

2022 年臺灣國際科學展覽會 優勝作品專輯

- 作品編號** 180012
- 參展科別** 地球與環境科學
- 作品名稱** 平流層極地渦旋及北極震盪與區域極端寒冷事件之關係
- 得獎獎項** 一等獎
美國ISEF正選代表
- 就讀學校** 高雄市立高雄高級中學
- 指導教師** 吳嘉鴻、盧孟明
- 作者姓名** 王律衡、楊博愷
- 關鍵詞** 極地渦旋，北極震盪，極端寒冷天氣

作者簡介



我是來自高雄中學的王律衡(右)，從國中開始在網路上注意到有關極地渦旋的相關事例，一直很好奇這其中更加深入成因，有這個機會在高中三年跟老師一起深入研究此議題非常高興，而過程中我們也學習到很多普通高中不會教的事情，例如資料處理的方法、較深入的大氣科學，雖然中間阻礙不少，但看著成果一步步的呈現出來更加促使我前進，希望未來有機會能夠繼續將這項研究做得更加深入。

我是來自高雄中學的楊博愷(左)，從高中一年級就開始跟隨著老師進行有關極地渦旋和北極震盪的相關研究。在專題研究的過程中，我學習到了各種資料處理的方法，更深入的了解大氣科學的奧妙，雖然其中遭遇了各種困難，也必須兼顧課業和研究，不過一點一滴的研究成果更成為我想堅持下去的動力。這一次很榮幸能參與國際科學展覽，期許未來能繼續揭開大氣科學神秘的面紗。

摘要

本研究使用 NOAA NECP Reanalysis Data 2000 年~2020 年冬季之緯向風、重力位高度場及其距平變化，探討北極震盪指數(AOI)、極地渦旋對北半球區域極端寒冷事件之關係。AOI 與對流層 300hPa 北緯 50~65 度緯向平均之緯向風速變動關係較顯著，而與平流層(50hPa)極地渦旋的緯向風速變動僅呈現中度正相關。在太平洋區中，極端寒冷事件發生在 AO 負相位的比例最高，不過，極端寒冷事件不必然僅發生在 AO 負相位的大氣條件下，而是與極區的重力位高度場變動有關，且可能發生延遲影響。當極區平流層(50hPa~100hPa)或極區對流層(300hPa~500hPa)的週平均重力位高度距平值明顯上升，代表極地渦旋發生變化，大多有伴隨有極端寒冷事件的出現，即使處於 AO 正相位的情況亦然，本文對於區域極端寒冷天氣事件之重力位高度場特徵做歸納與說明。

Abstract

Despite global warming, many regions in the northern hemisphere have been affected by extreme cold in winter in recent years, including Taiwan. Whenever there is a cold event, there is always mention about the negative Arctic Oscillation and the polar vortex. We are very curious whether extreme cold weather will occur during the negative Arctic Oscillation? And how are the atmospheric conditions with extreme cold weather?

In this research, we tried to figure out the correlation coefficient of the polar vortex in the stratosphere and the polar jet in the troposphere both between the Arctic Oscillation Index. And then attempting to explore the relationship between the regional extreme cold weather and the Arctic oscillation, and to explore the characteristics of the polar region geopotential height when the regional extreme cold event occurs.

壹、研究動機

2020 年底，許多媒體大幅報導了有關負北極震盪和極地渦旋的新聞，中央氣象局也預報「台灣將經歷 40 年來最冷的跨年夜」，報導說此波寒潮強度直逼 2016 年的霸王寒流，結果真的冷得令人直打哆嗦。當時 2016 年發生在臺灣的霸王寒流，我們還是小學生，不清楚發生寒流的原因，只記得連高雄都出現 10°C 以下的低溫，在回顧文獻時才知道那次寒流也與負北極震盪相關，因此我們十分好奇是不是極端寒冷天氣都會發生在負北極震盪呢？以及寒風刺骨的極端寒冷天氣發生的大氣情況為何？並著手開始研究。

貳、研究目的

- 一、探討平流層極地渦旋(polar vortex)與對流層之極地噴流(polar jet)與北極震盪指數(AOI)的關係。
- 二、分析區域極端寒冷事件與北極震盪(AO)之關係。
- 三、分析發生區域極端寒冷事件時，極區(北緯 60~90 度)重力位高度場之特徵。

參、研究設備及器材

- 一、筆記型電腦
- 二、R 語言分析軟體、Excel 2016
- 三、NOAA Physical Science Laboratory NCEP/NCAR Reanalysis 資料庫

肆、研究過程及方法

二、文獻探討

北極震盪(簡稱 AO)為一種大尺度的氣候變動性的狀態，其特徵顯現在逆時鐘方向環繞北半球極區的風場變化，可分為正相位與負相位兩種情形。當 AO 正相位時，存在較強的風環繞在北半球極區周圍，並維持較冷的空氣在極區之中；而 AO 負相位時，北半球極區周圍的環繞風場變得較弱且呈現扭曲的情況，使得原來位於極區的冷空氣較易流向中緯度地區

(Arctic Oscillation, NOAA), 經常導致局部地區發生極端寒冷天氣事件(例如：2010 年中國、南韓、美國；2016 年東亞地區；2019、2021 年美國)。

例如 2021 年 2 月有個明顯的負北極震盪的痕跡(圖 1)，中央氣象局局長鄭明典先生在 facebook 分享的文章中提到，「2 月分受到很強烈負北極振盪影響，兩股極區冷空氣外流路徑上，氣溫明顯比氣候值低，出現深藍色。一股在北美洲，另一股由歐洲延伸到亞洲北部。最特殊的還是在北美這一股冷空氣，它到達的緯度非常低，部分地區因此創了低溫的歷史紀錄！」

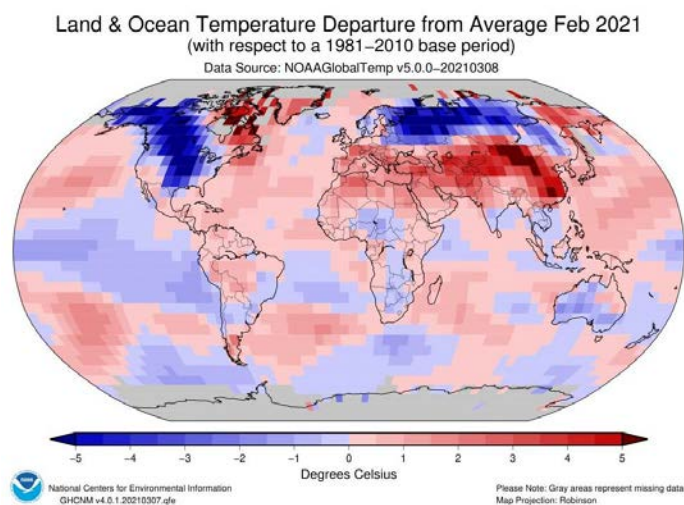


圖 1 2021 年 2 月全球陸地與海洋氣溫距平值分布圖

極地渦旋(Polar vortex)是指位於極區的低壓系統，渦旋(vortex)為逆時鐘方向的環流。當極地渦旋被提及的時候，經常令人混淆。Darryn Waugh 在 American Meteorological Society 撰文說明因為大氣層中實際上存在兩個極地渦旋(Darryn Waugh et al. 2017)，其中之一存在於冬季極區平流層中，另一個存在於對流層中，如圖 2 所示。

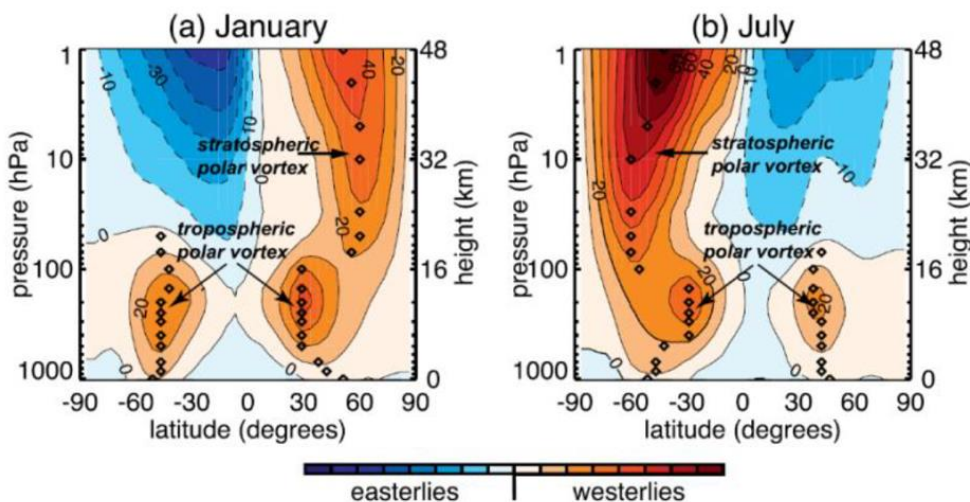


圖 2 平流層與對流層之極地渦旋分布位置(摘自 Darryn Waugh et al. 2017)

另一方面，Rebecca Lindsey(2021)指出北極極地渦旋是形成於北半球冬季平流層(高度約在 10 至 30 英里)之中，呈現帶狀且強勁的西風氣流。若極地渦旋穩定(stable polar vortex)則風速強，將使其中的空氣變得越冷。當極地渦旋減弱、偏移或分裂時(disrupted polar vortex)，此動盪經常造成位於其位置之下的極地噴流(polar jet stream)的變化，將極地噴流移向更南方、更波折，並導致極區寒冷空氣潰流向中緯度地區。如圖 3 所示 NOAA 平流層專家 Amy Butler 說明，極地渦旋(polar vortex)與極地噴流(polar jet stream)位於大氣圈不同的分層之中，極地噴流發生在對流層(高度約在 5 至 9 英里)之中，極地噴流在冬季天氣中扮演了一個重要的角色。

