

[研究成果報導]

颱風是碳埋藏（匯）的得力助手？

中央研究院環境變遷研究中心 李宗祐 高樹基

一、總結

從 2004 年侵台的敏督利颱風所引發濁水溪洪水的觀測，發現有 4.66×10^5 公噸的顆粒有機碳被河流夾帶輸出，可能會埋藏（碳匯）於深海中（相當於 10.09×10^5 公噸的二氧化碳），另外，約有 1.65×10^8 莫爾（約 7.26×10^3 公噸）的二氧化碳消耗於矽酸鹽風化的過程，而被河流帶出進入海洋[1]。研究結果顯示這種短期劇烈天氣現象可能驅動有機碳在海洋的埋藏機制。然而，颱風引起的山崩是這個輸出物質來源的主要貢獻者，山崩的過程卻同時也把植被移除，切斷了光合作用吸收路徑，且將原先儲存於土壤的有機碳暴露於大氣，引起氧化（碳源）。另外，到底這些河流夾帶的有機碳素，進入海洋之後，是否真的抵達海底，離開短期的系統，或是在傳輸的過程中被再次氧化返回大氣，也還未知。近年研究指出，西太平洋颱風強度有持續增加的趨勢，這樣大氣所引起的淨效應是正或是反回饋，還需要投入更多研究。

二、簡介

若地球歷史以二十四小時為基準，人類的出現只是午夜前最後的幾秒鐘，工業革命更在最後數十毫秒，便讓大氣中的二氧化碳暴增了約 1/3，前所未有快速而巨幅的干擾，改變大自然原有的碳循環，測試著大地之母的承載能力，也啟動了各種的反饋機制，成了人類午夜的夢魘。

石化能源的產出量（源）是很清楚而精準的，石化燃料排放，與陸地、海洋的吸收（匯）所產生的差額將累積在大氣中，然而過去數十年間的源與匯卻產生了差額（迷失碳，missing carbon），原因到現在還懸而未決。顯然，人類對母親的瞭解太膚淺。深入瞭解並重新評估碳素在地表的循環，為當務之急，也是解決全球暖化問題的重要基礎。

大氣、海洋與陸地之間，有著碳素的流通，以陸生植物與海洋藻類這些基礎生產者而言，二氧化碳的增加，產生了肥化效應，增加了吸收（匯），然而這些吸收的有機物質與儲存，大部分是短期的，會被異營生物消耗呼吸，釋放回到大氣（源）。各式各樣的源與匯在地表系統交錯，真正可以較長期儲存的匯，才能夠有效降低大氣的二氧化碳濃度，反饋到碳循環。

最近的研究顯示，人類引起的全球增溫很可能驅動了劇烈天氣，導致西太平洋的颱風強度逐漸增加。西太平洋低緯度區域遍布小島，位於颱風路徑，受到衝擊最為顯著。這些島嶼縱然面積小（<4%地表覆蓋），然為數眾多，更因為其本身的脆弱地質條件、陡坡與小儲存面積，強降雨引起的沖刷與洪水夾帶，引起大量的陸地物質輸出，以沈積物與有機碳而言，可佔全球 30% 的通量（圖一）[2]，以單位面積產出量來算，更是高居世界之冠。

