# 2014 年臺灣國際科學展覽會 優勝作品專輯

- 作品编號 170005
- 参展科別 地球與行星科學
- 作品名稱 平流層瞬時暖化與北極震盪之長期關係
- 得獎獎項 大會獎:三等獎

候補作品:1

- 就讀學校 國立嘉義高級工業職業學校
- 指導教師 張敦程、吕明欣
- 作者姓名 蔡明叡、劉長生

關鍵字 行星波、平流層瞬時暖化、北極震盪

作者簡介



我是劉長生(左),我來自於嘉義高工 電子科,「科學的探討,就如同偃仰一般」。從國小開始,參加無數的科學競賽,使我漸漸地愛上科學,或許每個人對於 熱情的發揮有所不同,但科學的探討卻是我熱情所在。近年來氣候變化的加劇, 是我與我的夥伴決定研究地球科學這門學問最大的主因,就這樣我和夥伴秉持著 一個專業是物理、一個專業是化學,物理加上化學就是大氣的理念,一路走到了 現在,進入國際科展的殿堂。希望能繼續探索關於地球科學這個領域,追求卓越、 實踐理想。

我是蔡明叡(右),現在就讀嘉義高工 化工科三年級,這次的研究真的與我就 讀的科系有著天差地遠,這一年多來的研究的確艱辛,一方面要處理二十多年的 研究數據,也要兼顧自己化學的專業科目。其實,這算是我從小熱愛大氣的緣故 吧!挫折,是這兩年間常常遇到的,但我一再秉持「面對 100 次的失敗,還是要以 微笑與熱情去面對第 101 次的成敗」的原則,遇到挫折重新站起來,重新面對一切 的挑戰。掌握科技新趨勢,發現科學新鮮事,科學的探討,創新的研究,使我們 更加了解我們的生活周遭的一切事務,也期許在未來的期間,能繼續探究大氣的 領域。

i

## 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「北極震盪(AO)」的相關性。在此次研究利用 NCEP/NCAR Reanalysis 資料,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,我們發現 SSW 對於對流層及地面皆有一定影響程度, 從垂直風場的分析中發現 SSW 高峰日後,北美地區東岸垂直氣流連續一週皆呈 現向下,導致溫度因為絕熱壓縮而增加,而地面的緯流指數(Zonal Index)也在此 時呈現下降趨勢,表示此時緯向環流的強度正在減弱(即為北極震盪負相位),最 後將出現極區氣溫上升、中低緯度氣溫下降的現象。

## Abstract

In recent years, humanity has faced unprecedented challenges due to climate change. Using long-term observations, we explore the effects of Stratospheric Sudden Warmings (SSWs) on the atmosphere, as well as the relation between SSWs and the Arctic Oscillation (AO). Examining atmospheric variables during SSW time periods using NCEP/NCAR Reanalysis data from 1991-2010, we find that mean zonal wind reversals occur during SSWs for all years between 2000-2010, denoting the occurrence of a major warming. Since major warmings were previously known to occur only once every 2-3 years, this indicates an increase in major warming frequency in recent years. Finally, we find that SSWs can affect the upper troposphere and regions near the surface to a certain degree, with downward vertical winds appearing over eastern North America for one week following the occurrence of an SSW. The zonal index near the surface also shows a decreasing trend during this time, indicating weaker zonal winds surrounding the polar region (the negative phase of the Arctic oscillation), causing an increase in high latitude temperatures and a decrease in middle and low latitude temperatures.

# 壹、 前言

#### 一、研究動機

在今天,生活於地球的人類面臨了最大的問題-氣候異常。不同時間與空間 因素下,影響氣候變化的機制各有所不同,許多機制的影響大小尚待釐清,更有 基者還有許多機制仍混沌不明。在科技日新月異下,新的觀測資料與模式中,我 們發現地球其實是處於多重、複雜的穩定狀態,經常被環境中不規則的震盪或新 加入的變數所影響,而進入到另一個平衡狀態。

這次會一腳踏入這個研究主題,其實出自於意外與我們的好奇心;2010年12 月氣象預報中心主任<u>鄭明典</u>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,自從去年北極震盪指數創下極端負值之後,到了11月底, 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1)。」



圖 1 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。

在這近三年的研究過程中,經過分析溫度及氣壓的數據後發現北極震盪與 SSW 有極大的關聯性,當 SSW 發生時,就溫度方面在北極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,兩者皆產生了「類似負北極震盪」 的現象,導致原本的冷空氣由高緯度往低緯度推及由高空往低空推,其影響範圍 也與負北極震盪發生時相似,將會造成中低緯度在該年冬天較以往寒冷。

