

國立臺灣師範大學
海洋環境科技研究所
碩士論文

西北太平洋渦旋偵測與統計分析
**Detection and Analysis on Eddies
generated in northwestern subtropical
Pacific Ocean**

報告者：李博硯

指導教授：鄭志文 博士

中華民國 103 年 7 月

致謝

研究所的四年時光，看似漫長的學習旅程，待我習慣每天規律的生活後，卻已進入尾聲，當我回想過往在這學習之路上的點滴，內心充滿許多感觸，一開始由於我沒有這方面的背景，課堂學習不是那麼容易上手，加入研究室後，我的研究方面也不是很順遂，還好我的指導老師-鄭志文博士，他總是耐心的教導我，面對我的問題也是耐心的回答，看著學長姐順利的畢業，我心中不禁著急與徬徨，在老師一步步的引導下，我更加確立我的目標，我希望能完成這段學習旅程，對我而言，也許這是學生身分的結束，但從這四年學到的研究方面的技能與精神，卻是幫助我面對往後人生的挑戰的開始，學無止盡，學以致用。此外，我還要感謝所上的老師們，從他們的課堂裡，我學習到全新的知識，也開拓了我的視野，原來知識是可以與我們周遭相連接的。

在畢業之餘，還要感謝我的家人，有了他們的支持，我才能在無後顧之憂下，完成我的學業，而在這學習之路上，更要感謝同學及學弟妹的幫助，不僅只是論文方面給予許多建議，私底下的相互打氣，更是點綴了這段時間裡的歡笑。最後感謝口試委員-何宗儒教授及郭南榮教授，在百忙之中聆聽我的口式報告，並給予本論文許多寶貴的建議，使論文更加嚴謹及完善。

摘要

西北太平洋渦漩的生成與傳遞，不僅影響了該區域的海高變化，也會影響到海洋生地化作用。本研究利用 20 年 (1993-2012) 的衛星高度計資料，對此區域中尺度渦漩進行偵測，並且根據渦旋特性進行一系列相關統計。結果顯示，在此區域中，暖渦數量 (16435) 明顯多於冷渦的數量 (12333)，除了在北緯 19-21° 範圍之內(冷渦數量多於暖渦數量)，暖渦主導了大部分的海域。一般而言，冷渦半徑稍大於暖渦半徑，兩者皆在 20°N 達到最大，並向南北逐漸減少，另外，暖渦之中心海表面高度異常變化 (Sea Level Anomaly, SLA) 平均較大於冷渦，並且隨經度向西增加，在黑潮附近達到最大，同樣地，渦旋受到向西傳播的影響，在黑潮附近數量最多，而渦旋動能 (EKE) 明顯在台灣東部海域為高值，主要是受到渦旋數量及中心 SLA 變化的影響。季節上，除了渦旋中心 SLA 外，冷暖渦之間差異不大。進一步分析渦旋的傳播，渦旋的平均移動速度為 8.3cm/s，主要朝著西方移動，冷暖渦分別向北及向南偏轉，最後受到黑潮的阻隔，在此速度減弱，甚至消散。渦旋的傳播不僅受到背景的影響，冷暖渦獨特的性質更會造成傳播上的差異，根據傳播的統計結果，顯示暖渦擁有更完整的發展過程在長生命週期上，隨著季節的不同，冷暖渦傳播特性的差異更會影響到進入台灣東部海域的渦旋路徑。

關鍵字: 渦漩、西北太平洋、黑潮、SLA、EKE、台灣東部海域

Abstract

Activity eddies in the Northwestern Subtropical Pacific Ocean affects not only the sea surface height change in the region but also marine dynamic and biogeochemical processes. In this study, by using 20 years (1993-2012) satellite altimeter data, eddies generated within this region were detected and their static characteristic were analyzed. The result showed that there are totally 12,333 cyclonic eddies (CEs) and 16,435 anticyclonic eddies (AEs) generated during this period. The number of AEs is significantly more than the number of CEs. AEs dominated the most area except the region between 19 ° N and 21 ° N that was dominated by CEs. The radius of CEs is slightly larger than those of AEs. Radius of both AEs and CEs reaches the maximum at 20 ° N and gradually decreases southwardly and northwardly. In addition, the variation of the center Sea Level Anomaly (SLA) of AEs is stronger than CEs. The variations of SLA increased gradually westwardly. Maximum SLA appeared near the western boundary (Kuroshio). Meanwhile, with westward propagation of those eddies, energy carried by those eddies accumulated gradually near the Kuroshio. EKE dominated by eddy number and eddy center SLA shows a significantly high value near the off east coast of Taiwan. Furthermore, we analyze the characteristics of eddy propagation, most eddies propagate westward with a mean speed of 8.3 cm/s. with and southward deflection for Cyclonic (anticyclonic) eddies propagated slightly northward (southward), respectively. Finally, eddies were blocked by Kuroshio and thus weakened, or even disappeared. Including local background conditions and individual properties of cyclonic and anticyclonic eddies all may cause changes of their propagation. According to their propagation, it shows that AEs has a more complete development process with longer life time. The seasonal variations of propagated characteristics of AEs and CEs also affect the pathways of eddies entering into the east coast of Taiwan.

Keywords: eddies · Northwestern Subtropical Pacific Ocean · Kuroshio · SLA · EKE · east coast of Taiwan .

目錄

摘要	I
Abstract	II
圖目錄	V
第一章 緒論	1
1.1 前言	1
1.2 研究區域	2
1-3 研究動機與目的	4
第二章 研究資料及研究方法	6
2.1 衛星遙測資料	6
2.1.1 衛星測高儀資料	6
2.2 研究方法	6
2.2.1 Vector geometry method	6
2.2.2 渦旋動能 (eddy kinetic energy, EKE)	7
第三章 統計結果及分析	8
3.1 引言	8
3.2 渦旋基本性質空間分析	9
3.2.1 渦旋數量	9
3.2.2 渦旋半徑	10
3.2.3 渦旋中心高度	11
3.3 渦旋基本性質時間分析	13
3.3.1 渦旋數量	13
3.3.2 渦旋半徑	14
3.3.3 渦旋中心高度	15
3.4 小結	16
第四章 渦旋傳播	18
4.1 移動方向	18
4.2 起始及消散	19

4.3 移動速度	20
4.4 移動路徑	21
4.5 小結	26
第五章 結論	28
參考文獻	30

圖目錄

圖 2- 1 渦旋自動偵測法限制條件示意圖	33
圖 2- 2 限制條件 4 之示意圖	34
圖 3- 1 北太平洋海表面高度標準差示意圖	35
圖 3- 2 北太平洋海表面高度變化均方根示意圖	35
圖 3- 3 沿 23°N 之經度-時間之 SLA 等值圖	36
圖 3- 4 (a) 渦旋數量空間分布圖、 (b) 渦旋數量緯向平均圖、 (c) 渦旋數量經 向平均圖.....	37
圖 3- 5 (a) 冷渦數量空間分布圖、 (b) 暖渦數量空間分布圖	38
圖 3- 6 (a) 渦旋極性空間分布圖、 (b) 渦旋極性緯向平均圖、 (c) 渦旋極性經 向平均圖.....	39
圖 3- 7 (a) 渦旋半徑空間分布圖、 (b) 渦旋半徑緯向平均圖、 (c) 渦旋半徑經 向平均圖.....	40
圖 3- 8 (a) 冷渦半徑空間分布圖、 (b) 暖渦半徑空間分布圖	41
圖 3- 9 (a) 冷暖渦半徑統計直方圖、 (b) 冷暖渦半徑緯向平均圖、 (c) 冷暖渦 半徑經向平均圖.....	42
圖 3- 10 渦旋平均海表面高度異常值空間分布圖	43
圖 3- 11 (a) 渦旋極性及渦旋 SLA 緯向平均圖、 (b) 冷暖渦 SLA 緯向平均圖	43
圖 3- 12 NWSTP 海表面高度異常示意圖.....	44
圖 3- 13 (a) 渦旋中心 SLA 強度空間分布圖、 (b) 渦旋中心 SLA 強度緯向平均 圖、 (c) 渦旋中心 SLA 強度經向平均圖.....	45
圖 3- 14 (a) 冷渦中心 SLA 強度空間分布圖、 (b) 暖渦中心 SLA 強度空間分布 圖.....	46
圖 3- 15 (a) 渦旋中心 SLA 強度統計直方圖、 (b) 冷暖渦中心 SLA 強度緯向平 均圖、 (c) 冷暖渦中心 SLA 強度經向平均圖.....	47
圖 3- 16 (a) 渦旋數量年際變化時間序列圖、 (b) 冷暖渦數量每年統計直方圖	48
圖 3- 17 冷暖渦數量季節統計直方圖	49
圖 3- 18 (a) 渦旋半徑年際變化時間序列圖、 (b) 冷暖渦半徑每年統計直方圖	50
圖 3- 19 冷暖渦半徑季節統計直方圖	51
圖 3- 20 (a) 渦旋中心 SLA 年際變化時間序列圖、 (b) 冷暖渦中心 SLA 每年統 計直方圖.....	52
圖 3- 21 冷暖渦中心 SLA 季節統計直方圖.....	53
圖 3- 22 (a) EKE 年際變化時間序列圖、 (b) EKE 季節統計直方圖.....	54
圖 3- 23 EKE、SLA、數量年際變化關係圖	55
圖 3- 24 EKE、SLA、數量季節變化關係圖	56
圖 4- 1 (a) 冷渦偏離角度統計直方圖、 (b) 暖渦偏離角度統計直方圖	57

圖 4-2 (a) 渦旋起始點空間分布圖、(b) 渦旋起始點緯向統計圖、(c) 渦旋起始點經向統計圖.....	58
圖 4-3 (a) 渦旋消散點空間分布圖、(b) 渦旋消散點緯向統計圖、(c) 渦旋消散點經向統計圖.....	59
圖 4-4 (a) 渦旋移動速度空間分布圖、(b) 渦旋移動速度緯向平均圖、(c) 渦旋移動速度經向平均圖.....	60
圖 4-5 (a) 冷暖渦向西移動速度的緯向平均圖、(b) 冷暖渦向北移動速度的緯向平均圖.....	61
圖 4-6 (a) 冷渦生命週期 12-24 周路徑圖、(b) 暖渦生命週期 12-24 周路徑圖	62
圖 4-7 (a) 冷渦生命週期 24-36 周路徑圖、(b) 暖渦生命週期 24-36 周路徑圖	63
圖 4-8 (a) 冷渦生命週期大於 36 周路徑圖、(b) 暖渦生命週期大於 36 周路徑圖.....	64
圖 4-9 冷暖渦路徑緯向統計圖	65
圖 4-10 冷暖渦路徑經向統計圖	66
圖 4-11 不同生命週期下的渦旋成長曲線變化示意圖	67
圖 4-12 春季渦旋路徑圖	68
圖 4-13 夏季渦旋路徑圖	69
圖 4-14 秋季渦旋路徑圖	70
圖 4-15 冬季渦旋路徑圖	71
圖 4-16 冷暖渦四季路徑經緯向統計圖	72
圖 4-17 冷暖渦以平均半徑為標準之路徑圖	73
圖 4-18 冷暖渦以平均 SLA 為標準之路徑圖.....	74
圖 4-19 冷暖渦路徑經緯向統計圖	75

第一章 緒論

1.1 前言

渦旋為海洋系統中的一種物理現象，尺度可從數公里到數百公里，存活時間從數天到數個月不等 (McWilliams et al., 1986)。當海水流動造成海面高度的改變後，斜壓也隨之改變，斜壓的不穩定產生了渦旋，而渦旋主要受季風，地形等相互作用影響 (He et al., 2002)，台灣東北附近，渦旋的形成，則另受黑潮擺動的影響 (Wu et al., 2008)。渦旋依照流場方向可分為，逆時針旋轉的氣旋式渦旋 (cyclonic)，順時針旋轉的反氣旋式渦旋 (anticyclonic)，在北半球，氣旋式渦旋受到科氏力的作用，海表面的水體向外輻散，海表面高度較低，為負異常值，反氣旋式渦旋則是海表面的水體向內輻合，海表面高度較高，為正異常值，其渦度值分別為正值及負值，在南半球，則為相反，分別為負值及正值。此外，氣旋式渦旋會引發湧升流 (upwelling)，將較深層的冷海水帶至上層，造成中心溫度較周遭為低溫，因此亦稱之冷渦，而反氣旋式渦旋則會引發沉降流 (downwelling)，將溫暖的上層海水帶至較深層，造成中心溫度較周遭為高溫，亦可稱之暖渦。這些渦旋獨特的運動方式，會引發一連串의 交互作用，就海洋生物化學作用方面，冷渦使海水帶至上層的動作，同時也將海洋較深層的豐富的營養鹽帶至上層，海表面的浮游植物受其正面影響，得以大量生長，進而提高海洋基礎生產力 (Crawford et al., 2005)。再者，渦旋造成海水垂直方向的改變，不僅會影響到海洋環境，甚至間接影響到海氣交互作用，例如，有研究指出當颱風經過預先存在於海上的渦旋時，由於渦旋本身的垂直結構不同，海洋混和層厚度改變，颱風強度會受其影響，暖渦所在區域，混和層較厚，會抑制颱風將冷海水帶至上層引發的冷卻作用，颱風強度因此會有快速增強的現象 (Lin et al., 2005)，颱風經過冷渦時，強度則有機會減弱 (Zheng et al., 2010)。

西北太平洋大部分的渦旋呈現向西的運動，當接觸到黑潮時，黑潮與渦旋之間的交互作用，會造成黑潮流量的改變 (Yang et al., 1999)。研究指出暖渦接觸黑潮時，黑潮流量會增加，冷渦接觸黑潮時，黑潮流量則會減少 (Yang et al., 1999; Zhang et al., 2001)。在渦旋移動的同時，能量也會隨渦旋流動，達到傳遞海洋中熱量的效果 (Jayne and Marotzke, 2002)，而這些渦旋攜帶的動能，根據研究顯示 (Chelton et al., 2007; Chelton et al., 2011)，占全球海洋能量比例相當高。另 Qiu and Chen (2005) 研究指出，渦旋所在區域的上層海水的溫度，會受深度的改變而影響其變化。由於渦旋的運動方式，為一邊旋轉一邊移動的，其旋轉速度較移動速度為快，因此內部水體較能保留渦旋本身的性質，持續的移動著，直到結束 (Chaigneau et al., 2011)，所以渦旋的研究，對於分析海洋中的能量、物質輸送有其相當重要的意義在。

1.2 研究區域

台灣四面環海，地處西北太平洋西側，西方以台灣海峽與中國大陸相鄰，北方為東海陸棚南部，西方及北方皆為大陸邊緣海域，深度較淺約 0-200 公尺，東方為西太平洋海盆，受到宜蘭海脊及琉球島弧分隔，可再細分以北為沖繩海槽，以南為花東海盆，深度可達 7000 公尺，接著台灣南方則以呂宋海峽與呂宋島相鄰，呂宋海峽地形多變複雜，深度可達 3000 公尺，西南方則為南海海盆，深度可達 5000 公尺 (Liu et al., 1998)，台灣附近海底地形可由幾百公尺的大陸棚，變化成數千公尺的海溝，這些特別的地形特色也同時影響著台灣周圍的海流。

台灣東邊海域流場受到低緯度季風風向的影響，主要為向西之海流，當接近西方陸棚時，受到西方強化影響，會形成流向高緯度的西方邊界流，長期平均為向北流場，此股靠近台灣東岸的海流即是黑潮 (Kuroshio)，黑潮為北太平洋重

要的西方邊界流，源頭來自靠近赤道地區的西向的北赤道洋流 (North Equatorial Current, NEC)，黑潮流經呂宋島東邊，至呂宋海峽時，主流繼續向北流，分支向西流進呂宋海峽中，甚至部分可達南海，此為呂宋海峽流場情況，穿越呂宋海峽後，黑潮繼續沿著台灣東岸向北流，此段黑潮受季風影響，主軸會有季節性的差異，冬季接近台灣東岸，夏季則較偏離台灣東岸 (Tang et al., 2000)。黑潮達台灣東北方後，受到東海陸棚影響，會轉成朝東北流向。

許多研究指出黑潮對於台灣周遭海洋系統的影響，如台灣東北海域的海洋生化作用 (Wong et al., 1991)，台灣東南方綠島島嶼尾流現象 (Chang et al., 2013)，甚至是大氣系統，如梅雨 (Sasaki et al., 2012)、氣旋 (Joyce et al., 2009) ... 等。然而，不管是海洋或大氣方面的作用，台灣都會受其影響。根據衛星遙測資料顯示，不僅只是台灣東邊黑潮附近海域的渦旋活躍，西北太平洋副熱帶逆流區 (North Pacific Subtropical Countercurrent, STCC) 的渦旋也是異常的活躍。STCC 的渦旋產生，主要是由於 NEC 與 STCC 之間垂直流切造成的斜壓不穩定引發的，STCC 的渦旋在向西傳播的過程，除了會將物質及能量帶至西北太平洋西方邊界外，當受到黑潮阻隔後，渦旋更會消散或合併，同時渦旋也會影響到黑潮的傳輸量。Qiu (1999) 和 Kobashi et al. (2001) 等人，利用 STCC 的海表面高度變化進行相關研究，指出黑潮的變動與西北太平洋的渦旋活動有明顯的相關性，因此渦旋在此台灣東邊海域的相關研究，對於海洋環境變化的了解有其重要性在。

渦旋研究不能只限制出現於台灣東邊海域的渦旋，也要考量到可能由 STCC (135°E~170°E，18°N~25°N) 傳播而來的渦旋，因此我們研究區域必須結合這兩塊區域，共同去討論渦旋在西北太平洋的活動以及傳播過程造成的影響，故選擇研究區域為西北副熱帶太平洋 (Northwest Subtropical Pacific, NWSTP)，此區域涵蓋，西北太平洋副熱帶逆流區 (STCC)，北赤道洋流 (NEC) 以及台灣東部海域，研究區域範圍定為：

經度 120°E~180°E，緯度 10°N~30°N。

1-3 研究動機與目的

早期渦旋的研究，由於受限於觀測技術的不足，對於渦旋現象的探討，多著重在理論或數值上 (McWilliams and Flierl, 1979)，除此之外，即使觀測技術成熟，現場實測仍然深受天氣影響，時間方面也較耗時 (Richard, 1981; Yasuda et al., 1992)，隨衛星的問世後，衛星遙測觀察的空間範圍及時間上的連續性，彌補現場實測上的不足，並且能得到高分辨率的結果，科學家得以藉衛星遙測，更加方便地，有效率地觀察渦旋 (Roemmich and Gilson, 2001)。但 Roemmich 等人的研究範圍不夠全面，只有分析部分區域得到的渦旋資料，對於台灣東邊海域的渦旋統計還是有些誤差在，此外，台灣東邊海域的渦旋研究，對於渦旋的判讀，大多採用人工判斷的方式，此方式較主觀，統計出來的結果，隨定義的不同可能會有不少差異，誤差方面也不小，短期的資料或許採用肉眼判讀還可以處理，但是長期的資料可能會導致效率低，甚至準確性也低，因此，需要客觀的工具，來輔助我們使用衛星遙測資料，進行渦旋的判斷，甚至得到渦旋的物理性質，以及渦旋的運動過程。本研究採用 vector geometry method 來辨識渦旋 (Nencioli et al., 2010; Liu et al., 2012)，此方法為 Nencioli 於 2010 年提出，主要以流速作為辨識渦旋存在的定義，此自動偵測法較為客觀，處理長期資料更加有效率。

目前太平洋副熱帶海域的渦旋研究，主要是探討渦旋動能 (eddy kinetic energy, EKE) 的變化 (Qiu, 1999)，或是衛星高度計資料結合 Argo 浮標分析渦旋的垂直結構 (Qiu and Chen, 2005)，對於渦旋的基本性質和物理特性之間的關係，並沒有進行完整地統計分析，即便有部份研究針對此區域渦旋的統計特性進行分析，但是對於渦旋的傳播過程，卻沒有多加著墨，因此，希望藉由衛星遙測得到的渦旋統計資料，除了能幫助我們分析渦旋的基本性質以及渦旋傳播特性外，更能進一步討論渦旋的行進路徑，找出路徑的密集帶，甚至搭配空間及時間特性，幫助我們了解不同背景下渦旋行進路徑的差異。

本研究區域除了黑潮區域外，由於受到東北信風的推動，海流大致東向西運動 (Mcphaden and Zhang, 2002) ，其中流速受柯氏力的影響，隨緯度增加而呈現遞減情況。正常情況下，海洋中的渦旋主要是向西傳播 (Chelton et al., 2011) ，類似 Rossby wave 性質 (Cushman-Roisin, 1994) ，傳播速度明顯從低緯度地區到高緯度地區呈現速度遞減的現象，但統計結果顯示本區域的渦旋在靠近赤道的部分，渦旋受到此區域海流的影響，其運動較為混亂，速度也呈現與 Rossby wave 不同的變化，是一個轉變成低值的情況，因此，本研究除了對於研究區域進行整個空間的討論外，也分別進行緯向及經向的討論並互相比較其差異，根據統計結果，分析此區域的渦旋物理特性，並將其分類，而這些物理特性的空間分析，可以連結渦旋產生的背景差異，以及可能的原因。進一步可討論渦旋對於海洋物理影響，例如渦旋入侵對於黑潮的影響。

第二章 研究資料及研究方法

2.1 衛星遙測資料

2.1.1 衛星測高儀資料

衛星測高儀原理為利用衛星上裝載的測高儀，經由發射脈衝至海面，隨後會反射折回，藉此來回花費的時間，推算衛星至海面的距離，最後得到海面的高度，本文使用的衛星測高儀資料，由法國 Archiving, Validation and Interpretation of Satellite Oceanographic data (AVISO) 所提供，這資料主要為 Topex/Poseidon (T/P)，Jason-1，ERS-2，Envisat，這些衛星合成得到的數據，資料類型有即時 (Near Real-Time, NRT) 與延時 (Delayed-Time, DT) 兩種類型資料，本文採用海表面高度異常資料 (Delayed Time- Map of Sea Level Anomalies, DT-MSLA)，以及地轉流速度異常資料 (geostrophic velocity anomalies)，其空間解析度為 $1/3^\circ \times 1/3^\circ$ ，時間解析度為 7 天，時間範圍選取 1993 年 1 月至 2012 年 12 月共 1043 周的資料，Sea Level Anomalies (SLA) 為絕對動力高度減去七年平均值 (1993-1999) 的結果，其中包含潮汐和大氣壓力的修正，而地轉流速度異常則為 SLA 換算而來。

2.2 研究方法

2.2.1 Vector geometry method

此方法為 Nencioli et al. [2010] 所提出，主要應用於渦旋的偵測上，而渦旋的定義，普遍認為，在一個區域中，存在流體持續旋轉，並圍繞著中心做順時針或反時針轉動 (McWilliams, 1990; Doglioli et al., 2007)，而渦旋擁有一些典型的特

徵，如渦旋中心附近有最低速度，切線速度大致隨距離線性增加，直到最大值後衰退，基於這些渦旋速度場的定義，自動偵測法必須滿足一些限制條件，包含條件1.2.3.4(見圖 2-1)。

- 1.沿著南北方向，東西的速度分量 (U) 會隨中心向外逐漸增加速度值
- 2.沿著東西方向，南北的速度分量 (V) 會隨中心向外逐漸增加速度值
- 3.速度場中同時符合條件1、2下的所有點，找尋速度最小值，而這速度最小值為渦旋的中心
- 4.圍繞著渦旋中心，速度向量方向隨著旋轉做持續的改變，但相鄰兩個速度向量不能跨越超過一個分區 (依速度向量方向分四個分區，1-東向北，2-北向西，3-西向南，4-南向東)，見圖 2-2。

2.2.2 渦旋動能 (eddy kinetic energy, EKE)

渦旋的流速及海平面高度異常的改變會造成動能的產生，動能能反應出渦旋在區域中的強度，動能越大代表渦旋的強度越大，而這渦旋動能為海洋能量的組成之一，藉由計算渦旋動能的多寡與渦旋動能的分布，可幫助我們了解渦旋的活躍程度以及海洋能量的流動，渦旋動能的計算如2-1式。

$$EKE = \frac{1}{2} (u^2 + v^2) \quad 2-1$$

u: $u = u_t - u_{\text{mean}}$ ，其中 u_t 為東西分量速度， u_{mean} 為 u_t 的平均值。

v: $v = v_t - v_{\text{mean}}$ ，其中 v_t 為南北分量速度， v_{mean} 為 v_t 的平均值。

第三章 統計結果及分析

3.1 引言

在先前的渦旋介紹裡，我們知道渦旋在海洋中的地位是非常重要的，因此渦旋方面的相關研究也是極其需要的。渦旋本身就是一種水團的運動，因此渦旋在海表面的訊號，我們可以藉由衛星遙測的海表面高度來獲得其變動資訊。我們從北太平洋的海表面高度變異量來看（圖 3-1），海高變異量在日本東邊海域最為高值，其次則是台灣東邊海域，靠近西北太平洋西方邊界的部分。而這些區域的海高變化又是什麼因素造成的，藉由 180 天 high-pass 濾波處理後，得到的 root-mean-square (RMS) sea surface height (SSH)（圖 3-2），得知這兩個區域為渦旋影響的結果，日本海域部分變異量，根據相關研究指出（Qiu and Chen, 2005），與黑潮延伸造成的海流變化產生之渦旋有關，而台灣東邊海域的渦旋，其產生機制卻是不一樣的，前人研究指出（Qiu, 1999），此區域的渦旋主要是 STCC 與 NEC 之間動力不穩定產生的，而此區域與台灣關係最為密切，因此研究重點才會放在台灣東邊渦旋好發區。藉由沿 23°N 之經度-時間之 SLA 變化（圖 3-3），我們可以看到信號隨著時間改變，而有著向西的運動，此說明了渦旋在本研究區域的傳播過程，會隨著傳播，在西方邊界受到黑潮的阻隔，在此信號累積，造成海表面高度的變異，接下來對於渦旋性質進行統計及分析，將有助於了解渦旋在時空變化下的特性。

3.2 渦旋基本性質空間分析

藉由自動偵測法，處理了 1993 年-2012 年的海表面高度異常值和地轉流異常值的衛星遙測資料後，我們得到了大量的渦旋資料，對其進行渦旋物理特性的統計分析，本節將介紹渦旋的數量，渦旋半徑，渦旋中心高度的空間特性。

3.2.1 渦旋數量

將渦旋總時間的出現次數加總，我們得到本研究區域的渦旋數量，總計 27768 個，並且將渦旋的出現位置合成 $1^\circ \times 1^\circ$ 的網格點資料，圖 3-4a 為渦旋數量的空間分布情況，可以看出大部分的渦旋集中出現在北緯 16 度以北的區域，而台灣東邊靠近黑潮部分，則是明顯的高值，數量可達 120 多個，為了幫助我們進一步了解空間的變化，我們將其渦旋數量的空間分布，進行沿著緯度方向的平均（圖 3-4b），以及沿著經度方向的平均（圖 3-4c），由於在西方邊界流（黑潮）的作用之下，東西兩側的背景環境為不同的情況，因此將其黑潮西邊的數量統計拿掉，而渦旋靠近陸地的部分也是不採計的，以及整個區域的東西南北四個邊界，考量自動偵測法可能造成的邊界誤差，也將不採計，藉此將其問題盡量降低。

經向平均顯示東經 123-125 度間為一個明顯高值，這主要是受到黑潮阻隔的作用，以及渦旋向西傳播影響，在此信號累積 (Qiu, 1999)，比起其他經度多出一半的數量。緯向平均則顯示低緯度部分數量明顯低出許多，北緯 22 度為最高值，北緯 24、26、27 度相對較低值，但整體上與前人研究類似 (Qiu, 1999)，18-25 度為相對渦旋好發區域。圖 3-5a 為冷渦空間分布，總計有 12333 個，圖 3-5b 為暖渦空間分布，總計有 16435 個，兩者皆顯示西方邊界附近為相對數量高值，不同之處在於冷渦在北緯 19-21 度明顯有一高值帶，而暖渦則是在北緯 22 度以北為高值，對此，我們進行渦旋極性的分析 (Chaigneau et al., 2009; Chen et al., 2011)，如 3-1 式。

$$\text{Polarity(極性)} = \frac{N(\text{acy}) - N(\text{cy})}{N(\text{acy}) + N(\text{cy})} \quad 3-1$$

其中 $N(\text{acy})$ 表示暖渦數量， $N(\text{cy})$ 表示冷渦數量，如果 $\text{Polarity} < 0$ ，代表暖渦數量少於冷渦數量， $\text{Polarity} = 0$ ，代表暖渦數量等於冷渦數量， $\text{Polarity} > 0$ ，則代表暖渦數量多於冷渦數量。

圖 3-6a 顯示的渦旋極性空間分布，主要為正值，這說明在本研究區域-NWSTP，主要是受到暖渦的影響，另外，北緯 19-21 度卻為負值（圖 3-6b），這說明在這緯度帶，反而是冷渦在主導，將南北正值區域區隔出來，根據 Liu et al. (2012)，此緯度帶範圍為 STCC 的南方支流，在其南側較容易產生冷渦，北側則較容易產生暖渦，圖 3-6c 顯示經向方面，幾乎為正值，暖渦主導著經向，而東經 130 度以東的渦旋極性隨經度增加呈現增加的趨勢，在 165-168 度左右達到最高值後，隨之減少。

