

國立臺灣大學理學院海洋研究所

碩士論文

Institute of Oceanography College of Science

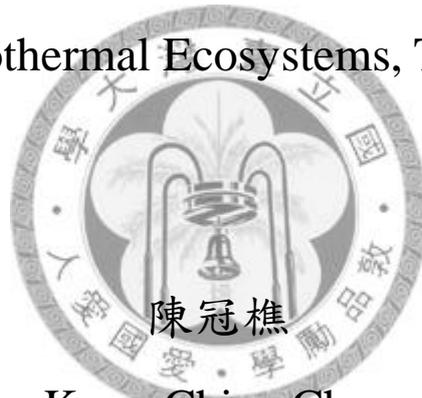
National Taiwan University

Master Thesis

台灣熱泉生態系統中微生物代謝之生物能量評估

Bioenergetic Evaluations of Microbial Metabolisms in

Hydrothermal Ecosystems, Taiwan



Kuan-Chiao Chen

指導教授：王珮玲 博士

Advisor: Pei-Ling Wang, Ph.D.

中華民國 98 年 1 月

January, 2009

國立臺灣大學（碩）博士學位論文
口試委員會審定書

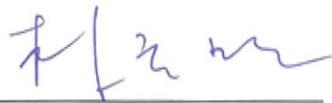
台灣熱泉生態系統中微生物代謝之生物能量評估
Bioenergetic Evaluations of Microbial Metabolisms in
Hydrothermal Ecosystems, Taiwan

本論文係陳冠樵君 (r95241302) 在國立臺灣大學海洋研究所完成之碩士學位論文，於民國 98 年 1 月 12 日承下列考試委員審查通過及口試及格，特此證明

口試委員：



(指導教授)



系主任、所長



致謝

首先要感謝王珮玲老師與林立虹老師的耐心栽培，並且提供我很多研究資源，讓我能順利的完成這本論文。感謝口試委員們細心的指導，提供許多建議與指導，使得論文更加完善。感謝地質系宋聖榮老師、海研所林斐然老師與海研所溫良碩老師，提供我完善的儀器設備，也感謝春好與佳靜學姐在實驗上的幫忙與協助，得以順利分析完所有樣本。感謝慈濟大學生命科學系陳俊堯老師與文穗、柵葶和永欣，在花蓮野外中的協助，得以去得完整的樣本。感謝所有實驗室夥伴在野外上的幫忙，特別是與哲維不畏風雨的革命情感，我會一直記在心裡。

在求學期間，感謝婷文學姐不時地提供寶貴建議，也感謝少薇學姐提供我很多參考資料，使我獲益良多。生活中，感謝所有關心我、幫助我的人，才潤、存義、以瑛、玲雯、智睿、鑑禕、哲維、寶萱、好甄、佳靜學姐、婷文學姐、佳蓉學姐、悅婷學姐、紹璿與未列出來的好友們，謝謝你們！

最後，我要感謝我的家人以及玉璽陪我度過奇妙的 2008 年，因為有你們的鼓勵與支持，讓我更有信心去面對未來的各種困難。

摘要

生存於熱泉生態系統中的嗜熱微生物，利用熱泉中的各種化學成分進行代謝作用維持生存，一方面受限於環境的地質地化條件而生長，另一方面又促進地質地化系統的循環。台灣地區無論在火成岩、變質岩或沉積岩地區均有溫泉出露，可提供嗜熱微生物多樣化的天然居所，是瞭解熱泉微生物族群變化與地質地化特性的關係，與討論不同區域中微生物代謝策略差異之好題材。本研究根據台灣各地溫泉的地球化學特性，計算反應自由能與能量通量，以期全面又快速的評估生態系統中微生物可以使用的代謝途徑，釐清微生物族群間的競爭關係，了解台灣熱泉生態系統中微生物族群結構與環境因子間的關連。

本研究依照地質條件將溫泉採樣區分成北部火成岩區、東部變質岩區與南部泥火山沉積岩區，共採集 16 處溫泉，測量熱泉中的各種陰陽離子、有機酸與溶解氣體，以及礦物種類。化學分析結果發現在台灣熱泉系統中出現的電子提供者包括 H_2 、 NH_4^+ 、 Fe^{2+} 、 H_2S 、 CH_4 、有機酸，電子接受者包括 O_2 、 NO_3^- 、 Fe^{3+} 、 SO_4^{2-} 、 S^0 和 CO_2 。取得完整的化學資料後，依據熱力學原理計算溫泉中各種化學反應的自由能與能量通量，配合微生物最低自由能需求的概念，推測微生物可能使用的代謝途徑，結果發現不同區域溫泉中微生物族群可用之代謝途徑與該途徑所能提供的能量通量，受控於溫泉中電子接受者與提供者的種類、濃度變化，而這些溫泉化學特徵的變化，可以歸因於地質條件的不同。進一步考量環境條件變化時，代謝反應的自由能與能量通量的變動，發現研究區域中微生物可能使用的代謝途徑大多能夠持續產能而被微生物所使用。對照已有的分子生物分析與微生物培養結果，大致與本研究結果相符，而微生物族群結構與物種間的競爭關係，亦可從地化條件與能量通量觀點討論之。

關鍵字：熱泉生態系統、嗜熱微生物、代謝作用、自由能、能量通量。

Abstract

Thermophilic microorganisms using chemical compounds to carry on their metabolisms not only are limited by geological and geochemical characteristics but also enhance geological and geochemical cycling in hydrothermal ecosystems. Hot springs are widely hosted in igneous, metamorphic and sedimentary rocks in Taiwan. These diverse natural habitats for thermophilic microorganisms are ideal studying sites to understanding the interaction between microbial communities and geochemical circumstance in various geological regions. On the basis of geochemical compositions, free energy and energy flux could be calculated for certain reactions. Such evaluation would provide a complete and quick way to clarify the energetic metabolic pathways, to understand the competition among microbial populations and to reveal the relationship between community structures and environmental factors in various Taiwan hot springs ecosystems.

This study sampled 16 hot springs derived from three geological domains, the northern volcanic region, the eastern metamorphic region and the western sedimentary region. Anions, cations, organic acids, dissolved gases, as well as minerals were measured in these hot springs. Chemical analyses showed that various electron donors, including H_2 , NH_4^+ , Fe^{2+} , H_2S , CH_4 and organic acids and electron acceptors, including O_2 , NO_3^- , Fe^{3+} , SO_4^{2-} , S^0 and CO_2 were available in Taiwan hot spring ecosystems. According to the thermodynamic principle and the concept of lowest free energy requirement, energetic metabolic pathways were revealed by the calculation of free energy and energy flux of various chemical reactions. Energetic metabolic reactions and their energy flux basically depended on the availability and concentration of electron acceptors and donors in different regions. Whether the metabolic reaction can continuously provide energy for the microorganism in the hot spring was also evaluated by the free energy and energy flux change due to certain geochemical variations. Most energetic metabolism pathways should be persistent

despite of the dynamic change of chemical and physical conditions. These results were generally supported by molecular biology and microbial incubation analyses. The structure and the competition within microbial community were examined in the view of geochemical conditions and energy flux in the hydrothermal ecosystems.

Keyword: hydrothermal ecosystem, thermophilic microorganism, metabolism, free energy, energy flux.



目 錄

口試委員會審定書.....	i
致謝.....	ii
摘要.....	iii
Abstract.....	iv
第一章 緒論.....	1
1-1 前言.....	1
1-2 前人研究.....	2
1-2-1 義大利火山島淺海熱泉熱力學上的研究.....	2
1-2-2 黃石公園溫泉熱力學上的研究.....	3
1-2-3 台灣地區溫泉與溫泉地球化學上的研究.....	5
1-3 研究目的.....	7
第二章 研究方法.....	10
2-1 資料蒐集與採樣點選擇.....	10
2-2 水化學分析工作.....	10
2-2-1 溫泉水中陽離子與微量元素分析.....	10
2-2-2 溫泉水中主要陰離子分析.....	10
2-2-3 溫泉水中有機酸分析.....	13
2-2-4 溫泉水中總有機碳分析.....	13
2-2-5 溫泉水中總溶解 HS ⁻ 分析.....	13
2-2-6 溫泉水中 Fe ²⁺ 與 Fe _{total} 分析.....	14
2-2-7 溫泉中沉積物礦物相分析.....	14
2-3 氣體化學分析.....	14
2-3-1 氣瓶準備工作.....	14
2-3-2 採集氣體方法.....	15
2-3-3 溫泉水中溶解氣體分析.....	15
2-3-3-1 標準氣體配置.....	16
2-3-3-2 檢量線測定.....	16
2-3-4 溶解氣體濃度計算與校正.....	19
2-3-4-1 溶解氣體濃度測量.....	19
2-3-4-2 溶解氣體濃度計算.....	19
2-4 熱力學原理與自由能計算.....	23
2-4-1 熱力學基本原理介紹.....	23
2-4-2 化學反應自由能計算.....	24
2-4-3 化學反應方程式選擇.....	25
2-4-4 Geochemist's Workbench 軟體應用.....	25
2-4-4-1 推定穩定存在礦物相.....	26

2-4-4-2	溫泉水樣之反應自由能計算.....	31
2-5	化學反應之能量通量原理與計算.....	35
2-5-1	能量通量基本原理.....	35
2-5-2	能量通量計算.....	36
2-5-3	微生物能量通量需求計算與微生物數量評估.....	38
第三章	結果.....	40
3-1	溫泉水陰陽離子分析.....	40
3-1-1	溫泉水陽離子分析結果.....	40
3-1-1-1	北台灣溫泉水主要陽離子分析結果.....	40
3-1-1-2	東台灣主要陽離子分析結果.....	43
3-1-1-3	南台灣主要陽離子分析結果.....	43
3-1-2	主要陰離子分析結果.....	46
3-1-2-1	北台灣溫泉水陰離子分析結果.....	46
3-1-2-2	台灣東部溫泉水陰離子分析結果.....	49
3-1-2-3	台灣南部溫泉水陰離子分析結果.....	49
3-1-3	有機酸分析結果.....	51
3-1-3-1	溫泉水中甲酸濃度.....	51
3-1-3-2	溫泉水中乙酸濃度.....	52
3-1-3-2	溫泉水中丙酸濃度.....	52
3-1-4	總溶解有機碳分析結果.....	53
3-1-5	礦物相分析結果.....	54
3-1-5-1	X 光繞射分析鑑定.....	54
3-1-5-2	溫泉水中穩定礦物相模擬結果.....	54
3-2	溫泉水中溶解氣體濃度分析結果.....	55
3-2-1	溫泉水中溶解之 O ₂ 、N ₂	55
3-2-2	溫泉水中溶解之 H ₂	56
3-2-3	溫泉水中溶解之 CH ₄ 、C ₂ H ₆ 、C ₃ H ₈	57
3-2-3-1	北部溫泉水中 CH _{4(aq)} 、C ₂ H _{6(aq)} 、C ₃ H _{8(aq)} 濃度.....	57
3-2-3-2	東部、南部溫泉水中 CH _{4(aq)} 、C ₂ H _{6(aq)} 、C ₃ H _{8(aq)} 濃度 ..	58
3-3	自由能計算結果.....	59
3-3-1	北台灣溫泉之化學反應自由能計算結果.....	59
3-3-2	東台灣與南台灣溫泉之化學反應自由能計算結果.....	62
3-4	能量通量計算結果.....	65
3-4-1	北台灣溫泉之化學反應的能量通量計算結果.....	65
3-4-2	東台灣與南台灣溫泉之化學反應的能量通量計算結果.....	67
第四章	討論.....	69
4-1	微生物可能使用的代謝途徑.....	69
4-1-1	非自發性化學反應.....	73

4-1-2	自發性化學反應.....	76
4-2	反應自由能之大小關係與區域上的變化.....	79
4-2-1	北台灣溫泉.....	79
4-2-2	東台灣溫泉.....	80
4-2-3	南台灣溫泉.....	80
4-3	熱力學在分子生物分析與微生物培養研究上的印證.....	81
4-3-1	北部溫泉 — 磺山.....	82
4-3-2	北部溫泉 — 龍鳳谷.....	82
4-3-3	北部溫泉 — 硫磺谷.....	83
4-3-4	北部溫泉 — 富源.....	84
4-3-5	北部溫泉 — 磺港.....	85
4-3-6	北部溫泉 — 小油坑.....	86
4-3-7	東部溫泉 — 紅葉.....	87
4-3-8	南部溫泉 — 新養女湖Ⅱ.....	87
4-3-9	南部溫泉 — 關仔嶺.....	87
4-4	溫度、化學物種濃度變化與自由能變化.....	88
4-4-1	北台灣溫泉 — 磺山.....	88
4-4-2	北台灣溫泉 — 龍鳳谷.....	92
4-4-3	北台灣溫泉 — 硫磺谷.....	95
4-4-4	北台灣溫泉 — 小油坑.....	96
4-4-5	東台灣溫泉 — 紅葉溫泉.....	102
4-4-6	南台灣溫泉 — 新養女湖Ⅱ.....	103
4-5	由能量通量討論微生物間之競爭關係.....	105
4-5-1	北台灣溫泉 — 磺山.....	105
4-5-2	北台灣溫泉 — 龍鳳谷.....	105
4-5-3	北台灣溫泉 — 硫磺谷.....	106
4-5-4	北台灣溫泉 — 富源.....	107
4-5-5	北台灣溫泉 — 磺港.....	107
4-5-6	北台灣溫泉 — 小油坑.....	108
4-5-7	東台灣溫泉 — 紅葉.....	108
4-5-8	南台灣溫泉 — 新養女湖Ⅱ.....	109
4-5-9	南台灣溫泉 — 關仔嶺.....	110
第五章	結論.....	111
參考文獻	112
英文部分	112
中文部分	118
附錄	119
附表一	化學反應與微生物代謝列表.....	119

附表二 溫泉水化學與溶解氣體濃度.....	125
附表三 溫泉中微生物可利用之礦物相.....	128
附表四 化學反應自由能.....	129
附表五 分子生物與微生物純化資料表.....	141
附表六 溫泉水化學反應自由能與通量.....	143

圖目錄

圖 2-1、本研究採樣地點。.....	12
圖 2-2、採集氣體裝置示意圖。.....	15
圖 2-3、化學反應自由能示意圖。.....	24
圖 2-4、穩定礦物相圖。.....	30
圖 2-5、化學物種 pKa、溫度與 pH 值作圖。.....	31
圖 2-6、能量通量示意圖。.....	36
圖 3-1、北部溫泉水中陽離子濃度。.....	41
圖 3-2、北部溫泉水之陽離子圓餅圖。.....	42
圖 3-3、東部、南部溫泉水中陽離子濃度。.....	44
圖 3-4、東部、南部溫泉水之陽離子圓餅圖。.....	45
圖 3-5、北部溫泉水中主要陰離子濃度。.....	46
圖 3-6、北部溫泉水之主要陰離子圓餅圖。.....	48
圖 3-7、東部、南部溫泉水中主要陰離子濃度。.....	49
圖 3-8、東部、南部溫泉水之陰離子圓餅圖。.....	50
圖 3-9、各溫泉水中甲酸濃度。.....	51
圖 3-10、各溫泉水中乙酸濃度。.....	52
圖 3-11、各溫泉水中丙酸濃度。.....	53
圖 3-12、各溫泉水中 DOC 值。.....	53
圖 3-13、各溫泉水中溶氧與溶氮濃度。.....	55
圖 3-14、各溫泉水中溶解氫氣濃度。.....	56
圖 3-15、北部各溫泉水中 $\text{CH}_{4(\text{aq})}$ 、 $\text{C}_2\text{H}_{6(\text{aq})}$ 、 $\text{C}_3\text{H}_{8(\text{aq})}$ 濃度。.....	57
圖 3-16、東部南部各溫泉水中 $\text{CH}_{4(\text{aq})}$ 、 $\text{C}_2\text{H}_{6(\text{aq})}$ 、 $\text{C}_3\text{H}_{8(\text{aq})}$ 濃度。.....	58
圖 3-17、北台灣溫泉之化學反應自由能計算結果。.....	62
圖 3-18、東台灣與南台灣溫泉之化學反應自由能計算結果。.....	64
圖 4-1、台灣熱泉系統之 107 個化學反應之自由能值。.....	78
圖 4-2、磺山溫泉 — 丙酸氧化與元素硫還原反應之自由能的變化。.....	89
圖 4-3、磺山溫泉 — 丙酸氧化與元素硫還原反應之能量通量變化。.....	90
圖 4-4、磺山溫泉 — 元素硫氧化與氧氣還原反應之自由能變化。.....	91
圖 4-5、磺山溫泉 — 元素硫氧化與氧氣還原反應之能量通量變化。.....	91
圖 4-6、龍鳳谷溫泉 — 丙酸與氧氣反應之自由能變化。.....	92
圖 4-7、龍鳳谷溫泉 — 丙酸與氧氣反應之能量通量變化。.....	93

圖 4-8、龍鳳谷溫泉 — 二價鐵與氧氣反應之自由能變化。	94
圖 4-9、龍鳳谷溫泉 — 二價鐵與氧氣反應之能量通量變化。	94
圖 4-10、硫磺谷溫泉 — 丙酸與元素硫反應之自由能變化。	95
圖 4-11、硫磺谷溫泉 — 丙酸與元素硫反應之能量通量變化。	96
圖 4-12、小油坑溫泉 — 元素硫與三價鐵之反應自由能變化。	97
圖 4-13、小油坑溫泉 — 元素硫與三價鐵之反應能量通量變化。	98
圖 4-14、小油坑溫泉 — 元素硫與氧氣之反應自由能變化。	99
圖 4-15、小油坑溫泉 — 元素硫與氧氣之反應能量通量變化。	100
圖 4-16、小油坑溫泉 — 甲酸與氧氣之反應自由能變化。	101
圖 4-17、小油坑溫泉 — 甲酸與氧氣之反應能量通量變化。	101
圖 4-18、紅葉溫泉 — 氫氣與氧氣反應之自由能變化。	102
圖 4-19、紅葉溫泉 — 氫氣與氧氣反應之能量通量變化。	103
圖 4-20、新養女湖Ⅱ — 氫氣與二氧化碳反應之自由能變化。	104
圖 4-21、新養女湖Ⅱ — 氫氣與二氧化碳反應之能量通量的變化。	104

表目錄

表 2-1、台灣溫泉水化學與地質特徵。	11
表 2-2、各種標準氣體的成分、濃度、偵測器種類與管柱類型。	18
表 2-3、本研究所測量氣體之 k_H^\ominus 與 $-\Delta_{\text{soln}}H/R$ 列表。	20
表 2-4、活度係數計算公式列表。	27
表 2-5、各離子活度係數對照表。	27
表 2-6、陽明山地區溫泉水 pH 值、Eh 值、 Fe^{2+} 與 SO_4^{2-} 濃度範圍。	28
表 4-1、微生物最低自由能需求。	71
表 4-2、微生物能量通量需求。	72

第一章 緒論

1-1 前言

熱泉是適合嗜熱微生物居住的環境，熱泉生態系統則綜合了生物、地質與化學三種特徵，而嗜熱微生物便在此系統中扮演了三種特徵彼此連結的重要角色 (Inskeep et al., 2005; Reysenbach and Shock, 2002)。在熱泉生態系統中，來自於熱液與岩石兩者交互作用下所產生之化學成分，包含了各種微生物代謝能夠使用的電子提供者與電子接受者，微生物能從未達平衡而能夠自然發生的氧化還原反應中獲取形成 ATP 的能量 (Canfield et al., 2006)，以供其生存所需，進行多樣化的代謝反應 (Amend et al., 2003; Amend and Shock, 2001; Inskeep et al., 2005)。

過去有很多研究針對嗜熱微生物可能出現的地區做了報導，包括陸地上的溫泉、淺海的熱泉系統、深海的熱泉系統以及地下礦坑深處的環境，其中陸上溫泉環境除了是我們容易取得的研究題材外，也常是具有區域差異的生態系統。本研究希望能夠透過分析台灣陸上溫泉的化學特性，根據熱力學原理和自由能的計算，全面又快速的評估各種氧化還原反應是否能夠自然發生，做為微生物所利用的代謝途徑 (Amend et al., 2003; Amend and Shock, 2001)，並在系統處於穩定狀態之前提下，計算比較不同代謝反應在生態系統中可提供的能量通量 (Hoehler, 2004)。

本研究的調查區域是總面積僅 3.6 萬平方公里的台灣本島，因為歐亞板塊與菲律賓板塊間的碰撞擠壓使得這小小的區域有著複雜的地質特徵，能讓我們討論在小區域中出露於不同岩性之溫泉系統的差異。依照地質條件在地域上簡單的區分，可分成北部的火成岩區、東部的變質岩區與南部沉積岩區的泥火山。其中出露於火成岩區的溫泉系統具有高溫與極酸的特徵 (Song et al., 2005)，可提供研究嗜酸、嗜熱微生物的最佳環境，而變質岩區和泥火山地區雖然沒有極酸或極高溫的條件，卻具有不同的化學組成。分析比較三種溫泉系統中微生物代謝的可能

途徑，配合熱泉中嗜熱微生物族群結構的分析結果，可突顯出台灣複雜的地質特性所導致的熱泉微生物群相變化，以及嗜熱微生物在地域上可能的分布情況與受控因素。

1-2 前人研究

熱泉生態系統是嗜熱微生物的天然住所，在這環境中各式各樣的微生物能夠利用生態系統中的化學成分，進行代謝作用來產生所需要的能量，因此環境中的化學組成直接影響微生物的族群結構。過去，科學家研究義大利 Aeolian archipelago 的淺海熱泉系統與美國黃石公園兩處溫泉，藉由熱力學原理來量化各種微生物可能利用的化學反應之能量，根據所計算出來的自由能變化，評估生態系統中可能出現的微生物代謝途徑，並進一步與分子生物分析和微生物培養的結果相互比較，對於熱泉生態系統中微生物族群結構與環境化學因子間的關聯有完整的了解 (Amend et al., 2003; Inskeep et al., 2005; Macur et al., 2004; Rogers and Amend, 2005; Rogers and Amend, 2006; Spear et al., 2005)。

1-2-1 義大利火山島淺海熱泉熱力學上的研究

位於義大利南邊的 Aeolian archipelago 淺海熱泉，受到岩漿熱液、海水與地下水三者互相作用，使得不同熱泉的化學成分有很大的變化，是一個適合研究地球化學變動與微生物多樣性的地區 (Amend et al., 2003; Capasso et al., 1997; Fulignati et al., 1998; Rogers and Amend, 2005; Rogers and Amend, 2006)。根據熱力學原理所計算出來的自由能結果顯示，在無機物做為電子提供者 (如氫氣) 的反應中，以 O_2 當作電子接受者的代謝反應能夠釋放出最多的能量 (85-115 kJ/mole e^-)，其次依序是電子接受者為 NO_3^- (55-100 kJ/mole e^-)、 Fe^{3+} (35-56 kJ/mole e^-) 與 S^0/SO_4^{2-} (2-17 kJ/mole e^-) 的反應 (Amend et al., 2003)。隨後 Rogers 與

Amend (2006) 更進一步去計算有機物參與的化學反應自由能，不同電子接受者所得到的自由能大小趨勢與無機反應相同，以 O_2 當作電子接受者的代謝反應能夠釋放出最多的能量 (100-118 kJ/mole e^-)，其次依序是電子接受者為 NO_3^- (61-93 kJ/mole e^-)、 Fe^{3+} (43-60 kJ/mole e^-) 與 S^0/SO_4^{2-} (6-27 kJ/mole e^-)；且比較了有機與無機反應的自由能大小，發現在使用相同電子接受者的情況下，以有機物做為電子接收者的反應每莫耳電子所放出來的能量較以無機物者的反應來高 (Rogers and Amend, 2006)。Rogers 和 Amend (2005) 的研究以分子生物分析方法找出 Pozzo Istmo 熱泉生態系統中的存在微生物種類，發現以發酵作用或元素硫還原與有機碳氧化來代謝的 *Palaeococcus. helgesonii*、利用元素硫代謝的 *Thermoplasmatales* 與利用氫氣氧化與氧氣還原來代謝的 *Aquificales*，而根據溫泉水組成計算這些代謝途徑在的自由能，其結果皆為產生能量之自然發生反應，得到了自由能計算與分子生物分析能夠相互印證的結論。

1-2-2 黃石公園溫泉熱力學上的研究

黃石公園擁有豐富的天然熱泉生態系統，過去對於地球化學與分子生物的相關研究不計其數，提供了此區域在溫泉化學組成與微生物族群種類的重要背景資料 (Inskeep et al., 2005; Macur et al., 2004; Spear et al., 2005)。Macur et al. (2004) 研究 Norris Geyser Basin 中的酸性硫酸鹽氯化物泉，進行分子生物與地球化學的分析，先以分子生物方法鑑定出的許多接近種屬並推測它們所進行的代謝反應，再根據溫泉化學成分所估算這些反應的自由能，預測反應可否自然發生，其結果發現存在於溫泉中之微生物物種能在代謝反應自由能的計算上大多能夠得到證實。例如：*Hydrogenobaculum* 以氫氣當作電子提供者，估算自由能值介於 -11 與 -90 kJ/mole e^- 之間；*Stygiolobus azoricus* 以氫氣當作電子提供者、元素硫當作電子接受者來代謝，估算自由能值為 -11 kJ/mole e^- ；*Thiomonas* 於有氧環境下能夠氧化二價鐵或 $S_2O_3^{2-}$ ，估算自由能值為 -32 kJ/mole e^- ；*Acidimicrobium* 在有氧環境

下能夠氧化二價鐵，估算自由能值為 -32 kJ/mole e^- ，若於無氧環境下則能夠還原三價鐵，估算自由能值介於 -29 與 -64 kJ/mole e^- 之間；*Metallosphaera prunae* 於有氧環境下能夠氧化元素硫，估算自由能為 -85 kJ/mole e^- ；*Thermofilum pendens* 於無氧環境下能夠還原元素硫，估算自由能值介於 -24 與 -85 kJ/mole e^- 之間。不過有些以分子生物學方法可以鑑定出的接近種屬，例如 *Caldococcus noboribetus*, *Thermocladium modesties*, *Acetobacteraceae*, *Aeropyrum pernix* 與 *Marinithermus hydrothermalis* 等五種微生物，它們能夠利用有機碳當作電子提供者進行代謝反應，但是卻因為當地溫泉缺少有機酸分析資料，所以無法估算自由能值。

Inskeep et al. (2005) 分析酸性的 Rainbow spring (RS) 和 Norris Geyser Basin-Perpetual Spouter (NGB-PS) 與偏中性的 Joseph' s Cost spring (JC) 與 Norris Geyser Basin (NGB-B) 等四處溫泉，計算33種氧化還原反應的自由能，結果顯示出 pH 值較低的 RS 與 NGB-PS 中三價鐵或鐵礦還原的反應中每莫耳電子能夠放出較多的能量；相對的，pH值較高之 JC 與 NGB-B 中二價鐵氧化反應中每莫耳電子能夠放出較多的能量。同時進行的分子生物學分析，發現並推測許多微生物族群所能進行的代謝反應，其自由能計算結果是可以自然發生的。例如：酸性的 NGB-B 與 RS 溫泉中都存在著以氫氣、元素硫或三價砷氧化與氧氣還原來代謝的 *Hydrogenobaculum*，其估算自由能值介於 -60 與 -90 kJ/mole e^- 之間；能氧化二價鐵或元素硫並還原氧氣的 *Metallosphaera* 與 *Sulfobacillus*，其估算自由能值介於 -25 與 -80 kJ/mole e^- 之間；偏中性的 JC 與 NGB-PS 中共同存在能夠氧化氫氣、 S_2O_3^- 或元素硫並還原氧氣的 *Thermocrinis*，其估算自由能值介於 -90 與 -95 kJ/mole e^- 之間；能夠氧化有機碳或三價砷並還原氧氣的 *Thermus*，它氧化三價砷時所計算出來的自由能範圍為 $-65 \sim -70 \text{ kJ/mole e}^-$ 。另一方面，在溫泉中也發現許多能夠氧化有機碳的微生物，例如酸性泉中發現的 *Acetobacteraceae* 能夠氧化有機碳並還原氧氣或三價鐵、*Caldococcus*,

Thermocladium 與 *Caldisphaera* 能氧化有機碳並還原元素硫，不過由於這些溫泉缺少有機酸的分析資料，所以無法計算這些代謝反應的自由能值。

前述對於義大利南邊 Aeolian archipelago 之淺海熱泉與黃石公園溫泉的研究，雖然在熱力學方面的工作已經相當詳盡，也配合了分子生物分析的相互驗證，但仍有許多地方未盡之處可以加以探討。這些缺少的研究分析可能包括以下四點：

- 一、化學分析之完整性不足。由分子生物分析資料中發現，溫泉中不乏能夠利用有機碳行代謝作用的微生物，但溫泉的有機酸分析資料相對不足。另外溶解於溫泉中的氫氣、氧氣、氮氣、二氧化碳、一氧化碳與甲烷等氣體也是重要的電子提供者 (Electron donor) 或電子接受者 (Electron acceptor)，所以完整的氣體分析也相當重要。
- 二、在微生物族群結構與地域或地化特徵變化上的關聯性，並無詳細的說明。以台灣各具特色的溫泉系統為題材，將可對此有所著墨。
- 三、關於已發現微生物族群是否能夠長時間穩定居住在熱泉之中，並沒有詳加評估。這部分可以藉由模擬溫泉生態系統中可能發生的化學條件變化，來討論反應自由能受環境因素影響的情況。若有長期化學監測資料的溫泉系統，則更適合根據現況做進一步評估。
- 四、自由能計算結果僅能推測化學反應能否自然發生，而無法確知反應是否發生，或是比較反應發生的優先順序。這點必須考慮微生物所需最小能量單位量、倖存所需能量、維持所需能量、生長所需能量等概念，並計算反應提供的能量通量來加以評估。

1-2-3 台灣地區溫泉與溫泉地球化學上的研究

台灣位於歐亞板塊與菲律賓海板塊的聚合交界帶上，受到擠壓力的影響，使得岩層容易形成褶皺、抬升與破裂，形成我們今日所觀察到的山脈以及斷層，也因為這些地形構造特徵，加上受地溫梯度影響並伴隨豐沛的雨量滲入地底受熱循環，讓台灣擁有豐富的溫泉地熱資源 (宋聖榮、劉佳玫, 2003)。此外在台灣北部發生的新生代大規模火山活動，使北台灣仍受到後火山活動的影響，形成另一種

與火山活動相關的溫泉地熱資源（何春蓀，1986）。

台灣本島共有124處溫泉露頭，依照溫泉所在地質區做分類，主要分成火成岩區、沉積岩區與變質岩三區（宋聖榮、劉佳玫, 2003）。出露於火成岩區之溫泉主要分布在北台灣的大屯火山群、龜山島與綠島。本研究區域為大屯火山群之溫泉，該地區岩性以凝灰角礫岩、輝石安山岩與角閃石安山岩為主，其下覆地層為漸新世晚期的五指山層（陳培源，2006）。陳肇夏（1989）提出大屯火山群之溫泉水的形成模式，認為大屯火山群的熱水主要儲存在五指山層的砂岩內，受到火山氣體（HCl、SO₂）溶入水中，使得本區溫泉水含有大量硫酸根或氯化物。陳柏淳（2005）針對北台灣32處溫泉露頭，進行陰陽離子與微量元素的水化學分析，依照水化學特性分成酸性硫酸鹽泉、酸性硫酸鹽氯化物泉、酸性氯化物泉、中性碳酸氫鹽泉、中性氯化物泉與中性硫酸鹽泉六種。劉康克等（1984）根據溫泉水中的氫氧同位素資料，將此區的水依來源與特性分成三類：(1) 天水受熱所造成，(2) 溫泉水與岩石間的作用，(3) 受蒸發作用的影響，研究並指出金山地區之溫泉可能受到海水的影響。有關大屯火山區之火山氣體的成分分析，以去除水氣後的相對氣體含量表示，發現 CO₂ 占 90% 以上，其他較少量的氣體包括 H₂S、SO₂、N₂、CH₄ 與 H₂（李曉芬, 2004）。

出露於沉積岩區的溫泉主要分布於西部麓山帶、東部海岸山脈與蘭陽平原（宋聖榮、劉佳玫, 2003）。本研究調查區域為台灣嘉義、台南和高雄一帶的泥火山，該區域現在仍持續活動的泥火山，能分成三個主要活動區，由北而南分別為觸口斷層活動區、古亭坑背斜與旗山斷層活動區（Yeh et al., 2005）。以漸新世後期、中新世、上新世到更新世初期的碎屑沉積岩為主，岩性主要為砂岩和頁岩兩者交互出現，局部層位夾有少量的石灰岩體和凝灰岩，且岩性由北而南逐漸轉變為以頁岩為主的沉積岩，顆粒大小逐漸變細，地層厚度逐漸增厚（宋聖榮、劉佳玫, 2003）。Yeh et al. (2005) 指出在旗山斷層活動區與古亭坑背斜活動區的泥火山之 CH₄ 含量佔總氣體的含量的 90% 以上；在觸口斷層活動區，濁水潭泥火

山主要氣體為 CO_2 ，佔總氣體含量的 80%，其次為 CH_4 佔總氣體的 11%；關仔嶺泥火山則以 CH_4 佔總氣體的 87% 為主，其次為 CO_2 的 13%。該研究也指出同為觸口斷層活動區的泥火山，其氣體組成比例卻有所差異，而在泥火山流體化學性質上，三個泥火山活動區皆含有豐富的 Cl^- 與 Na^+ ，且在古亭坑背斜區的泥火山流體含有 NO_3^- 以及觸口斷層區的泥火山流體中含有 SO_4^{2-} 。

出露於變質岩區的溫泉主要分布於雪山山脈帶、中央山脈板岩區與中央山脈大南澳片岩區 (宋聖榮、劉佳玫, 2003)。本研究調查區域為花蓮地區溫泉，屬於大南澳片岩區，此區域中玉里層的岩性以石英雲母片岩、雲母片岩為主，並夾雜綠色片岩及蛇紋岩體；長春層的岩性以綠色片岩與薄層的大理岩、石英岩和角閃岩為主；九曲層以厚層大理岩為主要岩性；南崗層以混合岩和片麻岩為主要岩性；天祥層則以石英雲母片岩、千枚岩和變質砂岩為主要岩性 (宋聖榮、劉佳玫, 2003)。溫泉水化學特性以 HCO_3^- 為主要離子，次要離子包括 SO_4^{2-} 、 Cl^- 、 Na^+ 、 Ca^{2+} ，水化學特性依不同溫泉而有所差異。

台灣大部分的溫泉已經有相當豐富的化學資料，可是卻只著重在有限的陰陽離子與相對氣體濃度的分析，對於本研究拿來討論微生物代謝的自由能計算略顯不足。對運用熱力學原理評估氧化還原反應發生的可能來說，必須涵蓋更多微生物可以使用的陰陽離子，再加上溫泉水中有機酸和溶解於溫泉水中的氣體濃度分析，以及溫泉沉積物中礦物組成，才能使微生物所能運用的代謝反應做最完整的討論。

1-3 研究目的

為藉由熱力學原理與能量通量概念，瞭解台灣區域地質特性與熱泉微生物群相變化的關係，並針對前人研究分析的不足之處，將本研究分為五階段，其目的分述如下。

一、完整的化學分析與反應自由能計算。

生態系統中，化學成分與微生物代謝作用密不可分，因此要對環境做初步的了解，化學分析是少不得的過程。與微生物代謝作用有關的完整的化學分析應包括氣體、陰陽離子，以及有機酸，其中可能的電子提供者包括 H_2 、 CH_4 、 Fe^{2+} 、 H_2S 、organic acid 與還原態礦物，電子接受者則包括 O_2 、 CO_2 、 CO 、 Fe^{3+} 、 NO_3^- 、 NO_2^- 與 SO_4^{2-} 。透過完整的化學分析，便能夠再進一步依據熱力學原理推估反應是否能夠自然發生，讓微生物所運用，了解生態系統中微生物可能的代謝途徑。

二、熱泉地化因子與微生物族群之關聯性。

對於研究區域，除了本研究所做的化學分析與熱力學計算外，也有研究室其他成員所同步進行的分子生物學分析與細菌培養的工作。熱力學的計算能夠全面性的評估可能發生的代謝反應，所計算出來的結果需要與環境微生物方面的分析結果來相互驗證，甚至能夠推測生態系中可能存在卻還未被發現的微生物物種，做為下一步的研究方向。

三、嗜熱微生物在地域上特徵與差異性。

根據採樣的涵蓋性和化學特性變化，本研究在小範圍上的探討將著重在北台灣溫泉，沿著金山斷層大致上分成三個區塊，由東北部金山的磺港溫泉一帶向西南方向延伸，途中經過小油坑溫泉一帶，至硫磺谷溫泉一帶，討論溫泉特性與代謝可能性在空間上的變化。

本研究採樣涵蓋台灣三大岩區溫泉，因此在大範圍上的討論是以台灣三大岩區因岩性不同而產生出不同化學特徵的溫泉為基礎，分析主要可能代謝反應的差異。對象包括北部大屯火山火成岩地區之溫泉、東部花蓮一帶的變質岩地區，以及西南部地區的泥火山地區。

四、模擬溫泉生態系統中的化學條件變異，討論反應自由能受環境影響的情形。

藉由改變泉水中化學物種的濃度或是泉溫、酸鹼度，模擬生態系統中可能發生的環境條件變動，重新計算反應自由能的變化，希望了解該代謝反應是否能夠持續的在生態系統中發生，也能進一步推測微生物是否持續使用該代謝反應而存活於生態系統之中。

五、溫泉生態系統中能量通量計算

自由能計算只能用來推測化學反應是否能夠自然發生，反應通量的計算則是將自由能結合時間和限制因子濃度等參數，量化出特定代謝反應所能提供的能量通量。考慮微生物所需最小能量單位量、倖存所需能量、維持所需能量、生長所需能量等概念，並結合反應的能量通量計算，可以進一步推測微生物間的競爭關係。



第二章 研究方法

2-1 資料蒐集與採樣點選擇

根據前人的報導指出台灣溫泉共 128 處 (宋聖榮、劉佳玫, 2003), 而本研究依照台灣溫泉出露地的地質特性將研究區域區分為三區, 分別以北部大屯火山地區的火成岩、西南部的沉積岩區的泥火山以及東部花蓮一帶的變質岩為母岩。本研究一共有 16 處採樣點 (圖 2-1), 主要由前人已發表的溫泉資料中, 選出溫度較高的溫泉與泥火山, 另外增加北部的富源溫泉與金山漁會溫泉、西南部的小滾水與新養女湖和東部的虎爺溫泉等採樣點 (表 2-1), 進行現地調查與樣本蒐集的工作。



2-2 水化學分析工作

2-2-1 溫泉水中陽離子與微量元素分析

陽離子的分析工作所使用的儀器為台灣大學地質系宋聖榮老師實驗室之感應耦合電漿原子發射光譜儀 (Inductively coupled plasma atomic emission spectrometry; ULTIMA 2, HORIBA John Yvon)。所測定的主要陽離子, 包括 Na^+ 、 K^+ 、 Mg^{2+} 、 Ca^{2+} 、 Fe_{total} 、 Al^{3+} 與 Mn_{total} 。微量元素則包括 As、B、Ba、Bi、Cd、Cr、Co、Cu、Li、Ni、Pb、Si、Sr 與 Zn。標準品為 MERCK 1000 mg/L 的標準溶液。個別樣本的分析誤差低於 3%, 偵測極限為 0.05 ppm。

2-2-2 溫泉水中主要陰離子分析

陰離子分析工作所使用儀器為台灣大學地質系宋聖榮老師實驗室之離子層析儀 (Ion chromatography; Metrohm MIC-5ADV)。所測定的陰離子, 包括 Cl^- 、 Br^- 、 NO_3^- 、 PO_4^{3-} 與 SO_4^{2-} 。流洗液為 3.2 mM Na_2CO_3 / 1 mM NaHCO_3 。標準品

為 MERCK 1000 mg/L 的標準溶液。測定檢量線所使用的濃度為 0.1、0.5、1、5、10、20 ppm。個別樣本的分析誤差低於 5%，偵測極限為 0.1 ppm。

表 2-1、台灣溫泉水化學與地質特徵。

溫泉名稱	溫度(°C)	pH	所屬地層	地層岩性	特殊地質現象
北台灣地區溫泉					
地熱谷	68.3	1.4	五指山層	砂岩	
硫磺谷	89.0	2.8	五指山層	砂岩/凝灰角礫岩	硫氣孔/熱水換質
龍鳳谷	79.6	5.4		安山岩/凝灰角礫岩	硫氣孔
大油坑	91.9	1.5		安山岩	硫氣孔/熱水換質
小油坑	71.6	2.4		安山岩	硫氣孔/熱水換質
七股	49.5	2.2		凝灰角礫岩	熱水換質
磺山	65.0	2.9		安山岩/凝灰角礫岩	硫氣孔/熱水換質
金山漁會	65.1	5.8	五指山層	砂岩/第四紀沉積物	
富源	67.7	1.8	五指山層	砂岩/第四紀沉積物	
磺港	74.2	3.0	五指山層	砂岩/第四紀沉積物	
東台灣地區溫泉					
花蓮紅葉	88.0	6.5	大南澳片岩	雲母片岩	
安通	66.0	8.7	利吉層	凝灰角礫岩	白色碳酸鈣沉澱物
虎爺	49.8	6.9	大南澳片岩	雲母片岩	
南台灣地區溫泉					
關仔嶺	63.8	8.4	中崙層	泥質頁岩	
小滾水	26.1	7.7	古亭坑層	厚層泥岩	
新養女湖	43.5	7.9	烏山層	砂質頁岩	

附註：溫泉水溫與酸鹼度為本研究採樣時之測量結果，所屬地層、岩性和特殊地質現象之資料來源為宋聖榮、劉佳玫 (2003) 與陳柏淳 (2005)。

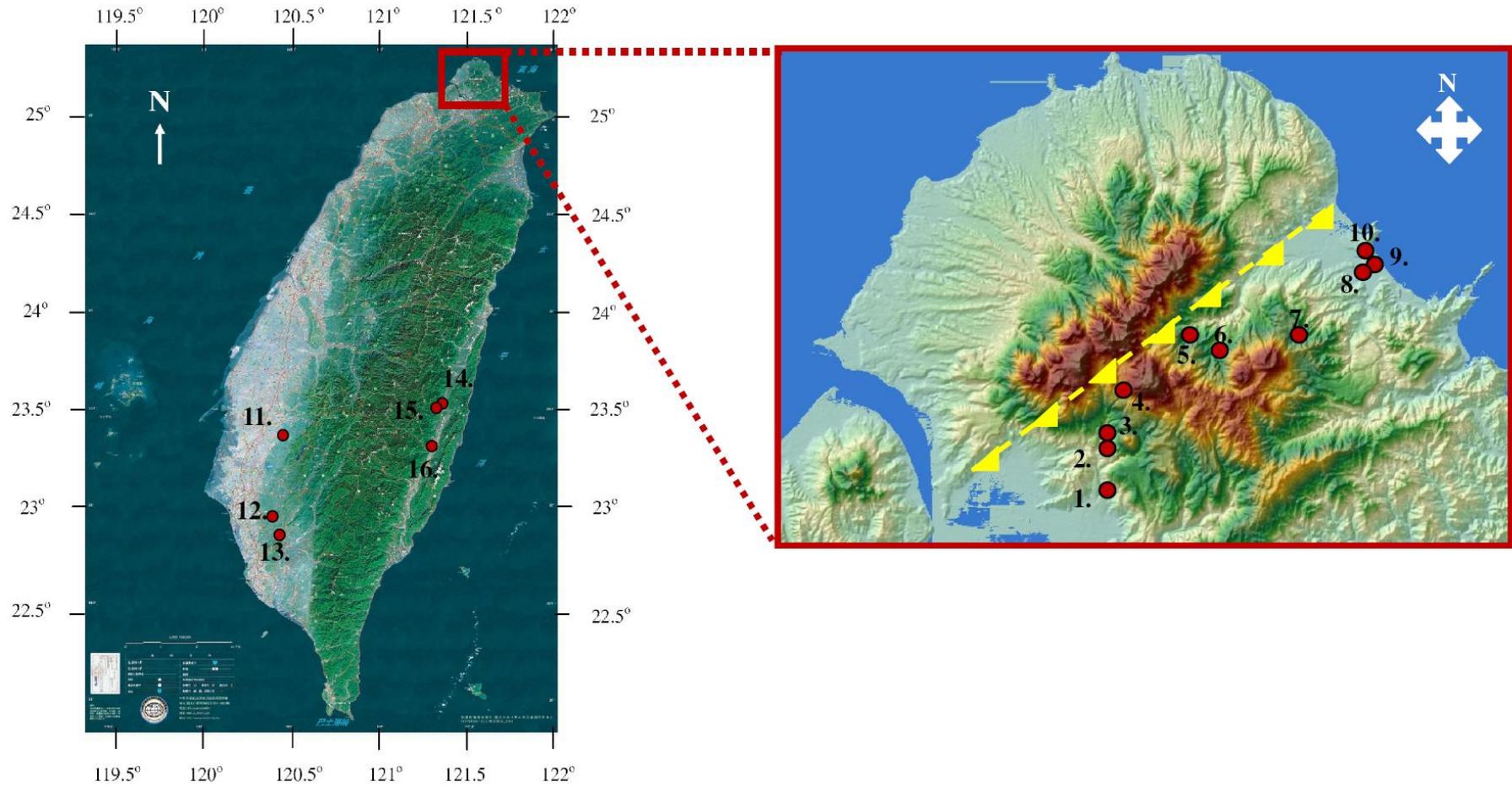


圖 2-1、本研究採樣地點。(1.地熱谷 2.硫磺谷 3.龍鳳谷 4.小油坑 5.七股 6.大油坑 7.磺山 8.富源 9.金山漁會 10.磺港 11.關仔嶺 12.小滾水 13.新養女湖 14.虎爺 15.紅葉 16.安通)。

2-2-3 溫泉水中有機酸分析

有機酸分析工作所使用儀器為台灣大學地質系宋聖榮老師實驗室之離子層析儀 (Ion chromatography; Metrohm MIC-5ADV)。所測定的有機酸包括 HCOO^- 、 CH_3COO^- 與 $\text{CH}_3\text{CH}_2\text{COO}^-$ 。流洗液為 0.001 N 之 H_2SO_4 。標準品分別利用 HCOONa 、 CH_3COONa 與 $\text{CH}_3\text{CH}_2\text{COONa}$ 三種藥品配置 200 ppm，再加以稀釋。測定檢量線所使用的濃度為 0.1、0.5、1、5、10、20 ppm。個別樣本的分析誤差低於 3%，偵測極限為 0.1 ppm。

2-2-4 溫泉水中總有機碳分析

水中總有機碳分析工作所使用儀器為台灣大學海洋研究所溫良碩老師實驗室之總碳分析儀 (TOC 1030)。使用之氧化劑為 10% 之 $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_8$ ，酸化劑為 1 L 之 4.25% 的 H_3PO_4 。標準品利用 $\text{C}_8\text{H}_5\text{KO}_4$ (Potassium Hydrogen Phthalate) 藥品配置成 1000 ppm，再加以稀釋。測定檢量線所使用的濃度為 0.1、0.5、1、5、10、20 ppm。個別樣本的分析誤差低於 3%，偵測極限為 0.1 ppm。

2-2-5 溫泉水中總溶解 HS^- 分析

水中總硫化物分析採用甲烯藍法，測量所使用的儀器為台灣大學地質系林立虹老師實驗室之分光光度計 (JASCO V-550)。水樣於野外取樣後立即過濾，混合 7.5 ml 水樣、0.5 ml 之 amine-sulfuric acid 與 0.15 ml 之 FeCl_3 後，立即搖晃均勻。靜置 5 分鐘，再加入 $(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4$ ，反應生成甲烯藍 (Methylene blue)。帶回實驗室後，使用分光光度計在波長 664 nm 處測定水樣中硫化物之濃度。個別樣本的分析誤差低於 5%，偵測極限為 0.1 ppm。

2-2-6 溫泉水中 Fe^{2+} 與 Fe_{total} 分析

水中 Fe^{2+} 與 Fe_{total} 分析所使用的儀器為台灣大學地質系林立虹老師實驗室之分光光度計 (JASCO V-550)。標準品利用硫酸亞鐵 (FeSO_4) 藥品配置與稀釋成 1、5、10、20、50、75 與 100 ppm，對照成 Fe^{2+} 濃度分別為 0.37、1.84、3.68、7.36、18.42、27.63 與 36.84 ppm，並以 0.25 M 之鹽酸當作背景值。分別取 0.1 ml 的配置標準品與 0.9 ml 的 ferrozine reagent (0.25 g ferrozine 溶解於 250 ml HEPES 溶液，並將 pH 值調至 7)，混和均勻後，使用分光光度計在波長 652 nm 處量測其吸光度值，進行檢量線測定。

2-2-7 溫泉中沉積物礦物相分析

礦物相分析工作所使用的儀器為中研院地球科學所俞震甫教授實驗室之 X 光繞射儀 (X-ray diffraction, XRD; Rigaku MiniFlex AD0316)。X 射線管為銅靶，實驗電壓 30 kV，電流 15 mA。於實驗室將沉積物烘乾磨碎，取少量沉積物粉末與去離子水，充分混合均勻，吸取約 100 μl 滴於載玻片上，靜置隔夜等待自然風乾。風乾後的薄片再進行 X 光繞射分析，得到繞射圖譜後進一步作礦物種類的定性鑑定。

2-3 氣體化學分析

2-3-1 氣瓶準備工作

1. 將藍色橡膠塞 (Belco, septum stopper, No. 2048-11800) 浸泡在裝有 1 N NaOH 的鐵氟龍燒杯中，隔水加熱至沸騰後煮一小時後，先以去離子水淨洗，再將橡膠塞浸泡於去離子水中加熱至沸騰後煮一個小時，以去除橡膠塞中的未知氣體。
2. 將容積 160 ml 的血清瓶塞上已處理過的橡膠塞，蓋上鋁環確保密封後，以真空幫浦抽氣至瓶內壓力約為 0.2 torr。

2-3-2 採集氣體方法

圖 2-2 為採集氣體裝置示意圖。管路的一端置入溫泉池中，另一端轉接上針頭，先以蠕動式幫浦將溫泉水填充滿整個管路，確定管中沒有空氣的存在後再將針頭插入真空瓶抽取溫泉水。由於瓶內為負壓，所以當溫泉水抽入瓶中後，溶於水中的氣體會釋放出來。待瓶中充填的水體積穩定不增加，再將針頭拔出，即完成一個氣體樣本的收集。

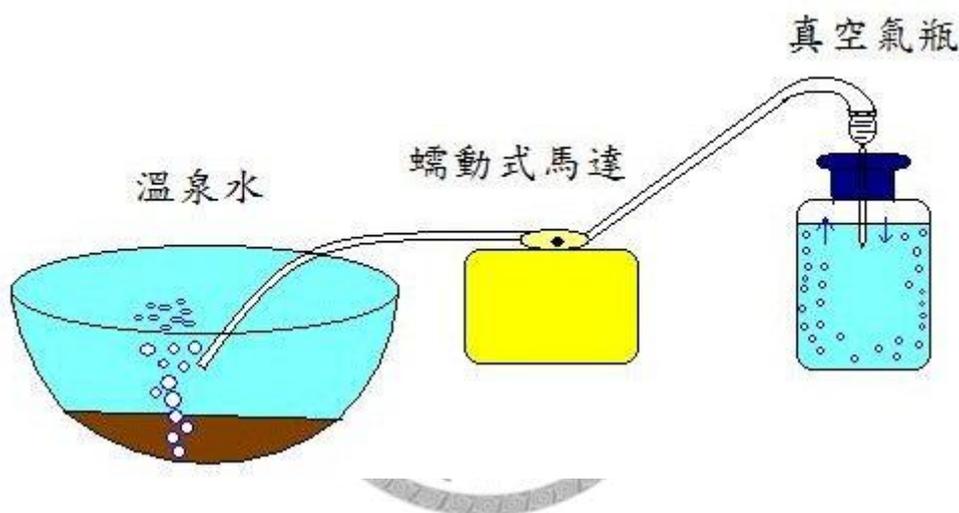


圖 2-2、採集氣體裝置示意圖。

2-3-3 溫泉水中溶解氣體分析

本研究的氣體分析工作所使用儀器為台灣大學地質系林立虹老師實驗室之氣相層析儀 (Gas chromatography; Agilent Technologies 6890N)。測量氣體種類包括 H_2 、 O_2 、 N_2 、 CO 、 CO_2 、 CH_4 、 C_2H_6 和 C_3H_8 。所使用之閥門進樣系統採直接注射進樣，進樣迴路的體積為 0.25 ml。氣體通過之層析管柱均為填充管柱，填充物分別為 Mole sieve 5A 與 Porapak Q。偵測器的部分依序串聯熱傳導偵測器 (Thermal conductivity detector, TCD)、觸媒轉換器 (Nickel catalyst) 和火焰離