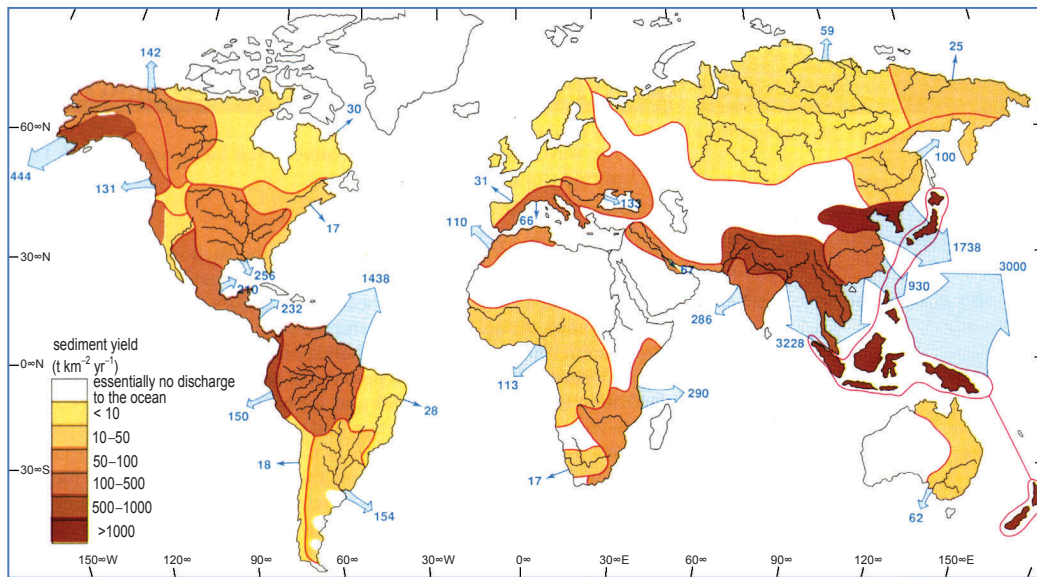
這樣一個陸海交換的熱點，對於颱風降雨的增強非常敏感，這些大量輸出的陸源物質含有來自於陸地生態系統所固定的碳素，如果成功送進深海將有助於碳匯，同時，岩石風化所吸收的二氧化碳，也會隨之進入海洋。

三、颱風的貢獻？

颱風對於居住在台灣的人，多半只有聯想到災害。然，颱風帶來的雨水卻是重要的水資源，對於水量，佔全年~40%，對沈積物或是有機碳素輸出，颱風引起的輸出更可高達 90%。然而這樣一個自然力，對於流域生態系統的碳以及相關元素的收支所造成的影響，是中研院環境變遷研究中心團隊的主要研究課題之一。

四、研究地點與方法

研究中選擇以濁水溪作為觀察敏督利颱風侵台期間水質變化的據點，濁水溪流域位於中央



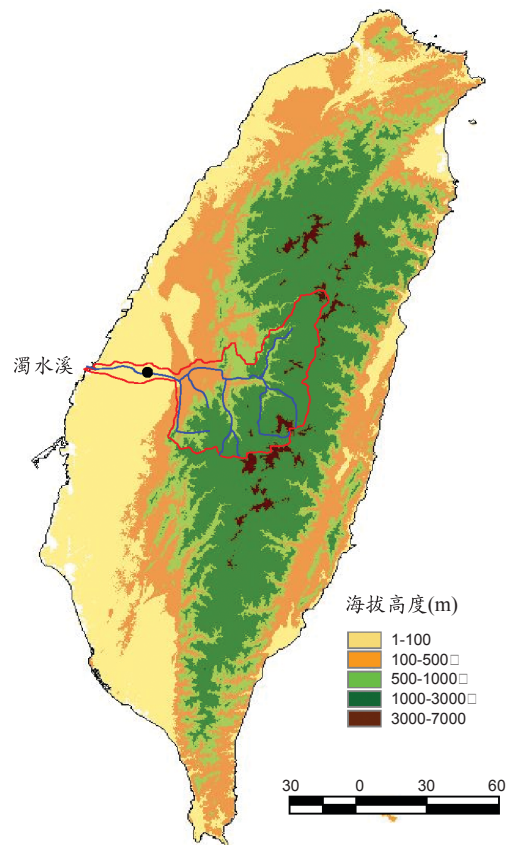
圖一 全球沈積物輸出量與單位面積產出。箭頭大小代表通量。箭頭前端數值代表單位面積產出量，以顏色區分為 7 個等級[2]

山脈西側，位在彰化、南投、及雲林三縣市境內，集水面積為 3,150 平方公里，集水區內地質構造主要由易破碎的第三紀中新世、上新世、低等變質的沈積岩及第四紀沖積層所組成[3]，年輕而脆弱的地層，容易受到暴雨事件的侵蝕，將泥砂帶至河川，近年來已經有許多研究在探討台灣河川的輸砂，不過這些研究大都著重在颱風事件究竟能產出多少的輸砂量[4,5,6]。較少著重於生態系統碳素輸出或對地化系統的影響。

