

探討南海葉綠素濃度與氣膠光學厚度的關係

黃世任 陳立偉

國立臺灣海洋大學海洋環境資訊系

本研究使用 MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectro- radiameter) 之氣膠光學厚度、葉綠素甲濃度和海表面溫度資料，探討南海海域葉綠素受氣膠影響之變化。以月變異量資料探討葉綠素及氣膠變化情況，在排除海水湧升之影響的條件下，當氣膠出現異常高值時，葉綠素濃度也出現異常高值的情況最多，這現象主要發生於 12 月、1 月和 2 月。研究結果也發現，在東北季風時期，葉綠素與氣膠高正相關($R>0.5$)現象遍佈南海；而在西南季風時期，其相關性良好($R>0.5$)之區域在南海南部較明顯，但分佈範圍零散。顯示在南海海域，氣膠的含量與葉綠素的成長存在著相當程度的正相關。

關鍵詞：南海、MODIS、氣膠光學厚度、葉綠素甲濃度和海表面溫度

一、前言

海洋葉綠素濃度能反應出浮游植物的多寡，而浮游植物則是海洋生物鏈中最低階的一環。浮游植物所行的光合作用，會形成海洋基礎生產力。所以海洋中葉綠素濃度可視為海洋基礎生產力的良好指標。海洋中營養鹽的來源有：河川輸入帶來陸地上人為排放污染物、海水湧升帶起海底底部營養鹽、大氣沈降帶來懸浮於大氣中的氣膠物質。Paerl (1997)指出，從大氣沈降結合了氮物種與磷物種的營養鹽也可能會直接增加海洋初級生產力。而大氣中的氣膠的來源包含：生質燃燒、都市及工業區之石化燃燒、海洋機制產生的海鹽性氣膠、火山爆發...等(Eck et al, 1999)。南海海域周圍氣膠來源有：冬季季風時期(十一月至四月)，普遍的東北季風會挾帶混合著人為性與沙塵性氣膠，帶至南海海域；夏季季風時期(七月至九月)，普遍的西南季風會傳輸婆羅洲與蘇門答臘生質燃燒的煙塵氣膠至南海海域(Lin et al., 2007)。本研究目的就在於以衛星資料時間上的連續性與長期性和空間上的廣泛性，探討南海海域葉綠素受氣膠影響之情況。

二、研究資料

本研究區域為南海海域，其範圍從赤道至北緯 25 度、東經 100 度至東經 125 度(如圖 1)。使用 MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer)

衛星資料，是由美國航空暨太空總署之 Oceancolor 網站所提供。所用到的資料有氣膠光學厚度(Aerosol Optical Thickness, T869)、海表面溫度(Sea Surface Temperature, SST)與葉綠素甲濃度(Chlorophyll-a, Chl-a)。資料時間解析度為月平均，空間解析度為 4 公里，資料時間從 2002 年 7 月至 2007 年 12 月。