3.2.2 渦旋半徑

圖 3-7a 顯示渦旋平均半徑的空間分布，根據統計的結果，全區域的渦旋平均半徑約為 90.5km。在研究區域的南北邊界附近半徑明顯為低值，向中間逐漸增加，由圖 3-7b 來看，渦旋半徑在北緯 21 度為最高值，向南北呈現遞減的趨勢，渦旋半徑由北緯 30 度遞增至 21 度，這現象與 Rossby radius 性質類似 (Chelton et al., 2011)，但是 21 度以南，Rossby radius 繼續遞增至赤道，而渦旋半徑卻是減少的，因此南部的渦旋性質與非線性效應較有關係，這可能造成南部的渦旋運動較複雜。圖 3-7c 為經向的變化，西經 165-180 度左右的渦旋半徑相對較為高值，隨經度往西，渦旋半徑穩定的變動著，直到 130 度才有個明顯減少的情況，這可能與渦旋傳播至西方邊界有關係，渦旋結構至此衰減，甚至消散。

圖 3-8a 顯示冷渦平均半徑的空間分布，圖 3-8b 顯示暖渦平均半徑的空間分布，冷渦約為 91.3km，暖渦約為 89.8km，冷渦半徑略大於暖渦，直方圖（圖 3-9a）呈現冷渦與暖渦半徑與數量的關係變化皆是類似的情況，80-100km 的數量為最多，圖 3-9b 顯示的冷渦與暖渦的緯向半徑變化，除了北緯 24-22 度為明顯暖渦大於冷渦外，其餘皆是冷渦大於暖渦的半徑。至於經向的變化（圖 3-9c），則呈現不規律的變動。

3.2.3 渦旋中心高度

圖 3-10 為渦旋平均海表面高度異常值的空間分布，冷渦 SLA 為負值，而暖渦 SLA 為正值，我們可以看出，大部分的空間顯示 SLA 正值的情況，只有在 20 度左右 SLA 相對不明顯。從圖 3-11a 顯示的 SLA 與 Polarity（渦旋極性）的緯向變化圖，可以看到這兩者的變化呈現一致的情況，由於先前提到過，暖渦在本研究區域的數量是明顯多於冷渦的，因此暖渦對於冷渦在 SLA 的影響上是佔優勢的，而冷暖渦自身的中心 SLA 也是一個影響因素，經過圖 3-11b 比較後，冷暖渦中心在緯向的 SLA 變化，在大部分的緯度都是呈現暖渦中心的 SLA 變化量高於冷渦，除了在低緯度部分為冷渦較高，因此綜合來看，暖渦的確主導渦旋 SLA 的影響。此外，圖 3-12 為海表面高度異常變化，北緯 20 度上下明顯有一個相對南北，SLA 較低的緯度帶，前面介紹過北緯 18 度以北為渦旋好發區（圖 3-2），而渦旋影響著海平面高度的變動，因此，此緯度帶由於冷渦的關係，所以其海表面高度異常相對較低，而大部分區域為暖渦主導海平面高度的變化，至於圖 3-12 顯示 SLA 在北緯 16 度以南為高值區域，這個結果搭配圖 3-2 來看，此區域的渦旋造成的影響很低，從數量來看（圖 3-4a），渦旋也是較低的，同時冷暖渦中心的

SLA 變化量也較低 (圖 3-11b) ，顯示這部分的海表面高度變化受到渦旋 SLA 變化的影響較少，可能主要是受到 NEC 在此流動的影響。

除了上述渦旋中心 SLA 與研究區域的 SLA 關係外，接著探討渦旋自身中心 SLA 的強度，在此強度是定義 SLA 的絕對值，而不是相對值，SLA 越大表示強度越大。圖 3-13a 顯示渦旋中心 SLA 強度的空間分布，明顯看出研究區域的西邊部分 SLA 強度較大，東邊部分則是較低，圖 3-13b 為緯向的平均，SLA 強度在北緯 22 度為最大值，此緯度向南及向北的 SLA 強度則呈現下降的情況，北方 24 度以上區域，變化幅度趨緩，22 度向南則是持續的減少 SLA 強度直到 14 度，14 度以南才又呈現別種情況。圖 3-13c 則為經向的平均，SLA 強度由東至西隨經度減少，呈現明顯增強的趨勢，於西經 125 度達到最強，SLA 約 25.5cm，接著減少，這變化應該與渦旋的向西傳播有關係，隨著傳播的過程，渦旋本身強度在增加，故渦旋中心 SLA 呈現增大的趨勢，到達西方邊界後，受到黑潮的影響，而衰弱減少 SLA 強度。

冷渦中心 SLA 強度空間分布 (圖 3-14a) ，與暖渦中心 SLA 強度空間分布 (圖 3-14b) ，皆呈現靠近西方邊界區域為高值的情況。而圖 3-15a 顯示冷暖渦中心 SLA 強度隨不同高度，數量上變化的直方圖，顯示冷暖渦中心 SLA 為 20cm 以內的數量是最多的，接著隨高度增加而減少數量，但是在 20cm 的區間裡，冷暖渦的數量差距是較為接近的，而其他區間則是暖渦數量明顯多於冷渦許多。圖 3-15c 為冷暖渦中心 SLA 強度的經向平均，可以看出冷暖渦之間相關性很好，皆為隨經度東向西，呈現上升的趨勢，稍微不同的地方，在於西經約 130-140 度的部分，由東向西來看，暖渦中心 SLA 強度，先是大幅的上升，接著幅度趨緩，冷渦則是平緩的上升後，接著大幅的上升，此外，暖渦的兩個高值，比冷渦的兩個高值還要提早經度發生。圖 3-15b 為冷暖渦中心 SLA 強度的緯向平均，冷暖渦在緯度 22 度左右為最高值，而其兩者的相關性之所以沒有經向平均這麼好，這是由於冷渦在 22 度以北，一開始呈現下降到 24 度，接著上升至 28 度，而暖

渦則是單純的下降至 28 度，這也是造成圖 3-15b 高緯度變化原因。22 度以南，冷渦與暖渦皆是呈現下降的趨勢，直到 14 度才改變成另種變化幅度，不過依然是類似的變化，此外，依照 20 度區分南北兩個部分，發現北邊部分，冷暖渦之間中心 SLA 強度差距是相對較大的，南邊部分則是相對較小的。整體來看，暖渦中心 SLA 強度是高於冷渦的，唯有在 14 度以南，是冷渦高於暖渦的，這說明兩處冷暖渦的動力機制似乎不太一樣。

3.3 渦旋基本性質時間分析

上節進行渦旋物理特性的空間分析後，本節將介紹渦旋的數量，渦旋半徑，渦旋中心高度於時間上的特性。

3.3.1 渦旋數量

圖 3-16a 顯示渦旋數量的年際變化，時間為 1993 至 2012 年的周資料，經過 52 周滑動平均 (running-mean) 的結果，大致上皆是暖渦數量多於冷渦數量，除了 1995-1996 年為冷渦多於暖渦，暖渦年際訊號的高值區間約在 2003 年至 2008 年間，冷渦約在 1995 至 1998 年，同樣都在高值之後呈現明顯的下降幅度，此外，冷渦與暖渦以 2002 年為分水嶺，1993-2002 年冷渦與暖渦數量的年際訊號呈現較為相反的變化，2003-2012 年則是呈現較為類似的變化，加上由於暖渦的數量大多明顯多於冷渦，除了在 1993-1997 年，2002-2003 年，2009-2010 年較為接近外，導致暖渦主導渦旋數量在 2003 年之後的變化，而 1998-2002 年則是受到冷渦的影響較多。圖 3-16b 為冷渦與暖渦每年數量的時間序列，可以看出冷渦 1993-1997 年數量為高值，而 1995 年為最高，1999 年為最低值，1998 年至 1999 年數量差距最大，1999 年達最低點後，開始增加至 2004 年，之後穩定波動著直

到 2012 年，暖渦則是 2003-2008 年為高值，2008 年為最高值，2009 年為最低值，這也造成 2008-2009 年數量差距最大，此外，值得注意的是，1999 年至 2002 年，冷渦數量隨著時間，呈現連續上升的情形，而暖渦卻是一個下降的情形。整體來看，暖渦數量在大部分的時間是大於冷渦的，除了 1993-1995 年為冷渦數量大於暖渦。

圖 3-17 則是冷暖渦數量的季節變化，從月資料來看，冷渦明顯從 2 月持續上升，直至 6 月達最大後，接著持續下降至 12 月，暖渦則是明顯從 2 月持續上升，直至 7 月達最大後，持續下降至 12 月。依照季節來區分，冷渦約是春末至夏季 (5-7 月) 數量較多，冷渦則是夏季 (6-8 月) 數量較多，冷渦與暖渦皆在冬季至春初 (1-3 月) 左右數量較低，不過整體上，冷渦與暖渦的季節變化為類似的情況。

3.3.2 渦旋半徑

圖 3-18a 顯示渦旋半徑的年際變化，時間為 1993 至 2012 年的周資料，經過 52 周 running-mean 的結果，冷渦的半徑於 1999-2002 年，2005-2007 年以及 2009-2012 年皆是大於暖渦的情況，尤其 1999-2001 年間差異最明顯，而暖渦則是於 1993-1995 年，1997-1998 年以及 2002-2003 年大於冷渦，尤其以 1997-1998 年差異最為明顯，整體來看是冷渦稍大於暖渦半徑。冷渦半徑的年際變化之中，最為明顯的區間約在 1999-2002 年間，並在 2000 年左右達到最高值，暖渦則是有兩個較大的區間，分別是 1994-2000 年間和 2001-2010 年間，其中時間變化範圍最廣的為 2001-2010 年，顯示從 2001 年低點上升至 2005 年左右，接著下降至 2010 年的趨勢，整體來看冷渦與暖渦年際變化為較為相反的情況。圖 3-18b 為冷渦與暖渦半徑的年平均，冷渦半徑在 1997 年為最小，1999 年為最大，同年的暖渦卻

不是呈現一個高值，這導致 1999 年冷暖渦之間半徑差距相當大，其他類似情況出現在 1997 年、2000 年及 2012 年，而 1997 年則是暖渦半徑大於冷渦，而暖渦半徑在 2012 年為最小，1993 年為最大。值得注意的是，2000-2003 年的冷渦半徑為隨時間連續下降的情況，而暖渦則呈現相反，為連續上升，這跟前面提到渦旋每年數量情況類似（圖 3-16b），時間點相當近（1999-2002 年），只不過渦旋數量的變化為冷渦上升，暖渦下降。

圖 3-19 為冷暖渦平均半徑的季節變化，從月資料來看，冷渦從 1 月下降至 4 月，接著上升至 8 月，暖渦則是從 1 月下降至 5 月，接著上升至 9 月。依照季節來區分，冷渦與暖渦皆在秋季（8-11 月）和冬季（12-2 月）半徑較大，而春季（3-5 月）半徑較小。

3.3.3 渦旋中心高度

圖 3-20a 顯示渦旋中心 SLA 強度的年際變化，時間為 1993 至 2012 年的周資料，經過 52 周 running-mean 的結果，大致上為暖渦 SLA 強度大於冷渦 SLA 強度，除了在 1993-1996 年間，為冷渦 SLA 強度大於暖渦 SLA 強度，冷渦與暖渦 SLA 強度差距則在 1994-1998 年間較為接近，而大部分的時間裡，其差距都是相當大的，尤其是 2006-2009 年差距特別明顯，而冷渦與暖渦在 1994-1997 年變化趨勢較為相近，2005-2012 年則較為反向。在這些年際變化裡，冷渦在 1998 年至 1999 年最為劇烈，呈現短時間快速下降的變化，SLA 量值從約 22.5cm 降至約 16.5cm，暖渦則是出現在 2009 年至 2010 年，也同樣呈現快速下降的變化，SLA 量值從 24cm 降至 19cm。整體上為暖渦主導海洋渦旋平均半徑的年際變化，其相關性可達 0.84。圖 3-20b 為冷渦與暖渦中心 SLA 強度的年平均，冷渦在 1993 年，1996-1997 年以及 2003-2004 年為 SLA 強度高值，最高值發生在 1997 年，

SLA 約 21.8cm，低值為 1999 年，2007 年以及 2010-2011 年，最低值發生在 2010 年，SLA 約 16cm，暖渦則是在 1997-1998 年，2003-2008 年為 SLA 強度高值，最高值發生在 2008 年，SLA 約 24cm，低值為 1993-1996 年以及 2009-2011 年，最低值發生在 1993 年，SLA 約 18cm。

圖 3-21 為冷暖渦中心 SLA 強度的季節變化，從月資料來看，冷渦從 3 月持續上升至 5 月，於 5 月達到最大，接著下降至 8 月後，再緩慢上升至 12 月，暖渦則是從 2 月持續上升至 7 月，於 7 月達到最大，接著持續下降 12 月。依照季節來區分，冷渦在冬季 (12-2 月) 至春季 (3-5 月) SLA 強度較大，夏季 (6-8 月) 至秋季 (9-11 月) SLA 強度較小，暖渦則是相反，冬季至春季 SLA 強度較小，夏季至秋季 SLA 強度較大，其中又以冷暖渦在夏秋季的季節變化相差最大。

3.4 小結

藉由衛星觀察到的海表高度變動，顯示 NWSTP 擁有活躍的渦旋活動，尤其是台灣東部海域更是明顯，因此我們對於 NWSTP 的渦旋進行統計分析，希望了解其時空變化下的差異。結果顯示，在暖渦數量明顯多於冷渦的情況下，暖渦主導著渦旋在 NWSTP 的空間分布，冷渦只有在北緯 19-21 度較佔優勢，整體來看，冷渦與暖渦皆集中在北緯 20 度以北，尤其是靠近黑潮的區域，時間上，冷渦相對於暖渦在近幾年是較顯著的減少，季節性的分布顯示，冷渦與暖渦都在夏天左右為高值，冷渦稍早些。冷渦半徑稍大於暖渦半徑，同樣都在北緯 20 度為最大值，向南北減少，靠近黑潮半徑會稍低，時間上，暖渦近幾年來呈現減少的趨勢，半徑也較冷渦來的小，季節性的分布顯示，冷渦與暖渦都在秋冬為高值，不過冷渦在秋季較明顯，暖渦則是在冬季。冷渦與暖渦中心 SLA 以北緯 20-22 度為最大值，隨此緯度向北，冷渦先減少又增加，暖渦則持續減少，此特性也造成渦旋

在高緯度部分相較低緯度的變化是較緩和的，冷暖渦同樣隨經度減少，而呈現上升的趨勢，尤其是靠近黑潮區域，整體上，暖渦中心 SLA 強度是大於冷渦的，時間上，冷暖渦在 1998 年為區分，之前差距較接近，之後較大，特別以 2005-2010 年間差距最為明顯，近幾年呈現先減少後增加的情況，季節性的分布則呈現相反的情況，冷渦夏秋較低，暖渦卻較高。

前人研究多以 EKE 來呈現渦旋的活躍程度 (Qiu et al., 1999)，本文經由 NWSTP 的 EKE 計算後，顯示與前人類似的結果 (圖 3-22a)，渦旋存在明顯的季節性變化，5-6 月為最大值 (圖 3-22b)，並且與渦旋數量、半徑、中心 SLA 進行相關性比對，我們發現不管是年際變化 (圖 3-23a、b、c) 及季節性變化 (圖 3-24a、b、c)，EKE、渦旋數量、渦旋中心 SLA 這三者之間擁有相當好的相關性，與渦旋半徑較無相關性，特別是季節性變化，甚至為負相關，這也說明了為何台灣東部海域 EKE 之所以這麼強烈，與渦旋的數量及中心 SLA 有很大的關係，而冷暖渦在空間上及季節性上彼此的相關性也比長時間週期來的好，除了渦旋中心 SLA 在季節性上為相反關係，這也說明冷暖渦在 NWSTP 的動力機制以及短時間氣候變化的影響下，兩者的物理變化比起長時間氣候的影響，其差異是較為小的，而渦旋中心 SLA，受到 NWSTP 海表面高度的季節變動，以及冷暖渦垂直結構的不同，因此，在季節性上顯示與其他物理特性不同的變化，其冷暖渦差異是較明顯的。

第四章 渦旋傳播

上一章經過渦旋空間及時間的統計及分析後，我們更加了解渦旋的物理特性隨空間與時間的變化，但隨著區域的不同，例如台灣東部海域及 STCC 出現的渦旋，可能之間有連續變動的關係，我們分析其在連續軌跡中隨之變動的物理特性，藉此了解渦旋傳播受背景的影響，並藉由這些渦旋軌跡資料，分析不同背景下，渦旋路徑是否也會有差異。在此台灣東部海域定義經度 $122^{\circ}\text{E}\sim 126^{\circ}\text{E}$ ，緯度 $18\text{N}\sim 24^{\circ}\text{N}$ 。

4.1 移動方向

NWSTP 的渦旋大致都向西傳播著，從圖 3-3 可以看到移動的情況，但前人研究顯示 (Chelton et al., 2011)，渦旋不僅只是單純向西方行進，會伴隨著偏轉，冷渦為向極偏轉，暖渦則是向赤道偏轉，這主要是受到 β 效應 (β -effect) 的影響所導致 (Cushman-Roisin, 2011)。當渦旋行進後，原本與渦旋接觸的水團，會受到渦旋影響，離開原本的環境，這一動作導致渦旋行進後的位置的柯氏參數會與原本不同，冷渦為逆時針旋轉，其柯氏參數因此減少，為了遵守位渦守恆 (potential vorticity)，相對渦度則增加，為正值，冷渦另一側的柯氏參數增加，相對渦度減少，為負值，此變化造成冷渦會有向北偏轉的力量產生，反之，由於暖渦為順時針旋轉，同樣須遵守著位渦守恆，暖渦會有向南偏轉的力量產生。經由渦旋傳播路徑統計的結果，可以發現在 NWSTP 的渦旋的確與前人的研究一樣，冷渦的行進路徑會稍微向北偏轉，暖渦則稍微向南偏轉。為了幫助我們進一步了解冷暖渦偏轉的情況，我們利用方位角的概念 (Chelton et al., 2011)，以冷暖渦向西傳播的方向為基準，角度為零度，向北偏轉為正值，向南偏轉為負值，取冷暖渦起始位置到結束位置的夾角，進行不同角度的數量分析 (圖 4-1a、b)，冷渦角度負值 (南偏) 與正值 (北偏) 相比約 48:52，暖渦角度負值 (南偏) 與正值

(北偏) 相比約 59:41，整體來看，冷渦向北偏的情況比較多，暖渦向南偏情況比較多，而暖渦偏轉的情況是較大於冷渦的，這顯示冷暖渦在 NWSTP 受到 β 效應影響的程度不同。

4.2 起始及消散

上一章渦旋的基本性質是根據渦旋出現的位置與渦旋出現的時間，進行空間上及時間上的統計及分析，而西北太平洋的渦旋大多擁有向西傳播的特質，因此我們想了解渦旋隨空間背景不同，是否產生機制也會隨之受到影響，另外還有導致渦旋消散的可能原因，故我們需要探討渦旋傳播路徑中的起源位置，以及最後消散的位置。

藉由自動偵測法，搭配上客觀的定義，我們得到了渦旋軌跡相關資料，為了避免軌跡處理上可能的誤差，我們選取生命週期四周以上的渦旋軌跡。符合條件的渦旋軌跡數量總共 4801 個，冷渦數量為 2141 個，暖渦數量為 2660 個，圖 4-2a 為渦旋起始點空間分布，圖 4-2b 為緯向的總和，圖 4-2c 為經向的總和，渦旋的空間分布明顯看出北緯 16 度以南，渦旋資料相當的少，這是由於此區域的動力機制沒有其他區域來的豐富，使得渦旋在此產生較少，此外，由於海流較混亂的原因，造成渦旋生命週期也較短，也比較不符合我們篩選的條件。從緯向統計來看，渦旋在北緯 22 度生成最多，這與前面渦旋數量統計結果一樣 (圖 3-4b)，大致上緯向變化也是一樣，再次證明渦旋在西北太平洋為向西傳播 (圖 3-3)，因此與渦旋數量的緯向平均差異較少，經向統計顯示 165-180°E 數量較少，而台灣東邊海域以 130-134°E 數量較多，這結果與前面渦旋數量經向平均 (3-4c) 不同，這主要是渦旋向西傳播，在西方邊界附近累積造成渦旋數量的高值，STCC 區域則是以 150-164°E 和 137-142°E 數量較多，台灣東邊海域與 STCC 區域相比，

於 STCC 生成的渦旋稍多，配合圖 3-4c 更能說明台灣東部海域的渦旋不僅在當地所生成，其他區域的貢獻更是明顯。圖 4-3a 為渦旋的消散點空間分布，圖 4-3b 為緯向的總和，圖 4-3c 為經向的總和，渦旋明顯沿著黑潮有著明顯的帶狀分布，這說明黑潮身為強勁的西方邊界流，當渦旋向西傳播與之接觸時，會造成大量的渦旋在此受到破壞消散 (Zhai et al., 2010)，只有少部分被黑潮帶往北方，或者成功通過呂宋海峽 (Sheu et al., 2010)，緯向統計與起始點一致，同樣最大值在北緯 22 度，經向統計則最大值在東經 123 度，這是由於渦旋向西傳播過程，渦旋在此撞擊黑潮，導致自身結構破壞，最後消散。

4.3 移動速度

已知渦旋擁有向西運動的特質，為了更加了解渦旋隨空間不同，運動強度也不同的情況，我們需要渦旋的移動速度幫我們去定量渦旋的運動特性，圖 4-4a 代表的是渦旋平均移動速度的空間分布，渦旋在生成後，以平均約 8.3cm/s 的速度向西移動著，渦旋最大移動速度可達 21.2cm/s，我們得到的渦旋移動速略低於 Qiu and Chen (2010) 研究結果——平均移動速度為 9.2cm/s，這可能是因為我們的研究採用整個區域的渦旋的移動速進行平均，而 Qiu and Chen 的研究是追蹤特定的渦旋進行分析，另低緯度區域的渦旋移動速度顯示較強，這是受到低緯度海流流速較快的原因，從緯向變化來看 (圖 4-4b)，U(東西速度分量) 的變化明顯要大於 V(南北速度分量)，U 隨著緯度減少而呈現上升的變化，在北緯 15 度達到最大值，此變化趨勢與 Rossby wave 的相速度變化大致吻合的 (Chelton et al., 1998)，而渦旋平均移動速度緯向變化也與 Yang et al. (2013) 結果一致，15 度之後速度減少。V 整體上隨緯度無明顯變化，接著從經向變化來看 (圖 4-4c)，U 的經向變化，大致隨經度隨經度東向西穩定的波動著，V 的經向變化與緯向變化一樣，

平緩的隨經度變化，最後會在東經 125 度左右，速度會呈現上升的情形，U 為負值代表速度分量為向西，V 為正值代表速度分量向北，因此 U 變大則向西移動速度變小，V 變大則向北移動速度變大，這是主要受到黑潮影響的結果，由於黑潮是強勁的西方邊界流，終年向北流，當渦旋移動至此，一方面受到阻隔，U 會變小，一方面也會受到黑潮北流影響，V 會變大。另外我們深入探討冷暖渦的平均移動速度的差異，圖 4-5a 為冷暖渦向西移動速度的緯向變化，顯示冷渦的移動速度是大於暖渦的，這點與 Liu et al. (2012) 稍微不同，但整體變化是類似的，圖 4-5b 則為冷暖渦向北移動速度的緯向變化，由高緯至低緯，冷渦的移動速度是大於暖渦的，大約 17 度之後，冷暖渦速度差會較接近，而且速度變化幅度較大，這點與 Liu et al. (2012) 結果一致，此外，緯度約 21-22 度左右，冷渦與暖渦皆呈現，以北為向南運動，以南為向北運動，其結果也是類似的，這現象可能是受背景流的影響，19-21 度約為 STCC 南支的主軸範圍，背景流流切造成 STCC 的主軸發生改變，因此渦旋才会有南北不同的運動差異。

4.4 移動路徑

前面所述，冷暖渦傳播方向的改變和傳播速度上的差異，這些渦旋於傳播過程中的變化，我們已經有所了解，但如果我們能進一步知道渦旋位置於空間上的連續變動情況，對於不管是現場的觀測，或是連結其他物理現象的關係，例如，黑潮，颱風等等，都有其幫助。

經過處理後，我們得到大量的渦旋路徑，這些渦旋路徑因考量到黑潮的影響，故選取起始及消散位置為黑潮以東的渦旋路徑，而渦旋與大多物理現象一樣，有其生命週期，因此，我們藉由不同生命週期的渦旋路徑統計，討論其渦旋路徑的差異，而冷渦與暖渦不同的物理特性，也會造成影響。圖 4-6a、b 為生命週期

12-24 周的冷暖渦路徑，冷渦路徑共 227 個，暖渦路徑共 260 個，圖 4-7a、b 為生命週期 24-36 周的冷暖渦路徑，冷渦路徑共 64 個，暖渦路徑共 98 個，圖 4-8a、b 為生命週期 36 周以上的冷暖渦路徑，冷渦路徑共 8 個，暖渦路徑共 48 個，根據統計結果，明顯暖渦多於冷渦，而路徑數量隨著渦旋生命週期上升而減少，整體空間分布來看，冷渦路徑主要分布北緯 18 度以北，暖渦範圍稍大，並且路徑較為密集，冷渦與暖渦同樣於北緯 16 度以南，路徑數量是明顯稀少的，這是由於渦旋在低緯數量較少，生命週期較短所造成，另外，隨著生命週期的增加，冷暖渦整體路徑會往北移動。接著為了更加深入了解空間的細部差異，進行了緯向（圖 4-9）與經向（圖 4-10）的統計，將路徑上的座標點加總，數量高代表渦旋路徑密集，低代表稀疏。為了更加完整分辨生命週期長短造成的路徑差異，加入了 12 周以下的資料，而 36 周以上資料較少，就不多加經緯向統計。冷渦在 12 周以下和 12-24 周及 24-36 周明顯在北緯 20 度左右通過路徑為高值（圖 4-9a、b、c），不同的是，24-36 周的冷渦路徑出現了另一個高值，於北緯 27 度附近（圖 4-9c），到了 36 周以上，這種差異更加明顯（圖 4-8a）。暖渦在 12 周以下，高值約集中在北緯 16-22 度，變化趨勢與冷渦類似（圖 4-9a），12-24 周則顯示原本 12 周以下的高值區域會整個往北移動，高值在北緯 18、22、25 度，冷渦路徑到了 24-36 周，高值區域會更加明顯往北移動，在 25 度達到最大值，36 周以上的路徑高低值的差異更是到了極致，20 度以南幾乎沒有路徑的存在（圖 4-8b）。接著從冷暖渦路徑的經向統計來看（圖 4-10），冷渦在不同的週期，於東經 130-140 度皆顯示較高值，隨著週期的增加，高值相對周遭會越來越明顯（圖 4-10c），暖渦在週期 12 周以下的經向變化，相對於其他週期是較接近冷渦的，隨著週期的增加，暖渦高值區域會向東邊移動，到了 24-36 周會更加的明顯，在 160 度達到最大值，冷渦與暖渦的路徑在經向的統計上，其數量差距也會隨週期更加的大。在不同的生命週期裡，冷渦的路徑比起暖渦在 20 度都是較多的，整體上暖渦由於數量較多的原因，其路徑數量也是較多的，但兩者差異卻隨 20 度分成兩種情

況，20 度以南的路徑數量差距，會隨著周期增加而減少，20 度以北則會增加，到了 36 周以上，甚至 20 度以南兩者數量一樣（圖 4-8a、b），另外值得注意的是，生命週期改變與冷暖渦路徑數量的比例關係，冷渦數量減少程度 (225-64-8) 一直都是較暖渦 (258-95-48) 為大的，尤其是生命週期大於 36 周的冷暖渦路徑 (4-8a、b)，冷渦數量只剩下寥寥的 8 個，暖渦卻存在 48 個之多，說明成熟的冷渦是較少存在於 NWSTP，而比起暖渦，其在傳播過程中對海洋進行的貢獻是較低的，而暖渦在扣除數量多於冷渦的優勢 (1.2 比 1) 之下，暖渦較能存活於長生命週期。進一步去探討渦旋的生長曲線（圖 4-11），發現在不同長度的生命週期下，分別為 12 周、24 周及 36 周，冷渦與暖渦會有不同的改變，冷渦半徑及 SLA 隨生命週期增加，成長曲線並無太大的變化，但暖渦在 36 周時候，半徑的成長曲線明顯趨緩，而 SLA 發展期明顯變長，相較於 12 周及 24 周時候，高峰期大約出現在在生命週期一半的地方，36 周的高峰期則是出現在生命週期四分之三的地方。暖渦與冷渦 SLA 在 36 周的成長曲線顯示暖渦比起冷渦，其發展期較長，高峰期較晚，這些現象說明暖渦需要較多的時間發展成熟，符合前面所提到，暖渦比起冷渦，擁有較能發展成長生命週期的機制。

前面提到渦旋擁有季節性的變化，則是另一個考量的影響因素，在此我們希望渦旋能有較長時間受環境的傳播過程，因此選用 12 周以上的渦旋路徑，圖 4-12、圖 4-13、圖 4-14、圖 4-15 為冷暖渦路徑於春夏秋冬四季的空間分布，冷渦數量分別為 196、119、91、119 個，暖渦數量則分別為 215、181、127、135 個，冷渦與暖渦路徑同樣在春季最多，隨後夏季減少，秋季降至最少，冬季則稍微增加些，冷渦春夏數量差距最大，暖渦夏秋差距最大，這應與冷暖渦數量的季節性有關（圖 3-17），從緯向統計（圖 4-16a、b）來看，冷渦基本上高值都在 20 度左右，春夏季在 27 度左右有另一個次高值，秋冬季則消失，暖渦春夏季高值同樣在 25-26 度，到了秋季，原本高值範圍反而降低，冬季則高值範圍相較前面是往南移動的，並且在 18 度左右出現次高值，整體上，冷渦的高值區域相對於暖渦