子化偵測器 (Flame ionization detector, FID)，測量時依所測量氣體之需要開啟不同偵測器。分析時均以氣密針 (Gas-tight syringe) 取樣與進樣。

針對測量不同種類氣體和濃度的需要，需要選擇不同載氣、管柱的種類，以及選擇是否開啟觸媒轉換器，依設定需要可將實驗方法分成三類，說明如下：

1. 採用載氣為 He，管柱為 Mole sieve 5A，使用 TCD 偵測 O₂ 與 N₂。個別樣本的分析誤差低於 3%，系統誤差低於 10%，偵測極限為 100 ppm。
2. 採用載氣為 N₂，管柱為 Mole sieve 5A，並開啟觸媒轉換器，使用 TCD 偵測 H₂，FID 則用於偵測 CH₄ 與 CO。偵測極限皆為 10 ppm。H₂ 個別樣本的分析誤差低於 3%，系統誤差低於 10%；CH₄ 個別樣本的分析誤差低於 2%，系統誤差低於 3%；CO 個別樣本的分析誤差低於 3%，系統誤差低於 2%。
3. 採用載氣為 He，管柱為 Porapak Q，使用 TCD 偵測 CO₂，FID 偵測 C₂H₆ 與 C₃H₈ 等碳氫化合物。偵測極限皆為 10 ppm。CO₂ 個別樣本的分析誤差低於 2%，系統誤差低於 8%；C₂H₆ 與 C₃H₈ 個別樣本的分析誤差低於 5%，系統誤差低於 2%。

2-3-3-1 標準氣體配置

本實驗所使用的標準氣體共有 7 種。各種標準氣體中的成分、濃度、所使用的偵測器種類與所搭配的管柱類型，詳列於表 2-2 中。

2-3-3-2 檢量線測定

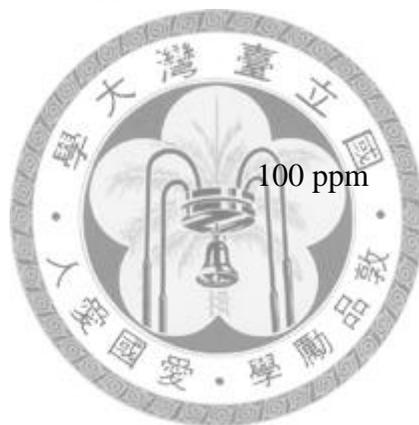
為避免操作時可能發生的空氣污染影響到測量結果，因此對於 O₂ 與 N₂ 的檢量線測定，均以氣密針直接自氣瓶中抽取標準氣體，不經任何稀釋便直接測量。其餘不易受空氣污染影響的氣體，如 CO、H₂、CH₄、CO₂、C₂H₆ 與 C₃H₈ 等，

則皆以集氣袋稀釋成不同濃度後，再進行檢量線測定。

1. O_2 、 N_2 的檢量線測定：利用氣密針直接從標準氣瓶內抽取氣體，其中 O_2 檢量線測定所使用的濃度為 100 ppm、1.00% 與 5.01%； N_2 檢量線則為 100 ppm 與 4.99%。
2. CO 的檢量線測定：以 N_2 稀釋標準氣體，檢量線濃度為 10、50、100、500 ppm。
3. H_2 、 CH_4 的檢量線測定：以 N_2 稀釋標準氣體， H_2 檢量線測定所使用的濃度為 10 ppm、50 ppm、100 ppm、500 ppm、1000 ppm、5000 ppm 以及 1.00%； CH_4 檢量線測定所使用的濃度為 10 ppm、50 ppm、100 ppm、500 ppm、1000 ppm、5000 ppm、1.00% 與 4.00%。
4. CO_2 的檢量線測定：以 He 稀釋標準氣體，檢量線測定所使用的濃度為 50 ppm、100 ppm、500 ppm、1000 ppm、5000 ppm、1.00% 與 4.99%。
5. C_2H_6 、 C_3H_8 的檢量線測定：以 N_2 稀釋標準氣體。 C_2H_6 檢量線測定所使用的濃度為 10 ppm、50 ppm、100.2 ppm、501 ppm 與 1002 ppm； C_3H_8 檢量線測定所使用的濃度為 9.96 ppm、49.8 ppm、99.6 ppm、498 ppm 和 996 ppm。

表 2-2、各種標準氣體的成分、濃度、偵測器種類與管柱類型。

	Scott standard gas (501697) ¹	Scott standard gas (22561) ²	Scott standard gas (501824) ¹	Scott standard gas (301300) ²	Scott standard gas (305200) ¹	Scott standard gas (303200) ¹	Scott standard gas (303103) ³	Detector	Column
CO ⁴	5.00%	1.00%						TCD/FID	mole sieve 5A
CO₂	4.99%	1.00%					0.20%	TCD	porapak Q
H₂	4.01%	1.00%		100 ppm				TCD	mole sieve 5A
CH₄	4.00%	1.00%	992 ppm					TCD/FID	mole sieve 5A / porapak Q
N₂	4.99%					100 ppm	4.99%	TCD	mole sieve 5A
O₂	5.01%	1.00%			100 ppm		5.01%	TCD	mole sieve 5A
He							4.00%	TCD/FID	mole sieve 5A
C₂H₆			1002 ppm				3.00%	TCD/FID	porapak Q
C₃H₈			996 ppm					TCD/FID	porapak Q
n-C₄H₁₀			997 ppm				1.01%	FID	porapak Q
n-C₅H₁₂			1010 ppm					FID	porapak Q
n-C₆H₁₄			1004 ppm					FID	porapak Q



¹ 平衡於 He；

² 平衡於 N₂；

³ 平衡於 CH₄；

⁴ 若開啟觸媒轉換器 (Nickel catalyst)，則偵測器選用 FID。

2-3-4 溶解氣體濃度計算與校正

2-3-4-1 溶解氣體濃度測量

野外採集樣本時共收集 10 瓶，其中 8 瓶為測量氣體濃度之用，另外 2 瓶則為測試瓶內壓力或做為備用樣本。量測氣體濃度前，將氣瓶從 4°C 冰箱拿出來回復至室溫。先以針筒確認測試用氣瓶內的壓力狀態，做為將瓶內壓力恢復為 1 atm 的依據，以便濃度的計算與校正。若上部空間為負壓，則打入載氣直至瓶內回復到 1 atm，並記錄所打入的載氣體積；若瓶內上部空間為正壓，則移除部分上部空間之氣體直至回復到 1 atm，並記錄所移除的氣體體積。

量測氣體樣本前，先依照測試氣瓶所記錄需要打入載氣或移除上部空間氣體，讓每個樣本的瓶內壓力皆回復到 1 atm。本實驗進樣使用氣密針，抽取氣體前，為了維持瓶內與針內壓力均為 1 atm，所以採取打 1 ml 載氣入瓶內，待其平衡再抽取 1ml 樣本進樣。氣樣注入進樣迴路，由氣相層析儀分析出該氣體濃度。

2-3-4-2 溶解氣體濃度計算

使用氣相層析儀所量測到的氣體濃度為上部空間氣體的濃度，所以必須再根據亨利定律計算出溶解於水中之氣體濃度，公式如下：

$$k_H = Ca / P_g \quad (1)$$

其中 k_H 為亨利定律常數， Ca 代表某氣體溶解在液相中的莫耳濃度， P_g 代表某氣體在氣相中的分壓。當氣體處於標準狀態下 ($T = 298.15 \text{ K}$)，亨利常數可用 k_H^\ominus 來表示。

當溫度不是處於標準狀態下時，要計算出溶解氣體濃度 (Ca)，必須將亨利定律常數根據溫度來做修正，其關係式如下：

$$k_H = k_H^\ominus \times \exp\left(\frac{-\Delta_{\text{soln}}H}{R} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T^\ominus}\right)\right) \quad (2)$$

其中 $\Delta_{\text{soln}}H$ 為溶液的焓 (enthalpy of solution)，其與溫度之間的關係如下：

$$\frac{d \ln k_H}{d(1/T)} = \frac{-\Delta_{\text{soln}}H}{R} \quad (3)$$

本研究所測量氣體之 k_H^\ominus 與 $-\Delta_{\text{soln}}H/R$ 列表於表 2-3 中。

表 2-3、本研究所測量氣體之 k_H^\ominus 與 $-\Delta_{\text{soln}}H/R$ 列表。

氣體種類	k_H^\ominus	$-\Delta_{\text{soln}}H/R$	Reference
O ₂	1.3×10^{-3}	1500	Lide and Frederikes, 1995
N ₂	6.5×10^{-4}	1300	Wilhelm et al., 1977
H ₂	7.8×10^{-4}	500	Lide and Frederikes, 1995
CO ₂	3.5×10^{-2}	2400	Lide and Frederikes, 1995
CO	9.9×10^{-4}	1300	Lide and Frederikes, 1995
CH ₄	1.4×10^{-3}	1600	Lide and Frederikes, 1995
C ₂ H ₆	1.9×10^{-3}	2300	Lide and Frederikes, 1995
C ₃ H ₈	1.5×10^{-3}	2700	Lide and Frederikes, 1995

將上部空間之氣體莫耳數加上溶於水中之氣體莫耳數即為該氣體總莫耳數，再利利用總莫耳數計算出水體中總溶解之氣體濃度。以下面案例一作簡單的計算說明：

【案例一】計算富源溫泉水溶解 O₂ 濃度

注意事項：計算 O₂、N₂ 時，需要將真空瓶中之殘存空氣扣除掉。

氣瓶總體積：160 ml 上部空間體積：1.4 ml 溫泉水體積：158.6 ml

室溫：25°C 氣密針進樣體積：1 ml

採樣前真空瓶內氣體壓力：0.2 torr = 0.2 × 0.0013157 = 2.63 × 10⁻⁴ atm

a. 採集前氣瓶中殘存 O₂ 總量計算：

$$n_{(\text{mole})} = P_{(\text{atm})}V_{(\text{L})}/RT_{(\text{K})} = \frac{(2.63 \times 10^{-4} \times 0.16)}{0.082 \times (273 + 25)} = 1.72 \times 10^{-6} \text{ mole}$$

b. 達平衡後上部空間 O₂ 總量與分壓計算：

上部空間中 O₂ 之測量濃度為

$$37251.9 \text{ ppm} = 37251.9/1000000 = 3.73 \times 10^{-2} \text{ atm}$$

O₂ 總量為

$$\begin{aligned} n_{(\text{mole})} &= P_{(\text{atm})}V_{(\text{L})}/RT_{(\text{K})} = \frac{(3.73 \times 10^{-2}) \times [(1.4 + 1)/1000]}{0.082 \times (273 + 25)} \\ &= 3.66 \times 10^{-6} \text{ mole} \end{aligned}$$

O₂ 分壓為

$$P_{(\text{atm})} = n_{(\text{mole})}RT_{(\text{K})}/V_{(\text{L})} = \frac{3.66 \times 10^{-6} \times 0.082 \times (273 + 25)}{(1.4/1000)} = 0.0639 \text{ atm}$$

c. 達平衡後溶解於溫泉水中之 O₂ 濃度與總量（實驗室室溫 25°C, T = 298 K）：

$$\begin{aligned}
Ca_{(M)} &= k_H \times Pg_{(atm)} \\
&= k_H^\ominus \times \exp\left(\frac{-\Delta_{soln}H}{R}\left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T^\ominus}\right)\right) \times Pg_{(atm)} \\
&= 0.0013 \times \exp\left(1500 \times \left(\frac{1}{273 + 25} - \frac{1}{273 + 25}\right)\right) \times 0.0639 \\
&= 8.31 \times 10^{-5} \text{ M} \\
&= 8.31 \times 10^{-5} \times (158.6/1000) = 1.32 \times 10^{-5} \text{ mole}
\end{aligned}$$

d. 現地溫泉水溶解 O₂ 濃度：

溫泉水溶解 O₂ 濃度

$$\begin{aligned}
&= (\text{上部空間 O}_2 \text{ 總莫耳數} + \text{溶解於溫泉水中之 O}_2 \text{ 總莫耳數} \\
&\quad - \text{採水前氣瓶中殘存 O}_2 \text{ 總莫耳數}) \div \text{採水體積} \\
&= [(4.27 \times 10^{-6}) + (1.32 \times 10^{-5}) - (3.61 \times 10^{-7})] \div 0.1586 \\
&= 107.88 \mu\text{M}
\end{aligned}$$

2-4 熱力學原理與自由能計算

2-4-1 熱力學基本原理介紹

熱力學第一定律為能量守恆，並定義焓 (enthalpy, ΔH)。焓是系統中經過化學反應在定壓力之下所增加或減少的熱。當 ΔH 為負值時，反應為放熱反應 (exothermic)；相反地，當 ΔH 為正值時，反應為吸熱反應 (endothermic)。依定義熱力學第二定律可以描述為”任何自發性的反應都是增加宇宙中的熵 (entropy, S)”，所謂宇宙包含系統與周圍環境兩部分，因此宇宙中的熵的變化寫成 (4) 式。

$$\Delta S_{total} = \Delta S_{surrounding} + \Delta S_{system} \quad (4)$$

ΔH 和 ΔS 都是所謂狀態方程式，用以描述或定義系統的狀態，與系統之前的歷史無關。

在定溫、定壓下

$$\Delta S_{surroundings} = -\Delta H_{system} / T \quad (5)$$

整理 (4) (5) 式可得

$$T\Delta S_{total} = -(\Delta H_{system} - T\Delta S_{system}) \quad (6)$$

因為自發性反應的 ΔS_{total} 必須為正值，也就是 $(\Delta H_{system} - T\Delta S_{system})$ 必須為負值。

據此定義出自由能 (Gibbs free energy) 這個狀態方程式

$$\Delta G = \Delta H - T\Delta S \quad \text{或在標準狀態下寫成} \quad \Delta G^{\circ} = \Delta H^{\circ} - T\Delta S^{\circ} \quad (7)$$

當化學反應之 ΔG 為負值，該反應會自然發生 (exergonic)；當化學反應之 ΔG 為正值，該反應為無法自然發生 (endorgonic) 或是需朝反方向自發進行；當化學反應之 ΔG 為 0，代表該系統已達到平衡。圖 2-3 為化學反應與反應自由能之示意圖，會自然發生的反應將釋放能量到環境中，但需注意的是反應能否進行，仍受控於活化能障礙是否能被克服。

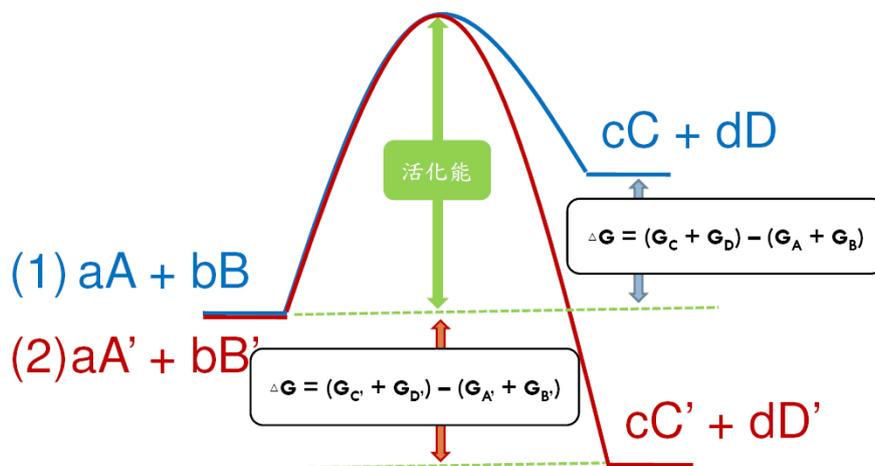


圖 2-3、化學反應自由能變化示意圖。情況 (1) 代表 $\Delta G > 0$ ，反應無法自然發生，情況 (2) 代表 $\Delta G < 0$ ，反應可以自然發生。

2-4-2 化學反應自由能計算

經由自由能 (Gibbs free energy, ΔG) 的計算，能夠推測反應是否能夠自然發生，並量化各種化學反應所釋放到環境中的能量。

計算 ΔG ，依照下列之 (8) 式：

$$\Delta G = \Delta G^{\circ} + RT \ln Q \quad (8)$$

其中，R 是氣體常數；T 是絕對溫度 (Kelvin)； ΔG° 代表標準狀態 (25°C，一大氣壓) 的自由能，Q 值則是將代謝反應中，各個產物活度(以 “{ }” 表示)之係數次方後相乘積除以各個反應物活度之係數次方後相乘積。例如，代謝反應是為 $aA + bB \rightarrow cC + dD$ ，則

$$Q = \frac{\{C\}^c \times \{D\}^d}{\{A\}^a \times \{B\}^b} \quad (9)$$

由於反應達平衡時之自由能為零，此時平衡常數 (K) 即為 Q 值，因此可得

$$\Delta G^{\circ} = -RT \ln K \quad (10)$$

將 (10) 式帶入 (8) 式，即得到另一形式的 ΔG 公式：

$$\Delta G = RT \ln(Q/K) = 2.303RT \log(Q/K) \quad (11)$$

根據 (11) 式，便可由反應平衡常數以及我們測得的各項化學及氣體濃度資料計算得到各個代謝的 ΔG 值。

2-4-3 化學反應方程式選擇

在溫泉系統中，混合了由地底下冒出來的熱水、池子周遭的溪水以及天水，可能造成了化學不平衡的環境。對微生物而言，這些未達化學平衡的反應能夠提供它們能量來源。本研究列出來的化學反應方程式清單，包含 107 個氧化還原反應(詳見附錄表一)，列舉的主要依據有兩大原則，分別是前人所發表過微生物能夠利用的代謝反應，以及反應式中參與的化合物屬於本研究所分析的範圍。依照電子接受者的不同，大致區分成六大類反應：(1) 有氧環境下的氧化作用 (Aerobic oxidation)；(2) 無氧環境下的硝酸根與亞硝酸根還原作用 (Nitrate, Nitrite reduction)、固氮作用 (Nitrogen fixation) 以及無氧氨氧化作用 (Anammox)；(3) 無氧環境下的元素硫與硫酸根還原作用 (Sulfur, Sulfate reduction) 以及元素硫的自身氧化還原作用 (Sulfur disproportionation)；(4) 無氧環境下的甲烷氧化作用 (Anaerobic methane oxidation)、產甲烷作用 (Methanogenesis) 以及產乙酸作用 (Acetogenesis)；(5) 無氧環境下的金屬離子還原作用 (Metal reduction)；(6) 發酵作用 (Fermentation)。

2-4-4 Geochemist's Workbench 軟體應用

Geochemist's Workbench (縮寫成 GWB) 軟體主要功能包括了平衡化學反應、計算活度、計算水體中化學物種平衡濃度、模擬反應過程、模擬化學物種於二維空間上的運輸過程與各種計算、模擬結果作圖。以下僅就本研究所使用的功能說

明之。

2-4-4-1 推定穩定存在礦物相

推定穩定存在礦物相的步驟如下：

1. 取得完整的溫泉水化學資料。
2. 計算出溫泉水中的離子強度。離子強度的計算公式如下：

$$I = \frac{1}{2} \sum m_i z_i^2 \quad (12)$$

其中 I 代表離子強度， m_i 代表水體中各個離子的莫耳濃度， z_i 代表各個離子的價數。

3. 計算活度係數 (activity coefficients, γ)。各種離子之活度係數的計算根據表 2-4 所列之公式 (Amend and Shock, 2001)，對於特定的離子種類配合溶液的離子強度，可經由表 2-5 得到各種離子的活度係數。



表 2-4、活度係數計算公式列表。

Approximation	Equation	Approximate Applicability
		[ionic strength (M)]
Debye-Hückel	$\log \gamma = -Az^2\sqrt{I}$	$I < 0.01$
Debye-Hückel	$\log \gamma = -Az^2 \frac{\sqrt{I}}{1 + B\bar{a}\sqrt{I}}$	$0.01 < I < 0.1$
Debye-Hückel	$\log \gamma = \frac{-Az^2\sqrt{I}}{1 + B\bar{a}\sqrt{I}} + b_\gamma I$	< 0.1
Davies	$\log \gamma = -Az^2 \left(\frac{\sqrt{I}}{1 + \sqrt{I}} - 0.2I \right)$	< 0.5

其中 γ 為活度係數， I 為離子強度， z 為離子價數， \bar{a} 為離子大小（單位為 angstroms）， $A = 1.82 \times 10^6 (\epsilon T)^{-3/2}$ ， $B = 50.3 (\epsilon T)^{-1/2}$ ， ϵ 是介電子常數（水於 0 °C, $\epsilon=88$ ；20 °C, $\epsilon=80.1$ ；100 °C, $\epsilon=55.3$ ；200 °C, $\epsilon=34.5$ ）。

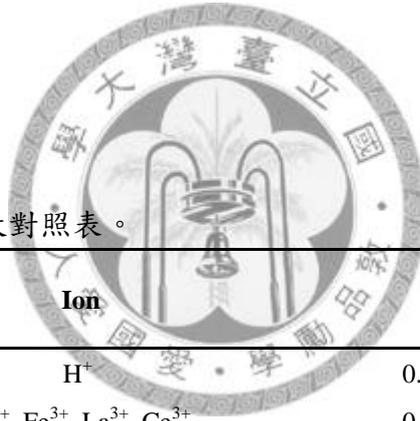


表 2-5、各離子活度係數對照表。

Ion Size, \bar{a} (angstroms)	Ion	Ion strength				
		10^{-4}	10^{-3}	10^{-2}	0.05	10^{-1}
9	H ⁺	0.99	0.97	0.91	0.86	0.83
	Al ³⁺ , Fe ³⁺ , La ³⁺ , Ce ³⁺	0.90	0.74	0.44	0.24	0.18
8	Mg ²⁺ , Be ²⁺	0.96	0.87	0.69	0.52	0.45
6	Ca ²⁺ , Zn ²⁺ , Cu ²⁺ , Sn ²⁺ , Mn ²⁺ , Fe ²⁺	0.96	0.87	0.68	0.48	0.40
5	Ba ²⁺ , Sr ²⁺ , Pb ²⁺ , CO ₃ ²⁻	0.96	0.87	0.67	0.46	0.39
4	Na ⁺ , HCO ₃ ⁻ , H ₂ PO ₄ ⁻ , CH ₃ COO ⁻	0.99	0.98	0.90	0.81	0.77
	SO ₄ ²⁻ , HPO ₄ ²⁻	0.96	0.87	0.66	0.44	0.36
	PO ₄ ³⁻	0.90	0.72	0.40	0.16	0.10
3	K ⁺ , Ag ⁺ , NH ₄ ⁺ , OH ⁻ , Cl ⁻ , ClO ₄ ⁻ , NO ₃ ⁻ , I ⁻ , HS ⁻	0.99	0.96	0.90	0.80	0.76

資料來源：Kielland, 1937

4. 求出離子活度 (activity, α)。活度計算公式如下：

$$\alpha = \gamma \cdot m \quad (13)$$

其中 α 代表離子活度， γ 為離子活度係數， m 為離子的莫耳濃度。

5. 執行 GWB 軟體中的 Act2 程式，輸入採樣溫泉水中 Fe^{2+} 、 SO_4^{2-} 等與微生物可使用之礦物相有關的離子活度、溫度，選擇以 pH 值以及 Eh 值當作兩軸，即可輸出礦物相圖。
6. 參考前人資料 (陳耀麟, 2001) 所測得的離子濃度範圍 (表 2-6)，以及本研究於現地所測量到的 pH 及 Eh 值，在礦物相圖中標示出溫泉水可能的 pH 及 Eh 值變動範圍，以推測水體中能夠穩定存在的礦物相種類。



表 2-6、陽明山地區溫泉水 pH 值、Eh 值、 Fe^{2+} 與 SO_4^{2-} 濃度範圍。

	庚子坪(礮山)	龍鳳谷	硫磺谷	地熱谷	小油坑	七股溫泉
pH ¹	1.8 ~ 2.5	2.7 ~ 4.0	2.9 ~ 4.2	1.0 ~ 2.5	2.2 ~ 3.5	2.7 ~ 4.0
Fe²⁺ (mg/L) ¹	30.6 ~ 58.3	2.55 ~ 21.3	9.6 ~ 40.1	18.3 ~ 81.7	16.4 ~ 102	29.6 ~ 60.1
SO₄²⁻ (mg/L) ¹	998 ~ 1321	187 ~ 587	688 ~ 1369	1775 ~ 3026	553 ~ 1760	1321 ~ 1677
Eh (mV) ²	-75 ~ -105	-293	-44 ~ -150	54 ~ 275	313	307

¹ 資料來源：陳耀麟, 2001。

² 資料來源：本實驗室野外資料。

以下以實際案例【案例二】說明之。

【案例二】運用 GWB 軟體，依據磺山溫泉水樣的化學組成，推定可以穩定存在之含硫與鐵的礦物相。

磺山之溫泉水化學資料，列表如下：

Cl⁻	222.3	μM	Al³⁺	863.0	μM
SO₄²⁻	3166.7	μM	Ca²⁺	505.0	μM
PO₄³⁻	3.9	μM	K⁺	84.6	μM
NH₄⁺	31.4	μM	Li⁺	28.8	μM
HS⁻	22.2	μM	Mg²⁺	485.6	μM
Fe²⁺	238.0	μM	Mn²⁺	5.5	μM
Fe³⁺	2.2	μM	Na⁺	382.6	μM
			Si⁴⁺	996.4	μM

1. 由公式 (12) 計算離子強度為 $I = \frac{1}{2} \sum m_i z_i^2 = 2.62 \times 10^{-2} \text{ M}$

2. 計算含硫、含鐵離子的活度係數

由於離子強度介於 0.01 和 0.1 之間 $0.01 < I < 0.1$ ，所以代入(表 2-4)中的

$$\log \gamma = -Az^2 \frac{\sqrt{I}}{1+B\sqrt{I}}$$

$$\text{其中 } A = 1.82 \times 10^6 (\epsilon T)^{-3/2} \quad B = 50.3 (\epsilon T)^{-1/2}$$

由已知溫度 0°C、20°C 與 100°C 三個溫度的 ϵ 值，可得到 ϵ 值與溫度之間的線性關係為 $\epsilon = -0.3221 \cdot T(\text{°C}) + 87.352$ 。由於磺山溫泉水溫為 65°C，求得

$$\epsilon = -0.3321 \cdot 65 + 87.352 = 66.4$$

$$A = 1.82 \times 10^6 \cdot (66.4 \cdot 338)^{-3/2} = 0.5413$$

$$B = 50.3 \cdot (66.4 \cdot 338)^{-1/2} = 0.3358$$

$$\log \gamma_{\text{SO}_4^{2-}} = -0.5413 \cdot (-2)^2 \frac{\sqrt{2.62 \cdot 10^{-2}}}{1 + 0.3358 \cdot 4 \cdot \sqrt{2.62 \cdot 10^{-2}}} = -0.28788$$

$$\gamma_{\text{SO}_4^{2-}} = 0.5153$$

$$\{\text{SO}_4^{2-}\} = 3.167 \times 10^{-3} \times 0.5153 = 1.632 \times 10^{-3}$$

$$\log \gamma_{\text{Fe}^{2+}} = -0.5413 \cdot (2)^2 \frac{\sqrt{2.62 \cdot 10^{-2}}}{1 + 0.3358 \cdot 6 \cdot \sqrt{2.62 \cdot 10^{-2}}} = -0.26428$$

$$\gamma_{\text{Fe}^{2+}} = 0.5441$$

$$\{\text{Fe}^{2+}\} = 2.380 \times 10^{-4} \times 0.5441 = 1.295 \times 10^{-4}$$

將 $\log \gamma_{\text{SO}_4^{2-}}$ 與 $\log \gamma_{\text{Fe}^{2+}}$ 輸入 ACT2 程式中得到下面礦物相圖 (圖 2-4)。

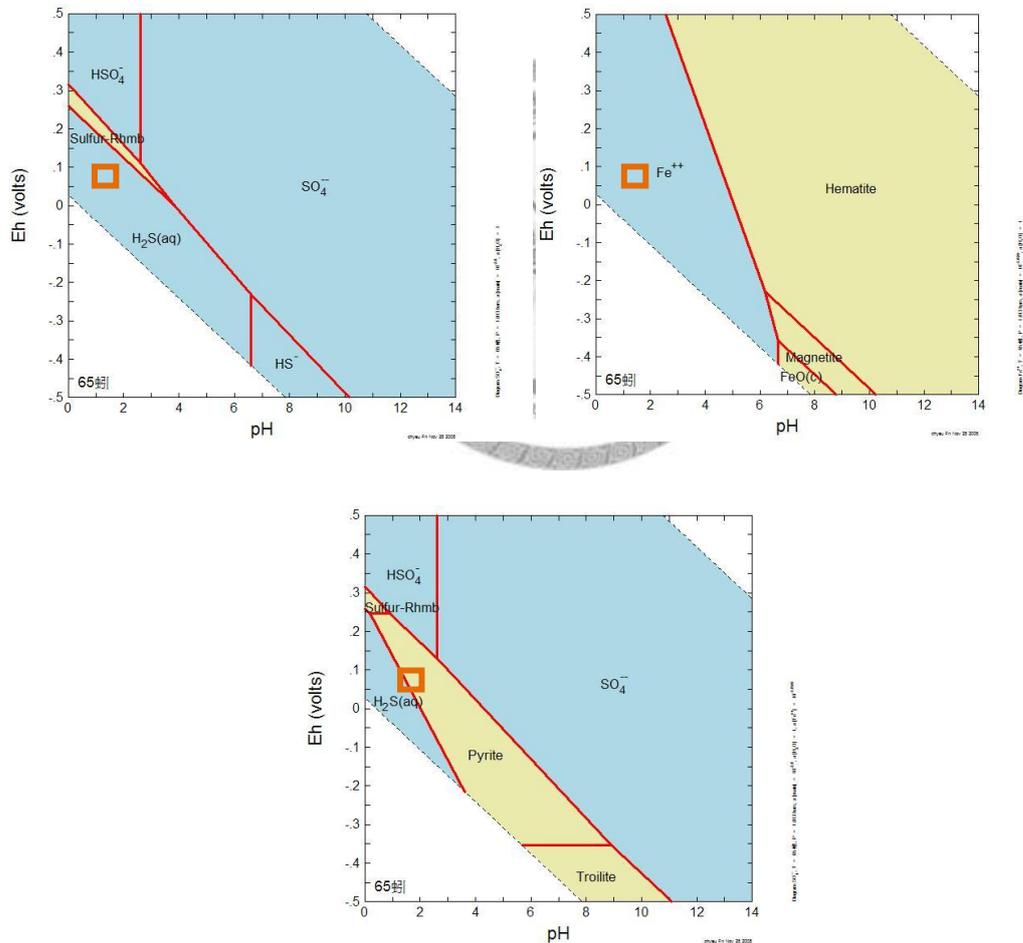


圖 2-4、磺山溫泉水樣穩定礦物相圖。依據磺山溫泉水的化學組成，所推定出溫泉水的礦物相圖。根據前人資料 (陳耀麟, 2001) 與本研究採樣時實測的 pH 值與氧化還原電位 (其中氧化還原電位介於 -75 和 -107 mV 之間, pH 則在 1.8 和 2.5 之間), 標出磺山溫泉水樣中應可穩定存在的礦物相座落在相圖中框出範圍。

此案例結果顯示在水體中黃鐵礦可以穩定存在，其他礦物如磁鐵礦、赤鐵礦、氧化鐵與元素硫等，均無法穩定存在於磺山溫泉水體中。

2-4-4-2 溫泉水樣之反應自由能計算

各個溫泉水樣中特定氧化還原反應之自由能計算，依下列步驟進行：

1. 選定反應參與物種。由於某些離子在水中的解離形式與比例與溫度和 pH 值有關，因此在選定反應所參與的物種時，需根據水樣的溫度和 pH 值加以調整。圖 2-5 說明各種主要參與代謝反應離子，隨 pH 值與溫度的不同所呈現的不同離子狀態。

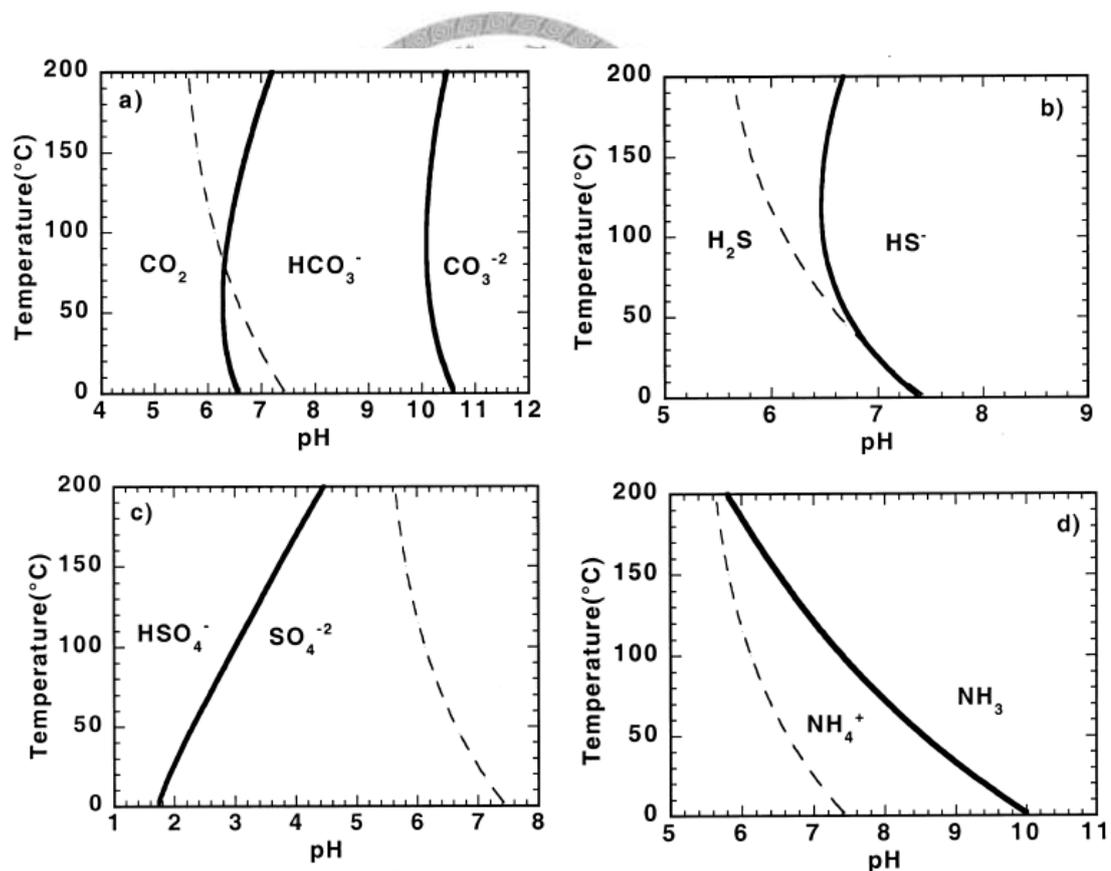


圖 2-5、化學物種 pKa、溫度與 pH 值作圖，以粗實線代表 (a) $\text{CO}_{2(\text{aq})}$ 、(b) $\text{H}_2\text{S}_{(\text{aq})}$ 、(c) HSO_4^- 與 (d) NH_4^+ 四種的 pKa 值。虛線為純水隨溫度變化的 pH 值改變 (Amend and Shock, 2001)。

2. 製作輸入資料檔。將完整的溫泉水化學資料，整理成執行 GWB 軟體所需的資料格式存檔。輸入資料檔中包括溫泉水溫、pH 值、各種陰陽離子濃度、溶解氣體濃度、有機酸濃度，以及欲計算的反應方程式。參與化學物種的選定須考慮離子 pKa 加以設定。資料檔建立後，執行 GWB 軟體中的 REACT 程式，該程式即會將計算結果記錄於輸出資料檔中(參考案例三)
3. 擷取輸出檔資料，計算自由能。在輸出資料檔中，我們可以取得從各個反應所計算出來的 $\log(Q/K)$ ，代入 (7) 式 即可以得到每個化學反應的自由能值。



以下以實際案例【案例三】說明自由能如何計算。

【案例三】計算礮山溫泉水樣中，各種氧化還原反應的自由能。

將溫泉水溫度、pH 值、水化學濃度、氣體化學濃度與化學反應式等，按照 GWB 所需輸入資料檔格式建立檔案，由於泉水的 pH 值為 2.86，因此在欲計算活化能的反應方程式中，由 $\text{CO}_{2(\text{aq})}$ 參與反應，檔案內容如下：

```
=====
reset
data = "c:\program files\gwb\gtdata\thermo.com.v8.r6+.dat" verify
work_dir = "d:\thermodynamic_modeling"
decouple all
fix CO2(aq) swap CO2(aq) for HCO3-
fix NH4+ swap NH4+ for NH3(aq)
fix H2S(aq) swap H2S(aq) for HS-
fix SO4-- fix Propanoic_acid(aq)

T = 65 C pH = 2.86

Na+ = 8.80 mg/kg NO2- = 1e-10 free mg/kg
K+ = 3.30 mg/kg H2S(aq) = 0.73 free mg/kg
Mg++ = 11.80 mg/kg H2(aq) = 0.83 free umolar
Ca+++ = 20.20 mg/kg O2(aq) = 33.67 free umolar
Fe+++ = 13.28 free mg/kg N2(aq) = 17.62 free umolar
Fe++++ = 0.12 free mg/kg CO2(aq) = 3982.05 free umolar
NH4+ = 0.57 free mg/kg CO(aq) = 1e-10 free umolar
Al+++ = 23.30 mg/kg Methane(aq) = 0.67 free umolar
Mn++ = 0.30 mg/kg Ethane(aq) = 0.13 free umolar
Cl- = 7.89 mg/kg Propane(aq) = 1e-10 free umolar
Br- = 1e-10 mg/kg Propanoic_acid(aq) = 1e-10 free mg/kg
SO4-- = 304.03 free mg/kg Acetic_acid(aq) = 1e-10 free mg/kg
NO3- = 1e-10 free mg/kg Formic_acid(aq) = 1e-10 free mg/kg

time start = 0 hours, end = 1 hours
# aerobic oxidation
kinetic redox-01-01 rxn = "H2(aq) + 0.5*O2(aq) -> H2O" rate_con = 8e-13
kinetic redox-01-02 rxn = "Formic_acid(aq) + .5*O2(aq) -> H2O + CO2(aq)" rate_con = 8e-13
```

kinetic redox-01-03 rxn = "Acetic_acid(aq) + 2*O2(aq) -> 2*H2O + 2*CO2(aq)" rate_con = 8e-13

kinetic redox-01-04 rxn = "Propanoic_acid(aq) + 3.5*O2(aq) -> 3*H2O + 3*CO2(aq)" rate_con = 8e-13

kinetic redox-01-05 rxn = "NO2- + 0.5*O2(aq) -> NO3-" rate_con = 8e-13

kinetic redox-01-06 rxn = "NH4+ + 1.5*O2(aq) -> NO2- + 2*H+ + H2O" rate_con = 8e-13

執行 REACT 程式後，在輸出檔中可以得到各個化學反應的 log (Q/K)值，
摘錄如下：

Kinetic	rate const.	catalyst	affinity	rxn rate
redox rxns	(molal/s; molal/cm2s)	area (cm2)	(log Q/K)	(mol/kg sec)
redox-01-01	8.000e-013	--	-32.00	8.000e-013
redox-01-02	8.000e-013	--	-25.37	8.000e-013
redox-01-03	8.000e-013	--	-117.3	8.000e-013
redox-01-04	8.000e-013	--	-223.8	8.000e-013
redox-01-05	8.000e-013	--	-11.10	8.000e-013
redox-01-06	8.000e-013	--	-41.68	8.000e-013

根據 (11) 式計算出各個化學反應的自由能，再依照該反應中電子傳遞的數量，統一化為每莫爾電子傳遞的自由能。計算結果如下：

$$\begin{aligned}\Delta G_{\text{redox-01-01}} &= 2.303 \cdot 8.314 \cdot (273 + 65) \cdot (-32) \\ &= -207095 \text{ J/mole} = -207.095 \text{ kJ/mole} = -103.548 \text{ kJ/mole } e^{-}\end{aligned}$$

$$\Delta G_{\text{redox-01-02}} = -164.188 \text{ kJ/mole} = -82.094 \text{ kJ/mole } e^{-}$$

$$\Delta G_{\text{redox-01-03}} = -759.314 \text{ kJ/mole} = -94.914 \text{ kJ/mole } e^{-}$$

$$\Delta G_{\text{redox-01-04}} = -1448.374 \text{ kJ/mole} = -103.451 \text{ kJ/mole } e^{-}$$

$$\Delta G_{\text{redox-01-05}} = -71.836 \text{ kJ/mole} = -35.918 \text{ kJ/mole } e^{-}$$

$$\Delta G_{\text{redox-01-06}} = -269.742 \text{ kJ/mole} = -44.957 \text{ kJ/mole } e^{-}$$

2-5 化學反應之能量通量原理與計算

2-5-1 能量通量基本原理

微生物有其所謂最小能量需求，代謝反應所產生的自由能必須大於或等於 ATP 所能攜帶儲存的最小單位能量，才能為生物所利用，這個最小單位能量被定義為生物能量量子 (Biological energy quantum, 縮寫成 BEQ) (Hoehler, 2004)。在微生物利用週遭的化學成分來代謝產生能量的過程中，又涉及能量產生與使用的速度，這個能量使用的需求，可以定義為維持能量 (Maintenance energy, 縮寫成 ME)。簡言之，BEQ 代表著支持微生物生存所進行的化學反應自由能所需跨越的界線值，而 ME 則是微生物為了維持本身特定的生理機能狀態所需的能量通量。

能量通量的估算是假設環境中測量到的物種濃度維持著穩定，也就是環境中被消耗的量與所產生的量相同，若此消耗由微生物所為，且在細胞內物種濃度維持特定值，那麼根據擴散作用原理可以估算出進入細胞內的物種通量，再將化學物種進入細胞的通量乘以使用該物種進行代謝反應的自由能，即可得到該代謝反應所提供的能量通量。

Hoehler (2004) 所提出的環境中微生物與環境中化學物種濃度關係的示意圖 (圖 2-6)，以較為複雜的模式說明化學物種濃度與細胞使用間的關係。根據圖 2-6 的模式，可得到物種在環境中的濃度與 ME 和自由能間的關係：

$$C_r = C_{\text{BEQ}} - \frac{\text{ME}_{\text{cell}}}{4\pi D \cdot \Delta G_{\text{int}}} \cdot \left(\frac{1}{(R-m)} - \frac{1}{r} \right) \quad (14)$$

$$C_{\infty} = C_{\text{BEQ}} - \frac{\text{ME}_{\text{cell}}}{4\pi D \cdot \Delta G_{\text{int}}} \cdot \left(\frac{1}{(R-m)} \right) \quad (15)$$

其中 C_r 代表與細胞中心距離為 r 的化學物種濃度， C_{∞} 代表距離細胞中心無限遠處的化學物種濃度， C_{int} 代表細胞內部的化學物種濃度， C_{BEQ} 表示維持微生物特定生理機能時細胞內之化學物種濃度， R 為細胞半徑， m 為細胞膜厚度， ME_{cell} 代表細胞的能量通量需求； ΔG_{int} 為細胞膜內的反應自由能。

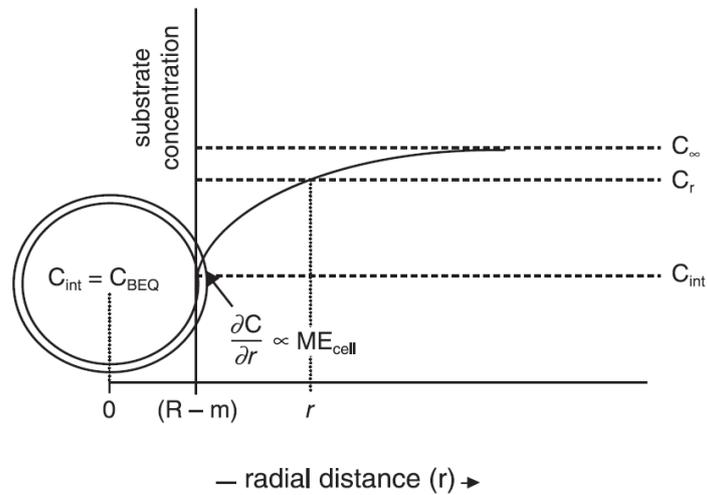


圖 2-6、細胞能量通量需求示意圖。圖中左側為水體中的一個微生物細胞，化學物種藉由擴散的方式從無限遠處到達細胞膜表面，最終藉著細胞膜上的蛋白質運輸入細胞內，化學物種的濃度也隨著與細胞間距離的縮短而逐漸減小。符號說明請見內文。摘自 Hoehler (2004)。

2-5-2 能量通量計算

在計算化學反應之能量通量時，需要先決定反應中的限制因子 (limiting substrate)，限制因子是反應式中通量與反應係數乘積較小的化學物種，再將限制因子產生的物質通量乘以反應自由能以求得能量通量。簡化 Hoehler (2004) 提出的模式，假設化學物種從距離微生物無限遠處擴散到微生物細胞膜外層被微生物完全的利用掉，細胞半徑為 $1 \mu\text{m}$ ($R=1 \mu\text{m}$)，不考慮細胞膜的厚度 ($m=0$)。將所有假設代入 (15) 式得到下列新的式子：

$$ME = -4\pi \cdot D \cdot C \cdot R \cdot \Delta G \quad (16)$$

其中 ME 為能量通量 (單位為 kJ/sec)，D 為限制因子的擴散係數 (單位為 cm^2/sec)，C 為限制因子的濃度，R 為微生物半徑 (設定為 $1 \mu\text{m}$)， ΔG 為該代謝反應的自由

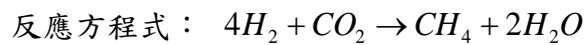
能 (單位為 kJ/mole)。各種化學物種的擴散係數，參考 Han and Bartels, 1996; Hunt et al., 1988; Jahne et al., 1987; Lasaga, 1998; Liu et al., 2004; Wise and Houghton, 1968。

以下以實際案例【案例四】說明能量通量如何計算。

【案例四】

採樣地點：小油坑

溫泉水溫度：71.6°C



反應方程式自由能： $\Delta G = -25.5 \text{ kJ/mole}$

H₂ 濃度：0.15 μM

H₂ 擴散係數： $1.222 \times 10^{-10} \text{ cm}^2/\text{sec}$

CO₂ 濃度：2582.87 μM

CO₂ 擴散係數： $5.49 \times 10^{-11} \text{ cm}^2/\text{sec}$

限制因子決定：

$$\text{H}_2 \text{ 通量} = -4\pi \times 0.15 \times (1.222 \times 10^{-10} \times 10^6) \times 1 = -2.30 \times 10^{-4} \mu\text{mole/sec}$$

$$\text{CO}_2 \text{ 通量} = -4\pi \times 2582.87 \times (5.49 \times 10^{-11} \times 10^6) \times 1 = -1.78 \mu\text{mole/sec}$$

根據此案例之反應方程式，每消耗 1 mole 的 CO₂ 同時需消耗 4 mole 的 H₂，而此水樣中 4 倍的 H₂ 通量遠小於 1 倍的 CO₂ 通量，所以 H₂ 為此反應的限制因子。

能量通量計算：

$$ME = -4\pi \cdot D \cdot C \cdot R \cdot \Delta G$$

$$= -4\pi \times (1.222 \times 10^{-10} \times 10^6) \times 0.15 \times 1 \times (-25.5)$$

$$= 1.47 \times 10^{-16} \text{ kJ/sec}$$

2-5-3 微生物能量通量需求計算與微生物數量評估

微生物為了維持本身特定的生理機能狀態所需的能量通量，依照微生物生存狀態的不同，可以區分為倖存 (Survive)、維持 (Maintenance) 和生長 (Growth) 等三種能量通量需求，其能量通量需求量可根據 Harder (1997) 所提出的計算公式求得，式子如下。

$$ME = A \cdot e^{-Ea/RT} \quad (17)$$

A 為 Arrhenius 方程式所計算出的經驗常數，微生物於生長、維持與倖存的三種生存狀態下之經驗常數分別為 $4.99E+12$ 、 $4.99E+9$ 與 $4.99E+6$ kJ/g-drybiomass/day (Harder, 1997; Tijhuis et al., 1993)；Ea 代表反應活化能，其值以 69.4 kJ/mole 代入 (Harder, 1997)；R 代表氣體常數；T 代表絕對溫度。

依照式子 (17) 與熱泉現地條件可計算出的微生物三種生存狀態所需要的能量通量，其單位為 kJ/g-drybiomass/day。若假設單一微生物細胞乾重 2×10^{-13} g (Whitman et al., 1998)，即可將單位換算成本研究使用的能量通量單位 kJ/cell/sec。再比較本研究所計算之化學反應所能提供的能量通量與微生物三種生存狀態所需要能量通量，即能計算出能夠使用該反應代謝的微生物數量。

以下以實際案例【案例五】說明如何計算微生物能量通量需求與評估特定代謝反應所能支持的微生物數量。

【案例五】

案例地點：小油坑

溫泉水溫度：71.6°C

計算公式： $ME = A \cdot e^{-Ea/RT}$ (kJ/g-drybiomass/day)

$Ea = 69.4$ kJ/mole 1 cell weigh = 200 fg

1 day = 86400 sec

生長狀態所需之能量通量：

$$\begin{aligned} ME_{Growth} &= (4.99E+12) \times e^{-Ea/RT} \times 200 \text{ fg} / 86400 \\ &= (4.99E+12) \times e^{-69.4/(8.314/1000)/(273+71.6)} \times (2E-13) / 86400 \\ &= 3.49E-16 \text{ (kJ/sec/cell)} \end{aligned}$$

推估代謝反應 N51 所支持的微生物數量：

代謝反應 N51 之能量通量為 1.72E-12 (kJ/sec)

估算出可利用代謝反應 N51 而處於生長狀態之微生物數量為

$$(1.72E-12) / (3.49E-16) = 5.05E+3 \text{ (cells)}$$

約為 5000 個單細胞微生物。

第三章 結果

3-1 溫泉水陰陽離子分析

各溫泉水樣之陰陽離子、有機酸與溶解氣體之分析數據請見附錄表二，以下分節說明之。

3-1-1 溫泉水陽離子分析結果

3-1-1-1 北台灣溫泉水主要陽離子分析結果

Na^+ 濃度在地熱谷、富源溫泉、金山漁會與磺港四處溫泉濃度較高，介於 10 mM 與 32 mM 之間，其餘六處溫泉之 Na^+ 濃度皆小於 1.4 mM； K^+ 濃度在地熱谷、富源溫泉、金山漁會與磺港四處溫泉濃度較高，介於 1.6 mM 與 6.7 mM 之間，其餘六處溫泉之 K^+ 濃度皆小於 0.5 mM； Mg^{2+} 濃度在富源溫泉、金山漁會與磺港三處溫泉濃度較高，介於 4.2 mM 與 6.4 mM 之間，其餘七處溫泉之 Mg^{2+} 濃度皆小於 2.3 mM； Ca^{2+} 濃度在地熱谷、金山漁會與磺港三處溫泉濃度較高，介於 4.4 mM 與 6.9 mM 之間，其餘七處溫泉之 Ca^{2+} 濃度皆小於 2.5 mM； Al^{3+} 濃度在地熱谷、小油坑、七股與大油坑四處溫泉濃度較高，介於 3.2 mM 與 4.8 mM 之間，其餘六處溫泉之 Al^{3+} 濃度皆小於 1 mM 或低於偵測極限； Fe^{2+} 濃度在地熱谷、磺港與大油坑三處溫泉濃度較高，介於 1270 μM 與 2036 μM 之間，小油坑、富源與七股溫泉之 Fe^{2+} 濃度介於 720 μM 與 987 μM 之間，其餘四處溫泉之 Fe^{2+} 濃度皆小於 280 μM 或低於偵測極限； Fe^{3+} 僅在磺山、地熱谷、小油坑、富源與大油坑等五處溫泉中測得，其中以富源與大油坑 Fe^{3+} 濃度最高，介於 194 μM 與 390 μM ； NH_4^+ 僅在磺山、硫磺谷與金山漁會等三處溫泉中測得，濃度介於 31 μM 與 142 μM (圖 3-1) (附錄表二)。

