

大氣中動能的製造

葉篤正

(中國科學院地球物理研究所)

大氣中各種式樣能量的平衡及相互轉換是氣象學中一個主要問題。過去的氣象學者們大都是集中於研究能量的相互轉換,在這方面 Margules⁽¹⁾ 早在1905年就發表了他的經典著作,隨後許多氣象學者更進而計算了氣旋、反氣旋及颱風等系統內各種能量的轉換。至於動能的平衡及維持這種平衡的物理作用的討論,最近才多了起來^(2,3,4),其中 Starr⁽²⁾ 和黃士松⁽³⁾ 深入地研究了大氣中動能平衡的問題。Starr 和黃士松所得的動能平衡方程是對的,但是他們對此方程的用法和由此而得的結論則是值得討論的。除此討論外本文將更深入地研究大氣中動能製造的物理過程。

(一) 內能、勢能與動能的相互轉換。大氣可壓縮性的重要

暫時不計地球的自轉及摩擦,由運動方程可得下列動能能量方程:

$$\frac{\partial}{\partial t} \int K_h d\tau = - \int \int K_h v_n ds - \int V_h \cdot \nabla_h p d\tau, \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \int K_v d\tau = - \int \int K_v v_n ds - \int w \frac{\partial p}{\partial z} d\tau - \int g \rho w d\tau. \quad (2)$$

其中 τ 為體積, s 為包圍此體積的面積, v_n 為垂直於 s 的風速,由內向外為正, $K_h = \frac{1}{2} \rho (u^2 + v^2)$ 為單位體積內水平運動的動能, $K_v = \frac{\rho}{2} w^2$ 為單位體積內的垂直運動的動能, V_h 為水平風速, $\nabla_h p$ 為水平氣壓梯度。(1)式為水平運動動能的平衡方程,它說明在任何一個體積內的水平方向的動能,除由於動能的輸送而改變外,祇可能由空氣在水平氣壓場內運動所作的功產生之。當風自高壓吹向低壓時,此功為正,也就是增加動能,反之為負,當風平行於等壓線時,不作功。影響垂直運動動能的變化,則除上述二種作用外,還有勢能的轉換,即(2)式中右邊第三項。

除勢能沒有其他任何型的能量可以直接地變成動能，除去空氣在氣壓場內所作的功外，沒有其他作用可以產生動能¹⁾。因此其他型的能量，如日輻射能，凝結熱等都得通過氣壓場才可以轉變為動能。

由(1)，(2)兩式可以看出勢能不能直接變成水平運動的動能，勢能變成水平運動動能的過程可以由下面討論看出。現將(1)，(2)兩式寫成：

$$\frac{\partial}{\partial t} \int K_h d\tau = - \int \int K_h v_n ds + \int \rho \operatorname{div}_h V_h d\tau - \int \operatorname{div}_h \rho V_h d\tau \quad (1')$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \int K_v d\tau = - \int \int K_v v_n ds + \int \rho \frac{\partial w}{\partial z} d\tau - \int \frac{\partial \rho w}{\partial z} d\tau - \frac{\partial}{\partial t} \int g \rho z d\tau \quad (2')$$

其中 $\operatorname{div}_h V_h = \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y}$ 。如以整個大氣為對象，則上二式為

$$\frac{\partial}{\partial t} \int K_h d\tau = \int \rho \operatorname{div}_h V_h d\tau, \quad (1'')$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \int K_v d\tau = \int \rho \frac{\partial w}{\partial z} d\tau - \frac{\partial}{\partial t} \int g \rho z d\tau. \quad (2'')$$

在大氣中垂直運動一般來說是很小的，所以(2'')式右邊兩項大致是平衡的。就整個大氣來說，勢能變化大致等於垂直膨脹所作的功，二者的少數差餘變成了大氣垂直運動的動能。由連續方程及絕熱方程可得

$$\frac{\partial w}{\partial z} = - \operatorname{div}_h V_h - \frac{1}{RT} \frac{d}{dt} (C_v T). \quad (3)$$

