

春季影響華南至臺灣主要大氣波動特性實務探討

林定宜
氣象預報中心
中央氣象局

摘要

春季華南至臺灣地區的大氣波動，包括了自由波(free waves)和強迫運動所產生之波動。春季華南常見的短波槽，主要由渦度平流帶動低層輻合、上層輻散，屬於自由波動的一種；至於青藏高原背風波形成之南支槽與西南低渦，則是由於地形強迫所產生。單純由地形強迫產生出的波動，離開地形越遠，能量愈可能被頻散或減弱掉。由於華南地區地形複雜，因此容易激發出大氣內重力波，但何以有些短波不易頻散，有些則易於頻散？本文經實際春雷個案推演並闡釋大氣中的自由波動，在層化大氣下依據羅斯貝變形半徑，判斷重力波是否頻散或可維持住，結果應證了重力波在傳播過程中，若能感受到來自地轉偏向力的影響，具有此時空特徵尺度的波動（亦即重力波時空特徵尺度大於羅斯貝變形半徑者），則波動擾動的能量較不易頻散掉；另由實際個案亦獲致，較深的南支槽前之短波所對應的南來水氣亦較能被維持住的結果，顯示此類天氣系統因氣塊由南往北移動， f 值由小漸大，羅斯貝變形半徑相對則為由大漸小，故重力波的運動較能感受到地球自轉，其波動能量也較易於持久；而相較由華南向東南東移動的南支槽前短波水氣，擾動能量則較易於頻散或減弱，持續時間則相對較短。

關鍵字：斜壓波(Baroclinic wave)，南支槽 (Southern Branch Trough)，慣性內重力波(Inertia-gravitational wave)，羅斯貝變形半徑(Rossby radius of deformation)

一、春季影響華南至臺灣之大氣

波動類型、成因與特性：

地球表面大氣波動現象種類繁多，包括地球大氣在重力、慣性力、科氏力或層結等因素作用下所發生的各種振盪，本研究係針對春季中短期影響華南至臺灣的主要大氣波動為對象，就自由波動而論，常見者有斜壓波與慣性內重力波，自由波動是指大氣中之粒子的傳送，有能量傳遞現象，此外潛熱釋放對波動的發展也非常重要。

(一) **斜壓波 (Baroclinic wave)**：斜壓波的發展能量主要來自基本氣流上的有效位能的釋放，亦即緯向可用位能減少，渦流可用位能增加，透過熱力直接環流，將渦流可用位能，轉為渦流動能。斜壓不穩定下要產生擾動必定要透過斜壓能量轉換模式，是由基本流動能直接轉換成位能，最大不穩定的波長約為 3000~5000km。垂直於基本氣流方向上的波數

越小的模態越容易發展。斜壓波是中緯度最重要的天氣系統之一，它不僅有著傳輸熱量和動量的重要作用，與其發展相伴的鋒生還提供了能量在不同尺度間轉輸的機制，對於天氣系統的發展有很重要的意義，其必要條件是南北水平溫度梯度或垂直風切超過某臨界值產生的不穩度，此時渦流擾動將在平均流內發展 (陳，1989)。

(二) **南支槽 (Southern Branch Trough)**：是地形強迫(青藏高原背風波)所形成之重力波，離開地形越遠，能量有可能會頻散掉，與斜壓波的形成機制不同。其是在低緯度地區活動的低槽短波天氣系統，源於冬半年副熱帶南支西風氣流在青藏高原南側孟加拉灣地區產生的半永久性低壓槽，亦稱為孟加拉灣南支槽、印緬槽或南支波動，其與季節性變化與冷空氣活動有著密切關係，主要活動在冬半年 (11~4 月)，春季(3 至 5 月)是南支槽最活躍的時期，此時冷、暖空氣交換頻繁，700 hPa 或 500 hPa 等壓面上南支槽活躍，經常出現在青藏高原南側 90°E 附

