

# 9608 号台风登陆北上总能量变化 及渤海高压维持

晁淑懿

仇永炎

(国家气象中心,北京 100081)

(北京大学地球物理系,100871)

汪迎辉

(国家气象中心,北京 100081)

## 提 要

首先分析了属于台风与西风槽的相互作用型的 9608 号台风在其登陆后台风核心区总能量及其组成部分的变化。结果指出,决定总能量再度增长的主要是潜热能,而此时潜热能的增长是同台风东侧低层偏南急流有密切关系。台风的东北象限内潜热能增长最盛,特大暴雨区恰也在这个象限。其次利用对流层高层散度风场与旋转风场的配置,从散度风动能与旋转风动能之间的转换关系,半定量地估计台风东侧黄海、渤海、日本海高压上空反气旋环流的增衰。结果表明低压区上空排出的散度风有利于高压上空反气旋环流的维持与加强,可保证暴雨持续 2~3 天。最后给出台风与西风槽相互作用型下的东西向垂直环流模式。

**关键词:** 台风 总能量 散度风动能的转换

## 引 言

在实时预报工作中,当一个台风在南方登陆后继续北上时,要考虑两个问题,其一是这个台风还有没有破坏力,能否再出现特大暴雨? 其二是这个台风未来是缓慢北移,造成北方特大暴雨,还是快速东移出大陆或消失? 从能量学观点第一个问题相当于问,台风总能量是维持或增加还是减弱,它的增减,究竟是哪一些能量形式起决定性作用。根据台风与西风槽相互作用<sup>[1]</sup>的观点,第二个问题相当于问,是什么能量转换过程,造成渤海、黄海、日本海高压(以下简称渤日海高压)是怎样相互依存的。9608 号台风造成北方大范围特大暴雨,酿成灾害,在文献[1]中将其定为台风与西风槽相互作用型,与 7503 号台风有许多相似之处。

我们想从能量学方面,围绕上述两个问题进行研究。第一个问题用总能量及其组成部分的变化来研究,考察哪一种能量形式对总能量变化具有最重要贡献。第二个问题通过考察对流层高层散度风动能与旋转风动能的关系,决定它们的配置是否有利于渤日海高压维持与加强。本文所用资料取自国家气象中心  $T_{63}L_{16}$  模式的  $2.5 \times 2.5$  网格产品。

## 1 9608 号台风登陆北上过程中能量变化

大气的总能量  $E_t$  由显热能、位能、潜热能和动能组成。对于单位质量的空气块的总能量可写为:

$$E_t = C_p T + gZ + Lq + \frac{1}{2}V^2 \quad (1)$$

式中均为常用符号。为实用方便计,总能量常

用大气总温度  $T_t$  表达如下<sup>[2]</sup>:

$$T_t = \frac{E_t}{C_p} = T + \frac{g}{C_p}Z + \frac{L}{C_p}q + \frac{1}{2C_p}V^2 \quad (2)$$

不言而喻,总能量与以绝对温度表示的总温度之间只是等压比热常数  $C_p$  的倍数关系。同时,由于此时动能  $\frac{1}{2C_p}V^2$  往往比前面三项小 1~2 个量级,其变化也很小,所以这里只讨论式(2)右边前三项以温度表达的能量变化,即

$$T_t \approx T + \frac{g}{C_p}Z + \frac{L}{C_p}q \quad (3)$$

为便于叙述,下文将上式左端仍称之为总能

量,右端三项仍分别称之为显热能、位能和潜热能。

取台风中心或减弱成低压的中心为圆心、6个纬距(约 660km)为半径、1000hPa 到 300hPa 为高度,组成所要研究的台风圆形气柱。对此气柱质量进行各种能量形式的积分,代表各种能量的总值。同时把台风或低压底的面积,如图 1 上中部的圆面积所示,等分为 1、2、3、4 四个象限。求出这四个象限上空体积内各种能量的总值。而后计算了 7 月 31 日至 8 月 5 日逐日能量与 24 小时变量。图 1 为全区域和四个象限各项能量变量的累积曲线。