以 ρ 乘(3)式，再對體積積分，可以看出垂直膨脹的功一部份變成了水平輻合的功，另一部使內能發生變化，內能變化為正或為負則看三度空間的輻散為負或為正了。由此看來過去人們謂空氣上升勢能增加，因為內能減少，這是不完全的。對此 Белинский^[7] 有詳細的討論。由上討論可以看出勢能變化通過了垂直膨脹，再經過水平膨脹才轉換成為水平運動動能——大氣中的主要動能。上面討論也同樣可以說內能通過了三度空間的輻散，一部變為水平運動動能，另一部變為垂直運動的動能和勢能。

茲將(1'')和(2'')相加，得

$$\frac{\partial}{\partial t} \int K d\tau = \int \rho \operatorname{div}_3 V d\tau - \frac{\partial}{\partial t} \int g \rho z d\tau \quad (4)$$

其中 $K = \frac{\rho}{2} (u^2 + V^2 + w^2)$ ， $\operatorname{div}_3 V = \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z}$ 。上式可以適用於整個大氣

1) 此處必須指出在自轉地球上風與氣壓場是相互制約的，氣壓場可以產生風，同樣風也可以影響氣壓梯度，對此 Rossby [5] 和葉篤正 [6] 有詳細的討論。本文祇涉及動能的製造，不涉及氣壓場的形成，故文中祇談氣壓場在動能製造的作用。

或任意一個機械閉合系統¹⁾。(4) 式說明一個閉合系統內或整個大氣中總動能的變化是由於兩個原因，一個是由於勢能的改變，另一個是由於三度空間輻散所作的功。由 (3) 式可得

$$\int \rho \operatorname{div}_3 V d\tau = - \int \rho \frac{d}{dt} (C_v T) d\tau,$$

對閉合系統或整個大氣來說，上式可寫為

$$\int \rho \operatorname{div}_3 V d\tau = - \frac{d}{dt} \int \rho C_v T d\tau. \quad (5)$$

由 (5) 式看出，(4) 式中三度空間輻散的功就是內能的減小。因此 (4) 式就是 Margules 的經典能量公式。由 (4) 和 (5) 兩式我們可以得一個重要的結論，就是在不可壓縮的流體中，對於整個流體或流體中任意一個閉合的部分來說，內能不可能轉換為動能。祇有通過了流體的可壓縮性內能的一部分才可以轉化為動能。可壓縮性愈大，則可以轉換成動能的內能部分也愈大。

在沒有可壓縮性的流體中，(4) 式似乎指出祇有位能可供動能之用。然而在運動過程之中勢能一定趨於減小，所放出的能量變為動能供摩擦消耗，最後勢能減至最低值，運動也就停止。運動停止後，除去外面機械的力量外，這個系統就不可能再由不均勻的加熱而自己發生運動。因為這時不均勻的加熱已不可能再使等容面發生改變，因而也失去了自發運動的可能性。

(二) 地球自轉的作用

由於地球自轉而產生的偏向力量的方向是與以地球為坐標系統中的風向成垂直的，因此偏向力不作功。所以 (4) 式在自轉地球上仍然是成立的，此時風速為相對於地球的風。上面所討論的勢能與內能轉成動能的機械作用也仍然成立。在自轉地球上，對整個大氣來說大氣的可壓縮性仍為勢能與內能轉成動的必要條件。

在整個動能方程中地球自轉項並不出現，這並不等於說在勢能與內能轉成動能的過程中地球自轉沒有作用。設有一旋轉的圓柱形的水槽，裏面的水面因為旋轉的關係不能是平的，水面中間最低，向四周升起。於是在水面以下，就造成壓力梯度，指向中心。當旋轉停止的時候，水面趨於變平，水面下的壓力場趨於消滅

