

南海光透層輸出生產力與深層顆粒垂直通量

魏慶琳

國立臺灣大學 海洋研究所

摘要

本實驗室以天然鈾系親顆粒放射核種 (^{234}Th 、 ^{210}Pb 和 ^{210}Po) 作為工具，探討元素在海洋中循環的課題，有效的量化顆粒體引起的元素清除與移除速率。過去十年來，致力於南海水體 (1)光透層輸出通量的時序變化，(2)深層水體中的顆粒清除現象，和 (3)顆粒沉降通量三個議題進行時序的觀察。本文將對已於近年發表的前二主題做簡要回顧，就第三主題以時序沉降顆粒收集器得到的垂直通量結果進行報告。

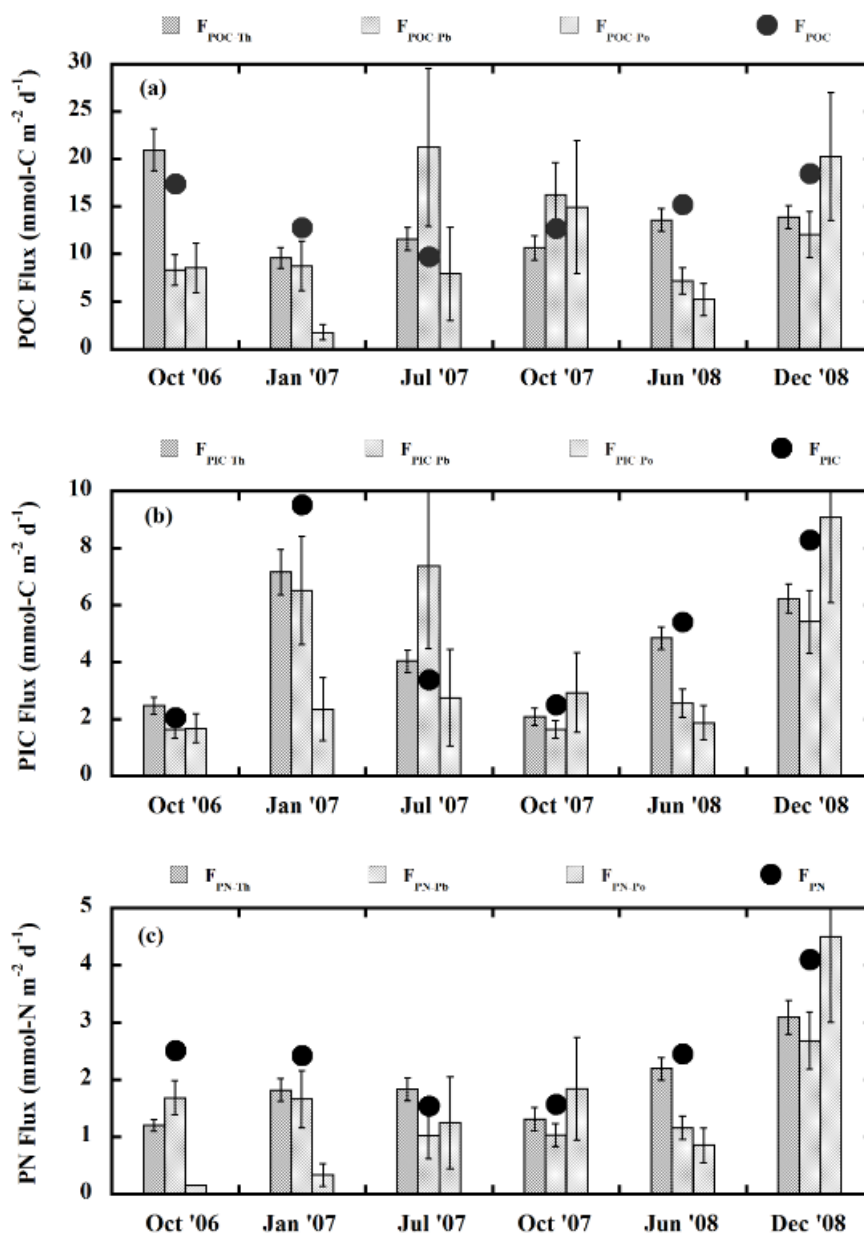
感言

今天我能在臺大海洋所服務，其實和 KK 老師有密切關係。1989 年我取得博士學位前，在 AGU 會議和 KK 認識，中午一起在 Wendy's 吃漢堡時，KK 問我有沒興趣回臺服務，他可以幫忙引薦。就這樣，我還沒畢業就被「訂」了，一待就是 25 年，從沒後悔當初的決定，對當初 KK 的引薦，只有感恩。1993 年，中研院地球所由臺大校園遷回南港，當時任職中研院的 KK 申請轉任臺大，我以海洋所化學組主任身份，禮聘他為專任教授。2000 年，設在臺大的海科中心 (NCOR) 首位主任李遠輝老師將卸任返美，當時我擔任國科會海洋學門召集人，向自然處推薦 KK 接主任一職。接下來幾年，在 KK 擔綱主持下，NCOR 成果輝煌，所延攬的博士後和研究人員，許多已成為國內海洋界優秀學者。