緯度是較低的。接著從經向統計來看（圖 4-16c、d），冷渦春季路徑以 145-170°E 為主要高值區域，130-140°E 為次高值，夏季東方主要高值區域路徑明顯減少，到了秋季，甚至減少至極低值，最後冬季東方區域才又回升，形成 130-140°E 和 150-175°E 兩塊冷渦路徑密集區域，暖渦春季高值區域約在 145-160°E，夏季與冷渦類似，其原本高值區域會減少，秋季持續減少，最後冬季會回升，形成以 158 度為中心的高值區域，冬季的經向差異相較其他季節較為明顯。

最後進一步想了解冷暖渦路徑是否也會受到自身的物理性質的影響，因此進行了冷暖渦起始半徑與中心 SLA 的路徑統計（圖 4-17、圖 4-18），研究方式是將冷暖渦半徑及中心 SLA 進行平均後，以其平均值做標準，分別對高於和低於這個標準進行統計分析，冷渦分別為 137 比 162 個，暖渦為 167 比 239 個。

渦旋半徑緯向統計方面（圖 4-19a），冷渦路徑在半徑高於及低於標準都是以 20 度為一個高值，分別向南北減少，不同的是低於的情況會在 28 度左右形成另一個高值，整體上，暖渦的路徑高值相對冷渦會較北偏，這情況在低於標準的時候會更加明顯，其高值會在 25 度左右，至於經向統計方面（圖 4-19b），冷渦在高於及低於標準的經向變動比起暖渦是較不明顯，只有在低於標準，於 130-140°E 形成一個路徑密集帶，暖渦在高於標準的時候以 140-170°E 為一個高值區域，此區域到了低於標準，其值會更加明顯，整體上暖渦的路徑高值相對冷渦是較明顯且範圍較東偏的。

渦旋中心 SLA 緯向統計方面（圖 4-19c），冷渦在高於及低於標準的情況下，同樣以 20 度為高值並向南北減少，到了 26-28 度才又增加，暖渦則是高值會往北邊移動，由 23 度至 25 度，冷渦與暖渦的這種變化情況皆類似其半徑的緯向變化（4-19a），而經向的統計方面（圖 4-19c），冷渦的高值會由原本的高值範圍（130-140°E）移至東邊（150-170°E），暖渦也有類似的情況，高值會往東移，在 140-170°E 形成路徑密集帶，此範圍與前面半徑一致。

經過這些路徑的統計及分析後，我們希望進一步知道進入台灣東部海域的渦旋路徑型態，及是否與 NWSTP 的渦旋路徑特性一致，基於上述 NWSTP 在季節性及物理性質的總路徑統計，我們另外做了進入台灣東部海域的路徑統計，冷渦與暖渦四季的路徑數量，分別為 9、6、8、15，和 15、11、5、14。冷渦春季路徑集中於北緯 20-24 度，而 NWSTP 在緯度是相對低值的，夏季隨 NWSTP 總路徑數量減少的影響，進入的渦旋路徑也減少，並且明顯路徑集中於北緯 23 度，這與 NWSTP 高值不同，到了秋季，進入的數量並沒有受到 NWSTP 數量減少的影響，反而是增加的，這是由於 NWSTP 西邊的高值是增加的，導致進入的路徑也隨之增加，並集中於北緯 20 度上下，這點倒是與 NWSTP 一致的，最後到了冬季，隨著 NWSTP 的增加，進入的路徑也是增加，但增加的幅度卻是相當大的(秋-冬, 5-15)，此原因可能為進入的路徑範圍大多在東經 122-135 度，而 NWSTP 在此範圍的路徑相對秋季是增加的，進入的路徑範圍約北緯 20-24 度。暖渦春季路徑多半位於北緯 18-20 度，而 NWSTP 則是在 21-24 度較多，夏季進入的路徑隨 NWSTP 減少而減少，並主要分為北緯 20 以上跟以下兩種類型，與 NWSTP 較看不出關聯，秋季隨著 NWSTP 繼續減少而再度減少，只剩下 5 個路徑，這應該與 NWSTP 路徑變短有關，能進入台灣東部海域的渦旋變少，路徑則集中於北緯 22-24 度，冬季台灣東部海域路徑增加，集中於北緯 22-24 度，NWSTP 於此緯度也是一個相對高值，並且主要以 20 度分成上下兩種路徑類型。

冷渦與暖渦在高於及低於半徑標準的路徑數量，分別為 10、13 及 14、9，冷渦在高於的時候，其路徑較為分散，不過大致都位於北緯 24 度以下，走向更是明顯的由東南向西北，低於的時候受到 NWSTP 西邊路徑增加的影響，進入的路徑機會也會增加，主要集中於北緯 20 度左右。暖渦在高於的時候，路徑主要集中在北緯 22 度，20 度以下次之，低於則受到 NWSTP 西邊 20-24 度路徑減少的緣故，進入的機會也會減少。最後進行高於及低於中心 SLA 標準的路徑比較，冷暖渦進入的路徑數量分別為 17、6 及 15、8，冷渦高於 SLA 的時候，與高於半

徑路徑類似，大多都位於北緯 24 度以下，其走向也是明顯東南向西北，低於 SLA 的時候，受到 NWSTP 西邊路徑減少的影響，進入路徑少很多，只有 6 個，範圍位於北緯 20-25 度之間，走向以單純的向西居多。暖渦高於的路徑以北緯 22 度較為集中，低於的路徑則以北緯 20 度以下最為明顯，並且走向為筆直的向西。整體來看，暖渦比起冷渦，在擁有高物理性質的情況下，是相對較容易進入台灣東部海域的。

4.5 小結

NWSTP 的渦旋受到背景場的影響，大多呈現向西傳播的運動方式，而這傳播過程在空間上的變化，不僅關係到渦旋本身物理性質的改變，也可能作用在海洋上。渦旋傳播的統計結果顯示，冷暖渦受到 β 效應的影響，冷渦會朝北偏轉，暖渦則朝南偏轉，並且大多起源以及消散於北緯 22 度以北，尤其以 22 度為最多，台灣東部海域起源較少，而消散明顯較多，這主要是受到黑潮的影響，造成傳播至此的渦旋大量消散，傳播速度方面，U 隨緯度減少而增加，在 15 度達到最大值，V 則無明顯變化，靠近黑潮區域，U 明顯減少，而 V 明顯增加，這主要受到黑潮阻隔及向北流的關係，此外，緯度約 21-22 度左右，冷渦與暖渦皆呈現，以北為向南運動，以南為向北運動，這現象可能是背景流流切造成 STCC 的主軸發生改變而造成，整體上，冷渦 U 跟 V 是稍大於暖渦的。

進一步統計渦旋的路徑，分析其在不同背景下，路徑於空間上的分布情況，結果顯示，隨著生命週期的增加，冷渦明顯以北緯 22 度為路徑高值區，到了 36 周以上，才在 28 度形成高值，暖渦的高值區隨生命週期增加，而呈現向北移動的趨勢，並且高值區也會跟著向東邊移動，此外，隨生命週期的增加，暖渦路徑數量明顯比冷渦衰減的少，到了 36 周以上，更是遠大於冷渦的數量，生長曲線

也顯示暖渦較晚成熟，這說明暖旋擁有較能發展成長生命週期的機制在西北太平洋副熱帶區域。冷暖渦在季節性的路徑分布方面，數量皆為春季最多，夏秋季減少，冬天增加，進入台灣東部海域的路徑，冷渦夏季最少，冬季最多，暖渦秋季最少，冬季最多，主要是受到 STCC 以西海域路徑分布的影響。冷暖渦在高於及低於平均半徑及平均中心 SLA 的統計，顯示冷暖渦都是在低於平均的時候，其路徑數量皆是較多的，而從空間統計來看，NWSTP 的渦旋路徑顯示，在低於平均的時候，冷渦與暖渦差異性較大，高於平均則差異性較小，而進入台灣的路徑，在高於中心 SLA 平均的時候，數量顯示較多，則可能與渦旋中心 SLA 在 STCC 以西到台灣東部海域之間為高值有關，相對高 SLA 的渦旋事件會較多，進入的可能性也會較高，而高於半徑平均，冷渦進入的路徑較少，暖渦較多，由於渦旋半徑在 STCC—台灣東部海域並不是一個高值的情況，這可能與渦旋的起源有關。

第五章 結論

本研究利用 20 年的衛星高度計資料，搭配 vector geometry method，對西北太平洋的渦旋進行有效地判讀，並進一步統計出時空變化下的渦旋基本性質，以及渦旋的傳播特性。海表高度的變動顯示了 NWSTP 存在活躍的渦旋現象，這些渦旋大多呈現向西傳播的特性，隨空間及時間變動下，其物理特性也會有其獨特的變化。

空間分析顯示，暖渦數量明顯多於冷渦，冷暖渦分別為 12333 個及 16435 個，暖渦主導著 NWSTP 的渦旋分布，冷渦則在 19-21°N 數量較多，冷暖渦皆集中再 20°N 以北，受到渦旋向西傳播的影響，渦旋分布靠近黑潮區域更是明顯。渦旋半徑方面，冷渦稍大於暖渦，冷暖渦分別為 91.3km 及 89.8km，同樣於 20°N 為最大值，並隨此緯度向南北減少其半徑，接觸黑潮後渦旋受其破壞，尺度更會減小。渦旋中心 SLA 顯示暖渦大於冷渦，分別為 20.7cm 及 18.7cm，並以 20-22°N 為最大值，隨此緯度向南減少，向北則暖渦減少，冷渦先減少後增加，此冷暖渦中心 SLA 的差異，造成了渦旋在高緯度部分的變化相對低緯度是較緩和的，此外，冷暖渦中心 SLA 隨經度減少，呈現明顯的上升趨勢，特別是黑潮附近，這說明了渦旋向西過程中，會逐漸發展成熟，增強其中心結構。

時間分析顯示，冷渦與暖渦數量高值出現在夏季，春季則為低值，冷渦與暖渦半徑高值出現在秋冬季，不過冷渦在秋季較明顯，暖渦則是在冬季，不同於渦旋數量及渦旋半徑的季節性分布，渦旋中心 SLA 顯示冷渦與暖渦為相反的變動，冷渦夏秋季較低，暖渦卻較高。進一步分析月資料，明顯看出 1-4 月皆為反常的情況，正常的情況下，冷渦半徑是大於暖渦的，暖渦中心 SLA 是大於冷渦的，可是在 1-4 月，冷渦半徑卻是小於暖渦，而暖渦中心 SLA 小於冷渦，數量方面，比起正常情況下暖渦的明顯優勢，在此時間裡差距是明顯較小的，這顯示這段時間，NWSTP 存在特別的動力機制變化，這導致冷暖渦呈現異常的變化。年際變

化方面，冷渦與暖渦的關係相較季節變化，是要來的不明顯。

前人研究多以 EKE 來呈現渦旋的活躍程度，本研究顯示與前人類似的結果，渦旋存在明顯的季節性變化，5-6 月為最大值，經過 EKE 與渦旋中心 SLA 及渦旋數量進行相關性比對後，三者的時間及空間上都有很好的關係，這說明渦旋中心 SLA 也是影響 EKE 的重要因素，特別是靠近黑潮的海域，這點在之前研究是較少被討論的。

渦旋傳播的統計結果顯示，冷暖渦受到 β 效應的影響，冷渦會朝北偏轉，暖渦則朝南偏轉，並且大多起源以及消散於北緯 22 度以北，尤其以 22 度為最多，台灣東部海域起源較少，而消散明顯較多，傳播速度方面，靠近黑潮區域，U 明顯減少，而 V 明顯增加，這主要受到黑潮阻隔及向北流關係，此外，緯度約 21-22 度左右，冷渦與暖渦皆呈現，以北為向南運動，以南為向北運動，這現象與背景流流切造成 STCC 的主軸發生改變有關，整體上，冷渦速度稍大於暖渦的，渦旋平均速度約 8.3 cm/s。

渦旋路徑的統計結果顯示，隨生命週期的增加，暖渦的高值區呈現向北移動及向東移動的趨勢，而且暖渦與冷渦的差距會更加明顯，生長曲線也顯示暖渦發展也會較長，這說明 NWSTP 的暖旋擁有較能發展成長生命週期的機制。冷暖渦在季節性的路徑分布方面，數量皆為春季最多，夏秋季減少，冬天增加，空間分布則顯示，暖渦相對冷渦較集中於高緯，進一步探討進入台灣東部海域的路徑，冷渦夏季最少，冬季最多，暖渦秋季最少，冬季最多。冷暖渦以平均半徑及平均中心 SLA 為標準的統計，顯示冷暖渦在低於標準的時候，其路徑數量皆是較多的，空間分布差異更加明顯，而進入台灣的路徑統計結果顯示，暖渦比起冷渦，在擁有高物理性質的情況下，是相對較容易進入台灣東部海域的，值得注意的是，進入台灣東部海域的渦旋大多不是從 STCCT 傳播而來，這說明渦旋的產生機制並不主要是受到 STCC-NEC 流切不穩定而產生，可能存在別的動力機制影響。

參考文獻

- Chaigneau, A., G. Eldin, and B. Dewitte (2009), Eddy activity in the four major upwelling systems from satellite altimetry (1992–2007). *Prog. Oceanogr.*, 83, 117–123.
- Chaigneau, A., M. Le Texier, G. Eldin, C. Grados, and O. Pizarro (2011), Vertical structure of mesoscale eddies in the eastern South Pacific Ocean: A composite analysis from altimetry and Argo profiling floats. *J. Geophys. Res.*, 116, C11025.
- Chang, M. H., T. Y. Tang, C. R. Ho, and S. Y. Chao (2013), Kuroshio-induced Wake in the Lee of Green Island off Taiwan. *J. Geophys. Res. Oceans*, 118, 1-12.
- Chen, G., Y. Hou, and X. Chu (2011), Mesoscale eddies in the South China Sea: Mean properties, spatiotemporal variability, and impact on thermohaline structure. *J. Geophys. Res.*, 116, C06018.
- Chelton, D. B., R. A. de Szoeke, M.G. Schlax, K. El Naggar, and N. Siwertz (1998), Geographical variability of the first-baroclinic Rossby radius of deformation. *J. Phys. Oceanogr.*, 28, 433–460.
- Chelton, D. B., M.G. Schlax, R. M. Samelson, and R. A. de Szoeke (2007), Global observations of large oceanic eddies. *Geophys. Res. Lett.* 34, L15606.
- Chelton, D. B., M.G. Schlax, and R. M. Samelson (2011), Global observations of nonlinear mesoscale eddies. *Prog. Oceanogr.*, 91, 167–216.
- Crawford, W. R., P. J. Brickley, T. D. Peterson, and A. C. Thomas (2005), Impact of Haida eddies on chlorophyll distribution in the eastern Gulf of Alaska. *Deep-Sea Res. II*, 52, 975–989
- Cushman-Roisin, B (1994), *Introduction to Geophysical Fluid Dynamics*. Prentice Hall, New Jersey. 320 pp.
- Cushman-Roisin, B., and J.-M. Beckers (2011), *Introduction to Geophysical Fluid Dynamics– Physical and Numerical Aspects*. Academic Press, 828 pp.
- Doglioli, A. M., B. Blanke, S. Speich, and G. Lapeyre (2007), Tracking coherent structures in a regional ocean model with wavelet analysis: Application to Cape Basin eddies. *J. Geophys. Res. Oceans*, 112 (C5) , C05043.
- He, Z. G., D. X. Wang, and J. Y. Hu (2002), Features of eddy kinetic energy and variations of upper circulation in the South China Sea. *Acta oceanologica sinica*, 21(2), 305-314.
- Jayne, S. R., and J. Marotzke (2002), The oceanic eddy heat transport. *J. Phys. Oceanogr.*, 32, 3328–3345.
- Joyce, T. M., Y. O. Kwon, and L. S. Yu (2009), On the Relationship between Synoptic Wintertime Atmospheric Variability and Path Shifts in the Gulf Stream and the

- Kuroshio Extension. *J. Climate*, 22, 3177-3192.
- Kobashi, F., and H. Kawamura (2001), Variation of sea surface height at periods of 65–220 days in the subtropical gyre of the North Pacific. *J. Geophys. Res. Oceans*, 106(C11).
- Lin, I. I., C. C. Wu, K. A. Emanuel, I. H. Lee, C. R. Wu, and I. F. Pun (2005), The interaction of Supertyphoon Maemi (2003) with a warm ocean eddy. *Mon. Weather Rev.*, 133 (9) , 2635-2649.
- Liu, C. S., S. Y. Liu, S. Lallemand, N. Lundberg, and D. L. Reed (1998), Digital elevation model offshore Taiwan and its tectonic implications. *TAO*, 9, 705–738.
- Liu, Y., C. Dong, Y. Guan, D. Chen, J. McWilliams, and F. Nencioli (2012), Eddy analysis in the subtropical zonal band of the North Pacific Ocean. *Deep-Sea Res., Part I*, 68, 54–67.
- McPhaden, M. J., and D. Zhang (2002), Slowdown of the meridional overturning circulation in the upper Pacific Ocean. *Nature*, 415, 603–608.
- McWilliams, James C., and Glenn R. Flierl (1979), On the Evolution of Isolated, Nonlinear Vortices. *J. Phys. Oceanogr.*, 9, 1155–1182.
- McWilliams, James C., Peter R. Gent, and Nancy J. Norton (1986), The Evolution of Balanced, Low-Mode Vortices on the β -Plane. *J. Phys. Oceanogr.*, 16, 838–855.
- McWilliams, James C (1990), The vortices of two-dimensional turbulence. *J. Fluid. Mech.*, 219, 361–385.
- Morrow, R., F. Birol, D. Griffin, and J. Sudre (2004), Divergent pathways of cyclonic and anti-cyclonic ocean eddies. *Geophys. Res. Lett.*, 31.
- Nencioli, F., C. Dong, T. Dickey, L. Washburn, and James C. McWilliams (2010), A vector geometry based eddy detection algorithm and its application to high-resolution numerical model products and high-frequency radar surface velocities in the Southern California Bight. *J. Atmos. Oceanic Technol.* 27, 564–579.
- Qiu, B. (1999), Seasonal eddy field modulation of the North Pacific Subtropical Countercurrent: TOPEX/Poseidon observations and theory. *J. Phys. Oceanogr.*, 29, 2471–2486.
- Qiu, B. (2000), Interannual variability of the Kuroshio Extension system and its impact on the wintertime SST field. *J. Phys. Oceanogr.*, 30,1486–1502.
- Qiu, B., and S. Chen (2005), Eddy-induced heat transport in the subtropical North Pacific from Argo, TMI, and altimetry measurements. *J. Phys. Oceanogr.*, 35, 458–473.
- Qiu, B., and S. Chen (2010), Interannual variability of the North Pacific Subtropical Countercurrent and its associated mesoscale eddy field. *J. Phys. Oceanogr.*, 40, 213–225.
- Backus, Richard H. (1981), Gulf Stream Cold-Core Rings: Their Physics, Chemistry,

- and Biology. *Science*, 212, 1091-1100.
- Roemmich, D., and J. Gilson (2001), Eddy transport of heat and thermocline waters in the North Pacific: A key to interannual/decadal climate variability? *J. Phys. Oceanogr.*, 31, 675–687.
- Sasaki, Y. N., S. Minobe, T. Asai, and M. Inatsu (2012), Influence of the Kuroshio in the East China Sea on the early summer (Baiu) rain. *J. Climate*, 25, 6627-6645.
- Tang, T. Y., J. H. Tai, and Y. J. Yang (2000), The flow pattern north of Taiwan and migration of the Kuroshio. *Continental Shelf Research*, 20, 349–371.
- Wong G. T. F., S. C. Pai, K. K. Liu, C. T. Liu and C. T. A. Chert (1991), Variability of the chemical hydrography at the frontal region between the East China Sea and the Kuroshio northeast of Taiwan. *Estuarine Coastal Shelf Science*, 33, 105-120.
- Wu, C. R., H. F. Lu, and S. Y. Chao (2008), A numerical study on the formation of upwelling off northeast Taiwan. *J. Geophys. Res.*, 113, C08025.
- Yang, G., F. Wang, Y. Li, and P. Lin (2013), Mesoscale eddies in the northwestern subtropical Pacific Ocean: Statistical characteristics and three-dimensional structures, *J. Geophys. Res. Oceans*, 118.
- Yang, Y., C. T. Liu, J. H. Hu, and M. Koga (1999), Taiwan Current (Kuroshio) and Impinging Eddies, *J. Oceanogr.*, 55, 609-617.
- Yasuda, I., K. Okuda, and M. Hirai (1992), Evolution of a Kuroshio warm-core ring – variability of the hydrographic structure, *Deep-Sea Res.*, 39, 131-161.
- Zhai, X., H. L. Johnson, and D. P. Marshall (2010), Significant sink of ocean-eddy energy near western boundaries. *Nat. Geosci.*, 3, 608–612.
- Zhang, D., Thomas N. Lee, William E. Johns, C. T. Liu, and R. Zantopp (2001), The Kuroshio East of Taiwan: Modes of variability and relationship to interior ocean mesoscale eddies. *J. Phys. Oceanogr.*, 31, 1054–1074.
- Zheng, Z. W., C. R. Ho, Q. Zheng, Y. T. Lo, N. J. Kuo, and G. Gopalakrishnan (2010), Effects of preexisting cyclonic eddies on upper ocean responses to Category 5 typhoons in the western North Pacific. *J. Geophys. Res.*, 115, C09013.

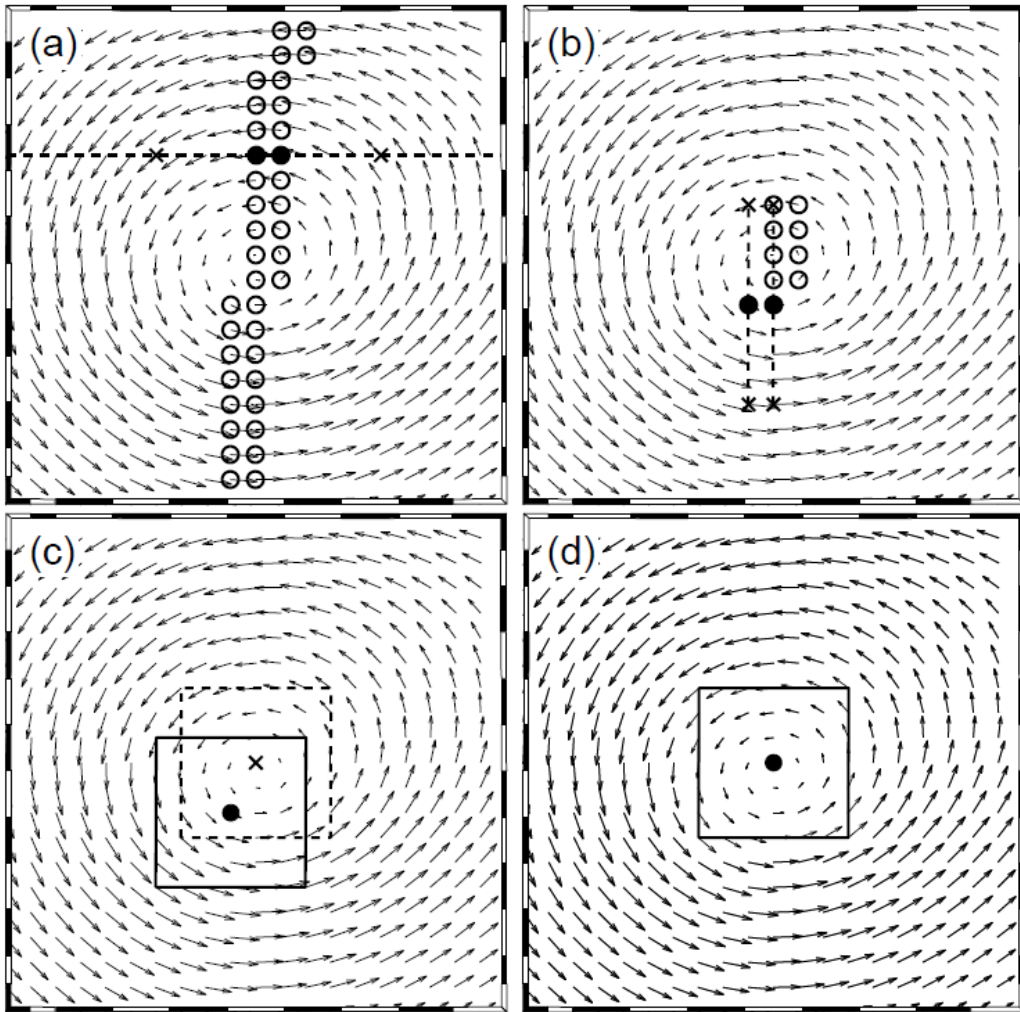


圖 2-1 渦旋自動偵測法限制條件示意圖(修改自 Nencioli et al., 2010)

Velocity vectors along searching area boundaries

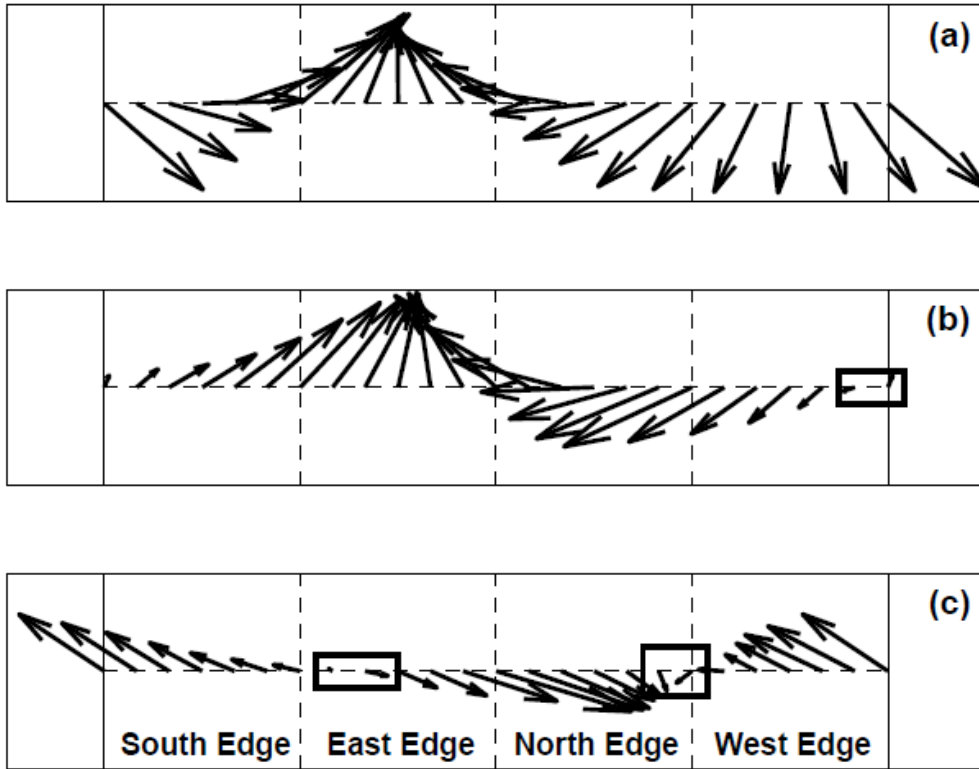


圖 2- 2 限制條件 4 之示意圖(Nencioli et al., 2010)

