

能量净输送与台风的移动

唐东升 丁志英

提 要

基于能量场的变化与台风移动有密切关系的事实, 本文试图从讨论能量场的变化入手, 探讨通过预报能量场系统的移动以预报台风移动的方法。

通过对 7504、7708、7806、7909、7910 号台风总湿位能场的分析, 发现台风在各层等压面上均对应着闭合的能量场系统 (700 毫巴以上 $\nabla^2 E_0 < 0$, 低层 $\nabla^2 E_0 > 0$), 且两者的移动路径一致。此外, 能量通量场和能量通量散度场的分析结果表明, 在台风的进路方向有明显的强能量输送带, 台风基本上沿着 500 毫巴能量水平通量散度梯度的方向移动。 ∇E_0 图和 $\nabla \cdot (\bar{\nabla} E_0)$ 图可以作为定性判断台风疑难路径的一种辅助工具。

一、台风与能量场系统的对应关系

近些年来, 有些文章分析了总湿位能场的等能线形态特征与台风移动路径的关系, 得出了一些定性预报台风移动路径的结论。实例分析表明, 当天气形势和能量场形势较稳定时, 等能线形态特征对台风的移动路径有一定的指示意义, 但当形势有较大变化时, 等能线形态特征对台风未来的移动路径失去指示意义。本文试图找出台风与能量场系统之间的关系, 通过预报能量场的变化以预报台风的移动。

本文选取了台风进入东海后突然西折、停滞少动、一直北上、登陆转向几种疑难路径作为例子, 分析了台风进路中每日 08 时和 20 时地面到 500 毫巴四个层次上的总湿位能场 (以下简称能量场)。分析结果表明, 在各时次和各层的能量场上, 台风均对应着一个闭合的能量系统 (暂称其为能涡)。能涡在 700 毫巴和 500 毫巴层上表现为 $\nabla^2 E_0 < 0$, 闭合等能线与闭合等高线的分布较对称; 在 1000 毫巴和 850 毫巴层上, $\nabla^2 E_0 > 0$, 闭合等能线与闭合等高线偏离较大 (图略)。

台风在能量场上的上述表现, 决定于台风的温、压、湿场的结构。由观测事实得知: (1) 台风内 $\nabla^2 T < 0$, 低层 $|\nabla^2 T|$ 较小, 700 毫巴以上 $|\nabla^2 T|$ 迅速增大; (2) 台风内 $\nabla^2 \phi > 0$, 其值在低层较大, 随高度迅速减小; (3) 台风低层有暖湿空气流入, 但 $\nabla^2 q$ 的值较小, 而中层以上 $\nabla^2 q < 0$, 其值较大。台风在总湿位能 (焓、位能、潜热能) 场上

的前述表现，实际上是这三者的综合反映。

台风在各时次的能量场上均对应着能涡这一事实，表明了台风与能涡移动的一致性（图1）。若能揭示出能涡的移动规律，则可以通过预报能涡的移动以预报台风的移动。

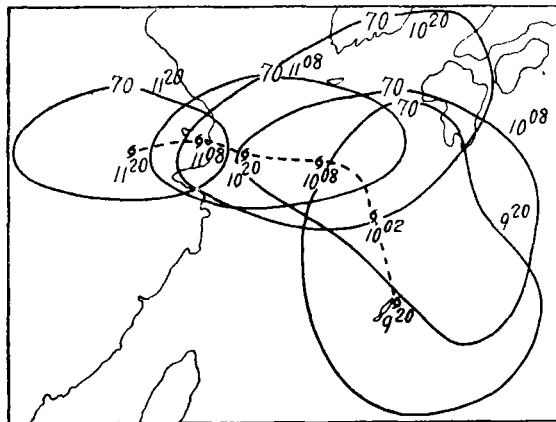


图1 7708号台风对应的500毫巴能涡动态图—等 E_σ/C_p 线

二、能量净输送与台风的移动

在等压面坐标系中单位质量湿空气的运动方程、绝热方程及连续方程取如下形式

$$\frac{du}{dt} = -\frac{\partial \phi}{\partial x} + f_v \quad (1)$$

$$\frac{dv}{dt} = -\frac{\partial \phi}{\partial y} - f_u \quad (2)$$

$$0 = -\frac{\partial \phi}{\partial p} - \frac{1}{\rho} \quad (3)$$

$$\nabla \cdot \vec{V} + \frac{\partial \omega}{\partial p} = 0 \quad (4)$$

$$\frac{d(C_p T + Lq)}{dt} + \frac{d(p\alpha)}{dt} - \alpha \frac{dp}{dt} = 0 \quad (5)$$