近，由於中緯度西風帶在經高原時被分成南北兩支噴流，地形南北側的曲型山脊，導致這兩支西風氣流都呈彎曲性，北、南兩支分別東移，北支移速稍快，南支在東經 90°E 之處容易形成動力性低槽，南支槽移到在高原南側會近似滯留並加強，因地理上位處於雲南的上游地區，其最大作用是槽前豐沛的水汽輸送，這支暖濕氣流是雲南甚至整個華南到臺灣的水汽來源，也常形成中國大陸南方的氣旋，伴隨的雲系不僅可造成陰雨連綿降水天氣，還常造成豪大雨、冰雹、大風等災害性天氣；其槽前相關聯的「西南低渦」若其能維持至離開青藏高原後，有時可能發展，為華南帶來有雨的天氣。此外，南支槽東移時會使副熱帶高壓脊東退，熱帶氣旋減速滯留，甚至可導引其進入西風帶，但仍需視南支槽的位置及強度而定。

南支槽對臺灣的晚秋到春季降雨影響力相當重要，故當預報員發現南支槽雲系呈帶狀時，可能是一條暖輸送帶，特別是當它與北支槽或其他系統雲系連結或合併時，會將低緯度的水汽、熱量和動量輸送到華南地區或臺灣，呈現大片稠密雲區，這將為華南或臺灣地區之降水提供有利條件，因此預報員作降水預報時必須要考慮到南支槽雲系的活動效應。

(三) 慣性內重力波(Inertia-gravitational wave)：

重力波 (gravity waves)，在大氣中可分為「外重力波」和「內重力波」，兩者最主要差別在內重力波在垂直方向的相位是傾斜的，外重力波則否，外重力波並非大氣中主要波動，因此本文主要著重於探討「內重力波」與實際天氣之關聯。內重力波其形成過程為流體密度在垂直方向是不均勻的 (即空氣密度或氣溫具有一定的垂直分佈)，當質點受擾動後便受浮力作用而圍繞某一平衡位置產生振盪現象，這種振盪向四周傳播形成波動，它屬於橫波，是頻散波，其振動頻率為 N 。

慣性內重力波是大氣中尺度運動過程中的主要波動，許多中尺度的天氣現象都和慣性內重力波的活動密切相關，這種波大多是在地面附近由於風場、地形的作用被激發。中緯度長波向東走得慢，常帶來的是較大範圍相摺疊的輻合、輻散效應。春天常見的短波，因受動力、地形等強迫機制激發，向東走得快，也帶來較強的局地輻合、輻散效應。

而有關中緯度慣性內重力波之實例，最常見的

應屬春季在華南快速向東移動之短波系統，由於春季主導華南至臺灣天氣變化的是短波系統，驅動力是渦度，中緯度綜觀尺度數度(D)比渦度(ζ)小一個數量級以上，因此經常藉助渦度方程以推導輻散/輻合場之分布。短波槽前伴隨很大正渦度平流，因此上層常伴隨大的輻散場，下層則是輻合場以及垂直運動，也可推導一個系統之正渦度產生，以維持或加強系統的強度，當高層輻散場大於低層輻合場時，低層低壓將發展。

二、春季華南至臺灣短波是否頻散的判據

羅斯貝變形半徑(Rossby radius of deformation)是判斷地球自轉變重要時的特徵尺度，也是風場與氣壓場相互調整保持地轉平衡時的一種臨界水平特徵尺度。華南至臺灣地區 f 值相對比低緯度大，羅斯貝變形半徑相對比熱帶低緯區為小，內重力波傳播時較低緯度容易感受到地球自轉偏向力，該區西風基本氣流並不強，短波經向波數大，故向西移動分量相對較小，可忽略向西之羅斯貝波效應，從而凸顯了重力波快速移動之現象，短波附近也常會激發出低層噴流，或是中尺度對流系統，亦可視為被慣性內重力波激發的。

至於春季華南至臺灣何種短波較不易頻散或減弱而能影響臺灣天氣？在地轉調整中，波長 \geq 羅斯貝變形半徑(L_R)的波，才能維持住波的能量與波形而傳遞，較不易頻散掉。此波的傳遞能感受到「地球自轉偏向力」的影響。

三、大氣慣性重力波 ~ 以臺灣地區春雷為例

1. 以 2017 年 2 月 20 日春雷個案為例，設正壓大氣狀態下之重力波，有羅斯貝變形半徑(L_R)如式 1。

$$L_R \equiv \frac{(gD)^{1/2}}{f} \dots\dots\dots(1)$$

重力波位於緯度 25°N， $\sin 25^\circ = 0.4226$

$$f = 2\Omega \sin \varphi.$$

$$= 0.00006163$$

地球的自轉角速度 ($\Omega = 7.2921 \times 10^{-5}$ rad/s)

g 是重力加速度 = 9.8 m/s^2

在緯度 25°N 得 $f = 6.163 \times 10^{-5}$

若當氣層高度 $D = 4.0 \text{ km}$, $L_R \approx 3214 \text{ km}$

$D = 1.0 \text{ km}$, $L_R \approx 1607 \text{ km}$.