爲了瞭解隱藏於洪水中的秘密，本研究團隊於颱風登陸期間(2004/7/1~7/5)在離濁水溪出海口上游約 50 公里處的彰雲大橋上(圖二)，以每三小時的採樣頻率採集河水樣本，採集的水樣經由過濾方式，分爲顆粒相及溶解相的物質，顆粒相的樣本再經由烘乾、秤重得到懸浮物質重量(再除以過濾水體積，即輸砂濃度)，再分析顆粒物質含有的有機碳含量；溶解相的樣本則透過 ICP-OES 儀器量測矽的濃度。每三個小時的水質數據，對應水利署公告之時流量，兩者的乘積則分別表示河川的輸砂量、顆粒物有機碳的輸出量、及矽元素的輸出量，對時間累加則爲颱風期間的總體輸出。

五、颱風敏督利的威力

敏督利颱風發源於 2004 年 6 月 23 日在關島附近西太平洋形成的熱帶性低壓，並於 7 月 1 日



圖二 濁水溪流域及採樣位置圖

由台灣東南方登入，颱風侵台 96 小時期間濁水溪集水區內五個雨量站平均降雨爲 650mm，並在 7 月 3 日上午 2 點及 7 月 4 日上午 9 點達到最高降雨強度，分別爲 28mm/h 及 76mm/h [7]，而

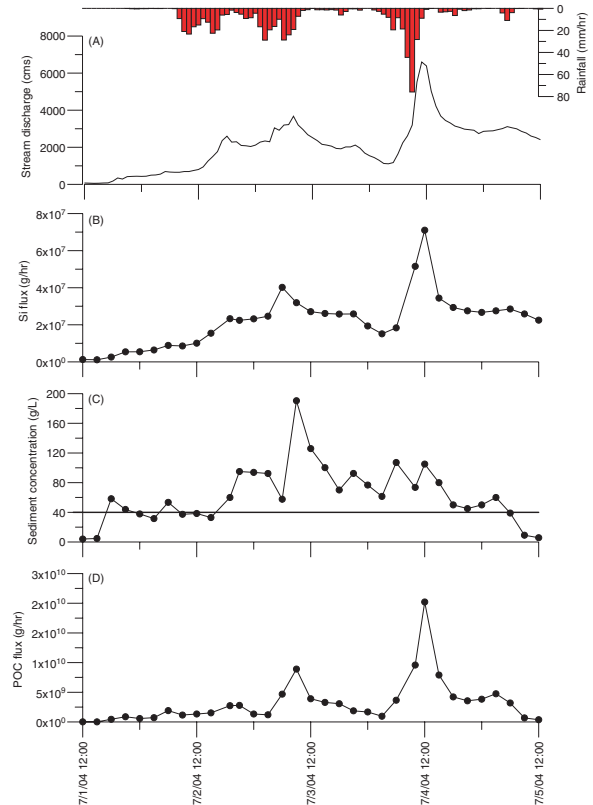
濁水溪流量在 7 月 4 日上午 11 點達到最高值，為 $6,600 \text{ m}^3/\text{s}$ 。

六、颱風的輸砂量與埋藏的碳含量

敏督利颱風侵台的 96 小時間，計算所得濁水溪的輸砂量約為 61.4 百萬噸，此事件所造成的輸砂量雖遠不及 1996 年賀伯颱風的 130 百萬噸，及集集大地震之後 2001 年特洛伊颱風所帶走的 175 百萬噸，那是因為上述兩者颱風在濁水溪造成的洪峰流量分別為 $14,800$ 及 $28,000 \text{ m}^3/\text{s}$ ，遠比敏督利的 $6,600 \text{ m}^3/\text{s}$ 來得高，但此次輸砂量卻遠高於同樣為山地集水區的波多黎各（美國屬地，位於西印度群島東部的島嶼）在面對 Georges 颶風所產生的輸砂量（2.4 百萬噸，洪峰流量變化範圍為 22 到 $2,140 \text{ m}^3/\text{s}$ ），這是目前唯一知道，在其他地理位置，因颶風/颱風所造成輸砂量[8]。

由於颱風觀測期間溪水的濁度很高（懸浮顆粒濃度多大於 40 g/l ，最高接近 200 g/l ，圖三），當懸浮顆粒濃度高於 40 g/l ，會使得淡水的密度接近 1.04 g/ml ，高於海水的密度（ 1.034 g/ml ），造成匯入海洋的洪水形成所謂的濁度超密流（hyperpycnal flow），直接注入海底而非漂浮在海面上，而後隨著海流的推動堆積在台灣附近的海槽中。敏督利颱風期間，96 小時中約有 80% 的時間，濁水溪的洪水便是以濁度超密流的形式注入海中。由於颱風劇烈的天氣（圖四），使得關於濁度超密流在河流以及海洋的觀測資料，非常缺乏。

