

國立臺灣大學理學院地質科學研究所

碩士論文

Graduate Institute of Geosciences

College of Science

National Taiwan University

Master Thesis

臺灣東南外海過去七千五百年來的黑潮水文變化

**Hydrographic changes of the Kuroshio Current off
southeast Taiwan during the past 7500 years**

賴永翔

Yung-Hsiang Lai

指導教授：魏國彥 博士

Advisor: Kuo-Yen Wei, Ph.D.

中華民國 98 年 6 月

June, 2009

誌謝

在這三年的研究生生涯中，感謝魏老師帶領著我走入古海洋的研究殿堂，雖然一開始在懵懵懂懂的状态中，踏入了研究翼足類的新領域，當時在搜尋翼足類的論文跟圖鑑，一邊欣賞著這些海裡漂流的海天使，一邊想著該怎麼將牠拿來作化學分析，對這一個小傢伙還蠻感興趣的，但事與願違，由於駑鈍的學生無法開發出一套新的方法來應對，讓自己沈浸在失望低落的心情許久許久……，接著在碩二的寒假中，跟魏老師與羅立學長的一席談話，討論更換我未來研究的題目跟方向時，讓我心中再次充滿著希望，接著琵琶別抱，由閃亮可愛的海天使轉換到動感十足的有孔蟲，謝謝老師在我最迷惘的時刻，為我點了一盞明燈，撥開我頭上覆蓋許久的烏雲，重見溫暖宜人的陽光，在魏老師的課堂上，特別是經濟來源的「生物的演化與絕滅」，老師淵博的知識與精鍊的話語，每次上課都讓我如沐春風，也對自然與人的議題多了一份省思，在身教與言教上，從魏老師身上學到做研究的態度及做人處世應當要有的堅持，謝謝老師。

在研究上的實驗操作，感謝沈川洲老師跟米泓生老師出借寶貴的儀器時間，讓學生能順利的得到研究所需的資料，感謝沈老師在 AGU 摘要截稿前夕幫我校稿，並指點我可以從哪些角度去看自己的資料並加以討論；感謝米老師給予我在穩定同位素地質學上的啟蒙，奠定我對氧同位素概念的基礎，並仔細訂正論文中的錯誤；感謝汪中和老師在地質年會與口試所提供的寶貴意見，補足學生思慮不周之處；感謝李孟陽老師與楊天南學長對我所研究的內容給予畫龍點睛之效，使學生的論文討論部分有新的方向與思考。感謝以上老師的幫助，讓學生能從各個角度來看黑潮的前世今生並順利完成論文。

謝謝羅立大學長在這三年來的指導與幫助，每次看到羅立寄來的電子信件，十有八九都是最近有關於全新世的相關文獻，更新文獻的速度真是讓鞭長莫及，此外，不論是在洗蟲還是上機教學上，學長都很有耐心的為我們解答各種問題，特別是在機器快要掛了的時候，用他靈巧的雙手跟經驗一一化解，真是實驗室的守護神；感謝致展學弟在這三年來的陪伴，不論是外出吃飯的飯友、羽球系隊的球友，還是洗蟲、上機時的助手，都讓我在緊湊的研究生活中有所放鬆；謝謝 317A 的好伙伴：怡綺、姿彤、忠哲，感謝你們在我最繁忙的時候，給我鼓勵陪我走過這如夢似幻的日子；謝謝智凱、文心、順中、揚蕙、殷田、巧芸、林蔭、瀨之、宏偉等學長姐們的鼓勵與建議；謝謝允心、貞吟、Tim 這幾位同學的砥礪；謝謝師大同梯的怡君、峰榮陪我一起走過，許多次 meeting 後的晚餐是我們最快樂的時光；謝謝怡美學姐的鼓勵與幫助及琇玉學姐分析樣本的辛勞；感謝 115 實驗室的郁豫學姐幫我們處理許多行政的大小雜物，讓我們可以無後顧之憂專心的研究。

最後感謝我最親愛的家人，有你們的支持與鼓勵真好，感謝每次回家陪伴我聊天的妹妹，遠在重洋的弟弟在 AGU 期間陪我聊到電話卡沒錢，還有無條件支持我的父母，甚至還來實驗室來看有孔蟲到底長什麼樣，還有畢業典禮特地來參加的阿公，您的出現我真的很感動，謝謝您們。

摘要

本研究分析臺灣東部外海綠島北方的 ORI715-21 岩芯過去 7.5 ka 的浮游有孔蟲氧同位素紀錄 ($\delta^{18}\text{O}_c$) 與鎂鈣元素比 (Mg/Ca ratio)，進而重建古海表溫 (Sea surface Temperature, SSTs) 及古海水鹽度 (Sea Surface Salinity, SSS)。ORI715-21 岩芯平均沈積速率約為 25 cm/kyr， $\delta^{18}\text{O}_c$ 之數值在 7.5 ka 以來呈現變輕且振盪加劇的趨勢，而重建之浮游有孔蟲鎂鈣比紀錄顯示在 7.5 ka 以來的趨勢大致呈穩定狀態。

將 ORI715-21 岩芯鎂鈣元素比所轉換的 SST 與西太平洋暖池、沖繩海槽 (MD01-2403) 岩芯的 SSTs 相對比，發現三者的 SSTs 長期趨勢相似，皆呈現穩定狀態。另與臺灣南投頭社盆地之全新世花粉紀錄所呈現之氣候序列相比，與花粉紀錄所得之森林相轉換暗示之冷暖變化無同時性，但與 GISP2 冰芯的 ^{10}Be 含量變化曲線有同時性的現象，另將台灣東岸外海及南沖繩海槽兩根岩芯與本州島中南部海域的緯向溫度差值作對比，發現黑潮主流在該海域的擺盪現象與黑潮上游區的溫度變化有連動關係，當黑潮上游區的溫度較高，在日本南部海域的黑潮易於向北擺盪。

在黑潮上游區 ORI715-21 岩芯經由 $\delta^{18}\text{O}_c$ 與鎂鈣元素比所重建的水體氧同位素值 $\delta^{18}\text{O}_{w-I}$ 變化與南沖繩海槽區的 MD01-2403 岩芯的 $\delta^{18}\text{O}_{w-I}$ 有相似的趨勢，兩者的振幅自 8.0 ka 至 1.3 ka 大體上相近，皆呈現自 8.0 ka 以來逐漸變輕，但卻與貴州董哥洞的石筍氧同位素值成反向關係，表示東亞地區東亞夏季季風的強度減弱，但是台灣東岸及南沖繩海槽的海水反而變淡，顯示東亞夏季季風的變化並無影響到熱帶太平洋開放海區。但從 1.3 ka 至今的水體氧同位素變化則與董哥洞的石筍氧同位素值呈同向變化，顯示東亞夏季季風小幅增強，表層海水氧同位素值也相應變淡。

ORI715-21 岩芯的水體氧同位素之振幅與 MD01-2403 岩芯的振幅各約 0.8‰ 與 0.6‰ 左右，顯示兩者分別皆有明顯的降雨量增加的現象，其值約 377 ± 217 mm 與 277 ± 217 mm，推測應是於東亞夏季季風期間在黑潮上游區與南沖繩海槽區域降

水增加所致。兩者之差值亦可視為兩地之間同一黑潮水團受到不同淡水量混合之影響，數值相差越小暗示流黑潮流速越快，期間所受外來水的混合效果越低，故可利用 ORI715-21 岩芯與 MD01-2403 岩芯之 $\delta^{18}\text{O}_{\text{W-I}}$ 之間的差值絕對值當作黑潮流速變化的代用指標，結果顯示黑潮流速變動有百年尺度的週期，而在 ITCZ 北移、ENSO 不顯著的全新世大暖期時，黑潮流速有加快的趨勢，此外，在過去 4.0 ka 以來，ITCZ 南移，ENSO 顯著時，黑潮流速有減弱的趨勢。在 6.1~5.9 ka 頭社盆地所記錄之暖期事件中， $\delta^{18}\text{O}_{\text{W-I}}$ 絕對差值有明顯減小的情形發生，可能暗示黑潮流速加快時使得台灣中部更為暖濕。

關鍵字：*Globigerinoides ruber*, 黑潮、氧同位素、海水氧同位素、鎂鈣元素比、東亞夏季季風、間熱帶輻合區、聖嬰現象—南方震盪



Abstract

We analyzed oxygen, carbon isotopes and Mg/Ca element ratios of planktonic foraminifera, *Globigerinoides ruber*, in the ORI715-21 marine core off southeast Taiwan during the past 7,500 years and reconstructed the sea surface temperatures (SSTs) and sea surface salinity (SSS). The average sedimentation rate of the core was about 25 cm/kyr. The values of $\delta^{18}\text{O}_c$ of *G. ruber* displayed a long-term gradual depletion trend with centennial-scale fluctuations and the reconstructed records of Mg/Ca ratios of *G. ruber* exhibited the approximately stable trend during the past 7.5 ka.

The Mg/Ca-derived SSTs of the core were compared with that of MD98-2181 in the west Pacific warm pool (WPWP), and MD01-2403 in the southern Okinawa Trough. We found that the long-term SSTs trends are similar in showing stable condition. However, in comparison with the Holocene climate series in Toushe Peat Bog, in central Taiwan, the Mg/Ca-derived SSTs are not closely related to the forest biome shifts reflected from the pollen spectra, yet, the SST records are synchronous with the changes in ^{10}Be flux in the GISP2 ice core.

The SST ($^{\circ}\text{C}$) in the ORI715-21 marine core compared with the latitudinal ΔT ($^{\circ}\text{C}$) off south Honshu, Japan. The two records are coupled, indicating that the higher temperature in the upper reach area of Kuroshio Current off east Taiwan, the stronger the northern migration of the Kuroshio Extension off the south Japan.

The $\delta^{18}\text{O}_{\text{W-I}}$ (calculated from the $\delta^{18}\text{O}_{\text{c}}$ and Mg/Ca ratio) of the ORI715-21 shows a similar trend with that of MD01-2403, but in opposite direction to the stalagmite $\delta^{18}\text{O}$ of the Dongge Cave during 8 - 1.3 ka, suggesting that the salinity of the sea-surface waters off east Taiwan had become fresher despite the East Asian monsoon had become weaker. However, during the last 1,300 years, they all exhibited the same direction, namely, the $\delta^{18}\text{O}_{\text{W-I}}$ has become more depleted while the East Asian monsoon intensified.

Magnitudes of the $\delta^{18}\text{O}_{\text{W-I}}$ fluctuations shown by the ORI715-21 core and MD01-2403 core are $\sim 0.8\text{‰}$ and $\sim 0.6\text{‰}$, respectively, during the past 1,300 years, signifying a salinity difference caused by local fresh-water input in the season of the East Asian summer monsoon equivalent to a 377 ± 217 mm precipitation off southeastern Taiwan, and 277 ± 217 mm precipitation in the south Okinawa Trough. Assuming that the $\delta^{18}\text{O}_{\text{W-I}}$ between these two sites were affected by the amount of precipitation over the east Taiwan region, the slower the Kuroshio, the larger the gradient is expected. Therefore, the $\delta^{18}\text{O}_{\text{W-I}}$ gradient can be used as a measure of the speed of the Kuroshio Current off eastern Taiwan. The result shows that the Kuroshio flew faster during the mid-Holocene when the ITCZ shifted northward and the ENSO was less frequent. The trend has reversed during the last 4,000 years when the ENSO became more frequent and the Kuroshio's speed also increased. Finally, the warm event recorded by the pollen in

Toushe Peat Bog at 6.1-5.9 ka, is coincided with a small value of the $\delta^{18}\text{O}_{\text{w-l}}$ gradient, implying that the faster the Kuroshio Current flow, the warmer and wetter the central Taiwan was.

Key words: *Globigerinoides ruber*, Kuroshio Current, oxygen isotope, oxygen isotope of sea water, Mg/Ca element ratios, East Asia summer monsoon, ITCZ, ENSO



目錄

致謝	I
中文摘要	II
英文摘要	IV
章節目錄	VIII
表目錄	X
圖目錄	X I



章節目錄

第一章	緒論	1
1.1	研究動機與目的	1
1.2	研究區域概況	3
1.3	前人研究	5
第二章	研究材料與方法	15
2.1	研究材料	15
2.2	研究方法	16
2.2.1	年代模式	16
2.2.2	氧、碳同位素 ($\delta^{18}\text{O}_c$ 、 $\delta^{13}\text{C}_c$) 原理與前處理方法	16
2.2.2.1	穩定同位素	16
2.2.2.2	浮游有孔蟲處理方法	17
2.2.2.3	氧、碳同位素分析	18
2.2.3	鎂鈣元素比 (Mg/Ca ratios) 原理與前處理方法	19
2.2.3.1	鎂鈣元素比原理	19
2.2.3.2	有孔蟲標本前處理	19
2.2.3.3	鎂鈣元素比分析	21
第三章	研究結果	24
3.1	ORI715-21 岩芯之浮游有孔蟲氧碳同位素的分析結果	24
3.2	ORI715-21 岩芯之浮游有孔蟲鎂鈣元素比的分析結果	25
第四章	討論	30
4.1	氧同位素的紀錄	30
4.2	鎂鈣元素比所轉換的古海表水溫	31
4.3	水體氧同位素變化	33
4.4	影響水體氧同位素變化的因子—黑潮	36

4.5 影響水體氧同位素變化的因子—雨量效應與東亞夏季季風期降水增加.	39
.....
第五章 結論.....	53
參考文獻.....	55



表目錄

表一 本研究所使用之加速質譜儀 (AMS) 碳十四定年結果及換算之日曆年代.

.....22



圖目錄

圖 1-1	本研究所研究之岩芯 ORI715-21 及與之相比較的海洋岩芯 A7、MD01-2403、MD98-2181、董哥洞石筍位置圖.....	7
圖 1-2	東亞與澳洲區域之 1982-1994 年平均 1000hPa 的七月風向線.....	8
圖 1-3	ORI715-21 岩芯位置圖.....	9
圖 1-4	ORI715-21 及 MD01-2403 岩芯附近海域的海表水層溫鹽資料.....	10
圖 1-5	國家海洋科學研究中心蒐集之 1991-2007 水文資料.....	11
圖 1-6	台灣東部外海海水表面鹽度與海水氧同位素之關係式.....	12
圖 1-7	熱帶太平洋年平均海表鹽度圖與西太平洋暖池海洋岩芯站位圖.....	13
圖 1-8	西太平洋暖池海洋岩芯之紀錄.....	13
圖 1-9	臺灣地區在梅雨季之不同乾濕年時，高低層的大氣環流變化示意簡圖..	14
圖 2-1	ORI715-21 岩芯的粗顆粒百分比對深度作圖.....	21
圖 2-2	本研究之岩芯 ORI715-21 之年代對深度圖以及年代對沈積速率圖.....	22
圖 2-3	浮游有孔蟲 <i>G. ruber</i> (s.s.) 殼體和 <i>G. ruber</i> (s.l.) 殼體之電子顯微鏡照片.....	23
圖 2-4	浮游有孔蟲 <i>G. ruber</i> (s.s.) 殼體鎂鈣元素比處理前後之電子顯微鏡照片.....	23
圖 3-1	ORI715-21 岩芯的 <i>G. ruber</i> (s.s.) 之深度對氧碳同位素曲線與鎂鈣元素比曲線圖.....	26
圖 3-2	ORI715-21 岩芯的 <i>G. ruber</i> (s.s.) 之年代對氧碳同位素曲線與鎂鈣元素比曲線圖.....	27
圖 3-3	岩芯 ORI715-21 的 <i>G. ruber</i> (s.s.) 之鎂鈣元素比對鋁鈣元素比之關係圖.....	28
圖 3-4	岩芯 ORI715-21 的 <i>G. ruber</i> (s.s.) 之鎂鈣元素比對鐵鈣元素比之關係圖.....	28

圖 3-5	岩芯 ORI715-21 的 <i>G. ruber</i> (s.s.) 之鎂鈣元素比對錳鈣元素比之關係圖	29
圖 4-1	ORI715-21 岩芯與 MD01-2403 岩芯 8.0 ka 以來之浮游有孔蟲 <i>G. ruber</i> (s.s.) 氧同位素紀錄	42
圖 4-2	ORI715-21 岩芯之 8.0 ka 以來之浮游有孔蟲 <i>G. ruber</i> (s.s.) 鎂鈣元素比紀錄所轉換成的 SSTs 紀錄	42
圖 4-3	過去一萬三千年以來南投頭社盆地古湖泊沈積物之孢粉群集與 ^{10}Be 通量曲線圖	43
圖 4-4	浮游有孔蟲 <i>G. ruber</i> (s.s.) 鎂鈣元素比所重建之 8.0 ka 以來的沖繩海槽、黑潮上游區、西太平洋暖池之古海表溫紀錄	44
圖 4-5	過去 8.0 ka 以來黑潮上游區與沖繩海槽之古海表溫紀錄與南投頭社盆地古湖泊沈積物之孢粉群集和 ^{10}Be 通量曲線比較圖	45
圖 4-6	ORI715-21 岩芯在 7.5 ka 以來之海水氧同位素值	46
圖 4-7	過去 8.0 ka 以來之全球海平面複合曲線、ORI715-21 岩芯之校正後海水氧同位素曲線以及海表面鹽度曲線	47
圖 4-8	8.0 ka 以來之沖繩海槽、黑潮上游區、西太平洋暖池之海水氧同位素曲線與董哥石筍氧同位素曲線比較圖	48
圖 4-9	(a) 日本本州島中南部海域四根海洋岩芯站位圖 (b) 日本本州島中南部海域南北緯向的溫度差異變化對年代圖	49
圖 4-10	各種氣候紀錄 8.0 ka 以來的比較圖	50
圖 4-11	ITCZ 與冷舌於東赤道太平洋之剖面示意圖	51
圖 4-12	過去一千三百年以來 ORI715-21 岩芯與 MD01-2403 岩芯之海水氧同位素 ($\delta^{18}\text{O}_{\text{W-I}}$)	52
圖 4-13	1973-2005 的香港京士柏氣象站 (Kings Park) 所記錄的月平均降水量對雨水氧同位素圖	52

第一章緒論

1.1 研究動機與目的

一般咸信全新世的氣候相對較穩定 (e.g. Dansgard *et al.*, 1993) ，但是最近由冰芯、海洋沈積物以及洞穴石灰岩所得到的高解析度紀錄卻顯示此觀點有待商榷 (Steig, 1999; Spahni *et al.*, 2005; Wang *et al.*, 2005; Lin *et al.*, 2006) 。在臺灣地區雖然有許多以花粉化石紀錄重建全新世以來的冷暖變化 (Liew and Huang, 1994; Liew, 1995; Liew *et al.*, 2006) ，但其解析的氣候變遷多為定性變化而難以定量；此外臺灣東部外海由於面臨深度陡降的太平洋，碳酸鹽溶躍面 (carbonate lysocline) 高於洋盆盆底 (Chen *et al.*, 1988) ，使得有孔蟲殼體常因溶解殆盡而難以解析。另外，靠近臺灣東岸的岩芯也會因為濁流作用影響，而無法獲得連續性的海洋岩芯，因此在對全新世的氣候解析上，臺灣東部外海常因缺乏高解析度且高品質的海洋岩芯，而難以對臺灣及其周圍海域的古氣候變化有更精確的了解。

在臺灣東部外海對古黑潮的水文變化中，主要有謝英宗 (1993) 在臺灣東南外海的研究及 Lin (2006) 在南沖繩海槽的研究，謝英宗 (1993) 所使用的兩根海洋岩芯：OR102-3P 岩芯與 OR216-17 岩芯，並利用此兩根岩芯的浮游性有孔蟲 *Globigerinoides sacculifer* 及 *Neogloboquadrina dutertrei* 為材料，藉由氧同位素比值的方法重建混合層與斜溫層之海水溫度，推測古黑潮流幅在 6500 年前以來有逐漸向臺灣東部海岸靠近，造成靠近臺灣東岸的海洋岩芯 OR102-3P 之斜溫層水溫增加，斜溫層深度變深，但此兩根岩芯在全新世的解析度不高，難以對全新世的古黑潮的水文變化有更詳細的探討；Lin *et al.* (2006) 利用位於南沖繩海槽的 MD01-2403 岩芯，藉由浮游性有孔蟲 *Globigerinoides ruber* (*G. ruber*)，並配合鎂鈣元素比 (Mg/Ca ratio) 與氧同位素 ($\delta^{18}\text{O}_\text{c}$) 的方法重建古海表溫度 (Sea Surface Temperature, SSTs) 及古海表鹽度 (Sea

Surface Salinity, SSS) ，建立全新世以來的黑潮水文變化，其發現全新世以來南沖繩海槽的 SST 維持穩定的狀態，但 SSS 呈現逐漸變淡的趨勢。儘管已經有了上述資料，臺灣東南外海的海洋岩芯仍沒有利用鎂鈣元素比的方法重建過去較精確的 SSTs，進而對此區域黑潮在全新世以來的水文變化有更進一步的了解。

本研究是利用在綠島北部外海所採的高解析度 ORI715-21 岩芯的浮游有孔蟲 *G. ruber* 的氧同位素與鎂鈣元素比，重建過去 7500 年來的 SST 與 SSS 的變化，將其與日本本州島南部海域的三根海洋岩芯之 SSTs 差值相比 (Sawada and Handa, 1998) ，比較是否出現在黑潮末端的擺盪現象與黑潮上游區的 SST 有連動關係，並與沖繩海槽的 A7 (Sun *et al.*, 2005) 、MD01-2403 海洋岩芯 (Lin *et al.*, 2006) 和西太平洋暖池的 MD98-2181 海洋岩芯 (Stott *et al.*, 2004) 對比，研究黑潮上游區與沖繩海槽、西太平洋暖池在中全新世以來的 SSTs 與水體氧同位素 ($\delta^{18}\text{O}_w$) 差異。除了海洋紀錄之外，與 Liew *et al.* (2006) 的臺灣南投頭社盆地的全新世花粉紀錄相比，判斷是否陸地與海洋的氣候紀錄有無同時性，此外與貴州省董哥洞石筍氣候紀錄 (Wang *et al.*, 2005) 比較，判斷海洋與陸地的氣候紀錄是否有相耦合的情況，最後藉由 ORI715-21 岩芯與 MD01-2403 岩芯的海水氧同位素絕對差值，建立黑潮流速快慢的代用指標，進而判斷是何種機制影響臺灣的古氣候以及黑潮的古水文變化。

1.2 研究區域概況

黑潮 (Kuroshio Current) 是西北太平洋最重要的西邊界流，它起源於西赤道太平洋上的北赤道洋流 (North Equatorial Current, NEC)，當 NEC 向西流至菲律賓群島附近時，受到地形影響在 12~15°N 間分叉成兩道洋流，北支為黑潮，南支為民答那峨洋流 (圖 1-1) (Mindanao Current) (Qiu and Lukas, 1996; Qu *et al.*, 1998; Qu and Lukas, 2003)。往北流的黑潮以大約 15 SV (1 SV=10⁶m³s⁻¹) 的高溫、高鹽、低營養鹽的海水流量流經呂宋島、臺灣的東岸以及南沖繩海槽 (southern Okinawa Trough) (Liang *et al.*, 2003)。進入南沖繩海槽之後受到東海陸棚的地形影響，黑潮主流只能沿著東海的大陸棚坡邊界轉向東北，流向日本南岸，最後離開日本向東流向北太平洋，形成黑潮續流 (Kuroshio Extension)，由於黑潮從熱帶海洋地區傳遞溫暖海水至中高緯度地區，因此在全球熱平衡中扮演重要的角色 (Qu, 2003)。

由於季風與聖嬰現象-南方振盪 (El Niño-Southern Oscillation, ENSO) 的活動影響了 NEC 的緯度位置，使得從 NEC 分離出的黑潮流量也連帶受到影響 (Qu and Lukas, 2003; Kim *et al.*, 2004; Qu *et al.*, 2004)。NEC 開始分離成南北兩道洋流的位置，在夏天有明顯偏南的現象，有助於更多黑潮水的傳輸，而在冬天則會呈相反的狀態；此外，黑潮在聖嬰年的傳輸量會減弱，在反聖嬰年則會增強，但是年際變動的效應對季風所導致的季節性傳輸量則是呈次要狀態，影響不太明顯 (Kim *et al.*, 2004)。

在東亞風場方面，An (2000) 的研究指出東亞季風深受熱帶太平洋與東亞陸塊間的比熱差異之影響，而東亞夏季季風所帶來之降雨對此區的居住環境與人口穩定發展有重要的貢獻，此外，東亞夏季季風會受澳洲季風系統的影響，在七月份時，間熱帶輻合區 (Intertropical Convergence Zone, ITCZ) 向北移動，促使澳洲北部的東南貿易風也向北遷移，越赤道後受科氏力 (Coriolis force) 的影響轉向成帶有暖濕水氣的西南氣流並增強東亞夏季季風，最遠可達

