

台风外围暴雨成因及其增幅的一种动力学机理^{*}

徐文金

(南京气象学院气象学系, 南京, 210044)

摘要 通过对9216号台风外围暴雨的诊断分析,发现暴雨是由低层低压气旋流场系统、与高层高压反气旋流场系统以及深厚的饱和湿度层所组成的一种高层抽吸作用所形成。暴雨的增幅原因,是通过台风和东风波系统与西风带的低涡低槽系统合并加深后,导致暴雨区上空暖平流因子增强和高层抽吸作用增强所形成。最后对预报和研究这类暴雨提出了几点看法。

关键词 台风暴雨, 动力学机理, 诊断分析

分类号 P444

9216号台风有着明显的外围暴雨区,而且在其登陆北上后,降水强度有一次明显突然增幅过程。本文将说明这种外围暴雨特征,并用平衡模式的 ω 方程,诊断分析了这种暴雨成因及其突然增幅的动力学机理。以使我们对其物理过程有进一步认识,并对预报和研究这类暴雨提供一种思路。

1 9216号台风路径与暴雨概况

由图1可见,9216号台风自1992年8月27日在台湾以东洋面形成后,向西偏北方向缓慢移动,经台湾岛后逐渐加速,于8月31日晨在福建省长乐县登陆,登陆时中心风力8级,中心气压为975hPa。此后,逐渐受西风槽影响,转向北并变性为斜压性低压,经江西、安徽、江苏于9月1日下午在山东省南部出海,向朝鲜北部移去。为一般抛物线型路径特征。其暴雨概况如下。

(1)由图2可见,8月29日08时~9月3日08时5日总雨量 $\geq 50\text{mm}$ 的地区,从广东北部经沿海数省一直到辽宁省东南部。并有两个大范围大暴雨区。其中一个在闽浙沿海,最大雨量中心在浙江省括苍山(为461mm),另据有关报导浙江省乐清县佛头过程雨量达741mm。另一个大暴雨区在山东半岛到辽宁省东南部,其最大值在大连为270mm。

(2)从逐段6小时雨量(下用 R_6 表示)看(图略),闽浙沿海总雨量大的原因,除雨强大外,降水持续时间长也是一个因素。当29日08时台风在台湾以东洋面时,闽浙沿海在强东风暖湿气流和地形作用下,就开始出现 $R_6 \geq 10\text{mm}$ 的雨区,一直维持到9月1日08时台风北上后才结束。强降水持续时间长达72小时。而山东半岛到辽东半岛的大暴雨区,则是降水强度突然增幅所致。以大连为例,在9月1日08时到20时之间雨量就达211mm,这是9216号台风登陆后,12小时内降水强度最大的降水,也是大连历史同期所罕见。

* 本工作得到国家“八·五”攻关项目85—906资助

收稿日期:1993—10—05;改回日期:1993—11—18

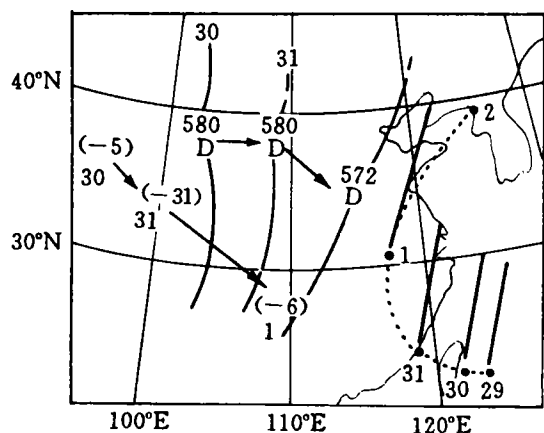


图1 9216号台风路径(点线),东风波(粗线)及500hPa的低槽(细线)、低涡(D)、24小时变温(圆圈内数值℃),动态图(一组数字为日期,时间为08时)

Fig. 1 Track of Typhoon 9216 (dotted line), easterly wave (thick solid line), trough line (thin solid), vortex (D) and 24-h temperature variation with the circled figure in $^{\circ}\text{C}$. Digits on the dynamic diagram stand for 0800 BST of the date given