1) 注意(1'')和(2'')不能適用於任意一個閉合系統，因為對於一個閉合系統(1')的 $\int \operatorname{div}_n \rho V_n d\tau$ 和 (2'')的 $\int \frac{\partial \rho w}{\partial z} d\tau$ 都不等於零。對於一個機械系統來說垂直於系統表面的 V_n 為零，而不是垂直於表面上的水平分速或 w 為零，Starr(2)曾將(1')的 $\int \operatorname{div}_n \rho V_n d\tau$ 等於 0 (對任意閉合系統) 是有問題的。

(也就是壓力變得均勻),放出的能量變成了水的動能。這種能量就是 Refsdal (8) 所謂的“壓力場能量”(Energie der Druckverteilung)。在有摩擦存在的情況中,能量最後被摩擦消耗而使運動停止。在自轉的地球上設有某區域局部加熱,該區空氣上升,四周空氣向該區輻合。當空氣向中心流動時地球自轉偏向力使空氣向右偏轉(在北半球),風向趨於平行等壓線,減小輻合作用,維持了氣壓梯度。如無地球自轉,則輻合作用必然很大,空氣順着氣壓梯度流向低壓中心,這樣氣壓梯度很快地便要消滅了。由(1)式我們可以看出水平運動的動能產生率是與氣壓梯度和在這個方向的風速分力的乘積成比例的,所以在前種情況下(有自轉)水平運動的動能產生率是較後者為小的。在前者情況下,一部份的能量儲存於氣壓場內了。Refsdal(8)認為地球自轉偏向力使大氣中不穩定能量的三分之一變成了氣壓場能量。由這個討論可以看出地球自轉作用之一就是減低大氣中動能的產生率,換句話說,地球自轉減低了大氣中內能與勢能施放的可能性。

地球自轉對動能製造的影響可以由(1)式裏看出,在自轉地球上的風可以分為兩部份,一部是地轉風,另一部為地轉風偏差。前者平行於等壓線,所以在氣壓場裏是不作功的。祇有後者可以在氣壓場裏作功,因此在平面坐標裏(1)式可以寫為

$$\frac{\partial}{\partial t} \int K_n d\tau = - \int \int K_n v_n d\tau - \int \frac{1}{f} \left(\frac{dv}{dt} \frac{\partial p}{\partial x} - \frac{du}{dt} \frac{\partial p}{\partial y} \right) d\tau.$$

由上式看出在自轉地球的大氣裏動能的製造是由加速度而非由風速而來。必須指出上式不能用於赤道附近,因為在這裏地球自轉的影響在運動方程裏是不存在的,因此在赤道區內不能將由自轉地球上運動方程中所得的 u 和 v 代入(1)式。

上面的結論由 Margules 鋒面公式也可以看出。在自轉地球上冷空氣是楔形地插入暖空氣裏,兩者所造的鋒面斜度與 f 成比例。當 $f=0$ 時,即無地球自轉,鋒面斜度為零,也就是冷空氣完全處於暖空氣之下。這樣勢能最低,也就是冷暖併排不穩定的空氣在自轉地球上所能放出的能量要少。

(三) 大氣中動能的平衡

在討論平衡問題時摩擦作用必須予以考慮,令 d 為每單位時間和單位體積內由於摩擦和其他作用(如小型湍流)而生的動能消耗率,於是(4)式應寫為

$$\frac{\partial}{\partial t} \int K d\tau = \int p \operatorname{div}_3 V d\tau - \frac{\partial}{\partial t} \int g \rho z d\tau - \int d d\tau. \quad (6)$$

上式右邊第一項為內能的變化，第二項為勢能的變化，第三項則為摩擦的動能消耗。為了將大氣的可壓縮性的重要在動能的平衡中表示出來，(6) 式可通過 (5) 式和下式（對整個大氣來說）

$$\int g\rho z d\tau = \frac{R}{C_v} \int \rho C_v T d\tau \quad (7)$$

寫為

$$\frac{\partial}{\partial t} \int K d\tau = \frac{C_p}{C_v} \int \rho \operatorname{div}_3 V d\tau - \int d d\tau, \quad (8)$$