二、研究簡介

#### (一)大氣層結構

在中性大氣的分層中,一般是以溫度隨高度改變,將大氣層大致分為對流層 (Troposphere)、平流層 (Stratosphere)、中氣層 (Mesosphere)及增溫層 (Thermosphere)分述如下(圖 2):



圖 2 典型中性大氣溫度對高度之變化 [University of Maryland, 2010]

#### 1. 對流層(Troposphere):

對流層之厚度,平均約12公里,夏季常較冬季為厚,低緯度地區亦常厚於高 緯度地區,赤道附近對流層厚約18公里,兩極附近厚僅8至9公里。對流層內氣 溫通常隨高度增高而下降,平均每增高1公里,約降低攝氏 6.5度。對流層內, 空氣較不穩定,上下對流頗盛,其中包括北極震盪等現象。而大氣中之水氣,幾 乎全部存於此層內,故雲、霧、雨、雪等常見之天氣現象,均限於此對流層中, 且多發生於此層之下部。

#### 2. 平流層(Stratosphere):

位於對流層的上方,其溫度上熱下冷,隨著高度的增加,與對流層呈現相反。 在此區大氣主要以水平方向流動, 垂直方向上的運動較弱,因此氣流平穩。由於 含有大量臭氧,平流層的上半部分能吸收大量的紫外線,導致氣溫隨高度上升, 因此此層也被稱為臭氧層。

另外在極地地區的平流層,冬季盛行強大的極地渦漩(polar vortex)由西向東 吹拂,這種環流主控著極區上空,阻止極地大氣與中低緯度的大氣交換,使冬季 平流層能夠維持極低的溫度。而在北半球的冬季,平流層瞬時暖化經常發生,這 是因為平流層吸收了行星波動能量所導致的現象之一。

#### (二)北極震盪(Arctic Oscillation)

所謂的北極震盪(Arctic Oscillation,簡稱 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(AO)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旋,在正常情況下會圍著北極 圖形成一環狀的渦旋,此渦旋能將北極的冷空氣限制在北極圈的上空內,但若北 極震盪(AO)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。

北極震盪主要分為正相位與負相位(圖 3),當極區處於正相位時代表極區的氣 壓比較低,而中高緯度的氣壓比較高,此時極區上空的氣流圈能將北極的冷空氣 限制在北極圈的上空使極區冷空氣較不容易南下影響中低緯度地區的天氣,一般 稱之為「正北極震盪」;而當極區處於負相位時,代表極區的氣壓比較高,而中低 緯度的氣壓比較低,此時極區上空的氣流圈會因強度不夠等原因,而導致原本限 制於氣流圈內的冷空氣將移往中低緯度影響中低緯度地區之天氣,一般稱之為「負 北極震盪」。

現今在全球氣象上常以AO指數來說明此現象之發生。當AO指數為正值時, 如同「正北極震盪」的現象,此時靠近北極的西風噴流(風速最大的區域)一般也 會較強,天氣系統會傾向於東西向移動,極區冷空氣較不容易南下影響中低緯度 地區的天氣。但當AO指數為負值時,就如同「負北極震盪」,西風噴流也會較弱。 當西風噴流較弱時,天氣系統比較容易有南北方向的移動,此時極區的冷空氣便 會移往中低緯度地區,進而影響中低緯度的天氣情況。



圖 3 北極震盪示意圖 (左圖為正相位,右圖為負相位) [NASA, 2012]

#### (三)平流層瞬時暖化(Stratospheric Sudden Warming)

平流層在極地地區,冬季盛行強大的極地渦旋(polar vortex)由西向東吹拂, 這種環流主控著極區上空,阻止極地大氣與中低緯度的大氣交換,使冬季平流層 能夠維持極低的溫度,雖然高度與對流層 AO 不相同,但兩者之結果極為相似。

平流層瞬時暖化事件(Stratospheric Sudden Warming,簡稱 SSW)是指東半球高 緯地區(60°以上)的平流層在當年的12月至隔年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,並使極地西風減 弱甚至有時將極地西風反轉成為東風,且持續數天或數個禮拜。到現階段為止, 廣為科學家認為 SSW 的主要動力機制,是因極區海陸分布的差異,使極區的對 流層容易產生經度上的不規則體,此擾動稱為定常行星波。此定常行星波 (quasi-stationary planetary waves)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,與平流層緯向平均風場(zonal mean flow)產生交互 作用所造成的現象。

