

中華民國第 60 屆中小學科學展覽會
作品說明書

高級中等學校組 地球與行星科學科

(鄉土)教材獎

051907

鑑今知古 - 四溝層有孔蟲化石之研究

學校名稱：國立屏東女子高級中學

作者： 高二 林佩蓁 高二 黃郁婷	指導老師： 鍾文淨
-------------------------	--------------

關鍵詞：四溝層、有孔蟲、碳氧同位素

摘要

本次研究的有孔蟲化石是取自恆春四溝層，透過探討樣本中有孔蟲優勢種屬的生態環境，且利用碳氧同位素來與現生種有孔蟲做對比、討論，可得知當時四溝層的水溫及鹽度範圍，並支持過去四溝層為潟湖環境。也根據討論樣本中底棲性有孔蟲的優勢種 *Quinqueloculina spp.* 為淺水機會種屬，加上適合生存水域為半淡鹹水域，推論 *Quinqueloculina spp.* 為淺海環境的指標化石。

壹、研究動機

在高中的課程內容中，曾提到有孔蟲中的氧同位素比例可反映當時的溫度、鹽度等環境因素，但關於有孔蟲的知識並沒有深入探討，因此對於「有孔蟲是否真的能反映環境情況」感到存疑。又從地科老師提供的有孔蟲觀察中得知，所觀察的沉積物是來自恆春的四溝層 (22°00'44"N， 120°43'02"E)，裡面的有孔蟲殼體是四溝層形成年代的化石。原本想透過觀察並比較現生底棲性有孔蟲與四溝層底棲性有孔蟲的差異，了解四溝層形成時的古環境，於是申請中山大學海洋科學系的實驗室接受指導並進行相關研究。

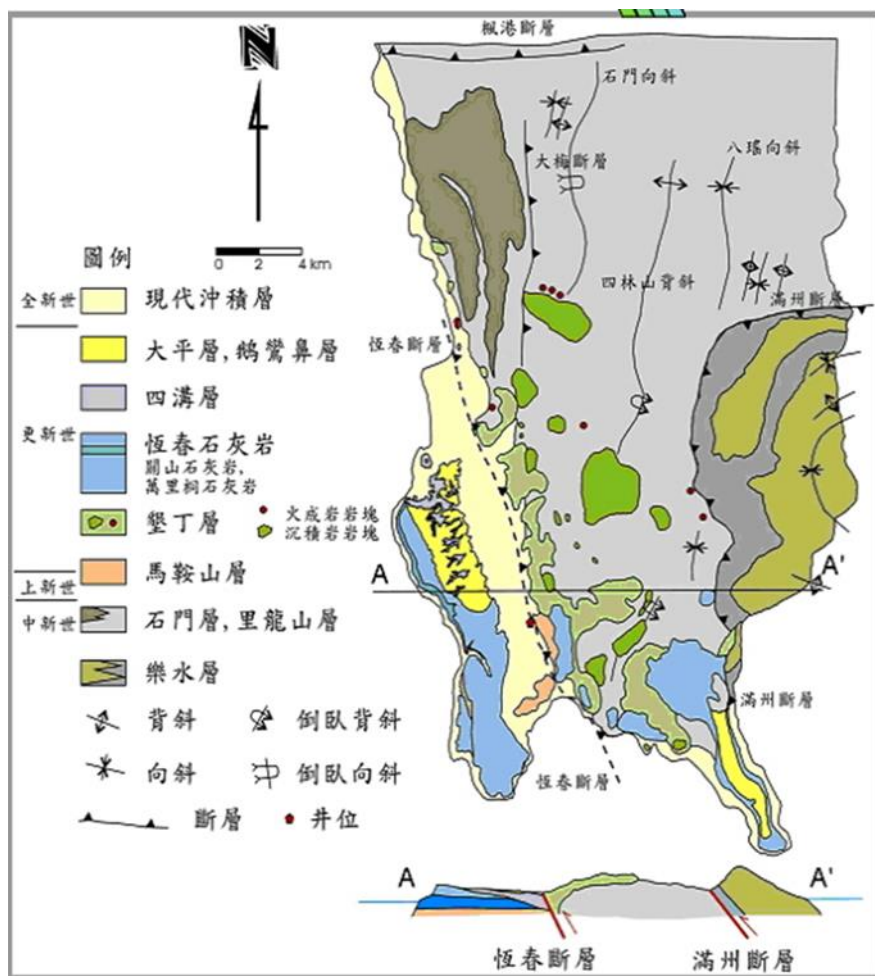
中山大學提供海研一號 1190 航次 HC2 站點海洋沉積做為比較用的標本，理由是本站的地點距離四溝最近(圖一)。我們挑選了兩處 100mesh(0.149~0.250mm)大小沉積物中的底棲性有孔蟲，進行鑑種及數量統計，發現不論是在種類或豐度，兩者都差異很大，顯然是完全不同的環境。另外，當時我們只比較了底棲性有孔蟲的種類和豐度，尚未進行碳氧同位素分析，所以對於四溝層形成時的海水沉積環境一無所悉。

在恆春半島地質圖中(圖二)，我們發現大部分岩層呈現區域性分布，而四溝層卻呈現局部性且沿著河溝分布；由岩層形成年代來看，其裸露的岩層較早於周圍岩層。不過裸露區域並未延伸至出海口，反而形成封閉型區塊。閱讀文獻後我們得知四溝層可能是一個半封閉的潟湖環境，於是我們想透過比較古代四溝層和現代沉積層中浮游性有孔蟲和底棲性有孔蟲，了解四溝層形成時的海水溫度或鹽度特性，以及在半封閉潟湖環境下的有孔蟲生態特徵，是否能找出此環境的指標化石，成為相似古環境快速的辨識工具。

(圖一)HC2 及四溝層位置



(圖二，陳等人，1985,取自阿山的地科研究室)



貳、研究目的

- 一、從四溝層底棲性有孔蟲種類和數量，驗證是否是潟湖環境的生態族群。
- 二、比較古今同種的有孔蟲殼體中碳氧同位素之差異，推測四溝層的海水沉積環境。
- 三、找尋該處環境之指標化石。

參、研究設備及器材

解剖顯微鏡、毛筆、燒杯 載盤、三孔玻片盒、篩網[網目大小各為 10(>2mm)、20(0.840~2mm)、40(0.420~0.840mm)、60(0.250~0.420mm)、100(0.149~0.250mm)、200(0.074~0.149mm) mesh]、拍攝軟體 AxioVision

肆、研究過程

一、文獻探討

(一) 有孔蟲

有孔蟲為單細胞原生動物，能分泌鈣質的殼體，殼上有無數細小的孔以供細胞質進出，因而被稱為有孔蟲，分為底棲和浮游兩種。底棲性有孔蟲又可分為表生種(生長在沉積物表層與海水交界面)與內生種(生長於沉積物內)，又照性質的不同可分為瓷質殼、膠結殼與玻璃殼三大類，多生長於潟湖、潮間帶、大陸棚、陸坡亦或海洋盆地，由於生活在底部，常年移動緩慢甚至不移動。底棲性有孔蟲死後通常沉積於原生長地，其殼體內微量元素可反映當地之環境變化。浮游性有孔蟲最早出現在侏儸紀晚期，又分為表水種與深水種，因本身不具有游泳的能力僅能漂浮在海水中，生活範圍為海表至海底，範圍變化大。(林芮君，2011)

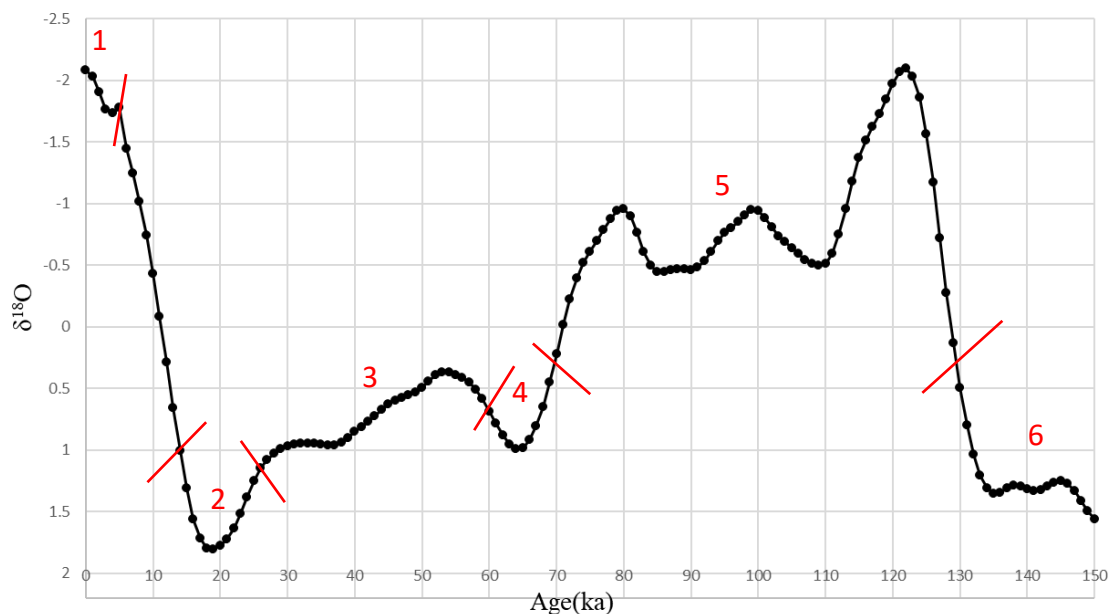
有孔蟲殼體形成來自海水中碳酸氫根離子與金屬離子結合，而殼體組成與周遭海水有正相關，有孔蟲殼體可反映不同沉積環境，因不同海水之物理與化學性質，影響不同殼質有孔蟲之保存度與造殼速率。所以利用碳氧同位素可以讓我們推測此有孔蟲生長環境，即海水環境。其中底棲性有孔蟲因無法隨海流流動移動，其種屬組合及殼體化學成分組成受深度、

溫度、鹽度、溶氧量、沉積物底質、有機質輸入多寡影響顯著，且於底棲性有孔蟲可分布在不同的生存環境，範圍可由濱海至幾千公尺深海，因此藉由底棲性有孔蟲的族群分布推測沉積環境之變化。

(二) 四溝層地質

四溝層位於臺灣西南部，分布在恆春西臺地東側斜坡上，而此臺地為波浪作用及潮汐形成，其地質主要由陸源矽質碎屑的泥質砂岩及砂質泥岩構成，富含化石，顯示其曾為陸相及海相環境，其中化石又富含有孔蟲、介形蟲與軟體動物由於缺乏足夠可信的指相化石及定年材料，依照電子自旋共振定年法（Electron Spin Resonance，ESR）的對貝類化石分析結果，大約於晚更新世形成，地質年代約 14~9 萬年前(國立自然科學博物館網站，數位典藏。地質學，四溝層)，相當於氧同位素年代標準曲線(呂佳珍等，2005)的第六階晚期到第五階，此時為非冰期(圖三)。

圖(三)氧同位素年代標準曲線(呂佳珍等，2005)



(三) 氧同位素與海水之關係

水由 H 和 O 組成， ^{16}O 質量比 ^{18}O 的輕，因此同緯度溫度上升而受到全球大氣循環作用時， ^{16}O 較容易從海水蒸發至大氣中。 ^{18}O 因質量較重，溫度下降導致凝結降水時，較容易受地吸引力而掉落至海洋中。

間冰期和冰期的海氣交互作用，也會使海水中氧同位素的比例有不同的結果。當冰期

時，隨著大氣循環蒸發後富含 ^{16}O 的水氣被帶往高緯度地區，越往高緯度移動，經歷的降水和蒸發也越多，水氣中的 ^{18}O 也會越來越少，到達極區的水富含 ^{16}O 並儲存在陸地上的冰川裡，此時海水中氧同位素就會含有比例較高的 ^{18}O ，也因海水蒸發使得海水鹽度上升；當間冰期時，陸地上的冰川融化，將富含 ^{16}O 的水釋放到海中導致海水鹽度下降，此時海水中 ^{18}O 的比例也會降低。

