

梅雨期間中尺度對流系統之 動能收支分析

林松錦 蔡欽明

國立中央大學大氣物理研究所

(中華民國七十八年七月十五日收稿；八月二十八日定稿)

摘 要

本文利用尺度分離之動能收支方程以及旋轉與輻散動能收支方程，針對梅雨期間華南地區之中尺度對流系統的演化過程進行動能收支診斷分析。

動能收支計算結果顯示大尺度環流並未直接提供系統生成的動能，而是透過中、大尺度流場的交互作用達成。大尺度環流的地轉風偏差則是系統發展最主要的貢獻，當這些有利於中尺度對流系統發展的條件消失時，系統亦逐漸消散。風場輻散分量的動能雖然只佔總動能的十分之一左右，但在動能收支過程中的貢獻卻與風場的旋轉分量相當，對中尺度對流系統演化過程的影響甚至更為重要。分析中尺度對流系統東南方生成的850hpa西南噴流發現，西南噴流的變動主要是由中尺度風場的變動而來。中尺度風場與大尺度環境風場風向的一致性，是低層噴流生成最主要的因素。跨越等壓線的地轉風偏差是中尺度強風速帶生成與維持最主要的貢獻。

關鍵詞：動能收支，中尺度對流系統。

一、前 言

在華南地區，每年的梅雨季節裡，常有組織性良好的中尺度對流系統 (Mesoscale Convective System, 簡稱MCS) 生成發展，並帶來大量降水，甚至豪雨成災。然而，我們對MCS的生成機制以及MCS與大尺度環境流場之間的交互作用仍然不十分了解。動能收支診斷分析的目的，在於了解對流系統生成發展過程中與環境之間能量的轉換與傳輸。藉分析的結果，期能增進了解中尺度對流系統的發生機制、在成長過程中環境流場如何控制系統的發展、以及系統成長過程中對環境流場的回饋效應。同時，分析的結果亦可提供日後建立中尺度數值預報模式的參考。

以往的分析研究大都將收支方程式中較難估計的一項 (如動能方程式中的消散項) 取為平衡方程

式等號兩邊各項總和的剩餘項。這一項通常數值都相當大，而一般都將其視為網格與次網格尺度系統之間的交互作用項，解釋上也相當困難。對時間解析度不足的觀測資料而言，時間變化率這一項已不具代表性，剩餘項更無法圓滿解釋。為克服這個問題，本文將不牽強去解釋時間變化項，而將以尺度分離的觀念 (Maddox, 1980; Lin 與 Chiou, 1985; Lin, 1988) 來討論收支方程式，並分別分析比較MCS和大尺度環流對收支過程的貢獻，期能藉此一研究策略使MCS和大尺度環流在收支過程中的角色更明朗化，更進而了解其間的交互作用。

從綜觀尺度動能收支的分析結果顯示，風場的旋轉分量對動能以及收支過程的貢獻遠大於輻散分量。因此有些數值模式在資料初始化時便將輻散分量除去。Chen等 (1978) 和Buechler與Fuehl-

erg (1986) 都發現對於暴發性氣旋及強烈對流系統，輻散分量對動能收支的貢獻並非小得可以忽略。對這兩個風場分量在MC S 成長過程中所佔的份量，本文亦將作一分析。

二、動能收支方程式

(一) 尺度分離動能收支方程式

Carney 與 Vincent (1986a, b) 曾以不同測站密度 (AVE / SESAME I 與美國 NWS 觀測網) 的客觀分析結果來代表全分析場與綜觀尺度場，而以二者之差代表 δ 尺度 (300 Km ~ 800 Km) 氣象場。其結論指出綜觀尺度運動的效應大於對流系統的影響。不過，事實上他們所研究的對流系統是範圍較小的對流雲，其所謂的綜觀尺度環流波長約為 800 公里而已。對尺度較大的 MC S 而言其結論是否相同值得探討。本文將以客觀尺度分離的觀念，應用 Carney 與 Vincent (1986a) 所發展的尤拉座標動能收支方程式來分析 MC S 生長過程中動能的收支情形。

假設 \vec{V} 為水平風場，則單位質量的動能為

$$k = \frac{1}{2}(\vec{V} \cdot \vec{V}) \quad (1)$$

若考慮某一區域，則區域上空氣柱內動能之含量為

$$K = \int_m k \, dm = \int_m \frac{1}{2}(\vec{V} \cdot \vec{V}) \, dm \quad (2)$$

其中積分符號代表

$$\int_m dm = \frac{1}{gA} \int_p \int_y \int_x dx \, dy \, dp \quad (3)$$

g 為重力加速度， A 為區域面積。將(2)式左右兩邊取時間微分，並將水平動量方程式代入可得動能隨時間的變化率

$$\frac{\partial K}{\partial t} = \int_m \left[\underbrace{-\vec{v} \cdot \nabla_p \phi}_a + \underbrace{\vec{v} \cdot \vec{F}}_c - \underbrace{\vec{v} \cdot (\vec{v} \cdot \nabla) \vec{v}}_d - \underbrace{\vec{v} \cdot (\omega \frac{\partial \vec{v}}{\partial p})}_{e} \right] dm \quad (4)$$

其中 ϕ 、 \vec{F} 、 f 及 ω 分別為重力位、摩擦力、科氏參數及等壓座標上的垂直速度，地面氣壓之變化所造成空氣柱內動能的改變，其數值通常較其他各項小了 1 ~ 2 個數量級，式中已予忽略不計。(4)式即為壓力座標上傳統尤拉形式的水平動能收支方程，其中(a)項為區域空氣柱內動能的時間變化率；(b)項為風場穿越等高線所造成的動能生成(消滅)項，意味著質量場內的位能與動能之間的轉換；(c)項是動能消散項，一般都以平衡等號兩邊的剩餘項來處理，因此除了摩擦作用外還包括了不同尺度間的能量轉換以及可能涉及各種誤差在內；(d)項與(e)項分別為水平與垂直動量傳輸的水平平流項。在原始的動能收支方程式 (Smith, 1969) 中，(d)與(e)項通常是以通量輻散形式來表示，為便於分析尺度交互作用，在此以平流形式表示。

(4)式雖然可以分析全分析風場的動能收支情形，卻無法顯示出中尺度動能的收支過程以及不同尺度間非線性的交互作用。因此，若將全分析場分解為大尺度場(下標為 1)與中尺度場(下標為 m)，並將動能分解成

$$K = \int_m \left[\frac{1}{2}(\vec{V}_1 \cdot \vec{V}_1) + \frac{1}{2}(\vec{V}_m \cdot \vec{V}_m) + \vec{V}_1 \cdot \vec{V}_m \right] dm = KL + KM + \int_m (\vec{V}_1 \cdot \vec{V}_m) dm \quad (5)$$

其中 KL 代表大尺度動能，KM 代表中尺度動能， $\vec{V}_1 \cdot \vec{V}_m$ 則為大尺度與中尺度風場之交互作用項。同樣對(5)式左右兩邊取時間微分並將水平動量方程式代入，可得到完整的尺度分離動能收支方程式如下：

$$\frac{\partial K}{\partial t} = \int_m \left[\underbrace{-\vec{V}_1 \cdot \nabla_p \phi}_a - \underbrace{\vec{V}_m \cdot \nabla_p \phi}_b - \underbrace{\vec{V}_1 \cdot \nabla_p \phi}_c - \underbrace{\vec{V}_m \cdot \nabla_p \phi}_d + \underbrace{\vec{V}_m \cdot \nabla_p \phi}_e + \underbrace{\vec{V}_1 \cdot \vec{F}_1}_f + \underbrace{\vec{V}_m \cdot \vec{F}_m}_g + \underbrace{\vec{V}_1 \cdot \vec{F}_m}_h + \underbrace{\vec{V}_m \cdot \vec{F}_1}_i - \underbrace{\vec{V}_1 \cdot (\vec{V}_1 \cdot \nabla) \vec{V}_1}_j - \underbrace{\vec{V}_m \cdot (\vec{V}_m \cdot \nabla) \vec{V}_m}_k - \underbrace{\vec{V}_1 \cdot (\vec{V}_m \cdot \nabla) \vec{V}_1}_k \right] dm$$

$$\begin{aligned}
 & -\vec{V}_m \cdot (\vec{V}_m \cdot \nabla) \vec{V}_i - \vec{V}_m \cdot (\vec{V}_i \cdot \nabla) \vec{V}_m - \vec{V}_i \cdot \\
 & \quad \mathbf{l} \qquad \qquad \mathbf{m} \\
 & (\vec{V}_m \cdot \nabla) \vec{V}_i - \vec{V}_i \cdot (\vec{V}_m \cdot \nabla) \vec{V}_m - \vec{V}_i \cdot (\vec{V}_i \cdot \nabla) \vec{V}_m \\
 & \quad \mathbf{n} \qquad \qquad \mathbf{o} \qquad \qquad \mathbf{p} \\
 & -\vec{V}_m \cdot (\vec{V}_i \cdot \nabla) \vec{V}_i - \vec{V}_i \cdot (\omega_i \frac{\partial \vec{V}_i}{\partial p}) - \vec{V}_m \cdot \\
 & \quad \mathbf{q} \qquad \qquad \mathbf{r} \\
 & (\omega_m \frac{\partial \vec{V}_m}{\partial p}) - \vec{V}_m \cdot (\omega_i \frac{\partial \vec{V}_m}{\partial p}) - \vec{V}_m \cdot (\omega_m \frac{\partial \vec{V}_i}{\partial p}) \\
 & \quad \mathbf{s} \qquad \qquad \mathbf{t} \qquad \qquad \mathbf{u} \\
 & -\vec{V}_i \cdot (\omega_m \frac{\partial \vec{V}_i}{\partial p}) - \vec{V}_i \cdot (\omega_m \frac{\partial \vec{V}_m}{\partial p}) - \vec{V}_i \cdot \\
 & \quad \mathbf{v} \qquad \qquad \mathbf{w} \\
 & (\omega_i \frac{\partial \vec{V}_m}{\partial p}) - \vec{V}_m \cdot (\omega_i \frac{\partial \vec{V}_i}{\partial p})] dm \qquad (6) \\
 & \quad \mathbf{x} \qquad \qquad \mathbf{y}
 \end{aligned}$$

藉(6)式可分析中尺度對流系統動能收支過程中不同

尺度的貢獻以及不同尺度間非線性交互作用的動能收支方程式。其中(b)至(e)項可合併為全分析場的動能生成(消滅)項($-\vec{V} \cdot \nabla_p \phi$), (f)至(i)項合併為全分析場的動能消散項($\vec{V} \cdot \vec{F}$), (j)至(q)項與(r)至(y)項則分別可合併為水平動量傳輸與垂直動量傳輸的水平平流項($-\vec{V} \cdot (\vec{V} \cdot \nabla) \vec{V}$ 與 $-\vec{V} \cdot (\omega \frac{\partial \vec{V}}{\partial p})$)。(6)式中各項關係式可以圖 1 之意圖來表示, 圖中每一項的數學式則如表一所示。

(二) 旋轉與輻散動能收支方程式

Chen 與 Wiin-Nielsen (1976) 曾對封閉的系統建立旋轉與輻散動能收支方程式。Chen 等(1978)也曾探討中尺度氣旋旋轉與輻散動能收支情形。為了解風場旋轉分量(\vec{V}_r)與輻散分量(\vec{V}_d)對中尺度對流系統發展過程中動能收支的貢獻, 本文將以 Buechler 與 Fuelberg (1986) 所建立的開

