

# 從黑潮邊緣海水交換作用到東海長期觀測與研究

龔國慶

國立臺灣海洋大學 海洋環境與生態研究所

## 摘要

海洋科學是一門需要整合跨次領域團隊合作的科學。1989 年劉康克與莊文思教授等人合力推動了臺灣首次的「黑潮邊緣海水交換作用」整合計畫(簡稱 KEEP; Kuroshio Edge Exchange Process)，從此開啟了臺灣海洋科學整合研究之門。KEEP 歷經四期後轉型為「東海長期觀測與研究」整合計畫(簡稱 LORECS; Long-term Observation and Research of the East China Sea)並延續至今。研究範圍從臺灣東北海域的東海南部逐步擴展至整個東海，研究方式也從「瞎子摸象」演進至「機制研究」。這段海洋科學研究的華路藍縷是海洋科學界先進們的共同記憶。在 KK 為臺灣海洋科學奮鬥的歷程中，我們發現了(1)臺灣東北外海的黑潮湧升作用是一個常年且持續的現象唯強弱有別；(2)春天時黑潮湧升流區浮游植物數量的劇烈變動是受黑潮主軸入侵陸棚的行為所控制；(3)亞熱帶東海海洋基礎生產力的季節性變化僅在全年長江流量最高的夏天發生高峰；(4)長江三峽大壩的截流將造成東海海洋基礎生產力降低；(5)長江發生毀滅性洪水的時機卻可提升東海海洋基礎生產力。

## 溫馨感言

我是劉康克教授(我們都稱呼他為 KK)的第一個博士班學生，我要自豪的告訴各位，我是他心中最疼愛也是最引以為傲的學生(我相信我的師弟妹們都會這樣告訴大家)。我今天所擁有的家庭幸福與人生歷練，全然是待我如同天父的 KK 所賜。1989-1992 學生時代，我的另外一位恩師白書禎教授引領我進入台大海洋研究所，教我蹲馬步(海洋化學分析技術)，KK 則引領我進入海洋科學研究之門。KK 指導學生、提攜後進、爭取國際曝光，不遺餘力，亦從不居功。從他身上學到的就是那「燃燒自己、點亮別人」的「使命感」。這份無私無我的使命感，正是促使我從畢業至今，永遠以推動海洋科學整合研究與積極服務海洋社群為奮鬥的目標。知恩應圖報，但我卻仍然掉入「子欲養而親不待」的深淵，這將是我終身的遺憾，盼望能以臺灣現今在東海的研究成果居世界之冠，回報您的教養之恩。

## 前言

海洋具有緩和氣候與資源蘊育的功能，海洋裡的海洋科學現象及其變動攸關人類的永續生存與發展。然而，海洋科學是跨學科甚至跨領域的科學，需透過不同專業與資源的整合研究，才能全盤瞭解並進一步達到預測的能力。也因為如此，在 1989 年時劉康克(KK)與莊文思教授共同推動了臺灣首次的海洋科學整合研究計畫，獲得當時的國家科學委員會的計畫補助，並於 1990 年開始以臺灣北部的東海南部海域為研究場域，進行「黑潮邊緣海水交換作用整合研究計畫(Kuroshio Edge Exchange Processes, 簡稱 KEEP)」°KEEP 歷經 3 期共 10 年(1990.8~2000.7)。在 KEEP 執行期間亦同時執行了臺灣首度與俄羅斯合作，在 1992 年的夏天進行中俄邊緣海合作採樣研究計畫「Kuroshio Edge Exchange Processes Marginal Seas Study, 簡稱 KEEP-MASS」。KEEP 結束後由我繼續推動「東海長期觀測與研究整合計畫(Long-term Observation and Research of the East China Sea, 簡稱 LORECS)」, LORECS 歷經 4 期共 12 年(2000.8~2012.7) , 研究範圍也從東海南部擴展至整個東海。