(8) 式適用於整個大氣或高度為無限的閉合大氣柱，而不能用於任意的閉合系統，因為在後者情況下 (7) 式不能成立。(8) 式明顯地說明對整個流體來說，流體的可壓縮性為勢能與內能轉變為動能的媒介，在沒有可壓縮性的大氣中，運動就成為不可能了。

(8) 式為大氣動能平衡方程，右邊第二項中的 d 代表一切大氣中動能消耗率故為正，因此在平衡的情況下右邊第一項平均亦必為正，亦即在整個大氣中的平均情況下，三度空間的輻散伴隨着較高的氣壓，三度空間的輻合伴隨着較低氣壓。(8) 式的物理意義可作如下解釋，將連續方程及氣體方程代入 (8) 式，得

$$\frac{\partial}{\partial t} \int K d\tau = - \frac{C_p}{C_v} \int R T \frac{\partial \rho}{\partial t} d\tau - \int d d\tau. \quad (9)$$

如使 (9) 式中第一項為正，則在時間上和空間上， T 和 $\frac{\partial \rho}{\partial t}$ 有負相關。二者中 T 永為正值，而 $\frac{\partial \rho}{\partial t}$ 可正可負。二者負相關就是高溫的空氣主要伴隨着 $\frac{\partial \rho}{\partial t} < 0$ ，而低溫空氣主要伴隨着 $\frac{\partial \rho}{\partial t} > 0$ 。我們知道空氣密度變化主要是由於氣壓的變化而來，氣壓在垂直方向的改變幾乎萬倍於在水平方向的改變。因此空氣的密度變化也主要是由於垂直運動而起，上升密度下降，下沉密度升高。因此 T 和 $\frac{\partial \rho}{\partial t}$ 的負相關也可以看成 T 和 w 的正相關。所以要維持大氣中動能的平衡，總的來說在大氣中正環流（暖空氣上升，冷空氣下降）要多於逆環流（冷空氣上升，暖空氣下降）。

對於整個大氣中的水平運動動能 Starr^[2] 曾得下列平衡方程

$$\frac{\partial}{\partial t} \int K_h d\tau = \int \rho \operatorname{div}_h V_h d\tau - \int d d\tau, \quad (10)$$

黃士松^[3] 也得到類似方程。因為大氣中垂直運動甚小，其動能在動能總量中可以略去，所以 (8)，(10) 兩式中的左端大致相等，而兩式右邊的第一項則差異很大。

但 (8)，(10) 兩式是可以相互轉換的。但是 (8) 式的物理意義更為清楚。

對整個大氣來說，(8) 和 (10) 兩式都是適用的。對於任意機械的閉合系統，(8) 式可以應用，而 (10) 式則不然。對於非機械閉合系統上二式都不能用。Starr

和黃士松都曾用 (10) 式來討論反氣旋中動能的製造問題，在大氣中反氣旋不是機械的閉合系統，因而他們的結論——反氣旋為大氣中動能製造的主要場所而氣旋為動能消耗場所也就有商討之必要了。

討論一個反氣旋或者氣旋，他們必須用他們另一個方程：

$$\frac{\partial}{\partial t} \int K_h d\tau = \int K \operatorname{div}_h V_h d\tau - \int \int p V'_n dl dz - \int K V_h ds - \int d d\tau, \quad (11)$$