表一 動能收支方程式各項之數學式。

$DKT = \frac{\partial}{\partial t}(K)$	$HIMML = -\vec{V}_m \cdot (\vec{V}_m \cdot \nabla) \vec{V}_i$
$GT = -\vec{V} \cdot \nabla_p \phi$	$VIMLM = -\vec{V}_m \cdot (\omega_i \frac{\partial \vec{V}_m}{\partial p})$
$DISST = \vec{V} \cdot \vec{F}$	$VIMML = -\vec{V}_m \cdot (\omega_m \frac{\partial \vec{V}_i}{\partial p})$
$HADT = -\vec{V} \cdot (\vec{V} \cdot \nabla) \vec{V}$	$DTLM = \frac{\partial}{\partial t}(\vec{V}_i \cdot \vec{V}_m)$
$VADT = -\vec{V} \cdot (\omega \frac{\partial \vec{V}}{\partial p})$	$GLM = -\vec{V}_i \cdot \nabla_p \phi_m$
$DKL = \frac{\partial}{\partial t}(K_i)$	$GML = -\vec{V}_m \cdot \nabla_p \phi_i$
$GL = -\vec{V}_i \cdot \nabla_p \phi_i$	$HILML = -\vec{V}_i \cdot (\vec{V}_m \cdot \nabla) \vec{V}_i$
$DISSL = \vec{V}_i \cdot \vec{F}_i$	$HILMM = -\vec{V}_i \cdot (\vec{V}_m \cdot \nabla) \vec{V}_m$
$HADL = -\vec{V}_i \cdot (\vec{V}_i \cdot \nabla) \vec{V}_i$	$HILLM = -\vec{V}_i \cdot (\vec{V}_i \cdot \nabla) \vec{V}_m$
$VADL = -\vec{V}_i \cdot (\omega_i \frac{\partial \vec{V}_i}{\partial p})$	$HIMLL = -\vec{V}_m \cdot (\vec{V}_i \cdot \nabla) \vec{V}_i$
$DKM = \frac{\partial}{\partial t}(K_m)$	$VILML = -\vec{V}_i \cdot (\omega_m \frac{\partial \vec{V}_i}{\partial p})$
$GM = -\vec{V}_m \cdot \nabla_p \phi_m$	$VILMM = -\vec{V}_i \cdot (\omega_m \frac{\partial \vec{V}_m}{\partial p})$
$DISSM = \vec{V}_m \cdot \vec{F}_m$	$VILLM = -\vec{V}_i \cdot (\omega_i \frac{\partial \vec{V}_m}{\partial p})$
$HADM = -\vec{V}_m \cdot (\vec{V}_m \cdot \nabla) \vec{V}_m$	$VIMLL = -\vec{V}_m \cdot (\omega_i \frac{\partial \vec{V}_i}{\partial p})$
$VADM = -\vec{V}_m \cdot (\omega_m \frac{\partial \vec{V}_m}{\partial p})$	$DISSI = (\vec{V}_i \cdot \vec{F}_m + \vec{V}_m \cdot \vec{F}_i)$
$HIMLM = -\vec{V}_m \cdot (\vec{V}_i \cdot \nabla) \vec{V}_m$	

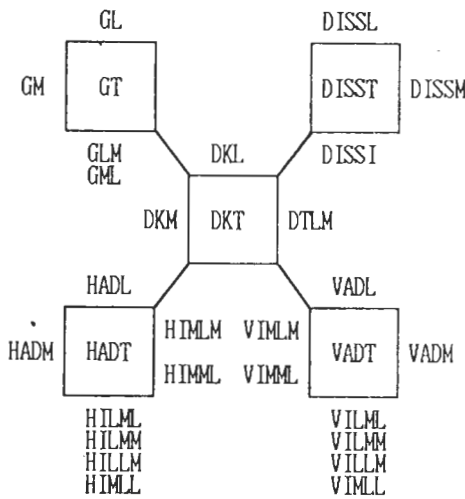


圖1 動能收支方程式各收支項的相互關係示意圖。

放區間動能收支方程，做進一步的分析探討。

應用Helmholtz的理論，水平風場可分解成旋轉分量與輻散分量 (Endlich, 1967)

$$\vec{V} = \vec{V}_r + \vec{V}_d \tag{7}$$

則區域空氣柱內動能含量可表示為

$$K = \int_m \left[\frac{1}{2}(\vec{V}_r \cdot \vec{V}_r) + \frac{1}{2}(\vec{V}_d \cdot \vec{V}_d) + (\vec{V}_r \cdot \vec{V}_d) \right] dm$$

$$= KR + KD + \int_m (\vec{V}_r \cdot \vec{V}_d) dm \tag{8}$$

其中KR為旋轉動能分量，KD為輻散動能分量。輻散動能KD的動能收支方程可由KD對時間微分並利用動量方程式得到

$$\frac{\partial KD}{\partial t} = \int_m \left\{ -\vec{V}_d \cdot \frac{\partial \vec{V}_r}{\partial t} - \left[-f(v_r u_d - u_r v_d) - \zeta(v_r u_d - u_r v_d) - \omega \frac{\partial k_r}{\partial p} - \omega \vec{V}_r \cdot \frac{\partial \vec{V}_d}{\partial p} \right] - \vec{V}_d \cdot \nabla \phi - \nabla \cdot k \vec{V}_d - \frac{\partial \omega k}{\partial p} + \vec{V}_d \cdot \vec{F} \right\} dm \tag{9}$$

DKD
INTD
Af

Az
B
C

GD
HFD
VF
DD

其中 $\zeta = \partial v_r / \partial x - \partial u_r / \partial y$ 。旋轉動能KR的動能收支方程亦可以同樣的方式求得，但為了方便起見，也可直接由K的定義來推導。由

$$\frac{\partial K}{\partial t} = \int_m \left[-\vec{V} \cdot \nabla \phi - \nabla \cdot k \vec{V} - \frac{\partial \omega k}{\partial p} + \vec{V} \cdot \vec{F} \right] dm \tag{10}$$

及對(8)式取時間微分

$$\frac{\partial KR}{\partial t} = \frac{\partial K}{\partial t} - \frac{\partial KD}{\partial t} - \int_m \frac{\partial (\vec{V}_r \cdot \vec{V}_d)}{\partial t} dm \tag{11}$$

並將(9)式代入可以得到旋轉動能KR的動能收支方程

$$\frac{\partial KR}{\partial t} = \int_m \left\{ -\vec{V}_r \cdot \frac{\partial \vec{V}_d}{\partial t} + \left[-f(v_r u_d - u_r v_d) - \zeta(v_r u_d - u_r v_d) - \omega \frac{\partial k_r}{\partial p} - \omega \vec{V}_r \cdot \frac{\partial \vec{V}_d}{\partial p} \right] - \vec{V}_r \cdot \nabla \phi - \nabla \cdot k \vec{V}_r + \vec{V}_r \cdot \vec{F} \right\} dm \tag{12}$$

DKR
INTR
Af

Az
B
C
GR

HFR
DR

由於(9)與(12)兩式裡中括符內的四項具相反之符號，因此可認為是KD與KR之間的轉換項，往後將以C(KD, KR)來代表。Chen與Win-Nielsen (1976)指出 \vec{V}_d 的功能在於水平傳輸帶有角動量的流體元素。為了滿足角動量之守恒，流體元素在傳輸交換時會產生一種切線方向的力。這個力對旋轉運動所作的功即為Af與Az。 \vec{V}_r 與 \vec{V}_d 的方位及大小將可決定Af與Az的正負及數值大小。B項為旋轉動量之垂直傳輸項。C項則為 \vec{V}_r 與 \vec{V}_d 交互作用之動量的垂直平流項。GD與GR分別是 \vec{V}_d 與 \vec{V}_r 跨越等高線所造成位能與動能之間的轉換，亦即動能之生成(消滅)項。HFD與HFR分別是由 \vec{V}_d 與 \vec{V}_r 傳輸的動能水平通量輻合。VF則為動能的垂直通量輻合。DD與DR一如前述當作剩餘項來處理，代表摩擦效應所造成的能量消散以及不同尺

度間的能量的轉換。INTD 與 INTR 均為 \vec{V}_d 與 \vec{V}_r 之交互作用所產生，亦可見 \vec{V}_d 與 \vec{V}_r 並非互相獨立，而是息息相關相互影響。若考慮一全球模式，對全球積分的結果，HFD、HFR 與 VF 都將自動為 0，而 GR、INTD 與 INTR 亦可改寫成氣流函數 (stream function) 與速度位 (velocity potential) 的 Jacobian 形式，對全球積分的結果亦為 0 (Chen 與 Wiin-Nielsen, 1976; Buechler 與 Fuelberg, 1986)。

三、個案分析結果與討論

本文所研討 MCS 個案為一發生在華南地區較具組織性且較為獨立的中- α 尺度 MCS。有關該系統的發展過程與結構在 Lin (1988) 中已有詳細的分析，系統約在 1984 年 5 月 31 日 0900 UTC 開始組織成長，到了 31 日 1800 UTC 達到成熟階段，整個 MCS 的生命期約為 18 小時。5 月 30 日 1800 UTC 已達成成熟階段之 MCS 位於本 MCS 個案分析區域的北方 (圖 2 箭頭 A 所指)，而後該系統向東移動並逐漸消散，但仍維持了相當長的時間。本個案所分析之 MCS 其生長過程與環流型態均受到此一系統之影響。5 月 31 日 0000 UTC 在 MCS 生成之前，500hPa 已出現明顯短波槽，強勢的斜壓分佈 (Lin, 1988)，生成位置有一地面低壓存在，梅雨鋒面帶由日本九州南方往華南地區延伸。5 月 31 日 0600 UTC 在梅雨鋒面帶尾端 (圖 2 箭頭 B 所指) 有一對流雲帶生成並發展，5 月 31 日 1200 UTC 對流所在位置低層相當溫暖潮溼，同時總指數亦大於 44，顯示此區有利於對流發展 (Lin, 1988)。梅雨鋒面位置近乎滯留不動，為發展性 MCS 之有利環境 (林等, 1988) 5 月 31 日 1800 UTC, MCS 達到成熟 (圖 2 箭頭 C 所指)，而後系統逐漸消散。6 月 1 日 0000 UTC 北方的高壓系統南移，鋒面帶亦往南移動，系統位置低層相當位溫降低許多，總指數大於 44 的區域只侷限於南部而已，MCS 繼續消散。到了 6 月 1 日 1200

UTC, MCS 已完全消散。

由於正常的探空觀測資料每 12 小時才有一次，時間解析度的不足使得動能的時間變化率解釋較為困難。本文中將偏重於個別時間動能收支過程的分析。所採用四個探空觀測資料時間分別代表 MCS 發生前 (5 月 31 日 0000 UTC)、發展階段 (5 月 31 日 1200 UTC)、消散階段 (6 月 1 日 0000 UTC) 以及消散後 (6 月 1 日 1200 UTC)。涉及時空變化項與動能消散項時則以 5 月 31 日 0000 UTC 至 5 月 31 日 1200 UTC 當作是系統發展階段、5 月 31 日 1200 UTC 至 6 月 1 日 0000 UTC 為強對流階段、6 月 1 日 0000 UTC 至 6 月 1 日 1200 UTC 為系統消散階段。個案的資料處理及分析方法在 Lin (1988) 中有詳細的敘述，本文中以 MCS 成熟時雲區所覆蓋的範圍為動能收支分析區域，亦即東經 104 ~ 112 度，北緯 22 ~ 26 度 (圖 2 粗實線所示範圍)。

