

國立中央大學

水文科學研究所

碩士論文

風場時空變化對全球大氣-海洋二氧化碳
通量計算影響之研究

An assessment of the effects of wind

for temporal and spatial variability

on the calculation of global atmosphere-ocean CO₂ flux

指導教授：蔡武廷 博士

研究生：葉鈞喬

中華民國九十四年七月



國立中央大學圖書館 碩博士論文電子檔授權書

(93年5月最新修正版)

本授權書所授權之論文全文電子檔，為本人於國立中央大學，撰寫之碩/博士學位論文。(以下請擇一勾選)

- () 同意 (立即開放)
() 同意 (一年後開放)，原因是： _____
() 同意 (二年後開放)，原因是： _____
() 不同意，原因是： _____

以非專屬、無償授權國立中央大學圖書館與國家圖書館，基於推動讀者間「資源共享、互惠合作」之理念，於回饋社會與學術研究之目的，得不限地域、時間與次數，以紙本、微縮、光碟及其它各種方法將上列論文收錄、重製、公開陳列、與發行，或再授權他人以各種方法重製與利用，並得將數位化之上列論文與論文電子檔以上載網路方式，提供讀者基於個人非營利性質之線上檢索、閱覽、下載或列印。

研究生簽名： 葉鈞喬

論文名稱：風場時空變化對全球大氣-海洋二氧化碳通量計算

影響之研究

指導教授姓名：蔡武廷 博士

系所：水文科學研究所 博士 碩士班

學號：92625011

日期：民國 94 年 7 月 21 日

備註：

1. 本授權書請填寫並親筆簽名後，裝訂於各紙本論文封面後之次頁（全文電子檔內之授權書簽名，可用電腦打字代替）。

2. 請加印一份單張之授權書，填寫並親筆簽名後，於辦理離校時交圖書館（以統一代轉寄給國家圖書館）。
3. 讀者基於個人非營利性質之線上檢索、閱覽、下載或列印上列論文，應依著作權法相關規定辦理。

摘要

風場為影響計算大氣-海洋介面二氧化碳通量的重要環境參數，由於不同的風場資料特性以及所使用的風場取樣間期，會造成計算大氣-海洋介面二氧化碳通量的誤差。因此本研究以風場時空變化為主軸，自大氣資料庫獲取八個全球海洋風場資料，使用八種全球海洋月平均風場計算二氧化碳通量，比較風場間的時空差異對於計算全球大氣-海洋二氧化碳通量的影響，並分析在同一種風場中使用長期風場與短期風場計算全球大氣-海洋二氧化碳通量的影響。本研究採用 Wanninkhof(1992) 的二次風速多項式二氧化碳氣體傳輸速度函式、Wanninkhof與 McGillis(1999) 的三次風速多項式二氧化碳氣體傳輸速度函式，以及適用於各緯度區域的長期三次風速多項式二氧化碳氣體傳輸速度函式，計算全球大氣-海洋二氧化碳通量。從計算結果我們得知不同風場間的空間分布特性對於影響通量計算的情形較為重要；使用長期風場計算通量的結果會高於使用短期風場的結果，若使用適用於各緯度區域的修正函式，則可降低長期與短期計算結果之間的差異。

關鍵字：海氣交互作用、二氧化碳通量、全球海洋風場。

誌謝

感謝蔡武廷教授在我這段求學期間提供給我良好的學習環境，幫助我能夠專心學習。而且老師做研究時的認真與踏實更深深影響我的學習態度，也由於這樣，本論文終得以完成。同時感謝口試委員李明旭教授、詹森教授對本論文提供寶貴建議與指正。

我也要謝謝立萍學姐常常關心我在做研究時所遇到的問題，世明學長提供實驗室軟體設備的支援，韋伯同學及學妹韻如的鼓勵，使我得以順利進行此研究。

最後，必須特別感謝父親、母親、哥哥以及教會的林牧師夫婦、好友珍綾、佩玲、涵婕、國鴻、俊彥，你們是我精神上最大的支柱，因為有你們的代禱與幫助，我才得以撐過這段難熬的日子，謝謝你們。

目錄

1	前言	1
1.1	研究背景簡介	1
1.2	研究目的及論文架構	5
2	全球海洋風場資料之整理與分析	7
2.1	現有全球海洋風場之類型	7
2.2	風場資料的介紹與整理	13
2.2.1	QSCAT-PO.DAAC 衛星遙感探測資料	13
2.2.2	QSCAT-RSS 衛星遙感探測資料	14
2.2.3	SSM/I-RSS 衛星遙感探測資料	14
2.2.4	NRA再分析資料	15
2.2.5	ECMWF再分析資料	16
2.2.6	QSCAT/NCEP合成資料	16
2.2.7	QSCAT-SF合成資料	17
2.2.8	QSCAT-COAPS合成資料	17
2.2.9	其他風場資料	18
2.3	全球海洋風場資料的時間變異特性	20
2.3.1	全球月平均及年平均風速的比較	20

2.3.2	全球月平均風速機率密度函數與累計密度函數的比較	21
2.4	全球海洋風場資料的空間特性	24
2.5	風場資料分析的結果整理與討論	28
3	全球海洋風場時空變化對計算大氣-海洋二氧化碳氣體交換係數K與二氧化碳氣體傳輸速度k的影響	47
3.1	交換係數的環境參數對於計算二氧化碳氣體交換係數 k 的影響	48
3.1.1	二氧化碳氣體傳輸速度 k 與海表面高空10公尺風速 U_{10} 之關係	48
3.1.2	史密特數 Sc 與溫度之關係	50
3.1.3	二氧化碳氣體溶解度 s 與溫度、鹽度之關係	51
3.1.4	風速 U_{10} 、海表面溫度 SST 、海表面鹽度 S 對於計算二氧化碳氣體交換係數 K 的影響	51
3.2	使用不同全球海洋月平均風場對於計算全球二氧化碳氣體交換係數 K 所造成的差異	54
3.3	使用長期風場與短期風場對於計算全球二氧化碳氣體傳輸速度 k 所造成的差異	58
3.3.1	以增強因子 R 討論長期與短期二氧化碳氣體傳輸速度函式在全球區域的適用性	58
3.3.2	推算區域性的長期二氧化碳氣體傳輸速度函式	62
3.3.3	使用長期風場與短期風場對於計算全球二氧化碳氣體傳輸速度 k 所造成的差異	63

3.4	從風場時空變化分析計算全球大氣-海洋介面二氧化碳氣體交換係數 K 與二氧化碳氣體傳輸速度 k 的結果整理與討論	68
4	全球海洋風場時空變化對計算大氣-海洋二氧化碳通量的影響	88
4.1	二氧化碳通量的計算方式與海洋-大氣二氧化碳的分壓差資料說明	88
4.2	使用不同全球海洋風場對於計算大氣-海洋二氧化碳通量所造成的差異	91
4.3	使用長期風場與短期風場對於計算全球大氣-海洋二氧化碳通量的影響	95
4.4	從風場時空變化分析計算全球大氣-海洋介面二氧化碳通量的結果整理與討論	99
5	討論與結論	109
	參考文獻	112
A	公式推導	118
A.1	雷利機率函數的推導過程	118
A.2	Wanninkhof(1992) 二次風速多項式二氧化碳氣體傳輸速度函式推導過程	120
A.3	Wanninkhof and McGillis(1999) 三次風速多項式二氧化碳氣體傳輸速度函式推導過程	122
A.4	增強因子 R 與風速 u 關係之推導過程	125

A.5 長期三次風速多項式二氧化碳氣體傳輸速度修正函式之 推導	127
--	-----

圖目錄

2.1	一至十二月月平均風場統計值特質。圖(a) 為月平均風速平均值 (mean), 圖 (b) 為月平均風速的標準方差 (standard deviation) 單位為 m s^{-1} , 圖(c) 為月平均風速的風速機率密度函數偏斜度 (skewness) 單位為 m s^{-1} , 圖(d) 為月平均風速的風速機率密度函數分布曲率度 (kurtosis), 橫軸表示月份。QSCAT-PO.DAAC以「紅細實線」表示、QSCAT-RSS「藍粗實線」表示、SSM/I-RSS「綠細實線」表示、NRA「黃細虛點點線」表示、ECMWF「黑細虛點點線」表示、QSCAT/NCEP「紫細虛線」表示、QSCAT-SF「桃紫粗虛線」表示、QSCAT-COAPS「墨綠細虛線」表示。(以下各圖的風場皆以此符號方式表示)。	29
2.2	圖(a)、圖 (b)、圖 (c)、圖 (d) 分別為一、四、七、十月月平均風場的風速機率密度函數圖, 縱軸表示特定風速網格數目佔所有網格的比例, 橫軸表示風速大小, 單位 m s^{-1} , 風速機率密度函數寬帶為 1 m s^{-1} 。	30
2.3	圖(a)、圖 (b)、圖 (c)、圖 (d) 分別為一、四、七、十月月平均風場的風速累計密度函數圖, 縱軸表示特定風速以下網格數目佔所有網格的比例, 橫軸表示風速大小, 單位 m s^{-1} , 風速累計密度函數寬帶為 1 m s^{-1} 。	31

2.4	一月 QSCAT-PO.DAAC、QSCAT-RSS、SSM/I-RSS、NRA、 ECMWF、QSCAT/NCEP、QSCAT-SF、QSCAT-COAPS 全球 海洋月平均風速空間分布圖，下方圖例風速單位為 m s^{-1} ，空白區域 表示陸地、冰塊或無風場資料。	32
2.5	四月 QSCAT-PO.DAAC、QSCAT-RSS、SSM/I-RSS、NRA、 ECMWF、QSCAT/NCEP、QSCAT-SF、QSCAT-COAPS 全球 海洋月平均風速空間分布圖，下方圖例風速單位為 m s^{-1} ，空白區域 表示陸地、冰塊或無風場資料。	33
2.6	七月 QSCAT-PO.DAAC、QSCAT-RSS、SSM/I-RSS、NRA、 ECMWF、QSCAT/NCEP、QSCAT-SF、QSCAT-COAPS 全球 海洋月平均風速空間分布圖，下方圖例風速單位為 m s^{-1} ，空白區域 表示陸地、冰塊或無風場資料。	34
2.7	十月 QSCAT-PO.DAAC、QSCAT-RSS、SSM/I-RSS、NRA、 ECMWF、QSCAT/NCEP、QSCAT-SF、QSCAT-COAPS 全球 海洋月平均風速空間分布圖，下方圖例風速單位為 m s^{-1} ，空白區域 表示陸地、冰塊或無風場資料。	35
2.8	一至十二月各風場的全球海洋月平均風速在緯度上的分布，縱軸表示 緯度，負值為南緯，正值為北緯，緯度空間寬帶為 4° ，橫軸表示風速， 單位為 m s^{-1} 。	36
2.9	一至十二月QSCAT-PO.DAAC 減去 QSCAT-RSS 的風速差值 空間分布圖，下方圖例風速單位為 m s^{-1} ，空白區域表示陸地、冰塊 或無風場資料。	37

2.10	一至十二月SSM/I-RSS 減去 QSCAT-RSS 的風速差值空間分布圖, 下方圖例風速單位為 m s^{-1} , 空白區域表示陸地、冰塊或無風場資料。	38
2.11	一至十二月NRA 減去 QSCAT-RSS 的風速差值空間分布圖, 下方圖例風速單位為 m s^{-1} , 空白區域表示陸地、冰塊或無風場資料。	39
2.12	一至十二月ECMWF 減去 QSCAT-RSS 的風速差值空間分布圖, 下方圖例風速單位為 m s^{-1} , 空白區域表示陸地、冰塊或無風場資料。	40
2.13	一至十二月QSCAT/NCEP 減去 QSCAT-RSS 的風速差值空間分布圖, 下方圖例風速單位為 m s^{-1} , 空白區域表示陸地、冰塊或無風場資料。	41
2.14	一至十二月QSCAT-SF 減去 QSCAT-RSS 的風速差值空間分布圖, 下方圖例風速單位為 m s^{-1} , 空白區域表示陸地、冰塊或無風場資料。	42
2.15	一至十二月QSCAT-COAPS 減去 QSCAT-RSS 的風速差值空間分布圖, 下方圖例風速單位為 m s^{-1} , 空白區域表示陸地、冰塊或無風場資料。	43
2.16	七個風場對QSCAT-RSS 一、四、七、十月月平均風場的等量線散布圖, 標號中前標 a、b、c、d 分別代表一、四、七、十月, 標號中後標1至7分別代表 QSCAT-PO.DAAC、SSM/I-RSS、NRA、ECMWF、QSCAT/NCEP、QSCAT-SF、QSCAT-COAPS 七個風場。縱軸表示後標風場, 橫軸表示 QSCAT-RSS 風場, 風速單位為 m s^{-1} , 兩風場風速寬帶單位皆為 0.2 m s^{-1} 。	44

- 2.17 七個風場對QSCAT-RSS 月平均風場的相關係數, QSCAT-PO.DAAC相對於 QSCAT-RSS 以「紅細實線」表示、SSM/I-RSS相對於 QSCAT-RSS 以「綠細實線」表示、NRA相對於 QSCAT-RSS 以「黃細虛點點線」表示、ECMWF相對於 QSCAT-RSS 以「黑細虛點點線」表示、QSCAT/NCEP相對於 QSCAT-RSS 以「紫細虛線」表示、QSCAT-SF相對於 QSCAT-RSS 以「桃紫粗虛線」表示、QSCAT-COAPS相對於 QSCAT-RSS 以「墨綠細虛線」表示。縱軸表示相關係數, 橫軸表示月份。 45
- 2.18 一至十二月七個風場與QSCAT-RSS 差值的月平均風場統計值特質。圖 (a) 為月平均風速差值平均值, 圖 (b) 為月平均風速差值的標準方差, 圖 (a) 縱軸表示月平均風速差值平均值, 圖 (b) 為縱軸表示月平均風速差值標準方差, 橫軸表示月份。QSCAT-PO.DAAC減去 QSCAT-RSS 以「紅細實線」表示、SSM/I-RSS減去 QSCAT-RSS 以「綠細實線」表示、NRA減去 QSCAT-RSS 以「黃細虛點點線」表示、ECMWF減去 QSCAT-RSS 以「黑細虛點點線」表示、QSCAT/NCEP減去 QSCAT-RSS 以「紫細虛線」表示、QSCAT-SF減去 QSCAT-RSS 以「桃紫粗虛線」表示、QSCAT-COAPS減去 QSCAT-RSS 以「墨綠細虛線」表示。 46

- 3.1 設海表面溫度 $SST=20^{\circ}\text{C}$ 時，二氧化碳氣體傳輸速度 k 隨風速的變化情形。縱軸表示二氧化碳氣體傳輸速度 k ，單位為 cm hr^{-1} ，橫軸表示風速，單位為 m s^{-1} 。Wanninkhof(1992) 提出的二次 (Quadratic) 風速多項式二氧化碳氣體傳輸速度函式以綠色實線表示，「細綠實線」表示短期函式，「粗綠實線」表示長期函式。Wanninkhof and McGillis(1999) 提出的三次 (Cubic) 風速多項式二氧化碳氣體傳輸速度函式以紅色虛線表示，「細紅虛線」表示套用短期函式，「粗紅虛線」表示套用長期函式。 70
- 3.2 一至十二月各全球海洋月平均風場以二次長期風速多項式函式計算的二氧化碳氣體交換係數 K 在緯度上的分布，縱軸表示緯度，負值為南緯，正值為北緯，緯度空間寬帶為 4° ，橫軸表示二氧化碳氣體交換係數 K ，單位為 $10^{-2} \text{ mole m}^{-2} \text{ yr}^{-1} \mu\text{atm}^{-1}$ 。 71
- 3.3 一至十二月各全球海洋月平均風場以三次長期風速多項式函式計算的二氧化碳氣體交換係數 K 在緯度上的分布，縱軸表示緯度，負值為南緯，正值為北緯，緯度空間寬帶為 4° ，橫軸表示二氧化碳氣體交換係數 K ，單位為 $10^{-2} \text{ mole m}^{-2} \text{ yr}^{-1} \mu\text{atm}^{-1}$ 。 72
- 3.4 各風場的月平均全球二氧化碳氣體交換係數 K ，使用 AVHRR 海表面溫度 SST 、WOA01 海表面鹽度 S ，圖 (a) 為使用二次長期風速多項式函式，圖 (b) 為三次長期風速多項式函式，縱軸表示二氧化碳氣體交換係數 K ，單位為 $10^{-2} \text{ mole m}^{-2} \text{ yr}^{-1} \mu\text{atm}^{-1}$ ，橫軸表示月份。 73

3.5	一至十二月NRA 全球海洋風場的風速機率密度函數圖，藍色實線表示該月份內全球的短期風速機率密度函數，紅色實線表示為利用該月份的全球月平均風速計算得到的雷利機率密度函數，縱軸表示特定風速網格數目佔所有網格的比例，橫軸表示風速大小，單位 m s^{-1} ，風速機率密度函數寬帶為 1 m s^{-1} 。	74
3.6	一至十二月QSCAT/NCEP 全球海洋風場的風速機率密度函數圖，藍色實線表示該月份內全球的短期風速機率密度函數，紅色實線表示為利用該月份的全球月平均風速計算得到的雷利機率密度函數，縱軸表示特定風速網格數目佔所有網格的比例，橫軸表示風速大小，單位 m s^{-1} ，風速機率密度函數寬帶為 1 m s^{-1} 。	75
3.7	一至十二月NRA 以二次風速多項式函式計算的增強因子 R 在緯度上的分布，藍色實線表示該月份內 NRA 的增強因子 R ，紅色實線表示為風速分布為雷利分布的增強因子 R ，縱軸表示緯度，負值為南緯，正值為北緯，空間寬帶為 4° ，橫軸表示增強因子 R 。	76
3.8	一至十二月QSCAT/NCEP 以二次風速多項式函式計算的增強因子 R 在緯度上的分布，藍色實線表示該月份內 QSCAT/NCEP 的增強因子 R ，紅色實線表示為風速分布為雷利分布的增強因子 R ，縱軸表示緯度，負值為南緯，正值為北緯，緯度空間寬帶為 4° ，橫軸表示增強因子 R 。	77
3.9	一至十二月NRA 以三次風速多項式函式計算的增強因子 R 在緯度上的分布，藍色實線表示該月份內 NRA 的增強因子 R ，紅色實線表示為風速分布為雷利分布的增強因子 R ，縱軸表示緯度，負值為南緯，正值為北緯，緯度空間寬帶為 4° ，橫軸表示增強因子 R 。	78

3.10	一至十二月QSCAT/NCEP 以三次風速多項式函式計算的增強因子 R 在緯度上的分布, 藍色實線表示該月份內 QSCAT/NCEP 的增強因子 R , 紅色實線表示為風速分布為雷利分布的增強因子 R , 縱軸表示緯度, 負值為南緯, 正值為北緯, 緯度空間寬帶為 4° , 橫軸表示增強因子 R 。	79
3.11	四月份QSCAT/NCEP 風場在南緯 68° 至 0° 緯度帶的風速機率密度函數圖, 圖中所包含的緯度範圍為其右上角所標示的緯度 2° 之內的風速機率密度函數狀況, 藍色實線表示該區域的風速機率密度函數, 紅色實線表示以該區平均風速計算得到的雷利機率密度函數, 綠色實線表示以 Justus 經驗函式得到的韋伯機率密度函數。縱軸表示特定風速網格數目佔所有網格的比例, 橫軸表示風速大小, 單位 m s^{-1} , 風速機率密度函數寬帶為 1 m s^{-1} 。	80
3.12	四月份QSCAT/NCEP 風場在北緯 4° 至 72° 緯度帶的風速機率密度函數圖, 圖中所包含的緯度範圍為其右上角所標示的緯度 2° 之內的風速機率密度函數狀況, 藍色實線表示該區域的風速機率密度函數, 紅色實線表示以該區平均風速計算得到的雷利機率密度函數, 綠色實線表示以 Justus 經驗函式得到的韋伯機率密度函數。縱軸表示特定風速網格數目佔所有網格的比例, 橫軸表示風速大小, 單位 m s^{-1} , 風速機率密度函數寬帶為 1 m s^{-1} 。	81
3.13	一至十二月全球各緯度區域風速的韋伯機率函式形狀參數。圖(a) 為 NRA 資料計算結果, 圖 (b) 為 QSCAT/NCEP 資料計算結果, 縱軸表示月份, 橫軸表示緯度, 緯度空間寬帶為 4° , 下方圖例無單位。 .	82

- 3.14 一至十二月NRA 以二次風速多項式函式計算的二氧化碳氣體傳輸速度 k 在緯度上的分布，藍色實線表示該區域的短期二氧化碳氣體傳輸速度平均值 \bar{k} ，紅色實線表示以該區平均風速計算得到的長期二氧化碳氣體傳輸速度 k_{av} 。縱軸表示緯度，負值為南緯，正值為北緯，緯度空間寬帶為 4° ，橫軸表示二氧化碳氣體傳輸速度 k ，單位為 cm hr^{-1} 。 83
- 3.15 一至十二月QSCAT/NCEP 以二次風速多項式函式計算的二氧化碳氣體傳輸速度 k 在緯度上的分布，藍色實線表示該區域的短期二氧化碳氣體傳輸速度平均值 \bar{k} ，紅色實線表示以該區平均風速計算得到的長期二氧化碳氣體傳輸速度 k_{av} 。縱軸表示緯度，負值為南緯，正值為北緯，緯度空間寬帶為 4° ，橫軸表示二氧化碳氣體傳輸速度 k ，單位為 cm hr^{-1} 。 84
- 3.16 一至十二月NRA 以三次風速多項式函式計算的二氧化碳氣體傳輸速度 k 在緯度上的分布，藍色實線表示該區域的短期二氧化碳氣體傳輸速度平均值 \bar{k} ，紅色實線表示以該區平均風速計算得到的長期二氧化碳氣體傳輸速度 k_{av} ，綠色實線表示以該區修正函式計算得到的長期二氧化碳氣體傳輸速度 k_{av-fix} 。縱軸表示緯度，負值為南緯，正值為北緯，緯度空間寬帶為 4° ，橫軸表示二氧化碳氣體傳輸速度 k ，單位為 cm hr^{-1} 。 85

3.17	一至十二月QSCAT/NCEP 以三次風速多項式函式計算的二氧化碳氣體傳輸速度 k 在緯度上的分布, 藍色實線表示該區域的短期二氧化碳氣體傳輸速度平均值 \bar{k} , 紅色實線表示以該區平均風速計算得到的長期二氧化碳氣體傳輸速度 k_{av} , 綠色實線表示以該區修正函式計算得到的長期二氧化碳氣體傳輸速度 k_{av-fix} 。縱軸表示緯度, 負值為南緯, 正值為北緯, 緯度空間寬帶為 4° , 橫軸表示二氧化碳氣體傳輸速度 k , 單位為 cm hr^{-1} 。	86
3.18	月平均全球二氧化碳氣體傳輸速度 k 圖 (a) 為採用二次風速多項式函式作計算的結果, 圖 (b) 為採用三次風速多項式函式作計算的結果。紅色線為 NRA 的資料, 藍色線為 QSCAT/NCEP 的資料, 虛線為使用長期函式計算的結果, 實線為使用短期函式計算結果的平均值, 虛點點線為使用長期修正函式計算的結果。計算時固定海表面溫度 $SST=20^\circ\text{C}$, 縱軸表示二氧化碳氣體傳輸速度 k , 單位為 cm hr^{-1} , 橫軸表示月份。	87
4.1	一至十二月全球海洋-大氣二氧化碳分壓差 $\Delta p\text{CO}_2$ 空間分布圖, 下方圖例單位為 μatm (micor atm), 空白區域表示陸地、或無資料。	100
4.2	一至十二月各風場以二次長期風速多項式函式計算的二氧化碳總通量在緯度上的分布, 縱軸表示緯度, 負值為南緯, 正值為北緯, 緯度空間寬帶為 4° , 橫軸表示二氧化碳總通量, 單位為 Pg Cyr^{-1} 。	101
4.3	一至十二月各風場以三次長期風速多項式函式計算的二氧化碳總通量在緯度上的分布, 縱軸表示緯度, 負值為南緯, 正值為北緯, 緯度空間寬帶為 4° , 橫軸表示二氧化碳總通量, 單位為 Pg Cyr^{-1} 。	102

4.4	各風場的月平均全球二氧化碳總通量, 使用AVHRR 海表面溫度 <i>SST</i> 、WOA01海表面鹽度 <i>S</i> , 圖 (a) 為使用二次長期風速多項式函式, 圖 (b) 為三次長期風速多項式函式, 縱軸表示二氧化碳總通量, 單位為 Pg Cyr^{-1} , 橫軸表示月份。	103
4.5	一至十二月NRA 以二次風速多項式函式計算的二氧化碳總通量在緯度上的分布, 藍色實線表示該區域的短期二氧化碳總通量平均值 \bar{F} , 紅色實線表示以該區平均風速計算得到的長期二氧化碳總通量 F_{av} 。縱軸表示緯度, 負值為南緯, 正值為北緯, 緯度空間寬帶為 4° 橫軸表示二氧化碳總通量, 單位為 Pg Cyr^{-1} 。	104
4.6	一至十二月QSCAT/NCEP 以二次風速多項式函式計算的二氧化碳總通量在緯度上的分布, 藍色實線表示該區域的短期二氧化碳總通量平均值 \bar{F} , 紅色實線表示以該區平均風速計算得到的長期二氧化碳總通量 F_{av} 。縱軸表示緯度, 負值為南緯, 正值為北緯, 緯度空間寬帶為 4° , 橫軸表示二氧化碳總通量, 單位為 Pg Cyr^{-1} 。	105
4.7	一至十二月NRA 以三次風速多項式函式計算的二氧化碳總通量在緯度上的分布, 藍色實線表示該區域的短期二氧化碳總通量平均值 \bar{F} , 紅色實線表示以該區平均風速計算得到的長期二氧化碳總通量 F_{av} , 綠色實線表示以該區修正函式計算得到的長期二氧化碳氣體總通量 F_{av-fix} 。縱軸表示緯度, 負值為南緯, 正值為北緯, 緯度空間寬帶為 4° , 橫軸表示二氧化碳總通量, 單位為 Pg Cyr^{-1} 。	106

- 4.8 一至十二月QSCAT/NCEP 以三次風速多項式函式計算的二氧化碳總通量在緯度上的分布, 藍色實線表示該區域的短期二氧化碳總通量平均值 \bar{F} , 紅色實線表示以該區平均風速計算得到的長期二氧化碳總通量 F_{av} , 綠色實線表示以該區修正函式計算得到的長期二氧化碳氣體總通量 F_{av-fix} 。縱軸表示緯度, 負值為南緯, 正值為北緯, 空間寬帶為 4° , 橫軸表示二氧化碳總通量, 單位為 Pg Cyr^{-1} 。 107
- 4.9 月平均全球二氧化碳總通量, 圖(a) 為採用二次風速多項式函式作計算的結果, 圖 (b) 為採用三次風速多項式函式作計算的結果。紅色線為 NRA 的資料, 藍色線為 QSCAT/NCEP 的資料, 虛線為使用長期公式計算的結果, 實線為使用短期公式計算結果的平均值, 虛點點線為使用長期修正函式計算的結果。計算時固定海表面溫度 $SST=20^\circ\text{C}$, 海表面鹽度 $S=35\text{psu}$, 縱軸表示二氧化碳總通量, 單位為 Pg Cyr^{-1} , 橫軸表示月份。 108

表目錄

2.1	風場基本資料比較表	10
2.2	風場基本資料比較表中縮寫字義 (按英文字母次序排列)	11
2.3	風場資料來源之機構網址	12
2.4	各風場的月平均, 年平均風速	23
3.1	各風場全球年平均二氧化碳氣體交換係數 K	57
3.2	各風場與 QSCAT-RSS 的全球年平均二氧化碳氣體交換係數 K 差值的百分比	57
3.3	NRA全球年平均長期二氧化碳氣體傳輸速度 k_{av} 、 k_{av-fix} , 短期二氧化碳氣體傳輸速度平均值 \bar{k} , 長期高估量佔短期的比例	67
3.4	QSCAT/NCEP全球年平均長期二氧化碳氣體傳輸速度 k_{av} 、 k_{av-fix} , 短期二氧化碳氣體傳輸速度平均值 \bar{k} , 長期高估量佔短期的比例	67
4.1	各風場全球年平均二氧化碳氣體總通量	94
4.2	各風場與 QSCAT-RSS 的全球年平均二氧化碳氣體總通量差值的百分比	94
4.3	NRA年平均長期二氧化碳總通量 F_{av} 、 F_{av-fix} , 短期二氧化碳總通量平均值 \bar{F} , 長期高估匯入量佔短期的比例	98

4.4	QSCAT/NCEP年平均長期二氧化碳總通量 F_{av} 、 F_{av-fix} ， 短期二氧化碳總通量平均值 \bar{F} ，長期高估量佔短期的比例	98
-----	---	----

Chapter 1

前言

1.1 研究背景簡介

地球的大氣層對地表溫度的維持來說，是非常重要的一個保護機制，大氣層中的溫室氣體(甲烷、二氧化碳、二氧化氮等)會吸收來自地表放出的長波輻射，讓地球表面保持平均攝氏15度的溫度，使地球成為大部分的生物都適合生存的環境。然而，在工業革命時代之後，人類工業生產活動排放大量的二氧化碳至大氣層，使得大氣層中二氧化碳濃度在這段期間增加了31%，由原來的280ppm 增加到目前的370ppm。大氣層中二氧化碳濃度的上升會改變地球原來的溫室效應，促使大氣溫度節節攀升，影響極區的冰原生態系以及全球環境的變遷情形。

為防止此氣候變遷所引起的生態危機，主要經濟體系的各國政府共同訂定了的氣候變化綱要公約 (United Nations Framework Convention on Climate Change) 設法控管各國工業活動所排放的二氧化碳，以防止地球大氣層快速暖化的情形。同時，各國的科學家也開始共組研究團隊，積極研究大氣中二氧化碳的變化情形。在過去科學家對大氣中的二氧化碳循環研究中，他們發現海洋調節著大氣中二氧化碳濃度的變化，如果沒有海洋吸收大氣中的二氧化碳，今日大氣中二氧化碳的濃度將會是435ppm，由此可知海洋在此循環中扮演著降低大氣中二氧化碳濃度的重要角色。

要瞭解全球海洋對於吸收大氣中二氧化碳總通量的情形，我們可以透過累加每個網格點的二氧化碳通量來計算全球大氣-海洋介面二氧化碳的總通量值 F_{total} ：

$$\begin{aligned}
F_{total} &= \sum_i \sum_j k_{ij} \times s_{ij} \times \Delta pCO_{2ij} \times \Delta a_{ij} \\
&= \sum_i \sum_j K_{ij} \times \Delta pCO_{2ij} \times \Delta a_{ij}
\end{aligned}$$

將二氧化碳在大氣-海洋介面的傳輸速度 k_{ij} 乘上二氧化碳在海水的溶解度 s_{ij} 再乘上二氧化碳在海洋-大氣之間的分壓差 ΔpCO_{2ij} 以及每個網格點的海表面面積 Δa_{ij} ;或以二氧化碳在大氣-海洋介面的交換係數 K_{ij} 乘上二氧化碳在海洋-大氣之間的分壓差 ΔpCO_{2ij} 以及每個網格點的海表面面積 Δa_{ij} , 所得到的總通量 F_{total} 便為全球海洋對於吸收大氣中二氧化碳總通量。在此計算式中有二項主要資料: 一為海洋-大氣介面二氧化碳分壓差 ΔpCO_2 的空間與時間分布, 另一為大氣-海洋介面二氧化碳氣體傳輸速度 k 與環境參數 (如海面上10公尺高風速、降雨量、海表面溫度、海表面鹽度、介面活性劑濃度等) 的關係函式, 以及這些環境參數的空間與時間分布。

(以下將大氣-海洋介面二氧化碳通量簡稱為大氣-海洋二氧化碳通量, 大氣-海洋介面二氧化碳氣體傳輸速度簡稱為大氣-海洋二氧化碳氣體傳輸速度, 大氣-海洋介面二氧化碳氣體交換係數簡稱為大氣-海洋二氧化碳氣體交換係數, 海洋-大氣介面二氧化碳分壓差簡稱為海洋-大氣二氧化碳分壓差。)

第一項海洋-大氣二氧化碳分壓差 ΔpCO_2 的資料, 我們是採用由 Takahashi 等 (2002), 所生產的全球海面月平均二氧化碳分壓差, 此資料為目前國際上可取得最完整的全球月平均海洋-大氣二氧化碳分壓差資料。

第二項通量計算重點為大氣-海洋二氧化碳氣體傳輸速度與環境參數的關係函式, 目前在國際上最常被引用的關係函式有二個: Wanninkhof(1992) 根據觀察氣體傳輸的取樣特性 (Fetch Dependence of Gas Transfer) 以及風速變異情況 (Wind Speed Variance) 所提出的二次 (Quadratic) 風速多項式二氧化碳氣體傳輸速度

函式以及 Wanninkhof 與 McGillis(1999) 對於在低海表面風速時介面活性劑會阻擋氣體傳輸的現象, 在高海表面風速時氣泡會增強大氣-海洋介面氣體傳輸的現象觀察結論, 所提出的三次 (Cubic) 風速多項式二氧化碳氣體傳輸速度函式。在這二個最常引用的關係函式中, 皆是以海面上 10 公尺高的風速(U_{10})作其最重要的參數, 而且在這非線性的函式中, 些微的風速變化都將造成顯著的氣體傳輸速度差值變化, 也由於這變化上的特質, 本研究將探討不同的風場透過非線性的函式估計二氧化碳通量所造成的差值改變。另外, Etcheto 與 Merlivat(1988) 指出雖然很多參數皆會影響傳輸速度的大小, 但風速卻是這些眾多變數裡最重要的一個。所以, 在進行大氣-海洋二氧化碳通量計算的研究中, 當愈瞭解風場的變化情形便愈能夠掌握二氧化碳的通量變化。

其他影響氣體傳輸速度的環境參數尚有介面活性劑 (surfactants)(Frew,1990; Asher,1997;Tsai and Liu,2003)、降雨 (Ho 等,1997;Ho 等,2003) 以及碎波造成的氣泡 (Keeling,1993), 然而, 由於環境參數資料的取得困難, 或是氣體傳輸速度與這些環境參數間的關係式尚未完全瞭解, 因此本研究還是以風速作為計算大氣-海洋二氧化碳通量的方法。至於全球海洋風場資料的取得管道, 目前科學家們可以透過衛星得知全球海面風場。此外, 許多大氣模式也能提供全球海面上的風場分布情形。

研究海洋風場變化對大氣-海洋二氧化碳通量計算的影響, 過去國際上的相關研究有: Carr等 (2002) 比較使用 QSCAT、SSM/I 兩個不同的衛星資料來計算各月份的全球大氣-海洋二氧化碳總通量, 他們發現在大部分的月份中, 使用 SSM/I 風場所得到的全球大氣-海洋二氧化碳總通量比使用 QSCAT 風場的多出 11%。Feely等 (2004) 比較使用 ECMWF、QSCAT、SSM/I 風場計算太平洋赤道區域的二氧化碳通量, 發現三個風場得到的值皆有 11% 的差異。Bates(2001) 在西北大西洋百慕達群島附近, 以現地實驗的方式, 使用不同時間間期取樣的風場資料來計算二氧化碳通量, 他發現短時間 (每小時) 取樣計算得到的二氧化碳通量較以日平均取樣的結果多了三

倍。Wanninkhof等 (2002) 使用 NCEP/NCAR reanalysis 的風場, 以長期風場與短期風場資料來計算全球年平均大氣-海洋二氧化碳總通量, 他發現以長期風場計算得到的二氧化碳總通量較短期風場計算的結果多了26%。

從 Carr 等 (2002)、Feely 等 (2004)、Bates(2001)、Wanninkhof 等 (2002) 四個研究的結果, 我們可以知道風場變化的差異情形 (例如不同類型、不同時間取樣) 會影響大氣-海洋二氧化碳通量計算的結果。因此, 本研究分析八種全球風場以及使用不同時間尺度的風場, 來分析風場時空變化對於全球海洋二氧化碳通量計算結果差異的影響, 希望透過分析這些風場資料得到的研究結果有助於瞭解全球大氣-海洋的碳循環變化。

1.2 研究目的及論文架構

從1.1節的研究背景簡介可知風場為影響計算大氣-海洋二氧化碳通量的重要環境參數，而風場變化影響計算二氧化碳通量差異的原因有二：一為所使用的風場資料，另一為風場取樣的間期。因此本研究以風場時空變化為主軸，使用八種全球海洋月平均風場計算二氧化碳通量，比較風場間的時空差異對於全球計算大氣-海洋二氧化碳通量的影響，並分析在同一種風場中使用長期風場與短期風場計算全球大氣-海洋二氧化碳通量的影響。

在進行研究風場時空變化對於計算大氣-海洋二氧化碳通量的影響過程中，我們必須對風場資料的特性、由風場資料計算所得的二氧化碳氣體交換係數 K 、二氧化碳氣體傳輸速度 k 以及其相關環境參數先有所分析，以便正確地認知風場時空變化的效應，以下遂說明論文架構：

第二章對八種全球海洋風場進行分析，2.1及2.2節為風場資料簡介及整理，2.3節分析各風場的時間變異特性，2.4節分析各風場的空間變異特性，2.5節討論風場時空變化分析結果。第三章分析由全球海洋風場資料計算所得的二氧化碳氣體交換係數 K 、二氧化碳氣體傳輸速度 k 的時空特性，於3.1節分析二氧化碳氣體交換係數 K 的環境參數對於計算二氧化碳氣體交換係數 K 的影響程度，3.2節比較使用不同全球海洋月平均風場來計算二氧化碳氣體交換係數 K 所造成的差異，3.3節比較使用長期風場與短期風場對於計算二氧化碳氣體傳輸速度 k 所造成的差異，3.4節討論整理分析結果並討論。第四章察看全球海洋風場時空變化對計算大氣-海洋二氧化碳通量的影響，於4.1節說明計算方式及海洋-大氣二氧化碳的分壓差 $\Delta p\text{CO}_2$ 資料特性，4.2節分析使用不同全球海洋月平均風場來計算大氣-海洋二氧化碳通量所造成的差異，4.3節比較使用長期風場與短期風場對於計算大氣-海洋二氧化碳通量所造成的差異。4.4節歸納前兩

節分析結果。第五章為研究結果及討論。

Chapter 2

全球海洋風場資料之整理與分析

由於計算二氧化碳通量的差異主要是由於風場變化造成的，因此本研究的第一步便是分析各全球海洋風場的特性。本章首先於2.1節將風場作概略的簡介及分類，接著在2.2節整理各風場資料，2.3節利用全球月平均風速機率密度函數、風速累計密度函數分析各風場的時間變異特性，2.4節利用風速空間分布、風速差值空間分布、風速等量線散布圖 (contour scatter diagram) 來分析各風場之間的空間變異特性，2.5節討論分析的結果。

2.1 現有全球海洋風場之類型

現在，要獲取海面風場資料只需透過網際網路，便可取得到十多種海面風場資料，包括衛星、再分析模式、海面浮球、船隻等。在擁有眾多的資料的情況下，使用這些資料時就需要特別注意資料的正確性與資料對於研究主題的適用性。

關於資料正確性的要求：由於能夠代表真實風場的只有現地實測的風場，利用其他方式測量得到的風場，即使該風場的計算方式有經過校正，其資料都會與真實風場有所差別，而無絕對的正確性。

關於資料適用性的要求：本研究所使用的風場資料必須是全球海表面高空10公尺的風場，風場資料時間則必須包含2000年的資料。同時風場最好能夠滿足取樣的時間尺度愈短愈好，空間尺度愈小愈好，如此才能正確計算出全球大氣-海洋的二氧化碳通

量。於是本研究便從眾多資料中選擇八個符合這些條件的風場進行詳細的特性分析。

依照風場產生方式的差異，本研究中所使用的風場資料可以歸納成三類：

第一類衛星遙測型資料 (Remotely Sensed)：此類型是最能夠快速取得海面風場資料的一種，但由於氣象衛星所探測的海表面區域有限，所以需要三天的飛行航次才能完全獲取所有海表面區域的資料。此類型資料的優劣與資料處理的方式、天氣狀況、以及衛星本身特性，例如探測原理、探測範圍、飛行在軌道上的穩定性等，有重要的相關性。在本研究共分析 JPL Physical Oceanography Distributed Active Archive Center(PO.DAAC) 出產的 QuikSCAT Level 3(之後簡稱 QSCAT-PO.DAAC)、Remote Sensing System(RSS) 公司出產的 QuikSCAT(之後簡稱 QSCAT-RSS) 與 Remote Sensing System(RSS) 公司出產的 SSM/I(之後簡稱 SSM/I-RSS) 三種衛星型風場。

第二類再分析型資料 (Reanalysis)：此類資料係利用已測得的海洋物理資料，例如：海面氣壓、海面降雨、浮球測得的海表面風速、衛星測得的海表面風速等，置入再分析模式中，重新產生的全球風場資料。此類型資料的優劣與應與置入資料的正確性以及模式分析的方法有重要的相關性。在本研究共分析美國國家環境預報中心 (National Centers for Environmental Prediction;NCEP, 之前該機構名稱爲 National Meteorological Center;NMC) 和美國國家大氣科學研究中心 (National Center for Atmospheric Research;NCAR) 共同出產的 NCEP/NCAR Reanalysis 再分析資料 (之後簡稱 NRA) 與歐洲中期天氣預報中心 (European Centre for Medium Range Weather Forecasts;ECMWF) 出產的再分析資料 (之後簡稱 ECMWF) 兩種再分析型風場。

第三類合成型資料 (Blended)：此類資料係利用已處理完成的衛星遙感探測資料再加上特殊方式補齊無衛星探測的資料空缺點，所產生的全球風場資料。此類型資料

的優劣與補齊資料空缺點的方式有重要的相關性。在本研究共分析 Colorado Research Associates(CRA) 出產的 QSCAT/NCEP blended(之後簡稱 QSCAT/NCEP) 與 NASA SeaFlux 出產的 QuikSCAT Ocean Winds (之後簡稱 QSCAT-SF) 與 Center for Ocean-Atmospheric Prediction Studies(COAPS) 出產的 COAPS QuikSCAT Global Daily Pseudo-Stress(之後簡稱 QSCAT-COAPS) 三種合成型風場。

表 2.1、表 2.2 與表 2.3 列舉進行本研究時所調查的風場基本資料，包括資料名稱、來源、空間與時間尺度、以及資料的網路下載位置。

表 2.1: 風場基本資料比較表

資料種類	資料名稱	來源	資料期間	空間分布範圍	時間解析度	空間解析度 經度 × 緯度	
衛星遙測型	SSM/I	RSS	1987/7/9-cont.	90°N-90°S	每日,3日,7日,月平均	0.25° × 0.25°	
	QSCAT	RSS	1999/7/19-cont.	90°N-90°S	每日,3日,7日,月平均	0.25° × 0.25°	
	QSCAT	PO.DAAC	1999/7/19-cont.	90°N-90°S	12小時	0.25° × 0.25°	
	NSCAT	PO.DAAC	1996/9-1997/6	90°N-90°S	12小時	0.5° × 0.5°	
	ADEOS II	RSS	2002/4/10-2002/10/24	90°N-90°S	每日,3日,7日,月平均	0.25° × 0.25°	
	ADEOS II	PO.DAAC	2002/4/10-2002/10/24	90°N-90°S	12小時	0.5° × 0.5°	
	ERS I	CERSAT/IFREMER	1991/8/5-1996/6/3	90°N-90°S	7日,月平均	0.5° × 0.5°	
	ERS II	CERSAT/IFREMER	1996/3/25-2001/1/15	90°N-90°S	7日,月平均	0.5° × 0.5°	
	再分析型	NCEP/NCAR reanalysis	NCEP	1948/01/01-cont.	90°N-90°S	6小時,每日,月平均	約1.875° × 1.915°
		NCEP/DOE reanalysis	NCEP	1979/01/01-cont.	90°N-90°S	6小時,每日,月平均	約1.875° × 1.915°
ECMWF 15yrs reanalysis		ECMWF	1979/01/01-1993/12/31	90°N-90°S	6小時,每日,月平均	2.5° × 2.5°	
ECMWF 40yrs reanalysis		ECMWF	1957/09/01-2002/08/31	90°N-90°S	6小時,每日,月平均	2.5° × 2.5°	
合成型		QSCAT/NCEP	DSS	1999/7-cont.	88°N-88°S	6小時	0.5° × 0.5°
		QSCAT	Seaflux	1999/7-cont.	75°N-75°S	12小時	0.5° × 0.5°
	QSCAT	COAPS/FSU	1999/7-cont.	90°N-90°S	6小時	1° × 1°	
	融合 ERS I,ERS2 SSM/I,NSCAT	CERSAT/IFREMER	1995/01/02-1999/07/1	90°N-90°S	每日	0.5° × 0.5°	