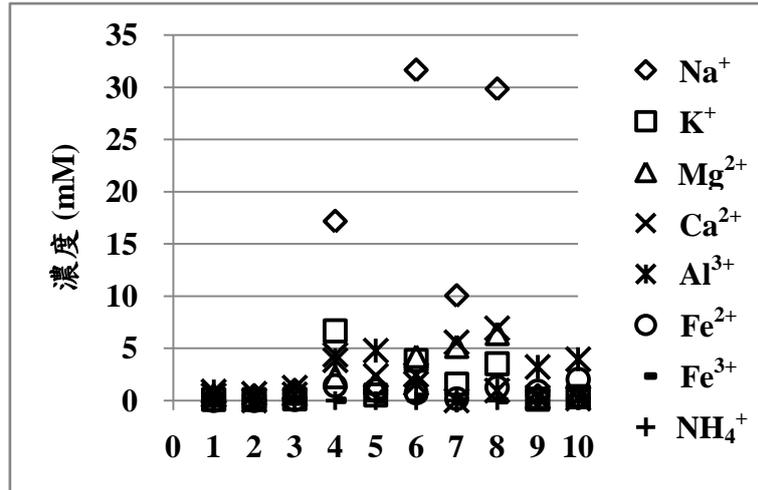


圖 3-1、北部溫泉水中陽離子濃度。縱軸為陽離子濃度，橫軸為溫泉採樣點 (1. 磺山、2.龍鳳谷、3.硫磺谷、4.地熱谷、5.小油坑、6.富源溫泉、7.金山漁會、8. 磺港、9.七股、10.大油坑)。

以各種陽離子在總陽離子濃度中所占的百分比來比較北部 10 個溫泉水化學特徵 (圖 3-2)，可區分為三組特徵：

- (1) 磺山、小油坑、大油坑與七股：四個地區之溫泉水樣中以 Al^{3+} 為主要陽離子，佔總陽離子濃度 33% 以上。其中磺山與小油坑兩個溫泉以 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 為次要的陽離子，各佔總陽離子的 10 至 20%；大油坑與七股兩個溫泉水樣則以鐵離子為次要陽離子，佔 17 至 30%。
- (2) 地熱谷、富源溫泉、金山漁會與磺港：四個地區之溫泉水樣中以 Na^+ 為主要陽離子，佔總陽離子濃度 44% 以上。其中地熱谷的次要陽離子為 K^+ ，佔總陽離子的 19%；金山漁會與磺港的次要陽離子為 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} ，各佔總陽離子的 13 至 23%；富源溫泉除了主要的 Na^+ 外，其餘陽離子所佔百分比皆小於總陽離子的 10%。
- (3) 龍鳳谷與硫磺谷：以 Na^+ 、 Mg^{2+} 、 Ca^{2+} 三者所佔陽離子總量的百分比最高，各佔 18% 以上。次要陽離子中，除了硫磺谷的 Al^{3+} 佔 15% 之外，其餘陽離子所佔的百分比皆小於 5%。

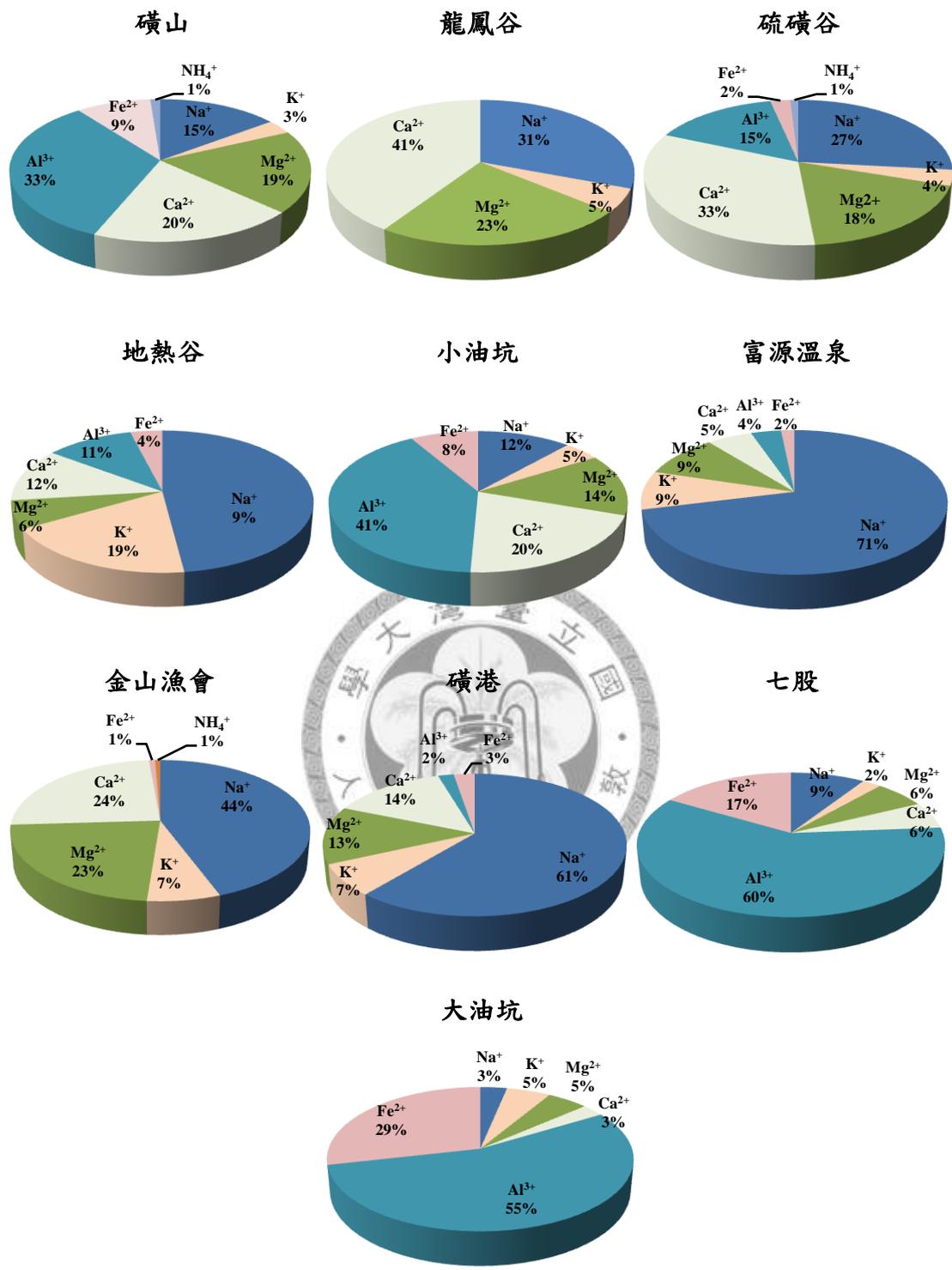


圖 3-2、北部溫泉水之陽離子圓餅圖。

3-1-1-2 東台灣主要陽離子分析結果

本研究分析的三處東部地區溫泉中，均以 Na^+ 為主要陽離子 (圖 3-3)。 Na^+ 濃度以虎爺溫泉的 150 mM 最高，其次為安通與紅葉溫泉， Na^+ 濃度約為 17 mM； K^+ 濃度介於 0.2 mM 與 5.3 mM，其中以虎爺溫泉之 K^+ 濃度最高； Mg^{2+} 僅於紅葉與虎爺溫泉水中測得，濃度範圍介於 0.1 mM 與 2.8 mM 之間； Ca^{2+} 濃度介於 0.6 mM 與 2.8 mM，其中以虎爺溫泉之 Ca^{2+} 濃度最高； Fe^{2+} 僅於安通與虎爺溫泉水中測得，濃度範圍介於 2.5 μM 與 22.4 μM 之間，以虎爺溫泉之 Fe^{2+} 濃度較高； Fe^{3+} 僅於紅葉與虎爺溫泉水中測得，濃度範圍介於 2.9 μM 與 10 μM 之間，以虎爺溫泉之 Fe^{3+} 濃度較高； NH_4^+ 濃度於虎爺溫泉之 1037 μM 最高，其次為紅葉溫泉的 400 μM 與安通的 21.4 μM (附錄表二)。

比較東部 3 個溫泉中各種陽離子在總陽離子濃度中所佔的百分比來 (圖 3-4)，結果清楚顯示 Na^+ 為主要陽離子，佔總陽離子的 88.6~92.7%，次要的陽離子則包括 K^+ 、 Mg^{2+} 、 Ca^{2+} 與 NH_4^+ ，大部分陽離子佔總陽離子的百分比在 4.4% 以下，唯有安通地區的 Ca^{2+} 可佔總陽離子的 10%。

3-1-1-3 南台灣主要陽離子分析結果

本研究分析的三處南部地區溫泉中，均以 Na^+ 為主要陽離子 (圖 3-3)。 Na^+ 濃度以小滾水溫泉的 180 mM 最高，其次為關仔嶺與新養女湖溫泉， Na^+ 濃度介於 81 mM 到 97 mM； K^+ 濃度以關仔嶺溫泉的 5.1 mM 最高，新養女湖與小滾水之 K^+ 皆小於 0.7 mM；鎂離子濃度介於 0.2 mM 與 0.5 mM 之間； Ca^{2+} 濃度介於 0.1 mM 與 0.5 mM 之間； Fe^{2+} 僅於關仔嶺與小滾水溫泉水中有分析資料，濃度範圍介於 3.4 μM 與 4.5 μM 之間，以小滾水溫泉之 Fe^{2+} 濃度較高； Fe^{3+} 僅於關仔嶺與小滾水溫泉水中有分析資料，濃度皆低於偵測極限； NH_4^+ 濃度僅於關仔嶺與小滾水溫泉水中有分析資料，以關仔嶺溫泉中的 428 μM 較高，小滾水溫泉之 NH_4^+ 濃度低於 21 μM (附錄表二)。

以各種陽離子在總陽離子濃度中所佔的百分比來比較南部 5 個溫泉水樣的化學

特徵 (圖 3-4), 結果清楚顯示 Na^+ 為主要陽離子, 佔有總陽離子的 94.1 ~ 99.8%, 次要的陽離子則包括 K^+ 、 Mg^{2+} 和 Ca^{2+} , 大多各佔總陽離子百分比的 1% 以下, 唯有關仔嶺地區的 K^+ 離子可佔總陽離子的 5.0%。

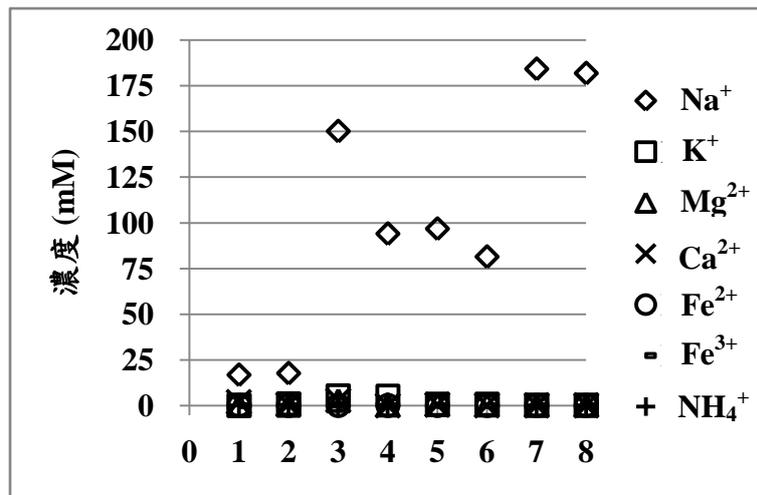


圖 3-3、東部、南部溫泉中陽離子濃度。縱軸為陽離子濃度，橫軸為溫泉採樣點 (1.安通、2.紅葉、3.虎爺、4.關仔嶺、5.新養女湖 I、6.新養女湖 II、7.小滾水 III、8.小滾水 IV)。

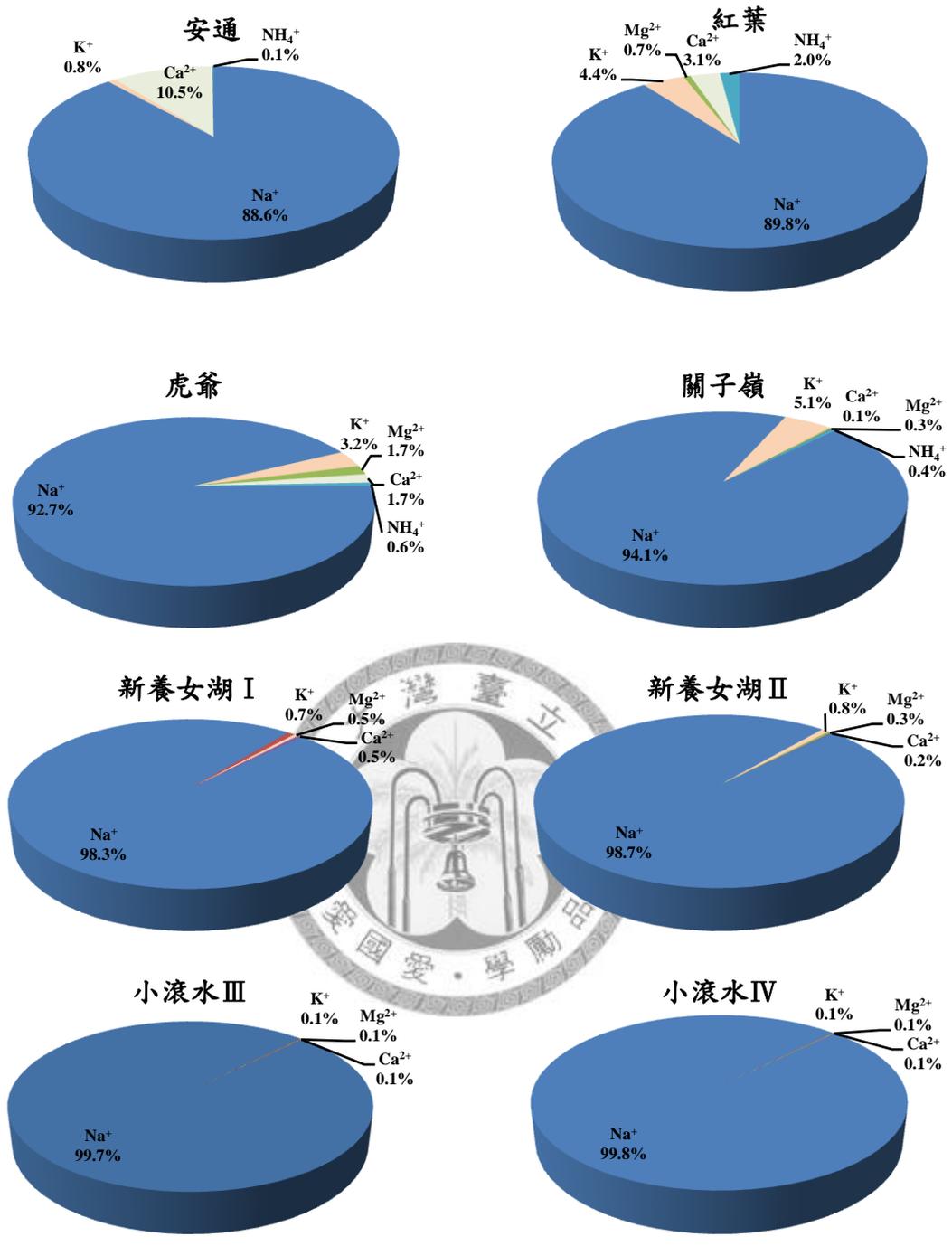


圖 3-4、東部、南部溫泉水之陽離子圓餅圖。

3-1-2 主要陰離子分析結果

3-1-2-1 北台灣溫泉水陰離子分析結果

本研究分析的十處北部地區溫泉中，以 Cl^- 與 SO_4^{2-} 為主要陰離子（圖 3-5）。其中地熱谷、富源溫泉、金山漁會、磺港與七股有較高的 Cl^- 濃度，以富源溫泉最高，濃度介於 15.5 mM 和 105.1 mM 之間，其餘樣品的 Cl^- 濃度皆低於 1.3 mM，其中以七股溫泉濃度最低。地熱谷、小油坑、富源溫泉、七股與大油坑溫泉中的 SO_4^{2-} 濃度超過 10 mM，其餘五處溫泉的 SO_4^{2-} 濃度介於 0.7 與 6.0 mM 之間。 Br^- 僅在小油坑、磺港和金山漁會溫泉水樣中高於偵測極限，濃度介於 0.02 與 2.75 mM 之間。 PO_4^{3-} 除了金山漁會外，其餘 9 個溫泉點皆可測得，濃度介於 1.6 與 54.8 μM 之間。 NO_3^- 僅在硫磺谷、小油坑、磺港和七股四處溫泉中測得，濃度介於 16.8 與 94.4 μM 之間。 HS^- 除了富源溫泉、金山漁會和磺港三處未測得外，其餘七處溫泉點的 HS^- 濃度範圍在 8.8 到 609.1 μM 之間，並以七股的 609.1 μM 最高（附錄表二）。

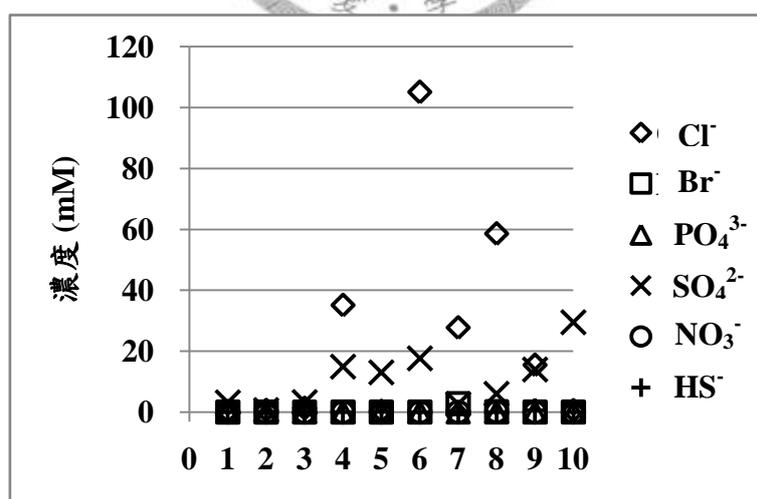


圖 3-5、北部溫泉水中主要陰離子濃度。縱軸為陰離子濃度，橫軸為溫泉採樣點（1.磺山、2.龍鳳谷、3.硫磺谷、4.地熱谷、5.小油坑、6.富源溫泉、7.金山漁會、8.磺港、9.七股、10.大油坑）。

以各種主要陰離子在總陰離子濃度中所佔的百分比來比較北部 10 個溫泉水化學特徵 (圖 3-6)，可將溫泉分為三類，分述如下：

- (1) 磺山、硫磺谷、小油坑與大油坑：以 SO_4^{2-} 為最主要的陰離子，除了硫磺谷佔 71% 之外，磺山、小油坑和大油坑的溫泉水中之 SO_4^{2-} 均佔總陰離子含量的 93% 以上。
- (2) 地熱谷、富源溫泉、金山漁會與磺港：以 Cl^- 為最主要陰離子，其中地熱谷溫泉水中的 Cl^- 佔總陰離子的 70%，富源溫泉、金山漁會和磺港溫泉的 Cl^- 濃度皆各佔有總陰離子之 84% 以上。
- (3) 龍鳳谷、七股： SO_4^{2-} 與 Cl^- 皆為主要的陰離子，所佔總陰離子的比例約為一比一關係。



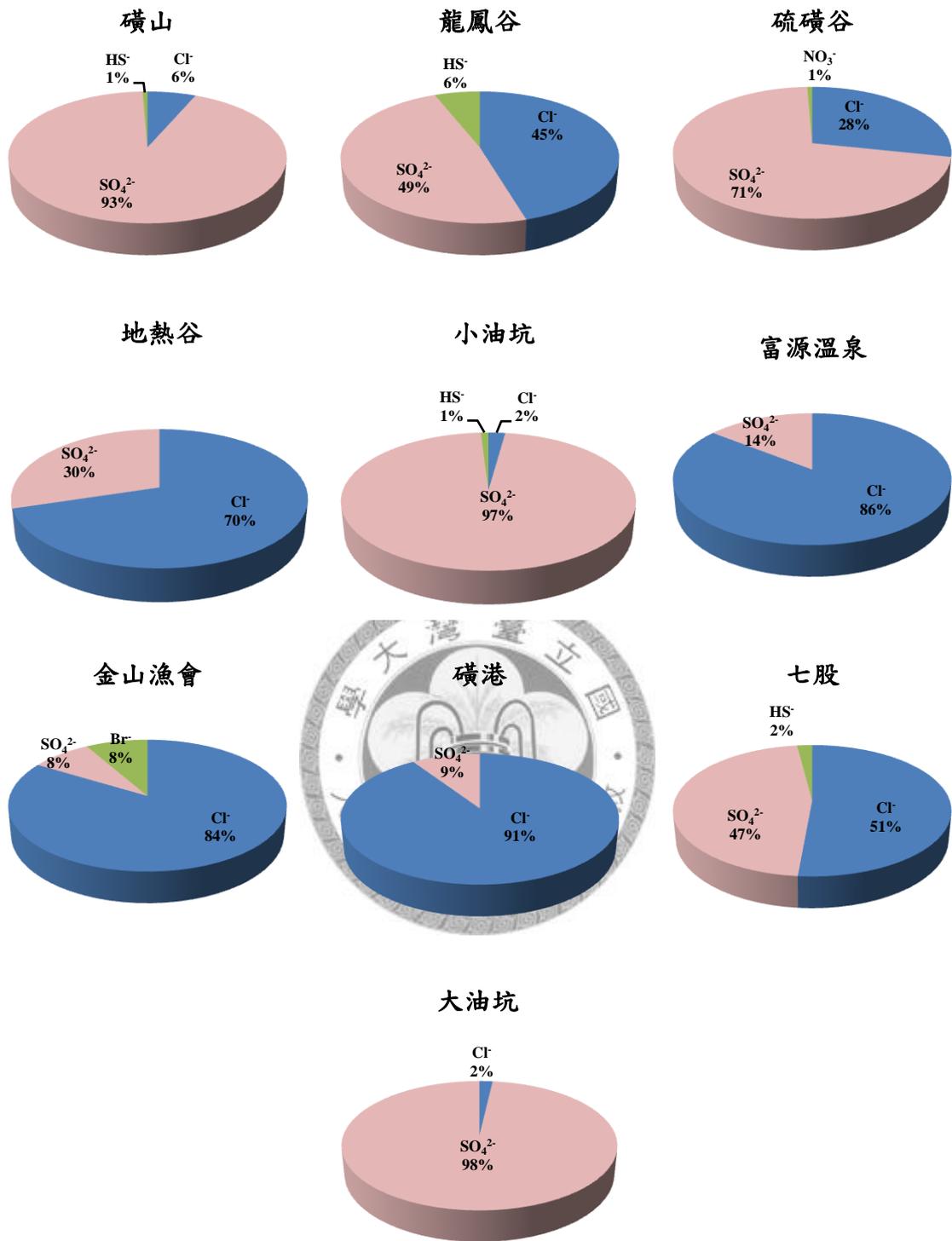


圖 3-6、北部溫泉水之主要陰離子圓餅圖。

3-1-2-2 台灣東部溫泉水陰離子分析結果

東部溫泉以 Cl^- 為主要的陰離子 (圖 3-7), 在虎爺溫泉中所偵測到的濃度為 74.8 mM。安通與紅葉的 Cl^- 濃度則低於 20 mM。除了 Cl^- 之外, 其餘的 Br^- 、 PO_4^{3-} 、 SO_4^{2-} 、 NO_3^- 與 HS^- 濃度皆偏低或低於偵測極限 (附錄表二)。

以各種主要陰離子在總陰離子濃度中所佔的百分比來比較東部 3 個溫泉水化學特徵 (圖 3-8), 結果顯示安通與紅葉兩處溫泉之陰離子以 Cl^- 濃度約佔總陰離子 80%, SO_4^{2-} 約佔總陰離子濃度 17~20%, 其餘陰離子所佔比例極低; 虎爺溫泉的 Cl^- 濃度佔總陰離子 99.8%, 其餘陰離子僅佔 0.2%。

3-1-2-3 台灣南部溫泉水陰離子分析結果

南部溫泉以 Cl^- 為主要的陰離子 (圖 3-7), 溫泉樣本中所偵測到的 Cl^- 濃度範圍介於 80 到 250 mM 之間。除了 Cl^- 之外, 其餘的陰離子濃度皆低於 1 mM 或低於偵測極限 (附錄表二)。

以各種主要陰離子在總陰離子濃度中所佔的百分比來比較南部 5 個溫泉水樣的化學特徵 (圖 3-8), 結果明顯可見 Cl^- 為主要陰離子, 佔有總陰離子的 99.7% 以上, 次要的陰離子則包括了 Br^- 與 SO_4^{2-} , 大多僅佔總陰離子的百分比在 0.3% 以下。

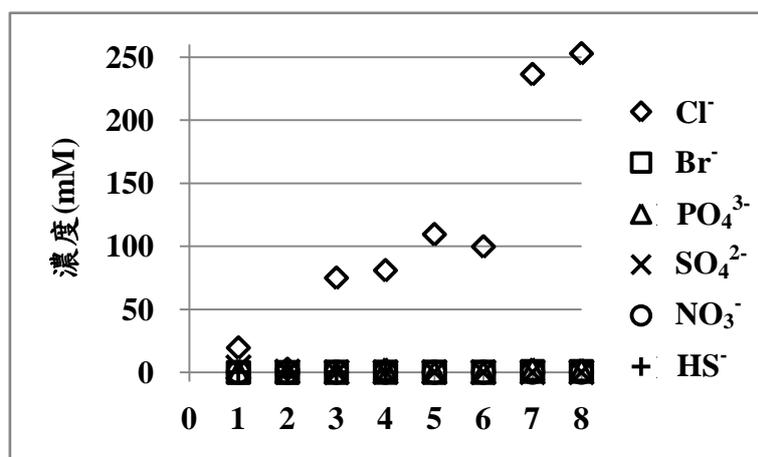


圖 3-7、東部、南部溫泉水中主要陰離子濃度。縱軸為陰離子濃度, 橫軸為溫泉採樣點 (1.安通、2.紅葉、3.虎爺、4.關仔嶺、5.新養女湖 I、6.新養女湖 II、7.小滾水 III、8.小滾水 IV)。

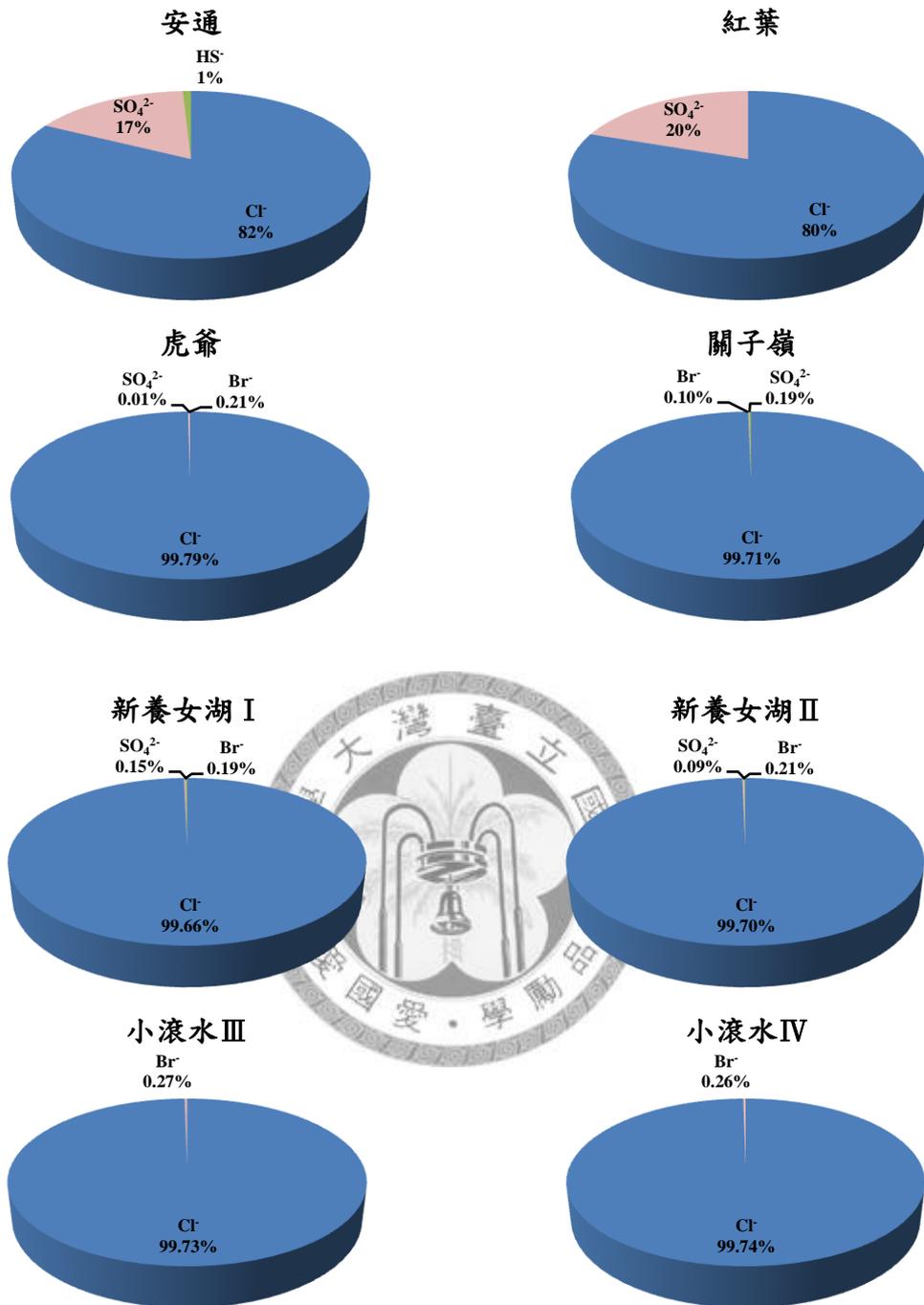


圖 3-8、東部、南部溫泉水之陰離子圓餅圖。

3-1-3 有機酸分析結果

3-1-3-1 溫泉水中甲酸濃度

溫泉水中甲酸的濃度隨採樣地點整理於圖 3-9 中。僅在南部地區的關仔嶺、新養女湖與小滾水IV水樣中可偵測到甲酸，濃度範圍在 5.4 到 15.9 μM 之間（附錄表二）。

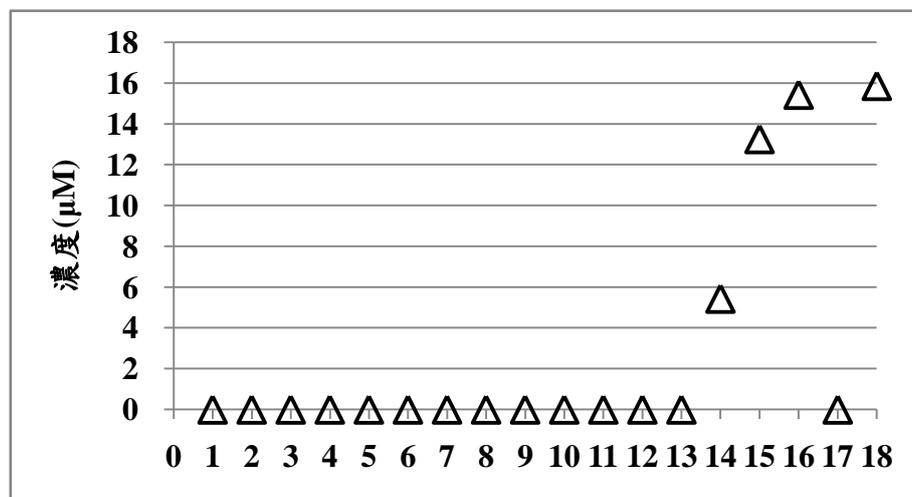


圖 3-9、各溫泉水中甲酸濃度。縱軸為甲酸濃度，橫軸為溫泉採樣點 (1.磺山、2.龍鳳谷、3.硫磺谷、4.地熱谷、5.小油坑、6.富源溫泉、7.金山漁會、8.磺港、9.七股、10.大油坑、11.安通、12.紅葉、13.虎爺、14.關仔嶺、15.新養女湖 I、16.新養女湖 II、17.小滾水 III、18.小滾水 IV)。

3-1-3-2 溫泉水中乙酸濃度

溫泉水中乙酸的濃度隨採樣地點整理於圖 3-10 中。與甲酸之分析結果相似，僅在南部地區的關仔嶺、新養女湖與小滾水IV水樣中可偵測到乙酸，其中關仔嶺溫泉中的乙酸濃度最高，約為 1200 μM ，小滾水IV之乙酸濃度較低，約為 30 μM （附錄表二）。

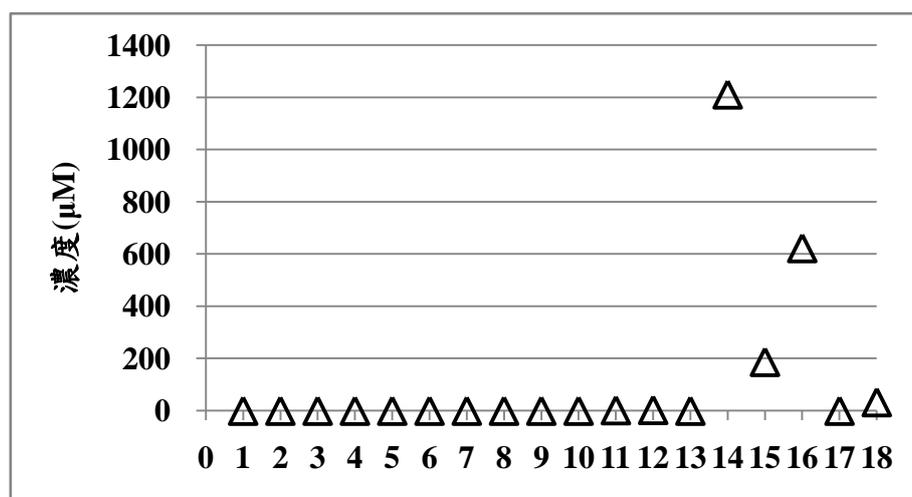


圖 3-10、各溫泉水中乙酸濃度。縱軸為乙酸濃度，橫軸為溫泉採樣點（1.磺山、2.龍鳳谷、3.硫磺谷、4.地熱谷、5.小油坑、6.富源溫泉、7.金山漁會、8.磺港、9.七股、10.大油坑、11.安通、12.紅葉、13.虎爺、14.關仔嶺、15.新養女湖 I、16.新養女湖 II、17.小滾水 III、18.小滾水 IV）。

3-1-3-2 溫泉水中丙酸濃度

溫泉水中丙酸的濃度隨採樣地點整理於圖 3-11 中。北部地區僅在龍鳳谷、硫磺谷與金山漁會三處溫泉水樣中測得丙酸，但濃度很低，濃度介於 6 到 17.5 μM 之間。丙酸普遍存在於東部與南部地區的溫泉水樣中，以虎爺溫泉與關仔嶺溫泉中的丙酸濃度最高，濃度大於 2000 μM ，紅葉、新養女湖與小滾水溫泉之丙酸濃度則介於 620 到 960 μM 之間，安通溫泉的丙酸濃度最低，只有 8.2 μM （附錄表二）。

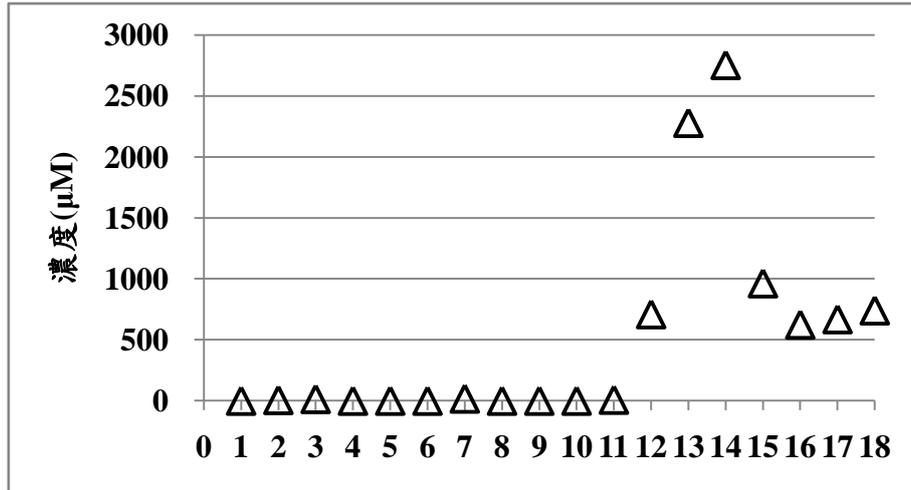


圖 3-11、各溫泉水中丙酸濃度。縱軸為丙酸濃度，橫軸為溫泉採樣點 (1.磺山、2.龍鳳谷、3.硫磺谷、4.地熱谷、5.小油坑、6.富源溫泉、7.金山漁會、8.磺港、9.七股、10.大油坑、11.安通、12.紅葉、13.虎爺、14.關仔嶺、15.新養女湖 I、16.新養女湖 II、17.小滾水 III、18.小滾水 IV)。

3-1-4 總溶解有機碳分析結果

溫泉水中總溶解有機碳的濃度隨採樣地點整理於圖 3-12 中，在 14 個分析樣本中，關仔嶺所測得的 DOC 值 54.7 ppmC 為最高，其次為虎爺的 11.6 ppmC，其餘 12 個溫泉樣本中所測得的 DOC 值皆小於 10 ppmC (附錄表二)。

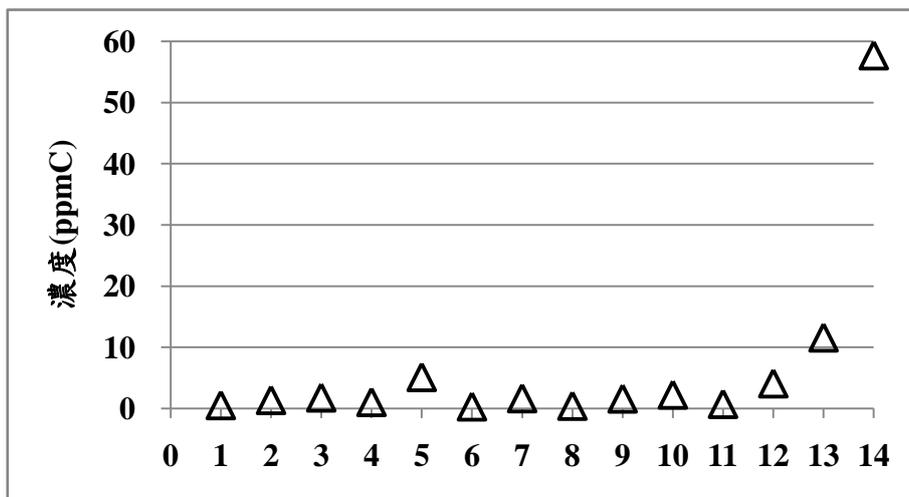


圖 3-12、各溫泉水中 DOC 值。縱軸為總溶解有機碳濃度，橫軸為溫泉採樣點 (1.磺山、2.龍鳳谷、3.硫磺谷、4.地熱谷、5.小油坑、6.富源溫泉、7.金山漁會、8.磺港、9.七股、10.大油坑、11.安通、12.紅葉、13.虎爺、14.關仔嶺)。

3-1-5 礦物相分析結果

溫泉沉積物之 X 光繞射分析鑑定或依據泉水化學特性所推測出可穩定存在的礦物相分析結果，請見附錄表三。

3-1-5-1 X 光繞射分析鑑定

北台灣溫泉僅可在磺山、硫磺谷、地熱谷、小油坑與大油坑等溫泉池中取得沉積物樣本，進行 X 光繞射分析鑑定所含有之微生物能夠利用於代謝反應的礦物。在上述沈積物中皆含有元素硫，此外在磺山溫泉池沈積物中可偵測到針鐵礦 (goethite)，小油坑溫泉池沈積物中也可鑑別出菱鐵礦 (siderite) 的存在。在南台灣溫泉沉積物中，則沒有偵測出任何能夠參與微生物代謝反應的礦物。

3-1-5-2 溫泉水中穩定礦物相模擬結果

根據溫泉的物理條件與水樣的化學組成，推估溫泉水中可以穩定存在礦物相，其結果顯示在北台灣溫泉水中黃鐵礦 (pyrite) 和元素硫可以普遍穩定存在，金山一帶的 3 個溫泉中赤鐵礦 (hematite) 可以穩定存在，七股溫泉中則沒有任何穩定礦物相的存在。在東台灣與南台灣溫泉水分析中，安通和關仔嶺溫泉中赤鐵礦可以穩定存在，安通、虎爺與小滾水溫泉水中黃鐵礦也可穩定存在。

3-2 溫泉水中溶解氣體濃度分析結果

3-2-1 溫泉水中溶解之 O_2 、 N_2

溫泉水中溶解氧氣與氮氣的濃度隨採樣地點整理於圖 3-13 中。北部地區的地熱谷、富源、磺港、七股溫泉與東部地區的紅葉、虎爺溫泉中有較高的溶氧和溶氮濃度， O_2 濃度介於 50 到 90 μM 之間， N_2 濃度介於 30 到 55 μM 之間。在北部火山區的龍鳳谷、大油坑、東部的安通與西部的關仔嶺的溫泉水中，溶氧及溶氮的濃度較低， O_2 濃度低於 16 μM ， N_2 濃度則低於 6 μM 。

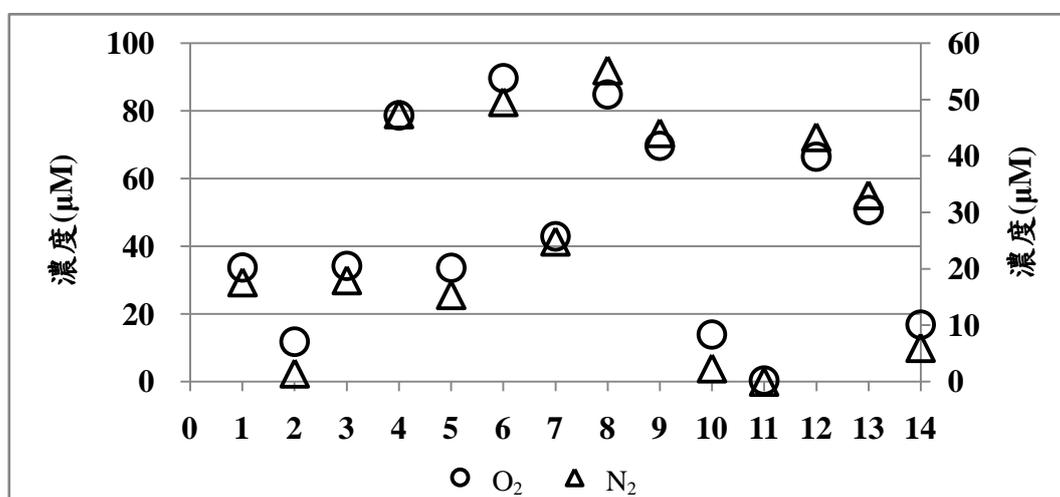


圖 3-13、各溫泉水中溶氧與溶氮濃度。左側縱軸為 $O_{2(aq)}$ 濃度，右側縱軸為 $N_{2(aq)}$ 濃度。橫軸為溫泉採樣點 (1.磺山、2.龍鳳谷、3.硫磺谷、4.地熱谷、5.小油坑、6.富源溫泉、7.金山漁會、8.磺港、9.七股、10.大油坑、11.安通、12.紅葉、13.虎爺、14.關仔嶺)。

3-2-2 溫泉水中溶解之 H_2

溫泉水中溶解氫氣的濃度隨採樣地點整理於圖 3-14 中，18 個採樣點之 $H_{2(aq)}$ 濃度從低於偵測極限到 $1.7 \mu M$ 不等。以關仔嶺的濃度最高，其次是磺山與地熱谷，濃度在 0.8 與 $1.0 \mu M$ 之間，富源、金山漁會、紅葉、新養女湖與小滾水溫泉中溶解氫氣的濃度則皆低於偵測極限。

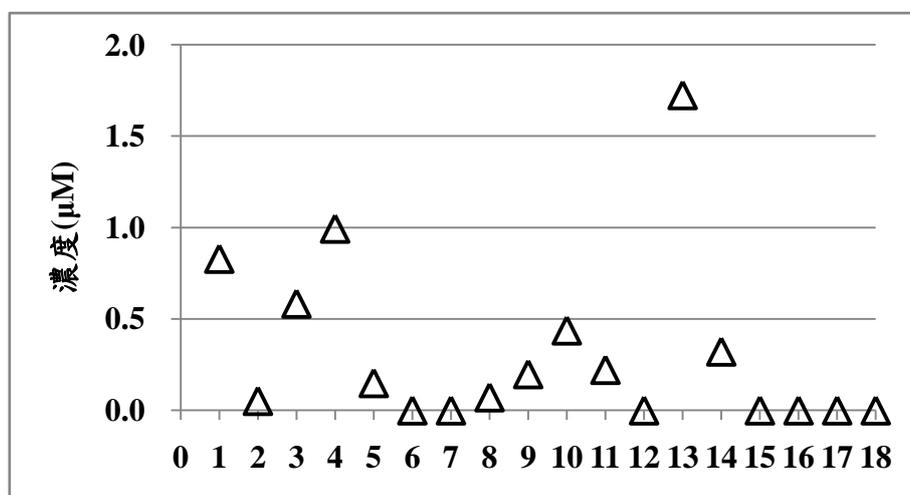


圖 3-14、各溫泉水中溶解氫氣濃度。縱軸為 $H_{2(aq)}$ 濃度，橫軸為溫泉採樣點 (1. 磺山、2. 龍鳳谷、3. 硫磺谷、4. 地熱谷、5. 小油坑、6. 富源溫泉、7. 金山漁會、8. 磺港、9. 七股、10. 大油坑、11. 安通、12. 紅葉、13. 虎爺、14. 關仔嶺、15. 新養女湖 I、16. 新養女湖 II、17. 小滾水 III、18. 小滾水 IV)。

3-2-3 溫泉水中溶解之 CH_4 、 C_2H_6 、 C_3H_8

3-2-3-1 北部溫泉水中 $\text{CH}_{4(\text{aq})}$ 、 $\text{C}_2\text{H}_{6(\text{aq})}$ 、 $\text{C}_3\text{H}_{8(\text{aq})}$ 濃度

北部溫泉水中的 $\text{CH}_{4(\text{aq})}$ 、 $\text{C}_2\text{H}_{6(\text{aq})}$ 、 $\text{C}_3\text{H}_{8(\text{aq})}$ 濃度整理於圖 3-15，其中金山漁會溫泉水中含有最高濃度的 $\text{CH}_{4(\text{aq})}$ ，濃度高達 $27 \mu\text{M}$ ，其次為七股與小油坑溫泉， $\text{CH}_{4(\text{aq})}$ 濃度分別是 $5.0 \mu\text{M}$ 和 $2.8 \mu\text{M}$ ，其餘七處溫泉水樣中所測得的 $\text{CH}_{4(\text{aq})}$ 皆小於 $0.7 \mu\text{M}$ 。 $\text{C}_2\text{H}_{6(\text{aq})}$ 只有在磺山、小油坑、金山漁會、磺港與七股溫泉中測得，濃度小於 $0.1 \mu\text{M}$ 。 $\text{C}_3\text{H}_{8(\text{aq})}$ 則未在北部地區的溫泉水樣中測得，其濃度皆為低於偵測極限。

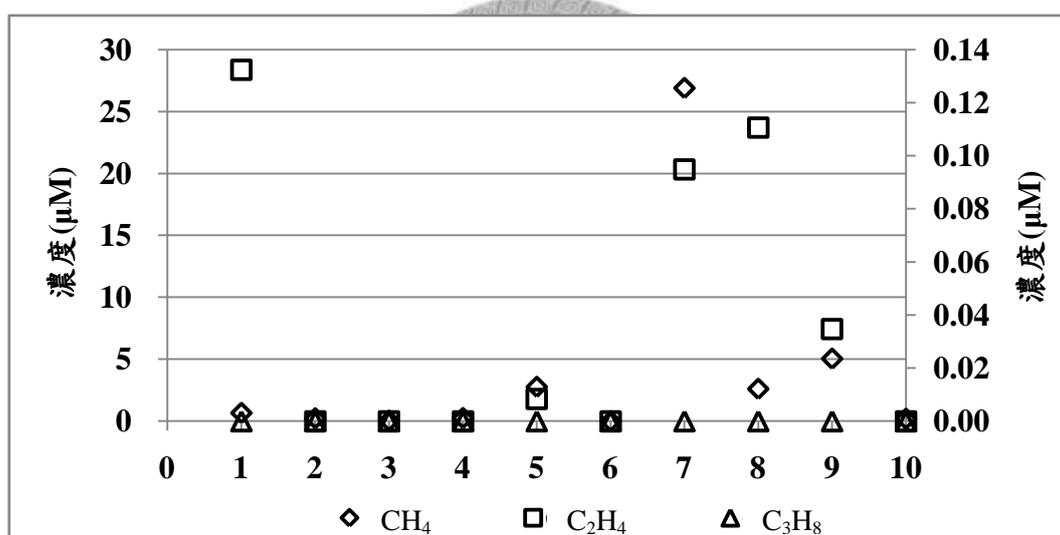


圖 3-15、北部各溫泉水中 $\text{CH}_{4(\text{aq})}$ 、 $\text{C}_2\text{H}_{6(\text{aq})}$ 、 $\text{C}_3\text{H}_{8(\text{aq})}$ 濃度。左側縱軸為 $\text{CH}_{4(\text{aq})}$ 濃度，右側縱軸為 $\text{C}_2\text{H}_{6(\text{aq})}$ 、 $\text{C}_3\text{H}_{8(\text{aq})}$ 濃度，橫軸為溫泉採樣點 (1.磺山、2.龍鳳谷、3.硫磺谷、4.地熱谷、5.小油坑、6.富源溫泉、7.金山漁會、8.磺港、9.七股、10.大油坑)。

3-2-3-2 東部、南部溫泉水中 $\text{CH}_4(\text{aq})$ 、 $\text{C}_2\text{H}_6(\text{aq})$ 、 $\text{C}_3\text{H}_8(\text{aq})$ 濃度

南部與東部溫泉中的 $\text{CH}_4(\text{aq})$ 含量普遍較北部火山區溫泉高 (圖 3-16)，其中以南部的新養女湖與小滾水之 $\text{CH}_4(\text{aq})$ 濃度最高，濃度介於 920 和 1416 μM 之間，僅次於新養女湖與小滾水溫泉的是東部地區的安通溫泉，其 $\text{CH}_4(\text{aq})$ 濃度為 237 μM ，紅葉、虎爺與關仔嶺溫泉之 $\text{CH}_4(\text{aq})$ 濃度則低於 15 μM 。 $\text{C}_2\text{H}_6(\text{aq})$ 的濃度以新養女湖中最高，濃度範圍介於 18 和 23 μM 之間，其他採樣點樣本之 $\text{C}_2\text{H}_6(\text{aq})$ 濃度皆小於 2.3 μM 。 $\text{C}_3\text{H}_8(\text{aq})$ 只有在新養女湖與小滾水IV的樣本中被偵測到，濃度範圍介於 0.1 和 4.9 μM 之間。