(一) 尺度分離之動能收支分析

表二為各分析時間區域內總動能 K、大尺度動能 K_L 、中尺度動能 K_M 以及大尺度與中尺度風場的純量積 $\vec{V}_e \cdot \vec{V}_m$ (以 VLVM 表示) 的含量。由四個時間的平均來看，總動能中約 83.6% 為大尺度環流的貢獻，21.5% 來自中尺度場，VLVM 則為一負的貢獻。顯然，大尺度環流仍佔最主要的部份。比較各分析時間的總動能發現，當系統發展時總動能卻較系統發生前少，然而大尺度動能與中尺度動能均較系統發生前增加，這就是 VLVM 的影響。可見在 MCS 的生長過程中未必有較大的動能含量，除了大尺度環流的變動有很大的影響外，系統本身之中尺度風場與大尺度環境場是否相配合或是互相抵消，也就是 VLVM 的正負，有著密切的關係。圖 3 是動能隨高度的分佈與演化的情形。KL 隨高度遞增，最大動能在 200hPa 至 300hPa 之間，KM 隨高度變化不大，而 VLVM 在上層有一相當大的負值存在，中、下層為正值，使得總動能最大正值並不在上層，而是在中層 (400hPa 至 700hPa

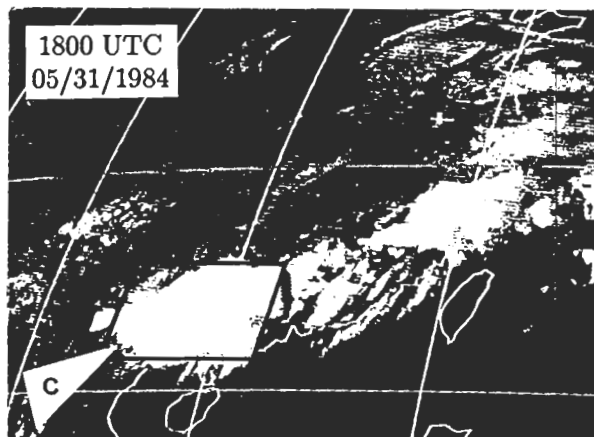
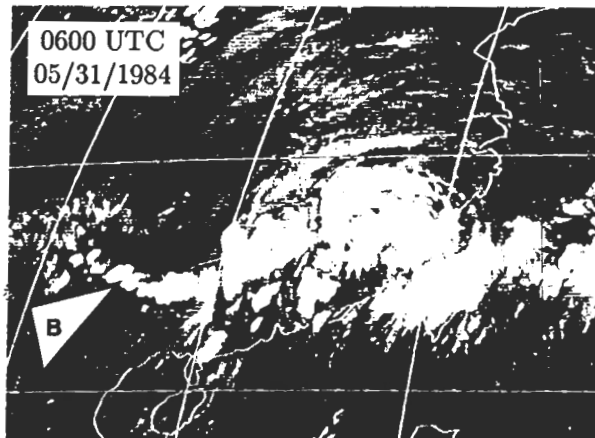
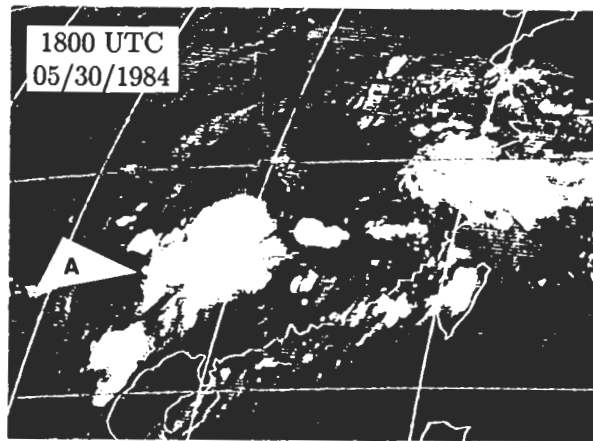


圖2 民國73年5月30日1800 UTC、5月31日0600 UTC及1800 UTC的GMS衛星雲圖。粗實線所示為動能收支分析區域。

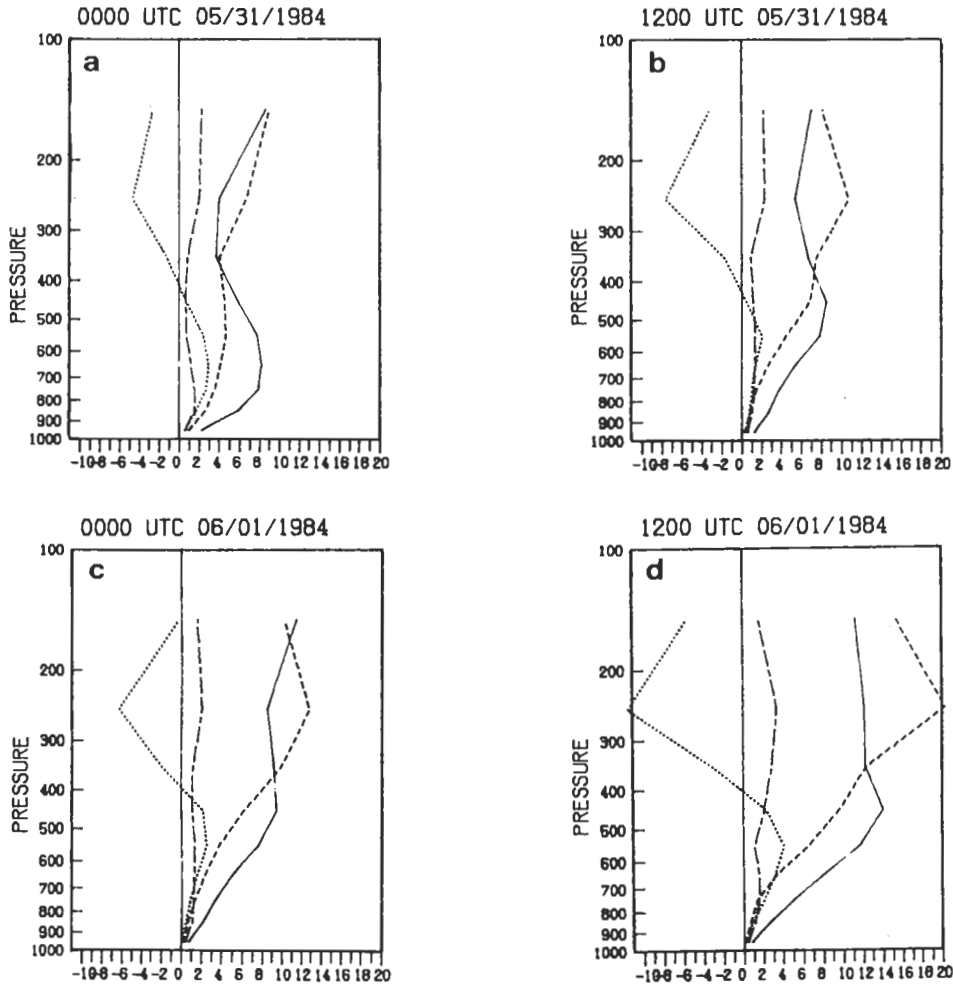


圖3 區域內總動能K (——)，大尺度動能KL (---)，中尺度動能KM (-.-) 以及大尺度與中尺度風場的純量積VLVM(.....)的垂直分佈圖。單位 10^4Jm^{-2} 。(a) 5.月31.日 0000 UTC、(b) 5.月31.日 1200 UTC、(c) 6.月 1.日 0000 UTC、(d) 6.月 1.日 1200 UTC。

)。這也是此一個案與其他研究個案 (Tsui 與 Kung, 1977 ; Fuelberg 與 Scoggins, 1978 ; Fuelberg 與 Jedlovec, 1982 ; Fuelberg 與 Printy, 1983) 不同之處,其他個案動能大致均往上遞增。

尺度分離動能收支方程式 (6 式) 中各收支項在分析區域範圍整層空氣柱內的變化情形如圖 5 ~ 9 所示,圖中包含整層 (1000hPa- 100hPa)、上層 (400hPa- 100hPa)、中層 (700hPa- 400hPa)、及下層 (700hPa- 1000hPa) 之分析,各分析

值之對應收支項請參考圖 1。圖 4 則為各分析時間 GT、HADT 與 VADT (各收支項之數學式請參考表一) 隨著高度變化之分佈情形。5 月 31 日 0000 UTC 系統發生前 (圖 5) GT 為 10.2Wm^{-2} , 提供了 MCS 生成的有利條件。正 GT 值來自中下層,而上層為能量消耗區。GL 為明顯的負值 (-6.3Wm^{-2}), GM 與 GLM 均為明顯的正值 (4.6Wm^{-2} 與 15.1Wm^{-2}), 顯示大尺度環流並不利於系統的生成,系統生成的主要動能來源是靠中尺度場本身以及大

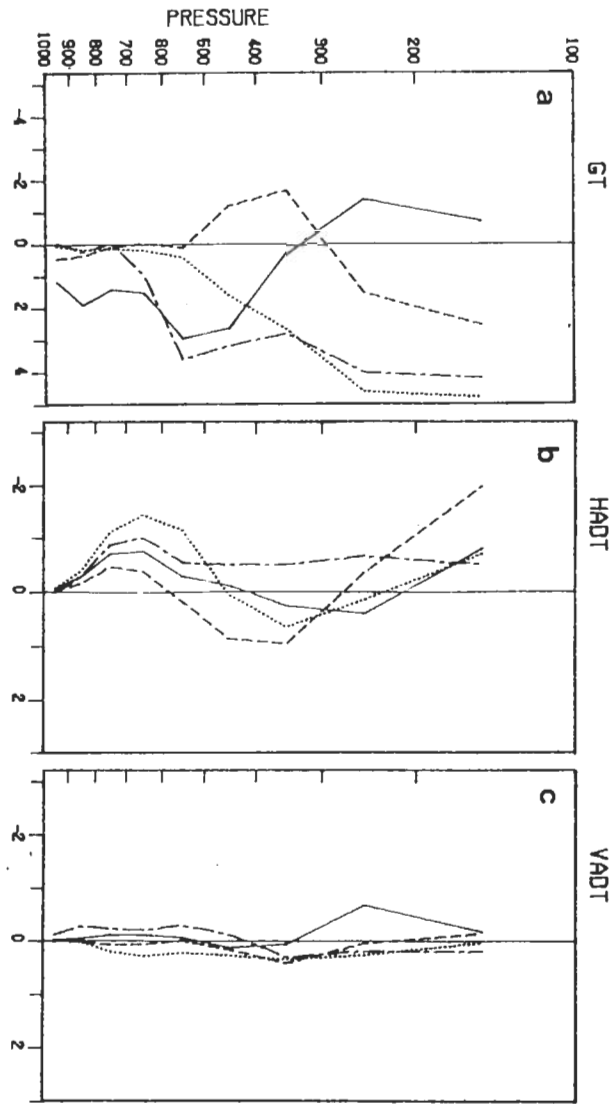


圖 4 分析區域內(a)總動能生成(消滅)項GT、(b)總動能水平平流項HADT及(c)總動能垂直平流項VADT的垂直分佈圖，單位為 Wm^{-2} 。——為5.月31.日0000 UTC、-----為5.月31.日1200 UTC、.....為6.月1.日0000 UTC、- · - · - 為6.月1.日1200 UTC。

尺度風場和中尺度高度場的配合。此時動能的水平平流項HADT除了400hPa至200hPa有少量的動能移入外，其餘各層均為動能外流區(圖4b)，整層而言亦為一負的效應(圖5)。其中HADL、HADM與HILML為動能的源(source)，而HIMLM與HILMM為主要的匯(sink)。整個來