由(1)、(2)式可得

$$\frac{dk}{dt} = -\vec{V} \cdot \nabla \phi \quad (6)$$

式中 $k = \frac{1}{2}(u^2 + v^2)$

由(3)、(5)式可得

$$\frac{dE_\sigma}{dt} = \frac{\partial \phi}{\partial t} + \vec{V} \cdot \nabla \phi \quad (7)$$

式中 E_σ 为总湿位能 ($E_\sigma = C_p T + \phi + Lq$)。

由(6)式知(7)式右端第二项为水平动能生成项。(7)式右端两项在大尺度运动中一般情况下符号相反而量级相当(10^{-4})，故本文假定 $\frac{\partial \phi}{\partial t} + \vec{V} \cdot \nabla \phi = 0$ 。(7)式可写成

$$\frac{\partial E_\sigma}{\partial t} = -\vec{V} \cdot \nabla E_\sigma - \omega \frac{\partial E_\sigma}{\partial p} \quad (8)$$

引入(4)式可将(8)式化为通量形式的总湿位能倾向方程

$$\frac{\partial E_\sigma}{\partial t} = -\nabla \cdot (\vec{V} E_\sigma) - \frac{\partial \omega E_\sigma}{\partial p} \quad (9)$$

其中
$$\frac{\partial \omega E_\sigma}{\partial p} = E_\sigma \frac{\partial \omega}{\partial p} + \omega \frac{\partial E_\sigma}{\partial p}$$

在 500 毫巴附近，台风中的径向风很弱， $\nabla \cdot \vec{V} \approx 0$ ，在大尺度流场中亦有 $\nabla \cdot \vec{V} \approx 0$ ，故 $E_\sigma \frac{\partial \omega}{\partial p} \approx 0$ 。又据台风中的 E_σ 垂直廓线分布知， $\frac{\partial E_\sigma}{\partial p}$ 甚小，而台风周围环境流

场中 ω 甚小，故 $\omega \frac{\partial E_\sigma}{\partial p}$ 项亦可忽略。(9)式可简化为

$$\frac{\partial E_\sigma}{\partial t} = -\nabla \cdot (\vec{V} E_\sigma) \quad (10)$$

或

$$\frac{\partial E_\sigma}{\partial t} = -\nabla \cdot (\vec{V} C_p T) - \nabla \cdot (\vec{V} \phi) - \nabla \cdot (\vec{V} Lq) \quad (10)'$$

(10) 式表明，500 毫巴层上的总湿位能局地变化主要决定于该层的能量水平通量散度，即能量的水平净输送。能量通量辐合时，局地能量增大；能量通量辐散时，局地能量减小。

基于 500 毫巴上的能涡与台风的配置较好的事实，且能涡的移动可看成是能量场变化的结果，所以可通过分析 500 毫巴能量水平通量散度场来判断台风的移动。

台风在 500 毫巴上所对应的能涡，一般呈圆形或椭圆形。假若能涡处于常定状态，则能涡中心的移速公式可写成

$$\left\{ \begin{array}{l} C_x = - \frac{\frac{\partial^2 E_\sigma}{\partial x \partial t}}{\frac{\partial^2 E_\sigma}{\partial x^2}} \\ C_y = - \frac{\frac{\partial^2 E_\sigma}{\partial y \partial t}}{\frac{\partial^2 E_\sigma}{\partial y^2}} \end{array} \right. \quad (11)$$

$$C = \sqrt{C_x^2 + C_y^2} \quad (12)$$

$$\operatorname{tg} \theta = \frac{\frac{\partial^2 E_\sigma}{\partial x^2}}{\frac{\partial^2 E_\sigma}{\partial y^2}} \cdot \operatorname{tg} \beta \quad (13)$$