表 2.2: 風場基本資料比較表中縮寫字義 (按英文字母次序排列)

縮寫	縮寫字義
ADEOS II	Advanced Earth Observing Satellite -2
AMI (ERS I, ERS II)	The Active Microwave Instrument (AMI) on European Remote Sensing Satellite
CDC	Climate Diagnostics Center
CERSAT /IFREMER	French ERS Processing and Archiving Facility / French Research Institute for Exploitation of the Sea
COAPS/FSU	The Center for Ocean-Atmospheric Prediction Studies / Florida State University
DOE	Department of Energy
DSS	DATA SUPPORT SECTION
ECMWF	European Centre for Medium-Range Weather Forecasts
NCAR	National Center for Atmospheric Research
NCEP	The National Centers for Environmental Prediction
NSCAT(ADEOS I)	NASA Scatterometer
PO.DAAC	Physical Oceanography Distributed Active Archive Center
QSCAT	NASA's Quick Scatterometer
RSS	Remote Sensing Systems
SSM/I	Special Sensor Microwave Imager Microwave Radiometer

表 2.3: 風場資料來源之機構網址

機構	提供的海洋風場資料	機構網址
JPL Air-Sea Interaction	QSCAT、NSCAT、ERS 等	http://airsea-www.jpl.nasa.gov/
CDC	NCEP/NCAR 再分析等	http://www.cdc.noaa.gov/
CERSAT /IFREMER	ERS I, ERS II, 融合 ERS 與 SSM/I 等	http://www.ifremer.fr/
COAPS/FSU	QSCAT、NSCAT、船隻、浮球等	http://www.coaps.fsu.edu/
DSS	QSCAT/NCEP、ADOES II、NCEP/NCAR 再分析、NCEP/DOE 再分析等	http://dss.ucar.edu/
ECMWF	ECMWF40yrs、ECMWF15yrs	http://data.ecmwf.int/data/
IRI	NCEP/NCAR 再分析等	http://iridl.ldeo.columbia.edu/
PO.DAAC	SSM/I、QSCAT、NSCAT、Seasat 等	http://podaac.jpl.nasa.gov/
RSS	SSM/I、QSCAT、NSCAT、Seawinds	http://www.remss.com/

2.2 風場資料的介紹與整理

本節接續敘述研究中所使用的八種風場資料以及其他有調查但並未分析的風場，敘述內容包括風場的發展任務與資料產生方式。

2.2.1 QSCAT-PO.DAAC 衛星遙感探測資料

QSCAT-PO.DAAC衛星遙感探測資料¹ 是由 SeaWinds on QuikSCAT 科學工作團隊使用 Level 3技術處理 QuikSCAT Level 2B 資料後，所獲得的經向、緯向風場資料。此資料每12小時一筆，資料期間始於1999年7月，空間解析度為經緯度各0.25°。詳細資料說明請見參考文獻 [31]。

Seawinds 散射儀²³ 是由美國航空暨太空總署 (National Aeronautics and Space Administration; NASA) 的美國太空總署噴射推進實驗室 (Jet Propulsion Laboratory; JPL) 專為測量海表面風場而製造的。其測量原理係由衛星之散射儀向海面發射頻率13.4GHz 微波波段⁴，再利用海面所反射的回波強度來推測海面上的風場強度以及風向。當海面起伏愈大所反射的回波強度就愈強代表海面上的風場愈強；反之，海面愈平靜所反射回波訊號就愈弱代表海面上的風場愈弱。由於 Seawinds 散射儀屬於主動式 (active) 微波探測，是適合在任何天氣情況下使用，且 QSCAT 所使用的 Ku 波段的訊號也不易受到降雨干擾，因此得到的海面風場資料都相當準確，誤差在 1 m s^{-1} 內，這些特點使得 Seawinds 散射儀 (QSCAT) 風場被公認為最佳的海面風場資料。

本研究中使用的是 QSCAT-PO.DAAC 西元2000年12小時一筆的風場資料，原始網格點資料包括風速、陸地。

¹PO.DAAC 網頁 <http://podaac.jpl.nasa.gov/>

²QuikBird 衛星酬載的 Seawinds 散射儀又稱 Seawinds/QSCAT 或 QuikSCAT或 QSCAT。

³Seawinds/QSCAT 測得的風場通常又稱為 QSCAT 風場。

⁴13.4GHz屬於12-18GHz 的 Ku 波段

2.2.2 QSCAT-RSS 衛星遙感探測資料

QSCAT-RSS衛星遙感探測資料⁵是由 Remote Sensing System 公司, 使用 Wentz 等 (2001) 所發展的 Ku-2001衛星風場資料演算模式, 處理 QuikBird 衛星酬載之 NASA 的 Seawinds 散射儀所測得海面微波回波所得到風場資料。此資料每12小時一筆, 資料期間始於1999年7月, 空間解析度為經緯各0.25°。詳細資料說明請見參考文獻 [9]。

本研究中使用的是 QSCAT-RSS 西元2000年月平均風場資料, 原始網格點資料包括風速、陸地。在各網格點的風場速度為當月所有風場資料平均值; 在鄰近極區附近, 若當月海面結冰的次數大於非結冰的次數, 則該點被定為無資料點。

2.2.3 SSM/I-RSS 衛星遙感探測資料

SSM/I-RSS衛星遙感探測資料⁶是由 Remote Sensing System 公司, 使用 Wentz 等 (1997) 所發展的衛星風場資料演算模式, 處理美國國防氣象衛星計劃 (Defense Meteorological Satellite Program; DMSP) 衛星酬載的 SSM/I 微波輻射儀 (之後簡稱 SSM/I) 所測得海面放射的微波所得到風場資料。此衛星資料每12小時一筆, 資料期間始於1987年7月, 空間解析度為經緯度各0.25°。詳細資料說明請見參考文獻 [8]。

到目前為止美國國防氣象衛星計劃共發射了六個載有 SSM/I 輻射儀的衛星⁷, 現在仍在執行任務的有 F13、F14、F15三顆衛星。SSM/I上有19.3、22.2、37.0、85.5GHz的感測器, 其主要目的為測量觀測海洋狀態、海面風速、冰雪覆蓋情形及大氣剖面狀態, 此外 SSM/I 也提供全球的降雨量、水汽含量和地面風速的資料。SSM/I測量原

⁵QSCAT-RSS 網頁 <http://www.remss.com>

⁶SSM/I-RSS 網頁 <http://www.remss.com>

⁷六個DMSP 衛星編號為 F08、F10、F11、F13、F14、F15

理為接收地球表面發出的微波輻射，再利用微波輻射強度又與海表面溫度、海面粗糙度、大氣溫度、大氣濕度的相關性，獲得到許多大氣及海面的觀測資料。另外，因為地球表面會發出的微波輻射容易受到水氣干擾，所以在水氣含量較高或有降雨區域，會有較大的誤差存在。因此 SSM/I 輻射儀所測得的海表面風速誤差在在 $1-3 \text{ m s}^{-1}$ 之間，此誤差範圍較 QSCAT 的測量誤差來得大。

本研究中使用的是 SSM/I F15 西元 2000 年月平均風場資料，原始網格點資料包括風速、海冰、陸地。其風場速度為當月所有風速資料平均值；在鄰近極區附近，若當月海面結冰的次數大於非結冰的次數，則該點被定為結冰區。

2.2.4 NRA再分析資料

NRA再分析資料⁸是由美國國家環境預報中心 (National Centers for Environmental Prediction; NCEP, 之前為 National Meteorological Center; NMC) 和美國國家大氣科學研究中心 (National Center for Atmospheric Research; NCAR) 共同出產的再分析資料。此資料每 6 小時一筆，資料期間始於 1949 年 1 月，風場空間解析度為經度 1.875° ，緯度約 1.915° 。詳細資料說明請見參考文獻 [22]。

NRA的發展目的是為要了解氣候變遷的現象。它使用最先進的定時模擬系統 (the frozen state of art analysis system) - 氣候資料模擬系統 (Climate Data Assimilation System; CDAS)(之後簡稱 CDAS)，將來自陸地、船隻、浮球、探空儀、衛星等氣象資料置入 CDAS，讓 CDAS 模擬過去的天氣現象。NRA 高空 10 公尺風場在模式中被歸類為 B 類型資料，這表示高空 10 公尺風場的正確性會受到輸入資料及模擬系統影響。

本研究中使用的是 NRA 西元 2000 年 6 小時一筆的經向、緯向風場資料，由於原始的風場資料為全球風場，因此在使用資料前已先覆蓋陸地、海冰網格點，以作為海面

⁸NRA 風場資料網頁 <http://www.cdc.noaa.gov/>

與非海面風場之區別。

2.2.5 ECMWF再分析資料

ECMWF再分析資料⁹是由歐洲中期天氣預報中心 (European Centre for Medium Range Weather Forecasts; ECMWF) 出產的再分析資料。這裡所採用的資料為歐洲中期天氣預報中心40年再分析資料 (ECMWF 40 Years Re-Analysis; ERA-40), 此資料每6小時一筆, 資料期間始於1957年9月, 終止於2002年8月, 風場空間解析度為經緯各2.5°。詳細資料說明請見參考文獻 [1]。

ECMWF的發展目的是為了能更有規劃地善用天然能源、地球環境及經營永續發展。在資料處理上,ECMWF 將現地 (In-Situ) 與遙感探測 (Remotely-Sensed) 以動態資料同化系統 (Variational Data Assimilation System) 合成, 輸入最新開發的大氣-陸地-海洋全球分析模式 (the atmosphere and land and ocean-wave global analyses), 進行再分析模擬作業。同時 ECMWF 也對模擬後輸出的再分析資料作驗證, 以確保輸出資料的品質。

本研究中使用的是 ECMWF 西元2000年6小時一筆的經向、緯向風場資料, 由於原始的風場資料為全球風場, 因此在使用資料前已先覆蓋陸地、海冰網格點, 以作為海面與非海面風場之區別。

2.2.6 QSCAT/NCEP合成資料

QSCAT/NCEP合成資料¹⁰是由在 Colorado Research Associates(CRA) 任職的 Jan Morzel 與 Ralph Milliff 所出產。此資料每6小時一筆, 資料期間始於1999年7月, 風場空間解析度為經緯各0.5°。詳細資料說明請見參考文獻 [30]。

Morzel與 Milliff 處理全球區域資料的方式為, 先將6小時中 QSCAT 掃描帶區

⁹ECMWF 資料網頁 <http://data.ecmwf.int/data/>

¹⁰QSCAT/NCEP 合成資料網頁 <http://dss.ucar.edu/datasets/ds744.4/>

域 (swath region) 所得到的風場置入, 接著在 QSCAT 掃描帶區域之間的空缺區, 則使用 Chin 等 (1998) 發展的方式, 將低波數 (low-wavenumber) NCEP 風場與高波數 (high-wavenumber) QSCAT 月平均風場來合成產生新的風場, 由此生成完整的全球區域風場。

本研究中使用的是 QSCAT/NCEP 西元 2000 年 6 小時一筆的經向與緯向風場資料, 由於原始的風場資料為全球風場, 因此在使用資料前已先覆蓋陸地網格點, 以作為陸地與海面風場之區別。

2.2.7 QSCAT-SF 合成資料

QSCAT-SF¹¹ 是由在 NASA SeaFlux 任職的 Wenqing Tang 與 W. Timothy Liu 共同發展的合成型風場資料。此資料每 12 小時一筆, 資料期間始於 1999 年 7 月, 風場空間解析度為經緯各 0.5°。詳細資料說明請見參考文獻 [41]。

Tang 與 Liu 使用他們在西元 1996 年發展的散射儀風場客觀內差法 (Objective Interpolation Method of Scatterometer Wind) 產生全球區域風場資料。首先將一筆 ECMWF 高空 10 公尺風場置入, 以此作為風場內差的起始值, 接著以 QSCAT 測量的風場作為內差法遞迴過程的參數, 進行遞迴作業, 當遞迴間風速前後差值小於所定的標準誤差值時, 便將之輸出。

本研究中使用的是 QSCAT-SF 西元 2000 年 12 小時一筆的風場資料; 在原始風場資料中已包括陸地網格點資料, 所以不需作任何前處理動作便可讀取風場資料。

2.2.8 QSCAT-COAPS 合成資料

QSCAT-COAPS¹² 是由在 COAPS 任職的 Bourassa 等人共同發展的合成型風場資料。此資料每 6 小時一筆, 資料期間始於 1999 年 7 月, 風場空間解析度為經緯各 1°。

¹¹QSCAT-SF 合成資料網頁 <http://airsea-www.jpl.nasa.gov/seaflex/>

¹²QSCAT-COAPS 合成資料網頁 <http://www.coaps.fsu.edu/>

詳細資料說明請見參考文獻 [27]。

Bourassa等人首先將衛星與現地測量的風速利用 bulk aerodynamic approach 轉為經向與緯向虛擬風切，接著將6小時平均的 QSCAT 風場置入作為背景風場值，以 Bourassa 等 (2002) 所提出的 the Variational Method, 藉由數種條件限制，使背景風場能夠最相似觀測值資料，降低空間上的非地物特徵，使虛擬風切能夠在不藉由任何平滑處理前就達到這上述兩個目標。

本研究中使用的是 QSCAT-COAPS 西元2000年6小時一筆的虛擬風切資料¹³ (pseudo-stress); 在原始風場資料中已包括陸地網格點資料，所以不需作任何前處理動作便可讀取風場資料。

2.2.9 其他風場資料

本研究蒐集資料的過程中亦找到許多其他的風場，在此亦將其資料列出。NASA JPL 的美國物理海洋學分布式檔案中心¹⁴(Physical Oceanography Distributed Active Archive Center;PO.DAAC) 提供 Seawinds 散射儀、NSCAT、SSM/I 等風場資料。

美國國家海洋及大氣管理局 (National Oceanic and Atmospheric Administration;NOAA) 環境科學合作研究院 (the Cooperative Institute for Research in Environmental Sciences;CIRES) 氣候診斷中心 (Climate Diagnostic Center;CDC)¹⁵ 提供 NCEP/DOE 再分析-2 (The National Centers for Environmental Prediction /Department of Energy reanalysis-2) 風場資料。

French ERS Processing and Archiving Facility/French Research Insti-

¹³ $W=(UW^2+VW^2)^{0.25}$; 風速 (W), 經向虛擬風切 (UW), 緯向虛擬風切 (VW)

¹⁴PO.DAAC 網頁 <http://podaac.jpl.nasa.gov/>

¹⁵NOAA,CDC網頁 <http://www.cdc.noaa.gov/>

tute for Exploitation of the Sea(CERSAT/IFREMER)¹⁶提供 Seawinds 散
射儀、NSCAT、ERS 等風場資料。

¹⁶CERSAT/IFREMER 網頁 <http://www.ifremer.fr/cersat/>

2.3 全球海洋風場資料的時間變異特性

本研究共分析前一節所提的QSCAT-PO.DAAC、QSCAT-RSS、SSM/I-RSS、NRA、ECMWF、QSCAT/NCEP、QSCAT-SF、QSCAT-COAPS 八個全球海洋風場的月平均風速資料，分析期間為2000年一至十二月。由於風場資料的時間解析度及空間解析度有所不同，因此在進行風場比較之前，需對所有資料空間尺度及時間尺度作處理。首先，將所有資料化為經緯各 0.25° ，若新的風場網格點位置恰在兩個原始網格點之間，則使用內差法求得其風速值，否則皆令新網格點的風速值為原網格的風速值。接著累加一個月份的風速值，再除以累計個數，計算得出月平均風速，若當月份網格上無資料個數大於有資料個數，則視該點月平均風速值為無資料點。

2.3.1 全球月平均及年平均風速的比較

風場的全球月平均風速值繪於圖 2.1(a)，全球月平均及年平均風速數值則整理於表 2.4。將各風場年平均風速作比較，風場全球年平均風速由大到小分別為 QSCAT-PO.DAAC (7.98 m s^{-1})、SSM/I-RSS(7.88 m s^{-1})、QSCAT-RSS(7.88 m s^{-1})、QSCAT/NCEP(7.76 m s^{-1})、QSCAT-COAPS(7.25 m s^{-1})、QSCAT-SF(7.18 m s^{-1})、NRA(7.08 m s^{-1})、ECMWF(7.06 m s^{-1})。接著再比較風場的全球月平均風速變化情形，從圖 2.1(a) 可知 QSCAT-PO.DAAC(紅細實線)、QSCAT-RSS(藍粗實線)、SSM/I-RSS(綠細實線)、NRA(黃細虛點點線)、ECMWF(黑細虛點點線)、QSCAT/NCEP(桃紫細虛線)、QSCAT-COAPS(墨綠細虛線)，這七個風場的全球月平均風速雖不相同，但皆有相同的變化趨勢。QSCAT-SF(深紫粗虛線) 的全球月平均風速變化趨勢在一至八月與上述七個風場有所不同，在八月之後才出現相符合的狀況。

2.3.2 全球月平均風速機率密度函數與累計密度函數的比較

接著再從風場的風速分布分析各風場特性，月平均風速機率密度函數(probability density function) 繪於圖 2.2,(a) 一月 (b) 四月 (c) 七月 (d) 十月。風速機率密度函數特性可從其平均值 (mean)、標準方差 (standard deviation)、偏斜度 (skewness)、曲率度 (kurtosis) 來瞭解，各月份風速的平均值、標準方差、偏斜度、曲率度繪於圖 2.1。平均值指示分布的中心位置；標準方差指示距離中心位置的分布範圍；偏斜度指示分布對於中心位置的對稱情況，大於零代表分布偏向平均值的右方，小於零代表分布偏向平均值的左方；曲率度指示分布情況相較於常態分布 (normal distribution) 的峰值 (peakedness)，大於零代表分布較常態分布來得尖銳、小於零代表分布較常態分布來得平坦。從圖 2.1(a) 平均值可知分布中心的變化情形，其中以 QSCAT-SF 變化最大，達 0.8 m s^{-1} ，其他風場的變化皆小於 0.4 m s^{-1} 。從圖 2.1(b) 標準方差可知 SSM/I-RSS 分布的範圍最廣，但各風場之間的差別並不大。從圖 2.1(c) 偏斜度可知除 QSCAT-SF 一月、四月、及 SSM/I-RSS 四月的分布是偏向平均值左方外，其他分布皆偏向平均值右方。從圖 2.1(d) 曲率度可知 QSCAT-RSS 分布皆較常態分布來得尖銳；NRA、ECMWF 分布皆較常態分布來得平坦；其餘分布則無固定特性。分析八個風場風速在平均值、標準方差、偏斜度、曲率度的變化趨勢，可看出 QSCAT-PO.DAAC、QSCAT-RSS、SSM/I-RSS、NRA、ECMWF、QSCAT/NCEP、QSCAT-COAPS 七個風場較為相似 QSCAT-SF 則與此七個風場在全球月平均風速分布上略有不同。

計算風場的月平均風速累計密度函數 (cumulative density function) 並將結果繪於圖 2.3,(a) 一月 (b) 四月 (c) 七月 (d) 十月。從圖 2.3 可看出風場可分為二個類型，第一類是 QSCAT-PO.DAAC、QSCAT-RSS、SSM/I-RSS、QSCAT/NCEP 屬於風速偏高的類型、NRA、ECMWF、QSCAT-SF、QSCAT-COAPS 屬於風速

略低的類型。

表 2.4: 各風場的月平均, 年平均風速

	QSCAT-PO.DAAC	QSCAT-RSS	SSM/I-RSS	NRA	ECMWF	QSCAT/NCEP	QSCAT-SF	QSCAT-COAPS
一月	7.85	7.76	7.67	7.01	6.96	7.63	6.67	7.11
二月	8.04	7.94	7.95	7.21	7.15	7.82	6.92	7.27
三月	7.97	7.87	7.90	7.06	7.06	7.75	6.87	7.21
四月	7.98	7.88	7.91	7.05	7.01	7.76	6.92	7.19
五月	7.98	7.88	7.83	7.05	7.06	7.73	7.25	7.21
六月	8.08	7.97	8.01	7.15	7.19	7.85	7.42	7.30
七月	8.03	7.91	7.92	7.08	7.08	7.80	7.50	7.25
八月	8.04	7.94	7.96	7.06	7.07	7.85	7.49	7.30
九月	7.95	7.85	7.83	7.00	6.99	7.81	7.30	7.29
十月	7.98	7.90	7.87	7.10	7.05	7.78	7.45	7.36
十一月	7.83	7.73	7.76	6.97	6.93	7.55	7.08	7.18
十二月	8.04	7.93	8.00	7.17	7.12	7.77	7.32	7.34
年平均	7.98	7.88	7.88	7.08	7.06	7.76	7.18	7.25

單位: m s^{-1}

2.4 全球海洋風場資料的空間特性

本節討論八個全球海洋風場在空間上的特性，觀看八個風場在空間上的分布情形，我們將2000年一、四、七、十月的全球海洋月平均風速風場的空間分布繪於圖 2.4、圖 2.5、圖 2.6、圖 2.7。從圖上可看出所有的風場雖然不盡相同但皆能顯示出相似的風場分布，確實表現出風場在空間上的分布特性。另外以目視觀測風場之間的差異，可以看出 QSCAT-PO.DAAC、QSCAT-RSS、SSM/I-RSS、QSCAT/NCEP 四個風場風速略高於其他四個風場，而且高緯度的高風速區特徵也特別明顯。

比較各風場在緯度上的分布情形，我們將八個風場一至十二月在各緯度的分布情形繪於圖 2.8。從圖上可看出，在多數月份中，QSCAT-PO.DAAC、QSCAT-RSS、SSM/I-RSS 三個風場的風速在各緯度上的分布都是較大的，而在南北緯 30 度以內 NRA、ECMWF 風速是較低的，在南北緯 30 度以外則是換為 QSCAT-SF 風速較低，QSCAT/NCEP、QSCAT-SF 風速在各緯度的分布上則是介於最高與最低風速之間。

接續比較各風場間的差異，由於 QSCAT 衛星的風速測量值與現地測量之間的誤差小於 1 m s^{-1} (Liu, 2002)，其資料被視為甚佳的風場資料，因此我們選用 QSCAT-RSS 作為比較的標準。當我們在以 QSCAT-RSS 作為比較標準時，亦可推估不同風場與真實風場的的差異。我們將七個風場的風速減去 QSCAT-RSS 的風速，繪製月平均風速差值全球分布圖，月平均風速差值全球分布圖繪於圖 2.9 至圖 2.15。

圖 2.9 為一至十二月 QSCAT-PO.DAAC 減去 QSCAT-RSS 的風速差值全球分布，從圖上可看到這兩個風場的差值絕大部分皆小於 $\pm 0.4 \text{ m s}^{-1}$ ，顯示出這兩個風場資料相當吻合。

圖 2.10 為 SSM/I-RSS 減去 QSCAT-RSS 的風速差值全球分布，從圖上可看到 SSM/I-RSS 在大洋的中間的風速高於 QSCAT-RSS 的風速，而在大洋周圍則

有低估風速的狀況。SSM/I-RSS在大洋周圍低估風速的原因是因為沿岸涼流所造成的影響 (Meissner 等,2001), 因為海流或寒冷的海表面溫度會使得輻射儀獲得的亮溫 (brightness temperature) 資料有誤差。

圖2.11為一至十二月 NRA 減去 QSCAT-RSS 的風速差值全球分布, 從圖上可看到 NRA 在在大部分海域的風速皆低於 QSCAT-RSS 的風速, 這樣的現象是因為 NRA 低估了氣壓間的振幅, 以致於 NRA 資料中有較弱的氣壓梯度以及風速 (Smith 等,2001)。在印度洋附近 NRA 低估風速的原因, 是因為 NRA 資料中忽略了降雨的考量性, 使得低估該區因為降雨引起熱對流所造成的風速 (Goswami 等,2003)。在太平洋、大西洋北邊以及大西洋南邊的春季,NRA 有高估風速的現象, 這是因為在春季時海洋的藻華現象 (spring bloom) 使得海面的漣漪 (capillary wave) 振盪幅度降低, 因而使 QSCAT 衛星低估風速 (Hashizume and Liu,2004)。

圖2.12為一至十二月 ECMWF 減去 QSCAT-RSS 的風速差值全球分布, 從圖上可看到 ECMWF 在大部分海域的風速皆低於 QSCAT-RSS 的風速, 而在靠近南極附近以及南美洲西岸有高估風速的情況。

圖2.13為一至十二月 QSCAT/NCEP 減去 QSCAT-RSS 的風速差值全球分布, 從圖上可看到這兩個風場的差值絕大部分皆小於 $\pm 0.4 \text{ m s}^{-1}$, 顯示出這兩個風場資料相當吻合。

圖2.14為一至十二月 QSCAT-SF 減去 QSCAT-RSS 的風速差值全球分布, 從圖上可看到這兩個風場的差值呈現出帶狀的分布, 在南北緯30度以外有較大的差值, 南北緯30度以內則有較小的差值。而且相較於其他六個風場對於 QSCAT-RSS 的差異, QSCAT-SF的差異特別明顯。

圖2.15為一至十二月 QSCAT-COAPS 減去 QSCAT-RSS 的風速差值全球分布, 從圖上可看到 QSCAT-COAPS 均勻地低估全球的風場, 僅在十月份太平洋的

區域有高估的情況出現。

接著沿用 Ebuchi(1999) 以等量線散布圖的方法，將全球海洋風場分為經緯各為 0.25° 的網格點，以 QSCAT-RSS 風場測得的風速作橫座標，其他七個風場測得的風速作縱座標，風速寬帶為 0.2 m s^{-1} ，決定網格點位置。決定完所有網格點的位置後，累計散布圖上每個位置的網格點個數，最後以等量線繪之。從等量線散布圖的曲線偏向位置我們可以知道，不同風場對於同區域所測得風速的差異。相對於對稱軸，若曲線偏向某一邊，則代表該風場所得到的風速大於另一風場所得到的風速，而圖形分布愈廣，則代表偏差的量愈大。將一、四、七、十月的月平均風速等量線散布圖繪於圖 2.16。同時，我們也比較七個風場與 QSCAT-RSS 的相關係數，計算結果繪於圖 2.17。

觀察不同風場在各月份的變化情形，可以知道各風場在不同月份所表現的圖形皆相似，這表示七個風場相較於 QSCAT-RSS 在時間上變化的改變並不大。

觀察 QSCAT-PO.DAAC 相較於 QSCAT-RSS 的等量線散布圖 (圖上後標為 1)，曲線幾乎集中在對稱軸上，這表示不論 QSCAT-RSS 是高或低風速，QSCAT-PO.DAAC 的風速幾乎與 QSCAT-RSS 相同。

觀察 SSM/I-RSS 相較於 QSCAT-RSS 的等量線散布圖 (圖上後標為 2)，曲線幾乎對稱分布在對稱軸上，這表示不論 QSCAT-RSS 是高或低風速，SSM/I-RSS 高估或低估風速的狀況參半。

觀察 NRA 與 ECMWF 相較於 QSCAT-RSS 的等量線散布圖 (圖上後標為 3、4)，等量線散布圖的曲線幾乎全偏向橫軸，這表示不論 QSCAT-RSS 是高或低風速，NRA 與 ECMWF 大部分皆低估風速。

觀察 QSCAT/NCEP 相較於 QSCAT-RSS 的等量線散布圖 (圖上後標為 5)，曲線略微偏向橫軸，但分布狀況平行於對稱軸，這表示不論 QSCAT-RSS 是高或低風速，QSCAT/NCEP 的風速雖然略比 QSCAT-RSS 來的小，但兩者空間分布情

形幾乎相同。

觀察 QSCAT-SF 相較於 QSCAT-RSS 的等量線散布圖 (圖上後標為6), 等量線散布圖的曲線幾乎全偏向橫軸, 這表示不論 QSCAT-RSS 是高或低風速, QSCAT-SF 皆低估風速。

觀察 QSCAT-COAPS 相較於 QSCAT-RSS 的等量線散布圖 (圖上後標為7), 線略微偏向橫軸, 但分布狀況平行於對稱軸, 這表示不論 QSCAT-RSS 是高或低風速, QSCAT-COAPS 的風速雖然略比 QSCAT-RSS 來的小, 但其分布情形幾乎與 QSCAT-RSS 相同。

接續比較各月份七個風場相較於 QSCAT-RSS 的相關係數, 從圖 2.17 上可看出 QSCAT-PO.DAAC、QSCAT/NCEP、QSCAT-COAPS 三個風場在各月份的線性相關係數皆大於 0.97, 這表示三者與 QSCAT-RSS 在空間分布上最為相似。SSM/I-RSS、QSCAT-SF、ECMWF, 三者在各月份的相關係數則介於 0.96 至 0.92 之間。NRA 的相關係數最低, 各月份的相關係數則介於 0.90 至 0.92 之間。

比較七個風場相較於 QSCAT-RSS 的差值平均值、差值標準方差, 計算結果繪於圖 2.18。在差值平均值上, 從圖 2.18(a) 上可看出 QSCAT-PO.DAAC、SSM/I-RSS、QSCAT/NCEP 三個風場的差值平均值最小, 介於 $\pm 0.2 \text{ m s}^{-1}$ 之間。NRA、ECMWF、QSCAT-SF、QSCAT-COAPS 的差值平均值較大, 各月份的差值平均值介於 -0.4 至 -1.0 m s^{-1} 之間。在差值標準方差上, 從圖 2.18(b) 上可看出 QSCAT-PO.DAAC、QSCAT/NCEP、QSCAT-COAPS 三個風場差值標準方差最小, 三者在各月份的差值標準方差皆小於 0.5 m s^{-1} 。NRA、SSM/I-RSS、QSCAT-SF、ECMWF, 四者在各月份的差值標準方差介於 0.6 至 1.0 m s^{-1} 之間, 其中又以 NRA 的的差值標準方差最大, 以上的分析告訴我們, 在七個風場中相較於 QSCAT-RSS 空間差異最大的就是 NRA。

2.5 風場資料分析的結果整理與討論

本章中從風場種類(2.1節)、時間特性 (2.3節)、空間特性 (2.4節) 去瞭解本研究所使用的風場風速特性。經由資料的分析, 我們可以得到以下的結論: 第一, 在時間特性上, 八個風場中除 QSCAT-SF 外, 其餘七個風場在時間上的變化趨勢皆相同。第二, 八個風場中 QSCAT-PO.DAAC、QSCAT-RSS、SSM/I-RSS、QSCAT/NCEP 屬於風速略高的風場, 全球平均風速約為 7.8 m s^{-1} , 其他四個風場全球平均風速約為 7.2 m s^{-1} 。第三, 我們發現風場間在空間上的變化特別明顯, 而且每種風場都有他本身的空間分布特徵。而風場風速在各緯度上的分布, QSCAT-PO.DAAC、QSCAT-RSS、SSM/I-RSS在各緯度上的分布都是較大的, 在南北緯30度以內 NRA、ECMWF 風速是較低的, 在南北緯30度以外則是換為 QSCAT-SF 風速較低, QSCAT/NCEP、QSCAT-SF風速在各緯度的分布上則是介於最高與最低風速之間。第四, 以 QSCAT-RSS 作為比較的標準, 我們可以知道 SSM/I-RSS、NRA、ECMWF、QSCAT-SF 與 QSCAT-RSS 在空間上的分布差異較大, 其中又以 NRA 差異最大, 而 QSCAT-SF 則在緯度分帶上有系統性的低估情況出現。第五, 從分析的結果我們得知風場資料即使是同一種類 (衛星遙測、再分析、合成型) 或使用同一衛星的原始資料, 並不代表該類所有風場資料必定相似, 風場資料的相似性決定於風場的演算方式。

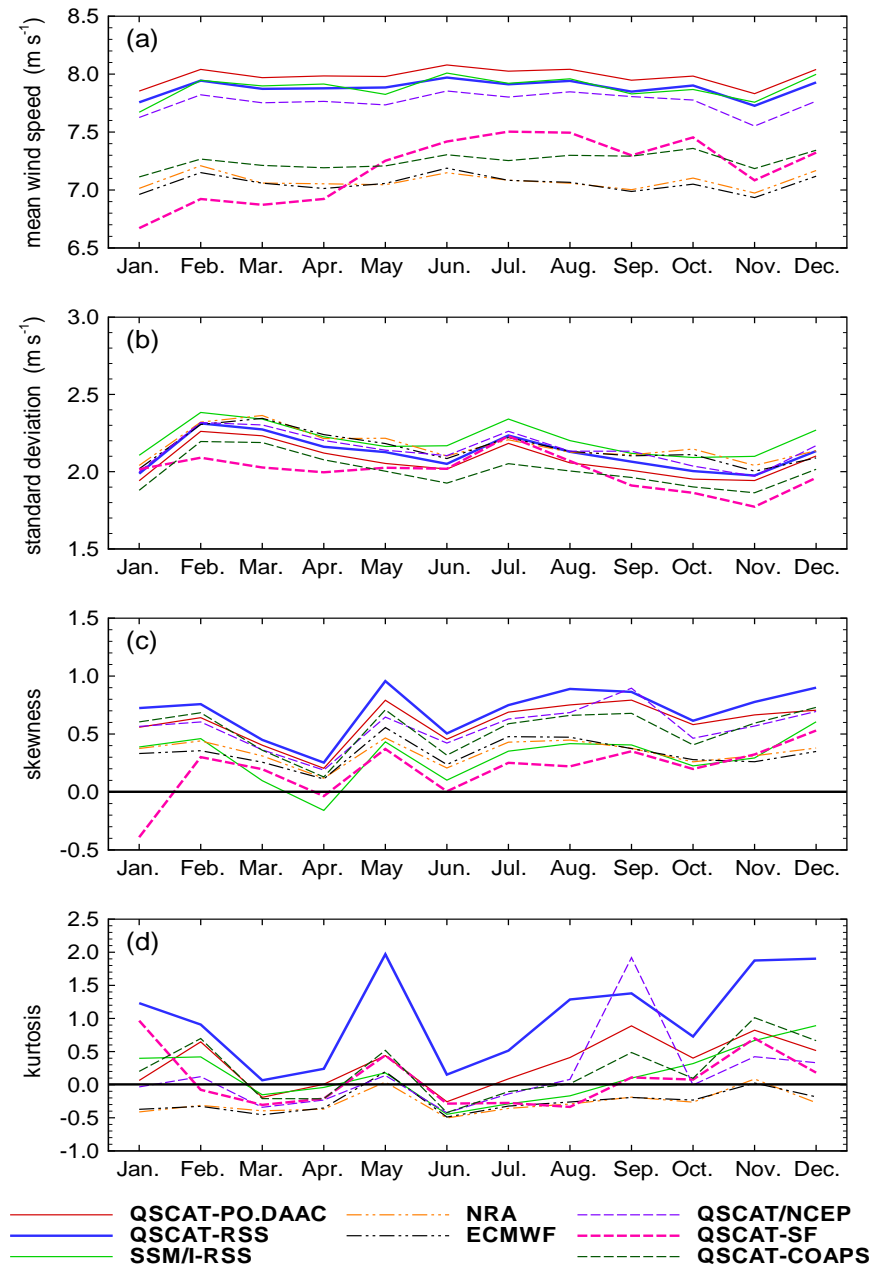


圖 2.1: 一至十二月月平均風場統計值特質。圖(a) 為月平均風速平均值 (mean)，圖 (b) 為月平均風速的標準方差 (standard deviation) 單位為 $m s^{-1}$ ，圖(c) 為月平均風速的風速機率密度函數偏斜度 (skewness) 單位為 $m s^{-1}$ ，圖(d) 為月平均風速的風速機率密度函數分布曲率度 (kurtosis)，橫軸表示月份。QSCAT-PO.DAAC以「紅細實線」表示、QSCAT-RSS「藍粗實線」表示、SSM/I-RSS「綠細實線」表示、NRA「黃細虛點點線」表示、ECMWF「黑細虛點點線」表示、QSCAT/NCEP「紫細虛線」表示、QSCAT-SF「桃紫粗虛線」表示、QSCAT-COAPS「墨綠細虛線」表示。(以下各圖的風場皆以此符號方式表示)。

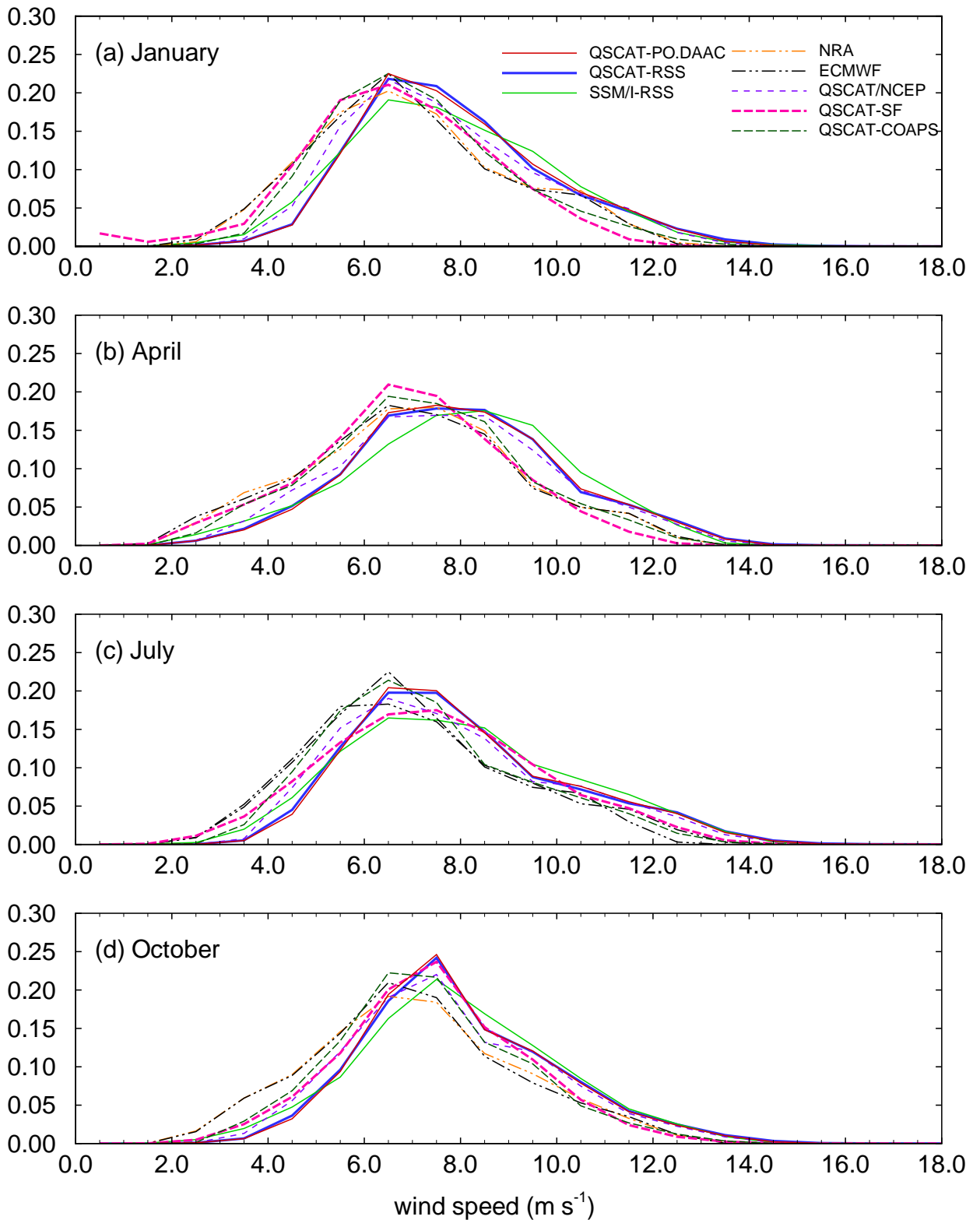


圖 2.2: 圖(a)、圖 (b)、圖 (c)、圖 (d) 分別為一、四、七、十月月平均風場的風速機率密度函數圖，縱軸表示特定風速網格數目佔所有網格的比例，橫軸表示風速大小，單位 m s^{-1} ，風速機率密度函數寬帶為 1 m s^{-1} 。

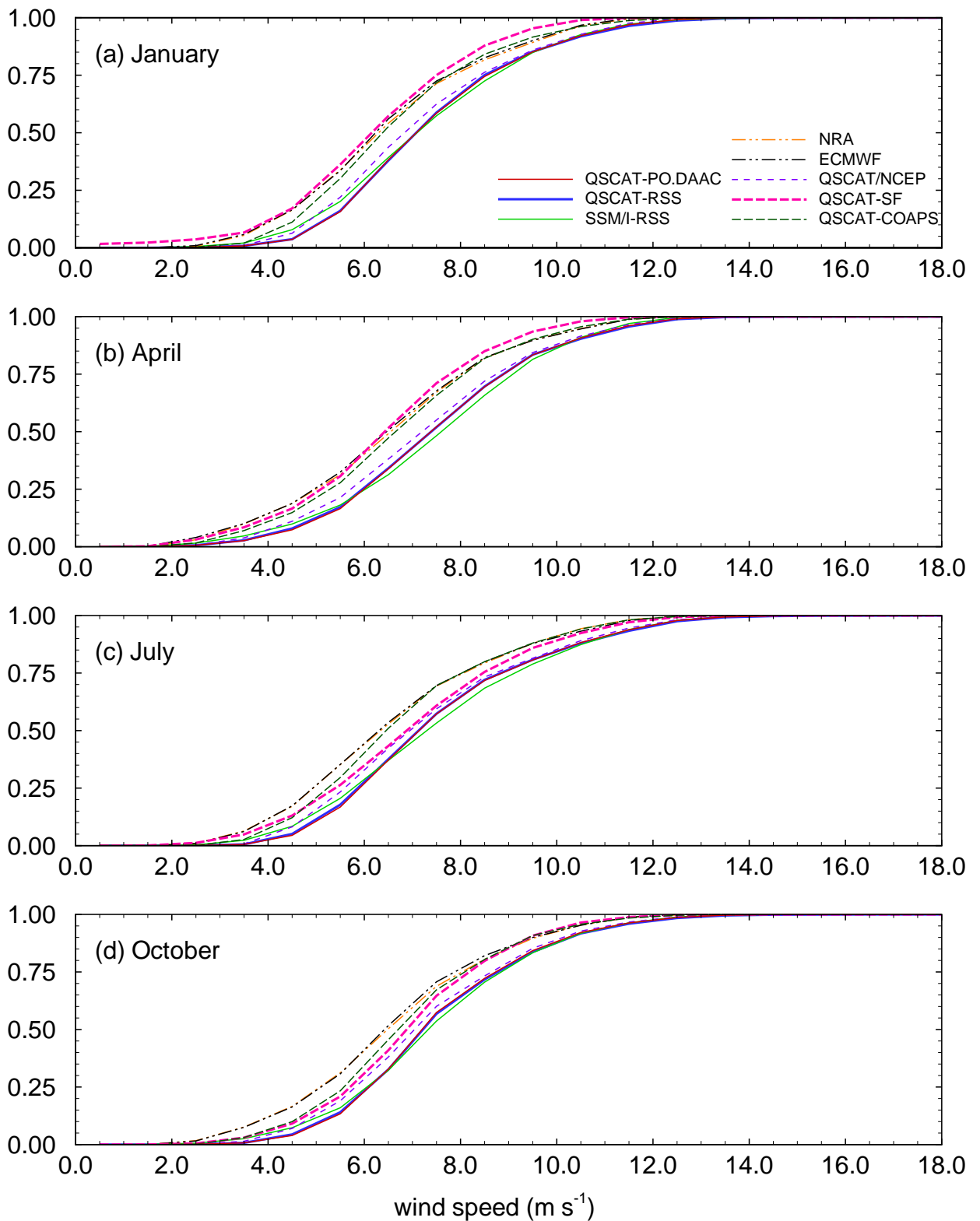


圖 2.3: 圖(a)、圖 (b)、圖 (c)、圖 (d) 分別為一、四、七、十月月平均風場的風速累計密度函數圖，縱軸表示特定風速以下網格數目佔所有網格的比例，橫軸表示風速大小，單位 m s^{-1} ，風速累計密度函數寬帶為 1 m s^{-1} 。