其中 l 為包圍着反氣旋或氣旋的面（如果有的話）與水平面的交線， V'_n 垂直於 l ，向外為正。 ds 與 V_n 代表意義如前。Starr 曾將上式右邊第二項 $-\int \int p V'_n dl dz$ （氣壓力在邊界面上所作的功）看作動能的重新分配的一種方式，將 $\int p \operatorname{div}_h V_h d\tau$ 看作動能製造項。因此 Starr 也可能並沒有將 (10) 式用於非機械閉合系統的反氣旋，而確是用了 (11) 式，但是由於他認為只有 (11) 式右邊第一項為動能製造項，所以只用此項為動能製造的討論基礎就夠了。但是 $-\int \int p V'_n dl dz$ 為壓力在一個系統邊界上所作的功率，這個功可以變成動能，當然也可以和 (11) 式中其他各項互相轉換。該項的作用不是將一處的動能傳送到另一處去（這是動能重新分配的含義）。因此將 $-\int \int p V'_n dl dz$ 看作動能的重新分配的一種方式是不妥當的。而事實上由 (1) 式可以看出 (11) 式右邊的第一、二兩項之和為此體積內空氣質點順着氣壓梯度移動時所作的功率，這個功變成了該體積內的動能了。茲將此二項都看成動能製造項，則對反氣旋來說，在它的下層平均有二度空間的輻散，故 (11) 式右邊第一項，如 Starr 和黃士松所指出，應為正，但第二項則為負，兩項在低空異號，在高空也如此。對整個反氣旋的積分兩項之和的正負號不能定。對於氣旋來說，在下層 (11) 式右邊第一項為負，第二項為正，高空反之，二者積分之和的正負號也不能確定。所以 Starr 和黃士松關於反氣旋維持動能平衡的理論不能認為是正確的。

圖 1a 為七月份地面平均，圖 1b 為一月份地面平均圖。粗略估計可以看出夏季的太平洋高壓和極地高壓的面積之和大致可與冬季太平洋高壓和西伯利亞高壓（包括極地高壓）的面積和相比，而夏季的大西洋高壓的面積要比冬季的大西洋高壓和美洲高壓的面積和就要大了。圖 2a 和 2b 為 Погосян^[9] 一文中七月和一月 500 毫巴平均圖，由此二圖看出夏季高壓面積要比冬季大得多了。如按 Starr 理論，則在夏季動能的製造率應大於冬季，這與實際是不相符的。按觀測事實夏季平均風速遠小於冬季，摩擦消耗也遠小於冬季，而動能的製造率而反大是不可能的。當然北半球不是個閉合系統，夏季北半球製造的動能可以輸送給南半球去，可是被輸送的動能要經過“赤道無風區”而不被利用，這種輸送的物理過程也是不容易想像

的。動能來自內能與勢能的放出，在北半球冬季大氣斜壓性大，所可能放出的能量亦大，夏季大氣斜壓性小，所可能放出的也少，從這方面看也應該冬季動能製造率大。由此看來總的結果很可能反氣旋為動能消耗的場所，而氣旋為動能製造場所。這個結論由現有的事實還不能完全肯定，還有待更多的事實來證明。

Starr 更將變動的主要製造場所放在副熱帶高壓，而同時又說他的討論是和 **Margules** 能量變換理論是相同的。根據 **Margules** 理論大氣中動能主要來自勢能和內能的放出，而勢能與內能放出的大小在於斜壓性的大小，在副熱帶高壓裏的空氣斜壓性是很小的，因此不能放出大量勢能和內能以供動能製造之用，這也說明副熱帶高壓不會是大氣中動能的主要製造場所。

依照 **Starr** 取二度空間的運動，將 (1) 式寫成

$$\frac{\partial}{\partial t} \int K_h d\tau = - \int \int K_h V_n ds - \int C \frac{\partial \rho}{\partial s} d\tau - \int d d\tau,$$