式中 θ 为 $\vec{C}$ 与能涡长轴之间的夹角, β 为变能升度与能涡长轴之间的夹角。
能涡呈圆形时

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 E_\sigma}{\partial x^2} &= \frac{\partial^2 E_\sigma}{\partial y^2} \\ \theta &= \beta \\ C &= - \frac{\frac{\partial^2 E_\sigma}{\partial s \partial t}}{\frac{\partial^2 E_\sigma}{\partial s^2}} \end{aligned} \quad (14)$$

将(10)式代入(14)式得

$$C = - \frac{\frac{\partial}{\partial s} (-\nabla \cdot \vec{V} E_\sigma)}{\frac{\partial^2 E_\sigma}{\partial s^2}} \quad (15)$$

或

$$C = - \frac{\partial}{\partial s} (-\nabla \cdot \vec{V} C_p T - \nabla \cdot \vec{V} \phi - \nabla \cdot \vec{V} L_q) / \frac{\partial^2 E_\sigma}{\partial s^2} \quad (15)'$$

式中 $\frac{\partial^2 E_\sigma}{\partial s^2}$ 为能涡的凹凸程度, 在 500 毫巴上能涡中心 $\frac{\partial^2 E_\sigma}{\partial s^2} < 0$; $\frac{\partial^2 E_\sigma}{\partial s \partial t}$ 为变能

升度： $\frac{\partial}{\partial s} (-\nabla \cdot \vec{V} E_0)$ 为能量水平通量散度梯度；C为能涡移速（因台风与能涡移动的一致性，也可看成是台风移速）。

(14)、(15)式表明，当台风在 500 毫巴上对应的能涡呈正圆形时，台风将沿能量水平通量散度梯度方向（即变能升度方向）移动，移速正比于能量水平通量散度梯度大小（即变能升度大小）。

能涡呈椭圆形而长轴与 x 轴重合时，在 500 毫巴上能涡中心

$$\frac{\partial^2 E_\tau}{\partial y^2} < \frac{\partial^2 E_\sigma}{\partial x^2} < 0$$

$$\theta < \beta$$

这种关系表明，当台风在 500 毫巴上所对应的能涡呈椭圆形时，台风将沿能涡的长轴与能量水平通量散度梯度（变能升度）之间的方向移动。

从以上讨论可以看出：

(1) 短期内能量场的变化决定于大气中已有能量的再分配，500毫巴能量场的变化主要决定于该层的能量水平净输送。

(2) 500 毫巴层的能量水平通量散度场也就是该层的瞬时变能场。

(3) 台风的移动与能量水平通量散度梯度之间的关系，反映了能量再分配的不均是影响台风移动的重要因素。

(4) 总湿位能场的变化包含着感热能、位能、潜热能净输送的贡献，是三者综合贡献的结果；能量净输送不均对台风移动的影响，实际上包含了温度场、湿度场、气压场、风场对台风移动的综合影响。

三、500 毫巴能量水平通量散度图在 台风移动预报方面的应用

为了探讨上述考虑能否应用于台风的移动预报，尤其是对疑难路径的预报有否助益，本文对 7504、7708、7806、7909、7910 号台风分析了其进路中各时次的过去 24 小时变能场和瞬时的能量水平通量散度场。

图 2 (a、b) 是 7708 号台风移近近海时出现路径西折前后时次的过去 24 小时变能图。从图上可清楚地看出，台风的移动路径与变能升度的方向是一致的。对比前述各个台风的过去 24 小时变能图（图略），还可看出台风的移速与变能升度的大小成正比。

图 2c 是与图 2b 同时段的变高图。将图 2c 与图 2b 进行对比，可看出正变能区对应着负变高区，负变能区对应着正变高区，变能升度与变高梯度的方向一致。这一事实，进一步表明，通过预报未来的变能场可以预报台风的未来移动路径。