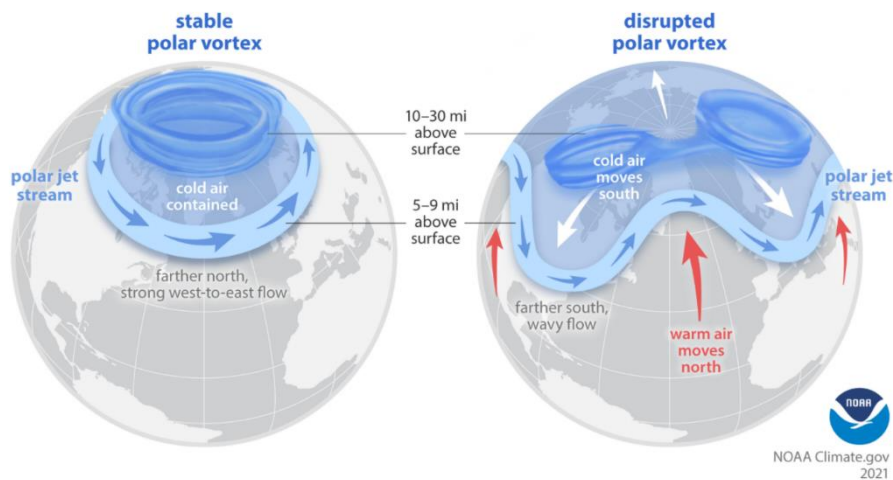


圖 3 穩定(stable)或分裂(disrupted)的極地渦旋伴隨之極地噴流之狀態

針對極地渦旋變動所伴隨的影響，Martius et al.(2009)研究結果指出，若極地渦旋發生偏離極區的情形，其伴隨北大西洋東側出現阻塞狀態；若極地渦旋發生分裂的情況，其伴隨北太平洋東側出現阻塞狀態或北太平洋東側與北大西洋同時出現阻塞狀態。以 2018 年 2 月至 3 月期間所發生的極端寒冷天氣與極地渦旋作案例分析，Overland et al(2020)提到極端寒冷天氣發生時大氣環流場的兩種型態，第一種型態發生在 2 月中與 3 月底，平流層極地渦旋的位置從極區偏離向南方較低緯度處，2 月中偏向於北美洲、3 月底偏向於西伯利亞北部，並且形成大氣環流的重力位高度場分布具有近似垂直的結構，而這些位於北美洲及歐亞大陸的大氣結構

場，驅使北極空氣向南平流。第二種型態發生在 2018 年 2 月 17 日，平流層極地渦旋減弱且出現平流層瞬時增暖的情形。

二、研究方法

本研究中之月平均北極震盪指數(AOI)來自 NOAA(網址：ncdc.noaa.gov/teleconnections/ao/)，並從 NOAA Physical Science Laboratory NCEP/NCAR Reanalysis 資料庫(網格解析度為 $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$)下載 2000 年至 2020 年之氣溫、緯向風速、重力位高度等資料，以 R 語言及 Excel 進行資料演算與分析。

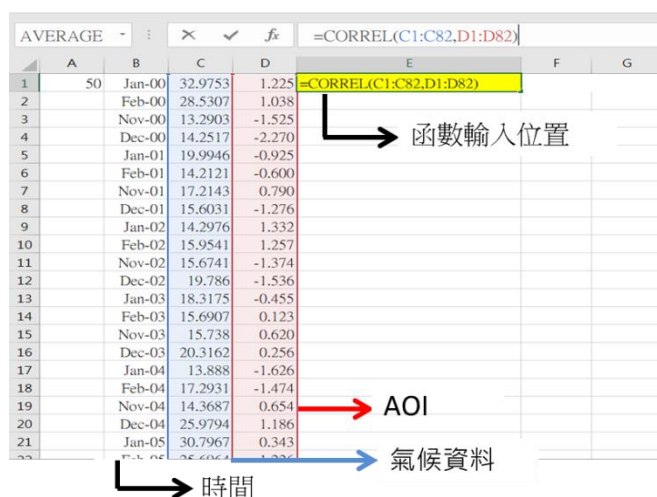
分析方法如下：

(一) 網站資料取得及轉檔流程

1. 自 NOAA Physical Sciences Laboratory 網站下載所需資料。
2. 利用 R 語言指令匯入 nc 檔。
3. 使用預先整理好的公式，將 nc 檔轉成 csv 檔。
4. 以 Excel 開啟轉檔完成的 csv 檔，進行後續所需之數據分析。

(二) 各月氣候資料距平值與月平均 AOI 之相關係數計算

1. 利用 Excel 開啟欲分析氣候資料的 csv 檔。
2. 將該氣候資料數據依時間軸整理排序成行。
3. 距平值的計算以 2000 ~2020 年的相同月份平均值為基準。
4. 月平均 AOI 按照對應各月資料距平值的時間，同樣排序成行。
5. 輸入函數=CORREL，使用 Excel 計算出兩者相關係數。



(三) 週平均氣溫計算與極端寒冷天氣事件之訂定

1. 自 NOAA NCEP/NCAR Reanalysis 資料庫下載西元 2000 年~2020 年中每年自 11 月 1 日起的 119 天，北緯 40 度至 50 度區間的日均溫資料。
2. 使用 R 語言將 nc 檔轉成 csv 檔。
3. 將每個冬季(11 月至隔年 2 月)共 119 天，分為 17 週次，再將該 17 週次劃分至自訂的四個期間，分配方式如下表 A 所示。

週次	1-4(Nov)	5-8(Dec)	9-12(Jan)	13-17(Feb)
對應期間	第 1 期	第 2 期	第 3 期	第 4 期

表 A

4. 算出每個冬季 17 週次的週平均氣溫。
5. 極端寒冷天氣事件訂定為 2000 年 11 月至 2020 年 2 月之間共計 340 週次之百分等第(PR 值) 5 以下之事件。

(四) 週平均極區重力位高度之距平值計算

1. 自 NOAA NCEP/NCAR Reanalysis 資料庫下載西元 2000 年 11 月至 2019 年 2 月每年自 11 月 1 日起的 119 天，北緯 60 到 90 度區間 1000hPa、500hPa、300hPa、100hPa、50hPa 的重力位高度的日平均資料。
2. 使用 R 語言將日資料依前述分析法(三)計算成週平均值。
3. 以 2000 年至 2019 年各週次對應之期間的平均值為基準，計算各層週平均重力

位高度之距平值。

4. 使用 R 語言繪出週平均重力位高度距平值之高度剖面圖。

伍、研究結果

一、探討北極震盪指數(月平均 AOI)與平流層及對流層緯向風之相關性

如圖 2，平流層與對流層各有一個強勁西風軸心區的存在，我們想了解哪一個才是主要代表北極震盪現象所述的環繞極區氣流，或者兩者皆是。表 B 為我們選取平流層與對流層頂環繞極區氣流的資料範圍：

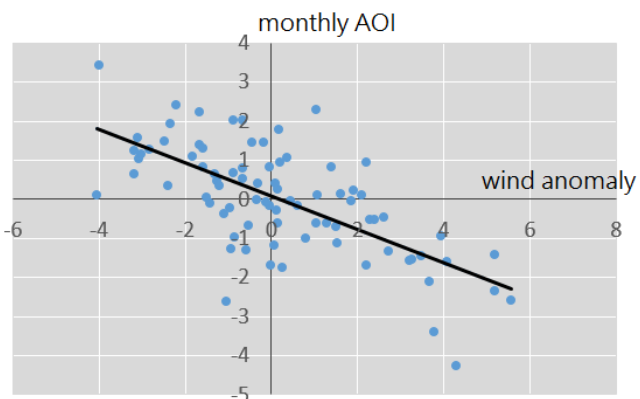
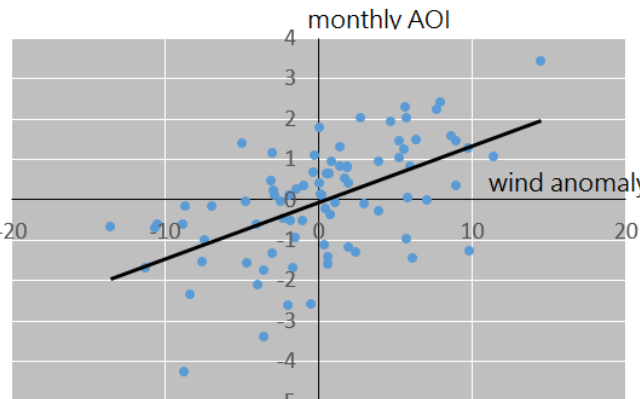
名稱	高度	位置	NCEP 資料
平流層西風軸心區	50 hPa	北緯 50 度~65 度	緯向風速
對流層頂西風軸心區	300 hPa	北緯 30 度~40 度	緯向風速

表 B

繪製其 2000 年至 2020 年冬季(十一月至隔年二月)的各月緯向平均之月平均緯向風速距平值(monthly zonal-mean zonal wind speed anomaly)與月平均 AOI 的散佈圖並計算相關係數，如表 1。結果得到月平均 AOI 與平流層西風軸心區緯向風速距平值呈現中度正相關(係數 0.57)，表示當月平均 AOI 為正值時，平流層西風軸心區緯向風速會較該月的平均值還快，反之亦然。令人意外的是，月平均 AOI 與對流層頂西風軸心區緯向風速距平值呈現高度負相關(係數-0.67)，也就是說當 AOI 為正值時，對流層頂西風軸心區緯向風速會較該月的 20 年平均值還慢，而 AOI 為負值時，反而高於該月的 20 年平均值，且其變化有相當高程度的關聯，對流層頂西風軸心區的分析結果與北極震盪所描述的環繞極區氣流變動的情況相違背。

根據前述結果，我們認為對流層頂西風軸心區並非北極震盪理論中所謂的環繞極區氣流，而平流層中的西風軸心區月平均風速的變化雖然符合北極震盪的說法，但關聯性卻不夠明顯。相對地，對流層中(300 hPa、500 hPa、1000 hPa)緯度範圍介於北緯 50 度~65 度、2000 年~2020 年冬季(十一月至隔年二月)的緯向平均之月平均緯向風速距平值與月平均 AOI 的散佈圖及相關係數(表一)，其中 1000 hPa 北緯 50 度~65 度的緯向平均之月平均緯向風速距平值與月平均 AOI 具有非常高度的正相關性(相關係數 0.95)，且符合北極震盪理論所提及之極地渦旋的變

化，當 AOI 為負值時，此緯度帶的西風強度弱於平均值，無法鎖住極區冷空氣，當冷空氣發生潰流時，將造成中緯度極端寒冷天氣事件。

300 hPa / 北緯 30~40 度 緯向平均之月平均緯向風速距平值與月平均 AOI	
散佈圖	相關係數
	- 0.67
50 hPa / 北緯 50 ~65 度 緯向平均之月平均緯向風速距平值與月平均 AOI	
散佈圖	相關係數
	0.57
300 hPa / 北緯 50 ~65 度 緯向平均之月平均緯向風速距平值與月平均 AOI	
散佈圖	相關係數
	0.88

