

南海時間序列研究：碳化學的研究成果

周文臣

國立臺灣海洋大學 海洋環境與生態研究所

摘要

時間序列研究是探究人為活動如何影響海洋碳循環的不二法門。1998 年在黃天福老師、KK 老師、許德惇老師、夏復國老師、陳仲吉老師、曾鈞懋老師及其他國內外海洋學者們的齊心努力下，我國正式展開了南海時間序列研究計畫，又稱東南亞時間序列研究（SouthEast Asia Time-series Study，簡稱 SEATS）。SEATS 計畫在物理、化學和生物海洋學上以及海洋地質方面均取得了豐碩的研究成果，相關的研究成果主要收錄在 2007 年 Deep-Sea Research II 所出版的 SEATS 專刊 [1]。本文僅就碳化學研究上的科學成果進行介紹。歷經了十多年的努力，SEATS 計畫在碳化學的研究上發現了：(1) 夏季時南海主要應為大氣二氧化碳的「源」；冬季時則為大氣二氧化碳的「匯」。以全年而言，海氣二氧化碳交換的淨通量非常接近零。此外，在聖嬰年時由於冬季季風減弱所引起之垂直混合作用衰減的效應，會造成南海二氧化碳釋放量的減少；相反的，在反聖嬰年時二氧化碳的釋放量則會大幅的增加 [2-4]；(2) 人為二氧化碳的濃度隨著深度的增加而減少，而其穿透深度約為 1200m。整個深度剖面所累積人為二氧化碳之總儲量約為 18 mol m^{-2} ，若將 SEATS 測站之結果套用於整個南海，則南海人為二氧化碳之總儲量約為 0.5 至 0.6Pg C，此量約佔全球海洋人為二氧化碳總儲量的 0.5% [5-6]；(3) 海水酸化的速率約為 $-1.6 \times 10^{-3} \text{ pH unit/yr}^{-1}$ 。此酸化速率與世界上其它時間序列站之觀測結果相仿，顯示大氣二氧化碳增加對海水酸化的影響效應並無明顯的區域性差異 [7]；(4) 外流的南海中層水，可藉由黑潮的傳送與湧升作用，進而削弱東海吸收大氣二氧化碳能力 [8-9]。

溫馨感言

「並不是我偏愛他，沒有人不愛春風的，沒有人在春風中不陶醉的。因為有春風，才有綠楊的搖曳；有春風，才有燕子的迴翔。有春風，大地才有詩；有春風，人生才有夢。」——《在春風裡，陳之藩》

對我而言，KK 老師就是那股和煦的春風。

與 KK 老師的緣分開始於碩士論文口試。這二十多年來，隨著年歲的增長，KK 老師在我心目中的形象也不斷的蛻變。學生時代的我，從 KK 老師身上看到的是科學家的理性與嚴謹；身為人師後，我發現 KK 老師不僅僅是一位執著於追求真理的傑出的科學家，也是一位春風化雨、凡事以身作則的良師益友，同時更是一位風骨嶙峋的知識分子；身為人夫、人父後，又看到了 KK 老師的真情與至性。在生命不同的階段裡，KK 老師彷彿就像一座佇立不搖的燈塔，在人生的汪洋中，不斷指引著我努力和依循的方向。**過去是如此，未來亦會是...**

