

2021 年臺灣國際科學展覽會 優勝作品專輯

作品編號 180005
參展科別 地球與環境科學
作品名稱 從遙測看水色與紫外線及溫度之關聯
得獎獎項 美國氣象學會獎

就讀學校 國立鳳新高級中學
指導教師 邱惠玲
作者姓名 黃榆姍、游凱丞

關鍵詞 水色、紫外線、環境變遷

作者簡介



▲作者照片 游凱丞(上)及黃榆姍(下)

我們是同一所高中熱愛地科的同學，在地科培訓社團中互相認識，並一起報名了許多比賽，在參加比賽過程中發現兩人都有追根究柢的精神以及研究事務的熱忱，在各種活動中培養了對地球科學的興趣，並一起報名了此次的科展。

摘要

本研究使用 NASA Ozone Watch 南極臭氧濃度、MODIS Aqua 之全球海平面水色、NOAA Operational SST Anomaly 之均溫異常，以及 Australian Antarctic Data Center 南極葉綠素濃度數據，探討三大洋海洋水色的逐年變化以及影響因素。我們認為受到環境變遷的影響，影響水色最主要的外在因素可能為紫外線及溫度。本研究利用 image J 軟體，估算臭氧洞逐年的範圍變化，並利用水色換算出的葉綠素濃度的變化趨勢，將上述數據製作成圖比較。

結果顯示：在紫外線的部分，葉綠素濃度會隨著紫外線入射量減少而提高。在深度的部分，南極同一時間點所測數據顯示，水表到 400 公尺深的範圍中，呈現深度越淺葉綠素濃度越高的趨勢。此外，海表溫度正異常($>1.5^{\circ}\text{C}$)之面積分布，證實海水表面溫度變高時，葉綠素濃度變高，南極數據也顯示相同特徵。我們認為，生物基於避險本能，在紫外線過量時，生物會傾向往海洋深層移動；在 $10^{\circ}\text{C}\sim 35^{\circ}\text{C}$ 間，溫度越高，葉綠素濃度越高，影響浮游植物在深度的分布。上述各項皆能影響水色。

Abstract

This study includes data from NASA Ozone Watch Antarctic ozone concentration, MODIS Aqua's global sea level watercolor, NOAA Operational SST Anomaly's average temperature anomaly, and Australian Antarctic Data Center Antarctic chlorophyll concentration data to explore the year-on-year changes and influencing factors on the watercolor of the three oceans. We believe that due to environmental changes, the most important external factors affecting watercolor may be ultraviolet light and temperature. In this study, we used ImageJ to estimate the year-to-year change of the ozone hole and calculated the trend of the chlorophyll concentration. Finally, the above data was made into a graph for comparison and observation.

The results show that the chlorophyll concentration increases as the amount of ultraviolet rays decreases. In terms of depth, the data measured at the same time in Antarctica shows that in the range from the surface to the depth of 400 meters, the shallower the depth, the higher the chlorophyll concentration is. Besides, the area distribution of positive sea surface temperature abnormalities ($>1.5^{\circ}\text{C}$) confirms that when the sea surface temperature becomes higher, the chlorophyll concentration increases. The Antarctic data also shows the same characteristics. We believe that organisms are based on the instinct to avoid danger. When ultraviolet rays are excessive, organisms tend to move toward the deeper ocean. Between 10°C to 35°C , the higher the temperature, the higher the chlorophyll concentration is, which affects the distribution of phytoplankton in depth.

壹、 研究動機

在地球科學的課程中，提到葉綠素與海洋水色有關。如果只考慮初級生產力，水色的變化應該跟季節較相關，可是，同一區域、同一季節，水色變化卻是每年不同。對於水色變化的原因，我們有許多的推測，而最感興趣的是葉綠素。葉綠素受許多因素影響，最特別的是紫外線，因此我們想了解紫外線對海洋性質的影響，是否能直接影響水色變化。

貳、 研究目的

- 一、 了解臭氧洞與葉綠素之間的關係。
- 二、 了解溫度異常對葉綠素之影響。
- 三、 了解緯度變化與葉綠素之關係。
- 四、 探討南極地區葉綠素變化成因。

參、 研究設備器材

- 一、 軟體：ImageJ、LibreOffice 6.2、Microsoft Office
- 二、 研究數據：
 - (一) NASA Ozone Watch：選取 2003~2018 年，每年 9 月之臭氧洞及臭氧濃度變化資料。
 - (二) Ocean Color Web：選取 2003~2018 年，每年 9 月之海洋水色資料。
 - (三) NOAA Operational SST Anomaly Charts：選取 2003~2018 年，海水表面溫度異常資料。主要參考數據為溫度大於 1.5°C 者。
 - (四) Australian Antarctic Data Center (AADC)：使用數據集 ONICE_Chlorophyll II 中葉綠素濃度與深度的數據，時間區間為 11/19~12/15，空間區間為緯度 -69.03~-61.37、經度 62.88~89.9。

肆、 研究過程與方法

一、 理論依據

(一) 海面接收的紫外線強度與緯度及臭氧層濃度有關

太陽的短波輻射在穿越大氣層的過程中，大多被氣體吸收。臭氧層主要吸收大部分波長 290-320 nm 的 UV-B，但仍有部份波長較長的 UV-B 會到達地表。平流層臭氧的減少，意味著較少的 UV-B 在平流層被吸收，使得地表的 UV-B 輻射增強。經估計，臭氧層濃度降低 1%，海平面的 UV-B 增加約 2%。(魏國彥、許晃雄, 1997)

(二) 紫外線對生物的影響

穿透大氣到達地面的少數 UV-B 對生物有害。UV-B 增強對植物的影響為樹葉面積減小、幼苗變短，以及減緩光合作用。水中的浮游生物對 UV-B(即使是極微量)極其敏感。如果 UV-B 增加，浮游生物勢必存活在水面下更深之處。如此一來，可吸收的可見光也減少，減緩了光合作用，浮游生物的存活量也將減少。(魏國彥、許晃雄, 1997)

(三) 紫外線、浮游生物及水色之間的關係

在不考慮局部地區的人為干擾時，倘若該地區紫外線入射量變多，浮游生物會傾向在海洋的較深處生存，導致海洋水色較往年藍。不考慮臭氧分布時，因低緯度區域遭太陽直射時間較長，可觀察到低、中緯地區相對於高緯較易出現水色偏藍的葉綠素偏低色塊。

(四) 溫度對葉綠素生產過程之影響

浮游植物的光合作用包括兩個過程：光反應以及碳反應。浮游植物行光合作用的速率以及時間受到光照時間影響。其中，溫度是酶促反應的重要因素，但對光合作用中的光反應影響不大，卻對碳反應有著很大的影響(楊東方等, 2002)。因此，為了解光合作用，目前大多使用 MODIS 衛星遙測所繪製的水色圖，對應出葉綠素 a 的濃度，進而能對浮游植物之初級生產力進行連續監測(吳, 2016)。分析水色圖資料轉為葉綠素 a 的含量，是目前估算葉綠素 a 最廣泛使用的方法。

二、 研究步驟

(一) 資料選取

由於 Ocean Color Web 的數據只有 2003~2018 年，為能比對及資料一致，所有資料庫皆選取 2003~2018 年的資料為研究數據，相關選取條件設定如下：

1. 臭氧洞及臭氧濃度資料：

臭氧濃度小於 220DU(Dobson unit)之區域，定義為臭氧洞，此定義為常用之臭氧洞定義。受極地渦旋及極地平流層雲的影響，南極臭氧洞在 9 月~10 月最為明顯，因此探討臭氧洞對葉綠素水色的關係時，採用南極 9 月的臭氧濃度以分析臭氧洞面積。

2. 葉綠素 a 及水色變化：

由於測量水色的衛星 MODIS Aqua 在 2003 年以後開始才有整年的資料，故本研究選用 2003~2018 年間之數據，同時這也影響了相關資料庫的選用年分。由於海洋的狀況較為複雜，為了讓干擾降低，分析水色圖時，選用較接近海洋中間的數據，且考量極端值受到外界干擾較小且易觀察，我們計算葉綠素 a 含量低值之面積為水色變化指標，低值數據顏色為藍紫色區域(對應葉綠素濃度大概在 0.2 mg/m³)。

3. 海溫異常值變化：

我們想觀察海溫變化對葉綠素 a 濃度所造成的影響，因此選用海溫異常數據。測試後，異常值以大於 1.5°C 較易觀察變化，因此以 1.5°C 為異常值界線。印度洋因緯度大多在南半球，部分資料探討時將不考慮印度洋。

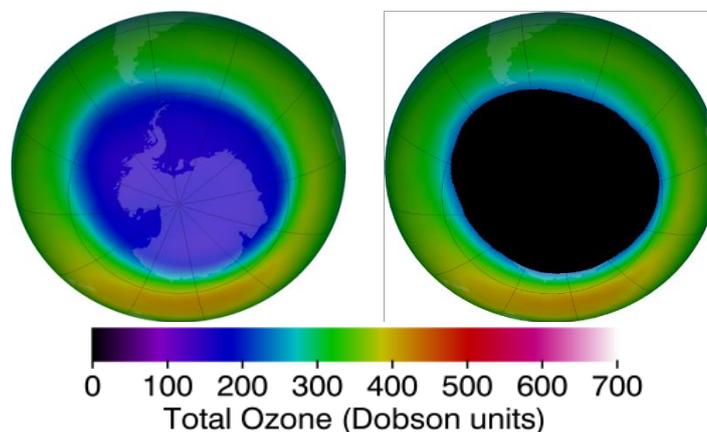
4. 南極資料選取：

我們想知道相對少人為影響之南極區域與變因較多的三大洋有何不同，因此取用 AADC 中十一月至十二月的海水深度及葉綠素濃度數據，緯度範圍為 61.37°S~69.01°S，經度範圍為 62.68°E~89.90°E。

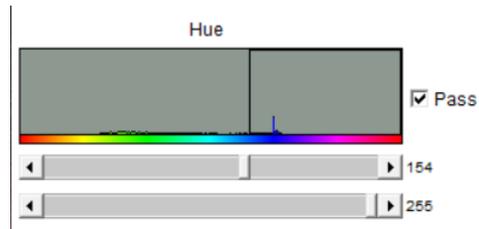
(二) 分析過程

1. 測量臭氧洞面積：

使用 ImageJ 將臭氧濃度 < 220DU 的區域，使用圖片遮罩調至同色，再使用內建的 ROI Manager 面積計算程式，得出此區域的面積(單位皆為像素)。



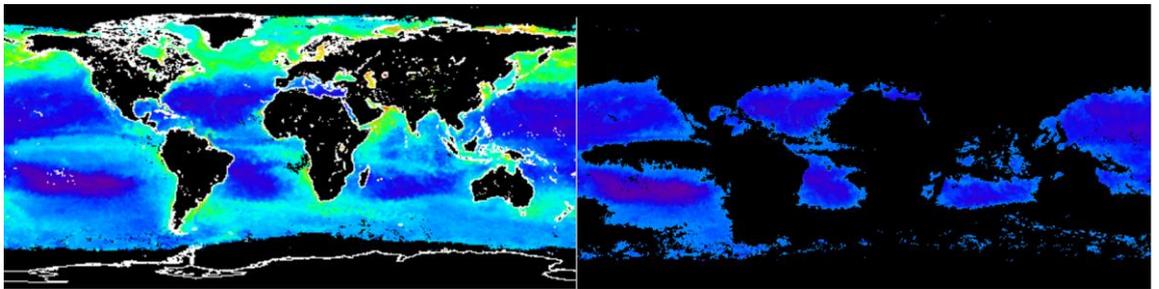
▲圖 1. 臭氧洞面積處理前(左圖)和處理後(右圖) (圖片取自：NASA)



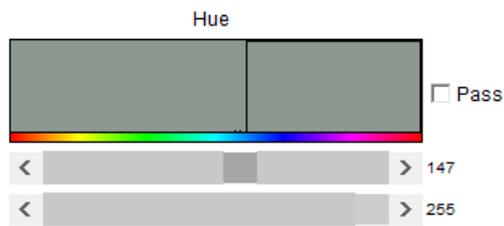
▲圖 2. Image J 圖片顏色遮罩設定-臭氧洞

2. 測量葉綠素低值的面積：

使用 ImageJ 選定藍紫色的區域(濃度約小於 0.2 mg/m^3)，用圖片遮罩將其他區調成同色，利用 ROI Manager 面積計算程式計算面積(單位像素)，把面積數值製成折線圖及散佈圖。



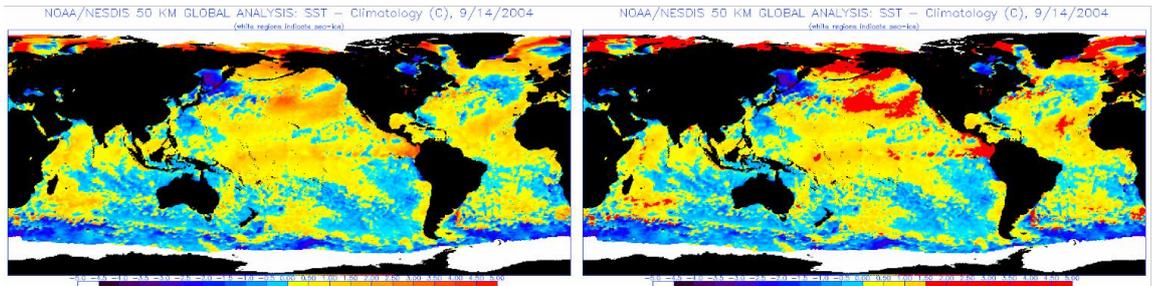
▲ 圖 3 海洋水色圖處理前(左圖)和處理後(右圖)(取自：Ocean Color Web)



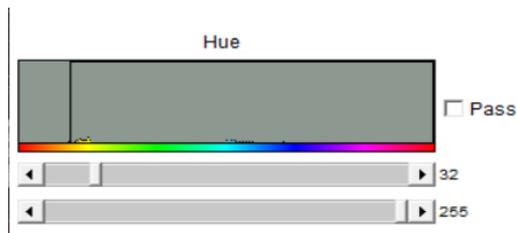
▲圖 4. Image J 圖片顏色遮罩設定-水色

3. 測量海溫異常面積：

使用 ImageJ 選取 2003-2018 年間 9 月的海溫異常資料，使用內建的圖片顏色遮罩將大於 1.5°C 之海溫正異常區塊調製同色，並使用內建之 ROI Manager 測量該區塊之面積，製作成折線圖及散佈圖。



▲ 圖 5. 海溫異常圖理前(左圖)和處理後(右圖)(取自：NOAA)



▲圖 6. Image J 圖片顏色遮罩設定-海溫異常值大於 1.5°C

4. 資料標準化：

將需要標準化的資料用 Libre Office Calc 內建的 STDEV 函式求出數據標準差，並將數據標準化，製作成 XY 散佈圖。

$$\sqrt{\frac{\sum(x - \bar{x})^2}{(n - 1)}}$$

▲圖 7. 標準差公式

5. 南極地區趨勢圖：

使用 Libre Office Calc 將其分別做成葉綠素隨海洋垂直分布圖與中午時間時 (12 時至 15 時) 深度 10、50、100、200 公尺之隨時間變化趨勢圖。

伍、 研究結果

▼表 1. 各大洋葉綠素偏低值面積及臭氧動面積(單位:像素)