我於 1989 年 9 月進入台大海洋研究所博士班就讀，成為白書禎與劉康克教授共同指導的第一位博士班學生，因此有幸參與臺灣首度的海洋科學整合研究計畫。攻讀博士學位期間，白書禎教授教導我做好海水分析化學，特別是以光度法分析溶氧量(Pai et al., 1993)以及營養鹽分析的打底功夫，KK 教導我海洋科學現象與機制的研究。從 KEEP 到 LORECS, KK 以推動者、執行者、參與者的角色，一直伴隨我的學術生涯發展。他關懷學生如同天父且從不居功，對國家海洋科學的發展更是具有強烈的使命感，這也正是他促使臺灣現今在東海的研究成果可以名列國際前茅的原因。KK 的驟逝不但我們不捨，國際學術組織成員更是惋惜，足見 KK 的影響力遍及國際。以下謹將從 KEEP 到 LORECS 整合計畫執行期間，在 KK 指導下的重要研究成果進行擇要回顧，盼藉此機會與海洋科學界的年輕後進們共同來分享。

## KEEP 研究成果

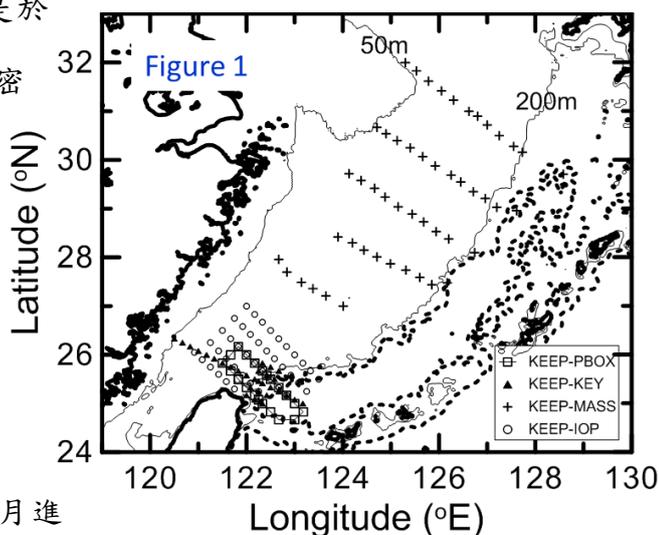
KEEP 的整合研究共歷經 10 年，共有 4 次的海洋聯合觀測。第一次是於 1990.8~1991.7 期間每月一次的 KEEP-PBOX 測站(Fig. 1 正方形符號)；第二次是於 1991.10~1992.7 期間每季一次的 KEEP-KEY 採樣測站(Fig. 1 三角形符號)；第三次是於 1992.7~1992.8 月期間與俄羅斯合作在東海 KEEP-MASS 的採樣測站

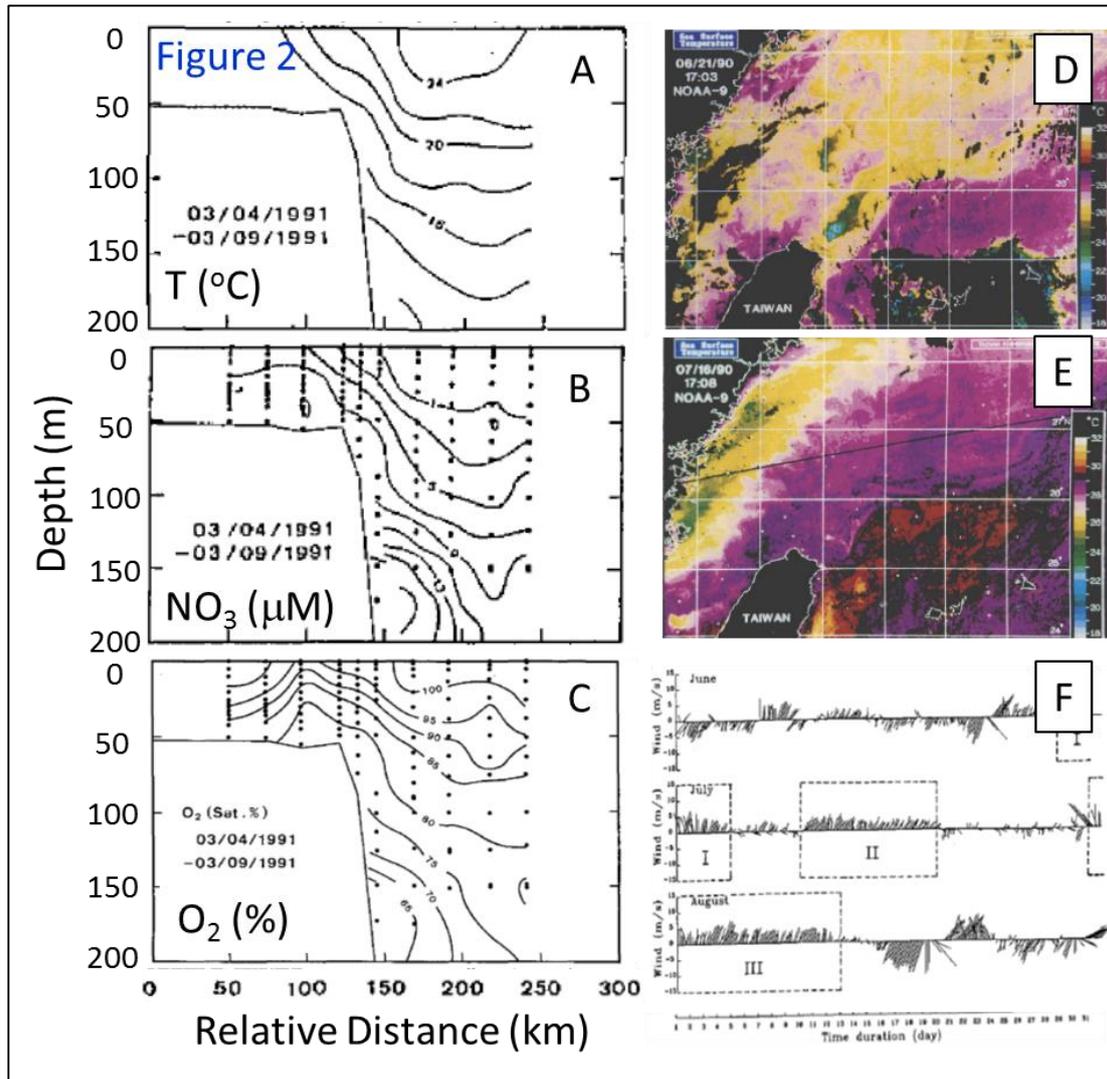
(Fig. 1 十字形符號)；第四次是於 1992.9~1993.5 的春秋兩季進行密