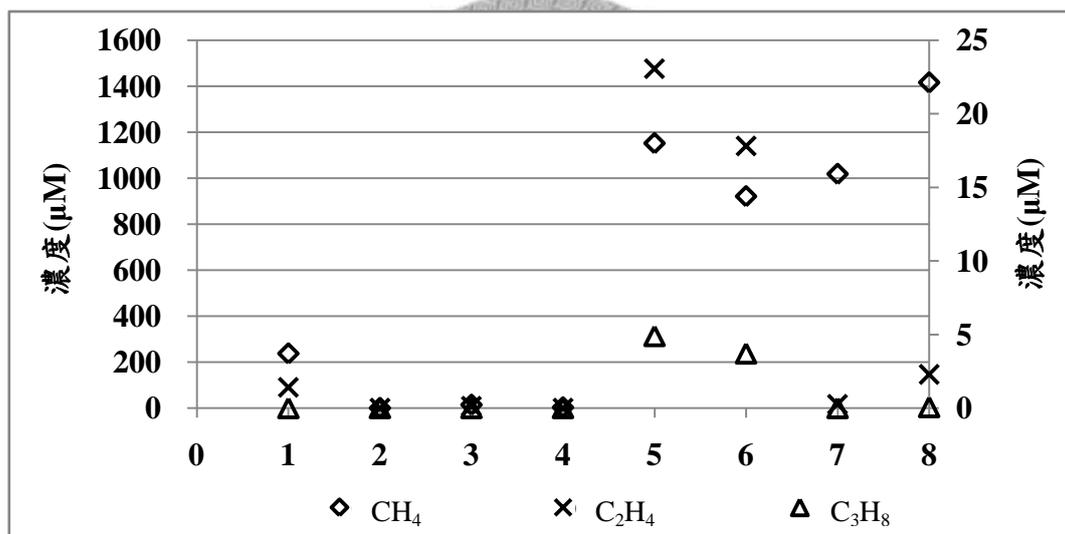


圖 3-16、東部南部各溫泉水中 $\text{CH}_4(\text{aq})$ 、 $\text{C}_2\text{H}_6(\text{aq})$ 、 $\text{C}_3\text{H}_8(\text{aq})$ 濃度。左側縱軸為 $\text{CH}_4(\text{aq})$ 濃度，右側縱軸為 $\text{C}_2\text{H}_6(\text{aq})$ 、 $\text{C}_3\text{H}_8(\text{aq})$ 濃度，橫軸為溫泉採樣點 (1.安通、2.紅葉、3.虎爺、4.關仔嶺、5.新養女湖 I、6.新養女湖 II、7.小滾水 III、8.小滾水 IV)。

3-3 自由能計算結果

本研究根據各溫泉水樣之化學成分與物理性質計算 107 個化學反應的自由能，其計算結果表列於附錄表四中，各溫泉活化能估算結果的特徵分述如下。

3-3-1 北台灣溫泉之化學反應自由能計算結果

磺山：此處溫泉中以好氧的氧化反應，傳遞每莫耳電子能夠釋放之能量最多。其中， HS^- 當作電子提供者、 O_2 當作電子接受者的化學反應之自由能最負，其值為 $-104.1 \text{ kJ/mole e}^-$ 。元素硫的還原反應與元素硫的自身氧化還原反應的自由能值為正值，表示這兩種化學反應在磺山溫泉中無法自然發生(圖 3-17a)。

龍鳳谷：此處溫泉中所有可計算反應之自由能均為負值。以丙酸與 H_2 當作電子提供者、磁鐵礦當作電子接受者的反應，傳遞每莫耳電子所釋放出來的能量最多，其自由能值分別為 -141.9 與 $-139.1 \text{ kJ/mole e}^-$ 。好氧的氧化反應中，也以用丙酸作為電子提供者時，傳遞每莫耳電子能夠釋放出最多能量，其自由能值為 $-102.8 \text{ kJ/mole e}^-$ 。但是以 H_2 當作電子提供者、 CO_2 當作電子接受者而產生 CH_4 之的反應自由能接近零，其值為 -1.6 kJ/mole e^- (圖 3-17b)。

硫磺谷：以丙酸當作電子提供者、 NO_3^- 當作電子接受者的反應自由能值最負，其值為 $-109.2 \text{ kJ/mole e}^-$ 。相對地，元素硫自身氧化還原反應的自由能值為正 (圖 3-17c)。

地熱谷：此處溫泉中所有可計算反應之自由能均為負值。以好氧的氧化反應，每莫耳電子能夠釋放之能量較多，其中以 H_2 當作電子提供者、 O_2 當作電子接受者的化學反應之自由能最負，其值為 $-104.0 \text{ kJ/mole e}^-$ ；元素硫自身氧化還原反應所計算出來的自由能值為負，但接近零，僅 -0.3 kJ/mole e^- (圖 3-17d)。

小油坑：此處溫泉中所有可計算反應之自由能均為負值。以 CO 當作電子提供者、 NO_3^- 當作電子接受者並產生 NO_2^- 與 CO_2 之反應的自由能值最負，其值為 $-116.9 \text{ kJ/mole e}^-$ ；元素硫自身氧化還原反應所計算出來的自由能值為負，但接近零，僅 -0.2 kJ/mole e^- (圖 3-17e)。

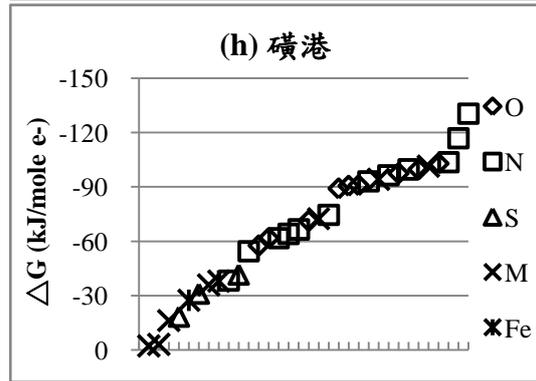
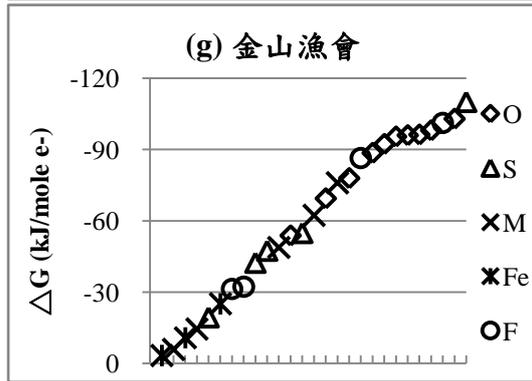
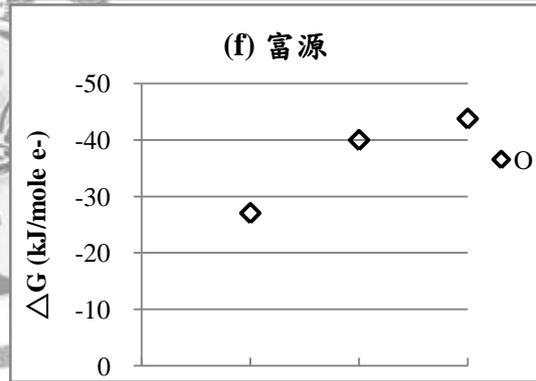
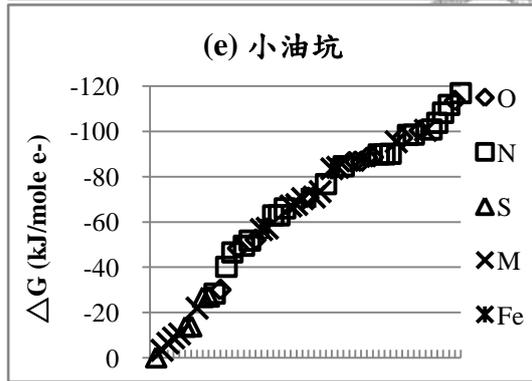
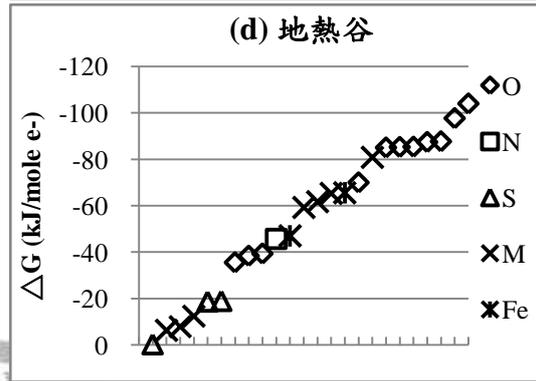
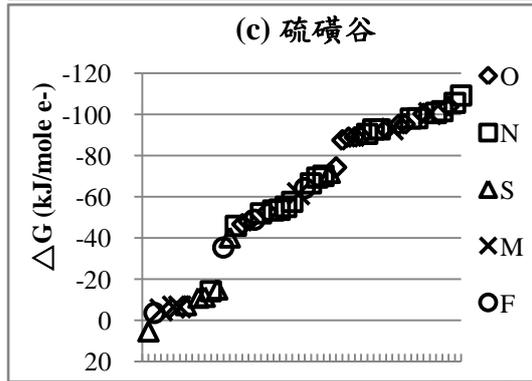
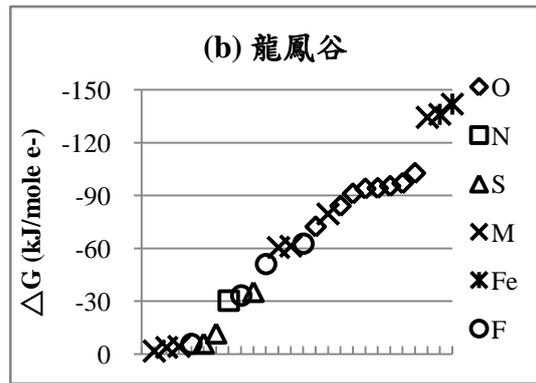
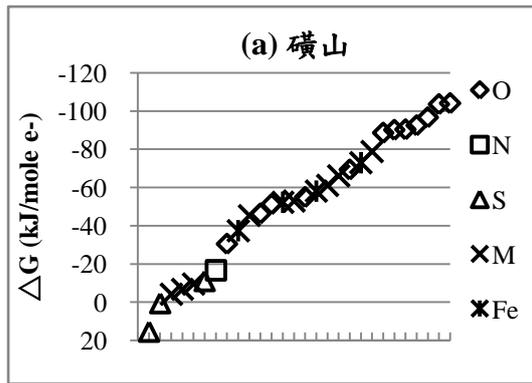
富源溫泉：由於此溫泉化學資料中， NO_3^- 、 H_2 、 CH_4 、 NH_4^+ 與 HS^- 皆低於偵測極限，因此能夠計算的化學反應只有三個，三個反應皆為好氧的 Fe^{2+} 氧化反應，自由能最大值為 $-27.1 \text{ kJ/mole e}^-$ 、最小值為 $-43.8 \text{ kJ/mole e}^-$ (圖 3-17f)。

金山漁會：此處溫泉中所有可計算反應之自由能均為負值。以丙酸當作電子提供者、元素硫當作電子接受者並產生 HS^- 之反應的自由能值最負，其值為 $-110.0 \text{ kJ/mole e}^-$ ；以元素硫當作電子提供者、赤鐵礦當作電子接受者並產生 SO_4^{2-} 與 Fe^{2+} 之反應的自由能值最大，其值為 -3.2 kJ/mole e^- (圖 3-17g)。

磺港：此處溫泉中所有可計算反應之自由能均為負值。以 Fe^{2+} 當作電子提供者、 NO_3^- 當作電子接受者並產生 NH_4^+ 與針鐵礦之反應的自由能值最負，其值為 $-130.4 \text{ kJ/mole e}^-$ ；以 H_2 當作電子提供者、 CO_2 當作電子接受者並產生 CH_4 之反應的自由能值最大，其值為 -2.1 kJ/mole e^- (圖 3-17h)。

七股：此處溫泉中所有可計算反應之自由能均為負值。以 Fe^{2+} 當作電子提供者、 O_2 當作電子接受者並產生 Fe^{3+} 之好氧氧化反應的自由能值最負，其值為 $-106.6 \text{ kJ/mole e}^-$ ；以 H_2 當作電子提供者、 CO_2 當作電子接受者並產生 CH_4 之反應的自由能值最大，其值為 -4.8 kJ/mole e^- (圖 3-17i)。

大油坑：此處溫泉中所有可計算反應之自由能均為負值。以 CO 當作電子提供者、 O_2 當作電子接受者並產生 CO_2 之好氧氧化反應的自由能值最負，其值為 $-113.9 \text{ kJ/mole e}^-$ ；元素硫自身氧化還原反應所計算出來的自由能值最大，其值為 -3.2 kJ/mole e^- (圖 3-17j)。



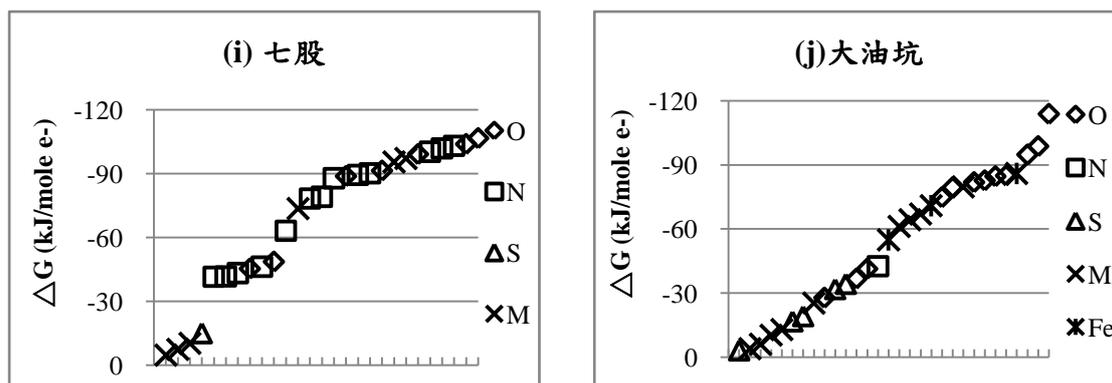
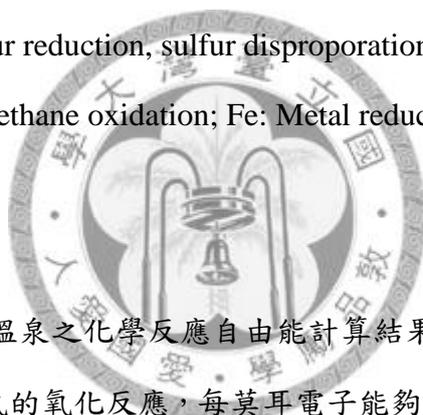


圖 3-17、北台灣溫泉之化學反應自由能計算結果。此圖不包含反應物未偵測或低於偵測極限之化學反應式，並將自由能值從大到小排列作圖。(a) 磺山 (b) 龍鳳谷 (c) 硫磺谷 (d) 地熱谷 (e) 小油坑 (f) 富源 (g) 金山漁會 (h) 磺港 (i) 七股 (j) 大油坑 (O: aerobic oxidation; N: nitrate, nitrite reduction, nitrogen fixation, anammox; S: sulfate, sulfur reduction, sulfur disproportionation; M: methanogenesis, acetogenesis, anaerobic methane oxidation; Fe: Metal reduction; F: fermentation)。



3-3-2 東台灣與南台灣溫泉之化學反應自由能計算結果

安通：此處溫泉中以好氧的氧化反應，每莫耳電子能夠釋放之能量最多，其中以 Fe^{2+} 當作電子提供者、 O_2 當作電子接受者並產生赤鐵礦的化學反應之自由能最負，其值為 $-114.5 \text{ kJ/mole e}^-$ 。以 H_2 當作電子提供者、以 CO_2 與針鐵礦當作電子接受者的化學反應之自由能為正，表示此化學反應在安通溫泉中無法自然發生(圖 3-18a)。

紅葉：此處溫泉中以 CO 當作電子提供者、 Fe^{3+} 當作電子接受者並產生 CO_2 與 Fe^{2+} 的化學反應之自由能最負，其值為 $-190.6 \text{ kJ/mole e}^-$ 。以 Fe^{2+} 當作電子提供者、 O_2 當作電子接受者並產生 Fe^{3+} 的化學反應之自由能為正，表示該反應無法自然發生 (圖 3-18b)。

虎爺：此處溫泉中以 H_2 當作電子提供者、 Fe^{3+} 當作電子接受者並產生 Fe^{2+} 的化學反應之自由能最負，其值為 $-106.8 \text{ kJ/mole e}^-$ 。以丙酸產生 CO_2 的發酵作

用反應之自由能為正 (圖 3-18c)。

關仔嶺：此處溫泉中以 CO 當作電子提供者、O₂ 當作電子接受者並產生 CO₂ 的化學反應之自由能值最負，其值為 -114.3 kJ/mole e⁻。以 H₂ 當作電子提供者、CO₂ 當作電子接受者並產生乙酸的化學反應之自由能為正 (圖 3-18d)。

新養女湖 I：此處溫泉中所有可計算反應之自由能均為負值。由於此溫泉水採樣點缺少 O₂ 與 N₂ 之氣體樣本，所以反應物中含有 O₂ 與 N₂ 的化學反應無法計算。以丙酸發酵產生甲酸之反應自由能值最負，其值為 -52.3 kJ/mole e⁻；以丙酸與 CO₂ 反應產生乙酸進行發酵作用時，傳遞每莫耳電子能夠釋放出的能量最少，其自由能值為 -3.3 kJ/mole e⁻ (圖 3-18e)。

新養女湖 II：此處溫泉中所有可計算反應之自由能均為負值。由於此溫泉水採樣點缺少 O₂ 與 N₂ 之氣體樣本，所以反應物中含有 O₂ 與 N₂ 的化學反應無法計算。以丙酸發酵產生甲酸之反應自由能值最負，其值為 -56.3 kJ/mole e⁻；以丙酸與 CO₂ 反應進行產生乙酸的發酵作用時，傳遞每莫耳電子能夠釋放出的能量最少，其自由能值為 -1.5 kJ/mole e⁻ (圖 3-18f)。

小滾水 III：此處溫泉中所有可計算反應之自由能均為負值。以 Fe²⁺ 當作電子提供者、NO₃⁻ 當作電子接受者並產生 NH₄⁺ 與針鐵礦的化學反應之自由能值最負，其值為 -209.8 kJ/mole e⁻；以 CH₄ 當作電子提供者、SO₄²⁻ 當作電子接受者並產生 HS⁻ 與 CO₂ 的化學反應，傳遞每莫耳電子能夠釋放出的能量最少，其自由能值為 -11.9 kJ/mole e⁻ (圖 3-18g)。

小滾水 IV：此處溫泉中所有可計算反應之自由能均為負值。以 Fe²⁺ 當作電子提供者、NO₃⁻ 當作電子接受者並產生 NH₄⁺ 與針鐵礦的化學反應之自由能值最負，其值為 -203.9 kJ/mole e⁻；以丙酸與 CO₂ 產生乙酸的發酵作用時，傳遞每莫耳電子能夠釋放出的能量最少，其自由能值為 -4.6 kJ/mole e⁻ (圖 3-18h)。

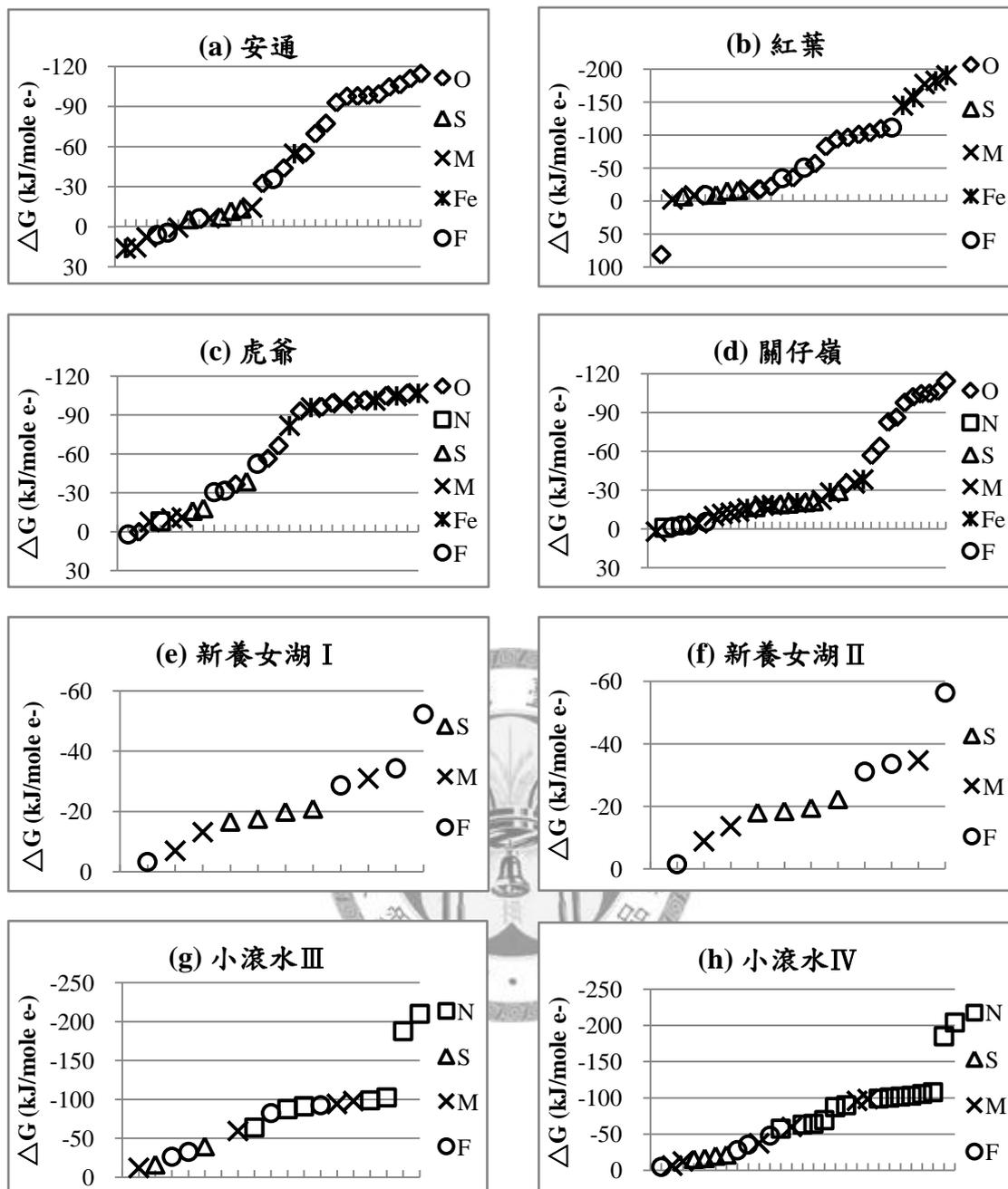


圖 3-18、東台灣與南台灣溫泉之化學反應自由能計算結果。此圖不包含反應物未偵測或低於偵測極限之化學反應式，並將自由能值從大到小排列作圖。(a) 安通 (b) 紅葉 (c) 虎爺 (d) 關仔嶺 (e) 新養女湖 I (f) 新養女湖 II (g) 小滾水 III (h) 小滾水 IV (O: aerobic oxidation; N: nitrate, nitrite reduction, nitrogen fixation, anammox; S: sulfate, sulfur reduction, sulfur disproportionation; M: methanogenesis, acetogenesis, anaerobic methane oxidation; Fe: Metal reduction; F: fermentation)。

3-4 能量通量計算結果

根據系統中化學物質之供需已達穩定狀態的假設，所計算出特定反應進行時所提供的通量大小整理於附錄表六中，各溫泉反應通量估算結果的特徵分述如下。

3-4-1 北台灣溫泉之化學反應的能量通量計算結果

礮山：以 HS^- 當作電子提供者、 O_2 當作電子接受者，並產生元素硫的化學反應之能量通量最大，其值為 $7.50\text{E-}13$ kJ/sec；以 CH_4 當作電子提供者、 SO_4^{2-} 當作電子接受者，並產生 HS^- 與 CO_2 之化學反應的能量通量最小，其值為 $1.29\text{E-}15$ kJ/sec。兩者能量通量相差兩個數量級。

龍鳳谷：能量通量最大之化學反應為以丙酸當作電子提供者、 O_2 當作電子接受者，並產生 CO_2 的化學反應，其值為 $4.26\text{E-}13$ kJ/sec；能量通量最小之化學反應為以 H_2 當作電子提供者、 CO_2 當作電子接受者，並產生 CH_4 的化學反應，其值為 $2.69\text{E-}17$ kJ/sec。兩者能量通量相差四個數量級。

硫磺谷：以丙酸當作電子提供者、 NO_3^- 當作電子接受者，並產生 CO_2 與 NO_2^- 的化學反應之能量通量最大，其值為 $1.27\text{E-}12$ kJ/sec；以 CH_4 當作電子提供者、 SO_4^{2-} 當作電子接受者，並產生 HS^- 與 CO_2 之化學反應的能量通量最小，其值為 $2.11\text{E-}16$ kJ/sec。兩者能量通量相差四個數量級。

地熱谷：以 HS^- 當作電子提供者、 O_2 當作電子接受者，並產生 SO_4^{2-} 的化學反應之能量通量最大，其值為 $8.29\text{E-}13$ kJ/sec；以 CH_4 當作電子提供者、 SO_4^{2-} 當作電子接受者，並產生 HS^- 與 CO_2 之化學反應的能量通量最小，其值為 $1.55\text{E-}15$ kJ/sec。兩者能量通量相差兩個數量級。

小油坑：能量通量最大之化學反應為以 HS^- 當作電子提供者、 NO_3^- 當作電子接受者，並產生 SO_4^{2-} 與 NH_4^+ 的化學反應，其值為 $1.62\text{E-}12$ kJ/sec；能量通量最小之化學反應為以 H_2 當作電子提供者、 CO_2 當作電子接受者，並產生 CH_4 的化學反

應，其值為 $1.47\text{E-}16$ kJ/sec。兩者能量通量相差四個數量級。

富源溫泉：以 Fe^{2+} 當作電子提供者、 O_2 當作電子接受者，並產生赤鐵礦的化學反應之能量通量最大，其值為 $8.70\text{E-}13$ kJ/sec；以 Fe^{2+} 當作電子提供者、 O_2 當作電子接受者，並產生 Fe^{3+} 之化學反應的能量通量最小，其值為 $5.38\text{E-}13$ kJ/sec。

金山漁會：能量通量最大之化學反應為以 CH_4 當作電子提供者、 O_2 當作電子接受者，並產生 CO_2 的化學反應，其值為 $1.20\text{E-}12$ kJ/sec；以丙酸與 CO_2 當作反應物並產生乙酸的發酵作用之化學反應能量通量最小，其值為 $8.48\text{E-}14$ kJ/sec。兩者能量通量相差兩個數量級。

磺港：能量通量最大之化學反應為以 Fe^{2+} 當作電子提供者、 NO_3^- 當作電子接受者，並產生 Fe^{3+} 與 N_2 的化學反應，其值為 $3.08\text{E-}12$ kJ/sec；能量通量最小之化學反應為以 H_2 當作電子提供者、 CO_2 當作電子接受者，並產生 CH_4 的化學反應，其值為 $4.63\text{E-}17$ kJ/sec。兩者能量通量相差五個數量級。

七股：以 Fe^{2+} 當作電子提供者、 O_2 當作電子接受者，並產生 Fe^{3+} 的化學反應之能量通量最大，其值為 $1.27\text{E-}12$ kJ/sec；以 H_2 當作電子提供者、 CO_2 當作電子接受者，並產生 CH_4 的化學反應之能量通量最小，其值為 $2.09\text{E-}16$ kJ/sec。兩者能量通量相差四個數量級。

大油坑：以 HS^- 當作電子提供者、 O_2 當作電子接受者，並產生 SO_4^{2-} 的化學反應之能量通量最大，其值為 $4.01\text{E-}13$ kJ/sec；以 H_2 當作電子提供者、 CO_2 當作電子接受者，並產生 CH_4 的化學反應之能量通量最小，其值為 $6.73\text{E-}16$ kJ/sec。兩者能量通量相差三個數量級。

3-4-2 東台灣與南台灣溫泉之化學反應的能量通量計算結果

安通：能量通量最大之化學反應為以 CH_4 當作電子提供者、 SO_4^{2-} 當作電子接受者，並產生 CO_2 與 HS^- 的化學反應，其值為 $6.92\text{E-}13$ kJ/sec；以丙酸與 CO_2 當作反應物並產生乙酸的發酵作用之化學反應能量通量最小，其值為 $-7.76\text{E-}15$ kJ/sec。兩者能量通量相差兩個數量級。

紅葉：以丙酸當作電子提供者、 SO_4^{2-} 當作電子接受者，並產生 CO_2 與 HS^- 的化學反應之能量通量最大，其值為 $4.74\text{E-}12$ kJ/sec；以 CH_4 當作電子提供者、 SO_4^{2-} 當作電子接受者，並產生 CO_2 與 HS^- 的化學反應之能量通量最小，其值為 $7.36\text{E-}16$ kJ/sec。兩者能量通量相差四個數量級。

虎爺：以丙酸與 CO_2 當作反應物並產生乙酸的發酵作用之化學反應能量通量最大，其值為 $7.87\text{E-}12$ kJ/sec；以 Fe^{2+} 當作電子提供者、 O_2 當作電子接受者，並產生 Fe^{3+} 的化學反應，其值為 $-1.91\text{E-}15$ kJ/sec。兩者能量通量相差三個數量級。

關仔嶺：能量通量最大之化學反應為以丙酸當作電子提供者、 SO_4^{2-} 當作電子接受者，並產生 CO_2 與 HS^- 的化學反應，其值為 $8.87\text{E-}12$ kJ/sec；能量通量最小之化學反應為以 H_2 當作電子提供者、 CO_2 當作電子接受者，並產生乙酸的化學反應，其值為 $-1.97\text{E-}16$ kJ/sec。兩者能量通量相差四個數量級。

新養女湖 I：以丙酸當作電子提供者、 SO_4^{2-} 當作電子接受者，並產生 CO_2 與 HS^- 的化學反應之能量通量最大，其值為 $4.40\text{E-}12$ kJ/sec；以甲酸當反應物，並產生 CH_4 與 CO_2 的自身氧化還原反應之能量通量最小，其值為 $5.34\text{E-}15$ kJ/sec。兩者能量通量相差三個數量級。

新養女湖 II：以丙酸當作電子提供者、 SO_4^{2-} 當作電子接受者，並產生 CO_2 與 HS^- 的化學反應之能量通量最大，其值為 $3.14\text{E-}12$ kJ/sec；以甲酸當反應物，並產生 CH_4 與 CO_2 的自身氧化還原反應之能量通量最小，其值為 $8.43\text{E-}15$ kJ/sec。兩者能量通量相差三個數量級。

小滾水III：以丙酸與 CO_2 當作反應物並產生乙酸的發酵作用之化學反應能量通量最大，其值為 $2.28\text{E-}12$ kJ/sec；以 Fe^{2+} 當作電子提供者、 NO_3^- 當作電子接受者，並產生 NO_2^- 與針鐵礦的化學反應之能量通量最小，其值為 $9.42\text{E-}15$ kJ/sec。兩者能量通量相差三個數量級。

小滾水IV：以丙酸與 CO_2 當作反應物並產生乙酸的發酵作用之化學反應能量通量最大，其值為 $4.31\text{E-}13$ kJ/sec；以 CH_4 當作電子提供者、 SO_4^{2-} 當作電子接受者，並產生 CO_2 與 HS^- 的化學反應之能量通量最小，其值為 $5.38\text{E-}16$ kJ/sec。兩者能量通量相差三個數量級。



第四章 討論

4-1 微生物可能使用的代謝途徑

欲判斷微生物可以使用並取得能量的代謝途徑，除了必須是自發性反應之外（活化能為負值），還必須定義出微生物的最低自由能需求與最低能量通量需求。ATP (Adenosine triphosphate) 是所有生物進行代謝反應時能量提供與儲存物質，微生物必須要藉著 ATP 的水解產生能量以提供生理需求、維持生命，或是將代謝反應所產生的能量以 ATP 的形式儲存。因為形成 ATP 時，還需考慮參與反應的離子個數和效率，因此微生物所需的最小單位能量被寫成 (17) 式之形式，

$$\Delta G_{\min} = \frac{\Delta G_{\text{ADP} \rightarrow \text{ATP}}}{n \cdot f} \quad (17)$$

其中 ΔG_{\min} 代表微生物能夠利用的產能代謝反應所必需提供的最小自由能，它等於將 ADP 合成為 ATP 所需的能量除以參與合成反應的離子個數 (n) 和 ATP 合成效能 (f)。 ΔG_{\min} 也被稱做生物能量量子 (Biological Energy Quantum, 縮寫為 BEQ)。

過去在微生物的最低自由能需求的研究上，通常採取純菌培養、共生培養、穩定培養系統或環境樣品分析等方式，估算微生物使用特定代謝反應時所需要的最小自由能。表 4-1 整理了以往關於微生物最低自由能需求的研究結果，並標準化為傳遞單位電子所釋出的能量 (Hoehler, 2004)。本研究根據前人研究結果（表 4-1）設定微生物最低自由能需求範圍在 -8.0 到 -0.8 kJ/mole e^- 之間，並稱此範圍為最小自由能需求帶。本研究計算之化學反應之自由能結果可分成三類：(一) 自由能值大於最小自由能需求帶之反應，包含自由能值為正的非自發性反應，或是反應釋出的能量不足以形成 ATP，所以微生物不使用此代謝途徑；(二) 自由能值小於最小自由能需求帶下界（自由能值小於 -8.0 kJ/mole e^- ）之反應，反應所產

生的能量足以形成 ATP，屬於微生物可以使用的代謝途徑；(三) 自由能值落於最小自由能需求帶內（自由能值介於於 -8.0 和 -0.8 kJ/mole e^- ）之反應，則無法確定微生物是否能夠利用該反應代謝，需要進一步討論微生物物種與產生 ATP 的效能問題。

圖4-1 整理本研究所有自由能計算結果，顯示在本研究所分析的溫泉水樣中，絕大部分的反應自由能值皆低於最小自由能需求帶，代表這些化學反應可以被微生物所使用以取得能量，僅有少數反應的自由能值落於最小自由能需求帶中或高於最小自由能需求帶。



表 4-1、微生物最低自由能需求。

Metabolic Reactions	ΔG (kJ/mole)	ΔG (kJ/mole e-)	system	Reference
$\text{CH}_3\text{CH}_2\text{CH}_2\text{COO}^- + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow 2\text{CH}_3\text{COO}^- + \text{H}^+ + 2\text{H}_2$ [4]	-6.2 ~ -3.8	-1.6 ~ -1.0	coculture	Dwyer et al., 1988
$\text{CH}_3\text{CH}_2\text{CH}_2\text{COO}^- + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow 2\text{CH}_3\text{COO}^- + \text{H}^+ + 2\text{H}_2$ [4]	-16	-4	freshwater sediment	Rothfuss and Conrad, 1993
$\text{CH}_3\text{CH}_2\text{CH}_2\text{COO}^- + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow 2\text{CH}_3\text{COO}^- + \text{H}^+ + 2\text{H}_2$ [4]	-17.5 ~ -4.5	-4.4 ~ -1.1	coculture	Jackson and McInerney, 2002
$4\text{H}_2 + \text{HCO}_3^- + \text{H}^+ \rightarrow \text{CH}_4 + 3\text{H}_2\text{O}$ [8]	-36.4 ~ -30	-4.6 ~ -0.8	chemostat	Seitz et al., 1990a
$4\text{H}_2 + \text{CO}_2 \rightarrow \text{CH}_4 + 2\text{H}_2\text{O}$ [8]	-14.1 ~ -9.0	-1.8 ~ -1.1	chemostat	Scholten and Conrad, 2000
$4\text{H}_2 + \text{CO}_2 \rightarrow \text{CH}_4 + 2\text{H}_2\text{O}$ [8]	-11.3 ~ -9.5	-1.4 ~ -1.2	marine sediment	Hoehler et al., 2001
$4\text{H}_2 + \text{CO}_2 \rightarrow \text{CH}_4 + 2\text{H}_2\text{O}$ [8]	-9.6	-1.2	marine sediment	Hoehler et al., 1994
$4\text{H}_2 + \text{CO}_2 \rightarrow \text{CH}_4 + 2\text{H}_2\text{O}$ [8]	-31.1 ~ -13.2	-3.9 ~ -1.7	paddy soil	Yao and Conrad, 1999
$4\text{H}_2 + \text{CO}_2 \rightarrow \text{CH}_4 + 2\text{H}_2\text{O}$ [8]	-15	-1.9	pure culture	Chong et al., 2002
$4\text{H}_2 + \text{CO}_2 \rightarrow \text{CH}_4 + 2\text{H}_2\text{O}$ [8]	-49.6 ~ -37.2	-6.2 ~ -4.7	pure culture	Conrad and Wetter, 1990
$4\text{H}_2 + \text{CO}_2 \rightarrow \text{CH}_4 + 2\text{H}_2\text{O}$ [8]	-32 ~ -24	-4.0 ~ -3.0	isolation culture	Kotsyurbenko et al., 2001
$\text{CH}_3\text{COO}^- + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CH}_4 + \text{HCO}_3^-$ [4]	-10.9 ~ -9.1	-2.7 ~ -2.3	marine sediment	Hoehler et al., 1994
$\text{CH}_3\text{COO}^- + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CH}_4 + \text{HCO}_3^-$ [4]	-12.8 ~ -10.5	-3.2 ~ -2.6	marine sediment	Hoehler et al., 2001
$\text{CH}_3\text{CH}_2\text{OH} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CH}_3\text{COO}^- + \text{H}^+ + 2\text{H}_2$ [2]	-16 ~ -11	-8.0 ~ -5.5	chemostat	Seitz et al., 1990b
$4\text{H}_2 + \text{SO}_4^{2-} \rightarrow \text{S}^{2-} + 4\text{H}_2\text{O}$ [8]	-22.3 ~ -15.9	-2.8 ~ -2.0	marine sediment	Hoehler et al., 2001
$4\text{H}_2 + \text{SO}_4^{2-} + \text{H}^+ \rightarrow \text{HS}^- + 4\text{H}_2\text{O}$ [8]	-49.2 ~ -41.2	-6.2 ~ -5.2	chemostat	Seitz et al., 1990a
$4\text{H}_2 + 2\text{CO}_2 \rightarrow \text{CH}_4\text{COO}^- + \text{H}^+ + 2\text{H}_2\text{O}$ [8]	-24 ~ -20	-3.0 ~ -2.5	pure culture	Conrad and Wetter, 1990
$4\text{H}_2 + 2\text{CO}_2 \rightarrow \text{CH}_4\text{COO}^- + \text{H}^+ + 2\text{H}_2\text{O}$ [8]	-28 ~ -20	-3.5 ~ -2.5	isolation culture	Kotsyurbenko et al., 2001
$4\text{H}_2 + 2\text{CO}_2 \rightarrow \text{CH}_4\text{COO}^- + \text{H}^+ + 2\text{H}_2\text{O}$ [8]	-25.3 ~ -20.4	-3.2 ~ -2.6	chemostat	Seitz et al., 1990a

附註：本表修改自 Hoehler (2004)。[] 內為電子傳遞數目。

另一方面，根據 2-5-3 節關於微生物處於三種生存狀態下所需要的能量通量公式 (17 式)，計算出 18 個採樣點中微生物處於的三種生存狀態所需要的能量通量 (表 4-2)。本節將討論微生物可能會使用的代謝途徑之能量通量，評估利用該代謝微生物族群是否處在生長狀態。

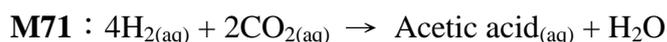
表 4-2、微生物能量通量需求。

微生物	磺山	龍鳳谷	硫磺谷	地熱谷	小油坑
生存狀態	65°C	79.6°C	89°C	68.3°C	71.6°C
Growth	2.17E-16	6.04E-16	1.12E-15	2.76E-16	3.49E-16
Maintenance	2.17E-19	6.04E-19	1.12E-18	2.76E-19	3.49E-19
Survival	2.17E-22	6.04E-22	1.12E-21	2.76E-22	3.49E-22
微生物	富源	金山漁會	磺港	七股	大油坑
生存狀態	67.7°C	65.1°C	74.2°C	49.5°C	91.9°C
Growth	2.64E-16	2.19E-16	4.18E-16	2.76E-16	1.34E-15
Maintenance	2.64E-19	2.19E-19	4.18E-19	2.76E-19	1.34E-18
Survival	2.64E-22	2.19E-22	4.18E-22	2.76E-22	1.34E-21
微生物	安通	紅葉	虎爺	關仔嶺	
生存狀態	66°C	80°C	49.8°C	63.8°C	
Growth	2.34E-16	6.21E-16	6.79E-17	1.99E-16	
Maintenance	2.34E-19	6.21E-19	6.79E-20	1.99E-19	
Survival	2.34E-22	6.21E-22	6.79E-23	1.99E-22	
微生物	新養女湖 I	新養女湖 II	小滾水 III	小滾水 IV	
生存狀態	35.2°C	43.5°C	20.4°C	26.1°C	
Growth	2.00E-17	4.06E-17	5.09E-18	8.75E-18	
Maintenance	2.00E-20	4.06E-20	5.09E-21	8.75E-21	
Survival	2.00E-23	4.06E-23	5.09E-24	8.75E-24	

附註：單位為 kJ/sec-cell。

4-1-1 非自發性化學反應

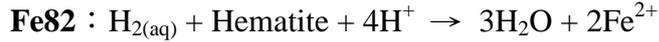
本研究涵蓋的反應中，只有少數在部分溫泉中出現自由能值高於最小自由能需求，以下討論造成此一現象的原因，以瞭解現地化學成分對於微生物使用代謝反應的限制，並解析該反應在地域上的差異性。



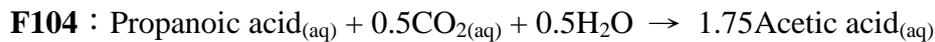
自由能值最大的地區為安通，此地區所測到 $\text{CO}_2(\text{aq})$ 濃度偏低，使得自由能值高於最小自由能需求帶；關仔嶺溫泉雖然 $\text{CO}_2(\text{aq})$ 濃度高達 $847.6 \mu\text{M}$ ，但此區擁有高濃度之 $\text{Acetic acid}(\text{aq})$ （濃度為 $1211 \mu\text{M}$ ），使得自由能值高於最小自由能需求帶而僅次於安通溫泉；磺山、龍鳳谷、硫磺谷、地熱谷、小油坑、磺港、七股、大油坑與虎爺等地區之溫泉水，有高濃度之 $\text{CO}_2(\text{aq})$ 且無偵測到 $\text{Acetic acid}(\text{aq})$ ，使得自由能值落於最小自由能需求帶上或低於最小自由能需求帶。以能量通量觀點來評估低於最小自由能需求帶的 9 個採樣地區，其中磺山、硫磺谷、地熱谷、小油坑、七股、大油坑與虎爺的能量通量最大，其值皆大於生長能量需求，代表利用此代謝反應之微生物能維持生長狀態。龍鳳谷與磺港的能量通量大於維持能量需求，代表利用此代謝反應僅能維持微生物之基本生理機能，但不足以提供其生長。



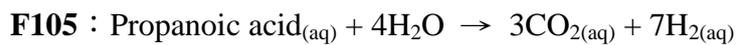
安通溫泉之 pH 值為 8.73，使得該反應之自由能值高於最小自由能需求帶；關仔嶺溫泉之 pH 值雖然也高達 8.36，但該地區之 Fe^{2+} 濃度偏低，以致自由能值仍低於最小自由能需求帶；金山漁會與磺港兩地區之溫泉之 pH 值分別為 5.84 與 2.99，使得該反應所計算出來之自由能值落於最小自由能需求帶上或低於最小自由能需求帶。金山漁會與磺港 2 處之能量通量值皆大於生長能量需求，代表利用此代謝反應之微生物能維持生長狀態。



此反應情況與 M77 反應相同。安通溫泉擁有較高的 pH 值，導致該反應之自由能值大於最小自由能需求帶；關仔嶺溫泉水雖然屬於鹼性，但由於 Fe^{2+} 濃度偏低，使得自由能值低於最小自由能需求帶；磺港溫泉水之 pH 值為 2.99，使自由能值低於最小自由能需求帶。磺港溫泉中此反應提供的能量通量值皆大於生長能量需求，代表利用此代謝反應之微生物能維持生長狀態。



在含有 $\text{Propanoic acid}_{(\text{aq})}$ 的 11 處溫泉中，龍鳳谷、硫磺谷、金山漁會、虎爺與小滾水Ⅲ等 5 處溫泉水中， $\text{Acetic acid}_{(\text{aq})}$ 濃度低於偵測極限，使得自由能值低於最小自由能需求帶；於安通、紅葉、關仔嶺、新養女湖 I、新養女湖 II 與小滾水 IV 等 6 處溫泉水中，所測到 $\text{Acetic acid}_{(\text{aq})}$ 濃度可以高達 1211.2 μM ，使得自由能值落於最小自由能需求帶上或高於最小自由能需求帶。在龍鳳谷、硫磺谷、金山漁會、虎爺與小滾水Ⅲ等 5 處溫泉中，此反應產生的能量通量值皆大於生長能量需求，代表利用此代謝反應之微生物能維持生長狀態。



在含有 $\text{Propanoic acid}_{(\text{aq})}$ 的 11 處溫泉中，金山漁會、紅葉、新養女湖 I、新養女湖 II、小滾水Ⅲ與小滾水 IV 等 6 處溫泉水中，未偵測到 $\text{H}_{2(\text{aq})}$ 的存在，導致自由能值低於最小自由能需求帶；龍鳳谷、硫磺谷、安通、虎爺與關仔嶺等 5 處溫泉水中可測得 $\text{H}_{2(\text{aq})}$ 的存在，使得自由能值落於最小自由能需求帶上或高於最小自由能需求帶。金山漁會、紅葉、新養女湖 I、新養女湖 II、小滾水Ⅲ與小滾水 IV 等 6 個採樣地區，此反應提供的能量通量皆大於生長能量需求，代表利用此代謝反應之微生物能維持生長狀態。

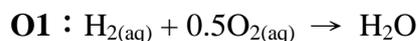


在含有 $\text{Propanoic acid}_{(aq)}$ 的 11 處溫泉中，小滾水Ⅲ與金山漁會之溫泉水中皆未測得 $\text{Acetic acid}_{(aq)}$ 與 $\text{H}_{2(aq)}$ ，使得反應之自由能值最負；龍鳳谷、硫磺谷、紅葉、虎爺、新養女湖Ⅰ、新養女湖Ⅱ、與小滾水Ⅳ等 7 處溫泉中，雖然僅測得 $\text{H}_{2(aq)}$ 與 $\text{Acetic acid}_{(aq)}$ 兩化學物種之其一，但反應自由能值仍低於最小自由能需求帶；安通與關仔嶺兩地區之溫泉水，同時測得 $\text{H}_{2(aq)}$ 與 $\text{Acetic acid}_{(aq)}$ ，導致反應自由能值高於最小自由能需求帶。龍鳳谷、硫磺谷、金山漁會、紅葉、虎爺、新養女湖Ⅰ、新養女湖Ⅱ、小滾水Ⅲ與小滾水Ⅳ等 9 個採樣地區，此反應提供的能量通量皆大於生長能量需求，代表利用此代謝反應之微生物能維持生長狀態。

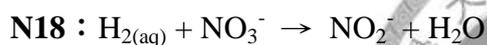


4-1-2 自發性化學反應

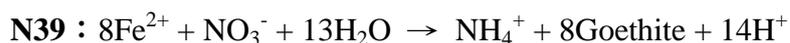
本研究涵蓋的反應中，自由能值低於最小自由能需求之自然發生反應占絕大部分，以下列舉幾個自由能極負之反應作例子，討論造成此一現象的原因。



此反應於 12 處溫泉中能夠自然發生，包括磺山、龍鳳谷、硫磺谷、地熱谷、小油坑、磺港、七股、大油坑、安通、虎爺與關仔嶺。只要於溫泉水中能夠測得 $\text{H}_{2(\text{aq})}$ 與 $\text{O}_{2(\text{aq})}$ ，該反應之自由能值皆低於最小自由能需求帶。這 12 處採樣點中，此反應提供的能量通量皆大於生長能量需求，代表利用此代謝反應之微生物能維持生長狀態。

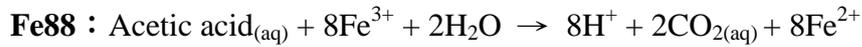


在含有 $\text{H}_{2(\text{aq})}$ 與 NO_3^- 的 4 處溫泉包括硫磺谷、小油坑、磺港與七股，且 NO_2^- 皆低於偵測極限，使得自由能值低於最小自由能需求帶。其值範圍從 -101.9 至 -105.6 kJ/mole e^- 。此反應於 12 處溫泉中能夠自然發生，包括磺山、龍鳳谷、硫磺谷、地熱谷、小油坑、磺港、七股、大油坑、安通、虎爺與關仔嶺。只要於溫泉水中能夠測得 $\text{H}_{2(\text{aq})}$ 與 $\text{O}_{2(\text{aq})}$ ，該反應之自由能值皆低於最小自由能需求帶。這 12 處採樣點中，此反應提供的能量通量皆大於生長能量需求，代表利用此代謝反應之微生物能維持生長狀態。這 4 處採樣點中，此反應提供的能量通量值皆大於生長能量需求，代表利用此代謝反應之微生物能維持生長狀態。



在含有 Fe^{2+} 與 NO_3^- 的 6 處溫泉中，小滾水Ⅲ與小滾水Ⅳ之 pH 值分別為 7.78 與 7.76，使得該反應自由能值最負，分別為 -209.8 與 -203.9 kJ/mole e^- 。另外 4 處溫泉包括硫磺谷、小油坑、磺港與七股，其 pH 值範圍從 2.16 至 5.84，

自由能值從 -57.6 至 -130.4 kJ/mole e⁻。6 個地區在該反應自由能值皆低於最小自由能需求帶。這 6 處採樣點中，此反應提供的能量通量皆大於生長能量需求，代表利用此代謝反應之微生物能維持生長狀態。



含有 Acetic acid_(aq) 與 Fe³⁺ 的溫泉包括虎爺與紅葉兩處，pH 值分別為 6.54 與 6.88，Fe²⁺ 濃度分別為低於偵測極限與 10.0 μM，導致反應自由能值皆低於最小自由能需求帶，且分別為 -182.1 與 -95.8 kJ/mole e⁻。這 2 處採樣點中，此反應提供的能量通量值皆大於生長能量需求，代表利用此代謝反應之微生物能維持生長狀態。

綜合上述討論可知，化學反應式中產物濃度過低或低於偵測極限時，自由能值變小以致於低於最小自由能需求帶，有利於反應自然發生；反之，化學反應式中反應物濃度過低時，自由能值變大以致於高於最小自由能需求帶，不利於反應自然發生。同時反應式中係數大的參與化學物種對於自由能值的影響較大，若為反應物則有利反應自然發生，若為產物則不利反應自然發生。

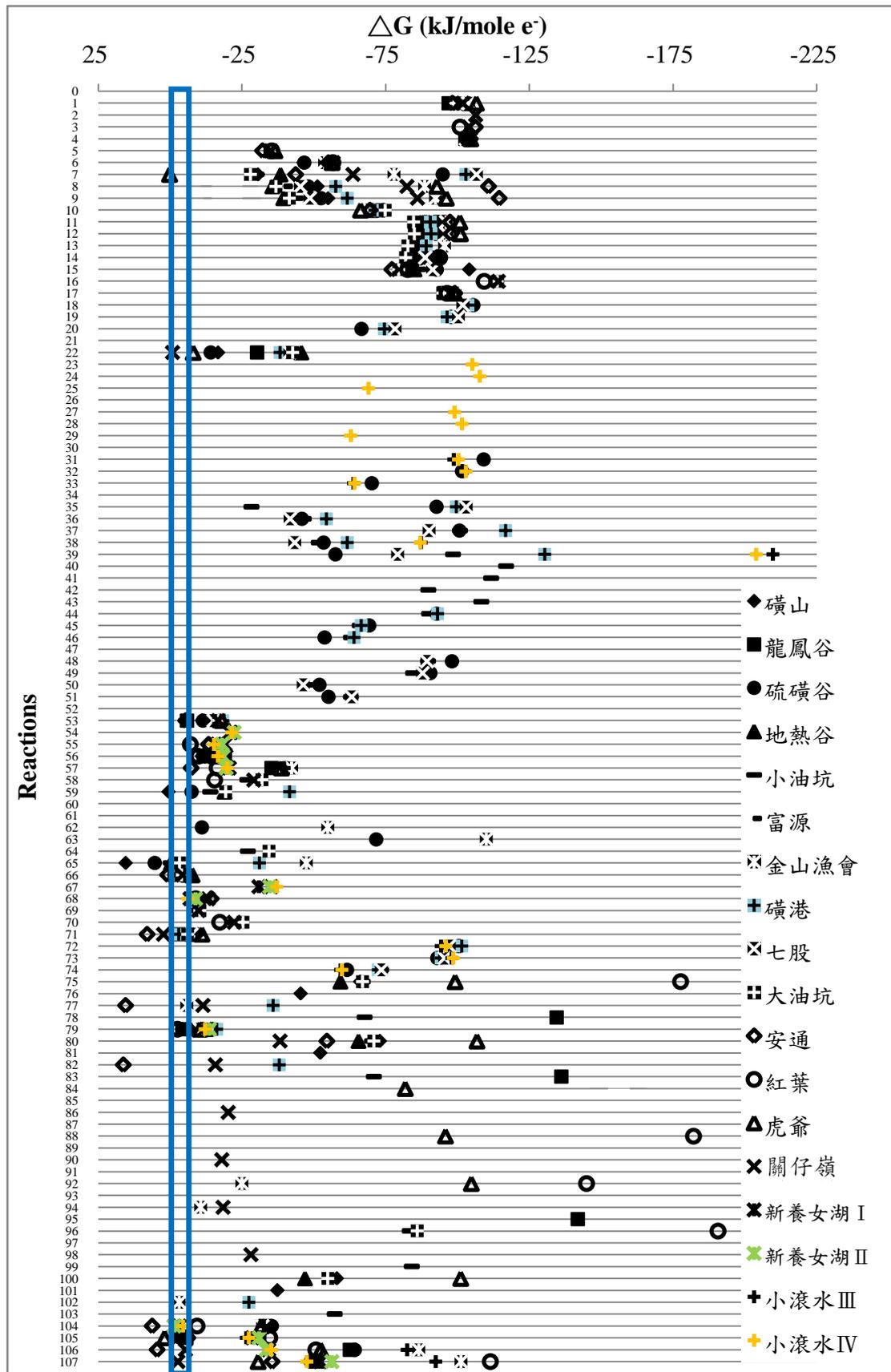


圖 4-1、台灣熱泉系統之 107 個化學反應之自由能值。框線範圍代表微生物最小自由能需求帶，為 $-0.8 \sim -8.0$ kJ/mole e^- 。

4-2 反應自由能之大小關係與區域上的變化

不同溫泉中的微生物族群可以使用之代謝途徑多寡，受到溫泉中電子接受者與電子供應者的種類而有所差異。本節依照不同電子接受者種類，來比較台灣各地溫泉中的化學反應之自由能大小。