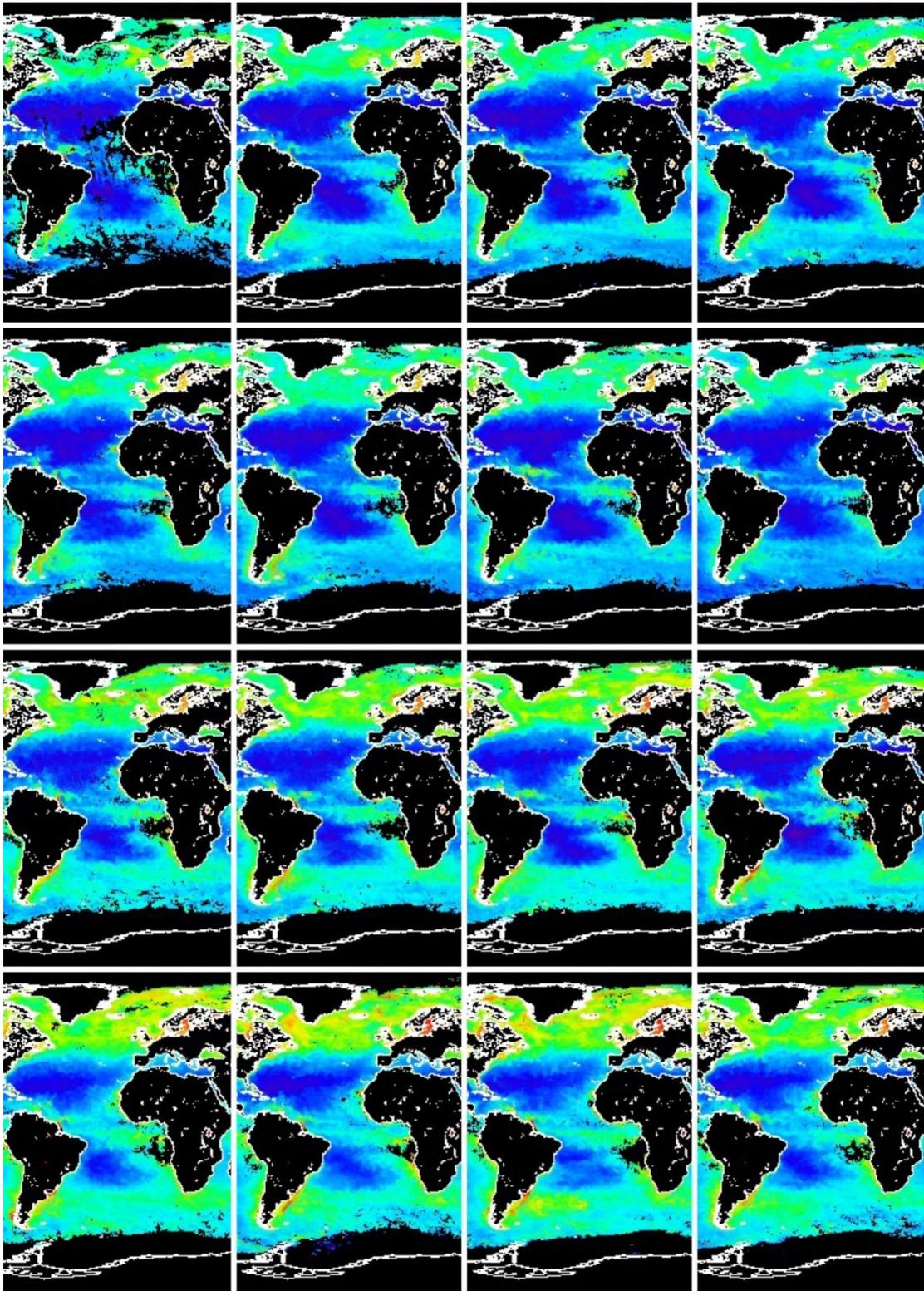
原始數據	年分	北大西洋	南大西洋	印度洋	北太平洋	南太平洋	臭氧洞面積
	2003	2367	1056	775	7933	7768	144936
	2004	2633	1590	1723	8842	8974	105181
	2005	3144	1716	1577	9000	10385	135233
	2006	2658	1449	1459	9339	9417	138283
	2007	2763	1313	1901	8851	10028	118320
	2008	2794	1311	2130	8764	10109	135027
	2009	2721	1503	2009	9245	11522	118183
	2010	2824	1267	2350	9683	12046	100047
	2011	2350	944	601	7640	3896	131205
	2012	2528	1113	1301	7398	5594	106521
	2013	2458	1277	1065	7366	4106	115523
	2014	2320	996	1579	7997	6157	112742
	2015	1527	628	680	7935	2985	131750
	2016	1889	703	876	8135	4574	101426
	2017	1511	584	673	7431	3574	79803
	2018	2072	785	821	7929	4060	122071
平均值		2409.9375	1139.6875	1345	8343	7199.6875	118515.6875
標準差		17292.8242	461.4125	347.4482	576.6489	755.4081	3151.4884
標準化							
後數據	年分	北大西洋	南大西洋	印度洋	北太平洋	南太平洋	臭氧洞面積
	2003	-0.0931	-0.2409	-0.9885	-0.5428	0.1803	1.5278
	2004	0.4834	1.2961	0.6555	0.6606	0.5630	-0.7711
	2005	1.5909	1.6587	0.4023	0.8697	1.0107	0.9667
	2006	0.5376	0.8902	0.1977	1.3185	0.7036	1.1431
	2007	0.7652	0.4988	0.9642	0.6725	0.8975	-0.0113
	2008	0.8324	0.4931	1.3613	0.5573	0.9232	0.9548
	2009	0.6742	1.0457	1.1515	1.1941	1.3715	-0.0192

2010	0.8974	0.3664	1.7428	1.7739	1.5378	-1.0680
2011	-0.1299	-0.5632	-1.2902	-0.9306	-1.0483	0.7338
2012	0.2559	-0.0768	-0.0763	-1.2510	-0.5095	-0.6936
2013	0.1042	0.3952	-0.4856	-1.2933	-0.9817	-0.1731
2014	-0.1949	-0.4136	0.4058	-0.4580	-0.3309	-0.3339
2015	-1.9136	-1.4727	-1.1532	-0.5401	-1.3374	0.7653
2016	-1.1290	-1.2568	-0.8133	-0.2753	-0.8332	-0.9883
2017	-1.9482	-1.5993	-1.1654	-1.2073	-1.1505	-2.2387
2018	-0.7324	-1.0208	-0.9087	-0.5480	-0.9963	0.2056

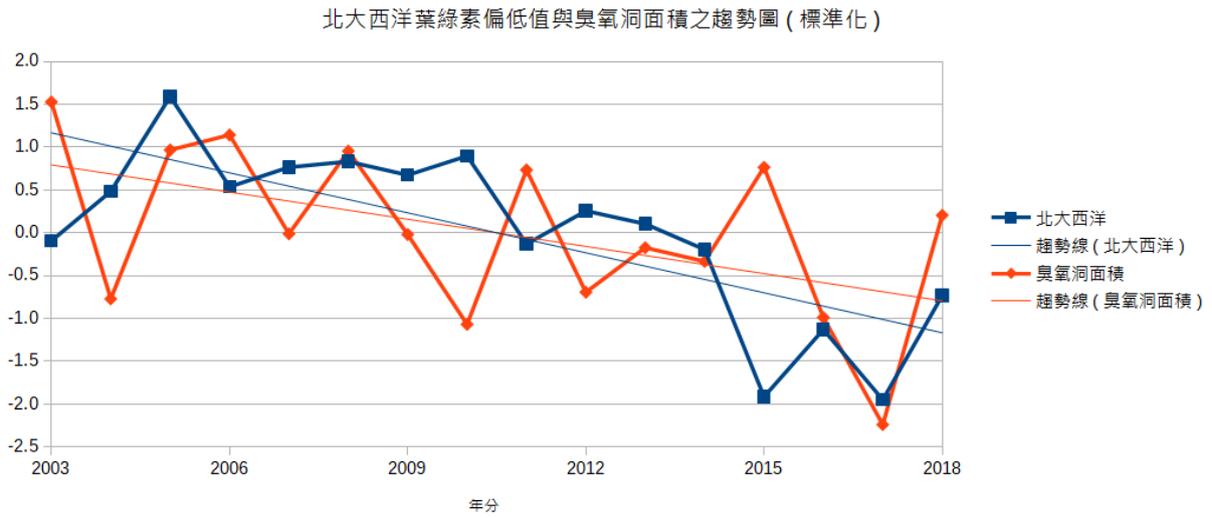
一、臭氧洞與葉綠素之間的關係

(一) 大西洋

圖 9 為大西洋在 2003 年到 2018 年，每年 9 月的海洋水色圖。此圖可以看出海洋水色的藍色區塊有變小的趨勢。

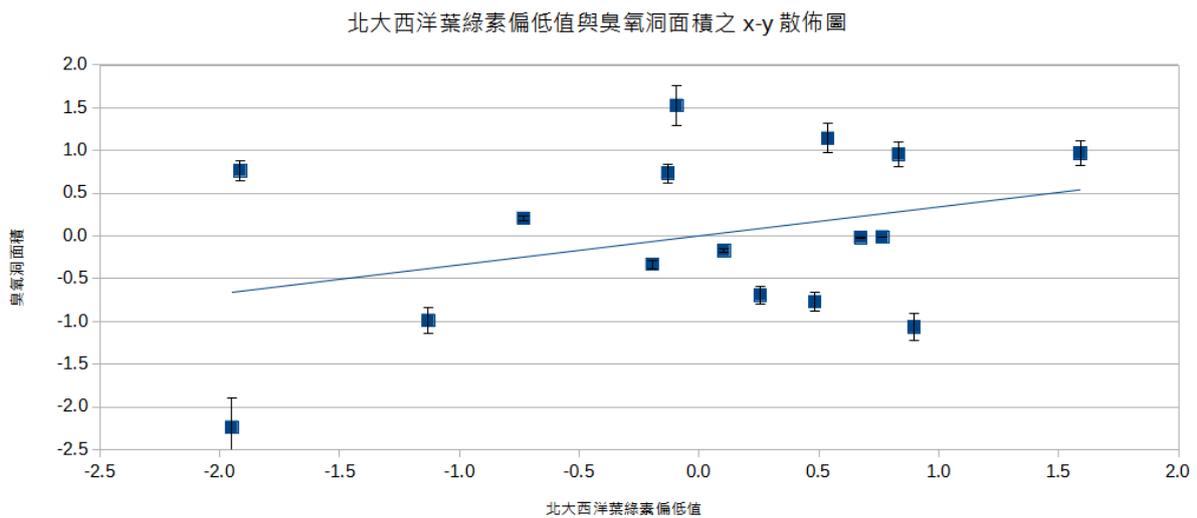


▲圖 8. 大西洋水色圖(左上 2003 年至右下 2018 年)



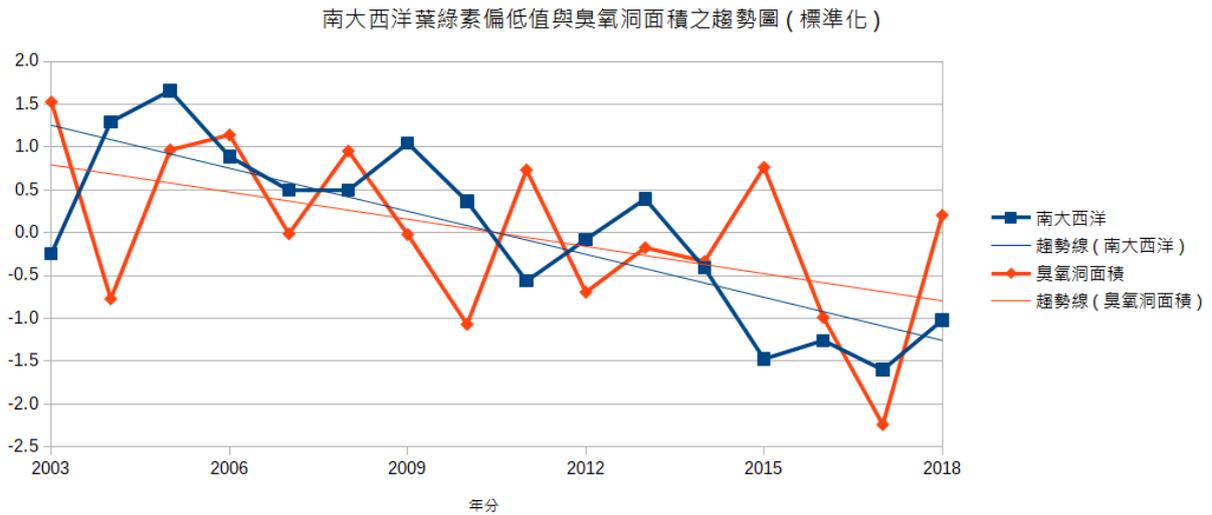
▲圖 9. 北大西洋葉綠素偏低值對臭氧洞面積之趨勢比較

圖 9 顯示北大西洋葉綠素偏低值與臭氧洞面積的趨勢圖，可以發現臭氧洞面積以及葉綠素偏低值面積大小皆有逐年下降趨勢。



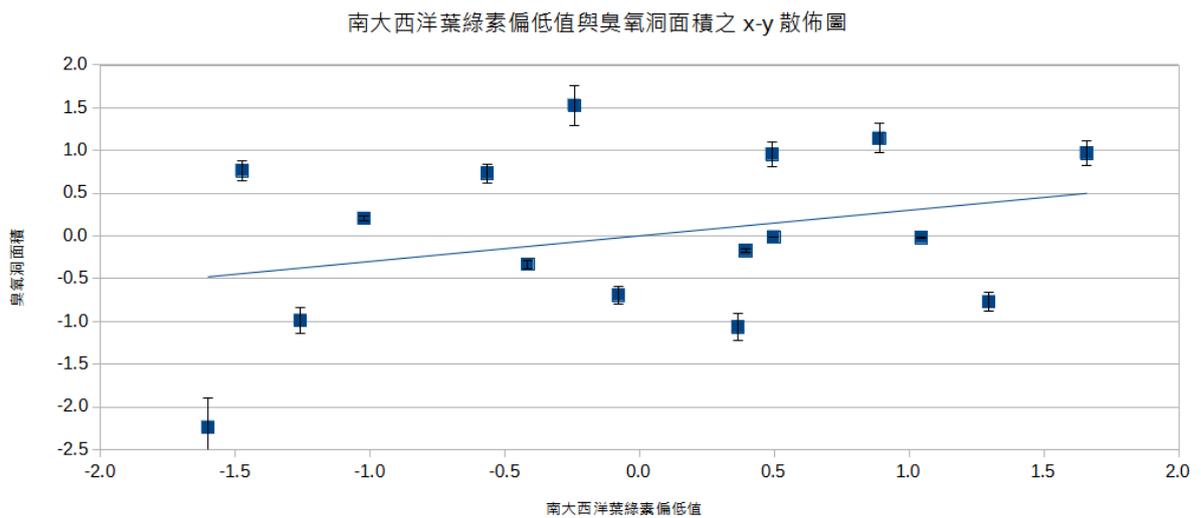
▲圖 10. 北大西洋葉綠素偏低值與臭氧洞面積之 xy 散佈圖

圖 10 顯示北大西洋葉綠素偏低值與臭氧洞面積的關係，可以發現臭氧洞面積上升時葉綠素偏低值面積也隨之上升，兩者呈現正相關。



▲圖 11. 南大西洋葉綠素偏低值對臭氧洞面積之趨勢比較

圖 11 顯示南大西洋的葉綠素變化與臭氧洞的關係。可以發現臭氧洞面積有變小趨勢而葉綠素偏低值也隨之下降，與北大西洋符合。

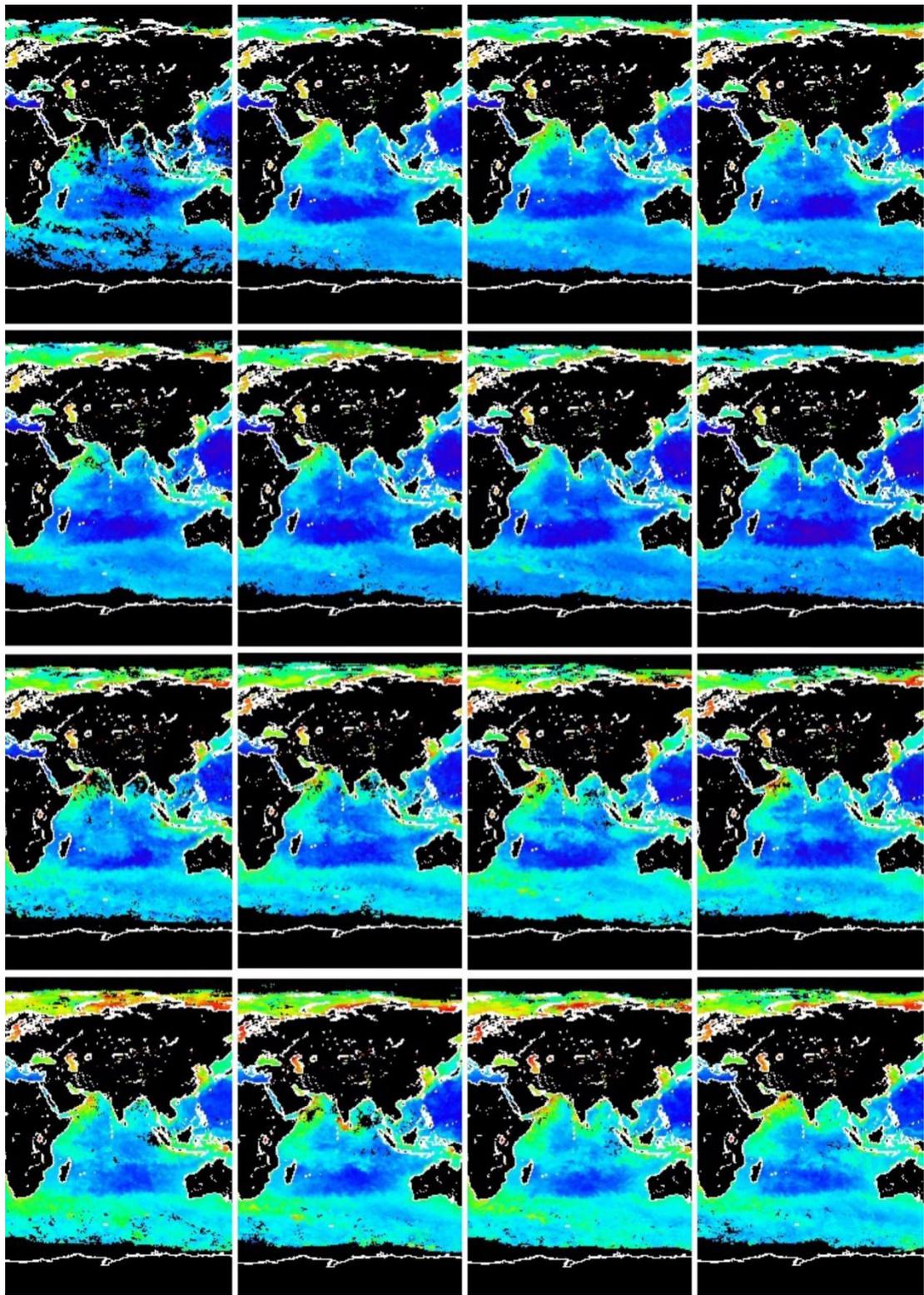


▲圖 12. 南大西洋葉綠素偏低值對臭氧洞面積之 xy 散佈圖

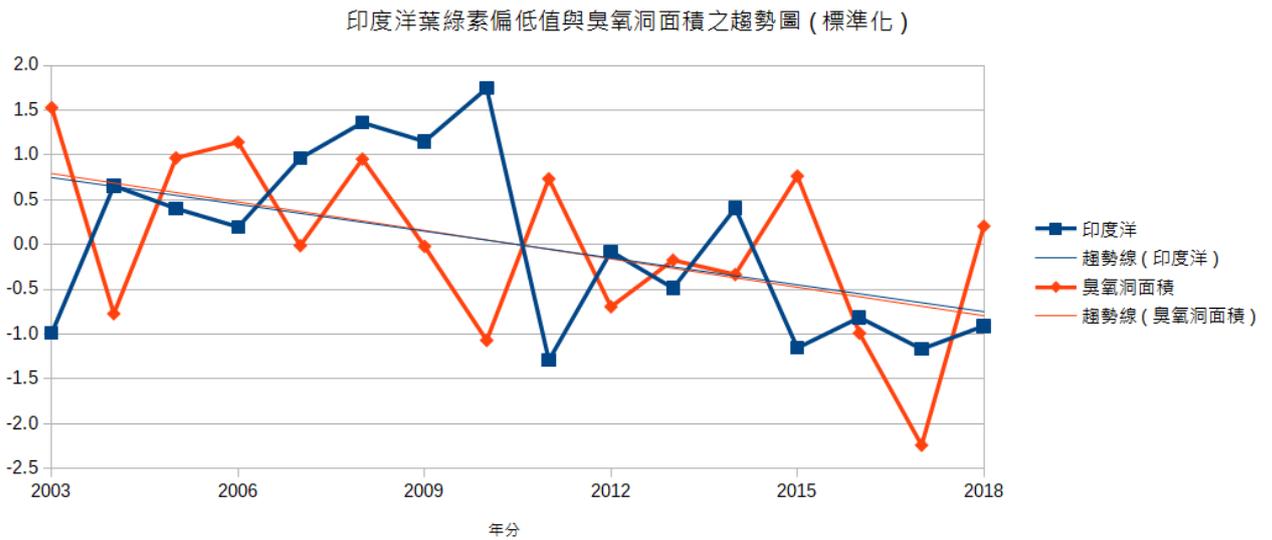
圖 12 顯示南大西洋葉綠素偏低值與臭氧洞面積的關係，可以發現臭氧洞面積變小時，葉綠素偏低值面積也隨之下降，兩組數據呈現正相關，且與北大西洋兩相符合，說明南、北大西洋之間有一定關聯性。

