

國立台灣大學地質科學系

碩士論文

Department of Geosciences

College of Science

National Taiwan University

Master Thesis

宜蘭平原土壤逸氣調查及其大地構造隱示

Soil Gas Survey in the Ilan Plain, NE Taiwan and its
Tectonic Implications



邱俊銘

Chiu, Chun-Ming

指導教授：楊燦堯 博士

Advisor : Tsanyao Frank Yang, Ph.D.

中華民國 99 年 7 月

July, 2010

摘要

宜蘭平原地處沖繩海槽的西南端，目前正受到拉張及橫移的變形作用。根據前人在宜蘭平原上的調查指出，平原底下可能有一些存疑性斷層與破裂帶存在。然而，平原地區覆蓋著大量的沉積物且斷層未出露地表，因此這些構造線的位置仍不確定。此外，從地球物理、地球化學等研究認為，受到沖繩海槽擴張的影響，熔融物質與火成岩體可能已經侵入到宜蘭平原底下，然而其具體位置與流體特性仍不清楚。

土壤逸氣的方法能夠作為判斷破裂帶與斷層的位置的有效工具，這是由於斷層或破裂帶提供了地底深部氣體向上遷移的通道，使地表氣體成分異常。本研究在宜蘭平原進行土壤逸氣調查，採集樣本並進行二氧化碳通量、氦氣、氬氣與主要氣體成分的分析，來了解斷層或破裂帶的地表分布以及探討沖繩海槽的張裂對研究區域的影響程度。

分析結果顯示宜蘭平原的土壤氣體濃度大致由東往西遞減，似乎與沖繩海槽向西漸漸張裂有關。此外，氣體濃度的異常值分布位置並無明顯與前人研究所提出之構造線一致的線形，這可能是宜蘭平原底下的沉積物過厚且地下水面高，使得氣體無法順暢地沿著通道到達地表，或是斷層可能並不存在於這些位置亦或是並未切穿地表。

由氬氣與二氧化碳對比可知，山區的氬氣值背景值較高，可能是淺層地表中含有較高的放射性元素；而在平原區，二氧化碳與氬氣濃度呈現正相關，顯示二氧化碳是將氬氣由深部帶往地表的攜行氣體。氬同位素顯示，本研究大部份樣本主要成分為空氣，並混有部分地殼源成分。二氧化碳碳同位素值顯示其來源為地殼與地函的混合。

在宜蘭平原的氣體濃度可定義出兩個異常帶，一個位在平原中部，另一則在平原南側。整合其他地球物理與地球化學資料，我們認為平原中部的異常帶可能代表了平原上張裂中心的位置；而在平原南側的異常帶，可能反映了斷層的存

在。

由長期的定期採樣結果發現，在特定地區的氣體成分變化，可能與當地的地震活動有關。因此在地震頻繁的東部地區，針對敏感的地點做連續性的觀察，更有利於地震的監測。

關鍵字：宜蘭平原、土壤氣體、氦氣、斷層與破裂帶



Abstract

The Ilan Plain, northeast Taiwan, which is located at the western tip of the Okinawa Trough, undergoes extension and left-lateral slip. There may exist a few suspected faults and fractures underneath the Ilan Plain related to back-arc spreading of the Okinawa Trough. However, these fault traces have not been well understood due to the thick alluvial sediments. Furthermore, previous geochemical and geophysical researches suggested melting features and igneous intrusive rocks resulting from the opening of the Okinawa Trough.

The soil gas method is a useful tool to recognize the fractures and fault zones of which provide the pathways for migration of fluid from deep source toward surface. This study attempts to utilize soil gas method to survey the Ilan Plain. We measured carbon dioxide flux, helium concentration, radon concentration and gas chemical compositions to identify the distribution of faults/fractures and to verify the influence of spreading of the Okinawa Trough to the Plain.

The results show that soil gas concentrations decrease apparently from east to west, which seems to relate to the progressive westward extension of the Okinawa Trough. Besides, the spatial distribution of soil gas anomalies corresponds to the specific faults and fractures pointed out by previous studies. Higher soil gas concentration appears in the southern part of the Plain, where seismic activities occurred intensively and frequently, implies the existence of fault/fractures beneath the Ilan Plain.

Carbon isotopic compositions of soil carbon dioxide indicate a mixture of organic and magmatic source. Based on the radon and carbon dioxide concentration, we propose two potential gas reservoirs in studied area. One is the deep source, showing good correlation with radon and carbon dioxide concentration. The

correlation also suggests that carbon dioxide is the carrier gas of radon being transported along the faults and fractures in the Ilan Plain. The other one may be the in-situ radon source, which is mostly observed in the northwestern flank of the Plain. Nevertheless, radioactive isotopes in soil samples should be undertaken to further explore this hypothesis.

Results of continuous monitoring indicated temporal variations of helium, radon, and carbon dioxide concentration, which may relate to tectonic activity or seismicity. However, further observation and monitoring is needed.

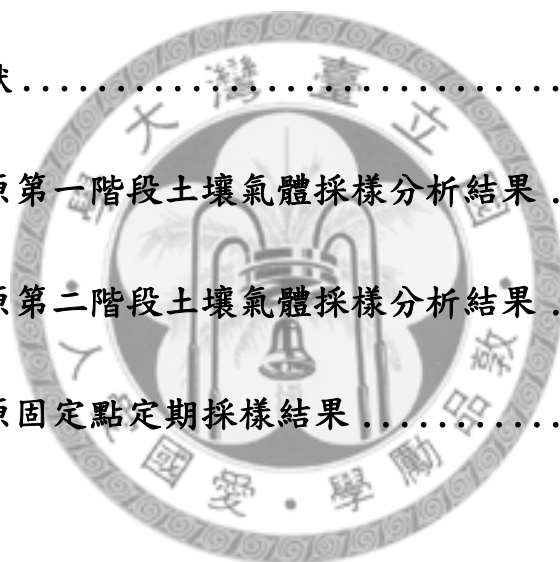
Keywords: Ilan Plain, soil gas, radon, faults and fractures



目錄

第一章 緒論	1
1-1 研究動機與目的	1
1-2 研究內容簡介	2
第二章 研究區域背景	3
2-1 地質背景	3
2-2 前人研究	5
2-2-1 斷層構造研究	5
2-2-2 地表位移研究	7
2-2-3 地震研究	12
2-2-4 基盤形貌與地下構造	14
2-2-5 南沖繩海槽之構造研究	16
2-2-6 平原上流體之研究	18
2-2-7 水文地質調查研究	21
第三章 研究方法及原理	22
3-1 原理	22
3-2 主要研究氣體之特性	24
3-2-1 氦氣 (Helium) 與氦同位素	24
3-2-2 氡氣 (Radon)	24
3-2-3 二氧化碳 (carbon dioxide) 與碳同位素	26
3-3 採樣方法	26
3-3-1 土壤氣體採樣方法	26
3-3-2 土壤逸氣通量量測	29
3-4 分析方法	32
3-4-1 氦氣偵測儀	32
3-4-2 氦氣分析儀	32
3-4-3 攜帶式氣相層析儀	35
3-4-4 氣相層析儀	36
3-4-5 二氧化碳的純化與碳同位素分析	38
3-4-6 氦氣的純化與氦同位素分析	39
3-5 野外採樣	40

第四章 結果與討論	43
4-1 第一階段與第二階段調查之比較	43
4-2 土壤氣體之空間分布情形	44
4-3 土壤氣體來源	48
4-3-1 氬氣來源	48
4-3-2 同位素成分	51
4-4 氣體濃度與構造之關係	55
4-4-1 北邊之氣體異常帶	55
4-4-2 南側之氣體異常帶	56
4-5 氣體濃度與隨時間的變化	62
第五章 結論	66
第六章 參考文獻	67
附錄一 宜蘭平原第一階段土壤氣體採樣分析結果	73
附錄二 宜蘭平原第二階段土壤氣體採樣分析結果	78
附錄三 宜蘭平原固定點定期採樣結果	81



圖目錄

圖 2-1：台灣的構造輪廓及地形圖。	4
圖 2-2：宜蘭區域地質圖。	4
圖 2-3：宜蘭平原五萬分之一地質圖。	5
圖 2-4：綜合各研究所繪製之斷層分布圖。	6
圖 2-5：宜蘭平原上南北走向水準測量結果。	8
圖 2-6：1992-1998 年間宜蘭地區測站相對於穩定歐亞大陸內部的速度場。	9
圖 2-7：(A) 宜蘭平原速度場分佈圖。(B) 上圖為平行剖面線段之速度分量剖面圖，下圖為垂直剖面線段之速度分量剖面圖。	10
圖 2-8：測線宜 25 之地形剖面圖。	10
圖 2-9：宜蘭平原上速度場剖面圖。右上圖為平行斷層之速度分量剖面圖，右下圖為垂直斷層之速度分量剖面圖。	10
圖 2-10：宜蘭地區之斷層系統及地體構造關聯示意圖。	11
圖 2-11：(A) 宜蘭地區相對於澎湖白沙站之水平速度場。(B) 宜蘭地區主軸應變率。	11
圖 2-12：宜蘭地區之微震分佈帶以及沿 AA' 與 BB' 之震源深度垂直剖面圖。	13
圖 2-13：宜蘭地區之淺層地層與構造剖面圖及其所對應地震與震源機制分佈圖。	13
圖 2-14：宜蘭平原基盤深度分佈圖。	15
圖 2-15：(A) 蘭陽平原下更新統與基盤之界面等深度分佈圖。(B) 沈積層與更新統之界面等深度分佈圖。	15
圖 2-16：基盤深度與濁水斷層、三星斷層分佈圖。	16
圖 2-17：沖繩海槽西南端的 2833 個微震分佈。	17
圖 2-18：宜蘭外海震測結果及構造特徵。	18
圖 2-19：宜蘭平原磁力異常分佈圖。	19
圖 2-20：龜山島與宜蘭平原的流體樣本之氦與氬同位素比值。	19
圖 2-21： V_P/V_S 之 3-D 立體成像圖。	20
圖 2-22：(A) 2002 年宜蘭地震與餘震的分佈圖。(B) 2002 年地震與 2005 年宜蘭雙主震之透視圖。(C) 和 (D) 為 2002 年及 2005 地震事件分別在南北和東西方向的剖面圖。	20

圖 2-23：宜蘭平原底下侵入岩體與斷層和岩脈之三維示意圖。	21
圖 3-1：地質構造與土壤氣體異常之示意圖。	23
圖 3-2： ^{238}U 衰變序列。	25
圖 3-2：野外採樣土壤氣體的情形	28
圖 3-3：採樣示意圖。(A) 為氣袋採樣方式。(B) 為採樣瓶採樣方式。	28
圖 3-3：土壤逸氣通量量測之儀器設備。	30
圖 3-4：使用密閉氣罩法量測土壤逸氣通量之工作情形。	30
圖 3-5：氦氣分析儀之腔室運作情形。	34
圖 3-6：A 能譜儀所分離出的核種。	34
圖 3-7：MICRO GC 檢量校正曲線。	36
圖 3-8：二氧化碳純化系統示意圖。	38
圖 3-9：氦氣純化系統示意圖。	40
圖 3-10：第一階段研究區域的採樣點分佈圖。	42
圖 3-11：第二階段研究區域的採樣點分佈圖。	42
圖 4-1：第一階段與第二階段採樣結果之盒形圖。A：氦氣，B：氦氣，C：二 氧化碳含量，D：二氧化碳通量。	44
圖 4-2：土壤氣體異常值分佈圖。(A) 氦氣濃度 (B) 氦氣濃度 (C) 二氧化碳含 量 (D) 二氧化碳通量。	46
圖 4-3：土壤氣體濃度等值線 (A) 氦氣濃度 (B) 氦氣濃度 (C) 二氧化碳濃 度 (D) 二氧化碳通量。	47
圖 4-4：土壤氣體濃度等值線，虛線為前人研究所提出的存疑性斷層或破裂帶。 (A) 氦氣濃度 (B) 氦氣濃度 (C) 二氧化碳濃度 (D) 二氧化碳通量。	48
圖 4-5：(A) 採樣點依照地形分區。(B) 二氧化碳與氦氣濃度之關係圖。 . . .	49
圖 4-6：二氧化碳同位素分析結果。(A) 本研究土壤氣體的碳同位素值。(B) 碳同位素值分布情形。	53
圖 4-7：宜蘭平原土壤氣體氮與氦同位素三端源圖。	54
圖 4-8： $\text{CO}_2 / ^3\text{He}$ 與 $\Delta^{13}\text{C}$ 的關係圖。	54
圖 4-9：宜蘭平原南北走向剖面位置與採樣點位投影範圍。	58
圖 4-10：宜蘭平原氣體濃度剖面圖及地震與震源機制分佈圖。	59
圖 4-11：氣體異常帶與淺層地震分佈圖。	60

圖 4-12：宜蘭平原東西向剖面與推測受到沖繩海槽擴張的影響範圍。(A) 東-西向剖面之位置。(B) 氣體濃度剖面圖。.....	61
圖 4-13：氣體異常帶與地體構造的關聯。.....	62
圖 4-14：宜蘭平原上定期採樣之點位。.....	63
圖 4-15：2009 年 5 月至 2005 年 9 月宜蘭礁溪地區土壤氦氣、氬氣與二氧化碳濃度變化圖，同時顯示與地震及雨量之相關性。.....	64
圖 4-16：2009 年 5 月至 2009 年 9 月中央氣象局宜蘭市地震站所記錄到震度 2 以上之地震其分佈位置。.....	65



表目錄

表 4-1：土壤氣體成分統計	43
表 4-2：土樣之放射性活度表	51
表 4-3：2009 年 5 月至 2009 年 9 月中央氣象局宜蘭市地震站所記錄到震度 2 以上地震之地震資料。.....	65



第一章 緒論

1-1 研究動機與目的

台灣位處菲律賓海板塊和歐亞板塊的碰撞交接帶上，菲律賓海板塊每年以 8.2 公分的速度向歐亞板塊聚合 (Yu et al., 1997)，使地殼活動特別活躍。而在台灣東北部，菲律賓海板塊向歐亞板塊隱沒，形成琉球海溝及琉球島弧之弧溝系統。沖繩海槽在琉球島弧後方，並往西南方延伸至宜蘭平原。宜蘭平原在此地體構造作用下，正處於橫移伸張變形的環境。

關於存在於宜蘭平原上的地質構造，江新春 (1986) 利用在平原上進行的震測結果提出在平原上有數條存疑性斷層。李錫堤等 (1998) 在所繪製的台灣活斷層圖中認為宜蘭平原西北部有三條存疑性活動斷層存在。Shyu et al. (2005) 認為平原南邊及北邊與山脈交接處可能有正斷層存在的可能。但由於平原上的沉積物過厚且上述之斷層皆未切穿地表，因此這些斷層存在的正確位置及其構造特性仍不清楚。

受到沖繩海槽張烈的影響，平原正受到拉張的作用，而岩漿活動是否已經影響到宜蘭平原？Yang et al. (2005a) 分析平原上的溫泉氣泡的氦同位素比值，武淵天然氣、蘇澳冷泉與清水地熱皆指示了某種程度的地函訊號。Tong et al. (2008) 認為清水地熱的熱源是平原底下存在的火成岩侵入體所提供，這些熱液並經地底的斷層或破裂帶上升地表。Lai et al. (2009) 認為 2005 年 3 月 5 日宜蘭雙主震是由岩脈侵入 (dyke intrusion) 造成。這些研究指出岩漿活動可能已侵入了宜蘭平原底下，但是其確切的位置以及熔融物質的來源仍須進一步的研究。

近年來有眾多針對沖繩海槽南端及宜蘭平原的地體構造與地下地質構造的相關研究，例如震測、地震、GPS、速度構造等，大都是地球物理方面的研究，但地球化學方面的研究相對較少，本研究希望提供另外一種方法，針對宜蘭平原的構造作探討，並與其他研究成果整合，以期對宜蘭平原有更深入的了解。

本研究利用土壤逸氣的方法，嘗試判定存疑性斷層的存在性及其位置。另外，藉由全區的調查及流體地球化學的分析，來更進一步了解宜蘭平原土壤氣體與地體構造的關係以及熔融物質對於平原影響的程度。

在地震頻繁的東部地區，我們是否能從土壤氣體的變化找到一些與地震活動的關聯性，若兩者之間有所關聯，那我們可用此地球化學的方法來進一步觀察地質災害的前兆訊號，作為可能發生災害的預警。

1-2 研究內容簡介

本研究內容主要分為六章：第一章闡述研究動機與目的；第二章介紹研究區域的地質背景，以及前人研究的回顧。藉由彙整前人在宜蘭平原地區所作的研究，能夠對平原的地質概況有初步的認識，也可了解對於平原上存在的構造，各個研究的所表達的看法及其相同相異或不足之處，以期仍待解決的問題。希望建基在前人研究之上，能夠做完整的調查來更了解宜蘭平原地區的構造。

第三章介紹原理及研究方法。本研究利用土壤逸氣的方法進行採樣，在此章中將簡述此方法的原理及其特點，以及與其他研究方法相比之優缺點。此外，還針對我們所分析各種氣體之物理化學特性與所分析的儀器作一基本介紹。

第四章為結果與討論，針對在宜蘭平原的採樣分析結果進行討論，我們分成三個方向來討論：氣體濃度在平原上的空間分布情形、利用氣體間的關係及同位素成分來判斷氣體來源以及氣體濃度隨時間的變化情形。最後將本研究之結果與前人研究作整理比較，提出可以解釋此地區大地構造之模型。於第五章結論中，針對本研究成果作簡明的歸納與總結。

第二章 研究區域背景

2-1 地質背景

台灣位處歐亞板塊與菲律賓海板塊的碰撞聚合帶上（圖 2-1），由 GPS 觀測可知，菲律賓海板塊每年以平均約 8.2 公分向西北方向移動（Yu et al., 1997），造成台灣附近地區構造活動頻繁。在台灣北方，菲律賓海板塊向北隱沒至歐亞大陸板塊之下，形成琉球島弧系統。沖繩海槽位於琉球弧溝系統的後方，是歐亞板塊大陸邊緣之弧後盆地，海槽由日本九州向西南延伸至台灣的東北方，宜蘭平原位處沖繩海槽之西端延伸，受到海槽擴張之影響，使得宜蘭平原處於伸張變形之環境。

宜蘭平原位於台灣東北處，為一沖積扇三角洲，北起頭城，南至蘇澳，西起三星牛鬥為頂點，外形成一等腰三角形，面積約為 320 平方公里，平原為蘭陽溪及其他小支流沖積而成，北接雪山山脈，南側與脊梁山脈相接（圖 2-2）。分開雪山山脈與脊梁山脈兩岩相構造帶的分界是梨山斷層，而梨山斷層是否延伸至宜蘭平原及所延伸出來的位置仍是大家所討論的重點。

平原上大部分的地區被沉積物所覆蓋，多為泥砂、礫石等未固結的沉積物。本區出露的地層主要以始新式及中新式地層為主。由江新春（1986）震測資料顯示，平原中間存在濁水斷層，平原上出露的地層以此斷層為界可分為南北兩單位，濁水斷層以北之地層由老至新計有中嶺層、西村層、四稜砂岩、萱源黏板岩及乾溝層等五層；斷層以南之地層有上部蘇澳層及下部蘇澳層等兩層。

根據中央地質調查所五萬分之一地質圖之三星、蘇澳與南澳圖幅（圖 2-3），蘭陽溪南側的地層受斷層所控制，例如廬山層與四稜砂岩地層之間的牛鬥斷層，而古魯斷層分開西側的南蘇澳層及廬山層與東側的東澳片岩、南蘇澳層與廬山層。南蘇澳層沿著小帽山斷層逆衝到蘇澳層之上。除此之外，還有可能與清水地熱成因相關的清水溪斷層。

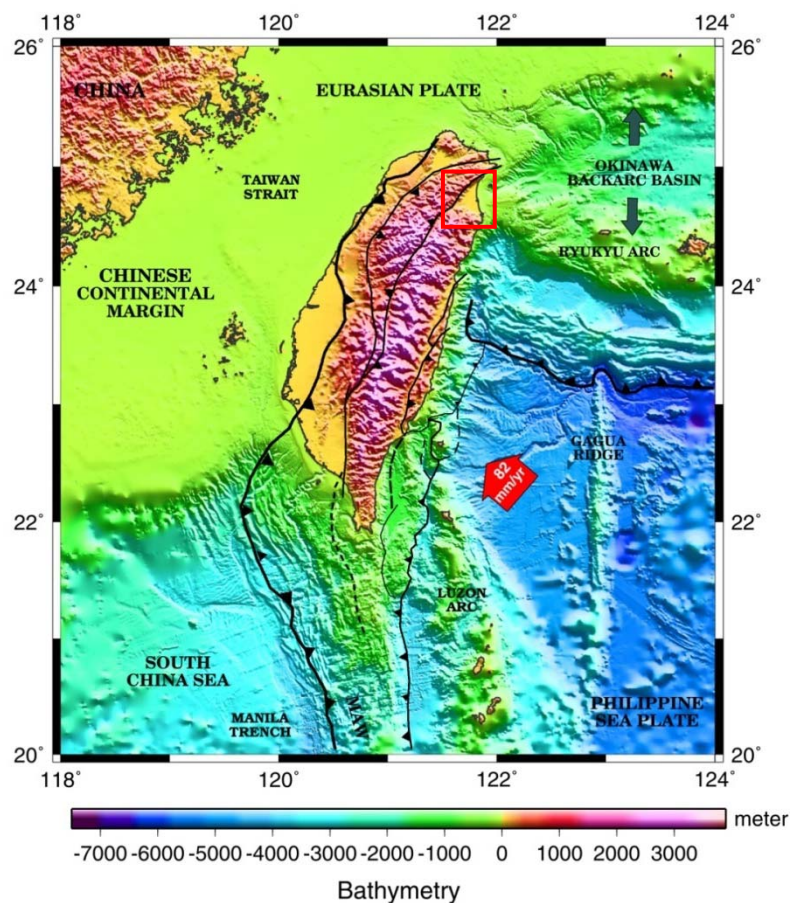


圖 2-1：台灣的構造輪廓及地形圖（修改自 Malavieille et al., 2002）。紅框為研究區域。

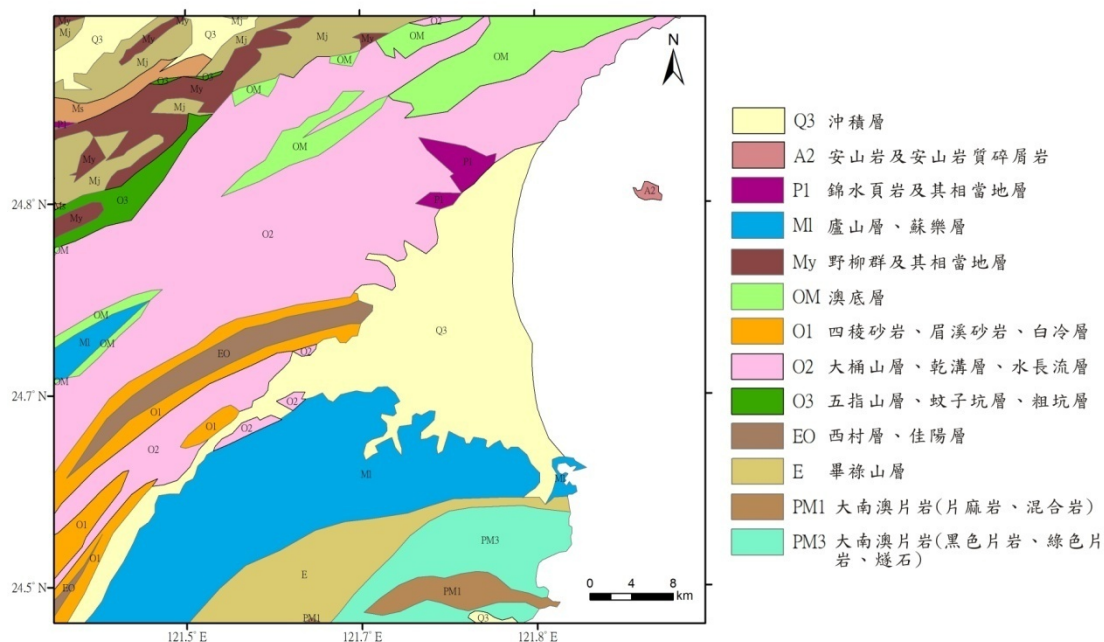


圖 2-2：宜蘭區域地質圖（改繪自地質調查所五十萬分之一地質圖）。

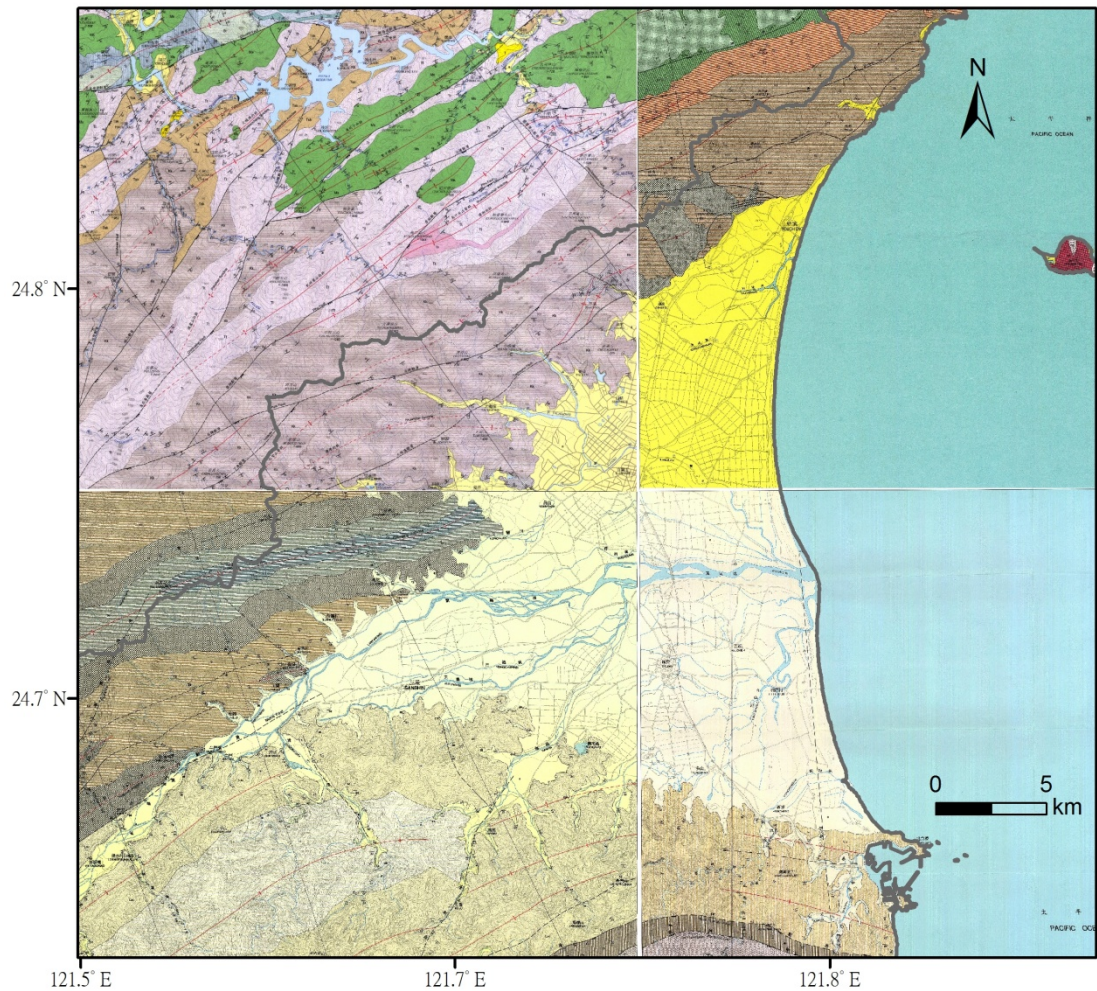


圖 2-3：宜蘭平原五萬分之一地質圖，圖幅依左上、右上、左下及右下分別為：新店地質圖（林朝宗，2000）、頭城地質圖（黃鑑水、何信昌，1984）、三星地質圖（林啟文、林偉雄，1995）、蘇澳地質圖（林啟文、高銘健，1997）。

2-2 前人研究

2-2-1 斷層構造研究

江新春（1976）利用反射與折射震測的結果，認為在宜蘭平原上有六條存疑性斷層通過，由北而南分別是頭城、鶺鴒、隘界、宜蘭、濁水及三星等六條斷層（圖 2-4）。Yu and Tsai（1979）在磁力異常的研究中，發現在宜蘭市西方有線狀負磁力異常，可能是由一線狀破裂帶所產生，其位置與走向與江新春（1976）所提出之坑四斷層相近。李錫堤等（1998）提出在宜蘭西北方有宜蘭、礁溪及牛鬥

三條存疑性活動斷層通過。Shyu et al. (2005) 由地形判識認為在平原的南北兩側與山脈交接處有正斷層存在。但由於平原上沉積物過厚及這些斷層並未出露地表，因此這些斷層的存在性及確切位置仍不確定。

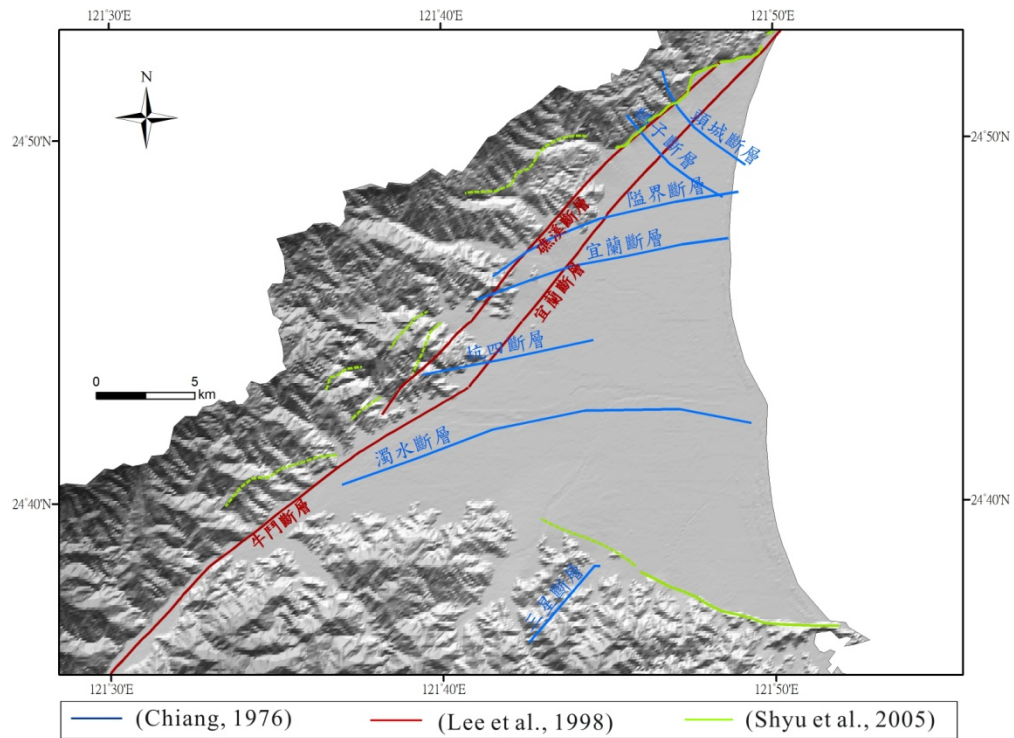


圖 2-4：綜合各研究所繪製之斷層分布圖。

2-2-2 地表位移研究

Liu (1995) 在宜蘭平原上進行水準測量 (圖 2-5)，結果顯示在宜蘭和羅東之間有每年 20 mm 的下陷量，而整個平原以每年 0.44 μ radian 的角速度向東快速傾斜，配合基盤資料估算出沖繩海槽之擴張正向西南延伸進入宜蘭平原後，其南緣以順時針方向 1.3 μ radian 的角速度擴張；頂點約在牛鬥附近，並以 126 mm/yr 的速度向西南延伸。

許雅儒 (1999) 進行 GPS 測量的結果顯示，宜蘭平均的最大主應變率為每年 1.02 μ strain 之伸張，方位為 N37°W。由 GPS 配合其他地物資料，推測在宜蘭和羅東之間有一走向 N53°E 的構造線通過 (圖 2-6)，垂直此構造線的速度分量由北向南、由西向東遞增，旋轉極可能位於宜蘭平原的西方，擴張的角速率約為 0.8 μ rad/yr，呈順時針張開。大地測量結果再加上宜蘭外海的海底地形，推斷平原只向南單一方向開裂，並形成一系列的正斷層。

徐閔儀 (2005) 藉由 1995 至 2005 北部地區 GPS 觀測結果歸納出宜蘭平原沿海一帶應變率最大，平原上的應變型態是西北-東南方向的伸張，主應變量約為 -0.17 至 1.98 μ strain/yr。此外，由平原上的速度剖面可觀察到二條構造線 (圖 2-7)，一條為牛鬥斷層，呈東北走向，為正斷層；另一條位於蘭陽溪口，為一東北東走向並具左移分量之正斷層。

康竹君 (2006) 藉由 RTK-GPS (Real Time Kinematic- Global Positioning System) 之野外地形實測，發現在蘭陽溪南側跨越濁水斷層兩側有約 2 公尺的落差 (圖 2-8)，顯示了斷層的活動性。再加上其它地震資料的分析，推測蘭陽平原受到菲律賓板塊的斜向擠壓碰撞的作用，對應產生塊體順時針旋轉變形行為。

