

中華民國第 53 屆中小學科學展覽會

作品說明書

高中組 地球科學科

第二名

040509

平流層瞬時暖化與北極震盪之長期關係

學校名稱：國立嘉義高級工業職業學校

作者： 職二 蔡明叡 職二 劉長生	指導老師： 呂明欣 張敦程
---------------------------------	-----------------------------

關鍵詞：行星波、平流層瞬時暖化、北極震盪

摘要

近年來氣候變遷的加劇使生活於地球的人類面臨了空前的挑戰，此次研究將以長期觀測數據深入探討近年受到科學家重視的「平流層瞬時暖化(SSW)」對於大氣的影響性，及與 SSW、「北極震盪(AO)」的相關性。在此次研究利用 NCEP/NCAR Reanalysis 分析了 1991~2012 年間發生 SSW 期間的大氣參數，我們從資料中發現自 2000 年起至 2010 年，緯向平均風場於 SSW 期間皆發生代表主要暖化的方向反轉，打破以往每 2~3 年發生一次主要暖化的頻率，顯示近年來主要暖化發生的頻率增加。另外，SSW 對於對流層上層及地面附近也有一定影響程度，在 10mb SSW 高峰日後約五天時間，極區 100mb 與 1000mb 皆出現氣溫上升的現象與中低緯度氣溫下降的現象發生。最後，10mb SSW 高峰日後 6~9 天，臺灣在氣溫上將會有近 10 度不等的降溫情況發生，且持續數天。

壹、前言

一、研究簡介

(一)北極震盪(Arctic Oscillation)

北極震盪(AO)是指影響北半球北緯 30 度以北地區下層對流層的一種大氣顯著的現象，通常在冬季的北極震盪的變化幅度會較其他時間來的明顯。極區對流層附近的強烈渦流，在正常情況下會圍著北極圈形成一環狀的渦流，此渦流能將北極冷空氣限制在北極圈的上空內，但若北極震盪發生時，極區附近的渦流圈會因強度不夠等原因，而導致原本限制冷空氣於北極圈上空之圓形環狀渦流圈轉變成一相對不規則狀，此時會導致原本北極圈內的寒冷氣流將移往相對溫暖的較低緯度，如歐洲、北美洲、俄羅斯、南北韓等中低緯度的國家。

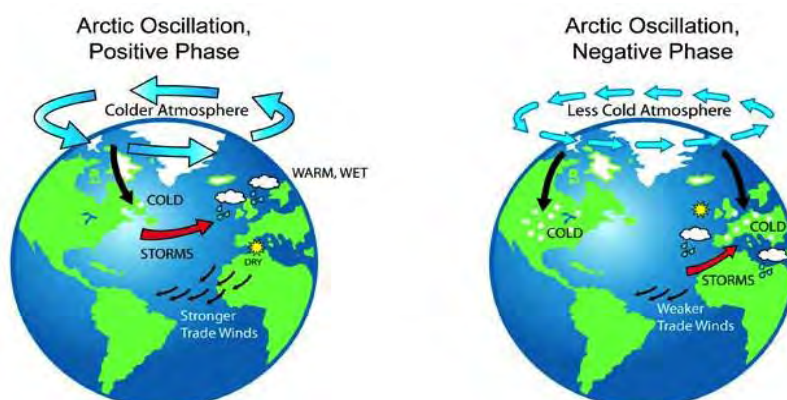


圖 1 北極震盪示意圖

(左圖為正相位，右圖為負相位) [NASA, 2012]

(二)平流層瞬時暖化(Stratospheric Sudden Warming)

平流層瞬時暖化(SSW)是指高緯地區的平流層在前年的 12 月至當年 2 月(約於 -30~60 天)會有一小段期間出現快速增溫的現象，在短短幾天內溫度上升 40~60K 不等，並使極區西風減弱或反轉成為東風，且持續數天或數個禮拜。SSW 的主要是因海陸分布的差異，使極區的地面及對流層容易產生經度上的不規則體，此擾動稱為行星波。行星波的振幅在 SSW 期間會快速加大，並且於適當條件下能夠向上垂直傳播到平流層，與平流層緯向風場產生交互作用所造成的現象。

二、研究動機

自然環境內在的變化與人類活動外在的變因所造成的環境議題不斷被提出，傳統的地球科學研究領域面臨各種環境變因的挑戰與困境。2010年12月氣象中心主任鄭明典在臉書上談到：「『北極震盪』回來了...其實『負的北極震盪』一直沒有中止，負號的北極震盪天氣型態再度增強，歐洲和北美的極寒是這一波負北極震盪的結果(圖2)。」因為這個特殊的名詞，激起我們探究北極極區各種現象的興趣。我們從2011年開始進行相關研究，分析許多大氣的數據後發現AO與SSW有著極大的相似性，兩者皆是因大氣中不均勻的擾動產生行星波所造成(圖1)，而且當SSW發生，溫度方面在北極極區上空約三十公里高的空氣變得特別暖，而氣壓也會較平常來的高，出現「類似負北極震盪」的現象。

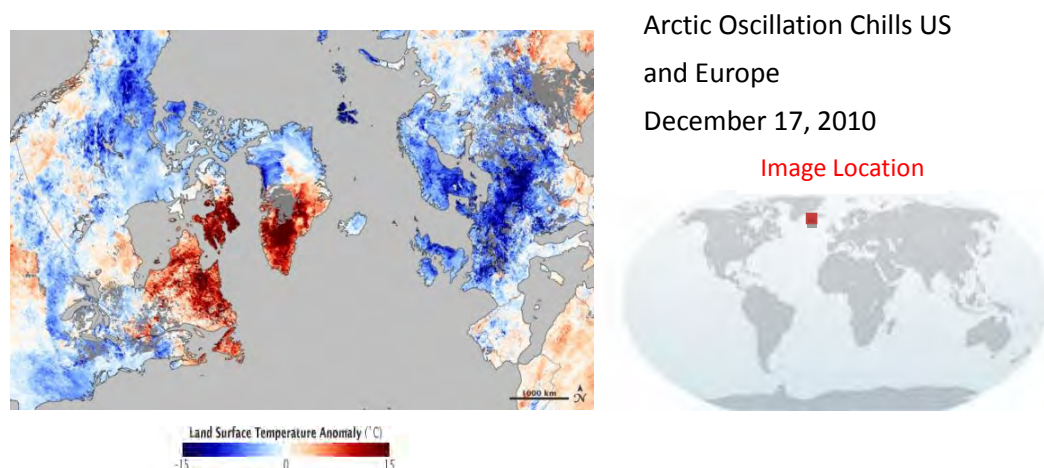


圖2 2010.12.17 北極震盪造成北美與歐洲氣溫異常圖 (NASA 2010)

因為無意間看到了這則訊息，引起了我們對於研究北極極區各種現象的興趣，從2011年中我們開始進行了相關的研究。而近年冬天歐洲和美國東北地區接連的受到冬季風暴的襲擊，亞洲以中國西北地區一直連接到日本也都受到持續的酷寒影響，這些現象都和強烈的北極震盪負相位有關。

三、研究目的

- (一) 探討 SSW 與 AO 兩者的相關性，並試著了解此現象背後機制。
- (二) 觀察 1991~2012 各年 SSW 主要與次要暖化的週期性與發生時機。
- (三) 探討 SSW 對於對流層與各緯度的影響性。
- (四) 觀察 SSW 波峰與波谷地區是否會受海陸性質差異的影響。
- (五) 藉由分析資料進一步了解 SSW 背後的增溫機制。
- (六) 分析 SSW 現象對臺灣之影響。

四、研究設備與器材

- (一) 個人電腦
- (二) Google Maps
- (三) Microsoft word、Microsoft Excel

貳、研究方法與流程

一、研究流程

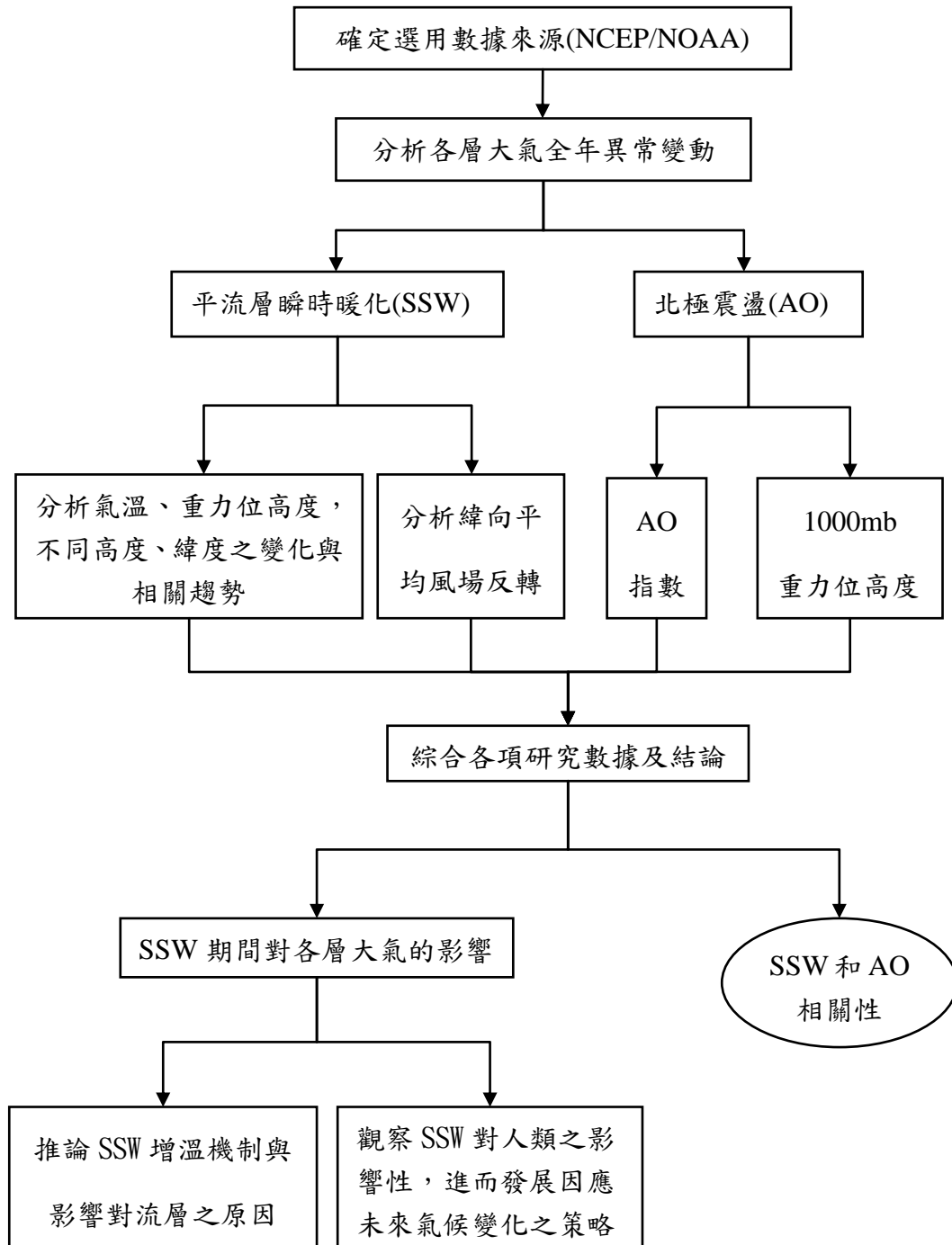


圖 3 研究分析流程圖

二、研究方法

- (一) 利用 NCEP/NCAR Reanalysis 的功能繪製出發生 SSW 期間與正常季節期間的全球大氣溫度圖，再加以深入探討兩者的差異。
- (二) 用上述方法畫出 1991~2012 北半球冬季各天全球氣溫圖，並了解 SSW 所影響的緯度範圍，經過比較後發現北半球每年 SSW 出現範圍皆在 30°N~60°N 之間，因此爲了細部探討各種現象與極區之關係性，在接下來研究中的各種現象探討皆從 30°N 開始向北至 90°N。
- (三) 使用方法二所畫出的全球氣溫圖，觀察自 1991~2012 各年度 SSW 期間行星波構造，並利用圖 4 所標示的方法，以行星波振幅[(最大值-最小值)/2]，計算出當年度 SSW 行星波之強度。圖中所代表的緯向平均，爲某一緯度其所有經度(0°E~360°E)數值的平均。