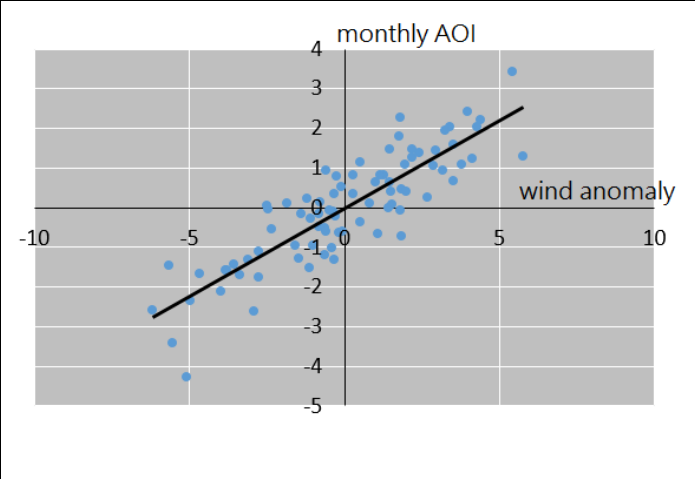
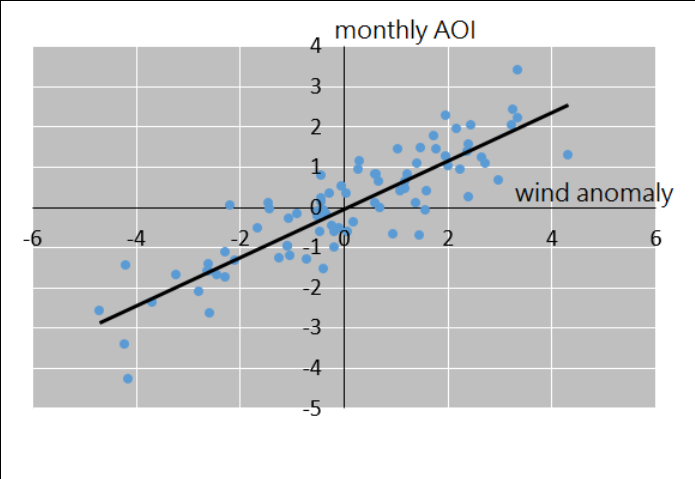
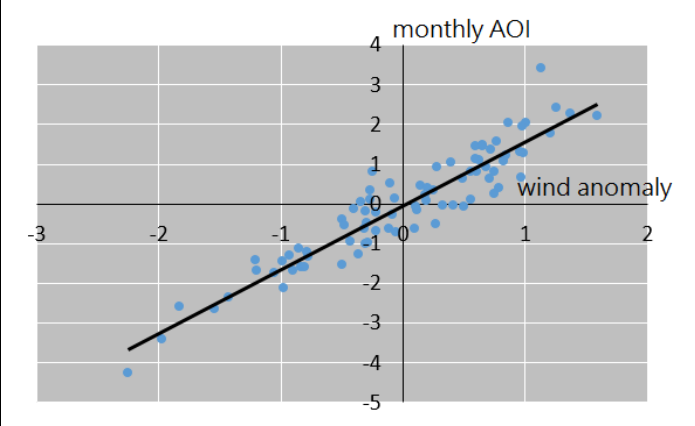
	
500 hPa / 北緯 50 ~65 度 緯向平均之月平均緯向風速距平值與月平均 AOI	
散佈圖	相關係數
	0.90
1000 hPa / 北緯 50 ~65 度 緯向平均之月平均緯向風速距平值與月平均 AOI	
散佈圖	相關係數
	0.95

表 1

2000 年~2020 年冬季(十一月至隔年二月)50hPa、300hPa、500hPa、1000hPa 之緯向平均之月平均緯向風速距平值與月平均 AOI 之散佈圖及相關係數。

二、探討極端寒冷天氣事件與北極震盪(AO)的關係

(一) 北極震盪(AO)相位變化週期分析

分析 2000 年至 2020 年每日 AOI 連續 3 天以上維持正值或負值的次數，結果顯示無論每日 AOI 為正值或負值，連續持續 3~5 天發生的次數是最多的，並隨著連續天數越長，發生的次數呈減少的趨勢，而每日 AOI 正價值之連續天數在 12~14 天有次高峰，每日 AOI 負價值之連續天數則在連續 6~8 天為次高峰，如圖 4。由此可知，北極震盪屬於一種短期的變化，通常在數天至數週之間產生改變。

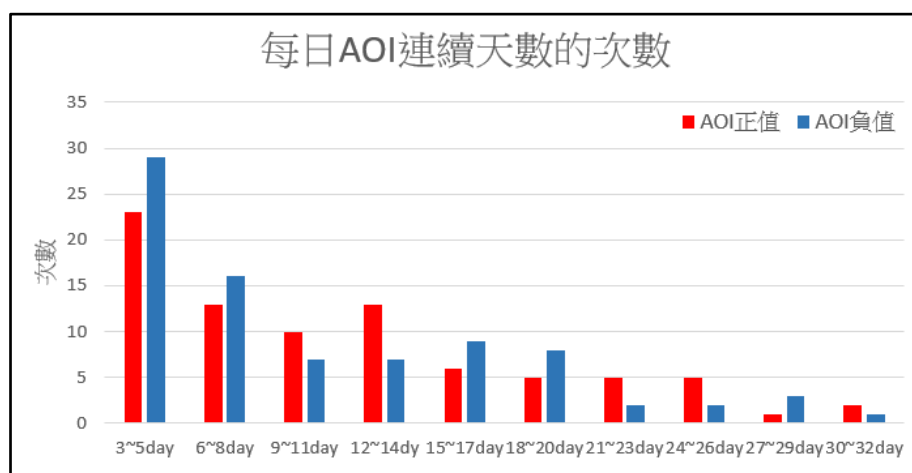


圖 4 2000 年至 2020 年每日 AOI 正值(負值)連續天數之發生次數

(二) 依週平均氣溫「PR 值」訂定寒冷天氣事件

我們採用分析方法(三)，將 2000 年~2020 年冬季(十一月至隔年二月)日均溫資料換算成週平均氣溫，每個冬季計有 17 週次，共計 340 週次，將所有冬季週平均氣溫資料做百分等級(percentage rank, PR)，依 PR 值區間訂定寒冷事件，再計算寒冷事件群在不同北極震盪相位時發生的百分比。

計算北半球中緯度(北緯 40 度~50 度)緯向平均之週平均氣溫的各種寒冷事件在北極震盪相位發生的百分比，其中寒冷程度分為「冷」(週平均氣溫 PR 值< 15)、「寒冷」(週平均氣溫 PR 值< 10)、「極端寒冷」(週平均氣溫 PR 值< 5)；北極震盪相位分為 AO 正相位(AOI>0.5)、一般(-0.5<AOI<0.5)、AO 負相位(AOI< -0.5)，其結果如圖 5。

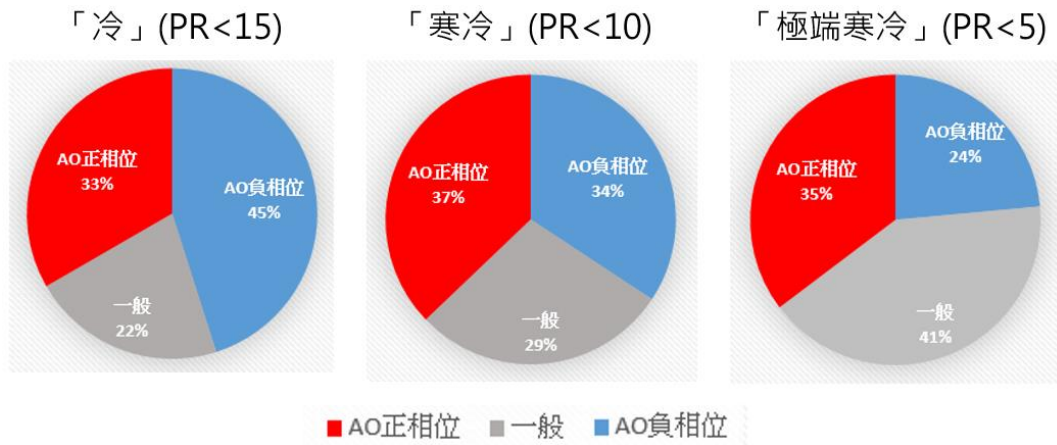


圖 5 不同程度的寒冷事件發生在北極震盪相位之百分比

由圖 5 的結果顯示出，週平均氣溫的 PR 值小於 15 的「冷」事件，有 45% 發生在 AO 負相位的情況中，而 PR 值小於 10 的「寒冷」事件則 AO 正相位、一般、AO 負相位各佔約三分之一的比例，當考慮 PR 值小於 5 的「極端寒冷」事件，則為一般的情況所佔比例最高，AO 正相位次之，發生在 AO 負相位的佔比最低，此結果與我們經常從媒體上獲知有關極端寒冷天氣事件的消息似乎不一致。

(三) 分區探討極端寒冷天氣事件與北極震盪(AO)的關係

我們將全球北緯 40~50 度的地區再依經度分為三區分別探討：歐亞大陸區(0°-120°E)、太平洋區(120°E-180°；120°W-180°)、北美及大西洋區(0°-120°W)，每個分區均各自計算其 2000 年~2020 年冬季(十一月至隔年二月)之週平均氣溫，並分別進行百分等級 (percentage rank, PR)，進一步探討各分區「極端寒冷」事件(PR<5) 在北極震盪相位發生的百分比，其結果如圖 6。

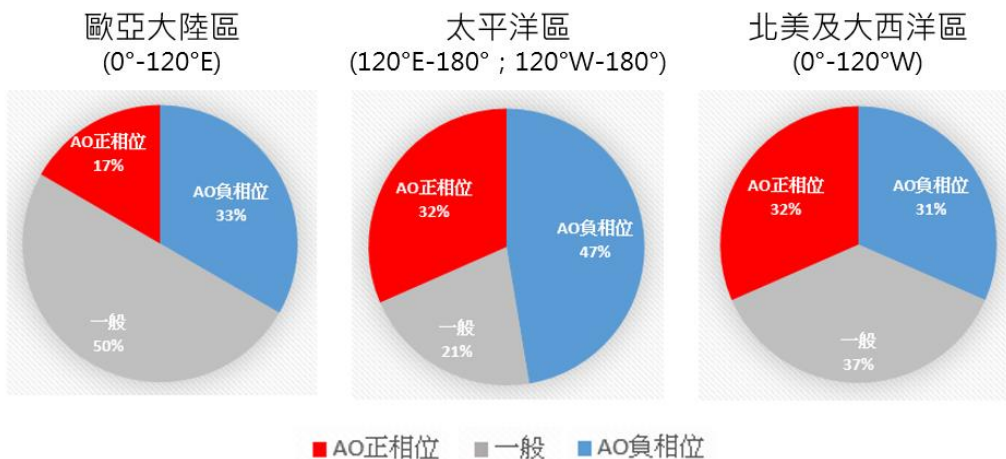


圖 6 不同區域的「極端寒冷」事件($PR < 5$)發生在北極震盪相位之百分比

由圖 6 的結果可知，歐亞大陸區及太平洋區的「極端寒冷」事件發生在 AO 負相位的比例均高於 AO 正相位的時期，另外北美及大西洋區則為 AO 正相位、一般、AO 負相位各佔約三分之一的比例。由各分區的結果可見，當北極震盪為負相位時，發生極端寒冷天氣事件的機會較高，特別是太平洋區。不過我們也注意到極端寒冷天氣事件，不必然只在北極震盪負相位時才會發生。