Rau et al. (2008) 也利用 GPS 資料進一步分析台灣北部彈性及塊體旋轉模型，發現在弧陸碰撞與隱沒/弧後張裂之間的過渡帶有三種不同的地質區域：碰撞衰減區、外圍過渡帶及較近的過渡帶。另外，在速度剖面上，可發現在濁水斷

層上兩邊的速度場有很大的差異(圖 2-9),指示了正斷層型式的運動並有左移分量。而在北邊的頭城斷層其兩側的速度差異並不大。

邱詠恬(2008)分析平原上的 GPS 觀測站資料,發現整體速度場有兩個趨勢:一為由北向南遞增,另一為由西向東遞增。蘭陽溪南北之速度分量的差異指示了沖繩海槽的不對稱張裂。此外,藉由速度場向量的不連續,推測平原上有四條主要的活動構造(圖 2-10),由北而南分別是牛鬥斷層、坑四斷層、濁水斷層及三星斷層等活動構造。

Hou et al. (2009) 利用 2002 至 2006 年宜蘭平原上的 34 個 GPS 測站,發現在平原北部的速度場並不明顯,越往南速度場有明顯的增加,方向大致呈東西向(圖 2-11)。而在最南邊,速度更增至 43 mm/yr 且方向呈 143°。另外,平原中部及南邊有著顯著的伸張應變。綜觀來看,平原正處橫移伸張的變形,並沿著琉球隱沒帶的弱帶有橫向逃脫(lateral extrusion)的作用力。

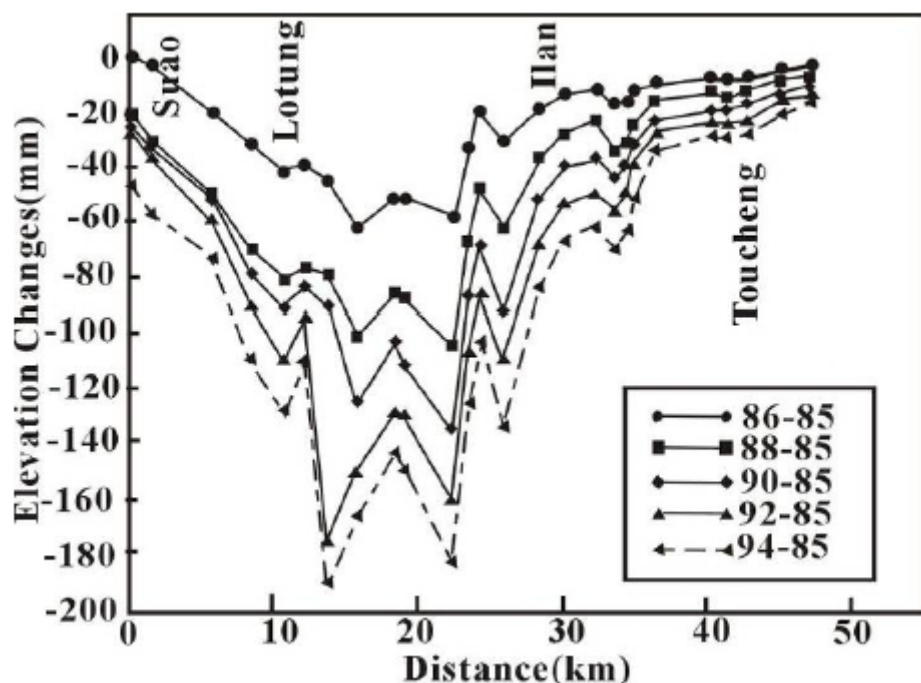


圖 2-5：宜蘭平原上南北走向水準測量結果 (Liu, 1995)。

圖 2-7：(A) 宜蘭平原速度場分佈圖。藍色虛線為剖面線，灰色箭頭為速度合向量值，藍色箭頭為垂直蘭陽溪之速度分量值，紅色箭頭為平行剖面線段之速度分量值。(B) 上圖為平行剖面線段之速度分量剖面圖，下圖為垂直剖面線段之速度分量剖面圖（徐閔儀，2005）。

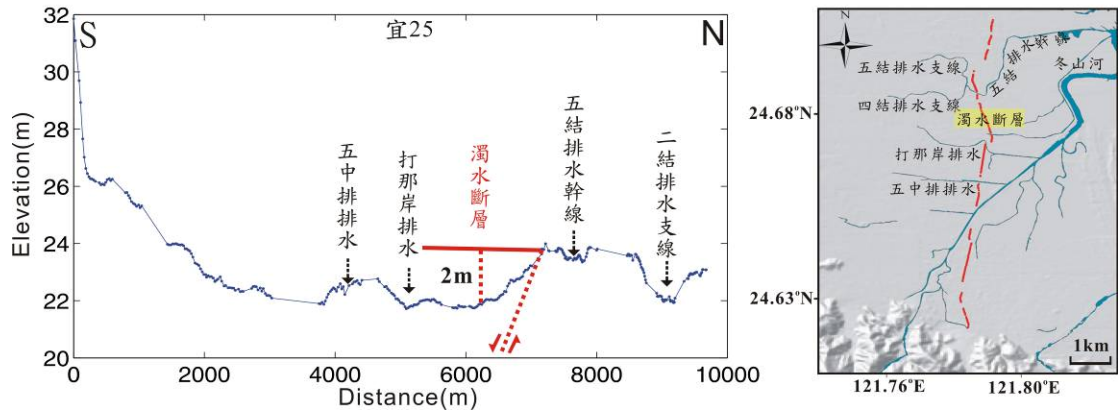


圖 2-8：測線宜 25 之地形剖面圖，右圖紅色線條為宜 25 測線於蘭陽溪南側之位置（康竹君，2006）。

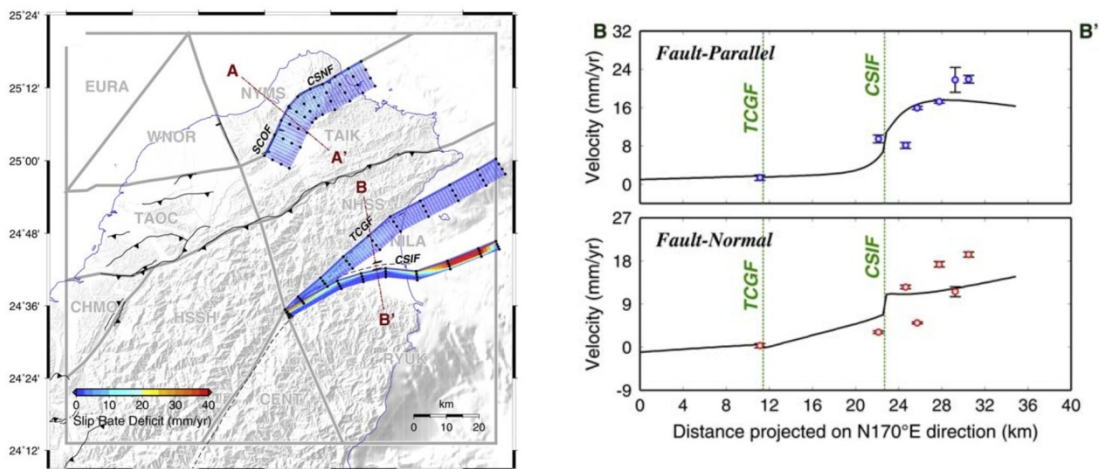


圖 2-9：宜蘭平原上速度場剖面圖。BB'為切過頭城斷層(TCGF)與濁水斷層(CSIF)的剖面線。右上圖為平行斷層之速度分量剖面圖，右下圖為垂直斷層之速度分量剖面圖（Rau et al., 2008）。

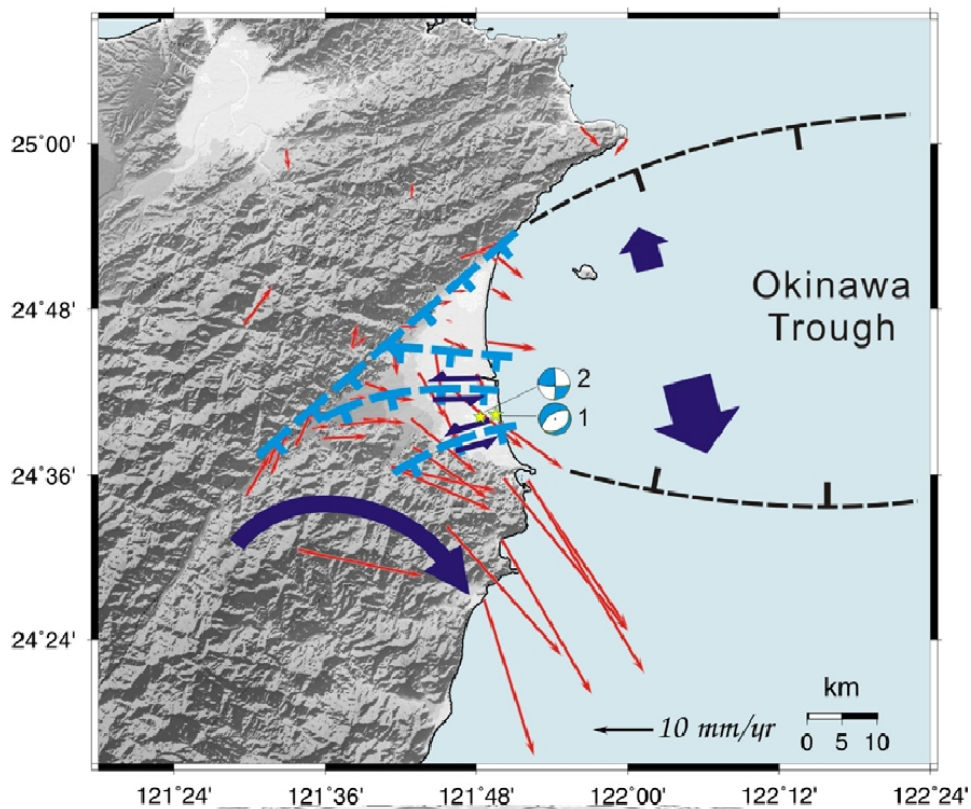


圖 2-10：宜蘭地區之斷層系統及地體構造關聯示意圖。紅色向量為 GPS 水平速度場，淺藍色虛線為推論之斷層位置，海灘球 1 和 2 為 2003 年 5 月宜蘭雙主震之地震斷層面機制解（邱詠恬，2008）。

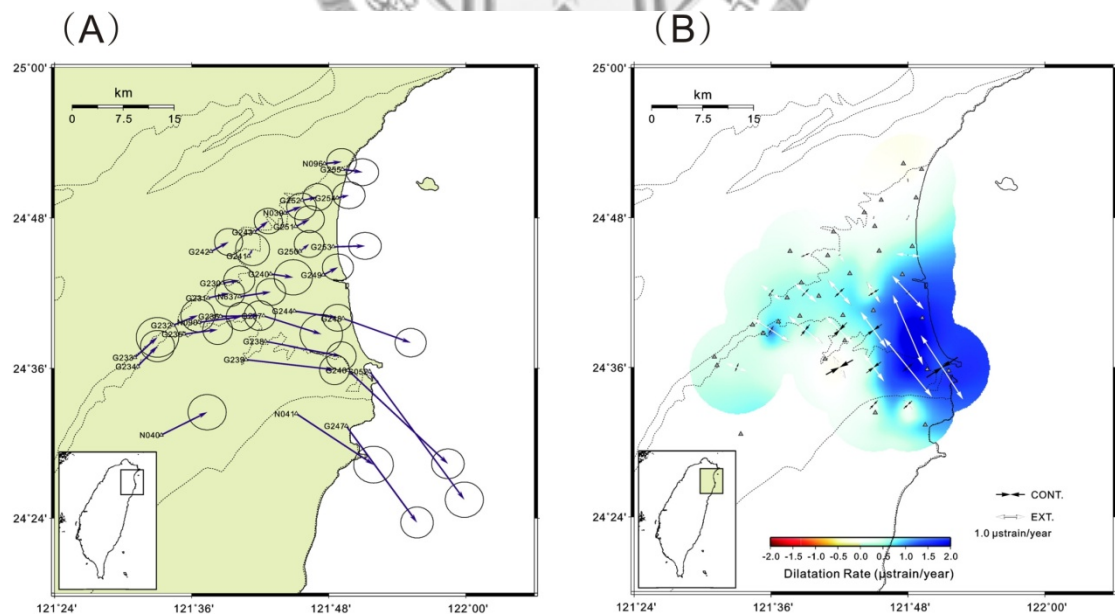


圖 2-11：(A) 宜蘭地區相對於澎湖白沙站之水平速度場。(B) 宜蘭地區主軸應變率，相對之箭頭代表壓縮，相反之箭頭代表伸張（Hou et al., 2009）。

2-2-3 地震研究

蔡義本 (1976) 根據遙記式測震網進行的觀測發現，在宜蘭與羅東之間有一寬約三公里，長約三十公里及深約二十公里之微震密集帶 (圖 2-12)，此密集帶向東北延伸入海直抵龜山島南方。根據震源機制解推測此地帶可能是一條東北走向的右移性活斷層的所在。

Yeh et al. (1989) 利用地震 P 波與 S 波到時逆推地震波速度構造，結果顯示龜山島南方為明顯的速度低區，此低速帶呈東西走向並延伸至宜蘭平原。重定位後的地震震源分佈也集中在該區，並呈現向南傾 50 度且淺於 15 公里的地震密集帶。加上斷層機制解的結果推斷宜蘭之龜山島南方間為一擴張盆地，可能為沖繩海槽向西延伸部分。

黃信樺 (2007) 利用中央氣象局地震觀測網的地震資料進行重新定位，並結合強地動觀測網的 P 波初動資料，以解析更精細的淺層地震資料。分析結果顯示在宜蘭平原下方之南、北部各有一處地震活動密集帶 (圖 2-13)，北邊的地震帶屬正斷層的震源機制，可能對應到多條存疑性斷層；而南邊的地震密集帶為左移斷層構造，且震源呈現南傾 80° 的構造面，其位置和傾角與濁水斷層符合。另外，平原底下可能存在一滑脫面，將南北兩邊的斷層系統相連接。

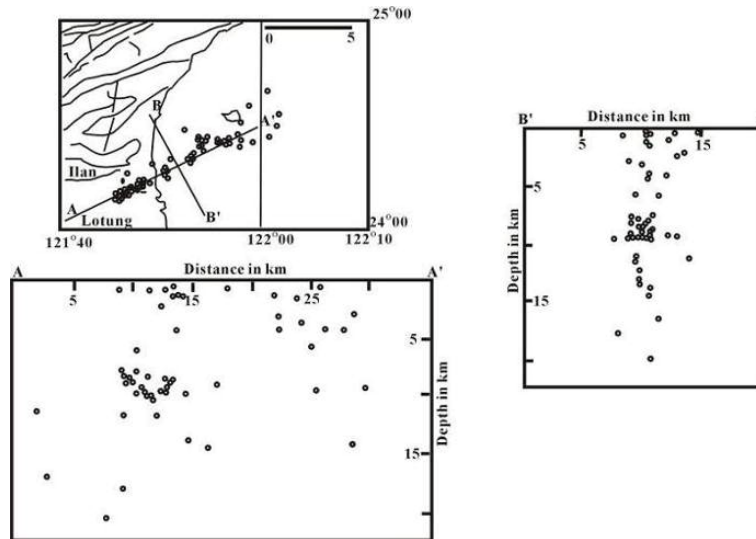


圖 2-12：宜蘭地區之微震分佈帶以及沿 AA'與 BB'之震源深度垂直剖面圖（蔡義本，1976）。

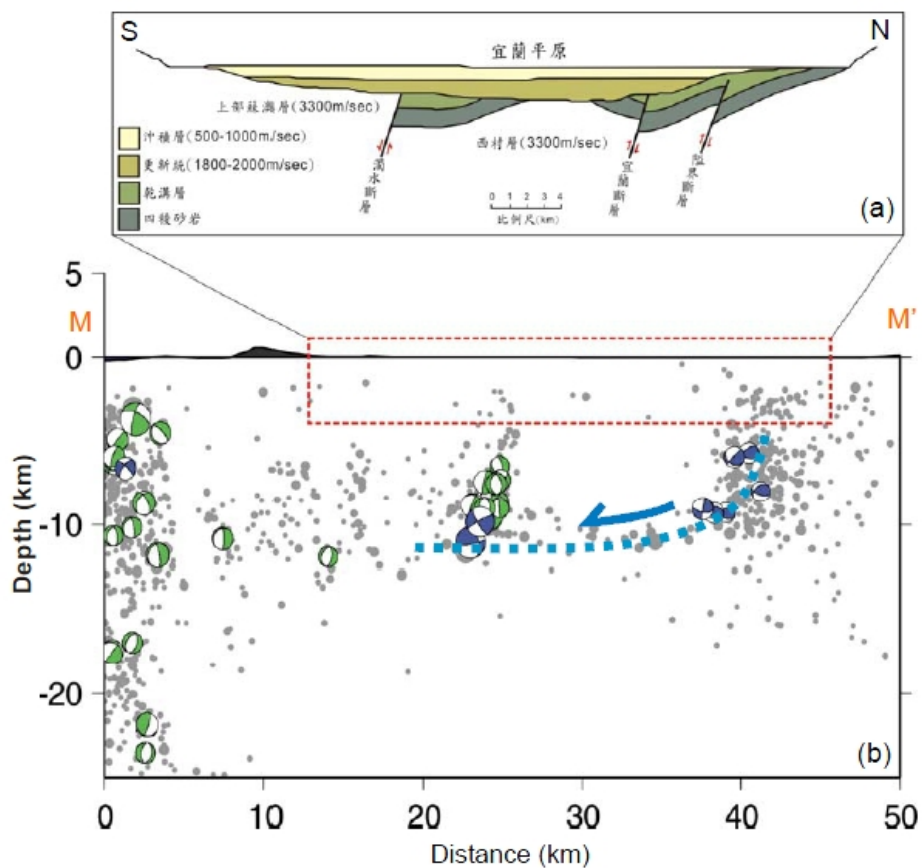


圖 2-13：宜蘭地區之淺層地層與構造剖面圖及其所對應地震與震源機制分佈圖。藍色虛線代表可能的滑脫面構造（黃信樺，2007）。

2-2-4 基盤形貌與地下構造

江新春(1976)利用反射震測結果判別出平原之地下地質由現世沖積層、更新統及基盤地層所形成，各層間以不整合關係相接觸。基盤成一不規則狀之盆狀低窪凹形面，以龜山島西側附近之海域最凹下，並以此向平原上升(圖 2-14)。平原附近中心附近之地層最老，向北、向南逐漸年輕。現世沖積層在平原邊緣附近直接覆蓋在基盤上，而在大部分區域以不整合關係覆蓋在更新統上。

林哲民(2003)將接收函數法利用於高頻地震資料，推求測站下淺層剪力波速度構造，由結果中可清楚地看到表土層、現世沖積層、更新世地層及基盤的存在(圖 2-15)，其速度與分佈變化與江新春(1976)的研究大致吻合。平原下更新統與基盤界面深度在平原邊緣最淺，往中央漸漸變深，並在壯圍海邊之深度最深；宜蘭市、羅東東邊之基盤深度成凹槽狀分佈。而沉積層與更新統之界面深度變化範圍在 100 至 400 公尺之間，其趨勢與基盤面深度同樣從平原邊緣往海邊加深，但其深度變化梯度較基盤面緩。

張峻瑋(2010)在宜蘭平原進行反射震測的研究，在靠近山區剖面的結果顯示基盤深度約 250 至 350 公尺(圖 2-16)；靠海剖面顯示蘭陽溪深達 760 公尺，越往山區越淺。此外，由震測剖面可辨識出兩條明顯的斷層：濁水斷層與三星斷層。濁水斷層之兩側基盤深度驟變，可能是分開不同地層之間的界限斷層；而三星斷層為橫移斷層，並切穿基盤以上之地層。

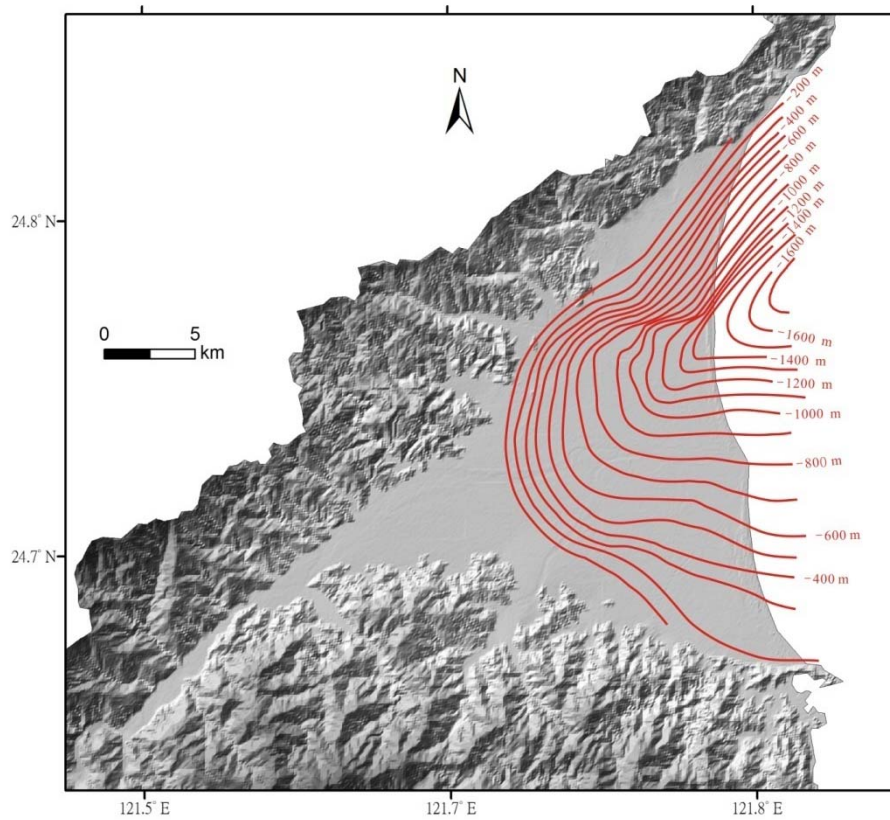


圖 2-14：宜蘭平原基盤深度分佈圖（修改自江新春，1976）。

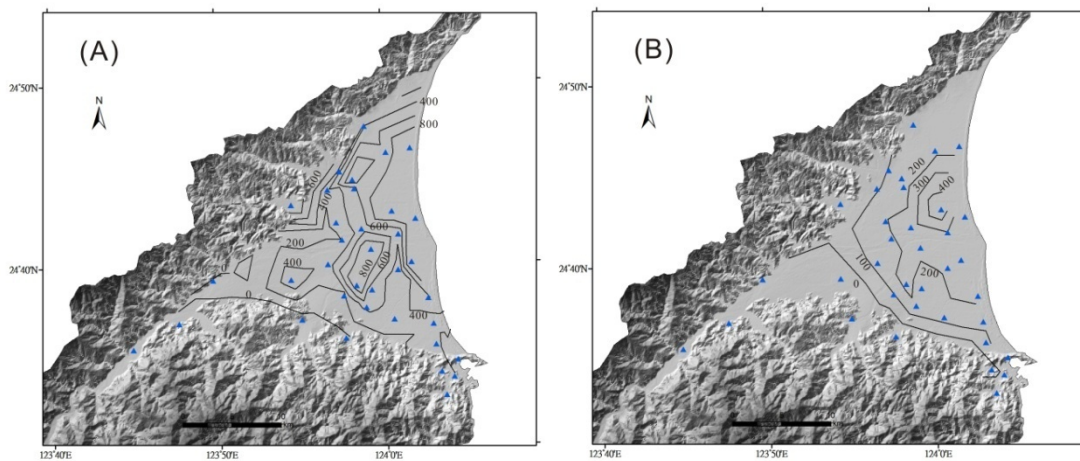


圖 2-15：(A) 蘭陽平原下更新統與基盤之界面等深度分佈圖。(B) 沈積層與更新統之界面等深度分佈圖（修改自林哲民，2003）。

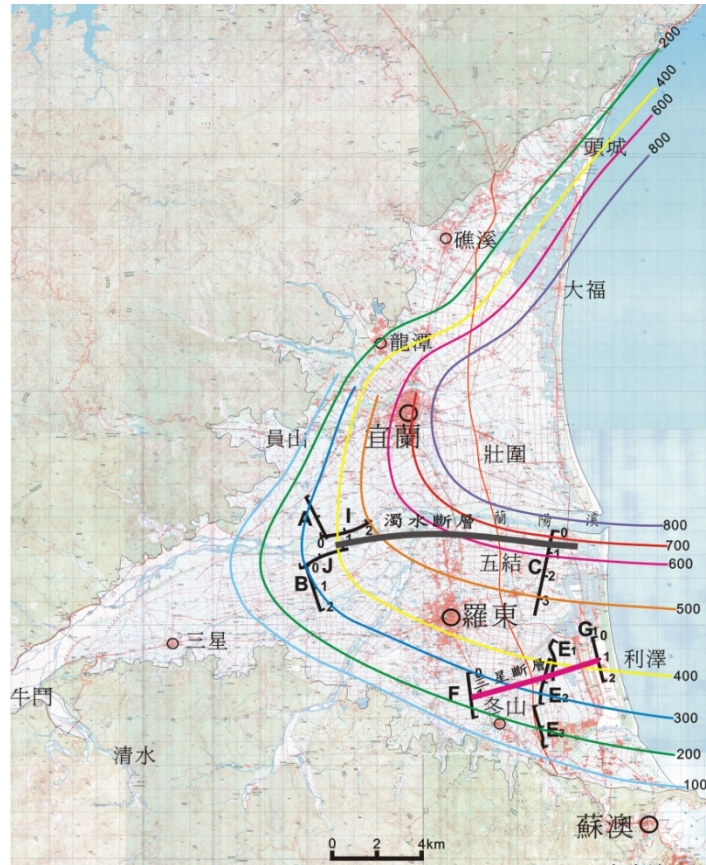


圖 2-16：基盤深度與濁水斷層、三星斷層分佈圖（張峻瑋，2010）。

2-2-5 南沖繩海槽之構造研究

Lin et al. (2009) 觀察沖繩海槽海床放置的地震儀所記錄到的 3300 個微震，發現到四個地震群。這些地震大都發生在淺部，且集中在南沖繩海槽的中間位置（圖 2-17）。此外，這些地震沿著東-西方向的正斷層分佈，也顯示了沖繩海槽南北向的張裂。而這些地震活動中止於東北-西南走向的梨山斷層的延伸處。此外，由 P 波速度指示了在弧後火山地區底下有岩漿庫的存在。

Ku et al. (2009) 於宜蘭平原外海進行震測剖面，發現到一走向為東北東-西南西的正斷層，名為宜蘭陸棚斷層 (Ilan shelf fault) (圖 2-18)。此斷層位於 2005 年宜蘭雙主震的東方，且餘震分佈走向與此斷層一致，此斷層可能向陸地延伸。由 GPS 資料顯示 Ilan shelf fault 帶有左移分量，中央山脈地塊也沿著此斷層作順時針的旋轉。因此 Ilan shelf fault 可能在板塊與地質構造上於沖繩海槽的南端扮

演了重要的角色。

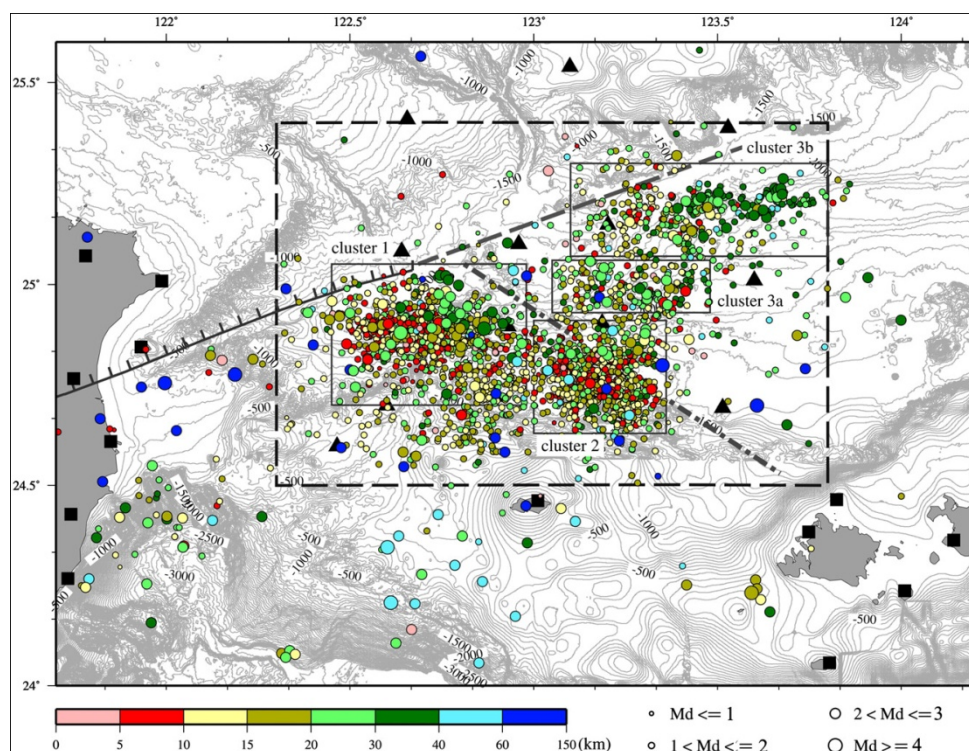


圖 2-17：沖繩海槽西南端的 2833 個微震分佈。四個灰色方框代表四個地震群。虛線為梨山斷層的延伸 (Lin et al., 2009)。

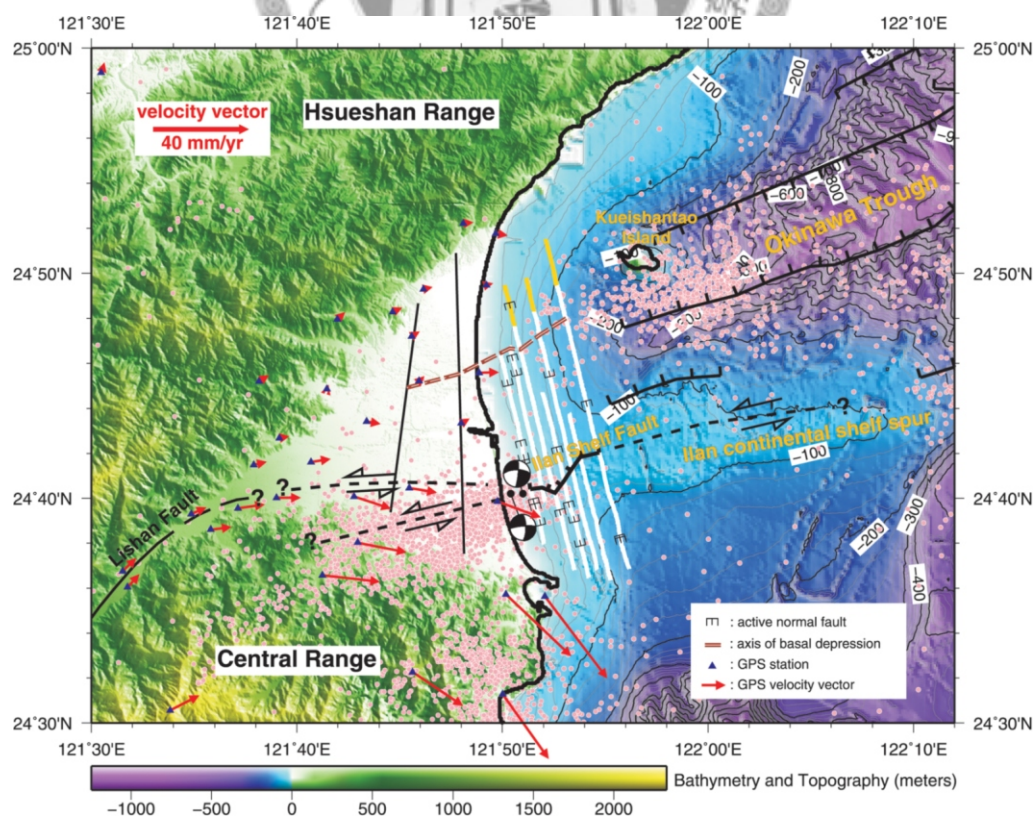


圖 2-18：宜蘭外海震測結果及構造特徵 (Ku et al., 2009)。白色粗線為測線位置，粉色點為 2005 年中央氣象局所記錄到的震央分佈位置。

2-2-6 平原上流體之研究

Yu and Tsai (1979) 進行磁力異常研究，發現由牛鬥延伸至宜蘭東邊海域有一磁力異常 (圖 2-19)，其長度超過 38 公里，推測可能是菲律賓海板塊隱沒於台灣島東北部地下所造成的侵入火成岩體，顯示具火成岩性的琉球內脊可能向西南延伸進入宜蘭平原。

Yang et al. (2005a) 分析宜蘭平原與龜山島上的溫泉氣泡之氦同位素 (圖 2-20)，發現龜山島的氣體樣本指示了明顯的地函來源，說明了龜山島仍是活火山。而平原上的某些溫泉 (武淵天然氣、蘇澳冷泉、清水地熱) 之氦與氬之同位素成分也指示少部分的岩漿成分，故推測岩漿來源的流體經由平原南部的盲斷層入侵到平原底下或是宜蘭平原底下有岩漿的侵入。