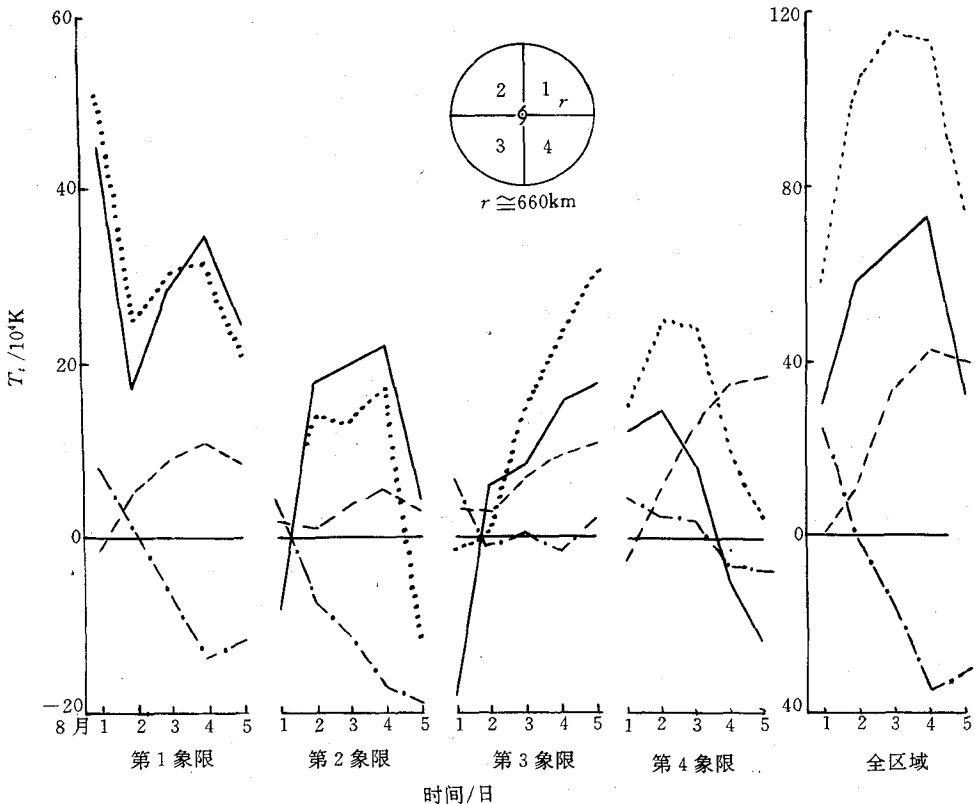


图 1 1996 年 8 月 1~5 日 9608 号台风或低压中心周围四个象限内显热能(点划线)、位能(断线)、潜热能(实线)和总能量(点线)24 小时变量的累积曲线

### 1.1 显热能减少

9608号台风在登陆的头一个24小时内(7月31日至8月1日)四个象限的显热能虽皆有所增长,可是,随后趋于减少,台风北部的1、2象限减量较大。显然,这是由于台风登陆后暖中心的减弱,以及冷空气入侵的影响。反映在全区域(包含四个象限)的显热能变化趋势与第1象限完全相似。

### 1.2 位能增长

9608号台风登陆的第2个24小时起,由于台风强度明显减弱,气压升高,高度增加,所有象限的位能都趋于增大。其中,台风东南方即第4象限增加最大,而台风前进方向即第2象限位能增量最小。整个台风圆柱体的位能增加趋势与显热能的减少趋势相反,绝对值相当。这种情况显然与温压场配置有关。

### 1.3 潜热能明显增长

图1清晰地显示台风或低压圆柱中,潜热能项是各项能量中变化最大的项,它几乎是显热能和位能两项变化的2倍,而且大气总能量与潜热能变化倾向基本一致,数值也接近。在各个象限中也存在类似特点。这就说明了,台风登陆后虽然组成其总能量的有些成分如显热能、位能有所增减,然而潜热能量有足够的补充,以致总能量可以再度适当增加,当台风到达北方后,还可以带来特大暴雨,再显威力,酿成灾害。这一切,应该说潜热能的明显增长起了最大贡献。

众所周知,深入内陆北上的台风,其潜热能的生长是与四周空气,特别是700hPa以下低层沿急流轴的水汽输送有关。本文把850hPa上风速在 $14\sim 28\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 和 $8\sim 13\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的轴分别定义为低空急流轴和大风轴。图2给出了8月1~4日急流轴和大风轴的分布。在台风登陆后,其东侧低层就建立起一支强劲的东南风急流,风速可达 $20\sim 28\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,这支急流可把东海上空的潮湿空气大量

