

行政院國家科學委員會專題計畫成果報告

南海表層水體清除作用研究：鉛-210、釷-210、釷-234 應用
Scavenging Phenomenon in the Surface Layer of the South China Sea:
 ^{210}Pb , ^{210}Po , ^{234}Th application

計畫類別：☒個別型計畫 ☐整合型計畫

計畫編號：91-2611-M-002-016

執行期間：91/08/01~92/07/31

計畫主持人：魏慶琳

處理方式：☒可立即對外提供參考

執行單位：國立台灣大學理學院海洋研究所

中華民國九十三年二月七日

摘要

本論文利用南海 SEATS 時序工作站研究計畫，自 1998 年 9 月至 2003 年 3 月於 S1 測站 (18°N, 116°E) 共計 14 個航次，採集海水進行總態鈷-234 活度垂直分佈資料。活度分佈顯示總態鈷-234 相對鈷-238 在 300m 以上水層有明顯的不足現象發生。並應用鈷-234/鈷-238 不平衡的計算方式得到 S1 測站 100m 以上水層之總態鈷-234 沉降通量，其變化範圍為：758~2406 dpm/m²/d；平均沉降通量為：1576 dpm/m²/d。整個採樣水層的總態鈷-234 沉降通量變化範圍為：1895~6449 dpm/m²/d；平均沉降通量為：4119 dpm/m²/d。總態鈷-234 於 S1 測站 100m 以上水層中的平均滯留時間為 156 天。

此外，假設鈷-234 為光透層中顆粒有機碳循環的良好示蹤劑，因此將鈷-234 之通量與經由現場過濾 >0.45μm 顆粒體之實測 POC/PTh-234 比值來估算 100m 以上水層、整個採樣水層之顆粒有機碳輸出通量。於本研究區域 S1 測站 100m 以上水層之顆粒有機碳輸出通量，其時序的變動範圍為 3.4~10.7 mmol C/m²/d。此變動範圍系統性的高於 Liu *et al.* (2002) 利用生地化模式估算之結果。

Abstract

A total of 14 vertical profiles of Th-234 were determined at the time-series station (18°N, 116°E) in the South China Sea from September 1998 to March 2003. Significant deficiencies of total Th-234 with respect to U-238 were found in the upper 300m layer, from which the Th-234 sinking fluxes of 758~2406 dpm/m²/d with an average value of 1576 dpm/m²/d at the depth of 100m and 1895~6449 dpm/m²/d with an average value of 4119 dpm/m²/d at the depth of 300 m were estimated from the irreversible scavenging model. The average residence time of total Th-234 with respect to the vertical flux at 100m was 156 day.

Assuming thorium can serve as an efficient tracer for the particulate organic carbon (POC) in the euphotic zone, the POC/PTh-234 ratios in the particles collected by 0.45μm filtration were used to convert Th-234 fluxes to the POC fluxes. Accordingly, the POC export fluxes range from 3.4 to 10.7 mmol C/m²/d at 100m. These values are systematically higher than the estimation based on the biogeochemical model by Liu *et al.* (2002).

第一章 緒論

1.1 研究動機與目的

在海洋系統中，邊緣海（marginal seas）通常是生物與化學作用較為強烈的區域。也因此在此一邊緣海域中有較高的基礎生產力及其他來源物質進入，使得在顆粒體吸、脫附作用或生物方面的利用、分解、再利用等作用相當旺盛。南海是一具有「大陸邊緣海」及「半封閉海盆」雙重特徵的近赤道海域，整個海域長時間受到內波（internal waves）、內潮（internal tides）及慣性波（inertia waves）的影響（Shiah *et al.*, 1999）。被視為貧瘠（oligotrophic）海域的南海溫躍層較其他海域淺（ $<50\text{m}$ ），其基礎生產率與世界上其他大陸邊緣海盆相比亦較低。由於地處亞洲季風區，冬季時有從大陸南下的冷高壓造成的東北季風；在夏季則以西南季風為主。強烈的季風交替變化，使得每年有超過 10 個以上的颱風過境此海域（Shiah *et al.*, 1999）。季風變化及颱風過境直接造成了水體中的層化現象消失，即可能產生營養鹽幫浦（nutrient pumping）造成下層深冷且含較多營養的海水湧升，提供上層生物生長所需的養分。在過去幾年，我國學者提出了南海時間序列研究 SEATS（South East Asia Time-series Study）計畫，欲利用此測站長時間觀測南海北部海域的生、地、化作用。此測站位於低緯度接近赤道、有明顯的季風變化並遠離大陸地區及河川輸入等邊界作用條件；與其他時間序列測站如：Hawaii Ocean Time-series（HOT）、Bermuda Atlantic Time-series（BATS）位於較高緯度不同，可謂第一個在低緯度設立的時序測站。也許更可以利用測站之特殊條件研究上層海水之營養鹽動力以及各種生物化學現象。

在研究清除作用（scavenging processes）時，鈾-鈷系列放射核種是相當好的工具。本文分析南海水體中總態、溶解態及顆粒態鈷-234 放射活度，藉由此活度分佈及其對母核種鈾-238 活度的不平衡現象與一維不可逆清除

模式的解釋來瞭解清除作用。另外，並利用鈷-234 的親顆粒性來估算顆粒有機碳輸出通量 (particulate organic carbon export flux)。為了瞭解在不同季節時，水體中顆粒體的循環變化與親顆粒性元素鈷-234 的清除效應及時序變化，尤其是在海域非常寬闊、總面積幾乎為渤、黃、東海面積總和 3 倍的南海，進行顆粒有機碳垂直輸出通量的研究就更有重要的意義。

此外，光透層是生物性物質產生、再循環及沈降到深海的一個重要的生態系統，其間所產生的生物顆粒被認為碳循環作用最重要的營力，而親顆粒性元素鈷-234 與顆粒體有機碳之間的關係已有初步的認識如：溶解態鈷-234 的清除速率與基礎生產力、新生產力或有機碳之通量成正比關係 (Coale and Bruland, 1985; Tanaka *et al.*, 1983; Wei and Murray, 1992; Buesseler *et al.*, 1992)，顯示鈷-234/鈾-238 不平衡可成為研究光透層碳循環的有效方法之一。因此，進一步獲得更多的鈷-234 時序變化數據，將對顆粒體動力學研究有明顯的幫助。

1.2 鈾-238/鈷-234 母子核種特性及其運用

鈾-238 是鈾-238 天然放射系列之起始母核種，其半衰期為四億五千萬年。鈷-234 為鈾-238 經阿爾發蛻變後產生之子核種，半衰期非常短，僅 24.1 天。海水中的鈾傾向與碳酸根離子 (CO_3^{2-}) 結合成化性穩定之錯合物 ($\text{UO}(\text{CO}_3)_3^{4-}$)，由於物種不易與懸浮顆粒結合 (Langmuir, 1978)，故海水中百分之九十九以上是以溶解態且呈守恆性 (conservative) (Hodge *et al.*, 1979)。其放射活度與海水的鹽度之間有一良好的線性關係：鈾-238 活度 (dpm/L) = $0.071 \times \text{鹽度 (psu)}$ (Ku *et al.*, 1977)。鈷元素在海洋中主要是以溶解態的氫氧化鈷 ($\text{Th}(\text{OH})_n^{(4-n)+}$) 形式存在 (Turner *et al.*, 1981)，由於鈷-234 的半衰期遠短於母核種鈾

-238，在封閉系統內約五個子核種的半衰期後其活度將與其母核種鈾-238 之活度相等，此一母-子核種關係稱為永世平衡（secular equilibrium）。鈦是海水中最親顆粒的元素之一，非常容易與懸浮顆粒結合並隨顆粒沉降而移除。所以經由測量海水中溶解態及顆粒態鈦-234 相對於鈾-238 的放射性不平衡程度，不但可以確定鈦-234 從溶解態清除至顆粒物上的速率，而且可以估算出顆粒態鈦-234 從不同水層中經顆粒沉降作用的移除速率（Coale and Bruland, 1985, 1987; Bruland and Coale, 1986; Murray *et al.*, 1989; Wei and Murray, 1991, 1992）。

1.3 研究區域

南海是東南大陸邊緣最大的邊緣海之一，水深大於 4000 m，北靠華南大陸，南至加里曼丹島，東鄰台灣、菲律賓群島，西界中南半島範圍介於赤道至北緯 23 度，東經 99 度至 121 度之間。面積約 3.5×10^4 平方公里。而其菱形海盆的地形與東鄰的台灣，菲律賓島弧、海溝，形成東南大陸邊緣最完整的溝-弧-盆半封閉構造體系。其海底地形相當複雜，起伏變化甚多，深度最深可達 4700 m。此一海盆經由數個介於板塊與島嶼之間的通道與開放海洋連接，而呂宋海峽卻是南海海水與北太平洋西部海水交換的主要通道，當太平洋的海水通過呂宋海峽後進入南海海盆而形成了南海深層的水團（Nitani, 1972; Broecker *et al.*, 1997），而此深層的水團湧升與表面海水混合過後，形成南海的中層水團（Gong *et al.*, 1992）。但就以溫度、鹽度整體的變化趨勢來觀察可知南海北部淺層水應終年來自同一來源（海洋科學中心南海時序 S1 測站簡報）。

另外，南海是一個典型的熱帶季風氣候區，雨量豐沛，夏季（6~9 月）西南季風盛行；冬季（11~3 月）則是受到東北季風所控制。海流受兩種季

風之作用，冬夏各不相同。冬季東北季風盛行時，寒冷的沿岸流由中國沿海流經台灣海峽進入南海，另外黑潮之一個小支流由巴士海峽匯入此沿岸流而轉向西南。夏季西南季風較強，海流由南部進入南海，而台灣南端之黑潮支流不再轉向而往北流入台灣海峽。

本實驗計畫的主要採樣點為遠離陸地干擾少、水體物理特性穩定之時序測站 S1 (如圖 1.1 所示)。因此，本文中利用海研三號於 1998~2001 年間，與海研一號在 2001 年 10 月及 2003 年 1 月、3 月所分析 S1 測站之各航次所得的鈷-234 活度分析資料，來對南海水體中顆粒體在不同時間之下的清除現象變化與顆粒有機碳輸出通量做一探討。此外，在 2001 年 10 月的航次中也在另一離陸地較近的測站 (E 測站) 採樣分析並且分析溶解態、顆粒態活度與 S1 測站嘗試做一初步的比較。

1.4 各海域利用鈷-234/鈾-238 不平衡之時序研究

近年來對南海的研究已逐漸受到重視，研究的層面涉及物理、化學、生物及地質的交換作用 (Shiah *et al.*, 1999)。就目前我們對南海顆粒體傳輸與清除現象及一些國外的時序測站所得的結果做一整理，摘要如下：

太平洋研究 (EqPac time-series)：

Buesseler *et al.* (1995) 分析位於 12°N 、 10°S 與 $95^{\circ}\sim 170^{\circ}\text{W}$ 所構成之縱面區域 100m 以上水層中總態鈷-234 活度，於春季期間的變化範圍為 1.7~2.2 dpm/L；夏季期間活度為 $<1.5\sim 2.1$ dpm/L。並利用一維不可逆模式計算 100m 以上水層中平均鈷-234/鈾-238 活度比值，其平均為 1.03，最大值 (1.2) 出現於 100m 處，此過量現象作者推測可能是表層水體中鈷-234 通量大並且在一些特定的深度下再礦化的速度快所造成之結果。除了利用一維模式之外更利用三維的模式估算鈷-234 通量，其範圍為 $>2000\sim 2500$

dpm/m²/d。在春季 POC 輸出通量為 2~4 mmol C/m²/d，秋季 POC 輸出通量為 2~7 mmol C/m²/d。

Bacon *et al.* (1996) 於太平洋時序航次中分析了位於赤道 (0°N, 140°W) 的測站水體中鈷-234 活度，在其光透層 (120m) 水體中鈷-234 的活度明顯的不足，顯示在赤道太平洋光透層水體的生物作用旺盛，而造成較為強烈的清除作用。此外，由於研究區域位於赤道區，有機物的產生輸出主要是由側向傳輸 (lateral advection) 造成，而並非是下沉 (sinking) 的顆粒體。

Murray *et al.* (1996) 使用沈積物收集器收集中赤道太平洋 (central equatorial Pacific) 於聖嬰年和非聖嬰年航次的鈷-234 通量。經由計算得到受聖嬰現象 (El Niño) 影響的第一航次 (1992 年 2 月~5 月) 於 150m 之鈷-234 通量為 500~2400 dpm/m²/d，而另外不受聖嬰現象影響的第二航次 (1992 年 8 月~9 月) 鈷-234 通量為 1300~3600 dpm/m²/d。可知受到聖嬰現象的影響下使得水體中鈷-234 通量較為偏低。並且相同的趨勢亦出現於 POC 輸出通量，第一航次 (1~6 mmol C/m²/d) 較第二航次 (2~30 mmol C/m²/d) 低了許多。

Charette *et al.* (1999) 亦在太平洋海域最北的副極區水體中的鈷-234 活度分佈，得知於 75m 以上的水層中鈷-234 相對於鈷-238 有明顯的缺乏，而在 150~200m 處有過量的現象。經由計算得到鈷-234 的通量介於 1000~1400 dpm/m²/d。平均 POC 輸出通量為 2.8~7.1 mmol C/m²/d。

ALOHA 測站 (22°45'N, 158°00'W) 為 JGOFS 自 1988 年起即在夏威夷近海設立的時序測站，Claudia Benitez-Nelson *et al.* (2001) 採集量測位於 ALOHA 於 1999 年 4 月至 2000 年 3 月的九個航次水體中鈷-234 的活度，並利用沈降顆粒收集器量測沈降通量，進而使用穩定態模式 (steady state scavenging model) 估算於北太平洋亞熱帶環流 (North Pacific Subtropical

Gyre；NPSG）的顆粒體輸出，同時亦修正以顆粒體沉降收集器所收集之通量。量測之結果，總態鈷-234 活度介於 $1.28 \pm 0.12 \sim 3.08 \pm 0.29$ dpm/kg，且在 100 m 以上水層中鈷-234 活度相對鈷-238 活度有最大之不平衡的現象，顯示於 ALOHA 測站 100 m 以上水層有旺盛之生物作用。此一現象與其他海域所量測之結果相似。

NPSG 所得顆粒有機碳輸出通量亦較其他海域的輸出通量明顯高出許多（Martin *et al.*, 1987；Karl *et al.*, 1995, 1996）。 $\frac{POC}{P_{Th}}$ 比值與北大西洋藻華實驗（Northern Atlantic Bloom Experiment；NABE）、百慕達大西洋時序測站（Bermuda Atlantic Time-Series；BATS）、赤道、及北太平洋所得之值相近。大西洋時序（Atlantic time-series）：

Buesseler *et al.*（1992）於北大西洋藻華實驗期間量測水體中鈷-234 活度，發現在 4 月的晚期，水體中被懸浮顆粒所清除之溶解態鈷-234 是主控水體中鈷-234 平衡的主要因素。而到了 5 月的初期表水中的總態鈷-234 活度是減少的。

Charette and Moran（1999）估算出於 1996 年 5 月～7 月中大西洋（mid-Atlantic） $35^{\circ}\text{S} \sim 10^{\circ}\text{N}$ 水體中溶解態鈷-234 的平均滯留時間為 135 天。並在靠近赤道的測站得知約 90% 的 POC 輸出發生在 20m 處，再礦化最強烈發生在 50m 處。