(3)从 R_6 图上还可看到9216号台风较强的降水区分布有两个。以8月31日14时 R_6 图为例(图略),可见一个位于福建省南部的台风中心附近,最大 R_6 为55mm在福建省九仙山。另一个位于台风中心北侧约400~1000km之间的浙江省到江苏省内,最大 R_6 为69mm在江苏省东台(本文称它为外围暴雨区)。图3给出了这两个暴雨区中最大 R_6 随时间变化曲线。可见,31日02时台风刚在福建省登陆时,其中心区最大 R_6 达108mm,此后便迅速减弱,到9月1日08时台风中心区最大 R_6 只有10mm左右。而外围暴雨区 R_6 强度在9月1日08时之前基本上在60~70mm附近变化。而在1日08时~20时之间 $R_6 \geq 100\text{mm}$,有显著增幅。

2 一些重要特征

(1)在台风登陆前,我国西部高原就

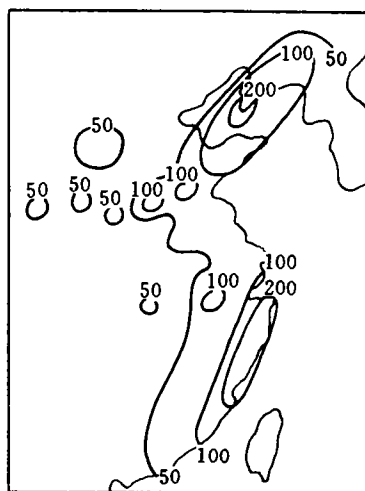


图2 1992年8月29日08时~9月3日08时5天总雨量 $\geq 50\text{mm}$ 分布

Fig. 2 5-day $\geq 50\text{mm}$ rainfall pattern for the period 0800 BST August 29 to the same hour of September 3, 1992

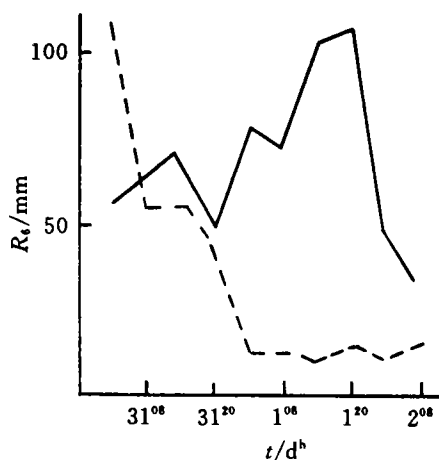


图3 最大 R_6 随时间变化曲线实线为台风外围最大 R_6 ,虚线为台风中心区内最大 R_6 ,时间取天气图时间
Fig. 3 Temporal curve of maximum R_6 , which is represented by solid (broken) line for the outside of the typhoon (its central part), with the time taken from the related weather maps

有低槽、低涡形成和东移,并引导一股冷空气南下(见图1)。在台风登陆后,这低值系统迫使西太平洋副热带高压东退,并引导台风北上变性。它对台风外围暴雨的增幅有着明显影响(后面将详细分析这一点)。

(2)大范围的台风低压环流和强风区。低层(925~700hPa)的气旋流场半径约达1500km,在台风北侧1000km 范围内存在一支偏东风低空急流。31日08时上海925hPa 上为东风 $26\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$,31日20时青岛850hPa为东风 $30\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。这支强急流与暖湿气流相结合为暴雨区提供了充沛的水汽。

由图1和图4可以看到以下(3)~(5)点的特征。

(3)暴雨区低层有一低压系统。这系统在台风西进过程中表现为东风波特征,在台风北上变性后表现为台风倒槽。这是台风北侧外围暴雨的直接影响系统。

(4)暴雨区高层250hPa 上为一高压脊。

(5)暴雨区附近上空存在大范围深厚的饱和层, $t-t_d\leq 3\text{C}$ 气层自地面一直到200hPa 高度。以上(3)~(5)点的特征,作者认为有一定代表性,因此,下文将着重分析这些特征所具有的动力学意义。

