

以錐蜷殼體之穩定碳氧同位素及元素成分探討古環境—以
斯里蘭卡Bolgoda湖泊為例

Paleoenvironment inferred from stable carbon and oxygen
isotope and element composition of thiaridis shells – a case
study of Lake Bolgoda, Sri Lanka

碩士畢業論文

A Master Thesis

張承瑞

Chen-Rui Zhang

國立臺灣師範大學

National Taiwan Normal University

地球科學系

Department of Earth Sciences

中華民國一百零八年八月

August, 2019

學科領域：地質學

Subject : Geology

中文摘要

以錐蜷殼體之穩定碳氧同位素及元素成分探討古環境—以
斯里蘭卡Bolgoda湖泊為例

張承瑞 國立臺灣師範大學 地球科學研究所

指導教授：米泓生 博士

關鍵字：穩定同位素、元素成分、古環境、全新世

本研究分析斯里蘭卡Bolgoda湖泊現生及湖泊岩芯(長度410 cm;取樣深度9 cm-253.5 cm)中的霏石質軟體動物殼體，進行穩定碳氧同位素以及微量元素成分分析來探討斯里蘭卡地區近2400年以來的環境特徵。

現生標本氧同位素數值介於-6.6‰和-1.7‰之間，（平均值為 $-3.2 \pm 0.9\text{‰}$ ， $N=74$ ； 1σ ；V-PDB）。岩芯中標本氧同位素數值介於-6.9‰和-1.8‰之間，（平均值為 $-4.0 \pm 1.1\text{‰}$ ， $N=352$ ； 1σ ；V-PDB）。將推算後的水體氧同位素數值與可倫坡測站30年平均氣溫資料帶入同位素溫度方程式計算出標本一年間的氧同位素理論平衡值，部分標本氧同位素記錄與理論平衡值呈現相似的季節性震盪變化，標本氧同位素數值約可呈現6個月至2年之季節性震盪記錄。

現生標本及岩芯標本的元素分析結果顯示Al/Ca、Fe/Ca、Mn/Ca比值均接近於偵測極限（0.3 mmol/mol），進一步顯示本研究標本的保存度良好，未受成岩作用影響。Bolgoda湖泊水體混和均勻，水體鹽度大致介於2 ppt~ 20 ppt之間，湖水鹽度受到海水及天水影響，理論上水體（殼體）氧同位素數值可以反映淡水注入比例。若殼體Na/Ca 比值的變化主要受到鹽度的影響，標本氧同位素數值較大或較小值時伴隨著較高或低的

Na/Ca 比值，進一步反映了乾季及雨季降雨量的差異。

季節性震盪中，現生標本及岩芯標本，於乾季之氧同位素數值多在-2‰左右；而雨季時現生標本約為-4‰；岩芯標本則約為-6‰。假設斯里蘭卡地區近3000年來溫度變化小，因此忽略溫度變化對標本氧同位素數值之影響，則現生標本及岩芯中標本相比可反映2340-190 (cal yr BP)斯里蘭卡西南部雨季降雨較現今強，亦表示較強烈的印度洋西南季風時期；而乾季降雨的降雨量變化不大。



Abstrast

Paleoenvironment inferred from stable carbon and oxygen isotope and element composition of thiaridis shells – a case study of Lake Bolgoda,

Sri Lanka

(August, 2019)

Chen-Rui Zhang, Department of Earth Sciences, National Taiwan

Normal University, Taiwan

Advisor: Dr. Horng-Sheng Mii

Key word: stable isotope, element composition, paleoenvironment, Holocene

To exam whether stable isotope and element composition records of thiaridae shells can be used as proxies of environment and to unravel the paleoenvironment, this study analyzed 10 shells collected from a core(~2400 yr B.P. to present), drilled in Lake Bolgoda and 4 modern samples collected from lakefront of Lake Bolgoda, Sri Lanka.

The oxygen and carbon isotope values of modern shells are from -6.6‰ to -1.7‰ ($-3.2 \pm 0.9\text{‰}$, N = 74; average $\pm 1\sigma$; V-PDB) and from -11.3‰ to -1.7‰ ($-4.4 \pm 2.6\text{‰}$), respectively. Oxygen and carbon isotope values of the core shells are from -6.9‰ to -1.8‰, ($-4.0 \pm 1.1\text{‰}$, N = 352) and from -13.0‰ to -1.0‰ ($-5.6 \pm 3.1\text{‰}$), respectively.

Compare shell oxygen isotope values with those of predicted values, the seasonal fluctuation pattern is similar to each other and 0.5~2.0 years of seasonal fluctuations are observed.

Most of the Al/Ca, Fe/Ca, Mn/Ca values of gastropod shells are low or below the detection limit indicate the samples studies are not altered by diagenesis thus well preserved. Assuming Na/Ca contents of gastropod shells

were mainly influenced by the Na/Ca content of water which these gastropods lived in, higher Na/Ca of shells may indicate higher salinity (low amount precipitation) of lake water. Thus, Na/Ca of shells can be used to infer the intensity change of Indian Ocean SW monsoon.

Seasonality of core shells were more variable, in terms of difference in $\delta^{18}\text{O}$ values, than those of modern shells indicating ~2400 years B.P. southwestern Sri Lanka was influenced by stronger Indian Ocean southwest monsoon and received more rainfall then present.



致謝

終於到了畢業的時候，這四年來要感謝太多人了，在這段期間遇到的所有人都豐富了我的研究生生涯，感謝大家的包容，讓我在回憶這些年的時候，都浮現出各位的笑容。

感謝我的指導教授米泓生教授，感謝老師總是耐心的提點我研究的方向及重點，也在老師嚴謹的態度下了解科學研究的方法，以及獨立思考的精神。另外，感謝老師在言談之中給了我不同觀點的刺激，在研究之外讓我獲益良多。

謝謝吳天偉教授對研究內容的建議，謝謝綉玉辛苦的產出數據以及陪我聊天吃飯，謝謝仲元學姊、昱琪學姊的照顧，還有謝謝世安、采玟及重燁以及研究生室的夥伴們。

最後感謝我的家人，不論是金錢上的支持或是情感上的支持，都萬分感謝。

目錄

摘要.....	ii
Abstract	ii
致謝.....	vi
目錄.....	vii
圖目	x
表目	xii
第一章、緒論	1
1.1 前言	1
1.2 標本介紹	2
1.3 穩定同位素	3
1.4 軟體動物殼體碳氧同位素之環境意義	5
1.5 軟體動物殼體微量元素之環境意義	6
1.6 斯里蘭卡近 3000 年古環境研究	7
1.7 研究動機與目的	8
第二章、研究區域及材料	9
2.1 研究區域	9
2.1.1 氣候概述	9
2.1.2 湖泊環境	10
2.1.3 採樣地點	11
2.2 研究材料	12
第三章、研究方法	14
3.1 標本前處理	14
3.2 標本保存度評估方式	14

3.3 標本取樣	15
3.4 穩定碳氧同位素分析	15
3.5 微量元素分析	16
3.6 碳酸鹽叢同位素(Carbonate Clumped-isotope)分析	16
第四章、結果與討論	19
4.1 標本構造與觀察	19
4.2 殼體成分及保存度測試	20
4.2.1 拉曼光譜儀檢測結果	20
4.2.2 掃描式電子顯微鏡檢視結果	21
4.2.3 微量元素成分分析	22
4.3 殼體分層	23
4.4 碳酸鹽叢同位素溫度計	29
4.5 殼體氧同位素理論平衡值估算	30
4.6 殼體穩定同位素探討	33
4.6.1 殼體穩定碳氧同位素分析結果	33
4.6.2 殼體氧同位素隨生長變化	35
4.6.3 殼體穩定碳氧同位素隨深度/年代變化	38
4.6.4 殼體穩定氧同位素及 Na/Ca 比值隨深度/年代變化	40
第五章、結論	41
參考文獻	42
附錄	49
附錄一、現生錐蜷殼體碳氧同位素及 Na/Ca 數值	49
附錄二、岩芯中黑蜷殼體碳氧同位素及元素分析數值	52

附錄三、碳酸鹽叢同位素數據.....	68
--------------------	----



圖目

圖	頁碼
圖1.1 腹足動物殼體分層（取自連凱莉及陳明輝，2004）。	3
圖2.1 可倫坡地區30年平均氣溫及雨量圖（資料取自WMO）。	10
圖2.2 斯里蘭卡地圖及氣候分區（修改自Joyanto Routh教授提供料）。	11
圖2.3 Bolgoda 湖泊系統，紅點處為岩芯採樣地點。	12
圖2.4 (a)現生標本殼體外觀(編號 BGLM3)。 (b)岩芯中標本殼體 外觀(編號 BG1)。	13
圖4.1 殼體外觀構造示意圖。	19
圖4.2 (a)岩芯中殼體拉曼光譜儀結果。(b)紅線為方解石(Calcite)拉曼光 譜圖形；黑線為霏石(Aragonite)拉曼光譜圖形(取自Wehrmeister et al, 2007)。	20
圖4.3 (a)現生殼體SEM影像。(b)岩芯中殼體SEM影像。	21
圖4.4 殼體分層圖。(a) 殼體表面顯示顏色的角質層以及角質層下方白色 的稜柱層。(b) 將外層磨掉後露出來的半透明珍珠層。	23

圖4.5 殼體分層拉曼光譜儀結果。(a) 稜柱層及珍珠層拉曼光譜圖形。 (b) 角質層拉曼光譜圖形，含有色素呈現的訊號。	25
圖4.6 稜柱層及珍珠層殼體氧同位素分析結果。	26
圖4.7 稜柱層及珍珠層殼體碳同位素分析結果。	26
圖4.8 稜柱層及珍珠層殼體Na/Ca比值分析結果。	27
圖4.9 稜柱層及珍珠層殼體Mg/Ca比值分析結果。	28
圖4.10 稜柱層及珍珠層殼體Sr/Ca比值分析結果。	28
圖4.11 殼體各月份氧同位素理論平衡值。	31
圖4.12 現生及岩芯中殼體氧同位素對距殼頂距離作圖。	32
圖4.13 現生標本及岩芯標本碳氧同位素分布圖與線性關係。(a)現生標本 數據。(b)岩芯標本數據。	34
圖4.14 現生殼體氧同位素數值對距殼頂距離作圖。	35
圖4.15 岩芯中殼體氧同位素數值對距殼頂距離作圖。	37
圖4.16 各殼體碳氧同位素平均值隨深度變化。	39
圖4.17 各殼體氧同位素及Na/Ca平均值隨深度變化(Na/Ca數值向左變 大)。	40

表目

表	頁碼
表2.1 岩芯中各標本深度及內插C-14定年年代(C-14定年年代；Gayantha et al., 2017)。	13
表3.1 各分子量二氧化碳氣體隨機分布的相對含量（修改自Eiler et al., 2007）。	17
表3.2 常見的 $\Delta 47-T$ °C公式。	18
表4.1 碳酸鹽叢同位素實驗計算之溫度。	29
表4.2 可倫坡2008-2013天水穩定同位素組成平均值(修改自Edirisinghe et al, 2017)。	31
表4.3 現生及岩芯錐蜷殼體碳氧同位素統計表。	33

第一章、緒論

1.1 前言

由於地球氣候快速變遷，因此研究氣候的變化對於人類的生活相當重要。欲研究地球過去數百年甚至數千年尺度以上氣候變動的基本特性與規律，需要長期且高精確度的氣象記錄資料，但有大量文獻資料紀錄的時間有限，因此，我們會利用自然界中的環境記錄來作為替代古環境真實記錄之代用指標(proxies)。透過這些代用指標來研究過去環境的記錄，使我們能夠慢慢重建過去的古環境。這些代用指標可以記錄下形成當下的環境訊號，並可由肉眼或是實驗分析而從記錄中看出環境變遷的過程，而常被科學家們取來研究古環境變遷或重建的材料主要有：海洋岩芯、有孔蟲、植物孢粉、矽藻、樹木年輪、超微化石、洞穴石灰岩、海洋性碳酸鈣膠結物、珊瑚骨骼、軟體動物殼體、腕足殼體等等(e.g., Webb, 1998; Hughe et al., 1984; Maier et al., 2004; Suzuki et al., 1999; Williams et al., 1999)。

全新世地質紀錄保存的較為完整豐富，因此全新世的氣候變化為熱門的研究主題之一。印度洋地區的海平面高度及氣候從 6000 年前至今保持大致穩定的狀態(Woodroffe and Horton, 2005)，南亞印度洋的季風的變化與自然環境的改變及人類的活動息息相關，例如印度地區的夏季西南季風強弱變動所造成的降雨量變化，會影響當地農作物收成，降雨偏少的年份平均會減少約8.9%的穀物糧食生產(Parthasarathy et al., 1988)；印度河三角洲的浮游有孔蟲記錄指出印度地區在4.2 ka BP有一乾燥事件，而這時間也與印度河的Harappan文明消失的時間一致，推測季風變化也與古文明的滅亡有關連(e.g., Staubwasser, 2003)，因此研究全新世的季風變化可以做為推測古環境與人類活動變化的良好指標。

1.2 標本介紹

本研究中，岩芯中採集之標本為*Faunus ater*殼體，*Faunus ater*於動物學上的分類為軟體動物門(Mollusca)、腹足綱(Gastropoda)、中腹足目(Mesogastropoda)、錐蜷科(Thiaridae)、*Faunus*屬(*Faunus*)、*Faunus ater* (黑蜷)，此物種廣泛的分佈在南亞、東南亞一帶，在澳洲北部亦有發現(Lok et al., 2011)。

黑蜷是一種生活在半鹹水區域的軟體動物，成年期的黑蜷殼體長度通常為 50-60 mm，最大可到 90 mm，生命週期約2年(Lok et al., 2011)，鹽度適應性很高，從河口到潟湖環境都能發現其蹤跡(Sri-aroon et al., 2005; Sri-aroon et al., 2006)，黑蜷依靠濾食水中有機物質維生(Yap et al., 2009)，移動性不高(Goldberg, 1975)。

而現生標本則因殼體外關較為破碎，難以辨認其真正的種屬名，不過現生標本及岩芯中標本皆為錐蜷科殼體。

一般而言，腹足動物殼體根據形成的方法和結構的不同，可分為三層：最外一層為角質層(Periostracum)、中間的是稜柱層(Prismatic Layer)，而內層與貝類軟體組織相連結的是珍珠層(Pearl/ Nacreous Layer)。角質層含有色素，形成各種殼體外表顏色的差異；稜柱層占殼體的大部分；珍珠層富有光澤且為半透明（例如蔡英亞等人，1997）。

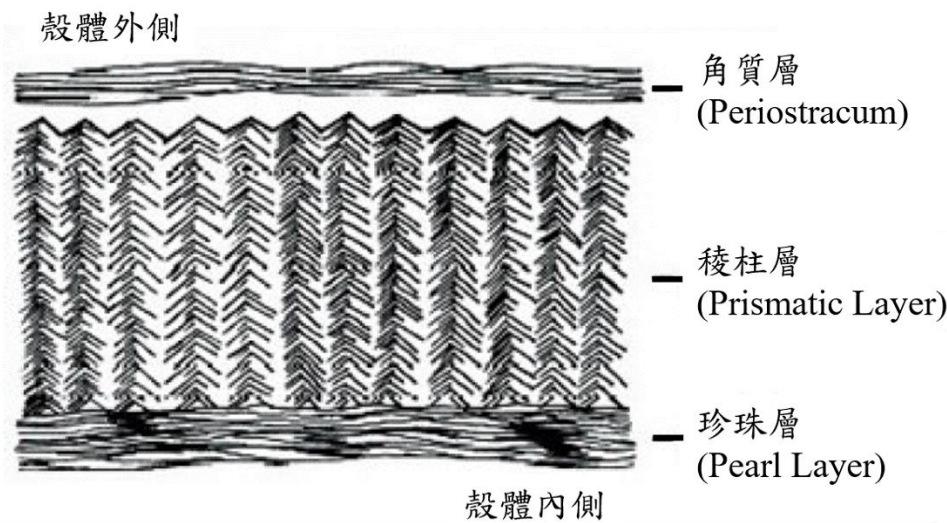


圖1.1 腹足動物殼體的分層（取自連凱莉及陳明輝，2004）。

1.3 穩定同位素

同位素是指原子核中之質子數相同，而中子數不同之元素，所以質量也會不同。而自然界中無法自行產生放射性衰變之同位素，則稱為穩定同位素。

穩定同位素在經動態、化學平衡反應作用，如：蒸發、降雨、結晶、沉澱後，同位素成份在反應物和生成物之間的含量會產生差異，稱為同位素分異效應(isotopic fractionation) (Anderson and Arthur, 1983；Attendorn and Bowen, 1997)。以水分子為例，海水蒸發時，含有質量較輕的氧同位素 ^{16}O 的水分子會優先蒸發至空氣中，因此海水中的就會比一般狀態下有更多含有 ^{18}O 的水分子，而含有 ^{16}O 的水分子則會比一般狀態下少，此時海水的水體氧同位素比值就會比較偏正，而大氣中的水氣則增加了許多含有 ^{16}O 的水分子，因此水氣的氧同位素比值就會變的較負。本文同位素數值的表示方法以千分比(‰)表示，以氧同位素為例，計算方法如下：

$$\delta^{18}\text{O}(\text{‰}) = \frac{(^{18}\text{O}/^{16}\text{O})_{\text{sample}} - (^{18}\text{O}/^{16}\text{O})_{\text{standard}}}{(^{18}\text{O}/^{16}\text{O})_{\text{standard}}} \times 1000$$

其中碳酸鹽類的碳、氧同位素的標準試樣是由 V-PDB(Vienna-Belemnite from Pee Dee Formation)作為其標準試樣，而水體樣本則是由 V-SMOW(Vienna-Standard Mean Ocean Water)作為其標準試樣。

美國芝加哥大學化學系教授 Urey 等人(1951)實驗確認相同水體中的沉積出的碳酸鈣結晶中的穩定氧同位素值，會與周圍水體呈現同位素平衡關係，且會因周圍水體溫度升高而有變負的趨勢。而生物所分泌的碳酸鈣殼體，同樣也可以保留當時水體的穩定氧同位素成份及對應的溫度趨勢的訊號，因此可藉由分析殼體中的穩定氧同位素數值，來回推當時水體的溫度。另外，在不同的物種、甚至是同一物種在不同個體發生階段，利用 ^{16}O 與 ^{18}O 之程度不盡相同，而海水的酸鹼值以及碳酸根離子濃度亦會影響生物殼體氧同位素數值(Spero et al., 1997)。

Epstein et al. (1953)首先利用軟體動物的殼體建構出古溫度方程式，說明了氧同位素的比值為溫度的函數。他們證實這些生物在水中分泌碳酸鈣殼體時，可與水體達成同位素平衡。之後 Grossman and Ku (1986)建立對於霏石質的有孔蟲與軟體動物的古溫度方程式，由平均海水(AMW)作校正，公式如下：

$$T(^{\circ}\text{C}) = 20.6 - 4.34 (\delta^{18}\text{O}_{\text{aragonite}} - \delta^{18}\text{O}_{\text{water, AMW}})$$

之後，Hudson and Anderson (1989)，由新的標準平均海水(SMOW)重新作校正，校正後的公式如下：

$$T(^{\circ}\text{C}) = 19.7 - 4.34 (\delta^{18}\text{O}_{\text{aragonite}} - \delta^{18}\text{O}_{\text{water, SMOW}})$$

T：碳酸鈣形成時的溫度。

$\delta^{18}\text{O}_{\text{aragonite}}$ ：碳酸鈣物質相對於PDB(現V-PDB)的氧同位素數值

$\delta^{18}\text{O}_{\text{water, SMOW}}$ ：碳酸鈣形成時周圍水體相對於SMOW(現V-SMOW)

的氧同位素數值。

此方程式被廣泛地應用於霏石質碳酸鹽類的同位素研究。若想推測來自化石碳酸鈣殼體紀錄的古溫度，當海水的 $\delta^{18}\text{O}_{\text{water}}$ 無法直接被測量出來時，則須估算海水 $\delta^{18}\text{O}_{\text{water}}$ 值。

另外，由於形成化石的過程中，有可能也會受到成岩作用影響，導致生物殼體本身的碳酸鈣組成發生改變，如殼體原為較不穩定的霏石組成，受到成岩作用後轉變成較穩定的方解石，而無法記錄到原環境之訊息。或是原本的同位素或化學成分被替換掉，這樣也不能代表當時的狀況(例如Popp et al., 1986)。

古環境研究中運用軟體動物殼體之優點為：(1)軟體動物生命週期多超過一年，因此利用軟體動物殼體所記錄的氧、碳同位素，可以瞭解年際間海水溫度及環境的變化；(2)軟體動物一般不易表現同位素的生機效應(Grossman and Ku, 1986)；(3)成岩作用容易被檢測出來，例如由霏石質轉變成方解石質(Kobashi et al., 2001)，有許多非破壞性的方法可以簡單區分此二類物質。因此，軟體動物很適合作為古氣候的指標。

1.4 軟體動物殼體碳氧同位素之環境意義

軟體動物門(Mollusca)種類繁多，現存的有11萬種以上，在動物界中僅次於節肢動物門(例如：任淑仙等1995)。其中腹足綱有約75000個現生種，為軟體動物門中最大的一綱(Vermeij, 2007)，腹足綱生物分布廣泛，不同深度及性質的海洋環境到各種淡水水域都有分布，身體通常包覆著一枚螺旋狀的殼體，身體可全部縮入殼體之內。

腹足綱動物的研究多以分析生物學上的種屬異同或是古今物種的演化差異(e.g., Hickman, 1992; Zinsmeister and Camacho, 1980)。進行同位素分析的也不少，Fredrik 等人(1999)，實驗確認潮間帶地區的 *Littorina*

littorea 殼體氧同位素會與水體的溫度及氧同位素達成平衡，由氧同位素震盪變化推估水體的季節性變遷，並以此重建古環境。

Weber and Rocque (1964)，採集湖泊腹足動物並分析其同位素組成，發現在湖泊這類水流緩慢的環境下，植物組織腐爛釋出較輕的同位素進入湖水中，此現象將會被水中的腹足動物記錄下來。

一般而言，海水中無機碳之 $\delta^{13}\text{C}$ 數值介於0‰及2‰之間，而天水形成之河水無機碳中 $\delta^{13}\text{C}$ 同位素數值常因陸源有機質的影響而隨季節產生變化 (Hellings, 1999) 因此，生活於河、海交接觸之貝類常因季節性溫度及降雨量之不同而於碳、氧同位素分布圖上呈現明顯之線性關係 (例如：彭宗仁等人，1990、彭宗仁和汪中和，1990、以及Wang et al., 1991)。

1.5 軟體動物殼體微量元素之環境意義

珊瑚骨骼中的Sr/Ca比值被認為與殼體生長速率及生長溫度有正相關，所以成為常用的古溫度計之一，而軟體動物的霏石質殼體中的Sr/Ca比值亦與生長速率相關，但是Sr/Ca比值則不受熱力學控制，Sr/Ca比值與 $\delta^{18}\text{O}$ 間的相關性是弱的(Gillikin, 2005)。

Lorens and Bender (1980)研究方解石及霏石在不同Na/Ca比值的溶液中結晶後的元素成分，其中方解石對溶液中的Na/Ca比值較不敏感，而霏石中的Na/Ca比值就反映出溶液中的Na增加的情況，所以霏石質的軟體動物殼體應能反映水體的鹽度變化。