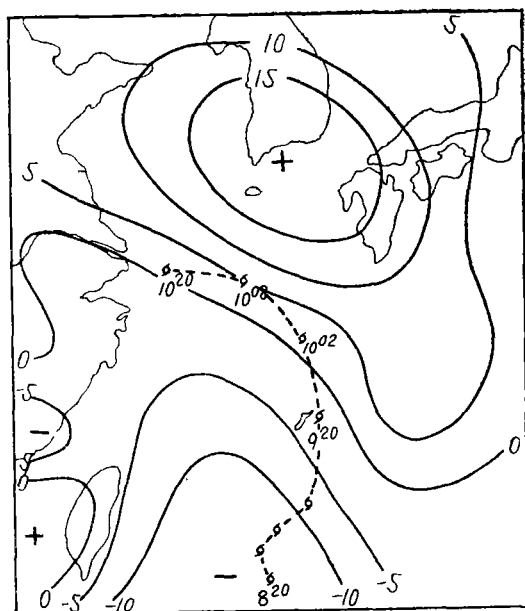


图 2a 500毫巴 $\Delta \left(\frac{E_{\sigma}}{C_p} \right)_{24}$ 1977.9.8²⁰ ~ 9²⁰

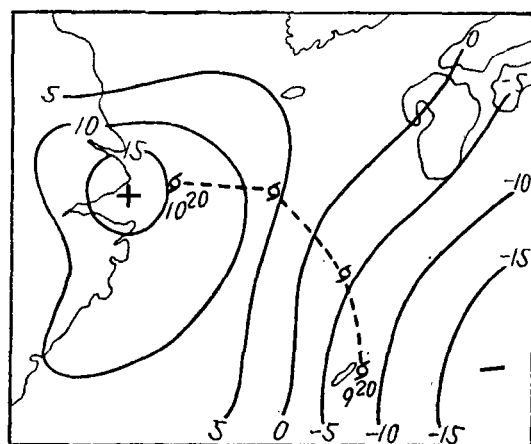


图 2b 500毫巴 $\Delta \left(\frac{E_{\sigma}}{C_p} \right)_{24}$ 1977.9.9²⁰ ~ 10²⁰

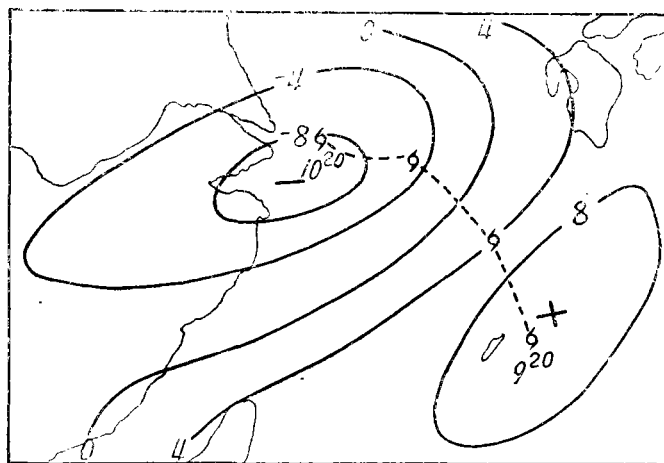


图 2c 500毫巴 ΔH_{24} 1977.9.9²⁰~10²⁰

图3(a、b、c)是7708、7806、7504号台风移近时的 $\nabla \cdot (\vec{V} E_\sigma)$ 图。从图3a上可看出7708号台风在9日20时中心位于冲绳岛附近，其西北象限有一强辐合中心（增能中心），其东南象限有一强辐散中心（减能中心），变能升度的方向为西北东南向。对比图3a与图2a可看出，在9日20时以前的时段里变能升度的方向为南北向，而在9日2