說，大尺度與中尺度之間的交互作用是區域內動能移出最主要的因素。動能的垂直平流項VADT，正值表示動能的垂直平流是由較大的動能傳至較小的動能，反之亦然。此項顯然較水平平流項HADT小，而同樣是動能負的貢獻。VADT中最主要的匯是VADL與VILML。

表二 分析區域內各分析時間整層空氣柱之總動能 K ，大尺度動能 K_L 、中尺度動能 K_M 、大尺度與中尺度風場的純量積 $V_L V_M$ 的含量(單位為 $10^5 Jm^{-2}$)、以及各項之時間變化率(單位為 Wm^{-2})

1000hPa~100hPa								
DATE/TIME	K	DK	KL	DKL	KM	DKM	VLVM	DVLVM
05/31/0000UTC	5.49		4.05		1.18		0.25	
		-1.4		0.6		0.1		-2.1
05/31/1200UTC	4.90		4.30		1.24		-0.64	
		2.2		1.1		-0.2		1.3
06/01/0000UTC	5.83		4.78		1.15		-0.09	
		4.6		5.2		1.1		-1.6
06/01/1200UTC	7.83		7.00		1.61		-0.77	

表三 分析區域內各分析時間整層空氣柱之總動能 K 、旋轉動能 K_R 、輻散動能 K_D 、旋轉與輻散風場的純量積 $V_R V_D$ (單位為 $10^5 Jm^{-2}$)、以及各項之時間變化率(單位為 Wm^{-2})。

1000hPa~100hPa								
DATE/TIME	K	DK	KR	DKR	KD	DKD	VRVD	DVRVD
05/31/0000UTC	5.5		4.6		0.67		0.22	
		-1.4		.1		-.6		-.9
05/31/1200UTC	4.9		4.7		0.40		-0.17	
		2.2		2.6		-.3		-.1
06/01/0000UTC	5.8		5.8		0.26		-0.22	
		4.6		3.4		.1		1.2
06/01/1200UTC	7.8		7.2		0.29		0.32	

5月31日1200 UTC 系統發展時(圖6)動能產生項 G_T 為 $19.2 Wm^{-2}$ 是系統發展時動能的主要來源，最大正值已由中、下層轉為中、上層(600 hPa 以上)(圖4a)。此時大尺度場 G_L 已成了動能的源之一， G_M 與 G_{LM} 仍為源，只有 G_{ML} 為滙，而值並不大。顯示在系統發展時，大尺度與中尺度風場跨越等高線的地轉風偏差對動能增加有正的效應，也就是說系統所在位置有顯著的位能轉換成動能之情形。其中又以大尺度環流與整個高度場

的配合， $G_L + G_{LM} = -\vec{v}_1 \cdot \nabla_p \phi$ 為最主要，也就是說大尺度環流之地轉風偏差提供了系統發展主要的能源。整層來看，除了 G_M 在中層有最大的變化值外，其餘三項上層的變化仍是最主要的。HADT 在系統發展時整層均為動能外流區(圖4b)。低層(1000hPa 至 700hPa)在分析區域之西半部有動能流入，而東半部為動能流出區，上層則幾乎都為動能外流區域(圖未示)。HADT 中以 HADL 與 HILLM 之外流作用為最主要。VADT 在系統

73年 5月31日 0000 UTC

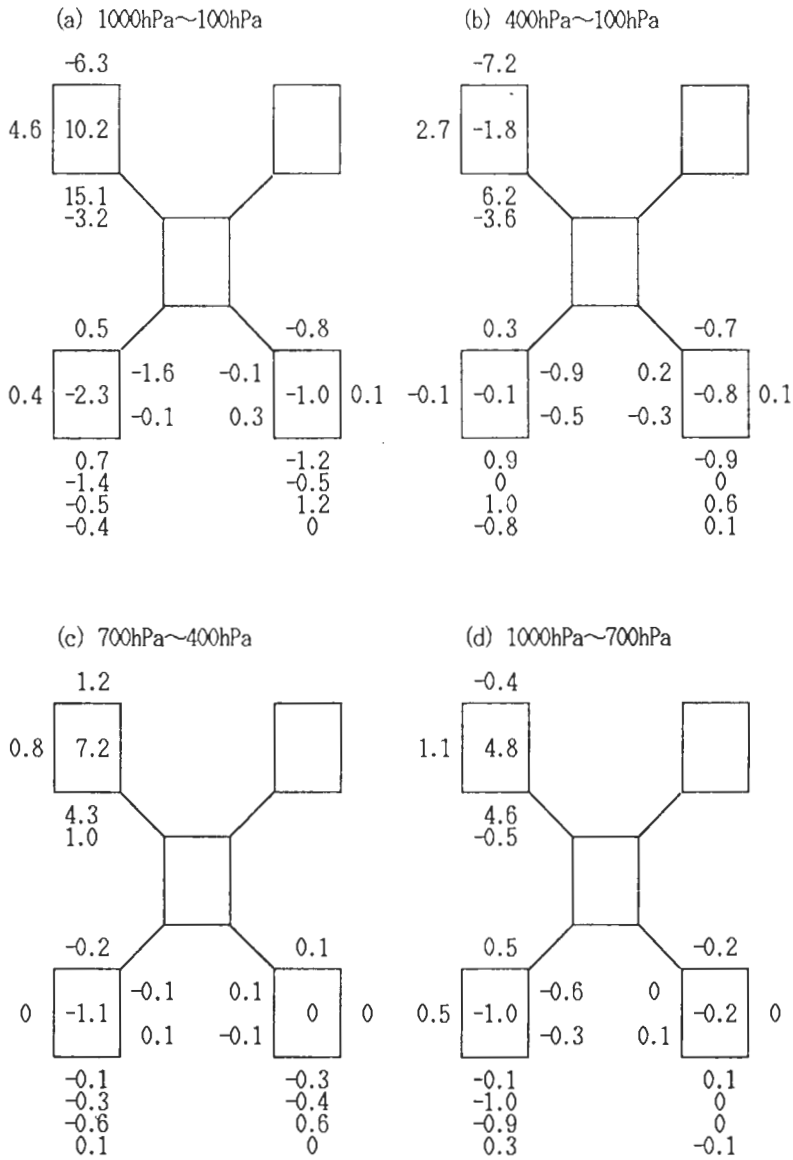


圖 5 民國 73 年 5 月 31 日 0000 UTC 分析區域平均動能收支圖。單位為 Wm^{-2} 。(a) 整層 (1000hPa 至 100hPa)、(b) 上層 (400hPa 至 100hPa)、(c) 中層 (700hPa 至 400hPa)、(d) 下層 (1000hPa 至 700hPa)。

發展時仍為負值，但是很明顯的 400hPa 以下為負象。
 值，400hPa 以上為正值 (圖 4 c)，說明了系統發展時能量藉著垂直運動由中、下層平流至上層的現

象。
 6 月 1 日 0000 UTC 系統正在消散時 (圖 7)
 ，GT 明顯地大幅減小，只剩下 $2.2Wm^{-2}$ 。500

73年 5月31日 1200 UTC

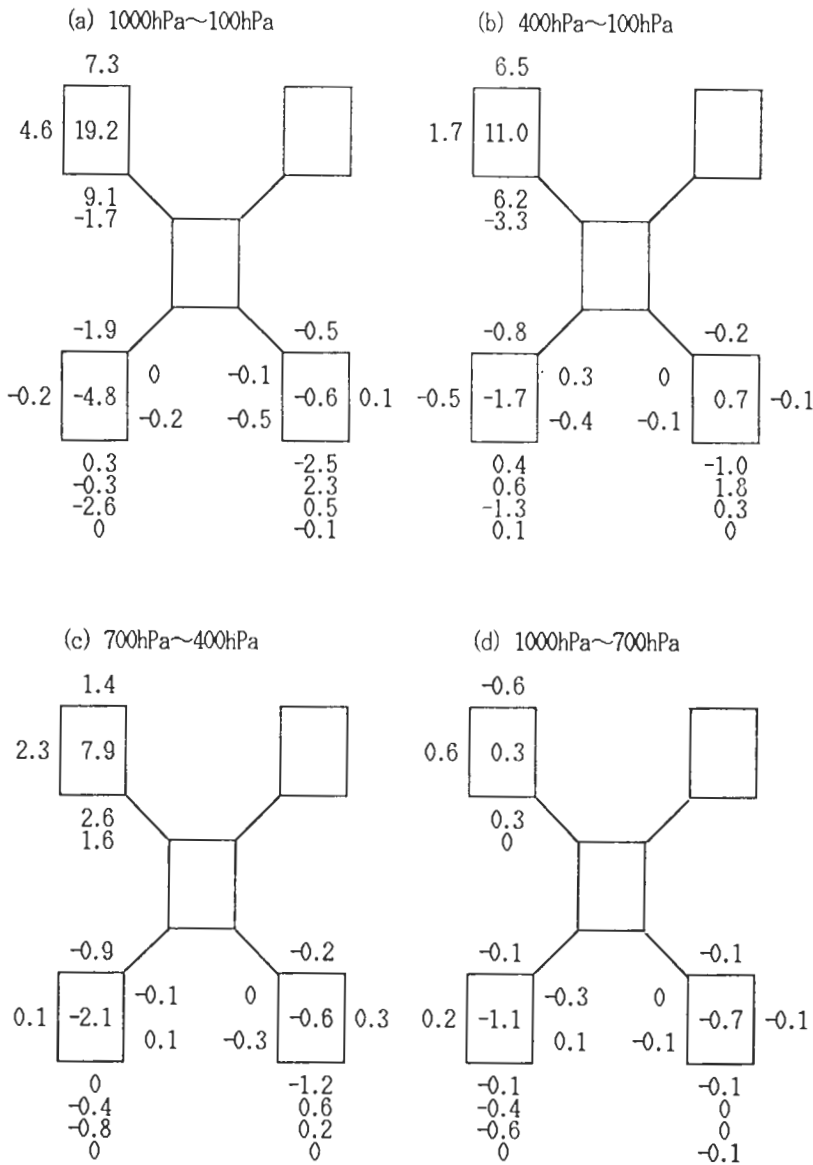


圖 6 民國73年 5月31日 1200 UTC分析區域平均動能收支圖。說明同圖 5。

hPa 至 300hPa 之間已成了動能的滙(圖4a)，顯示有利於系統發展的條件已消失。此時大尺度場GL仍為正值但已減小，GML為一小的源，而GM與GLM則都成了動能的滙。可見當系統消散時，中尺度高度場的配置已不利於系統繼續發展。HADT在系統消散時500hPa至300hPa有輻合作用造成動能之移入，下層動能移出情形並無多大變化，上

層的動能外流區域已有部分區域轉為動能移入區(圖未示)。整層而言仍為動能負的貢獻。而HADL與HILLM成為此時動能最主要的滙與源。系統消散時VADT反而是正的貢獻，唯值甚小。區域內上層大致仍為正值，下層大部份地區已成了負值，已看不出有動能往上平流的現象(圖4c)。