(6)这次台风外围暴雨区从未有过雷暴记录,从暴雨区云状上看多为层状云,层结曲线也多是接近中性特征。因此,可以认为这次台风外围暴雨主要是系统性强烈抬升作用所引起的。层结不稳定因子不是一个主要因子。

3 诊断分析

大家知道形成暴雨必然有强上升运动。而平衡模式的 ω 方程表达了有12项强迫因子与垂直速度的关系。是一个比较完整地描述了 ω 与强迫因子关系的理论方程。它的表达式为

$$\nabla^2(\sigma\omega) + f^2 \frac{\partial^2 \omega}{\partial p^2} = \sum_{i=1}^{12} F_i$$

其中 F_i 分别表示12个强迫因子。 F_i 的表达式在文献[1,2]中已有说明。我们计算了11个因子(未计算显热加热因子)。由于该方程是线性方程,因而可采用各种强迫因子求和后解 ω 值,再分别求解各单个强迫因子 F_i 所对应的 ω_i 值,而且有

$$\sum_{i=1}^{11} \omega_i = \omega$$

我们用实测资料连续计算了暴雨发生前后几个时次的 ω_i 和 ω 值。计算的 ω 与当时的 R_6 大值区分布基本一致。追踪分析暴雨区上空是哪些强迫因子使计算值出现较大上升运动值呢?表1、表2给出了暴雨区上空计算结果值。表1是8月31日08时暴雨区位于江苏省时,暴雨区内2点计算平均值,表2是9月1日08时暴雨区移到山东半岛时,山东半岛2点计算平均值。表中只给出对 ω 起较大作用的几项 F_i 因子所对应的 ω_i 值。由表可看到:

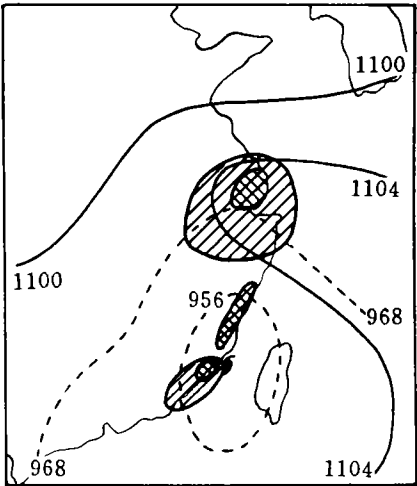


图4 1992年8月31日08时暴雨区上下层特征配置,实线为250hPa 等高线(dagpm),虚线为925hPa 等高线(gpm),斜格区为 $R_6 \geq 20\text{mm}$ 区,斜线区为 $t-t_d \leq 3\text{C}$ (自地面一直到200hPa)

Fig. 4 Collocation of the upper and low levels of the rainstorm band at 0800 BST August 31, 1992, with the 250 (925) hPa contours denoted by solid (broken) line in units of dam (gpm). Area of $R_6 \geq 20\text{mm}$ is cross-hatched and that of $t-t_d \leq 3\text{C}$ (from ground to 200 hPa level) hatched

(1) ω 值是对应于11项强迫因子总和所解得台风外围暴雨区上空的垂直速度值。表1显示当时江苏省暴雨区上空最强的上升运动高度位于850hPa 附近(ω 为 -7.3 , 单位见表中说明,下同),其他高度也有很强的上升运动。表2显示当时山东半岛的暴雨区上空最强上升运动高度位于700hPa 附近(ω 为 -16.5),比31日08时强了很多。

表1 1992年8月31日08时暴雨区计算值, $\omega/10^{-2} \text{ hPa}\cdot\text{s}^{-1}$, $\zeta/10^{-5} \text{ s}^{-1}$

Table 1 Calculations of the rainstor.n area at 0800 BST, August 31, 1992.