Yap 等人(2010)利用黑蜷的軟組織及殼體進行重金屬含量之研究，認為黑蜷殼體相對於軟組織容易記錄下更高濃度的重金屬元素，顯示黑蜷殼體對環境的重金屬元素含量變化有較高的敏感程度，可能可以做為重金屬汙染或是其他造成水體元素組成改變事件的潛在生物監測器。

1.6 斯里蘭卡近3000年古環境研究

針對斯里蘭卡的古氣候研究多是全新世晚期對印度洋西南季風強弱變化的解釋，Gayantha等人(2017)，從位於斯里蘭卡西南部沿海的Bolgoda湖泊中鑽取長4.1m的沉積物岩芯，並利用岩芯中的軟體動物殼體進行C-14定年，定年結果表示岩芯約從2941(cal yr BP)至今。Gayantha等人利用粒徑、主要和微量元素、總有機碳以及穩定碳氮同位素分析沉積物以重建古氣候變化，並將斯里蘭卡區分成四個不同的氣候變化區間：2941-2390(cal yr BP)區間為濕潤，強降雨伴隨大量的陸緣物質沖刷並沉澱在湖中；2390-1782(cal yr BP)區間在潮濕的氣候中伴隨著不穩定的乾燥期間；1782-1299(cal yr BP)區間則又是溫暖濕潤的強降雨時期；1299-0(cal yr BP)區間表示季風的強度有減弱的趨勢，降雨量減少。

斯里蘭卡的Horton高原的沉積物岩芯研究中(Premathilake and Risberg, 2003)，分析花粉、孢粉、矽藻、碳同位素及C/N比值，研究結果顯示斯里蘭卡地區受到的印度洋西南季風影響由3000-2000(cal yr BP)的強烈又潮濕的西南季風時期轉變為2000-0(cal yr BP)的較弱且乾燥的西南季風時期。

除了斯里蘭卡本土的研究記錄，印度中部及印度西南地區的研究也都指出印度洋西南季風在全新世晚期整體是減弱的趨勢。

1.7 研究動機與目的

本研究分析斯里蘭卡Bolgoda湖泊現生錐蜷科標本殼體及鑽探湖泊岩芯中的霏石質軟體動物黑蜷*Faunus ater* (Linnaeus, 1758)殼體所記錄的碳氧同位素及微量元素，討論殼體碳氧同位素及微量元素成分與環境間的關係、斯里蘭卡地區季節性的溫度及降雨量變化以及斯里蘭卡及鄰近區域近3千年以來受到印度洋季風影響的環境特徵，並比較印度洋季風區由全新世晚期至現今周邊的環境變遷。透過全新世古環境的重建，有助於我們對印度洋季風區新生代古氣候的了解、並有助於瞭解未來可能之環境變遷。



第二章、研究區域及材料

2.1 研究區域

2.1.1 氣候概述

本研究區域位於斯里蘭卡西南部，位於斯里蘭卡較為濕潤的地帶。斯里蘭卡南部屬熱帶雨林氣候，北部為熱帶草原氣候。根據斯里蘭卡氣象單位(Department of Meteorology -Sri Lanka)的區分，本地區可依季風吹拂的月份分為四個季節，分別為第一次季風交替季節(3- 5月)、西南季風季節(6- 9月)、第二次季風交替季節(10- 11月)、東北季風季節(12至隔年2月)。斯里蘭卡西南部全年有雨，但降雨較多集中在西南季風季節以及第二次季風交替季節；北部的雨量較少，降雨集中在第二次季風交替季節。

根據世界氣象組織 (WMO) 1961- 1990年間紀錄，首都可倫坡月均溫介於 26.6°C 及 28.3°C 之間，月均溫的變化範圍為 1.7°C ；月最高溫介於 30°C 及 31.8°C 之間，月最高溫的變化範圍為 1.8°C ；而月最低溫介於 22.3°C 至 25.5°C 之間，最大差值為 3.2°C (圖2.1)。雨量方面，WMO 記錄可倫坡年平均降雨量2523.7 mm。本地區全年有雨，主要降雨時間呈現雙峰形式，主要降雨季節落在3- 5月及10- 11月的兩次季風交替期，第一次季風交替期的降雨多來自位在西南季風迎風面所導致的降雨；第二次季風交替期的降雨則包含了印度洋颶風的影響（資料取自斯里蘭卡氣象單位）。

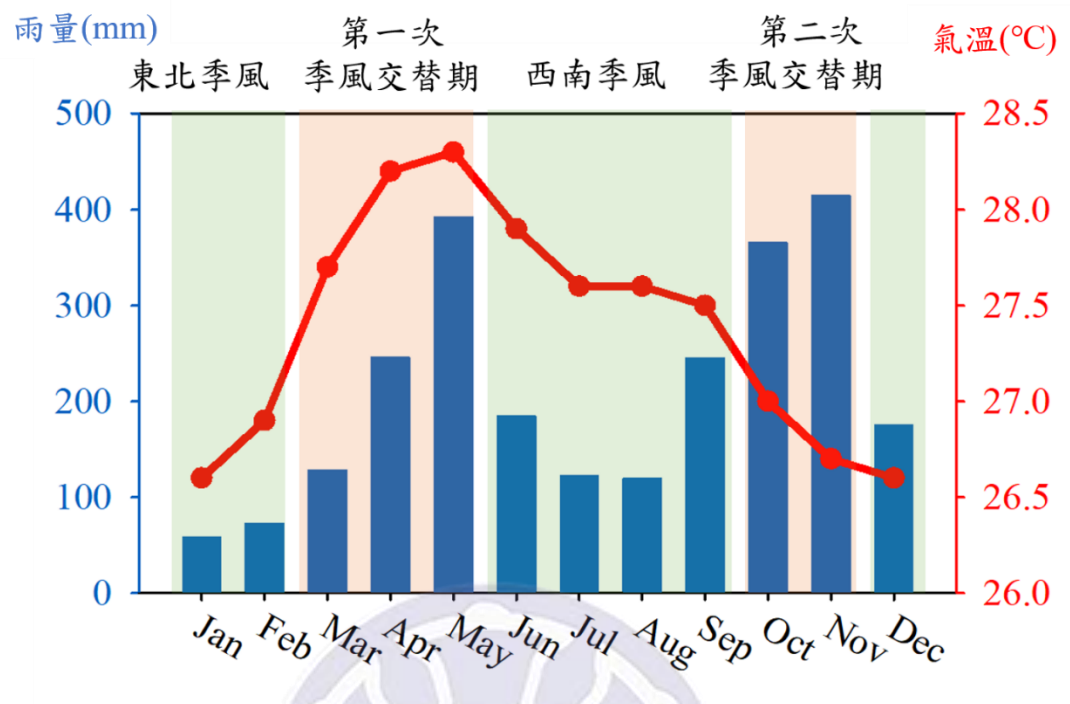


圖2.1 可倫坡地區30年平均氣溫及雨量圖（資料取自WMO）。

2.1.2 湖泊環境

Bolgoda南北湖泊面積共約243平方公里，平均湖水深度介於2 ~ 3m之間，因靠近印度洋，湖水鹽度會受到海水的影響，為一半鹹水湖(Ratnayake et al, 2017)。湖泊的 pH 值介於 6.67 至 8.01 之間；湖水的表面溫度變化介於28.5至32.5°C之間(Gunatilaka, 2009)，不同月份之間的溫度變化不大。湖泊周圍的天然植物主要為紅樹林植物，周圍也有人工的稻田。近年來周圍家庭污水、動物糞便及工業用水排放至湖泊及周圍水體中，使得水體的污染程度增高(Wijeyaratne, 2016)。

2.1.3 採樣地點

本研究區域 Bolgoda 湖泊位於斯里蘭卡西南部沿海，為斯里蘭卡最大的天然湖泊，距離斯里蘭卡首都可倫坡南方約20公里處(圖2.2)。湖泊經度介於 $79^{\circ}53'55''$ - $79^{\circ}58'25''$ E 之間，緯度介於 $6^{\circ}40'56''$ - $6^{\circ}48'47''$ N 之間。Bolgoda 湖泊由南北兩湖組成，兩個湖泊之間由 Bolgoda Ganga 河流相連，並分別由不同的出海口注入印度洋，本研究所採集標本位於北湖湖泊岩芯之中及北湖湖邊(圖2.3)。



圖2.2 斯里蘭卡地圖及氣候分區（取自Joyanto Routh教授提供資料）。

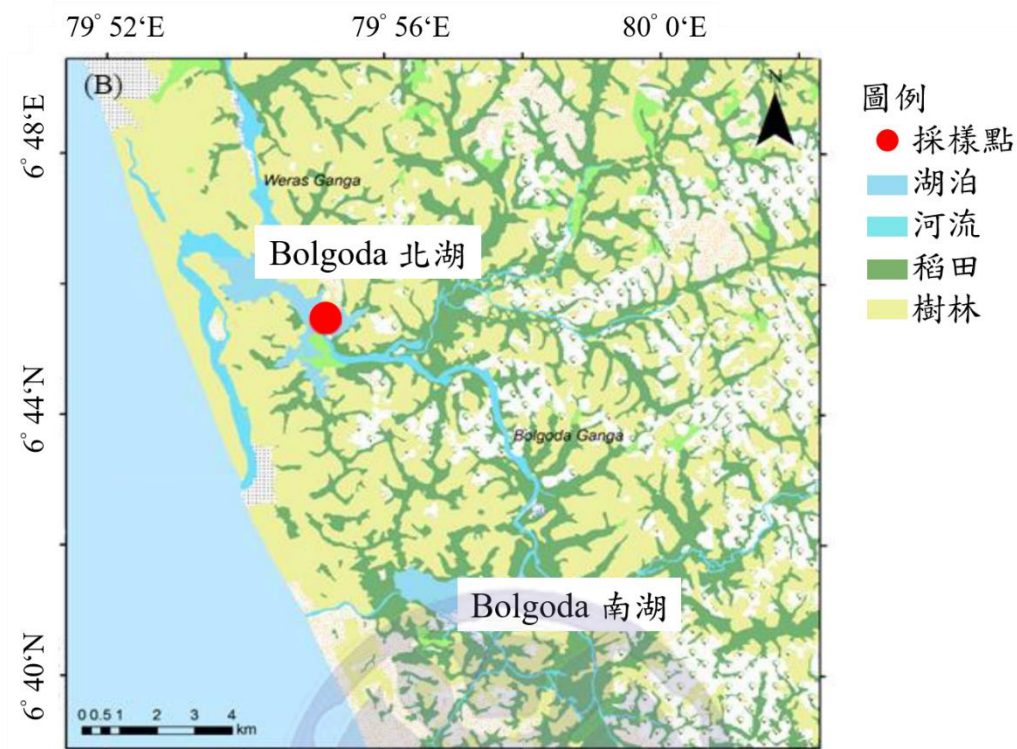


圖2.3 Bolgoda 湖泊系統，紅點處為岩芯採樣地點。

2.2 研究材料

本研究所使用之殼體標本由 Linköping 大學 Joyanto Routh 教授團隊採集自 Bolgoda 北湖，現生標本共四隻，採集於湖邊；岩芯中標本共十隻(圖2.4)，分別位在 Bolgoda 湖泊沉積物岩芯之不同層位，殼體所在的岩芯深度範圍介於 9 至 253 公分之間，岩芯經C-14定年後年代介於 190 至 2340 年前之間(Gayantha et al., 2017)。

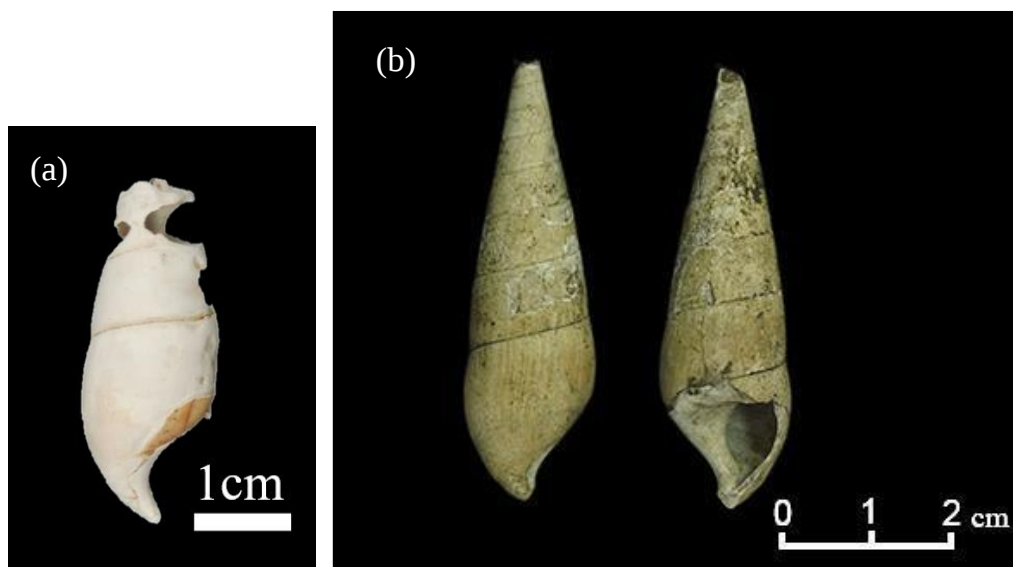


圖2.4 (a)現生標本殼體外觀(編號 BGLM3)。

(b)岩芯中標本殼體外觀(編號 BG1)。

表2.1 岩芯中各標本深度及內插C-14定年年代(C-14定年年代; Gayantha et al., 2017)。

標本編號	深度(cm)	C-14 定年年代(Cal yr BP)
BG1	9.0	190
BG3	11.0-11.5	240
BG10	13.5-14.5	300
BG11	15.5-17.5	370
BG14	21.5-22.0	470
BG15	23.5-24.0	520
BG20	37.0-37.5	800
BG22	197.5-198.0	2090
BG28	241.0-242.5	2330
BG29	242.0-243.5	2340

第三章、研究方法

3.1 標本前處理

(1) 清洗標本

將所採集之岩芯中標本及現生標本，將表面附著的沉積物先以清水沖洗乾淨，並放入超音波震盪儀中震盪出雜質。標本初步清洗完畢後放入燒杯中，調配2%過氧化氫溶液倒入，使標本完全浸泡在溶液中24小時以上以去除有機物質，然後取出並以清水及超音波震盪儀洗淨後放置使其自然風乾。

(2) 標本觀察與紀錄

將完全風乾後的標本拍照存檔、測量殼體長度及重量，並進行標本之鑑定。

3.2 標本保存度評估方式

(1) 拉曼光譜儀檢測

拉曼光譜儀(Raman Spectrometer)分析是使用國立臺灣博物館之 Jobin Yvon 拉曼光譜儀(UV-VIS LABRAM HR)，以 17mW 綠光(514.5 nm)的氬離子雷射，利用不同分子的發射光譜差異檢測標本的礦物組成，現生殼體應為霰石質，若岩芯中標本得到的結果不是霰石，則推測該殼體可能有受到成岩作用的影響。

(2) 掃描式電子顯微鏡檢視

掃描式電子顯微鏡(Scanning Electron Microscope)，簡稱 SEM，SEM 攝影是使用國立臺灣博物館之 FEI 掃描式電子顯微鏡(Quanta 250)，觀察標本表面型態，比對現生標本及岩芯中標本的結構差異，若岩芯中標

本的觀察結果異於現生標本，則推估該深度之殼體可能受到成岩作用的影響。

(3) 微量元素成分分析

使用 Thermo Scientific iCAP 6000 Series 型的感應耦合電漿發射光譜儀(Inductively Couple Plasma Optical Emission Spectrometry, ICP-OES)，分析標本粉末中的微量元素，檢視其中的Al/Ca, Mn/Ca, Fe/Ca比值，若數值高則可能有成岩作用的影響，反之則保存良好(Berrocso et al., 2004)。

3.3 標本取樣

軟體動物殼體由外向內可分為角質層、稜柱層及珍珠層，挑選保存狀況良好的標本，以手持式電鑽磨去表面含有色素的角質層後，由殼頂（幼年期）向殼口（成年期）方向，沿殼體生長紋路，約每隔 4mm 等間距於標本上進行取樣。鑽取完稜柱層粉末後，將周圍的殼體去除乾淨，再在相同位置鑽取內側珍珠層殼體的粉末。

3.4 穩定碳氧同位素分析

將取得的碳酸鈣粉末，放入穩定同位素分析的反應瓶中，將反應瓶放入 Gilson 自動分析儀(Multicrab Sample Preparation System)內，在恆溫 90°C 下抽真空後與 100% 的磷酸(H₃PO₄)反應，碳酸鈣粉末與酸反應所生成的二氧化碳 (CO₂) 氣體以超微氣相比例質譜儀(Micromass IsoPrime Isotope Ratio Mass Spectrometer, Micromass IsoPrime IRMS)分析穩定碳氧同位素組成。本研究中使用國際標準試樣 NBS-19($\delta^{18}\text{O} = -2.20\text{‰}$; $\delta^{13}\text{C} = 1.95\text{‰}$)進行校正，以V-PDB表示。

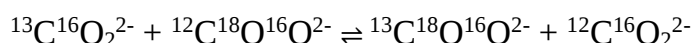
3.5 微量元素分析

將取得的碳酸鈣粉末，放入分析管中並加入 10ml 的 5% 的稀硝酸 (HNO_3)，使用 ICP-OES 進行分析，分析標本前確認各元素在不同濃度的檢量線的相關係數皆在 0.995 以上，再開始測量標本中各元素的濃度，經過感應耦合電漿的加熱，各待測元素被激發，藉由偵測並分析各激發原子或離子的發射光譜波長及強度，可以得到標本含有何種微量元素及其含量。本研究中使用 AccuTrace™ Reference Standard ICP multi-element standard solution IV 製作檢量線並進行校正。

3.6 碳酸鹽叢同位素(Carbonate Clumped-isotope)分析

碳酸鹽叢同位素溫度計(Ghosh et al., 2006; Eiler, 2007)是重建古溫度的新方法，叢同位素是指含有兩個及兩個以上的重同位素結合在一起的分子，而晶體結構中叢同位素的含量會受到熱力增加而減少，也就是隨著溫度的升高，系統內的叢同位素將會減少，並最終達到與自然界中相對含量相符的純隨機分布，

反應式如下：



表示低溫時形成的C-O鍵結會有較多的 $^{13}\text{C}^{18}\text{O}^{16}\text{O}$ 這樣有兩個重同位素集合的叢同位素，而隨著溫度的上升，就會傾向反應式的左側，叢同位素的生成會更接近自然界相對含量的分布，即為含量變低。

而 CO_2 的分子中，含量最多的叢同位素為 $^{13}\text{C}^{18}\text{O}^{16}\text{O}$ ，分子量為47(表3.1)，藉由分析碳酸鈣與磷酸反應後，所有分子量為44、45、46、47的 CO_2 分子的數量，並計算得到 $\Delta 47$ 值，而 $\Delta 47$ 值會有相應的溫度公式以計算溫度。

表3.1 各分子量二氧化碳氣體隨機分布的相對含量（修改自Eiler et al.,2007）。

分子量	同位素所組成的化合物 (isotopologues)	相對含量
44	$^{12}\text{C}^{16}\text{O}_2$	98.40%
45	$^{13}\text{C}^{16}\text{O}_2$	1.11%
	$^{12}\text{C}^{17}\text{O}^{16}\text{O}$	748 ppm
46	$^{12}\text{C}^{18}\text{O}^{16}\text{O}$	0.40%
	$^{13}\text{C}^{17}\text{O}^{16}\text{O}$	8.4 ppm
	$^{12}\text{C}^{17}\text{O}_2$	0.142 ppm
47	$^{13}\text{C}^{18}\text{O}^{16}\text{O}$	44.4 ppm
	$^{12}\text{C}^{17}\text{O}^{18}\text{O}$	1.50 ppm
	$^{13}\text{C}^{17}\text{O}_2$	1.60 ppb
48	$^{12}\text{C}^{18}\text{O}_2$	3.96 ppm
	$^{13}\text{C}^{17}\text{O}^{18}\text{O}$	16.8 ppb
49	$^{13}\text{C}^{18}\text{O}_2$	44.5 ppb

隨著實驗流程的差異及標本的差別，產生數條的 $\Delta 47$ -T °C公式(表3.2)，在篩選本研究所需的公式時需先考慮與酸反應溫度，所以需選擇90°C下與酸反應的公式；另外還有公式本身適用的溫度，因本研究的標本生活區域的溫度介於25-35°C之間，所以公式的適用溫度必須涵蓋這段溫度區間；最後是標本的成分，因本研究材料為霏石質，所以最後本研究中的 $\Delta 47$ -T °C公式來自Kluge et al. (2015)，因其在實驗中包含了方解石及霏石，並且溫度區間皆符合本研究所需，公式如下：

$$\Delta 47 = 0.98 \cdot (-3.407 \cdot 10^9/T^4 + 2.365 \cdot 10^7/T^3 - 2.607 \cdot 10^3/T^2 - 5.880/T) + 0.293$$

其中T為絕對溫度, $\Delta 47$ 以千分比(‰)表示。

表3.2 常見的 $\Delta 47$ - T °C公式。

來源	與酸反應溫度	公式	適用溫度(°C)
Dennis and Schrag, 2010	90 °C	$0.0362 \times 10^6 / T^2 + 0.292$	7.5-75°C
Gosh et al., 2006	25 °C	$0.0636 \times 10^6 / T^2 - 0.0047$	1-50°C
Henkes et al., 2013	90 °C	$0.0327 \times 10^6 / T^2 + 0.3286$	1-29.5°C
Kluge et al., 2015	90 °C	$0.98 \times (-3.407 \times 10^9 / T^4 + 2.365 \times 10^7 / T^3 - 2.607 \times 10^3 / T^2 - 5.880 / T) + 0.293$	25-250°C
Passey and Henkes, 2012	90 °C	$-3.407 \times 10^9 / T^4 + 2.365 \times 10^7 / T^3 - 2.607 \times 10^3 / T^2 - 5.880 / T + 0.28$	475-800°C
Zaruur et al., 2013	25 °C	$0.0526 \times 10^6 / T^2 + 0.052$	5-65°C

而碳酸鹽叢同位素溫度計的優點在於，不會受到形成時的周圍水體影響到 $\Delta 47$ 的數值(Cao and Liu, 2012)，現在廣泛的運用在碳酸鈣物質的埋藏溫度或是發生成岩作用的溫度(Huntington et al., 2011)，也用於分析生物骨骼並得到生物生長時周圍水溫變化或是動物生存時的體溫紀錄(Löffler et al., 2019; Eagle et al., 2010)。Guo 等人(2019)，利用中國陸地上腹足動物殼體的進行碳酸鹽叢同位素溫度計的實驗以重建棲息地的環境。

本研究之碳酸鹽叢同位素實驗由國立臺灣大學海洋研究所王珮玲教授實驗室進行實驗，實驗儀器為 Thermo 的 Finnigan MAT253 型質譜儀，每次實驗需取標本粉末至少 7mg，，在 90°C下與酸進行反應收集二氧化碳，並進行三重覆，共需 21mg 以上殼體粉末。