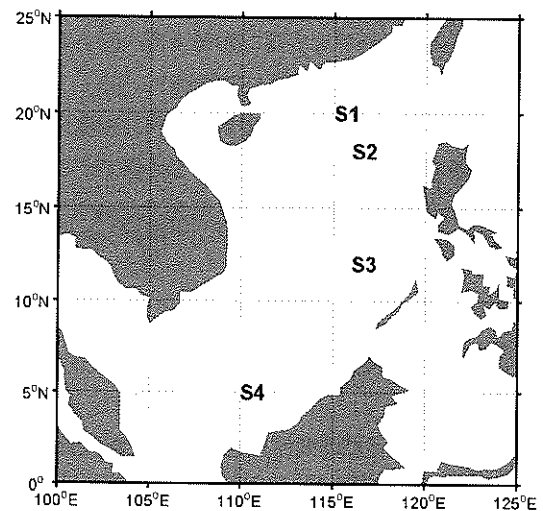


圖 1 研究區域示意圖

三、研究方法

為了瞭解氣膠濃度改變時，葉綠素濃度是否也會跟著變化，而變化的情形又是如何，並考慮葉綠素增長受海水湧升之影響。因此將 MODIS Aqua 衛星的氣膠

光學厚度資料(T869)與葉綠素濃度資料(Chl-a)以及海表溫度資料(SST),以統計的方法統計氣膠與葉綠素之關係。

本研究以月變異量資料(即單月月平均減單月長期月平均),探討 1°x1°範圍內各資料間的相關性。將資料依不同時間尺度分為兩部份來探討。一、先瞭解各個月份相關情形,故將所有資料分成一至十二月,共十二組計算長期相關性。二、因為南海海域水文現象受季風影響為多,故將所有資料依季風風向分成 5 月至 9 月(西南季風時期)及 10 月至 4 月(東北季風時期)兩組。其相關係數計算公式如下:

$$R = \frac{\sum(x - \bar{x})(y - \bar{y})}{\sqrt{\sum(x - \bar{x})^2} \sqrt{\sum(y - \bar{y})^2}} \quad (1)$$

x 為長期衛星資料 1; y 為長期衛星資料 2; \bar{x} 為

長期衛星資料 1 之平均值; \bar{y} 為長期衛星資料 2 之平均值。

由於海水湧升通常會帶起營養鹽,而增加葉綠素之生長,而湧升的海水通常比週邊海水溫度低。所以本研究將先移除海表溫的影響後再探討各資料間的相關性。其方法為,先將 SST 與 Chl-a 依(1)式,按照各時間尺度計算其長期月變異量資料之相關性。將相同時間尺度的相同位置上,找出 SST 與 Chl-a 相關係數小於-0.5 高負相關的位置,則表示此海域是受到水溫影響而不列入探討。

四、結果與討論

(一) 長期時間序列期間各衛星資料間的相關性

本研究選取 S1(115°E, 20°N)、S2(116°E,

18°N)、S3(116°E, 12°N)及 S4(110°E, 5°N)四點作為研究點。此四點由北至南遍佈南海海域,且本研究將 S1、S2 視為南海北部海域,S3 代表南海中部海域,S4 則為南海南部海域。表 1 為 S1 至 S4 四點各資料間 2002 年 7 月至 2007 年 12 月月平均時間序列相關性分

析。風速與海表溫在 4 個測點中,相關性均小於 -0.61,呈現負相關;風速與葉綠素在 S1 點(R=0.53)與 S2 點(R=0.61)皆有良好相關性,在 S3 與 S4 為相關性較低;至於風速與氣膠濃度(T869)之相關性在 S4 點(R=0.55)有正相關現象。海表溫與葉綠素之相關在 S1 點相關性最高達到-0.78,其 S2 點也有-0.75,在這兩處為高度負相關,而在 S3 和 S4 也呈現負相關;海表溫與氣膠濃度在 S4 點有負相關(R=-0.64),剩餘三點皆呈低的相關性。葉綠素與氣膠濃度之相關在 S2 及 S3 為低度正相關,在 S1 與 S4 則呈無相關。

表 1 2002 年 7 月至 2007 年 12 月, S1-S4 各資料之相關性分析

S1 (115°E, 20°N)

R	wind	SST	Chl-a	T869
wind		-0.64	0.53	0.44
SST	-0.64		-0.78	-0.34
Chl-a	0.53	-0.78		0.19
T869	0.44	-0.34	0.19	

S2 (116°E, 18°N)

R	wind	SST	Chl-a	T869
wind		-0.69	0.61	0.49
SST	-0.69		-0.75	-0.39
Chl-a	0.61	-0.75		0.49
T869	0.49	-0.39	0.43	

S3 (116°E, 12°N)

R	wind	SST	Chl-a	T869
wind		-0.61	0.36	0.36
SST	-0.61		-0.56	-0.46
Chl-a	0.36	-0.56		0.43
T869	0.36	-0.46	0.43	

S4 (110°E, 5°N)