4-2-1 北台灣溫泉

北台灣溫泉以是否測到 NO_3^- 與 Fe^{3+} 兩種電子接受者作簡單的分類，以下將電子接受者依其反應自由能值由小到大排列：

(1) 無 NO_3^- 、有 Fe^{3+} 之溫泉，包括磺山、地熱谷與大油坑。

磺山： O_2 、 Fe^{3+} 、Goethite、 N_2 、 S 、 SO_4^{2-} 與 CO_2

大油坑： O_2 、 Fe^{3+} 、 N_2 、 S 、 SO_4^{2-} 與 CO_2

地熱谷： O_2 、 Fe^{3+} 、 N_2 、 S 、 SO_4^{2-} 與 CO_2

(2) 有 NO_3^- 、無 Fe^{3+} 之溫泉，包括硫磺谷、磺港與七股。

硫磺谷： NO_3^- 、 O_2 、 S 、 SO_4^{2-} 、 N_2 與 CO_2

磺港： NO_3^- 、 O_2 、 S 、 N_2 、Hematite、 SO_4^{2-} 與 CO_2

七股： O_2 、 NO_3^- 、 N_2 、 SO_4^{2-} 與 CO_2

(3) 有 NO_3^- 、有 Fe^{3+} 之溫泉，例如小油坑。

小油坑： NO_3^- 、 O_2 、Magnetite、 Fe^{3+} 、 S 、 N_2 、 SO_4^{2-} 與 CO_2

(4) 無 NO_3^- 、無 Fe^{3+} 之溫泉，包括龍鳳谷、金山漁會與富源。

龍鳳谷： Magnetite 、 O_2 、 SO_4^{2-} 、 N_2 與 CO_2

金山漁會： S 、 O_2 、 SO_4^{2-} 與 Hematite

富源： O_2

北台灣溫泉之化學反應自由能值由小到大的排列大致為 NO_3^- 、 O_2 、Magnetite、 Fe^{3+} 、Goethite、 S 、 N_2 、Hematite、 SO_4^{2-} 與 CO_2 。此排列順序並非在所有溫泉中均相同，除了電子接受者種類會影響各地區代謝途徑的多寡外，

同一地區溫泉之電子提供者或其他化學物種的濃度也會改變上列所述之自由能順序排列。例如，龍鳳谷地區由於 Fe^{2+} 濃度低於偵測極限，使得 Magnetite 還原成 Fe^{2+} 之反應自由能為最負值；金山漁會地區由於有較高的丙酸濃度與較高的 pH 值，使得丙酸加上元素硫並產生乙酸加上 HS^- 之反應自由能最負。

4-2-2 東台灣溫泉

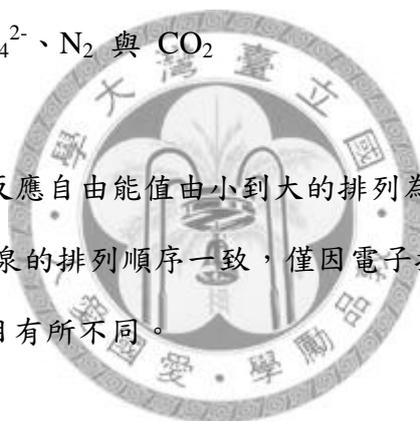
以下將東台灣溫泉中參與反應的電子接受者，依其反應自由能值由小到大排列：

安通： O_2 、 SO_4^{2-} 、 CO_2 與 Hematite

紅葉： Fe^{3+} 、 O_2 、 SO_4^{2-} 與 CO_2

虎爺： Fe^{3+} 、 O_2 、 SO_4^{2-} 、 N_2 與 CO_2

東台灣溫泉之化學反應自由能值由小到大的排列為 Fe^{3+} 、 O_2 、 SO_4^{2-} 、 N_2 、 CO_2 與 Hematite。各溫泉的排列順序一致，僅因電子接受者種類之多寡，而使得可利用的代謝途徑數目有所不同。



4-2-3 南台灣溫泉

以下將南台灣溫泉中參與反應的電子接受者，依其反應自由能值由小到大排列：

關仔嶺： O_2 、 Fe^{3+} 、 SO_4^{2-} 、 CO_2 與 N_2

新養女湖： SO_4^{2-}

小滾水： NO_3^- 與 SO_4^{2-}

由於新養女湖與小滾水地區無氧氣與氮氣測量資料，因此無法比較三處溫泉的異同。若以關仔嶺作為代表，則南台灣溫泉之化學反應自由能由小到大的排列為 O_2 、 Fe^{3+} 、 SO_4^{2-} 、 CO_2 與 N_2 ，其中無任何以礦物當作電子接受者的反應發

生。

綜合上述討論可知，依照不同區域的地質特性，溫泉中微生物可以使用之代謝反應自由能的大小順序也有所差異，大致順序依反應自由能值由小到大的排列如下：

台灣北部火成岩區： NO_3^- 、 O_2 、Magnetite、 Fe^{3+} 、Goethite、S、 N_2 、Hematite、 SO_4^{2-} 與 CO_2

台灣東部變質岩區： Fe^{3+} 、 O_2 、 SO_4^{2-} 、 N_2 、 CO_2 與 Hematite

台灣南部沉積岩區： O_2 、 Fe^{3+} 、 SO_4^{2-} 、 CO_2 與 N_2

4-3 熱力學在分子生物分析與微生物培養研究上的印證

本研究所量測的化學分析樣本與做為分子生物分析和微生物培養研究之用的樣本為同一時間、同一個溫泉池所取得的，所以藉由分析結果間的相互比對，能夠評估自由能與能量通量計算結果的適用性。反過來說，自由能的計算能夠預測出溫泉水中所有可能發生的化學反應，除了能與分子生物分析結果相應證，也可以對於無培養資料之分子生物訊號，推測該微生物族群可能使用的代謝作用。此外也提供給微生物培養策略上一些重要資訊，先從自由計算結果推測溫泉水中可能存在的代謝反應，再設計適當的培養基成分，以培養出使用該代謝反應的微生物。另一方面，計算不同代謝反應所能提供的能量通量，則能依據微生物不同生存狀態所需要的能量通量，進一步估算出環境中使用此代謝反應而處於該生存狀態的微生物數量。

本節將討論台灣北部、東部與南部三個地區的分生生物資料、微生物培養工作結果（附錄表五）與反應自由能、能量通量計算及微生物數量估計結果（附錄表六）之間的符合與矛盾之處。

4-3-1 北部溫泉 — 礪山

礪山溫泉水樣的分子生物分析結果發現接近 *Vulcanisaeta distribute* 和 *Sulfolobus tokodaii* 的 DNA 序列存在，所佔比例約達 100% (附錄表五)。

Vulcanisaeta distribute 能氧化有機碳並還原 S^0 來代謝，本研究所計算的化學反應式中涉及到有機碳氧化與 S^0 還原的反應有 S60、S61、S62 與 S63 四個，前兩者分別是甲酸與乙酸的氧化，後兩者為丙酸氧化。但是於礪山地區的溫泉水中，甲、乙、丙酸均低於偵測極限，若設定一低於偵測極限濃度進行計算，也只有使用甲酸的代謝作用可以自然發生，所以推測接近 *Vulcanisaeta distribute* 的微生物可能是利用其他種有機酸的氧化來進行代謝，而該有機酸並不在本研究的分析範圍之內。

Sulfolobus tokodaii 能將有機碳或 S^0 氧化並將 $O_{2(aq)}$ 還原，為本研究所計算的 O2、O3、O4 與 O13 四個反應。此四反應之自由能值皆小於 $-88.6 \text{ kJ/mole } e^-$ 。能量通量之計算，由於礪山溫泉水中的甲、乙、丙酸濃度均低於偵測極限，所以無法計算通量值。O13 反應提供的能量通量則大於生長狀態所需的通量 (表 4-2)，且能夠提供約 3000 個微生物細胞生長 (附表六 a)。代表熱力學原理所計算出來的自由能和能量通量與接近 *Sulfolobus tokodaii* 之微生物的存在相互支持。

4-3-2 北部溫泉 — 龍鳳谷

龍鳳谷溫泉水樣的分子生物分析結果發現接近 *Caldisphaera lagunensis*、*Thermocodium modesties*、*Sulfolobus metallicus* 和 *Metallosphaera sedula* 的 DNA 序列存在，所佔比例約達 53% (附錄表五)。

Caldisphaera lagunensis 與 *Thermocodium modesties* 皆能氧化有機碳並還原 S^0 ，本研究所計算的化學反應式中涉及到有機碳氧化與 S^0 還原的反應有 S60、S61、S62 與 S63 四個，前兩者分別是甲酸與乙酸的氧化，後兩者為丙酸氧化。但是於龍鳳谷地區的溫泉水中，甲、乙酸低於偵測極限，若設定甲、乙酸為一低於偵測極限濃度以及丙酸為現地測量濃度來進行計算，其自由能計算結果

分別為 7.7、-9.2、-18.6 與 -75.5 kJ/mole e⁻，這表示當 S⁰ 存在的情況下，S60 不會自然發生，而 S61、S62 與 S63 會自然發生於溫泉之中。其中 S62 的能量通量計算結果為 8.07E-14 kJ/sec，大於生長狀態所需的通量 (表 4-2)，且能夠提供約 100 多個微生物細胞生長 (附表六 b)。自由能和能量通量計算結果與溫泉中存在接近 *Caldisphaera lagunensis* 與 *Thermocodium modesties* 兩物種的微生物相互支持。

Sulfolobus metallicus 能夠將 S⁰ 氧化與還原 O_{2(aq)}，以反應 O13 表示。若設定一低於偵測極限濃度進行計算，其自由能計算結果為 -93.4 kJ/mole e⁻，能量通量計算為 2.96E-13 kJ/sec，大於生長狀態所需的通量 (表 4-2)，且能夠提供約 500 個微生物細胞生長 (附表六 b)。顯示出接近 *Sulfolobus metallicus* 之微生物存在於龍鳳谷溫泉的事實與自由能和能量通量計算結果相符。

Metallosphaera sedula 能夠將 H_{2(aq)}、有機碳、Fe²⁺、S⁰ 與 S²⁻ 氧化，並將 O_{2(aq)} 還原來進行代謝。本研究所計算的化學反應式中涉及到該微生物代謝方式之反應有 O1、O2、O3、O4、O7、O13、O14 與 O15。其自由能計算的結果，僅有 O7 的自由能值為 -4.7 kJ/mole e⁻，其餘 7 個反應的自由能值皆小於 -76 kJ/mole e⁻。其中能夠計算通量之反應有 O1、O4、O13、O14 與 O15，所提供的能量通量以 O4 的最大，其值為 4.45E-13 kJ/sec，能夠提供約 700 多個微生物細胞生長；以 O1 的能量通量最小，其值為 1.69E-15 kJ/sec，能夠提供約 3000 多個微生物細胞處於維持狀態 (附表六 b)。接近 *Metallosphaera sedula* 之微生物存在於龍鳳谷溫泉中的事實與自由能和能量通量計算結果相符合。

4-3-3 北部溫泉 — 硫磺谷

硫磺谷溫泉水樣的分子生物分析結果發現接近 *Caldisphaera lagunensis*、*Sulfolobus metallicus* 和 *Acidianus infernus* 的 DNA 序列存在，所佔比例約達 41% (附錄表五)。

Caldisphaera lagunensis 可以利用有機碳的氧化與 S⁰ 還原的反應來代謝，

本研究所計算的化學反應式中涉及到有機碳氧化與 S^0 還原的反應有 S60、S61、S62 與 S63，其自由能計算結果分別為 16.8、-0.9、-11.0 與 -71.7 kJ/mole e^- 。能量通量計算結果中，S62 與 S63 的通量值皆大於 $1.27E-13$ kJ/sec，能夠支持約 100 多個微生物細胞處於生長狀態（附表六 c）。因此接近 *Caldisphaera lagunensis* 之微生物最有可能利用丙酸氧化來進行代謝，而甲酸與乙酸的氧化反應，必須要有足夠的濃度時才有可能會被利用。

Sulfolobus metallicus 能運用 S^0 氧化與 $O_{2(aq)}$ 還原來進行代謝，其反應式為 O13，自由能值為 -87.5 kJ/mole e^- ，而 O13 的反應能量通量值為 $9.27E-13$ kJ/sec，能夠支持約 800 多個微生物細胞處於生長狀態（附表六 c）。因此反應自由能計算結果與接近 *Sulfolobus metallicus* 之微生物存在於硫磺谷溫泉的事實相符合。

Acidianus infernos 能氧化 $H_{2(aq)}$ 、 S^0 與還原 $O_{2(aq)}$ ，即使用反應 O1 與 O13，也能夠還原 $H_{2(aq)}$ 與氧化 S^0 ，即使用反應 S59。三反應之自由能值分別為 -100.3、-87.5 與 -7.4 kJ/mole e^- ，且以 O13 的反應能量通量最大，其值為 $9.27E-13$ kJ/sec，能夠支持約 800 多個微生物細胞處於生長狀態；以 S59 的反應能量通量最小，其值為 $1.74E-15$ kJ/sec，能夠支持約 1500 多個微生物細胞處於維持狀態（附表六 c）。上述三種代謝之自由能和能量通量計算結果與接近 *Acidianus infernos* 之微生物存在於溫泉中的事實相符合。

4-3-4 北部溫泉 — 富源

富源溫泉水樣的分子生物分析結果發現接近 *Sulfolobus metallicus*、*Acidianus infernos* 和 *Acidianus manzaensis* 的 DNA 序列存在，所佔比例約達 100%（附錄表五）。

Sulfolobus metallicus 能夠利用 S^0 氧化與 $O_{2(aq)}$ 還原的反應來進行代謝，使用化學反應 O13，其自由能值為 -86.5 kJ/mole e^- ，能量通量值為 $1.73E-12$ kJ/sec，能夠支持約 6000 多個微生物細胞處於生長狀態（附表六 f）。接近 *Sulfolobus metallicus* 之微生物生存於富源溫泉中的事實與自由能和能量通量計算結果相

符合。

Acidianus infernus 能氧化 $H_{2(aq)}$ 、 S^0 與還原 $O_{2(aq)}$ ，使用反應 O1、O13，也能夠還原 $H_{2(aq)}$ 與氧化 S^0 ，使用反應 S59，但由於富源溫泉中的 $H_{2(aq)}$ 濃度低於偵測極限，所以 O1 與 S59 不列入自由能與能量通量的討論。O13 的自由能計算結果推估為 $-86.5 \text{ kJ/mole } e^-$ ，能量通量值為 $1.73E-12 \text{ kJ/sec}$ ，能夠提供約 6000 多個微生物細胞生長（附表六 f）。這代表著自由能和能量通量計算結果與接近 *Acidianus infernus* 之微生物的存在可以相互支持。

Acidianus manzaensis 能夠運用 O1、O2、O3、O4、O13、Fe80、Fe84、Fe88、Fe92 與 Fe100 等反應進行代謝。由於富源溫泉中的 $H_{2(aq)}$ 濃度低於偵測極限，所以 O1 與 Fe80 不列入自由能的討論，其餘反應的自由能計算結果皆小於 $-59.4 \text{ kJ/mole } e^-$ 。其中能夠計算通量之反應有 O13 與 Fe100，能量通量值皆大於 $3.66E-13 \text{ kJ/sec}$ ，能夠提供約 1000 多個微生物細胞生長（附表六 f）。自由能和能量通量計算結果與接近 *Acidianus manzaensis* 之微生物存在於富源溫泉中相互支持。



4-3-5 北部溫泉 — 磺港

磺港溫泉水樣的分子生物分析結果發現接近 *Caldisphaera lagunensis*、*Sulfolobus metallicus*、*Acidilobus aceticus* 和 *Acidianus infernus* 的 DNA 序列存在，所佔比例約達 87%（附錄表五）。

Caldisphaera lagunensis 與 *Acidilobus aceticus* 皆能利用有機碳的氧化與 S^0 的還原來代謝，本研究所計算的化學反應式中涉及到有機碳氧化與 S^0 還原的反應有 S60、S61、S62 與 S63，其自由能的計算結果分別為 -28.9 、 -38.6 、 -42.1 與 $-62.8 \text{ kJ/mole } e^-$ 。雖然自由能計算結果皆為負值，但該處溫泉未偵測到甲、乙、丙酸，表示接近 *Caldisphaera lagunensis* 與 *Acidilobus aceticus* 之微生物可能利用其他種類的有機碳來代謝。

Sulfolobus metallicus 能夠利用 S^0 氧化與 $O_{2(aq)}$ 還原的反應來進行代謝，即

使用化學反應 O13，該反應之自由能值為 $-89.1 \text{ kJ/mole e}^-$ ，提供之能量通量為 $1.87\text{E-}12 \text{ kJ/sec}$ ，可支持約 4000 多個微生物細胞處於生長狀態 (附表六 f)。自由能和能量通量計算結果與接近 *Sulfolobus metallicus* 之微生物存在於磺港溫泉的事實相符合。

Acidianus infernus 能氧化 $\text{H}_{2(\text{aq})}$ 、 S^0 與還原 $\text{O}_{2(\text{aq})}$ ，使用反應 O1 與 O13，也能夠還原 $\text{H}_{2(\text{aq})}$ 與氧化 S^0 ，使用反應 S59。三反應的自由能計算結果分別為 -99.6 、 -89.1 與 $-41.6 \text{ kJ/mole e}^-$ ，且以 O13 的反應能量通量最大，其值為 $1.87\text{E-}12 \text{ kJ/sec}$ ，能夠支持約 4000 多個微生物細胞處於生長狀態；以 S59 的反應能量通量最小，其值為 $9.32\text{E-}16 \text{ kJ/sec}$ ，能夠支持約 2000 多個微生物細胞處於維持狀態 (附表六 f)。磺港溫泉中，接近 *Acidianus infernus* 之微生物的存在與自由能和能量通量計算結果相符合。

4-3-6 北部溫泉 — 小油坑

小油坑溫泉水樣的微生物培養結果發現接近 *Acidianus manzaensis* 的 DNA 序列之微生物存在 (附錄表五)。*Acidianus manzaensis* 能夠氧化 $\text{H}_{2(\text{aq})}$ 、 S^0 或有機碳，並還原氧氣或 Fe^{3+} ，即運用 O1、O2、O3、O4、O13、Fe80、Fe84、Fe88、Fe92 與 Fe100 等反應進行代謝。實驗室的培養工作以 Fe100 作為其配製培養基的代謝策略，該反應之自由能的計算結果為 $-56.6 \text{ kJ/mole e}^-$ ，能量通量為 $2.35\text{E-}14 \text{ kJ/sec}$ ，且該能量通量能夠支持約 60000 多個微生物細胞維持生理機能而不生長 (附表六 g)。其餘的 9 個反應之自由能值皆小於 $-47.3 \text{ kJ/mole e}^-$ 。其中能夠計算能量通量的反應有 O1、O13、Fe80 與 Fe100，以 O13 反應的能量通量值最大，其值為 $6.93\text{E-}13 \text{ kJ/sec}$ ，且該能量通量能夠提供約 2000 個微生物細胞生長；以 Fe80 反應的能量通量值最大，其值為 $3.24\text{E-}15 \text{ kJ/sec}$ ，且該能量通量能夠提供約 9000 個微生物細胞處於維持狀態 (附表六 g)。自由能和能量通量計算結果與微生物培養工作的結果是相符合的。

4-3-7 東部溫泉 — 紅葉

紅葉溫泉水樣的分子生物分析結果發現接近 *Uncultured Desulfurococcales* 的 DNA 序列存在，所佔古菌比例達 55% (附錄表五)。*Desulfurococcales* 一般能利用氧化 $H_{2(aq)}$ 或有機碳並還原 S^0 來進行代謝，可以使用反應 S59、S60、S61、S62 與 S63。由於缺乏沈澱礦物分析資料， S^0 亦非泉水中可以穩定存在的礦物相， $H_{2(aq)}$ 濃度也低於偵測極限，因此自由能的計算結果僅供參考。其中反應 S61、S62 與 S63 均為微生物可利用的自發性反應，此結果支持接近 *Desulfurococcales* 之微生物的存在。

紅葉溫泉水樣的分子生物分析結果發現接近 *Aquificales* 的 DNA 序列存在，所佔細菌比例達 100% (附錄表五)。*Aquificales* 能利用 $H_{2(aq)}$ 的氧化與 $O_{2(aq)}$ 的還原來代謝，使用反應 O1。由於當地之 $H_{2(aq)}$ 濃度低於偵測極限，所以假設 $1E-10 \mu M$ 為氫氣濃度之自由能值計算結果僅供參考，但其值仍小於最小自由能需求帶，表示該反應能提供能量給接近 *Aquificales* 之微生物使用。

4-3-8 南部溫泉 — 新養女湖II

新養女湖溫泉水樣的分子生物分析結果發現接近 *Methanosaeta thermophila* 的 DNA 序列佔古菌比例達 74% (附錄表五)。*Methanosaeta thermophila* 能產生甲烷，可使用反應 M67 與 M68，其自由能的計算結果分別為 -34.7 與 -8.8 kJ/mole e^- 。其中反應的能量通量值皆大於 $8.43E-15$ kJ/sec，能夠提供約 2000 多個微生物細胞維持生長 (附表六 p)。自由能和能量通量的計算結果支持接近 *Methanosaeta thermophila* 之微生物的存在。

4-3-9 南部溫泉 — 關仔嶺

關仔嶺溫泉水樣的微生物培養結果發現接近 *Thermodesulfobacterium commune* 之 DNA 序列之微生物存在 (附錄表五)。*Thermodesulfobacterium commune* 能利用 $H_{2(aq)}$ 或有機碳的氧化與 SO_4^{2-} 的還原來代謝，使用反應 S53、

S54、S55、S56 與 S57，其自由能的計算結果分別為 -16.8、-21.2、-19.0、-19.5 與 -20.6 kJ/mole e⁻，均為微生物可利用之代謝反應。能量通量值則以反應 S56 較大，其值為 8.84E-12 kJ/sec，能夠提供約 4 萬個微生物細胞維持生長；以反應 S53 較小，其值為 1.45E-15 kJ/sec，能夠提供約 7000 個微生物細胞處於維持狀態 (附表六 n)。自由能和能量通量計算結果支持接近 *Thermodesulfobacterium commune* 之微生物的存在。

4-4 溫度、化學物種濃度變化與自由能變化

由於本研究所收集的溫泉樣本是定點的單次採樣，所以分析的化學資料、計算的自由能值與能量通量僅代表該溫泉水在某一個時間的狀態，而無法得知當溫泉水中的各種化學物種濃度或泉溫變動時，是否影響到微生物的生存。藉著調整反應式中化學物種濃度、pH 值和溫度來討論自由能值的變化，可評估微生物在這些變動裡是否能夠繼續生存於該溫泉水中。本節之討論，根據已有的分子生物分析、微生物培養研究資料，挑選出確定存在於溫泉池中的微生物代謝反應 (見附錄表五)，再考慮前人在北台灣溫泉中長期分析的陰陽離子和 pH 值之變化情形 (表 2-5)，或是環境中可能發生的合理變動，設定化學物種濃度變化的範圍，做為本研究討論自由能值變化的依據。以下選擇北部火山區之磺山、龍鳳谷、硫磺谷、小油坑溫泉、東部變質岩區之紅葉和南部沉積岩區之新養女湖等六處溫泉討論之。

4-4-1 北台灣溫泉 — 磺山

Vulcanisaeta distribute 能夠利用有機碳當作電子提供者、元素硫當作電子接受者來進行代謝作用，是分子生物分析得到的 DNA 訊號所接近的種屬。但由 4-3-1 節的討論可知，根據現地條件計算 *Vulcanisaeta distribute* 可能使用之反應的自由能，均不是自發反應。圖 4-2 顯示改變丙酸濃度時，自由能值隨丙酸濃度增加而變得更負，隨溫泉水溫度增加也變得更負，表示丙酸氧化、元素硫還原的

反應，在溫度高、丙酸濃度高時，可以成為自發反應，但仍僅接近最小自由能需求的下限。圖 4-3 顯示高溫時能量通量隨丙酸濃度增加而變大，表示此一反應在高溫與丙酸濃度高時，足以提供微生物處於生長狀態所需要的通量。由上述評估可知，當環境有很大的變動時，此一使用丙酸與元素硫的代謝反應才可能被接近 *Vulcanisaeta distribute* 之微生物所使用。由於溫泉水中仍有未鑑別之有機碳的存在，因此推論在環境變化不大的情形下，分子生物訊號接近 *Vulcanisaeta distribute* 的微生物若使用與 *Vulcanisaeta distribute* 相似代謝反應，則可能是利用其他本研究沒有測量的有機物做為電子提供者。

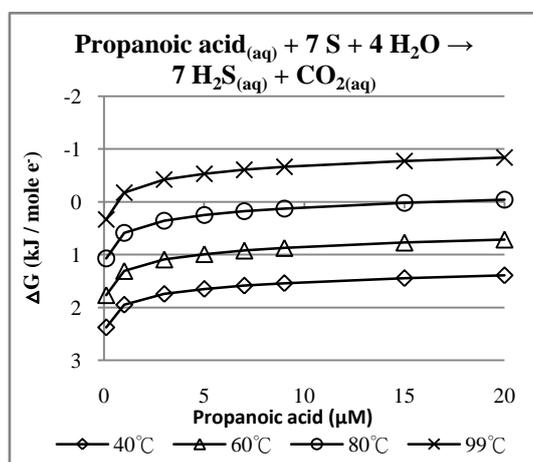


圖 4-2、礪山溫泉水中，丙酸氧化與元素硫還原反應之自由能的變化。計算隨溫度和丙酸濃度改變的自由能變化，其他資料設定為現地測量值。

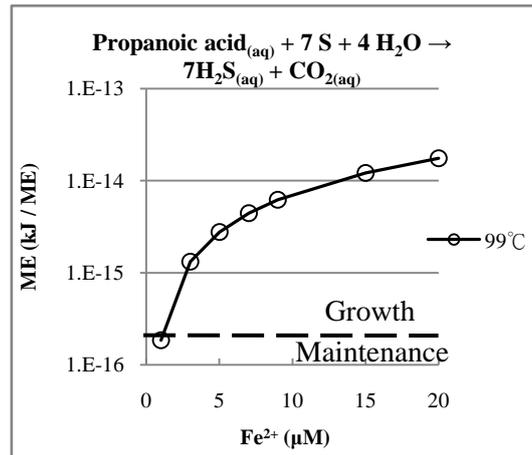


圖 4-3、磺山溫泉水中，丙酸氧化與元素硫還原反應之能量通量變化。計算 99 °C 下隨丙酸濃度改變的能量通量變化，其他資料設定為現地測量值。圖中虛線代表微生物生長狀態不同所需要的能量通量分界線，通量值落於分界線之上代表此通量可支持微生物處於生長狀態，分界線之下則代表此通量可支持微生物處於維持狀態。



Sulfolobus tokodaii 亦是分子生物分析得到的接近種屬，它能夠行好氧有機酸或元素硫氧化反應以取得能量。圖 4-4 說明該反應在氧氣濃度、酸鹼度和溫度變動時的自由能變化趨勢，結果顯示隨自由能值溶氧濃度增高而變得更負、隨氫離子濃度和溫度增高而增大。圖 4-5 顯示氧氣濃度、酸鹼度和溫度變動時，能量通量的變化趨勢，可知能量通量隨溶氧濃度增高、氫離子濃度降低和溫度增高而增加，但程度不同。在所計算的 O_{2(aq)} 濃度、酸鹼度與溫度的變化範圍內，反應均能自然發生於溫泉中，不僅大幅超出微生物的最小自由能需求，且提供的能量通量都能支持微生物處於生長狀態。即使以溶氧濃度為 1E-10 μM、pH 值為 1.8、溫泉水溫為 99°C 等嚴苛條件計算自由能，其值為 -63.9 kJ/mole e⁻，該反應仍可持續發生。

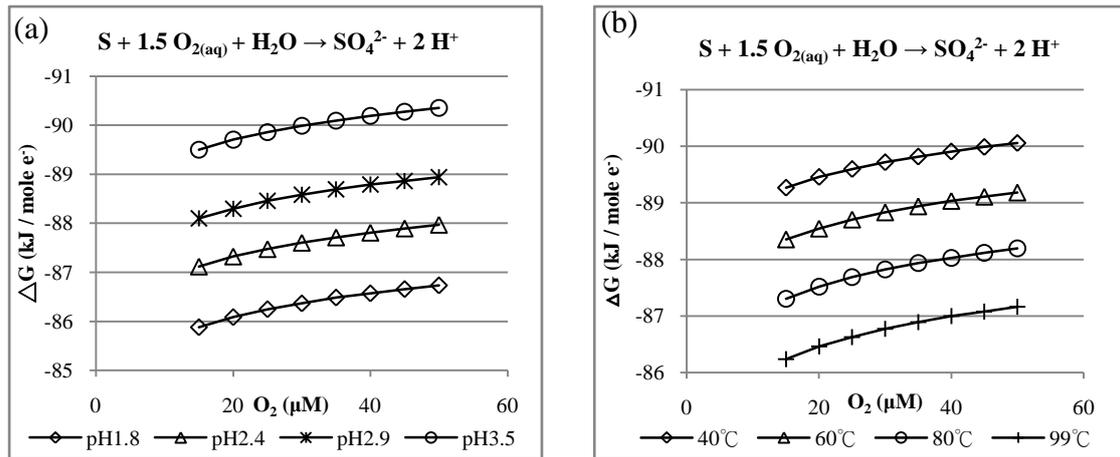


圖 4-4、礪山溫泉水中，元素硫氧化與氧氣還原反應之自由能變化。(a) 酸鹼度與溶氧濃度改變時自由能的變化；(b) 溫度與溶氧濃度改變時自由能的變化。計算設定的其他條件為現地測量值。

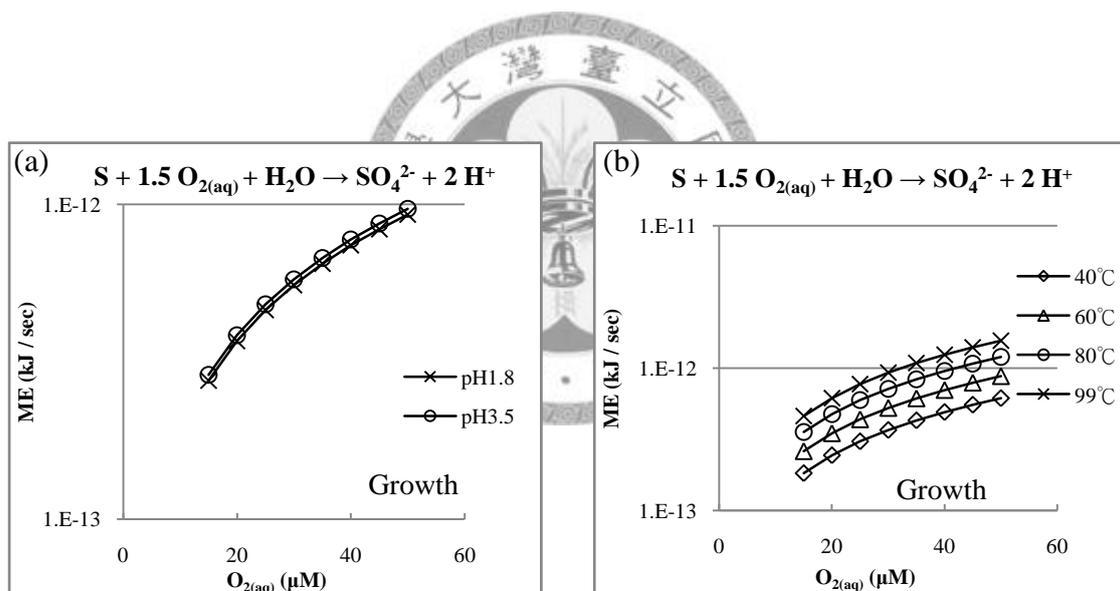


圖 4-5、礪山溫泉水中，元素硫氧化與氧氣還原反應之能量通量變化。(a) 酸鹼度與溶氧濃度改變時能量通量的變化情形，計算結果皆大於微生物生長狀態所需的通量值；(b) 溫度與溶氧濃度改變時能量通量的變化情形，計算結果皆大於微生物生長能量所需的通量值。計算設定的其他條件為現地測量值。

4-4-2 北台灣溫泉 — 龍鳳谷

Caldisphaera lagunensis、*Thermocladium modestius* 與 *Metallosphaera sedula* 是分子生物分析得到的接近種屬，皆能夠利用氧氣來氧化有機酸進行代謝。圖 4-6 顯示丙酸當作電子提供者與氧氣當作電子接受者之反應自由能，在丙酸濃度、酸鹼度和泉溫變化時的變化趨勢，可知自由能值隨丙酸濃度增高而愈負、隨 pH 值變大和溫度增加而增大。圖 4-7 顯示能量通量隨溫度降低與丙酸濃度增加而變大，當 pH 值改變時的變化非常小。在所計算的丙酸濃度、酸鹼度與溫度的變化範圍內，該反應能持續供微生物利用，且提供能量通量支持微生物維持生長狀態。即使以丙酸濃度為 $1\text{E}-10 \mu\text{M}$ 、pH 值為 5.5 與溫泉水溫為 99°C 之嚴苛條件計算自由能，其值為 $-96.8 \text{ kJ/mole } e^-$ ，該反應仍可持續發生。

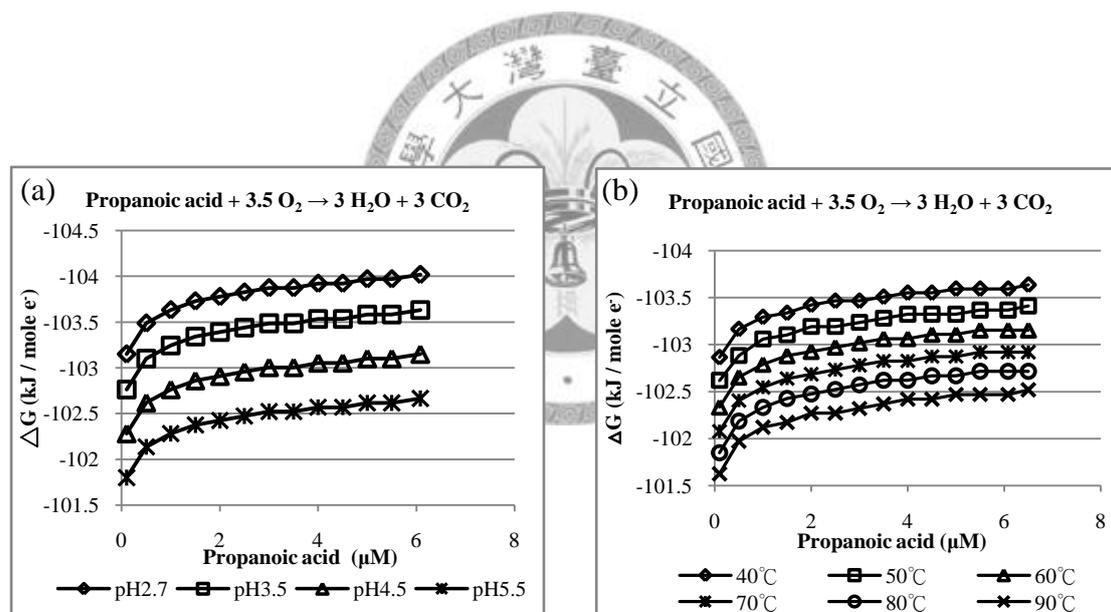


圖 4-6、龍鳳谷溫泉水中，丙酸與氧氣反應之自由能變化。(a) 酸鹼度與丙酸濃度改變時自由能的變化；(b) 溫度與丙酸濃度改變時自由能的變化。計算設定的其他條件為現地測量值。

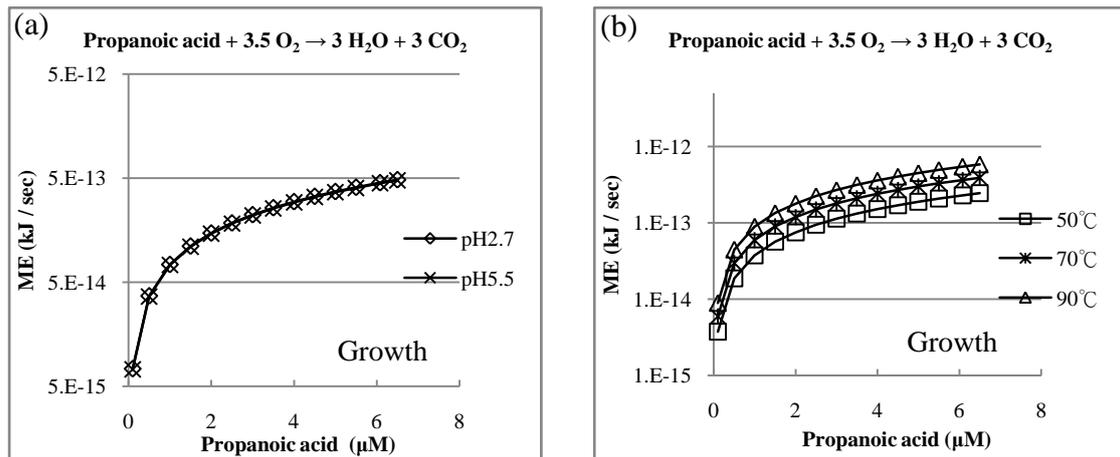


圖 4-7、龍鳳谷溫泉水中，丙酸與氧氣反應之能量通量變化。(a) 酸鹼度與丙酸濃度改變時能量通量的變化情形，計算結果皆大於微生物處於生長狀態所需的通量值；(b) 溫度與丙酸濃度改變時能量通量的變化情形，計算結果皆大於微生物處於生長狀態所需的通量值。計算設定的其他條件為現地測量值。

Metallosphaera sedula 也是龍鳳谷溫泉中分子生物分析得到的接近種屬，可以利用氧氣氧化 Fe^{2+} 。圖 4-8 顯示該反應之自由能隨 Fe^{2+} 濃度和 H^+ 濃度增加而變負、隨溫度增加而變大。圖 4-9 中顯示能量通量隨 Fe^{2+} 濃度和 H^+ 濃度增加而變大、也隨溫度增加而變大。可知在此 Fe^{2+} 濃度、酸鹼度與溫度的改變範圍內，此代謝反應能夠持續發生於龍鳳谷溫泉水中，且使用此代謝反應的微生物能維持生長狀態。即使以 Fe^{2+} 濃度為 $1\text{E-}7 \mu\text{M}$ 、pH 值為 5.5 與溫泉水溫為 99°C 之嚴苛條件計算自由能，其值為 -9.8 kJ/mole e^- ，表示只要 Fe^{2+} 濃度大於 $1\text{E-}7 \mu\text{M}$ 此反應可持續為微生物使用。

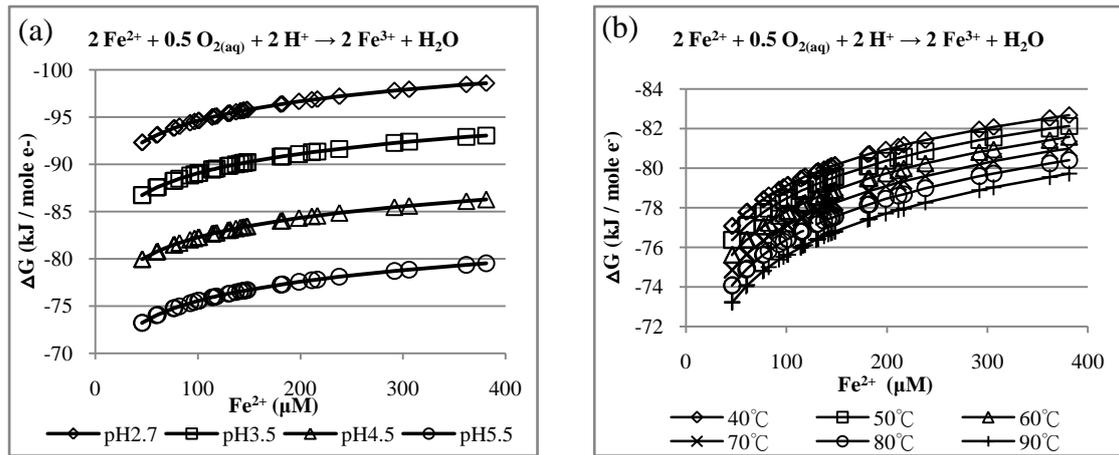


圖 4-8、龍鳳谷溫泉水中， Fe^{2+} 氧化反應之自由能變化。(a) 酸鹼度與 Fe^{2+} 濃度改變時自由能的變化；(b) 溫度與 Fe^{2+} 濃度改變時自由能的變化。計算設定的其他條件為現地測量值， Fe^{2+} 濃度介於 45.7 到 362.0 μM 之間。

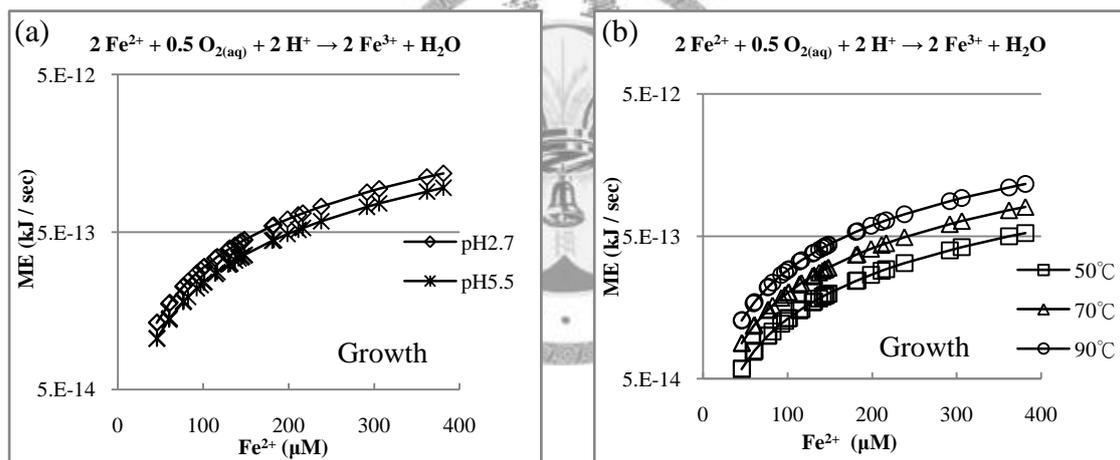


圖 4-9、龍鳳谷溫泉水中， Fe^{2+} 與氧氣反應之能量通量變化。(a) 酸鹼度與 Fe^{2+} 濃度改變時能量通量的變化情形，計算結果皆大於微生物處於生長狀態所需的通量值；(b) 溫度與 Fe^{2+} 濃度改變時能量通量的變化情形，計算結果皆大於微生物處於生長狀態所需的通量值。計算設定的其他條件為現地測量值。

4-4-3 北台灣溫泉 — 硫磺谷

Caldisphaera lagunensis 是分子生物分析得到的接近種屬，能將有機碳當作電子提供者、元素硫當作電子接受者來進行代謝反應。圖 4-10 顯示丙酸氧化元素硫還原反應之自由能隨丙酸濃度、酸鹼度和溫度改變的變化情形，可知自由能值隨丙酸濃度和溫度增加而變負、隨 H^+ 濃度增加而變大。圖 4-11 顯示能量通量隨丙酸濃度和溫度的增加而變大、隨 H^+ 濃度增加而略微變小。在此丙酸濃度、溫度與酸鹼度的變化範圍內，該反應能夠自然發生，溫度高於 $60^{\circ}C$ 時可微幅超出微生物的最小自由能需求，但丙酸濃度仍需大於特定濃度（約為 $0.1 \mu M$ ），才能支持微生物維持生長狀態。以丙酸濃度 $1E-4 \mu M$ 與 pH 值 4.2 之嚴苛條件計算自由能，其值為 $-8.3 \text{ kJ/mole } e^-$ ，表示在丙酸濃度大於 $1E-4 \mu M$ 之情況下，該反應能持續發生於此熱泉中。若是溫度低於 $60^{\circ}C$ ，設定酸鹼值為採樣時酸鹼值的條件下，該反應雖能夠自然發生，但所提供的能量落入最小自由能需求帶中（圖 4-6b）。

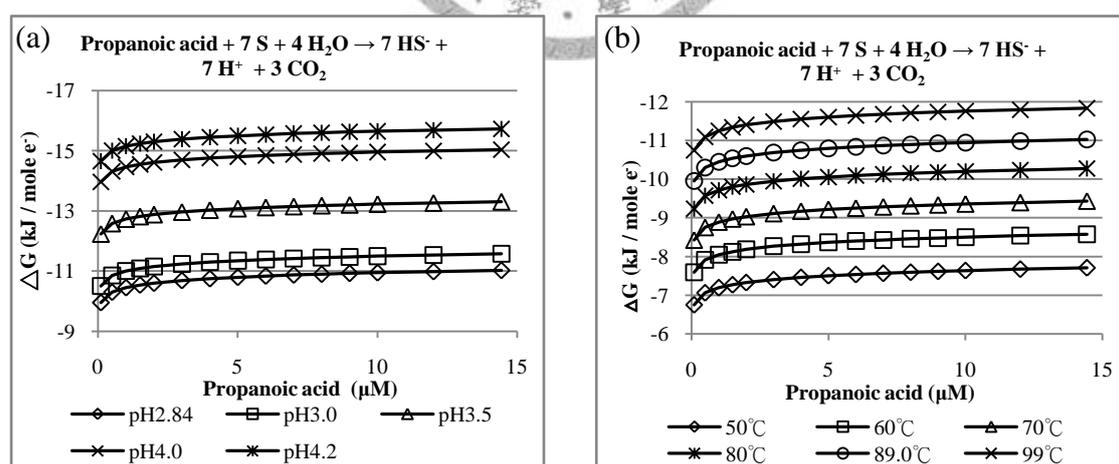


圖 4-10、硫磺谷溫泉水中，丙酸與元素硫反應之自由能變化。(a) 酸鹼度與丙酸濃度改變時自由能的變化；(b) 溫度與丙酸濃度改變時自由能的變化。計算設定的其他條件為現地測量值。

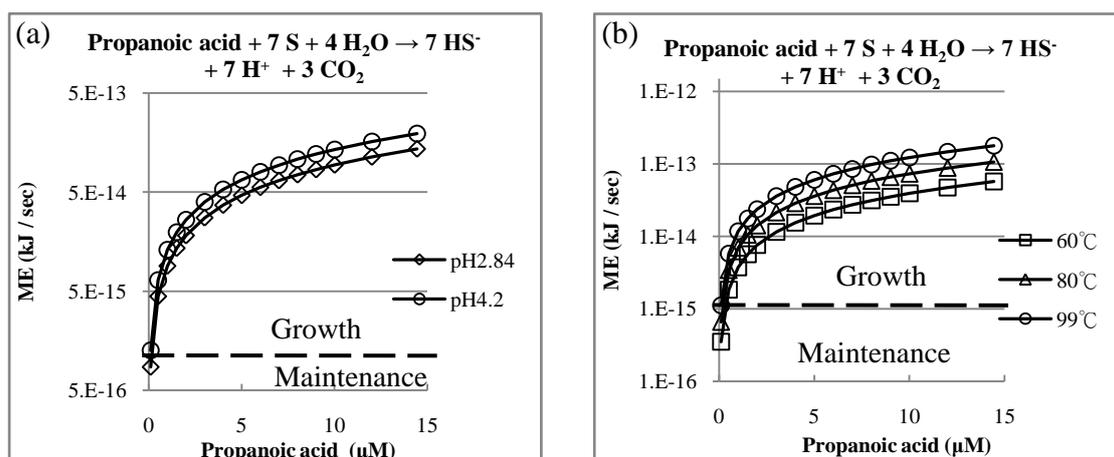


圖 4-11、硫磺谷溫泉水中，丙酸與元素硫反應之能量通量變化。(a) 酸鹼度與丙酸濃度改變時能量通量的變化；(b) 溫度與丙酸濃度改變時能量通量的變化。計算設定的其他條件為現地測量值。圖中虛線代表微生物不同生長狀態所需要的能量通量分界線，通量值落於分界線之上代表此通量可支持微生物處於生長狀態，分界線之下則代表此通量可支持微生物處於維持狀態。

4-4-4 北台灣溫泉 — 小油坑

由微生物培養工作所培養出來的分子生物訊號接近 *Acidianus manzaensis* 微生物有多元化的代謝途徑，包括了將元素硫氧化與 Fe^{3+} 還原以產生 SO_4^{2-} 與 Fe^{2+} 之反應、元素硫氧化與氧氣還原產生 SO_4^{2-} 之反應，以及以氧氣氧化有機碳與而產生二氧化碳之反應。圖 4-12 顯示元素硫氧化與 Fe^{3+} 還原反應之自由能隨 Fe^{2+} 、 SO_4^{2-} 濃度、酸鹼度和溫度改變的情形，可知此代謝反應之自由能隨 Fe^{2+} 、 SO_4^{2-} 與 H^+ 濃度的增加而變大、隨溫度增加而變負。圖 4-13 顯示此反應的能量通量隨 Fe^{2+} 、 SO_4^{2-} 濃度和溫度的增加而變大，隨 H^+ 濃度增加而變小。在所計算的 pH 值、溫度、 Fe^{2+} 濃度與 SO_4^{2-} 濃度範圍內，此反應能持續發生於小油坑溫泉水中，並使得該微生物維持生長狀態。