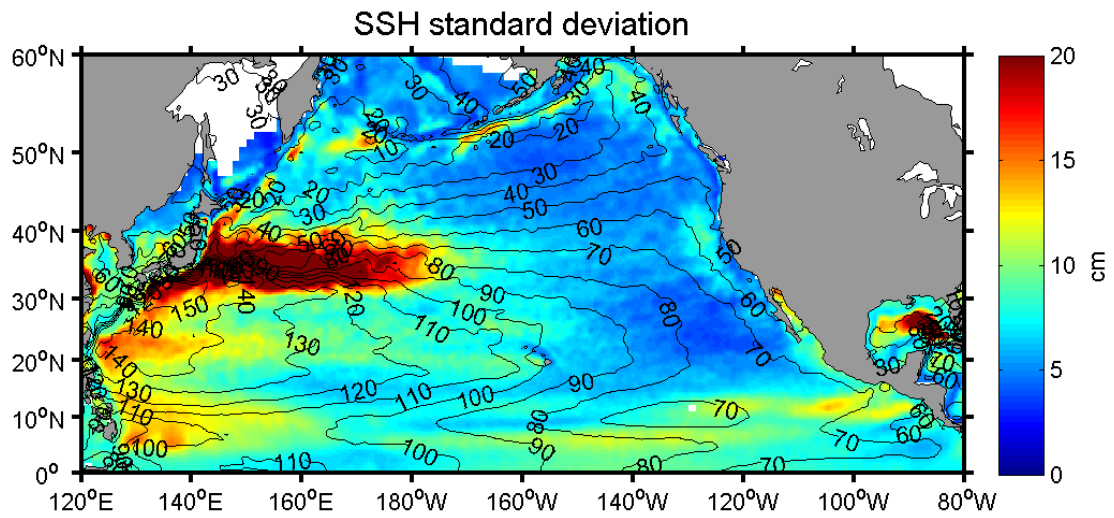


圖 3- 1 北太平洋海表面高度標準差示意圖，底圖為海表面高度標準差 (cm)，等值線為平均海表面高度場 (cm)。

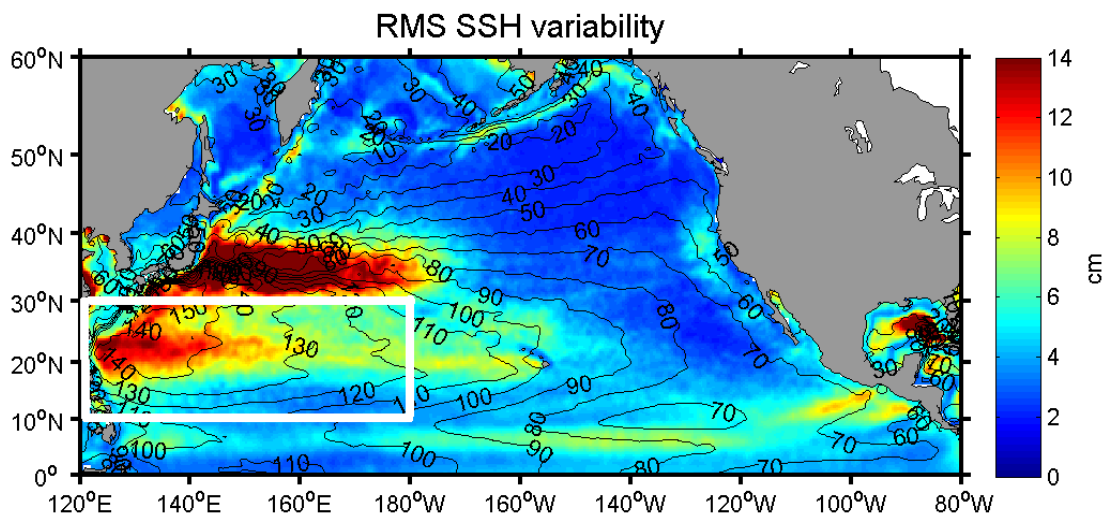


圖 3- 2 北太平洋海表面高度變化均方根示意圖，底圖為海表面高度經過半年濾波處理後的均方根 (cm)，等值線為平均海表面高度場 (cm)，白線圍繞區塊為本研究區域 (NWSTP)。

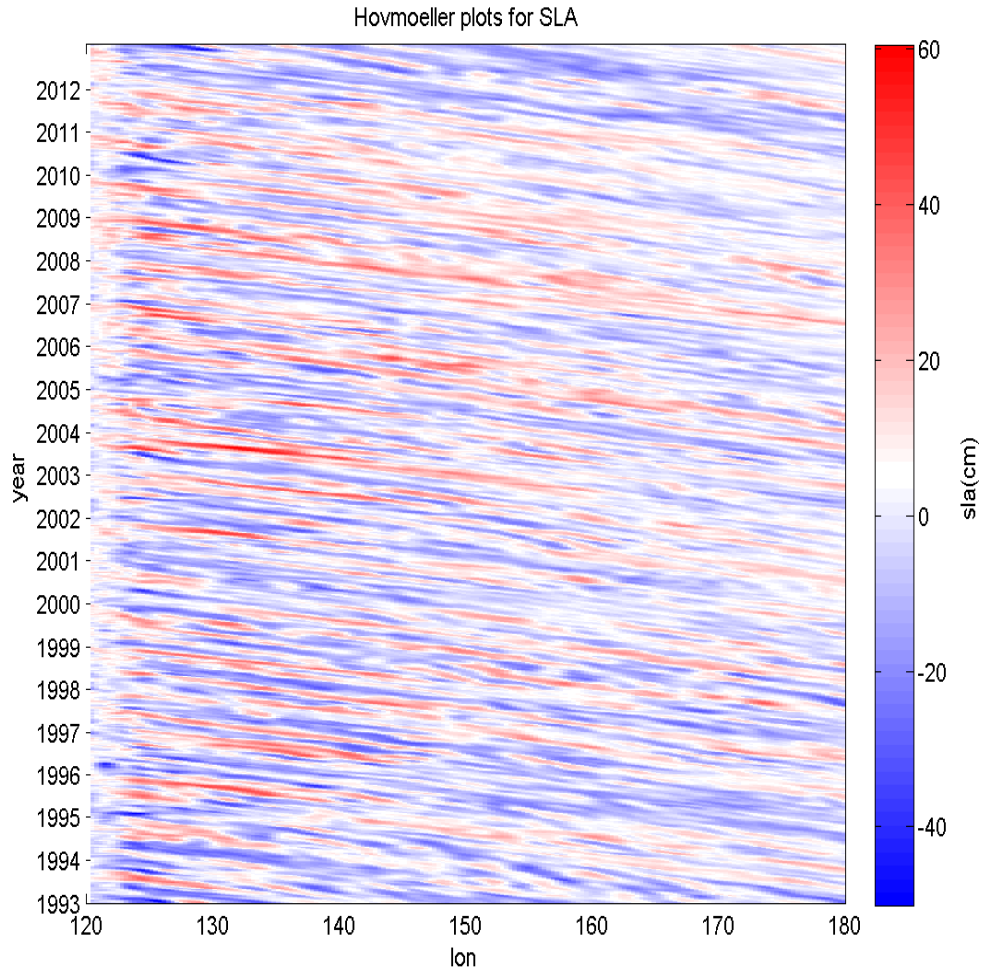


圖 3-3 沿 23°N 之經度-時間之 SLA 等值圖，觀測時間為 1993 年 1 月至 2012 年 12 月，底圖為 SLA，藍色表示 SLA 負值，紅色則表示 SLA 正值。

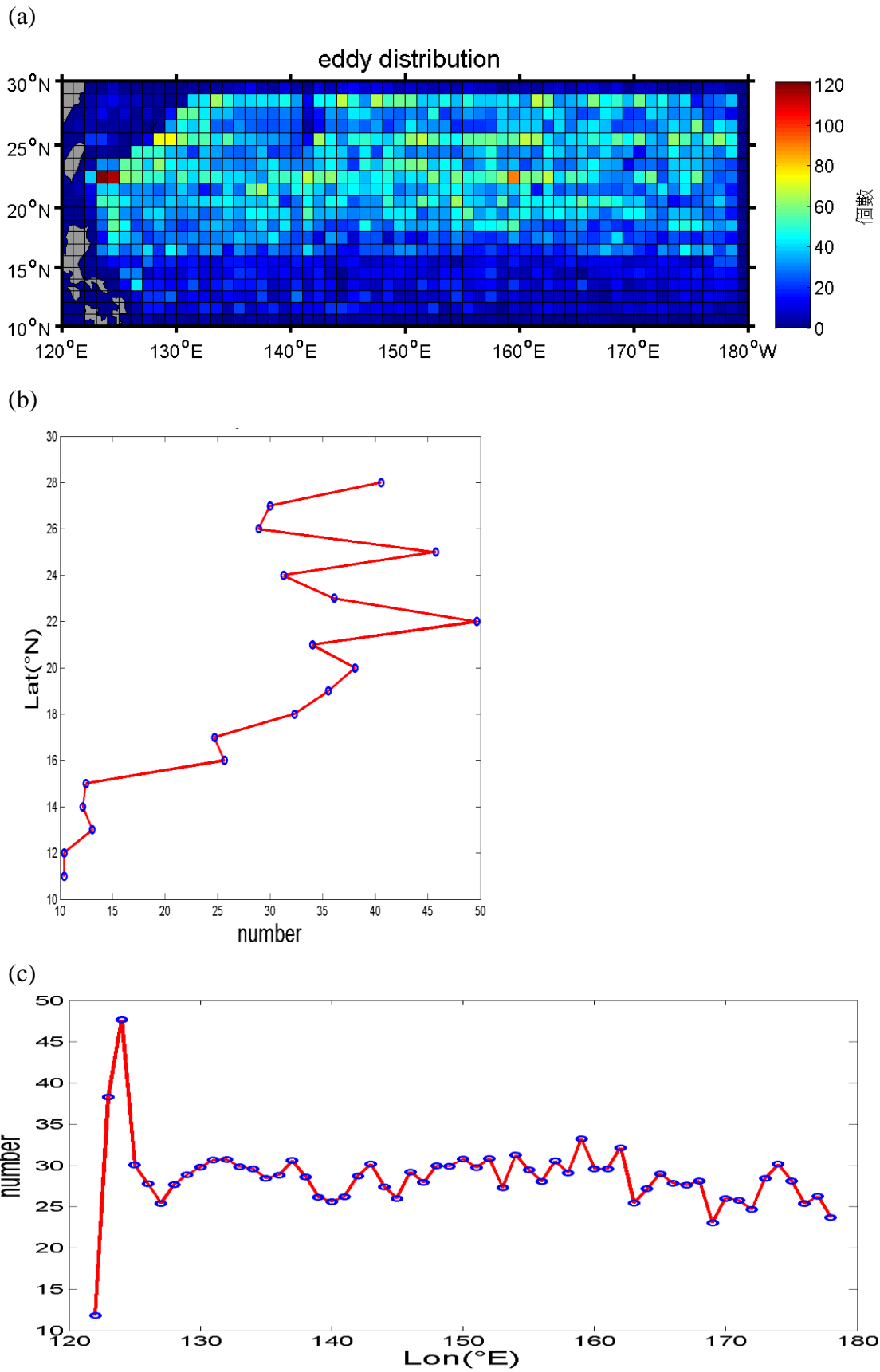


圖 3-4 (a) 渦旋數量空間分布圖、(b) 渦旋數量緯向平均圖、(c) 渦旋數量經向平均圖

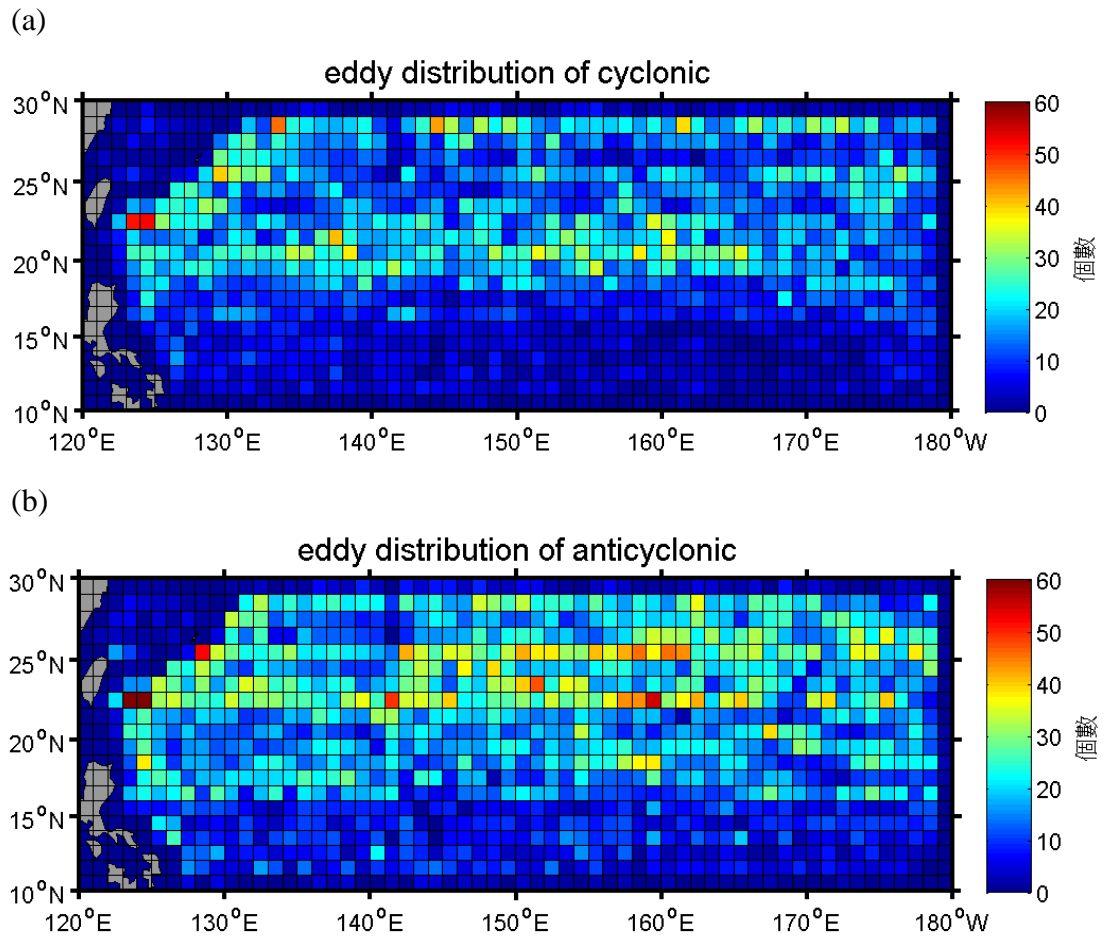


圖 3- 5 (a) 冷渦數量空間分布圖、 (b) 暖渦數量空間分布圖

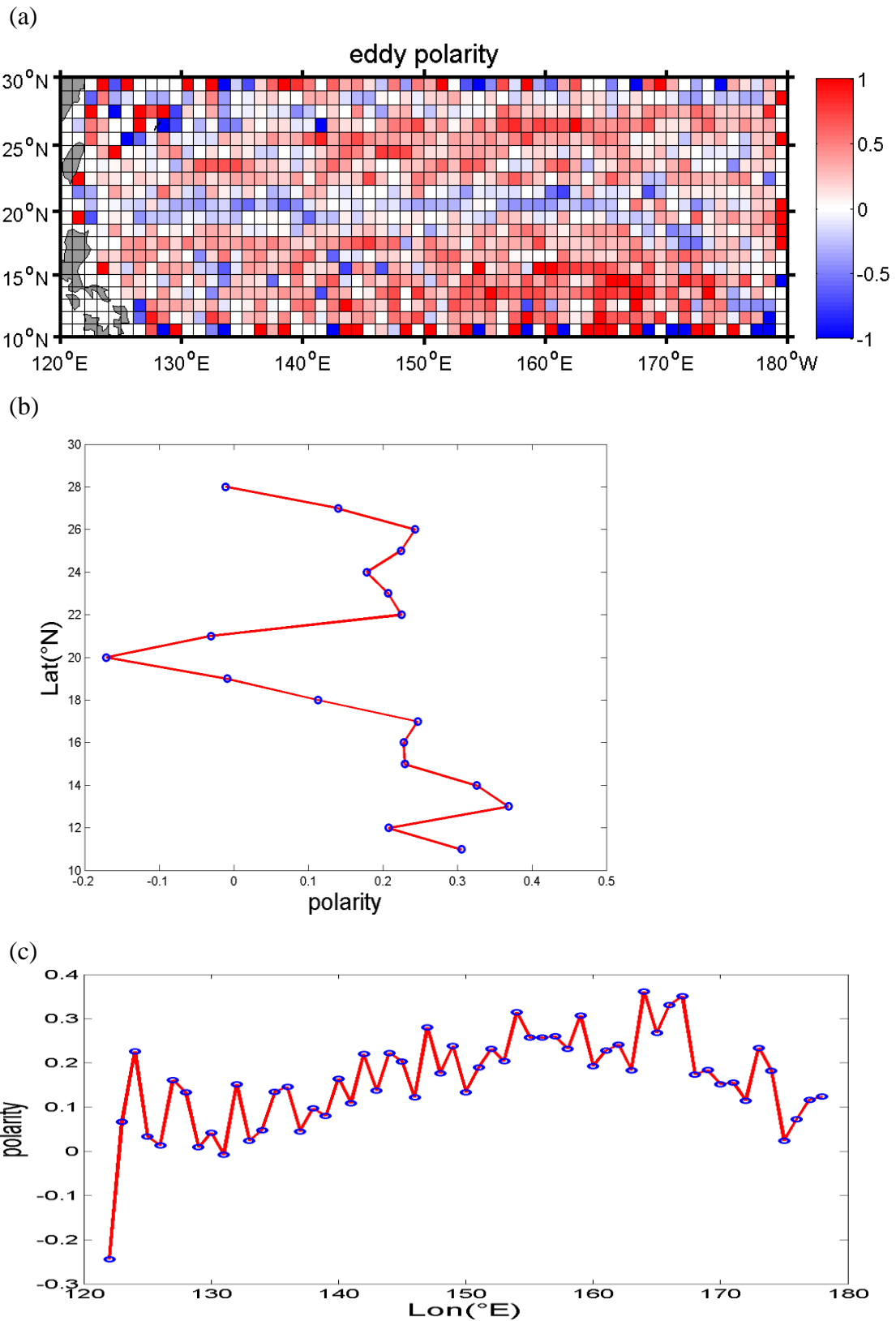
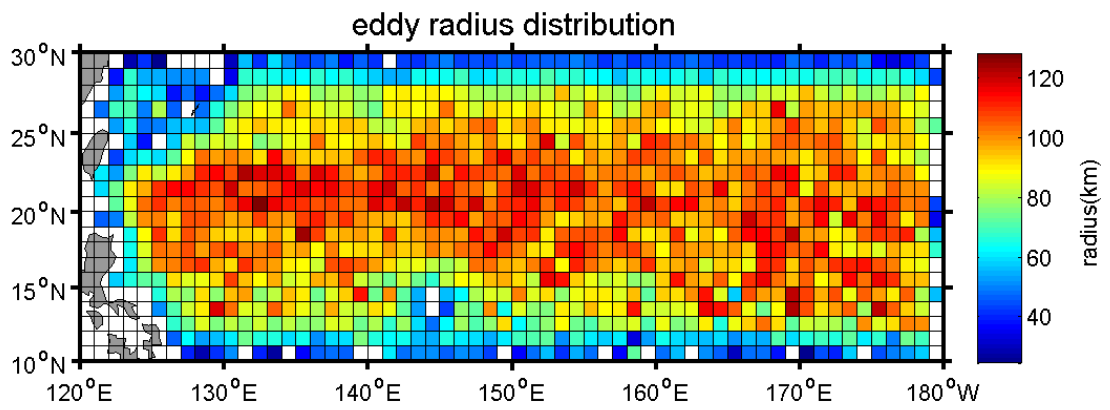
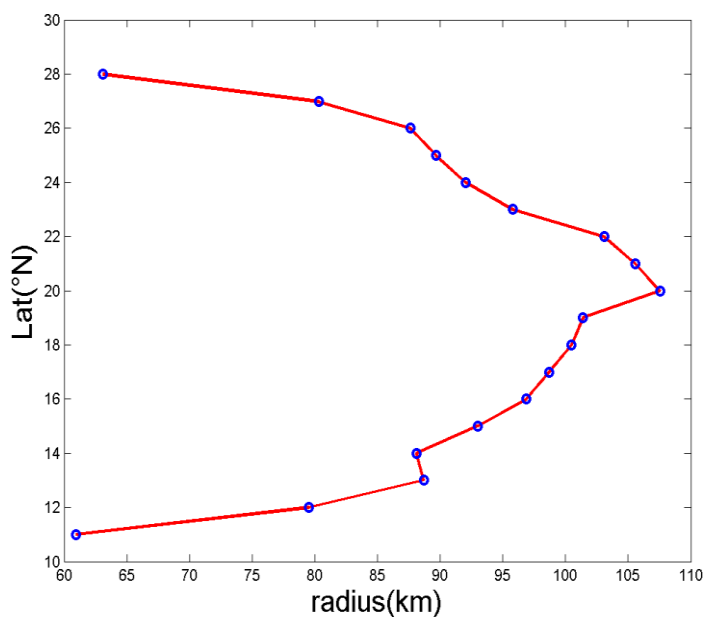


圖 3-6(a) 渦旋極性空間分布圖、(b) 渦旋極性緯向平均圖、(c) 渦旋極性經向平均圖，Polarity 為+1 表示渦旋組成全為暖渦，0 表示冷渦數量等於暖渦數量，-1 表示渦旋組成全為冷渦。

(a)



(b)



(c)

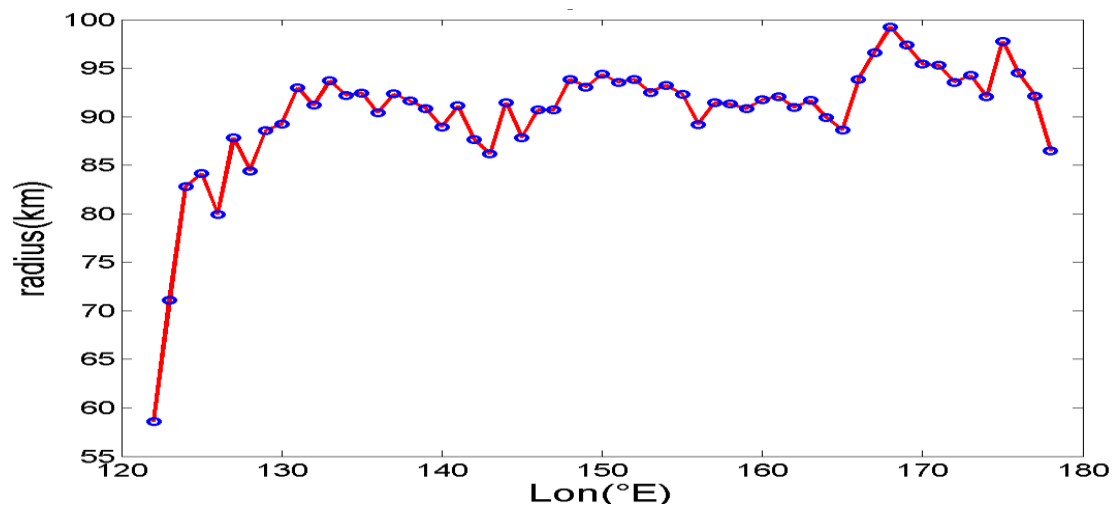
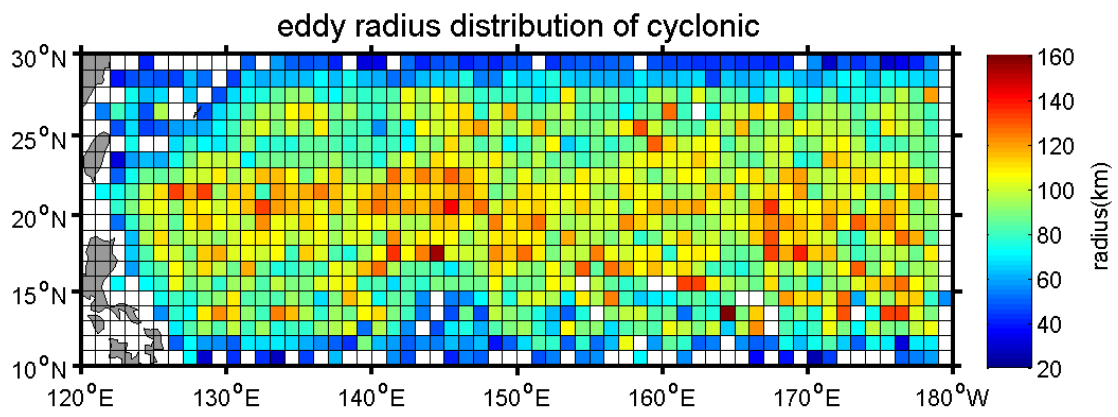


圖 3-7(a) 渦旋半徑空間分布圖、(b) 渦旋半徑緯向平均圖、(c) 渦旋半徑經向平均圖

(a)



(b)

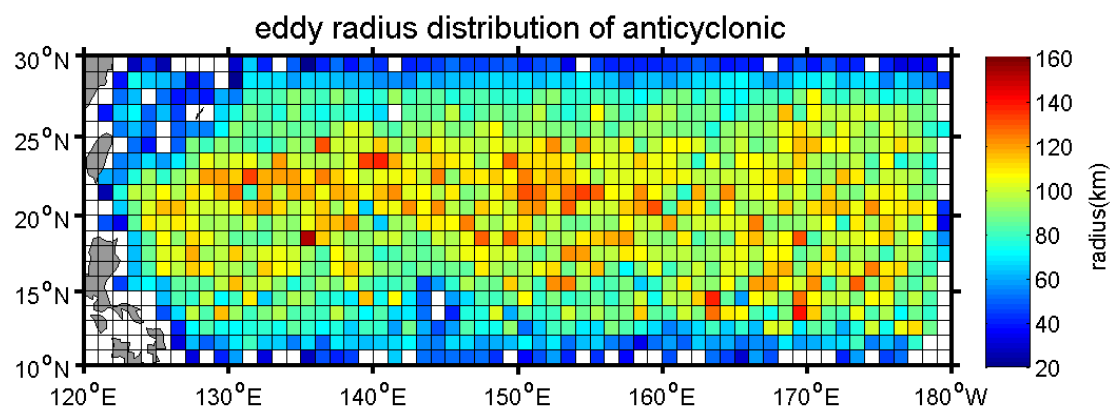
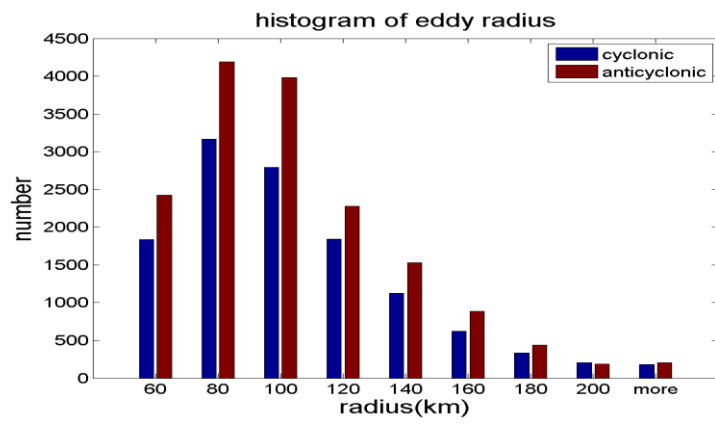
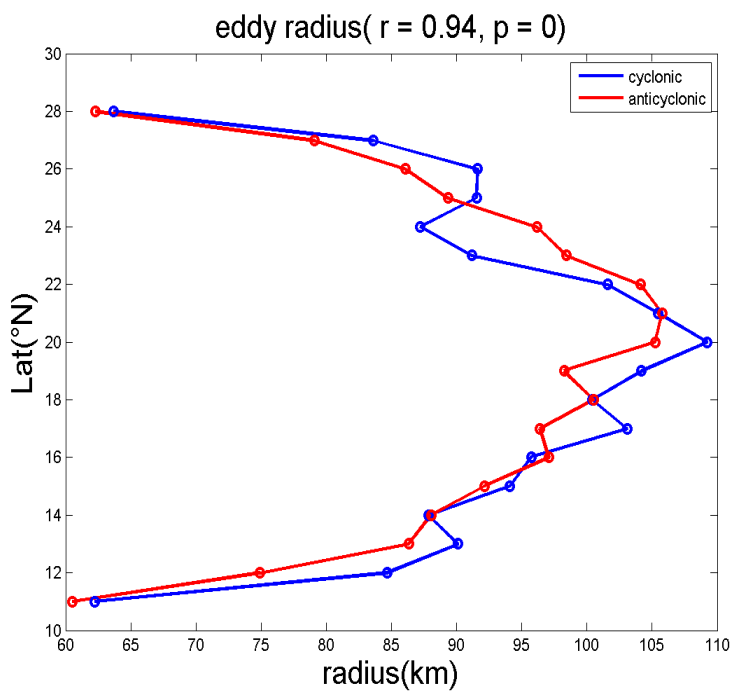


圖 3- 8 (a) 冷渦半徑空間分布圖、 (b) 暖渦半徑空間分布圖

(a)



(b)



(c)

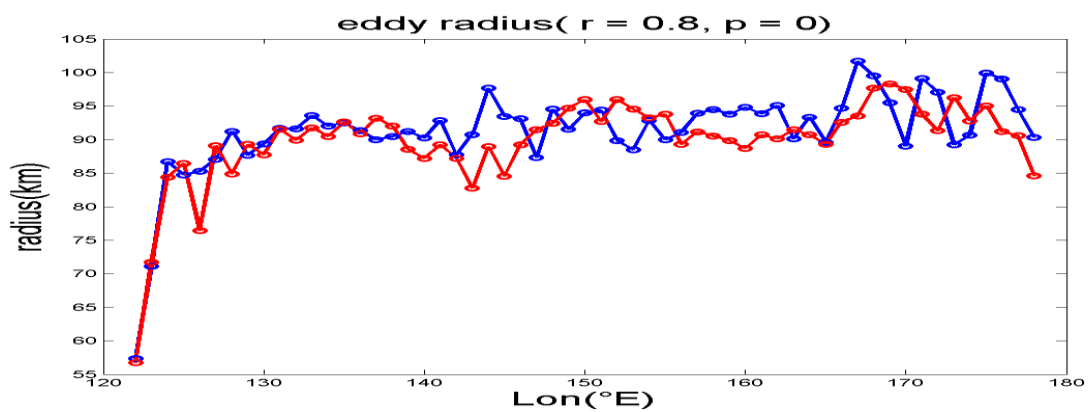


圖 3-9(a) 冷暖渦半徑統計直方圖、(b) 冷暖渦半徑緯向平均圖、(c) 冷暖渦半徑經向平均圖， r 為相關係數， p 為顯著水準。

(a)