地输送到陆地上,使不断减弱的台风区的水汽猛增,潜热能迅速增长。8月2日、3日,东南急流依然存在,风速有所减小,3日风速减小到 $14\sim 16\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。4日,台风低压东侧虽然只有 $8\sim 14\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的偏南大风轴,但大风轴一直向北挺进到河北省南部。与此同时,在台风低压西侧还有一支自南海、经广西、贵州等省区北上的 $8\sim 12\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 的大风轴。显然,3~4日,南海海面上空也提供了大量水汽。8月5日,尽管自南海向北到 $40^{\circ}\text{N}$ 还一直是偏南风,但绝大多数风速已小于 $8\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,水汽输送显著减弱。因此,从整个台风看,8月1~4日潜热能日益增加;4日潜热能变化累积曲线达到顶峰,5日曲线下降,潜热能明显减少。潜热能这种变化趋势显然同急流轴或大风轴的强弱有关。所以在实际工作中,特别在对北方暴雨预报中,对于低空急流的认真分析是非常重要的<sup>[3,4]</sup>。

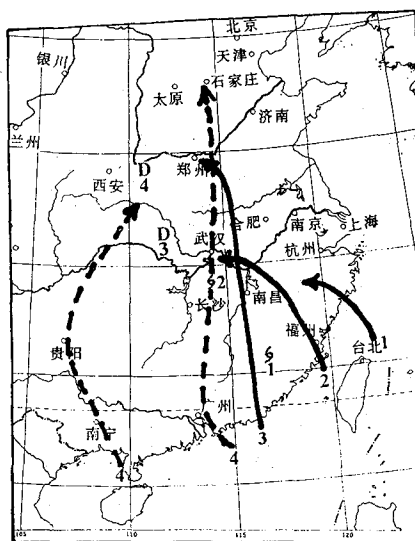


图2 1996年8月1~4日850hPa低空急流轴(粗实线)和大风轴(粗断线)

至于台风周围四个象限内潜热能变化却有较大差异,其特点是:

### 1.3.1 第1象限潜热能累积增长最多

8月1日,台风中心右前方,即第1象限,潜热能猛增,增长了 $45 \times 10^4 \text{K}$ ,它比台风整个区域的潜热能增长还要大,更遥遥领先于其它象限。3日和4日,潜热能持续增加,只有2日,此象限潜热大幅度下降。根据对流层下层温湿资料考察,这种情况与较干、冷空气被卷夹进入有关。第1象限潜热能的逐日增减变化又与该象限降水强度的强弱变化一致,恰好也是台风登陆当天与台风北上造成暴雨灾害最严重的一个象限(表略)。

### 1.3.2 第4象限潜热能累积增量最少

第4象限处在台风中心右后方,除台风登陆的头两天潜热能增加外,8月3~5日,潜热能连续下降。这与该象限从台风登陆时潜热能量最多转变到潜热能量最少。相应,这个象限内降水强度也是减弱的。

### 1.3.3 第2、3象限潜热能先减后增

台风刚登陆时,台风西侧的第2、3象限,潜热能反比登陆前小。这个现象可能带有普遍性。因为一则内陆空气干燥,台风自身带来的充沛水汽在狂风暴雨过程中消耗了许多,二则由东南急流输送的水汽,经过第4、第1象限后,到达第2、第3象限的数量不足以补充所消耗的量。这也许是第3象限潜热能减

少量是第2象限2倍的原因。2日,这两个象限潜热能都有较大幅度的增长。这可能是由于2日台风四周的降水强度全面减弱,尤其是第1象限已无暴雨出现,而低层急流强度减弱甚少,于是随台风环流进入这两个象限的水汽量明显增加,潜热能得到足够的补充。

## 2 渤日海高压维持的机理分析

天气事实和诸多论文<sup>[1,3,5,6,7]</sup>揭示,汛期华北暴雨,尤其是北上台风暴雨时渤海、黄海、日本海地区经常有块状高压存在和维持,已成为一个关键系统。这个系统对北上台风暴雨的作用在于:①致使东亚中低纬地区环流的经向度强烈发展,有阻塞阻挡作用,引导台风北上与西风槽发生相互作用。②高压的西部与台风之间形成很强的偏南或偏东急流,向华北地区输送丰沛水汽。③高压体内的下沉气流在低层辐散,加强了台风低压的辐合上升气流,有利于台风区对流加强。图3a、b给出1996年8月4日500hPa亚洲形势及相应垂直运动分布。可以看出,渤海、日本海地区为一片下沉区,中心位于黄海和朝鲜半岛,它的西侧,华北为强烈上升运动区,这样它们就构成了东西向的垂直环流圈。华北上空强烈上升运动有利于凝结潜热的释放。