經分析河川輸砂中顆粒物有機碳含量，計算得出颱風期間顆粒物有機碳的輸出量約為 5.00×10^5 噸，除以集水區面積平均後，其顆粒物有機碳的單位面積產出量約等於 159 噸每平方公里，此單一颱風的貢獻量遠高於很多在紐西蘭高顆粒物有機碳輸出河川之年貢獻量 [10,11,21]（表二）。近期研究指出，紐西蘭及台灣河川在顆粒物有機碳的輸出遠高於地球上任何一條河川，單單敏督利颱風期間，即約有 4.66×10^5 噸，也就是 93% 的顆粒物有機碳，是和著泥砂以濁度超密流的形式注入海中。此顆粒物有機碳的輸出數值仍為一保守估計值，因為(1) 研究中僅計算懸浮的輸砂量，一般認為總輸砂量的 30% 是以河床載的形式輸出[4]，(2) 研究中



圖三 (A)敏督利颱風侵台 96 小時期間降雨主體圖及流量歷線，小時流量由水利署提供於彰雲大橋之觀測資料，降雨量由濁水溪流流域境內五個雨量平均而得；(B)計算之砂輸出通量；(C)觀測河川中之懸浮顆粒濃度，橫線（濃度= 40 g/l ）表示發生濁度超密流(hyperpycnal flow)的臨界濃度；(D)計算之顆粒物有機碳的輸出量



圖四 研究團隊於敏督利颱風期間於濁水溪流流域採樣之情形

並沒有將漂流的殘枝枯葉列入計算，(3) 研究中採用了較保守的估算輸砂量方法。

表一 因矽酸鹽風化而產生的矽酸鹽產出量以及二氧化碳消耗量

地點（計算所用之時間尺度）	H ₄ SiO ₄ 產出量(t km ⁻²)	CO ₂ 通量(10 ³ mol km ⁻²)
敏督利颱風（96 小時）	0.73	52.5
其他地區（年產出量）		
紐西蘭北島_東角地區 ^[12]	2.4 - 15.1	170 - 1074
紐西蘭南島_南阿爾卑斯山 ^[12]	4.2 - 13.3	296 - 946
安地斯山脈 ^[11]	—	220 - 1000
喜馬拉雅山 ^[11]	—	100 - 320

表二 顆粒物有機碳 (POC) 產出量

地點（計算所用之時間尺度）	POC 輸出量 (10 ⁶ g km ⁻²)
敏督利颱風（96 小時）	159
其他地區（年產出量）	
紐西蘭北島_東角地區 ^[9,10]	1.3 - 222
紐西蘭南島_南阿爾卑斯山 ^[9,10]	1.4 - 168
台灣蘭陽溪 ^[21]	53

七、矽酸鹽風化消耗二氧化碳

敏督利颱風期間，濁水溪溶解相矽的輸出量約為 2.32×10^3 噸，集水區每平方公里的產出量約為 0.74 噸，根據 Edmond and Huh 於 1997 年^[11]所提之計算方法，因矽酸鹽風化造成的二氧化碳消耗量，可藉由兩倍的矽產出量得到，即 52.5×10^3 mol/km²，此單一事件的數量約佔紐西蘭南、北兩島年二氧化碳消耗量的 31%^[12]（表一），支持了大部分因矽酸鹽風化而得之溶解相矽在颱風期間輸出的想法，雖然研究中採樣的設計不能用以立即分辨矽是從地下水抑或是地表漫地流而來，卻提供了整體矽酸鹽沈積岩風化量及在颱風期間的輸出量，除此之外，在其他以大量火山岩覆蓋的高山集水區，其矽的輸出量勢必更高。

八、輸砂的命運及對碳埋藏的助益

暴雨狀況下，高山集水區河川往往能在短時間內產生極高的流量，加上集水區內沈積物的來源充足，為產生濁度超密流的必要條件，濁度超密流所夾雜之泥砂、顆粒物有機碳等物質將直接

