



國立中山大學 海洋生物科技暨資源學系研究所

碩士論文

利用漂流浮球觀測南海北部表層環流的統計分析

Statistical analysis of the surface circulation in the northern South

China Sea using Lagrangian buoys

研 究 生：曾光明 撰

指導教授：曾若玄 博士

中華民國 九十六年 七月

謝 誌

本篇論文能順利完成，首先要感謝我的恩師曾若玄老師，謝謝老師這段日子的諄諄教誨，幫助我在學習上度過許多的困難和挫折，在此獻上我最誠摯的感謝，並謝謝師母殷勤的關心我求學生活上的大小事，提醒我要注意健康。感謝王玉懷老師一路上給我的建言與鼓勵，您風趣的言談總是令我印象深刻。感謝海軍官校呂黎光老師和梁文德老師在口試時細心的指正與建議，讓我獲益良多。感謝張育嘉學長在程式上與生活上熱心的幫助，也很感謝海物所林昆毅等同學與學長、學姐們的陪伴，讓我的研究所生活充滿歡樂。謝謝大家。

最後感謝我最親愛的家人，謝謝妳們給我最無私的愛，並且將這份喜悅獻給在我研一時辭世的父親，想再跟您說聲我愛您。

摘 要

1986 年到 2006 年間美國 NOAA/AOML 浮標資料庫中南海北部的表層海洋環流有超過 505 顆的衛星定位浮標的資料，加上本實驗室 2006 年下半年在澎湖水道與呂宋海峽西側自行施放的十顆浮標資料可供分析。本文以 Eulerian 法和 Lagrangian 統計方法來分析經過處理的浮標速度資料，分析表面環流從中尺度到季節性循環的空間結構與暫時性變化。

平均流向量圖、速度變化量橢圓圖和平均流動能圖等都是以 $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$ 網格點來製作。平均流向量圖證實在冬季東北季風時南海北部流場是一個大型的逆時針環流，而在東沙環礁周圍有一股由東北向西南的海流(簡稱東沙海流)，並延伸到越南外海成為一股強勁的海流(簡稱越南海流)，越南海流的最大流速能超過 100cm/s。在夏季西南季風的吹拂下，東沙海流變得非常微弱，此時多數浮標在東沙環礁附近徘徊。呂宋海峽進入南海的黑潮水、東沙海流與越南海流有連貫性。

在南海北部海域的南北向擴散率和 Lagrangian 的時間尺度、空間尺度個別為 $5.12 \times 10^7 \text{cm}^2/\text{s}$ 、2.56 天和 64.43 公里，而東西向的統計則約為上述值的一半，顯示此區域的時間尺度與空間尺度有很高的不等向性。

東沙海流的平均流速為 0.33 m/s。將東沙海流流域區分為十個 $2^{\circ} \times 2^{\circ}$ 的方塊以分析其空間分佈的 Lagrangian 統計特性，結果東沙海流在 113-

121°E 之間的渦動動能均大於平均流動能，顯示此區域的中尺度運動發達，同時由東向西方向，其渦動動能也是逐漸變小，顯示離呂宋海峽越近，其渦動動能越大。

沿著越南東岸外海向南流的浮標資料顯示越南海流的寬度在 80 到 120 公里間變化，其平均的核心速度在 60-150cm/s 之間。冬季時最大的向南海流速度在離岸約 38 公里處達到 130cm/s 以上。春季時的向南海流速度較弱，但是最大流速也有 100cm/s 以上，並集中在離岸距離較近約在 18km 處，而夏、秋季則缺乏浮標資料。

(關鍵字：Lagrangian、浮標、表層環流、東沙海流、南海、黑潮)

Abstract

The surface circulation of the northern South China Sea (NSCS) for the period of 1986-2006 is studied using the data of more than 505 satellite-tracked drifters from NOAA/AOML database and the data from ten drifters which were released by our lab in the Penghu channel and in the Luzon Strait in 2006. In this study, the spatial structure and the temporal variability of the surface currents, at mesoscale to seasonal cycle, are described in terms of Eulerian and Lagrangian statistics from the drifter velocities that have been processed.

Maps of mean currents, velocity variance ellipses and mean kinetic energies were produced in domain of $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$. The mean flow map confirms that during the winter monsoon, there is a global cyclonic circulation in the NSCS and the southwestward current which passes Dongsha Island and is called the "Dongsha Current". Its continuation is the southward coastal jet off Vietnam which is called the "Vietnam Current". Maximum velocities in the Vietnam Current can exceed 100 cm/s. During the summer monsoon, the Dongsha Current became very weak and the drifters looped near Dongsha Island. The drifter data shows that part of Kuroshio water intrudes into South China Sea through Luzon Strait, Dongsha Current and Vietnam Current were coherent flows.

Values of 5.12×10^7 cm²/s, 2.56 days and 64.43 km were obtained for the diffusivity, Lagrangian time scale and spatial scale in the meridional direction in the NSCS, respectively. In the zonal direction, the statistics are half of the above values which show that the characteristic time and space scale are anisotropic.

The mean velocity in the Dongsha Current is 0.33 m/s. The domain of Dongsha Current is subdivided into ten boxes of size $2^{\circ} \times 2^{\circ}$ in order to analyze the spatial structure of Lagrangian statistics. The result shows that the eddy kinetic energy is considerably higher than the mean kinetic energy in the region 113-121°E, indicating that the mesoscale motions are particularly frequent. The eddy kinetic energy gradually decreases toward the west and has a maximum value near the Luzon Strait.

The drifters that flow southward along the east coast of Vietnam shows that the width of the Vietnam Current varies between 80 and 100 km and has a mean core speed of 60-150 cm/s. In winter, Maximum southward velocities could reach 130 cm/s at 38 km off the coast. In spring, a weaker maximum speed (around 100 cm/s) exists at about 18 km off the Vietnam coast. There were not enough drifter data in summer and fall.

(Keywords: Lagrangian, drifter, surface circulation, Dongsha Current, South China Sea, Kuroshio)

目 錄

章次	頁次
謝誌	
中文摘要	
英文摘要	
目錄	
圖目錄	
表目錄	
一、 前言	1
1.1 研究區域	1
1.2 前人研究	1
1.3 研究目的	4
二、 實驗方法與資料來源	6
2.1 浮標資料來源	6
2.2 WOCE-SVP	7
2.3 浮標系統與資料處理過程	8
2.4 海岸線與水深資料	9
三、 分析方法	20

3.1 Eulerian 統計方法	20
3.2 Lagrangian 統計方法	22
四、 平均環流、速度變化量和擴散率	26
4.1 Eulerian 統計	26
4.1.1 平均環流	26
4.1.2 速度變化量	27
4.1.3 平均流動能(MKE)、渦動動能(EKE)	28
4.2 Lagrangian 統計	29
4.2.1 時間尺度與空間尺度	29
4.2.2 擴散率	31
五、 季節性與空間性的變化	48
5.1 南海北部海域 Eulerian 統計	48
5.2 越南海流隨離岸距離的變化	50
5.3 Lagrangian 特性的時空分佈	51
5.4 東沙海流的空間分佈統計	52
六、 結論	74
參考文獻	76

圖目錄

圖 1-1. 南海北部海底地形水深圖	5
圖 2-1. 南海海域浮標軌跡圖(1982-2006)	11
圖 2-2. 南海北部 1986-2006 浮標資料數目年月分佈圖	12
圖 2-3. 東沙海流 1986-2006 浮標資料數目年月分佈圖	13
圖 2-4. 越南東岸外海 1986-2006 浮標資料數目年月分佈圖	14
圖 2-5. 南海北部海域浮標資料數目密度圖(1982-2006)	15
圖 2-6. 本研究流入東沙海流的浮標軌跡圖	16
圖 2-7. Argos 浮標之迷你型洞襪式浮標照片圖	17
圖 2-8. Argos 浮標之原型與迷你型洞襪式浮標示意圖(摘自 NOAA/AOML 網站)	18
圖 3-1. No.56662 浮標的自相關函數	25
圖 4-1. 水深 15m 平均流速向量圖(1982-2006)	33
圖 4-2. 南海海域浮標流速大於 40cm/s 的軌跡圖(1982-2006)	34
圖 4-3. 南海海域浮標流速大於 60cm/s 的軌跡圖(1982-2006)	35
圖 4-4. 南海海域浮標大於 80cm/s 的軌跡圖(1982-2006)	36
圖 4-5. 南海海域浮標流速大於 100cm/s 的軌跡圖(1982-2006)	37
圖 4-6. 冬季水深 15m 平均流速分佈圖(1982-2006)	38
圖 4-7. 夏季水深 15m 平均流速分佈圖(1982-2006)	39
圖 4-8. 水深 15m 平均流向量與速度變化量橢圓圖(1982-2006)	40
圖 4-9. 水深 15m 平均流向量與平均流動能圖(1982-2006)	41
圖 4-10. 水深 15m 速度變化量橢圓與平均渦動動能(1982-2006)	42

圖 4-11. 水深 15m EKE/MKE 圖(1982-2006)	43
圖 4-12. 以 Lagrangian 統計法計算南海北部海域浮標軌跡資料中流速移除平均流速後的擴散率(diffusivity)對 10 天的時間延遲圖	44
圖 5-1. 南海北部浮標軌跡的四季分佈圖	55
圖 5-2. 秋季水深 15m 平均流速分佈圖(1982-2006)	56
圖 5-3. 春季水深 15m 平均流速分佈圖(1982-2006)	57
圖 5-4. 水深 15m 四季渦旋動能圖(1982-2006)	58
圖 5-5. 冬季水深 15m 平均流向量與平均流動能圖(1982-2006)	59
圖 5-6. 冬季水深 15m 速度變化量橢圓與平均渦動動能圖	60
圖 5-7. 冬季水深 15m EKE/MKE 圖(1982-2006)	61
圖 5-8. 夏季水深 15m 平均流向量與平均流動能圖(1982-2006)	62
圖 5-9. 夏季水深 15m 速度變化量橢圓與平均渦動動能圖	63
圖 5-10. 夏季水深 15m EKE/MKE 圖(1982-2006)	64
圖 5-11. 朝南流的越南海流向南流速統計圖	65
圖 5-12. 南海北部四季浮標單質點位移量的吐煙圖	66
圖 5-13. 東沙海流四季浮標單質點位移量的吐煙圖	67
圖 5-14. 越南東岸外海全年與冬季浮標位移量的吐煙圖	68
圖 5-15. 東沙海流水深 15m 平均流速向量圖(1982-2006)	69
圖 5-16. 水深 15m 平均流向量與速度變化量橢圓圖(1982-2006)	70
圖 5-17. 東沙海流的 Lagrangian 空間尺度、時間尺度與擴散率對 $2^{\circ} \times 2^{\circ}$ 速度變化量圖	71

表目錄

表 2-1. 本研究以海研三號施放 Argos 浮標紀錄	19
表 4-1. 南海北部浮標 Lagrangian 統計摘要	45
表 4-2. 東沙海流浮標 Lagrangian 統計摘要	46
表 4-3. 越南東岸外海浮標 Lagrangian 統計摘要	47
表 5-1. 東沙海流浮標 Lagrangian 統計的空間變化摘要	72

一、前言

1.1 研究區域

南海(South China Sea)(如圖 1-1)位於台灣西南方，範圍約在緯度 0°到 23°N 與經度 99°E 到 121°E 之間，是一個水深達 5000 公尺的世界第三大邊緣海(僅次於珊瑚海和阿拉伯海)及東北-西南向的半封閉海盆，平均水深約 1200 公尺，越向東邊越深，最大水深超過 5000 公尺。南海四周圍繞有中國大陸、台灣、菲律賓、馬來西亞、印尼、新加坡及越南，是太平洋與印度洋的航運中樞，在經濟與國防戰略上有舉足輕重的地位，其水體主要經由北邊的台灣海峽(Taiwan Strait)、東北邊的呂宋海峽(Luzon Strait)以及南邊的麻六甲海峽(Malacca Strait)分別與東海、太平洋及印度洋交換海水，而呂宋海峽比起其他海峽由於具有較寬且深的水道，所以在南海與西太平洋的動力交換上扮演重要的角色，西北海域和西南海域則皆為寬廣較淺的大陸棚。

1.2 前人研究

過去幾十年來許多學者曾分別利用不同的海洋探測術，如數值模式、都卜勒海流剖面儀(ADCP)、衛星海面高度計和溫鹽深儀(CTD)等，為了解南海海域的環流與機制投入許多心力。Shaw and Chao(1994)以數值模式模擬南海的表面環流，顯示南海流場的年變化上，冬季是一個大尺度(basin-

scale)的氣旋式環流，夏季流場是由越南東側海域的東北向海流蜿蜒到呂宋島西北側，在此東北向海流的西北側呈一氣旋式環流，東南側則呈一反氣旋式環流，結果並指出冬季時黑潮在東北季風的作用下會從呂宋海峽入侵南海，而夏季則是南海海水會流出呂宋海峽。

Hwang and Chen(2000)利用衛星高度計分析南海的環流和渦漩，結果顯示南海環流的季節性變換方向深受季風的影響，在冬季時(12月到2月)為大型的逆時針環流，夏季時(7月到8月)的南海則為一個大型的順時針環流。在呂宋島西側、呂宋海峽西側和越南東側海域都有冷渦和暖渦出現過。在越南東岸外海向南的沿岸流會有反轉的現象是依據風應力的結果來判定的。

梁文德(2002)以錨碇實測資料與數值模式探討南海上層海洋溫度場與流場變化的動力機制，其結果顯示黑潮支流在呂宋海峽入侵南海是終年性的，只是入侵的大小與範圍有季節性的變化，冬季時大量入侵南海的黑潮可以到達越南東岸外海，夏季時入侵量較小的黑潮到達範圍則僅侷限在台灣西南側海域。Liang et al.(2003)分析在呂宋海峽以船載式海流儀與錨碇式海流儀的資料，其結果支持黑潮支流是終年進入南海的，部分黑潮水經由呂宋海峽北側入侵南海後會再返回黑潮主流。

Centurioini et al.(2004)分析 Argos 浮標資料、衛星高度計資料與海表面溫度資料，結果發現浮標只在10月到1月之間以 0.7 ± 0.4 m/s 的平

均流速通過呂宋海峽進入南海內部，而且每天平均向西流的速度超過 1.65 m/s，其主要向西流的路經約在 20°N，其衛星高度計資料指出在一次浮標經過海峽直接向西入侵南海的路徑中，在海峽西側浮標路徑的北面 and 南面分別有順時針的渦漩和逆時針的渦漩存在。藉由通過呂宋海峽的浮標測量向西的表面流速結果顯示遠大於風速 8-10 m/s 東北季風所造成的艾克曼流速。

大陸學者 Su(2004)整合分析近年南海的水文資料與衛星高度計資料說明冬季在東沙群島周圍有一股沿著中國南側大陸棚由東北向西南的海流，是逆時針環流的西方邊界流，簡稱為東沙海流，東北季風和入侵南海的黑潮支流是其動力來源之一，並延伸到越南東岸外海形成一股強勁的南向海流。到了夏季西南季風吹拂下，入侵南海的黑潮水減少，東沙海流潛在朝向東北方流的風驅流下，而越南東岸外海變成北向海流並轉而向東噴射造成湧升流現象。

綜合以上學者所述，南海流場的年變化受季風影響甚大，冬季受東北季風的影響，黑潮支流進入南海後一直向西流形成一個逆時針的環流，到達南海西側的越南外海會出現一個流速較大的南向海流。到了夏季，進入南海的黑潮水減少，對南海環流的影響改由西南季風取代，在南海北部海域的西北側呈一逆時針的環流，西南側呈一順時針環流。

1.3 研究動機與目的

從前人的研究可知在南海的流場觀測多半是採用都卜勒海流剖面儀、衛星遙測(如衛星海面高度計)和溫鹽深儀等以及數值模式來分析研究，但是以浮標觀測海洋流場的外國研究過去在阿爾及利亞海流(Salas, 2001)、亞得里亞海流(Poulain, 2001)和中地中海(Poulain, 2007)等都已獲得不錯的成效。由於一直以來有關南海海域浮標資料的觀測數目在 2003 年以前十分缺乏，每年都低於 5000 筆以下，但是自從 2003 年起在南海施放或是漂流進入南海海域浮標觀測資料數目則出現大幅度的倍數成長，且 Argos 浮標系統與 Lagrangian 法的運用業已成熟完備，但是由於有關南海表面環流的 Lagrangian 法相關研究仍屬稀少，所以本研究目的是期望能以 Lagrangian 方法分析南海北部的表層浮標資料，藉由浮標能有別於其他研究方法在任何天候、海象與時間下進行大面積、大範圍和長週期實測資料的特性與優點，能更有效的了解此區域表面流場的季節性變化，同時針對東沙海流、越南東岸外海的南向海流(簡稱越南海流)的流速和流向變化加以分析，並探討這些現象的關連性為何。

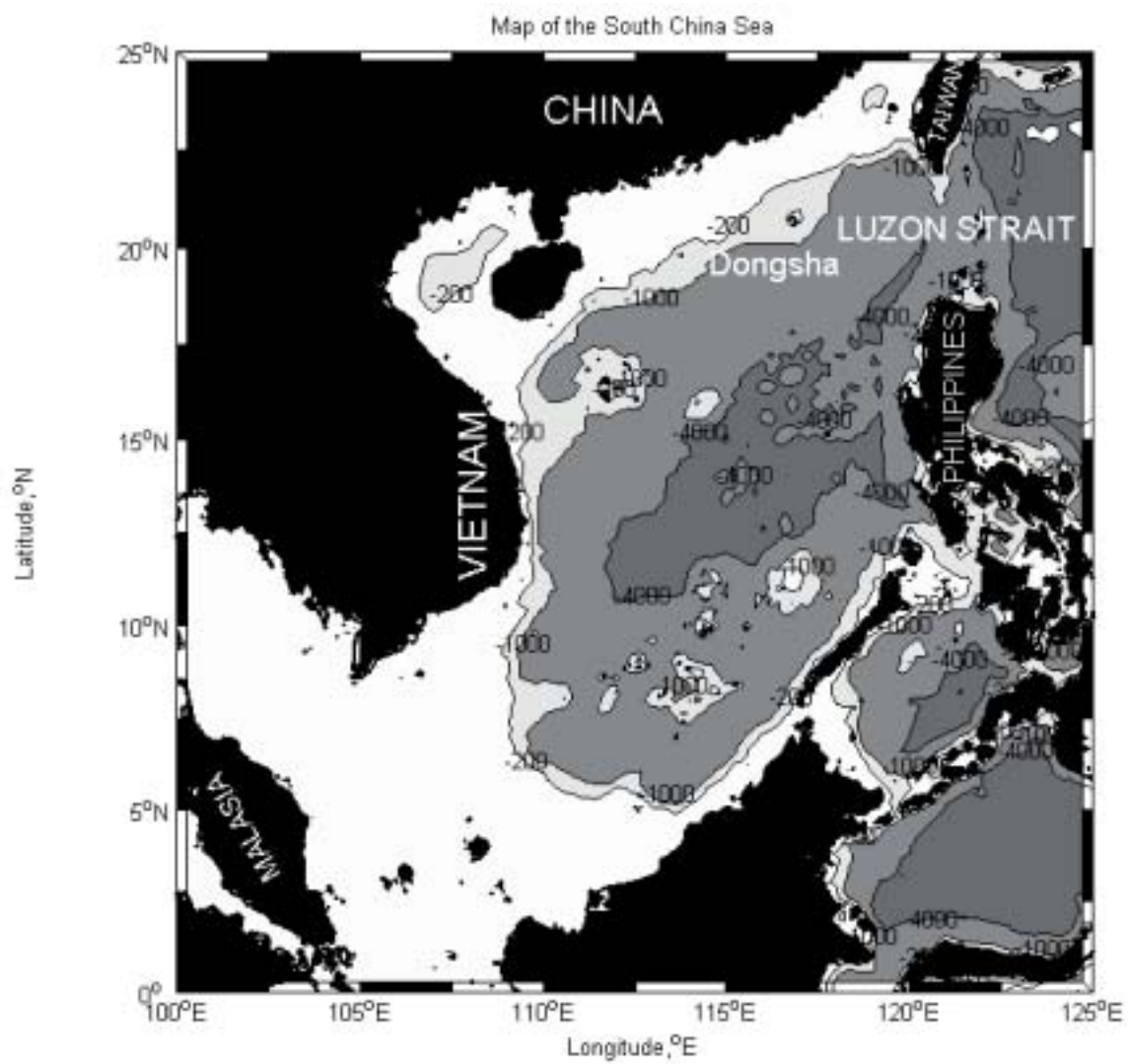


圖 1-1. 南海北部海底地形水深圖，等深線為 200m、1000m 和 4000m

二、實驗方法與資料來源

2.1 浮標資料來源

本研究利用 NOAA/AOML 浮標資料庫(National Oceanic & Atmospheric Administration/The Atlantic Oceanographic and Meteorological Laboratory)中南海所有的表層(15m)浮標資料(SVP drifters)，下載網址為 <http://www.aoml.noaa.gov/phod/trinanes/xbt.html>

，下載 1986 年 11 月 24 日到 2006 年 8 月 31 日，北緯 10° 到 25° ，東經 100° 到 130° 的歷史浮標資料，並表示成圖 2-1 南海歷史浮標的軌跡圖，圖中符號「.」代表浮標的施放點與起點，顯示浮標的起點大多集中在南海北部的東部邊界，也就是台灣東南方海域到菲律賓呂宋島西南海域一帶，此外大多數的浮標都是從太平洋向西漂流過來的，所以浮標的起點大多集中在圖片右側太平洋西側邊界處，而浮標起點在南海北部海域則分佈稀疏，但是在南海東南部海域則十分稀少且缺乏浮標軌跡的覆蓋。南海北部、東沙海流和越南海流浮標資料的年月分佈情形請參見圖 2-2、圖 2-3 和圖 2-4，其季節資料量都是在冬季高點，夏季時則為低點。可以得知在研究區域南海北部海域浮標資料(圖 2-2)有 505 顆浮標，間隔 6 小時共 83041 筆的浮標日(drifterdays)，共 227.5 浮標年，資料巔峰期在 2005 年浮標資料達 30000 筆以上。在東沙海流的浮標資料(圖 2-3)有 322 顆浮標，間隔 6 小時共 45746 筆的浮標日(drifterdays)，共 125.3 浮標年，資料巔峰期在 2005

年浮標資料達 20000 筆以上。在越南海流的浮標資料(圖 2-4)有 138 顆浮標，間隔 6 小時共 13252 筆的浮標日(drifterdays)，共 36.3 浮標年，資料巔峰期在 2005 年浮標資料達 5000 筆以上。浮標資料數目密度圖(圖 2-5)顯示在南海北部海域網格點為 $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$ 內的浮標數目密度，可以看出從呂宋海峽起隨著南海環流的主流一路向西延伸到越南東岸外海，浮標資料數目密度大多都在 200 筆以上，尤其是在呂宋海峽的西邊和東沙環礁的西側海域甚至都高達了 500 筆以上的浮標資料。

本實驗室在 2006 年 11 月起到 12 月亦分成 4 個階段自行施放 20 顆浮標(表 2-1)，並在此浮標資料中取 10 顆有漂到南海北部的浮標資料，而這 10 顆浮標中，有八顆進入了東沙海流(圖 2-6)，其中有五顆則是在呂宋海峽施放的。

2.2 WOCE SVP

本研究中的表層浮標為 WOCE (The World Ocean Circulation Experiment)所發展出來的 Argos 洞襪式浮標(Holey Sock Drifter)，其特性為：(1)拖傘(Drogue)受海流的拖曳力遠大於風和浪對浮球的作用力(2)表面浮球(Surface Float)為玻璃纖維圓球，內有電池組、發報器、天線、溫度感應器等裝置(3)以纜繩連接球體與托傘(4)拖傘由尼龍布製成，其中心深度為 15m，以測量在海洋表層混合層中的海流(5)資料間隔為 6 小時一

筆(6)以纜繩拉力感測與海水導電感應器來偵測浮球與拖傘是否分離(7)可記錄海水表層溫度(SST)(8)平均壽期大於 400 天。

洞襪式浮標有原型和迷你型兩種(圖 2-7 為迷你型浮標,圖 2-8 為原型和迷你型浮標示意圖),主要為大小上的差異,原型有表面浮球和次浮球,原型浮球直徑為 30.5 到 40 cm,托傘由上至下以圓環形塑膠管分為七層,總長度為 6.44 m,每層 92 cm 長,直徑 92 cm,重 45 kg。迷你型浮球直徑為 38 cm,托傘分為 4(5)層,總長度為 4.88 m(6.1 m),重 20 kg,每層 1.22 m 長,直徑為 61 cm。托傘每層有兩個圓洞相對,相鄰兩層的圓洞為 90° 交錯。

托傘在浮標佈放前是以溶於水的紙膠帶捆綁起來以縮小體積方便施放,連接球體與托傘的纜繩也會捲在溶於水的厚紙板圓弧上,避免其下水前後扭結在一塊,浮標施放前得先將浮球上的磁鐵移除,使其磁力開關打開並開始發送信號,下水後經 1 小時以上托傘和纜繩便會完全施展開來,承受其設計深度中心水深 15 m 左右的海流拖曳力。浮標可在船速最大 25 節,距海平面高 10 m 以下的甲板上進行佈放,而且目前也已經可以成功的利用 C-130 運輸機上進行空投佈放了。

2.3 浮標系統與資料處理過程

Argos 是一種資料收集、處理和提供的衛星定位系統,相似於

GPS(Global Positioning System)定位系統，但不一樣之處是採用都卜勒效應來傳送資料給衛星接收，每天每顆浮標約有 16 到 20 顆的衛星予以定位，本系統的優點是平均每天的用電量較 GPS 系統省電，只要消耗數毫安培，微型化的發報器模組僅 17 g，其衛星定位的準確度在 200 m-300 m 內。

