



國立臺灣大學理學院地質科學系暨研究所

碩士論文

Department of Geosciences

College of Science

National Taiwan University

Master Thesis

中國甘肅省黃爺洞 1450 年來之石筍碳氧同位素紀錄：

氣候、植被以及人類活動的關聯

Stalagmite $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{18}\text{O}$ Records in Huangye Cave of

Gansu Province, China during the last 1450 years:

Climate impacts on vegetation and human society

陳則喻

Tze-Yu Chen

指導教授：李紅春 博士

Advisor: Hong-Chun Li, Ph.D.

中華民國 102 年七月

July 2013



國立臺灣大學（碩）博士學位論文
口試委員會審定書

中國甘肅省黃爺洞 1450 年來之石筍碳氧同位素紀錄：

氣候、植被以及人類活動的關聯

Stalagmite $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{18}\text{O}$ Records in Huangye Cave of

Gansu Province, China during the last 1450 years:

Climate impacts on vegetation and human society

本論文係陳則喻君（R98224213）在國立臺灣大學地質科學系暨
研究所完成之碩（博）士學位論文，於民國 102 年 6 月 11 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：

李君

（指導教授）

陳惠芬

陳明鏡

張川

系主任、所長

（簽名）

誌謝



終於到致謝的這一刻，要感謝的人真的不少！首先一定要感謝付出最多讓我求學的家人，還有支持我回來唸書的武哥、由聖和大鈞等各朋友，有你們的相挺和鼓勵，讓我能把心定下來，好好地回來將學業完成。也最感謝我的指導教授李紅春老師，在成大認識老師、在台大成為老師的學生真的十分開心！謝謝老師在這裡指導我的耐心與協助，除了感謝還是要感謝！感謝在路上鼓勵我、給予各種幫助和建議的老師們，龔老師、陳老師、沈川洲老師及前來參與口試的陳明德老師和陳惠芬老師，謝謝在不同時期遇到的各位老師們，給予學生寶貴的指導和建議，感謝！

接下來依序謝謝這兩年給予我關懷的人們，感謝品彰學長許許多多的幫助、謝謝成大的雪姿姐和阿環姐對我的鼓勵和關愛！感謝最先認識也最感心的加倍佳、李小班及各位學弟妹們！感謝 317 研究室的好室友，晉平、皓正、建儒大大，我都把你們當作偶像，非常、超級感謝不管在平時生活、實驗上還有出地調等等各種時候給我的協助，大感謝！感謝在這裡的知心麻吉同學，黃魚琚、林頭大和簡武雄，不管你們承不承認、反正我是打上來了，有妳們讓我能不斷地笑呵呵、一直笑！還有感謝從碩一就和我陪伴實驗室的助理昱璇！

感謝在二年級來相伴的阿彰、大綸和誼真，讓我在研究室能夠更認真地搞笑！感謝實驗室的光輝兄、岳明學長和良奇學長，在這段時間可以跟諸位學長相處真的非常棒！感謝施施姊，再忙、也要喝一杯阿水，謝謝妳讓我在餐廳也很愉快！特別感謝蘇怡君小姐，在這裡成為我的最佳搭檔，不管你承不承認，反正你要相信我最真誠的感謝！

最後，還有崇哲、邵又和阿凱這幾位，因為篇幅不夠說、多說變囉嗦，是兄弟不用說了！對於以上還有全部在這裡認識的人們，能在這兩年遇見而跟大家相處，是我上輩子修來的福氣、這輩子作夢也夢不到的好運氣！祝大家幸福。

摘要



本研究報導 2005 年採自位於中國甘肅省武都區的黃爺洞(33°35'N, 105°07'E)三根石筍的碳氧同位素記錄。三根石筍分別為 HY05-2 (長 14 cm)、HY05-3 (長 23.6 cm) 和 HY05-4 (長 19 cm)。經過鈾系定年，三根石筍生長範圍都在全新世以內。石筍在老於 1400 年前皆有沉積間斷，而 1400 年以來三根石筍的沉積都是連續的。因此，本文著重討論這個石筍連續沉積期間的同位素記錄。在這段時間內，HY05-2，HY05-3 和 HY05-4 分別有 340 個，695 個和 468 個樣品進行了碳氧同位素分析。

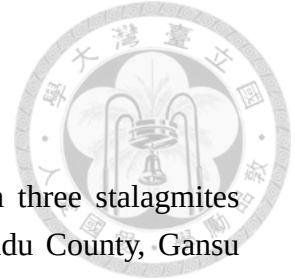
首先，在年齡的誤差範圍內三根石筍的氧同位素曲線有較好的重合，顯示石筍氧同位素可以反映當地降水的變化：氧同位素偏輕的時段，表示季風降雨強度較強；氧同位素偏重的時段，指示氣候較乾旱。其次，在較長時間尺度上(>50 年)碳氧同位素的變化呈現相同的趨勢，說明植被受氣候的影響很大，即濕潤氣候下(氧同位素值偏輕)，植物較發育，植被密度增加，C3/C4 植物種類的比例增加，石筍碳同位素值變輕。黃爺洞石筍記錄顯示：西元 600~1000 年間，氧同位素值由平均值逐漸變重，碳同位素值比平均值重大約 1‰，指示氣候變乾旱，植被發育較差。在西元 1100~1200 年，1300~1360 年，1420~1500 年，1600~1780 年和 1850~1900 年這幾個時間段內，氧同位素值都比平均值偏輕，指示這幾個時間段內的氣候相對濕潤，而在這些時間段之間，氣候變乾旱。除了在西元 1200-1300 年之間，碳同位素在西元 1000 年以來的變化基本上與氧同位素一致，而且比西元 1000 年前的碳同位素值要輕。這個西元 1000 年前後的碳同位素值的變化，也可能包含人類活動對植被的影響，如種植農作物等。碳同位素在宋末元初期間不隨氧同位素變重而保持較輕，可能是人口大量往南方遷移，人類活動的影響大幅減少，植物與生態得以恢復。在西元 1360~1410 年，1580~1600 年，1790~1840 年有三次碳同位素明顯變重的短暫時期。這三個碳氧同位素同時變重的時期基本

上可以與萬象洞石筍氧同位素記錄對應，但並不能說明氣候變化是導致中國朝代更替的主因。

對比黃爺洞、萬象洞和大禹洞的石筍記錄、以及青海湖沉積物岩心中碳氮比（指示降雨）記錄和太陽輻照記錄，在許多事件上呈現一致，但也存在不少差異。在進入小冰期第二階段(西元 1550 年至 1850 年)的時候，黃爺洞和大禹洞以及青海湖三個地方的記錄都指示降雨相對增強，與萬象洞記錄相反。黃爺洞氧同位素值變得最輕的西元 1100~1200 年，剛好對應於太陽黑子活動的 Medieval Maximum，同地區的萬象洞與太陽黑子活動在長時間尺度上變化極為相似，表明太陽黑子活動對東亞夏季風的強弱有明顯的影響。

關鍵字：中國甘肅、石筍、碳氧同位素、降雨、植被

Abstract



This study presents carbon and oxygen isotopic records from three stalagmites collected in 2005 from Huangye cave (33°35'N, 105°07'E) in Wudu County, Gansu Province, China. Three stalagmites with lengths of 14 cm for HY05-2, 23.6 cm for HY05-3, and 19 cm for HY05-4, have been dated with ICP-MS $^{230}\text{Th}/\text{U}$ in HISPEC at NTU. The $^{230}\text{Th}/\text{U}$ dating result shows that the three stalagmites grow within Holocene and contain hiatuses in the parts of older than age 1400 years. However, the three stalagmites had grown continuously during the last 1400 years, for which we focus on. In the 1400-yr part, there are 340, 695 and 468 isotope data sets in HY05-2, HY05-3 and HY05-4, respectively.

First of all, within dating uncertainties the three stalagmite $\delta^{18}\text{O}$ records are comparable each other, suggesting that the $\delta^{18}\text{O}$ records of the stalagmites is a reliable paleoclimate proxy. Periods with lighter $\delta^{18}\text{O}$ values reflect wet climate, and vice versa. Secondly, the $\delta^{13}\text{C}$ co-varied with the $\delta^{18}\text{O}$ on longer time scale (>50 years), demonstrating climatic control on vegetation change with wet climates (lighter $\delta^{18}\text{O}$) resulting in better vegetation coverage, and/or rise in vegetation C3/C4 ratio that gives lighter $\delta^{13}\text{C}$. Huangye Cave record shows that during AD 600-1000, $\delta^{18}\text{O}$ values gradually became heavier from the average value and $\delta^{13}\text{C}$ values were heavier than its average about 1‰, reflecting climate were drier and poor vegetation coverage. During the intervals of AD 1100-1200, AD 1300-1360, AD 1420-1500, AD 1600-1780 and AD 1850-1900, the $\delta^{18}\text{O}$ values are lighter than the average, illustrating relatively wet climates. Dry climates occurred among the intervals between the above these time periods. Except the interval of AD 1200-1300, the $\delta^{13}\text{C}$ record basically followed the $\delta^{18}\text{O}$ record since AD 1000 and the values are lighter than that before AD 1000. The change of $\delta^{13}\text{C}$ value before and after AD 1000 might contain the human impact on vegetation, such as crop cultivation. Diminished human impact on vegetation around the cave might occur as the population decrease during the late Song Dynasty and early Yuan Dynasty, shown by relatively light $\delta^{13}\text{C}$ values and not following the $\delta^{18}\text{O}$ trend. The $\delta^{13}\text{C}$ record was obviously heavier during AD 1360-1410, AD1580-1600 and AD 1790-1840. These heavier $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{18}\text{O}$ periods generally agree with Wanxiang Cave stalagmite $\delta^{18}\text{O}$ record. However, these correlations do not support that climate was the main cause of Chinese dynastic change.

Comparisons among stalagmites records (Huangye Cave, Wanxiang Cave, Dayu Cave), C/N ratio of cores in Lake Qinghai, and solar irradiance record reveal consistence in many events, but many discrepancies also exist. Unlike Wanxiang Cave

record, the records from Huangye Cave , Dayu Cave, Lake Qinghai indicate that relatively wet climates were prevailed during the 2nd half of the Little Ice Age. The $\delta^{18}\text{O}$ of the Huangye cave record has lightest values during AD 1100-1200 which were corresponding to the Medieval Maximum of sunspot activity. In the same region, Wanxiang Cave record shows the similar trend with sunspot activity on long time scale, demonstrating that solar forcing is one of influential role in modulating variability of Asian monsoon strength.

Keyword: Gansu Province, Stalagmite, Stable isotopes, Paleoclimate, Vegetation

目錄



口試委員會審定書.....	i
誌謝.....	ii
摘要.....	iii
Abstract.....	v
目錄.....	vii
圖目錄.....	ix
表目錄.....	xi
第一章 緒論	1
1.1 亞洲季風.....	1
1.2 喀斯特地形.....	2
1.2.1 溶洞與洞穴碳酸鹽成因.....	3
1.2.2 洞穴碳酸鹽應用於古氣候研究.....	4
1.3 洞穴石筍穩定同位素的理論基礎.....	5
1.3.1 同位素基本原理.....	5
1.3.2 石筍氧同位素基理.....	5
1.3.3 石筍碳同位素基理.....	9
1.4 前人研究.....	12
1.5 研究目的.....	13
第二章 研究區域與方法	15
2.1 研究區域地理環境.....	15
2.1.1 地理位置與氣候概況.....	17
2.1.2 黃爺洞概況.....	18
2.2 石筍樣品與方法.....	19
2.3 鈾鈷質譜定年.....	20
2.3.1 鈾系質譜定年原理.....	20
2.3.2 ICP-MS 感應耦合電漿質譜儀.....	22
2.3.3 鈾系質譜定年實驗步驟.....	25
2.4 ^{210}Pb 定年.....	26
2.4.1 ^{210}Pb 定年原理.....	26
2.4.2 ^{210}Pb 定年實驗步驟.....	28
2.5 碳氧穩定同位素分析.....	29
2.5.1 Kiel III - Delta XP plus IRMS 儀器原理.....	29
2.5.2 碳氧穩定同位素分析實驗步驟.....	30
第三章 結果	32
3.1 鈾鈷定年分析結果.....	32

3.1.1 石筍 HY05-2 鈾釷定年結果	32
3.1.2 石筍 HY05-3 鈾釷定年結果	32
3.1.3 石筍 HY05-4 鈾釷定年結果	32
3.2 石筍沉積速率計算.....	36
3.2.1 石筍 HY05-2 沉積速率	36
3.2.2 石筍 HY05-3 沉積速率	36
3.2.3 石筍 HY05-4 沉積速率	36
3.3 ^{210}Pb 定年分析結果.....	40
3.4 碳氧同位素分析結果.....	42
3.4.1 石筍 HY05-2 碳氧同位素紀錄	42
3.4.2 石筍 HY05-3 碳氧同位素紀錄	42
3.4.3 石筍 HY05-4 碳氧同位素紀錄	42
3.5 石筍 HY05-2、HY05-3、HY05-4 綜合結果	46
3.5.1 利用碳氧同位素特徵校正年齡.....	47
3.5.2 全新世以來的石筍紀錄.....	52
第四章 討論	53
4.1 黃爺洞紀錄討論.....	53
4.1.1 黃爺洞石筍氧同位素.....	53
4.1.2 黃爺洞石筍碳同位素.....	56
4.2 黃爺洞與其它紀錄指標比對.....	59
4.2.1 與青海湖和大禹洞紀錄對比.....	59
4.2.2 與萬象洞紀錄和太陽活動對比.....	61
4.3 全新世以來的紀錄.....	67
4.4 頻譜分析.....	69
第五章 結論	74
參考文獻.....	76
附錄.....	80

圖目錄



圖 1-1、亞洲季風系統影響示意圖	2
圖 1-2、甘肅隴南武都黃爺洞洞穴景觀	3
圖 1-3、溶洞與洞穴沉積物形成示意圖	4
圖 1-4、影響雨水氧同位素效應示意圖	8
圖 1-5、洞穴沉積物碳來源示意圖	11
圖 2-1、中國行政區分佈圖	15
圖 2-2、甘肅省與隴南市行政區分佈圖	16
圖 2-3、武都區各月份降雨量與氣溫變化	17
圖 2-4、黃爺洞與其它區域位置圖	18
圖 2-5、黃爺洞三根石筍樣品 (HY05-2； HY05-3； HY05-4)	20
圖 2-6、MC-ICP-MS 構造圖	23
圖 2-7、離子變焦透鏡示意圖	24
圖 2-8、二次電子倍增器偵測原理與示意圖	24
圖 2-9、沉積環境 ^{210}Pb 來源途徑示意圖	27
圖 2-10、過剩 ^{210}Pb 及支持 ^{210}Pb 示意圖	28
圖 2-11、Delta XP plus IRMS 內部構造	29
圖 2-12、同位素比值質譜儀基本構造示意圖	30
圖 2-13、Kiel III - Delta XP plus IRMS	31
圖 3-1、石筍 HY05-2 深度對 U-Th 定年年齡作圖	37
圖 3-2、石筍 HY05-3 深度對 U-Th 定年年齡作圖	38
圖 3-3、石筍 HY05-4 深度對 U-Th 定年年齡作圖	39
圖 3-4、石筍 HY05-3 深度對 ^{210}Pb 活度衰變趨勢	41
圖 3-5、石筍 HY05-2 碳氧同位素隨深度變化圖	43
圖 3-6、石筍 HY05-3 碳氧同位素隨深度變化圖	44
圖 3-7、石筍 HY05-4 碳氧同位素隨深度變化圖	45
圖 3-8、黃爺洞三根石筍樣品標記定年結果	46
圖 3-9、石筍 HY05 (三個) 1450 年內之氧同位素隨時間變化圖 (調整前)	47
圖 3-10、石筍 HY05 (三個) 1450 年內之碳氧同位素紀錄隨深度變化圖	49
圖 3-11、石筍 HY05 (三個) 1450 年內之氧同位素紀錄隨深度變化圖	50
圖 3-12、石筍 HY05 (三個) 1450 年內之氧同位素隨時間變化圖 (調整後)	51
圖 3-13、黃爺洞石筍全新世以來碳氧同位素隨時間變化圖	52
圖 4-1、黃爺洞洞穴石筍氧同位素紀錄比較	54
圖 4-2、石筍 HY05 (三個) 氧同位素去趨勢作圖	55
圖 4-3、石筍 HY05 (三個) 1450 年內之碳同位素隨時間變化圖	57
圖 4-4、石筍 HY05 (三個) 碳與氧同位素隨時間變化圖	58

圖 4-5、黃爺洞與青海湖和大禹洞紀錄比對	60
圖 4-6、黃爺洞與萬象洞、太陽活動及青海湖紀錄比對	64
圖 4-7、黃爺洞與萬象洞、太陽活動及青海湖紀錄比對 (之二).....	65
圖 4-8、黃爺洞與萬象洞、太陽活動及青海湖紀錄比對 (之三).....	66
圖 4-9、黃爺洞與其它區域位置圖 (之二).....	67
圖 4-10、黃爺洞與和尚洞、董哥洞石筍氧同位素與日照紀錄對比	68
圖 4-11、洞穴石筍紀錄 (萬象洞；黃爺洞；大禹洞).....	70
圖 4-12、石筍 HY05-3 及 HY05-4 譜分析 (Redfit)	71
圖 4-13、洞穴石筍紀錄 (萬象洞；黃爺洞；大禹洞) 之二.....	72
圖 4-14、石筍 HY05-3 及 HY05-4 合併紀錄作譜分析 (Redfit)	73

表目錄

表 3-1、石筍 HY05-2 鈾釷定年數據.....	33
表 3-2、石筍 HY05-3 鈾釷定年數據.....	34
表 3-3、石筍 HY05-4 鈾釷定年數據.....	35
表 3-4、石筍 HY05-3 之 ^{210}Pb 放射性強度.....	41



第一章 緒論

1.1 亞洲季風

季風環流是一個大尺度且具週期性的海陸風系統。季風的成因主要是海洋和陸地的溫差，由於海洋和陸地對太陽輻射加熱或冷卻的速度不同，形成溫度上的差異。夏季時陸地上方空氣溫度升溫較快、氣溫較高，形成低壓區，當潮溼的空氣由海洋吹向陸地常會帶來豐沛的水量。冬季則相反，風由陸地吹向海洋，因此夏季季風和冬季季風在季風氣候區經常表現為雨季與旱季的氣候特徵。亞洲季風按地域可分為南亞、東亞、西北太平洋三個次季風區。南亞季風也就是印度的西南季風，範圍包括北印度洋和孟加拉灣沿岸地區。東亞季風範圍包括南海及太平洋西北沿岸地區，大致包含中國東部、朝鮮半島、日本等地區。東亞季風是影響中國氣候的重要因素之一，由於受到青藏高原的地形及其他因素的影響，東亞的季風比南亞地區來得複雜(圖 1-1)。

中國的地域位置在歐亞大陸的中緯度地區，東邊面臨海洋，境內西邊有青藏高原，因此中國地區的氣候會受到大氣環流（北極濤動、東亞季風）和海洋環流的影響。其中季風活動深深地影響著中國地區的降雨及降雨帶的移動。研究表示，在東亞夏季風較強的時期會導致華北及黃河中下游地區較為濕潤多雨，而長江中下游地區較為乾旱少雨。換言之，當東亞夏季風活動增強的時候，中國的夏季季風雨帶位置會偏北，長江流域的降雨相對偏少；而夏季風弱的時候，季風降雨帶位置會偏南。驅動季風環流的基本推動力為太陽輻射隨季節的變動，而海陸分佈是造成季風現象的基礎。另外諸如海表溫度、高原地勢和冰雪覆蓋等因素都會對季風的強度有一定程度的影響。

有各種不同的地質材料用以研究古氣候，像是樹輪、冰芯、珊瑚、石筍、黃土、湖泊及海洋沉積物和有孔蟲等等。近十來年，洞穴石筍在研究古氣候與古環境上成為熱門的材料，以下即對石筍形成的環境背景及成因做介紹。

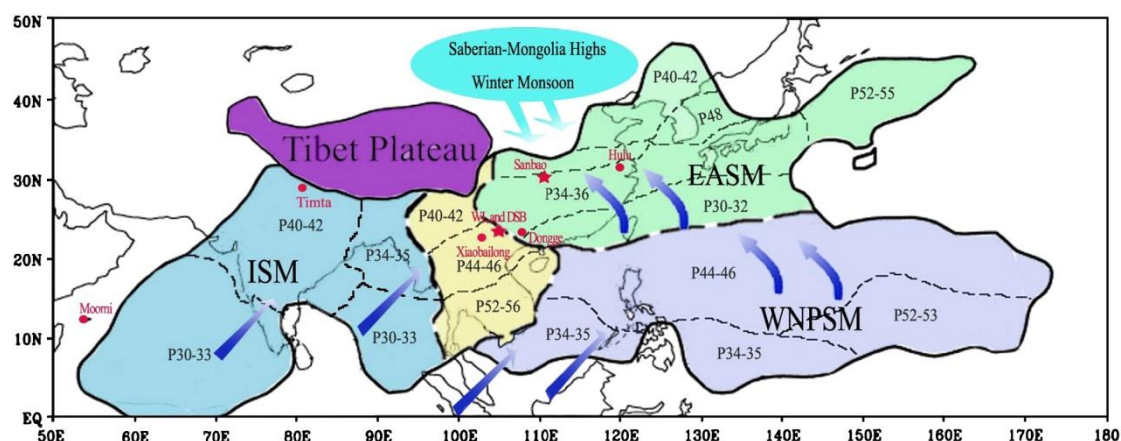


圖 1-1、亞洲季風系統影響示意圖 (Zhao et al., 2010)。

1.2 喀斯特地形

典型的喀斯特地形是碳酸鹽類岩石分佈地區的特有地貌，指的是可溶性岩石經過溶蝕等作用後形成的地表和地下形態總稱，又有溶蝕地形、石灰岩地形等別名。中國地區碳酸鹽類岩石（石灰石、白雲岩、石膏和岩鹽等）分佈很廣，因此中國的喀斯特地貌分佈廣泛，幾乎全國各省區都有，主要分佈於廣東西部、廣西、貴州、雲南東部及四川和西藏部分地區等。地上常見孤峰、峰叢、峰林、窪地、丘陵、落水洞和乾谷等景觀；地下則有石筍、石柱、石鐘乳、鵝管、地下暗河等溶洞景觀（圖 1-2）。

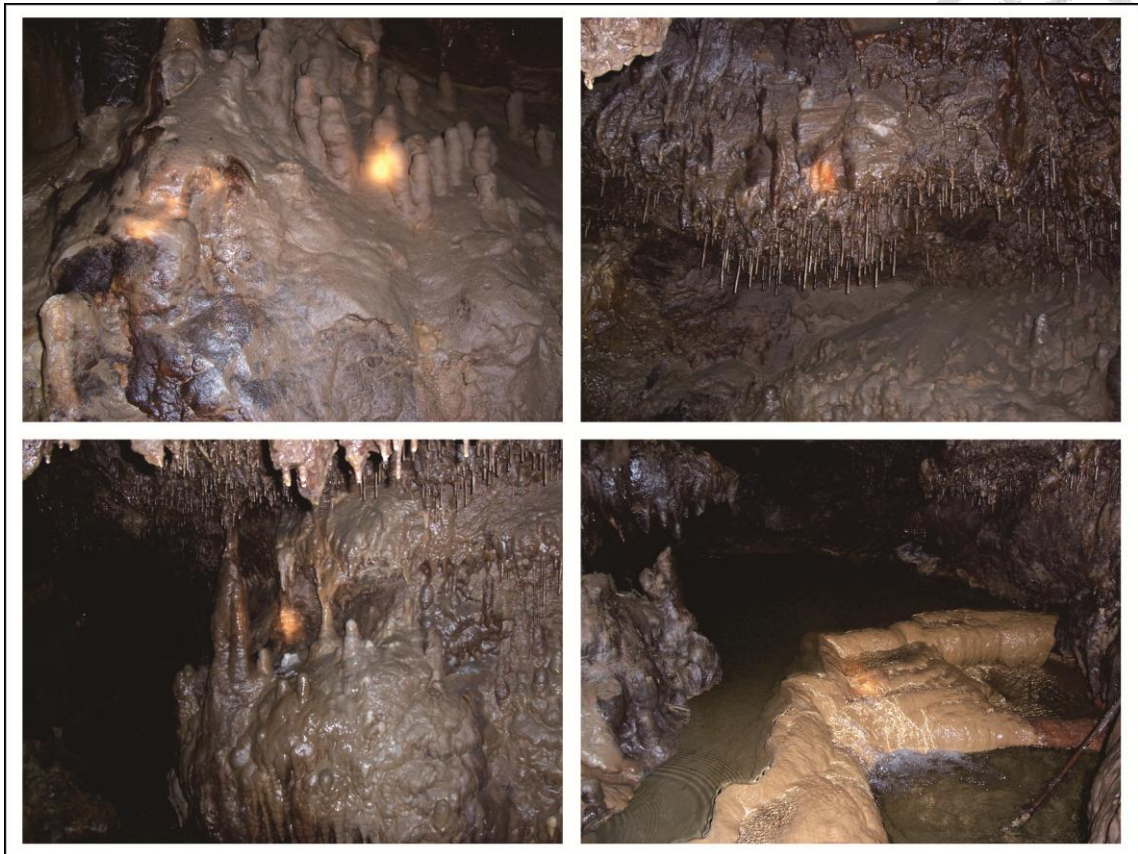
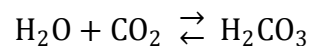


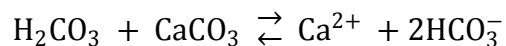
圖 1-2、甘肅隴南武都黃爺洞洞穴景觀。

1.2.1 溶洞與洞穴碳酸鹽成因

洞穴碳酸鹽沉積主要發生在石灰岩洞 (溶洞)，以下對溶洞及洞穴沉積形成過程作說明 (圖 1-3)。當降雨到達地表後會進入土壤，土壤中的空氣與大氣組成差異很大，由於植物和微生物活動會在土壤中行呼吸作用，使得土壤中二氧化碳的濃度比大氣高出許多。當降水進入土壤便會溶解較多的 CO_2 而呈弱酸性 (如下式)。



弱酸性的水繼續往地下流滲遇到可溶性岩石 (石灰岩)，會溶蝕周圍的碳酸鹽成為富含鈣離子與碳酸氫根的溶液 (如下式)。



當溶解 CaCO_3 的溶液流出岩層、進入洞穴時便會因蒸發和二氧化碳逸氣作用形

成碳酸鈣沉澱 (如下式)。可分為兩種過程：一為蒸發作用導致溶液中的鈣離子過飽和而析出沉澱。二為過飽和水溶液，因為流到洞穴、壓力降低，溶液中 CO_2 逸出而沉澱出碳酸鹽。



在利用洞穴沉積進行古氣候研究的情況下，一般在蒸發條件下沉澱的洞穴碳酸鹽不適於進行研究，希望條件像是在 CO_2 逸氣過程導致緩慢沉澱的碳酸鹽，因為沉澱的過程要慢才有利於其同位素達到平衡。

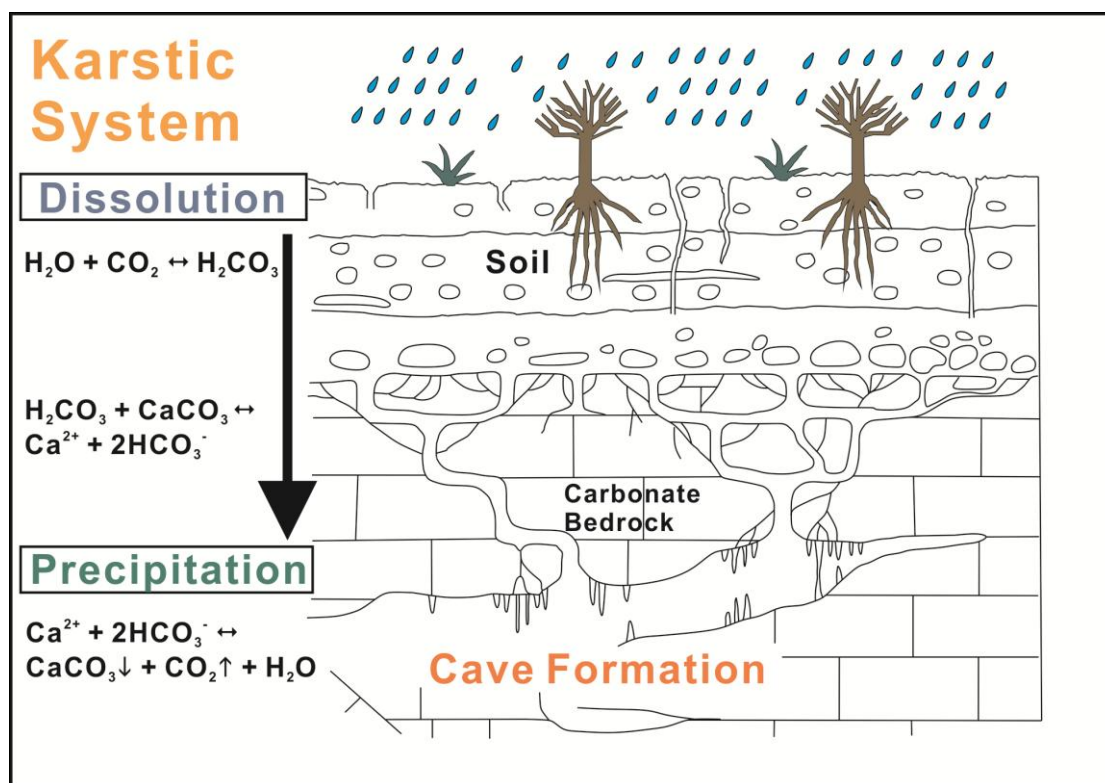


圖 1-3、溶洞與洞穴沉積物形成示意圖。

1.2.2 洞穴碳酸鹽應用於古氣候研究

在洞穴形成的許多碳酸鹽沉積類型中，石筍以及鵝管較適合作為研究古氣候的材料。作為研究材料必須考慮樣品的適宜性，像是受到快速的蒸發或風的擾動產生動力學分餾，會影響洞穴滴水與碳酸鈣沉澱之間同位素分餾的平衡。

因此選擇洞穴及採樣地點時，最好符合相對濕度高 (100%左右)，在洞內深部遠離洞口的位置。如此可以減少洞外的干擾，沒有顯著的空氣流動，導致洞內 CO_2 的分壓高，使得滴水的逸氣過程可以緩慢地進行。在穩定的洞穴環境中，洞穴深部溫度基本上為恆定狀態 (接近於地表年均溫)，一年四季不會隨季節改變太大，亦可減少溫度變化造成的分餾影響。

1.3 洞穴石筍穩定同位素的理論基礎

在洞穴石筍中，碳氧穩定同位素是最重要的氣候代用指標，不少地區利用石筍穩定同位素重建了不同時間尺度的古氣候訊息，以下對同位素的分餾以及碳氧穩定同位素的原理和氣候意義作介紹。

1.3.1 同位素基本原理

同位素是指具有相同的原子序但不同質量數 (質子數相同，中子數不同) 的核素。當受到熱力學或動力學的效應，會產生物理或化學反應過程。輕的同位素 (如 ^{16}O)，化學鍵會比重的同位素 (如 ^{18}O) 容易斷開；同位素分餾的主要規則為較重的同位素傾向於留在較穩定的結構中，以下列出影響同位素分餾的因素：

- A. 化學鍵強度：共價鍵強度高於離子鍵，在共價鍵結中易富集重的同位素。
- B. 原子序大小：與原子序數小的結合分餾會大於與原子序數大的結合。
- C. 晶體結構影響：同位素在同質異構物中分餾會有所差異 (如石墨與鑽石)。
- D. 壓力效應：分餾和壓力成反比，當環境壓力越大，同位素分餾越小。
- E. 溫度效應：分餾和溫度成反比，當環境溫度越高，同位素分餾越小。
- F. 相態效應：較重的同位素傾向於結構較穩定的相態 (固體 > 液體 > 氣體)。

1.3.2 石筍氧同位素基理

石筍氧同位素取決於洞穴溫度和洞穴滴水的氧同位素值。首先，適宜條件下沉積的石筍碳酸鈣與滴水母液之間存在同位素平衡分餾，此平衡分餾為洞穴溫度 (滴水溫度) 的函數。此分餾在 0 至 500°C 時可用下式表示 (Friedman et al.,

1977 ; O'Neil et al., 1977) :

$$\delta^{18}\text{O}_c (\text{SMOW}) = \delta^{18}\text{O}_w (\text{SMOW}) + 2.78 \times 10^6 / (T + 273)^2 - 2.89$$

上式 $\delta^{18}\text{O}_c$ 為碳酸鈣氧同位素值； $\delta^{18}\text{O}_w$ 為與其平衡的滴水母液氧同位素值。

在 0 到 30°C 內的分餾可用一個線性方程式表述 (Li et al., 2000) :

$$\delta^{18}\text{O}_c (\text{PDB}) = 0.97\delta^{18}\text{O}_w (\text{SMOW}) - 0.2272 T (^\circ\text{C}) + 4.2712$$

氧同位素標準 SMOW 與 PDB 之間轉換如下式：

$$\delta^{18}\text{O}_c (\text{SMOW}) = 1.03086 \delta^{18}\text{O}_c (\text{PDB}) + 30.86$$

由上述式子可知道，當洞穴溫度升高/降低時，碳酸鹽的 $\delta^{18}\text{O}_c$ 值會變輕/變重。在洞穴內部的氣溫約等於當地地表的年均溫，假設在討論的時間範圍內氣溫變化很小的話所造成 $\delta^{18}\text{O}_c$ 值變化是非常小的，那麼碳酸鹽的 $\delta^{18}\text{O}_c$ 就主要取決於洞內滴水的 $\delta^{18}\text{O}_w$ 值。在同位素平衡的條件下，滴水的 $\delta^{18}\text{O}_w$ 變化基本上承襲了大氣降水的 $\delta^{18}\text{O}$ 變化，當地表水從洞頂滲入洞穴的時間較短時，滴水 $\delta^{18}\text{O}_w$ 值通常反映了地表雨水的年平均氧同位素值。而大氣降水的 $\delta^{18}\text{O}$ 值會受到水汽凝結溫度、水汽源、水汽遷移路徑及降雨量等因素控制 (圖 1-4)，包括下列幾種效應：

A. 溫度效應：學者總結在北半球大部分內陸地區的雨水 $\delta^{18}\text{O}$ 值與當地氣溫呈正比的關係，範圍由 0.1 ‰/°C 到 0.6 ‰/°C 變化不等 (Rozanski et al., 1993)。

此溫度對大氣降水 $\delta^{18}\text{O}$ 值的影響與洞穴溫度對 $\delta^{18}\text{O}_c$ — $\delta^{18}\text{O}_w$ 之間平衡分餾的影響呈相反的趨勢。

B. 緯度效應、高程效應：從遠處遷移來的降水氣團會經過多次地冷凝降雨，產生氣—液之間的同位素分餾，氣—液分餾時，重的同位素 ^{18}O 趨於液相，分餾的結果使得殘留氣團的 $\delta^{18}\text{O}$ 值變輕。所以從遠處而來的降水氣團經過多次冷凝降雨的分餾後，其 $\delta^{18}\text{O}$ 值一般會比原地地表水蒸發形成之降水氣團的 $\delta^{18}\text{O}$ 值要輕得多。緯度效應為降水氣團由低緯度往高緯度長距離遷移的過程中會持續地冷凝降雨，使得殘留氣團的 $\delta^{18}\text{O}$ 值變輕。高程效應為降水氣團遷移中遇到高地，由於上升過程中溫度與壓力的降低

導致凝結降雨，產生同位素分餾，經過高地後氣團的 $\delta^{18}\text{O}$ 值會變輕。

- C. 雨量效應：降雨量和降水氣團的 $\delta^{18}\text{O}$ 值會影響雨水的 $\delta^{18}\text{O}$ 值。雨量效應是指雨水的 $\delta^{18}\text{O}$ 值與當地的降雨量呈負相關，降雨量越大，降雨的 $\delta^{18}\text{O}$ 值會越輕（越負）。

在東亞季風氣候區，對於石筍氧同位素的解釋仍存在著多解性，一般認為，石筍的 $\delta^{18}\text{O}$ 指示夏季風的強度或是季風降雨的變化。中國季風控制區內，雨季大部分集中於夏季，而主要夏季的降雨氣團來源是從太平洋及印度洋過去的，從海洋過去且長距離遷移的氣團導致其雨水的氧同位素值比較輕，並且降雨量高的話也會使雨水的氧同位素值比較輕。例如對中國北方地區而言，夏季風強盛時，由海上過去的氣團強度增強，並且降雨量增加，雨水的 $\delta^{18}\text{O}$ 值變輕，換言之，石筍 $\delta^{18}\text{O}$ 值變化反映了該地區降雨量受夏季風影響的變化。目前來看，季風影響地區內生長的石筍，其 $\delta^{18}\text{O}$ 值主要紀錄的是氣團的來源 (source) 和降雨量變化的信息，而在長時間尺度下才能看出溫度的影響；不同的是，在非季風區的洞穴研究，可得到石筍氧同位素主要紀錄溫度變化的信息，例如北美和法國等的溫帶和高緯度地帶或地中海式氣候區的洞穴石筍，其 $\delta^{18}\text{O}$ 值主要反映了溫度的變化。

對以上石筍氧同位素的意義簡述，洞穴滴水的 $\delta^{18}\text{O}_w$ 變化基本上承襲了大氣降水的 $\delta^{18}\text{O}$ 變化，通常反映地表雨水的年平均氧同位素值。在季風氣候區，降雨的 $\delta^{18}\text{O}$ 值會受到降雨量效應的影響（雨量越大，降雨的 $\delta^{18}\text{O}$ 值會越輕），所以我們可以用氧同位素去關連降雨的強度。並且一般典型中國季風氣候區域內的降雨主要為夏季風所帶來的，因此石筍氧同位素的變化常作為季風降雨或季風強度的代用指標。

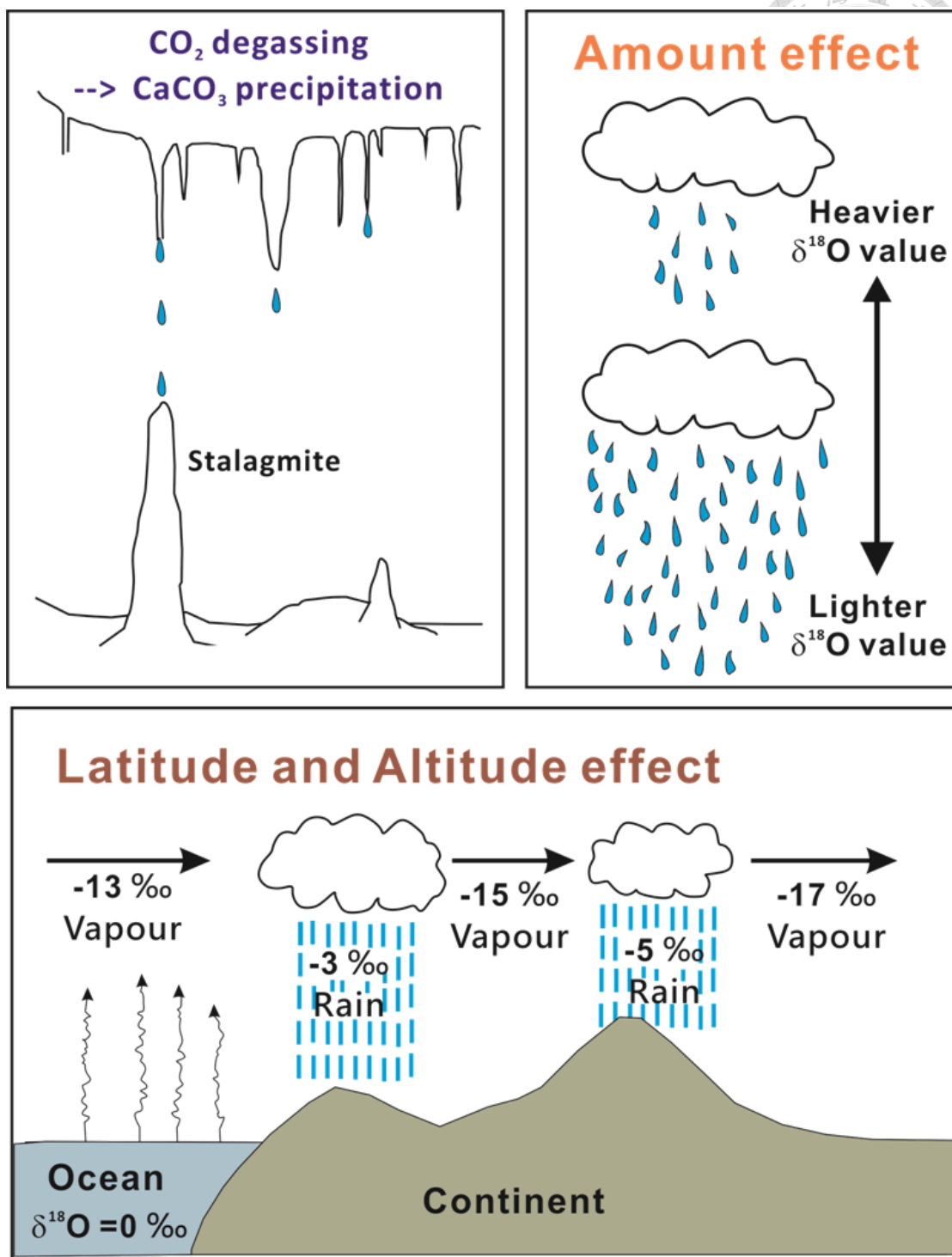


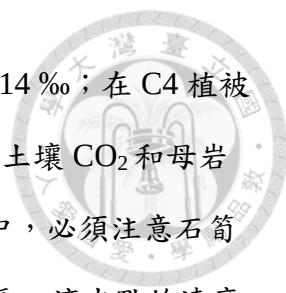
圖 1-4、影響雨水氧同位素效應示意圖。洞穴滴水繼承大氣降水的 $\delta^{18}\text{O}$ 變化，而降雨的 $\delta^{18}\text{O}$ 值會受到水汽源、水汽遷移過程中的降水分餾、雨量效應等因素影響。



1.3.3 石筍碳同位素基理

岩溶系統中碳同位素的變化較為複雜，在 70 年代即有學者系統性地說明了影響洞穴石筍 $\delta^{13}\text{C}$ 的來源、控制因素及同位素分餾的機制 (Hendy, 1971)，洞穴碳酸鈣的 $\delta^{13}\text{C}$ 主要取決於大氣 CO_2 、土壤中的 CO_2 及基岩溶解的碳同位素組成。在岩溶生態系統中，碳元素的運移過程是：大氣 CO_2 —植被—土壤 CO_2 —土壤水 DIC (溶解基岩)—洞穴滴水—洞穴次生化學沉積物 (Li et al., 2012)。土壤中的空氣和大氣中的空氣組成差異很大，由於植物和微生物在土壤中會進行呼吸作用，造成土壤的二氧化碳濃度比大氣中的高，大氣 CO_2 平均濃度約 380 ppm，土壤空氣中的 CO_2 濃度可達 10^4 ppm。再者，由大氣降水到洞穴滴水過程中，岩溶系統於開放體系和封閉體系不同的環境下，碳酸鈣 $\delta^{13}\text{C}$ 的變化受基岩影響的程度相差很大。開放體系下，洞穴碳酸鈣主要反映了洞穴上覆土壤 CO_2 的 $\delta^{13}\text{C}$ 值變化；而在封閉體系下，石灰岩母岩對洞穴碳酸鈣 $\delta^{13}\text{C}$ 值的貢獻可達 50%，但在自然界中大部分的岩溶系統為開放體系。因此，控制洞穴沉積碳酸鈣的 $\delta^{13}\text{C}$ 值主要受到土壤 CO_2 之 $\delta^{13}\text{C}$ 值變化和在滲流水中溶解的土壤 CO_2 與溶解母岩碳來源比例的影響 (圖 1-5)。土壤中的 CO_2 主要來自於植物的呼吸作用、微生物的分解等，其土壤 CO_2 的 $\delta^{13}\text{C}$ 值會受到上覆植被的型態及發育影響。

植物依其光合作用機制的分別可以分為三大類：C3 植物、C4 植物、CAM 植物。簡單來說，我們知道木本植物較原始，草本植物較進化，而 C3 植物較原始，C4 植物較進化，像是較原始的蕨類植物和裸子植物就沒有 C4 植物，只有較進化的草本、被子植物中才有 C4 植物。大部分農作物如水稻、小麥、棉花、大豆，蔬菜，蕨類，裸子植物及重要木本植物 (除紅杉等) 都是 C3 植物；玉米、高粱、甘蔗、黍、粟等幾種適合於高溫、強光和乾旱條件下生長的植物為 C4 植物。一般 C3 植物種類的碳同位素組成較輕，其 $\delta^{13}\text{C}$ 值為 $-22 \sim -34 \text{ ‰}$ ，平均約 -27 ‰ (VPDB)；C4 植物種類的碳同位素較重， $\delta^{13}\text{C}$ 值為 $-9 \sim -19 \text{ ‰}$ ，平均約為 -13 ‰ (VPDB)；母岩的 $\delta^{13}\text{C}$ 值一般約為 $1 \sim -2 \text{ ‰}$ 。考慮同位素平衡的條件



下，洞穴碳酸鈣沉積的 $\delta^{13}\text{C}$ 值在 C3 植被覆蓋地區約為 $-9 \sim -14\text{‰}$ ；在 C4 植被覆蓋地區約為 $-4 \sim -8\text{‰}$ ，但實際情況要視溶解在滲流水中的土壤 CO_2 和母岩 CO_2 的混合比例而有所不同。而在洞穴滴水沉積石筍的過程中，必須注意石筍的碳同位素比氧同位素更容易受到蒸發作用、滴水的快速脫氣、滴水點的速度快慢等因素影響其 $\delta^{13}\text{C}$ 值波動，在應用石筍碳同位素於古氣候研究時，需多加考慮可能造成擾動的過程。

對以上石筍碳同位素的意義簡述，石筍裡面碳的來源主要來自土壤中的二氧化碳和來自溶解石灰岩母岩。上覆地表植被的形態及發育多寡會影響土壤二氧化碳的碳同位素組成，並且溶解自土壤二氧化碳和母岩兩者的比例變動也會造成碳同位素值的變化。而如果水流的狀況是較為恆常的狀態，也就是溶解的碳酸鹽的比例是一個變化不大的值的話，就會像是一個背景值的貢獻。再者，雖然在洞穴還有上述脫氣作用或其它造成動力分餾的因素會影響，但是這些影響因素主要是在更短時間尺度上面的。因此，從長時間尺度上來看控制碳同位素的變化主要因素為植被的變化，碳同位素輕的方向指示植被比較發育或 C3 植物比例比較高；碳同位素往重的方向則是相反，植被較不發育。植被不發育可能有兩種情況，一個是氣候的原因，另外一個還有人類活動的影響，例如人住進來將森林破壞掉了，植被情況也就變差，所以對碳同位素的變化來說，既包含自然的因素，也可能包含人類的因素。