$D = 0.4 \text{ km}$, $L_R \approx 1016 \text{ km}$

$D = 0.1 \text{ km}$, $L_R \approx 508 \text{ km}$

$D = 0.04 \text{ km}$, $L_R \approx 321 \text{ km}$

L_R 隨氣層高度迅速增加，但華南至臺灣地區一般情形大氣並非正壓型。

2. 因此，假設華南至臺灣地區是在層化(斜壓)大氣狀態之下，則有羅斯貝變形半徑(L_R)如式 2。

$$L_{R,n} \equiv \frac{NH}{n\pi f_0} \dots\dots\dots(2)$$

此處 N 是 Brunt-Väisälä frequency

H 是特徵高度(scale height, $n = 1, 2, \dots$)， n 表示第 n 個垂直結構特徵值，取 $n=1$

$f_0 = 0.00006163 \text{ rad/s}$

在地球大氣層，海平面氣壓平均值約為 1010 hPa ，乾空氣平均莫耳質量為 28.964 g/mol 因此， $28.964 \times 1.660 \times 10^{-27} = 4.808 \times 10^{-26} \text{ kg}$, $g = 9.81 \text{ m/s}^2$

地球大氣的特徵高度是溫度的函數，

Boltzmann constant = $1.38 \times 10^{-23} \text{ J}\cdot\text{K}^{-1}$

因此， $1.38/(4.808 \times 9.81) \times 10^3 = 29.26 \text{ m/deg}$.

這產生了以下代表性空氣溫度的特徵高度：

$T = 290 \text{ K}$, $H = 8500 \text{ m}$

$T = 273 \text{ K}$, $H = 8000 \text{ m}$

$T = 260 \text{ K}$, $H = 7610 \text{ m}$

$T = 210 \text{ K}$, $H = 6000 \text{ m}$

應用 Brunt-Väisälä frequency Calculator 計算 N 值，有關各項大氣參數設定及計算結果請參考表 1。

結果得： $N = 0.0053/\text{s}$

H (特徵高度) 取 $T = 290 \text{ K}$, $H = 8500 \text{ m}$

代入 2 式得羅斯貝變形半徑

$$L_R \approx 232.676 \text{ km} \approx 233 \text{ km}$$

在層化大氣狀況下，依據羅斯貝變形半徑進行判斷，從實際雲圖中可看到雲系呈現波動式排列(如圖 8)，觀察系統波長尺度大於 233 km ，因此證明此系統屬於慣性內重力波，而於華南至臺灣上空的垂直剖面(cross section)圖(如圖 9)顯示該波動在大氣中低層呈現輻散、輻合場交錯分布傳遞現象，乃是內重力波特徵。此個案由於重力波在傳遞過程中，

其時空特徵尺度大於計算所得之羅斯貝變形半徑 233 km ，屬於「慣性內重力波」，其波動能量不易頻散或減弱，可影響到臺灣地區的天氣。

另外，由熱帶低緯地區 5°N ， 10°N 羅斯貝變形半徑之實際估算如下，設在正壓大氣之狀態下：

$\sin 5^\circ = 0.0872$ $f = 0.000013$

$\sin 10^\circ = 0.1736$ $f = 0.000025$

地球的自轉角速度($\Omega = 7.2921 \times 10^{-5} \text{ rad/s}$)

g 是重力加速度 = 9.8 m/s^2

在緯度 5°N 得 $f = 1.3 \times 10^{-5}$

對於 $D = 1.0 \text{ km}$, $L_R \approx 7615.0 \text{ km}$.

$D = 0.4 \text{ km}$, $L_R \approx 4816.1 \text{ km}$.