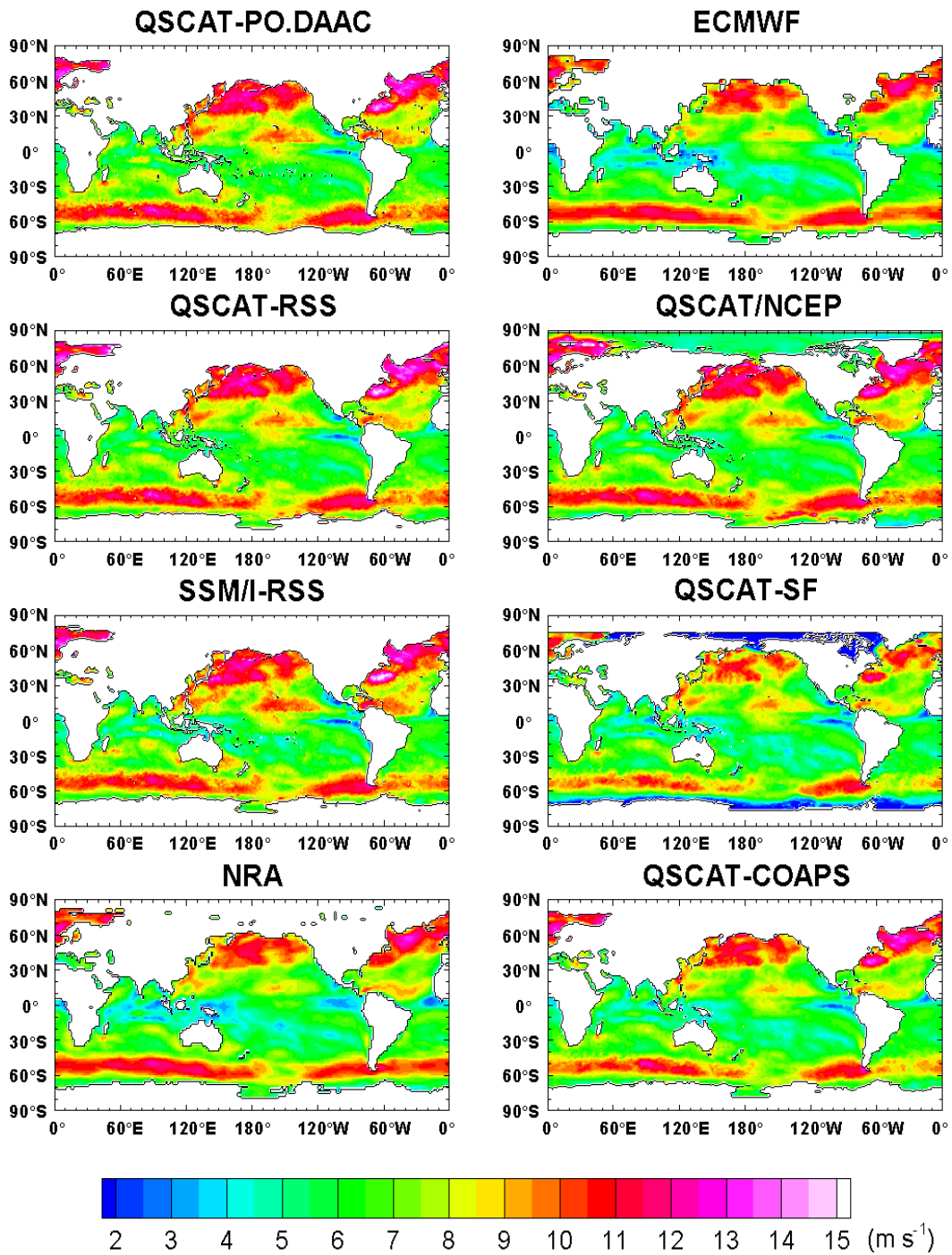


圖 2.4: 一月 QSCAT-PO.DAAC、QSCAT-RSS、SSM/I-RSS、NRA、ECMWF、QSCAT/NCEP、QSCAT-SF、QSCAT-COAPS 全球海洋月平均風速空間分布圖，下方圖例風速單位為 m s^{-1} ，空白區域表示陸地、冰塊或無風場資料。

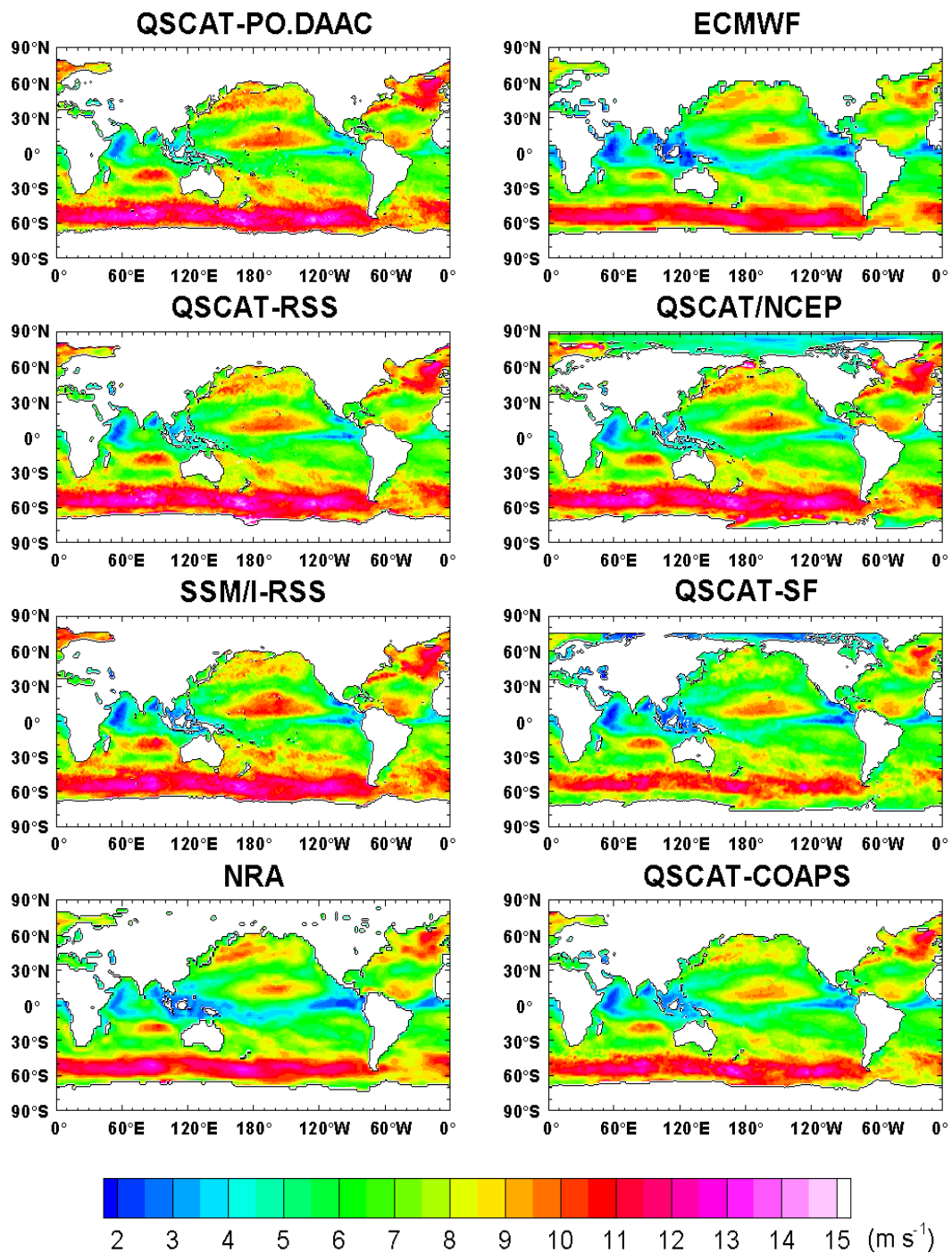


圖 2.5: 四月 QSCAT-PO.DAAC、QSCAT-RSS、SSM/I-RSS、NRA、ECMWF、QSCAT/NCEP、QSCAT-SF、QSCAT-COAPS 全球海洋月平均風速空間分布圖，下方圖例風速單位為 m s^{-1} ，空白區域表示陸地、冰塊或無風場資料。

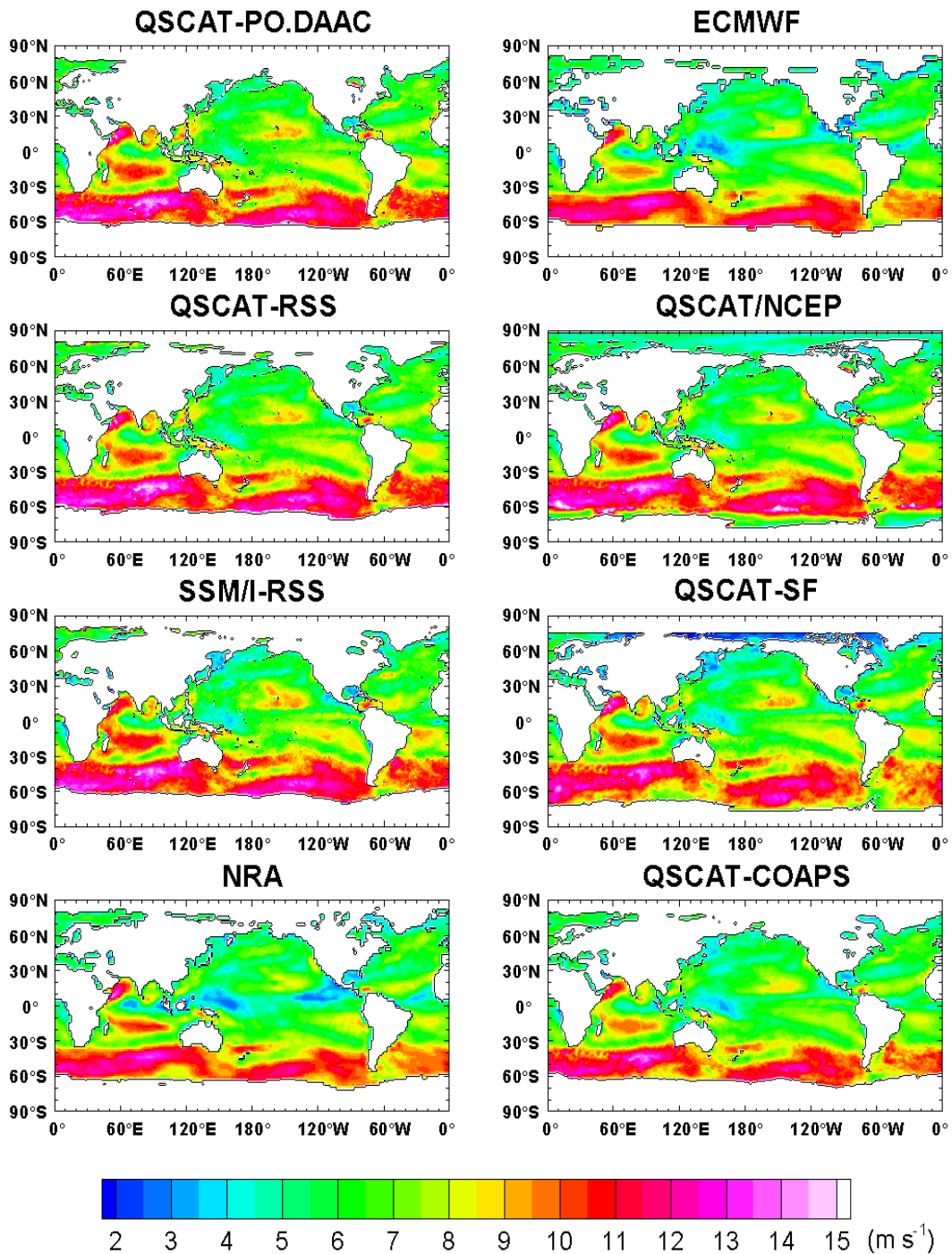


圖 2.6: 七月 QSCAT-PO.DAAC、QSCAT-RSS、SSM/I-RSS、NRA、ECMWF、QSCAT/NCEP、QSCAT-SF、QSCAT-COAPS 全球海洋月平均風速空間分布圖，下方圖例風速單位為 m s^{-1} ，空白區域表示陸地、冰塊或無風場資料。

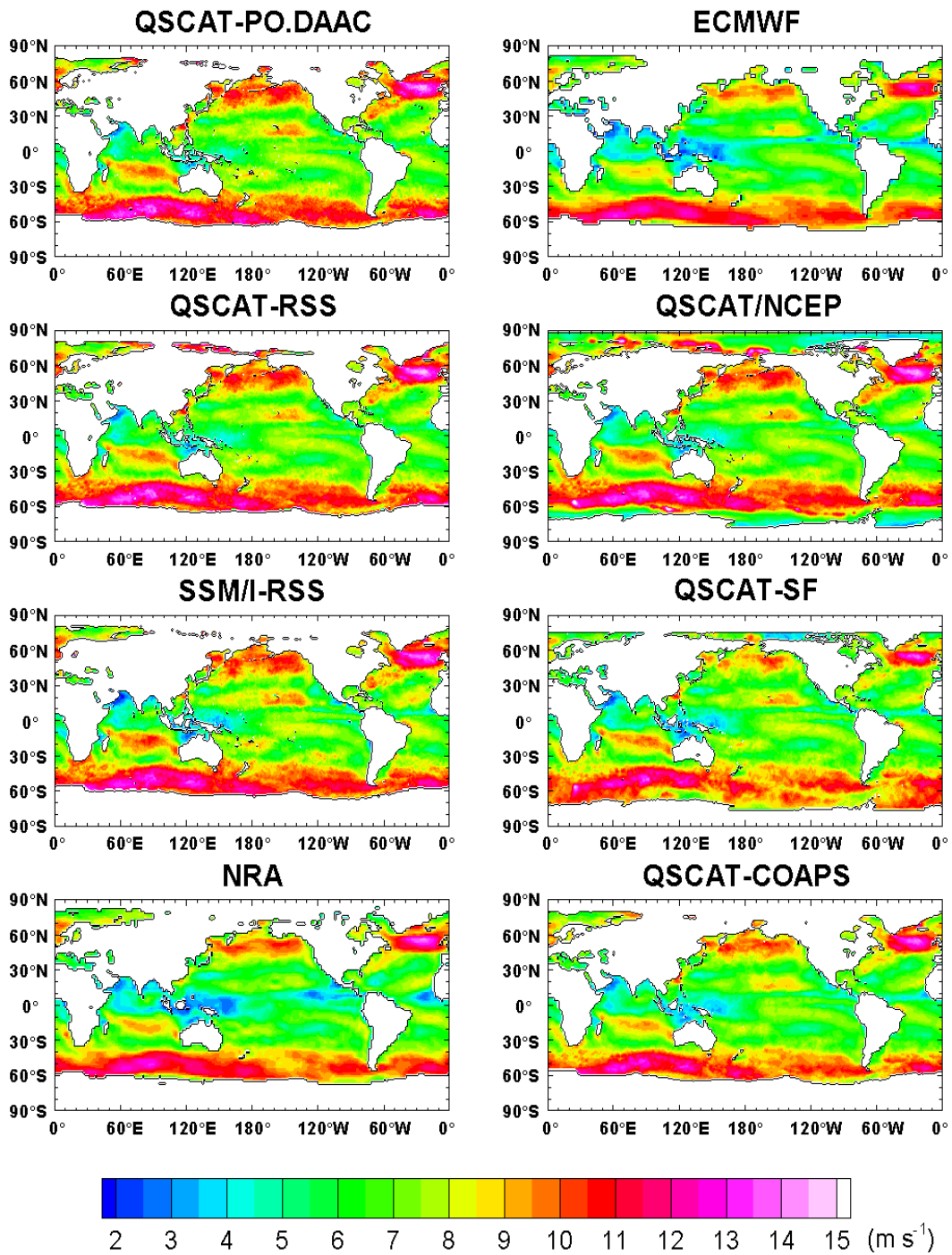


圖 2.7: 十月 QSCAT-PO.DAAC、QSCAT-RSS、SSM/I-RSS、NRA、ECMWF、QSCAT/NCEP、QSCAT-SF、QSCAT-COAPS 全球海洋月平均風速空間分布圖，下方圖例風速單位為 m s^{-1} ，空白區域表示陸地、冰塊或無風場資料。

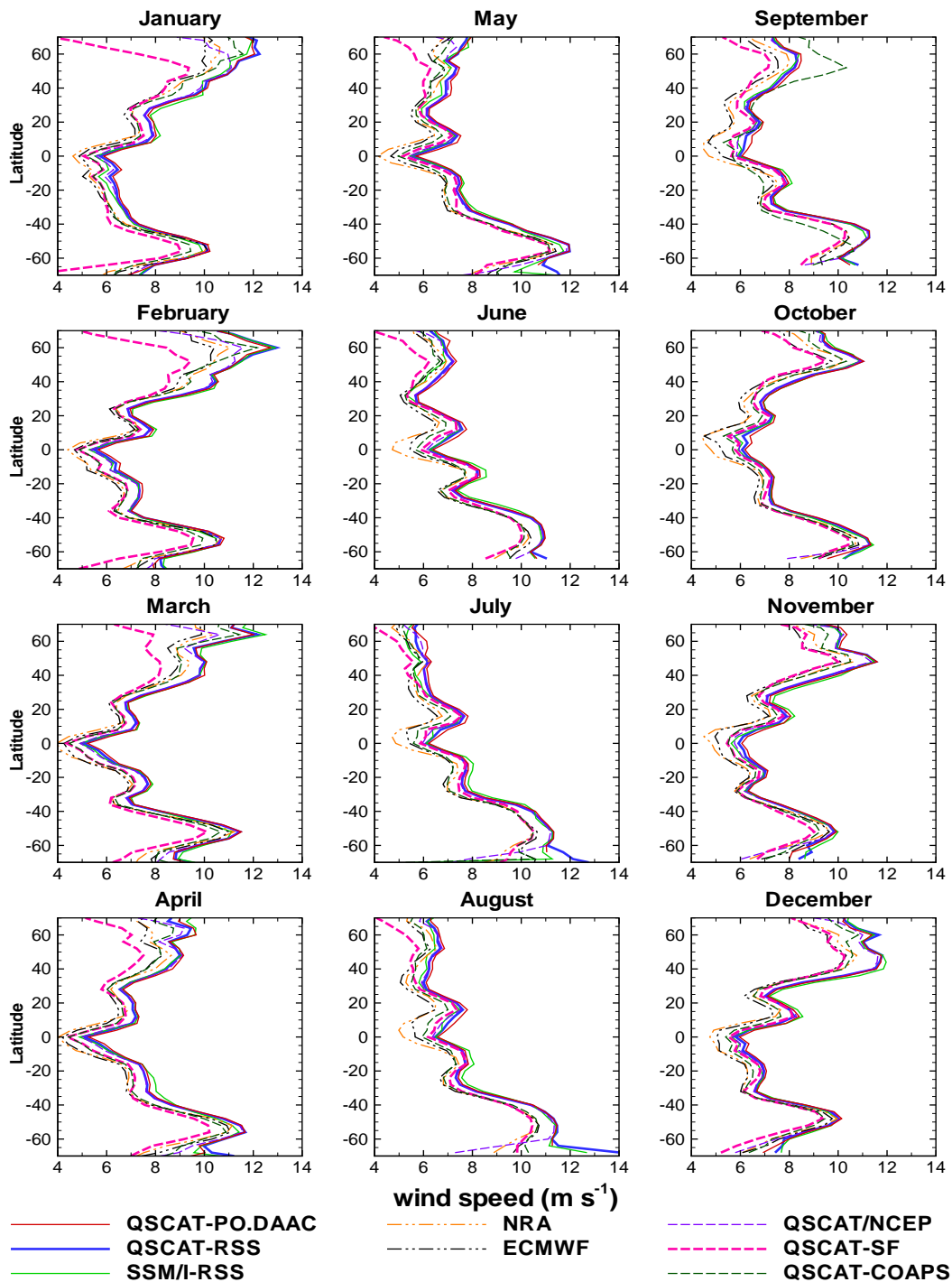


圖 2.8: 一至十二月各風場的全球海洋月平均風速在緯度上的分布，縱軸表示緯度，負值為南緯，正值為北緯，緯度空間寬帶為 4° ，橫軸表示風速，單位為 m s^{-1} 。

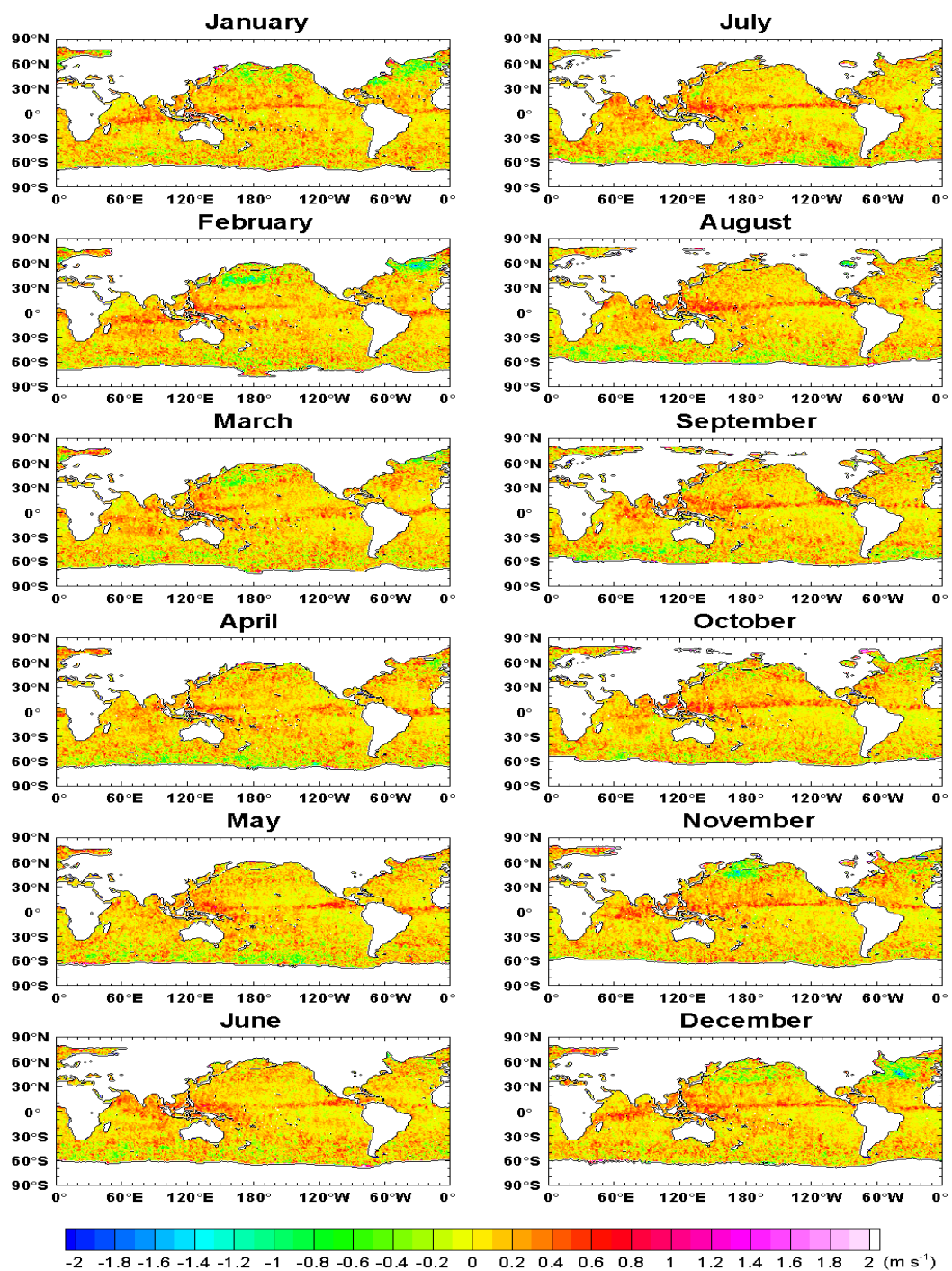


圖 2.9: 一至十二月QSCAT-PO.DAAC 減去 QSCAT-RSS 的風速差值空間分布圖, 下方圖例風速單位為 m s^{-1} , 空白區域表示陸地、冰塊或無風場資料。

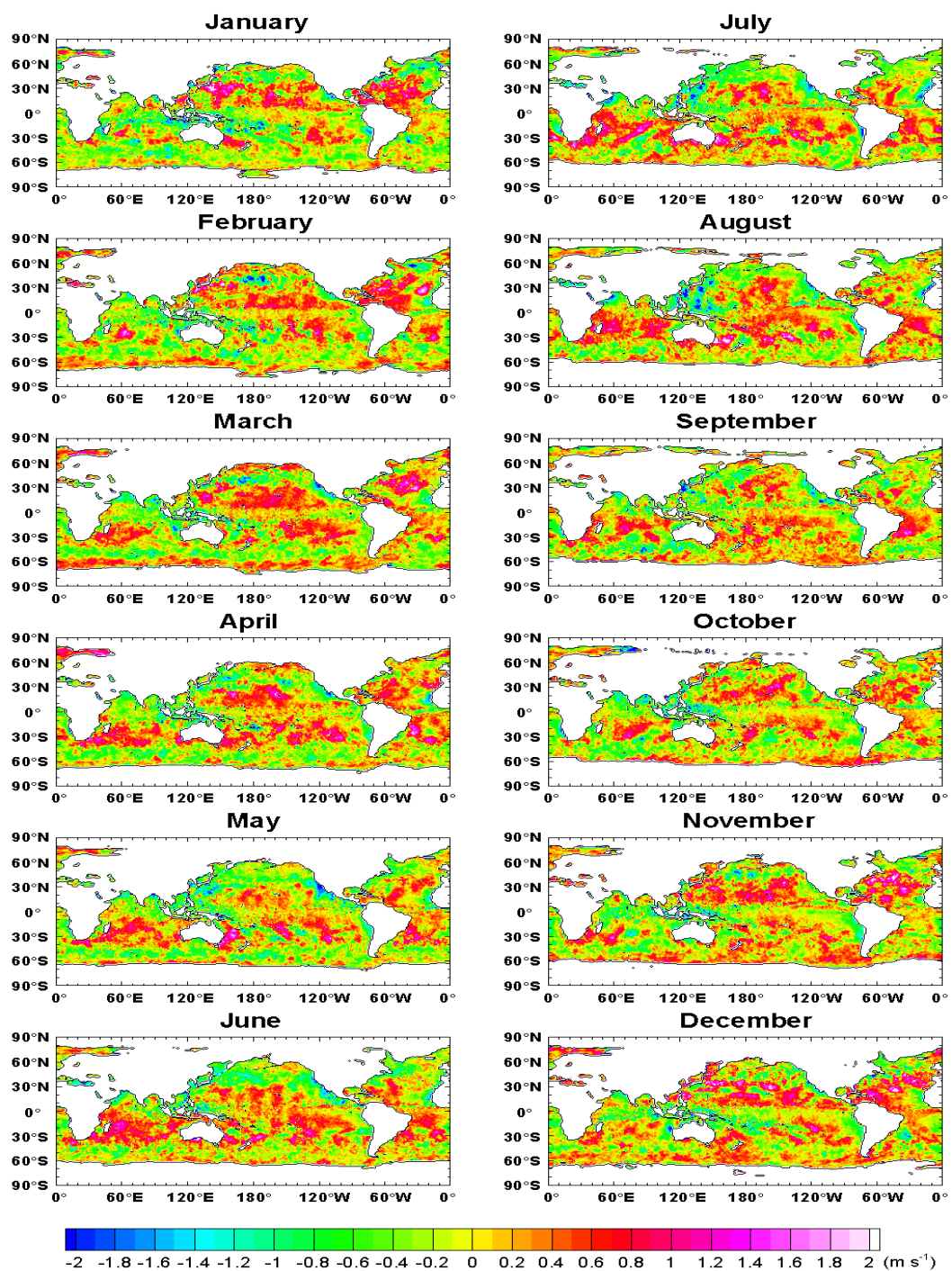


圖 2.10: 一至十二月SSM/I-RSS 減去 QSCAT-RSS 的風速差值空間分布圖，下方圖例風速單位為 m s^{-1} ，空白區域表示陸地、冰塊或無風場資料。

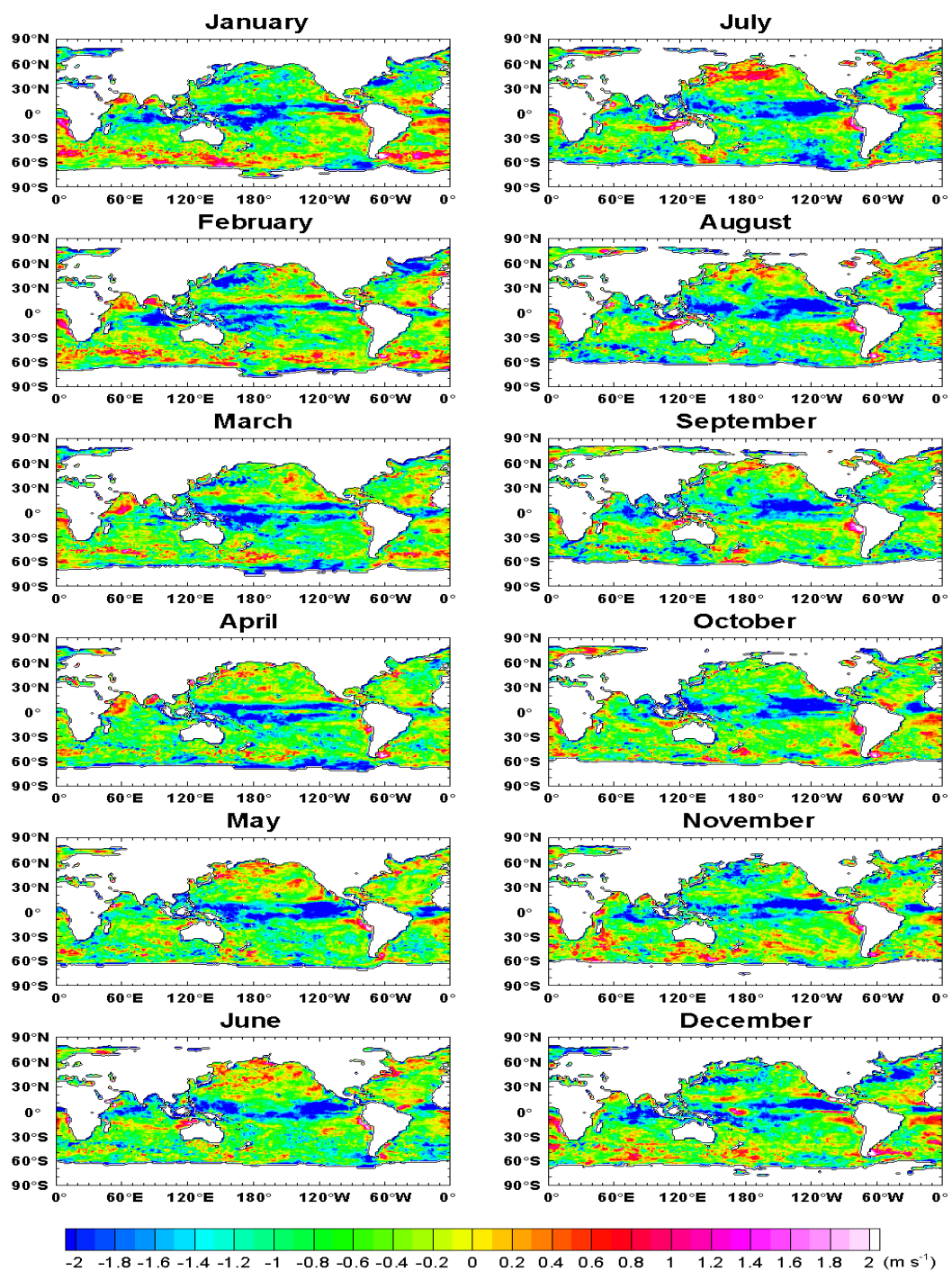


圖 2.11: 一至十二月NRA 減去 QSCAT-RSS 的風速差值空間分布圖，下方圖例風速單位為 m s^{-1} ，空白區域表示陸地、冰塊或無風場資料。

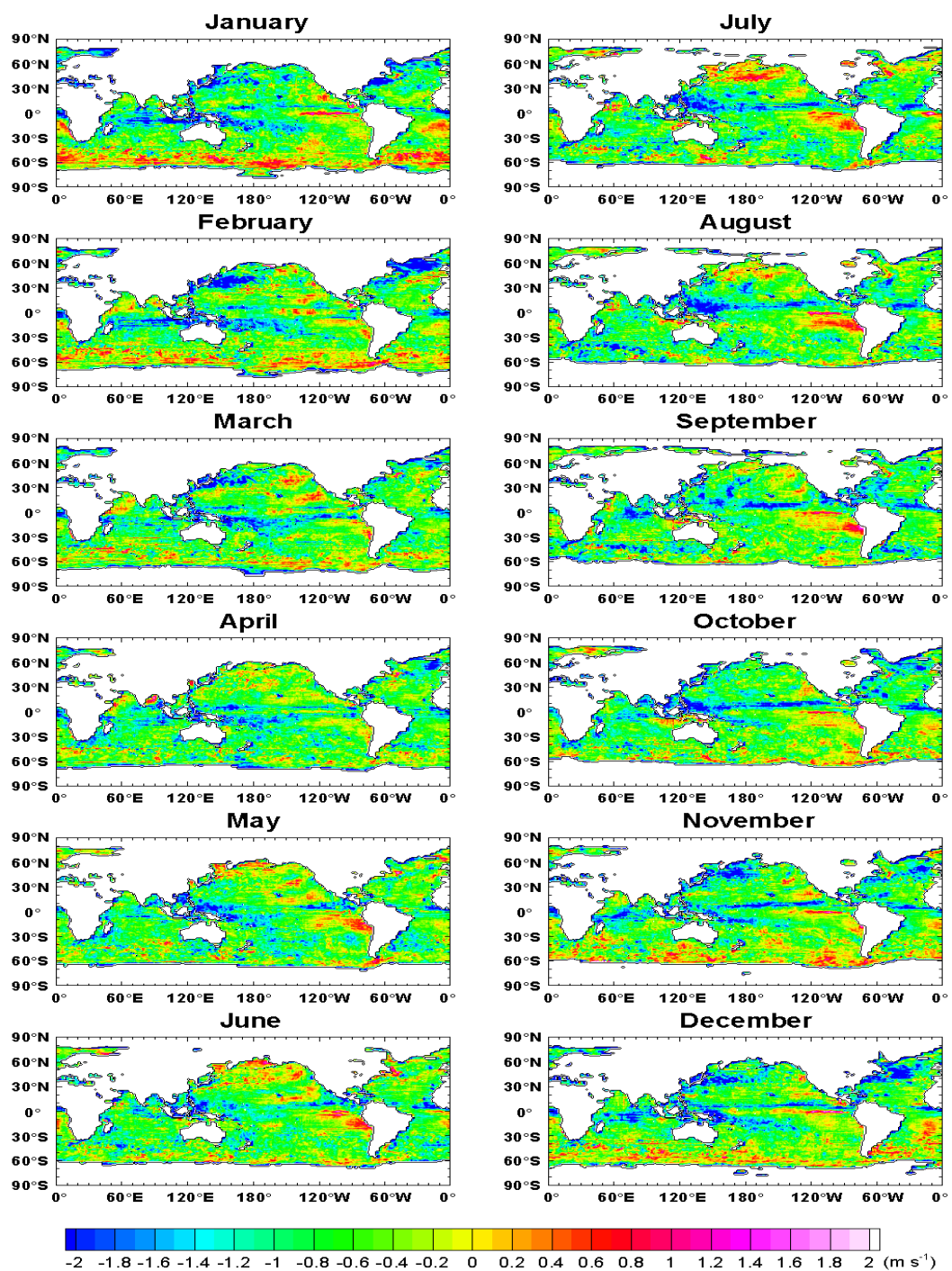


圖 2.12: 一至十二月ECMWF 減去 QSCAT-RSS 的風速差值空間分布圖，下方圖例風速單位為 m s^{-1} ，空白區域表示陸地、冰塊或無風場資料。

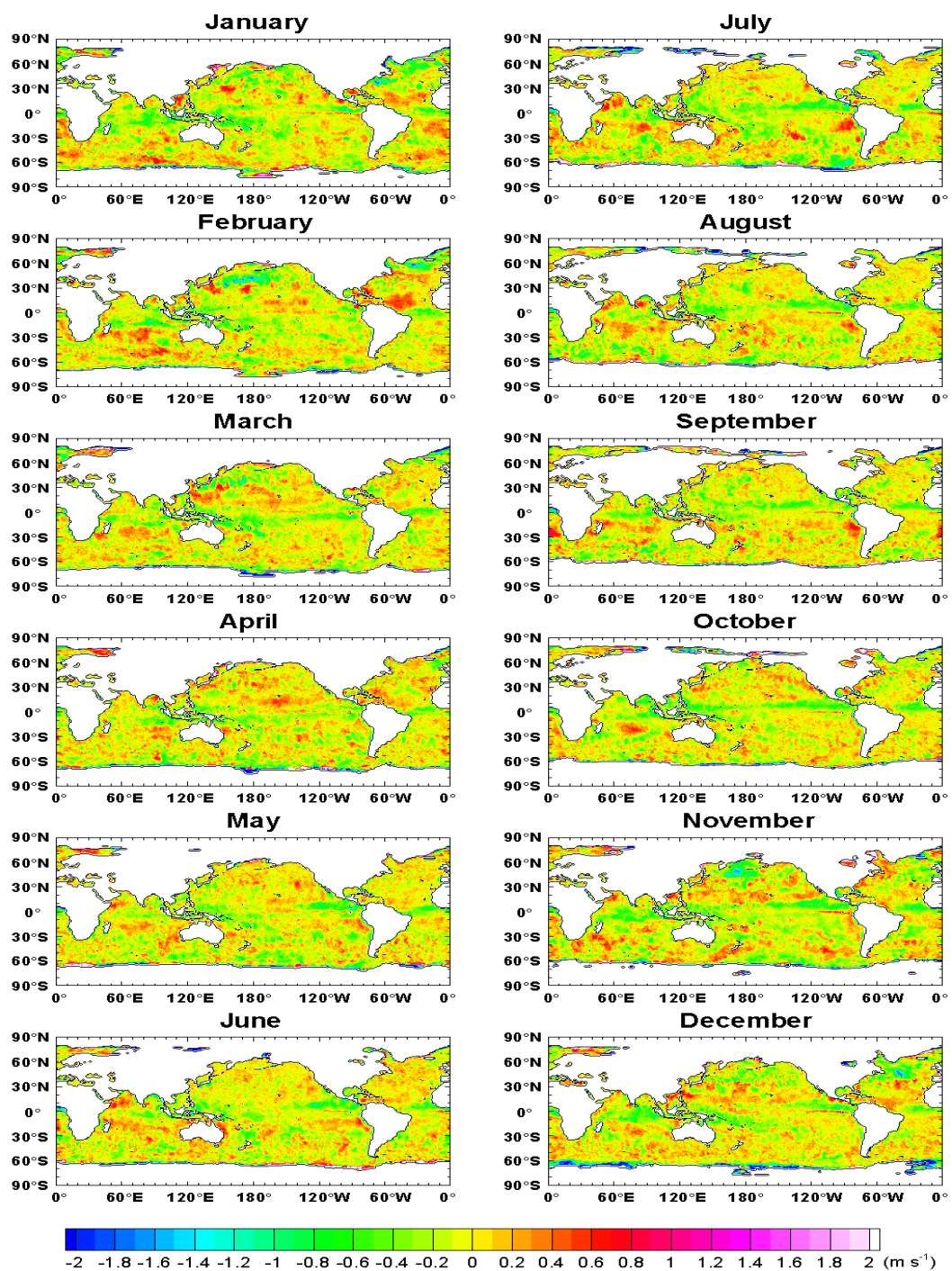


圖 2.13: 一至十二月QSCAT/NCEP 減去 QSCAT-RSS 的風速差值空間分布圖, 下方圖例風速單位為 m s^{-1} , 空白區域表示陸地、冰塊或無風場資料。

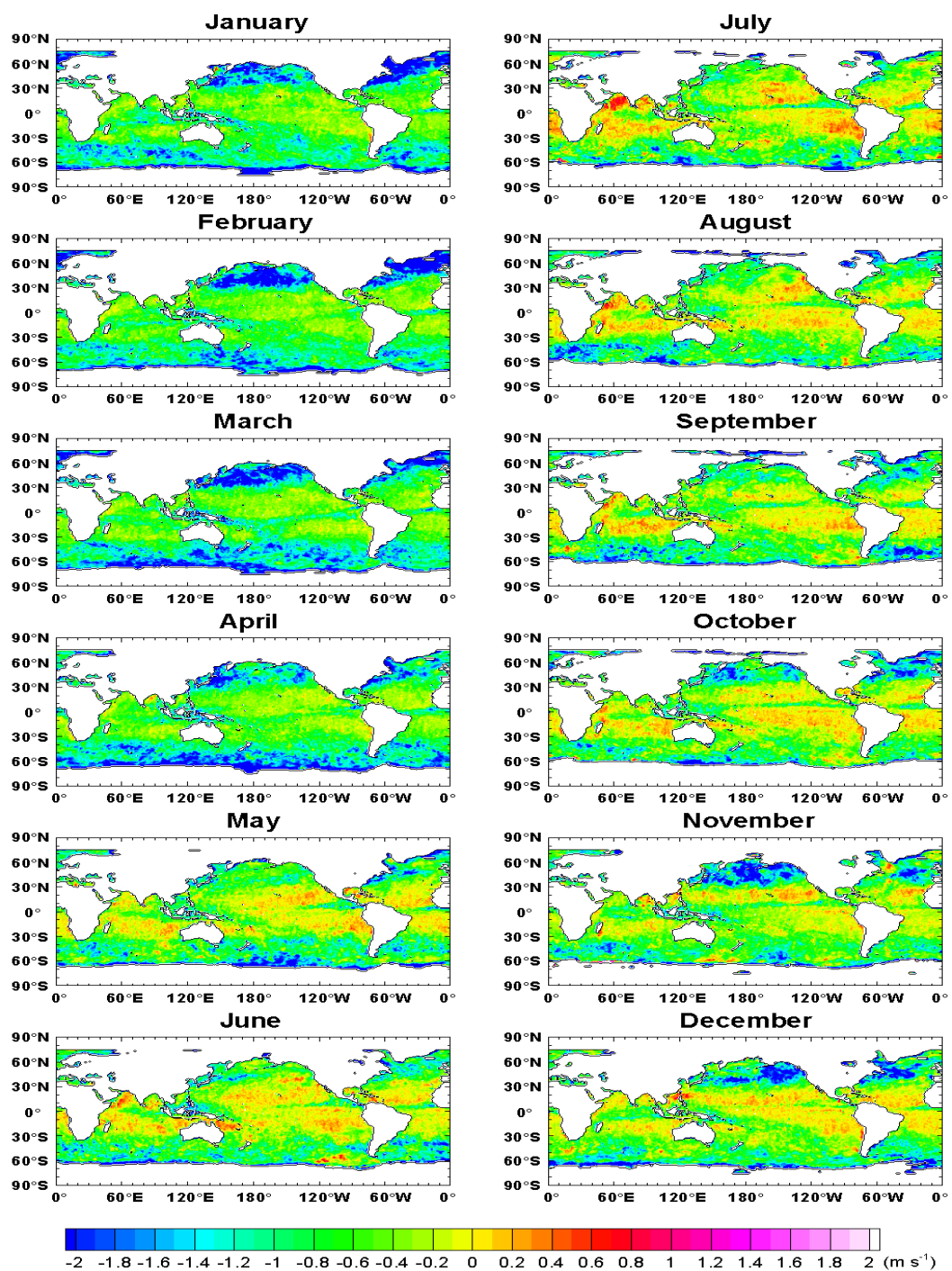


圖 2.14: 一至十二月QSCAT-SF 減去 QSCAT-RSS 的風速差值空間分布圖, 下方圖例風速單位為 m s^{-1} , 空白區域表示陸地、冰塊或無風場資料。