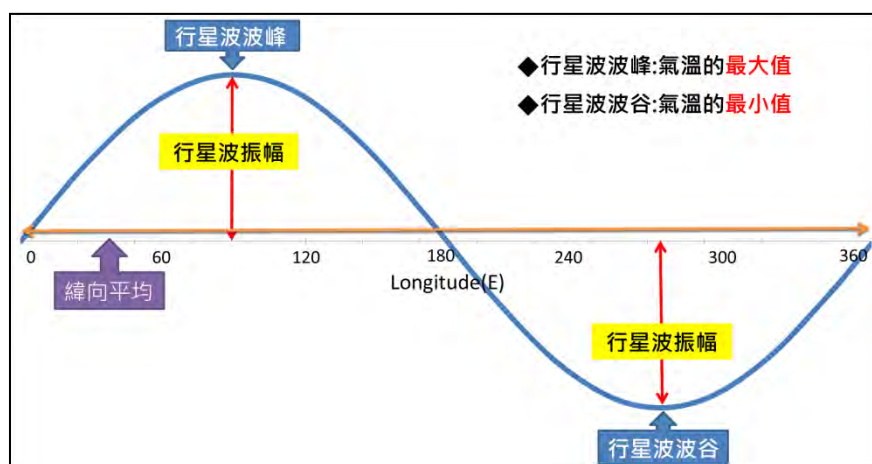


圖 4 行星波分析計算方法示意圖

(四) 計算圖表趨勢

此次研究中利用線性迴歸的方法，計算出圖表的迴歸直線，並將計算出的趨勢線斜率用以表現出氣溫在緯度上的分布趨勢，其計算公式如下：

$$y = mx + b \quad (m \text{ 爲斜率、} b \text{ 爲截距}) \quad (\text{式 } 1)$$

但在大氣中各緯度平均氣溫有時會受到其他自然變因的影響，使氣溫並沒有穩定的趨勢，導致趨勢線不足以代表整張圖的整體走向。而此次研究在有趨勢線的圖表右上方，放入計算此圖的趨勢線是否足以代表整體趨勢的 R^2 數值，來檢視此趨勢線的代表性。 $(R^2$ 數值越接近 1 者，表示此條趨勢線越代表該圖的走向)

(五) 計算相關係數

爲了驗證研究過程中所分析的各現象是否呈現相關性，故在分析圖表後，再加以計算其相關係數來作爲判斷的依據。在學術上定義相關係數界於-1~1之間，若相關係數 >0 視爲正相關、相關係數 $=0$ 視爲無相關、而相關係數 <0 則視爲負相關。其計算公式如下：

$$Correl(X, Y) = \frac{\sum (x - \bar{x})(y - \bar{y})}{\sqrt{\sum (x - \bar{x})^2 \sum (y - \bar{y})^2}} \quad (\text{式 } 2)$$

[\bar{x} 及 \bar{y} 爲樣本平均數 AVERAGE(array1) AVERAGE(array2)]

當計算出的相關係數取絕對值後，其值小於 0.3，稱爲低度相關；介於 0.3~0.7，稱爲中度相關；而達到 0.7~0.8，稱爲高度相關；若數值達 0.8 以上時，即稱爲非常高度相關。

(六) 1991~2012 年度季平均

在研究中爲了找出發生 SSW 的期間，我們取各年度(1991~2011)冬季 10mb 的北半球大氣溫度數據加以平均，得到平均氣溫 216.72(K)，在以每天的(最大值+最小值)/2 做爲平均振幅，得到 22.19(K)，將兩數據相加後其值爲 238.91(K)，因此我們以 240(K)爲基準，若當日最大值超過 240K 就將其視爲當年度 SSW 的開始。

參、研究過程與結果

一、SSW 發生期間與正常期間之比較

在研究初期的過程中，為了解與定義 SSW 在冬季的發生期間與未發生期間，其大氣溫度在全球分布的差異，因此選擇此次研究過程中發生最大一次的 SSW(2008~2009 年)，作為比較正常期與發生期兩者差異的範例，並繪製出 10mb (約 30km，此高度屬平流層)的全球氣溫圖(圖 5-1~5-2)來觀察與比較兩者的差異性。在北半球冬季 SSW 未發生期間(圖 5-1)，因太陽照射角度的不同，北半球處於冬季時，南半球正處於太陽直射的夏季半球，從赤道往北極極區方向前進，其大氣溫度應呈現由高溫往低溫之趨勢，但若發生 SSW 時，將造成北極極區之氣溫會明顯比赤道之氣溫高(圖 5-2)，即為 SSW 造成極區的「溫度反轉」現象。

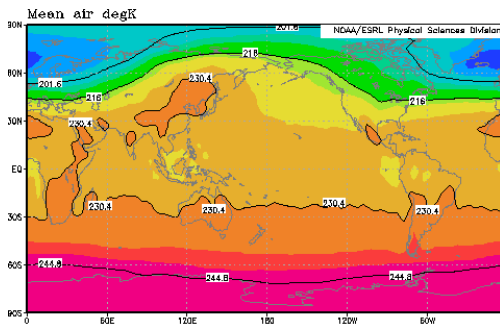


圖 5-1 全球氣溫圖(10mb)

[正常北半球冬季氣溫分布]

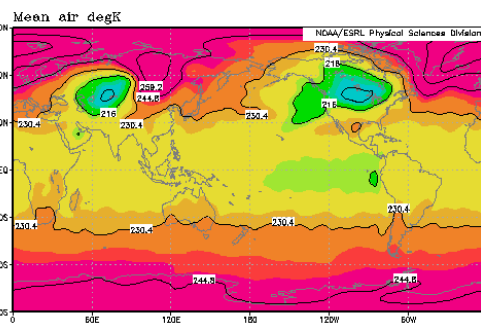
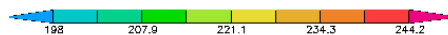


圖 5-2 全球氣溫圖(10mb)

[SSW 期間北半球冬季氣溫分布]



二、SSW 發生期間的溫度反轉

接著，就如上述提到在北半球冬季從赤道往北極極區方向前進，其大氣溫度應呈現由高溫往低溫之趨勢，但若發生平流層瞬時暖化現象時，將造成極區之氣溫會明顯比中低緯度之氣溫來的高，即稱為「溫度反轉」。為了瞭解溫度反轉此一現象對於溫度曲線所造成的改變，我們以研究過程最大之 SSW 年度(2008~2009)畫出圖 6，

以當年 SSW 發生期間,行星波每天成長及改變的氣溫圖，藉此與利用大氣溫度製成得溫度曲線圖(圖 7、圖 8)互相比較後可以看出在行星波達到最高強度時，氣溫在緯向平均的分布上明顯發生的反轉現象。

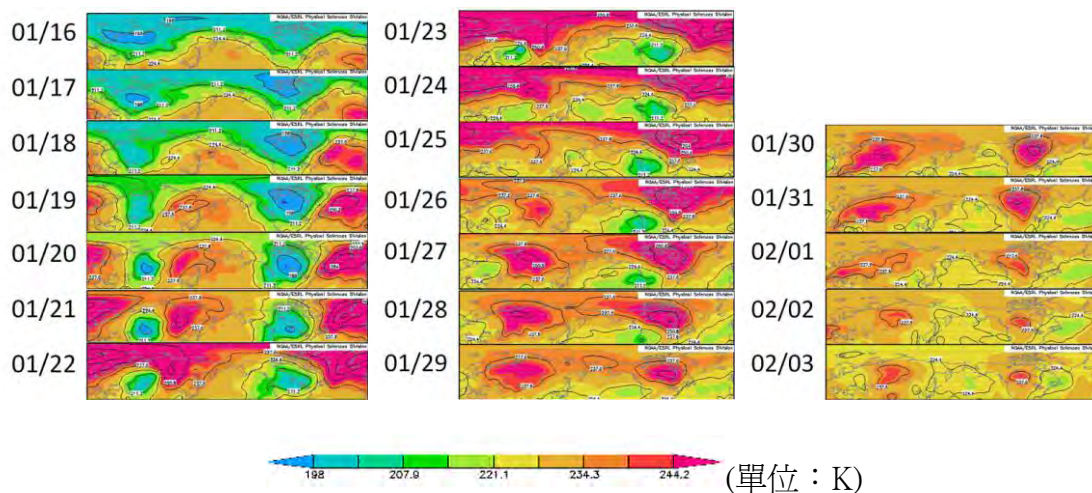


圖 6 2008~2009 最大 SSW 行星波隨時間變化氣溫圖(10mb)
(範圍：30°N~90°N、北半球經度±180°)

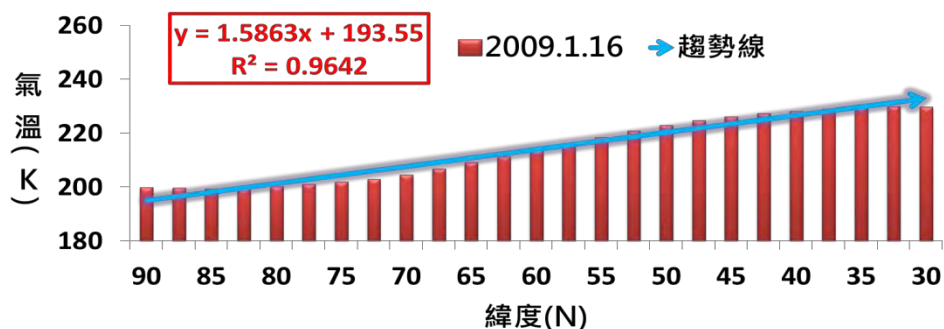


圖 7 2009.01.16 北緯 30°~90°各緯度緯向平均圖(10mb，緯度間隔為 2.5°N)

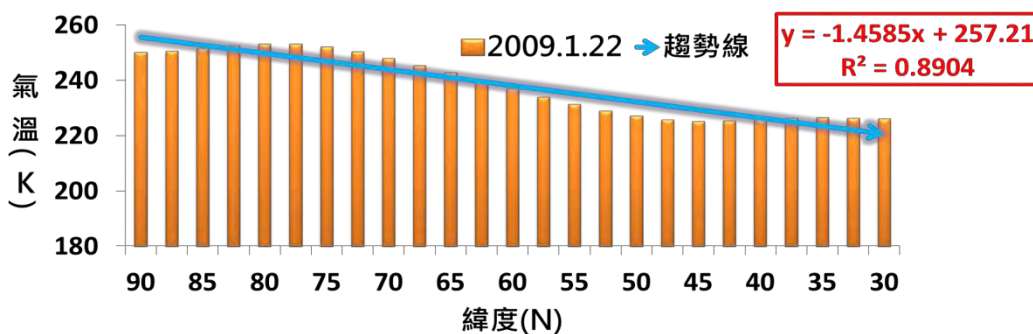


圖 8 2009.01.22 北緯 30°~90°各緯度緯向平均圖(10mb，緯度間隔為 2.5°N)