(二) 印度洋

圖 13 為印度洋在 2003 年到 2018 年中，每年 9 月水色圖資料，圖中可以大致看到藍色區塊逐漸變小的過程。印度洋在赤道以北的區塊，因為資料過少，不納入選取及討論。

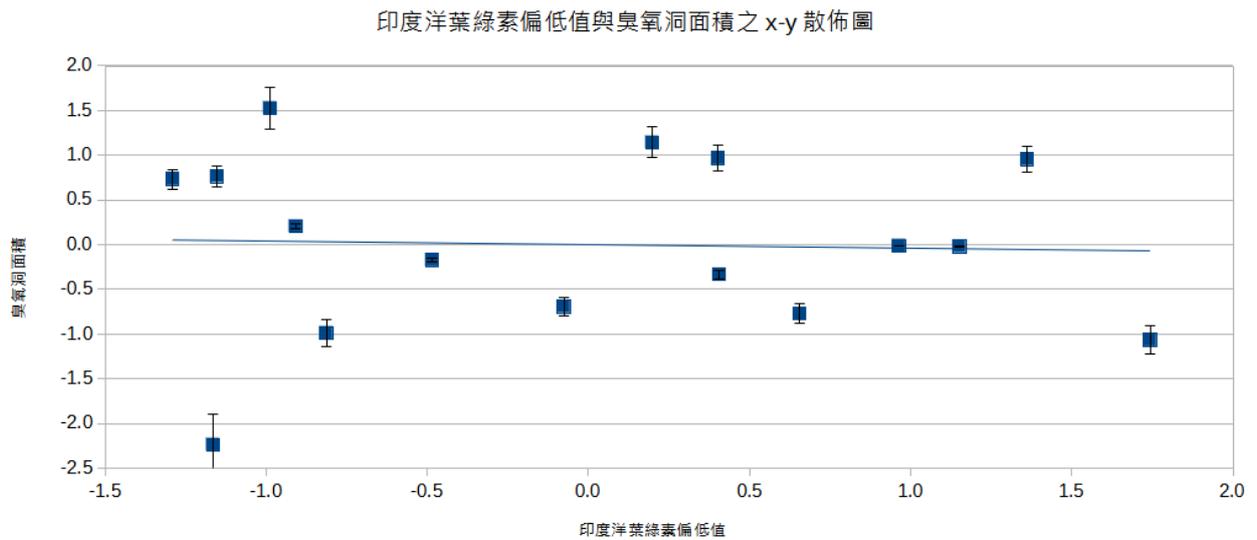


▲圖 13. 印度洋水色圖(左上 2003 年至右下 2018 年)



▲圖 14. 印度洋葉綠素偏低值對臭氧洞面積之趨勢比較

在圖 14 中可以發現臭氧洞面積有變小趨勢，而葉綠素偏低值也隨之下降，與北大西洋及南大西洋符合。但數據起伏較大，兩者相關性需用散佈圖討論。

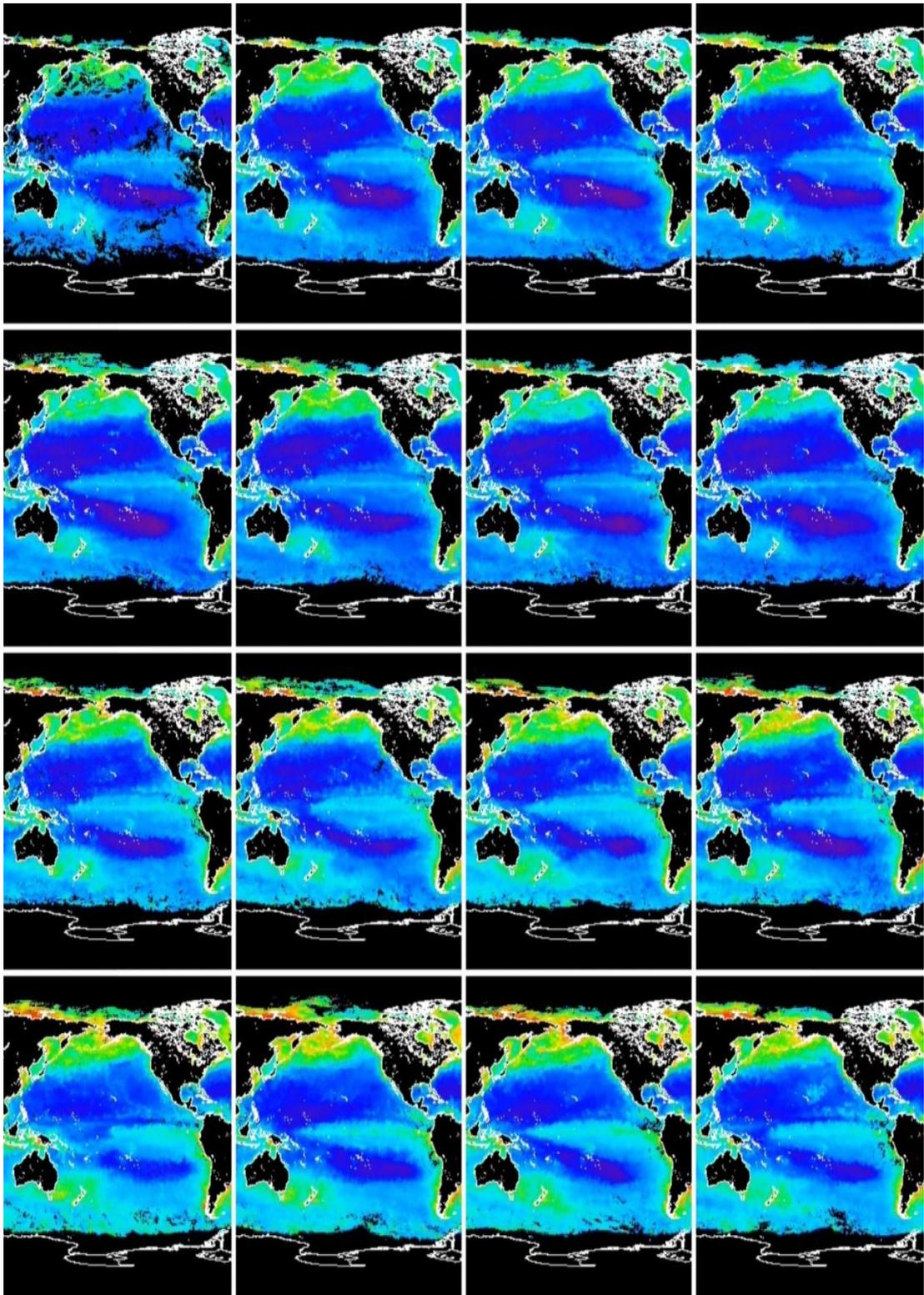


▲圖 15. 印度洋葉綠素偏低值對臭氧洞面積之 xy 散佈圖

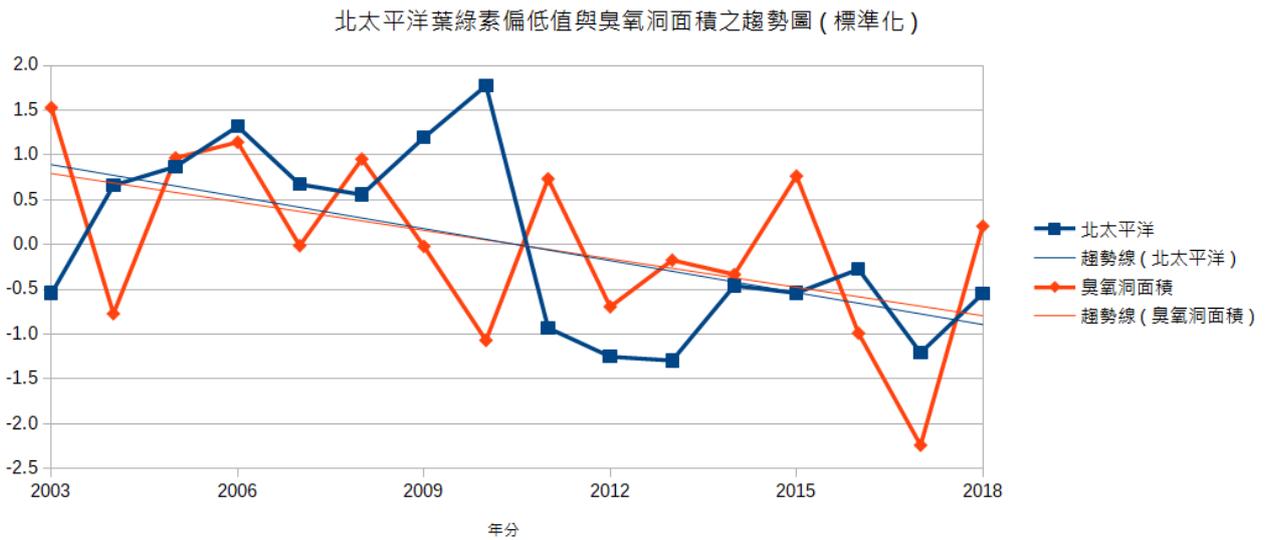
圖 15 為印度洋葉綠素偏低值與臭氧洞面積的 xy 散佈圖。可以觀察到當臭氧洞面積有變大時趨勢葉綠素偏低值卻隨之微微下降，屬於數據中較特別的一例。

(三) 太平洋

圖 16 為太平洋在 2003 年到 2018 年，每年 9 月的水色圖，其藍紫色區塊也像其他海洋一樣逐漸變小。

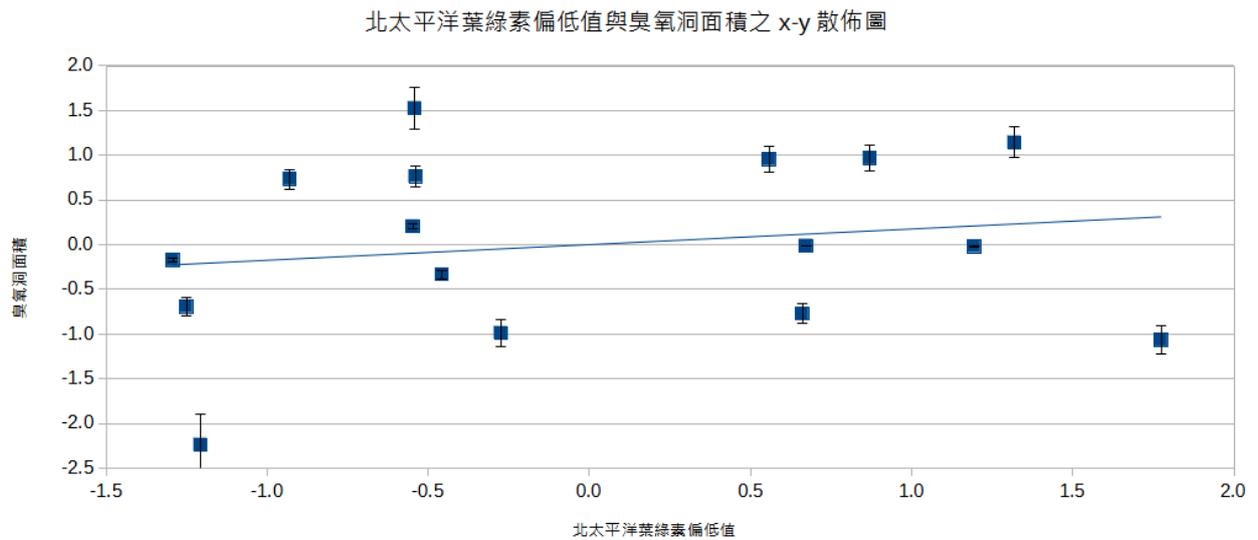


▲圖 16. 太平洋水色圖(左上 2003 年至右下 2018 年)