三、分析區域極端寒冷事件與極區重力位高度場之關係

(一) 極區重力位高度距平變動情形

為了瞭解區域極端寒冷事件與極區重力位高度場的變化是否存在關聯性，我們使用 R 語言程式繪製 2000 年至 2019 年冬季(十一月至隔年二月)極區(北緯 60~90 度)的重力位高度週平均距平之垂直剖面圖(圖 7(a) ~ (j))。

[註]距平基準為 2000 年至 2019 年各月份之週平均重力位高度平均值。區域極端寒冷天氣事件代號：EA 歐亞大陸區、PA 太平洋區、NA 北美及大西洋區。

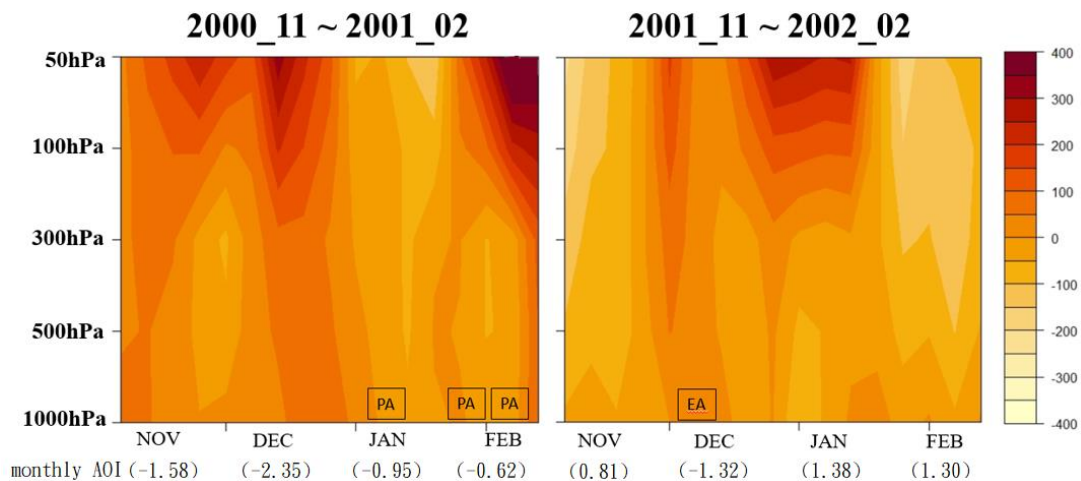


圖 7(a) 2000 與 2001 冬季(11 月至隔年 2 月) 重力位高度週平均距平剖面圖

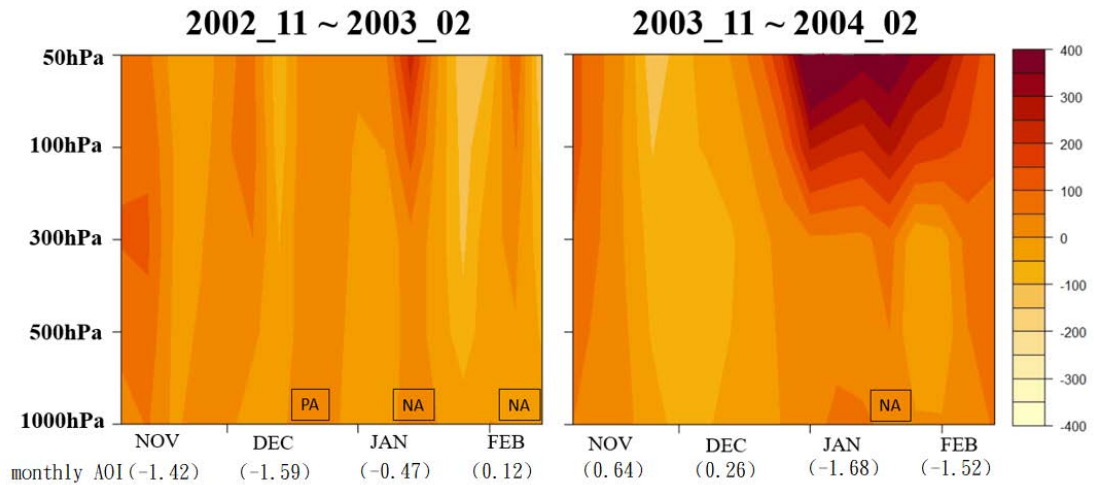


圖 7(b) 2002 與 2003 冬季(11 月至隔年 2 月) 重力位高度週平均距平剖面圖

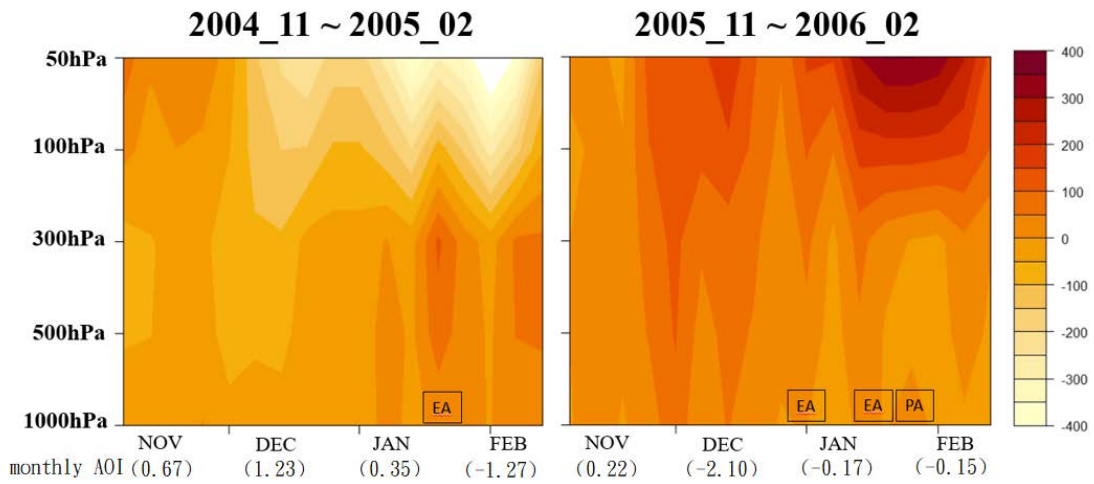


圖 7(c) 2004 與 2005 冬季(11 月至隔年 2 月) 重力位高度週平均距平剖面圖

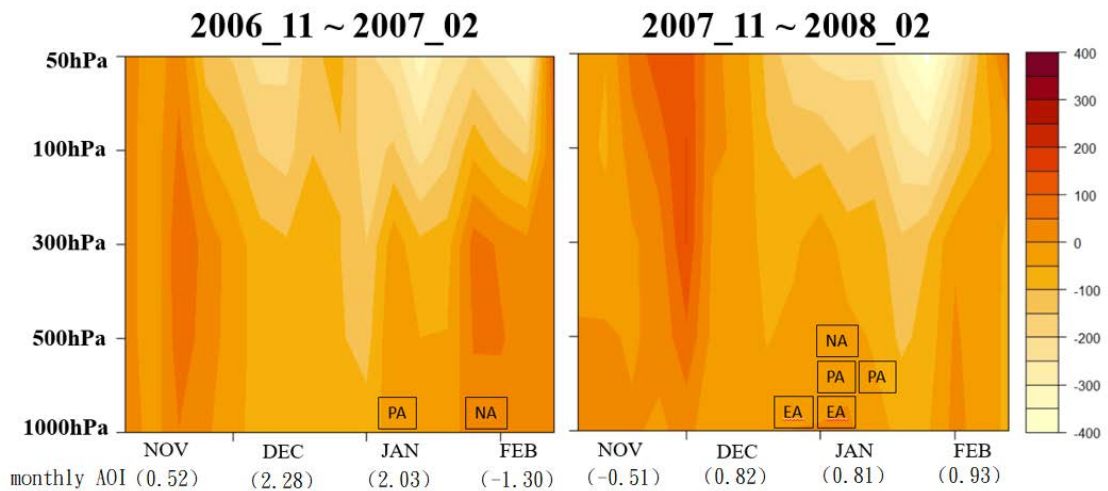


圖 7(d) 2006 與 2007 冬季(11 月至隔年 2 月) 重力位高度週平均距平剖面圖

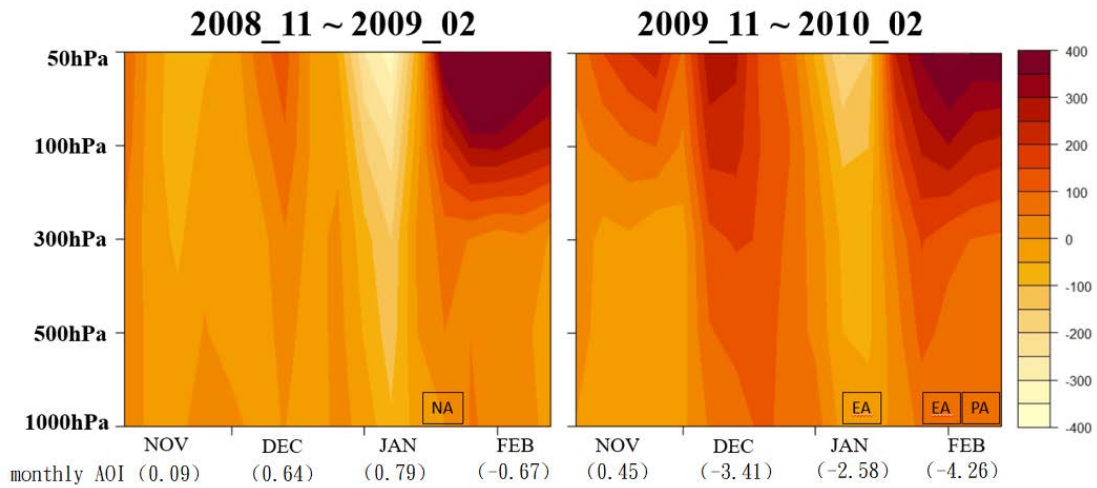


圖 7(e) 2008 與 2009 冬季(11 月至隔年 2 月) 重力位高度週平均距平剖面圖

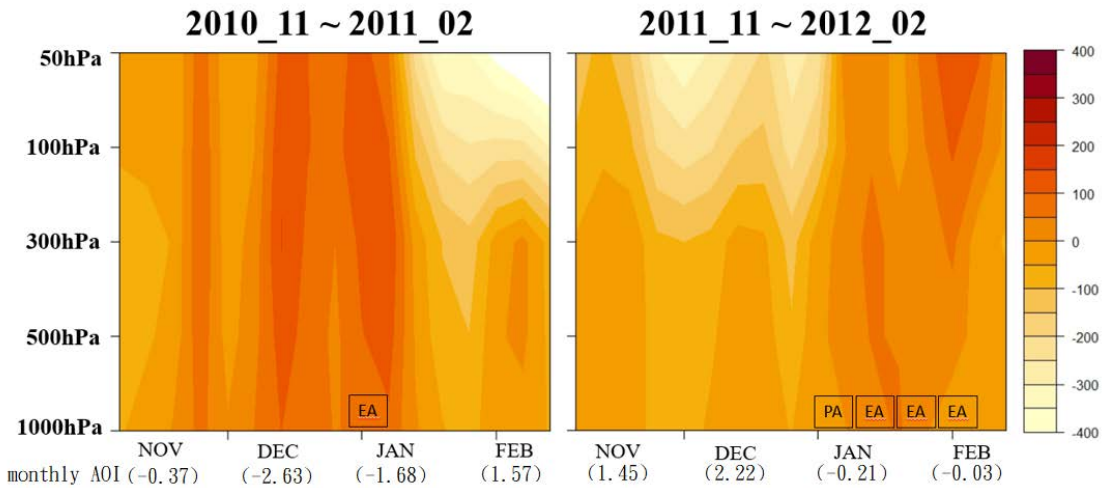


圖 7(f) 2010 與 2011 冬季(11 月至隔年 2 月) 重力位高度週平均距平剖面圖

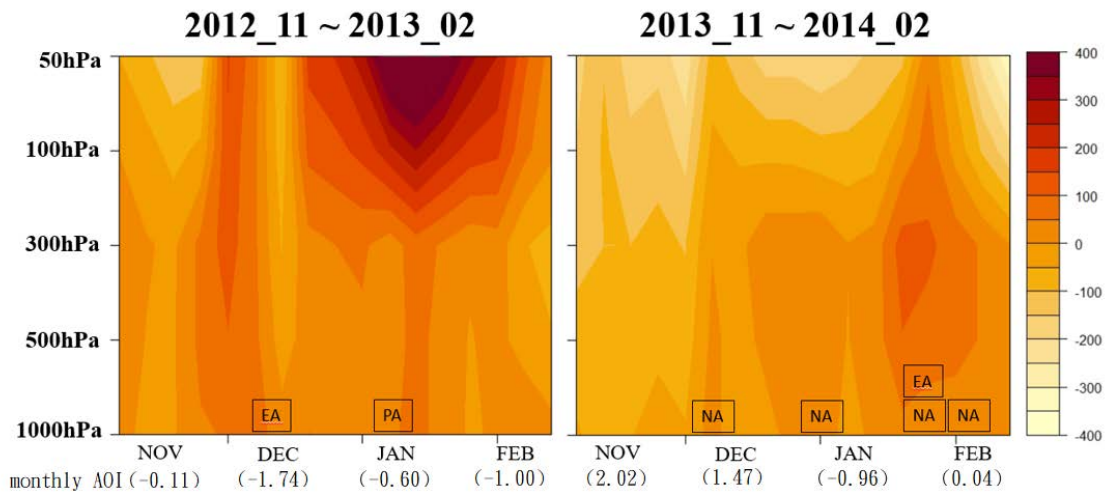