R	wind	SST	Chl-a	T869
wind		-0.66	0.35	0.55
SST	-0.66		-0.69	-0.64
Chl-a	0.35	-0.69		0.25
T869	0.55	-0.64	0.25	

綜合以上論述,無論是在南海北部至南部,海表溫的變化皆受風速變化之影響。風速與氣膠濃度在 S4 點的相關性為最好,但只為中度正相關(R=0.55)。而海表溫在 S1 點與 S2 點即南海北部,對於葉綠素濃度有高度負相關(R < -0.7),所以葉綠素濃度在南海北

部主要受海表溫變化之影響，但 S3 與 S4 點相關性也皆為中度負相關，應該也會受海表溫影響，所以南海葉綠素濃度的變化主要受海表溫之影響。氣膠濃度變化與葉綠素濃度變化在 S1 點至 S4 點皆無發現良好的相關性，可能是葉綠素濃度的變化主要受海表溫影響的關係。所以之後在研究氣膠濃度與葉綠素濃度之關係時，應該將海表溫的影響納入考慮。

(二) T869 與 Chl-a 長期月變異量相關性

為了探討 T869 與 Chl-a 兩種資料之相關性，本研究先扣除受海表溫影響的資料點後，再以各資料的變異量計算出 $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ 範圍的相關係數。在此先依月份探討各月份的 2 種資料的相關性，再計算以季風時期所劃分時間尺度之相關，探討是否結果會受季風影響。

1. 依各個月份(1 至 12 月)

圖 2 為排除水溫影響後，T869 與葉綠素濃度 1 到 12 月各月長期月變異量的相關圖。顯示在 1 月份正相關現象分佈於呂宋島北方、南海中部以及南海南部，整個南海海域由東北至西南皆有發現正相關現象，推測與 1 月份為東北季風盛行時期，將中國大陸之氣膠能傳輸至較遠處。2 月份正相關現象分佈在泰國灣及越南南部海域，應該也為強勁東北季風所導致，南海中部以北沒發現有正高相關區域。3 月份正相關區域有明顯減少，分佈於呂宋島西北邊外海、越南東南沿岸；但在東京灣內有高度正相關之區域，各年此月份在東京灣附近之陸地皆有氣膠高值的產生，或許是此原因而造成高度正相關。4 月份正相關也出現在東京灣內、呂宋島西邊海域及西北邊海域，南海中部海域也可看見有一正相關區域，南海南部皆無相關較多。5 月份正負相關現象皆不明顯，推測與季風開始轉向且轉弱導致所夾帶的氣膠量減少有關。6 月份西南季風增強，從西南邊帶來生質燃燒氣膠，在越南南部海域及泰國灣內有正相關現象。7 月，泰國灣內、南海南部有正相關現象，但比 6 月弱，其餘南海中部以北皆為無相關較多。8 月在婆羅洲東側海域有發現正相關區域，因為 8 月時在波羅洲南部常有生質燃燒，再配合風向，多少會將氣膠帶至波羅州東部海域；呂宋島西南海域有明顯負相關現象，造成此區域之現象有待查證原因。9 月，正相關現象零星散佈南海海域，推