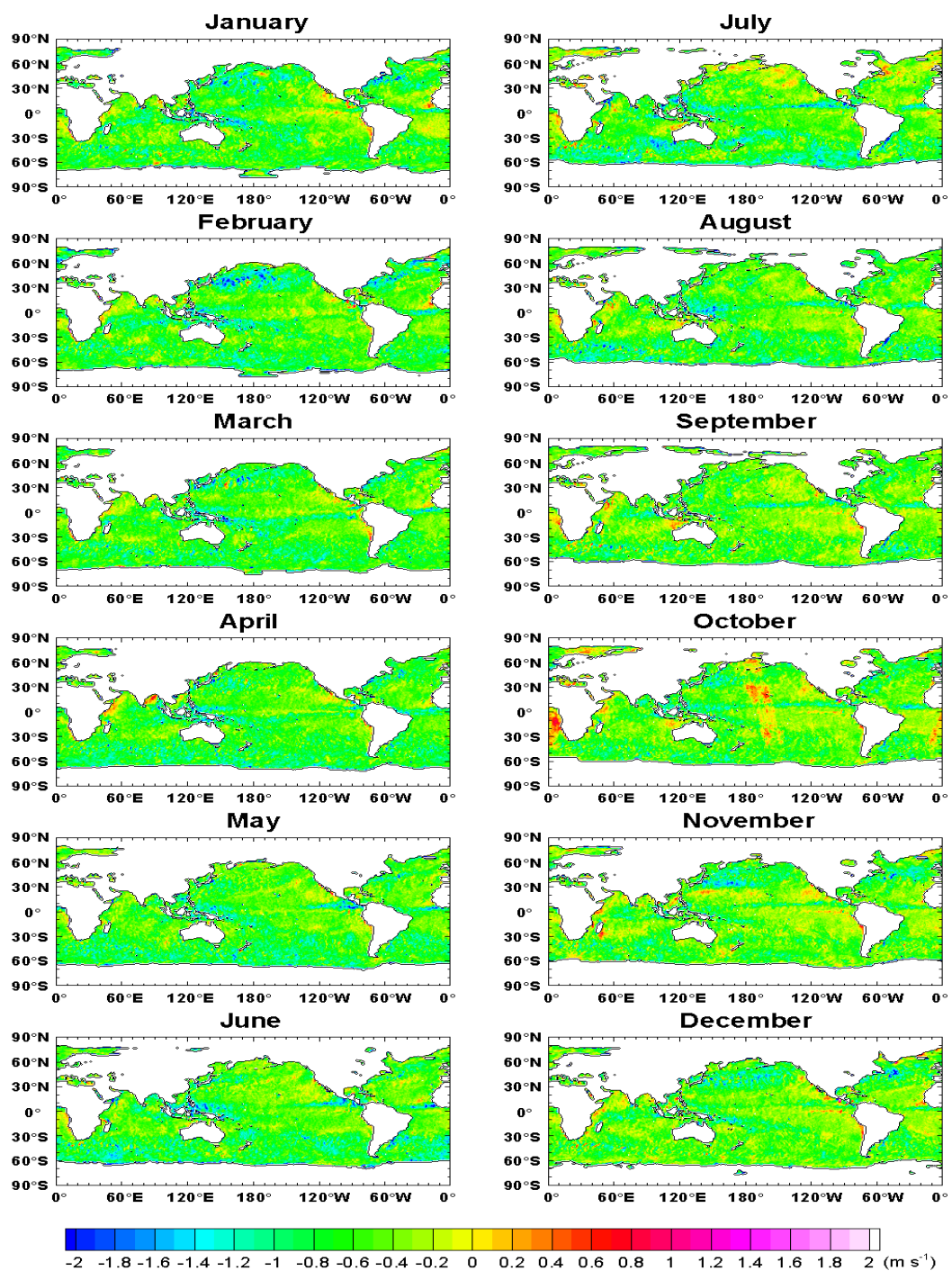


圖 2.15: 一至十二月QSCAT-COAPS 減去 QSCAT-RSS 的風速差值空間分布圖, 下方圖例風速單位為 m s^{-1} , 空白區域表示陸地、冰塊或無風場資料。

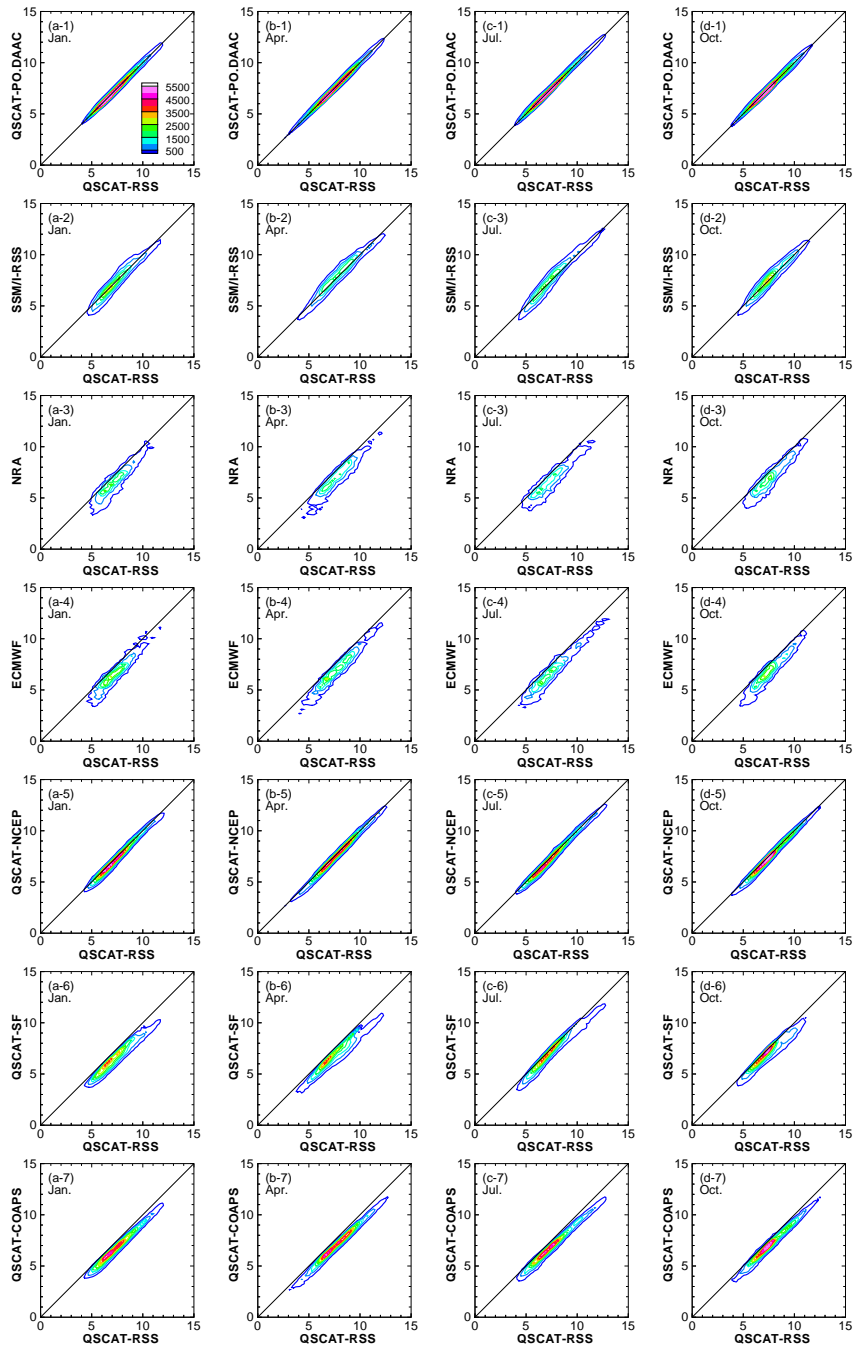


圖 2.16: 七個風場對QSCAT-RSS 一、四、七、十月月平均風場的等量線散布圖，標號中前標 a、b、c、d 分別代表一、四、七、十月，標號中後標1至7分別代表 QSCAT-PO.DAAC、SSM/I-RSS、NRA、ECMWF、QSCAT/NCEP、QSCAT-SF、QSCAT-COAPS 七個風場。縱軸表示後標風場，橫軸表示 QSCAT-RSS 風場，風速單位為 m s^{-1} ，兩風場風速寬帶單位皆為 0.2 m s^{-1} 。

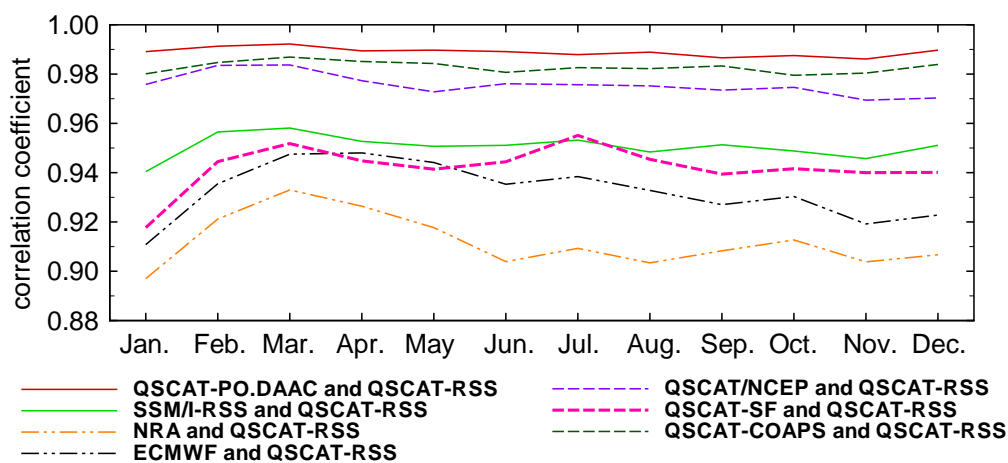


圖 2.17: 七個風場對QSCAT-RSS 月平均風場的相關係數, QSCAT-PO.DAAC相對於 QSCAT-RSS 以「紅細實線」表示、SSM/I-RSS相對於 QSCAT-RSS 以「綠細實線」表示、NRA相對於 QSCAT-RSS 以「黃細虛點點線」表示、ECMWF相對於 QSCAT-RSS 以「黑細虛點點線」表示、QSCAT/NCEP相對於 QSCAT-RSS 以「紫細虛線」表示、QSCAT-SF相對於 QSCAT-RSS 以「桃紫粗虛線」表示、QSCAT-COAPS相對於 QSCAT-RSS 以「墨綠細虛線」表示。縱軸表示相關係數, 橫軸表示月份。

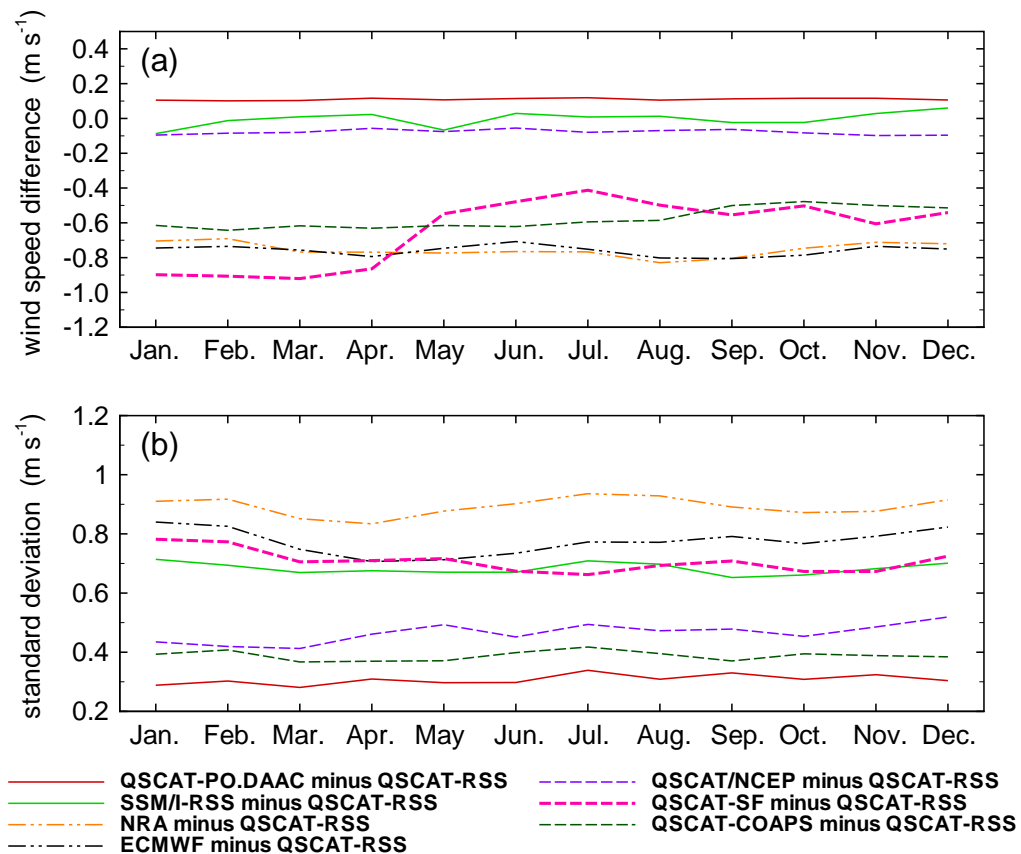


圖 2.18: 一至十二月七個風場與QSCAT-RSS 差值的月平均風場統計值特質。圖 (a) 為月平均風速差值平均值, 圖 (b) 為月平均風速差值的標準方差, 圖 (a) 縱軸表示月平均風速差值平均值, 圖 (b) 為縱軸表示月平均風速差值標準方差, 橫軸表示月份。QSCAT-PO.DAAC減去 QSCAT-RSS 以「紅細實線」表示、SSM/I-RSS減去 QSCAT-RSS 以「綠細實線」表示、NRA減去 QSCAT-RSS 以「黃細虛點點線」表示、ECMWF減去 QSCAT-RSS 以「黑細虛點點線」表示、QSCAT/NCEP減去 QSCAT-RSS 以「紫細虛線」表示、QSCAT-SF減去 QSCAT-RSS 以「桃紫粗虛線」表示、QSCAT-COAPS減去 QSCAT-RSS 以「墨綠細虛線」表示。

Chapter 3

全球海洋風場時空變化對計算大氣-海洋二氧化碳氣體交換係數 K 與二氧化碳氣體傳輸速度 k 的影響

計算大氣-海洋二氧化碳通量值 F [單位為 $\text{mole s}^{-1} \text{ m}^{-2}$] 的方式如3.1a式、

3.1b式

$$F = 2.778 \times 10^{-12} \times k \times s \times \Delta p\text{CO}_2 \quad (3.1a)$$

$$= 3.169 \times 10^{-8} \times K \times \Delta p\text{CO}_2 \quad (3.1b)$$

通量值 F 等於二氧化碳氣體傳輸速度 (transfer velocity, k) [單位為 cm hr^{-1}] 乘上二氧化碳氣體在海水的溶解度 (solubility, s) [單位為 $\text{mole m}^{-3} \text{ atm}^{-1}$] 再乘上二氧化碳在海洋-大氣之間的分壓差 ($\Delta p\text{CO}_2$) [單位為 μatm]，或是寫作二氧化碳氣體交換係數 K (exchange coefficient; 二氧化碳氣體交換係數 K 等於傳輸速度 k 與溶解度 s 的乘積, $K = k \times s$) [單位為 $\text{mole m}^{-2} \text{ yr}^{-1} \mu\text{atm}^{-1}$]，乘上海洋-大氣二氧化碳分壓差 $\Delta p\text{CO}_2$ 。3.1a式中 2.778×10^{-12} 與 3.1b式中 3.1688×10^{-8} 的數字皆為單位轉換之常數。

在計算全球海洋風場變化造成的大氣-海洋二氧化碳通量差值的過程中，由於海洋-大氣二氧化碳分壓差資料 $\Delta p\text{CO}_2$ 是將實測資料經過處理後獲得，因而我們將之視為定值數據資料。所以，要瞭解大氣-海洋二氧化碳通量的差值變化便需知道二氧化碳氣體交換係數 K 或二氧化碳氣體傳輸速度 k 在時間與空間上的變化情形。本研究於3.1節

分析二氧化碳氣體交換係數 K 的環境參數（風速、鹽度、海表面溫度）對於計算二氧化碳氣體交換係數 K 的影響程度，3.2節比較使用不同全球海洋月平均風場來計算二氧化碳氣體交換係數 K 所造成的差異，3.3節比較使用長期風場（月平均）與短期風場（6小時）對於計算二氧化碳氣體傳輸速度 k 所造成的差異。3.4節歸納前兩節分析結果，並提供未來要計算二氧化碳通量時所應注意的事項。

3.1 交換係數的環境參數對於計算二氧化碳氣體交換係數 k 的影響

二氧化碳氣體交換係數 K 等於二氧化碳氣體傳輸速度 k 與二氧化碳氣體溶解度 s 的乘積： $K = k \times s$ 。影響二氧化碳氣體傳輸速度 k 的環境參數有海面上10公尺高風速 U_{10} 、降雨強度、海表面溫度 SST 、介面活性劑濃度等，而在本研究中僅考慮風速 U_{10} 、海表面溫度 SST 對於二氧化碳氣體傳輸速度的影響。影響二氧化碳氣體溶解度 s 的環境參數則有海表面溫度 SST 與海表面鹽度 S 。於是本節討論風速 U_{10} 、海表面溫度 SST 、海表面鹽度 S 這三個環境參數對於計算交換係數 K 的影響程度。

3.1.1 二氧化碳氣體傳輸速度 k 與海表面高空10公尺風速 U_{10} 之關係

有關氣體傳輸速度 k 與距海表面高空10公尺風速 U_{10} 之關係函式 $k = k(U_{10})$ ：本研究使用國際上最普遍引用的 Wanninkhof 提出的二次 (Quadratic) 風速多項式二氧化碳氣體傳輸速度函式，以及 Wanninkhof and McGillis 提出的三次 (Cubic) 風速多項式二氧化碳氣體傳輸速度函式來進行計算，以下分別討論此二函式與距海表面高空10公尺風速 U_{10} 之關係函式 $k = k(U_{10})$ 之關係；二氧化碳氣體傳輸速度 k 隨風速的變化情形繪於圖3.1。

Wanninkhof從過去有關氣體傳輸速度的研究資料中發現到，氣體傳輸資料的選取方式 (Fetch Dependence of Gas Transfer) 以及風速變異情況 (Wind Speed Variance) 會造成估算氣體傳輸速度的差異，於是 Wanninkhof 提出以二次風速多

項式函式取代從前的一次風速多項式函式，重新估算氣體傳輸速度。他使用 Broecker 等 (1986,1985) 及 Cember(1989) 得到的全球海表面¹⁴C 傳輸速度研究數據資料以二次全球海表面 10 公尺高平均風速多項式函式作逼近，得到一長期風速傳輸速度函式 (3.2b 式)。另外，他假設全球風場的機率函數為雷利 (Rayleigh) 機率函數¹，以¹⁴C 傳輸速度研究數據資料以及平均風速資料推算出短期風速傳輸速度函式²(3.2a 式)。其提出的二次風速多項式二氧化碳氣體傳輸速度函式關係如下：

$$k = 0.31U_{10}^2 \left(\frac{Sc}{660} \right)^{-1/2} \quad \text{適用短期風速} \quad (3.2a)$$

$$k_{av} = 0.39U_{10av}^2 \left(\frac{Sc}{660} \right)^{-1/2} \quad \text{適用長期風速} \quad (3.2b)$$

上二式之適用範圍分別代表適用短期風速 (風速取樣間期小於一日) 的二氧化碳氣體傳輸速度函式 (3.2a 式)，以及適用長期風速 (風速取樣間期大於一個月) 的二氧化碳氣體傳輸速度函式 (3.2b 式)。k 之單位為 [cm hr⁻¹]，式中 $Sc = \nu/d$ 表示為史密特數 (Schmidt Number)， ν 為流體之黏滯係數 (kinematic viscosity)， d 為氣體在流體中的擴散係數 (diffusivity)。常數 660 表示為在 20°C 海水的史密特參數，而在有波紋的液體表面 (free surface) 之下，傳輸速度 k 正比於史密特數 Sc 的負二分之一次方 ($k \propto Sc^{-1/2}$) (Ledwell,1982,1984)， U_{10av} 表示長期風速， k_{av} 表示長期二氧化碳氣體傳輸速度。

在 1992-1999 年間，科學家對大氣-海洋介面氣體傳輸的知識有了更多的瞭解，他們

¹雷利機率函數的說明與推導過程請見附錄 A.1

²短期與長期二次風速多項式二氧化碳氣體傳輸速度函式推導過程請見附錄 A.2

發現在低到中等風速區間，海面上的介面活性劑會阻擋氣體的傳輸，而在高風速時海面則會產生氣泡，這些氣泡會增強大氣-海洋介面氣體的傳輸。於是 Wanninkhof 與 McGillis 根據相關的研究提出以三次風速多項式近似二氧化碳氣體傳輸速度的想法，他們並以 Gas Ex-98的氣體傳輸速度觀測數據以二次風速多項式函式與三次風速多項式函式去作逼近，從逼近的結果他們發現使用三次風速多項式函式比二次風速多項式函式更能近似觀測結果，接著他們以 Broecker 等 (1986) 得到的全球海表面¹⁴C 傳輸速度研究數據資料，假設二氧化碳氣體傳輸速度為三次風速多項式函式，得到短期風速的傳輸速度函式 (風速取樣間期小於一日,3.3a式)。同時假設全球風場的機率函數為雷利機率函數，以逼近的方式得到三次長期風速多項式二氧化碳氣體傳輸速度函式 (風速取樣間期大於一個月,3.3b式)。其提出的三次風速多項式二氧化碳氣體傳輸速度函式如下³:

$$k = 0.0283U_{10}^3 \left(\frac{Sc}{660} \right)^{-1/2} \quad \text{適用短期風速} \quad (3.3a)$$

$$k_{av} = 0.054U_{10av}^3 \left(\frac{Sc}{660} \right)^{-1/2} \quad \text{適用長期風速} \quad (3.3b)$$

使用二次風速多項式函式與使用三次風速多項式函式在計算上的差別為二氧化碳氣體傳輸速度 k 時的非線性效應強弱差異，當使用三次風速多項式函式所得到的二氧化碳氣體傳輸速度要比使用二次風速式多項式函式來的大。

3.1.2 史密特數 Sc 與溫度之關係

在傳輸速度函式 $k = k(U_{10}, Sc)$ 的史密特數 Sc 是海表面溫度 SST 的函數

³短期與長期三次風速多項式二氧化碳氣體傳輸速度函式推導過程請見附錄A.3

($S_c = S_c(SST)$)。Wanninkhof(1992) 分析 Jahne(1987) 的研究資料以海表面溫度之三次多項式近似當海水鹽度為 $35^0/_{00}$ 時史密特數 S_c 對攝氏溫度 t 變化之關係函數:

$$S_c = A - Bt + Ct^2 - Dt^3 \quad (3.4)$$

3.4式中常數 $A = 2073.1, B = 125.62, C = 3.6276, D = 0.043219$ 。本研究中重新分析 Jahne 的研究資料, 我們發現以海表面溫度之五次多項式能夠更精確近似 海水鹽度為 $35^0/_{00}$ 時史密特數 S_c 對攝氏溫度 t 變化之關係函數:

$$S_c = A - Bt + Ct^2 - Dt^3 + Et^4 - Ft^5 \quad (3.5)$$

3.5式中常數 $A = 2037.2, B = 134.01, C = 5.1269, D = 0.130740, E = 0.0019866, F = 0.000013155$ 。

3.1.3 二氧化碳氣體溶解度 s 與溫度、鹽度之關係

二氧化碳氣體溶解度 s 是溫度 T 與鹽度 S 的函數 ($s = s(T, S)$)。依 Weiss(1974) 之測量可得二氧化碳氣體溶解度 s 對絕對溫度 T 與鹽度 S 的近似函式:

$$s = 1000 \times \exp \left\{ A_1 + A_2 \left(\frac{100}{T} \right) + A_3 \log \left(\frac{T}{100} \right) \right\} + 1000 \times \exp \left\{ S \left[B_1 + B_2 \left(\frac{100}{T} \right) + B_3 \log \left(\frac{T}{100} \right) \right] \right\} \quad (3.6)$$

3.6式溶解度 s 單位為 $[\text{mole m}^{-3} \text{ atm}^{-1}]$, 溫度 T 單位為絕對溫度 $^{\circ}\text{K}$ [$^{\circ}\text{K} = 273.15 + ^{\circ}\text{C}$], 鹽度 S 單位為 [practical alinity unit;psu], 常係數 $A_1 = -58.0931, A_2 = 90.5069, A_3 = 22.294, B_1 = 0.027766, B_2 = -0.02588, B_3 = 0.0050578$ 。

3.1.4 風速 U_{10} 、海表面溫度 SST 、海表面鹽度 S 對於計算二氧化碳氣體交換係數 K 的影響

瞭解風速 U_{10} 、海表面溫度 SST 、海表面鹽度 S 與交換係數函式之關係後, 現在我們來

比較風速 U_{10} 、海表面溫度 SST 、海表面鹽度 S 這三個環境參數對於計算二氧化碳氣體交換係數 K 的影響程度。

海表面溫度 SST 資料我們採用 NOAA 單位 NESDIS(National Environmental Satellite, Data, and Information Service) 提供的 Interim Version 4.1 5-channel AVHRR(Advanced Very High Resolution Radiometers) 最佳海表面溫度⁴ AVHRR的測量原理為接收海洋表面發出的微波輻射，再利用微波輻射強度與海表面溫度相關性，獲得海表面溫度資料。本研究中使用的 AVHRR SST 是2000年時間解析度為每月一筆，空間解析度為經緯度各 0.5° (54公里) 的資料，其 SST 的測量精確度為 0.3°C 。詳細資料說明請見參考文獻 [29]。

海表面鹽度 S 資料我們採用 NOAA 單位 NESDIS-NODC(National Oceanographic Data Center) 提供的 WOA01(WORLD OCEAN ATLAS 2001) 海表面鹽度⁵。WOA01鹽度資料為 OSD(Ocean Satation Data) 所提供的，他們利用研究船到定點測站獲取海洋資料，包括溫度、鹽度、溶氧量、葉綠素濃度等資料，再將實測資料經過內插等處理後，所獲得的全球海洋鹽度資料。本研究中使用的 WOA01鹽度是時間解析度為每月一筆，空間解析度為經緯度各 1° ，資料種類屬於'Analyzed mean'的資料。詳細資料說明請見參考文獻 [40]。

我們比較海表面溫度 SST 與海表面鹽度 S 對於計算全球月平均二氧化碳氣體交換係數 K 的影響：我們發現以本研究所使用八個風場在計算全球月平均二氧化碳氣體交換係數 K 時，使用 AVHRR 海表面溫度 SST 與僅將海表面溫度 SST 設為平均海水溫度 20°C ，所造成的最大誤差為2.8%；使用 WOA01海表面鹽度 S 資料與僅將海表面鹽度 S 設為平均海水鹽度35psu，所造成的最大誤差為0.3%；使用 AVHRR 海表面溫度 SST 、WOA01海表面鹽度 S 資料與僅將海表面溫度 SST 設為平均海水溫度

⁴AVHRR best SST 資料置於 PO.DAAC 網頁 <http://podaac.jpl.nasa.gov>

⁵NODC 網頁 <http://www.nodc.noaa.gov>

20°C、海表面鹽度 S 設為平均海水鹽度35psu 計算所造成的最大誤差為3.1%。然而，以不同風場所估算月平均全球二氧化碳氣體交換係數 K 的最大差距，大於鹽度與溫度所造成的影響。由此可知，影響計算交換係數 K 最重要的環境參數為風速 U_{10} 。所以我們在估計全球大氣-海洋二氧化碳氣體通量時，首先需要考慮的便是風場時空變化所造成的影響以及海-氣介面的二氧化碳分壓差資料。

3.2 使用不同全球海洋月平均風場對於計算全球二氧化碳氣體交換係數 K 所造成的差異

從第二章中我們已經對全球海洋月平均風場的時間、空間特性進行過分析，現在我們來比較使用不同全球海洋月平均風場來計算二氧化碳氣體交換係數 K 所造成的差異。本研究計算二氧化碳氣體交換係數 K 的使用資料為：八個全球海洋月平均風場風速 U_{10} ，AVHRR 最佳海表面溫度 SST ，WOA01海表面鹽度 S 。使用的計算函式為 Wanninkhof(1992) 的長期二次風速多項式二氧化碳氣體傳輸速度函式,3.2b式，以及 Wanninkhof and McGillis(1999) 的長期三次風速多項式二氧化碳氣體傳輸速度函式,3.3b式，

由於在計算過程中需要風速 U_{10} 、海表面鹽度 S 以及海表面溫度 SST 資料，所以本研究在程式內判定一網格點有二氧化碳氣體交換係數 K 的依據為：該網格點需要有風速 U_{10} 、海表面鹽度 S 且海表面溫度 SST 大於 -1.8°C ，才認定該網格點為有值網格點。

在計算結果的比較上，我們比較 QSCAT-SF 與 Carr 等 (2002)QSCAT 未對面積加權的全球年平均二氧化碳氣體交換係數 K 計算結果。我們計算的結果為 $6.98 \times 10^{-2} \text{ mole m}^{-2} \text{ yr}^{-1} \mu\text{atm}^{-1}$ ，此結果與Carr 等的結果 $7.07 \times 10^{-2} \text{ mole m}^{-2} \text{ yr}^{-1} \mu\text{atm}^{-1}$ 極接近，印證本計算結果之正確性。

接續比較風場空間變化對計算全球二氧化碳氣體交換係數 K 的差異。我們將各風場月平均二氧化碳氣體交換係數 K 隨緯度分布的計算結果繪於圖3.2、圖3.3。由於二氧化碳氣體交換係數 K 的數值大小反應出的即為風速的強弱，所以其在緯度分布的情況與風速在緯度分布的情況相同。我們觀察各緯度月平均二氧化碳氣體交換係數 K 的變化情形，在南北緯30度之間，各月份的二氧化碳氣體交換係數 K 變化不大，且此區的二氧化碳氣體交換係數 K 數值較小；在南北緯30度以外，各月份的二氧化碳氣體交換係數 K 則變化較大。一般來說，各緯度在當地的冬季時，其二氧化碳氣體交換係數 K 的

值會較大，在當地夏季其二氧化碳氣體交換係數 K 值會較小。

比較各風場之間二氧化碳氣體交換係數 K 在緯度上的分布趨勢，在多數月份中，QSCAT-PO.DAAC、QSCAT-RSS、SSM/I-RSS三個風場的二氧化碳氣體交換係數 K 在各緯度上的分布都是較大的，而在南北緯30度以內 NRA、ECMWF 的二氧化碳氣體交換係數 K 較低，在南北緯30度以外則是改為 QSCAT-SF 的二氧化碳氣體交換係數 K 較低，QSCAT/NCEP、QSCAT-SF 在各緯度的分布上則是介於最高與最低之間。

比較各風場的全球月平均二氧化碳氣體交換係數 K ，計算結果繪於圖3.4，由於二氧化碳氣體交換係數 K 為風速的函式，所以我們從圖上可看到它在時間上的變動趨勢與風速的相同，QSCAT-PO.DAAC、QSCAT-RSS、SSM/I-RSS、NRA、ECMWF、QSCAT/NCEP、QSCAT-COAPS，這七個風場的全球二氧化碳氣體交換係數 K 雖不相同，但皆有相同的變化趨勢。QSCAT-SF的全球二氧化碳氣體交換係數 K 變化趨勢在一至八月與上述七個風場有所不同，在八月之後才出現與其他風場相符合的狀況。

統計各風場間在空間差異造成計算全球月平均二氧化碳氣體交換係數 K 上的差值，最大的差值發生在三月 QSCAT-PO.DAAC 與 QSCAT-SF 的差值（以二次風速多項式計算），達 $1.89 \times 10^{-2} \text{ mole m}^{-2} \text{ yr}^{-1} \mu\text{atm}^{-1}$ ，以及二月QSCAT-PO.DAAC 與 QSCAT-SF 的差值（以三次風速多項式計算）達 $3.40 \times 10^{-2} \text{ mole m}^{-2} \text{ yr}^{-1} \mu\text{atm}^{-1}$ 。而全球年平均最大差異為QSCAT-PO.DAAC 與 ECMWF 的差值（以二次風速多項式計算）達 $1.46 \times 10^{-2} \text{ mole m}^{-2} \text{ yr}^{-1} \mu\text{atm}^{-1}$ ，以及QSCAT-PO.DAAC與 QSCAT-SF 的差值（以三次風速多項式計算）達 $2.45 \times 10^{-2} \text{ mole m}^{-2} \text{ yr}^{-1} \mu\text{atm}^{-1}$ 。各風場年平均二氧化碳氣體交換速度資料請看表3.1。

我們若以 QSCAT-RSS 作為比較標準，各風場間與 QSCAT-RSS 在空間差異造成計算全球月平均二氧化碳氣體交換係數 K 上最大的差值，發生在三月與 QSCAT-

SF 的差值, 以二次風速多項式計算達 $1.71 \times 10^{-2} \text{ mole m}^{-2} \text{ yr}^{-1} \mu\text{atm}^{-1}$, 之間誤差有22%。以及二月與 QSCAT-SF 的差值, 以三次風速多項式計算達 $3.16 \times 10^{-2} \text{ mole m}^{-2} \text{ yr}^{-1} \mu\text{atm}^{-1}$, 之間誤差有31%。而全球年平均最大差異為與 ECMWF 的差值, 以二次風速多項式計算達 $1.26 \times 10^{-2} \text{ mole m}^{-2} \text{ yr}^{-1} \mu\text{atm}^{-1}$, 之間誤差有16%。以三次風速多項式計算達 $2.12 \times 10^{-2} \text{ mole m}^{-2} \text{ yr}^{-1} \mu\text{atm}^{-1}$, 之間誤差有22%。各風場與 QSCAT-RSS 的全球年平均二氧化碳氣體交換係數 K 差值的百分比資料請看表3.2。

表 3.1: 各風場全球年平均二氧化碳氣體交換係數 K

使用函式	QSCAT-PO.DAAC	QSCAT-RSS	SSM/I-RSS	NRA	ECMWF	QSCAT/NCEP	QSCAT-SF	QSCAT-COAPS	最大差值絕對值
二次風速多項式函式	8.00	7.80	7.87	6.56	6.54	7.69	6.63	6.73	1.46
三次風速多項式函式	10.06	9.73	9.89	7.66	7.61	9.54	7.62	7.84	2.45

單位: $10^{-2} \text{ mole m}^{-2} \text{ yr}^{-1} \mu\text{atm}^{-1}$

表 3.2: 各風場與 QSCAT-RSS 的全球年平均二氧化碳氣體交換係數 K 差值的百分比

使用函式	QSCAT-PO.DAAC	SSM/I-RSS	NRA	ECMWF	QSCAT/NCEP	QSCAT-SF	QSCAT-COAPS	最大差值的百分比
二次風速多項式函式	3	1	-16	-16	-1	-15	-14	-16
三次風速多項式函式	3	2	-21	-22	-2	-22	-19	-22

單位: 百分比

3.3 使用長期風場與短期風場對於計算全球二氧化碳氣體傳輸速度 k 所造成的差異

通常科學家在計算二氧化碳通量時，會使用長期平均風速 U_{10} (以下將 U_{10} 簡計為 u)來計算二氧化碳通量。現今隨著科學進步的發展，世界上已經有很多大型的氣候資料庫提供著高時間解析度的全球風場資料，因此我們可以比較，若以長期風場(月平均)與短期風場(6小時)計算所得的結果是否會相同。在計算中，由於我們探討的要點在風場時間變異特性，而風速 u 在計算通量的式子中僅為二氧化碳氣體傳輸速度 k 的函數，所以我們在比較差異特性時，以二氧化碳氣體傳輸速度 k 來作討論⁶，同時假設二氧化碳氣體傳輸速度 k 的另一個參數—海表面溫度 SST 為 20°C ，以方便觀察風場時間變異特性。

風場資料使用 NRA、QSCAT/NCEP 六小時全球海洋風場資料。二氧化碳氣體傳輸速度函式採用 Wanninkhof 二次風速多項式的函式,3.2式 以及 Wanninkhof and McGillis 三次風速多項式的函式,3.3式。在3.3.1節中首先我們將檢視長、短期二氧化碳氣體傳輸速度函式在全球區域的適用性；由於區域性風場的分布情形並非皆呈現雷利分布，因此在3.3.2節我們提出長期二氧化碳氣體傳輸速度的修正函式，以滿足計算區域性的長期二氧化碳氣體傳輸速度，最後在3.3.3節察看使用長期風場與短期風場對於計算全球二氧化碳氣體傳輸速度 k 所造成的差異。

3.3.1 以增強因子 R 討論長期與短期二氧化碳氣體傳輸速度函式在全球區域的適用性

在3.1節，我們已經討論過 Wanninkhof 推導長期與短期間的二次風速多項式二氧化碳氣體傳輸速度函式，以及 Wanninkhof and McGillis 推導長期與短期間的三次風速多項式二氧化碳氣體傳輸速度函式時，皆利用 Wentz(1984) 發現全球海洋風場分

⁶二氧化碳氣體傳輸速度 k 與二氧化碳氣體交換速度 K ，僅相差溶解度的參數，但在差值比上其意義是相同的

布為雷利分布之研究結果，假設全球海洋風場為雷利分布來轉換長期與短期間的二氧化碳氣體傳輸速度函式。本小節中我們將以增強因子 R 、風速機率密度函數作為檢視長、短期二氧化碳氣體傳輸速度函式在全球以及各緯度的適用性的方法。

首先我們討論全球海洋月平均風場的風速分布情形，比較 Wentz 的研究結果。我們將 NRA 與 QSCAT/NCEP 的全球風速機率密度函數繪於圖 3.5 及圖 3.6，圖中藍色的線表示該月份內全球的短期風速機率密度函數，紅色線表示為利用該月份的全球月平均風速計算得到的雷利機率密度函數，從圖上可以看到真實機率密度函數狀況與雷利機率密度函數在高風速區 ($>15 \text{ m s}^{-1}$) 幾乎相等，風速從 0 至 5 m s^{-1} 以及 10 至 15 m s^{-1} 雷利機率密度函數的值要來的大，5 至 10 m s^{-1} 則是真實機率密度函數較大。雖然兩者有所不同，但是期間的差異並不大，因此可以說全球月平均風速機率密度函數接近雷利機率密度函數。

另外，由於我們在計算全球大氣-海洋二氧化碳氣體傳輸速度 k 時，是計算全球各網格點之平均值，因此我們亦需考慮這樣的函式是否適用在全球各區域上。Wanninkhof 等 (2002) 曾經探討過這樣子的問題。他們從長期與短期的二氧化碳氣體傳輸速函式尋找二函式之間的關係。雖然長期函式與短期函式的風速乘方皆相同，但是，由於 Wanninkhof (1992) 以及 Wanninkhof and McGillis (1999) 在推導長期與短期之間的二氧化碳氣體傳輸速度函式時，假設全球海洋風場的機率函數為雷利機率函數，因此在長期函式與短期函式中，存在一係數比。比較長期二次風速多項式函式 (3.2b 式) 與短期二次風速多項式函式 (3.2a 式) 兩式間的係數，其中長期的係數是短期的 1.25 倍。再比較長期三次風速多項式函式 (3.3b 式) 與短期三次風速多項式函式 (3.3a 式)，其中長期的係數是短期的 1.9 倍。於是 Wanninkhof 等人為了表示風速分布的特質定義出增強因子 R ，增強因子 R 等於長期函式的係數除以短期函式的係數。在二次風速多項式函式中： $R = \frac{0.39}{0.31} = 1.25$ ，在三次風速多項式函式中： $R = \frac{0.054}{0.0283} = 1.9$ 。而增

強因子 R 除了等於長期函式的係數除以短期函式的係數外，他同時也是是短期風速與平均風速的函式⁷ ($R = R(u_i, u_{av})$), 如下式:

$$R = \frac{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N u_i^d}{u_{av}^d} \quad (3.7)$$

上式中 u_i 為短期風速, u_{av} 為平均風速, d 為二氧化碳氣體傳輸速度函式的風速乘方。若 R 等於1則表示該風場的分布皆為固定 (steady) 風速, 若在 $d=2, R=1.25$; 或是在 $d=3, R=1.9$; 則表示該風場的分布為雷利分布。因此我們可以利用 NRA 六小時和 QSCAT/NCEP 六小時風速資料作為短期風場資料, 使用一個月內累計六小時風速資料後再除以總個數的風速作為的平均風速, 輸入這兩項資料獲得增強因子 R 的值, 以此討論 NRA 與 QSCAT/NCEP 的風場分布是否為雷利分布 (此分布在物理上的意義為即全球海洋風場的特性均屬於均向風 (isotropic wind))。

我們將 NRA 與 QSCAT/NCEP 的增強因子 R 在各緯度的分布情形繪於圖3.7至圖3.10, 圖中藍色實線表示該月份各緯度增強因子 R 的連線, 紅色實線表示雷利分布的增強因子 R 理論值。從圖上可看出, 在 NRA 與 QSCAT/NCEP 的資料中, 無論是使用二次風速多項式二氧化碳氣體傳輸速度函式或三次風速多項式二氧化碳氣體傳輸速度函式, 接近所有緯度的增強因子 R 都是小於雷利分布的狀況。這代表使用長期函式來估計的二氧化碳氣體傳輸速度, 會比使用短期函式來估計的量來的高。另外, 從圖上觀察增強因子 R 在各緯度的分布趨勢, 可以看到有三個特別低的區域 (R 值在二次風速多項式函式接近1.1, 在三次風速多項式函式接近1.4), 這些低值區接近分布在南緯55度、南緯20度、北緯20度附近, 對應這些區域的風帶, 分別為極地西風帶、東南信風帶與東北信風帶, 而這些風帶的風向趨向定向風也是正好與均向風有所差異, 或許這可能是造成較大差值的原因。