集航次在 KEEP-IOP 的採樣測站(Fig. 1 空心圓符號)。以下就 KEEP 階段完成之重要研究成果簡述如下。

### (一) KEEP-PBOX 研究成果

KEEP-PBOX 的航次是每個月進行一次的探測(Fig. 1)，從各月份取得之海水水文化學資料，首度證實臺灣東北海域的黑潮湧升是一個常年且持續存在的現象。在非冬天時期，可從受湧升影響區域之表面水溫低於周邊海水的結果證實。在冬天時期無法從溫度及硝酸鹽濃度觀測到湧升(Fig. 2A,2B)，但是可以從實測溶氧未飽和的情形證實湧升仍然存在(Liu et al., 1992; Fig. 2C)。另外，我們也發現在夏天時，黑潮湧升流區的低溫跡象在強勁且持續西南季風的吹送下，會被具有高溫低鹽的臺灣海峽水所掩蓋(龔國慶等, 1992; Fig. 2D-2F)。黑潮常年的持續湧升可將富含營養鹽的次表層海水輸送至有光層水體，是形成湧升海域擁有豐富漁業資源的基礎，我們也進一步發現湧升海域的營養鹽濃度，可以經由彭佳嶼的月平均氣溫推算得到(Gong et al., 1995)。

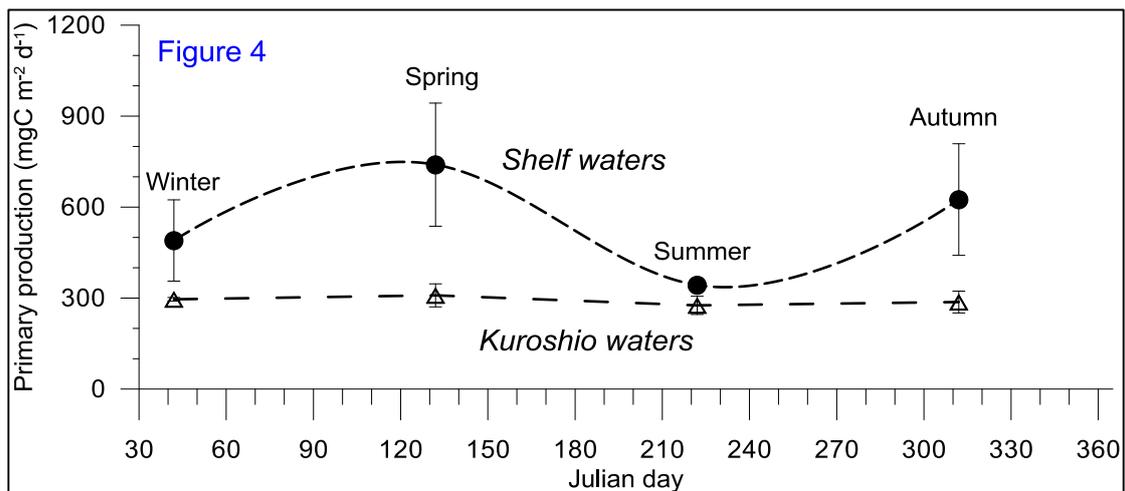
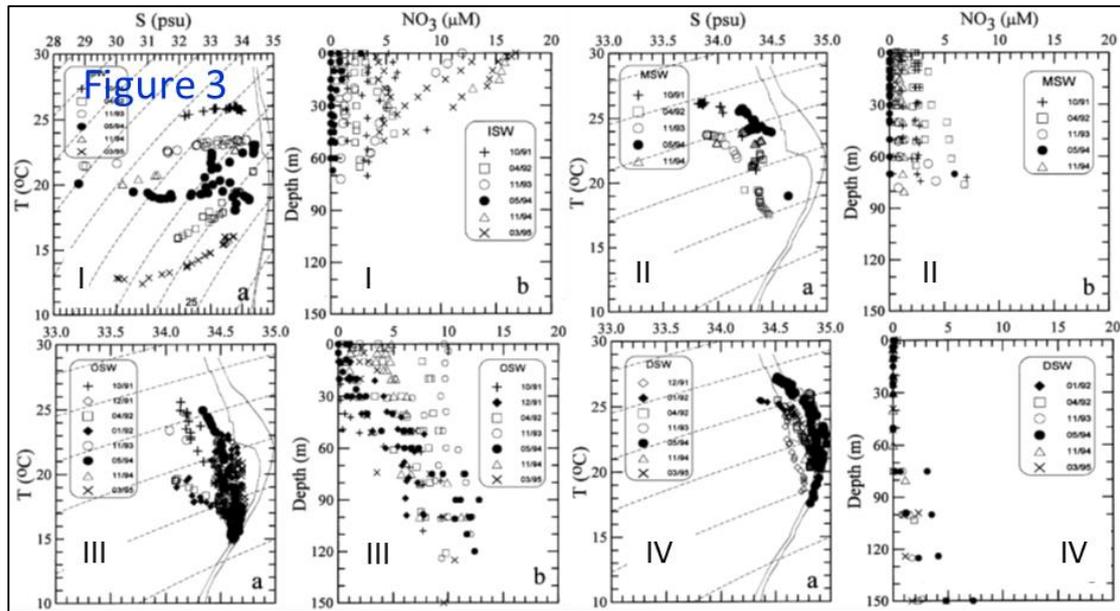




## (二) KEEP-KEY 研究成果

KEEP-KEY 航次的探測範圍從接近大陸沿岸的馬祖往東南外海延伸至黑潮主軸流經的深海區(Fig. 1)。在此研究海域有四個不同類型(I-IV)的水團存在，分別是大陸沿岸水與臺灣海峽水的混合水(I)、臺灣海峽水與黑潮湧升的混合水(II)、黑潮湧升水與臺灣海峽水的混合水(III)、黑潮水(IV)。其中以第 I 及第 III 種類型水的營養鹽供應量最高，第 I 類型的營養鹽主要由河川所供應，第 III 類型的營養鹽主要由黑潮湧升所供應；其次是第 II 類型；最貧瘠的是第 IV 類型(Fig. 3)。因為營養鹽供應量的時空差異與日照的季節性變動，使得陸棚區(第 I-III 類型近岸至黑潮湧升)的海洋基礎生產力年平均值( $549 \pm 84 \text{ mgC m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ )高於外海黑潮主軸區(第 IV 類型， $292 \pm 15 \text{ mgC m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ )，陸棚區海水因其水文化學特性有明顯季