## 三、研究數據來源

在這次研究中所使用的數據,經過多次的討論後,選擇美國國家環境預測中 心(National Centers for Environmental Prediction,簡稱 NCEP)所提供各種的大氣 資料,NCEP提供的大氣資料是將真實的觀測數據放入物理模式中進行資料同化, 所謂資料同化是結合原觀測值(包含衛星測得之數據等)和數值模式所獲得的最佳 輸出,再利用數學方法製成6小時一筆的數據資料。而 NCEP 的資料,其最大特 點便是將原本全球分散的觀測數據,利用上述方法製成全球經度、緯度及高度分 佈均勻的資料點。



圖 4 NCEP/NCAR Reanalysis 使用界面

(http://www.esrl.noaa.gov/psd/data/gridded/data.ncep.reanalysis.pressure.html)

## 四、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)探討每年產生 SSW 的行星波移動方向與移動速度是否具有相似性。

(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)探討 SSW 對於對流層與各緯度的影響性。

(六)藉由分析資料進一步了解 SSW 背後的增溫機制。

## 五、研究設備與器材

(一) 個人電腦

(ニ) Google Maps

 $(\Xi)$  Microsoft word  $\cdot$  Microsoft Excel  $\cdot$  Matlab

# 貳、 研究流程與方法

一、研究流程



圖 5 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,因此為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 6 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,為 某一緯度其所有經度(0℃~360℃)數值的平均。



圖 6 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:

$$y = mx + b$$
 (m 為斜率、b 為截距) (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<sup>2</sup>數值,來檢視此趨勢線的代表性。(R<sup>2</sup>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

為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為判斷的依據。在學術上定義相關係數界於 -1~1之間,若相關係數>0視為正相關、相關係數=0視為無相關、而相 關係數<0則視為負相關。其計算公式如下:

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

[x 及 y 為樣本平均數 AVERAGE(array1) AVERAGE(array2)]

當計算出的相關係數取絕對值後,其值小於 0.3,稱為低度相關;介於 0.3~0.7,稱為中度相關;而達到 0.7~0.8,稱為高度相關;若數值達 0.8 以上時,即稱為非常高度相關。

(六) 1991~2012 年度季平均

在研究中為了找出發生 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 做為平均振幅,得到 22.19(K),將兩數據相加 後其值為 238.91(K),因此我們以 240(K)為基準,若當日最大值超過 240K 就將其視為當年度 SSW 的開始。 (七) 緯流指數(zonal index)

緯流指數亦稱西風指數,是表示平均地轉風速的西風分量的一個指標, 可定量表示緯向環流的強弱。此次研究將75°與60°N兩個緯向平均風相 減所得平均地轉西風定義為緯流指數。利用其計算方法,能作為極區冷 空氣是否向中低緯度擴散之依據。

(八) 垂直風場(Vertical Velocity)

垂直風場分析是本研究探討機制上重要的一個環節,為了能有完整分析 1991~2012年長期的垂直風場且準確的數據,我們選用了 NCEP Reanalysis Vertical Velocity 的參數,在研究中利用垂直風場中,能判斷各 層高度之氣流垂直間的變化。

# 參、 研究過程與結果

## 一、SSW 發生期間與正常期間之比較

在這次研究的初期,為了更加了解 SSW 發生期間與未發生期間大氣溫度在 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 7-1~7-7)來方便觀察與比較。