第四章、結果與討論

4.1 標本構造與觀察

觀察殼體外觀可見其為右旋螺（圖4.1），外型呈錐狀，表面平滑無突起或肋，外表顏色多呈現淡棕色至白色。殼體大小不一，最大的殼體長約7cm，並可在表面見到清楚的縫合線；觀察破損殼體則可見到位於殼體中央的軸柱，殼體生長均以軸柱為中心，自殼頂開始生長，形成許多螺層，而螺層內部是互相連通的，形成容納軟體動物身軀的體腔。

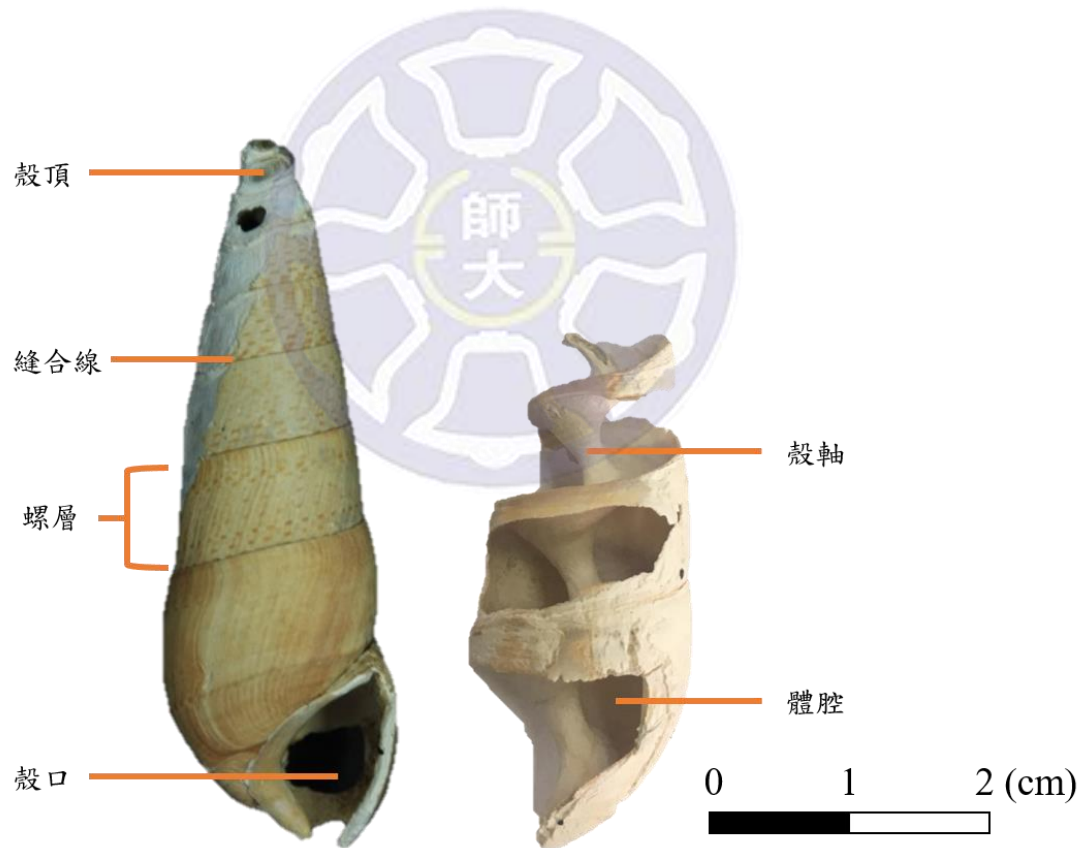


圖4.1 標本殼體外觀構造示意圖。

4.2 殼體成分及保存度測試

4.2.1 拉曼光譜儀檢測結果

本實驗利用拉曼光譜儀(Raman Spectrometer) 檢測標本礦物成分(圖4.2)，實驗結果中，波數704(cm^{-1})及1084(cm^{-1})表示殼體為碳酸鈣成分，而波數151(cm^{-1})及205(cm^{-1})可確認標本殼體組成礦物為霏石，表示岩芯中標本殼體組成為霏石，保存良好且沒有受到成岩作用的影響。

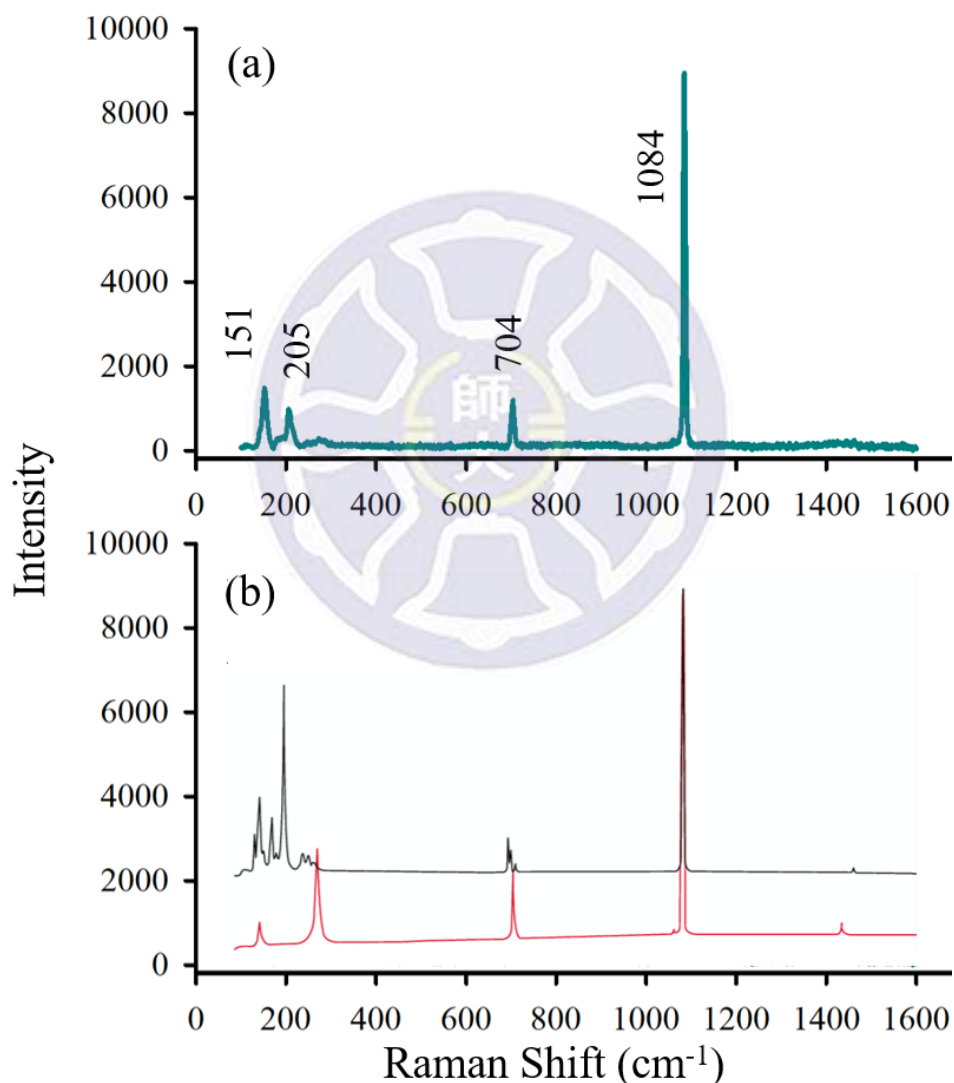


圖4.2 (a)岩芯中殼體拉曼光譜儀結果。

(b)紅線為方解石(Calcite)拉曼光譜圖形；黑線為霏石(Aragonite)拉曼光譜圖形(取自 Wehrmeister et al, 2007)。

4.2.2 掃描式電子顯微鏡檢視結果

利用SEM檢視殼體表面結構(圖4.3)，在現生及岩芯中殼體皆可見到霏石的針狀、樹枝狀結構(Gobac et al.,2009)，表示殼體標本保存度良好且沒有受到成岩作用及再結晶作用的影響。綜合拉曼光譜儀及SEM的結果，確認本實驗標本可進行採樣並進行古環境研究之分析。

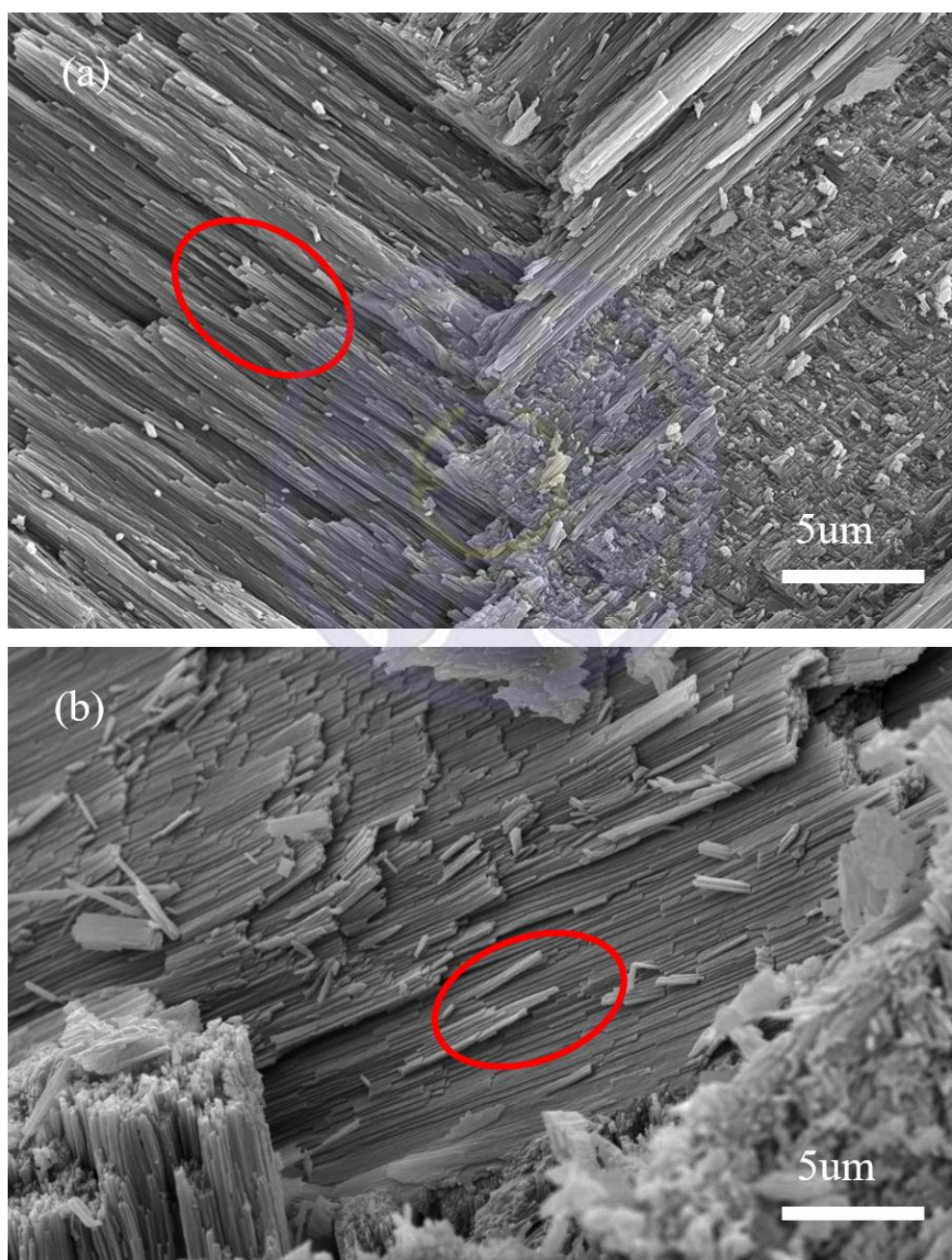


圖4.3 (a)現生殼體SEM影像。 (b)岩芯中殼體SEM影像。

4.2.3 微量元素成分分析

ICP- OES分析殼體中的微量元素含量，分析的元素有Al, Fe, Mn, Mg, Na, Sr等六種，其中岩芯中殼體的Al/Ca, Fe/Ca, Mn/Ca數值大都低於儀器偵測極限（Below detection limit），表示殼體未受到成岩作用的影響，進一步表示本研究之標本保存度良好。



4.3 殼體分層

腹足動物殼體根據形成的方法和結構的不同，可分為三層(圖1.2)：最外一層為角質層，角質層含有色素，並能形成各種殼體顏色及外表突起的差異；中間的是稜柱層；而內層則是珍珠層，珍珠層富有光澤且為半透明(圖4.4)。

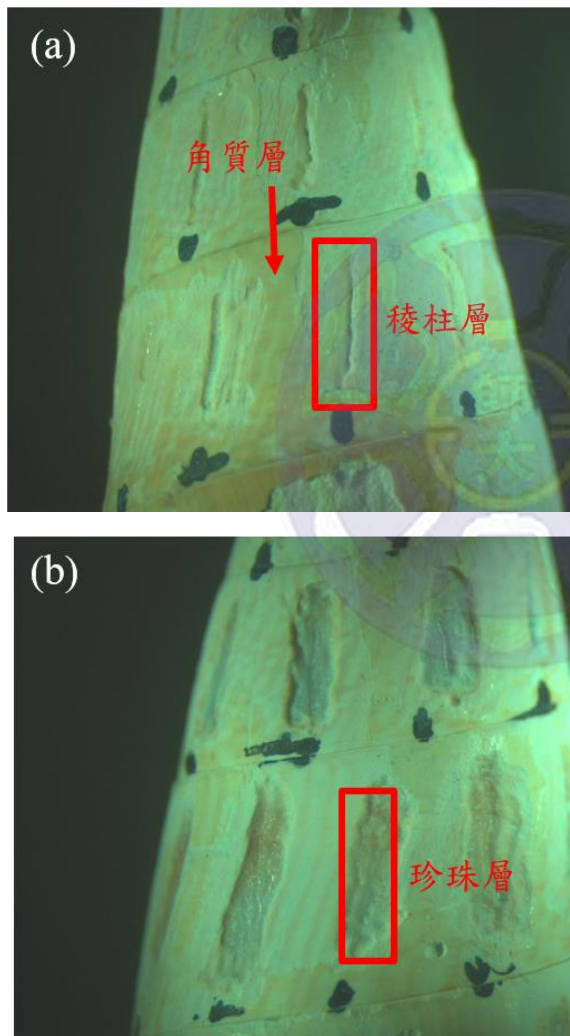


圖4.4 殼體分層圖。(a) 殼體表面顯示顏色的角質層以及角質層下方白色的稜柱層。(b) 將外層磨掉後露出來的半透明珍珠層。

在拉曼光譜儀實驗中，三層殼體均顯示霰石的圖形，但最外層的角質層在霰石的波數有偵測到發射光譜以外，在波數約 $1133(\text{cm}^{-1})$ 及 $1531(\text{cm}^{-1})$ 有另外偵測到的峰值(圖4.5)。Wade et al. (2019) 利用拉曼光譜儀檢測多種有顏色的軟體動物殼體，發現在拉曼光譜波數 $1117-1144(\text{cm}^{-1})$ 及 $1501-1540(\text{cm}^{-1})$ 皆有出現兩道峰值，而這是由於殼體中含有類胡蘿蔔素(carotenoid)所導致，類胡蘿蔔素是一有機色素，可以使軟體動物殼體呈現特定的顏色，在紅色、棕色、紫色、黑色等的軟體動物殼體中皆能檢測到這兩個特定的峰值，但黃色及綠色的殼體就沒有出現這兩個峰值，應是代表這類顏色是由其他結構的色素所呈現。不只是在軟體動物的殼體，有色的腕足動物殼體、珊瑚骨骼、珍珠等，也都能夠在拉曼光譜儀的檢測下發現特定色素所造成的峰值(Bergamonti et al., 2017; Gaspard et al., 2019)。



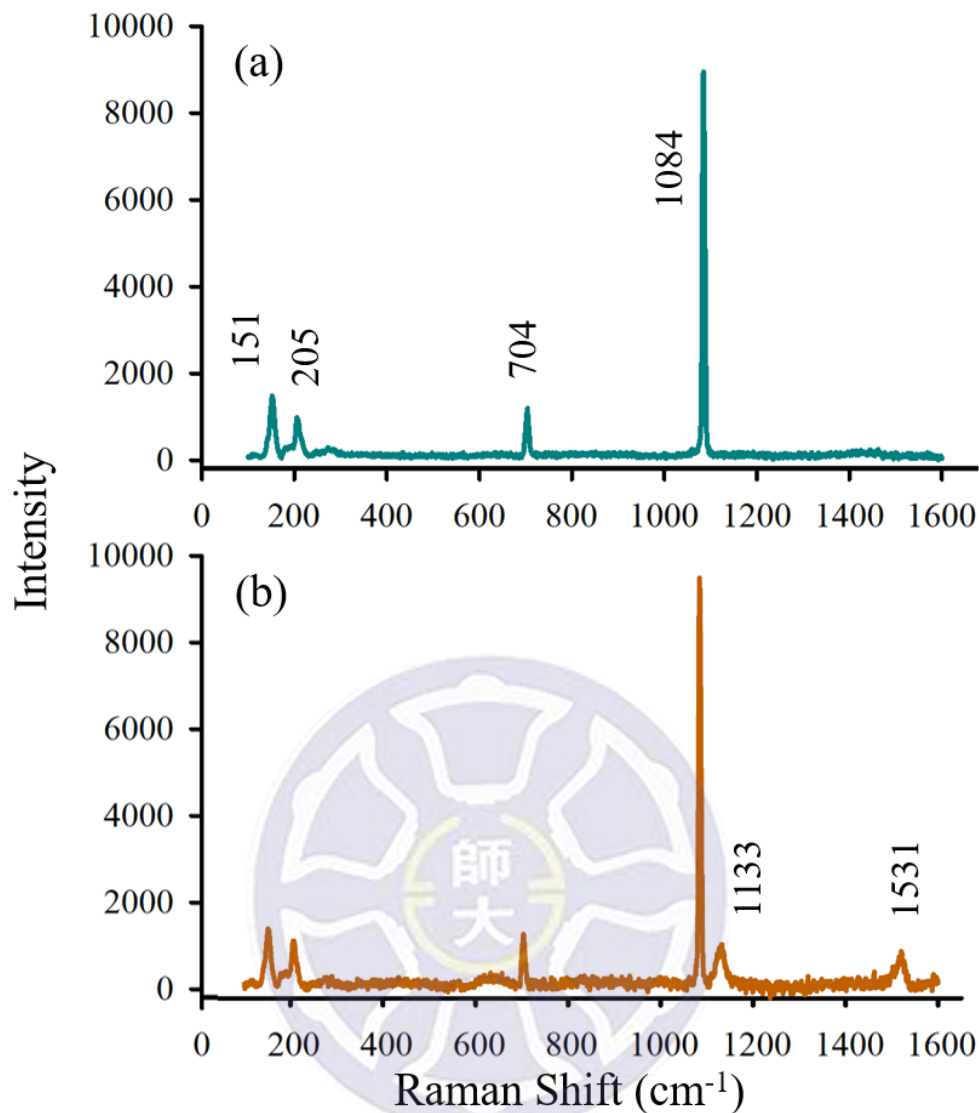


圖4.5 殼體分層拉曼光譜儀結果。(a) 稜柱層及珍珠層拉曼光譜圖形。

(b) 角質層拉曼光譜圖形，含有色素呈現的訊號。

稜柱層及珍珠層的殼體皆為霏石，且都是伴隨著殼體生長而在相同水體中形成，預期稜柱層及珍珠層應會紀錄到相同的穩定同位素數值。實驗結果顯示，穩定碳氧同位素的部分，稜柱層（外層）及珍珠層（內層）之數值相近，與 Dettman et al. (1999) 分析同一隻雙殼綱殼體標本的珍珠層以及部分稜柱層的穩定碳氧同位素數值的結果相似，並都隨著生長距離變化(圖4.6、圖4.7)。

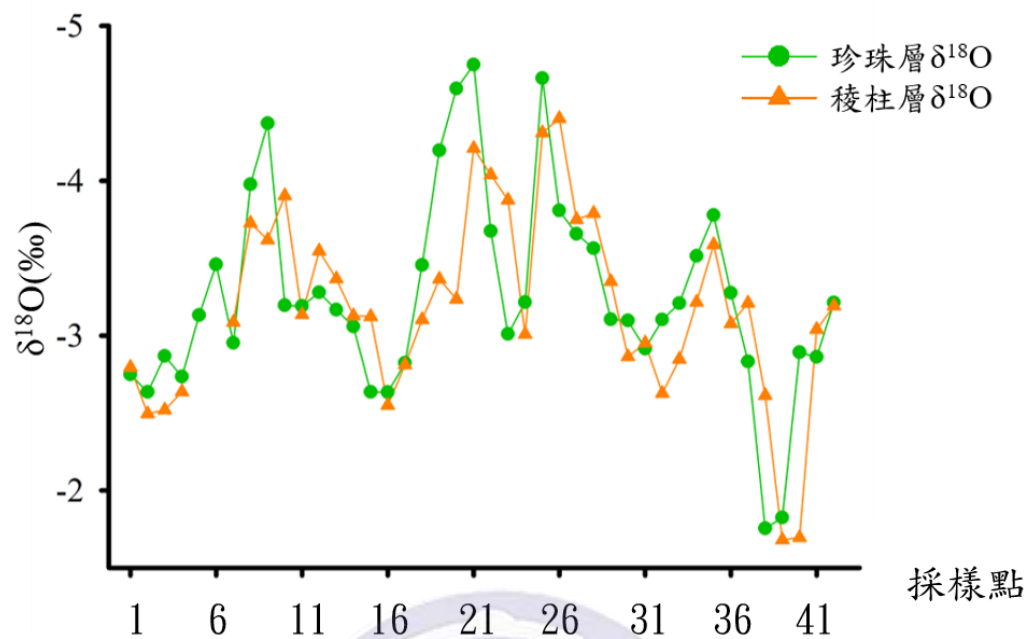


圖4.6 稜柱層及珍珠層殼體氧同位素分析結果。

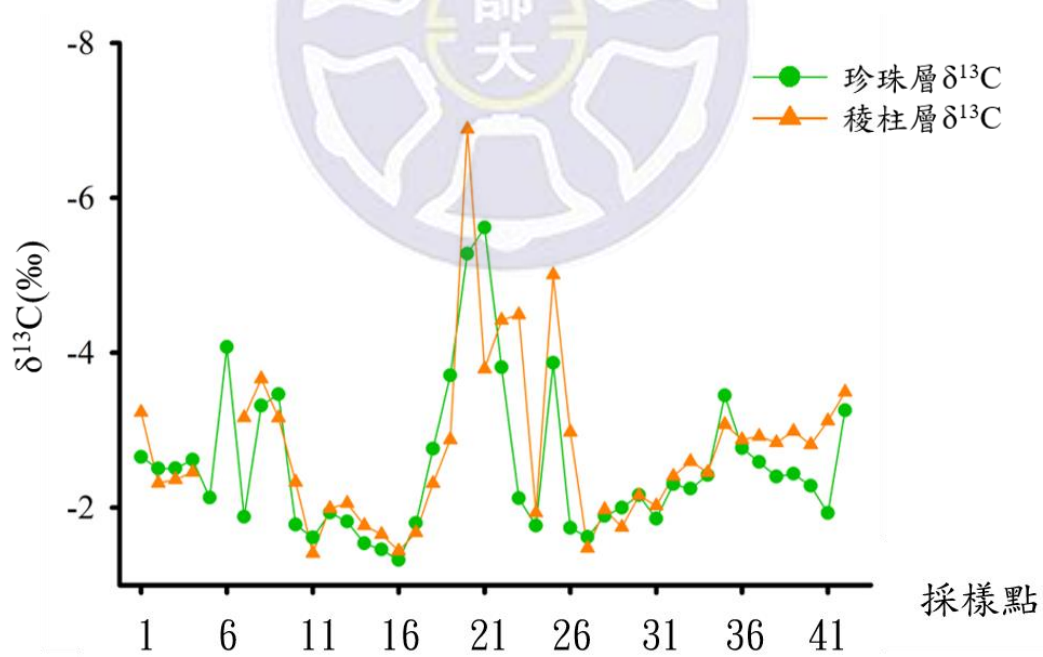


圖4.7 稜柱層及珍珠層殼體碳同位素分析結果。

另外，本研究也使用ICP- OES分析殼體稜柱層及珍珠層的微量元素含量，分析的元素有Al, Fe, Mn, Mg, Na, Sr等六種，其中Al/Ca, Fe/Ca, Mn/Ca比值在稜柱層及珍珠層數值均接近於偵測極限(0.3 mmole/mole)，表示兩層殼體在Al, Fe, Mn的含量上相近，進一步表示本研究之標本保存度良好，未受成岩作用影響。而稜柱層及珍珠層的Na/Ca, Mg/Ca, Sr/Ca比值(圖4.8~圖4.10)，在Mg/Ca有出現部分較大的差異，但Na/Ca及Sr/Ca比值的部分則較為吻合。