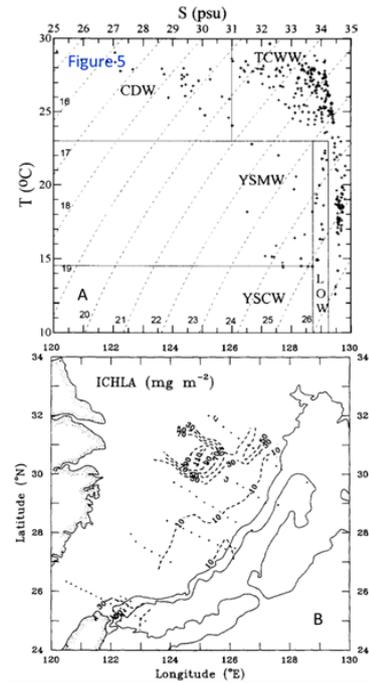
節性變化，使得基礎生產力也有季節性變化，春秋兩季較夏冬兩季為高；黑潮主軸區則無明顯的季節性變化(Fig. 4) (Gong et al., 2000)。



### (三) KEEP-MASS 研究成果

KEEP-MASS 航次的探測範圍含蓋了東海及日本海(Fig. 1B)，不但是臺灣海洋科學家首度也是全世界首次有此機會獲取夏天時整個東海的海洋環境資料。該航次取得之資料與代表性研究成果(Gong et al., 1996)，不但是後來推動東海長期觀測與研究整合計畫的基礎，更是全世界在東海進行相關研究的依據。在此航次中因為使用俄羅斯研究船的緣故，測站無法進入陸棚內側，不過仍然取得了夏天時東海各種水團的水文、化學及葉綠素等基本生態特性資料。夏天時東海共有五

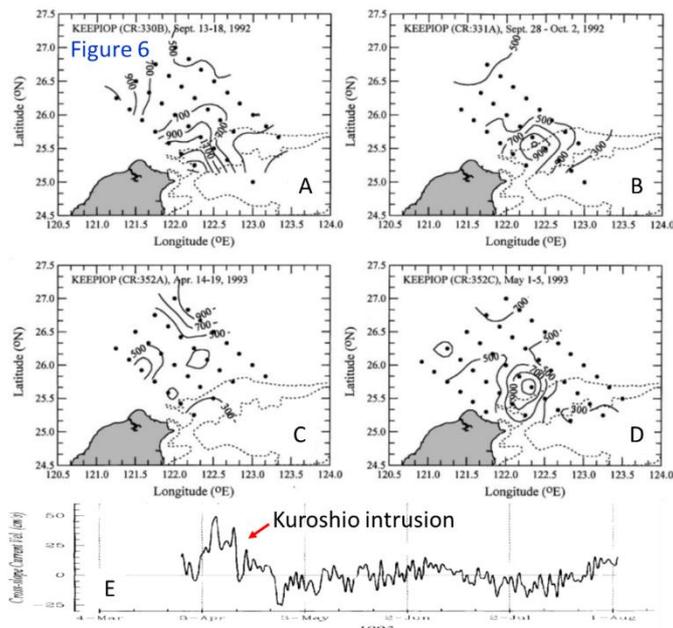
種水團存在，分別為長江沖淡水(CDW)、臺灣暖流水(TCWW)、黑潮水(KW)、黃海混合水(YSMW)、黃海冷水(YSCW)以及低氧水(LOW) (Fig. 5A)。進一步我們也首度發現夏天時東海除了臺灣東北海域黑潮湧升區具有高基礎生產力以外，在長江口以東的陸棚中側也發現高區(Fig. 5B)，此高葉綠素區證實是由營養鹽豐富(特別是硝酸鹽)的長江沖淡水(我們將之定義為鹽度小於 31 的海水)所貢獻。不過由於長江沖淡水具有高氮低磷的特性，暗示東海應是一個磷限制的系統(Gong et al., 1996; Wong et al., 1998)。



#### (四) KEEP-IOP 研究成果

KEEP-PBOX、KEEP-KEY 及 KEEP-MASS 期間的研究成果較偏重在觀測到結果的描述。經過此階段的經驗累積與交流，已逐漸瞭解到黑潮主軸會有季節性的變動，其變動或對海洋生地化現象產生關鍵性的影響，因此規劃了夏末秋初(9月中至 10月初)以及春天(4月中至 5月初)的密集探測航次(簡稱為 KEEP-IOP)。