中國北緯 40° 的位置附近 (圖 1-2)。

本研究所採用的岩芯為臺灣東南外海綠島北方之 ORI715-21 岩芯 (121.50°E, 22.72°N, 水深 760 公尺) (圖 1-3) 與 MD01-2403 岩芯 (Lin *et al.*, 2006)，兩岩芯皆位處於黑潮主流流經之地，分別代表黑潮上游區 (NEC 分叉點至臺灣東部外海之間的區域) 及南沖繩海槽的狀況 (圖 1-1)。ORI715-21 岩芯和 MD012403 岩芯所在位置之現今 SST 分別為 27.2°C 和 26.5°C (圖 1-4-a)，而現今 SSS 則分別約為 34.12 psu 和 34.45 psu，兩者所處海域相差約 0.33 psu (圖 1-4-b) (國家海洋研究中心海洋資料庫，<http://www.ncor.ntu.edu.tw>)；黑潮主流最大可達每秒 100 公分的流速 (圖 1-5) (國家海洋科學中心海洋資料庫，<http://www.ncor.ntu.edu.tw>)，在臺灣東部外海之黑潮流幅可達 100 公里 (Liang *et al.*, 2003)，而臺灣東南部外海的海水表面鹽度與海水氧同位素值 ($\delta^{18}\text{O}_{\text{sw}}$) 呈現 $\delta^{18}\text{O}_{\text{sw}}(\text{VSMOW}) = 0.33 \times \text{SSS} - 11.01$ 的關係 ($R^2=0.62$, $N=57$) (圖 1-6) (林清芬, 1999; Lin, 2005; 2007 水文聯合探測 CTD 資料)，根據此關係式，可以從 $\delta^{18}\text{O}_{\text{sw}}$ 反推得知 SSS 的變化情形。

1.3 前人研究

臺灣東部海域面臨深廣的太平洋，無明顯大陸坡，離岸兩公里左右即為陡峭的大陸斜坡，水深陡降至 1500 公尺或更深，且因臺灣位處於環太平洋地震帶上，使得濁流頻繁，洋底沈積物頗受擾動，經常無法獲得適合古海洋研究的岩芯。目前臺灣東部海域有關古海洋學的文章有 Chen *et al.* (1984) 、Wang *et al.* (1985) 、Chen *et al.* (1992a) 、謝英宗 (1993) 、Lin *et al.* (2006) ；而南沖繩海槽相關古海洋學的文章較多，有 Wang and Chen (1988) 、Chang *et al.* (2005) 、Zhao *et al.* (2005) 、Wei *et al.* (2005) 、Richter *et al.* (2006) 、Wei (2006) 等。

根據 Stott *et al.* (2004) 利用西太平洋暖池 (West Pacific Warm Pool, WPWP) 的三根海洋岩芯 (圖 1-7) 所重建全新世以來之 SSTs 跟 SSS 的研究，顯示在全新世以來 WPWP 的 SST 在整個全新世以來減少 0.5 °C 左右 (圖 1-8b)，但 SSS 有逐漸變淡的趨勢，全新世以來減少約 1.5 psu (圖 1-8a)，暗示著全新世以來的 SST 無太大的變化之下，SSS 的改變可能是現今東西太平洋赤道地區 SSS 梯度有所差異，或是整個太平洋海盆呈現鹽度變淡的趨勢。

本研究所使用的 ORI715-21 岩芯位於臺灣東部外海的黑潮上游區的中繼地帶，且黑潮水將低緯度之 WPWP 的表層海水帶至中高緯度地區，因此研究本區的全新世以來的水文特性之變化，可探討 WPWP 的 SST 與 SSS 之變化能否影響到中高緯度地區，進而了解區域氣候特性與 WPWP 的水文變化在影響黑潮水文變化中所扮演的角色。

在區域降水特性中，梅雨是臺灣地區除了颱風與之外另一個重要的降水來源，對於梅雨的成因變化有助於對臺灣周圍海域的古氣候研究，Chen (1990, 1992) 認為梅雨活躍年 (多雨年) 與不活躍年 (少雨年) 之間的差異主要取決於對流層低層氣流的發源地及其強弱變化，亦即源自孟加拉灣地區的西南風旺盛時，若伴隨西太平洋高壓偏弱或偏南，常易形成梅雨活躍年。Wang and

Huang (1993) 展現乾濕梅雨季節在大氣環流上的差異特徵 (圖 1-9)：在濕梅年時，受到鄂霍次克海上空的阻塞高壓影響，使北方的乾冷系統易於在東亞發展，此外，如以臺灣為中心分東西兩邊的話，會發現高空噴流受到北方強化的乾冷大氣系統影響，在臺灣以西會以西北往東南的走向行進，而在臺灣以東則是由西南往東北的走向，而且其態勢會比乾梅年時更往南偏，有利於南方暖濕的大氣系統與北方乾冷的大氣系統在臺灣地區附近集中，加上南亞高壓在梅雨季時較為強大，輔以弱勢的西太平洋副熱帶高壓 (副高)，使得發源於孟加拉灣一帶的西南氣流給東亞帶來豐沛水氣，也讓臺灣地區的對流雲系發展旺盛、降水增加，形成濕梅年；在乾梅年時，鄂霍次克海上空並無阻塞高壓的存在，北方乾冷系統不易在東亞發展，高空噴流無明顯的偏南態勢，使其走向呈經向移動，不利於南北兩大氣系統在此區之發展；如果此時的南亞高壓向東南方移動，且副高向西北方向發展，會迫使西南氣流減弱，無法在東亞地區有更進一步的發展，使得東亞地區對流雲系減弱、降水減少，形成乾梅年。



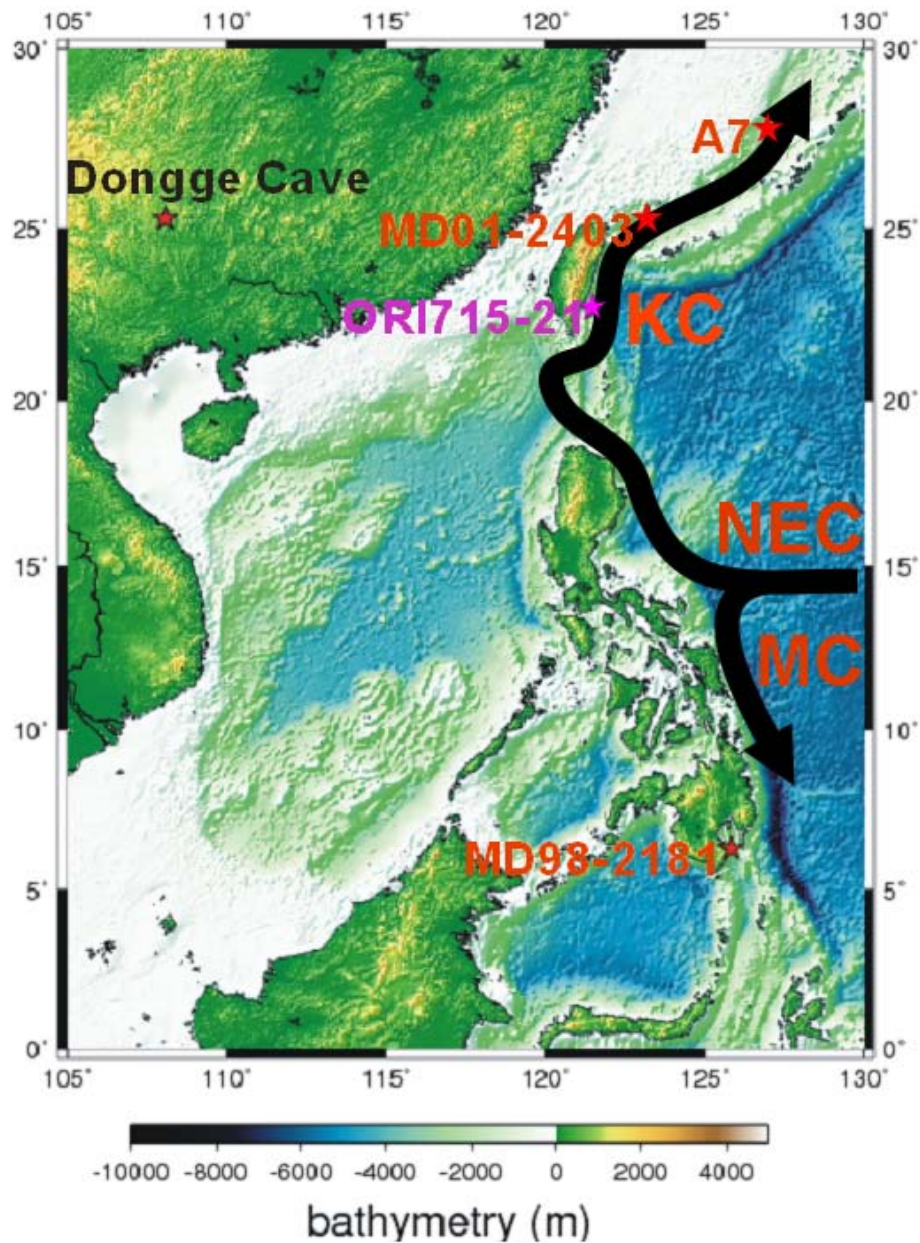


圖 1-1、本研究所研究的岩芯 ORI715-21 海洋岩芯及與之相比較的海洋岩芯 A7、MD01-2403、MD98-2181、董哥洞石筍位置圖。ORI715-21 岩芯 (121.50°E, 22.72°N, 水深 760 公尺)、A7 岩芯 (126.98°E, 27.82°N 水深 1,264 公尺) (Sun *et al.*, 2005)、MD01-2403 岩芯 (123.2°E, 25.3°N, 水深 1420 公尺) (Lin *et al.*, 2006)、MD98-2181 岩芯 (125.83°E, 6.3°N 水深 2,114 公尺) (Stott *et al.*, 2004) 以及貴州董哥洞 (108°5'E, 25°17'N 海拔高度 680 公尺) (Wang *et al.*, 2005)。KC：黑潮、NEC：北赤道洋流、MC：民答那峨洋流。

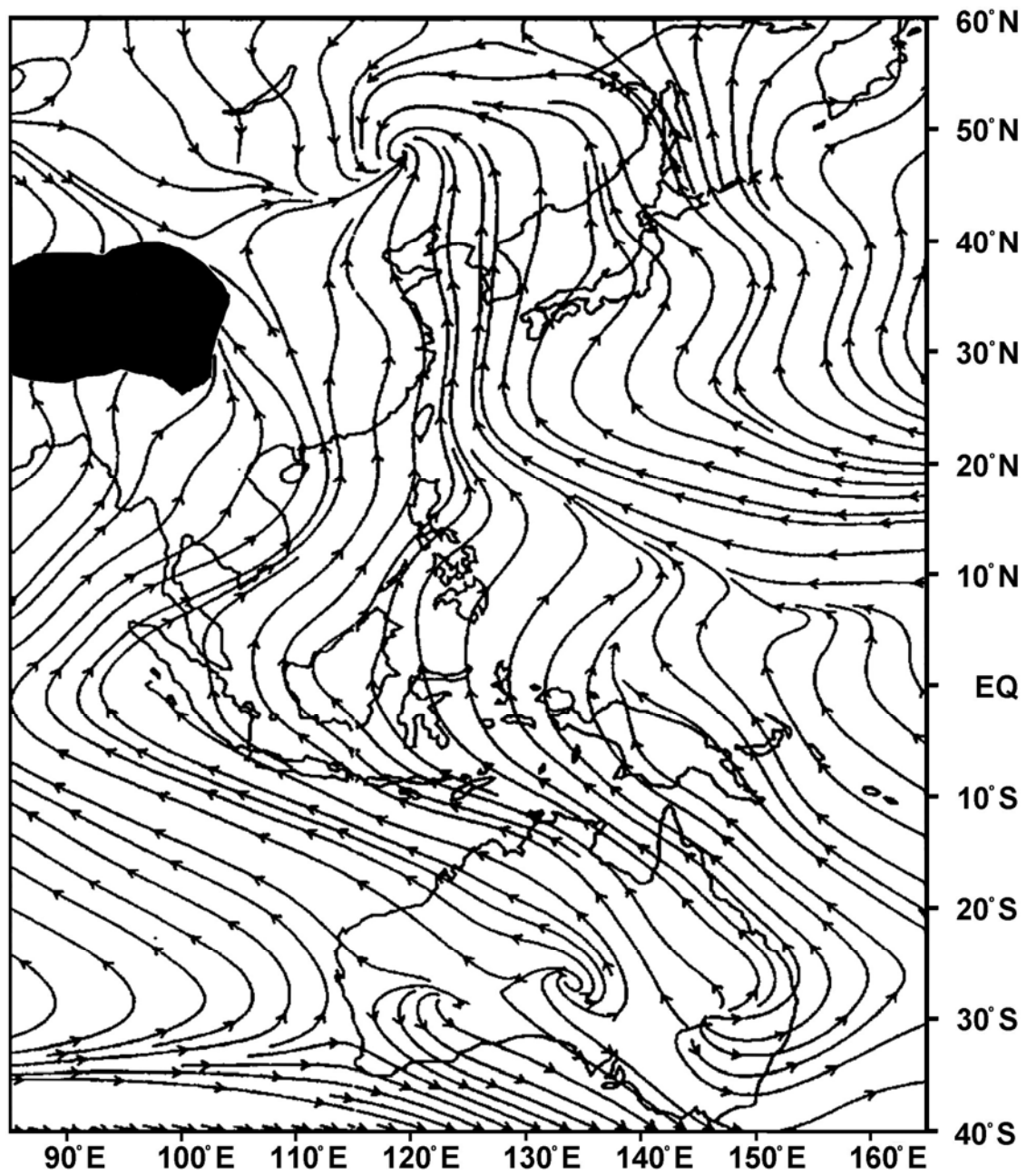


圖 1-2、東亞與澳洲區域之 1982-1994 年平均 1000hPa 的七月風向線。黑色區塊為
 西藏高原。此圖描述南北兩半球間的大氣交換情形。

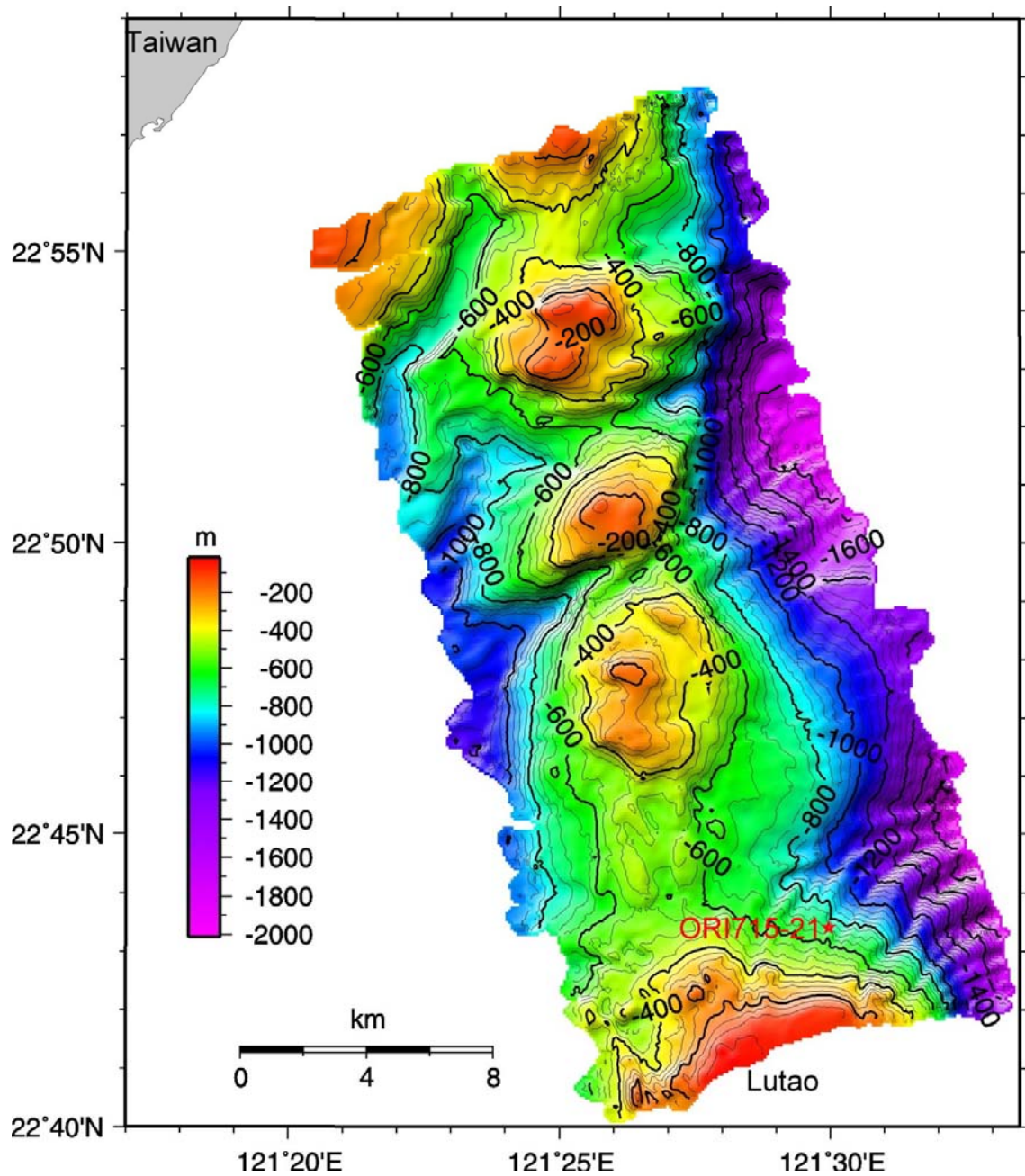


圖 1-3、ORI715-21 岩芯位置圖 (121.50°E, 22.72°N, 水深 760 公尺) (宋國士, 2009, 未發表)。

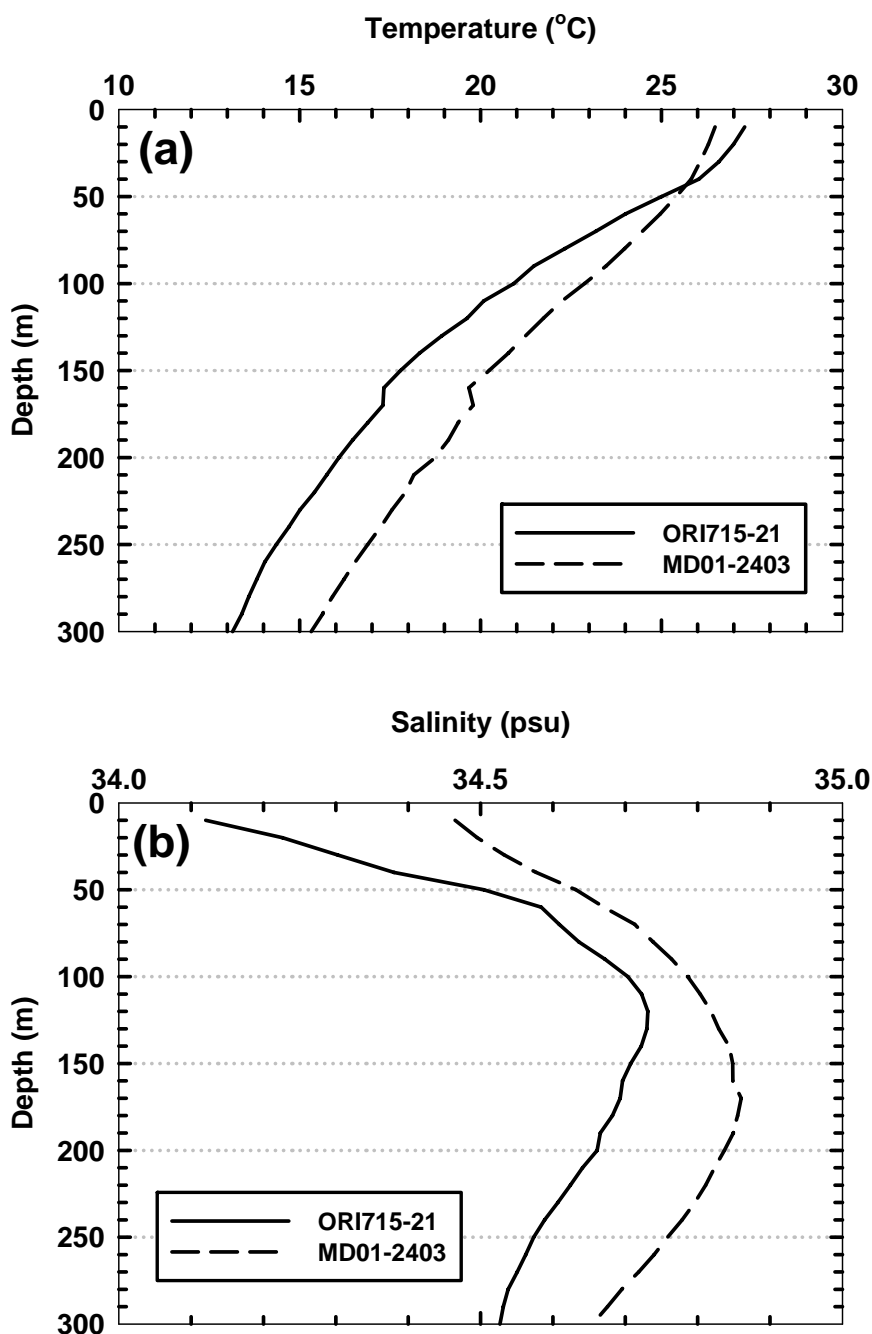


圖 1-4、ORI715-21 岩芯及 MD01-2403 岩芯附近海域的海表水層溫鹽資料。本圖係以國家海洋科學研究中心於 1985-2005 期間，以 30 分網格化每 10 米深度之四季溫鹽資料，再加以求取平均所得的全年溫鹽資料。ORI715-21 岩芯附近海域的溫鹽資料以 $(121^{\circ}0'-30' \times 22^{\circ}30'-60')$ 之範圍所繪，MD01-2403 岩芯附近海域的溫鹽資料以 $(123^{\circ}0'-30' \times 25^{\circ}0'-30')$ 之範圍所繪。(a) ORI715-21 岩芯和 MD01-2403 岩芯區域表層溫度對深度圖、(b) 鹽度對深度圖。

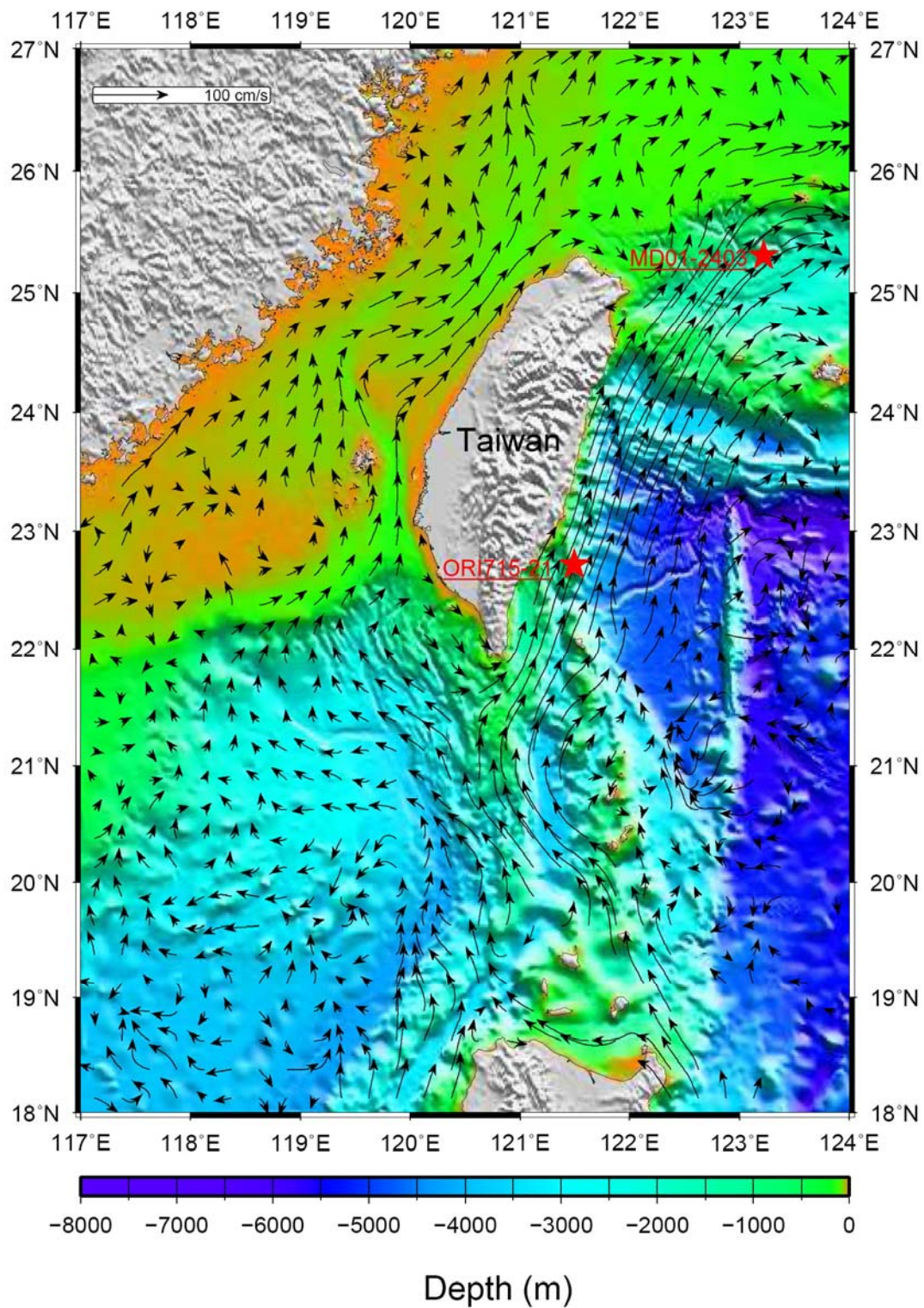


圖 1-5、根據國家海洋科學研究中心蒐集之 1991-2007 水文資料，繪製之臺灣周邊表層洋流流速圖，箭頭方向指示海流流向，箭頭長度指示海流流速大小，ORI715-21 岩芯與 MD01-2403 岩芯位置亦標於圖上，均位於黑潮主流流徑上。