Argos 浮標資料由 AOML 的 Drifter Data Assembly Center (DAC)來收集，並做資料品管(Quality Control, QC)，刪除浮標擱淺、托傘脫落、被漁夫撈走和在船上未佈放前的位置，採用「kriging」的內插方法消除極端錯誤的資料後內插成為 6 小時間隔的資料(Hansen and Poulain, 1996)，再經由 0.5 天的位移量取中心點有限差分 (centered finite differences) 的東西向與南北向速度分量。此資料庫所蒐集浮標流速的精確度在 10 m/s 的風作用下，誤差在 0.01 m/s 左右(Niiler et al., 1995)。

2.4 海岸線與水深資料

海岸線資料和水深資料皆源自美國 NGDC(National Geophysical Data Center)資料庫，在 Coastline Extractor 下載海岸線資料，由 World Vector Shoreline 資料庫所提供，下載網址為

<http://rimmer.ngdc.noaa.gov/mgg/coast/getcoast.html>。

地形水深資料來自 NGDC 的 GEODAS(Geophysical Data System)由 ETOPO2(Earth topography Two Minute)資料庫所提供，水平網格解析度達

2 分，下載網址為

http://www.ngdc.noaa.gov/mgg/gdas/gd_designagrid.html。

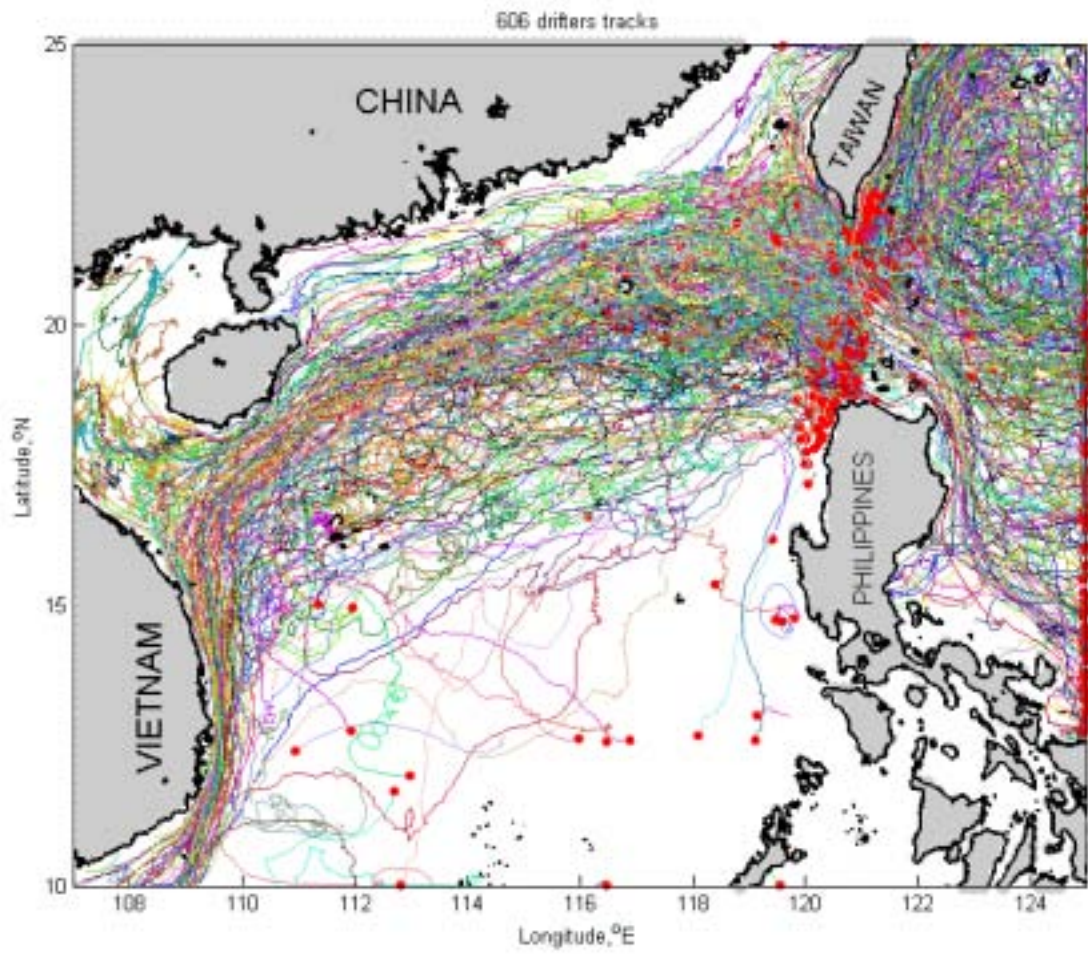


圖 2-1. 南海海域浮標軌跡圖(1982-2006)，「.」表示浮標施放點與起點

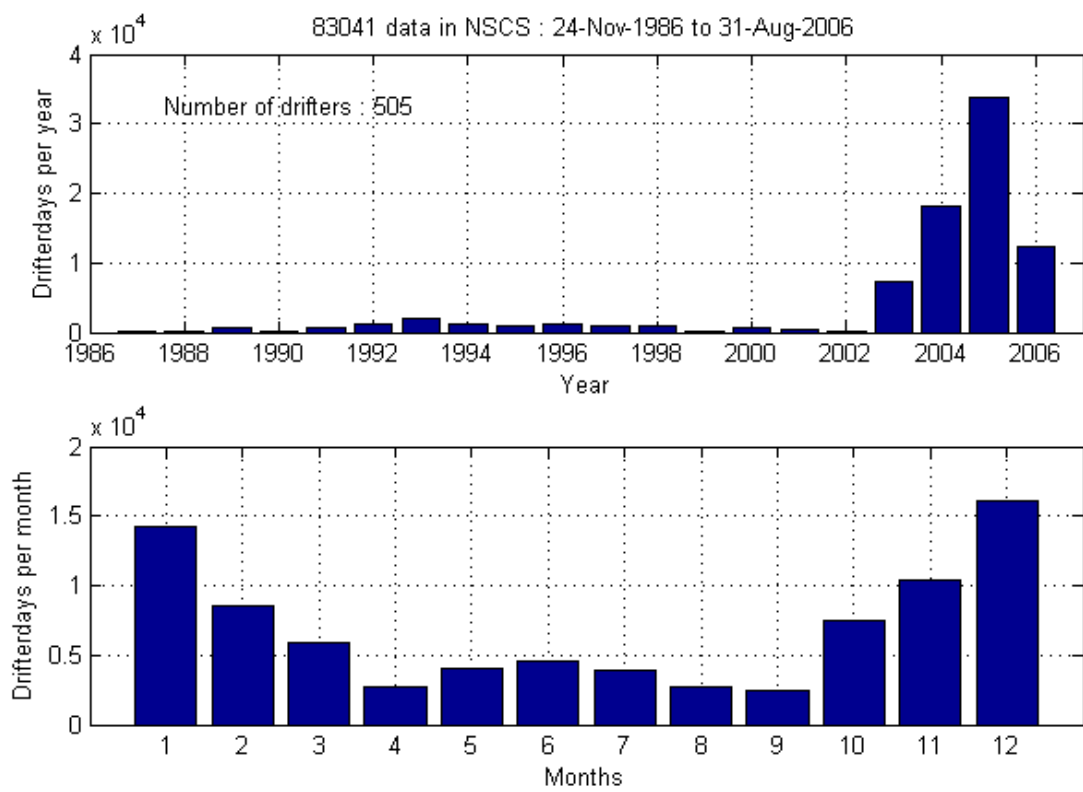


圖 2-2. 南海北部 1986-2006 浮標資料數目年月分佈圖

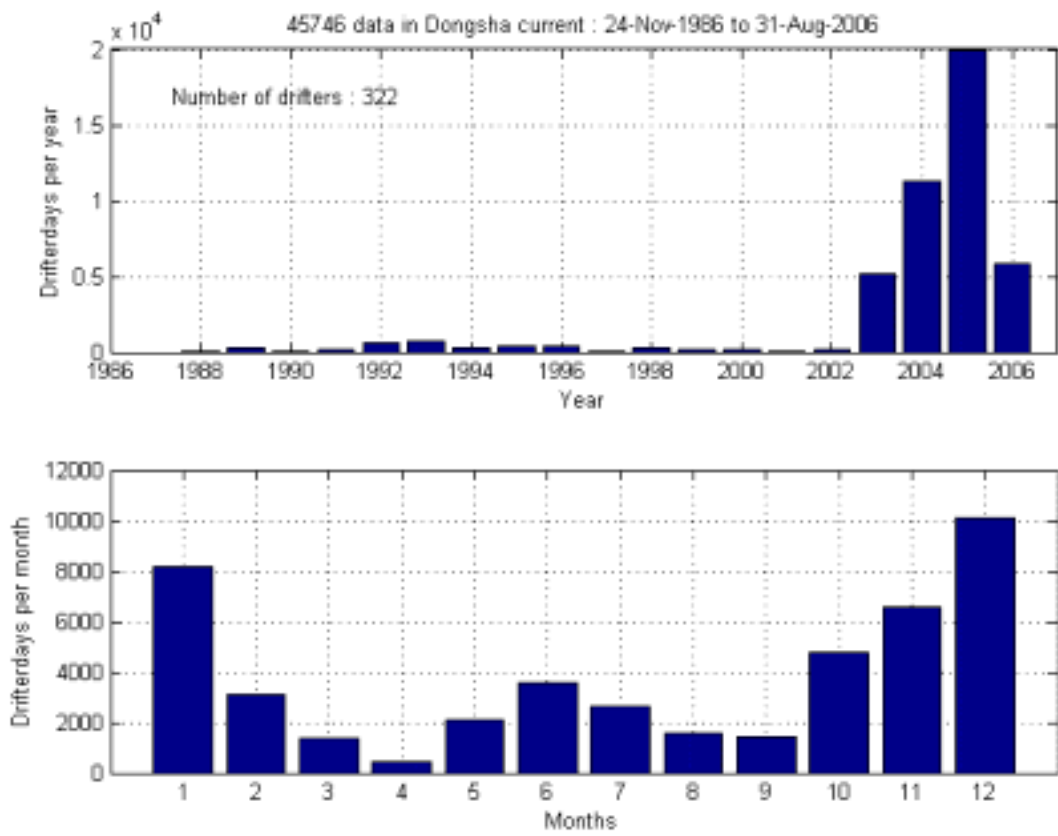


圖 2-3. 東沙海流 1986-2006 浮標資料數目年月分佈圖

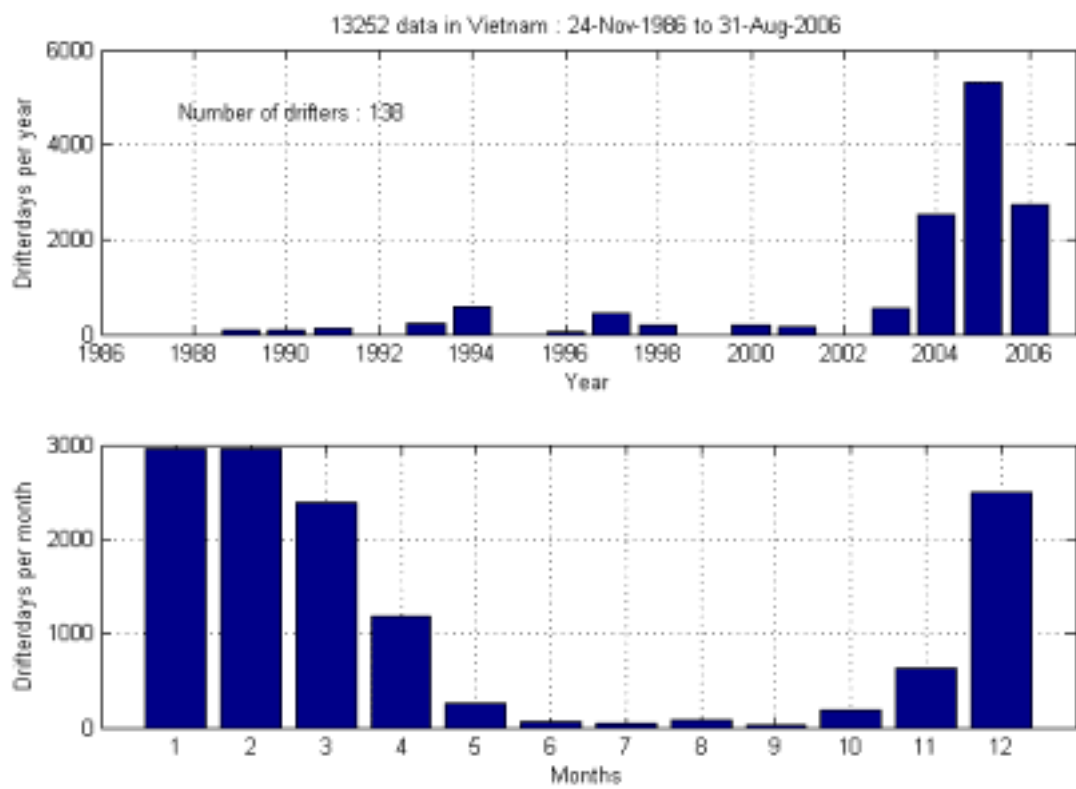


圖 2-4. 越南海流 1986-2006 浮標資料數目年月分佈圖

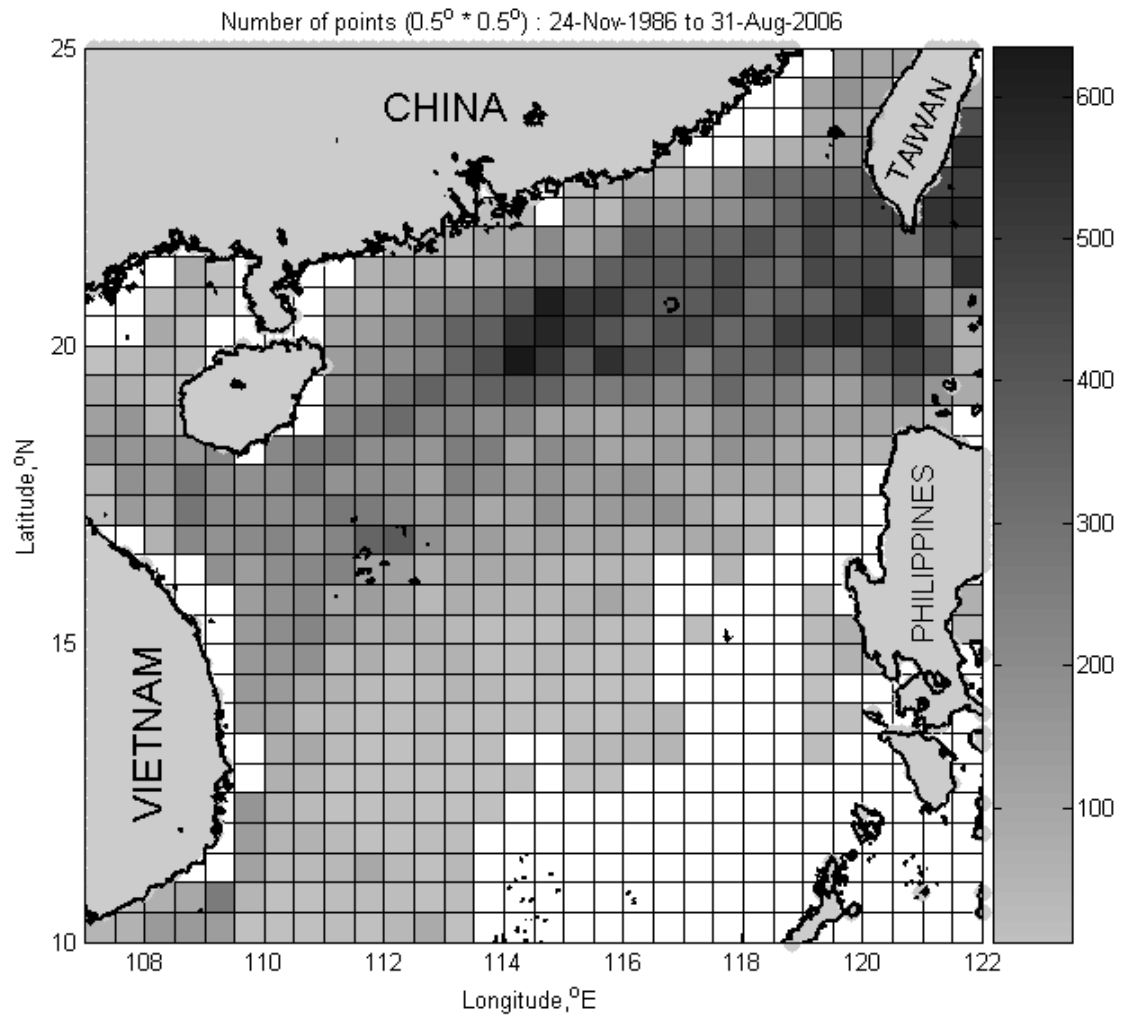


圖 2-5. 南海北部海域浮標資料數目密度圖(1982-2006) ，網格點為 $0.5^\circ \times 0.5^\circ$

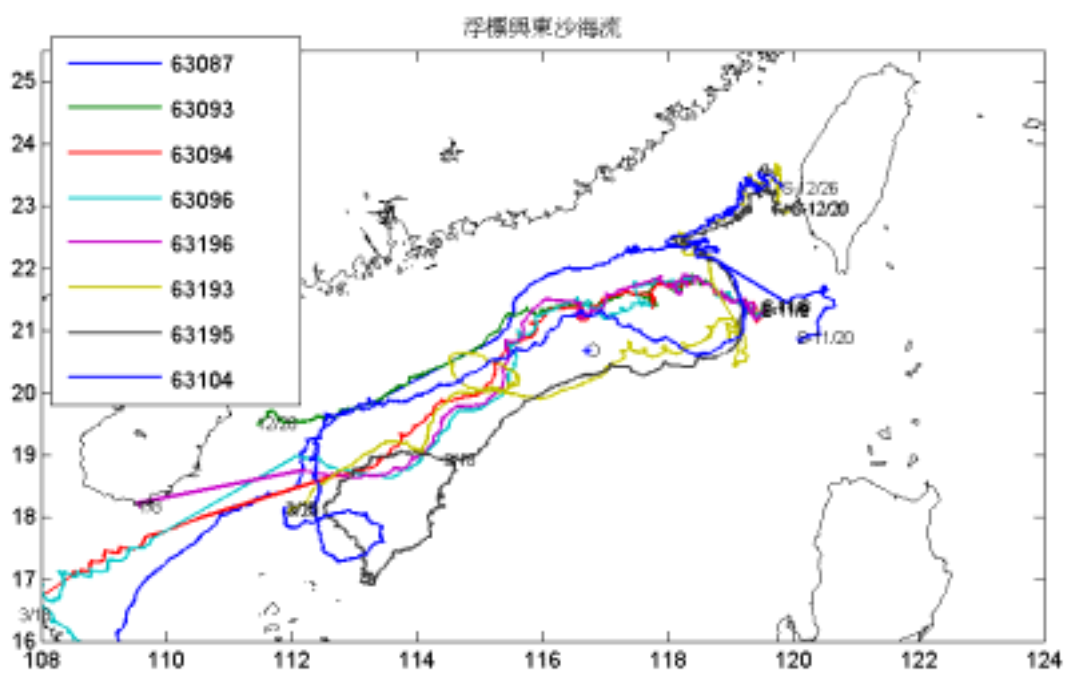


圖 2-6. 本研究流入東沙海流的浮標軌跡圖，起點以 S 加日期表示



圖 2-7. Argos 浮標之迷你型洞襪式浮標照片圖

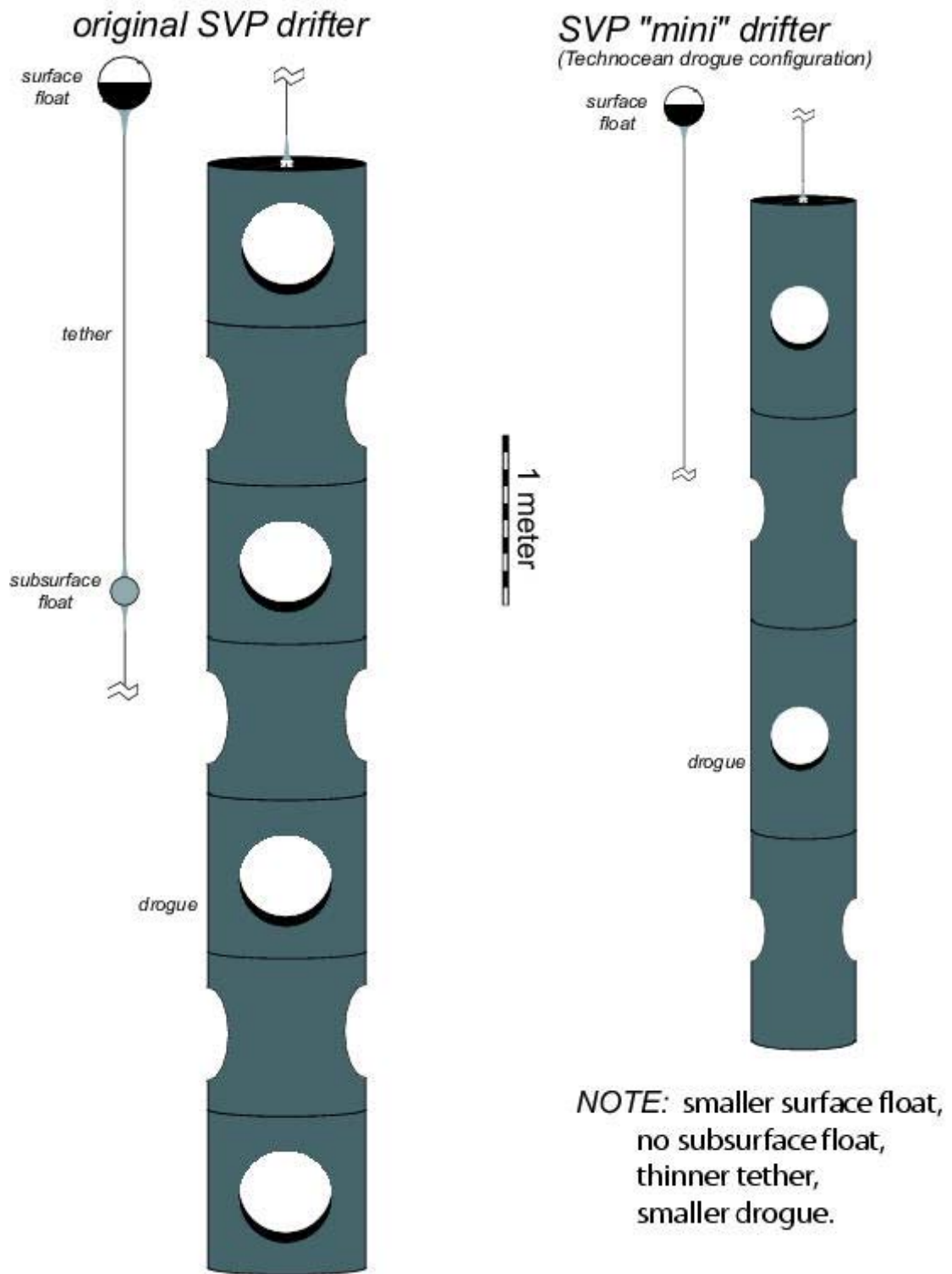


圖 2-8. Argos 浮標之原型與迷你型洞襪式浮標示意圖(摘自 NOAA/AOML 網站)

表 2-1. 本研究以海研三號施放 Argos 浮標紀錄

日期	施放浮標數	進入南海浮標編號	施放海域
Nov. , 8, 2006	5	63092、63093、63094、63096、63196	呂宋海峽
Nov. , 20, 2006	4	63087	呂宋海峽
Dec. , 20, 2006	3	63193、63195	澎湖水道
Dec. , 26, 2006	3	63104、63106	澎湖水道

三、分析方法

3.1 Eulerian 統計方法

本研究將此南海北部海域1986年到2006年間歷年的浮標資料以 $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ 的網格做平均後，取資料筆數大於10筆的網格點資料(季節平均則取大於五筆)，運用 Poulain(2001)文中所提供的 Eulerian 統計方法加以分析，其方法如下：

(1) 平均速度(Mean Flow)： $\langle u_i \rangle_L$

$$\langle \rangle_L = \frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} dt \text{ 表示平均}$$

T 是時間序列的長度

(2) 平均動能(Mean Kinetic Energy, MKE)：表示流場平均流強度。

$$MKE = \frac{1}{2} \left[\langle u_1 \rangle_L^2 + \langle u_2 \rangle_L^2 \right]$$

速度 u 的下標 1 是東西方向分量，下標 2 是南北方向分量

(3) 渦動動能(Eddy Kinetic Energy, EKE):

$$EKE = \frac{1}{2} \left[\langle u_1' u_1' \rangle_L + \langle u_2' u_2' \rangle_L \right]$$

$u' = u - \langle u \rangle_L$ ，表示剩餘速度(the residual velocity)

渦動動能表示流場紊流的強度，該海域渦動動能越大的季節，其吐煙圖煙柱的大小和時空距離與其他季節相比亦為最大。

(4) 速度變化量(Velocity Variance):