Lin et al. (2004) 利用地震資料推算三維 V_p 和 V_s 速度構造與 V_p/V_s 比值，發現在琉球隱沒帶西端之上有一低 V_s 、高 V_p/V_s 的臘腸狀體，深度由 20 至 100 公里 (圖 2-21)，推測是隱沒的沉積物、海洋地殼與蛇紋岩化地函脫水作用形成的富水物質。從地震層析成像圖中可推論富含水的物質或岩漿斜向上升流向龜山島的方向，再與沖繩海槽弧後張裂盆地的岩漿反應。最後岩漿在上部的脆性地殼中經由一些通道向上遷移。另外，Lai et al. (2009) 將 2005 雙主震的地震序列進行重新定位及斷層機制解，配合 GPS 數據認為 2005 年的地震與 2005 年宜蘭雙主震為岩脈侵入造成，並有往陸地及向上移動的傾向 (圖 2-22)，這現象與沖繩海槽的弧後張裂有關。

Tong et al. (2008) 分析地磁場資料再加上地球物理與鑽井資料所建立的三維模型顯示 (圖 2-23)，清水地熱的熱源為淺部地殼的岩漿庫與侵入的火成岩體所提供，而天水與地層水在地底經由一些斷層與破裂帶循環上升，提供了地熱的水源。

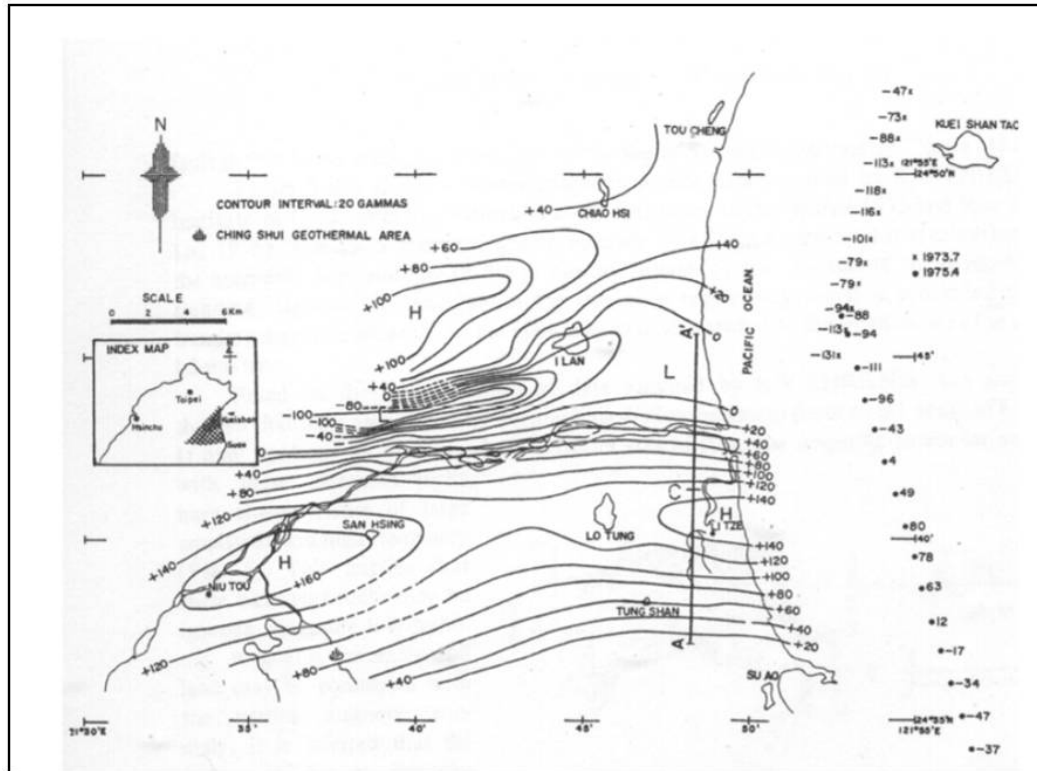


圖 2-19：宜蘭平原磁力異常分佈圖（Yu and Tsai, 1979）。

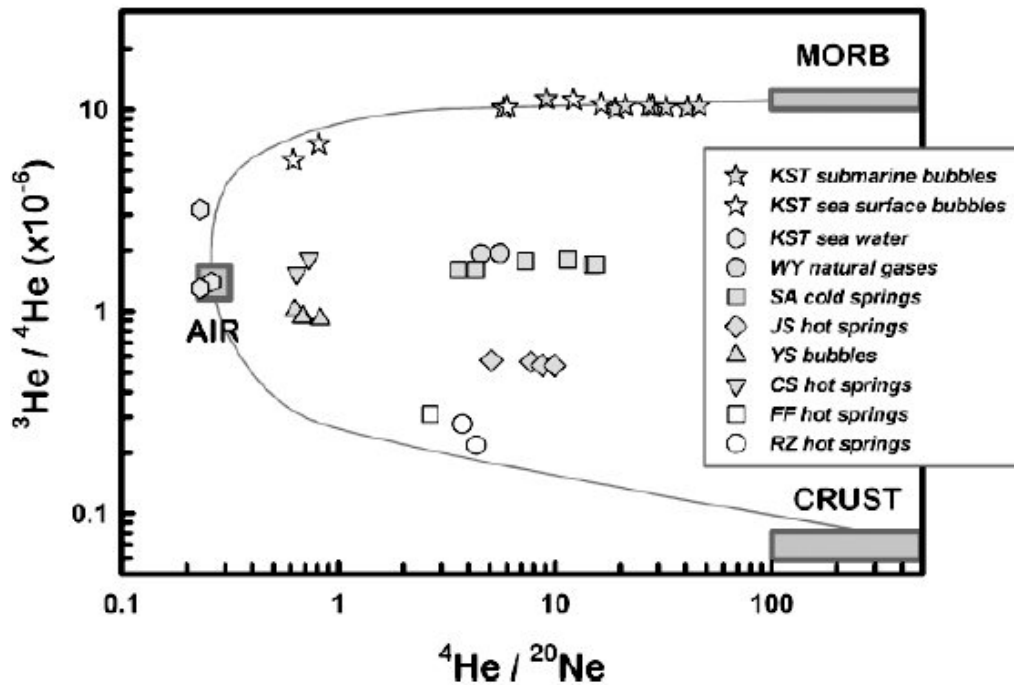


圖 2-20：龜山島與宜蘭平原的流體樣本之氦與氖同位素比值。灰線為不同端成分的混合模式（Yang et al., 2005a）。

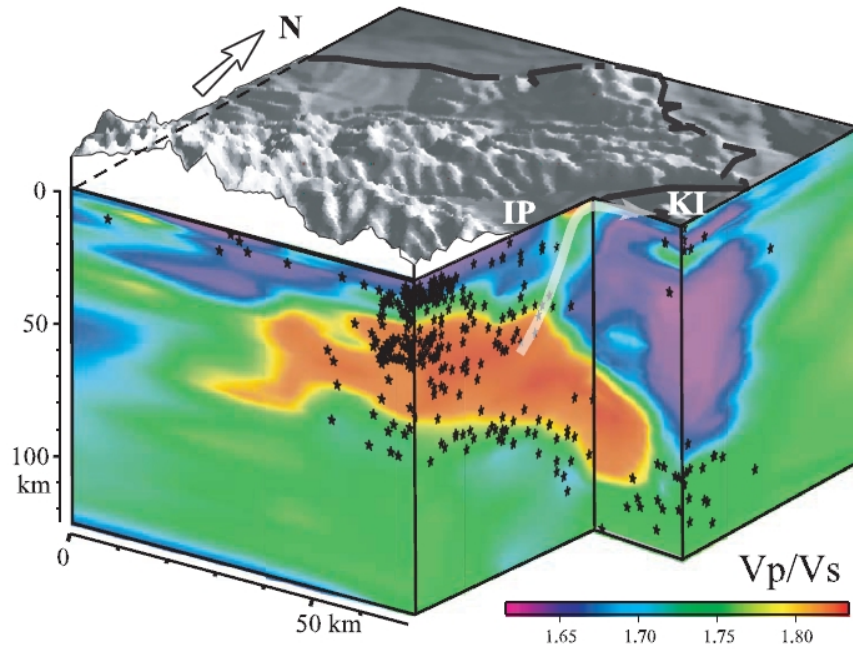


圖 2-21： V_p/V_s 之 3-D 立體成像圖 (Lin et al., 2004)。在 40 公里深處有高 V_p/V_s 的臘腸狀物體。白色箭頭表示高 V_p/V_s 的流體移動的路徑。星號為地震位置。

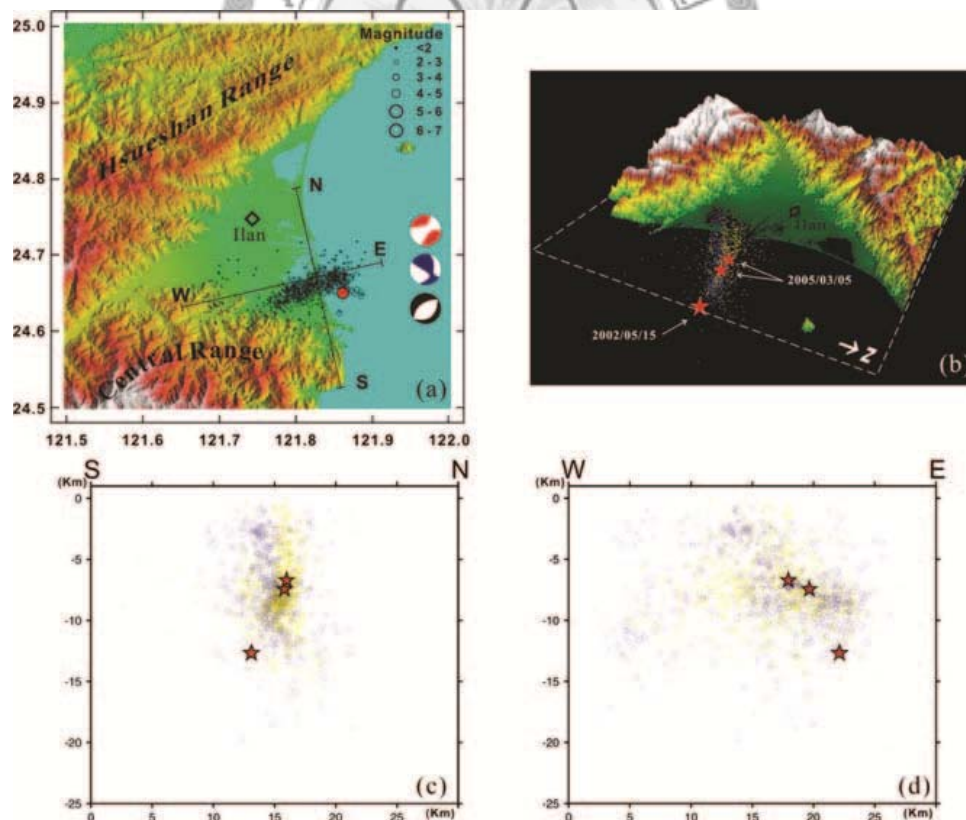


圖 2-22：(A) 2002 年宜蘭地震與餘震的分佈圖。(B) 2002 年地震與 2005 年宜蘭雙主震之透視圖。(C) 和 (D) 為 2002 年及 2005 地震事件分別在南北和東西方向的剖面圖。紅色星號代表主震 (Lai et al., 2009)。

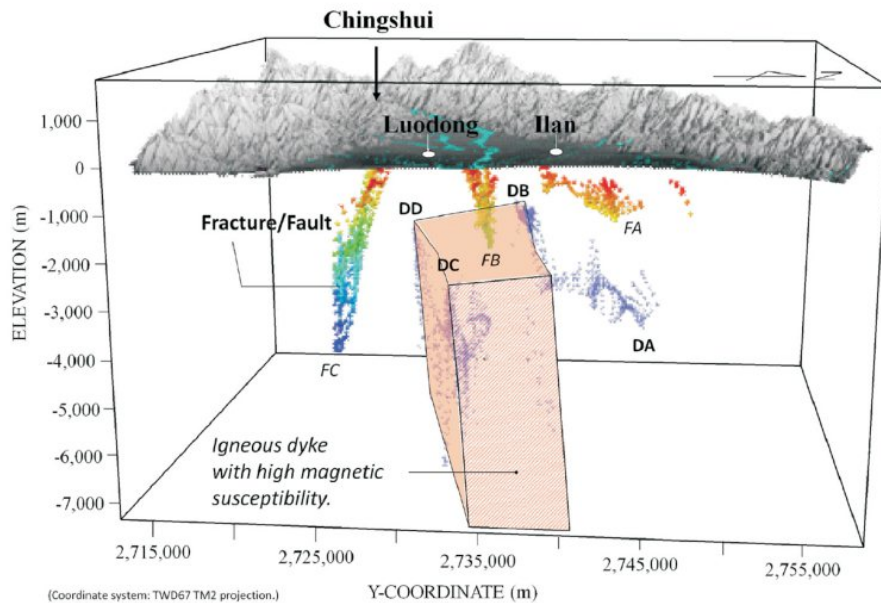


圖 2-23：宜蘭平原底下侵入岩體與斷層和岩脈之三維示意圖 (Tong et al., 2008)。

2-2-7 水文地質調查研究

陳文山 (2000) 利用中央地質調查所的 12 個井位資料，認為從 18000 年來屬於向上變深再變淺的沉積層序。沉積環境在 18000 年時為全球海水位較低的時期，因此在蘭陽平原下形成一個不整合面。之後的沉積環境在近海側為由河口灣或濱面轉變為遠濱環境，之後再轉變為濱面至沖積平原。接近山側的井位沉積環境是由下游沖積平原轉為沖積扇環境。6000 年前時海水面高度達最高峰，沉積環境不再變深。此時沉積物大量填充至沉積盆地中，沉積環境快速變淺。估算 6000 年以來構造沉降速率，以盆地中央區域來計算，在深溝、中興與五結井的構造沉積速率約每千年 7-9 公尺。

吳樂群 (2003) 分析蘭陽平原的鑽井岩心沉積物並建立層序，發現在蘭陽溪以北的層序數目較少，可能代表蘭陽平原沉積盆地的低區。蘭陽平原的沉積受當時海水面變化的影響至為明顯，但在 18000 至 6000 B.P. 本區可能發生構造性下陷。另外，由沉積物成分可知，本區的沉積物來源受控於源自變質岩區的蘭陽平原本身的河流系統。

第三章 研究方法及原理

3-1 原理

一般說來，空氣成分與地底下之土壤氣體成分有所不同。在土壤中的氣體除了部分來自大氣成分之外，岩漿脫氣、放射衰變、岩石交互作用或是生物活動皆會產生不同成分的氣體。除此之外，在土壤氣體到達地表的途中，混合、稀釋、混染或是溶解於地下水以及各種化學和生物反應皆會改變原來的氣體成分，因此在特定區域內對某種氣體來說，其成分可能會有很大的變化。近幾年來流體地球化學研究的進步，使得土壤氣體成為研究斷層活動性以及地震災害的有潛力的工具 (Burton et al., 2004; Ciotoli et al., 1998)。斷層可被視為是含有高度破裂物質、斷層泥與流體的弱帶。由於在斷層上土壤的滲透性較高，使深部氣體能夠滲出，產生較為明顯得地球化學特徵，而與周圍背景區的地球化學性質有所不同

(Ciotoli et al., 1998; Fu et al., 2009; King et al., 1996; Sugisaki et al., 1983; Walia et al., 2005; Zhang and Sanderson, 1996)。因此，若是地表地下有深的斷裂或是破裂帶，可形成一個通道，讓源自於地殼深部或是地函的氣體沿著此通道上升遷移至地表，使得地表附近的土壤氣體濃度或是氣體通量會有明顯的異常 (Burton et al., 2004; Ciotoli et al., 1998; Toutain and Baubron, 1999)。藉由此特性，我們常利用氦氣、氬氣、氡氣、二氧化碳及甲烷等氣體的分布情形來尋找斷層的位置與走向 (圖 3-1)。

在國內外的研究中，氣體成分的變化也常與地震或斷層活動等構造活動有所關，尤其是當中度或大地震來臨之前，在破裂帶或是斷層面上因局部應力的改變使孔隙壓力產生變化，造成某些氣體濃度瞬間改變或是遷移，因此流體地球化學可作為觀察地震前兆的工具 (Chyi et al., 2005; Hickman et al., 1995; Miklavcic et al., 2008; Perez et al., 2007; Walia et al., 2009; Yang et al., 2005b; Zhang and Sanderson, 1996)。

本研究著重於土壤氣中氦氣、氬氣、二氧化碳濃度及通量的變化情形，來觀察宜蘭平原上的構造分佈。氦氣與氬氣等稀有氣體是很好的追蹤劑，在土壤氣體地球化學中提供了斷層位置、活動性與構造特性的資訊，而二氧化碳是土壤氣體的主要成分之一，一般相信它可以作為稀有氣體的攜行氣體。

由於土壤氣體的分佈也會受土壤、生物與天候因素所影響，然而一般相信這些因素相對於構造分佈是較為次要的。為了完整了解整個區域系統，我們必須要分析各種不同的氣體並一起綜合討論，在野外同時也必須要採及足夠多的樣本。採樣時必須要在穩定的天候條件與土壤濕度下進行（例如：在乾季時採樣），最後要用適當的統計方法來處理這些數據（Ciotoli et al., 2007）。

本研究用土壤逸氣探勘技術，其優勢在於即使地表地形沒有任何明顯的構造特徵出現，用傳統野外調查方法很困難去辨識時，仍可以用土壤逸氣來探勘這種地殼中的不連續帶（Ciotoli et al., 1998; Duddridge et al., 1991; Fu, 2005）。由於這些特性，花費不高及採樣的快速，使土壤逸氣方法成為地質調查方法一個很有用的工具。

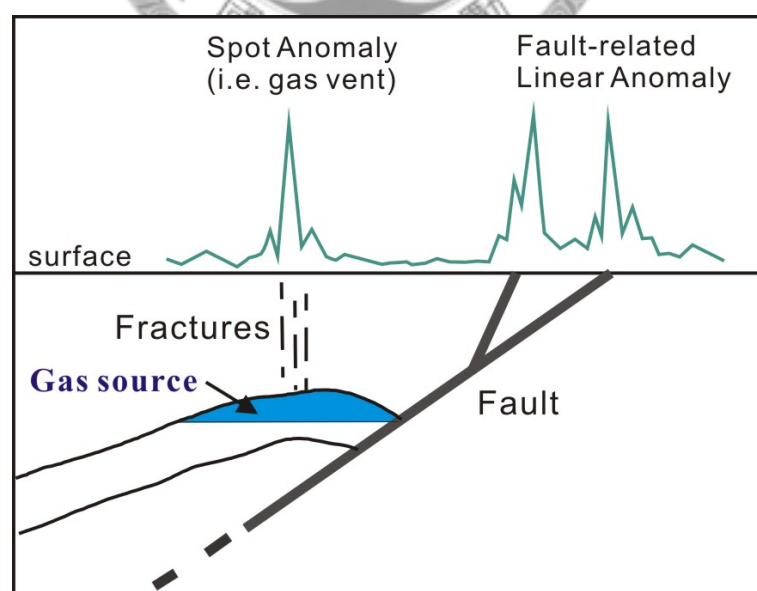


圖 3-1：地質構造與土壤氣體異常之示意圖（修改自 Ciotoli et al., 2007）。

3-2 主要研究氣體之特性

3-2-1 氦氣 (Helium) 與氦同位素

氦氣在自然界中有兩種穩定同位素： ^3He 與 ^4He ；另外還有半衰期很短的人造放射性同位素： ^5He 、 ^6He 、 ^8He 。氦氣 (^4He) 是鈾鈷衰變的產物，為一種無色、無嗅的惰性氣體，由於其惰性、穩定、極難溶於水的性質，另外，氦的移動性高且能夠穿過很厚的破裂帶，因此成為很好的破裂帶追蹤劑 (Andrews, 1983; Oliver et al., 1984)。在空氣中，氦氣的擴散係數 ($1.68 \text{ cm}^2/\text{s}$) 是氮氣、氧氣 ($0.198 \text{ cm}^2/\text{s}$) 與二氧化碳 ($0.155 \text{ cm}^2/\text{s}$) 的 10 倍。由於從地球內部脫氣至地表與逸散到太空中氦氣成動態平衡，因此氦氣在大氣中含量相當穩定，約為 $5.24 \pm 0.004 \text{ ppm}$ (Roberts et al., 1975)。氦氣主要是由富鈾岩石生成 (一立方公尺的岩石若含有 1 ppm 的 ^{238}U 每百萬年能產生 10^{-6} 立方公分的氦氣)，深層的氦經由斷層與破裂系統到達地表，因為其高移動性及低活度，因此被作為地殼不連續帶的特殊指標 (Ciotoli et al., 1998; Duddridge et al., 1991; Kahler, 1981; Toutain et al., 2009)。此外， ^4He 也常被用來作為連續的地震觀測 (Toutain and Baubron, 1999)。

自然界中除了一種放射性反應之外 ($^6\text{Li} (n, \alpha) ^3\text{H} \rightarrow ^3\text{He}$)，一般自然界中沒有反應可以生成 ^3He 。 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 的比值在天然樣品中變化很大，能有數個數量級之差。空氣中的 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 比值非常均一 (1.39×10^{-6})，故廣被當成標準值 ($1 R_A$ ， R_A 大氣比值)。由於地殼中有豐富的放射性物質產生大量的 ^4He ，因此地殼中的氦同位素比值遠低於空氣 ($0.1 \sim 0.01 R_A$)。源自於上部地函的中洋脊玄武岩 (Mid Ocean Ridge Basalt)，其氦同位素比值之範圍相當固定 ($8 \pm 1 R_A$)；下部地函因保存了地球生成時原始的 ^3He ，通常會有較高 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 的比值 ($> 30 R_A$)。因此，可以由氦同位素比值來區分樣本源自於何處。

3-2-2 氡氣 (Radon)

氡氣是自然界中鈾鉛衰變序列的中間產物 (圖 3-2)，為一種無色無味且是最

重的稀有氣體。放射性元素氡有三種自然生成的同位素，包括： ^{219}Rn (An, action)、 ^{220}Rn (Tn, thoron) 和 ^{222}Rn (Rn, radon)。 ^{219}Rn 、 ^{220}Rn 和 ^{222}Rn 的半衰期分別為 3.96 秒、55.6 秒和 3.824 天。因為 ^{219}Rn 及 ^{220}Rn 較短的半衰期限限制了它們在地表中的遷移距離，因此本研究主要是以偵測 ^{222}Rn 為主。

在淺部地層中，土壤氡氣的濃度除了和鐳 (^{226}Ra) 含量有密切的關聯外，還受到土壤本身的性質，如：孔隙度 (porosity)、滲透性 (permeability)、溫度 (temperature)、濕度 (moisture) 所影響。氡氣在土壤中遷移的機制有二：擴散 (diffusion) 和由載體流體的滲流行為 (advection) 而被攜至他處。氡氣本身的移動性並不高，其擴散係數為 0.04 至 0.004 cm^2/s (Schroeder et al., 1965)，因此通常氡氣的來源離觀察點的距離相當短。若氡氣被其他流體 (如：地下水、 CO_2 、 CH_4 、 N_2 等) 所攜帶 (Shapiro et al., 1982; Toutain et al., 1992; Walia et al., 2010; Yang et al., 2003b)，氡氣就可從地底深處遷移至地表附近或大氣中。氡氣的出現不只突顯出有流體能循環的破裂帶，還有通常在黏土中的富鈾礦物。這些特性讓氡氣成為描繪活動斷層 (Al-Hilal and Al-Ali, 2010; Amponsah et al., 2008; Ciotoli et al., 1998; Font et al., 2008; Holub and Brady, 1981; King et al., 1996; Toutain and Baubron, 1999)、熱液系統位置及尋找鈾礦的工具。

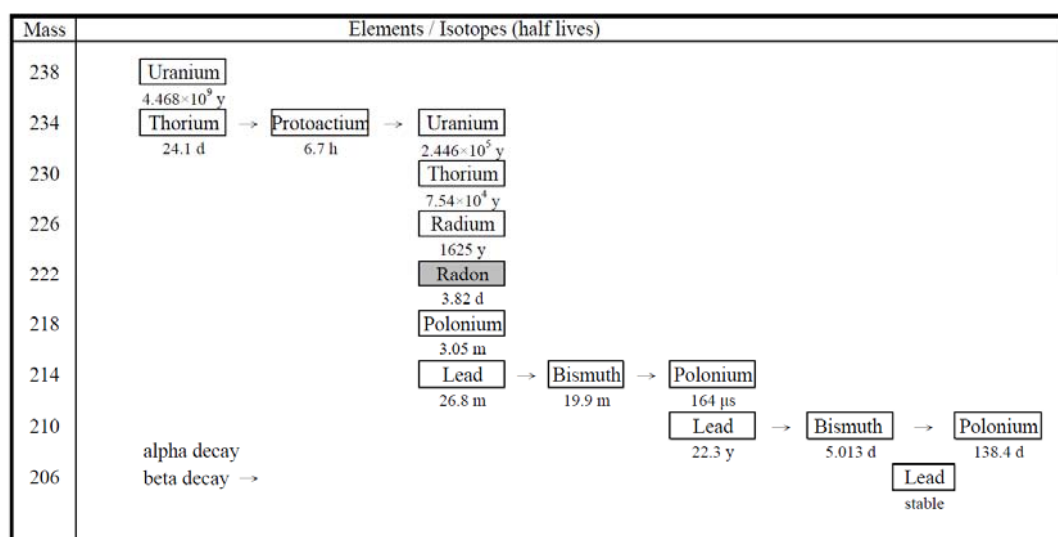


圖 3-2： ^{238}U 衰變序列 (修改自 Brookins, 1990)。

3-2-3 二氧化碳 (carbon dioxide) 與碳同位素

從熱液系統到火山環境中，二氧化碳是最豐富的氣體。斷層帶上的二氧化碳可能是由各種來源交互影響：地函脫氣、石灰岩變質、石灰岩溶解 (dissolution) 而釋放二氧化碳、有機物質的氧化、微生物或植物的呼吸作用等 (Sugisaki et al., 1983)。二氧化碳通量高通常在與高熱能的地區(與活火山或是老火山作用有關)，或是有深斷裂的地方，使從地函或是地殼岩石變質作用產生的二氧化碳能夠遷移上升。二氧化碳排放量高可能指示了深度的孔隙壓力較高，因此可用來判斷潛在地震區域的指標 (Irwin and Barnes, 1980)。在眾多研究中，二氧化碳常被用來繪製斷層的走向 (Ciotoli et al., 1998; Lewicki et al., 2003)，以及監測火山與地震活動 (Rahn et al., 1996; Shapiro et al., 1982; Toutain et al., 1992)。

碳同位素是判別其來源的有效方法，有機成因的二氧化碳碳同位素($\delta^{13}\text{C}_{\text{CO}_2}$)約為-15‰~-39‰，地函或火山源的二氧化碳碳同位素介於-7至-4‰，碳酸岩熱分解的二氧化碳碳同位素則約為0‰。

3-3 採樣方法

3-3-1 土壤氣體採樣方法

採樣方法如下：

- (1) 首先利用一支長約 130 公分，直徑約 3 公分中空的不鏽鋼管，在其前端接上拋棄式鑽頭（以利鑽進土壤中且能避免土壤阻塞不鏽鋼管造成氣體無法流通），利用鐵鎚將鋼管敲入地表下約 1 公尺左右。
- (2) 接著用一根較細的實心鋼條插入中空的鋼管中，利用重擊使最前端的拋棄式鑽頭與鋼管分離，以利土壤中的氣體順利進入不鏽鋼管（圖 3-2）。
- (3) 再將鋼管連接上已設計好的管線，此管線包含兩個過濾器，一為過濾塵土，另一則用來阻擋水器進入。之後用手動邦浦讓管線經過土壤氣體的沖刷約 30 秒，使存在管線之中的氣體為土壤氣體以避免空氣或前次採樣時的殘留

氣體所汙染。

- (4) 將事先抽好真空的採樣袋接上管線，沖刷數次後用手動邦浦將土壤氣樣抽入採樣袋中即完成採樣工作（圖 3-3-A）。
- (5) 少部分樣本欲進行氮同位素值的分析時，則使用鉀玻璃材質的採氣瓶，且事先抽真空至 1×10^{-3} torr，當管線經過氣樣沖刷後直接開啟旋鈕，由於採樣瓶為一負壓因此會將土壤氣自動抽入採樣瓶中（圖 3-3-B）。





圖 3-2：野外採樣土壤氣體的情形

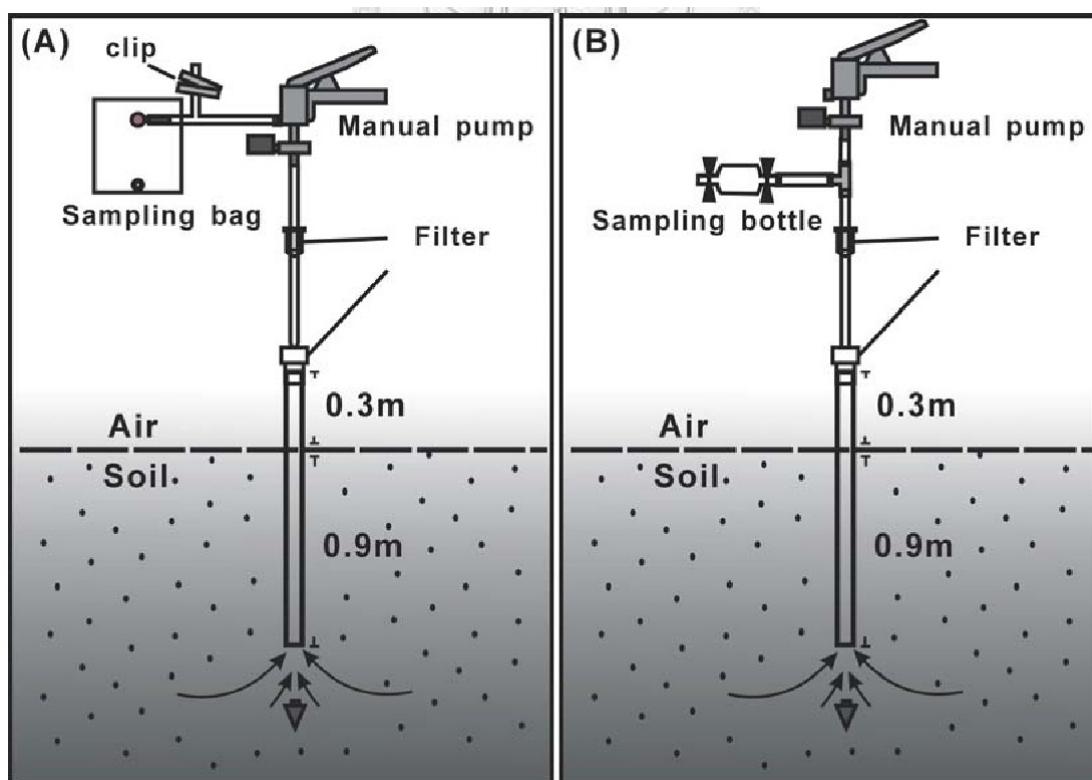


圖 3-3：採樣示意圖。(A) 為氣袋採樣方式。(B) 為採樣瓶採樣方式（傳慶州, 2006）。

3-3-2 土壤逸氣通量量測

本研究採用密閉氣罩法進行土壤逸氣的通量調查 (Chiodini et al., 1998)，所使用的儀器為義大利 WEST SYSTEMS 所製造的可攜式裝備，而儀器主要分為三部分 (Lan et al., 2007；溫心怡，2010) (圖 3-3)：

(1) 循環氣罩 (Circular Chamber)：為一鋁製的封閉罩 (Closed chamber)，底面積 314 平方公分，高 20 公分，內部總體積為 6.2×10^{-3} 立方公分。氣罩具有進氣端及出氣端與二氧化碳分析儀連接，使管線成為一循環系統。另配有毛細管可平衡罩內外壓力以避免因為壓力差造成的測量誤差，但不會造成氣罩內外氣體的交換。由於二氧化碳密度較空氣大，易沉降於氣罩底部，造成濃度不均勻；因此氣罩內部有一轉速固定之風扇，用以均勻混合氣罩內部之氣體。為防止水氣進入儀器造成測量誤差及儀器損壞，在進入氣罩前的管路加裝乾燥劑。經測試，分子塞 (molecular sieve) 的除濕效果好且易於更換，是相當合適的乾燥劑。另外，在進行測量前，應將氣罩邊緣以土壤覆蓋妥當，以避免外部空氣進入，造成干擾。在風較大的狀況下應更小心氣罩的密閉。此外，量測前須確定氣罩內的二氧化碳濃度已經與空氣之濃度相當，才能開始測量，否則初始值會高於真正土壤的二氧化碳濃度，造成量測時間加長。

(2) 二氧化碳分析儀：利用 LICOR LI820 非擴散性遠紅外光譜儀，其偵測範圍 0-20000 ppm。

(3) 掌上型電腦：儀器的控制及數據儲存均利用掌上型電腦進行。由掌上型電腦內建的程式可以立即得到通量值數據 (單位：ppm/s)，及時得到數據後可以立刻確知實驗的正確與否，而決定是否重新測試，是相當便利、有效率的方法。