我們發現於夏末秋初期間都可以在陸坡處觀測到因為黑潮湧升作用形成的海洋基礎生產力高峰區(Fig. 6A, 6B);但是在春天時期此高峰區僅在 5月初的航次被發現(Fig. 6D), 4月中的航次消失(Fig. 6C)是因為受到黑潮入侵東海陸棚的作用使然(Fig. 6E)，不過此高值應是被黑潮推往西北方向(Gong et al., 1997)。

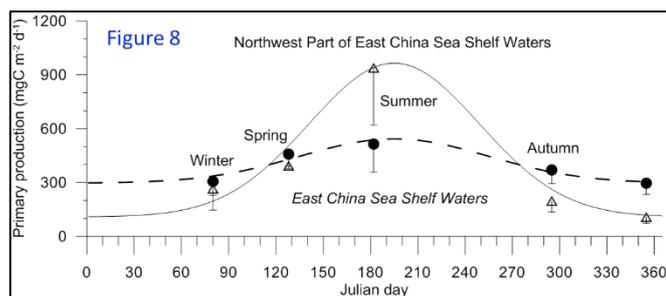
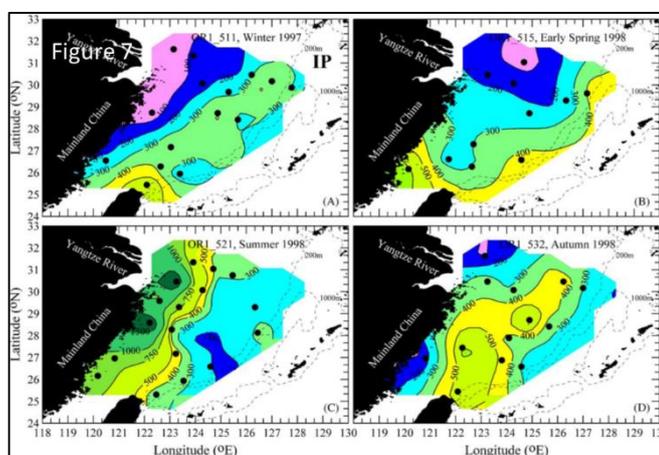


## LORECS 研究成果

LORECS 的研究共歷經四期，研究海域由在 KEEP 時期的東海南部擴展至整個東海範圍，計畫之目的是擬從對東海的水文、化學及生態因子進行長期的觀測，據以瞭解在全球變遷下的人為擾動(長江三峽大壩工程、河川污染、暖化與酸化)與極端氣候現象對海洋生地化循環與生態系統的影響。第一期(2000.8~2003.7)是建立與瞭解東海水文、生地化及生態特性的四季變化；第二期(2003.8~2006.7)是擬探討長江三峽大壩蓄水對東海的影響；第三期(2006.8~2009.7)是探討亞洲沙塵暴對黑潮淺層貧瘠海水的影響；第四期(2009.8~2012.7)是探討洪水與颱風等極端氣候現象對東海及西北太平洋的影響。以下是與讀者分享海洋基礎生產力的研究成果。

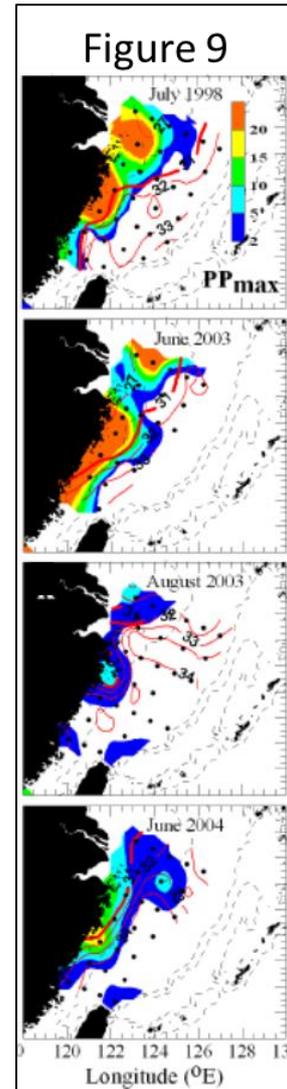
### (一) LORECS-I 研究成果

東海位於亞熱帶氣候區，海水的水文及生地化特性主要是受到季風、海潮流、歐亞第一大河川—長江以及黑潮湧升等作用所影響。透過對東海陸棚一年四季的現場觀測結果顯示，高峰出現在夏天，特別是在陸棚西北側受長江沖淡水影響的海域(Fig. 7C)，春秋兩季次之(Fig. 7B, 7D)，冬天最低(Fig. 7A)。整個東海陸棚平均基礎生產力介於 297~515  $\text{mgC m}^{-2} \text{d}^{-1}$  之間，在陸棚西北側受長江沖淡水影響的海域基礎生產力介於 108~939  $\text{mgC m}^{-2} \text{d}^{-1}$  之間，全年最高值出現在夏天(Fig. 8) (Gong et al., 2003)。