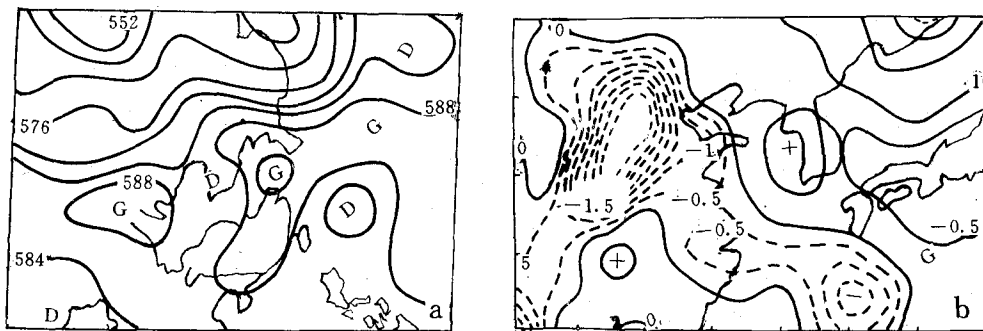


图3 1996年8月4日500hPa高度(a)与垂直速度(b)/ $10^{-3} \text{hPa} \cdot \text{s}^{-1}$ ,负号表示上升

关于北上台风东侧的渤日海高压的维

持,我们认为可以通过对流层高层散度风和

旋转风的分析,以及它们动能之间的转换研究给予启示。因为高层散度风不仅表明辐散、辐合的分布,还可表明辐散气流的流向。至于它们动能间的转换,会表明旋转风场的加强与减弱趋势。下文就是沿着这个设想去研究。

### 2.1 流函数和速度势场的相互作用

水平风向量可分解为无散和无旋两部分:

$$\mathbf{V} = \mathbf{V}_\psi + \mathbf{V}_\chi \quad (4)$$

$$\mathbf{V}_\psi = \mathbf{k} \times \nabla \psi \quad (5)$$

$$\mathbf{V}_\chi = -\nabla \chi \quad (6)$$

式中,  $\psi$  是流函数,  $\chi$  是速度势,  $\mathbf{k}$  是垂直方向的单位向量。同样,大气动能  $K$  也近似地由旋转风动能  $K_\psi$  和散度风动能  $K_\chi$  两部分组成,即:

$$K = K_\psi + K_\chi \quad (7)$$

由式(4)~(7)式、大气水平运动方程及连续方程,并利用垂直运动  $\omega = 0$  的地面边界条件,可以得到整个气柱的旋转风动能和散度风动能的时间变率方程<sup>[8]</sup>。

$$\frac{dk_\psi}{dt} = -\frac{1}{g} \int_0^{p_0} \int_s [(\zeta_\psi + f) \mathbf{V}_\psi \cdot (\mathbf{k} \cdot \mathbf{V}_\chi) + k_\psi \cdot \nabla \mathbf{V}_\chi + \omega \mathbf{V}_\psi \cdot \frac{\partial \mathbf{V}_\chi}{\partial p}] ds dp + \frac{1}{g} \int_0^{p_0} \int_s \mathbf{V}_\psi \cdot \mathbf{F} ds dp \quad (8)$$

$$\frac{dk_\chi}{dt} = \frac{1}{g} \int_0^{p_0} \int_s [(\zeta_\psi + f) \mathbf{V}_\psi \cdot (\mathbf{k} \cdot \mathbf{V}_\chi) + k_\psi \cdot \nabla \mathbf{V}_\chi + \omega \mathbf{V}_\psi \cdot \frac{\partial \mathbf{V}_\chi}{\partial p}] ds dp - \frac{1}{g} \int_0^{p_0} \int_s \mathbf{V}_\chi \cdot \nabla \psi ds dp \quad (9)$$

由式(8)、(9)可见,散度风动能向旋转风动能的转换项为:

$$C(K_\chi, K_\psi) = -\frac{1}{g} \int_0^{p_0} \int_s [(\zeta_\psi + f) \mathbf{V}_\psi \cdot (\mathbf{k} \cdot \mathbf{V}_\psi) + k_\psi \cdot \nabla \cdot \mathbf{V}_\chi + \omega \mathbf{V}_\psi \cdot \frac{\partial \mathbf{V}_\chi}{\partial p}] ds dp \quad \text{A}$$