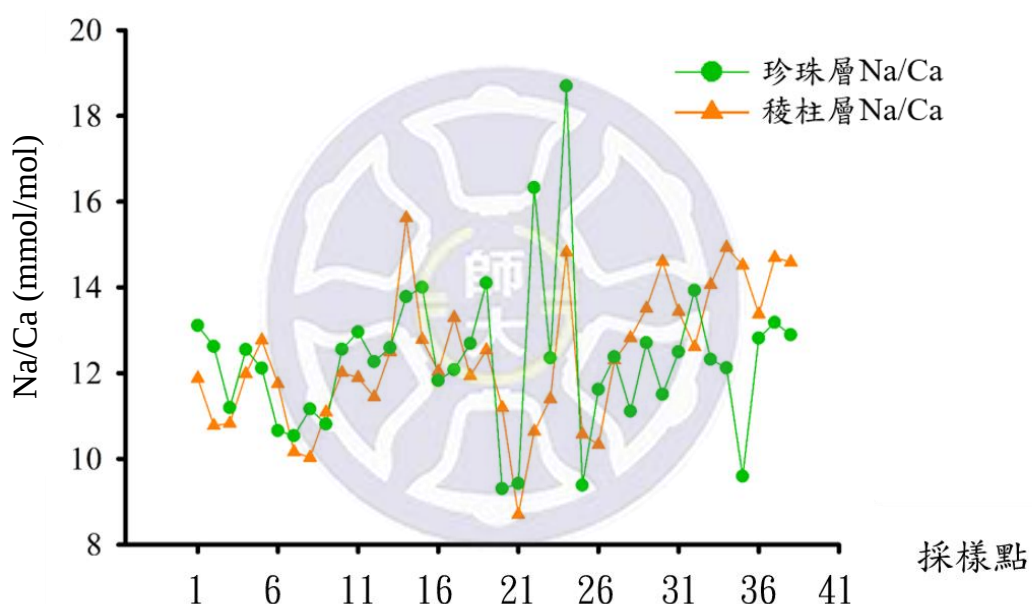


圖4.8 稜柱層及珍珠層殼體Na/Ca比值分析結果。

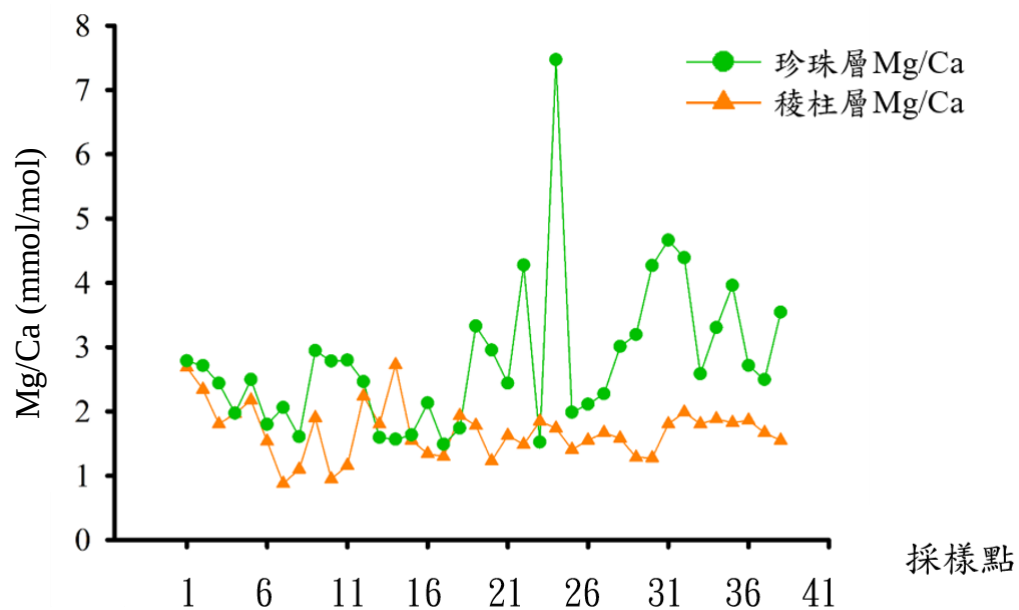


圖4.9 稜柱層及珍珠層殼體Mg/Ca比值分析結果。

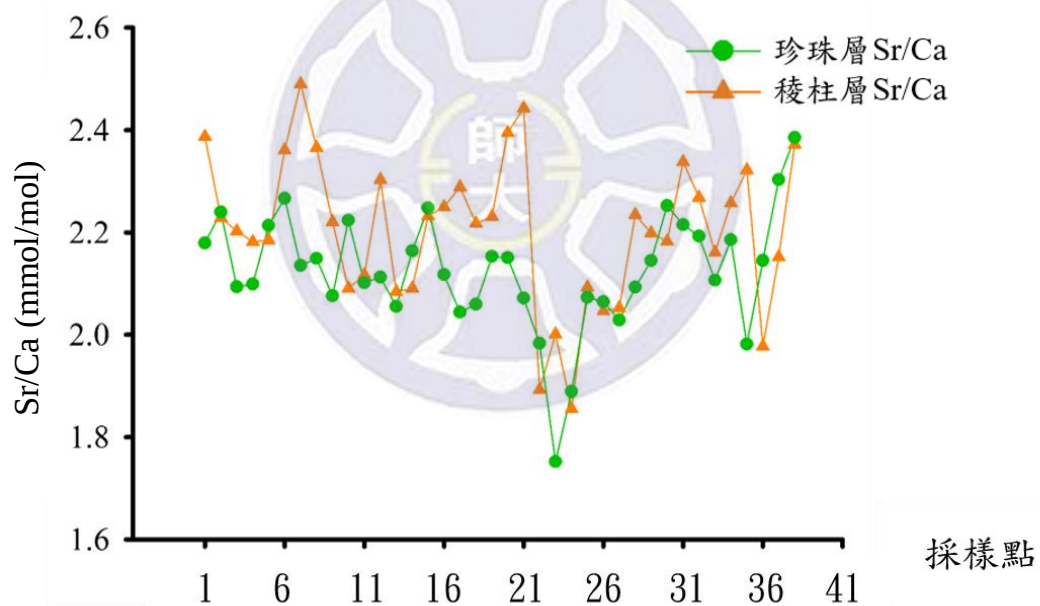


圖4.10 稜柱層及珍珠層殼體Sr/Ca比值分析結果。

經過穩定同位素及元素分析的結果，顯示黑蜷殼體的稜柱層及珍珠層有紀錄到相似的碳氧穩定同位素訊號以及元素組成，皆可用於古環境的討論，但部分殼體因表面破損而只剩下最內側的珍珠層，所以本研究將針對殼體珍珠層採樣並進行後續的實驗。

4.4 碳酸鹽叢同位素溫度計

碳酸鹽叢同位素的實驗因所需要的標本粉末量較多，所以在不同的定年年代區間以及現生標本中選擇殼體較完整的標本，並且在同一標本中依照氧同位素數值高於平均值1個標準差及低於平均值1個標準差分開取樣並編號命名，例如BG15中選擇氧同位素數值高於平均值1個標準差的取樣點取樣，則此分析標本就命名為BG15_H；反之則為BG15_L。

實驗的結果中(表4.1)，所有標本所顯示的溫度均與可倫坡地區的月均溫 $26.6(^{\circ}\text{C}) \sim 28.3(^{\circ}\text{C})$ 相距甚遠，此溫度亦不能當作Bolgoda 湖泊水體的真實溫度，也因為溫度變化大而難以校正，也就不能利用此溫度加上殼體氧同位素數值以計算水體氧同位素。而殼體也經過前文的實驗確定沒有經過成岩作用而出現再結晶的情況，所以不該紀錄到如此的高溫。現在碳酸鹽叢同位素的 $\Delta 47 - T(^{\circ}\text{C})$ 換算公式眾多，但適合本研究殼體的 $\Delta 47 - T(^{\circ}\text{C})$ 換算公式可能還需要更多的研究分析。

表4.1 碳酸鹽叢同位素實驗計算之溫度。

標本編號	C-14定年年代	$\Delta 47$	$\Delta 47$ 換算溫度($^{\circ}\text{C}$)
BGLM4_H	現生標本	0.622	54
BGLM4_L		0.739	11
BG15_H	520(Cal yr BP)	0.470	147
BG15_L		0.486	134
BG22_H	2090(Cal yr BP)	0.512	114
BG22_L		0.496	125
BG28_H	2340(Cal yr BP)	0.476	142
BG28_L		0.483	136

4.5 殼體氧同位素理論平衡值估算

利用碳酸鹽叢同位素無法取得標本殼體結晶時真實的水體溫度，也就無法利用Hudson and Anderson (1989)的古溫度方程式：

$$T(^{\circ}\text{C}) = 19.7 - 4.34 (\delta^{18}\text{O}_{\text{aragonite}} - \delta^{18}\text{O}_{\text{water, SMOW}})$$

計算出達同位素平衡下水體的氧同位素數值。

所以改採以估算的水體氧同位素數值及水體溫度，代入古溫度方程式，來估算殼體的氧同位素理論平衡值的方式進行下述討論。

由於沒有實測水體溫度，水體溫度 $T(^{\circ}\text{C})$ 採用WMO所紀錄的1961-1990年斯里蘭卡可倫坡地區的月均溫代入(圖2.3)。而湖水水體氧同位素數值主要受到天水及海水等來源的影響，此處設定湖水水體氧同位素成分等於天水與海水的混和，不考慮其他水體來源，所以湖水的鹽度也就受到天水(鹽度為0‰)及海水(鹽度為35‰)的混合比例影響，且為線性的關係，故可由湖水鹽度計算當時湖水中天水及海水的比例。

Ratnayake et al. (2017) 實測2010年9月湖水鹽度為2‰，此時的湖水中應有2/35是海水，而其他33/35則全為天水，所以湖水中海水/天水的比例應為2/33，此月份降雨量為400mm。另外2016年9月的湖水鹽度則為20‰，此時湖水中20/35是海水，而其他15/35則全為天水，所以湖水中海水/天水的比例應為20/15，此月份降雨量為50mm。

藉由上述兩個實測值便可推算出特定降雨量條件下的湖水鹽度，利用WMO所紀錄的1961- 1990年可倫坡地區的月平均雨量(圖2.3)，可以推估每個月理想狀況下的水體鹽度，進而得到每個月湖水中海水及天水的組成比例。

表4.2 可倫坡2008-2013天水穩定同位素組成平均值(取自Edirisinghe et al, 2017)。

降雨特徵		$\delta^{18}\text{O}(\text{‰})$	$\delta^2\text{H}(\text{‰})$
NEM	(東北季風，12月至隔年2月)	-5.99	-34.8
1IM	(第一次季風交替期，3-5月)	-3.16	-6.0
SWM	(西南季風，6-9月)	-2.16	-11.6
2IM	(第二次季風交替期，10-11月)	-7.13	-41.8

假設現今海水氧同位素數值平均為0‰，而Edirisinghe 等人(2017)收集並分析可倫坡2008~2013年天水氫氧同位素，並依照斯里蘭卡降雨特徵分類(表4.2)，故11月天水氧同位素實測值用-7.13‰代入。

所以11月水體氧同位素 = $2/35 \times 0$ (海水氧同位素) + $33/35 \times (-7.13)$ (天水氧同位素) $\div -6.7\text{‰}$ 。然後查出11月溫度(26.7°C)，代入古溫度方程式就可得到11月的殼體理論平衡值 $^{18}\text{O}_a = -8.3\text{‰}$ 。利用上述步驟就可以得到全年12個月的殼體理論平衡值(圖4.11)。

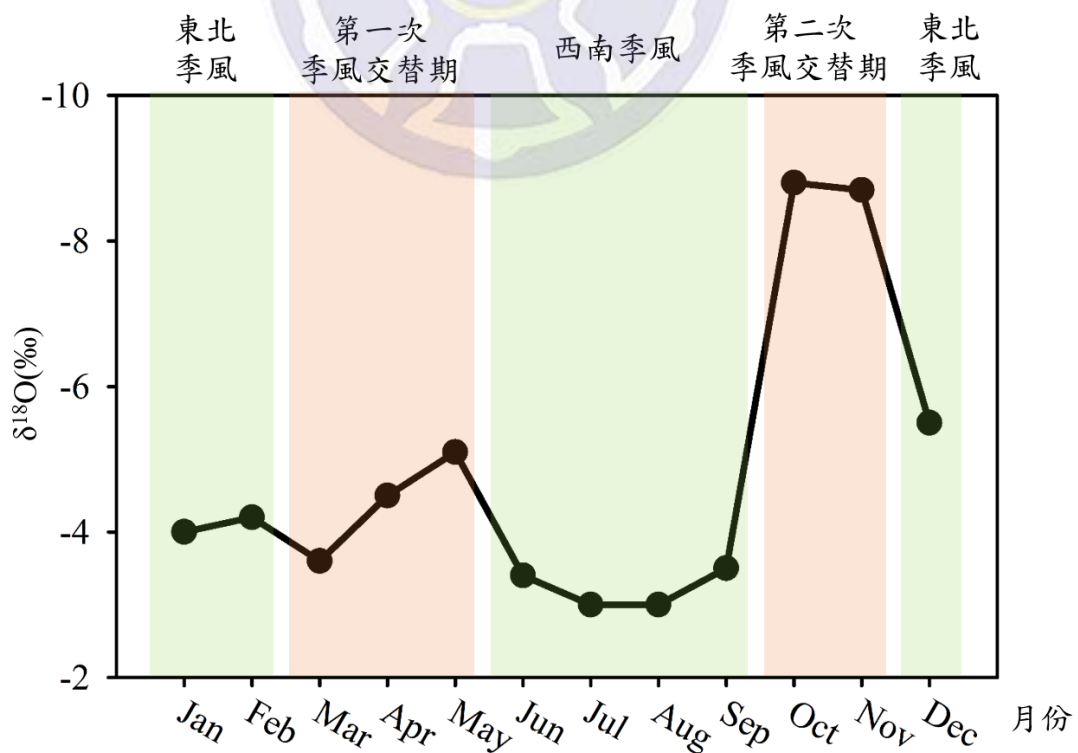


圖4.11 殼體各月份氧同位素理論平衡值。

計算現代之理論氧同位素數值介於 -3.0‰ 至 -8.8‰ 之間，有接近 6‰ 的變化幅度。在3-5月及10-11月的兩次季風交替期有相似的降雨量，但由於天水中氧同位素數值的差異，所以換算過後的殼體氧同位素理論平衡值在第二次季風交替期有較輕的峰值，而第一次季風交替期則較不明顯。將現生及岩芯中殼體的氧同位素數值（圖4.12）對照理論平衡值，也有隨著季節而變動的趨勢，但數值間的差異小於理論平衡值，因可倫坡地區月均溫高低間有約 2°C 的差值，換算成氧同位素約為 0.5‰ 的差異，且可倫坡地區每年降雨月份分布變動劇烈，以及湖水會有地下水、地表逕流等水的來源進而影響湖水水體的氧同位素數值，皆可能導致現生殼體氧同位素數值變化幅度較30年平均之理論平衡值小。

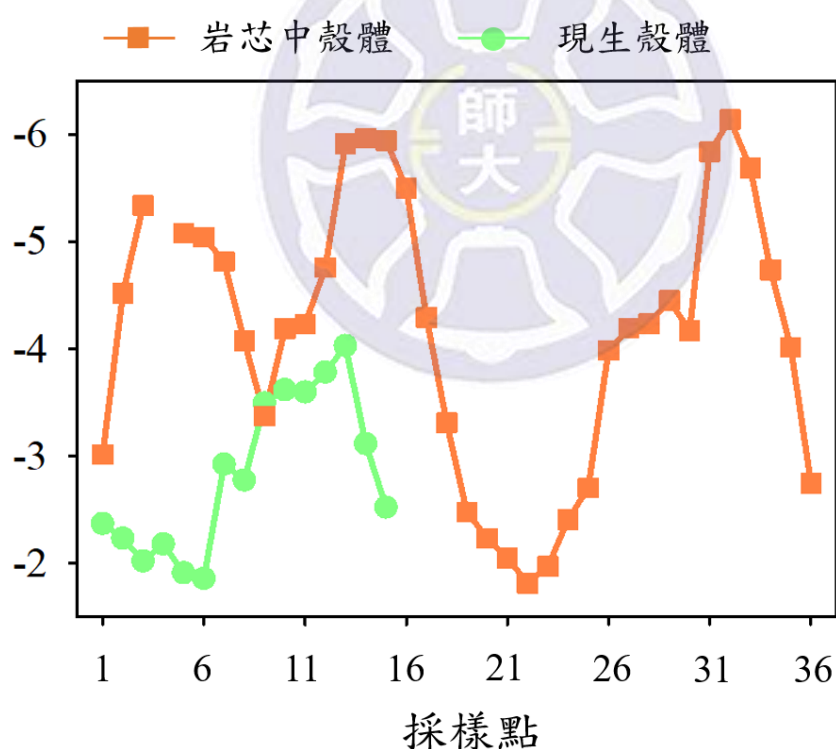


圖4.12 現生及岩芯中殼體氧同位素對距殼頂距離作圖。

4.6 殼體穩定同位素探討

4.6.1 殼體穩定碳氧同位素分析結果

本研究分析現生錐蜷標本4隻， $\delta^{18}\text{O}$ 數值介於-6.55‰~-1.66‰之間，平均值為 $-3.2 \pm 0.9\text{‰}$ ($N=74$; 1σ)， $\delta^{13}\text{C}$ 數值介於-11.25‰~-1.74‰之間，平均值為 $-4.4 \pm 2.6\text{‰}$ (表4.3，圖4.13-a，附錄一)，氧同位素對碳同位素的線性關係極低。

岩芯中黑蜷標本10隻， $\delta^{18}\text{O}$ 數值介於-6.94‰~-1.76‰之間，平均值為 $-4.0 \pm 1.1\text{‰}$ ($N=352$; 1σ)， $\delta^{13}\text{C}$ 數值介於-13.03‰~-1.02‰之間，平均值為 $-5.6 \pm 3.1\text{‰}$ (表4.3，圖4.13-b，附錄一)，氧同位素對碳同位素的線性關係 R^2 介於0.40至0.74之間，岩芯標本之穩定同位素分析是為林采玟於104年科技部大專學生研究計畫期間所分析的結果(林采玟，2016)。

彭宗仁等人(1990)的研究，海水環境生物其殼體碳氧同位素數值偏重，而淡水環境生物殼體碳氧同位素值則偏輕，而半鹹半淡環境的生物殼體碳氧同位素數值則會介於兩者之間，並呈線性分布，分布範圍也較廣。比較現生及岩芯標本，兩者所記錄之碳氧同位素數值範圍接近，但岩芯標本具有較佳的線性關係，推測受到海水、淡水交互影響較明顯。

表4.3 現生及岩芯殼體標本碳氧同位素統計表。

研究材料		平均(‰)	標準偏差	個數	最小值(‰)	最大值(‰)
現生殼體	$\delta^{13}\text{C}$	-4.4	2.6	74	-11.25	-1.74
	$\delta^{18}\text{O}$	-3.2	0.9	74	-6.55	-1.66
岩芯殼體	$\delta^{13}\text{C}$	-5.6	3.1	352	-13.03	-1.02
	$\delta^{18}\text{O}$	-4.0	1.1	352	-6.94	-1.76

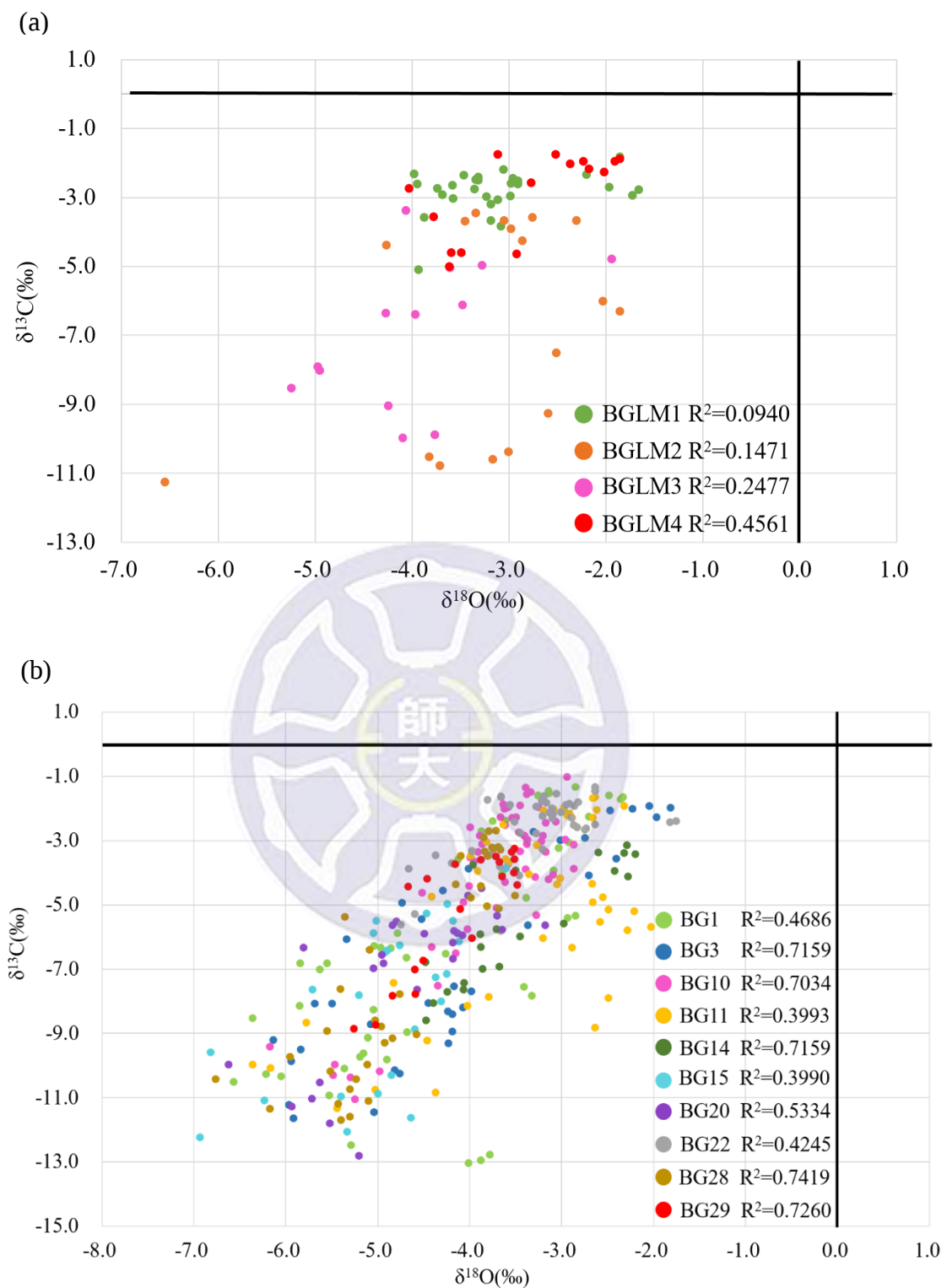


圖4.13 現生標本及岩芯標本碳氧同位素分布圖與線性關係。(a)現生標本數據。(b)岩芯標本數據。

4.6.2 殼體氧同位素隨生長變化

現生殼體的氧同位素數值介於-1.66‰至-6.55‰之間（圖4.13），部分的殼體因破損而缺少連續性的氧同位素紀錄，其中較完整且連續的BGLM1及BGLM4數值多介於-2‰至-4‰之間。