圖 7(g) 2012 與 2013 冬季(11 月至隔年 2 月) 重力位高度週平均距平剖面圖

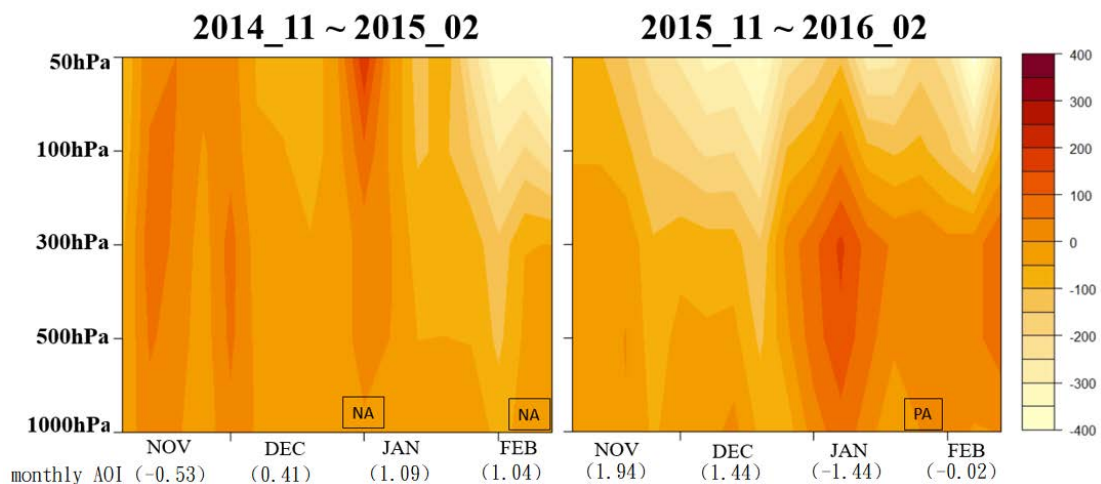


圖 7(h) 2014 與 2015 冬季(11 月至隔年 2 月) 重力位高度週平均距平剖面圖

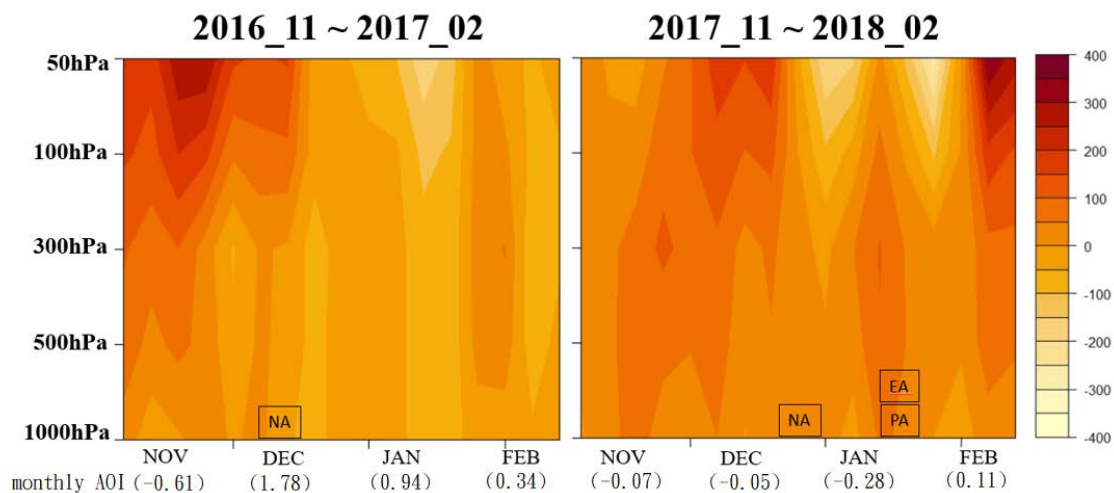


圖 7(i) 2016 與 2017 冬季(11 月至隔年 2 月) 重力位高度週平均距平剖面圖

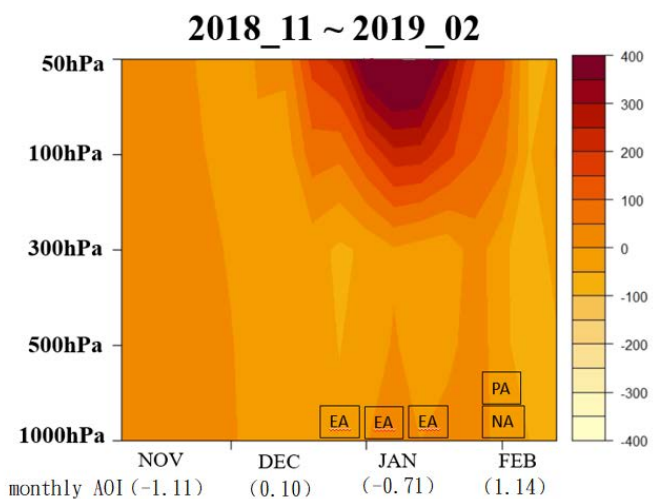


圖 7(j) 2018 冬季(11 月至隔年 2 月) 重力位高度週平均距平剖面圖

從 2000 年至 2019 年冬季極區(北緯 60~90 度)的重力位高度週平均距平之垂直剖面圖中，我們歸納得出有兩種情況：(1)對流層(300hPa~500hPa)極地重力位高度距平值有顯著增加但平流層(50hPa~100hPa)極地重力位高度距平值沒有明顯增加；(2)對流層和平流層極地重力位高度距平值均有顯著增加，經常與區域極端寒冷事件的發生有關聯。表 2 及表 3 為各情況之極端寒冷天氣事件。

情況一：對流層極地重力位高度距平值有顯著增加但平流層極地重力位高度距平值沒有明顯增加		
年份	週次	極端寒冷事件區域
2004.11 ~ 2005.02	第 13 週次	EA(歐亞大陸區)
2011.11 ~ 2012.02	第 13、14、15 週次	
2013.11 ~ 2014.02	第 14、15 週次	
2017.11 ~ 2018.02	第 13 週次	
2015.11 ~ 2016.02	第 14 週次	PA(太平洋區)
2017.11 ~ 2018.02	第 13 週次	
2006.11 ~ 2007.02	第 14 週次	NA(北美大西洋區)
2013.11 ~ 2014.02	第 14、15 週次	