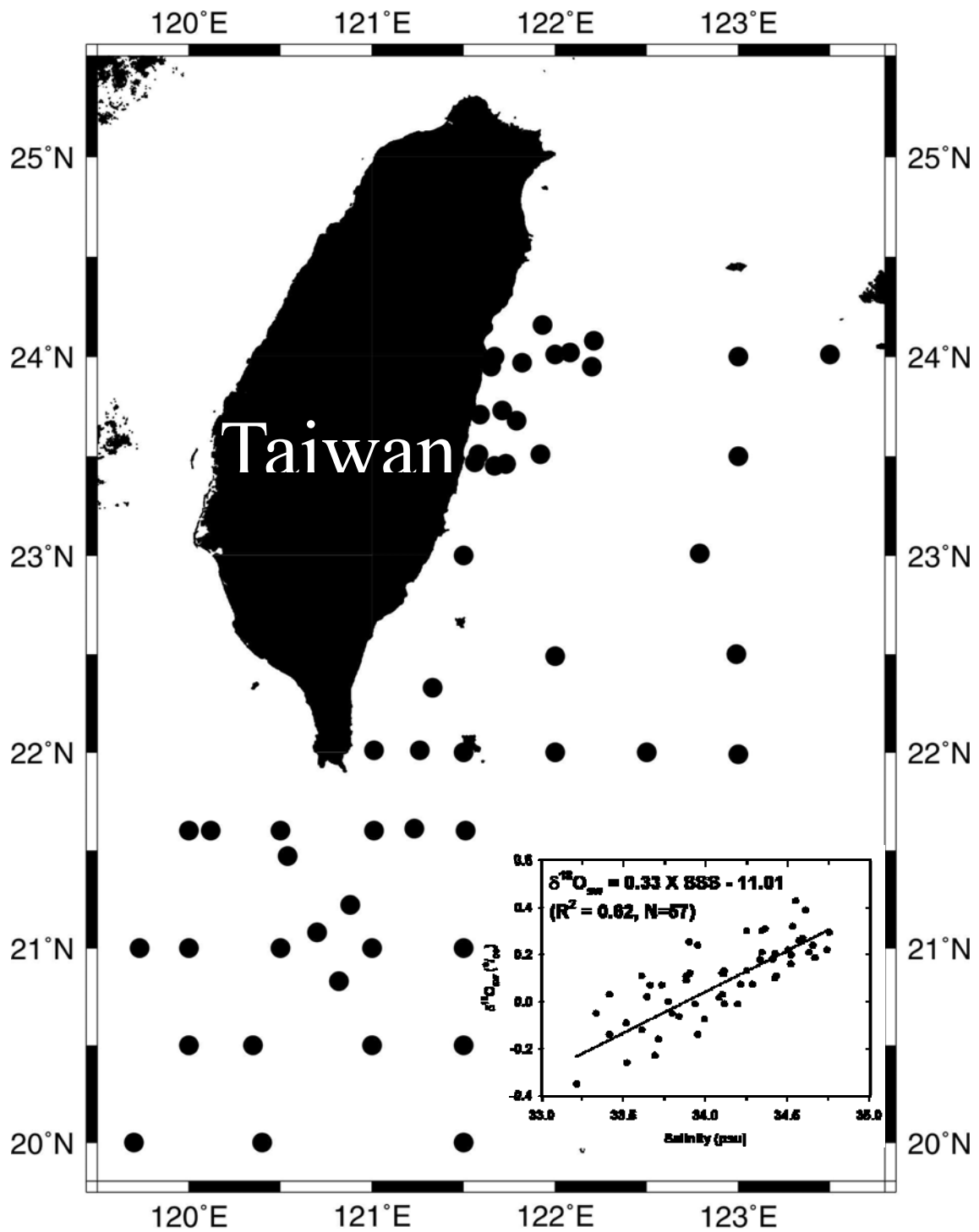


圖 1-6、台灣東南部外海海水表面鹽度與海水氧同位素之測量點（取自林清芬，1999; Lin, 2005; 2007 水文聯合探測 CTD 資料），及所建立之 $\delta^{18}\text{O}_{\text{sw}}$ (VSMOW) = $0.33 \times \text{SSS} - 11.01$ 的關係式 ($R^2=0.62, N=57$)。

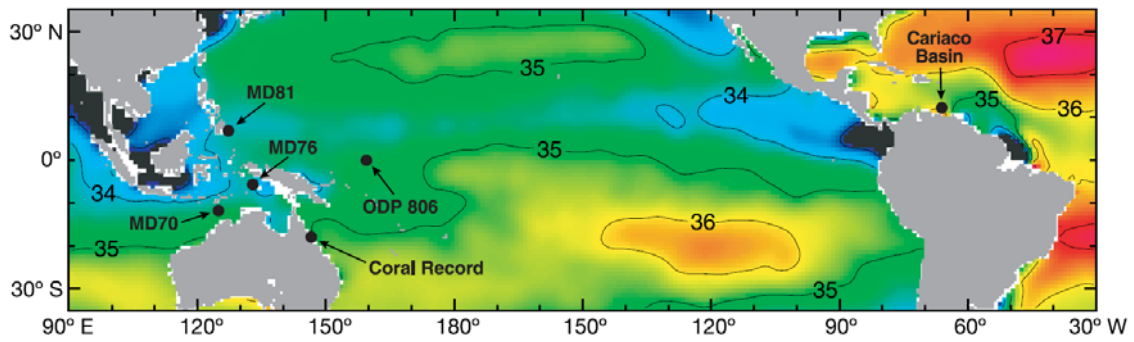


圖 1-7、熱帶太平洋年平均海表鹽度圖與西太平洋暖池海洋岩芯站位圖。(取自 Stott *et al.*, 2004)

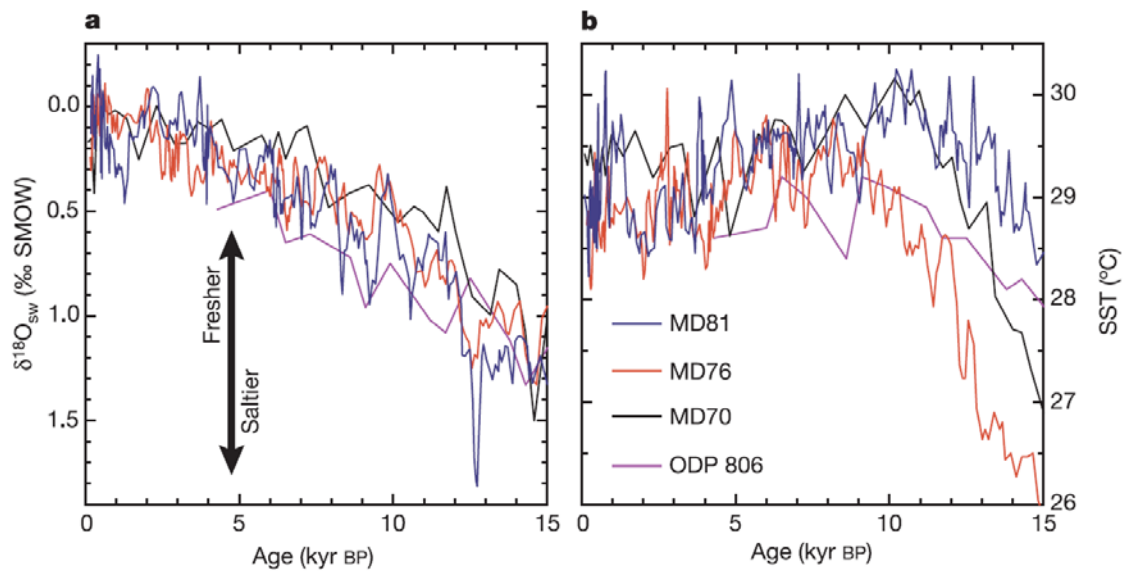


圖 1-8、西太平洋暖池海洋岩芯之紀錄。(a) 海水氧同位素值、(b) 海表溫度。MD81 岩芯：藍色、MD76 岩芯：紅色、MD70 岩芯：黑色、ODP806 岩芯：紫色 (取自 Stott *et al.*, 2004)。

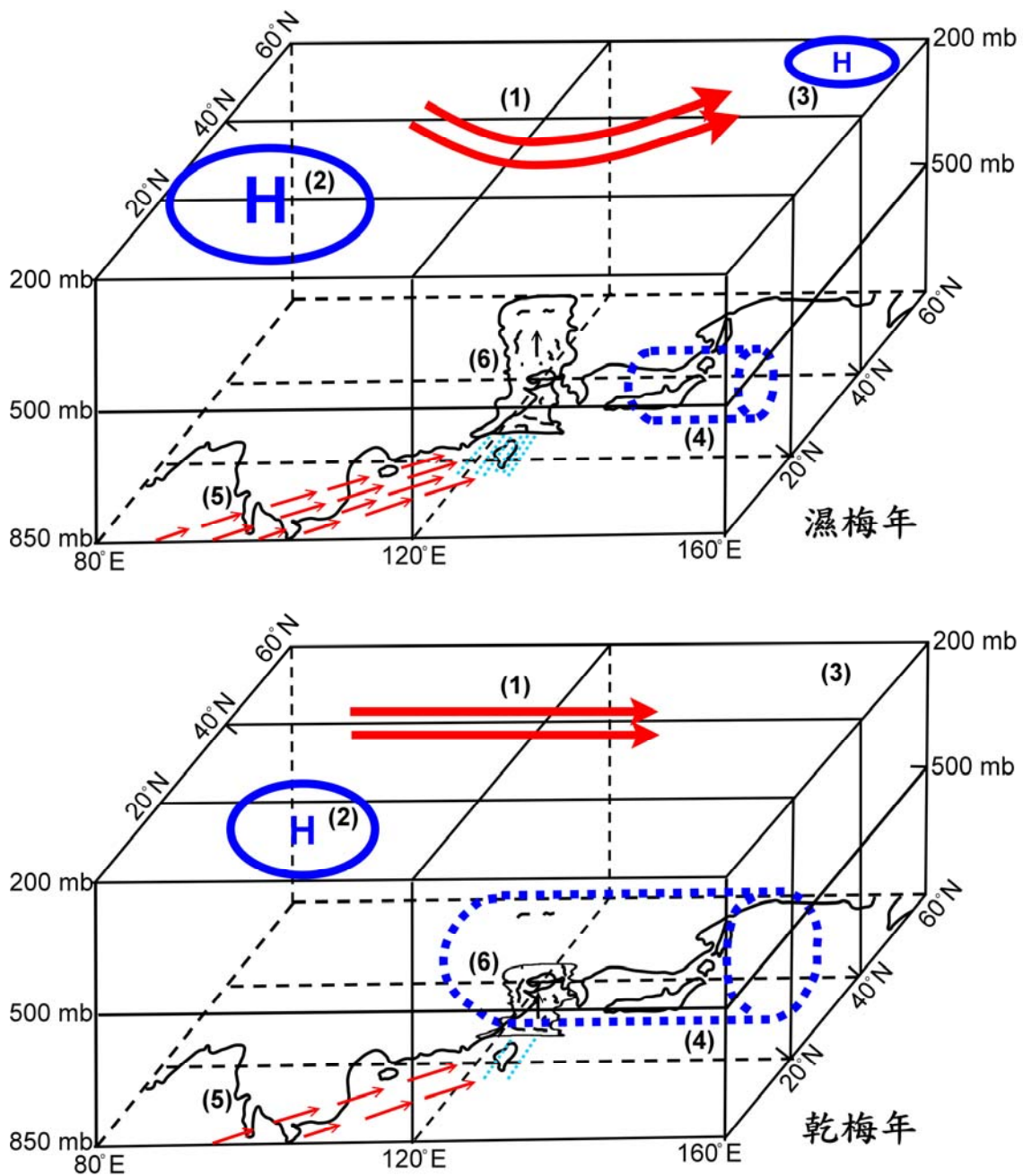


圖 1-9、臺灣地區在梅雨季之不同乾濕年時，高低層的大氣環流變化示意簡圖。(1) 高空噴流、(2) 南亞高壓、(3) 鄂霍次克海上空的阻塞高壓、(4) 西太平洋副熱帶高壓、(5) 西南氣流、(6) 積雲。圖中編號 (2) 的大小代表南亞高壓的強弱，編號 (4) 的大小代表副熱帶高壓的強弱與西伸情形 (修改自王作臺等人，1992)。

第二章研究材料與方法

2.1 研究材料

本研究使用的 ORI715-21 站位之重力岩芯取自臺灣東部外海綠島 (Lutao) 北方 (121.50°E, 22.72°N) 的斜坡上，水深 760 公尺處 (圖 1-3)。岩芯總長 193 公分，採樣間距為 2 公分。本岩芯含有大量的翼足類殼體 (Pteropoda)，且此區域碳酸鹽溶躍面深度 (Carbonate Lysocline Depth, CLD) 約 3000 公尺深 (Thunell *et al.*, 1992)，因此岩芯中的有孔蟲化石保存良好，未受到海水溶蝕。整體而言，本岩芯在 7.5 ka 以來的沈積速率在 7.5 ka 的 35.5 cm/kyr 之快速沈積逐漸減緩至約 3.3 ka 的 14.8 cm/kyr，再逐漸加快至約 1.2 ka 的 28.0 cm/kyr，平均沈積速率約為 25.2 cm/kyr。檢視岩芯，觀察粗顆粒 (> 63 μm) 之組成大部分為有孔蟲殼體，但也有火成岩屑之出現，特別是在岩芯深度 148 公分以下的火成岩屑有明顯增加的情形，因此，本岩芯之沈積速率之變化主要受非碳酸鈣質之陸源沈積物供應量多寡之影響，粗顆粒沈積物中火成岩屑的主要來源推測為綠島的火成岩體，與謝英宗 (1993) 對鄰近綠島海域的 ORI216-17P 海洋岩芯所做的粗顆粒分析的結果相似。在深度 148 公分 (~6.2 ka) 與 166 公分 (~6.7 ka) 處分別有約 50% 和 65% 的粗顆粒百分比 (圖 2-1)，檢視岩芯後發現含有淺海生物化石，顯示可能受到濁流事件的影響，因此在第三章的研究結果中，將此岩芯兩處深度之結果予以剔除。

2.2 研究方法

2.2.1 年代模式

本研究的年代模式依據 Lin *et al.* (2006) 之碳十四定年結果所建立 (表一)：岩芯 ORI715-21 分別在第 5 公分、第 39 公分、第 71 公分、第 144 公分、第 164 公分、第 174 公分，挑選了總重量大於 6 mg 的浮游性有孔蟲殼體 (*Globigerinoides spp.* 以及 *Orbulina universa*)，送往紐西蘭拉福特實驗室 (Rafter Radiocarbon Laboratory, Institute of Geological and Nuclear Sciences, New Zealand) 進行加速質譜儀 (AMS) 碳十四定年分析，分析結果扣除 400 年之全球中低緯度海洋平均碳儲存庫年齡 (reservoir age) (Bard, 1988)，再利用 CALIB 5.0.2 程式 (<http://calib.qub.ac.uk/calib/calib.html>) (Stuiver *et al.*, 2005) 修正成為日曆年代 (Calendar year)。除了上述 6 個絕對定年點之外，在深度 174 公分以淺的日曆年代皆用內插的方式獲得，而 176 公分至 192 公分的日曆年代則用外插的方式獲得 (圖 2-2)。

2.2.2 氧、碳同位素 ($\delta^{18}\text{O}_c$ 、 $\delta^{13}\text{C}_c$) 原理與前處理方法

2.2.2.1 穩定同位素

本研究為了提供全新世以來的氣候變遷訊息，我們進行了浮游有孔蟲穩定氧、碳同位素分析。

穩定氧、碳同位素比值的定義如下：

$$\delta^{18}\text{O} (\text{‰}) = \left[\frac{(^{18}\text{O}/^{16}\text{O})_{\text{sample}} - (^{18}\text{O}/^{16}\text{O})_{\text{std}}}{(^{18}\text{O}/^{16}\text{O})_{\text{std}}} \right] \times 1000$$

$$\delta^{13}\text{C} (\text{‰}) = \left[\frac{(^{13}\text{C}/^{12}\text{C})_{\text{sample}} - (^{13}\text{C}/^{12}\text{C})_{\text{std}}}{(^{13}\text{C}/^{12}\text{C})_{\text{std}}} \right] \times 1000$$

浮游有孔蟲的氧同位素 ($\delta^{18}\text{O}_c$) 被廣泛作為建立古海水文的工具 (e.g. Spero *et al.*, 2003; Waelbroeck *et al.*, 2005)，如果古海水表面

溫度已知，還可以結合 $\delta^{18}\text{O}_c$ 以得到海水鹽度變化 (e.g., Duplessy *et al.*, 1981a; Mashiotta *et al.*, 1999; Lea *et al.*, 2000)。 $\delta^{18}\text{O}_c$ 作為古海洋代用指標，受到許多控制變因的控制：

- (1) 有孔蟲殼體在結殼時的溫度 (temperature effect)。
- (2) 不同種屬之間的有孔蟲對氧同位素的偏好不同，就算是同種之間，也會因為個體發生 (ontogeny) 階段之不同生理的作用而產生生機效應 (vital effect)。
- (3) 冰川體積效應 (ice volume effect)。
- (4) 區域性蒸發與降水所造成的海水鹽度變化 (salinity effect)。
- (5) 海水的碳酸根離子濃度 $[\text{CO}_3^-]$ 和鹼度的變化 ($[\text{CO}_3^-]$ and alkalinity effect) (Spero *et al.*, 1997)。
- (6) 海水造成的差異溶解效應 (Dissolution effect)。

以上有孔蟲個體間的氧同位素差異 (ΔF)，可視為上述諸多影響因素之總和 (修改自 Berger, 1979)：

$$\Delta F = T + \Delta V + \Delta I + \Delta C + \Delta S + \Delta D$$

T：溫度效應 ΔV ：生機效應 ΔI ：冰川效應

ΔC ： $[\text{CO}_3^-]$ and alkalinity 效應

ΔS ：鹽度效應 ΔD ：溶解效應

2.2.2.2 浮游有孔蟲處理方法

(1) 選取方法

為了避免因不同種屬、型態和大小的浮游有孔蟲殼體所造成氧碳同位素之生機效應，故本研究選取以單一種浮游有孔蟲 *Globigerinoides ruber sensu stricto*, (s.s.) (圖 2-3-a) 作為氧碳同位素的分析材料，其鑑定標準參考 Wang (2000)，各岩芯標本以 2 公分為挑

選間距，挑選粒徑介於 250-355 μm 的範圍，挑選 16 隻保存完整、無末房室歪斜的 *G. ruber* sensu stricto (s.s.) 標本，而不選用 *Globigerinoides ruber* sensu lato (s.l.) (圖 2-3-b) 進行分析，主要係因前人研究 (Wang, 2000; Löwemark *et al.*, 2005; Steinke *et al.*, 2005) 發現這兩種形態的 *G. ruber* 在岩芯頂樣 (core top) 與岩芯 (downcore) 中，在穩定氧碳同位素數值上均有統計上的明顯差異。

(2) 清洗步驟

1. 為了清除附著於有孔蟲殼體上的細顆粒雜質，將挑選出來的有孔蟲以甲醇 (CH_3OH) 浸泡，並以超音波震盪器震盪 3 次，每次約 1-2 秒，再以太離子水反覆清洗 3 次。
2. 為了去除附著於有孔蟲殼體上之有機物質，以次氯酸鈉溶液 ($\text{NaOCl}_{(\text{aq})}$) 浸泡 24 小時後，用吸管將次氯酸鈉溶液吸出，再以太離子水反覆清洗 6 次。
3. 將清洗好的有孔蟲樣本置放於攝氏 50°C 之恆溫箱中烘乾，約需時 48 小時。

2.2.2.3 氧、碳同位素分析

使用附有 Multicarb 碳酸鹽標本自動處理系統之超微氣相比例質譜儀 (Micromass IsoPrime Isotope Ratio Mass Spectrometer) 進行氧、碳同位素分析，儀器設置於國立臺灣師範大學地球科學系米泓生教授所主持的穩定同位素實驗室。各樣本取 6 至 8 隻浮游性有孔蟲 *G. ruber* (s.s.)，約每 10 個樣本穿插放置一個碳酸鈣標準樣品 NBS19 ($\delta^{18}\text{O}$: -2.20‰, $\delta^{13}\text{C}$: 1.95‰) 以進行校正，並將樣本所得之殼體氧同位素校正至 VPDB。當上述的有孔蟲樣本放入標本瓶中，在 90°C 定溫下以自動針頭滴入濃度為 100% 之磷酸 (H_3PO_4) 於標本瓶中溶解有孔蟲

樣本，藉以產生二氧化碳氣體。每個標本分析時間約需 50 分鐘，大體上，基於對 NBS-19 的分析，超微氣相比例質譜儀所分析之 $\delta^{18}\text{O}_c$ 的長期分析誤差為 0.10‰， $\delta^{13}\text{C}$ 則為 0.06‰ (2 Standard Deviation, 2SD)。

2.2.3 鎂鈣元素比 (Mg/Ca ratios) 原理與前處理方法

2.2.3.1 鎂鈣元素比原理

有孔蟲殼體的鎂鈣元素比近年來廣泛運用於古海水溫度變化的代用指標，不管是由海水中採集或是浮游有孔蟲養殖實驗 (culturing experiment) 的結果，都證實有孔蟲殼體的鎂鈣元素比主要受控於殼體結殼時的海水溫度變化 (Nürnberg *et al.*, 1996; Elderfield *et al.*, 2000; Barker *et al.*, 2005)，但仍有其他因素會影響到鎂鈣元素比的測量結果，例如：(1)有孔蟲死後的沈降埋藏作用過程中，深層海水與沈積物孔隙水的溶解效應 (Rosenthal and Lohmann, 2002; Lea *et al.*, 2005)、(2) 海水鹽度變化的效應 (Nürnberg *et al.*, 1996; Lea *et al.*, 1999; Ferguson *et al.*, 2008)，因此在使用鎂鈣元素比作為古海水溫度計的代用指標時仍須謹慎評估這些因素。

2.2.3.2 有孔蟲標本前處理

(1) 選取方法

與 2.2.2.2 的選取方法相同，仍挑選浮游有孔蟲 *Globigerinoides ruber sensu stricto*, (s.s.) (圖 2-3-a) 作為鎂鈣元素比的分析材料，岩芯以 2 公分為間距，各深度挑選 20 隻，介於 250-355 μm ，且保存完整、無末房室歪斜的 *G. ruber sensu stricto* (s.s.) 進行鎂鈣元素比分析。

(2) 清洗步驟

將挑選後的有孔蟲殼體壓碎後置於 1.5 mL 鐵氟龍燒杯內(圖 2-4-a) , 以掃描式電子顯微鏡檢查可見有孔蟲殼體的孔洞仍包含有些許的碎屑物充填, 依照 Barker *et al.* (2003)之清洗過程, 進行以下的前處理步驟:

1. 施加 0.45 mL 的乙醇 (C_2H_5OH) , 反應時間為 20 分鐘, 藉以減少有孔蟲殼體碎片的表面張力, 使施加之藥劑能進入殼體碎片的孔洞內, 讓藥劑與殼體表面能密切接觸, 以達到去除表面雜質的效果。
2. 施加 3%之雙氧水溶液 ($H_2O_{2(aq)}$) 0.45 mL, 反應時間為 2 小時, 藉以將殼體碎片表面的有機物氧化。
3. 為了溶解在殼體碎片表層中能以離子交換方式移除之附著物, 施加 1.0 M 之氯化銨水溶液 ($NH_4Cl_{(aq)}$) 0.45 mL, 反應時間為 20 分鐘。
4. 為了分解附著於殼體碎片表面之金屬氧化物, 施加 0.01M 之羥胺溶液($NH_2OH_{(aq)}$) 0.45 mL 加以還原, 反應時間為 3 小時。
5. 為了清除在清洗過程中吸附於殼體碎片表面之雜質, 施加 5×10^{-4} N 之硝酸溶液 ($HNO_{3(aq)}$) 0.3-0.6 mL, 反應時間為 5 分鐘。

以上五個步驟中, 為了徹底清除殘存藥劑以及被溶解所釋出的雜質, 再用 0.45 mL 之超純水重複清洗殼體碎片樣本 3 次。而各步驟所用之藥劑的 pH 值皆控制在 9 左右, 至於清洗所需之超純水, 為了避免 pH 值變化使殼體碎片發生溶解效應, 每 250 mL 水中加入 30 μ L、1 N 的氫氧化鈉水溶液 ($NaOH_{(aq)}$)。圖 2-4-b 為鎂鈣元素比清洗步驟所清洗後之殼體碎片情形, 可見孔洞的碎屑物被清洗乾淨無碎屑物之充填。在上機之前, 根據殼體碎片的多少, 施加 0.3~0.45 mL 的 5%硝酸溶液 ($HNO_{3(aq)}$) , 將殼體碎片溶解, 最後取出 0.1 mL 溶液進行鎂鈣元素比分析。