由此可知大氣循環作用、溫度、間冰期與冰期皆會影響海洋中的氧同位素，而 ^{18}O 在海水中的比例也能反映出海洋鹽度等訊息。

自然界中富含 O_2 ，其又分為 ^{16}O 、 ^{17}O 、 ^{18}O ，因 ^{17}O 於自然界中比例過少，因此在化學分析中，常用 ^{16}O 和 ^{18}O 的比值進行分析。以有孔蟲殼體中碳酸鈣的 ^{16}O 、 ^{18}O 比例，以下列公式推算出 $\delta^{18}\text{O}$ ，PDB 為國際標準值，計算出的 $\delta^{18}\text{O}$ 則可反映其生存當時的海洋溫鹽度。常用於地球化學的分析當中。

$$\delta^{18}\text{O} = \frac{\left(\frac{^{18}\text{O}}{^{16}\text{O}}\right)_{\text{標本}} - \left(\frac{^{18}\text{O}}{^{16}\text{O}}\right)_{\text{PDB}}}{\left(\frac{^{18}\text{O}}{^{16}\text{O}}\right)_{\text{PDB}}} \times 1000\text{‰}$$

(四) 碳同位素與環境之關係

水深較淺的浮游性有孔蟲可能有藻類共生，共生藻和浮游植物因 ^{12}C 所占比例較高，因為生物利用 ^{12}C 進行光合作用較多，故此表水的碳同位素組成就含有相對比例較高的 ^{13}C ， $\delta^{13}\text{C}$ 較重，當表層有孔蟲生長時，表水的生產力高就會導致殼體內 ^{13}C 比例較高；表水生產力降低時，海水中 ^{12}C 比例上升，也代表殼體中 ^{12}C 的比例上升， $\delta^{13}\text{C}$ 較輕。

水深較深的浮游性或底棲性有孔蟲，因為海水上層生物殘骸中的 C 被分解釋出海水，當中包含 ^{12}C 及 ^{13}C ，所以海水下層有孔蟲以 ^{12}C 組成其殼體的機會比上層有孔蟲來的大，也就是說，海水下層有孔蟲殼體中 ^{12}C 的比例會比上層多。

由此可知，間冰期與冰期、海氣交互作用、生物作用都會影響海水中碳同位素的比例。在自然界中的碳含 ^{12}C 、 ^{13}C 、 ^{14}C ，因 ^{14}C 具放射性，所以在化學分析中常以 ^{12}C 、 ^{13}C 的做分析，有孔蟲殼體中的碳酸鈣中的 ^{12}C 、 ^{13}C 與形成時的環境有機物質含量與是否具有共生藻有關，生活於表水層的有孔蟲因浮游藻類常利用 ^{12}C 行光合作用，故其殼體中的 ^{13}C 含量

則會較多，其用下列公式計算出來的 $\delta^{13}\text{C}$ 會偏重，PDB 為國際標準值。反之，表層水生物死亡後分解的 ^{12}C 可供較底層的浮游性有孔蟲造殼，故其 $\delta^{13}\text{C}$ 會較輕，可用此作為依據，推算浮游性有孔蟲的大概生存範圍。

$$\delta^{13}\text{C} = \frac{\left(\frac{^{13}\text{C}}{^{12}\text{C}}\right)_{\text{標本}} - \left(\frac{^{13}\text{C}}{^{12}\text{C}}\right)_{\text{PDB}}}{\left(\frac{^{13}\text{C}}{^{12}\text{C}}\right)_{\text{PDB}}} \times 1000\text{‰}$$

二、標本處理過程

(一) 過篩

- (1)取四溝層岩壁上之樣品，以清水浸泡 3 天，待其完全沉積後過篩。
- (2)將泥水分別以 10、20、40、60、100、200mesh 之篩網過篩。
- (3)將篩後的標本放入燒杯後放入 50°C 的烘箱，以去除水分。
- (4)取出樣品並分別秤重。

(二) 挑蟲及鑑種

- (1)取 40、60、100mesh 之樣品各 5g。
- (2)分別將沉積物顆粒置於解剖顯微鏡下，挑選底棲性及浮游性有孔蟲。
- (3)根據特有紋路及外型進行鑑種，並挑選其中佔比例較高之優勢種數，底棲性共六種，浮游性共五種。

(三) 拍照

(1)將有孔蟲分別至於解剖顯微鏡下。

(2)利用 AxioVision 拍攝數量並拍照。

(四) 清洗標本

(1)從送測種類中各挑選 5~8 隻完整的有孔蟲放入標本瓶中。



(2)將適量乙醇注入標本瓶，使殼體完全浸泡，以超音波震盪器清洗約 5~15 秒鐘，去除附著在殼體上的雜質後，用 D.D.W【註 1】清洗。(重覆三次)



(3)將適量次氯酸鈉注入標本瓶，使殼體浸泡 24 小時。

(4)用 D.D.W 清洗五次後，放入 50°C 烘箱烘乾。

(五) 送往國立台灣師範大學地球科學系米泓生教授之穩定同位素地球化學實驗室進行質譜儀分析。

【註 1】 D.D.W: 低氘水，又稱超輕水。




三、鑑種與數量統計方法與過程


我們在 40mesh、60mesh、100mesh 沉積物中量秤各 5g，鑑種並統計數量，其中底棲性有孔蟲 1179 個殼體中，約有三十餘種、浮游性有孔蟲 240 個殼體中，約十餘種。然後挑選其中佔優勢比例的種屬，底棲性六種、浮游性五種，作為本次研究分析的標本。其餘種屬因出現隻數未達可進行碳氧同位素分析之標本數，故不列入討論。

伍、結果與討論

研究一：探討四溝層中的優勢種有孔蟲生態環境

表(一)優勢底棲性有孔蟲各種屬的生態環境一覽表



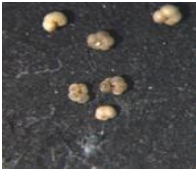
底棲性種屬名	構造特徵	水域種類	水深	備註
<i>Quinqueloculina spp.</i> 	瓷質殼，中間凸起，似米粒狀。	半淡鹹水種	125-261m 26-54m	表生種，淺水域機會種屬，為台灣海峽分布最為廣泛的種屬。
<i>Pseudorotalia indopacifica</i> 	玻璃殼，一面紋路向中心輻合，另一面似塊狀紋路。	無資料	無資料	表生種
<i>Trioculina spp.</i> 	瓷質殼，有稜角，似三面體。	半淡鹹水種	無資料	表生種，為台灣海峽分布第二廣泛的種數。
<i>Elphidium craticulatum</i> 	玻璃殼，表面有輻射狀紋路。	無資料	無資料	表生種
<i>Spiroloculin spp.</i> 	瓷質殼，扁平，似米粒狀。	半淡鹹水種	125-264m 25-30.4m 26-54m	表生種
<i>Nonion suburgidum</i>	玻璃殼，開口處突起，紋路	半淡鹹水種	無資料	機會主義種屬 【註 3】

	向中心輻合。			
---	--------	--	--	--

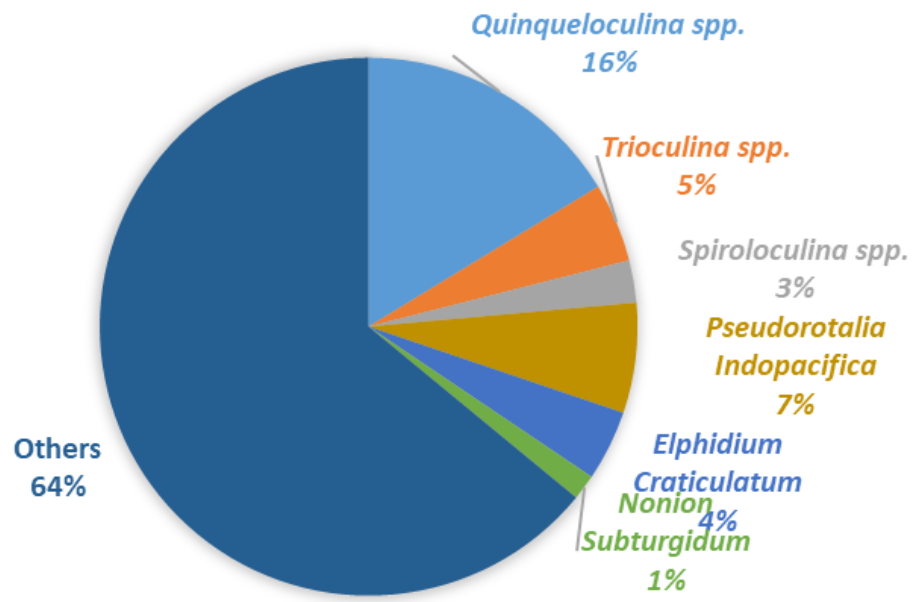
【註 2】半淡鹹水水域: 指鹽度 5‰以上，低於 40‰的水，鹽度變化大。例如溪流的出海口、沿海的養殖魚塭等。

【註 3】機會主義種數: 在生態環境遭逢巨變後，能快速適應且再度大量繁殖，或是得處於營養鹽較低的區域。

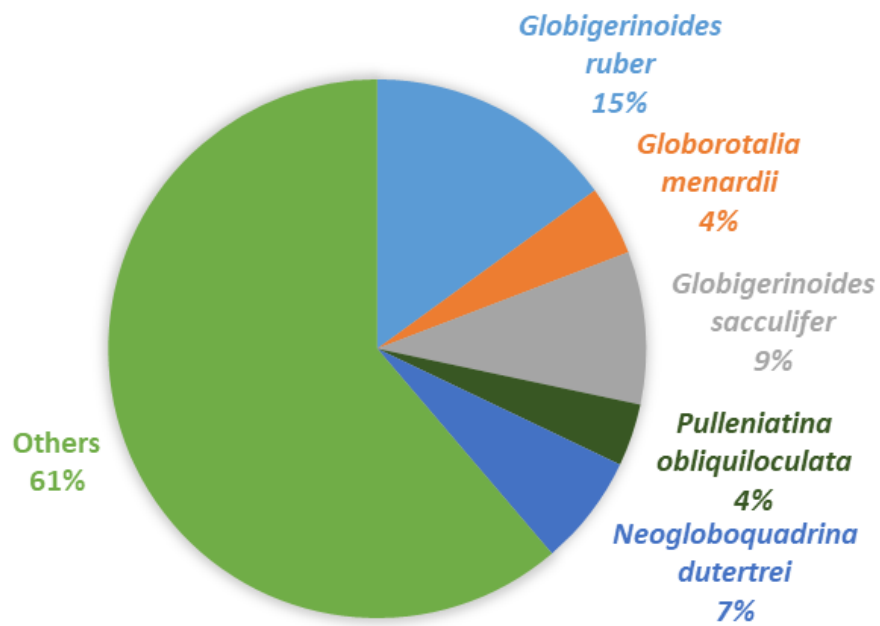
表(二)優勢浮游性有孔蟲各種屬的生態環境一覽表

浮游性種屬名	構造特徵	水體種類	分布水深	分布範圍	備註
<i>Globigerinoides ruber</i> 	針狀構造，三個近等大的房室，交接處有一小洞。	無資料	0-50m	熱帶 副熱帶	具共生藻，生存於海溫 14-30°C 處，無法生存於 <13°C 處。
<i>Globigerinoides sacculifer</i> 	三個房室交接處有一凸出小房室。	表水及斜溫層。	0-80m	熱帶 副熱帶	具共生藻，喜居於較 <i>G.ruber</i> 溫暖海域，較淺水層豐度比 <i>G.ruber</i> 高。
<i>Neogloboquadrina dutertrei</i> 	無針狀構造，環繞式房室，其中一房室較大。	表水種及溫躍層的頂至中部。	20-80m	熱帶	可作為湧升流的指標種屬。
<i>Globorotalia menardii</i>	無針狀構造，扁平狀。	幼年於透光帶及混合層，成年則下沉	無資料	無資料	無