6月1日1200UTC系統消散後(圖8)，環

73年 6月 1日 0000 UTC

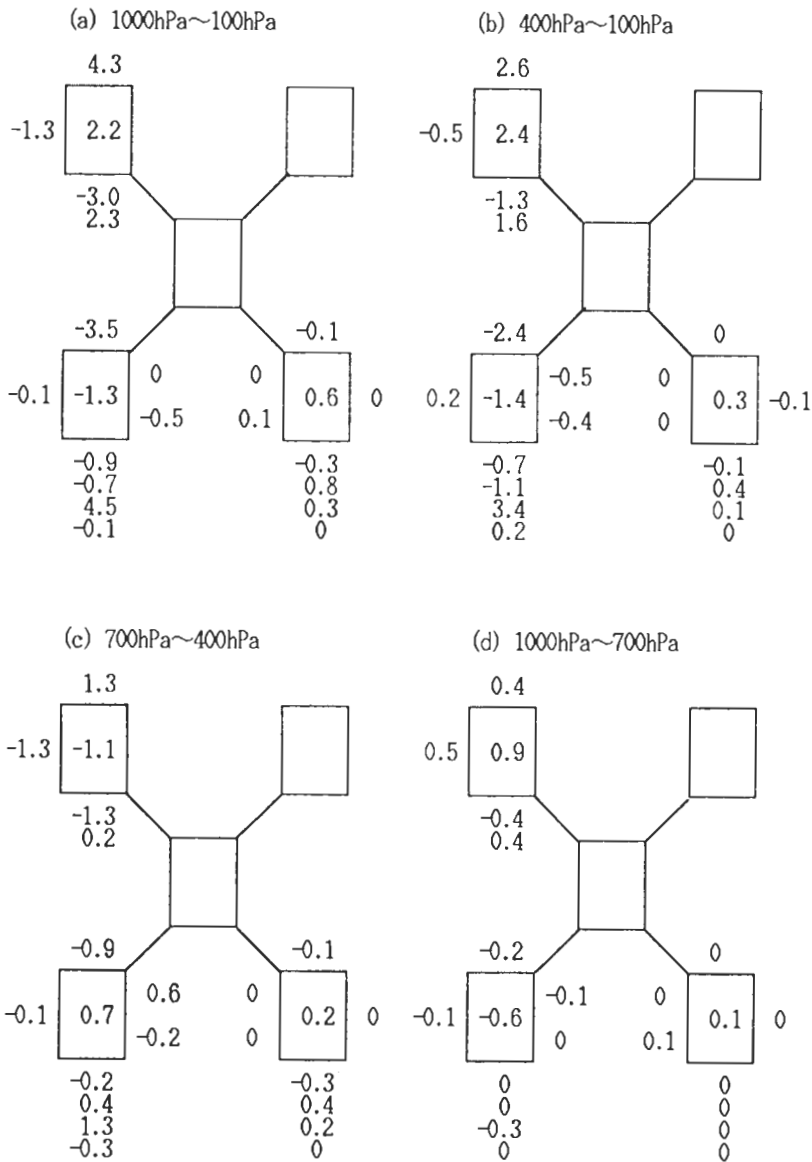


圖 7 民國 73 年 6 月 1 日 0000 UTC 分析區域平均動能收支圖。說明同圖 5。

境的 GT 值又增加，主要的正值都在上層(圖 4a)。GL 是系統消散後最主要的貢獻，其它項均大為減少。正 GL 值的大為增加顯示系統的發展破壞了中上層大尺度流場的地轉平衡。HADT 此時仍為動能外流的作用，最主要的外流區在 800hPa 至 500 hPa 之間(圖 4b)。大尺度環流 HADL 仍是動

能最主要的匯，HILLM 則為源。VADT 則是幾乎整層都為正值(圖 4c)，比較中層與下層(圖未示)平面分析圖還可以發現區域內此時反而有動能由上往下平流的現象。

動能消散項 DISSL、DISSM 以及 DISSI 的計算是以剩餘量處理。圖 9 為分析區域內整層空氣

73年 6月 1日 1200 UTC

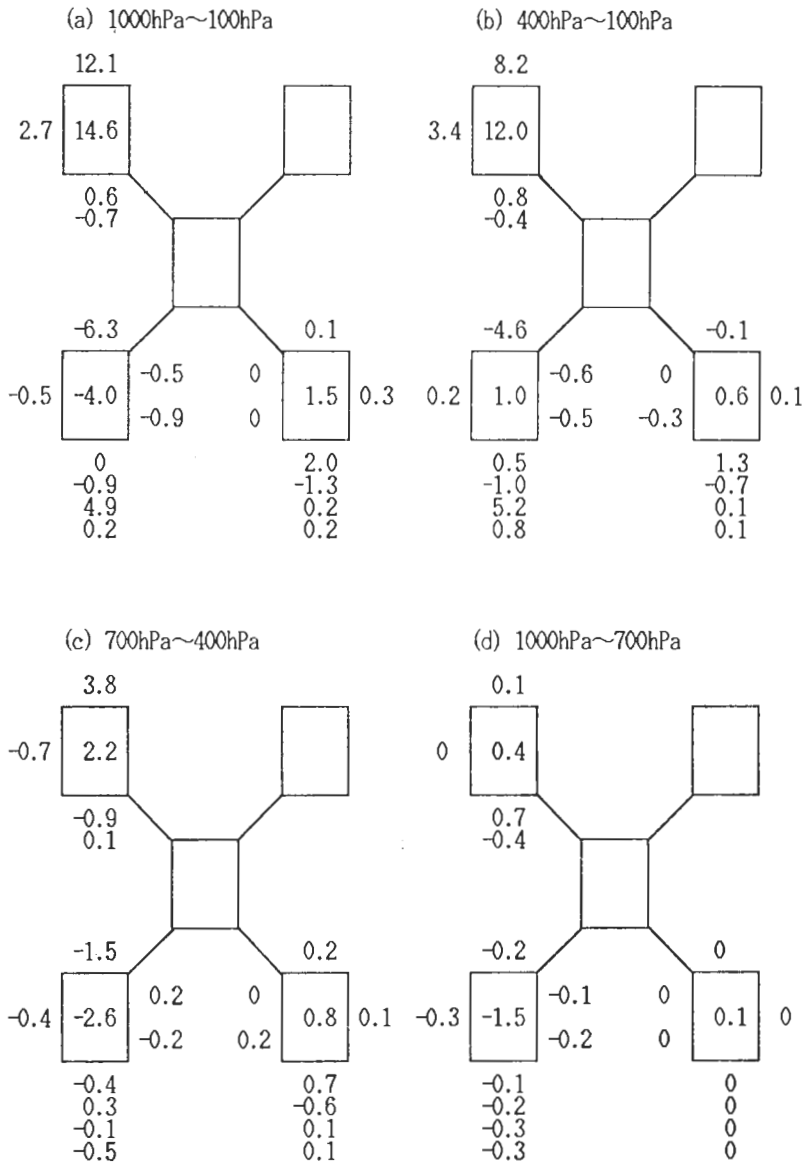


圖 8 民國 73 年 6 月 1 日 1200 UTC 分析區域平均動能收支圖。說明同圖 5。

柱之平均，動能消散項 DISST 在三個分析時段中均為負值，然其值有很大的變化。在 5 月 31 日 0000 UTC 至 1200 UTC 系統發展階段 DISST 為 -11.7 Wm^{-2} ，而且整層均為負值，似乎意味著發展階段有能量由網格尺度傳遞至次網格尺度供系統發展。其中以不同尺度間的交互作用項 DISSI -9.6 Wm^{-2}

最顯著，DISSM 為 -3.5 Wm^{-2} ，DISSL 反而是一正值 1.4 Wm^{-2} 。此時 DISSL 的正值與 5 月 31 日 0000 UTC GL 的負值均說明了大尺度環流並未提供系統生成的動能，而是透過中、大尺度流場的交互作用。5 月 31 日 1200 UTC 至 6 月 1 日 0000 UTC 為強烈對流階段，此時 DISST 為 -5.5 Wm^{-2}

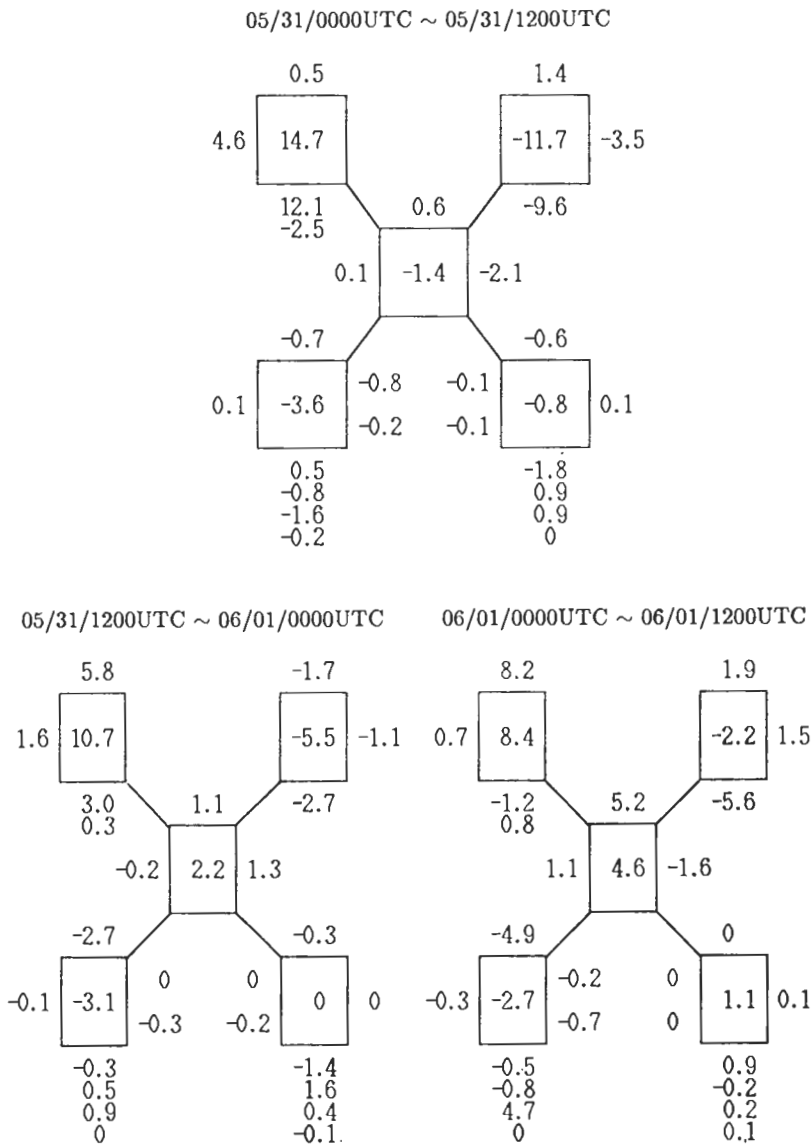


圖9 分析區域整層 (1000hPa 至 100hPa) 平均動能收支圖。單位為 Wm^{-2} 。(a)系統發展階段 (5.月31.日 0000 UTC 至 5.月31.日 1200 UTC)、(b)強烈對流階段 (5.月31.日 1200 UTC 至 6.月1.日 0000 UTC)、(c)系統消散階段 (6.月1.日 0000 UTC 至 6.月1.日 1200 UTC)。

，DISSL、DISSM與DISSI均為負值。在6月1日0000UTC至6月1日1200UTC的系統消散階段、中、下層消散項均已成了正值(圖未示)，整層的DISST只剩下 $-2.2Wm^{-2}$ ，而DISSL與DISSM均成了動能的源之一。似乎在系統消散時

會有回饋作用將動能由次網格尺度再傳遞至網格尺度。

由以上的分析結果發現，在MCS生成發展階段，大、中尺度的交互作用非常重要，其中又以上層的變化最為顯著。GLM(大尺度風場與中尺度高

度場的交互作用)是系統生成發展時動能最主要的來源,消散時GLM變成了負值。這說明了大尺度環境流場順著中尺度高度梯度流動,是系統生成發展相當重要的過程,同時系統發展所造成上層中尺度高度場的抬升對系統繼續發展有正面的貢獻。DISSI在系統發展階段的顯著負值,亦說明了系統生成所需要的動能主要是透過大、中尺度的交互作用所提供。強烈對流的維持則有賴大尺度環境流場的配合。當有利於對流發展的條件消失時(如GT正值大幅減小、HADL負值的增加),系統逐漸消散,同時對環境產生回饋的作用。