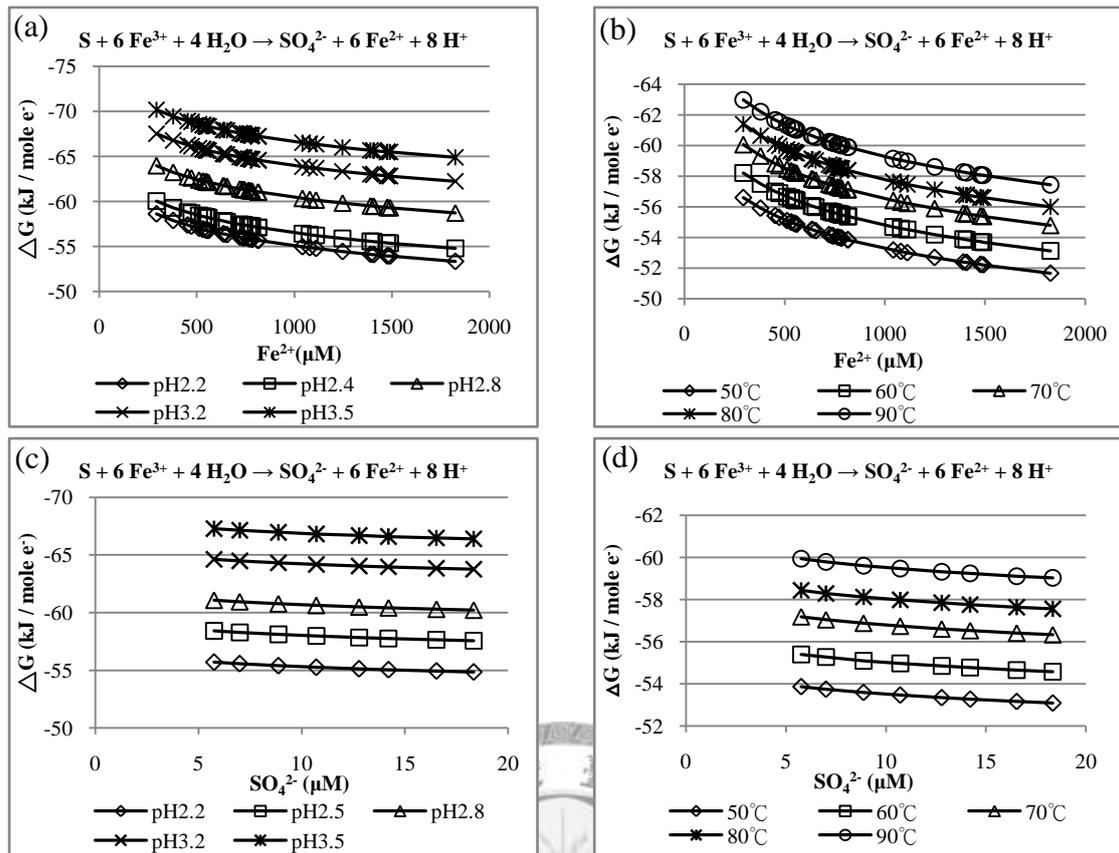


圖 4-12、小油坑溫泉水中，元素硫與 Fe^{3+} 之反應自由能變化。(a) 不同酸鹼度下 Fe^{2+} 濃度改變時的自由能變化；(b) 不同溫度下 Fe^{2+} 濃度改變時的自由能變化；(c) 不同酸鹼度下 SO_4^{2-} 濃度改變時的自由能變化；(d) 不同溫度下 SO_4^{2-} 濃度改變時的自由能變化。計算設定的其他條件為現地測量值。

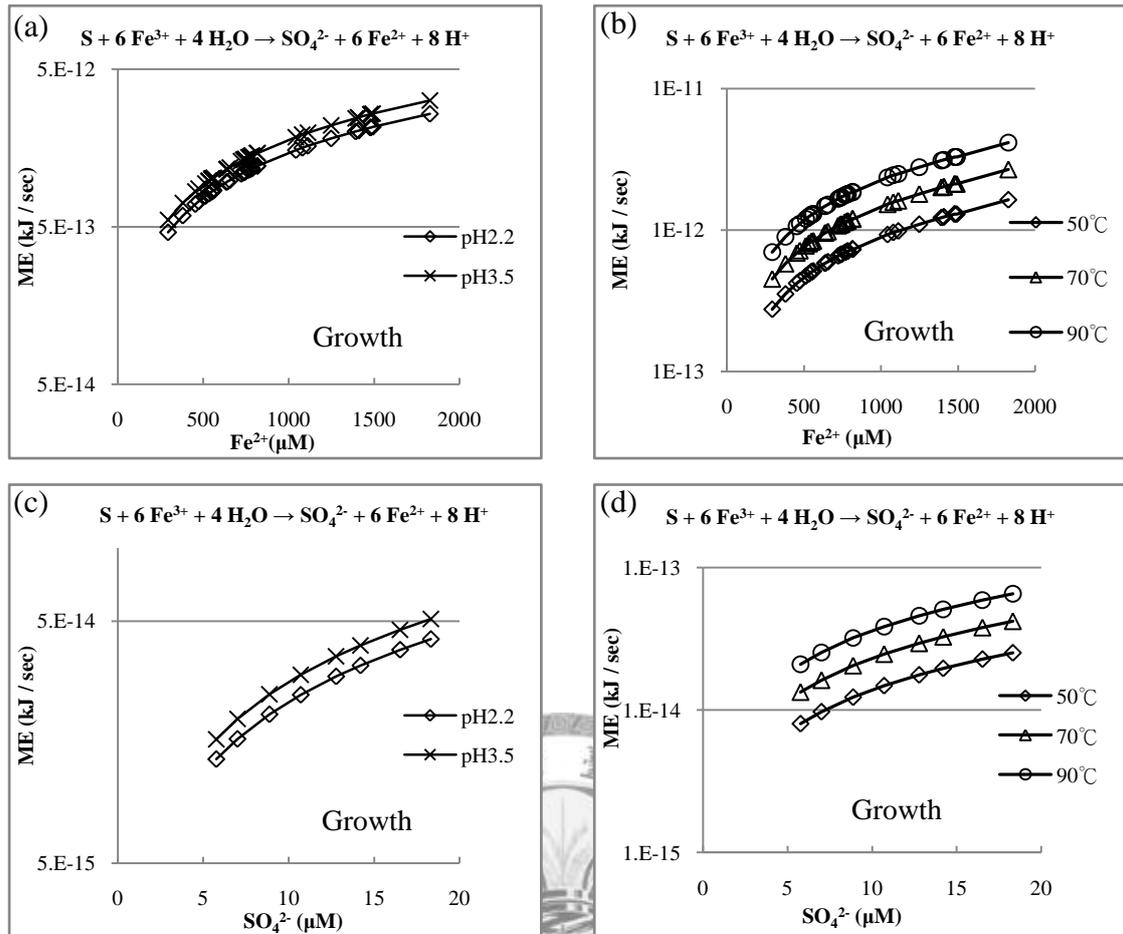


圖 4-13、小油坑溫泉水中，元素硫與 Fe^{3+} 之反應能量通量變化。(a) 不同酸鹼度下 Fe^{2+} 濃度改變時的能量通量變化，計算結果皆大於微生物處於生長狀態所需的通量值；(b) 不同溫度下 Fe^{2+} 濃度改變時的能量通量變化，計算結果皆大於微生物處於生長狀態所需的通量值；(c) 不同酸鹼度下 SO_4^{2-} 濃度改變時的能量通量變化，計算結果皆大於微生物處於生長狀態所需的通量值；(d) 不同溫度下 SO_4^{2-} 濃度改變時的能量通量變化，計算結果皆大於微生物處於生長狀態所需的通量值。計算設定的其他條件為現地測量值。

圖 4-14 顯示以氧氣氧化元素硫反應之自由能隨溶氧濃度、酸鹼度、溫度改變的變化，可見自由能隨 $O_{2(aq)}$ 濃度增加而變負、隨 H^+ 濃度和溫度增加而自由變大。圖 4-15 顯示該反應之能量通量隨 $O_{2(aq)}$ 濃度的增加而變大、隨產物 H^+ 濃度的增加而略微變小、隨溫度增加而變大。在所計算的 pH 值、溫度、 Fe^{2+} 濃度與 SO_4^{2-} 濃度範圍內，自由能值皆為負值，且提供之能量通量可支持該微生物維持生長狀態。以 $O_{2(aq)}$ 濃度為 $1E-10 \mu M$ 、pH 值為 2.2 與溫泉水溫為 $99^\circ C$ 之嚴苛條件計算自由能，其值為 $-54.1 \text{ kJ/mole } e^-$ ，亦遠小於最小自由能需求範圍，代表著此反應能持續發生於小油坑溫泉水中。

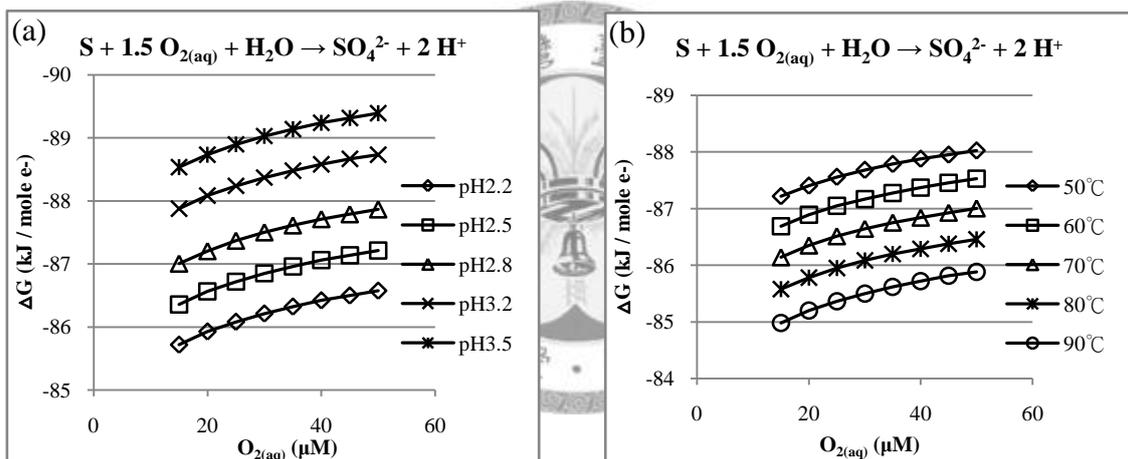


圖 4-14、小油坑溫泉水中， $O_{2(aq)}$ 氧化 S^0 反應之自由能變化。(a) 不同酸鹼度下 $O_{2(aq)}$ 濃度改變時的自由能變化；(b) 不同溫度下 $O_{2(aq)}$ 濃度改變時的自由能變化。計算設定的其他條件為現地測量值。

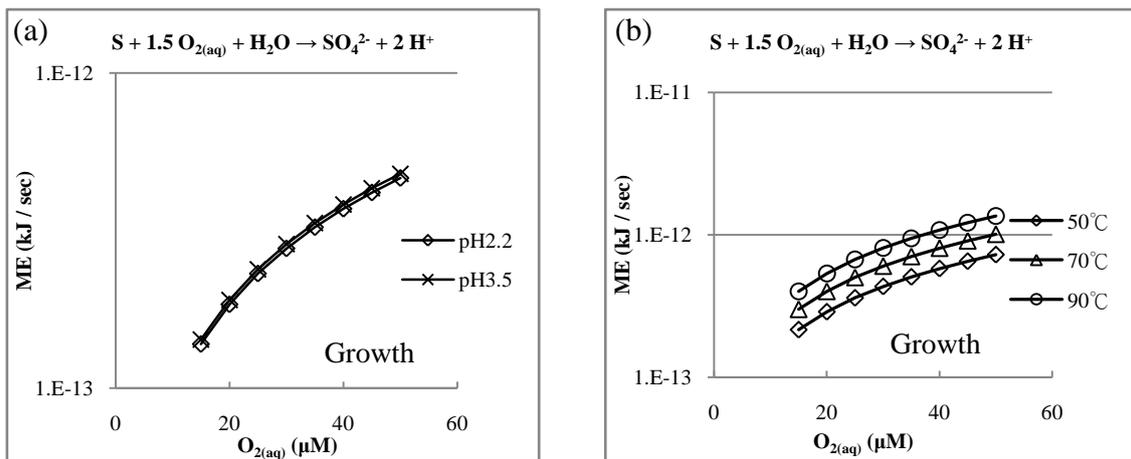


圖 4-15、小油坑溫泉水中， $O_{2(aq)}$ 氧化 S^0 反應之能量通量變化。(a) 不同酸鹼度下 $O_{2(aq)}$ 濃度改變時的能量通量變化，計算結果皆大於微生物維持生長狀態所需的通量值；(b) 不同溫度下 $O_{2(aq)}$ 濃度改變時的能量通量變化，計算結果皆大於微生物維持生長狀態所需的通量值。計算設定的其他條件為現地測量值。

Acidianus manzaensis 可使用耗氧的有機物氧化反應，圖 4-16 顯示耗氧 formic acid_(aq) 氧化反應的自由能隨 formic acid_(aq) 濃度和溫度變化的改變情形，可見自由能隨 formic acid_(aq) 濃度的增加而變負、隨溫度增加而變大。圖 4-17 顯示此反應之能量通量隨 formic acid_(aq) 濃度和溫度增加而變大。在所計算的 pH 值、溫度與 formic acid_(aq) 濃度範圍內，自由能值皆為負值，且提供之能量通量可支持該微生物維持生長狀態。以甲酸濃度為 $1E-10 \mu M$ 與溫泉水溫為 $99^\circ C$ 之嚴苛條件計算自由能，其值為 $-73.0 \text{ kJ/mole } e^-$ ，遠小於最小自由能需求範圍，表示該反應能持續發生於小油坑溫泉水中，並支持接近 *Acidianus manzaensis* 的微生物生存於此熱泉環境中。

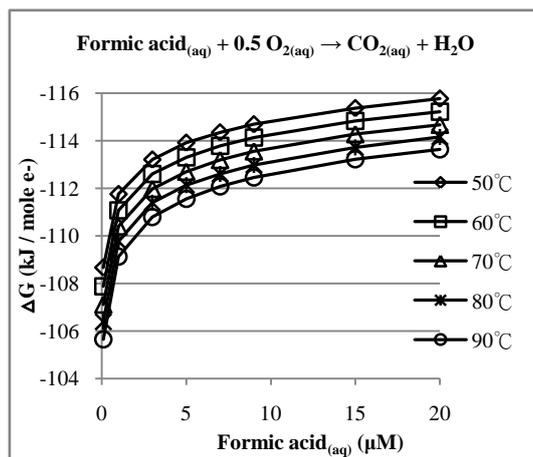


圖 4-16、小油坑溫泉水中， $O_{2(aq)}$ 氧化 formic acid $_{(aq)}$ 反應之自由能變化。計算設定的其他條件為現地測量值。

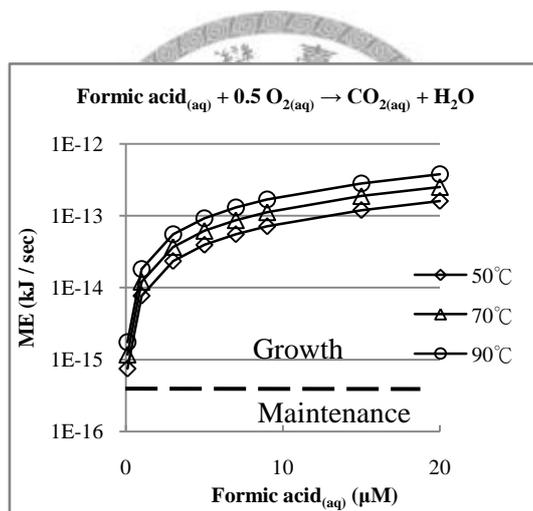


圖 4-17、小油坑溫泉水中， $O_{2(aq)}$ 氧化 formic acid $_{(aq)}$ 反應之能量通量變化。計算結果皆大於微生物維持生長狀態所需的通量值。計算設定的其他條件為現地測量值。圖中虛線代表微生物不同生長狀態所需要的能量通量分界線，通量值落於分界線之上代表此通量可支持微生物處於生長狀態，分界線之下則代表此通量可支持微生物處於維持狀態。

4-4-5 東台灣溫泉 — 紅葉溫泉

Aquificales str. SS5H1 是分子生物分析得到的接近種屬，能夠利用 $O_{2(aq)}$ 將 $H_{2(aq)}$ 氧化並產生 H_2O 。圖 4-18 顯示自由能隨 $O_{2(aq)}$ 濃度增加而變負、隨溫度增加而變大。圖 4-19 顯示能量通量隨 $O_{2(aq)}$ 濃度增加而變大、亦隨溫度增加而變大。在計算 $H_{2(aq)}$ 濃度 ($0.1\sim 1.5 \mu M$) 與溫度的變化範圍內，該反應能持續發生紅葉溫泉中，且提供足夠能量通量使得該微生物維持生長狀態。以 H^+ 濃度為 $1E-10 \mu M$ 、溫度為 $99^\circ C$ 之嚴苛條件計算自由能，其值為 $-21.6 \text{ kJ/mole } e^-$ ，表示該反應仍能被微生物使用。

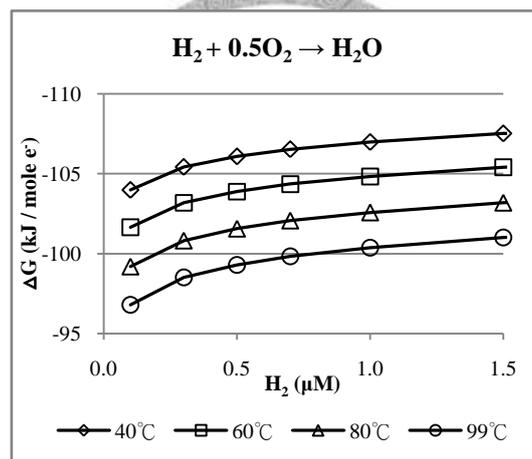


圖 4-18、紅葉溫泉水中， $O_{2(aq)}$ 氧化 $H_{2(aq)}$ 反應之自由能變化。計算自由能隨溫度和 $H_{2(aq)}$ 濃度改變的情形。設定的其他條件為現地測量值。

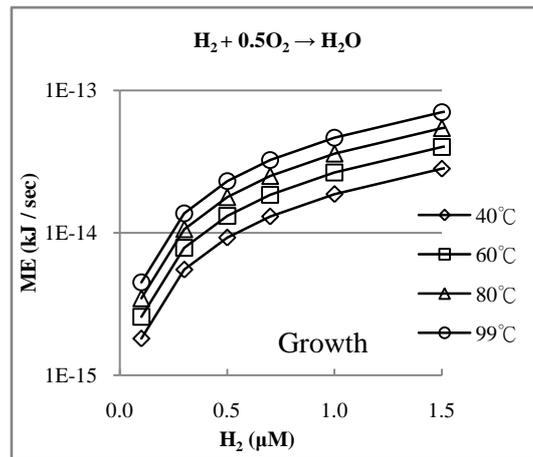


圖 4-19、紅葉溫泉水中， $O_{2(aq)}$ 氧化 $H_{2(aq)}$ 反應之能量通量變化。計算結果皆大於微生物維持生長狀態所需的通量值。設定的其他條件為現地測量值。

4-4-6 南台灣溫泉 — 新養女湖 II

Methanosaeta thermophila 是分子生物分析得到的接近種屬，能夠以 $H_{2(aq)}$ 當作電子提供者、 $CO_{2(aq)}$ 當作電子接受者並產生 $CH_{4(aq)}$ 來進行代謝反應。圖 4-20 顯示該反應之自由能隨 $H_{2(aq)}$ 的濃度增高而變負、隨溫度的增加而變大，但只有在溫度低於 $20^{\circ}C$ 與 $H_{2(aq)}$ 濃度大於 $1.5 \mu M$ 時，此一反應的自由能才能超過生物最小自由能需求的上限。圖 4-21 顯示該反應產生的能量通量隨 $H_{2(aq)}$ 的濃度增高而變大、隨溫度的增加而變小，而 $H_{2(aq)}$ 濃度需要大於特定濃度（約 $0.3 \mu M$ ），才能支持微生物維持生長狀態。

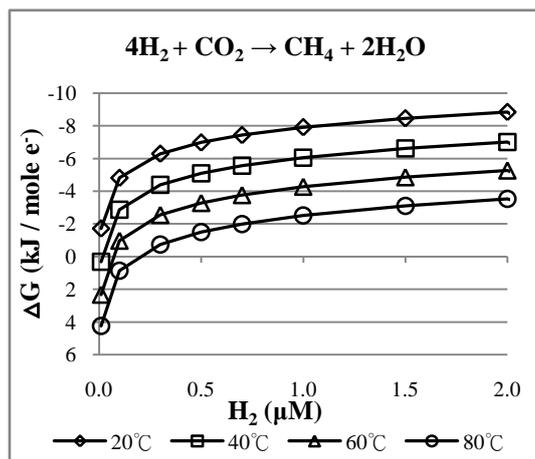


圖 4-20、新養女湖Ⅱ中，以 $\text{H}_{2(\text{aq})}$ 與 $\text{CO}_{2(\text{aq})}$ 產生 $\text{CH}_{4(\text{aq})}$ 反應之自由能變化。計算溫度和 $\text{H}_{2(\text{aq})}$ 濃度改變時，自由能的變化情形。設定的其他條件為現地測量值。

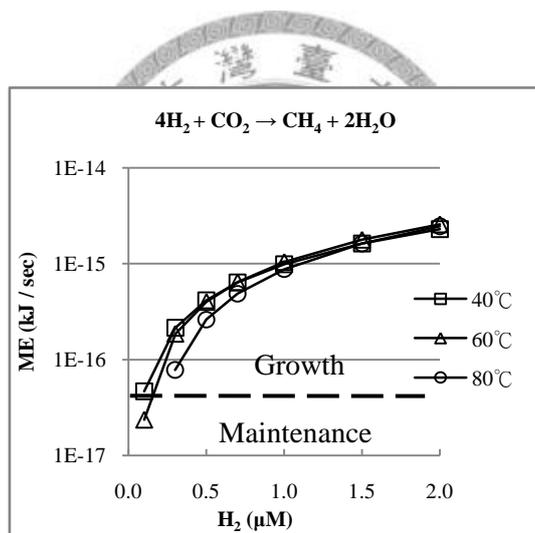


圖 4-21、新養女湖Ⅱ中，以 $\text{H}_{2(\text{aq})}$ 與 $\text{CO}_{2(\text{aq})}$ 產生 $\text{CH}_{4(\text{aq})}$ 之能量通量變化。計算能量通量隨溫度和 $\text{H}_{2(\text{aq})}$ 濃度改變的變化情形。圖中虛線代表微生物不同生長狀態所需要的能量通量分界線，通量值落於分界線之上代表此通量可支持微生物處於生長狀態，分界線之下則代表此通量可支持微生物處於維持狀態。

綜合上述模擬環境改變之自由能與能量通量變化情形可知，反應自由能值隨反應物濃度增加而變小、隨產物濃度增加而變大，而溫度的上升則會降低溶解氣

體濃度而改變自由能值；能量通量則一定隨反應物濃度增加而變大，酸鹼度改變的影響不大。在討論的反應中，能夠持續發生的反應包括了所有好氧的氧化反應以及小油坑地區的 S^0 氧化 Fe^{3+} 還原之反應，其中絕大部分反應都能提供足夠的能量通量，使支持微生物處於生長狀態。

4-5 由能量通量討論微生物間之競爭關係

本節利用能量通量的比較，探討熱泉生態系統中可能存在的族群競爭關係，以及可能的競爭結果。所討論的競爭關係為同一熱泉生態系統中，使用同一種化學限制因子來進行代謝的微生物族群。在使用同一限制因子的情況下，能使用能量通量愈大的化學反應來代謝之微生物，對此限制因子的使用就愈具有競爭力；相對的，使用能量通量小的化學反應來進行代謝之微生物，在無法與優勢物種競爭的情況下可能會受到抑制。

附錄表六列出了各個熱泉系統內所有會自然發生的化學反應，以下挑選數處溫泉，考慮以同一化學限制因子的化學反應，以比較各種化學反應之能量通量和組群大小等方式，對微生物間的競爭關係做進一步討論。

4-5-1 北台灣溫泉 — 磺山

以 $O_{2(aq)}$ 當作限制因子的反應中，通量由大到小依序是 O15、O13、O12、O11、O10、O9、O8 與 O7，最大通量與最小通量相差約 3 倍。在分子生物分析中所得之接近 *Sulfolobus tokodaii* 的微生物，便能夠利用 O13 來進行代謝，其在族群結構中占有 38%。

4-5-2 北台灣溫泉 — 龍鳳谷

以 Propanoic acid_(aq) 當作限制因子的反應中，通量由大到小分別是 Fe95、O4、S62、F107、S56、S57、F104、F106 與 F105，最大與最小相差約 25 倍；以 $O_{2(aq)}$

當作限制因子的反應中，通量由大到小依序是 O13、O14、O12、O11、O15 與 O10，最大通量與最小通量差異不大。

分子生物分析結果所得接近的 *Caldisphaera lagunensis* 與 *Thermocodium modesties* 之微生物，若選擇氧化丙酸來代謝，則可使用反應 S62，兩物種於族群中所占的比例分別為 26% 與 5%。造成兩物種比例上差異的可能為兩物種在使用能量的效能不同，或者可使用另外不同的有機碳所致。*Sulfolobus metallicus* 與 *Metallosphaera sedula* 能夠利用 O13 進行代謝，接近於此二物種的分子生物訊號於族群中皆占有 10.5%，代表著兩物種競爭 $O_{2(aq)}$ 的能力相當，而在族群結構中皆為使用 $O_{2(aq)}$ 代謝的優勢種。*Ferriplasma acidophilum*、Unclassified group A 與 Unclassified group B 是代謝途徑未明或未經培養純化分離的物種，接近於此三物種的分子生物訊號於族群中所占的比例為 47%，而凡是自由能值低於最小自由能需求帶之反應皆有可能為這三物種之代謝途徑。若考慮能量通量的大小，這些微生物可能會使用反應能量通量較大的反應，如 Fe95 或 O4，或者使用其他不需與其他物種競爭相同限制因子的代謝反應，例如以 $CH_{4(aq)}$ 或 $H_{2(aq)}$ 為限制因子的反應。

4-5-3 北台灣溫泉 — 硫磺谷

以 Propanoic acid_(aq) 當作限制因子的反應中，通量由大到小分別是 N31、O4、N32、N33、S56、F107、S57、S62、S63、F104、F106 與 F105，最大與最小相差約 30 倍；以 $O_{2(aq)}$ 當作限制因子的反應中，通量由大到小依序是 O13、O12、O11、O10、O9、O8、O14 與 O15，最大通量與最小通量相差約 9 倍；以 $H_{2(aq)}$ 當作限制因子的反應中，通量由大到小依序是 N18、O1、N19、N20、N22、S53、S59、M71 與 M66，最大通量與最小通量相差約 20 倍。

在分子生物分析中，接近 *Caldisphaera lagunensis* 的微生物於族群中占 11%，若該物種以還原丙酸來行代謝作用，則可使用的代謝途徑為反應 S62。反應 S62

之能量通量與同時競爭丙酸但可取得最大能量通量的反應相差一個數量級，由於此水樣中代謝特徵未明的分子生物訊號佔五成以上，表示可能有其他微生物與接近 *Caldisphaera lagunensis* 相互競爭丙酸，並佔有更大的族群比例。接近 *Sulfolobus metallicus* 與 *Acidianus infernus* 的分子生物訊號分別占族群百分比的 8% 與 22%，兩者皆能夠使用 O13 當作代謝途徑而彼此競爭 $O_{2(aq)}$ ，但是後者除了使用反應 O13 外還能利用反應 O1 與反應 S59，且此二反應以 $H_{2(aq)}$ 為限制因子並不與其他已發現物種共用，由於其代謝途徑多元，可能是該物種能在族群結構中占有最大比例的原因。其餘接近代謝途徑未明或未經培養純化的物種則包括了 Unclassified group A to H 等 7 種，所佔族群比例達 59%。若考慮能量通量的大小是支持族群大小的主因，表示其中的優勢物種可能使用能量通量最大的反應，或是在能量通量差距不大的情況下，選擇其他不競爭相同限制因子的反應，做為取得能量所需。

4-5-4 北台灣溫泉 — 富源

以 $O_{2(aq)}$ 當作限制因子的反應中，通量由大到小依序是 O13、O7、O8 與 O9，最大通量與最小通量相差約 3 倍。在分子生物分析中，接近於 *Sulfolobus metallicus*、*Acidianus infernus* 與 *Acidianus manzaensis* 的微生物序列於族群結構中分別占 7%、80% 與 13%。雖然三物種皆能使用 O13 來進行代謝反應，但可能受到使用能量的效能不同影響，使得三物種於族群中所占的比例有明顯的差別。

4-5-5 北台灣溫泉 — 磺港

以 $O_{2(aq)}$ 當作限制因子的反應中，通量由大到小依序是 O7、O13、O12、O11、O10、O9 與 O8，最大通量與最小通量相差不大；以 $H_{2(aq)}$ 當作限制因子的反應中，通量由大到小依序是 N18、O1、N19、N20、S59、N22、Fe82、S53、M71 與 M66，

最大通量與最小通量則相差約 47 倍。

分子生物分析中，接近 *Caldisphaera lagunensis* 與 *Acidilobus aceticus* 的微生物序列，分別占族群比例的 44% 與 30%，為族群中最大的兩個物種，由於磺港地區所測量之甲、乙、丙酸濃度皆低於偵測極限，所以推測兩物種可能使用其他類型的有機碳來行代謝作用，也因此在此無法討論兩物種的競爭關係。接近 *Sulfolobus metallicus* 與 *Acidianus infernos* 的微生物分子生物訊號於族群結構中分別占 4% 與 9%，兩物種皆能夠使用 O13 當作代謝途徑而彼此競爭 $O_{2(aq)}$ ，但是接近 *Acidianus infernos* 的微生物除了使用反應 O13 外，還能利用反應 O1 與 S59 來代謝，由於其使用代謝途徑較為多元，且 O1 與 S59 兩反應以 $H_{2(aq)}$ 為限制因子，並不與其他已發現物種競爭，使得該物種能在族群結構中較占優勢。

4-5-6 北台灣溫泉 — 小油坑

以 $O_{2(aq)}$ 當作限制因子的反應中，通量由大到小依序是 O15、O14、O13、O12、O11、O10、O9、O8、O7 與 O17，最大通量與最小通量相差約 6 倍；以 $H_{2(aq)}$ 當作限制因子的反應中，通量由大到小依序是 N18、O1、N19、N20、Fe83、Fe80、N22、S53、M71、M66 與 S59，最大通量與最小通量相差高達約 300 倍；以 Fe^{3+} 當作限制因子的反應只有 F100，能量通量值為 $2.35E-14$ kJ/sec。水樣中所培養出來接近於 *Acidianus manzaensis* 的微生物能使用 O1、Fe80 與 Fe100，表示該物種在小油坑溫泉中具三種代謝途徑可以選擇，增加了接近於 *Acidianus manzaensis* 之微生物於生態系統中之競爭力。

4-5-7 東台灣溫泉 — 紅葉

以 Propanoic acid_(aq) 當作限制因子的反應中，通量由大到小依序是 F105、F107、S56、F106、O4、F104 與 Fe92，最大通量與最小通量相差約 2000 倍；以 Acetic acid_(aq) 當作限制因子的反應中，通量由大到小依序是 Fe88、O3、S55 與

M68，最大通量與最小通量相差約 40 倍；以 SO_4^{2-} 當作限制因子的反應只有 S57，能量通量值為 $2.35\text{E-}14$ kJ/sec。

分子生物分析結果中，接近 *Aquificae* 的微生物序列占細菌族群比例的 100%，該微生物能夠使用 O_2 來進行代謝。根據 4-4-5 節中的模擬結果推論，即使 $\text{H}_{2(\text{aq})}$ 濃度低至 $10\ \mu\text{M}$ ，該反應依然會自然發生，因此紅葉溫泉水中雖然 $\text{H}_{2(\text{aq})}$ 濃度低於偵測極限，但不反駁接近 *Aquificae* 之微生物的存在。以 $\text{H}_{2(\text{aq})}$ 當作電子提供者之細菌只有 *Aquificae*，表示 *Aquificae* 在細菌的族群中應可具有絕對優勢。

紅葉溫泉的分子生物分析與微生物培養資料仍待進一步解析，尤其是其中能夠使用發酵作用和好氧化作用的族群，以便與反應能量通量的分析相互比對，討論微生物族群間可能的競爭關係。

4-5-8 南台灣溫泉 — 新養女湖 II

以 $\text{Formic acid}_{(\text{aq})}$ 做為限制因子的反應中，通量由大到小依序是 S54 與 M67，最大通量與最小通量相差約 3 倍；以 $\text{Acetic acid}_{(\text{aq})}$ 做為限制因子的反應只有 M68，能量通量值為 $2.35\text{E-}14$ kJ/sec；以 SO_4^{2-} 做為限制因子的反應中，通量由大到小依序是 S55、S56、S57 與 M79，最大通量與最小通量相差約 14 倍。

分子生物分析中，接近 *Methanosaeta thermophila* 之微生物占古菌族群比例的 74%，能使用反應 M67 和 M68 來進行代謝，其中 M68 反應並無其他反應與其競爭 $\text{Acetic acid}_{(\text{aq})}$ ，且可提供較大的能量通量，應可使接近 *Methanosaeta thermophila* 之微生物具有絕對優勢。

新養女湖 II 溫泉的分子生物分析與微生物培養資料仍待進一步解析，尤其是其中能夠使用有機碳和 SO_4^{2-} 的族群，而氣體化學資料仍須補足，以便完整計算反應自由能與能量通量，討論微生物族群間可能的競爭關係。

4-5-9 南台灣溫泉 — 關仔嶺

以 $O_{2(aq)}$ 當作限制因子的反應中，通量由大到小依序是 O4、O3 與 O6，最大通量與最小通量相差約 2 倍；以 $H_{2(aq)}$ 當作限制因子的反應中，通量由大到小依序是 O1、S53、Fe82、M66 與 N22，最大通量與最小通量相差約 100 倍；以 $Formic\ acid_{(aq)}$ 當作限制因子的反應中，通量由大到小依序是 O2、S54、Fe86 與 M67，最大通量與最小通量相差約 30 倍；以 $Acetic\ acid_{(aq)}$ 當作限制因子的反應中，通量由大到小依序是 Fe90 與 M68，最大通量與最小通量相差高達 3 倍；以 SO_4^{2-} 當作限制因子的反應中，通量由大到小依序是 S55、S56 與 S57，最大通量與最小通量相差約 10 倍。

微生物培養工作所培養出來接近於 *Thermodesulfobacterium commune* 的微生物，能使用反應 S53、S54、S55、S56 與 S57 來進行代謝，牽涉的限制因子包括 $H_{2(aq)}$ 、 $Formic\ acid_{(aq)}$ 與 SO_4^{2-} 三種，當競爭 $H_{2(aq)}$ 和 $Formic\ acid_{(aq)}$ 時，並非產生能量通量最大的反應，但以 SO_4^{2-} 為反應限制因子時，應無其他物種與其競爭。由於培養實驗無法提供族群大小的訊息，進一步根據能量通量討論微生物族群間可能的競爭關係，則需要完整的分子生物分析。

綜合上述討論可知，同一溫泉生態系統中，若微生物使用不同代謝途徑但競爭相同限制因子時，能量通量愈大的化學反應式所支持的微生物物種愈具有競爭力，在族群中所占的比例也相對的較多。若微生物使用相同代謝途徑競爭相同限制因子時，則需要考量到微生物使用能量的效能，才能比較物種間的競爭關係。

第五章 結論

本研究評估台灣熱泉生態系統中微生物代謝之生物能量，獲得下列結論：

1. 分析台灣各地溫泉的化學組成，計算各種反應的自由能，並考慮微生物之最小自由能需求的限制，可評估代謝反應能否自然發生，並被微生物所利用。假設溫泉之化學組成達穩定狀態，可計算各種代謝反應的能量通量，根據微生物不同生理狀態的能量需求，即可估算各種代謝反應所能支持的微生物數量。
2. 台灣各地溫泉受控於不同地質條件所影響，其地球化學特徵有所差異，溫泉生態系統中可被微生物利用的代謝反應種類、反應自由能與能量通量的大小與排序，均有所不同。
3. 台灣溫泉生態系統之分子生物分析與微生物培養所鑑別出的微生物物種，其行使的代謝反應，大都能與根據溫泉水化學組成所計算出的反應自由能與能量通量計算結果相印證。
4. 考慮台灣溫泉系統中可能發生的物理、化學條件變動，藉由調整化學物種濃度、pH 值和溫度得知自由能與能量通量的變化，可以評估微生物是否能夠繼續利用該代謝反應，以及支持何種微生物的生存狀態。參考台灣溫泉生態系統之分子生物分析與微生物培養結果，本研究所評估的代謝反應大多能夠持續發生，且支持微生物維持生長狀態，少數反應仍受到環境限制，而無法持續發生。
5. 配合分子生物之族群結構分析結果，比較溫泉中微生物能夠使用之代謝反應的能量通量，可以評估溫泉中微生物物種間之競爭關係。當微生物使用不同代謝途徑但競爭相同限制因子時，使用能量通量較大之代謝反應的微生物應較具有競爭力，通常在族群中所占的比例也相對的較多，可見能量通量與族群結構的關連。



參考文獻

英文部分

- Amend, J.P., Rogers, K.L., Shock, E.L., Gurrieri, S., and Inguaggiato, S., 2003, Energetics of chemolithoautotrophy in the hydrothermal system of Vulcano Island, southern Italy: *Geobiology*, v. 1, p. 37-58.
- Amend, J.P., and Shock, E.L., 2001, Energetics of overall metabolic reactions of thermophilic and hyperthermophilic Archaea and Bacteria: *FEMS Microbiology Reviews*, v. 25, p. 175-243.
- Canfield, D.E., Rosing, M.T., and Bjerrum, C., 2006, Early anaerobic metabolisms: *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, v. 361, p. 1819-1836.
- Capasso, G., Favara, R., and Inguaggiato, S., 1997, Chemical features and isotopic composition of gaseous manifestations on Vulcano Island, Aeolian Islands, Italy: An interpretative model of fluid circulation: *Geochimica et Cosmochimica Acta*, v. 61, p. 3425-3440.
- Chong, S., Liu, Y., Cummins, M., Valentine, D., and Boone, D., 2002, *Methanogenium marinum* sp. nov., a H₂-using methanogen from Skan Bay, Alaska, and kinetics of H₂ utilization: *Antonie van Leeuwenhoek*, v. 81, p. 263-270.
- Conrad, R., and Wetter, B., 1990, Influence of temperature on energetics of hydrogen metabolism in homoacetogenic, methanogenic, and other anaerobic bacteria: *Archives of Microbiology*, v. 155, p. 94-98.
- Dwyer, D.F., Weeg-Aerssens, E., Shelton, D.R., and Tiedje, J.M., 1988, Bioenergetic Conditions of Butyrate Metabolism by a Syntrophic, Anaerobic Bacterium in Coculture with Hydrogen-Oxidizing Methanogenic and Sulfidogenic Bacteria:

- Appl. Environ. Microbiol., v. 54, p. 1354-1359.
- Fulignati, P., Gioncada, A., and Sbrana, A., 1998, Geologic model of the magmatic-hydrothermal system of Vulcano (Aeolian Islands, Italy): Mineralogy and Petrology, v. 62, p. 195-222.
- Han, P., and Bartels, D.M., 1996, Temperature Dependence of Oxygen Diffusion in H₂O and D₂O: The Journal of Physical Chemistry, v. 100, p. 5597-5602.
- Harder, J., 1997, Species-independent maintenance energy and natural population sizes: FEMS Microbiology Ecology, v. 23, p. 39-44.
- Hoehler, T.M., 2004, Biological energy requirements as quantitative boundary conditions for life in the subsurface: Geobiology, v. 2, p. 205-215.
- Hoehler, T.M., Alperin, M.J., Albert, D.B., and Martens, C.S., 1994, Field and Laboratory Studies of Methane Oxidation in an Anoxic Marine Sediment: Evidence for a Methanogen-Sulfate Reducer Consortium: Global Biogeochem. Cycles, v. 8, p. 451-463.
- Hoehler, T.M., Alperin, M.J., Albert, D.B., and Martens, C.S., 2001, Apparent minimum free energy requirements for methanogenic Archaea and sulfate-reducing bacteria in an anoxic marine sediment: FEMS Microbiology Ecology, v. 38, p. 33-41.
- Huber, G., Spinnler, C., Gambacorta, A., and Stetter, K.O., 1989, *Metallosphaera sedula* gen. nov. and sp. nov. represents a new genus of aerobic, metal-mobilizing, thermoacidophilic archaeobacteria: Systematic and Applied Microbiology, v.12, p.38-47.
- Huber, G., and Stetter, K.O., 1991, *Sulfolobus metallicus*, sp. nov., a novel strictly chemolithoautotrophic thermophilic archaeal species of metal-mobilizers: Systematic and Applied Microbiology, v.14, p. 372-378.

- Hunt, S., Gaito, S.T., and Layzell, D.B., 1988, Model of gas exchange and diffusion in legume nodules: *Planta*, v. 173, p. 128-141.
- Inskeep, W.P., Ackerman, G.G., Taylor, W.P., Kozubal, M., Korf, S., and Macur, R.E., 2005, On the energetics of chemolithotrophy in nonequilibrium systems: case studies of geothermal springs in Yellowstone National Park: *Geobiology*, v. 3, p. 297-317.
- Itoh, T., Suzuki, K.I., and Nakase, T., 1998, *Thermocladium modestius* gen. nov., sp. nov., a new genus of rod-shaped, extremely thermophilic crenarchaeote: *Int J Syst Bacteriol*, v. 48, p. 879-887.
- Itoh, T., Suzuki, K., and Nakase, T., 2002, *Vulcanisaeta distributa* gen. nov., sp. nov., and *Vulcanisaeta souniana* sp. nov., novel hyperthermophilic, rod-shaped crenarchaeotes isolated from hot springs in Japan: *Int J Syst Evol Microbiol*, v. 52, p. 1097-1104.
- Itoh, T., Suzuki, K., Sanchez, P.C., and Nakase, T., 2003, *Caldisphaera lagunensis* gen. nov., sp. nov., a novel thermoacidophilic crenarchaeote isolated from a hot spring at Mt Maquiling, Philippines: *Int J Syst Evol Microbiol*, v. 53, p. 1149-1154.
- Jackson, B.E., and McInerney, M.J., 2002, Anaerobic microbial metabolism can proceed close to thermodynamic limits: *Nature*, v. 415, p. 454-456.
- Jahne, B., Heinz, G., and Dietrich, W., 1987, Measurement of the Diffusion Coefficients of Sparingly Soluble Gases in Water: *J. Geophys. Res.*, v. 92, p. 10767-10776.
- Jeanthon, C., L'Haridon, S., Cuffe, V., Banta, A., Reysenbach, A.L., and Prieur, D., 2002, *Thermodesulfobacterium hydrogeniphilum* sp. nov., a thermophilic, chemolithoautotrophic, sulfate-reducing bacterium isolated from a deep-sea hydrothermal vent at Guaymas Basin, and emendation of the genus

- Thermodesulfobacterium: *Int J Syst Evol Microbiol*, v. 52, p. 765-772.
- Kielland, J., 1937, Individual Activity Coefficients of Ions in Aqueous Solutions: *Journal of the American Chemical Society*, v. 59, p. 1675-1678.
- Kotsyurbenko, O.R., Glagolev, M.V., Nozhevnikova, A.N., and Conrad, R., 2001, Competition between homoacetogenic bacteria and methanogenic archaea for hydrogen at low temperature: *FEMS Microbiology Ecology*, v. 38, p. 153-159.
- Lasaga, A.C., 1998, Kinetic theory in the earth science.
- Lide, D. R. and Frederikse, H. P. R., 1995, *CRC Handbook of Chemistry and Physics*, 76th Edition. CRC Press, Inc., Boca Raton, FL.
- Liu, J.G., Luo, G.S., Pan, S., and Wang, J.D., 2004, Diffusion coefficients of carboxylic acids in mixed solvents of water and 1-butanol: *Chemical Engineering and Processing*, v. 43, p. 43-47.
- Macur, R.E., Langner, H.W., Kocar, B.D., and Inskeep, W.P., 2004, Linking geochemical processes with microbial community analysis: successional dynamics in an arsenic-rich, acid-sulphate-chloride geothermal spring: *Geobiology*, v. 2, p. 163-177.
- Madigan, M.T., and Martinko, J.M., 2006, *Biology of Microorganisms: eleventh edition*, p. 992.
- Patel, G.B., and Sprott, G.D., 1990, *Methanosaeta concilii* gen. nov., sp. nov. ("Methanothrix concilii") and *Methanosaeta thermoacetophila* nom. rev., comb. nov: *Int J Syst Bacteriol*, v. 40, p. 79-82.
- Prokofeva, M.I., Miroshnichenko, M.L., Kostrikina, N.A., Chernyh, N.A., Kuznetsov, B.B., Tourova, T.P., and Bonch-Osmolovskaya, E.A., 2000, *Acidilobus aceticus* gen. nov., sp. nov., a novel anaerobic thermoacidophilic archaeon from continental hot vents in Kamchatka: *Int J Syst Evol Microbiol*, v. 50, p.

2001-2008.

Reysenbach, A.L., and Shock, E., 2002, Merging Genomes with Geochemistry in Hydrothermal Ecosystems: *Science*, v. 296, p. 1077-1082.

Rogers, K.L., and Amend, J.P., 2005, Archaeal diversity and geochemical energy yields in a geothermal well on Vulcano Island, Italy: *Geobiology*, v. 3, p. 319-332.

Rogers, K.L., and Amend, J.P., 2006, Energetics of potential heterotrophic metabolisms in the marine hydrothermal system of Vulcano Island, Italy: *Geochimica et Cosmochimica Acta*, v. 70, p. 6180-6200.

Rothfuss, F., and Conrad, R., 1993, Thermodynamics of methanogenic intermediary metabolism in littoral sediment of Lake Constance: *FEMS Microbiology Ecology*, v. 12, p. 265-276.

Scholten, J.C.M., and Conrad, R., 2000, Energetics of Syntrophic Propionate Oxidation in Defined Batch and Chemostat Cocultures: *Appl. Environ. Microbiol.*, v. 66, p. 2934-2942.

Segerer, A., Neuner, A., Kristjansson, J.K., and Stetter, K.O., 1986, *Acidianus infernus* gen. nov., sp. nov., and *Acidianus brierleyi* Comb. nov.: Facultatively Aerobic, Extremely Acidophilic Thermophilic Sulfur-Metabolizing Archaeobacteria: *Int J Syst Bacteriol*, v. 36, p. 559-564.

Seitz, H.J., Schink, B., Pfennig, N., and Conrad, R., 1990a, Energetics of syntrophic ethanol oxidation in defined chemostat cocultures: *Archives of Microbiology*, v. 155, p. 82-88.

Seitz, H.J., Schink, B., Pfennig, N., and Conrad, R., 1990b, Energetics of syntrophic ethanol oxidation in defined chemostat cocultures: *Archives of Microbiology*, v. 155, p. 89-93.

Song, S.R., Ku, W.Y., Chen, Y.L., Liu, C.M., Yang, T.F., Chen, C.H., Liu, T.K., and Li, M.,

- 2005, Hydrochemical Changes in Spring Waters in Taiwan: Implications for Evaluating Sites for Earthquake Precursory Monitoring.: Terrestrial, Atmospheric and Oceanic Sciences, v. 16, p. 745-762.
- Spear, J.R., Walker, J.J., McCollom, T.M., and Pace, N.R., 2005, Hydrogen and Bioenergetics in the Yellowstone Geothermal Ecosystem: Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, v. 102, p. 2555-2560.
- Suzuki, T., Iwasaki, T., Uzawa, T., Hara, K., Nemoto, N., Kon, T., Ueki, T., Yamagishi, A., and Oshima, T. "Sulfolobus tokodaii sp. nov. (f. Sulfolobus sp. strain 7), a new member of the genus Sulfolobus isolated from Beppu Hot Springs, Japan." Extremophiles (2002) 6:39-44.
- Tijhuis, L., van Loosdrecht MCM, and Heijnen, J.J., 1993, A thermodynamically based correlation for maintenance gibbs energy requirements in aerobic and anaerobic chemotrophic growth: Biotechnology and Bioengineering, v. 42, p. 509-519.
- Whitman, W.B., Coleman, D.C., and Wiebe, W.J., 1998, Prokaryotes: The unseen majority: Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, v. 95, p. 6578-6583.
- Wilhelm, E., Battino, R., and Wilcock, R.J., 1977, Low-pressure solubility of gases in liquid water: Chemical Reviews, v. 77, p. 219-262.
- Wise, D.L., and Houghton, G., 1968, Diffusion coefficients of neon, krypton, xenon, carbon monoxide and nitric oxide in water at 10-60°C: Chemical Engineering Science, v. 23, p. 1211-1216.
- Yao, H., and Conrad, R., 1999, Thermodynamics of methane production in different rice paddy soils from China, the Philippines and Italy: Soil Biology and Biochemistry, v. 31, p. 463-473.

- Yeh, G.H., Chen, T.F., Chen, J.C., and Song, S.R., 2005, Fluid Geochemistry of Mud Volcanoes in Taiwan. *Mud Volcanoes, Geodynamics and Seismicity*, p. 227-237.
- Yoshida, N., Nakasato, M., Ohmura, N., Ando, A., Saiki, H., Ishii, M., and Igarashi, Y., 2006, *Acidianus manzaensis* sp. nov., a Novel Thermoacidophilic Archaeon Growing Autotrophically by the Oxidation of H₂ with the Reduction of Fe³⁺: *Current Microbiology*, v. 53, p. 406-411.