2.2.3.3 鎂鈣元素比分析

本研究利用國立臺灣大學地質科學系沈川洲老師實驗室的感應耦合電漿質譜儀 (Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry, ICP-MS ; Finnigan Element II) 進行微量元素分析，依照 Lu (2006) ，以「標準品—樣品—標準品」為標本序列的分析流程，測量標準品及樣品的 ^{24}Mg 、 ^{27}Al 、 ^{43}Ca 、 ^{55}Mn 、 ^{86}Sr 的訊號強度，再換算成： $^{24}\text{Mg}/^{43}\text{Ca}$ 、 $^{27}\text{Al}/^{43}\text{Ca}$ 、 $^{55}\text{Mn}/^{43}\text{Ca}$ 、 $^{86}\text{Sr}/^{43}\text{Ca}$ 之比值，接著利用標準品的上述之比值與實際的 Mg、Al、Mn、Sr 分別對 Ca 的比值關係，推算出樣本的 Mg/Ca、Al/Ca、Mn/Ca 和 Sr/Ca 之比值。鎂鈣元素比分析的精確度為 1.4% (2RSD) 。

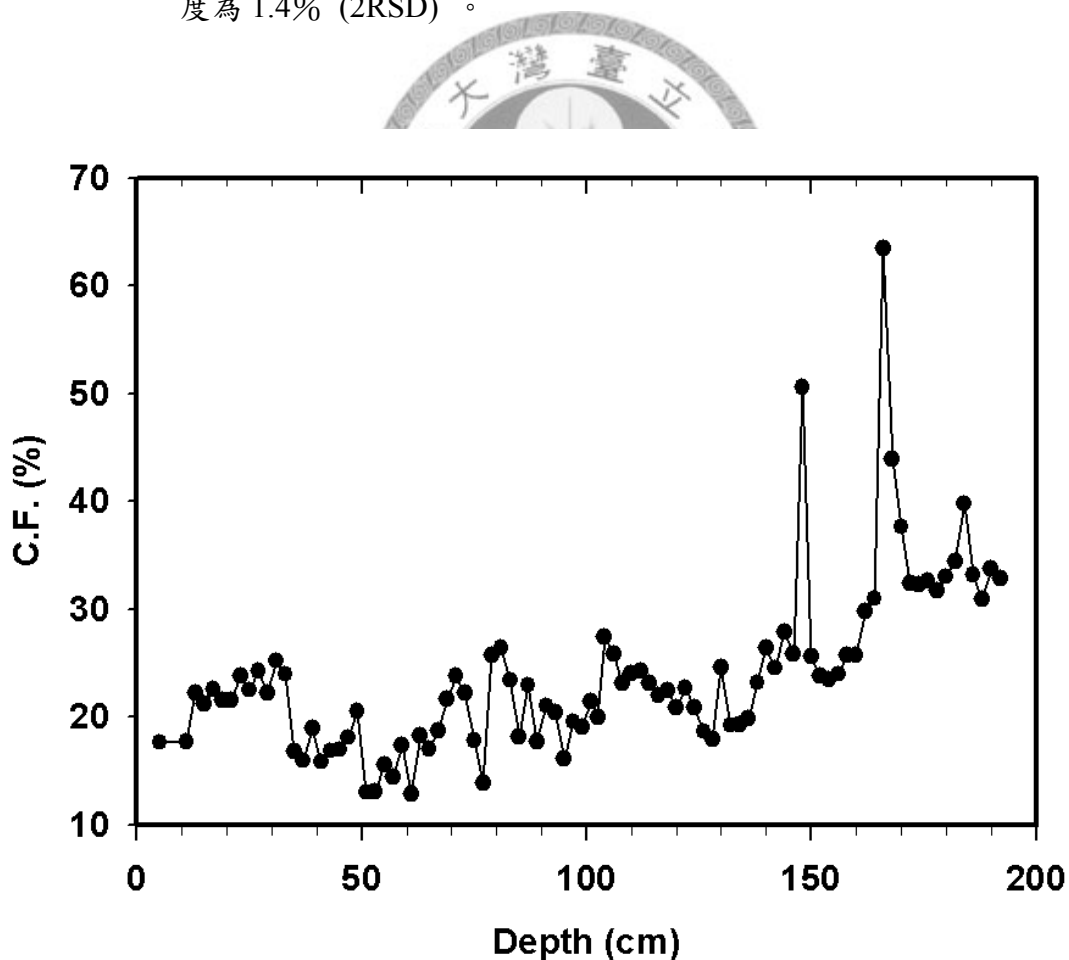


圖 2-1、ORI715-21 岩芯的粗顆粒 (coarse fraction, $>63\ \mu\text{m}$) 百分比對深度作圖。

表一、Lin *et al.* (2006) 發表之加速質譜儀 (AMS) 碳十四定年結果及換算之日曆年代。

Core	Depth (cm)	AMS ¹⁴ C age (year BP)	Error (years)	Calendar age (year BP)
ORI 715-21	5	407	40	0
	39	1657	30	1215
	71	3491	35	3372
	144	5694	35	6094
	164	6229	35	6675
	174	6454	35	6957

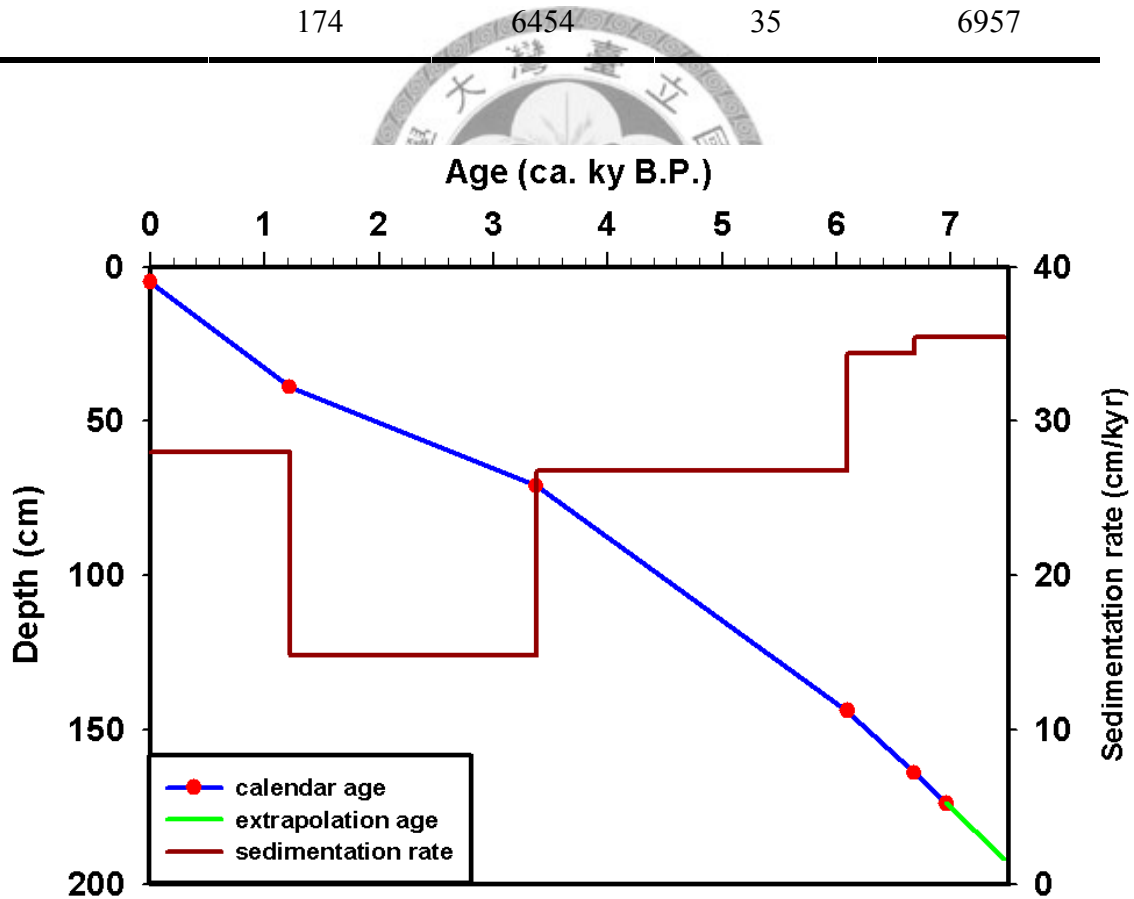


圖 2-2、本研究之岩芯 ORI715-21 之年代對深度圖以及年代對沈積速率圖。藍線為內插法求得之日曆年代，綠線為外插法求得之日曆年代，棕線為沈積速率 (cm/kyr)。

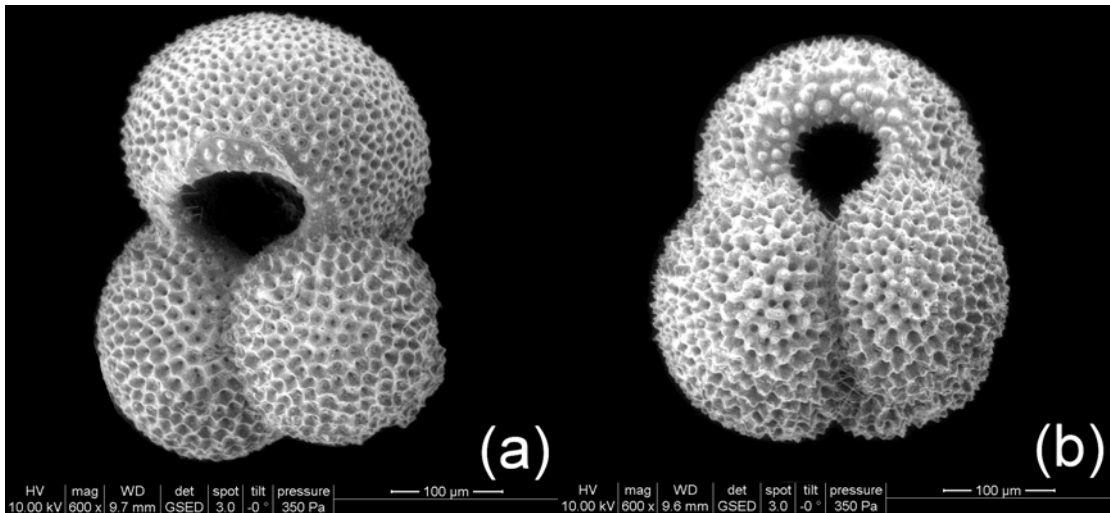


圖 2-3、(a) ORI715-21 岩芯深度 93 公分之浮游有孔蟲 *Globigerinoides ruber sensu stricto*, (s.s.)、(b) ORI715-21 岩芯深度 97 公分之浮游有孔蟲 *Globigerinoides ruber sensu lato* (s.l.)。

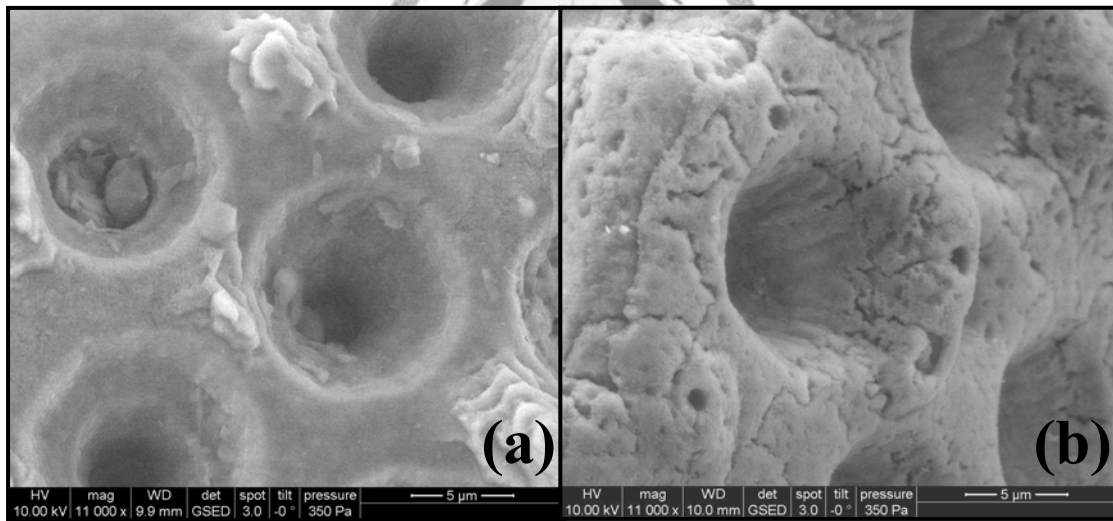


圖 2-4、(a) ORI715-21 岩芯深度 91 公分之浮游有孔蟲 *Globigerinoides ruber sensu stricto*, (s.s.) 於鎂鈣元素比實驗清洗步驟前之殼體細部特徵、(b) 於鎂鈣元素比實驗清洗步驟清洗後之殼體細部特徵。

第三章研究結果

3.1 ORI715-21 岩芯之浮游有孔蟲氧碳同位素的分析結果

$\delta^{18}\text{O}_c$ 數值之分布範圍介於 -2.0‰ 至 -3.2‰ 之間，振盪幅度相當大；相鄰兩標本間數值變化最大可高達 0.6‰ (圖 3-1)；而 $\delta^{13}\text{C}_c$ 數值分布範圍介於 1.0‰ 至 1.8‰ 之間，其變動較小，相鄰標本的差值最大約 0.4‰ 左右 (圖 3-1)。

氧同位素對年代的分析結果顯示， $\delta^{18}\text{O}_c$ 之數值在 7.5 ka 以來呈現逐漸變輕且振盪加劇的趨勢 (圖 3-2-a)，此現象與位於菲律賓南方靠近赤道的 MD98-2181 氧同位素值在全新世以來有逐漸變輕的現象相似 (Stott *et al.*, 2004)。 $\delta^{13}\text{C}_c$ 之數值在 7.5 至 6.0 ka 有逐漸增加的趨勢，但在 6.0 至 1.0 ka 有逐漸減少的現象 (圖 3-2-b)，從 1.0 ka 至今有逐漸增加的情形。但在 0.3 ka 至今， $\delta^{13}\text{C}_c$ 數值有驟減的趨勢，這與工業時代以來，煤炭與化石燃料大幅使用，使輕碳被人為大量排放至大氣、並溶入表層海水有關 (Sarmiento and Gruber, 2002)。

3.2 ORI715-21 岩芯之浮游有孔蟲鎂鈣元素比的分析結果

G. ruber (s.s.) 的鎂鈣元素比大致上約介於 4.2-5.1 mmol/mol 之間，振盪幅度相當大；相鄰兩標本間數值變化可高達 0.8 mmol/mol (圖 3-1-c)，在深度 142、166、178、190 公分處的鎂鈣元素比測定中，皆含有高鋁鈣比的情形，分別為 0.76、0.41、0.24、0.22 mmol/mol，可能受到陸源火山岩屑物質注入之干擾 (Lea *et al.*, 2005)。根據 Lea *et al.* (2005) 的研究，指出在加拉巴戈群島 (Galápagos Islands) 附近海域之海洋岩芯 (TR163-22) 所測得的浮游性有孔蟲 *G. ruber* 鎂鈣元素比與鋁鈣元素比、鐵鈣元素比分別有 $R^2=0.5$ 左右、 $R^2=0.59$ 之正相關，推測是受到陸源火山岩屑物質注入之影響，並且其鎂鈣元素比與錳鈣元素比有 $R^2=0.6$ 左右之正相關，推測浮游性有孔蟲殼體表面受成岩作用之影響產生氧化還原，使其被碳酸錳物質所包覆，進而促使錳鈣元素比過高。但 ORI715-21 岩芯之鎂鈣元素比與鋁鈣元素比、鐵鈣元素比、錳鈣元素比之相關性分別為 $R^2=0.01$ 、0.04、0.03 (圖 3-3)，顯示鎂鈣元素比與鋁鈣元素比、鐵鈣元素比、錳鈣元素比的關係不大，因當它們的相關係數越高，代表越易受到陸源火山岩屑物質注入以及成岩作用的氧化還原反應之影響，所以 ORI715-21 岩芯中除了 148 公分和 166 公分處可能受濁流作用而予以剔除，其餘鋁鈣元素比過高之深度則因對鎂鈣元素比之相關係數偏低，推測不易受到陸源火山岩屑物質注入之影響，仍予以保留。*G. ruber* (s.s.) 的鎂鈣元素比在 7.5 ka 以來大致呈穩定狀態但振幅仍呈劇烈震盪 (圖 3-2-c)。

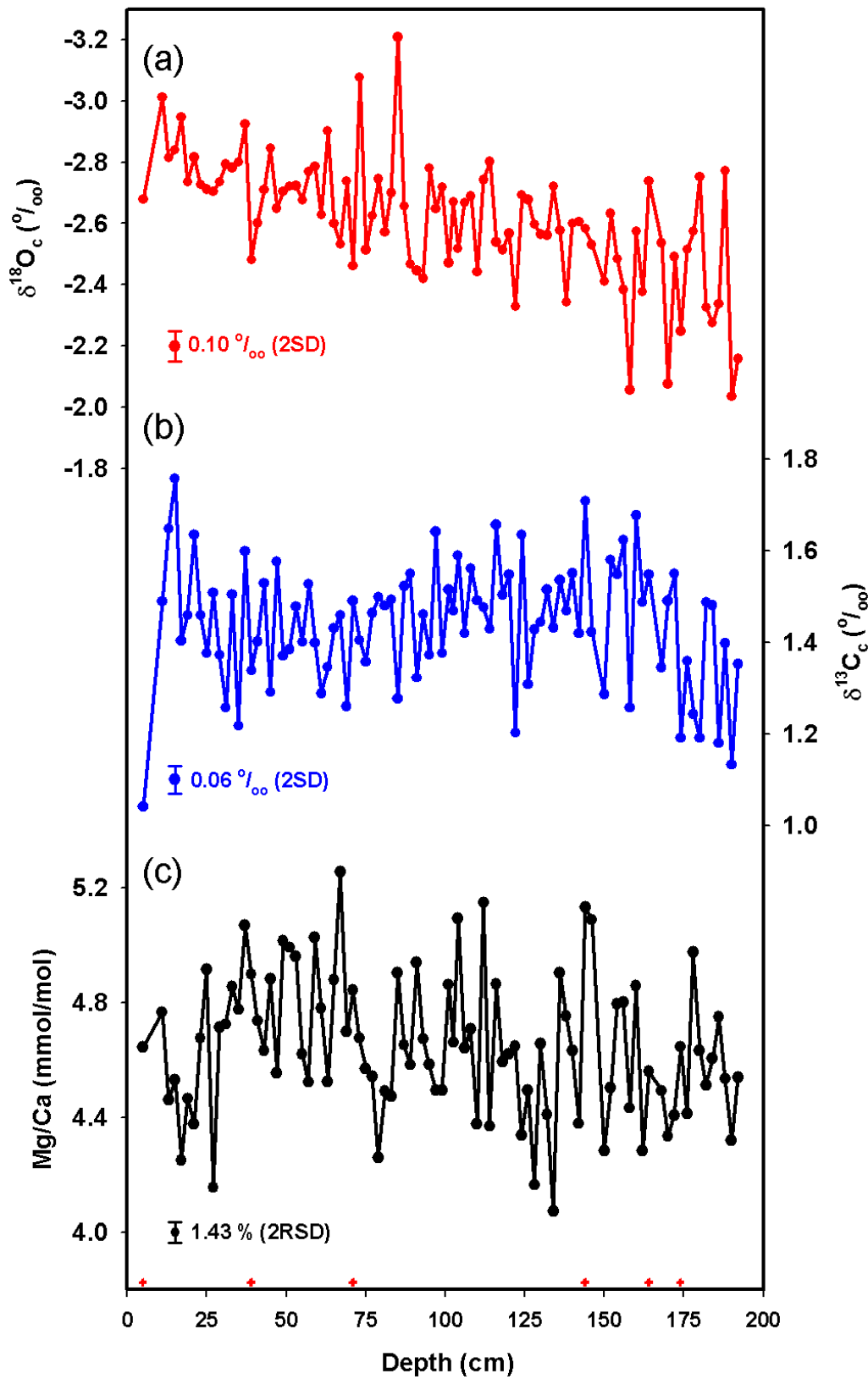


圖 3-1、ORI715-21 岩芯的 *G. ruber* (s.s.) 之深度對 (a) $\delta^{18}\text{O}_c$ 曲線；(b) $\delta^{13}\text{C}_c$ 曲線；

(c) 鎂鈣元素比曲線。6 個紅色十字標示著 AMS ^{14}C 定年點。

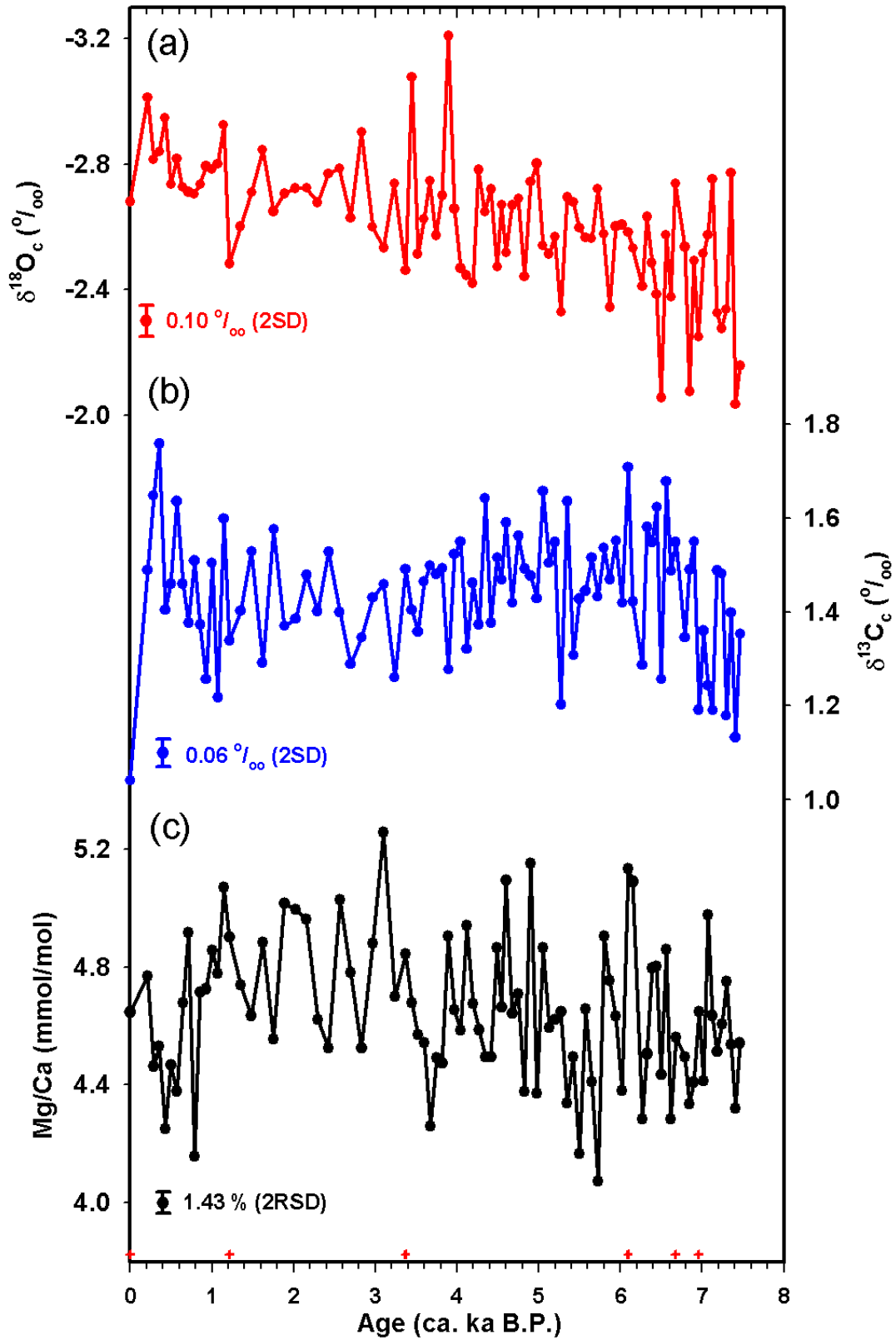


圖 3-2、岩芯 ORI715-21 的 *G. ruber* (s.s.) 之年代對 (a) $\delta^{18}\text{O}_c$ 曲線；(b) $\delta^{13}\text{C}_c$ 曲線；(c) 鎂鈣元素比曲線。6 個紅色十字標示 AMS ^{14}C 定年點。