KK 老師，

您對生命的熱愛，

對工作的熱情，

對國家社會強烈的使命感，

對至真、至善、至美境界無窮盡的追尋，

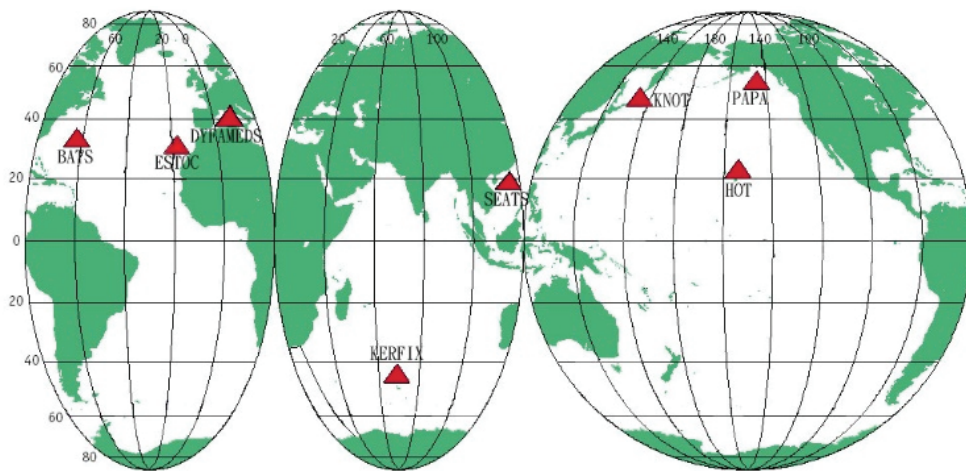
將是我一生學習的典範。

如同四季的更迭，當春回大地後，春風又將滋潤萬物的萌芽與成長...

南海時間序列研究的緣起

海洋時間序列研究主要目的乃在於探究海洋碳循環在不同時間尺度下，自然背景之變化及其控制機制。因為唯有清楚瞭解自然背景的變化，方能將人為活動所引起海洋碳循環的改變與自然變化之背景值加以區辨，進而評估海洋對人為二氧化碳的吸收能力，以及此種能力在人為活動持續影響下，所可能發生的改變，及其對氣候系統所可能產生的回饋效應。

由於全球海域分布極其遼闊，不同海域的外在作用營力（如氣溫、風場及流場...等等），在時空的變化上都存在著顯著的差異。因此，不難預期在不同海域，碳的生地化循環可能存在著截然不同的運作模式，且其時序變化的形態亦可能迥然不同。為了增進對全球海域碳循環隨時序變化的瞭解，在世界各國通力合作下，總共在全球海域建構了八個時間序列測站，這八個時間序列測站分布在不同海域，各有其代表性（圖一）。而其中唯一一個位於低緯度邊緣海域的測站：南海時間序列站，又稱東南亞時間序列站（South East Asia Time-series Study，簡稱SEATS），是由我國負責其運作。SEATS計畫的緣起，是基於身為地球村一員的我們，對地球生命體永續發展的關心與體認，以及配合政府對海洋事務日漸增加的關懷與重視，在國科會（科技部的前身）的資助下，自1998年起由國家海洋科學研究中心（國研院 台灣海洋科技研究中心的前身）開始負責執行的一項整合性研究計畫。