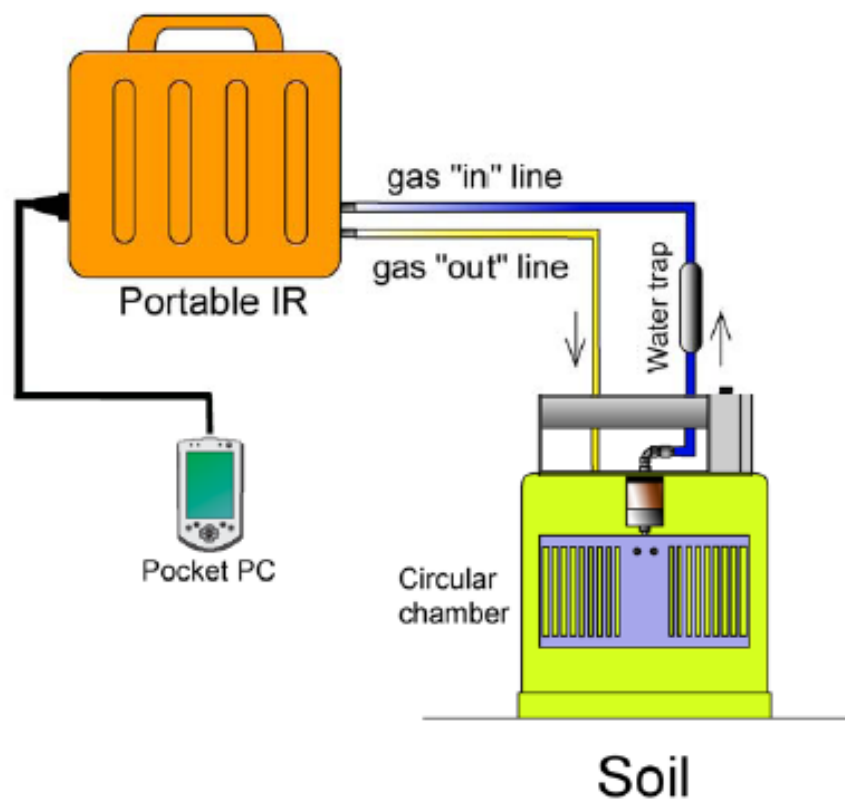


圖 3-3：土壤逸氣通量量測之儀器設備。



圖 3-4：使用密閉氣罩法量測土壤逸氣通量之工作情形。

原理

從計算二氧化碳質量的增加來求得通量 (ψ)，必須固定氣罩的體積；並於固定時間間隔量測二氧化碳濃度。可得到以下的關係式：

$$V_C C_{CO_2,t+dt} = V_C C_{CO_2,t} + \psi_{inp} A_C C_{soil,CO_2} dt - \psi_{out} A_C C_{CO_2,t} dt \quad (1)$$

A_C 為氣罩底面積， V_C 為氣密罩體積， $C_{CO_2,t+dt}$ 為二氧化碳於 dt 時間內增加的濃度。 V_C 與 $C_{CO_2,t+dt}$ 相乘即為在 $t+dt$ 時內二氧化碳增加的質量。這個值與 t 時刻氣罩內二氧化碳質量 ($V_C C_{CO_2,t}$) 加上 dt 時間內，由外進入的質量

($\psi_{inp} A_C C_{soil,CO_2} dt$)，並減去留出氣密罩的質量後 ($\psi_{out} A_C C_{CO_2,t} dt$) 應相等。而氣體進出氣罩的速率 (ψ_{inp} 、 ψ_{out}) 由儀器控制，兩者應相等，因此沒有壓力不等的問題。又 V_C/A_C 即為氣罩的高度 (H_C)，因此 (1) 可寫成：

$$dC_{CO_2}/(C_{CO_2,t} - C_{soil,CO_2}) = -(\psi_{inp}/H_C) dt \quad (2)$$

(2) 恰為帶有常數的一次線性微分方程式，計算後可寫成：

$$C_{CO_2,t} = C_{soil,CO_2} + (C_{air,CO_2} - C_{soil,CO_2}) \exp(-t\psi_{inp} H_C) \quad (3)$$

若於初始狀態 ($t \rightarrow 0$)，式 (2) 可以寫成：

$$\psi_{inp} (C_{soil,CO_2} - C_{air,CO_2}) = (dC_{CO_2}/dt)_{t \rightarrow 0} H_C \quad (4)$$

土壤氣逸氣之二氧化碳濃度通常會大於空氣二氧化碳濃度 ($C_{air,CO_2} \gg C_{soil,CO_2}$)，因此：

$$\psi_{soil,CO_2} = \alpha H_C \quad (5)$$

要計算 ψ_{soil,CO_2} 須先確定 α 值，而 α 決定於開始量測通量前 $C_{CO_2} - t$ 的斜率。

3-4 分析方法

3-4-1 氦氣偵測儀

氦氣偵測儀 (Helium detector) 為 ALCTEL 所生產的 ASM 100HDS 型，為一種簡易型的磁場式質譜儀，重約 20 公斤，適合用於野外現地分析，可以連續準確地分析氣體樣品中的氦氣含量。當氣體分子進入離子裝置之後，使得電子光束碰撞而轉換出大量的離子，由於電場加速了這些粒子，不同的粒子因質量不同產生不同的迴旋半徑。由於 He 的質荷比固定 ($m/e = 4$)，He 離子束會進入直流放大器，接著通過偵測器後而求得氦氣濃度。其操作步驟為：

1. 開機待其暖機完成後，接上三用電表並將機器校正歸零。
2. 將進樣的管線連接上儀器主體後，靜待儀器與空氣達成穩定平衡。
3. 穩定後，將數值微調至 1.719 ± 0.001 即可進行分析，所得電壓值 V 代入下列公式即可得氦氣濃度 (ppm)

$$0.1 \times \exp (2.3026 \times V) \quad (6)$$

備註：

1. 三用電表可達小數點後三位
2. 空氣中氦氣濃度約為 5.24 ppm
3. 儀器誤差約為 0.6 %

3-4-2 氦氣分析儀

我們所使用的氦氣分析儀為德國 SARAD 公司所生產的 RTM 2100 Radon/Thoron monitor。儀器本身內建邦浦，可將採樣袋中的氣體吸入腔室 (chamber) 中，因在腔室入口設有兩階段的過濾器，只有 Rn-222 與 Rn-220 能通過 (圖 3-5)。由於鈾氣半衰期短 (55.6 秒)，受限於分析時間及所採集的樣本數，本研究只針對氦氣作討論。

腔室與其內部的半導體探測器形成一對高壓的電極，這電極能在腔室的內壁

與探測器的表面產生靜電場。當 Rn-222 在腔室內衰變後，產生的 Po-218 將會被游離。由於 α 粒子對一些軌道電子的散射，Po-218 粒子在一段時間內帶正電，這些帶電粒子被半導體探測器表面收集，收集到的 Po-218 的離子數目正比於腔室內氡氣濃度。

Po-218 的半衰期為 3.05 分鐘，探測器將記錄下其 50%（粒子在探測器表面衰變）的衰變粒子，氡的衰變速度與探測器記錄的 Po-218 粒子數目之間平衡時間為 5 個半衰期，也就是 15 分鐘，這個時間即為氡氣測定的最小反應時間。

在氡氣衰變鏈上，其中有兩個核種是 β 放射性核種：Pb-214 和 Bi-214，接著才是另一個 α 放射性核種 Po-214，也就是說，每一個 Po-218 衰變後將釋放超過 1 個可探測的 α 粒子，但由於 Po-214 在衰變過程上所處的位置關係，疊加起來的時間導致其延時 3 小時，同時 Po-218 和 Po-214 釋放粒子的能量不同，我們可以用 α 能譜將其分開（圖 3-6）。

RTM 2100 有兩種計算氡濃度的方式，慢速 (slow) 模式包含 Po-218 和 Po-214 的衰變，而另一種方式快速 (fast) 模式僅僅使用 Po-218 的信號。此研究使用快速模式，其誤差為

$$E(\%) = 100\% \times k \times \frac{\sqrt{N}}{N}$$

E：統計誤差

k：信心水準 (k-sigma)

N：計數值 (counts)

而計數值被兩個因素所控制：儀器的靈敏度與量測的時間間隔，靈敏度對於一個儀器來說是一個常數，因此可由下式得到氡氣濃度：

$$C_{Rn} = \frac{N}{T \times S}$$

C_{Rn} ：氡氣濃度 (kBq/m^3)

N：計數值 (counts)

T：測量的時間間隔 (min)

S：靈敏度 (counts per min/ (kBq/m³))

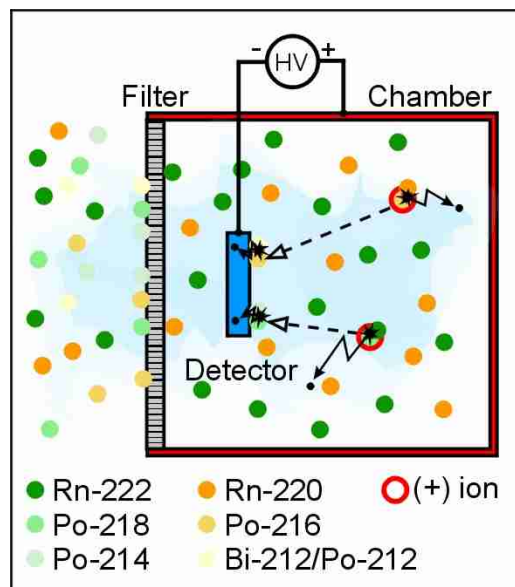


圖 3-5：氡氣分析儀之腔室運作情形。

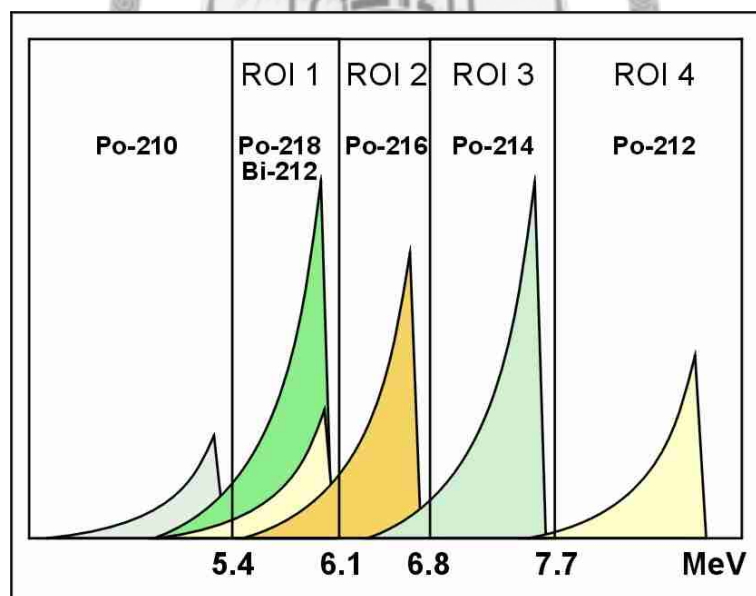


圖 3-6：α 能譜儀所分離出的核種。

3-4-3 攜帶式氣相層析儀

攜帶式氣相層析儀 (Micro Gas Chromatography) 為 Varian 公司的 CP-4900 型，簡稱為 Micro GC (如圖 3-5)。目前由一個偵測器配合兩組分離柱組成，利用氦氣當作攜行氣體將樣本帶入分離柱的層析原理，則可分析出樣品中所有氣體的成分。以下分成兩個部分來說明：

Channel A：利用 He 當攜行氣體，通過 Molecular Sieve 5A (MS-5A) 的分離柱 (為一種依氣體大小篩濾的分離柱，體積過大的氣體分子，如 CO_2 則會被濾掉)，進入熱傳導偵檢器可以分析到 Ar、 O_2 、 N_2 、 CH_4 。熱傳導偵檢器 (Thermal Conductivity Detector，簡稱 TCD) 是利用氣體的熱傳導值不同來偵測，為一種廣泛使用的偵檢器。

Channel B: 利用 He 當攜行氣體，通過 PPQ 分離柱 (為一種針對烷類所設計的分離柱，可在短時間之內迅速分離出各成分來)，進入熱傳導偵檢器可以分析到 N_2 、 CH_4 、 CO_2 、 C_2H_6 、CO。

由於此型號配有小鋼瓶及充電電池，因此可將儀器直接帶至野外進行現地分析。以上我們一次進樣即可同時分析出樣品中主要的氣體成分，並且於分析樣品完後，作標準氣體分析以檢測檢量線 (圖 3-7)，以確保分析之準確度。

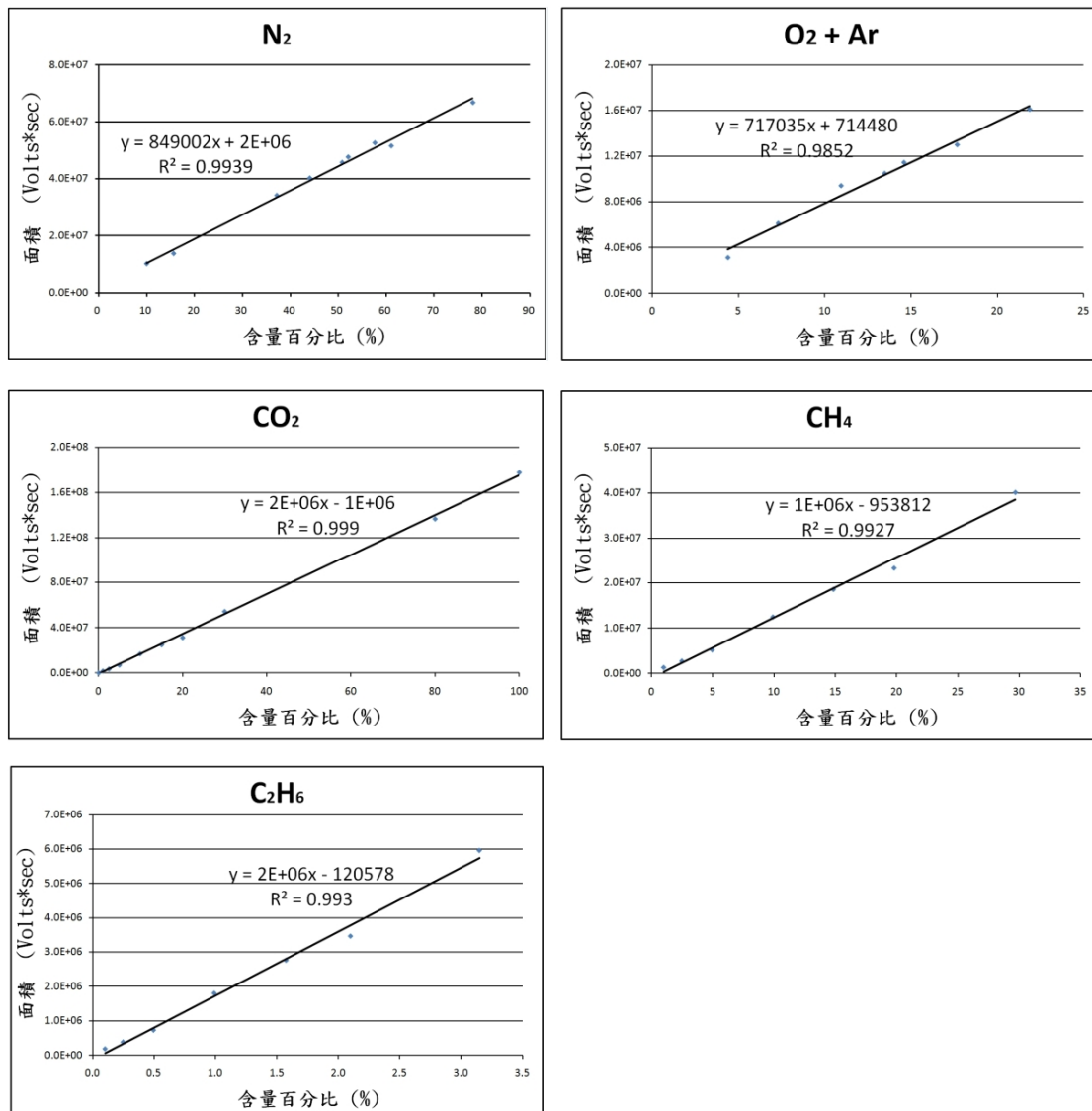


圖 3-7：Micro GC 檢量校正曲線。

利用標準氣體所製備的減量線，將求得的各氣體電壓峰值面積，再換算成氣體成分的百分比，一般主要氣體的分析誤差小於 5%，而微量的氣體（含量 < 1%，如 Ar）的誤差較高，可能介於 10% - 20%。

3-4-4 氣相層析儀

由於前述攜帶式氣相層析儀為特點是分析快速且易攜帶方便，適合初步的分析。而以下介紹的氣相層析儀更為精確，且可以分析到許多含量較低的氣體，因此在本研究的第二階段調查中，便使用氣相層析儀來作分析。

我們所使用的氣相層析儀(Gas Chromatography, 簡稱 GC)型號為 SRI 8610C, 具有三個偵測器: 火焰離子化偵測器(FID, Flame Ionization Detector FID)及二個熱傳導偵測器(TCD, Thermal Conductivity Detector)。FID 與其中一個 TCD 使用 H_2 作為載流氣體, 分別通過 Hayesep-D 與 MS-13X 的管柱, 可分析樣品中 CH_4 、 C_2H_6 、 CO 、 CO_2 、 Ar 及 N_2 的成分。另一 TCD 偵測器則是使用 Ar 作為載流氣體, 通過 MS-5A 的分離柱, 可以分析到 He 、 H_2 、 O_2 、 N_2 、 CH_4 。分析 Ar 時, 因為 Ar , 因為 O_2 與 Ar 的滯留時間十分相近, 一般的分離管柱在正常操作下無法將之完整分離開來。為有效分析 Ar 的含量, 樣品先經過 MS-5A 管柱將各成分分離後, 必須流經高溫達 $150^\circ C$ 的除氧觸媒填充管柱(鎳觸媒, $Rh\ 1.5\%$ in Al_2O_3)使 O_2 與 H_2 反映轉化為 H_2O , 已除去氧氣成分波峰對氫氣波峰偵測的干擾(江政鴻, 2002)。再以氫氣為載流氣體 Hayesep-D 與 MS-13X 管柱, 由電子閥來控制載流氣體的開關。首先讓氫氣通過 MS-13X 管柱, 在樣本中的 Ar 和 N_2 被偵測出來後, 將通過此管柱的電子閥關閉, 同時打開控制 Hayesep-D 管柱的電子閥, 以 Hayesep-D 管柱來分離碳氫化合物(李曉芬, 2003)。

本分析系統穩定性高、體積小, 只使用了 H_2 和 Ar 兩個鋼瓶(內建空氣壓縮機), 而且可以直接由電腦連線控制。我們對新儀器作了一連串的測試與校正; 溫度設定方面, 管柱所在的烘箱加熱器利用階段式升溫程式, 使得最慢析出的乙烷波峰提前析出來縮短作業時間。起始溫度設定在 $50^\circ C$, 保持 8 分鐘以 $80^\circ C/min$ 的速率升溫至 $250^\circ C$, 總共分析完一個標本需時 20 分鐘。

本系統一次進樣即可同時分析樣品中主要的氣體成分, 並且每次開機開始分析樣品前與分析樣品後, 作標準氣體分析以檢測檢量線, 以確保分析之準確度。利用標準氣體所製備的檢量線, 求得氣體的毫莫耳數(mmole), 再換算成氣體成分的百分比, 一般主要氣體的分析誤差小於 5%, 而微量的氣體(含量 $<1\%$, 如 He 、 H_2 、 Ar 等)的誤差較高, 可能介於 10% - 20%之間(李曉芬, 2003)。

3-4-5 二氧化碳的純化與碳同位素分析

氣體樣品經過氣相層析儀分析之後，選擇其中二氧化碳濃度較高的樣品，進入氣體萃取系統（圖 3-8），其二氧化碳純化步驟如下（謝佩珊，2000）：

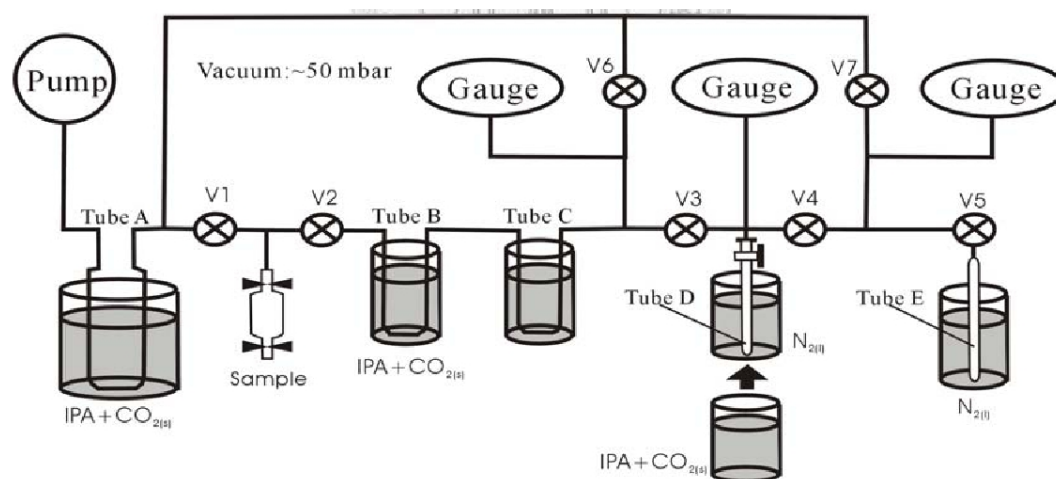


圖 3-8：二氧化碳純化系統示意圖。樣品自左而右逐步純化後，封存在玻璃管中以待質譜儀分析。IPA：異丙醇，AC：乙醇。

- 維持真空：打開所有閥門抽真空，在 Tube A 上放置異丙醇與乾冰混合漿，可使溫度降至約-83℃，用來吸附較難抽離的水氣。抽約數小時後，當真空維持在約 50 mbar 時，關閉 V1、V3 與 V6，並繼續抽後半部的真空。
- 除去雜氣：打開採樣瓶，氣體進入 Tube B 中，在 Tube B 中放置異丙醇與乾冰混合漿，可用來分離樣品中的水氣，另在 Tube C 中放置液態氮與酒精，主要用來分離樣品中的甲烷及其他少量的氣體，關閉 V2 後，等待約 2 分鐘。
- 抓住 CO₂：關閉 V4，打開 V3，將氣樣放入 Tube D，並加入液態氮抓取二氧化碳，靜置約 5 分鐘後，關閉 V3，打開 V4 將不要的氣體抽離。
- 封存 CO₂：關閉 V7，移開液態氮換上異丙醇與乾冰之混合漿，溫度平衡後，在 Tube E 放置液態氮，打開 V5，將純化後的二氧化碳抓到玻璃管內封存。

純化後的二氧化碳，再使用穩定同位素實驗室之氣相比值質譜儀（DELTA Plus, Finnigan Mat, Germany）進行碳同位素分析。質譜儀由電腦控制，而資料經

由軟體運算後直接以 $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ 的形式輸出。 $\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ 乃是實驗室的碳同位素值與國際標準值 (Belemnite from American, Peedee Formation, Cretaceous, South Carolina)

比較的結果，其計算方式如下：

$$\delta = \left[\frac{R_e - R_{\text{std}}}{R_{\text{std}}} \right] \times 10^{-3} (\text{‰}) \quad (7)$$

R_e ：樣品中 $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ 的比值

R_{std} ：標準樣品的 $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ 比值

3-4-6 氦氣的純化與氦同位素分析

氦同位素分析是利用英國 Micromass[®] 公司所生產之 MM5400 稀有氣體質譜儀分析系統 (Yang et al., 2003a; 楊燦堯, 2000)，如圖 3-9 所示。樣本分析前分析前須要進行氣體純化步驟以去除其他氣體成分而保留氦氣進行分析。本系統分為兩處純化線 (RGA-Bench & MM-Bench)，前段 RGA-Bench 專供流體樣本分析用；後段 MM-Bench 則專給固態樣品及純化過的流體樣本使用。樣本自前段 RGA-Bench 進入，在初步的吸除水氣之後，再經過吸附與高溫反應，以去除大部分不要的氣體。最後進入 MM-Bench，將活性氣體與重稀有氣體去除後，分析氦氣與氖氣等稀有氣體同位素。

MM5400 稀有氣體質譜儀具有兩個極高靈敏度的偵測器 (Faraday detector: $\sim 10^{11}$; Daly detector: $\sim 10^{13}$)，偵測極限低 (10^{-12} ccSTP of ^4He)，以標準空氣重複分析亦有良好的再現性 ($\pm 2.19\%$) 及極佳的準確度 ($\pm 2.00\%$)。

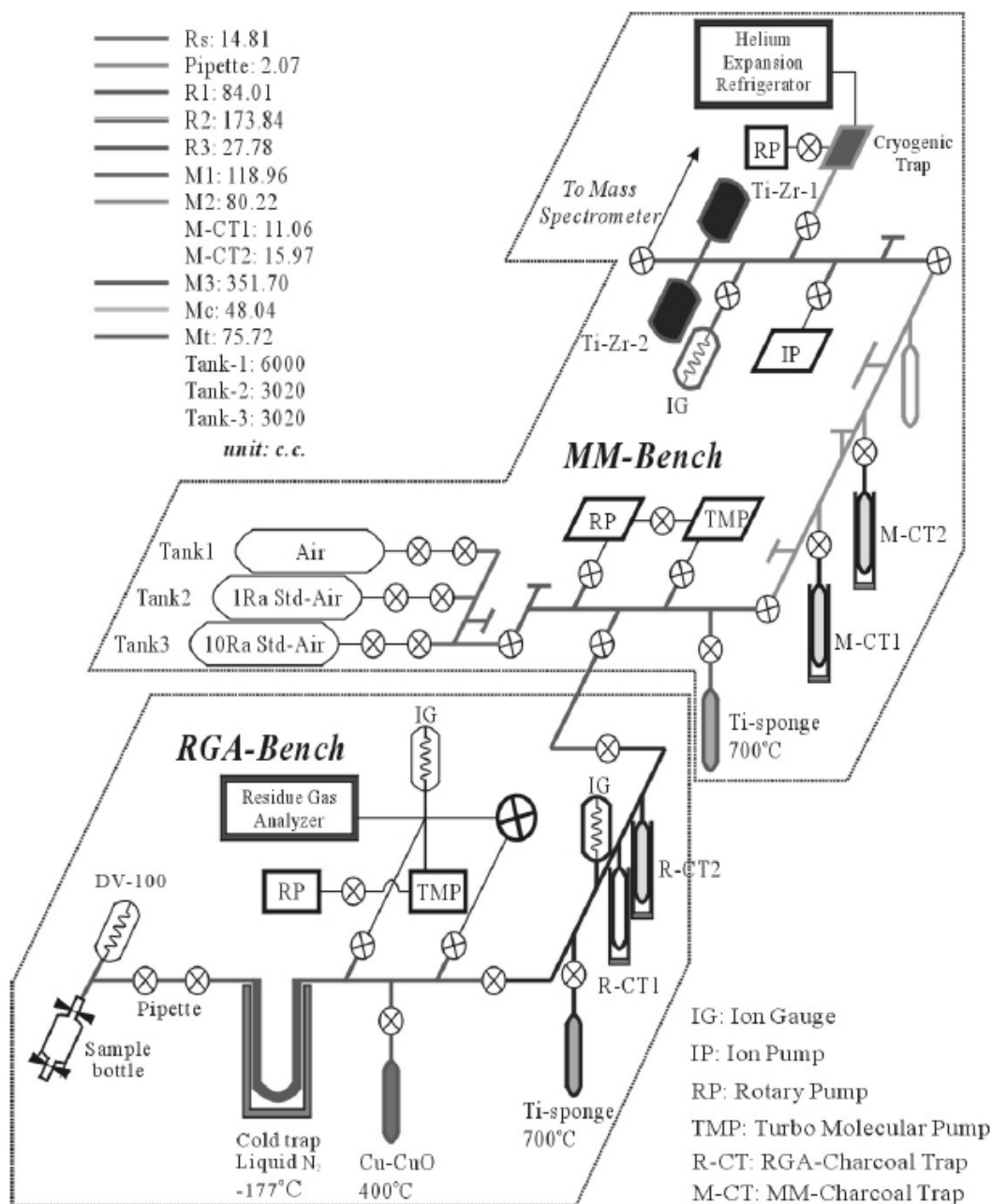


圖 3-9：氮氣純化系統示意圖。

3-5 野外採樣

本研究針對宜蘭平原進行了有計畫的採樣，我們選擇氣候條件相似的時段內進行採樣，且採樣點盡量以均勻的格點式分布，每個採樣點之間距約為 1 至 2 公里。本研究於 2009 年 4 月 2 日至 4 月 5 進行了第一階段的採樣，共計採集了 159 個樣本，其採樣點分布情形如圖 3-10 所示。

為了驗證此研究的再現性，本研究於 2009 年 7 月至 9 月選取第一階段採樣中氣體成分較高的點位，再次進行重複採樣；另外也於 2010 年 2 月至 3 月在宜蘭西北近山區進行採樣，使採樣點分布更為均勻，此第二階段採樣共計採集了 86 個樣本，其採樣點分布情形如圖 3-11 所示。



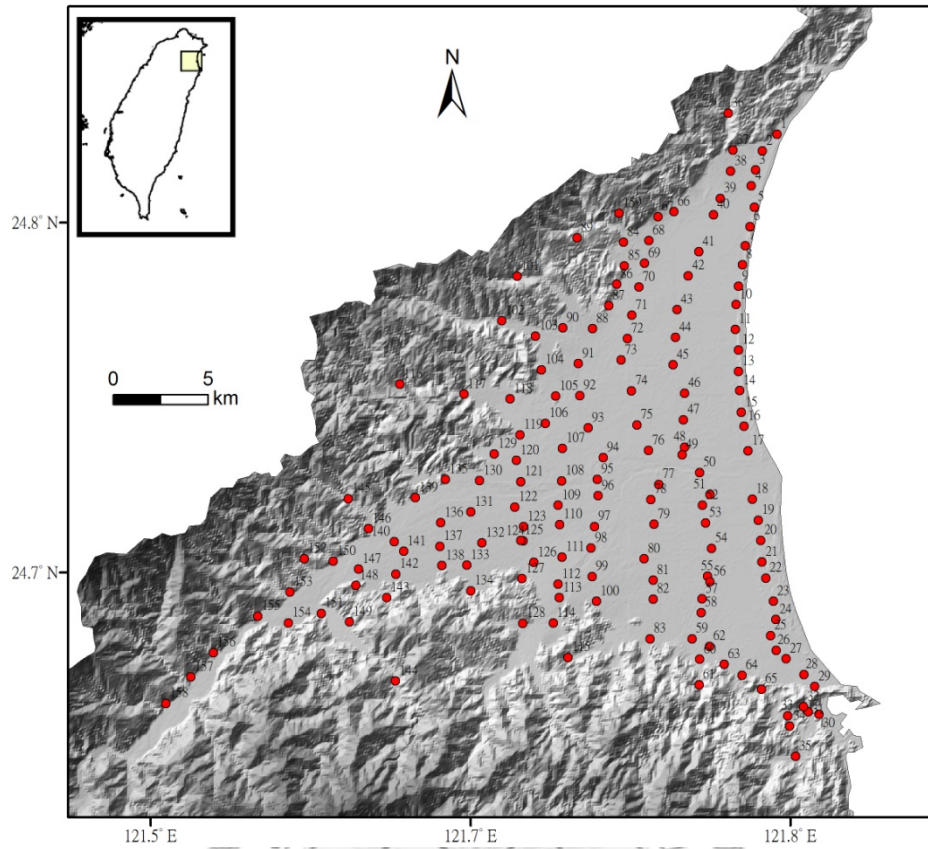


圖 3-10：第一階段研究區域的採樣點分佈圖，紅點代表每個採樣的位置。

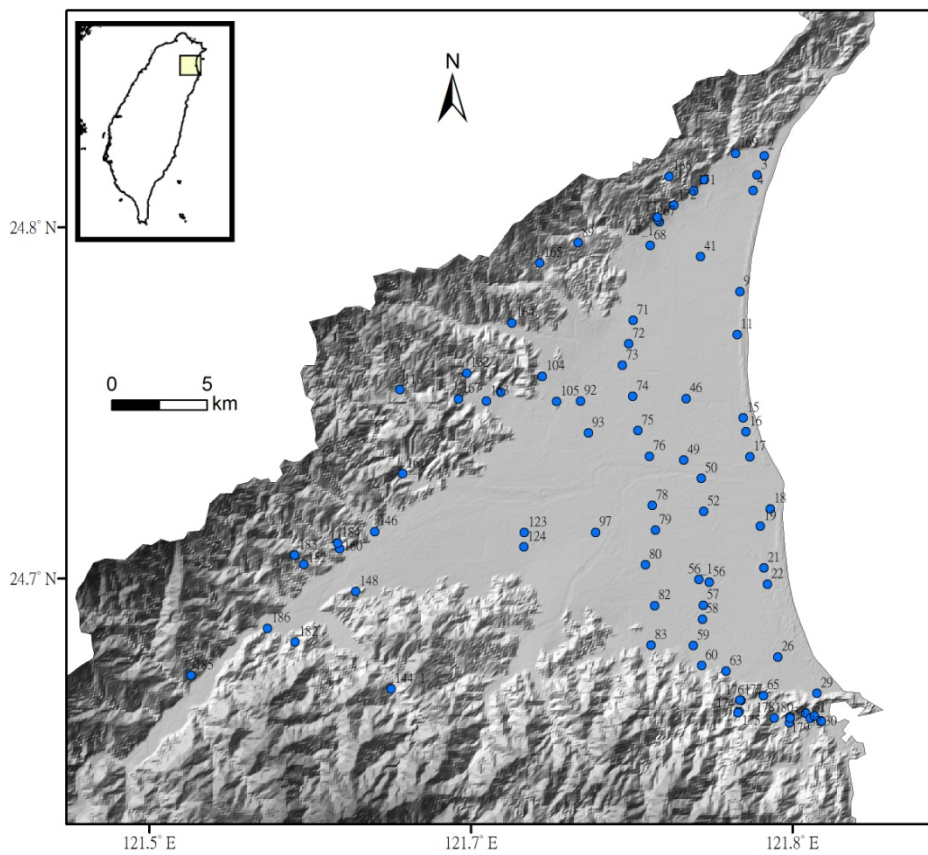


圖 3-11：第二階段研究區域的採樣點分佈圖，藍點代表每個採樣的位置。

第四章 結果與討論

4-1 第一階段與第二階段調查之比較

第一階段進行了全面性的調查，分析結果如附錄一；而第二階段針對氦氣、氬氣或二氧化碳含量較高的點位再次採樣，分析結果如附錄二。將兩階段分析結果作統計與比較，如表 4-1。