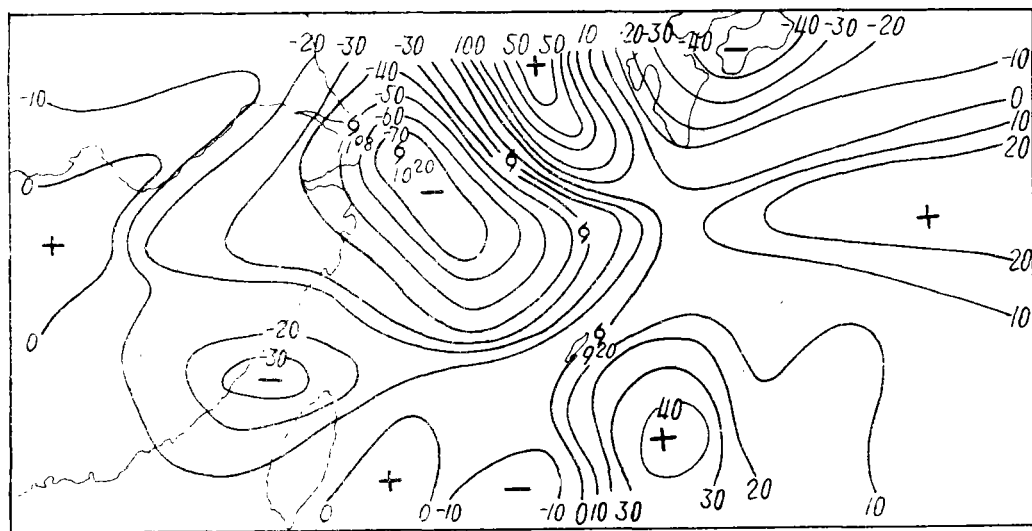


图 3a 500毫巴 $\nabla \cdot \left(\frac{1}{g} \vec{V} E_\sigma \right)$ 单位 10^{-5} 卡/毫巴·厘米²·秒 1977.9.9.20^h

时的能量水平通量散度图上，变能升度的方向转为西北东南向，这表明9日20时后能量场将发生较大的变化。从图3a和图2b上可看出，9日20时的能量水平通量散度场与未来24小时变能场的形势一致，且台风中心恰好移到了上海以东的能量水平通量辐合中心

附近。该例的事实表明，瞬时的 $\nabla \cdot (\vec{V} E_\sigma)$ 场可近似表示未来24小时的变能场。其它各例的情况也是如此。

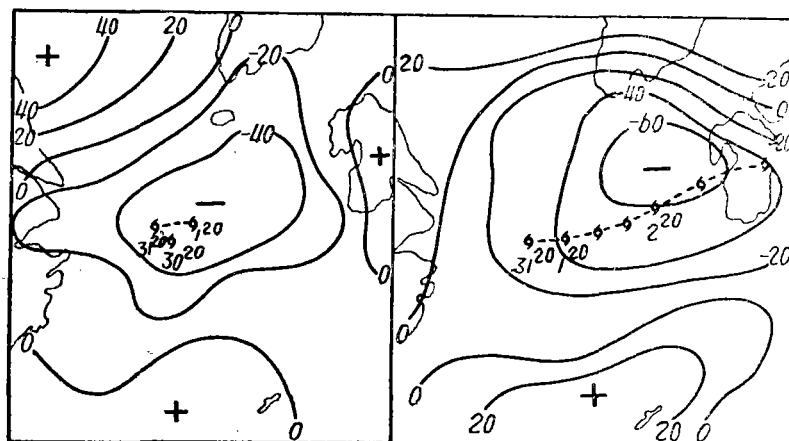


图 3b 500毫巴 $\nabla \cdot \left(\frac{1}{g} \vec{V} E_\sigma \right)$ 单位 10^{-5} 卡/毫巴·厘米²·秒

左图: 1978.7.30.20^h 右图: 1978.7.31.20^h

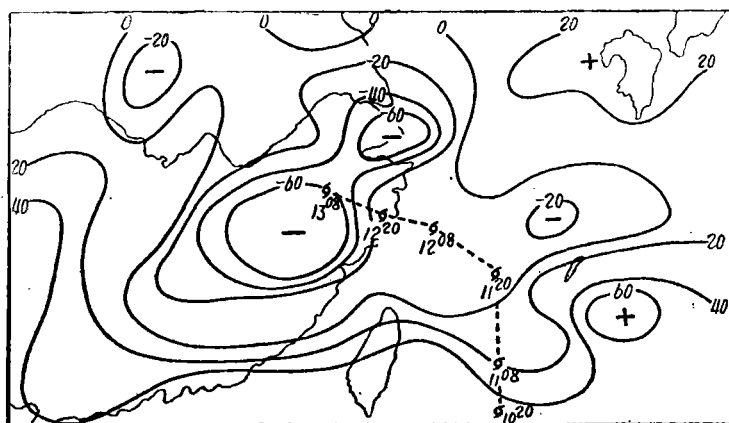


图 3c 500毫巴 $\nabla \cdot \left(\frac{1}{g} \vec{V} E_\sigma \right)$ 单位同前 1975.8.11.20^h