2003 年，KK 離開臺大後，時或傳來他對海洋所批評的聲音，我相信這是他對學術工作的執著，是恨鐵不成鋼的高度期望使然。KK 對海洋所的不滿，卻於今年六月中給我的最後一封電郵中翻轉，他對海洋所施放的海氣象浮標，傳回即時高品質的氣象和海洋上層水文剖面資料，給予高度肯定，並勉勵我們更進一步地增加生物和化學量測參數。他說海洋所將有大幅的進展，並不吝給我鼓勵。斯人已逝，身為海洋所所長，我向在天家的 KK 輕聲說：海洋所會繼續努力，為海洋科學做出更多貢獻。

(一) 南海光透層輸出通量的時序變化

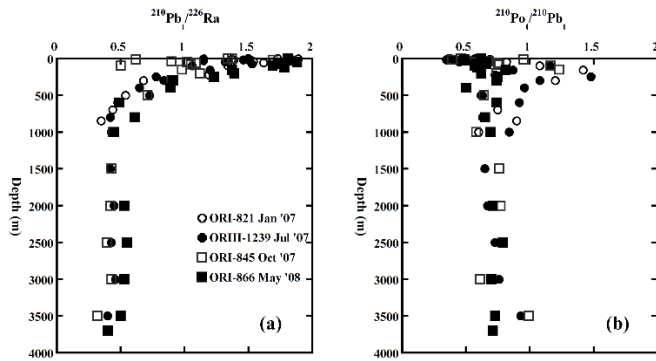
以 ^{234}Th ($t_{1/2}=24.1$ days)、 ^{210}Pb ($t_{1/2}=22$ years) 和 ^{210}Po ($t_{1/2}=138$ days) 作為碳的類比元素 (analogue proxy) 估算海洋光透層輸出通量 (export production)，可經由親顆粒放射核種與母核種間的放射不平衡程度，算出三個核種的顆粒移除通量 (F_{Th} , F_{Pb} , F_{Po})，再乘以沉降顆粒體中有機碳與核種活度比值，即可得到碳輸出通量 (F_{POC})。同理，以無機碳 (F_{PIC}) 及顆粒態氮 (F_{PN}) 型式的輸出通量，亦可由核種的顆粒移除通量和沉降顆粒體中無機碳及氮與核種活度比值相乘積而得。