梅雨期間850hPa經常存在有一低層噴流由台灣北部往西南延伸。將風場經尺度分離分析的結果發現,此一低層噴流的形成與變動,主要是中尺度

風場的貢獻,大尺度風場的變化並不顯著。850 hPa VLVM的結果(圖10)顯示最大風速帶正好是VLVM最大值之所在。由此可見,中尺度風場的變動及與大尺度風場的配合,風向一致,是華南地區低層噴流形成最主要的因素。另針對經常在MCS東南方有一低層850hPa強風速帶,由分析中尺度收支各項的水平分佈情形,希望能進一步了解華南地區低層噴流的生成機制。

5月31日0000 UTC,圖2箭頭A所示之對流系統東南方存在一中尺度最大風速帶(圖11),同時隨著系統發展往東北東方移動。到了6月1日0000 UTC系統由浙江出海並快速消散,最大風速帶則移至台灣北部海面。此時本文所分析之MCS個案東南方又有一中尺度最大風速帶形成。6月1

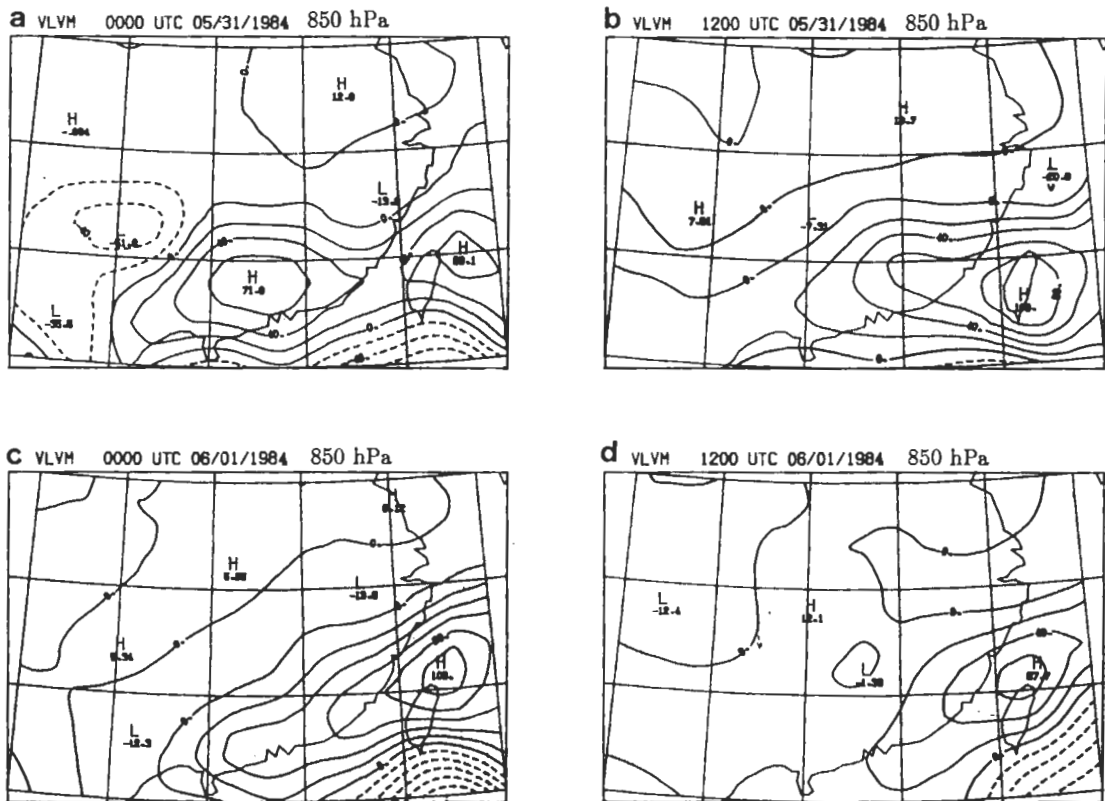


圖10 850hPa大尺度與中尺度風場的純量積VLVM的水平分佈圖,等值線間距為 $20 \text{ m}^2 \text{ s}^{-2}$ 。(a)5月31日0000 UTC、(b)5月31日1200 UTC、(c)6月1日0000 UTC、(d)6月1日1200 UTC。

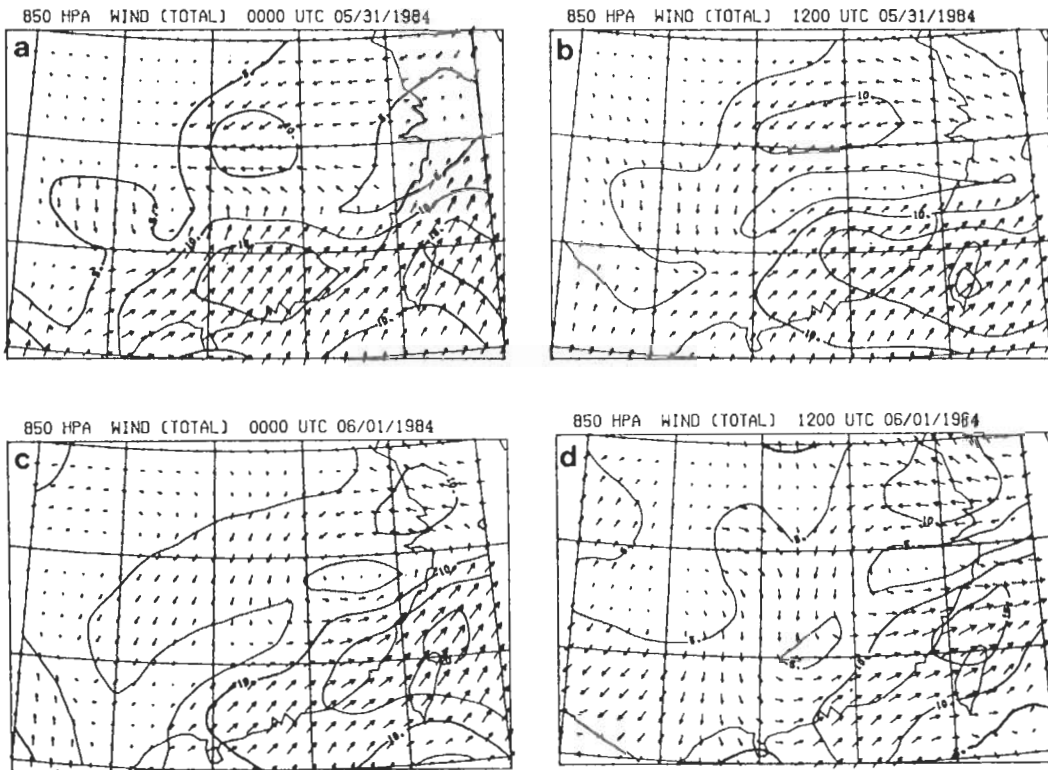


圖11 850hPa 等壓面上的風場分析圖，等值線間距為 5 m s^{-1} 。(a) 5.月31.日 0000UTC、(b) 5.月31.日 1200 UTC、(c) 6.月 1.日 0000 UTC、(d) 6.月 1.日 1200 UTC。

日 1200 UTC，浙江福建一帶只剩下零星的小系統，台灣北部海面之最大風速帶只略為減小。中尺度最大風速帶的存在，可能包含了鋒面與其它中尺度系統的作用。由分析結果發現中尺度動能生成項 (GM) 在最大風速帶均為顯著的正效應，數值亦較其他各項為大 (圖12)。由此可知跨越等壓線的地轉風偏差是維持華南地區低層噴流最主要的貢獻。動能水平平流項 (HADM) 與其交互作用項 (HIMML 及 HIMLM) 最大正值均位於噴流的下游處 (圖未示)，顯示動能往下游平流，同時，強風軸亦可能因此往下游 (東北方) 移動。動能垂直平流 (VADM) 與其交互作用項 (VIMML 及 VILML) 對動能的貢獻有正有負 (圖未示)，且由於時間解析度的不足，對低層噴流形成之初是否有動量下傳的現象較難判斷。但是此二項顯然是小了一個數

量級，相信對華南地區低層噴流的貢獻是較次要的。

(二) 旋轉與輻散動能收支分析

採用 Endlich (1967) 的方法將二維風場分解成旋轉分量與輻散分量時，是以原始風場的渦旋度為基準，逐次的修正使得風場之輻散分量為 0，而原有的渦旋度保持不變。如此，得到的風場即為風場的旋轉分量 \vec{v}_r ，以原始風場 \vec{v} 減去旋轉分量即得風場的輻散分量 \vec{v}_d 。大部分地區風場的旋轉分量佔了 90% 以上，其風場較傾向於地轉風。但和衛星雲圖比較發現雲區所在位置高層都有一明顯的輻散外流風場存在。由此可見輻散分量在對流系統分析上是不容忽視的。

採用和尺度分離動能收支分析相同的分析區域

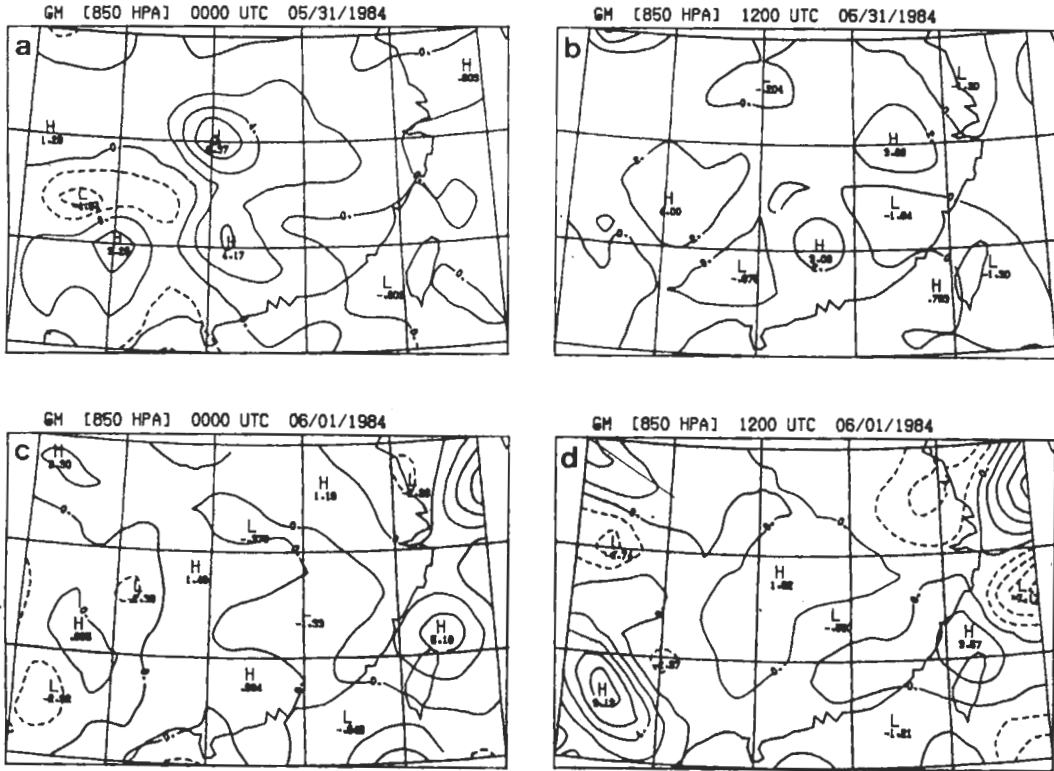


圖12 850hPa 等壓面上中尺度動能產生項 $(-V_m \cdot \nabla_p \phi_m)$ 的水平分佈圖。等值線間距為 $10^3 \text{ m}^2 \text{ s}^{-3}$ 。(a)5月31日 0000 UTC、(b)5月31日 1200 UTC、(c)6月1日 0000 UTC、(d)6月1日 1200 UTC。