阿拉伯海（Arabian Sea time-series）：

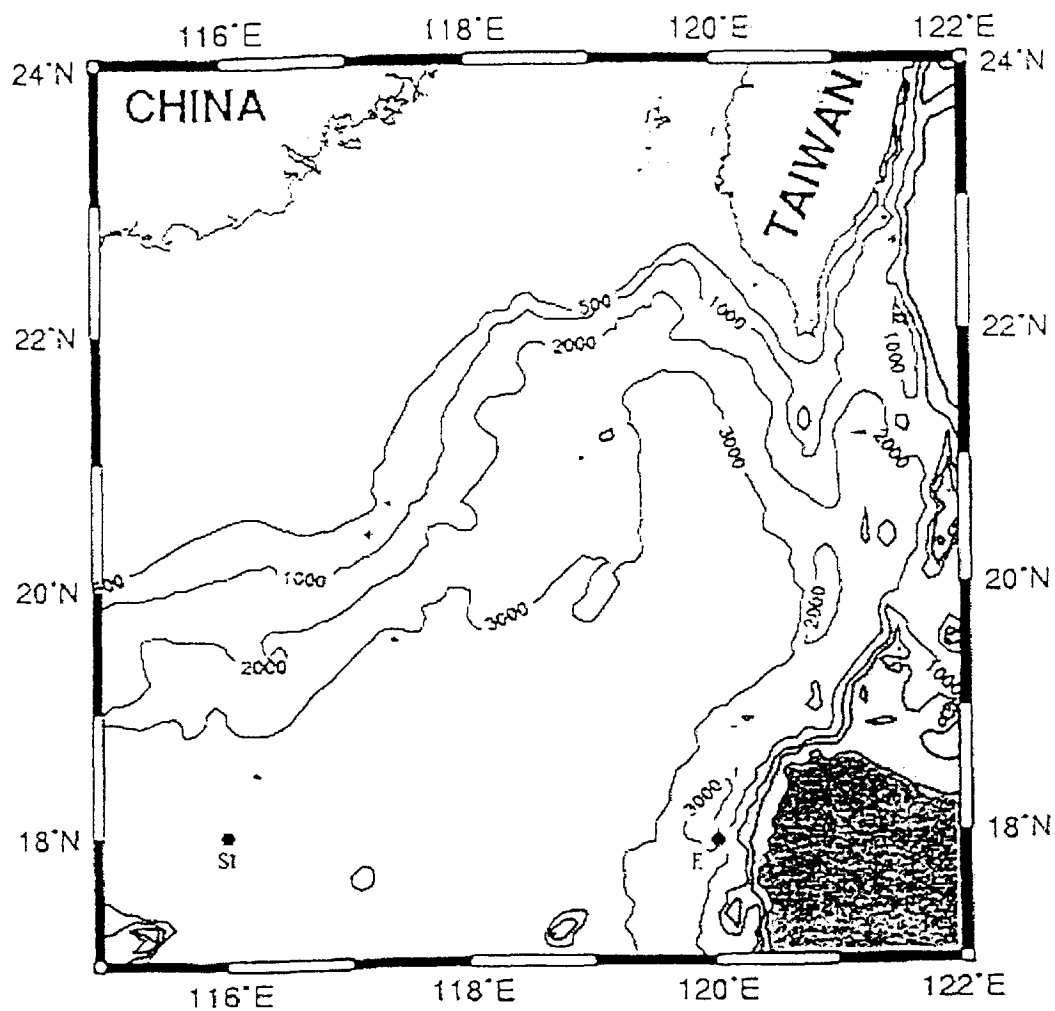
Buesseler *et al.*（1998）於受東北季風、春季季風交替及中、晚西南季風影響時期採集阿拉伯海域水體中的鈷-234；利用一維不可逆模式計算於 100m 以上水層的鈷-234 通量介於 $0 \sim >5000$ dpm/m²/d，此通量範圍與 Buesseler *et al.*（1992, 1995）於 NABE 相近。 $\frac{POC}{P_{Th}}$ 比值範圍介於 $<1 \sim >20$

$\mu\text{mole/dpm}$ 。但最重要的發現是於西南季風晚期的鈷-234 與 POC 輸出通量都相對的提高了。而在 N 線 (N-line) 上, POC 輸出通量的最高值出現於春季季風交替的時期 ($6\sim 8 \text{ mmol C/m}^2/\text{d}$) 及西南季風晚期 ($2\sim 10 \text{ mmol C/m}^2/\text{d}$)。

Gunderson *et al.* (1998) 亦指出阿拉伯海域在春季季風交替時期的影響下, 100m 以上的水層中 POC 通量比在受西南季風影響下還要高些。

南海時序 (South China Sea time-series) :

Cai *et al.* (2001) 於 1999 年 4 月~5 月間利用兩個航次 (T1、T2) 量測位於南海的時序測站 ($10^{\circ}12.00'\text{N}$, $113^{\circ}22.17'\text{E}$)。分析得到 T1 航次總態鈷-234 活度介於 $1.471\pm 0.060 \sim 2.379\pm 0.121 \text{ dpm/L}$, T2 航次總態鈷-234 活度介於 $1.193\pm 0.057 \sim 2.383\pm 0.095 \text{ dpm/L}$ 。較為不同的是在 300 m 以下, 總態鈷-234 相對鈾-238 仍有明顯的不足與本實驗 S1 測站水體中總態鈷-234 在 300 m 處分佈略為不同。兩航次之間的 $\frac{POC}{P_{Th}}$ 比值在 12.3 天之間的變化卻有約 3 倍的差距。上述在同一測站下產生極大差距的結果亦在 Buesseler *et al.* (1992) NABE 中亦有類似的情形發生, 量測之結果相差約 2 倍之多, 其原因為浮游植物藻華所造成與南海的季節性變化影響有不同之處。但相較之下, Cai *et al.* (2001) 所得之 $\frac{POC}{P_{Th}}$ 比值明顯要比 Buesseler *et al.* (1992) 所得結果變化劇烈。此外, Cai *et al.* (2002) 也於南海另一測站 ($6^{\circ}00.94'\text{N}$, $110^{\circ}01.26'\text{E}$) 量測總態鈷-234 活度, 其分佈與上述之測站相似。但在此測站水體的總態鈷-234 活度介於 $1.29\pm 0.076 \sim 3.17\pm 0.112 \text{ dpm/L}$, 且清除作用明顯的是出現於 150 m 以上的水層。 $\frac{POC}{P_{Th}}$ 比值也較上述測站略低一些。這些證據說明於南海的清除作用深度約為 150 m 左右, $\frac{POC}{P_{Th}}$ 比值要比在太平洋海域所得略高。



採樣位置： 18°N, 116°E (S1)； 18°N, 120°E (E)

採樣日期 (民國年/月)：

87/09, 87/10, 88/05, 88/07, 88/09, 88/11, 89/03, 89/05, 89/07,
89/10, 90/06, 90/10, 92/01, 92/03

圖 1.1 南海時序測站採樣位置圖

第三章 結果與討論

3.1 水文特性

本時序研究測站 (S1) 的水深約為 3000 m，1999~2001 及 2003 年各航次中 100 m 以上水層的溫度、鹽度垂直分佈於圖 3.1 及圖 3.2 所示，可以看出在該測站混合層深度平均為 40 m 左右，相對於其他海域的混合層是較為淺的。表層的低鹽層，與降雨或颱風過境的影響有關；每年平均有超過 10 個颱風通過此海域，因此，其所造的影響也為造成鹽度變化的重要因素之一。

南海上層水體的氣候變化最主要是受到東亞季風 (East Asian monsoon) 的控制。夏季時，南海表層海水異常的溫度變化與冬季時赤道表層海水的溫度異常現象有明顯的關連性。這些溫度異常的變化也顯示南海的季風變化、聖嬰現象 (El Niño) 及南方震盪 (southern oscillation) (Ose *et al.*, 1997) 之間的關聯性。此外，由南海的生地化作用與季節的變化可以反應南海季風交替的影響，南海系統的生地化與季風轉向的關聯應和阿拉伯海 (Arabian Sea) 相似 (Smith *et al.*, 1998; Barkill, 1999)。

3.2 鈷-234 之垂直分佈

各本研究由各航次採得的總態鈷-234，溶解態、顆粒態鈷-234，鈷-238 的活度，總態鈷-234/鈷-238 的活度比值 (Activity Ratio) 之整理詳見於附錄 I。圖 3.3 為 S1、E 測站各航次之總態鈷-234 及溶解態、顆粒態鈷-234 及估算鈷-238 的活度垂直分佈。我們觀察 100 m 以上水層中的鈷-234 活度，於 100 m 以上水層中的活度相對鈷-238 有明顯不足 (deficit) 的現象，顯示鈷-234 的清除作用與光透層中的生物活動有密切的相關性。在生物活動旺盛的區域，鈷-234 被生物攝取或吸附於排泄物顆粒上而隨之沉降帶出光透層，造成鈷-234 活度偏離永世平衡活度現象，亦即水體中的鈷-234 被清除

至顆粒體上且移出水體中。而 100m 以下的水層中，鈷-234 相對於鈷-238 的活度變化漸趨於平緩最後與鈷-238 活度達到永世平衡，顯示水層中之懸浮顆粒濃度降低而使得清除現象較為不強烈。此外，下層水體中的沉降顆粒被分解成較小顆粒使得顆粒沉降的速率降低了，而增加了顆粒體的滯留時間使得與鈷-238 達到平衡。1998 年 10 月的航次分析資料中，10 m 及 150 m 深度的鈷-234 活度異常的高，吾人猜測應該為實驗上的誤差，因此捨棄此二筆深度的資料（圖 3.3）。此外，於 2000 年 3 月與 2003 年 3 月航次中 150 m、200 m 處鈷-234 活度相對於鈷-238 有過平衡現象，此過量鈷-234 的異常現象在文獻中不乏相同的現象，如 Claudia Benitez-Nelson *et al.* (2001) 於 ALOHA 測站分析結果於 100 m、200 m 有相似的過平衡現象。此一過平衡現象較有可能原因是此處顆粒體的分解作用而造成鈷-234 釋放回水體中，亦或是由上層水體沉降或經由水平輸送至此水體中的顆粒體被分解。但另外也有可能原因是由於顆粒體再礦化（rem Mineralization）或顆粒體沉降遲滯所造成的結果（Chen *et al.*, 1996b）。

吾人在於 2000 年 10 月於 S1 及 E 測站鈷-234 做溶解態及顆粒態活度分析，S1 測站之溶解態鈷-234 活度介於 1.484 ~1.952 dpm/L。顆粒態鈷-234 活度為 0.145~0.310 dpm/L，其空間分佈型態主要是受顆粒組成之影響。在 E 測站之溶解態鈷-234 活度介於 1.351 ~1.995 dpm/L。顆粒態鈷-234 活度為 0.338~0.481 dpm/L。二測站溶解態及顆粒態鈷-234 的活度分佈與在南沙群島海域（Chen *et al.*, 1996a, 1996b；Cai *et al.*, 2001, 2002；Huang *et al.*, 1996）所分析的活度值相近。這也說明南海北部海域與南沙群島海域水體中的鈷-234 變動性不大。圖 3.4 為 1998~2001、2003 年 S1 測站總態鈷-234 /鈷-238 平均活度比值與採樣時間的結果，其範圍為 0.71~0.93。觀察其變化可發現一個簡單的趨勢，於 1999、2000 年 5~9 月的時間週期內的總態鈷-234 /鈷

-238 平均活度比值有著降低的趨勢。換言之，在此段採樣時間週期內鈷-234 的清除作用有增強的作用，推測此一趨勢與南海海域的季風變化或颱風過境所造成水體的變化有關，或是浮游動植物的生物活動增加而造成水體中顆粒體的變動，但實際影響還需要更多的氣候資料及生物活動變化等相關資料來證明。

3.3 [TSM]與鈷-234 分佈係數

3.3.1 總懸浮顆粒濃度[TSM]

[TSM]的計算數據及垂直分佈分別列於表一及圖 3.5。圖中可見，於 S1 測站 50 m 處有極大值 (0.62 mg/L)，E 測站的 30 m 處亦有一極大值 (0.45 mg/L)，且其分佈隨深度的增加而有減低的趨勢。對照上述之內容所示，混合層平均深度約為 40 m 左右，而這些極大值所分佈的深度也在此一平均深度範圍之內，因此在混合層水體中的生物活動旺盛及其排泄物顆粒濃度高也就是造成 [TSM]在混合層水體中偏高的主要因素。但隨著深度的增加浮游生物的數量及活動性就相對的較混合層來的減少很多，使得在較深的水體中 [TSM]也隨著降低。

3.3.2 水體中鈷-234 分佈係數之差異

在計算元素對顆粒體表面親和性的強弱上，通常使用元素之分佈係數 (distribution coefficient, 簡稱 K_d) 作為指標 (Wei *et al.*, 1992; Baskaran *et al.*, 1993; Moran *et al.*, 1993)。其數學式如下：

$$K_d = \frac{P_{\text{element}}}{D_{\text{element}}} \times \frac{1}{[\text{TSM}]} \times 10^6$$