圖 7-1 全球氣溫圖(10mb) 2008.Dec01~2009.Jan15 [SSW 發生前]平均



圖 7-2 全球氣溫圖(10mb) 2009.Jan16~Feb06 [SSW 發生期間]平均





圖 7-5 全球氣溫圖(10mb) 2009.Mar01~May31 [2009 年北半球春季]平均

圖 7-6 全球氣溫圖(10mb) 2009.Jun01~Aug31 [2009 年北半球夏季]平均



圖 7-7 全球氣溫圖(10mb) 2009.Aug01~Oct30 [2009 年北半球秋季]平均

在北半球冬季 SSW 尚未發生前(如圖 7-1),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,故從圖中可以看出南半球之氣溫明 顯高於北半球,越往南極極區氣溫越高呈現紅色;而北半球也因為處於冬季所以 氣溫較低,越往北極極區氣溫越低呈現藍色。隨著太陽直射赤道,在每年三月期 間北半球由冬季轉為春季(圖 7-5),南半球則從夏季轉為秋季,而此現象會一直持 續到大約每年五月底;而每年八至九月北半球由夏季轉為秋季,而此現象會一直持 續到大約每年五月底;而每年八至九月北半球由夏季轉為秋季(圖 7-7),南半球則 從冬季轉為春季,故上述的兩個期間赤道氣溫會較南北半球及其他地區來的高, 從圖 7-5 及圖 7-7 中便可觀察此一現象。到六月開始,太陽會直射北半球,故北 半球地區會轉為夏季,而南半球則進入了冬季,如圖 7-6 北半球極區氣溫明顯高 於其他地區,且正與圖 7-1 呈現相反的情況,也說明了兩者因季節的不同與太陽 照射角度的不同,使得氣溫在分布上呈現相反情況。 按照上述所言,北半球在冬季期間氣溫的分布應該是越往南極極區氣溫越高, 而越往北極極區氣溫越低。但在 SSW 發生期間可以明顯發現到氣溫的反轉,從 圖 7-2 中可以看出與圖 7-1 在北緯 30°以北的地區有著明顯的差異,原本氣溫應該 較南極極區與赤道低的北半球中低緯度以北區域,在 2009.01.16~02.06 這段 SSW 發生期間,氣溫瞬間上升,使發生期間的極區平均氣溫較赤道來的更高。而每年 SSW 的高峰日,其氣溫發生反轉現象是當次發生期最為明顯的一天,從圖 7-3 中 可以看出當 SSW 達到最大時,北半球的極區溫度甚至超過於南半球極區,此一 現象即為此次研究的主角--平流層瞬時暖化。

在 SSW 發生過後,我們以二月底作為北半球冬季與春季的劃分,將 SSW 發 生後,趨於穩定的二月剩餘天數(2009.02.17~02.28)來平均作圖,從圖 7-4 中可看 出全球氣溫回到正常的分布現象,但受到地球自轉使太陽照射角度隨時間慢慢向 赤道移動,故在南極極區的氣溫較原本南半球夏天有些許降低,而北半球的氣溫 則有些許的提高。

### 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 8,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 9、圖 10)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。

13



圖 8 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 9 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 10 2009.01.22 北緯 30°~90°各緯度緯向平均圖(10mb,緯度間隔為 2.5°N)

利用 SSW 發生的第一天(圖 9)與 SSW 最高峰當日(圖 10)這兩張圖中可以看出 在 2008~2009 年此次的 SSW 期間,剛開始發展時氣溫的分布呈現中低緯度高於 高緯度地區,而到了高峰日,溫度則出現反轉現象。從趨勢線來看,原本的平流 層在尚未受到行星波傳遞增溫時,其趨勢線應為「由左至右向上移動」;而在高峰 日當日趨勢線有了明顯的改變,從原先的「由左至右向上移動」轉變成「由左至 右向下移動」,我們認為此現象的發生,應該是 SSW 行星波從對流層剛出現時由 於行星波起始點位於中低緯度,因此增溫現象並不明顯,但到了最高峰日前一兩 天因行星波向北移動及擴散,使極區的增溫現象明顯增大,造成溫度反轉現象的 出現。

## 三、SSW 高峰日之日期分佈

首先,在此階段的研究,為了深入探討 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 視為 每年 SSW 期間的開始,直到的行星波中心點低於 240K 為結束日。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 來說明觀察所 得的分佈情況。表中的換算天數,我們以發生年份較大的那一年其 1 月 1 日視為 第 1 天、1 月 2 日視為第 2 天,以此類推,而較小年的 12 月 31 日視為第 0 天、 12 月 30 日視為第-1 天,並以此類推。(例如年份為 1991~1992,其 1992.01.11 的 換算天數為第 11 天,若是 1991.12.27 則換算天數為第-4 天)