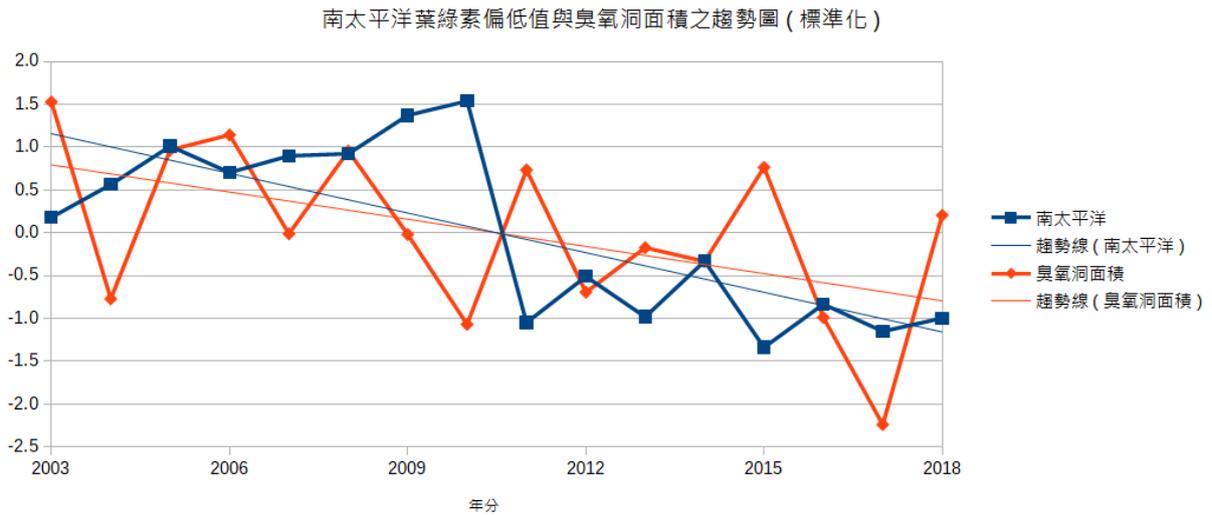
▲圖 17. 北太平洋葉綠素偏低值對臭氧洞面積之趨勢比較

在圖 17 中可以發現臭氧洞面積有變小趨勢，葉綠素偏低值也隨之下降，與南、北大西洋及印度洋符合。



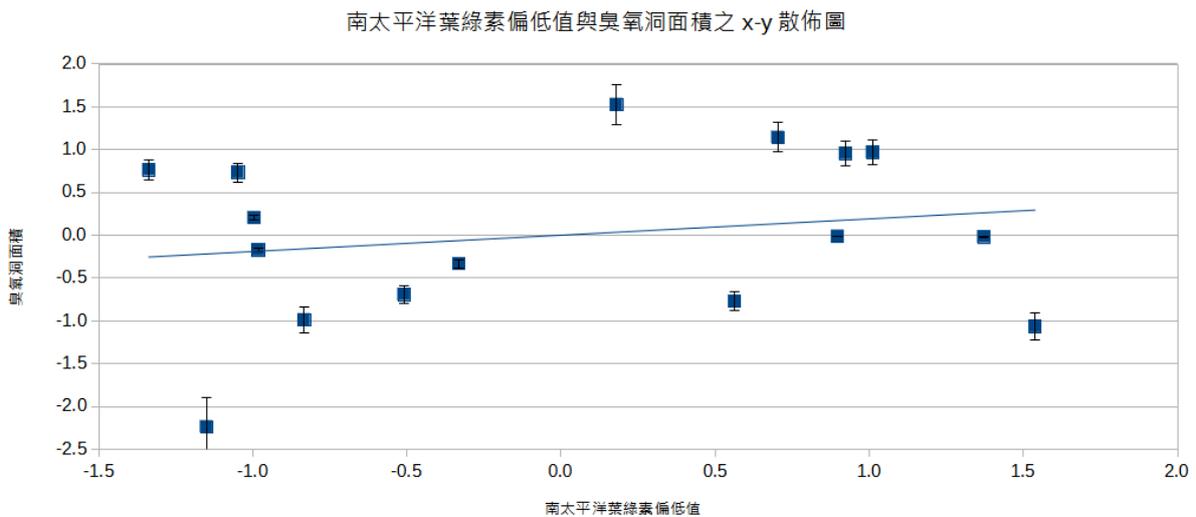
▲圖 18. 北太平洋葉綠素偏低值對臭氧洞面積之 xy 散佈圖

圖 18 顯示北太平洋葉綠素偏低值與臭氧洞面積的關係，由圖可知臭氧洞面積與葉綠素偏小值呈正相關，可以發現臭氧洞面積下降時葉綠素偏低值有變小趨勢。



▲圖 19. 南太平洋葉綠素偏低值與臭氧洞面積之趨勢圖

在圖 19 中可以發現臭氧洞面積有變小趨勢，而葉綠素偏低值也隨之下降，與其他兩大洋符合。但數據起伏較大，在 2010 年間有明顯驟降，兩者相關性需用散佈圖討論。



▲圖 20. 南太平洋葉綠素偏低值與臭氧洞面積之 xy 散佈圖

圖 20 顯示北大西洋葉綠素偏低值與臭氧洞面積的關係，可以發現臭氧洞面積下降時葉綠素偏低值面積也隨之下降，兩數據組呈現正相關，與北太平洋符合。

二、溫度異常與葉綠素之關係

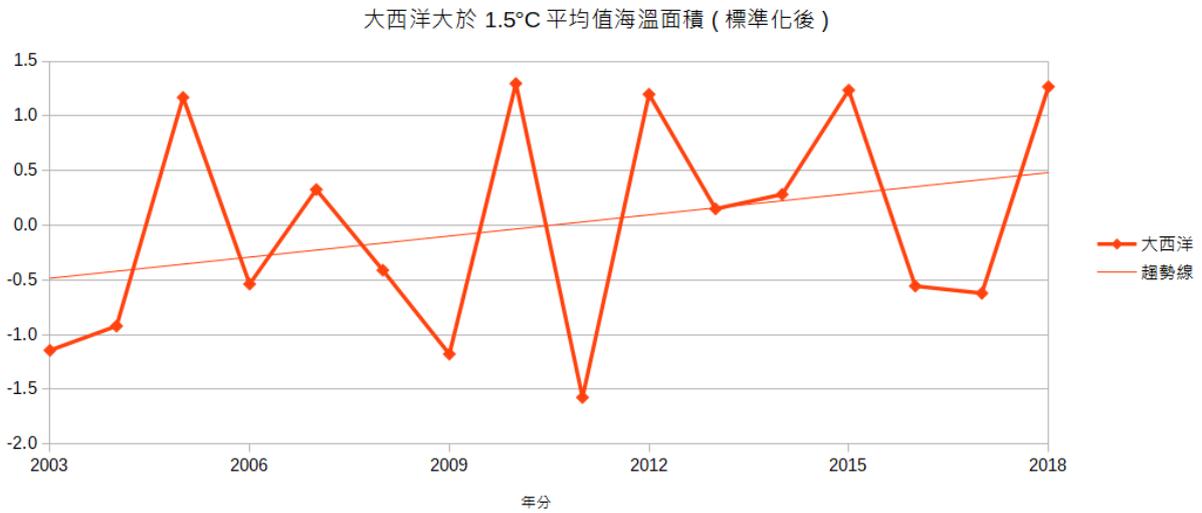
我們分別測量三大洋中在 9 月份的海溫異常，並與葉綠素偏低值的面積比對，整體變化顯示於表 2。本研究的觀察重點在異常增溫的現象，可以看得出來這些異常值若以年為單位，並沒有特別的規律性。

▼表 2. 三大洋葉綠素偏低值面積及海溫異常(>1.5°C)面積(單位:像素)

原始數據	年分	葉綠素偏低值			海溫異常值		
		大西洋	印度洋	太平洋	大西洋	印度洋	太平洋
	2003	3423	775	15701	1954	261	5509
	2004	4223	1723	17816	2368	765	7776
	2005	4860	1577	19385	6266	301	6607
	2006	4107	1459	18756	3084	377	6838
	2007	4076	1901	18879	4695	1008	3711
	2008	4105	2130	18873	3321	918	6279
	2009	4224	2009	20767	1890	837	5340
	2010	4091	2350	21729	6502	854	8026
	2011	3294	601	11536	1152	699	5539
	2012	3641	1301	12992	6319	2110	8640
	2013	3735	1065	11472	4366	559	10557
	2014	3316	1579	14154	4613	1008	9692
	2015	2155	680	10920	6389	4604	24567
	2016	2592	876	12709	3050	1214	7294
	2017	2095	673	11005	2927	2283	4600
	2018	2857	821	11989	6447	893	4471
平均值		3549.625	1345	15542.6875	4083.9375	1168.1875	7840.375
標準差		793.7642	576.6489	3844.8619	1863.9446	1073.6093	4847.1085
標準化後							
數據	年分	北大西洋	印度洋	太平洋	北大西洋	印度洋	太平洋
	2003	-0.1595	-0.9885	0.0411	-1.1427	-0.8450	-0.4810
	2004	0.8484	0.6555	0.5912	-0.9206	-0.3756	-0.0133
	2005	1.6509	0.4023	0.9992	1.1707	-0.8077	-0.2545
	2006	0.7022	0.1977	0.8357	-0.5365	-0.7370	-0.2068
	2007	0.6632	0.9642	0.8676	0.3279	-0.1492	-0.8519
	2008	0.6997	1.3613	0.8661	-0.4093	-0.2330	-0.3221
	2009	0.8496	1.1515	1.3587	-1.1770	-0.3085	-0.5159
	2010	0.6821	1.7428	1.6089	1.2973	-0.2927	0.0383

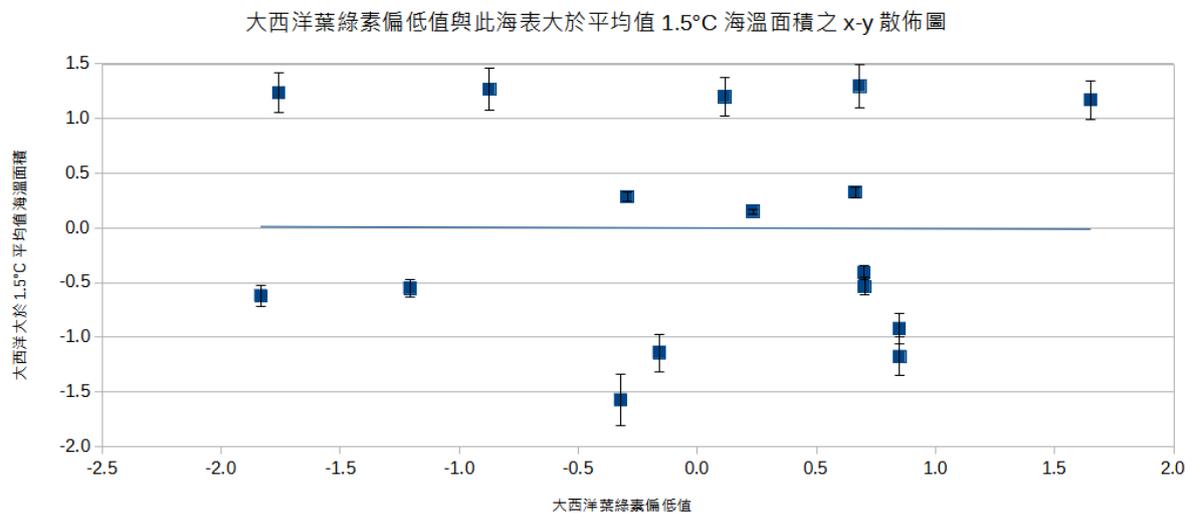
2011	-0.3220	-1.2902	-1.0422	-1.5730	-0.4370	-0.4748
2012	0.1151	-0.0763	-0.6635	1.1992	0.8772	0.1650
2013	0.2336	-0.4856	-1.0588	0.1513	-0.5674	0.5605
2014	-0.2943	0.4058	-0.3613	0.2839	-0.1492	0.3820
2015	-1.7570	-1.1532	-1.2024	1.2367	3.2003	3.4508
2016	-1.2064	-0.8133	-0.7371	-0.5547	0.0427	-0.1127
2017	-1.8325	-1.1654	-1.1803	-0.6207	1.0384	-0.6685
2018	-0.8726	-0.9087	-0.9243	1.2678	-0.2563	-0.6951

(一)大西洋



▲圖 21. 大西洋 9 月之海面溫度正異常(+1.5°C 以上)面積之線性趨勢

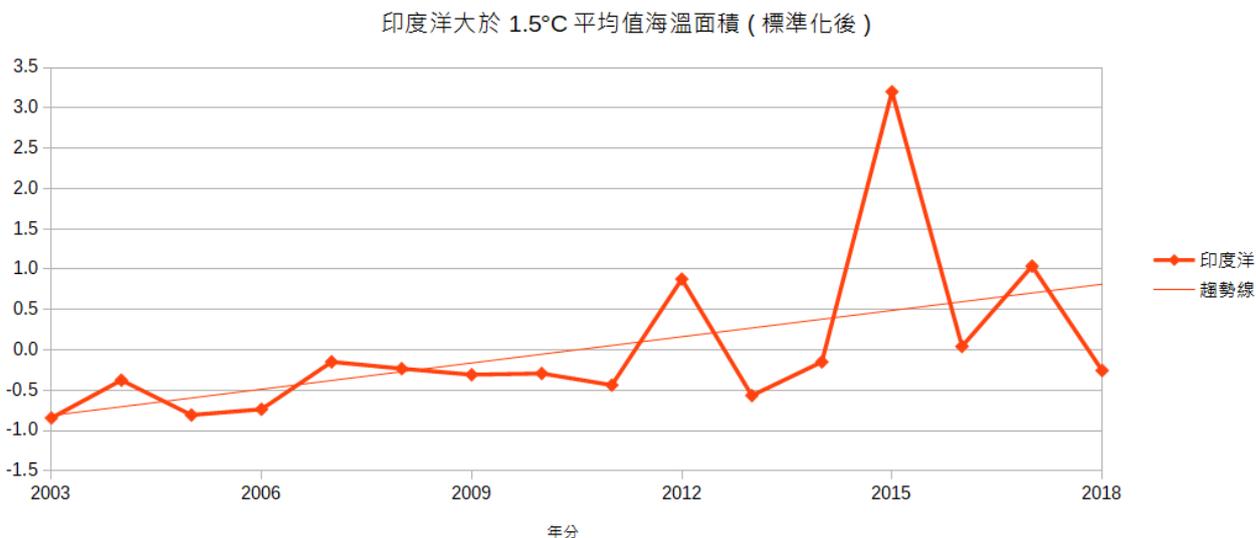
從圖 21 能觀察到海面溫度異常面積之線性趨勢斜率為正，代表此數據逐年上升，可推測海溫平均值也有逐年上升趨勢。



▲圖 22. 大西洋 9 月之海面溫度正異常(+1.5°C 以上)標準化後面積與葉綠素偏小值面積之 xy 散佈圖

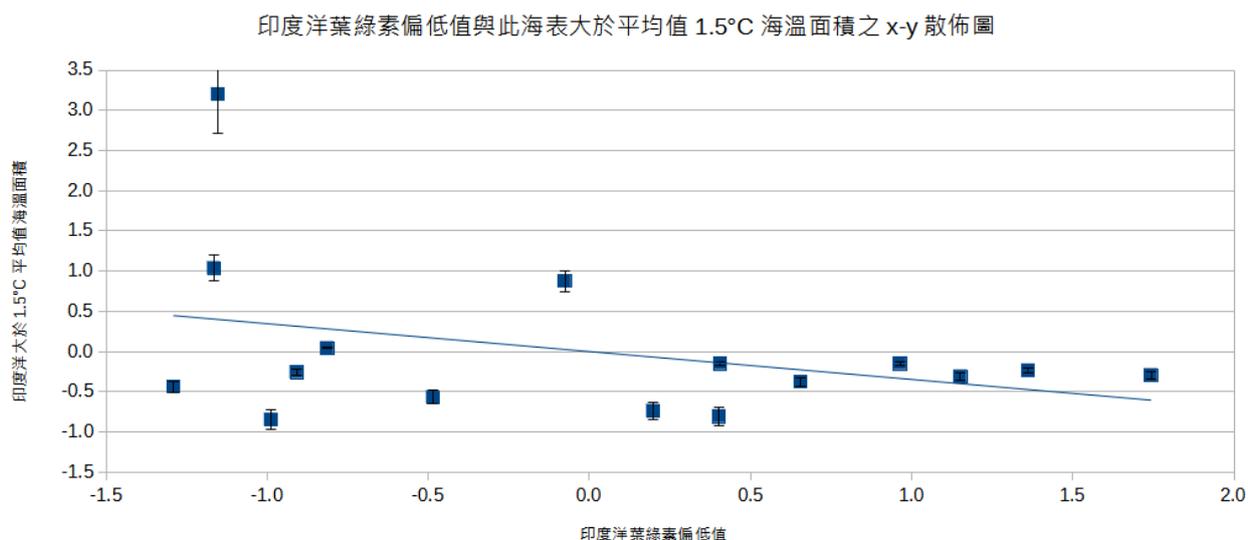
圖 22 為一 xy 散佈圖，且此圖數據離散程度較大且斜率幾乎為零。主要原因為大西洋在這段時間內海溫異常震盪大，沒有明顯趨勢性，導致此圖較無明顯相關性。

(二)印度洋



▲圖 23. 印度洋 9 月之海面溫度正異常(+1.5°C 以上)面積之線性趨勢

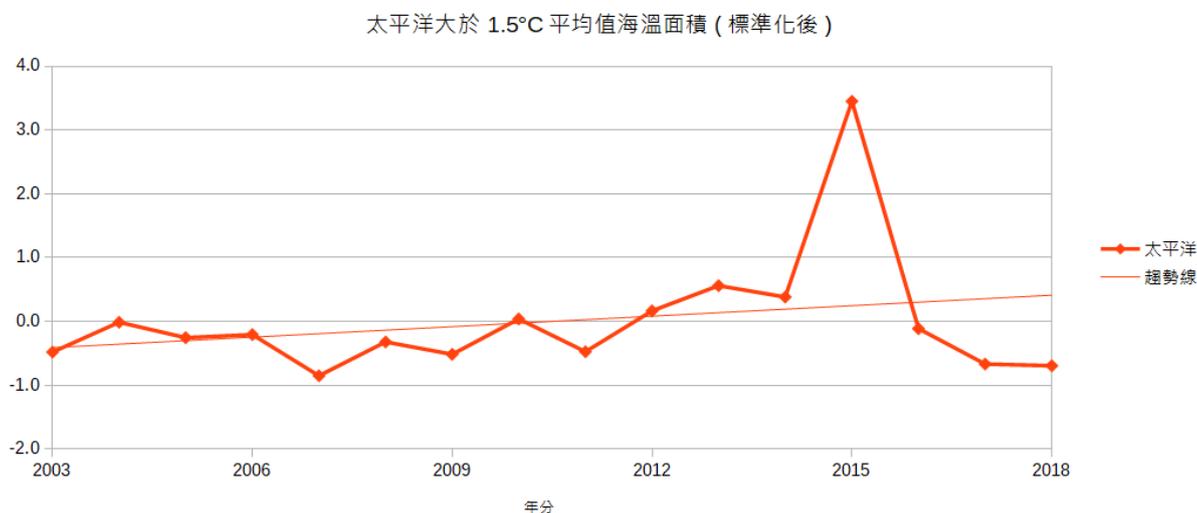
從圖 23 能觀察到海面溫度異常面積之線性趨勢斜率為正，代表此數據逐年上升，可推測海溫平均值也有逐年上升趨勢。



▲圖 24. 印度洋 9 月之海面溫度正異常(+1.5°C 以上)標準化後面積與葉綠素偏小值面積之 xy 散佈圖

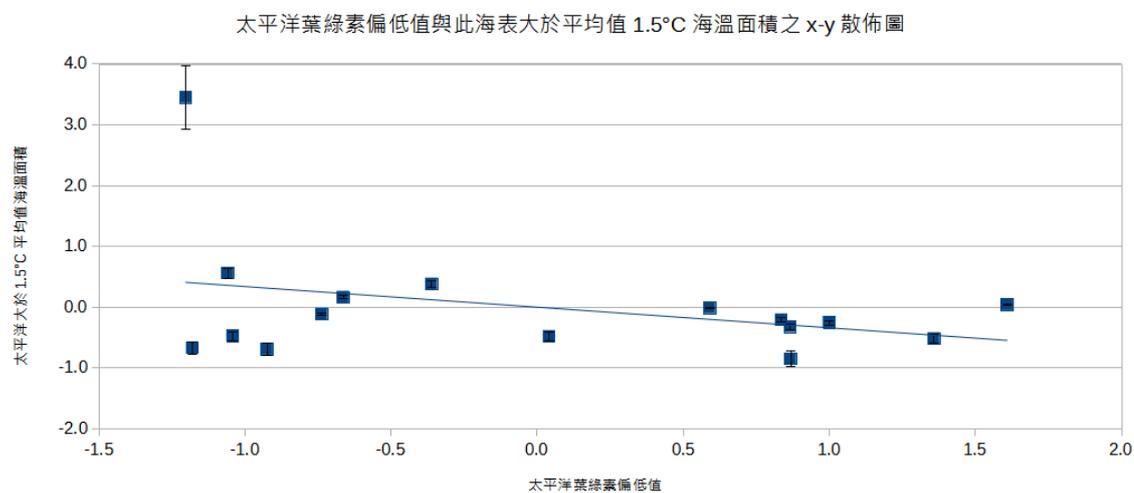
圖 24 之數據分布都較靠近趨勢線，代表數據離散較小。數據斜率為負，當海溫異常值大於 1.5°C 的面積越大，葉綠素偏小值面積越小，葉綠素濃度也就相對較高。可以看出資料分布情況與太平洋相近。