三、SSW 高峰日之日期分佈

首先，在此階段的研究，爲了深入探討 SSW 行星波的出現，在每一年度是否集中於哪一時間點而導致有此現象的發生，因此利用研究初期所繪出的 1991~2012 年北半球冬季各天全球氣溫圖(10mb)，以行星波中心點超過 240K 視爲每年 SSW 期間的開始，直到的行星波中心點低於 240K 爲結束日。利用此方法試著找出每年度最大的 SSW 是否出現在相同時間點，並整理出表 1 及圖 9 來說明觀察所得知的分佈情況。表中的換算天數，我們以發生年份較大的那一年其 1 月 1 日視爲第 1 天、1 月 2 日視爲第 2 天；而較小年的 12 月 31 日視爲第 0 天、12 月 30 日視爲第-1 天，並以此類推。

表 1 每年最大 SSW 發生日期與當次 SSW 高峰日(10mb)

發生年份	高峰日	高峰日換算天數	每年 SSW 期間(始末)
1991~1992	1992.01.11	11	1992.01.09~1992.01.23
1992~1993	1993.02.01	32	1993.01.26~1993.02.05
1993~1994	1993.12.27	-04	1993.12.24~1994.01.04
1994~1995	1994.12.31	00	1994.12.26~1995.01.07
1995~1996	1996.01.19	19	1996.01.17~1996.02.01
1996~1997	1996.12.21	-10	1996.12.17~1996.12.26
1997~1998	1998.02.01	32	1998.01.27~1998.02.11
1998~1999	1998.12.12	-19	1998.12.07~1998.12.19
1999~2000	2000.02.07	38	2000.02.06~2000.02.10
2000~2001	2000.12.07	-24	2000.12.01~2000.12.15
2001~2002	2001.12.18	-13	2001.12.14~2002.01.02
2002~2003	2002.12.28	-03	2002.12.22~2003.01.05
2003~2004	2003.12.16	-15	2003.12.06~2003.12.28
2004~2005	2005.02.19	40	2005.02.17~2005.02.27
2005~2006	2006.01.09	09	2006.01.01~2006.01.14
2006~2007	2006.12.30	-01	2006.12.29~2007.01.07
2007~2008	2008.01.23	23	2008.01.18~2008.01.28
2008~2009	2009.01.22	22	2009.01.16~2009.02.03
2009~2010	2010.01.25	25	2010.01.19~2010.02.07
2010~2011	2011.01.04	04	2010.12.29~2011.01.12
2011~2012	2011.12.25	-06	2011.12.23~2012.01.05

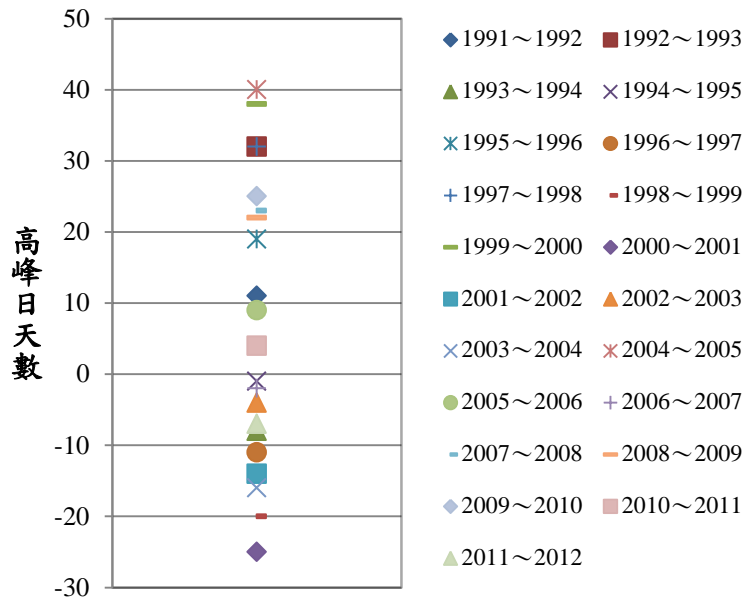


圖 9 1991~2012 SSW 高峰日之日期分佈圖

經由圖 9 的研究結果發現，在研究這二十一次 SSW 後發現每年度最大的 SSW 皆分佈於前年 12 月至當年 2 月(約-30~60 天)，每一年度皆明顯的集中在這三個月間，但細分這三個月間的集中程度，並沒有特別集中於任何時間點，而是隨著當時各種條件達到滿足時，便會有 SSW 事件的發生，不過每年度 SSW 的大小就要依照當年各種因素的條件而定。

四、每年 SSW 最大行星波振幅比較

在此次的研究中，爲了討論 SSW 是否有像北極震盪(AO)一樣存在所謂的週期性，所以使用行星波振幅以每年最高峰當日 30°N~90°N 的 10 mb 大氣溫度振幅數值，視爲當年 SSW 行星波的強弱大小，整理後如表 2 與圖 10。

表 2 1991~2012 年各年度 SSW 振幅

年度	1991~1992	1992~1993	1993~1994	1994~1995	1995~1996	1996~1997	1997~1998
SSW 振幅(K)	42.19	29.93	35.41	39.31	30.54	30.69	33.24
年度	1998~1999	1999~2000	2000~2001	2001~2002	2002~2003	2003~2004	2004~2005
SSW 振幅(K)	32.29	30.14	35.72	37.45	41.32	34.94	30.37
年度	2005~2006	2006~2007	2007~2008	2008~2009	2009~2010	2010~2011	2011~2012
SSW 振幅(K)	33.10	35.43	39.92	43.12	35.40	37.63	33.73

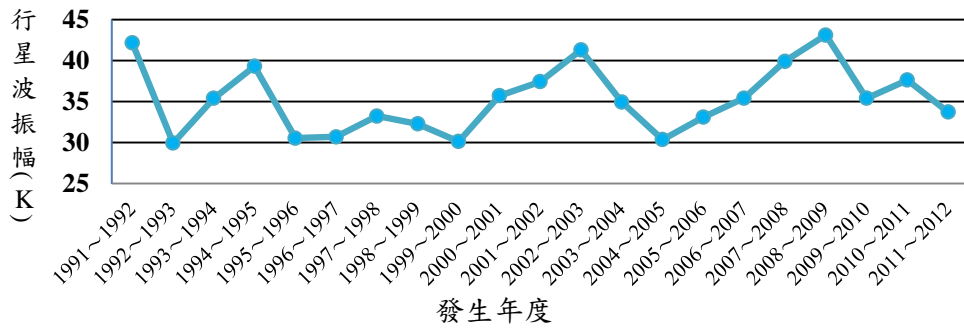


圖 10 SSW 振幅趨勢圖 1991~2012

藉由圖 10 可以看出在 1991~2012 年的行星波振幅於 21 年之中有 6 個相對高點，分別出現在 1991-1992，1994-1995，1997-1998，2002-2003，2008-2009 及 2010-2011，顯示出此振幅在這段期間約略呈現 4~5 年出現一次的週期。

五、SSW 主要暖化與次要暖化

平流層瞬時暖化(SSW)依可照強度分為主要(major)與次要(minor)，在國際上為分辨此現象，世界氣象組織(WMO)定義兩者以緯度 60°線 10mb 氣壓面的緯向平均風場做判斷的依據，若 SSW 使極地西風反轉成東風稱為主要暖化；而 SSW 使極地西風減弱並未反轉則稱為次要暖化。此次研究的過程中，我們為了實際了解在研究的 1991~2012 年，這 21 年間各年度主要暖化與次要暖化的分佈，以及是否與現有的往例「主要暖化每 2~3 年發生一次」相符，經過將 21 年 U-wind 北緯 60°線的數據計算後，整理出表 3。從表 3 中可以清楚了解 1991~2012 各年風場有否反轉外，也可利用此研究分析來觀察各年 SSW 大小會不會受到緯向平均風場減弱或反轉造成該年的 SSW 強度有所影響。

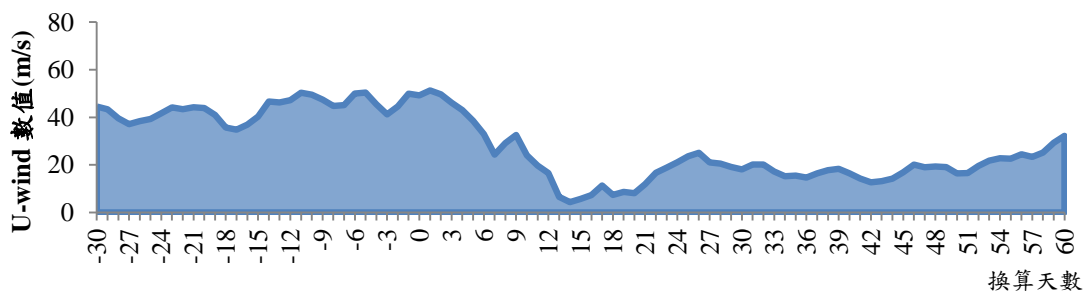


圖 11-1 1991~1992 年冬季 U-wind 60°N 每日緯向平均(10mb)

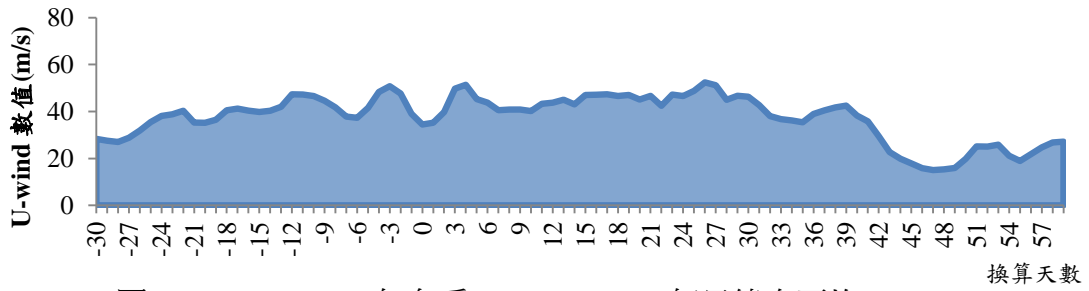


圖 11-2 1992~1993 年冬季 U-wind 60°N 每日緯向平均(10mb)

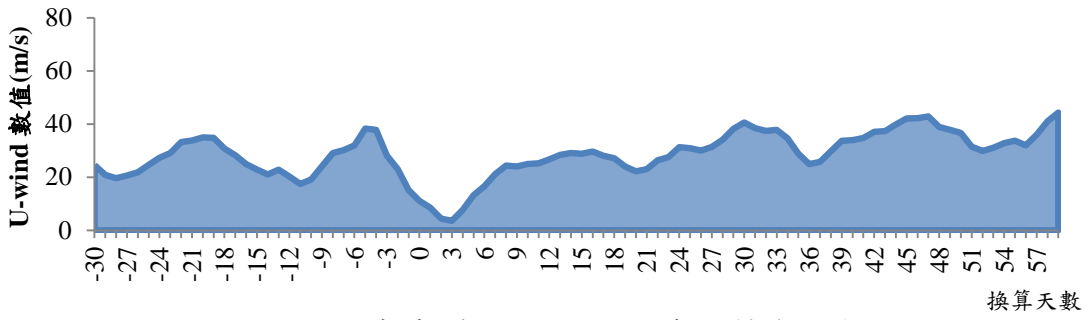


圖 11-3 1993~1994 年冬季 U-wind 60°N 每日緯向平均(10mb)

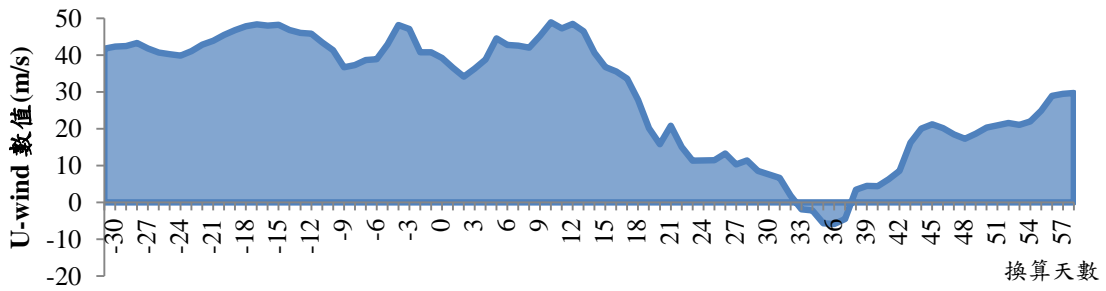


圖 11-4 1994~1995 年冬季 U-wind 60°N 每日緯向平均(10mb)