图 3b 是 7806 号台风移入东海后趋于停滞时的 $\nabla \cdot (\vec{V} E_\sigma)$ 图。从图上可看出，30 日 20 时台风位于能量水平通量辐合中心附近，通量散度梯度近于零，且台风周围为辐散区所包围，台风停滞少动。31 日 20 时 $\nabla \cdot (\vec{V} E_\sigma)$ 辐合中心位于台风东北象限，台风由停滞转为向偏东北方向移动。

从上述分析可知，当台风移向、移速有较大变化时，从引导气流角度考虑也就是大

范围的环境流场有较大变化时,在24小时前的 $\nabla \cdot \vec{V}E_0$ 。图上有明显的反映,利用 $\nabla \cdot \vec{V}E_0$ 。图来帮助诊断和预报疑难台风路径是有一定助益的。

四、500 毫巴能量水平通量图在 台风移动预报方面的应用

本文在分析台风进路中 $\nabla \cdot \vec{V}E_0$ 。场特征的同时,还分析了表示大范围内能量水平输送情况的水平通量(VE_0)场特征。分析结果表明,能量通量场与台风的移动亦有着密切的关系,且由于 VE_0 。计算简便和误差小,对不具备计算条件的地方,应用 VE_0 。图比应用 $\nabla \cdot \vec{V}E_0$ 。图更为可行。

图4和图5是上述过程中的500毫巴能量水平通量图。从图4可看出,台风是一个强能量输送系统,在台风的进路方向为一强输送带,台风的移动路径与输送带轴线方向一致,对比前后时次的 VE_0 。图还可看出,输送带轴线的转向先于台风移向的转向(图略)。从图5可看出,当台风位于对称的环形等通量线之中时,台风停滞少动。

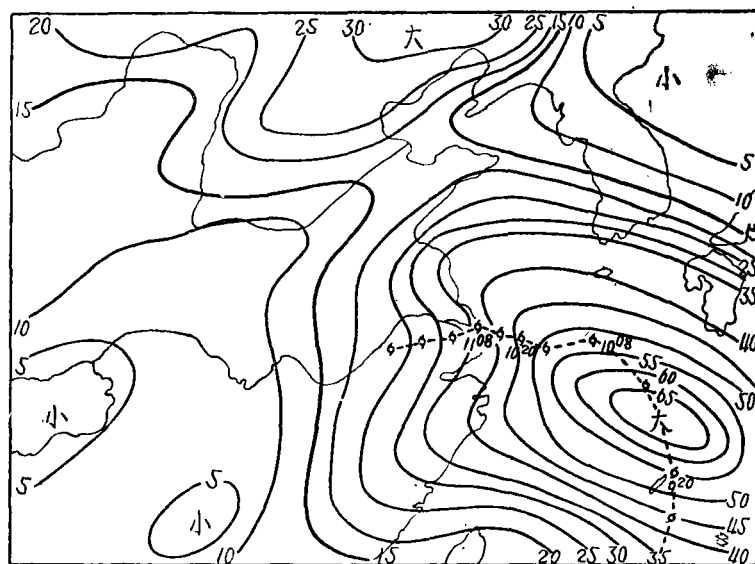


图4 500毫巴 $\frac{1}{g} VE_0$ 。单位卡/毫巴·厘米·秒 1977年9月9日20时

为了进一步了解能量水平通量的变化与台风移动的关系,本文还分析了台风进路中的能量通量24小时变量图。由变量图(图略)上可看出,在台风进路的前方有较强的能量通量增强带和增值中心,两侧有明显的通量减弱带和减值中心,在夹于两侧通量减弱带中间的增强带为台风的通道,通道的走向与未来24小时的移向一致,且前者的转向亦先于台风路径的转向(VE_0 。场的变化比单独的风场和能量场变化敏感)。通量增强带的强