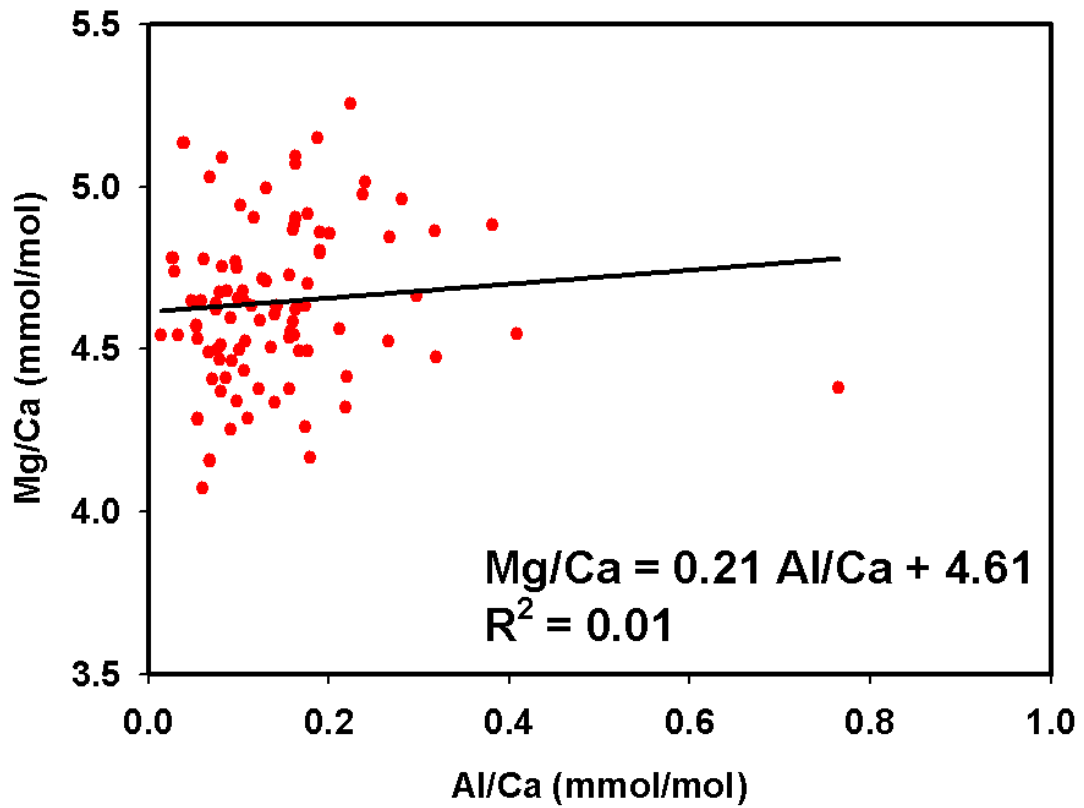


圖 3-3、岩芯 ORI715-21 的 *G. ruber* (s.s.) 之鎂鈣元素比與鋁鈣元素比之關係圖。

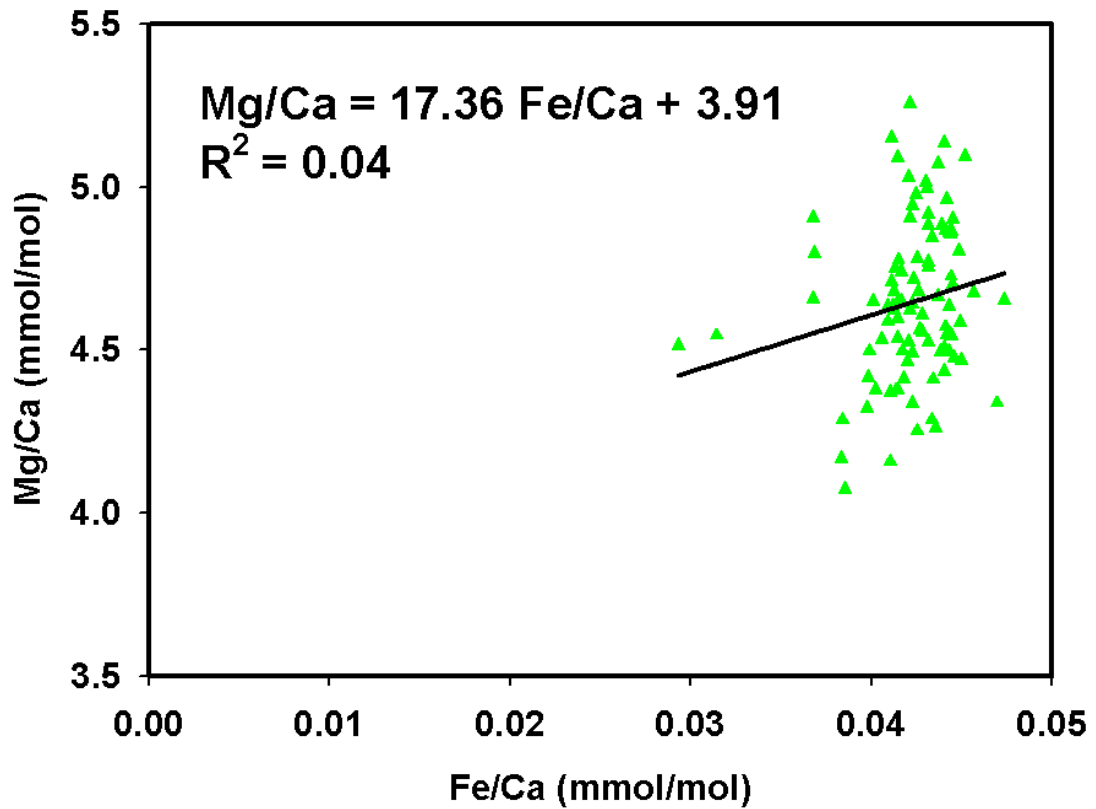


圖 3-4、岩芯 ORI715-21 的 *G. ruber* (s.s.) 之鎂鈣元素比與鐵鈣元素比之關係圖。

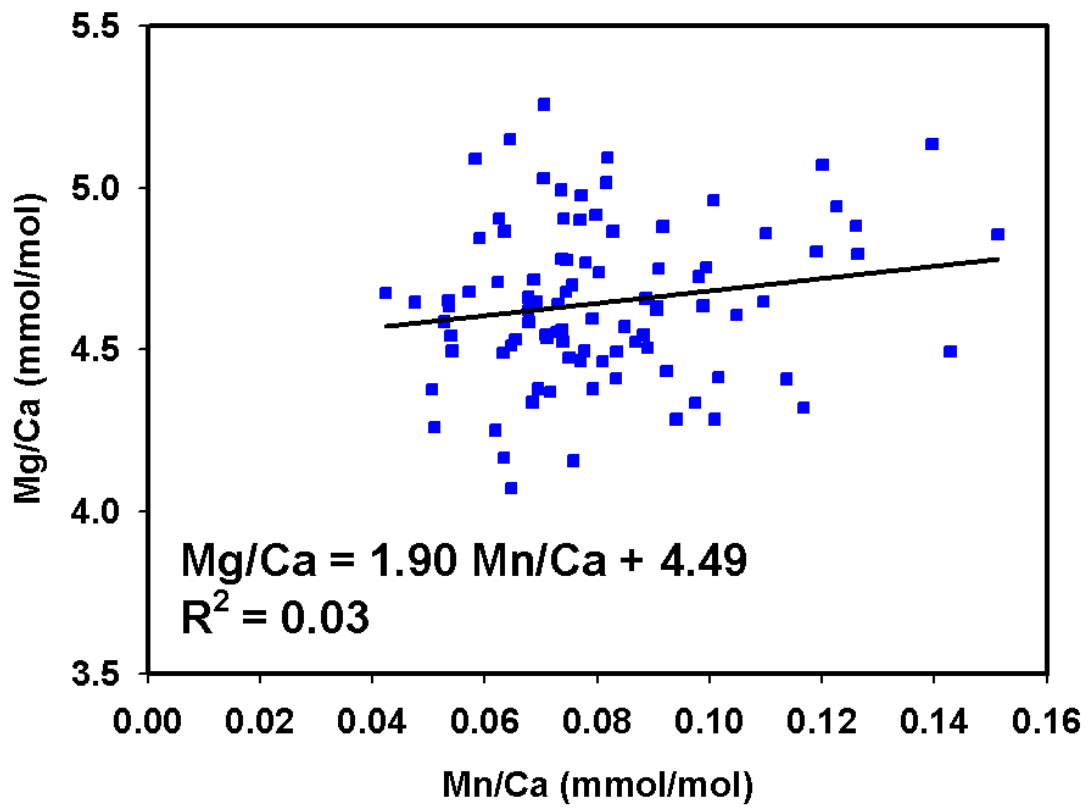


圖 3-5、岩芯 ORI715-21 的 *G. ruber* (s.s.) 之鎂鈣元素比與錳鈣元素比之關係圖。



第四章討論

4.1 氧同位素的紀錄

Stott *et al.* (2004) 根據西太平洋暖池 (West Pacific warm pool, WPWP) 的三根岩芯之浮游有孔蟲氧同位素和鎂鈣元素比紀錄重建該區域全新世以來的海水表面溫度與海水表面鹽度 (圖 1-7、圖 1-8) , 發現西太平洋暖池的氧同位素值在全新世以來有逐漸變負的趨勢。本研究的結果也反映類似的特徵, 位於黑潮上游區的岩芯 ORI715-21 在 7.5 ka 以來氧同位素值約介於 $-2.0 \sim -3.3\%$ 之間, 且有逐漸變負的趨勢, 而沖繩海槽的岩芯 MD01-2403 之 $\delta^{18}\text{O}_c$ 也有相似的變動範圍和趨勢 (圖 4-1), 但是在 0.8 ka、1.5~2.8 ka、3.4 ka、3.9 ka, ORI715-21 岩芯與 MD01-2403 岩芯兩者之間的氧同位素振盪幅度不同, 最多可達約 0.6% 的差異量, 顯示自全新世以來, 台灣附近黑潮上游區南端 (ORI715-21) 與北端 (MD01-2403) 之間的氣候變動規模與幅度大體上相近, 但在中全新世至晚全新世時, 影響兩地水域之氣候因子可能有強弱之分, 造成自 4 ka 以來的振盪幅度有所不同, 因此需要進一步剔除其他影響浮游有孔蟲氧同位素的因素, 釐清可能造成兩者在中全新世以來氣候振盪幅度有所差異的原因。

4.2 鎂鈣元素比所轉換的古海表水溫

為了了解黑潮上游區的古海表水溫 (sea surface temperatures, SSTs) 變化,本研究利用 Hastings *et al.* (2001) 在南海表層沈積物所建立的浮游有孔蟲殼體之鎂鈣元素比與海溫的關係式:

$$\text{SST } (^{\circ}\text{C}) = \ln(\text{Mg}/\text{Ca}/0.38)/0.089$$

將 *G. ruber* (s.s.) 鎂鈣元素比 (圖 3-2-c) 轉換成 SST, 結果如圖 4-2 所示, 顯示 8.0 ka 以來 SSTs 約介於 26~30°C 之間, 大體上, SSTs 的長期趨勢在 8.0~2.0 ka 緩升, 在 2.0 ka 至今則有緩降的情形, 平均 SST 為 28.2 °C, 但有一相對高值出現在 3.1 ka, 其 SST 可達 29.5 °C。

Liew *et al.* (2006) 以南投頭社盆地的古湖泊沈積物所得之花粉序列, 重建了過去一萬三千年以來的森林相群聚變化 (圖 4-3-a), 利用 *Salix* 孢子量百分比多寡代表氣候的冷乾與暖濕。此外, Bond *et al.* (2001) 利用 ¹⁴C 和 ¹⁰Be 的強弱變化作為代表太陽磁場的弱強指標, 當太陽磁場的活動較強 (弱) 時會導致宇宙射線入射至地球的通量減少 (增加), 促使 ¹⁴C 和 ¹⁰Be 的通量也隨之減少 (增加), 並與北大西洋的冰漂物作對比, 發現有 1500 年的週期性, 意味著太陽磁場增強時, ¹⁰Be 的含量減少, 氣候較暖, 反之亦然, 因此 Liew *et al.* (2006) 發現主要森林相轉變事件雖較 ¹⁰Be 含量變化有遲滯數百年的現象, 兩者之間無明顯的同時性之變化, 但兩者皆表現 1500 年的週期 (圖 4-3-b); 而在森林相轉換事件中, 冷期發生於 11.2~11.0 ka、7.5~7.1 ka、5.2~4.9 ka, 而暖期發生於 6.1~5.9 ka。

由於岩芯 A7 (Sun *et al.*, 2005)、岩芯 MD01-2403 (Lin *et al.*, 2006)、岩芯 MD98-2181 (Stott *et al.*, 2004) 的全新世之 SSTs 的重建也是利用浮游有孔蟲 *G. ruber* (s.s.) 殼體鎂鈣元素比, 利用 Hastings *et al.* (2001) 經驗方程將其鎂鈣元素比轉換成為 SSTs 並與 ORI715-21 岩芯的 SST 作比較 (圖 4-4), 發現四者所處海域的 SSTs 的趨勢相似, 不論是在沖繩海槽、黑潮上游區或是

在西太平洋暖池在 8.0 ka 以來的 SSTs 的變動範圍皆不大，皆呈現穩定的狀況，由沖繩海槽至西太平洋暖池的長期溫度變化趨勢範圍分別介於 25.8~26.8 °C、26.9~28.5 °C、27.5~28.5 °C、28.6~29.6 °C 之間，可知西太平洋暖池的 SST 最高，而沖繩海槽的 SST 最低，由於岩芯 A7、岩芯 MD01-2403、岩芯 ORI715-21 皆位於黑潮主流流經之區域，但三者所處的緯度各相差約 2.6°，顯示各受到緯度漸北、氣候轉涼的影響。

將 ORI715-21 岩芯和 MD01-2403 岩芯的 8.0 ka 以來的 SSTs 與 GISP2 冰芯所記錄的 ^{10}Be 通量變化作對比 (Bond *et al.*, 2001)，並搭配 Liew *et al.* (2006) 的全新世以來的孢粉紀錄中森林相轉換所反映的冷暖事件 (圖 4-5)，發現 SSTs 與 ^{10}Be 通量變化曲線有較良好的對應關係，亦即太陽活動的強弱會影響 SSTs 之變化；但中臺灣地區的森林相變化所記錄的冷期事件與古海溫變化的相關性低，在兩次冷期階段 ORI715-21 岩芯和 MD01-2403 岩芯所記錄的 SSTs 皆無明顯偏低的情形；但在陸相出現暖期階段則有相對應的 SST 升溫，這暗示著 ^{10}Be 通量變化曲線與 SSTs 的變化沒有明顯的滯後現象，呈現同時性的情形，而此時的中臺灣地區森林相轉換所造成的冷暖階段，則有明顯的滯後情形，表示台灣海陸兩者的氣候紀錄仍有其他氣候因素干擾，使得兩者未呈現同時性的氣候變化。

4.3 水體氧同位素變化

將浮游有孔蟲殼體 *G. ruber* (s.s.) 的氧同位素數據 ($\delta^{18}\text{O}_C$) 扣除溫度 (SST) 效應 (由鎂鈣元素比建立)，即可得到海水氧同位素值 ($\delta^{18}\text{O}_W$) 之紀錄。本研究使用之 ORI715-21 岩芯、A7 岩芯、MD01-2403 岩芯、MD98-2181 岩芯皆選用 *G. ruber* (s.s.) 作為浮游有孔蟲 $\delta^{18}\text{O}_C$ 的測定，因此選用 *G. ruber* 造殼時與棲息深度之 $\delta^{18}\text{O}_W$ 和溫度 ($T^\circ\text{C}$) 之間的關係式 (Bemis *et al.*, 1998)：

$$T(^{\circ}\text{C}) = 14.9 - 4.8 \times (\delta^{18}\text{O}_C - \delta^{18}\text{O}_W)$$

當作本研究的 $\delta^{18}\text{O}_W$ 計算公式，由於此公式 $\delta^{18}\text{O}_W$ 之單位為 ‰-PDB，需要將之換算為 ‰-SMOW 單位，故需加回 0.27‰ 之差值 (Bemis *et al.*, 1998)。將由鎂鈣元素比所得之溫度與 *G. ruber* (s.s.) 的 $\delta^{18}\text{O}_C$ 數據分別代入此公式即可得到 7.5 ka 以來的 $\delta^{18}\text{O}_W$ (圖 4-6)。

由於全新世的海平面變化仍不甚穩定，利用 Wei (2009, 未發表) 整理 Chen and Liu (1996)、Baker and Haworth (2000)、Nunn and Peltier (2001)、Peltier and Fairbanks (2006)、Bird *et al.* (2007)、Gischler *et al.* (2008) 等人所建立之上次冰盛期以來古海面紀錄，重新整合成上次冰盛期以來的海平面升降曲線 (圖 4-7-a)，根據 Adkins *et al.*, (2002) 所建立上次冰盛期的深海 $\delta^{18}\text{O}_W$ 與現今深海 $\delta^{18}\text{O}_W$ 之比較，發現兩者相差約 $1 \pm 0.1\text{‰}$ ，本研究假設上次冰盛期海平面下降 120 公尺，得到當全球海平面下降 1 公尺時， $\delta^{18}\text{O}_W$ 組成即增加 $0.008 \pm 0.1\text{‰}$ ，因此將 ORI715-21 岩芯所得之 $\delta^{18}\text{O}_W$ 扣除海平面變化，即可得扣除冰川體積效應之海水氧同位素值 $\delta^{18}\text{O}_{W-I}$ (圖 4-7-b)。

從圖 4-7-b 可發現 ORI715-21 岩芯之 $\delta^{18}\text{O}_{W-I}$ 在 7.5 ka 以來有逐漸變負的趨勢，長期平均 $\delta^{18}\text{O}_{W-I}$ 的大體上約介於約 $0.14 \sim 0.60\text{‰}$ 之間，如配合圖 1-4 之臺灣東南外海的 $\delta^{18}\text{O}_{SW}$ 與 SSS 之關係式 (取自林清芬, 1999; Lin, 2005; 2007 水文聯合探測 CTD 資料)：

$$\delta^{18}\text{O}_{\text{sw}}(\text{VSMOW}) = 0.33 \times \text{SSS} - 11.01 \quad (R^2=0.62, N=57)$$

可得到圖 4-7-c 的 7.5 ka 以來的海水表面鹽度之變化情形，發現在此段時間中 SSS 的長期趨勢在 7.5 ka 以來有約~1.4 psu 的變化量，顯示 SSS 有隨時間逐漸變淡的情形發生，其中在 0.4 ka、2.8 ka、3.4 ka、3.9 ka、5.7 ka 有明顯的偏淡現象，除了在 2.8 ka 的 $\delta^{18}\text{O}_{\text{w-I}}$ 值約為 0.06‰ (~33.6 psu)，其餘 $\delta^{18}\text{O}_{\text{w-I}}$ 值皆低於 0.0‰ (~33.4 psu)，並與圖 4-3 的 SSTs 曲線相比，在 2.8 ka、3.4 ka、3.9 ka 之 SSTs 無明顯偏低現象，反映黑潮上游區中部在上述時間點有大量淡水注入的情形，但在 0.4 ka、5.7 ka 之 SSTs 有明顯偏低現象，可能受到 (1) 大量淡水注入的影響，(2) 黑潮擺盪且/或強度減弱的影響，使原本高溫高鹽度的表層海水轉為較低溫低鹽之狀況。

利用 Wei (2009) 所建立的海平面複合曲線，配合 MD98-2181 岩芯、ORI715-21 岩芯、MD01-2403 岩芯、A7 岩芯之 *G. ruber* 的 $\delta^{18}\text{O}_{\text{C}}$ 以及鎂鈣元素比，得到此三根岩芯 8.0 ka 以來的 $\delta^{18}\text{O}_{\text{w-I}}$ 曲線與董哥洞的石筍氧同位素 (Wang *et al.*, 2005) 作對比 (圖 4-8)，由於董哥洞的石筍紀錄代表著夏季西南季風強弱所帶來的降雨變化，因此當石筍氧同位素值低 (高)，顯示降雨強 (弱)，西南季風強 (弱)，藉此當作東亞夏季季風的代用指標，而圖 4-8 顯示董哥洞的石筍氧同位素紀錄在 8~1.3 ka 有變正趨勢，顯示東亞夏季季風有減弱的現象，在 1.3 ka 至今則有趨負的態勢，亦即東亞夏季季風有增強現象，但從南至北之海洋岩芯 $\delta^{18}\text{O}_{\text{w-I}}$ 值長期趨勢變動範圍分別為 0.85~0.30‰、0.61~0.14‰、0.63~0.02‰、0.90~0.29‰ 可知，8ka - 1.3ka 西太平洋暖池 (MD98-2181 岩芯)、黑潮上游區 (ORI715-21 岩芯) 及沖繩海槽 (A7 岩芯、MD01-2403 岩芯) 皆有 $\delta^{18}\text{O}_{\text{w-I}}$ 值逐漸變輕的趨勢，設若長期以來，夏季西南季風減弱，則降雨量減少，伴隨之雨量效應也應減小，故雨水所造成的海水氧同位素趨負的幅度減少，海水 $\delta^{18}\text{O}_{\text{w-I}}$ 值應呈變重之趨勢，而各個海洋岩芯並未呈現相應的趨重趨勢，與董哥洞石筍氧同位素值並未相呼應，顯示黑

潮主流區及西太平洋暖池的海水鹽度變化與東亞夏季季風減弱未耦合。但從 1.3 ka 自今，四根海洋岩芯之 $\delta^{18}\text{O}_{\text{w-I}}$ 值明顯趨負與董哥洞的氧同位素負向變化又趨於相符合之現象，暗示著東亞夏季季風增強與西北太平洋區的鹽度變淡皆受到降水量增加的影響。



4.4 影響水體氧同位素變化的因子—黑潮

從圖 4-5 的結果顯示 8.0 ka 以來黑潮上游區與沖繩海槽之 SSTs 趨勢相似，只是振幅不同。從圖 4-8 可知，兩者的水體氧同位素自 8.0 ka 以來逐漸變輕的趨勢與在西太平洋暖池的 MD98-2181 岩芯之古海水氧同位素值在全新世以來逐漸變輕 (Stott *et al.* 2004) 的趨勢相似。董哥洞的石筍氧同位素值變重與 ORI715-21 岩芯、A7 岩芯、MD01-2403 岩芯的水體氧同位素值變輕呈反向之關係。黑潮上游區與沖繩海槽深受黑潮主流的影響，反映的是熱帶太平洋的變化；而董哥洞石筍氧同位素紀錄的是從孟加拉灣一帶往東北方前進的西南氣流，亦即西南季風的強度減弱並無影響到熱帶太平洋水文變化。

在黑潮流區的研究中，除了黑潮上游區與南沖繩海槽皆受黑潮主流的影響之外，位於日本南部海域也深受黑潮主流強弱之影響，Sawada and Handa (1998) 利用四根日本本州島中南部海域不同緯度的岩芯之烯酮類不飽和指數 (U_{37}^k) 重建的古溫度，指出大部分 SSTs 的改變歸因於黑潮擺盪所致，且在 8.0~7.0 ka 發生明顯的黑潮向北擺盪現象，認為是受到副熱帶高壓增強的結果，導致北太平洋旋迴增強進而帶動黑潮流速與流量，使更多熱能從低緯區帶至中緯區的日本沿海，最後造成黑潮向北擺盪 (圖 4-9)。根據圖 4-5 的紀錄顯示在 6.0~5.0 ka 的黑潮上游區之古溫度與 ^{10}Be 通量變化曲線紀錄中，發現 ORI715-21 岩芯的古溫度有先降溫再升溫的變化，亦即黑潮的強度在 6.0~5.0 ka 有減弱再增強的情況產生，此現象應當也會發生在黑潮末端，造成日本南部海域的黑潮產生先南後北的擺盪現象出現，從圖 4-9 可發現在 6.0~5.0 ka 有小幅南北擺盪的現象出現，顯示黑潮主流在日本本州島中南部海域的擺盪現象與黑潮上游區的溫度變化有連動關係，當黑潮上游區變暖時，在日本南部海域的黑潮主流易於向北擺盪，反之亦然，而且此段時間 ^{10}Be 通量變化也有先增加再減少的趨勢，顯示太陽活動對地球所造成熱量的變化，會促使北太平洋環流減弱與增強，並影響北赤道洋流流量與流速的改

變，最後導致輸送熱量至中緯度地區的黑潮在日本南部海域會有擺盪的現象產生。

在溫度無多大改變的情況下，當黑潮流速快時，區域性的蒸發或降水來不及影響黑潮水時，黑潮就已經從上游區中段 (ORI715-21 岩芯區域) 被帶至南沖繩海槽 (MD01-2403 岩芯區域)，而黑潮流速慢時，區域性的蒸發/降水效則應會使得海水氧同位素值有所變動，進而使黑潮水之 $\delta^{18}\text{O}_{\text{W-I}}$ 數值有所改變，因此利用 ORI715-21 岩芯與 MD01-2403 岩芯之間 $\delta^{18}\text{O}_{\text{W-I}}$ 梯度的絕對值可以用來當作黑潮流速快慢的指標 (圖 4-10-c)，顯示 8.0 ka 以來黑潮流速有百年尺度週期變化；此外，將該黑潮流速指標與其他氣候紀錄做對比，圖 4-10-a 為 GRIP 冰芯以 GICC05 的年代模式校正所得之 8.0 ka 以來的氧同位素曲線 (Vinther *et al.*, 2006)，冰芯的氧同位素 ($\delta^{18}\text{O}$) 越正，代表水汽凝結成冰的溫度越高， $\delta^{18}\text{O}$ 越負，代表水汽凝結成冰的溫度越低；圖 4-10-b 為 ODP1002 站位於 Cariaco Basin 之 8.0 ka 以來的鈦 (Ti) 含量百分比 (Haug *et al.*, 2001)，當鈦含量變多，代表間熱帶輻合區 (Intertropical Convergence Zone, ITCZ) 向北移，造成委內瑞拉附近區域降水增加，使河流攜帶較多的陸源沈積物入海，而鈦含量減少則代表 ITCZ 向南移，造成委內瑞拉附近區域降水減少，使陸源沈積物入海的量減少；圖 4-10-c 之灰色陰影區塊為 Laguna Pallcacocha 湖泊岩芯的沈積物反射色所建立之 8.0 ka 以來的 ENSO 每百年的發生次數頻率 (Moy *et al.*, 2002)，根據圖 4-10 的各種氣候紀錄顯示，在全新世大暖期時，北半球的冰芯的氧同位素偏正，Cariaco Basin 的鈦含量較多，代表當時的氣溫較高、ITCZ 偏北，且 ENSO 現象不明顯，根據 Qu and Lukas, 2003; Kim *et al.*, 2004; Qu *et al.*, 2004 等的研究顯示，當北赤道洋流 (North Equator Current, NEC) 開始分離成南北兩道洋流的位置，在夏天有明顯偏南的現象，有助於更多黑潮水的傳輸，而在冬天則會呈相反的狀態，此外，黑潮在聖嬰年的傳輸量會減弱，在反聖嬰年則會增強，且根據 Deser and Wallace, 1990; Mitchell and Wallace, 1992; Raymond *et al.*, 2004; Koutavas *et*

al., 2006 等的研究顯示，在東太平洋赤道的冷舌區域之湧升流和 SSTs 之季節性與年間變動與 ITCZ 位置之變動有關，當 ITCZ 於北半球夏季遠離赤道向北移時，赤道地區會處在強烈的東南信風吹拂之下，方向與美洲大陸西岸西北—東南走向之海岸線地形近似，藉由艾克曼傳送 (Ekman transport) 之結果，沿岸海水向西傳送產生湧升流，SSTs 冷卻，產生較低溫的冷舌區域 (Mitchell and Wallace, 1992) (圖 4-11)，當 ITCZ 異常向北轉移時，會造成南美西岸的湧升流增強，海溫異常偏低造成東西赤道太平洋溫度梯度增加，易於發生 La Niña 事件，所以在 ITCZ 偏北、且 La Niña 年時會呈現黑潮增強的現象，根據類比，在圖 4-10-c 的中全新世時期之長期平均 $\delta^{18}\text{O}_{\text{W-I}}$ 絕對差值逐漸變小，也顯示黑潮於 La Niña 的水文狀況下有逐漸增強的現象，而在 4 ka 以來，北半球的冰芯的氧同位素偏負，Cariaco Basin 的鈦含量較少，代表當時的氣溫較低、ITCZ 偏南，且 ENSO 現象發生頻率高，在圖 4-10-c 的長期平均 $\delta^{18}\text{O}_{\text{W-I}}$ 絕對差值中，此階段差值有逐漸變大，顯示黑潮水的流速有逐漸減弱的現象，代表在 El Niño-like 的水文狀況時，黑潮水的流速會有減弱的情形發生。