⁷增強因子 R 函式的推導過程請見附錄A.4

爲了瞭解造成實際差異的原因，我們從各緯度的短期風速機率密度函數去作分析。由於我們在計算增強因子 R 時，所計算的是風速的乘方值，所以在進行觀察的過程中，我們要特別注意高風速區的差異性，因爲在風速愈高的地方，其所造成的增強因子 R 值差異就愈大。在這裡我們以分析 QSCAT/NCEP 四月份的風速機率密度函數資料，其各緯度的短期風速的機率密度函數繪於圖 3.11、圖 3.12，圖中所包含的緯度範圍爲其右上角所標示的緯度 2° 之內的風速機率密度函數狀況，藍色實線表示該區域的風速機率密度函數，紅色實線表示該區域的雷利機率密度函數。我們對照圖 3.10 四月份的增強因子 R 分布圖，可以明顯看到在南緯 56 度、南緯 16 度、北緯 16 度附近有三個低值區，首先我們檢視第一個增強因子 R 低值區，觀察圖 3.11，標號 60°S 至 52°S 的圖，該區域的風速機率密度函數較雷利機率密度函數來的集中，因而其在 18 m s^{-1} 以上的風速機率密度函數較雷利機率密度函數來的小。檢視第二個增強因子 R 低值區，觀察圖 3.11，標號 20°S 至 12°S 的圖，該區域的風速機率密度函數較雷利機率密度函數來的集中，因而其在 12 m s^{-1} 以上的風速機率密度函數較雷利機率密度函數來的小。檢視第三個增強因子 R 低值區，觀察圖 3.12，標號 12°N 至 20°N 的圖，該區域的風速機率密度函數較雷利機率密度函數來的集中，因而其在 12 m s^{-1} 以上的風速機率密度函數較雷利機率密度函數來的小。相較於其他增強因子 R 的高值區（南緯 36 度、北緯 32 度以上），這些區域在高風速區的風速機率密度函數情形與雷利機率密度函數甚爲相似，而且在其他風速區域的機率密度函數情形與雷利機率密度函數也很接近。由此我們可以歸納出當風速機率密度函數與雷利機率密度函數的高風速區差異愈大時，其愈容易形成增強因子 R 的低值區。

另外我們察看過去有關風速機率函數的研究，風速機率函數的情形通常以韋伯 (Weibull) 機率函數⁸ 表示，控制韋伯機率函數的因子有尺度參數 A 與形狀參數 C ，其

⁸有關韋伯機率函數說明，請見附錄 A.1

中尺度參數 A 為平均風速與形狀參數 C 的函數；形狀參數 C 可由風速機率密度函數之平均值與標準方差推得 (Hennessey, 1977)。當形狀參數 $C=2$ 時，該風速機率函數為雷利機率函數。

Jensen 等 (1984) 的研究指出在極地與接近赤道附近，形狀參數 C 大約是 1；在溫帶區域，形狀參數 C 大約是 2；在固定風向帶 (persistent wind zones) 上，形狀參數 C 大約是 3，一般狀況 $1.5 < C < 2.5$ 。從這份研究資料中，我們可以知道在不同緯度上，形狀參數 C 並不都等於 2，意即風場機率函數並非皆呈現雷利機率函數，所以各緯度的增強因子 R 值並非皆等於雷利機率函數時的增強因子 R 值。

3.3.2 推算區域性的長期二氧化碳氣體傳輸速度函式

由於全球各區域的風速分布情形並非皆為雷利分布，因此若僅以雷利分布去推算長期與短期之間氣體傳輸速度的關係，則計算所得短期平均值的結果與長期的結果便會有所差異。為降低長-短期之間計算結果的差異性，我們必須瞭解各區域風速分布情形。我們沿用過去分析風速分布的方式，假設風速機率函數為韋伯機率函數，以 Justus (1978) 之經驗函式，使用風速機率密度函數之平均值、標準方差估計韋伯機率函數之形狀參數 C 及尺度參數 A ：

$$C = \left(\frac{u_{av}}{\sigma} \right)^{1.086} \quad (3.8)$$

$$A = \frac{u_{av}}{\Gamma(1 + 1/C)} \quad (3.9)$$

上式中 σ 為風速機率密度函數之標準方差， Γ 為 Γ 函數。

以 Justus 之經驗函式 (3.8 式) 計算所得到的全球各緯度各月份的形狀參數 C 繪於圖 3.13，從圖上可看出南緯 60-55 度、南緯 20-5 度、北緯 10-20 度三區的形狀參數 C 值皆大於 2.7，這也說明了前一小節該三個區域增強因子 R 之所以偏低的原因。

察看以估計方式獲得的各緯度區域韋伯機率密度函數與真實風速機率密度函數之差異 (以 QSCAT/NCEP 四月份為例), 我們將之以綠色實線繪於圖 3.11、圖 3.12。以估計方式獲得的結果 (綠色實線) 較雷利機率密度函數 (紅色實線) 在高風速部分 (12 m s^{-1} 以上) 與真實情況 (藍色實線) 為相似, 而這表示修正之函式將有助於降低長期二氧化碳氣體傳輸速度與短期平均值之間的差異。

接著我們利用 Wanninkhof and McGillis 使用 Gas-Ex98 實驗所得短期二氧化碳氣體傳輸速度 k 與短期風速 u 之間的關係 ($k = 0.0280u^3$)、各緯度區域風速機率函數推算出長期二氧化碳氣體傳輸速度 k_{av} , 再以該緯度區域的平均風速 u_{av} 推算該緯度區域的長期三次風速多項式二氧化碳氣體傳輸速度係數 a_i , 由此我們可以得到適合各緯度區域的三次風速多項式長期二氧化碳氣體傳輸速度⁹:

$$k_{av-fix} = a_i u_{av}^3 \left(\frac{Sc}{660} \right)^{-1/2} \quad \text{適用長期風速} \quad (3.10)$$

上式中 k_{av-fix} 表示是以修正函式計算的長期二氧化碳氣體傳輸速度, a_i 表示適用於第 i 個緯度區域的長期二氧化碳氣體傳輸速度係數。

3.3.3 使用長期風場與短期風場對於計算全球二氧化碳氣體傳輸速度 k 所造成的差異

在前二小節我們分析了長、短期二氧化碳氣體傳輸速度函式在全球區域的適用性以及獲取長期二氧化碳氣體傳輸速度修正函式後, 本小節我們要察看使用長期風場與短期風場對於計算全球二氧化碳氣體傳輸速度 k 所造成的差異。

在計算二氧化碳氣體傳輸速度時, 我們假設全球海表面溫度 SST 皆為平均海表面溫度 20°C 。將各月份 NRA、QSCAT/NCEP 六小時的風場資料帶入短期風速多項

⁹有關修正函式之推導說明, 請見附錄 A.5

式的二氧化碳氣體傳輸速度函式3.2a、3.3a計算後可以得到各月份的短期風速的二氧化碳氣體傳輸速度平均值 k^{10} 。將各月份NRA、QSCAT/NCEP 月平均的風場資料帶入3.2b、3.3b的長期風速多項式的二氧化碳氣體傳輸速度函式和適用於各緯度的修正函式，計算後可以得到各月份的長期風速的二氧化碳氣體傳輸速度 k^{11} 。接著我們要比較使用長期風場計算的結果與使用短期風場計算的結果在各緯度以及在全球區域所造成的差值。我們將 NRA、QSCAT/NCEP風場使用長、短期二次風速多項式計算得到的短期二氧化碳氣體傳輸速度在各緯度分布的情形繪於圖3.14、圖3.15；使用三次風速多項式計算得到的二氧化碳氣體傳輸速繪於圖3.16、圖3.17。

察看 NRA(圖3.14) 及 QSCAT/NCEP(圖3.15) 長期二次風速多項式二氧化碳氣體傳輸速度 k_{av} 與短期二次風速多項式二氧化碳氣體傳輸速度平均值 \bar{k} 在各緯度分布的情形，除了在南緯55度、北緯55度、南緯20度、北緯20度附近，長期（紅色實線）與短期（藍色實線）的差值較大以外，其他地區的差值並不明顯。察看 NRA(圖3.16) 及 QSCAT/NCEP(圖3.17) 長期三次風速多項式二氧化碳氣體傳輸速度 k_{av} 與短期三次風速多項式二氧化碳氣體傳輸速度平均值 \bar{k} 在各緯度分布的情形，由於此時二氧化碳氣體傳輸速度以三次風速多項式作計算，增強其非線性效應的特性，所以此時長期（紅色實線）與短期（藍色實線）的差值也特別明顯，尤其在南緯55度附近，其差值超過短期的40%。造成差值的原因為：短期風速機率密度函數與以平均風速計算得到的雷利機率密度函數有所差別，尤其是兩者在風速機率密度函數中的高風速區的差異所造成的影響較大。相較於使用修正函式計算之結果 k_{av-fix} （綠色實線），其與短期（藍色實線）的結果已經相當接近，而在南緯55度、北緯55度、南緯20度、北緯20度附近皆能有效降低長期與短期平均值之間的差異。

¹⁰以下短期風速的二氧化碳氣體傳輸速度平均值的代號以 \bar{k} 表示

¹¹以下長期風速的二氧化碳氣體傳輸速度的代號以 k_{av} 表示，以修正函式獲得的二氧化碳氣體傳輸速度的代號以 k_{av-fix} 表示

接續比較各月份的全球短期二氧化碳氣體傳輸速度平均值 \bar{k} ，以及全球長期二氧化碳氣體傳輸速度 k_{av} 的差異，計算結果繪於圖3.18。察看各月份的長期全球二氧化碳氣體傳輸速度 k_{av} 與短期全球二氧化碳氣體傳輸速度平均值 \bar{k} ，圖3.18(a)為採用二次風速多項式的計算結果，圖3.18(b)為採用三次風速多項式的計算結果。紅色線為 NRA 的資料，藍色線為 QSCAT/NCEP 的資料，虛線為使用長期函式計算的結果，虛點點線為使用長期修正函式計算的結果，實線為使用短期函式計算結果的平均值。從圖上可以看出，各月份長期全球二氧化碳氣體傳輸速度 k_{av} 與短期全球二氧化碳氣體傳輸速度平均值 \bar{k} 之間的差值大致相似，比較其在各月份的差異，在 NRA 的資料中長期全球二氧化碳氣體傳輸速度 k_{av} 高估的比例以七月最高，使用二次風速多項式作計算長期的結果 (21.97 cm hr⁻¹) 高估了短期平均值(19.58 cm hr⁻¹) 總量的12%，使用三次風速多項式作計算長期的結果 (25.51 cm hr⁻¹) 高估了短期平均值(18.09 cm hr⁻¹) 總量的41%，在 QSCAT/NCEP 的資料中長期全球二氧化碳氣體傳輸速度 k_{av} 高估的比例以七月最高，使用二次風速多項式作計算長期的結果 (25.74 cm hr⁻¹) 高估了短期平均值(23.25 cm hr⁻¹) 總量的10%，使用三次風速多項式作計算長期的結果 (31.95 cm hr⁻¹) 高估了短期平均值(23.58 cm hr⁻¹) 總量的35%。比較使用修正函式計算之結果與短期平均值之差異，在 NRA 的資料中修正函式之長期全球二氧化碳氣體傳輸速度 k_{av-fix} 高估的比例以二月最高，使用三次風速多項式作計算長期的結果 (21.55 cm hr⁻¹) 高估了短期平均值(18.09 cm hr⁻¹) 總量的10%，在 QSCAT/NCEP 的資料中修正函式之長期全球二氧化碳氣體傳輸速度 k_{av-fix} 高估的比例以二月最高，使用三次風速多項式作計算長期的結果 (26.99 cm hr⁻¹) 高估了短期平均值(23.58 cm hr⁻¹) 總量的10%。

比較全球年平均長期二氧化碳氣體傳輸速度 k_{av} 與全球短期二氧化碳氣體傳輸速度平均值 \bar{k} 之間的差值比例，在 NRA 的資料中使用二次風速多項式作計算長期的結果

(21.87 cm hr⁻¹) 高估了短期平均值(19.67 cm hr⁻¹) 總量的11%, 使用三次風速多項式作計算長期的結果 (25.24 cm hr⁻¹) 高估了短期平均值(18.41 cm hr⁻¹) 總量的37%, 使用三次風速多項式修正函式作計算的長期結果 (19.66 cm hr⁻¹) 高估了短期平均值(18.41 cm hr⁻¹) 總量的6%。在QSCAT/NCEP 的資料中使用二次風速多項式作計算長期的結果 (25.74 cm hr⁻¹) 高估了短期平均值(23.39 cm hr⁻¹) 總量的10%, 使用三次風速多項式作計算長期的結果 (31.60 cm hr⁻¹) 高估了短期平均值(23.82 cm hr⁻¹) 總量的33%, 使用三次風速多項式修正函式作計算的長期結果 (25.16 cm hr⁻¹) 高估了短期平均值(23.82 cm hr⁻¹) 總量的5%。全球年平均二氧化碳氣體傳輸速度資料請看表3.3、表3.4。

表 3.3: NRA 全球年平均長期二氧化碳氣體傳輸速度 k_{av} , k_{av-fix} , 短期二氧化碳氣體傳輸速度平均值 \bar{k} , 長期高估量佔短期的比例

使用函式	長期二氧化碳氣體傳輸速度	短期二氧化碳氣體傳輸速度平均值	長期高估量佔短期的比例
二次風速多項式函式	21.87	19.67	11%
三次風速多項式函式	25.54	18.41	37%
三次風速多項式修正函式	19.66		6%

二氧化碳氣體傳輸速度單位: cm hr^{-1}

表 3.4: QSCAT/NCEP 全球年平均長期二氧化碳氣體傳輸速度 k_{av} , k_{av-fix} , 短期二氧化碳氣體傳輸速度平均值 \bar{k} , 長期高估量佔短期的比例

使用函式	長期二氧化碳氣體傳輸速度	短期二氧化碳氣體傳輸速度平均值	長期高估量佔短期的比例
二次風速多項式函式	25.74	23.39	10%
三次風速多項式函式	31.60	23.82	33%
三次風速多項式修正函式	25.16		5%

二氧化碳氣體傳輸速度單位: cm hr^{-1}

3.4 從風場時空變化分析計算全球大氣-海洋介面二氧化碳氣體交換係數 K 與二氧化碳氣體傳輸速度 k 的結果整理與討論

本章中我們從不同風場之時空變化以及使用長、短期風場兩方面，討論風場變異特性對於計算二氧化碳氣體交換係數 K 與二氧化碳氣體傳輸速度 k 所造成的影響。從3.2節的對風場時空變化的分析中我們發現除了 QSCAT-SF 外，各風場在時間上的變異特性變化甚小，而造成風場之間計算差距主要因素還是因為風場在空間中的分布有所不同而造成的。而這樣的差異性對於計算年平均二氧化碳氣體交換係數 K ，當以 QSCAT-RSS作為比較標準時，最多會造成16%的差距（以二次風速多項式計算）以及22%的差距（以三次風速多項式計算）。上述結果意味，若我們使用風場資料去估計二氧化碳氣體交換係數 K 的範圍是屬於小區域性的，例如太平洋的南緯至北緯10度區間，那麼便需謹慎考量該風場在空間上分布特質。

在3.3節我們討論以長期（月平均）、短期（6小時）全球風場去計算二氧化碳氣體傳輸速度 k ，從研究的結果中我們知道以長期風場去計算二氧化碳氣體傳輸速度 k_{av} ，會較以短期二氧化碳氣體傳輸速度平均值 \bar{k} 計算的結果來的大，而且這種狀況在使用三次風速多項式的二氧化碳氣體傳輸速度 k 函式時更為明顯。在年平均值的差量上，長期結果相較於短期結果的差距量最多會造成11%的差距（以二次風速多項式計算）以及37%的差距（以三次風速多項式計算）。造成這種狀況的原因大部分來自於長、短期二氧化碳氣體傳輸速度的函式中，短期風速機率函數為雷利機率函數的假設。而且，從我們對各緯度的短期風速機率密度函數分析中知道，假設風場分布為雷利分布並不適用在每個地區，尤其是在極地西風帶，東北信風帶、東南信風帶，所以當我們直接以平均風速去推算長期二氧化碳氣體傳輸速度 k_{av} ，這會造成有大量高估短期二氧化碳氣體傳輸速度平均值 \bar{k} 的結果。相較於使用修正函式，我們納入各緯度風速分布特徵考量後，以三次風速多項式計算，長期 k_{av-fix} 與短期平均值 \bar{k} 的差值可降低至6%，以上結果說

明, 若以平均風速計算二氧化碳氣體傳輸速度時, 使用修正函式之必要性。

本研究的最終目的是討論風場時空變化對全球大氣-海洋二氧化碳通量計算的影響, 在計算通量的資料中, 需要全球海洋二氧化碳氣體交換係數 K 以及二氧化碳分壓差 $\Delta p\text{CO}_2$ 兩項資料。這兩個資料中, 由於全球的二氧化碳分壓差 $\Delta p\text{CO}_2$ 資料呈現緯度帶狀的分布特徵, 因此若我們要瞭解風場變化對全球大氣-海洋二氧化碳通量計算的影響, 則我們需知道各風場的二氧化碳氣體交換係數 K (或二氧化碳氣體傳輸速度 k) 在緯度分布上的特徵, 以釐清風場變化對全球大氣-海洋二氧化碳通量計算影響的原因。而經過3.2節分析各風場的二氧化碳氣體交換係數 K 在緯度空間變化的特性, 以及3.3節分析長期風場的二氧化碳氣體傳輸速度以及短期風場的二氧化碳氣體傳輸速度平均值在緯度空間變化的特性, 已經讓我們對釐清風場變化對全球大氣-海洋二氧化碳通量計算影響的問題提供了最佳的資料。

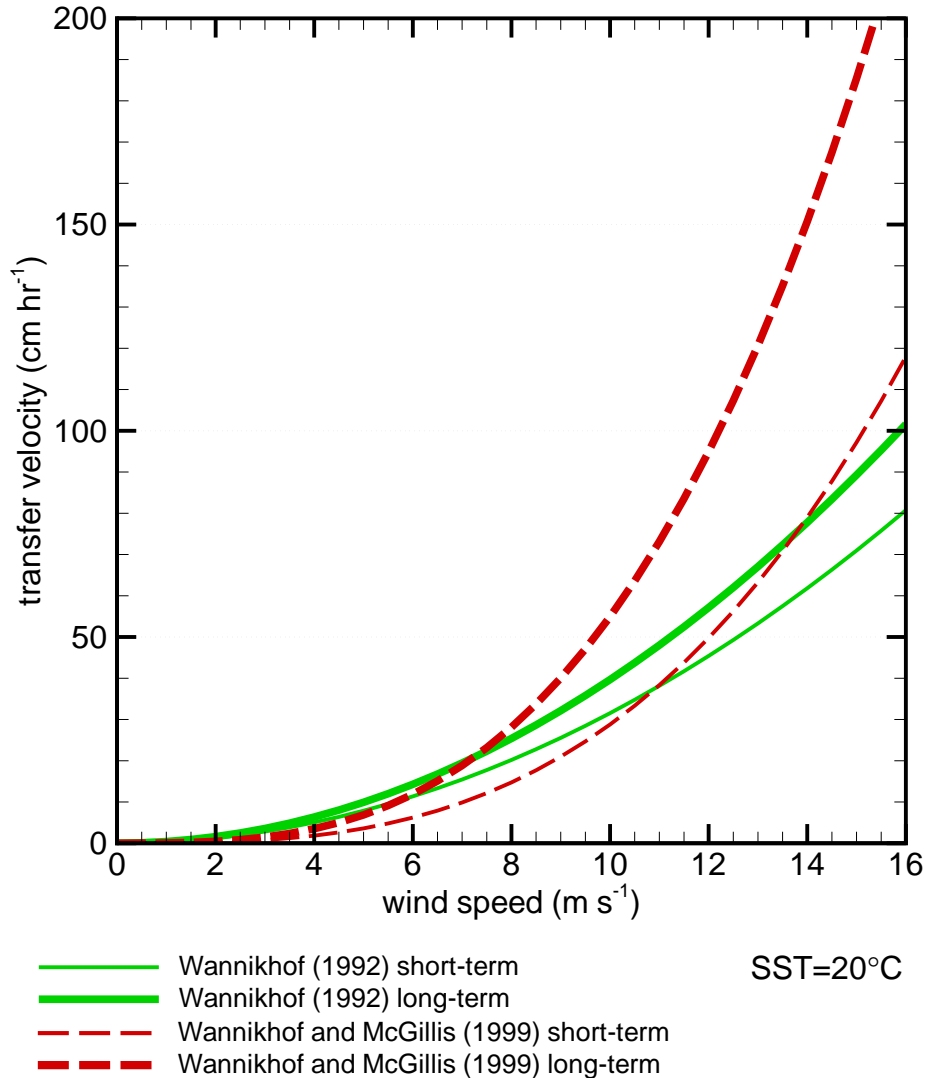


圖 3.1: 設海表面溫度 $SST=20^{\circ}\text{C}$ 時, 二氧化碳氣體傳輸速度 k 隨風速的變化情形。縱軸表示二氧化碳氣體傳輸速度 k , 單位為 cm hr^{-1} , 橫軸表示風速, 單位為 m s^{-1} 。Wanninkhof(1992) 提出的二次 (Quadratic) 風速多項式二氧化碳氣體傳輸速度函式以綠色實線表示, 「細綠實線」表示短期函式, 「粗綠實線」表示長期函式。Wanninkhof and McGillis(1999) 提出的三次 (Cubic) 風速多項式二氧化碳氣體傳輸速度函式以紅色虛線表示, 「細紅虛線」表示套用短期函式, 「粗紅虛線」表示套用長期函式。

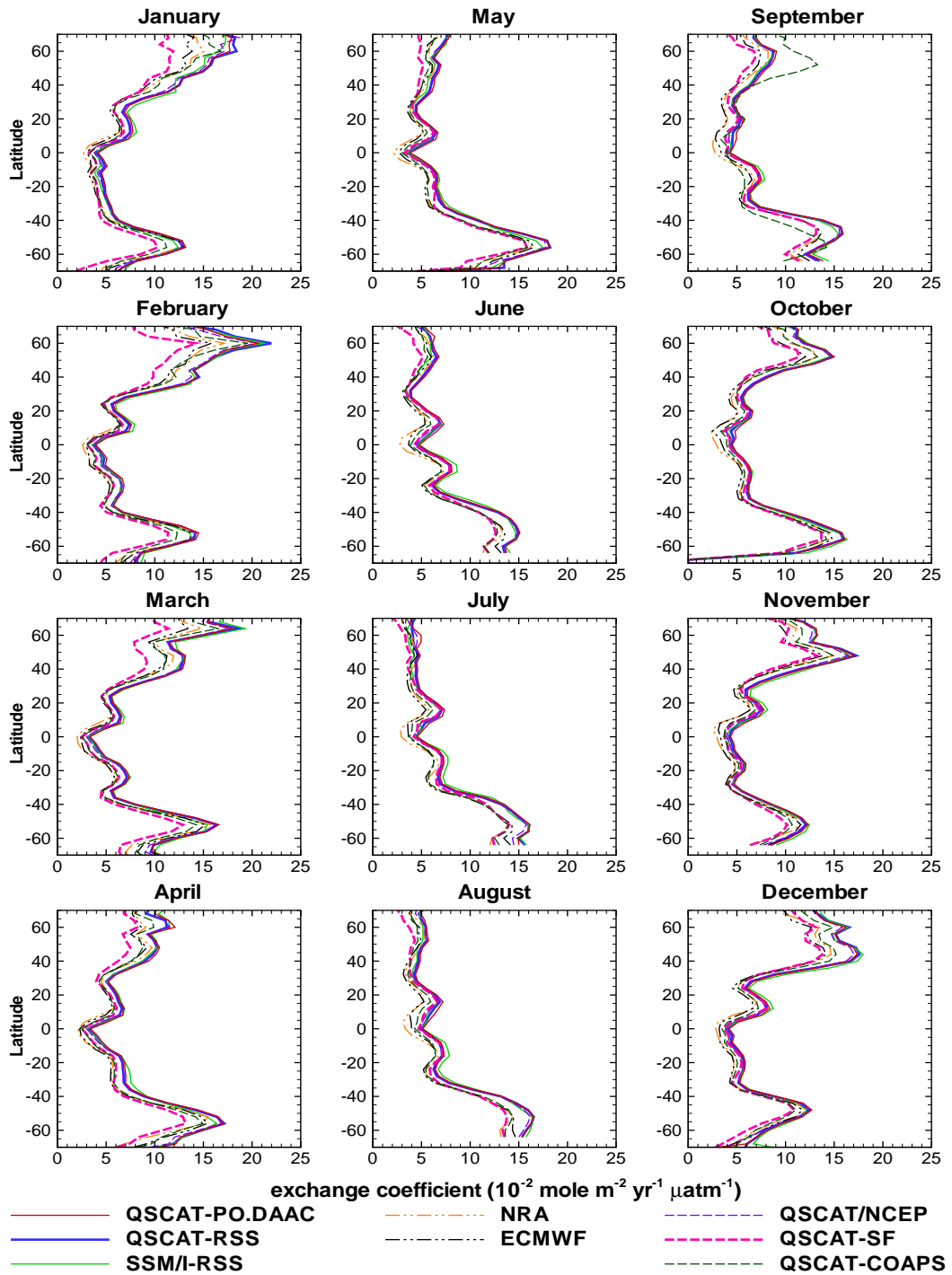


圖 3.2: 一至十二月各全球海洋月平均風場以二次長期風速多項式函式計算的二氧化碳氣體交換係數 K 在緯度上的分布，縱軸表示緯度，負值為南緯，正值為北緯，緯度空間寬帶為 4° ，橫軸表示二氧化碳氣體交換係數 K ，單位為 $10^{-2} \text{ mole m}^{-2} \text{ yr}^{-1} \mu\text{atm}^{-1}$ 。

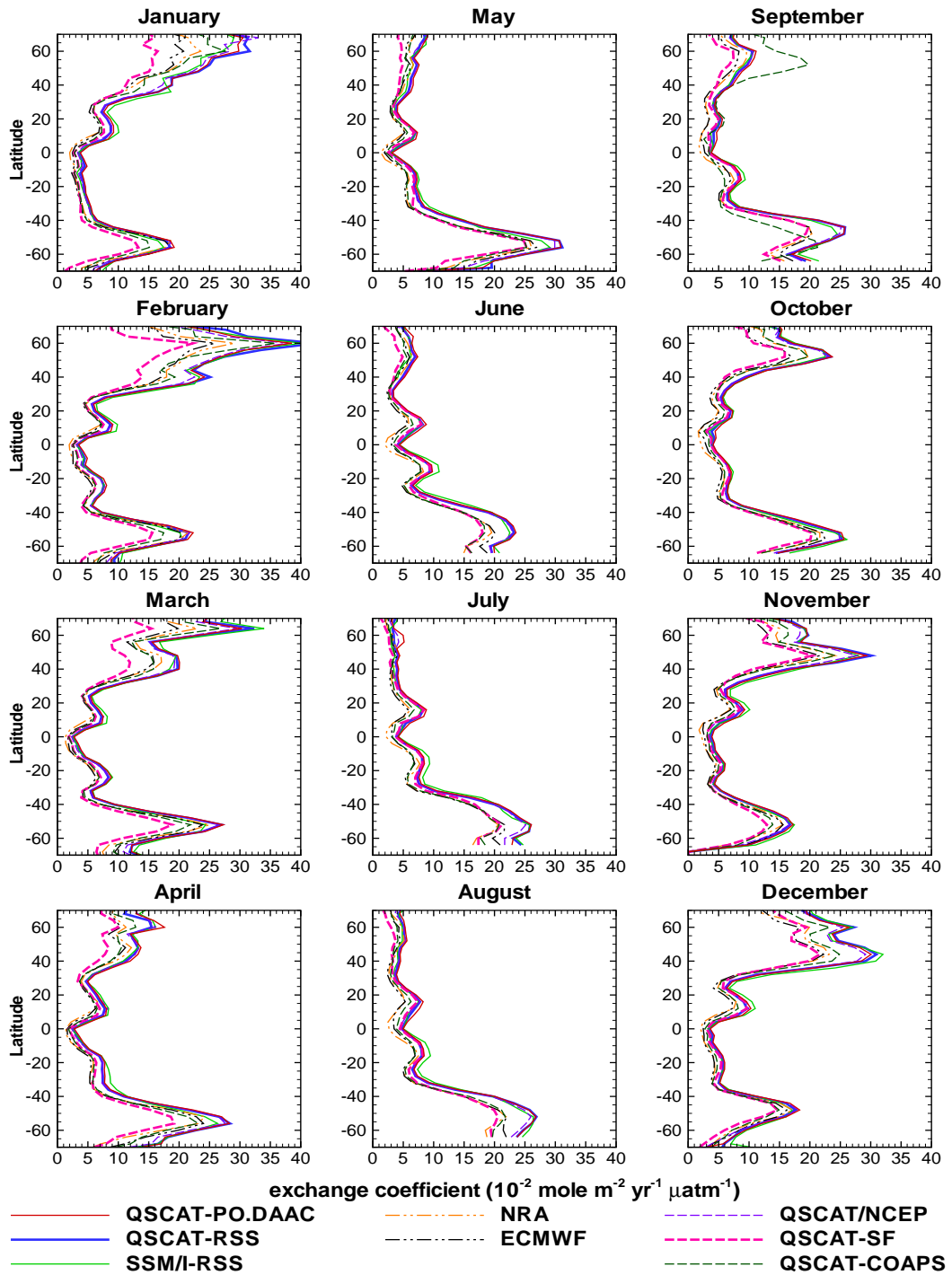


圖 3.3: 一至十二月各全球海洋月平均風場以三次長期風速多項式函式計算的二氧化碳氣體交換係數 K 在緯度上的分布，縱軸表示緯度，負值為南緯，正值為北緯，緯度空間寬帶為 4° ，橫軸表示二氧化碳氣體交換係數 K ，單位為 $10^{-2} \text{ mole m}^{-2} \text{ yr}^{-1} \mu\text{atm}^{-1}$ 。

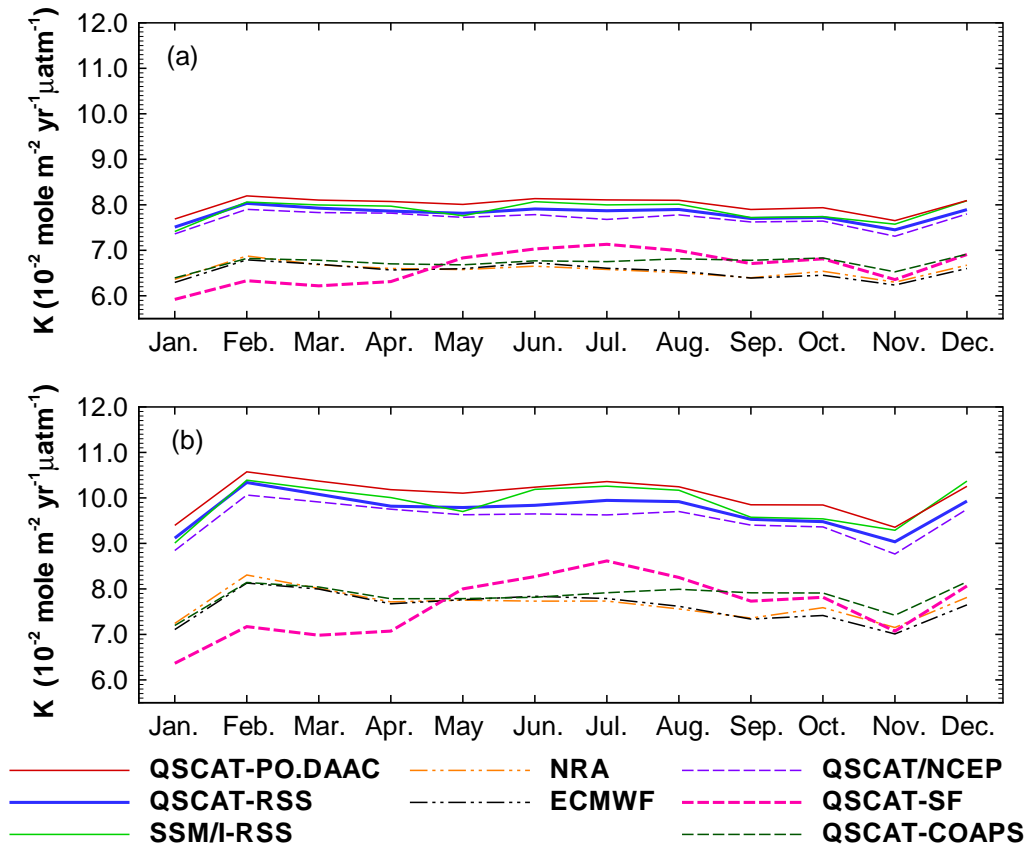


圖 3.4: 各風場的月平均全球二氧化碳氣體交換係數 K , 使用 AVHRR 海表面溫度 SST 、WOA01海表面鹽度 S , 圖 (a) 為使用二次長期風速多項式函式, 圖 (b) 為三次長期風速多項式函式, 縱軸表示二氧化碳氣體交換係數 K , 單位為 $10^{-2} \text{ mole m}^{-2} \text{ yr}^{-1} \mu\text{atm}^{-1}$, 橫軸表示月份。

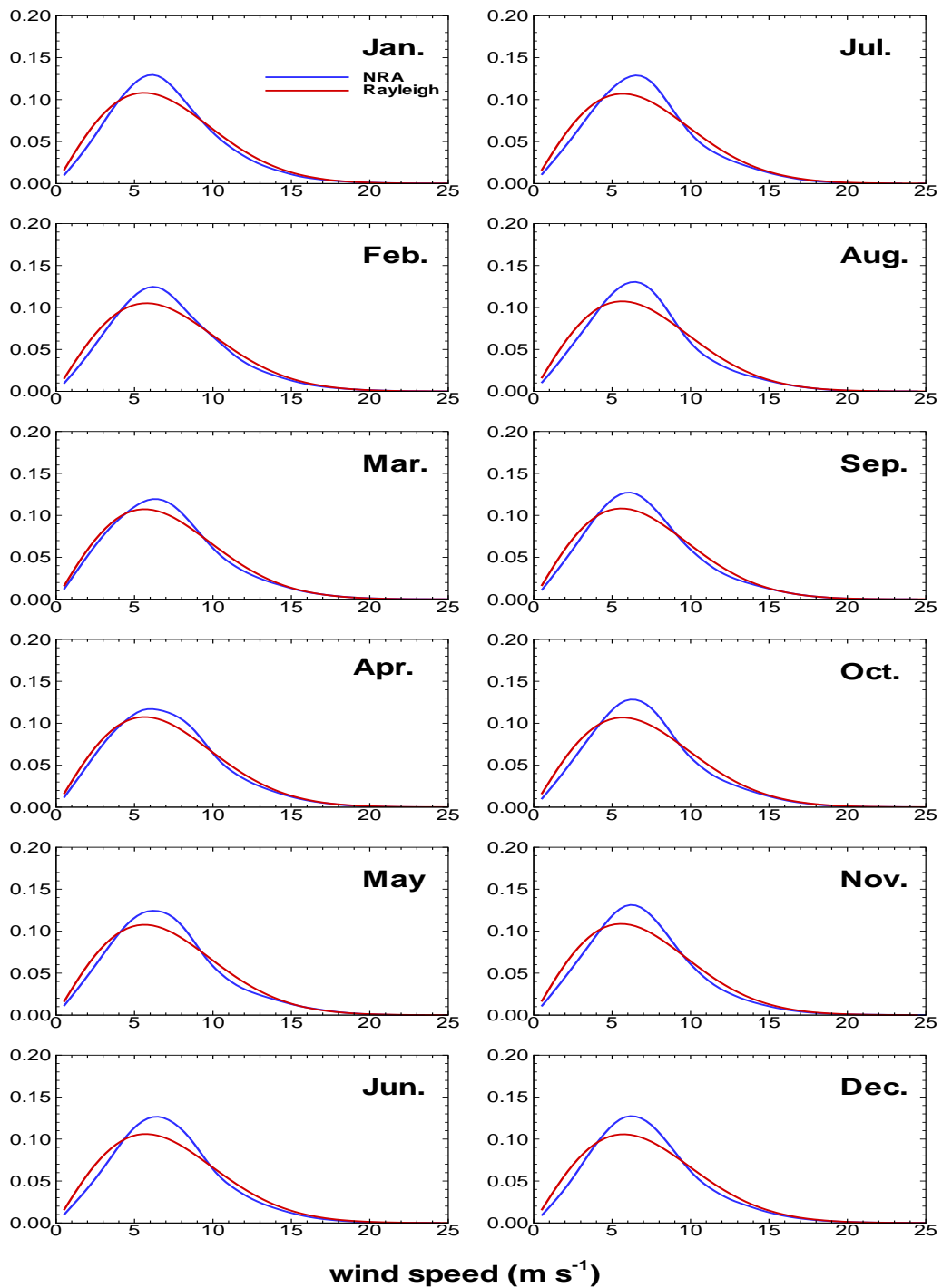


圖 3.5: 一至十二月NRA 全球海洋風場的風速機率密度函數圖, 藍色實線表示該月份內全球的短期風速機率密度函數, 紅色實線表示為利用該月份的全球月平均風速計算得到的雷利機率密度函數, 縱軸表示特定風速網格數目佔所有網格的比例, 橫軸表示風速大小, 單位 m s^{-1} , 風速機率密度函數寬帶為 1 m s^{-1} 。

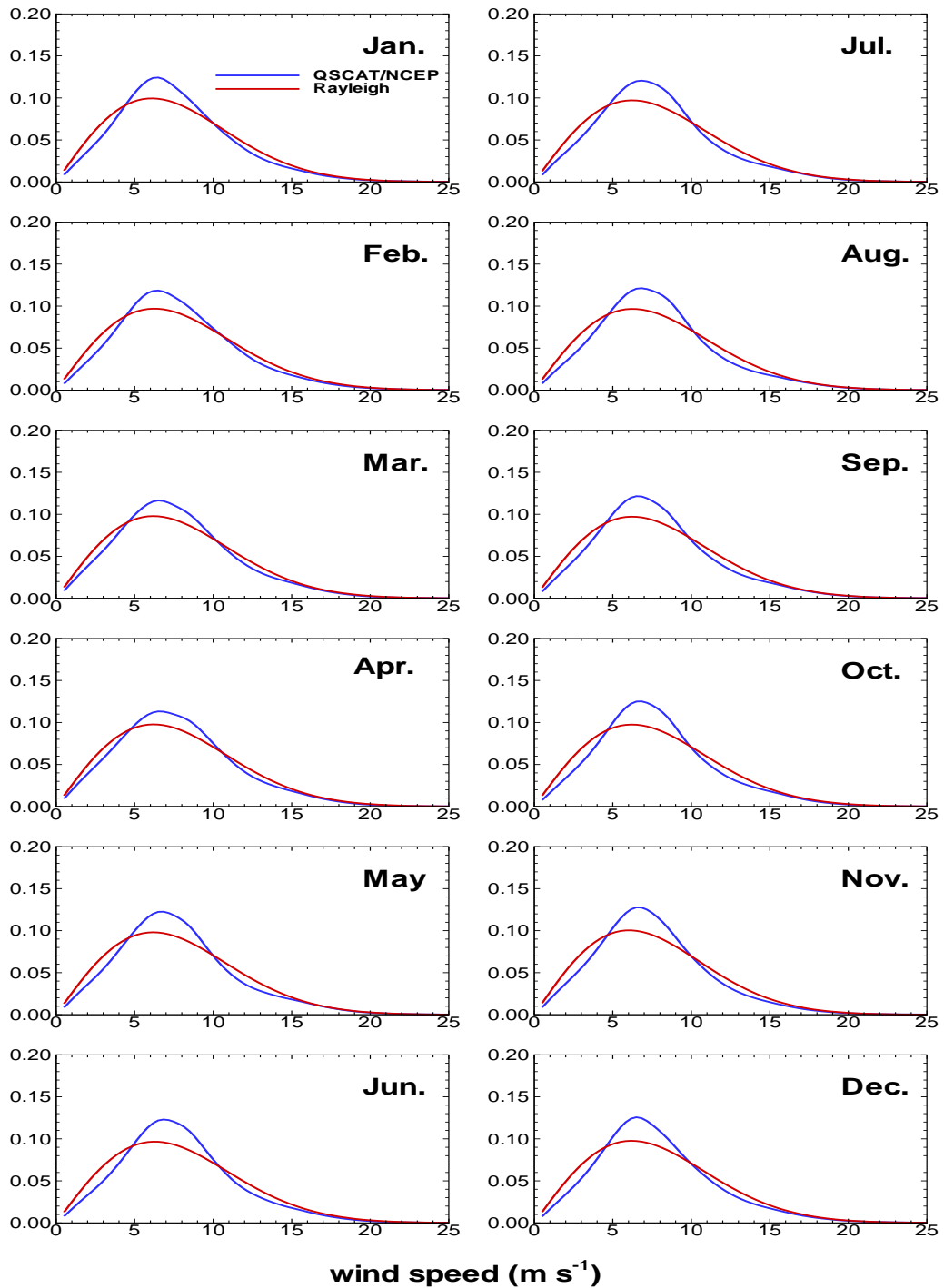


圖 3.6: 一至十二月QSCAT/NCEP 全球海洋風場的風速機率密度函數圖，藍色實線表示該月份內全球的短期風速機率密度函數，紅色實線表示為利用該月份的全球月平均風速計算得到的雷利機率密度函數，縱軸表示特定風速網格數目佔所有網格的比例，橫軸表示風速大小，單位 m s^{-1} ，風速機率密度函數寬帶為 1 m s^{-1} 。

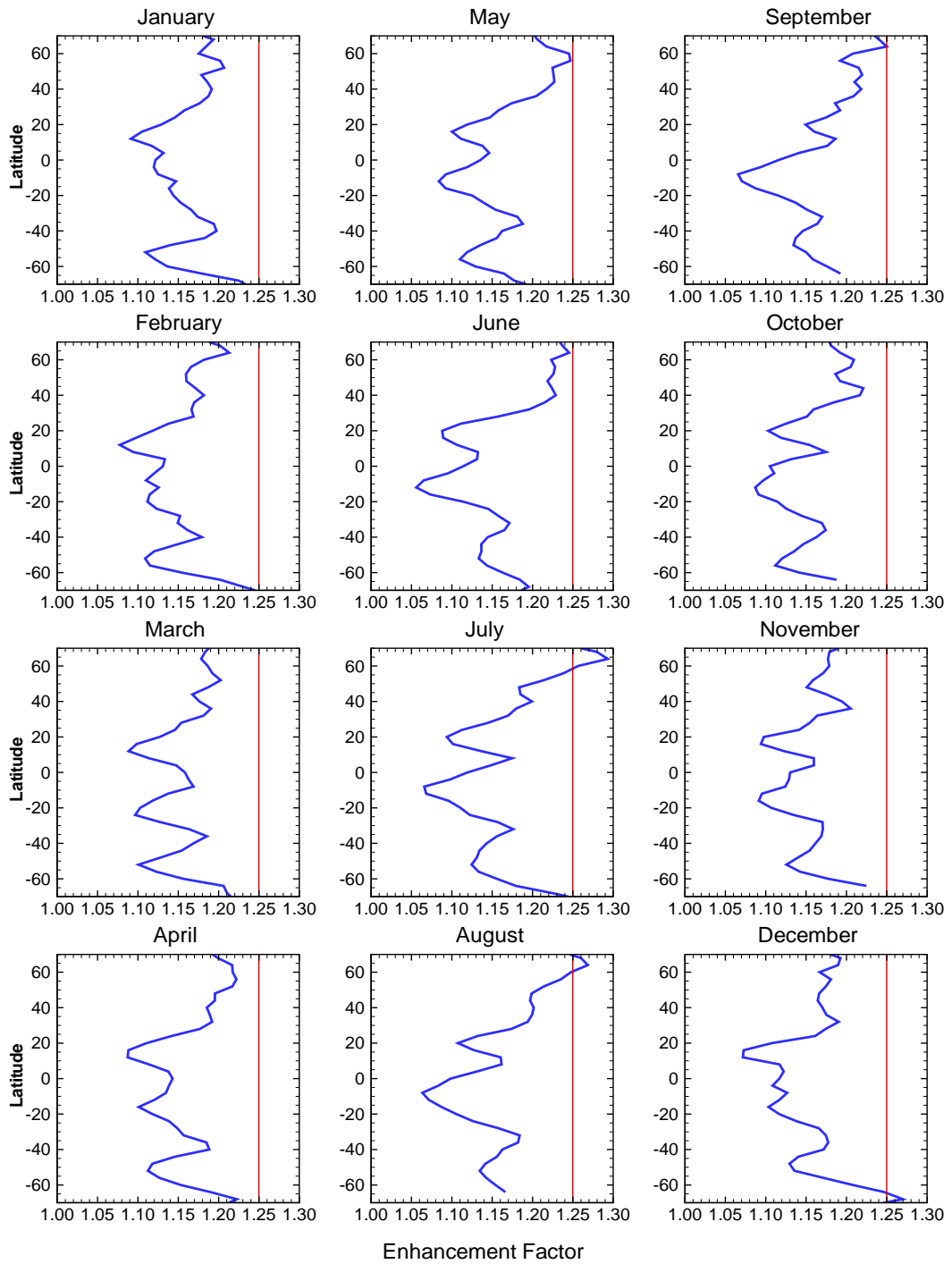


圖 3.7: 一至十二月NRA 以二次風速多項式函式計算的增強因子 R 在緯度上的分布, 藍色實線表示該月份內 NRA 的增強因子 R , 紅色實線表示為風速分布為雷利分布的增強因子 R , 縱軸表示緯度, 負值為南緯, 正值為北緯, 空間寬帶為 4° , 橫軸表示增強因子 R 。