乾季時較少的降雨量，會讓湖水中海水的比例增加而使得水體氧同位素數值較重，而顯示出較重的殼體氧同位素數值。且四枚現生標本數據中，顯示乾季的較重的氧同位素數值多在-2‰左右，表示Bolgoda 湖泊水體在相對較乾燥、降雨量較少的季節有較穩定的水體氧同位素數值。

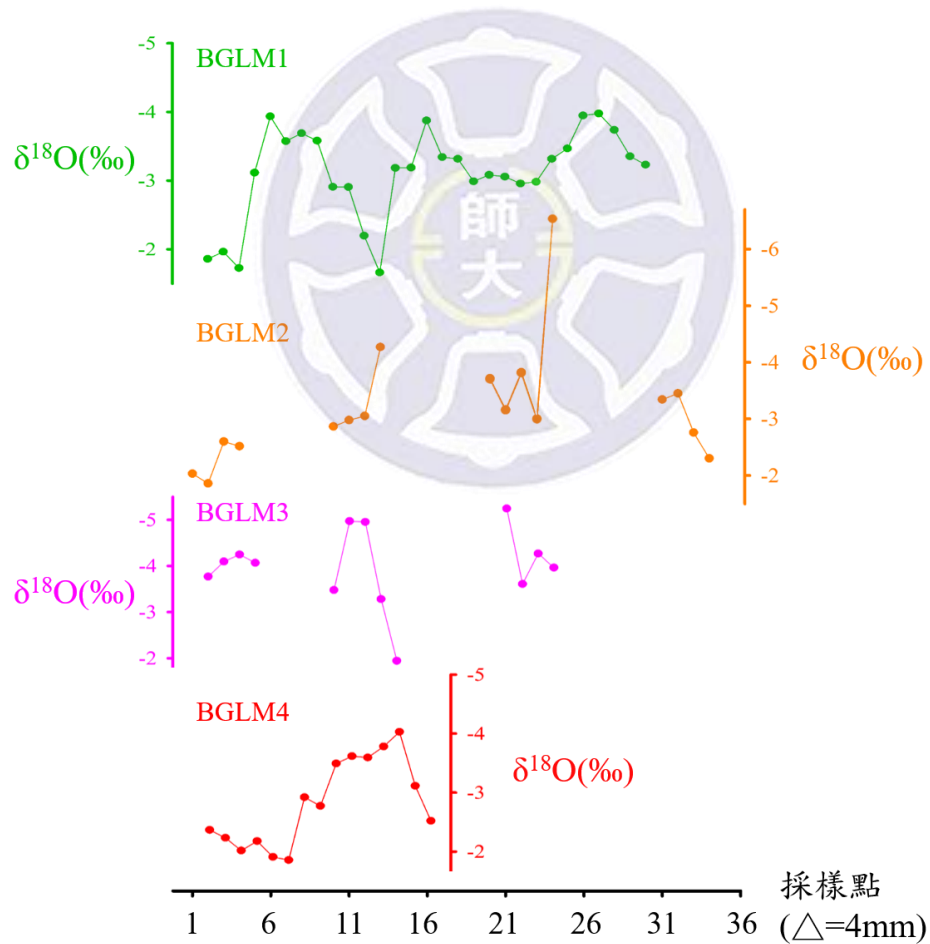


圖4.14 現生殼體氧同位素數值對距殼頂距離作圖。

岩芯中標本的氧同位素數值介於-1.76‰至-6.94‰之間（圖4.14），而大部分的殼體氧同位素數值震盪範圍介於-2‰至-6‰之間。其中BG1、BG3、BG11、BG14等四個標本中，較重的氧同位素數值約在-2‰左右，與現生標本相近，表示這四個標本生長期間有經歷與現今相似的乾季氣候。而其他標本較重的氧同位素數值則約在-3‰~ -4‰左右，表示當時Bolgoda 湖泊水體有更多的天水進入，乾季時的降雨量比現今來得多，而有較輕的水體氧同位素數值。而岩芯中標本普遍有比現生標本更輕的氧同位素數值，表示岩芯中標本生長的古環境應有較高的季節性降雨，使得雨季時的水體氧同位素數值較輕，進而被標本殼體所紀錄下來。

氧同位素對距殼頂距離作圖可以看出部分殼體的震盪圖形與理論平衡值相似，也可推測標本紀錄到的生長時間約為1-2年，另外部分標本氧同位素數值有出現較長時間維持穩定的區間，難以辨認季節性變化，例如：BG10（距殼頂30~150mm）及BG28（距殼頂100~150mm），而這樣的區間是出現在相對較重的氧同位素數值，推測是較長時間的低降雨量所導致。

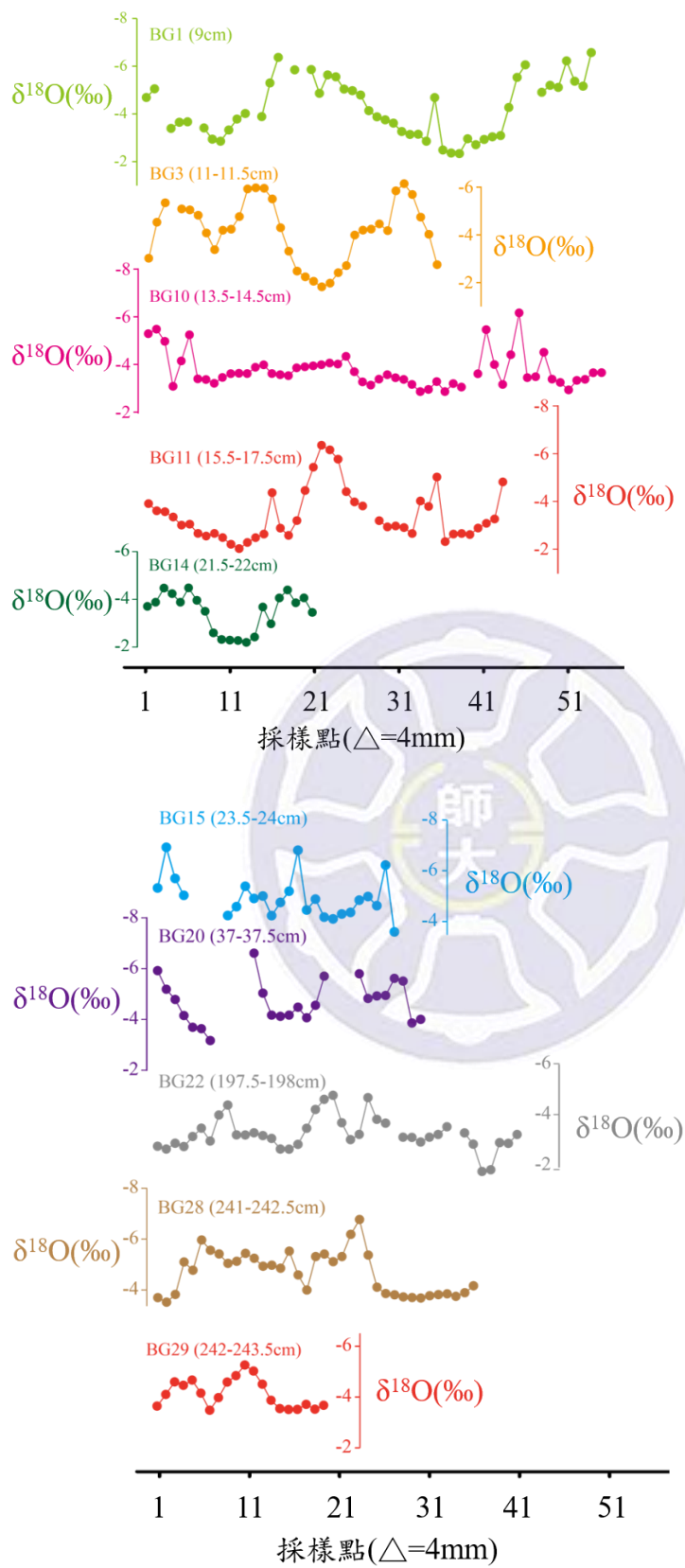


圖4.15 岩芯中殼體氧同位素數值對距殼頂距離作圖。

4.6.3 殼體穩定碳氧同位素隨深度/年代變化

將各殼體碳氧同位素平均值根據深度年代排列（圖4.15），可見到碳氧同位素同步變化的趨勢。Gayantha et al. (2017)使用Bolgoda湖泊岩芯資料將斯里蘭卡地區近三千年的氣候依據印度洋西南季風的強弱分為四個時期，本研究標本皆分布在弱西南季風的時期，不過氧同位素數值皆有隨年代由老至新向上變正的趨勢，可能表示了Bolgoda湖泊地區氣候由潮濕轉為乾燥的過程。

標本氧同位素從2340 cal yr BP至2090 cal yr BP由輕轉為重，與Gayantha et al. (2017) 研究中2275 cal yr BP至2064 cal yr BP，有一快速由潮濕轉乾燥的事件相吻合。且1300 cal yr BP到現今，Bolgoda湖泊地區則為越來越乾燥的氣候，也與本研究的氧同位素數值變化相同。

Premathilake et al. (2003)利用胞粉等研究指出斯里蘭卡地區約在2000年前由潮濕的強西南季風期間轉為弱西南季風，而本研究在2330 cal yr BP的殼體平均氧同位素為- 4.7‰，2090 cal yr BP的殼體平均氧同位素為- 3.3‰，呈現變正的趨勢，可能記錄到氣候轉變的過程；Premathilake et al. (2003)也指出約在600 cal yr BP有短暫變潮濕的事件出現，而本研究在520 cal yr BP之殼體平均氧同位素數值為- 5.0‰，相較其他年代呈現較負的數值，可能反映到此次變潮濕的事件。Veena et al. (2014)認為近500年來受到印度洋西南季風強度改變的影響，南印度地區由潮濕轉為較乾燥的環境，本研究在520 cal yr BP之殼體平均氧同位素數值為- 5.0‰，而現生殼體平均氧同位素數值為- 3.2 ‰，也有反映到此研究內容。Gayantha et al. (2017)在2390 cal yr BP 至2153 cal yr BP觀察到大量的藻類生長，藻類會優先利用湖水中的 ^{12}C ，使得湖水的 ^{13}C 增加，這時生長的標本殼體便會記錄下較重的碳同位素數值，本研究在2330 cal yr BP的殼體碳同位素數值

為-7.0‰，2090 cal yr BP的殼體碳同位素數值則為- 2.3‰，與前人研究趨勢相符。

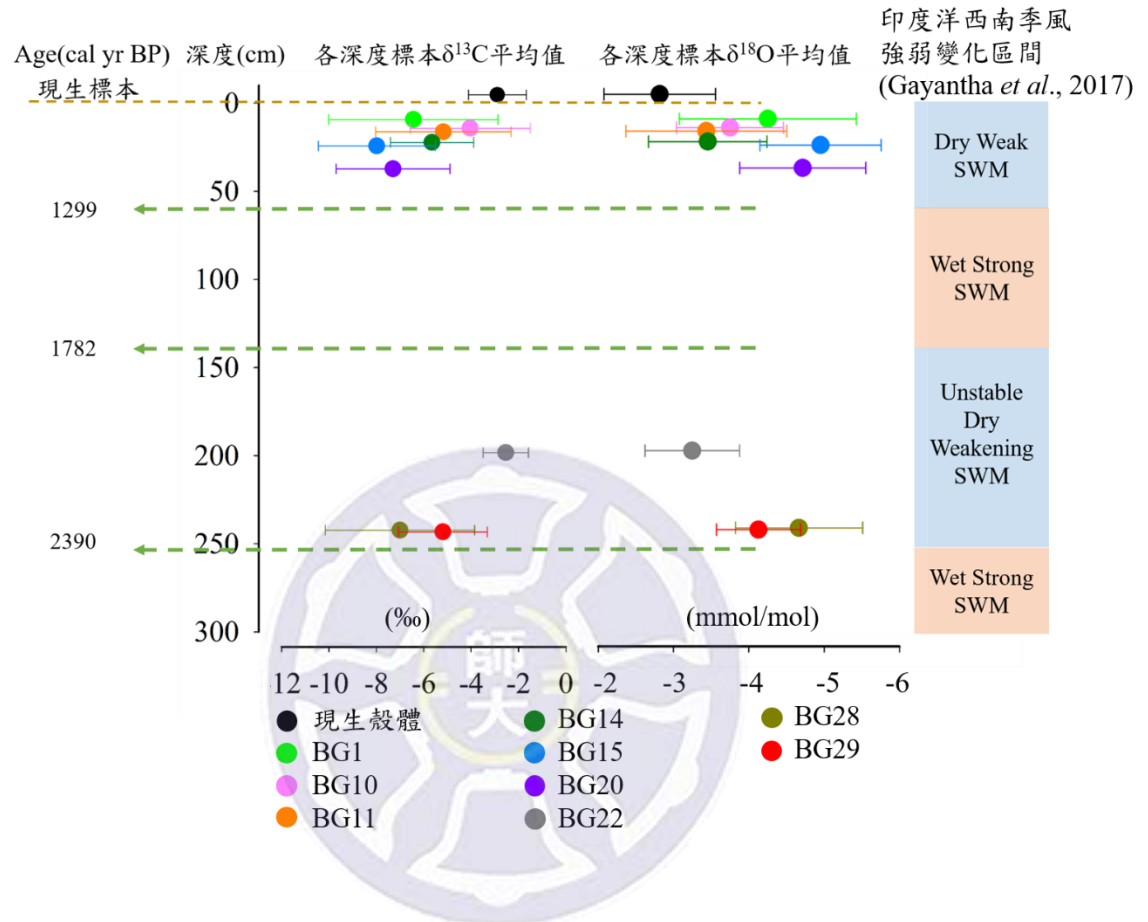


圖4.16 各殼體碳氧同位素平均值隨深度變化。

4.6.4 殼體穩定氧同位素及Na/Ca比值隨深度/年代變化

Bolgoda湖泊地區年均溫變化不大，殼體氧同位素數值的變化主要受到湖水的水體氧同位素數值變動的影響，也就是降雨量的影響，而降雨量多寡也會同時改變水體的鹽度，所以較多的降雨量應會形成較輕的殼體氧同位素數值及較低的Na/Ca數值，而比較各殼體的平均氧同位素數值及Na/Ca數值，並將其與深度年代做圖（圖4.16），可看出殼體氧同位素與Na/Ca數值有相似的變化趨勢。

殼體氧同位素與Na/Ca數值的變化趨勢與Gayantha et al. (2017)、Premathilake et al. (2003)、Veena et al. (2014)對斯里蘭卡近3000年的氣候變動解釋皆符合，說明影響Bolgoda湖泊中錐蜷殼體氧同位素數值的因素以降雨量為主。

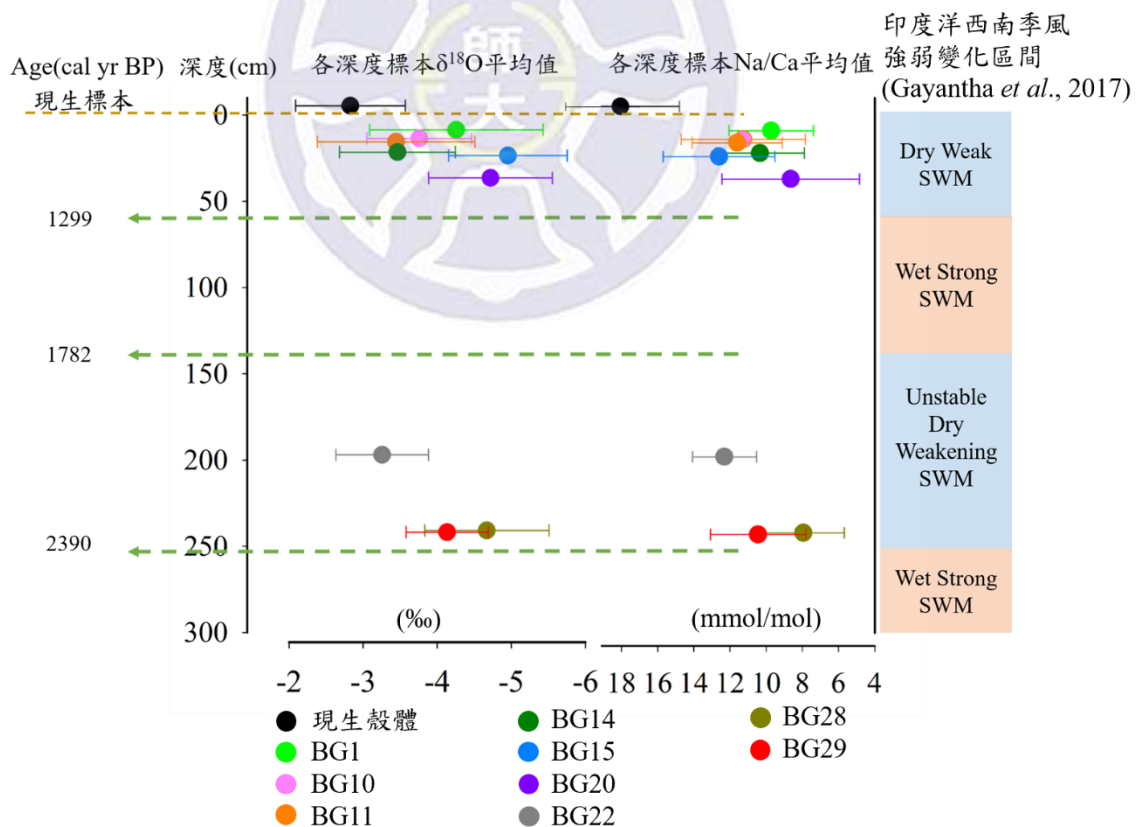


圖4.17 各殼體氧同位素及Na/Ca平均值隨深度變化(Na/Ca數值向左變大)。

第五章、結論

本研究分析斯里蘭卡Bolgoda湖泊岩芯殼體標本及現生殼體標本，比較2340~190 yr B.P.與現今之季節性訊號及環境變化。

斯里蘭卡Bolgoda 湖泊地區生長之軟體動物殼體在不同的殼體分層有紀錄到相似的數值，且估算的殼體氧同位素理論平衡值及實際殼體氧同位素數值皆可紀錄到季節性的穩定同位素變化趨勢，但本研究中的殼體氧同位素數值大都較理論平衡值為重，說明除了降雨量多寡以外，水體溫度變化及地下水等淡水來源均會影響水體氧同位素數值以及錐蜷殼體達成同位素平衡形成殼體的穩定同位素數值。

現生殼體的氧同位素數值震盪範圍約2‰，而岩芯殼體氧同位素震盪範圍則在2‰至4‰，顯示2340~190 yr B.P.時期的印度洋季風降雨強度普遍較現今強，其中亦有不同的降雨強度變化。另外各殼體中的氧同位素數值震盪也都顯示在年季間都有不同的降雨強度變化，而變化的趨勢與現今相近。

近3000年來印度洋西南季風有著不定的強弱變化，而本研究之殼體在穩定同位素及元素成分都有相應的變化，並與前人研究相符合，且斯里蘭卡地區關於軟體動物氧同位素的分析稀少，本研究結果說明不同年代殼體可反映印度洋季風的變動，亦可藉由軟體動物殼體中的連續採樣得到1-2年間的紀錄，並從中看出乾濕季的變化。

參考文獻

- 任淑仙等編著，1995，無脊椎動物學(上)：淑馨出版社，第302-342頁
- 林采玟，2016，中華民國105年地質與地球物理聯合年會論文壁報
- 彭宗仁、汪中和，1990，現生錐螺與台南層錐螺化石碳氧同位素組成之初步比較：中國地質學會會刊，第33卷，第4期，第289-301頁
- 彭宗仁、汪中和、陳鎮東，1990，苗栗白沙屯過港貝化石層內軟體動物化石之碳氧同位素研究：經濟部中央地質調查所特刊，第4號，第307-322頁
- 連凱莉、陳明輝，2004，如何判別鐘螺和蝾螺的性別？一種快速又簡便的方法：漁業推廣，行政院農委會漁業署，第208號，第52-54頁
- 蔡英亞、張英、魏若飛，1997，貝類學概論：水產出版社
- Arthur, M. A., Anderson, T. F., Kaplan, I. R., Veizer, J., and Land, L. S., 1983, Stable isotopes of oxygen and carbon and their application to sedimentologic and paleoenvironmental problems: Stable isotopes in sedimentary geology: SEPM Short Course, p. 1-151.
- Attendorf, H. G., and Bowen, R. N. C., 1997, Radioactive and Stable Isotope Geology: London, Chapman & Hall, p.1-522.
- Bergamonti, L., Bersani, D., and Lottici, P. P., 2011, The Nature of the Pigments in Corals and Pearls: A Contribution from Raman Spectroscopy: Spectroscopy Letters, v. 44, p. 453-458.
- Berrocoso, Á., Zuluaga, M., and Elorza, J., 2004, Minor- and trace-element intra-shell variations in Santonian inoceramids (Basque-Cantabrian Basin, northern Spain): Diagenetic and primary causes: Facies, v. 50, p. 35-60.
- Cao, X., and Liu, Y., 2012, Theoretical estimation of the equilibrium distribution of clumped isotopes in nature: Geochimica et Cosmochimica Acta, v. 77, p.292-303.