表 2

情況二：對流層和平流層極地重力位高度距平值均有顯著增加		
年份	週次	極端寒冷事件區域
2001.11 ~ 2002.02	第 2 週次	EA(歐亞大陸區)
2005.11 ~ 2006.02	第 10、12 週次	
2009.11 ~ 2010.02	第 15 週次	
2010.11 ~ 2011.02	第 10 週次	
2012.11 ~ 2013.02	第 6 週次	
2018.11 ~ 2019.02	第 9、10、11 週次	
2000.11 ~ 2001.02	第 11、14、15、16 週次	PA(太平洋區)
2005.11 ~ 2006.02	第 14 週次	
2009.11 ~ 2010.02	第 16 週次	
2012.11 ~ 2013.02	第 11 週次	

2018.11 ~ 2019.02	第 15 週次	NA(北美大西洋區)
2002.11 ~ 2003.02	第 12 週次	
2003.11 ~ 2004.02	第 13 週次	
2008.11 ~ 2009.02	第 13 週次	
2014.11 ~ 2015.02	第 10 週次	
2016.11 ~ 2017.02	第 7 週次	
2017.11 ~ 2018.02	第 9 週次	
2018.11 ~ 2019.02	第 15 週次	

表 3

(二) 極區重力位高度分布情形與極端寒冷事件之關係

我們利用 NOAA Visualize NCEP Reanalysis Daily Average Data Plot，依各極端寒冷事件發生的年份及週次繪製週平均極區重力位高度場(範圍：北緯 30~90 度)，並比較不同情況、不同分區之 50hPa、100hPa、300hPa、500hPa 分布之情形進行探討。

【情況一】

在區域極端寒冷事件發生且極區 300hPa~500hPa 處的重力位高度距平值有顯著增加者，檢視其極區的 50hPa 重力位高度分布情況，其重力位高度極低值區多會維持在極區中，而 300hPa~500hPa 處的重力位高度場則有相對較高值區由低緯往高緯度延伸，甚至伸入極區的範圍之中，我們以歐亞大陸區(2004.11~2005.02 第 13 週次)、太平洋區(2015.11~2016.02 第 14 週次)、北美大西洋區(2006.11~2007.02 第 14 週次)作為代表事件(表 4)。

分區	歐亞大陸區	太平洋區	北美大西洋區
極端寒冷事件	2004.11 ~ 2005.02 第 13 週次	2015.11 ~ 2016.02 第 14 週次	2006.11 ~ 2007.02 第 14 週次
50 hPa			

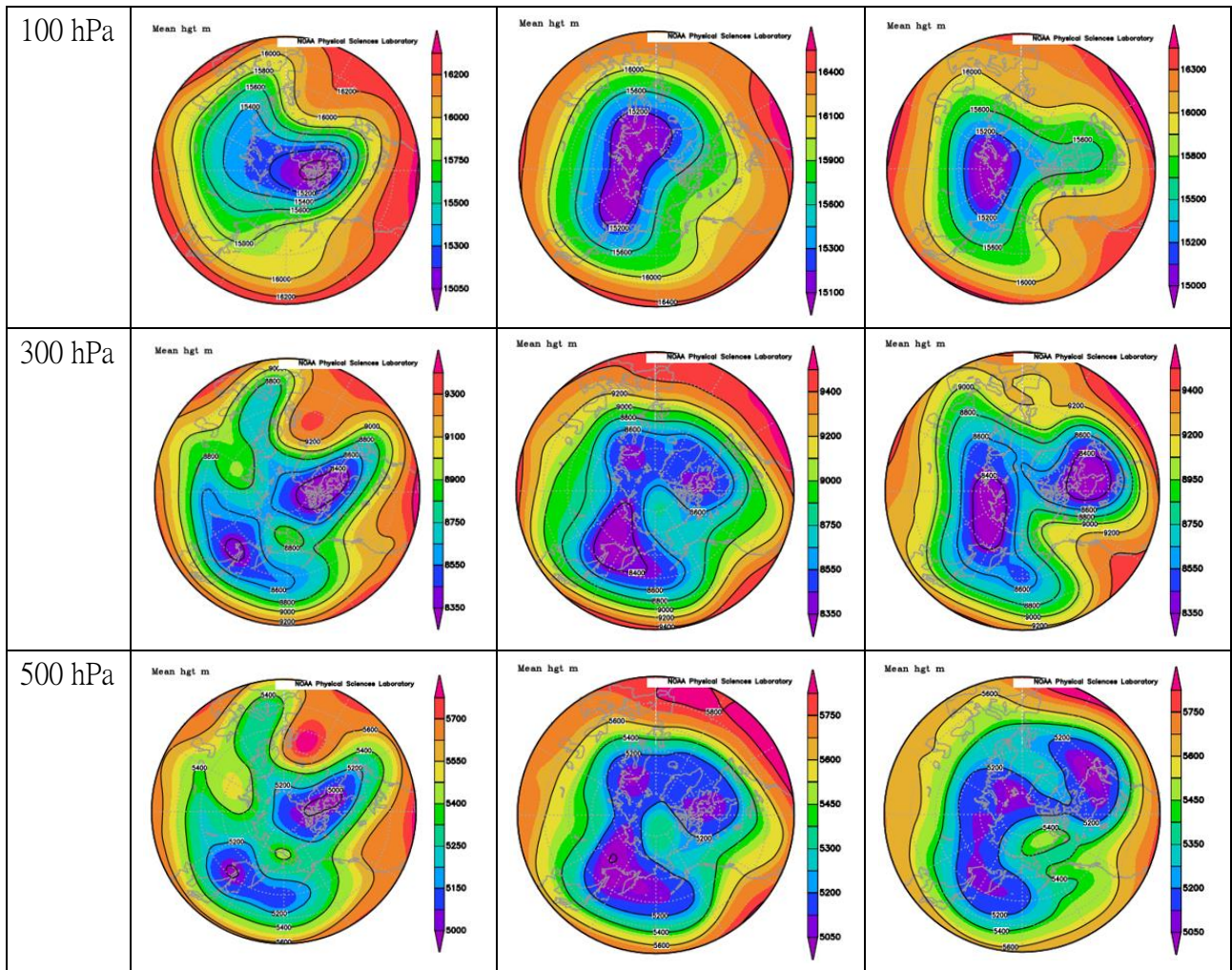


表 4

【情況二】

在區域極端寒冷事件發生且極區 50hPa~100hPa 處的重力位高度距平值有顯著增加者，我們以歐亞大陸區(2005.11~2006.02 第 10 週次)、太平洋區(2018.11~2019.02 第 15 週次)、北美大西洋區(2014.11~2015.02 第 10 週次)作為代表事件(表 5)，檢視其極區的 50 hPa 重力位高度分布情況，主要有兩種特徵，第一種情況為 50 hPa 重力位高度場會出現分離的兩個極低值區，例如表 5 北美大西洋區代表事件；另一種情形則為 50 hPa 重力位高度場極低值區會偏離極區，分布在較低緯度的情況，例如表 5 歐亞大陸區及太平洋區代表事件。在此情況下所發

生的極端寒冷天氣事件，可以觀察到 50hPa、100hPa、300hPa、500hPa 之重力位高度低值區的分布位置在垂直方向上具有較高的一致性，不同區域發生之極端寒冷事件的差異主要在於重力位高度低值區分布的位置，具有地理位置傾向的特徵，當重力位高度低值區傾向於北美大西洋區時，該區好發生極端寒冷天氣。

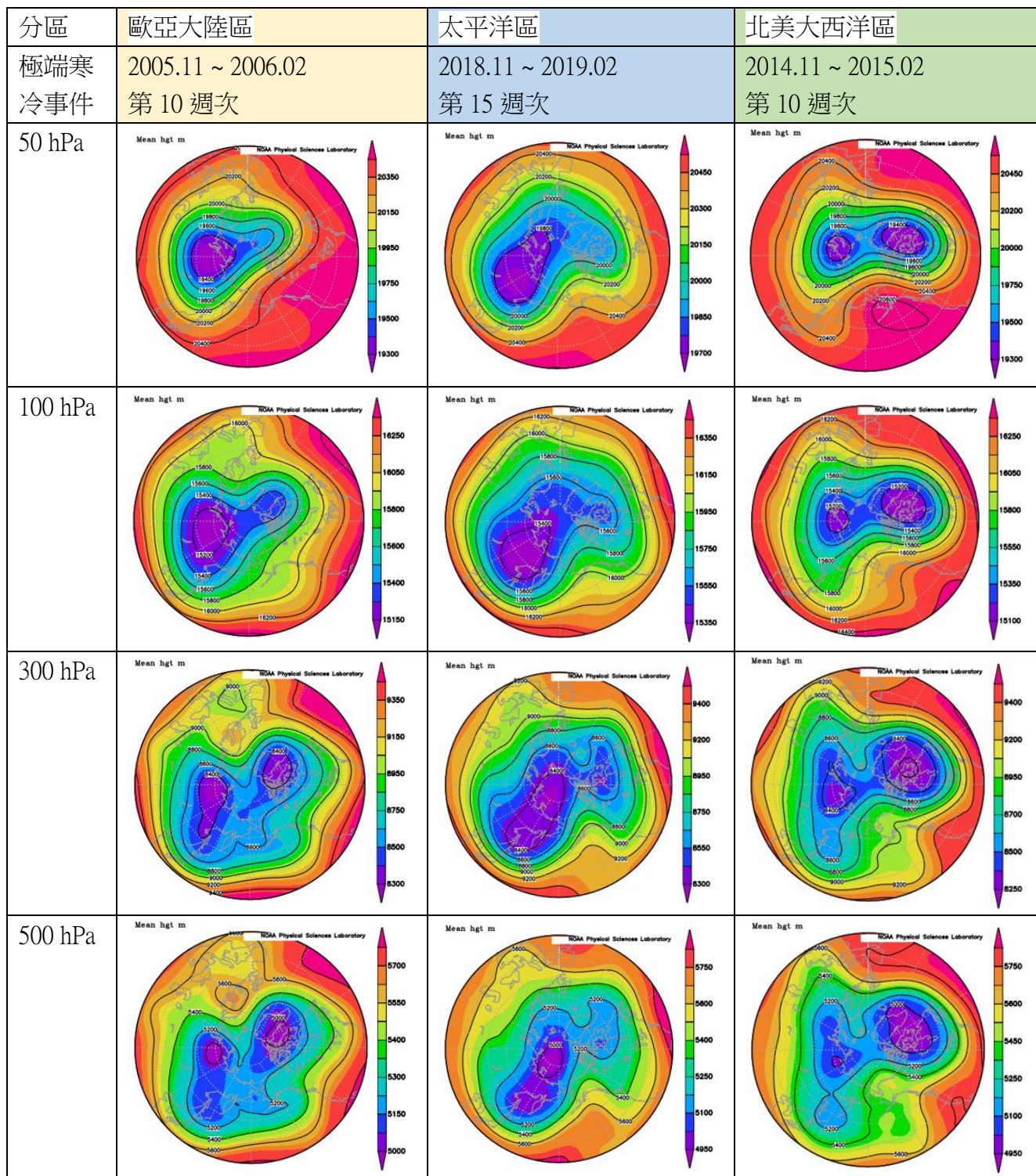


表 5

陸、討論

一、 探討中緯度氣溫之全球緯向平均與分區緯向平均之寒冷事件與北極震盪相位之關係

圖 5 為北半球中緯度(北緯 40~50 度)緯向平均之週平均氣溫的各種寒冷事件在北極震盪相位發生的百分比，其結果顯示極端寒冷的天氣事件發生在北極震盪負相位的比例是最低的，這和我們平常所認識負北極震盪容易造成極端寒冷的情況並不吻合，所以我們採取了分區的方式，再進一步對各分區分析極端寒冷天氣事件在北極震盪相位發生的百分比，圖 6 的結果顯示出極端寒冷天氣事件在負北極震盪時發生的比例確實是較高的。比較圖 5 與圖 6 的結果推知，極端寒冷天氣事件主要為區域性的現象，當採取全球緯向平均的方式做分析，容易造成極端寒冷天氣事件的低溫被同緯度未發生寒冷天氣的高溫地區平均後而未能反應出來。