此外，長期平均 $\delta^{18}\text{O}_{\text{W-I}}$ 絕對差值在 6.0 ka 時顯示此時段的差值最小，配合 Liew *et al.* (2006) 的南投頭社盆地古湖泊沈積物所得之花粉序列，在 6.1~5.9 ka 是屬於熱帶森林相，且 *Salix* 孢粉百分比較低 (圖 4-3) 顯示氣候為暖濕，推論黑潮流速加快時，也使得台灣中部氣候變得暖濕。

4.5 影響 1300 年至今水體氧同位素變化的因子—雨量效應與東亞夏季

季風期降水增加

為了解過去 1.3 ka 以來 ORI715-21 岩芯區域（黑潮上游區）與 MD01-2403 岩芯區域（南沖繩海槽）的 SSS 變化是否受到其它因素的影響，需先了解這兩者的現今 SSS 變化，根據圖 1-2-b，可知黑潮上游區與南沖繩海槽現今的 SSS 分別約為 34.12 psu 和 34.45 psu，利用圖 1-4 的海水氧同位素值 ($\delta^{18}\text{O}_{\text{SW}}(\text{VSMOW})$) 與表層海水鹽度 (SSS) 的關係式：

$$\delta^{18}\text{O}_{\text{SW}}(\text{VSMOW}) = 0.33 \times \text{SSS} - 11.01 \quad (\text{R}^2=0.62, \text{N}=57)$$

得知黑潮上游區與南沖繩海槽的現今 $\delta^{18}\text{O}_{\text{SW}}$ 數值約為 0.25‰ 和 0.36‰，假設臺灣東南外海與南沖繩海槽的水汽來源在全新世維持不變 (Aggarwal *et al.*, 2004)，臺灣台北地區的 1990-1998 年平均雨水氧同位素值 ($\delta^{18}\text{O}_{\text{prep}}$) 為 $-5.4 \pm 0.66\text{‰}$ (Wang and Peng, 2001)，根據魏國彥等人 (2008) 所使用的雨水與海水氧同位素混合比例之方程式來估算過去一千三百年來所增加的降水量。

$$\delta^{18}\text{O}_{\text{SW, MIX}} = f \delta^{18}\text{O}_{\text{prep}} + (1-f) \delta^{18}\text{O}_{\text{KS}}$$

其中， f ：表層 50 公尺海水中混入的降雨比例

$\delta^{18}\text{O}_{\text{SW, MIX}}$ ：混合後的海水氧同位素

$\delta^{18}\text{O}_{\text{prep}}$ ：雨水氧同位素

$\delta^{18}\text{O}_{\text{KS}}$ ：黑潮水氧同位素

假設一千三百年前黑潮上游區與南沖繩海槽之 $\delta^{18}\text{O}_{\text{W-I}}$ 值未與雨水氧同位素進行混合，代表當時的黑潮水氧同位素，且此兩區域 1.3 ka 時之 $\delta^{18}\text{O}_{\text{W-I}}$ 值分別約為 $0.67 \pm 0.17\text{‰}$ 與 $0.42 \pm 0.17\text{‰}$ (圖 4-12)，此段時間區間內黑潮上游區與南沖繩海槽的最低 $\delta^{18}\text{O}_{\text{W-I}}$ 值分別為 $-0.12 \pm 0.17\text{‰}$ 與 $-0.22 \pm 0.17\text{‰}$ ，藉由上述方程式之估算，過去一千三百年以來之降雨量於黑潮上游區與南沖繩海槽最多分別增加了 $650 \pm 200 \text{ mm}$ 與 $550 \pm 200 \text{ mm}$ ，但由於降雨量的增加

會使得雨水的氧同位素有變輕的現象 (Roznanski *et al.*, 1992) , 為了解臺灣附近地區長期雨水氧同位素與降水量之關係, 藉國際原子能總署 (International Atomic Energy Agency, IAEA) 所提供之鄰近臺灣的香港氣象站資料, 將西元 1973 年至西元 2005 年共 32 年的長期月平均雨量和雨水氧同位素值的資料進行統計分析, 兩者存在 $\delta^{18}\text{O}_w = -3.22 - 0.008P$, $r = 0.61$ 的線性關係, 即每增加 100 mm 的降雨量會使得雨水氧同位素值變輕 0.8‰ (圖 4-13) , 且由於臺灣地區的降水量有半數以上來自夏季時節之降雨, 在短時間所造成之強降雨深受雨量效應之影響, 降雨越強、氧同位素值越輕, 故推估現今臺灣台北地區的 $\delta^{18}\text{O}_{\text{prep}}$ 值 $-5.4 \pm 0.66\text{‰}$ 需 273 ± 83 mm 的強降雨量即可達成, 所以 1.3 ka 以來黑潮上游區與南沖繩海槽有明顯分別增加約 377 ± 217 mm 與 277 ± 217 mm 左右的降水量, 顯示兩區域皆有降雨量增加的現象。

由於臺灣地區每年主要的降雨月份為 5 至 9 月 (鄭俠, 1989) , 亦為東亞夏季季風盛行的季節, 其中 5 月、6 月為梅雨季節 (王時鼎, 1970) , 7 至 9 月則為西北太平洋地區颱風最活躍之季節 (朱錦紅等, 2002) , 因此梅雨與颱風雨為臺灣地區的兩個主要降水來源, 佔臺灣全年雨量約 60-90% (魏國彥、許晃雄, 1997) 。在降水型態上, 梅雨季包含較長期的滯留鋒面降水與短期的陣性降水 (王時鼎, 1970) , 颱風雨則為短期強降水, 在颱風發生頻率上, 依據中央氣象局的統計資料顯示, 從 1987-1992 年共有 335 個颱風侵臺, 平均每年約有 3.5 個颱風侵襲臺灣。根據 Lin *et al.*, (2004, 2007) 對南海北部的沈積物蒐集器以及拖網蒐集浮游有孔蟲群集分析, 發現 *G. ruber* 的豐度在夏天明顯大於冬天, 假設 *G. ruber* 在臺灣東部外海與南沖繩海槽也有相同的生長季節, 將之視為夏天種, 它所記錄的殼體氧同位素變化可以被視為夏季溫度以及水體氧同位素的代用指標, 所以圖 4-8 所呈現的 ORI715-21 與

MD01-2403 岩芯之 $\delta^{18}\text{O}_{\text{w-I}}$ 則能顯現 SSS 受到東亞夏季季風期降雨量變化的情形。

根據圖 4-8 從 1.3 ka 至今黑潮上游區與南沖繩海槽區域皆有明顯分別增加約 377 ± 217 mm 與 277 ± 217 mm 降雨量，暗示著受東亞夏季季風期降雨量變化的影響，亦即當西南氣流之態勢增強時，其與北方乾冷的系統進行拉鋸所形成的梅雨鋒面可能會使降雨強度增加，此外，颱風強降水的增加亦為造成東亞夏季季風期降雨量變化的原因之一，因此推測 1.3 ka 至今的水體氧同位素變化在黑潮上游區與南沖繩海槽受控於東亞夏季季風盛行期間的降水增加，主要的來源可能為梅雨鋒面之增強以及颱風強降水增加所致。



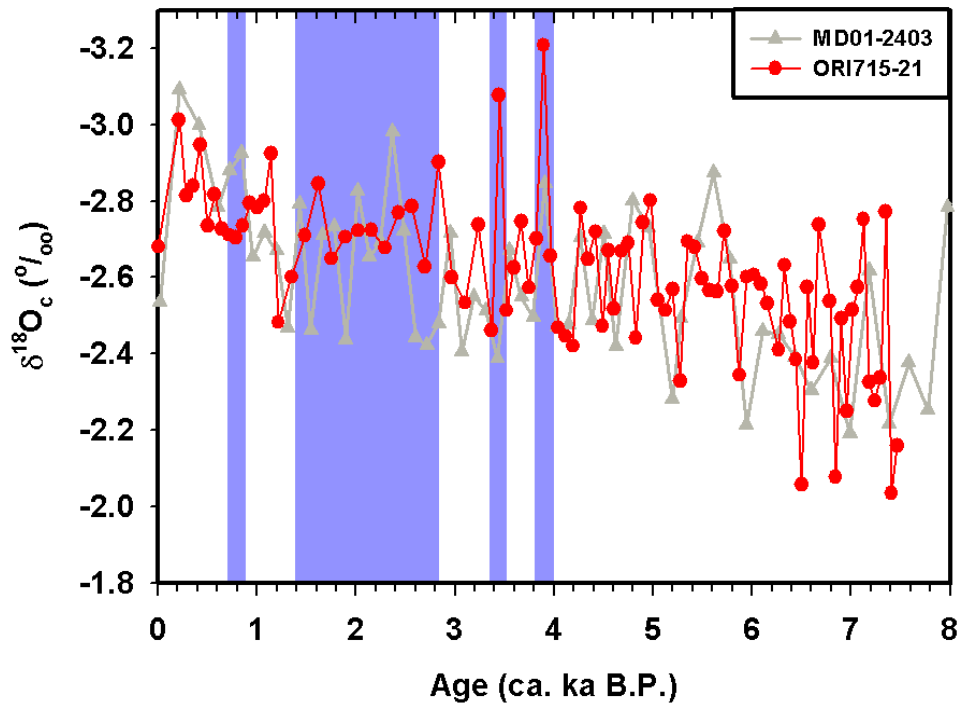


圖 4-1、ORI715-21 岩芯與 MD01-2403 岩芯 8.0 ka 以來之浮游有孔蟲 *G. ruber* (s.s.) 氧同位素紀錄，紫色區塊為此兩根岩芯之氧同位素之震盪差異較顯著之時期。

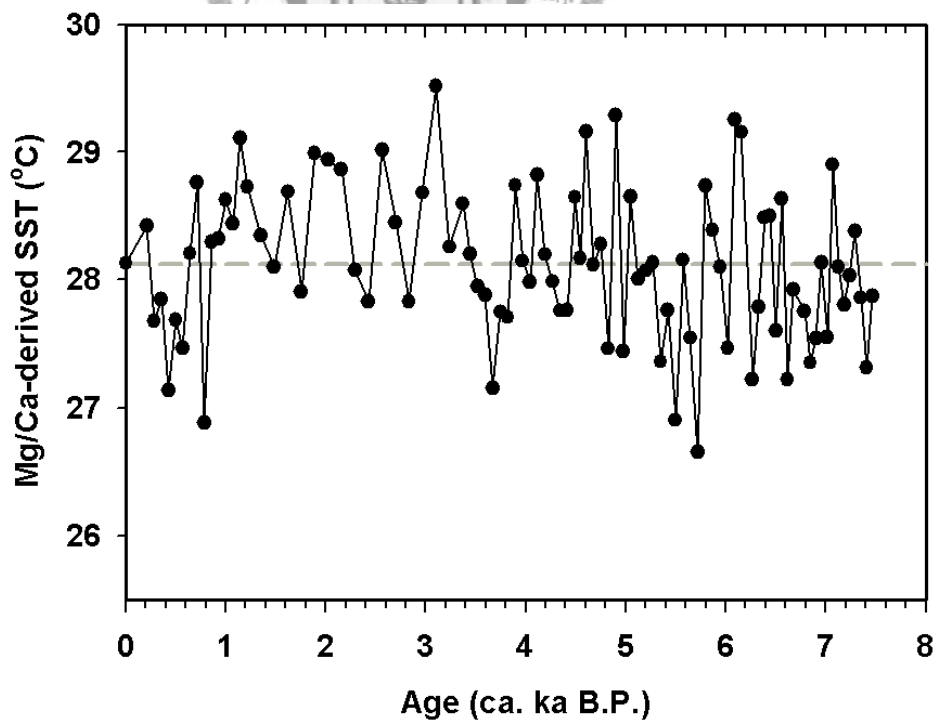


圖 4-2、ORI715-21 岩芯之 8.0 ka 以來之浮游有孔蟲 *G. ruber* (s.s.) 鎂鈣元素比紀錄所轉換成的 SSTs 紀錄。

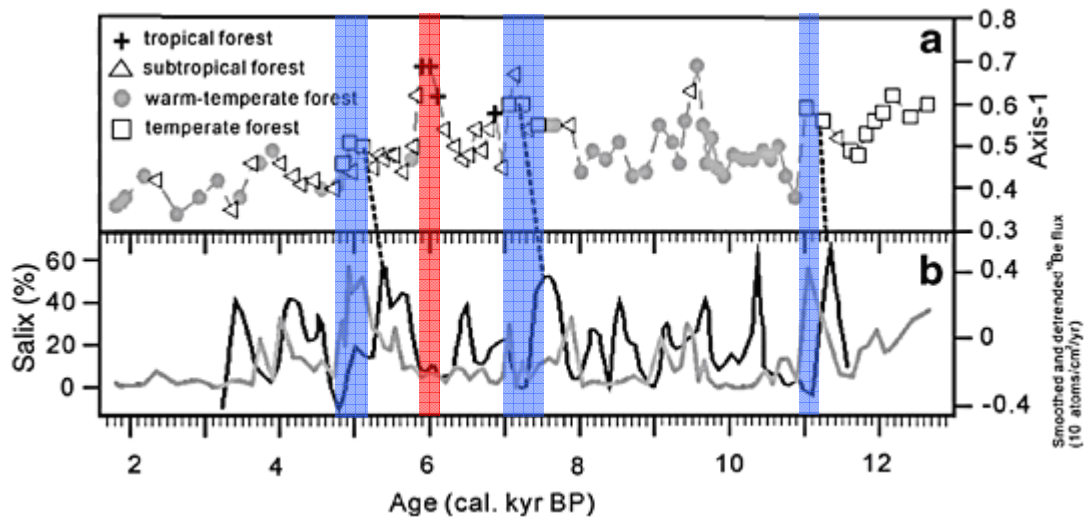


圖 4-3、(a) 南投頭社盆地古湖泊沈積物之孢粉群集經去趨勢對應分析 (detrended correspondence analysis, DCA) 所得之一萬三千年以來之森林群聚指數。(b) 黑色實線為 ^{10}Be 曲線(Bond *et al.*, 2001)，代表太陽磁場強弱的變化，灰色實線為 *Salix* 孢子含量百分比，反映冷乾氣候程度，大部分的 *Salix* 峰值都比 ^{10}Be 峰值遲滯幾百年，但兩者皆受到 1500 年的週期主導。(a)、(b) 兩圖間的虛線代表 ^{10}Be 峰值與主要森林相轉換的冷事件兩者之間的可能的對應關係，顯示森林相轉換的冷期事件相對於 ^{10}Be 峰值滯後數百年。而淺藍色帶代表森林相轉換的冷期事件，紅色色帶代表森林相轉換的暖期事件。(修改自 Liew *et al.*, 2006)

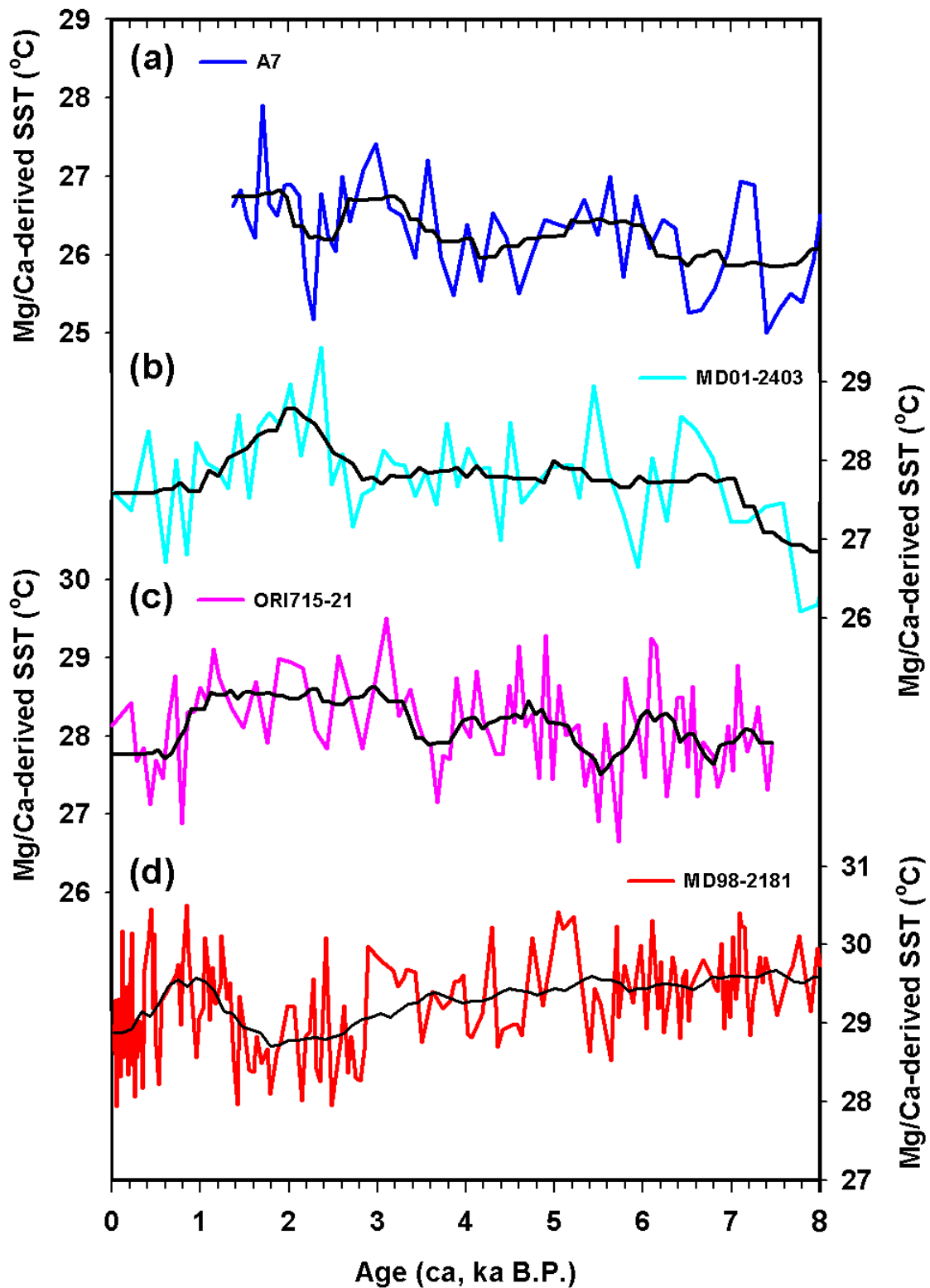


圖 4-4、A7 岩芯 (Sun *et al*, 2005)、MD01-2403 岩芯 (Lin *et al*, 2006)、ORI715-21 岩芯、MD98-2181 岩芯 (Stott *et al*, 2004) 之浮游有孔蟲 *G. ruber* (s.s.) 鎂鈣元素比所重建之 8.0 ka 以來的 SSTs 紀錄。

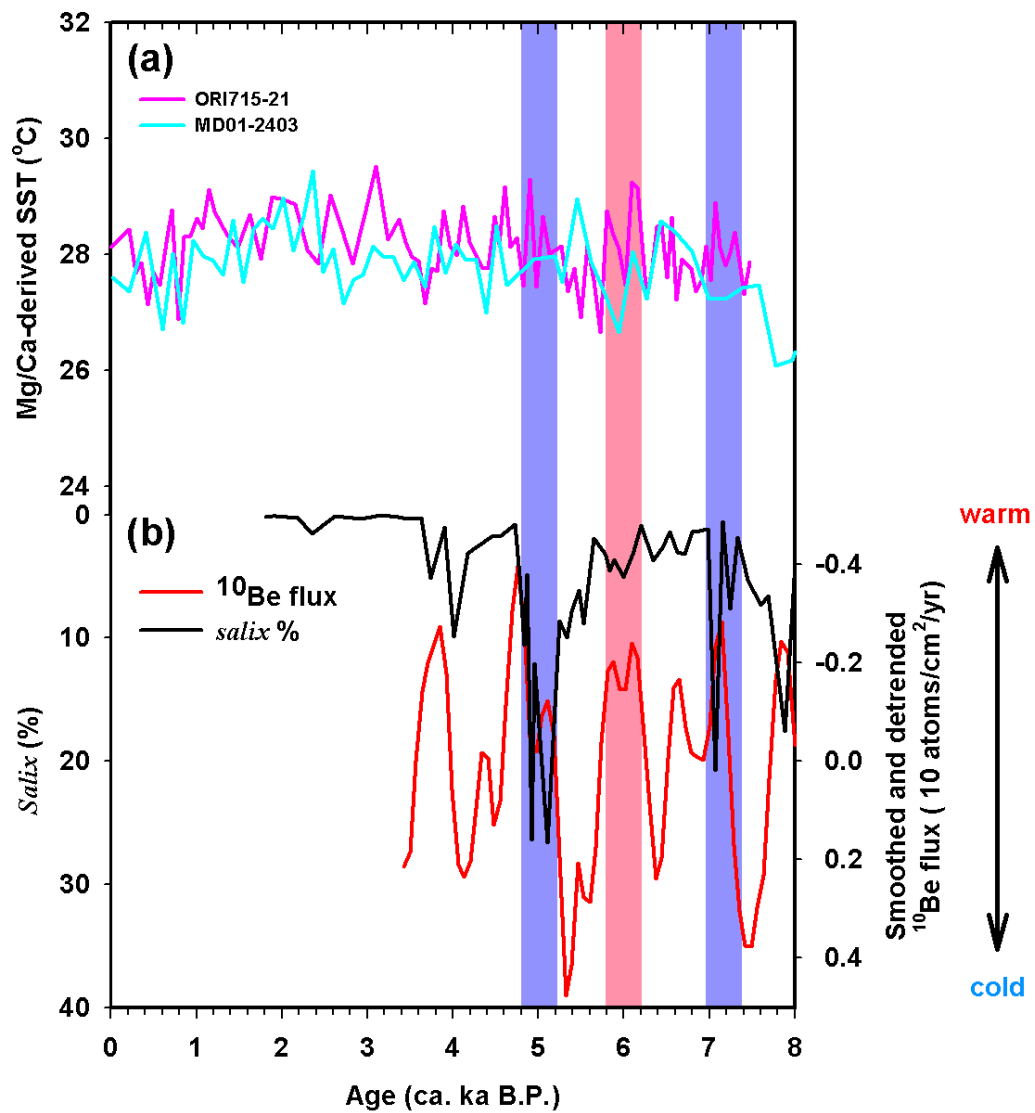


圖 4-5、(a) ORI715-21 岩芯與 MD01-2403 岩芯 8.0 ka 以來之浮游有孔蟲 *G. ruber* (s.s.)