$D = 0.1 \text{ km}$, $L_R \approx 2408.1 \text{ km}$.

在緯度 10°N 得 $f = 2.5 \times 10^{-5}$

對於 $D = 1.0 \text{ km}$, $L_R \approx 3959.8 \text{ km}$.

$D = 0.4 \text{ km}$, $L_R \approx 2504.4 \text{ km}$.

$D = 0.1 \text{ km}$, $L_R \approx 1252.2 \text{ km}$.

由上述計算可知，熱帶低緯度地區重力波波長若要大於或等於羅斯貝變形半徑，則熱帶慣性重力波的波長普遍比中緯度慣性重力波的波長為長。

四、研究發現及總結

本研究探討華南至臺灣春季主要波動類型，主要包括斜壓波、南支槽及慣性內重力波，研究歸納內獲致下列結論：

(一) 大氣波動具有尺度選擇性(scale selection)，各緯度波動有不同之呈現方式，中緯度主要為斜壓波能量轉換，華南至臺灣早春時仍易見到來自北方的斜壓波，此外春季常見慣性重力波由西向東傳遞。以上均屬自由波動，意指大氣中之粒子的傳送，有能量傳遞現象；至於青藏高原背風波形成之南支槽則是靠地形強迫運動所產生之波動。

(二) 由個案顯示，單純由地形強迫產生出的南支槽，離開地形越遠，能量就越可能被頻散或減弱(圖 1、圖 2)，圖 2 顯示離開地形越遠垂直方向輻散及輻合場愈弱。南支槽對臺灣的晚秋到春季降雨影響相當重要，當南支槽雲系呈帶狀時，可能是一條暖輸送帶，特別當它與北支槽或其他系統雲系連結或合併時，會將低緯度的水汽、熱量和動量輸送到華南地區或臺灣(圖 3)。

(三) 由實際個案亦獲致，較深的南支槽前之短波所

對應的南來水氣或渦度常較能被維持住的結果(圖3、圖4及圖5)，顯示此類天氣系統因氣塊由南往北移動， f 值由小漸大，羅斯貝變形半徑相應則為由大漸小，故重力波的運動其波動能量也較易於持久；而相較由華南向東南東移動的南支槽前短波水氣，擾動能量則較易於頻散或減弱，持續時間相應較短(圖6及圖7)。

(四)由假定層化大氣下的春雷個案，依據羅斯貝變形半徑進行研判，結果應證了重力波在傳播過程中，其時空特徵尺度大於羅斯貝變形半徑，因此波動能量不易頻散，並從實際雲圖中觀察到雲系呈現波動式的排列(圖8)，而由華南至臺灣上空作垂直剖面，發現中低層有輻散、輻合場相交錯呈現，代表其以「慣性重力波」特徵形式由西往東傳遞(圖9)。

五、參考文獻：

李國平，2006年12月：《新編動力氣象學》，氣象出版社，北京，497pp.

陳泰然，1989-11-01出版，《天氣學原理》，聯經出版事業股份有限公司，337pp.

參考網址：

http://www.shodor.org/os411/courses/_master/tools/calculators/brunt/

Holton, J. R., 1992: *Introduction to Dynamic Meteorology*. 3d ed. Academic Press, 511 pp.

Markowski, P. And Y. Richardson, 2010: *Mesoscale meteorology in midlatitudes*. Wiley-Blackwell, 2010. ISBN: 978-0470742136. 430 pp.

六、附圖：

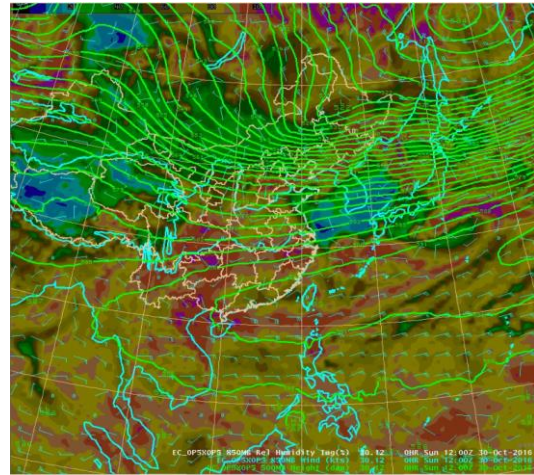


圖1：2016年10月30日12UTC 500hPa高度場疊加850hPa風場與相對溼度場。圖中的南支槽基本上是以地形強迫機制產生之波動(一種Forcing wave)，為青藏高原背風波，與斜壓波的生成原理不同。