被注入海底沈積，或是隨著濁度超密流的前進繼續沖刷海床，由於追蹤不易，引起許多學者的高度興趣^[5,6,13]。曾有航次前往外海調查敏督利颱風過後濁水溪外海海床沈積的情形，結果由海床沈積物的 C/N 及 $\delta^{13}C$ 發現均為陸源有機物^[14]，使得濁度超密流直接注入海底的想法更具說服力，也隱含了透過濁度超密流埋藏陸源有機物的可能性。

在夏季時，從濁水溪或是其他台灣西北部河川所注入之濁度超密流，一般相信其沈積物會隨著向北流動的洋流在台灣海峽內移動(Lee and Chao, 2003)，沿著台灣海峽海床可以發現不連續的沈積帶就是最好的證明^[14]，最終則會移動至台灣北端，進入沖繩海槽^[5]，雖然學者還未能全盤瞭解此部分因濁度超密流產生沈積物之最終命運，但事實是台灣東北方、東部、西南方河川均流入海底盆地（分別流入沖繩海槽、花東海盆、及南海海盆），支持了快速傳輸及隨後沈積物埋藏的想法。從水利署全台灣砂測站長期的紀錄來看(1970–1998)，顯示除了濁水溪外，其他另外至少九條河川都曾經在集集大地震前發生過接近或甚至濁度超密流的現象^[15]，這樣的紀錄顯示研究中在濁水溪觀測到的現象，包含濁度超密流的發生，和潛在顆粒物有機碳埋藏的機制，是可以被擴大解釋到其他河川的。

為了證明敏督利颱風所引發的碳埋藏和二氧化碳消耗量在全球尺度上面的重要性，我們將在此事件中所得到的相關數值，與過去所建立全球尺度的年總量作比較，敏督利颱風因矽酸鹽風化所消耗之二氧化碳，約佔一年全球消耗量 0.058 Gt^[16]的 0.003%，雖然相較於全球尺度而言，此數值顯得微不足道，但仍表示有大量的

Ca 及 Mg 從濁水溪集水區內發育未完全的矽酸鹽質沈積岩輸出至海洋；然而，濁水溪在敏督利颱風期間顆粒物有機碳的輸出卻佔了全球三角洲沈積系統年埋藏量的 0.95%，雖然此計算是假設所有輸出的顆粒物有機碳均被有效埋藏，但以每年約有四個颱風侵襲台灣來計算[17]，0.95% 此數值應該不會離真實情況太遠。再者，雖然沈積物因為會在台灣海峽海床上的移動，未必提供了良好碳埋藏的環境，但研究中所有的計算僅包含了台灣一條河流在一個事件中的輸出，並未納入從台灣東北、東部、及西南河川的輸出，從這些區域的輸出亦有可能在濁度超密流發生時繞過近海岸系統而直接埋藏，這些區域的台灣河川每年約會輸出約 200 百萬噸的輸砂量[18]。

研究中提及大量的顆粒物有機碳輸出，伴隨著颱風引起洪水中大量的泥砂，提供了大量埋藏陸源有機碳的必要條件，此濁度超密流效應伴隨著矽酸鹽風化對二氧化碳之消耗，展示了颱風此類型短期、不定期的氣候型態在高山集水區，特別是高海拔的大洋洲及其他地震活動頻繁的地區，於調節地質時間尺度之地球氣候所扮演的重要角色[9,12]，近年來的研究提出，由於全球暖化的影響[19]，颱風的強度及季風的頻率都可能因此增加[20]，也會因此引發大洋洲島嶼更大量的顆粒物有機碳輸出、更多因矽酸鹽風化的二氧化碳消耗、及更多陸源有機碳的埋藏等。因此，亦可以合理的推斷，在其他地理環境類似的地區，像是中亞、東亞、或是像加勒比及中美洲，也都會受到強度更大且頻率越頻繁的降雨事件（像是颶風/颱風或季風活動）影響。研究中所提及濁水溪因敏督利颱風所引起的流量、河水中溶解相矽的濃度、顆粒物有機碳及輸砂等現象，暗示我們颱風活動的增加將會提高矽酸鹽風化的速率，增大河川輸砂量，可能潛在增加了顆粒物有機碳的輸出與埋藏。

