

## 蓋亞-大地之母：在颱風-聖嬰現象關係中扮演之角色

國立臺灣大學大氣科學系 林依依  
國立臺灣師範大學地球科學系/海洋環境科技研究所 鄭志文

過去研究顯示，聖嬰發展時西太平洋颱風生成位置偏東，偏暖的海水有利颱風發展，加上颱風生成地點距離陸地較遠，照理而言會出現較平常年更為強勁之颱風，可是統計分析結果顯示，聖嬰年期間颱風卻沒有特別顯著增強之趨勢。過去學界對此沒有定論，但現在科學家發現了聖嬰年期間颱風強大的負向回饋機制，此機制順利解開聖嬰年颱風強度演變之謎[1]。

早在 1970 年代，蓋亞假說提出我們的地球具備有自我調制(self-regulating)的機制，藉此可以提供一穩定的條件供地球上生命得以延續[2]。而熱帶氣旋(又稱颱風)是地球上最具破壞力的災害之一，聖嬰年時期，熱帶太平洋颱風強度的發展在統計資料呈現以及理論說明上的理解尚仍有一定程度之落差[3,4]。因此，促使我們想要探知蓋亞假說相關過程(Gaia-like process)，在聖嬰年期間颱風發展歷程當中，扮演著怎樣的角色。

在現行的研究架構之下，我們知道，聖嬰年期間，在赤道太平洋特殊背景環境底下，颱風生成位置往東南偏移(見圖一)。此偏移讓颱風得以從溫暖海洋獲取發展能量的時空範圍皆擴大，對颱風強度的發展為一正向回饋(positive feedback)機制[5,6]。然而，長久以來，在上述的架構之中，我們卻都忽略了，聖嬰年期間海洋次層水條件亦產生改變的事實，在上述正向回饋發揮作用的期間，其實，水底下有一股強烈的反向的作用(negative process)也正默默的作動著[1]。

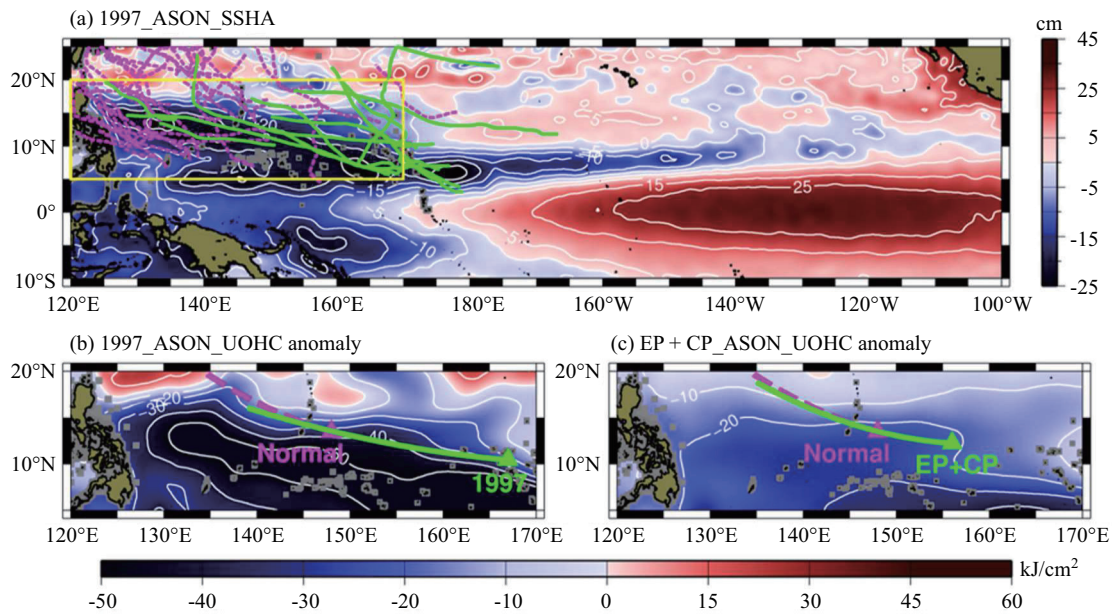
最近，台大大氣系、師大海環所以及夏威夷大學研究團隊合作，利用衛星觀測資料、歐洲中期天氣預報中心(ECMWF)海洋再分析資料，配合海洋數值模式之執行，計算海表溫降，並透過熱動力方程式計算海氣熱通量變化。研究團隊證實，有一先前未受到注意之重要過程源自於聖嬰