我們於 2006 至 2009 年間，參與海研一號或三號的六個航次，在南海時序站 SEATS (South East Asian Time-series Study, 116°00'E, 18°00'N) 進行水樣採樣，另外，我們亦在 SEATS 站選擇三個深度施放漂浮型沉降顆粒收集器，量得上述三種核種及顆粒有機碳、顆粒無機碳、和顆粒氮的沉降通量。因此， F_{POC} , F_{PIC} , F_{PN} 的取得共有四種不同的手段，其中三者為以放射核種示蹤劑間接求得，另亦能用沉降顆粒收集器直接量測。下圖為南海 SEATS 光透層(100m)各航次的 F_{POC} , F_{PIC} , F_{PN} 。整體來看，四個獨立的方式得到的輸出生產力相當一致，其中由 ^{210}Po 估算的輸出生產力，偶或呈現較低結果，可能是因 ^{210}Po 屬 b-type 金屬，會被基礎生產者攝取(uptake)進入浮游植物細胞，再被浮游動物攝食，向高階生物傳遞，使得 ^{210}Po 在光透層的滯留時間(residence time)增加所致。詳細成果請參考已發表論文 (Wei et al., 2011)。



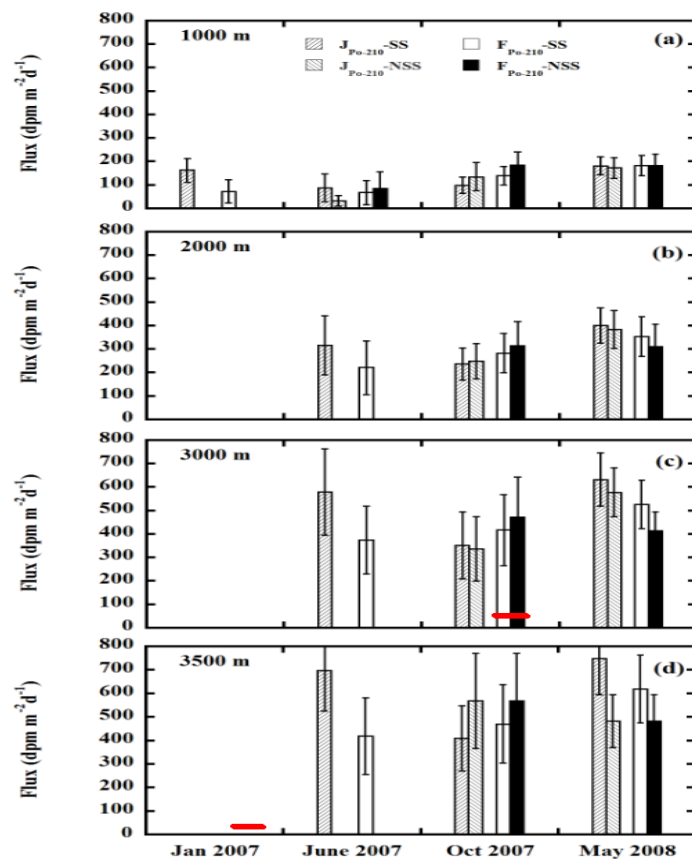
(二) 南海深層水體中的顆粒清除現象

由於海洋深層的顆粒體濃度不高，元素的清除速率也相對較低，若要探討顆粒體在深層海洋的動力學，必須仰賴半衰期較長的 ^{210}Po 和 ^{210}Pb 作為示蹤劑。本實驗室於 SEATS 站四個航次量得的 $^{210}\text{Pb}/^{226}\text{Ra}$ 和 $^{210}\text{Po}/^{210}\text{Pb}$ 比值垂直剖面如下圖。