(三) 太平洋



▲圖 25 太平洋 9 月之海面溫度正異常($+1.5^{\circ}\text{C}$ 以上)面積之線性趨勢

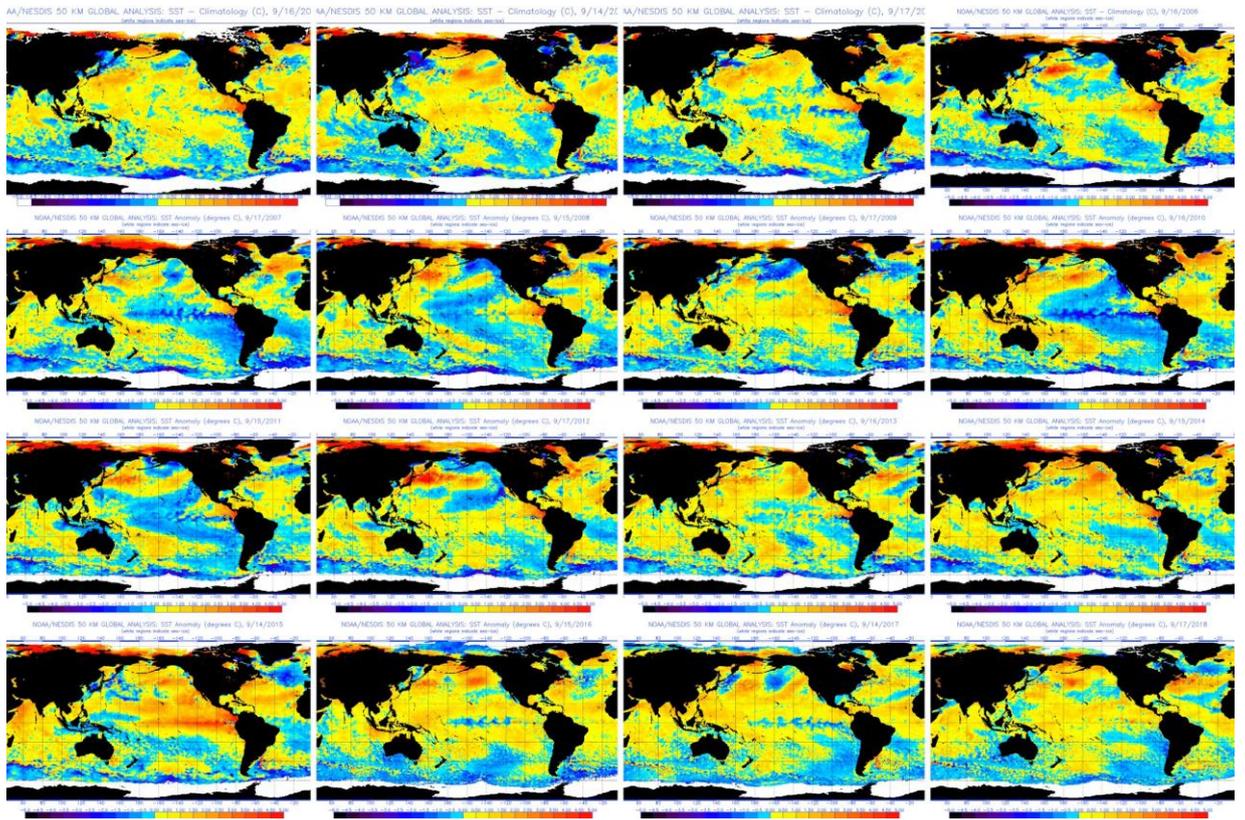
從圖 25 能觀察到海面溫度異常面積之線性趨勢斜率為正，代表此數據逐年上升，可推測海溫平均值也有逐年上升趨勢。



▲圖 26. 太平洋 9 月之海面溫度正異常($+1.5^{\circ}\text{C}$ 以上)標準化後面積與葉綠素偏小值面積之 xy 散佈圖

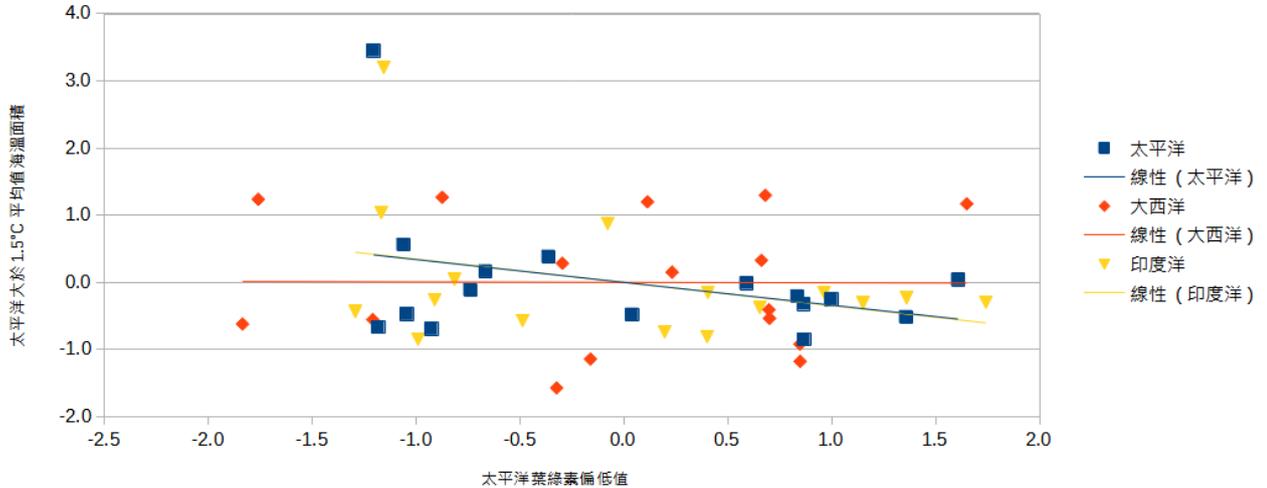
圖 26 為一 xy 散佈圖，且數據分布都靠近趨勢線，代表數據離散較小，為強負相關，異常值大於 1.5°C 的面積越大，葉綠素偏小值面積越小。

(四) 三大洋



▲圖 27. 全球海溫異常圖(左上 2003 年至右下 2018 年)

太平洋葉綠素偏低值與此海表大於平均值 1.5°C 海溫面積之 x-y 散佈圖

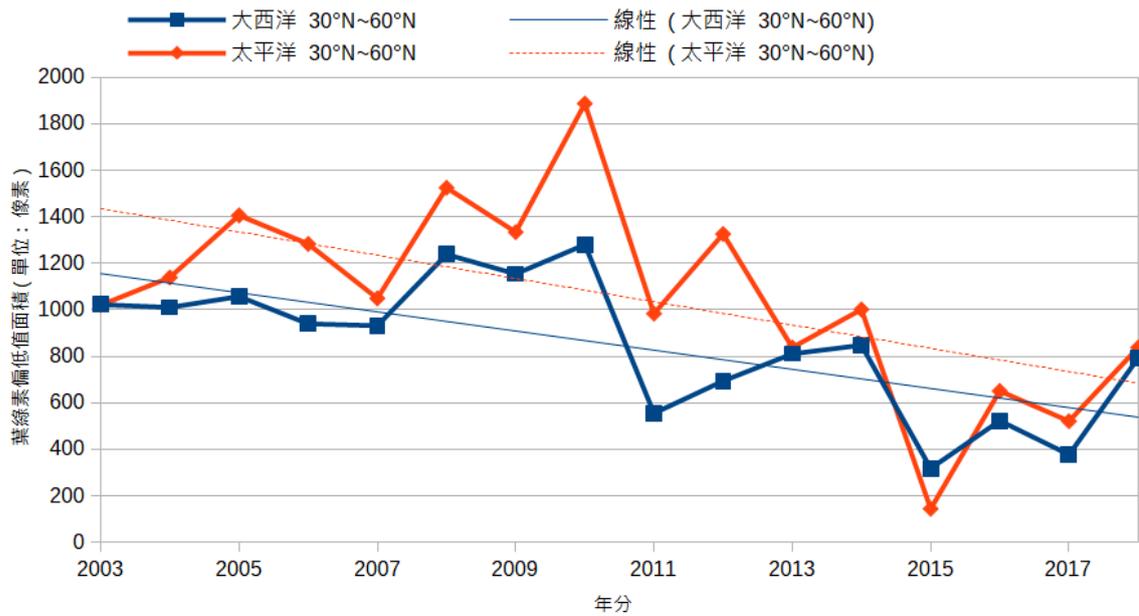


▲圖 28 三大洋在 9 月的海面溫度正異常(+1.5°C 以上)面積

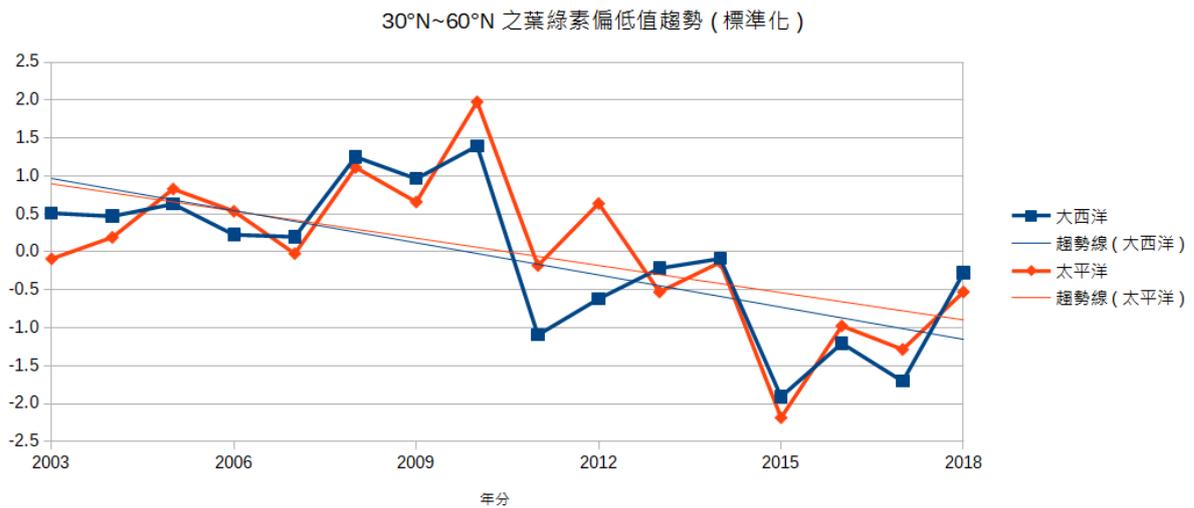
圖 28 為太平洋、大西洋和印度洋在 9 月與當月之葉綠素偏低值比較，兩者皆經標準化，可以看到印度洋與太平洋之線性趨勢剛好重合，且兩者海溫與葉綠素關係皆呈反相關，可看出太平洋及印度洋之趨勢幾乎完全相符；大西洋則呈現零相關。

三、緯度變化與葉綠素之關係

(一) 各大洋同緯度之葉綠素偏低值面積比較

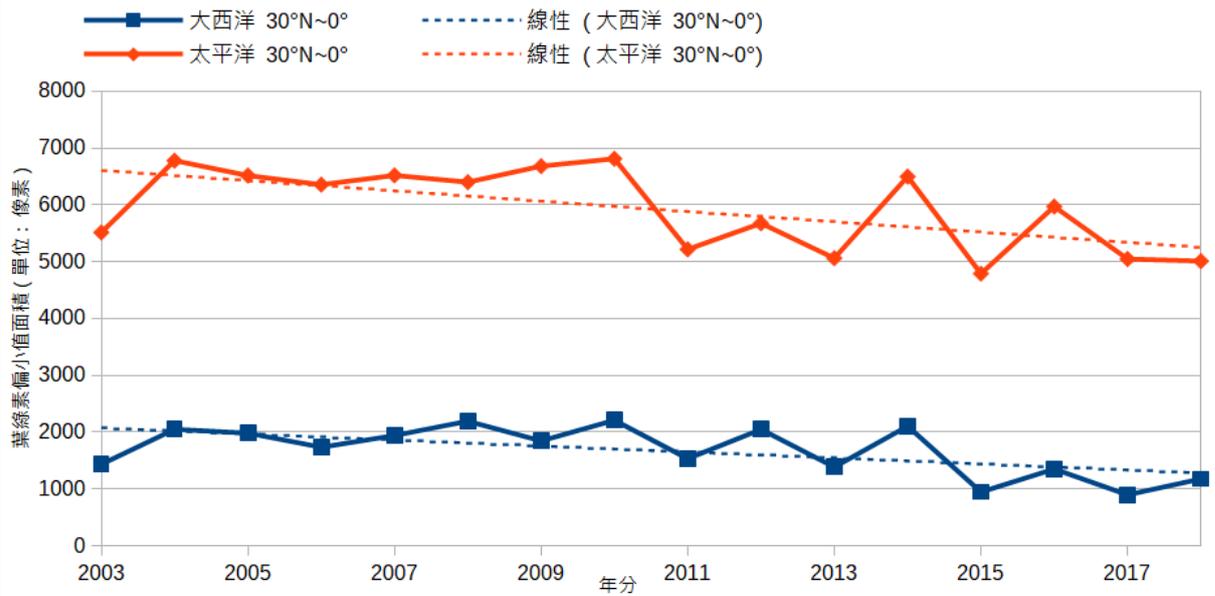


▲圖 29. 大西洋與太平洋 30°N-60°N 的葉綠素偏低值面積逐年趨勢

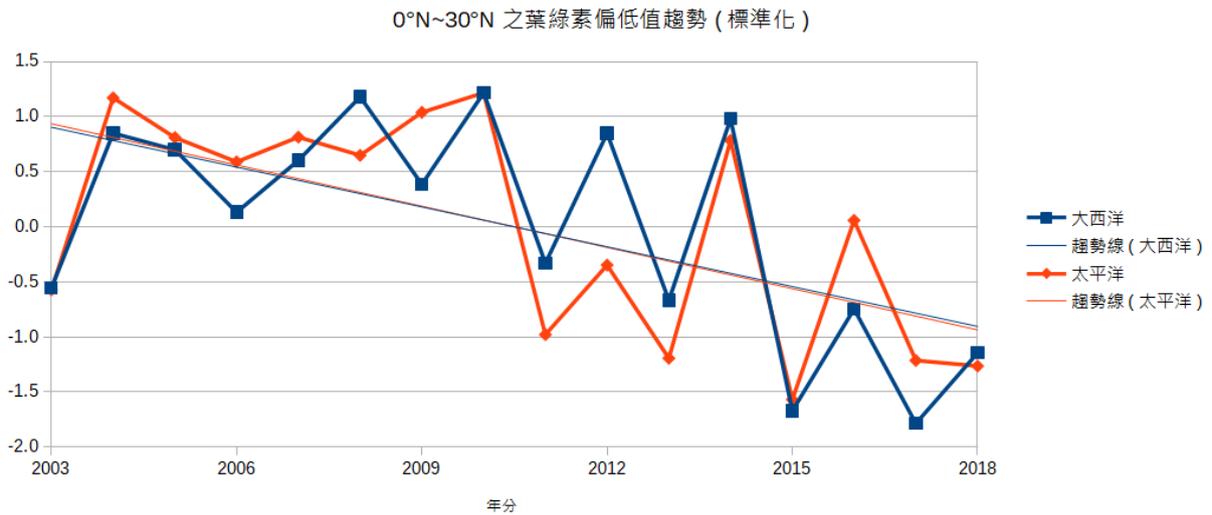


▲圖 30. 大西洋與太平洋 30°N-60°N 的葉綠素偏低值面積逐年趨勢(標準化)

從圖 29 中可以看到整體線性趨勢均為下降，說明兩者之葉綠素偏低面積皆逐年降低。進一步觀察圖 30 可以發現兩者斜率接近，並且數據呈正相關。兩者數據皆在 2010 年達到最高峰，2015 年有著最小值，可以間接推論緯度對水色分佈有影響。

