

高空輻散與劇烈天氣之關係

陳毓雷

Relationship between High Altitude Divergence and Severe Weather

Yulei Chen

The prediction of severe weather depends largely on the following four factors: high altitude divergence, low level moisture supply, instability and low level convergence (related to LLJ), of which the first is of prior importance. Here the term "high altitude" should be defined as 200~300mb level, and the divergence area can be determined qualitatively in terms of the jetstream core. Quantitative method is also introduced provided wind field data is available and sufficiently accurate. Two typical cases in the U.S. and Taiwan are presented to illustrate the procedure of severe weather prediction using high altitude divergence as the main predictor.

壹、前言

首先我們對題目中兩個形容詞加以較正確的界說，高空有多高，而劇烈又到甚麼程度？實際上本文討論的內容應該是「上對流層綜觀幅度輻散區域和龍捲風等劇烈天氣活動，發生地區之對應關係」，為醒目而簡化如前。

最劇烈的天氣當然首推龍捲風，但有時天氣極不穩定，乳狀雲、漏斗雲、強風、雷暴、降雹等一項或數項聯合出現，並且具有龍捲發生的潛在威脅，這種強烈對流性天氣都屬本文所稱「劇烈天氣」的界定範圍。

劇烈天氣的發生，和下列四種天氣參數密切有關，早被認為不爭的事實。那就是低空濕度、不穩定度、地面輻合和高空輻散，但是還有很多問題須進一步澄清的。例如上述參數中那項最為重要？高空輻散和高空強風（達到激流性質者）中心有多少關係？那一高度的強風中心最具關鍵性？可否以定量方式決定高空輻散場的型態和強度？

根據五十年代以來諸多氣象學家的潛心研究，加上近年觀測資料日益豐富，精確的佐證，我們已可肯定以 300 mb 為代表的上對流層高度上的大幅度輻散是促使劇烈天氣發生的最重要參數，而這種輻散區域又和激流強風中心有關。這樣就答覆了上列一連串問題中的前兩條，以下分四節進一步對上列問題作一較詳盡的說明，並取二實例為證。

貳、高空輻散和激流

過去二十年中有關劇烈天氣的研究文獻，凡涉及高空氣流的大都着眼於 500 mb 層上。這可能由

於該層資料比較豐富，準確而易於獲得的緣故。氣象界往往也有一窩風現象，而 500 mb 定壓層分析就像四十年代的籌備分析一樣被認為是各種預報目標的萬應靈藥，但是根據 500 mb 層資料研究所得的結論，證據似不充份，應用起來也就不很有效。六十年代低空激流（LLJ）現象被提出後，當然也有學者就此與劇烈天氣的關係加以探討，結論是它之與對流發展雖可謂有利因素之一，但不是引起強烈對流活動的主因。

因此研究方向便開始向上對流層發展，早在一九五六年 Ramaswamy 氏即曾就印度次大陸上空的副熱帶激流從事研究，分析結果認為在低空有潛在不穩定性的濕空氣條件下，強烈對流性天氣都和 300 mb 強風中心有關，而且雷暴活動的多寡和區域也和該層激流最大風速數值成正比。晉入衛星世代以後，高空激流的位置和強度，已不必完全依賴為數甚少的探空報告而可以用衛星雲圖來幫助決定，因此氣象學家可利用的資料遽增，對於高空激流的位置決定也準確得多，所以對高空輻散與劇烈天氣活動之間關係，有了更良好的研究條件，為廓清上節所提出的很多問題，美國國家劇烈風暴預報中心（NSSFCC）不但作了定性的探討，而且還從事定量的嚐試，希望能對劇烈天氣的預測益臻客觀。

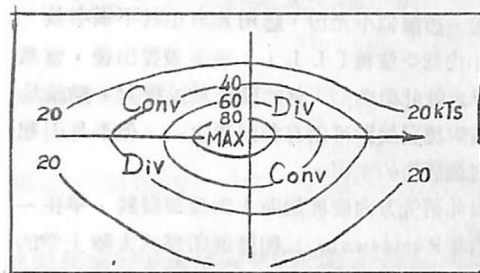
參、高空強風中心與劇烈天氣發生區域之定性關係

在本文中所利用的激流資料主要在其「最大風速中心」，而本節所稱高空強風中心則以 300 mb 為準。我們知道激流軸心（jet core）有蜿蜒而行的性質，即使氣象人員，也常常不注意其在水平的蜿蜒之外還有垂直的起伏性質（因為我們的三度空