(圖四)四溝層底棲性有孔蟲各種數含量比例圖



(圖五) 四溝層浮游性有孔蟲各種數含量比例圖



- (一) 此次樣本取自於四溝層的岩壁之上，透過濕篩法將其分成 10、20、40、60、100、200mesh，使用解剖顯微鏡觀察過後，發現 40、60、100mesh 中，含有的有孔蟲數量較多，10、20mesh 多為貝殼或有機物和石屑，200mesh 大多為泥沙與有孔蟲殼體碎屑，因破碎程度嚴重，導致無法辨認種屬，故採取 40、60、100mesh 之大小進行討論。40、60mesh 與全部の有孔蟲比例吻合，加上底棲性有孔蟲因種屬不同，導致本身粒徑不一，大多介於 40~60mesh 之間，故在 100mesh 中，底棲性有孔蟲所占數量較少。比較了底棲性有孔蟲優勢種於各種大小的比例，發現總數比例與 40、60mesh 差異不大(附錄圖一、二、三)，說明底棲性有孔蟲種屬比例與粒徑大小無關。反之，因浮游性有孔蟲於海中漂浮，體積較小利於生存，所以 100mesh 中，含有的浮游性有孔蟲數量多於 40mesh 與 60mesh，60mesh 中浮游性有孔蟲數量含量少，但此五種浮游性有孔蟲為優勢種，所以在 60mesh 中，比例較高於 100mesh。
- (二) 根據圖(四)比例數據顯示，*Quinqueloculina spp.*在四溝層底棲性有孔蟲中，所佔比例為最高者。*Quinqueloculina spp.*生長環境於半淡鹹水(brackish water)水域中，該環境鹽度變化大，其又為淺水機會種屬，可得知其形成時為淺水區域。
- (三) 圖(五)浮游性有孔蟲最優勢種則為 *G. ruber*，其居住水深介於 0~50m 之間，水溫則於 14~30°C 之間，無法生存至低於 13°C 之下的水域之中，廣布於熱帶及副熱帶海域。故可推測當時雖海水溫度較現今低，但水溫必 > 14°C，加上 *G. sacculifer* 數量比例為第二高者，適合居住的水溫範圍重疊處為 18~30°C，故此時期水溫必介於 18~30°C 間。

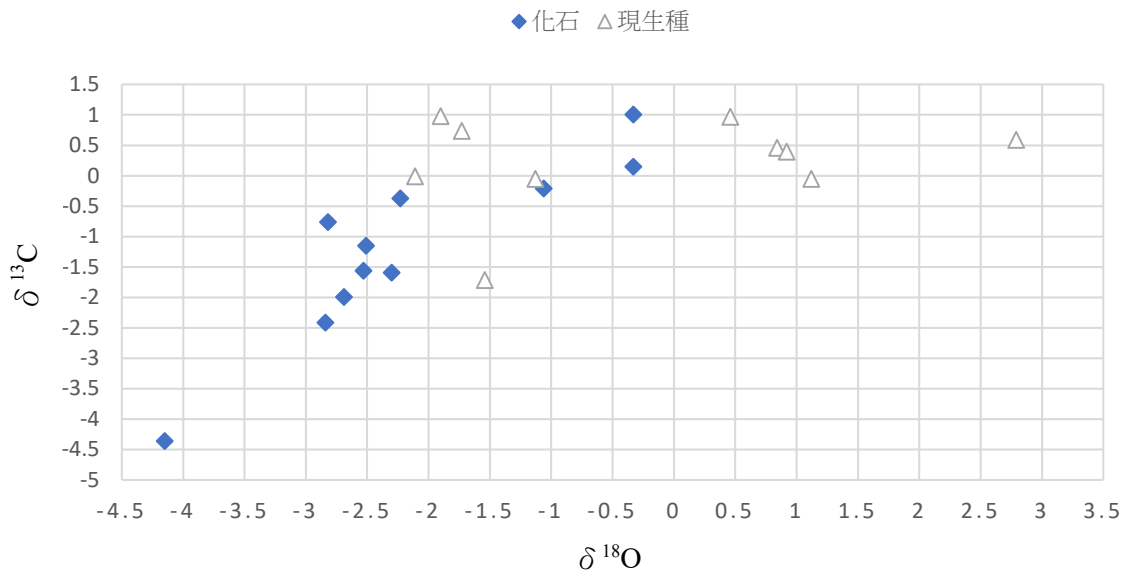
【註 4】Others:包含 30 餘種有孔蟲但是各種屬隻數稀少。

研究二: 比較古今同種有孔蟲碳氧同位素之差異

表(四)底棲性有孔蟲數據一覽表

底棲性 種屬名稱	標 本 來 源	粒徑大小 (mesh)	$\delta^{18}\text{O}$	$\delta^{13}\text{C}$	標 本 來 源	粒徑大小 (mesh)	$\delta^{18}\text{O}$	$\delta^{13}\text{C}$
<i>Spiroloculin spp.</i>	四 溝 層	40	-2.82	-0.76	中 山 大 學 海 科 院 提 供 之 現 生 種	40	-1.90	0.98
		60	-2.23	-0.37		60	0.46	0.97
<i>Quinqueloculina spp.</i>		40	-0.33	1.01		-2.11	-0.01	
		60	-2.30	-1.59		1.12	-0.05	
<i>Trioculina spp.</i>		40	-2.51	-1.15		-1.54	-1.71	
		60	-4.15	-4.36		2.79	0.59	
<i>Elphidium craticulatum</i>		40	-2.53	-1.56		-1.73	0.74	
		60	-2.69	-1.99		-1.13	-0.05	
<i>Pseudorotalia indopacifica</i>		40	-0.33	0.15		0.92	0.40	
		60	-1.06	-0.21		0.84	0.46	
<i>Nonion suburgidum</i>		60	-2.84	-2.41		無資料		

圖(六)四溝層化石與現生種的底棲性有孔蟲對比圖

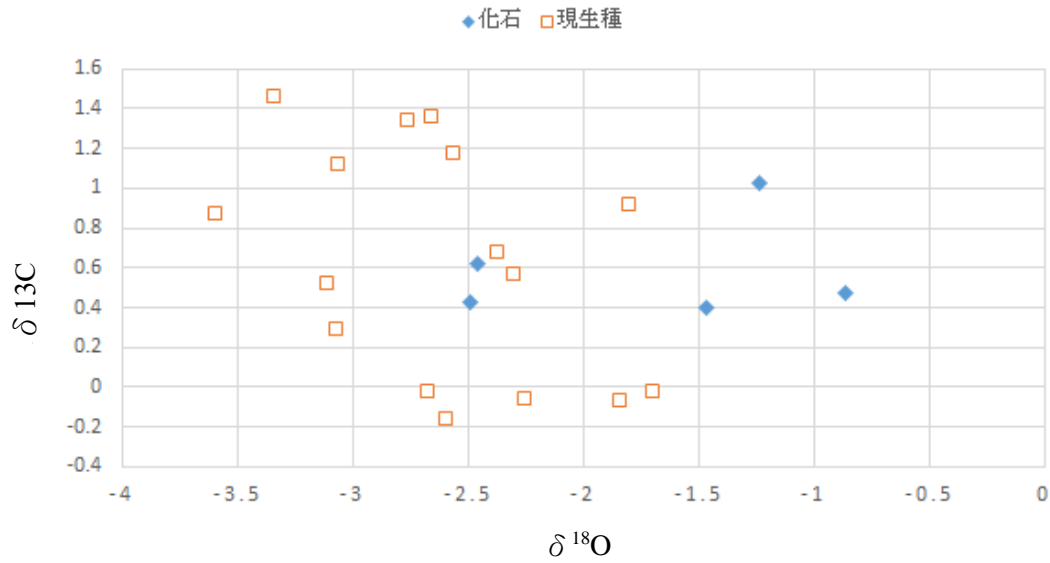


- (一) 根據底棲性有孔蟲四溝層樣本與現生種同位素比較圖顯示，可以發現四溝層樣本 $\delta^{18}\text{O}$ 皆為負值，表示樣本中 ^{18}O 比例較低，也就代表殼體內所含有的 ^{16}O 較多。其值反映出蒸發作用較弱，表示水溫較現今低。
- (二) 根據圖(六)中 *Trioculina spp.* 之一(-4.15,-4.36)的碳氧同位素數值與其他差異較大，推測可能是受成岩作用影響，亦有可能受二次搬運後於四溝層沉積。單論成岩作用，如果有孔蟲為同一時期生長，其餘亦有可能受成岩作用影響，導致各種屬數值相近。但其他種屬數值與 *Trioculina spp.*(-4.15,-4.36) 差異大，依舊有可能受成岩作用影響，但程度微弱，加上 $\delta^{13}\text{C}$ 與 $\delta^{18}\text{O}$ 皆為負值，故不影響討論結果。

表(五)浮游性有孔蟲數據一覽表

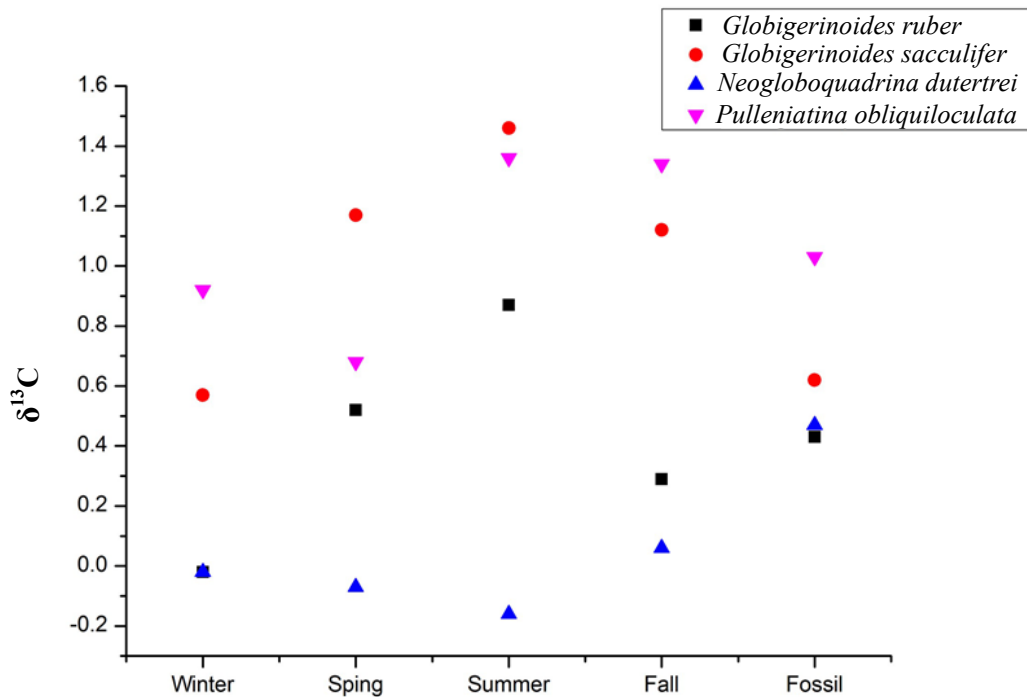
浮游性 種屬名稱	標 本 來 源	粒徑 大小 (mesh)	$\delta^{18}\text{O}$	$\delta^{13}\text{C}$	標 本 來 源	粒徑 大小 (mesh)	季 節	$\delta^{18}\text{O}$	$\delta^{13}\text{C}$
<i>Globigerinoides ruber</i>	四 溝 層	60	-2.49	0.43	參 考 謝 慧 英	60	冬	-2.67	-0.02
							春	-3.11	0.52
							夏	-3.59	0.87
							秋	-3.07	0.29
<i>Globigerinoides sacculifer</i>			冬	-2.30			0.57		
			春	-2.56			1.17		
			夏	-3.34			1.46		
			秋	-3.06			1.12		
<i>Neogloboquadrina dutertrei</i>			冬	-1.80			0.92		
			春	-2.37			0.68		
			夏	-2.66			1.36		
			秋	-2.76			1.34		
<i>Pulleniatina obliquiloculata</i>			冬	-1.70			-0.02		
			春	-1.84			-0.07		
			夏	-2.59			-0.16		
			秋	-2.25			-0.06		
<i>Globorotalia menardii</i>			1.47	0.40		無資料			