其中 C 為風速， s 順着風向。式中右邊第二項為水平動能製造項，當風有順氣壓梯度的分向時，則該項為正，有動能製造，當風有逆氣壓梯度分向時，則有動能消耗。在平均情況下在氣旋下部多為輻合，上部為輻散，因此下部風有順氣壓梯度的方向，上面反之。在反氣旋的下部為輻散上部為輻合，因此在下部風亦有順氣壓梯度的方向，上面也反之。**Bannon**^[10] 非地轉風的觀測也證實了此點。因此上式右邊第二項，無論氣旋或反氣旋皆為動能製造的場所，高空則為動能消耗的場所。至於整個系統積分的結果如何，究竟高壓有剩餘的動能的製造，或是低壓有剩餘動能的製造，此處不能肯定。同時還必需指出這樣機械地把氣旋與反氣旋分開來討論是不合適的。它們二者有着有機的聯系，強調那一個的重要性都是不適宜的。

在近地面層由於摩擦作用，風向有順氣壓梯度的方向，製造了動能。這種動能的製造補償了一部份摩擦消耗，其餘的摩擦消耗則必需由其他動力作用而產生的非地轉風來補償。因為平均非地轉風要製造動能以補償摩擦的消耗，所以我們可以得出這樣的結論，在整個大氣中，在長時間的平均下，順氣壓梯度方向的非地轉風要大於逆氣壓梯度方向的非地轉風。或者在時間和空間的平均上，在氣壓梯度較大的地區裏，非地轉風的方向是順着氣壓梯度的；而在氣壓梯度較小的地區裏，非地轉風的方向是逆着氣壓梯度的。

(四) 冬夏平均狀態大氣的“有效能量”

作者和徐淑英^[11]曾計算冬夏對流層上部的能量儲蓄，這種能量絕大部份都是

不能利用的。由計算結果看夏季內能和勢能之和大於冬季，但因夏季大氣的斜壓性小，它所能放出的能量一定小於冬季。這可能是冬季平均風速大於夏季的原因。冬季和夏季平均大氣中所可能放出最大的勢能和內能到底若干，本節將加以計算。茲令此最大可能放出的能量名為“有效能量”。以整個大氣為對象的“有效能量”的計算需世界各處大量的高空紀錄，這是沒有的。現以 Hess^[12] 所發表沿西經 80° 的剖面代表大氣的平均狀態，並以此為起始狀態。“有效能量”為起始狀態與最後狀態勢能與內能之差。不同的假定可以有不同最後狀態，於是“有效能量”也就不同了。

本文以北半球 1000 毫巴到 200 毫巴間的空氣為一閉合系統，在最後狀態中各等壓面上的溫度為均勻的，溫度的垂直遞減率各處相同，200 毫巴等壓面上的溫度為起始狀態中該面上最高的溫度，1000 毫巴等壓面上的溫度為起始狀態中該面上最低的溫度。一個單位切面面積上的空氣柱內的勢能與內能之和為

$$\frac{c_p}{g} \int_{200}^{1000} T dp + p_{10} h_{10} - p_2 h_2,$$

其中 $p_{10} = 1000$ 毫巴， $p_2 = 200$ 毫巴， h_{10} 及 h_2 為 1000 及 200 毫巴面的高度。依此公式計算出的北半球起始狀態，最後狀態的勢能與內能之和及“有效能量”見表 1。

表 1

北半球 1000 至 200 毫巴間，空氣起始和最後狀態的勢能與內能和及“有效能量”(單位 10^{27} 爾格)

	冬季	夏季
起始狀態	4783	4962
最後狀態	4302	4751
有效能量	481	211

表 1 指出冬季大氣中的“有效能量”約為夏季的 2.3 倍，如“有效能量”完全放出，並且完全被 1000 到 200 毫巴的空氣吸收，變為動能，則在冬季風速約為 155 秒米，在夏季為 103 秒米。

根據作者與徐淑英^[11]的計算，在 1946 年自北緯 22.5° 至 67.5°，700 至 300 毫巴大氣中的冬季和夏季內能與勢能之和的數量級約為表 1 中起始狀態的四分之一，其空氣質量亦約為本文所採用的質量的四分之一，此點可以說明我們所得的大氣中內能與勢能的量級是可靠的。