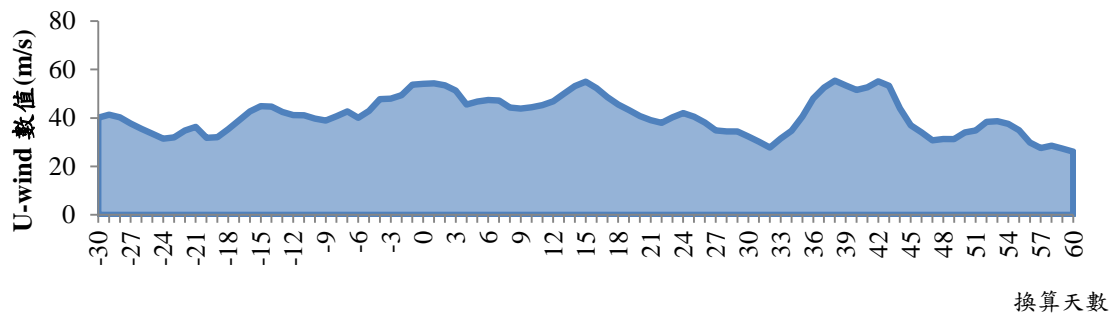


圖 11-5 1995~1996 年冬季 U-wind 60°N 每日緯向平均(10mb)

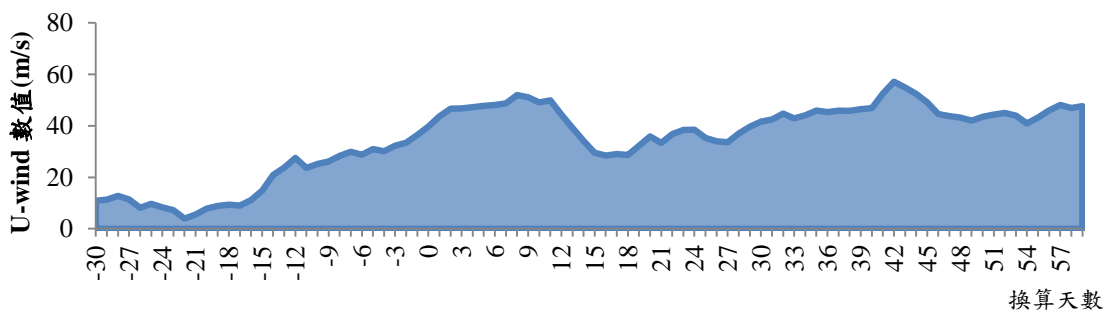


圖 11-6 1996~1997 年冬季 U-wind 60°N 每日緯向平均(10mb)

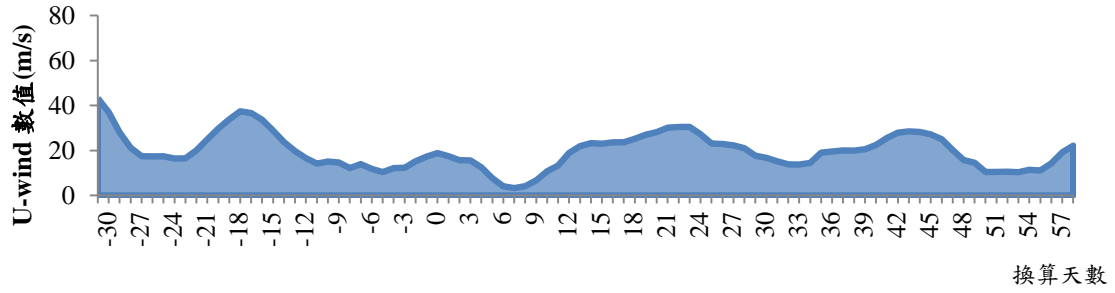


圖 11-7 1997~1998 年冬季 U-wind 60°N 每日緯向平均(10mb)

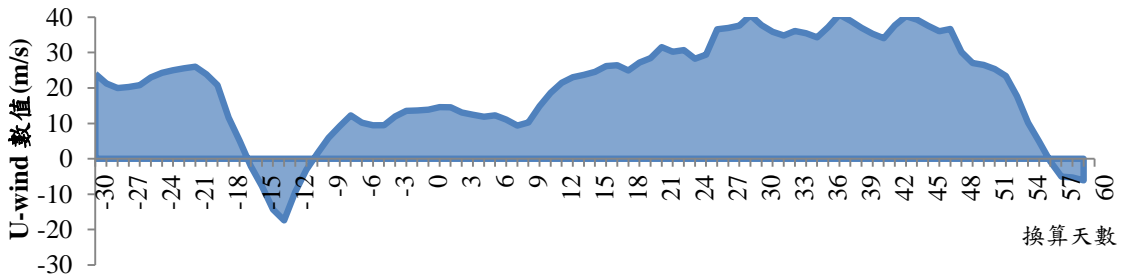


圖 11-8 1998~1999 年冬季 U-wind 60°N 每日緯向平均(10mb)

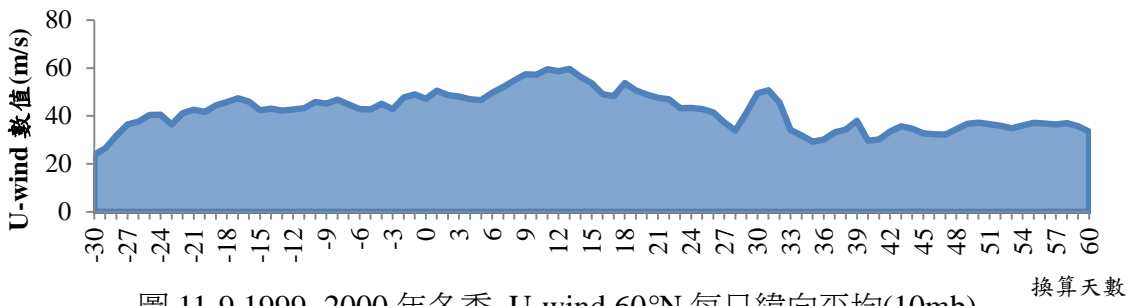


圖 11-9 1999~2000 年冬季 U-wind 60°N 每日緯向平均(10mb)

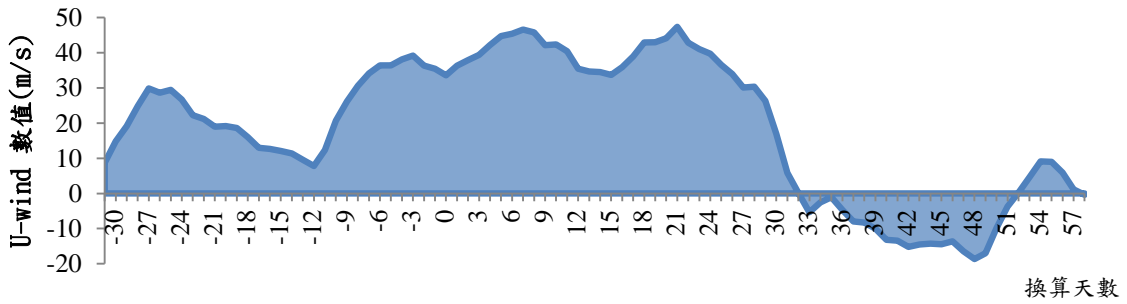


圖 11-10 2000~2001 年冬季 U-wind 60°N 每日緯向平均(10mb)

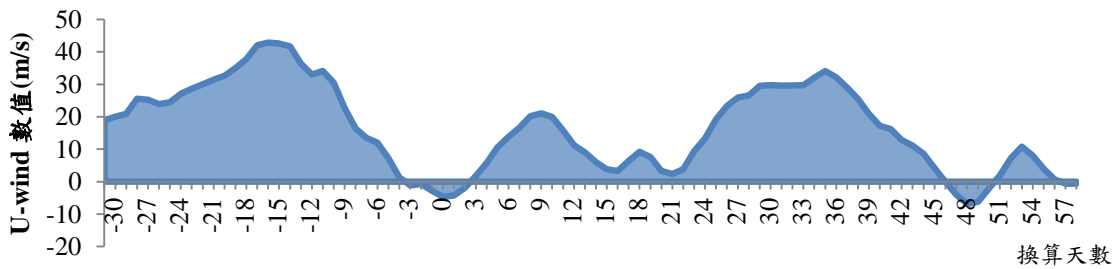


圖 11-11 2001~2002 年冬季 U-wind 60°N 每日緯向平均(10mb)

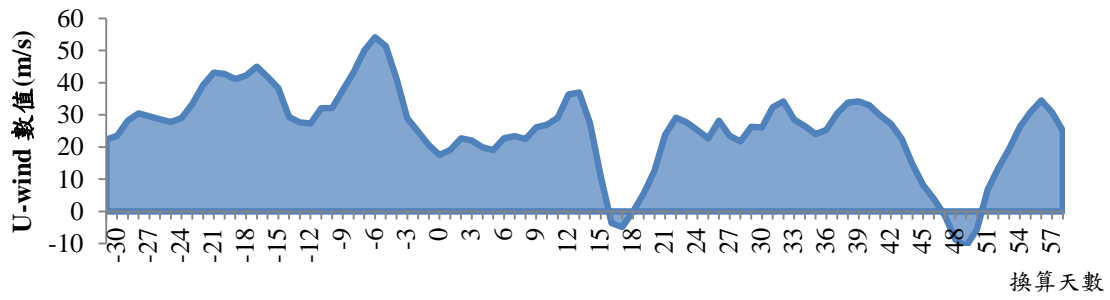


圖 11-12 2002~2003 年冬季 U-wind 60°N 每日緯向平均(10mb)

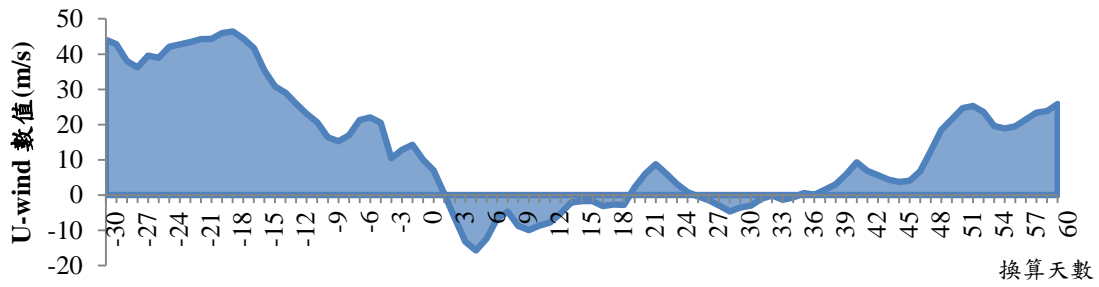


圖 11-13 2003~2004 年冬季 U-wind 60°N 每日緯向平均(10mb)

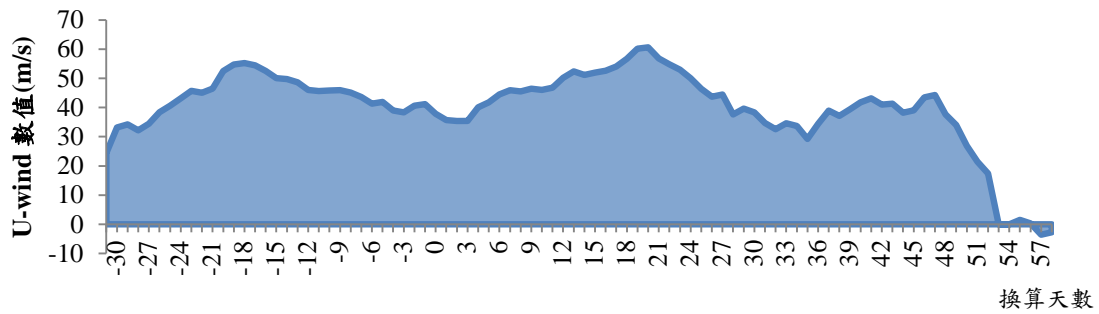


圖 11-14 2004~2005 年冬季 U-wind 60°N 每日緯向平均(10mb)