鎂鈣元素比紀錄所轉換成的 SSTs，根據 Liew *et al.* (2006) 的森林相轉換事件，淺藍色區塊代表森林相轉換的冷期事件，紅色區塊代表森林相轉換的暖期事件。(b) GISP2 冰芯 8.0~3.2 ka 以來的 ¹⁰Be 通量變化曲線圖 (Finkel and Nishiizumi, 1997; Bond *et al.*, 2001)。

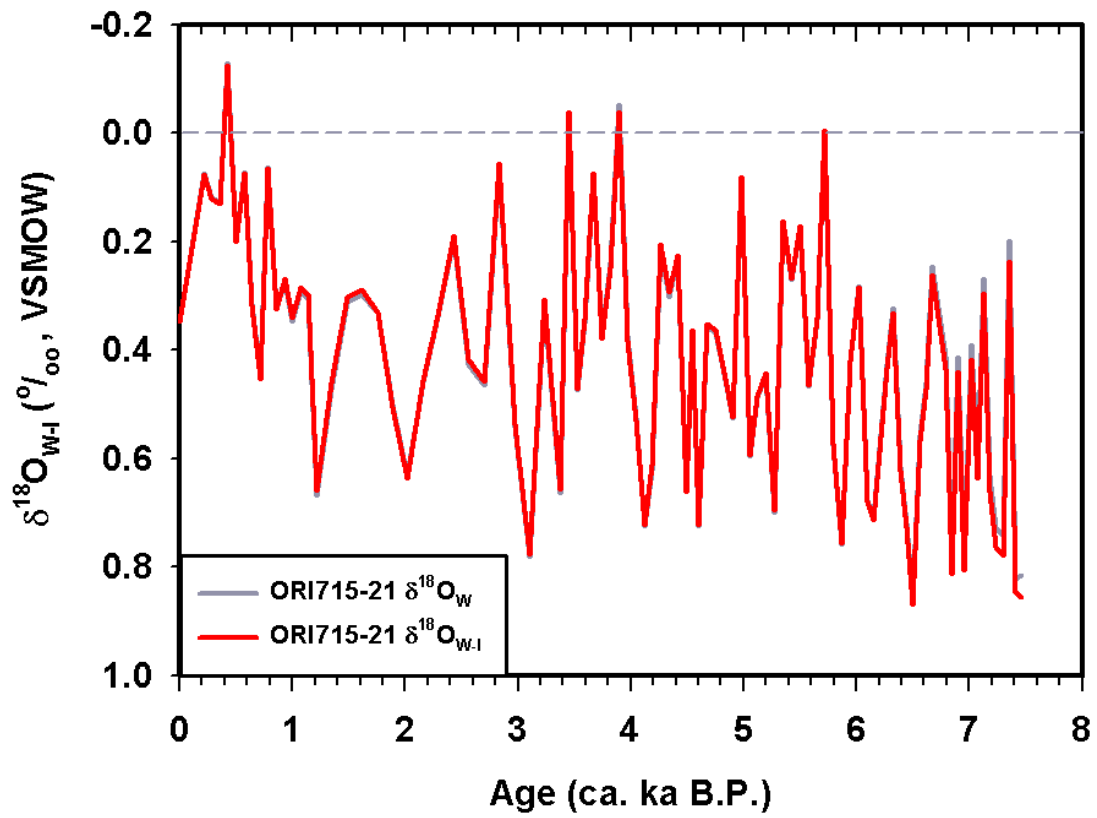


圖 4-6、ORI715-21 岩芯在 7.5 ka 以來之海水氧同位素值 ($\delta^{18}\text{O}_{\text{w}}$)：深灰色實線，扣除冰川效應的校正後海水氧同位素值 ($\delta^{18}\text{O}_{\text{w-l}}$)：紅色實線。

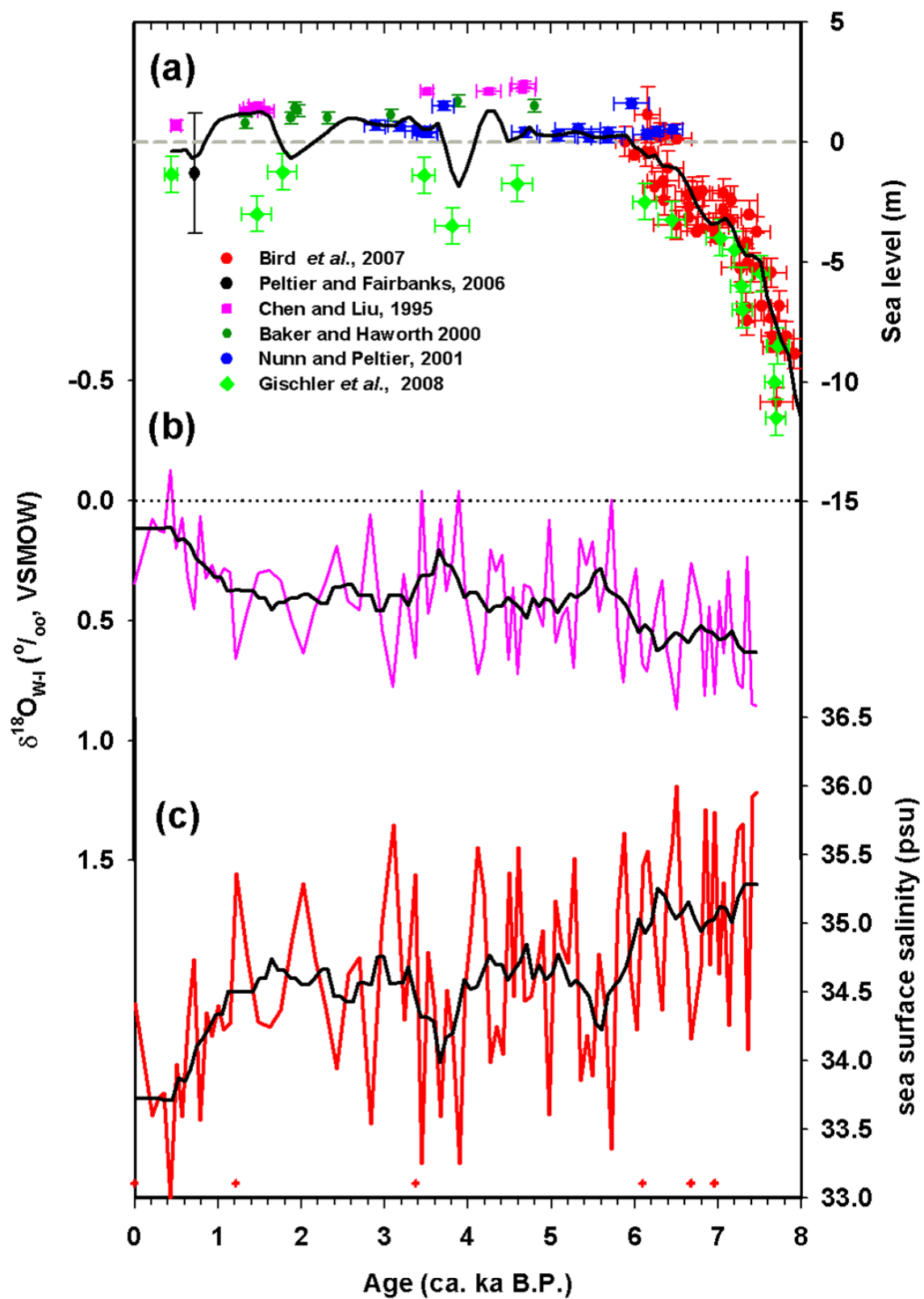


圖 4-7、(a) 海平面複合曲線 (Wei, 2009)；(b) ORI715-21 岩芯之 $\delta^{18}\text{O}_{\text{W-I}}$ 曲線；(c) ORI715-21 岩芯之 SSS 曲線。6 個紅色十字代表的是本研究的 AMS ^{14}C 定年點。

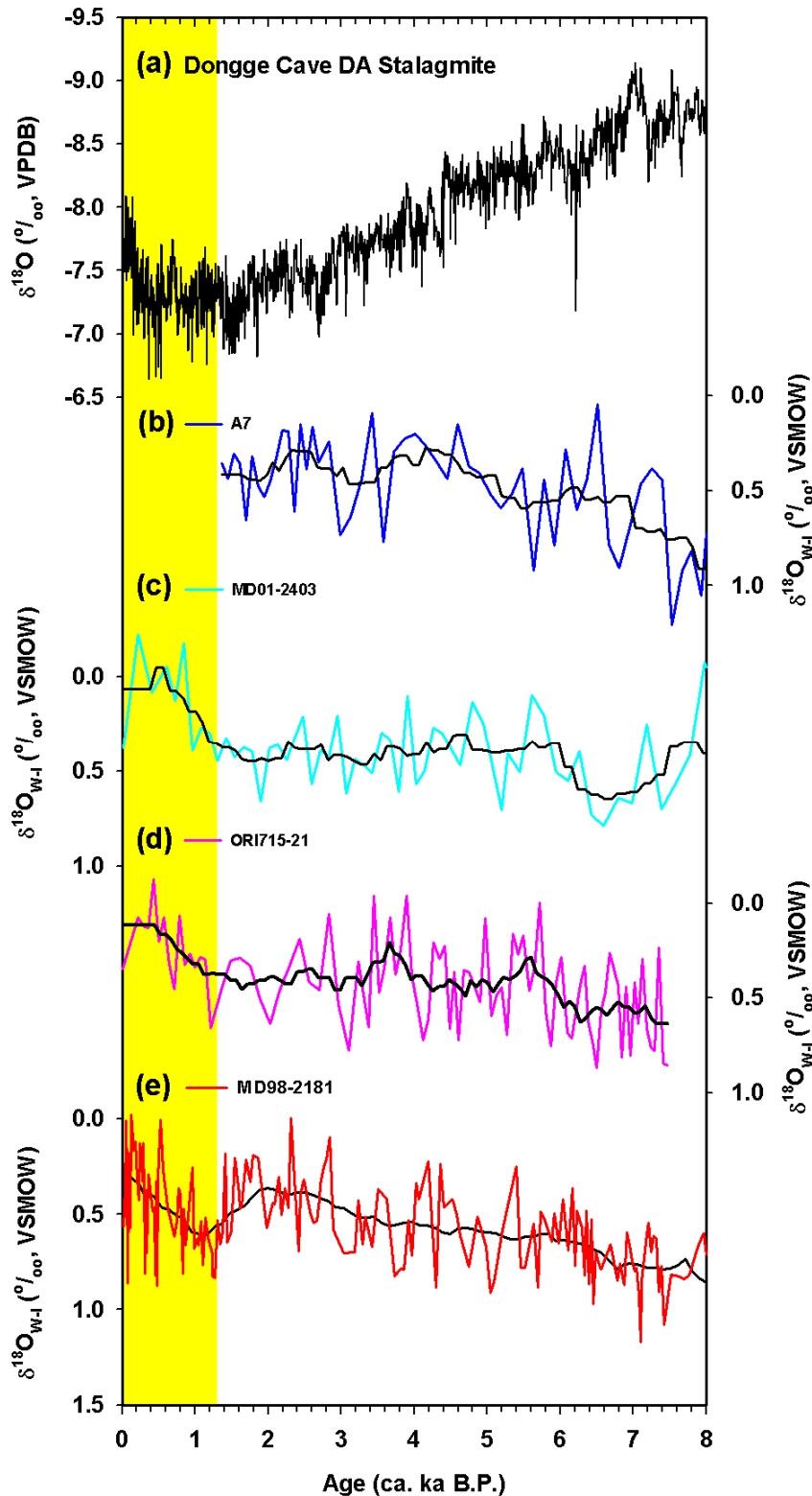


圖 4-8、8.0 ka 以來之 (a) 董哥洞之石筍 $\delta^{18}\text{O}$ 曲線 (Wang *et al.*, 2005)；(b) 岩芯 A7 之 $\delta^{18}\text{O}_{\text{w-l}}$ 曲線 (Sun *et al.*, 2005)；(c) 岩芯 MD01-2403 之 $\delta^{18}\text{O}_{\text{w-l}}$ 曲線 (Lin *et al.*, 2006)；(d) 岩芯 ORI715-21 之 $\delta^{18}\text{O}_{\text{w-l}}$ 曲線；(e) 岩芯 MD98-2181 之 $\delta^{18}\text{O}_{\text{w-l}}$ 曲線 (Stott *et al.*, 2004)。黃色區塊為過去 1.3 ka 以來的時間。

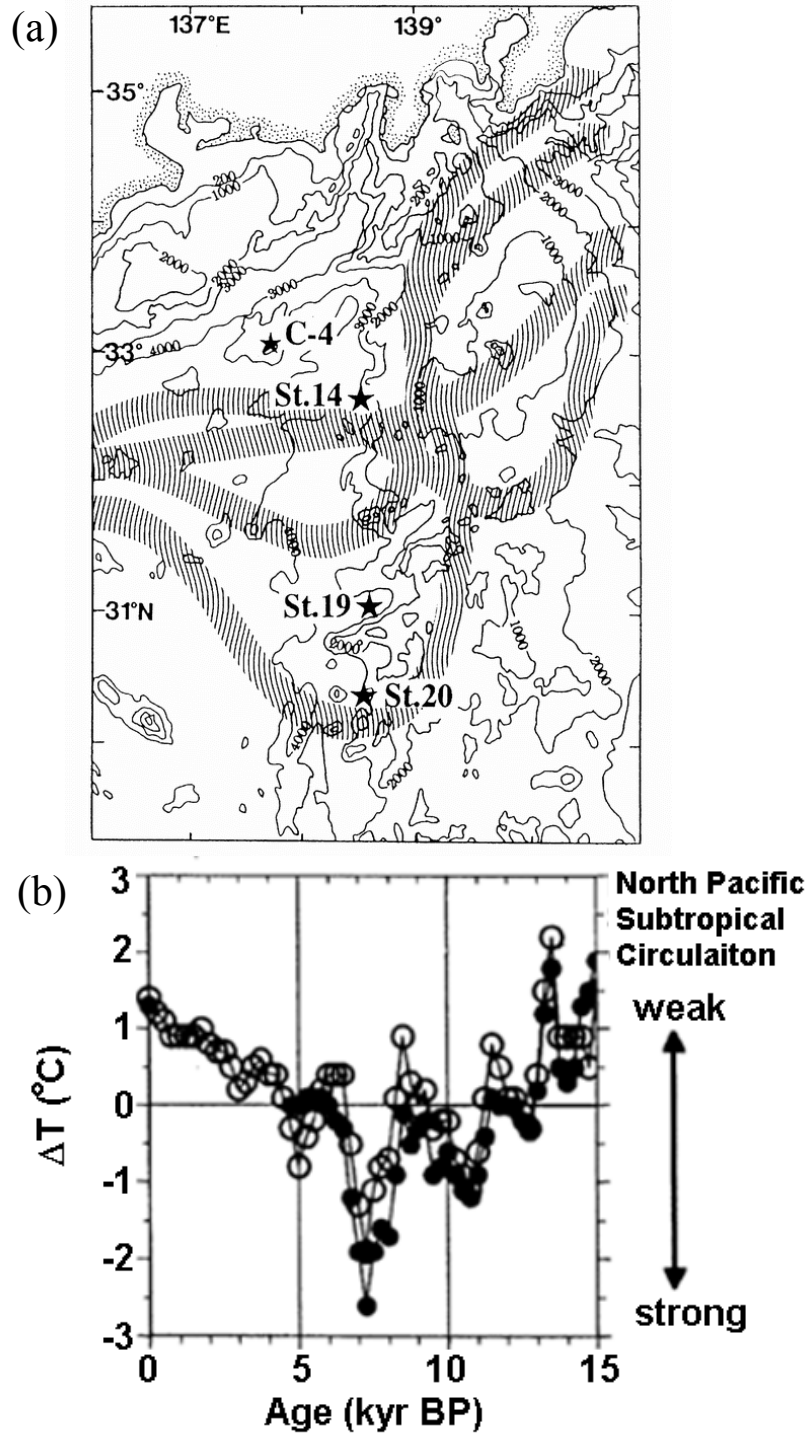


圖4-9、(a) 日本本州島中南部海域四根海洋岩芯站位圖，其中黑色條紋線為黑潮擺盪所流經之區域。(b) 日本本州島中南部海域南北緯向的溫度差異變化對年代圖。以南邊的站位19 (31° 5.7' N, 138° 39.9' E) 與站位20 (30° 22.6' N, 138° 38.9' E) 之烯酮類不飽和指數 (U_{37}^k) 所重建的古溫度各自減去北邊的站位14 (32° 40.1' N, 138° 27.3' E) 之古溫度所得之溫度差值，其中每一點皆以原實測值以內插250年所得之溫度進行運算。(修改自Sawada and Handa, 1998)

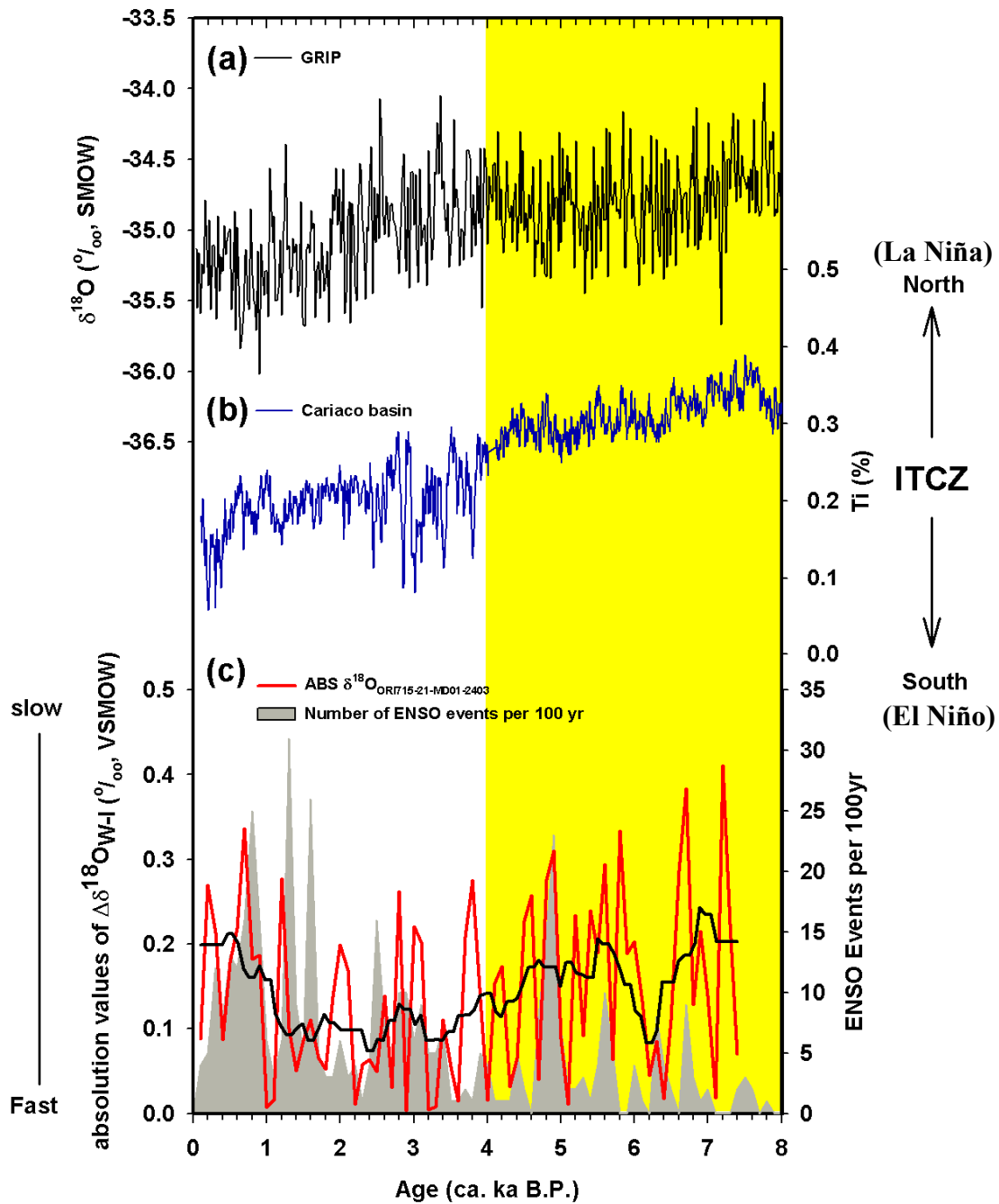


圖 4-10、各種氣候紀錄 8.0 ka 以來的比較：(a) GRIP 的 $\delta^{18}\text{O}$ 曲線 (Vinther *et al.*, 2006)。 (b) ODP1002 岩芯 (Cariaco Basin) 之鈦元素含量 (Haug *et al.*, 2001)。 (c) 全新世 ENSO 每百年發生之次數 (Moy *et al.*, 2002) 與 ORI715-21 岩芯和 MD01-2403 岩芯之 $\delta^{18}\text{O}_{\text{W-I}}$ 梯度絕對值，較大的 $\delta^{18}\text{O}_{\text{W-I}}$ 絕對值差值暗示著較慢的黑潮流速。黃色區塊為全新世的大暖期時間。

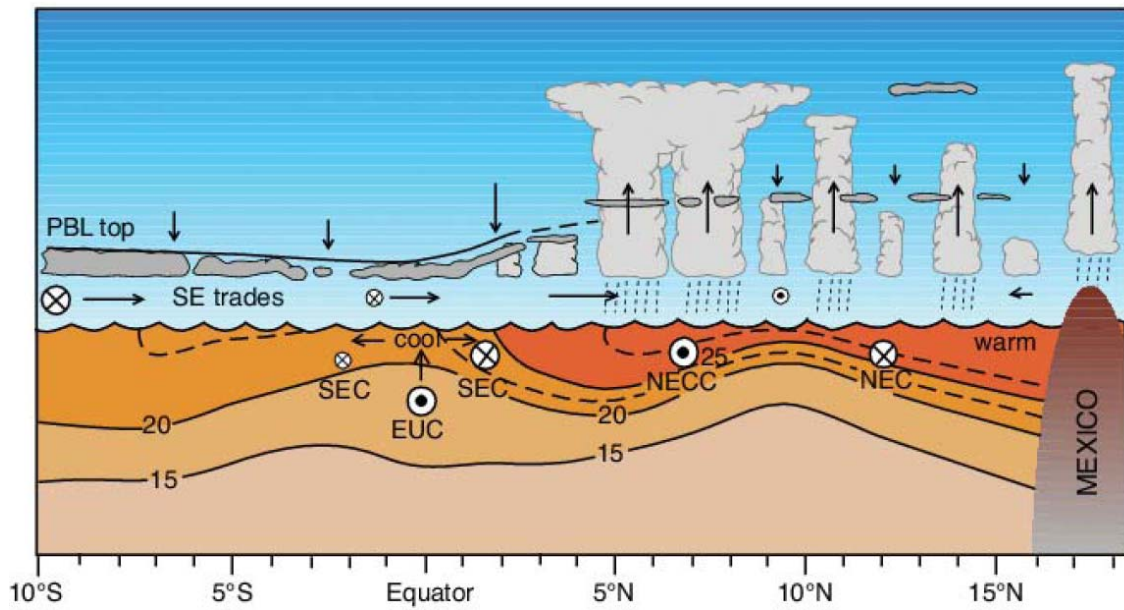


圖 4-11、ITCZ 與冷舌於東赤道太平洋之剖面示意圖：顯示大氣南北向環流、大氣邊界層高度以及海洋溫度結構。SEC：南赤道洋流、NEC：北赤道洋流、NECC：北赤道反流、EUC：赤道潛流、直展雲系：指示 ITCZ 的位置、 \odot ：向東方前進的風或洋流、 \otimes ：向西方前進的風或洋流。（取自 Raymond *et al.*, 2004）



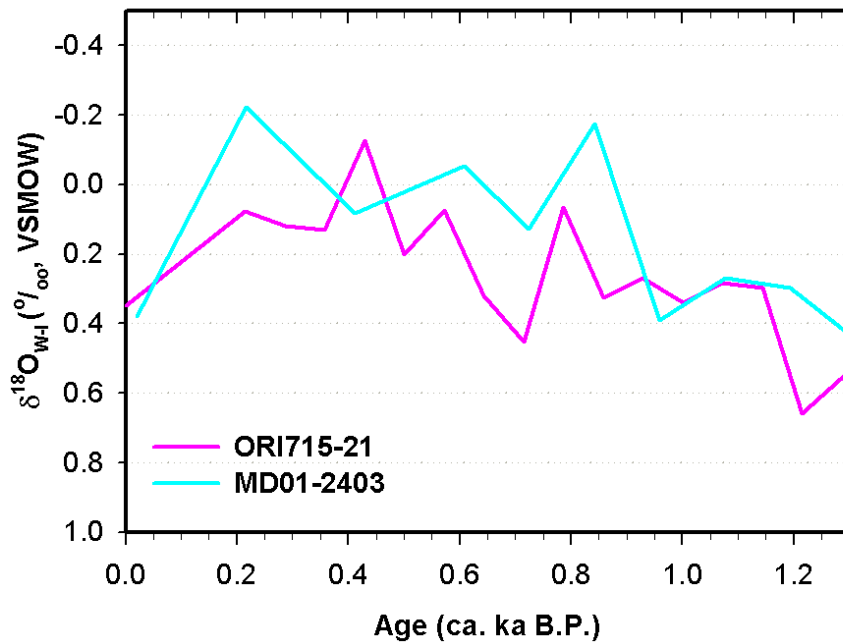


圖 4-12、過去 1.3 ka 以來 ORI715-21 岩芯與 MD01-2403 岩芯之海水氧同位素 ($\delta^{18}\text{O}_{\text{W-I}}$)。



Hong Kong Station (1973-2005)