- Curry, W. B., Duplessy, J. C., Labeyrie, L. D., and Shackleton, N. J., 1988, Changes in the distribution of $\delta^{13}\text{C}$ of deep water ΣCO_2 between the last glaciation and the Holocene: *Paleoceanography*, v. 3, p. 317-341.
- Dennis, K. J. and Schrag, D. P., 2010, Clumped isotope thermometry of carbonatites as an indicator of diagenetic alteration: *Geochim. Cosmochim. Acta*, v. 74, p. 4110-4122.
- Dettman, D. L., Reische, A. K., and Lohmann, K. C., 1999, Controls on the stable isotope composition of seasonal growth bands in aragonitic fresh-water bivalves (unionidae): *Geochimica et Cosmochimica Acta*, v. 63(7-8), p. 1049-1057.
- Eagle, R. A., Schauble, E. A., Tripathi, A. K., Tutken, T., Hulbert, R. C., and Eiler, J. M. 2010, Body temperatures of modern and extinct vertebrates from ^{13}C - ^{18}O bond abundances in bioapatite: *Proceedings of the National Academy of Sciences*, v. 107(23), p. 10377-10382.
- Edirisinghe, E. A. N. V., Pitawala, H. M. T. G. A., Dharmagunawardhane, H. A., and Wijayawardane, R. L., 2017, Spatial and temporal variation in the stable isotope composition ($\delta^{18}\text{O}$ and $\delta^2\text{H}$) of rain across the tropical island of Sri Lanka: *Isotopes in Environmental and Health Studies*, v. 53(6), p. 628-645.
- Eiler, J. M., 2007, "Clumped-isotope" geochemistry—The study of naturally-occurring, multiply-substituted isotopologues: *Earth and Planetary Science Letters*, v. 262(3), p. 309-327.
- Epstein, S., and Mayeda, T., 1953, Variation of ^{18}O content of water from natural sources: *Geochimica et Cosmochimica Acta*, v. 4, p. 213-224.
- Fredrik, P. A., Birger, S., and Emma, J., 1999, Surface-Water Seasonality from Stable Isotope Profiles of *Littorina littorea* Shells: Implications for Paleoenvironmental Reconstructions of Coastal Areas: *PALAIOS*, V. 14, n. 3, p. 273-281.
- Gaspard, D., Paris, C., Loubry, P., and Luquet, G., 2019, Raman investigation of the pigment families in recent and fossil brachiopod shells: *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, v. 208, p. 73-84.
- Gayantha, K., Routh, J., and Chandrajith, R., 2017, A multi-proxy reconstruction of the late Holocene climate evolution in Lake Bolgoda, Sri Lanka: *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, v. 473, p. 16-25.

- Ghosh, P., Adkins, J., Affek, H., Balta, B., Guo, W., Schauble, E. A., Schrag, D., and Eiler, J. M., 2006, ^{13}C – ^{18}O bonds in carbonate minerals: A new kind of paleothermometer: *Geochimica et Cosmochimica Acta*, v. 70(6), p. 1439-1456.
- Gillikin, D. P., Lorrain, A., Navez, J., Taylor, J. W., André, L., Keppens, E., Dehairs, F., 2005, Strong biological controls on Sr/Ca ratios in aragonitic marine bivalve shells: *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, v. 6, n. 5, p. 1-16.
- Gobac, Z. Z., Posilovic, H., and Bermanec, V. 2009, Identification of biogenic Calcite and Aragonite using SEM: *Geologia Croatica*, v. 9611, p. 201-206.
- Goldberg, E. D., 1975, The mussel watch: A first step in global marine monitoring: *Marine Pollution Bulletin*, v. 6, p. 111.
- Grossman, E. L., and Ku, T. L., 1986, Oxygen and carbon isotope fractionation in biogenic aragonite: Temperature effects: *Chemical Geology*, v. 59, p. 59-74.
- Gunatilaka, W. M. P., and Wijeyaratne, S. C., 2009, A study of water quality of Bolgoda North Lake: *Vidyodaya J of Sci.*, v. 14, no. 11, p. 113-133.
- Guo, Y., Deng, W., Wei, G., Lo, L., and Wang, N., 2019, Clumped isotopic signatures in land-snail shells revisited: Possible palaeoenvironmental implications: *Chemical Geology*, v. 519, p. 83-94.
- Hellings, L., Dehairs, F., Tack, M., Keppens, E., and Baeyens, W., 1999, Origin and fate of organic carbon in the freshwater part of the Scheldt Estuary as traced by stable carbon isotope composition: *Biogeochemistry*, v. 47, p. 167-186.
- Henkes, G. A., Passey, B. H., Wanamaker, A. D., Grossman, E. L., Ambrose, W. G., & Carroll, M. L., 2013, Carbonate clumped isotope compositions of modern marine mollusk and brachiopod shells: *Geochimica et Cosmochimica Acta*, v. 106, p. 307-325.
- Hickman, C.S., 1992, Interpreting the separate taphonomic fates of turbinid gastropod shells and opercula in fossil mollusk assemblages: *Western Society of Malacologists*, v. 24, p. 18-19.
- Hudson, J. D., and Anderson, T. F., 1989, Ocean temperatures and isotopic compositions through time: *Transactions of the Royal Society of Edinburgh: Earth Sciences*, v. 80, p. 183-192.

- Hughes, M. K., Schweingruber, F. H., Cartwright, D., and Kelly, P.M., 1984, July/August temperature at Edinburgh between 1721 and 1975 from tree-ring density and width data: *Nature*, v. 308, p. 341-344.
- Huntington, K. W., Budd, D. A., Wernicke, B. P., and Eiler, J. M., 2011, Use of Clumped-Isotope Thermometry To Constrain the Crystallization Temperature of Diagenetic Calcite: *Journal of Sedimentary Research*, v. 81(9), p. 656-669.
- Kluge, T., John, C. M., Jourdan, A.-L., Davis, S., and Crawshaw, J., 2015, Laboratory calibration of the calcium carbonate clumped isotope thermometer in the 25-250°C temperature range: *Geochimica et Cosmochimica Acta*, v. 157, p.213-227.
- Kobashi, T., Grossman, E. L., Yancey, T. E., and Dockery, D. T., 2001, Reevaluation of conflicting Eocene tropical temperature estimates: Molluscan oxygen isotope evidence for warm low latitudes: *Geology*, v. 29, p. 983-986.
- Kroopnick, P. M., 1974a, Correlations between ^{13}C and ΣCO_2 in surface waters and atmospheric CO_2 : *Earth Planetary Science Letters*, v. 22, p. 397-403.
- Kroopnick, P. M., 1974b, The dissolved O_2 - CO_2 - ^{13}C system in the eastern Equatorial Pacific: *Deep-Sea Research*, v. 21, p. 211-227.
- Kroopnick, P. M., Deuser, W. G., and Craig, H., 1970, Carbon 13 measurements on dissolved inorganic carbon at the North Pacific (1969) Geosecs station.:*Journal of Geophysical Research*, v. 75, p. 7668-7671.
- Löffler, N., Fiebig, J., Mulch, A., Tütken, T., Schmidt, B. C., Bajnai, D., Conrad, A. C., Wacker, U., Böttcher, M. E., 2019, Refining the temperature dependence of the oxygen and clumped isotopic compositions of structurally bound carbonate in apatite: *Geochimica et Cosmochimica Acta*, v. 253, p. 19-38.
- Lok, A. F. S. L., W. F. Ang, P. X. Ng, B. Y. Q. Ng, and S. K. Tan, 2011, Status and distribution of *Faunus ater* (Linnaeus, 1758) (Mollusca: Cerithioidea) in Singapore: *Nature in Singapore*, v. 4, p. 115-121.
- Lorens, R. B., and Bender, M. L., 1980, The impact of solution chemistry on *Mytilus edulis* calcite and aragonite: *Geochimica et Cosmochimica Acta*, v. 44, n. 9, p. 1265-1278.
- Maier, C., Felis, T., Pätzold, J., and Bak, R.P.M., 2004, Effect of skeletal growth and lack of species effects in the skeletal oxygen isotope climate signal within the coral genus *Porites*: *Marine Geology*, v. 207, p. 193-208.

- Parthasarathy, B., Munot, A. A., and Kothawale, D. R., 1988, Regression model for estimation of indian foodgrain production from summer monsoon rainfall: *Agricultural and Forest Meteorology*, v. 42, no. 2-3, p. 167-182.
- Passey, B. H. and Henkes, G. A., 2012, Carbonate clumped isotope bond reordering and geospeedometry: *Earth Planet. Sci. Lett.* v. 351-352, p. 223-236.
- Premathilake, R., and Risberg, J., 2003, Late Quaternary climate history of the Horton Plains, central Sri Lanka: *Quaternary Science Reviews*, v. 22, p. 1525-1541.
- Spero, H. J., Bijima, J., Lea, D. and Bemis, B. E., 1997, Effect of seawater carbonate concentration on foraminiferal carbon and oxygen isotopes: *Nature*, v. 390(4), p. 497-500.
- Sri-aroon, P., Lohachit, C. and Harada, M., 2005, Brackish-water molluscs of Surat Thani Province, Southern Thailand: *Southeast Asian Journal of Tropical Medicine and Public Health*, v. 36, p. 180-188.
- Sri-aroon, P., Lohachit, C. and Harada, M., 2006, Malacological survey in Phang-Nga Province, Southern Thailand, Pre- and Post-Indian Ocean Tsunami: *Southeast Asian Journal of Tropical Medicine and Public Health*, v. 37, p. 104-109.
- Staubwasser, M., Sirocko, F., Grootes, P. M., and Segl, M., 2003, Climate change at the 4.2 ka BP termination of the Indus valley civilization and Holocene south Asian monsoon variability: *Geophysical research letters*, v. 30.
- Suzuki A., Yukino I., Kawahata H., 1999, Temperature-skeletal $\delta^{18}\text{O}$ relationship of *Porites australiensis* from Ishigaki Island, the Ryukyus, Japan: *Geochem. J.*, v. 33, p. 419-428.
- Urey, H. C., Lowenstam, H. A., Epstein, S., and McKinney, C. R., 1951, Measurement of paleotemperatures and temperatures of the Upper Cretaceous of England, Denmark, and southeast United States: *Geological Society of America Bulletin*, v. 62, p. 399-416.
- Veena, M. P., Achyuthan, H., Eastoe, C., and Farooqui, A., 2014, A multi-proxy reconstruction of monsoon variability in the late Holocene, South India: *Quaternary International*, v. 325, p. 63-73.

- Vermeij, G., 2002, Evolution in the consumer age: predators and the history of life: Paleontol. Soc. v. 8, p. 375-394.
- Wade, J., Pugh, H., Nightingale, J., Kim, J. S., and Williams, S. T., 2019, Colour in bivalve shells: Using resonance Raman spectroscopy to compare pigments at different phylogenetic levels: Journal of Raman Spectroscopy, p. 1-10.
- Wang, C. H., Peng, T. R., and Chen, P. F., 1991, Oxygen And Carbon Isotopic Compositions Of Mollusks From The Late Pleistocene Szekou Formation, Southern Taiwan: Earth Sci. Academia Sinica, p. 11-49.
- Webb, T., 1998, Late Quaternary Climates: Data Synthesis and Model Experiments: Quaternary Science Reviews, v.17, p.587-606.
- Weber J. N. and Rocque A. L., 1964, Carbon Isotopic Composition of Lacustrine Gastropoda from Pond-Weed Environments: Journal of Paleontology, v. 38, no. 5, p. 965-967.
- Wehrmeister, U., Jacob, D. E., Soldati, A. L., Ha'ger, T., and Hofmeister, W., 2007, Vaterite in freshwater cultured pearls from China and Japan: J. Gemmol., v. 31, p. 269-276.
- Wijeyaratne, W. D. N., 2016, Application of pollution indices to quantify the pollution status of shallow sediments of the Bolgoda Lake, Sri Lanka. Journal of the National Science Foundation of Sri Lanka, v. 44(3), p. 279-289.
- Williams, P. W., Marshall, A., Ford, D. C. and Jenkinson, A. V., 1999, Palaeoclimatic interpretation of stable isotope data from Holocene speleothems of the Waitomo district, North Island, New Zealand: Holocene, v. 9, p. 649-657.
- Woodroffe, S. A., and Horton, B. P., 2005, Holocene sea-level changes in the Indo-Pacific: Journal of Asian Earth Sciences, v. 25(1), p. 29-43.
- Yap, C. K., Aziran, Y. and Cheng, W. H., 2009, Distribution of heavy metal concentrations in different soft tissues and shells of the bivalve *Psammotaea elongata* and gastropod *Faunus ater* collected from Pantai Sri Tujuh, Kelantan: Journal of Sustainability Science and Management, v. 4(1), p. 66-74.
- Yap, C. K., Hisyam, M. N. D., Edward, F. B., Cheng, W. H., and Tan, S. G., 2010, Concentrations of Heavy Metal in Different Parts of the Gastropod, *Faunus ater* (Linnaeus), Collected from Intertidal Areas of Peninsular Malaysia: Pertanika Journal of Tropical Agricultural Science, v. 33(1), p. 45-60.

- Zaarur, S., Affek, H. P., and Brandon, M., 2013, A revised calibration of the clumped isotope thermometer: *Earth Planet. Sci. Lett.*, v. 382, p. 47-57.
- Zinsmeister, W. J. and Camacho, H. H., 1980, Late Eocene Struthiolariidae (Mollusca, Gastropoda) from Seymour Island, Antarctic Peninsula and their significance to the biogeography of Early Tertiary shallow-water faunas of the Southern Hemisphere: *Journal of Paleontology*, v. 54, p. 1-14.



附錄

附錄一、現生錐蜷殼體碳氧同位素及 Na/Ca 數值

Sample No.	距殼頂 距離(mm)	$\delta^{18}\text{O}_{\text{PDB}}$ (‰)	$\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ (‰)	Al/Ca (mmol/mol)	Fe/Ca (mmol/mol)	Mn/Ca (mmol/mol)	Mg/Ca (mmol/mol)	Na/Ca (mmol/mol)	Sr/Ca (mmol/mol)
BGLM1_2	4	-1.86	-1.82	0.00	0.00	0.00	0.70	14.84	2.29
BGLM1_3	8	-1.97	-2.71	0.00	0.00	0.00	1.20	18.98	1.94
BGLM1_4	12	-1.73	-2.93	0.32	0.50	0.00	2.03	22.70	2.11
BGLM1_5	16	-3.12	-3.06	0.73	0.58	0.00	1.90	11.58	2.11
BGLM1_6	20	-3.94	-5.09	0.39	0.00	0.00	1.65	10.58	2.13
BGLM1_7	24	-3.58	-3.03	0.32	0.00	0.00	1.51	9.95	2.08
BGLM1_8	28	-3.69	-2.92	0.00	0.00	0.00	1.59	9.93	2.26
BGLM1_9	32	-3.58	-2.65	0.51	0.86	0.00	2.46	14.26	2.21
BGLM1_10	36	-2.91	-2.61	0.40	0.00	0.00	1.71	27.09	1.98
BGLM1_11	40	-2.91	-2.52	0.58	0.00	0.00	1.53	12.45	1.99
BGLM1_12	44	-2.20	-2.33	1.01	0.58	0.00	1.63	18.87	2.01
BGLM1_13	48	-1.66	-2.76	1.50	0.00	0.00	1.74	13.42	2.16
BGLM1_14	52	-3.19	-3.66	1.45	2.04	0.00	1.84	10.11	2.13
BGLM1_15	56	-3.19	-3.19	0.00	0.41	0.00	2.22	34.26	2.13
BGLM1_16	60	-3.88	-3.57	0.85	0.00	0.00	1.31	10.50	2.19
BGLM1_17	64	-3.34	-2.48	0.00	1.56	0.00	2.68	27.25	1.79

BGLM1_18	68	-3.32	-2.50	1.16	0.50	0.00	2.24	13.13	1.94
BGLM1_19	72	-2.99	-2.96	0.54	0.49	0.00	1.81	14.03	1.90
BGLM1_20	76	-3.08	-3.83	0.36	0.00	0.00	1.44	13.25	1.89
BGLM1_21	80	-3.06	-2.18	0.00	0.00	0.00	1.65	15.57	1.95
BGLM1_22	84	-2.96	-2.43	0.53	0.32	0.00	1.17	11.98	2.56
BGLM1_23	88	-2.98	-2.59	0.69	0.33	0.00	1.40	13.12	2.00
BGLM1_24	92	-3.32	-2.40	0.00	0.00	0.00	1.44	15.15	1.91
BGLM1_25	96	-3.47	-2.35	0.00	0.30	0.00	1.89	25.63	1.86
BGLM1_26	100	-3.95	-2.60	1.29	0.51	0.00	1.99	14.19	1.97
BGLM1_27	104	-3.98	-2.32	0.60	0.37	0.00	1.77	15.73	2.06
BGLM1_28	108	-3.74	-2.72	0.00	0.45	0.00	2.13	13.56	1.90
BGLM1_29	112	-3.35	-2.75	0.68	0.47	0.00	2.70	15.00	2.01
BGLM1_30	116	-3.23	-2.97	0.95	0.50	0.49	4.42	14.62	1.78
BGLM2_1	0	-2.03	-6.01	0.94	1.72	0.00	1.23	9.71	2.74
BGLM2_2	4	-1.86	-6.29	0.00	1.30	0.00	0.97	8.58	2.68
BGLM2_3	8	-2.60	-9.27	0.00	1.49	0.00	1.22	10.55	2.78
BGLM2_4	12	-2.52	-7.50	0.00	1.35	0.00	0.95	10.15	2.70
BGLM2_5	36	-2.87	-4.25	0.00	1.36	0.00	1.03	10.28	2.29
BGLM2_6	40	-2.98	-3.91	0.39	1.24	0.00	1.29	13.75	2.43
BGLM2_7	44	-3.05	-3.67	0.42	1.88	0.00	1.45	12.32	2.51
BGLM2_8	48	-4.27	-4.38	0.70	4.62	0.00	1.40	12.55	2.41
BGLM2_9	76	-3.72	-10.78	0.76	0.75	0.00	1.44	11.53	2.48
BGLM2_10	80	-3.17	-10.59	0.34	0.94	0.00	1.43	12.05	2.58
BGLM2_11	84	-3.83	-10.52	0.00	0.99	0.00	1.18	12.80	2.38
BGLM2_12	88	-3.01	-10.37	0.00	1.94	0.00	1.27	13.23	2.49
BGLM2_13	92	-6.55	-11.25	0.90	0.66	0.00	1.06	7.15	2.88

BGLM2_14	120	-3.34	-3.45	0.35	1.11	0.00	1.26	11.17	2.40
BGLM2_15	124	-3.45	-3.68	0.35	1.27	0.00	1.35	11.81	2.43
BGLM2_16	128	-2.76	-3.57	0.64	1.50	0.00	1.05	8.07	2.42
BGLM2_17	132	-2.30	-3.67	0.50	1.77	0.00	1.27	12.90	2.53
BGLM3_1	4	-3.77	-9.87	1.54	10.99	0.00	3.18	15.89	2.33
BGLM3_2	8	-4.10	-9.96	0.00	2.61	0.00	2.15	11.55	2.43
BGLM3_3	12	-4.25	-9.04	0.56	1.90	0.00	2.24	13.62	2.26
BGLM3_4	16	-4.07	-3.37	2.80	0.70	0.00	3.14	16.07	2.20
BGLM3_5	36	-3.48	-6.12	1.08	2.12	0.00	2.01	17.34	2.67
BGLM3_6	40	-4.97	-7.91	0.41	3.33	0.00	1.86	13.66	2.52
BGLM3_7	44	-4.95	-8.02	0.00	0.78	0.00	1.84	13.33	2.65
BGLM3_8	48	-3.28	-4.97	0.00	0.55	0.00	2.12	15.18	2.97
BGLM3_9	52	-1.94	-4.78	0.75	0.33	0.00	2.28	14.93	2.92
BGLM3_10	80	-5.25	-8.53	0.34	1.85	0.00	2.04	13.67	2.31
BGLM3_11	84	-3.61	-5.04	0.00	2.34	0.00	2.26	12.94	2.72
BGLM3_12	88	-4.27	-6.35	0.00	3.08	0.00	2.28	13.23	2.75
BGLM3_13	92	-3.96	-6.39	0.00	0.77	0.00	2.24	13.10	2.63
BGLM4_1	4	-2.37	-2.03	0.00	2.67	0.00	0.00	9.19	2.17
BGLM4_2	8	-2.23	-1.96	1.30	2.15	0.00	1.55	14.10	2.44
BGLM4_3	12	-2.02	-2.26	0.49	5.79	0.00	1.99	17.31	2.43
BGLM4_4	16	-2.18	-2.17	0.00	8.11	0.00	2.44	19.93	2.30
BGLM4_5	20	-1.91	-1.94	0.96	8.68	0.00	1.89	21.00	2.21
BGLM4_6	24	-1.86	-1.88	0.50	3.84	0.00	2.01	21.17	2.45
BGLM4_7	28	-2.92	-4.63	0.91	1.52	0.00	1.97	19.56	2.84
BGLM4_8	32	-2.77	-2.57	0.00	0.00	0.00	2.09	20.24	2.44
BGLM4_9	36	-3.49	-4.59	0.00	2.69	0.00	2.10	22.32	2.54
BGLM4_10	40	-3.62	-5.01	0.53	1.08	0.00	2.10	16.26	2.57

BGLM4_11	44	-3.60	-4.59	0.33	0.90	0.00	1.82	16.99	2.42
BGLM4_12	48	-3.78	-3.55	0.33	1.88	0.00	1.87	16.93	2.27
BGLM4_13	52	-4.03	-2.72	0.61	3.31	0.00	2.04	20.43	2.37
BGLM4_14	56	-3.11	-1.75	0.80	3.75	0.00	1.48	16.09	2.05
BGLM4_15	60	-2.52	-1.74	0.55	2.33	0.00	2.41	19.23	2.06

附錄二、岩芯中黑蜷殼體碳氧同位素及元素分析數值

殼體編號：BG1 岩芯深度：9 (cm) 定年年代：190 (cal yr BP)

Sample No.	距殼頂 距離(mm)	$\delta^{18}\text{O}_{\text{PDB}}$ (‰)	$\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ (‰)	Al/Ca (mmol/mol)	Fe/Ca (mmol/mol)	Mn/Ca (mmol/mol)	Mg/Ca (mmol/mol)	Na/Ca (mmol/mol)	Sr/Ca (mmol/mol)
BG1_1	0	-4.69	-6.64	0.00	0.00	0.00	1.20	14.28	2.72
BG1_2	4	-5.05	-8.27	2.10	0.40	0.00	7.51	5.93	1.23
BG1_4	12	-3.39	-4.78	0.00	0.00	0.00	0.00	13.35	2.41
BG1_5	16	-3.65	-4.03	0.00	0.00	0.00	0.00	9.07	2.36
BG1_6	20	-3.67	-5.80	0.00	0.00	0.00	0.00	7.05	2.39
BG1_8	28	-3.41	-7.54	3.47	1.41	0.00	3.05	15.02	2.39
BG1_9	32	-2.94	-5.40	0.00	0.00	0.00	0.00	10.09	2.37
BG1_10	36	-2.85	-5.33	0.00	0.00	0.00	0.00	8.45	2.37
BG1_11	40	-3.32	-7.83	0.00	0.00	0.00	0.00	7.65	2.40
BG1_12	44	-3.78	-12.77	0.00	0.00	0.00	0.59	8.36	2.47
BG1_13	48	-4.01	-13.03	0.00	0.00	0.00	0.60	7.96	2.40
BG1_15	56	-3.88	-12.95	0.00	0.00	0.00	0.31	7.12	2.28
BG1_16	60	-5.29	-12.47	0.00	0.00	0.00	0.00	6.49	2.31
BG1_17	64	-6.36	-8.52	0.00	0.00	0.00	0.85	5.92	2.48
BG1_19	72	-5.84	-6.81	0.00	0.00	0.00	0.84	8.80	2.63
BG1_21	80	-5.85	-8.14	0.00	0.00	0.00	0.70	8.86	2.37