中文部分

- 何春蓀 (1986) 台灣地質概論及台灣地質圖說明書，經濟部中央地質調查所，共 164 頁。
- 李曉芬 (2004) 大屯火山區火山氣體成分及其冷凝水之氫氧同位素組成。國立台灣大學地質科學研究所碩士論文，共 83 頁。
- 宋聖榮、劉佳玫 (2003) 台灣的溫泉，遠足文化事業有限公司。
- 陳肇夏 (1989) 台灣的溫泉和地熱，地質，第九卷，第二期，327-340 頁。
- 陳耀麟 (2002) 大屯火山區溫泉水之化學成分及其對河水之影響。國立臺灣大學地質科學研究所博士論文，共 216 頁。
- 陳柏淳 (2005) 臺北地區溫泉露頭調查與水質分析。經濟部中央地質調查所研究發展專題，共 70 頁。
- 陳培源 (2006) 台灣地質，台灣省應用地質公會，共 487 頁。
- 劉康克、陳中華、謝越寧與江新春 (1984) 台北市大屯火山地區碳氫同位素之研究，中央研究院地球科學研究所，研究報告 ASIES-CR8401，共 39 頁。

附錄

附表一 化學反應與微生物代謝列表

Aerobic oxidation	
O1 ^{1,3}	$\text{H}_{2(\text{aq})} + 0.5 \text{O}_{2(\text{aq})} \rightarrow \text{H}_2\text{O} [2]^2$ <p><i>Acidovorax, Alcaligenes, Ancylobacter, Hydrogenophaga, Pseudomonas, Xanthobacter, Sulfolobus, Bacillus, Hydrogenobacter, Hydrogenophilus, Calderobacterium, Sulfurospirillum</i></p>
O2	$\text{Formic acid}_{(\text{aq})} + 0.5 \text{O}_{2(\text{aq})} \rightarrow \text{H}_2\text{O} + \text{CO}_{2(\text{aq})} [2]$
O3 ³	$\text{Acetic acid}_{(\text{aq})} + 2 \text{O}_{2(\text{aq})} \rightarrow 2 \text{H}_2\text{O} + 2 \text{CO}_{2(\text{aq})} [8]$ <p><i>Pyrobaculum, Sulfurospirillum</i></p>
O4 ³	$\text{Propanoic acid}_{(\text{aq})} + 3.5 \text{O}_{2(\text{aq})} \rightarrow 3 \text{H}_2\text{O} + 3 \text{CO}_{2(\text{aq})} [14]$ <p><i>Pyrobaculum, Sulfurospirillum</i></p>
O5 ³	$\text{NO}_2^- + 0.5 \text{O}_{2(\text{aq})} \rightarrow \text{NO}_3^- [2]$ <p><i>Nitrobacter, Nitrospina, Nitrococcus</i></p>
O6 ³	$\text{NH}_4^+ + 1.5 \text{O}_{2(\text{aq})} \rightarrow \text{NO}_2^- + 2 \text{H}^+ + \text{H}_2\text{O} [6]$ <p><i>Nitrosococcus, Nitrosomonas, Nitrosospira, Nitrosovibrio, Nitrosolobus</i></p>
O7 ³	$2 \text{Fe}^{2+} + 0.5 \text{O}_{2(\text{aq})} + 2 \text{H}^+ \rightarrow 2 \text{Fe}^{3+} + \text{H}_2\text{O} [2]$ <p><i>Sulfolobacillus, Acidianus, Thiobacillus, Acidimicrobium, Sulfurococcus</i></p>
O8	$\text{Fe}^{2+} + 0.25 \text{O}_{2(\text{aq})} + 1.5 \text{H}_2\text{O} \rightarrow 2 \text{H}^+ + \text{Goethite} [1]$
O9	$\text{Fe}^{2+} + 0.25 \text{O}_{2(\text{aq})} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow 0.5 \text{Hematite} + 2 \text{H}^+ [1]$
O10 ³	$2 \text{Pyrite} + 7.5 \text{O}_{2(\text{aq})} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow 2 \text{Fe}^{3+} + 4 \text{SO}_4^{2-} + 2 \text{H}^+ [28]$ <p><i>Sulfolobacillus, Thiobacillus, Sulfurococcus, Thiobacillus, Inferred:Acidianus brierleyi</i></p>
O11	$\text{Pyrite} + 2.5 \text{H}_2\text{O} + 3.75 \text{O}_{2(\text{aq})} \rightarrow \text{Goethite} + 4 \text{H}^+ + 2 \text{SO}_4^{2-} [14]$
O12	$\text{Pyrite} + 2 \text{H}_2\text{O} + 3.75 \text{O}_{2(\text{aq})} \rightarrow 0.5 \text{Hematite} + 4 \text{H}^+ + 2 \text{SO}_4^{2-} [14]$
O13 ³	$\text{S} + 1.5 \text{O}_{2(\text{aq})} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{SO}_4^{2-} + 2 \text{H}^+ [6]$ <p><i>Thiobacillus, Aquifex, Acidianus, Metallosphaera, Sulfolobus, Sulfolobacillus, Sulfurococcus, Thermothrix, Thermococcus, Thiomicrospira, Beggiatoa, Thiovulum</i></p>
O14 ³	$\text{HS}^- + 2 \text{O}_{2(\text{aq})} \rightarrow \text{SO}_4^{2-} + \text{H}^+ [8]$ <p><i>Thiovulum, Beggiatoa, Thiomicrospira, Thiobacillus, Thermothrix, Sulfolobus</i></p>
O15 ³	$\text{HS}^- + 0.5 \text{O}_{2(\text{aq})} + \text{H}^+ \rightarrow \text{S} + \text{H}_2\text{O} [2]$ <p><i>Thermothrix, Thiovulum, Beggiatoa</i></p>

(接續附表一)

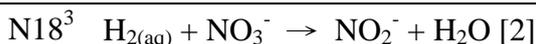


Beggiatoa schlegelii, Pseudomonas, Alcaligenes



Methylococcus thermophilus

Nitrate, Nitrite reduction, Nitrogen fixation, Anammox



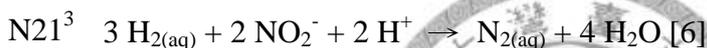
Veillonella, Micrococcus, Thiobacillus, Pseudomonas, Silicibacter, Thermothrix, Clostridium, Aerobacter, Escherichia coli, Spirillum, Selenomonas



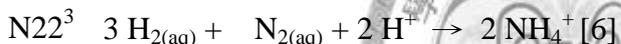
Micrococcus, Thiobacillus, Clostridium, Pseudomonas



Ammonifex, Veillonella, Pyrolobus fumarii



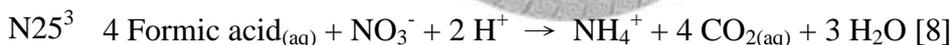
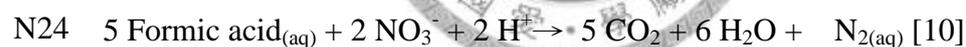
Aquifex pyrophilus, Micrococcus denitrificans, Thiobacillus denitrificans



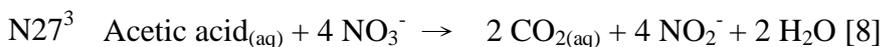
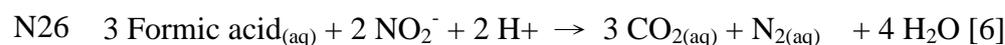
Methanosarcina, Desulfovibrio



Bacillus infenus



Ammonifex degensii, Thermothrix thioparus, Pyrobaculum aerophilum



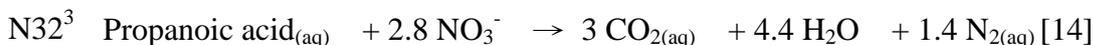
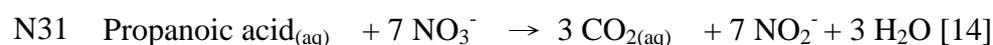
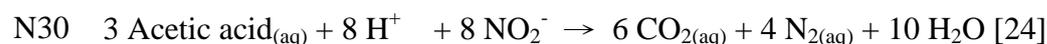
Pyrobaculum, Thermothrix



Pyrobaculum

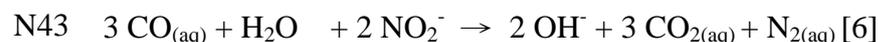
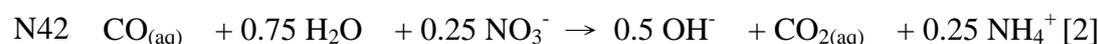
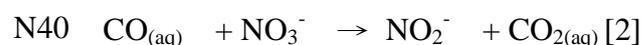
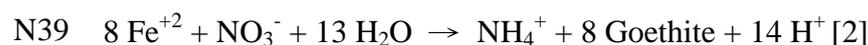
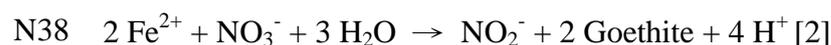
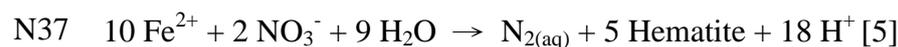
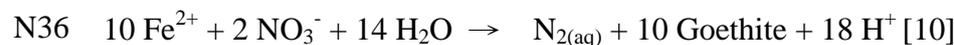
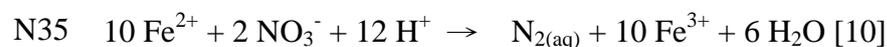
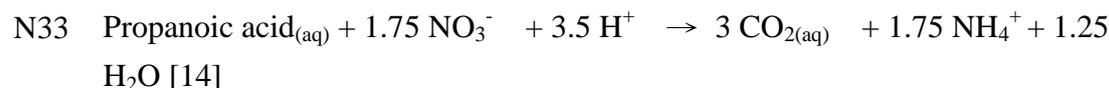


Geobacter metallireducens

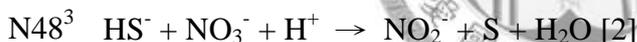
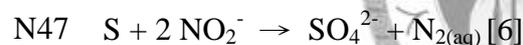


Pyrobaculum

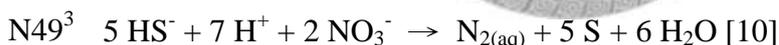
(接續附表一)



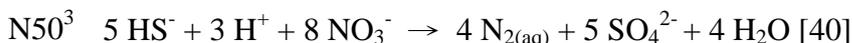
Thiobacillus denitrificans, Aquifex pyrophilus, Thioploca chileae, Thioploca araucae



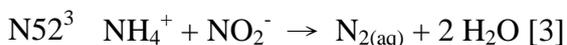
Ferroglobus placidus, Thermothrix thioparus



Thioploca chileae, Thioploca araucae, Thermothrix thioparus

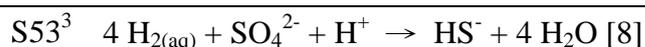


Thioploca chileae, Thioploca araucae, Thermothrix thioparus



Planctomycete

Sulfate, Sulfur reduction, Sulfur disproportionation



Archaeoglobus, Desulfotomaculum, Desulfacinum, Desulfonatronum, Thermodesulfobacterium, Thermodesulfovibrio, Desulfonatronovibrio, Ammonifex, Desulfobulbus, Desulfovibrio; Hydrogen from an organic source: Archaeoglobus fulgidus, Thermocladium modestius

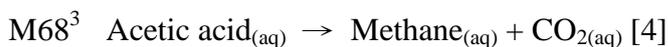
(接續附表一)

- S54³ Formic acid_(aq) + 0.25 SO₄²⁻ + 0.25 H⁺ → CO_{2(aq)} + 0.25 HS⁻ + H₂O [2]
Desulfotomaculum, Desulfonatronovibrio, Ammonifex, Archaeoglobus fulgidus
- S55³ Acetic acid_(aq) + SO₄²⁻ + H⁺ → 2 CO_{2(aq)} + HS⁻ + 2 H₂O [8]
Desulfotomaculum, Thermodesulforhabdus
- S56³ Propanoic acid_(aq) + 1.75 SO₄²⁻ + 1.75 H⁺ → 1.75 HS⁻ + 3 CO_{2(aq)} + 3 H₂O [14]
Desulfotomaculum
- S57³ Propanoic acid_(aq) + 0.5 SO₄²⁻ + 0.5 H⁺ → 1.25 Acetic acid_(aq) + 0.5 CO_{2(aq)} + 0.5 HS⁻ + 0.5 H₂O [4]
Desulforhopalus, Desulfotomaculum, Desulfobulbus
- S58 CO_(aq) + 0.25 SO₄²⁻ + 0.25 H⁺ → CO_{2(aq)} + 0.25 HS⁻ [2]
- S59³ H_{2(aq)} + S → HS⁻ + H⁺ [2]
Pyrodictium, Acidianus, Ammonifex, Thermoproteus, Thermodiscus, Aquifex, Desulfurella, Desulfurobacterium, Hyperthermus, Stetteria, Stygiolobus, Sulfurospirillum; Hydrogen from an organic source: Thermococcus, Pyrobaculum, Thermoproteus uzoniensis, Thermoplasma, Thermofilum, Pyrococcus, Thermococcus profundus, Thermococcus celer, Desulfurococcus, Thermocladium, Thermosiphon, Thermotoga, Staphylothermus
- S60³ Formic acid_(aq) + S → H⁺ + CO_{2(aq)} + HS⁻ [2]
Thermoproteus, Sulfurospirillum
- S61³ Acetic acid_(aq) + 4 S + 2 H₂O → 4 H⁺ + 2 CO_{2(aq)} + 4 HS⁻ [8]
Desulfuromonas, Geobacter, Desulfurella
- S62³ Propanoic acid_(aq) + 7 S + 4 H₂O → 7 HS⁻ + 7 H⁺ + 3 CO_{2(aq)} [14]
Desulfurella
- S63 Propanoic acid_(aq) + S + H₂O → H⁺ + 1.5 Acetic acid_(aq) + HS⁻ [2]
- S64 CO_(aq) + S + H₂O → H⁺ + CO_{2(aq)} + HS⁻ [2]
- S65³ 4 S + 4 H₂O → SO₄²⁻ + 3 HS⁻ + 5 H⁺ [6]
Desulfocapsa, Desulfobulbus

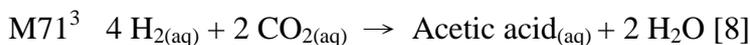
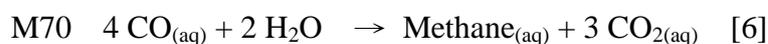
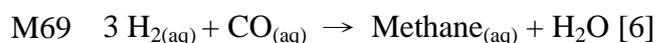
Methanogenesis, Acetogenesis, Anaerobic methane oxidation

- M66³ 4 H_{2(aq)} + CO_{2(aq)} → Methane_(aq) + 2 H₂O [8]
Methanococcus, Methanosarcina, Methanobacterium, Methanopyrus, Methanothermus, Methanocalculus
- M67³ 4 Formic acid_(aq) + H₂O → Methane_(aq) + 3 CO_{2(aq)} + 2 H₂O [2]
Methanocalculus, Methanococcus, Methanobacterium, Methanoplanus

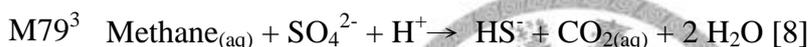
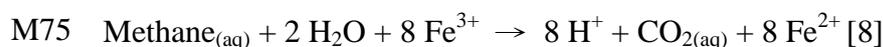
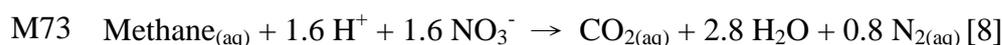
(接續附表一)



Methanotherix

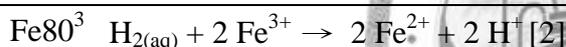


Acetogenium, Desulfotomaculum

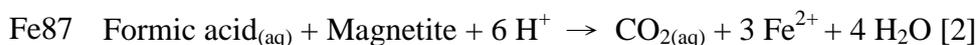
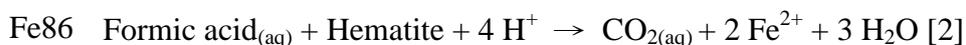
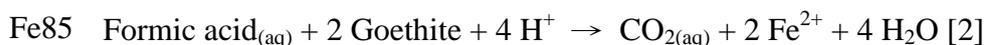
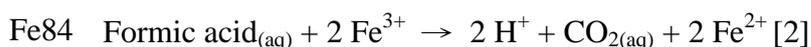
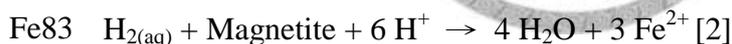
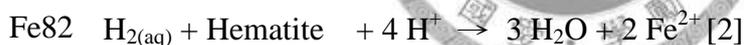
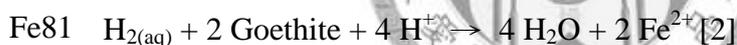


Cluster ANME-1 (suggested)

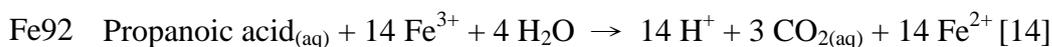
Metal reduction



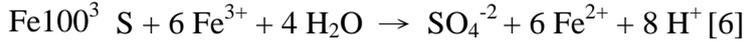
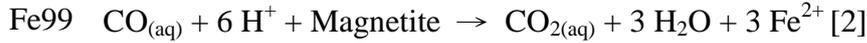
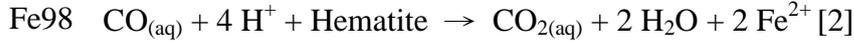
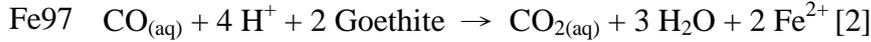
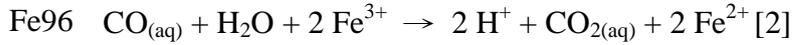
Geobacter, Thermoterrabacterium



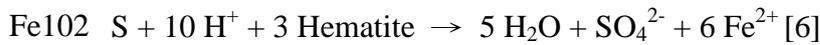
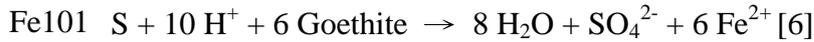
Geobacter, Desulfuromonas



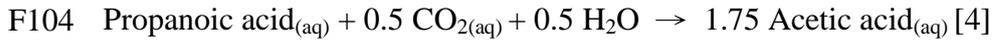
(接續附表一)



Sulfolobus, Thiobacillus



Fermentation



¹ 化學反應分類

O : Aerobic oxidation

N : Nitrate, Nitrite reduction, Nitrogen fixation, Anammox

S : Sulfate, Sulfur reduction, Sulfur disproportionation

M : Methanogenesis, Acetogenesis, Anaerobic methane oxidation

Fe : Metal reduction

F : Fermentation

² [] = 電子傳遞數量。

³ 已有報導之微生物代謝反應與微生物種屬名。

附表二 溫泉水化學與溶解氣體濃度

A. 台灣北部地區溫泉

	磺山	龍鳳谷	硫磺谷	地熱谷	小油坑	富源	金山漁會	磺港	七股	大油坑
T°C	65.0	79.6	89.0	68.3	71.6	67.7	65.1	74.2	49.5	91.9
pH	2.86	5.37	2.84	1.35	2.36	1.82	5.84	2.99	2.16	1.52
Na ⁺ (mM)	0.38	0.50	1.01	17.19	1.36	31.67	10.06	29.86	0.49	0.23
K ⁺ (mM)	0.08	0.08	0.13	6.67	0.53	3.84	1.57	3.51	0.13	0.38
Mg ²⁺ (mM)	0.49	0.37	0.69	2.28	1.66	4.23	5.18	6.42	0.34	0.35
Ca ²⁺ (mM)	0.51	0.66	1.25	4.39	2.38	2.45	5.58	6.93	0.33	0.20
Al ³⁺ (mM)	0.86	BDL	0.57	3.87	4.77	1.63	BDL	0.96	3.22	3.93
Mn ²⁺ (μM)	5.45	BDL	7.27	141.82	36.36	67.27	36.36	110.91	5.45	BDL
Cl ⁻ (mM)	0.22	0.6	1.32	35.13	0.29	105.13	27.76	58.63	15.49	0.54
Br ⁻ (mM)	BDL ¹	BDL	BDL	BDL	0.02	BDL	2.75	0.13	BDL	BDL
PO ₄ ³⁻ (μM)	3.87	3.55	11.29	11.61	1.61	25.81	BDL	10.00	35.81	54.84
Fe ²⁺ (μM)	237.99	BDL	90.86	1410.22	986.56	720.43	170.97	1270.79	890.68	2036.56
Fe ³⁺ (μM)	2.15	BDL	BDL	37.99	24.91	390.50	BDL	BDL	BDL	194.44
NH ₄ ⁺ (μM)	31.43	BDL	35.72	BDL	BDL	BDL	142.22	BDL	BDL	BDL
SO ₄ ²⁻ (mM)	3.17	0.67	3.30	14.91	12.99	17.67	2.68	6.02	14.02	29.51
NO ₃ ⁻ (μM)	BDL	BDL	30.81	BDL	51.77	BDL	BDL	94.35	16.77	BDL
NO ₂ ⁻ (μM)	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL
HS ⁻ (μM)	22.19	83.64	8.79	25.62	129.39	BDL	BDL	BDL	609.09	9.70
H _{2(aq)} (μM)	0.83	0.05	0.58	0.99	0.15	BDL	BDL	0.07	0.20	0.44
O _{2(aq)} (μM)	33.67	11.75	34.18	78.61	33.57	89.59	42.87	84.80	69.62	13.89
N _{2(aq)} (μM)	17.62	1.47	17.99	47.40	15.36	49.55	24.84	55.18	44.06	2.38
CO _{2(aq)} (μM)	3982.05	1215.33	1014.03	312.34	2582.87	413.24	6973.38	4000.21	733.17	1264.58
CO _(aq) (μM)	NA ²	NA	NA	NA	0.07	NA	NA	NA	BDL	0.25
CH _{4(aq)} (μM)	0.67	0.24	0.05	0.26	2.77	BDL	26.89	2.61	5.05	0.20
C ₂ H _{6(aq)} (μM)	0.13	BDL	BDL	BDL	0.01	BDL	0.09	0.11	0.03	BDL
C ₃ H _{8(aq)} (μM)	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL
Formic acid (μM)	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL

(接續附表二 A.)

Acetic acid (μM)	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL
Propanoic acid (μM)	BDL	6.08	14.43	BDL	BDL	BDL	17.70	BDL	BDL	BDL
DOC (ppmC)	0.55	1.39	1.80	1.06	5.14	0.34	1.68	0.45	1.63	2.27

B. 台灣東部與南部地區溫泉

	安通	花蓮紅葉	虎爺	關仔嶺	新養女湖 1	新養女湖 2	小滾水 3	小滾水 4
T °C	66.00	80.00	49.80	63.80	35.20	43.50	20.40	26.10
pH	8.73	6.54	6.88	8.36	7.66	7.92	7.78	7.67
Na ⁺ (m M)	16.82	17.70	150.13	94.03	96.75	81.45	184.17	181.84
K ⁺ (m M)	0.16	0.86	5.26	5.12	0.73	0.66	0.14	0.14
Mg ²⁺ (m M)	BDL	0.14	2.81	0.27	0.46	0.27	0.18	0.17
Ca ²⁺ (m M)	1.99	0.61	2.78	0.08	0.50	0.15	0.13	0.13
Al ³⁺ (m M)	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL
Mn ²⁺ (μM)	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL
Cl ⁻ (m M)	19.32	2.42	74.77	80.74	109.37	99.59	236.42	252.94
Br ⁻ (m M)	0.02	BDL	0.15	0.08	0.21	0.21	0.64	0.67
PO ₄ ³⁻ (μM)	BDL	BDL	BDL	2.58	BDL	BDL	2.58	1.94
Fe ²⁺ (μM)	2.51	BDL	22.40	3.41	NA	NA	9.50	4.48
Fe ³⁺ (μM)	BDL	2.87	10.04	BDL	NA	NA	BDL	BDL
NH ₄ ⁺ (μM)	21.43	400.00	1036.98	428.57	NA	NA	21.43	14.29
SO ₄ ²⁻ (m M)	3.92	0.59	0.01	0.16	0.16	0.09	0.01	0.01
NO ₃ ⁻ (μM)	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL	2.19	4.61
NO ₂ ⁻ (μM)	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL	BDL
HS ⁻ (μM)	206.88	13.75	BDL	BDL	NA	NA	NA	NA
H _{2(aq)} (μM)	0.22	BDL	1.72	0.32	BDL	BDL	BDL	BDL
O _{2(aq)} (μM)	0.31	66.41	50.64	16.81	NA	NA	NA	NA
N _{2(aq)} (μM)	BDL	43.34	33.06	6.00	NA	NA	NA	NA
CO _{2(aq)} (μM)	49.69	5114.80	10810.38	847.62	1241.46	368.41	360.57	426.25
CO _(aq) (μM)	BDL	0.01	BDL	0.02	BDL	BDL	BDL	BDL
CH _{4(aq)} (μM)	237.63	0.50	14.66	3.16	1152.22	921.42	1018.53	1416.42
C ₂ H _{6(aq)} (μM)	1.40	BDL	0.12	BDL	23.07	17.82	0.25	2.28

(接續附表二 B.)

C₃H_{8(aq)} (μM)	BDL	BDL	BDL	BDL	4.89	3.71	BDL	0.07
Formic acid (μ M)	BDL	BDL	BDL	5.43	13.26	15.43	BDL	15.87
Acetic acid (μ M)	2.00	3.00	BDL	1211.17	187.00	622.83	BDL	32.67
Propanoic acid (μ M)	8.24	710.14	2279.32	2754.46	963.51	624.59	668.92	741.35
DOC (ppm C)	0.75	4.11	11.61	57.74	NA	NA	NA	NA

¹ BDL = below detection limit (低於偵測極限)

² NA = not available (無分析資料)



附表三 溫泉中微生物可利用之礦物相

北部採樣點	磺山	龍鳳谷	硫磺谷	地熱谷	小油坑	
沉積物礦物相 ¹	sulfur, goethite	NA ³	sulfur	sulfur	sulfur, siderite	
水中穩定礦物相 ²	pyrite	magnetite, FeO(s), pyrite, troilite	Pyrite	pyrite, melanterite, sulfur	magnetite, pyrite, melanterite	
北部採樣點	富源	金山漁會	磺港	七股	大油坑	
沉積物礦物相 ¹	NA	NA	NA	NA	sulfur	
水中穩定礦物相 ²	hematite, melanterite	hematite, pyrite, melanterite, sulfur	hematite, pyrite, melanterite, sulfur	None ⁴	pyrite, sulfur	
東部、南部採樣點	安通	花蓮紅葉	虎爺	關仔嶺	新養女湖	小滾水
沉積物礦物相 ¹	NA	NA	NA	None	None	None
水中穩定礦物相 ²	hematite, melanterite, pyrite	troilite	pyrite	hematite	None	pyrite

¹ XRD 分析結果。

² GWB 模擬結果。

³ NA: not available (無分析資料)。

⁴ None: 無微生物可利用之礦物。

附表四 化學反應自由能

A. 台灣北部溫泉

反應 ¹	磺山	龍鳳谷	硫磺谷	地熱谷	小油坑	富源	金山漁會	磺港	七股	大油坑
O1	-103.6²	-97.0	-100.3	-104.0	-100.4			-99.6	-103.9	-98.8
O2	(-77.8) ³	(-76.4)	(-76.0)	(-81.5)	(-77.3)	(-91.1)	(-77.2)	(-86.9)	(-83.1)	(-74.5)
O3	(-94.0)	(-93.3)	(-93.7)	(-96.2)	(-93.9)	(-98.5)	(-93.7)	(-96.6)	(-96.4)	(-92.7)
O4	(-98.3)	-102.8	-103.9	(-100.4)	(-98.4)	(-101.7)	-102.9	(-100.1)	(-100.2)	(-97.4)
O5	(-35.5)	⁴	(-5.3)		(-3.4)		(-35.7)	(-4.0)	(-2.0)	
O6	-46.4		-46.7		(-32.7)		-53.7	(-34.7)	(-33.4)	
O7	-30.6	(-4.7)	-94.9	-38.4	-30.1	-27.1	-77.9	-102.9	-106.6	-27.9
O8	-51.3	(-1.9)	-48.1	-35.6	-48.3	-40.0	-88.5	-57.6	-45.4	-36.8
O9	-55.0	(-6.1)	-52.6	-39.4	-52.2	-43.8	-92.3	-61.6	-48.6	-41.4
O10	-69.4	-72.4	-74.3	-70.0	-70.7		-69.4	-71.3		-74.9
O11	-90.1	-93.9	-88.9	-87.5	-88.4		-96.0	-90.5		-84.7
O12	-90.4	-94.2	-89.2	-87.7	-88.6		-96.3	-90.8		-85.0
O13	-88.6	(-93.4)	-87.5	-85.4	-86.7	(-86.5)	-95.4	-89.1		-82.8
O14	-92.5	-91.1	-88.8	-85.3	-86.6	(-76.9)	(-83.6)	(-81.3)	-88.8	-82.0
O15	-104.1	-84.1	-92.8	-85.1	-86.4	(-48.0)	(-48.1)	(-58.0)	-91.4	-79.5
O16					-113.5					-113.9
O17	-96.7	-95.4	-95.3	-97.7	-97.1	(-90.1)	-98.0	-97.5	-99.2	-94.9
N18	(-68.0)		-105.6		-103.8			-103.7	-101.9	

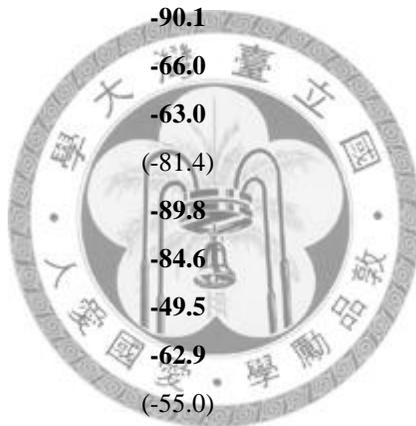
(接續附表四 A.)

	礮山	龍鳳谷	硫礮谷	地熱谷	小油坑	富源	金山漁會	礮港	七股	大油坑
N19	(-85.8)		-98.0		-98.6			-96.4	-100.3	
N20	(-59.9)		-66.6		-76.7			-74.6	-78.3	
N21	(-97.6)		(-93.0)		(-95.1)			(-91.5)	(-99.3)	
N22	-16.7	-30.3	-14.1	-45.7	-40.1			-38.3	-41.6	-42.6
N23	(-42.3)		(-81.3)		(-80.8)		(-41.5)	(-90.9)	(-81.1)	
N24	(-60.0)		(-73.8)		(-75.6)		(-55.2)	(-83.7)	(-79.6)	
N25	(-34.1)		(-42.3)		(-53.6)		(-27.9)	(-61.9)	(-57.5)	
N26	(-71.8)		(-68.8)		(-72.1)		(-64.4)	(-78.8)	(-78.5)	
N27	(-58.4)		(-99.1)		(-97.4)		(-58.0)	(-100.7)	(-94.4)	
N28	(-76.2)		(-91.5)		(-92.2)		(-71.8)	(-93.4)	(-92.8)	
N29	(-50.3)		(-60.1)		(-70.2)		(-44.5)	(-71.6)	(-70.8)	
N30	(-80.9)		(-86.5)		(-82.5)		(-80.9)	(-83.1)	(-77.2)	
N31	(-62.8)		-109.2		(-101.7)		(-67.2)	(-102.1)	(-98.4)	
N32	(-80.6)		-101.6		(-96.6)		(-81.0)	(-96.8)	(-96.8)	
N33	(-54.6)		-70.2		(-74.6)		(-53.7)	(-75.0)	(-74.8)	
N34	(-46.2)		(-49.5)		(-47.1)		(-46.3)	(-47.5)	(-44.1)	
N35	(-12.8)		-92.7		-28.3		(-56.0)	-99.6	-103.0	
N36	(-33.5)		-45.9		-46.6		(-66.6)	-54.4	-41.8	
N37	(-74.5)		-100.7		-100.9		(-140.7)	-116.8	-90.2	
N38	(-15.8)		-53.4		-51.7		(-52.8)	-61.7	-43.4	



(接續附表四 A.)

	礮山	龍鳳谷	硫礮谷	地熱谷	小油坑	富源	金山漁會	礮港	七股	大油坑
N39	(-30.5)		-57.6		-98.4		(-157.3)	-130.4	-79.2	
N40					-116.9					
N41					-111.8					
N42					-89.8					
N43					-108.3					
N44	(-53.1)		-92.8		-90.1		(-59.8)	-93.1	(-85.9)	
N45	(-64.7)		-69.3		-66.0		(-64.8)	-66.5	(-61.8)	
N46	(-44.9)		-53.8		-63.0		(-46.2)	-64.0	(-62.4)	
N47	(-82.7)		(-80.2)		(-81.4)		(-82.7)	(-81.0)	(-83.3)	
N48	(-68.6)		-98.2		-89.8		(-12.4)	(-62.1)	-89.4	
N49	(-86.3)		-90.6		-84.6		(-26.1)	(-54.8)	-87.8	
N50	(-48.6)		-52.0		-49.5		(-48.6)	(-49.9)	-46.3	
N51	(-48.8)		-55.1		-62.9		(-34.4)	(-56.3)	-63.2	
N52	(-80.9)		(-78.9)		(-55.0)		(-81.9)	(-53.3)	(-57.6)	
S53	-11.1	-5.9	-11.5	-18.7	-13.8			-18.3	-15.1	-16.8
S54	(14.7)	(14.7)	(12.8)	(3.9)	(9.3)	(-14.2)	(6.4)	(-5.6)	(5.7)	(7.4)
S55	(-1.4)	(-2.2)	(-4.9)	(-10.8)	(-7.3)	(-21.7)	(-10.1)	(-15.3)	(-7.6)	(-10.8)
S56	(-5.8)	-11.7	-15.1	(-15.0)	(-11.7)	(-24.8)	-19.3	(-18.8)	(-11.6)	(-15.4)
S57		-35.4	-40.3				-42.3			
S58					-26.9					-31.9



(接續附表四 A.)

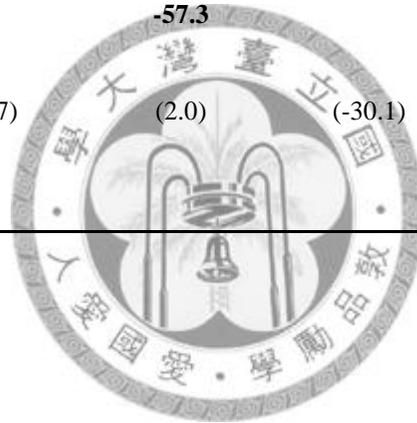
	礮山	龍鳳谷	硫礮谷	地熱谷	小油坑	富源	金山漁會	礮港	七股	大油坑
S59	0.5	(-12.9)	-7.4	-19.0	-13.9			-41.6	(-12.5)	-19.3
S60	(26.3)	(7.7)	(16.8)	(3.6)	(9.1)	(-43.0)	(-29.1)	(-28.9)	(8.3)	(5.0)
S61	(10.1)	(-9.2)	(-0.9)	(-3.9)	(-4.1)	(-44.5)	(-45.6)	(-38.6)	(-0.4)	(-6.9)
S62	(5.8)	(-18.6)	-11.0	(-4.0)	(-4.1)	(-43.7)	-54.8	(-42.1)	(-0.4)	(-7.0)
S63	(-20.6)	(-75.5)	-71.7	(-40.3)	(-38.5)	(-72.5)	-110.0	(-62.8)	(-32.9)	(-45.8)
S64					-27.1					-34.4
S65	15.5	(-9.3)	5.4	-0.3	-0.2	(-38.5)	-47.4	-31.0	(3.5)	-3.2
M66	-6.8	-1.6	-5.0	-6.3	-3.3			-2.1	-4.8	-3.9
M67	(75.7)	(76.0)	(77.0)	(65.1)	(79.1)	(-3.8)	(83.4)	(42.2)	(64.0)	(81.4)
M68	(5.6)	(4.2)	(3.0)	(3.2)	(6.4)	(-16.9)	(8.6)	(1.8)	(5.5)	(4.3)
M69					-8.7					-10.3
M70					-21.9					-25.3
M71	-9.6	-3.7	-6.5	-7.9	-6.5	(27.0)		-3.0	-7.5	-6.1
M72	-61.2	-61.3	-100.5	-61.8	-100.5		-62.3	-101.5	-97.1	-61.2
M73	-78.9	-79.6	-93.0	-80.9	-95.4		-76.1	-94.3	-95.5	-79.7
M74	-53.0	-60.5	-61.6	-65.3	-73.4		-48.8	-72.5	-73.5	-64.3
M75	-66.1	(-100.0)	(-0.3)	-59.3	-67.0	(-63.0)	(-20.1)	(5.4)	(7.5)	-67.0
M76	-45.4	(-93.5)	(-47.2)	(-62.2)	(-48.8)	(-50.2)	(-9.5)	(-39.9)	(-53.7)	(-58.1)
M77	(-41.7)	(-89.3)	(-42.7)	(-58.4)	(-44.9)	(-46.3)	-5.7	-35.9	(-50.5)	(-53.4)
M78		-134.5			-67.7					

(接續附表四 A.)

	礮山	龍鳳谷	硫礮谷	地熱谷	小油坑	富源	金山漁會	礮港	七股	大油坑
M79	-4.2	-4.3	-6.4	-12.4	-10.5	(-13.2)	-14.4	-16.2	-10.3	-12.9
Fe80	-73.0	(-101.7)	-5.4	-65.6	-70.3			(3.3)	(2.7)	-70.9
Fe81	-52.3	(-95.1)	(-52.2)	(-68.5)	(-52.1)			(-42.0)	(-58.5)	(-62.0)
Fe82	(-48.6)	(-90.9)	(-47.7)	(-64.7)	(-48.2)			-38.0	(-55.3)	(-57.4)
Fe83		-136.1			-71.0					
Fe84	(-47.2)	(-81.0)	(-18.9)	(-43.0)	(-47.3)	(-64.0)	(0.7)	(15.9)	(23.5)	(-46.6)
Fe85	(-26.5)	(-74.5)	(-28.0)	(-45.9)	(-29.1)	(-51.1)	(11.4)	(-29.3)	(-37.7)	(-37.7)
Fe86	(-22.8)	(-70.3)	(-23.4)	(-42.1)	(-25.1)	(-47.3)	(15.1)	(-25.3)	(-34.5)	(-33.1)
Fe87	(-44.4)	(-115.5)			(-47.9)					
Fe88	(-63.4)	(-97.9)	(1.2)	(-57.7)	(-63.8)	(-71.5)	(-15.8)	(6.3)	(10.2)	(-64.9)
Fe89	(-42.6)	(-91.4)	(-45.7)	(-60.6)	(-45.6)	(-58.6)	(-5.2)	(-39.0)	(-51.0)	(-56.0)
Fe90	(-38.9)	(-87.2)	(-41.2)	(-56.8)	(-41.7)	(-54.8)	(-1.5)	(-35.0)	(-47.8)	(-51.3)
Fe91	(-60.6)	(-132.4)			(-64.5)					
Fe92	(-67.8)	(-107.4)	-8.9	(-61.9)	(-68.3)	(74.6)	-25.0	(2.8)	(6.2)	(-69.5)
Fe93	(-47.0)	(-100.9)	(-55.8)	(-64.8)	(-50.1)	(-61.7)	(-14.4)	(-42.5)	(-55.0)	(-60.6)
Fe94	(-43.3)	(-96.7)	(-51.3)	(-60.9)	(-46.1)	(-57.9)	-10.6	(-38.5)	(-51.8)	(-56.0)
Fe95	(-64.9)	-141.9			(-68.9)					
Fe96					-83.4					-86.0
Fe97					(-65.2)					(-77.1)

(接續附表四 A.)

	礮山	龍鳳谷	硫礮谷	地熱谷	小油坑	富源	金山漁會	礮港	七股	大油坑
Fe98					(-61.3)					(-72.4)
Fe99					-84.1					
Fe100	-58.1	(-98.1)	(7.5)	-47.0	-56.6	(-59.4)	(-17.5)	(13.8)	(18.7)	-54.9
Fe101	-37.3	(-91.5)	(-39.4)	(-49.8)	(-38.4)	(-46.5)	(-6.9)	(-31.4)	(-42.6)	(-46.0)
Fe102	(-33.6)	(-87.3)	(-35.0)	(-46.0)	(-34.4)	(-42.7)	-3.2	-27.4	(-39.3)	(-41.3)
Fe103		(-132.5)			-57.3					
F104		-33.2	-35.4				-32.2			
F105	(5.3)	-5.8	-3.6	(3.7)	(2.0)	(-30.1)	-31.3	(-0.5)	(3.5)	(1.4)
F106		-62.6	-64.3				-86.5			
F107		-51.0	-49.0				-101.2			



B. 台灣東部、南部溫泉

	安通	紅葉	虎爺	關仔嶺	新養女湖 I	新養女湖 II	小滾水 III	小滾水 IV
O1	-98.3		-106.5	-101.9				
O2	(-89.0)	(-75.5)	(-81.6)	-106.4				
O3	-106.3	-100.8	(-95.5)	-104.2				
O4	-104.5	-103.6	-104.6	-104.6				
O5	-32.2	-35.4	-36.4	-35.1				
O6	-55.1	-56.6	-56.3	-56.8				
O7	-43.7	81.3	0.2	-63.6				
O8	-110.8	(-18.0)	-92.8	-82.5				
O9	-114.5	(-22.2)	-96.1	-86.1				
O10	-69.6		-66.3					
O11	-97.5		-100.8					
O12	-97.7		-101.0					
O13	(-98.0)	(-97.5)	(-100.9)	(-97.5)				
O14	-92.9	-93.8	(-88.6)	(-85.2)				
O15	-77.2	-82.7	(-51.6)	(-48.1)				
O16		-109.3		-114.3				
O17	-99.1	-96.4	-98.9	-97.6				
N18	(-66.1)		(-70.1)	(-66.8)				
N19	(-83.4)		(-83.5)	(-80.3)				
N20	(-48.9)		(-55.2)	(-50.5)				

(接續附表四 B.)

	安通	紅葉	虎爺	關仔嶺	新養女湖 I	新養女湖 II	小滾水 III	小滾水 IV
N21	(-95.0)		(-92.4)	(-89.3)				
N22	(8.6)		-8.0	-0.9				
N23	(-56.8)	(-40.1)	(-45.1)	(-71.3)			(-72.5)	-105.2
N24	(-74.2)	(-51.7)	(-58.5)	(-84.8)			(-76.3)	-107.8
N25	(-39.6)	(-24.2)	(-30.2)	(-55.0)			(-37.6)	-69.1
N26	(-85.7)	(-59.5)	(-67.5)	(-93.8)			(-78.8)	(-109.5)
N27	(-74.1)	(-65.5)	(-59.1)	(-69.1)			(-89.4)	-99.0
N28	(-91.4)	(-77.1)	(-72.5)	(-82.6)			(-93.2)	-101.6
N29	(-56.9)	(-49.5)	(-44.1)	(-52.8)			(-54.6)	-62.9
N30	(-81.2)	(-84.5)	(-77.3)	(-80.6)			(-70.3)	(-71.6)
N31	(-72.3)	(-68.1)	(-68.2)	(-69.5)			-98.8	-100.3
N32	(-89.6)	(-79.8)	(-81.5)	(-83.0)			-102.6	-103.0
N33	(-55.1)	(-52.2)	(-53.2)	(-53.2)			-63.9	-64.2
N34	(-46.4)	(-48.3)	(-44.2)	(-46.1)			(-40.1)	(-40.9)
N35	(-28.8)	(105.1)	(23.3)	(-42.0)			-58.7	-57.4
N36	(-96.0)	(5.7)	(-69.8)	(-60.9)			-91.1	-89.7
N37	(-199.4)	(3.1)	(-146.2)	(-129.0)			-187.6	-185.0
N38	(-78.6)	(17.4)	(-56.4)	(-47.4)			-87.4	-87.1
N39	(-245.8)	(133.1)	(-165.8)	(-124.4)			-209.8	-203.9
N40		(-73.9)		(-79.2)				

(接續附表四 B.)

	安通	紅葉	虎爺	關仔嶺	新養女湖 I	新養女湖 II	小滾水 III	小滾水 IV
N41		(-85.6)		(-92.7)				
N42		(-58.1)		(-62.9)				
N43		(-93.3)		(-101.7)				
N44	(-65.8)	(-62.2)	(-64.4)	(-62.4)			(-94.1)	(-95.7)
N45	(-64.9)	(-67.6)	(-61.8)	(-64.5)			(-56.2)	(-57.3)
N46	(-48.6)	(-46.2)	(-49.5)	(-46.1)			(-59.2)	(-59.6)
N47	(-94.7)	(-81.5)	(-86.7)	(-84.9)			(-100.4)	(-100.1)
N48	(-45.0)	(-47.3)	(-15.2)	(-13.0)			(-47.1)	(-47.6)
N49	(-62.4)	(-58.9)	(-28.6)	(-26.5)			(-50.9)	(-50.3)
N50	(-48.7)	(-50.7)	(-46.4)	(-48.4)			(-42.2)	(-43.0)
N51	(-43.4)	(-42.5)	(-37.2)	(-33.8)			(-47.5)	(-47.6)
N52	(-103.6)	(-81.2)	(-84.5)	(-88.4)			(-105.6)	(-105.1)
S53	-5.5		-18.0	-16.8				
S54	(3.8)	(18.3)	(7.0)	-21.2	-20.9	-22.3	(9.9)	-21.5
S55	-13.4	-7.0	(-7.0)	-19.0	-16.6	-18.1	(-7.1)	-15.3
S56	-11.6	-9.7	-16.0	-19.5	-17.5	-18.5	-16.4	-16.6
S57	-7.3	-16.4	-38.7	-20.6	-19.9	-19.5	-39.7	-19.9
S58		-15.5		-29.2				
S59	(-21.1)		(-54.9)	(-53.8)				
S60	(-11.8)	(7.2)	(-29.9)	(-58.2)	(-57.7)	(-61.8)	(-25.4)	(-57.5)

(接續附表四 B.)

	安通	紅葉	虎爺	關仔嶺	新養女湖 I	新養女湖 II	小滾水 III	小滾水 IV
S61	(-29.0)	(-18.2)	(-43.9)	(-56.0)	(-53.4)	(-57.6)	(-42.3)	(-51.4)
S62	(-27.2)	(-20.8)	(-53.0)	(-56.5)	(-54.3)	(-58.0)	(-51.7)	(-52.7)
S63	(-16.9)	(-36.9)	(-107.3)	(-59.1)	(-60.0)	(-60.5)	(-107.7)	(-60.5)
S64		(-26.6)		(-66.2)				
S65	(-20.8)	(-14.8)	(-49.2)	(-49.3)	(-49.0)	(-52.7)	(-47.0)	(-48.0)
M66	0.8		-7.6	-4.3				
M67	(40.3)	(83.6)	(69.5)	-35.2	-31.0	-34.7	(87.2)	-37.1
M68	-14.3	-8.9	(6.8)	-13.2	-6.9	-8.8	(9.7)	-6.2
M69				-9.9				
M70		-17.3		-22.3				
M71	8.0		-11.0	2.3				
M72	(-66.9)	(-61.0)	(-62.5)	(-62.5)			-94.4	-95.9
M73	(-84.2)	(-72.6)	(-75.9)	(-76.0)			-98.1	-98.6
M74	(-49.7)	(-45.1)	(-47.6)	(-46.2)			-59.4	-59.8
M75	(-55.4)	-177.7	-99.2	(-33.9)			(-39.4)	(-41.2)
M76	(11.7)	(-78.4)	(-6.1)	(-15.1)			(-6.9)	(-8.8)
M77	15.5	(-74.2)	(-2.8)	-11.4				
M78								
M79	-6.3	-2.6	-10.4	-12.4	-13.1	-13.6	-11.9	-12.2
Fe80	-54.6		-106.8	-38.3				

(接續附表四 B.)

	安通	紅葉	虎爺	關仔嶺	新養女湖 I	新養女湖 II	小滾水 III	小滾水 IV
Fe81	(12.5)		(-13.7)	(-19.4)				
Fe82	16.3		(-10.4)	-15.8				
Fe83								
Fe84	(-45.3)	(-156.8)	-81.8	(-42.7)			(-17.6)	(-50.5)
Fe85	(21.8)	(-57.5)	(11.3)	(-23.9)			(14.9)	(-18.0)
Fe86	(25.6)	(-53.3)	(14.6)	-20.2			(17.5)	(-15.3)
Fe87								
Fe88	(-62.5)	-182.1	-95.8	(-40.5)			(-34.6)	(-44.3)
Fe89	(4.6)	(-82.8)	(-2.7)	(-21.7)			(-2.1)	(-11.9)
Fe90	(8.3)	(-78.6)	(0.6)	-18.0			(0.6)	(-9.1)
Fe91								
Fe92	(-60.8)	-144.9	-104.8	(-41.0)			(-43.9)	(-45.6)
Fe93	(6.4)	(-85.5)	(-11.7)	(-22.1)			(-11.4)	(-13.2)
Fe94	10.1	(-81.3)	(-8.5)	-18.5			(-8.8)	(-10.4)
Fe95								
Fe96		-190.6		(-50.6)				
Fe97		(-91.3)		(-31.8)				
Fe98		(-87.1)		-28.1				
Fe99								
Fe100	(-54.3)	(-178.8)	-101.1	(-33.8)			(-39.3)	(-41.0)

(接續附表四 B.)