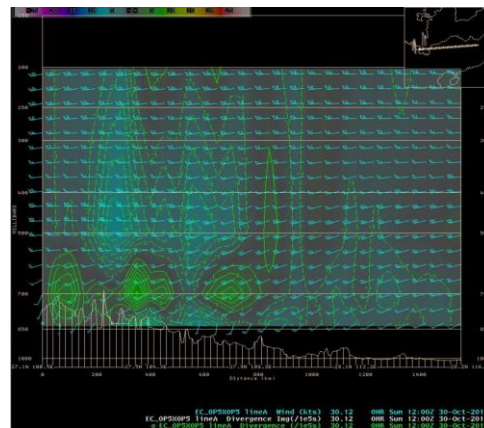


圖2：2016年10月30日12UTC 青藏高原下游南支槽輻散場垂直剖面圖，西風帶受青康藏高原的地形阻擋，會以重力波的形式，即輻散輻合場傳遞，這種重力波型態的短波為頻散波，由地形強迫產生出的波動，離開地形越遠，能量會逐漸減弱。

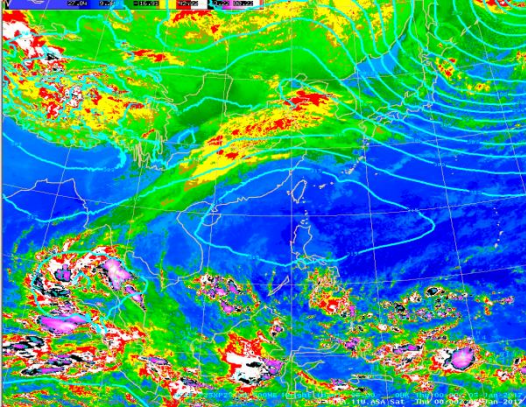


圖3：2018年1月5日00UTC 500hPa高度場疊加HIMA紅外線11 μ 色調強化衛星雲圖，顯示南支槽前的水氣輸送旺盛。

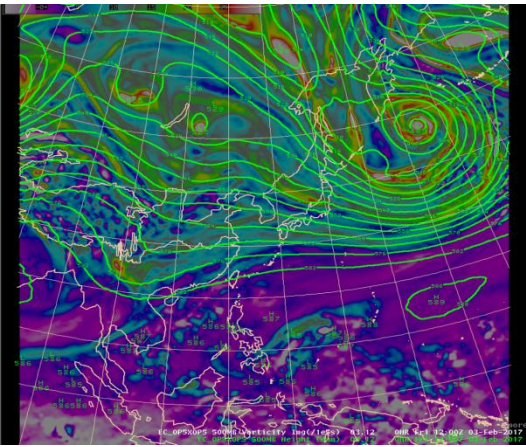


圖4：2017年2月3日12UTC 500hPa高度場疊加渦度場圖像。

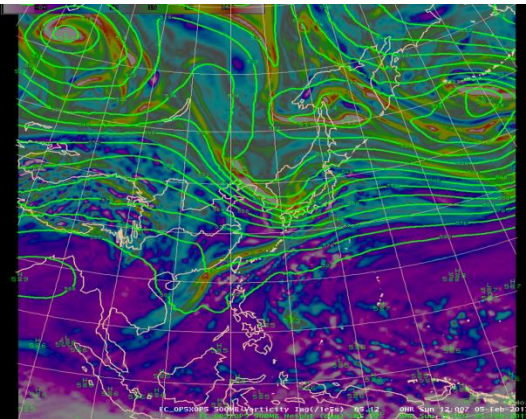


圖5：2017年2月5日12UTC 500hPa高度場疊加渦度場圖像，顯示了南支槽前的渦度場被維持住之現象。

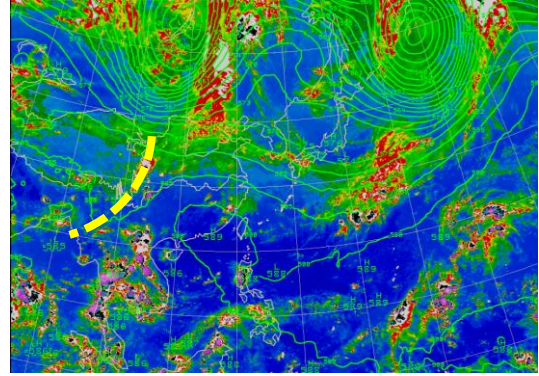


圖6：2018年05月21日12UTC 500hPa高度場疊加HIMA紅外線11 μ 色調強化衛星雲圖。

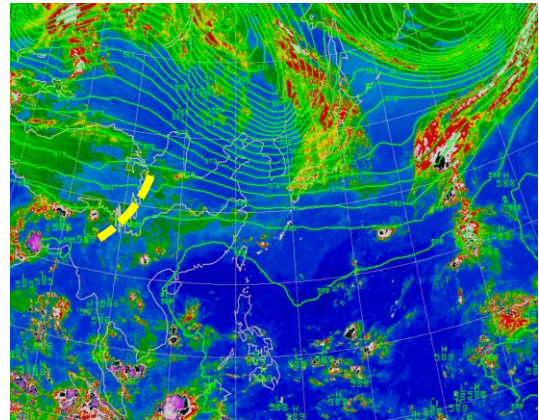


圖7：2018年05月23日00UTC 500hPa高度場疊加HIMA紅外線11 μ 色調強化衛星雲圖。

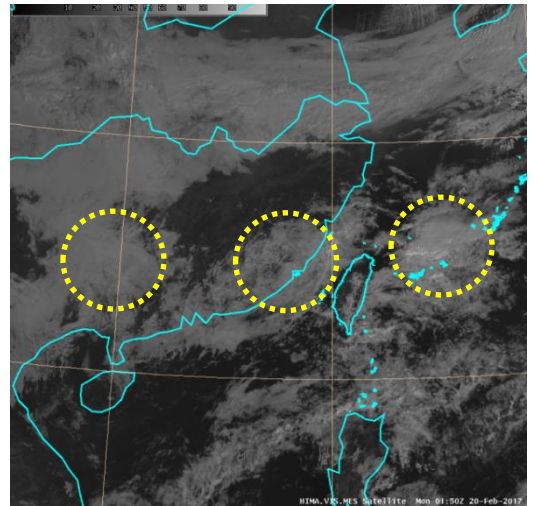


圖8：2017年2月20日0150UTC可見光衛星雲圖，綠色虛線圈呈現慣性內重力波的分布。