Units: $10^{-2} \text{ hPa}\cdot\text{s}^{-1}$ for ω and 10^{-5} s^{-1} for ζ

	SFC	850	700	550	400	250
ω	- .08	- 7.3	- 5.2	- 5.2	- 4.2	- 1.6
ω_5		- 6.5	- 6.3	- 6.7	- 5.0	- 1.1
ω_6		- 0.4	- 0.3	0.0	0.0	0.0
ω_h	- 0.8	- 0.2	0.0	0.0	0.0	0.0
ω_2		- 0.3	1.7	1.5	0.9	- 0.5
ω_1		- 0.1	- 0.1	- 0.1	- 0.1	0.0
ζ	1.7	3.5	3.5	0.1	- 1.1	- 0.5

表2 1992年9月1日08时暴雨区计算值,单位同表1

Table 2 As in Table 1 except for 0800 BST, September 1, 1992

	SFC	850	700	550	400	250
ω	- 9.5	- 10.5	- 16.5	- 12.2	- 8.6	- 2.8
ω_5		- 9.1	- 15.3	- 10.5	- 7.7	- 2.1
ω_6		- 0.2	- 0.9	- 1.0	- 0.2	0.1
ω_h	- 1.0	- 0.4	- 0.2	- 0.1	0.0	0.0
ω_2		- 0.9	- 0.8	- 0.6	- 0.8	- 0.7
ω_1		0.2	- 0.2	- 0.3	- 0.3	- 0.1
ζ	1.8	4.3	6.1	6.9	0.8	- 3.2

(2) ω_5 是由水汽潜热加热因子 F_5 求得的垂直速度。水汽潜热的计算方法参照文献[3]。表中 ω_5 均为负值。且比其他 ω_i 值大出一个量级左右。这说明仔细分析水汽潜热作用是暴雨研究和预报中一个至关重要的问题。下面将进一步分析它。

(3) ω_6 由 F_6 因子求解得到的垂直速度

$$F_6 = f \frac{\partial}{\partial p} (\omega \frac{\partial \zeta}{\partial p})$$

它的物理意义是涡度垂直输送差。表1中 ω_6 在850、700hPa 分别是 -0.4 、 -0.3 ,除 ω_5 外它是较大值。表2中 ω_6 在700、550hPa 分别是 -0.9 、 -1.0 ,与表1中 ω_6 值对比,显示该因子对上升运动作用增强了很多。它是暴雨突然增幅原因之一。这个因子的物理图像下文将对它进行综合分析。

(4) ω_h 是由下边界摩擦因子求得的垂直速度。它在近地层上升速度值也较大,是由暴雨区近地层为低压、正涡度流场所形成。

(5) ω_2 是由温度平流因子解出来的垂直速度。在各高度上它的数值也较大。表1中700到400hPa高度之间为正值,起抑制上升运动作用。表2中各高度都为负值,起上升运动作用。表1与表2中 ω_2 值的这种差别也是9月1日山东半岛到辽东半岛暴雨突然增幅原因之一。本文后面将进一步分析它。

(6) ω_1 是由涡度平流上下差而求解出来的垂直速度。在表1各高度 ω_1 值都较小,说明起作用不大。在表2中 ω_1 值增大些,在700hPa以上起上升运动作用。

以下我们来综合分析上述计算值所表达的物理图像和动力学机理。首先分析暴雨成因的物理机理,然后再分析突然增幅的物理机理。

4 台风外围暴雨成因的物理机理

图5给出上述诊断分析计算值所表达的暴雨区上空主要物理图像。图中深厚的水汽饱和和气层表达出水汽潜热加热作用。它使暴雨区上空气柱形成暖性结构,在静力学原理作用下,高层形成一高压,低层形成一低压特征。在气压梯度力作用下,高层出现辐散气流,低层出现辐合上升气流。与此同时,在地转偏向力作用下,高层出现反气旋流场,低层出现气旋流场,使大气趋向于地转适应方向发展。如果此时不出现其他因子作用,则在地转适应过程中,上升运动也将逐渐减弱,到地转适应时,上升运动将完全停止。潜热加热作用也将停止,降水也将停止。

但是事实上,上述过程中必然同时存在摩擦因子和涡度垂直输送差 F_v 因子。因为 F_v 因子的大小取决于 ω 与涡度的垂直分布特征。它的物理作用过程,是使低空较大的正涡度流场