主要軸的速度變化量(principal axes of variances)或稱為速度變化量橢圓(variance ellipses)的分析方法是採用 Emery and Thomson (1998) 在 Data Analysis Methods in Physical Oceanography 一書中所提供的方法，公式如下：

$$\text{Principal angle : } \tan(2\theta_p) = \frac{2\overline{u_1' u_2'}}{\overline{u_1'^2} - \overline{u_2'^2}}$$

$$\theta_p = \frac{1}{2} \tan^{-1} \left[\frac{2\overline{u_1' u_2'}}{\overline{u_1'^2} - \overline{u_2'^2}} \right]$$

$$-\pi/2 \leq \theta_p \leq \pi/2$$

$$\left. \begin{matrix} \lambda_1 \\ \lambda_2 \end{matrix} \right\} = \frac{1}{2} \left\{ \left(\overline{u_1'^2} + \overline{u_2'^2} \right) \pm \left[\left(\overline{u_1'^2} - \overline{u_2'^2} \right)^2 + 4 \left(\overline{u_1' u_2'} \right)^2 \right]^{1/2} \right\}$$

上式中符號「+」表示 λ_1 ，符號「-」表示 λ_2 ， λ_1 是主要軸(長軸)的速度變化量， λ_2 是次要軸(短軸)的速度變化量，主要軸與次要軸為 90° 夾角， θ_p 是主要軸的角度。速度變化量可以用來找出在固定點流速儀、風速計，或是固定網格內 Lagrangian 浮標軌跡所代表的流場主要軸方向。因為平均流和低頻海流通常會平行地沿著海岸線或海底等深線運動，所以速度變化量的主要軸常定義為沿岸方向(longshore)，次要軸則為離岸方向

(cross-shore)。

3.2 Lagrangian 統計方法

浮球流速以每六小時時間間隔計算，流速 u 可視為一個隨機穩定的過程。Lagrangian 時間尺度及空間尺度為表示流場的質點能記憶其運動路徑的有效時間和距離，就是在此時間和距離內的質點運動有因果關係 (Poulain and Niiler, 1989)。本研究採用 Poulain and Niiler (1989) 文中的公式以計算自相關函數、時間尺度與空間尺度，計算公式如下：

(1) 自相關函數 (autocorrelation function)

$$\begin{aligned} R_{ij}(\tau, T, t_0, x_0) &= \frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} u'_i(x_0, t) u'_j(x_0, t + \tau) dt \\ &= \langle u'_i(x_0, t) u'_j(x_0, t + \tau) \rangle_L \\ \langle \rangle_L &= \frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} dt \text{ 表示平均} \end{aligned}$$

速度 $u(x_0, t)$ 表示浮標在初始時間 t_0 (初始位置為 x_0) 經過 t 時的速度，在 t 時某一固定點的剩餘速度為 $u' = u - \langle u \rangle_L$ ， T 是時間序列的長度， τ 是時間延遲 (time lag)。

理論上自相關函數 R 是從 +1 衰減到 0，即是到完全不相關為止，但實測上往往會出現小幅度的正負值振盪，如果用資料全程的時間來決定

Lagrangian 時間尺度及空間尺度，將無法得到一個有意義的數值。所以以

自相關函數 R 值積分到 R 值第一次降為零值為止，除去其後的振盪，積分後的 R 值便是真實尺度的上限(Poulain and Niiler, 1989)，如圖 3-1。

(2) Lagrangian 時間尺度(time scales)

$$T_i^L = \frac{1}{\langle u_i'^2 \rangle_L} \int_0^t R_{ii}(\tau) d\tau$$

質點能記憶其運動路徑的有效時間。流場中的質點運動超過 Lagrangian 時間尺度及空間尺度後，可視為不相關和視為另一浮球的軌跡，因此可以在此時間尺度與空間尺度後視為新的質點運動以大幅增加資料量。

(3) Lagrangian 空間尺度(space scales)

$$L_i^L = \frac{1}{[\langle u_i'^2 \rangle_L]^{1/2}} \int_0^t R_{ii}(\tau) d\tau = [\langle u_i'^2 \rangle_L]^{1/2} T_i^L$$

質點能記憶其運動路徑的有效距離，其東西和南北分量可做以起始點為時間零的「單質點擴散吐煙圖」，方便觀察流場中質點擴散與對流情形。

(4) 單質點擴散率(絕對擴散率)

(Single particle or absolute diffusivity)

$$K_{ii} = \frac{1}{2} \frac{d}{dt} \overline{x_i x_i} = \overline{u_i^2} \int_0^t R_{ii}(\tau) d\tau$$

$$\overline{x_i^2}(t) = 2\overline{u_i^2} \int_0^t (t - \tau) R_{ii}(\tau) d\tau$$

K_{ii} 可由左式直接計算或經由自相關函數求得，其一致性可檢查流場是否為均勻性(homogeneous)。關於 $R(\tau)$ 有兩個限制情形 (Taylor, 1921)

$$\overline{x_i^2}(t) = \begin{cases} \overline{u_i^2} t^2 & , (t < T) \text{ and } (R(\tau) \rightarrow 1) \\ 2\overline{u_i^2} t T_i & , \text{ when } (t \rightarrow \infty) \text{ or approximately } (t \gg T) \text{ and } (R(\tau) \rightarrow 0) \end{cases}$$

第一個限制情形是針對較短的時間所設，稱為初始擴散(Initial Dispersion)，第二個限制情形則是時間趨近於無限，稱為隨機漫步狀態(Random Walk Regime)，在此情形下擴散會隨著時間線性增加。

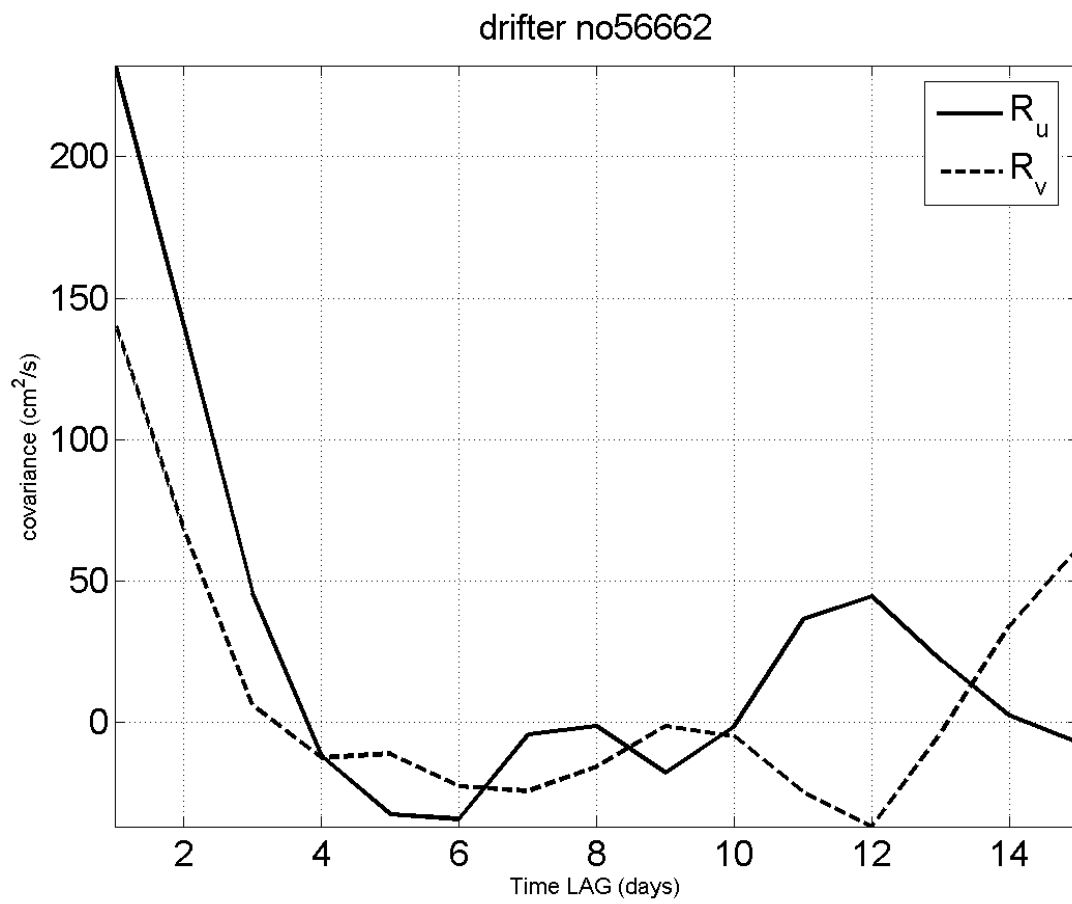


圖 3-1. No. 56662 浮標的自相關函數

四、平均環流、速度變化量和擴散率

4.1 Eulerian 統計

4.1.1 平均環流

在假設南海北部的表層流速統計結果是穩定的狀態下，計算其 Eulerian 統計方法結果。整個南海表層環流的平均流速向量圖為圖 4-1，並以框線表示東沙海流與越南海流的研究範圍，BOX 1 為東沙海流的分析區域，BOX 2 為越南海流的分析區域。如果只畫出浮標流速快過 40 cm/s(圖 4-2)、60 cm/s(圖 4-3)、80 cm/s(圖 4-4)和 100 cm/s(圖 4-5)等流速門檻值的浮標軌跡，那麼流速較快的海流結構便清晰可見，例如南海的主要環流。當流速門檻值設為 80 cm/s(圖 4-4)時，快速通過呂宋海峽的海流、東沙海流與其延伸的越南海流就明顯易見；當流速門檻值設為 60 cm/s(圖 4-3)時，連帶凸顯出在中國大陸南方沿海一帶向東北的沿岸流以及菲律賓西側向北的沿岸流。由於南海海域的浮標資料量以秋冬季為大宗，所以就整個南海的表層平均流速向量圖(圖 4-1)而言，雖然顯示和量化了表層環流的主要特徵，但也是以秋冬季的影響力為主，證實了前面學者研究水文資料、數值模式、流速計和浮標的大部分結果。

南海平均環流主要受季節性季風變化的影響，冬季時(12 月到 2 月)南海主要的環流(圖 4-6)為黑潮入侵南海的支流通過呂宋海峽後與菲律賓西側向北流的海水結合，沿著南海北部邊界的大陸棚邊界成為向西南流的東

沙海流，此海流平均流速都超過了 20 cm/s，到了東沙環礁的西側也就是海南島的東南方海域海流逐漸加速，此時的平均流流向順著越南東南方大陸棚的邊界朝向了西南方，平均流速也超過了 40 cm/s，到了南海的西部邊界也就是在越南東岸外海轉而成為向南強勁的越南海流，平均流速甚至超過了 100 cm/s，最終在南海形成一個大型的逆時針環流。夏季時(6 月到 8 月)(圖 4-7)南海受西南季風盛行影響，黑潮入侵南海的流速流量亦減弱，在中國大陸南方沿海、台灣西南海域和菲律賓西北方海域都出現有平均流速大於 20 cm/s 到 40 cm/s 以上的東北向海流，而在東沙環礁的東西兩側，其平均流速僅在 20 cm/s 以下，夏季南海北部的表面平均流大多是朝向東北方流去。相較之下，冬季東北季風對平均流速的影響力是遠大於夏季西南季風的。本研究定量並特徵化平均表面環流的軌跡，改善了以往研究中較少完整海流實測資料的問題，提供了長周期大範圍的時空變化的統計，東沙海流從呂宋海峽沿著南海北部海域的北部邊界，向西遠達 1000 km 外的南海北部海域的西部邊界，海流延伸成為沿著越南東岸海岸線的越南海流。

4.1.2 速度變化量

速度變化量能表示小尺度的渦漩、風驅流和表面環流季節性的變化，平均流向量與主要軸的速度變化量橢圓方向通常是與海岸線或是等深線平

行(Poulain, 2001)。圖 4-8 為南海北部的平均流向量與速度變化量 (Velocity variance ellipses) 橢圓圖，在沿岸或海流流速較大處，如越南外海，其主要軸的速度變化量通常也越趨向於極端的大，速度變化量橢圓細長，主要軸的速度變化量可以達到 $1600 \text{ cm}^2/\text{s}^2$ 。在南海中央或海流流速較弱處，主要軸變化量與次要軸變化量相近，速度變化量橢圓也較小較圓。

4.1.3 平均流動能(MKE)、渦動動能(EKE)

利用 Eulerian 法計算所獲得的平均流動能(圖 4-9)如同預期的一樣，平均流動能(MKE)的最大值會出現在沿海地區，尤其是平均流速較大之處，在越南海流一帶，其最大的平均流動能超過 $5000 \text{ cm}^2/\text{s}^2$ ，而其最小值(低於 $500 \text{ cm}^2/\text{s}^2$)大多分布在北南海中央一帶，此區域是平均流動能較小之處。圖 4-9 為平均流向量與平均流動能圖，顯示出平均流向量與平均流動能的關係，平均流動能如同平均流向量呈現出如逆時針的環流的一樣，在南海北部海域亦有較高值的平均流動能帶狀分佈，因此當平均流速越大時，其平均流動能的值亦越高。

圖 4-10 代表流場紊流強度的渦動動能(EKE)，其較大值分佈在呂宋海峽與越南海流，超過 $2000 \text{ cm}^2/\text{s}^2$ ，但是與該海域之平均流動能相比則顯得微弱。圖 4-10 速度變化量橢圓與渦動動能圖，顯示出速度變化量橢圓如同

渦動動能一樣，其較大值亦分佈在呂宋海峽與越南海流，因此當速度變化量橢圓越大時，其渦動動能的值亦越高。為了能夠更明顯地比較出渦動動能與平均流動能在南海北部的影響力，本研究利用 EKE/MKE 的比值(圖 4-11)以凸顯出渦動動能在南海北部的比重，尤其是在呂宋海峽東南方延伸至南海北部中央一帶有趨近於 1 的帶狀分佈，而此區域亦是渦動動能影響力較大的區域，顯示由東北向西南的渦動動能影響較為強勢，大陸學者 Su(2004)認為是由於入侵南海的黑潮支流增大了東沙海流的渦動強度所致。而自東沙環礁開始以西，經海南島東南方海域到越南東岸外海海域，為一股平均流速較大的沿海區域，此沿海地帶的 EKE/MKE 比值大多在 0.5 以下，顯示其平均流動能為其主要的影響，尤其是越南海流 EKE/MKE 的比值更是趨近到 0.2 以下。

4.2 Lagrangian 統計

4.2.1 時間尺度與空間尺度

Lagrangian 統計的浮標流速經過消除平均流速後，其分析結果呈現在表 4-1、表 4-2 和表 4-3，分別為南海北部、東沙海流與越南海流的 Lagrangian 統計摘要，取浮標的漂流時間有大於 20 天的軌跡來作分析，分別計算各區域全部資料和四季的平均流速、r. m. s. 流速、時間尺度、空間尺度、渦動動能、平均流動能和擴散率。

在南海北部海域(表 4-1)，其南北方向的時間尺度約為 2.56 天，東西方向為 1.84 天。南北方向與東西方向的空間尺度各為 64.43 公里與 36.86 公里，東西向的統計則約為南北向值的一半，顯示此區域的時間尺度與空間尺度有很高的不等向性(anisotropic)。其趨勢相反於 Centurioini et al.(2004)在呂宋海峽以東的西太平洋海域所計算的統計值，在西太平洋海域的時間尺度在南北方向為 1.6 天，東西方向為 3.2 天，南北方向與東西方向的空間尺度各為 55 公里和 60 公里，對照圖 4-11 Eulerian 法的 EKE/MKE 比值圖後推測是南海北部海域的紊流作用(渦動動能)大於西太平洋所致，此點與 Salas(2001)以 Lagrangian 法對地中海向東流的阿爾及利亞海流部分流域的統計結果是相似的，也就是在浮標軌跡一直打轉(loop)的區域，其渦動動能大於平均流動能，而南北方向的時間尺度與空間尺度亦明顯地大於東西方向。在東沙海流海域(表 4-2)，其南北方向的時間尺度約為 1.59 天，東西方向為 1.41 天，南北方向與東西方向的空間尺度各為 32.72 公里與 29 公里，雖然東沙海流是由東向西的海流，但是由於此海域與阿爾及利亞海流部分流域有一致的現象，是浮標軌跡不停打轉(loop)的區域，所以其在南北方向的時間尺度與空間尺度皆大於東西方向，此海流的渦動動能值亦大於平均流動能。在越南海流(表 4-3)，其南北方向的時間尺度約為 2.29 天，東西方向為 1.22 天，南北方向與東西方向的空間尺度各為 63.22 公里與 23.36 公里，其南北方向的時間尺度與空間尺度特

別地高於東西方向，表示越南海流的流場在南北方向是非常均勻 (homogeneous) 的，其浮標軌跡也有很好的關聯性，由圖 4-3 南海海域浮標流速大於 60 cm/s 的軌跡圖中可以很清楚的看出南北向的浮標軌跡，而此海流的平均流動能值大於渦動動能，同樣的現象亦類似在阿爾及利亞海流的部分流域統計結果(Salas, 2001)。

4.2.2 擴散率

經由計算絕對擴散率和 Lagrangian 尺度，可以量化質點如何經由紊流速度造成擴散以及質點的記憶有多長。海洋的擴散率在空間上並非呈現一致性或均勻性的，而擴散率與渦動動能有關聯性，即擴散率與速度變化量成線性比例或是與渦動速度的均方根(rms eddy velocity)成線性成長 (Poulain and Niiler, 1989)。圖 4-12 表示個別經由質點擴散直接計算和以自相關函數所求得 10 天時間延遲內的擴散率。就經由質點擴散直接計算法求得的擴散率而言(K_{u1} 、 K_{v1})，顯示出在南北方向的擴散率，在約 1 天後到達最大值 $1.31 \times 10^8 \text{ cm}^2/\text{s}$ ，而東西方向的擴散率則顯得相對的小，在經過 2 天後的擴散率最大值僅達到 $4.52 \times 10^7 \text{ cm}^2/\text{s}$ 以下。在南海北部海域以直接計算法得到的擴散率(表 4-1)在南北方向為 $5.12 \times 10^7 \text{ cm}^2/\text{s}$ 大於東西方向的 $2.22 \times 10^7 \text{ cm}^2/\text{s}$ ，而在南北方向的渦動速度均方根亦大於東西方向的，符合 Poulain and Niiler(1989)擴散率與渦動速度均方根成正相

關，與 Poulain(2007)在中地中海南部所獲得的沿岸方向擴散率 4.3×10^7 cm^2/s 和離岸方向擴散率 1.5×10^7 cm^2/s 趨勢一致。在越南海流，以直接計算法求得的擴散率(表 4-3)在南北方向為 5.56×10^7 cm^2/s ，大於東西方向的 1.37×10^7 cm^2/s ，其南北方向的渦動速度均方根亦大於東西方向的，其擴散率亦與渦動速度均方根成正相關。在東沙海流海域，直接計算法求得的擴散率(表 4-2)在南北方向為 2.07×10^7 cm^2/s ，大於東西方向的 1.79×10^7 cm^2/s ，但是其在南北方向的渦動速度均方根卻是小於東西方向的，進一步比較其四季的擴散率與渦動速度的均方根後，發現其四季擴散率仍然與渦動速度均方根成正相關，可能是東沙海流的渦動動能較大，使得其四季的平均值會有此相異現象。因此在南海北部、東沙海流與越南海流的海域都顯現了南北方向擴散率大於東西方向擴散率的趨勢，推測是由於此區域受東北和西南季風作用明顯之因素(Hwang, 2000；Wu, 2005)。

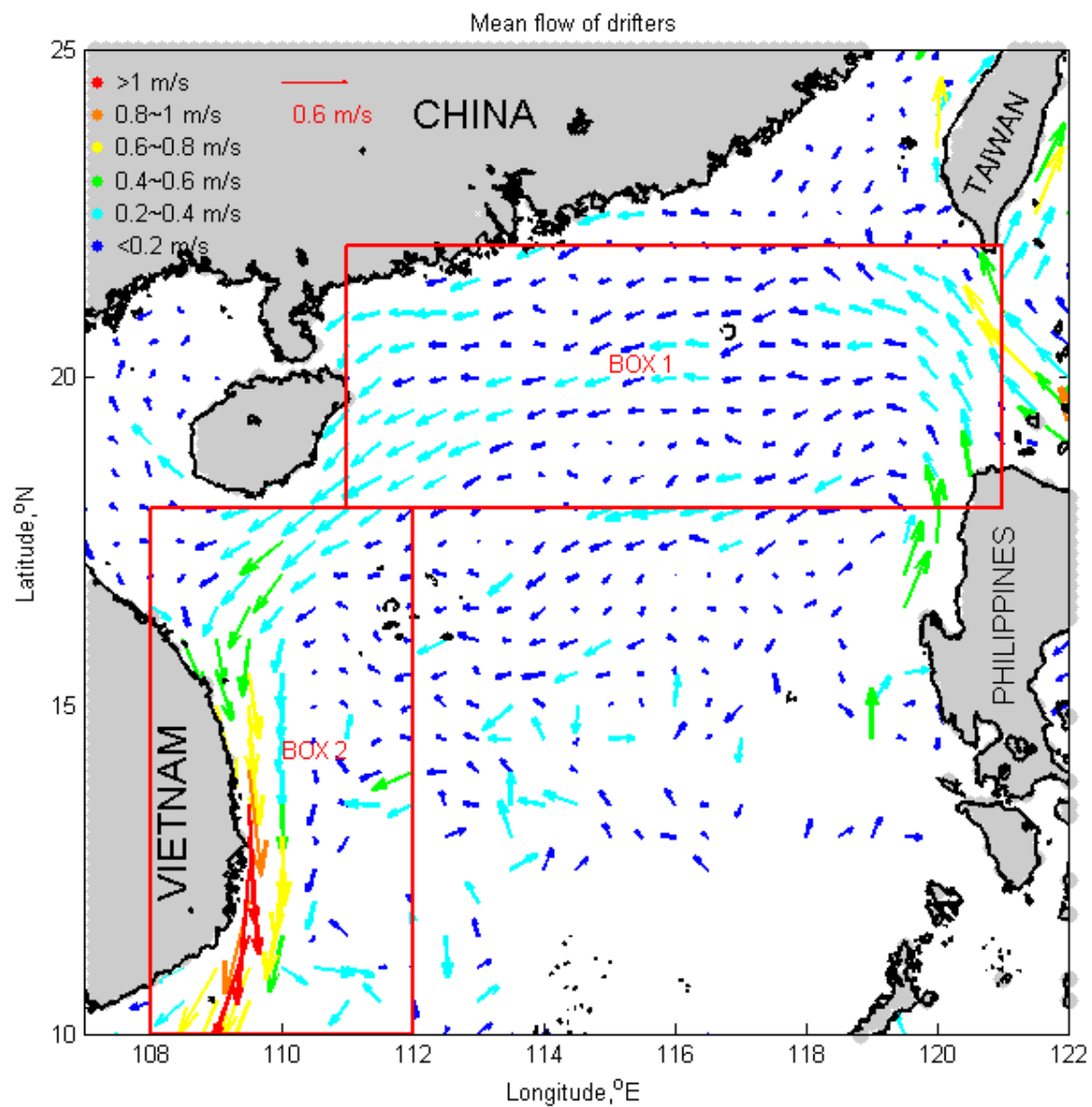


圖 4-1. 水深 15m 平均流速向量圖(1982-2006)，網格點為 $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$ ，框線