表 2 是將北半球 1000 到 200 毫巴空氣分成兩個閉合系統所計算的結果，一個是自赤道至緯度 30 度，另一個是自緯度 30 度到 90 度。由這個表中可以看出低緯

系統內的“有效能量”冬夏變化小，高緯度系統的“有效能量”冬夏變化大；在冬季高緯度和低緯度系統“有效能量”相差大，夏季小；兩個系統內的“有效能量”都是冬季大，這些事實都是於我們的常識符合的。比較表 1, 2 我們可以看出下面一個重要事實無論冬夏表 1 中的“有效能量”較表 2 中的二系統的“有效能量”之和大得許多。因此我們可以推出：對於勢能與內能的施放來說，在同樣的大

表 2

兩個閉合系統內，起始狀態與最後狀態的勢能與內能之和及“有效能量”(單位 10^{27} 爾格)

	冬 季		夏 季	
	0—30°N	30—90°N	0—30°N	30—90°N
起始狀態	2497	2285	2515	2445
最後狀態	2421	2155	2467	2375
有效能量	76	130	48	70

氣中一個大系統要較許多小系統的效率大得多。因此當南北兩個系統(緯度相距不遠)相遇於同一經度時，則應加深。當南北二系統相遇時南北的空氣有機會組成一個系統，而有大量的內能和勢能放出，以供天氣系統加深之用。這個計算結果的物理解釋也是簡單的。設想有兩個均一的氣團，其溫度各為 T_1 與 T_2 ，當此二氣團為二獨立系統時，在任何一氣團內都不能有能量放出。但當此二氣團組成一個系統時，則有大量能量放出。

由上面事實我們還可以進一步地指出，當平直西風環流變為南北環流時，將有大量勢能與內能放出，以供天氣系統加深之用，此時期可稱為“有效能量”施放期。反之當南北環流變為西風環流時，能量放出的少，可以稱為“有效能量”儲存期。在平直西風環流的情況下，南北的溫度梯度漸漸加強增加了斜壓性，儲存了“有效能量”；南北環流加強時，平均南北溫度梯度變小，也就是將所儲存的“有效能量”放出了一部。

致謝：在進行此項研究中曾與東星北教授討論多次，隨後又經石延漢，徐爾灝，謝義炳等教授提過意見。張銘達和包海燕同志計算了起始狀態與最後狀態，能量和“有效能量”，謹此致謝。

參 考 文 獻

- [1] Margules, M., 1905: Über die Energie der Stürme; Jahrb. d. K. K. Zentralanstalt f. Meteor., Anhang, 1—26.
- [2] Starr, V. P., 1948: On the production of kinetic energy in the atmosphere, *Jour. Meteor.*; 5, 193—196.

- [3] 黃士松, 1952: 論反氣旋在大氣中的作用. 氣象學報, 23, 130—134.
- [4] Miller, J. E., 1950: Energy transformation functions. *Jour. Meteor.* 7, 152—159.
- [5] Rossby, C. G., 1937: On the mutual adjustment of pressure and velocity distributions in certain simple current systems I and II.
- [6] Yeh, T. C. (葉薦正), 1949: On energy dispersion in the atmosphere. *Jour Meteor.*, 6, 1—16.
- [7] Белинский, В. А., 1948: Динамическая метеорология. Ленинград.
- [8] Refsdal, A., 1932: Zur Thermodynamik der Atmosphäre. 9, No. 12, 1—63.
- [9] Погорян, X. П., 1947: Сезонные колебания общей циркуляции атмосферы. Труды, вып. 1(28).
- [10] Bannon, J. K., 1949: The angular deviation of wind from the isobars at Liverpool *Quart. Jour. Roy. Met. Soc.*, 75, 131—146.
- [11] 葉薦正、徐淑英, 1953: 中緯度對流層上部的能量變化. 氣象學報, 23, 193—203.
- [12] Hess, S. L., 1948: Some new meridional cross sections through the atmosphere. *Jour. Meteor.*, 5, 293—300.