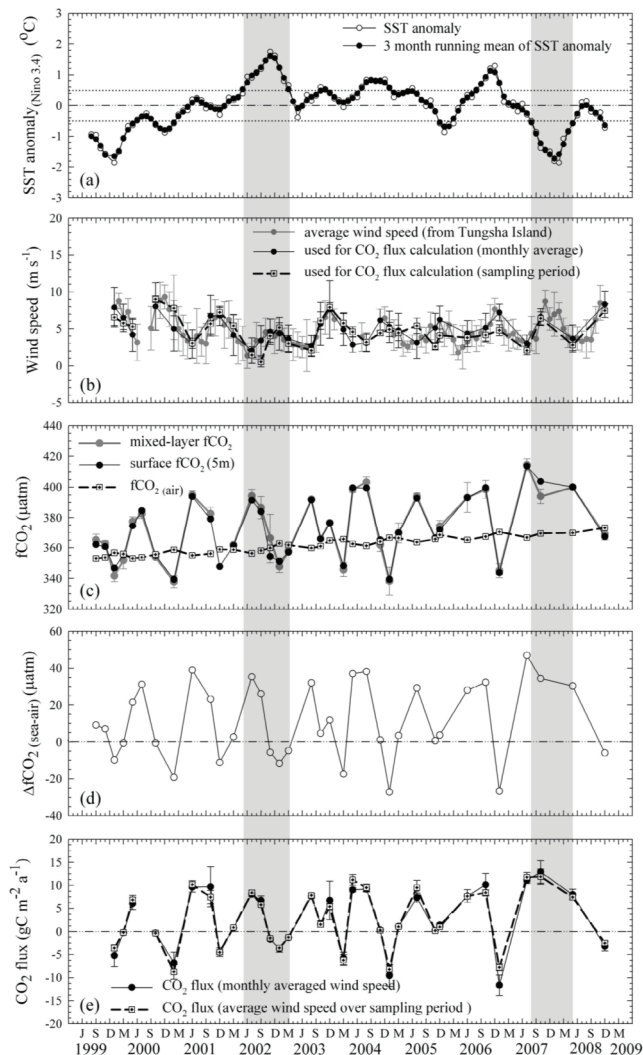


圖一、 全球海洋時間序列測站分布圖。位於南海北部的SEATS測站是唯一位於低緯度邊緣海域的海洋時間序列站。

南海時間序列研究：碳化學的研究成果

(一) 海氣二氧化碳交換通量的季節性變化及其與聖嬰年/反聖嬰年的相關性

1998至2008年的觀測結果顯示，SEATS測站表水在夏季時二氧化碳大多呈現過飽和的狀態，冬季時則多為不飽和的狀態；春、秋兩季則大致呈現海氣平衡的情形。換言之，夏季時南海主要應為大氣二氧化碳的「源」；冬季時則為大氣二氧化碳的「匯」。以全年而言 [2-3]，海氣二氧化碳交換的淨過量非常接近零。此外，在聖嬰年時由於冬季季風減弱所引起之垂直混合作用減弱的效應，會造成南海二氧化碳釋放量的減少；相反的，在反聖嬰年時則會大幅的增加（圖二）[4]。



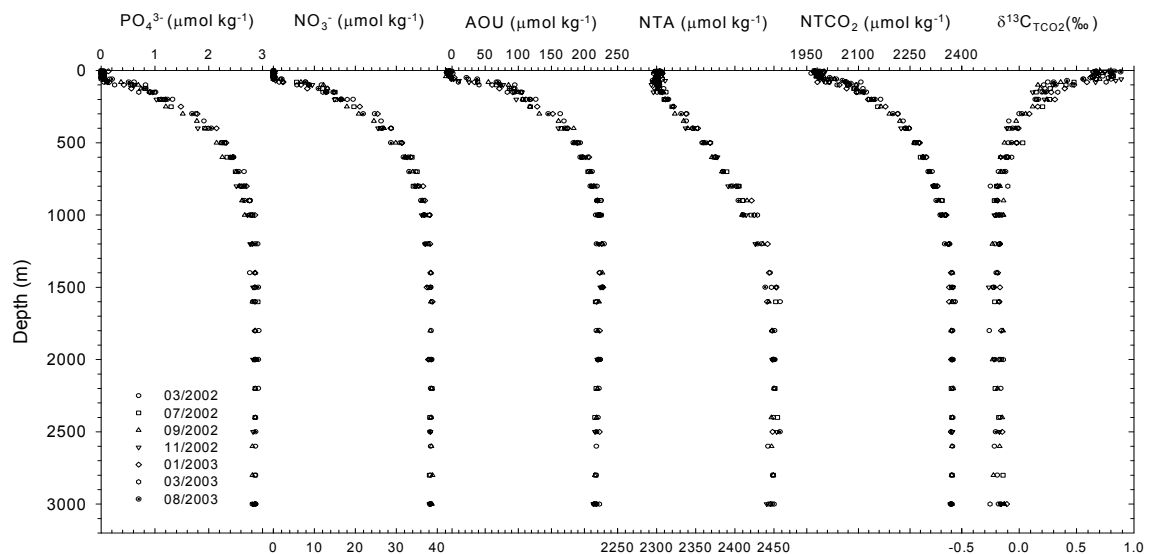
圖二、 1999-2008年SEATS測站表水溫度異常、風速、二氧化碳逸度 (fCO₂)、海