垂直输送到高层,去破坏高层为了与高压相适应所形成的反气旋流场,也使低层必须不断有辐合气流产生正涡度流场,来与低压场相适应。这样就起到维持上升运动的作用。我们称 F_v 因子的这种作用为高层抽吸作用。在水汽供应充足的条件下,这种抽吸作用具有自身维持功能,使降水维持下去。因为如果没有水汽潜热作用,那么上升运动在绝热冷却下,气柱将降温,将不可能维持高层为高压,低层为低压的特征,上述抽吸作用也将不可能维持。可以推理,深厚的饱和层可使这种抽吸作用拉伸到较高的高度上,从而有利暴雨的形成和维持。

因此,深厚的水汽饱和和气层是发生暴雨必不可少的条件之一。因为它不仅是云中液态水的来源,而且水汽释放的潜热加热具有上述的动力学作用,它是在研究和预报暴雨时,必须加以细心注意的问题之一。

那么深厚的水汽饱和和气层是如何形成和维持的呢?在环境水汽供应充足条件下,它与上升运动本身也存在一种相互维持的作用,这个问题我们将在以后的工作中再深入讨论。

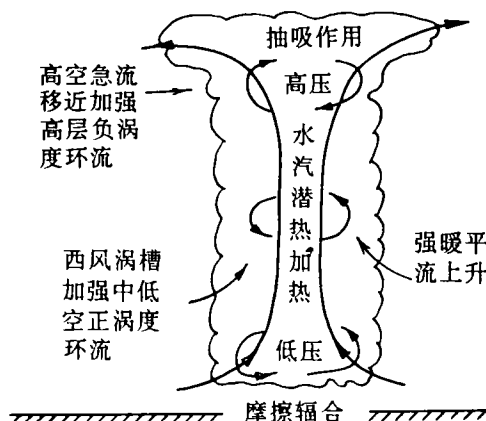


图5 1992年9月1日08时暴雨成因

和增幅因子综合物理图像

Fig. 5 Integrative physical diagram of the rainstorm's causes and its enhancing factors for 0800 BST September 1, 1992

5 暴雨突然增幅原因的物理机理

前面已说明暴雨突然增幅出现在9月1日08时到20时之间,山东半岛到辽东半岛附近地区。因此,我们着重分析1日08时之前,在山东半岛附近大气中发生了那些与暴雨增幅有关的变化。

(1)由表1与表2中显示出的 ω_2 在8月31日08时到9月1日08时之间,从低层到高层均发生了有利于上升运动的变化。即暖平流因子大大增强了。追踪分析天气图(图6)可见,这是由于台风和东风波北上与西风带涡槽合并加深后,使江苏沿海由原先偏东气流急转为偏南气流,与其以北的济南、大连等地的偏东气流之间形成很强的暖锋锋生区。它是暴雨突然增幅原因之一。暖平流因子对上升运动起作用的物理机制,本质上与水汽潜热加热作用一样,都是起到维持暖区结构,使高层形成高压,低层形成低压的作用。

(2)前面诊断分析中已指出 ω_6 值在9月1日08时有明显增强,表明此时暴雨区上空抽吸作用因子增强很多。由于这个因子的大小是取决于涡度与 ω 的垂直分布特征。对比表1与表2的最后一行涡度值,可见8月31日 ζ 最大值3.5出现在850、700hPa上,负涡度最强值-1.1出现在400hPa上。而9月1日08时 ζ 最大值6.9出现在550hPa上,负涡度最强值-3.2出现的高度也比前一天高了许多。正是这些变化,使暴雨区上空抽吸作用大大增强了。再进一步分析涡度如此变化的原因,从天气图可见到9月1日08时暴雨区上空,中低层正涡度值增大的原因是西风带低涡、低槽与台风及东风波合并加深的结果。例如500hPa低涡中心闭合线31日08时为580,到9月1日08时加深到572(见图1)。而暴雨区高层9月1日08时负涡度增强的原因,从250hPa图(图略)可见到是西风槽前的高空急流移近暴雨区而形成的。