然而，這樣的研究，仍缺乏對於生態系統的計算，因為大規模崩塌，多半移除了植被，切斷光合作用的路徑，且將原先儲存於土壤的有機碳暴露於大氣，引起氧化，將碳素返還大氣。

另外，到底這些河流夾帶的有機碳素，進入海洋之後，是否真的抵達海底，離開短期的系統，或是在傳輸的過程中被再次氧化，也還未知。縱然西太平洋颱風強度有持續增加的趨勢，

這樣大氣所引起的淨效應是正或是反回饋，還需要投入更多研究。

參考文獻

- [1] S. T. Goldsmith, A. E. Carey, W. B. Lyons, S. J. Kao, T. Y. Lee and J. Chen, *Geology*, **36**, 483 (2008).
- [2] J. D. Milliman and J. P. M. Syvitski, *J. Geol.*, **100**, 525 (1992).
- [3] C. S. Ho, An introduction to the geology of Taiwan: Taipei, Taiwan, Ministry of Economic Affairs, p. 192 (1988).
- [4] S. J. Dadson, N. Hovius, H. G. Chen, W. B. Dade, M. L. Hsieh, S. D. Willett, J. C. Hu, M. J. Horng, M. C. Chen, C. P. Stark, D. Lague and J. C. Lin, *Nature*, **426**, 648 (2003).
- [5] J. D. Milliman and S. J. Kao, *J. Geol.*, **113**, 503 (2005).
- [6] S. J. Dadson, N. Hovius, S. Pegg, W. B. Dade, M. J. Horng and H. Chen, *J. Geophys. Res.*, **F04016**, doi:10.1029/2004JF000244 (2005).
- [7] Water Resources Agency, Hydrological year book of Taiwan, Republic of China, 2004: Taipei, Ministry of Economic Affairs, p. 445 (2004).
- [8] A. G. Warne, R. M. T. Webb and M. C. Larsen, Water, sediment, and nutrient discharge characteristics of rivers in Puerto Rico, and their potential influence on coral reefs, *U.S. Geological Survey Scientific Investigations Report 2005-5206*, p. 58 (2005).
- [9] W. B. Lyons, C. A. Nezat, A. E. Carey and D. M. Hicks, *Geology*, **30**, 443, doi: 10.1130/0091-7613(2002)030<0443:OCFTTO>2.0.CO;2 (2002).
- [10] A. E. Carey, C. B. Gardner, S. T. Goldsmith, W. B. Lyons and D. M. Hicks, *Geophys. Res. Lett.*, **32**, L15404, doi: 10.1029/2005GL023159 (2005).
- [11] J. M. Edmond and Y. Huh, *Chemical weathering yields from basement and orogenic terrains in hot and cold climates*, in Ruddiman/W.F., (Ed.), *Tectonic uplift and climate change*,

- New York, Springer, p. 329-351 (1997).
- [12] W. B. Lyons, A. E. Carey, D. M. Hicks and C. A. Nezat, *J. Geophys. Res.*, **110**, F01008, doi: **10.1029/2003JF000088** (2005).
- [13] T. Mulder and J. P. M. Syvitski, *J. Geol.*, **103**, 285 (1995).
- [14] J. D. Milliman, S. Lin, S. J. Kao, J. P. Liu, C. S. Liu, J. K. Chiu and Y. C. Lin, *Geology*, **35**, 779 (2007).
- [15] J. D. Milliman and S. J. Kao, *J. Geol.*, **116**, 431 (2008).
- [16] J. Gaillardet, B. Dupré, P. Louvat and C. J. Allègre, *Chem. Geol.*, **159**, 3-30, doi: **10.1016/S0009-2541(99)00031-5** (1999).
- [17] C. C. Wu and Y. H. Kuo, *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, **80**, 67, doi: **10.1175/1520-0477(1999)080<0067:TATCUA>2.0.CO;2** (1999).
- [18] S. J. Kao, T. Y. Lee and J. D. Milliman, *Terrestrial, atmospheric, and oceanic sciences*, **16**, 653 (2005).
- [19] K. Emanuel, *Nature*, **436**, 686, doi: **10.1038/nature03906** (2005).
- [20] B. N. Goswami, V. Venugopal, D. Sengupta, M. S. Madhusoodanan and P. K. Xavier, *Science*, **314**, 1442, doi: **10.1126/science.1132027** (2006).
- [21] S. J. Kao and K. K. Liu, *Limnol. Oceanogr.*, **41**, 1749 (1996).