氣二氧化碳逸度差 (ΔfCO₂) 及海氣二氧化碳交換通量時間序列變化圖。

圖取自[4]。

(二) 人為二氧化碳穿透深度及儲量

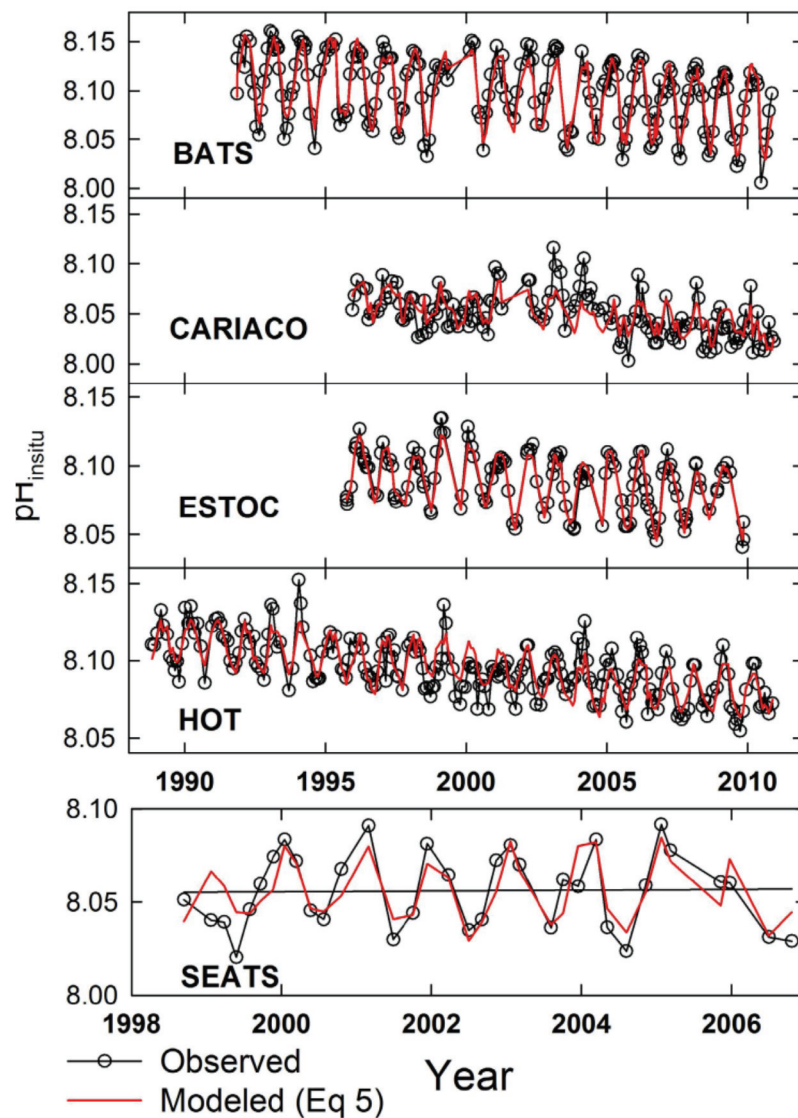
利用SEATS測站碳化學、溶解態無機碳同位素組成 ($\delta^{13}\text{C}_{\text{TCO}_2}$) 及其它相關化學水文參數垂直分布的資料 (圖三), 可針對人為二氧化碳 (anthropogenic CO_2) 穿透深度及儲量進行估算。計算結果顯示, 人為二氧化碳的濃度隨著深度的增加而減少, 而其穿透深度約為1200m [5]。整個垂直剖面所累積人為二氧化碳之總儲量約為 18 mol m^{-2} , 略小於西北太平洋相同緯度海域之儲量。推測這可能是由於南海內部有較強的湧升作用, 降低了其對人為二氧化碳之儲存能力。若將SEATS測站之結果套用於整個南海, 則南海人為二氧化碳之總儲量約為0.5至0.6Pg C, 此量約佔全球海洋人為二氧化碳總儲量的0.5%。顯示南海對人為二氧化碳之儲存能力亦低於全球海洋的平均值。推測可能亦與南海內部較強的湧升作用有關 [5-6]。