		Day of Peak	Temperatures	Type (1 = displacement,		
Winter	SSW Period	Calendar	Day Index			
		Day	(1 = 1 Jan)	2 = splitting $)$		
1991 - 1992	1992.01.09 -	1992.01.11	11	1		
	1992.01.23	1772.01.11	11	-		
1992 – 1993	1993.01.26 -	1993.02.01	32	1		
	1993.02.05			_		
1993 – 1994	1993.12.24 -	1993.12.27	-04	1		
	1994.01.04					
1994 – 1995	1994.12.26 -	1994.12.31	00	1		
	1995.01.07					
1995 – 1996	1990.01.17 -	1996.01.19	19	1		
	1996 12 17 -					
1996 – 1997	1996.12.26	1996.12.21	-10	1		
	1998.01.27 -	1000.00				
1997 – 1998	1998.02.11	1998.02.01	32	1		
1009 1000	1998.12.07 -	1009 10 10	10	1		
1998 – 1999	1998.12.19	1998.12.12	-19	1		
1000 2000	2000.02.06 -	2000 02 07	20	1		
1999 – 2000	2000.02.10	2000.02.07	50	1		
2000 - 2001	2000.12.01 -	2000 12 07	-24	1		
	2000.12.15	2000.12.07	21	Ĩ		
2001 - 2002	2001.12.14 -	2001.12.18	-13	1		
	2002.01.02					
2002 - 2003	2002.12.22 - 2003.01.05	2002.12.28	-03	1		
	2003.01.05					
2003 - 2004	2003.12.28	2003.12.16	-15	1		
	2005.02.17 -	2005.02.10	10	1		
2004 - 2005	2005.02.27	2005.02.19	40	I		
2005 2006	2006.01.01 -	2006 01 00	00	1		
2003 - 2000	2006.01.14	2000.01.09	09	1		
2006 - 2007	2006.12.29 -	2006.12.30	-01	1		
2000 2007	2007.01.07	2000.12.20		-		
2007 - 2008	2008.01.18 -	2008.01.23	23	1		
	2008.01.28					
2008 - 2009	2009.01.16 -	2009.01.22	22	2		
	2009.02.03					
2009 - 2010	2010.01.19 - 2010.02.07	2010.01.25	25	1		
	2010.12.29 -					
2010 - 2011	2011.01.12	2011.01.04	04	1		
2011 2012	2011.12.23 -	0011 10 05	0.5	1		
2011 - 2012	2012.01.05	2011.12.25	-06	1		

表 1 1991-2012 最大 SSW 發生日期統整表 (10mb)

四、每年最大 SSW 演變過程(1991~2012)

在第三點中提到了各年行星波的始末期間,為了能清楚了解每年度 SSW 產 生的行星波隨時間改變的過程,我們利用 NCEP 畫出圖 11-1~圖 11-21,以由上往 下、由左至右,來呈現每年度行星波的成長及改變(圖中範圍:30°N~90°N、北 半球經度±180°)



圖 11-1 1991~1992 最大 SSW 行星波隨時間變化氣溫圖(10mb)



圖 11-2 1992~1993 最大 SSW 行星波隨時間變化氣溫圖(10mb)



圖 11-3 1993~1994 最大 SSW 行星波隨時間變化氣溫圖(10mb)



圖 11-4 1994~1995 最大 SSW 行星波隨時間變化氣溫圖(10mb)

234.3

(單位:K)



圖 11-5 1995~1996 最大 SSW 行星波隨時間變化氣溫圖(10mb)



圖 11-6 1996~1997 最大 SSW 行星波隨時間變化氣溫圖(10mb)

01/26	02/02	
01/27	02/03	
01/28	02/04	02/09
01/29	02/05	02/10
01/30	02/06	02/11
01/31	02/07	02/12
02/01	02/08	02/13

圖 11-7 1997~1998 最大 SSW 行星波隨時間變化氣溫圖(10mb)



圖 11-8 1998~1999 最大 SSW 行星波隨時間變化氣溫圖(10mb)



圖 11-9 1999~2000 最大 SSW 行星波隨時間變化氣溫圖(10mb)



圖 11-10 2000~2001 最大 SSW 行星波隨時間變化氣溫圖(10mb)



圖 11-11 2001~2002 最大 SSW 行星波隨時間變化氣溫圖(10mb)



圖 11-12 2002~2003 最大 SSW 行星波隨時間變化氣溫圖(10mb)



圖 11-13 2003~2004 最大 SSW 行星波隨時間變化氣溫圖(10mb)

198 207.9 221.1 234.3 244.2 (單位:K)



圖 11-14 2004~2005 最大 SSW 行星波隨時間變化氣溫圖(10mb)



圖 11-15 2005~2006 最大 SSW 行星波隨時間變化氣溫圖(10mb)



圖 11-16 2006~2007 最大 SSW 行星波隨時間變化氣溫圖(10mb)





圖 11-17 2007~2008 最大 SSW 行星波隨時間變化氣溫圖(10mb)





圖 11-19 2009~2010 最大 SSW 行星波隨時間變化氣溫圖(10mb)



圖 11-20 2010~2011 最大 SSW 行星波隨時間變化氣溫圖(10mb)



圖 11-21 2011~2012 最大 SSW 行星波隨時間變化氣溫圖(10mb)

198 207.9 221.1 234.3 244.2 (單位:K)

從圖 11 中,讓我們對於 SSW 隨時間在北半球的改變有更深一層的認識。另 外,我們發現 SSW 以東西向隨時間改變其位置也會移動,但改變的幅度並不劇 烈,且在每年位移方向大概是從發源地先向東移動,直到高峰日後則又向西移動 回到當年發源地附近才消失。