由以上對石筍碳氧同位素的說明，可以知道在季風氣候區，石筍氧同位素紀錄主要指示降雨量變化的氣候乾濕情況；石筍碳同位素紀錄則主要指示當地植被環境的情況（植被發育、密度及 C3/C4 植物種類的比例變化），間接地提供了連結氣候的信息。

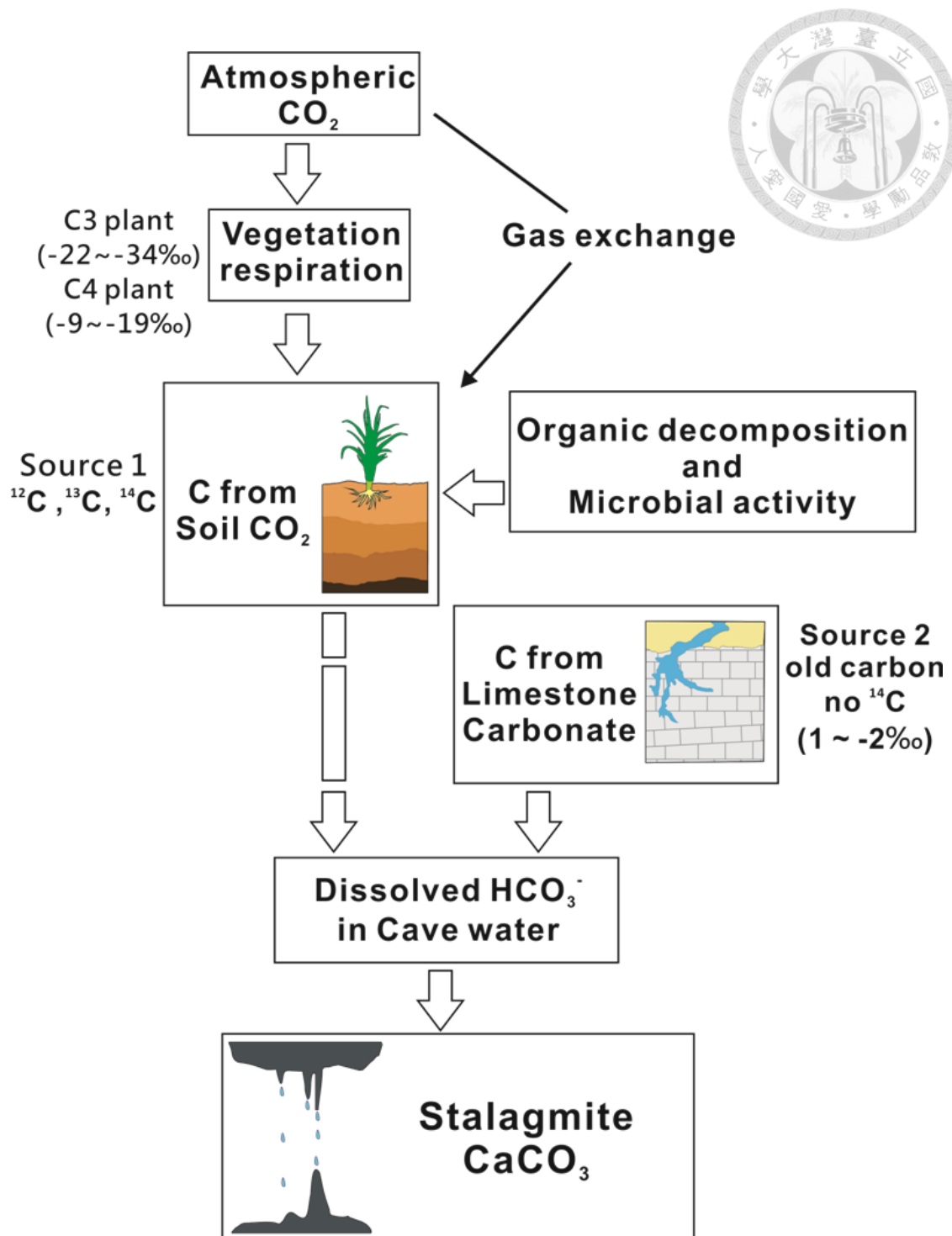


圖 1-5、洞穴沉積物碳來源示意圖。沉積石筍的洞穴滲流水溶解 HCO_3^- 之碳來源

主要有土壤中 CO_2 和來自溶解石灰岩圍岩的碳貢獻。

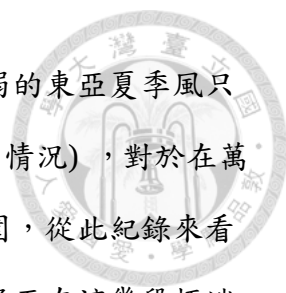


1.4 前人研究

在萬象洞的研究包含 1810 年以來的石筍氧同位素紀錄 (Zhang et al., 2008)。學者將萬象洞石筍 (WX42B) $\delta^{18}\text{O}$ 紀錄作為季風變化的代用指標，並與降雨和隴西歷史乾濕紀錄比對，且進一步將石筍 $\delta^{18}\text{O}$ 紀錄與其它紀錄進行比對 (阿爾卑斯山冰川變化、太陽活動變化、中國及北半球溫度、石花洞及董哥洞紀錄、北大西洋冰漂指標、蘇格蘭石筍及其它季風指數)。學者提出石筍紀錄指示季風強弱的變化與中國朝代興衰的關聯性，舉出三個石筍氧同位素偏重代表弱夏季風的時期，指示相對乾旱的氣候，對應於唐、元、明朝代的衰亡。邏輯就是氧同位素偏重指示夏季風偏弱，季風弱造成降雨減少，乾旱的氣候就導致社會不穩定，因而氣候是引起朝代變更的關鍵因素。而氧同位素偏輕的北宋強夏季風時期 (NSSMP) 促成稻米耕作、人口增加，穩定北宋朝代起始的發展。文中說明雖然在中國文化歷史中必然會有其它因素影響，這些關聯性顯示氣候扮演了重要的角色。

對於氣候與歷史朝代的連結，其他學者也繼而提出討論，張德二等人利用歷史資料、季風指數和氣候紀錄對萬象洞石筍研究中季風強度與中國朝代興衰的關聯性進行驗證 (Zhang et al., 2010)。文中指出夏季風的強弱變化與中國歷史朝代的興衰是可以用中國歷史事實驗證的，石筍所指示的季風強度變化與中國歷史上社會興衰的關係有許多矛盾的地方。而季風強度與不同區域降水的不同關係，說明採用單個地點的石筍紀錄代表東亞夏季風的強度變化及用來討論夏季風對社會發展的影響是不合適的。在過去西元 1500 年以來，中國東部季風區的降水在 1~10 年尺度上存在明顯的空間差異，也就是單個地點的降水紀錄不能用以代表中國大範圍的降水變化。因此，對於古季風影響中國歷史進程的問題需要小心地求證。

其他學者也對以上氣候變化連結中國朝代興衰問題的驗證進一步提出解釋 (Cheng et al., 2010)。首先對上述論點經由器測資料提出的東亞夏季風強度與降水的區域不一致性，說明提及的現象 (在中國北方、南方華南地區及東南沿海地區常可發現兩者的正相關關係，而在長江上游和中游及江淮流域一般為負相關關係。



也就是在東亞夏季風較強時會進一步影響中國北方，相反地較弱的東亞夏季風只能影響長江中游、上游和江淮流域，造成北方和南方較為乾旱的情況)，對於在萬象洞中三個弱季風時期的氧同位素值超出現代半世紀以來的範圍，從此紀錄來看在弱季風時期的氣候情況是比這些器測紀錄更為極端的。解釋降雨在這幾段極端氧同位素值中的變化是難以知道的，他們也將其關聯於北方乾旱的情況。文中舉出與歷史紀錄的一致，在崇禎大旱時影響中國廣大的地區範圍，不論降雨變化的細節，北方的確是異常的乾旱，而特別是在這幾段弱季風時期 (WMPs)，可能對應於中國範圍廣大的乾旱情況。對於東亞夏季風指標及歷史文獻所記載的氣候情況也提出適宜性和考慮誤差的問題，和對張德二等人利用氣象資料對過去 50 年統計結果所作的推論提出質疑，季風強度與變化在較早以前與現在是不同的，必須假設過去季風的變異與近 50 年來一樣才行。再者，全球暖化與人類活動對於氣候(包括季風系統)的影響，可能對近 50 年來的氣候產生異常的影響。張德二等人所探討中國文化與氣候變遷的關聯，學者也解釋他們的本意並以許多歷史舉證說明，聲明他們的原意並不是氣候牽連中國文化的每一事件，如萬象洞文章所提到的在中國文化歷史必然會有其它因素影響 (Zhang et al., 2008)。

在黃爺洞的前人研究中 (Tan et al., 2010)，學者利用三根黃爺洞的石筍氧同位素重建了 1860 年以來的季風降雨變化。將其紀錄與前述發表的萬象洞石筍紀錄和歷史文獻重建的隴西地區乾濕降雨變化及海河流域的乾濕紀錄作比對。進一步地將黃爺洞石筍紀錄的季風降雨變化和北方地區戰爭頻率作比對，發現北方地區朝代交替的戰爭高峰期幾乎都對應於降雨急劇減少或溫度降低的氣候惡劣時期。

1.5 研究目的

本研究主要利用黃爺洞石筍碳氧同位素探討研究地區過去 1450 年以來的古氣候及當地植被狀況。區分氣候相對乾旱或濕潤的時期，並與其它紀錄作比對，討論不同紀錄指示氣候狀況的一致性 or 差異。進一步地探討造成氣候變化的因素以及紀錄中所反映人類活動對植被的可能影響。而關於古季風影響中國歷史進程的

問題，如果由單個地點的古氣候紀錄反映乾濕狀況進而連結東亞季風與中國朝代變更的關係是有風險的，本文也對氣候與歷史朝代的連結進行部分的討論。





第二章 研究區域與方法

2.1 研究區域地理環境

本研究的石筍樣品是在 2005 年採自位於中國甘肅省隴南市武都區的黃爺洞 (33°35'N, 105°07'E)。甘肅省位於中國的中西部，為細長型的輪廓 (圖 2-1)，地勢自西南向東北傾斜 (東西長 1655 公里，南北寬 530 公里)，東接陝西、西連青海、南鄰四川，北靠內蒙。甘肅省地貌多樣，可大致分為各具特色的六大區域：隴南山地、隴中黃土高原、甘南高原、河西走廊、祁連山地、河西走廊以北地帶。隴南市位於甘肅省的東南邊陲，地勢大致上呈西北高、東南低，平均海拔 1000 米，全市東西長約 237 公里，南北寬約 230.5 公里。全市轄一區八縣 (圖 2-2)，分別為武都區、成縣、文縣、宕昌縣、康縣、西和縣、禮縣、徽縣、兩當縣。



圖 2-1、中國行政區分佈圖。紅色區塊為甘肅省行政區範圍。

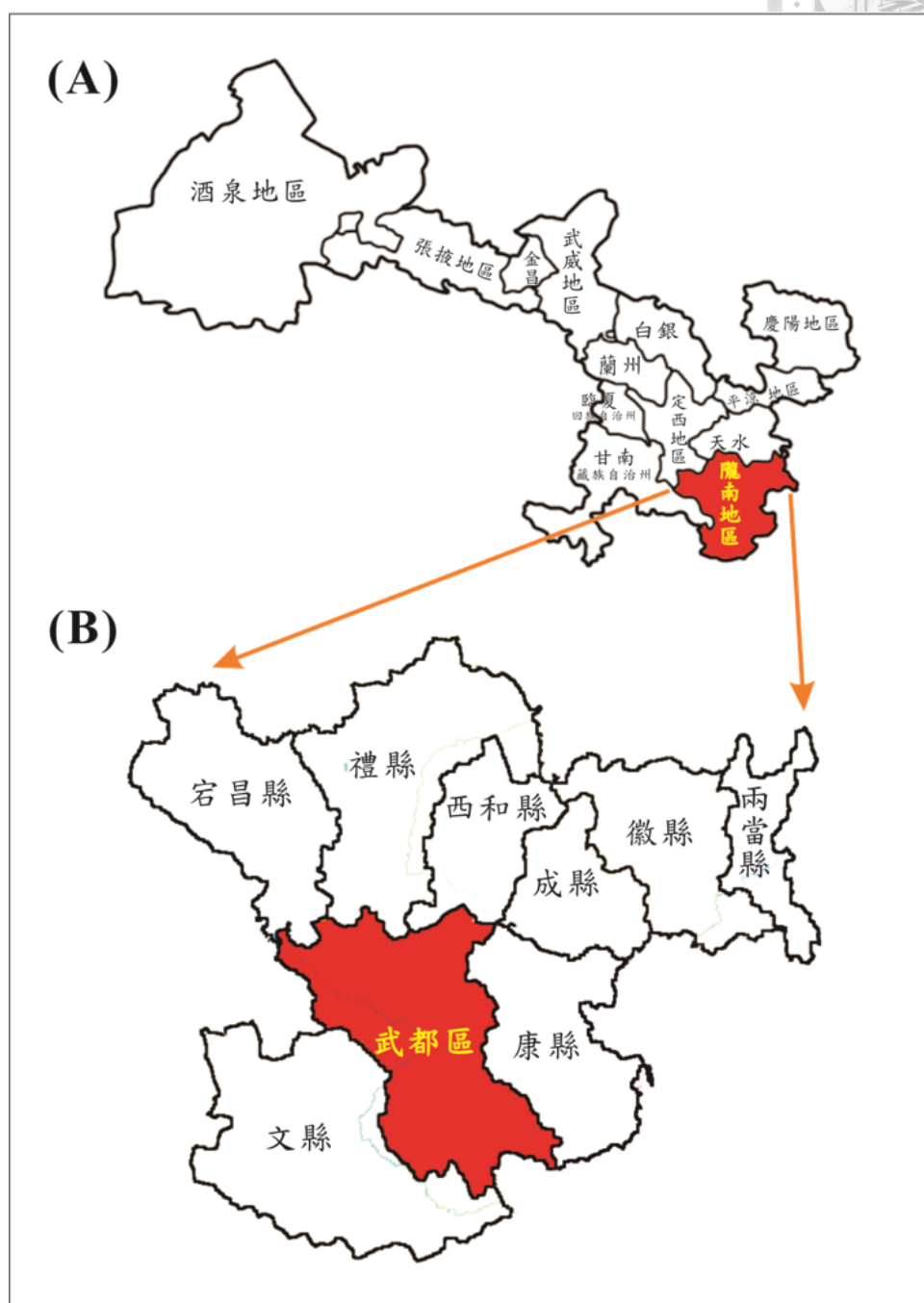


圖 2-2、甘肅省與隴南市行政區分佈圖。圖 A 為甘肅省行政區分佈，研究區域位於甘肅省隴南市 (紅色區域)。圖 B 為隴南市行政區分佈，研究區域位於隴南市武都區 (紅色區域)。

2.1.1 地理位置與氣候概況

武都區位於甘肅省東南部，為甘肅省隴南市下轄的一個市轄區，面積 4683 平方公里。武都區屬於亞熱帶半濕潤氣候，受亞洲季風系統影響，氣候垂直差異明顯，具有亞熱帶、暖溫帶、冷溫帶三種氣候特徵。據 1971-200 年資料統計 (圖 2-3)，武都地區的年均溫約 14.6 °C，年降雨量 470 mm 左右，主要降雨月份集中在 5-9 月，即夏季季風發生的時節。

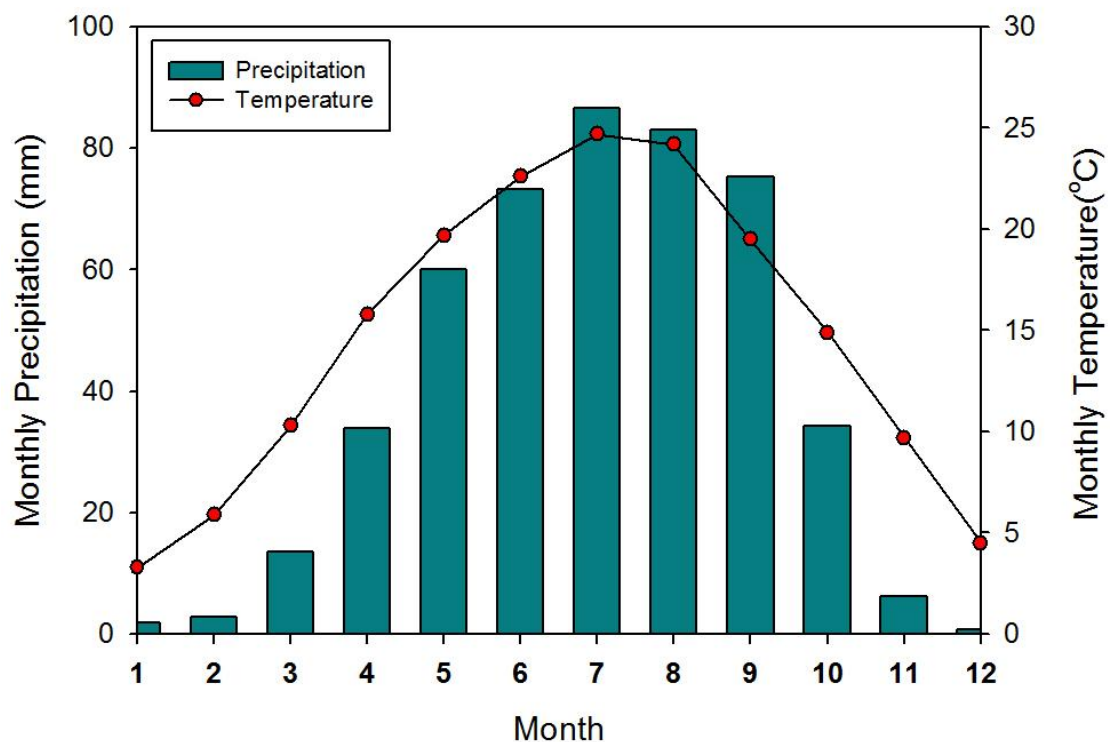


圖 2-3、武都區各月份降雨量與氣溫變化。綠色長條圖為降雨量；紅點折線圖為氣溫。數據自西元 1971-2000 年資料統計 (來源：中國天氣網)。

2.1.2 黃爺洞概況

黃爺洞 (33°35'N, 105°07'E) 位於武都境內，洞口海拔約 1650 米，處於黃土高原與青藏高原的過渡帶，接近季風影響的區域邊界 (圖 2-4)。萬象洞位於其西南方約 30 公里，東南方約 120 公里處為大禹洞，鄰近地區湖泊有青海湖，距黃爺洞約 600 公里。黃爺洞洞長約 2 公里，洞內寬約 1 到 9 米，洞內高約 0.5 到 10 米 (Zhang et al., 2005)。洞裡有石筍、鐘乳石和流石等各類次生碳酸鹽沉積物，洞穴上覆植被主要為溫帶次生林及灌木叢組成。

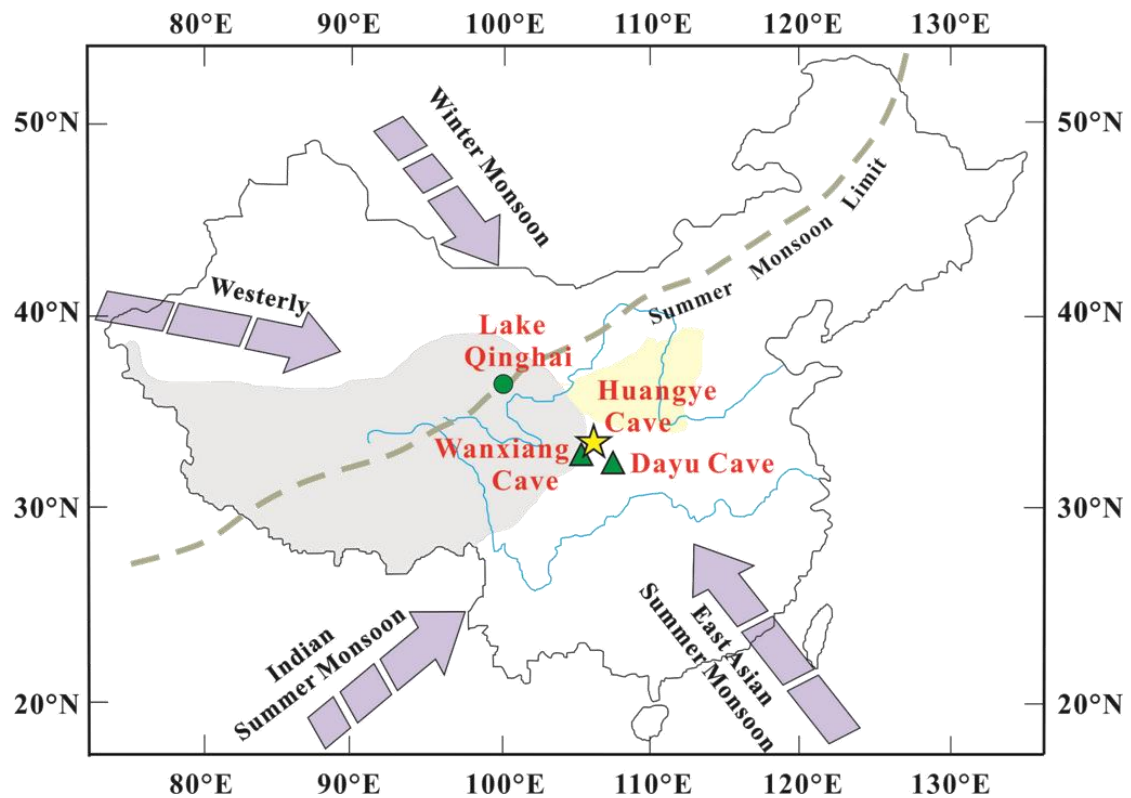


圖 2-4、黃爺洞與其它區域位置圖。黃色星號為本研究黃爺洞 (Huangye Cave) 位置，虛線標示季風影響範圍邊界。綠色三角形標示萬象洞 (Wanxiang Cave) 位置與大禹洞 (Dayu Cave) 位置；綠色圓形標示青海湖 (Lake Qinghai) 位置。



2.2 石筍樣品與方法

本研究使用三根採自黃爺洞的石筍，分別為 HY05-2 (長 14 cm)、HY05-3 (長 23.6 cm) 和 HY05-4 (長 19 cm) (圖 2-5)。石筍 HY05-2 在 10 cm 以上為較均勻的碳酸鈣沉積，觀察樣品可見在 8.7 cm 處有一層顏色差異的間斷及 11.8 cm 處左右有一層明顯黑色的沉積間斷。石筍 HY05-3 在 13 cm 以上質地較均勻且顏色透明，為較純的碳酸鈣沉積，在 13.5 cm 以下顏色多次變化並在 15~16 cm 之間有明顯黑色夾層之沉積間斷，還有在 18 cm 左右有一層顏色差異變化，上下可能非連續的沉積。石筍 HY05-4 相較於前兩根石筍，整體顏色呈現偏乳白色，除了在 11.8~12.6 cm 之間存在一層黑色的沉積間斷，其它部分目視觀察為均勻的沉積。由以上描述配合石筍照片可以觀察三根石筍皆有沉積不連續或沉積間斷的地方，其中有兩處斷點 (HY05-2 石筍的 11.8 cm 位置及 HY05-4 石筍約 11.8~12.6 cm 處的間斷)，它們的斷頭不像是自然的 (自然的斷頭會比較平滑)，初步推測較可能像是被打斷的，例如在過去有人類活動進到洞裡面的話，就可能把這個石筍破壞掉。

研究樣品主要進行以下三種儀器分析，分別為 α 能譜 ^{210}Pb 定年法、MC-ICP-MS 鈾釷定年、IRMS 碳氧同位素分析。古氣候研究最重要的就是掌握樣品的時間尺度，所以透過鈾系質譜定年及 ^{210}Pb 定年建立確切的年代，再配合碳氧同位素的分析討論結果。

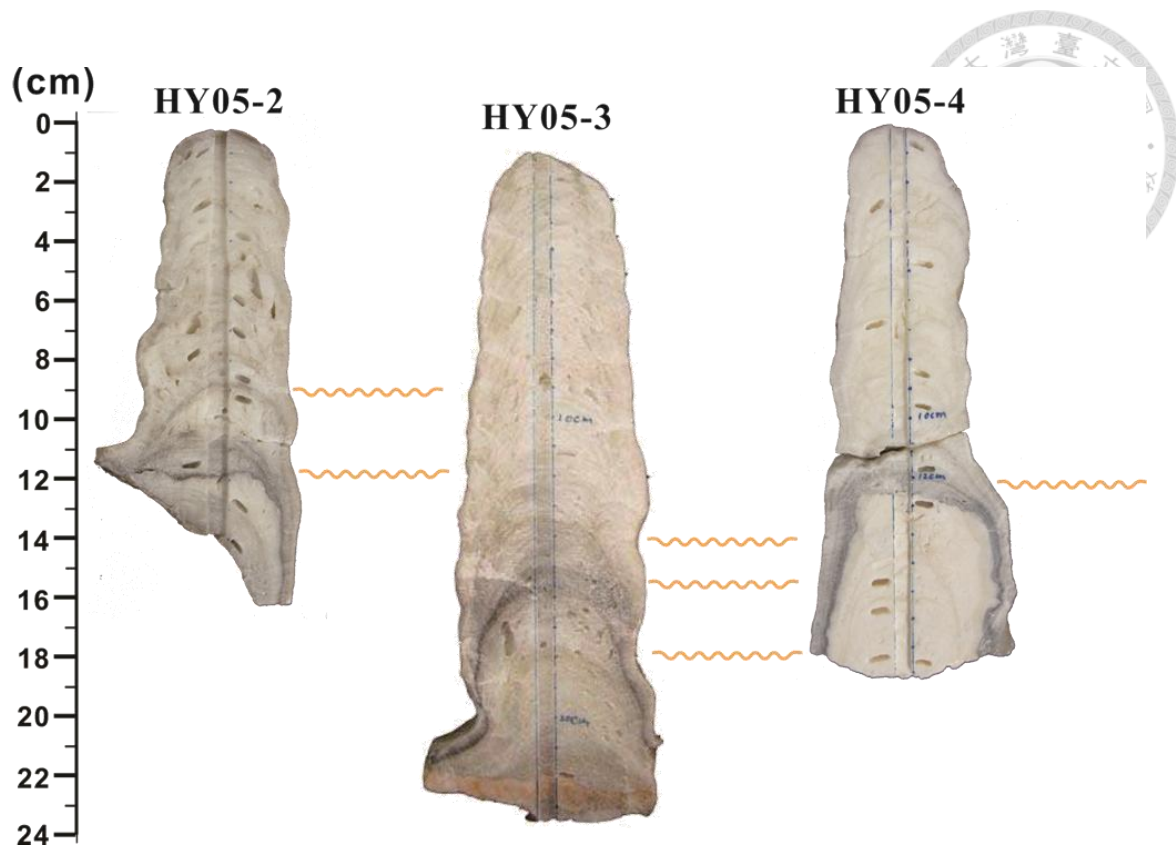


圖 2-5、黃爺洞三根石筍樣品 (HY05-2； HY05-3； HY05-4)。三根石筍長度依序為 14 cm、23.6 cm 及 19 cm。黃色波浪線標示沉積不連續或沉積間斷。

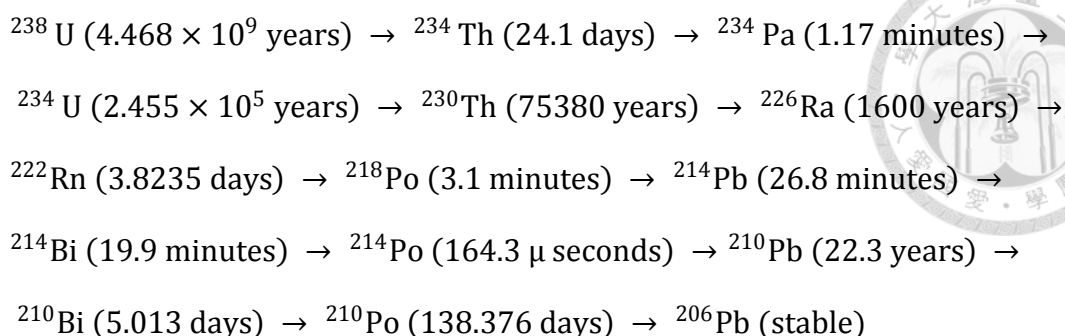
2.3 鈾鈷質譜定年

鈾系定年法為放射性定年法的一種，是利用放射性元素的含量和衰變產物的含量比例，進一步得到樣品的絕對年齡。鈾鈷定年是現在建立石筍年代最主要的定年技術，其定年的範圍跨度也很長，測量範圍能夠從現代到 60 萬年。

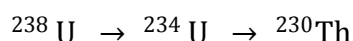
2.3.1 鈾系質譜定年原理

在前述洞穴碳酸鹽的形成過程中，滲流水會溶解土壤或岩層中微量的鈾，洞穴滴水沉積石筍後可視為一封閉系統，當中所溶解的鈾便會被封存在石筍內。由於在洞穴中受到外界的干擾小，所以鈾含量較高且純淨的石筍便能透過鈾系定年得到精確的年代。

當形成石筍沉積後，封存在石筍內的 ^{238}U 就會開始衰變，而 ^{238}U 的衰變序列如下式：



其中，鈾釷定年主要用到的衰變序列為 ^{238}U 到 ^{230}Th ，而當中 ^{234}Th 和 ^{234}Pa 的半衰期比其它元素要短許多，可以忽略不計，在幾個月的時間後就可與母核達到放射性永久平衡，故鈾釷定年的衰變可以簡化為下式：



石筍的鈾釷定年基本原理與一般岩石礦物的放射性同位素定年相同，符合下方公式：

$$N = N_0 e^{-\lambda t}$$

上式的 N 為現在放射性元素的數量； N_0 為沉積物初始放射性同位素的數量； λ 為衰變常數； t 為經過時間。而鈾釷定年又稱為鈾系不平衡法，最常使用的是 ^{230}Th - ^{234}U - ^{238}U 體系，適用於 60 萬年以內的樣品定年。

對於洞穴石筍，樣品中帶有 ^{230}Th ，其中一部分是一開始就存在的(稱為初始 ^{230}Th)，此部分 ^{230}Th 與 ^{232}Th 同時進入樣品中，因此常用初始 $^{230}\text{Th}/^{232}\text{Th}$ 比值去校正初始 ^{230}Th 。而另一部分是封閉之後由 ^{234}U 衰變形成的，所以經過 t 年後 ^{230}Th 的總放射性如下式：

$$^{230}\text{Th}_{\text{總}}^t = ^{230}\text{Th}_{\text{初}}^t + ^{230}\text{Th}_{\text{衰變}}^t \quad \text{式(1)}$$

目前一般認為自然界中 ^{234}U 相對於 ^{238}U 是過剩的，因此由 ^{234}U 衰變生成的 $^{230}\text{Th}_{\text{衰變}}$ 可分為兩部分，一部分為與 ^{238}U 平衡的 ^{234}U 衰變形成的($^{230}\text{Th}_{\text{衰變A}}$)，另一部分是相對於 ^{238}U 過剩的 ^{234}U 衰變形成的($^{230}\text{Th}_{\text{衰變B}}$)，所以式(1)可以進一步寫為下式：

$$^{230}\text{Th}_{\text{總}}^t = ^{230}\text{Th}_{\text{初}}^t + ^{230}\text{Th}_{\text{衰變 A}}^t + ^{230}\text{Th}_{\text{衰變 B}}^t \quad \text{式(2)}$$

計算經過 t 年後的各項值，首先根據前述放射性衰變公式 ($N = N_0 e^{-\lambda t}$)，由初始值($^{230}\text{Th}_{\text{初}}^0$)計算 t 年後的初始 ^{230}Th 的值($^{230}\text{Th}_{\text{初}}^t$)，如下式：

$$^{230}\text{Th}_{\text{初}}^t = ^{230}\text{Th}_{\text{初}}^0 e^{-\lambda_{230} t} \quad \text{式(3)}$$

第二，與 ^{238}U 平衡的 ^{234}U 衰變生成的($^{230}\text{Th}_{\text{衰變 A}}^t$)如下式：

$$^{230}\text{Th}_{\text{衰變 A}}^t = (^{238}\text{U}^t) \frac{\lambda_{230}}{\lambda_{230} - \lambda_{238}} (1 - e^{-(\lambda_{230} - \lambda_{238})t})$$

由於 λ_{238} 遠遠小於 λ_{230} ，可以忽略不計，因此可簡化為下式：

$$^{230}\text{Th}_{\text{衰變 A}}^t = ^{238}\text{U}^t (1 - e^{-\lambda_{230} t}) \quad \text{式(4)}$$

第三，過剩的 ^{234}U 衰變生成的($^{230}\text{Th}_{\text{衰變 B}}^t$)如下式：

$$^{230}\text{Th}_{\text{衰變 B}}^t = (^{234}\text{U}^t - ^{238}\text{U}^t) \frac{\lambda_{230}}{\lambda_{230} - \lambda_{234}} (1 - e^{-(\lambda_{230} - \lambda_{234})t}) \quad \text{式(5)}$$

因此將式(3)、(4)、(5)代回式(2)，可得樣品封閉經過 t 年以後 ^{230}Th 的放射性($^{230}\text{Th}_{\text{總}}^t$)如下式：

$$\begin{aligned} ^{230}\text{Th}_{\text{總}}^t &= ^{230}\text{Th}_{\text{初}}^t + ^{230}\text{Th}_{\text{衰變 A}}^t + ^{230}\text{Th}_{\text{衰變 B}}^t \\ &= ^{230}\text{Th}_{\text{初}}^0 e^{-\lambda_{230} t} + ^{238}\text{U}^t (1 - e^{-\lambda_{230} t}) \\ &\quad + (^{234}\text{U}^t - ^{238}\text{U}^t) \frac{\lambda_{230}}{\lambda_{230} - \lambda_{234}} (1 - e^{-(\lambda_{230} - \lambda_{234})t}) \end{aligned}$$

此式即為 ^{230}Th - ^{234}U - ^{238}U 體系定年法的通式。

2.3.2 ICP-MS 感應耦合電漿質譜儀

本研究鈾釷定年實驗感謝台大地質系沈川洲老師實驗室的幫助，利用 MC-ICP-MS 進行測量。ICP-MS (Inductively coupled plasma mass spectrometry) 為結合扇形磁場與多接收器陣列的儀器 (圖 2-6)。

首先，ICP 離子源具有強大的離子化效果，可以產生很多的離子使接收器得到較強的訊號，提高儀器的靈敏度及偵測極限。所以 ICP-MS 常用液體進樣，樣品經由霧化器作用後以氫氣為載流氣體帶入高溫電漿，達到游離化效果。

游離化的離子進入靜電分析器，藉由磁場作用使得離子因質荷比的不同而造成偏轉角度不同，最後篩選出欲測量的質荷比離子進入偵測器。離子變焦透鏡（圖 2-7）的主要目的是克服離子束內離子能量的散佈，其組成是將靜電分析器與磁鐵相結合，當離子束進入弧形的靜電分析器，其偏移量僅受控於能量大小，因此這兩種變焦透鏡組件可以透過調節而有效改變離子束的分散狀況，且達到快速質量掃描的目的。

ICP-MS 偵測系統中，點式離子接收器可分三種：二次電子倍增器 (Secondary Electron Multiplier, SEM)、法拉第杯 (Faraday Cup)、閃爍計數器。在此使用二次電子倍增器 (SEM)，SEM 是利用高速移動的離子碰撞倍增管內的電極板 (dynode) 表面，經電位差加速後放出大量二次電子（圖 2-8）。故電極板的個數將可決定訊號放大的倍數，較適合偵測離子訊號（離子強度）較低的狀況。一般 SEM 可利用計數模式與類比模式分別偵測不同離子強度的訊號（鍾全雄，2007）。

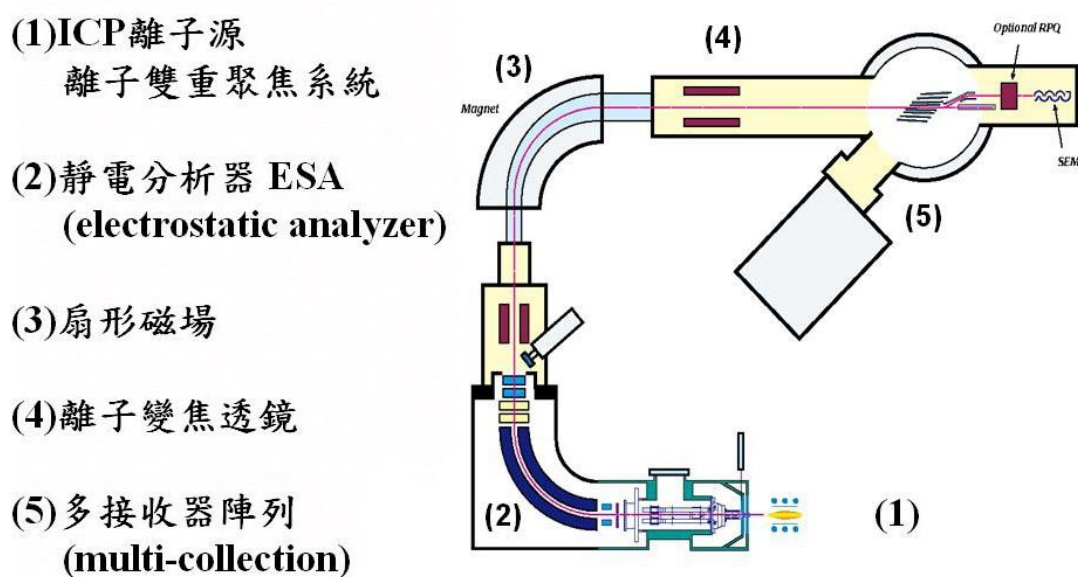


圖 2-6、MC-ICP-MS 構造圖（來源：郭子興，2009）。

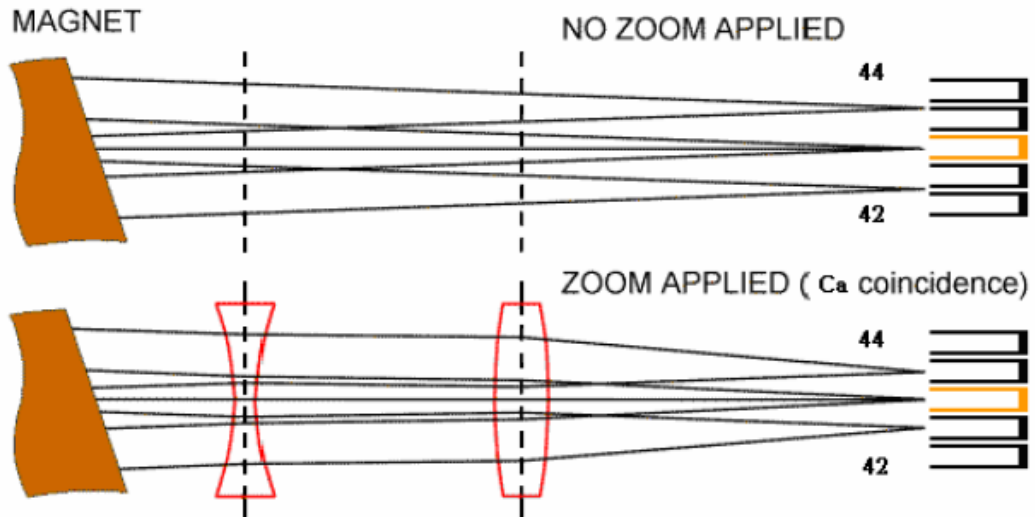


圖 2-7、離子變焦透鏡示意圖 (賴諭萱，2006)。

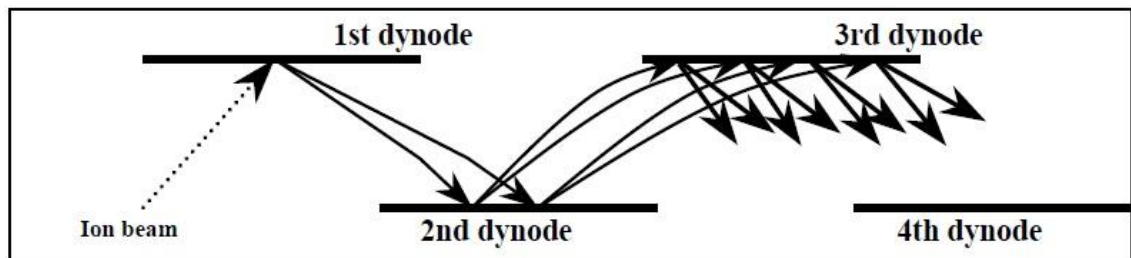


圖 2-8、二次電子倍增器偵測原理與示意圖 (鍾全雄，2007)。



2.3.3 鈾系質譜定年實驗步驟

三根石筍的定年工作分次於 2009 年、2011 年、2012 年、2013 年，皆在台灣大學地質系沈川洲老師的實驗室 (HISPEC) 完成。首先在欲定年的層位鑽取石筍粉末，一般為 0.1 到 0.2 克。

石筍 HY05-2 鑽取定年位置在距離頂部 8 mm、25.5 mm、36.5 mm、58 mm、69 mm、77 mm、85 mm、92 mm、114 mm、127 mm 和 138 mm，共 11 個定年點。石筍 HY05-3 鑽取定年位置於距離頂部 12.6 mm、18 mm、30 mm、50 mm、65.6 mm、90 mm、112 mm、126 mm、136 mm、150 mm、160.6 mm、188.6 mm、209 mm 和 219 mm，共 14 個定年點。石筍 HY05-4 鑽取定年位置在距離頂部 5 mm、8 mm、25 mm、47 mm、67 mm、83.5 mm、95 mm、117 mm、128.5 mm、156 mm、166 mm、183 mm，共 12 個定年點。

鑽好粉末後依照以下標準實驗流程進行前處理：

- (1) 將石筍樣品粉末秤重約 0.1g 置入鐵氟龍 beaker 中秤重，並加入適量的純水及 14N HNO₃ 至 CaCO₃ 粉末完全溶解。
- (2) 加入 SPIKE—人造核種標準液(²²⁹Th, ²³³U, ²³⁶U)並紀錄重量。
- (3) 加入十滴 HClO₄(去除有機物) 及一滴鐵 (FeCl₃ 溶液) 後封閉容器，並在加熱板以 180°C 加熱八到九小時 (關蓋反應)。
- (4) 開蓋蒸乾 (以 230°C 加熱樣本液至完全脫水呈塊狀)後，加入適量 2N HCl 將殘留內容物洗入底部後加入純水，至樣本完全溶解。
- (5) 等樣品冷卻後盛入離心管，先加入五滴氨水(NH₄OH)使溶液發生 U、Th 與 Fe(OH)₃ 的共沉澱(pH >7)，並觀察反應情形逐滴加入且視情況添加鐵溶液。
- (6) 將進行共沉澱過程後的樣本離心 (離心完成後捨棄水分，再加入適量純水離心，重覆三次)。
- (7) 完成離心後，殘餘之沉澱物加入十滴 14N HNO₃ 溶樣，盛入原來的鐵氟龍 beaker 中再加入兩滴 HClO₄，以 230°C 進行加熱，使樣本液脫水呈塊狀。

- 
- (8) 完成後加入一滴 14N HNO₃，以 230℃ 進行加熱脫水，並重複此步驟三次。
- (9) 完成上述程序後，加入十滴 7N HNO₃ 溶樣，準備 column (離子交換樹脂管) 後置入。
- (10) 在 column 中加入適量 7N HNO₃ 待其完全通過，並拋棄所產生液體。
- (11) 在 column 下方放置 beaker，於 column 中加入適量 6N HCl，收集 Th。
- (12) 在 column 下方放置 beaker，於 column 中加入適量純水，收集 U。
- (13) 加入兩滴 HClO₄ 至樣本液，以 230℃ 進行加熱脫水後，加入一滴 HClO₄ 並以原溫度蒸乾。
- (14) 脫水後加入一滴 14N HNO₃ 以原溫度繼續加熱至脫水，且重複此步驟三次。
- (15) 加入適量百分之一 14N HNO₃ 及 HF 混合液至樣本完全溶化，封閉容器，準備上機。

2.4 ²¹⁰Pb 定年

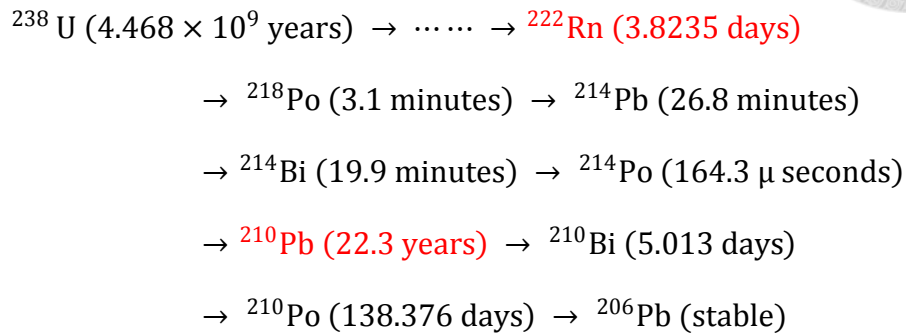
²¹⁰Pb 為鈾系衰變序列核素之一，其半衰期只有約 22.3 年，定年範圍最多至 5~6 個半衰期，約一百多年，適用於較年輕的近代樣品。由於近百年的環境或氣候變遷與我們息息相關且受到的重視，²¹⁰Pb 定年技術廣泛應用於近代的研究。

2.4.1 ²¹⁰Pb 定年原理

土壤、岩石中含有微量的 ²³⁸U，當衰變至生成 ²²²Rn，由於 ²²²Rn 是氣體，放射性核素 ²²²Rn 會逸散到大氣中，²²²Rn 在大氣快速地衰變形成 ²¹⁰Pb 隨著落塵或降與沉降到陸地，此部分的 ²¹⁰Pb 稱為 excess ²¹⁰Pb (過剩鉛)，而過剩 ²¹⁰Pb 經過約五個半衰期後，因儀器偵測極限，得到的讀數會趨近於零。此外沉積環境中有微量的 ²¹⁰Pb 稱為 supported ²¹⁰Pb (支持鉛)，來自於本身所含有的 ²³⁸U 衰變序列 (圖 2-9)。因此當樣品大於 100 年以上時將會只剩下支持 ²¹⁰Pb (圖 2-10)。²¹⁰Pb 定年主要用到的是 excess ²¹⁰Pb，與一般放射性同位素定年相同，過剩 ²¹⁰Pb 的衰變遵循以下公式：

$$N = N_0 e^{-\lambda t}$$

上式 N 為現在 excess ^{210}Pb 活度； N_0 為沉積物初時 excess ^{210}Pb 活度； λ 為 ^{210}Pb 的衰變常數 (0.0311 year^{-1})； t 為樣品的年齡。當中主要的衰變序列如下式：