測季風轉向為原因。

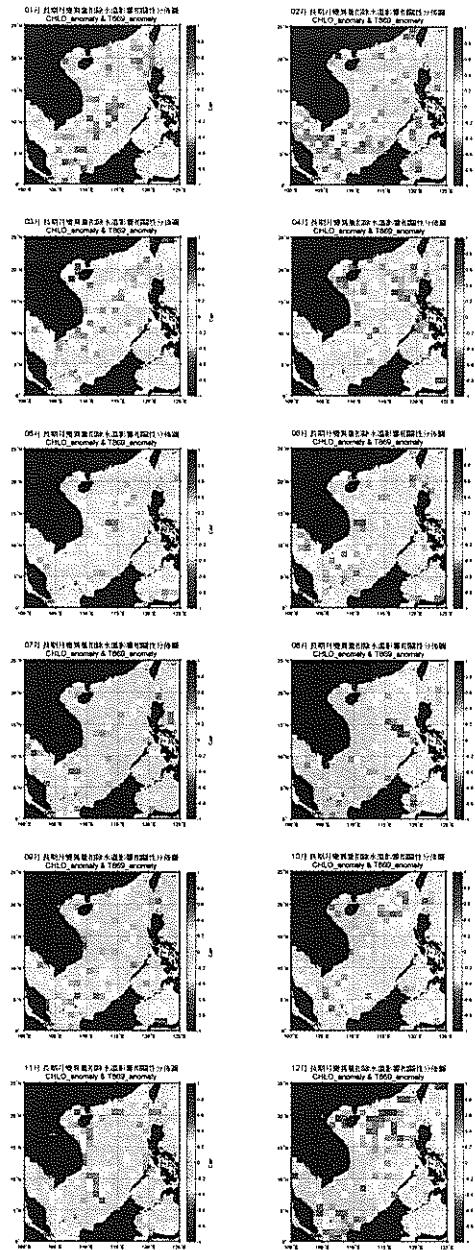


圖 2 Chl-a 與 T869 各月長期月變異量排除水溫影響之相關性

10 月，東北季風開始，呂宋島西北部外海有明顯的正相關現象；巽他陸棚也有發現正相關區域，這時期為婆羅洲生質燃燒之盛期，因為南海南部還有微弱的西南季風，所以也會將南方的氣膠帶到南海南部。11 月，東京灣四周海域皆有高正相關現象，以及越南

東南部海域也有高正相關現象。12月，東經110度至東經120度、北緯15度至北緯20度，此大範圍區域有高度正相關現象發生，以及東京灣內和南海南部海域皆有正相關現象，應該是強勁的東北季風，將中國大陸的氣膠傳送且遍佈南海海域。

2. 依季風時期(5月至9月、10月至4月)

圖4.2為排除水溫影響的情況下，5月至9月西南季風期間，T869與葉綠素濃度變異量的相關。由圖可看出在呂宋島北部海域有高度正相關區域，以及泰國灣內、南海南部、蘇祿海峽和婆羅洲東部海域皆有高度正相關區域，所分佈的區域多靠近南海南方氣膠之源地。而排除水溫影響的情況下，在東北季風期間(10月至4月)T869與葉綠素濃度變異量的相關性(圖4.3)，看出正相關現象普遍分佈於南海北部、越南東南部海域以及巽他陸棚附近。

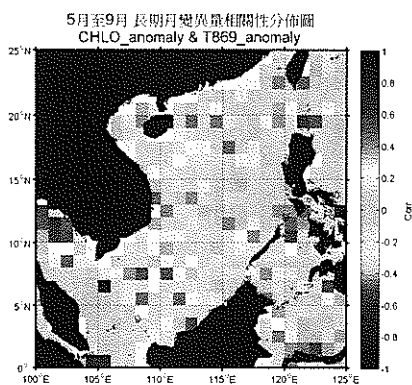


圖 4.2 Chl-a 與 T869 長期時間月變異量排除湧升影響之相關性(五月至九月)

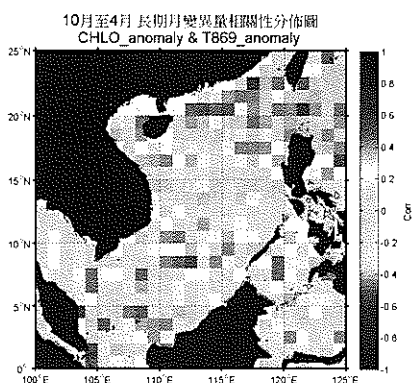


圖 4.3 Chl-a 與 T869 長期時間月變異量排除湧升影響之相關性(十月至四月)