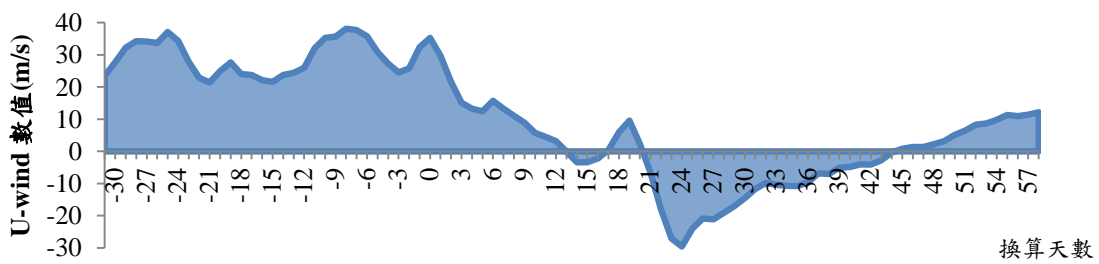


圖 11-15 2005~2006 年冬季 U-wind 60°N 每日緯向平均(10mb)

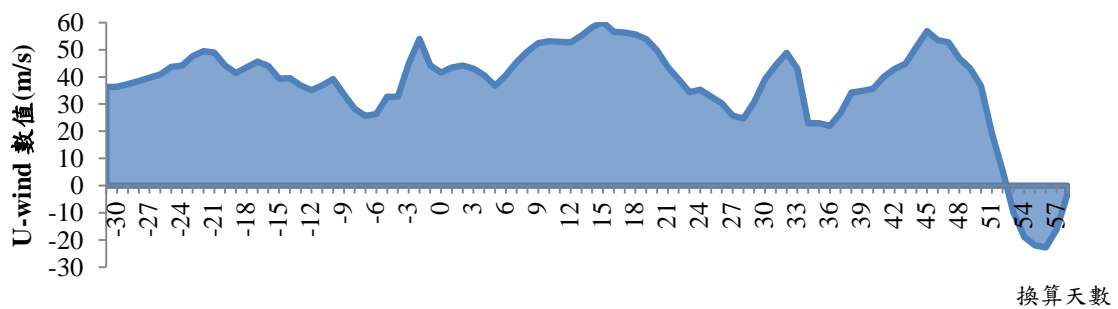


圖 11-16 2006~2007 年冬季 U-wind 60°N 每日緯向平均(10mb)

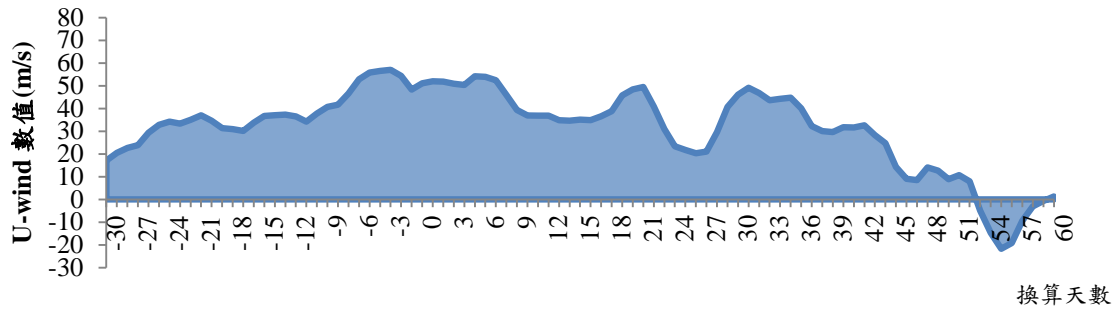


圖 11-17 2007~2008 年冬季 U-wind 60°N 每日緯向平均(10mb)

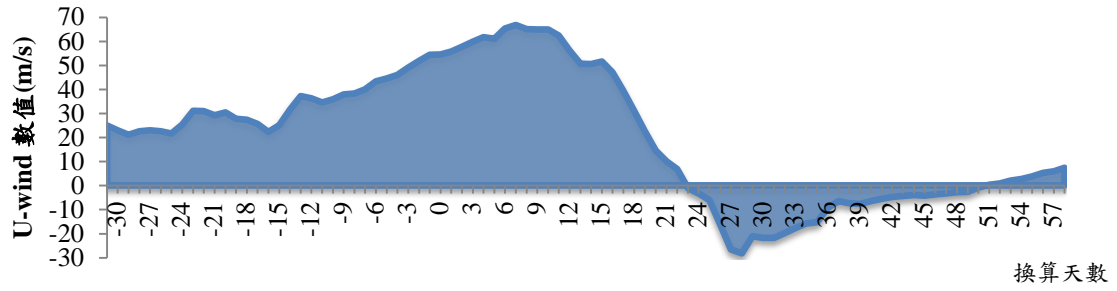


圖 11-18 2008~2009 年冬季 U-wind 60°N 每日緯向平均(10mb)

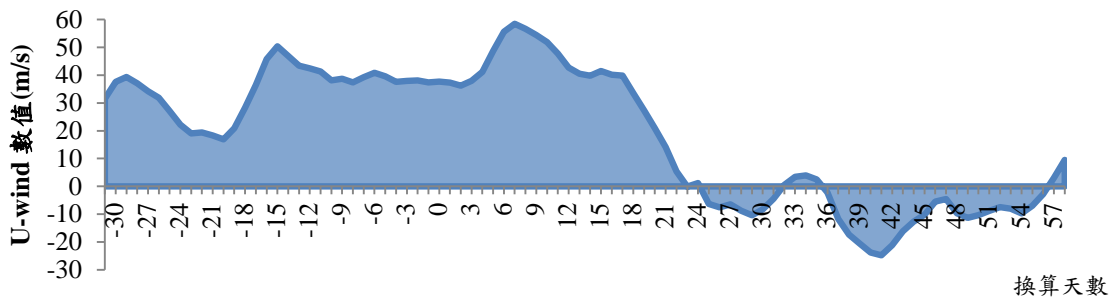


圖 11-19 2009~2010 年冬季 U-wind 60°N 每日緯向平均(10mb)

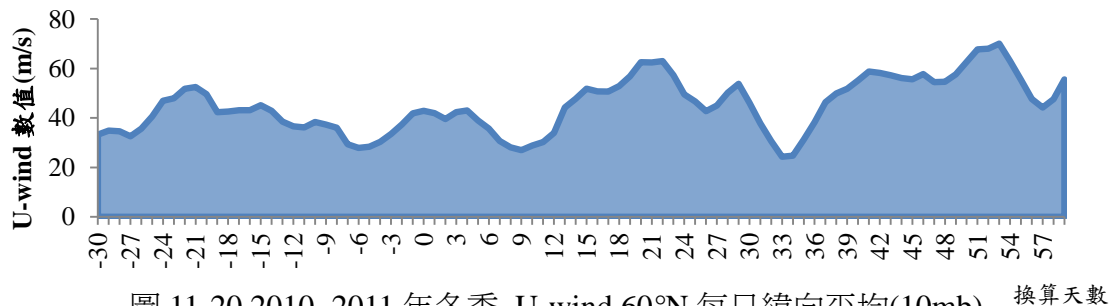


圖 11-20 2010~2011 年冬季 U-wind 60°N 每日緯向平均(10mb)

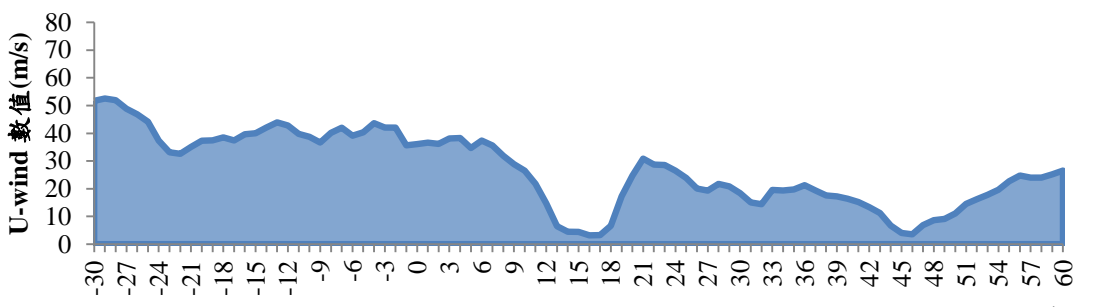


圖 11-21 2011~2012 年冬季 U-wind 60°N 每日緯向平均(10mb)

表 3 1991~2012 年 各年度緯向平均風場減弱/反轉統整

年度	1991~1992	1992~1993	1993~1994	1994~1995	1995~1996	1996~1997	1997~1998
風場方向	W	W	W	E	W	W	W
年度	1998~1999	1999~2000	2000~2001	2001~2002	2002~2003	2003~2004	2004~2005
風場方向	E	W	E	E	E	E	E
年度	2005~2006	2006~2007	2007~2008	2008~2009	2009~2010	2010~2011	2011~2012
風場方向	E	E	E	E	E	W	W

註: E=Easterly(東風) $\bar{u}<0$ W=Westerly(西風) $\bar{u}>0$

六、SSW 行星波各年波數與波峰波谷分佈區域

除了觀察近 21 年來的主要暖化及次要暖化現象之外，我們利用 NCEP 10mb 的氣溫數據畫出研究的 21 年間，行星波波峰與波谷的分佈情況，從圖 12 可以看出這 21 年來行星波波峰與波谷明顯分佈為兩區，而各年度的波數統計可參考下表 4。

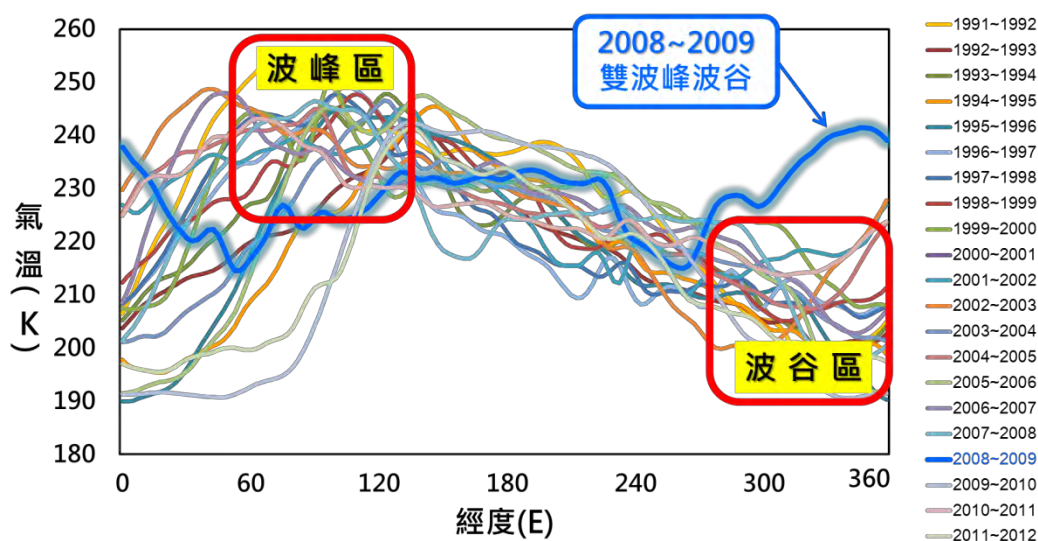


圖 12 1991~2012 年 SSW 首日行星波溫場波峰波谷分佈(10mb)