BG1_22	84	-4.86	-6.34	0.00	0.00	0.00	0.81	7.69	2.27
BG1_23	88	-5.63	-7.00	0.00	0.00	0.00	0.45	8.19	2.23
BG1_24	92	-5.55	-6.81	0.00	0.00	0.00	0.79	8.78	2.24
BG1_25	96	-5.04	-6.27	0.00	0.00	0.00	0.81	12.87	2.30
BG1_26	100	-4.97	-6.32	0.00	0.00	0.00	0.75	8.93	2.25
BG1_27	104	-4.79	-5.87	0.00	0.00	0.00	0.42	9.43	2.25
BG1_28	108	-4.13	-3.59	0.00	0.00	0.00	0.95	10.57	2.19
BG1_29	112	-3.87	-2.70	0.00	0.00	0.00	0.47	11.94	1.85
BG1_30	116	-3.75	-2.40	0.00	0.00	0.00	0.00	13.53	2.29
BG1_31	120	-3.61	-2.37	0.00	0.00	0.00	0.57	12.78	1.98
BG1_32	124	-3.26	-1.60	0.00	0.00	0.00	0.47	12.70	1.87
BG1_33	128	-3.13	-1.52	0.00	0.00	0.00	0.56	11.74	1.76
BG1_34	132	-3.14	-1.46	0.00	0.00	0.00	1.03	11.20	1.75
BG1_35	136	-2.85	-1.33	0.00	0.00	0.00	1.19	12.29	1.77
BG1_36	140	-4.68	-8.96	0.00	0.00	0.00	0.48	13.04	1.73
BG1_37	144	-2.48	-1.60	0.00	0.00	0.00	0.74	12.32	1.72
BG1_38	148	-2.36	-1.71	0.00	0.00	0.00	0.37	12.21	1.91
BG1_39	152	-2.33	-1.64	0.00	0.00	0.00	0.51	11.84	1.86
BG1_40	156	-2.96	-2.13	0.00	0.00	0.00	0.54	12.16	1.77
BG1_41	160	-2.71	-2.26	0.00	0.00	0.00	1.09	10.53	1.88
BG1_42	164	-2.93	-3.05	0.00	0.00	0.00	0.55	10.41	1.92
BG1_43	168	-3.04	-3.23	0.00	0.00	0.00	1.27	10.25	2.11
BG1_44	172	-3.09	-3.93	0.00	0.00	0.00	0.60	11.34	2.11
BG1_45	176	-4.27	-6.53	0.00	0.00	0.00	1.05	11.46	2.00
BG1_46	180	-5.53	-10.92	0.00	0.00	0.00	1.10	9.54	1.90
BG1_47	184	-6.05	-10.34	0.00	0.00	0.00	0.82	7.51	1.89
BG1_49	192	-4.90	-9.81	0.00	0.00	0.00	0.80	6.45	2.36
BG1_50	196	-5.19	-9.72	0.00	0.00	0.00	0.00	8.02	2.55

BG1_51	200	-5.11	-9.14	0.00	0.00	0.00	0.67	6.20	2.52
BG1_52	204	-6.22	-10.26	0.00	0.00	0.00	0.32	8.59	2.61
BG1_53	208	-5.36	-10.10	0.00	0.00	0.00	0.77	8.51	2.51
BG1_54	212	-5.16	-9.61	0.00	0.00	0.00	0.89	9.43	2.33
BG1_55	216	-6.57	-10.51	0.00	0.00	0.00	0.86	8.97	2.56

殼體編號：BG3 岩芯深度：11.0-11.5 (cm) 定年年代：240 (cal yr BP)

Sample No.	距殼頂距離 (mm)	$\delta^{18}\text{O}_{\text{PDB}}$ (‰)	$\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ (‰)	BG3_23	88	-1.97	-2.28
BG3_1	0	-3.02	-2.98	BG3_24	92	-2.41	-3.56
BG3_2	4	-4.52	-5.44	BG3_25	96	-2.71	-4.09
BG3_3	8	-5.34	-6.07	BG3_26	100	-3.99	-7.68
BG3_5	16	-5.08	-8.71	BG3_27	104	-4.19	-8.40
BG3_6	20	-5.04	-11.44	BG3_28	108	-4.24	-8.31
BG3_7	24	-4.82	-10.14	BG3_29	112	-4.45	-8.06
BG3_8	28	-4.07	-8.19	BG3_30	116	-4.17	-7.52
BG3_9	32	-3.37	-5.63	BG3_31	120	-5.84	-9.49
BG3_10	36	-4.19	-8.94	BG3_32	124	-6.14	-9.19
BG3_11	40	-4.23	-9.31	BG3_33	128	-5.69	-8.08
BG3_12	44	-4.76	-10.25	BG3_34	132	-4.74	-4.93
BG3_13	48	-5.92	-11.65	BG3_35	136	-4.02	-3.88
BG3_14	52	-5.96	-11.22	BG3_36	140	-2.75	-2.92
BG3_15	56	-5.94	-9.86				
BG3_16	60	-5.50	-8.07				
BG3_17	64	-4.29	-4.56				
BG3_18	68	-3.31	-2.73				
BG3_19	72	-2.48	-2.06				
BG3_20	76	-2.23	-2.01				

BG3_21	80	-2.05	-1.92
BG3_22	84	-1.81	-1.98

殼體編號：BG10 岩芯深度：13.5-14.5 (cm) 定年年代：300 (cal yr BP)

Sample No.	距殼頂 距離(mm)	$\delta^{18}\text{O}_{\text{PDB}}$ (‰)	$\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ (‰)	Al/Ca (mmol/mol)	Fe/Ca (mmol/mol)	Mn/Ca (mmol/mol)	Mg/Ca (mmol/mol)	Na/Ca (mmol/mol)	Sr/Ca (mmol/mol)
BG10_1	0	-5.30	-10.37	0.00	0.65	0.64	2.77	5.97	2.59
BG10_2	4	-5.49	-10.30	0.00	0.00	0.00	2.97	6.17	2.38
BG10_3	8	-4.98	-10.17	0.00	0.00	0.00	2.02	7.15	2.22
BG10_4	12	-3.09	-4.07	0.00	0.00	0.00	0.00	7.54	2.40
BG10_5	16	-4.16	-6.51	0.31	0.00	0.00	2.08	5.20	2.46
BG10_6	20	-5.25	-11.04	0.00	0.00	0.00	0.00	5.49	2.42
BG10_7	24	-3.41	-2.84	0.00	0.00	0.00	0.00	9.44	2.31
BG10_8	28	-3.38	-2.96	0.00	0.00	0.00	1.98	10.11	2.15
BG10_9	32	-3.22	-3.02	0.00	0.33	0.00	2.26	9.48	2.31
BG10_10	36	-3.46	-2.73	0.00	0.00	0.00	0.00	9.67	2.35
BG10_11	40	-3.62	-2.51	0.00	0.00	0.00	1.57	10.65	2.37
BG10_12	44	-3.64	-1.87	0.00	0.00	0.00	1.96	12.18	3.18
BG10_13	48	-3.63	-2.02	0.00	0.00	0.00	0.00	11.64	2.45
BG10_14	52	-3.89	-2.84	0.00	0.00	0.00	0.57	12.60	2.36
BG10_15	56	-3.99	-2.59	0.00	0.00	0.00	0.38	12.80	2.39
BG10_16	60	-3.63	-1.95	0.00	0.00	0.00	2.25	11.52	2.61
BG10_17	64	-3.58	-1.95	0.00	0.00	0.00	3.02	11.25	2.64
BG10_18	68	-3.54	-2.29	0.00	0.00	0.00	0.53	10.86	2.49
BG10_19	72	-3.87	-3.11	0.00	0.00	0.00	2.87	10.78	2.53
BG10_20	76	-3.91	-3.35	0.40	0.36	0.00	1.98	12.22	2.47
BG10_21	80	-3.95	-3.64	0.00	0.00	0.00	1.81	10.49	2.54
BG10_22	84	-4.00	-3.53	0.00	0.00	0.00	0.92	10.85	2.64

BG10_23	88	-4.07	-4.91	0.00	0.00	0.00	1.08	10.22	2.47
BG10_24	92	-4.02	-5.75	0.00	0.00	0.00	0.95	9.93	2.37
BG10_25	96	-4.35	-7.51	0.00	0.00	0.00	3.15	9.20	2.36
BG10_26	100	-3.71	-5.10	0.00	0.00	0.00	1.34	8.47	2.33
BG10_27	104	-3.28	-5.32	0.00	0.00	0.00	1.75	8.75	2.03
BG10_28	108	-3.15	-4.21	0.00	0.00	0.00	1.86	8.39	2.09
BG10_29	112	-3.39	-3.90	0.00	0.00	0.00	2.17	9.30	2.03
BG10_30	116	-3.58	-3.72	0.00	0.00	0.00	1.18	8.75	2.15
BG10_31	120	-3.45	-3.34	0.55	0.00	0.00	2.53	8.96	2.21
BG10_32	124	-3.38	-3.11	0.00	0.00	0.00	1.12	10.48	2.22
BG10_33	128	-3.17	-3.35	0.00	0.00	0.00	1.56	9.64	2.19
BG10_34	132	-2.87	-3.87	0.54	0.00	0.00	1.69	10.68	2.45
BG10_35	136	-2.96	-2.96	0.00	0.00	0.00	0.84	10.39	2.39
BG10_36	140	-3.29	-4.14	0.00	0.00	0.00	0.39	10.82	2.49
BG10_37	144	-2.87	-3.12	0.00	0.00	0.00	0.00	12.80	2.49
BG10_38	148	-3.21	-2.85	0.00	0.00	0.00	1.12	11.64	2.45
BG10_39	152	-3.06	-2.41	0.00	0.00	0.00	0.48	12.68	2.43
BG10_41	160	-3.62	-4.29	0.00	0.00	0.00	0.33	9.63	2.48
BG10_42	164	-5.47	-9.97	0.00	0.00	0.00	0.00	8.28	2.40
BG10_43	168	-4.01	-4.41	0.00	0.00	0.00	0.96	11.13	2.35
BG10_44	172	-3.17	-2.44	0.00	0.00	0.00	0.37	10.94	2.14
BG10_45	176	-4.42	-6.31	0.00	0.00	0.00	0.52	11.07	2.15
BG10_46	180	-6.17	-9.41	0.00	0.00	0.00	0.99	11.30	2.17
BG10_47	184	-3.46	-1.90	0.00	0.00	0.00	1.04	15.91	1.87
BG10_48	188	-3.49	-2.28	0.00	0.00	0.00	0.77	17.25	2.20
BG10_49	192	-4.52	-4.61	0.00	0.00	0.00	0.60	18.94	2.36
BG10_50	196	-3.39	-1.34	0.00	0.00	0.00	0.00	18.96	2.24
BG10_51	200	-3.25	-1.95	0.00	0.74	0.00	0.00	20.05	2.16

BG10_52	204	-2.94	-1.02	0.00	0.00	0.00	1.19	18.63	2.21
BG10_53	208	-3.34	-1.48	0.00	0.00	0.00	0.79	16.02	2.18
BG10_54	212	-3.38	-1.55	0.00	0.00	0.00	0.81	11.47	2.30
BG10_55	216	-3.66	-1.64	0.00	0.00	0.00	0.88	18.35	2.32
BG10_56	220	-3.66	-2.27	0.00	0.00	0.00	1.19	16.70	2.38

殼體編號：BG11 岩芯深度：15.5-17.5 (cm) 定年年代：370 (cal yr BP)

Sample No.	距殼頂 距離(mm)	$\delta^{18}\text{O}_{\text{PDB}}$ (‰)	$\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ (‰)	Al/Ca (mmol/mol)	Fe/Ca (mmol/mol)	Mn/Ca (mmol/mol)	Mg/Ca (mmol/mol)	Na/Ca (mmol/mol)	Sr/Ca (mmol/mol)
BG11_1	0	-3.92	-3.94	0.00	0.54	0.00	0.62	10.40	2.57
BG11_2	4	-3.61	-3.58	0.71	0.31	0.00	1.09	11.61	2.61
BG11_3	8	-3.58	-3.67	0.59	0.00	0.00	1.25	12.83	2.67
BG11_4	12	-3.35	-4.06	0.00	0.00	0.00	1.87	10.90	2.88
BG11_5	16	-3.01	-4.17	0.78	0.34	0.00	1.31	12.57	2.74
BG11_6	20	-3.05	-4.36	0.00	0.00	0.00	1.48	11.19	2.81
BG11_7	24	-2.67	-4.34	0.41	0.00	0.00	1.17	14.11	2.75
BG11_8	28	-2.56	-4.77	0.00	0.00	0.00	0.53	11.85	2.66
BG11_9	32	-2.67	-4.91	0.00	0.00	0.00	2.05	10.06	2.90
BG11_10	36	-2.49	-5.14	0.00	0.00	0.00	0.79	10.46	2.56
BG11_11	40	-2.21	-5.20	0.00	0.00	0.00	0.94	9.78	2.45
BG11_12	44	-2.03	-5.69	0.61	0.00	0.00	2.74	10.32	2.46
BG11_13	48	-2.29	-5.79	0.00	0.00	0.00	0.72	10.49	2.81
BG11_14	52	-2.49	-7.90	0.00	0.00	0.00	1.04	9.55	2.88
BG11_15	56	-2.64	-8.82	0.00	0.00	0.00	0.92	7.92	2.73
BG11_16	60	-4.37	-10.84	0.00	0.00	0.00	1.13	10.87	2.55
BG11_17	64	-2.89	-6.33	0.33	0.39	0.00	2.28	9.91	2.83
BG11_18	68	-2.58	-5.52	0.66	0.00	0.00	1.69	11.62	2.96
BG11_19	72	-3.20	-6.03	0.44	0.00	0.00	1.42	9.33	2.46

BG11_20	76	-4.47	-9.21	0.00	0.00	0.00	0.74	7.56	2.40
BG11_21	80	-5.44	-11.32	0.00	0.55	0.00	0.60	8.91	2.42
BG11_22	84	-6.36	-9.97	0.00	0.00	0.00	1.12	9.46	2.29
BG11_23	88	-6.17	-10.07	0.00	0.00	0.00	1.37	7.01	2.38
BG11_24	92	-5.77	-8.66	0.00	0.00	0.00	1.10	8.44	2.38
BG11_25	96	-4.42	-4.74	0.00	0.00	0.00	1.47	11.56	2.59
BG11_26	100	-3.99	-3.47	0.00	0.00	0.00	1.78	11.77	2.36
BG11_27	104	-3.82	-3.05	0.00	0.00	0.00	1.97	11.71	2.17
BG11_28	108	-3.64	-2.50	2.19	0.78	0.00	3.26	12.84	2.23
BG11_29	112	-3.20	-2.06	0.38	0.00	0.00	2.43	15.60	2.30
BG11_30	116	-2.94	-2.22	0.32	2.57	0.00	2.20	15.72	2.43
BG11_31	120	-2.98	-1.97	0.00	1.38	0.00	1.21	13.70	2.31
BG11_32	124	-2.91	-2.16	0.38	0.43	0.00	2.09	14.01	2.28
BG11_33	128	-2.66	-2.28	0.00	0.64	0.00	1.93	13.76	2.26
BG11_34	132	-4.03	-8.14	1.39	1.03	0.00	1.16	7.91	2.53
BG11_35	136	-3.80	-7.86	0.00	0.00	0.00	2.70	8.32	2.59
BG11_36	140	-5.03	-10.76	0.00	0.00	0.00	0.96	11.14	2.56
BG11_37	144	-2.32	-1.93	0.00	0.00	0.00	1.72	18.06	2.42
BG11_38	148	-2.64	-1.65	0.00	0.00	0.00	2.22	15.50	2.21
BG11_39	152	-2.66	-1.69	0.00	0.00	0.00	0.95	12.31	2.13
BG11_40	156	-2.62	-2.05	0.00	0.00	0.00	1.14	12.66	2.19
BG11_41	160	-2.89	-2.28	0.42	0.00	0.00	1.67	13.89	2.10
BG11_42	164	-3.09	-2.02	0.00	0.00	0.00	1.53	13.49	2.26
BG11_43	168	-3.27	-3.14	0.00	0.00	0.00	1.17	13.00	2.73
BG11_44	172	-4.83	-7.43	0.00	0.00	0.00	1.97	16.45	2.81

殼體編號：BG14 岩芯深度：21.5-22.0 (cm) 定年年代：470 (cal yr BP)

Sample No.	距殼頂 距離(mm)	$\delta^{18}\text{O}_{\text{PDB}}$ (‰)	$\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ (‰)	Al/Ca (mmol/mol)	Fe/Ca (mmol/mol)	Mn/Ca (mmol/mol)	Mg/Ca (mmol/mol)	Na/Ca (mmol/mol)	Sr/Ca (mmol/mol)
BG14_1	0	-3.71	-5.75	1.79	1.86	1.38	2.36	16.04	2.39
BG14_2	4	-3.88	-6.30	0.62	0.30	0.00	0.00	9.94	2.34
BG14_3	8	-4.48	-8.59	0.00	0.00	0.00	0.00	6.53	2.28
BG14_4	12	-4.24	-7.70	0.00	0.00	0.00	1.68	7.64	2.13
BG14_5	16	-3.88	-5.91	0.43	0.00	0.00	1.28	8.58	2.04
BG14_6	20	-4.48	-6.78	0.00	0.00	0.00	0.90	7.62	2.05
BG14_7	24	-3.96	-3.75	0.00	0.00	0.00	2.27	9.16	1.97
BG14_8	28	-3.50	-3.93	0.00	0.00	0.00	1.19	8.93	1.76
BG14_9	32	-2.60	-3.36	0.00	0.00	0.00	0.59	10.41	2.03
BG14_10	36	-2.32	-3.38	0.46	0.53	0.00	1.07	10.87	2.04
BG14_11	40	-2.29	-3.14	1.59	0.36	0.00	3.78	12.32	2.27
BG14_12	44	-2.28	-4.11	0.60	0.00	0.00	1.16	11.40	2.47
BG14_13	48	-2.20	-3.42	1.56	2.34	0.00	1.24	14.05	2.40
BG14_14	52	-2.43	-3.94	0.00	0.00	0.00	3.24	10.59	2.34
BG14_15	56	-3.68	-6.93	0.00	0.00	0.00	2.62	10.27	2.49
BG14_16	60	-2.98	-5.59	0.47	0.48	0.00	1.04	14.40	2.48
BG14_17	64	-4.06	-7.42	0.00	0.00	0.00	2.33	9.31	2.53
BG14_18	68	-4.40	-8.06	0.00	0.00	0.00	2.66	7.13	2.52
BG14_19	72	-3.86	-6.99	0.00	0.00	0.00	1.28	8.02	2.27
BG14_20	76	-4.07	-7.63	0.38	0.79	0.00	2.05	12.06	2.42
BG14_21	80	-3.46	-5.97	0.00	0.00	0.00	1.84	11.93	2.65

殼體編號：BG15 岩芯深度：23.5-24.0 (cm) 定年年代：520 (cal yr BP)

Sample No.	距殼頂 距離(mm)	$\delta^{18}\text{O}_{\text{PDB}}$ (‰)	$\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ (‰)	Al/Ca (mmol/mol)	Fe/Ca (mmol/mol)	Mn/Ca (mmol/mol)	Mg/Ca (mmol/mol)	Na/Ca (mmol/mol)	Sr/Ca (mmol/mol)
BG15_1	0	-5.33	-12.06	0.00	0.00	0.00	0.00	5.74	1.85
BG15_2	4	-6.94	-12.23	1.41	0.00	0.00	0.00	7.85	1.87
BG15_3	8	-5.71	-7.63	0.00	0.00	0.00	0.00	16.66	1.91
BG15_4	12	-5.04	-5.88	0.00	0.00	0.00	0.00	10.81	2.09
BG15_9	32	-4.25	-7.15	0.00	0.00	0.00	0.00	8.72	2.62
BG15_10	36	-4.60	-8.88	0.00	0.00	0.00	0.00	7.37	2.38
BG15_11	40	-5.40	-10.95	0.00	0.00	0.00	0.00	7.62	2.26
BG15_12	44	-4.92	-6.48	0.00	0.00	0.00	0.54	13.20	2.03
BG15_13	48	-5.02	-5.49	0.00	0.00	0.00	0.00	18.19	1.94
BG15_14	52	-4.25	-4.97	0.00	0.00	0.00	0.00	9.68	1.82
BG15_15	56	-4.76	-6.25	0.00	0.00	0.00	0.00	8.89	1.88
BG15_16	60	-5.21	-7.80	0.00	0.00	0.00	0.00	8.49	1.98
BG15_17	64	-6.82	-9.59	0.00	0.00	0.00	0.97	15.05	2.00
BG15_18	68	-4.47	-5.27	0.00	0.00	0.00	0.00	12.97	2.20
BG15_19	72	-4.90	-6.42	0.00	0.00	0.00	0.00	45.20	2.37
BG15_20	76	-4.19	-5.49	0.68	0.33	0.00	2.90	12.81	2.13
BG15_21	80	-4.12	-6.13	0.00	0.00	0.00	0.93	12.29	2.23
BG15_22	84	-4.31	-8.01	0.00	0.00	0.00	1.19	11.49	1.97
BG15_23	88	-4.37	-7.25	0.00	0.00	0.00	0.00	11.23	2.06
BG15_24	92	-4.86	-10.30	0.00	0.00	0.00	1.07	13.92	2.30
BG15_25	96	-5.00	-10.88	0.00	0.00	0.00	0.52	12.91	2.21
BG15_26	100	-4.64	-11.62	0.00	0.00	0.00	0.00	7.57	1.97
BG15_27	104	-6.23	-11.09	0.00	0.00	0.00	0.00	12.76	2.06

BG15_28	108	-3.61	-3.85	0.00	0.00	0.00	0.80	11.10	2.41
---------	-----	-------	-------	------	------	------	------	-------	------

殼體編號：BG20，岩芯深度：37.0-37.5 (cm)，定年年代：800 (cal yr BP)