THE PRODUCTION OF KINETIC ENERGY IN THE ATMOSPHERE

Yeh Tu-cheng

Abstract

In the present note the mechanism of conversion of the internal and potential energy into kinetic energy is discussed. The potential energy first changes into the work to stretch an air column in vertical dimension, it then changes into the kinetic energy of horizontal motion through horizontal divergence. The internal energy changes into kinetic energy through three dimensional divergence. It is further found that it is only in compressible fluid the internal and potential energy reserved in baroclinity can be converted into kinetic energy. The effect of earth's rotation is to reduce the possibility to release the internal and potential energy in the atmosphere.

Starr's conclusion that anticyclone is the source of kinetic energy is criticized.

Finally the maximum possible release of the internal and potential energy in the mean summer and winter atmosphere is estimated.

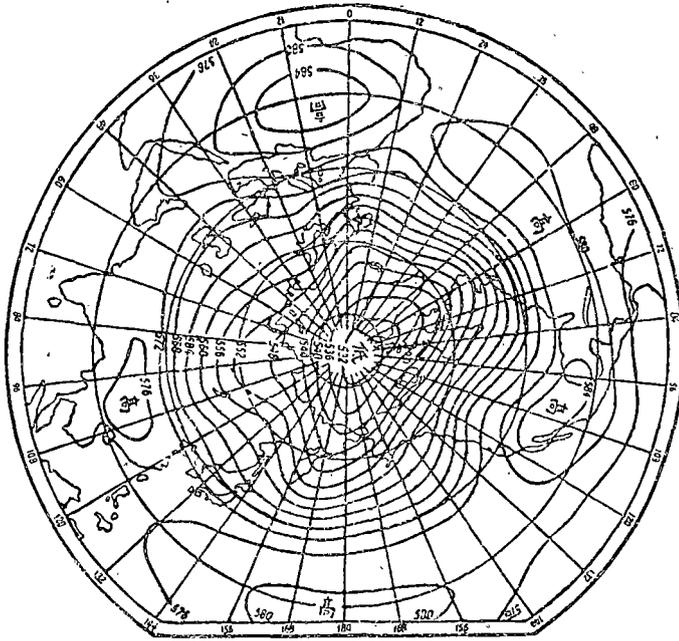


圖 2a 北半球七月份 500 毫巴平均圖(依 ПОГОСЯН).

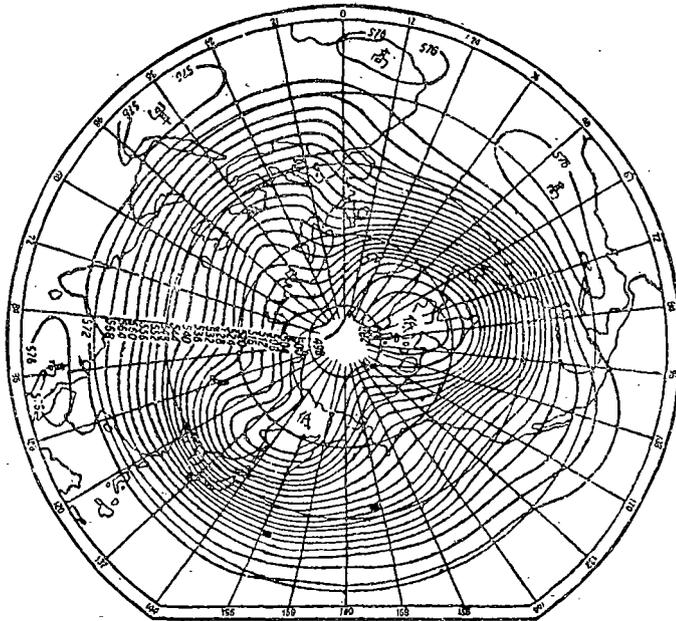


圖 2b 北半球一月份 500 毫巴平均圖(依 ПОГОСЯН).