BOX 1 和 BOX 2 分別代表東沙海流與越南海流

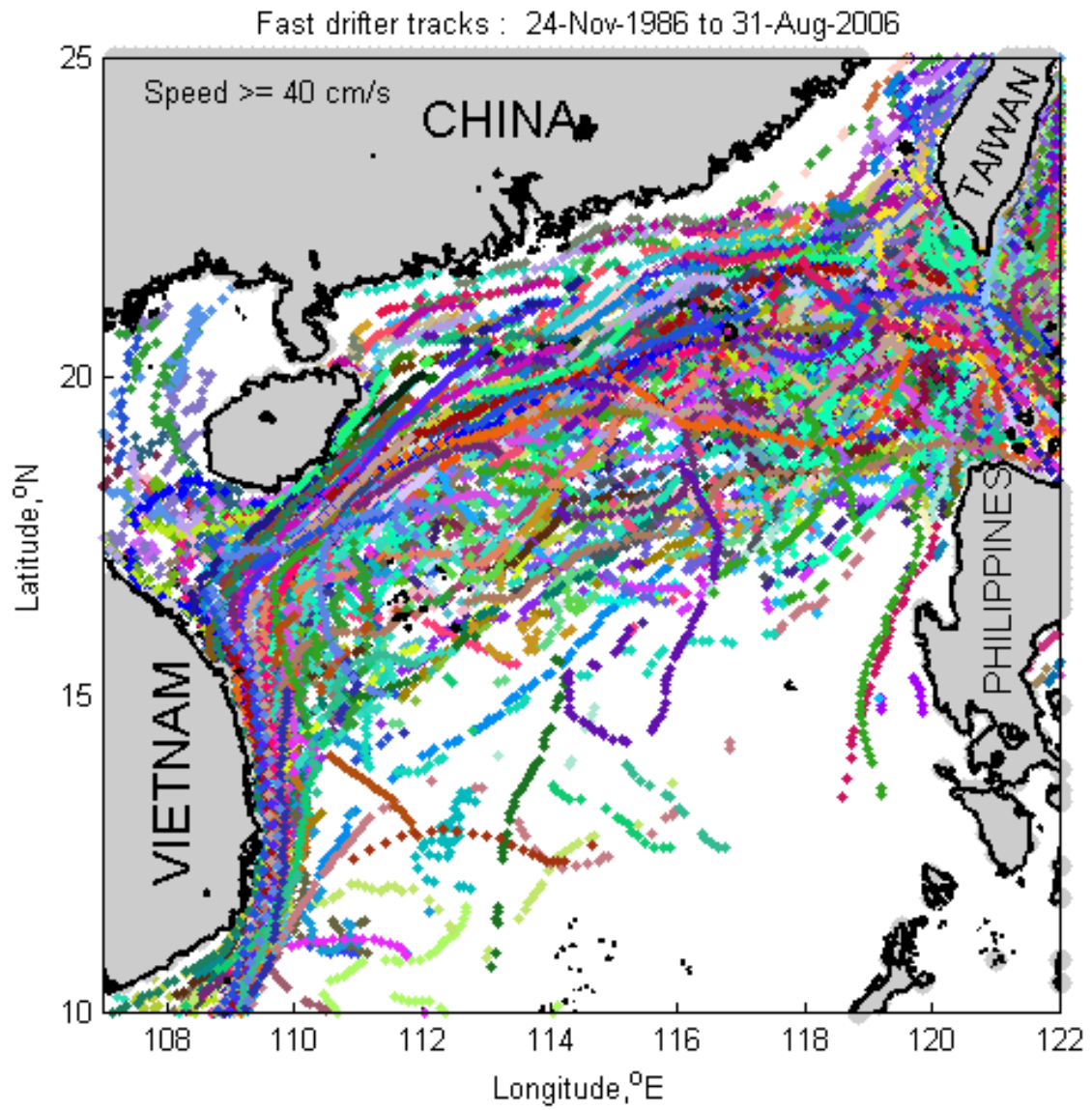


圖 4-2. 南海海域浮標流速大於 40cm/s 的軌跡圖(1982-2006)，顯示主要的逆

時針環流、東沙海流與越南海流

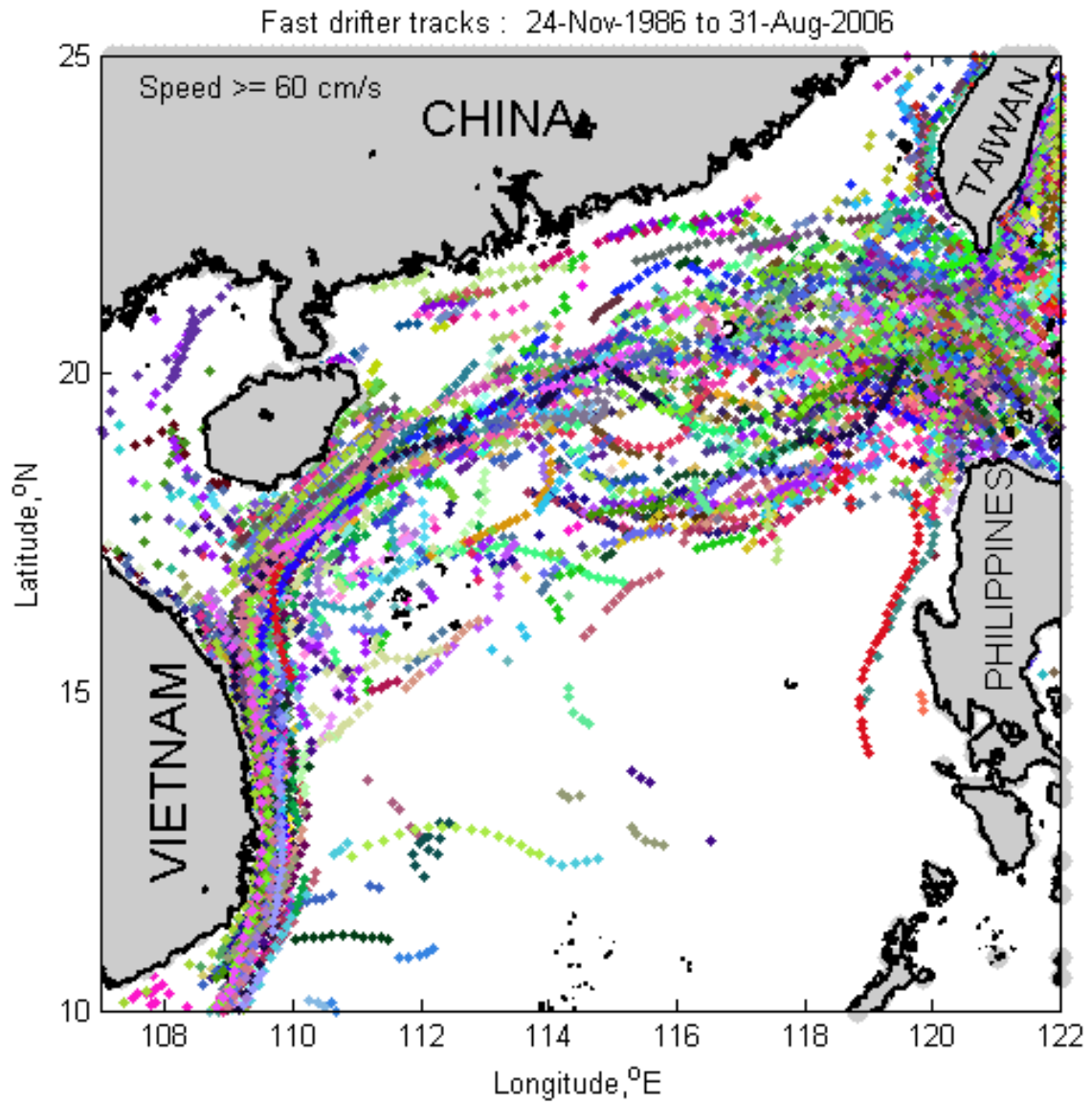


圖 4-3. 南海海域浮標流速大於 60cm/s 的軌跡圖(1982-2006)，顯示主要的逆時

針環流、東沙海流與越南海流

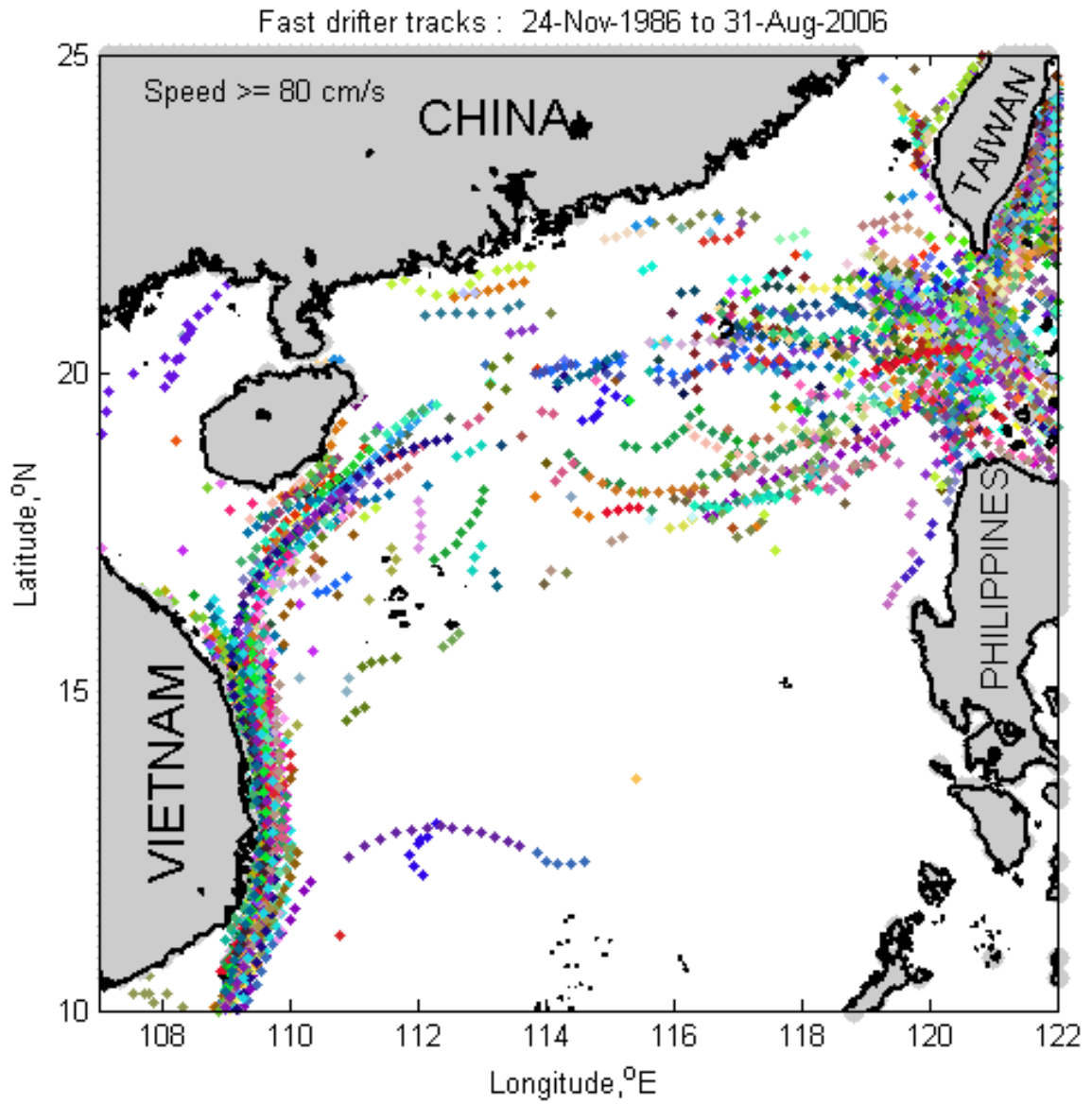


圖 4-4. 南海海域浮標大於 80cm/s 的軌跡圖(1982-2006)，顯示主要的逆時針環

流、東沙海流與越南海流

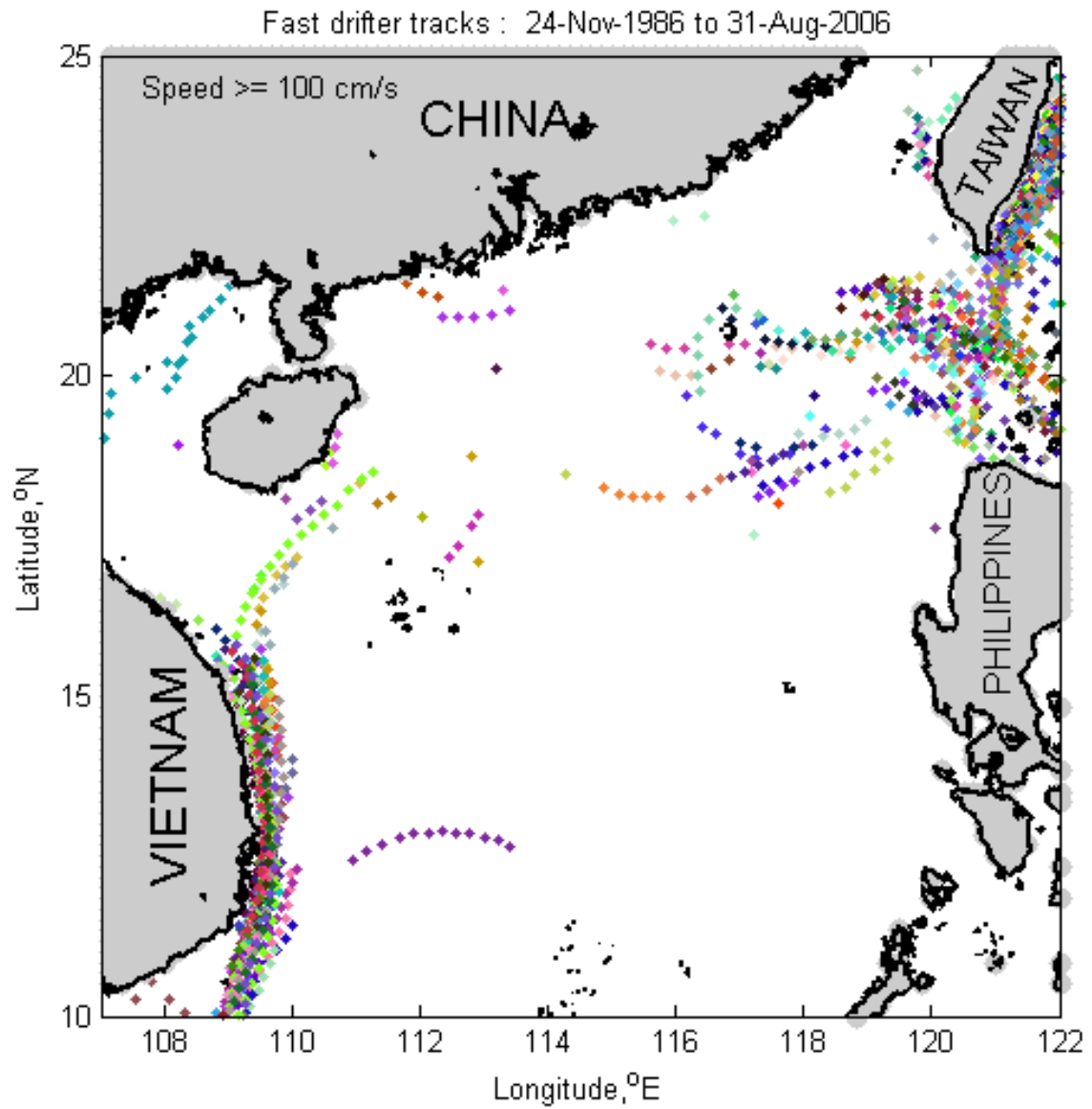


圖 4-5. 南海海域浮標流速大於 100cm/s 的軌跡圖(1982-2006)，顯示朝西流的

東沙海流與向南流的越南海流

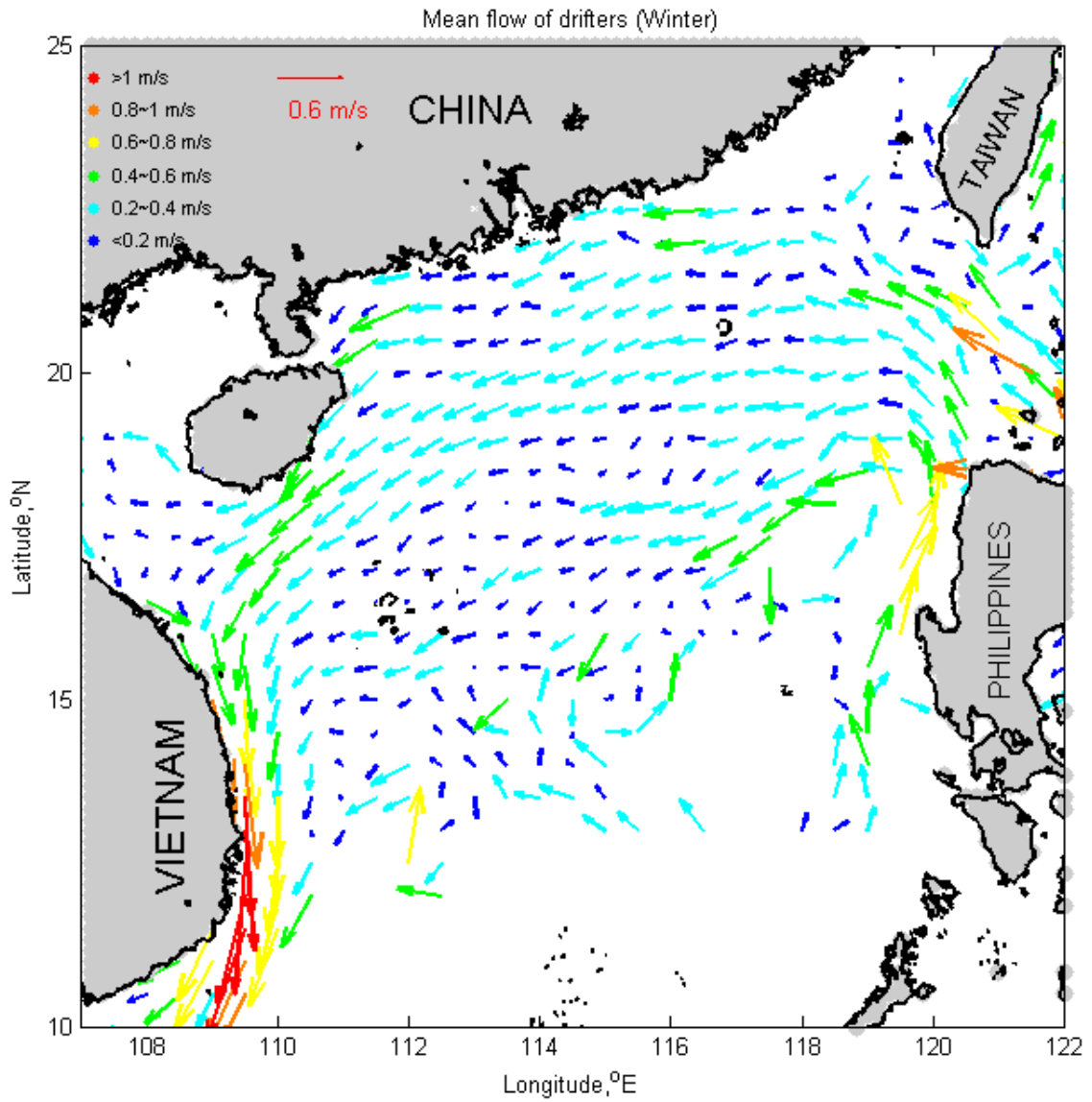


圖 4-6. 冬季水深 15m 平均流速分佈圖(1982-2006)，網格點為 $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$