年颱風期間之次層海水淺化效應(subsurface shoaling)，相對於上述聖嬰年期間較長的發展距離帶給颱風發展之正向效應，該次層水淺化效應的出現就如同一調節器(damper)一般，可有效抑制聖嬰年期間颱風可能過度增強的現象。並且，此現象不僅出現在 1997-1998 年強聖嬰年事件之上，在其他的聖嬰年事件之上亦清楚可見[1]。

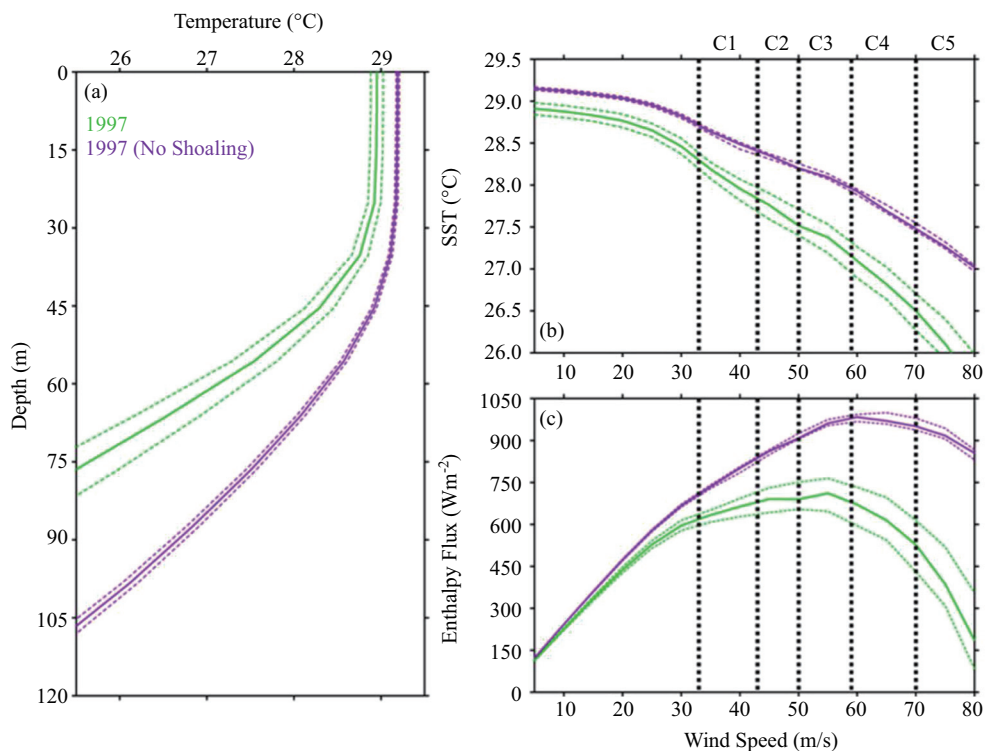
海洋是供給颱風增強之能量來源，一直以來皆是控制颱風發展與否的重要環境因子之一[7-9]。此研究當中，研究團隊著重於海洋能量供給對颱風增強的作用之上，要有適當的海洋條件能夠供給颱風發展，海表溫以及海洋次層水條件皆是關鍵[10-12]。颱風前海表溫越溫暖、上層海洋熱含量(upper ocean heat content, UOHC)越高以及次表層暖水層越厚，皆越有利於促使颱風增強[13]。上述這些海洋條件皆與颱風引起的冷卻效應有關，冷卻效應越強，透過海氣介面熱通量交換從海洋進到颱風的能量就會越少[12]。

如同圖一(b)所示，1997 年聖嬰現象期間，西北太平洋颱風在熱含量明顯減少( $\sim 20-50 \text{ kJ cm}^{-2}$ )的區域上形成與發展，相對平常年熱含量( $> 100 \text{ kJ cm}^{-2}$ )的條件而言，該熱含量減少接近 20-50%。類似的情況，在其他聖嬰年期間也可見，圖一(c)呈現自 1980 年起所有出現的聖嬰現象(共有八次事件)之 UOHC 合成圖，呈現一平均  $10-30 \text{ kJ cm}^{-2}$  的熱含量減弱情形。

上述資料分析結果顯示，聖嬰年颱風季期間西北太平洋呈現一顯著的次層水淺化現象，研究團隊接著執行數值實驗以檢視該淺化現象後續可能造成之衝擊。圖二(a)比對颱風 1997 年 ASON 平均垂直溫度剖面(綠線)，以及非淺化(no-shoaling)時期的平均垂直溫度剖面(紫線，取自 1980-2010 溫度剖面氣候平均值)。圖中顯示，聖嬰年期間，較冷的次層水(綠線)明顯較平常年期間(紫線)接近水面，接著，團隊利用 3D Price-