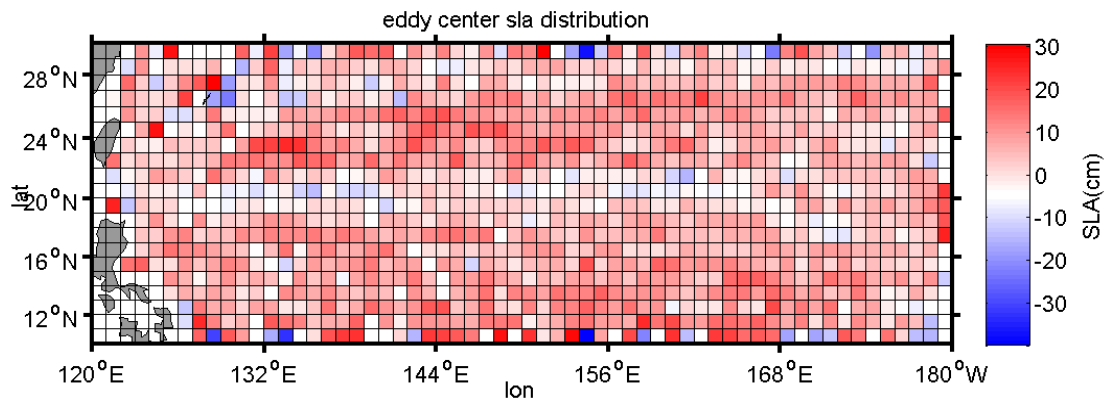
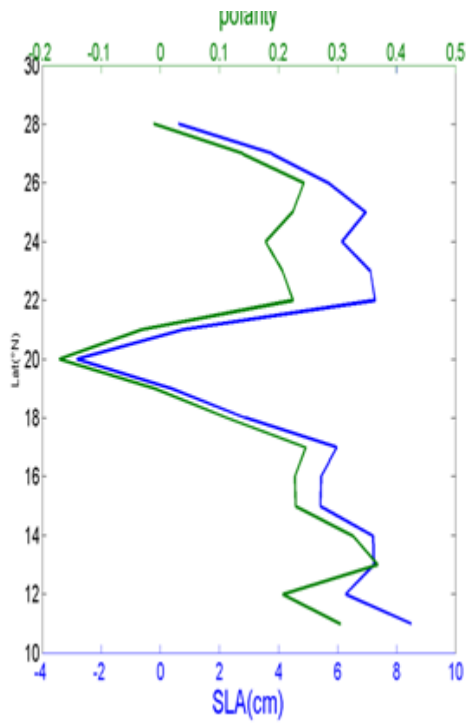


圖 3- 10 渦旋平均海表面高度異常值空間分布圖

(a)



(b)

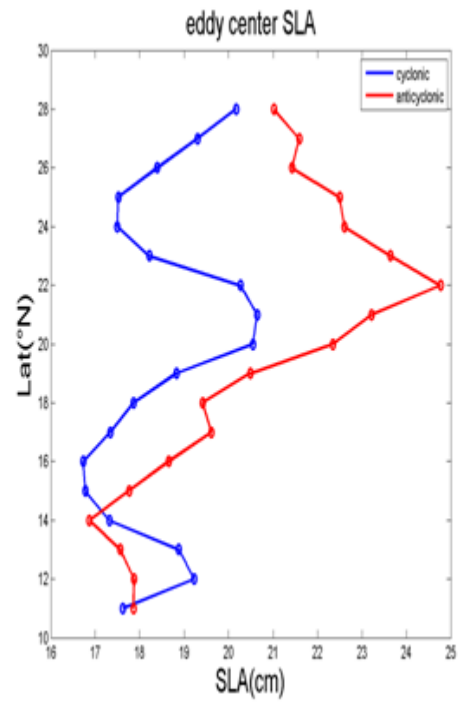


圖 3- 11 (a) 渦旋極性及渦旋 SLA 緯向平均圖、 (b) 冷暖渦 SLA 緯向平均圖

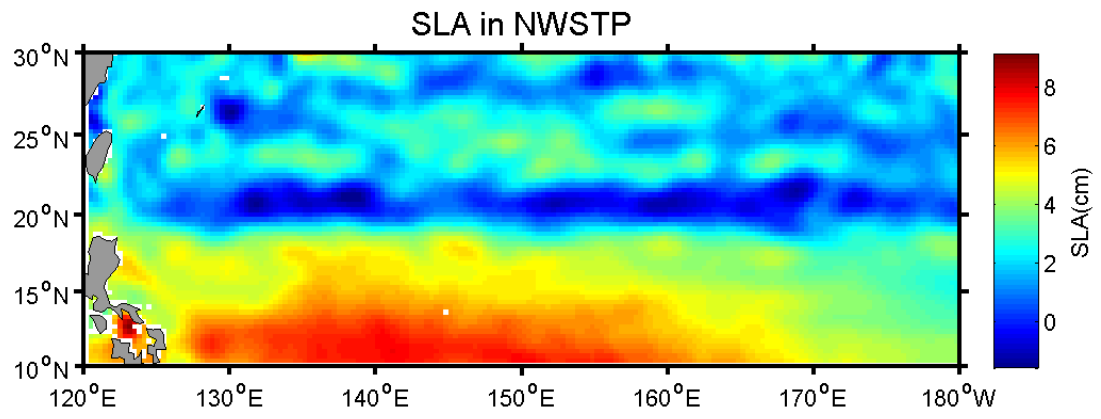


圖 3- 12 NWSTP 海表面高度異常示意圖

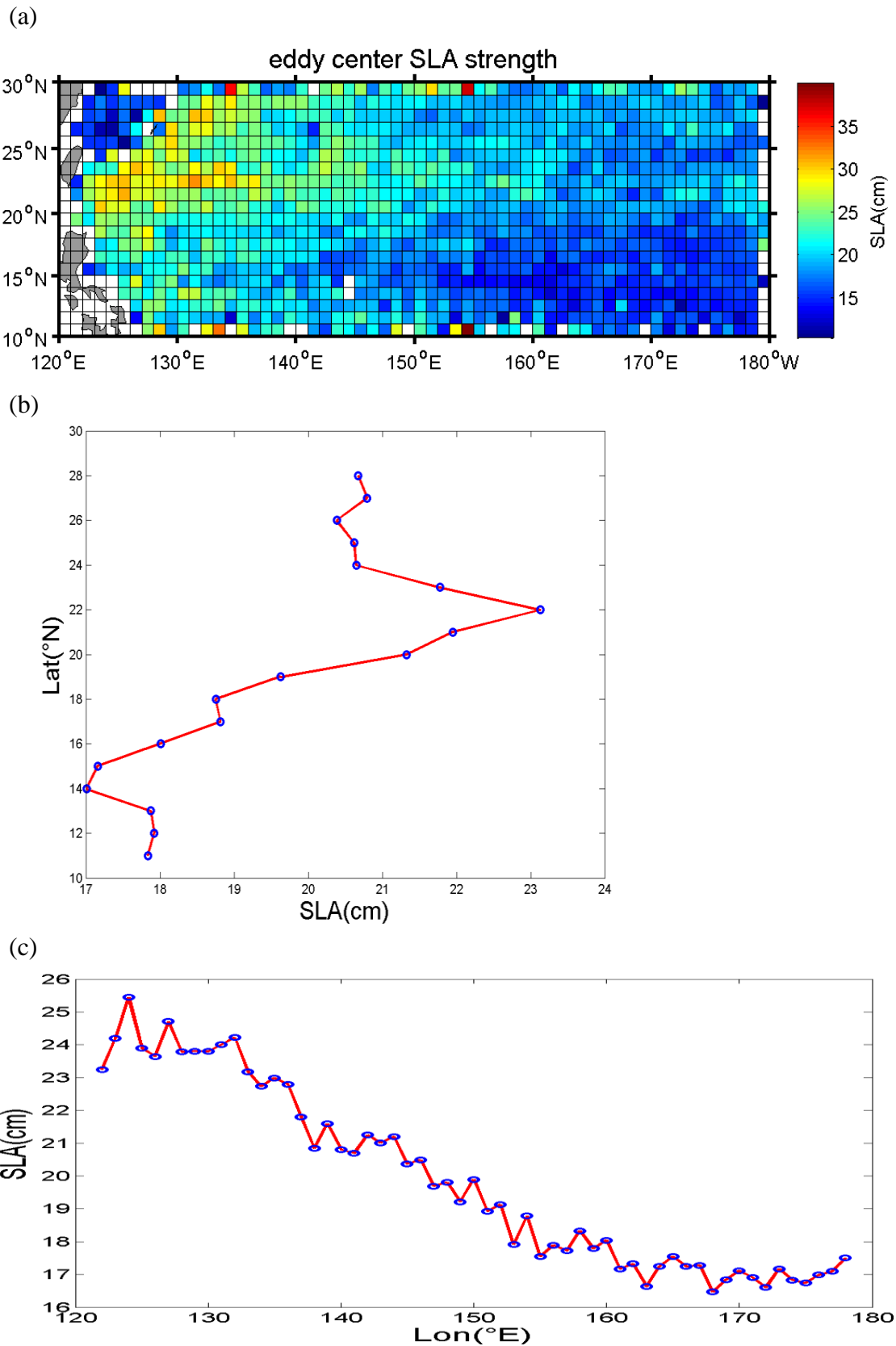


圖 3- 13 (a) 渦旋中心 SLA 強度空間分布圖、 (b) 渦旋中心 SLA 強度緯向平均圖、 (c) 渦旋中心 SLA 強度經向平均圖

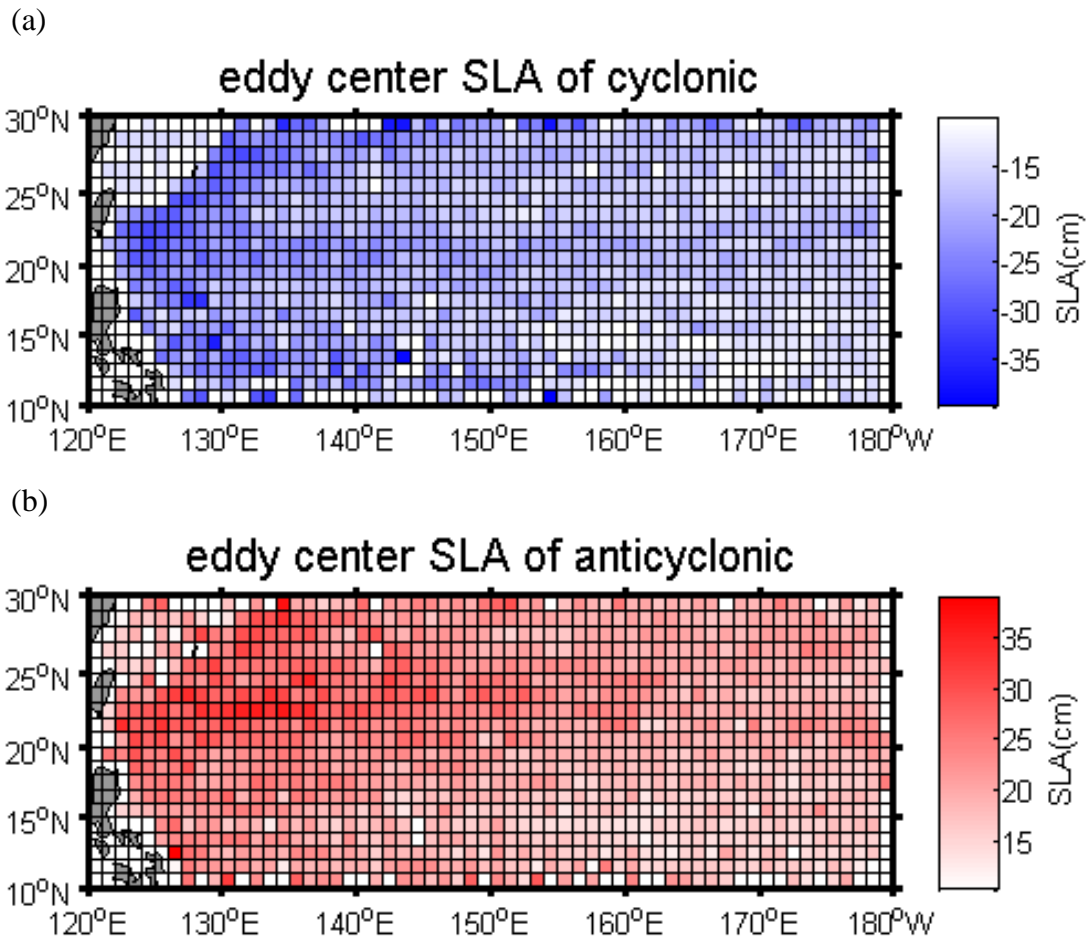
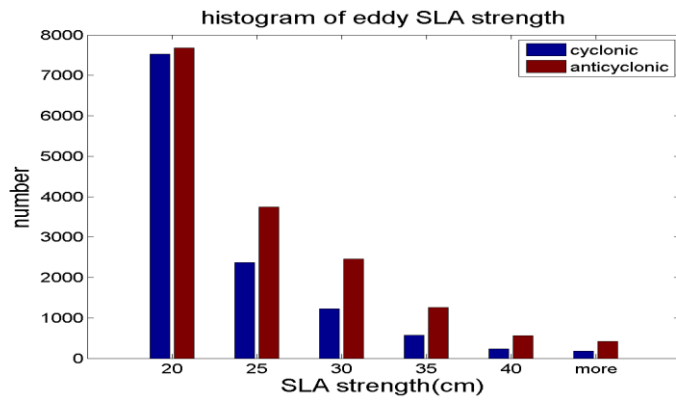
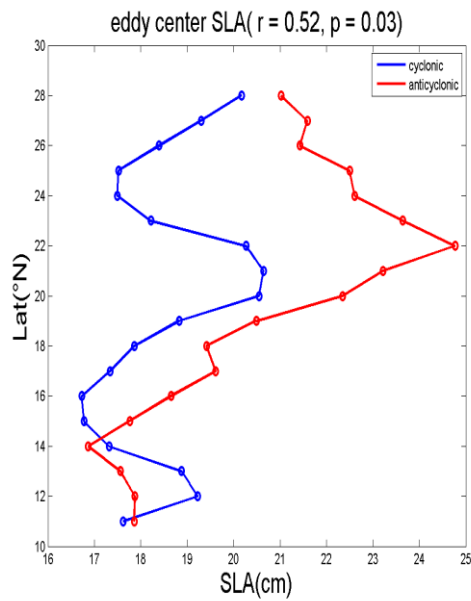


圖 3- 14 (a) 冷渦中心 SLA 強度空間分布圖、 (b) 暖渦中心 SLA 強度空間分布圖

(a)



(b)



(c)

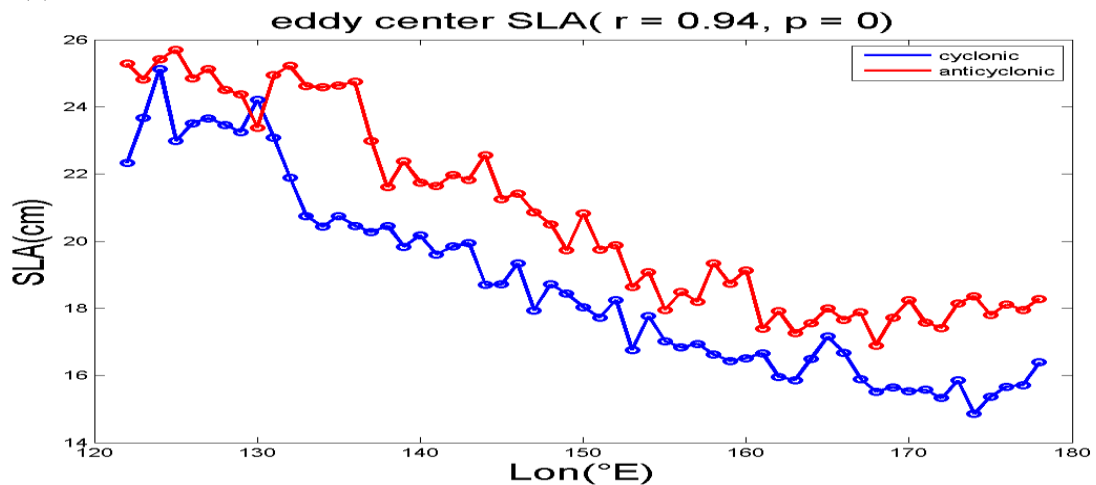
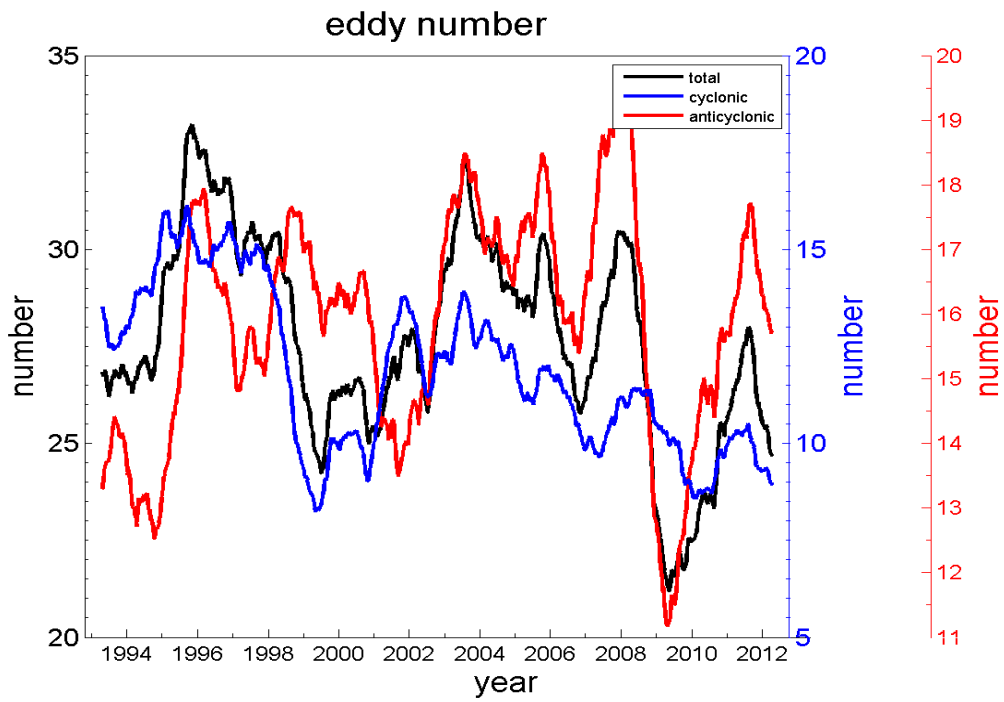


圖 3- 15 (a) 渦旋中心 SLA 強度統計直方圖、 (b) 冷暖渦中心 SLA 強度緯向平均圖、 (c) 冷暖渦中心 SLA 強度經向平均圖，r 為相關係數，p 為顯著水準。

(a)



(b)

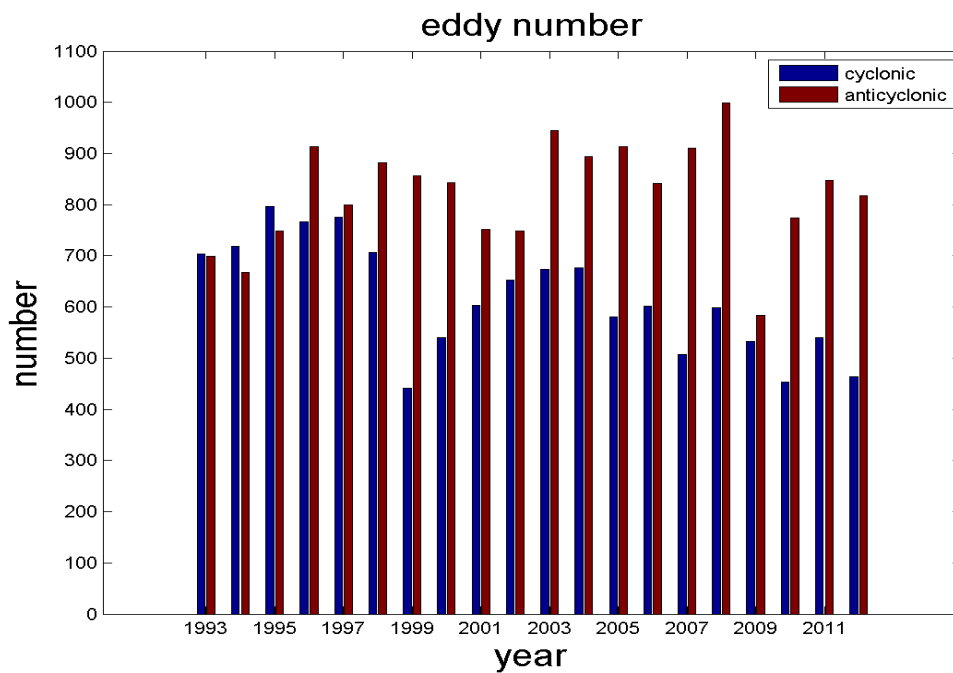


圖 3- 16 (a) 渦旋數量年際變化時間序列圖、 (b) 冷暖渦數量每年統計直方圖，上圖黑線為總渦旋，藍線為冷渦，紅線為暖渦，下圖藍色為冷渦，紅色為暖渦。

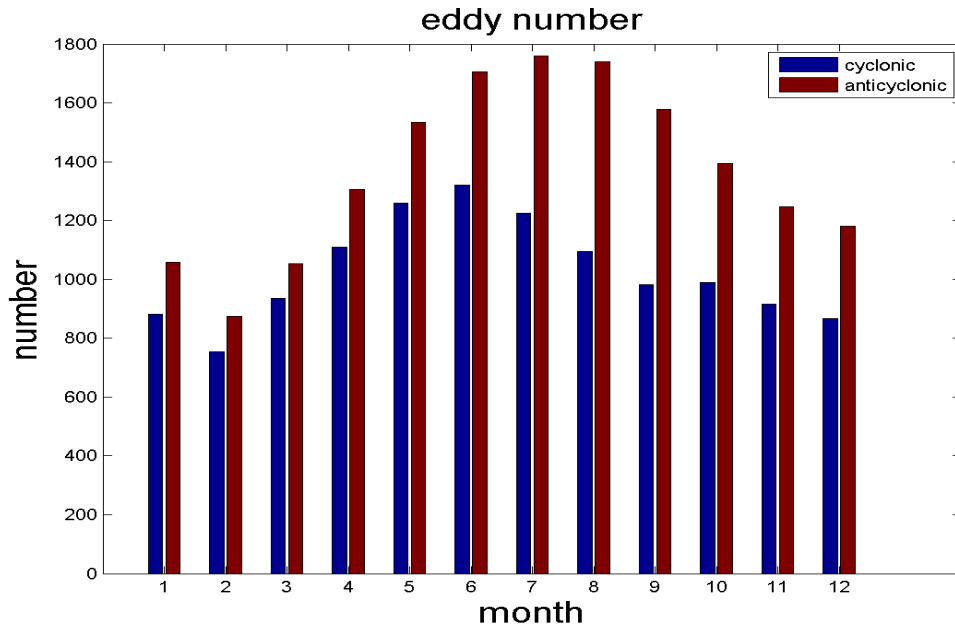
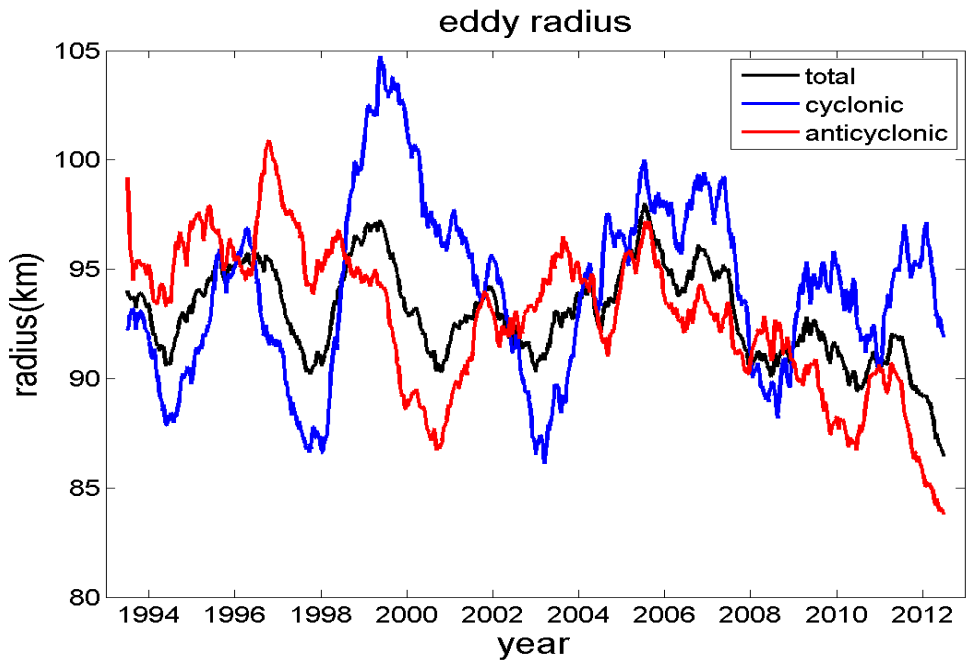


圖 3- 17 冷暖渦數量季節統計直方圖，藍色為冷渦，紅色為暖渦。

(a)



(b)

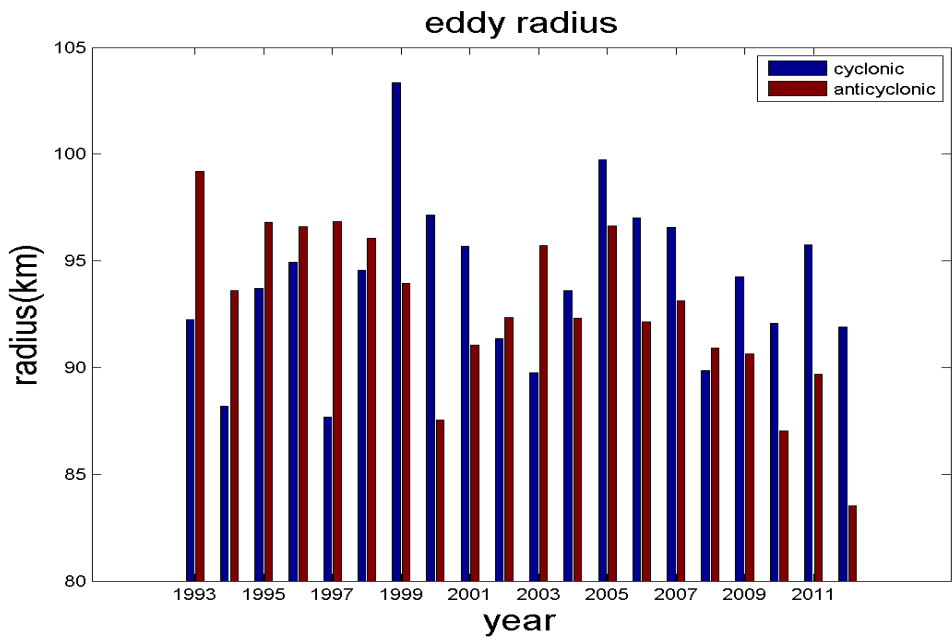


圖 3- 18 (a) 渦旋半徑年際變化時間序列圖、(b) 冷暖渦半徑每年統計直方圖，上圖黑線為總渦旋，藍線為冷渦，紅線為暖渦，下圖藍色為冷渦，紅色為暖渦。

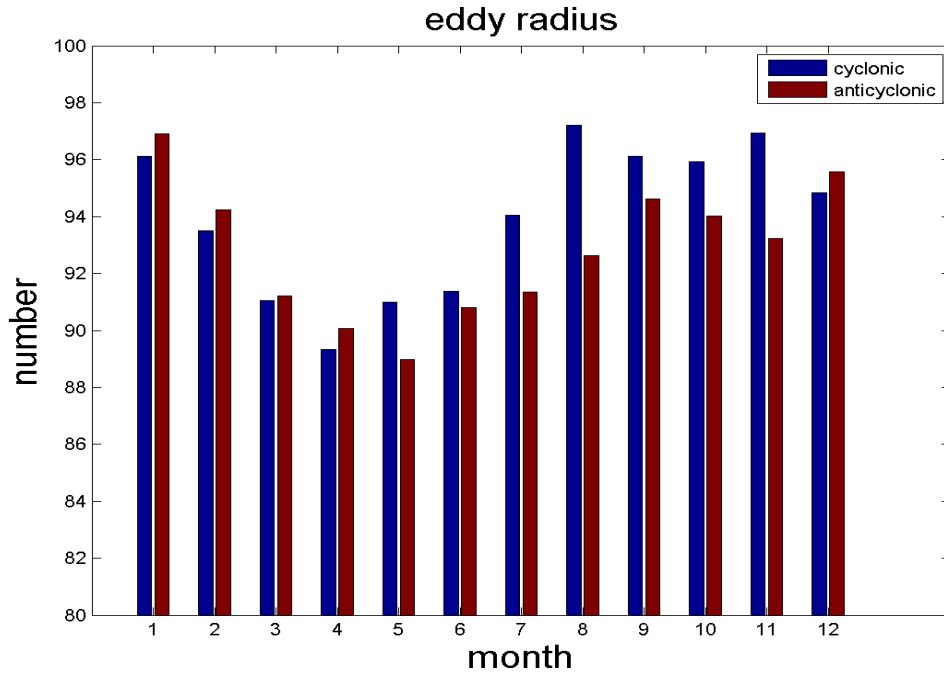
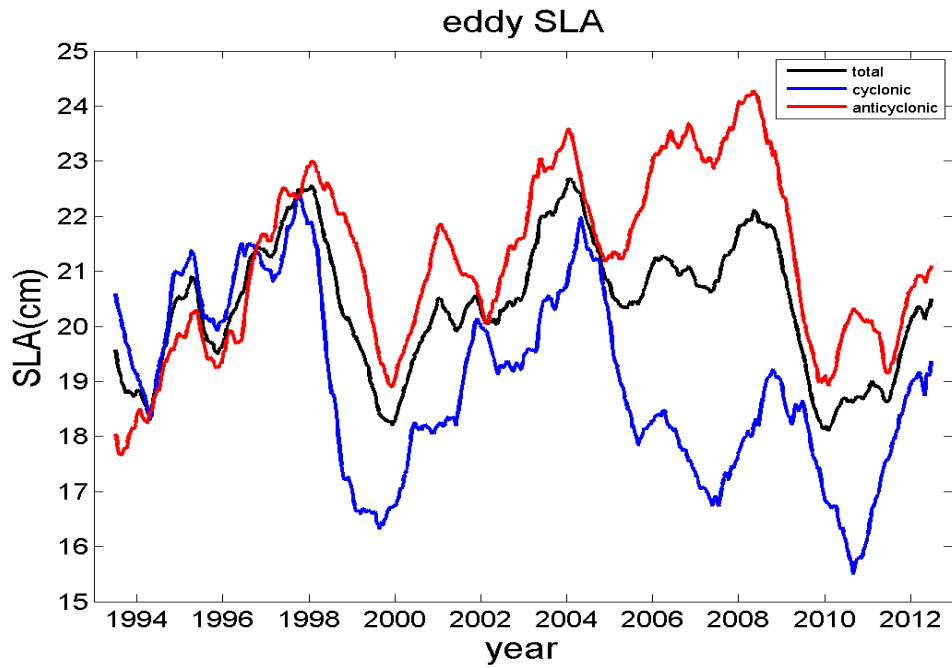