圖(七)四溝層化石與現生浮游性有孔蟲對比圖



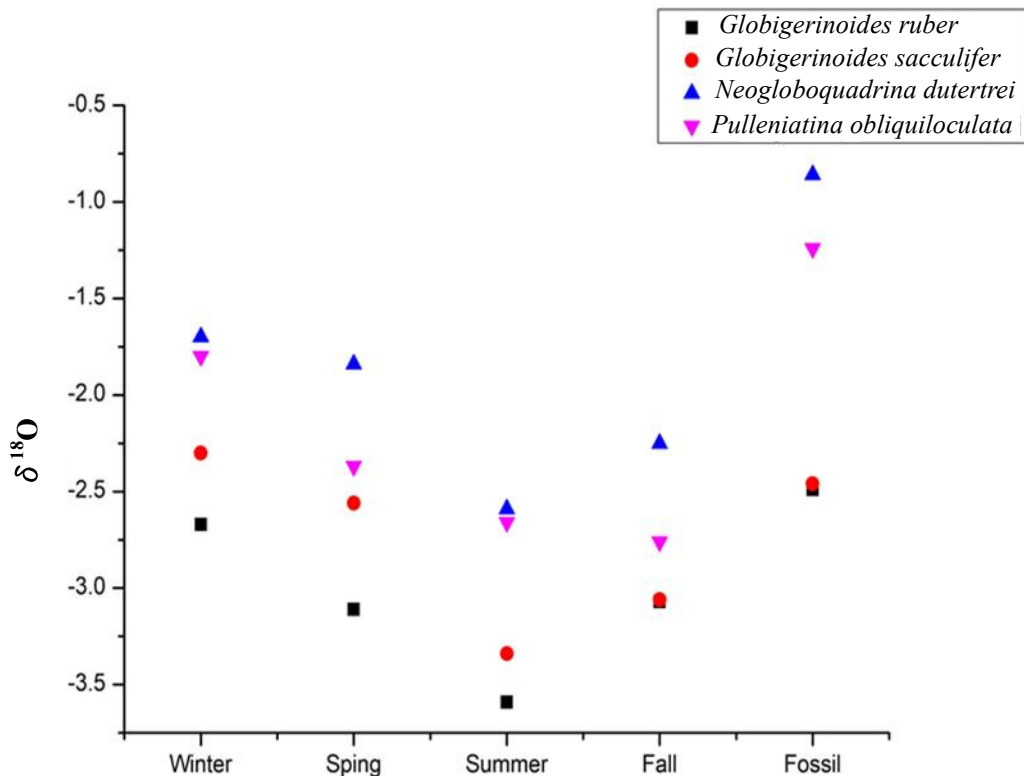
(三) 根據圖(七)總觀四溝層浮游性有孔蟲的 $\delta^{13}\text{C}$ 位於中間值，可能牽扯到的原因有機質含量，與環境相關，則可看出棲息環境變化不大。又因溫度影響氣體溶解量，空氣中 O_2 含量較多，故 $\delta^{18}\text{O}$ 的變化會比 $\delta^{13}\text{C}$ 顯著且因現生種浮游性有孔蟲 $\delta^{18}\text{O}$ 會因四季的變異而改變，且四溝層浮游性有孔蟲多為表水種，殼體內元素受溫度影響較大，故 $\delta^{18}\text{O}$ 數據點較為離散。

圖(八)四溝層化石與現生浮游性有孔蟲四季 $\delta^{13}\text{C}$ 差異



- (四) 根據圖(八)可以看出 *G. sacculifer* 與 *G. ruber* 的 $\delta^{18}\text{O}$ 接近現生種，故可排除該地層沉積年代應該非氧同位素年代標準曲線(圖三)的第六階冰期狀態。且 *N. dutertrei* 與 *P. obliquiloculata*，喜溫暖海水且為中深水種，上層生物體死亡後無機碳酸根回歸至海洋，故可利用的 ^{12}C 較多，造成其 $\delta^{13}\text{C}$ 較輕。
- (五) 根據討論(一)之條件顯示，四溝層化石與現生浮游性有孔蟲季節差異對比，無法判斷其為何種季節形成，但若以 $\delta^{13}\text{C}$ 判斷水深，分布範圍多於淺水區，是因為透光層的 ^{12}C 會被可行光合作用的生物利用，較深的水層因生物死亡分解， ^{12}C 會回歸至海洋，使 $\delta^{13}\text{C}$ 偏輕。總觀整體 $\delta^{13}\text{C}$ 偏重，固為淺水區。現在是通往過去的一把鑰匙，所以樣品中所使用的有孔蟲，未因時間改變而導致棲息地的變化。

圖(九)四溝層化石與現生浮游性有孔蟲四季 $\delta^{18}\text{O}$ 差異



- (六) 依據圖(九)的數據點來看，可以看出四季中的 $\delta^{18}\text{O}$ 皆有所差異，夏天對流旺盛，加上採樣地位於南海，屬於熱帶季風區，夏季多有熱帶氣旋雨而導致降雨量增加，凝結入海的水中除了有 ^{18}O 亦有 ^{16}O ，印證 $\delta^{18}\text{O}$ 的值較其他季節來的低，因為夏季降雨所帶進海洋的 ^{16}O 比冬季來的多，故冬季值較高，春秋則介於兩季之間，秋季 $\delta^{18}\text{O}$ 相較於春季高可能是因為此時仍有熱帶氣旋的影響。
- (七) *G. sacculifer* 與 *G. ruber* 屬同一屬，數據點分布相似，其值皆比 *G. ruber* 高是因為 *G. sacculifer* 比 *G. ruber* 種屬間本具有差異，故得此數值。

- (八) 將四溝層化石浮游性有孔蟲的 $\delta^{13}\text{C}$ 值減掉底棲性的 $\delta^{13}\text{C}$ 值為-0.72，而現生種則為-0.385，代表過去四溝層的表水生產力較現今為低。

陸、結論

- 一、根據浮游性有孔蟲最優勢種 *G. ruber*，其居住水深介於 0~50m 之間，水溫則於 14~30°C 之間，廣布於熱帶及副熱帶海域。故可推測當時雖海水溫度較現今低，加上 *G. sacculifer* 數量比例為第二高者，適合居住的水溫範圍重疊處為 18~30°C，故此時期水溫必介於 18~30°C 間。推論當時四溝層形成時的水域溫度，介於 18~30°C。同時考慮四溝層浮游性與底棲性有孔蟲的分布深度來判斷，交集位於 20~54m 處，故水深必介於 20~54m 間，再以 *Quinqueloculina spp.* 的 $\delta^{18}\text{O}$ 推論，有孔蟲於四溝層沉積時，為淺海環境。
- 二、四溝層浮游性有孔蟲和底棲性有孔蟲 $\delta^{13}\text{C}$ 值相差-0.72，而現生種的兩者的差異為 -0.385，四溝層化石的差異大於現生種，代表過去四溝層的表水生產力較現今為低。而 $\delta^{18}\text{O}$ 卻有明顯比現生種低，推論當時海水溫度較今日為低所造成。
- 三、根據底棲性有孔蟲含量比例，可以看出 *Quinqueloculina spp.* 為最高比例種屬，且從可以得知當時四溝層為淺海環境。 *Quinqueloculina spp.* 為半淡鹹水種，又是淺水機會種屬，因此我們認為，其為潟湖淺海環境的指標化石。

柒、參考資料

王飛飛和高茂生，2012，底棲性有孔蟲在海岸帶環境汙染指示方面的研究現狀，微體古生物學報。

王銘章，2014，利用多種屬浮游有孔蟲殼體穩定同位素紀錄探討最近兩萬年沖繩海槽中部的古水文演變，海洋科學系研究所，國立中山大學，第 1-2 頁，第 7-10 頁。

江愛蘋，2004，台灣西南海域沉積物中底棲性有孔蟲的分佈，海洋地質及化學研究所，國立中山大學，共 93 頁。

江秉崑，2015，台灣海峽現生底棲性有孔蟲的分佈，海洋科學系研究所，國立中山大學，共 64 頁。

呂佳珍，林慧玲，李昭興，米泓生，2005，南海北部晚第四紀有孔蟲碳氧同位素地層及古海洋變遷，經濟部中央地質調查所彙刊第十八號。

梁華升，2012，台灣鄰近海域浮游性有孔蟲殼體重量與數量之變化，海洋地質及化學研究所，國立中山大學，共 81 頁。

曾文健，2004，高雄壽山地區兩口井下岩心之古亭坑層浮游性有孔蟲穩定同位素紀錄，海洋地質及化學研究所，國立中山大學，第 20-33 頁，第 61-67 頁。

劉進興，2012，利用岩心 GH08-2004 記錄探討最近 2 萬 6 千年黑潮中下游區之古海表水文變化，海洋地質及化學研究所，國立中山大學，共 81 頁。

詹明達，2009，南海和熱帶西太平洋之全新世氣候變遷：多種有孔蟲穩定同位素證據，應用地球科學研究所，國立台灣大學，共 55 頁。

熊衍昕，2005，高雄壽山地區岩心古亭坑層之底棲性有孔蟲研究，海洋地質及化學研究所，國立中山大學，共 78 頁。

謝慧英，2006，南海北部現生浮游性有孔蟲組合及其碳氧同位素組成的季節性變化，海洋生物科技暨資源研究所，共 115 頁。

魏國彥，2013，海底沉積物岩芯中的檔案：有孔蟲氧同位數比值和水溫的關係。

行政院農委會漁業署網站，意見交流。

<https://www.fa.gov.tw/cht/ForumsGuest/content.aspx?id=20107695&chk=68de0e04-3513-482e-b33d-82b9559e03be>

國立自然科學博物館網站。數位典藏。地質學，四溝層。2019 年 12 月 04 日，取自 <http://digimuse.nmns.edu.tw/Default.aspx?tabid=373&ObjectId=0b00000181dad97a&Domin=g&Field=fi&ContentType=Exhibit&Language=CHI&FieldName=>

阿山的地科研究室。2020 年 3 月 10 日，取自 <http://ashan.gl.ntu.edu.tw/chinese/earthquake/Paleo/HenChun/page1.htm>

※誌謝

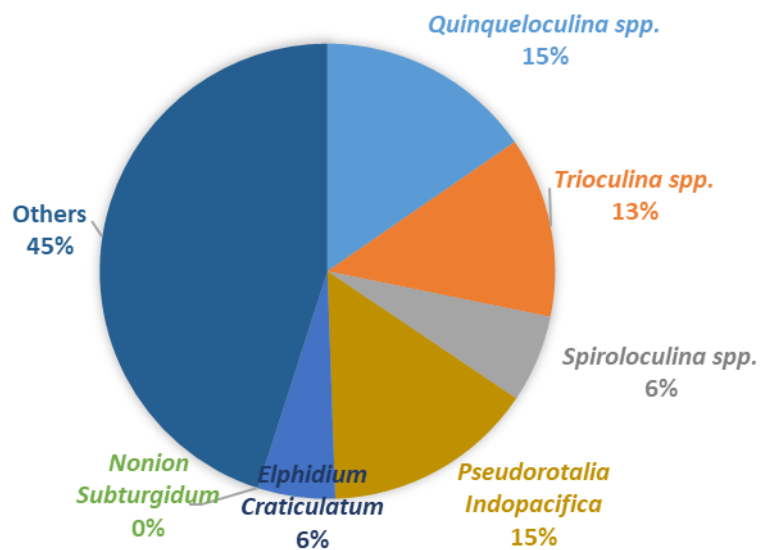
感謝國立中山大學海洋科學院林慧玲教授提供我們實驗室學習，並在我們提起要做科展之際的大力支持，教導我們關於有孔蟲的各項知識，且在迷茫之際，指引我們研究的方向，並指點我們於觀念上的缺失，助理林黛君老師指導辨認有孔蟲，在此表示最高的敬意與感謝。再者，感謝楊仁凱博士，教我們拍攝儀器的操作。最後，感謝國立臺灣師範大學地球科學系(含海洋環境科技研究所)米泓生教授協助碳氧同位素測量，在此深表感謝之意。

捌、附錄

表(一)40mesh(粒徑 0.420~0.840mm)之底棲性有孔蟲各占比例

底棲性有孔蟲種屬	隻數	所占比例(%)
<i>Spiroloculin spp.</i>	17	6.23
<i>Quinqueloculina spp.</i>	42	15.38
<i>Trioculina spp.</i>	35	12.82
<i>Elphidium craticulatum</i>	15	5.49
<i>Nonion subturgidum</i>	0	0
<i>Pseudorotalia indopacifica</i>	41	15.02
Others	123	45.05
Total	273	100