^{210}Pb (22.3 y) 經由 β 以及 γ 衰變形成 ^{210}Bi (5.013 d)，而 ^{210}Bi 透過 β 衰變形成 ^{210}Po (138.376 d)，最後 ^{210}Po 透過 α 衰變形成穩定元素 ^{206}Pb 。由於 ^{210}Pb 的半衰期遠遠長於 ^{210}Bi 及 ^{210}Po ，當子元素經過 5 至 6 個半衰期便會與母元素達成平衡，因此可以透過 α 能譜測量 ^{210}Po 活度進行 ^{210}Pb 定年。

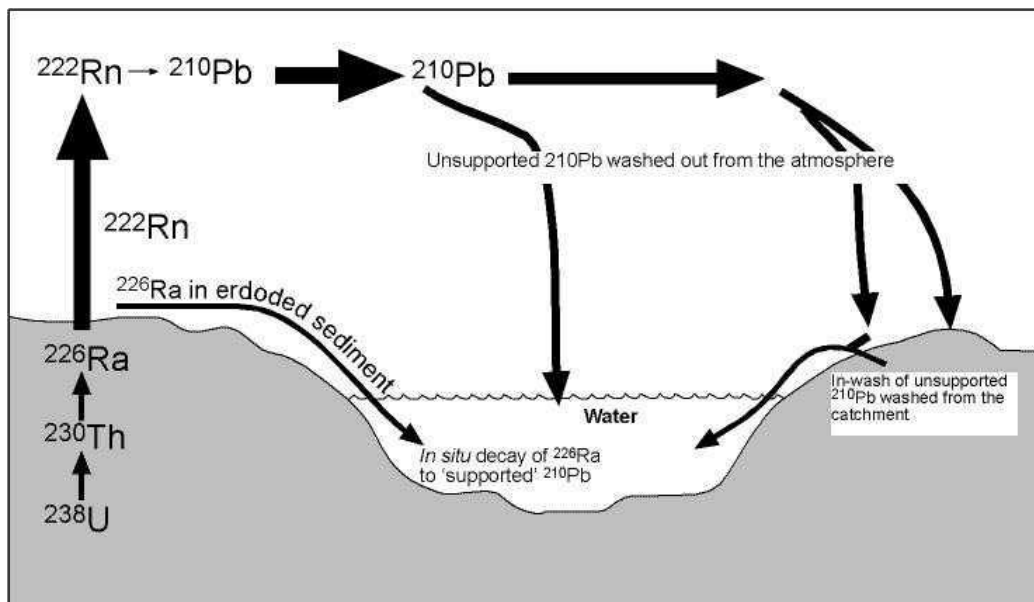


圖 2-9、沉積環境 ^{210}Pb 來源途徑示意圖 (Oldfield and Appleby, 1984)。

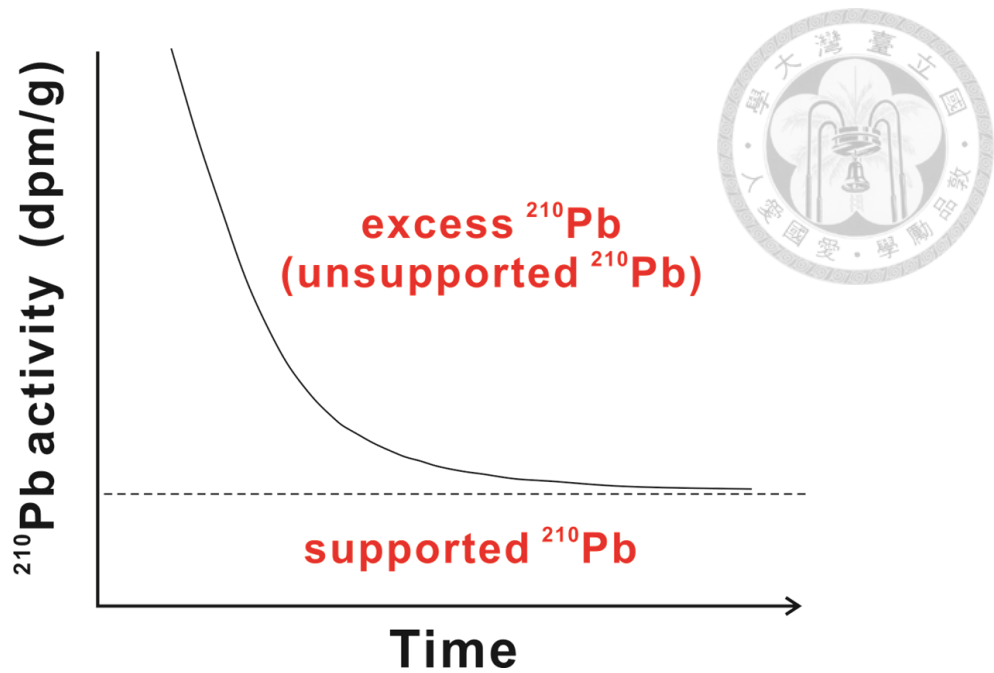


圖 2-10、過剩 ^{210}Pb 及支持 ^{210}Pb 示意圖。

2.4.2 ^{210}Pb 定年實驗步驟

^{210}Pb 定年實驗是以 ^{209}Po 作示蹤，利用 α 能譜儀測定 ^{210}Po 強度，進而得到樣品的 ^{210}Pb 放射性強度。石筍 HY05-3 在台灣大學進行 ^{210}Pb 定年，首先取樣於頂部 3 公分內以 2~5 mm 不等的間隔取樣（分別距頂部 1、3、5、8、12、15、18.5、23.5、27.5 mm），共取了 9 個樣品。取樣時需注意確保鑽取的粉末在相同的層位。其中兩個樣品鑽取約 0.45 g，其餘樣品皆為近 0.2 g。鑽好的粉末依照以下實驗流程進行前處理：

- (1) 紀錄石筍粉末重量並置入鐵氟龍 beaker。
- (2) 加入 spike 並紀錄重量，再加入 14N HNO_3 將 beaker 內的樣品全溶。
- (3) 將 beaker 放到加熱台開蓋加熱蒸乾。
- (4) 加入 5ml 不等的 1N HCl 到 beaker 中溶解樣品並倒入離心管中（重複兩次）。
- (5) 加入適量的抗壞血酸至離心管中，並使其全溶。
- (6) 將刻好標記的待鍍銀片放入離心管中（鍍面朝上，刻字朝下）。
- (7) 將離心管蓋上，置於 70~80°C 的熱水浴中，隔水加熱至少 4 小時以上。

(8) 完成後取出銀片，以去離子水沖洗乾淨，並用拭鏡紙吸乾銀片上的水分。

(9) 準備上機，以 α 能譜儀進行測量 activity。

2.5 碳氧穩定同位素分析

碳氧穩定同位素是利用石筍研究古氣候最主要的代用指標。將石筍的年代建立起來後，配合碳氧同位素變化趨勢將可對古氣候與古環境進行探討。

2.5.1 Kiel III - Delta XP plus IRMS 儀器原理

碳酸鹽進樣器－同位素比值質譜儀 (Kiel III - Delta XP plus IRMS)。Kiel III 為前置碳酸鹽進樣系統；IRMS 為同位素比值質譜儀。同位素比值質譜儀主要結構包含離子源、磁場加速和離子接收器等 (圖 2-11)，與一般質譜儀基本構造相同。本儀器使用氣體進樣系統，以純的樣品氣體或是經由載流氣體進樣，將氣體導入同位素質譜儀後，先將氣體分子引入離子化室，經由電子束使氣體分子脫去電子形成正離子。離子化後由電場加速離開。在飛行管柱中，藉由磁場的作用，將不同質荷比的離子分離，最後由三個法拉第杯收集各個不同質荷比的離子 (質量數從 44 ~ 46 的 CO_2) 並分析訊號 (圖 2-12)。

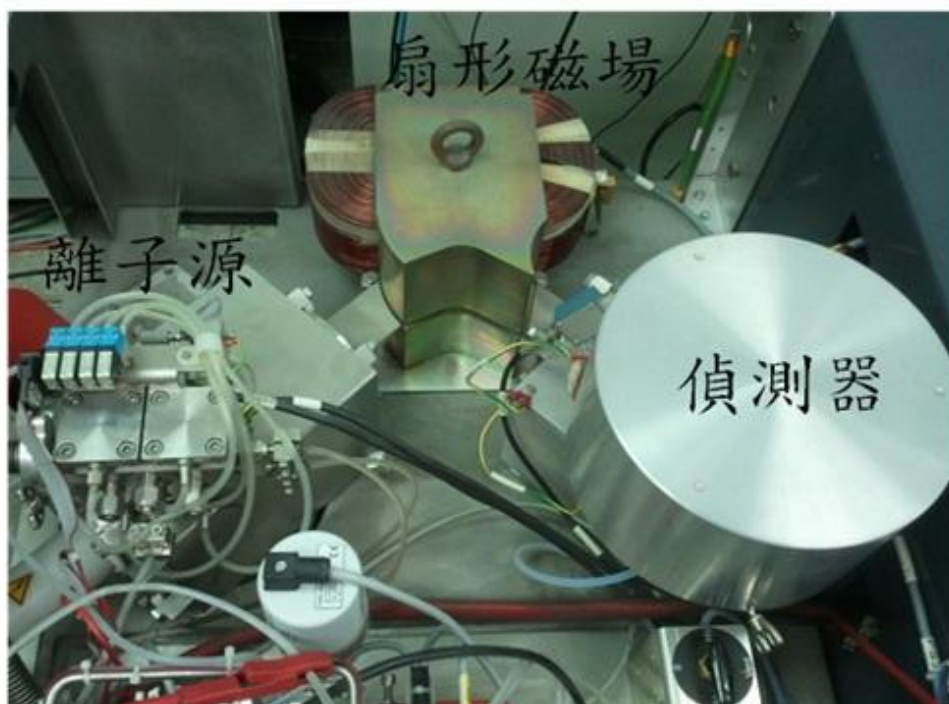


圖 2-11、Delta XP plus IRMS 內部構造 (李宗翰，2011)。

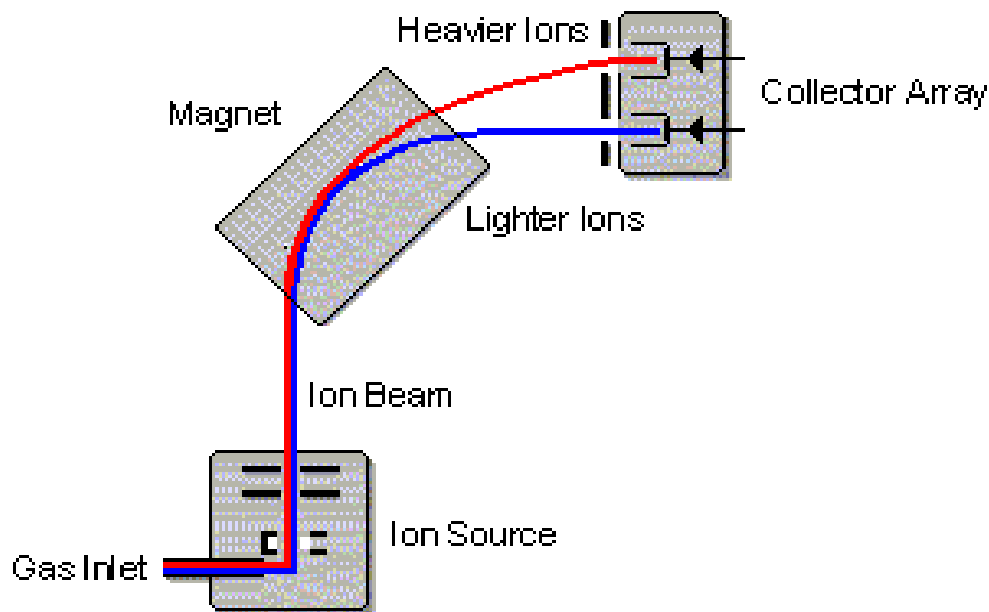


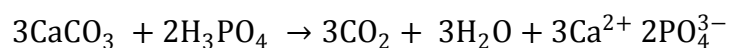
圖 2-12、同位素比值質譜儀基本構造示意圖。

2.5.2 碳氧穩定同位素分析實驗步驟

碳氧穩定同位素的樣品前處理相對較簡單，沿著生長軸每 0.2 mm 或 0.25 mm 連續鑽取粉末樣品，需配合 Micro Mill 才能精確地依照所需間隔進行高解析度取樣。

石筍 HY05-2 長度 14 cm，碳氧同位素分析從石筍頂部沿生長軸以 0.25 mm 分辨率取樣，共分析 552 個粉末樣品。石筍 HY05-3 長度 23.6 cm，由石筍頂部沿生長軸以 0.2 mm 分辨率取樣，共分析了 1180 個粉末樣品。石筍 HY05-4 長度 19 cm，由石筍頂部沿生長軸以 0.25 mm 分辨率取樣，共分析了 748 個粉末樣品。

一般取碳酸鹽粉末樣品約 10 ~ 50 μg 放入樣品試管中，再將試管依序放於自動進樣盤，接著置入 Kiel III (圖 2-13)。儀器會自動滴入磷酸與碳酸鹽類反應形成二氧化碳與水，反應溫度為 70°C，反應式如下：



酸溶的反應產物 CO_2 被抽到第一個 Trap 後，利用液態氮冷卻到 -150°C 以下，將 CO_2 及水氣凝固成固體，將氮氣、氧氣等凝固點低於 -190°C 的雜氣分離移除。之後再將溫度升至 -30°C ，此時水仍是固體，而 CO_2 為氣體被抽到第二個 Trap 並冷卻到 -150°C 成為固體封存 (CO_2 的熔點與沸點分別為 -78°C 與 -57°C)，此步驟使得 CO_2 與水分離。最後，升溫到 30°C 使 CO_2 全部揮發為氣體進入同位素比值質譜儀中分析。



圖 2-13、Kiel III - Delta XP plus IRMS。標記 A 為氣體穩定同位素比值質譜儀 (Delta XP plus Isotope Ratio Mass Spectrometer)；標記 B 為全自動碳酸鹽進樣系統 (Kiel III Carbonate Device)。

第三章 結果



3.1 鈾釷定年分析結果

經由鈾系定年結果我們得到黃爺洞三根石筍 (HY05-2；HY05-3；HY05-4) 的生長範圍都在全新世以內。

3.1.1 石筍 HY05-2 鈾釷定年結果

石筍 HY05-2 定年結果中 (表 3-1) 深度 25.5 mm、58 mm、92 mm、114 mm 和 127 mm 之定年點由於 ^{232}Th 的含量高使得定年誤差較大，所以未採用這些定年點。還有深度 8 mm 和 77 mm 定年點由於年代反序且其誤差相對較大，所以這兩點也未採用計算沉積速率。因此石筍 HY05-2 利用的數據為深度 36.5 mm、69 mm、85 mm 和 138 mm 定年點。

3.1.2 石筍 HY05-3 鈾釷定年結果

石筍 HY05-3 定年結果中 (表 3-2) 深度 65.6 mm 定年點由於年代反序，深度 219 mm 定年點由於釷含量高、誤差較大，因此這兩筆數據未採用。

3.1.3 石筍 HY05-4 鈾釷定年結果

石筍 HY05-4 定年結果中 (表 3-3) 深度 5 mm 定年點雖在合理的年代範圍，但是相對的誤差較大，所以未採用此定年數據。

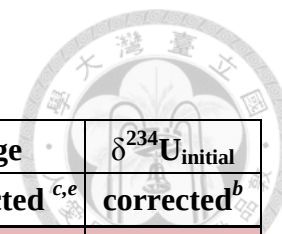


表 3-1、石筍 HY05-2 鈾釷定年數據

Sample	Depth	^{238}U	^{232}Th	$\delta^{234}\text{U}$	$[\text{}^{230}\text{Th}/\text{}^{238}\text{U}]$	$[\text{}^{230}\text{Th}/\text{}^{232}\text{Th}]$	Age	Age	$\delta^{234}\text{U}_{\text{initial}}$
ID	(mm)	ppb	ppt	measured ^a	activity ^c	ppm ^d	uncorrected	corrected ^{c,e}	corrected ^b
HY05-02-01	8	610.3 ± 1.5	1582 ± 8	848 ± 5	0.02253 ± 0.00030	143 ± 2	1338 ± 18	1301 ± 41	851 ± 5
HY2-1	25.5	663.89 ± 0.62	14498 ± 74	842.3 ± 2.0	0.02013 ± 0.00059	15.22 ± 0.45	1,199 ± 35	885 ± 161	844.4 ± 2.1
HY2-2	36.5	720.16 ± 0.77	793.8 ± 4.8	845.8 ± 2.6	0.01711 ± 0.00013	256.3 ± 2.4	1,016 ± 8	1,001 ± 11	848.2 ± 2.6
HY2-3	58	655.00 ± 0.60	65642 ± 720	825.8 ± 2.1	0.0251 ± 0.0013	4.14 ± 0.23	1,510 ± 81	50 ± 740	825.9 ± 2.7
HY2-4	69	645.74 ± 0.63	405.1 ± 4.0	828.4 ± 2.2	0.01951 ± 0.00016	513.5 ± 6.6	1,171 ± 10	1,162 ± 11	831.1 ± 2.2
HY05-02-05	77	818.6 ± 1.6	8440 ± 62	822 ± 4	0.02030 ± 0.00057	33 ± 1	1222 ± 35	1073 ± 154	825 ± 4
HY2-5	85	580.37 ± 0.62	411.9 ± 4.1	815.8 ± 2.5	0.02121 ± 0.00012	493.3 ± 5.6	1,282 ± 7	1,271 ± 9	818.7 ± 2.5
HY2-6	92	545.14 ± 0.51	141142 ± 2233	786.4 ± 2.1	0.0645 ± 0.0036	4.11 ± 0.24	4,004 ± 225	111 ± 2000	786.6 ± 4.9
HY2-7	114	650.09 ± 0.65	97975 ± 1287	799.0 ± 2.4	0.0313 ± 0.0023	3.43 ± 0.25	1,914 ± 139	-322 ± 1140	798.3 ± 3.5
HY2-8	127	621.93 ± 0.62	92636 ± 1094	788.6 ± 2.3	0.0434 ± 0.0021	4.81 ± 0.24	2,675 ± 131	454 ± 1131	789.6 ± 3.4
HY05-02-11	138	495.4 ± 1.0	27381 ± 351	834 ± 4	0.12645 ± 0.00337	38 ± 1	7759 ± 214	6967 ± 824	851 ± 5

說明：紅色標示為未採用的數據。

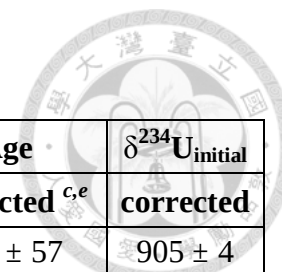


表 3-2、石筍 HY05-3 鈾釷定年數據

Sample	Depth	^{238}U	^{232}Th	$\delta^{234}\text{U}$	$[\text{}^{230}\text{Th}/\text{}^{238}\text{U}]$	$[\text{}^{230}\text{Th}/\text{}^{232}\text{Th}]$	Age	Age	$\delta^{234}\text{U}_{\text{initial}}$
ID	mm	ppb	ppt	measured	activity	ppm	uncorrected	corrected ^{c,e}	corrected
HY05-3-1	12.6	408.6 ± 0.7	1641.4 ± 8.4	904 ± 4	0.005 ± 0.0001	20 ± 1	273 ± 11	217 ± 57	905 ± 4
HY1	18	471.5 ± 1.6	752.8 ± 7.2	892 ± 11	0.00633 ± 0.00019	65 ± 2	366 ± 11	344 ± 16	893 ± 11
HY05-3-2	30	442.8 ± 0.7	784.1 ± 7.5	906 ± 3	0.008 ± 0.0001	73 ± 2	451 ± 10	426 ± 26	907 ± 3
Hy3-1	50	483.14±0.9	285 ± 5	911.5 ± 6.6	0.00985 ± 0.00011	275 ± 6	564 ± 6	556 ± 8	912.9 ± 6.6
H7	65.6	423.3 ± 0.8	381 ± 8	913 ± 5	0.01861 ± 0.00017	341 ± 8	1,067 ± 10	1,055 ± 12	916 ± 5
HY3	90	420.5 ± 1.7	523.3 ± 7.0	902 ± 10	0.01564 ± 0.00024	208 ± 4.1	901 ± 15	884 ± 17	904 ± 10
HY05-3-5	112	530.2 ± 9.8	220.3 ± 6.8	910 ± 19	0.019 ± 0.0001	765 ± 25	1105 ± 26	1,099 ± 27	913 ± 19
H8	126	513.2 ± 1.2	512 ± 9	914 ± 5	0.02185 ± 0.00022	361 ± 7	1253 ± 13	1,239 ± 15	917 ± 5
H9	136	476.0 ± 1.2	514 ± 11	916 ± 6	0.02463 ± 0.00025	377 ± 9	1412 ± 15	1,397 ± 17	919 ± 6
H10	150	533.4± 1.2	766 ± 11	904 ± 5	0.03588 ± 0.00021	413 ± 6	2074 ± 14	2,055 ± 17	909 ± 5
H11	160.6	451.6 ± 0.7	1791 ± 16	900 ± 3	0.09522 ± 0.00049	396 ± 4	5594 ± 31	5,539 ± 41	914 ± 3
H12	188.6	592.7 ± 0.8	2938 ± 12	846 ± 3	0.15600 ± 0.00084	520 ± 3	9582 ± 56	9,512 ± 66	869 ± 3
H13	209	700.0 ± 1.2	1084 ± 10	825 ± 3	0.15470 ± 0.00053	1649 ± 16	9610 ± 39	9,588 ± 41	848 ± 4
HY05-3-10	219	665.6 ±976.1	9733 ± 14273.2	847 ± 4	0.188 ± 0.389	212 ± 440	11611 ± 25542	11404 ± 25281	875 ± 72

說明：紅色標示為未採用的數據。

表 3-3、石筍 HY05-4 鈾釷定年數據

Sample	Depth	^{238}U	^{232}Th	$\delta^{234}\text{U}$	$[\text{}^{230}\text{Th}/\text{}^{238}\text{U}]$	$[\text{}^{230}\text{Th}/\text{}^{232}\text{Th}]$	Age	Age	$\delta^{234}\text{U}_{\text{initial}}$
ID	(mm)	ppb	ppt	measured ^a	activity ^c	ppm ^d	uncorrected	corrected ^{c,e}	corrected ^b
HY05-4-1	5	343.1 ± 11.3	4179 ± 19	688 ± 31	0.01117 ± 0.00053	15 ± 1	725 ± 37	534 ± 194	689 ± 31
Hy4-1	8	293.19 ± 0.83	125 ± 5	654.1 ± 7.7	0.00784 ± 0.00013	303 ± 13	519 ± 9	512 ± 10	655.1 ± 7.7
HY4-1	25	335.74 ± 0.38	908.7 ± 3.9	653.0 ± 2.5	0.01094 ± 0.00018	66.7 ± 1.1	725 ± 12	681 ± 25	654.2 ± 2.5
HY4-2	47	301.93 ± 0.45	1996.4 ± 6.2	657.9 ± 2.7	0.01398 ± 0.00032	34.92 ± 0.81	924 ± 21	819 ± 57	659.5 ± 2.7
HY4-3	67	346.51 ± 0.42	1477.6 ± 5.1	656.7 ± 2.4	0.01447 ± 0.00022	56.01 ± 0.89	957 ± 15	889 ± 37	658.3 ± 2.4
HY4-4	83.5	403.28 ± 0.71	486.7 ± 3.8	662.0 ± 3.2	0.01507 ± 0.00014	206.1 ± 2.5	994 ± 10	975 ± 14	663.9 ± 3.2
HY05-4-4	95	374.6 ± 0.6	498 ± 7	658 ± 3	0.01724 ± 0.00022	214 ± 4	1141 ± 15	1120 ± 26	660 ± 3
HY4-5	117	370.79 ± 0.48	601.0 ± 4.0	660.5 ± 3.0	0.02221 ± 0.00023	226.2 ± 2.7	1,469 ± 15	1,443 ± 20	663.2 ± 3.0
HY4-6	128.5	248.81 ± 0.33	1437.5 ± 5.0	481.1 ± 2.4	0.03377 ± 0.00047	96.5 ± 1.4	2,516 ± 35	2,413 ± 62	484.4 ± 2.4
HY4-7	156	298.56 ± 0.33	417.1 ± 4.1	493.7 ± 2.5	0.03590 ± 0.00026	424.3 ± 5.1	2,653 ± 20	2,629 ± 24	497.4 ± 2.6
HY4-8	166	297.61 ± 0.46	404.3 ± 4.3	472.4 ± 3.0	0.03657 ± 0.00026	444.5 ± 5.6	2,743 ± 21	2,719 ± 24	476.0 ± 3.1
HY4-9	183	293.88 ± 0.76	1518.3 ± 6.2	490.5 ± 5.6	0.03825 ± 0.00061	122.2 ± 2.0	2,835 ± 47	2,743 ± 66	494.3 ± 5.7

說明：紅色標示為未採用的數據。



3.2 石筍沉積速率計算

利用以上選擇較明確且合理之定年數據，我們利用定年點計算線性沉積速率來建立石筍的年齡。

3.2.1 石筍 HY05-2 沉積速率

由於 HY05-2 石筍下半段可用定年點不足，加上約 87 mm 有一層顏色變化間斷及約 118 mm 有一沉積間斷，所以只能計算石筍 85 mm 以上到頂部的線性沉積速率。經由定年結果計算線性沉積速率得到石筍 85 mm 到 36.5 mm 區間的沉積速率約為 0.15 mm/yr ~ 0.2 mm/yr (圖 3-1)。石筍底部年齡約有 7000 年，頂部計算年齡約為 820 年前。

3.2.2 石筍 HY05-3 沉積速率

在 HY05-3 石筍 135 mm 以下顏色多次變化並在 150 ~ 160 mm 之間有明顯黑色之沉積間斷，所以上半部經由定年結果計算石筍 139 mm 以上至頂部的沉積速率，約為 0.04 ~ 0.15 mm/yr。下半部 160.6 ~ 188.6 mm 區間的沉積速率為 0.007 mm/yr，由於此段當中石筍在約 180 mm 有一層顏色較不同於上下，並且沉積速率相對很低，所以此段可能不是為連續的沉積；而在 188.6 ~ 209 mm 區間得到沉積速率為 0.268 mm/yr (圖 3-2)。石筍底部年齡約有近 10000 年，頂端則是到近代的沉積。

3.2.3 石筍 HY05-4 沉積速率

HY05-4 石筍在 118~126 mm 之間存在一層沉積間斷，所以分為上半部和下半部計算沉積速率。上半部 117 mm 以上至頂部由定年結果計算的沉積速率約為 0.07 ~ 0.29 mm/yr。下半部的沉積速率有兩段明顯的分異，128.5 ~ 166 mm 區間的沉積速率約為 0.11 ~ 0.13 mm/yr；166 ~ 183 mm 區間的沉積速率較快，為 0.708 mm/yr (圖 3-3)。計算石筍底部年齡約有 2750 年，頂部年齡約為 430 年前。

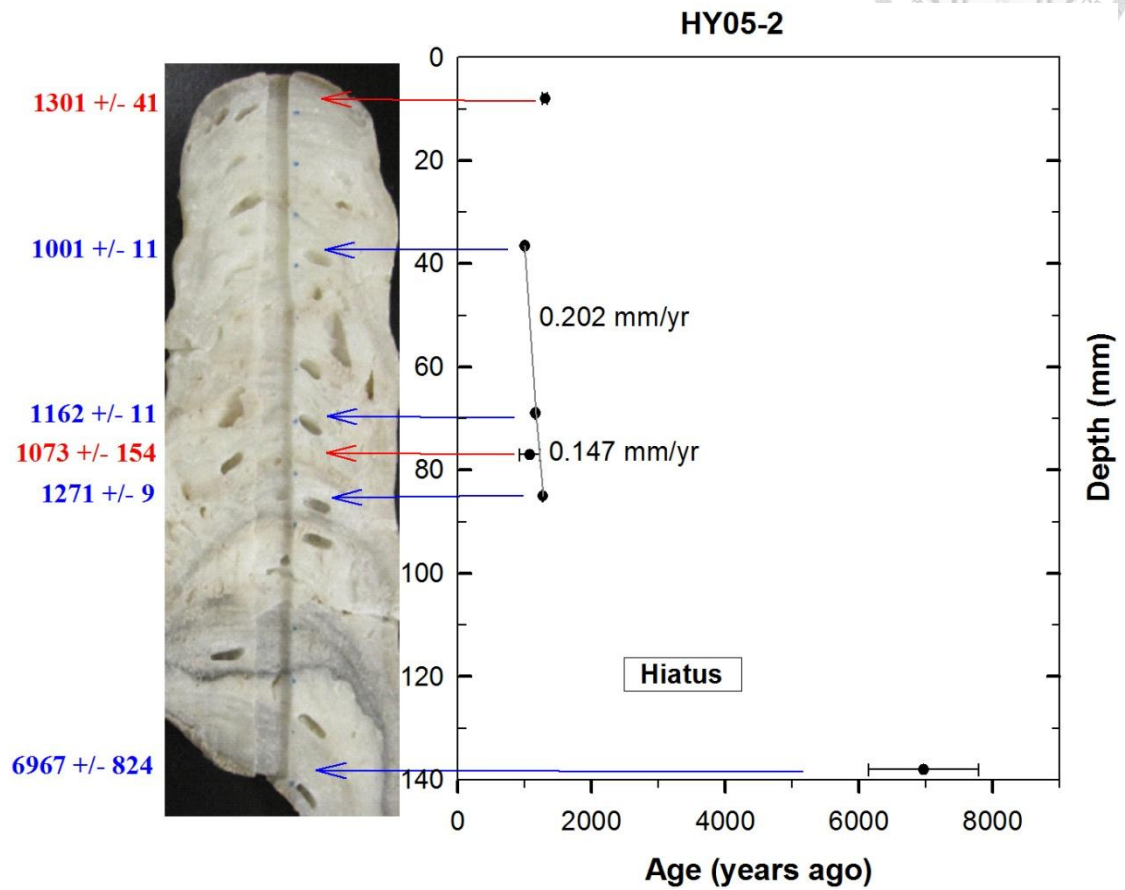


圖 3-1、石筍 HY05-2 深度對 U-Th 定年年齡作圖。紅色標示為未採用之定年點；

藍色標示為採用之定年點，計算出線性沉積速率。

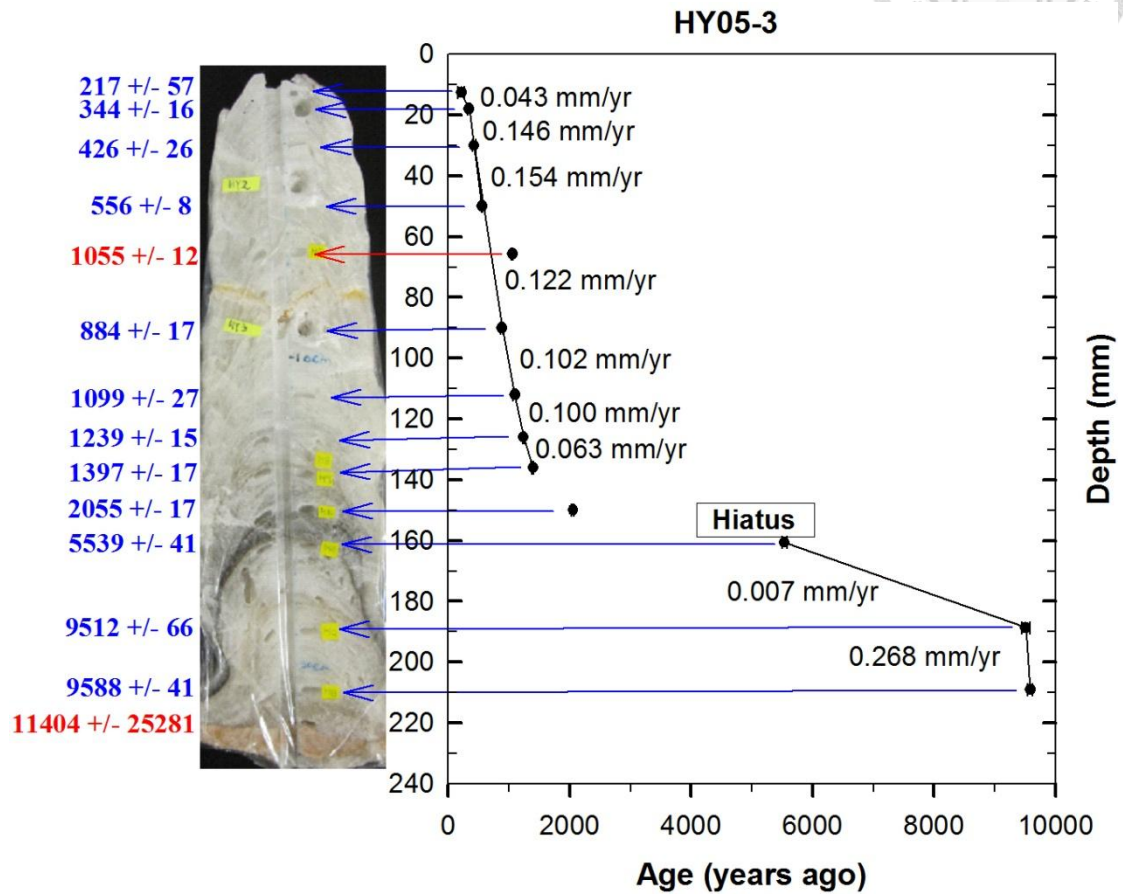


圖 3-2、石筍 HY05-3 深度對 U-Th 定年年齡作圖。紅色標示為未採用之定年點；

藍色標示為採用之定年點，計算出線性沉積速率。

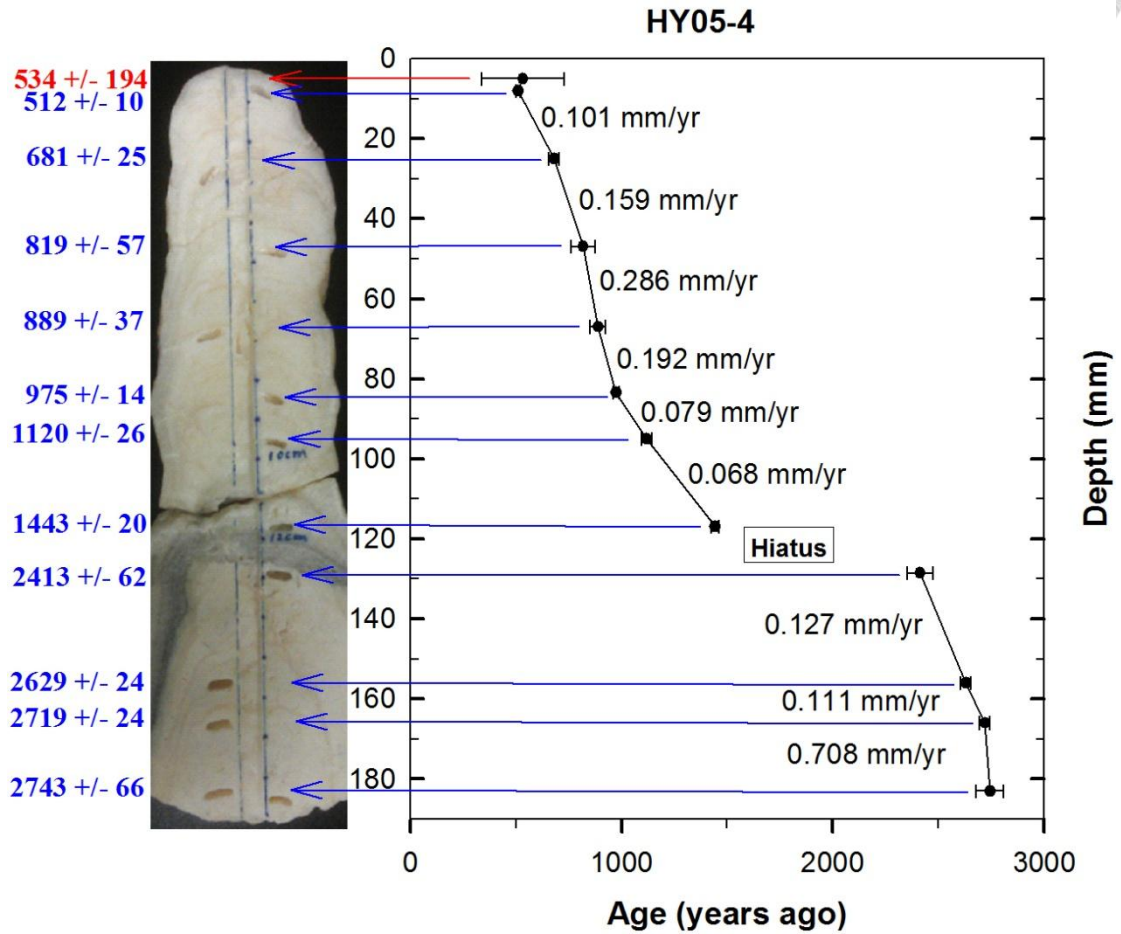


圖 3-3、石筍 HY05-4 深度對 U-Th 定年年齡作圖。紅色標示為未採用之定年點；

藍色標示為採用之定年點，計算出線性沉積速率。

3.3 ^{210}Pb 定年分析結果

石筍 HY05-3 的 ^{210}Pb 定年得到結果距頂部 8 mm 以內有 ^{210}Pb 活度且有衰變的趨勢，在 12 mm 以下的強度基本上已降到背景值 (表 3-4)，表示 12 mm 之後的樣品沒有過剩鉛的部分。 ^{210}Pb 的半衰期約為 22.3 年，過剩 ^{210}Pb 的存在表明樣品年齡小於 100 年，由於在數據點 8 mm 測得的強度已經很小，接近背景值，所以推論石筍一百年內的沉積為至少深度 8 mm 以內到頂端的部分。將深度 8 mm 以內的四個數據點加上指數趨勢線計算沉積速率 (圖 3-4)，從趨勢線可得到值 0.7447，代入下式計算：

$$\frac{\lambda}{S} = 0.7447$$

其中 $\lambda = ^{210}\text{Pb}$ 衰變常數，約為 0.031 year^{-1}

$S =$ 沉積速率，此處單位為 mm/year

經由計算結果得到沉積速率約為 0.042 mm/yr。

配合石筍 HY05-3 鈾釷定年結果所計算的線性沉積速率，在深度 12.6 mm ~ 18 mm 的沉積速率為 0.043 mm/yr，與 ^{210}Pb 定年所得到 8 mm 至頂部的沉積速率 0.042 mm/yr 相當接近。因此經過 ^{210}Pb 定年結果可說明石筍 HY05-3 頂部為現代的，即小於一百年的沉積；並且計算得出石筍前 8 mm 的沉積速率也落於合理的範圍內。

表 3-4、石筍 HY05-3 之 ^{210}Pb 放射性強度

Sample ID	Depth (mm)	Range (mm)	Sample weight (g)	Spike ^{209}Po activity (dpm/g)	Spike weight (g)	measured ^{210}Pb (dpm/g)
HY3Pb-1	1.0	1.0	0.4682	24.1	0.57340	51.5 ± 1.1
HY3Pb-3	3.0	1.0	0.1965	24.1	0.38002	2.07 ± 0.16
HY3Pb-5	5.0	1.5	0.4571	24.1	0.57340	0.327 ± 0.032
HY3Pb-8	8.0	1.0	0.2028	24.1	0.17207	0.240 ± 0.062
HY3Pb-12	12.0	1.0	0.1835	24.1	0.16949	0.130 ± 0.049
HY3Pb-15	15.0	1.0	0.1826	24.1	0.16788	0.049 ± 0.035
HY3Pb-18.5	18.5	1.0	0.1931	24.1	0.17405	0.132 ± 0.035
HY3Pb-23.5	23.5	1.0	0.1904	24.1	0.17447	0.135 ± 0.035
HY3Pb-27.5	27.5	1.0	0.1813	24.1	0.17375	0.056 ± 0.032

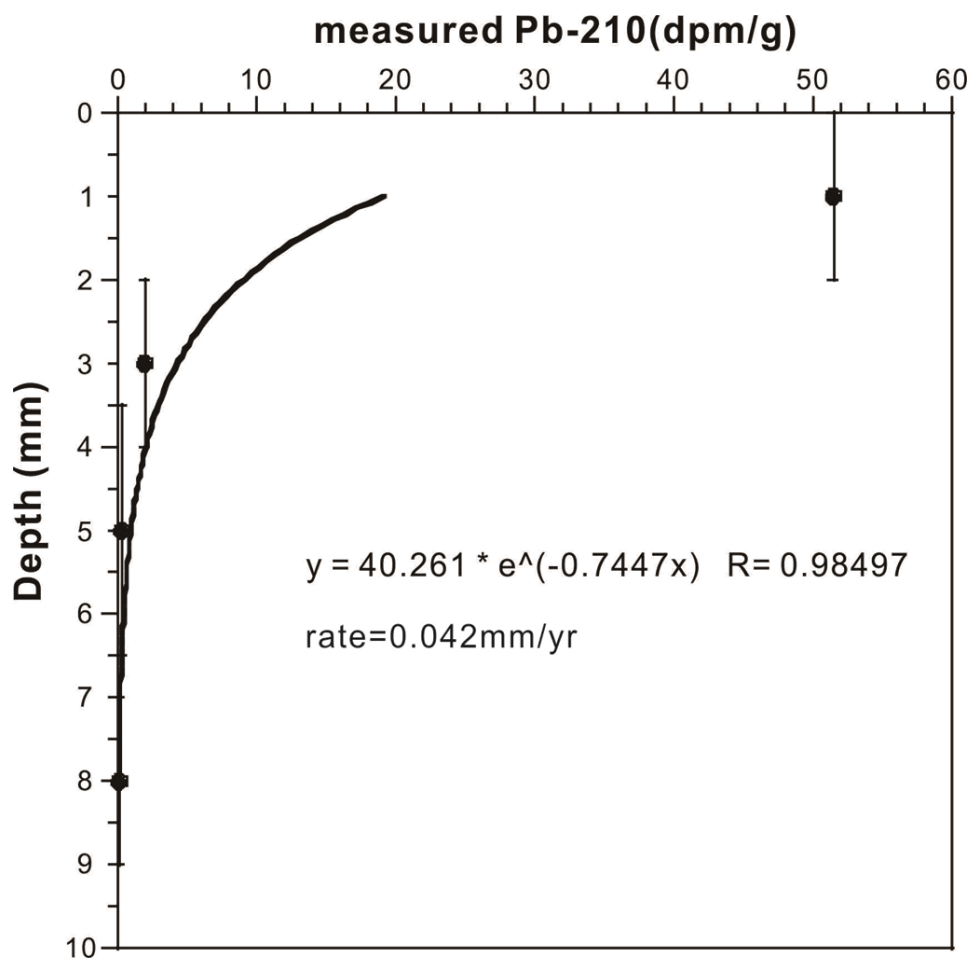


圖 3-4、石筍 HY05-3 深度對 ^{210}Pb 活度衰變趨勢。由趨勢線計算沉積速率。



3.4 碳氧同位素分析結果

三根石筍 (HY05-2、HY05-3、HY05-4) 碳氧穩定同位素的樣品採集與分析工作於 2010 到 2011 年在國立成功大學穩定同位素實驗室進行。

3.4.1 石筍 HY05-2 碳氧同位素紀錄

石筍 HY05-2 碳氧同位素分析結果 (圖 3-5)，其 $\delta^{18}\text{O}$ 值在 $-8.59 \sim -10.37 \text{ ‰}$ (VPDB) 範圍內變化； $\delta^{13}\text{C}$ 值在 $-7.04 \sim -10.22 \text{ ‰}$ (VPDB) 範圍內變化。

3.4.2 石筍 HY05-3 碳氧同位素紀錄

石筍 HY05-3 碳氧同位素分析結果 (圖 3-6)，其 $\delta^{18}\text{O}$ 值在 $-8.97 \sim -12.07 \text{ ‰}$ 範圍內變化； $\delta^{13}\text{C}$ 值在 $-6.44 \sim -10.64 \text{ ‰}$ 範圍內變化。可以見到石筍氧同位素在深度 158 mm 左右為一分界，石筍底部到此分界的氧同位素值整體偏輕，平均值為 -11.24 ‰ (VPDB)，分界到石筍頂部的氧同位素整體相對偏重，平均值為 -9.44 ‰ (VPDB)，兩段平均值相差將近 2 ‰。

3.4.3 石筍 HY05-4 碳氧同位素紀錄

石筍 HY05-4 碳氧同位素分析結果 (圖 3-7)，其 $\delta^{18}\text{O}$ 值在 $-8.29 \sim -10.06 \text{ ‰}$ 範圍內變化； $\delta^{13}\text{C}$ 值在 $-6.68 \sim -9.57 \text{ ‰}$ 範圍內變化。

