# 台风海棠造成河南暴雨过程的位涡分析

靖春悦<sup>1,3</sup> 寿绍文<sup>1</sup> 贺 哲<sup>2</sup> 李 平<sup>2</sup> 乔春贵<sup>2</sup> 范学峰<sup>2</sup>

(1.南京信息工程大学大气科学系、江苏省气象灾害重点实验室,210044;2.河南省气象台;3.河南省许昌市气象局)

提 要:采用 NCEP/NCAR 再分析资料对 2005 年台风海棠影响河南所造成的三个 阶段的区域性暴雨进行位涡分析,揭示了此次台风暴雨产生的机制。结果表明:台风 海棠低压环流呈现为高位涡结构。它造成的河南第一个阶段强降水是在台风东北部 的东南急流南侧产生的;第二和第三个阶段是由于台风到达较高纬度后,与西风带高 位涡冷空气相互作用而产生的远距离暴雨。同时,高空西风急流的南移有利于高位 涡的向南输送,对于暴雨的增幅具有促进作用。 关键词:台风 位涡 冷空气 暴雨

# Analysis of Potential Vorticity for the Rainstorm Processes in Henan Province Caused by Typhoon Haitang

Jing Chunyue<sup>1,3</sup> Shou Shaowen<sup>1</sup> He Zhe<sup>2</sup> Li Ping<sup>2</sup> Qiao Chungui<sup>2</sup> Fan Xuefeng<sup>2</sup>

 Department of Atmospheric Sciences, Jiangsu Key Laboratory of Meteorological Disaster, Nanjing University of Information Science and Techology, 210044;2. Henan Meteorological Observatory; 3. Xuchang Meteorological Office, Henan Province)

**Abstract**: Based on the analysis of the potential vorticity(PV) on isentropic surface in the three phases of regional rainstorm in Henan Province caused by Typhoon Haitang, the mechanism for the generation of the rainstorm is disclosed. The results show that typhoon is a system with high PV value, the first rainstorm phase is generated in the south to the southeasterly jet stream which lies in the northeastern part of typhoon. The second and the third phases are the rainstorms far from the typhoon. They occur because of the interaction of typhoon and cold air with high PV when typhoon reaches the relatively high latitude . In addition , the southward shift of upper level

收稿日期: 2006年11月14日; 修定稿日期: 2007年1月15日

基金项目:国家自然科学基金项目(40405009、40575022、40205008);江苏省气象局科技开发项目(200406);江苏省气象灾 害重点实验室项目(KLME050201);国家重点基础研究发展规划项目(2004CB418301);江苏省自然科学基金项 目(BK2005141)

jet stream is advantageous to the southward transportation of high value PV and can promote the intensification of rainstorm.

Key Words: typhoon potential vorticity cold air rainstorm

# 引 言

台风是夏季影响我国的主要天气系统之 一。由于台风对人类生产、生活的重大影响 以及它的难预报性,多年来已有很多学者对 台风进行过研究[1-9]。已有的研究结果表 明<sup>[7-9]</sup>,登陆北上的台风携带大量的热带扰动 动量和暖湿气流进入中纬度地区,若与高低 空急流、西风槽、冷空气等中纬度天气系统发 生相互作用,能够使得西风带系统获得大量 斜压能量,促使中纬度斜压系统强烈发展。 而台风外围环流或台风倒槽与西风带系统的 结合,则往往能产生远距离暴雨,此类暴雨通 常比台风本身的降水要大得多。以往对台风 进行研究的方法很多,由于台风的主要灾害 是暴雨,而且台风在我国登陆时通常已经到 达较高纬度,因而通过位涡对台风暴雨进行 分析是可行的。这是因为位涡是一个综合反 映大气热力学和动力学的物理量,并且在绝 热、无粘条件下的斜压大气中,位涡沿气块轨 迹具有守恒性[10]。位涡理论近年来在暴雨 的分析中得到广泛应用并取得较好效 果<sup>[9-11]</sup>。

河南是受台风影响较为严重的内陆省份 之一,历史上著名的 63.8、75.8、82.8、96.8 等台风暴雨过程均对河南产生了深重影响。 2005 年 7 月登陆北上的台风海棠也是对河 南造成重大影响的台风之一,其中既有台风 环流直接造成的强降水,也有台风倒槽与西 风带斜压系统相结合所产生的远距离暴雨, 本文侧重从位涡的角度对"海棠"所造成的河 南暴雨过程进行分析,进而探讨此次暴雨产 生的物理机制。

## 1 "海棠"及其在河南所形成暴雨过程概况

0505 号台风海棠于 2005 年 7 月 12 日 在西北太平洋上生成,18 日中午在我国台湾 省宜兰县登陆,19 日傍晚在福建连江再次登 陆。二次登陆后,迅速减弱成为热带风暴和 热带低压,低压中心经过福建、江西,最后进 入湖南。20 日下午台风倒槽云系开始影响 到河南省(图略)。

台风海棠影响河南所产生的暴雨过程, 按照暴雨落区可分为三个阶段,分别是7月 20日20时—21日20时、21日20时—22日 20时和22日20时—23日20时,其中21日 20时—22日20时为区域性大暴雨,并有4 个站24小时降水量突破其历史极值。如图 1所示,第一个阶段暴雨主要产生在河南省 的淮南地区,而第二个阶段暴雨落区为河南 省西北部及洛阳到郑州一带,第三阶段暴雨 区移至河南省东北部。