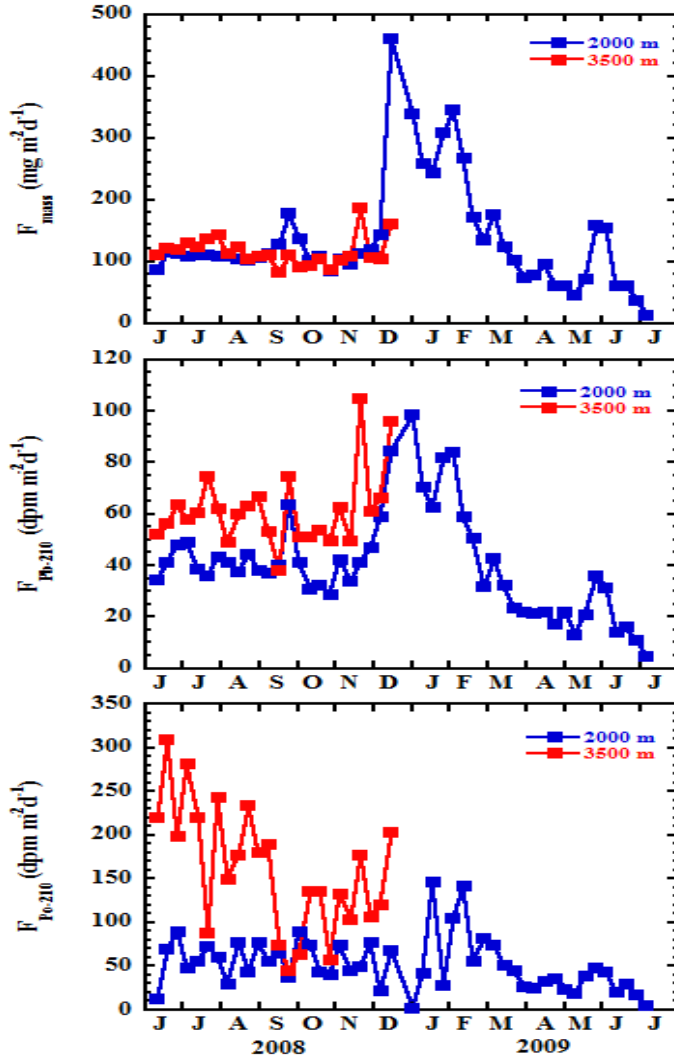
由母子核種放射活度不平衡程度可估算子核種的移除通量，由 $^{210}\text{Pb}/^{226}\text{Ra}$ 不平衡得到 ^{210}Pb 之移除通量於3500 m，介於39與46 $\text{dpm m}^{-2}\text{d}^{-1}$ 之間，和深海沉降顆粒收集器於3000 m和3500 m測得約~50 $\text{dpm m}^{-2}\text{d}^{-1}$ 相近。至於 ^{210}Po ，我們

則以穩定狀態 (steady-state, SS) 和非穩定狀態 (non-steady state, NSS) 兩種情況算出1000, 2000, 3000 m深度的 ^{210}Po 垂直通量，結果顯示於下圖。圖中紅色短線則為沉降顆粒收集器量的的通量值，可看出量測通量遠低於模式估算值，我們發表的論文推論 ^{210}Po 通量的估算與量測值不符應與南海海盆中顆粒通量的季節變化大有關 (Wei et al., 2014)，此推論有賴長期時序顆粒通量監測方能驗證。