圖 3- 19 冷暖渦半徑季節統計直方圖，藍色為冷渦，紅色為暖渦。

(a)



(b)

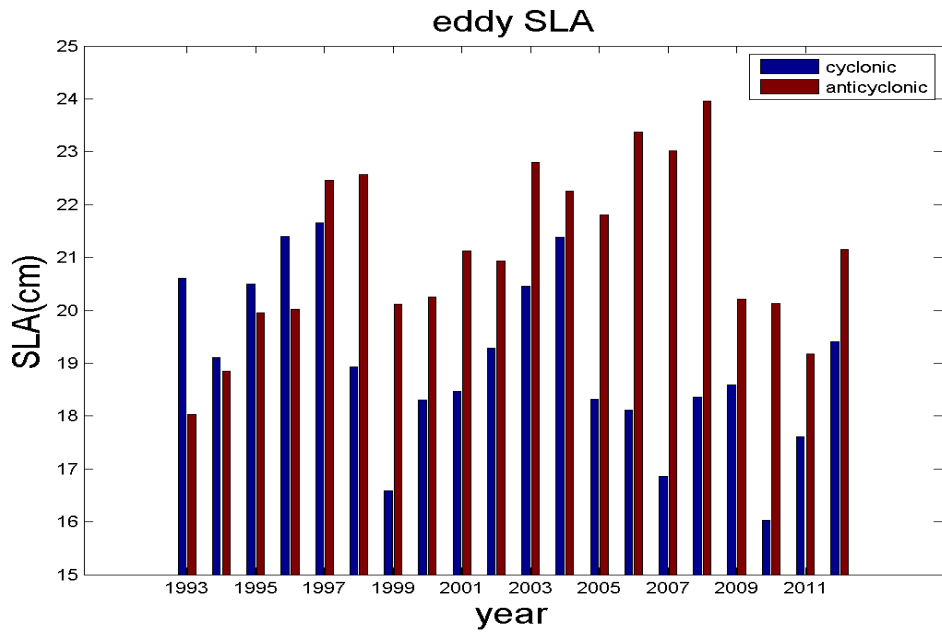


圖 3- 20 (a) 渦旋中心 SLA 年際變化時間序列圖、 (b) 冷暖渦中心 SLA 每年統計直方圖，上圖黑線為總渦旋，藍線為冷渦，紅線為暖渦，下圖藍色為冷渦，紅色為暖渦。

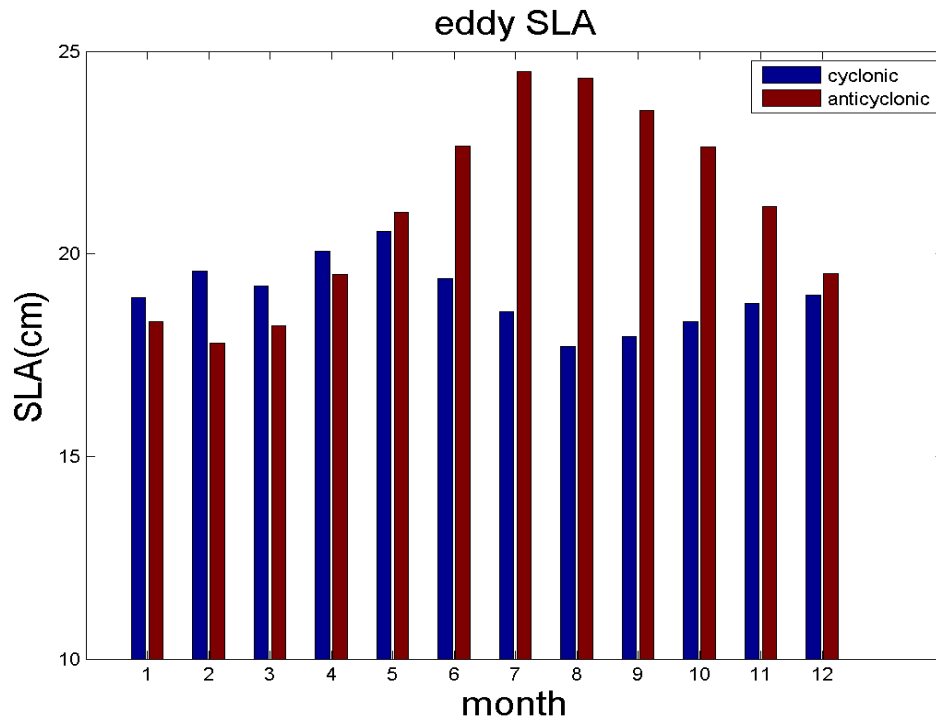
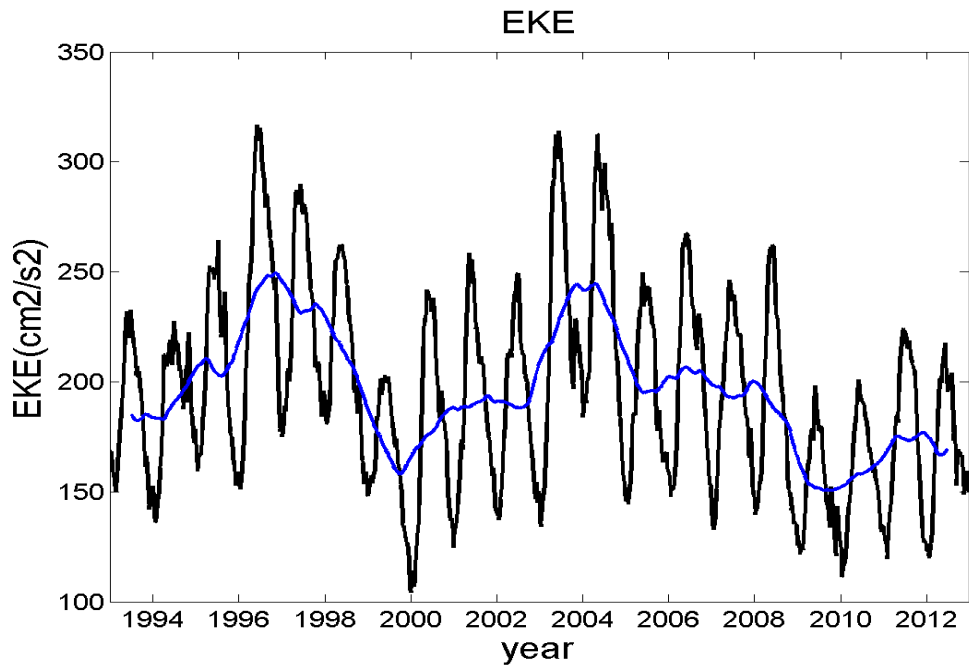


圖 3- 21 冷暖渦中心 SLA 季節統計直方圖，藍色為冷渦，紅色為暖渦。

(a)



(b)

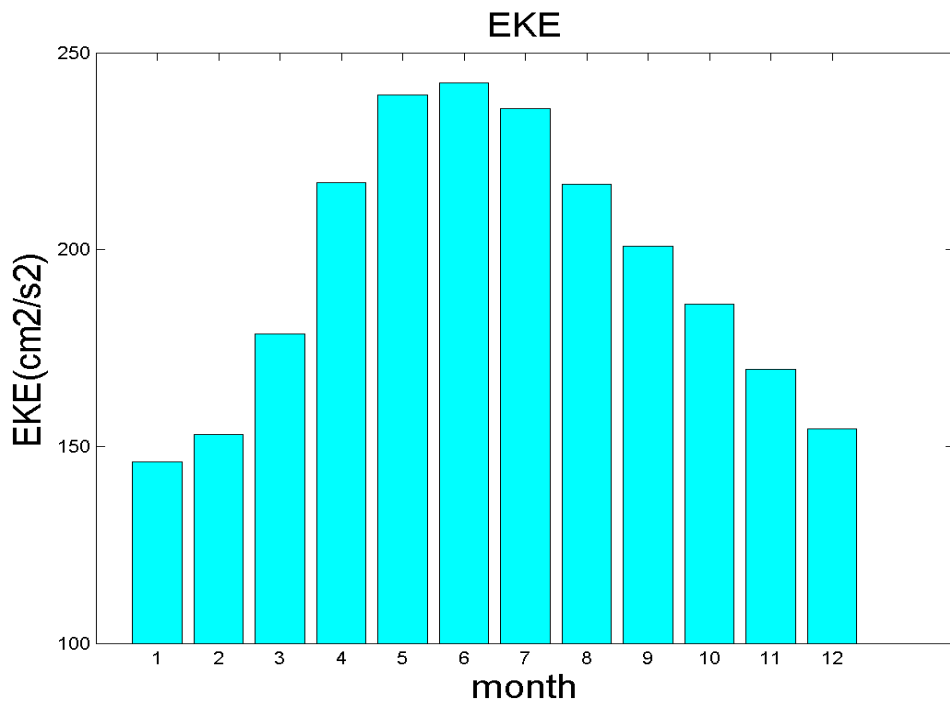
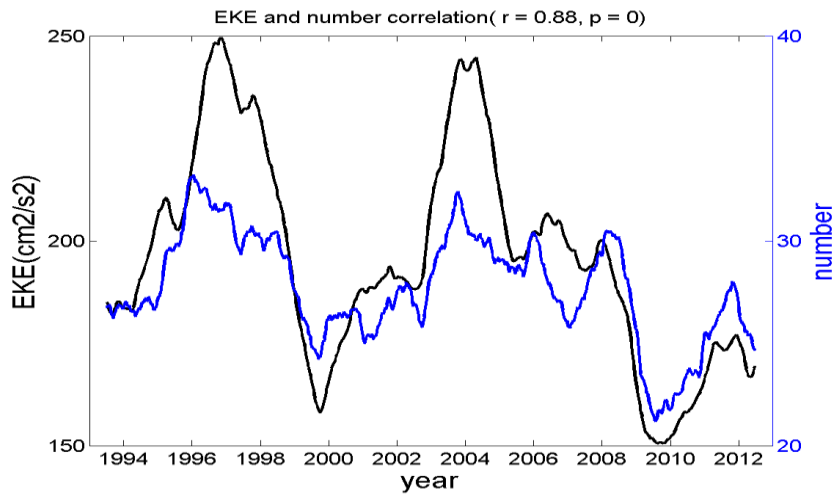
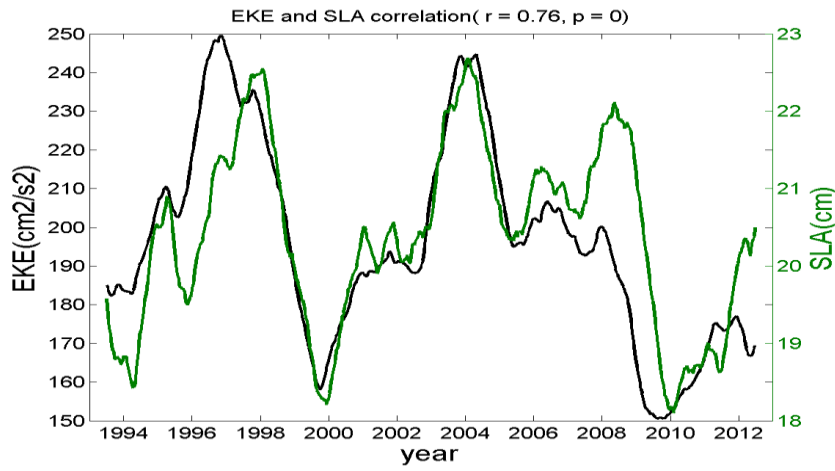


圖 3- 22 (a) EKE 年際變化時間序列圖、 (b) EKE 季節統計直方圖，上圖黑線為 EKE 月平均時間序列，藍線為 EKE 經過一年滑動平均之時間序列。

(a)



(b)



(c)

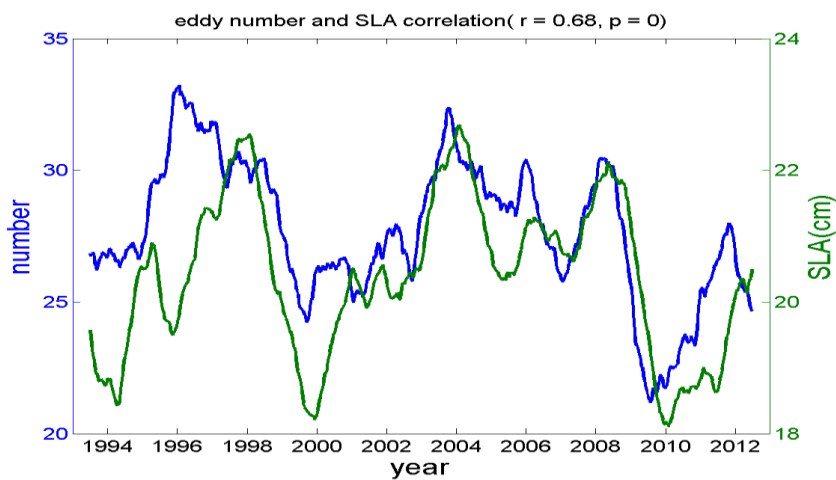
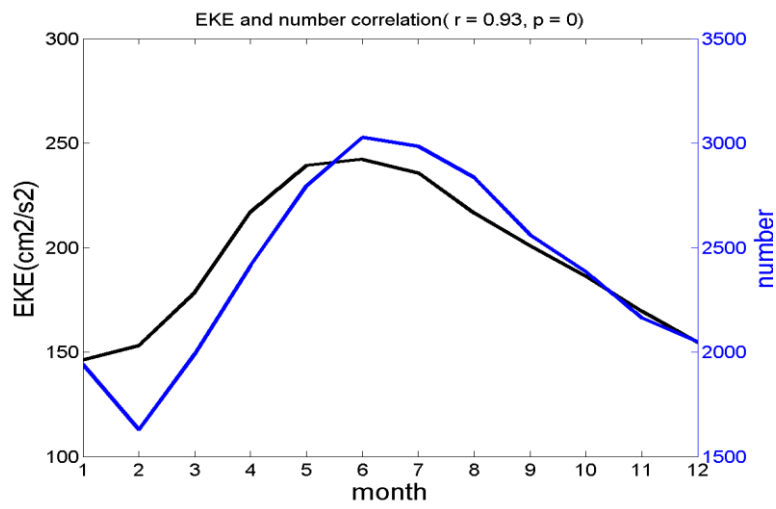
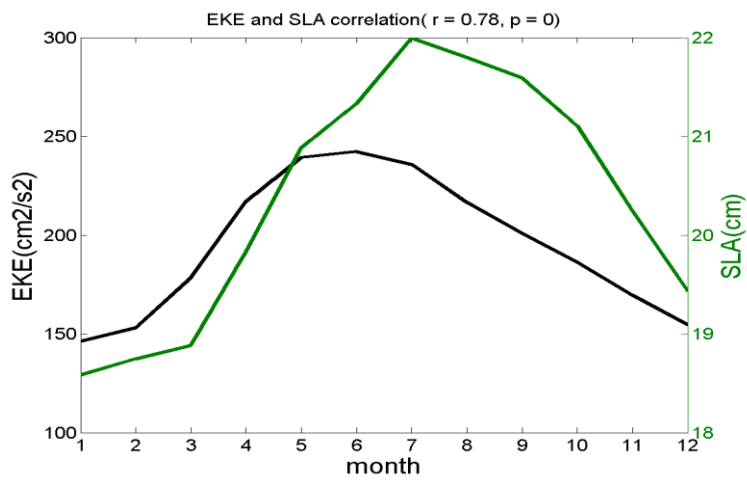


圖 3- 23 EKE、SLA、數量年際變化關係圖，黑線為 EKE，藍線為渦旋數量，綠線為渦旋中心 SLA，其之間相關係數分別為 0.88、0.76、0.68。

(a)



(b)



(c)

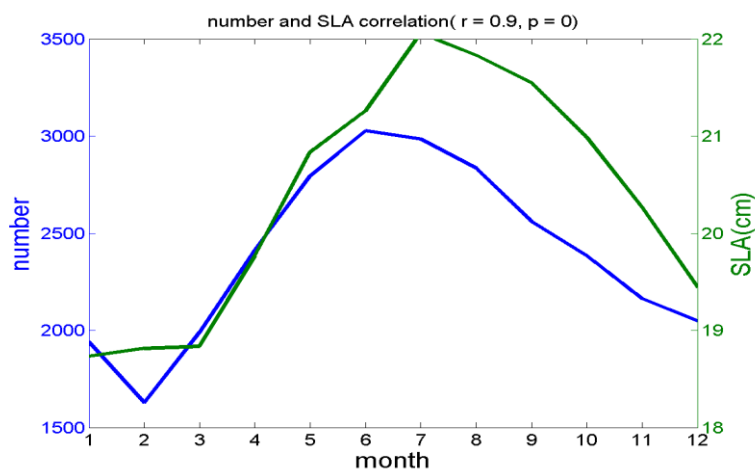
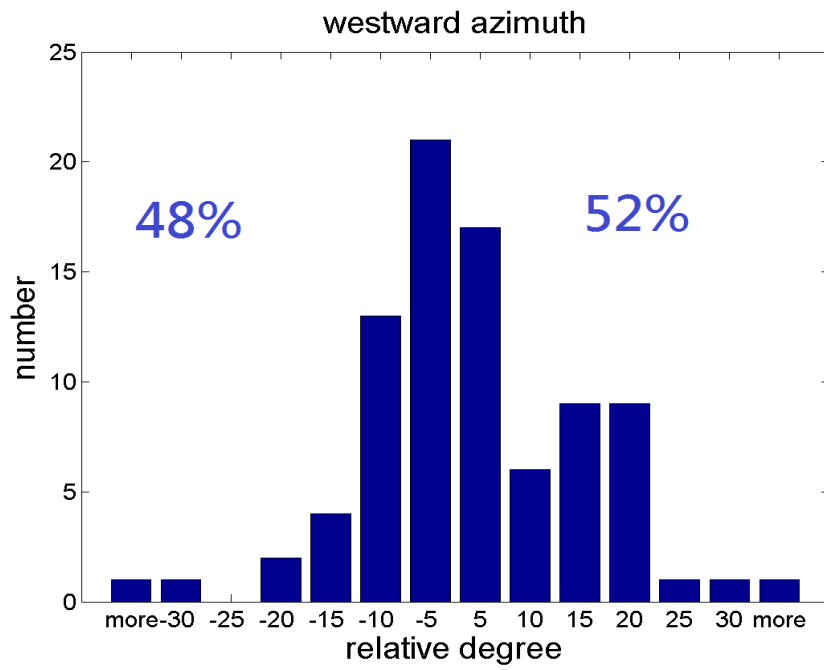


圖 3- 24 EKE、SLA、數量季節變化關係圖，黑線為 EKE，藍線為渦旋數量，綠線為渦旋中心 SLA，其之間相關係數分別為 0.93、0.78、0.9。

(a)



(b)

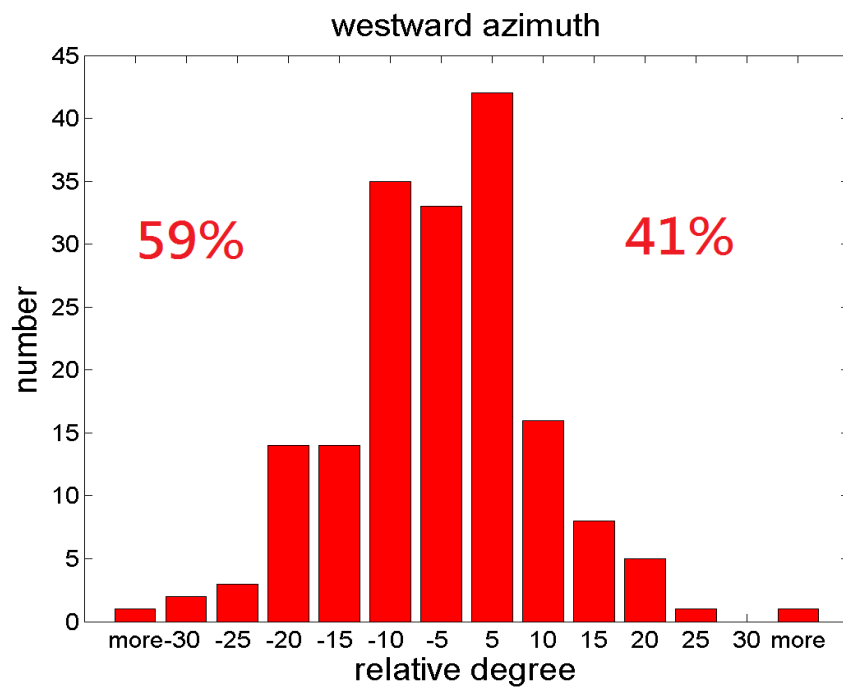


圖 4- 1 (a) 冷渦偏離角度統計直方圖、 (b) 暖渦偏離角度統計直方圖

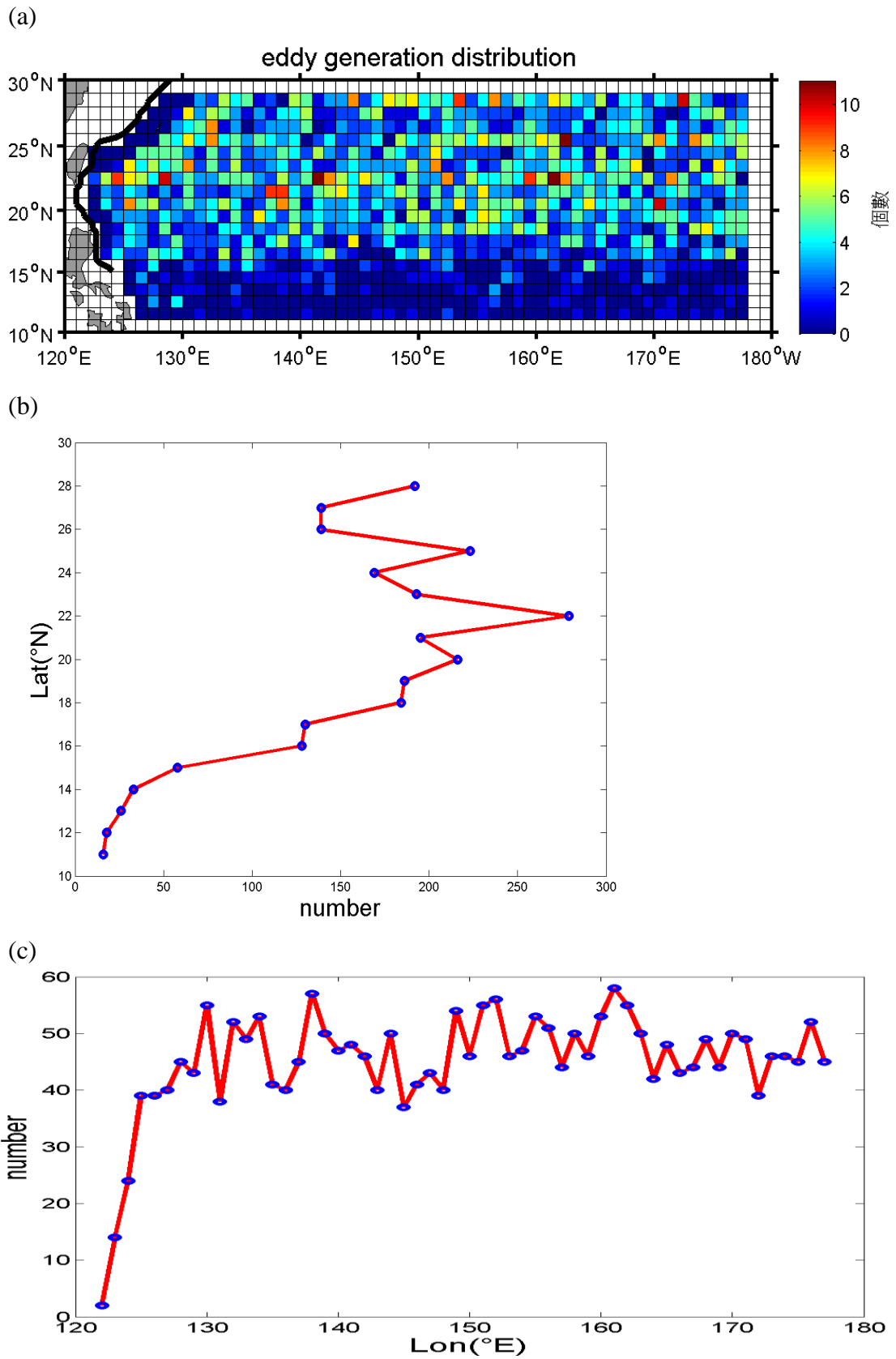


圖 4-2(a) 渦旋起始點空間分布圖、(b) 渦旋起始點緯向統計圖、(c) 渦旋起始點經向統計圖，圖 a 黑線為黑潮主軸示意。

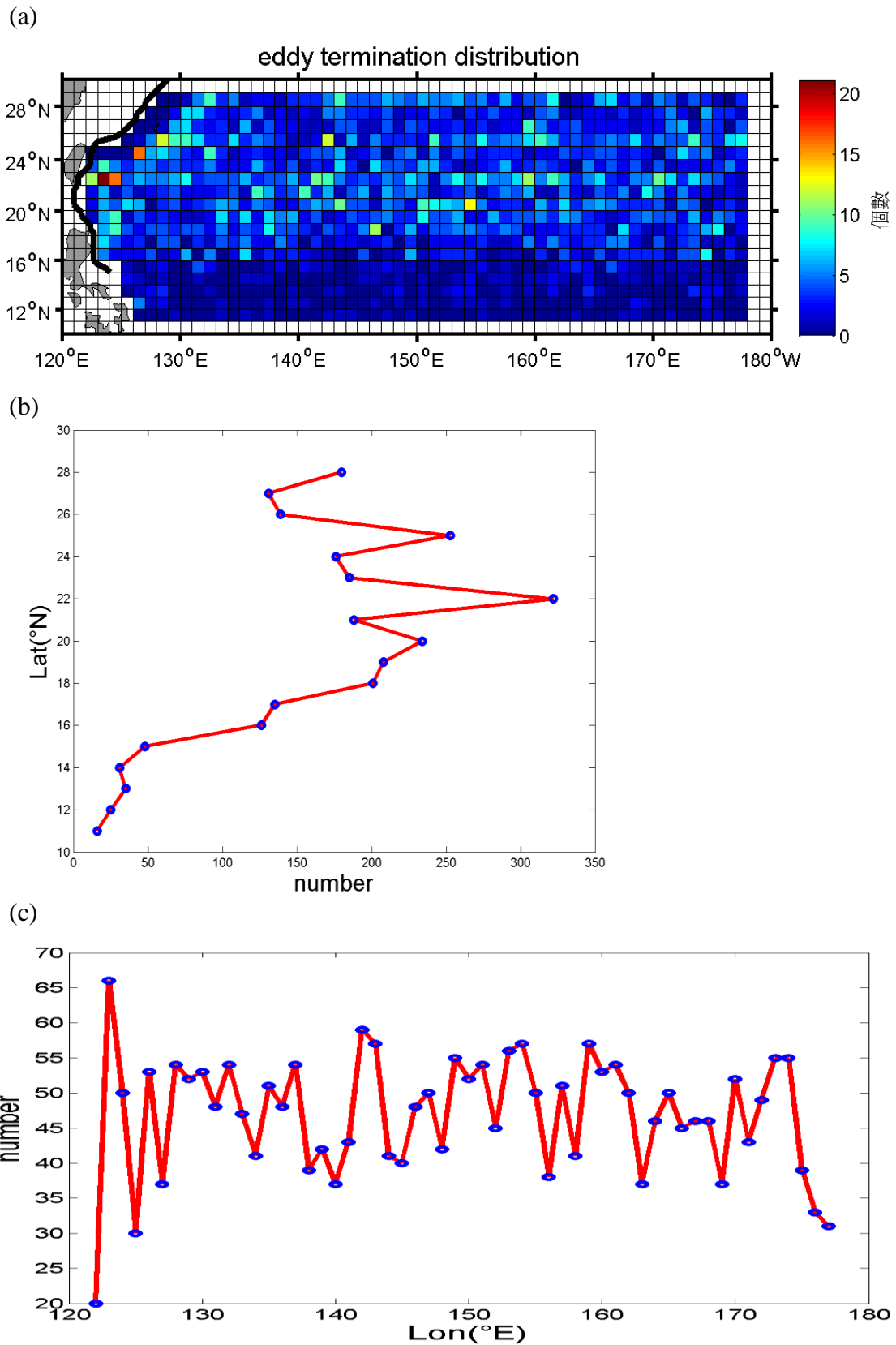
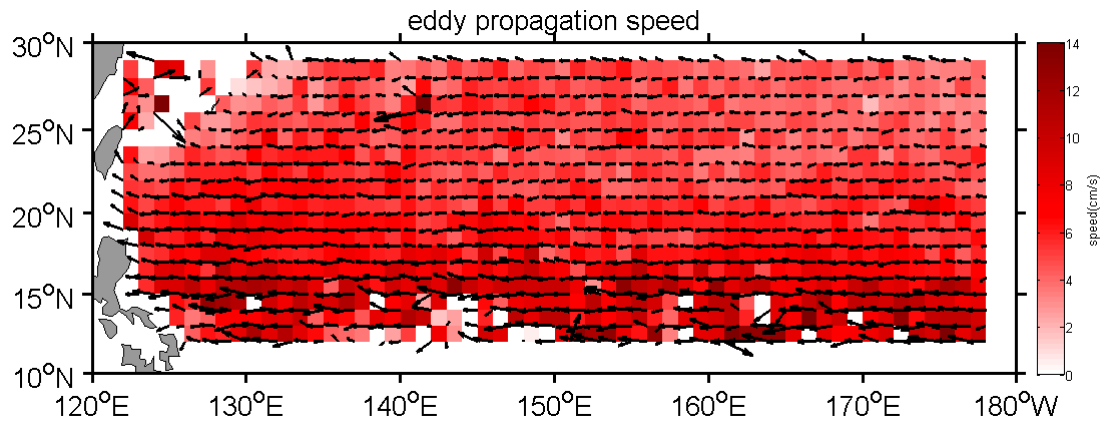
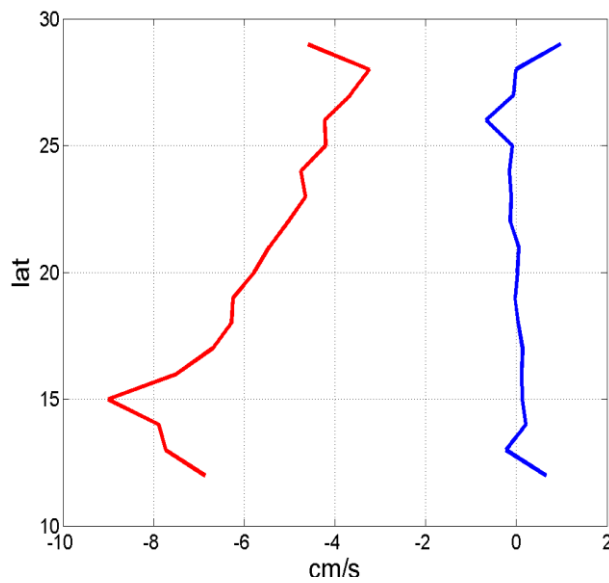