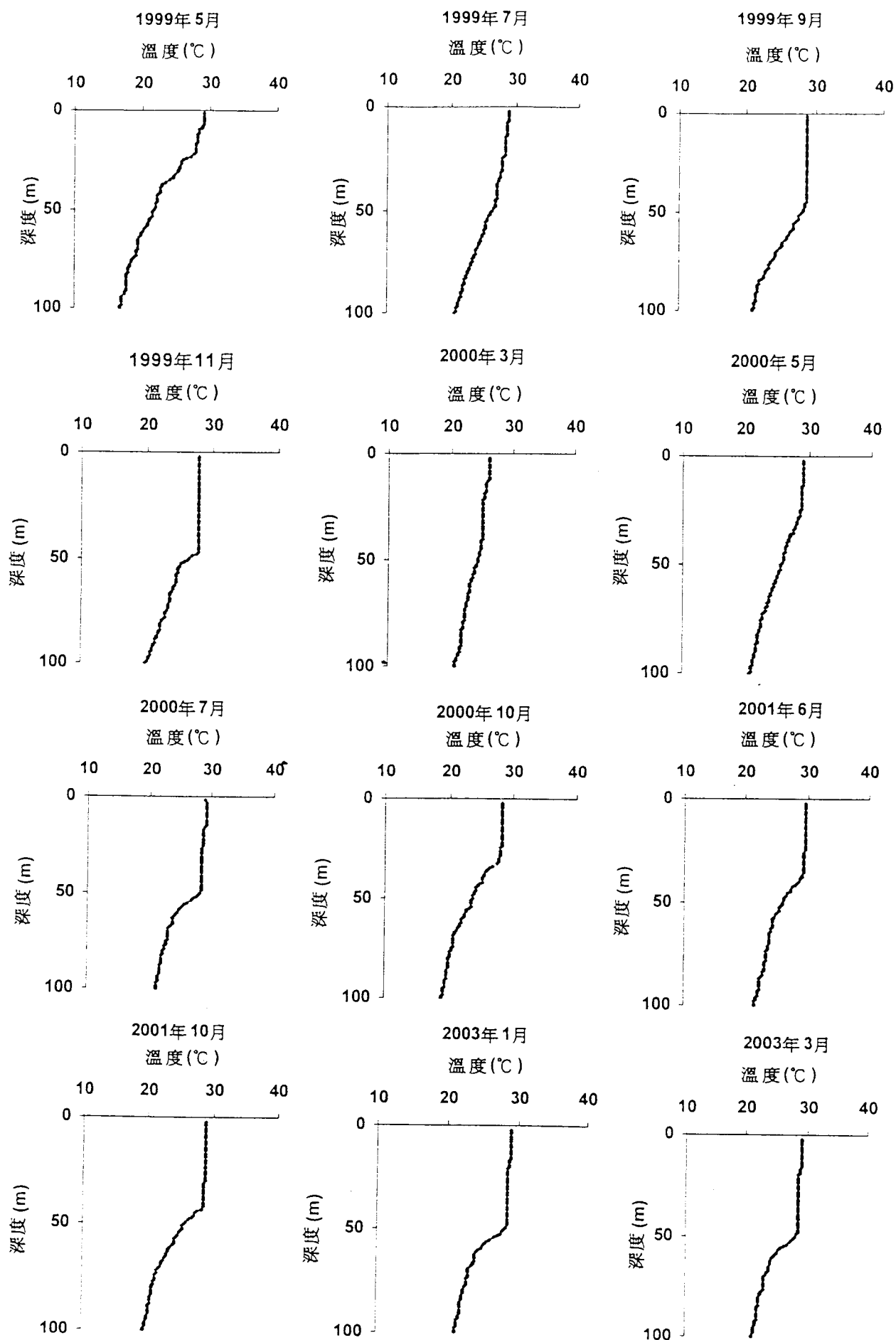


圖 3.1 S1 測站各航次溫度分佈

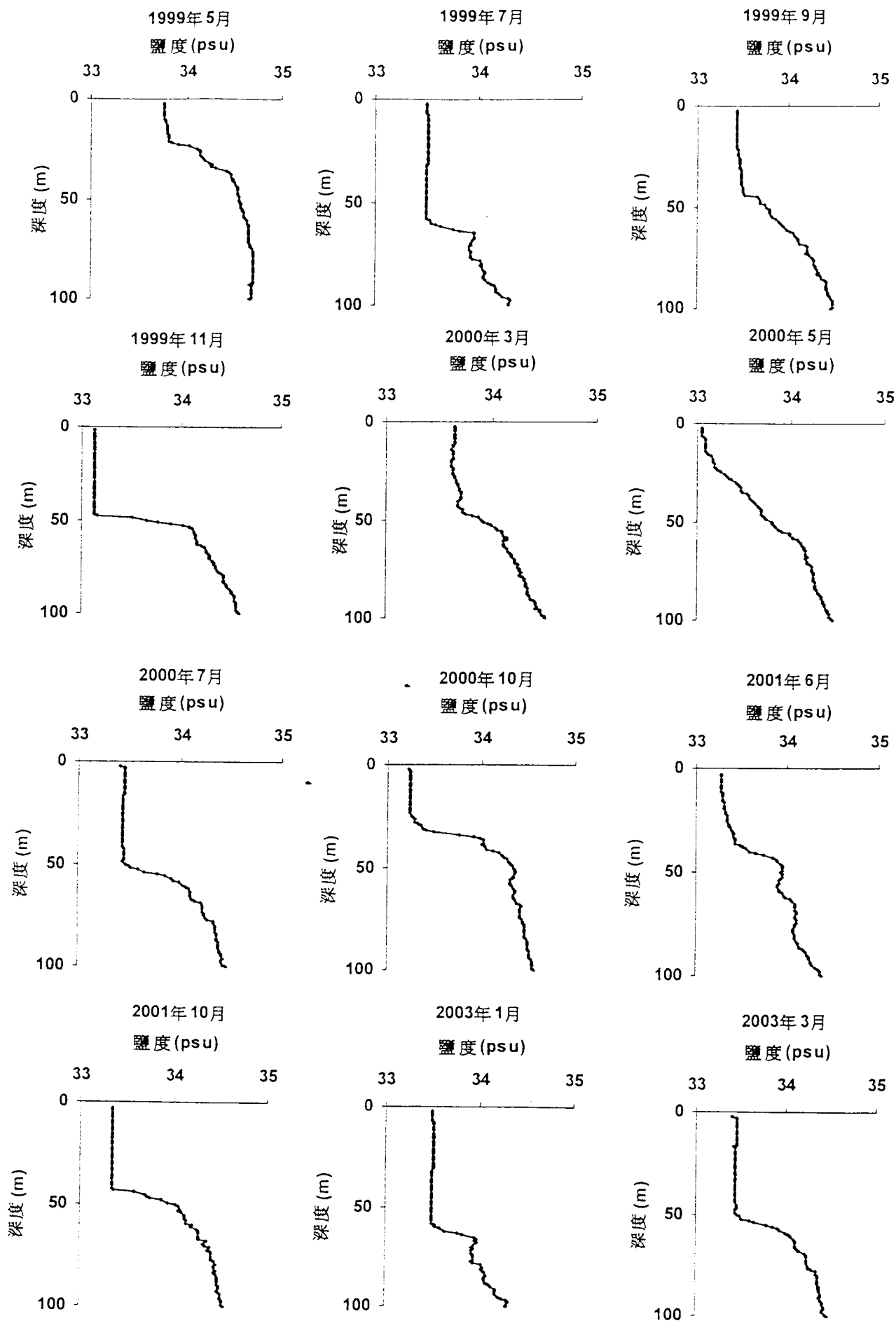


圖 3.2 S1 測站各航次鹽度分佈

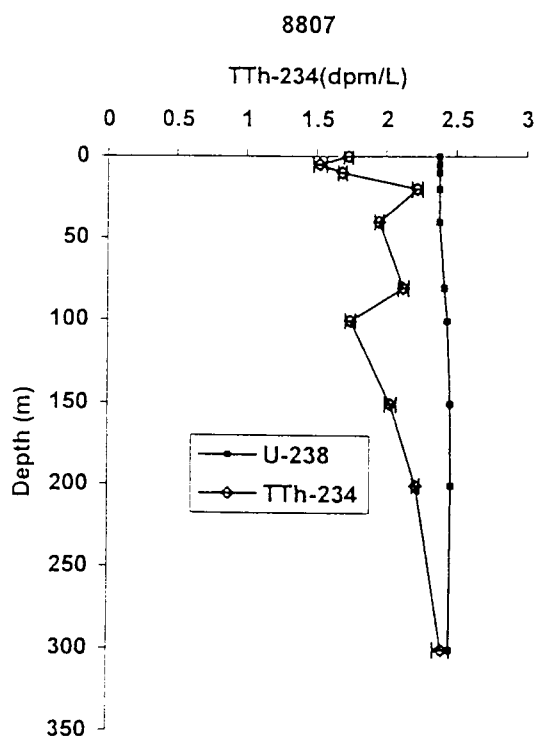
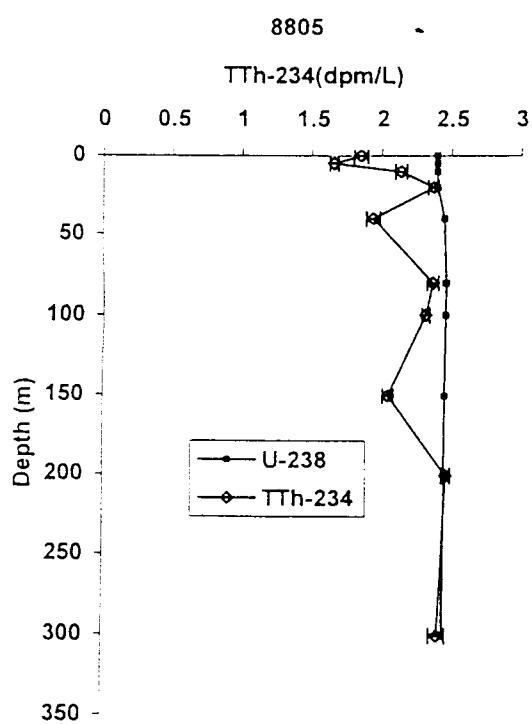
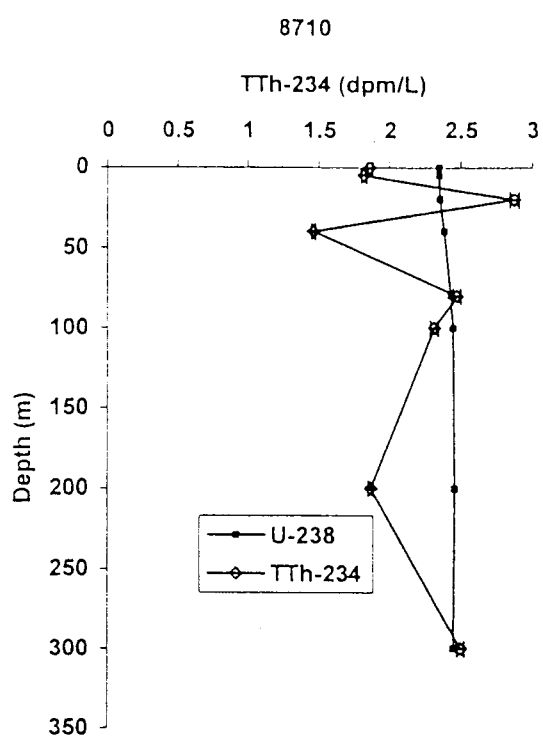
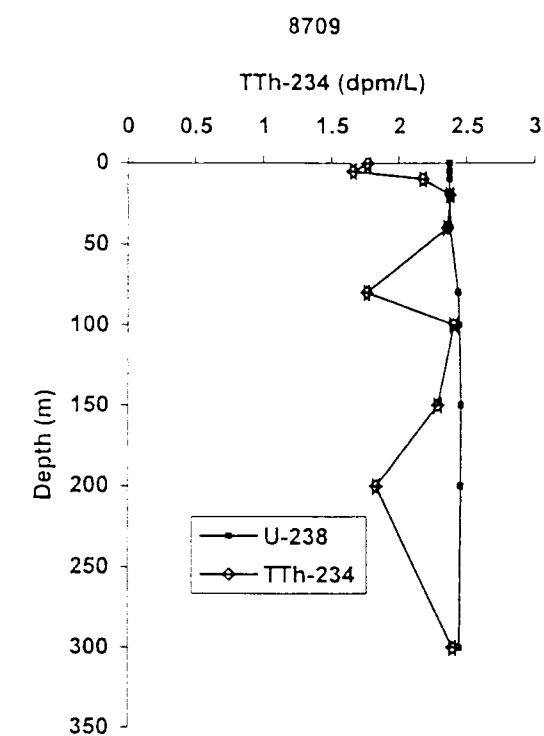


圖 3.3 各航次釷-234、鈾-238 活度之垂直分佈。

Error bar (1σ) 為計測樣品時之不準確偏差。

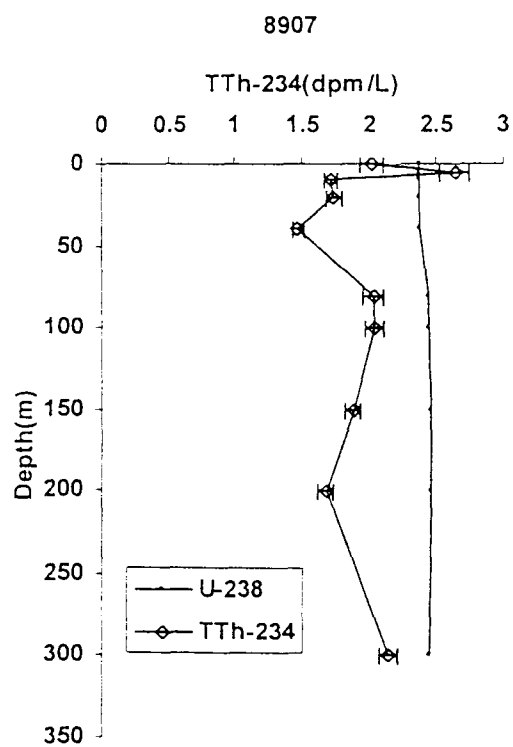
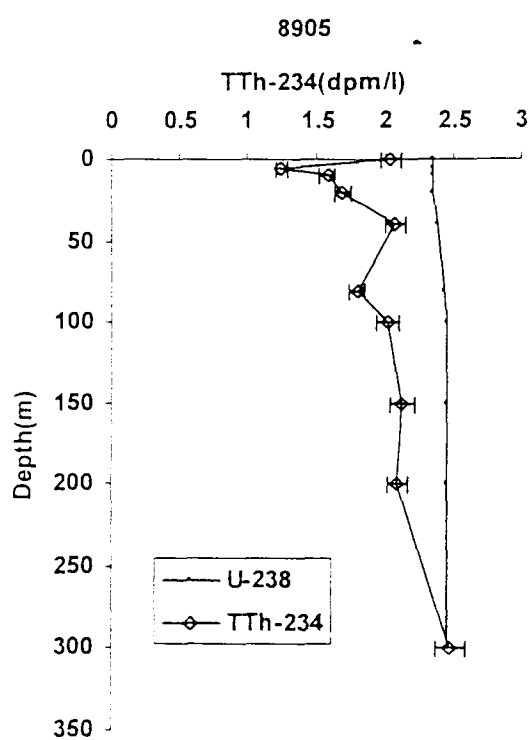
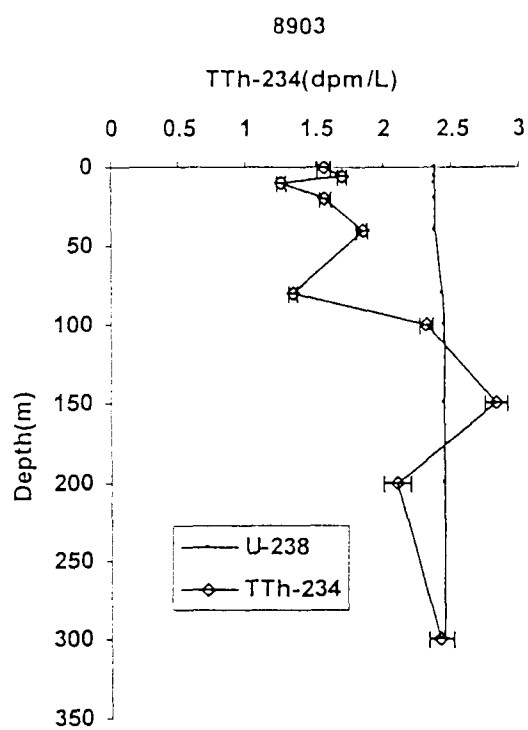
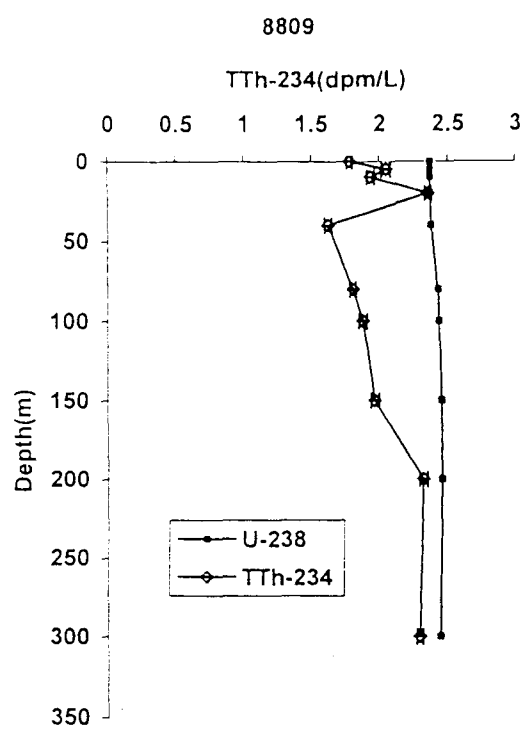


圖 3.3 各航次鈾-234、鈾-238 活度之垂直分佈 (續)。

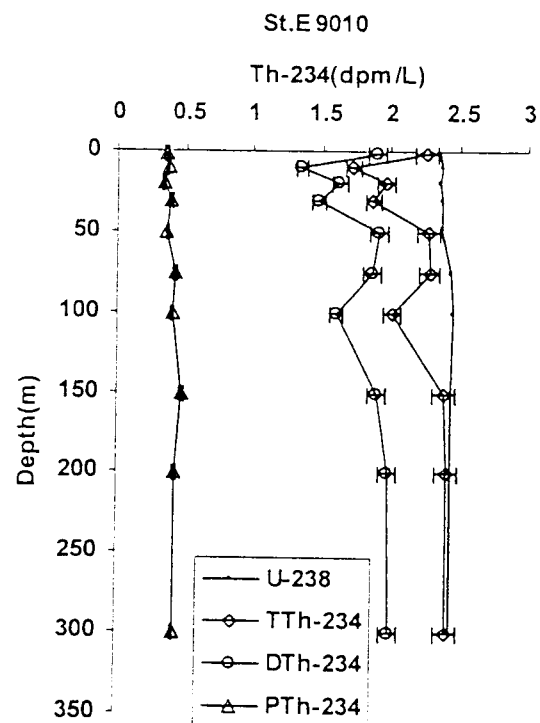
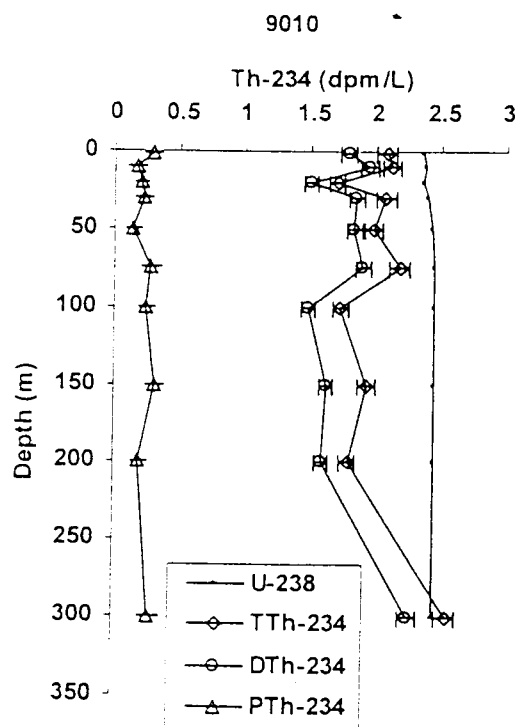
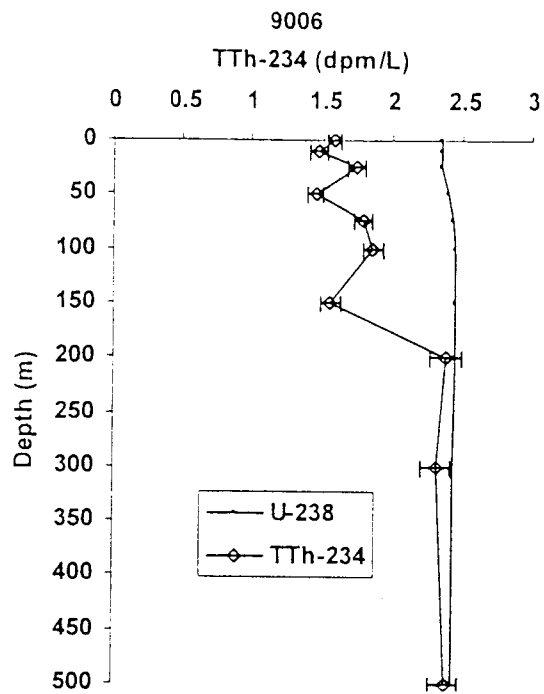
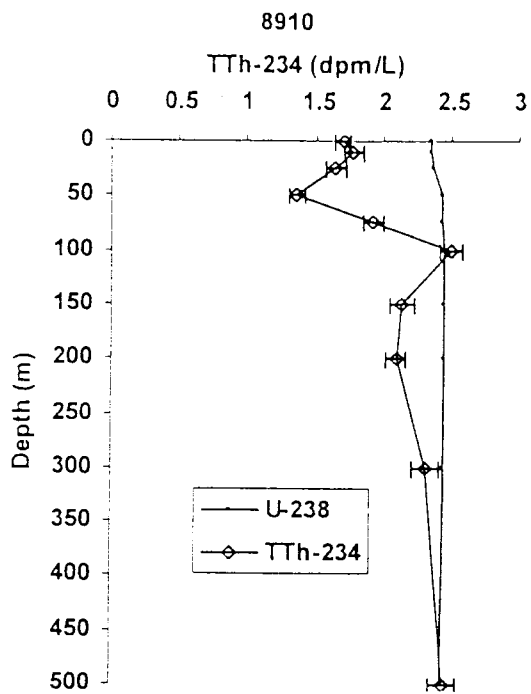