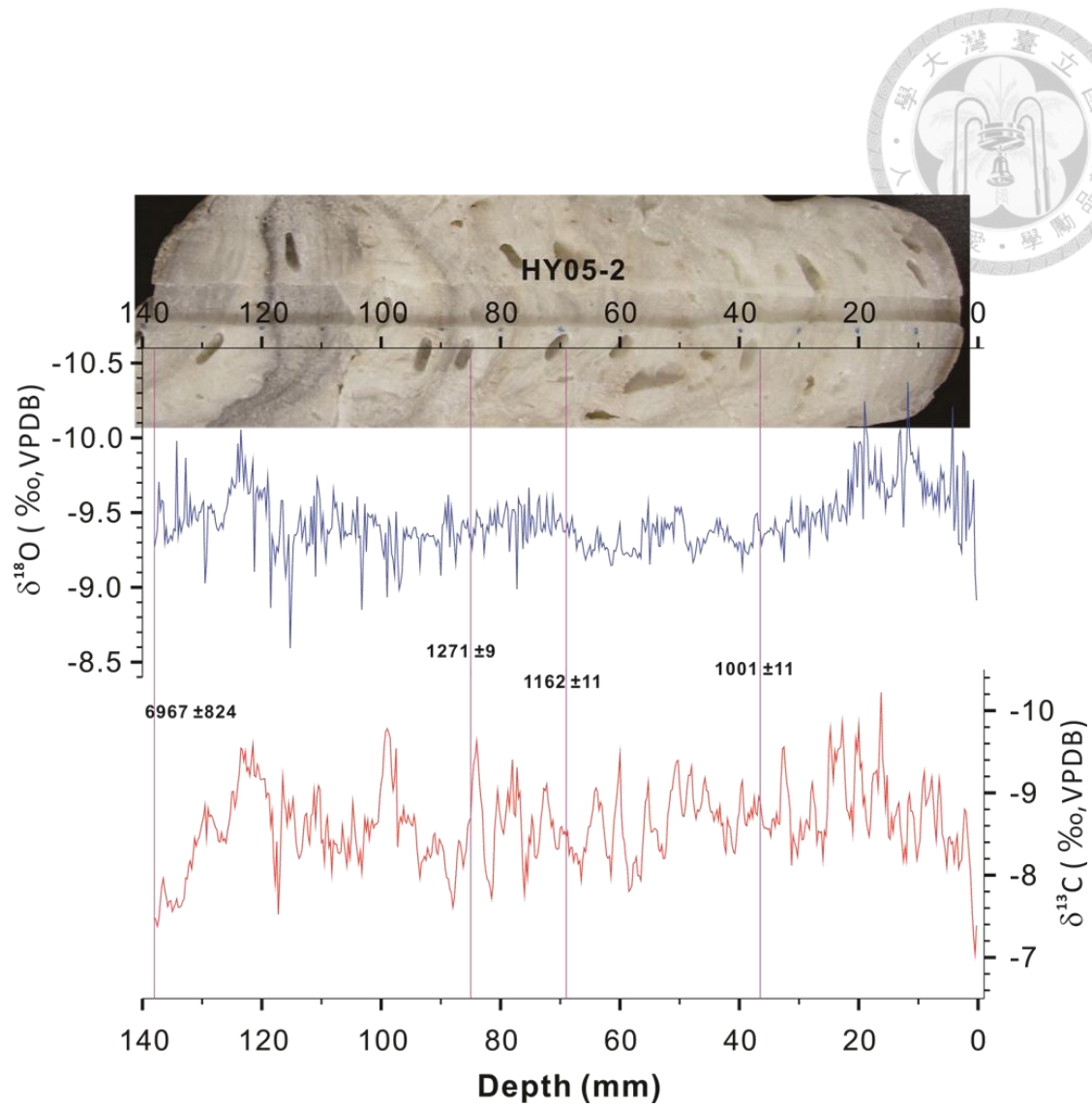


圖 3-5、石筍 HY05-2 碳氧同位素隨深度變化圖。垂直線段表示定年點的深度並標示定年年齡。

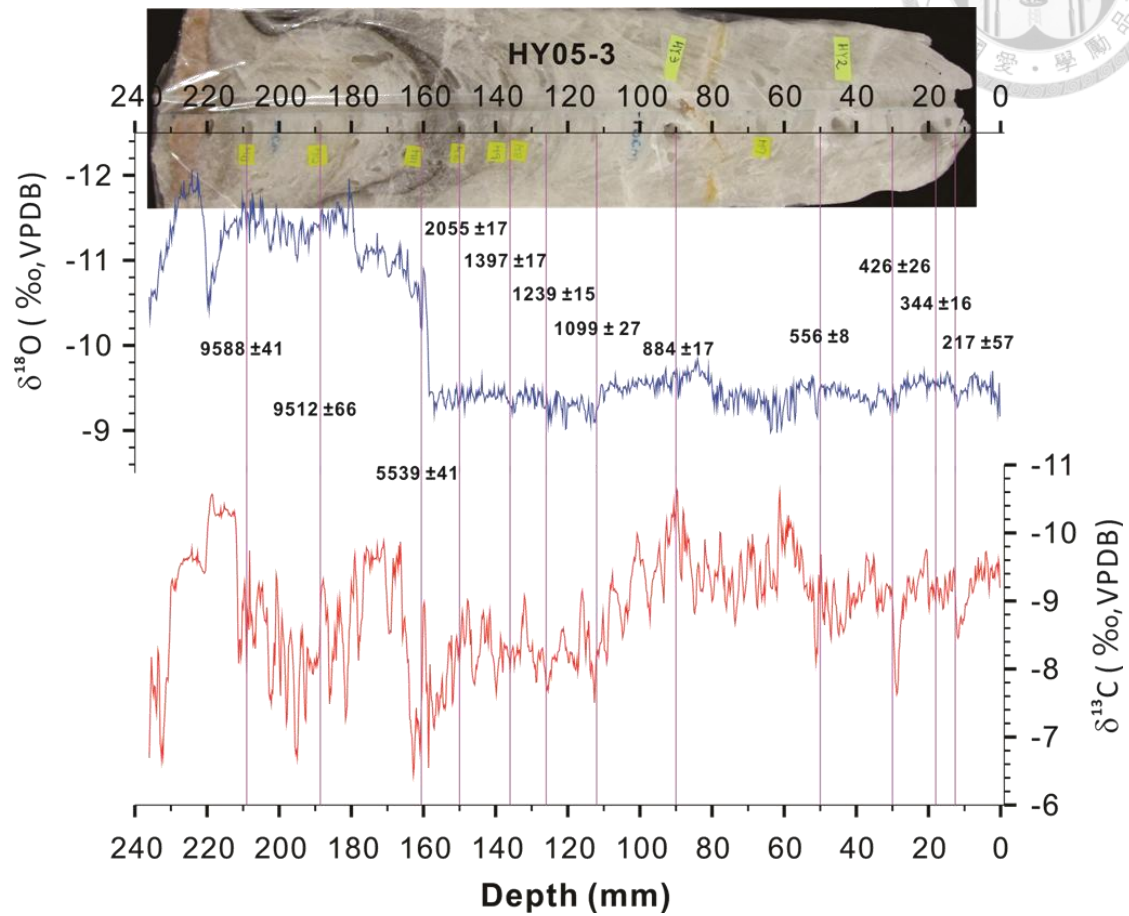


圖 3-6、石箭 HY05-3 碳氧同位素隨深度變化圖。垂直線段表示定年點的深度並標示定年年齡。

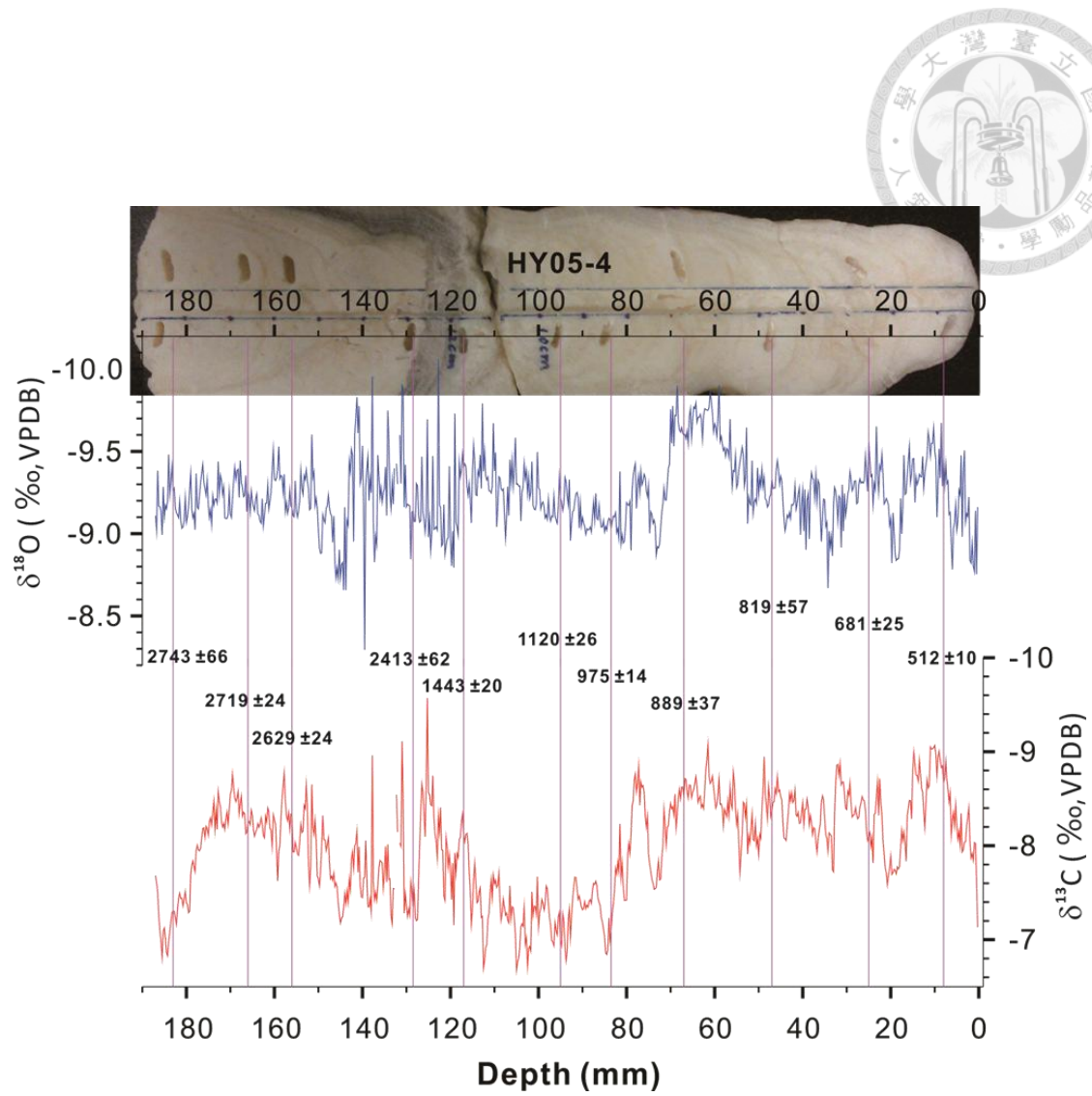


圖 3-7、石筴 HY05-4 碳氧同位素隨深度變化圖。垂直線段表示定年點的深度並標示定年年齡。

3.5 石筍 HY05-2、HY05-3、HY05-4 綜合結果

經過鈾系定年，三根石筍的生長範圍都在全新世以內。將定年結果對照石筍可知三根石筍在老於 1400 年前皆有沉積間斷，而 1400 年以內三根石筍的沉積都是連續的，也是本文主要討論的時間範圍（圖 3-8）。

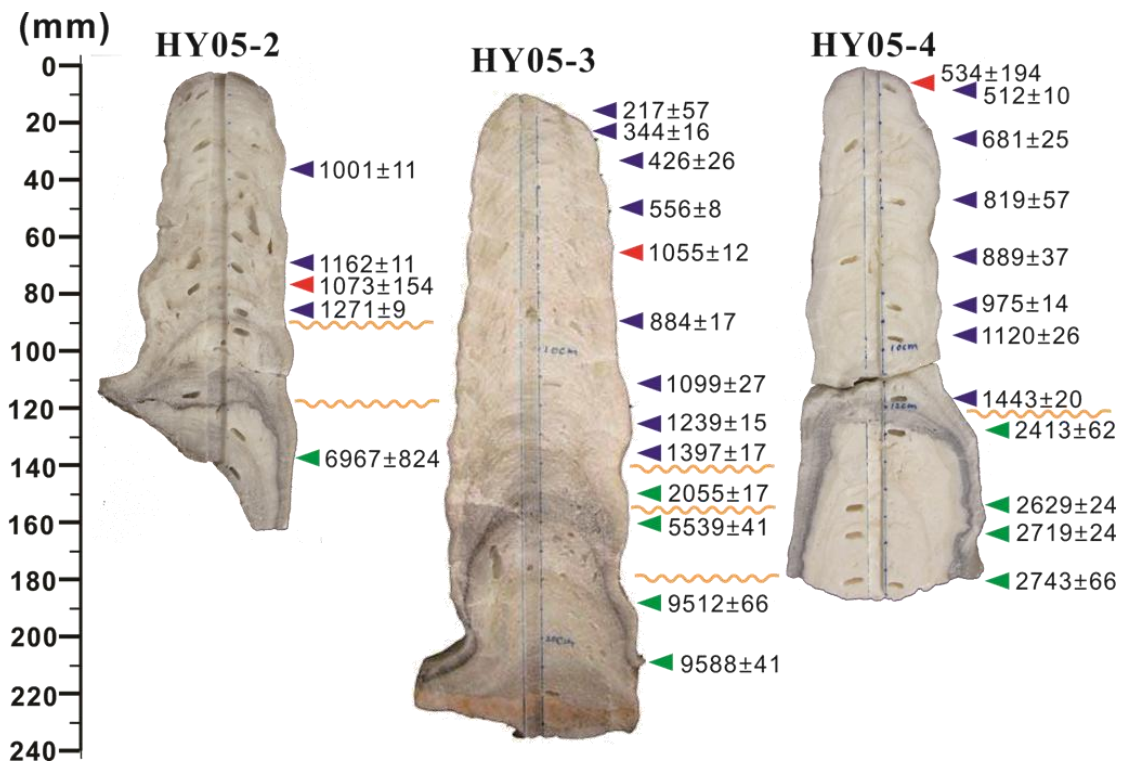


圖 3-8、黃爺洞三根石筍樣品標記定年結果。三角箭頭紅色標示為未採用的定年點；藍色標示 1450 年以內的定年點；綠色標示為老於 1450 年的定年點。黃色波浪線標示沉積不連續或沉積間斷。加上鈾鈦定年結果可見三根石筍生長範圍都在全新世以內，石筍在老於約 1400 年以前皆有沉積間斷，而 1400 年以來三根石筍的沉積都是連續的，研究討論著重在這段石筍連續沉積期間的紀錄，也就是藍色箭頭標示的範圍內。



3.5.1 利用碳氧同位素特徵校正年齡

我們討論的時間段著重在 1450 年以來三根石筍的連續沉積紀錄。在我們利用原始定年點得出的氧同位素隨時間變化圖中 (圖 3-9), 從三根石筍彼此間的對比可見, 有兩個時間段的對應是較為不好的: 分別為西元 1250~1450 年左右, 石筍 HY05-3 與 HY05-4 的偏差; 以及西元 900~1100 年左右, 石筍 HY05-3 與另外兩個石筍紀錄的差別。因此我們將對石筍 HY05-3 在此兩個時間段內作年代上的修正。

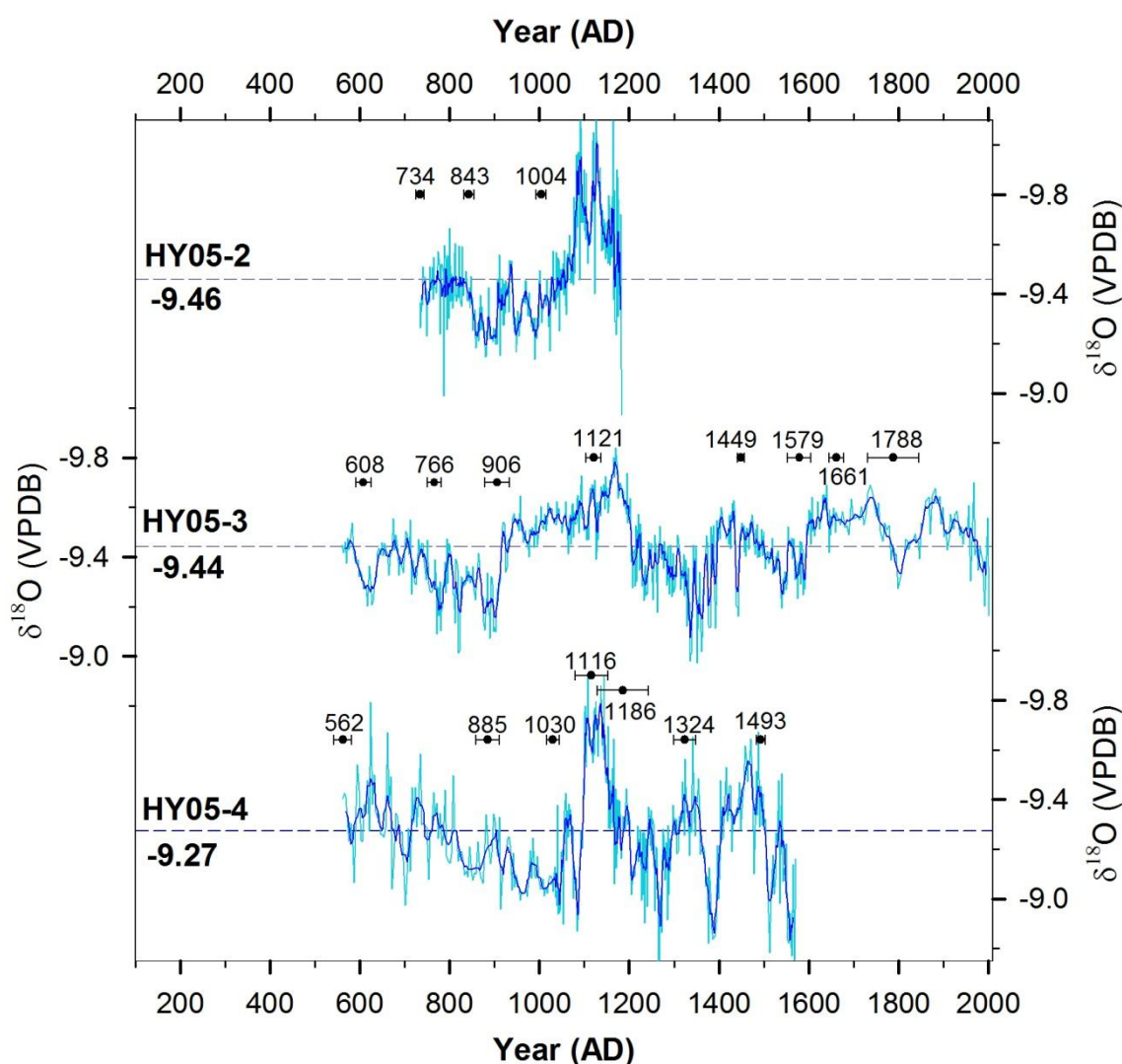


圖 3-9、石筍 HY05 (三個) 1450 年內之氧同位素隨時間變化圖 (調整前)。淺藍線表示原始數據; 深藍線表示五點數據滑動平均。在西元 1250~1450 年以及西元 900~1100 年兩個時間段內的紀錄對應較差。



首先，將石筍 HY05-2 深度 85 mm 到頂部、石筍 HY05-3 深度 139 mm 到頂部、石筍 HY05-4 深度 117 mm 到頂部的碳氧同位素對深度作圖比對，在石筍 HY05-3 及石筍 HY05-4 同位素變化的特徵峰可以找到相當的對應 (圖 3-10)。由於石筍 HY05-3 在 50 mm 到 90 mm 定年點之間沒有年代控制點，並且在原先氧同位素對年代作圖的曲線上這部分與石筍 HY05-4 的對應較不好，因此我們採用補差的辦法去校正這部分的沉積速率。理論上在同一地區，尤其一個洞穴裡的氧同位素紀錄要能對得起來，因為降雨的影響對一個洞裡面的石筍或者小範圍區域裡的洞穴石筍應該一樣，所以其氧同位素的變化趨勢理論上要能一致，也就是可以去調整其年代 (像是用補差的辦法) 的基礎。對 HY05-3 約 51.2 mm 氧同位素變重的特徵峰進行校正，利用判讀出 HY05-4 約 18.5 mm 同樣特徵峰的年代去調整；HY05-3 約 52.4 mm 氧同位素變輕的特徵峰，利用 HY05-4 約 23.25 mm 變輕的特徵峰年代進行校正；還有 HY05-3 約 62 mm 同位素變重的特徵峰以 HY05-4 約 33 mm 變重的特徵峰年代去校正 (圖 3-11)。

第二，在我們利用原始的定年控制點拉出的石筍同位素對年代作圖上，在石筍 HY05-3 西元 900 ~1100 年之間與另兩個石筍 (HY05-2；HY05-4) 的對應是較為偏差的。因此，我們也將石筍 HY05-3 約 100.4 mm 輕的特徵峰，利用 HY05-4 約 77.75 mm 的特徵峰年代去校正；HY05-3 約 112.6 mm 重的特徵峰，以 HY05-4 約 84.25 mm 的特徵年代去調整 (圖 3-10)。

協調完之後將石筍氧同位素與年代作圖 (圖 3-12)，在年齡的誤差範圍內，三根石筍的氧同位素顯示一定的重現性，從我們的紀錄去看整個曲線的變化特徵上是一致的。

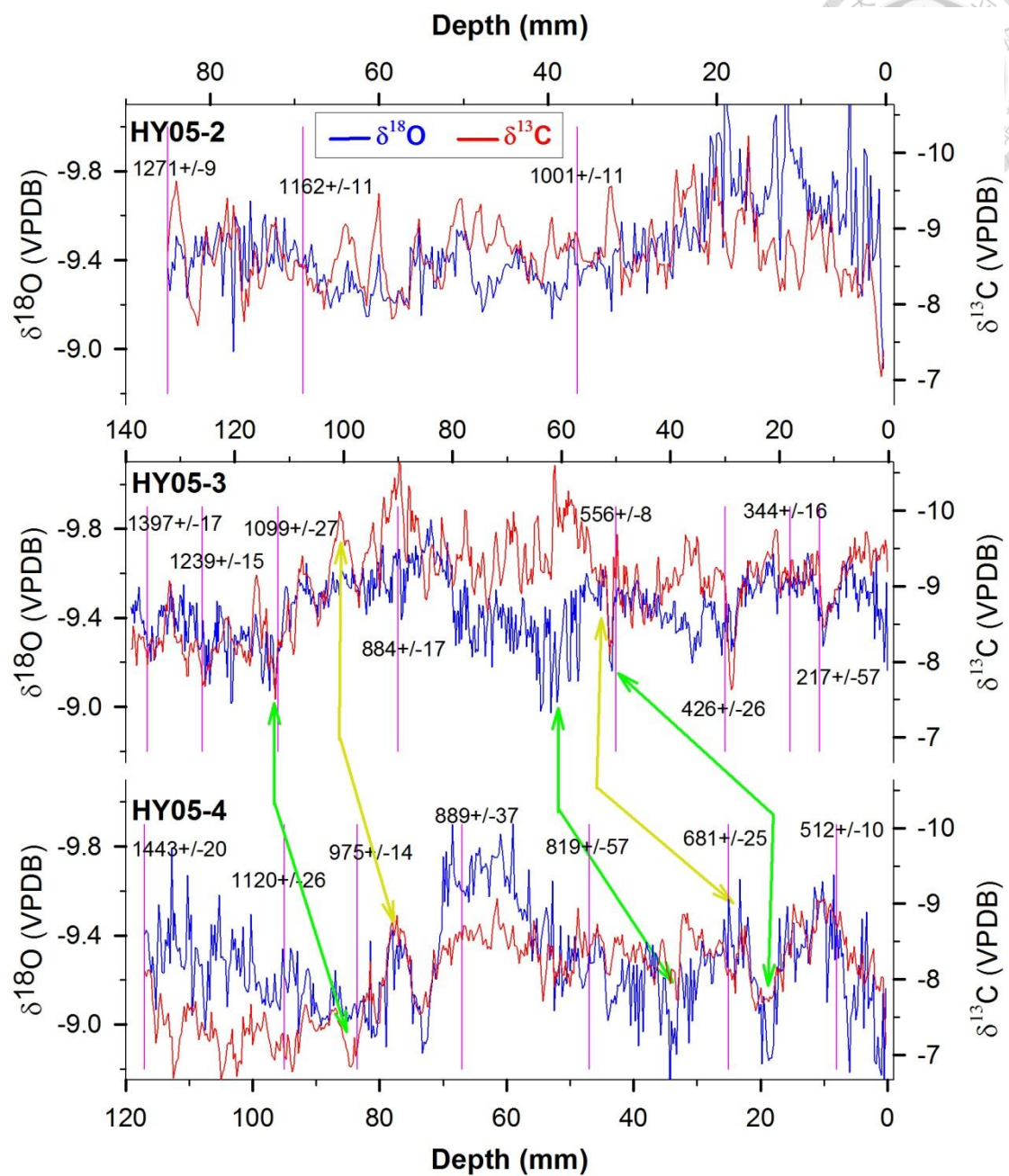


圖 3-10、石筍 HY05 (三個) 1450 年內之碳氧同位素紀錄隨深度變化圖。箭頭線段指示相互比對進行年代校正的特徵峰。

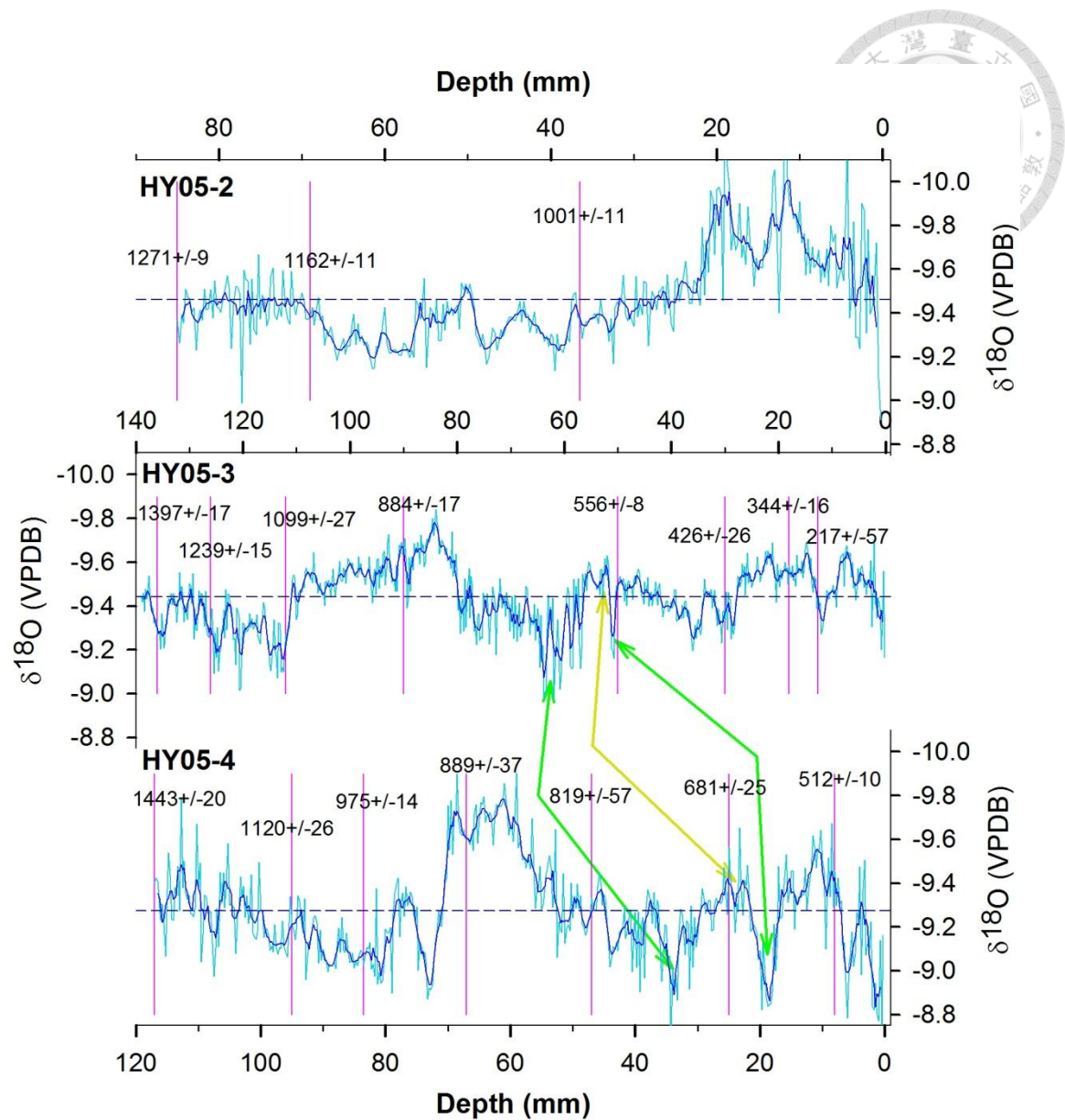


圖 3-11、石筍 HY05 (三個) 1450 年內之氧同位素紀錄隨深度變化圖。淺藍線表示原始數據；深藍線表示五點數據滑動平均。箭頭線段指示相互比對進行年代校正的特徵峰。

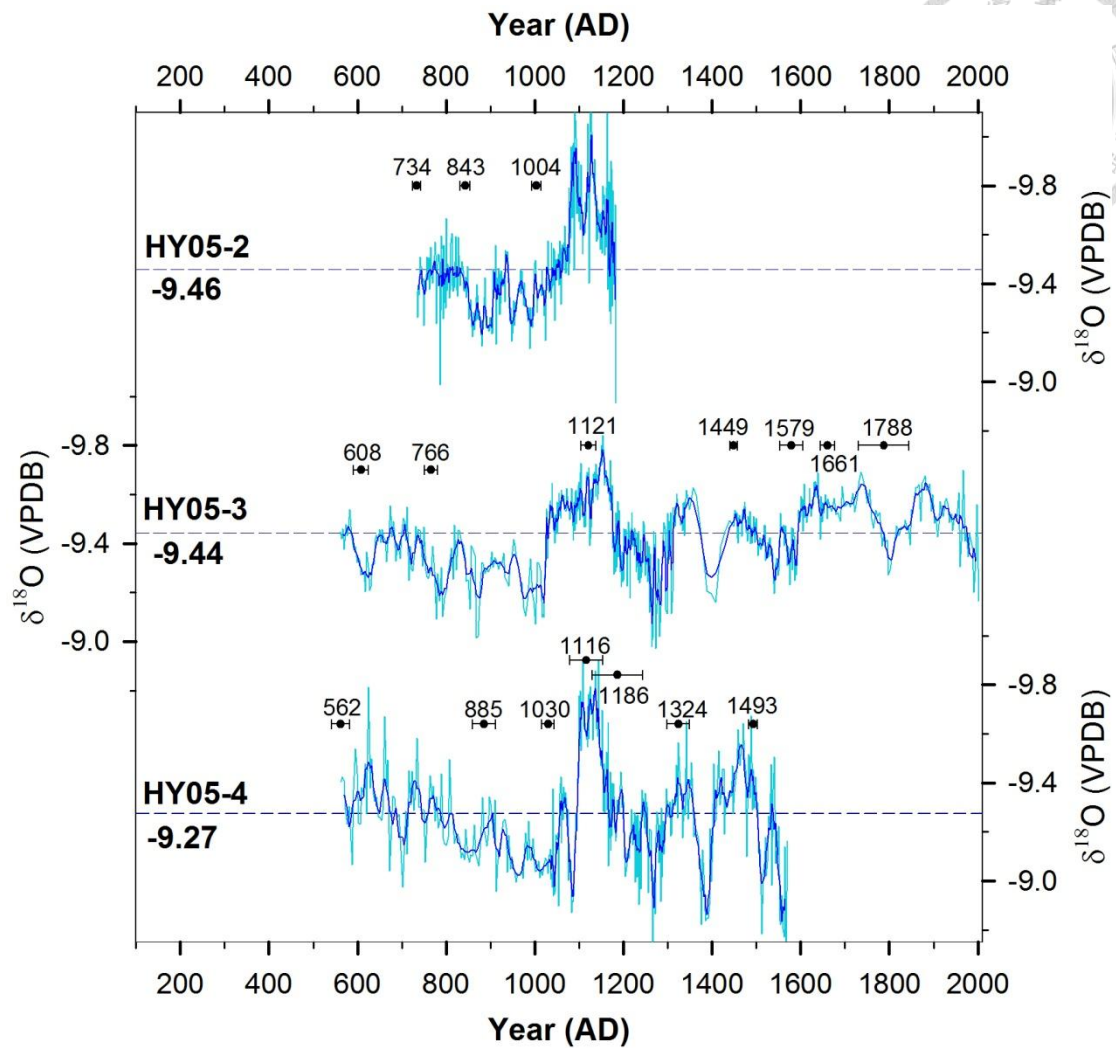


圖 3-12、石筍 HY05 (三個) 1450 年內之氧同位素隨時間變化圖 (調整後)。橫軸為西元年, 包含從西元 560 年以來的紀錄。上為石筍 HY05-2 沉積間斷之上深度 85 mm 到頂部, 為西元 730~1180 年的紀錄。中為石筍 HY05-3 深度 139 mm 到頂端, 西元 560~2000 年之紀錄。下為石筍 HY05-4 沉積間斷之上深度 117 mm 到頂端, 西元 560~1570 年之紀錄。



3.5.2 全新世以來的石筍紀錄

由三根石筍整段的碳氧同位素與年代作圖，從長時間尺度來看氧同位素值從過去九千多年來到近 1450 年的紀錄是往重的方向變化，而碳同位素的波動幅度較大 (圖 3-13)。

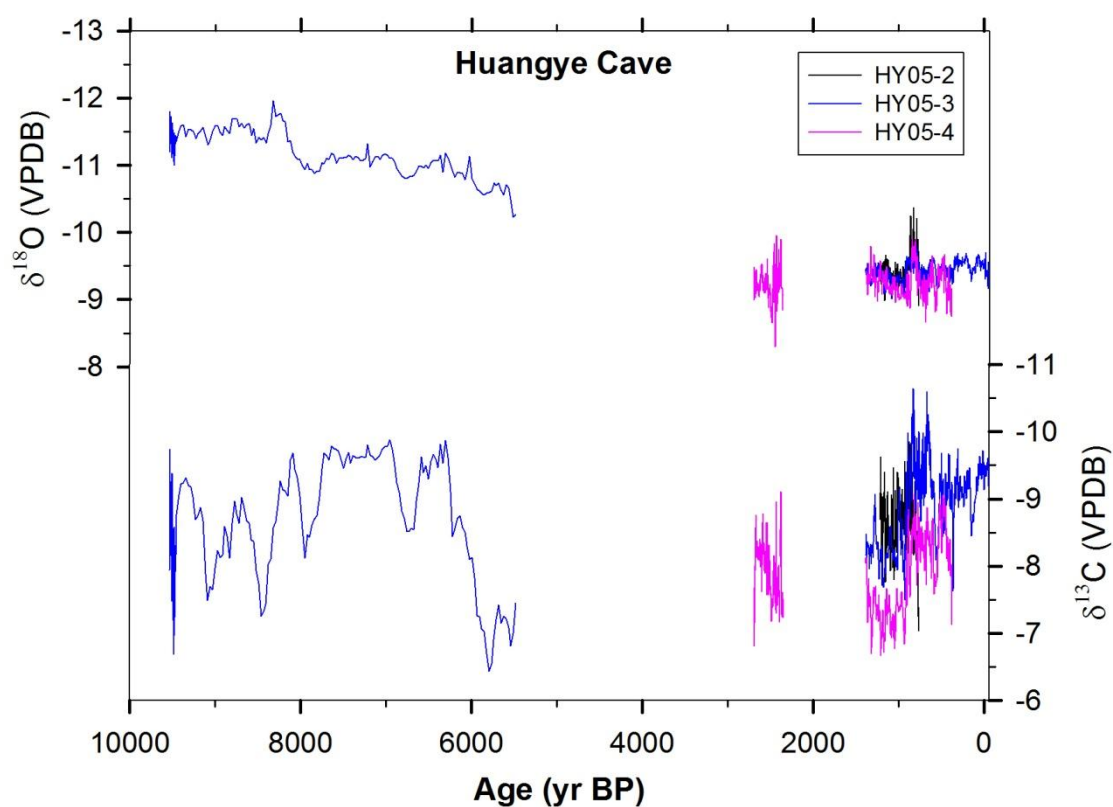


圖 3-13、黃爺洞石筍全新世以來碳氧同位素隨時間變化圖。

第四章 討論



4.1 黃爺洞紀錄討論

在進一步討論之前，要將我們的黃爺洞紀錄與先前發表的同一洞穴氧同位素紀錄作比對。包括在 2010 年譚亮成等人在 *The Holocene* 發表的 1860 年以來的黃爺洞石筍氧同位素紀錄 (Tan et al., 2010)，以及代志波在 2007 年發表的碩士論文包含西元 842 ~ 1698 年的黃爺洞石筍氧同位素紀錄。同一洞穴的氧同位素紀錄應具可對比性，經過比對可以確立紀錄對氣候指標的可靠性。

4.1.1 黃爺洞石筍氧同位素

本研究黃爺洞石筍 (HY05-2, HY05-3, HY05-4) 在年齡的誤差範圍內，三根石筍的氧同位素曲線有較佳的重合。比對前人發表的氧同位素曲線可見在中世紀暖期西元 1100 ~ 1200 年左右，氧同位素明顯地偏輕並且各紀錄都顯示同樣的變化 (圖 4-1)。本研究與譚亮成等人發表的紀錄在特定時段的氧同位素特徵對應較為符合，例如在西元 1300 年前後以及西元 1400 ~ 1500 年間氧同位素偏輕的特徵峰，還有西元 1850 年以來至近代氧同位素由輕往重的趨勢變化。當中幾個氧同位素相對偏重的時期也可以互相對應，而較有差異的地方在於西元 1600 ~ 1800 年間，我們的氧同位素紀錄 (HY05-3) 比平均值偏輕，而譚亮成等人的紀錄在此段時間是較其平均值偏重。

從整體的氧同位素變化趨勢來看，比對本研究紀錄與譚亮成等人的石筍氧同位素紀錄可知在同一洞穴石筍的氧同位素變化可以展現一定的重現性，藉以讓我們確定這些石筍紀錄是能夠代表氣候變化的一個重要基礎，尤其是在大的特徵上可以相互對應，可說明石筍紀錄具有指示氣候變化的可靠性。石筍氧同位素可以反映當地降水的變化，氧同位素偏輕的時段，表示季風降雨強度較強，氣候較濕潤；而氧同位素偏重的時段表示降雨比較少、夏季風弱，指示氣候較乾旱。

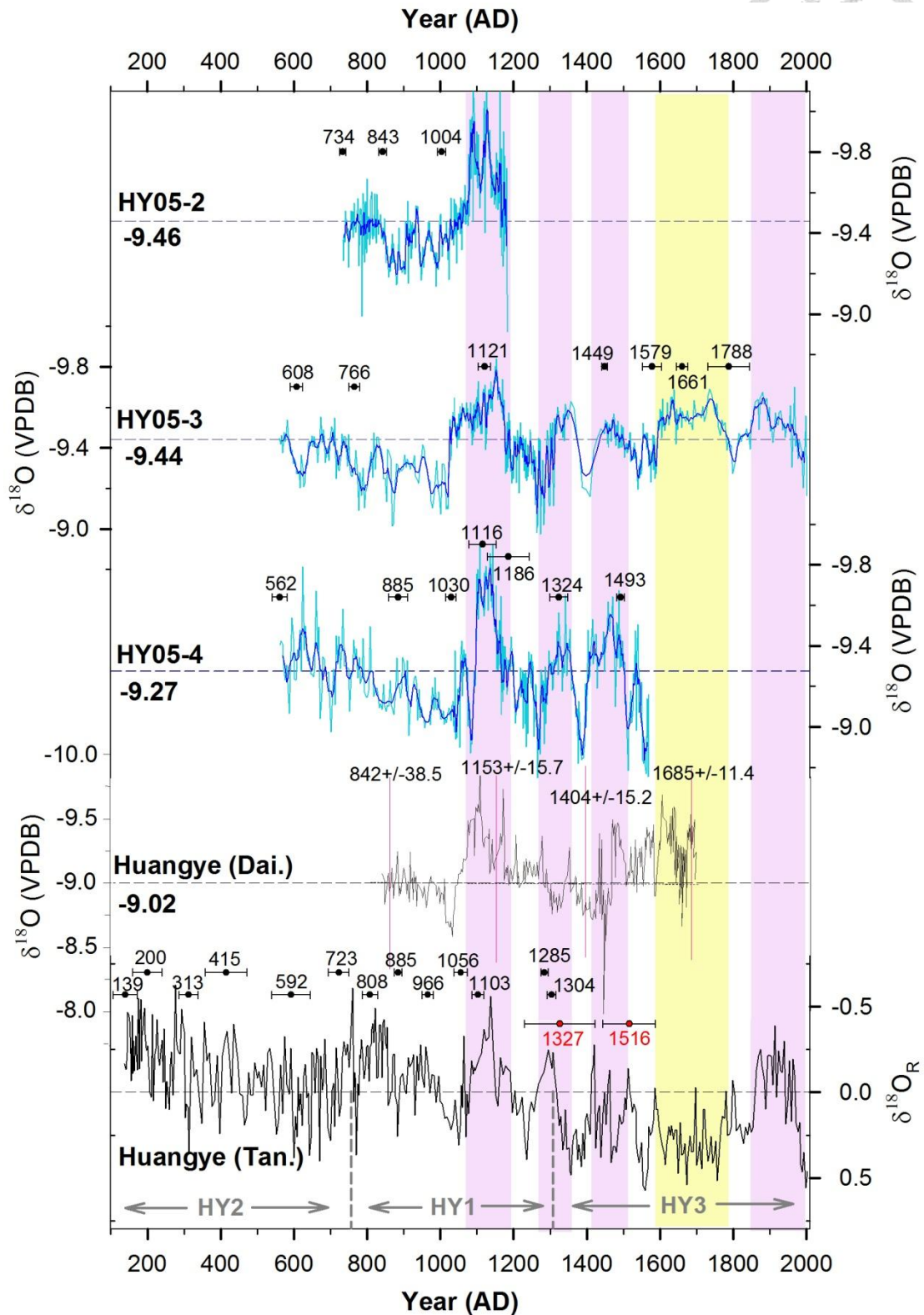


圖 4-1、黃爺洞洞穴石筍氧同位素紀錄比較。由上到下前三個為本研究紀錄；接下來為代志波的碩士論文研究紀錄 (代志波, 2007)；最後為已發表之譚亮成等人的紀錄 (Tan et al., 2010)。

我們先由本研究的石筍紀錄 (HY05-2, HY05-3, HY05-4) 中氧同位素的距平表現劃分相對乾旱/濕潤的時期，將其去除掉趨勢，藉以劃分氧同位素的距平表現 (圖 4-2)。這 1450 年來黃爺洞石筍氧同位素紀錄的顯示西元 600~1000 年間，氧同位素值由平均值逐漸變重，指示氣候變乾旱。在西元 1100~1200 年，1300~1360 年，1420~1500 年，1600~1780 年和 1850~1900 年這幾個時間段內，氧同位素值都比平均值偏輕，指示這幾個時間段內的氣候相對濕潤，而在這些時間段之間，氣候變得相對乾旱。

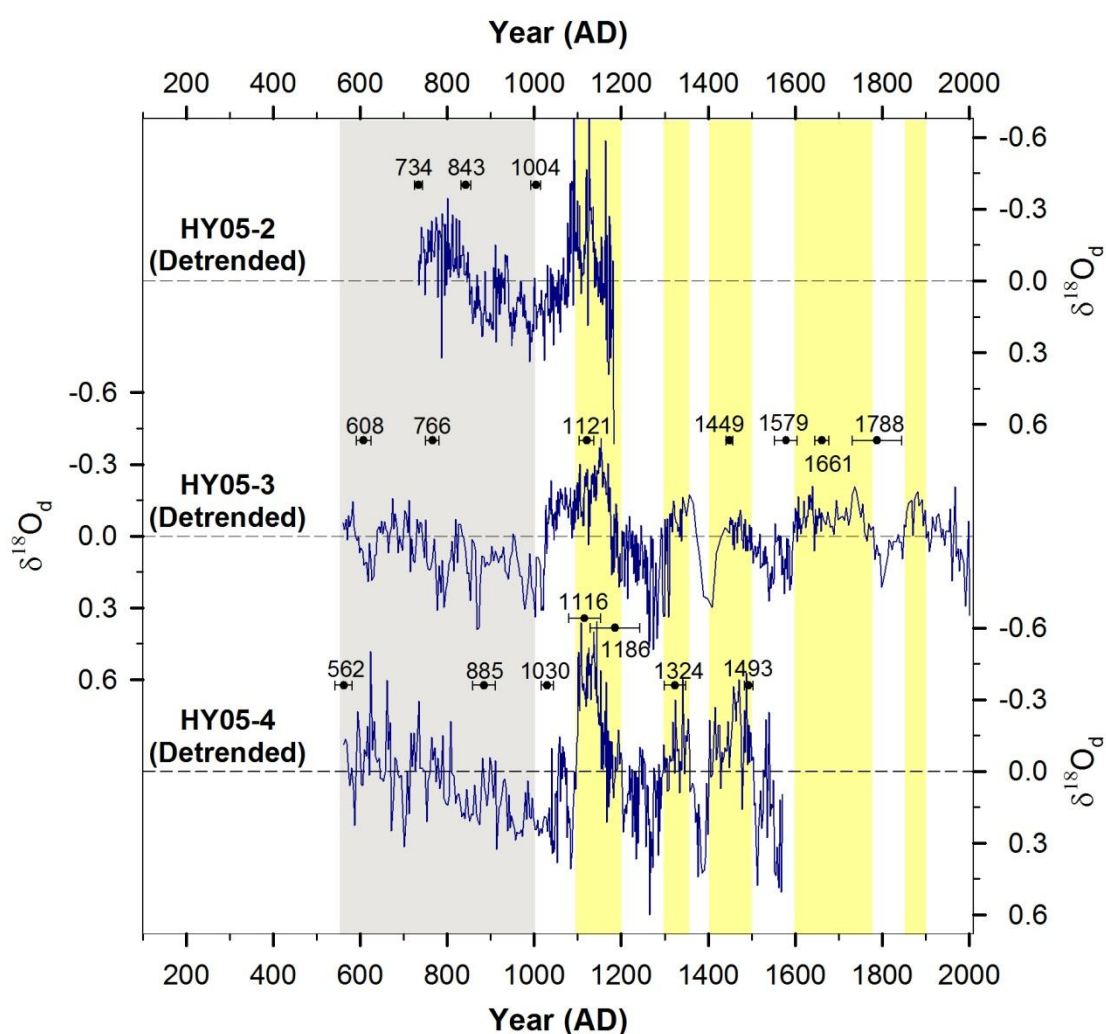


圖 4-2、石筍 HY05 (三個) 氧同位素去趨勢作圖。灰色標示西元 600~800 年間，氧同位素值由平均值逐漸變重。黃色標示時間段：西元 1100~1200 年，1300~1360 年，1420~1500 年，1600~1780 年和 1850~1900 年，氧同位素值比平均值偏輕，

指示這幾個時間段內的氣候相對濕潤。在這些時間段之間空白的區段，即氧同位素值偏重的時段，指示氣候相對乾旱。



4.1.2 黃爺洞石筍碳同位素

在百年尺度上影響 $\delta^{13}\text{C}$ 值最重要的因素就是植被的發育， $\delta^{13}\text{C}$ 值比較重代表 C4 植物占的比例比較多或者是植被發育不是太好； $\delta^{13}\text{C}$ 值比較輕的影響因素第一為土壤有機物多，或是說植被的密度較高，第二為植被的種類，像是 C3 的植物比例提高了，兩者皆會影響使得 $\delta^{13}\text{C}$ 值比較輕。碳氧同位素協變性高可說明植被受到氣候影響演變，紀錄於碳氧同位素的變化中。在有人類活動的歷史中，氣候也會影響人類，再者人類也會改變植被。如果碳氧同位素的變化很不一致，也有可能是人類活動的影響。然而人類活動較難以掌握，通常不是長時間持續的活動，可能是短時間內對植被造成破壞或種植耕作行為改變等。

在西元 600 ~1000 年左右，黃爺洞石筍碳同位素基本比平均值偏重 (圖 4-3)，較平均值重約 1‰，說明此時期由於整體氣候比較乾旱，使得植被發育較差。而西元 1000 年以來的變化比西元 1000 年以前的碳同位素值要輕，特別是西元 1000 到 1350 年左右，碳同位素都比平均值偏輕，說明因為氣候相對濕潤，植被發育較好，這個西元 1000 年前後的碳同位素值的變化，也可能包含人類活動對植被的影響，如種植農作物等。整體來看，除了在西元 1200 ~1300 年之間以外，碳同位素在西元 1000 年以來的變化基本上與氧同位素一致 (圖 4-4)，而且比西元 1000 年前的碳同位素值要輕。西元 1350 年以後碳同位素在平均值上下震盪，其中西元 1360 ~1410 年、1580 ~1600 年和 1790 ~1840 年有三次碳同位素明顯變重的短暫時期。除了考慮氣候影響，還有人類種植農作物的改變，特別是在西元 1580 到 1600 年的時間段，碳同位素急劇、短暫地下降，原因可能跟人為影響有關，導致植被很快地惡化。