間分析在垂直方面一向是用選擇性的定壓面來割裂表示的，例如 300 mb 上面就跳到 200 mb 了），所以真正能夠代表上對流層範圍內的強風中心位置應該由 300 mb 和 200 mb 的風場分析聯合決定，上述之以 300 mb 為準祇是基於方便，又下文將涉及到的用 850 mb 強風中心來代表低空激流也是同樣的一種權宜之計，讀者應先自此瞭解。

(一) 300 mb 強風中心附近之輻散場型態

就高空而言渦度方程中的平流項 $(+V \cdot \nabla \zeta)$ 大致和輻散項 $(-\eta \nabla \cdot V)$ 相平衡，所以正渦流 (PVA) 應該屬輻散區；反之，負渦度平流屬輻合區，在平直的激流軸心附近的渦度場僅由風切項決定，所以強風中心附近的輻散場可分四個象限分別予以決定如圖一。亦即面向下游，左前及右後象限為輻散區，左後及右前為輻合區，這種由理論推得的型態和實際觀測證明相符。



圖一、高空 (300mb) 平直激流附近之輻散場分布型態

以上討論結果係就平直的激流軸心而言。如果強風中心處的氣流本身有彎曲，則上述結果必須加入渦度的曲率影響，於是，作氣旋式彎曲的激流左方，不論輻散或輻合的強度都將增加（可參考 J. Bjerknes 及 J. Holmboe 一九四四年所論述高空短波槽前屬 PVA 極大值的理論），而激流右方的渦度由於切變項和曲率項符號相反有相消作用，因此使相對渦度、渦度平流以及與其相平衡的輻散（合）究應落在何區，強度如何等問題無法予以一般定性，必須根據當時實際資料加以定量計算後方知，不過如果 300 mb 圖上的等風速線和流線分析完整可信的話，仍可據以決定輻散區的位置所在，另外一方面，當激流作反氣旋式彎曲時，其右方的負

渦度受曲率項影響加強，以致圖一所示軸心右方輻散，輻合區的強度也會增加，而左方則成爲難以定性。

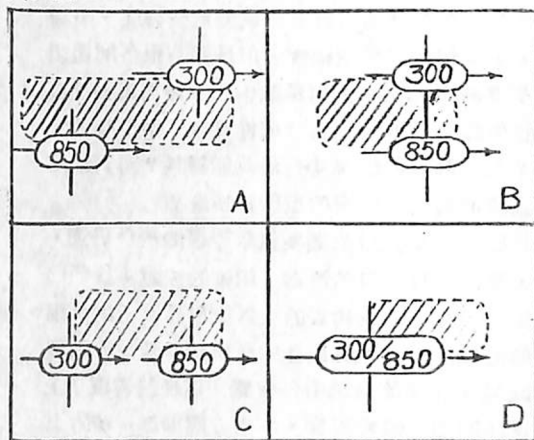
(二) 850 mb 強風中心

低空的情形和高空大有不同。我們必須把摩擦項、慣性項都加入考慮，所以不能簡單地像 300 mb 層以地僅就運動學觀點即可獲致輻散場的分佈型態。所以研究人員放開低空輻合區和 850 mb 強風中心的關係不論而直接利用後者的真實資料從事與劇烈天氣、高空輻散三者之間關係的分析。

(三) 高、低空強風中心與劇烈天氣發生區之相互關係

國家劇烈風暴預報中心從近年資料中發現一九七六年的劇烈天氣特別多，其中不乏所謂的「龍捲群爆發」(outbreak) 例子。所以 NSSFC 就在該年春季蒐集了 61 次個案作為原始資料從事詳盡分析。然後取一九七三年五月的實際資料作為獨立資料來校驗，而證實了下面這幾點結論大致正確。