所以我们归结9216号台风外围暴雨突然增幅的原因是:台风与东风波北上后与西风带低涡低槽合并加深及高空急流移近的结果。它的物理过程是通过增强暖平流作用和增强高层抽吸作用来实现。

6 对预报和研究的启示

根据本文分析结论,有如下几点供今后暴雨预报和研究参考。

(1)注意分析大气中三维空间水汽的饱和状态及其变化,可能比分析比湿场更有意义。分析 $t - t_d \leq 3^\circ\text{C}$ 最大厚度区能更好地显示出暴雨区范围和强度。分析厚度区的演变,可能有助于掌握暴雨区的演变。

(2)注意大气中的抽吸作用。它是由高层(400hPa高度以上)与低层系统配置以及饱和湿度层的结合情况所决定。建议分析300与250hPa的高空图,以便了解高层是否存在抽吸作用。

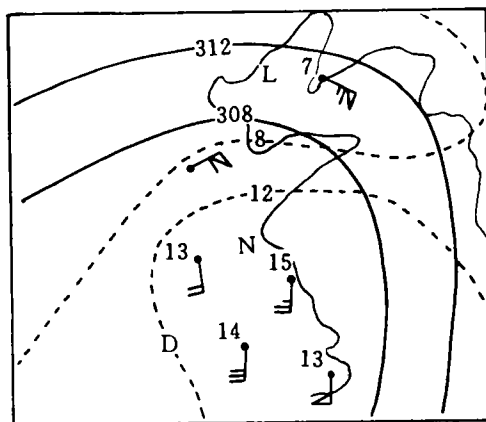


图6 1992年9月1日08时700hPa温度平流特征,
实线为等高线,虚线为等温线,站点上数值是温度值
Fig. 6 700-hPa temperature advection characteristics
with the contour (isotherm) denoted by solid (broken)
line and the figure beside the station standing for
the temperature. The time is the same as in Fig. 5

(3)应注意暖平流因子作用。从 ω 方程可知,暖平流最强的地区是上升运动,而冷平流最强的地区是下沉运动。预报员预报降水通常多注意冷空气活动,也是有经验为依据。这是否与理论结论有矛盾呢?作者对此解释是,由于我国西部地区的地形特殊性,冷空气活动常比暖空气活动更为明显一些,冷空气活动常导致高空低槽的发生、发展,从而使槽前的暖平流加强,导致高低空气压场、涡度场发生有利于抽吸作用的变化。所以降水预报中,注意冷空气活动是应该的,但是,也应该进一步分析冷空气活动是否会引起本地区上空暖平流和抽吸作用的增强,这样理解可能更好地抓住降水的本质,使我们的预报思路更加全面一些。

参 考 文 献

1 Krishnamuti T N. A diagnostic balance model for studies of weather system of low and high latitudes Rossby number less than 1. *Mon Wea. Rev.*, 1968, 96(4): 197~207

2 王德翰,吴宝俊,徐文金等. 暴雨分析方法有关物理量的计算. 北京:气象出版社,1985. 92~100

3 Tarbell T C, Warner T T, Anthes R A. An example of the initialization of the divergent wind component in a mesoscale numerical weather predication model. *Mon Wea Rev.*, 1981, 109: 77~95

ON DYNAMIC MECHANISM FOR TYPHOON RAINSTORM
CAUSE AND ENHANCEMENT

Xu Wenjin

(Department of Meteorology, NIM, Nanjing. 210044, PRC)

Abstract Diagnosis is performed of the rainstorm from Typhoon 16 of 1992, indicating that the rainfall is generated through high-level pumping operated with a low-level cyclonic flowfield, a high-level anticyclonic flowfield, and a deep vapor-saturated layer available, and that the raingush enhancement is attributed to the typhoon moving into the easterly wave system or a vortex or trough in westerlies, thus leading to intensified warm advection over the rainband and increased pumping at high levels. Eventually, some remarks are given as to the research and prediction in the scope of typhoon rainstorm.

Keywords typhoon rainstorm, dynamic mechanism, diagnosis