(三) 南海顆粒沉降通量

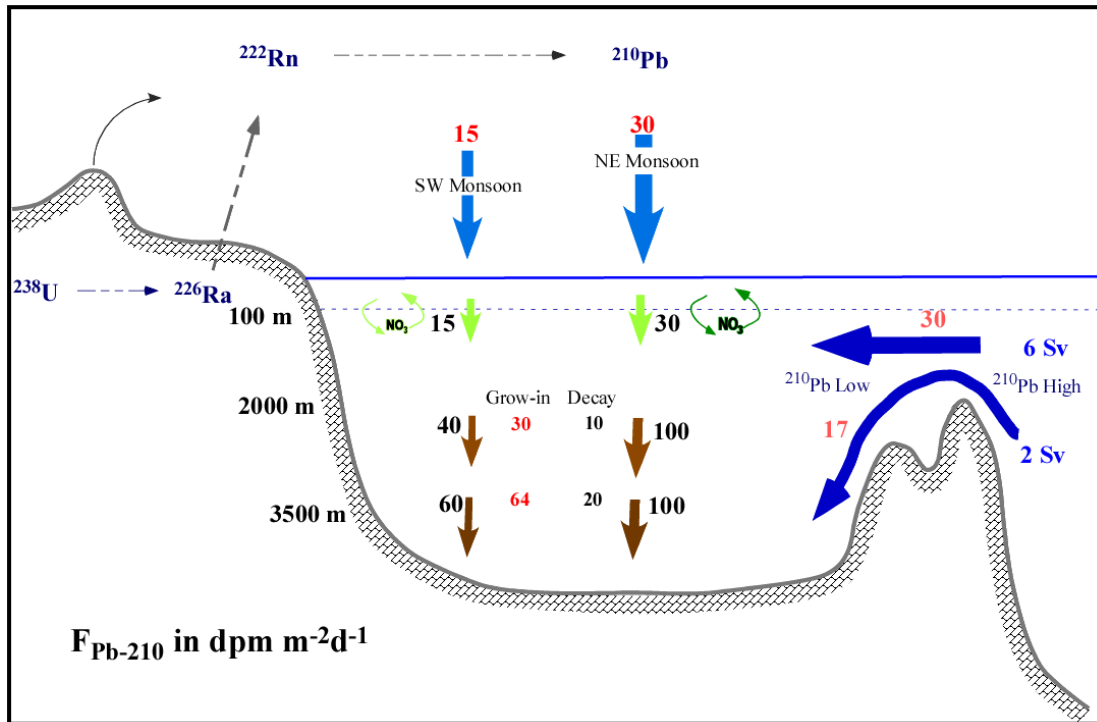
從 2008 年六月至 2009 年七月，我們取得兩梯次的錨碇式沉降顆粒收集器收集的顆粒體，量測了 2000 m 及 3500 m 兩深度的質量通量(F_{mass})， ^{210}Pb 通量(F_{Pb-210})與 ^{210}Po 通量(F_{Po-210})時序變化數據如下圖所示，因收集器運作失常，沒收集到 2009 年 3500 m 的樣品。



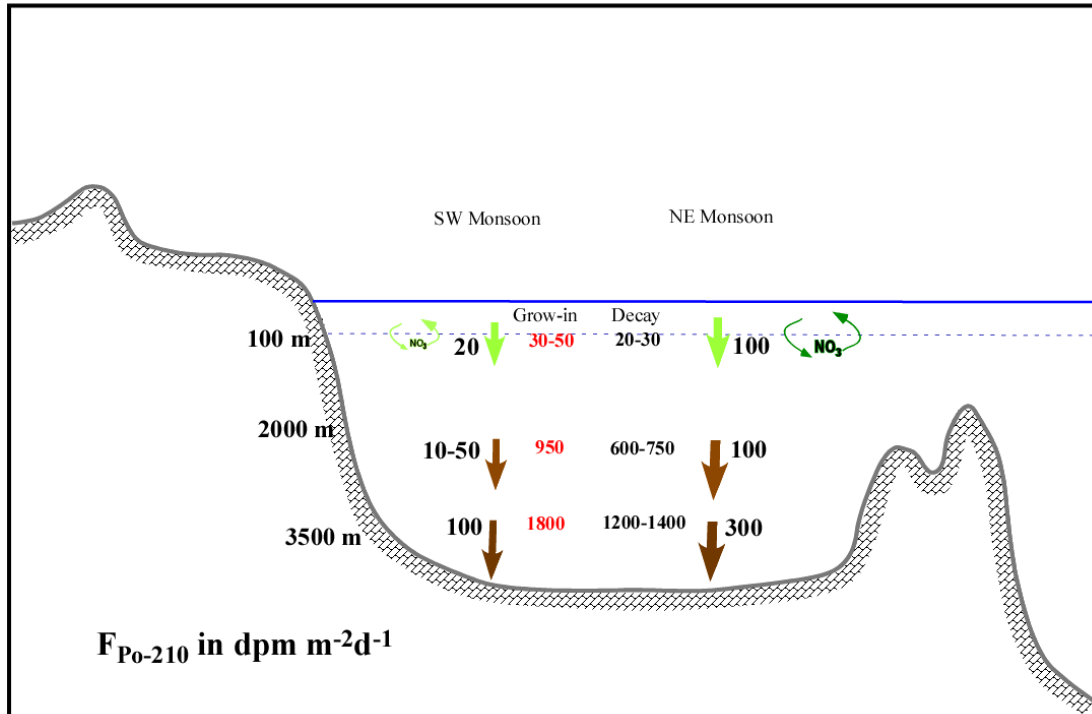
2000 m F_{mass} 呈現夏秋低冬春高的時序變化並有年間的變化，其變化範圍和表層基礎生產力變化幅度相當；3500 m 2008 年下半年的 F_{mass} 變化不大，約 $120 \text{ mg m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ 。兩深度的 F_{mass} 並無明顯的差異，故應無顆粒體橫向傳輸的現象。 F_{Pb-210} 介於 4.5 與 $105.2 \text{ dpm m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ 之間，兩深度的 F_{Pb-210} 呈現同步時序變化，3500 m 的 F_{Pb-210} 高於 2000 m，且與 F_{mass} 呈良好線性關係，表示南海水體中 ^{210}Pb 的清除速率受顆粒垂直通量控制。 F_{Po-210} 介於 2.6 與 $309.3 \text{ dpm m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ 之間，3500 m 的 F_{Po-210} 高於 2000 m， F_{Po-210} 與 F_{mass} 相關性不高。