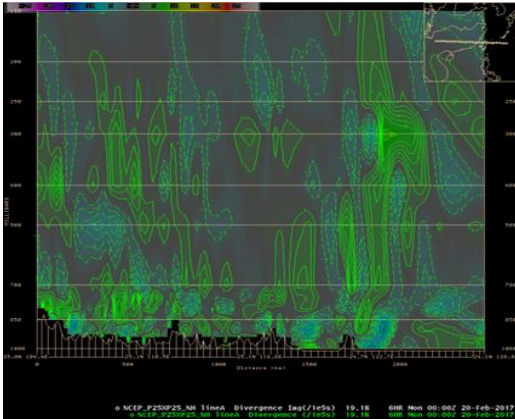


圖9：2017年2月20日0000UTC
NCEP_P25XP25700hPa ivergence °

Brunt-Vaisala Frequency Calculator	
Input Values:	
dT/dz (in Kelvin/meter)	-0.009
Wind Speed (M, in meters/second)	8
Temperature (T _v , in Celsius)	17
Geopotential Height (z ₁ , in meters)	500
Damping Factor/ E-folding Distance (b)	3
Distance Downwind (x, in meters)	15
Dry Temperature (T _d , in Celsius)	12
Results:	
N _{BV} (second ⁻¹)	0.0053
Wavelength (meters)	9.48
Height of air above starting equilibrium height (meters)	295.06
Height of lifting condensation level or cloud (meters)	625

表1：應用 Brunt-Vaisala Frequency Calculator 設定輸入環境參數並計算得到N值。請參考：
http://www.shodor.org/os411/courses/_master/tools/calculators/brunt/