。表三是分析區域內整層空氣柱各分析時間之總動能 K 、旋轉動能 K_R 、輻散動能 K_D 、旋轉與輻散風場的純量積 $VRVD$ ，以及各項之時間變化率。區域內總動能含量的時間加權平均為 $5.8 \times 10 \text{ Jm}^{-2}$ ，其中 K_R 佔了 92.9%， K_D 只佔了 6.8%， $VRVD$ 因為正負相抵消的結果只佔了約 0.6%，事實上 $VRVD$ 的絕對值並不小。絕大多數的動能都是由 K_R 所支配， K_R 的垂直分佈形勢亦與總動能大致吻合（圖13）。通常當強烈對流系統活躍時上層會有輻散外流，下層會有輻合現象，因此會有比例上較大的輻散動能。5月31日 0000 UTC 之較大的輻散動能就是由於在本文所討論的對流系統北方另一個正在消散中的系統（中心 27° N ， 110° E ）上層輻散、下層輻合的結果。因為受到此一鄰近系統的影響，

在分析區域內系統發展時 K_D 的增加並不明顯。通常輻合輻散的作用越近系統中心 K_D 越小，因此系統外圍應該比系統內部有較大的 K_D 值。

表四是各分析時間不涉及時間變化之各項動能收支的分析結果。 K_D 與 K_R 間的轉換項 $C(K_D, K_R)$ 是由 A_f, A_z, B, C 等四項所組成。在分析的四個時間中 $C(K_D, K_R)$ 都是正值，代表能量是由 K_D 轉換成 K_R 。當 MCS 發展時（5月31日 1200 UTC）與消散時（6月1日 0000 UTC）， $C(K_D, K_R)$ 顯然較小（表四）。也就是說當對流系統活躍時只有較少量的輻散動能轉換成旋轉動能，甚至可能有相反方向動能轉換的情形，這也是對流系統存在時會有比例上較大 K_D 值的原因之一。 $C(K_D, K_R)$ 中最主要的源是 A_f ，主要的正

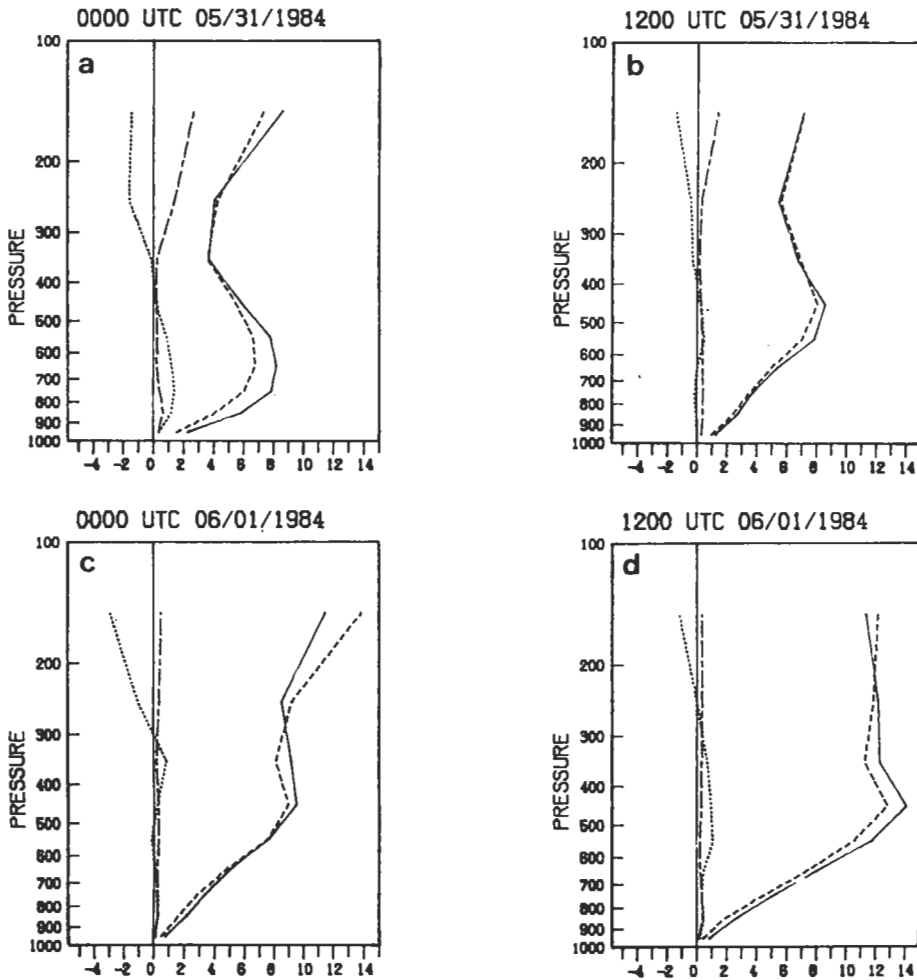


圖13 分析區域內總動能 K (——), 旋轉動能 K_R (-----), 輻散動能 K_D (---) 以及旋轉與輻散風場的純量積 $VRVD$ (·····) 的垂直分佈圖, 單位為 10^4Jm^{-2} 。(a) 5月31日 0000 UTC、(b) 5月31日 1200 UTC、(c) 6月1日 0000 UTC、(d) 6月1日 1200 UTC。

值來自中、下層、上層除了消散時為正值外, 其餘時間都是負的貢獻(表四)。 A_f 的正負值可由 \vec{v}_r 與 \vec{v}_a 間的夾角決定。當由 \vec{v}_r 至 \vec{v}_a 的夾角介於 $0^\circ \sim 180^\circ$ 之間時 A_f 為正。角度是 90° 時有最大值。因此上層的外流現象使得系統北面 A_f 為正而南面為負, 中下層的 A_f 大致為正值(圖未示)。Az正負的判斷方法與 A_f 相同, 只要再考慮渦旋度之正負即可。上層Az的值為北負南正的情形, 與 A_f 正好相反, 下

層大部份地區均為氣旋式環流區, 除了6月1日1200 UTC之外, A_z 與 A_f 的型態非常一致(圖未示)。藉由 A_f 與 A_z 的比較(表四), 上層符號相反, 可見區域內傾向於反氣旋式環流, 中、下層符號相同, 區域內大致仍為氣旋式環流。旋轉動能的垂直傳輸項B, 當區域內之旋轉動能是往上遞增時, 向上的垂直運動將可得到負的B值。此個案中最大旋轉動能的分佈由中層隨著系統的發展漸移至上層,

表四 分析區域內各分析時間非時間變化之各項動能收支分析。

(a) 1000hPa~100hPa										
DATE/TIME	AF	AZ	B	C	C(KD, KR)	GD	HFD	VF	GR	HFR
05/31/0000UTC	2.1	2.9	-1.8	.7	4.0	3.8	-.5	.0	6.4	-3.6
05/31/1200UTC	2.1	.3	-1.3	.5	1.6	4.7	-.5	.3	14.5	-5.6
06/01/0000UTC	1.9	-.8	.3	-.0	1.4	-.3	.4	.3	2.5	-.9
06/01/1200UTC	3.5	.1	1.6	.1	5.4	6.1	-1.9	.0	8.6	-3.9
(b) 400hPa~100hPa										
DATE/TIME	AF	AZ	B	C	C(KD, KR)	GD	HFD	VF	GR	HFR
05/31/0000UTC	-2.8	1.8	-1.6	.6	-2.0	-2.3	-1.5	.7	.4	-.8
05/31/1200UTC	-.4	.4	.1	.4	.5	.6	-1.2	2.2	10.4	-2.0
06/01/0000UTC	1.2	-.7	.1	.1	.7	.2	-.7	.6	2.2	-1.2
06/01/1200UTC	-.5	.4	.3	.1	.4	1.5	.5	-1.1	10.5	-.5
(c) 700hPa~400hPa										
DATE/TIME	AF	AZ	B	C	C(KD, KR)	GD	HFD	VF	GR	HFR
05/31/0000UTC	2.0	-.1	-.1	.2	1.9	2.6	.9	-.6	4.6	-1.0
05/31/1200UTC	1.4	-.4	-.8	.1	.4	2.9	.3	-1.0	5.0	-2.1
06/01/0000UTC	.4	-.4	.3	-.1	.2	-.8	1.1	-.3	-.3	1.2
06/01/1200UTC	3.1	-.5	1.0	.0	3.6	3.3	-1.7	.7	-1.1	-2.0
(d) 1000hPa~700hPa										
DATE/TIME	AF	AZ	B	C	C(KD, KR)	GD	HFD	VF	GR	HFR
05/31/0000UTC	2.9	1.2	-.1	-.0	4.0	3.5	.1	-.1	1.3	-1.7
05/31/1200UTC	1.0	.3	-.6	.1	.7	1.2	.3	-.9	-.9	-1.5
06/01/0000UTC	.3	.3	-.1	.0	.5	.3	-.0	-.1	.7	-.8
06/01/1200UTC	.9	.1	.3	.0	1.3	1.2	-.7	.5	-.8	-1.5

因此B值也由負值漸轉變成正值。C項一直是很小的正值，變化極微（表四）。

GD與GR分別為KD與KR之產生項（表四），在MCS發生前，GD與GR分別為3.8與6.4 Wm^{-2} ，當系統發展時GD與GR更高達4.7與14.5 Wm^{-2} ，均提供了系統生成與發展的有利條件。GD主要的源在中、下層，而GR主要的源則為中、上層。系統消散時GD與GR都大幅減小，GR只有2.2 Wm^{-2} ，GD更成了KD的滙之一。系統

消散後GD與GR又增加了起來。輻散動能雖只佔總動能的6.8%，然而因輻散風場所造成的動能產生項GD卻佔了整個動能生成項的1/2~1/3左右。

HFD與HFR分別為 \vec{V}_a 與 \vec{V}_r 所傳輸的動能水平通量輻合。系統發展前MCS所在位置中、下層HFD為正，上層HFD為負（表四），顯示中、下層有 \vec{V}_a 的輻合，上層有 \vec{V}_a 的輻散作用，這樣的型態有利於系統之發展。系統發展時中、下層 \vec{V}_a 繼續

表五 分析區域內含時間變化之各項動能收支分析。

(a) 1000hPa~100hPa

DATE/TIME	GD	VF	HFD	DD	INTD	C(KD, KR)	GR	HFR	DR	INTR
05/31/0000UTC										
\int	4.3	.2	-5	-2.3	.6	2.8	10.4	-4.6	-8.8	.3
05/31/1200UTC										
\int	2.2	.3	-1	-1.5	.3	1.5	8.5	-3.2	-4.1	-.1
06/01/0000UTC										
\int	2.9	.1	-7	.8	.3	3.4	5.6	-2.4	-1.6	-1.6
06/01/1200UTC										

(b) 400hPa~100hPa

DATE/TIME	GD	VF	HFD	DD	INTD	C(KD, KR)	GR	HFR	DR	INTR
05/31/0000UTC										
\int	-.8	1.5	-1.3	-1.1	.5	-.7	5.4	-1.4	-1.5	-.7
05/31/1200UTC										
\int	.4	1.4	-.9	-.7	.3	.6	6.3	-1.6	-2.5	-.1
06/01/0000UTC										
\int	.9	-.3	-.1	-.0	.1	.6	6.3	-.9	-4.4	-.7
06/01/1200UTC										