## (二) LORECS-II 研究成果

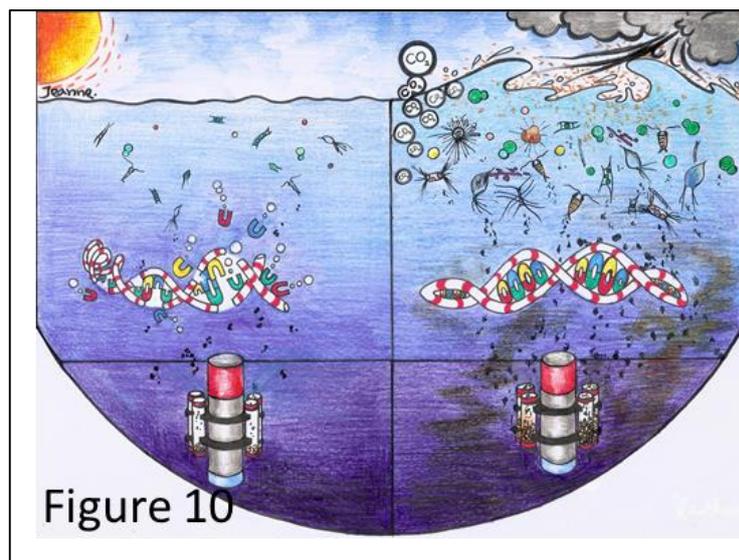
經由 LORECS-I 的研究已證實夏季長江物質的輸送通量是趨動高基礎生產力的主因，因此我們持續針對夏天進行觀測，特別是在長江三峽大壩工程實施第一階段蓄水的前後，從連續性的現場觀測結果發現在第一階段蓄水工程完成後(June 2003)的 2 個月，東海夏天出現高基礎生產力的範圍急遽縮小(Fig. 9)，海洋基礎生產力較蓄水前降低了 86%，海水矽與氮的比值亦從正常的 1.5 降低至 0.4，再度證實夏天長江沖淡水的物質輸送通量對東海生態系運轉的關鍵(Gong et al., 2006)。



## (三) LORECS-III 研究成果

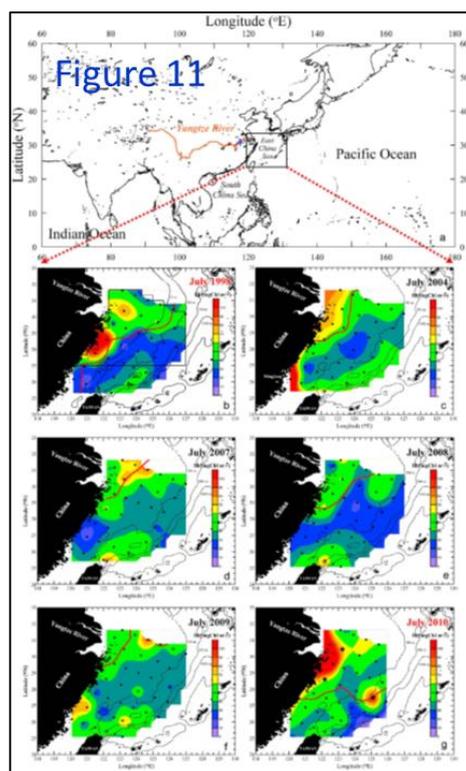
沙塵暴所挾帶的巨量微量元素(特別是鐵)可提升當今富營養鹽與低葉綠素海洋的基礎生產力與吸收二氧化碳的能力，但是對於貧營養鹽海域的影響則是未知。臺灣東北外海黑潮海域每年春天都會受到亞洲沙塵暴的影響，因此我們團隊於每年沙塵