圖三、 SEATS測站磷酸鹽 (PO_4^{3-})、硝酸鹽 (NO_3^-)、表觀溶氧消耗量 (AOU)、鹽度標準化鹼度 ($\text{NTA}=\text{TA} \times 35/\text{salinity}$)、鹽度標準化溶解態無機二氧化碳 ($\text{NTCO}_2=\text{TCO}_2 \times 35/\text{salinity}$) 及其碳同位素組成 ($\delta^{13}\text{C}_{\text{TCO}_2}$) 垂直分布圖。

(三) 海水酸化的速度

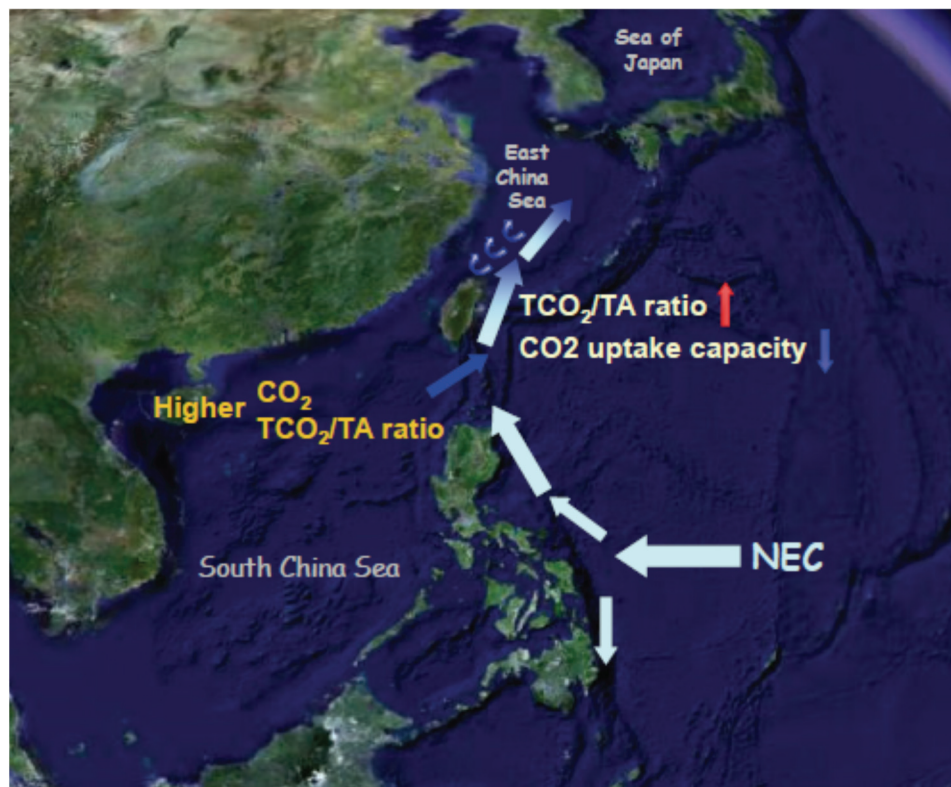
人為活動所排放的二氧化碳，其實並沒有全部累積在大氣當中，透過碳的循環，其中部分的碳會被海洋所吸收。海洋吸收人為二氧化碳後，會導致海水化學特性發生改變（其中之一是海水的酸度會逐漸增加），這個現象稱為海洋酸化。可信的海水酸化速度唯有透過長期系統性的連續觀測方能求得。根據1998至2006年SEATS測站的觀測數據，再扣除全球暖化的影響效應後，所推得之海洋酸化速率約為 $-1.6 \times 10^{-3} \text{ pH unit/yr}^{-1}$ [7]。此酸化速率與世界上其它時間序列觀測站所得之結果相仿，顯示大氣二氧化碳增加對海水酸化的影響效應並無明顯的區域性差異。



圖四、 全球各主要海洋時間序列測站表水pH值之時序變化圖。圖取自[7]