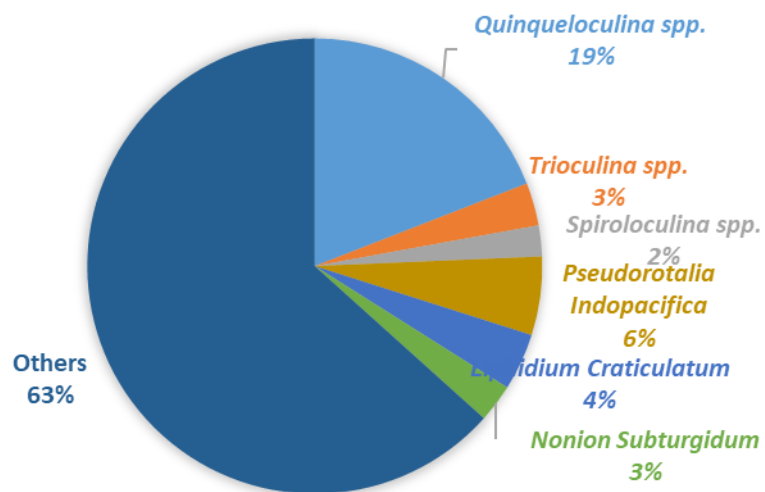
圖(一)40mesh(粒徑 0.420~0.840mm)之底棲性有孔蟲各占比例圖



表(二)60mesh(粒徑 0.250~0.420mm)之底棲性有孔蟲各占比例

底棲性有孔蟲種屬	隻數	所占比例(%)
<i>Spiroloculin spp.</i>	13	2.20
<i>Quinqueloculina spp.</i>	113	19.09
<i>Trioculina spp.</i>	18	3.04
<i>Elphidium craticulatum</i>	24	4.05
<i>Nonion suburgidum</i>	16	2.70
<i>Pseudorotalia indopacifica</i>	33	5.57
Others	375	63.34
Total	592	100

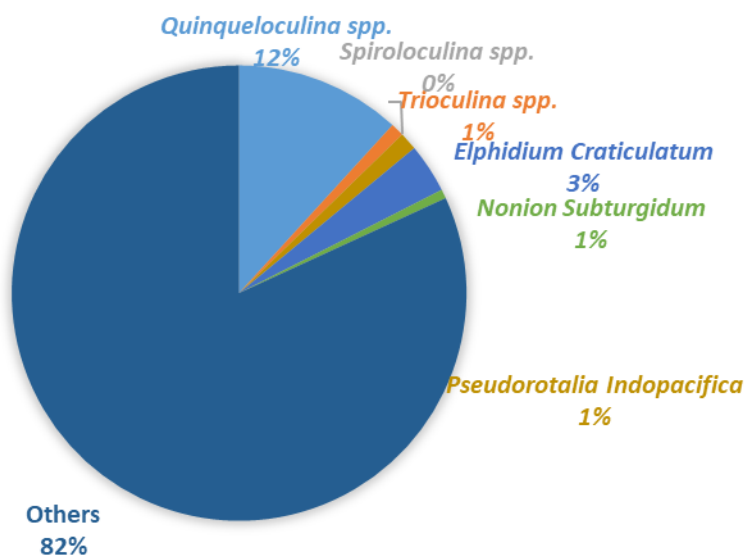
圖(二)60mesh(粒徑 0.250~0.420mm)之底棲性有孔蟲各占比例圖



表(三)100 mesh(粒徑 0.149~0.250mm)之底棲性有孔蟲各占比例

底棲性有孔蟲種屬	隻數	所占比例(%)
<i>Spiroloculin spp.</i>	0	0
<i>Quinqueloculina spp.</i>	37	11.78
<i>Trioculina spp.</i>	3	0.96
<i>Elphidium craticulatum</i>	11	3.50
<i>Nonion subturgidum</i>	2	0.64
<i>Pseudorotalia indopacifica</i>	4	1.27
Others	257	81.85
Total	314	100

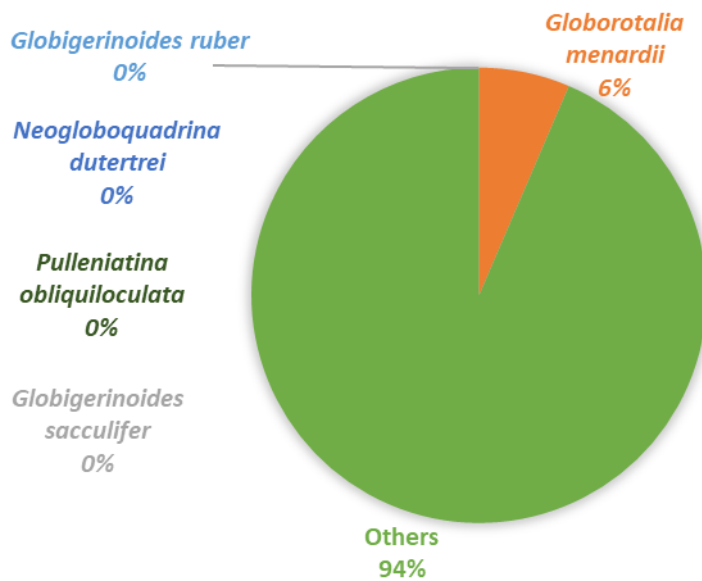
圖(三)100 mesh(粒徑 0.149~0.250mm)之底棲性有孔蟲各占比例圖



表(四)40mesh(粒徑 0.420~0.840mm)浮游性有孔蟲各占比例

浮游性有孔蟲種數	隻數	所占比例(%)
<i>Globigerinoides ruber</i>	0	0
<i>Globigerinoides sacculifer</i>	0	0
<i>Globorotalia menardii</i>	2	6.45
<i>Neogloboquadrina dutertrei</i>	0	0
<i>Pulleniatina obliquiloculata</i>	0	0
Others	29	93.55
Total	31	100

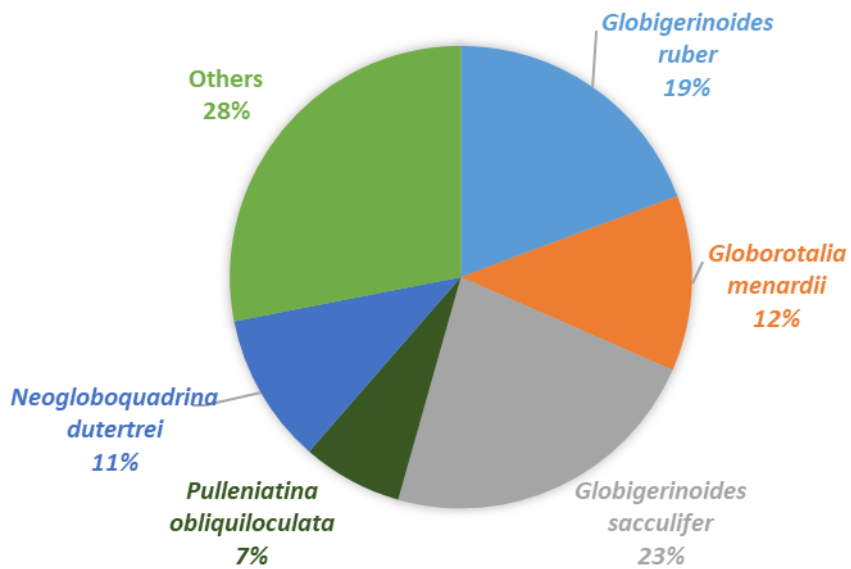
圖(四)40mesh(粒徑 0.420~0.840mm)浮游性有孔蟲各占比例圖



表(五)60mesh(粒徑 0.250~0.420mm)浮游性有孔蟲各占比例

浮游性有孔蟲種數	隻數	所占比例(%)
<i>Globigerinoides ruber</i>	11	19.30
<i>Globigerinoides sacculifer</i>	13	22.81
<i>Globorotalia menardii</i>	7	12.28
<i>Neogloboquadrina dutertrei</i>	6	10.53
<i>Pulleniatina obliquiloculata</i>	4	7.02
Others	16	28.07
Total	57	100

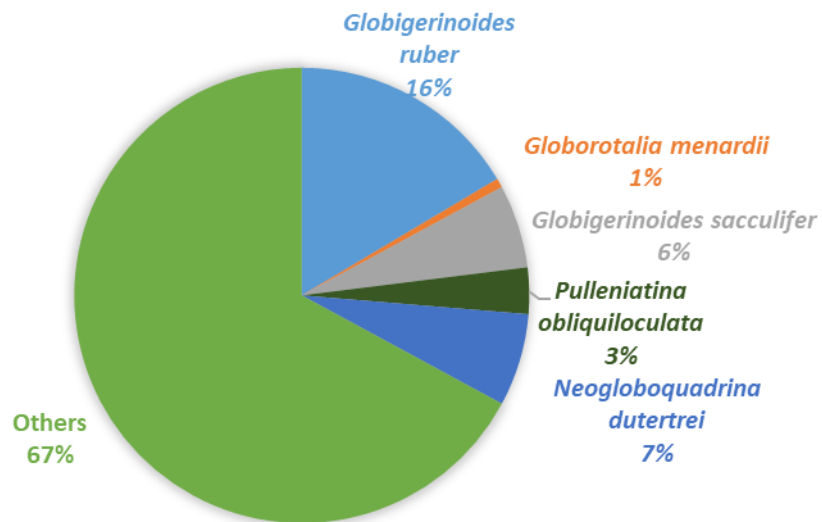
圖(五)60mesh(粒徑 0.250~0.420mm)浮游性有孔蟲各占比例圖



表(六)100mesh(粒徑 0.149~0.250mm)浮游性有孔蟲各占比例

浮游性有孔蟲種數	隻數	所占比例(%)
<i>Globigerinoides ruber</i>	25	16.45
<i>Globigerinoides sacculifer</i>	9	5.92
<i>Globorotalia menardii</i>	1	0.66
<i>Neogloboquadrina dutertrei</i>	10	6.58
<i>Pulleniatina obliquiloculata</i>	5	3.29
Others	102	67.10
Total	152	100

圖(六)100mesh(粒徑 0.149~0.250mm)浮游性有孔蟲各占比例圖



【評語】 051907

本作品找出台灣恆春四溝層有孔蟲化石的優勢種屬，然後量測其 $\delta^{18}\text{O}$ 與 $\delta^{13}\text{C}$ 值，以做為類似四溝層沉積環境之同位素指標。有孔蟲化石種類之鑑識屬專業辨識，需時間養成； $\delta^{18}\text{O}$ 及 $\delta^{13}\text{C}$ 分析及數據解釋又為地球化學之一專業領域，故此作品具學術參考價值。作者對有孔蟲 $\delta^{18}\text{O}$ 及 $\delta^{13}\text{C}$ 分析有基本認知，建議將分析值誤差納入討論。另對四溝層之沉積環境可用實際野外觀察及文獻探討提出更深入之描述。亦可加強成岩作用對以有孔蟲化石的 $\delta^{18}\text{O}$ 及 $\delta^{13}\text{C}$ 值判識沉積環境之影響，例如：說明成岩作用是如何影響有孔蟲化石的 $\delta^{18}\text{O}$ 及 $\delta^{13}\text{C}$ 值；亦即，使其值上升或降低之原因。如此，更能提升本作品之科學價值。

壹、摘要

本次研究的有孔蟲化石是取自恆春四溝層，透過探討樣本中有孔蟲優勢種屬的生態環境，且利用碳氧同位素來與現生種有孔蟲做對比、討論，可得知當時四溝層的水溫及鹽度範圍並推導過去四溝層為瀉湖環境。也根據討論樣本中底棲性有孔蟲的優勢種 *Quinqueloculina spp.* 為淺水機會種屬，加上適合生存水域為半淡鹹水域，推論 *Quinqueloculina spp.* 為淺海環境的指標化石。