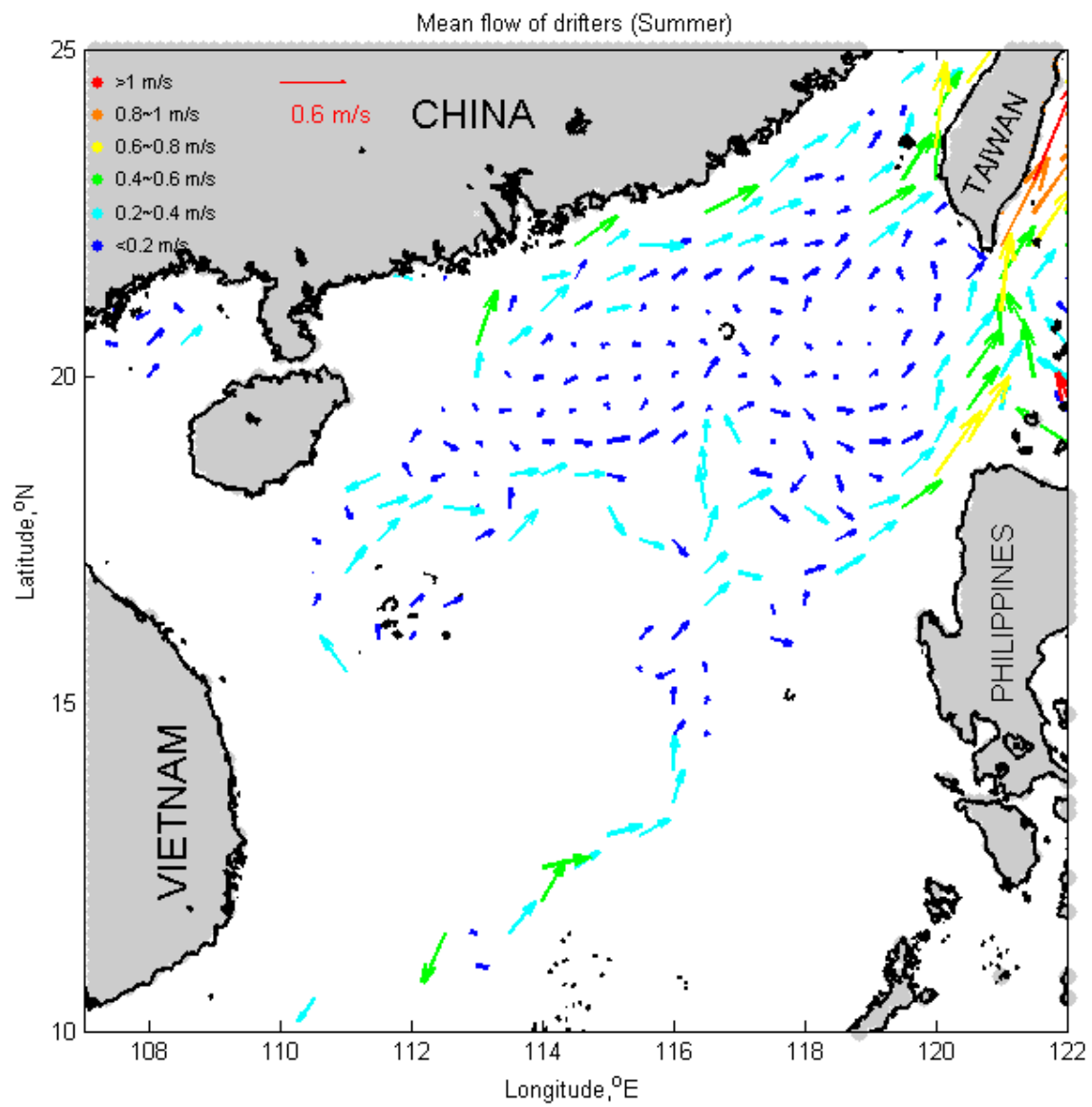


圖 4-7. 夏季水深 15m 平均流速分佈圖(1982-2006)，網格點為 $0.5^{\circ}\times 0.5^{\circ}$

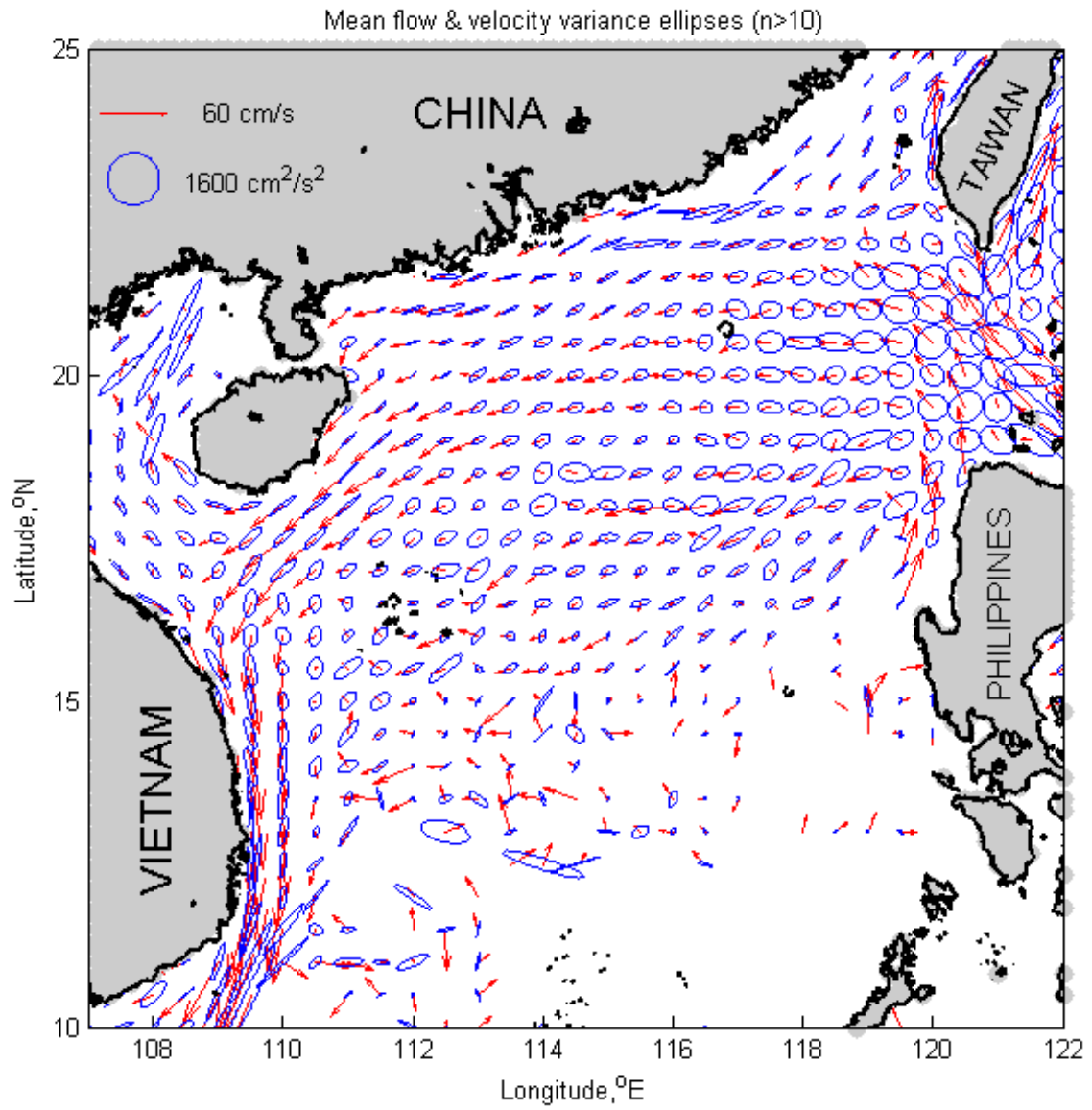


圖 4-8. 水深 15m 平均流向量與速度變化量橢圓圖(1982-2006)，網格點為 0.5°

$\times 0.5^\circ$

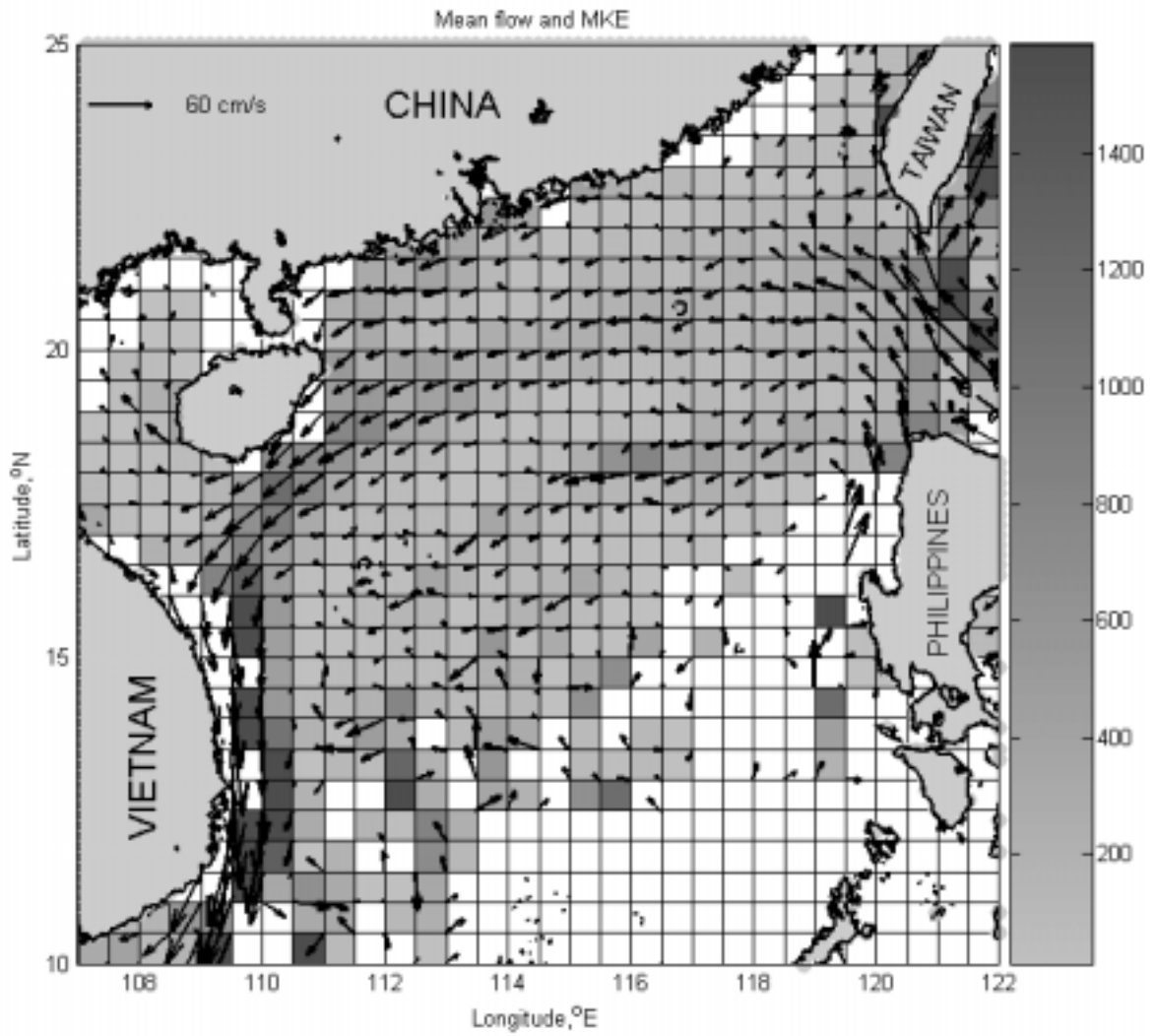


圖 4-9. 水深 15m 平均流向量與平均流動能(Mean flow and MKE)圖(1982-2006) ,

網格點為 $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$

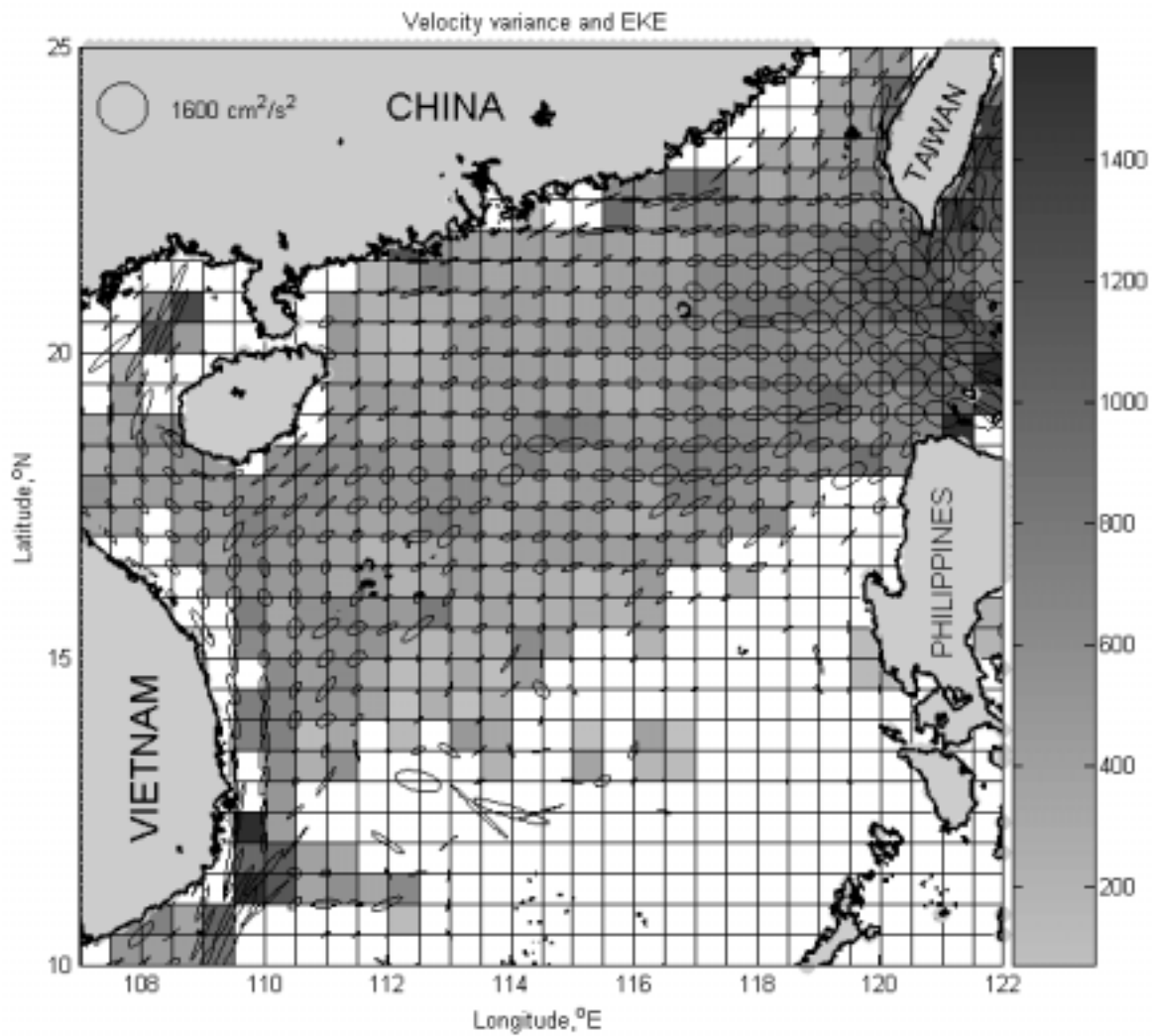


圖 4-10. 水深 15m 速度變化量橢圓與平均渦動動能(Velocity variance and EKE)

圖(1982-2006)，網格點為 $0.5^\circ \times 0.5^\circ$

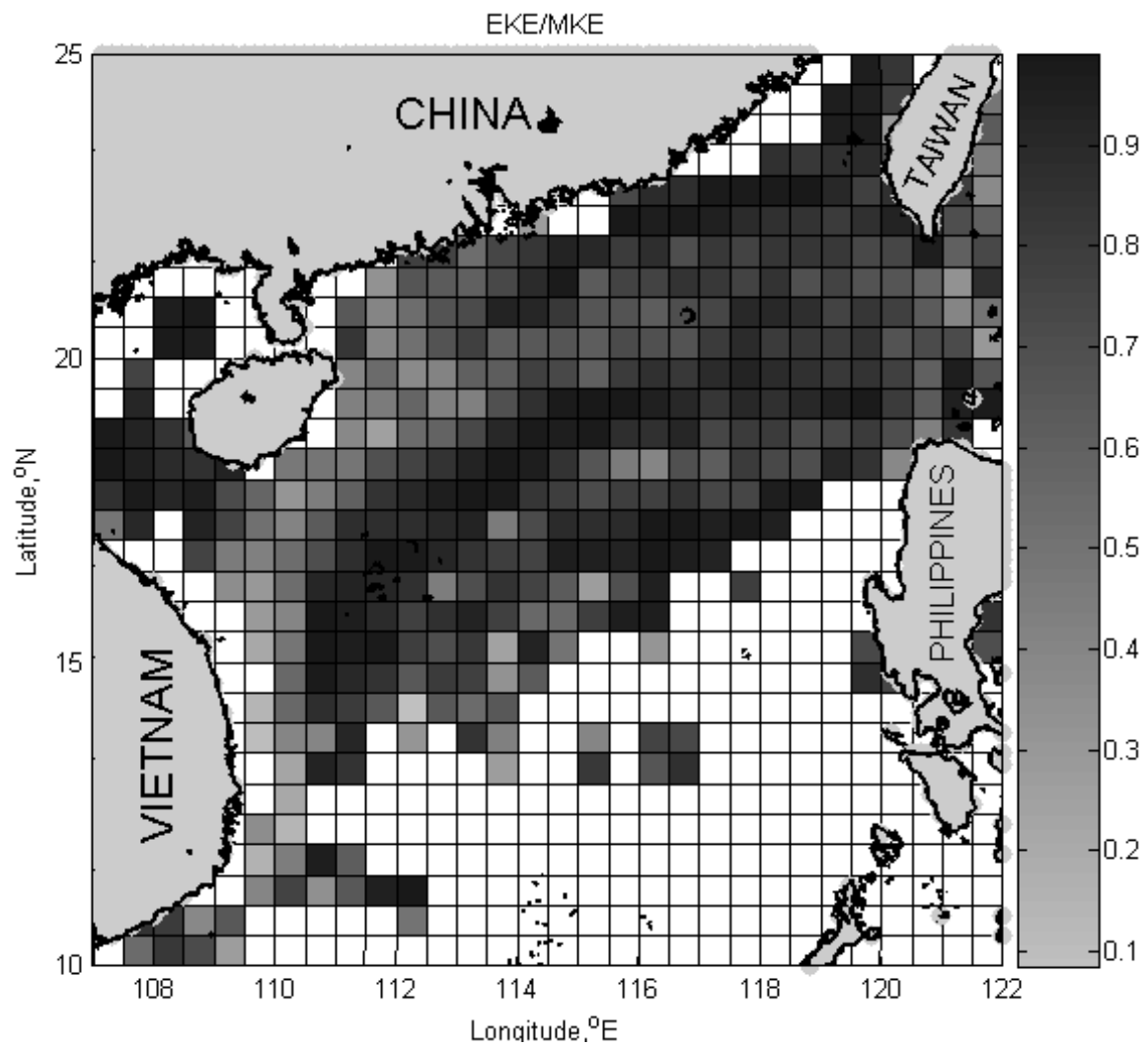


圖 4-11. 水深 15m 平均動能(EKE/MKE)圖(1982-2006)，網格點為 $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$

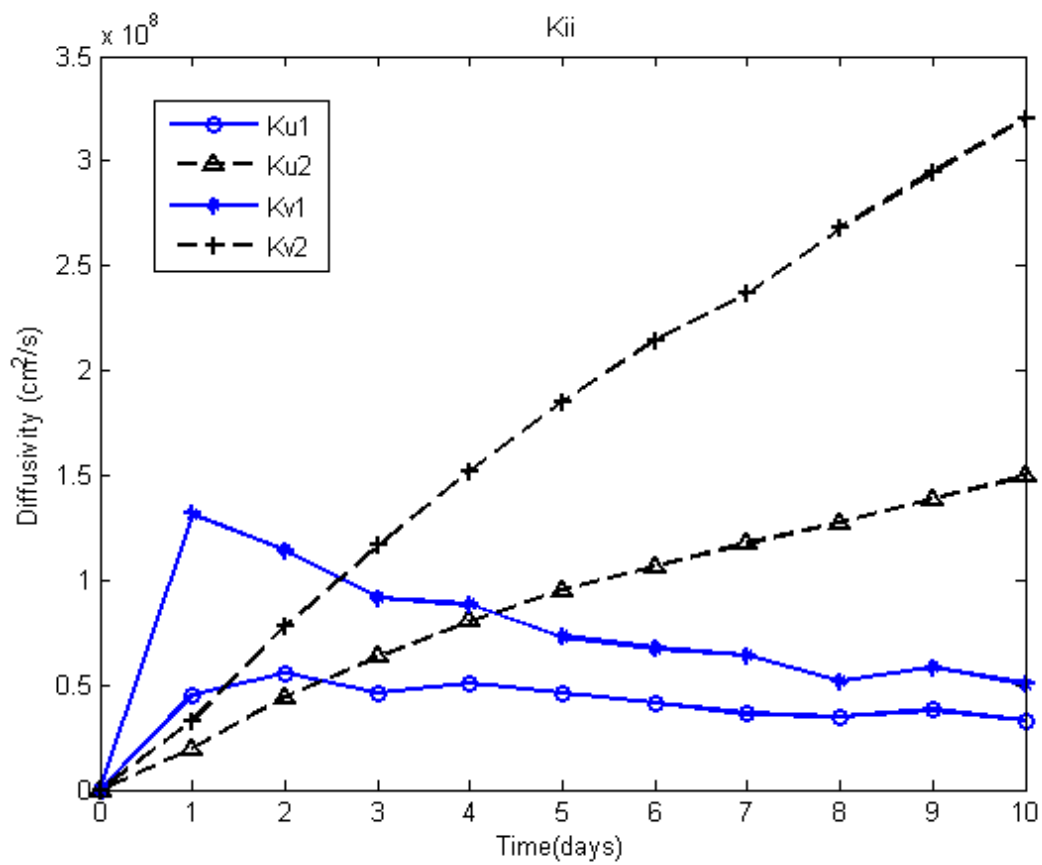


圖 4-12. 以 Lagrangian 統計法計算南海北部海域浮標軌跡資料中流速移除平均

流速後的擴散率(diffusivity)對 10 天的時間延遲圖，K1 是由質點

擴散直接計算的擴散率，K2 是由自相關函數計算的擴散率

表 4-1. 南海北部(NSCS)浮標 Lagrangian 統計摘要,分析區域為北緯 10° 到 22°, 東經 107° 到 121°, 分為四個季節,取漂流時間大於 20 天的浮標軌跡來作分析, T 是 Lagrangian 的時間尺度, L 是 Lagrangian 的空間尺度, 下標 u 是東西方向, 下標 v 是南北方向, <>是平均, rms 是剩餘速度方均根, K1 是由自相關函數計算的擴散率, K2 是由質點擴散直接計算的擴散率

	歷年	秋	冬	春	夏
<U> cm/s	-13.49	-18.94	-17.52	-3.85	3.36
Urms cm/s	23.87	21.72	23.78	23.5	19.76
<V> cm/s	-5.28	-3.54	-8.63	-3.32	3.6
Vrms cm/s	27.08	25.1	25.98	25.99	18.74
EKE cm ² /s ²	422.28	304.23	459.23	403.36	281.04
MKE cm ² /s ²	231.53	407.23	344.32	294.32	258.18
EKE / MKE	1.82	0.74	1.33	1.37	1.08
Tu days	1.84	1.25	1.8	1.56	1.30
Tv days	2.56	2.14	2.38	1.87	1.08
Lu km	36.86	23.09	36.42	33.86	21.47
Lv km	64.43	46.95	56.74	43.78	16.62
Ku1 cm ² /s	2.22 E+07	1.29 E+07	2.24 E+07	2.21 E+07	1.07 E+07
Ku2 cm ² /s	8.90 E+07	5.16 E+07	8.94 E+07	8.85 E+07	4.28 E+07
Kv1 cm ² /s	5.12 E+07	3.54 E+07	4.31 E+07	3.24 E+07	7.98 E+06
Kv2 cm ² /s	2.05 E+08	1.41 E+08	1.72 E+08	1.30 E+08	3.19 E+07

表 4-2. 東沙海流浮標 Lagrangian 統計摘要，分析區域為北緯 18° 到 22°，東經

111° 到 121°，分為四個季節，取漂流時間大於 20 天的浮標軌跡來作分

析，T 是 Lagrangian 的時間尺度，L 是 Lagrangian 的空間尺度，下標 u

是東西方向，下標 v 是南北方向， $\langle \rangle$ 是平均，rms 是剩餘速度方均根，

K1 是由質點擴散直接計算的擴散率，K2 是由自相關函數計算的擴散率

	歷年	秋	冬	春	夏
$\langle U \rangle$ cm/s	-15.30	-19.53	-19.70	-7.81	2.50
Urms cm/s	23.56	21.34	23.93	24.35	19.72
$\langle V \rangle$ cm/s	-0.93	-1.27	-3.16	5.31	2.88
Vrms cm/s	22.72	22.47	22.73	21.31	18.16
EKE cm^2/s^2	520.69	401.28	520.42	458.36	339.73
MKE cm^2/s^2	230.66	395.76	350.66	271.72	236.62
EKE / MKE	2.25	1.01	1.48	1.68	1.43
Tu days	1.41	1.11	1.39	0.71	1.08
Tv days	1.59	1.84	1.52	0.62	0.86
Lu km	29	21.14	29.52	15.35	18.22
Lv km	32.72	35.99	29.78	10.83	13
Ku1 cm^2/s	1.79 E+07	1.94 E+07	1.93 E+07	9.78 E+06	9.13 E+06
Ku2 cm^2/s	7.17 E+07	4.78 E+07	7.71 E+07	3.91 E+07	3.65 E+07
Kv1 cm^2/s	2.07 E+07	2.16 E+07	1.81 E+07	5.76 E+06	6.27 E+06
Kv2 cm^2/s	8.28 E+07	8.65 E+07	7.23 E+07	2.30 E+07	2.51 E+07

表 4-3. 越南海流浮標 Lagrangian 統計摘要，分析區域為北緯 10° 到 18°，東經

108° 到 112°，分為四個季節，取漂流時間大於 20 天的浮標軌跡來作分析，

T 是 Lagrangian 的時間尺度，L 是 Lagrangian 的空間尺度，下標 u 是東

西方向，下標 v 是南北方向，<> 是平均，rms 是剩餘速度方均根，K1 是由

質點擴散直接計算的擴散率，K2 是由自相關函數計算的擴散率

	歷年	秋	冬	春	夏
<U> cm/s	-2.69	-4.52	-9.34	-0.5	Nan
Urms cm/s	22.16	24.27	20.17	23.32	Nan
<V> cm/s	-15.11	-12.02	-20.69	-7.57	Nan
Vrms cm/s	30.12	40.82	29.34	30.08	Nan
EKE cm ² /s ²	545.47	320.11	476.85	565.17	Nan
MKE cm ² /s ²	847.41	1094.1	877.58	467.37	Nan
EKE / MKE	0.64	0.29	0.54	1.20	Nan
Tu days	1.22	1.91	1.14	1.3	Nan
Tv days	2.29	1.76	2.24	2.02	Nan
Lu km	23.36	38.47	20.49	28.1	Nan
Lv km	63.22	59.69	61.34	55.99	Nan
Ku1 cm ² /s	1.37 E+07	2.34 E+07	1.12 E+07	1.86 E+07	Nan
Ku2 cm ² /s	5.50 E+07	9.36 E+07	4.48 E+07	7.46 E+07	Nan
Kv1 cm ² /s	5.56 E+07	8.47 E+07	5.29 E+07	4.76 E+07	Nan
Kv2 cm ² /s	2.22 E+07	3.39 E+07	2.11 E+07	1.90 E+07	Nan

五、季節性與空間性的變化

5.1 南海北部海域的 Eulerian 統計

圖 5-1 顯示南海北部浮標軌跡的四季分佈情形，整個南海北部的浮標覆蓋率除了在夏季比較稀疏外，覆蓋率在秋冬春三季都是不錯的。1982 年到 2006 年南海北部的水深 15m 平均流速向量圖可以顯示出了南海北部四季個別平均的表層環流(圖 4-6、圖 4-7、圖 5-2 和圖 5-3)，並將其主要的季節性特徵予以量化。本研究將四季區分為 12、1、2 月為冬季，3、4、5 月為春季，6、7、8 月為夏季，9、10、11 月為秋季。顯示黑潮水是整年經由呂宋海峽入侵南海的，而除夏季外，在強勁東北季風與黑潮水西進的作用下，自呂宋海峽開始也有一股持續向西南的東沙海流，一直連貫到越南外海成為向南的強勁海流。夏季受西南季風影響，表層海水大多朝向東北方流去。東沙海流(圖 2-6)，由浮標資料取得其流向為由東北向西南流，平均流速為 0.33 m/s，秋季平均流速為 0.34 m/s，冬季增為 0.35 m/s，春季平均流速為 0.32 m/s，到了夏季，表面流場轉而由西南向東北方流去，平均流速減為 0.25 m/s，符合 Su(2005)對東沙海流的研究。越南海流其平均流速為 0.59 m/s，冬季平均流速為 0.64 m/s，夏季由於缺乏浮標流經此處的資料，不予估算。

圖 5-4 是南海四季流場紊流強度的渦動動能，其最大值大多在呂宋海峽與越南海流一帶，尤其是在秋冬春三季，冬季則明顯地自呂宋海峽起向

西南延伸呈現帶狀分布的高渦動動能，與歷年浮標資料 EKE/MKE 的比值(圖 4-11)趨勢一致，而夏季的渦動動能則顯得微弱。爲了明顯的表示出此區域季節性變化的不同，本文比較了此區域在冬季和夏季兩個極端季節的平均流向量與平均流動能圖、速度變化量橢圓與渦動動能圖和 EKE/MKE 的比值，顯示在冬季時的平均流動能(圖 5-5)隨著平均流向量自呂宋海峽開始有向西南方增加的趨勢，到了越南海流更出現有最大高於 $5000 \text{ cm}^2/\text{s}^2$ 的平均流動能，推測是受東北季風的影響所致，並且由冬季 EKE/MKE 的比值(圖 5-7)顯示出自東沙環礁以西到越南東岸外海有小於 0.5 的分布，表示出東沙海流在東沙環礁以西是平均流動能較大的，而在東沙環礁以東的渦動動能影響大，再比較冬季時速度變化量橢圓與渦動動能(圖 5-6)以及 EKE/MKE 比值(圖 5-7)的較高值分佈在呂宋海峽一帶，向西延伸到南海北部海域中央，證實了入侵南海的黑潮支流增大了東沙海流的渦動強度。夏季時平均流動能(圖 5-8)的較大值只有出現在呂宋海峽以東，而在中國大陸南部沿海一帶有部分較大值隨著向東北的平均流向量出現，但是其平均流動能都在 $1000 \text{ cm}^2/\text{s}^2$ 以下，經由比較 EKE/MKE 比值(圖 5-10)亦顯示出在中國大陸南部沿海一帶與菲律賓西北方海域有趨近於 0.1 的比值，表示其平均流動能的影響力較大。夏季時速度變化量橢圓與渦動動能(圖 5-9)受入侵南海的黑潮支流減弱的影響，較大值只有出現在呂宋海峽一帶，其影響力無法延伸到南海北部海域的中央。但是比較夏季 EKE/MKE 的比值(圖 5-10)

後，發現自台灣西南海域起，在呂宋海峽向西延伸到東沙環礁以西一帶，EKE/MKE 的比值仍有趨近於 1 的趨勢，顯示其渦動動能影響力仍屬不低，可能是受到南海環流和部分黑潮支流作用的影響。

5.2 越南海流隨離岸距離的變化

越南海流是南海北部海域中最重要的海流之一，除了延續東沙海流的能量外，並沿著越南東岸的海岸線增強其朝南的流速，形成向南的噴射流，構成了南海冬季逆時針大環流的主要部份。為了增加對越南海流的了解，參考 Poulain(2001)研究西亞得里亞海海流(the West Adriatic Current)北部海流的沿岸流速統計方法。在假設越南海流的流場是均勻的狀態下，從越南東岸 11.8°N 到 14°N 之間的海岸線向大洋方向延伸，將浮標流速以離開越南海岸線每 8 km 的距離作一個網格平均，平均成離岸方向每 4 km 為間隔的向南平均速度、r. m. s. 速度和每六小時一筆的觀測資料筆數，以顯示歷年來越南海流冬、春二季個別的空間分佈統計資料，因為夏、秋二季缺乏浮標資料，故未予以分析，其結果表示在圖 5-11 中，顯示出越南海流季節性的強度與結構變化。越南海流的寬度在 80 到 120 公里間變化，其平均的核心速度在 60-150cm/s 之間。冬季時最大的向南海流速度在離岸約 38 公里處達到 130cm/s 以上，此時的越南海流的 r. m. s. 速度變動量穩定，顯示冬季的越南海流的向南流速是持續且穩定的。春季時的向南海流速度

較弱，但是最大流速也有 100cm/s 以上，並集中在離岸距離較近約在 18km 處，但是由於春季正值季節性季風轉換時期，所以其 r. m. s. 速度變動量較大，夏、秋季則缺乏浮標資料。

5.3 Lagrangian 特性的時空分佈

為了從 Lagrangian 統計中了解其潛在的季節訊息，將歷年的浮標資料分類成四季，並且計算南海北部海域、東沙海流與越南海流個別季節的統計資料，並在計算 Lagrangian 統計前將浮標流速資料減去各季節的平均流速，其統計結果歸納在表 4-1、表 4-2 和表 4-3。

在夏季時紊流作用明顯微弱而且更具等向性，而到了冬季紊流作用就有如預期的一樣在南海北部海域是強烈且較極端。以 Lagrangian 統計表中四季 EKE/MKE 的比值來做比較時，就南海北部海域而言，代表紊流作用的渦動動能在冬季時有大於 1 的比值，但是卻是在春季時比值到達巔峰，夏季時比值小於冬季，爾後逐漸下降到秋季時比值小於 1 到達最弱，而平均流動能正好相反，在四季 EKE/MKE 的比值中秋季時小於 1 達到巔峰，爾後也是逐漸下降到春季比值大於 1 達到最弱。