表 4 1991~2012 年 各年度行星波波數統整

年度	1991~1992	1992~1993	1993~1994	1994~1995	1995~1996	1996~1997	1997~1998
行星波波數	1	1	1	1	1	1	1
年度	1998~1999	1999~2000	2000~2001	2001~2002	2002~2003	2003~2004	2004~2005
行星波波數	1	1	1	1	1	1	1
年度	2005~2006	2006~2007	2007~2008	2008~2009	2009~2010	2010~2011	2011~2012
行星波波數	1	1	1	2	1	1	1

七、AO 與各層大氣相互的關係性

從前述研究中得知，冬季為北極震盪影響北半球最劇烈時間與 SSW 影響北半球時間大致相同(當年 12 月~隔年 2 月, -30~60 天),表 5 為本次研究從 1991~2012 Dec、Jan、Feb 與 3 個月平均之數值及圖 13 為每年 AO 及 SSW 影響期間 AO 指數平均的趨勢圖：

表 5 AO 指數 1991~2012 每年度 Dec、Jan、Feb 與 3 個月平均之數值

年度	1991~1992	1992~1993	1993~1994	1994~1995	1995~1996	1996~1997	1997~1998
Dec	1.61	1.63	-0.10	0.89	-2.13	-1.72	-0.07
Jan	0.55	3.50	-0.29	-0.15	-1.20	-0.46	-2.08
Feb	1.12	0.18	-0.86	1.43	0.16	1.89	-0.18
平均	1.09	1.77	-0.42	0.72	-1.05	-0.10	-0.78
年度	1998~1999	1999~2000	2000~2001	2001~2002	2002~2003	2003~2004	2004~2005
Dec	1.35	1.04	-2.35	-1.32	-1.59	0.27	1.23
Jan	0.11	1.27	-0.96	1.38	-0.47	-1.69	0.36
Feb	0.48	1.08	-0.62	1.30	0.13	-1.53	-1.27
平均	0.65	1.13	-1.31	0.45	-0.65	-0.98	0.11
年度	2005~2006	2006~2007	2007~2008	2008~2009	2009~2010	2010~2011	2011~2012
Dec	-2.10	2.28	0.82	0.65	-3.41	-2.63	2.22
Jan	-0.17	2.03	0.82	0.80	-2.59	-1.68	-0.22
Feb	-0.16	-1.31	0.94	-0.67	-4.27	1.58	-0.04
平均	-0.81	1.00	0.86	0.26	-3.42	-0.91	0.65

註：Dec、Jan、Feb 表示當年 Dec 與隔年 Jan、Feb (如 1991~1992，表示 1991 Dec 到 1992 Feb)

在大氣中，同一個氣壓面會因氣溫、大氣中的擾動等因素，而導致同一氣壓面上的各點其高度不一定相同。重力位高度簡單來說就是同一氣壓面的各點高度，利用重力位高度的數據，便可就藉由高度來表示其氣壓大小。SSW 期間所造成的風場減弱或反轉會進而導致極區渦流的減弱與位移，因此我們將 AO 指數(在 1000mb 觀測)冬季平均與 1000mb、100mb、10mb 三層重力位高度冬季平均來相互比較其相關性(AO 指數為正，表正相位時期，極區氣壓低；AO 指數為負，表負相位時期，極區氣壓高，因此 AO 指數應與重力位高度呈現相反情況)如下圖 13。

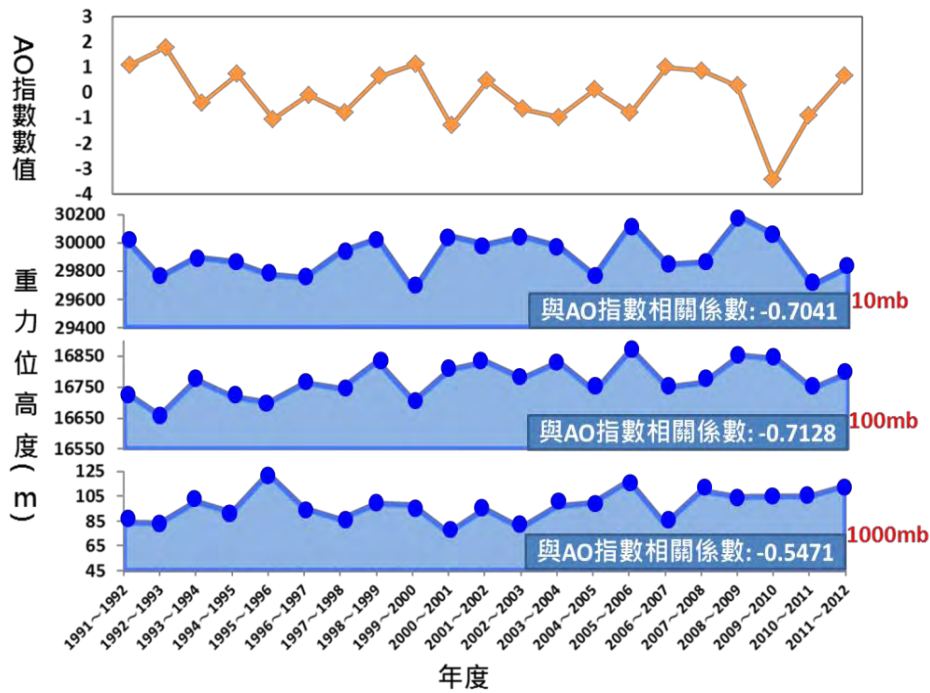


圖 13 1991~2012 各年冬季 重力位高度平均及 AO 指數比較圖

(註:圖 13 的重力位高度為 60N°~90N°緯向平均值)

將 AO 指數與重力位高度互相比對後，可以看出呈現高度負相關，其相關係數 10mb 為負的 0.7041、100mb 為負的 0.7128、1000mb 為負的 0.5471，由此可知各層重力位高度與 AO 指數負相關性極高。藉由此現象便可了解緯向平均風場的反轉與減弱，導致極區的渦流減弱與位移的情況，會影響極區各層的渦流，造成類似負北極震盪的現象發生。

八、SSW 對不同高度及緯度之影響

到底 SSW 在平流層發生的期間，對於生活於陸地的我們有什麼的影響性？我們先比較各層氣溫在 SSW 期間，其高度不同導致增溫期間之差異，來加以觀察平流層增溫後，其增溫與渦流減弱現象，會從平流層影響自其他高度層所需的時間。圖 14 為各層大氣溫度隨時間改變的每日 60°N~90°N 的平均氣溫圖，我們將觀察到的現象以 2008~2009 年作為代表，呈現於報告書中的時間點為當年 SSW 發生前一周到 SSW 結束後大約十天，以方便觀察平流層開始增溫到結束的現象，以及平流層增溫時影響各層大氣的時間點。

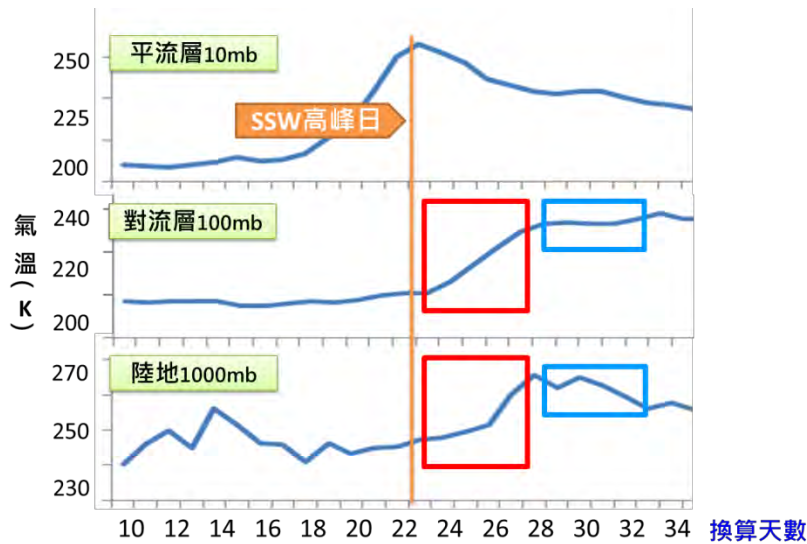


圖 14 2009 年第 10~34 日 各層大氣每日 60°N~90°N 平均氣溫疊圖

在圖 14 中的紅圈處為對流層與陸地開始增溫的期間，我們從圖中觀察到 100mb 與 1000mb 兩層氣溫受到平流層增溫的影響皆於 2009 年第 22~23 日開始增溫，到了第 28 日附近為該層整個增溫現象最顯著的開始。在研究後我們分析每年增溫現象的分布，平流層(10mb)增溫至當年高峰日時，約隔 5~7 天會是 100mb 與 1000mb 增溫現象最顯著的開始。另外，為了探討增溫現象對於生活在陸地的我們，其影響性與影響範圍，我們利用圖 14 陸地(1000mb)的增溫期間分佈，找出增溫影響陸地最為明顯的期間 2009 年第 28~32 天(藍色方框處)，並且畫出圖 15~圖 20，來分析對陸地的影響範圍。

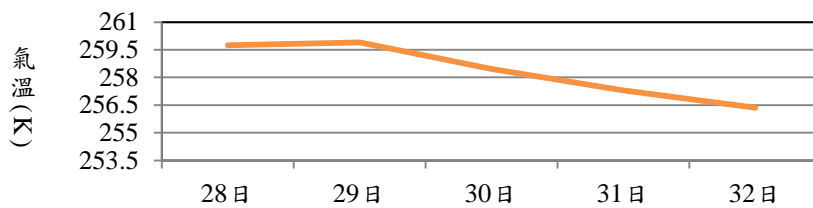


圖 15 2009 年 第 28~32 日 每日 90°N~80°N 平均氣溫圖(1000mb)

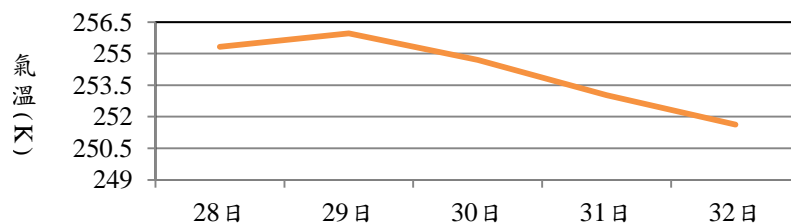


圖 16 2009 年 第 28~32 日 每日 80°N~70°N 平均氣溫圖(1000mb)

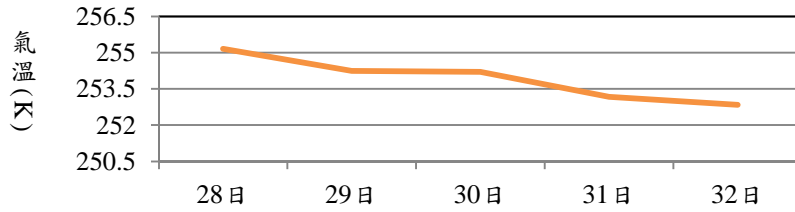


圖 17 2009 年 第 28~32 日 每日 70°N~60°N 平均氣溫圖(1000mb)

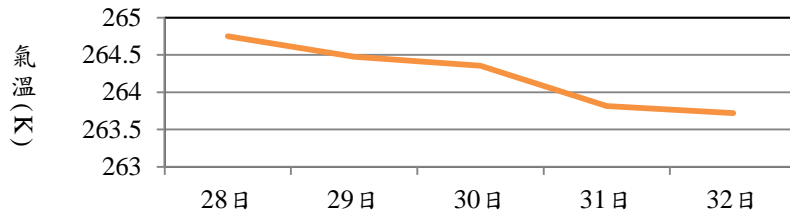


圖 18 2009 年 第 28~32 日 每日 60°N~50°N 平均氣溫圖(1000mb)