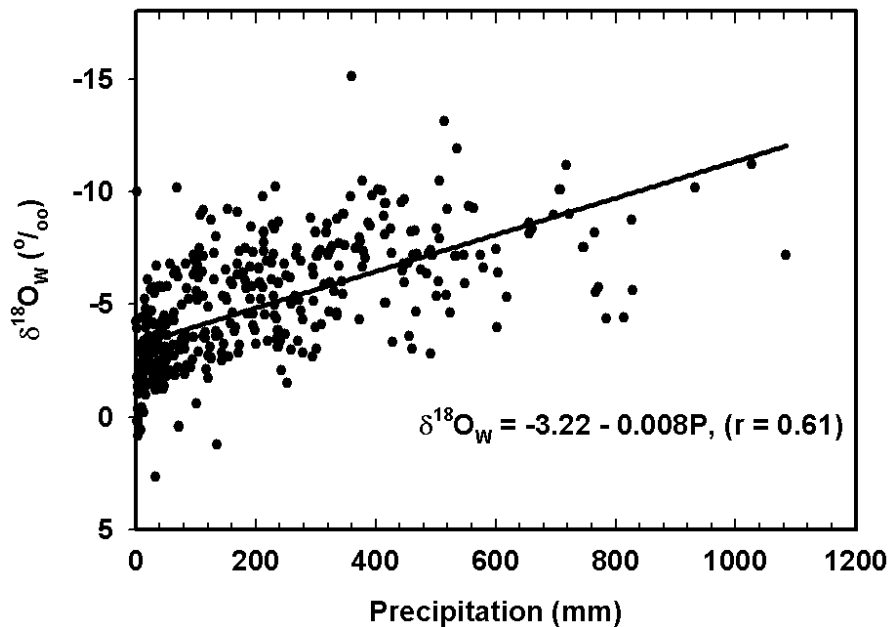


圖 4-13、1973-2005 的香港京士柏氣象站 (Kings Park) 所記錄的月平均降水量對雨水氧同位素圖。線性迴歸 ($r=0.61$) 顯示降水對雨水氧同位素的存在著雨量效應的關係，約每增加 100 mm 雨量， $\delta^{18}\text{O}_{\text{W}}$ 下降 0.8‰。

第五章結論

- 一、ORI715-21 岩芯的平均沈積速率約為 25.2 cm/kyr，在深度 148 公分 (~6.2 ka) 與 166 公分處 (~6.7 ka) 分別有約 50% 和 65% 的粗顆粒百分比，可能受到濁流作用的影響。
- 二、本研究以臺灣東部外海綠島北緣的 ORI715-21 岩芯建立過去 7.5 ka 以來的浮游有孔蟲氧碳同位素紀錄， $\delta^{18}\text{O}_c$ 之數值在 7.5 ka 以來呈現逐漸變輕且振盪加劇的趨勢，與南沖繩海槽 MD01-2403 岩芯的氧同位素紀錄相似。
- 三、本研究所重建之浮游有孔蟲鎂鈣比紀錄顯示在 7.5 ka 以來的趨勢大致呈穩定狀態，其所轉換的 SST 長期趨勢變化與西太平洋暖池、沖繩海槽的 SSTs 變化趨勢類似，皆呈現穩定狀態，而與 Liew *et al.* (2006) 的臺灣南投頭社盆地之全新世花粉序列紀錄相比在森林相轉換造成的冷期事件無明顯相關性，但與 GISP2 冰芯的 ^{10}Be 通量變化曲線有同時性的現象。
- 四、本研究重建的 7.5 ka 以來的 $\delta^{18}\text{O}_{\text{w-I}}$ 變化，在臺灣東部外海與西太平洋暖池、沖繩海槽的 $\delta^{18}\text{O}_{\text{w-I}}$ 皆有相似的趨勢，自 8.0 ka 以來的 $\delta^{18}\text{O}_{\text{w-I}}$ 有逐漸變輕的現象，三者的振幅從 8.0 ka 至 1.3 ka 大體上相近，但卻與董哥洞的石筍氧同位素值成反向關係，反映西南季風的強度減弱並無影響到熱帶太平洋開放海區的變化。
- 五、黑潮主流在日本本州島中南部海域的擺盪現象與黑潮上游區的溫度變化有連動關係，當黑潮上游區的溫度較高，在日本南部海域的黑潮易於向北擺盪。
- 六、利用 ORI715-21 岩芯與 MD01-2403 岩芯相扣除之 $\delta^{18}\text{O}_{\text{w-I}}$ 絕對差值表示黑潮流速的強弱，顯示黑潮流速變動有百年尺度的週期，而在 ITCZ 北移、ENSO 現象不顯著的全新世大暖期時，黑潮流速有變快的趨勢，此外，在 4.0 ka 以來，ITCZ 南移，ENSO 現象的狀況加強時，黑潮流速有減弱的趨勢。

- 七、在 6.0 ka 時 $\delta^{18}\text{O}_{\text{w-l}}$ 絕對差值最小，與 Liew *et al.* (2006) 在 6.1~5.9 ka 的熱帶雨林相所呈現之暖期事件有關，推測當時的黑潮增強時使台灣中部形成暖濕氣候。
- 八、從 1.3 ka 至今的水體氧同位素變化與董哥洞石筍氧同位素呈同向變化，而 ORI715-21 岩芯的振幅約 0.8‰ 與 MD01-2403 岩芯的振幅約 0.6‰，皆有明顯的降雨量增加的現象，分別約為 377 ± 217 mm 與 277 ± 217 mm，推測應是梅雨鋒面降水及颱風強降水在黑潮上游區與南沖繩海槽區域增加所致。



參考文獻

- 王作臺、黃志銘與胡志文 (1992) 乾濕梅雨季東亞環流特性之研究。大氣科學，第20期，267-294。
- 王時鼎 (1970) 論臺灣之梅雨。氣象預報與分析，第44期，12~20。
- 朱錦紅、柯文雄、許晃雄 (2002) 臺灣降水變化研究回顧-颱風長期變化與降水長期預報。全球變遷通訊雜誌，第36期，38-46。
- 林清芬 (1999) 南海及呂宋海峽海水氧同位素組成之研究。國立中山大學海洋地質及化學研究所碩士論文。
- 鄭俠 (1989) 臺灣天氣之特異性及與自然季節關係之分析。氣象學報，第35卷第2期，105-124。
- 魏國彥、林玉詩、羅立、沈川洲、林殷田、米泓生 (2008) 近一萬年來沖繩海槽的海表溫與水文變化。自然與人為互動：環境史研究的視角，33-53。臺北市：中央研究院、聯經出版公司。
- 魏國彥、許晃雄 (1997) 全球環境變遷導論。臺北市：教育部。
- 謝英宗 (1993) 臺灣東部海域晚第四紀之古海洋。國立臺灣大學海洋學研究所博士論文。
- Adkins, J.F., McIntyre, K., Schrag, D.P. (2002) The Salinity, temperature, and $\delta^{18}\text{O}$ of the glacial deep ocean. *Science* 298, 1769-1773.
- Aggarwal, P. K., Fröhlich, K., Kulkarni, K. M. & Gourcy, L. L. (2004) Stable isotope evidence for moisture sources in the Asian summer monsoon under present and past climate regimes. *Geophysical Research Letter* 31, doi:10.1029/2004GL019911.
- Baker, R.G.V. and Haworth, R.J. (2000) Smooth or oscillating late Holocene sea-level curve? Evidence from the palaeo-zoology of fixed biological indicators in east Australia and beyond. *Marine Geology* 163, 367-386.
- Bard, E. (1988). Correction of accelerator mass spectrometry ^{14}C age measured on planktonic foraminifera: paleoceanographic implications. *Paleoceanography* 3(6), 635-645.

- Barker, S., Greaves, M., and Elderfield, H. (2003) A study of cleaning procedures used for foraminiferal Mg/Ca paleothermometry. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems* 4, Paper number 2003GC000559.
- Barker, S., Cacho, I., Benway, H., Tachikawa, K., (2005) Planktonic foraminiferal Mg/Ca as a proxy for past oceanic temperatures: a methodological overview and data compilation for the last glacial maximum. *Quaternary Science Reviews* 24(7-9), 821-834.
- Bemis, B.E., Spero, H.J., Bijma, J., Lea, D.W. (1998) Re-evaluation of the oxygen isotopic composition of planktonic foraminifera: experimental results and revised paleotemperature equations. *Paleoceanography* 13, 150-160.
- Berger, W.H. (1979) Stable isotopes in foraminifera. *Foraminiferal Ecology and Paleoecology, SEPM short course*, No.6.
- Bird, M.I., Fifield, L.K., Teh, T.S., Chang, C.H., Shirlaw, N., Lambeck, K. (2007) An inflection in the rate of early mid-Holocene eustatic sea-level rise: A new sea-level curve from Singapore. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 71, 523-536.
- Bond, G., Kromer, B., Beer, J., Muscheler, R., Evans, M.N., Showers, W., Hoffmann, S., Lotti-Bond, R., Hajdas, I., Bonani, G. (2001) Persistent solar influence on North Atlantic climate during the Holocene. *Science* 294, 2130-2136.
- Chang, Y.-P., Wu, S.-M., Wei, K.-Y., Murayama, M., Kawahata, H., Chen, M.-T. (2005) Foraminiferal oxygen isotope stratigraphy and high-resolution organic carbon, carbonate records from the Okinawa Trough (IMAGES MD012404 and ODP Site 1202). *Atmospheric and Oceanic Sciences (TAO)*, 16(1), 57-73.
- Chen, M.-S., Jeng, W.-L., Liu, K.-K., and Chen, J.-C. (1984) Oxygen isotope studies of planktonic foraminifera of core TMS125 from sea floor off eastern Taiwan. *GSC Annual Meeting Abstract*. Taipei

- Chen, C.T.A., Feely, R. A., and Gendron, J.F. (1988) Lysocline, calcium carbonate compensation depth, and calcareous sediments in the North Pacific Ocean. *Pacific Science* 42, 237-252.
- Chen, G. T. J. (1990) Overview of Mei-Yu research in Taiwan. *East Asia and Western Pacific Meteorology and Climate*, World Scientific Publishing Co., Editors P. Sham & C. P. Chang, 14– 37
- Chen, G. T. J. (1992) Mesoscale features observed in the Taiwan Mei-Yu season, *J. Meteor. Soc.* 70, 497– 516
- Chen, M.-P. Hwang, C.-K., Lo, L. and Wang, C.-H. (1992a) Late Pleistocene paleoceanography of the Kuroshio Current in the area offshore southeast Taiwan. *Atmospheric and Oceanic Sciences (TAO)*, 3(1):81-110.
- Chen, Y.-G., and Liu, T.-K. (1996) Sea level changes in the last several thousand years, Penghu Islands, Taiwan Strait. *Quaternary Research* 45, 254-262.
- Deser, C. and Wallace, M.J. (1990) Large-scale atmospheric circulation features of warm and cold episodes in the tropical Pacific. *Journal of Climate*, vol. 3. 1254-1281.
- Dansgaard. W., Johnsen, S.J., Clausen, H.B., Dahl-Jensen, D., Gundestrup, N.S., Hammer, C.U., Hvidberg, C.S., Steffensen, J.P., Sveinbjömsdottir, A.E., Jouzel, J., and Bond, G. (1993) Evidence for general instability of past climate from a 250-kyr ice-core record. *Nature* 364(6434), 218-220.
- Duplessy, J.C., Be, A.W.H., Blanc, P.L. (1981a) Oxygen and carbon isotopic composition and biogeographic distribution of planktonic foraminifera in the Indian Ocean. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 33, 9–46.
- Elderfield, H., and Ganssen, G. (2000) Past temperature and $\delta^{18}\text{O}$ of surface ocean waters inferred from foraminiferal Mg/Ca ratios. *Nature* 405(6785), 442-445.

- Ferguson, J.E., Henderson, G.M., Kucera, M., Rickaby, R.E.M. (2008) Systematic change of foraminiferal Mg/Ca ratios across a strong salinity gradient. *Earth and Planetary Science Letters* 265, 153-166.
- Finkel, R.C., and K. Nishiizumi. (1997) Beryllium 10 concentrations in the Greenland Ice Sheet Project 2 ice core from 3-40 ka. *Journal of Geophysical Research* 102:26699-26706.
- Gischler, E., Hudson, J.H., Pisera, A. (2008) Late Quaternary reef growth and sea level in the Maldives (Indian Ocean). *Marine Geology* 250, 104-113.
- Haug, G., Hughen, K. A., Sigman, D.M., Peterson, L.S., Röhl, U. (2001) Southward migration of the intertropical Convergence Zone through the Holocene. *Science*, 293, 1304-1308, doi:10.1126/science.1059725
- Hastings, D., Kienast M., Steinke S., and Whitko A. A. (2001) Comparison of three independent paleotemperature estimates from a high resolution record of deglacial SST records in the tropical South China Sea, EOS, 82, PP12B-10.
- Koutavas, A., Demenocal, P.B., Olive, G.C., and Lynch-Stuegkutz, J. (2006) Mid-Holocene El Niño-Southern Oscillation (ENSO) attenuation revealed by individual foraminifera in eastern tropical Pacific sediments. *Geology* 34, 993-996.
- Kim, Y.Y., Qu T., Miyama, T., Mitsudera, H., Kang, H.W., Ishida, A. (2004) Seasonal and interannual variations of the North Equatorial Current bifurcation in a high-resolution OGCM. *Journal of Geophysical Research* 109, C03040. doi:10.1029/2003JC002013
- Lea, D., Mashiotta, T., Spero, H. (1999) Controls on magnesium and strontium uptake in planktonic foraminifera determined by live culturing. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 63(16), 2369-2379.
- Lea, D.W., Pak, D.K., Spero, H.J. (2000) Climate impact of late Quaternary equatorial Pacific sea surface temperature variations. *Science* 289, 1719-1724.

- Lea, D.W., Pak, D.K., and Paradis G. (2005) Influence of volcanic shards on foraminiferal Mg/Ca in a core from the Galápagos region. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems* 6, Paper number 2005GC000970.
- Liang, W.-D., Tang, T.-Y., Yang, Y.-J., Ko, M.-T., Chuang W.-S. (2003) Upper-ocean currents around Taiwan. *Deep-Sea Research: part 2. Topical Studies Oceanography* 50, 1085-1105.
- Liew, P.-M., and Huang, S.-Y. (1994) A 5000 year's pollen record from Chitsai lake, in Central Taiwan. *Atmospheric and Oceanic Sciences (TAO)* 5(3), 411-420.
- Liew, P.-M., Kuo, C.-M., Chen, A.C.T., and Lou, J.-Y. (1995) Climatic fluctuations during the last several millennia indicated by lake sediments of Taiwan. *Proc. 1995 Nagoya IGBP-PAGES/PEP II Symposium.*, 103-108.
- Liew, P.-M., Lee, C.-Y., and Kuo, C.-M. (2006) Holocene thermal optimal and climate variability of East Asian monsoon inferred from forest reconstruction of a subalpine pollen sequence, Taiwan. *Earth Planetary Science Letter* 250, 596-605.
- Lin, H.-L., Wang, W.-C., Hung, G.-W., (2004) Seasonal variation of planktonic foraminiferal isotopic composition from the sediment traps in the South China Sea. *Marine Micropaleontology* 53, 447-460.
- Lin, H.-L., and Hsieh, H.-Y. (2007) Seasonal variations of modern planktonic foraminifera in the South China Sea. *Deep-Sea Research II* 54, 1634-1644.
- Lin, Y.-S. (2005) Holocene paleoceanography in the upper reach of the Kuroshio. *M.Sc. Thesis, National Taiwan University*, 21-23.
- Lin, Y.-S., Wei, K.-Y., Lin, I.-T., Yu, P.-S., Chiang, H.-W., Chen, C.-Y., Shen, C.-C., Mii, H.-S., Chen, Y.-G. (2006) The Holocene *Pulleniatina* Minimum Event revisited: geochemical and faunal evidence from the Okinawa Trough and upper reaches of the Kuroshio current. *Marine Micropaleontology* 59, 153–170.

- Lu C.-J. (2006) High-precision determination of carbonate Mg/Ca and Sr/Ca ratios by inductively coupled plasma sector field mass spectrometry. *M.Sc. Thesis, National Taiwan University*, 10-32.
- Löwemark, L., Hong, W.-L., Yui, T.-F., Hung, G.-W. (2005) A test of different factors influencing the isotopic signal of planktonic foraminifers in surface sediments from the northern South China Sea. *Marine Micropaleontology* 55, 49–62.
- Mashiotta, T.A., Lea, D.W., Spero, H.J. (1999) Glacial-interglacial changes in Subantarctic sea surface temperature and $\delta^{18}\text{O}$ using foraminifera. *Earth and Planetary Science Letters* 170, 417–432.
- Mitchell, T.P., and Wallace, J.M. (1992) The annual cycle of equatorial convection and sea surface temperature. *Journal of Climate*, vol. 5, 1140-1156.
- Moy, C.M., Seltzer, G.O., Seltzer, D.T., and Anderson, D.M. (2002) Variability of El Niño/Southern Oscillation activity at millennial time scales during the Holocene epoch. *Nature* 420(6912), 162-165.
- Nunn, P.D. and Peltier, W.R. (2001) Far-field test of the ice-4g model of global isostatic response to deglaciation using empirical and theoretical Holocene sea-level reconstructions for the Fiji islands, southwestern Pacific. *Quaternary Research* 55, 203-214.
- Nürnberg, d., Bijma, J., and Hemleben, C. (1996) Assessing the reliability of magnesium in foraminiferal calcite as a proxy for water mass temperatures. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 60(5), 803-814.
- Peltier, W.R. and Fairbanks, R.G. (2006) Global glacial ice volume and Last Glacial Maximum duration from an extended Barbados sea level record. *Quaternary Science Review* 25, 3322-3337.

- Qiu, B., and Lukas, R. (1996) Seasonal and interannual variability of the North Equatorial Current, Mindanao Current, and the Kuroshio along the Pacific western boundary. *Journal of Geophysical Research* 101(C5), 12,315-12,330.
- Qu, T., Mitsudera, H., Yamagata, T. (1998) On the western boundary currents in the Philippine Sea. *Journal of Geophysical Research* 103(C4), 7537-7548.
- Qu, T. (2003) Mixed layer heat balance in the western North Pacific. *Journal of Geophysical Research* 108(C7), 3242, doi:10.1029/2002JC001536.
- Qu, T., and Lukas, R. (2003) The bifurcation of the North Equatorial Current in the Pacific. *Journal of Physical Oceanography* 33, 5-18.
- Qu, T., Kim, Y.Y., Yaremchuk, M., Tozuka, T., Ishida, A., Yamagata, T. (2004) Can Luzon Strait transport play a role in conveying the impact of ENSO to the South China Sea? *Journal of Climate* 17, 3644-3657.
- Raymond, D.J., Esbensen, S.K., Paulson, C., Grgg, M., Bretherton, C.S., Petersen, W.A., Cifelli, R., Shay, L.K., Ohlmann, C., and Zuidema, P., (2004) EPIC2001 and the coupled ocean-atmosphere system of the tropical east Pacific. *Bulletin of the American Meteorological Society*. vol. 85, 1341-1354.
- Richter, C., Venuti, A., Verosub, K., Wei, K.Y. (2006) Variations of the geomagnetic field during the Holocene: Relative paleointensity and inclination record from the West Pacific (ODP Hole 1202B). *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 156, 179-193.
- Rosenthal, R. and Lohmann, G.P. (2002) Accurate estimation of seasurface temperatures using dissolution-corrected calibrations for Mg/Ca paleothermometry. *Paleoceanography* 17, 16.1-16.6.
- Rozanski, K., Araguds-Araguds, L., and Gonfiantini (1992) Relation between long-term trends of ^{18}O isotope composition of precipitation and climate. *Science*, 258, 981-985.

- Sarmiento, J.L. and Gruber, N. (2002) Sinks for anthropogenic carbon. *Physics Today*, 55(8), 30-36.
- Sawada, K. and Handa N. (1998) Variability of the path of the Kuroshio ocean current over the past 25,000 years. *Nature* 392, 592-595.
- Spahni, R., Chappellaz, J., Stocker, T.F., Loulergue, L., Hausammann, G., Kawamura, K., Flückiger, J., Schwander, J., Raynaud, D., Masson-Delmotte, V., Jouzel, J. (2005) Atmospheric methane and nitrous oxide of the late Pleistocene from Antarctic ice cores. *Science* 310,1317-1321.
- Spero, H.J., Bijima, J., Lea, D., and Bemis, B.E. (1997) Effect of seawater carbonate concentration on foraminiferal carbon and oxygen isotopes. *Nature* 390(4), 497-500.
- Spero, H.J., Mielke, K.M., Kalve, E.M., Lea, D.W., Pak, D.K. (2003) Multispecies approach to reconstructing eastern equatorial Pacific thermocline hydrography during the past 360 kyr. *Paleoceanography* 18 (1), 1022, doi:10.1029/2002PA000814
- Steig, E.J. (1999) Paleoclimate:Mid-Holocene climate change. *Science* **286** (5444), 1485. [DOI: 10.1126/science.286.5444.1485]
- Steinke, S., Chiu, H.-Y, Yu, P.-S., Shen, C.-C., Lowemark, L., Mii, H.-S., Chen, M.-T. (2005) Mg/Ca ratios of two *Globigerinoides ruber* (white) morphotypes: Implications for reconstructing past tropical/subtropical surface water conditions. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems* 6, doi:10.1029/2005GC000926.
- Steinke, S., Kienast, M., Groeneveld, J., Lin, L.-C., Chen, M.-T., Rendle-Bühning, R. (2008) Proxy dependence of the temporal pattern of deglacial warming in the tropical South China Sea: toward resolving seasonality. *Quaternary Science Reviews* 27, 688-700.

- Stott, L., Cannariato, K., Thunell, R., Haug, G.H., Koutavas, A., Lund, S. (2004) Decline of surface temperature and salinity in the western tropical Pacific Ocean in the Holocene epoch. *Nature* 431, 56–59.
- Stuiver, M., Reimer, P.J., Reimer, R.W. (2005) CALIB 5.0.2 (<http://radiocarbon.pa.qub.ac.uk/calib/>).
- Sun, Y., D. Oppo, W., Xiang, R., Liu, W., and Gao, S. (2005) Last deglaciation in the Okinawa Trough: subtropical northwest Pacific link to northern hemisphere and tropical climate, *Paleoceanography*, 20, PA4005, doi:10.1029/2004PA001061.
- Thunell, R. Miao, Q., Calvert, S. E., Pedersen, T. F. (1992) Glacial-Holocene biogenic sedimentation patterns in the South China Sea: productivity variations and surface water pCO₂. *Paleoceanography* 7, 143-162.
- Vinther, B. M., Clausen, H. B., Johnsen, S.J., Rasmussen, S.O., Andersen, K.K., Buchardt, S.L., Dahl-Jensen, D., Seierstad, I.K., Siggaard-Andersen, M.-L., Steffensen, J.P., Svensson, A.M., Olsen, J., and Heinemeier, J. (2006) A synchronized dating of three Greenland ice cores throughout the Holocene. *Journal of Geophysical Research*, vol. 111, D13102, doi:10.1029/2005JD006921
- Waelbroeck, C., Mulitza, S., Spero, H., Dokken, T., Kiefer, T., Cortijo, E. (2005) A global compilation of late Holocene planktonic foraminiferal $\delta^{18}\text{O}$: relationship between surface water temperature and $\delta^{18}\text{O}$. *Quaternary Science Reviews* 24, 853–868.
- Wang, C.-H., Chen, J.-C. and Liu, K.-K. (1985) Stable isotope records from Holocene deep-sea sediments off northeastern Taiwan. *Bull. Inst. Earth Sci., Academia Sinica*, 5:59-66.
- Wang, C.-H. and Chen, J.-C. (1988) Oxygen and carbon isotopes of planktonic foraminifera in core LEG 4-6 from the southern Okinawa Trough. *Proc. Geol. Soc. China*, 31:219-225.

- Wang, C.-H. and Peng, T.-R., (2001) Hydrogen and oxygen isotopic compositions of Taipei precipitation: 1990 to 1998. *Western Pacific Earth Sciences* 1, No.4, 429-442.
- Wang, J.-T., and Huang, C.-M. (1993) Large-scale flow characteristics during the wet and dry Mei--Yu Seasons. *East Asia and Western Pacific Meteorology and Climate*. Edited by W.J.Kyle and C.P. Chang, 8--13, World Scientific Publishing, Singapore.
- Wang, L. (2000) Isotopic signals in two morphotypes of *Globigerinoides ruber* (white) from the South China Sea: implications for monsoon climate change during the last glacial cycle. *Palaeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 161, 381–394.
- Wang, Y.-J., Cheng, H., Edwards, R. L., He, Y.-Q., Kong, X.-G., An, Z.-S., Wu, J.-Y., Kelly, M.J., Dykoski, C.A., Li, X.-D. (2005) The Holocene Asian monsoon: links to solar changes and North Atlantic climate. *Science* 308, 854-857.
- Wei, K.-Y., Mii, H.-S. and Huang, C.-Y. (2005) Age model and oxygen isotope stratigraphy of Site ODP1202 in the southern Okinawa Trough, northwestern Pacific. *Terrestrial, Atmospheric and Oceanic Sciences (TAO)*, 16, 1-17.
- Wei, K.-W. (2006) Leg 195 synthesis: site 1202-late Quaternary sedimentation and paleoceanography in the Southern Okinawa Trough. *Proceedings of the Ocean Drilling Program: Scientific Results* 195, Manuscript number: 195SR-101.
- Wei, K.-Y. (2009) Compositeing a high-resolution eustatic sea-level curve of the past 20,000 years by data compilation, screening and smoothing. (manuscript)
- Vinther, B.M., Clausen, H.B., Johnsen, S.J., Rasmussen, S.O., Andersen, K.K., Buchardt, S.L., Dahl-Jensen, D., Seierstad, I.K., Siggaard-Andersen, M.-L., Steffensen, J.P., Svensson, A.M., Olsen, J., and Heinemeier, J. (2006). A synchronized dating of three Greenland ice cores throughout the Holocene. *Journal of Geophysical Research*, vol. 111, D13102, 2006, doi:10.1029/2005JD006921

Zhao, M., Huang, C.-Y. and Wei, K.-Y. (2005) A 28,000 year U_{37}^k sea surface temperature record of ODP Site 1202B, Southern Okinawa Trough. *Terrestrial, Atmospheric and Oceanic Sciences (TAO)*, 16, 45-56.