二、 極區重力位高度距平變化與區域極端寒冷天氣之關係

由圖 7(a) ~ (j)週平均重力位高度距平剖面圖可知，當或 300hPa~500hPa(情況一)或 50hPa~100hPa(情況二)出現顯著的正距平時，經常伴隨發生各區域的極端寒冷天氣事件。當 50hPa~100hPa 出現顯著的正距平時，代表原來位於極區高空的極地渦旋受到影響而分裂或是發生偏離極區的情況，此時極區 50hPa 重力位高度場會呈現如圖 8(a)(b)的圖案；當 300hPa~500hPa 出現顯著的正距平時，此時極區 300hPa 重力位高度場會呈現較曲折的情況，容易發生重力位高度高值區向極區深入或重力位高度場脊線振幅較大的情形，如圖 8(c)(d)的圖案。由此可知，兩種情形皆與區域極端寒冷天氣事件有關，依表 2 及表 3，在 2000 年~2019 年期間，情況二伴隨極端寒冷天氣事件發生的頻率高於情況一。

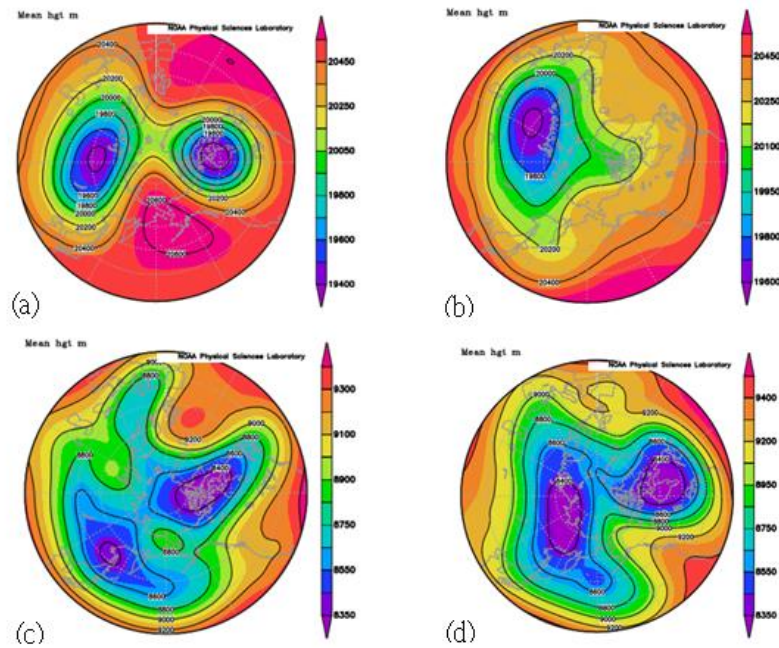


圖 8(a)50hPa 重力位高度場低值區分裂；(b)50hPa 重力位高度場低值區偏離極區；
(c)300hPa 重力位高度場高值區深入極區；(d)300hPa 重力位高度場脊線振幅大。

三、 區域極端寒冷天氣事件與重力位高度場特徵之關係

1. 歐亞大陸區

當極端寒冷事件發生於情況一時，50 hPa 重力位高度場低值區會位於極區位置或有向歐亞大陸拉伸呈橢圓的情形；若發生於情況二時，50 hPa 重力位高度場低值區會朝向歐亞大陸而偏離極區位置，兩種情況的 300 hPa 重力位高度場具有相似的特徵，在冰島至北歐的區域會出現重力位高度場高值區深入極區的情形，由重力位高度等值線分布情形做判斷，歐亞大陸區位於環繞極區氣流的下游處，風向以北風為主，驅使極區冷空氣向南移動，如表 6。

極端寒冷事件	情況一	情況二
	2011.11 ~ 2012.02 第 13 週次	2018.11 ~ 2019.02 第 15 週次

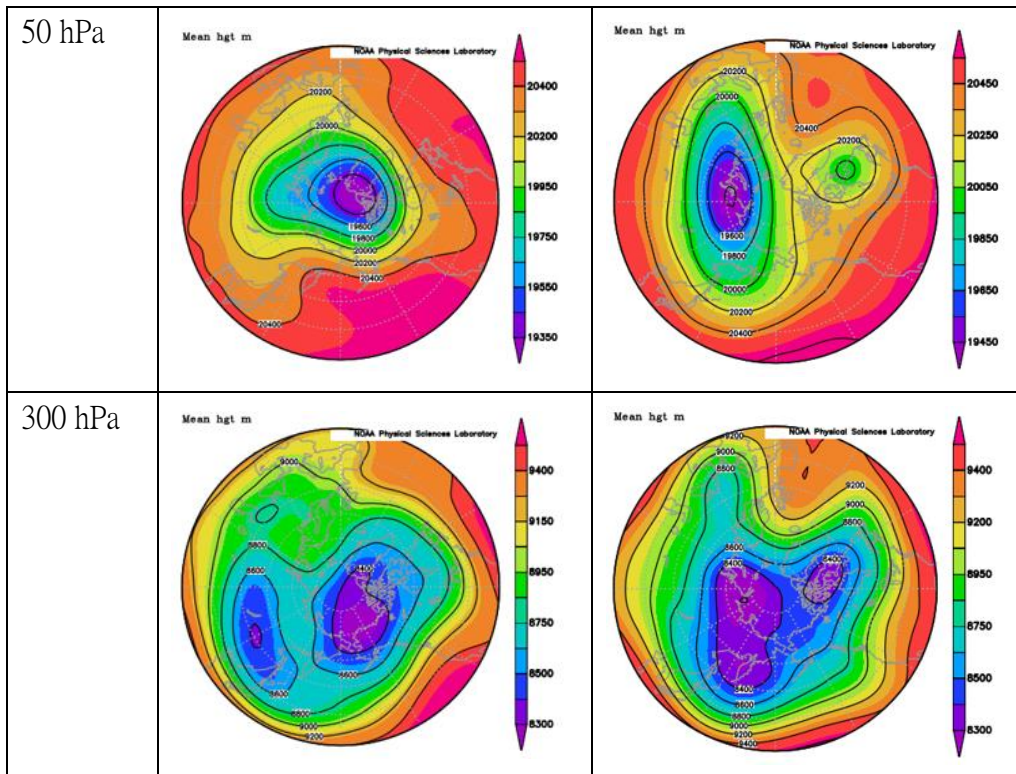


表 6

2. 太平洋區

當極端寒冷事件發生於情況一時，50 hPa 重力位高度場低值區會位於極區位置；若發生於情況二時，50 hPa 重力位高度場低值區會分裂或呈現橢圓形且長軸朝向太平洋區，而兩種情況的 300 hPa 重力位高度場的等值線在太平洋區會形成振幅大的脊線，此時太平洋區位於環繞極區氣流之脊線的上游區，重力位高度場的梯度較大，使風速加強，增加極區冷空氣潰流的作用，如表 7。

極端寒冷事件	情況一	情況二
	2017.11 ~ 2018.02 第 13 週次	2009.11 ~ 2010.02 第 15 週次

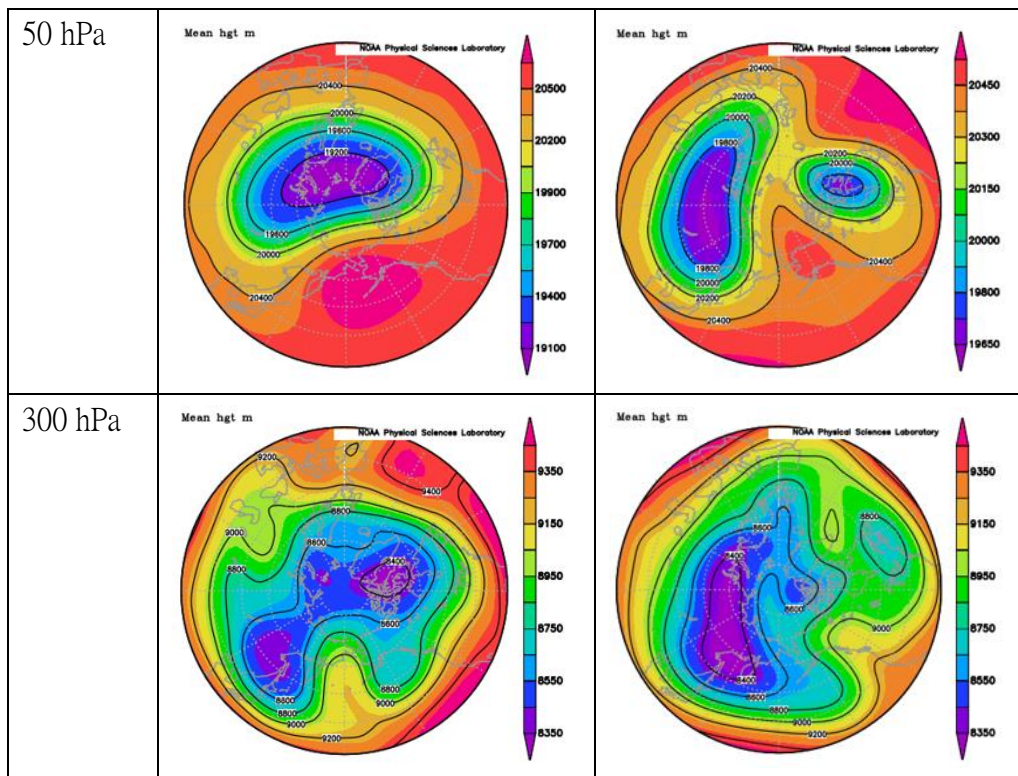


表 7

3. 北美大西洋區

當極端寒冷事件發生於情況一時，50 hPa 重力位高度場低值區會位於極區位置；若發生於情況二時，50 hPa 重力位高度場低值區以發生分裂情形較多，而兩種情況的 300 hPa 重力位高度場的主要低值區會朝向北美洲的方向，並且加深此區重力位高度場的槽線，甚至達到北緯 30 度，同時使重力位高度場梯度增大、槽線處的北風增強，驅使極區冷空氣流向低緯度，如表 8。