表 4-1：土壤氣體成分統計

	平均值	標準差	變異係數	最小值	最大值	樣本個數
	(標準差/平均值)					
第一階段採樣						
He (ppm)	5.25	0.12	2.2	4.23	5.78	159
Radon (kBq/m ³)	16.2	11.8	72.8	0.1	73.9	157
CO ₂ 含量 (%)	3.02	2.75	91.0	0.05	14.25	157
CO ₂ flux (g/m ² /day)	13.79	11.93	86.5	0.53	87.03	158
第二階段採樣						
He (ppm)	5.23	0.17	3.2	4.39	6.24	86
Radon (kBq/m ³)	28.2	19.6	69.5	0.6	102.6	86
CO ₂ 含量 (%)	5.96	5.17	86.7	0.09	32.16	86
CO ₂ flux (g/m ² /day)	13.85	8.04	58.0	0.25	57.25	69

由第一階段與第二階段分析比較（圖 4-1）可知，氦氣濃度與二氧化碳通量在兩階段採樣的結果大致相同，顯示其背景值維持一定；而氬氣與二氧化碳含量結果顯示，第二階段的分析值略高於第一階段，可能代表在第二階段採樣期間宜蘭平原地區的氬氣與二氧化碳背景值略為增高。

由於第一階段與第二階段的氣體濃度整體差異並不是太大，於是我們將第一

階段所採樣的 159 個樣本加上第二階段採樣新增的 28 個樣本，共計 187 個樣本整合一起討論。

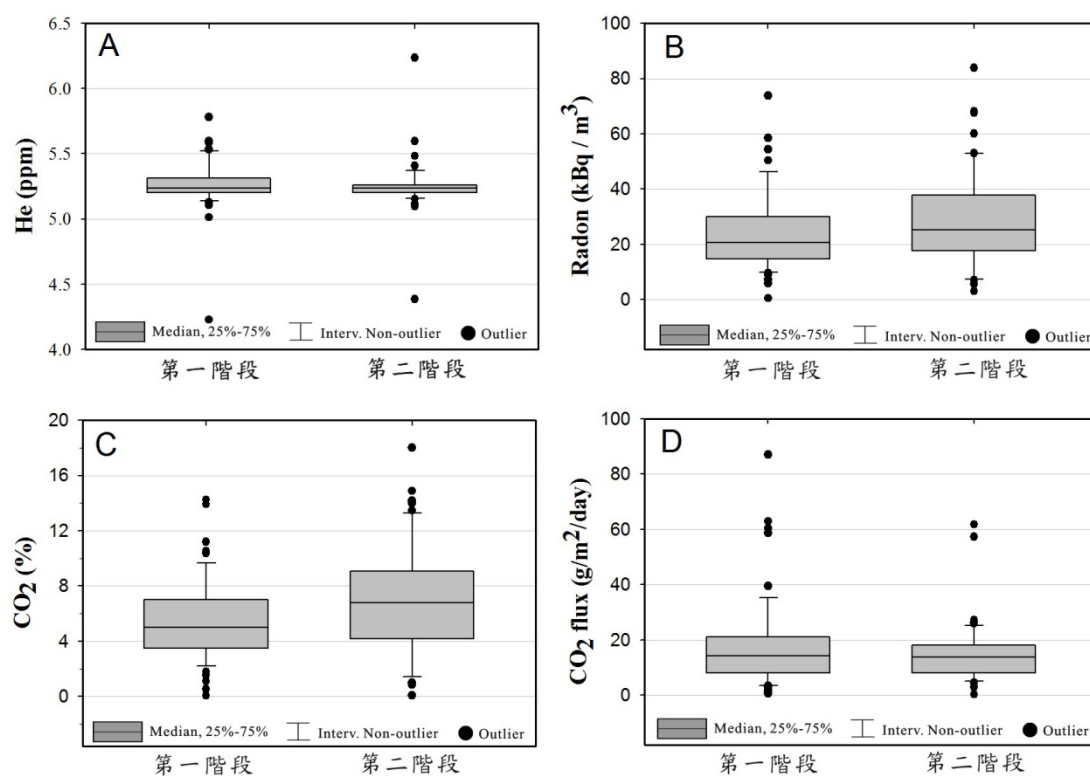


圖 4-1：第一階段與第二階段採樣結果之盒形圖 (box plots)。A：氦氣，B：氡氣，C：二氧化碳含量，D：二氧化碳通量。

4-2 土壤氣體之空間分布情形

要作進一步空間上的討論時，首先要先定義氣體濃度的異常值。本研究的氣體濃度異常值門檻定義為：先將明顯過高的分析值去掉後，將所有分析結果取平均值加上兩倍標準差（達 95% 的可信度），當分析值高於此門檻值者，即視為異常值。因此可得到氦氣濃度、氡氣濃度、二氧化碳濃度與二氧化碳通量的異常值門檻分別為：5.36 ppm、36.8 kBq/m³、8.1 %和 26.9 g/m²/day。

土壤氣體異常值分佈位置圖顯示（圖 4-2），氦氣濃度異常分佈在平原中部與南部，氡氣濃度之異常位置零星分散在平原上與山區一帶，二氧化碳濃度之異

常除了平原南部之外，北部也有零星分佈；而二氧化碳通量的異常明顯分佈在平原中部與南部。另外，異常點位置大都分佈在平原東部，而且沿著前人研究所提出之存疑性斷層上似乎並無明顯的異常值分佈。

將採樣點用克利金法（Kriging method）內差並繪製出等值線圖，如圖 4-3 所示，可以看到氣體濃度在整體上在東邊最高，呈現大致由東往西遞減的趨勢，而此趨勢越接近西部雪山山脈則趨於不明顯。

此外，在平原西南邊的清水地熱區有氦氣、氬氣與二氧化碳濃度特別高的現象，顯示清水地熱這個熱液系統其氣量旺盛且氣體有著深部的來源。

若加上前人所提出的存疑性斷層與破裂帶來看，如圖 4-4 所示，可以看到土壤氣體濃度似乎沒有呈現與這些構造線一致的線性，可能的原因如下：

1. 由於宜蘭平原地下水位高及平原底下厚層的沉積物，阻擋了氣體遷移至地表的路徑。
2. 這些斷層可能並不存在，由於大家對這些斷層的位置及其存在性仍不清楚，因此有可能這些斷層並不存在於這些位置。
3. 斷層並未切穿地表，使地表上觀察到的氣體異常並不明顯。

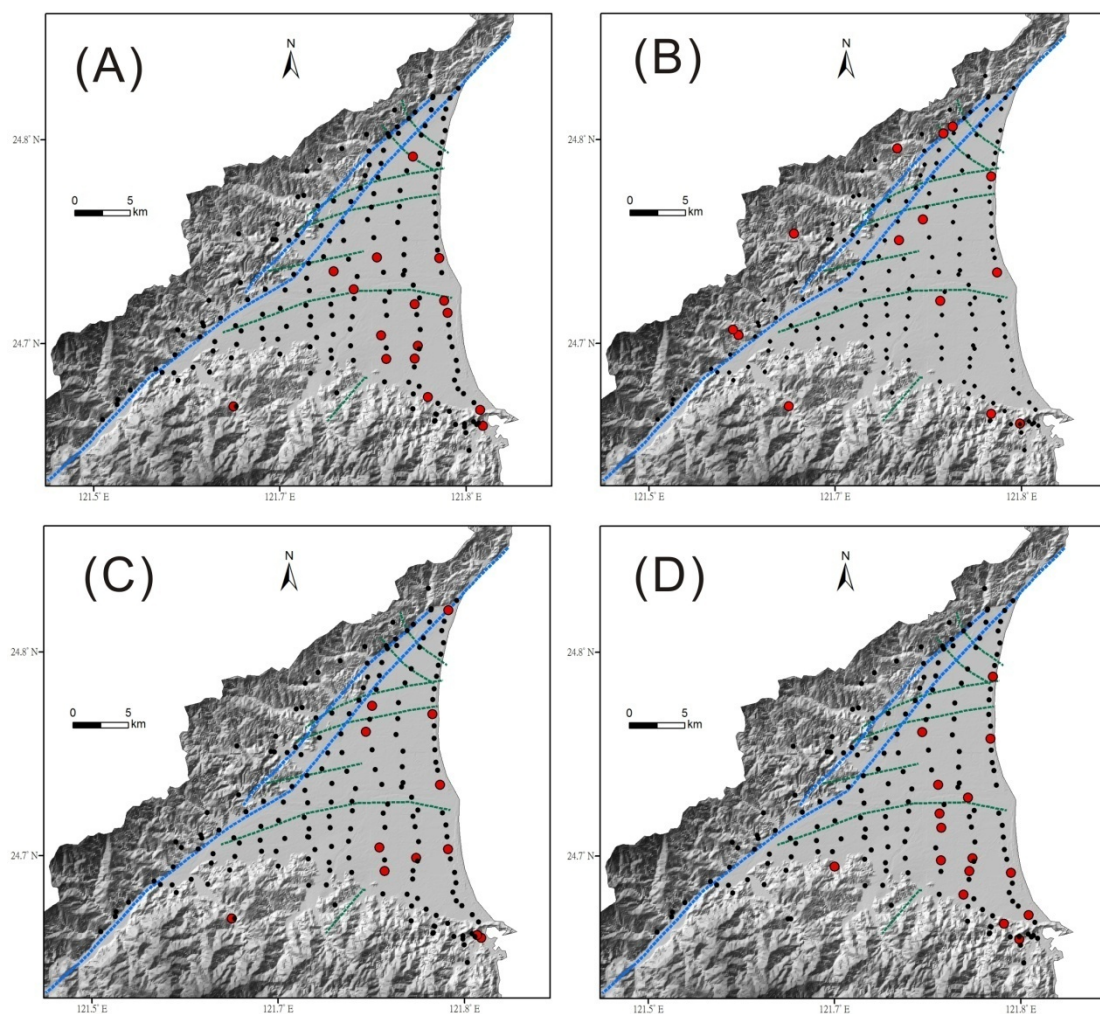


圖 4-2：土壤氣體異常值分佈圖。(A) 氮氣濃度 (B) 氮氣濃度 (C) 二氧化碳含量 (D) 二氧化碳通量。紅點為各氣體濃度之異常分佈位置，黑點為低於異常值門檻之樣本分佈位置。綠線與藍線為江新春（1976）與李錫堤等（1998）所提出之存疑性斷層位置。

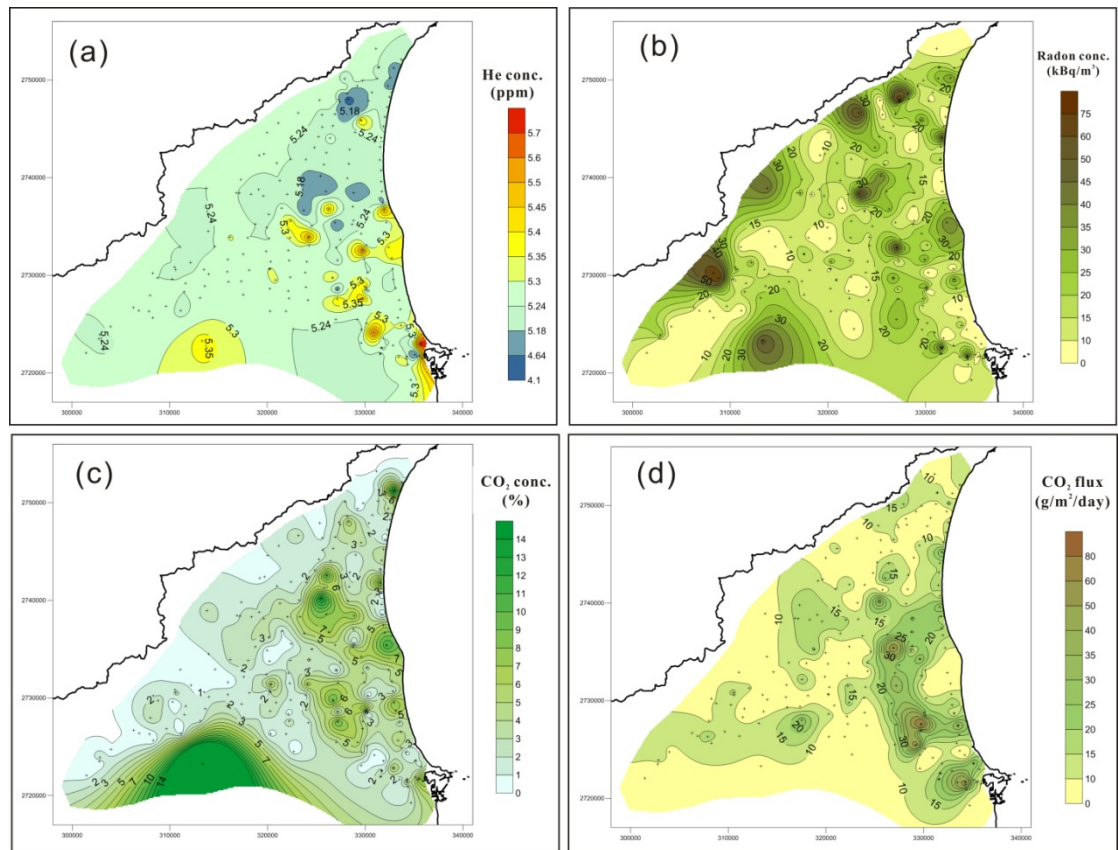


圖 4-3：土壤氣體濃度等值線，黑十字為採樣點。(A) 氦氣濃度 (B) 氬氣濃度 (C) 二氧化碳濃度 (D) 二氧化碳通量。

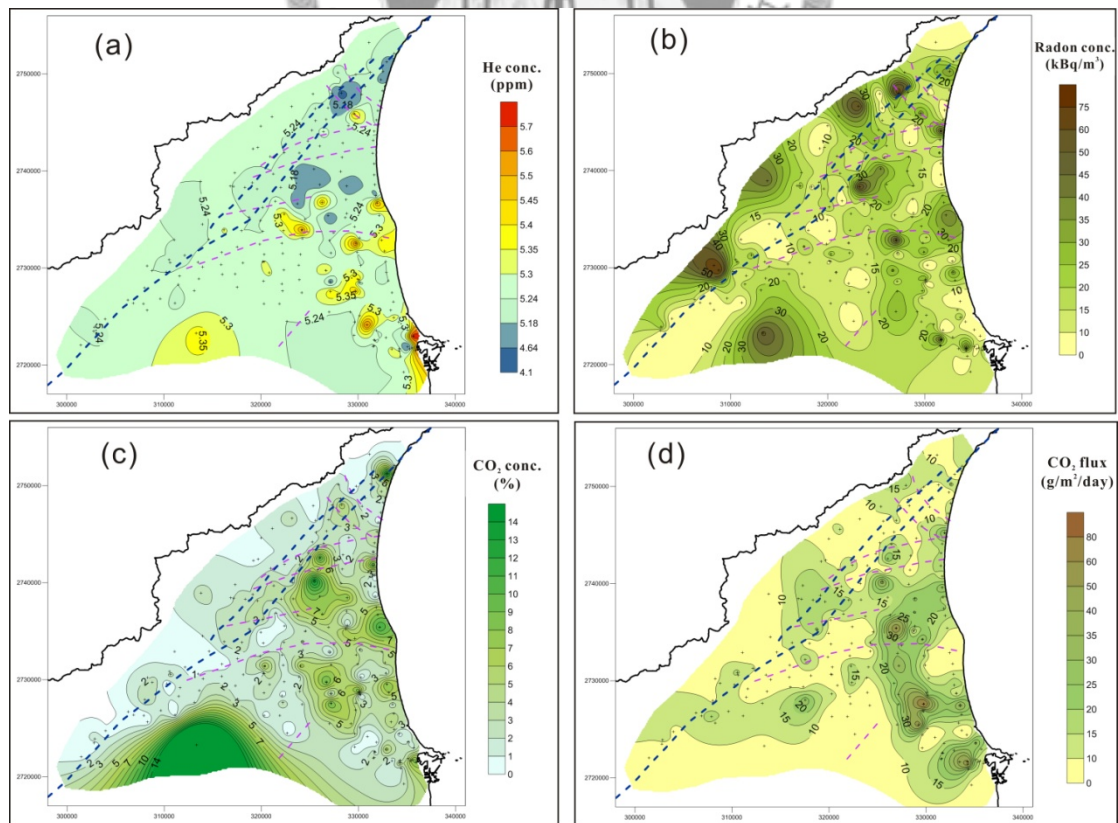


圖 4-4：土壤氣體濃度等值線，黑十字為採樣點，虛線為前人研究所提出的存疑性斷層或破裂帶。(A) 氦氣濃度 (B) 氬氣濃度 (C) 二氧化碳濃度 (D) 二氧化碳通量。

4-3 土壤氣體來源

4-3-1 氬氣來源

圖 4-3 (D) 顯示，氬氣濃度除了在平原特定區域有著較高的濃度值之外，在平原的西北方的山區也有相當高的濃度值。因此，我們將平原區與山區의 採樣點分開討論，如圖 4-5 (A) 所示，由二氧化碳對氬氣濃度的作圖可知，在平原區上的樣品，其二氧化碳濃度與氬氣濃度呈現正相關的趨勢；而在山區的樣品，其氬氣濃度的增加與二氧化碳沒有明顯的關係。



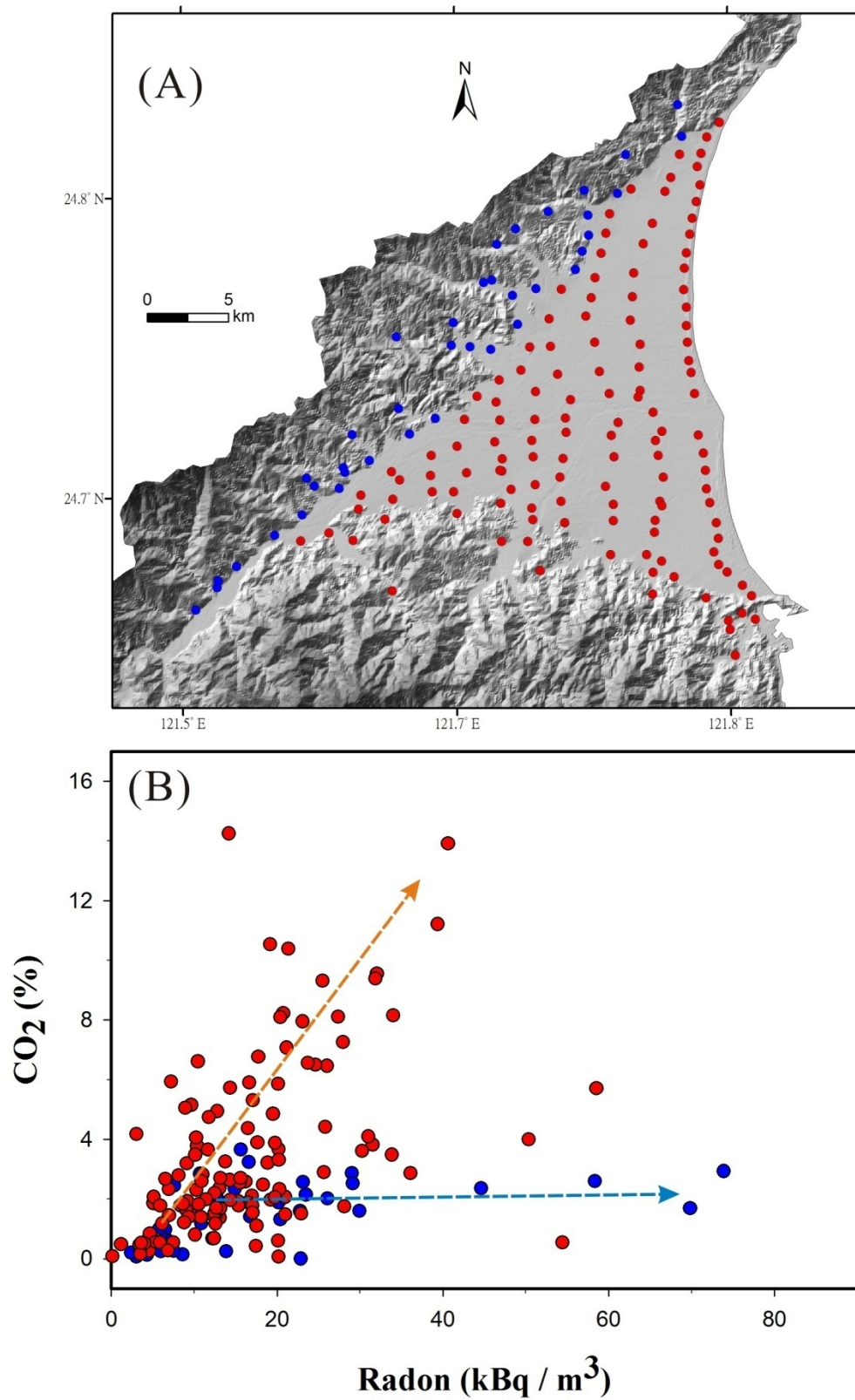


圖 4-5：(A) 採樣點依照地形分區，紅色圈為位處平原上的採樣點，藍色圈為在雪山山脈的採樣點。(B) 二氧化碳與氡氣濃度之關係圖。

由於氦氣的來源為地殼中鈾鉛等放射性元素衰變形成，因此為了瞭解土壤氦氣的原生量，本研究分別在山區和平原區採取地表以下約 15 至 20 公分之新鮮土樣，送至行政院原子能委員會輻射偵測中心分析。加馬能譜 (gamma spectrum) 分析結果如表 4-2，並與周哲仰 (2002) 於台灣南部泥火山附近採樣結果比較。

由表 4-2 中可知山區土壤中的放射性活度平均高於平原區，這可能是雪山山脈地層中的硬頁岩與粉砂岩所含的放射性元素含量較高，因此氦氣的母核種 ^{226}Ra 含量也較高，使山區的氦氣濃度明顯比平原高。而與平原區不同的是，山區的氦氣來源為現地 (in-situ) 放射性衰變產生，其氦氣背景值較平原區來的高。

而在平原上，放射性活度無明顯地異常，代表氦氣來源不是由地表附近現地產生的，而是地殼深部的來源。由於氦氣的分子量大、遷移係數較小及其半衰期短，使其移動性低，若只靠氦氣自身的擴散作用，氦氣在地底下移動距離僅有數公尺。因此在平原區上由深部來源的氦氣需要靠其他的攜行氣體 (carrier gas) 將氦氣由地底深部攜帶上來，這些攜行氣體可以是氬氣、二氧化碳、甲烷等氣體。由平原上氬氣與二氧化碳濃度的正相關顯示，在平原上二氧化碳作為氦氣的攜行氣體。

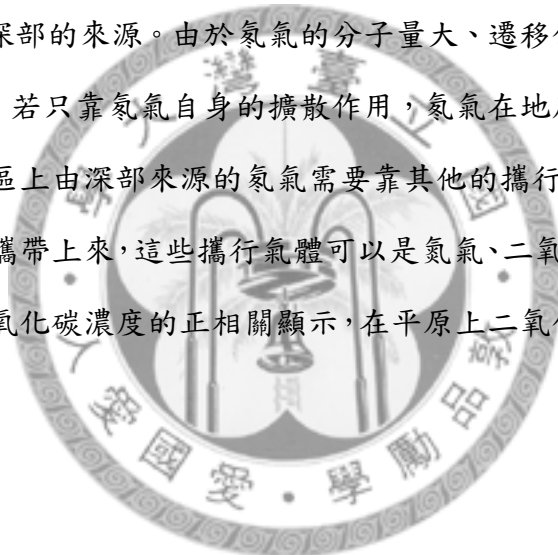


表 4-2：土樣之放射性活度表

採樣地點	重量 (kg)	鉀 40 (Bq/kg)	銫 137 (Bq/kg)	釷系 (Bq/kg)	鈾系 (Bq/kg)	氡氣濃度 (kBq/m ³)
山區						
89	0.154	697 ± 21	-	64 ± 3	39 ± 1	60.1
116	0.156	566 ± 17	3 ± 1	60 ± 2	33 ± 1	83.9
67	0.151	817 ± 21	-	63 ± 2	35 ± 1	102.7
152	0.140	766 ± 22	7 ± 1	69 ± 3	44 ± 1	13.3
162	0.153	832 ± 17	11 ± 0.7	57 ± 2	38 ± 1	20.2
165	0.159	769 ± 23	3 ± 0.7	54 ± 3	37 ± 1	29.9
166	0.168	646 ± 19	-	63 ± 3	38 ± 2	18.0
平均	-	728	6	61	38	47
平原區						
29	0.223	606 ± 15	-	35 ± 1	21 ± 1	22.6
16	0.198	552 ± 17	-	41 ± 2	26 ± 1	26.9
78	0.148	647 ± 19	4 ± 0.4	49 ± 2	32 ± 1	27.5
52	0.154	745 ± 22	2 ± 0.3	56 ± 2	32 ± 1	20.0
63	0.169	705 ± 21	-	46 ± 2	27 ± 1	53.1
92	0.206	242 ± 16	-	35 ± 2	20 ± 1	67.5
9	0.166	618 ± 19	2 ± 0	40 ± 2	25 ± 1	37.3
平均	-	588	3	43	26	36
台灣南部泥火山（周哲仰，2002）						
燕巢測站	0.181	526 ± 16	-	29 ± 2	17 ± 1	
燕巢泥水潭	0.173	533 ± 16	-	28 ± 2	18 ± 1	
燕巢人造泥水潭	0.198	559 ± 17	-	33 ± 2	19 ± 1	
中崙測站	0.158	561 ± 17	-	35 ± 2	16 ± 1	
中崙濁水潭	0.223	447 ± 13	-	34 ± 1	16 ± 1	

4-3-2 同位素成分

同位素成分為辨識土壤氣體來源的一個很有利的工具。本研究針對二氧化碳含量較高的 52 個樣本進行二氧化碳碳同位素分析，其結果如圖 4-6 所示。二氧化碳的碳同位素介於-6.6 ~ -24.5 ‰之間，主要來源為有機物質（約-30 ‰），並有部分岩漿來源（約-5 ‰）與石灰岩物質（0 ‰）的混染。

由碳同位素分佈圖可知，宜蘭市附近有較重的碳同位素值(-11 ‰至-15 ‰)，可能是生物來源與非生物源（岩漿源與石灰岩源）的混合結果，而清水地熱明顯地為岩漿來源。

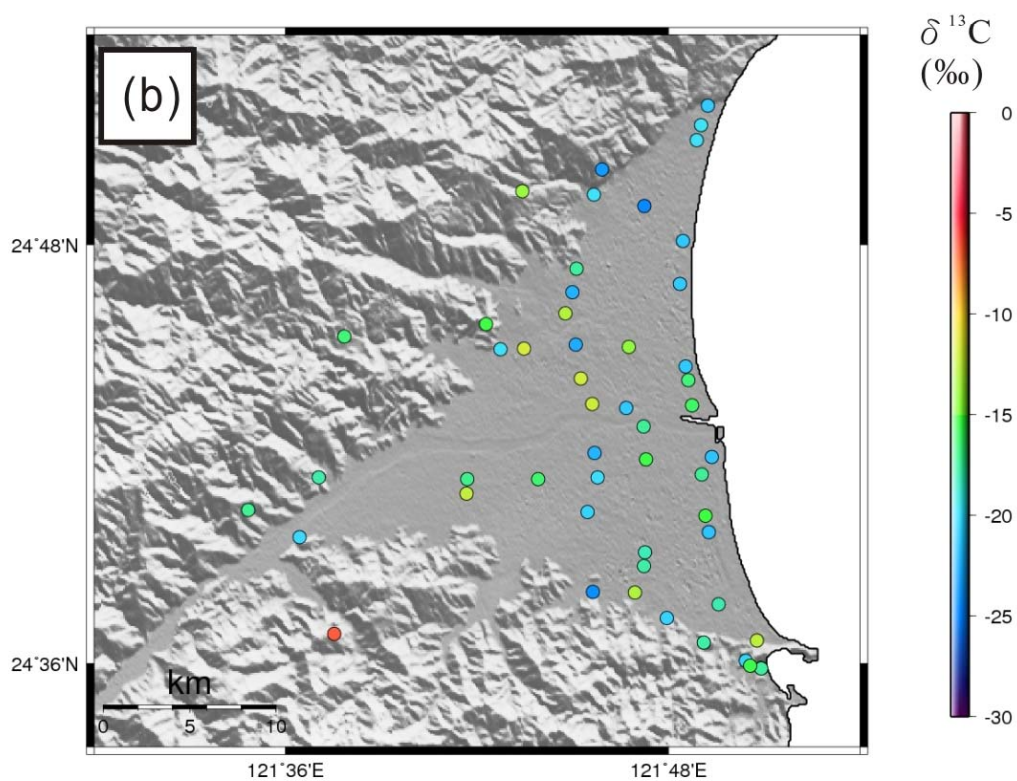
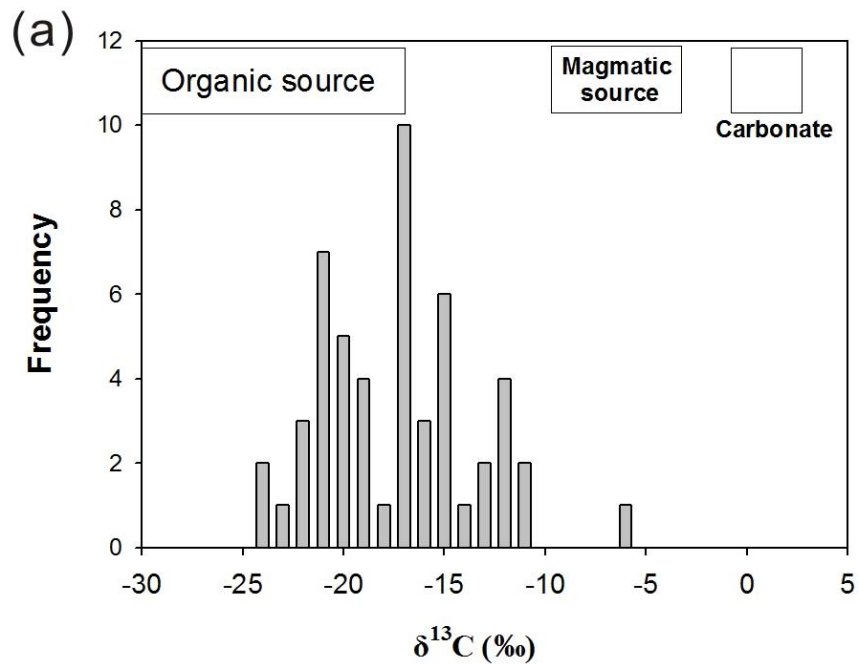


圖 4-6：二氧化碳碳同位素分析結果。(A) 本研究土壤氣體的碳同位素值，方框為地殼上的主要端成分。(B) 碳同位素值分布情形。

除了碳同位素之外，我們也針對氦氣濃度異常的點，進行氦氣與氬氣同位素分析。氦同位素值顯示（圖 4-7），本研究的氦氣來源以空氣成分為主，並含有部分地殼來源而無明顯的地函來源。

另外，在武淵一帶有大量的水溶性天然氣，可供一般民眾日常生活使用。而根據氦同位素分析結果，武淵天然氣有著明顯的地殼來源。武淵天然氣多產自深 100 公尺附近的沖積層內，一般認為此種水溶性天然氣的產因為（江新春，1976）：

（1）蘭陽溪所攜帶之有機物，在沖積層發育時經長期掩埋變質而成，（2）天然氣來自深部較老的地層，經由斷層或不整合面逸出而賦存於沖積層中。此兩種成因皆認為氣體長期累積存在於沉積層中，因此可解釋氦同位素分析結果為地殼源。

我們將二氧化碳資料與氦同位素資料合併討論，根據 Sano and Marty(1995) 提出的混合模式，宜蘭平原上的氣體來源介於地函來源與沉積物及石灰岩物質等地殼端源的混染（圖 4-8）。

由各種同位素資料可知，宜蘭平原之土壤氣體有多種來源：二氧化碳大都為生物來源，並有部分的地函與石灰岩來源。氦氣以空氣為主要成分，並有少許的地殼來源。

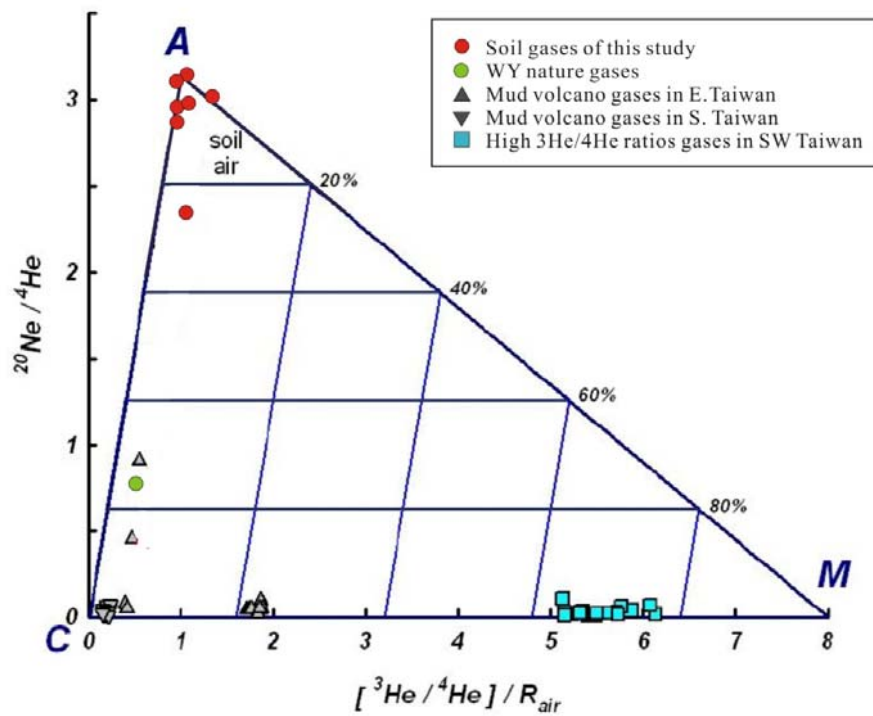


圖 4-7：宜蘭平原土壤氣體氦與氖同位素三端源圖，並與台灣南部的泥火山作比較（資料來自 Yang et al., 2003a; 2003b），A 代表空氣；C 代表地殼；M 代表地函端源。