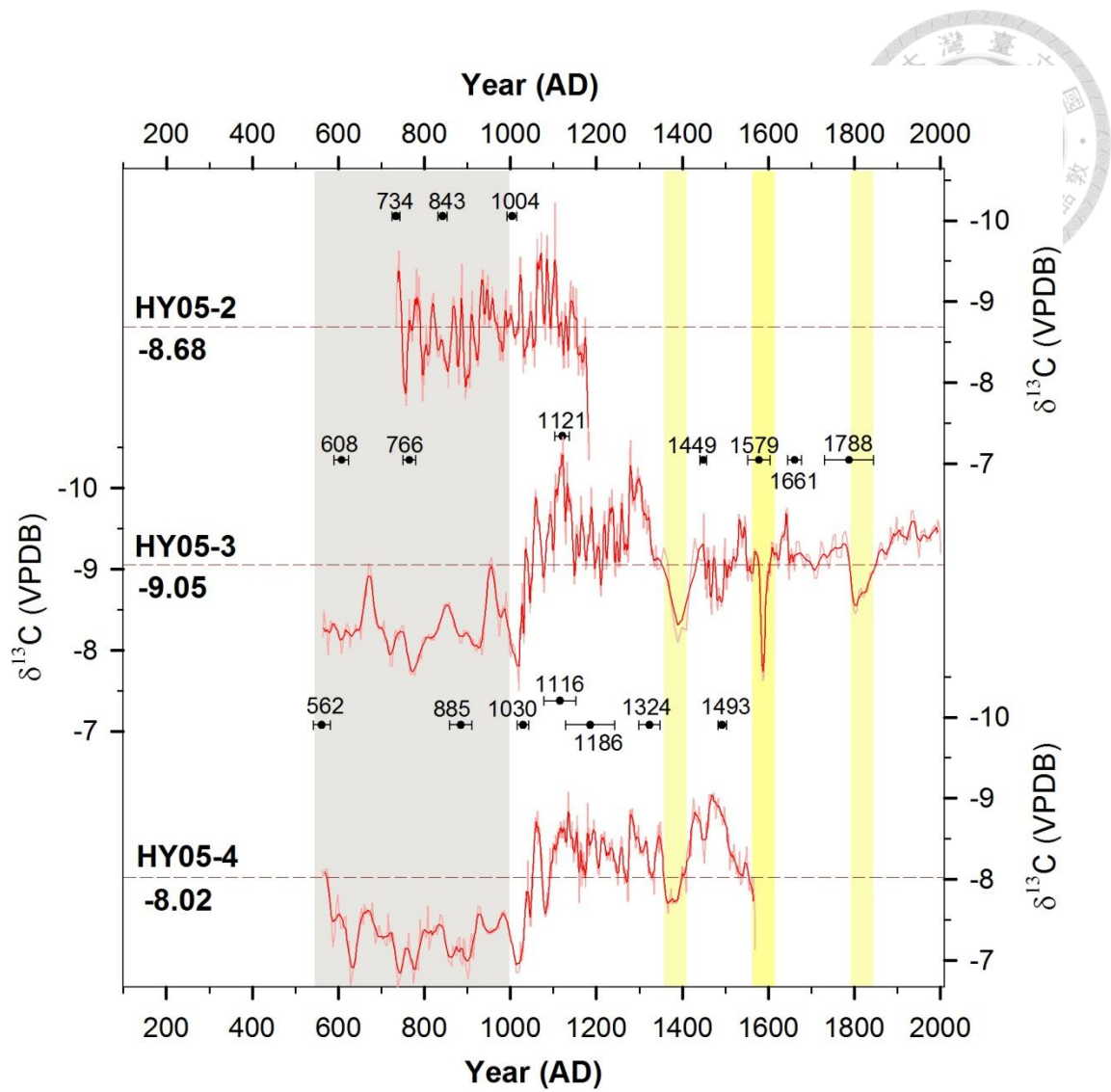


圖 4-3、石筍 HY05 (三個) 1450 年內之碳同位素隨時間變化圖。黃色標示時間段：西元 1360 ~1410 年，1580 ~1600 年和 1790 ~1840 年，三次碳同位素明顯變重的短暫時期。

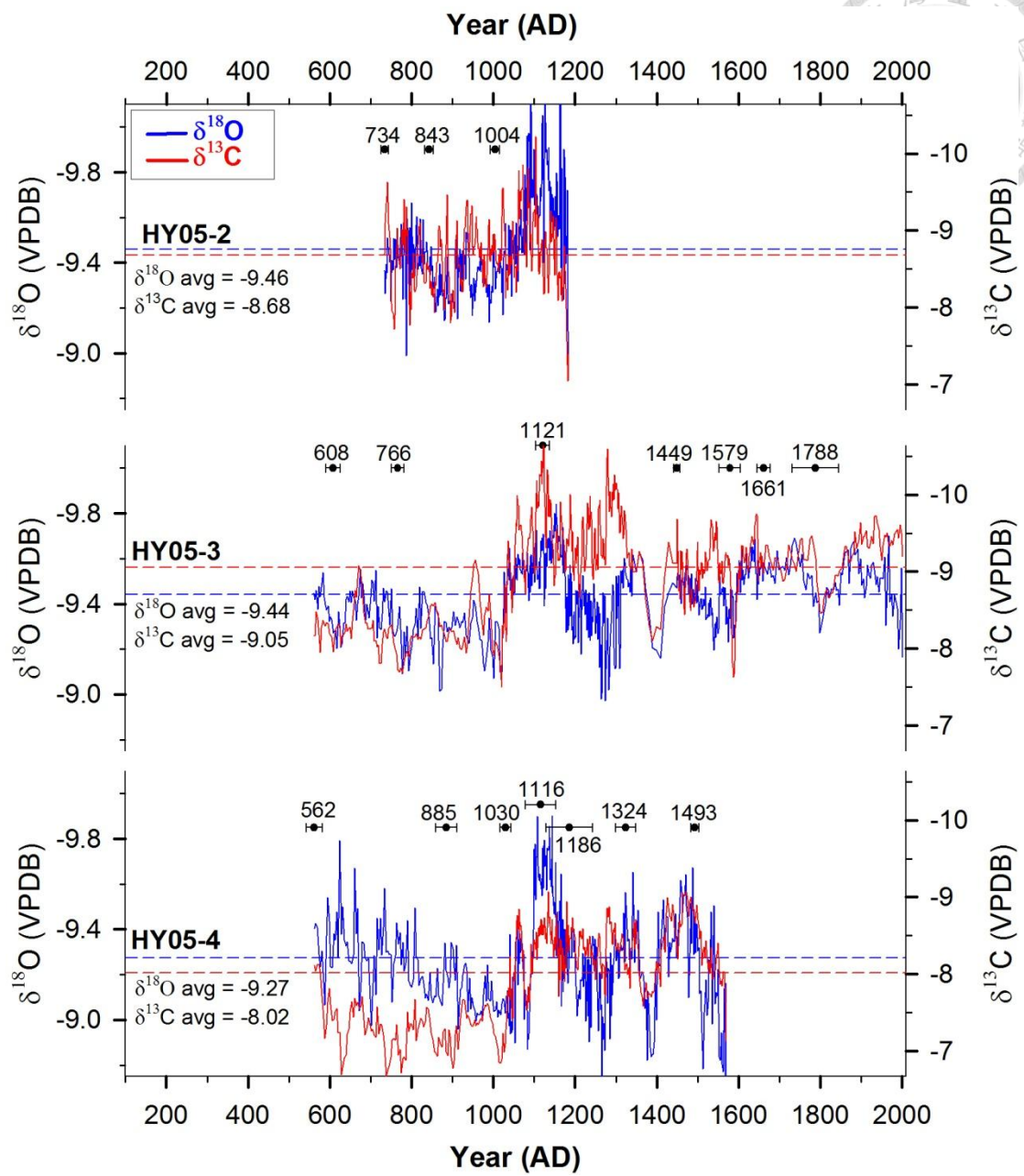


圖 4-4、石筍 HY05 (三個) 碳與氧同位素隨時間變化圖。



4.2 黃爺洞與其它紀錄指標比對

在比對同一洞穴紀錄及討論氣候及植被狀況後，進一步將黃爺洞石筍紀錄與其它紀錄作比對。從圖 2-4 可見標示其它紀錄地點的位置，而藉我們的石筍紀錄來說明，當氧同位素變化偏重（偏正）的時候，表示氣候較乾旱、亞洲夏季風較弱，較弱的亞洲夏季風就沒有辦法將水氣推到正常的季風降雨帶。季風降雨帶是從沿海向中國的內陸推進，如果季風強的話，就可將降雨推向較內陸的區域，其降雨會比較多；季風弱的话就無法將水氣帶過去。

4.2.1 與青海湖和大禹洞紀錄對比

學者徐海等人在青海湖岩心結合了各種化學指標，包括碳氧同位素、總碳、總有機碳 (TOC)、碳氮比、有機碳同位素等，並將其區分為受控於溫度或降雨的代用指標 (Xu et al., 2006)。其中以青海湖沉積物的總有機碳、碳氮比 (C/N 比) 和有機碳同位素，推測青海湖的 TOC 及 C/N 比的變化主要是受控於降雨量的變化，降雨量越大，沉積物的 TOC 值及 C/N 比值就越高，特別是 C/N 比與氣象降雨紀錄 (1960 年代以來) 的對應較佳。

在黃爺洞鄰近地區約 120km 的大禹洞有過去 750 年以來的石筍氧同位素紀錄 (Tan et al., 2009)。比對青海湖岩心碳氮比、黃爺洞及大禹洞石筍氧同位素三處指示降雨的指標 (圖 4-5)，顯示青海湖沉積物碳氮比與黃爺洞石筍氧同位素在過去 600 年以來有相似的變化趨勢，說明季風降雨在這兩個地點呈現同步的變化。在西元 1500 年前後降雨較弱，指示氣候相對乾旱的時期，兩個紀錄 (青海湖、黃爺洞) 的年代上稍有偏差，但於合理範圍內；在西元 1800 年前後，也是季風降雨較弱的時期，在兩地紀錄上可見到一致的對應。而對比大禹洞紀錄發現，雖然在整體的趨勢變化較為不同，但在特定時期有同向的季風降雨強度變化。在進入小冰期第二階段 (西元 1550 年至 1850 年) 的時候，黃爺洞和大禹洞以及青海湖三個地方的記錄都指示降雨相對增強 (圖 4-5)，並在大約西元 1550 到 1780 年的時期內維持較高的降雨強度，說明此區域範圍中這三個地點在小冰

期第二階段表現相對濕潤的氣候。

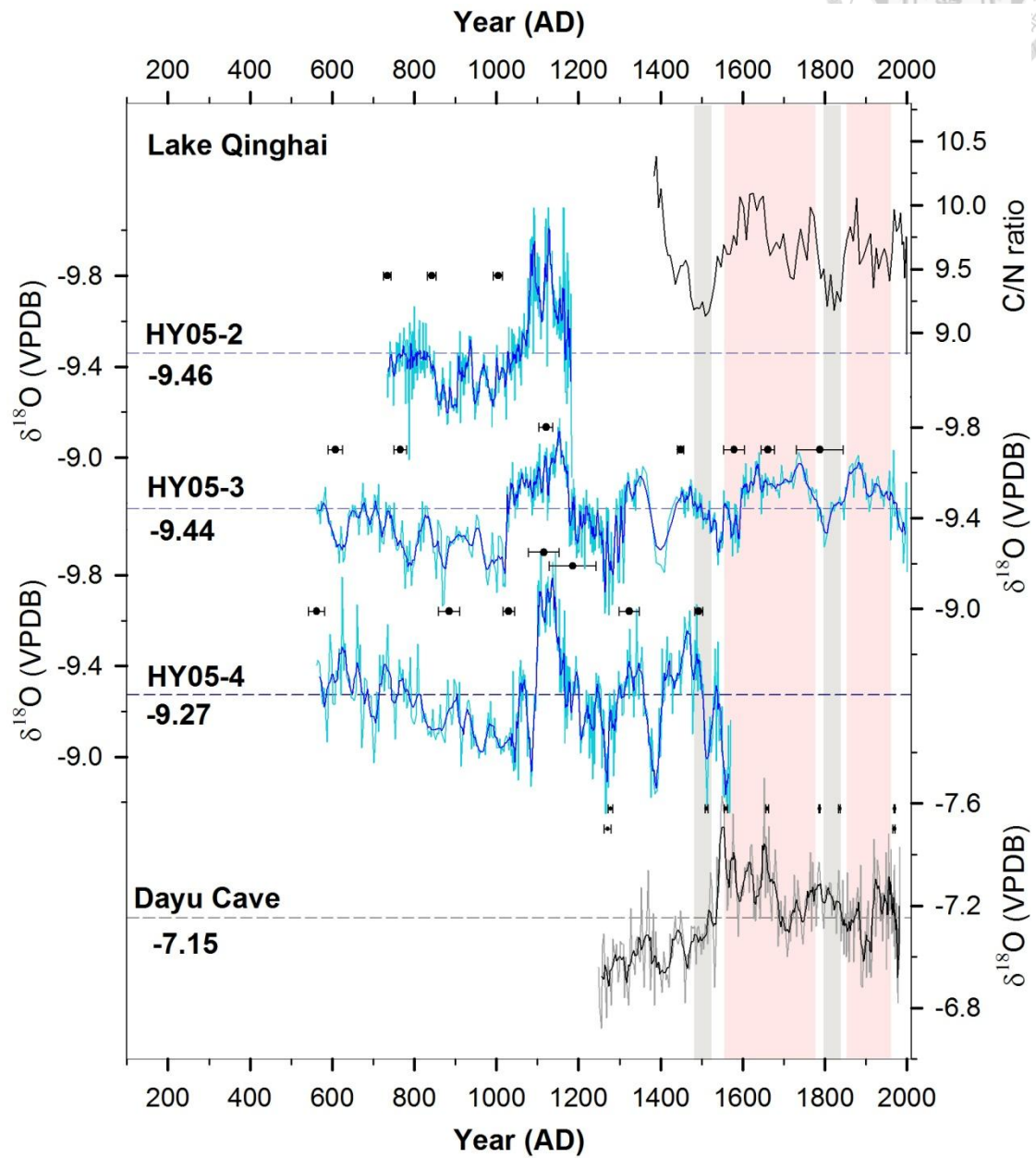


圖 4-5、黃爺洞與青海湖和大禹洞紀錄比對。上方曲線為青海湖岩心碳氮比紀錄 (Xu et al., 2006)；中間為黃爺洞石筍氧同位素紀錄 (藍色曲線)；下方為大禹洞石筍氧同位素紀錄 (Tan et al., 2009)。



4.2.2 與萬象洞紀錄和太陽活動對比

在發表的石筍紀錄中最接近本研究黃爺洞的即為相距 30 公里的萬象洞，理論上在此距離範圍內的兩個洞穴紀錄變化應是較為相似的。比對顯示雖然在一些事件上黃爺洞的紀錄可以與萬象洞紀錄互相對應，但也存在一些差異（圖 4-6）。在西元 1100~1200 年期間黃爺洞氧同位素紀錄顯著地偏輕，在萬象洞紀錄 (Zhang et al., 2008) 也可以看到同樣的趨勢，也就是在中世紀暖期當中，存在一段季風降雨特別增強的時期。對應較為一致的還有黃爺洞、萬象洞及青海湖三個紀錄在約西元 1850 年之後的變化有相似的趨勢，尤其約西元 1850~1900 年皆表現為降雨相對較強的時期。但是在前述小冰期第二階段中西元 1550~1780 年的時間段，黃爺洞、大禹洞及青海湖三個地方的紀錄都指示降雨相對較強，而萬象洞的紀錄沒有這種趨勢，在這段期間是表現為相對乾旱的時期。

為了進一步探討驅動季風降雨變化的機制，我們將太陽輻照紀錄 (Bard et al., 2000) 與這些降雨指標作比對。首先看到同樣位於武都區的萬象洞在長時間尺度上與太陽黑子活動的變化有相似的趨勢（圖 4-7）。而太陽黑子的活動有數個極大或極小期的事件依序為 Oort Minimum (歐特極小期；西元 1040~1080 年)、中古極大期 (Medieval Maximum；西元 1100~1250 年)、Wolf minimum (沃夫極小期；西元 1280~1350 年)、Spörer Minimum (史波勒極小期；西元 1450~1550 年)、Maunder Minimum (蒙德極小期；西元 1645~1715 年)、Dalton Minimum (道爾頓極小期；西元 1790~1830 年)、Modern Maximum (現代極大期；西元 1950 年代至今)。通常來說，太陽輻射比較強的時候北半球氣溫會變暖，一般氣溫變暖的時候夏季風強度會增加，而夏季風強度增加就會造成降雨比較多。比對太陽輻照紀錄可見，黃爺洞氧同位素值變得最輕的西元 1100~1200 年，氣候是比較濕潤的，跟太陽輻射的強度增加吻合，也就是剛好對應於太陽黑子活動的 Medieval Maximum；但是在幾個極小期的事件上，卻不能夠與黃爺洞氧同位素紀錄連結對應，表示在短時間尺度（十年尺度到百年尺度）上，太陽輻照未必是

控制降雨強度的因素。因此，從較長時間趨勢來看太陽活動會影響東亞夏季風的強度；而從十年至百年尺度上的事件比對顯示，太陽活動並不是影響降雨的主要因素。

由黃爺洞氧碳同位素的變化來討論，從整個紀錄較平均值輕重來說，氣候乾旱時植被發育較不好，氣候比較濕潤的話植被發育較好，這個同向的變化是合理的（圖 4-8）。前面說過的，西元 600~1000 年間，碳同位素比平均值重大約 1‰，指示氣候變乾旱，植被發育較差。而碳同位素在西元 1000 年以來的變化基本上與氧同位素一致，且比西元 1000 年前的碳同位素值要輕，而其中不同向的地方在西元 1200~1300 年之間，氧同位素是偏重，碳同位素反而變輕。如果在此時期碳同位素表現不是受氣候控制的話，有兩種可能性，一種是洞穴滴水來源的水系系統改變了，像是水流路徑改變等等，可能會造成碳同位素的波動；另一種就是人類活動在這個地區的影響，可分為以下兩方面的可能。第一像是在此時期為宋朝和元朝的交界，在南宋的時候很多的漢人都被北方的遊牧民族趕到南方去了，假設在此地原來有許多人居住，但是某時期全都從該地撤離了，即減少了人類的干擾活動的話，雖然氣候在當時相對比較差，但其原始森林可能反而會較復育，即人類破壞得少、植被會恢復，此為一種可能。第二就是在當地作物的改變，例如原來種馬鈴薯的改種水稻，馬鈴薯是 C4 的植物而水稻是 C3 的植物，像是這種種植作物種類的改變也會造成碳同位素值的變化。另外，同樣前面提過的碳同位素變重的這三個短暫時期，其中西元 1580~1600 年的這個事件，不見得完全是因氣候變化才造成這種結果。比較在其它兩次（西元 1360~1410 年和 1790~1840 年）的時期，氧同位素也是變得比較重的，不像在此時氧同位素並沒有變很重，而碳同位素是急劇地下降，其碳同位素變重的特徵峰不是單點數據的跳動、是由八至九個數據點組成的。它的變化不光是因為氣候變化造成的，有人為的活動在裡面，這種在短時間內的大幅變化，可能與人為的行為有關，例如可能由人類過度的開發導致整個植被的退化，而不完全是氣



候的變化所造成。

所以從黃爺洞的紀錄與萬象洞之間的比對，在一些特徵之間可以得到氣候的變化有區域性的一致性，但是並不能夠完全支持萬象洞紀錄所提出的氣候變化是造成中國朝代更替的主因。例如在唐代末期，萬象洞紀錄的弱夏季風時期（西元 850~940 年）無法跟黃爺洞的紀錄有良好的對應。其次在元朝末期，萬象洞紀錄提出的弱夏季風時期為西元 1350~1380 年（圖 4-6），在這種只有幾十年的範圍內對應黃爺洞的紀錄是有些偏差的，雖然彼此的定年誤差都要考慮，但是若要連結朝代滅亡的短暫特定時期有一定的風險，對年到十年尺度上來說可能一些偏差甚至會呈現相反的表現。而在萬象洞紀錄中西元 1580~1640 年的弱夏季風時期對應明朝的衰亡（圖 4-6），與黃爺洞紀錄所顯示的特徵有些出入，也就是前面所討論的西元 1580~1600 年之間，黃爺洞碳同位素明顯變重的時期，顯示了氣候與歷史之間的矛盾問題。從氣候影響是關鍵的起因來說，首先在我們的紀錄所看到的氧同位素值在西元 1580~1640 年當中只有起始表現更為短暫且幅度不大地變重，並且在此段時間整體來說是相對變輕的，所以對應上呈現不完全一致的特徵。其次在這當中碳同位素是表現更為劇烈地變重且比明朝滅亡的時期早了數十年，除了對應的特徵和時間範圍出入之外，對於氣候是影響人為的起因或者由紀錄所顯示的人為自身的影響可能更加顯著，在兩者當中的關係是難以去界定的，可能是人類自身影響歷史，而不一定是氣候進而影響歷史，至少從目前的紀錄上不能夠完全支持氣候是關鍵起因的說法。因此，在利用石筍紀錄對中國歷史朝代興衰進行探討時需進行更多的驗證。

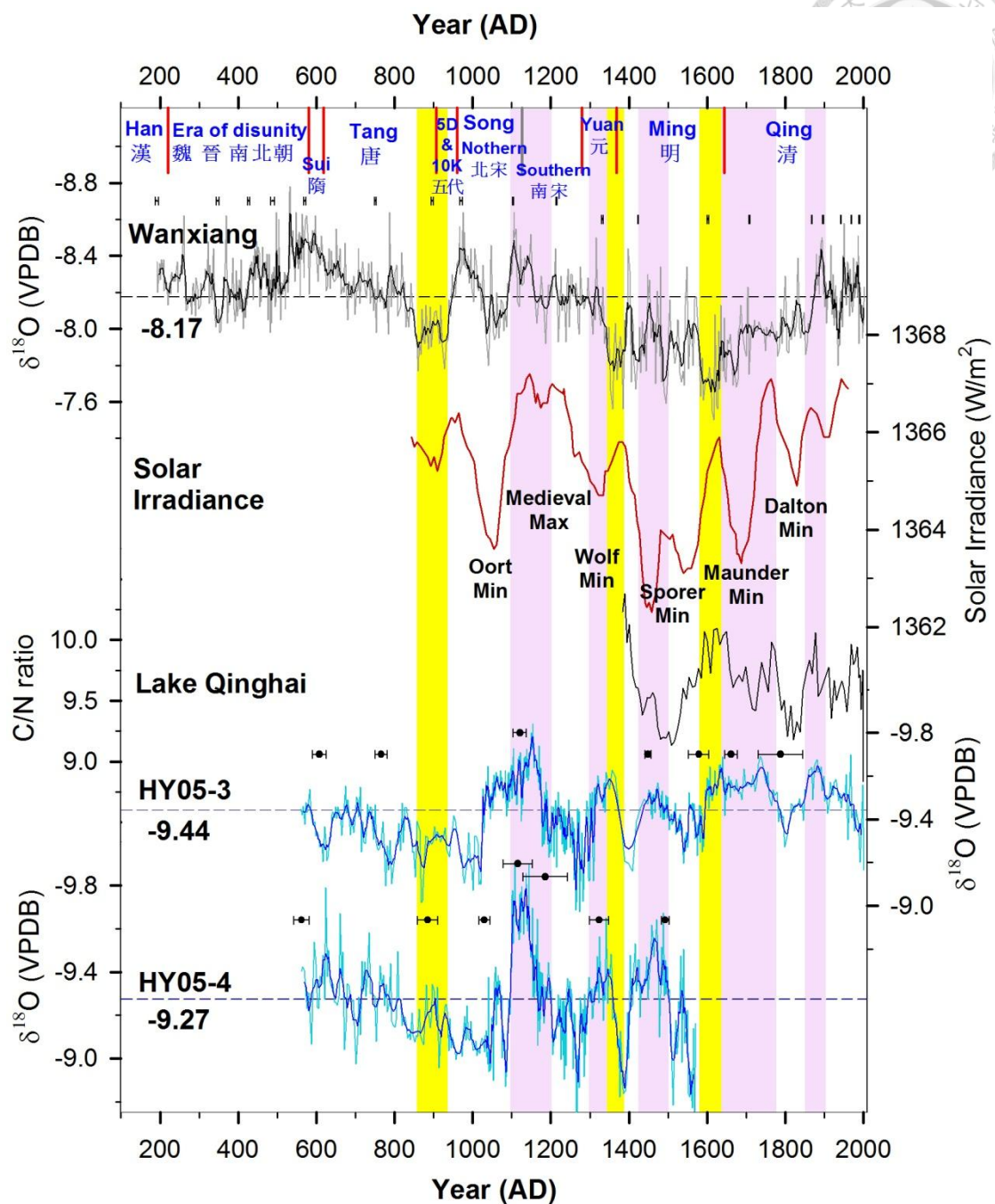


圖 4-6、黃爺洞與萬象洞、太陽活動及青海湖紀錄比對。由上到下依序為萬象洞石筍氧同位素紀錄 (Zhang et al., 2008)；太陽輻照紀錄 (Bard et al., 2000)；青海湖岩心碳氮比 (Xu et al., 2006)；黃爺洞石筍氧同位素。黃色標示萬象洞紀錄提出的三個弱夏季風時期；淺紫色標示本研究黃爺洞紀錄所劃分氣候相對濕潤的時期。

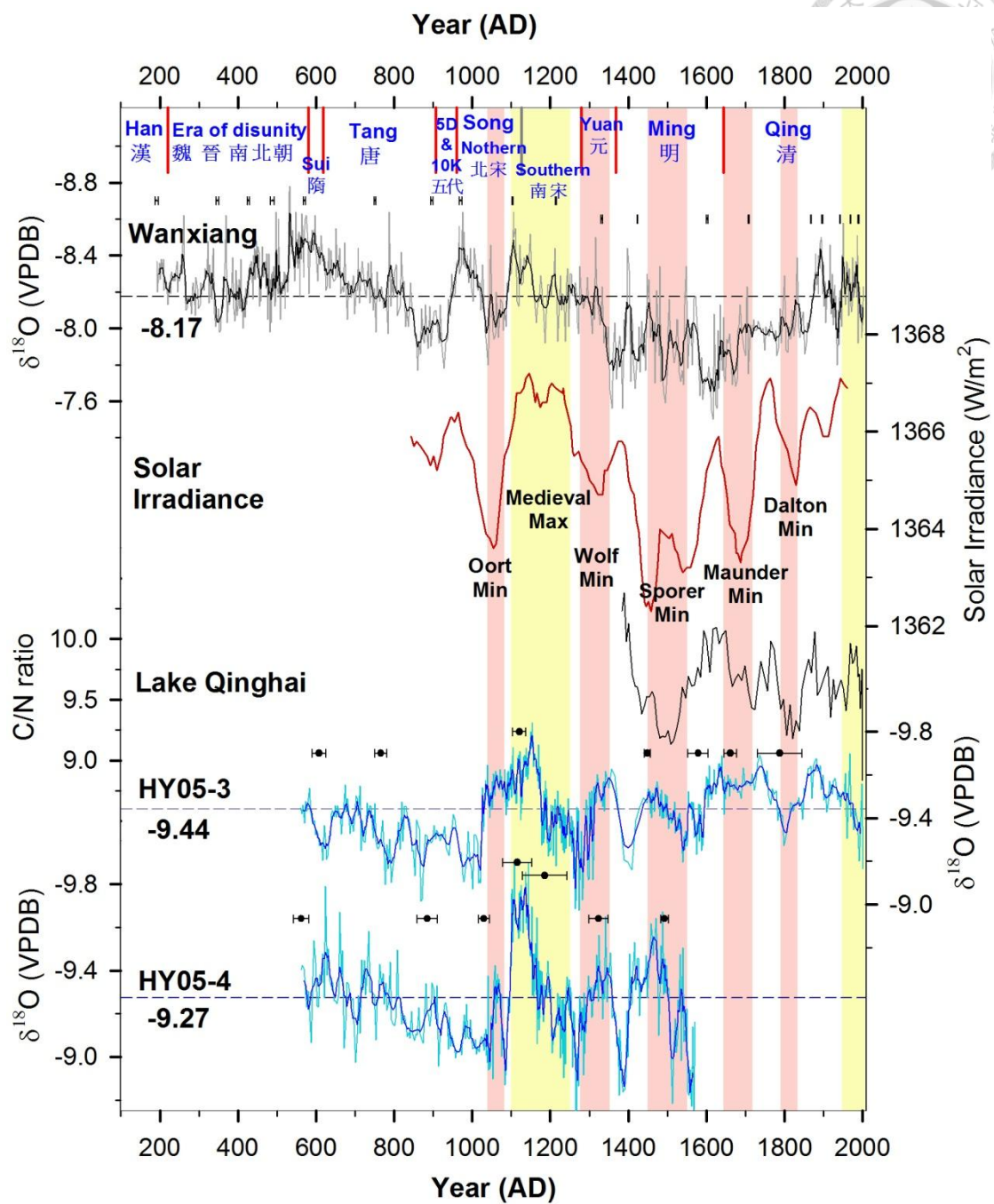


圖 4-7、黃爺洞與萬象洞、太陽活動及青海湖紀錄比對 (之二)。紅色標示太陽黑子活動極小期事件的時間段；淺黃色標示太陽黑子活動極大期的時間段。

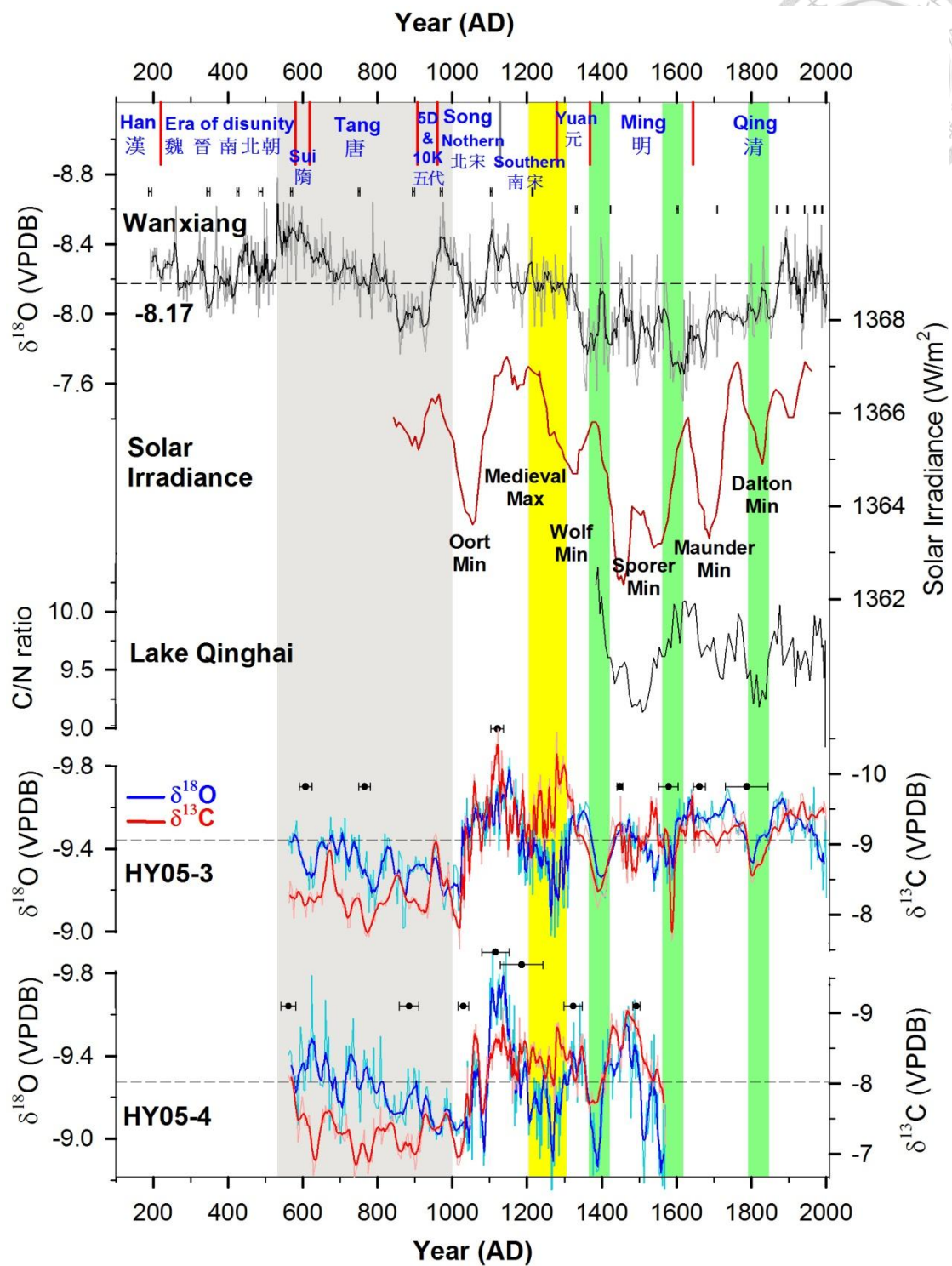


圖 4-8、黃爺洞與萬象洞、太陽活動及青海湖紀錄比對 (之三)。黃爺洞紀錄 (HY05-3；HY05-4) 虛線是平均值，比平均值輕表示氣候比較濕、植被發育比較好；比較重的話表示氣候比較乾、植被發育較不好。黃色標示碳氧同位素變化不同向的時間段 (西元 1200~1300 年)；綠色標示三次碳同位素明顯變重的短暫時期。



4.3 全新世以來的紀錄

討論完本研究的三根黃爺洞石筍 1450 年來的連續沉積紀錄，在此加上石筍沉積間斷以下的部分與其它洞穴紀錄 (和尚洞及董哥洞) 進行比較 (圖 4-9)。我們可以看到在前述討論較短的時間尺度上，縱使鄰近的紀錄也可能因區域性的差異造成不盡相同的變化。而從更長時間尺度上 (千年尺度以上) 可以看到與相距更遠的洞穴氧同位素紀錄上顯示了整體趨勢的一致性 (圖 4-10)，隨著日照強度的減弱，氧同位素皆呈現變重的趨勢。所以在長時間尺度上，太陽輻照會控制石筍氧同位素的變化，即對東亞夏季風的強度有一定的影響。

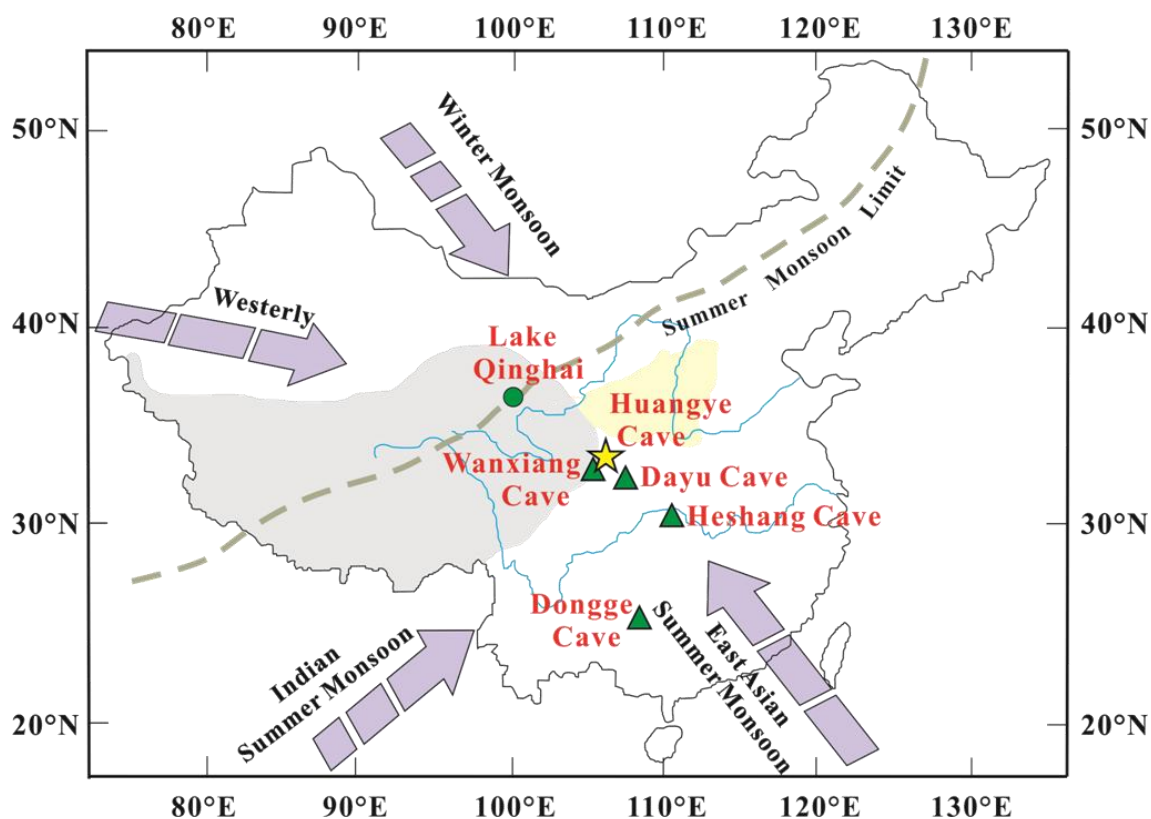


圖 4-9、黃爺洞與其它區域位置圖 (之二)。黃色星號為本研究黃爺洞 (Huangye Cave) 位置；綠色圓形標示青海湖 (Lake Qinghai) 位置；綠色三角形標示萬象洞 (Wanxiang Cave)、大禹洞 (Dayu Cave)、和尚洞 (Heshang Cave) 及董哥洞 (Dongge Cave) 位置。

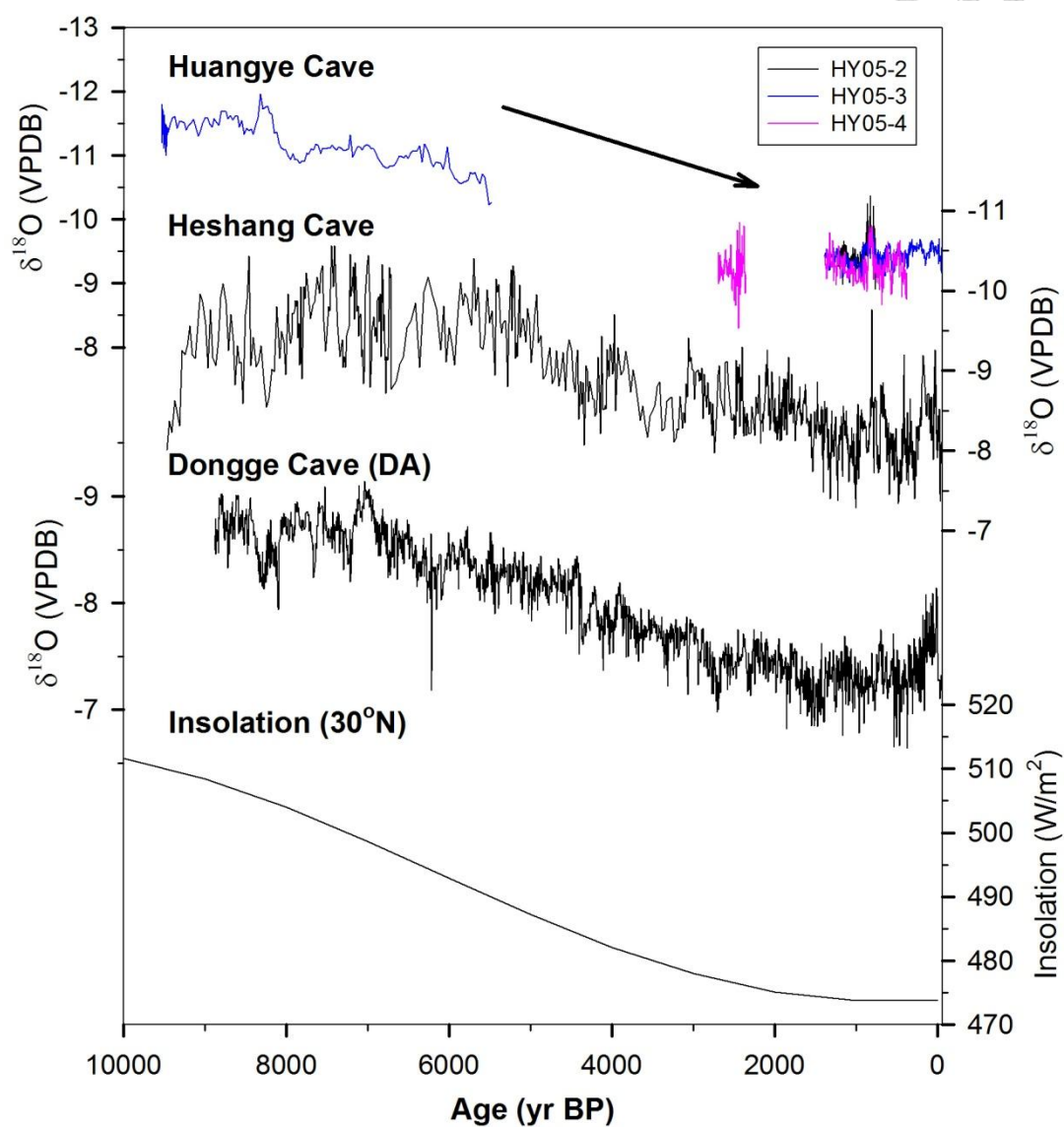


圖 4-10、黃爺洞與和尚洞、董哥洞石筍氧同位素與日照紀錄對比。上到下為本研究黃爺洞氧同位素紀錄；和尚洞紀錄 (Hu et al., 2008)；董哥洞紀錄 (Wang et al., 2005)；30°N 的六月日照曲線 (Berger and Loutre, 1991)。

4.4 頻譜分析

我們對黃爺洞石筍 HY05-3 及 HY05-4 的氧同位素紀錄作譜分析，找出其中所包含的週期性，並與萬象洞和大禹洞的結果作比較，檢視是否有一致的週期。

分別對前面所討論之石筍 HY05-3 及 HY05-4 自西元 560 年以來的紀錄作譜分析 (圖 4-11)。利用 Redfit 方法 (Schulz and Mudelsee, 2002) 進行譜分析，得到主要週期在石筍 HY05-3 為 11.5 年，7.4~7.2 年，5.4 年及 4.6 年；在石筍 HY05-4 為 6.1 及 4.5 年 (圖 4-12)。對照其它洞穴所提出的結果，萬象洞石筍氧同位素紀錄有 170 年，10.5 年，6.4 年和 5.5 年的週期 (Zhang et al., 2008)；大禹洞石筍氧同位素紀錄有 117.8 年，34.6 年，14 年，10.3 年和 6 年左右的週期 (Tan et al., 2009)。由此來看三個洞穴 (黃爺洞、萬象洞及大禹洞) 石筍氧同位素紀錄皆有 6 至 7 年左右的週期，此週期可連結 ENSO (聖嬰—南方震盪現象) 的週期。

在考慮數據解析度問題當中，石筍 HY05-4 的解析度約為 2~3 年左右範圍，而石筍 HY05-3 在某些區段解析度較低，如此要討論所得的 6~7 年週期是不足的。因此，為了週期結果的可信度，我們將兩個石筍紀錄 (HY05-3 及 HY05-4) 分別去趨勢之後再合併起來 (圖 4-13)，提高數據的解析度。可以見到合併後的紀錄中，在兩紀錄重合的時間範圍內數據點密度是較高的，即西元 560~1570 年。因此我們將整段紀錄和此段西元 560~1570 年的紀錄都進行譜分析 (圖 4-14)，兩者結果顯示得到的週期大致相同，但是並不能重現 6 至 7 年的週期。

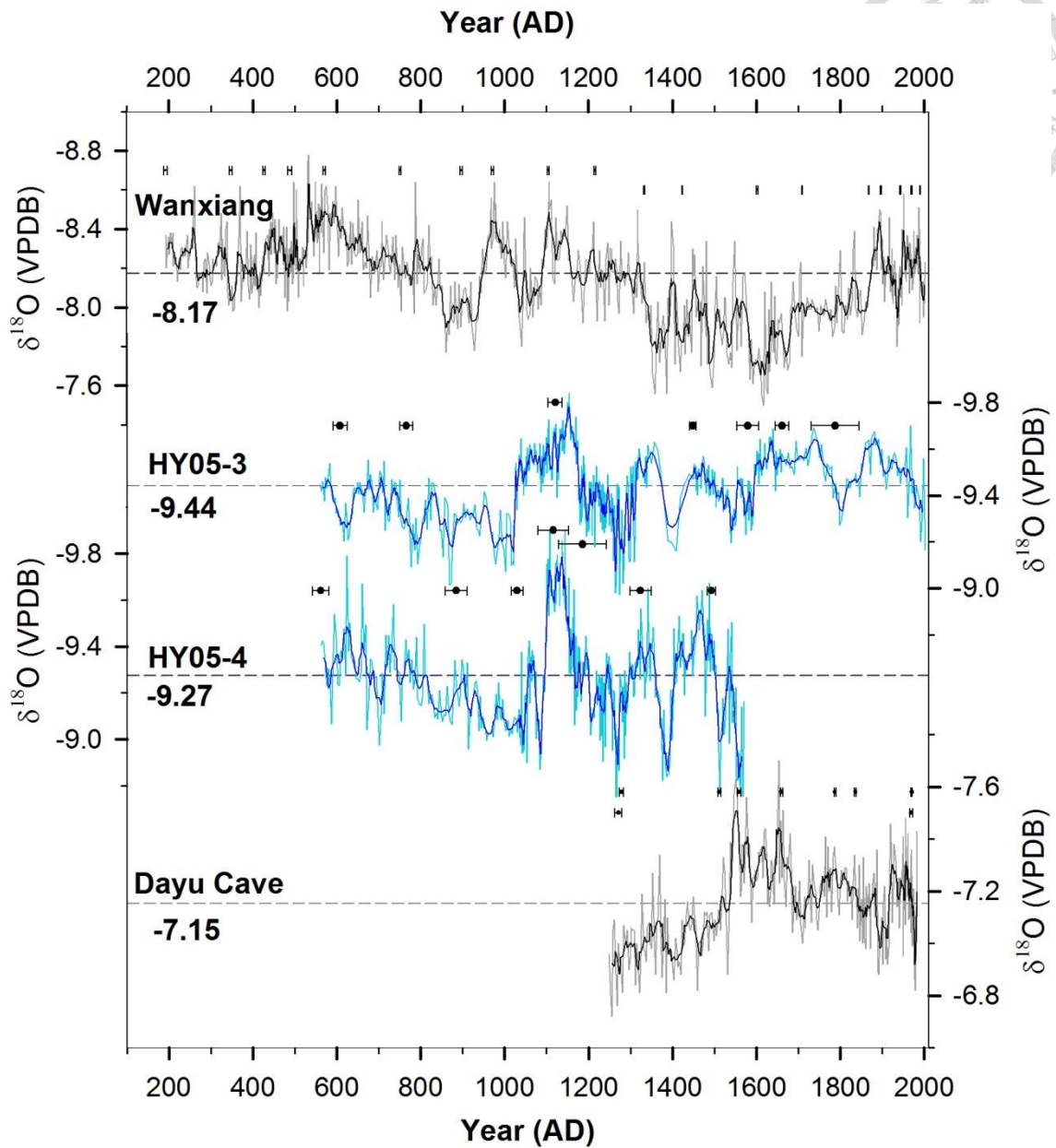


圖 4-11、洞穴石筍紀錄 (萬象洞；黃爺洞；大禹洞)。上方為萬象洞紀錄 (西元 190 ~2003 年)；中間為本研究黃爺洞石筍 HY05-3 紀錄 (西元 560 ~2000 年) 及 HY05-4 紀錄 (西元 560 ~1570 年) ；下方為大禹洞紀錄 (西元 1249 ~1983 年)。