^{210}Pb 可作為南海深層顆粒有機碳通量的示蹤劑，以估算顆粒有機碳通量 (F_{POC})，得到 F_{POC} 和 ^{210}Pb 的通量與來源通量比值 (F/P) $_{Pb-210}$ 間的相關公式為： $F_{POC} (\mu\text{g cm}^{-2} \text{ y}^{-1}) = 0.2 + 472.9 (F/P)_{Pb-210}$ ，南海的半封閉邊緣海盆特性，使得邊緣清除現象 (boundary scavenging phenomenon) 明顯，必須考慮由呂宋海峽流入的深層西菲律賓海水輸入的 ^{210}Pb 。

綜合南海水體中 ^{210}Pb 分布、表層漂浮式沉降顆粒收集器、深層時序沉降顆粒收集器量得的 F_{Pb-210} 結果， ^{210}Pb 在南海的循環可總結如下圖，紅色數字為源 (source) 通量，黑色數字為匯 (sink) 通量，可看出季風轉換造成 ^{210}Pb 通量的變化情形；由西菲律賓海輸入南海的 ^{210}Pb 總通量為 $47 \text{ dpm m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ ，其中部分被顆粒清除增加垂直沉降通量，其餘仍隨海水輸出南海。



同樣地， ^{210}Po 於南海的循環狀況如下圖所示， $F_{\text{Po-210}}$ 的變化大於 $F_{\text{Pb-210}}$ ， ^{210}Po 隨顆粒體沉降過程中的分解再礦化(remineralization)作用的影響，造成其沉降通量隨深度的變化。



References

- Wei, C.-L., Yi, M.-C., Lin, S.-Y., Wen, L.-S., and Lee, W.-H.: Seasonal distributions and fluxes of ^{210}Po and ^{210}Pb in the Northern South China Sea, *Biogeosc.*, 11, 6813-6826, 2014.
- Wei, C. L., Lin, S. Y., Sheu, D. D., Chou, W. C., Yi, M. C., Santschi, P. H., and Wen, L. S.: Particle-reactive radionuclides (^{234}Th , ^{210}Pb , ^{210}Po) as tracers for the estimation of export production in the South China Sea, *Biogeosc.*, 8, 3793-3808, 2011.