Sample No.	距殼頂 距離(mm)	$\delta^{18}\text{O}_{\text{PDB}}$ (‰)	$\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ (‰)	Al/Ca (mmol/mol)	Fe/Ca (mmol/mol)	Mn/Ca (mmol/mol)	Mg/Ca (mmol/mol)	Na/Ca (mmol/mol)	Sr/Ca (mmol/mol)
BG20_1	0	-5.94	-11.28	0.00	0.00	0.00	0.00	4.57	2.65
BG20_2	4	-5.20	-12.80	0.00	0.00	0.00	0.00	4.67	2.15
BG20_3	8	-4.80	-5.51	0.00	0.00	0.00	0.00	1.18	2.31
BG20_4	12	-4.17	-5.80	0.00	0.00	0.00	0.00	6.68	2.56
BG20_5	16	-3.70	-5.33	0.00	0.00	0.00	0.00	5.42	2.31
BG20_6	20	-3.65	-5.78	0.00	0.00	0.00	0.00	6.32	2.52
BG20_7	24	-3.18	-5.63	0.00	0.00	0.00	0.00	10.84	2.45
BG20_12	44	-6.62	-9.97	0.00	0.00	0.00	0.00	1.37	1.62
BG20_13	48	-5.05	-6.98	0.00	2.03	0.00	0.00	6.71	2.33
BG20_14	52	-4.18	-6.17	0.00	0.00	0.00	0.00	6.55	2.52
BG20_15	56	-4.13	-5.87	0.00	0.00	0.00	0.00	7.62	2.73
BG20_16	60	-4.18	-6.68	0.00	0.00	0.00	0.00	9.12	2.44
BG20_17	64	-4.49	-5.89	0.00	0.00	0.00	0.00	9.63	2.45
BG20_18	68	-4.08	-5.95	0.00	0.00	0.00	0.00	8.17	2.46
BG20_19	72	-4.57	-7.64	0.00	0.00	0.00	0.00	6.65	2.47
BG20_20	76	-5.72	-11.03	0.00	0.00	0.00	0.00	9.27	2.60
BG20_24	92	-5.81	-6.33	0.00	0.00	0.00	1.17	31.01	2.43
BG20_25	96	-4.84	-5.63	0.00	0.00	0.00	0.00	11.07	2.46
BG20_26	100	-4.94	-6.82	0.00	0.00	0.00	0.00	14.67	2.53
BG20_27	104	-4.96	-6.55	0.00	0.00	0.00	0.00	18.82	2.75
BG20_28	108	-5.63	-10.52	0.00	0.00	0.00	0.00	6.19	1.82
BG20_29	112	-5.52	-11.80	0.00	0.00	0.00	0.00	6.82	1.79
BG20_30	116	-3.87	-4.48	0.00	0.00	0.00	0.00	4.34	2.25

BG20_31	120	-4.02	-4.71	0.00	0.00	0.00	0.00	9.74	2.14
---------	-----	-------	-------	------	------	------	------	------	------

殼體編號：BG22，岩芯深度：197.5-198.0 (cm)，定年年代：2090 (cal yr BP)

稜柱層(外層)殼體數值

Sample No.	距殼頂 距離(mm)	$\delta^{18}\text{O}_{\text{PDB}}$ (‰)	$\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ (‰)	Al/Ca (mmol/mol)	Fe/Ca (mmol/mol)	Mn/Ca (mmol/mol)	Mg/Ca (mmol/mol)	Na/Ca (mmol/mol)	Sr/Ca (mmol/mol)
BG22_1_a	0	-2.80	-3.23	0.00	3.82	0.00	2.69	11.88	2.39
BG22_2_a	4	-2.50	-2.32	0.00	0.00	0.00	2.34	10.78	2.23
BG22_3_a	8	-2.52	-2.36	0.00	1.88	0.00	1.80	10.83	2.20
BG22_4_a	12	-2.64	-2.46	0.00	2.99	0.00	1.97	11.98	2.18
BG22_5_a	16	—	—	0.00	0.00	0.00	2.18	12.77	2.19
BG22_6_a	20	—	—	0.00	0.35	0.00	1.54	11.75	2.36
BG22_7_a	24	-3.09	-3.16	0.00	0.00	0.00	0.88	10.16	2.49
BG22_8_a	28	-3.73	-3.67	0.00	0.00	0.00	1.10	10.03	2.37
BG22_9_a	32	-3.62	-3.16	0.00	0.00	0.00	1.90	11.09	2.22
BG22_10_a	36	-3.90	-2.33	0.00	1.67	0.00	0.95	12.01	2.09
BG22_11_a	40	-3.14	-1.41	0.00	0.41	0.00	1.16	11.90	2.12
BG22_12_a	44	-3.55	-1.99	0.00	0.61	0.00	2.24	11.44	2.30
BG22_13_a	48	-3.37	-2.06	0.00	0.00	0.00	1.80	12.50	2.08
BG22_14_a	52	-3.13	-1.77	0.00	0.00	0.00	2.73	15.62	2.09
BG22_15_a	56	-3.12	-1.66	0.00	0.00	0.00	1.55	12.79	2.23
BG22_16_a	60	-2.55	-1.44	0.00	0.00	0.00	1.34	12.04	2.25
BG22_17_a	64	-2.81	-1.68	0.00	3.84	0.00	1.30	13.30	2.29
BG22_18_a	68	-3.10	-2.31	0.00	0.00	0.00	1.94	11.94	2.22
BG22_19_a	72	-3.37	-2.88	0.00	0.00	0.00	1.78	12.54	2.23
BG22_20_a	76	-3.24	-6.89	0.00	0.00	0.00	1.23	11.19	2.39
BG22_21_a	80	-4.21	-3.79	0.00	0.00	0.00	1.63	8.70	2.44

BG22_22_a	84	-4.04	-4.42	0.00	0.00	0.00	1.49	10.64	1.89
BG22_23_a	88	-3.88	-4.49	0.00	0.00	0.00	1.85	11.40	2.00
BG22_24_a	92	-3.01	-1.93	0.00	0.00	0.00	1.74	14.82	1.86
BG22_25_a	96	-4.31	-5.01	0.82	0.31	0.00	1.41	10.57	2.09
BG22_26_a	100	-4.40	-2.98	0.00	0.00	0.00	1.55	10.33	2.05
BG22_27_a	104	-3.75	-1.48	0.00	0.00	0.00	1.67	12.30	2.05
BG22_28_a	108	-3.79	-1.98	0.00	0.00	0.00	1.58	12.82	2.23
BG22_29_a	112	-3.35	-1.75	0.00	0.00	0.00	1.29	13.51	2.20
BG22_30_a	116	-2.86	-2.16	0.00	0.00	0.00	1.28	14.60	2.18
BG22_31_a	120	-2.95	-2.02	0.00	0.36	0.00	1.81	13.44	2.34
BG22_32_a	124	-2.63	-2.41	0.00	0.00	0.00	1.99	12.61	2.27
BG22_33_a	128	-2.85	-2.60	0.00	0.00	0.00	1.81	14.06	2.16
BG22_34_a	132	-3.22	-2.46	0.00	0.00	0.00	1.88	14.93	2.26
BG22_35_a	136	-3.59	-3.07	3.88	0.00	0.00	1.83	14.51	2.32
BG22_36_a	140	-3.08	-2.88	0.00	0.00	0.00	1.86	13.38	1.98
BG22_37_a	144	-3.21	-2.92	0.00	0.00	0.00	1.67	14.69	2.15
BG22_38_a	148	-2.61	-2.84	0.00	0.00	0.00	1.55	14.59	2.37
BG22_39_a	152	-1.68	-2.99	0.00	0.73	0.00	1.53	13.80	2.51
BG22_40_a	156	-1.70	-2.82	0.00	0.00	0.00	1.73	14.21	2.36
BG22_41_a	160	-3.04	-3.12	0.35	0.42	0.00	3.40	12.67	2.44
BG22_42_a	164	-3.19	-3.49	0.00	0.67	0.00	1.74	11.05	2.40

殼體編號：BG22，岩芯深度：197.5-198.0 (cm)，定年年代：2090 (cal yr BP)

珍珠層(內層)殼體數值

Sample No.	距殼頂 距離(mm)	$\delta^{18}\text{O}_{\text{PDB}}$ (‰)	$\delta^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$ (‰)	Al/Ca (mmol/mol)	Fe/Ca (mmol/mol)	Mn/Ca (mmol/mol)	Mg/Ca (mmol/mol)	Na/Ca (mmol/mol)	Sr/Ca (mmol/mol)
BG22_1_b	0	-2.75	-2.65	2.96	1.00	0.00	2.78	13.11	2.18
BG22_2_b	4	-2.64	-2.50	0.52	1.26	0.00	2.71	12.62	2.24

BG22_3_b	8	-2.87	-2.51	0.00	0.49	0.00	2.44	11.19	2.09
BG22_4_b	12	-2.74	-2.62	0.00	0.64	0.00	1.97	12.55	2.10
BG22_5_b	16	-3.13	-2.13	0.00	0.00	0.00	2.50	12.12	2.21
BG22_6_b	20	-3.46	-4.07	0.00	0.55	0.00	1.80	10.66	2.27
BG22_7_b	24	-2.95	-1.88	0.00	0.00	0.00	2.06	10.54	2.14
BG22_8_b	28	-3.98	-3.32	0.00	0.00	0.00	1.61	11.16	2.15
BG22_9_b	32	-4.37	-3.46	0.00	0.00	0.00	2.94	10.81	2.08
BG22_10_b	36	-3.20	-1.78	0.00	0.00	0.00	2.78	12.55	2.22
BG22_11_b	40	-3.19	-1.61	0.00	0.00	0.00	2.80	12.96	2.10
BG22_12_b	44	-3.28	-1.93	0.00	0.00	0.00	2.46	12.27	2.11
BG22_13_b	48	-3.17	-1.82	0.00	0.00	0.00	1.59	12.59	2.06
BG22_14_b	52	-3.06	-1.54	0.00	0.00	0.00	1.57	13.78	2.16
BG22_15_b	56	-2.64	-1.46	0.00	0.00	0.00	1.63	14.00	2.25
BG22_16_b	60	-2.64	-1.32	0.00	0.00	0.00	2.13	11.82	2.12
BG22_17_b	64	-2.82	-1.80	0.00	0.00	0.00	1.49	12.08	2.04
BG22_18_b	68	-3.46	-2.76	0.00	0.00	0.00	1.74	12.69	2.06
BG22_19_b	72	-4.20	-3.71	0.00	0.33	0.00	3.33	14.11	2.15
BG22_20_b	76	-4.59	-5.28	0.00	0.00	0.00	2.95	9.30	2.15
BG22_21_b	80	-4.75	-5.62	0.00	0.00	0.00	2.44	9.43	2.07
BG22_22_b	84	-3.68	-3.81	0.00	0.00	0.00	4.28	16.33	1.98
BG22_23_b	88	-3.01	-2.12	0.00	0.00	0.00	1.52	12.35	1.75
BG22_24_b	92	-3.22	-1.77	0.00	0.00	0.00	7.47	18.70	1.89
BG22_25_b	96	-4.66	-3.87	0.00	0.00	0.00	1.99	9.38	2.07
BG22_26_b	100	-3.81	-1.74	0.00	0.00	0.00	2.11	11.62	2.06
BG22_27_b	104	-3.66	-1.62	0.00	0.00	0.00	2.27	12.38	2.03
BG22_28_b	108	-3.56	-1.89	0.00	0.00	0.00	3.01	11.11	2.09
BG22_29_b	112	-3.11	-2.00	0.00	0.46	0.00	3.19	12.71	2.14
BG22_30_b	116	-3.10	-2.16	0.00	0.00	0.00	4.27	11.50	2.25

BG22_31_b	120	-2.92	-1.86	0.00	2.11	0.00	4.66	12.50	2.22
BG22_32_b	124	-3.10	-2.30	0.00	0.00	0.00	4.39	13.93	2.19
BG22_33_b	128	-3.21	-2.24	0.00	0.00	0.00	2.58	12.32	2.11
BG22_34_b	132	-3.51	-2.42	0.00	0.00	0.00	3.30	12.12	2.19
BG22_35_b	136	-3.78	-3.45	0.00	0.00	0.00	3.96	9.59	1.98
BG22_36_b	140	-3.28	-2.77	0.00	0.00	0.00	2.71	12.81	2.15
BG22_37_b	144	-2.83	-2.59	0.00	0.32	0.00	2.49	13.18	2.30
BG22_38_b	148	-1.76	-2.40	0.00	0.00	0.00	3.54	12.89	2.39
BG22_39_b	152	-1.83	-2.44	—	—	—	—	—	—
BG22_40_b	156	-2.89	-2.28	—	—	—	—	—	—
BG22_41_b	160	-2.86	-1.93	—	—	—	—	—	—
BG22_42_b	164	-3.21	-3.26	—	—	—	—	—	—

殼體編號：BG28，岩芯深度：241.0-242.5 (cm)，定年年代：2330 (cal yr BP)

Sample No.	距殼頂 距離(mm)	$\delta^{18}\text{O}$ PDB(‰)	$\delta^{13}\text{C}$ PDB(‰)	Al/Ca (mmol/mol)	Fe/Ca (mmol/mol)	Mn/Ca (mmol/mol)	Mg/Ca (mmol/mol)	Na/Ca (mmol/mol)	Sr/Ca (mmol/mol)
BG28_1	0	-3.69	-5.10	0.00	0.00	0.00	0.31	8.00	2.70
BG28_2	4	-3.51	-4.70	0.00	0.00	0.00	0.79	7.97	2.53
BG28_3	8	-3.81	-5.04	0.00	0.00	0.00	0.00	8.10	2.51
BG28_4	12	-5.09	-6.40	0.00	0.00	0.00	0.00	6.02	2.31
BG28_5	16	-4.76	-7.77	0.00	0.00	0.00	0.52	8.91	2.91
BG28_6	20	-5.96	-9.72	0.00	0.00	0.00	0.00	9.61	2.74
BG28_7	24	-5.55	-8.93	0.00	0.00	0.00	0.80	6.71	2.37
BG28_8	28	-5.40	-7.61	0.00	0.00	0.00	0.77	7.50	2.53
BG28_9	32	-5.03	-8.59	0.00	0.00	0.00	0.00	5.68	2.59
BG28_10	36	-5.12	-9.96	0.00	0.00	0.00	0.00	6.52	2.51
BG28_11	40	-5.43	-11.18	0.00	0.00	0.00	0.60	6.10	2.19

BG28_12	44	-5.23	-10.42	0.00	0.00	0.00	0.31	7.15	2.17
BG28_13	48	-4.92	-9.29	0.00	0.00	0.00	0.00	7.42	2.14
BG28_14	52	-4.96	-8.79	0.00	0.00	0.00	0.43	7.74	2.19
BG28_15	56	-4.84	-9.16	0.00	0.00	0.00	0.00	7.94	2.53
BG28_16	60	-5.51	-10.17	0.00	0.00	0.00	0.66	5.16	2.32
BG28_17	64	-4.58	-9.03	0.00	0.00	0.00	0.43	6.57	2.18
BG28_18	68	-3.99	-4.77	0.00	0.00	0.00	1.07	7.19	2.17
BG28_19	72	-5.30	-10.74	0.00	0.00	0.00	0.31	8.71	2.37
BG28_20	76	-5.40	-11.70	0.00	0.00	0.00	0.40	4.79	2.23
BG28_21	80	-5.10	-11.10	0.00	0.00	0.00	0.00	4.79	2.32
BG28_22	84	-5.30	-11.59	0.00	0.00	0.00	0.00	6.48	2.37
BG28_23	88	-6.18	-11.34	0.00	0.00	0.00	0.00	5.27	2.21
BG28_24	92	-6.76	-10.42	0.00	0.00	0.00	0.00	5.45	2.38
BG28_25	96	-5.36	-5.36	0.00	0.00	0.00	0.00	3.94	2.31
BG28_26	100	-4.10	-3.48	0.00	0.00	0.00	0.00	7.02	2.35
BG28_27	104	-3.85	-2.90	0.00	0.00	0.00	0.00	7.69	1.90
BG28_28	108	-3.80	-2.70	0.00	0.00	0.00	0.00	8.80	2.24
BG28_29	112	-3.71	-2.69	0.00	0.00	0.00	0.00	10.26	2.27
BG28_30	116	-3.69	-3.20	0.00	0.00	0.00	0.00	12.28	2.30
BG28_31	120	-3.67	-3.27	0.00	0.00	0.00	0.00	10.91	1.84
BG28_32	124	-3.76	-3.21	0.00	0.00	0.00	0.00	12.75	2.33
BG28_33	128	-3.80	-3.47	0.00	0.00	0.00	0.00	12.69	2.34
BG28_34	132	-3.84	-3.34	0.00	0.00	0.00	0.00	10.60	2.42
BG28_35	136	-3.74	-3.24	0.00	0.00	0.00	0.00	10.74	2.42
BG28_36	140	-3.88	-4.42	0.00	0.00	0.00	0.00	11.05	2.44
BG28_37	144	-4.15	-4.37	0.00	0.00	0.00	0.00	9.35	2.43

殼體編號：BG29，岩芯深度：242.0-243.5 (cm)，定年年代：2340 (cal yr BP)

Sample No.	距殼頂 距離(mm)	$\delta^{18}\text{O}$ PDB(‰)	$\delta^{13}\text{C}$ PDB(‰)	Al/Ca (mmol/mol)	Fe/Ca (mmol/mol)	Mn/Ca (mmol/mol)	Mg/Ca (mmol/mol)	Na/Ca (mmol/mol)	Sr/Ca (mmol/mol)
BG29_1	0	-3.65	-4.12	1.17	0.65	0.00	2.60	11.32	2.30
BG29_2	4	-4.10	-5.12	1.32	2.00	0.00	2.60	9.67	2.31
BG29_3	8	-4.60	-7.01	0.00	0.00	0.00	0.74	9.78	2.20
BG29_4	12	-4.46	-4.19	0.00	0.00	0.00	0.92	9.09	2.26
BG29_5	16	-4.67	-4.43	0.00	0.36	0.00	2.62	8.78	2.48
BG29_6	20	-4.16	-3.74	0.00	0.00	0.00	1.40	10.52	2.42
BG29_7	24	-3.48	-4.37	0.40	0.00	0.00	1.14	11.53	2.33
BG29_8	28	-3.98	-6.04	0.34	0.00	0.00	1.39	17.29	2.54
BG29_9	32	-4.59	-7.77	0.36	0.00	0.00	2.23	7.37	2.61
BG29_10	36	-4.84	-7.82	0.95	0.72	0.00	1.70	6.78	2.59
BG29_11	40	-5.26	-8.86	0.38	0.00	0.00	1.64	9.14	2.61
BG29_12	44	-5.02	-8.74	0.34	0.00	0.00	1.38	7.64	2.40
BG29_13	48	-4.51	-6.73	0.68	0.00	0.00	2.51	9.94	2.01
BG29_14	52	-3.88	-3.60	0.00	0.00	0.00	0.82	10.92	2.24
BG29_15	56	-3.55	-3.35	0.66	0.00	0.00	1.80	10.88	2.05
BG29_16	60	-3.51	-3.57	0.69	0.00	0.00	4.13	17.29	2.13
BG29_17	64	-3.51	-3.25	0.54	0.00	0.00	2.23	9.85	2.15
BG29_18	68	-3.71	-3.48	0.00	0.00	0.00	2.69	9.51	2.01
BG29_19	72	-3.52	-4.00	0.00	0.00	0.00	4.92	12.06	2.19
BG29_20	76	-3.68	-3.67	0.47	0.00	0.00	2.60	9.64	2.11

附錄三、碳酸鹽叢同位素數據

	Easotope Name	Sample Type	Mass Spec	Enabled Acquisit ions	ID	D47 CDES (Final)	D47 CDES (Final) SD	D47 CDES (Final) SE	49 Param (<0.2)	D48 Offset (<1.5)	D47 Kluge	D47 Kluge SD	D47 Kluge SE	Kluge- SE °C	Kluge °C	Kluge+ SE °C
S1					BGLM_L	0.739	0.002	0.001			0.739	0.002	0.001	12	11	11
R1	BGLM_L	Aragonite	Clio	8	2019/3/6 15:16	0.741			0.118	-0.284	0.741					
R2	BGLM_L	Aragonite	Clio	8	2019/3/11 17:52	0.739			-0.095	-0.260	0.739					
R3	BGLM_L	Aragonite	Clio	8	2019/3/12 18:34	0.736			0.049	-0.099	0.736					
S2					BGLM_H	0.622	0.09	0.05			0.622	0.093	0.054	79	54	32
R1	BGLM_H-1	Aragonite	Clio	8	2019/4/16 18:41	0.728			-0.247	0.544	0.728					
R2	BGLM_H-2	Aragonite	Clio	8	2019/4/17 18:49	0.585			-0.277	-0.125	0.585					
R3	BGLM_H-3	Aragonite	Clio	8	2019/4/18 15:32	0.554			-0.263	-0.323	0.554					
S3					BG28_L	0.483	0.03	0.02			0.483	0.030	0.017	150	136	122
R1	BG28_L-1	Aragonite	Clio	8	2019/5/2 18:57	0.458			-0.414	-0.882	0.458					
R2	BG28_L-2	Aragonite	Clio	8	2019/5/3 15:25	0.476			-0.159	-0.488	0.476					
R3	BG28_L-3	Aragonite	Clio	8	2019/5/7 14:36	0.516			-0.171	-0.438	0.516					
S4					BG28_H	0.476	0.04	0.02			0.476	0.037	0.021	162	142	124
R1	BG28_H-1	Aragonite	Clio	8	2019/5/3 18:36	0.449			-0.176	0.024	0.449					
R2	BG28_H-2	Aragonite	Clio	8	2019/5/7 17:53	0.518			-0.068	0.281	0.518					
R3	BG28_H-3	Aragonite	Clio	8	2019/5/8 16:22	0.461			-0.346	-0.867	0.461					
S5					BG22_L	0.496	0.05	0.03			0.496	0.050	0.029	150	125	105
R1	BG22_L-1	Aragonite	Clio	8	2019/4/24 18:58	0.439			-0.472	-1.067	0.439					
R2	BG22_L-2	Aragonite	Clio	8	2019/4/25 15:21	0.515			-0.180	0.079	0.515					
R3	BG22_L-3	Aragonite	Clio	8	2019/4/30 15:18	0.534			-0.256	-0.120	0.534					
S6					BG22_H	0.512	0.01	0.01			0.512	0.010	0.006	118	114	110
R1	BG22_H-1	Aragonite	Clio	8	2019/4/25 18:39	0.514			-0.111	0.120	0.514					
R2	BG22_H-2	Aragonite	Clio	8	2019/4/30 18:31	0.520			-0.179	-0.193	0.520					
R3	BG22_H-3	Aragonite	Clio	8	2019/5/2 15:55	0.501			-0.395	-0.707	0.501					
S7					BG15_L	0.486	0.04	0.02			0.486	0.035	0.020	152	134	118
R1	BG15_L-1	Aragonite	Clio	8	2019/4/18 18:39	0.510			-0.311	-0.368	0.510					
R2	BG15_L-2	Aragonite	Clio	8	2019/4/19 15:22	0.502			-0.324	-0.321	0.502					
R3	BG15_L-3	Aragonite	Clio	8	2019/4/23 15:44	0.445			-0.482	-0.866	0.445					
S8					BG15_H	0.470	0.03	0.02			0.470	0.034	0.020	166	147	131
R1	BG15_H-1	Aragonite	Clio	8	2019/4/19 18:35	0.483			-0.221	-0.181	0.483					
R2	BG15_H-2	Aragonite	Clio	8	2019/4/23 18:57	0.495			-0.219	0.075	0.495					
R3	BG15_H-3	Aragonite	Clio	8	2019/4/24 15:50	0.431			-0.356	-0.894	0.431					