圖 3.3 各航次釷-234、鈾-238 活度之垂直分佈 (續)。

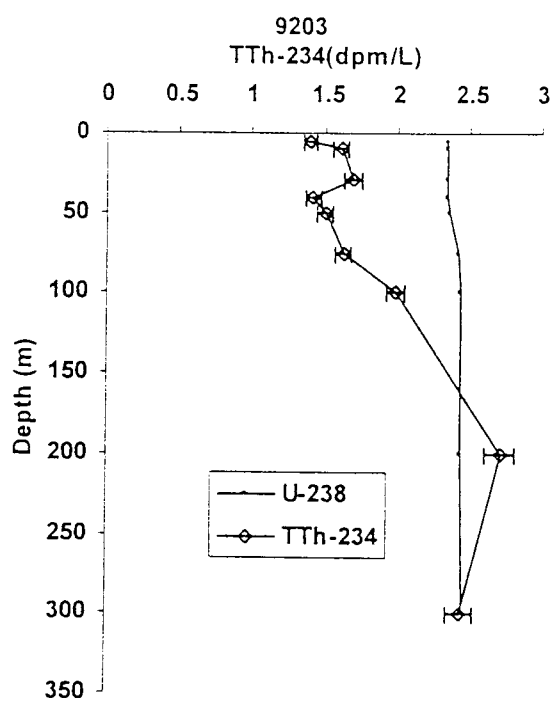
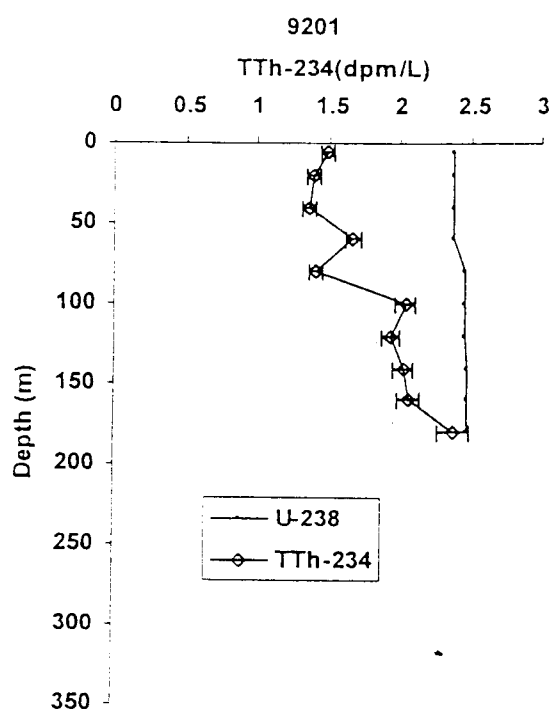


圖 3.3 各航次鈾-234、鈾-238 活度之垂直分佈 (續)。

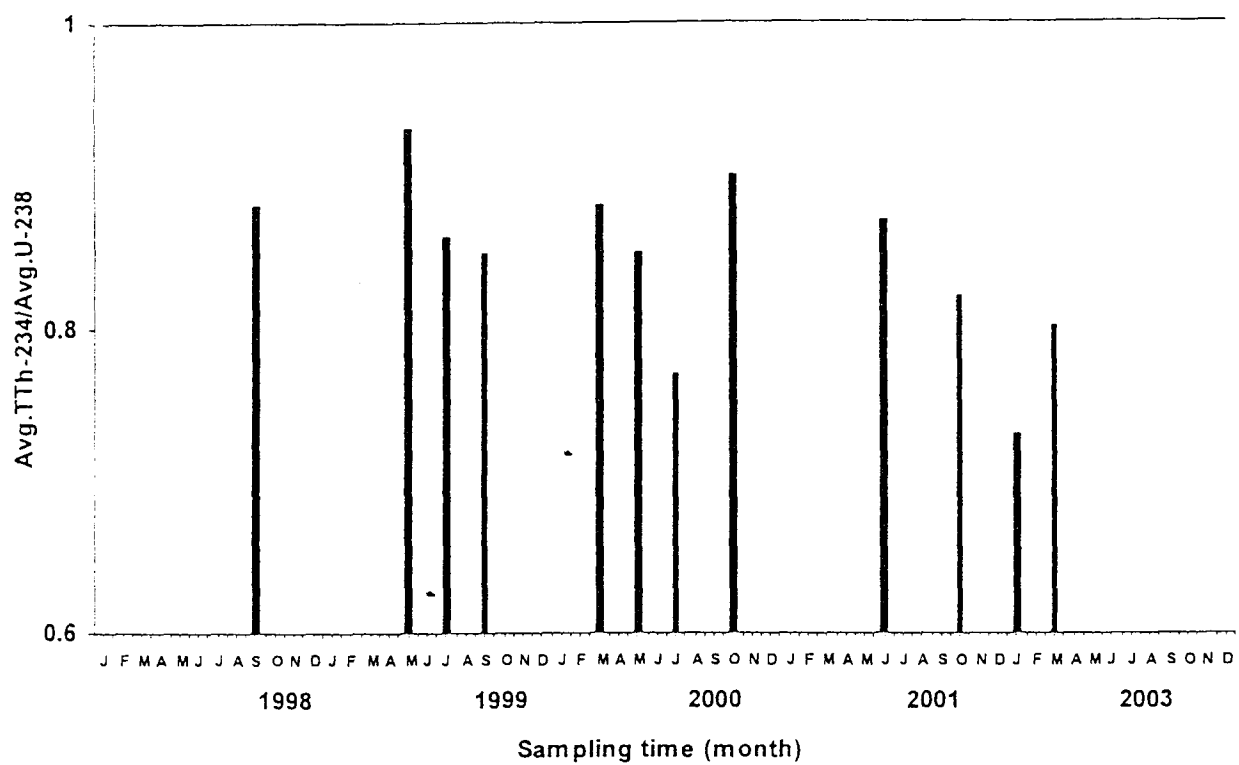


圖 3.4 1998~2001、2003 年 S1 測站於整個採樣水層 TTh-234 /U-238 活度比值變化分佈，橫線表示鈾-234 與鈾-238 活度比為 1。

K_d	元素的分佈係數 (ml/g)
P_{element}	鈷-234 在顆粒相的活度 (dpm/L)
D_{element}	鈷-234 在溶解相的活度 (dpm/L)
[TSM]	總懸浮顆粒濃度 (mg/L)

由於鈷-234 的分佈係數非常大，常在 10^5 - 10^7 左右，因此為說明方便，常取對數($\log K_d$)表示。2001 年 10 月之 S1 及 E 測站鈷-234 對數分佈係數($\log K_d$)對深度的垂直分佈如表二及圖 3.6 所示。兩測站的鈷-234 對數分佈係數約介於 5.1~6.5 之間，與 Hung *et al.* (1994) 在南海東北部海域 ($19^\circ 45'N$, $115^\circ 50.10'E$, $18^\circ N$, $119^\circ 59.9'E$, $19^\circ 55'N$, $118^\circ 15'E$) 三測站所計算之結果非常接近 (表二)。另外，由南沙群島海域鈷-234 的平均 K_d 值 7.2×10^4 ml/g 及南海東北部平均 K_d 值 4.8×10^5 ml/g (Chen *et al.*, 1996) 可知南海東北部平均 K_d 值較南沙群島海域鈷-234 的平均 K_d 值高出 7 倍左右，反應出在南海東北部海域的顆粒體對鈷-234 之親和力較南沙群島海域高。從對數分佈係數的垂直變化可看出 S1 及 E 測站在混合層中的對數分佈係數比深層水的數值大，兩測站間對數分佈係數也有明顯的差異，E 測站之對數分佈係數較 S1 測站高出一個數量級，意味著在 E 測站水體中的顆粒體對鈷-234 的親和力較高。分佈係數大小主要受顆粒組成、顆粒性質 (大小、形狀等) 及總懸浮顆粒濃度所影響 (Mckee *et al.*, 1986, Honeyman *et al.*, 1988)。由於 S1 測站較缺乏陸源輸入之顆粒，其顆粒組成應較為偏向生物性顆粒；而生物性顆粒體對於鈷-234 的清除能力較差，因此 S1 測站水體中的鈷-234 較無法有效的被清除，也使得其水體中鈷-234 的分佈係數偏低。

3.4 南海鈷-234 之清除速率及顆粒有機碳通量

假設於穩定狀態 (steady-state)，總態、溶解態與顆粒態鈷-234 之活度

不隨時間變化，由質量守恒可列式如下（Coale and Bruland ., 1985）：

$$\frac{dA'_{Th}}{dt} = 0 = \lambda A_u - \lambda A'_{Th} - K_C A'_{Th} \quad (3-1)$$

$$\frac{dA^d_{Th}}{dt} = 0 = \lambda A^d_U - \lambda A^d_{Th} - J \quad (3-2)$$

$$\frac{dA^p_{Th}}{dt} = 0 = J - \lambda A^p_{Th} - P \quad (3-3)$$

A_u : 鈾-238 活度 (dpm/L)

A'_{Th} : 總態鈾-234 活度 (dpm/L)

A^d_{Th} : 溶解相鈾-234 之放射活度 (dpm/L)

A^p_{Th} : 顆粒相鈾-234 之放射活度 (dpm/L)

K_C : 鈾-234 的一級清除速率 (scavenging rate) 常數

λ : 鈾-234 之蛻變常數 (0.02876 d^{-1})

J : 清除速率 (dpm/L/d)

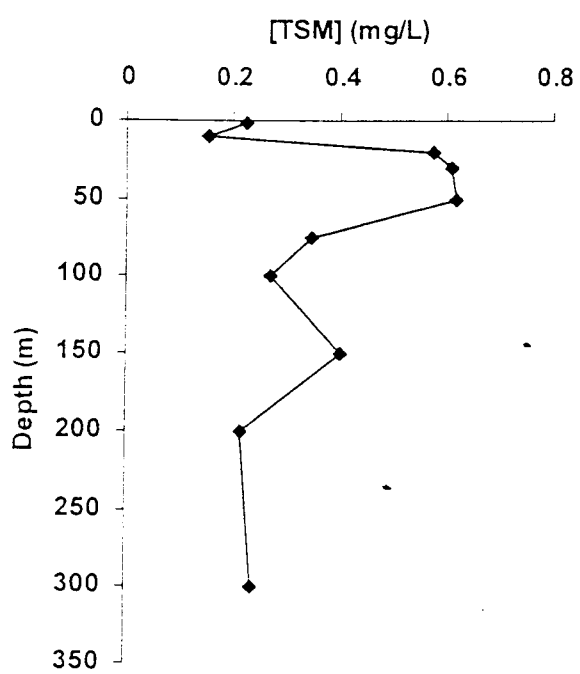
P : 顆粒移除速率 (dpm/L/d)

總態鈾-234 的滯留時間、溶解態與顆粒態鈾-234 之滯留時間分別為：

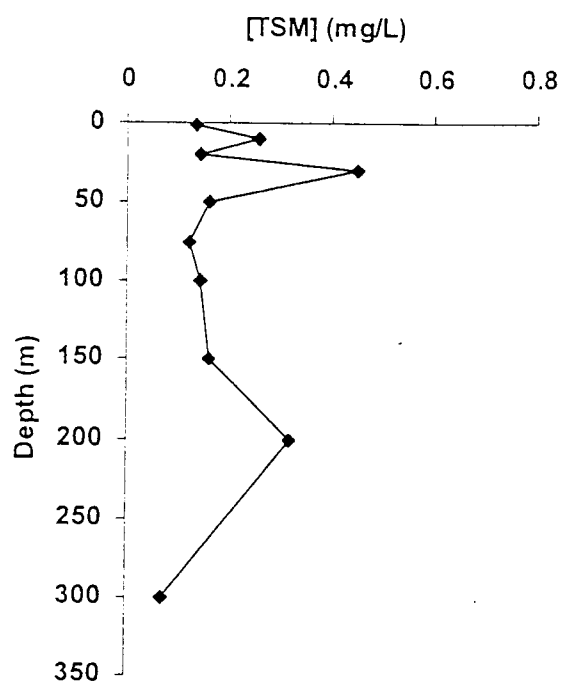
$$\tau_{Th} = \frac{1}{K_C} = \frac{1}{[\lambda \times (\frac{A_U}{A'_{Th}} - 1)]} \quad (3-4)$$

$$\tau_{dTh} = \frac{A^d_{Th}}{J} \quad (3-5)$$

$$\tau_{pTh} = \frac{A^p_{Th}}{P} \quad (3-6)$$



(a)



(b)

圖 3.5 (a) S1 測站[TSM]之垂直變化，(b) E 測站 [TSM]之垂直變化。

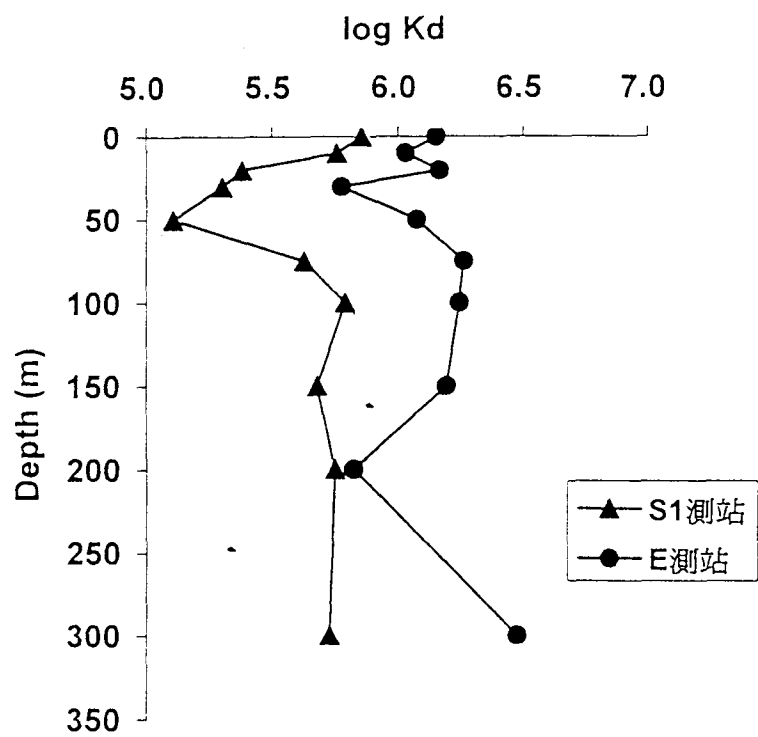


圖 3.6 S1, E 測站水體中鈷-234 分佈係數之垂直變化

3.4.1 鈷-234 之清除速率

將 S1 測站各航次的水體垂直分為 100 m 以上水層與整個採樣水層二個盒子模式來計算總態鈷-234 之滯留時間、鈷-234 經由顆粒體沉降之通量、清除通量、移除通量及溶解態與顆粒態鈷-234 之滯留時間（表三、表四、表五）。圖 3.7、3.8 為 S1 測站各航次 100m 以上水層、整個採樣水體的總態鈷-234 沉降通量（ $F_{TTh-234}$ ）時序變化。圖 3.7 中 100 m 以上水層總態鈷-234 沉降通量（ $F_{TTh-234}$ ）變化範圍為：758~2406 dpm/m²/d；平均沉降通量為：1576 dpm/m²/d。而圖 3.8 中整個採樣水層總態鈷-234 沉降通量（ $F_{TTh-234}$ ）變化範圍介於 1895~6449 dpm/m²/d；平均沉降通量為：4119 dpm/m²/d。由以上數據可得知從 S1 測站 100 m 以上水層所沉降的通量約佔整個採樣水層沉降通量的 38%。

圖 3.9、3.10 為各航次總態鈷-234 於 100 m 以上水層、整個採樣水層中滯留時間時序變化；觀察圖 3.9 夏季（6~9 月）的變化趨勢，有一遞減的情形。而如此的遞減情形連續於 1999 與 2000 年的夏季出現，推測與南海海域夏季季風變化所造成的水體中顆粒體變化有關。總態鈷-234 於 100 m 以上水層之滯留時間介於 62~286 天，平均滯留時間為 156 天。此外，由於 1998 年 10 月份航次資料不完整，故在計算此項數據時並不將其計算在內。E 測站 100 m 以上水層的總態鈷-234 平均滯留時間為 248 天比 S1 測站高出很多。圖 3.10 為整個採樣水層中鈷-234 之滯留時間的分佈，其範圍介於 164~473 天，平均滯留時間為 226 天。比較 2000 年 10 月份 S1 與 E 二測站 100 m 以上水層中的溶解態、顆粒態鈷-234 的清除作用；大致上，S1 測站 100 m 以上水層中溶解態鈷-234 的清除作用較弱，但在顆粒態鈷-234 的移除作用方面反而是 S1 測站較為強烈。S1 測站 100 m 以上水層的溶解態鈷-234（99 天）滯留時間比 E 測站（86 天）高出些許；但反之在顆粒態鈷-234 方面就