按照季風風向不同，而將資料分作為兩部份探討。其5月至9月正相關區域分佈於南海南部較多，而10月至4月正相關區域廣泛分佈於南海。此現象與西南季風時期，風速最大出現於南海中部；東北季風時期，最大風速可到達南海南部，且東北季風最強風速會大於西南季風最強風速。綜合先前之論述，西南季風挾帶南方來源之氣膠，由南海南部向北部傳送，因風速強度之關係，所以最多將氣膠帶至南海中部，也在南海南部發現了T869與Chl-a有高度正相關($R > 0.5$)區域。在東北季風盛行期時，季風能傳輸東北亞之氣膠至南海，而氣膠遍佈範圍可達南海南部，且T869與Chl-a高度正相關($R > 0.5$)區域廣泛分佈。結果顯示了在南海海域，氣膠的含量與葉綠素的成長存在著相當程度的正相關。

五、結論

本研究使用MODIS衛星資料(T869、Chl-a與SST)，研究南海海域葉綠素濃度受氣膠濃度變化之情況。各種資料做了長期各月月變異量以及依不同時間尺度資料之間相關性。其結果如下：

通常海表溫低的區域其葉綠素濃度較高，主要是因為湧升作用。因季風不斷吹拂海表面，將表層海水帶離，使得海表層下的海水往上補充，將底層較冷的海水與營養鹽帶至海表面，而形成海表溫降低與葉綠素增高同時出現的情況。所以在本研究中採用當葉綠素增多時，而海表溫降低，定義為有受湧升作用之影響。在隨後的研究也都有將湧升之影響所排除。

將氣膠和葉綠素變化的情況作探討。由氣膠與葉綠素長期各月月變異得知：在南海海域中，當氣膠濃度有異常高值時，葉綠素濃度也有異常高值的情況最多，這現象主要發生於12月、1月和2月。

探討各月份氣膠與葉綠素變化的情形，將資料分成12個月份。1月的高正相關($R > 0.5$)區域分佈於中南部海域，以中部最多。2月分佈在南部海域。在3月，高正相關現象減弱。4月高正相關現象明顯出現於北部海域，而5月開始正相關現象較弱。5月至9月，高正相關區域零星分佈於南海南部。10月可明顯看見在北部海域有正相關現象。11月則是在越南東側海域。12月在南海北部與南部皆有發現高度正相關現象

之區域，以北部較多。

為了得知是否受季風影響，又將資料依季風時期分為兩部份。西南季風時期，高正相關區域在泰國灣與南海最南部可發現，其他高正相關區域皆零散分佈於南海；東北季風時期，可發現在南海北部有大範圍高正相關現象，在南海中、南部也有但現象不明顯。

西南季風挾帶來自蘇門答臘與婆羅洲之生質燃燒煙塵，這些生質燃燒氣膠因西南季風風速較弱，所以分佈於南海中部南部，對於南海南部葉綠素的生長較有幫助；而東北季風輸送來自東北亞工業污染與沙塵，因東北季風風速較強，來自於中國大陸的氣膠能遍佈整個南海海域，同時也有助於整個南海海域葉綠素生長。

參考文獻

- Eck, T.F., B.N. Holben, J.S. Reid, O. Dubovik, A. Smirnov, N.T. O'Neill, I. Slutsker, S. Kinne (1999), Wavelength dependence of optical depth of biomass burning, urban, and desert dust aerosols, *Journal of Geophysical research*, Vol. 104, NO. D24, 31333-31349.
- Lin, I. I., J.P. Chen, G.T.F. Wong, C.W. Huang, C.C. Lien (2007), Aerosol input to the South China Sea Results from the MODerate Resolution Imaging Spectro-radiometer, the Quik Scatterometer, and the Measurements of Pollution in the Troposphere Sensor, *Deep-Sea Research II*, Vol. 54, 1589-1601.
- Paerl, H.W. (1997), Coastal eutrophication and harmful algal blooms: Importance of atmospheric deposition and groundwater as "new" nitrogen and other nutrient sources, *Limnology and Oceanography*, 42(5, part 2), 1154-1165.