	安通	紅葉	虎爺	關仔嶺	新養女湖 I	新養女湖 II	小滾水 III	小滾水 IV
Fe101	(12.8)	(-79.5)	(-8.0)	(-15.0)			(-6.8)	(-8.6)
Fe102	(16.5)	(-75.3)	(-4.7)	(-11.3)			(-4.1)	(-5.8)
Fe103								
F104	6.2	-9.4	-31.7	-1.5	-3.3	-1.5	-32.7	-4.6
F105	-6.2	-34.7	2.0	-2.7	-28.6	-31.1	-26.5	-27.5
F106	4.5	-50.7	-52.4	-5.3	-34.3	-33.6	-82.5	-35.3
F107	-35.5	-111.5	-30.6	-2.8	-52.3	-56.3	-92.5	-47.6

¹ 化學反應分類 O : aerobic oxidation N : nitrate, nitrite reduction, nitrogen fixation, anammox S : sulfate, sulfur reduction, sulfur disproportionation M : methanogenesis, acetogenesis, anaerobic methane oxidation Fe : Metal reduction F : fermentation。

² 自由能單位為 (kJ / mole e⁻)

³ () = 反應物低於偵測極限。假設其反應物為兩個化學反應的中間產物，並以 1E-10 μM 的濃度值代入式子計算。

⁴ 空格 表示該化學反應不存在於該溫泉水中。

附表五 分子生物與微生物純化資料表

Methodology	Sampling site	Closest strains ¹	% ¹	e ⁻ donor ⁴	e ⁻ acceptor	Reference ⁵
DNA analysis	礪山	<i>Vulcanisaeta distribute</i>	63 ²	OC	S ⁰	Itoh et al., 2002
		<i>Sulfolobus tokodaii</i>	38 ²	OC / S ⁰	O ₂	Suzuki T et al., 2002
DNA analysis	龍鳳谷	<i>Caldisphaera lagunensis</i>	26 ²	OC	S ⁰	Itoh et al., 2003
		<i>Thermocodium 141odesties</i>	5 ²	OC	S ⁰	Itoh et al., 1998
		<i>Sulfolobus metallicus</i>	11 ²	S ⁰	O ₂	Huber and Stetter, 1991
		<i>Metallosphaera sedula</i>	11 ²	H ₂ / OC / Fe ²⁺ / S ⁰ / S ²⁻	O ₂	Huber et al., 1989
		<i>Feravidococcus fontis</i>	5 ²	unpublished	unpublished	
		Unclassified group A, B	42 ²			
DNA analysis	硫磺谷	<i>Caldisphaera lagunensis</i>	11 ²	OC	S ⁰	Itoh et al., 2003
		<i>Sulfolobus metallicus</i>	8 ²	S ⁰	O ₂	Huber and Stetter, 1991
		<i>Acidianus infernos</i>	22 ²	H ₂ / S ⁰	O ₂ / S ⁰	Seegerer et al., 1986
		Unclassified group A to H	59 ²			
DNA analysis	富源	<i>Sulfolobus metallicus</i>	7 ²	S ⁰	O ₂	Huber and Stetter, 1991
		<i>Acidianus infernos</i>	80 ²	H ₂ / S ⁰	O ₂ / S ⁰	Seegerer et al., 1986
		<i>Acidianus manzaensis</i>	13 ²	H ₂ / S ⁰ / OC	O ₂ / Fe ³⁺	Yoshida et al., 2006
DNA analysis	礪港	<i>Caldisphaera lagunensis</i>	44 ²	OC	S ⁰	Itoh et al., 2003

		<i>Sulfolobus metallicus</i>	4 ²	S ⁰	O ₂	Huber and Stetter, 1991
		<i>Acidianus infernus</i>	9 ²	H ₂ / S ⁰	O ₂ / S ⁰	Seegerer et al., 1986
		<i>Acidilobus aceticus</i>	30 ²	OC	S ⁰	Prokofeva et al., 2000
		Unclassified group I	13 ²			
Isolation experiment	小油坑	<i>Acidianus manzaensis</i>		H ₂ / S ⁰ / OC	O ₂ / Fe ³⁺	Yoshida et al., 2006
DNA analysis	紅葉	<i>Uncultured Desulfurococcales archaeon clone</i>	55 ²	OC	S ⁰	
		<i>Aquificales str. SS5H1</i>	100 ³	H ₂	O ₂	Madigan and Martinko, 2006
DNA analysis	新養女湖 II	<i>Methanosaeta thermophila</i>	74 ²	H ₂ / OC	CO ₂	Patel and Sprott, 1990
Isolation experiment	關仔嶺	<i>Thermodesulfobacterium commune</i>		H ₂ / OC	SO ₄ ²⁻	Jeanthon et al., 2002

¹ 資料來源：本實驗室未發表分子生物分析資料與微生物培養資料。

² 古菌族群中所占的比例。

³ 細菌族群中所占的比例。

⁴ OC：有機碳 (Organic carbon)

⁵ 該微生物進行之代謝反應參考文獻。

附表六 溫泉水化學反應自由能與通量

a. 礮山

反應式 ¹	自由能 (kJ/mole e ⁻) ²	限制因子	通量 (kJ/sec)	生長狀態 細胞數量 (cells)	維持狀態 細胞數量 (cells)	倖存狀態 細胞數量 (cells)
O15	-104.1	O _{2(aq)}	7.50E-13	3.45E+03	3.45E+06	3.45E+09
O14	-92.5	HS ⁻	7.45E-13	3.43E+03	3.43E+06	3.43E+09
O13	-88.6	O _{2(aq)}	6.39E-13	2.94E+03	2.94E+06	2.94E+09
O12	-90.4	O _{2(aq)}	6.08E-13	2.80E+03	2.80E+06	2.80E+09
O11	-90.1	O _{2(aq)}	6.06E-13	2.79E+03	2.79E+06	2.79E+09
O6	-46.4	NH ₄ ⁺	5.50E-13	2.53E+03	2.53E+06	2.53E+09
O10	-69.4	O _{2(aq)}	4.67E-13	2.15E+03	2.15E+06	2.15E+09
O9	-55.0	O _{2(aq)}	3.96E-13	1.82E+03	1.82E+06	1.82E+09
O8	-51.3	O _{2(aq)}	3.70E-13	1.70E+03	1.70E+06	1.70E+09
O7	-30.6	O _{2(aq)}	2.20E-13	1.01E+03	1.01E+06	1.01E+09
O17	-96.7	CH _{4(aq)}	2.95E-14	1.36E+02	1.36E+05	1.36E+08
O1	-103.6	H _{2(aq)}	2.37E-14	1.09E+02	1.09E+05	1.09E+08
M75	-66.1	CH _{4(aq)}	2.01E-14	9.25E+01	9.25E+04	9.25E+07
Fe80	-73.0	H _{2(aq)}	1.67E-14	7.68E+01	7.68E+04	7.68E+07
Fe81	-52.3	H _{2(aq)}	1.19E-14	5.48E+01	5.48E+04	5.48E+07
N22	-16.7	H _{2(aq)}	3.82E-15	1.76E+01	1.76E+04	1.76E+07
S53	-11.1	H _{2(aq)}	2.53E-15	1.16E+01	1.16E+04	1.16E+07
M71	-9.6	H _{2(aq)}	2.20E-15	1.01E+01	1.01E+04	1.01E+07
Fe100	-58.1	Fe ³⁺	1.89E-15	8.70E+00	8.70E+03	8.70E+06
M76	-45.4	CH _{4(aq)}	1.73E-15	7.96E+00	7.96E+03	7.96E+06
M66	-6.8	H _{2(aq)}	1.56E-15	7.18E+00	7.18E+03	7.18E+06
M79	-4.2	CH _{4(aq)}	1.29E-15	5.94E+00	5.94E+03	5.94E+06

b.龍鳳谷

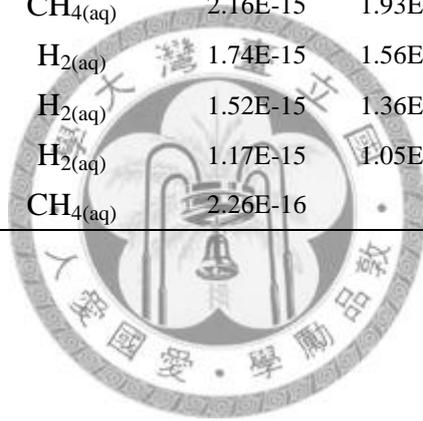
反應式	自由能 (kJ/mole e ⁻)	限制因子	通量 (kJ/sec)	生長狀態 細胞數量 (cells)	維持狀態 細胞數量 (cells)	倖存狀態 細胞數量 (cells)
Fe95	-141.9	Propanoic acid _(aq)	6.14E-13	1.02E+03	1.02E+06	1.02E+09
O4	-102.8	Propanoic acid _(aq)	4.45E-13	7.36E+02	7.36E+05	7.36E+08
O13	-93.4	O _{2(aq)}	2.96E-13	4.90E+02	4.90E+05	4.90E+08
O14	-91.1	O _{2(aq)}	2.89E-13	4.78E+02	4.78E+05	4.78E+08
O12	-94.2	O _{2(aq)}	2.79E-13	4.62E+02	4.62E+05	4.62E+08
O11	-93.9	O _{2(aq)}	2.78E-13	4.60E+02	4.60E+05	4.60E+08
O15	-84.1	O _{2(aq)}	2.67E-13	4.42E+02	4.42E+05	4.42E+08
O10	-72.4	O _{2(aq)}	2.14E-13	3.54E+02	3.54E+05	3.54E+08
S62	-18.6	Propanoic acid _(aq)	8.07E-14	1.34E+02	1.34E+05	1.34E+08
F107	-51.0	Propanoic acid _(aq)	6.31E-14	1.04E+02	1.04E+05	1.04E+08
S56	-11.7	Propanoic acid _(aq)	5.05E-14	8.36E+01	8.36E+04	8.36E+07
S57	-35.4	Propanoic acid _(aq)	4.19E-14	6.93E+01	6.93E+04	6.93E+07
F104	-33.2	Propanoic acid _(aq)	4.10E-14	6.78E+01	6.78E+04	6.78E+07
F106	-62.6	Propanoic acid _(aq)	3.87E-14	6.40E+01	6.40E+04	6.40E+07
F105	-5.8	Propanoic acid _(aq)	2.49E-14	4.12E+01	4.12E+04	4.12E+07
M78	-134.5	CH _{4(aq)}	1.92E-14	3.18E+01	3.18E+04	3.18E+07
O17	-95.4	CH _{4(aq)}	1.36E-14	2.25E+01	2.25E+04	2.25E+07
Fe83	-136.1	H _{2(aq)}	2.37E-15	3.92E+00	3.92E+03	3.92E+06
O1	-97.0	H _{2(aq)}	1.69E-15	2.80E+00	2.80E+03	2.80E+06
M79	-4.3	CH _{4(aq)}	6.16E-16	1.02E+00	1.02E+03	1.02E+06
N22	-30.3	H _{2(aq)}	5.28E-16		8.74E+02	8.74E+05
S53	-5.9	H _{2(aq)}	1.03E-16		1.70E+02	1.70E+05
M71	-3.7	H _{2(aq)}	6.50E-17		1.08E+02	1.08E+05
M66	-1.6	H _{2(aq)}	2.81E-17		4.65E+01	4.65E+04

c. 硫磺谷

反應式	自由能 (kJ/mole e ⁻)	限制因子	通量 (kJ/sec)	生長狀態 細胞數量 (cells)	維持狀態 細胞數量 (cells)	倖存狀態 細胞數量 (cells)
N31	-109.2	Propanoic acid _(aq)	1.36E-12	1.22E+03	1.22E+06	1.22E+09
O4	-103.9	Propanoic acid _(aq)	1.29E-12	1.15E+03	1.15E+06	1.15E+09
N32	-101.6	Propanoic acid _(aq)	1.26E-12	1.13E+03	1.13E+06	1.13E+09
N35	-92.7	NO ₃ ⁻	1.24E-12	1.11E+03	1.11E+06	1.11E+09
N46	-53.8	NO ₃ ⁻	1.15E-12	1.03E+03	1.03E+06	1.03E+09
O7	-94.9	O _{2(aq)}	1.01E-12	9.04E+02	9.04E+05	9.04E+08
O6	-46.7	NH ₄ ⁺	9.88E-13	8.84E+02	8.84E+05	8.84E+08
O13	-87.5	O _{2(aq)}	9.27E-13	8.30E+02	8.30E+05	8.30E+08
N45	-69.3	NO ₃ ⁻	9.27E-13	8.30E+02	8.30E+05	8.30E+08
O12	-89.2	O _{2(aq)}	8.83E-13	7.90E+02	7.90E+05	7.90E+08
O11	-88.9	O _{2(aq)}	8.80E-13	7.88E+02	7.88E+05	7.88E+08
N33	-70.2	Propanoic acid _(aq)	8.71E-13	7.79E+02	7.79E+05	7.79E+08
O10	-74.3	O _{2(aq)}	7.35E-13	6.58E+02	6.58E+05	6.58E+08
N37	-100.7	NO ₃ ⁻	6.74E-13	6.03E+02	6.03E+05	6.03E+08
N36	-45.9	NO ₃ ⁻	6.14E-13	5.49E+02	5.49E+05	5.49E+08
O9	-52.6	O _{2(aq)}	5.57E-13	4.98E+02	4.98E+05	4.98E+08
O8	-48.1	O _{2(aq)}	5.10E-13	4.56E+02	4.56E+05	4.56E+08
N44	-92.8	NO ₃ ⁻	4.96E-13	4.44E+02	4.44E+05	4.44E+08
O14	-88.8	O _{2(aq)}	4.08E-13	3.65E+02	3.65E+05	3.65E+08
N39	-57.6	NO ₃ ⁻	3.08E-13	2.76E+02	2.76E+05	2.76E+08
N38	-53.4	NO ₃ ⁻	2.86E-13	2.56E+02	2.56E+05	2.56E+08
N51	-55.1	HS ⁻	2.53E-13	2.26E+02	2.26E+05	2.26E+08
N50	-52.0	HS ⁻	2.39E-13	2.14E+02	2.14E+05	2.14E+08
S56	-15.1	Propanoic acid _(aq)	1.87E-13	1.67E+02	1.67E+05	1.67E+08
F107	-49.0	Propanoic acid _(aq)	1.74E-13	1.56E+02	1.56E+05	1.56E+08
S57	-40.3	Propanoic acid _(aq)	1.43E-13	1.28E+02	1.28E+05	1.28E+08
S62	-11.0	Propanoic acid _(aq)	1.37E-13	1.23E+02	1.23E+05	1.23E+08
S63	-71.7	Propanoic acid _(aq)	1.27E-13	1.14E+02	1.14E+05	1.14E+08
F104	-35.4	Propanoic acid _(aq)	1.26E-13	1.13E+02	1.13E+05	1.13E+08
F106	-64.3	Propanoic acid _(aq)	1.14E-13	1.02E+02	1.02E+05	1.02E+08
N48	-98.2	HS ⁻	1.13E-13	1.01E+02	1.01E+05	1.01E+08
O15	-92.8	O _{2(aq)}	1.07E-13	9.58E+01	9.58E+04	9.58E+07
N49	-90.6	HS ⁻	1.04E-13	9.31E+01	9.31E+04	9.31E+07

(接續附表六 c.)

反應式	自由能 (kJ/mole e ⁻)	限制因子	通量 (kJ/sec)	生長狀態 細胞數量 (cells)	維持狀態 細胞數量 (cells)	倖存狀態 細胞數量 (cells)
F105	-3.6	Propanoic acid _(aq)	4.45E-14	3.98E+01	3.98E+04	3.98E+07
N18	-105.6	H _{2(aq)}	2.46E-14	2.20E+01	2.20E+04	2.20E+07
O1	-100.3	H _{2(aq)}	2.34E-14	2.09E+01	2.09E+04	2.09E+07
N19	-98.0	H _{2(aq)}	2.29E-14	2.05E+01	2.05E+04	2.05E+07
N20	-66.6	H _{2(aq)}	1.55E-14	1.39E+01	1.39E+04	1.39E+07
M72	-100.5	CH _{4(aq)}	3.52E-15	3.15E+00	3.15E+03	3.15E+06
O17	-95.3	CH _{4(aq)}	3.34E-15	2.99E+00	2.99E+03	2.99E+06
N22	-14.1	H _{2(aq)}	3.30E-15	2.95E+00	2.95E+03	2.95E+06
M73	-93.0	CH _{4(aq)}	3.26E-15	2.92E+00	2.92E+03	2.92E+06
S53	-11.5	H _{2(aq)}	2.67E-15	2.39E+00	2.39E+03	2.39E+06
M74	-61.6	CH _{4(aq)}	2.16E-15	1.93E+00	1.93E+03	1.93E+06
S59	-7.4	H _{2(aq)}	1.74E-15	1.56E+00	1.56E+03	1.56E+06
M71	-6.5	H _{2(aq)}	1.52E-15	1.36E+00	1.36E+03	1.36E+06
M66	-5.0	H _{2(aq)}	1.17E-15	1.05E+00	1.05E+03	1.05E+06
M79	-6.4	CH _{4(aq)}	2.26E-16		2.02E+02	2.02E+05



d.地熱谷

反應式	自由能 (kJ/mole e ⁻)	限制因子	通量 (kJ/sec)	生長狀態 細胞數量 (cells)	維持狀態 細胞數量 (cells)	倖存狀態 細胞數量 (cells)
O13	-85.4	O _{2(aq)}	1.52E-12	5.51E+03	5.51E+06	5.51E+09
O12	-87.7	O _{2(aq)}	1.45E-12	5.25E+03	5.25E+06	5.25E+09
O11	-87.5	O _{2(aq)}	1.45E-12	5.25E+03	5.25E+06	5.25E+09
O10	-70.0	O _{2(aq)}	1.16E-12	4.20E+03	4.20E+06	4.20E+09
O14	-85.3	O _{2(aq)}	8.37E-13	3.03E+03	3.03E+06	3.03E+09
O9	-39.4	O _{2(aq)}	7.00E-13	2.54E+03	2.54E+06	2.54E+09
O7	-38.4	O _{2(aq)}	6.83E-13	2.48E+03	2.48E+06	2.48E+09
O8	-35.6	O _{2(aq)}	6.32E-13	2.29E+03	2.29E+06	2.29E+09
O15	-85.1	O _{2(aq)}	2.09E-13	7.57E+02	7.57E+05	7.57E+08
O1	-104.0	H _{2(aq)}	3.00E-14	1.09E+02	1.09E+05	1.09E+08
Fe100	-47.0	Fe ³⁺	2.84E-14	1.03E+02	1.03E+05	1.03E+08
Fe80	-65.6	H _{2(aq)}	1.89E-14	6.85E+01	6.85E+04	6.85E+07
N22	-45.7	H _{2(aq)}	1.32E-14	4.78E+01	4.78E+04	4.78E+07
O17	-97.7	CH _{4(aq)}	1.23E-14	4.46E+01	4.46E+04	4.46E+07
M75	-59.3	CH _{4(aq)}	7.47E-15	2.71E+01	2.71E+04	2.71E+07
S59	-19.0	H _{2(aq)}	5.46E-15	1.98E+01	1.98E+04	1.98E+07
S53	-18.7	H _{2(aq)}	5.39E-15	1.95E+01	1.95E+04	1.95E+07
M71	-7.9	H _{2(aq)}	2.27E-15	8.23E+00	8.23E+03	8.23E+06
M66	-6.3	H _{2(aq)}	1.81E-15	6.56E+00	6.56E+03	6.56E+06
M79	-12.4	CH _{4(aq)}	1.56E-15	5.65E+00	5.65E+03	5.65E+06

e. 金山漁會

反應式	自由能 (kJ/mole e ⁻)	限制因子	通量 (kJ/sec)	生長狀態 細胞數量 (cells)	維持狀態 細胞數量 (cells)	倖存狀態 細胞數量 (cells)
O17	-98.0	CH _{4(aq)}	1.20E-12	5.48E+03	5.48E+06	5.48E+09
O4	-102.9	Propanoic acid _(aq)	9.50E-13	4.34E+03	4.34E+06	4.34E+09
O13	-95.4	O _{2(aq)}	8.77E-13	4.01E+03	4.01E+06	4.01E+09
O9	-92.3	O _{2(aq)}	8.48E-13	3.87E+03	3.87E+06	3.87E+09
O12	-96.3	O _{2(aq)}	8.26E-13	3.77E+03	3.77E+06	3.77E+09
O11	-96.0	O _{2(aq)}	8.23E-13	3.76E+03	3.76E+06	3.76E+09
O8	-88.5	O _{2(aq)}	8.14E-13	3.72E+03	3.72E+06	3.72E+09
O7	-77.9	O _{2(aq)}	7.16E-13	3.27E+03	3.27E+06	3.27E+09
O10	-69.4	O _{2(aq)}	5.95E-13	2.72E+03	2.72E+06	2.72E+09
S62	-54.8	Propanoic acid _(aq)	5.06E-13	2.31E+03	2.31E+06	2.31E+09
O6	-53.7	O _{2(aq)}	4.94E-13	2.26E+03	2.26E+06	2.26E+09
F105	-31.3	Propanoic acid _(aq)	2.89E-13	1.32E+03	1.32E+06	1.32E+09
F107	-101.2	Propanoic acid _(aq)	2.67E-13	1.22E+03	1.22E+06	1.22E+09
S56	-19.3	Propanoic acid _(aq)	1.78E-13	8.13E+02	8.13E+05	8.13E+08
M79	-14.4	CH _{4(aq)}	1.76E-13	8.04E+02	8.04E+05	8.04E+08
S63	-110.0	Propanoic acid _(aq)	1.45E-13	6.62E+02	6.62E+05	6.62E+08
F106	-86.5	Propanoic acid _(aq)	1.14E-13	5.21E+02	5.21E+05	5.21E+08
S57	-42.3	Propanoic acid _(aq)	1.11E-13	5.07E+02	5.07E+05	5.07E+08
Fe94	-10.6	Propanoic acid _(aq)	9.82E-14	4.49E+02	4.49E+05	4.49E+08
F104	-32.2	Propanoic acid _(aq)	8.48E-14	3.87E+02	3.87E+05	3.87E+08
M77	-5.7	CH _{4(aq)}	7.03E-14	3.21E+02	3.21E+05	3.21E+08

f. 富源

反應式	自由能 (kJ/mole e ⁻)	限制因子	通量 (kJ/sec)	生長狀態 細胞數量 (cells)	維持狀態 細胞數量 (cells)	倖存狀態 細胞數量 (cells)
O13	-86.5	O _{2(aq)}	1.73E-12	6.55E+03	6.55E+06	6.55E+09
O7	-43.8	O _{2(aq)}	8.77E-13	3.32E+03	3.32E+06	3.32E+09
O8	-40.0	O _{2(aq)}	8.01E-13	3.03E+03	3.03E+06	3.03E+09
O9	-27.1	O _{2(aq)}	5.42E-13	2.05E+03	2.05E+06	2.05E+09
F100	-59.4	Fe ³⁺	3.66E-13	1.38E+03	1.38E+06	1.38E+09

g. 小油坑

反應式	自由能 (kJ/mole e ⁻)	限制因子	通量 (kJ/sec)	生長狀態 細胞數量 (cells)	維持狀態 細胞數量 (cells)	倖存狀態 細胞數量 (cells)
N51	-62.9	NO ₃ ⁻	1.76E-12	5.05E+03	5.05E+06	5.05E+09
N46	-63.0	NO ₃ ⁻	1.67E-12	4.79E+03	4.79E+06	4.79E+09
N49	-84.6	NO ₃ ⁻	1.63E-12	4.67E+03	4.67E+06	4.67E+09
N45	-66.0	NO ₃ ⁻	1.10E-12	3.15E+03	3.15E+06	3.15E+09
N37	-100.9	NO ₃ ⁻	8.38E-13	2.40E+03	2.40E+06	2.40E+09
N50	-49.5	NO ₃ ⁻	8.22E-13	2.36E+03	2.36E+06	2.36E+09
O15	-86.4	O _{2(aq)}	8.00E-13	2.29E+03	2.29E+06	2.29E+09
N36	-46.6	NO ₃ ⁻	7.73E-13	2.22E+03	2.22E+06	2.22E+09
O14	-86.6	O _{2(aq)}	7.20E-13	2.06E+03	2.06E+06	2.06E+09
O13	-86.7	O _{2(aq)}	6.93E-13	1.99E+03	1.99E+06	1.99E+09
N48	-89.8	NO ₃ ⁻	6.87E-13	1.97E+03	1.97E+06	1.97E+09
O12	-88.6	O _{2(aq)}	6.62E-13	1.90E+03	1.90E+06	1.90E+09
O11	-88.4	O _{2(aq)}	6.60E-13	1.89E+03	1.89E+06	1.89E+09
N39	-98.4	NO ₃ ⁻	6.54E-13	1.88E+03	1.88E+06	1.88E+09
N44	-90.1	NO ₃ ⁻	5.98E-13	1.71E+03	1.71E+06	1.71E+09
O10	-70.7	O _{2(aq)}	5.28E-13	1.51E+03	1.51E+06	1.51E+09
N35	-28.3	NO ₃ ⁻	4.70E-13	1.35E+03	1.35E+06	1.35E+09
O9	-52.2	O _{2(aq)}	4.18E-13	1.20E+03	1.20E+06	1.20E+09
O8	-48.3	O _{2(aq)}	3.86E-13	1.11E+03	1.11E+06	1.11E+09
N38	-51.7	NO ₃ ⁻	3.43E-13	9.83E+02	9.83E+05	9.83E+08
O7	-30.1	O _{2(aq)}	2.41E-13	6.91E+02	6.91E+05	6.91E+08
M72	-100.5	CH _{4(aq)}	1.43E-13	4.10E+02	4.10E+05	4.10E+08
O17	-97.1	O _{2(aq)}	1.39E-13	3.99E+02	3.99E+05	3.99E+08
M73	-95.4	CH _{4(aq)}	1.36E-13	3.90E+02	3.90E+05	3.90E+08
M74	-73.4	CH _{4(aq)}	1.05E-13	3.01E+02	3.01E+05	3.01E+08
M78	-67.7	CH _{4(aq)}	9.66E-14	2.77E+02	2.77E+05	2.77E+08
M75	-67.0	CH _{4(aq)}	9.56E-14	2.74E+02	2.74E+05	2.74E+08
Fe100	-56.6	Fe ³⁺	2.35E-14	6.74E+01	6.74E+04	6.74E+07
M79	-10.5	CH _{4(aq)}	1.01E-14	2.90E+01	2.90E+04	2.90E+07
N18	-103.8	H _{2(aq)}	4.78E-15	1.37E+01	1.37E+04	1.37E+07
O1	-100.4	H _{2(aq)}	4.62E-15	1.32E+01	1.32E+04	1.32E+07
N19	-98.6	H _{2(aq)}	4.54E-15	1.30E+01	1.30E+04	1.30E+07

(接續附表六 g.)

反應式	自由能 (kJ/mole e ⁻)	限制因子	通量 (kJ/sec)	生長狀態 細胞數量 (cells)	維持狀態 細胞數量 (cells)	倖存狀態 細胞數量 (cells)
N20	-76.7	H _{2(aq)}	3.53E-15	1.01E+01	1.01E+04	1.01E+07
Fe83	-71.0	H _{2(aq)}	3.27E-15	9.38E+00	9.38E+03	9.38E+06
Fe80	-70.3	H _{2(aq)}	3.24E-15	9.29E+00	9.29E+03	9.29E+06
N22	-40.1	H _{2(aq)}	1.85E-15	5.30E+00	5.30E+03	5.30E+06
N40	-116.9	CO _(aq)	1.70E-15	4.87E+00	4.87E+03	4.87E+06
O16	-113.5	CO _(aq)	1.65E-15	4.73E+00	4.73E+03	4.73E+06
N41	-111.8	CO _(aq)	1.62E-15	4.64E+00	4.64E+03	4.64E+06
N42	-89.8	CO _(aq)	1.30E-15	3.73E+00	3.73E+03	3.73E+06
Fe99	-84.1	CO _(aq)	1.22E-15	3.50E+00	3.50E+03	3.50E+06
Fe96	-83.4	CO _(aq)	1.21E-15	3.47E+00	3.47E+03	3.47E+06
S53	-13.8	H _{2(aq)}	4.77E-16	1.37E+00	1.37E+03	1.37E+06
M69	-8.7	CO _(aq)	3.80E-16	1.09E+00	1.09E+03	1.09E+06
S58	-26.9	CO _(aq)	3.41E-16		9.78E+02	9.78E+05
M71	-6.5	H _{2(aq)}	2.98E-16		8.54E+02	8.54E+05
M70	-21.9	CO _(aq)	2.38E-16		6.82E+02	6.82E+05
S64	-27.1	CO _(aq)	1.96E-16		5.62E+02	5.62E+05
M66	-3.3	H _{2(aq)}	1.50E-16		4.30E+02	4.30E+05
S59	-13.9	H _{2(aq)}	1.56E-17		4.47E+01	4.47E+04

h. 磺港

反應式	自由能 (kJ/mole e ⁻)	限制因子	通量 (kJ/sec)	生長狀態 細胞數量 (cells)	維持狀態 細胞數量 (cells)	倖存狀態 細胞數量 (cells)
N46	-64.0	NO ₃ ⁻	3.25E-12	7.77E+03	7.77E+06	7.77E+09
N35	-99.6	NO ₃ ⁻	3.16E-12	7.56E+03	7.56E+06	7.56E+09
O7	-102.9	O _{2(aq)}	2.17E-12	5.19E+03	5.19E+06	5.19E+09
N45	-66.5	NO ₃ ⁻	2.11E-12	5.05E+03	5.05E+06	5.05E+09
O13	-89.1	O _{2(aq)}	1.87E-12	4.47E+03	4.47E+06	4.47E+09
N37	-116.8	NO ₃ ⁻	1.85E-12	4.42E+03	4.42E+06	4.42E+09
O12	-90.8	O _{2(aq)}	1.78E-12	4.26E+03	4.26E+06	4.26E+09
O11	-90.5	O _{2(aq)}	1.78E-12	4.26E+03	4.26E+06	4.26E+09
N36	-54.4	NO ₃ ⁻	1.73E-12	4.14E+03	4.14E+06	4.14E+09
N39	-130.4	NO ₃ ⁻	1.65E-12	3.95E+03	3.95E+06	3.95E+09
O10	-71.3	O _{2(aq)}	1.40E-12	3.35E+03	3.35E+06	3.35E+09
O9	-61.6	O _{2(aq)}	1.30E-12	3.11E+03	3.11E+06	3.11E+09
O8	-57.6	O _{2(aq)}	1.21E-12	2.89E+03	2.89E+06	2.89E+09
N44	-93.1	NO ₃ ⁻	1.18E-12	2.82E+03	2.82E+06	2.82E+09
N38	-61.7	NO ₃ ⁻	7.82E-13	1.87E+03	1.87E+06	1.87E+09
M72	-101.5	CH _{4(aq)}	1.43E-13	3.42E+02	3.42E+05	3.42E+08
O17	-97.5	CH _{4(aq)}	1.38E-13	3.30E+02	3.30E+05	3.30E+08
M73	-94.3	CH _{4(aq)}	1.33E-13	3.18E+02	3.18E+05	3.18E+08
M74	-72.5	CH _{4(aq)}	1.02E-13	2.44E+02	2.44E+05	2.44E+08
M77	-35.9	CH _{4(aq)}	5.06E-14	1.21E+02	1.21E+05	1.21E+08
M79	-16.2	CH _{4(aq)}	2.28E-14	5.45E+01	5.45E+04	5.45E+07
N18	-103.7	H _{2(aq)}	2.32E-15	5.55E+00	5.55E+03	5.55E+06
O1	-99.6	H _{2(aq)}	2.23E-15	5.33E+00	5.33E+03	5.33E+06
N19	-96.4	H _{2(aq)}	2.16E-15	5.17E+00	5.17E+03	5.17E+06
N20	-74.6	H _{2(aq)}	1.67E-15	3.99E+00	3.99E+03	3.99E+06
S59	-41.6	H _{2(aq)}	9.32E-16	2.23E+00	2.23E+03	2.23E+06
N22	-38.3	H _{2(aq)}	8.57E-16	2.05E+00	2.05E+03	2.05E+06
Fe82	-38.0	H _{2(aq)}	8.52E-16	2.04E+00	2.04E+03	2.04E+06
S53	-18.3	H _{2(aq)}	4.11E-16		9.83E+02	9.83E+05
M71	-3.0	H _{2(aq)}	6.72E-17		1.61E+02	1.61E+05
M66	-2.1	H _{2(aq)}	4.76E-17		1.14E+02	1.14E+05

i.七股

反應式	自由能 (kJ/mole e ⁻)	限制因子	通量 (kJ/sec)	生長狀態 細胞數量 (cells)	維持狀態 細胞數量 (cells)	倖存狀態 細胞數量 (cells)
O7	-106.6	O _{2(aq)}	1.21E-12	4.38E+03	4.38E+06	4.38E+09
O15	-91.4	O _{2(aq)}	1.04E-12	3.77E+03	3.77E+06	3.77E+09
O14	-88.8	O _{2(aq)}	1.01E-12	3.66E+03	3.66E+06	3.66E+09
O9	-48.6	O _{2(aq)}	5.54E-13	2.01E+03	2.01E+06	2.01E+09
O8	-45.4	O _{2(aq)}	5.16E-13	1.87E+03	1.87E+06	1.87E+09
N35	-103.0	NO ₃ ⁻	3.60E-13	1.30E+03	1.30E+06	1.30E+09
N51	-63.2	NO ₃ ⁻	3.53E-13	1.28E+03	1.28E+06	1.28E+09
N49	-87.8	NO ₃ ⁻	3.07E-13	1.11E+03	1.11E+06	1.11E+09
O17	-99.2	CH _{4(aq)}	1.66E-13	6.02E+02	6.02E+05	6.02E+08
M72	-97.1	CH _{4(aq)}	1.63E-13	5.91E+02	5.91E+05	5.91E+08
N50	-46.3	NO ₃ ⁻	1.62E-13	5.87E+02	5.87E+05	5.87E+08
M73	-95.5	CH _{4(aq)}	1.60E-13	5.80E+02	5.80E+05	5.80E+08
N37	-90.2	NO ₃ ⁻	1.57E-13	5.69E+02	5.69E+05	5.69E+08
N36	-41.8	NO ₃ ⁻	1.46E-13	5.29E+02	5.29E+05	5.29E+08
N48	-89.4	NO ₃ ⁻	1.25E-13	4.53E+02	4.53E+05	4.53E+08
M74	-73.5	CH _{4(aq)}	1.23E-13	4.46E+02	4.46E+05	4.46E+08
N39	-79.2	NO ₃ ⁻	1.11E-13	4.02E+02	4.02E+05	4.02E+08
N38	-43.4	NO ₃ ⁻	6.06E-14	2.20E+02	2.20E+05	2.20E+08
M79	-10.3	CH _{4(aq)}	1.73E-14	6.27E+01	6.27E+04	6.27E+07
O1	-103.9	H _{2(aq)}	4.35E-15	1.58E+01	1.58E+04	1.58E+07
N18	-101.9	H _{2(aq)}	4.26E-15	1.54E+01	1.54E+04	1.54E+07
N19	-100.3	H _{2(aq)}	4.20E-15	1.52E+01	1.52E+04	1.52E+07
N20	-78.3	H _{2(aq)}	3.28E-15	1.19E+01	1.19E+04	1.19E+07
N22	-41.6	H _{2(aq)}	1.74E-15	6.31E+00	6.31E+03	6.31E+06
S53	-15.1	H _{2(aq)}	6.32E-16	2.29E+00	2.29E+03	2.29E+06
M71	-7.5	H _{2(aq)}	3.14E-16	1.14E+00	1.14E+03	1.14E+06
M66	-4.8	H _{2(aq)}	2.00E-16		7.25E+02	7.25E+05

j.大油坑

反應式	自由能 (kJ/mole e ⁻)	限制因子	通量 (kJ/sec)	生長狀態 細胞數量 (cells)	維持狀態 細胞數量 (cells)	倖存狀態 細胞數量 (cells)
O14	-82.0	HS ⁻	4.33E-13	3.23E+02	3.23E+05	3.23E+08
O13	-82.8	O _{2(aq)}	3.72E-13	2.77E+02	2.77E+05	2.77E+08
O15	-79.5	O _{2(aq)}	3.57E-13	2.66E+02	2.66E+05	2.66E+08
O12	-85.0	O _{2(aq)}	3.56E-13	2.65E+02	2.65E+05	2.65E+08
O11	-84.7	O _{2(aq)}	3.55E-13	2.65E+02	2.65E+05	2.65E+08
O10	-74.9	O _{2(aq)}	3.14E-13	2.34E+02	2.34E+05	2.34E+08
Fe100	-54.9	Fe ³⁺	2.36E-13	1.76E+02	1.76E+05	1.76E+08
O9	-41.4	O _{2(aq)}	1.86E-13	1.39E+02	1.39E+05	1.39E+08
O8	-36.8	O _{2(aq)}	1.65E-13	1.23E+02	1.23E+05	1.23E+08
O7	-27.9	O _{2(aq)}	1.25E-13	9.31E+01	9.31E+04	9.31E+07
O1	-98.8	H _{2(aq)}	1.82E-14	1.36E+01	1.36E+04	1.36E+07
O17	-94.9	CH _{4(aq)}	1.40E-14	1.04E+01	1.04E+04	1.04E+07
Fe80	-70.9	H _{2(aq)}	1.31E-14	9.76E+00	9.76E+03	9.76E+06
M75	-67.0	CH _{4(aq)}	9.85E-15	7.34E+00	7.34E+03	7.34E+06
O16	-113.9	CO _(aq)	9.64E-15	7.18E+00	7.18E+03	7.18E+06
N22	-42.6	H _{2(aq)}	7.87E-15	5.86E+00	5.86E+03	5.86E+06
Fe96	-86.0	CO _(aq)	7.28E-15	5.42E+00	5.42E+03	5.42E+06
S59	-19.3	H _{2(aq)}	3.56E-15	2.65E+00	2.65E+03	2.65E+06
S53	-16.8	H _{2(aq)}	3.11E-15	2.32E+00	2.32E+03	2.32E+06
S64	-34.4	CO _(aq)	2.91E-15	2.17E+00	2.17E+03	2.17E+06
S58	-31.9	CO _(aq)	2.70E-15	2.01E+00	2.01E+03	2.01E+06
M69	-10.3	CO _(aq)	2.61E-15	1.94E+00	1.94E+03	1.94E+06
M79	-12.9	CH _{4(aq)}	1.90E-15	1.42E+00	1.42E+03	1.42E+06
M70	-25.3	CO _(aq)	1.61E-15	1.20E+00	1.20E+03	1.20E+06
M71	-6.1	H _{2(aq)}	1.12E-15		8.34E+02	8.34E+05
M66	-3.9	H _{2(aq)}	7.27E-16		5.42E+02	5.42E+05

k.安通

反應式	自由能 (kJ/mole e ⁻)	限制因子	通量 (kJ/sec)	生長狀態 細胞數量 (cells)	維持狀態 細胞數量 (cells)	倖存狀態 細胞數量 (cells)
M79	-6.3	CH _{4(aq)}	6.94E-13	2.97E+03	2.97E+06	2.97E+09
S56	-11.6	Propanoic acid _(aq)	5.10E-14	2.18E+02	2.18E+05	2.18E+08
F107	-35.5	Propanoic acid _(aq)	4.45E-14	1.90E+02	1.90E+05	1.90E+08
F105	-6.2	Propanoic acid _(aq)	2.70E-14	1.16E+02	1.16E+05	1.16E+08
S55	-13.4	Acetic acid _(aq)	9.28E-15	3.97E+01	3.97E+04	3.97E+07
S57	-7.3	Propanoic acid _(aq)	9.17E-15	3.92E+01	3.92E+04	3.92E+07
O9	-114.5	O _{2(aq)}	7.73E-15	3.31E+01	3.31E+04	3.31E+07
O8	-110.8	O _{2(aq)}	7.48E-15	3.20E+01	3.20E+04	3.20E+07
O3	-106.3	O _{2(aq)}	7.17E-15	3.07E+01	3.07E+04	3.07E+07
O4	-104.5	O _{2(aq)}	7.05E-15	3.02E+01	3.02E+04	3.02E+07
O17	-99.1	O _{2(aq)}	6.69E-15	2.86E+01	2.86E+04	2.86E+07
O1	-98.3	O _{2(aq)}	6.63E-15	2.84E+01	2.84E+04	2.84E+07
O14	-92.9	O _{2(aq)}	6.26E-15	2.68E+01	2.68E+04	2.68E+07
O12	-97.7	O _{2(aq)}	6.15E-15	2.63E+01	2.63E+04	2.63E+07
O11	-97.5	O _{2(aq)}	6.13E-15	2.62E+01	2.62E+04	2.62E+07
O15	-77.2	O _{2(aq)}	5.21E-15	2.23E+01	2.23E+04	2.23E+07
M68	-14.3	Acetic acid _(aq)	4.96E-15	2.12E+01	2.12E+04	2.12E+07
O10	-69.6	O _{2(aq)}	4.38E-15	1.87E+01	1.87E+04	1.87E+07
O6	-55.1	O _{2(aq)}	3.72E-15	1.59E+01	1.59E+04	1.59E+07
O7	-43.7	O _{2(aq)}	2.95E-15	1.26E+01	1.26E+04	1.26E+07
S53	-5.5	H _{2(aq)}	3.37E-16	1.44E+00	1.44E+03	1.44E+06

1.紅葉

反應式	自由能 (kJ/mole e ⁻)	限制因子	通量 (kJ/sec)	生長狀態 細胞數量 (cells)	維持狀態 細胞數量 (cells)	倖存狀態 細胞數量 (cells)
F105	-34.7	Propanoic acid _(aq)	1.77E-11	2.85E+04	2.85E+07	2.85E+10
F107	-111.5	Propanoic acid _(aq)	1.62E-11	2.61E+04	2.61E+07	2.61E+10
S56	-9.7	Propanoic acid _(aq)	4.95E-12	7.97E+03	7.97E+06	7.97E+09
S57	-16.4	SO ₄ ²⁻	3.85E-12	6.20E+03	6.20E+06	6.20E+09
F106	-50.7	Propanoic acid _(aq)	3.70E-12	5.96E+03	5.96E+06	5.96E+09
O4	-103.6	Propanoic acid _(aq)	1.87E-12	3.01E+03	3.01E+06	3.01E+09
F104	-9.4	Propanoic acid _(aq)	1.36E-12	2.19E+03	2.19E+06	2.19E+09
O6	-56.6	O _{2(aq)}	1.02E-12	1.64E+03	1.64E+06	1.64E+09
O14	-93.8	HS ⁻	5.92E-13	9.54E+02	9.54E+05	9.54E+08
Fe88	-182.1	Acetic acid _(aq)	2.55E-13	4.11E+02	4.11E+05	4.11E+08
O3	-100.8	Acetic acid _(aq)	1.41E-13	2.27E+02	2.27E+05	2.27E+08
O15	-82.7	HS ⁻	1.30E-13	2.09E+02	2.09E+05	2.09E+08
M75	-177.7	CH _{4(aq)}	5.33E-14	8.59E+01	8.59E+04	8.59E+07
O17	-96.4	CH _{4(aq)}	2.89E-14	4.66E+01	4.66E+04	4.66E+07
S55	-7.0	Acetic acid _(aq)	9.85E-15	1.59E+01	1.59E+04	1.59E+07
Fe92	-144.9	Propanoic acid _(aq)	7.82E-15	1.26E+01	1.26E+04	1.26E+07
M68	-8.9	Acetic acid _(aq)	6.26E-15	1.01E+01	1.01E+04	1.01E+07
M79	-2.6	CH _{4(aq)}	7.69E-16	1.24E+00	1.24E+03	1.24E+06
Fe96	-190.6	CO _(aq)	4.88E-16		7.86E+02	7.86E+05
O16	-109.3	CO _(aq)	2.80E-16		4.51E+02	4.51E+05
S58	-15.5	CO _(aq)	3.97E-17		6.40E+01	6.40E+04
M70	-17.3	CO _(aq)	3.31E-17		5.33E+01	5.33E+04

m.虎爺

反應式	自由能 (kJ/mole e ⁻)	限制因子	通量 (kJ/sec)	生長狀態 細胞數量 (cells)	維持狀態 細胞數量 (cells)	倖存狀態 細胞數量 (cells)
F104	-31.7	Propanoic acid _(aq)	7.87E-12	1.16E+05	1.16E+08	1.16E+11
F107	-30.6	Propanoic acid _(aq)	7.25E-12	1.07E+05	1.07E+08	1.07E+11
F106	-52.4	Propanoic acid _(aq)	6.21E-12	9.14E+04	9.14E+07	9.14E+10
O4	-104.6	O _{2(aq)}	8.71E-13	1.28E+04	1.28E+07	1.28E+10
O9	-96.1	O _{2(aq)}	8.00E-13	1.18E+04	1.18E+07	1.18E+10
O12	-101.0	O _{2(aq)}	7.85E-13	1.16E+04	1.16E+07	1.16E+10
O11	-100.8	O _{2(aq)}	7.83E-13	1.15E+04	1.15E+07	1.15E+10
O8	-92.8	O _{2(aq)}	7.73E-13	1.14E+04	1.14E+07	1.14E+10
O10	-66.3	O _{2(aq)}	5.15E-13	7.58E+03	7.58E+06	7.58E+09
M75	-99.2	CH _{4(aq)}	4.86E-13	7.15E+03	7.15E+06	7.15E+09
O17	-98.9	CH _{4(aq)}	4.85E-13	7.14E+03	7.14E+06	7.14E+09
O6	-56.3	O _{2(aq)}	4.69E-13	6.90E+03	6.90E+06	6.90E+09
S56	-16.0	SO ₄ ²⁻	3.45E-13	5.08E+03	5.08E+06	5.08E+09
S57	-38.7	SO ₄ ²⁻	7.96E-14	1.17E+03	1.17E+06	1.17E+09
Fe80	-106.8	H _{2(aq)}	3.86E-14	5.68E+02	5.68E+05	5.68E+08
O1	-106.5	H _{2(aq)}	3.85E-14	5.67E+02	5.67E+05	5.67E+08
M79	-10.4	SO ₄ ²⁻	2.14E-14	3.15E+02	3.15E+05	3.15E+08
Fe92	-104.8	Fe ³⁺	1.25E-14	1.84E+02	1.84E+05	1.84E+08
Fe100	-101.1	Fe ³⁺	1.21E-14	1.78E+02	1.78E+05	1.78E+08
S53	-18.0	H _{2(aq)}	6.51E-15	9.58E+01	9.58E+04	9.58E+07
M71	-11.0	H _{2(aq)}	3.99E-15	5.87E+01	5.87E+04	5.87E+07
N22	-8.0	H _{2(aq)}	2.88E-15	4.24E+01	4.24E+04	4.24E+07
M66	-7.6	H _{2(aq)}	2.75E-15	4.05E+01	4.05E+04	4.05E+07

n. 關仔嶺

反應式	自由能 (kJ/mole e ⁻)	限制因子	通量 (kJ/sec)	生長狀態 細胞數量 (cells)	維持狀態 細胞數量 (cells)	倖存狀態 細胞數量 (cells)
Fe94	-18.5	Propanoic acid _(aq)	2.57E-11	1.29E+05	1.29E+08	1.29E+11
S56	-19.5	SO ₄ ²⁻	8.84E-12	4.44E+04	4.44E+07	4.44E+10
Fe90	-18.0	Acetic acid _(aq)	7.19E-12	3.61E+04	3.61E+07	3.61E+10
F105	-2.7	Propanoic acid _(aq)	3.78E-12	1.90E+04	1.90E+07	1.90E+10
M68	-13.2	Acetic acid _(aq)	2.64E-12	1.33E+04	1.33E+07	1.33E+10
F107	-2.8	Propanoic acid _(aq)	1.11E-12	5.58E+03	5.58E+06	5.58E+09
F106	-5.3	Propanoic acid _(aq)	1.06E-12	5.33E+03	5.33E+06	5.33E+09
S57	-20.6	SO ₄ ²⁻	9.34E-13	4.69E+03	4.69E+06	4.69E+09
S55	-19.0	SO ₄ ²⁻	8.64E-13	4.34E+03	4.34E+06	4.34E+09
F104	-1.5	CO _{2(aq)}	6.13E-13	3.08E+03	3.08E+06	3.08E+09
O4	-104.6	O _{2(aq)}	3.69E-13	1.85E+03	1.85E+06	1.85E+09
O3	-104.2	O _{2(aq)}	3.67E-13	1.84E+03	1.84E+06	1.84E+09
O6	-56.8	O _{2(aq)}	2.00E-13	1.00E+03	1.00E+06	1.00E+09
O2	-106.4	Formic acid _(aq)	1.56E-13	7.84E+02	7.84E+05	7.84E+08
O17	-97.6	CH _{4(aq)}	1.37E-13	6.88E+02	6.88E+05	6.88E+08
M79	-12.4	CH _{4(aq)}	1.75E-14	8.79E+01	8.79E+04	8.79E+07
M77	-11.4	CH _{4(aq)}	1.60E-14	8.04E+01	8.04E+04	8.04E+07
S54	-21.2	Formic acid _(aq)	1.11E-14	5.58E+01	5.58E+04	5.58E+07
Fe86	-20.2	Formic acid _(aq)	1.06E-14	5.33E+01	5.33E+04	5.33E+07
O1	-101.9	H _{2(aq)}	8.79E-15	4.42E+01	4.42E+04	4.42E+07
O9	-86.1	Fe ²⁺	6.69E-15	3.36E+01	3.36E+04	3.36E+07
O8	-82.5	Fe ²⁺	6.41E-15	3.22E+01	3.22E+04	3.22E+07
O7	-63.6	Fe ²⁺	4.95E-15	2.49E+01	2.49E+04	2.49E+07
M67	-35.2	Formic acid _(aq)	4.59E-15	2.31E+01	2.31E+04	2.31E+07
S53	-16.8	H _{2(aq)}	1.45E-15	7.29E+00	7.29E+03	7.29E+06
Fe82	-15.8	H _{2(aq)}	1.36E-15	6.83E+00	6.83E+03	6.83E+06
O16	-114.3	CO _(aq)	3.87E-16	1.94E+00	1.94E+03	1.94E+06
M66	-4.3	H _{2(aq)}	3.74E-16	1.88E+00	1.88E+03	1.88E+06
M69	-9.9	CO _(aq)	1.01E-16		5.07E+02	5.07E+05
S58	-29.2	CO _(aq)	9.86E-17		4.95E+02	4.95E+05
Fe98	-28.1	CO _(aq)	9.52E-17		4.78E+02	4.78E+05
N22	-0.9	H _{2(aq)}	7.96E-17		4.00E+02	4.00E+05
M70	-22.3	CO _(aq)	5.66E-17		2.84E+02	2.84E+05

o.新養女湖 I

反應式	自由能 (kJ/mole e ⁻)	限制因子	通量 (kJ/sec)	生長狀態 細胞數量 (cells)	維持狀態 細胞數量 (cells)	倖存狀態 細胞數量 (cells)
F105	-28.6	Propanoic acid _(aq)	6.89E-12	3.45E+05	3.45E+08	3.45E+11
S56	-17.5	SO ₄ ²⁻	4.01E-12	2.01E+05	2.01E+08	2.01E+11
F107	-52.3	Propanoic acid _(aq)	3.59E-12	1.80E+05	1.80E+08	1.80E+11
F106	-34.3	Propanoic acid _(aq)	1.18E-12	5.91E+04	5.91E+07	5.91E+10
F104	-3.3	CO _{2(aq)}	1.01E-12	5.06E+04	5.06E+07	5.06E+10
S57	-19.9	SO ₄ ²⁻	4.55E-13	2.28E+04	2.28E+07	2.28E+10
S55	-16.6	SO ₄ ²⁻	3.79E-13	1.90E+04	1.90E+07	1.90E+10
M79	-13.1	SO ₄ ²⁻	3.00E-13	1.50E+04	1.50E+07	1.50E+10
M68	-6.9	Acetic acid _(aq)	1.06E-13	5.31E+03	5.31E+06	5.31E+09
S54	-20.9	Formic acid _(aq)	1.31E-14	6.56E+02	6.56E+05	6.56E+08
M67	-31.0	Formic acid _(aq)	4.87E-15	2.44E+02	2.44E+05	2.44E+08

p.新養女湖 II

反應式	自由能 (kJ/mole e ⁻)	限制因子	通量 (kJ/sec)	生長狀態 細胞數量 (cells)	維持狀態 細胞數量 (cells)	倖存狀態 細胞數量 (cells)
F105	-31.1	Propanoic acid _(aq)	6.02E-12	1.48E+05	1.48E+08	1.48E+11
S56	-18.5	SO ₄ ²⁻	3.14E-12	7.73E+04	7.73E+07	7.73E+10
F107	-56.3	Propanoic acid _(aq)	3.12E-12	7.68E+04	7.68E+07	7.68E+10
F106	-33.6	Propanoic acid _(aq)	9.30E-13	2.29E+04	2.29E+07	2.29E+10
M68	-8.8	Acetic acid _(aq)	5.94E-13	1.46E+04	1.46E+07	1.46E+10
S57	-19.5	SO ₄ ²⁻	3.31E-13	8.15E+03	8.15E+06	8.15E+09
S55	-18.1	SO ₄ ²⁻	3.07E-13	7.56E+03	7.56E+06	7.56E+09
M79	-13.6	SO ₄ ²⁻	2.32E-13	5.71E+03	5.71E+06	5.71E+09
F104	-1.5	CO _{2(aq)}	1.73E-13	4.26E+03	4.26E+06	4.26E+09
S54	-22.3	Formic acid _(aq)	2.17E-14	5.34E+02	5.34E+05	5.34E+08
M67	-34.7	Formic acid _(aq)	8.43E-15	2.08E+02	2.08E+05	2.08E+08

q.小滾水III

反應式	自由能 (kJ/mole e ⁻)	限制因子	通量 (kJ/sec)	生長狀態 細胞數量 (cells)	維持狀態 細胞數量 (cells)	倖存狀態 細胞數量 (cells)
F105	-26.5	Propanoic acid _(aq)	2.91E-12	5.72E+05	5.72E+08	5.72E+11
F107	-92.5	Propanoic acid _(aq)	2.90E-12	5.70E+05	5.70E+08	5.70E+11
F104	-32.7	CO _{2(aq)}	1.98E-12	3.89E+05	3.89E+08	3.89E+11
F106	-82.5	Propanoic acid _(aq)	1.29E-12	2.53E+05	2.53E+08	2.53E+11
S56	-16.4	SO ₄ ²⁻	1.56E-13	3.06E+04	3.06E+07	3.06E+10
S57	-39.7	SO ₄ ²⁻	3.77E-14	7.41E+03	7.41E+06	7.41E+09
N32	-102.6	NO ₃ ⁻	2.40E-14	4.71E+03	4.71E+06	4.71E+09
N33	-63.9	NO ₃ ⁻	2.39E-14	4.70E+03	4.70E+06	4.70E+09
M73	-98.1	NO ₃ ⁻	2.30E-14	4.52E+03	4.52E+06	4.52E+09
M74	-59.4	NO ₃ ⁻	2.23E-14	4.38E+03	4.38E+06	4.38E+09
N37	-187.6	NO ₃ ⁻	2.20E-14	4.32E+03	4.32E+06	4.32E+09
N36	-91.1	NO ₃ ⁻	2.13E-14	4.18E+03	4.18E+06	4.18E+09
N39	-209.8	NO ₃ ⁻	1.96E-14	3.85E+03	3.85E+06	3.85E+09
N35	-58.7	NO ₃ ⁻	1.37E-14	2.69E+03	2.69E+06	2.69E+09
M79	-11.9	SO ₄ ²⁻	1.13E-14	2.22E+03	2.22E+06	2.22E+09
N38	-87.4	NO ₃ ⁻	9.42E-15	1.85E+03	1.85E+06	1.85E+09
N31	-98.8	NO ₃ ⁻	9.25E-15	1.82E+03	1.82E+06	1.82E+09
M72	-94.4	NO ₃ ⁻	8.83E-15	1.73E+03	1.73E+06	1.73E+09

r.小滾水IV

反應式	自由能 (kJ/mole e ⁻)	限制因子	通量 (kJ/sec)	生長狀態 細胞數量 (cells)	維持狀態 細胞數量 (cells)	倖存狀態 細胞數量 (cells)
F105	-27.5	Propanoic acid _(aq)	3.94E-12	4.50E+05	4.50E+08	4.50E+11
F107	-47.6	Propanoic acid _(aq)	1.96E-12	2.24E+05	2.24E+08	2.24E+11
F106	-35.3	Propanoic acid _(aq)	7.24E-13	8.27E+04	8.27E+07	8.27E+10
F104	-4.6	CO _{2(aq)}	3.81E-13	4.35E+04	4.35E+07	4.35E+10
S56	-16.6	SO ₄ ²⁻	1.86E-13	2.12E+04	2.12E+07	2.12E+10
N25	-69.1	NO ₃ ⁻	6.27E-14	7.16E+03	7.16E+06	7.16E+09
N24	-107.8	NO ₃ ⁻	6.11E-14	6.98E+03	6.98E+06	6.98E+09
N32	-103.0	NO ₃ ⁻	5.84E-14	6.67E+03	6.67E+06	6.67E+09
N33	-64.2	NO ₃ ⁻	5.83E-14	6.66E+03	6.66E+06	6.66E+09
N28	-101.6	NO ₃ ⁻	5.77E-14	6.59E+03	6.59E+06	6.59E+09
N29	-62.9	NO ₃ ⁻	5.71E-14	6.52E+03	6.52E+06	6.52E+09
N37	-185.0	NO ₃ ⁻	5.25E-14	6.00E+03	6.00E+06	6.00E+09
N36	-89.7	NO ₃ ⁻	5.09E-14	5.81E+03	5.81E+06	5.81E+09
N39	-203.9	NO ₃ ⁻	4.63E-14	5.29E+03	5.29E+06	5.29E+09
N35	-57.4	NO ₃ ⁻	3.25E-14	3.71E+03	3.71E+06	3.71E+09
S54	-21.5	SO ₄ ²⁻	2.40E-14	2.74E+03	2.74E+06	2.74E+09
N23	-105.2	NO ₃ ⁻	2.39E-14	2.73E+03	2.73E+06	2.73E+09
N31	-100.3	NO ₃ ⁻	2.28E-14	2.60E+03	2.60E+06	2.60E+09
N27	-99.0	NO ₃ ⁻	2.25E-14	2.57E+03	2.57E+06	2.57E+09
S57	-19.9	SO ₄ ²⁻	2.22E-14	2.54E+03	2.54E+06	2.54E+09
N38	-87.1	NO ₃ ⁻	1.98E-14	2.26E+03	2.26E+06	2.26E+09
S55	-15.3	SO ₄ ²⁻	1.71E-14	1.95E+03	1.95E+06	1.95E+09
M68	-6.2	Acetic acid _(aq)	1.28E-14	1.46E+03	1.46E+06	1.46E+09
M67	-37.1	Formic acid _(aq)	5.41E-15	6.18E+02	6.18E+05	6.18E+08
M73	-98.6	CH _{4(aq)}	3.83E-15	4.38E+02	4.38E+05	4.38E+08
M72	-95.9	CH _{4(aq)}	3.73E-15	4.26E+02	4.26E+05	4.26E+08
M74	-59.8	CH _{4(aq)}	2.33E-15	2.66E+02	2.66E+05	2.66E+08
M79	-12.2	CH _{4(aq)}	4.76E-16	5.44E+01	5.44E+04	5.44E+07

¹ 化學反應式代號，請參考附錄一。反應式依照自由能由小到大向下排列。

² 自由能值的計算列表不包含反應物未偵測或低於偵測極限之化學反應式。