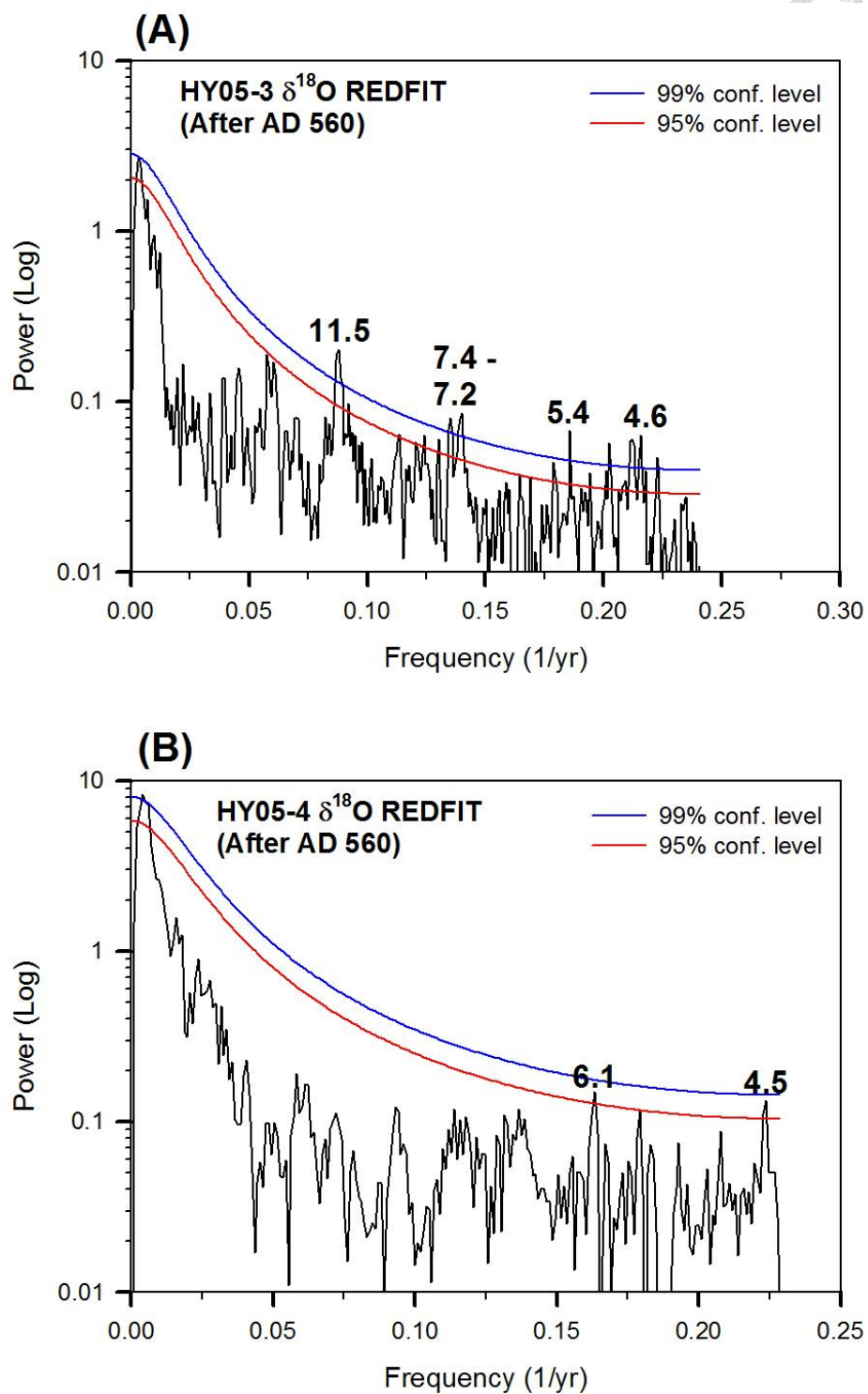


圖 4-12、石筍 HY05-3 及 HY05-4 譜分析 (Redfit)。圖 A 為石筍 HY05-3 結果；圖 B 為石筍 HY05-4 結果。

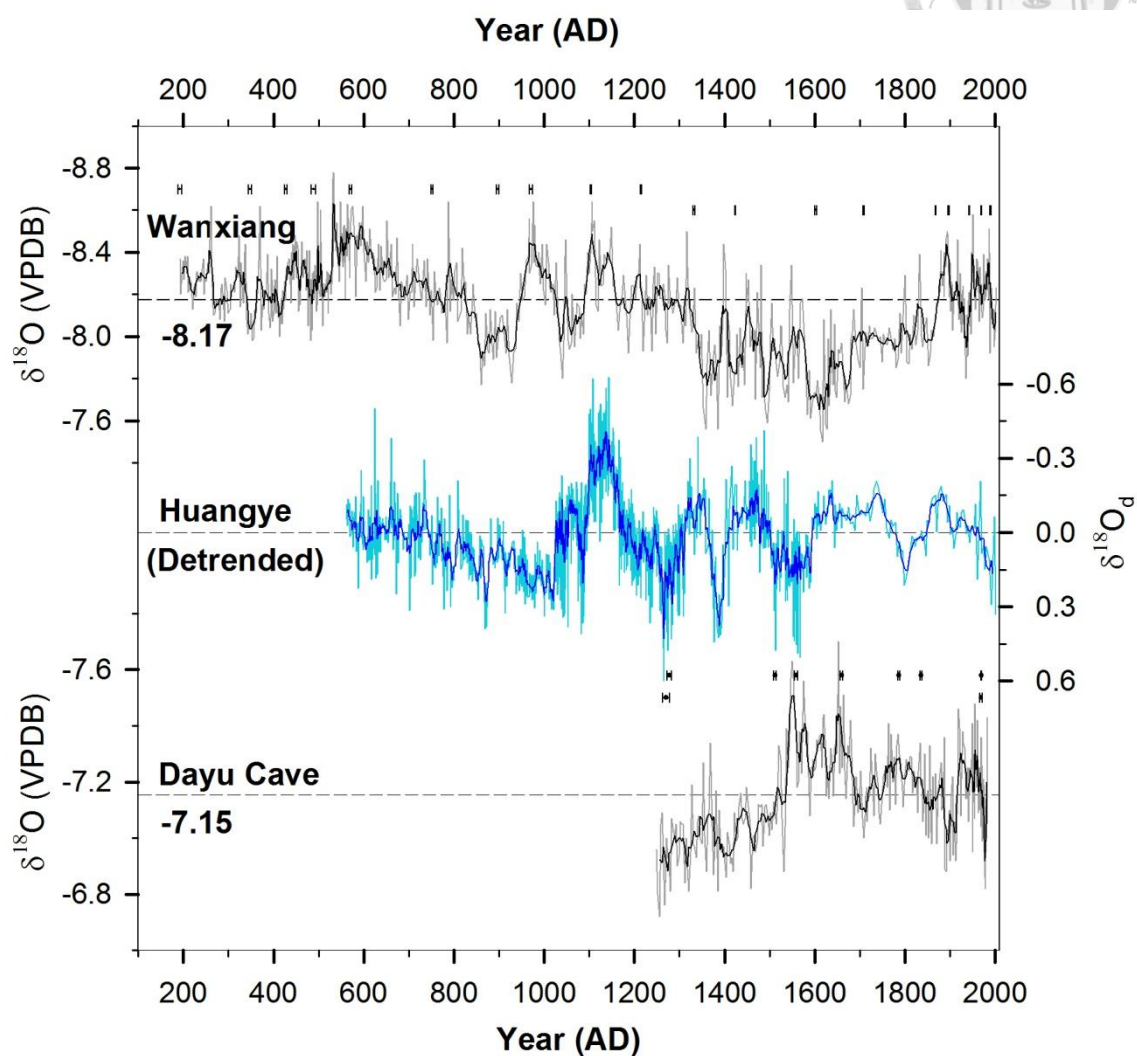


圖 4-13、洞穴石筍紀錄 (萬象洞；黃爺洞；大禹洞) 之二。中間黃爺洞紀錄為石筍

HY05-3 及 HY05-4 分別去趨勢後合併的紀錄。

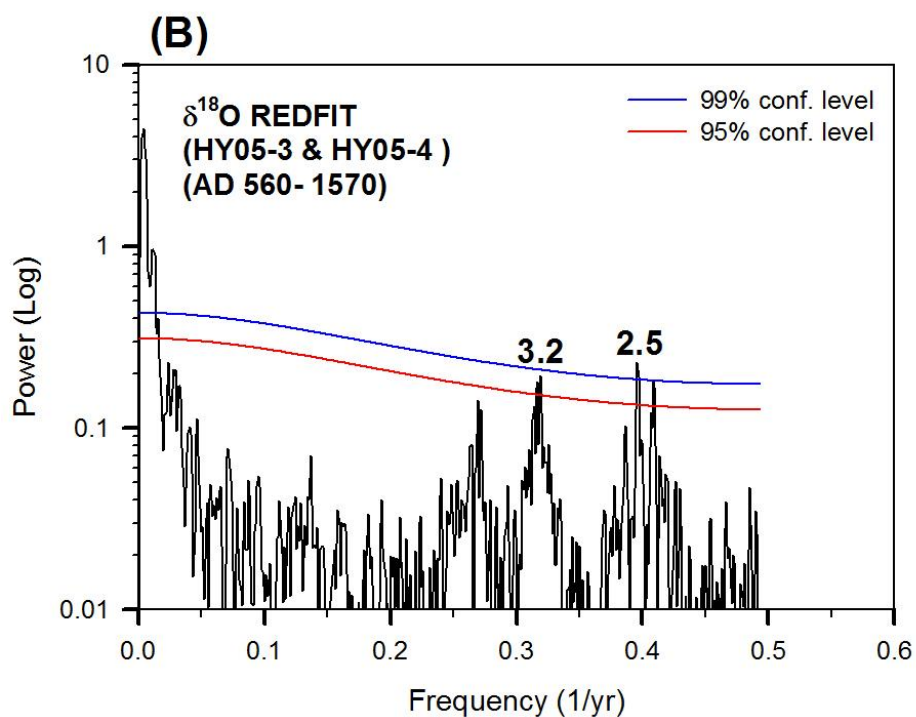
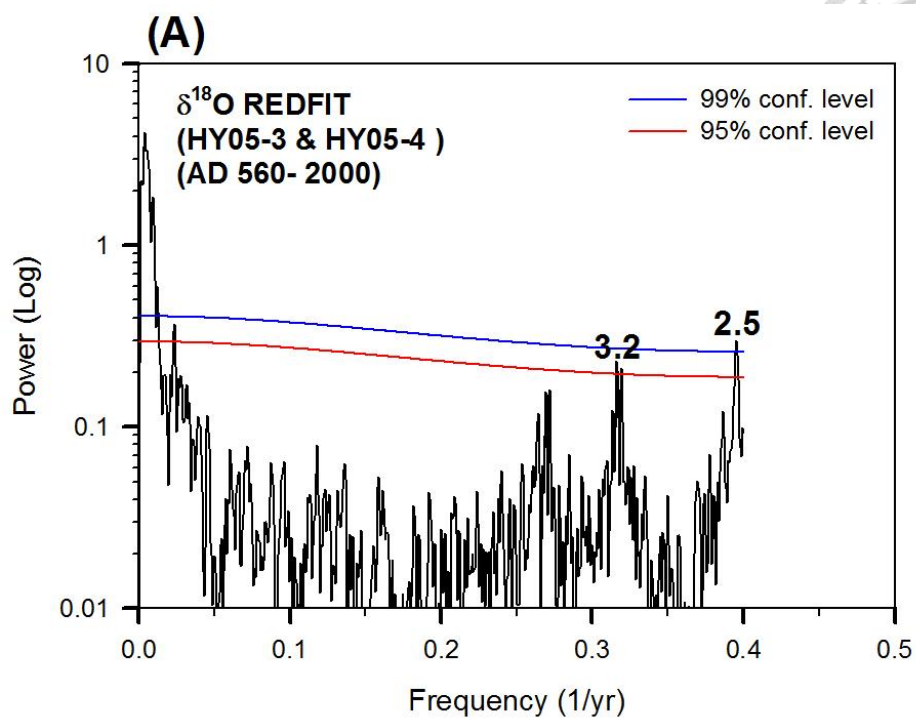


圖 4-14、石筍 HY05-3 及 HY05-4 合併紀錄作譜分析 (Redfit)。圖 A 為合併後的紀錄以整段 (西元 560~2000 年)作譜分析結果；圖 B 合併後紀錄以西元 560~1570 年時間段的紀錄作譜分析結果。

第五章 結論



本研究經由對黃爺洞三根石筍定年及碳氧同位素分析結果進行討論與比對之後，獲得下述的結果：

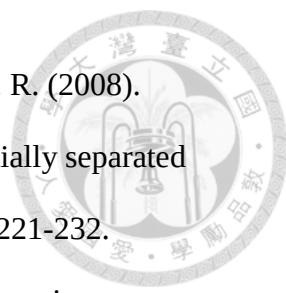
1. 黃爺洞三根石筍 (HY05-2；HY05-3；HY05-4) 生長範圍在全新世以內，在老於 1400 年皆有沉積間斷，而 1400 年內有連續的沉積紀錄。
2. 近 1450 年來黃爺洞區域位置的氣候在西元 1100~1200 年，1300~1360 年，1420~1500 年，1600~1780 年和 1850~1900 年這幾個時間段內是相對較濕潤的，特別在中世紀暖期當中有一段季風降雨特別增強的時期（西元 1100~1200 年）。
3. 根據比對結果顯示在過去 600 年來青海湖岩心碳氮比指示降雨的紀錄與黃爺洞紀錄呈現相當的一致性。其中與萬象洞紀錄不一樣的是，在進入小冰期第二階段（西元 1550 年至 1850 年）的時候，黃爺洞和大禹洞以及青海湖三個位置的記錄都指示相對濕潤的氣候（西元 1550~1780 年），跟萬象洞記錄在此時間段相對乾旱的狀態呈相反的結果。該時期相對濕潤的氣候狀態也進一步說明季風氣候不僅存在冷乾及暖濕的模式，也有像此時期所顯示冷濕的表現。
4. 碳氧同位素紀錄顯示，洞穴區域上覆植被受氣候變化控制的影響很大，其中西元 1200~1300 年間以及西元 1580~1600 年當中碳同位素的變化包含非氣候影響的因素（如人為的活動）。其次本研究結果無法支持萬象洞紀錄所提出之氣候與中國朝代更替的關聯：以對於明朝末年的農民起義而滅亡，而西元 1580~1600 年植被的變差發生早於明末數十年；還有唐代末年與萬象洞紀錄的弱夏季風時期之間的特徵不一致來看，顯示不能支持氣候的狀況關連社會的繁衰、氣候是引起朝代變更之關鍵因素的觀點。
5. 將黃爺洞九千多年來的不連續紀錄與和尚洞及董哥洞紀錄比對，顯示在長時間尺度上（千年尺度以上）可以得到在區域上較為廣泛的一致性，並且與日照紀錄有相當的變化趨勢，反映了全新世以來東亞夏季風強度的減弱。

- 
6. 與太陽輻照紀錄比對，顯示在長時間尺度上太陽輻照可以影響東亞夏季風的強度；但是在短時間尺度（十年尺度或百年尺度）上，太陽輻照未必是影響季風降雨強度的主因。
 7. 由黃爺洞氧同位素紀錄頻譜分析的初步結果，可在黃爺洞、萬象洞及大禹洞找到相近的 6~7 年左右的週期性。如能增進此週期的可靠性，可進一步地對季風與 ENSO 的關係作更多的探討。

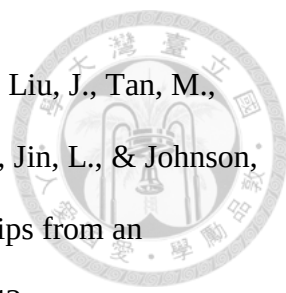
參考文獻



- 代志波. (2007). 甘肅武都黃爺洞石筍穩定同位素組成及氣候意義. 蘭州大學碩士論文, 中國甘肅, 58 頁.
- 李廷勇, 李紅春, 向曉晶, 郭子興, 李俊雲, 周福莉, 陳虹利, 彭玲莉. (2012). 碳同位素($\delta^{13}\text{C}$)在重慶岩溶地區植被-土壤-基岩-洞穴系統運移特徵研究. 中國科學 地球科學, 42(4), 526-535.
- 李紅春, 顧德隆, Dorte Paulsen, 等. (2000). 陝南石筍穩定同位素記錄中的古氣候和古季風信息. 地震地質, 22(增刊), 63-78.
- 鍾全雄, 黃國芳, 王博賢, 游鎮烽. (2007). 高精度無機質譜儀在地球科學及海洋科學研究上的應用. 中國化學會期刊, 第 65 卷第二期, 頁 113~124.
- Bard, E., Raisbeck, G., Yiou, F., & Jouzel, J. (2000). Solar irradiance during the last 1200 years based on cosmogenic nuclides. *Tellus B*, 52(3), 985-992.
- Berger, A., & Loutre, M. F. (1991). Insolation values for the climate of the last 10 million years. *Quaternary Science Reviews*, 10(4), 297-317.
- Cheng, H., Edwards, R. L., & Haug, G. (2010). Comment on “On linking climate to Chinese dynastic change: Spatial and temporal variations of monsoonal rain”. *Chinese Science Bulletin*, 55(32), 3734-3737.
- Friedman, I., & O'Neil, J. R. (1977). Compilation of stable isotope fractionation factors of geochemical interest. U S Geological Survey Professional Paper, P-0440-KK, 1-12.
- Hendy, C. H. (1971). The isotopic geochemistry of speleothems—I. The calculation of the effects of different modes of formation on the isotopic composition of speleothems and their applicability as palaeoclimatic indicators. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 35(8), 801-824.

- 
- Hu, C., Henderson, G. M., Huang, J., Xie, S., Sun, Y., & Johnson, K. R. (2008). Quantification of Holocene Asian monsoon rainfall from spatially separated cave records. *Earth and Planetary Science Letters*, 266(3–4), 221–232.
- O’Neil, J. R., Shaw, S. E., & Flood, R. H. (1977). Oxygen and hydrogen isotope compositions as indicators of granite genesis in the New England Batholith, Australia. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 62(3), 313–328.
- Schulz, M., & Mudelsee, M. (2002). REDFIT: estimating red-noise spectra directly from unevenly spaced paleoclimatic time series. *Computers & Geosciences*, 28(3), 421–426.
- Schwarcz, H. (2007). CARBONATE STABLE ISOTOPES | Overview. In A. E. Editor-in-Chief: Scott (Ed.), *Encyclopedia of Quaternary Science* (pp. 287–290). Oxford: Elsevier.
- Schwarcz, H. (2007). CARBONATE STABLE ISOTOPES | Speleothems. In A. E. Editor-in-Chief: Scott (Ed.), *Encyclopedia of Quaternary Science* (pp. 290–300). Oxford: Elsevier.
- Tan, L., Cai, Y., Yi, L., An, Z., & Ai, L. (2008). Precipitation variations of Longxi, northeast margin of Tibetan Plateau since AD 960 and their relationship with solar activity. *Clim. Past*, 4(1), 19–28.
- Tan, L., Cai, Y., Cheng, H., An, Z., & Edwards, R. L. (2009). Summer monsoon precipitation variations in central China over the past 750 years derived from a high-resolution absolute-dated stalagmite. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 280(3–4), 432–439.

- 
- Tan, L., Cai, Y., An, Z., Edwards, R. L., Cheng, H., Shen, C.-C., & Zhang, H. (2011). Centennial- to decadal-scale monsoon precipitation variability in the semi-humid region, northern China during the last 1860 years: Records from stalagmites in Huangye Cave. *Holocene*, 21, 287–296.
- Tan, L., Cai, Y., An, Z., Yi, L., Zhang, H., & Qin, S. (2011). Climate patterns in north central China during the last 1800 yr and their possible driving force. *Clim. Past*, 7(3), 685-692.
- Wang, Y., Cheng, H., Edwards, R. L., He, Y., Kong, X., An, Z., Wu, J., Kelly, M. J., Dykoski, C. A., & Li, X. (2005). The Holocene Asian Monsoon: Links to Solar Changes and North Atlantic Climate. *Science*, 308(5723), 854-857.
- Xu, H., Ai, L., Tan, L., & An, Z. (2006). Stable isotopes in bulk carbonates and organic matter in recent sediments of Lake Qinghai and their climatic implications. *Chemical Geology*, 235(3–4), 262-275.
- Xu, H., Hou, Z. H., Ai, L., & Tan, L. C. (2007). Precipitation at Lake Qinghai, NE Qinghai–Tibet Plateau, and its relation to Asian summer monsoons on decadal/interdecadal scales during the past 500 years. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 254(3–4), 541-549.
- Zhang, D., Li, H.-C., Ku, T.-L., & Lu, L. (2010). On linking climate to Chinese dynastic change: Spatial and temporal variations of monsoonal rain. *Chinese Science Bulletin*, 55(1), 77-83.
- Zhang, P., Dai, Z., An, C., Li, C., Pang, F., Long, L et al. (2005). Huangye Cave: A new karst cave found in Southern Gansu Province. *Quaternary Sciences* 25: 795 (in Chinese with English abstract).

- 
- Zhang, P., Cheng, H., Edwards, R. L., Chen, F., Wang, Y., Yang, X., Liu, J., Tan, M., Wang, X., Liu, J., An, C., Dai, Z., Zhou, J., Zhang, D., Jia, J., Jin, L., & Johnson, K. R. (2008). A Test of Climate, Sun, and Culture Relationships from an 1810-Year Chinese Cave Record. *Science*, 322(5903), 940-942.
- Zhao, K., Wang, Y., Edwards, R. L., Cheng, H., & Liu, D. (2010). High-resolution stalagmite $\delta^{18}\text{O}$ records of Asian monsoon changes in central and southern China spanning the MIS 3/2 transition. *Earth and Planetary Science Letters*, 298(1–2), 191-198.

附錄



附表一、石筍 HY05-2 碳氧同位素實驗分析數據

ID	Depth (mm)	$\delta^{13}\text{C}$ (PDB)	$\delta^{18}\text{O}$ (PDB)	ID	Depth (mm)	$\delta^{13}\text{C}$ (PDB)	$\delta^{18}\text{O}$ (PDB)	ID	Depth (mm)	$\delta^{13}\text{C}$ (PDB)	$\delta^{18}\text{O}$ (PDB)
2-001	0.25	-7.388	-8.913	2-029	7.25	-8.627	-9.628	2-057	14.25	-8.522	-9.732
2-002	0.50	-7.041	-9.099	2-030	7.50	-8.895	-9.541	2-058	14.50	-8.717	-9.606
2-003	0.75	-7.253	-9.721	2-031	7.75	-9.189	-9.687	2-059	14.75	-8.437	-9.612
2-004	1.00	-7.561	-9.517	2-032	8.00	-9.049	-9.623	2-060	15.00	-8.472	-9.596
2-005	1.25	-7.987	-9.431	2-033	8.25	-8.955	-9.610	2-061	15.25	-9.215	-9.652
2-006	1.50	-8.251	-9.396	2-034	8.50	-8.907	-9.704	2-062	15.50	-8.821	-9.522
2-007	1.75	-8.481	-9.781	2-035	8.75	-8.850	-9.580	2-063	15.75	-9.213	-9.698
2-008	2.00	-8.759	-9.308	2-036	9.00	-9.256	-9.737	2-064	16.00	-9.407	-9.706
2-009	2.25	-8.802	-9.870	2-037	9.25	-9.126	-9.573	2-065	16.25	-10.223	-9.885
2-010	2.50	-8.525	-9.901	2-038	9.50	-8.820	-9.763	2-066	16.50	-9.644	-9.621
2-011	2.75	-8.184	-9.236	2-039	9.75	-8.416	-9.719	2-067	16.75	-9.050	-9.710
2-012	3.00	-8.159	-9.291	2-040	10.00	-8.327	-9.909	2-068	17.00	-9.274	-9.654
2-013	3.25	-8.080	-9.288	2-041	10.25	-8.186	-9.767	2-069	17.25	-9.237	-9.902
2-014	3.50	-8.486	-9.817	2-042	10.50	-8.386	-9.850	2-070	17.50	-9.238	-9.711
2-015	3.75	-8.364	-9.516	2-043	10.75	-8.687	-9.832	2-071	17.75	-9.113	-9.688
2-016	4.00	-8.163	-9.378	2-044	11.00	-8.774	-9.902	2-072	18.00	-8.654	-9.770
2-017	4.25	-8.406	-10.209	2-045	11.25	-8.780	-9.888	2-073	18.25	-8.470	-9.688
2-018	4.50	-8.379	-9.791	2-046	11.50	-8.987	-10.021	2-074	18.50	-8.560	-9.994
2-019	4.75	-8.468	-9.549	2-047	11.75	-8.886	-10.373	2-075	18.75	-8.680	-10.069
2-020	5.00	-8.447	-9.609	2-048	12.00	-8.183	-9.858	2-076	19.00	-8.954	-10.244
2-021	5.25	-8.095	-9.571	2-049	12.25	-8.344	-9.794	2-077	19.25	-8.853	-9.457
2-022	5.50	-8.296	-9.516	2-050	12.50	-8.172	-9.401	2-078	19.50	-9.361	-9.936
2-023	5.75	-8.426	-9.762	2-051	12.75	-8.404	-9.766	2-079	19.75	-9.296	-9.974
2-024	6.00	-8.494	-9.724	2-052	13.00	-8.581	-10.052	2-080	20.00	-9.820	-9.965
2-025	6.25	-8.941	-9.798	2-053	13.25	-8.884	-10.016	2-081	20.25	-9.507	-9.668
2-026	6.50	-9.169	-9.524	2-054	13.50	-8.828	-9.746	2-082	20.50	-9.662	-9.918
2-027	6.75	-8.885	-9.692	2-055	13.75	-8.737	-9.691	2-083	20.75	-9.072	-9.959
2-028	7.00	-8.420	-9.562	2-056	14.00	-8.702	-9.671	2-084	21.00	-8.524	-9.587

ID	Depth (mm)	$\delta^{13}\text{C}$ (PDB)	$\delta^{18}\text{O}$ (PDB)	ID	Depth (mm)	$\delta^{13}\text{C}$ (PDB)	$\delta^{18}\text{O}$ (PDB)	ID	Depth (mm)	$\delta^{13}\text{C}$ (PDB)	$\delta^{18}\text{O}$ (PDB)
2-085	21.25	-8.838	-9.732	2-118	29.50	-8.429	-9.382	2-151	37.75	-8.700	-9.268
2-086	21.50	-8.683	-9.482	2-119	29.75	-8.662	-9.567	2-152	38.00	-8.809	-9.298
2-087	21.75	-8.765	-9.790	2-120	30.00	-8.459	-9.340	2-153	38.25	-8.686	-9.274
2-088	22.00	-8.804	-9.435	2-121	30.25	-8.226	-9.369	2-154	38.50	-8.755	-9.221
2-089	22.25	-9.123	-9.492	2-122	30.50	-8.335	-9.395	2-155	38.75	-8.599	-9.232
2-090	22.50	-9.533	-9.534	2-123	30.75	-8.391	-9.364	2-156	39.00	-8.621	-9.242
2-091	22.75	-9.856	-9.551	2-124	31.00	-8.488	-9.395	2-157	39.25	-8.789	-9.304
2-092	23.00	-9.563	-9.443	2-125	31.25	-8.118	-9.574	2-158	39.50	-9.148	-9.136
2-093	23.25	-9.539	-9.443	2-126	31.50	-8.791	-9.456	2-159	39.75	-9.070	-9.290
2-094	23.50	-9.525	-9.518	2-127	31.75	-8.995	-9.435	2-160	40.00	-8.769	-9.303
2-095	23.75	-9.386	-9.636	2-128	32.00	-9.100	-9.452	2-161	40.25	-8.682	-9.248
2-096	24.00	-9.511	-9.566	2-129	32.25	-9.286	-9.424	2-162	40.50	-8.420	-9.296
2-097	24.25	-9.154	-9.523	2-130	32.50	-9.559	-9.169	2-163	40.75	-8.263	-9.269
2-098	24.50	-9.419	-9.455	2-131	32.75	-9.537	-9.375	2-164	41.00	-8.289	-9.308
2-099	24.75	-9.778	-9.559	2-132	33.00	-9.185	-9.269	2-165	41.25	-8.382	-9.317
2-100	25.00	-9.533	-9.545	2-133	33.25	-8.617	-9.365	2-166	41.50	-8.572	-9.342
2-101	25.25	-8.787	-9.317	2-134	33.50	-8.632	-9.377	2-167	41.75	-8.603	-9.308
2-102	25.50	-8.476	-9.353	2-135	33.75	-8.757	-9.388	2-168	42.00	-8.690	-9.405
2-103	25.75	-8.540	-9.477	2-136	34.00	-8.586	-9.459	2-169	42.25	-8.272	-9.353
2-104	26.00	-8.198	-9.576	2-137	34.25	-8.689	-9.352	2-170	42.50	-8.371	-9.312
2-105	26.25	-8.528	-9.395	2-138	34.50	-8.676	-9.385	2-171	42.75	-8.631	-9.390
2-106	26.50	-8.515	-9.523	2-139	34.75	-8.468	-9.398	2-172	43.00	-8.604	-9.392
2-107	26.75	-8.538	-9.502	2-140	35.00	-8.568	-9.370	2-173	43.25	-8.843	-9.454
2-108	27.00	-8.390	-9.499	2-141	35.25	-8.553	-9.376	2-174	43.50	-8.663	-9.360
2-109	27.25	-8.814	-9.416	2-142	35.50	-8.578	-9.360	2-175	43.75	-8.794	-9.455
2-110	27.50	-8.921	-9.468	2-143	35.75	-8.567	-9.360	2-176	44.00	-8.730	-9.407
2-111	27.75	-9.126	-9.499	2-144	36.00	-8.607	-9.331	2-177	44.25	-8.655	-9.365
2-112	28.00	-9.001	-9.439	2-145	36.25	-8.747	-9.284	2-178	44.50	-8.772	-9.370
2-113	28.25	-8.560	-9.251	2-146	36.50	-8.891	-9.385	2-179	44.75	-8.766	-9.383
2-114	28.50	-8.616	-9.538	2-147	36.75	-8.958	-9.380	2-180	45.00	-8.846	-9.380
2-115	28.75	-8.673	-9.546	2-148	37.00	-8.729	-9.495	2-181	45.25	-9.024	-9.358
2-116	29.00	-8.593	-9.394	2-149	37.25	-8.758	-9.487	2-182	45.50	-9.027	-9.319
2-117	29.25	-8.437	-9.440	2-150	37.50	-8.950	-9.455	2-183	45.75	-9.184	-9.295

ID	Depth (mm)	$\delta^{13}\text{C}$ (PDB)	$\delta^{18}\text{O}$ (PDB)	ID	Depth (mm)	$\delta^{13}\text{C}$ (PDB)	$\delta^{18}\text{O}$ (PDB)	ID	Depth (mm)	$\delta^{13}\text{C}$ (PDB)	$\delta^{18}\text{O}$ (PDB)
2-184	46.00	-9.102	-9.323	2-217	54.25	-8.565	-9.405	2-250	62.50	-8.425	-9.253
2-185	46.25	-8.901	-9.266	2-218	54.50	-8.530	-9.425	2-251	62.75	-8.610	-9.296
2-186	46.50	-8.815	-9.230	2-219	54.75	-8.521	-9.333	2-252	63.00	-8.838	-9.271
2-187	46.75	-8.776	-9.310	2-220	55.00	-8.687	-9.152	2-253	63.25	-8.888	-9.351
2-188	47.00	-8.796	-9.331	2-221	55.25	-9.128	-9.557	2-254	63.50	-8.790	-9.256
2-189	47.25	-8.682	-9.251	2-222	55.50	-8.940	-9.413	2-255	63.75	-9.013	-9.396
2-190	47.50	-8.785	-9.196	2-223	55.75	-8.886	-9.373	2-256	64.00	-9.062	-9.344
2-191	47.75	-8.934	-9.167	2-224	56.00	-8.571	-9.435	2-257	64.25	-9.011	-9.247
2-192	48.00	-9.322	-9.266	2-225	56.25	-8.303	-9.459	2-258	64.50	-8.807	-9.252
2-193	48.25	-9.214	-9.304	2-226	56.50	-7.934	-9.197	2-259	64.75	-8.703	-9.211
2-194	48.50	-9.216	-9.246	2-227	56.75	-7.994	-9.229	2-260	65.00	-8.593	-9.283
2-195	48.75	-9.063	-9.277	2-228	57.00	-7.994	-9.198	2-261	65.25	-8.587	-9.252
2-196	49.00	-8.844	-9.301	2-229	57.25	-8.222	-9.226	2-262	65.50	-8.452	-9.224
2-197	49.25	-8.713	-9.425	2-230	57.50	-8.152	-9.259	2-263	65.75	-8.282	-9.183
2-198	49.50	-8.724	-9.482	2-231	57.75	-8.144	-9.263	2-264	66.00	-8.331	-9.224
2-199	49.75	-8.878	-9.533	2-232	58.00	-7.877	-9.209	2-265	66.25	-8.182	-9.288
2-200	50.00	-9.075	-9.490	2-233	58.25	-7.828	-9.206	2-266	66.50	-7.936	-9.336
2-201	50.25	-9.398	-9.533	2-234	58.50	-7.802	-9.219	2-267	66.75	-8.177	-9.304
2-202	50.50	-9.383	-9.506	2-235	58.75	-8.098	-9.233	2-268	67.00	-8.136	-9.315
2-203	50.75	-9.311	-9.536	2-236	59.00	-8.189	-9.230	2-269	67.25	-8.264	-9.254
2-204	51.00	-9.184	-9.327	2-237	59.25	-8.404	-9.218	2-270	67.50	-8.262	-9.388
2-205	51.25	-9.038	-9.436	2-238	59.50	-8.471	-9.221	2-271	67.75	-8.164	-9.366
2-206	51.50	-9.027	-9.424	2-239	59.75	-8.758	-9.262	2-272	68.00	-8.337	-9.471
2-207	51.75	-8.846	-9.390	2-240	60.00	-9.466	-9.426	2-273	68.25	-8.338	-9.416
2-208	52.00	-8.728	-9.426	2-241	60.25	-9.189	-9.345	2-274	68.50	-8.249	-9.345
2-209	52.25	-8.339	-9.393	2-242	60.50	-8.987	-9.278	2-275	68.75	-8.532	-9.427
2-210	52.50	-8.203	-9.454	2-243	60.75	-8.815	-9.241	2-276	69.00	-8.465	-9.388
2-211	52.75	-8.203	-9.322	2-244	61.00	-8.652	-9.247	2-277	69.25	-8.531	-9.369
2-212	53.00	-8.367	-9.440	2-245	61.25	-8.331	-9.150	2-278	69.50	-8.498	-9.375
2-213	53.25	-8.287	-9.274	2-246	61.50	-7.981	-9.145	2-279	69.75	-8.592	-9.457
2-214	53.50	-8.315	-9.276	2-247	61.75	-8.235	-9.191	2-280	70.00	-8.570	-9.492
2-215	53.75	-8.541	-9.462	2-248	62.00	-8.207	-9.255	2-281	70.25	-8.327	-9.447
2-216	54.00	-8.562	-9.361	2-249	62.25	-8.236	-9.267	2-282	70.50	-8.314	-9.449

ID	Depth (mm)	$\delta^{13}\text{C}$ (PDB)	$\delta^{18}\text{O}$ (PDB)	ID	Depth (mm)	$\delta^{13}\text{C}$ (PDB)	$\delta^{18}\text{O}$ (PDB)	ID	Depth (mm)	$\delta^{13}\text{C}$ (PDB)	$\delta^{18}\text{O}$ (PDB)
2-283	70.75	-8.332	-9.394	2-316	79.00	-8.824	-9.571	2-349	87.25	-8.255	-9.361
2-284	71.00	-8.455	-9.442	2-317	79.25	-8.658	-9.513	2-350	87.50	-7.977	-9.162
2-285	71.25	-8.667	-9.591	2-318	79.50	-8.502	-9.464	2-351	87.75	-7.726	-9.300
2-286	71.50	-8.586	-9.350	2-319	79.75	-8.562	-9.402	2-352	88.00	-7.608	-9.421
2-287	71.75	-8.769	-9.374	2-320	80.00	-8.673	-9.422	2-353	88.25	-7.782	-9.537
2-288	72.00	-8.886	-9.439	2-321	80.25	-8.820	-9.431	2-354	88.50	-7.830	-9.269
2-289	72.25	-9.106	-9.594	2-322	80.50	-9.032	-9.549	2-355	88.75	-7.957	-9.619
2-290	72.50	-9.025	-9.385	2-323	80.75	-8.768	-9.378	2-356	89.00	-7.966	-9.413
2-291	72.75	-9.054	-9.428	2-324	81.00	-8.539	-9.506	2-357	89.25	-8.074	-9.541
2-292	73.00	-8.815	-9.370	2-325	81.25	-7.899	-9.420	2-358	89.50	-8.275	-9.431
2-293	73.25	-8.682	-9.392	2-326	81.50	-7.718	-9.415	2-359	89.75	-8.350	-9.414
2-294	73.50	-8.415	-9.605	2-327	81.75	-7.850	-9.509	2-360	90.00	-8.395	-9.078
2-295	73.75	-8.264	-9.565	2-328	82.00	-7.928	-9.368	2-361	90.25	-8.437	-9.292
2-296	74.00	-8.205	-9.372	2-329	82.25	-7.957	-9.412	2-362	90.50	-8.253	-9.318
2-297	74.25	-8.223	-9.341	2-330	82.50	-8.057	-9.356	2-363	90.75	-8.290	-9.277
2-298	74.50	-8.594	-9.459	2-331	82.75	-8.247	-9.230	2-364	91.00	-8.510	-9.314
2-299	74.75	-8.710	-9.481	2-332	83.00	-8.754	-9.423	2-365	91.25	-8.476	-9.348
2-300	75.00	-8.383	-9.371	2-333	83.25	-8.910	-9.404	2-366	91.50	-8.277	-9.340
2-301	75.25	-8.460	-9.666	2-334	83.50	-9.087	-9.467	2-367	91.75	-8.214	-9.343
2-302	75.50	-7.971	-9.301	2-335	83.75	-9.373	-9.470	2-368	92.00	-8.253	-9.342
2-303	75.75	-8.202	-9.323	2-336	84.00	-9.629	-9.510	2-369	92.25	-8.333	-9.362
2-304	76.00	-7.767	-9.557	2-337	84.25	-9.442	-9.355	2-370	92.50	-8.181	-9.349
2-305	76.25	-8.042	-9.257	2-338	84.50	-9.353	-9.393	2-371	92.75	-8.230	-9.312
2-306	76.50	-8.566	-9.545	2-339	84.75	-9.096	-9.264	2-372	93.00	-8.180	-9.359
2-307	76.75	-9.008	-9.557	2-340	85.00	-8.698	-9.365	2-373	93.25	-8.153	-9.342
2-308	77.00	-8.933	-9.595	2-341	85.25	-8.662	-9.335	2-374	93.50	-7.967	-9.136
2-309	77.25	-9.310	-8.989	2-342	85.50	-8.587	-9.450	2-375	93.75	-8.145	-9.330
2-310	77.50	-8.717	-9.492	2-343	85.75	-8.306	-9.394	2-376	94.00	-8.322	-9.335
2-311	77.75	-8.753	-9.520	2-344	86.00	-8.226	-9.403	2-377	94.25	-8.604	-9.400
2-312	78.00	-9.405	-9.520	2-345	86.25	-8.098	-9.448	2-378	94.50	-8.729	-9.400
2-313	78.25	-9.099	-9.437	2-346	86.50	-8.266	-9.427	2-379	94.75	-8.597	-9.372
2-314	78.50	-8.819	-9.237	2-347	86.75	-8.395	-9.298	2-380	95.00	-8.622	-9.327
2-315	78.75	-9.019	-9.518	2-348	87.00	-8.421	-9.345	2-381	95.25	-8.667	-9.349

ID	Depth (mm)	$\delta^{13}\text{C}$ (PDB)	$\delta^{18}\text{O}$ (PDB)	ID	Depth (mm)	$\delta^{13}\text{C}$ (PDB)	$\delta^{18}\text{O}$ (PDB)	ID	Depth (mm)	$\delta^{13}\text{C}$ (PDB)	$\delta^{18}\text{O}$ (PDB)
2-382	95.50	-8.729	-9.340	2-415	103.75	-8.139	-9.332	2-448	112.00	-8.382	-9.279
2-383	95.75	-8.636	-9.396	2-416	104.00	-8.293	-9.609	2-449	112.25	-8.489	-9.296
2-384	96.00	-8.662	-9.324	2-417	104.25	-8.429	-9.331	2-450	112.50	-8.753	-9.234
2-385	96.25	-8.823	-9.380	2-418	104.50	-8.666	-9.456	2-451	112.75	-8.721	-9.456
2-386	96.50	-8.634	-9.102	2-419	104.75	-8.891	-9.506	2-452	113.00	-8.552	-9.383
2-387	96.75	-8.709	-9.031	2-420	105.00	-8.458	-9.353	2-453	113.25	-8.317	-9.319
2-388	97.00	-8.628	-8.986	2-421	105.25	-8.206	-9.362	2-454	113.50	-8.243	-9.525
2-389	97.25	-8.340	-9.224	2-422	105.50	-8.414	-9.357	2-455	113.75	-8.202	-9.454
2-390	97.50	-9.543	-9.507	2-423	105.75	-8.109	-9.342	2-456	114.00	-8.273	-9.372
2-391	97.75	-9.166	-9.080	2-424	106.00	-8.268	-9.374	2-457	114.25	-8.409	-9.350
2-392	98.00	-9.032	-9.186	2-425	106.25	-8.414	-9.331	2-458	114.50	-8.683	-9.351
2-393	98.25	-9.224	-9.225	2-426	106.50	-8.604	-9.568	2-459	114.75	-8.931	-9.279
2-394	98.50	-9.662	-9.404	2-427	106.75	-8.287	-9.293	2-460	115.00	-8.790	-8.968
2-395	98.75	-9.733	-9.456	2-428	107.00	-8.261	-9.395	2-461	115.25	-8.685	-8.593
2-396	99.00	-9.781	-8.934	2-429	107.25	-8.275	-9.469	2-462	115.50	-8.871	-9.355
2-397	99.25	-9.739	-9.365	2-430	107.50	-8.380	-9.564	2-463	115.75	-8.607	-9.193
2-398	99.50	-9.548	-9.201	2-431	107.75	-8.377	-9.533	2-464	116.00	-8.800	-9.075
2-399	99.75	-9.211	-9.251	2-432	108.00	-8.422	-9.649	2-465	116.25	-8.912	-9.215
2-400	100.00	-9.118	-9.342	2-433	108.25	-8.026	-9.398	2-466	116.50	-9.194	-9.580
2-401	100.25	-8.929	-9.418	2-434	108.50	-8.414	-9.384	2-467	116.75	-8.606	-9.580
2-402	100.50	-8.654	-9.416	2-435	108.75	-8.338	-9.358	2-468	117.00	-7.994	-9.365
2-403	100.75	-8.620	-9.414	2-436	109.00	-8.711	-9.383	2-469	117.25	-7.525	-9.237
2-404	101.00	-8.622	-9.479	2-437	109.25	-8.600	-9.183	2-470	117.50	-8.408	-9.271
2-405	101.25	-8.571	-9.413	2-438	109.50	-8.155	-9.310	2-471	117.75	-7.895	-9.163
2-406	101.50	-8.675	-9.487	2-439	109.75	-8.428	-9.478	2-472	118.00	-8.171	-9.279
2-407	101.75	-8.593	-9.466	2-440	110.00	-8.393	-9.336	2-473	118.25	-8.771	-9.341
2-408	102.00	-8.434	-9.475	2-441	110.25	-9.034	-9.586	2-474	118.50	-8.596	-8.862
2-409	102.25	-8.672	-9.493	2-442	110.50	-9.091	-9.669	2-475	118.75	-8.980	-9.560
2-410	102.50	-8.535	-9.236	2-443	110.75	-8.961	-9.726	2-476	119.00	-8.999	-9.741
2-411	102.75	-8.695	-9.560	2-444	111.00	-8.625	-9.072	2-477	119.25	-8.944	-9.496
2-412	103.00	-8.340	-9.235	2-445	111.25	-9.029	-9.613	2-478	119.50	-9.173	-9.666
2-413	103.25	-8.029	-8.850	2-446	111.50	-8.754	-9.288	2-479	119.75	-9.170	-9.651
2-414	103.50	-8.298	-9.343	2-447	111.75	-8.717	-9.542	2-480	120.00	-9.160	-9.593