極端寒冷事件	情況一 2017.11 ~ 2018.02 第 9 週次	情況二 2008.11 ~ 209.02 第 13 週次
50 hPa		

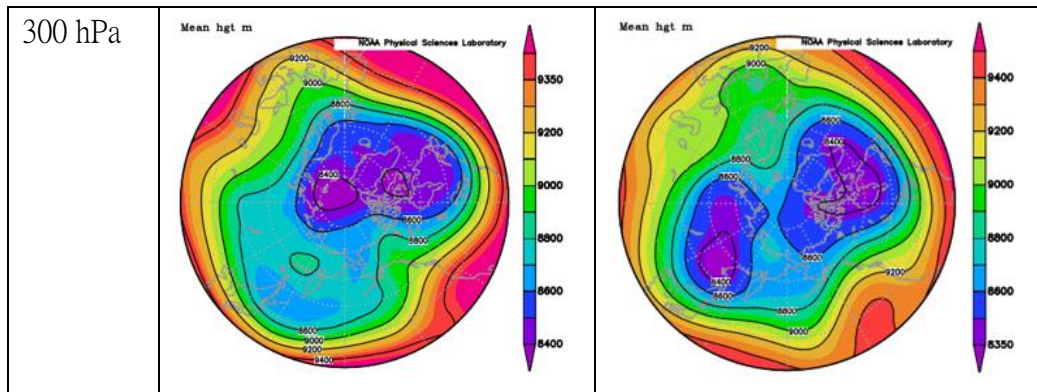


表 8

四、北極震盪對極地渦旋、極地噴流、區域極端寒冷天氣事件之影響

綜合本文研究分析結果，我們把 50 hPa 北緯 50~65 度緯向風速距平作為極地渦旋 (polar vortex) 的變化，而 300 hPa 北緯 50~65 度緯向風速距平作為極地噴流 (polar jet) 的變化，由研究結果一得知，極地噴流之作用與月平均北極震盪指數呈現高度正相關 (相關係數 0.88)，代表月平均北極震盪指數為正值時，極地噴流也較強；另一方面極地渦旋現象與月平均北極震盪指數僅中度正相關 (相關係數 0.57)，代表兩者彼此的關聯性低於極地噴流。從圖 7(a)~(j)，2000 年~ 2019 年之各年冬季 (十一月至隔年二月) 重力位高度週平均距平剖面圖可觀察到，當月平均 AOI 為正值時通常伴隨 50~100 hPa 處呈現較大的負距平值，反之當月平均 AOI 為負值時通常伴隨 50~100 hPa 處呈現較大的正距平值，由前述討論已說明月平均 AOI 為正值時伴隨極地噴流也較強，除此之外，位於 500 hPa 及 1000 hPa 的環繞極區氣流也較強，與月平均 AOI 之相關係數分別為 0.90、0.95，此時有利於寒冷空氣在極區大氣層中累積，故反應至 50~100 hPa 的重力位高度值則較小。另外，我們也注意到，當區域極端寒冷天氣發生時，月平均 AOI 經常由正轉負或有顯著變小的情況 (雖然不是每一次皆然)，例如：2001 年 11 月至 12 月、2003 年 12 月至 2004 年 1 月、2005 年 1 月至 2 月、2007 年 1 月至 2 月、2009 年 1 月至 2 月、2011 年 12 月至 2012 年 1 月、2013 年 11 月至 12 月、2015 年 12 月至 2016 年 1 月，代表先有寒冷空氣在極區的大氣層中累積醞釀，當 AOI 轉變成負值伴隨極地噴流減弱以及 50~100 hPa 或 300~500 hPa 出現明顯正距平，代表有重力位高度場的脊線或高值區深入極區，造成環繞極區氣流受到擾動，故造成極區冷空氣向外潰流的情況發生。

然而，有時候造成極區重力位場擾動的因素並未立即反應在天氣事件上，而有延遲影響的情況，便出現區域極端寒冷天氣事件發生在 AO 正相位的情況下，例如：2007 年 1 月及 12 月、2008 年 1 月、2015 年 1 月、2016 年 12 月、2019 年 2 月，所以在研究結果二之圖 6 分析中，出現部分比例的極端寒冷天氣事件於 AO 正相位的情況中，若細究其原因，仍與極區重力位高度場受到擾動的因素有關。但大氣並非絕對特性的系統，還是有一些例外的事件，例如：2015 年 2 月，則需要另外探討分析。

對於極端寒冷天氣事件會發生在哪一個分區，並無法從北極震盪指數(AOI)或極區重力位高度距平剖面的變化得知，我們僅能就討論三歸納出各分區發生極端寒冷天氣事件時之重力位高度場分布特徵，這些特徵發展的過程與原因則有待更多的研究。

柒、結論

- 一、 利用 2000 年至 2020 年冬季(十一月至隔年二月)月平均北極震盪指數(AOI)尋找平流層及對流層緯向氣流的相關性，與北極震盪關係密切的是 300 hPa 北緯 50~65 度之環繞極區氣流，我們認為此處即為極地噴流(polar jet)的位置。
- 二、 在本研究進行資料分析期間，冬季對流層頂西風軸心區，300 hPa 北緯 30~40 度月平均緯向風速距平值與月平均 AOI 之相關係數為 -0.67 ，表示當月平均 AOI 為負值時，冬季對流層頂西風軸心區的風速經常高於平均值，此現象發生之原因值得進一步作探究。
- 三、 經由分析 2000 年至 2020 年每日 AOI 連續 3 天以上維持正值或負值的次數，可知北極震盪屬於一種短期的變化，通常在數天至數週之間產生改變。
- 四、 計算北半球中緯度(北緯 40 度~50 度)三個分區：歐亞大陸區(0° - 120° E)、太平洋區(120° E- 180° ； 120° W- 180°)、北美及大西洋區(0° - 120° W)緯向平均之週平均氣溫之極端寒冷事件($PR < 5$)在北極震盪相位發生的百分比，可看出極端寒冷事件發生在 AO 負相位的情況多於 AO 正相位，不過，特別注意到的是，極端寒冷天氣不必然發生在 AO 負相位($AOI < -0.5$)的條件下，在一般情況($-0.5 < AOI < 0.5$)或 AO 正相位($AOI > 0.5$)時，仍有發生

極端寒冷天氣事件的可能性，這類事件多與極區重力位高度場受到擾動並延遲影響有關，但存在例外事件。

五、 區域極端寒冷事件發生時，極區重力位高度距平值於 300 ~ 500 hPa(情況一)或 50 ~ 100 hPa(情況二)有明顯的正距平發生，情況一代表 300 hPa 容易發生重力位高度高值區向極區深入或重力位高度場脊線振幅較大，情況二代表原來位於極區高空的極地渦旋受到影響而分裂或是發生偏離極區，綜合各分區的案例數量來看，極區高空的極地渦旋受到影響而分裂或是發生偏離極區之情況時，伴隨極端寒冷天氣事件發生的頻率高於情況一。

六、 關於極端寒冷天氣事件偏向發生之區域，我們認為主要與 300 hPa 重力位高度場分布的特徵有關，其各區事件之特徵如後：**【歐亞大陸區之事件】**在冰島至北歐的區域會出現重力位高度場高值區深入極區的情形，此時歐亞大陸區位於環繞極區氣流的下游處；**【太平洋區之事件】**重力位高度場在太平洋區會形成振幅大的脊線，此時太平洋區位於環繞極區氣流之脊線的上游區，其重力位高度場的梯度較大，使風速增強；**【北美大西洋區之事件】**在 300 hPa 重力位高度場的主要低值區會朝向北美洲的方向，並且加深此區重力位高度場的槽線，同時使重力位高度場梯度增大、槽線處的北風增強。以上各區域之 300 hPa 重力位高度場分布之特徵，將驅使各區域北方之冷空氣強勁潰流，而導致極端寒冷天氣發生。

七、 北極震盪指數(AOI)最能代表對流層(1000 hPa~300 hPa)北緯 50~65 度環繞極區氣流的強弱狀態。若冬季月平均 AOI 正值伴隨對流層中環繞極區氣流較強，便有利於寒冷空氣在極區醞釀與累積，此情況能顯現在 50 hPa 重力位高度場存在一個低值區且位於極區範圍中，當冬季月平均 AOI 轉變為負值或顯著減小時，經常發生 50 hPa 的極地渦旋(polar vortex)分裂或偏離極區，或者 300 hPa 有重力位高度場的脊線或高值區深入極區，造成極地噴流(polar jet)受到擾動，進而使極區冷空氣向外潰流造成區域極端寒冷天氣事件的發生。

捌、參考資料

Darryn, W. Waugh, Adam, H. Sobel, & Lorenzo, M. Polvani (2017). What is the polar vortex and How does it influence weather? American Meteorological Society. doi:10.1175/BAMS-D-15-00212.1

Hoffman H. N. Cheung, Wen Zhou, Marco Y. T. Leung (2016). A strong phase reversal of the Arctic Oscillation in midwinter 2015/2016 : Role of the stratospheric polar vortex and tropospheric blocking. *J. Geophys. Res. Atmos.*, 121, 13,443-13,457, doi:10.1002/2016JD025288.

Rebecca Lindsey(2021). Understanding the Arctic polar vortex. NOAA Climate. Gov

O. Martius, L. M. Polvani, and H. C. Davies (2009). Blocking precursors to stratospheric sudden warming events. *Geophysical Research Letters*, VOL. 36, L14806, doi: 10.1029/2009GL038776, 2009.

James Overland, Richard Hall, Edward Hanna (2020). The Polar Vortex and Extreme Weather: The Beast from East in Winter 2018. *Atmosphere* 2020, 11,644.

【評語】 180012

使用冬季緯向風、重力位高度廠及其距平變化探討北極震盪指數，極地渦旋與北半球區域極端寒冷事件之關聯。歸納出其間的相關性，結構完整。建議可加強這些複雜連結的物理機制討論。