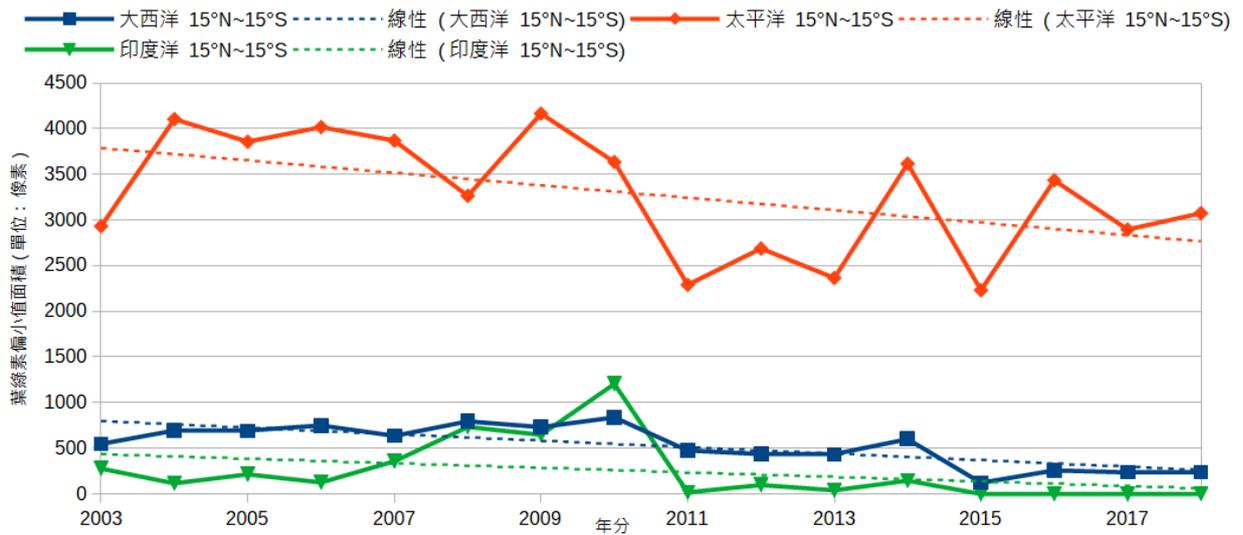


▲圖 31. 大西洋與太平洋 0°N-30°N 的葉綠素偏低值面積逐年趨勢

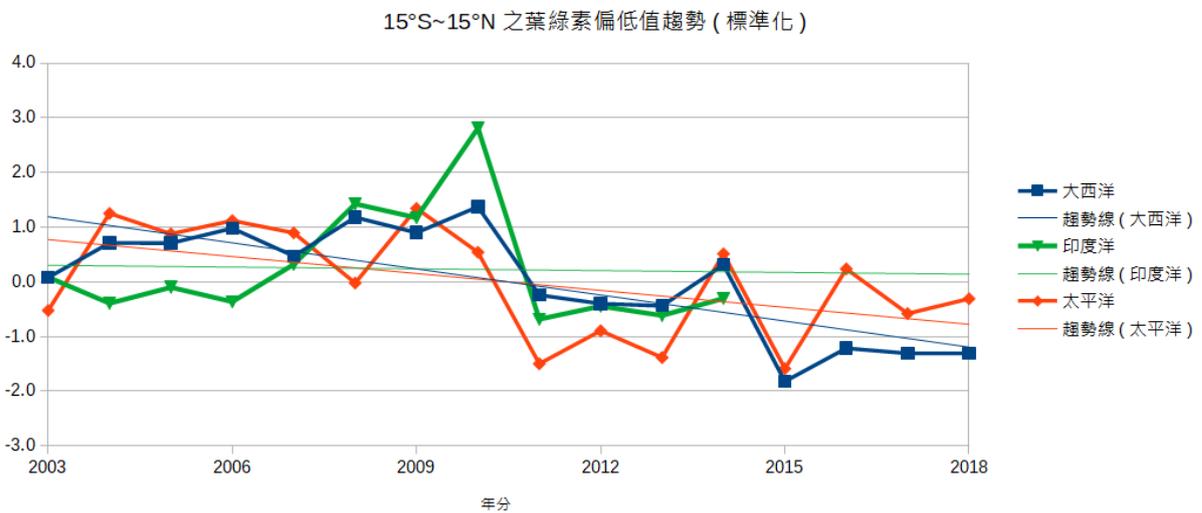


▲圖 32. 大西洋與太平洋 0°N-30°N 的葉綠素偏低值面積逐年趨勢(標準化)

在圖 31 中，太平洋和大西洋的葉綠素偏低值，兩者面積大小不同，但逐年變小的趨勢斜率幾乎相符。進一步觀察圖 32 可以發現兩者斜率幾乎吻合，說明兩者之關聯性強，且緯度對水色分佈有不小的影響。

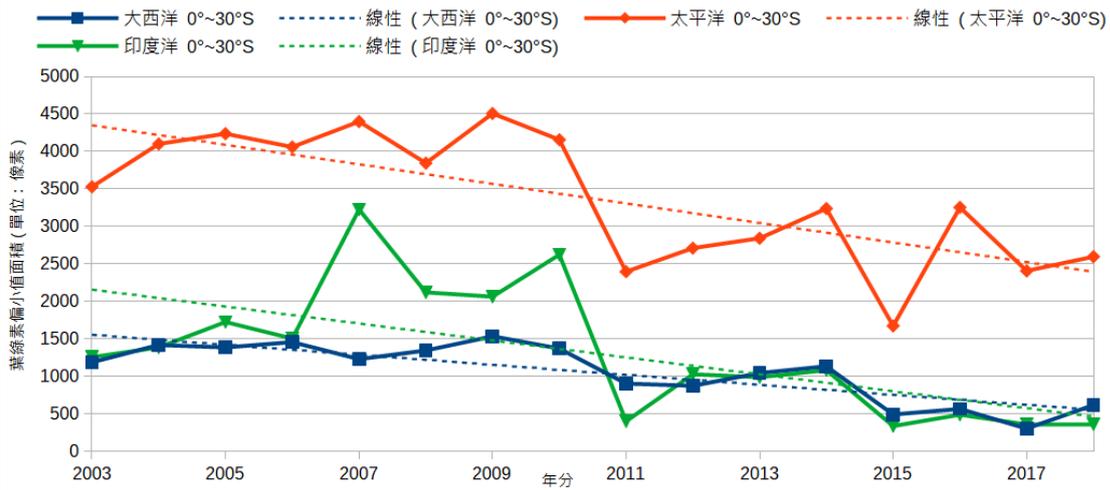


▲圖 33. 三大洋 15°N-15°S 的葉綠素偏低值面積逐年趨勢

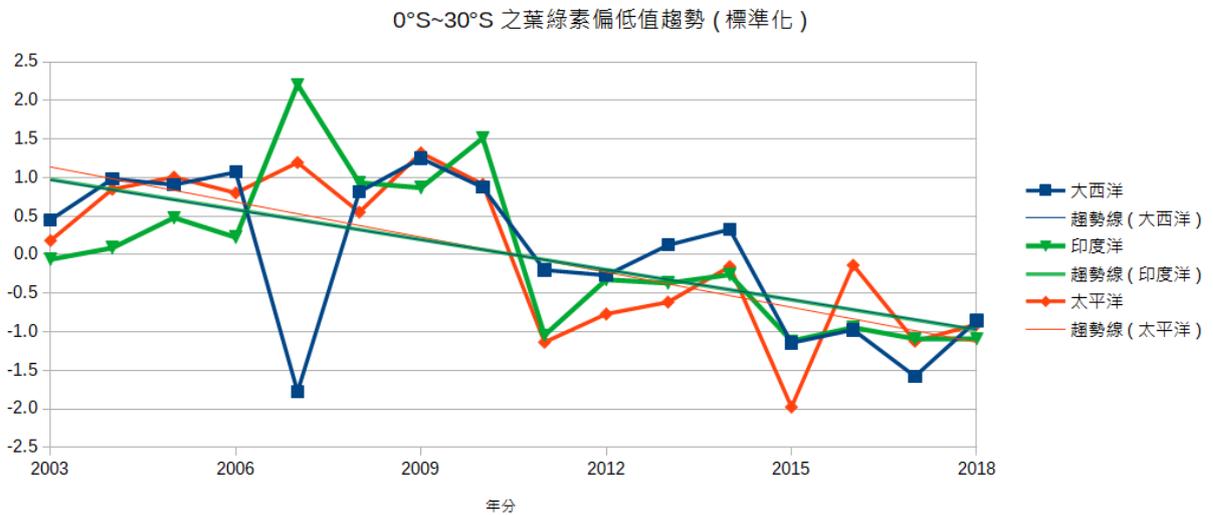


▲圖 34. 三大洋 15°N-15°S 的葉綠素偏低值面積逐年趨勢(標準化)

從圖 33 中可以看到整體線性趨勢均為下降且斜率接近，不過數據無明顯相關，推測是因為赤道影響變因較多。太平洋葉綠素濃度偏低面積明顯較大，且起伏明顯。雖然數據無明顯相關性，但在 2010、2014 年間還是可以看到一致的數據趨勢。接下來觀察圖 34，能看到三組數據雖無直接關聯，但趨勢皆為逐年降低，與前述結果相符。

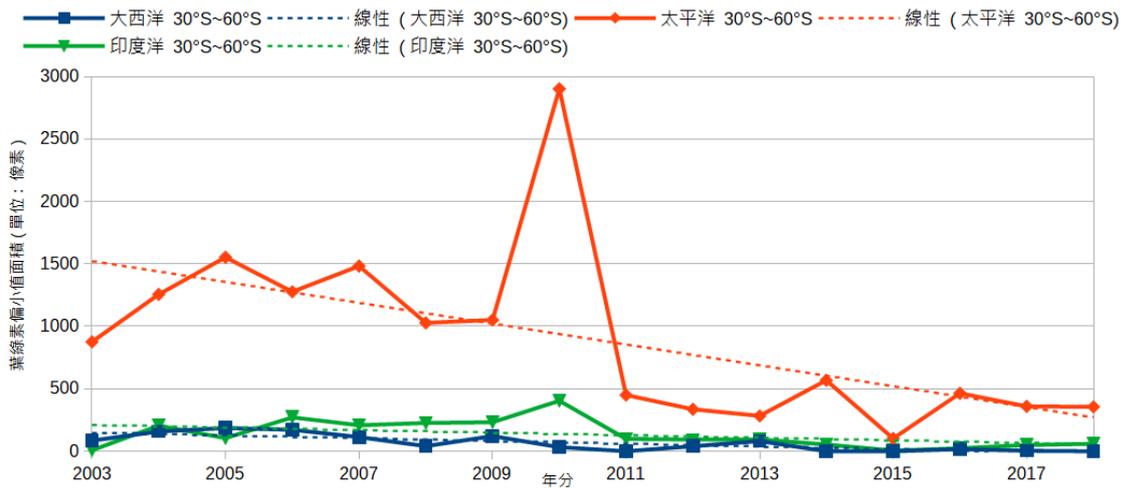


▲圖 35. 三大洋 0°-30°S 的葉綠素偏低值面積逐年趨勢

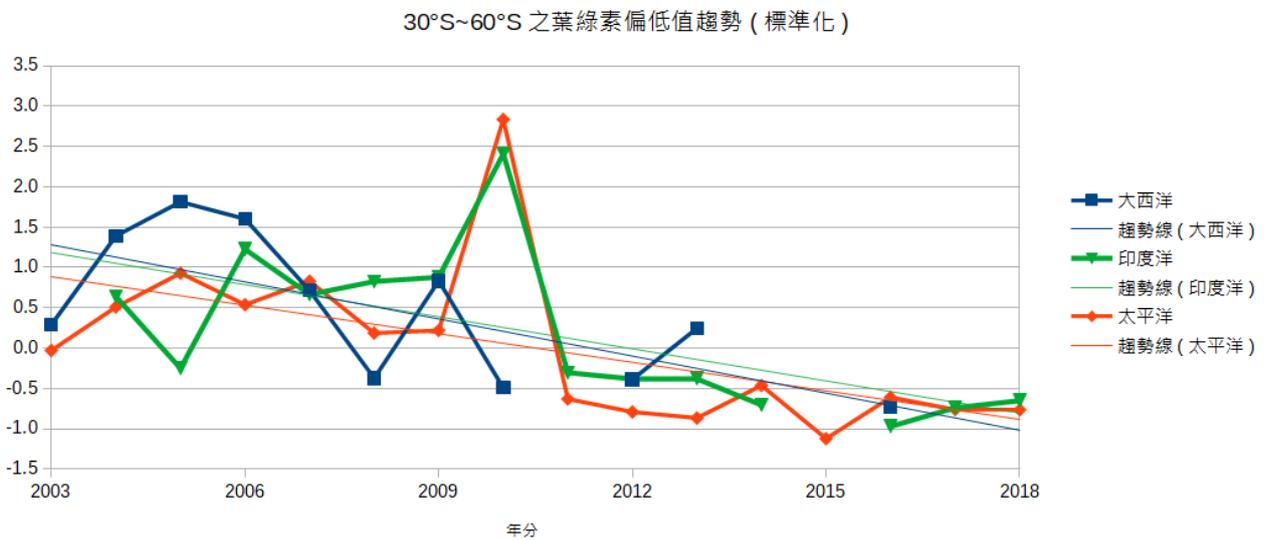


▲圖 36. 三大洋 0°-30°S 的葉綠素偏低值面積逐年趨勢(標準化)

從圖 35 中可以看到太平洋與印度洋整體線性趨勢均為下降且趨勢接近。觀察圖 36 可看到，但大西洋在 2007 年有驟降，推斷有其他變因影響葉綠素濃度，此外太平洋與印度洋起伏都很劇烈，後續可分別提出討論。



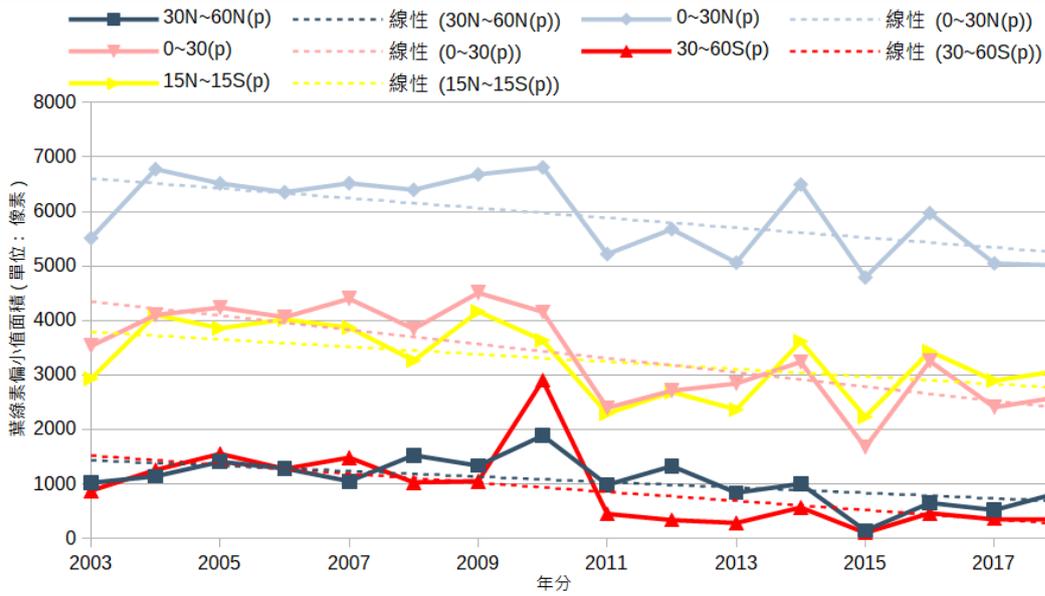
▲圖 37. 三大洋 30°-60°S 的葉綠素偏低值面積逐年趨勢化



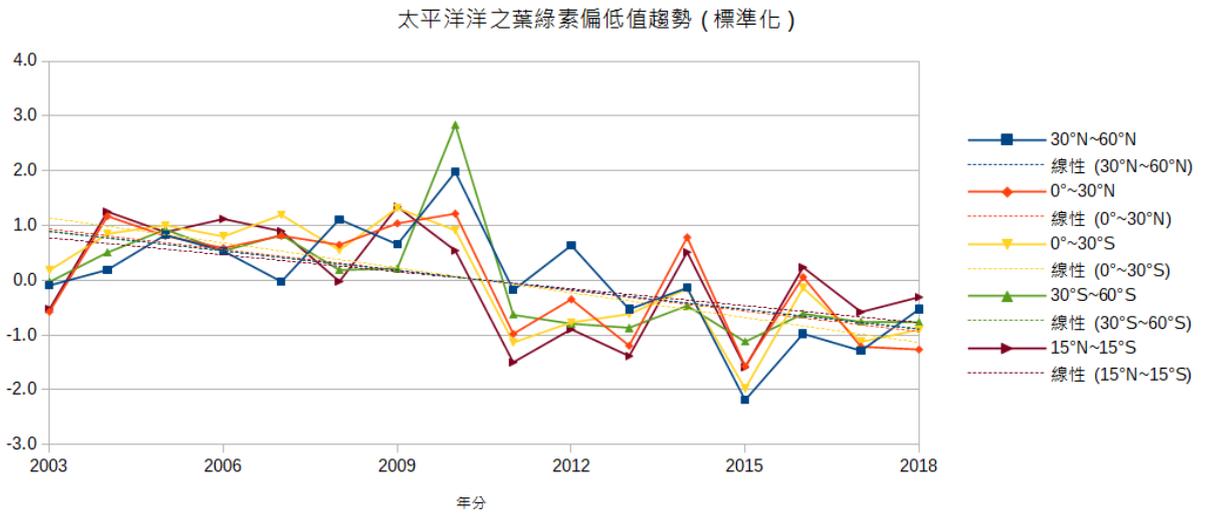
▲圖 38. 三大洋 30°-60°S 的葉綠素偏低值面積逐年趨勢化(標準化)

圖 37 內印度洋與大西洋之與數據變化遠小於太平洋，尤其 2010 年，太平洋的數據更是突出，從此張圖很難明確觀察到中緯度對葉綠素濃度的影響。圖 38 內雖然可以看到部分數據趨勢相符，但因此區葉綠素總體濃度及少而出現資料缺少的現象，故較難觀察到明顯關聯性。