## 五、每年 SSW 最大行星波振幅比較

在此次的研究中,為了討論 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,視為當年 SSW 行星波的強弱大小,整理後如表 2 與圖 12。

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

表 2 1991~2012 年各年度 SSW 振幅



圖 12 1991~2012 年 SSW 振幅趨勢圖

## 六、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,繪出圖 13。從圖 13 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 13-4 1994~1995 年冬季 U-wind 60°N 每日緯向平均(10mb)



圖 13-5 1995~1996 年冬季 U-wind 60°N 每日緯向平均(10mb)





圖 13-8 1998~1999 年冬季 U-wind 60°N 每日緯向平均(10mb)





圖 13-16 2006~2007 年冬季 U-wind 60°N 每日緯向平均(10mb)



圖 13-17 2007~2008 年冬季 U-wind 60°N 每日緯向平均(10mb)



圖 13-18 2008~2009 年冬季 U-wind 60°N 每日緯向平均(10mb)





## 七、SSW 行星波各年波數與波峰波谷長年分佈

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14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 3。



圖 14 1991~2012 年 SSW 首日行星波波峰波谷分佈(10mb)

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

表 3 1991~2012 年 各年度行星波波數統整

# 八、緯流指數年度分佈

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4為本次研究從1991~2012 各年高峰日後5天緯流指數數值。

Winter	Peak	+1	+2	+3	+4	+5
1991~1992	-8.90	-39.81	-23.41	-0.65	-6.32	-47.81
1992~1993	90.49	64.79	55.56	-2.15	-78.20	-62.72
1993~1994	18.36	8.55	-17.78	-44.85	-56.10	-69.88
1994~1995	21.00	-18.31	-30.70	1.22	10.93	-21.76
1995~1996	-81.82	-94.95	-90.10	-75.95	-66.59	-125.93
1996~1997	-84.34	-43.26	53.10	41.97	37.05	13.66
1997~1998	-17.71	9.24	-40.35	-67.07	-73.85	-86.42
1998~1999	32.24	22.70	-27.01	9.03	0.81	-13.63
1999~2000	10.13	-35.49	-19.94	11.33	38.03	35.74
2000~2001	-9.16	-52.57	-107.64	-118.36	-109.97	-97.03
2001~2002	21.06	18.01	38.35	36.76	69.91	73.76
2002~2003	-68.22	-71.84	-45.72	-35.25	-42.94	-42.76
2003~2004	-20.75	-20.63	-2.03	-34.22	-44.09	-5.06
2004~2005	31.48	5.24	12.73	-39.22	-44.36	5.06
2005~2006	13.74	31.08	31.38	11.12	6.07	5.24

表4 1991~2012 各年高峰日後5天 緯流指數數值

2006-2007	17.88	62.00	45.08	35.08	7 38	17 17
2000~2007	17.00	02.09	45.00	55.90	1.38	-1/.1/
2007~2008	125.13	117.63	105.21	45.01	2.88	33.52
2008~2009	-9.03	-8.53	-39.50	-47.01	-56.63	-43.33
2009~2010	74.23	144.31	76.72	-37.45	-63.35	-77.76
2010~2011	1.31	-14.83	-67.34	-45.91	-26.43	-42.03
2011~2012	50.20	53.26	51.05	15.88	-11.90	-16.54
mean	9.87	6.51	-2.02	-16.18	-24.17	-28.71

## 九、各層重力位高度相互關係性

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。



圖 15 1991~2012 各年冬季 各層重力位高度平均 (註:圖 15 的重力位高度為 60N°~90N°緯向平均值)

最後,為了佐證圖 15 各層大氣在 21 年所呈現之趨勢具有相關性,在計算相關係數後發現 10mb(平流層)與 100mb(對流層上層)兩者在各年 30°N~90°N 的緯向平均中,其相關係數高達 0.7863,為高度相關,藉此我們觀察出兩者互相影響的程度相當大;而在比較 100mb 與 1000mb(地面)後,兩者相關係數也呈現正相關的數值 0.5296,視為中度相關,會有些許差異的原因我們推測應該是受對流層的

其他擾動所影響,以至於造成其些許差異的產生。按照推論若大氣中的重力位高度有所變動,便會影響 1000mb~10mb 之間各層大氣的變動。若以溫度方面來看, 在同一高度面上其溫度上升、而氣體膨脹,重力位高度便會上升,故溫度與重力 位高度呈正比關係。由此可知當 SSW 發生時,10mb 大氣溫度增溫(氣溫上升), 重力位高度也會隨即上升。