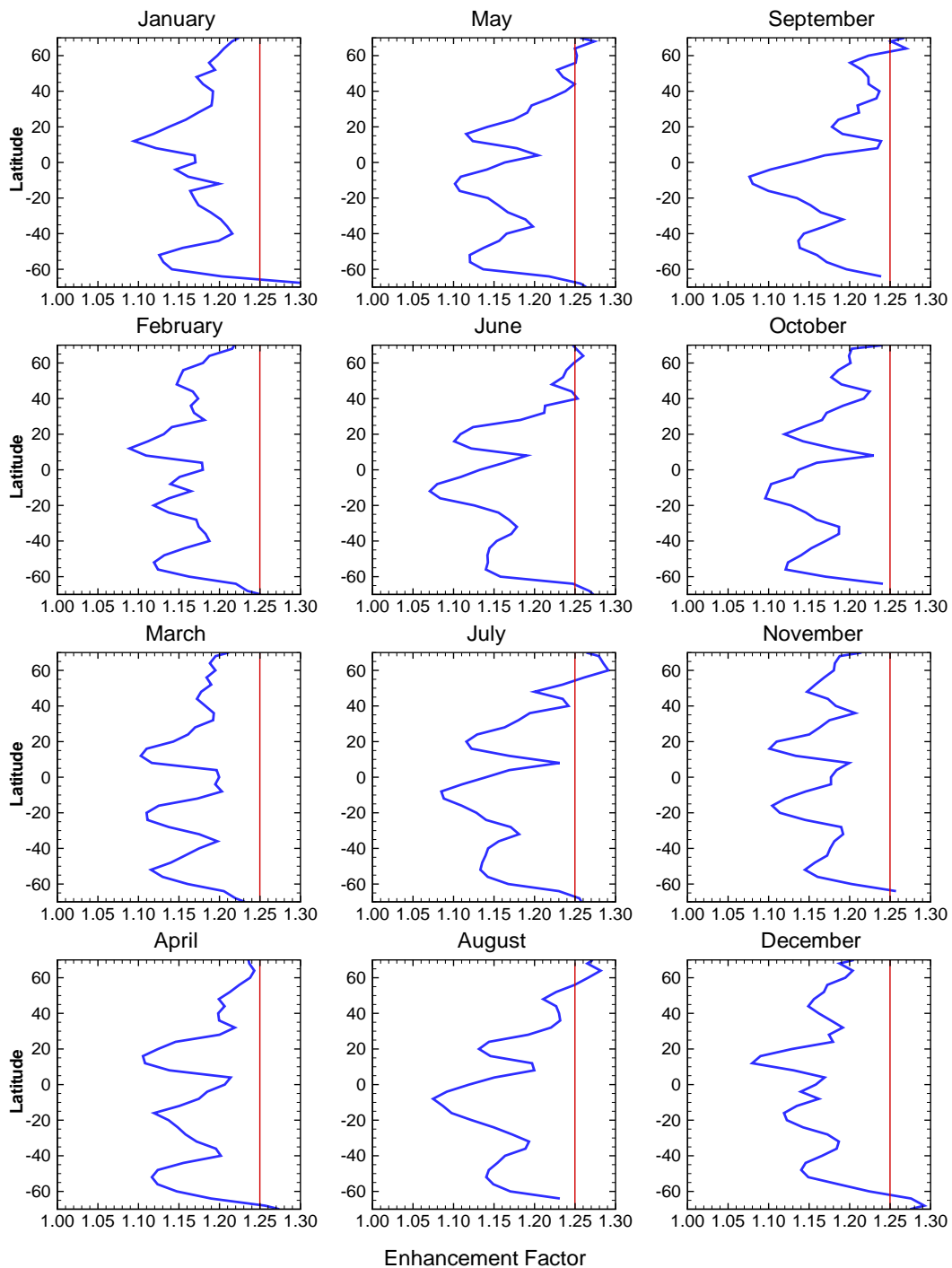


圖 3.8: 一至十二月QSCAT/NCEP 以二次風速多項式函式計算的增強因子 R 在緯度上的分布, 藍色實線表示該月份內 QSCAT/NCEP 的增強因子 R , 紅色實線表示為風速分布為雷利分布的增強因子 R , 縱軸表示緯度, 負值為南緯, 正值為北緯, 緯度空間寬帶為 4° , 橫軸表示增強因子 R 。

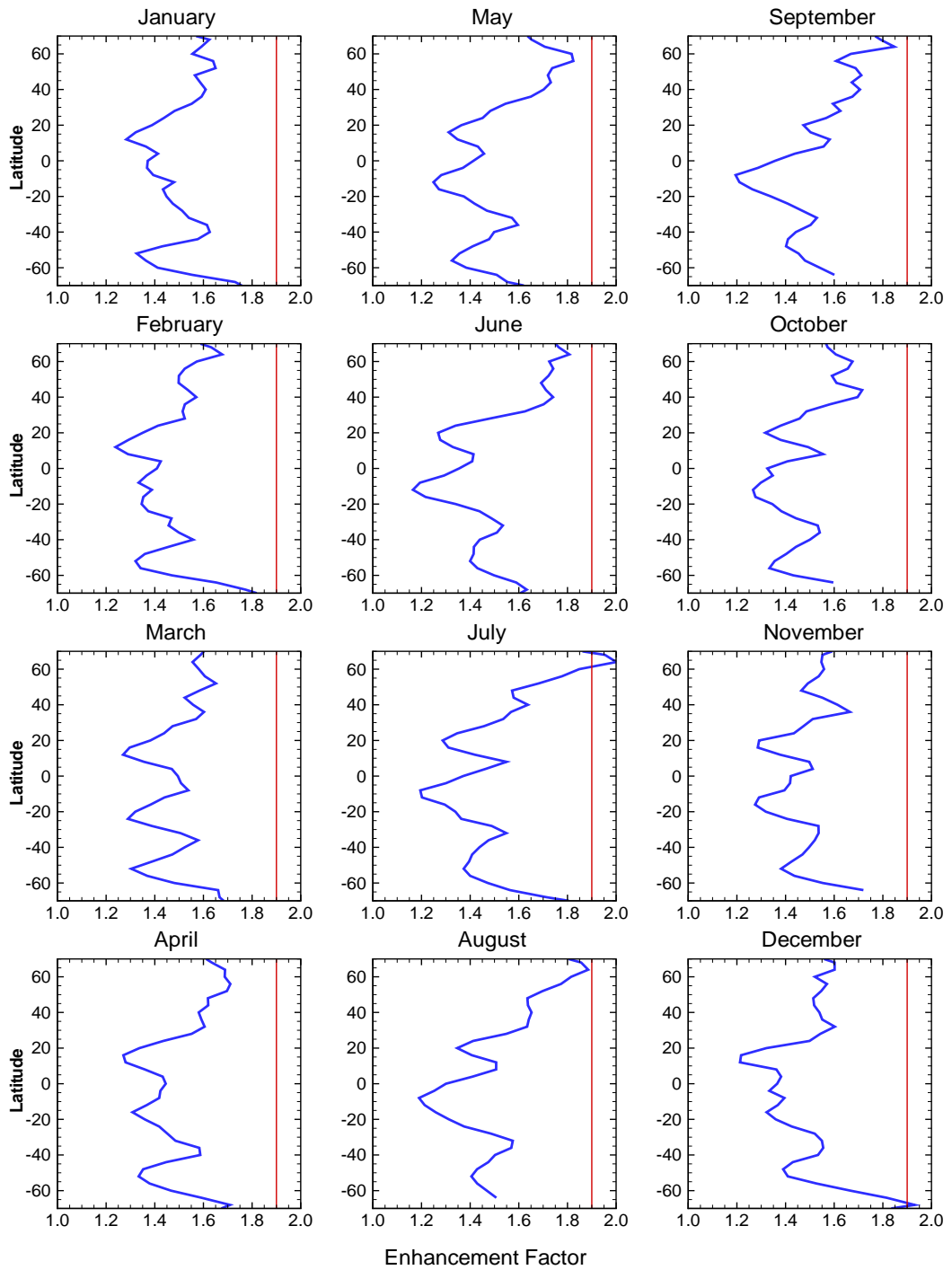


圖 3.9: 一至十二月NRA 以三次風速多項式函式計算的增強因子 R 在緯度上的分布, 藍色實線表示該月份內 NRA 的增強因子 R , 紅色實線表示為風速分布為雷利分布的增強因子 R , 縱軸表示緯度, 負值為南緯, 正值為北緯, 緯度空間寬帶為 4° , 橫軸表示增強因子 R 。

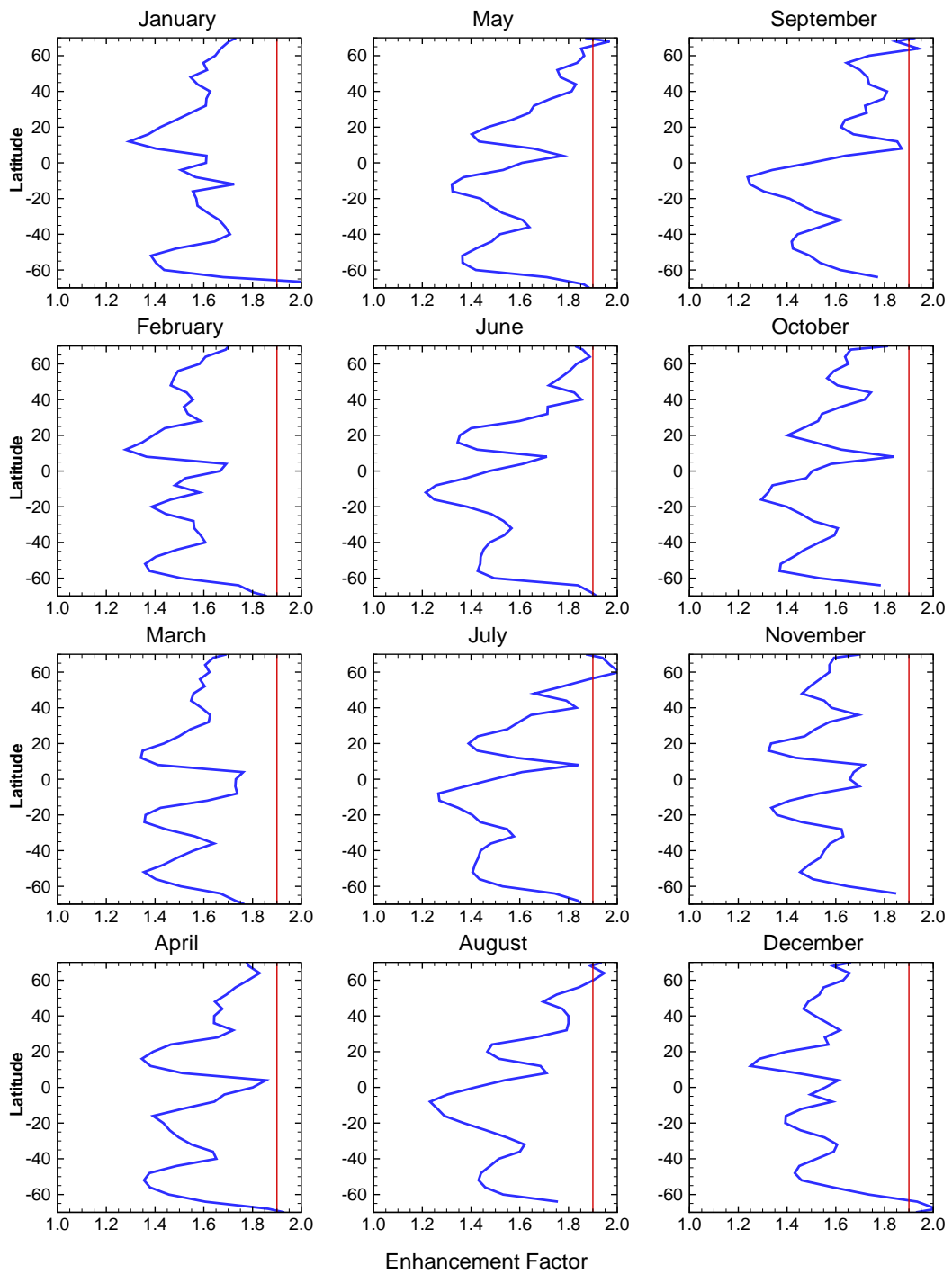


圖 3.10: 一至十二月QSCAT/NCEP 以三次風速多項式函式計算的增強因子 R 在緯度上的分布, 藍色實線表示該月份內 QSCAT/NCEP 的增強因子 R , 紅色實線表示為風速分布為雷利分布的增強因子 R , 縱軸表示緯度, 負值為南緯, 正值為北緯, 緯度空間寬帶為 4° , 橫軸表示增強因子 R 。

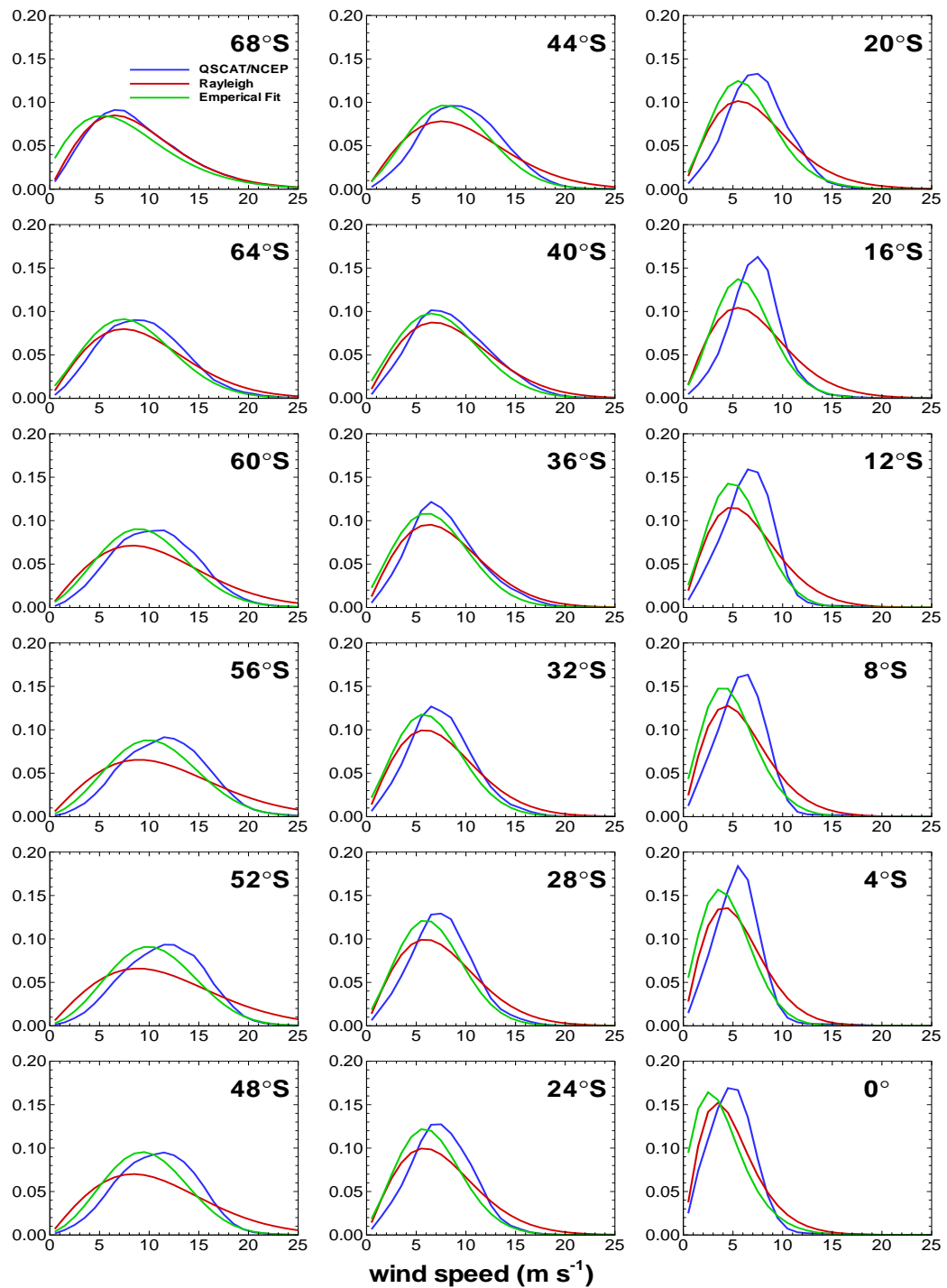


圖 3.11: 四月份QSCAT/NCEP 風場在南緯68°至0°緯度帶的風速機率密度函數圖，圖中所包含的緯度範圍為其右上角所標示的緯度2°之內的風速機率密度函數狀況，藍色實線表示該區域的風速機率密度函數，紅色實線表示以該區平均風速計算得到的雷利機率密度函數，綠色實線表示以 Justus 經驗函式得到的韋伯機率密度函數。縱軸表示特定風速網格數目佔所有網格的比例，橫軸表示風速大小，單位 m s^{-1} ，風速機率密度函數寬帶為 1 m s^{-1} 。

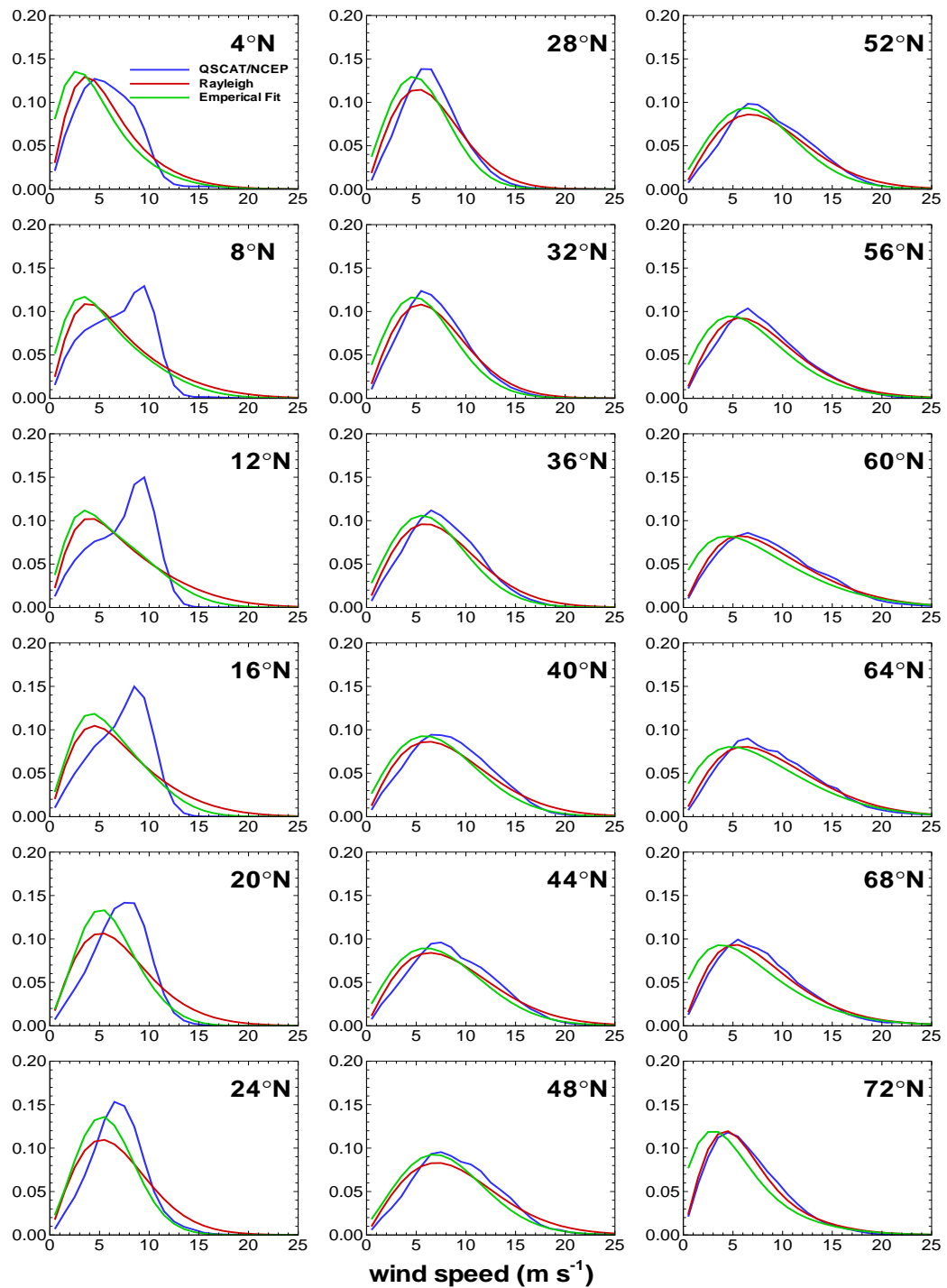


圖 3.12: 四月份QSCAT/NCEP 風場在北緯4°至72°緯度帶的風速機率密度函數圖，圖中所包含的緯度範圍為其右上角所標示的緯度2°之內的風速機率密度函數狀況，藍色實線表示該區域的風速機率密度函數，紅色實線表示以該區平均風速計算得到的雷利機率密度函數，綠色實線表示以 Justus 經驗函式得到的韋伯機率密度函數。縱軸表示特定風速網格數目佔所有網格的比例，橫軸表示風速大小，單位 m s^{-1} ，風速機率密度函數寬帶為 1 m s^{-1} 。

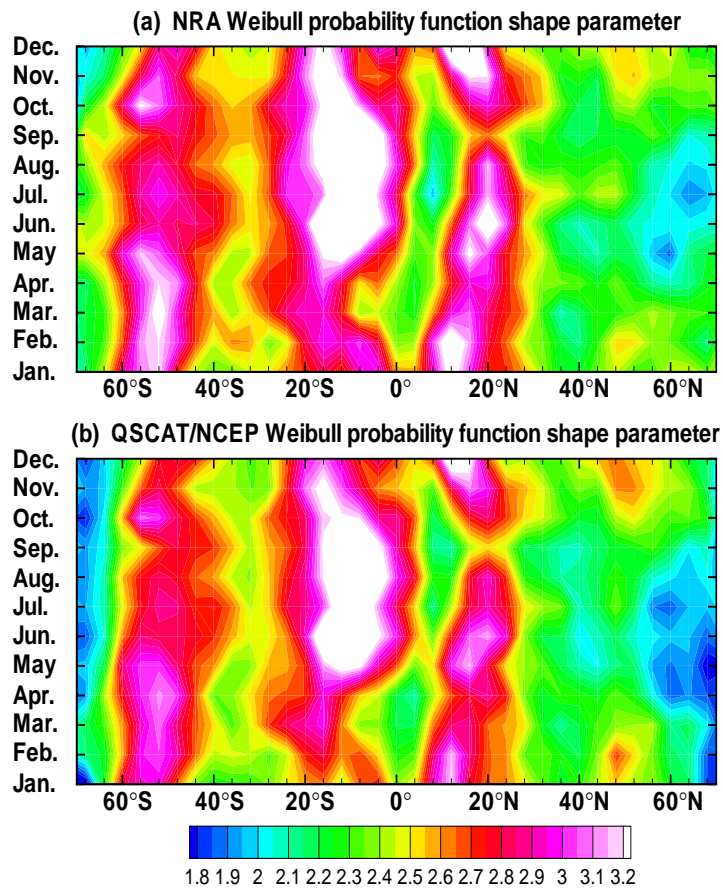


圖 3.13: 一至十二月全球各緯度區域風速的韋伯機率函式形狀參數。圖(a) 為 NRA 資料計算結果, 圖 (b) 為 QSCAT/NCEP 資料計算結果, 縱軸表示月份, 橫軸表示緯度, 緯度空間寬帶為 4° , 下方圖例無單位。

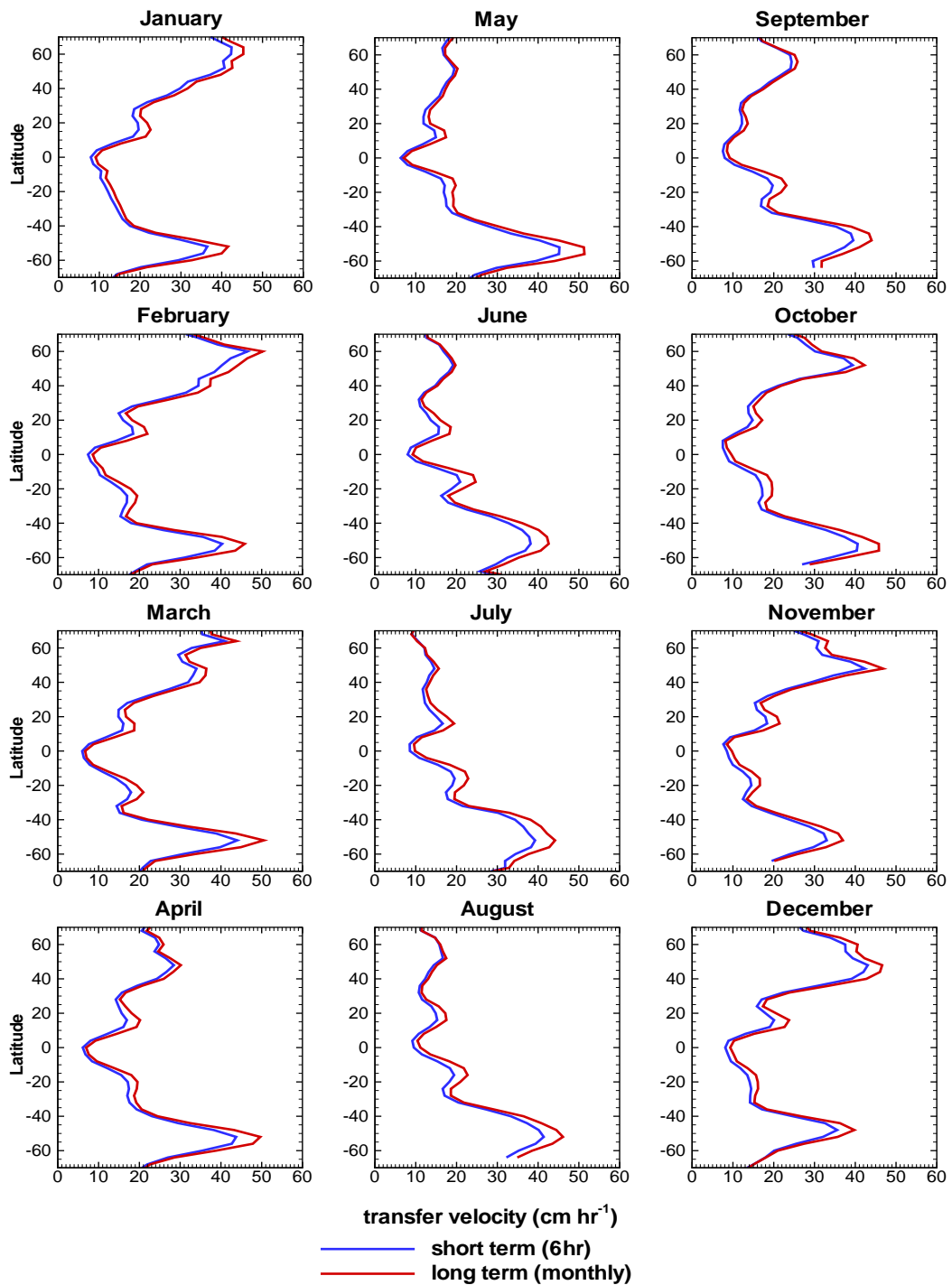


圖 3.14: 一至十二月NRA 以二次風速多項式函式計算的二氧化碳氣體傳輸速度 k 在緯度上的分布, 藍色實線表示該區域的短期二氧化碳氣體傳輸速度平均值 \bar{k} , 紅色實線表示以該區平均風速計算得到的長期二氧化碳氣體傳輸速度 k_{av} 。縱軸表示緯度, 負值為南緯, 正值為北緯, 緯度空間寬帶為 4° , 橫軸表示二氧化碳氣體傳輸速度 k , 單位為 cm hr^{-1} 。

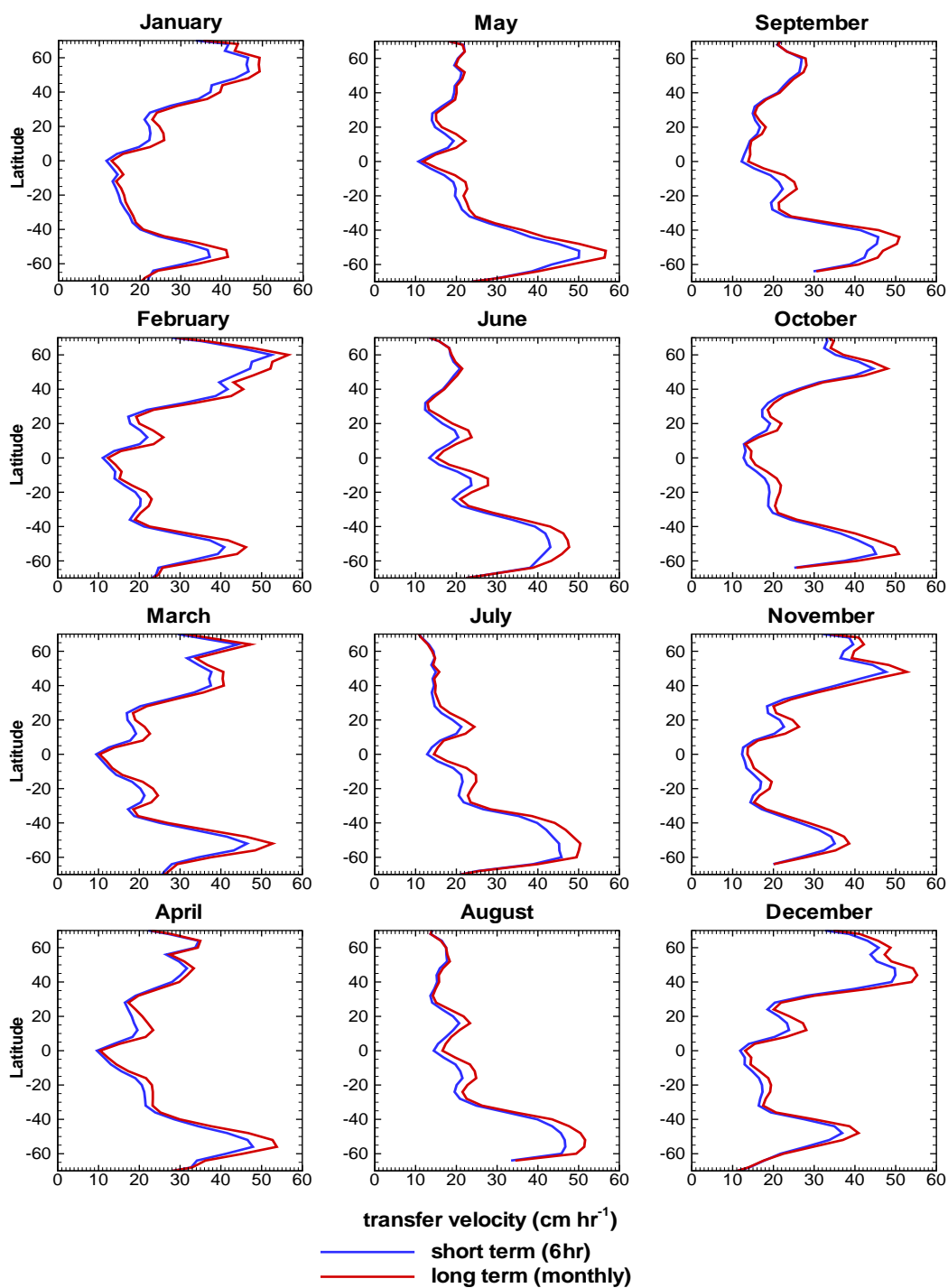


圖 3.15: 一至十二月QSCAT/NCEP 以二次風速多項式函式計算的二氧化碳氣體傳輸速度 k 在緯度上的分布, 藍色實線表示該區域的短期二氧化碳氣體傳輸速度平均值 \bar{k} , 紅色實線表示以該區平均風速計算得到的長期二氧化碳氣體傳輸速度 k_{av} 。縱軸表示緯度, 負值為南緯, 正值為北緯, 緯度空間寬帶為 4° , 橫軸表示二氧化碳氣體傳輸速度 k , 單位為 cm hr^{-1} 。

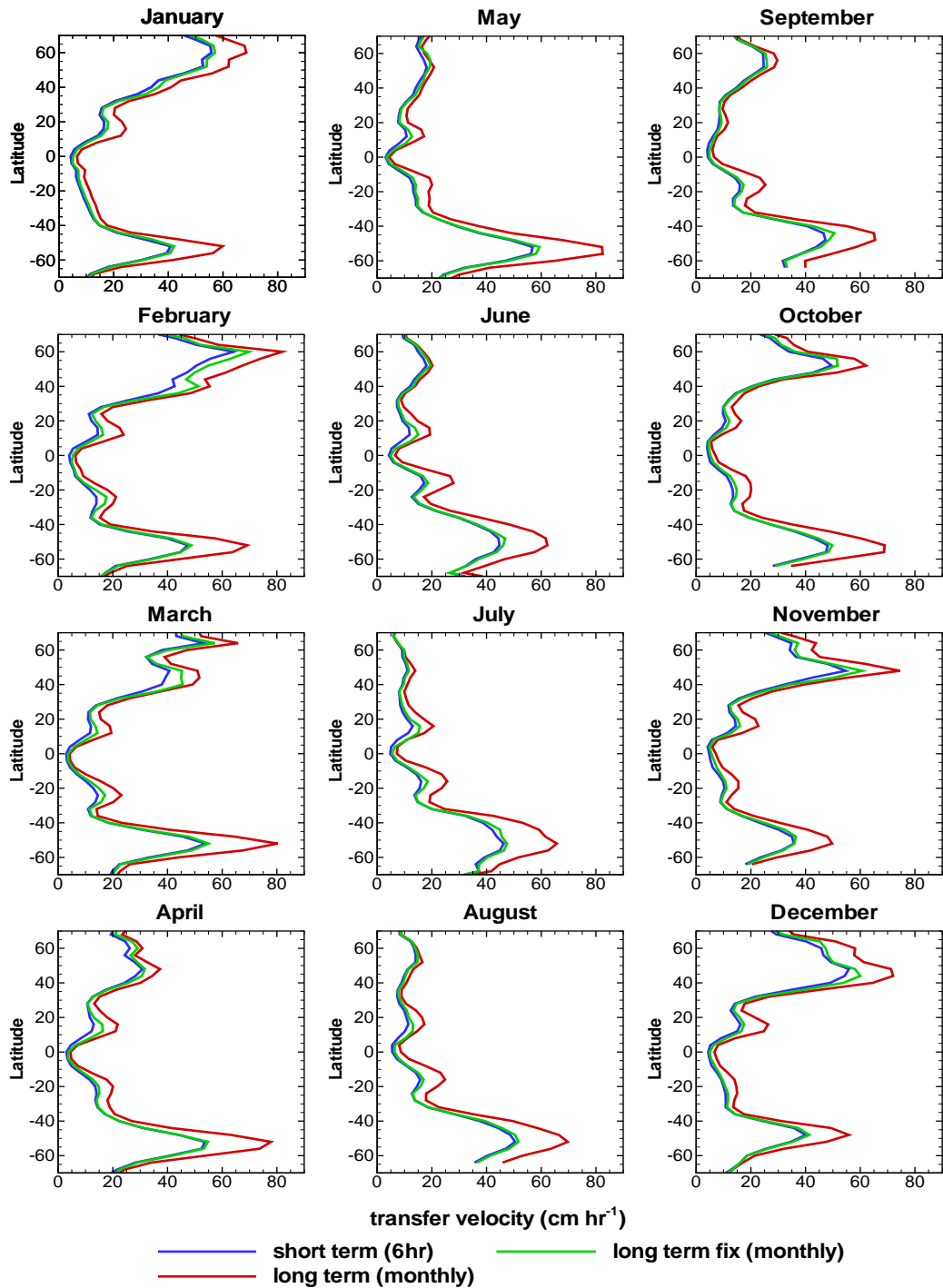


圖 3.16: 一至十二月NRA 以三次風速多項式函式計算的二氧化碳氣體傳輸速度 k 在緯度上的分布, 藍色實線表示該區域的短期二氧化碳氣體傳輸速度平均值 \bar{k} , 紅色實線表示以該區平均風速計算得到的長期二氧化碳氣體傳輸速度 k_{av} , 綠色實線表示以該區修正函式計算得到的長期二氧化碳氣體傳輸速度 k_{av-fix} 。縱軸表示緯度, 負值為南緯, 正值為北緯, 緯度空間寬帶為 4° , 橫軸表示二氧化碳氣體傳輸速度 k , 單位為 cm hr^{-1} 。

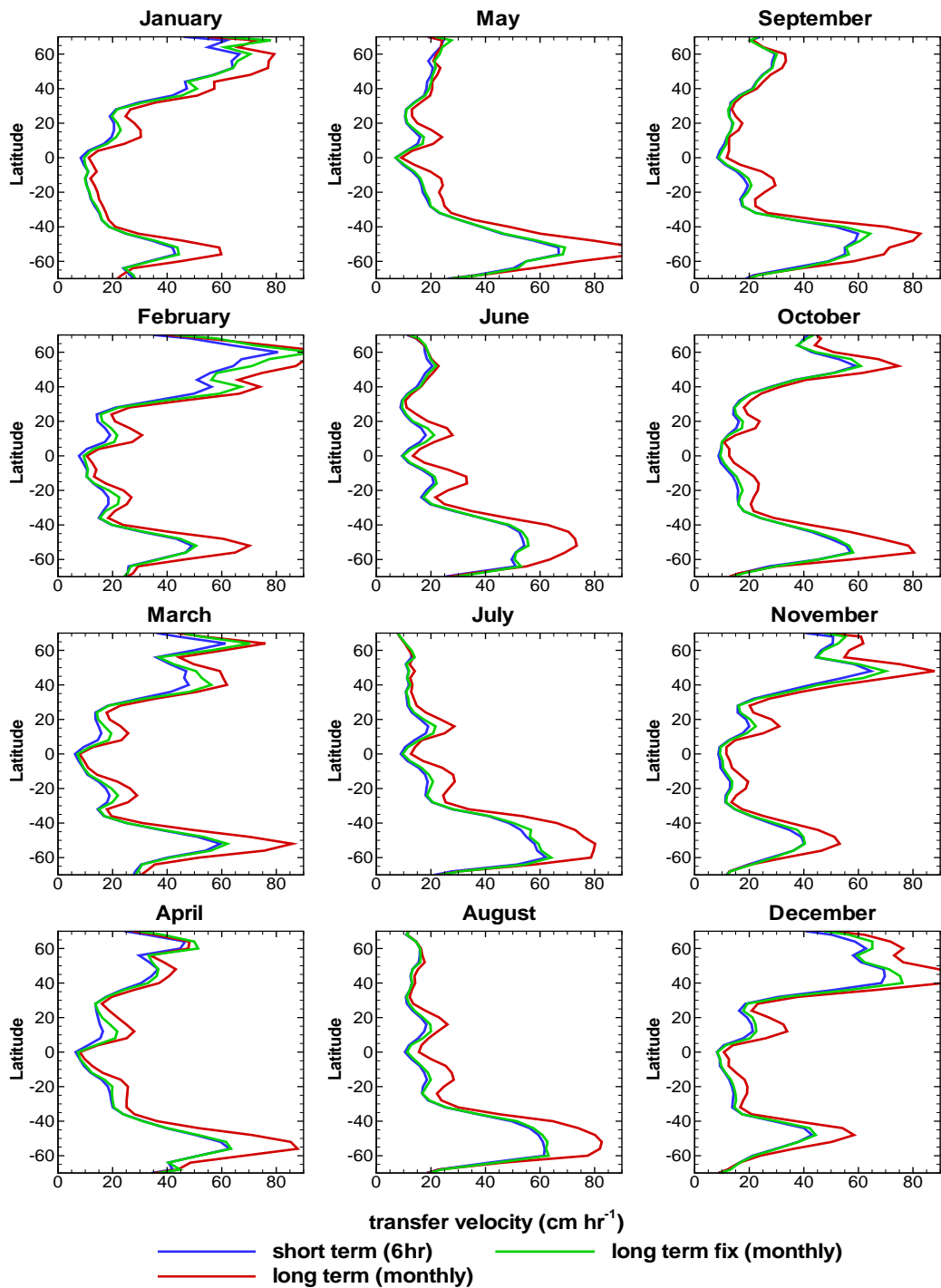


圖 3.17: 一至十二月QSCAT/NCEP 以三次風速多項式函式計算的二氧化碳氣體傳輸速度 k 在緯度上的分布, 藍色實線表示該區域的短期二氧化碳氣體傳輸速度平均值 \bar{k} , 紅色實線表示以該區平均風速計算得到的長期二氧化碳氣體傳輸速度 k_{av} , 綠色實線表示以該區修正函式計算得到的長期二氧化碳氣體傳輸速度 k_{av-fix} 。縱軸表示緯度, 負值為南緯, 正值為北緯, 緯度空間寬帶為 4° , 橫軸表示二氧化碳氣體傳輸速度 k , 單位為 cm hr^{-1} 。

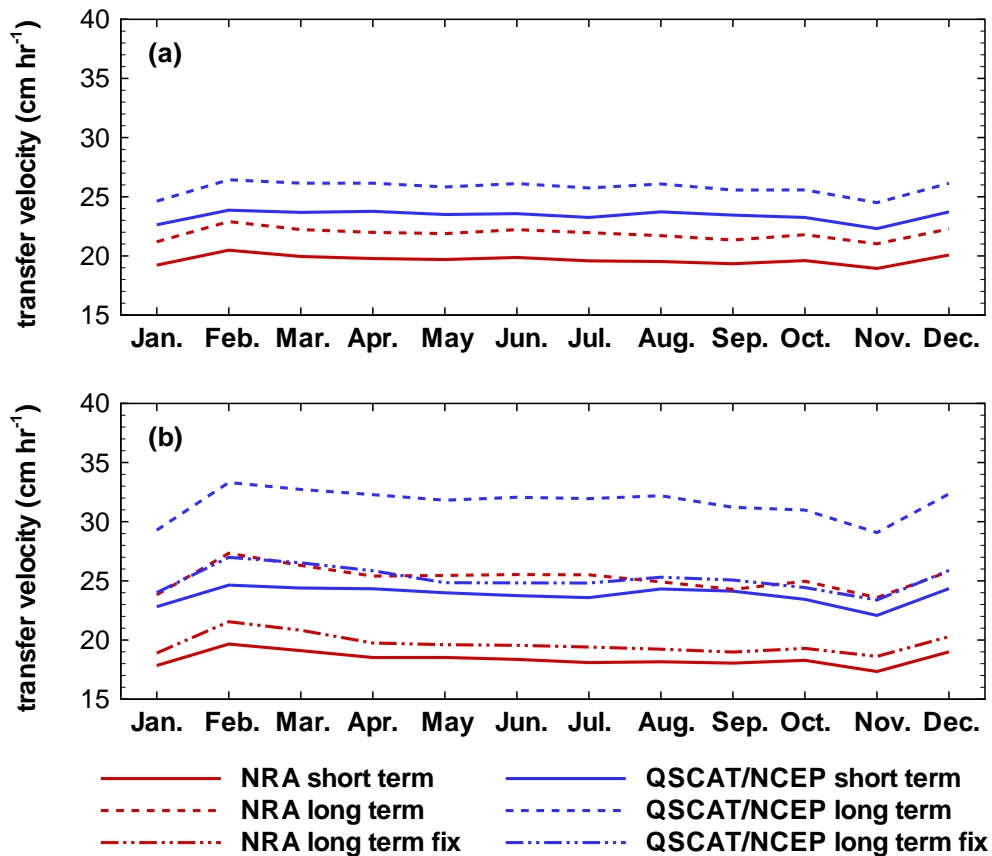


圖 3.18: 月平均全球二氧化碳氣體傳輸速度 k 圖 (a) 為採用二次風速多項式函式作計算的結果, 圖 (b) 為採用三次風速多項式函式作計算的結果。紅色線為 NRA 的資料, 藍色線為 QSCAT/NCEP 的資料, 虛線為使用長期函式計算的結果, 實線為使用短期函式計算結果的平均值, 虛點點線為使用長期修正函式計算的結果。計算時固定海表面溫度 $SST=20^{\circ}\text{C}$, 縱軸表示二氧化碳氣體傳輸速度 k , 單位為 cm hr^{-1} , 橫軸表示月份。