有明顯的差異；S1 測站（19 天）明顯低於 E 測站（44 天）。由以上 S1 測站溶解態與顆粒態鈷-234 滯留時間之結果與其他開放海洋相較之下是相近的；而 E 測站之顆粒態鈷-234 滯留時間略顯較長。

3.4.2 顆粒有機碳輸出通量

3.4.2.1 顆粒有機碳通量計算

新生產力泛指浮游植物利用系統外輸入的營養鹽所產生之生產力，例如由底層湧升輸入光透層的硝酸鹽（Dugdale and Goering, 1967）。Eppley *et al.* (1983) 指出在穩定態條件下，新生產力相當於光透層的顆粒有機碳輸出通量。因此，從光透層輸出的顆粒有機碳通量可視為新生產力的一個度量，Downs (1989) 將這個通量稱為輸出生產力。我們根據輸出生產力的定義，利用鈷-234 親顆粒的特性測定顆粒體上的 $\frac{POC}{PTh}$ 比值以估算顆粒有機碳輸出通量，換句話說，鈷-234 在此研究上被假設為有機碳的示蹤劑來量測有機碳輸出通量。這一方法是假設顆粒有機碳與鈷-234 不需有相同的滯留時間（Murray *et al.*, 1989）。所以，將實測的鈷-234 沉降通量結合 $\frac{POC}{PTh}$ 比值即可估算出顆粒有機碳輸出通量。計算公式如下：

$$F_{POC} = F_{Th} \times \frac{POC}{PTh} \quad (3-7)$$

F_{POC} : 顆粒有機碳輸出通量 (mmol C/m²/d)

F_{Th} : 鈷-234 被顆粒體移除的沉降通量 (dpm/m²/d)

$\frac{POC}{PTh}$: 顆粒物中顆粒體有機碳含量與顆粒態鈷-234 活度的比值 (μmole/dpm)

此方法的準確與否主要掌控在 $\frac{POC}{P_{Th}}$ 比值的變化 (Cochran *et al.*, 1995)，一般而言，在光透層的 $\frac{POC}{P_{Th}}$ 比值較高並且會隨著深度的增加而減少。此現象說明了在顆粒有機物從上層水體被傳輸至較深水體的過程中，POC 有明顯的再礦化作用 (Santschi *et al.*, 1999)。此外，利用沈積物收集器所收集的下沈顆粒 $\frac{POC}{P_{Th}}$ 比值，相反的會隨著深度的增加而增高。在顆粒大小與 $\frac{POC}{P_{Th}}$ 比值方面，隨著顆粒大小的增加 $\frac{POC}{P_{Th}}$ 比值會跟著減低。Santschi *et al.* (1999) 也提出 $\frac{POC}{P_{Th}}$ 比值與顆粒大小的趨勢可能為：底層沈積物 > 懸浮顆粒體 > 沈積收集器收集之顆粒體。而浮游植物群落的結構在控制 $\frac{POC}{P_{Th}}$ 比值與顆粒體大小之間的相關性亦扮演著相當重要的角色 (Charette and Moran, 1999)。例如：矽藻生長旺盛的區域， $\frac{POC}{P_{Th}}$ 比值會隨著顆粒體大小的增加而上升。反之，生態系統中若是主要是以較小的浮游植物為主，兩者之間的關係將是呈現相反的趨勢 (Charette and Moran, 1999)。因此許多學者認為在估算顆粒體有機碳輸出時，一般是以較大且下沉速度快之顆粒體為主的 $\frac{POC}{P_{Th}}$ 比值來估算 POC 通量是較為正確的方法 (Buesseler *et al.*, 1992, 1995; Moran *et al.*, 1993; Charette and Moran, 1999)。Charette *et al.* (1999) 認為在估算上層水體的 POC 輸出通量時，以 $>0.5 \sim 0.7 \mu m$ 之 $\frac{POC}{P_{Th}}$ 比值可靠性較高。而本實驗是以顆粒體大小 $>0.45 \mu m$ 為主的 $\frac{POC}{P_{Th}}$ 比值來進行 POC 通量估算。

表六為本研究所得 $\frac{POC}{P_{Th}}$ 比值與其他海域研究之比較，其中本實驗與 Murray *et al.* (1996) 所量測的中赤道太平洋中 $>0.45 \mu m$ 的 $\frac{POC}{P_{Th}}$ 比值相近似。但相對的，如 Buesseler *et al.* (1995, 1996) 所量測 $>53 \mu m$ 大顆粒體之 $\frac{POC}{P_{Th}}$ 比

值，明顯的較本實驗結果低了許多。

3.4.2.2 顆粒體有機碳輸出通量之變化

吾人利用 S1 測站 2001 年 10 月份的航次的 POC 實測值(中山大學洪佳章老師實驗室)提供再與所分析之顆粒態鈾-234 活度換算 $\frac{POC}{PTh}$ 比值(附錄 II)並以此估算各航次 100m 以上水層、整個採樣水層中的 POC 輸出通量。S1 測站 $\frac{POC}{PTh}$ 比值在整個採樣水體的變化範圍介於 4.5~16.9 $\mu\text{mole/dpm}$ 。表七為各航次利用 S1 測站 $\frac{POC}{PTh} = 4.5 \mu\text{mole/dpm}$ 計算於不同水層之 POC 輸出通量；100m 以上水層 POC 輸出通量其時序變動範圍介於 3.4~10.7 $\text{mmol C/m}^2/\text{d}$ ，平均輸出通量 (7.5 $\text{mmol C/m}^2/\text{d}$) 佔了整個採樣水層平均輸出通量 (19.1 $\text{mmol C/m}^2/\text{d}$) 的 39%。

2001 年 10 月份航次 100m 以上水層 POC 輸出通量，利用 S1 測站於 100m 的 $\frac{POC}{PTh} = 4.5 \mu\text{mole/dpm}$ 估算得到結果為 10.2 $\text{mmol C/m}^2/\text{d}$ ，約佔整個採樣水層 POC 輸出通量 (23.9 $\text{mmol C/m}^2/\text{d}$) 的 43%。E 測站 $\frac{POC}{PTh}$ 比值在整個採樣水層的變化範圍介於 2.8~7.1 $\mu\text{mole/dpm}$ 。100m 以上水層 POC 輸出通量，亦利用於 100m 的 $\frac{POC}{PTh}$ 比值 = 2.8 $\mu\text{mole/dpm}$ 估算出為 4.9 $\text{mmol C/m}^2/\text{d}$ 。E 測站 POC 輸出通量明顯較 S1 測站低，且 100m 以上水層 POC 輸出通量佔了整個採樣水層 POC 輸出通量 (7.2 $\text{mmol C/m}^2/\text{d}$) 的 68%。

Liu *et al.* (2002) 利用生地化模式計算於 100m 水層 POC 輸出通量的年變化，圖 3.11 為本研究各航次於 100m 水層 POC 輸出通量與其模式估算之 POC 輸出通量結果做一比較。由圖中趨勢發現利用鈾-234/鈾-238 不平衡所估算之 POC 輸出通量是較高，但其變化性與模式計算所得趨勢是符合的。此外；經由模式計算所得於 100m 水層 POC 輸出通量平均約為 4.1 mmol C/

m^2/d ，而同時再利用 Martin *et al.* (1987) 的深度-POC 關係計算公式，計算出 100m 水層的 POC 輸出通量約為 $4.3 \text{ mmol C}/\text{m}^2/\text{d}$ ，此二筆數據結果均皆低於吾人在本研究所估算各航次 100m 水層 POC 輸出通量的平均值 $7.5 \text{ mmol C}/\text{m}^2/\text{d}$ 。

由表八可得知兩測站在 POC 的滯留時間方面有相當大的差異，在 E 測站 100m 以下水層的滯留時間相當的大（147 天）而且就整個採樣水層而言 E 測站約為 S1 測站的 4 倍。圖 3.12、3.13 為各航次於 100m 以上水層與整個採樣水層 POC 輸出通量的變化分佈，圖 3.12 中其變化於 1999、2000 年的 5~9 月航次均有增加的趨勢，變化呈強烈的季節性。

Chen *et al.* (1996a) 在南沙海域利用實測的 $\frac{POC}{P_{Th}}$ 比值 ($> 0.45\mu\text{m}$) 估算出秋、冬二季 POC 輸出通量介於 $3.8 \sim 32.4 \text{ mmol C}/\text{m}^2/\text{d}$ 。而黃等 (2002) 也於 1993~1999 年間在 $5^{\circ}50' \sim 20^{\circ}45' \text{N}$, $112^{\circ}00' \sim 120^{\circ}00' \text{E}$ 的南海海域，採用鈷-鈾不平衡的方式估算，得到 POC 輸出通量介於 $3.7 \sim 46.5 \text{ mmol C}/\text{m}^2/\text{d}$ ，平均 POC 輸出通量為 $20.4 \text{ mmol C}/\text{m}^2/\text{d}$ 。同樣地，黃等 (2002) 於 1987~1988 年間於南海北部 ($18^{\circ}27.48' \text{N}$, $116^{\circ}1.7' \text{E}$ 附近)，利用時間系列沈積物收集器所收集分析研究得出南海北部 100m 水層的輸出通量為 $2.4 \text{ mmol C}/\text{m}^2/\text{d}$ 。

Cai *et al.* (2001) 於南沙海域的時間系列測站 ($10^{\circ}12.00' \text{N}$, $113^{\circ}22.17' \text{E}$) 在相隔 12.3 天的兩時間點 T1、T2，結合實測的 $\frac{POC}{P_{Th}}$ 比值估算 100m 水層的 POC 輸出通量分別為 46.5 和 $13.1 \text{ mmol C}/\text{m}^2/\text{d}$ ，儘管 T1、T2 採樣時刻相同，但由於 100m 水層內 $\frac{POC}{P_{Th}}$ 比值的顯著變化，導致所得的 POC 輸出通量相差達 3 倍之多，表明在十多天的時間尺度內， $\frac{POC}{P_{Th}}$ 比值可能發生顯著的變化。

故欲獲得準確的 POC 輸出通量，必須觀測 $\frac{POC}{P_{Th}}$ 比值的時間變化。此外，在南海海域月份間 POC 輸出通量最高與最低值可差一個數量級，更進一步的說明了此海域的強烈季節變化影響。

而受東北季風、春季季風交替及中、晚西南季風影響的阿拉伯海域，POC 輸出通量在春季季風交替時期的影響下，100m 以上的水層中 POC 輸出通量比在受西南季風影響下還要高 (Gunderson *et al.*, 1998)，並且 POC 輸出通量的變動 ($<1 \sim >25 \text{ mmol C/m}^2/\text{d}$) 亦呈現強烈的季節性及空間性的變化 (Buesseler *et al.*, 1998)。

表九將上述各研究結果與其他海域研究之結果作一歸納整理。由表中所歸納之結果顯示，南海海域之 POC 輸出通量較位於赤道太平洋海域高。但相對於阿拉伯海 POC 輸出通量的變化量，南海南、北海域的區域 POC 通量變動性並不明顯。

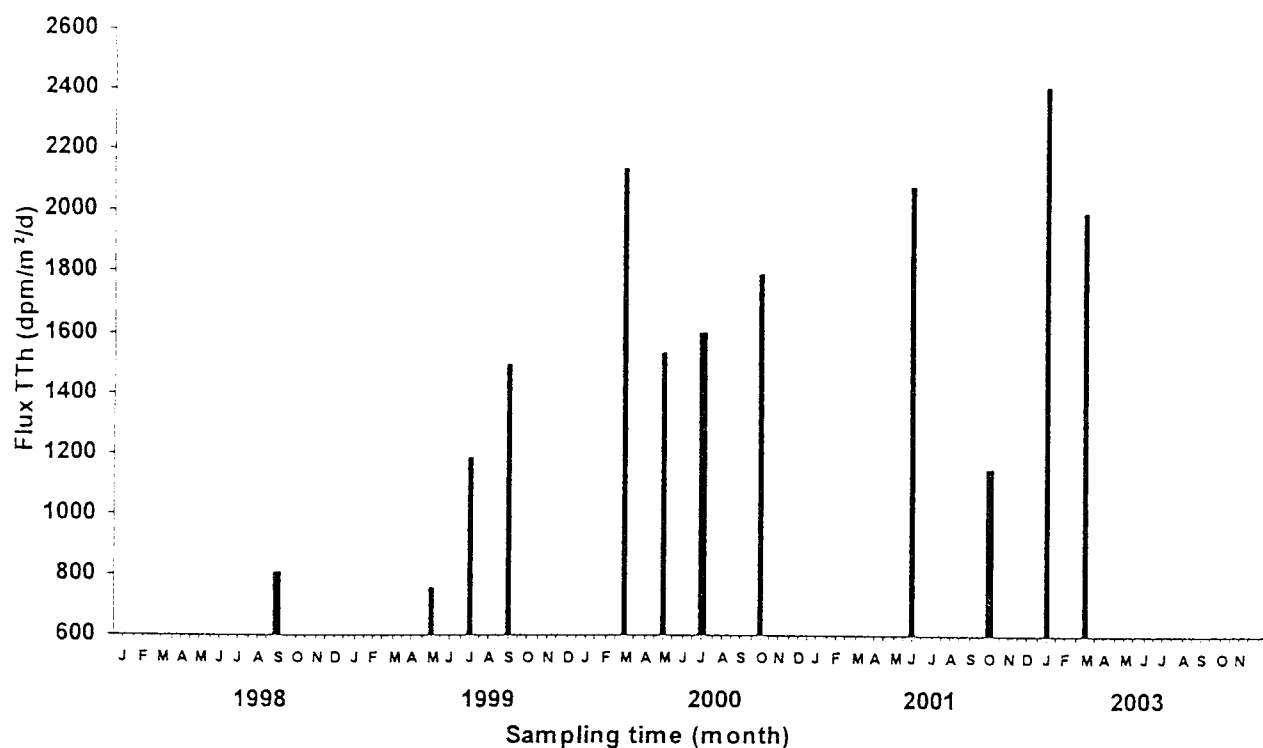


圖 3.7 1998~2001、2003 年 S1 測站於 100m 以上水層之總態鈷-234 沉降通量 ($F_{TTh-234}$) 的變化分佈。其範圍為 758~2406 dpm/m²/d。

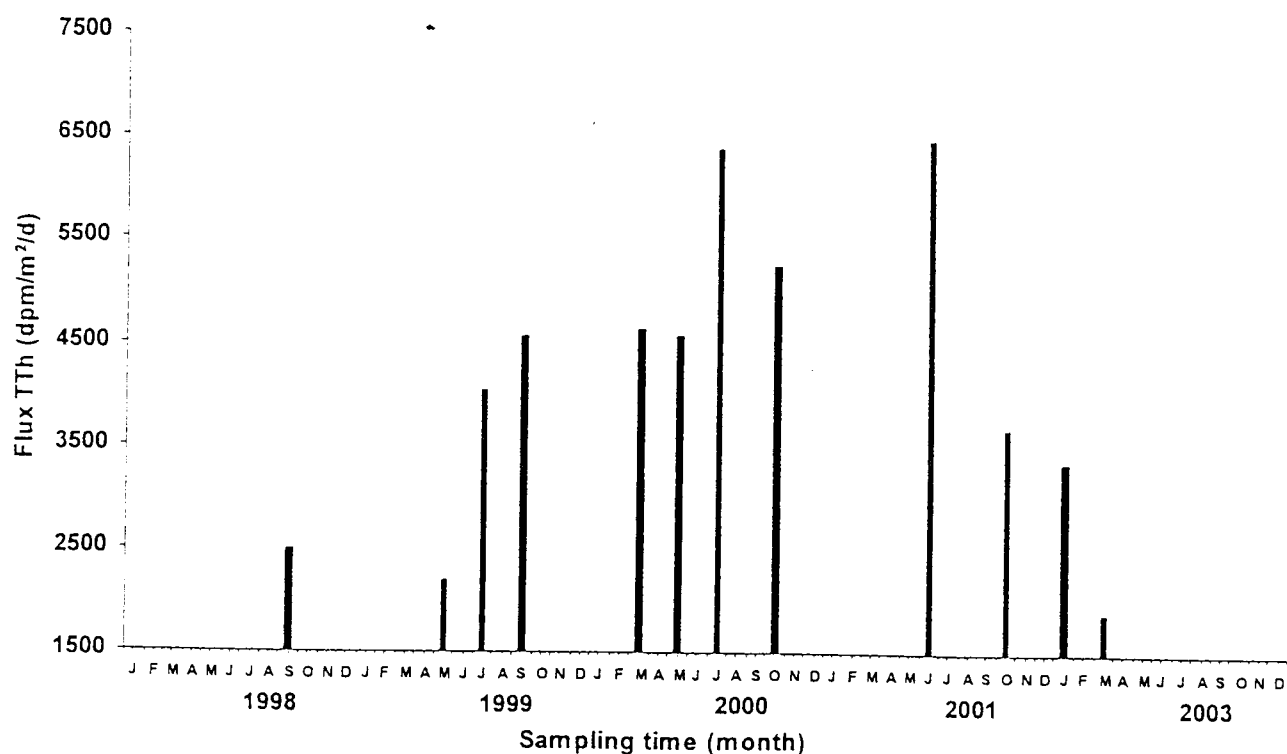


圖 3.8 1998~2001、2003 年 S1 測站於整個採樣水層之總態鈷-234 沉降通量 ($F_{TTh-234}$) 的變化分佈。其範圍為 1895~6449 dpm/m²/d。