(二) 三大洋緯度對葉綠素偏低值面積的影響

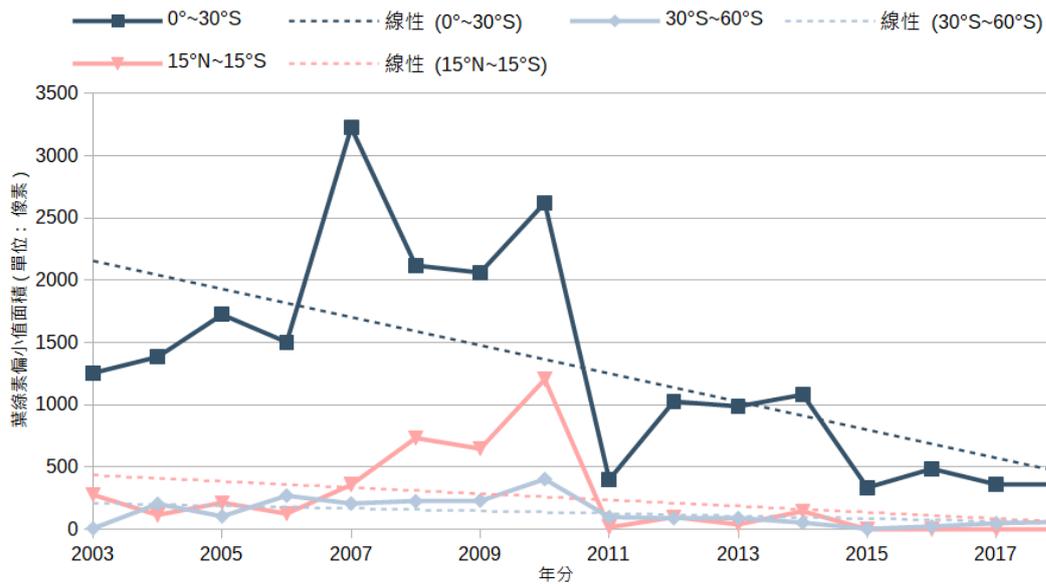


▲圖 39. 太平洋各緯度葉綠素偏低值面積趨勢

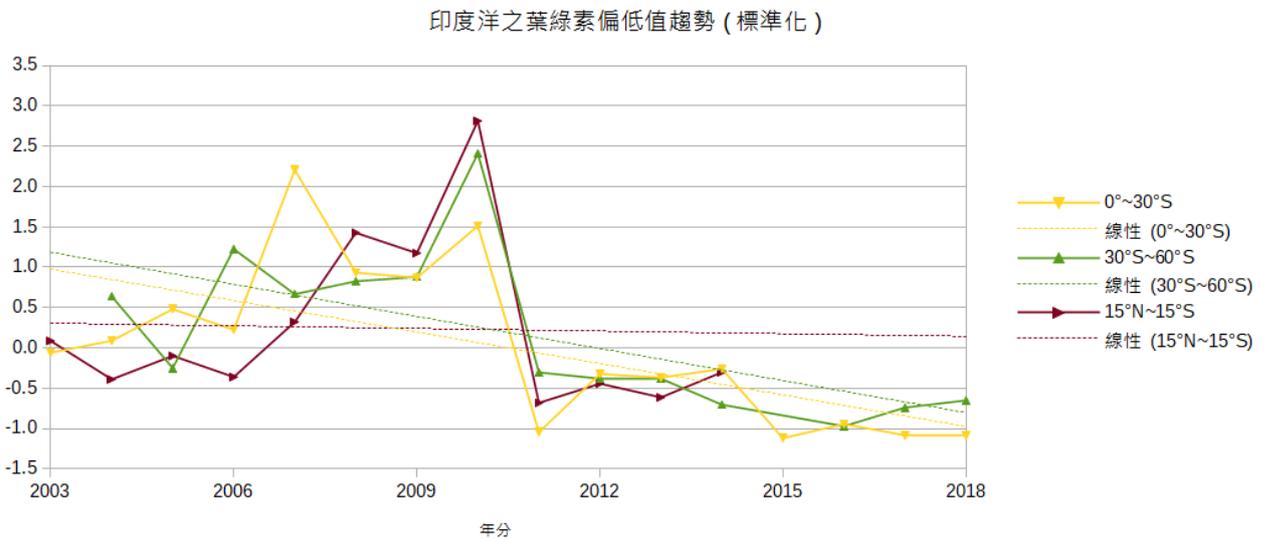


▲圖 40. 太平洋各緯度葉綠素偏低值面積趨勢(標準化)

圖 39 顯示太平洋各緯度之葉綠素偏低值面積，其面積下降趨勢相近。2010 年這些數據出現顯著上升，初步推測是因為當年 9 月有明顯的海溫異常，因此才導致 2010 年的突然上升。圖 40 則可以看到此水體各緯度雖有差異，但大致上葉綠素濃度的每年變化趨勢相同。

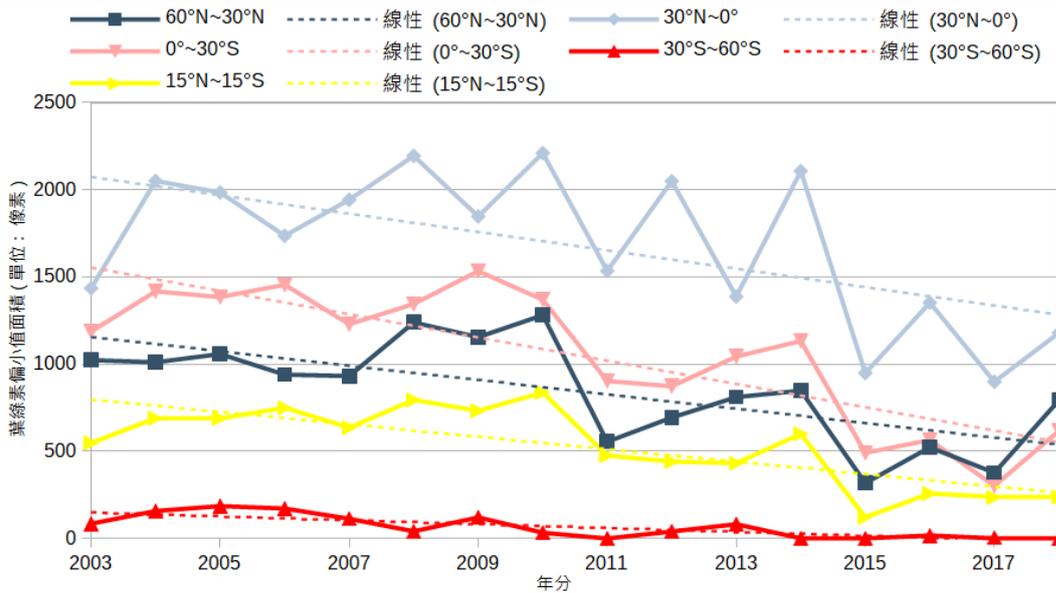


▲圖 41. 印度洋各緯度葉綠素偏低值面積之趨勢

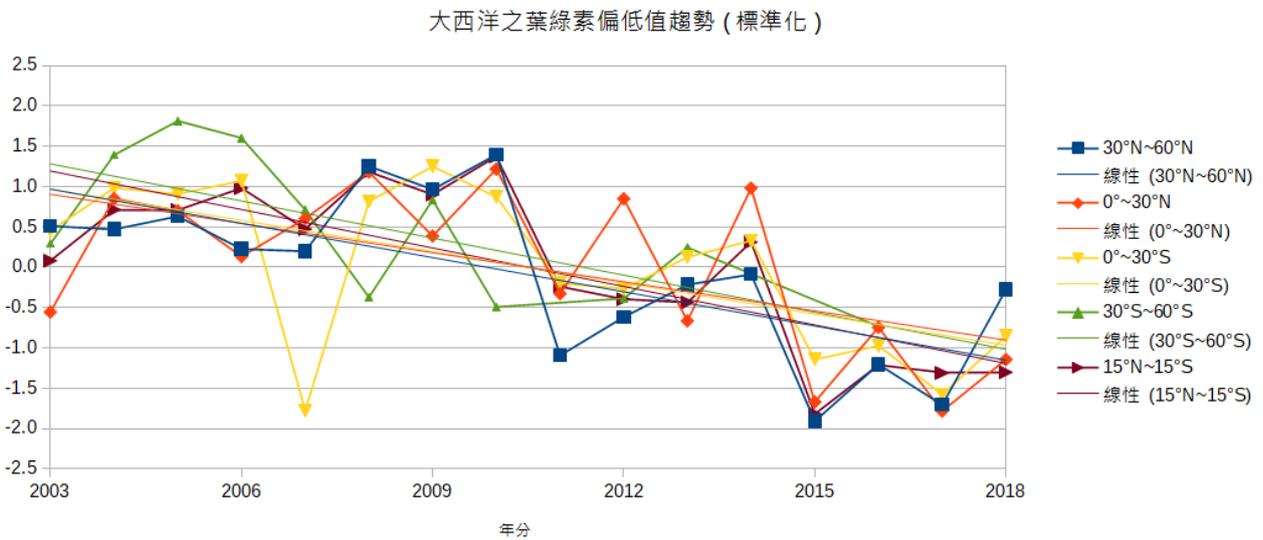


▲圖 42. 印度洋各緯度葉綠素偏低值面積之趨勢(標準化)

從圖 41 內可以觀察到印度洋的葉綠素偏低值面積，不管在哪個緯度，總體趨勢還是下降，且 2009~2015 年間可以看到三個緯度變化的線段很相似。圖 42 則能觀察到 0° - 30° S 及 30° - 60° S 之趨勢較相近， 15° N- 15° S 則與其他兩者無較大關聯，推測主要原因是因為印度洋在赤道以北的面積較小，導致取樣時葉綠素濃度較低，故無法與赤道以南之葉綠素產生關連性。



▲圖 43. 大西洋各緯度葉綠素偏低值面積趨勢

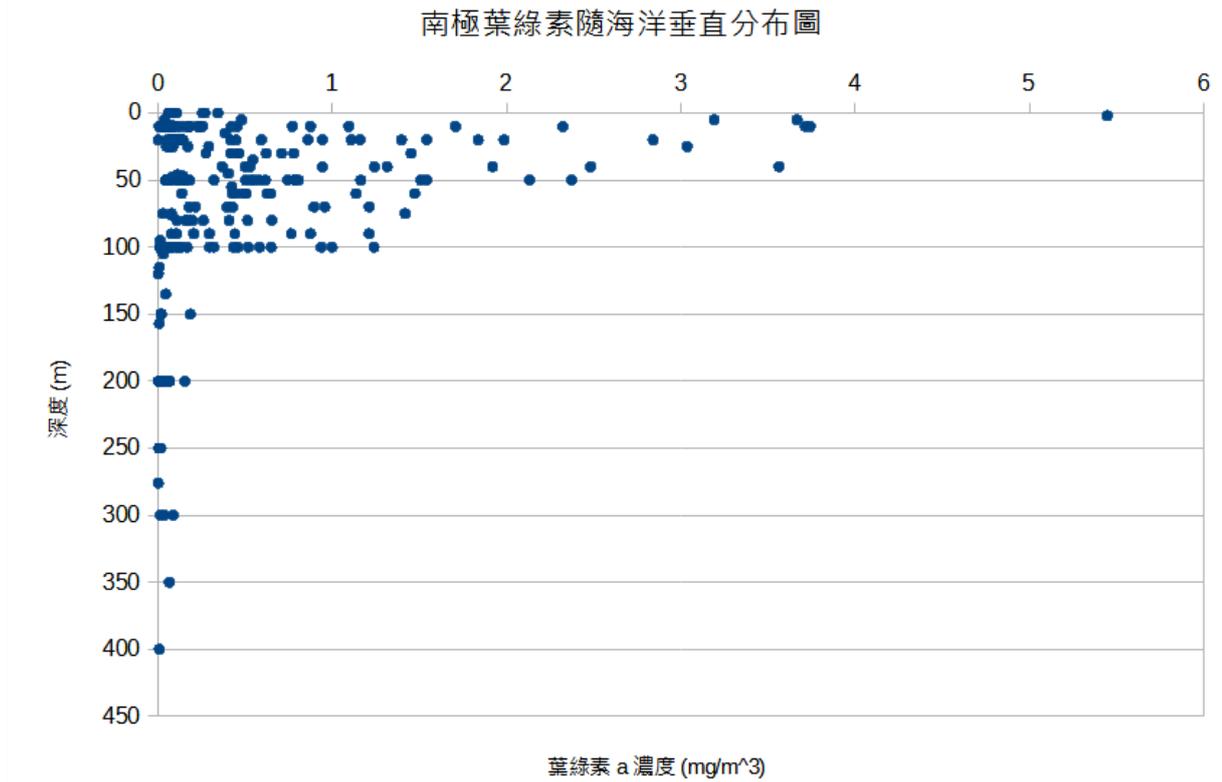


▲圖 44. 大西洋各緯度葉綠素偏低值面積趨勢(標準化)

從圖 43 中可觀察到，除了低緯與赤道區的數據起伏較大之外，各緯度的數據變化趨勢都相似。這樣的變化有可能是因為赤道的數據較大，所以其他緯度比較後較不明顯。各緯度數據在 2014 年間都有明顯驟降，初步推測是因為水溫異常導致。從圖 44 則能觀察到 5 組數據之斜率相當接近，符合上述印度洋及太平洋得出之結論。

四、南極地區葉綠素變化

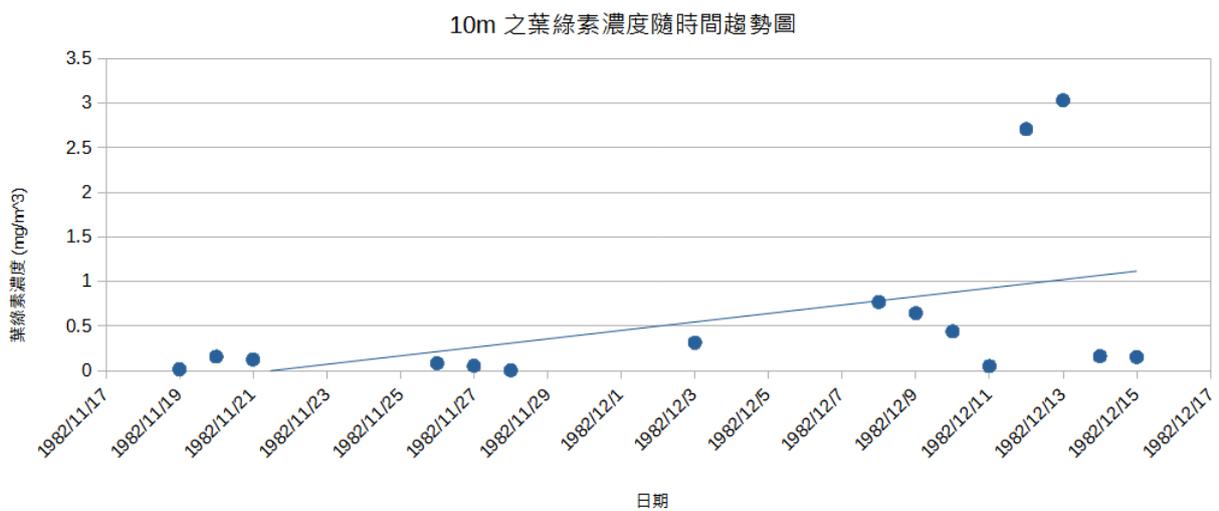
(一)深度-葉綠素濃度圖



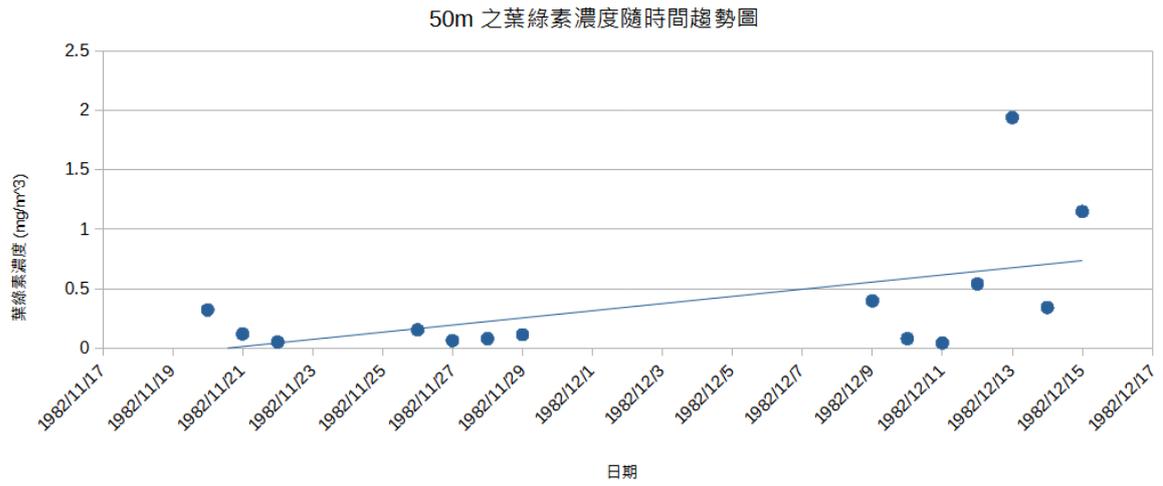
▲圖 45. 南極葉綠素隨海洋垂直分布圖

由圖 45 可觀察到除有些較密集的數據外，葉綠素濃度從水面往水底遞減，大部分數據集中於 200m 以內，且葉綠素濃度最大值在深度於小於 50m 處，可以觀察到水表面的濃度並非最高，濃度最高的區域大約落在 2~50m 之間。