經由起始點為時間零的南海北部、東沙海流與越南海流的單質點吐煙圖(圖 5-12、圖 5-13 和圖 5-14)，在假設流場是均勻的紊流場下顯示各區域流場中質點和擴散與對流情形，左半部為東西方向分量，右半部為南北

方向分量，由上至下季節依序為秋季、冬季、春季和夏季。圖 5-12 顯示南海北部海域在秋冬兩季由東向西擴散趨勢明顯，其南北方向分量先向北後向南，這也是南海北部冬季是一個逆時針大環流的現象，而春、夏季缺乏東北季風強勁的吹拂和黑潮水入侵南海的減少，所以其東西和南北方向分量皆多呈現東西和南北方向震盪，而此時浮標的平均流速也相對較弱。

5.4 東沙海流的空間分佈統計

為了探討東沙海流在局部區域上 Lagrangian 時間尺度與空間尺度所顯現的強烈變化，參考 Salas(2001)研究中對阿爾及利亞海流的空間分佈分析方法，假設東沙海流是一致性與穩定的海流，運用先前 Lagrangian 統計東沙海流的方法來分析其東沙海流個別的區塊，將東沙海流流域劃分為十個 $2^{\circ} \times 2^{\circ}$ 方塊，其地理相對位置表示在圖 5-15 的方塊，而其統計結果歸納在表 5-1 中，在網格內的浮標日在 1000 日到 7000 日的範圍內。利用圖 5-15 東沙海流 Eulerian 法的平均流向量圖可以明顯的表示出其局部區域(方塊)海流的平均流速和流向等主要特徵。方塊 1 在呂宋海峽的西北側，而黑潮支流主要由呂宋海峽的北側入侵南海(梁文德，2002；Centurioini et al., 2004)，所以其路徑會經過方塊 1，方塊 2 為菲律賓西北側向北沿岸流的路徑，方塊 3 位於東沙環礁的東北面，為延續黑潮向西入侵的路徑。方塊 4 和方塊 6 在東沙環礁的南面海域，平均流速較小，

在 20 cm/s 以下。方塊 5 位於東沙環礁的西北面，其南面有平均流速大於 20 cm/s 的東沙海流經過。方塊 7 和方塊 8 的中間有逐漸轉向西南方且平均流速大於 20 cm/s 的海流。方塊 7 和方塊 8 在海南島的東側，此時的東沙海流流速明顯變強，並且以 20 cm/s 以上的流速向西南方流去。

東沙海流速度變化量橢圓圖(圖 5-16)則印證了東沙海流平均流向量圖(圖 5-15)的趨勢，速度變化量橢圓的主要軸平行於沿岸方向或是東沙海流的流向。藉由分析東沙海流空間分佈的統計特性(表 5-1)，可以觀察到其東西向的時間尺度由呂宋海峽向西逐漸增加，南北向的時間尺度則不停變化。方塊 1 由於其東西和南北向時間尺度與空間尺度的相近，說明了東沙海流在此有很好的等向性(isotropic)，可由圖 5-16 中方塊 1 中的呈現不極端且等向性的速度變化量橢圓獲得證明。東沙海流在方塊 3 到方塊 8 之間，其東西方向的擴散率一直大於南北方向，在圖 5-16 的速度變化量橢圓東西向速度變化量亦大於南北向，同時由東向西方向，其渦動動能也是逐漸變小，顯示離呂宋海峽越近，其渦動動能越大，證明 Su(2004)所述入侵南海的黑潮支流會增強東沙海流的紊流強度(渦動動能)，圖 5-16 以 Eulerian 法所表示的東沙海流速度變化量橢圓亦支持上述論點，其速度變化量明顯地向東越接近呂宋海峽越大。在方塊 7、8、9、10 內的海流呈現向西南方的一致性，代表浮標軌跡間有很好的相關性。同時由東向西方向，其渦動動能也是逐漸變小，顯示離呂宋海峽越近，其渦動動能越大。東沙

海流在 113-121°E 之間的渦動動能均大於平均流動能，顯示此區域的中尺度運動發達。

同時探討東沙海流的擴散率與速度變化量的關係時，以表 5-1 中 Lagrangian 空間尺度、時間尺度和質點直接計算的擴散率分別對速度變化量作圖，以探討其相互間的關係，其結果表示在圖 5-17 中，速度變化量以 2°×2° 的方塊計算，每一點代表一個東沙海流的局部區域，圖 5-17(a)和(b)顯示空間尺度、時間尺度對速度變化量較無明顯的關係，而圖 5-17(c)則顯示出擴散率與速度變化量有近似於正比的正相關存在，符合 Poulain and Niiler(1989)的對擴散率與速度變化量關係的分析。

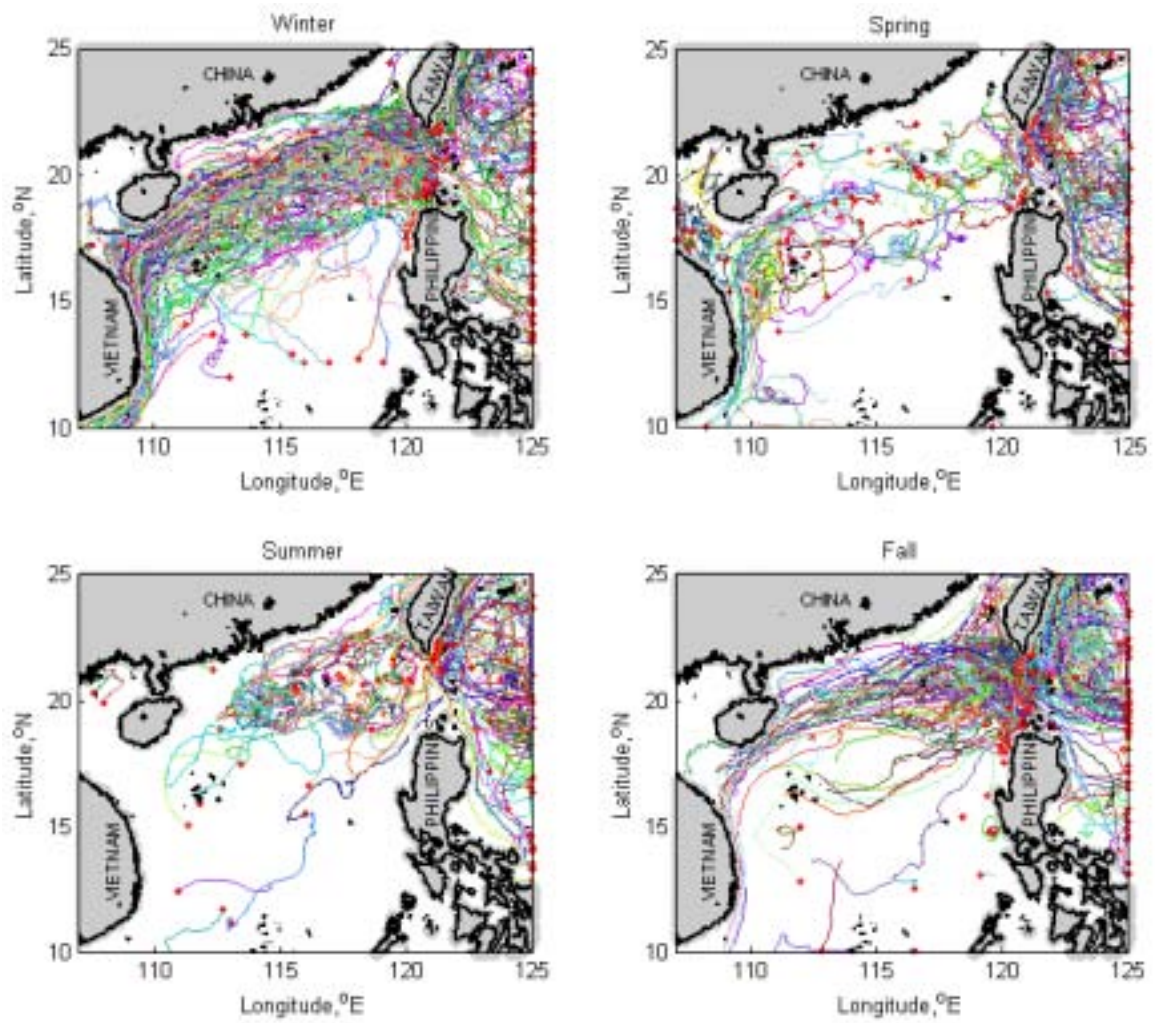


圖 5-1. 南海北部浮標軌跡的四季分佈圖

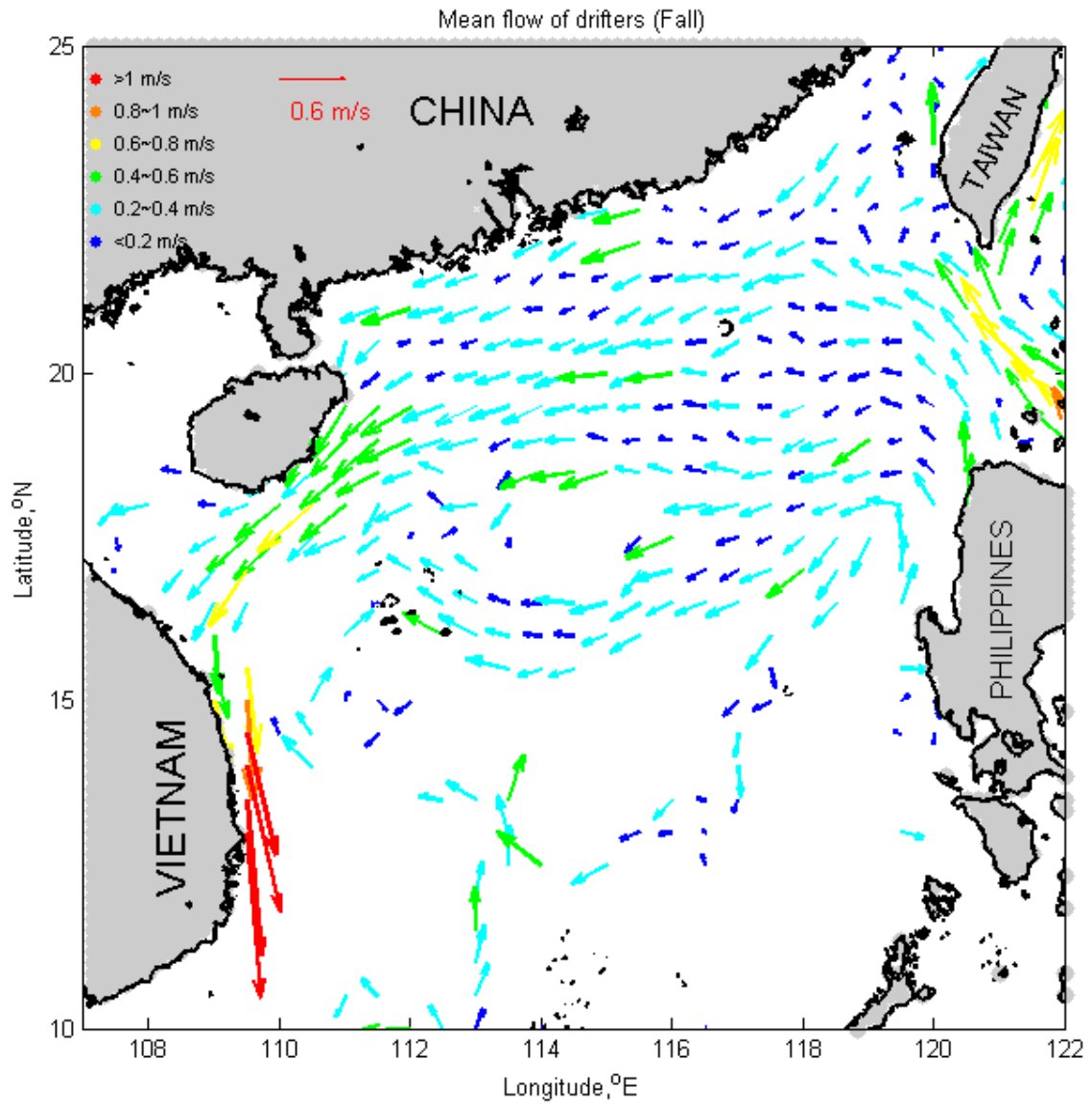


圖 5-2. 秋季水深 15m 平均流速分佈圖(1982-2006)，網格點為 $0.5^{\circ}\times 0.5^{\circ}$

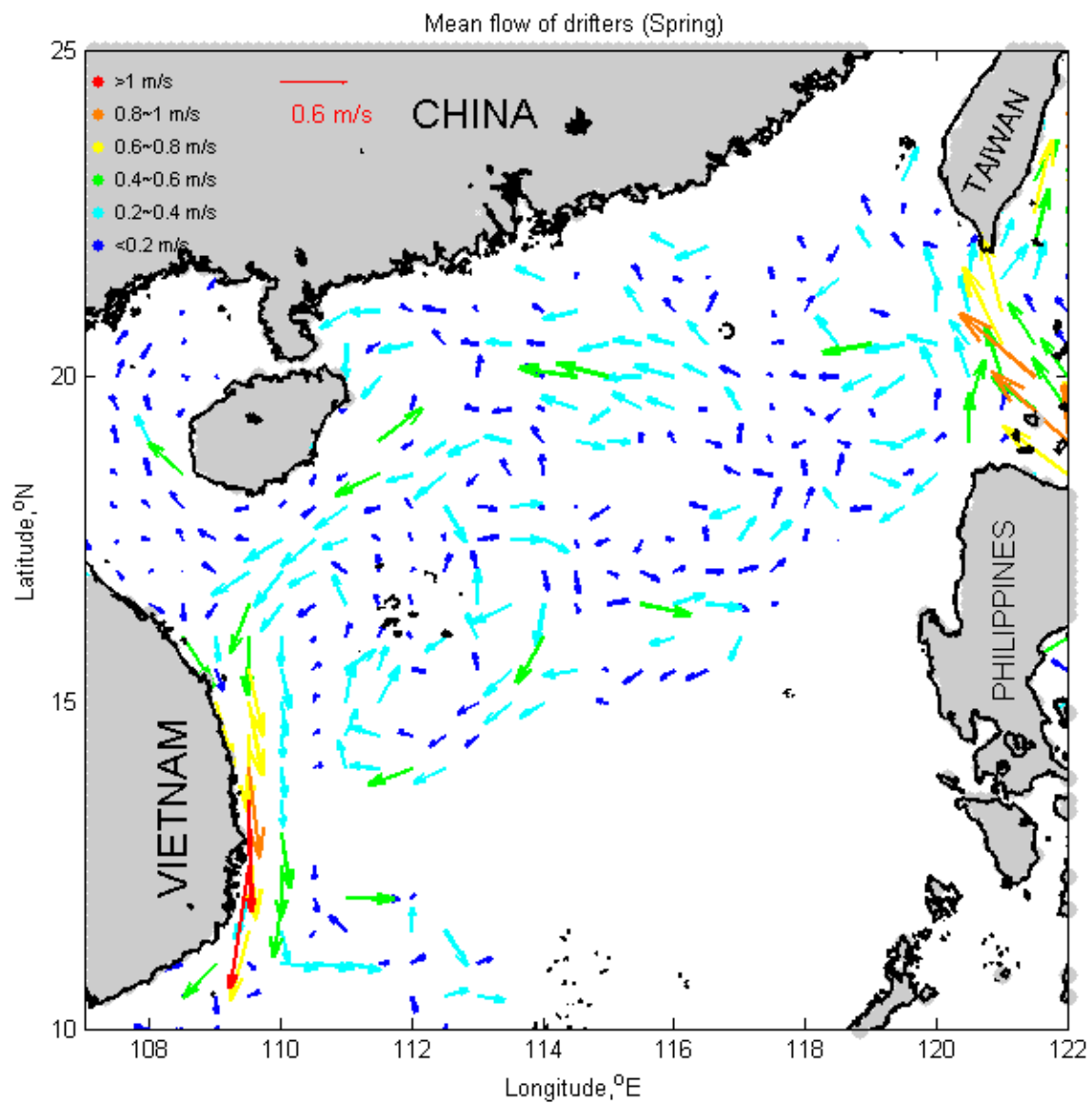


圖 5-3. 春季水深 15m 平均流速分佈圖(1982-2006)，網格點為 $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$