圖 4-3 (a) 渦旋消散點空間分布圖、(b) 渦旋消散點緯向統計圖、(c) 渦旋消散點經向統計圖，圖 a 黑線為黑潮主軸示意。

(a)



(b)



(c)

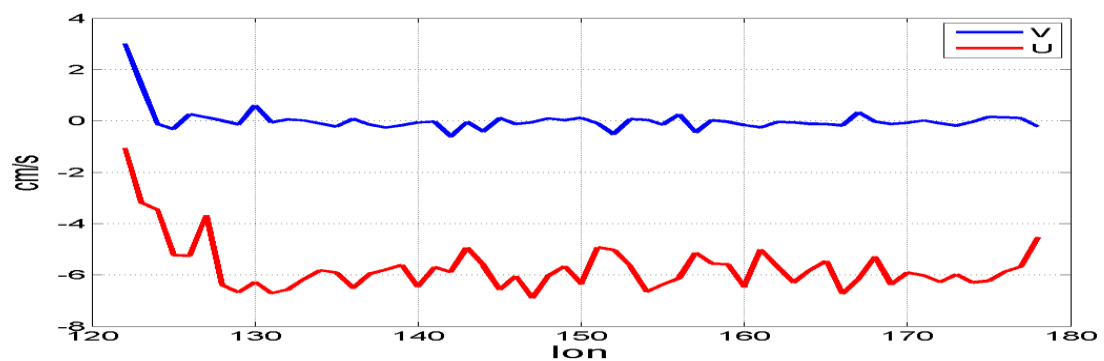
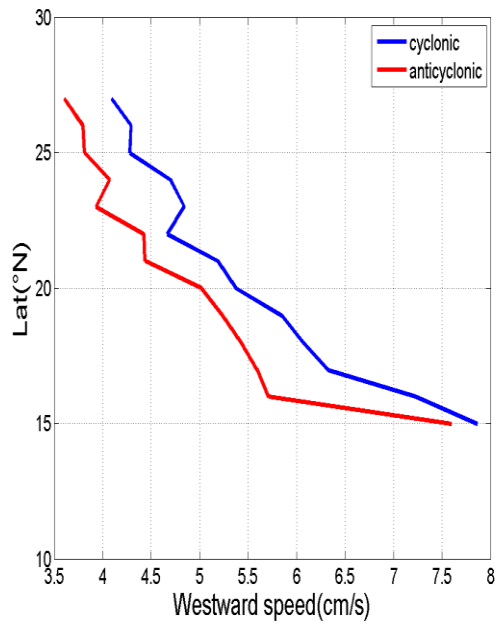


圖 4-4 (a) 渦旋移動速度空間分布圖、(b) 渦旋移動速度緯向平均圖、(c) 渦旋移動速度經向平均圖，箭頭為渦旋速度及方向(cm/s)，底圖為渦旋平均移動速度大小，藍線為南北速度分量 V，紅線為東西速度分量 U。

(a)



(b)

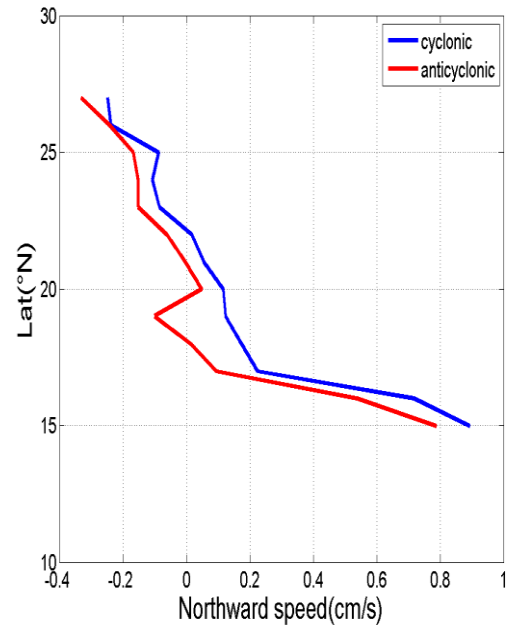


圖 4-5 (a) 冷暖渦向西移動速度的緯向平均圖、(b) 冷暖渦向北移動速度的緯向平均圖，藍線為冷渦，紅線為暖渦。

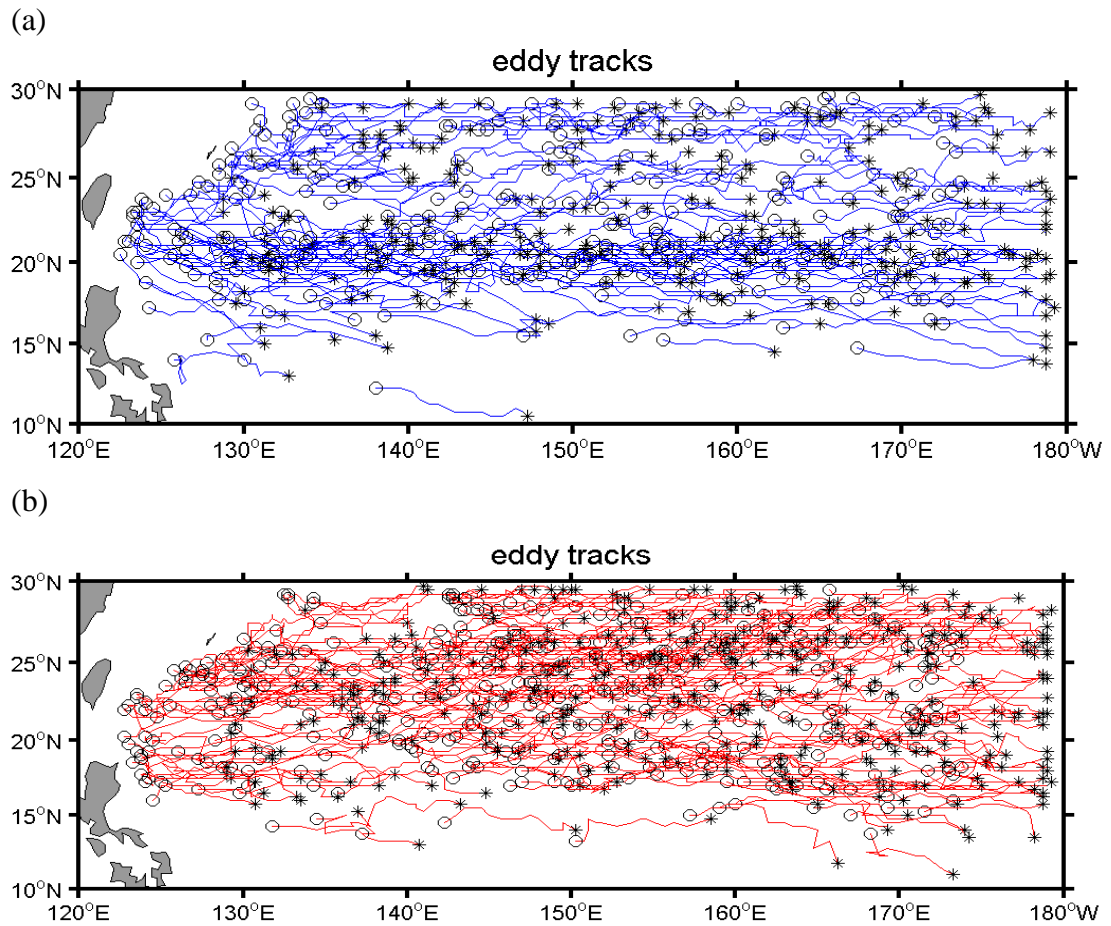


圖 4- 6 (a) 冷渦生命週期 12-24 周路徑圖、 (b) 暖渦生命週期 12-24 周路徑圖，上圖藍線為冷渦路徑，下圖紅線為暖渦路徑，星號為起始位置，圓點為結束位置。

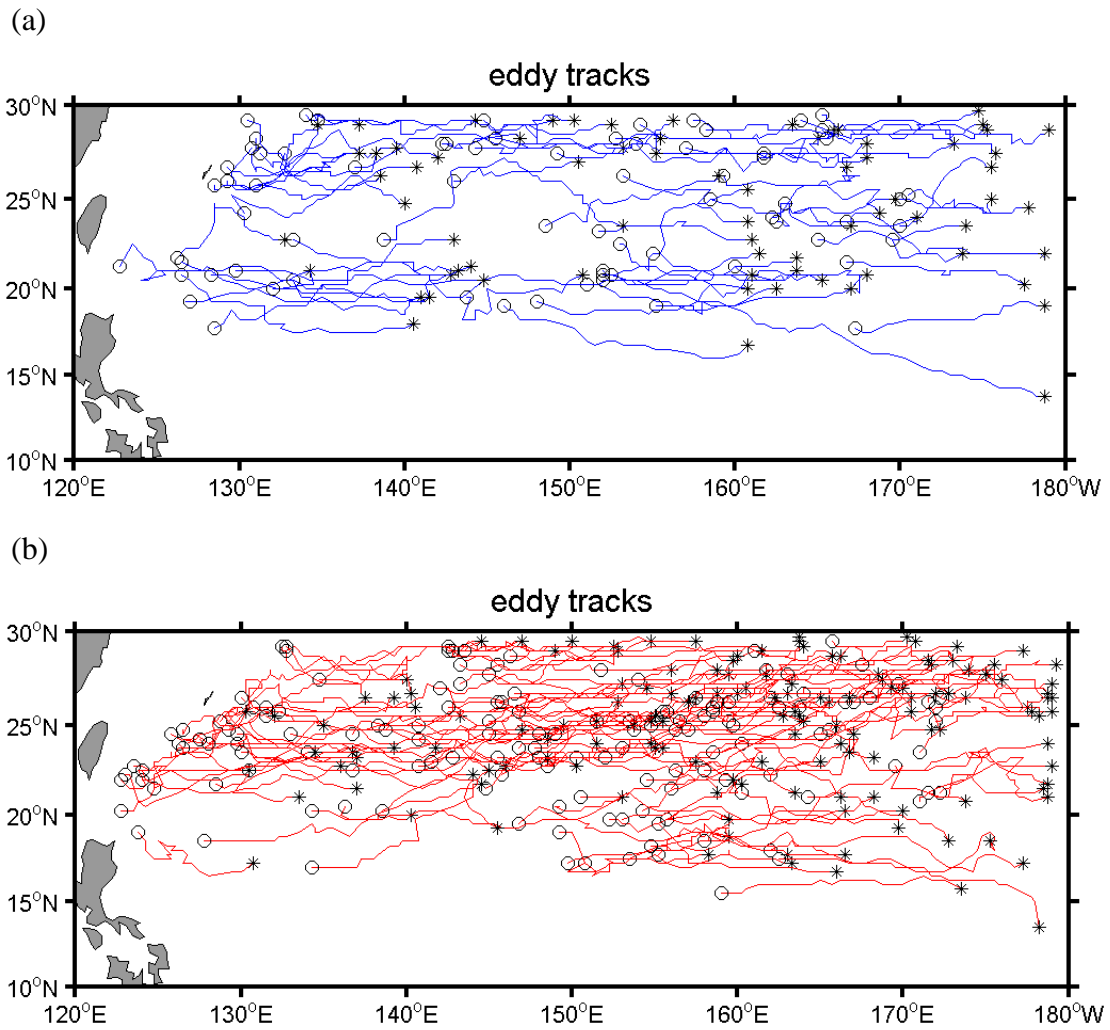


圖 4-7 (a) 冷渦生命週期 24-36 周路徑圖、(b) 暖渦生命週期 24-36 周路徑圖，上圖藍線為冷渦路徑，下圖紅線為暖渦路徑，星號為起始位置，圓點為結束位置。

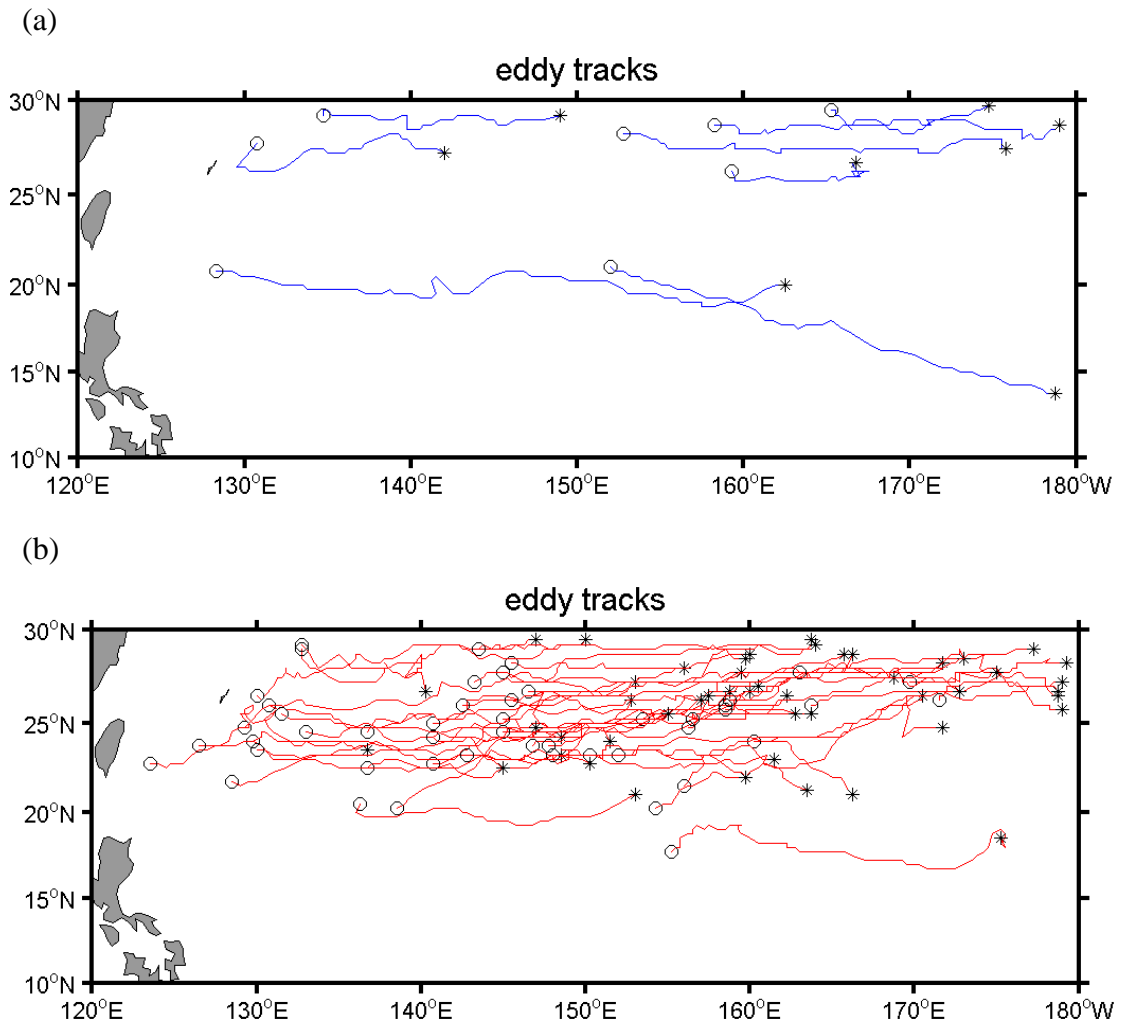
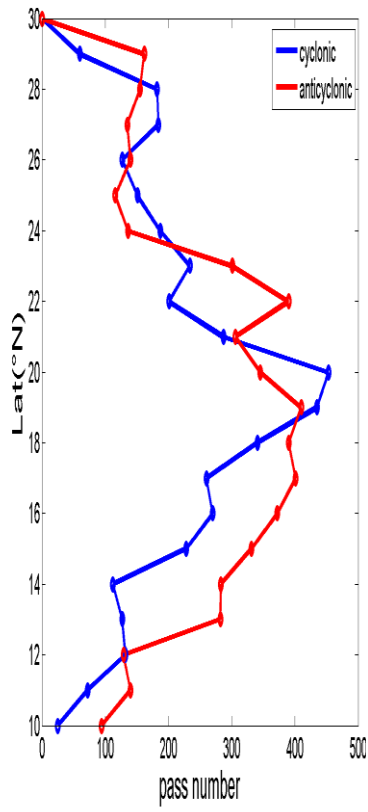
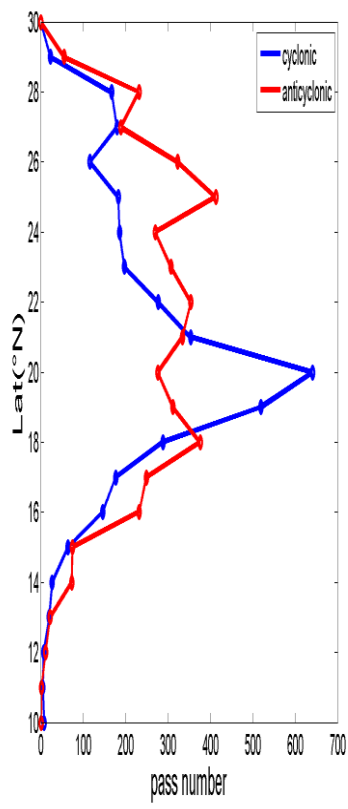


圖 4- 8 (a) 冷渦生命週期大於 36 周路徑圖、(b) 暖渦生命週期大於 36 周路徑圖，上圖藍線為冷渦路徑，下圖紅線為暖渦路徑，星號為起始位置，圓點為結束位置。

(a)



(b)



(c)

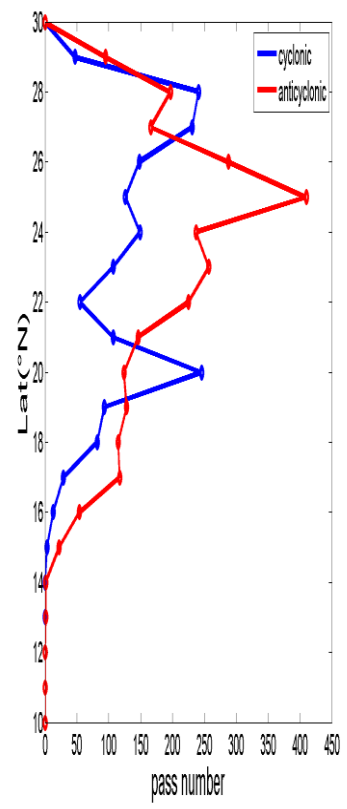
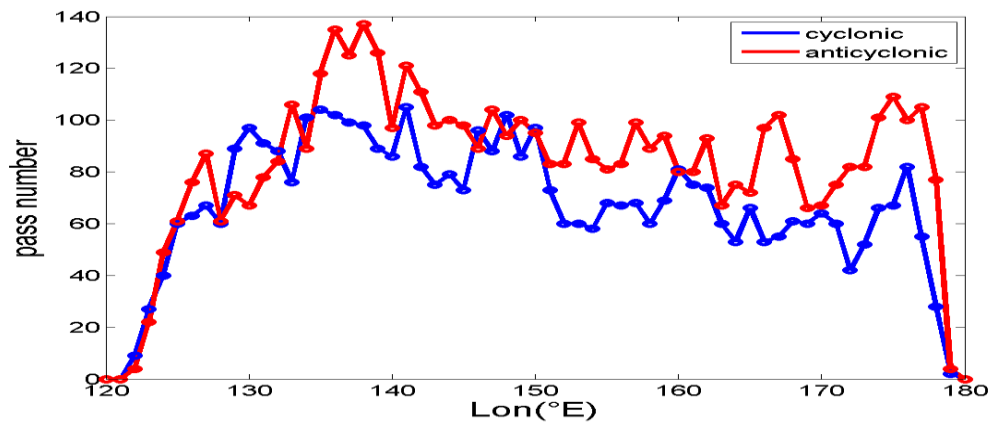
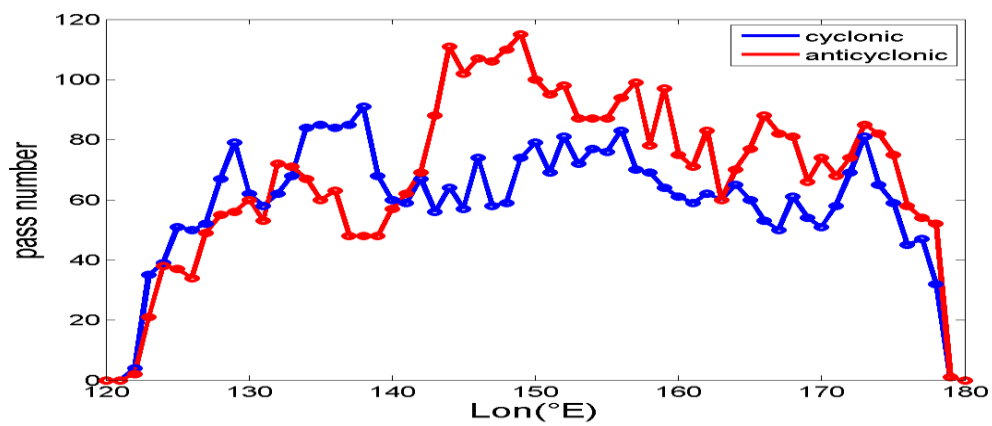


圖 4-9 冷暖渦路徑緯向統計圖，左至右分別為 (a) 12 周以下、(b) 12-24 周、(c) 24-36 周之渦旋路徑，藍線為冷渦，紅線為暖渦。

(a)



(b)



(c)

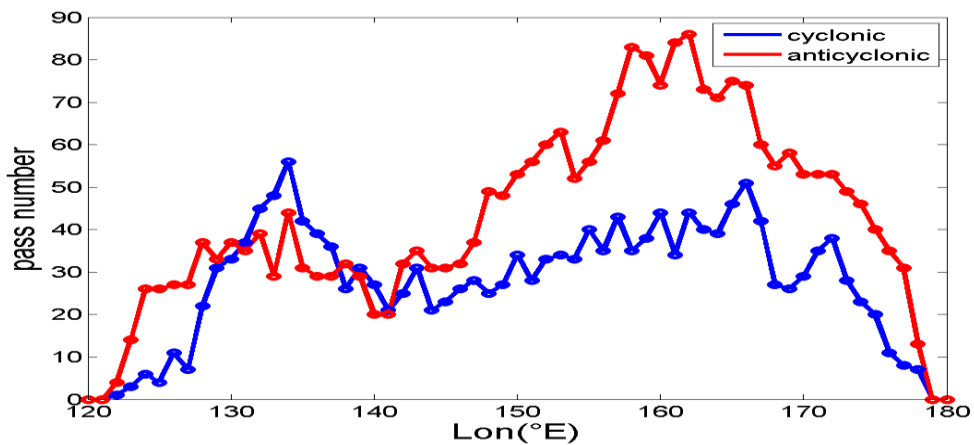


圖 4- 10 冷暖渦路徑經向統計圖，上至下分別為 (a) 12 周以下、(b) 12-24 周、(c) 24-36 周之渦旋路徑，藍線為冷渦，紅線為暖渦。

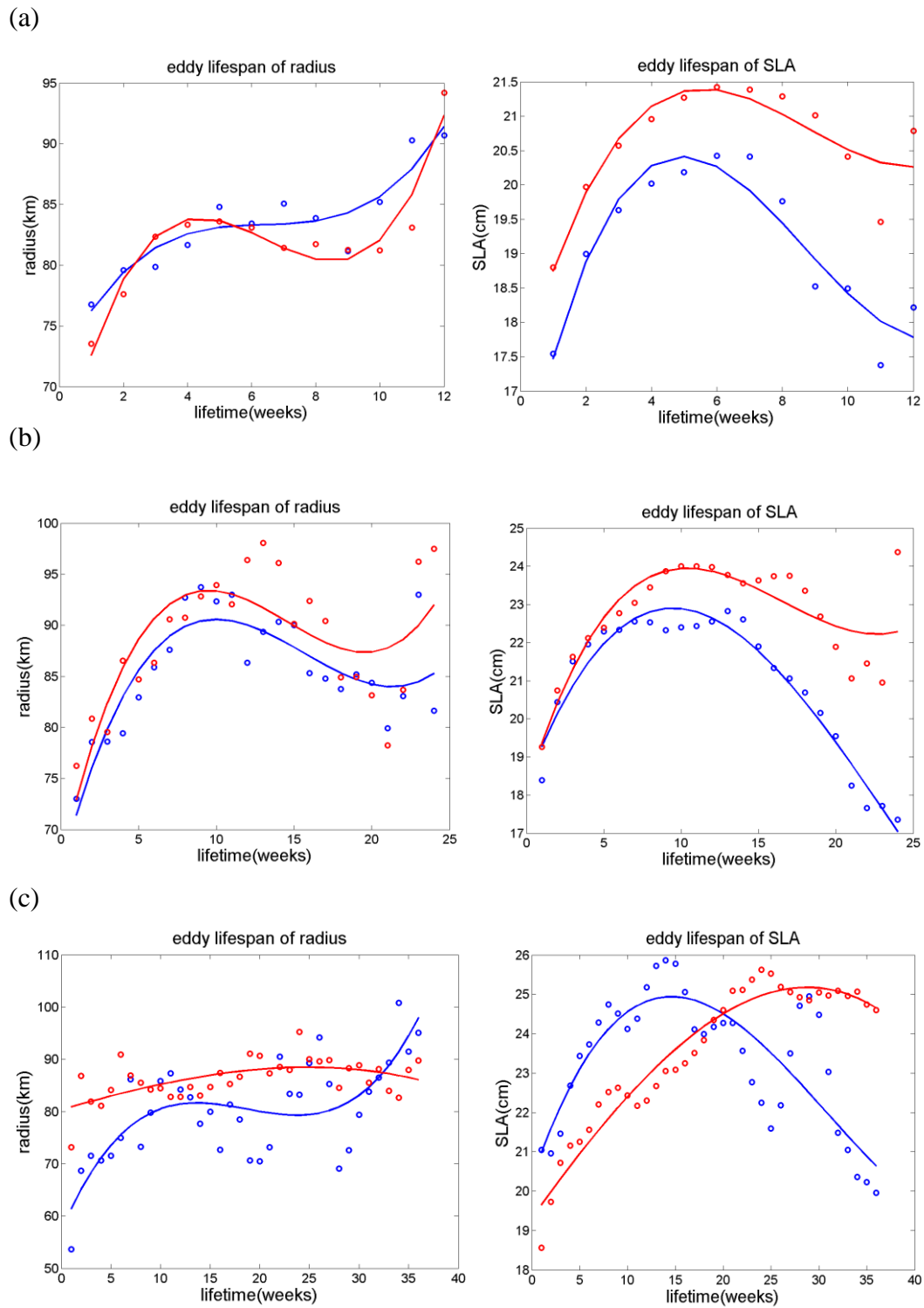
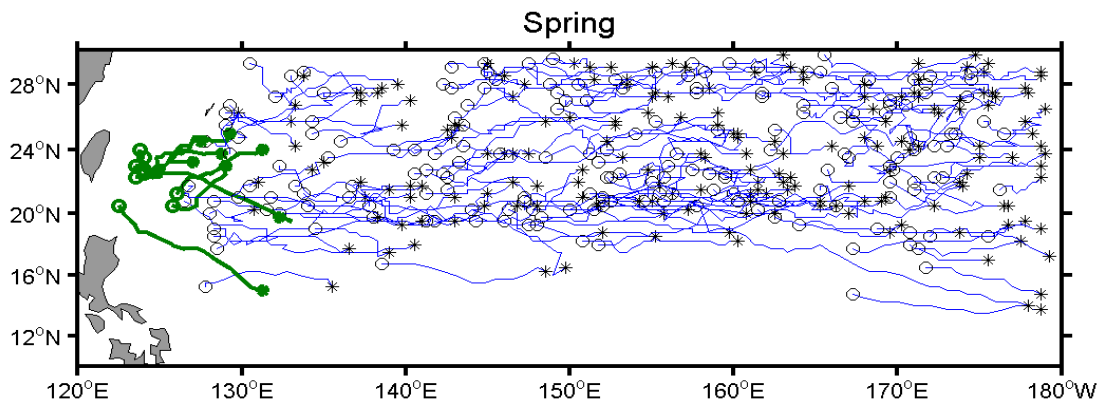