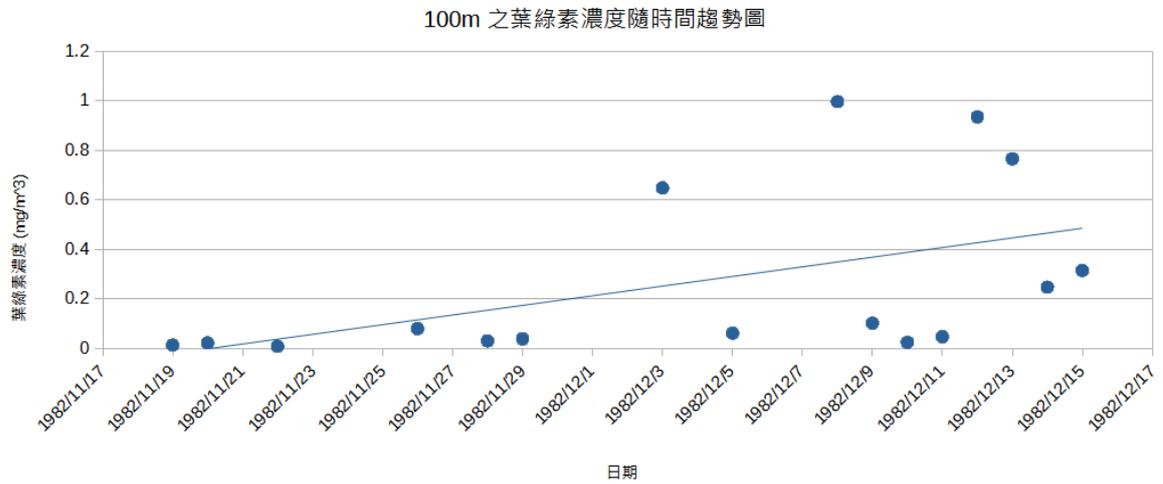
(二) 同深度之葉綠素濃度趨勢圖



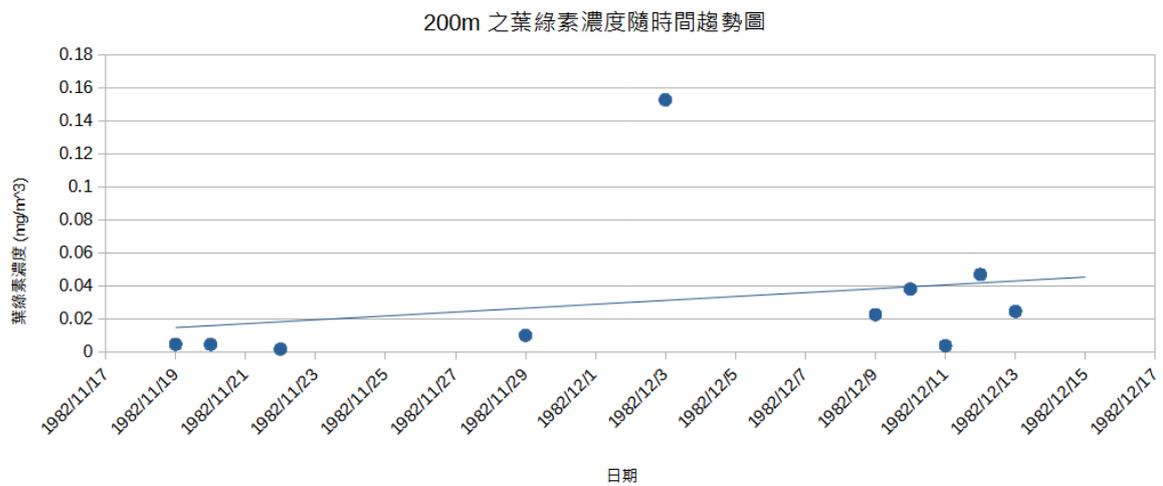
▲圖 46. 10m 之葉綠素濃度隨時間趨勢圖



▲圖 47. 50m 之葉綠素濃度隨時間趨勢圖



▲圖 48. 100m 之葉綠素濃度隨時間趨勢圖



▲圖 49. 200m 之葉綠素濃度隨時間趨勢圖

由圖 46~圖 49 可觀察到在海水深度固定的條件下，1982/11/19~1982/12/15 的這段期間葉綠素濃度，不管在什麼深度都有上升趨勢。在這段期間(11 月~12 月)，南極為夏天且溫度逐漸升高，故次結論與先前之溫度會影響葉綠素濃度之結論符合，再次說明了溫度變高時，葉綠素濃度也會隨之改變。

陸、 討論

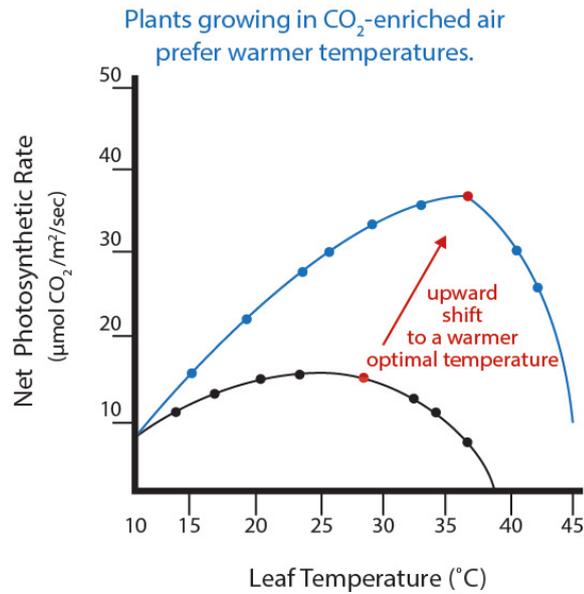
一、 臭氧洞與葉綠素的關係

從三大洋的臭氧洞面積對葉綠素偏低值面積趨勢圖中可觀察到，臭氧洞面積與葉綠素偏低值面積的趨勢均逐年漸下降；從三大洋的臭氧洞面積對葉綠素偏低值面積 xy 散佈圖中可觀察到，除了印度洋之外，其他四塊海域(南、北大西洋、太平洋)中的四筆資料皆呈現了正相關。因臭氧洞可以對應到紫外線的入射量，故得到紫外線入射量越高，海水表面葉綠素濃度越低的結論。

而北大西洋和南大西洋、北太平洋和南太平洋的折線圖變化趨勢雖然相似，但細部變化不大一樣，並不是每一年都一起升高或降低(例如 2010 年的異常)，由此可知臭氧洞雖會間接影響海水表面的葉綠素濃度，但應該還有其他因素也會影響葉綠素濃度。

從南、北太平洋與南、北大西洋的臭氧洞面積對葉綠素偏低值面積(標準化後)xy 散佈圖可觀察到，數據的分布為一帶狀，且臭氧洞面積與葉綠素面積的趨勢線斜率為正，代表了臭氧洞面積越大時，葉綠素偏低值面積也隨之變大，也就是葉綠素濃度變低。但印度洋非常特殊，趨勢線斜率較為特殊，有微微往上的趨勢，我們推測原因是因為印度洋多靠陸地且範圍較小，人為干擾過多導致如此現象。

二、 溫度異常對葉綠素之影響



▲圖 50. 光合反應速率對溫度之變化(資料來源：Bruce Dunn，2017)

海洋水色所拍攝出的葉綠素分佈，其實可以視為浮游植物的分布。陽光充足、食物足夠的情況下，浮游植物大量繁衍，使得海水表面的葉綠素增加，水色偏綠。正因為如此，我們可以使用水色圖反推葉綠素含量。浮游植物中的葉綠體，會因為參與酵素活性不同，而有不同速率的光反應。根據圖 50 的變化曲線，我們可以看到光合作用之最佳溫度落在 10°C~35°C 區間，而不是越高溫越好。

研究中針對海水表面溫度異常值的分析顯示(圖 21~圖 27、表 2)，若以 1.5°C 為基準，溫度異常數值大於 1.5°C 的地方，其範圍大小逐漸上升。以 2015 年為例，在太平洋溫度異常的數據中(圖 25、圖 26)，顯示太平洋的異常值在此年有劇烈的變化，很明顯 2015 年的海水溫度特別高。觀察太平洋葉綠素偏低的面積趨勢圖(圖 44)，會發現當年的數據出現了最低值，表示此年的海水表面的葉綠素含量變高。在緯度分佈的資料中也說明了，儘管各個緯度葉綠素數據都不一樣，但他們逐年變化的趨勢皆相同，斜率也十分的相近。這種海溫正異常的趨勢逐年上升，葉綠素的濃度也相對地逐年升高的結果，證明海洋水色的變化不只受紫外線影響，也受海水表面溫度影響。

同樣的情形在印度洋和大西洋也一樣，各緯度的線性趨勢大致相同並往升溫的方向變化。當然，兩個海洋的數據，也都能藉由海溫的異常升溫圖，解釋臭氧洞面積與海水表面葉綠素分佈中，幾個比較特別不同的數據。不過，除了 2015 年很明顯是因為海水溫度的關係之外，其實印度洋的各種相關性並沒有太平洋好。影響因素推測是印度洋太小，較易受到陸地的影響，使得當地的葉綠素分佈有更多不同的變因控制。大西洋的緯度數據則和太平洋較貼近，大西洋不同緯度的海溫變化趨勢，斜率幾乎一樣。

三、緯度變化與葉綠素之關係

從圖 29~圖 44 可觀察到，不管是各大洋同緯度範圍的區塊，還是相同海洋中不同緯度帶的區塊，顯示的葉綠素低值的面積都隨時間大致在下降，下降的幅度和斜率也接近。

(一)不同海洋相同緯度

從圖 29~圖 38 可以觀察到各緯度的數據趨勢均為下降，且趨勢線的斜率接近，推論是因為相同緯度，溫度、紫外線入射量等環境條件差不多，使得同緯度的葉綠素濃度變化趨勢相同。此時顯示的，即是較大系統對海水表面葉綠素濃度的影響，讓海水表面的葉綠素濃度隨著時間逐漸變高。

(二)相同海洋不同緯度

從圖 39~圖 44 可觀察到同一個海洋的不同緯度，在海水表面測得的葉綠素濃度的變化上表現一致，但還是有些許不同。可觀察到各大洋數據最大的區塊，太平洋和大西洋都是 $0\sim 30^{\circ}\text{N}$ 的數據值為最大，印度洋因為在南半球所以不會出現此情形。另外，緯度較高時，水色圖中藍色區塊越少，代表了高緯的葉綠素濃度較低緯還低。雖然低緯度海水溫度較高，理論上來說應使得浮游植物繁殖量變多，葉綠素濃度提高，但低緯度紫外線入射量比高緯多，故造成了低緯葉綠素濃度較高緯低的情況。從這邊也可以推測，海水表面葉綠素濃度在緯度的分佈，受到紫外線的影響大於受海溫的影響。

四、南極地區葉綠素濃度變化

在圖 45. 深度-葉綠素濃度散佈圖中可以看到海水深度越淺葉綠素濃度越高，並且葉綠素濃度高值幾乎都在深度 50 公尺之上，但在深度 0m，也就是海表，現有數據的數值都不高，反而在深度 2m 的深度能找到濃度高達 $5.444581\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$ 的數據，可以說明葉綠素會偏好在陽光充足的地方聚集，因此深度越淺葉綠素濃度越高，但卻因生物躲避紫外線的本能，並非海表濃度最高。將同深度的時間-葉綠素濃度圖加入參考，會發現在 11 月~12 月區間葉綠素濃度在任何深度都有上升趨勢，推測原因為 11 月~12 月為南半球的夏天，因此時正接近南半球的夏至，且南極地區為永晝，故光照量增加，提高光合作用的效率，在溫度與陽光驅使之下，葉綠素濃度有上升趨勢。

柒、 結論

若以海洋水色圖做為海水表面葉綠素濃度變化的依據，可以得知海水越偏綠色，海水表面葉綠素濃度越高；海水越偏藍色，海水表面葉綠素濃度越低。本研究以此為論述基礎，設定葉綠素 a 含量低值之面積為水色變化指標，再利用 image J，將 2003 年到 2018 年間每

年9月各大洋的水色低值數據中，顏色為藍紫色區域(對應葉綠素濃度大概在 0.2 mg/m^3)計算出來。我們發現，三大洋從2003年到2018年的海水表面葉綠素濃度逐漸增高。於此同時，我們也利用image J將臭氧洞自2003年到2018年的面積數據計算出來，結果也是顯示，臭氧洞的面積變化雖沒有一定的規律，但這幾年來臭氧洞恰好也是逐漸變小。因此當紫外線入射量變小時，浮游植物較易在海水表面繁殖，紫外線入射量較高時，浮游植物的生活區域會移往海水較深處。

在相同海洋不同緯度的海水表面葉綠素濃度分析中，顯示了各緯度葉綠素濃度都逐年緩慢變高，而低緯度的葉綠素濃度即濃度變化量都比中緯度、高緯度明顯。於此顯示了溫度對海水水色的影響。當海洋表層水溫在一定的範圍內升高，越高溫則浮游植物繁殖越旺盛，海洋表面的葉綠素濃度越高，水色越偏綠色。

溫度對葉綠素濃度的影響也可以由海水表面溫度異常值來看，將海洋表面溫度異常升溫超過 1.5°C 的範圍估算出來。葉綠素偏低值面積數據在海溫正異常面積較高的年份會出現下降，2015年就是個很好的例子，由此可知溫度異常的確影響葉綠素的濃度，且溫度異常值越大，葉綠素含量越多。從三大洋溫度異常線性趨勢可以看到全球海溫有升高趨勢，加上葉綠素偏低值面積線性也為下降趨勢，可進一步證明海溫越高，葉綠素濃度也會隨之提高。最後我們加上了南極地區的葉綠素濃度變化，由時間來看，葉綠素濃度會隨時間增加，在南半球十一月及十二月為夏天，溫度升高

(<https://www.timeanddate.com/weather/antarctica/south-pole/climate>)且陽光充足，因此趨勢圖一致呈現上升趨勢；由深度來看，葉綠素濃度趨向於陽光充足的深度，但卻不會在表面，這和我們的研究相符，葉綠素為了行光合作用會傾向於生活在陽光充足的地方，但是陽光除了能夠推進光合作用，其中的紫外線也同時會對光合生物造成傷害，因此大部分數據顯示的最大值會落在2m-50m區間，而非水表。

由這些結果我們知道，這幾年臭氧層逐漸修復，臭氧洞面積變小了，對於生物來講是好事一件。當臭氧洞面積變小，則臭氧濃度較足夠，能吸受大量的紫外線，陸地生物及海洋生物才能繁衍下去。倘若臭氧洞面積變大，入射的紫外線變多，即使海洋生物在海中比陸生生物多一層海水保護，也被迫需適應還應，而往海洋深層移動。因此，我們希望這份研究能讓大家知道，只要大家願意配合，臭氧洞可以逐漸復原，環境變遷也可以逐漸往對地球環境好的地方發展。

捌、參考資料

- 一、*Operational SST Anomaly Chart of the year* (2003~2018). NOAA, from the World Wide Web: <https://www.ospo.noaa.gov/Products/ocean/sst/anomaly/2003.html>
- 二、*Journal of Plankton Research*, Volume 22, Issue 1, January 2000, Pages 91~106, from the World Wide Web: <https://doi.org/10.1093/plankt/22.1.91>
- 三、*Level 1&2 browsers*. Ocean Color Web, from the World Wide Web: <https://oceancolor.gsfc.nasa.gov/cgi/browse.pl?sen=amod>
- 四、*North Pacific and North America: Showing the Changing Seasons*. Scientific Visualization Studio, from the World Wide Web: <https://svs.gsfc.nasa.gov/436>
- 五、*20 Years of Global Biosphere*. Scientific Visualization Studio, from the World Wide Web: <https://svs.gsfc.nasa.gov/4596>
- 六、*Ozone watch*. NASA, from the World Wide Web: <https://ozonewatch.gsfc.nasa.gov/>
- 七、Dobson unit. In *Wikipedia*. https://en.wikipedia.org/wiki/Dobson_unit
- 八、楊東方、高振會、王培剛、孫培艷、李欽亮(2002)。光照時間和水溫對浮游植物生長影響的初步剖析-以膠州灣為例。《海洋科學》，第十二期，18 頁。
- 九、李通藝 (民 106)。《基礎地球科學下冊(第 4 版)》。臺北市：龍騰。
- 十、吳祐欣 (2016)。以 MODIS Aqua 海洋水色衛星影像評估台灣近岸水質(碩士論文)取自：https://researchoutput.ncku.edu.tw/zh/studentTheses/以_modis-aqua_海洋水色衛星影像評估台灣近岸水質。
- 十一、洪明仕(2019)。《海洋環境與生態保育(2 版)》。臺北市：華都文化
- 十二、黃靜雅，蔡菁芳(譯)(2018)。《觀念地球科學 3：海洋・大氣》(原作者：Frederick K. Lutgens, Edward J. Tarbuck, Dennis Tasa)。臺北市：天下文化。(原著出版年：2010)
- 十三、All Year Climate & Weather Averages in South Pole. TimeAndDate.com. <https://www.timeanddate.com/weather/antarctica/south-pole/climate>
- 十四、UV Index in different latitudes. Weather Online. https://www.woeurope.eu/cgi-app/weather-charts?LANG=eu&MAPS=uv&CONT=euro&LAND=__&ZEIT=202101300600

【評語】 180005

利用衛星資料探討海洋水色與紫外線以及海溫間的關係，並做成綜合性的研究內容，研究動機明確，統計分析合理，但不夠深入。對影響海洋水色之其他因子以及相關文獻應該要作整理與分析，以便和研究議題連結，相互比對。南極臭氧洞面積是否適合作為全球紫外線變化之指標，應作交代。變化趨勢一致不一定就有關聯，宜再作進一步之分析探討。海洋水色與溫度之關係探討，建議應先濾除紫外線之影響才能較清楚分析出兩者的關係。長期趨勢有不少短周期變動很大之情況，要有些討論。不論紫外線或溫度對海洋水色的影響建議可以從季節變動之趨勢去討論，可能可以較容易得到明確的分析結果。