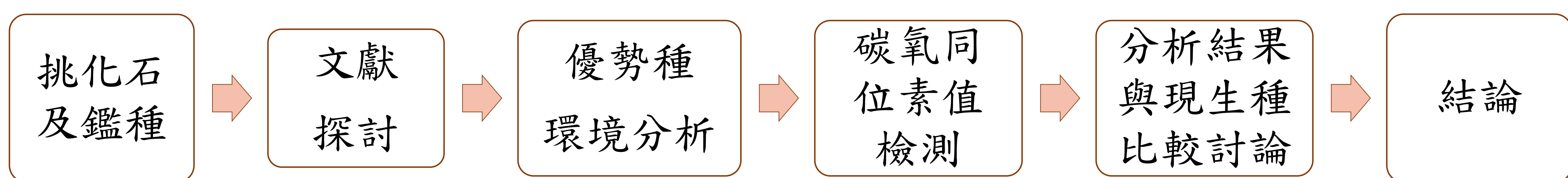
貳、研究動機

在高中課程內容中，曾提到有孔蟲中的氧同位素比例可反映當時的溫度、鹽度等環境因素，但關於有孔蟲的知識並沒有深入探討，因此對於「有孔蟲是否真的能反映環境情況」感到存疑。於是透過比較古代四溝層和現代沉積層中浮游性有孔蟲和底棲性有孔蟲，了解四溝層形成時的海水溫度或鹽度特性，以及在半封閉瀉湖環境下的有孔蟲生態特徵，是否能找出此環境的指標化石，成為相似古環境快速的辨識工具。

參、研究目的

- 一. 從四溝層底棲性有孔蟲種類和數量，驗證是否是瀉湖環境的生態族群。
- 二. 比較古今同種的有孔蟲殼體中碳氧同位素之差異，推測四溝層的海水沉積環境。
- 三. 找尋該處環境之指標化石。







肆、研究過程








伍、結果與討論

研究一：探討四溝層中的優勢種有孔蟲生態環境

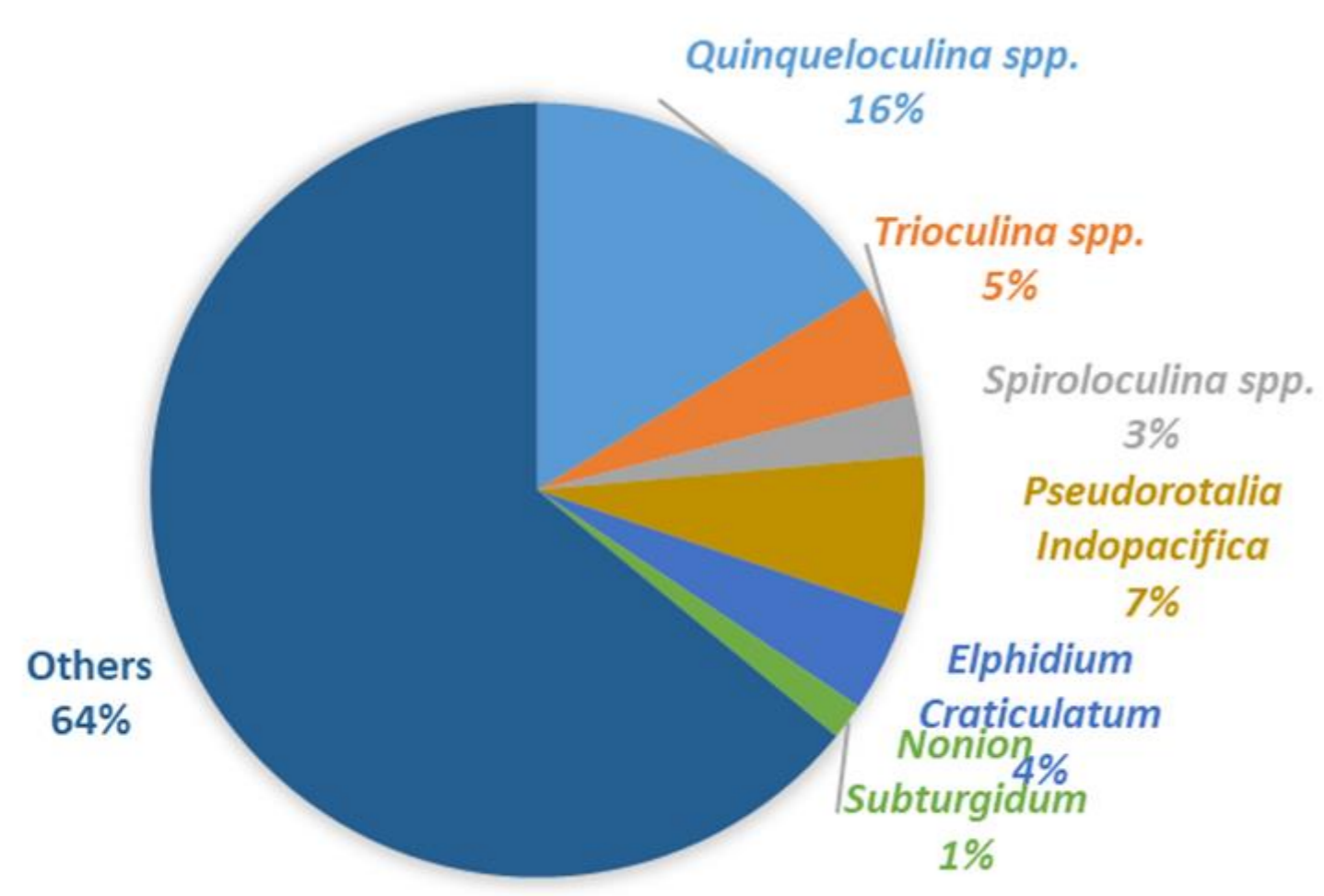
表(一)優勢底棲性有孔蟲各種屬的生態環境一覽表

底棲性鑑種結果	水域	水深 (m)	備註
<i>Spiroloculin spp.</i> 	半淡鹹水種【註2】	125-264 25-30.4 26-54	表生種
<i>Quinqueloculina spp.</i> 	半淡鹹水種	125-261 26-54	表生種，淺水域機會種屬，台灣海峽分布最廣泛的種屬。
<i>Trioculina spp.</i> 	半淡鹹水種	無資料	表生種，為台灣海峽分布第二廣泛的種屬。
<i>Elphidium craticulatum</i> 	無資料	無資料	表生種
<i>Nonion subturgidum</i> 	半淡鹹水種	無資料	機會主義種屬【註3】
<i>Pseudorotalia indopacifica</i> 	無資料	無資料	表生種

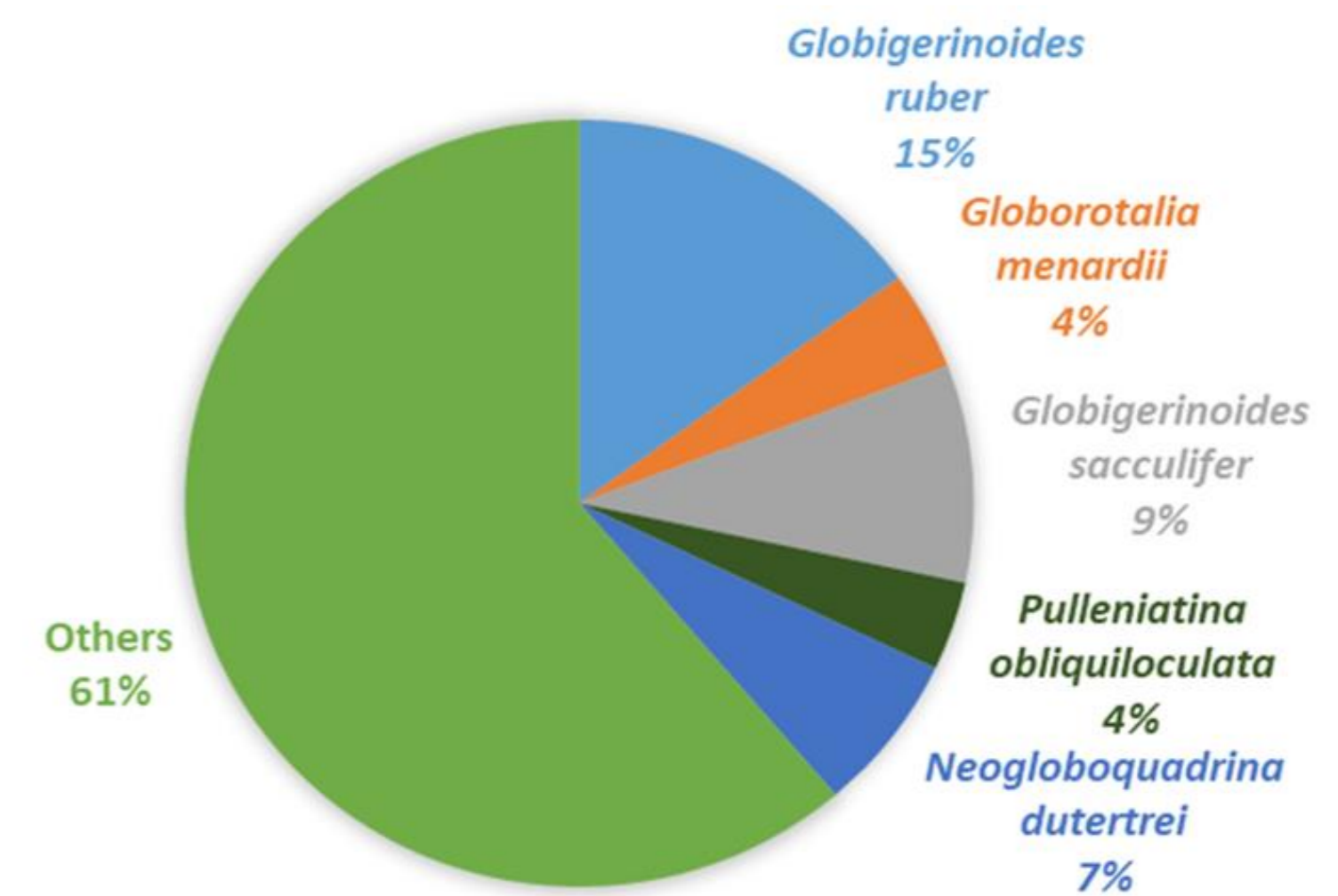
表(二)優勢浮游性有孔蟲各種屬的生態環境一覽表

浮游性鑑種結果	水層	水深 (m)	分布範圍	備註
<i>Globigerinoides ruber</i> 	無資料	0-50	熱帶副熱帶	具共生藻，海水表溫 14-30°C，無法 < 13°C 處。
<i>Globigerinoides sacculifer</i> 	表水斜溫層	0-80	熱帶副熱帶	具共生藻，居於較 <i>G.ruber</i> 溫暖海域，較淺水層豐度比 <i>G.ruber</i> 高。
<i>Globorotalia menardii</i> 	幼年於透光帶及混合層，成年則下沉到溫躍層。	無資料	無資料	無
<i>Neogloboquadrina dutertrei</i> 	中深水種	20-80	熱帶	可作為湧升流的指標種。
<i>Pulleniatina obliquiloculata</i> 	中深水種	無資料	無資料	生存溫度介 18-30°C。