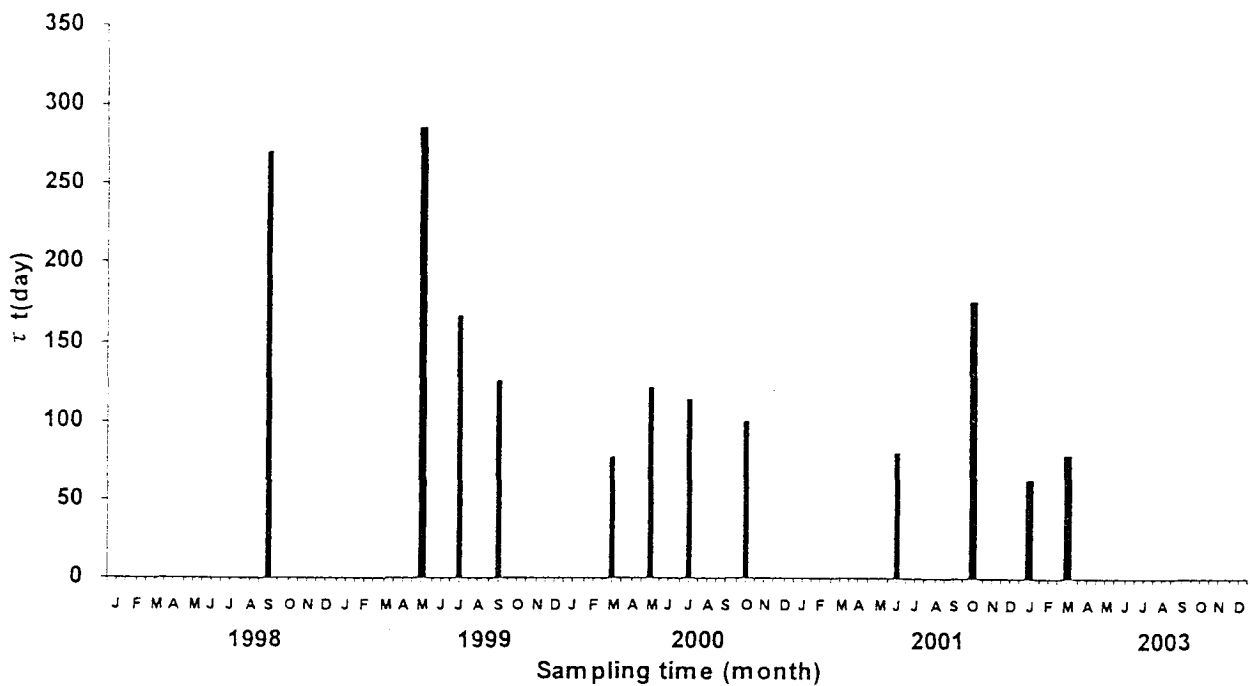


圖 3.9 1998~2001、2003 年 S1 測站於 100m 以上水層中之總態鈷-234 滯留時間變化分佈。其範圍介於 62~286 天，平均滯留時間為 156 天。

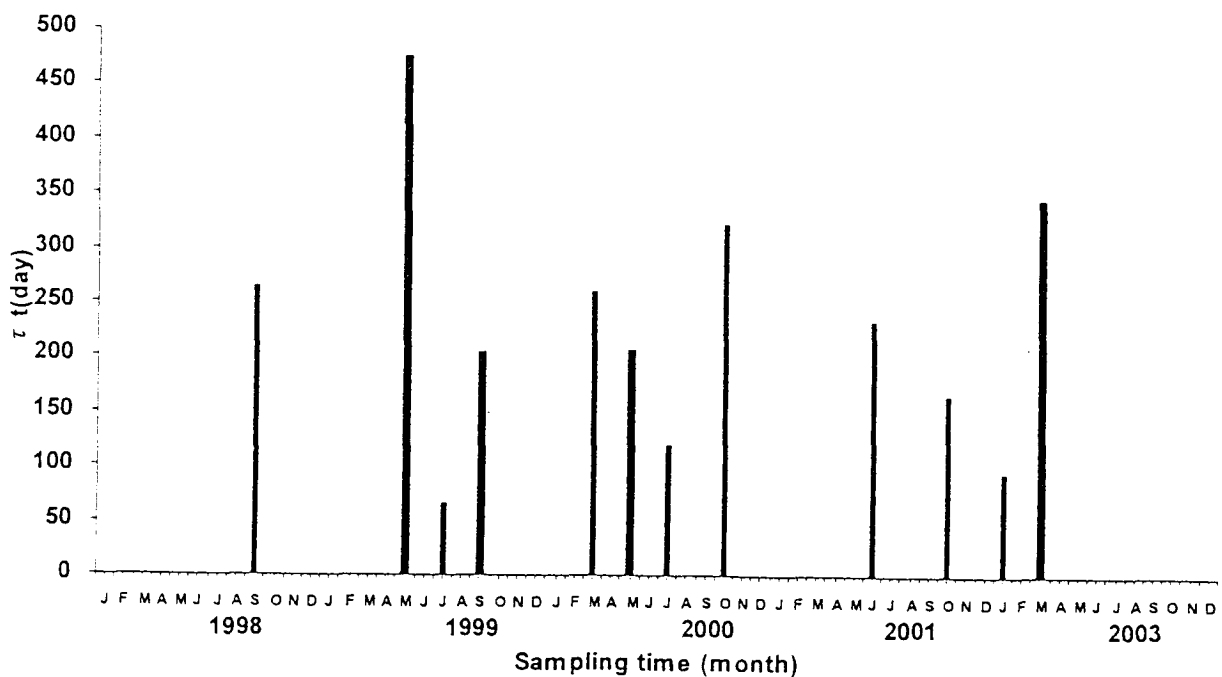


圖 3.10 1998~2001、2003 年 S1 測站於整個採樣水層之總態鈷-234 滯留時間變化分佈。其範圍介於 164~473 天，平均滯留時間為 226 天。

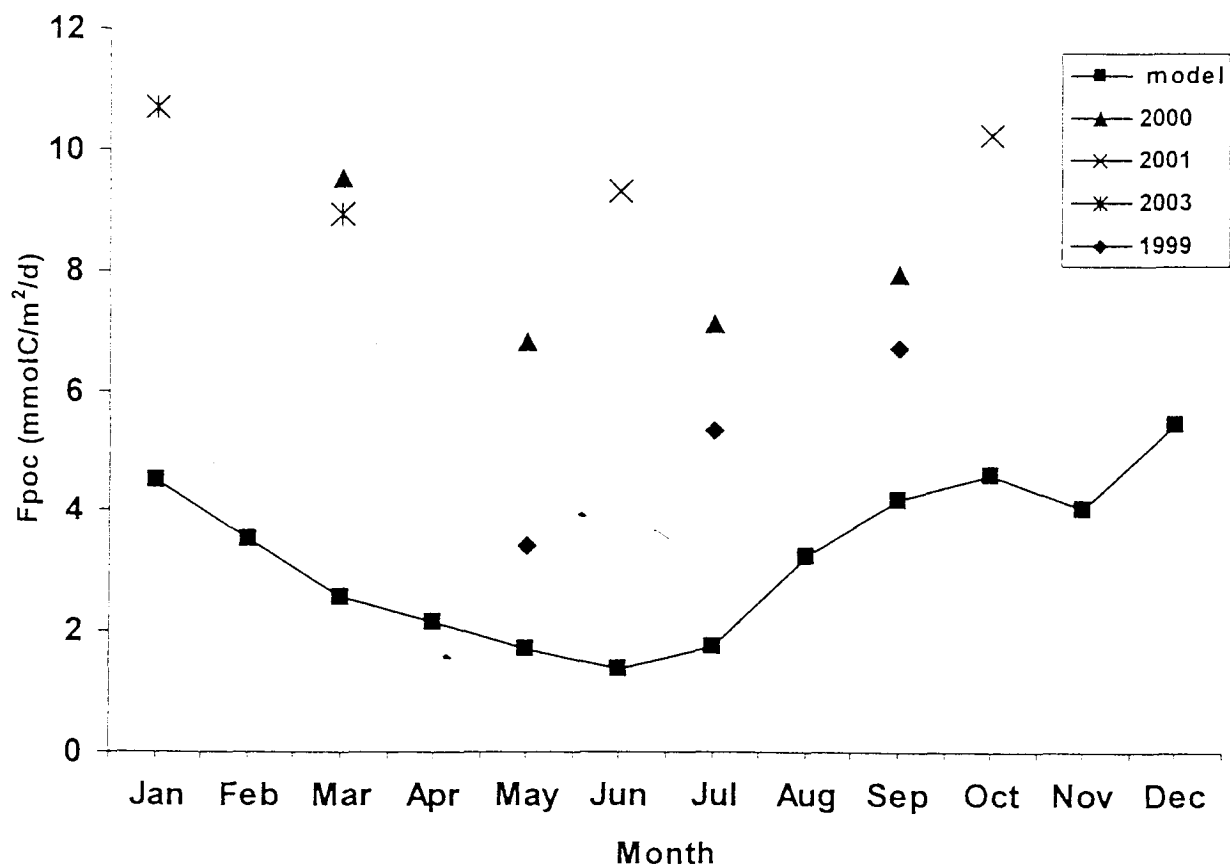


圖 3.11 各航次 100m 深度之 POC 輸出通量與模式計算 (Liu *et al.*, 2002) 之年變化趨勢，可以看出在本研究的不同年份之變化與模式所計算的結果有相似的趨勢。

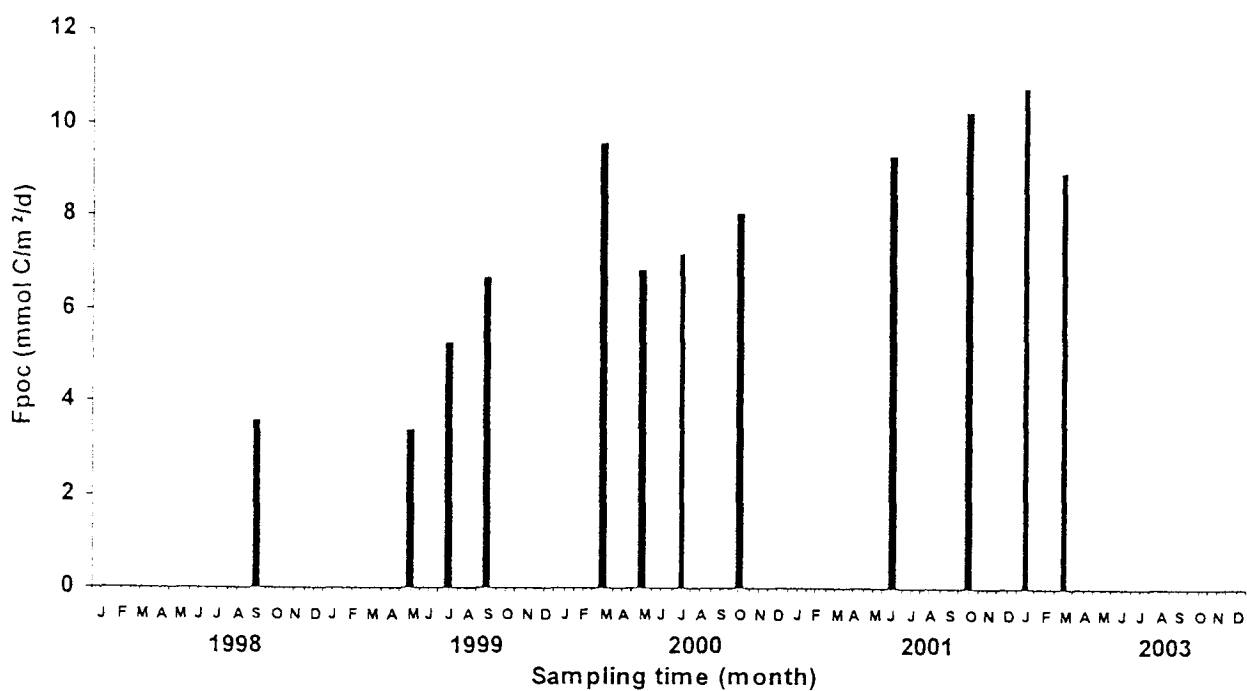


圖 3.12 1998~2001、2003 年 S1 測站於 100m 以上水層中 POC 輸出通量變化。POC 輸出通量介於 3.4~10.7 mmol C/m²/d。平均 POC 輸出通量為 7.5 mmol C/m²/d。

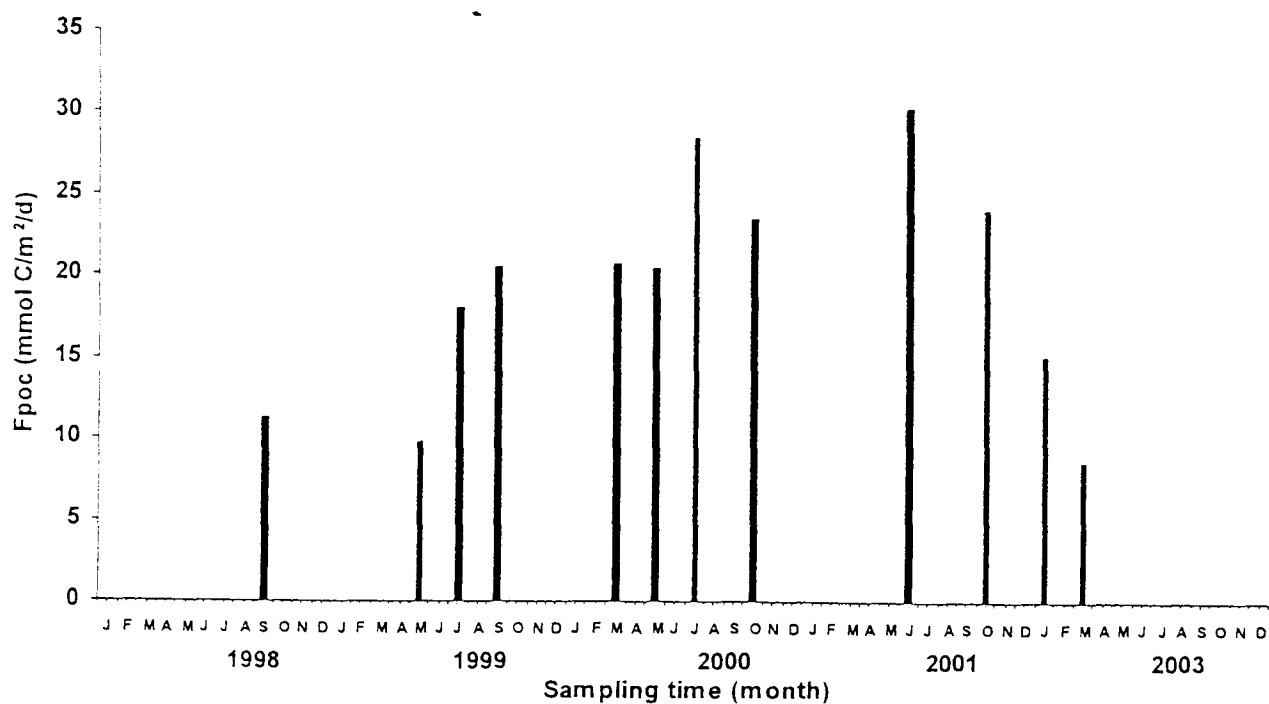


圖 3.13 1998~2001、2003 年 S1 測站整個採樣水層 POC 輸出通量變化。POC 輸出通量介於 8.5~29.7 mmol C/m²/d。平均 POC 輸出通量為 19.1 mmol C/m²/d。

第四章 結論與未來研究方向

4.1 結論

本文就南海北部水體中之顆粒體清除作用及 POC 輸出通量的時序變化作初步探測，其初探結果如下：

- 一、由 S1 測站水體中鈷-234 的分佈係數較 E 測站偏低，可以推斷 S1 測站水體的清除作用應該較 E 測站和緩。
- 二、S1 測站各航次 100m 以上水層之總態鈷-234 沉降通量 ($F_{TTh-234}$) 變化範圍為：758~2406 dpm/m²/d；平均沉降通量為：1576 dpm/m²/d。整個採樣水體總態鈷-234 沉降通量 ($F_{TTh-234}$) 變化範圍介於 1895~6449 dpm/m²/d；平均沉降通量為：4119 dpm/m²/d。S1 測站於 100m 以上水層所沉降的通量約佔整個採樣水體沉降通量的 38%。
- 三、S1 測站總態鈷-234 於 100m 以上水層之滯留時間介於 62~286 天，平均滯留時間為 156 天。
- 四、100m 以上水層 S1 測站的溶解態鈷-234 滯留時間比 E 測站高出些許；反之，在顆粒態鈷-234 方面就有明顯的差異，S1 測站明顯低於 E 測站。S1 測站溶解態與顆粒態鈷-234 滯留時間之結果與其他開放海洋相近；而 E 測站之顆粒態鈷-234 滯留時間較長。
- 五、S1 測站 100m 以上水層的平均 POC 輸出通量為 7.5 mmol C/m²/d，佔整個採樣水層平均 POC 輸出通量(19.1 mmol C/m²/d)的 39%。E 測站 100m 以上水層 POC 輸出通量為 4.9 mmol C/m²/d 較 S1 測站低。