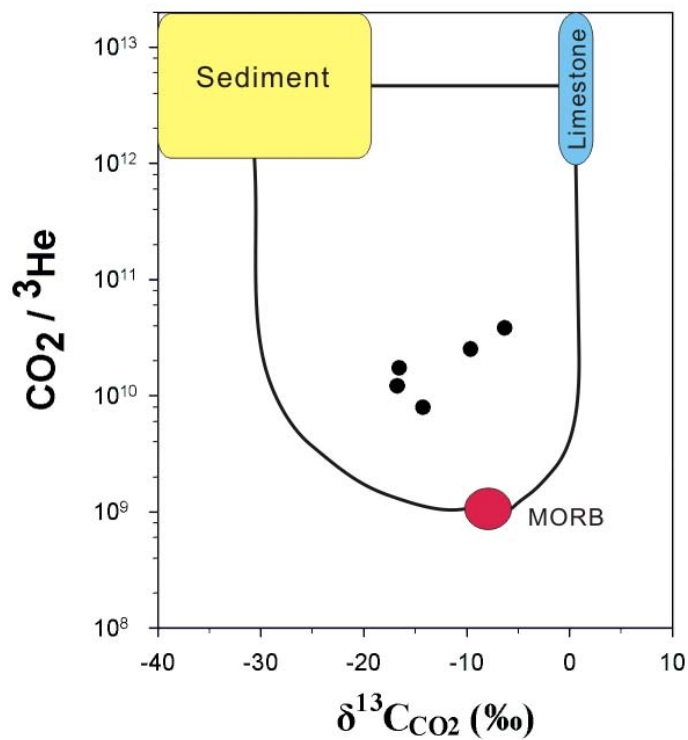


圖 4-8：CO₂/³He 與 δ¹³C 的關係圖。同時顯示中洋脊玄武岩、石灰岩與沉積物質等三端源的混合模式（Sano & Marty, 1995）。

4-4 氣體濃度與構造之關係

為了瞭解平原上氣體濃度之分布與構造之關係，本研究在平原上由北到南作一條剖面（圖 4-9），並將其兩側的點投影在這條剖面上。由於這裡要討論平原上的構造，加上 4-3 節所提平原與山區為兩個不同的氣體來源，因此這裡便將山區的資料去除後再加以討論。

我們選擇氦氣濃度作為指標性氣體，不選擇其他氣體的原因為：形成二氧化碳的作用有多種，如地函脫氣、石灰岩變質、有機物氧化、植物與微生物的呼吸作用等皆會產生二氧化碳，而且二氧化碳容易溶於水，因此會影響二氧化碳的因素太多；另外，氦氣也易溶於水，也會受氣壓、雨量等天候因素影響。而氦氣作為惰性氣體，不易與其他物質反應，在地殼中除了放射性衰變外並不會有其他作用會生成氦氣，氦氣較不易溶於水、遷移性高，這些特性使氦氣成為良好的破裂帶或斷層之追蹤劑。將山區的資料去除後，我們根據前述統計方法定出平原區上的氣體濃度異常值門檻，由氦氣濃度的異常值可以劃分出兩個異常帶（圖 4-10），同時可以發現，在這兩個異常帶中，其他氣體也有異常的情形，說明底下確實有構造存在。這兩個異常帶的位置，一個在平原中部偏北處，另一則是在平原南邊。

4-4-1 北邊之氣體異常帶

位在平原中偏北部的異常帶可能與平原的張裂中心有關，因受張裂作用，此區的地殼較薄，同時也產生一系列的破裂帶，使氣體容易沿著這些破裂帶往上遷移，造成地表上量測到的氣體濃度較高。4-2 節提及氣體濃度在整體宜蘭平原上的分佈大致呈由東往西遞減的趨勢，而靠近西邊的山區氣體濃度的變化則趨於不明顯，這現象與沖繩海槽由東向西漸漸擴張的作用有關，也說明了宜蘭平原正受到沖繩海槽擴張作用的影響。

淺層地震資料顯示，從沖繩海槽南端之龜山島有地震密集帶延伸至宜蘭平原中間，此地震密集帶的位置與本研究所發現之氣體異常帶相近（圖 4-11），而斷

層機制解為南-北向至西北-東南向的正斷層作用。另外，由基盤輪廓資料可知，在宜蘭中部的基盤最深（江新春, 1986; 林哲民, 2003; 張峻瑋, 2010），這也反映了此區可能為平原的張裂中心。GPS 資料顯示（圖 2-10-B），宜蘭平原中間有顯著的西北-東南向伸張應變（Hou et al., 2009）。配合這些資料可知，平原上的張裂中心為平原中部附近，並往南伸張呈現不對稱張裂（圖 4-13）。

4-2 節提到在平原上氣體濃度由東往西遞減，往西邊山區濃度變低（圖 4-3），為了更清楚地了解此一現象，我們可在平原上作一條東-西方向的剖面（圖 4-12），可以明顯地看到東邊氣體濃度明顯地高於異常值門檻甚多，而越往西邊氣體濃度較低，無明顯地異常。推測氣體濃度由東往西降低的趨勢可能反映了沖繩海槽由東向西擴張的結果。另外，由剖面可以看到在 13-14 公里附近有一明顯的界線存在，在這界線以東氣體濃度相當高，以西氣體濃度非常低且無明顯異常值。此界線約在東經 121.73° 附近，約在平原的中心，因此沖繩海槽擴張的影響可能只到此界線以東，而西半部則無受到張裂的作用（圖 4-12-A）。

4-4-2 南側之氣體異常帶

平原南部的異常帶，可能代表了斷層的存在，因為斷層提供了一個通道，使氣體可以沿著此通道上升至地表附近。對照震測結果（江新春, 1976; 張峻瑋, 2010），此異常帶與震測辨識所得之三星斷層的位置相近。而根據震測剖面，此斷層已切穿基盤以上地層，到達震測剖面頂部（張峻瑋, 2010）。此結果與氣體資料能互相呼應，我們推測此斷層因已切穿地殼淺部，因此深部來源之氣體能夠順暢地到達地表附近，而造成此區氣體濃度的異常。

Tong et al. (2008) 利用地磁資料的解析，也認為在宜蘭平原南側可能有斷層存在。此外，此氣體異常帶同時也是另一地震密集帶的位置（圖 4-11），也是 2002 年 5 月 15 日 (M_L 6.2) 與 2005 年 3 月 5 日 (M_L 5.9) 宜蘭雙主震及其餘震序列的位置。雖然針對雙主震利用 P 波初動法與波形反演法所得的斷層機制解有

所不同，不過都指示了其為東-西走向，王天慧（2007）及 Lai et al.（2009）皆認為雙主震為帶有正斷層分量的左移走向斷層。

Ku et al.（2009）於宜蘭近海進行震測剖面發現的宜蘭陸棚斷層（Ilan Shelf Fault），其走向與位置與三星斷層相近，然而缺乏由陸上延伸至海的震測資料，故仍無法確定陸棚斷層上陸的位置以及兩者是否能夠連接。

根據 GPS 觀測資料，Hou et al.（2009）觀察到平原南側有最大的拉張應變，且呈順時針旋轉。邱詠恬（2008）發現在三星斷層兩側，在平行與垂直斷層的速度上皆有變化，並推測三星斷層為帶有正斷層分量之左移斷層。由於受到沖繩海槽之拉張及呂宋島弧碰撞的影響，使北部造山帶彎折，而沿著地質弱帶形成一系列的左移走向滑移斷層，如平原南部的三星斷層，及南側小帽山斷層與南澳斷層（康竹君，2006；黃信燁，2007）。因此，由地震構造及 GPS 可觀察到，三星斷層兩側在應力場及大地構造上有所區別，在其北側為拉張的環境而在其南側為走向滑移，它可能在構造上扮演了重要的角色（圖 4-13）。

Lai et al.（2009）認為 2005 年宜蘭雙主震是由岩脈侵入造成，地震波速度層析影像也提出了臺灣東北部底下 20 至 100 公里深處可能有熔融物質存在的證據（Lin et al., 2004）。若宜蘭平原底下存有岩漿物質，則由氣體成分應可看到明顯的高氦同位素比值。然而本研究測得氣體同位素所指示的岩漿來源訊號並不明顯（圖 4-7 及圖 4-8），這可能是我們分析氦同位素的樣本不夠，或是土壤氣體方法受限於採樣深度太淺無法明顯看到這類如此深的岩漿訊號，或岩漿來源的氣體從十幾公里深處上升途中已與地殼或土壤氣體混染而改變了原始成分。

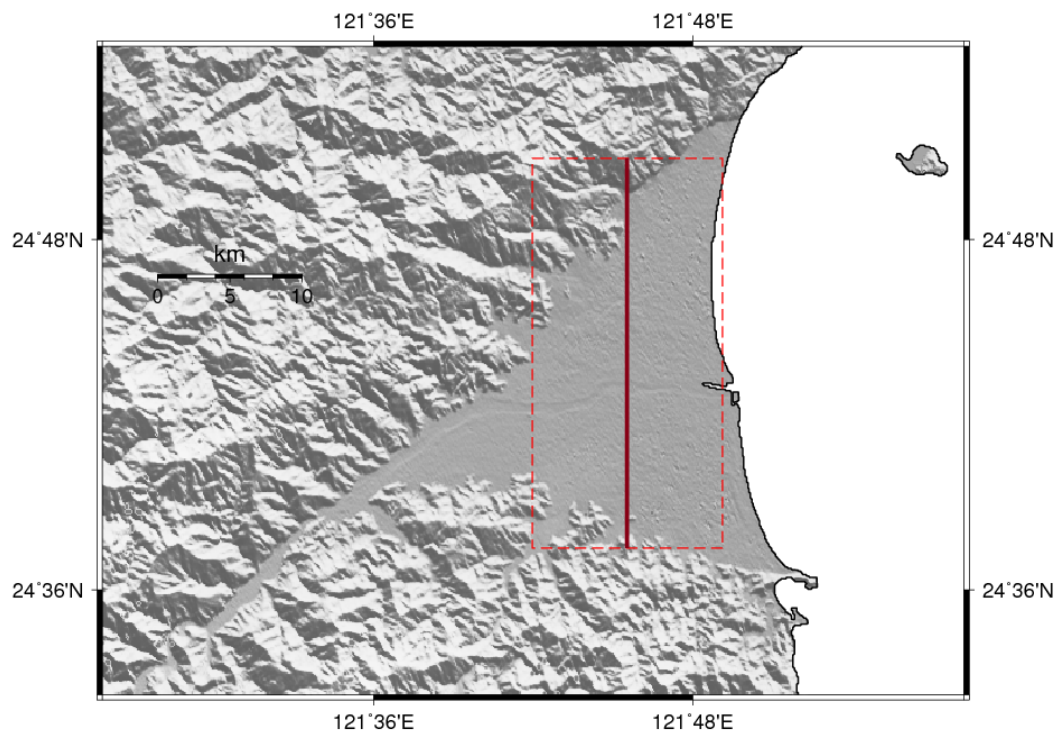


圖 4-9：宜蘭平原南北走向剖面位置與採樣點位投影範圍，實線為剖面位置，虛線為投影範圍。



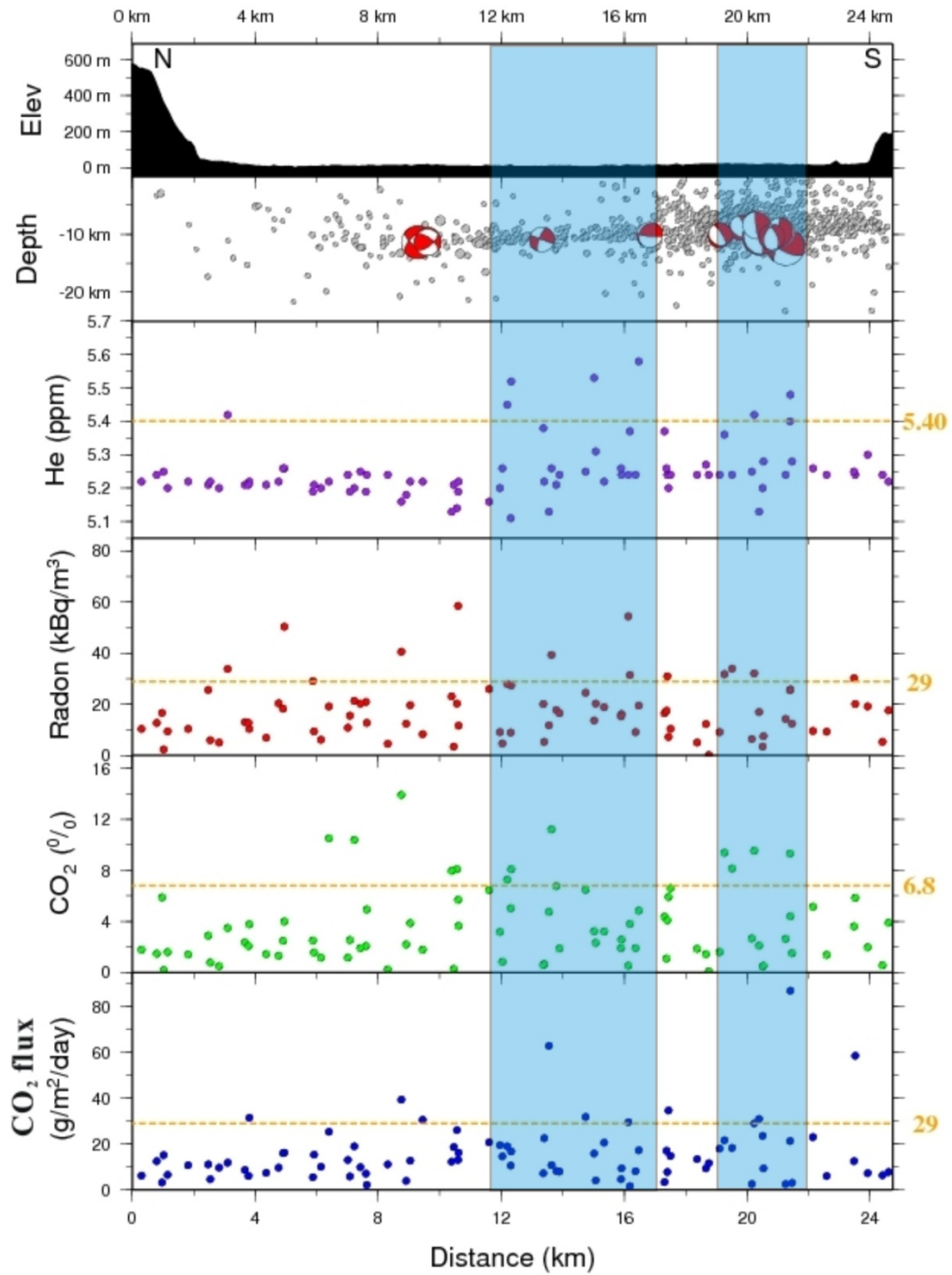


圖 4-10：宜蘭平原氣體濃度剖面圖及地震與震源機制分佈圖。水平的虛線為各氣體參數之異常值門檻，藍色區域為根據氣體濃度所描繪出的異常帶。地震資料與震源機制資料來自 Wu et al. (2008a; 2008b)。

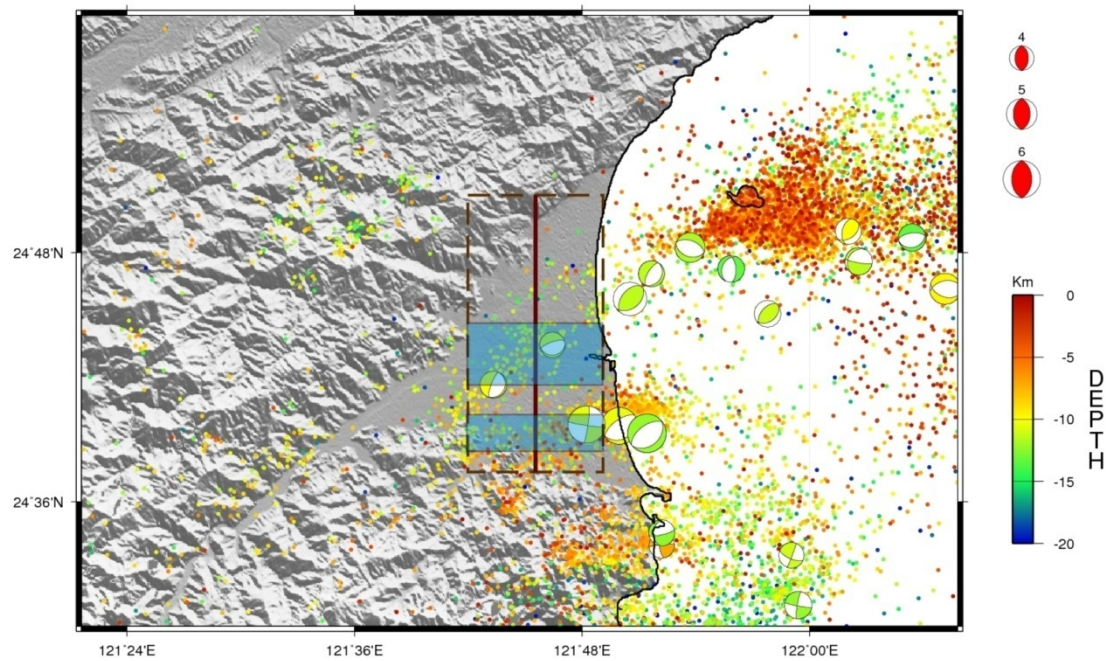


圖 4-11：氣體異常帶與淺層地震分佈圖。實線為剖面位置，虛線為投影範圍。藍色區塊為氣體異常帶。地震資料與震源機制資料來自 Wu et al. (2008a; 2008b)



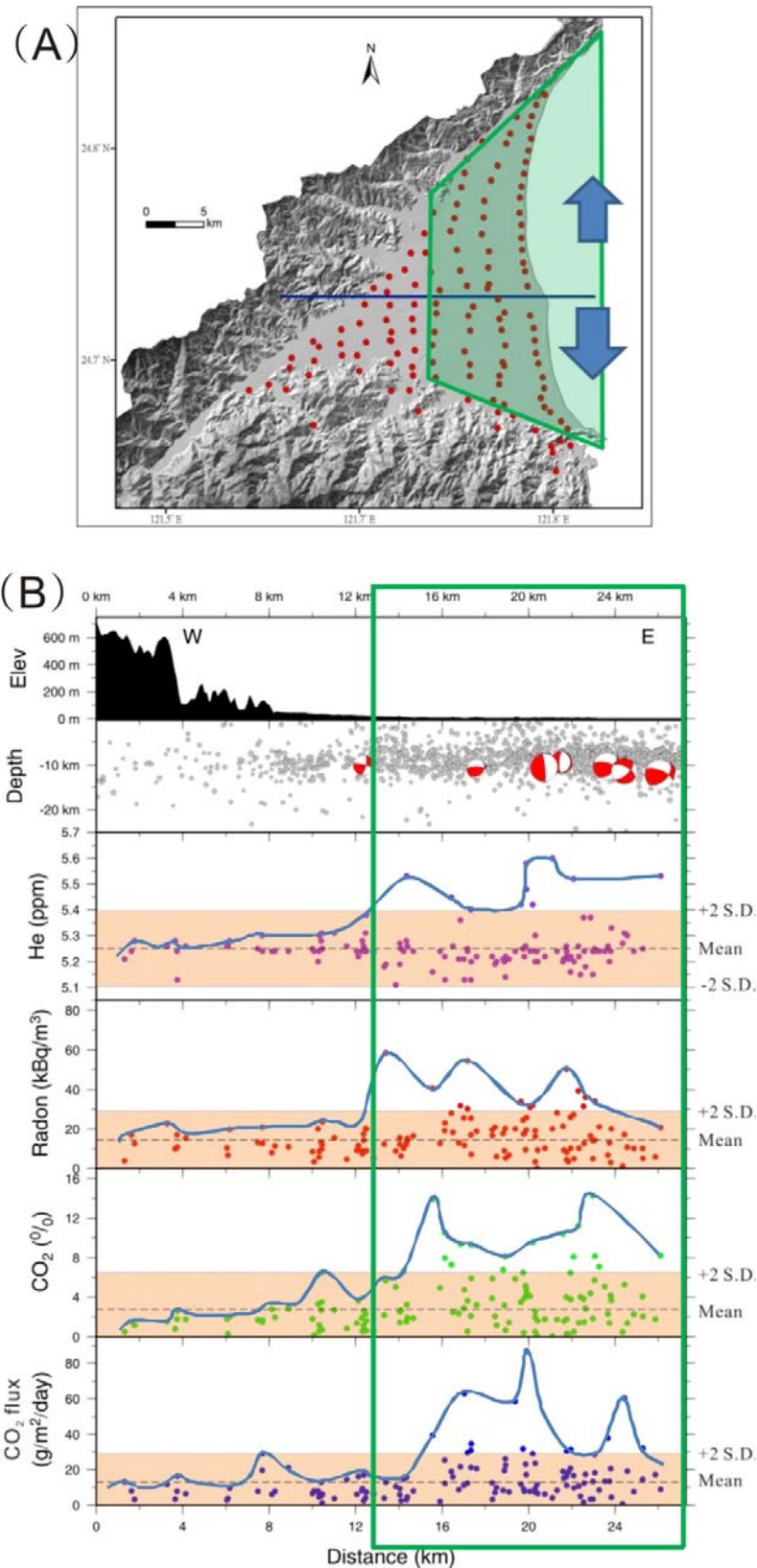


圖 4-12：宜蘭平原東西向剖面與推測受到沖繩海槽擴張的影響範圍。(A) 東-西向剖面之位置。(B) 氣體濃度剖面圖，虛線和陰影區代表平均值加上兩個標準偏差，藍色線為將氣體濃度的高值連接的結果。綠色方框為氣體濃度明顯較高的範圍，可能反映了受沖繩海槽擴張的影響範圍。

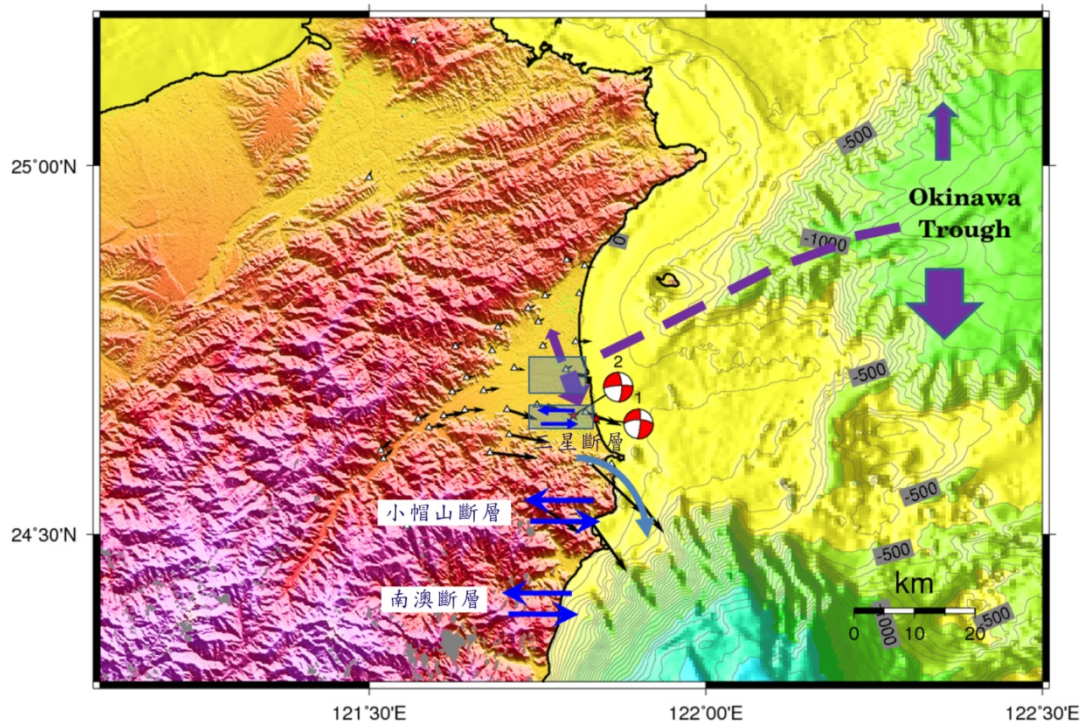


圖 4-13：氣體異常帶與地體構造的關聯。兩藍色區塊為氣體異常帶。紫色虛線為沖繩海槽往平原延伸的方向，藍色箭頭為走向滑移斷層的運動方向。紅色星號為 2005 年宜蘭雙主震位置，其斷層機制解為 BATS CMT。GPS 資料來自 Hou et al., 2009。

4-5 氣體濃度與隨時間的變化

在進行宜蘭平原的土壤逸氣調查時，我們發現到幾個氣體濃度較高的站位，我們對此很感興趣，於是便針對這些感興趣點的點進行長期的採樣（圖 4-14）。我們將不鏽鋼管放置在這些站位中，每隔一到二週便到實地進行採樣。根據長期的觀察結果，如附錄三，在特定點位，土壤氣體濃度會有明顯的變化。

在這些點位中，礁溪此點觀察的時間最長，因此我們這裡取礁溪的點作為討論。在礁溪我們選取了彼此相距 200 公尺的兩個點進行長期的採樣。從 2009 年 4 月至 2009 年 9 月的採樣分析結果顯示（圖 4-15），氦氣、氬氣及二氧化碳的濃度常會有明顯的變化。由於氣體的變化會與氣候因子或是構造活動有關，我們將氣體濃度同時對雨量與地震活動作對比。由於氣體濃度的變化可能反應的是當地局部區域的地震，因此這裡選取在這段採樣時間內，中央氣象局宜蘭市地震站所

記錄到震度二以上之地震來做討論（表 4-3、圖 4-16）。由圖顯示，氦氣與氬氣濃度的變化可能與地震活動有關，這可能是當地震來臨前，當地局部應力的改變，使岩石孔隙壓力發生變化或是岩石發生微破裂，使氣體濃度有顯著的變化。例如 2009 年 5 月 15 日（編號 a）和 6 月 28 日的花蓮地震（編號 b）發生前氣體濃度有異常的上升，而 2009 年 7 月底的氣體濃度異常可能與 7 月 29 日宜蘭南澳的地震（編號 f）有關，而其它地震因距離較遠（編號 c、d 及 e）可能對此氣體異常較無顯著的關聯。2009 年 8 月 17 日發生的花蓮外海地震因震央離測站距離太遠，因此氣體濃度沒有明顯的反應。2009 年 9 月 23 日的蘇澳地震之前氣體濃度有略為增加但不明顯，可能因此地震規模不大（M3.9）及震源深度較深（51 公里）的緣故。

在宜蘭平原上特定區域的初步觀察結果顯示，氣體濃度的變化可能與當地的地震活動有關。然而此研究為每一至二星期進行採樣，因此可能在採樣間隔之外的氣體變化會被遺漏掉，未來希望能夠在反應敏感之地區設立連續之氣體觀測站，以清楚地了解氣體成分的變化對構造活動的關係。

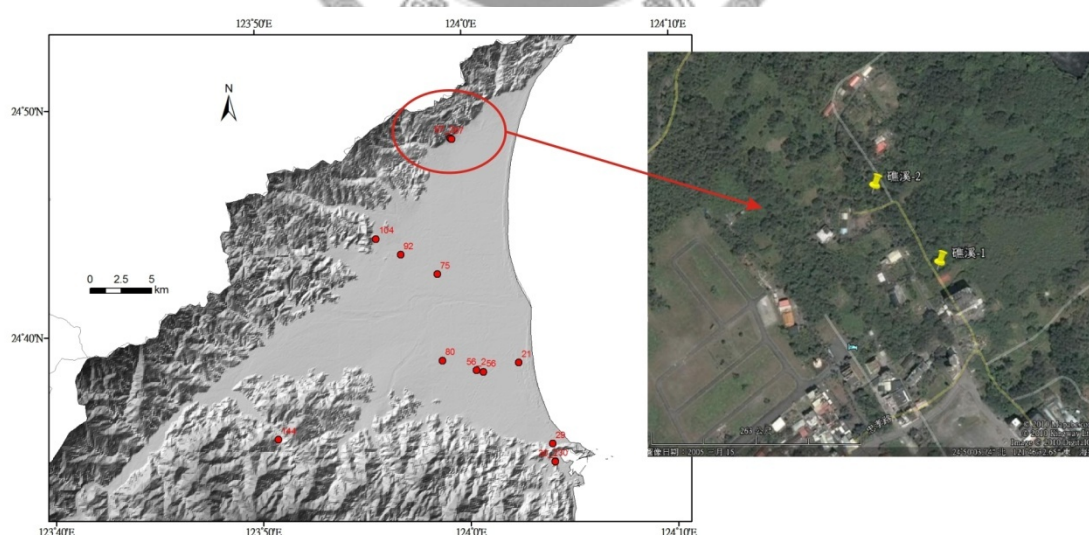


圖 4-14：宜蘭平原上定期採樣之點位。右圖為位於礁溪的兩個點位。

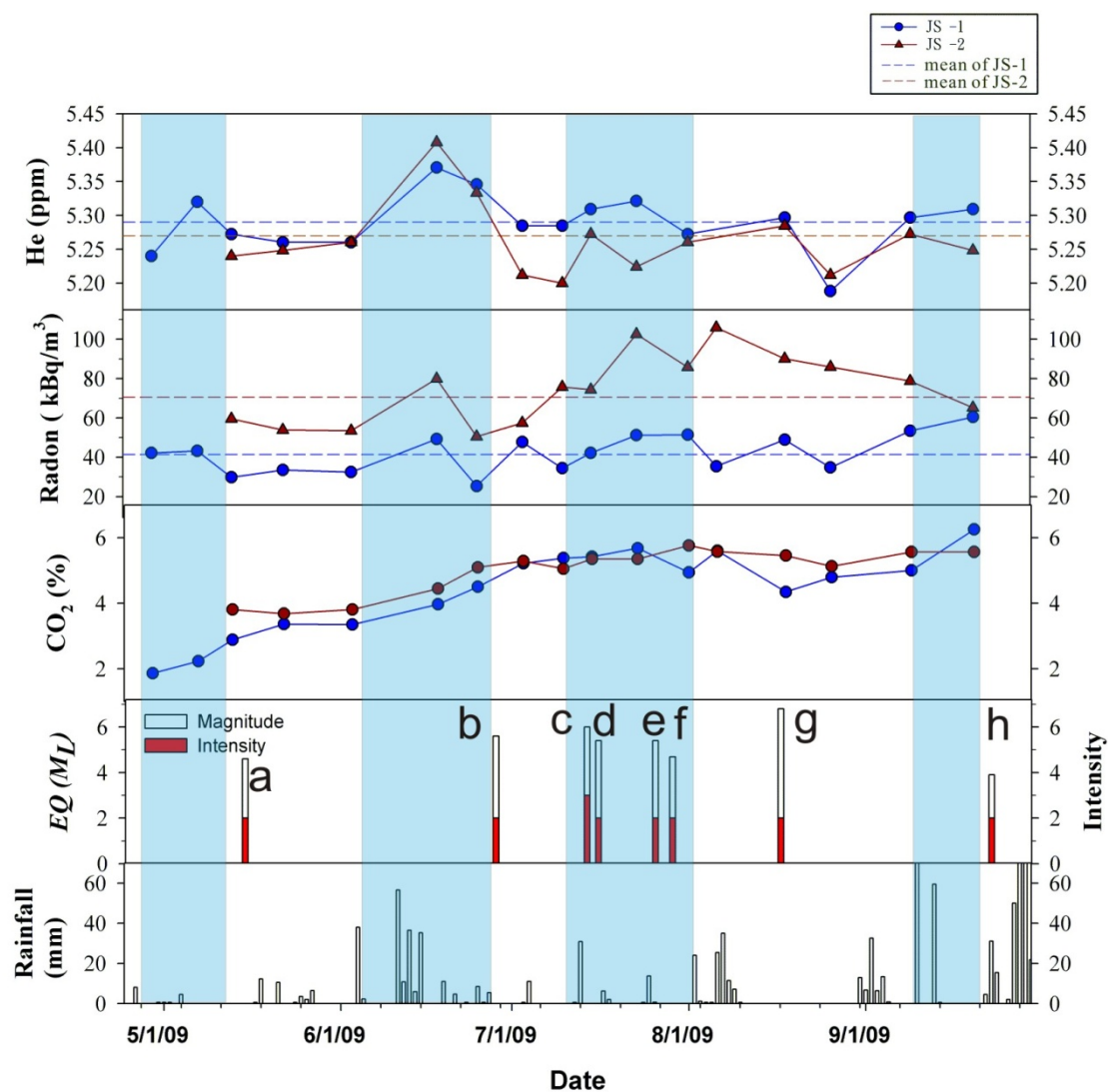


圖 4-15：2009 年 5 月至 2009 年 9 月宜蘭礁溪地區土壤氦氣、氡氣與二氧化碳濃度變化圖，同時顯示與地震及雨量之相關性。橫虛線為二處採樣點在此時段內之分別平均值，藍色區塊為氣體濃度高於平均值之異常區間。地震資料選取中央氣象局宜蘭市地震站震度 2 以上之地震，雨量資料來源為中央氣象局宜蘭市氣象站。