Chapter 4

全球海洋風場時空變化對計算大氣-海洋二氧化碳通量的影響

接續第三章我們已經分析討論全球海洋風場時空變化對於計算大氣-海洋介面二氧化碳氣體交換係數 K 與二氧化碳氣體傳輸速度 k 的影響，現在我們在計算中加入海洋-大氣二氧化碳的分壓差 $\Delta p\text{CO}_2$ 的資料，討論風場時空變化反應在計算大氣-海洋二氧化碳通量的影響。本研究於4.1節說明全球大氣-海洋介面二氧化碳通量的計算方式以及海洋-大氣二氧化碳的分壓差 $\Delta p\text{CO}_2$ 的資料特性，4.2節分析使用不同全球海洋月平均風場來計算大氣-海洋二氧化碳總通量所造成的差異，4.3節比較使用長期風場（月平均）與短期風場（6小時）對於計算大氣-海洋二氧化碳總通量所造成的差異。4.4節歸納前兩節分析結果。

4.1 二氧化碳通量的計算方式與海洋-大氣二氧化碳的分壓差資料說明

大氣-海洋介面二氧化碳的通量值 F 等於二氧化碳氣體傳輸速度 k ，乘上二氧化碳氣體在海水的溶解度 s ，再乘上二氧化碳在海洋-大氣之間的分壓差 $\Delta p\text{CO}_2$ ，或是寫作二氧化碳氣體交換係數 K ，乘上海洋-大氣二氧化碳分壓差 $\Delta p\text{CO}_2$ 。

在程式中我們計算全球大氣-海洋介面二氧化碳的總通量 F_{total} 的方式為累加每個網

格點的二氧化碳通量, 其算式如下:

$$\begin{aligned}
 F_{total} &= \sum_i \sum_j F_{ij} \times \Delta a_{ij} \\
 &= \sum_i \sum_j k_{ij} \times s_{ij} \times \Delta pCO_{2ij} \times \Delta a_{ij} \\
 &= \sum_i \sum_j K_{ij} \times \Delta pCO_{2ij} \times \Delta a_{ij}
 \end{aligned}$$

i 表示網格點所在經度的位置, j 表示網格點所在緯度的位置, F_{ij} 表示二氧化碳通量, k_{ij} 表示二氧化碳氣體傳輸速度, s_{ij} 表示二氧化碳氣體在海水的溶解度, ΔpCO_{2ij} 表示海洋-大氣二氧化碳的分壓差, Δa_{ij} 表示海表面面積, K_{ij} 表示的二氧化碳氣體交換係數。為配合海洋-大氣二氧化碳的分壓差 ΔpCO_2 資料的空間解析度, 本研究中計算總通量時所取的網格點空間解析度為經度 $5^\circ \times$ 緯度 4° 。

海洋-大氣二氧化碳的分壓差 ΔpCO_2 的資料, 我們是採用由 Takahashi 等 (2002) 所生產的全球海面月平均二氧化碳分壓差, 此資料為目前國際上可取得最完整的全球海面月平均二氧化碳分壓差¹。Takahashi等的資料處理方式為: 將940000個海表面二氧化碳分壓資料測量值, 去除聖嬰期間於赤道太平洋介於北緯10度至南緯10度之實測數據, 使用海洋傳輸方程式 (ocean-transport equation) 內插補足時間與空間上缺失之數據後, 得到的全球海洋表面 pCO_2 資料, 減去1995年的大氣二氧化碳濃度, 得到的全球海洋-大氣二氧化碳分壓差資料 ΔpCO_2 , 資料誤差為 $\pm 3\mu atm$, 空間解析度為經度 5° , 緯度 4° 。詳細資料說明請見參考文獻 [33]。

我們觀察海洋-大氣二氧化碳的分壓差 ΔpCO_2 的時空分布特性。將海洋-大氣二氧化碳的分壓差 ΔpCO_2 資料在十二個月份的空間分布情形繪於圖4.1, 圖中黃色至紅色部分 (正值區) 表示二氧化碳氣體傳輸方向是由海洋往大氣傳輸, 綠色至藍色部分 (負

¹ ΔpCO_2 資料置於美國哥倫比亞大學 Lamont-Doherty Earth Observatory FTP 站:
ftp://ftp.ldeo.columbia.edu/

值區) 表示二氧化碳氣體傳輸方向是由大氣往海洋傳輸。從圖上可以看出三項特質, 第一、海洋-大氣二氧化碳的分壓差 $\Delta p\text{CO}_2$ 的同值區大致是沿緯度分布的。第二、在赤道附近海洋-大氣二氧化碳的分壓差 $\Delta p\text{CO}_2$ 呈現正值, 赤道以外的區域海洋-大氣二氧化碳的分壓差 $\Delta p\text{CO}_2$ 呈現負值居多。第三、在十二個月份中, 六月至八月海洋-大氣二氧化碳的分壓差 $\Delta p\text{CO}_2$ 的正值區分布最廣, 十一月至一月海洋-大氣二氧化碳的分壓差 $\Delta p\text{CO}_2$ 的正值區分布最窄。

4.2 使用不同全球海洋風場對於計算大氣-海洋二氧化碳通量所造成的差異

過去關於比較使用不同風場來計算大氣-海洋二氧化碳通量的相關研究有：

Carr等 (2002) 比較使用 QSCAT、SSM/I 兩個不同的衛星資料來計算各月份的全球大氣-海洋二氧化碳總通量，他們發現在大部分的月份中，使用 SSM/I 風場所得到的全球大氣-海洋二氧化碳總通量比使用 QSCAT 風場的多出11%。Feely等 (2004) 比較使用 ECMWF、QSCAT、SSM/I 風場計算太平洋赤道區域的二氧化碳通量，發現三個風場得到的值皆有11個百分比的差異。現在我們比較八個風場，察看各風場間的變化。接續上一章第2節的研究，我們將各全球海洋月平均風場的二氧化碳氣體交換係數 K 資料乘上全球海洋-大氣二氧化碳的分壓差 $\Delta p\text{CO}_2$ 的資料，以及海洋表面積之後可以獲得全球海洋的大氣-海洋二氧化碳總通量。

首先比較風場空間變化對計算全球二氧化碳總通量的差異。我們將各風場的月平均二氧化碳總通量隨緯度分布的計算結果繪於圖4.2、圖4.3。從圖上可以看到海洋在南北緯30度之間為釋放區 (outgassing flux; 正值)，在南北緯30度以外為吸收區 (absorption flux; 負值)，這是因為海洋-大氣二氧化碳分壓差 $\Delta p\text{CO}_2$ 在南北緯30度之間多為正值，在南北緯30度之外多為負值。南北緯60度以外由於該區大多為海冰區，所以該區二氧化碳總通量較小。觀察二氧化碳總通量在不同季節的變化情形，在南北緯30度之間其量變化不大，南北緯30度之外，由於二氧化碳氣體交換係數 K 呈季節性的變化，所以二氧化碳總通量在當地冬季的值會最大，在當地夏季的值會最小。比較各風場之間二氧化碳總通量在緯度上的分布趨勢，因為二氧化碳氣體總通量的量反應出的即為二氧化碳氣體交換係數 K 的值，QSCAT-PO.DAAC、QSCAT-RSS、SSM/I-RSS三個風場的二氧化碳總通量的量在各緯度上的分布都是較大的，而在南北緯30度以內 NRA、ECMWF 的二氧化碳氣體總通量的量較低，在南北緯30度以

外則是換為 QSCAT-SF 的二氧化碳氣體總通量的量較低, QSCAT/NCEP、QSCAT-SF 在各緯度的分布上則是介於最高與最低之間。

我們將各風場的月平均全球二氧化碳總通量計算結果繪於圖 4.4, 從圖上可以看到八個風場的二氧化碳總通量皆為負值, 代表海洋為大氣中二氧化碳的吸收區。各風場的總通量值在時間的變化趨勢上, 在一月至五月間除 QSCAT-SF 略有差異外, 其他風場幾乎相同, 在五月之後各種風場的趨勢皆相似。比較各月份間的全球大氣-海洋二氧化碳總通量變化情形, 全球大氣-海洋二氧化碳總通量的匯入量以十二月最大, 六至八月最小。再比較各風場間的差異, 我們看到八個風場中, QSCAT-PO.DAAC、QSCAT-RSS、SSM/I-RSS、QSCAT/NCEP 屬於二氧化碳吸收總通量較高的風場, QSCAT-SF 的二氧化碳吸收總通量是最小, NRA、ECMWF、QSCAT-COAPS 則介於之間。在各風場間 QSCAT-SF 成爲之中二氧化碳吸收總通量是最小, 這是因爲 QSCAT-SF 在南北緯 30 度以外的風速較其他風場的風速來的小, 且該區的海洋-大氣二氧化碳分壓差 $\Delta p\text{CO}_2$ 爲負值居多, 因而使得 QSCAT-SF 的二氧化碳匯入量較少, 而在南北緯 30 度以內 QSCAT-SF 的風速與其他風場相差不大, 且該區的海洋-大氣二氧化碳分壓差 $\Delta p\text{CO}_2$ 爲正值居多, 因而使得 QSCAT-SF 的二氧化碳匯出總量與其他風場相差不大, 所以 QSCAT-SF 的二氧化碳吸收總通量是呈現的量最小。

統計各風場間在空間差異造成計算全球月平均二氧化碳總通量上的差值, 最大的差值發生在十二月 SSM/I-RSS 與 QSCAT-SF 的差值, 以二次風速多項式計算達 $0.96 \text{ Pg Cyr}^{-12}$, 以三次風速多項式計算達 2.06 Pg Cyr^{-1} 。而全球年平均最大差異爲 SSM/I-RSS 與 QSCAT-SF 的差值, 以二次風速多項式計算達 0.60 Pg Cyr^{-1} , 以三次風速多項式計算達 1.17 Pg Cyr^{-1} 。各風場全球年平均二氧化碳氣體總通量資料請看表 4.1。

²Pg Cyr⁻¹ 爲 Peta gram Carbon per year 的縮寫; Peta = 10^{15}

我們若以 QSCAT-RSS 作為比較標準 則各風場間與 QSCAT-RSS 在空間差異造成計算全球月平均二氧化碳總通量上最大的差值, 發生在十二月與 QSCAT-SF 的差值, 以二次風速多項式計算, 達 0.83 Pg Cyr^{-1} , 之間誤差有23%, 以三次風速多項式計算達 1.77 Pg Cyr^{-1} , 之間誤差有30%。而全球年平均值最大差異為與 QSCAT-SF 的差值 (以二次風速多項式計算) 達 0.56 Pg Cyr^{-1} , 之間誤差有30%。以及與 QSCAT-SF 的差值 (以三次風速多項式計算) 達 1.13 Pg Cyr^{-1} , 之間誤差有38%。各風場與 QSCAT-RSS 的全球年平均二氧化碳總通量差值的百分比資料請看表4.2。

在比較各風場之間二氧化碳總通量的差值變化時, 有一點值得注意的, 原本 ECMWF、NRA、QSCAT-SF 三個風場的二氧化碳氣體交換係數 K 都是在各風場屬於較低的一族, 然而由於 ECMWF、NRA 在空間分布與 QSCAT-SF 有所不同, 所以使用 ECMWF、NRA 風場計算得到的二氧化碳吸收通量較 QSCAT-SF 來的高。

表 4.1: 各風場全球年平均二氧化碳氣體總通量

使用函式	QSCAT-PO.DAAC	QSCAT-RSS	SSM/I-RSS	NRA	ECMWF	QSCAT/NCEP	QSCAT-SF	QSCAT-COAPS	最大差值絕對值
二次風速多項式函式	-1.79	-1.81	-1.84	-1.81	-1.59	-1.82	-1.24	-1.54	0.60
三次風速多項式函式	-2.97	-2.99	-3.03	-2.69	-2.37	-2.96	-1.86	-2.36	1.17

單位: Pg Cyr⁻¹

表 4.2: 各風場與 QSCAT-RSS 的全球年平均二氧化碳氣體總通量差值的百分比

使用函式	QSCAT-PO.DAAC	SSM/I-RSS	NRA	ECMWF	QSCAT/NCEP	QSCAT-SF	QSCAT-COAPS	最大差值的百分比
二次風速多項式函式	-1	2	0	-12	1	-31	-15	-31
三次風速多項式函式	0	1	-10	-21	-1	-38	-21	-38

單位: 百分比

4.3 使用長期風場與短期風場對於計算全球大氣-海洋二氧化碳通量的影響

過去關於比較使用不同時間尺度的風場去計算二氧化碳通量的相關研究有：Wanninkhof等 (2002) 使用 NCEP/NCAR reanalysis 長期風場與短期風場資料來計算全球大氣-海洋二氧化碳總通量，他發現以長期風場計算得到的全球二氧化碳總通量較短期風場計算的結果最大的差異量可達 26%。另外，Bates(2001) 在西北大西洋百慕達群島附近，以實測資料使用不同時間頻率取樣的風場資料來計算二氧化碳通量，他發現短時間（每小時）取樣計算得到的二氧化碳通量較以日平均取樣的結果多了三倍。

本研究則採用 NRA、QSCAT/NCEP 六小時全球風場資料來進行分析，我們將上章第3節計算所得到的長期全球二氧化碳氣體傳輸速度 k_{av} 、 k_{av-fix} 與短期全球二氧化碳氣體傳輸速度平均值 \bar{k} 資料，乘上二氧化碳氣體溶解度 s 、全球海洋-大氣二氧化碳的分壓差 ΔpCO_2 的資料，以及海洋表面積之後可以獲得長期全球大氣-海洋二氧化碳總通量（以 F_{av} 示之，使用修正函式之結果以 F_{av-fix} 表示）跟短期平均值的全球大氣-海洋二氧化碳總通量（以 \bar{F} 示之）。

以NRA、QSCAT/NCEP 風場使用長、短期二次風速多項式計算得到的二氧化碳總通量在各緯度分布的情形繪於圖 4.5、圖 4.6；使用三次風速多項式計算得到的二氧化碳總通量繪於圖 4.7、圖 4.8。察看短期二氧化碳總通量平均值 \bar{F} （藍色實線）與長期二氧化碳總通量 F_{av} （紅色實線）、 F_{av-fix} （綠色實線）之間的差異，我們發現三者之間的差異僅存在於量的差別，其差異量源於以長期風場計算得到的二氧化碳氣體傳輸速度 k_{av} 、 k_{av-fix} 是否等於短期全球二氧化碳氣體傳輸速度平均值 \bar{k} ，以及海洋-大氣二氧化碳的分壓差 ΔpCO_2 的量值。比較 F_{av} 與 \bar{F} 之差異，從前一章的分析中我們知道，當短期風場的風速機率密度函數與雷利機率密度函數有所差異。以長期風場計算得到的二

二氧化碳氣體傳輸速度 k_{av} 便不等於短期全球二氧化碳氣體傳輸速度平均值 \bar{k} ，同時，從計算結果中我們知道絕大多數的緯度上，以長期風場計算得到的二氧化碳氣體傳輸速度 k_{av} 會高於短期全球二氧化碳氣體傳輸速度平均值 \bar{k} ，因而我們得到長期二氧化碳總通量 F_{av} 量值（紅色實線）會高於短期二氧化碳總通量平均值 \bar{F} （藍色實線）的結果。其中兩者較大的差值出現在赤道附近以及南北緯50度附近，這與我們在分析長期二氧化碳氣體傳輸速度 k_{av} 與短期二氧化碳氣體傳輸速度平均值 \bar{k} 出現最大差值量的區域有所不同，因為計算通量時還需考量二氧化碳分壓差 ΔpCO_2 的空間分布情況，以及網格點的海洋表面面積大小。比較使用修正函式計算之結果，長期二氧化碳總通量 F_{av-fix} 量值（綠色實線）僅在赤道地區與北緯50度附近地區其值略高於短期二氧化碳總通量平均值 \bar{F} （藍色實線），而在其他地區所得之結果差異不大。

各月份的全球短期二氧化碳總通量平均值 \bar{F} ，以及全球長期二氧化碳總通量 F_{av} 、 F_{av-fix} 的計算結果繪於圖 4.9，圖 4.9(a) 為採用二次風速多項式作計算的結果，圖 4.9(b) 為採用三次風速多項式作計算的結果。紅色線為 NRA 的資料，藍色線為 QS-CAT/NCEP 的資料，虛線為使用長期函式計算的結果，虛點點線為使用長期修正函式計算的結果，實線為使用短期函式計算結果的平均值。察看以二次風速多項式作計算的結果（圖 4.9(a)），可以知道長期與短期平均值的差距不大，但在計算二氧化碳匯入量值上，長期的結果略高於短期平均值的結果。察看以三次風速多項式作計算的結果（圖 4.9(b)），由於使用三次風速多項式時其非線性效應較為明顯，因此使得在計算二氧化碳匯入量值上，長期的結果明顯高於短期平均值的結果，而使用修正函式計算之結果則略高於短期平均值的結果。

比較各月份長、短估計二氧化碳匯入量值最大的差異，在 NRA 的資料長期全球二氧化碳氣體總通量 F_{av} 高估的量以十二月最高，使用二次風速多項式作計算長期的結果（ $-3.07 \text{ Pg Cyr}^{-1}$ ）高估了短期平均值（ $-2.85 \text{ Pg Cyr}^{-1}$ ）總量的8%，使用三次風

速多項式作計算長期的結果($-4.58 \text{ Pg Cyr}^{-1}$) 高估了短期平均值($-3.56 \text{ Pg Cyr}^{-1}$) 總量的29%, 在 QSCAT/NCEP 的資料中長期全球二氧化碳氣體總通量 F_{av} 高估的量以十二月最高, 使用二次風速多項式作計算長期的結果 ($-3.44 \text{ Pg Cyr}^{-1}$) 高估了短期平均值($-3.19 \text{ Pg Cyr}^{-1}$) 總量的8%, 使用三次風速多項式作計算長期的結果($-5.57 \text{ Pg Cyr}^{-1}$) 高估了短期平均值($-4.33 \text{ Pg Cyr}^{-1}$) 總量的28%。比較使用修正函式計算之結果與短期平均值之差異, 在 NRA 的資料長期全球二氧化碳氣體總通量 F_{av-fix} 高估的量以十二月最高, 使用三次風速多項式作計算長期的結果 ($-3.76 \text{ Pg Cyr}^{-1}$) 高估了短期平均值($-3.56 \text{ Pg Cyr}^{-1}$) 總量的6%, 在QSCAT/NCEP 的資料中長期全球二氧化碳氣體總通量 F_{av-fix} 高估的量以十二月最高, 使用三次風速多項式作計算長期的結果 ($-4.66 \text{ Pg Cyr}^{-1}$) 高估了短期平均值($-4.33 \text{ Pg Cyr}^{-1}$) 總量的8%。

計算年平均長期二氧化碳總通量 F_{av} 與短期二氧化碳氣體總通量平均值 \bar{F} 二氧化碳匯入量值的差值比例, 在NRA 的資料中使用二次風速多項式作計算時, 長期的結果 ($-1.71 \text{ Pg Cyr}^{-1}$) 高估了短期平均值($-1.64 \text{ Pg Cyr}^{-1}$) 總量的5%, 使用三次風速多項式作計算時, 長期的結果($-2.57 \text{ Pg Cyr}^{-1}$) 約高估了短期平均值($-2.08 \text{ Pg Cyr}^{-1}$) 總量的23%, 使用三次風速多項式修正函式作計算的長期結果 ($-2.11 \text{ Pg Cyr}^{-1}$) 約高估了短期平均值($-2.08 \text{ Pg Cyr}^{-1}$) 總量的1%。在QSCAT/NCEP 的資料中使用二次風速多項式作計算時, 長期的結果 ($-1.71 \text{ Pg Cyr}^{-1}$) 約高估了短期平均值($-1.66 \text{ Pg Cyr}^{-1}$) 總量的3%, 使用三次風速多項式作計算時, 長期的結果($-2.82 \text{ Pg Cyr}^{-1}$) 約高估了短期平均值($-2.36 \text{ Pg Cyr}^{-1}$) 總量的20%, 使用三次風速多項式修正函式作計算的長期結果 ($-2.41 \text{ Pg Cyr}^{-1}$) 約高估了短期平均值($-2.36 \text{ Pg Cyr}^{-1}$) 總量的2%。年平均二氧化碳總通量資料請看表 4.3、表 4.4。

表 4.3: NRA年平均長期二氧化碳總通量 F_{av} 、 F_{av-fix} ,短期二氧化碳總通量平均值 \bar{F} ，長期高估匯入量佔短期的比例

使用函式	長期二氧化碳總通量	短期二氧化碳總通量平均值	長期高估匯入量佔短期的比例
二次風速多項式函式	-1.71	-1.64	5%
三次風速多項式函式	-2.57	-2.08	23%
三次風速多項式修正函式	-2.11		1%

二氧化碳通量單位: Pg C_{yr}⁻¹

表 4.4: QSCAT/NCEP年平均長期二氧化碳總通量 F_{av} 、 F_{av-fix} ,短期二氧化碳總通量平均值 \bar{F} ，長期高估量佔短期的比例

使用函式	長期二氧化碳總通量	短期二氧化碳總通量平均值	長期高估匯入量佔短期的比例
二次風速多項式函式	-1.71	-1.66	3%
三次風速多項式函式	-2.82	-2.36	20%
三次風速多項式修正函式	-2.41		2%

二氧化碳通量單位: Pg C_{yr}⁻¹

4.4 從風場時空變化分析計算全球大氣-海洋介面二氧化碳通量的結果整理與討論

本章中我們從不同風場之時空變化以及使用長、短期風場兩方面，討論風場變異特性對於計算全球大氣-海洋介面二氧化碳通量所造成的影響。

從4.2節的對風場時空變化的分析中我們知道，各風場間的全球大氣-海洋介面二氧化碳通量在時間上的變化甚小，而各風場在空間上特性則促使所得之結果有較大的差異性。例如 QSCAT-SF 風場在緯度分帶上系統性的低估現象，使得該風場的全球大氣-海洋介面二氧化碳通量值在眾風場最高。從分析結果我們也知道，若以 QSCAT-RSS 作比較，使用不同風場作計算，年平均最大差值（以二次風速多項式計算）達 0.57 Pg Cyr^{-1} ，之間誤差有31%。以及與 QSCAT-SF 的差值（以三次風速多項式計算）達 1.13 Pg Cyr^{-1} ，之間誤差有38%。這樣的結果告訴我們，在計算全球大氣-海洋介面二氧化碳通量時必須要慎選所使用的風場。

在4.3節我們討論以長期（月平均）、短期（6小時）全球風場去估計全球大氣-海洋介面二氧化碳通量，從研究的結果中我們知道由於二氧化碳分壓差 $\Delta p\text{CO}_2$ 資料的空間分布特性，降低了原本在計算全球二氧化碳氣體傳輸速度的差異性，因而在年平均的通量差值上使用二次風速多項式作計算時，之間的差距只有5%；但是，在使用三次風速多項式作計算時，之間的差距仍有23%，而以修正函式計算，之間的差距可降低至2%。這表示若三次風速多項式為接近自然界的大氣-海洋二氧化碳傳輸方式，則我們一定要考慮所使用的風場時間解析度以及長期氣體傳輸速度函式之適用性，否則錯估的情形會非常嚴重。

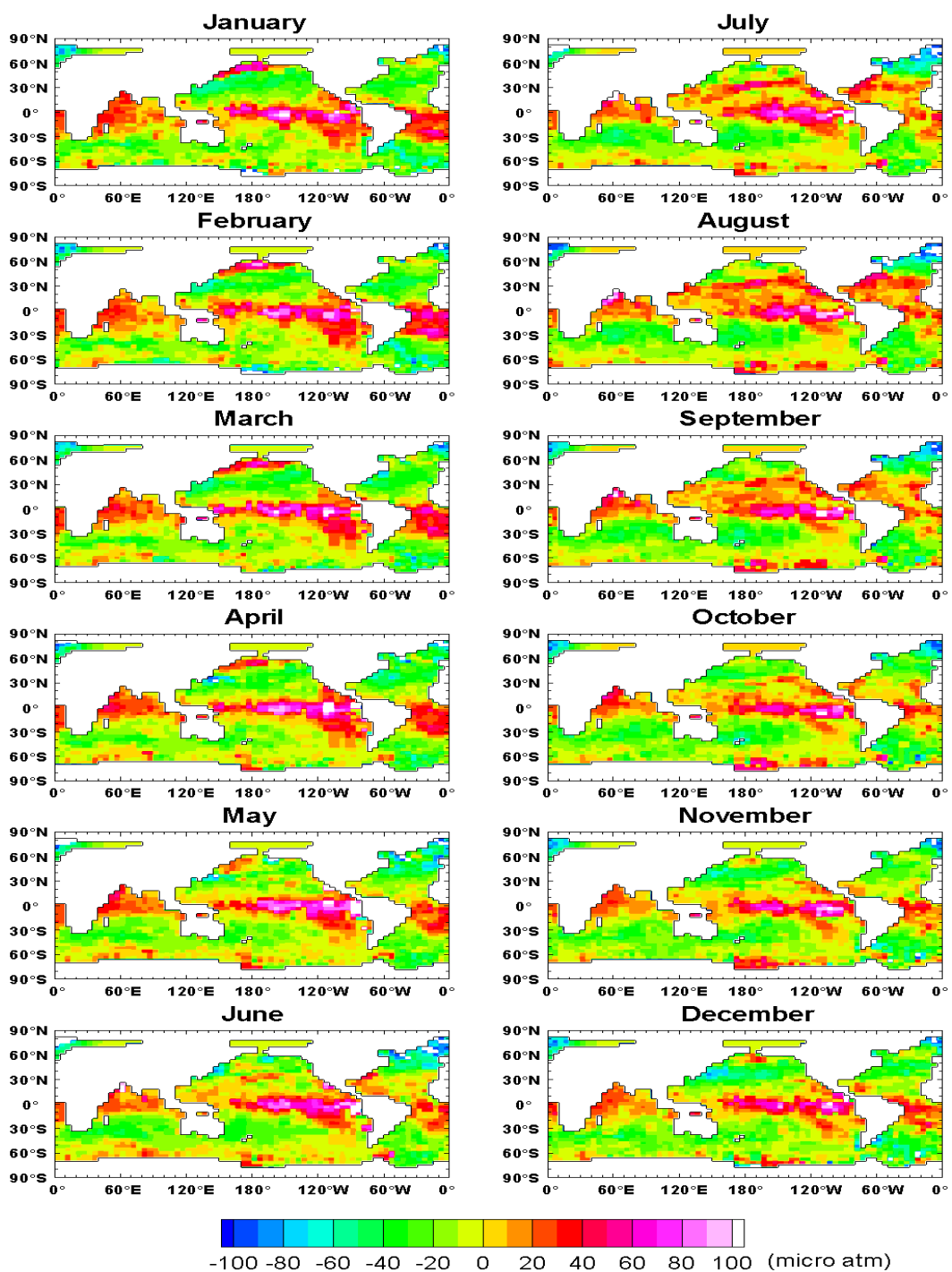


圖 4.1: 一至十二月全球海洋-大氣二氧化碳分壓差 $\Delta p\text{CO}_2$ 空間分布圖, 下方圖例單位為 μatm (micor atm), 空白區域表示陸地、或無資料。

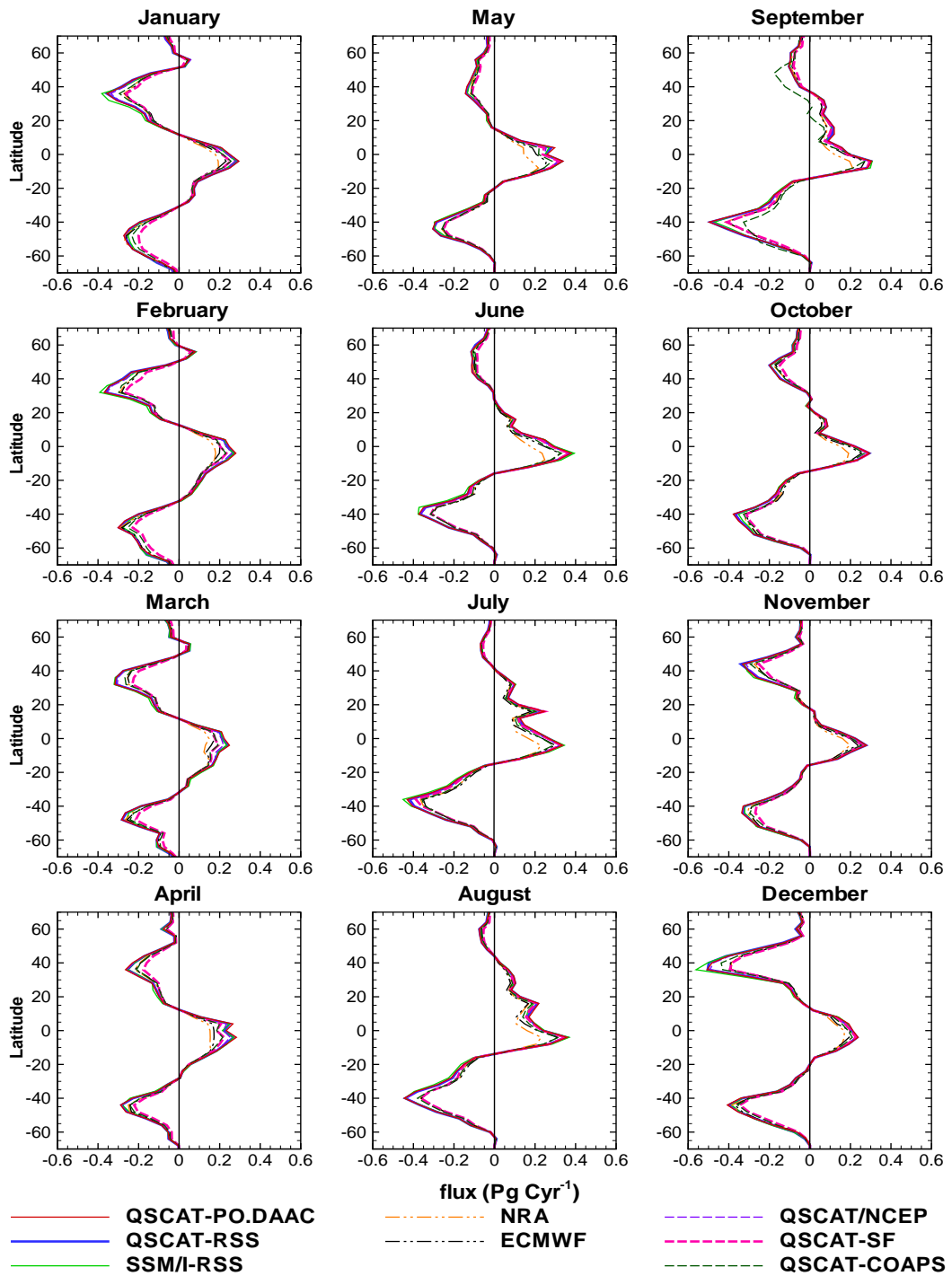


圖 4.2: 一至十二月各風場以二次長期風速多項式函式計算的二氧化碳總通量在緯度上的分布，縱軸表示緯度，負值為南緯，正值為北緯，緯度空間寬帶為 4° ，橫軸表示二氧化碳總通量，單位為 Pg Cyr^{-1} 。

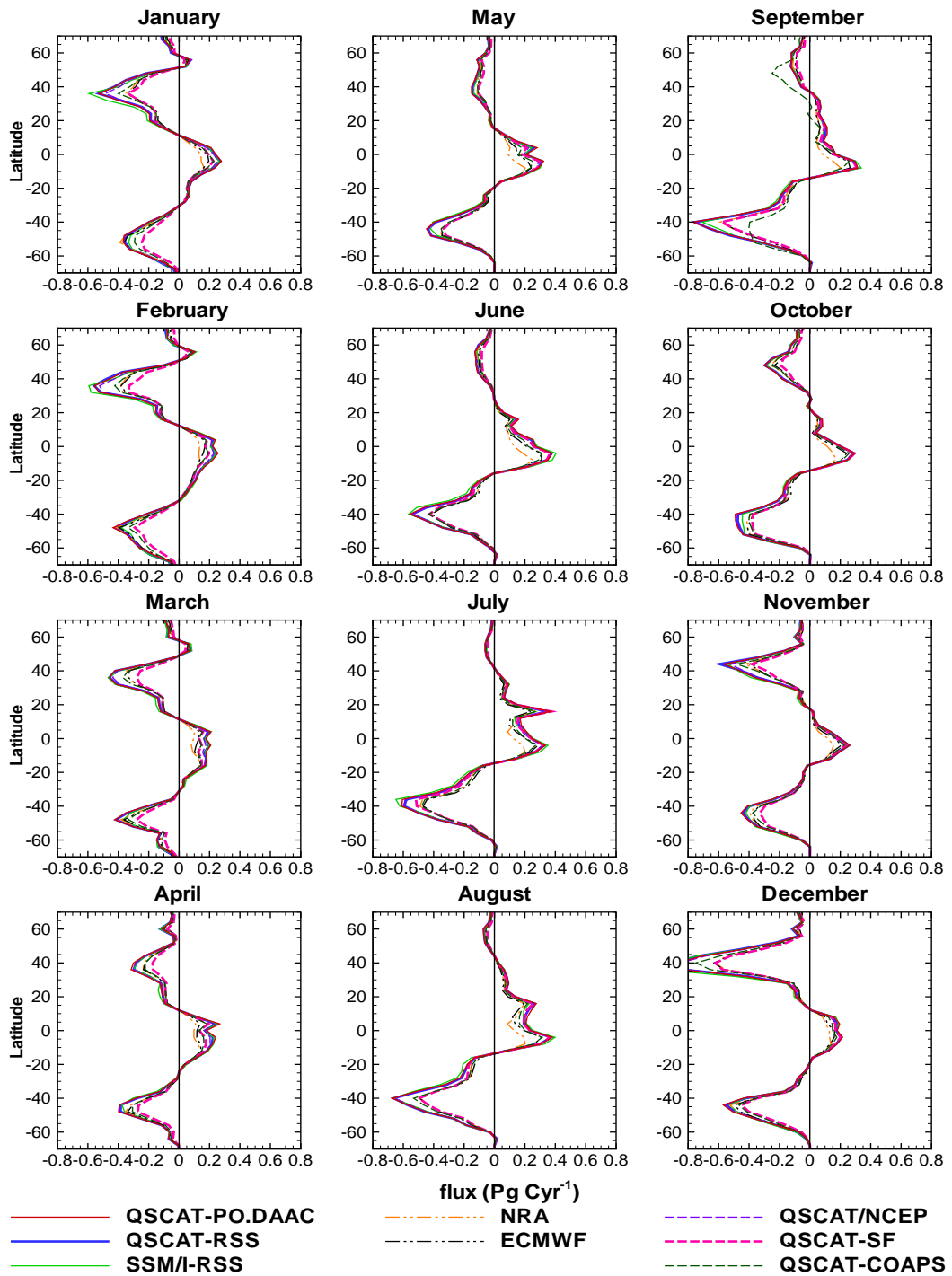


圖 4.3: 一至十二月各風場以三次長期風速多項式函式計算的二氧化碳總通量在緯度上的分布，縱軸表示緯度，負值為南緯，正值為北緯，緯度空間寬帶為 4° ，橫軸表示二氧化碳總通量，單位為 Pg Cyr^{-1} 。

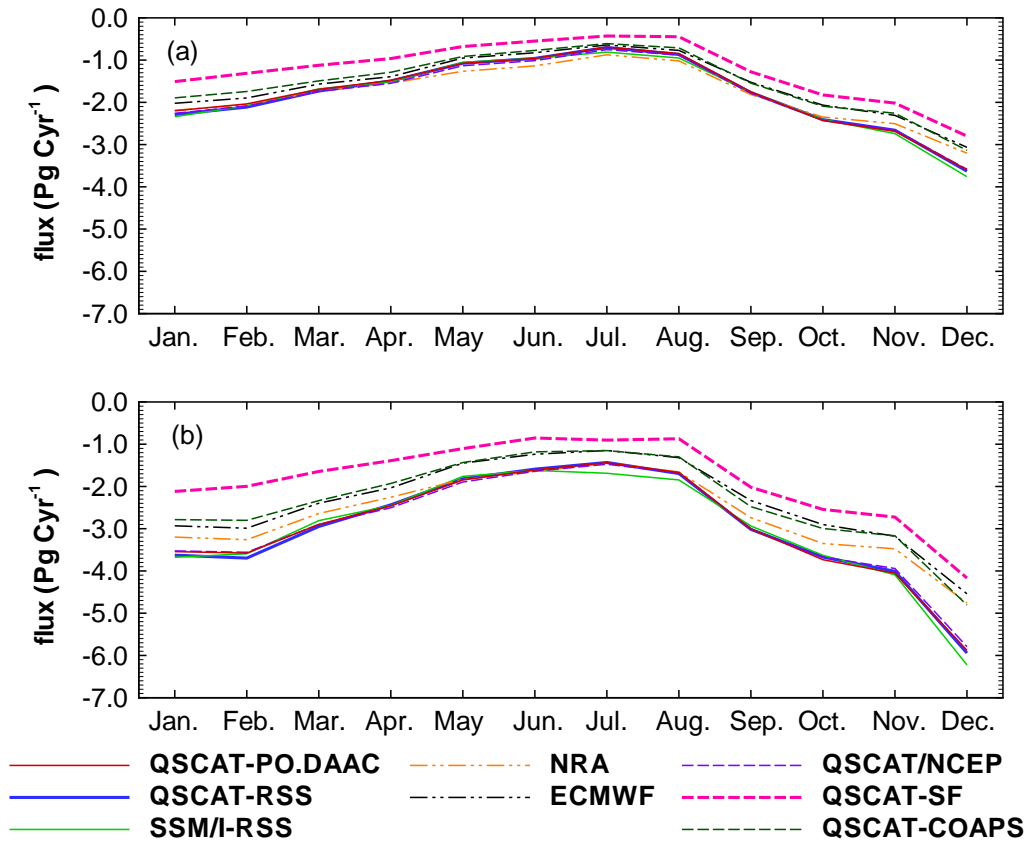


圖 4.4: 各風場的月平均全球二氧化碳總通量, 使用AVHRR 海表面溫度 SST 、WOA01海表面鹽度 S , 圖 (a) 為使用二次長期風速多項式函式, 圖 (b) 為三次長期風速多項式函式, 縱軸表示二氧化碳總通量, 單位為 Pg Cyr^{-1} , 橫軸表示月份。

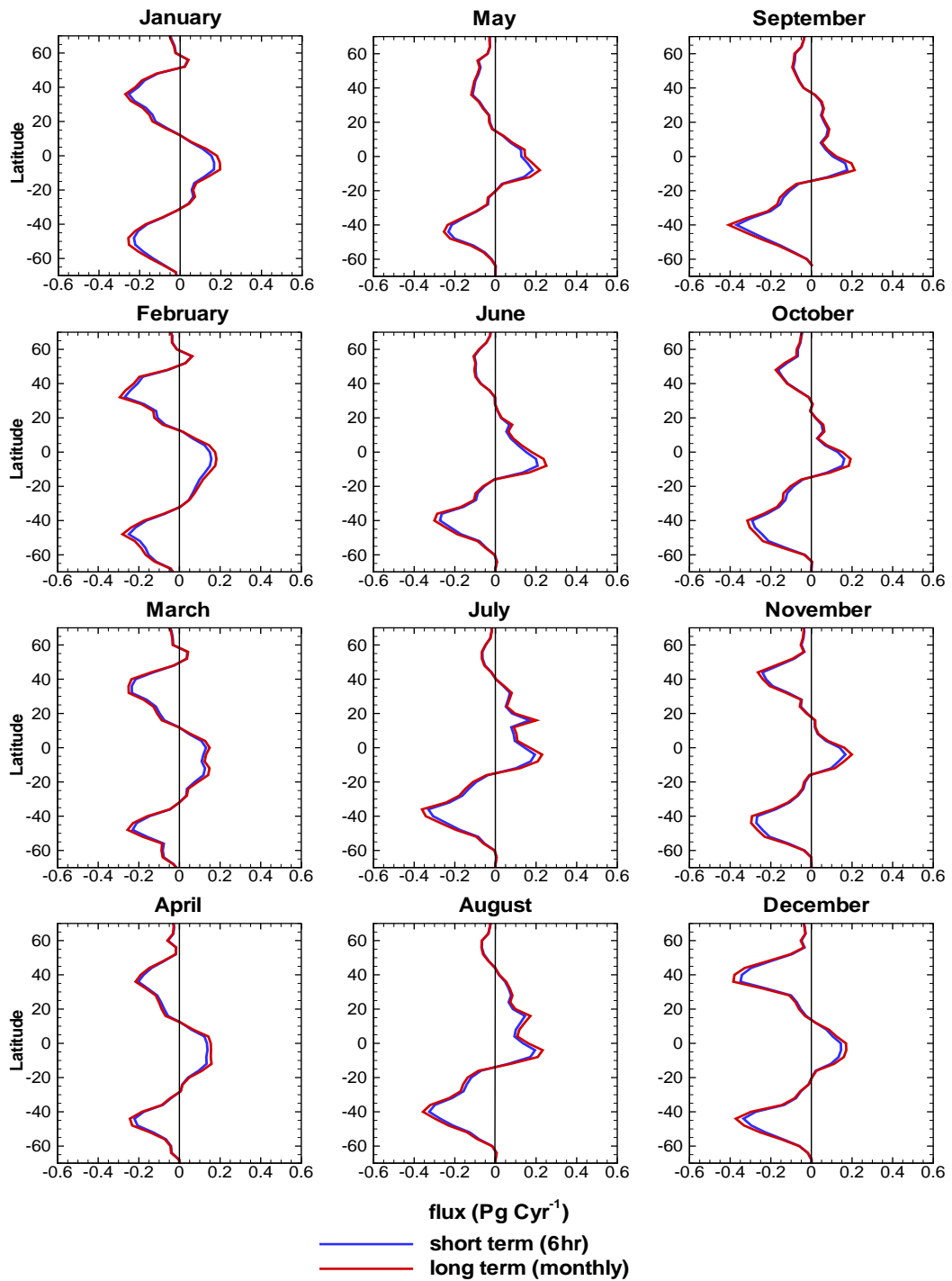


圖 4.5: 一至十二月NRA 以二次風速多項式函式計算的二氧化碳總通量在緯度上的分布, 藍色實線表示該區域的短期二氧化碳總通量平均值 \bar{F} , 紅色實線表示以該區平均風速計算得到的長期二氧化碳總通量 F_{av} 。縱軸表示緯度, 負值為南緯, 正值為北緯, 緯度空間寬帶為 4° 橫軸表示二氧化碳總通量, 單位為 Pg Cyr^{-1} 。