4.2 未來研究方向

本研究對南海北部水體中的顆粒體清除作用及顆粒體有機碳輸出通量的時序變化作初步探測，對於此海域的分佈型態已略窺一二。但是以目前的

資料而言，對於本研究海域更詳細之清除機制、顆粒體傳輸、顆粒體有機碳輸出通量變化等僅能做初步的推測。若欲進一步得到更正確的資訊，則需要更高密度的航次、相關的顆粒體組成分析資料、沈積物收集器的使用來獲得較詳細的顆粒體輸出通量，解釋南海光透層顆粒體的時序變化。

表一 S1、E 測站 [TSM] (mg/L)分析數據

深度(m)	[TSM] (mg/L)	
	S1 測站	E 測站
0	0.23	0.13
10	0.15	0.26
20	0.58	0.14
30	0.61	0.45
50	0.62	0.16
75	0.35	0.12
100	0.27	0.14
150	0.40	0.16
200	0.22	0.32
300	0.24	0.07

表二 南沙群島、南海東北部海域及本研究區域水體鈷-234 分佈係數 (logKd) 變化分佈

研究計畫	研究海域	經緯度	採樣時間	Kd(ml/g)	logKd
南海研究計畫	南沙群島海域	9°00' N, 113°00' E	1994.9.15	$1.43 \times 10^4 \sim 1.58 \times 10^5$	4.16~5.20
		5°50' N, 112°00' E	1994.9.24	$1.83 \times 10^4 \sim 3.37 \times 10^5$	4.25~5.53
		7°25' N, 115°50.30' E	1994.9.27	$1.11 \times 10^4 \sim 3.88 \times 10^5$	4.05~5.59
南海研究計畫	南海東北部海域	19°45' N, 115°50.10' E	1994.9.3	$0.40 \times 10^5 \sim 9.00 \times 10^5$	4.60~6.31
		18°00' N, 119°59.9' E	1994.9.4	$2.68 \times 10^5 \sim 1.52 \times 10^6$	5.43~6.18
		19°55' N, 118°15' E	1994.9.8	$0.64 \times 10^5 \sim 4.39 \times 10^5$	4.80~5.64
This study	南海北部海域	18°00' N, 116°00' E	2001.10	$1.28 \times 10^5 \sim 7.19 \times 10^5$	5.11~5.86
		18°00' N, 120°00' E	2001.10	$5.96 \times 10^5 \sim 2.97 \times 10^6$	5.78~6.47

表三 以盒子模式計算總態鈷-234 於 100m 以上水層中之滯留時間及通量

測站	採樣時間	τ_t (day)	$F_{TTh-234}$ (dpm/m ² /d)
S1	87 年 9 月	271	804
S1	88 年 5 月	286	758
S1	88 年 7 月	167	1181
S1	88 年 9 月	125	1491
S1	89 年 3 月	77	2137
S1	89 年 5 月	121	1528
S1	89 年 7 月	115	1598
S1	89 年 10 月	99	1790
S1	90 年 6 月	80	2073
S1	90 年 10 月	175	1145
S1	92 年 1 月	62	2406
S1	92 年 3 月	78	1998
E	90 年 10 月	248	848

表四 以盒子模式計算總態鈷-234 於整個採樣水層之滯留時間及通量

測站	採樣時間	τ_t (day)	$F_{TTh-234}$ (dpm/m ² /d)
S1	87 年 9 月	264	2506
S1	88 年 5 月	473	2201
S1	88 年 7 月	66	4045
S1	88 年 9 月	202	4564
S1	89 年 3 月	259	4620
S1	89 年 5 月	205	4561
S1	89 年 7 月	118	6351
S1	89 年 10 月	320	5221
S1	90 年 6 月	231	6449
S1	90 年 10 月	164	3670
S1	92 年 1 月	95	3346
S1	92 年 3 月	342	1895
E	90 年 10 月	486	1401

表五 以盒子模式計算清除通量、移除通量及溶解態、顆粒態鈾-234 之滯留時間

樣式深度	採樣時間	S1 測站				E 測站			
		J(dpm/m ² /d)	P(dpm/m ² /d)	τ_D (day)	τ_P (day)	J(dpm/m ² /d)	P(dpm/m ² /d)	τ_D (day)	τ_P (day)
100m	90 年 10 月	1808.1	1175.9	99	19	1984.8	871.1	86	44
目採樣水層		5851.8	3670.5	90	20	5047.0	1439.1	110	87

表六 各海域 POC/Th-234 比值

Location	Particle size (μm)	Ratio ($\mu\text{mole/dpm}$)	Author
EqPac	> 0.7	2~4	Buesseler <i>et al.</i> , 1995
	> 53	0.5~2.5	
EqPac	> 53	1.3~6.2 (20m)	Buesseler <i>et al.</i> , 1996
		0.6 (200m)	
EqPac	> 53	4.6	Bacon <i>et al.</i> , 1996
central EqPac	> 0.45	2.5~7.0	Murray <i>et al.</i> , 1996
subartic northest Pacific ocean	> 1	5~43	Charette <i>et al.</i> , 1999
North Atlantic	> 1	2.3 (35m)	Buesseler <i>et al.</i> , 1992a
		7.9 (300m)	
Arabian Sea	> 53	2~5 (100m)	Buesseler <i>et al.</i> , 1998
	all type	< 1~> 20	
South China Sea	> 0.45	4.5~16.9 (Stat. S1)	This study
		2.8~7.1 (Stat. E)	

表七 S1、E 測站於不同水層之 POC 輸出通量 ($\text{mmol C/m}^2/\text{d}$)

測站	採樣時間	100m	整個採樣水層
S1	87 年 9 月	3.6	11.2
	88 年 5 月	3.4	9.8
	88 年 7 月	5.3	18
	88 年 9 月	6.7	20.4
	89 年 3 月	9.5	20.6
	89 年 5 月	6.8	20.3
	89 年 7 月	7.1	28.3
	89 年 10 月	8	23.3
	90 年 6 月	9.3	30
	90 年 10 月	10.2	23.9
	92 年 1 月	10.7	14.9
	92 年 3 月	8.9	8.5
	Avg. F_{POC}	7.5	19.1
E	89 年 10 月	4.9	7.2

註：Stat. S1 POC/PTh=4.5 (at 100m), Stat. E POC/PTh=2.8 (at 100m)

表八 POC 於不同水層之滯留時間(day)

模式深度	S1 測站	E 測站
100m	17	41
>100m	20	147
整個採樣水層	19	75

表九 各研究海域 100m 以上水層顆粒體輸出通量之比較

研究海域	Fpoc (mmol C/m ² /d)	研究方法	研究者
South China Sea	19.3	Th-234/U-238 不平衡	Huang <i>et al.</i> , 1996
	3.7~46.5		Huang <i>et al.</i> , 2002
	3.8~32.4		Chen <i>et al.</i> , 1996
	46.5		Cai <i>et al.</i> , 2001
	5.7		Cai <i>et al.</i> , 2002
	3.4~10.7		This study
EqPac	1~7	Th-234/U-238 不平衡	Buesseler <i>et al.</i> , 1995
	2		Bacon <i>et al.</i> , 1996
	3.8	沈積物收集器	Murray <i>et al.</i> , 1994
	2.4	Th-234/U-238 不平衡	
Central EqPac	1~6 (Survey I)	沈積物收集器	Murray <i>et al.</i> , 1996
	2~30(Survey II)		
North Pacific	4.0	Th-234/U-238 不平衡	C. Benitez-Nelson <i>et al.</i> , 2001
Subartic northeast Pacific	2.8~7.1	Th-234/U-238 不平衡	Charette <i>et al.</i> , 1999
Arabian Sea	< 1~> 25	Th-234/U-238 不平衡	Buesseler <i>et al.</i> , 1998

參考英文文獻

- Bacon, M. P., J. K. Cochran, D. Hirschberg, T. R. Hammer and A. P. Fleer (1996)
Export flux of carbon at the equator during the EQPAC time-series
cruises estimated from Th-234 measurement. Deep-Sea Res. II, 43,
1133-1153.
- Baskaran, M. and P. H. Santschi (1993) The role of particles and colloids in the
transport of radionuclides in coastal environments of Texas. Mar. Chem.,
43, 95-114.
- Benitez-Nelson, C., K. O. Buesseler., D. M. Karl and J. Andrews (2001) A
time-series study of particulate matter export in the North Pacific
Subtropical Gyre based on ^{234}Th : ^{238}U disequilibrium. Deep-Sea Res. I, 48,
2595-2611.
- Broecker, W. S., W. C. Patzert, J. R. Toggweiler and M. Stuiver (1986)
Hydrography, chemistry and radioisotopes in the south-east Asian basins.
J. Geophys. Res., 91, 14345-14354.
- Bruland, K. W. and K. H. Coale (1986) Surface water $^{234}\text{Th}/^{238}\text{U}$ disequilibria:
spatial and temporal variations of scavenging rates within the Pacific
ocean, In: Dynamic Processes in the Chemistry of the Upper Ocean,
New York, 159-172.
- Buesseler, K. O., M. P. Bacon, J. K. Cochran and H. D. Livingston (1992)
Carbon and nitrogen export during the JGOFS North Atlantic Bloom
Experiment estimated from Th-234: U-238 disequilibria. Deep-Sea Res.,
39, 1115-1137.
- Buesseler, K. O., J. A. Andrew, M. C. Hartman, R. Belostock and F. Chai (1995)

Regional estimates of the export flux of particulate organic carbon derived from thorium-234 during the JGOFS EQPAC program. Deep-Sea Res. II, 42, 777-804.

Buesseler, K. O., L. Ball, J. Andrews, C. Benitez-Nelson, R. Belostock, F. Chai and Y. Chao (1998) Upper ocean export of particulate organic carbon in the Arabian Sea derived from thorium-234. Deep-Sea Res. II, 45, 2461-2487.

Burkill, P. H. (1999) Arabesque : an overview. Deep-Sea Res. II, 529-547.

Cai, P., Y. Hung, M. Chen, G. Liu and Y. Qiu (2001) Export of particulate organic estimated from $^{234}\text{Th} / ^{238}\text{U}$ disequilibria and its temporal variation in the South China Sea. Science in China, 46 (20), 1722-1726.

Cai, P., Y. Hung, M. Chen, L. Guo, G. Liu and Y. Qiu (2002) New production based on ^{228}Ra -derived nutrient budgets and thorium-estimated POC export at the intercalibration station in the South China Sea. Deep-Sea Res. I, 49, 53-66.

Charette, M. A. and S. B. Moran (1999) Rates of particle scavenging and particulate organic carbon export estimated using Th-234 as a tracer in the subtropical and equatorial Atlantic Ocean. Deep-Sea Res. II, 46, 885-906.

Charette, M. A., S. B. Moran and J. K. B. Bishop (1999) ^{234}Th as a tracer of particulate organic carbon export in the subarctic northeast Pacific Ocean. Deep-Sea Res. II, 46, 2833-2861.

Chen, M., Y. Hung, F. Chen, Y. Qiu, Y. Xie, L. Huang, X. Chen and H. Wang (1996a) Particle dynamics in euphotic zone IV: Th-234 scavenging in the

upper water column of the Nansha sea area. In: Isotope Marine Chemistry of Nansha Island Waters. China Ocean Press, Beijing, pp. 123-133.

Chen, M., Y. Hung, F. Chen, Y. Qiu, Y. Xie, X. Chen and P. Cai (1996b) Particle dynamics in euphotic zone II: the regional estimates of the export production derived from ^{234}Th : ^{238}U disequilibria in the Nansha sea area. In: Isotope Marine Chemistry of Nansha Island Waters. China Ocean Press, Beijing, pp. 145-153.

Chen, M., Y. Hung, F. Chen, Y. Qiu, Y. Xie, X. Chen, P. Cai., M. Xu and D. Jiang (1996) Particle dynamics in euphotic zone V: The particle/solution distribution of Th-234 in the upper waters of South Chins Sea. In: Isotope Marine Chemistry of Nansha Island Waters. China Ocean Press, Beijing, pp. 154-164.

Coale, K. H. and K. W. Bruland (1985) ^{234}Th : ^{238}U disequilibria within California Current. Limnol. Oceanogr., 30, 22-33.

Coale, K. H. and K. W. Bruland (1987) Oceanic stratified euphotic zone as elucidated by Th-234: U-238 disequilibria. Limnol. Oceanogr., 32, 189-200.

Cochran, J. K., C. Barnes, D. Achman and D. J. Hirschberg (1995) $^{234}\text{Th}/^{238}\text{U}$ disequilibrium as an indicator of scavenging rates and particulate organic carbon fluxes in the Northeast Water Polynya, Greenland. J. Geophys. Res., 100, 4399- 4410.

Downs, J. N. (1989) Export of production in oceanic systems: information from phaeopigment, carbon and nitrogen analyses, Ph. D. Thesis, University

of Washington.

- Dugdale, R. C. and J. J. Goering (1967) Uptake of new and regenerated nitrogen in primary productivity. *Limnol. Oceanogr.*, 12, 196-206
- Eppley, R. W., E. H. Renger and P. R. Betzer (1983) The residence time of particulate organic carbon in the surface layer of the ocean. *Deep-Sea Res.*, 30, 311-323.
- Goldberg, E. D. (1954) Marine Chemistry 1. Chemical scavengers of the sea. *J. Geol.*, 62, 249-265.
- Gong, G. -C., K. -K. Liu, C.-T. Liu and S. -C. Pai (1992) Chemical hydrography of the South China Sea and a comparison with the West Philippine Sea. *Terr. Atm. Ocean. Sci.*, 3, 587-602.
- Gundersen, J. S., W. D. Gardner, M. J. Richardson and I. D. Walsh (1998) Effects of monsoons on the seasonal and spatial distributions of POC and chlorophyll in the Arabian Sea. *Deep-Sea Res. II*, 45, 2103-2132.
- Hodge, V. F., M. Koide, and E. D. Goldberg (1979) Particulate uranium, plutonium and polonium in the biogeochemistries of the coastal zone. *Nature*, 277, 206-209.
- Honeyman, B. D., L. S. Balistrieri and J. W. Murray (1988) Oceanic trace metal scavenging: the importance of particle concentration. *Deep-Sea Res.*, 35, 227-246.
- Huang, Y., M. Chen., F. Chen., Y. Qiu, Y. Xie, L. Huang, S. Chen and H. Wang (1996) Particle dynamics in euphotic zone III: the stratified structure and export production in the euphotic zone of the Nansha sea area. In: *Isotope Marine Chemistry of Nansha Island Waters*. China Ocean Press,

Beijing, pp. 134-144.

Hung, C. -C. and C. -L. Wei (1994) Scavenging phenomenon in the surface water of Kuroshio Edge Exchange Processes (KEEP) area elucidated by $^{234}\text{Th}/^{238}\text{U}$ disequilibria. *Acta Oceanogr. Taiwanica*, 33, 81-96. (in Chinese).

Karl, D. M., R. M. Letelier., D. V. Hebel., L. M. Tupas., J. R. Chistian and C. D. Winn (1995) Ecosystem changes in the North Pacific subtropical gyre attributed to the 1991-1992 El Niño. *Nature*, 373, 230-234.

Karl, D. M., J. R. Chistian, J. E. Dore, D. V. Hebel, R. M. Letelier, L. M. Tupas and C. D. Winn (1996) Seasonal and interannual variability in primary production and particle flux at Station ALOHA. *Deep-Sea Res. II*, 43, 539-568.

Langmuir, D. (1978) Uranium solution-mineral equilibria at low temperature with application to sedimentary ore deposits. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 42, 547-569.

Liu, K. -K., S. -Y. Chao, P. -T. Shaw, G. -C. Gong, C. -C. Chen and T. -Y. Tang (2002) Monsoon-forced chlorophyll distribution and primary production in the South China Sea: observations and a numerical study. *Deep-Sea Res. I*, 49, 1387-1412.

Ku, T. L., K. G. Knauss and G. G. Mathiew (1977) Uranium in open ocean: concentration and isotopic composition. *Deep-Sea Res.*, 24, 1005-1017.

Matin, J. H., G. A. Knauer, D. M. Karl and W. W. Broenkow (1987) VERTEX: carbon cycling in the north Pacific. *Deep-Sea Res.*, 34, 267-285.

McKee, B. A., D. J. DeMaster and C. A. Nittrouer (1986) Temporal variability in

the partitioning of thorium between dissolved and particulate phases on the Amazon shelf: implications for the scavenging of particle-reactive species. *Cont. Shelf Res.*, 6, 87-106.

Moran, S. B. and K. O. Buesseler (1993) Size-fractionated Th-234 in continental shelf waters off New England: implications for the role of colloids in oceanic trace metal scavenging. *J. Mar. Res.*, 51, 893-922.