暴旺盛的春季期間進行了多次密集的海上觀測，發現東北季風與亞洲沙塵暴的共伴效應，可提升海洋基礎生產力與二氧化碳往深海傳送的能力，同時會緩和超微浮游植物缺鐵與缺營養鹽的基因表現(Fig. 10, SOLAS 2010)。



#### (四) LORECS-IV 研究成果

1998 年與 2010 年是 1880 年至今全球最熱的 2 年，同時也是長江發生有史以來超大洪水的其中 2 年，東海研究團隊經過連續 15 年在東海的長期觀測與研究，發現洪水雖然造成陸上毀滅性的災難，但卻可以大幅提升海洋生產力與吸收二氧化碳的能力 (Fig. 11; Gong et al., 2011)，估計每月可增加約 41 萬噸的漁業資源潛能。此結果進一步提供在氣候變遷衝擊研究的另一思維。



#### 參考文獻

- Pai, S.-C., G.-C. Gong and **K.-K. Liu** (1993) Determination of Dissolved Oxygen in Seawater by Direct Spectrophotometry of Total Iodine, *Marine Chemistry*, 41, 343-351. (Cited=118)
- 龔國慶、徐崇仁、施文鴻、**劉康克** (1992) 台灣東北海域冷水消長：1990 年 6~12 月，*台灣海洋學刊*，28，118-127.
- Liu, K.-K.**, G.-C. Gong, S. Lin, C.-Y. Yang, C.-L. Wei, S.-C. Pai and C.-K. Wu (1992) The year-round upwelling at the shelf break near the northern tip of Taiwan as evidenced by chemical hydrography, *Terrestrial Atmospheric and Oceanic Sciences*, 3, 243-276. (Cited=108)
- Gong, G.-C., **K.-K. Liu** and S.-C. Pai (1995) Prediction of nitrate concentration from two end member mixing in the Southern East China Sea, *Continental Shelf Research*, 15, 827-842. (Cited=80)
- Gong, G.-C., Y.-L. Chen and **K.-K. Liu** (1996) Summertime hydrography and chlorophyll *a* distribution in the East China Sea in summer: Implications of nutrient dynamics, *Continental Shelf Research*, 16, 1561-1590. (Cited=174)
- Wong, G. T. F., G.-C. Gong, **K.-K. Liu** and S.-C. Pai (1998) Excess "nitrate" in the East China Sea, *Estuarine Coastal and Shelf Science*, 46, 411-418. (Cited=87)
- Gong, G.-C., F.-K. Shiah, **K.-K. Liu**, W.-S. Chuang and J. Chang (1997) Effect of the Kuroshio intrusion on the chlorophyll distribution in the southern East China Sea north of Taiwan during spring, 1993. *Continental Shelf Research*, 17, 79-94. (Cited=37)
- Gong, G.-C., F.-K. Shiah, **K.-K. Liu**, Y.-H. Wen and M.-H. Liang (2000) Spatial and temporal variation of chlorophyll *a*, primary productivity and chemical hydrography in the southern East China Sea. *Continental Shelf Research*, 20, 411-436. (Cited=99)
- Gong, G.-C., Y.-H. Wen, B.-W. Wang and G.-J. Liu (2003) Seasonal variation of chlorophyll *a* concentration, primary production and environmental conditions in the subtropical East China Sea. *Deep-Sea Research Part II*, 50, 1219-1236. (Cited=159)
- Gong, G.-C., J. Chang, K.-P. Chiang, T.-M. Hsiung, C.-C. Hung, S.-W. Duang, L. Codispodi (2006) Reduction of primary production and changing of nutrient ratio in the East China Sea: Effect of the Three Gorges Dam? *Geophysical Research Letters*, 33, L07610, doi:10.1029/2006GL025800. (Cited=90)
- Gong, G.-C., **K.-K. Liu**, K.-P. Chiang, T.-M. Hsiung, J.-R. Chang, C.-C. Chen, C.-C. Hung, W.-C. Chou, C.-C. Chung, H.-Y. Chen, F.-K. Shiah, A.-Y. Tsai, C.-H. Hsieh, J.-C. Shiao, C.-M. Tseng, S. C. Hsu, H.-J. Lee, M.-A. Lee, I.-I. Lin, and F. Tsai (2011) Yangtze River Floods Enhance Coastal Ocean Phytoplankton Biomass and Potential Fish Production, *Geophysical Research Letters*, 38, L13603, doi:10.1029/2011GL047519. (Cited=30)