圖(一)四溝層底棲性有孔蟲各種屬含量比例圖



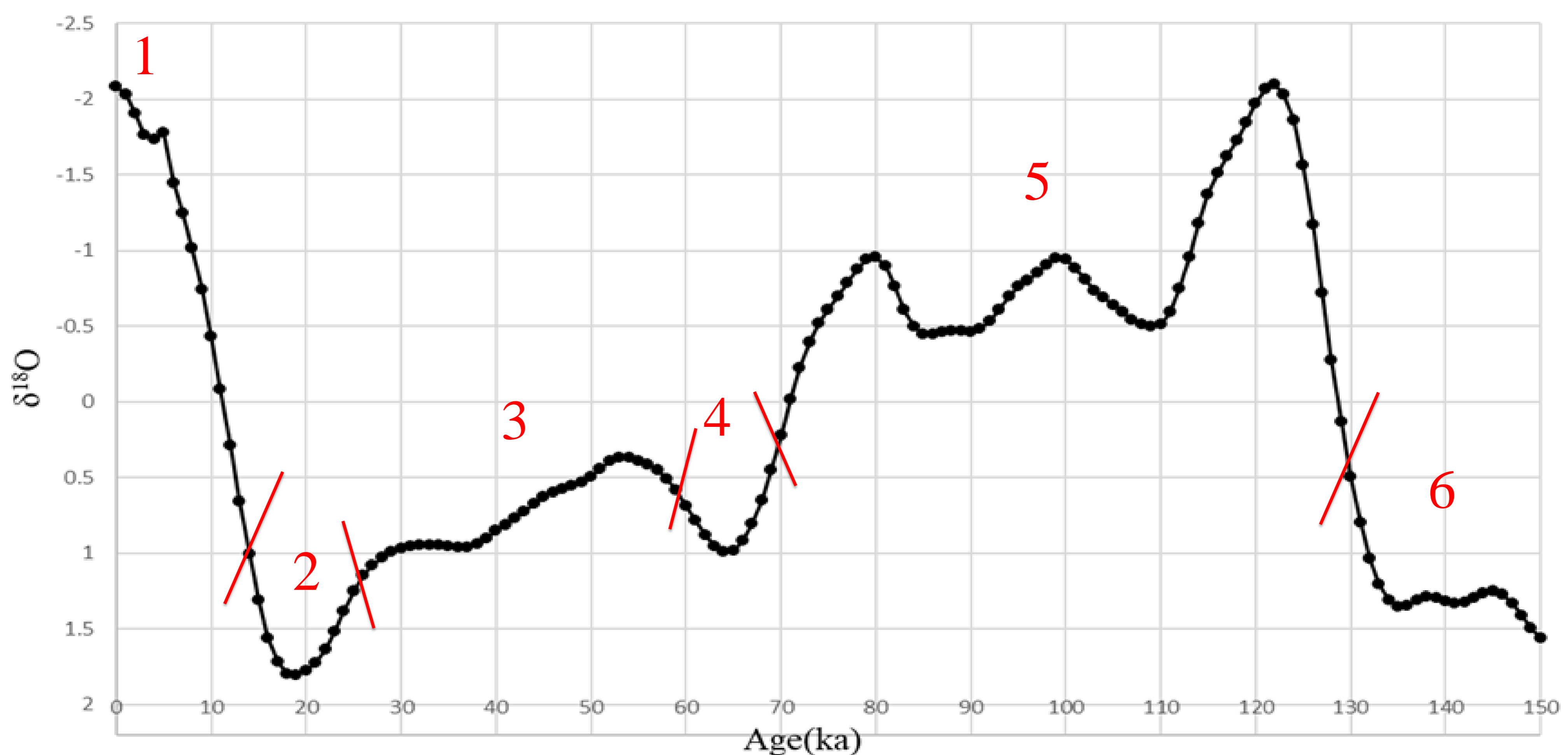
圖(二)四溝層浮游性有孔蟲各種屬含量比例圖



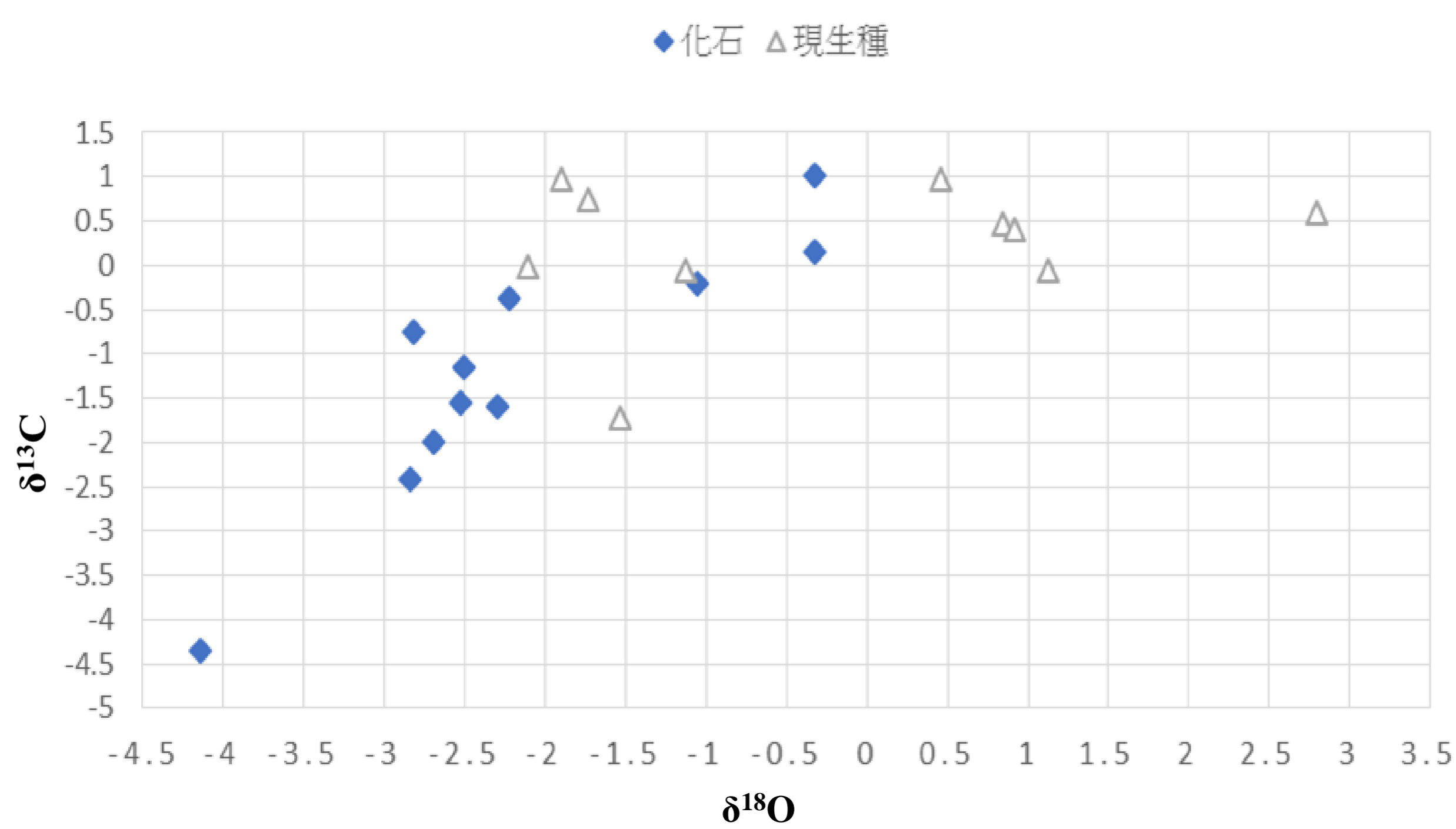
- 根據圖(一)數據顯示，*Quinqueloculina spp.*在四溝層底棲性有孔蟲中，所佔比例最高。*Quinqueloculina spp.*生長於半淡鹹水水域，環境鹽度變化大，該種屬又為淺水機會種屬，可推測其生長時的周遭環境為淺水區。
- 圖(二)浮游性有孔蟲最優勢種為*G. ruber*，其居住水深介於0~50m之間，水溫於14~30°C之間，廣布於熱帶及副熱帶海域。加上數量比例第二高為*G. sacculifer*，兩種屬適合居住的水溫範圍重疊處為18~30°C，故此時期水溫必介於18~30°C間。

研究二:比較古今同種有孔蟲同位素之差異

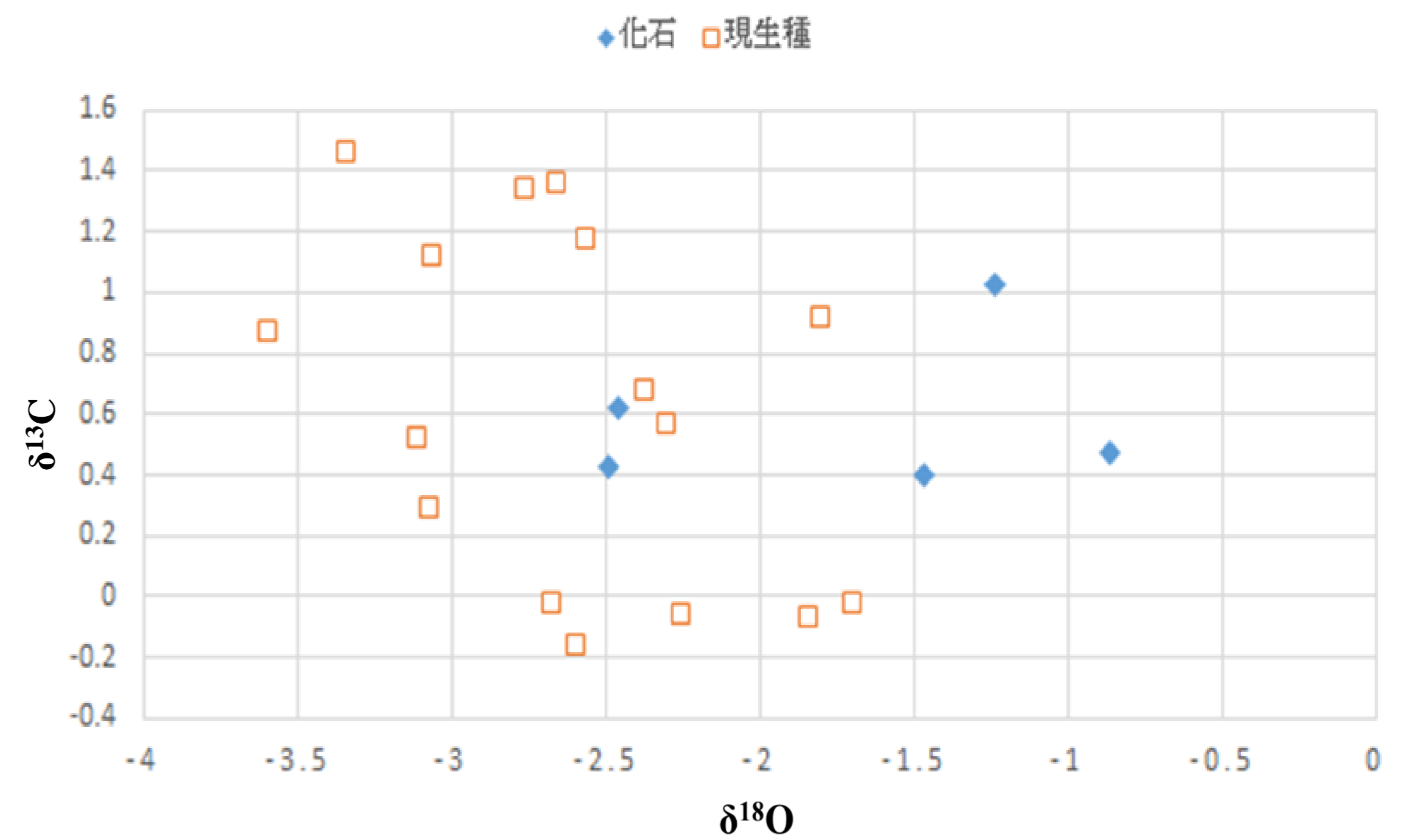
圖(三)氧同位素年代標準曲線(呂佳珍等, 2005)