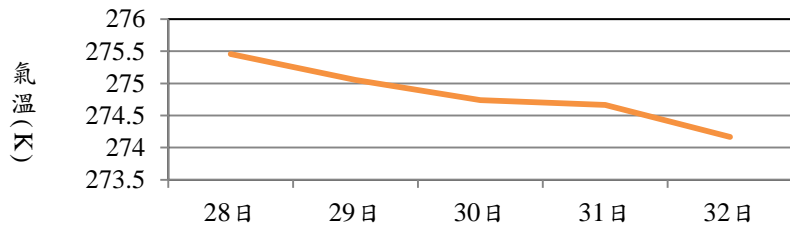


圖 19 2009 年 第 28~32 日 每日 50°N~40°N 平均氣溫圖(1000mb)

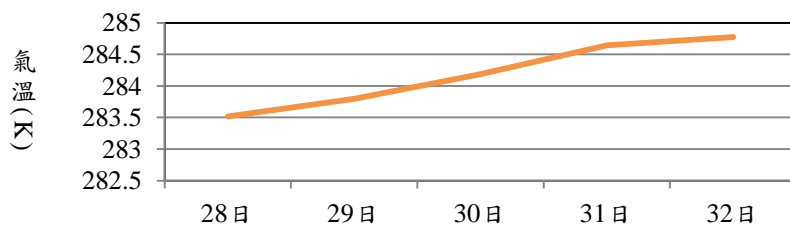


圖 20 2009 年 第 28~32 日 每日 40°N~30°N 平均氣溫圖(1000mb)

由畫出的 1000mb 各緯度圖(圖 15~圖 20)，可以看出圖 15~圖 19(90°N~40°N)在此期間的氣溫趨勢呈現類似走向，但從圖 20 可以發現 40°N~30°N 的氣溫走勢明顯不同於 40°N 以北，我們將各緯度圖表相互計算其相關係數並加以比較，來佐證各緯度間的相關性，其計算數值如下表 6。

表 6 各緯度間相互比較之相關係數

緯度比較	相關係數
90°N~80°N 與 80°N~70°N	0.9832
80°N~70°N 與 70°N~60°N	0.6309
70°N~60°N 與 60°N~50°N	0.8340
60°N~50°N 與 50°N~40°N	0.7427
50°N~40°N 與 40°N~30°N	0.2975

從計算出的相關係數當中更可看出 90°N~40°N 在此期間的氣溫趨勢呈現高度正相關，而 40°N~30°N 則與其他緯度呈現低度正相關，因此我們推論在 SSW 期間北半球 1000mb 的增溫影響只到 40°N 以北的地區。

肆、討論

一、SSW 主要暖化與次要暖化

前述中提到的主要暖化(major warming)與次要暖化(minor warming)，我們依照世界氣象組織(WMO)所定義的緯度 60°線 10mb 氣壓面緯向平均風場來分析 1991~2012 每年度暖化現象的程度。若極地西風反轉稱之為主要暖化(major warming)；而極地西風減弱並未反轉則稱之為次要暖化(minor warming)。在 2000 年前一般學界的往例，都指出主要暖化現象大約每隔 2~3 年會出現一次，但經過我們分析資料後整理出表 3 及圖 11，發現近幾年來主要暖化所發生的次數與頻率明顯增加，從 2000~2010 年，每年皆發生緯向平均風場反轉成東風氣流的主要暖化現象。藉由下圖 21 與 22 即可更加清楚了解近年主要暖化的頻率增加。

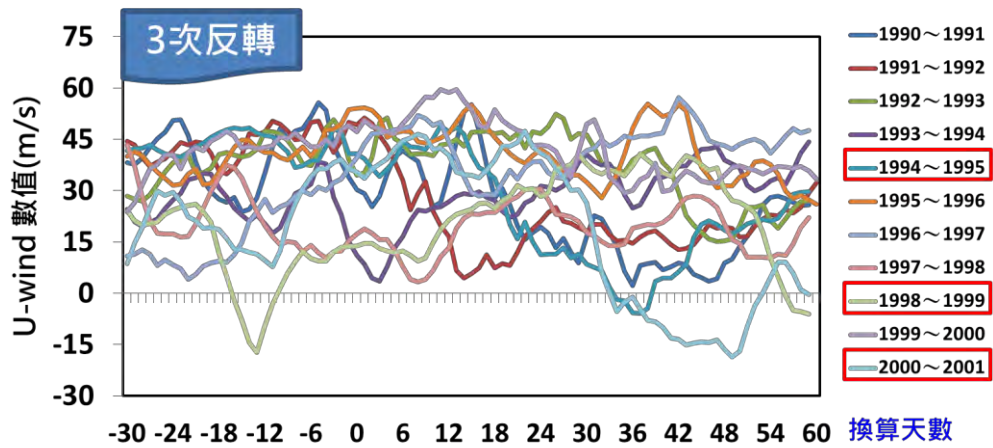


圖21 1990~2001每年冬季60°N 緯向平均緯向風 (\bar{u}) (10mb)

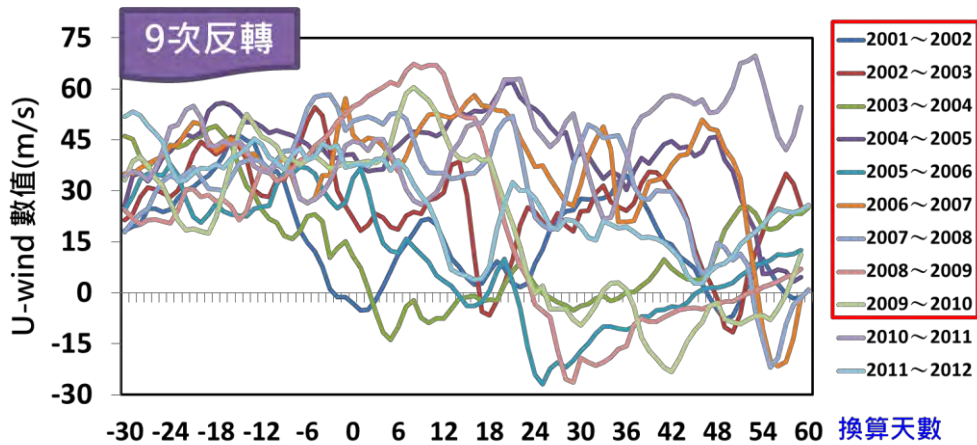


圖22 2001~2012每年冬季60°N 緯向平均緯向風 (\bar{u}) (10mb)

在找出緯向平均風場於各年度減弱或是反轉現象的分佈後，我們將各年度的緯向平均風場對比各年度 SSW 行星波的振幅大小，發現兩者之間並沒有直接的影響性，圖中折線圖各點為當年 SSW 行星波的振幅大小，而若該年度發生緯向平均風場的反轉，則我們在圖中以黃點標示。從圖 23 便可看出黃點的分佈有高有低，並沒有集中於行星波振幅較大的年度才出現黃點。

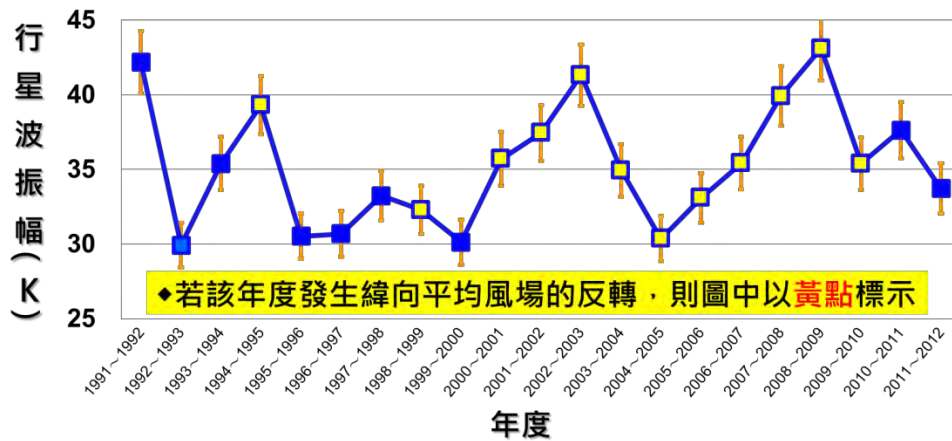


圖 23 1991~2012 年行星波振幅與緯向平均緯向風比較圖

二、SSW 行星波波峰波谷分佈區域

經過上述分析之後，我們找出這 21 年來，各年度 SSW 發生的首日，其行星波的波峰與波谷的經緯度，並利用 Google maps 的標記圖(圖 24)，在平流層波峰皆集中於歐亞大陸(西伯利亞)地區，而波谷則在近七年間由以往的加拿大地區移往格陵蘭島附近，因此我們推論這與近年北極夏季融冰量的大幅增加有所關聯。另外，我們發現觀測史上行星波振幅破 40 的年度，其波谷的位置皆位於海洋上，因此我們推論當年行星波的大小會受到海陸分佈差異的影響。

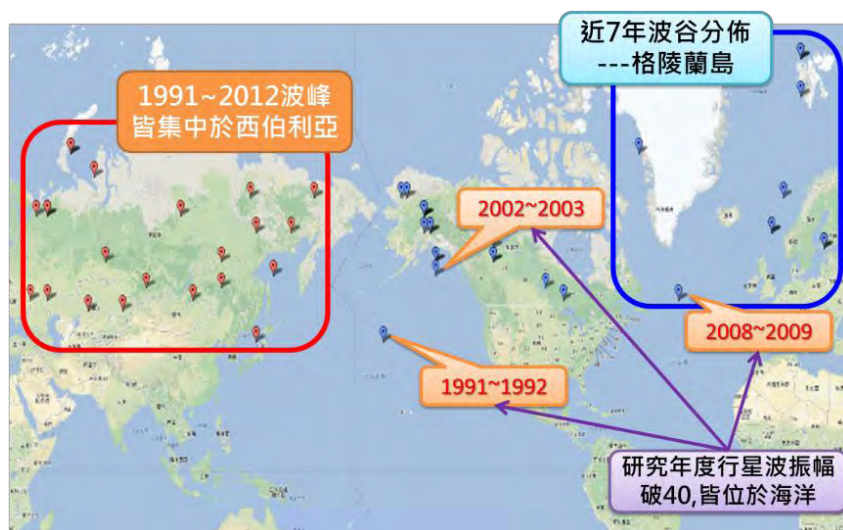


圖 24 1991~2012 年 各年度行星波波峰波谷分佈標記圖

(註：圖中紅色標記點為波峰，藍色標記點為波谷)

三、SSW 對不同緯度之影響

爲了瞭解 SSW 現象，對於生活於陸地(1000mb)的我們，所帶來的影響程度，我們找出增溫現象影響陸地最爲明顯的期間，40°N 以北增溫趨勢皆很相似，但到 30°N 時的氣溫走勢明顯不同於 40°N 以北地區(圖 15~圖 20)，且在計算相關係數後(如表 6)，30°N 與 40°N 以北的相關性大幅下降，故推斷在 1000mb 的增溫現象影響範圍只到 40°N 以北的地區。

四、AO 與各層大氣相互的關係性

前述中曾經提到過，當 AO 指數爲正，表正相位時期，極區氣壓較中低緯度低；AO 指數爲負，表負相位時期，極區氣壓較中低緯度高，因此 AO 指數會與極區重力位高度呈現相反情況。從圖 13 中，AO 指數與重力位高度比對後，可以看出 AO 與各層大氣明顯呈現負相關的走向。藉由此研究觀測出的現象便可了解緯向平均風場的反轉與減弱，導致極區的渦流減弱與位移的情況，會影響極區各層的渦流，造成與類似負北極震盪的現象發生。