圖一 (a)1997 年衛星高度計觀測颱風季節(八月~十一月, ASON)之平均海表面高度異常資料(SSHA), 1997 年 ASON 平均颱風軌跡分布(綠線), 1998-2001 年 ASON(代表非聖嬰年期間)颱風軌跡分布(紫線), 黃色框框為主要研究區域。(b)1997 年 ASON 之上層海洋熱含量異常(相對於 1980-2009 年平均), 對應之平均颱風生成軌跡以及位置使用綠色線以及綠色三角標示, 紫色線與三角則標示長期平均颱風移動軌跡以及其生成位置。(c)同(b), 但為 1980 年起八個聖嬰事件合成之熱含量異常。



圖二 (a)1997 颱風季節(ASON)對應之初始垂直溫度剖面(綠線, 剖面計算取點位置可參考圖一(b)), 紫色線為非淺化情境對應之垂直溫度剖面(由 1980-2010 ASON 計算平均獲得), 虛線為 95%信賴區間範圍, (b)3DPWP 模式計算獲得之颱風發展期間海表溫冷卻降溫效應, (c)如同(b), 但為熱動力方程式估算之海氣介面熱焓通量。

表一 不同情境下海洋能夠供給颱風增強之熱焔通量估算，第二行為颱風發展期間平均熱焔通量，括弧為誤差估計，第三行為不同情境下，颱風平均移動距離，第四行為颱風期間考量其個別發展距離後估算之總熱焔通量，第五行為各情境相對於正常年狀態下之熱焔通量百分比。

(a)	Flux ( $Wm^{-2}$ )	Distance (km)	Flux $\times$ Distance ( $10^9 Wm^{-1}$ )	Flux $\times$ Distance .wrt. normal (%)	Genesis Position
1997 El Niño	500 (46)	3066	1.534 (0.142)	136%	171.01°E 8.94°N
1997 El Niño (if no shoaling)	712 (10)	3066	2.182 (0.029)	194%	171.01°E 8.94°N
(b)	Flux ( $Wm^{-2}$ )	Distance (km)	Flux $\times$ Distance ( $10^9 Wm^{-1}$ )	Flux $\times$ Distance .wrt. normal (%)	Genesis Position
8 El Niño composites	597 (16)	2401	1.434 (0.039)	127%	154.68°E 12.5°N
8 El Niño Composites (if no shoaling)	698 (7)	2401	1.676 (0.017)	149%	154.68°E 12.5°N
(c)	Flux ( $Wm^{-2}$ )	Distance (km)	Flux $\times$ Distance ( $10^9 Wm^{-1}$ )	Flux $\times$ Distance .wrt. normal (%)	Genesis Position
Normal condition	583 (16)	1932	1.127 (0.031)	100%	146.98°E 14.55°N

Weller-Pinkel 海洋混合層模式(3DPWP)，搭配圖二(a)之溫度剖面，對颱風在不同強度下可能引起的海面降溫進行估計，獲得的結果如圖二(b)。從圖中可以發現，在相同的颱風風力條件底下，聖嬰年期間颱風引起的海表面冷卻效應(綠線)遠較沒有淺化現象(正常年)時期的颱風造成之降溫現象(紫線)為強。

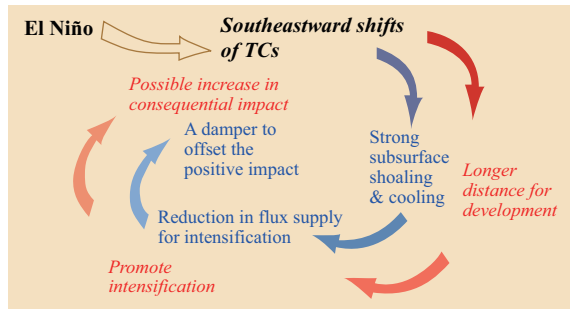
此外，由於不同的海面降溫程度將導致不同的海氣介面間能量交換，後續將對颱風發展造成衝擊，團隊並利用熱動力方程式(bulk aerodynamic formula)估算不同條件底下之熱焔通量(顯熱+潛熱通量)，並利用統計的颱風發展距離，藉此估算，在不同條件底下，颱風發展期間得以從海洋獲取能量之多寡，藉此推估，颱風增強的發展歷程，其估算結果如表一。