表 4-3：2009 年 5 月至 2009 年 9 月中央氣象局宜蘭市地震站所記錄到震度 2 以上地震之地震資料。

No.	Date	Mag. (M_L)	Local Intensity	Depth (km)	Epicentral distance (km)
a	2009/5/15	4.6	2	12	70
b	2009/6/28	5.3	2	13	72
c	2009/7/14	6.0	3	18	93
d	2009/7/16	5.4	2	21	91
e	2009/7/26	5.4	2	14	150
f	2009/7/29	4.7	2	14	63
g	2009/8/17	6.8	2	43	230
h	2009/9/23	3.9	2	51	36

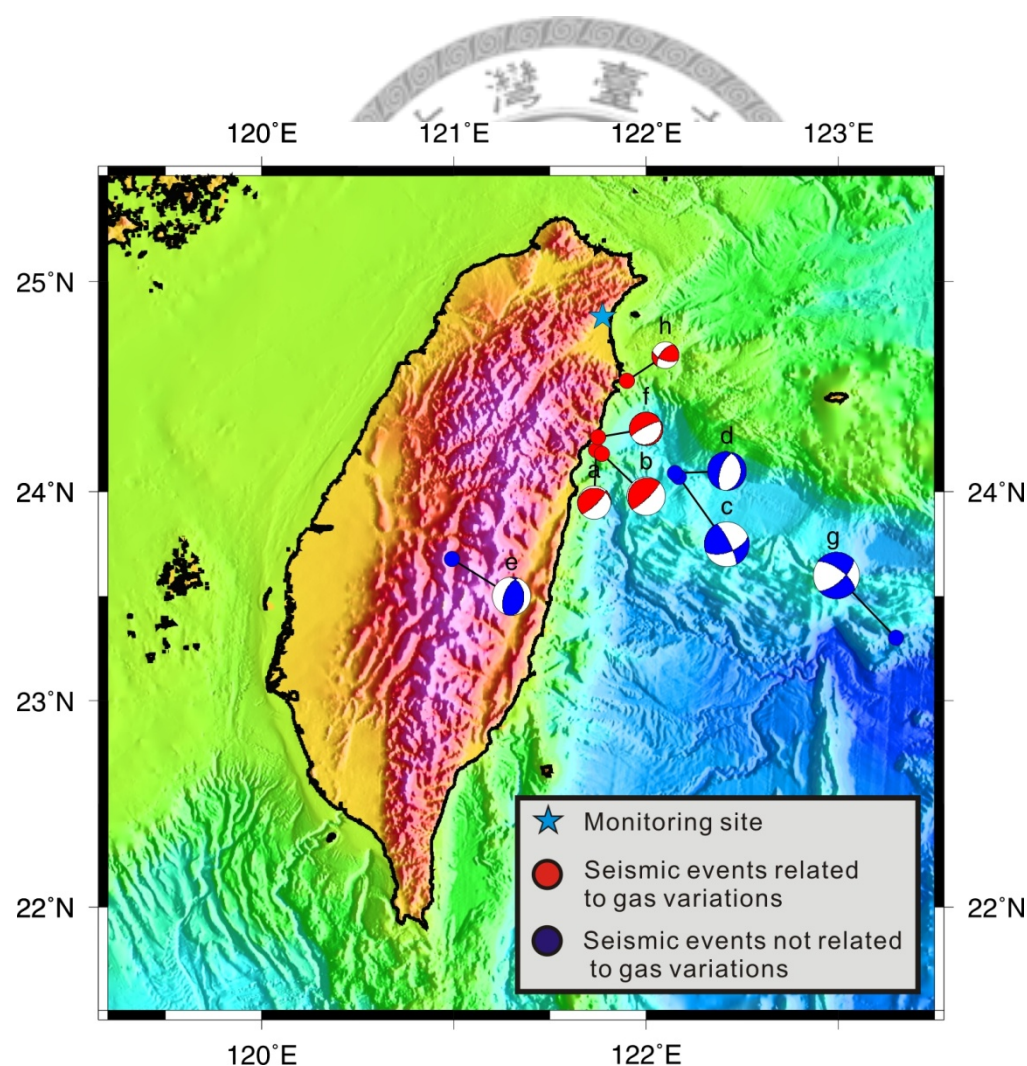


圖 4-16：2009 年 5 月至 2009 年 9 月中央氣象局宜蘭市地震站所記錄到震度 2 以上之地震其分佈位置。藍色星號為位於礁溪的土壤氣體採樣點，紅點為推測與此站氣體變化有關之地震活動，藍點為推測與此站氣體變化無關之地震活動。

第五章 結論

本研究利用土壤逸氣方法於宜蘭平原進行調查，其結果於本章作一整理與總結。

1. 根據本研究分析結果，在前人研究所提出之存疑性斷層位置上並無發現到對應的氣體異常趨勢，可能的原因有：宜蘭平原底下的厚層沉積物與含水層阻擋了氣體向上遷移的通道；此外，也有可能斷層不存在於這些位置上。另外一種可能是斷層並未切穿地表，使地表上觀察到的氣體異常並不明顯。
2. 除了在山區的氦氣濃度之外，氣體濃度大致由東向西遞減，靠近西邊山區其氣體濃度無明顯的氣體異常。此現象可能與沖繩海槽往西擴張進而延伸至宜蘭平原有關。
3. 由宜蘭平原上的氣體濃度剖面圖可發現兩個異常帶，一個在平原中間，可能代表了平原的張裂中心；另一則是在平原南側，可能意謂著此處有斷層的存在。
4. 平原上有多種氣體來源：氦氣的來源有二，山區的放射性元素含量高，指示了現地的氦氣來源；平原區的氦氣由二氧化碳從地殼深部攜帶上來。氦同位素和碳同位素的資料顯示本區的氣體來源為地殼與空氣的混染結果，加上少許但不顯著的地函訊號；而二氧化碳的碳同位素值大都為有機來源。
5. 由長期的觀測結果顯示，在特定地點的氣體濃度變化可能與當地的地震活動有關。

第六章 參考文獻

- 王天慧 (2007) 2005 年宜蘭雙主震之震源機制解: 應用近場波形反演法探討區域地震機制。國立臺灣大學地質科學研究所碩士論文, 共 79 頁。
- 江政鴻 (2002) 嘉義中崙地區天然逸氣來源與自動化監測結果。國立臺灣大學地質科學研究所碩士論文, 共 110 頁。
- 江新春 (1976) 宜蘭平原之震測。礦業技術, 第 14 卷 (第六期), 第 215-221 頁。
- 李曉芬 (2003) 大屯火山區火山氣體成份及其冷凝水之氫氧同位素組成。國立臺灣大學地質科學研究所碩士論文, 共 83 頁。
- 李錫堤、鄭錦桐、廖啟雯、張原賓 (1998) 台灣活斷層圖: 中央大學應用地質研究所, 工程及地質防災科技研究室。
- 吳樂群 (2003) 台灣地區地下水觀測網第二期計畫水文地質調查研究九十二年度報告, 沉積物與沉積環境分析及地層對比研究—嘉南平原、竹苗地區及蘭陽平原, 經濟部中央地質調查所, 共 99 頁。
- 周哲仰 (2002) 台灣西南部燕巢及中埔之土壤氬氣背景值調查。國立臺灣大學地質科學研究所碩士論文, 共 84 頁。
- 林啟文、林偉雄 (1995) 五萬分之一臺灣地質圖說明書, 三星, 經濟部中央地質調查所
- 林啟文、高銘健 (1997) 五萬分之一臺灣地質圖說明書, 蘇澳, 經濟部中央地質調查所。
- 林朝宗 (2000) 五萬分之一臺灣地質圖及說明書, 新店, 經濟部中央地質調查所。
- 林哲民 (2003) 利用接收函數法推估蘭陽平原淺層速度構造。國立中央大學地球物理研究所碩士論文, 共 170 頁。
- 邱詠恬 (2008) 利用 gps 觀測資料探討宜蘭平原之現今地殼變形。國立臺灣大學地質科學研究所碩士論文, 共 90 頁。
- 徐閔儀 (2005) 台灣北部震間地殼變形: 1995-2005 年 GPS 觀測。國立成功大學碩士論文, 共 114 頁。
- 康竹君 (2006) 蘭陽平原地區之新期構造分析研究。國立臺灣海洋大學碩士論文, 共 84 頁。
- 張峻璋 (2010) 利用反射震測探討宜蘭平原南部之基盤深度及斷層分佈。國立中央大學地球物理研究所碩士論文, 共 104 頁。
- 許雅儒 (1999) gps 觀測資料探討宜蘭平原的伸張變形。國立中央大學應用地質研究所碩士論文, 共 108 頁。
- 陳文山 (2000) 台灣地區地下水觀測網第二期計畫水文地質調查研究八十九年度報告, 沉積物與沉積環境分析及地層對比研究—蘭陽平原, 經濟部中央地質調查所, 共 48 頁。
- 傅慶州 (2006) 利用土壤逸氣調查掩覆斷層及破裂帶之可能分佈: 以潮州斷層為例。國立臺灣大學地質科學研究所碩士論文, 共 82 頁。

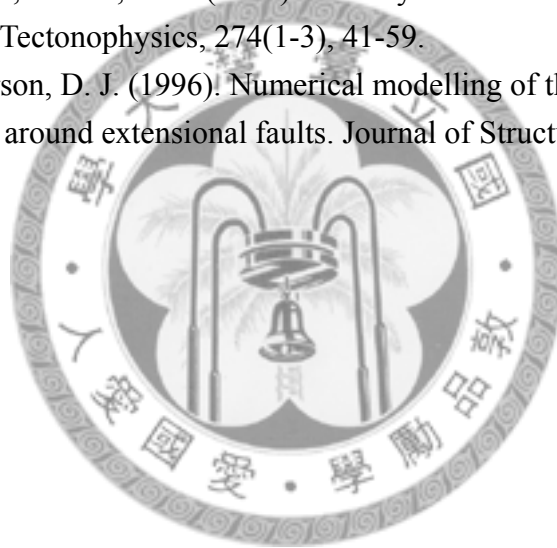
- 黃信樺 (2007) 台灣東北地區的地震構造：由碰撞末期轉變為隱沒拉張之構造特性。國立臺灣大學地質科學研究所碩士論文，共 110 頁。
- 黃鑑水、何信昌 (1984) 五萬分之一臺灣地質圖及說明書，頭城，經濟部中央地質調查所。
- 楊燦堯 (2000) 陽明山國家公園大屯火山群噴氣之氦同位素比值研究。國家公園學報，10 (1)，73-97。
- 蔡義本 (1976) 宜蘭地區之地震研究。礦業技術，14 (5)，154-161。
- 謝佩珊 (2000) 台灣地區溫泉與泥火山氣體來源初探。國立臺灣大學地質科學研究所碩士論文，共 77 頁。
- Al-Hilal, M., & Al-Ali, A. (2010). The role of soil gas radon survey in exploring unknown subsurface faults at Afamia B dam, Syria. *Radiation Measurements*, 45(2), 219-224.
- Amponsah, P., Banoeng-Yakubo, B., Andam, A., & Asiedu, D. (2008). Soil radon concentration along fault systems in parts of south eastern Ghana. *Journal of African Earth Sciences*, 51(1), 39-48.
- Andrews, J. N. (1983). Dissolved radioelements and inert gases in geothermal investigations. *Geothermics*, 12(2-3), 67-82.
- Brookins, D. G. (1990). *The indoor radon problem*. New York: Columbia University Press.
- Burton, M., Neri, M., & Condarelli, D. (2004). High spatial resolution radon measurements reveal hidden active faults on Mt. Etna. *Geophysical Research Letters*, 31(7), L07618.
- Chiodini, G., Cioni, R., Guidi, M., Raco, B., & Marini, L. (1998). Soil CO₂ flux measurements in volcanic and geothermal areas. *Applied Geochemistry*, 13(5), 543-552.
- Chyi, L. L., Quick, T. J., Yang, T. F., & Chen, C. H. (2005). Soil gas radon spectra and earthquakes. *Terrestrial Atmospheric and Oceanic Sciences*, 16(4), 763-774.
- Ciotoli, G., Guerra, M., Lombardi, S., & Vittori, E. (1998). Soil gas survey for tracing seismogenic faults: A case study in the Fucino basin, Central Italy. *Journal of Geophysical Research*, 103(B10), 23781-23794.
- Ciotoli, G., Lombardi, S., & Annunziatellis, A. (2007). Geostatistical analysis of soil gas data in a high seismic intermontane basin: Fucino Plain, central Italy. *Journal of Geophysical Research*, 112, B05407.
- Duddridge, G. A., Grainger, P., & Durrance, E. M. (1991). Fault detection using soil gas geochemistry. *Quarterly Journal of Engineering Geology*, 24(4), 427-435.
- Font, L., Baixeras, C., Morena, V., & Bach, J. (2008). Soil radon levels across the Amer fault. *Radiation Measurements*, 43, S319-S323.

- Fu, C.C., Yang, T. F., Walia, V., Liu, T.K., Lin, S.J., Chen, C.H., et al. (2009). Variations of soil-gas composition around the active Chihshang Fault in a plate suture zone, eastern Taiwan. *Radiation Measurements*, 44(9-10), 940-944.
- Fu, C. C. (2005). Reconnaissance of soil gas composition over the buried fault and fracture zone in southern Taiwan. *Geochemical Journal*, 39(5), 427.
- Hickman, S., Sibson, R., & Bruhn, R. (1995). Introduction to special section: Mechanical involvement of fluids in faulting. *Journal of Geophysical Research*, 100(B7), 12831-12840.
- Holub, R. F., & Brady, B. T. (1981). The effect of stress on radon emanation from rock. *Journal of Geophysical Research*, 86(NB3), 1776-1784.
- Hou, C. S., Hu, J. C., Ching, K. E., Chen, Y. G., Chen, C. L., Cheng, L. W., et al. (2009). The crustal deformation of the Ilan Plain acted as a westernmost extension of the Okinawa Trough. *Tectonophysics*, 466(3-4), 344-355.
- Irwin, W. P., & Barnes, I. (1980). Tectonic relation of carbon dioxide discharges and earthquakes. *Journal of Geophysical Research*, 85(NB6), 3115-3121.
- Kahler, D. E. (1981). Helium – A gaseous geochemical guide to faults, fractures and geothermal systems. *Transactions - Geothermal Resources Council*, 5, 87-89.
- King, C.Y., King, B.-S., Evans, W. C., & Zhang, W. (1996). Spatial radon anomalies on active faults in California. *Applied Geochemistry*, 11(4), 497-510.
- Ku, C.Y., Hsu, S.K., Sibuet, J.C., & Tsai, C.-H. (2009). The Neo-Tectonic Structure of the Southwestern Tip of the Okinawa Trough. *Terrestrial, Atmospheric and Oceanic Sciences*, 20(5), 11.
- Lai, K. Y., Chen, Y. G., Wu, Y. M., Avouac, J. P., Kuo, Y. T., Wang, Y., et al. (2009). The 2005 Ilan earthquake doublet and seismic crisis in northeastern Taiwan: evidence for dyke intrusion associated with on-land propagation of the Okinawa Trough. *Geophysical Journal International*, 179(2), 678-686.
- Lan, T. F., Yang, T. F., Lee, H. F., Chen, Y. G., Chen, C. H., Song, S. R., et al. (2007). Compositions and flux of soil gas in Liu-Huang-Ku hydrothermal area, northern Taiwan. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 165(1-2), 32-45.
- Lewicki, J. L., Evans, W. C., Hilley, G. E., Sorey, M. L., Rogie, J. D., & Brantley, S. L. (2003). Shallow soil CO₂ flow along the San Andreas and Calaveras Faults, California. *Journal of Geophysical Research*, 108(B4), 2187.
- Lin, J. Y., Hsu, S. K., & Sibuet, J. C. (2004). Melting features along the western Ryukyu slab edge (northeast Taiwan): Tomographic evidence. *Journal of Geophysical Research-Solid Earth*, 109(B12), 15.
- Lin, J. Y., Sibuet, J. C., Lee, C. S., Hsu, S. K., Klingelhoefer, F., Auffret, Y., et al. (2009). Microseismicity and faulting in the southwestern Okinawa Trough.

- Tectonophysics, 466(3-4), 268-280.
- Liu, C. C. (1995). The Ilan plain and the southward extending Okinawa Trough. *Journal of the Geological Society of China*, 38, 229-242.
- Malavieille, J., S.E. Lallemand, S. Dominguez, A. Deschamps, C.Y. Lu, C.S. Liu, P. Schnurle, and A.S. Crew (2002), Arc-continent collision in Taiwan : new marine observations and tectonic evolution., *Geological Society of America Special Paper*, 358, 189-213.
- Miklavcic, I., Radolic, V., Vukovic, B., Poje, M., Varga, M., Stanic, D., et al. (2008). Radon anomaly in soil gas as an earthquake precursor. *Applied Radiation and Isotopes*, 66(10), 1459-1466.
- Oliver, B. M., Bradley, J. G., & Farrar Iv, H. (1984). Helium concentration in the Earth's lower atmosphere. *Geochimica Et Cosmochimica Acta*, 48(9), 1759-1767.
- Perez, N. M., Hernandez, P. A., Padron, E., Melian, G., Marrero, R., Padilla, G., et al. (2007). Precursory subsurface Rn-222 and Rn-220 degassing signatures of the 2004 seismic crisis at Tenerife, Canary Islands. *Pure and Applied Geophysics*, 164(12), 2431-2448.
- Rahn, T. A., Fessenden, J. E., & Wahlen, M. (1996). Flux chamber measurements of anomalous CO₂ emission from the flanks of Mammoth Mountain, California. *Geophysical Research Letters*, 23(14), 1861-1864.
- Rau, R.J., Ching, K.E., Hu, J.C., & Lee, J.C. (2008). Crustal deformation and block kinematics in transition from collision to subduction: Global positioning system measurements in northern Taiwan, 1995-2005. *Journal of Geophysical Research*, 113.
- Roberts, A. A., Friedman, I., Donovan, T. J., & Denton, E. H. (1975). Helium survey, a possible technique for locating geothermal reservoirs. *Geophysical Research Letters*, 2(6), 209-210.
- Sano, Y., & Marty, B. (1995). Origin of carbon in fumarolic gas from island arcs. *Chemical Geology*, 119(1-4), 265-274.
- Schroede, G. L., Kraner, H. W., & Evans, R. D. (1965). Diffusion of radon in several naturally occurring soil types. *Journal of Geophysical Research*, 70(2), 471-474.
- Shapiro, M. H., Melvin, J. D., Tombrello, T. A., Fong, liang, J., Gui, et al. (1982). Correlated radon and CO₂ variations near the San Andreas Fault. *Geophysical Research Letters*, 9(5), 503-506.
- Shyu, J. B. H., Sieh, K., Chen, Y.G., & Liu, C.S. (2005). Neotectonic architecture of Taiwan and its implications for future large earthquakes. *Journal of Geophysical Research*, 110(B8), B08402.

- Sugisaki, R., Ido, M., Takeda, H., Isobe, Y., Hayashi, Y., Nakamura, N., et al. (1983). Origin of hydrogen and carbon dioxide in fault gases and its relation to fault activity. *The Journal of Geology*, 91(3), 239-258.
- Tong, L. T., Ouyang, S., Guo, T. R., Lee, C. R., Hu, K. H., Lee, C. L., et al. (2008). Insight into the geothermal structure in Chingshui, Ilan, Taiwan. *Terrestrial Atmospheric and Oceanic Sciences*, 19(4), 413-424.
- Toutain, J.P., Baubron, J.C., Bronec, J., Allard, P., Briole, P., Marty, B., et al. (1992). Continuous monitoring of distal gas emanations at Vulcano, southern Italy. *Bulletin of Volcanology*, 54(2), 147-155.
- Toutain, J. P., & Baubron, J. C. (1999). Gas geochemistry and seismotectonics: a review. *Tectonophysics*, 304(1-2), 1-27.
- Toutain, J. P., Sortino, F., Baubron, J. C., Richon, P., Surono, Sumarti, S., et al. (2009). Structure and CO₂ budget of Merapi volcano during inter-eruptive periods. *Bulletin of Volcanology*, 71(7), 815-826.
- Walia, V., Lin, S. J., Fu, C. C., Yang, T. F., Hong, W.L., Wen, K.L., et al. (2010). Soil-gas monitoring: A tool for fault delineation studies along Hsinhua Fault (Tainan), Southern Taiwan. *Applied Geochemistry*, 25(4), 602-607.
- Walia, V., Su, T. C., Fu, C. C., & Yang, T. F. (2005). Spatial variations of radon and helium concentrations in soil-gas across the Shan-Chiao fault, Northern Taiwan. *Radiation Measurements*, 40(2-6), 513-516.
- Walia, V., Yang, T. F., Hong, W.L., Lin, S.J., Fu, C.C., Wen, K.L., et al. (2009). Geochemical variation of soil-gas composition for fault trace and earthquake precursory studies along the Hsincheng fault in NW Taiwan. *Applied Radiation and Isotopes*, 67(10), 1855-1863.
- Wu, Y.M., Chang, C.H., Zhao, L., Teng, T.L., & Nakamura, M. (2008a). A Comprehensive Relocation of Earthquakes in Taiwan from 1991 to 2005. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 98(3), 1471-1481.
- Wu, Y.M., Zhao, L., Chang, C.H., & Hsu, Y.J. (2008b). Focal-Mechanism Determination in Taiwan by Genetic Algorithm. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 98(2), 651-661.
- Yang, T. F., Chen, C. H., Tien, R. L., Song, S. R., & Liu, T. K. (2003a). Remnant magmatic activity in the Coastal Range of East Taiwan after arc-continent collision: fission-track data and ³He/⁴He ratio evidence. *Radiation Measurements*, 36(1-6), 343-349.
- Yang, T. F., Chou, C. Y., Chen, C. H., Chyi, L. L., & Jiang, J. H. (2003b). Exhalation of radon and its carrier gases in SW Taiwan. *Radiation Measurements*, 36(1-6), 425-429.
- Yang, T. F., Lan, T. F., Lee, H.F., Fu, C.C., Chuang, P.C., Lo, C.H., et al. (2005a). Gas

- compositions and helium isotopic ratios of fluid samples around Kueishantao, NE offshore Taiwan and its tectonic implications. *Geochemical Journal*, 39(5), 469-480.
- Yang, T. F., Walia, V., Chyi, L. L., Fu, C. C., Chen, C. H., Liu, T. K., et al. (2005b). Variations of soil radon and thoron concentrations in a fault zone and prospective earthquakes in SW Taiwan. *Radiation Measurements*, 40(2-6), 496-502.
- Yeh, Y. H., Lin, C. H., & Roecker, S. W. (1989). A Study Of Upper Crustal Structures Beneath Northeastern Taiwan: Possible Evidence Of The Western Extension Of Okinawa Trough. *Proceedings of the Geological Society of China*, 32(2), 139-156.
- Yu, S.B., & Tsai, Y.B. (1979). Geomagnetic anomalies of the Ilan plain. *Petroleum Geology of Taiwan*, 16, 19-27.
- Yu, S. B., Chen, H. Y., & Kuo, L. C. (1997). Velocity field of GPS stations in the Taiwan area. *Tectonophysics*, 274(1-3), 41-59.
- Zhang, X., & Sanderson, D. J. (1996). Numerical modelling of the effects of fault slip on fluid flow around extensional faults. *Journal of Structural Geology*, 18(1), 109-119.



附錄一 宜蘭平原第一階段土壤氣體採樣分析結果

sampling date	NO.	CO ₂ flux (g/m ² /day)	Helium (ppm)	Radon (kBq/m ³)	N ₂ (%)	O ₂ (%)	CO ₂ (%)	CH ₄ (%)	d ¹³ C (‰)
2009/4/5	1	13.50	5.20	13.1	78.89	19.74	1.37	n.d.	-
2009/4/5	2	3.43	5.15	14.2	80.64	5.11	14.25	n.d.	-23.12
2009/4/5	3	17.34	5.18	36.1	79.78	17.35	2.87	n.d.	-
2009/4/5	4	5.00	5.15	-	79.09	16.87	4.04	n.d.	-
2009/4/5	5	12.42	5.24	12.7	79.43	19.09	1.48	n.d.	-
2009/4/5	6	10.65	5.22	10.5	79.28	19.29	1.43	n.d.	-
2009/4/5	7	9.66	5.20	5.1	79.57	19.93	0.51	n.d.	-
2009/4/5	8	31.48	5.22	10.3	79.42	16.80	3.78	n.d.	-
2009/4/5	9	16.26	5.26	50.3	81.50	14.51	4.00	n.d.	-22.21
2009/4/5	10	15.35	5.21	9.4	79.45	19.00	1.56	n.d.	-
2009/4/5	11	19.04	5.20	21.4	82.06	7.53	10.38	0.03	-21.20
2009/4/5	12	11.05	5.24	4.5	79.76	19.98	0.26	n.d.	-
2009/4/5	13	30.57	5.22	8.4	79.40	18.83	1.78	n.d.	-
2009/4/5	14	18.65	5.21	3.5	79.10	20.62	0.27	n.d.	-
2009/4/5	15	20.83	5.16	26.0	79.17	14.37	6.46	n.d.	-20.61
2009/4/5	16	16.74	5.52	27.4	90.35	1.25	8.10	0.30	-21.72
2009/4/5	17	10.76	5.26	39.4	84.39	4.40	11.21	n.d.	-14.87
2009/4/2	18	1.50	5.37	31.5	81.53	14.66	3.82	n.d.	-14.41
2009/4/2	19	3.34	5.37	16.5	84.96	10.30	4.37	0.37	-17.80
2009/4/2	20	13.36	5.24	5.1	80.09	18.04	1.86	n.d.	-
2009/4/2	21	18.21	5.24	34.0	82.46	9.38	8.15	n.d.	-14.24
2009/4/2	22	8.43	5.24	21.1	80.81	12.12	7.07	n.d.	-
2009/4/2	23	37.86	5.26	6.9	80.78	16.89	2.33	n.d.	-
2009/4/2	24	20.61	5.24	3.1	79.85	15.97	4.17	n.d.	-
2009/4/2	25	13.59	5.24	-	80.75	14.17	5.08	n.d.	-
2009/4/2	26	4.43	5.33	20.2	82.36	13.98	3.67	n.d.	-17.21
2009/4/2	27	0.67	5.27	1.2	79.41	20.11	0.48	n.d.	-
2009/4/2	28	32.16	5.25	5.1	80.33	17.60	2.07	n.d.	-
2009/4/2	29	17.27	5.78	5.9	79.26	18.95	1.78	n.d.	-14.97
2009/4/2	30	8.80	5.53	20.7	90.56	1.21	8.23	n.d.	-15.66
2009/4/3	31	17.84	5.24	0.5	-	-	-	-	-
2009/4/12	32	14.64	5.01	10.2	75.00	13.58	4.05	7.38	-16.24

sampling date	NO.	CO ₂ flux (g/m ² /day)	Helium (ppm)	Radon (kBq/m ³)	N ₂ (%)	O ₂ (%)	CO ₂ (%)	CH ₄ (%)	d ¹³ C (‰)
2009/4/2	33	60.34	5.31	17.1	82.71	11.99	5.30	n.d.	-
2009/4/2	34	19.26	5.30	10.8	80.43	18.20	1.38	n.d.	-
2009/4/2	35	7.65	5.24	10.3	80.02	17.68	2.30	n.d.	-
2009/4/11	36	7.04	5.26	4.3	79.64	20.23	0.13	n.d.	-
2009/4/5	37	13.68	5.22	22.8	79.42	18.99	1.59	n.d.	-
2009/4/5	38	8.30	5.24	28.1	79.90	18.35	1.75	n.d.	-
2009/4/5	39	6.20	5.22	10.4	79.81	18.40	1.79	n.d.	-
2009/4/5	40	6.45	5.20	9.5	79.62	18.78	1.60	n.d.	-
2009/4/5	41	11.87	5.42	33.9	87.14	9.38	3.48	n.d.	-24.18
2009/4/5	42	7.32	5.21	7.0	79.06	19.49	1.45	n.d.	-
2009/4/5	43	10.02	5.20	6.1	79.03	19.79	1.17	n.d.	-
2009/4/5	44	7.07	5.19	21.0	79.04	18.89	2.07	n.d.	-
2009/4/5	45	12.64	5.22	19.7	81.95	14.17	3.88	n.d.	-
2009/4/5	46	26.06	5.14	20.4	80.01	11.89	8.09	n.d.	-14.87
2009/4/5	47	19.45	5.20	9.1	79.94	16.87	3.19	n.d.	-
2009/4/5	48	22.55	5.22	5.3	79.32	20.02	0.66	n.d.	-
2009/4/5	49	8.20	5.21	17.7	82.84	10.39	6.77	n.d.	-21.94
2009/4/3	50	31.79	5.25	24.6	82.15	11.35	6.50	n.d.	-21.41
2009/4/3	51	9.35	5.24	16.2	80.85	16.57	2.58	n.d.	-
2009/4/3	52	17.29	5.58	19.5	93.61	1.54	4.85	n.d.	-20.76
2009/4/3	53	7.73	5.24	31.0	81.12	14.79	4.09	n.d.	-
2009/4/3	54	11.66	5.24	0.1	79.28	20.64	0.08	n.d.	-
2009/4/3	55	28.97	5.42	32.0	84.43	6.02	9.55	n.d.	-
2009/4/3	56	23.54	5.20	3.4	79.54	19.96	0.47	0.03	-
2009/4/3	57	87.03	5.48	25.8	87.03	8.55	4.41	n.d.	-
2009/4/3	58	22.97	5.26	9.6	82.46	12.39	5.15	n.d.	-
2009/4/3	59	58.63	5.24	20.1	83.02	11.12	5.86	n.d.	-
2009/4/12	60	7.71	5.22	17.6	79.63	16.49	3.89	n.d.	-18.45
2009/4/12	61	9.05	5.25	17.4	79.36	20.22	0.42	n.d.	-
2009/4/3	62	7.25	5.30	19.2	83.31	14.72	1.97	n.d.	-
2009/4/3	63	4.02	5.60	20.2	87.70	12.25	0.06	n.d.	-
2009/4/3	64	15.90	5.24	0.6	79.47	20.45	0.08	n.d.	-
2009/4/3	65	28.47	5.25	14.3	81.54	12.74	5.72	n.d.	-18.74
2009/4/5	66	3.09	4.23	16.6	55.81	13.96	5.90	24.32	-7.24
2009/4/5	67	8.59	5.20	29.0	79.28	17.85	2.87	n.d.	-18.08

sampling date	NO.	CO ₂ flux (g/m ² /day)	Helium (ppm)	Radon (kBq/m ³)	N ₂ (%)	O ₂ (%)	CO ₂ (%)	CH ₄ (%)	d ¹³ C (‰)
2009/4/5	68	11.03	5.21	25.6	79.53	17.58	2.89	n.d.	-18.34
2009/4/5	69	8.61	5.21	13.1	79.61	18.03	2.36	n.d.	-
2009/4/5	70	16.03	5.26	18.3	79.00	18.51	2.48	n.d.	-
2009/4/5	71	25.38	5.22	19.2	83.42	6.06	10.53	n.d.	-23.50
2009/4/5	72	2.04	5.24	12.8	82.06	12.99	4.94	n.d.	-20.93
2009/4/5	73	39.46	5.16	40.6	82.06	4.03	13.91	n.d.	-11.37
2009/4/4	74	12.24	5.13	23.1	81.49	10.56	7.95	n.d.	-16.30
2009/4/4	75	18.99	5.45	27.9	88.27	4.37	7.26	0.11	-13.70
2009/4/4	76	62.90	5.13	11.8	79.97	15.29	4.74	n.d.	-21.22
2009/4/4	77	20.54	5.22	18.9	80.27	16.52	3.21	n.d.	-
2009/4/4	78	29.64	5.24	54.4	85.83	13.63	0.54	n.d.	-
2009/4/4	79	34.68	5.20	7.2	80.10	13.98	5.93	n.d.	-22.26
2009/4/4	80	21.68	5.36	31.9	87.04	3.53	9.39	0.04	-16.07
2009/4/4	81	30.88	5.13	17.0	78.97	18.92	2.11	n.d.	-
2009/4/4	82	21.33	5.40	25.5	87.88	2.80	9.31	n.d.	-23.21
2009/4/4	83	12.50	5.25	30.3	79.64	16.75	3.61	n.d.	-
2009/4/4	84	4.60	5.22	5.9	79.41	19.79	0.79	n.d.	-
2009/4/11	159	15.13	5.25	2.4	79.48	20.32	0.20	n.d.	-
2009/4/4	85	5.96	5.21	12.7	79.59	18.34	2.07	n.d.	-
2009/4/4	86	9.71	5.22	20.4	78.66	20.03	1.31	n.d.	-
2009/4/4	87	5.47	5.19	29.1	79.27	18.21	2.52	n.d.	-
2009/4/4	88	5.72	5.19	15.5	79.11	18.36	2.54	n.d.	-
2009/4/11	89	0.54	5.30	58.4	79.81	17.58	2.60	n.d.	-
2009/4/4	90	13.04	5.24	10.9	79.59	19.23	1.18	n.d.	-
2009/4/4	91	3.88	5.18	12.5	78.98	18.83	2.19	n.d.	-
2009/4/4	92	13.05	5.19	58.5	79.31	14.99	5.71	n.d.	-11.83
2009/4/4	93	10.56	5.11	8.9	78.38	16.57	5.05	0.01	-11.44
2009/4/4	94	7.84	5.24	16.5	80.55	17.57	1.88	n.d.	-
2009/4/2	95	15.83	5.53	13.8	92.68	4.07	3.25	n.d.	-16.02
2009/4/2	96	4.60	5.26	15.3	79.35	18.73	1.92	n.d.	-
2009/4/3	97	14.69	5.24	10.5	80.34	13.05	6.61	n.d.	-
2009/4/3	98	9.26	5.27	12.4	79.72	18.84	1.44	n.d.	-
2009/4/3	99	2.52	5.25	6.5	79.67	17.66	2.67	n.d.	-
2009/4/3	100	3.06	5.28	12.5	79.49	18.99	1.52	n.d.	-
2009/4/11	101	7.51	5.25	6.5	78.90	20.13	0.97	n.d.	-