B C

它包括 A、B、C 三项,并分别以  $C_A$ 、 $C_B$ 、 $C_C$  表示,其中  $C_A$  项是主要的,  $C_C$  项很小,可以略去。

通常情况下,绝对涡度  $(\zeta_\psi + f) > 0$ , 同时把向量化为数量形式,则有:

$$C_A \propto -\mathbf{V}_\psi \cdot (\mathbf{k} \times \mathbf{V}_\chi) \propto -|\nabla \psi| \cdot |\mathbf{V}_\chi| \cos \alpha \quad (10)$$

式中  $\alpha$  为  $\nabla \psi$  方向向右旋到  $\mathbf{V}_\chi$  方向的夹角,当  $\alpha > 90^\circ$  而小于  $270^\circ$  时(参看示意图 4), 则式(10)为:

$$C_A \propto |\nabla \psi| \cdot |\mathbf{V}_\chi| \sin \gamma > 0$$

在绝对涡度为正时,表示散度风动量向旋转风动能转换。反之,当  $\alpha < 90^\circ$ , 或  $\alpha = 270^\circ + \gamma$  时,旋转风动能向散度风动能转换。

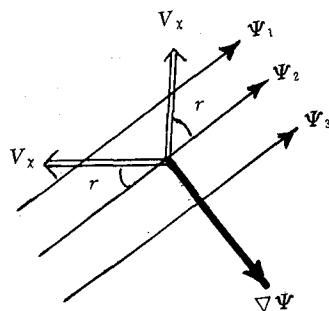


图4 示意图

至于  $C_B$  项,当散度风辐散时,  $C_B < 0$ , 表示消耗旋转风,加强散度风。反之,当散度风辐合时,  $C_B > 0$ , 即消耗散度风,加强旋转风。

### 2.2 1996年8月初大气动能的转换情况

#### 2.2.1 A项贡献

9608号台风低压北上造成华北特大暴雨的时段出现在8月4日至5日晨,当时华北东部沿海上空500hPa为南北向副热带高压单体控制(图3a),特大暴雨发生在副高单体西侧。图5给出8月4日200hPa散度风(a)以及流线(b)。(b)图中双箭头分别表示渤、日海地区的流函数升度( $\nabla \psi$ )方向,与图5a上相应的散度风  $\mathbf{V}_\chi$  之间的夹角都在  $90^\circ \sim 180^\circ$  之间。同时,根据计算200hPa上该地区绝对涡度均为正值。因此表明在这些地区存在散度动能向旋转风动能转换,这意味着

该地区反气旋环流要加强。图5c是7日28日至8月5日200hPa上沿120°E经度线上37.5°N和35.0°N两个格点逐日流函数升度方向(虚线)与散度风向量(实线),分别代表渤海和黄海地区的 $C_A$ 情况。可见,自7月30日至8月4日,渤海地区全部是散度风动能

向旋转风功能转换,使渤海反气旋环流得以维持或加强。而且随着9808号台风低压的北上,8月2~4日,散度风日益增大,其贡献也逐日递增。这段时期内,黄海地区的情况也基本相同。