Murray, J. W., J. N. Downs, S. Storm, C. -L. Wei and H. W. Jannason (1989) Nutrient assimilation, export production and Th-234 scavenging in the eastern equatorial Pacific. *Deep-Sea Res.*, 36, 1471-1489.

Murray, J. W., R. T. Barber., M. R. Bacon., R. A. Feely (1994) Physical and biological controls on carbon cycling in the equatorial Pacific. *Science*, 266, 58-65.

Murray, J. W., J. Young, J. Newton, J. Dunne, T. Chapin, B. Paul and J. J. McCarthy (1996) Export flux of particulate organic carbon from the central equatorial Pacific determined using a combined drifting trap-²³⁴Th approach. *Deep-Sea Res. II*, 43, 1095-1132.

Nitanti, H (1972) Beginning of the Kuroshio. In: Stommel, H., Yoshida, K. (Eds.) , *Kuroshio*. University of Washington Press, Seattle, 129-163.

Ose, T., Y. K. Song and A. Kitoh (1997) Sea surface temperature in the South China Sea-an index for the Asian monsoon and ENSO system. *J. Meteor. Soc. of Japan*, 75, 1091-1107.

Santschi, P. H., L. Guo, I. D. Walsh, M. S. Quigley and M. Baskaran (1999) Boundary exchange and scavenging of radionuclides in the continental margin waters of the Middle Atlantic Bight: implications for organic

carbon fluxes. *Cont. Shelf Res.*, 19, 609-636.

Smith, S. L., L. A. Codispoti, J. M. Morrison and R. T. Barber (1998) The 1994-96 Arabian expedition: an integrated, interdisciplinary investigation of the response of the north western Indian Ocean to monsoonal forcing. *Deep-Sea Res. II*, 45, 1905-1915.

Shiah, F. -K., K. -K. Liu and T. -Y. Tang (1999) South East Asia Time-Series Station established in South China Sea. *U.S. JGOFS Newsletter* 10 (1), 8-9.

Tanaka, N., Y. Takeda and S. Tsunogai (1983) Biological effect on removal of Th-234, Po-210 and Pb-210 from surface water in Funka Bay, Japan. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 47, 1783-1790.

Turner, D. R., M. Whitfield, and A. G. Dickson (1981) The equilibrium speciation of dissolved components on freshwater and seawater at 25°C and 1 atm pressure. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 46, 855-882.

Wei, C. -L. (1990) Studies of marine scavenging by naturally occurring radionuclides., Ph.D Thesis, University of Washington, Seattle, 199.

Wei, C.-L., S. -J. Sun and C. -S. Huang (1991) Manganese distribution in the water column off northeast Taiwan-a preliminary investigation. *Acta Oceanogr. Taiwanica*, 26, 85-93.

Wei, C. -L. and J. W. Murray (1992) Temporal variation of Th -234 activity in the water column of Dabob Bay: Particle scavenging. *Limnol. Oceanogr.*, 37, 296-314.

Wei, C. -L. and C. -C. Hung (1992) Spatial variation of ^{234}Th scavenging in the surface water of the Bashi Channel and the Luzon Strait, *J. Oceanogr.*, 48,

427-437.

參考中文文獻

海洋科學研究中心（2002）南海海域時序 S1 測站物理、化學、生物水文時序變化研究簡報。

黃奕普、陳敏、蔡平河、劉廣山、陳飛舟、邱雨生，2002：南海顆粒有機碳垂直通量的時空變異。海峽兩岸第五屆台灣鄰近海域海洋科學研討會論文集。160 頁

附錄 I 各航次水體垂直剖面之分析數據

(A)

測站	採樣時間	深度(m)	鹽度(psu)	TTh-234(dpm/L)	U-238(dpm/L)	TTh/U	POC(ug/L)
S1	87 年 9 月	0	33.437	1.767 ± 0.020	2.374	0.744	-
		5	33.436	1.659 ± 0.021	2.374	0.699	-
		10	33.436	2.177 ± 0.072	2.374	0.917	-
		20	33.439	2.375 ± 0.030	2.374	1.000	-
		40	33.499	2.357 ± 0.013	2.378	0.991	-
		80	34.309	1.759 ± 0.018	2.436	0.722	-
		100	34.486	2.404 ± 0.028	2.448	0.982	-
		150	34.621	2.287 ± 0.027	2.458	0.930	-
		200	34.609	1.830 ± 0.022	2.457	0.745	-
		300	34.469	2.398 ± 0.023	2.447	0.980	-

(B)

測站	採樣時間	深度(m)	鹽度(psu)	TTh-234(dpm/L)	U-238(dpm/L)	TTh/U	POC(ug/L)
S1	87 年 10 月	0	33.056	1.857 ± 0.021	2.347	0.791	-
		5	33.056	1.817 ± 0.019	2.347	0.774	-
		20	33.175	2.874 ± 0.031	2.355	1.220	-
		40	33.606	1.463 ± 0.013	2.386	0.613	-
		80	34.251	2.474 ± 0.026	2.432	1.017	-
		100	34.443	2.314 ± 0.027	2.445	0.946	-
		200	34.587	1.864 ± 0.018	2.456	0.759	-
		300	34.488	2.500 ± 0.024	2.449	1.021	-

(C)

測站	採樣時間	深度(m)	鹽度(psu)	TTh-234(dpm/L)	U-238(dpm/L)	TTh/U	POC(ug/L)
S1	88 年 5 月	0	33.760	1.847 ± 0.050	2.397	0.771	-
		5	33.759	1.654 ± 0.031	2.397	0.690	-
		10	33.763	2.139 ± 0.041	2.397	0.892	-
		20	33.803	2.371 ± 0.038	2.400	0.988	-
		40	34.480	1.935 ± 0.050	2.448	0.790	-
		80	34.703	2.369 ± 0.042	2.464	0.962	-
		100	34.673	2.320 ± 0.029	2.462	0.942	-
		150	34.563	2.050 ± 0.039	2.454	0.835	-
		200	34.497	2.461 ± 0.033	2.449	1.005	-
		300	34.433	2.405 ± 0.056	2.445	0.984	-

(D)

測站	採樣時間	深度(m)	鹽度(psu)	TTh-234(dpm/L)	U-238(dpm/L)	TTh/U	POC(ug/L)
S1	88 年 7 月	0	33.499	1.725 ± 0.032	2.378	0.725	-
		5	33.500	1.523 ± 0.049	2.378	0.640	-
		10	33.502	1.683 ± 0.031	2.379	0.707	-
		20	33.509	2.219 ± 0.037	2.379	0.933	-
		40	33.486	1.945 ± 0.031	2.378	0.818	-
		80	34.009	2.121 ± 0.038	2.415	0.879	-
		100	34.295	1.742 ± 0.036	2.435	0.716	-
		150	34.593	2.029 ± 0.043	2.456	0.826	-
		200	34.644	2.211 ± 0.028	2.460	0.899	-
		300	34.523	2.396 ± 0.058	2.451	0.978	-

(E)

測站	採樣時間	深度(m)	鹽度(psu)	TTh-234(dpm/L)	U-238(dpm/L)	TTh/U	POC(ug/L)
S1	88 年 9 月	0	33.437	1.784 ± 0.021	2.374	0.751	92.85
		5	33.436	2.052 ± 0.032	2.374	0.864	-
		10	33.436	1.938 ± 0.028	2.374	0.817	104.41
		20	33.439	2.360 ± 0.026	2.374	0.994	113.70
		40	33.499	1.628 ± 0.027	2.378	0.685	-
		80	34.309	1.808 ± 0.024	2.436	0.742	86.89
		100	34.486	1.882 ± 0.029	2.448	0.769	64.40
		150	34.621	1.968 ± 0.031	2.458	0.801	-
		200	34.609	2.322 ± 0.030	2.457	0.945	64.56
		300	34.469	2.298 ± 0.025	2.447	0.939	-

(F)

測站	採樣時間	深度(m)	鹽度(psu)	TTh-234(dpm/L)	U-238(dpm/L)	TTh/U	POC(ug/L)
S1	89 年 03 月	0	33.643	1.581 ± 0.050	2.389	0.662	-
		5	33.642	1.711 ± 0.038	2.389	0.716	-
		10	33.640	1.264 ± 0.030	2.388	0.529	-
		20	33.620	1.581 ± 0.045	2.387	0.662	7.26
		40	33.678	1.849 ± 0.044	2.391	0.773	7.28
		80	34.311	1.345 ± 0.035	2.436	0.552	-
		100	34.507	2.325 ± 0.052	2.450	0.949	10.58
		150	34.656	2.834 ± 0.087	2.461	1.152	-
		200	34.595	2.103 ± 0.106	2.456	0.856	6.73
		300	34.460	2.427 ± 0.091	2.447	0.992	-

(G)

測站	採樣時間	深度(m)	鹽度(psu)	TTh-234(dpm/L)		U-238(dpm/L)	TTh/U	POC(ug/L)
S1	89 年 05 月	0	33.056	2.046	± 0.070	2.347	0.872	7.51
		5	33.056	1.251	± 0.042	2.347	0.533	-
		10	33.087	1.586	± 0.055	2.349	0.675	10.36
		20	33.175	1.694	± 0.057	2.355	0.719	31.86
		40	33.606	2.079	± 0.080	2.386	0.871	7.94
		80	34.251	1.800	± 0.062	2.432	0.740	-
		100	34.443	2.015	± 0.084	2.445	0.824	8.29
		150	34.646	2.125	± 0.094	2.460	0.864	-
		200	34.587	2.094	± 0.072	2.456	0.853	-
		300	34.488	2.476	± 0.102	2.449	1.011	-

(H)

測站	採樣時間	深度(m)	鹽度(psu)	TTh-234(dpm/L)		U-238(dpm/L)	TTh/U	POC(ug/L)
S1	89 年 07 月	0	33.406	2.023	± 0.080	2.372	0.853	-
		5	33.455	2.643	± 0.108	2.375	1.113	-
		10	33.454	1.719	± 0.057	2.375	0.724	15.87
		20	33.432	1.743	± 0.057	2.374	0.734	52.05
		40	33.438	1.474	± 0.047	2.374	0.621	19.71
		80	34.343	2.033	± 0.073	2.438	0.834	12.64
		100	34.455	2.043	± 0.069	2.446	0.835	-
		150	34.637	1.886	± 0.060	2.459	0.767	12.08
		200	34.598	1.682	± 0.057	2.456	0.685	9.17
		300	34.484	2.141	± 0.069	2.448	0.874	-

(I)

測站	採樣時間	深度(m)	鹽度(psu)	TTh-234(dpm/L)	U-238(dpm/L)	TTh/U	POC(ug/L)
S1	89 年 10 月	0	33.251	1.699 ± 0.058	2.361	0.720	-
		10	33.251	1.780 ± 0.071	2.361	0.754	-
		25	33.295	1.642 ± 0.074	2.364	0.695	-
		50	34.327	1.365 ± 0.056	2.437	0.560	-
		75	34.387	1.927 ± 0.072	2.441	0.789	-
		100	34.562	2.504 ± 0.085	2.454	1.020	-
		150	34.616	2.145 ± 0.089	2.458	0.873	-
		200	34.574	2.097 ± 0.080	2.455	0.854	-
		300	34.456	2.320 ± 0.101	2.446	0.948	-
		500	34.412	2.458 ± 0.099	2.443	1.006	-

(J)

測站	採樣時間	深度(m)	鹽度(psu)	TTh-234(dpm/L)	U-238(dpm/L)	TTh/U	POC(ug/L)
S1	90 年 6 月	0	33.210	1.589 ± 0.034	2.360	0.673	-
		10	33.156	1.477 ± 0.040	2.350	0.629	-
		25	33.225	1.743 ± 0.036	2.360	0.739	-
		50	33.935	1.457 ± 0.037	2.410	0.605	-
		75	34.243	1.799 ± 0.036	2.430	0.740	-
		100	34.499	1.864 ± 0.038	2.450	0.761	-
		150	34.589	1.563 ± 0.042	2.460	0.635	-
		200	34.532	2.386 ± 0.046	2.450	0.974	-
		300	34.439	2.318 ± 0.048	2.450	0.946	-
		500	34.412	2.387 ± 0.044	2.440	0.978	-

(K)

測站	採樣時間	深度(m)	鹽度(psu)	DTh-234(dpm/L)	PTh-234 (dpm/L)	U-238(dpm/L)	[TSM](mg/L)	POC(ug/L)
S1	90 年 10 月	2	33.199	1.788 ± 0.060	0.290 ± 0.009	2.357	0.23	16.79
		10	33.487	1.952 ± 0.066	0.171 ± 0.006	2.378	0.15	-
		20	33.252	1.496 ± 0.051	0.207 ± 0.007	2.361	0.58	18.23
		30	33.645	1.851 ± 0.062	0.226 ± 0.007	2.389	0.61	-
		50	34.150	1.832 ± 0.061	0.145 ± 0.005	2.425	0.62	29.42
		75	34.509	1.902 ± 0.063	0.281 ± 0.009	2.450	0.35	-
		100	34.571	1.484 ± 0.050	0.246 ± 0.008	2.455	0.27	-
		150	34.585	1.624 ± 0.055	0.310 ± 0.010	2.456	0.40	18.31
		200	34.579	1.592 ± 0.054	0.194 ± 0.006	2.455	0.22	13.50
		300	34.576	2.259 ± 0.075	0.284 ± 0.009	2.455	0.24	20.37

(L)

測站	採樣時間	深度(m)	鹽度(psu)	DTh-234(dpm/L)	PTh-234 (dpm/L)	U-238(dpm/L)	[TSM](mg/L)	POC(ug/L)
E	90 年 10 月	2	33.308	1.900 ± 0.065	0.360 ± 0.012	2.365	0.13	12.11
		10	33.510	1.351 ± 0.046	0.373 ± 0.012	2.379	0.26	-
		20	33.225	1.629 ± 0.055	0.338 ± 0.011	2.359	0.14	28.76
		30	33.553	1.478 ± 0.050	0.398 ± 0.013	2.382	0.45	-
		50	33.532	1.913 ± 0.064	0.367 ± 0.012	2.381	0.16	30.89
		75	34.418	1.868 ± 0.062	0.422 ± 0.014	2.444	0.12	-
		100	34.729	1.608 ± 0.054	0.403 ± 0.013	2.466	0.14	16.36
		150	34.494	1.907 ± 0.064	0.481 ± 0.016	2.449	0.16	-
		200	34.439	1.983 ± 0.067	0.422 ± 0.014	2.445	0.32	17.42
		300	34.509	1.995 ± 0.067	0.419 ± 0.014	2.450	0.07	30.68

(M)

測站	採樣時間	深度(m)	鹽度(psu)	TTh-234(dpm/L)	U-238(dpm/L)	TTh/U	POC(ug/L)
S1	92 年 1 月	5	33.455	1.491 ± 0.053	2.375	0.628	-
		20	33.517	1.393 ± 0.050	2.380	0.585	-
		40	33.529	1.365 ± 0.048	2.381	0.574	-
		60	33.635	1.673 ± 0.059	2.388	0.700	-
		80	34.693	1.417 ± 0.051	2.463	0.575	-
		100	34.729	2.043 ± 0.075	2.466	0.828	-
		120	34.750	1.938 ± 0.069	2.467	0.786	-
		140	34.792	2.025 ± 0.071	2.470	0.820	-
		160	34.800	2.065 ± 0.083	2.471	0.836	-
		180	34.799	2.382 ± 0.106	2.471	0.964	-

(N)

測站	採樣時間	深度(m)	鹽度(psu)	TTh-234(dpm/L)	U-238(dpm/L)	TTh/U	POC(ug/L)
S1	92 年 3 月	5	33.067	1.403 ± 0.047	2.348	0.598	-
		10	33.069	1.609 ± 0.055	2.348	0.685	-
		30	33.087	1.698 ± 0.059	2.349	0.723	-
		40	33.155	1.422 ± 0.050	2.354	0.604	-
		50	33.202	1.504 ± 0.054	2.357	0.638	-
		75	34.251	1.625 ± 0.056	2.432	0.668	-
		100	34.317	1.991 ± 0.069	2.437	0.817	-
		200	34.450	2.714 ± 0.096	2.446	1.110	-
		300	34.587	2.440 ± 0.098	2.456	0.993	-

附錄 II S1、E 測站 POC、 $\frac{POC}{PTh}$ 分析數據

(a)

測站	深度 (m)	POC (mg/l)	POC (μ M)	$\frac{POC}{PTh}$ (μ mol/dpm)
S1	2	0.02	1.40	4.8
	20	0.02	1.52	7.3
	50	0.03	2.45	16.9
	100	0.01	1.10	4.5
	150	0.02	1.53	4.9
	200	0.01	1.13	5.8
	300	0.02	1.70	6.0

(b)

測站	深度 (m)	POC (mg/l)	POC (μ M)	$\frac{POC}{PTh}$ (μ mol/dpm)
E	2	0.01	1.01	2.8
	20	0.03	2.40	7.1
	50	0.03	2.57	7.0
	100	0.02	1.36	3.4
	200	0.03	2.56	3.4
	300	0.01	1.01	6.1