- 1 劇烈天氣發生時，高空必須有顯著輻散區，且與圖一所示象限位置相符。
- 2 低空輻合，低空不穩定性、低空水汽供應三者均屬有利因素。但其重要性均遜於高空輻散。例如某地區不穩定指數雖僅在邊際值，但祇要高空有顯著輻散區就照樣可以發生劇烈天氣。反之，不穩定指數雖極高，若無高空輻散在上仍不易發生。水汽供應的情形亦類似。



圖二、850 mb、300 mb 強風中心與易滋劇烈天氣發生區域之相互位置關係

3 850 mb 強風中心，300 mb 激流軸心，劇烈天氣發生區域，這三種位置的配賦有其一定的四種型式，如圖二所示，間接說明了低空輻合和 850 mb 強風中心確有某種程度的關係（前者應在後者的北方）。

(四) 預報法則

根據個案分析的結果可以歸納得到下列法則供預測未來 24 小時內有無劇烈天氣發生以及發生區域、時間如何決定之指示。

- 1 劇烈天氣發生在 850 mb、300 mb 強風中心之間，且居於高空輻散之下。
- 2 若 850 mb、300 mb 強風中心之水平距離超過 900 公里則無劇烈天氣發生。
- 3 過去流行 500 mb、850 mb 激流軸心相交處為龍捲風預測之法則 (Beebe 及 Bates, 1955)，應加修正者如下：

- (1) 高空應指 200 至 300 而非 500 mb。
- (2) 必須加入高空輻散區之存在。
- (3) 高、低空激流軸心不一定相交，平行、重疊均無不可。
- 4 若 850 mb、300 mb 強風中心平行（或接近平行，例如交角不足 30°），則劇烈天氣發生在高空輻散（先決條件）、低空水汽最大中心、低空不穩定區域均相重疊之範圍內。

(1) 低空水汽最大中心指地面以上 100 mb 層內平均水汽混合比超過 1 g/kg，但非必要條件。易言之，先決條件若良好，水汽值縱小於此，仍可發生劇烈天氣。

(2) 不穩定指數能達邊際值以上即已構成充份條件。NSSFC 採用「舉升指數」(lifting index LI) 為量度不穩定性之指標。所謂邊際值指 LI 在 0°C 至 2°C 間。

5 觸發機制如冷鋒過境、山脈阻擋、颶風逼近等均屬重要之觸發因子。

6 所有參數包括觸發因子，應每隔六小時作一次合理預測，預報其移動及強度變化。再行按上開法則決定劇烈天氣之將發生與否，何地、何時發生。

肆、定量分析初探

定性方法（用 300 mb 強風中心推定為主）有其先天缺點，其一是不能確定輻散最大值的地區範圍，尤當緯流不夠強盛時為然。另一缺點就是第叁節之(一)已經提及的當激流軸心本身有彎曲時，祇能決定一邊的輻散場，另一邊無法斷定。鑒於高空輻散對預測劇烈天氣的關鍵性，我們總希望能進一步用定量的方式來決定輻散場，以排除定性方式的缺點。固然定量分析也須要高空觀測網的健全作為前提，現在假定 300 mb、200 mb 風場資料完整的條件下來介紹實用的輻散量計算公式和步驟如下。

(一) 所採公式

$$D_{iv} = \nabla \cdot V = m^2 \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{u}{m} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{v}{m} \right) \right] \quad (1)$$

m 是地圖因子，其他符號都是氣象學習慣所用的。祇用某一定壓層上的資料可能不太正確，所以用 200 到 300 mb 層的垂直平均以增加分析的準確性。

$$\overline{D_{iv}} = \frac{1}{100} \int_{300}^{200} \nabla \cdot V \, dp$$

(二) 計算方法

實際上我們可利用的原始資料有 300、250、200 mb 上的風向量。首先決定一個適當的網格式，但消除短波（雜音性質沒有氣象意義的短波）影響而保存綜觀幅度的意義，美國 NSSFC 現在採用的距離是 190.5 公里。其次從原始資料用內插法求得每一網格式上的 u 和 v，然後分別就各定壓層上以差分法計算每點上的輻散值。最後求個各網格式的垂直平均時，實際是用下面所謂「梯形平均」的(3)式來估擬(2)式的。

$$\overline{D_{iv}} \cong \frac{1}{4} [D_{iv300} + 2D_{iv250} + D_{iv200}] \quad (3)$$