(c) 700hPa~400hPa

DATE/TIME	GD	VF	HFD	DD	INTD	C(KD, KR)	GR	HFR	DR	INTR
05/31/0000UTC										
\int	2.7	-.8	.6	-1.2	-.2	1.2	4.8	-1.5	-4.7	.5
05/31/1200UTC										
\int	1.1	-.6	.7	-.9	.0	.3	2.3	-.4	-1.9	.1
06/01/0000UTC										
\int	1.3	.2	-.3	.6	.1	1.9	-.7	-.4	2.0	-.6
06/01/1200UTC										

(d) 1000hPa~700hPa

DATE/TIME	GD	VF	HFD	DD	INTD	C(KD, KR)	GR	HFR	DR	INTR
05/31/0000UTC										
\int	2.4	-.5	.2	.0	.2	2.4	.2	-1.6	-2.6	.5
05/31/1200UTC										
\int	.7	-.5	.1	.2	-.0	.6	-.1	-1.1	.4	-.2
06/01/0000UTC										
\int	.7	.2	-.4	.2	.2	.9	-.1	-1.1	.9	-.3
06/01/1200UTC										

傳輸正的動能通量，而上層仍為負。系統消散時下層 \vec{V}_a 之動能輻合已消失，上層之輻散現象也已大為減少。系統消散後反而成了上層輻合，中、下層輻散的情形（表四）。至於HFR則一直是KR的滙，系統發展時有最大的動能通量輻散，而系統消散時負值減少。整個分析過程中HFD的變化比HFR明顯且重要，顯示在MCS的生長過程中HFD的作用要比HFR重要得多。

VF是影響KD的動能垂直通量輻合（因為

$\Delta \cdot \vec{V}_r = 0$ ），系統發展時區域下層與中層分別有 0.9 與 1.0 Wm^{-2} 的能量上傳，上層則有 2.2 Wm^{-2} 的能量流入，整個分析區域此時都是動能上傳的情形。系統消散時系統西方（先消散）先轉為動能由上往下傳輸的情形，區域內只有 0.6 Wm^{-2} 的能量傳至上層。到了6月1日1200 UTC系統消散後，整個區域都是動能下傳之現象。可見系統發展之時下層要有輻散風場分量造成之動能通量輻合，能量往上传輸，以及上層動能通量輻散。而系統消散過

後整個能量傳遞過程反了過來，成為上層通量輻合，能量下傳，下層通量輻散的現象。

INTD 與 INTR 是由 $\vec{v}_r \cdot \vec{v}_a$ 所衍生之動能收支項。 \vec{v}_r (\vec{v}_a) 隨著時間的變化可經由 INTD (INTR) 而影響 KD (KR)。整個系統成長過程中只為極小的正值，變化極為微小(表五)。INTR 值亦很小，最初為 KR 的源之一，系統發展以後反而成了 KR 的匯。DD 與 DR 是 KD 與 KR 的消散項 5 月 31 日 0000 UTC 至 5 月 31 日 1200 UTC 系統發展階段，DD 與 DR 分別是 KD 與 KR 最主要的匯，達到 -2.3 與 -8.8 Wm^{-2} (表五)。5 月 31 日 1200 UTC 至 6 月 1 日 0000 UTC 強烈對流階段，DD 與 DR 數值雖減小，仍為動能主要的匯。到了 6 月 1 日 0000 UTC 至 6 月 1 日 1200 UTC 系統消散階段，中、下層之 DD 與 DR 均為正值，使得 DD 反而成為 KD 的源之一，DR 之負值亦大為減小。此一結果與應用尺度分離方法計算之結果相同，都說明了在系統成長之初期，能量由網格尺度傳遞給次網格尺度供系統發展的現象，而在系統消散階段則有相反方向的回饋作用發生。當然 DD 與 DR 為平衡收支方程兩邊的剩餘量，其中包含了動能生成(消滅)項中無法有效地轉換成動能的部份以及各種誤差的累積，同時對時間解析度不足的觀測資料而言，各時間變化項與消散項物理意義的掌握是比較困難的。

四、結 論

本文就民國 73 年 5 月 31 日至 6 月 1 日在華南地區成長的中尺度對流系統進行動能收支分析。結果顯示，使用尺度分離之動能收支分析確實可以掌握系統生成發展過程中不同尺度的交互作用，以及系統消散時的回饋作用。旋轉與輻散動能收支分析的應用亦可了解輻散風場在 MCS 的生長過程中確實有相當重要的影響。在此，將前節之分析結果歸納如下：

(1) 區域內中尺度對流系統發展時總動能未必增加，除了大尺度環境流場本身的變動可能非常大之外

，大尺度與中尺度流場之間的交互作用 ($\vec{v}_1 \cdot \vec{v}_m$) 亦可能有抵消的作用，使得總動能反而減少。

(2) MCS 發生前區域北方另一正在消散中的系統上層輻散，下層輻合的作用，配合環境的不穩定度(總指數大於 44)，提供了系統生成的有利條件。5 月 31 日 0000 UTC 時 GLM 是動能最主要的來源，GM 亦為正的貢獻，GL 反而是主要的動能消耗項。在系統發展階段 DISSL 仍為正值而 DISSI 卻為一顯著的負值。這都說明了大尺度環流並未直接提供系統生成的動能，而是透過大尺度與中尺度流場的交互作用達成。

(3) 5 月 31 日 1200 UTC 環境仍適合深對流發展(總指數仍大於 44)，此時 GLM 與 GM 對系統之發展仍是正的貢獻，而已 GL 成為動能主要的來源之一，顯示中尺度流場本身以及與大尺度場的正貢獻，加上大尺度環境流場的配合，使得 MCS 得以繼續發展。

(4) 6 月 1 日 0000 UTC 環境已趨於較穩定的狀態(總指數約減少 4)，GT 的正值大幅減小而 HADL 負值加大，說明了有利於 MCS 發展的條件已消失。

(5) MCS 發展階段 DISST 值為 -11.7 Wm^{-2} ，在 MCS 消散階段 DISST 只剩下 -2.2 Wm^{-2} ，其中 DISSL 與 DISSM 亦從強烈對流階段的負值轉變為正值，顯示在系統生成發展時有動能由網格尺度傳遞至次網格尺度的情形，而在系統消散階段則有反方向的回饋作用。

(6) 中尺度風場的變動以及與大尺度風場的配合，是華南地區低層噴流生成最主要的因素。而跨越等壓線的地轉風偏差則是華南地區低層噴流生成與維持最主要的貢獻，動能的水平平流則可能使強風速軸往下游移動，至於動能垂直平流項的貢獻則是較次要的。

(7) 輻散與旋轉動能之間的轉換項 C (KD, KR) 中以 Af 與 Az 最主要。當區域內強烈對流存在時 C (KD, KR) 減小，代表 KD 轉換成 KR 的量減

- 少，甚至有從KR轉換成KD的可能，因此有比例上較大的輻散動能。
- (8) MCS發展時中下層有輻散風場的動能通量輻合，上層通量輻散的情形，同時動能由中下層垂直往上傳輸。消散時輻散動能的下層通量輻合上層通量輻散現象已消失，動能之垂直傳輸亦不明顯。
- (9)就整個中尺度對流系統發展過程看來，不同尺度間的交互作用確實相當重要。輻散風場雖然只是風場總動能的一小部份，在動能收支過程中的影響卻是非常顯著，在系統生成發展過程中亦扮演了相當重要的角色。

誌謝

本研究進行期間承國科會經費支援、中央氣象局提供探空觀測資料及衛星雲圖，謹此誌謝。

參考文獻

- 林民生，林禧閔與王時鼎，1988：發展性與非發展性中尺度對流系統環境條件之比較。天氣分析與預報研討會，台北，53-63。
- Buechler, D.E., and H.E. Fuelberg, 1986: Budgets of divergent and rotational kinetic energy during two periods of intense convection. *Mon. Wea. Rev.*, *114*, 95-114.
- Carney, T.Q., and D.G. Vincent, 1986a: Meso-synoptic scale interactions during AVE/SESAME I, 10-11 April 1979. Part I: Theoretical development of interaction equations. *Mon. Wea. Rev.*, *114*, 344-352.
- _____, and _____, 1986b: Meso-synoptic scale interactions during AVE/SESAME I, 10-11 April 1979. Part II: Influence of convective activity on larger scale flow. *Mon. Wea. Rev.*, *114*, 353-370.
- Chen, T.C., and A. Wiin-Nielsen, 1976: On the kinetic energy of the divergent and nondivergent flow in the atmosphere. *Tellus*, *28*, 486-498.
- _____, J.C. Alpert and T.W. Schlatter, 1978: The effects of divergent and nondivergent winds on the kinetic energy budget of a mid-latitude cyclone: A case study. *Mon. Wea. Rev.*, *106*, 458-468.
- Endlich, R.M., 1967: An iterative method for altering the kinetic properties of wind fields. *J. Appl. Meteor.*, *6*, 837-844.
- Fuelberg, H.E., and J.R. Scoggins, 1978: Kinetic energy budgets during the life cycle of intense convective activity. *Mon. Wea. Rev.*, *106*, 637-653.
- _____, and G.J. Jedlovec, 1982: A subsynoptic-scale kinetic energy analysis of the Red River Valley tornado outbreak (AVE-SESAME I). *Mon. Wea. Rev.*, *110*, 2005-2024.
- _____, and M.F. Printy, 1983: Meso-scale thunderstorm/environment interactions during AVE-SESAME V (20-21 May 1979). *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, *64*, 1144-1156.
- Lin, S.C., and T.K. Chiou, 1985: Objective scale separation technique and its application on the mesoscale convective system diagnosis. *P. Meteor. Res.*, *8*, 69-94.
- _____, 1988: The life cycle and structure of a mesoscale convective system occurring in the southern China area during Mei-Yu season. *P. Meteor. Res.*, *11*, 1-26.
- Maddox, R.A., 1980: An objective technique for separating macroscale and mesoscale features in meteorological data. *Mon. Wea. Rev.*, *108*, 1108-1121.
- Smith, P.J., 1969: On the contribution of a limited region to the global energy budget. *Tellus*, *21*, 202-207.
- Tsui, T.L., and E.C. Kung, 1977: Subsynoptic-scale energy transformations in various severe storm situations. *J. Atmos. Sci.*, *34*, 98-110.

**Kinetic Energy Budgets of A Mesoscale Convective System
Occurring in the Mei-Yu Season**

Song-Chin Lin and Chin-Ming Tsai
Institute of Atmospheric Physics
National Central University

(manuscript received July 15, 1989; in final form August 28, 1989)

ABSTRACT

This study utilizes the scale-separated and rotational/divergent kinetic energy budget equations to diagnose the evolution of a mesoscale convective system occurring in the southern China area during Mei-Yu season.

Computational results reveal that, instead of the large-scale flow, the scale-interaction accounts for most of the generation of kinetic energy. The large-scale ageostrophic wind plays an important role in the development of mesoscale convective system, the system starts to decay as the wind becomes geostrophic. Although the divergent wind has only about 1/10 of contribution to the total kinetic energy, its contributions to the kinetic energy budget terms are comparable with the rotational counterparts. Analysis results also depict that the low-level jet at the south-eastern flank of the mesoscale convective system is a result due to the consistency of large-scale and mesoscale wind directions, and is maintained by the cross isobaric ageostrophic flow.

Keywords: kinetic energy budget, mesoscale convective system