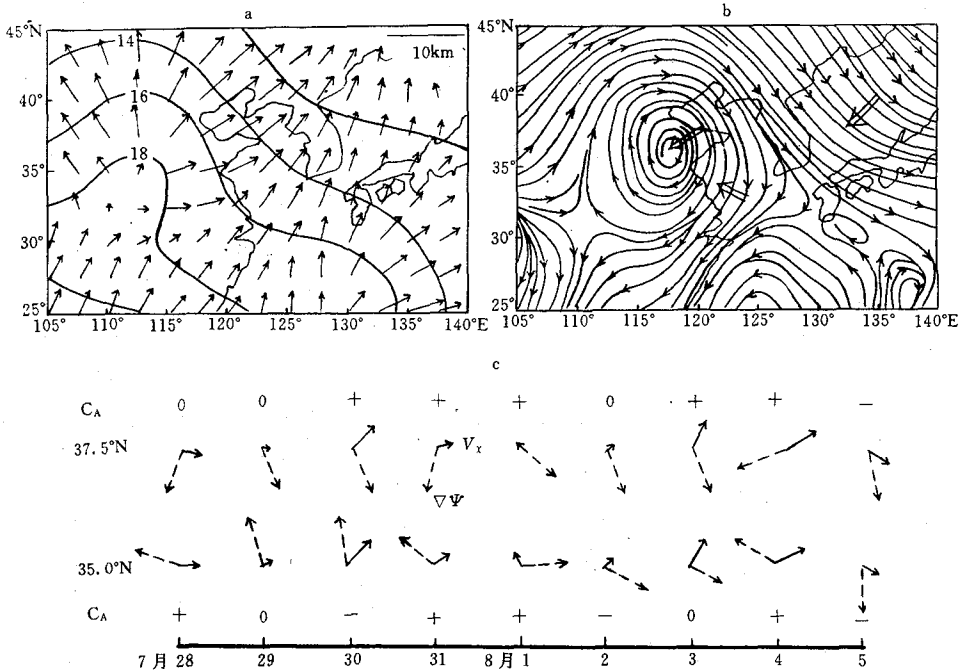


图5 1996年8月2日200hPa散度风(a)、流线(b),以及7月28日至8月5日200hPa站120°E上37.5°N(上)、35.0°N(下)格点上 $\nabla\phi$ 与 $\nabla\chi$ 以及动能转换项 $C_A$ 符号的逐日情况(c)

### 2.2.2 B项贡献

由图5a散度风场上风速大小的分布还可以判断出渤海、日本海都处于散度风风速辐合区,即 $\nabla V_x > 0$ ,表明这些区域也是散度风动能向旋转风动能转换,同样对渤海高压的维持作正贡献。

上述讨论表明,动能转换函数的A、B两项都有利于散度风动能向旋转风动能转换,使渤海高压得以维持。

丁一汇等曾给出“75.8”暴雨的天气学模

式<sup>[3,6]</sup>。这个模式由于特别着重于水汽输送和低空急流,未曾注意到渤海高压的维持与作用。“75.8”例与“96.8”例,按仇永炎文<sup>[1]</sup>中讨论,同属于台风与西风槽的相互作用型,都为11年周期的组成部分。我们在参考该模式的基础上,加以补充。用简单示意图(图6)表达我们的看法。一旦北上台风由于渤海高压的阻挡作用,容易与西风槽发生相互作用的形势,并呈准静止状态。同时在受到来自我国东南海面低层偏南急流的水汽输送,使台

风能量再度增长(主要是通过潜热能),或者说台风增幅,促进对流发展,产生特大暴雨。暴雨的凝结热释放的加热作用,高层辐散加强,散度风动能增加。这一切发生在渤日海高压上空非常有利于散度风动能向旋转风动能转换的形势下,从而使高压上空反气旋环流加强,也有利于渤日海高压的维持与加强。这是一种反馈过程,还会使低层急流维持与加强。这种垂直环流与台风、西风低槽、以及渤

日海高压的水平环流组成的有机联系系统,会不断地循环下去,直到破坏条件出现后才会终止。所以,在盛夏季节,北上台风过程降水量达到400mm以上的形势多属于这种情况。值得说明的是,本文讨论有一点不足,就是只注意到台风、槽的东侧,而未涉及其西侧,因为西侧就要特别注意冷空气的作用。这种情况,留待以后再作讨论。

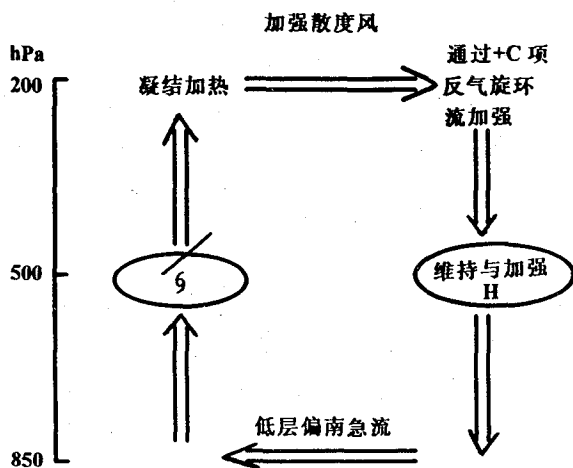


图6 台风与西风槽相互作用型下的垂直环流及渤日海高压的维持作用

⊗表示台风低压,其北的斜线表示其与西风槽的相互作用,H表示渤日海高压块的位置,+C项是指散度风动能向旋转风动能的正转换

#### 4 小结

通过对9608号台风的总能量分析和 $\chi$ - $\psi$ 能量学研究,可以得到以下两点:

4.1 在9608号台风登陆减弱北上过程中,组成其总能量的各种能量项的变化特点是:动能明显减少,显热能逐渐减少,位能略有增长,而潜热能显著增长。其中,潜热能的生长对总能量的再增长作出最重要的贡献,而潜热能的生长与低空急流的存在密切相关。这种情况很

可能就是在日常工作中所见到的减弱台风达到北方后还会带来很大灾害性的重要原因之一。此外,台风(低压)中心东北方的第1象限潜热能增长最为迅猛,这一特点是这个象限成为大暴雨的主要落区的原因之一。

4.2 台风登陆后,其与西风槽组成的低值系统与渤日海高压系统的大尺度配置,在高层出现有利于散度风动能向旋转风动能转换的形势,结果使反气旋环流增强,加强渤日海高

压的维持。从而低空急流得以维持与加强,产生特大暴雨。这种形势的配置与反复循环(如图6所示),很可能就是台风达到北方后出现2~3天大暴雨的一种重要过程。

**致谢:**本文在设计、研制、直到写作过程中,与吴宝俊研究员多次讨论,得到很多帮助与启发,特此感谢。文中许多资料与图的绘制,得到翟盘茂、任富民同志的帮助,亦表感谢。

**参考文献**

- 1 仇永炎. 北方盛夏台风暴雨的天气型及其年际变率. 气象, 1997, 23(7): 3~9.
- 2 朱乾根, 林锦瑞, 寿绍文. 天气学原理与方法. 北京: 气象出版社, 1981年: 458~459.
- 3 丁一汇等. 1975年8月上旬河南特大暴雨的研究(一)—“75.8”暴雨发生发展条件的分析. 暴雨及强对流天气的研究. 北京: 科学出版社, 1980年: 25~38.

- 4 蒋尚诚. 中低纬度系统相互作用的特大暴雨. 华北暴雨. 北京: 气象出版社, 1992年: 182.
- 5 丁一汇等. 影响华北夏季暴雨的几类天气尺度系统分析. 暴雨及强对流天气的研究. 北京: 科学出版社, 1980年: 1~13.
- 6 蔡则怡等. 1975年8月上旬河南特大暴雨的研究(二)—“75.8”暴雨的反馈作用与维持. 暴雨及强对流天气的研究. 北京: 科学出版社, 1980年: 47~59.
- 7 晁淑懿. 夏季黄、渤、日本海高压与华北暴雨的观测事实. 应用气象学报, 1990年, 1(2).
- 8 T. C. Chen, A. C. Wiin-Nielsen. On the kinetic Energy of the divergent and nondivergent flow in the atmosphere, *Tellus*, 1976, 28(6): 486~498.

## The Total Energy Variation during the Northward after Typhoon 9608 Landfall over China and The Maintenance of Bohai Japanese Sea High

Chao Shuyi

(National Meteorological Center, Beijing 100081)

Qiu Yongyan

(Department of Geophysics, Peking University 100871)

Wang Yinghai

(National Meteorological Center, Beijing 100081)

### Abstract

Firstly, variations of the total energy and its compositions at the central area of the landed Typhoon 9608, which belongs to the pattern of the interaction between Typhoon and westerly trough, have been analysed. The results show that as a result of the latent heat energy increase, the total energy increased once again. But the increase of the latent heat energy was closely related to the low level jet of east by south wind on the east side of the Typhoon. And, within the east-north quadrant of the Typhoon the latent heat energy increased vigorously, and there is the maximum rainfall area as well. Secondly, using the arrangements between the divergent wind field and the rotation wind field at upper level of the troposphere, and the conversion relation between the kinetic energies of the divergent wind and the rotation wind, the variation tendency for maintaining the upper level anticyclonic circulation located on the east of Typhoon and over Bohai Sea-Japanese sea has been estimated by eyes. The divergent wind flowed from upper level over the depression area was advantageous to maintain and strengthen the upper anticyclonic circulation. Finally, the east-west vertical circulation scheme of the pattern of the interaction between Typhoon and westerly trough is given.

**Key Words:** Typhoon 9608 total energy kinetic energy conversion of divergent wind