（四）外流的南海中層水對東海吸收大氣二氧化碳能力的影響

南海是一個半封閉性的邊緣海，而呂宋海峽是唯一夠深且夠寬的通道，可以容許南海水與外洋水進行交換。而呂宋海峽垂直的流況，基本上是呈現“三明治”式的結構：表層水和深層水是由西菲律賓海流入南海，中層水則是向外流出南海。而這股向外流出的中層水正好可以扮演類似輸送帶的角色，將南海所吸收的二氧化碳向外輸送。藉由比較分析了SEATS測站、呂宋海峽和西菲律賓海碳化學參數的垂直分布情形可發現，外流的南海中層水的確可以伴扮演大陸棚幫浦 (continental shelf pump) 的角色，將南海內部所吸收的二氧化碳向外洋輸出[8]。此外，外流的南海次表層水會使得黑潮水的TA與DIC比值降低，而此值的高低與海水吸收大氣二氧化碳的能力呈正相關，故會降低其對大氣二氧化碳吸收能力。這個影響可以隨著黑潮的流動持續向北傳遞，當這股受南海次表層海影響的黑潮水湧升上東海陸棚時，可能會削弱東海對大氣二氧化碳的吸收能力（圖五）[9]。



圖五、外流的南海中層水對東海吸收大氣二氧化碳能力影響之示意圖。

參考文獻

- [1] Wong, G.T.F., Ku, T.-L., Mulholland, M., Tseng, C.-M., Wang, D.-P. (Eds.), 2007. The SouthEast Asian Time-series Study (SEATS) and the biogeochemistry of the Northern South China Sea, *Deep Sea Research Part II*, 54, 1433-18544.
- [2] Chou, W.-C., Sheu, D.D., Chen, C.T.A., Wang, S.-L., Tseng, C.-M., 2005. Seasonal variability of carbon chemistry at the SEATS time-series site, northern South China Sea between 2002 and 2003, *Terrestrial, Atmospheric and Oceanic Sciences*, 16, 445-465.
- [3] Tseng, C.-M., Wong, G.T.F., Chou, W.-C., Lee, B.-S., Sheu, D.D., Liu, K.-K., 2007. Temporal variations in the carbonate system in the upper layer at the SEATS station. *Deep-Sea Research II*, 54, 1448-1468.
- [4] Sheu, D.D., Chou W.-C., Wei, C.-L., Hou, W.-P., Hsu, C.-W., Wong, G.T.F., 2010. Influence of El Nino on the sea-to-air CO₂ flux at the SEATS time-series site, northern South China Sea. *Journal of Geophysical Research*, 115, C10021, doi:10.1029/2009JC006013.
- [5] Chou, W.-C., Sheu, D.D., Lee, B.-S., Tseng, C.-M., Chen, C.T.A., Wang, S.-L., Wong, G.T.F., 2007. Depth distributions of alkalinity, TCO₂, and $\delta^{13}\text{C}_{\text{TCO}_2}$ at SEATS Time-series site in the northern South China Sea, *Deep-Sea Research II*, 54, 1469-1485.
- [6] Chen, C.T.A., Wang, S.-L., Chou, W.-C., Sheu, D.-D., 2006. Carbonate chemistry and projected future changes in pH and CaCO₃ saturation state of the South China Sea, *Marine Chemistry*, 101, 277-305.
- [7] Lui, H.-K., Chen, C.T.A., 2015. Deducing acidification rates based on short-term time series, *Scientific Reports*, 5:11517, doi:1038/srep11517.
- [8] Sheu, D.D., Chou W.-C., Chen, C.T.A., Wei, C.-L., Hsieh, H.-L., Hou, W.-P., Dai, M., 2009. Riding over the Kuroshio from the South to the East China Sea: Mixing and transport of DIC, *Geophysical Research Letters*, 36, L07603, doi:10.1029/2008GL037017.
- [9] Chou, W.-C., Sheu, D.D., Wen, L.-S., Chen, C.-T.A., Yang, Y., Wei, C.-L., 2007. Transport of the South China Sea subsurface water outflow and its influence on the carbon chemistry of Kuroshio waters off southeastern Taiwan, *Journal of Geophysical Research*, 112, C12008, doi:10.1029/2007JC004087.