圖 4- 11 不同生命週期下的渦旋成長曲線變化示意圖，上至下分別為 (a) 12 周、(b) 24 周、(c) 36 周的渦旋半徑平均及 SLA 平均，藍色圓圈為冷渦，紅色圓圈為暖渦，藍線與紅線則為三項式擬合。

(a)



(b)

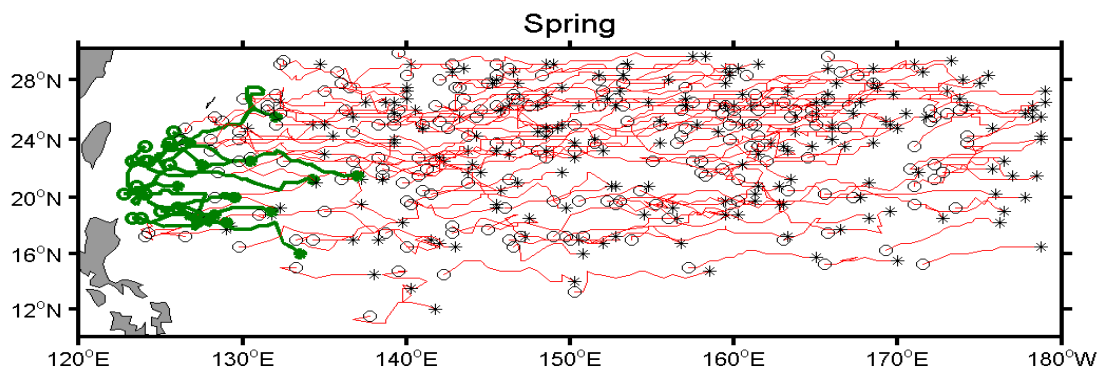
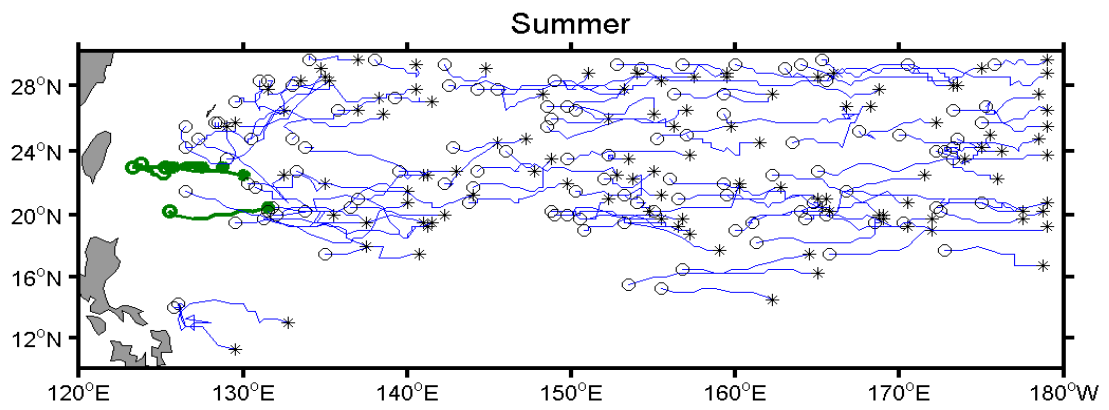


圖 4- 12 春季渦旋路徑圖，上圖藍線為冷渦，下圖紅線為暖渦，綠線為進入台灣東邊海域之渦旋路徑。

(a)



(b)

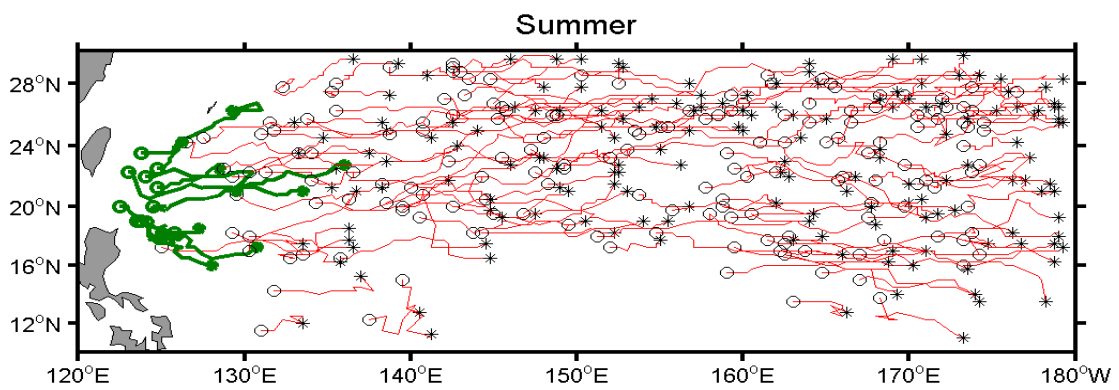
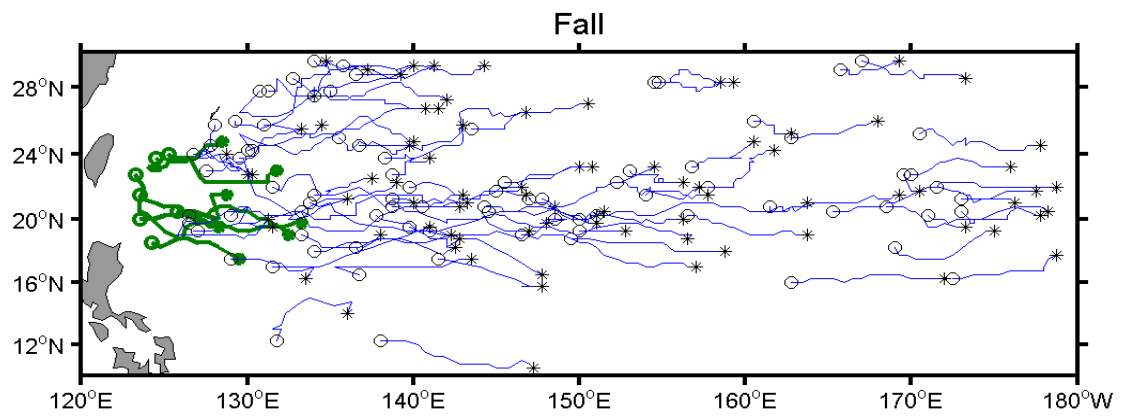


圖 4- 13 夏季渦旋路徑圖，上圖藍線為冷渦，下圖紅線為暖渦，綠線為進入台灣東邊海域之渦旋路徑。

(a)



(b)

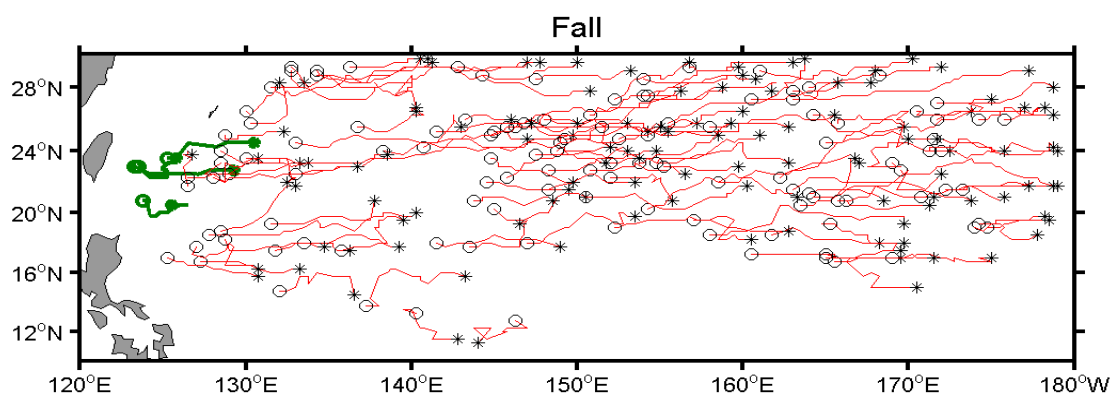
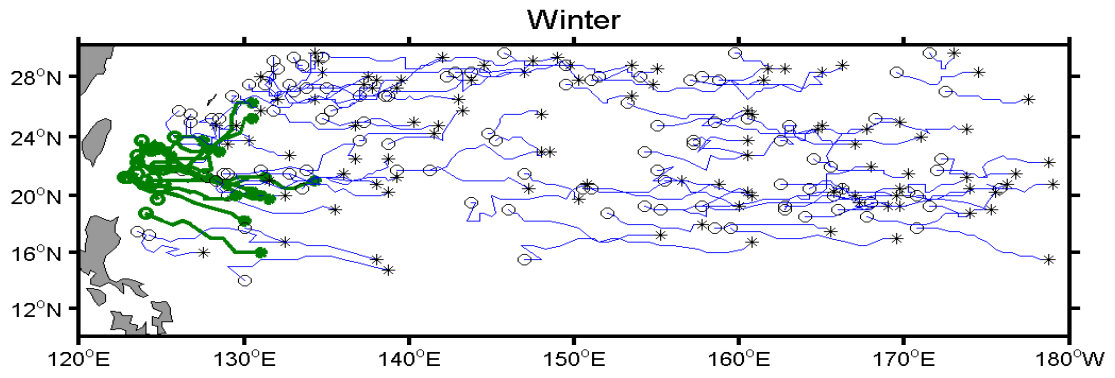


圖 4- 14 秋季渦旋路徑圖，上圖藍線為冷渦，下圖紅線為暖渦，綠線為進入台灣東邊海域之渦旋路徑。

(a)



(b)

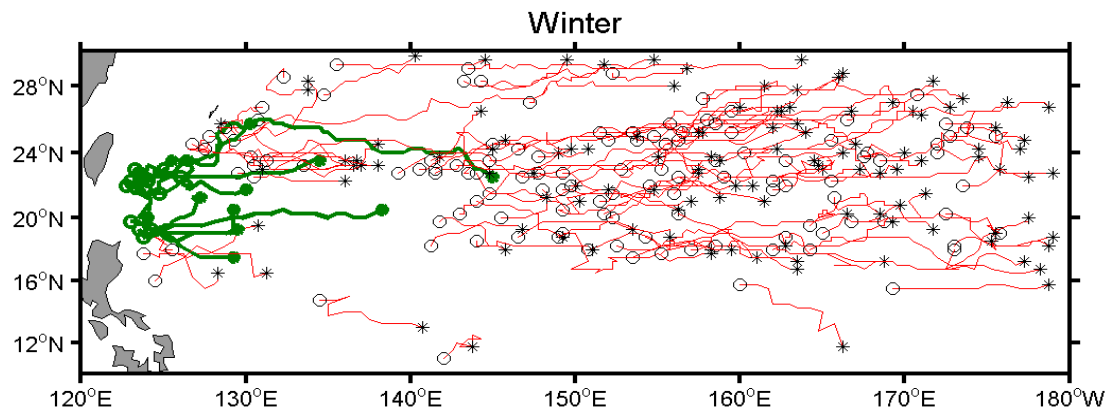


圖 4- 15 冬季渦旋路徑圖，上圖藍線為冷渦，下圖紅線為暖渦，綠線為進入台灣東邊海域之渦旋路徑。

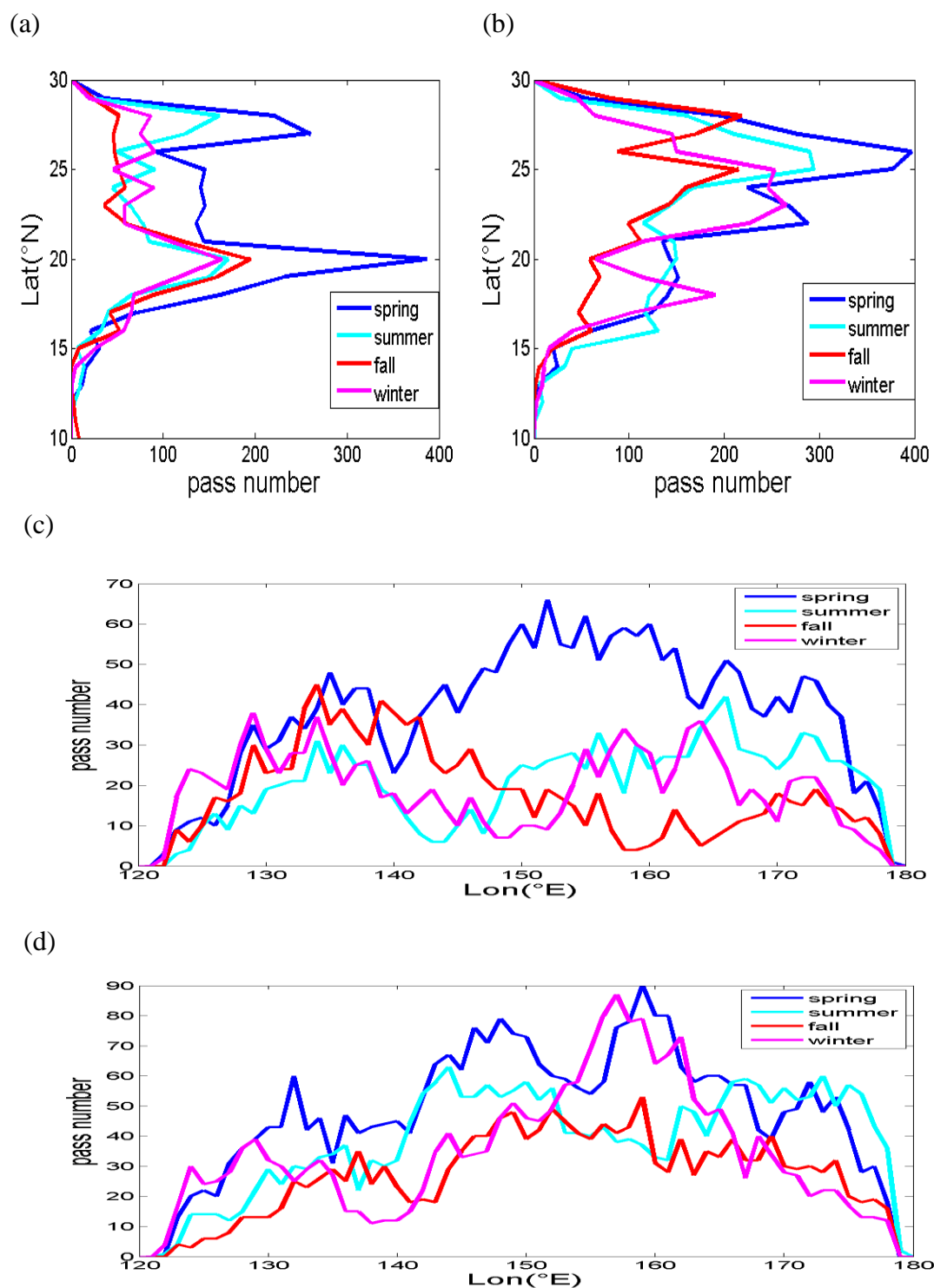


圖 4- 16 冷暖渦四季路徑經緯向統計圖，上至下分別為 (a) 冷渦緯向統計、(b) 暖渦緯向統計、(c) 冷渦經向統計、(d) 暖渦經向統計，藍線為春季，青線為夏季，紅線為秋季，桃紅線為冬季。

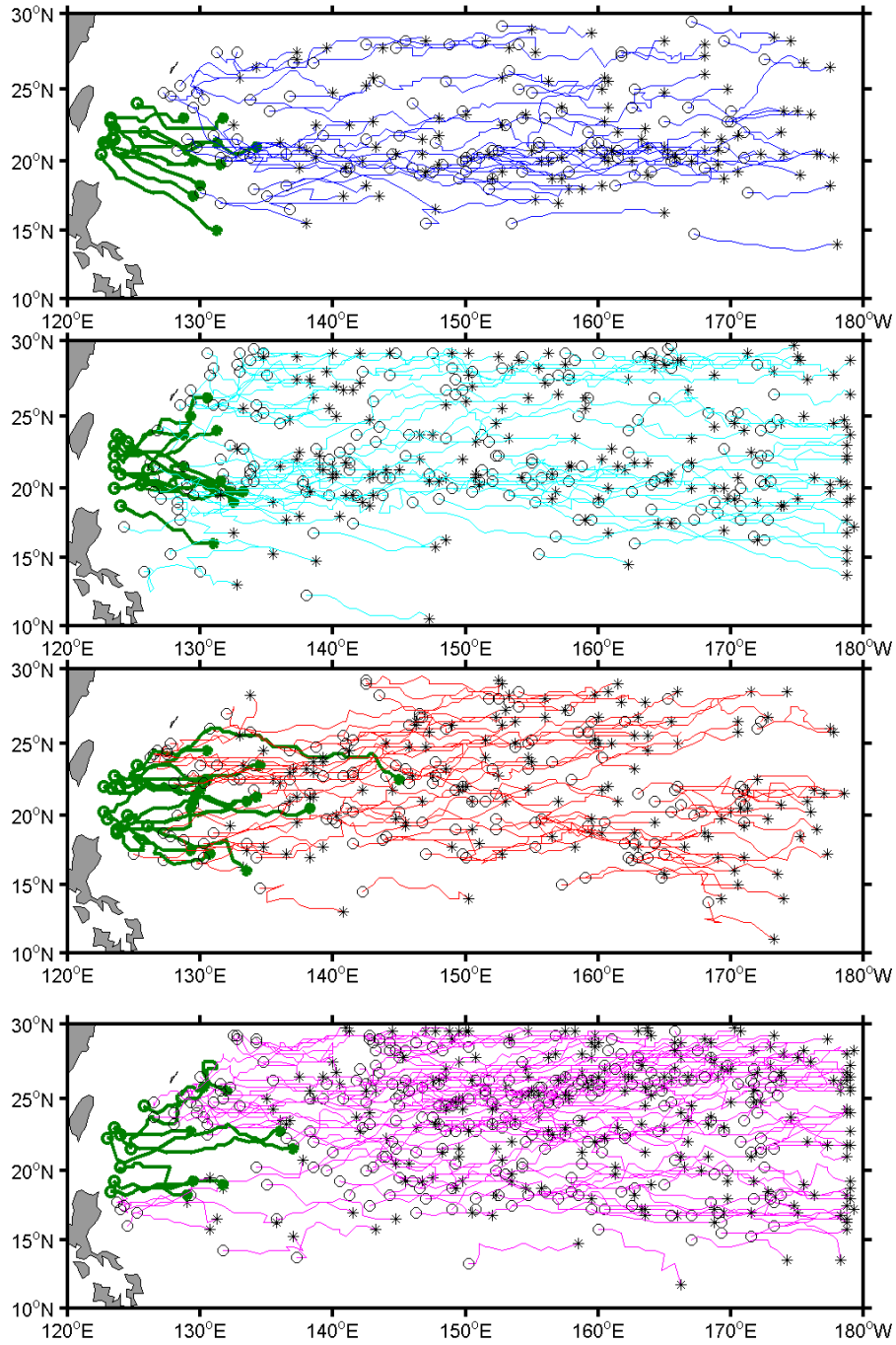


圖 4- 17 冷暖渦以平均半徑為標準之路徑圖，藍線為冷渦高於標準，青線為冷渦低於標準，紅線為暖渦高於標準，桃紅線為暖渦低於標準，綠線為進入台灣東部海域之路徑。

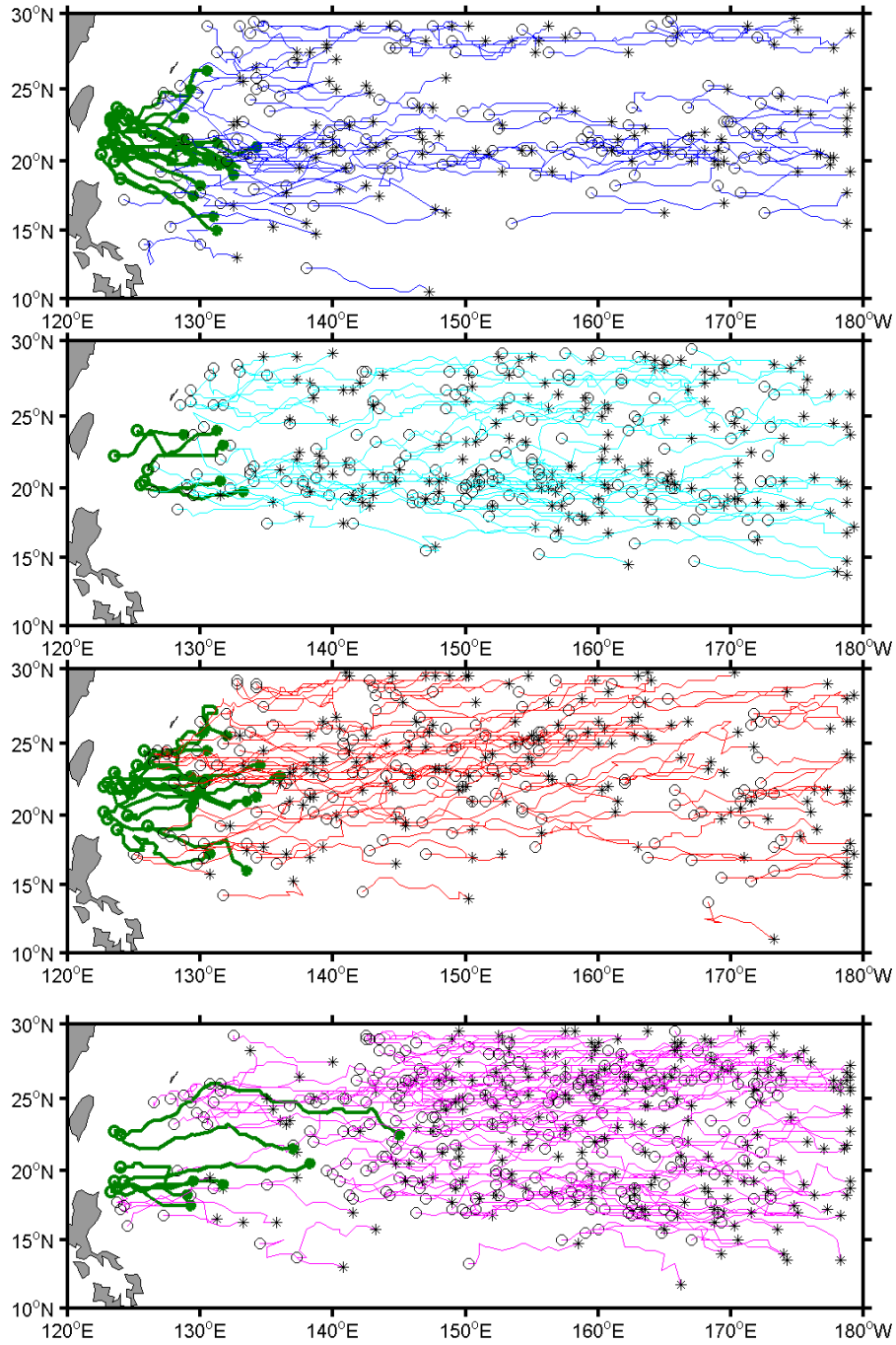


圖 4- 18 冷暖渦以平均 SLA 為標準之路徑圖，藍線為冷渦高於標準，青線為冷渦低於標準，紅線為暖渦高於標準，桃紅線為暖渦低於標準，綠線為進入台灣東部海域之路徑。

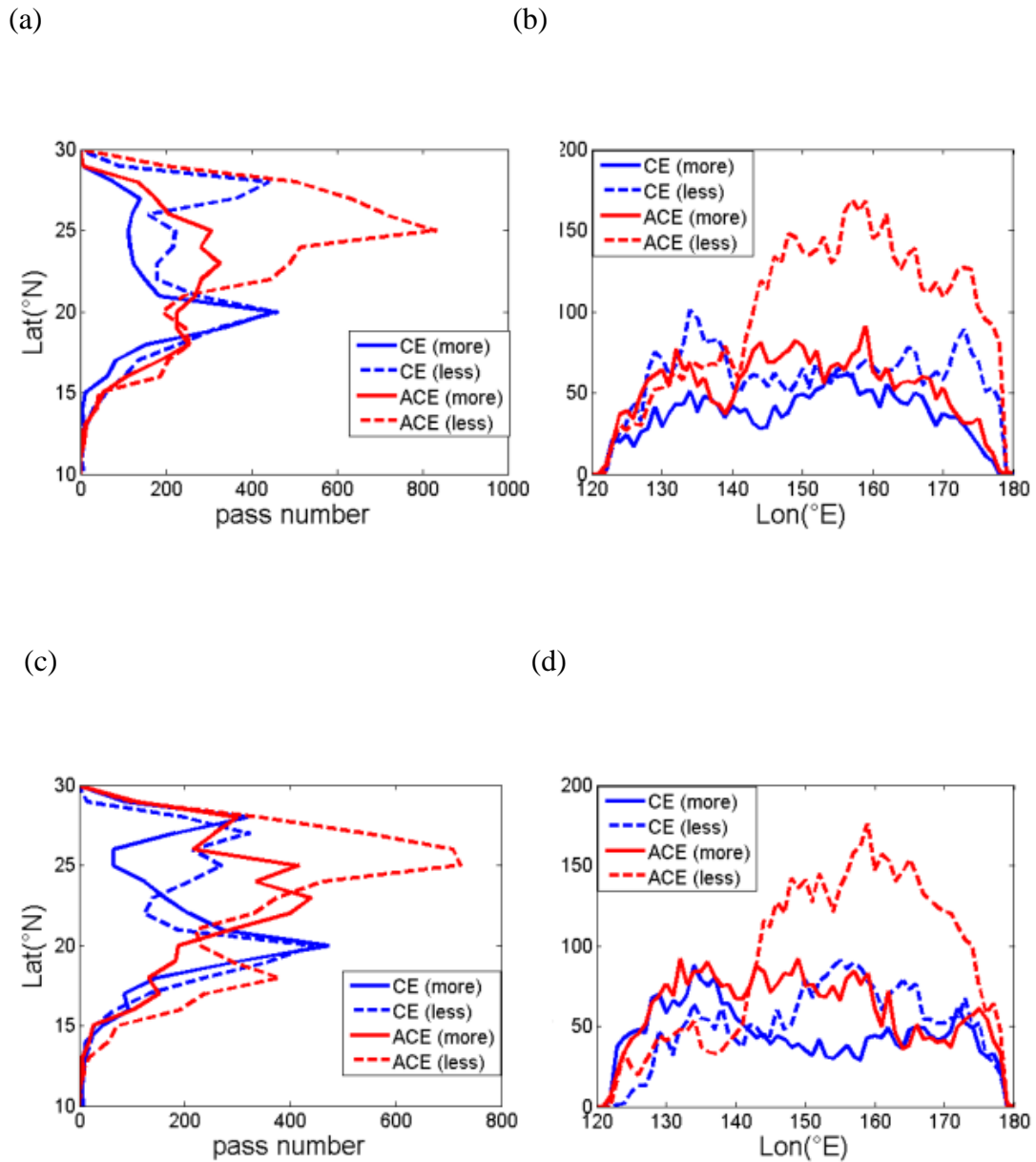


圖 4-19 冷暖渦路徑經緯向統計圖，上至下分別為 (a) 以半徑為標準之經向統計、(b) 以半徑為標準之緯向統計、(c) 以 SLA 為標準之經向統計、(d) 以 SLA 為標準之緯向統計，藍色實線為高於標準之冷渦，藍色虛線為低於標準之冷渦，紅色實線為高於標準之暖渦，紅色虛線為低於標準之暖渦。