五、SSW 發生機制與對流層及地面影響性

造成此現象出現的原因，應該是因冬季海陸熱力差異，以及對流層中的斜壓波動的發展，導致對流層中的波動變得十分活躍並且能夠向上傳播，其中一種波長尺度達到上千公里的波動，在適當的條件下可以傳播到達平流層，由於這種波的波長與地球半徑可以互相比擬，因此又被稱爲行星波動(Planetary Wave);根據行星波傳播的動力機制與理論，行星波在西風氣流中可以向上傳輸，同時因爲空氣密度隨高度增加而快速減少，行星波振幅會發生快速增長，最後行星波的波動因振幅過大及與緯向平均風場發生交互作用，使原本波動之能量將釋放到高層的平均流中造成極區平流層發生增溫的現象。

就前述所言，我們推論整個現象應該要區分爲兩大部分。第一部分是平流層下

層及對流層上層的增溫現象，因為平流層東風氣流(西風反轉成爲東風)的出現，會阻礙行星波繼續向上傳輸，因此行星波只能上傳至較低的高度上，並造成該處的緯向平均風場反轉及渦流發生變化，因此造成 SSW 增溫現象出現在更低層。根據上述所言，由於上層大氣密度開始變小，天氣系統逐漸變少，使行星波振盪幅度變大，近而行星波所具有之能量降低、波長變長，其參考公式如下：

$$E = \frac{1}{2} \rho V \cdot v^2 \quad (\text{式 3})$$

(E ：能量， ρ ：密度， V ：體積， v ：能量振幅)

而對流層下層空氣密度比較大，天氣系統比較多，密度分佈差異性明顯，因此對於大氣波動的傳播阻礙物較多。因為傳播阻礙物較多，所以在波動過程中反射也會比較多，造成向下傳遞的能量無法到達對流層的下層。第二部分是對流層下層與陸地的增溫現象，因為平流層緯向風場與行星波發生交互作用後，會造成原本的風場結構改變，導致平流層的渦流系統也會因此減弱與位移，從前述研究中可知，大氣中的重力位高度若在 10mb 有所改變的，便會影響其他各層重力位高度的變動，也因此使得極區對流層下層的渦流系統減弱與位移，因此極區冷空氣減少、暖空氣增加，使其在幾天時間內溫度上升；中低緯度地區則因暖空氣減少、冷空氣增加，使中低緯度區域在該年冬季會較以往來的寒冷，這也就是 SSW 現象所影響陸地及對流層下層的成因。；

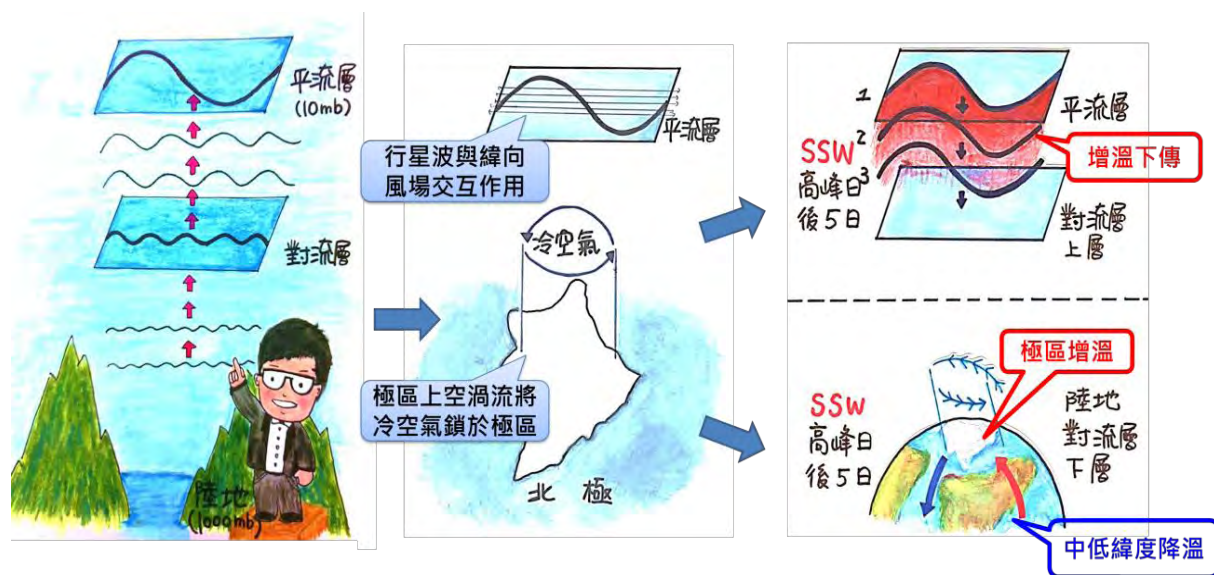


圖 25 SSW 事件形成與影響現象之推導機制圖

六、SSW 現象對臺灣之影響

在前述的機制中提到，當 SSW 現象在平流層到達高峰日後，極區的對流層與陸地皆會有增溫之現象；而中低緯度地區則會有冷空氣來襲造成降溫的情況發生。因此身處臺灣的我們，在 SSW 高峰日後會有什麼影響，也是此次研究所探討的項目之一。

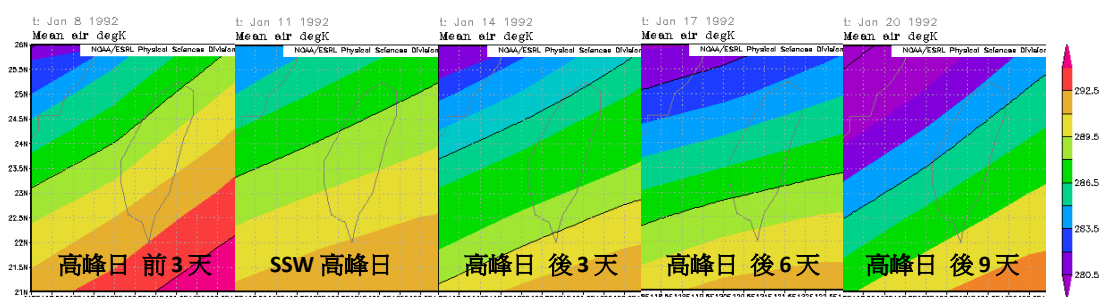


圖 26 1991~1992 年 SSW 期間 臺灣氣溫變化圖 (1000 mb)

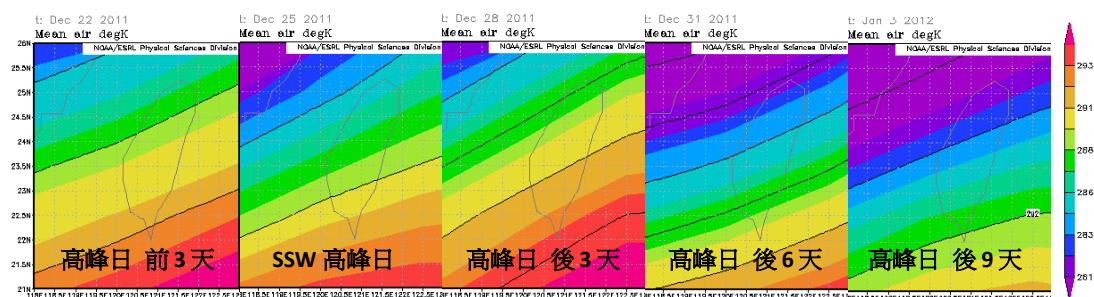


圖 27 2011~2012 年 SSW 期間 臺灣氣溫變化圖 (1000 mb)

在 21 年的研究期間中，我們發現 SSW 現象對臺灣的影響期間，大約發生在平流層 SSW 高峰日後 6~9 天，此時將會造成氣溫上有近 10 度不等的降溫情況，且持續數天。而在這 21 年的研究中，每年 SSW 期間所造成冷空氣到達臺灣之時間，約略有 1~2 天的差異，我們認為與每年北極極區渦流位移方向有所關連，因此在未來的研究中，我們希望加入極區渦流位移方向的探討，讓此研究所提出的預報其精確度能再更加提升。

伍、結論與應用

一、結論

- (一) 產生 SSW 每年度最大的行星波皆集中分佈於前年 12 月至當年 2 月 (約-30~60 天)。
- (二) SSW 的主要暖化事件在 2000 年以前約呈現 2~3 年為一次,但 2000 年起至 2010 年,視為主要暖化緯向平均風場反轉,打破以往每 2~3 年發生一次主要暖化的往例,顯示近年來主要暖化發生的頻率增加。
- (三) SSW 期間行星波出現時,在平流層波峰皆位於歐亞大陸地區,而波谷都出現在北美區域,因此我們認為海陸分佈的不同對行星波的大小及地理分佈具有影響。
- (四) SSW 現象發生時,我們發現對於對流層上層及陸地有一定影響程度,在 10mb SSW 高峰日後約五天時間,對流層上層與極區陸地皆出現增溫現象,而此時中低緯度地面則會有劇烈寒害之發生。
- (五) 平流層 SSW 高峰日後 6~9 天,臺灣在氣溫上將會有近 10 度不等的降溫情況發生,且持續數天。

二、應用

從研究中我們發現 SSW 增溫現象自平流層開始,導致對流層下層及極區陸地增溫而中低緯度地區氣溫下降的現象,會有 5~7 天的傳遞期間。結合本研究的結論,若未來利用即時觀測的方法,便可預測對流層下層及陸地的極區增溫與中低緯度地區將會較為寒冷的情況,先預防寒害造成中低緯度地區的農作物的受損並先行做好防護措施,將各種災害的損失降到最低。

陸、未來展望

此次研究深入分析 SSW 現象自 1991 年至今的變化，我們將 NCEP 2006 年以後的數據與我國學界所發展的福衛三號觀測數據相互比對，其結果差異性並不大。現階段國家太空中心(NSPO)與美國國家海洋暨大氣總署(NOAA)合作之計畫--福衛七號氣象衛星星系，其衛星部署兼顧全球與台灣的資料涵蓋面，將提供比福衛三號多 5 倍的全球氣象觀測資料並且加強中低緯度地區資料的觀測，不僅在全球模式預測的準確度上將有更大的貢獻外，在未來也可大幅提升氣象預報準確度。

柒、參考文獻

- 一、林佳廷 2012 成功大學碩士論文 平流層瞬間暖化對低緯度電離層之影響,30、31
- 二、Matsuno, T. (1971), A dynamical model of the stratospheric sudden warming, *J. Atmos. Sci.*, 28, 1479 - 1494.
- 三、McInturff, R. (1978), Stratospheric warmings: Synoptic, dynamic and general-circulation aspects, NASA Reference Publ. NASA-RP-1017, NASA, Natl. Meteorol. Cent., Washington, D. C.
- 四、Charlton, A. J., and L. M. Polvani (2007), A new look at stratospheric sudden warmings. Part I: Climatology and modeling benchmarks, *J. Clim.*, 20, 449 - 469, doi:10.1175/JCLI3996.1.

【評語】 040509

這個議題掌握了當前氣候變化研究的熱點，從國際研究機構的觀測資料，整理出北極地區在對流層與平流層間的溫度變化關係與氣流間的交互作用，並討論這些效應與中緯度之間的關聯。整個研究的深度與廣度都很好，是一個不錯並相當用心的作品。參與學生間的團隊默契及合作精神很好。

1. 科學性高，運用多項資料交叉比對，數據處理周延，解說流暢，對研究主題的基本原理掌握良好。惟行星波影響台灣的天氣結論需再檢視是否有其他天氣系統影響，並確實探討或建構影響的機制，方能釐清是否確實由行星波造成。
2. 選題是個氣候上的重要議題，使用的資料是國際上通用的大型資料庫。資料分析充分，考慮亦稱全面。而所需的背景知識要求較高，所以需要再加強。