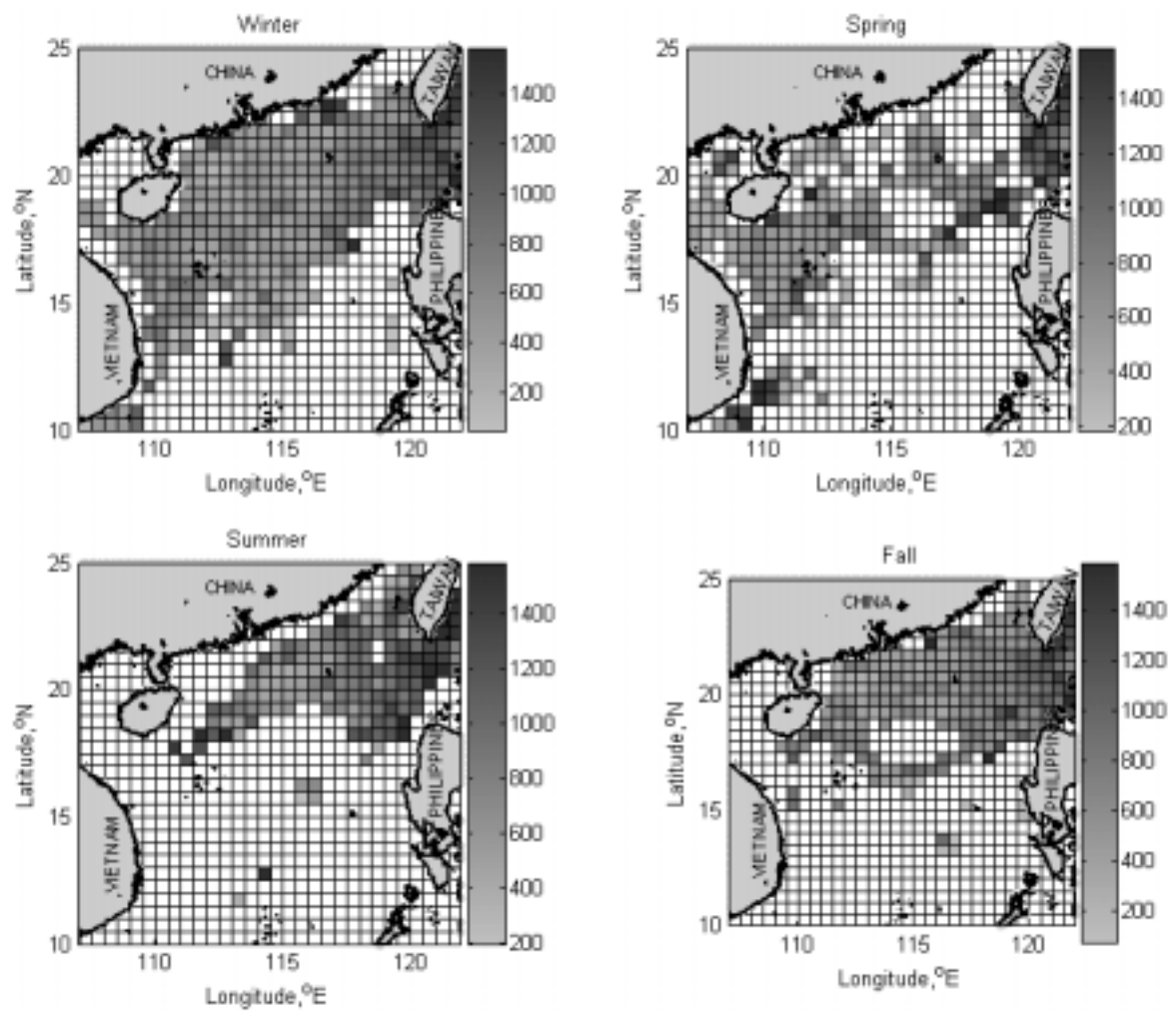


圖 5-4. 水深 15m 四季渦旋動能(Eddy Kinetic Energy)圖(1982-2006)，網格點

為 $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$

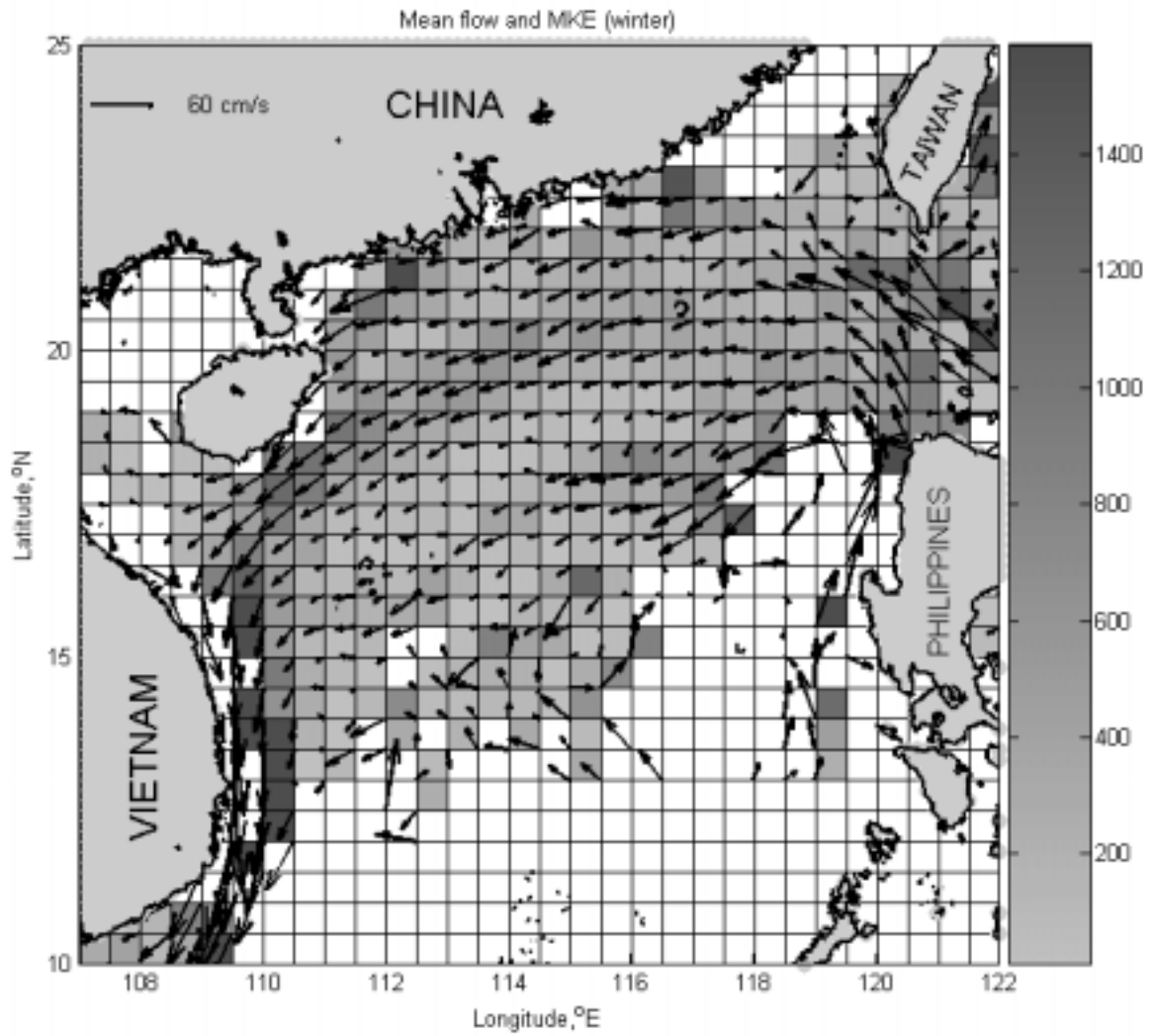


圖 5-5. 冬季水深 15m 平均流向量與平均流動能(Mean flow and MKE)圖

(1982-2006)，網格點為 $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$

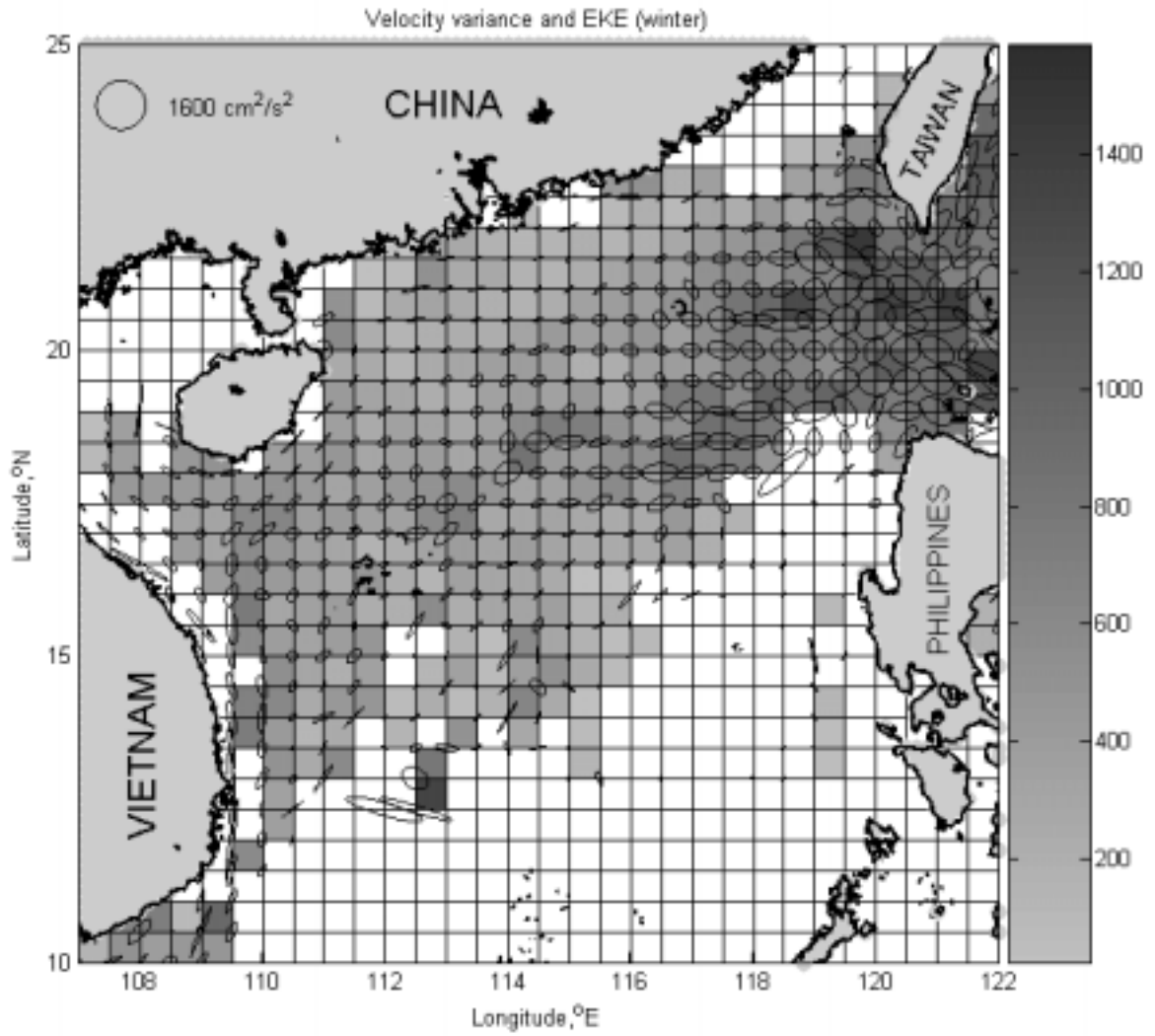


圖 5-6. 冬季水深 15m 速度變化量橢圓與平均渦動動能(Velocity variance and

EKE)圖(1982-2006)，網格點為 $0.5^\circ \times 0.5^\circ$

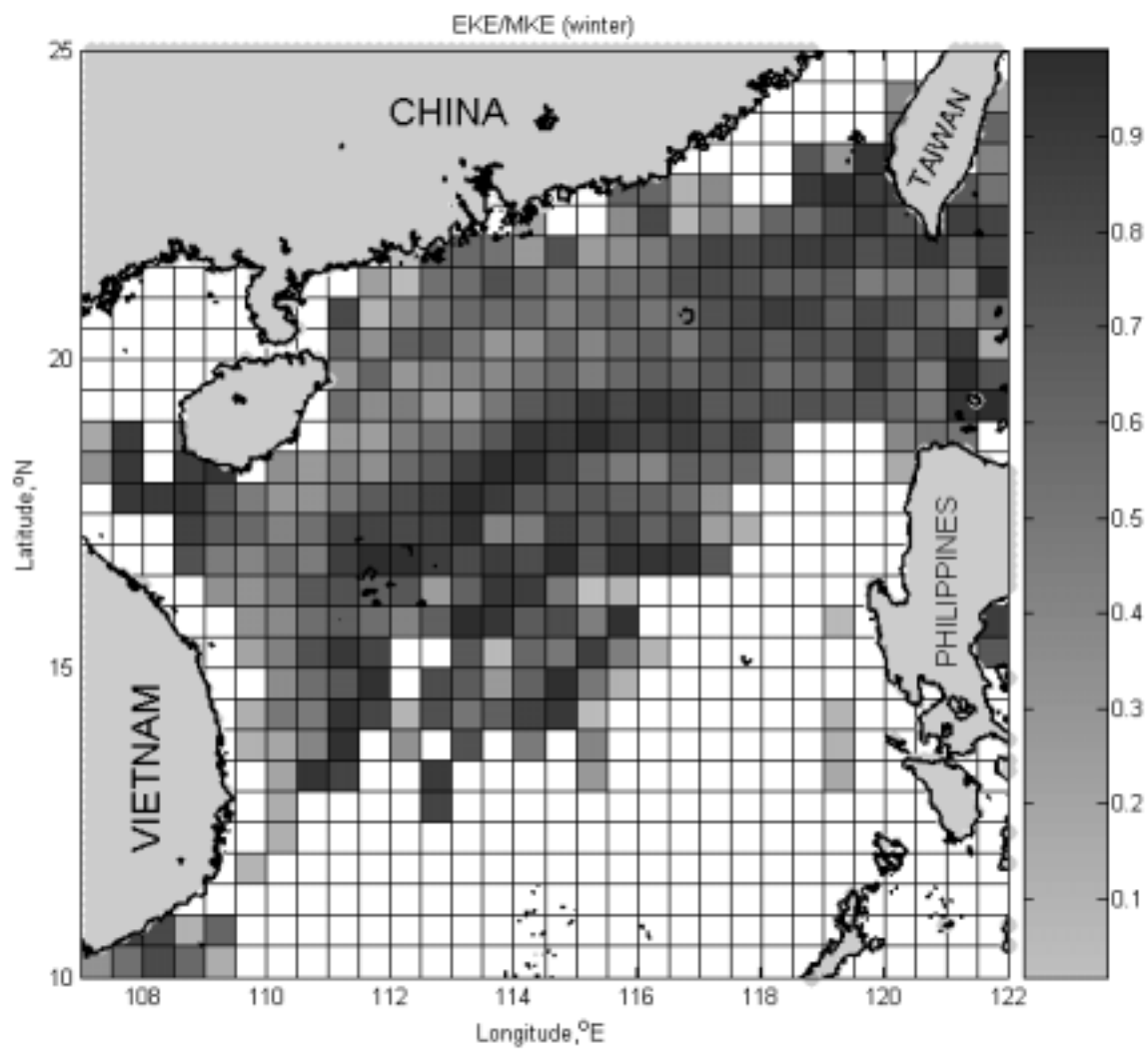


圖 5-7. 冬季水深 15m EKE/MKE 圖(1982-2006)，網格點為 $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$

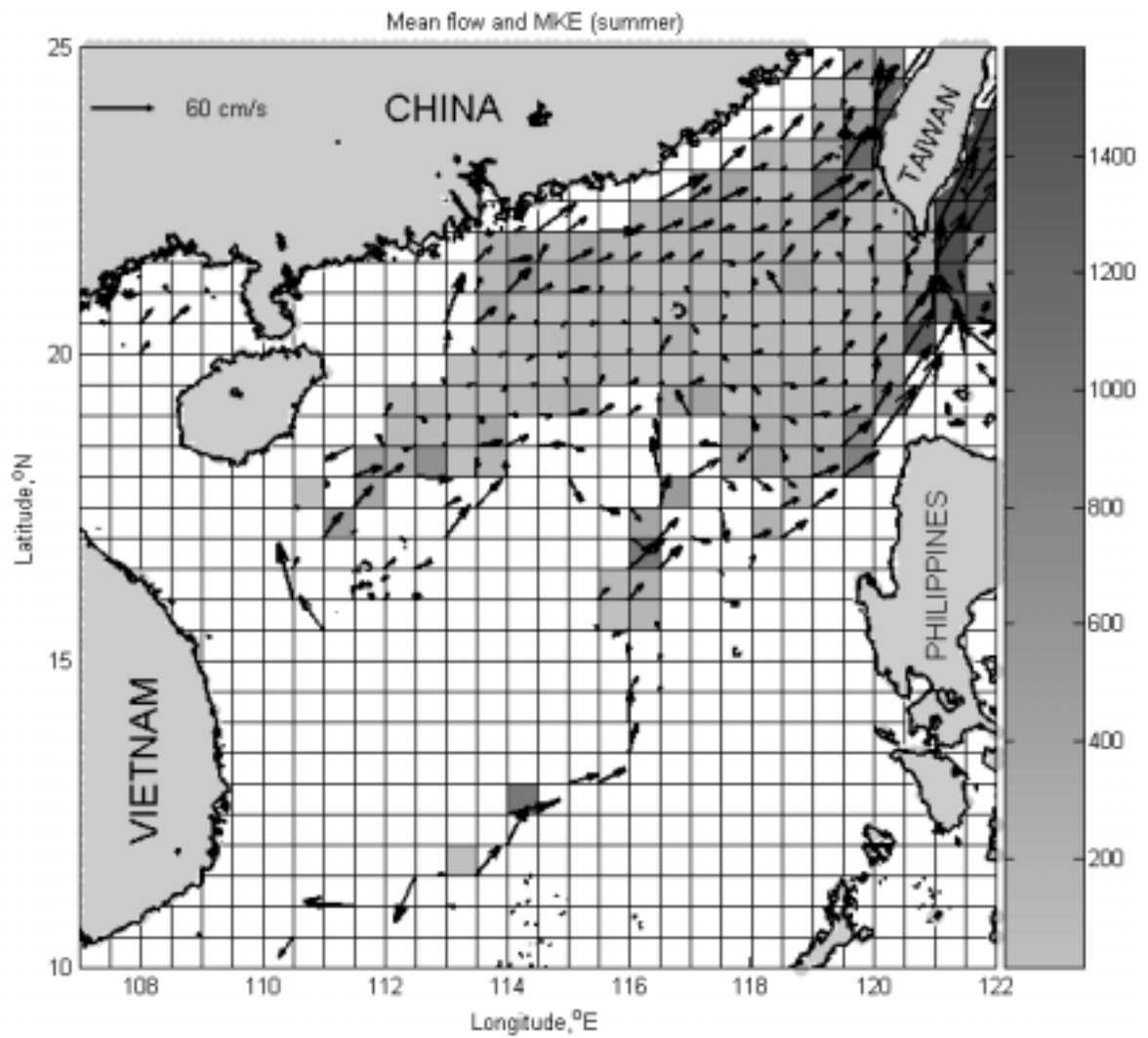


圖 5-8. 夏季水深 15m 平均流向量與平均流動能(Mean flow and MKE)圖

(1982-2006)，網格點為 $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$

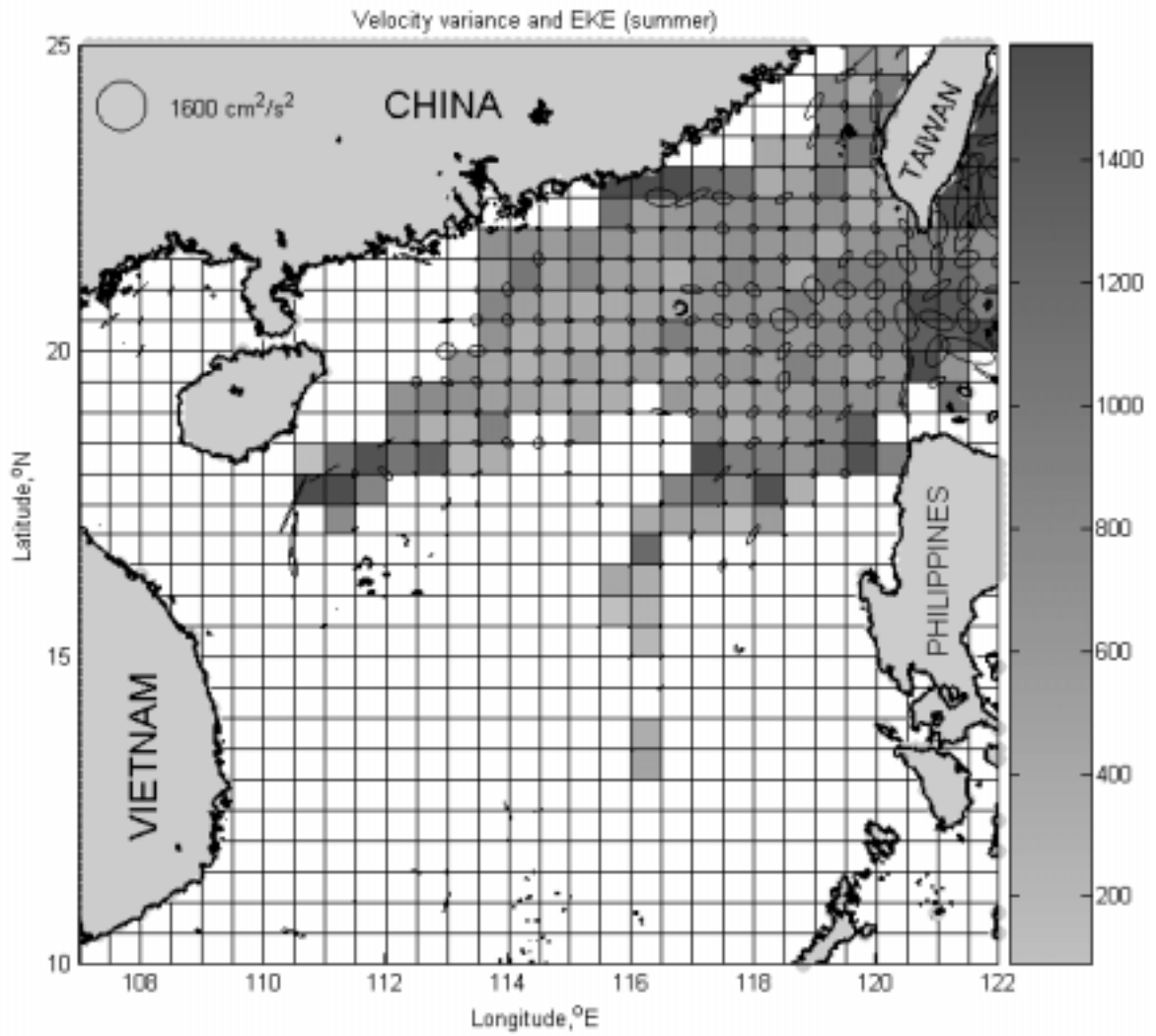


圖 5-9. 夏季水深 15m 速度變化量橢圓與平均渦動動能(Velocity variance and EKE)圖(1982-2006)，網格點為 $0.5^\circ \times 0.5^\circ$

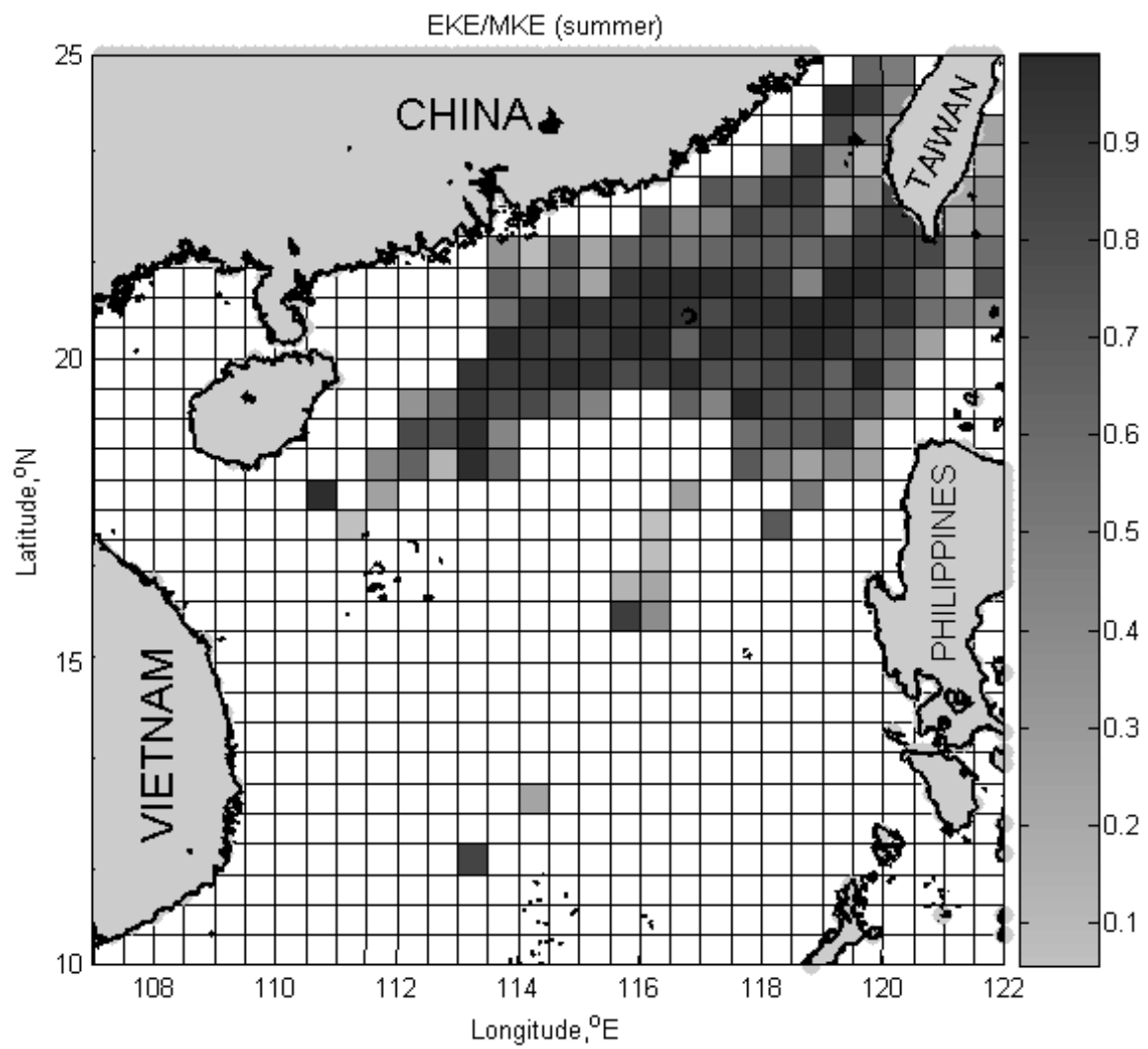


圖 5-10. 夏季水深 15m EKE/MKE 圖(1982-2006)，網格點為 $0.5^{\circ} \times 0.5$

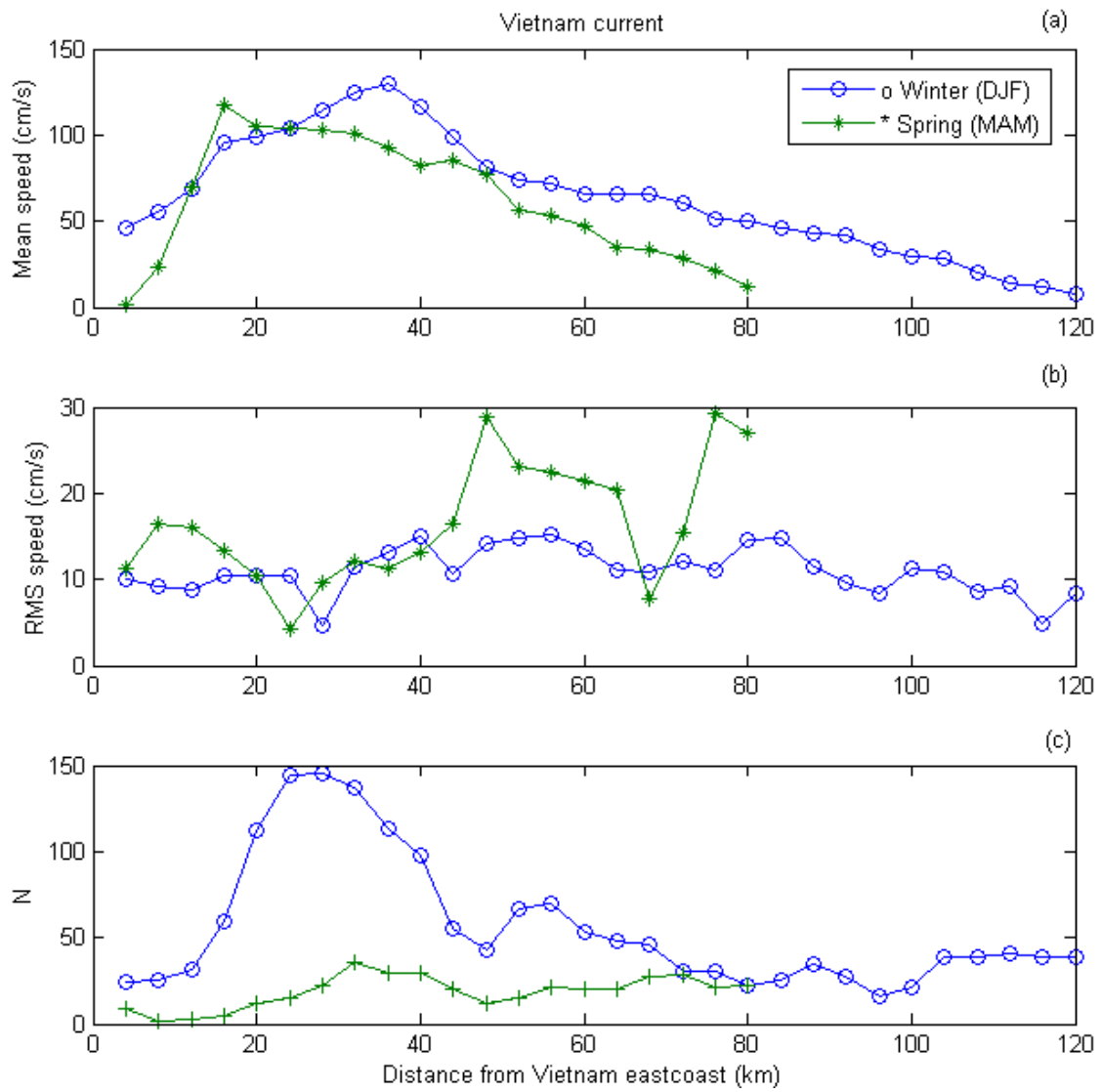


圖 5-11. 朝南流的越南海流向南流速統計圖(11.8°N 到 14°N 的海岸線)。浮標流速以離越南海岸線每 8 km 作一個網格平均，顯示歷年來冬春二季個別
的向南平均速度(a)、r. m. s. 速度(b)和每六小時一筆的觀測資料數(c)。