sampling date	NO.	CO ₂ flux (g/m ² /day)	Helium (ppm)	Radon (kBq/m ³)	N ₂ (%)	O ₂ (%)	CO ₂ (%)	CH ₄ (%)	d ¹³ C (‰)
2009/4/11	102	13.71	5.27	4.3	79.37	20.04	0.59	n.d.	-
2009/4/11	103	9.82	5.25	20.2	79.72	18.36	1.91	n.d.	-
2009/4/11	104	11.87	5.24	15.6	80.13	16.21	3.66	n.d.	-15.96
2009/4/11	105	16.11	5.22	11.7	80.30	16.04	3.66	n.d.	-
2009/4/4	106	14.60	5.26	4.7	80.81	18.34	0.84	n.d.	-
2009/4/4	107	7.21	5.38	20.1	87.17	12.23	0.60	n.d.	-
2009/4/4	108	3.96	5.31	20.3	82.96	14.72	2.33	n.d.	-
2009/4/2	109	8.11	5.24	9.2	80.43	17.66	1.92	n.d.	-
2009/4/2	110	17.04	5.26	17.5	79.87	19.02	1.10	n.d.	-17.41
2009/4/3	111	18.02	5.24	9.1	79.27	19.12	1.61	n.d.	-
2009/4/3	112	9.29	5.28	7.5	79.88	19.58	0.54	n.d.	-
2009/4/3	113	2.40	5.24	14.3	80.07	17.30	2.63	n.d.	-
2009/4/3	114	5.97	5.24	9.3	79.38	19.23	1.39	n.d.	-
2009/4/12	115	6.33	5.24	5.4	79.64	19.79	0.56	n.d.	-
2009/4/11	116	4.05	5.24	44.6	80.46	17.18	2.36	n.d.	-18.35
2009/4/11	117	-	5.22	23.5	79.70	18.16	2.14	n.d.	-
2009/4/11	118	19.24	5.21	16.6	79.43	17.32	3.24	n.d.	-
2009/4/4	119	7.99	5.20	20.2	80.28	16.41	3.31	n.d.	-
2009/4/4	120	7.97	5.24	3.5	79.67	20.18	0.15	n.d.	-
2009/4/4	121	4.60	5.24	5.9	79.36	20.10	0.54	n.d.	-
2009/4/2	122	6.54	5.25	8.6	79.55	18.61	1.84	n.d.	-
2009/4/2	123	6.07	5.25	23.7	81.83	11.60	6.56	n.d.	-19.76
2009/4/3	124	5.48	5.31	10.1	81.62	1.13	3.48	13.78	-11.68
2009/4/12	125	6.73	5.30	8.8	80.04	18.75	1.21	n.d.	-
2009/4/3	126	3.73	5.31	15.6	80.52	16.74	2.70	n.d.	-
2009/4/12	127	13.01	5.28	13.2	80.00	17.30	2.70	n.d.	-
2009/4/3	128	1.25	5.25	12.4	79.28	20.04	0.68	n.d.	-
2009/4/4	129	21.14	5.24	11.0	80.08	17.09	2.82	n.d.	-
2009/4/4	130	6.05	5.24	8.1	79.94	17.28	2.79	n.d.	-
2009/4/2	131	19.77	5.30	21.0	80.94	17.59	1.48	n.d.	-
2009/4/2	132	7.71	5.24	11.4	79.69	18.32	1.99	n.d.	-
2009/4/3	133	7.67	5.25	13.2	79.37	18.94	1.69	n.d.	-
2009/4/3	134	29.08	5.24	12.7	79.15	19.15	1.70	n.d.	-
2009/4/4	135	10.61	5.31	14.9	80.74	16.91	2.35	n.d.	-
2009/4/2	136	3.67	5.26	6.9	79.68	20.06	0.27	n.d.	-

sampling date	NO.	CO ₂ flux (g/m ² /day)	Helium (ppm)	Radon (kBq/m ³)	N ₂ (%)	O ₂ (%)	CO ₂ (%)	CH ₄ (%)	d ¹³ C (‰)
2009/4/2	137	2.89	5.26	10.6	80.72	17.46	1.82	n.d.	-
2009/4/3	138	9.55	5.28	19.8	80.75	17.20	2.05	n.d.	-
2009/4/4	139	10.07	5.24	3.8	79.44	20.18	0.38	n.d.	-
2009/4/2	140	3.36	5.28	10.1	79.85	19.36	0.80	n.d.	-
2009/4/2	141	6.39	5.26	15.4	79.74	18.48	1.78	n.d.	-
2009/4/2	142	7.79	5.24	17.0	80.27	17.95	1.78	n.d.	-
2009/4/12	143	11.65	5.26	22.9	80.03	18.46	1.51	n.d.	-
2009/4/12	144	16.31	5.13	10.9	79.32	18.08	2.60	n.d.	-
2009/4/3	145	3.54	5.24	6.0	79.69	20.07	0.24	n.d.	-
2009/4/3	146	11.21	5.20	22.9	-	-	-	-	-
2009/4/2	147	3.22	5.28	12.6	80.39	18.44	1.17	n.d.	-
2009/4/3	148	7.96	5.24	17.0	80.22	18.25	1.54	n.d.	-
2009/4/12	149	13.25	5.21	4.0	79.72	19.77	0.51	n.d.	-
2009/4/3	150	13.95	5.24	8.6	79.82	20.04	0.14	n.d.	-
2009/4/3	151	14.00	5.28	14.4	80.53	17.51	1.96	n.d.	-
2009/4/3	152	11.54	5.24	73.9	81.04	16.03	2.93	n.d.	-
2009/4/3	153	9.00	5.27	10.7	80.43	16.73	2.84	n.d.	-
2009/4/3	154	18.03	5.24	3.6	79.33	20.14	0.53	n.d.	-
2009/4/3	155	13.87	5.26	13.8	80.13	19.62	0.24	n.d.	-
2009/4/12	156	8.61	5.26	3.0	79.60	20.33	0.07	n.d.	-
2009/4/12	157	3.03	5.20	7.5	79.37	20.37	0.26	n.d.	-
2009/4/12	158	8.56	5.26	6.9	79.86	19.54	0.60	n.d.	-

註：n.d. = not detected

附錄二 宜蘭平原第二階段土壤氣體採樣分析結果

sample No.	No.	CO ₂ flux (g/m ² /day)	Helium (ppm)	Radon (kBq/m ³)	Ar (%)	N ₂ (%)	CO (%)	CH ₄ (%)	CO ₂ (%)	C ₂ H ₆ (%)	C ₃ H ₈ (%)	He (%)	H ₂ (%)	O ₂ (%)	d ¹³ C (‰)
2009/7/23	67	10.40	5.32	51.2	0.88	79.06	0.01	n.d.	6.31	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	13.74	-
2009/7/23	67_1	9.19	5.22	102.7	0.88	79.00	0.01	n.d.	5.81	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	14.30	-23.49
2009/7/23	68	19.03	5.22	39.8	0.87	78.22	0.01	n.d.	6.82	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	14.07	-19.81
2009/7/23	89	6.03	5.21	60.1	0.86	78.89	0.01	n.d.	3.68	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	16.56	-13.87
2009/7/23	104	13.21	5.21	26.0	0.88	78.89	0.01	n.d.	6.08	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	14.14	-15.17
2009/7/23	116	13.69	5.20	83.9	1.01	78.47	n.d.	n.d.	2.63	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	17.89	-16.43
2009/7/23	29	13.55	6.24	24.4	0.82	73.29	0.01	n.d.	12.85	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	13.02	-12.57
2009/7/23	30	13.97	5.25	19.9	0.93	83.81	0.01	n.d.	13.19	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	2.05	-15.20
2009/7/23	30_1	10.92	5.43	34.4	0.92	83.65	0.01	n.d.	7.71	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	7.71	-17.44
2009/7/23	21	16.86	5.26	18.2	0.90	80.40	0.01	0.07	8.36	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	10.26	-15.08
2009/7/23	80	13.67	5.12	10.7	0.88	78.25	0.01	0.07	13.18	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	7.61	-20.70
2009/7/24	2	18.21	5.25	3.1	0.87	77.24	0.01	n.d.	5.24	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	16.64	-21.06
2009/7/24	3	17.51	5.26	43.2	0.88	79.87	0.01	n.d.	6.58	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	12.65	-19.75
2009/7/24	4	23.34	5.26	26.4	0.91	80.16	0.01	n.d.	8.22	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	10.69	-19.85
2009/7/24	41	4.52	5.41	68.2	1.00	87.30	0.01	0.03	6.82	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	4.83	-24.45
2009/7/24	9	5.98	5.25	37.3	0.88	78.29	0.01	n.d.	7.68	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	13.15	-21.25
2009/7/24	11	17.98	5.19	24.2	0.87	78.62	0.01	n.d.	10.94	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	9.56	-21.09
2009/7/24	15	-	5.25	43.7	0.89	81.43	n.d.	n.d.	11.39	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	6.29	-21.17
2009/7/24	16	10.25	5.41	26.9	0.95	86.22	n.d.	0.11	12.45	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	0.27	-16.55
2009/7/24	17	27.27	5.20	34.9	0.87	77.62	0.01	n.d.	9.98	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	11.52	-15.94
2009/7/24	49	16.37	5.19	20.6	0.88	79.05	0.01	0.02	8.84	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	11.20	-21.12
2009/7/24	76	0.25	5.12	30.5	0.86	77.79	0.01	2.75	17.04	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	1.54	-12.08
2009/7/24	75	12.24	5.27	45.0	0.92	83.31	0.01	0.51	8.99	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	6.26	-11.75
2009/7/24	74	8.41	5.19	24.9	0.90	77.80	0.01	0.34	8.43	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	12.53	-22.65
2009/7/24	92	9.68	5.16	67.5	0.87	77.82	0.01	n.d.	10.91	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	10.39	-11.53
2009/7/25	78	17.58	5.15	27.5	0.84	75.96	0.01	n.d.	9.77	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	13.42	-22.16
2009/7/25	79	-	5.20	5.6	0.86	77.57	0.01	n.d.	5.11	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	16.45	-20.13
2009/7/25	97	8.55	5.19	7.2	0.87	77.89	0.01	n.d.	6.95	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	14.28	-16.24
2009/7/25	123	6.80	5.22	18.2	0.85	78.65	0.01	0.07	7.82	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	12.61	-17.02
2009/7/25	124	15.34	5.25	5.5	0.94	80.31	0.01	n.d.	7.49	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	11.24	-12.33
2009/7/25	148	5.71	5.22	14.6	0.89	79.00	0.01	n.d.	3.18	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	16.92	-20.29
2009/7/25	146	4.46	5.25	7.9	0.95	79.02	0.01	n.d.	1.12	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	18.90	-17.74

sample No.	No.	CO ₂ flux (g/m ² /day)	Helium (ppm)	Radon (kBq/m ³)	Ar (%)	N ₂ (%)	CO (%)	CH ₄ (%)	CO ₂ (%)	C ₂ H ₆ (%)	C ₃ H ₈ (%)	He (%)	H ₂ (%)	O ₂ (%)	d ¹³ C (‰)
2009/8/1	71	15.59	5.25	19.7	0.85	79.89	n.d.	n.d.	8.07	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	11.18	-17.49
2009/8/1	72	13.71	5.27	8.1	0.89	80.71	n.d.	n.d.	5.93	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	12.47	-22.34
2009/8/1	73	18.61	5.21	46.4	0.91	83.36	n.d.	n.d.	12.52	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	3.21	-12.97
2009/8/1	46	23.21	5.20	6.9	0.87	79.82	n.d.	n.d.	7.56	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	11.74	-14.21
2009/8/1	93	18.03	5.21	7.6	0.86	79.90	n.d.	n.d.	3.48	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	15.75	-
2009/8/1	105	14.05	5.25	14.0	0.89	8n.d.	n.d.	n.d.	5.10	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	14.01	-19.78
2009/8/1	152	7.42	5.28	34.0	0.88	80.99	n.d.	n.d.	1.02	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	17.11	-17.12
2009/8/1	144_1	7.23	4.85	51.8	0.70	59.03	n.d.	0.26	26.08	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	13.93	-6.57
2009/8/1	60	7.50	5.25	20.3	0.86	79.66	n.d.	n.d.	4.36	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	15.13	-
2009/8/1	32	23.39	4.39	26.6	0.64	52.72	n.d.	39.25	6.77	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	0.60	-20.58
2009/8/6	18	13.95	5.60	51.7	0.89	81.19	n.d.	0.56	12.07	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	5.28	-21.40
2009/8/19	50	57.25	5.22	15.9	0.85	81.77	n.d.	n.d.	7.10	n.d.	n.d.	n.d.	0.02	10.26	-17.33
2009/8/19	52	3.18	5.30	20.0	0.87	82.51	n.d.	n.d.	5.86	n.d.	n.d.	n.d.	0.02	10.75	-15.27
2009/8/19	19	5.93	5.16	13.8	0.87	81.06	n.d.	n.d.	1.09	n.d.	n.d.	n.d.	0.02	16.96	-17.30
2009/8/19	22	15.60	5.25	19.0	0.87	80.89	n.d.	n.d.	3.68	n.d.	n.d.	n.d.	0.02	14.54	-21.47
2009/8/19	26	10.46	5.21	27.4	0.85	79.66	n.d.	n.d.	8.26	n.d.	n.d.	n.d.	0.02	11.21	-17.94
2009/8/19	31	13.09	5.27	18.1	0.88	80.90	n.d.	n.d.	0.11	n.d.	n.d.	n.d.	0.02	18.09	-15.34
2009/8/19	33	26.37	5.25	21.9	0.86	80.19	n.d.	n.d.	6.94	n.d.	n.d.	n.d.	0.02	12.00	-
2009/8/19	65	10.91	5.33	20.2	0.88	81.78	n.d.	n.d.	6.52	n.d.	n.d.	n.d.	0.02	10.80	-17.63
2009/8/19	63	5.73	5.48	53.1	0.85	93.45	n.d.	n.d.	0.99	n.d.	n.d.	n.d.	0.02	4.69	-20.65
2009/8/19	59	25.98	5.09	30.2	0.84	79.14	n.d.	0.02	8.32	n.d.	n.d.	n.d.	0.02	11.66	-13.02
2009/8/19	58	15.39	5.16	52.7	0.86	80.46	n.d.	n.d.	8.04	n.d.	n.d.	n.d.	0.02	10.62	-17.64
2009/8/19	57	22.30	5.25	27.1	0.82	83.56	n.d.	n.d.	11.69	n.d.	n.d.	n.d.	0.02	3.92	-18.11
2009/8/19	56	13.77	5.12	46.3	0.85	80.23	n.d.	n.d.	6.18	n.d.	n.d.	n.d.	0.02	12.71	-
2009/8/19	56_1	7.45	4.71	20.8	0.69	65.27	n.d.	15.53	16.76	n.d.	n.d.	n.d.	0.02	1.74	-
2009/8/19	82	23.79	5.20	25.5	0.85	81.02	n.d.	n.d.	8.47	n.d.	n.d.	n.d.	0.02	9.64	-
2009/8/19	83	2.84	5.22	25.6	0.88	80.53	n.d.	n.d.	3.65	n.d.	n.d.	n.d.	0.02	14.92	-24.11
2009/8/26	169	-	5.24	18.5	0.86	80.34	n.d.	n.d.	1.94	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	16.86	-22.27
2009/8/26	170	-	5.24	18.6	0.86	80.98	n.d.	n.d.	0.86	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	17.29	-23.21
2009/8/26	171	-	5.22	13.4	0.87	81.27	n.d.	n.d.	0.43	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	17.42	-
2009/8/26	172	-	5.20	46.9	0.85	80.04	n.d.	n.d.	2.92	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	16.19	-22.42
2009/8/26	173	-	5.19	72.8	0.86	80.84	n.d.	n.d.	2.51	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	15.79	-23.24
2009/7/3	167	-	5.26	15.8	0.89	78.03	n.d.	n.d.	1.98	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	19.10	-18.77
2009/7/3	168	-	5.20	14.8	0.90	78.39	n.d.	n.d.	2.65	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	18.06	-20.19
2009/9/9	174	-	5.24	20.4	0.77	69.98	n.d.	n.d.	5.04	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	24.20	-

sample No.	No.	CO ₂ flux (g/m ² /day)	Helium (ppm)	Radon (kBq/m ³)	Ar (%)	N ₂ (%)	CO (%)	CH ₄ (%)	CO ₂ (%)	C ₂ H ₆ (%)	C ₃ H ₈ (%)	He (%)	H ₂ (%)	O ₂ (%)	d ¹³ C (‰)
2009/9/9	175	-	5.22	18.1	0.80	70.76	n.d.	n.d.	4.41	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	24.03	-
2009/9/9	176	-	5.24	32.5	0.81	71.54	n.d.	n.d.	0.66	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	26.98	-
2009/9/9	177	-	5.26	50.2	0.81	72.37	n.d.	n.d.	3.58	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	23.25	-
2009/9/9	178	-	5.32	10.9	0.81	72.11	n.d.	n.d.	1.19	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	25.89	-
2009/9/9	179	-	5.25	47.2	0.80	71.62	n.d.	n.d.	3.07	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	24.50	-
2009/9/9	180	-	5.24	29.2	0.79	71.46	n.d.	n.d.	3.62	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	24.12	-
2009/9/20	181	-	5.26	10.0	0.70	70.46	n.d.	n.d.	11.42	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	17.42	-
2010/2/9	160	13.83	5.19	23.1	0.91	78.66	n.d.	n.d.	2.76	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	17.67	-
2010/2/9	161	7.95	5.22	5.8	0.88	79.28	n.d.	n.d.	1.08	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	18.75	-
2010/2/10	162	17.97	5.25	20.2	0.91	79.47	n.d.	n.d.	1.92	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	17.70	-
2010/2/10	163	17.60	5.24	7.6	0.90	79.39	n.d.	n.d.	2.56	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	17.15	-
2010/2/10	164	8.94	5.24	12.2	0.94	79.35	n.d.	n.d.	0.70	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	19.01	-
2010/2/10	165	11.64	5.27	29.9	0.92	79.80	n.d.	n.d.	1.72	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	17.55	-
2010/2/10	166	17.15	5.21	18.0	0.90	79.62	n.d.	n.d.	2.12	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	17.36	-
2010/3/20	182	13.06	5.25	1.8	0.89	79.00	n.d.	n.d.	0.12	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	19.98	-
2010/3/20	183	7.65	5.25	69.8	0.94	79.11	n.d.	n.d.	1.80	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	18.15	-
2010/3/20	184	16.72	5.24	16.8	0.91	79.19	n.d.	n.d.	1.34	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	18.56	-
2010/3/20	185	15.12	5.21	26.1	0.91	78.98	n.d.	n.d.	1.95	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	18.15	-
2010/3/20	186	14.40	5.24	0.6	0.98	79.17	n.d.	n.d.	0.18	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	19.67	-

註：n.d. = not detected

附錄三 宜蘭平原固定點定期採樣結果

Date	CO ₂ Flux (g/m ² /day)	He (ppm)	Rn (kBq/m ³)	N ₂ (%)	O ₂ +Ar (%)	CO ₂ (%)	CH ₄ (%)	δ ¹³ C (‰)
NO. 67								
2009/4/5	8.6	5.20	29.0	79.28	17.85	2.87	n.d.	-16.07
2009/4/29	14.8	5.24	42.2	79.85	18.29	1.86	n.d.	-
2009/5/7	-	5.32	43.2	81.35	16.42	2.23	n.d.	-
2009/5/13	-	5.27	29.7	81.32	15.79	2.88	n.d.	-
2009/5/22	-	5.26	33.5	79.86	16.77	3.36	n.d.	-
2009/6/3	-	5.26	32.5	79.69	16.96	3.35	n.d.	-20.58
2009/6/18	-	5.37	49.2	81.22	14.81	3.97	n.d.	-
2009/6/25	-	5.35	25.3	82.40	13.10	4.50	n.d.	-18.99
2009/7/3	-	5.28	47.7	81.40	13.38	5.22	n.d.	-
2009/7/10	-	5.28	34.4	80.22	14.40	5.38	n.d.	-18.86
2009/7/15	-	5.31	42.2	81.43	13.14	5.42	n.d.	-
2009/7/23	10.4	5.32	51.2	80.88	13.44	5.68	n.d.	-
2009/8/1	-	5.27	51.4	79.63	15.42	4.94	n.d.	-
2009/8/6	-	-	35.4	78.93	15.47	5.60	n.d.	-
2009/8/18	-	5.30	48.9	80.13	15.52	4.35	n.d.	-18.68
2009/8/26	-	5.19	34.8	78.67	16.54	4.79	n.d.	-
2009/9/9	-	5.30	53.4	80.56	14.44	5.00	n.d.	-
2009/9/20	-	5.31	60.5	80.94	12.81	6.26	n.d.	-
2009/12/4	-	5.37	-	80.27	17.71	2.01	n.d.	-
2010/2/10	-	5.36	32.5	81.90	16.89	1.21	n.d.	-
NO. 67_1								
2009/5/13	-	5.24	59.6	79.87	16.32	3.81	n.d.	-
2009/5/22	-	5.25	53.8	80.12	16.20	3.68	n.d.	-
2009/6/3	-	5.26	53.5	80.55	15.64	3.81	n.d.	-24.22
2009/6/18	-	5.41	79.9	83.61	11.95	4.45	n.d.	-
2009/6/25	-	5.33	50.5	82.78	12.12	5.10	n.d.	-23.63
2009/7/3	-	5.21	57.5	79.97	14.74	5.29	n.d.	-
2009/7/10	-	5.20	75.7	80.02	14.92	5.06	n.d.	-23.89
2009/7/15	-	5.27	74.4	81.36	13.29	5.35	n.d.	-
2009/7/23	9.2	5.22	102.7	80.59	14.06	5.35	n.d.	-23.49
2009/8/1	-	5.26	85.8	80.62	13.61	5.76	n.d.	-

Date	CO ₂ Flux (g/m ² /day)	He (ppm)	Rn (kBq/m ³)	N ₂ (%)	O ₂ +Ar (%)	CO ₂ (%)	CH ₄ (%)	δ ¹³ C (‰)
2009/8/6	-	-	105.9	80.76	13.66	5.58	n.d.	-
2009/8/18	-	5.28	90.2	80.76	13.78	5.46	n.d.	-23.38
2009/8/26	-	5.21	86.0	80.42	14.45	5.13	n.d.	-
2009/9/9	-	5.27	78.8	80.95	13.49	5.56	n.d.	-
2009/9/20	-	5.25	65.2	80.19	14.25	5.56	n.d.	-
2009/12/4	-	5.50	-	86.81	8.17	5.02	n.d.	-
2010/2/10	-	5.24	39.8	81.17	14.91	3.92	n.d.	-

NO. 29

2009/4/5	17.3	5.78	5.9	79.26	18.95	1.78	n.d.	-14.97
2009/4/29	4.2	6.97	23.5	79.78	13.16	7.06	n.d.	-14.24
2009/5/7	-	6.53	16.9	78.32	14.99	6.68	n.d.	-
2009/5/13	-	6.01	17.9	77.53	15.36	7.11	n.d.	-
2009/5/22	-	6.28	19.1	76.51	14.23	9.27	n.d.	-
2009/6/3	-	6.67	24.0	75.71	12.08	12.21	n.d.	-12.97
2009/6/18	-	6.82	17.8	76.17	10.20	13.64	n.d.	-
2009/6/25	-	6.52	23.1	74.59	11.79	13.63	n.d.	-12.70
2009/7/3	-	6.10	15.7	73.29	13.01	13.70	n.d.	-
2009/7/10	-	5.88	16.4	73.40	13.87	12.73	n.d.	-12.00
2009/7/15	-	6.11	22.4	74.02	12.94	13.04	0.01	-
2009/7/23	13.6	6.24	24.4	73.71	12.83	13.46	n.d.	-12.57
2009/8/1	-	5.92	22.2	72.93	13.78	13.29	n.d.	-
2009/8/6	-	-	21.8	78.22	17.26	4.53	n.d.	-
2009/8/18	-	5.94	22.6	73.87	14.36	11.77	n.d.	-11.85
2009/8/26	-	5.77	18.7	72.64	14.43	12.92	n.d.	-
2009/9/9	-	6.12	28.2	73.55	12.36	14.09	n.d.	-
2009/9/20	-	6.17	28.1	73.60	9.55	16.85	n.d.	-
2009/10/1	-	6.34	22.2	74.06	12.47	13.47	n.d.	-
2009/12/23	-	lost	15.7	81.87	13.49	4.64	n.d.	-
2010/3/20	-	6.44	41.6	79.10	13.29	7.61	n.d.	-

NO. 30

2009/4/5	8.8	5.53	20.7	90.56	1.21	8.23	n.d.	-15.66
2009/4/29	21.7	5.60	23.5	90.59	1.23	7.74	0.44	-16.86
2009/5/7	-	5.46	18.7	89.02	1.34	9.34	0.30	-
2009/5/13	-	5.40	20.6	88.33	1.95	9.72	n.d.	-
2009/5/22	-	5.36	18.1	85.73	3.47	10.80	n.d.	-

Date	CO ₂ Flux (g/m ² /day)	He (ppm)	Rn (kBq/m ³)	N ₂ (%)	O ₂ +Ar (%)	CO ₂ (%)	CH ₄ (%)	δ ¹³ C (‰)
2009/6/3	-	5.38	21.4	86.70	2.19	11.11	n.d.	-16.74
2009/6/18	-	5.42	13.9	85.88	4.10	9.91	0.11	-
2009/6/25	-	5.37	21.0	86.29	1.32	12.38	0.01	-16.42
2009/7/3	-	5.32	17.5	83.94	2.55	13.50	n.d.	-
2009/7/10	-	5.27	16.5	82.37	6.64	10.99	n.d.	-15.75
2009/7/15	-	5.52	17.7	85.70	1.91	12.39	n.d.	-
2009/7/23	14.0	5.25	19.9	84.26	2.65	13.09	n.d.	-15.20
2009/8/1	-	5.25	16.7	83.50	4.92	11.52	0.06	-
2009/8/6	-	-	19.6	82.85	3.24	13.91	n.d.	-
2009/8/18	-	5.38	23.9	84.10	3.41	12.48	n.d.	-14.98
2009/8/26	-	5.26	29.3	82.02	3.78	14.20	n.d.	-
2009/9/9	-	5.27	24.6	82.88	5.18	11.94	n.d.	-
2009/9/20	-	5.33	25.5	84.29	2.16	13.55	n.d.	-
2009/12/23	-	-	20.5	92.54	1.02	5.87	0.57	-
2010/3/20	-	5.57	14.2	91.87	1.16	6.65	0.32	-
NO. 30_1								
2009/6/3	-	5.40	35.4	81.27	15.12	3.61	n.d.	-15.34
2009/6/25	-	5.43	20.3	85.51	8.05	6.43	n.d.	-16.86
2009/7/3	-	5.35	29.5	83.66	9.47	6.87	n.d.	-
2009/7/10	-	5.33	31.0	82.09	11.21	6.70	n.d.	-17.04
2009/7/15	-	5.41	28.6	82.05	11.50	6.45	n.d.	-
2009/7/23	10.9	5.43	34.4	85.20	7.89	6.91	n.d.	-17.44
2009/8/1	-	5.33	34.3	83.04	9.26	7.70	n.d.	-
2009/8/6	-	-	51.7	83.35	5.71	10.22	0.71	-
2009/8/18	-	5.42	31.6	83.53	10.93	5.54	n.d.	-16.35
2009/8/26	-	5.32	38.5	82.92	9.29	7.79	n.d.	-
2009/9/9	-	5.38	46.9	83.58	10.22	6.19	n.d.	-
2009/9/20	-	5.46	49.8	86.38	6.29	7.34	n.d.	-
NO. 21								
2009/4/2	-	5.24	34.0	82.46	9.38	8.15	n.d.	-14.24
2009/6/18	-	5.33	21.1	83.10	9.78	7.12	n.d.	-
2009/6/25	-	5.25	17.1	80.53	12.28	7.19	n.d.	-15.03
2009/7/3	-	5.24	12.2	79.34	14.02	6.64	n.d.	-
2009/7/10	-	5.21	12.6	79.06	15.06	5.88	n.d.	-14.47
2009/7/23	16.9	5.26	18.2	81.66	10.64	7.70	n.d.	-15.08

Date	CO ₂ Flux (g/m ² /day)	He (ppm)	Rn (kBq/m ³)	N ₂ (%)	O ₂ +Ar (%)	CO ₂ (%)	CH ₄ (%)	δ ¹³ C (‰)
2009/8/18	-	5.26	25.7	80.17	8.78	11.05	n.d.	-
NO. 104								
2009/4/12	-	5.24	15.6	80.13	16.21	3.66	n.d.	-15.96
2009/7/3	-	5.27	20.9	80.53	14.46	5.01	n.d.	-
2009/7/10	-	5.24	21.0	80.61	14.23	5.16	n.d.	-15.03
2009/7/23	13.2	5.21	26.0	80.35	14.24	5.40	n.d.	-15.17
2009/8/1	-	5.22	26.3	79.86	14.66	5.49	n.d.	-
2009/8/18	-	5.31	28.9	81.99	11.52	6.50	n.d.	-15.78
2009/8/26	-	5.22	18.0	80.45	13.35	6.20	n.d.	-
2009/9/20	-	5.28	33.5	80.98	17.69	1.33	n.d.	-
2009/12/4	-	5.28	-	83.39	10.84	5.77	n.d.	-
NO. 80								
2009/4/5	21.7	5.36	31.9	87.04	3.53	9.39	0.04	-16.07
2009/4/29	30.1	5.15	13.3	78.77	18.29	2.94	n.d.	-
2009/5/7	-	5.15	7.2	78.46	18.16	3.38	0.01	-
2009/5/13	-	5.12	10.4	79.93	7.88	11.65	0.54	-
2009/5/22	-	5.13	11.6	79.40	7.75	12.80	0.05	-
2009/6/3	-	5.21	12.7	80.79	4.86	14.33	0.02	-20.58
2009/7/23	13.7	5.12	10.7	78.34	7.61	13.96	0.08	-
2009/8/18	-	5.11	20.6	77.81	5.96	16.20	0.03	-20.79
2009/9/20	-	5.13	14.9	77.23	5.50	16.27	0.99	-
NO. 56								
2009/4/5	23.5	5.20	3.4	79.54	19.96	0.47	0.03	-
2009/4/29	20.7	-	-	-	-	-	-	-
2009/5/7	-	5.22	35.7	80.84	12.33	6.83	n.d.	-
2009/5/13	-	5.18	34.2	81.40	11.06	7.54	n.d.	-
2009/5/22	-	5.09	28.8	77.88	15.05	7.08	n.d.	-
2009/6/3	-	5.16	28.7	78.51	15.03	6.41	0.04	-23.62
2009/8/19	13.8	5.12	46.3	79.05	14.04	6.91	n.d.	-
NO. 56_1								
2009/5/7	-	3.13	5.2	48.35	0.63	23.81	27.20	-
2009/5/13	-	4.34	6.8	51.61	0.68	19.35	28.35	-
2009/5/22	-	4.72	6.5	58.02	0.68	21.93	19.37	-
2009/6/3	-	4.76	6.4	59.11	0.73	22.40	17.77	-9.63

Date	CO ₂ Flux (g/m ² /day)	He (ppm)	Rn (kBq/m ³)	N ₂ (%)	O ₂ +Ar (%)	CO ₂ (%)	CH ₄ (%)	δ ¹³ C (‰)
2009/8/19	7.5	4.71	20.8	59.47	0.80	19.55	20.18	-
NO. 75								
2009/7/24	12.2	5.27	45.0	84.35	6.11	8.84	0.70	-11.75
2009/8/18	-	5.40	43.8	84.97	6.91	8.03	0.10	-9.82
2009/9/20	-	5.30	44.9	84.54	6.71	8.15	0.60	-
NO. 92								
2009/7/24	9.68	5.16	67.5	79.65	10.12	10.23	n.d.	-11.53
2009/8/18	-	5.28	63.8	82.22	11.60	6.18	n.d.	-10.81
2009/9/20	-	5.40	93.4	87.66	4.58	7.76	n.d.	-
NO. 144								
2009/7/10	-	5.37	47.4	59.13	14.32	26.32	0.22	-6.67
2009/7/25	7.84	5.53	2.8	79.73	19.53	0.74	0.00	-10.20
2009/8/1	7.23	4.85	51.8	54.53	12.99	32.16	0.32	-
2009/8/18	-	5.38	85.3	58.16	12.12	29.28	0.44	-6.31
2009/9/20	-	5.41	93.3	55.53	11.75	32.28	0.44	-
2009/12/4	-	6.59	-	41.83	8.57	49.37	0.23	-
2010/2/9	-	5.13	54.9	56.01	12.02	31.82	0.15	-
2010/3/20	-	4.89	41.6	50.69	10.89	38.24	0.18	-

註：n.d. = not detected