## 十、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? 而 SSW 除了對極區範圍有影響外,其增溫影響範圍又有多廣,成了我們有興趣 探討的項目之一。首先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與影響的層面。圖 24 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 16 2009 年第 10~34 日 各層大氣每日 60°N~90°N 平均氣溫疊圖

我們從圖 16 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。

## 肆、 討論

## 一、SSW 發生集中區間

經由圖 17的研究發現,SSW 在一年之中有明顯的集中現象,都分佈於當年 12 月至隔年 2 月,但在研究這 21 次 SSW 後發現,在此三個月間並沒有集中於哪個 時間點發生,而是隨著各種條件達到滿足時,SSW 現象便會出現,不過每年 SSW 的大小就要視當年各種條件而定。



圖 17 1991~2012 各年 SSW 高峰日分佈圖

## 二、SSW 主要暖化與次要暖化

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 SSW 使極地西風反轉稱之為主 要暖化(major warming);而 SSW 若使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,繪出各年度緯向平均緯向風分佈圖(圖 13),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,打破以往每 2~3 年發生 一次主要暖化的往例。藉由下圖 18 與 19 即可更加清楚了解近年主要暖化的頻率 增加。



圖 18 1990~2001 每年冬季 60°N 緯向平均緯向風 (ū) (10mb)



圖 19 2001~2012 每年冬季 60°N 緯向平均緯向風 (ū) (10mb)

分析緯向平均緯向風於各年度發生減弱或是反轉之分佈後,我們將各年度的 緯向平均緯向風對比各年度 SSW 行星波的振幅大小,發現兩者之間並沒有直接 的影響性(如下圖 20 所示),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緯向風的反轉,則我們在圖中以黃點標示。從圖 20 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 20 1991~2012 年行星波振幅與緯向平均緯向風比較

## 三、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21),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 21 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)

## 四、各層重力位高度相互關係性

綜合分析資料與圖 15 得知,若大氣中的重力位高度有所變動,便會影響 1000mb~10mb之間各層大氣間的變動。當 SSW 現象發生時,10mb 空氣溫度上 升,導致氣體膨脹,因而重力位高度也會上升,連帶下層大氣因增溫現象,其重 力位高度也會隨之上升,從 21 年來的研究資料分析,SSW 現象的起始範圍皆在 北緯 40°~65°之間,且出現當年度最高峰的位置也不盡相同,但增溫現象皆會蔓 延至北半球極區上空,造成極區溫度的反轉,使北半球極區上空重力位高度上升 導致極地渦旋減弱與位移,極區內的冷空氣會往中低緯度移動,而中低緯度 的暖空氣也會隨之進入極區,形成類似負北極震盪之現象。

## 五、垂直風場

在研究中利用垂直風場中,能判斷各層高度之氣流垂直間的變化。為了能分析 1991~2012 年長期的垂直風場,我們選用了 NCEP Reanalysis Vertical Velocity 的參數,而 Vertical Velocity Data 為表示在某一點高度上其氣垂直氣流變化速率之分佈。Vertical Velocity Data 在正值時表示,該處的垂直風場氣流向下,反之, Vertical Velocity Data 呈現負值時,表示垂直風場氣流向上。



圖 22 2008~2009 年各層重直風速高峰日後 5 天平均圖

## 六、SSW 發生機制

造成 SSW 現象發生的主要機制是由行星波(Planetary Wave)所造成。而行星 波主要是冬季海陸熱力差異,導致對流層中的波動變得十分活躍並且能夠 向上傳播,其波長尺度達到上千公里,約略可繞地球一周,是一種行星尺度的 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,因此又被稱為行星波動;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,同時因為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,而波破碎的現象使原本波的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。



圖 23 冬季平流層波向上傳遞之示意圖 (Holton, 2000)

37

## 七、SSW 對對流層及地面影響性

就前述所言,我們推論平流層瞬時暖化(SSW)會影響對流層上層及對流層下 層與陸地的氣溫,而整個影響的現象應該要區分為兩大部分。第一部分是平流層 下層及對流層上層的增溫現象,行星波因為海陸分布差異的影響而產生,隨著向 上傳遞至平流層,振幅隨著大氣密度的遞減而增加,最後造成行星波在平流層破 碎。破碎的行星波對平流層的風場產生西向加速,導致緯向風由西風反轉成東風, 而受科氏力影響致使東風向北偏轉,形成南風,最終南風在北極附近匯集碰撞, 產生向下的氣流(圖 23)。向下的氣流因為氣壓增加而增溫,並傳遞到對流層。這 會使對流層極區上空的的渦旋強度減弱,最終極區冷空氣向中低緯度擴散。