上述結果顯示，聖嬰年期間因為淺化效應造成一完全不同於正常年之海洋條件供颱風發展，因此，在颱風增強期間有機會造成較為顯著之降溫，接著從海洋進到颱風之熱焔通量將大為減少，該現象將不利於颱風發展[7-9,11]，以 1997 年為例(見表一)，在相同的大氣條件之下，估算之熱焔通量供給就較平常年減少了近 30%，對颱風發展而言，是一個顯著的能量供給削弱。反之，若沒有該次層水淺化效應作用，因為聖嬰年較長的颱風發展距離，颱風有機會獲得之熱焔通量幾

乎是平常年的兩倍(~194%)。然而，就是因為有強烈的海洋淺化效應在聖嬰年期間出現，才讓整體熱焔通量降低到僅為平常年的 1.36 倍。

換句話說，聖嬰年期間，考量颱風發展距離以及次層水淺化效應後，單一颱風可能自溫暖海洋獲得之能量仍較平常年來得高，研究團隊指出，這是一個「打折」過後的能量強度，反向思考，若今天沒有該次層水淺化調節機制的的作用，出現在聖嬰年期間的颱風強度可能遠高於平常年，因為有接近兩倍(~194%)的能量挹注，在現今脆弱的地球環境之下，如此強烈的颱風可能帶來難以想像的破壞。

此研究顯示真實的自然界系統遠比我們想像的或已認識的複雜許多，並且，在此研究中呈現的過程，其特性與與蓋亞假說的理念相符。如同圖三所示，先前，我們只注意到聖嬰年由於颱風生成軌跡往東南偏移，對颱風發展正向的影響(紅色箭頭)，但在此研究中，團隊將聖嬰年肇因於次層水淺化，因而對颱風發展形成之反向機制亦呈現出來(藍色箭頭)。在相同的聖嬰現象作用底下，正反機制相互作用，相互牽制也相互制衡，也因為研究中指出的次層水淺化效應，得以讓聖嬰年的颱風不至於過度發展，就如同大自然具有自我調節之機制一般，聖嬰年越強，颱風發展距離越長，雖然颱風有更多的發展機會，但卻也需



圖三 蓋亞機制(Gaia-like mechanism)對聖嬰-颱風強度變化關係作用示意圖，紅色箭頭表示聖嬰年透過延長颱風發展距離進而對颱風強度發展衍生的正向效應(positive impact)，而藍色箭頭則表示透過次層水淺化效應，聖嬰年對颱風發展潛在的負向效應(negative impact)。

面臨「較差」的次層水海洋條件。試想，若沒有該機制默默在背後調節，聖嬰年期間產生之颱風所帶來之災害將可能比我們想像的還要糟許多。

#### 參考文獻

- [1] Z.-W. Zheng, I.-I. Lin, B. Wang, H.-C. Huang and C.-H. Chen, *Sci. Rep.* **5**, 11103; doi: 10.1038/srep11103 (2015).
- [2] J. E. Lovelock, *Nature*, **426**, 769-770 (2003).
- [3] S. J. Camargo and A. H. Sobel, *J. Clim.* **18**, 2996-3006 (2005).
- [4] C. Wang, C. Li, M. Mu and W. Duan, *Clim. Dyn.* **40**, 2887-2902 (2013).
- [5] J. C. L. Chan, *Mon. Wea. Rev.* **113**, 599-606 (1985).
- [6] H. H. Chia and C. F. Ropelewski, *J. Clim.* **15**, 2934-2944 (2002).
- [7] K. A. Emanuel, *Nature* **401**, 665-669 (1999).
- [8] M. A. Bender and I. Ginis, *Mon. Wea. Rev.* **128**, 917-946 (2000).
- [9] I. I. Lin, P. Black, J. F. Price, C.-Y. Yang, S. S. Chen, C.-C. Lien, P. Harr, N.-H. Chi, C.-C. Wu and E. A. D'Asaro, *Geophys. Res. Lett.* **40**, doi:10.1002/grl.50091 (2013).
- [10] J. F. Price, *J. Phys. Oceanogr.* **11**, 153-175 (1981).
- [11] J. J. Cione and E. W. Uhlhorn, *Mon. Wea. Rev.* **131**, 1783-1796 (2003).
- [12] D. F. Leipper and D. Volgenau, *J. Phys. Oceanogr.* **2**, 218-224 (1972).
- [13] I.-I. Lin, I.-F. Pun and C.-C. Lien, *Geophys. Res. Lett.* **41**, doi:10.1002/2014GL061281 (2014).