(三) 資料時間

原則上，資料時間當然應該固定在一個繪圖時間上，如 0000Z。但前後三小時內的資料都宜儘量採用進去。雖然激流的位置和強度在二、三小時內都可能作相當大的變動而影響輻散場計算的精確性，但是鑒於我們要預測的劇烈天氣發生區域原非定點性質而是在一個範圍之內，而且在作出預報決

心時還要配合低空其他三個參數的位置，所以二、三小時的時距影響不致嚴重。況且劇烈天氣確實發生時地往往都由觸發因子所決定，這就不是現階段的預報技術所能爲力了。反過來說，當我們預測劇烈天氣發生地區時也應該仔細考慮 300 mb 強風中心的移動趨向爲當。

伍、實例舉證

本節就台灣和美國各舉一例，所用資料均經詳細分析但爲節省篇幅及製圖不易，附圖數未列入。

(一) 民國六十年四月二日 06、50 Z 屏東縣高樹鄉天昏地黯，狂風橫掃，且有降雹，歷時約半小時，蕉樹毀於頃刻，損失約達六千萬元。

分析該日 0000Z 的 300 mb 等風速圖，強風軸線橫越台灣中部，台灣南部地區在強風中心 (70 KTS) 之右後象限，故屬高空輻散區。其他相配合的參數情況也都有利，如東港、馬公兩地 0000Z 探空報告顯示不穩定總指數在 40~50 的高數值 (約合 $LI - 2.5^{\circ}C$ ，已超過邊際值)，850 mb 圖上又顯示濕舌正自南海伸向台灣。但何以天氣發生在下午二時的屏東地區呢？似乎應該指向當時的觸發因子，因爲 0600Z 冷鋒正在過境，而高樹鄉之東有大武山爲屏障，使迫升的垂直氣流釋放了潛在性不穩定。順便一提該日台灣南部很多地區都有漏斗狀雲、狂風等劇烈天氣發生，不過不如高樹鄉之嚴重而已。

(二) 一九七六年三月十三日 0000Z 前後，美國大湖迤南密歇根州，印第阿那州有成串的龍捲群爆發。這個區域當時就是位於 300 mb 強風中心 (130

KTS) 的左前象限，值得注意的是低空不穩定指數 ($LI + 2^{\circ}C$) 不過剛夠邊際值而已，而低空水汽量在印州僅及 $4 g/kg$ ，遠遜於其南方阿拉巴馬州的 $2 g/kg$ 。可是因爲高空輻散強烈所以當冷鋒在 2100Z 開始掃過印州後的下午三、四個小時因觸發了劇烈天氣現象達 24 次之多。更可輔助說明的是阿拉巴馬州境內到 0200Z 後也有 4 次劇烈天氣的報告。那是因爲強風中心向東移，那時阿州已成爲它的右後象限，也是高空輻散區，加上冷鋒的南段尾部到這時候才掃過阿州境，所以也發生了劇烈天氣。

本例可以強調兩點：一是高空輻散的重要性超過低空其他參數因素；二是強風中心位置移動的短時預報應予掌握，方可對時、地的預測多一份把握。

此外，台灣的緯度較低，強風中心風速較弱，隨之輻散強度也較小，所以台灣春夏之交雖低空條件都十分有利，但龍捲風等劇烈天氣的發生頻率却遠較美國爲小，可以作爲高空輻散重要性的旁證。

陸、結 論

劇烈天氣在台灣出現頻率雖不算很高，但台灣西南地區春夏兩季比較常見，加上我國工、商、交通日見發達，高價設施日益密接，一旦有劇烈天氣發生都可能招致巨大損失。所以對颱風而外的龍捲風等現象的預報也有加強研究、實施的必要，本文目的在提供有關此一問題的新觀念和新方法。重點已歸納在本文第參節之四預報法則內，在此不贅。