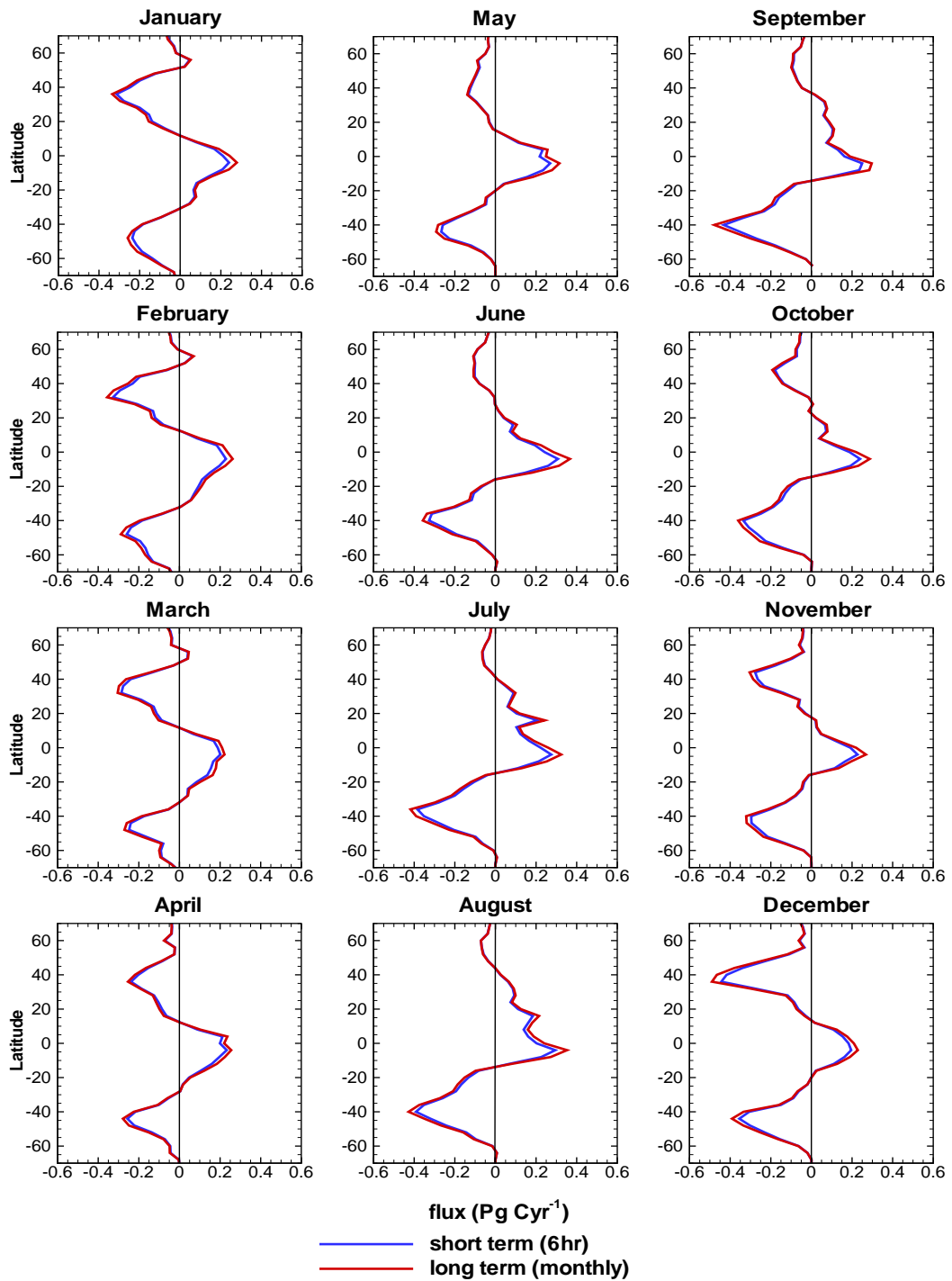


圖 4.6: 一至十二月QSCAT/NCEP 以二次風速多項式函式計算的二氧化碳總通量在緯度上的分布, 藍色實線表示該區域的短期二氧化碳總通量平均值 \bar{F} , 紅色實線表示以該區平均風速計算得到的長期二氧化碳總通量 F_{av} 。縱軸表示緯度, 負值為南緯, 正值為北緯, 緯度空間寬帶為 4° , 橫軸表示二氧化碳總通量, 單位為 Pg Cyr^{-1} 。

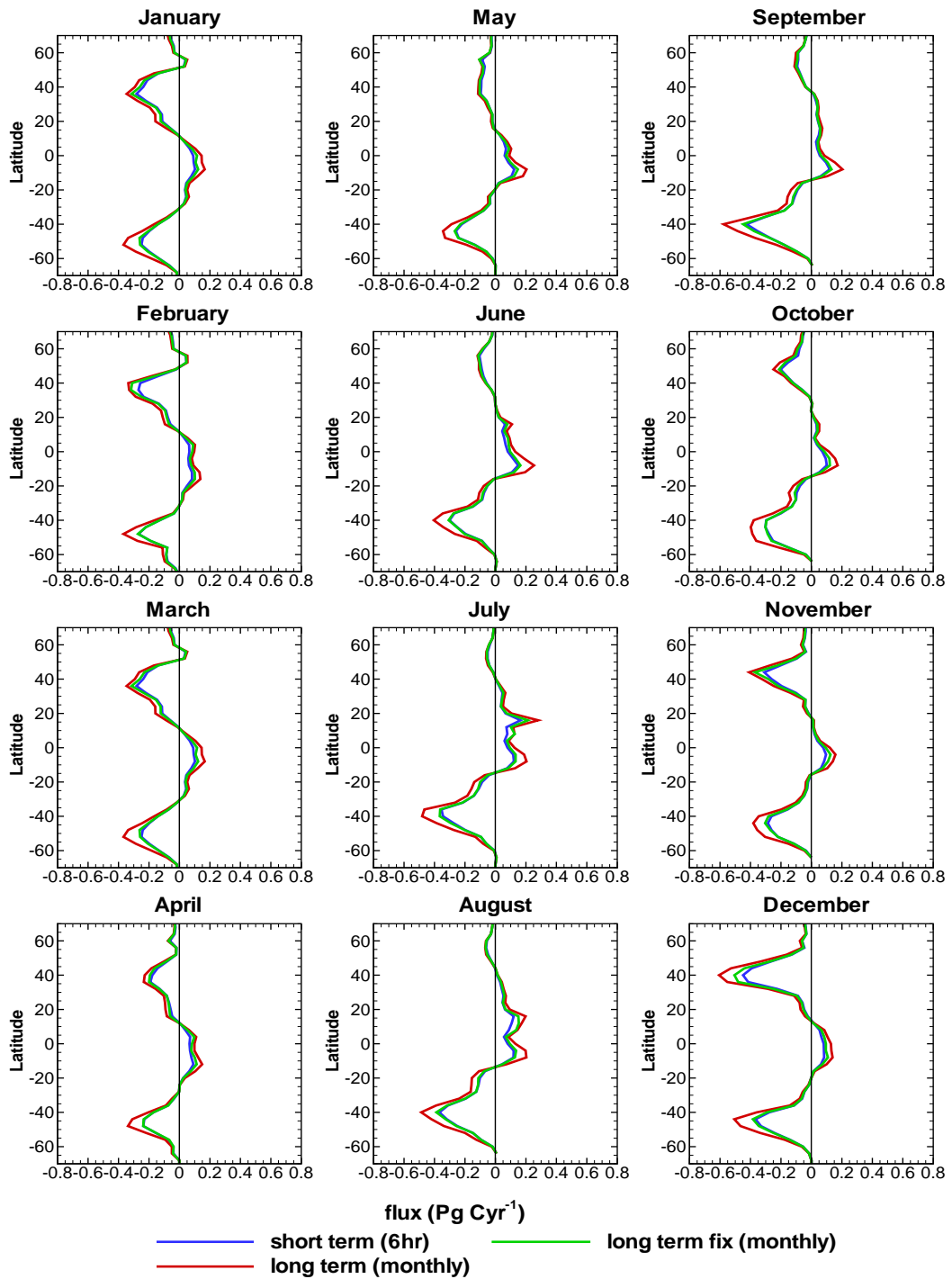


圖 4.7: 一至十二月NRA 以三次風速多項式函式計算的二氧化碳總通量在緯度上的分布, 藍色實線表示該區域的短期二氧化碳總通量平均值 \bar{F} , 紅色實線表示以該區平均風速計算得到的長期二氧化碳總通量 F_{av} , 綠色實線表示以該區修正函式計算得到的長期二氧化碳氣體總通量 F_{av-fix} 。縱軸表示緯度, 負值為南緯, 正值為北緯, 緯度空間寬帶為 4° , 橫軸表示二氧化碳總通量, 單位為 Pg Cyr^{-1} 。

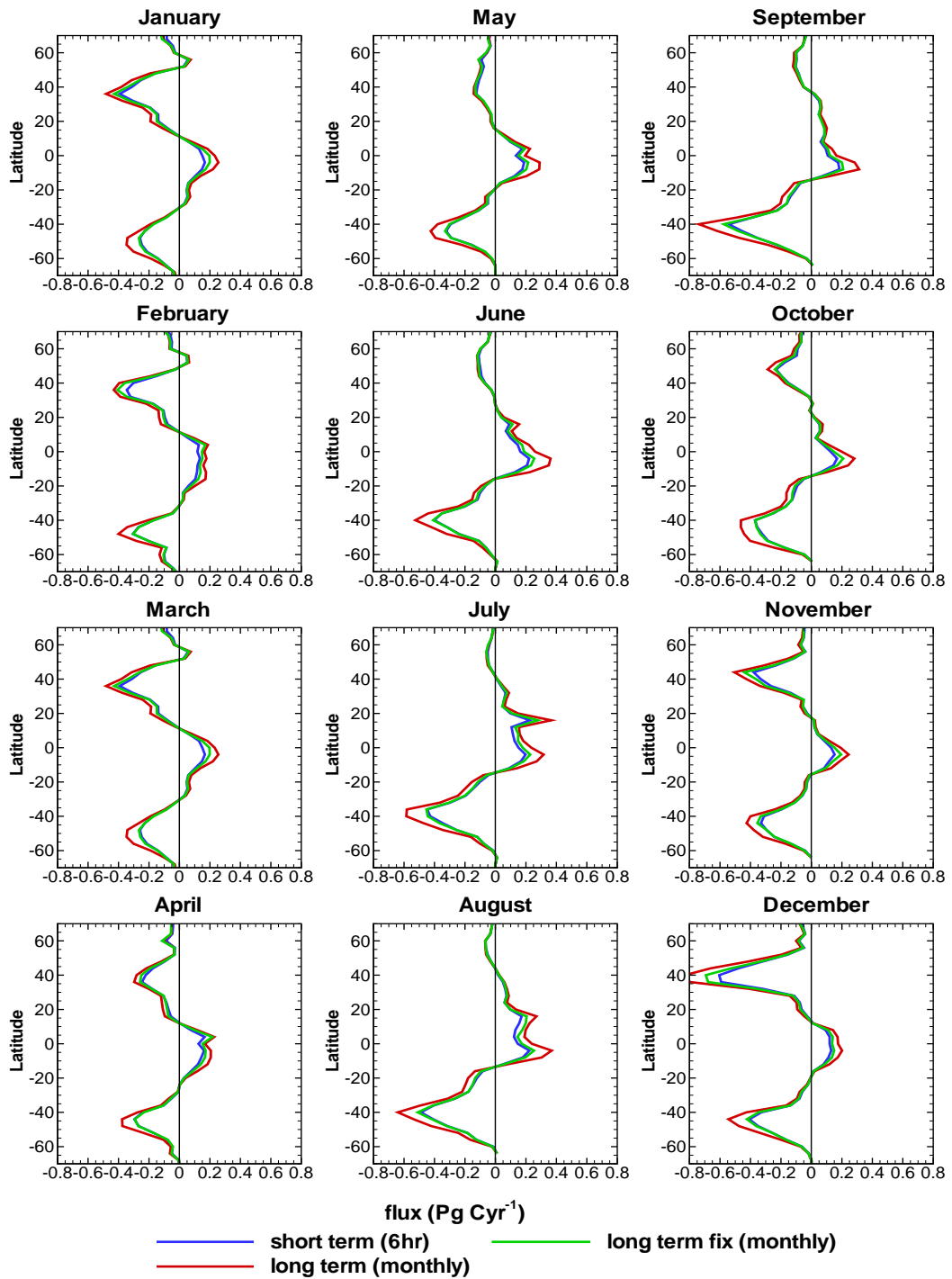


圖 4.8: 一至十二月QSCAT/NCEP 以三次風速多項式函式計算的二氧化碳總通量在緯度上的分布，藍色實線表示該區域的短期二氧化碳總通量平均值 \bar{F} ，紅色實線表示以該區平均風速計算得到的長期二氧化碳總通量 F_{av} ，綠色實線表示以該區修正函式計算得到的長期二氧化碳氣體總通量 F_{av-fix} 。縱軸表示緯度，負值為南緯，正值為北緯，空間寬帶為 4° ，橫軸表示二氧化碳總通量，單位為 Pg Cyr^{-1} 。

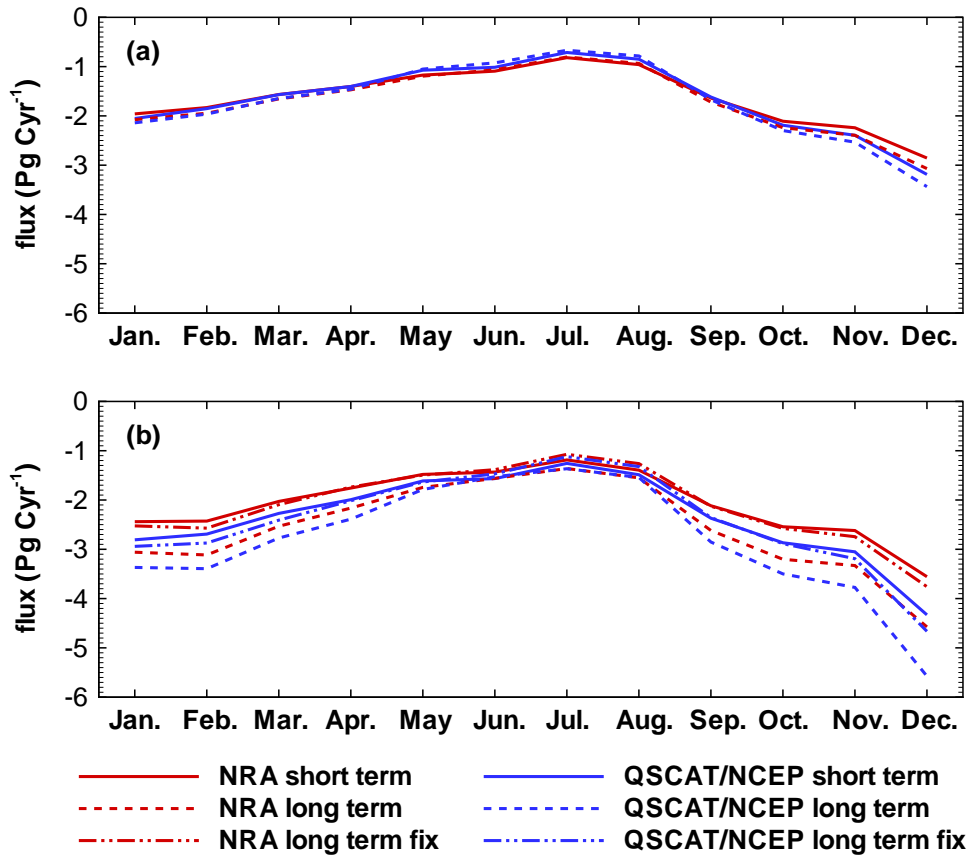


圖 4.9: 月平均全球二氧化碳總通量, 圖(a) 為採用二次風速多項式函式作計算的結果, 圖 (b) 為採用三次風速多項式函式作計算的結果。紅色線為 NRA 的資料, 藍色線為 QSCAT/NCEP 的資料, 虛線為使用長期公式計算的結果, 實線為使用短期公式計算結果的平均值, 虛點點線為使用長期修正函式計算的結果。計算時固定海表面溫度 $SST=20^{\circ}\text{C}$, 海表面鹽度 $S=35\text{psu}$, 縱軸表示二氧化碳總通量, 單位為 Pg Cyr^{-1} , 橫軸表示月份。

Chapter 5

討論與結論

影響全球大氣-海洋介面二氧化碳通量計算的重要環境參數有海面上10公尺高風速 U_{10} ，以及二氧化碳分壓差 $\Delta p\text{CO}_2$ 。本研究使用八種科學界常使用的風場資料，分析不同全球海洋月平均風場的時空變化對於計算通量所造成的影響，從資料的分析中我們得知風場之間的時間變化對於計算全球大氣-海洋介面二氧化碳氣體交換係數 K ，以及全球大氣-海洋二氧化碳通量時，除 QSCAT-SF 的差異較大外，其他風場間幾乎無所差異。影響計算差值較大的因素來自同一時間上風場的空間分布情形，例如以 QSCAT-RSS 作為比較標準，計算全球大氣-海洋介面二氧化碳氣體交換係數 K 時，年平均值最多會造成16%的差距（以二次風速多項式計算）以及22%的差距（以三次風速多項式計算）；計算全球大氣-海洋二氧化碳通量時，年平均值最多會造成31%的差距（以二次風速多項式計算）以及38%的差距（以三次風速多項式計算）。這表示風場資料的選擇對於計算通量來說是很重要的，尤其要注意其在空間分布上的特性。

研究中我們也對取用短期風場或長期風場造成的差異作了分析，從資料的分析中我們得知取用風場資料的間期對於計算全球大氣-海洋介面二氧化碳氣體傳輸速度 k 有很大的影響，當我們直接以平均風速去推算長期二氧化碳氣體傳輸速度 k_{av} ，會造成有大量高估短期二氧化碳氣體傳輸速度平均值 \bar{k} 的結果，其在年平均值的差量上，長期結果相較於短期結果的差距量最多會造成11%的差距（以二次風速多項式計算）以及37%的差距（以三次風速多項式計算）。長期二氧化碳氣體傳輸速度 k_{av} 與短期二氧化碳氣

體傳輸速度平均值 \bar{k} 的差異特性，反應在全球大氣-海洋二氧化碳總通量的差值上，年平均最多會造成5%的差距(以二次風速多項式計算) 以及23%的差距 (以三次風速多項式計算)。分析長期二氧化碳氣體傳輸速度 k_{av} 會大量高估短期二氧化碳氣體傳輸速度平均值 \bar{k} 的原因，假設我們所選用的NRA 再分析資料與空間解析度較高的 QS-CAT/NCEP 合成型資料，能夠切實表現出短期風速的特徵，則我們推論造成差異的原因，可能來自長期與短期二氧化碳氣體傳輸速度函式的基本假設為風速機率分布函數為雷利機率分布函數有關，因為雷利機率函數在空間上所代表的意義為風場為均向風的狀況，然而我們知道全球海洋各區的風場方向分布情形並非如此，例如極地西風帶，東北信風帶、東南信風帶的風向特徵為定向風，在溫帶區域的緯度地區風向較趨向於均向風。因而我們提出適用於各緯度區域的長期二氧化碳氣體傳輸速度修正函式，使用修正函式計算時，在二氧化碳氣體傳輸速度的年平均差值上，長期結果相較於短期結果的差距量最多會造成6%的差距 (以三次風速多項式計算)。長期二氧化碳氣體傳輸速度 k_{av-fix} 與短期二氧化碳氣體傳輸速度平均值 \bar{k} 的差異特性，反應在全球大氣-海洋二氧化碳總通量的差值上，年平均最多會造成2%的差距(以三次風速多項式計算)。

上述風場時間變異特性的分析結果也告訴我們，若短期的二氧化碳氣體傳輸速度函式為趨近自然界的二氧化碳氣體傳輸速度狀況，則我們在前項以月平均風場的計算結果高估了真實的全球大氣-海洋二氧化碳總通量(即短期平均值)，因此未來在改善因為取用短期風場或長期風場造成的差異可以有兩種方法：第一種是以實驗的方法值找出短期二氧化碳氣體傳輸速度的風速函式，再以短期風速去計算該區的二氧化碳氣體傳輸速度，而後求取該區的短期二氧化碳氣體傳輸速度平均值去計算大氣-海洋二氧化碳總通量。第二種是從長期統計資料找出各區域的風速機率密度函數特性，用以調整長期二氧化碳氣體傳輸速度函式後，再以月平均風場資料去計算長期二氧化碳氣體傳輸速

度, 而後以長期二氧化碳氣體傳輸速度去計算大氣-海洋二氧化碳通量。

由本研究可知風場的時空變化對於計算大氣-海洋二氧化碳通量所造成的影響程度, 同時本研究的分析方法亦可用於其他風場驅動大氣-海洋氣體通量的研究上, 期望本研究之結果可作為後人對此進行研究時的參考。

參考文獻

- [1] A. J. Simmons and J. K. Gibson., 2000. ERA-40 project report series No.1.
<www.ecmwf.int/research/era/Project/Plan/Project_plan_TOC.html>
- [2] Asher, W.E., Karle, L.M., Higgins, B.J., Farley, P.J., Monahan, E.C. and Leifer, I.S., 1996. The influence of bubble plumes on air-seawater gas transfer velocities. *J. Geophys. Res.*, **101(C5)**, 12027-12041.
- [3] Bates N.R. and L. Merlivat, 2001. The influence of short-term wind variability on air-sea CO₂ exchange. *Geophys Res. Lett.*, **28(17)**, 3281-3284.
- [4] Broecker, W. S., T.-H. Peng, G. Ostlund, and M. Stuiver, 1985. The distribution of bomb radiocarbon in the ocean. *J. Geophys. Res.*, **90**, 6953-6970.
- [5] Broecker, and Coauthors, 1986. Isotopic versus micrometeorologic ocean CO₂ fluxes: A serious conflict. *J. Geophys. Res.*, **91**, 10,517-10,527.
- [6] Carr, M.-E., Tang, W. and Liu, W.T., 2002, CO₂ exchange coefficients from remotely sensed wind speed measurements: SSM/I versus QuickSCAT in 2000. *Geophys. Res. Lett.*, **29(15)**,

doi:10.1029/2002GL015068.

- [7] Cember, R., 1989. Bomb radiocarbon in the Red Sea: A medium-scale gas exchange experiment. *J. Geophys. Res.*, **94**, 2111-2123.
- [8] Description of SSM/I Data Products., Remote Sensing System.
<www.ssmi.com/ssmi/ssmi_description.html>
- [9] Description of Scatterometer Data Products., Remote Sensing System.
<www.ssmi.com/qscat/qscat_description.html>
- [10] Ebuchi N., 1999. Statistical distribution of wind speeds and directions globally observed by NSCAT *J. Geophys. Res.*, **104 (C5)**, 11393-11403.
- [11] Etcheto, J. and Merlivat, L., 1988. Satellite determination of the carbon dioxide exchange coefficient at the ocean-atmosphere interface: A first step. *J. Geophys. Res.*, **93(C12)**, 15669-15678.
- [12] Feely, R. A., R. Wanninkhof, W. McGillis, M.-E. Carr, and C. E. Cosca, 2004, Effects of wind speed and gas exchange parameterizations on the air-sea CO₂ fluxes in the equatorial Pacific Ocean. *J. Geophys. Res.*, **109**, C08S03, doi:10.1029/2003JC001896.
- [13] Frew, N.M., Goldman, J.C., Dennett, M.R. and Johnson, A.S., 1990. Impact of phytoplankton-generated surfactants on air-sea gas exchange. *J. Geophys. Res.*, **95(C3)**, 3337-3352.
- [14] Goswami, B. N. and Sengupta, D. 2003. A note on the deficiency of NCEP/NCAR reanalysis surface winds over the Indian Ocean. *J. Geophys. Res.*, **108**, doi:10.1029/2002JC001479.

- [15] Hashizume H., Liu W. T., 2004. Systematic error of microwave scatterometer wind related to the basin-scale plankton bloom *Geophys. Res. Lett.*, **29(15)**, doi:10.1029/2002GL015068.
- [16] Hennessey, J. P., 1977. Some aspects of wind power statistics. *J. Appl. Meteorol.*, **16**, 119-128.
- [17] Ho, D.T., Bliven, L.F., Wanninkhof, R. and Schlosser, P., 1997. The effect of rain on air-water gas exchange. *Tellus*, **49 B(2)**, 149-158.
- [18] Ho, D.T., Asher WE, Bliven LF, et al., 2000. On mechanisms of rain-induced air-water gas exchange. *J. Geophys. Res.* **105 (C10)**, 24045-24057.
- [19] Jahne, B., Heinz, G. and Dietrich, W., 1987. Measurement of the diffusion coefficients of sparingly soluble gases in water. *J. Geophys. Res.*, **92(C10)**, 10767-10776.
- [20] Jensen, N. O., E. L. Petersen and I. Troen, 1984. Extrapolation of mean wind statistics with special regard to wind energy application. WMO Rep., WMO/TD-NO 15, WCP-86, 85pp
- [21] Justus, C., W. Hargraves, A. Mikhail, and D. Graber, 1978. Methods for estimating wind speed frequency distributions. *J. Appl. Meteor.*, **17**, 350-353.
- [22] Kalnay, E., and Coauthors, 1996. The NCEP/NCAR 40-Year Reanalysis Project. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **77**, 437-471.
- [23] Keeling, R.F. 1993, On the role of large bubbles in air-sea gas exchange

- and supersaturation in the ocean. *J. Marine Res.*, **51**, 237-271.
- [24] Ledwell, J. R., 1982. Gas exchange across the air-water interace, Ph. D. thesis, Harvard Univ., Cambridge, Mass.
- [25] Ledwell, J. R., 1984. The variation of the gas transfer coefficient with molecular diffusivity, in *Gas Transfer at Water Suraces*, edited by W. Brutsaert and G. H. Jirka, pp. 293-302, D. Reidel, Hingham, Mass.
- [26] Liu, W. T., 2002, Progress in scatterometer application, *Journal of Oceanography*, **58**, 121-136.
- [27] Mark A. Bourassa, Shawn R. Smith, and James J. O'Brien, 2002. Assimilation of Scatterometer and In Situ Winds for Regularly Gridded Products. *Sixth Symposium on Integrated Observing Systems*, 4.9
- [28] Meissner, T., D. Smith, and F. Wentz, 2001. A 10-year intercomparison between collocated Special Sensor Microwave Imager oceanic surface wind speed retrievals and global analyses. *J. Geophys. Res.*, **106(C6)**, 11731-11742.
- [29] NOAA/NASA AVHRR Oceans Pathfinder Sea Surface Temperature Data Set User's Reference Manual Version 4.0. Jet Propulsion Laboratory.
 <podaac.jpl.nasa.gov/pub/sea_surface_temperature/avhrr/pathfinder/doc/usr_gde4_0_toc.html>
- [30] QSCAT-DIRTH and NCEP blended winds method description.
 <www.cora.nwra.com/morzel/blendedwinds.qscat.dirth.2002.html>

- [31] SeaWinds on QuikSCAT Level 3 Daily, Gridded Ocean Wind Vectors Guide Document. Jet Propulsion Laboratory.
<podaac.jpl.nasa.gov/podaac_web/quikscat/qscat_doc.html>
- [32] Smith, S. R., Legler, D. M. and Verzone, V., 2001. Quantifying uncertainties in NCEP reanalyses using high quality research vessel observations. *J. Clim.*, **14**, 4062-4072.
- [33] Takahashi, T., Sutherland, S. C., Sweeney, C., Poisson, A., Metz, N. et al., 2002. Global sea-air CO₂ flux based on climatological surface ocean pCO₂, and seasonal biological and temperature effects. *Deep Sea Res. II*, **49**, 1601-1622.
- [34] Tsai, W.-T, and K.-K. Liu, 2003, An assessment of the effect of sea surface surfactant on global atmosphere-ocean CO₂ flux. *J. Geophys. Res.*, **108**(C4), 3127, doi:10.1029/2000JC000740.
- [35] Wanninkhof, R., 1992. Relationship between wind-speed and gas-exchange over the ocean. *J. Geophys. Res.*, **97**, 7373-7382.
- [36] Wanninkhof, R., and W. R. McGillis, 1999. A cubic relationship between air-sea CO₂ exchange and wind speed. *Geophys Res. Lett.*, **26**, 1889-1892.
- [37] Wanninkhof, R., Doney, S.C., Takahashi, T., McGillis, W.R., 2002. The effect of using time-averaged wind s on regional air-sea CO₂ fluxes. In: Donelan M., Drennan W., Saltzman E., Wanninkhof R. (Eds.), *Gas Transfer at Water Surfaces*, AGU Geophys. Monograph 127, Washing-

- ton, DC. 351-356.
- [38] Weiss, R.F., 1974. Carbon dioxide in water and seawater: the solubility of a non-ideal gas. *Mar. Chem.*, **2**, 203-215.
- [39] Wentz, F. J., S. Peteherych, and L. A. Thomas, 1984. A model function for ocean radar cross sections at 14.6 GHz. *J. Geophys. Res.*, **89**, 3689-3704.
- [40] World Ocean Atlas 2001 Data Set Documentation Ocean Climate Laboratory National Oceanographic Data Center.
<www.nodc.noaa.gov/OC5/WOA01/docwoa01.html>
- [41] W. Tang and Liu, W. T., 1996. Objective interpolation of scatterometer winds, JPL Pub. 96-19, Jet Propulsion Laboratory, Pasadena, 16pp.
- [42] 蔡武廷 (2000) <全球海洋二氧化碳通量的高解析度計算> 《八十九年度國科會/環保署科技合作研究計畫定稿報告書》

附錄 A

公式推導

A.1 雷利機率函數的推導過程

雷利 (Rayleigh) 機率函數為韋伯 (Weibull) 機率函數的形狀等於2的機率函數 推導過程如下:

韋伯機率函數:

$$f(u; A, C) = \frac{C}{A} \left(\frac{u}{A}\right)^{C-1} \exp \left[- \left(\frac{u}{A}\right)^C \right]$$

u 代表風速, C 代表形狀參數, A 代表尺度參數。

其中尺度參數 $A = \frac{u_{av}}{\Gamma(1+\frac{1}{C})}$, u_{av} 代表平均風速。當風場為均向風 (isotropic winds),

則形狀參數 $C=2$, 此時尺度參數 $A = \frac{2}{\sqrt{\pi}} u_{av}$ 。令 $\Delta u = u_{av}(\frac{\pi}{2})^{(-\frac{1}{2})}$,

則 $A = \sqrt{2}\Delta u$ 。

所以我們可以將雷利機率函數寫作如下:

$$f(u; A, C) = \frac{C}{A} \left(\frac{u}{A}\right)^{C-1} \exp \left[- \left(\frac{u}{A}\right)^C \right]$$

將 $C = 2$ 帶入上式

$$f(u; A) = \frac{2}{A} \left(\frac{u}{A}\right) \exp \left[- \left(\frac{u}{A}\right)^2 \right]$$

將 $A = \sqrt{2}\Delta u$ 帶入上式

$$\begin{aligned} f(u) &= \frac{2}{\sqrt{2}\Delta u} \left(\frac{u}{\sqrt{2}\Delta u} \right) \exp \left[- \left(\frac{u}{\sqrt{2}\Delta u} \right)^2 \right] \\ &= \frac{u}{\Delta u^2} \exp \left(\frac{-u^2}{2\Delta u^2} \right) \\ &= \frac{u [\exp (-u^2/2\Delta u^2)]}{\Delta u^2} \\ &= 2\pi \frac{u [\exp (-u^2/2\Delta u^2)]}{2\pi \Delta u^2} \end{aligned}$$

令 $P(u) = \frac{u [\exp (-u^2/2\Delta u^2)]}{2\pi \Delta u^2}$ 為沿某一方向的風速機率函數則上式可寫作:

$$f(u) = 2\pi P(u)$$

因此沿某一方向的雷利機率函數可寫作:

$$P(u) = \frac{u [\exp (-u^2/2\Delta u^2)]}{2\pi \Delta u^2}$$

A.2 Wanninkhof(1992) 二次風速多項式二氧化碳氣體傳輸速度函式推導過程

短期傳輸速度公式推導:

我們知道平均傳輸速度等於短期傳輸速度的平均值

$$k_{av} = \bar{k}$$

假設短期傳輸速度為二次多項式風速函式 ($k = bu^2$, b 為短期傳輸速度比例常數), 帶入上式。

$$\begin{aligned} k_{av} &= \overline{bu^2} \\ &= b\overline{u^2} \end{aligned}$$

假設短期風速機率分布為雷利機率分布, 再將上式乘上方向係數 2π 則上式可寫作:

$$k_{av} = b2\pi \int_0^{\infty} P(u)u^2 du$$

整理上式, 則短期傳輸速度比例常數 b 可寫作:

$$b = \frac{k_{av}}{2\pi \int_0^{\infty} P(u)u^2 du}$$

因為 $2\pi \int_0^{\infty} P(u)u^2 du = 2\Delta u^2$, $\Delta u = u_{av}(\frac{\pi}{2})^{(-\frac{1}{2})}$, 所以上式可寫作:

$$\begin{aligned} b &= \frac{k_{av}}{2\Delta u^2} \\ &= \frac{k_{av}}{2 \left[u_{av}(\frac{\pi}{2})^{(-\frac{1}{2})} \right]^2} \end{aligned}$$

將 $k_{av}=21.9 \text{ cm hr}^{-1}$, $u_{av}=7.4 \text{ m s}^{-1}$ (Broecker 等, 1986) 帶入上式, 可得係數 $b=0.31$,

將 $k_{av}=21.2 \text{ cm hr}^{-1}$, $u_{av}=7.4 \text{ m s}^{-1}$ (Broecker 等, 1985), 可得係數 $b=0.30$, 將 $k_{av}=9.11$

cm hr^{-1} , $u_{av}=4.7 \text{ m s}^{-1}$ (Cember 等, 1989) 可得係數 $b=0.32$ 。取三筆資料的平均值, 則可得短期傳輸速度比例常數 $b = 0.31$

長期傳輸速度公式推導:

將 $k_{av}=21.9 \text{ cm hr}^{-1}$, $u_{av}=7.4 \text{ m s}^{-1}$ (Broecker 等, 1986), $k_{av}=21.2 \text{ cm hr}^{-1}$, $u_{av}=7.4 \text{ m s}^{-1}$ (Broecker 等, 1985), $k_{av}=9.11 \text{ cm hr}^{-1}$, $u_{av}=4.7 \text{ m s}^{-1}$ (Cember 等, 1989), 三筆長期氣體傳輸速度與平均風速資料, 假設長期氣體傳輸速度為二次多項式平均風速函式 ($k_{av} = au_{av}^2$), 以最小平方法作逼近, 可得到

$$k_{av} = 0.395u_{av}^2$$

這與 Wanninkhof 的結果

$$k_{av} = 0.39u_{av}^2$$

相當接近。

A.3 Wanninkhof and McGillis(1999) 三次風速多項式二氧化碳氣體 傳輸速度函式推導過程

短期傳輸速度公式推導:

我們知道平均傳輸速度等於短期傳輸速度的平均值

$$k_{av} = \bar{k}$$

假設短期傳輸速度為三次多項式風速函式 ($k = bu^3$, b 為短期傳輸速度比例常數), 帶入上式。

$$\begin{aligned} k_{av} &= \overline{bu^3} \\ &= b\overline{u^3} \end{aligned}$$

假設短期風速機率分布為雷利機率分布, 再將上式乘上方向係數 2π 則上式可寫作:

$$k_{av} = b2\pi \int_0^{\infty} P(u)u^3 du$$

整理上式, 則短期傳輸速度比例常數 b 可寫作:

$$b = \frac{k_{av}}{2\pi \int_0^{\infty} P(u)u^3 du}$$

因為 $2\pi \int_0^{\infty} P(u)u^3 du = \frac{3\sqrt{\pi}}{\sqrt{2}} \Delta u^3$, $\Delta u = u_{av}(\frac{\pi}{2})^{(-\frac{1}{2})}$, 所以上式可寫作:

$$\begin{aligned} b &= \frac{k_{av}}{\frac{3\sqrt{\pi}}{\sqrt{2}} \Delta u^3} \\ &= \frac{k_{av}}{\frac{3\sqrt{\pi}}{\sqrt{2}} \left[u_{av}(\frac{\pi}{2})^{(-\frac{1}{2})} \right]^3} \end{aligned}$$

將 $k_{av}=22 \text{ cm hr}^{-1}$, $u_{av}=7.4 \text{ m s}^{-1}$ (Broecker 等,1985) 帶入上式, 可得係數 $b=0.0284$, 這與 Wanninkhof and McGillis 的結果 $b=0.0283$ 相當接近。

長期傳輸速度公式推導:

由於平均傳輸速度等於短期傳輸速度的平均值, 所以我們可以得到下式:

$$\begin{aligned}k_{av} &= \bar{k} \\&= 0.0283 \left[2\pi \int_0^\infty P(u)u^3 du \right] \\&= 0.0283 \times \frac{3\sqrt{\pi}}{\sqrt{2}} \left[u_{av} \left(\frac{\pi}{2} \right)^{\left(-\frac{1}{2}\right)} \right]^3\end{aligned}$$

我們將 u_{av} 以0至20 m s⁻¹帶入上式, 再將得到的 k_{av} 以最小平方法逼近, 可得到三次多項式風速函式:

$$k_{av} = [-.000461u_{av} - 0.0000903u_{av}^2 + 0.054u_{av}^3]$$

此結果與 Wanninkhof and McGillis 的結果 (下式) 有所不同。

$$k_{av} = [1.09u_{av} - 0.333u_{av}^2 + 0.078u_{av}^3]$$

若我們將 $k_{av}=22$ cm hr⁻¹, $u_{av}=7.4$ m s⁻¹(Broecker 等,1985) 的研究結果, 僅以三次方平均風速表示長期二氧化碳氣體傳輸速度風速函式, 所得的結果為:

$$k_{av} = 0.054u_{av}^3$$

此結果與 Wanninkhof 等 (2002) 的結果 (下式) 亦有所不同。

$$k_{av} = 0.0615u_{av}^3$$

這些計算上的疑問困擾我們甚久, 所幸經由指導教授蔡武廷教授將此疑問直接與 Wanninkhof 通信後得到瞭解。Wanninkhof在信中回覆我們這個疑問, 他提到在他

們1999與2002所發表的文章中，所得到的三次多項式長期二氧化碳氣體傳輸速度風速函式確實計算錯誤，而正確的長期二氧化碳氣體傳輸速度風速函式應為：

$$k_{av} = 0.054u_{av}^3$$

因此我們在計算三次風速多項式長期二氧化碳氣體傳輸速度時，便以上式作為計算函式。

A.4 增強因子 R 與風速 u 關係之推導過程

增強因子 R 的功用是用以判斷風速機率密度函數的分布情形是否呈現雷利機率密度分布。

在二次風速多項式的二氧化碳氣體傳輸速度函式中，長期二次風速多項式的二氧化碳氣體傳輸速度函式： $(k_{av} = 0.39u_{av}^2 \left(\frac{Sc}{660}\right)^{-1/2})$ 與短期二次風速多項式的二氧化碳氣體傳輸速度函式 $(k = 0.31u^2 \left(\frac{Sc}{660}\right)^{-1/2})$ ，的係數中，長期的係數是短期的1.25倍。

若為三次風速多項式的函式，長期三次風速多項式的二氧化碳氣體傳輸速度函式：

$(k_{av} = 0.054u_{av}^3 \left(\frac{Sc}{660}\right)^{-1/2})$ 與短期三次風速多項式的二氧化碳氣體傳輸速度函式 $(k = 0.0283u^3 \left(\frac{Sc}{660}\right)^{-1/2})$ ，的係數中，長期的係數是短期的1.9倍，

Wanninkhof等 (2002) 將此係數上的比例定為增強因子 R 在二次風速多項式函式中：

$R = \frac{0.39}{0.31} = 1.25$ ，在三次風速多項式函式中： $R = \frac{0.054}{0.0283} = 1.9$ 。於是在表示長、短期二氧化碳氣體傳輸速度函式與增強因子 R 間的關係，我們可將短期二氧化碳氣體傳輸速度函式簡寫為：

$$k = bu^d$$

上式中 b 為短期二氧化碳氣體傳輸速度的比例常數， d 為風速的乘方。

接著將增強因子 R 與短期二氧化碳氣體傳輸速度的比例常數 b 代入短期二氧化碳氣體傳輸速度函式，則長期二氧化碳氣體傳輸速度函式可寫為：

$$k_{av} = Rbu_{av}^d$$

上式中，當 $d=2$ 時， $R=1.25$ ；當 $d=3$ 時， $R=1.9$ 。

另外，增強因子 R 除了是長期除上短期的係數比外，其同時也是短期風速與平均風速的

函式 ($R = R(u_i, u_{av})$), 其關係推導過程如下:

因爲以平均風速的傳輸速度 k_{av} 等於短期傳輸速度的平均值 \bar{k} , 所以我們可以得到下式:

$$k_{av} = \bar{k} \\ = \frac{\sum_{i=1}^N k_i}{N}$$

將 $k_{av} = Rbu_{av}^d$ 、 $k_i = bu_i^d$ 代入上式, 則上式可化爲:

$$Rbu_{av}^d = \frac{\sum_{i=1}^N bu_i^d}{N}$$

整理上式後可得:

$$R = \frac{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N bu_i^d}{bu_{av}^d} \\ = \frac{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N u_i^d}{u_{av}^d}$$

A.5 長期三次風速多項式二氧化碳氣體傳輸速度修正函式之推導

長期三次風速多項式二氧化碳氣體傳輸速度函式如下：

$$k_{av} = a(u_{av})^3$$

上式中 a 為長期傳輸速度函式比例常數。另外我們知道平均傳輸速度等於短期傳輸速度的平均值

$$k_{av} = \bar{k}$$

此處短期傳輸速度為三次多項式風速函式 ($k = bu^3$, b 為短期傳輸速度比例常數) 因此我們可將上式改寫為：

$$\begin{aligned} k_{av} &= \overline{bu^3} \\ &= b\overline{u^3} \end{aligned}$$

假設風速機率分布為韋伯機率分布時，則上式可改寫為：

$$k_{av} = b \sum f(u; A, C)u^3\Delta$$

上式中 $f(u; A, C)$ 為韋伯機率函數， Δ 為計算時所取的寬帶區間¹，其形狀參數 C 與尺度參數 A 可由 Justus(1978) 所提之經驗公式，藉由風速機率密度函數的平均值與標準方差估計得來：

$$C = \left(\frac{u_{av}}{\sigma}\right)^{1.086}$$

$$A = \frac{u_{av}}{\Gamma(1 + 1/C)}$$

¹在程式中計算 $\sum f(u; A, C)u^3\Delta$ 的方式為： $\sum_{i=1}^{1000} f(u_i; A, C)u_i^3\Delta$ 。
在這裡 $u_i = 0.025 + 0.05 \times (i - 1)$, $\Delta = 0.05$

上式中 σ 為風速機率密度函數之標準方差, Γ 為 Γ 函數²。短期傳輸速度比例常數 b 的值,我們以 Wanninkhof and McGillis 在 Gas-Ex98的實驗結果 $b = 0.0280$ 代入。因此,適用於各緯度區域的長期傳輸速度函式比例常數 a_i 可寫作:

$$\begin{aligned} a_i &= \frac{k_{av}}{u_{av}^3} \\ &= \frac{\bar{k}}{u_{av}^3} \\ &= \frac{b \sum f(u; A, C) u^3 \Delta}{u_{av}^3} \\ &= \frac{0.0280 \sum f(u; A, C) u^3 \Delta}{u_{av}^3} \end{aligned}$$

所以,使用各緯度區域風速資料,即可以求得適用於該區各緯度區域的長期傳輸速度函式:

$$k_{av-fix} = a_i u_{av}^3$$

² $\Gamma(\alpha) = \int_0^\infty \exp(-t)t^{\alpha-1}dt$, 或著可以改寫為: $\Gamma(\alpha) = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{n!n^\alpha}{(\alpha)(\alpha+1)(\alpha+2)\dots(\alpha+n)}$, $\alpha \neq 0, -1, -2, \dots, -n$
在程式中計算 $\Gamma(\alpha)$ 的方式為令前式之 $n = 1 \times 10^7$ 代入。