ID	Depth (mm)	$\delta^{13}\text{C}$ (PDB)	$\delta^{18}\text{O}$ (PDB)	ID	Depth (mm)	$\delta^{13}\text{C}$ (PDB)	$\delta^{18}\text{O}$ (PDB)	ID	Depth (mm)	$\delta^{13}\text{C}$ (PDB)	$\delta^{18}\text{O}$ (PDB)
2-481	120.25	-9.166	-9.647	2-514	128.50	-8.732	-9.555	2-547	136.75	-7.871	-9.583
2-482	120.50	-9.277	-9.589	2-515	128.75	-8.711	-9.525	2-548	137.00	-7.680	-9.519
2-483	120.75	-9.347	-9.670	2-516	129.00	-8.812	-9.540	2-549	137.25	-7.462	-9.706
2-484	121.00	-9.193	-9.624	2-517	129.25	-8.450	-9.180	2-550	137.50	-7.378	-9.381
2-485	121.25	-9.211	-9.104	2-518	129.50	-8.849	-9.027	2-551	137.75	-7.459	-9.321
2-486	121.50	-9.587	-9.839	2-519	129.75	-8.714	-9.576	2-552	138.00	-7.483	-9.266
2-487	121.75	-9.408	-9.735	2-520	130.00	-8.634	-9.552				
2-488	122.00	-9.209	-9.631	2-521	130.25	-8.550	-9.502				
2-489	122.25	-9.308	-9.624	2-522	130.50	-8.457	-9.504				
2-490	122.50	-9.264	-9.709	2-523	130.75	-8.428	-9.443				
2-491	122.75	-9.505	-9.852	2-524	131.00	-8.351	-9.459				
2-492	123.00	-9.383	-9.688	2-525	131.25	-8.454	-9.541				
2-493	123.25	-9.525	-9.865	2-526	131.50	-8.232	-9.510				
2-494	123.50	-9.544	-10.055	2-527	131.75	-8.073	-9.431				
2-495	123.75	-9.247	-9.703	2-528	132.00	-8.174	-9.594				
2-496	124.00	-9.108	-9.962	2-529	132.25	-8.111	-9.406				
2-497	124.25	-8.926	-9.705	2-530	132.50	-7.954	-9.426				
2-498	124.50	-8.822	-9.665	2-531	132.75	-7.967	-9.867				
2-499	124.75	-9.018	-9.686	2-532	133.00	-7.719	-9.460				
2-500	125.00	-9.012	-9.728	2-533	133.25	-7.682	-9.419				
2-501	125.25	-8.757	-9.622	2-534	133.50	-7.628	-9.369				
2-502	125.50	-8.626	-9.658	2-535	133.75	-7.609	-9.453				
2-503	125.75	-8.539	-9.557	2-536	134.00	-7.609	-9.344				
2-504	126.00	-8.391	-9.511	2-537	134.25	-7.714	-9.979				
2-505	126.25	-8.444	-9.487	2-538	134.50	-7.647	-9.378				
2-506	126.50	-8.417	-9.395	2-539	134.75	-7.606	-9.391				
2-507	126.75	-8.520	-9.431	2-540	135.00	-7.558	-9.316				
2-508	127.00	-8.402	-9.410	2-541	135.25	-7.690	-9.347				
2-509	127.25	-8.415	-9.379	2-542	135.50	-7.682	-9.320				
2-510	127.50	-8.549	-9.393	2-543	135.75	-7.618	-9.296				
2-511	127.75	-8.578	-9.439	2-544	136.00	-7.735	-9.401				
2-512	128.00	-8.633	-9.513	2-545	136.25	-7.820	-9.301				
2-513	128.25	-8.697	-9.496	2-546	136.50	-7.962	-9.569				

附表二、石筍 HY05-3 碳氧同位素實驗分析數據

ID	Depth (mm)	$\delta^{13}\text{C}$ (PDB)	$\delta^{18}\text{O}$ (PDB)	ID	Depth (mm)	$\delta^{13}\text{C}$ (PDB)	$\delta^{18}\text{O}$ (PDB)	ID	Depth (mm)	$\delta^{13}\text{C}$ (PDB)	$\delta^{18}\text{O}$ (PDB)
3-001	0.20	-9.195	-9.164	3-034	6.80	-9.300	-9.626	3-066	13.20	-9.422	-9.510
3-002	0.40	-9.504	-9.559	3-035	7.00	-9.520	-9.616	3-067	13.40	-9.143	-9.537
3-003	0.60	-9.609	-9.328	3-036	7.20	-9.244	-9.676	3-068	13.60	-9.150	-9.463
3-004	0.80	-9.434	-9.201	3-037	7.40	-9.199	-9.660	3-069	13.80	-9.158	-9.503
3-005	1.00	-9.547	-9.382	3-038	7.60	-9.137	-9.644	3-070	14.00	-9.434	-9.619
3-007	1.40	-9.489	-9.439	3-039	7.80	-9.119	-9.491	3-071	14.20	-9.408	-9.564
3-008	1.60	-9.346	-9.347	3-040	8.00	-9.214	-9.641	3-072	14.40	-9.189	-9.620
3-009	1.80	-9.409	-9.441	3-041	8.20	-9.331	-9.631	3-073	14.60	-9.006	-9.665
3-010	2.00	-9.334	-9.408	3-042	8.40	-9.326	-9.627	3-074	14.80	-9.092	-9.690
3-011	2.20	-9.335	-9.700	3-043	8.60	-9.241	-9.592	3-075	15.00	-9.161	-9.657
3-012	2.40	-9.502	-9.460	3-044	8.80	-9.058	-9.527	3-076	15.20	-9.283	-9.570
3-013	2.60	-9.455	-9.304	3-045	9.00	-9.036	-9.538	3-077	15.40	-9.345	-9.529
3-014	2.80	-9.474	-9.608	3-046	9.20	-9.001	-9.394	3-078	15.60	-9.029	-9.604
3-015	3.00	-9.340	-9.511	3-047	9.40	-8.943	-9.465	3-079	15.80	-8.896	-9.549
3-016	3.20	-9.142	-9.516	3-048	9.60	-8.961	-9.461	3-080	16.00	-8.879	-9.566
3-017	3.40	-9.327	-9.513	3-049	9.80	-8.954	-9.494	3-081	16.20	-9.025	-9.559
3-018	3.60	-9.551	-9.452	3-050	10.00	-8.791	-9.463	3-082	16.40	-9.092	-9.552
3-019	3.80	-9.628	-9.521	3-051	10.20	-8.717	-9.464	3-083	16.60	-9.175	-9.634
3-020	4.00	-9.725	-9.486	3-052	10.40	-8.730	-9.464	3-084	16.80	-9.186	-9.490
3-021	4.20	-9.710	-9.551	3-053	10.60	-8.656	-9.431	3-085	17.00	-9.017	-9.526
3-022	4.40	-9.359	-9.585	3-054	10.80	-8.668	-9.463	3-086	17.20	-9.108	-9.519
3-023	4.60	-9.461	-9.572	3-055	11.00	-8.772	-9.471	3-087	17.40	-9.196	-9.584
3-024	4.80	-9.362	-9.512	3-056	11.20	-8.734	-9.402	3-088	17.60	-9.347	-9.530
3-025	5.00	-9.302	-9.526	3-057	11.40	-8.642	-9.364	3-089	17.80	-9.338	-9.551
3-026	5.20	-9.323	-9.572	3-058	11.60	-8.484	-9.332	3-090	18.00	-8.975	-9.581
3-027	5.40	-9.531	-9.477	3-059	11.80	-8.454	-9.295	3-091	18.20	-9.052	-9.500
3-028	5.60	-9.464	-9.427	3-060	12.00	-8.496	-9.273	3-092	18.40	-9.131	-9.574
3-029	5.80	-9.452	-9.510	3-061	12.20	-8.676	-9.414	3-093	18.60	-9.204	-9.558
3-030	6.00	-9.355	-9.482	3-062	12.40	-8.859	-9.406	3-094	18.80	-9.081	-9.599
3-031	6.20	-9.641	-9.600	3-063	12.60	-9.172	-9.448	3-095	19.00	-9.252	-9.565
3-032	6.40	-9.406	-9.532	3-064	12.80	-9.354	-9.388	3-096	19.20	-9.179	-9.552
3-033	6.60	-9.356	-9.643	3-065	13.00	-9.470	-9.526	3-097	19.40	-9.190	-9.524

ID	Depth (mm)	$\delta^{13}\text{C}$ (PDB)	$\delta^{18}\text{O}$ (PDB)	ID	Depth (mm)	$\delta^{13}\text{C}$ (PDB)	$\delta^{18}\text{O}$ (PDB)	ID	Depth (mm)	$\delta^{13}\text{C}$ (PDB)	$\delta^{18}\text{O}$ (PDB)
3-098	19.60	-9.108	-9.566	3-131	26.20	-8.914	-9.450	3-164	32.80	-8.862	-9.451
3-099	19.80	-8.877	-9.489	3-132	26.40	-9.021	-9.581	3-165	33.00	-9.140	-9.467
3-100	20.00	-8.979	-9.537	3-133	26.60	-9.038	-9.540	3-166	33.20	-8.978	-9.448
3-101	20.20	-9.426	-9.592	3-134	26.80	-9.081	-9.592	3-167	33.40	-8.972	-9.446
3-102	20.40	-9.732	-9.418	3-135	27.00	-8.728	-9.508	3-168	33.60	-9.028	-9.450
3-103	20.60	-9.754	-9.534	3-136	27.20	-8.977	-9.489	3-169	33.80	-9.119	-9.523
3-104	20.80	-9.727	-9.533	3-137	27.40	-8.798	-9.525	3-170	34.00	-8.851	-9.431
3-105	21.00	-9.645	-9.565	3-138	27.60	-8.711	-9.536	3-171	34.20	-8.988	-9.413
3-106	21.20	-9.600	-9.689	3-139	27.80	-8.604	-9.451	3-172	34.40	-8.892	-9.287
3-107	21.40	-9.416	-9.588	3-140	28.00	-8.342	-9.414	3-173	34.60	-9.101	-9.269
3-108	21.60	-9.355	-9.622	3-141	28.20	-8.265	-9.307	3-174	34.80	-9.294	-9.293
3-109	21.80	-9.395	-9.639	3-142	28.40	-7.839	-9.271	3-175	35.00	-9.590	-9.342
3-110	22.00	-9.419	-9.652	3-143	28.60	-7.665	-9.306	3-176	35.20	-9.657	-9.320
3-111	22.20	-9.458	-9.591	3-144	28.80	-7.628	-9.249	3-177	35.40	-9.407	-9.251
3-112	22.40	-9.408	-9.650	3-145	29.00	-7.755	-9.433	3-178	35.60	-9.503	-9.312
3-113	22.60	-9.366	-9.587	3-146	29.20	-7.816	-9.430	3-179	35.80	-9.450	-9.254
3-114	22.80	-9.320	-9.557	3-147	29.40	-8.181	-9.462	3-180	36.00	-9.300	-9.195
3-115	23.00	-9.246	-9.562	3-148	29.60	-8.420	-9.292	3-181	36.20	-9.265	-9.236
3-116	23.20	-9.200	-9.536	3-149	29.80	-8.811	-9.465	3-182	36.40	-9.423	-9.297
3-117	23.40	-9.041	-9.512	3-150	30.00	-9.009	-9.335	3-183	36.60	-9.597	-9.363
3-118	23.60	-9.007	-9.555	3-151	30.20	-9.112	-9.379	3-184	36.80	-9.595	-9.381
3-119	23.80	-9.082	-9.555	3-152	30.40	-9.175	-9.373	3-185	37.00	-9.629	-9.350
3-120	24.00	-9.228	-9.624	3-153	30.60	-9.076	-9.231	3-186	37.20	-9.678	-9.387
3-121	24.20	-9.316	-9.555	3-154	30.80	-9.211	-9.312	3-187	37.40	-9.560	-9.425
3-122	24.40	-9.230	-9.529	3-155	31.00	-9.185	-9.342	3-188	37.60	-9.299	-9.417
3-123	24.60	-9.138	-9.527	3-156	31.20	-9.211	-9.388	3-189	37.80	-9.149	-9.346
3-124	24.80	-9.113	-9.507	3-157	31.40	-9.231	-9.310	3-190	38.00	-9.155	-9.403
3-125	25.00	-9.175	-9.485	3-158	31.60	-9.252	-9.372	3-191	38.20	-9.138	-9.344
3-126	25.20	-9.195	-9.523	3-159	31.80	-9.220	-9.422	3-192	38.40	-9.069	-9.352
3-127	25.40	-9.339	-9.551	3-160	32.00	-9.137	-9.473	3-193	38.60	-9.008	-9.337
3-128	25.60	-9.292	-9.505	3-161	32.20	-8.990	-9.435	3-194	38.80	-9.128	-9.337
3-129	25.80	-9.339	-9.642	3-162	32.40	-8.922	-9.392	3-195	39.00	-9.193	-9.331
3-130	26.00	-9.135	-9.543	3-163	32.60	-8.847	-9.475	3-196	39.20	-9.255	-9.476

ID	Depth (mm)	$\delta^{13}\text{C}$ (PDB)	$\delta^{18}\text{O}$ (PDB)	ID	Depth (mm)	$\delta^{13}\text{C}$ (PDB)	$\delta^{18}\text{O}$ (PDB)	ID	Depth (mm)	$\delta^{13}\text{C}$ (PDB)	$\delta^{18}\text{O}$ (PDB)
3-197	39.40	-9.182	-9.473	3-230	46.00	-9.163	-9.551	3-263	52.60	-9.147	-9.548
3-198	39.60	-9.003	-9.415	3-231	46.20	-9.295	-9.569	3-264	52.80	-9.296	-9.433
3-199	39.80	-8.976	-9.392	3-232	46.40	-9.240	-9.551	3-265	53.00	-9.115	-9.569
3-200	40.00	-9.035	-9.421	3-233	46.60	-9.077	-9.499	3-266	53.20	-9.025	-9.565
3-201	40.20	-8.974	-9.395	3-234	46.80	-8.784	-9.538	3-267	53.40	-9.066	-9.451
3-202	40.40	-8.915	-9.378	3-235	47.00	-8.444	-9.518	3-268	53.60	-9.078	-9.490
3-203	40.60	-9.115	-9.375	3-236	47.20	-8.515	-9.430	3-269	53.80	-9.250	-9.492
3-204	40.80	-9.113	-9.423	3-237	47.40	-8.724	-9.490	3-270	54.00	-9.219	-9.474
3-205	41.00	-9.001	-9.421	3-238	47.60	-8.821	-9.482	3-271	54.20	-9.218	-9.507
3-206	41.20	-8.956	-9.399	3-239	47.80	-8.863	-9.499	3-272	54.40	-9.173	-9.509
3-207	41.40	-9.029	-9.384	3-240	48.00	-9.129	-9.517	3-273	54.60	-9.316	-9.512
3-208	41.60	-8.746	-9.351	3-241	48.20	-9.262	-9.505	3-274	54.80	-9.550	-9.526
3-209	41.80	-8.764	-9.411	3-242	48.40	-9.027	-9.402	3-275	55.00	-9.654	-9.538
3-210	42.00	-9.068	-9.437	3-243	48.60	-9.273	-9.503	3-276	55.20	-9.749	-9.585
3-211	42.20	-9.384	-9.502	3-244	48.80	-8.646	-9.421	3-277	55.40	-9.792	-9.601
3-212	42.40	-9.274	-9.485	3-245	49.00	-8.803	-9.527	3-278	55.60	-9.475	-9.567
3-213	42.60	-9.001	-9.404	3-246	49.20	-8.753	-9.509	3-279	55.80	-9.431	-9.470
3-214	42.80	-8.869	-9.433	3-247	49.40	-8.923	-9.506	3-280	56.00	-9.611	-9.549
3-215	43.00	-8.683	-9.512	3-248	49.60	-9.270	-9.537	3-281	56.20	-9.714	-9.493
3-216	43.20	-8.611	-9.446	3-249	49.80	-9.686	-9.520	3-282	56.40	-9.857	-9.513
3-217	43.40	-8.574	-9.437	3-250	50.00	-9.105	-9.470	3-283	56.60	-9.736	-9.546
3-218	43.60	-8.537	-9.400	3-251	50.20	-9.118	-9.494	3-284	56.80	-9.513	-9.203
3-219	43.80	-8.612	-9.464	3-252	50.40	-9.383	-9.449	3-285	57.00	-9.501	-9.114
3-220	44.00	-8.653	-9.445	3-253	50.60	-8.935	-9.388	3-286	57.20	-9.770	-9.225
3-221	44.20	-8.659	-9.398	3-254	50.80	-8.249	-9.160	3-287	57.40	-10.027	-9.526
3-222	44.40	-8.780	-9.532	3-255	51.00	-8.287	-9.196	3-288	57.60	-9.822	-9.390
3-223	44.60	-8.661	-9.460	3-256	51.20	-8.096	-9.205	3-289	57.80	-10.072	-9.490
3-224	44.80	-8.492	-9.460	3-257	51.40	-8.312	-9.359	3-290	58.00	-10.069	-9.334
3-225	45.00	-8.529	-9.512	3-258	51.60	-8.635	-9.468	3-291	58.20	-10.151	-9.522
3-226	45.20	-8.617	-9.410	3-259	51.80	-9.104	-9.594	3-292	58.40	-10.090	-9.116
3-227	45.40	-8.825	-9.442	3-260	52.00	-9.266	-9.629	3-293	58.60	-10.057	-9.115
3-228	45.60	-8.939	-9.445	3-261	52.20	-9.014	-9.540	3-294	58.80	-10.258	-9.129
3-229	45.80	-8.956	-9.486	3-262	52.40	-8.996	-9.617	3-295	59.00	-9.939	-9.204

ID	Depth (mm)	$\delta^{13}\text{C}$ (PDB)	$\delta^{18}\text{O}$ (PDB)	ID	Depth (mm)	$\delta^{13}\text{C}$ (PDB)	$\delta^{18}\text{O}$ (PDB)	ID	Depth (mm)	$\delta^{13}\text{C}$ (PDB)	$\delta^{18}\text{O}$ (PDB)
3-296	59.20	-10.140	-9.461	3-329	65.80	-9.088	-9.314	3-362	72.40	-9.512	-9.434
3-297	59.40	-9.922	-9.486	3-330	66.00	-9.095	-9.324	3-363	72.60	-9.188	-9.374
3-298	59.60	-10.036	-9.436	3-331	66.20	-9.018	-9.348	3-364	72.80	-9.082	-9.177
3-299	59.80	-9.713	-9.365	3-332	66.40	-9.169	-9.269	3-365	73.00	-8.978	-9.421
3-300	60.00	-9.826	-9.312	3-333	66.60	-9.564	-9.382	3-366	73.20	-8.888	-9.457
3-301	60.20	-9.849	-9.270	3-334	66.80	-9.507	-9.425	3-367	73.40	-8.744	-9.488
3-302	60.40	-10.044	-9.210	3-335	67.00	-9.311	-9.479	3-368	73.60	-8.664	-9.384
3-303	60.60	-9.782	-9.075	3-336	67.20	-9.168	-9.490	3-369	73.80	-8.761	-9.337
3-304	60.80	-9.986	-9.020	3-337	67.40	-8.901	-9.407	3-370	74.00	-8.971	-9.227
3-305	61.00	-10.226	-9.178	3-338	67.60	-8.943	-9.320	3-371	74.20	-9.290	-9.369
3-306	61.20	-10.596	-9.339	3-339	67.80	-9.111	-9.343	3-372	74.40	-9.449	-9.456
3-307	61.40	-10.485	-9.239	3-340	68.00	-9.383	-9.280	3-373	74.60	-9.346	-9.398
3-308	61.60	-10.112	-9.194	3-341	68.20	-9.685	-9.258	3-374	74.80	-9.197	-9.402
3-309	61.80	-9.443	-9.111	3-342	68.40	-9.782	-9.415	3-375	75.00	-9.111	-9.434
3-310	62.00	-9.084	-8.973	3-343	68.60	-9.719	-9.347	3-376	75.20	-9.256	-9.460
3-311	62.20	-9.195	-9.438	3-344	68.80	-9.985	-9.239	3-377	75.40	-9.306	-9.250
3-312	62.40	-9.164	-9.327	3-345	69.00	-9.578	-9.355	3-378	75.60	-9.143	-9.259
3-313	62.60	-9.343	-9.396	3-346	69.20	-9.737	-9.449	3-379	75.80	-9.070	-9.245
3-314	62.80	-9.376	-9.314	3-347	69.40	-9.553	-9.250	3-380	76.00	-8.883	-9.366
3-315	63.00	-9.428	-9.449	3-348	69.60	-9.735	-9.304	3-381	76.20	-8.962	-9.350
3-316	63.20	-9.181	-9.299	3-349	69.80	-9.839	-9.445	3-382	76.40	-8.994	-9.225
3-317	63.40	-9.177	-9.014	3-350	70.00	-9.890	-9.372	3-383	76.60	-9.518	-9.299
3-318	63.60	-9.203	-9.005	3-351	70.20	-9.621	-9.285	3-384	76.80	-9.265	-9.284
3-319	63.80	-9.212	-8.981	3-352	70.40	-9.345	-9.410	3-385	77.00	-9.395	-9.355
3-320	64.00	-9.465	-9.221	3-353	70.60	-9.243	-9.427	3-386	77.20	-9.545	-9.501
3-321	64.20	-9.607	-9.151	3-354	70.80	-9.144	-9.463	3-387	77.40	-9.754	-9.536
3-322	64.40	-9.932	-9.358	3-355	71.00	-9.067	-9.353	3-388	77.60	-9.996	-9.347
3-323	64.60	-9.868	-9.120	3-356	71.20	-9.005	-9.448	3-389	77.80	-10.008	-9.572
3-324	64.80	-9.849	-9.335	3-357	71.40	-9.198	-9.418	3-390	78.00	-9.555	-9.510
3-325	65.00	-9.820	-9.389	3-358	71.60	-9.329	-9.390	3-391	78.20	-9.492	-9.447
3-326	65.20	-9.243	-9.330	3-359	71.80	-9.556	-9.460	3-392	78.40	-9.332	-9.301
3-327	65.40	-9.027	-9.245	3-360	72.00	-9.715	-9.525	3-393	78.60	-9.415	-9.527
3-328	65.60	-9.226	-9.410	3-361	72.20	-9.659	-9.462	3-394	78.80	-9.365	-9.284

ID	Depth (mm)	$\delta^{13}\text{C}$ (PDB)	$\delta^{18}\text{O}$ (PDB)	ID	Depth (mm)	$\delta^{13}\text{C}$ (PDB)	$\delta^{18}\text{O}$ (PDB)	ID	Depth (mm)	$\delta^{13}\text{C}$ (PDB)	$\delta^{18}\text{O}$ (PDB)
3-395	79.00	-9.363	-9.432	3-428	85.60	-9.367	-9.707	3-461	92.20	-9.826	-9.508
3-396	79.20	-9.426	-9.412	3-429	85.80	-9.479	-9.680	3-462	92.40	-10.009	-9.551
3-397	79.40	-9.253	-9.274	3-430	86.00	-9.548	-9.600	3-463	92.60	-10.181	-9.559
3-398	79.60	-9.083	-9.431	3-431	86.20	-9.705	-9.579	3-464	92.80	-10.022	-9.727
3-399	79.80	-9.021	-9.380	3-432	86.40	-9.899	-9.681	3-465	93.00	-9.777	-9.689
3-400	80.00	-8.994	-9.523	3-433	86.60	-9.869	-9.662	3-466	93.20	-9.370	-9.567
3-401	80.20	-9.178	-9.638	3-434	86.80	-9.940	-9.725	3-467	93.40	-8.967	-9.496
3-402	80.40	-9.259	-9.571	3-435	87.00	-9.713	-9.592	3-468	93.60	-9.196	-9.650
3-403	80.60	-9.353	-9.563	3-436	87.20	-9.793	-9.647	3-469	93.80	-9.243	-9.638
3-404	80.80	-9.420	-9.537	3-437	87.40	-10.001	-9.691	3-470	94.00	-9.379	-9.539
3-405	81.00	-9.522	-9.739	3-438	87.60	-9.723	-9.646	3-471	94.20	-9.532	-9.532
3-406	81.20	-9.491	-9.572	3-439	87.80	-10.269	-9.648	3-472	94.40	-9.593	-9.581
3-407	81.40	-9.541	-9.607	3-440	88.00	-10.327	-9.685	3-473	94.60	-9.839	-9.479
3-408	81.60	-9.644	-9.616	3-441	88.20	-10.008	-9.565	3-474	94.80	-9.738	-9.617
3-409	81.80	-9.735	-9.606	3-442	88.40	-9.308	-9.624	3-475	95.00	-9.681	-9.610
3-410	82.00	-9.907	-9.666	3-443	88.60	-9.339	-9.596	3-476	95.20	-9.513	-9.451
3-411	82.20	-9.345	-9.636	3-444	88.80	-9.448	-9.469	3-477	95.40	-9.493	-9.569
3-412	82.40	-9.224	-9.676	3-445	89.00	-9.838	-9.621	3-478	95.60	-9.430	-9.534
3-413	82.60	-9.142	-9.683	3-446	89.20	-10.034	-9.420	3-479	95.80	-9.445	-9.414
3-414	82.80	-9.171	-9.700	3-447	89.40	-10.192	-9.391	3-480	96.00	-9.431	-9.471
3-415	83.00	-9.143	-9.674	3-448	89.60	-10.614	-9.621	3-481	96.20	-9.331	-9.544
3-416	83.20	-9.148	-9.646	3-449	89.80	-10.642	-9.710	3-482	96.40	-9.320	-9.625
3-417	83.40	-9.252	-9.638	3-450	90.00	-10.344	-9.665	3-483	96.60	-9.254	-9.574
3-418	83.60	-9.501	-9.751	3-451	90.20	-10.281	-9.635	3-484	96.80	-9.086	-9.558
3-419	83.80	-9.549	-9.785	3-452	90.40	-10.142	-9.691	3-485	97.00	-9.035	-9.543
3-420	84.00	-9.496	-9.840	3-453	90.60	-10.434	-9.667	3-486	97.20	-8.712	-9.497
3-421	84.20	-9.371	-9.770	3-454	90.80	-10.252	-9.678	3-487	97.40	-8.871	-9.536
3-422	84.40	-8.950	-9.721	3-455	91.00	-10.233	-9.605	3-488	97.60	-8.953	-9.545
3-423	84.60	-8.914	-9.801	3-456	91.20	-10.266	-9.469	3-489	97.80	-8.920	-9.547
3-424	84.80	-8.815	-9.747	3-457	91.40	-10.046	-9.586	3-490	98.00	-9.123	-9.595
3-425	85.00	-8.841	-9.714	3-458	91.60	-9.972	-9.469	3-491	98.20	-9.150	-9.554
3-426	85.20	-9.095	-9.691	3-459	91.80	-9.845	-9.519	3-492	98.40	-9.301	-9.625
3-427	85.40	-9.297	-9.699	3-460	92.00	-9.911	-9.529	3-493	98.60	-9.383	-9.530

ID	Depth (mm)	$\delta^{13}\text{C}$ (PDB)	$\delta^{18}\text{O}$ (PDB)	ID	Depth (mm)	$\delta^{13}\text{C}$ (PDB)	$\delta^{18}\text{O}$ (PDB)	ID	Depth (mm)	$\delta^{13}\text{C}$ (PDB)	$\delta^{18}\text{O}$ (PDB)
3-494	98.80	-9.471	-9.536	3-527	105.40	-8.802	-9.463	3-560	112.00	-8.301	-9.273
3-495	99.00	-9.535	-9.536	3-528	105.60	-8.936	-9.506	3-561	112.20	-8.060	-9.196
3-496	99.20	-9.608	-9.547	3-529	105.80	-8.958	-9.485	3-562	112.40	-7.784	-9.099
3-497	99.40	-9.595	-9.552	3-530	106.00	-8.999	-9.459	3-563	112.60	-7.504	-9.119
3-498	99.60	-9.601	-9.596	3-531	106.20	-9.107	-9.528	3-564	112.80	-7.787	-9.100
3-499	99.80	-9.538	-9.575	3-532	106.40	-9.118	-9.507	3-565	113.00	-7.913	-9.291
3-500	100.00	-9.620	-9.593	3-533	106.60	-9.143	-9.548	3-566	113.20	-8.048	-9.320
3-501	100.20	-9.862	-9.605	3-534	106.80	-9.132	-9.646	3-567	113.40	-8.093	-9.322
3-502	100.40	-9.866	-9.618	3-535	107.00	-9.178	-9.505	3-568	113.60	-7.914	-9.072
3-503	100.60	-9.953	-9.558	3-536	107.20	-9.155	-9.531	3-569	113.80	-7.991	-9.167
3-504	100.80	-9.989	-9.504	3-537	107.40	-9.154	-9.522	3-570	114.00	-8.384	-9.195
3-505	101.00	-9.792	-9.560	3-538	107.60	-9.400	-9.547	3-571	114.20	-8.709	-9.337
3-506	101.20	-9.676	-9.573	3-539	107.80	-9.296	-9.556	3-572	114.40	-8.491	-9.232
3-507	101.40	-9.594	-9.513	3-540	108.00	-9.187	-9.543	3-573	114.60	-8.542	-9.162
3-508	101.60	-9.631	-9.517	3-541	108.20	-9.228	-9.575	3-574	114.80	-8.437	-9.104
3-509	101.80	-9.558	-9.532	3-542	108.40	-9.047	-9.558	3-575	115.00	-8.172	-9.136
3-510	102.00	-9.496	-9.604	3-543	108.60	-8.850	-9.482	3-576	115.20	-8.381	-9.238
3-511	102.20	-9.384	-9.549	3-544	108.80	-8.570	-9.500	3-577	115.40	-8.618	-9.244
3-512	102.40	-9.347	-9.505	3-545	109.00	-8.175	-9.463	3-578	115.60	-8.976	-9.297
3-513	102.60	-9.259	-9.497	3-546	109.20	-8.091	-9.471	3-579	115.80	-9.037	-9.322
3-514	102.80	-9.034	-9.447	3-547	109.40	-8.240	-9.468	3-580	116.00	-9.149	-9.391
3-515	103.00	-8.864	-9.488	3-548	109.60	-8.265	-9.459	3-581	116.20	-9.093	-9.417
3-516	103.20	-8.852	-9.568	3-549	109.80	-8.277	-9.358	3-582	116.40	-8.924	-9.341
3-517	103.40	-8.743	-9.505	3-550	110.00	-8.567	-9.339	3-583	116.60	-8.753	-9.315
3-518	103.60	-8.947	-9.439	3-551	110.20	-8.831	-9.491	3-584	116.80	-8.408	-9.226
3-519	103.80	-8.848	-9.485	3-552	110.40	-8.667	-9.534	3-585	117.00	-8.054	-9.247
3-520	104.00	-8.903	-9.519	3-553	110.60	-8.412	-9.541	3-586	117.20	-7.941	-9.261
3-521	104.20	-8.765	-9.494	3-554	110.80	-8.382	-9.522	3-587	117.40	-8.154	-9.362
3-522	104.40	-8.565	-9.513	3-555	111.00	-8.383	-9.438	3-588	117.60	-8.042	-9.317
3-523	104.60	-8.523	-9.509	3-556	111.20	-8.326	-9.378	3-589	117.80	-7.987	-9.323
3-524	104.80	-8.464	-9.401	3-557	111.40	-8.191	-9.300	3-590	118.00	-8.013	-9.295
3-525	105.00	-8.641	-9.459	3-558	111.60	-8.265	-9.278	3-591	118.20	-8.144	-9.326
3-526	105.20	-8.716	-9.447	3-559	111.80	-8.218	-9.249	3-592	118.40	-8.057	-9.344

ID	Depth (mm)	$\delta^{13}\text{C}$ (PDB)	$\delta^{18}\text{O}$ (PDB)	ID	Depth (mm)	$\delta^{13}\text{C}$ (PDB)	$\delta^{18}\text{O}$ (PDB)	ID	Depth (mm)	$\delta^{13}\text{C}$ (PDB)	$\delta^{18}\text{O}$ (PDB)
3-593	118.60	-8.127	-9.303	3-626	125.20	-7.832	-9.277	3-659	131.80	-9.008	-9.554
3-594	118.80	-8.232	-9.365	3-627	125.40	-7.685	-9.091	3-660	132.00	-9.075	-9.433
3-595	119.00	-8.216	-9.298	3-628	125.60	-7.745	-9.286	3-661	132.20	-8.909	-9.399
3-596	119.20	-8.252	-9.285	3-629	125.80	-7.693	-9.389	3-662	132.40	-8.668	-9.326
3-597	119.40	-8.245	-9.297	3-630	126.00	-7.728	-9.304	3-663	132.60	-8.756	-9.415
3-598	119.60	-8.094	-9.276	3-631	126.20	-7.928	-9.277	3-664	132.80	-8.588	-9.426
3-599	119.80	-8.090	-9.318	3-632	126.40	-8.010	-9.257	3-665	133.00	-8.357	-9.456
3-600	120.00	-8.190	-9.322	3-633	126.60	-8.073	-9.263	3-666	133.20	-8.133	-9.405
3-601	120.20	-8.248	-9.206	3-634	126.80	-8.196	-9.290	3-667	133.40	-8.277	-9.458
3-602	120.40	-8.311	-9.023	3-635	127.00	-8.306	-9.468	3-668	133.60	-8.261	-9.408
3-603	120.60	-8.287	-9.015	3-636	127.20	-8.290	-9.308	3-669	133.80	-8.228	-9.435
3-604	120.80	-8.466	-9.350	3-637	127.40	-8.254	-9.380	3-670	134.00	-8.324	-9.419
3-605	121.00	-8.500	-9.374	3-638	127.60	-8.126	-9.453	3-671	134.20	-8.215	-9.316
3-606	121.20	-8.598	-9.392	3-639	127.80	-8.162	-9.456	3-672	134.40	-8.185	-9.315
3-607	121.40	-8.555	-9.133	3-640	128.00	-8.254	-9.410	3-673	134.60	-8.167	-9.224
3-608	121.60	-8.579	-9.251	3-641	128.20	-8.210	-9.470	3-674	134.80	-8.037	-9.208
3-609	121.80	-8.553	-9.248	3-642	128.40	-8.064	-9.356	3-675	135.00	-8.268	-9.303
3-610	122.00	-8.434	-9.345	3-643	128.60	-7.808	-9.287	3-676	135.20	-8.327	-9.365
3-611	122.20	-8.361	-9.396	3-644	128.80	-7.807	-9.296	3-677	135.40	-8.280	-9.202
3-612	122.40	-8.269	-9.405	3-645	129.00	-8.050	-9.388	3-678	135.60	-8.246	-9.284
3-613	122.60	-8.257	-9.451	3-646	129.20	-8.022	-9.250	3-679	135.80	-8.141	-9.280
3-614	122.80	-8.243	-9.454	3-647	129.40	-8.104	-9.549	3-680	136.00	-7.957	-9.273
3-615	123.00	-8.119	-9.293	3-648	129.60	-8.102	-9.411	3-681	136.20	-8.149	-9.329
3-616	123.20	-8.151	-9.474	3-649	129.80	-8.365	-9.492	3-682	136.40	-8.178	-9.344
3-617	123.40	-8.122	-9.254	3-650	130.00	-8.265	-9.504	3-683	136.60	-8.203	-9.323
3-618	123.60	-8.200	-9.380	3-651	130.20	-8.266	-9.430	3-684	136.80	-8.322	-9.390
3-619	123.80	-8.158	-9.311	3-652	130.40	-8.253	-9.337	3-685	137.00	-8.336	-9.373
3-620	124.00	-8.147	-9.287	3-653	130.60	-8.256	-9.370	3-686	137.20	-8.295	-9.396
3-621	124.20	-8.168	-9.207	3-654	130.80	-8.338	-9.399	3-687	137.40	-8.326	-9.429
3-622	124.40	-8.119	-9.178	3-655	131.00	-8.328	-9.327	3-688	137.60	-8.367	-9.538
3-623	124.60	-7.889	-9.103	3-656	131.20	-8.469	-9.437	3-689	137.80	-8.270	-9.473
3-624	124.80	-7.966	-9.301	3-657	131.40	-8.678	-9.490	3-690	138.00	-7.948	-9.432
3-625	125.00	-7.930	-9.164	3-658	131.60	-8.879	-9.427	3-691	138.20	-8.181	-9.477

ID	Depth (mm)	$\delta^{13}\text{C}$ (PDB)	$\delta^{18}\text{O}$ (PDB)	ID	Depth (mm)	$\delta^{13}\text{C}$ (PDB)	$\delta^{18}\text{O}$ (PDB)	ID	Depth (mm)	$\delta^{13}\text{C}$ (PDB)	$\delta^{18}\text{O}$ (PDB)
3-692	138.40	-8.377	-9.375	3-725	145.00	-8.100	-9.453	3-758	151.60	-7.802	-9.326
3-693	138.60	-8.478	-9.461	3-726	145.20	-8.010	-9.383	3-759	151.80	-7.527	-9.263
3-694	138.80	-8.167	-9.419	3-727	145.40	-8.044	-9.447	3-760	152.00	-7.488	-9.245
3-695	139.00	-8.166	-9.447	3-728	145.60	-7.885	-9.362	3-761	152.20	-8.496	-9.321
3-696	139.20	-8.062	-9.501	3-729	145.80	-7.767	-9.329	3-762	152.40	-8.220	-9.318
3-697	139.40	-7.963	-9.387	3-730	146.00	-7.793	-9.386	3-763	152.60	-8.349	-9.404
3-698	139.60	-7.816	-9.401	3-731	146.20	-7.836	-9.399	3-764	152.80	-8.393	-9.449
3-699	139.80	-7.635	-9.372	3-732	146.40	-7.901	-9.433	3-765	153.00	-8.359	-9.478
3-700	140.00	-7.767	-9.367	3-733	146.60	-8.016	-9.449	3-766	153.20	-8.107	-9.416
3-701	140.20	-7.881	-9.399	3-734	146.80	-8.582	-9.553	3-767	153.40	-7.954	-9.362
3-702	140.40	-8.062	-9.516	3-735	147.00	-8.353	-9.395	3-768	153.60	-7.880	-9.357
3-703	140.60	-8.139	-9.413	3-736	147.20	-8.617	-9.479	3-769	153.80	-7.485	-9.260
3-704	140.80	-8.196	-9.427	3-737	147.40	-8.867	-9.422	3-770	154.00	-7.412	-9.286
3-705	141.00	-8.207	-9.393	3-738	147.60	-8.991	-9.361	3-771	154.20	-7.465	-9.294
3-706	141.20	-8.293	-9.397	3-739	147.80	-9.015	-9.469	3-772	154.40	-7.429	-9.386
3-707	141.40	-8.676	-9.458	3-740	148.00	-8.794	-9.397	3-773	154.60	-7.516	-9.377
3-708	141.60	-8.856	-9.422	3-741	148.20	-8.505	-9.348	3-774	154.80	-7.865	-9.505
3-709	141.80	-8.729	-9.466	3-742	148.40	-8.401	-9.339	3-775	155.00	-7.748	-9.443
3-710	142.00	-8.360	-9.393	3-743	148.60	-8.347	-9.223	3-776	155.20	-7.589	-9.459
3-711	142.20	-8.477	-9.386	3-744	148.80	-8.450	-9.372	3-777	155.40	-7.602	-9.454
3-712	142.40	-8.687	-9.416	3-745	149.00	-8.695	-9.494	3-778	155.60	-7.441	-9.443
3-713	142.60	-8.544	-9.406	3-746	149.20	-8.838	-9.418	3-779	155.80	-7.356	-9.378
3-714	142.80	-8.394	-9.374	3-747	149.40	-8.706	-9.512	3-780	156.00	-7.553	-9.355
3-715	143.00	-8.382	-9.339	3-748	149.60	-8.454	-9.419	3-781	156.20	-7.646	-9.324
3-716	143.20	-8.745	-9.396	3-749	149.80	-8.304	-9.348	3-782	156.40	-7.623	-9.258
3-717	143.40	-8.838	-9.438	3-750	150.00	-8.104	-9.401	3-783	156.60	-7.319	-9.318
3-718	143.60	-8.747	-9.438	3-751	150.20	-8.307	-9.334	3-784	156.80	-7.313	-9.332
3-719	143.80	-8.770	-9.621	3-752	150.40	-8.183	-9.288	3-785	157.00	-7.122	-9.198
3-720	144.00	-8.543	-9.469	3-753	150.60	-8.382	-9.417	3-786	157.20	-7.158	-9.404
3-721	144.20	-8.371	-9.413	3-754	150.80	-8.474	-9.522	3-787	157.40	-7.344	-9.441
3-722	144.40	-8.213	-9.417	3-755	151.00	-8.393	-9.445	3-788	157.60	-7.522	-9.453
3-723	144.60	-8.178	-9.481	3-756	151.20	-8.186	-9.468	3-789	157.80	-7.551	-9.446
3-724	144.80	-8.183	-9.410	3-757	151.40	-8.002	-9.299	3-790	158.00	-7.740	-9.455

ID	Depth (mm)	$\delta^{13}\text{C}$ (PDB)	$\delta^{18}\text{O}$ (PDB)	ID	Depth (mm)	$\delta^{13}\text{C}$ (PDB)	$\delta^{18}\text{O}$ (PDB)	ID	Depth (mm)	$\delta^{13}\text{C}$ (PDB)	$\delta^{18}\text{O}$ (PDB)
3-791	158.20	-8.067	-9.438	3-824	164.80	-8.504	-10.783	3-857	171.40	-9.783	-11.167
3-792	158.40	-7.390	-9.413	3-825	165.00	-8.569	-10.880	3-858	171.60	-9.745	-11.137
3-793	158.60	-6.545	-9.719	3-826	165.20	-8.752	-10.885	3-859	171.80	-9.645	-11.088
3-794	158.80	-7.495	-10.089	3-827	165.40	-8.710	-10.893	3-860	172.00	-9.622	-11.131
3-795	159.00	-7.757	-10.293	3-828	165.60	-8.559	-10.821	3-861	172.20	-9.579	-11.127
3-796	159.20	-7.695	-10.433	3-829	165.80	-8.442	-10.896	3-862	172.40	-9.623	-11.056
3-797	159.40	-8.395	-10.591	3-830	166.00	-9.106	-11.007	3-863	172.60	-9.653	-10.976
3-798	159.60	-8.884	-10.819	3-831	166.20	-9.622	-11.112	3-864	172.80	-9.809	-11.321
3-799	159.80	-8.977	-10.861	3-832	166.40	-9.872	-11.179	3-865	173.00	-9.615	-11.102
3-800	160.00	-8.911	-10.899	3-833	166.60	-9.536	-10.895	3-866	173.20	-9.632	-11.081
3-801	160.20	-8.377	-10.617	3-834	166.80	-9.815	-11.148	3-867	173.40	-9.625	-11.070
3-802	160.40	-7.648	-10.216	3-835	167.00	-9.471	-11.077	3-868	173.60	-9.610	-11.112
3-803	160.60	-7.455	-10.262	3-836	167.20	-9.591	-11.066	3-869	173.80	-9.615	-11.130
3-804	160.80	-6.997	-10.229	3-837	167.40	-9.661	-11.073	3-870	174.00	-9.649	-11.083
3-805	161.00	-6.814	-10.488	3-838	167.60	-9.560	-11.036	3-871	174.20	-9.532	-11.125
3-806	161.20	-7.089	-10.662	3-839	167.80	-9.301	-10.950	3-872	174.40	-9.695	-11.155
3-807	161.40	-7.216	-10.707	3-840	168.00	-9.495	-11.004	3-873	174.60	-9.595	-11.113
3-808	161.60	-7.253	-10.555	3-841	168.20	-9.394	-10.960	3-874	174.80	-9.458	-11.111
3-809	161.80	-7.149	-10.623	3-842	168.40	-9.629	-10.979	3-875	175.00	-9.586	-11.107
3-810	162.00	-7.427	-10.736	3-843	168.60	-9.239	-10.986	3-876	175.20	-9.716	-11.108
3-811	162.20	-7.206	-10.703	3-844	168.80	-8.965	-10.908	3-877	175.40	-9.745	-11.032
3-812	162.40	-6.909	-10.735	3-845	169.00	-8.547	-10.851	3-878	175.60	-9.753	-11.148
3-813	162.60	-6.553	-10.618	3-846	169.20	-8.560	-10.826	3-879	175.80	-9.784	-11.178
3-814	162.80	-6.439	-10.598	3-847	169.40	-8.519	-10.834	3-880	176.00	-9.581	-11.084
3-815	163.00	-6.699	-10.583	3-848	169.60	-8.521	-10.806	3-881	176.20	-9.646	-11.105
3-816	163.20	-7.027	-10.561	3-849	169.80	-8.710	-10.809	3-882	176.40	-9.684	-11.016
3-817	163.40	-7.063	-10.575	3-850	170.00	-8.818	-10.843	3-883	176.60	-9.446	-11.039
3-818	163.60	-7.247	-10.618	3-851	170.20	-9.104	-10.897	3-884	176.80	-9.030	-10.908
3-819	163.80	-7.265	-10.644	3-852	170.40	-9.241	-10.953	3-885	177.00	-8.752	-10.917
3-820	164.00	-7.833	-10.727	3-853	170.60	-9.560	-11.046	3-886	177.20	-8.708	-10.874
3-821	164.20	-8.129	-10.798	3-854	170.80	-9.738	-11.104	3-887	177.40	-8.608	-10.932
3-822	164.40	-8.105	-11.130	3-855	171.00	-9.877	-11.101	3-888	177.60	-8.431	-10.931
3-823	164.60	-8.302	-10.893	3-856	171.20	-9.780	-11.146	3-889	177.80	-8.466	-11.029

ID	Depth (mm)	$\delta^{13}\text{C}$ (PDB)	$\delta^{18}\text{O}$ (PDB)	ID	Depth (mm)	$\delta^{13}\text{C}$ (PDB)	$\delta^{18}\text{O}$ (PDB)	ID	Depth (mm)	$\delta^{13}\text{C}$ (PDB)	$\delta^{18}\text{O}$ (PDB)
3-890	178.00	-8.123	-10.935	3-923	184.60	-8.591	-11.572	3-956	191.20	-8.105	-11.394
3-891	178.20	-8.556	-10.990	3-924	184.80	-8.171	-11.445	3-957	191.40	-8.145	-11.345
3-892	178.40	-9.048	-11.083	3-925	185.00	-8.131	-11.486	3-958	191.60	-8.016	-11.278
3-893	178.60	-9.314	-11.094	3-926	185.20	-8.238	-11.594	3-959	191.80	-8.106	-11.145
3-894	178.80	-9.438	-11.121	3-927	185.40	-7.968	-11.585	3-960	192.00	-8.289	-11.351
3-895	179.00	-9.682	-11.188	3-928	185.60	-7.653	-11.501	3-961	192.20	-8.311	-11.313
3-896	179.20	-9.584	-11.364	3-929	185.80	-7.701	-11.371	3-962	192.40	-7.905	-11.278
3-897	179.40	-9.047	-11.344	3-930	186.00	-7.487	-11.302	3-963	192.60	-7.241	-11.195
3-898	179.60	-9.117	-11.642	3-931	186.20	-7.887	-11.432	3-964	192.80	-7.283	-11.191
3-899	179.80	-9.137	-11.670	3-932	186.40	-8.674	-11.564	3-965	193.00	-7.602	-11.245
3-900	180.00	-9.270	-11.775	3-933	186.60	-8.874	-11.504	3-966	193.20	-8.009	-11.348
3-901	180.20	-8.980	-11.750	3-934	186.80	-8.753	-11.473	3-967	193.40	-8.428	-11.440
3-902	180.40	-8.665	-11.721	3-935	187.00	-8.693	-11.392	3-968	193.60	-8.580	-11.483
3-903	180.60	-8.569	-11.962	3-936	187.20	-9.033	-11.503	3-969	193.80	-8.378	-11.282
3-904	180.80	-8.104	-11.596	3-937	187.40	-9.172	-11.522	3-970	194.00	-8.496	-11.432
3-905	181.00	-8.024	-11.468	3-938	187.60	-9.200	-11.536	3-971	194.20	-8.089	-11.366
3-906	181.20	-7.431	-11.331	3-939	187.80	-9.316	-11.421	3-972	194.40	-7.922	-11.353
3-907	181.40	-7.329	-11.412	3-940	188.00	-9.243	-11.606	3-973	194.60	-7.499	-11.226
3-908	181.60	-7.256	-11.380	3-941	188.20	-9.222	-11.585	3-974	194.80	-6.961	-11.058
3-909	181.80	-7.745	-11.419	3-942	188.40	-9.065	-11.511	3-975	195.00	-6.690	-11.001
3-910	182.00	-7.929	-11.333	3-943	188.60	-8.767	-11.361	3-976	195.20	-6.803	-11.062
3-911	182.20	-8.365	-11.542	3-944	188.80	-8.344	-11.352	3-977	195.40	-6.753	-11.060
3-912	182.40	-8.398	-11.442	3-945	189.00	-8.165	-11.421	3-978	195.60	-6.859	-11.195
3-913	182.60	-8.643	-11.619	3-946	189.20	-8.156	-11.405	3-979	195.80	-7.534	-11.264
3-914	182.80	-8.681	-11.607	3-947	189.40	-8.068	-11.388	3-980	196.00	-7.927	-11.368
3-915	183.00	-8.868	-11.557	3-948	189.60	-8.188	-11.417	3-981	196.20	-8.161	-11.427
3-916	183.20	-9.025	-11.621	3-949	189.80	-8.036	-11.431	3-982	196.40	-8.333	-11.420
3-917	183.40	-8.640	-11.577	3-950	190.00	-8.080	-11.426	3-983	196.60	-8.445	-11.307
3-918	183.60	-8.779	-11.685	3-951	190.20	-8.130	-11.427	3-984	196.80	-8.556	-11.447
3-919	183.80	-8.967	-11.685	3-952	190.40	-8.015	-11.443	3-985	197.00	-8.464	-11.450
3-920	184.00	-8.643	-11.687	3-953	190.60	-7.924	-11.338	3-986	197.20	-8.379	-11.425
3-921	184.20	-8.125	-11.468	3-954	190.80	-7.939	-11.391	3-987	197.40	-8.318	-11.452
3-922	184.40	-8.453	-11.517	3-955	191.00	-8.079	-11.319	3-988	197.60	-7.716	-11.295