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,其參考公式如下:

$$E = \frac{1}{2}\rho V \cdot v^2 \qquad (\vec{\mathfrak{X}} \ 3)$$

(*E*:能量,ρ:密度,*V*:體積,*v*:風速)

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完全到達對流層的下層。

第二部分是對流層下層與陸地的增溫現象,因為平流層緯向平均風場與行星 波發生波破碎後,會造成原本的西風減弱或是反轉成為東風,導致平流層的 渦旋系統也會因此減弱與位移,並且從垂直風場分析中發現,在SSW高峰日 後,皆有極強的向下氣流,向下氣流會使對流層因絕熱壓縮而增溫(絕熱壓縮發生 在氣壓上升時,這時氣體溫度也會上升。壓縮體積是對氣體做功, 故氣體能量 增加也就是內能增加,因而溫度上升。)加上從前述研究所知,大氣中的重力位高 度若在10mb 改變,便會影響其他各層重力位高度的變動,也因如此,使得極區 對流層下層的渦旋系統減弱與位移,造成原本極區內的冷空氣會往中低緯 度移動,而中低緯度的暖空氣也會隨之進入極區,這也就是 SSW 現象所影響 陸地及對流層下層的成因。



從圖 24 中,我們可以清楚看到平流層受前述 SSW 現象機制之影響,在極區 發生了增溫現象。另外,在地面的緯流指數(Zonal Index)也在高峰日過後呈現下 降趨勢(圖 25),表示此時緯向環流的強度正在減弱,其原因便是極區對流層的 调旋系統在高峰日後發生的減弱與位移,造成原本極區內的冷空氣會往中 低緯度移動,極區冷空氣減少、暖空氣增加,使極區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,導致該年中低緯度區域在冬季 會較以往來的寒冷。

39



圖 25 1991~2012 各年 SSW 高峰日後 5 天 Zonal Index 平均

## 伍、 結論與應用

#### 一、結論

- (一) 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加。
- (二) 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。
- (三) SSW 發生後會產生極強的向下垂直風場,並且由中低緯度往極區方向擴 散,導致阿拉斯加與西伯利亞地區皆有高壓增強發生,造成極區渦旋減 弱,而導致北極震盪負相位產生。
- (四)在研究中發現 SSW 與 AO 兩者現象在長期間的相互關係,為 SSW 現象 會以強烈的垂直風場去導致 AO 的發生。

#### 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

此次研究因為深入分析自 1991 年至今,SSW 現象在這 21 年間的變化,礙於 數據年度問題,故未使用 2006 年升空的福衛三號衛星之觀測數據做為研究依據, 但我們將 NCEP 2006 年以後的數據與福衛三號觀測資料相互比對,其結果差異性 並不大,因此福衛三號的即時觀測資料應可運用於往後的天氣預測與科學研究。 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區域的資料涵蓋面,並且提供 比目前福衛三號多 5 倍的全球氣象觀測資料,也加強中低緯度地區氣象資料的觀 察,不僅在全球模式預測的準確度上將有持續性之貢獻外,也可大幅提升氣象預 報準確度。本次研究所得之結論,未來如結合福衛七號星系所提供大幅增加的全 球掩星資料量,以及更多且密集的全球氣象觀測資料,相信有助於提升往後平流 層瞬時暖化與北極震盪等天氣系統有關的預報能力,對於未來防災的應用效益將 更值得期待。

# 柒、 參考文獻

- 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
- Matsuno, T. (1971), A dynamical model of the stratospheric sudden warming, J. Atmos. Sci., 28, 1479–1494.
- McInturff, R. (1978), Stratospheric warmings: Synoptic, dynamic and generalcirculation aspects, NASA Reference Publ. NASA-RP-1017, NASA, Natl. Meteorol. Cent., Washington, D. C.
- 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.
- Blunden, J., D. S. Arndt, and M. O. Baringer, Eds. (2011), State of the Climate in 2010. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 92 (6), S1-S266.
- Liu, H.-L., and R. G. Roble (2002), A study of a self-generated stratospheric sudden warming and its mesospheric–lower thermospheric impacts using the coupled TIME-GCM/CCM3, J. Geophys. Res., 107(D23), 4695.
- Holton James R. and M. Joan Alexander (2000), The Role of Waves in the Transport Circulation of the Middle Atmosphere, GEOPHYSICAL MONOGRAPH SERIES, VOL. 123, PP. 21-35.

# 評語

對近二十年來平流層急劇增溫之現象有深入之探討,特別是對此現象與最近 相當引起注意之北極震盪間的可能關連,進行前瞻之嘗試分析,有許多值得再進 一步研究之發現。