圖(四)四溝層化石與現生種的底棲性有孔蟲對比圖

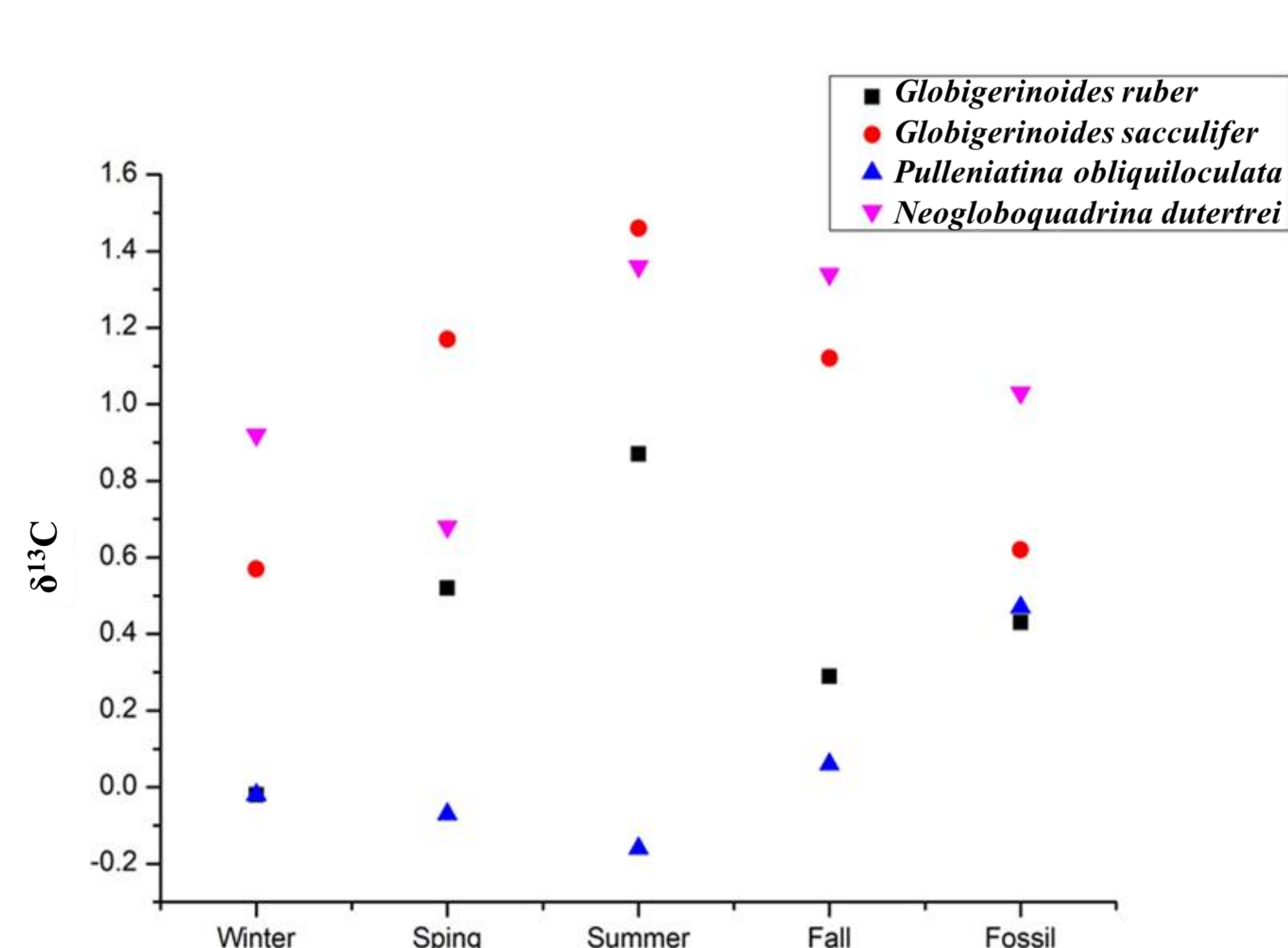
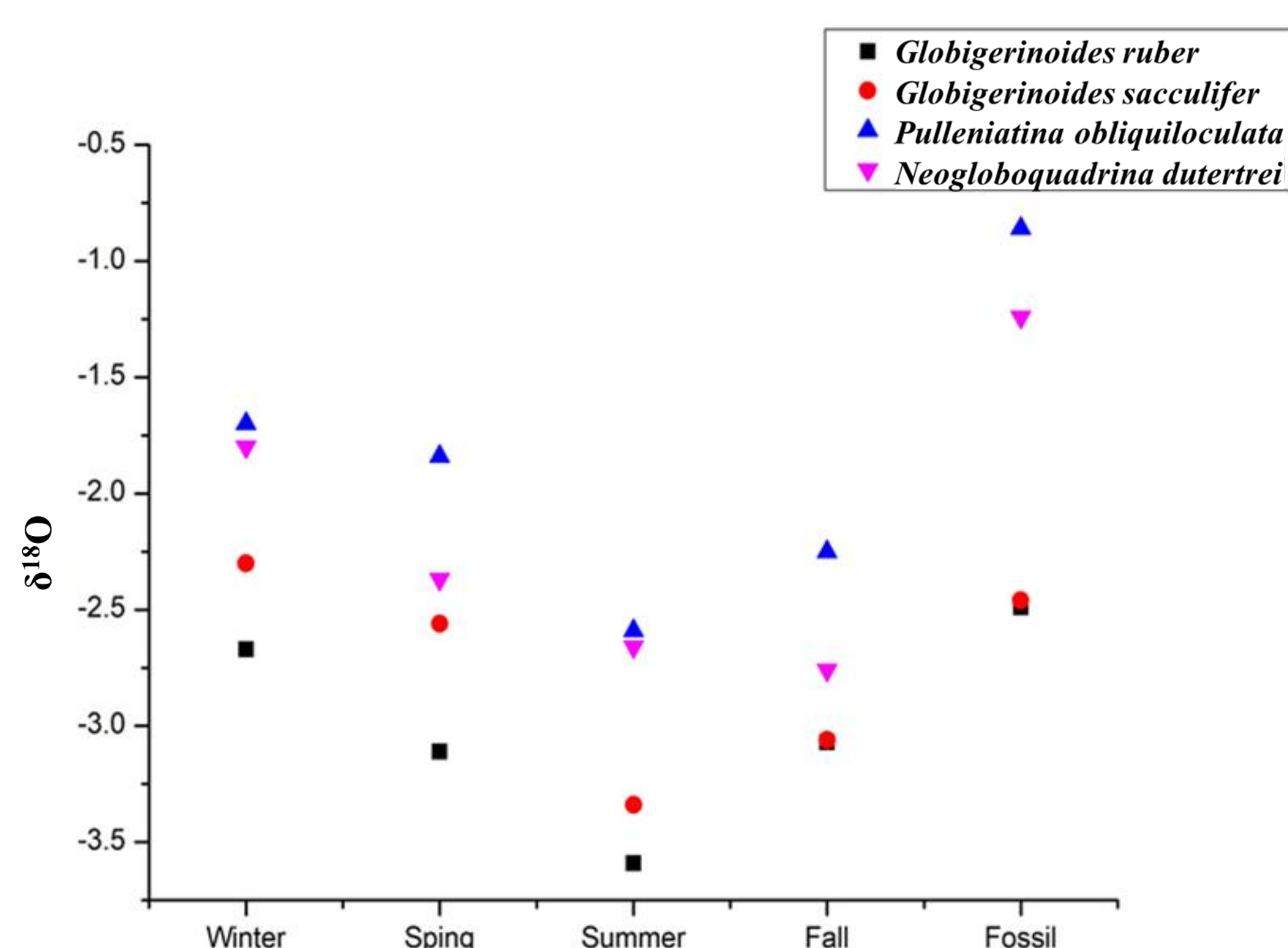


圖(五)四溝層化石與現生種的浮游性有孔蟲對比圖



- 根據圖(四)，可以發現四溝層樣本 $\delta^{18}\text{O}$ 皆為負值。反映出蒸發作用較弱，表示水溫較低。
- 圖(四)中*Trioculina spp.*之一(-4.15,-4.36)的碳氧同位素數值與其他差異較大，推測可能是受成岩作用影響或二次搬運後於四溝層沉積造成。若有孔蟲為同時期生長，其餘亦有可能受成岩作用，導致各種屬數值相近。不過各種屬數值皆保有差異性，雖仍有可能受成岩作用影響，但程度微弱，加上 $\delta^{13}\text{C}$ 與 $\delta^{18}\text{O}$ 皆為負值，故不影響討論結果。
- 根據圖(五)，總觀四溝層浮游性有孔蟲的 $\delta^{13}\text{C}$ 位於中間值，可能牽扯到的原因與環境相關，可看出棲息環境變化不大。又因溫度影響氣體溶解量，空氣中 O_2 含量較多，故 $\delta^{18}\text{O}$ 的變化會比 $\delta^{13}\text{C}$ 顯著，加上四溝層浮游性有孔蟲多為表水種，殼體內元素受海水表層溫度影響大，故 $\delta^{18}\text{O}$ 數據點較為離散。

圖(八)四溝層化石與現生浮游性有孔蟲四季 $\delta^{18}\text{O}$ 差異 圖(九)四溝層化石與現生浮游性有孔蟲四季 $\delta^{13}\text{C}$ 差異



- 根據圖(八)，可以看出四季中的 $\delta^{18}\text{O}$ 皆有所差異，夏天對流旺盛，加上採樣地位於南海，屬於熱帶季風區，夏季多有熱帶氣旋雨而導致降雨量增加，凝結入海的水中除了有 ^{18}O 亦有 ^{16}O ，印證 $\delta^{18}\text{O}$ 的值較其他季節來的低，因為夏季降雨所帶進海洋的 ^{16}O 比冬季來的多，故冬季值較高，春秋則介於兩季之間，秋季 $\delta^{18}\text{O}$ 相較於春季高可能是因為此時仍有熱帶氣旋的影響。
- G. sacculifer*與*G. ruber*屬同一屬，數據點分布相似，其值皆比*G. ruber*高是因為*G. sacculifer*比*G. ruber*種屬間本具有差異，故得此數值。
- 將四溝層化石浮游性有孔蟲的 $\delta^{13}\text{C}$ 值減掉底棲性的 $\delta^{13}\text{C}$ 值為-0.72，而現生種則為-0.385，代表過去四溝層的表水生產力較現今為低。
- 根據圖(九)可以看出*G. sacculifer*與*G. ruber*的 $\delta^{18}\text{O}$ 接近現生種，故可排除該地層沉積年代應該非冰期狀態。*N. dutertrei*與*P. obliquiloculata*喜溫暖海水且為中深水種，上層生物體死亡後無機碳酸根回歸至海洋，造成其 $\delta^{13}\text{C}$ 較輕。且四溝層化石與現生浮游性有孔蟲季節差異對比，無法判斷其為何種季節形成，但若以 $\delta^{13}\text{C}$ 判斷水深，分布範圍多於淺水區，故樣品中所使用的有孔蟲，未因時間改變而導致棲息地的變化。

陸、結論

- 根據浮游性有孔蟲最優勢種*G. ruber*，其居住水深介於0~50m之間，水溫則於14~30°C之間，廣布於熱帶及副熱帶海域。故可推測當時雖海水溫度較現今低，加上*G. sacculifer*數量比例為第二高者，適合居住的水溫範圍重疊處為18~30°C，故此時期水溫必介於18~30°C間。推論當時四溝層形成時的水域溫度，介於18~30°C。同時考慮四溝層浮游性與底棲性有孔蟲的分布深度來判斷，交集位於20~54m處，故水深必介於20~54m間，再以*Quinqueloculina spp.*的 $\delta^{18}\text{O}$ 推論，有孔蟲於四溝層沉積時，為淺海環境。
- 四溝層浮游性有孔蟲和底棲性有孔蟲 $\delta^{13}\text{C}$ 值相差-0.72，而現生種的兩者的差異為-0.385，四溝層化石的差異大於現生種，代表過去四溝層的表水生產力較現今為低。而 $\delta^{18}\text{O}$ 卻明顯比現生種低，推論當時海水溫度較今日為低所造成。
- 根據底棲性有孔蟲含量比例，可以看出*Quinqueloculina spp.*為最高比例種屬，且從可以得知當時四溝層為淺海環境。*Quinqueloculina spp.*為半淡鹹水種，又是淺水機會種屬，因此我們認為，其為潟湖淺海環境的指標化石。

柒、參考文獻

- 呂佳珍，林慧玲，李昭興，米泓生，2005，南海北部晚第四紀有孔蟲碳氧同位素地層及古海洋變遷，經濟部中央地質調查所彙刊第十八號。
- 江秉崑，2015，台灣海峽現生底棲性有孔蟲的分佈，海洋科學系研究所，國立中山大學，共64頁。
- 江愛蘋，2004，台灣西南海域沉積物中底棲性有孔蟲的分佈，海洋地質及化學研究所，國立中山大學，共93頁。
- 謝慧英，2006，南海北部現生浮游性有孔蟲組合及其碳氧同位素組成的季節性變化，海洋生物科技暨資源研究所，國立中山大學，共115頁。
- 國立自然科學博物館網站。數位典藏。地質學，四溝層。