度变化与台风移速的变化成正相关。当台风位于较弱的增值中心附近而没有明显的增强带时，台风停滞少动。

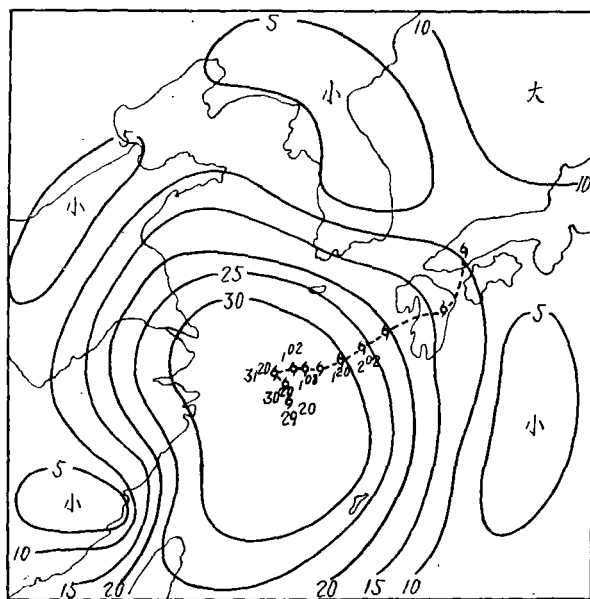


图5 500毫巴 $\frac{1}{g} \nabla \cdot \vec{V} E_0$ 。1978年7月30日20时

综合分析能量水平通量图和能量水平通量散度图可知，位于7708号台风进路前方的通量散度辐合中心恰位于强能量输送带内，且位于强输送中心前方的输送带轴线附近，也恰是过去24小时通量增值中心和未来24小时负变高中心及台风中心位置附近。7806号台风的上述图表明，在台风停滞少动阶段，没有明显的强能量输送带，且通量散度辐合中心和呈环形的等通量线中心均在台风中心附近。这些对应关系，进一步表明：(1)台风的移动与能量的传播有关；(2)能量通量场虽不能直接表示未来的变能场，但最强的能量净输送发生在强输送带轴线附近，因而能量通量图上的强输送带可以指示台风的未来移动路径。

结 束 语

依据上述分析，可简要归纳为以下几个要点：

1. 台风和能涡的对应关系表明，可以通过预报能量场的变化以预报台风的移动。
2. 500毫巴上的能量水平通量散度场近似地表示了该层能量场未来的变化趋势， $\nabla \cdot \vec{V} E_0$ 图可提前24小时明显地指示出未来能量场和气压场的重大变化。
3. 当台风强度变化不大时，台风基本上沿500毫巴能量水平通量散度梯度方向移动，24小时后的台风中心位置靠近通量散度辐合中心的位置。
4. 台风在未来24—48小时内，基本上沿500毫巴上强能量输送带方向并向通量增值

中心附近移动, 且强输送带方向和增强带方向的改变导前于台风路径的改变。

5. 台风位于能量水平通量散度辐合中心附近和位于近似园形的高值通量系统中心附近时, 停滞少动。

以上结论是由 5 个例子的分析中得出的, 是否具有普遍性, 还有待进一步探讨。

参 考 文 献

- [1] 陈联寿、丁一汇, 西太平洋台风概论, 科学出版社, 1979。
- [2] 山岬正纪, 台风的结构和发展的动力学, 气象研究汇集(日), 第129号, 1976。
- [3] E. 帕尔门、C.W. 牛顿著, 程纯枢等译, 大气环流系统, 科学出版社, 1978。

On the Net Energy Transport and Movement of Typhoons

Tang Dongsheng, Ding Zhiying

ABSTRACT

The study is based on the close relation between energy fields and the motion of typhoons in attempt to develop a new means for forecasting the movement of the depressions by examining the variations in energy fields.

By investigating the total moist potential fields of Typhoons numbered as 7504, 7708, 7806, 7909 and 7910, the authors have found the correspondence between these fields at isobaric surfaces and the closed energy field system ($\nabla^2 E\sigma < 0$ above 700mb and $\nabla^2 E\sigma > 0$ at lower levels) as well as the same trends in their movements. Moreover, analysis shows that there exists an intense energy transport belt along the typhoon's track as the tropical cyclone moves and travels basically in the direction of gradients of horizontal flux at 500mb level, Charts of $VE\sigma$ and $\nabla \cdot (\vec{VE}\sigma)$ can be used as an additional means for judging typhoon movements in troublesome situations.