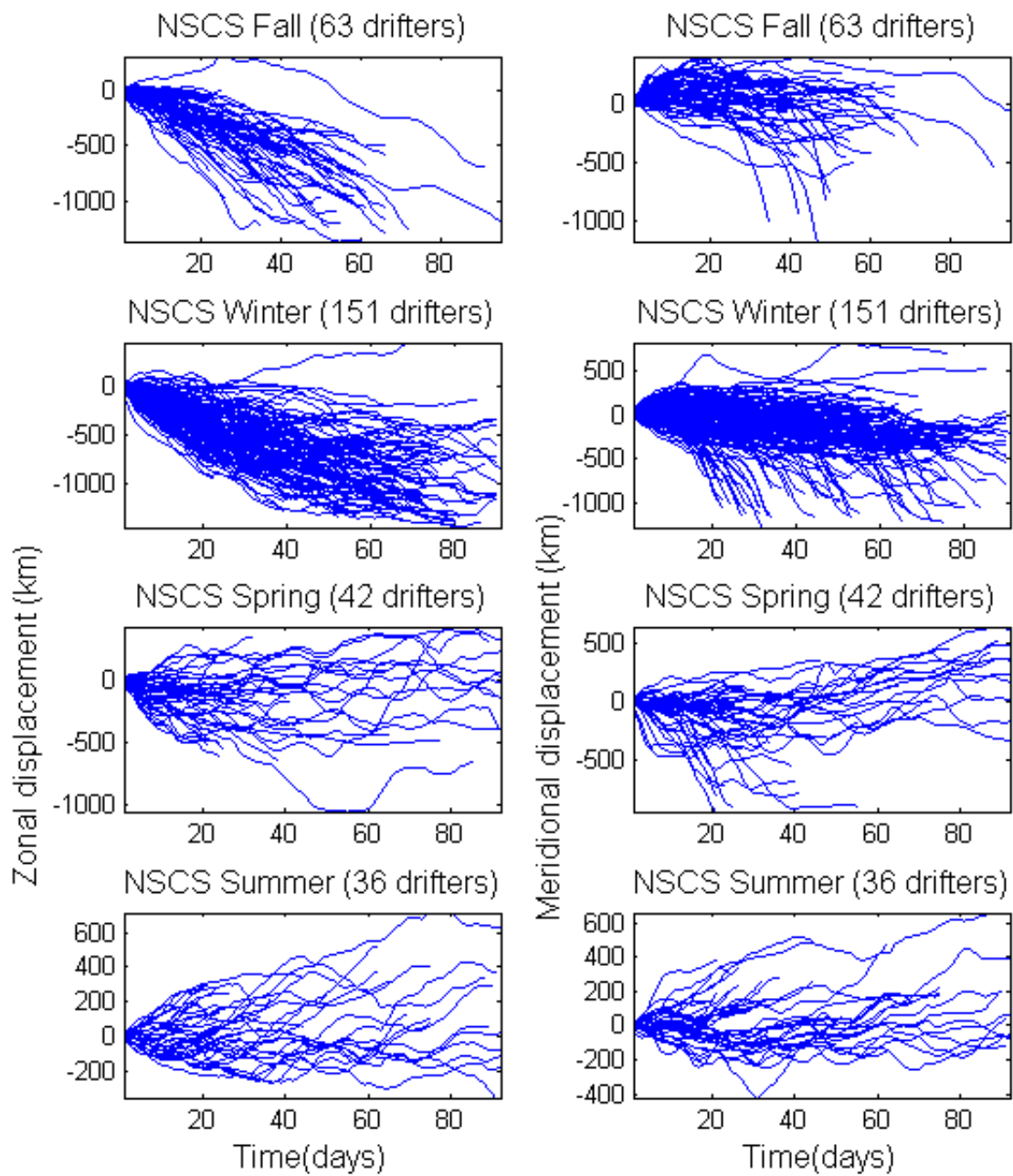


圖 5-12. 南海北部(簡稱 NSCS)四季浮標單質點位移量的吐煙圖，左半部為東西

方向分量，向東為正值，右半部為南北方向分量，向北為正值

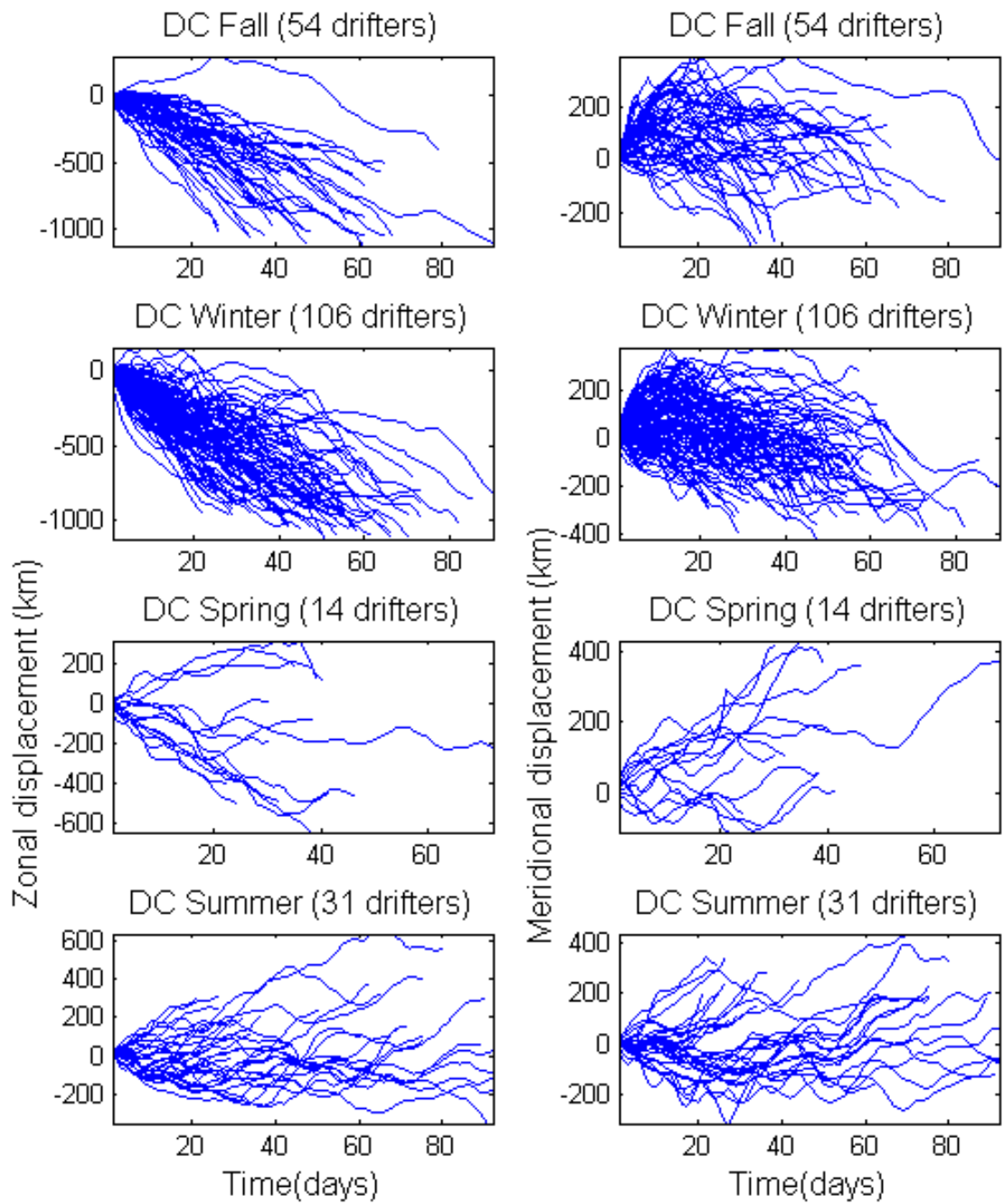


圖 5-13. 東沙海流(簡稱 DC)四季浮標單質點位移量的吐煙圖，左半部為東西方

向分量向東為正值，右半部為南北方向分量，向北為正值

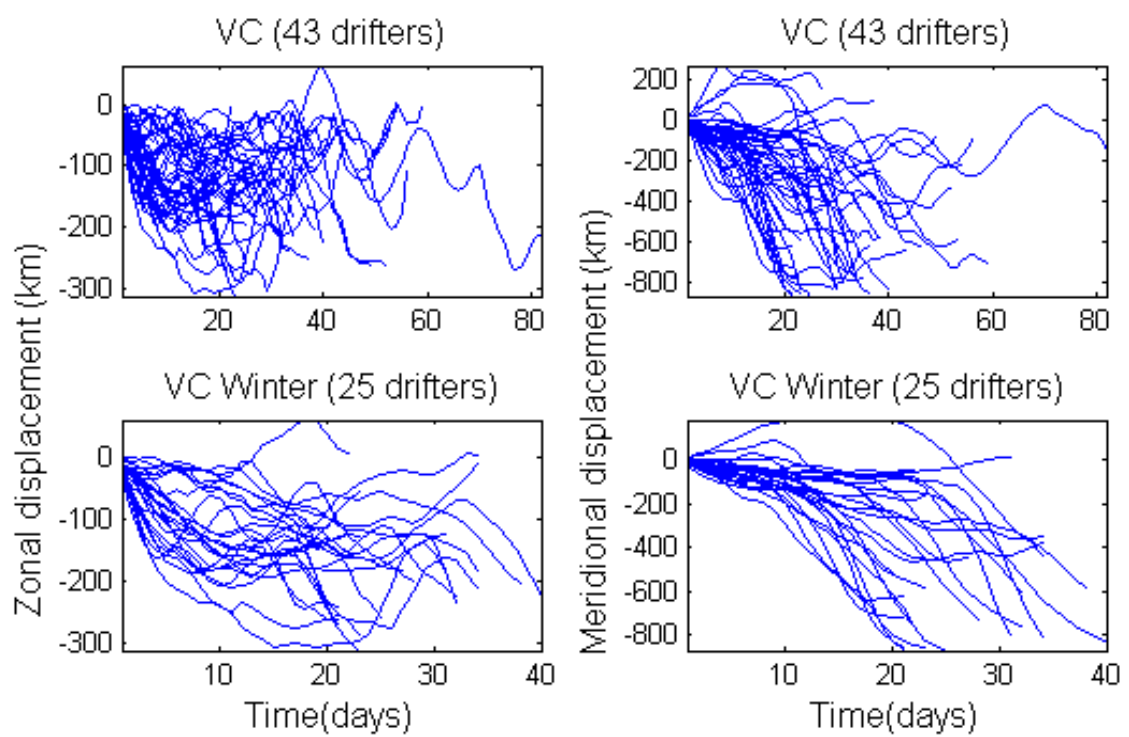


圖 5-14. 越南海流(簡稱 VC)全年與冬季浮標位移量的吐煙圖，左半部為東西方

向分量，向東為正值，右半部為南北方向分量，向北為正值

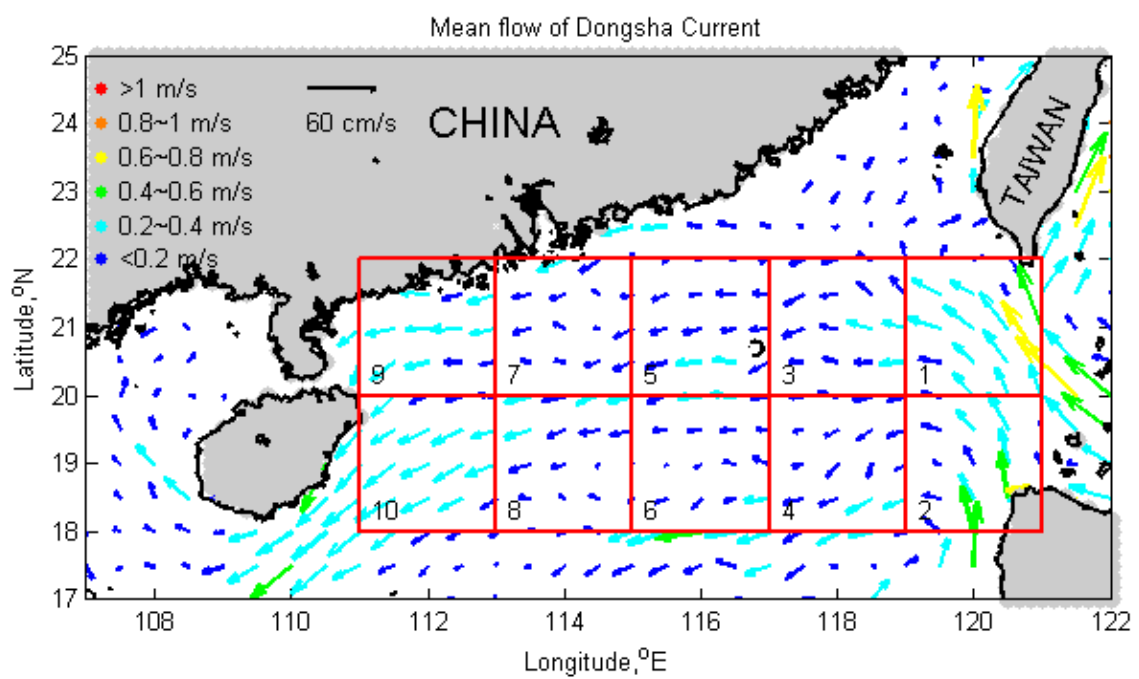


圖 5-15. 東沙海流水深 15m 平均流速向量圖(1982-2006)，網格點為 $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$ ，

$2^{\circ} \times 2^{\circ}$ 的方塊 1 到 10 格分別代表東沙海流的分析區域

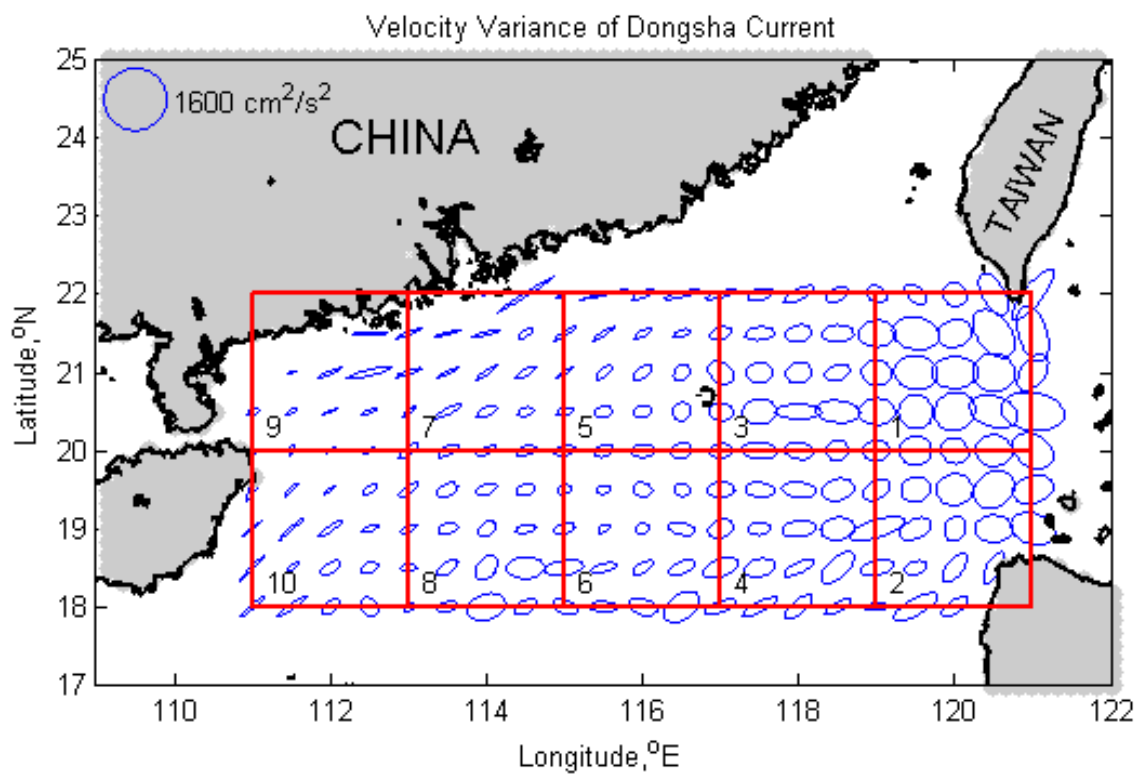


圖 5-16. 水深 15m 平均流向量與速度變化量橢圓圖(1982-2006)，網格點為 $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ ， $2^\circ \times 2^\circ$ 的方塊 1 到 10 格分別代表東沙海流的分析區域

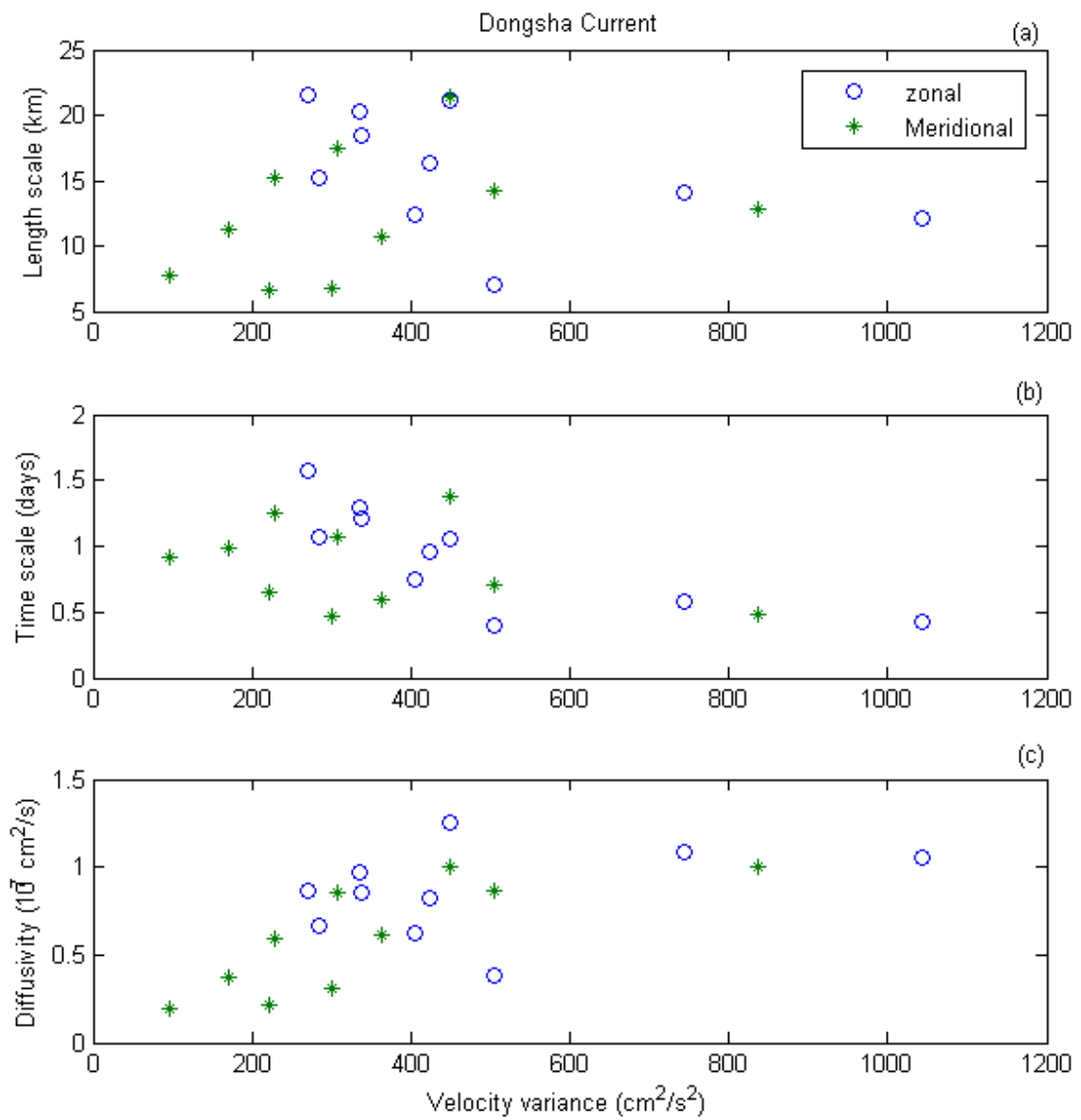


圖 5-17. 東沙海流的 Lagrangian 空間尺度(a)、時間尺度(b)與擴散率(c)對速度變化量圖，每一個資料點代表圖 5-17 和表 5-1 中所劃分的一個方塊。

表 4-4. 東沙海流浮標 Lagrangian 統計的空間變化摘要，分析區域為北緯 18°

到 22°，東經 111°到 121°，分為十格，每格為 2°x2°，取漂流時間大於 20 天的浮標軌跡來作分析，T 是 Lagrangian 的時間尺度，L 是 Lagrangian 的空間尺度，下標 u 是東西方向，下標 v 是南北方向，<>是平均，rms 是剩餘速度方均根，K 是由質點擴散直接計算的擴散率

Box	1	2	3	4	5
Buoy days	6923	3790	5901	4180	5422
<U> cm/s	-6.33	-2.23	-5.9	-2.75	-5.22
<V> cm/s	3.48	6.28	0.58	-1.64	2.04
Urms cm/s	32.28	22.49	27.27	20.1	18.36
Vrms cm/s	28.9	21.16	22.45	19.03	14.88
U_variance cm ² /s ²	1043	505.9	744.1	404	337.1
V_variance cm ² /s ²	835.66	448.09	504.24	362.33	221.55
Tu days	0.42	0.4	0.57	0.74	1.21
Tv days	0.48	1.37	0.7	0.59	065
Lu km	12.17	7.09	14.14	12.34	18.47
Lv km	12.85	21.47	14.18	10.71	6.56
Ku cm ² /s	1.05 E+07	3.85 E+06	1.09 E+07	6.26 E+06	8.52 E+06
Kv cm ² /s	1.00 E+07	9.97 E+06	8.66 E+06	6.10 E+06	2.15 E+07

EKE cm ² /s ²	872.56	773.42	629.36	588.36	420.04
MKE cm ² /s ²	411.98	345.17	150.95	142.75	158.12

Box	6	7	8	9	10
Buoy days	4085	3848	5424	1332	3870
<U> cm/s	-4.08	-0.53	-5.06	-6.82	-7.51
<V> cm/s	-1.47	2.37	-1.13	0.33	-0.76
Urms cm/s	16.87	20.57	21.2	16.45	18.32
Vrms cm/s	15.09	17.31	17.53	9.82	13.04
U_variance Cm ² /s ²	284.7	423.3	449.7	270.7	335.8
V_variance Cm ² /s ²	227.88	299.74	307.34	96.57	170.12
Tu days	1.07	0.95	1.05	1.57	1.29
Tv days	1.24	0.46	1.07	0.91	0.99
Lu km	15.14	16.37	21.08	21.61	20.31
Lv km	15.14	6.81	17.41	7.78	11.31
Ku cm ² /s	6.71 E+06	8.22 E+06	1.25 E+07	8.68 E+06	9.71 E+06
Kv cm ² /s	5.92 E+06	3.11 E+06	8.51 E+06	1.92 E+06	3.77 E+06
EKE cm ² /s ²	468.92	360.96	453.74	312.95	340.75
MKE cm ² /s ²	151.01	156.76	140.04	379.78	353.03

六、結論

藉由分析 NOAA/AOML 浮標資料庫中南海北部海域近二十年並超過 80000 筆的表層(15m)浮標資料，結合 Lagrangian 和 Eulerian 的統計方式，了解和量化南海北部海域上層流場的時空變化，例如沿岸流在近岸的強度以及不同季節的平均環流和擴散特性，以期能更深入了解甚至預測南海北部海域或是其他半封閉海盆的表面流場，本研究獲得以下結論：

1. 黑潮從呂宋海峽入侵沿著南海北部邊界的大陸棚向西流動，之後成為向西南流的東沙海流，到了南海的西部邊界也就是在越南東岸外海，轉而成為向南強勁的越南海流。在東沙海流和越南海流的最大平均速度都超過了 40 cm/s，此流終在南海形成一個大型的逆時針環流。
2. 在南海北部海域的南北向擴散率和 Lagrangian 的時間尺度、空間尺度個別為 $5.12 \times 10^7 \text{ cm}^2/\text{s}$ 、2.56 天和 64.43 公里，而東西向的統計則約為上述值的一半，顯示此區域的時間尺度與空間尺度有很高的不等向性。
3. 冬季時的平均流動能隨著平均流向量自呂宋海峽開始有向西南方增加的趨勢，到了越南東岸外海更出現有最大高於 $5000 \text{ cm}^2/\text{s}^2$ 的平均流動能，推測是受東北季風的影響所致，EKE/MKE 比值的較高值分佈在呂宋海峽一帶，向西延伸到南海北部海域中央，證實了入侵南海的黑潮支流增大了

東沙海流的渦動強度。

4. 夏季時平均流動能的較大值只有出現在呂宋海峽東側，而在中國大陸南部沿海一帶有部分較大值隨著向東北的平均流向量出現。夏季時速度變化量橢圓與渦動動能自台灣西南海域起，在呂宋海峽以西延伸到東沙環礁以西一帶，其渦動動能影響力仍屬不低，可能是受到南海環流和部分黑潮支流作用的影響所致。
5. 越南海流平均流速為 0.59 m/s。沿著越南東岸外海向南流的浮標資料顯示越南海流的寬度在 80 到 120 公里間變化，其平均的核心速度在 60-150cm/s 之間。冬季時最大的向南海流速度在離岸約 38 公里處達到 130cm/s 以上，此時的越南海流的 r. m. s. 速度變動量穩定，顯示冬季的越南海流的向南流速是持續且穩定的。春季時的向南海流速度較弱，但是最大流速也有 100cm/s 以上，並集中在離岸距離較近約在 18km 處，但是由於春季正值季節性季風轉換時期，所以其 r. m. s. 速度變動量較大，夏、秋季則缺乏浮標資料。
6. 東沙海流的平均流速為 0.33 m/s。將東沙海流流域區分為十個 $2^{\circ} \times 2^{\circ}$ 的方塊以分析其空間分佈的 Lagrangian 統計特性，結果東沙海流在 113-121 $^{\circ}$ E 之間的渦動動能均大於平均流動能，顯示此區域的中尺度運動發達，同時由東向西方向，其渦動動能也是逐漸變小，顯示離呂宋海峽越近，其渦動動能越大。

參考文獻

- 梁文德(2002)：南海上層海溫及海流變化之研究。國立台灣大學海洋研究所博士論文。
- Centurioini. L. R., Niiler, P. P., and Lee, D.K., 2004 : Observations of inflow of Philippine Sea surface water into the South China Sea through the Luzon Strait. *J. Phys. Oceanogr.*, 34, 113-121.
- Emery, W. J. and Thomson, R. E., 1998 : *Data analysis methods in Physical Oceanography*. Pergamon, Oxford, US, 328-328.
- Hansen, D. V. and Poulain, P. M., 1996 : Processing of WOCE/TOGA drifter data. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, 13, 900-909.
- Hwang, C. and Chen, S. A., 2000 : Circulations and eddies over the South China Sea derived from TOPEX/Poseidon altimetry. *J. Geophys. Res.*, 105, 23943-23965.
- Liang, W. D., T. Y. Tang, Y. J. Yang, M. T. Ko, and W. S. Chuang, 2003 : Upper-ocean currents around Taiwan. *Deep-Sea. Res. Part II*, 50, 1085-1105.
- Poulain, P. M. and P. P. Niiler, 1989 : Statistical analysis of the surface circulation in the California Current system using satellite-tracked drifters. *J. Phys. Oceanogr.*, 19, 1588 - 1603.

- Poulain, P. M., 2001: Adriatic Sea surface circulation as derived from drifter data between 1990 and 1999. *J. Mar. Syst.*, 29, 3 – 32.
- Poulain, P. M. and Zambianchi, E., 2007 : Surface circulation in the central Mediterranean Sea as deduced from Lagrangian drifters in the 1990s. *Cont. Shelf Res.*, 27, 981–1001.
- Salas, J., Emilio G. L., and Font, J., 2001 : Statistical analysis of the surface circulation in the Algerian Current using Lagrangian buoys. *J. Mar. Syst.*, 29, 69–85.
- Shaw, P. T. and S. Y. Chao, 1994 : Surface circulation in the South China Sea, *Deep-Sea Res.*, 41, 1663–1683.
- Su, J. L., 2004 : Overview of the South China Sea circulation and its influence on the Coastal Physical Oceanography near the Pearl River estuary. *Cont. Shelf Res.*, 24, 1745–1760.
- Taylor, G. I., 1921 : Diffusion by continuous movements. *Proc. London Math. Soc.*, 20, 196–212.
- Wu, C. R., Tang, T. Y., and Lin, S. F., 2005 : Intra-seasonal variation in the velocity field of the northeastern South China Sea. *Cont. Shelf Res.*, 25, 2075–2083.
- NOAA, The Global Drifter Program,

http://www.aoml.noaa.gov/phod/dac/gdp_drifter.html.