ID	Depth (mm)	$\delta^{13}\text{C}$ (PDB)	$\delta^{18}\text{O}$ (PDB)	ID	Depth (mm)	$\delta^{13}\text{C}$ (PDB)	$\delta^{18}\text{O}$ (PDB)	ID	Depth (mm)	$\delta^{13}\text{C}$ (PDB)	$\delta^{18}\text{O}$ (PDB)
3-989	197.80	-7.284	-11.173	3-1022	204.40	-8.863	-11.639	3-1055	211.00	-8.426	-11.464
3-990	198.00	-7.197	-11.181	3-1023	204.60	-9.232	-11.697	3-1056	211.20	-8.082	-11.327
3-991	198.20	-7.694	-11.253	3-1024	204.80	-9.155	-11.507	3-1057	211.40	-8.476	-11.273
3-992	198.40	-8.038	-11.338	3-1025	205.00	-9.180	-11.679	3-1058	211.60	-9.280	-11.368
3-993	198.60	-8.345	-11.445	3-1026	205.20	-8.973	-11.728	3-1059	211.80	-9.844	-11.498
3-994	198.80	-8.441	-11.495	3-1027	205.40	-9.077	-11.461	3-1060	212.00	-10.101	-11.455
3-995	199.00	-8.570	-11.389	3-1028	205.60	-9.259	-11.427	3-1061	212.20	-10.237	-11.468
3-996	199.20	-8.758	-11.523	3-1029	205.80	-9.195	-11.450	3-1062	212.40	-10.315	-11.488
3-997	199.40	-8.428	-11.407	3-1030	206.00	-9.085	-11.404	3-1063	212.60	-10.263	-11.439
3-998	199.60	-7.604	-11.192	3-1031	206.20	-8.988	-11.390	3-1064	212.80	-10.309	-11.435
3-999	199.80	-7.893	-11.254	3-1032	206.40	-8.760	-11.438	3-1065	213.00	-10.278	-11.434
3-1000	200.00	-8.370	-11.350	3-1033	206.60	-8.300	-11.325	3-1066	213.20	-10.243	-11.396
3-1001	200.20	-8.855	-11.448	3-1034	206.80	-8.479	-11.519	3-1067	213.40	-10.245	-11.415
3-1002	200.40	-9.041	-11.523	3-1035	207.00	-8.400	-11.660	3-1068	213.60	-10.268	-11.383
3-1003	200.60	-9.306	-11.546	3-1036	207.20	-8.355	-11.475	3-1069	213.80	-10.289	-11.376
3-1004	200.80	-9.385	-11.627	3-1037	207.40	-8.698	-11.800	3-1070	214.00	-10.270	-11.282
3-1005	201.00	-8.612	-11.477	3-1038	207.60	-8.786	-11.572	3-1071	214.20	-10.333	-11.348
3-1006	201.20	-8.049	-11.401	3-1039	207.80	-8.684	-11.491	3-1072	214.40	-10.345	-11.334
3-1007	201.40	-8.385	-11.461	3-1040	208.00	-8.960	-11.710	3-1073	214.60	-10.332	-11.311
3-1008	201.60	-8.032	-11.231	3-1041	208.20	-9.742	-11.201	3-1074	214.80	-10.353	-11.351
3-1009	201.80	-7.649	-11.281	3-1042	208.40	-8.576	-11.459	3-1075	215.00	-10.348	-11.351
3-1010	202.00	-7.676	-11.225	3-1043	208.60	-8.727	-11.549	3-1076	215.20	-10.417	-11.496
3-1011	202.20	-7.486	-11.128	3-1044	208.80	-8.842	-11.566	3-1077	215.40	-10.337	-11.310
3-1012	202.40	-7.613	-11.171	3-1045	209.00	-7.942	-11.340	3-1078	215.60	-10.298	-11.258
3-1013	202.60	-7.567	-11.115	3-1046	209.20	-8.489	-11.443	3-1079	215.80	-10.295	-11.215
3-1014	202.80	-7.641	-11.168	3-1047	209.40	-9.094	-11.598	3-1080	216.00	-10.238	-11.153
3-1015	203.00	-8.157	-11.303	3-1048	209.60	-9.262	-11.662	3-1081	216.20	-10.358	-11.360
3-1016	203.20	-8.592	-11.437	3-1049	209.80	-9.096	-11.676	3-1082	216.40	-10.265	-11.101
3-1017	203.40	-8.906	-11.471	3-1050	210.00	-8.896	-11.608	3-1083	216.60	-10.244	-11.056
3-1018	203.60	-8.677	-11.415	3-1051	210.20	-8.955	-11.735	3-1084	216.80	-10.280	-11.003
3-1019	203.80	-8.709	-11.379	3-1052	210.40	-8.304	-11.387	3-1085	217.00	-10.265	-10.999
3-1020	204.00	-8.709	-11.325	3-1053	210.60	-8.168	-11.423	3-1086	217.20	-10.273	-10.929
3-1021	204.20	-8.797	-11.376	3-1054	210.80	-8.431	-11.495	3-1087	217.40	-10.264	-10.926

ID	Depth (mm)	$\delta^{13}\text{C}$ (PDB)	$\delta^{18}\text{O}$ (PDB)	ID	Depth (mm)	$\delta^{13}\text{C}$ (PDB)	$\delta^{18}\text{O}$ (PDB)	ID	Depth (mm)	$\delta^{13}\text{C}$ (PDB)	$\delta^{18}\text{O}$ (PDB)
3-1088	217.60	-10.253	-10.839	3-1121	224.20	-9.776	-12.068	3-1154	230.80	-7.830	-11.155
3-1089	217.80	-10.274	-10.772	3-1122	224.40	-9.685	-11.879	3-1155	231.00	-7.863	-11.082
3-1090	218.00	-10.332	-10.739	3-1123	224.60	-9.662	-11.890	3-1156	231.20	-7.869	-11.202
3-1091	218.20	-10.420	-10.807	3-1124	224.80	-9.648	-11.898	3-1157	231.40	-7.784	-11.107
3-1092	218.40	-10.547	-10.915	3-1125	225.00	-9.624	-11.781	3-1158	231.60	-7.482	-11.020
3-1093	218.60	-10.570	-10.809	3-1126	225.20	-9.638	-11.785	3-1159	231.80	-7.266	-11.009
3-1094	218.80	-10.547	-10.849	3-1127	225.40	-9.602	-11.780	3-1160	232.00	-7.109	-10.957
3-1095	219.00	-10.514	-10.553	3-1128	225.60	-9.625	-11.777	3-1161	232.20	-6.723	-10.881
3-1096	219.20	-10.419	-10.643	3-1129	225.80	-9.608	-11.769	3-1162	232.40	-6.889	-10.922
3-1097	219.40	-10.293	-10.424	3-1130	226.00	-9.617	-11.719	3-1163	232.60	-6.662	-10.899
3-1098	219.60	-10.224	-10.569	3-1131	226.20	-9.592	-11.744	3-1164	232.80	-6.840	-11.096
3-1099	219.80	-10.088	-10.469	3-1132	226.40	-9.621	-11.936	3-1165	233.00	-6.909	-11.058
3-1100	220.00	-9.896	-10.639	3-1133	226.60	-9.600	-11.738	3-1166	233.20	-7.871	-10.925
3-1101	220.20	-9.684	-10.902	3-1134	226.80	-9.539	-11.767	3-1167	233.40	-8.211	-10.860
3-1102	220.40	-9.454	-11.148	3-1135	227.00	-9.548	-11.767	3-1168	233.60	-8.273	-10.748
3-1103	220.60	-9.414	-11.338	3-1136	227.20	-9.551	-11.848	3-1169	233.80	-7.677	-10.610
3-1104	220.80	-9.406	-11.405	3-1137	227.40	-9.519	-11.733	3-1170	234.00	-7.350	-10.535
3-1105	221.00	-9.433	-11.523	3-1138	227.60	-9.500	-11.740	3-1171	234.20	-7.477	-10.557
3-1106	221.20	-9.436	-11.531	3-1139	227.80	-9.467	-11.744	3-1172	234.40	-7.737	-10.648
3-1107	221.40	-9.476	-11.616	3-1140	228.00	-9.398	-11.694	3-1173	234.60	-7.752	-10.615
3-1108	221.60	-9.494	-11.666	3-1141	228.20	-9.321	-11.616	3-1174	234.80	-7.603	-10.637
3-1109	221.80	-9.510	-11.761	3-1142	228.40	-9.322	-11.585	3-1175	235.00	-7.694	-10.580
3-1110	222.00	-9.578	-11.760	3-1143	228.60	-9.189	-11.500	3-1176	235.20	-7.889	-10.602
3-1111	222.20	-9.585	-11.903	3-1144	228.80	-9.281	-11.680	3-1177	235.40	-8.175	-10.638
3-1112	222.40	-9.569	-11.769	3-1145	229.00	-9.157	-11.537	3-1178	235.60	-7.756	-10.463
3-1113	222.60	-9.711	-12.035	3-1146	229.20	-9.187	-11.341	3-1179	235.80	-7.227	-10.321
3-1114	222.80	-9.570	-11.832	3-1147	229.40	-9.236	-11.401	3-1180	236.00	-6.693	-10.569
3-1115	223.00	-9.645	-11.853	3-1148	229.60	-9.318	-11.379				
3-1116	223.20	-9.617	-11.799	3-1149	229.80	-9.286	-11.229				
3-1117	223.40	-9.601	-11.820	3-1150	230.00	-9.208	-11.337				
3-1118	223.60	-9.610	-11.827	3-1151	230.20	-8.872	-11.417				
3-1119	223.80	-9.619	-11.798	3-1152	230.40	-8.413	-11.264				
3-1120	224.00	-9.590	-11.822	3-1153	230.60	-8.223	-11.141				

附表三、石筍 HY05-4 碳氧同位素實驗分析數據

ID	Depth (mm)	$\delta^{13}\text{C}$ (PDB)	$\delta^{18}\text{O}$ (PDB)	ID	Depth (mm)	$\delta^{13}\text{C}$ (PDB)	$\delta^{18}\text{O}$ (PDB)	ID	Depth (mm)	$\delta^{13}\text{C}$ (PDB)	$\delta^{18}\text{O}$ (PDB)
4-001	0.25	-7.134	-9.162	4-033	8.25	-8.849	-9.289	4-067	16.75	-8.027	-9.238
4-002	0.50	-7.639	-8.753	4-034	8.50	-8.831	-9.673	4-068	17.00	-8.147	-9.477
4-003	0.75	-8.025	-9.139	4-035	8.75	-8.911	-9.338	4-069	17.25	-8.055	-9.155
4-004	1.00	-8.034	-8.770	4-036	9.00	-9.005	-9.515	4-070	17.50	-8.166	-8.999
4-005	1.25	-7.845	-8.804	4-037	9.25	-8.946	-9.296	4-071	17.75	-7.978	-9.214
4-006	1.50	-7.915	-8.942	4-038	9.50	-8.746	-8.766	4-072	18.00	-7.782	-8.901
4-007	1.75	-7.871	-8.821	4-039	9.75	-8.973	-9.454	4-073	18.25	-7.752	-8.846
4-008	2.00	-8.043	-8.838	4-040	10.00	-9.067	-9.503	4-074	18.50	-7.774	-8.847
4-009	2.25	-8.406	-9.223	4-041	10.25	-9.045	-9.644	4-075	18.75	-7.701	-8.837
4-010	2.50	-8.304	-9.105	4-042	10.50	-9.029	-9.549	4-076	19.00	-7.740	-8.878
4-011	2.75	-8.215	-9.123	4-043	10.75	-9.029	-9.549	4-077	19.25	-7.748	-9.025
4-012	3.00	-8.044	-9.071	4-044	11.00	-9.051	-9.471	4-078	19.50	-7.714	-9.127
4-013	3.25	-8.035	-9.506	4-045	11.25	-8.643	-9.565	4-079	19.75	-7.695	-8.821
4-014	3.50	-7.958	-9.374	4-046	11.50	-8.613	-9.617	4-080	20.00	-7.890	-9.091
4-015	3.75	-7.934	-8.981	4-047	11.75	-8.703	-9.468	4-081	20.25	-7.765	-9.049
4-016	4.00	-8.344	-9.476	4-049	12.25	-8.193	-9.364	4-082	20.50	-7.685	-9.172
4-017	4.25	-8.009	-9.235	4-050	12.50	-8.369	-9.275	4-083	20.75	-7.583	-9.198
4-018	4.50	-8.156	-9.266	4-051	12.75	-8.565	-9.470	4-084	21.00	-7.707	-9.214
4-019	4.75	-8.069	-9.078	4-052	13.00	-8.610	-9.345	4-085	21.25	-7.764	-9.194
4-020	5.00	-8.210	-9.020	4-053	13.25	-8.763	-9.347	4-086	21.50	-7.908	-9.180
4-021	5.25	-8.438	-9.178	4-054	13.50	-8.909	-9.362	4-087	21.75	-8.049	-9.359
4-022	5.50	-8.211	-9.069	4-055	13.75	-8.687	-9.321	4-088	22.00	-8.328	-9.484
4-023	5.75	-8.353	-9.032	4-056	14.00	-8.747	-9.298	4-089	22.25	-8.466	-9.388
4-024	6.00	-8.279	-8.783	4-057	14.25	-8.752	-9.343	4-090	22.50	-8.712	-9.414
4-025	6.25	-8.112	-8.943	4-058	14.50	-8.862	-9.190	4-091	22.75	-8.322	-9.253
4-026	6.50	-8.563	-9.129	4-059	14.75	-8.995	-9.457	4-092	23.00	-8.677	-9.364
4-027	6.75	-8.461	-9.117	4-060	15.00	-8.791	-9.455	4-093	23.25	-8.512	-9.652
4-028	7.00	-8.599	-9.321	4-061	15.25	-8.285	-9.361	4-094	23.50	-8.348	-9.268
4-029	7.25	-8.704	-9.304	4-062	15.50	-8.479	-9.311	4-095	23.75	-8.329	-9.307
4-030	7.50	-8.899	-9.424	4-063	15.75	-8.481	-9.531	4-096	24.00	-7.816	-9.175
4-031	7.75	-8.723	-9.298	4-065	16.25	-8.319	-9.357	4-097	24.25	-8.084	-9.359
4-032	8.00	-8.668	-9.455	4-066	16.50	-7.835	-9.247	4-098	24.50	-7.994	-9.348

ID	Depth (mm)	$\delta^{13}\text{C}$ (PDB)	$\delta^{18}\text{O}$ (PDB)	ID	Depth (mm)	$\delta^{13}\text{C}$ (PDB)	$\delta^{18}\text{O}$ (PDB)	ID	Depth (mm)	$\delta^{13}\text{C}$ (PDB)	$\delta^{18}\text{O}$ (PDB)
4-099	24.75	-8.139	-9.451	4-132	33.00	-7.722	-9.177	4-165	41.25	-8.312	-9.181
4-100	25.00	-8.100	-9.563	4-133	33.25	-7.744	-8.865	4-166	41.50	-8.329	-9.148
4-101	25.25	-8.056	-9.257	4-134	33.50	-8.103	-8.985	4-167	41.75	-8.594	-9.294
4-102	25.50	-8.154	-9.362	4-135	33.75	-8.121	-8.914	4-168	42.00	-8.483	-9.188
4-103	25.75	-8.385	-9.473	4-136	34.00	-8.136	-9.015	4-169	42.25	-8.459	-9.172
4-104	26.00	-8.475	-9.322	4-137	34.25	-7.941	-8.669	4-170	42.50	-8.565	-9.177
4-105	26.25	-8.489	-9.307	4-138	34.50	-8.075	-9.070	4-171	42.75	-8.479	-9.092
4-106	26.50	-8.523	-9.316	4-139	34.75	-8.119	-9.044	4-172	43.00	-8.555	-9.130
4-107	26.75	-8.455	-9.307	4-140	35.00	-8.291	-9.206	4-173	43.25	-8.359	-9.097
4-108	27.00	-8.410	-9.332	4-141	35.25	-8.491	-9.210	4-174	43.50	-8.216	-9.112
4-109	27.25	-8.301	-9.300	4-142	35.50	-8.531	-9.094	4-175	43.75	-8.055	-9.057
4-110	27.50	-8.287	-9.189	4-143	35.75	-8.462	-8.952	4-176	44.00	-8.073	-9.017
4-111	27.75	-8.327	-9.182	4-144	36.00	-8.226	-9.127	4-177	44.25	-8.085	-9.093
4-112	28.00	-8.406	-9.322	4-145	36.25	-8.167	-9.302	4-178	44.50	-8.269	-9.206
4-113	28.25	-8.337	-9.319	4-146	36.50	-8.078	-9.324	4-179	44.75	-8.486	-9.323
4-114	28.50	-8.322	-9.280	4-147	36.75	-7.929	-9.194	4-180	45.00	-8.521	-9.350
4-115	28.75	-8.305	-9.261	4-148	37.00	-8.044	-9.359	4-181	45.25	-8.593	-9.300
4-116	29.00	-8.458	-9.331	4-149	37.25	-8.181	-9.215	4-182	45.50	-8.575	-9.389
4-117	29.25	-8.669	-9.377	4-150	37.50	-8.192	-9.329	4-183	45.75	-8.736	-9.444
4-118	29.50	-8.538	-9.271	4-151	37.75	-8.120	-9.337	4-184	46.00	-8.552	-9.389
4-119	29.75	-8.580	-9.243	4-152	38.00	-8.250	-9.370	4-185	46.25	-8.606	-9.277
4-120	30.00	-8.385	-9.163	4-153	38.25	-8.322	-9.288	4-186	46.50	-8.469	-9.277
4-121	30.25	-8.400	-9.109	4-154	38.50	-8.221	-8.968	4-187	46.75	-8.458	-9.275
4-122	30.50	-8.548	-9.243	4-155	38.75	-8.409	-9.244	4-188	47.00	-8.369	-9.331
4-123	30.75	-8.678	-9.016	4-156	39.00	-8.496	-9.202	4-189	47.25	-8.310	-9.240
4-124	31.00	-8.677	-9.298	4-157	39.25	-8.390	-8.903	4-190	47.50	-8.507	-9.223
4-125	31.25	-8.649	-8.916	4-158	39.50	-8.387	-9.269	4-191	47.75	-8.634	-9.176
4-126	31.50	-8.875	-9.216	4-159	39.75	-8.222	-9.016	4-192	48.00	-8.285	-9.162
4-127	31.75	-8.745	-9.229	4-160	40.00	-8.459	-9.266	4-193	48.25	-8.423	-9.201
4-128	32.00	-8.864	-9.074	4-161	40.25	-8.351	-9.169	4-194	48.50	-8.538	-9.212
4-129	32.25	-8.856	-9.191	4-162	40.50	-8.245	-8.994	4-195	48.75	-8.946	-9.342
4-130	32.50	-8.663	-9.259	4-163	40.75	-8.236	-9.279	4-196	49.00	-8.583	-9.285
4-131	32.75	-8.332	-9.282	4-164	41.00	-8.355	-9.240	4-197	49.25	-8.373	-9.395

ID	Depth (mm)	$\delta^{13}\text{C}$ (PDB)	$\delta^{18}\text{O}$ (PDB)	ID	Depth (mm)	$\delta^{13}\text{C}$ (PDB)	$\delta^{18}\text{O}$ (PDB)	ID	Depth (mm)	$\delta^{13}\text{C}$ (PDB)	$\delta^{18}\text{O}$ (PDB)
4-198	49.50	-8.077	-9.288	4-232	58.00	-8.210	-9.505	4-265	66.25	-8.576	-9.623
4-199	49.75	-8.121	-9.339	4-233	58.25	-8.393	-9.546	4-266	66.50	-8.707	-9.578
4-200	50.00	-7.905	-9.240	4-234	58.50	-8.446	-9.591	4-267	66.75	-8.713	-9.603
4-201	50.25	-8.075	-9.400	4-235	58.75	-8.440	-9.560	4-268	67.00	-8.520	-9.597
4-202	50.50	-8.001	-9.183	4-236	59.00	-8.712	-9.902	4-269	67.25	-8.622	-9.611
4-203	50.75	-8.238	-9.211	4-237	59.25	-8.554	-9.712	4-270	67.50	-8.622	-9.645
4-204	51.00	-8.052	-9.193	4-238	59.50	-8.438	-9.590	4-271	67.75	-8.498	-9.618
4-205	51.25	-8.067	-9.124	4-239	59.75	-8.401	-9.649	4-272	68.00	-8.602	-9.630
4-206	51.50	-8.341	-9.444	4-240	60.00	-8.509	-9.668	4-273	68.25	-8.506	-9.680
4-207	51.75	-8.181	-9.174	4-241	60.25	-8.623	-9.620	4-274	68.50	-8.339	-9.899
4-208	52.00	-8.030	-9.188	4-242	60.50	-8.740	-9.734	4-275	68.75	-8.188	-9.718
4-209	52.25	-8.104	-9.224	4-243	60.75	-8.685	-9.807	4-276	69.00	-8.548	-9.719
4-210	52.50	-7.911	-9.061	4-244	61.00	-8.662	-9.857	4-277	69.25	-8.326	-9.531
4-211	52.75	-8.441	-9.645	4-245	61.25	-8.737	-9.768	4-278	69.50	-8.413	-9.777
4-212	53.00	-8.307	-9.344	4-246	61.50	-9.074	-9.750	4-279	69.75	-8.393	-9.551
4-213	53.25	-8.445	-9.290	4-247	61.75	-8.922	-9.751	4-280	70.00	-8.449	-9.755
4-214	53.50	-8.462	-9.476	4-248	62.00	-8.811	-9.755	4-281	70.25	-8.365	-9.422
4-215	53.75	-8.129	-9.526	4-249	62.25	-8.598	-9.759	4-282	70.50	-8.217	-9.397
4-217	54.25	-7.714	-9.436	4-250	62.50	-8.395	-9.718	4-283	70.75	-8.193	-9.302
4-218	54.50	-8.044	-9.384	4-251	62.75	-8.438	-9.574	4-284	71.00	-8.006	-9.203
4-219	54.75	-8.335	-9.301	4-252	63.00	-8.407	-9.695	4-285	71.25	-8.223	-9.204
4-220	55.00	-8.227	-9.280	4-253	63.25	-8.529	-9.725	4-286	71.50	-8.388	-9.277
4-221	55.25	-8.391	-9.477	4-254	63.50	-8.505	-9.707	4-287	71.75	-7.998	-9.185
4-222	55.50	-8.666	-9.378	4-255	63.75	-8.460	-9.708	4-288	72.00	-7.875	-9.130
4-223	55.75	-8.783	-9.384	4-256	64.00	-8.629	-9.678	4-289	72.25	-7.642	-9.036
4-224	56.00	-8.398	-9.284	4-257	64.25	-8.735	-9.794	4-290	72.50	-7.636	-8.938
4-225	56.25	-8.450	-9.455	4-258	64.50	-8.659	-9.760	4-291	72.75	-7.838	-8.913
4-226	56.50	-8.623	-9.696	4-259	64.75	-8.597	-9.770	4-292	73.00	-7.728	-8.921
4-227	56.75	-8.320	-9.464	4-260	65.00	-8.568	-9.694	4-293	73.25	-7.560	-8.870
4-228	57.00	-8.477	-9.507	4-261	65.25	-8.511	-9.581	4-294	73.50	-7.544	-9.043
4-229	57.25	-8.308	-9.518	4-262	65.50	-8.644	-9.759	4-295	73.75	-7.536	-9.083
4-230	57.50	-8.348	-9.470	4-263	65.75	-8.645	-9.713	4-296	74.00	-7.601	-9.063
4-231	57.75	-8.387	-9.522	4-264	66.00	-8.507	-9.548	4-297	74.25	-7.644	-9.117

ID	Depth (mm)	$\delta^{13}\text{C}$ (PDB)	$\delta^{18}\text{O}$ (PDB)	ID	Depth (mm)	$\delta^{13}\text{C}$ (PDB)	$\delta^{18}\text{O}$ (PDB)	ID	Depth (mm)	$\delta^{13}\text{C}$ (PDB)	$\delta^{18}\text{O}$ (PDB)
4-298	74.50	-7.727	-9.134	4-331	82.75	-7.518	-9.103	4-364	91.00	-7.429	-9.219
4-299	74.75	-7.807	-9.003	4-332	83.00	-7.378	-9.106	4-365	91.25	-7.539	-9.251
4-300	75.00	-7.913	-9.293	4-333	83.25	-7.274	-9.072	4-366	91.50	-7.662	-9.241
4-301	75.25	-8.313	-9.225	4-334	83.50	-7.092	-9.030	4-367	91.75	-7.666	-9.197
4-302	75.50	-8.197	-9.259	4-335	83.75	-6.989	-9.085	4-368	92.00	-7.564	-9.143
4-303	75.75	-8.311	-9.341	4-336	84.00	-7.232	-9.094	4-369	92.25	-7.428	-9.133
4-304	76.00	-8.567	-9.362	4-337	84.25	-6.893	-9.072	4-370	92.50	-7.242	-9.066
4-305	76.25	-8.639	-9.320	4-338	84.50	-6.843	-9.022	4-371	92.75	-7.021	-8.958
4-306	76.50	-8.621	-9.297	4-339	84.75	-6.861	-9.044	4-372	93.00	-7.326	-9.329
4-307	76.75	-8.679	-9.383	4-340	85.00	-7.036	-9.012	4-373	93.25	-7.219	-9.175
4-308	77.00	-8.431	-9.249	4-341	85.25	-7.108	-9.080	4-374	93.50	-6.875	-9.231
4-309	77.25	-8.846	-9.355	4-342	85.50	-7.188	-9.042	4-375	93.75	-6.775	-9.315
4-310	77.50	-8.662	-9.294	4-343	85.75	-7.233	-9.039	4-376	94.00	-6.917	-9.342
4-311	77.75	-8.574	-9.154	4-344	86.00	-7.361	-9.089	4-377	94.25	-7.193	-9.186
4-312	78.00	-8.763	-9.426	4-345	86.25	-7.399	-9.173	4-378	94.50	-7.273	-9.142
4-313	78.25	-8.700	-9.395	4-346	86.50	-7.444	-9.084	4-379	94.75	-6.941	-9.191
4-314	78.50	-8.480	-9.355	4-347	86.75	-7.585	-9.094	4-380	95.00	-6.996	-9.217
4-315	78.75	-8.422	-9.258	4-348	87.00	-7.623	-9.245	4-381	95.25	-7.289	-9.340
4-316	79.00	-8.117	-8.898	4-349	87.25	-7.587	-9.083	4-382	95.50	-7.246	-9.162
4-317	79.25	-7.916	-9.197	4-350	87.50	-7.600	-9.196	4-383	95.75	-7.052	-9.062
4-318	79.50	-8.026	-9.172	4-351	87.75	-7.524	-9.110	4-384	96.00	-7.098	-9.082
4-319	79.75	-7.907	-9.177	4-352	88.00	-7.387	-9.010	4-385	96.25	-7.182	-9.108
4-320	80.00	-7.420	-9.189	4-353	88.25	-7.427	-9.040	4-386	96.50	-6.936	-9.230
4-321	80.25	-7.421	-9.052	4-354	88.50	-7.407	-9.026	4-387	96.75	-6.976	-9.102
4-322	80.50	-7.417	-8.954	4-355	88.75	-7.347	-9.023	4-388	97.00	-6.990	-9.107
4-323	80.75	-7.562	-8.943	4-356	89.00	-7.367	-9.030	4-389	97.25	-7.150	-9.077
4-324	81.00	-7.816	-8.994	4-357	89.25	-7.330	-8.995	4-390	97.50	-7.236	-9.106
4-325	81.25	-7.665	-8.938	4-358	89.50	-7.404	-9.044	4-391	97.75	-7.381	-9.210
4-326	81.50	-8.232	-9.377	4-359	89.75	-7.331	-9.065	4-392	98.00	-7.546	-9.087
4-327	81.75	-7.728	-8.974	4-360	90.00	-7.318	-9.099	4-393	98.25	-7.572	-9.114
4-328	82.00	-7.825	-9.031	4-361	90.25	-7.347	-9.047	4-394	98.50	-7.380	-9.095
4-329	82.25	-7.701	-9.006	4-362	90.50	-7.405	-9.185	4-395	98.75	-7.315	-9.162
4-330	82.50	-7.761	-9.128	4-363	90.75	-7.464	-9.034	4-396	99.00	-7.386	-9.193

ID	Depth (mm)	$\delta^{13}\text{C}$ (PDB)	$\delta^{18}\text{O}$ (PDB)	ID	Depth (mm)	$\delta^{13}\text{C}$ (PDB)	$\delta^{18}\text{O}$ (PDB)	ID	Depth (mm)	$\delta^{13}\text{C}$ (PDB)	$\delta^{18}\text{O}$ (PDB)
4-397	99.25	-7.428	-9.182	4-430	107.50	-7.261	-8.974	4-464	116.00	-8.026	-9.232
4-398	99.50	-7.334	-9.152	4-432	108.00	-7.433	-9.272	4-465	116.25	-8.131	-9.289
4-399	99.75	-7.285	-9.268	4-433	108.25	-7.292	-9.262	4-466	116.50	-8.123	-9.408
4-400	100.00	-7.133	-9.278	4-434	108.50	-7.206	-9.274	4-467	116.75	-8.042	-9.425
4-401	100.25	-7.671	-9.496	4-435	108.75	-7.406	-9.337	4-468	117.00	-8.117	-9.404
4-402	100.50	-7.273	-9.178	4-436	109.00	-7.711	-9.346	4-469	117.25	-8.336	-9.484
4-403	100.75	-7.355	-9.145	4-437	109.25	-7.582	-9.165	4-470	117.50	-8.266	-9.389
4-404	101.00	-7.355	-9.152	4-438	109.50	-7.557	-9.041	4-471	117.75	-8.091	-9.345
4-405	101.25	-7.257	-9.174	4-439	109.75	-7.634	-9.494	4-472	118.00	-8.063	-9.433
4-406	101.50	-7.509	-9.438	4-440	110.00	-7.594	-9.381	4-473	118.25	-7.875	-8.993
4-407	101.75	-6.881	-9.250	4-441	110.25	-7.688	-9.671	4-474	118.50	-7.916	-9.040
4-408	102.00	-6.929	-9.215	4-442	110.50	-7.444	-9.287	4-475	118.75	-7.707	-9.071
4-409	102.25	-6.906	-9.344	4-443	110.75	-7.642	-9.248	4-476	119.00	-7.922	-9.730
4-410	102.50	-6.716	-9.243	4-444	111.00	-7.506	-9.259	4-477	119.25	-7.156	-8.794
4-411	102.75	-7.021	-9.386	4-445	111.25	-7.287	-9.261	4-478	119.50	-7.814	-9.015
4-412	103.00	-6.952	-9.334	4-446	111.50	-7.216	-9.344	4-479	119.75	-7.428	-8.805
4-413	103.25	-7.347	-9.429	4-447	111.75	-6.947	-9.326	4-480	120.00	-7.753	-8.961
4-414	103.50	-7.144	-9.283	4-448	112.00	-6.910	-9.353	4-481	120.25	-7.904	-9.410
4-415	103.75	-7.168	-9.248	4-449	112.25	-6.785	-9.499	4-482	120.50	-7.771	-8.977
4-416	104.00	-7.139	-9.077	4-450	112.50	-6.696	-9.379	4-483	120.75	-7.978	-8.967
4-417	104.25	-6.920	-9.290	4-451	112.75	-7.248	-9.791	4-484	121.00	-8.088	-8.927
4-418	104.50	-6.808	-9.289	4-452	113.00	-7.236	-9.274	4-485	121.25	-7.417	-8.874
4-419	104.75	-6.761	-9.303	4-453	113.25	-7.553	-9.478	4-486	121.50	-7.468	-9.177
4-420	105.00	-6.675	-9.300	4-454	113.50	-7.507	-9.352	4-487	121.75	-7.952	-8.939
4-421	105.25	-7.052	-9.583	4-455	113.75	-7.409	-9.381	4-488	122.00	-7.957	-8.926
4-422	105.50	-7.213	-9.409	4-456	114.00	-7.393	-9.232	4-489	122.25	-8.406	-9.159
4-423	105.75	-7.340	-9.288	4-457	114.25	-7.609	-9.236	4-490	122.50	-8.142	-9.174
4-424	106.00	-7.350	-9.448	4-458	114.50	-7.815	-9.437	4-491	122.75	-8.316	-10.062
4-425	106.25	-7.225	-9.309	4-459	114.75	-7.635	-9.540	4-492	123.00	-7.868	-9.022
4-426	106.50	-7.573	-9.450	4-460	115.00	-7.339	-9.372	4-493	123.25	-8.049	-9.042
4-427	106.75	-7.179	-9.110	4-461	115.25	-7.161	-9.066	4-494	123.50	-8.127	-9.030
4-428	107.00	-7.210	-9.285	4-462	115.50	-7.538	-9.214	4-495	123.75	-8.304	-9.026
4-429	107.25	-7.283	-9.103	4-463	115.75	-7.722	-9.304	4-496	124.00	-8.745	-9.472

ID	Depth (mm)	$\delta^{13}\text{C}$ (PDB)	$\delta^{18}\text{O}$ (PDB)	ID	Depth (mm)	$\delta^{13}\text{C}$ (PDB)	$\delta^{18}\text{O}$ (PDB)	ID	Depth (mm)	$\delta^{13}\text{C}$ (PDB)	$\delta^{18}\text{O}$ (PDB)
4-497	124.25	-8.426	-9.005	4-532	133.00	-7.546	-9.180	4-565	141.25	-8.154	-9.830
4-498	124.50	-8.437	-8.897	4-533	133.25	-7.172	-9.318	4-566	141.50	-8.026	-9.707
4-499	124.75	-8.540	-9.094	4-534	133.50	-7.255	-9.152	4-567	141.75	-7.996	-9.602
4-500	125.00	-8.565	-8.979	4-535	133.75	-7.647	-9.242	4-568	142.00	-7.760	-8.953
4-501	125.25	-9.570	-9.694	4-536	134.00	-7.642	-9.564	4-569	142.25	-7.934	-9.478
4-502	125.50	-8.692	-9.112	4-537	134.25	-8.014	-9.748	4-570	142.50	-7.852	-9.514
4-503	125.75	-8.096	-9.010	4-538	134.50	-7.613	-9.110	4-571	142.75	-7.529	-9.376
4-504	126.00	-8.328	-9.081	4-539	134.75	-7.991	-9.404	4-572	143.00	-7.642	-9.441
4-505	126.25	-8.568	-9.132	4-540	135.00	-7.716	-9.274	4-573	143.25	-7.399	-9.052
4-506	126.50	-8.659	-9.468	4-541	135.25	-7.548	-9.250	4-574	143.50	-7.520	-9.081
4-507	126.75	-8.358	-9.079	4-542	135.50	-7.816	-9.193	4-575	143.75	-7.384	-8.657
4-508	127.00	-7.986	-9.070	4-543	135.75	-7.832	-9.280	4-576	144.00	-7.490	-9.161
4-509	127.25	-7.629	-9.113	4-544	136.00	-7.843	-9.218	4-577	144.25	-7.335	-8.657
4-510	127.50	-7.213	-9.290	4-545	136.25	-7.768	-9.350	4-578	144.50	-7.244	-8.825
4-511	127.75	-7.203	-9.304	4-546	136.50	-7.582	-9.478	4-579	144.75	-7.227	-8.812
4-512	128.00	-7.234	-9.075	4-547	136.75	-7.418	-8.932	4-580	145.00	-7.176	-8.732
4-513	128.25	-7.520	-9.075	4-548	137.00	-7.504	-8.986	4-581	145.25	-7.274	-8.903
4-514	128.50	-7.345	-9.139	4-549	137.25	-7.422	-8.827	4-582	145.50	-7.386	-8.728
4-515	128.75	-7.509	-9.130	4-550	137.50	-7.609	-9.070	4-583	145.75	-7.560	-8.793
4-516	129.00	-7.615	-8.845	4-551	137.75	-8.960	-9.955	4-584	146.00	-7.603	-8.730
4-517	129.25	-7.261	-9.170	4-552	138.00	-7.298	-9.249	4-585	146.25	-7.566	-8.822
4-518	129.50	-7.329	-9.173	4-553	138.25	-7.437	-9.336	4-586	146.50	-7.710	-9.107
4-519	129.75	-7.247	-9.179	4-554	138.50	-7.348	-9.201	4-587	146.75	-7.631	-8.948
4-520	130.00	-7.360	-9.163	4-555	138.75	-7.352	-9.469	4-588	147.00	-7.676	-9.107
4-521	130.25	-7.490	-9.419	4-556	139.00	-7.674	-9.391	4-589	147.25	-7.649	-9.123
4-522	130.50	-7.283	-9.161	4-557	139.25	-8.054	-9.283	4-590	147.50	-7.842	-9.162
4-523	130.75	-8.538	-9.882	4-558	139.50	-7.665	-8.294	4-591	147.75	-8.083	-9.234
4-524	131.00	-9.111	-9.902	4-559	139.75	-7.654	-9.181	4-592	148.00	-8.013	-9.170
4-525	131.25	-7.992	-9.304	4-560	140.00	-7.448	-9.534	4-593	148.25	-7.949	-9.152
4-526	131.50	-8.028	-9.599	4-561	140.25	-7.455	-9.345	4-594	148.50	-8.061	-9.066
4-528	132.00	-8.147	-9.301	4-562	140.50	-7.576	-9.305	4-595	148.75	-8.066	-9.085
4-529	132.25	-8.542	-9.425	4-563	140.75	-7.987	-9.776	4-596	149.00	-8.320	-9.115
4-531	132.75	-7.541	-9.397	4-564	141.00	-7.718	-9.612	4-597	149.25	-7.980	-8.884

ID	Depth (mm)	$\delta^{13}\text{C}$ (PDB)	$\delta^{18}\text{O}$ (PDB)	ID	Depth (mm)	$\delta^{13}\text{C}$ (PDB)	$\delta^{18}\text{O}$ (PDB)	ID	Depth (mm)	$\delta^{13}\text{C}$ (PDB)	$\delta^{18}\text{O}$ (PDB)
4-598	149.50	-7.734	-8.880	4-631	157.75	-8.777	-9.362	4-664	166.00	-8.243	-9.258
4-599	149.75	-7.571	-8.908	4-632	158.00	-8.648	-9.249	4-665	166.25	-8.145	-9.133
4-600	150.00	-7.645	-9.026	4-633	158.25	-8.501	-9.347	4-666	166.50	-8.128	-9.354
4-601	150.25	-7.680	-9.158	4-634	158.50	-8.288	-9.353	4-667	166.75	-8.339	-9.234
4-602	150.50	-8.057	-9.216	4-635	158.75	-8.007	-9.333	4-668	167.00	-8.357	-9.225
4-603	150.75	-8.273	-9.170	4-636	159.00	-7.937	-9.529	4-669	167.25	-8.314	-9.280
4-604	151.00	-8.121	-9.375	4-637	159.25	-7.625	-9.391	4-670	167.50	-8.527	-9.313
4-605	151.25	-8.190	-9.340	4-638	159.50	-7.947	-9.340	4-671	167.75	-8.445	-9.444
4-606	151.50	-8.652	-9.602	4-639	159.75	-8.227	-9.323	4-672	168.00	-8.340	-9.220
4-607	151.75	-7.765	-9.155	4-640	160.00	-8.275	-9.332	4-673	168.25	-8.579	-9.392
4-608	152.00	-7.572	-9.145	4-641	160.25	-8.330	-9.511	4-674	168.50	-8.510	-9.383
4-609	152.25	-7.821	-9.273	4-642	160.50	-7.992	-9.383	4-675	168.75	-8.468	-9.329
4-610	152.50	-8.417	-9.322	4-643	160.75	-8.159	-9.251	4-676	169.00	-8.510	-9.406
4-611	152.75	-8.647	-9.389	4-644	161.00	-8.191	-9.196	4-677	169.25	-8.624	-9.322
4-612	153.00	-8.393	-9.327	4-645	161.25	-8.365	-9.149	4-678	169.50	-8.762	-9.204
4-613	153.25	-8.429	-9.353	4-646	161.50	-8.402	-9.298	4-679	169.75	-8.591	-9.098
4-614	153.50	-8.155	-9.238	4-647	161.75	-8.253	-9.185	4-680	170.00	-8.546	-9.118
4-615	153.75	-8.140	-9.275	4-648	162.00	-8.313	-9.184	4-681	170.25	-8.374	-9.257
4-616	154.00	-8.227	-9.387	4-649	162.25	-8.084	-9.113	4-682	170.50	-8.231	-9.115
4-617	154.25	-8.034	-9.201	4-650	162.50	-8.111	-9.045	4-683	170.75	-8.359	-9.092
4-618	154.50	-7.897	-9.140	4-651	162.75	-8.228	-9.212	4-684	171.00	-8.286	-9.093
4-619	154.75	-7.913	-9.101	4-652	163.00	-8.296	-9.063	4-685	171.25	-8.172	-9.096
4-620	155.00	-7.979	-9.137	4-653	163.25	-8.233	-9.077	4-686	171.50	-8.237	-9.284
4-621	155.25	-8.034	-9.321	4-654	163.50	-8.197	-9.111	4-687	171.75	-8.198	-9.238
4-622	155.50	-7.933	-9.103	4-655	163.75	-8.234	-9.121	4-688	172.00	-8.246	-9.323
4-623	155.75	-7.934	-9.110	4-656	164.00	-8.173	-9.241	4-689	172.25	-8.418	-9.356
4-624	156.00	-8.335	-9.158	4-657	164.25	-8.141	-9.208	4-690	172.50	-8.468	-9.244
4-625	156.25	-8.336	-9.169	4-658	164.50	-8.101	-9.140	4-691	172.75	-8.576	-9.438
4-626	156.50	-8.175	-9.266	4-659	164.75	-8.166	-9.163	4-692	173.00	-8.173	-9.185
4-627	156.75	-8.353	-9.158	4-660	165.00	-8.325	-9.199	4-693	173.25	-8.378	-9.210
4-628	157.00	-8.267	-9.123	4-661	165.25	-8.380	-9.261	4-694	173.50	-8.173	-9.210
4-629	157.25	-8.312	-9.189	4-662	165.50	-8.222	-9.129	4-695	173.75	-8.475	-9.173
4-630	157.50	-8.480	-9.133	4-663	165.75	-8.260	-9.221	4-696	174.00	-8.351	-9.231



ID	Depth (mm)	$\delta^{13}\text{C}$ (PDB)	$\delta^{18}\text{O}$ (PDB)	ID	Depth (mm)	$\delta^{13}\text{C}$ (PDB)	$\delta^{18}\text{O}$ (PDB)
4-697	174.25	-8.219	-9.054	4-729	182.25	-7.163	-9.128
4-698	174.50	-8.295	-9.148	4-730	182.50	-7.235	-9.156
4-699	174.75	-8.254	-9.097	4-731	182.75	-7.303	-9.276
4-700	175.00	-8.112	-9.170	4-732	183.00	-7.309	-9.259
4-701	175.25	-8.179	-9.326	4-733	183.25	-7.286	-9.408
4-702	175.50	-8.207	-9.233	4-734	183.50	-7.194	-9.321
4-703	175.75	-8.087	-9.274	4-735	183.75	-7.085	-9.239
4-704	176.00	-8.189	-9.312	4-736	184.00	-6.977	-9.481
4-705	176.25	-8.184	-9.421	4-737	184.25	-6.827	-9.196
4-706	176.50	-8.086	-9.371	4-738	184.50	-6.866	-9.151
4-707	176.75	-7.976	-9.314	4-739	184.75	-7.024	-9.174
4-708	177.00	-7.946	-9.236	4-740	185.00	-7.124	-9.100
4-709	177.25	-7.954	-9.151	4-741	185.25	-7.091	-9.284
4-710	177.50	-8.006	-9.162	4-742	185.50	-6.811	-8.993
4-711	177.75	-7.951	-9.365	4-743	185.75	-6.975	-9.133
4-712	178.00	-7.722	-9.024	4-744	186.00	-7.094	-9.164
4-713	178.25	-7.773	-9.124	4-745	186.25	-7.249	-9.169
4-714	178.50	-7.838	-9.096	4-746	186.50	-7.511	-9.383
4-715	178.75	-7.796	-9.148	4-747	186.75	-7.603	-9.019
4-716	179.00	-7.689	-9.368	4-748	187.00	-7.682	-9.109
4-717	179.25	-7.304	-9.266				
4-718	179.50	-7.287	-9.161				
4-719	179.75	-7.372	-9.101				
4-720	180.00	-7.393	-9.068				
4-721	180.25	-7.512	-9.218				
4-722	180.50	-7.434	-9.079				
4-723	180.75	-7.358	-9.041				
4-724	181.00	-7.441	-9.032				
4-725	181.25	-7.440	-9.080				
4-726	181.50	-7.495	-9.199				
4-727	181.75	-7.441	-9.097				
4-728	182.00	-7.329	-9.113				