对于这三个暴雨阶段的天气学分析(图略)表明,第一个阶段是由于北上的台风与其 东北侧的副热带高压之间的东南急流造成 的,其间并无冷空气的参与,台风低压与西风 带系统没有产生相互作用。而第二和第三个 阶段则是由于台风登陆进入江西、湖南等地 后折向西南方向,其北侧的倒槽延伸至黄河 中下游,并与西风带冷空气相互作用而产生 的远距离暴雨。

# 2 资料及计算方法

采用 NCEP/NCAR 所提供的逐日 00、 06、12、18 四个时次(世界时)的格点分析资 料,格距为 1°×1°,垂直方向为 1000~10hPa 共 26 个层次。



a. 20 目 20 时—21 目 20 时,b. 21 目 20 时 22 目 20 时,c. 22 目 20 时—23 目 20 时

在绝热、无粘条件下的斜压大气中, 位涡 沿气块轨迹守恒<sup>10</sup>。在 p 坐标系下, 忽略  $\omega$ 的水平变化, 位涡 PV 的表达式为:

$$PV = -g(\zeta + f) \frac{\partial \theta}{\partial p} + g(\frac{\partial v}{\partial p} \frac{\partial \theta}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial p} \frac{\partial \theta}{\partial y}) \qquad (1)$$

PV可分为两个部分,

$$PV1 = -g(\zeta + f) \frac{\partial\theta}{\partial p}$$
$$PV2 = g(\frac{\partial v}{\partial p} \frac{\partial \theta}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial p} \frac{\partial \theta}{\partial y})$$

PV1 为与静力稳定度有关的正压项; PV2 为与风速垂直切变和位温水平梯度有关的斜压项。位涡单位采用 PVU,1PVU= $10^{-6}$  m<sup>-2</sup> · s<sup>-1</sup> · K · kg。位涡是综合反映大气动力学和热力学的物理量,它把大气中两种不稳定机制有机地结合在一起<sup>[9]</sup>。

位涡分析有多种方法,最常用的方法之 一是等熵位涡(IPV)分析法,即在等位温面 (即等熵面)上分析等位涡线。利用等熵位涡 来研究天气系统的演变的优点之一是能够跟 踪观察天气系统发生、发展过程中气块的涡 旋行为。在绝热、无摩擦条件下,运动大气的 位涡具有守恒性。因此可以根据位涡异常区 (即位涡高值区或低值区)的变化来追踪大气 扰动的演变情况<sup>[10]</sup>。等熵位涡采用如下公 式在指定的等熵面上进行计算:

$$IPV = -g(\zeta_{\theta} + f) \frac{\partial \theta}{\partial p}$$
(2)

文中将采用公式(1)、(2)对位涡和等熵 位涡进行计算。

## 3 等熵位涡分析

#### 3.1 第一阶段降水

分析位于对流层中层 500hPa 附近的 θ=330K等熵面上的位涡和温度分布及其演 变特征可知,在19 日 08 时(图略)台风中心 位于台湾海峡,与台风环流相对应的是高位 涡中心和暖中心,其中心位涡强度超过了 2.2PVU。台风登陆以后,随着其西北行,强 度逐渐减弱,与其中心相对应的位涡强度也 逐渐减小,台风倒槽云系于 20 日下午开始影 响河南省南部地区。图 2a 给出的是 21 日 02 时 330K 等熵位涡及温度分布,位涡强度 ≥1PVU 的区域基本对应着台风低压环流, 从福建、江西经湖北伸至河南省的东南部,而 位涡强度≥0.8PVU 的区域范围更广,覆盖 了河南省的东部及东南部地区,对比图 1a 可 知,此区域基本上与 20 日 20 时—21 日 20 时的强降雨区相吻合,尤其是大雨和暴雨区 与此区域中 *IPV*≥1PVU 的区域相对应。 这说明,台风低压环流中的高位涡对于暴雨 的产生具有重要作用。

另外,从图 2a 还可以看到,在 105°E 以 东,由于副热带系统的北进,高位涡区的北界 逐渐向北推移,在 120~125°E 附近到达最北 端。而与北方(中高纬)冷空气相对应的高位 涡区在 105°E 以西位于 35°N 以北地区,100 ~105°E 之间有高位涡带南伸,表明此处有 冷空气向南扩展。而温度场的分布表明,在 河套以西有一相应的温度槽存在,图中位涡 以及温度分布显然表明,台风低压所对应的 高位涡区与中高纬度高位涡区之间存在有位 涡低值带,而且直到 21 日 20 时,此位涡低值 带仍然存在(图略),说明这期间中高纬冷空 气并未作用于台风低压环流,对于第一个暴 雨阶段的产生没有贡献。

## 3.2 第二阶段暴雨

位涡分布演变特征表明,上文所提到的 位于100~105°E之间的高位涡舌随时间逐 渐东移,在东移的过程中,其南段由于受暖气 团的阻挡移速较慢,而北段移速较快并最终 与南段发生断裂。北段在东移的过程中,由 于受暖气团的作用,其南端也逐渐向北收缩,



**图 2** 330K 等熵位涡和温度分布(图 a、b 标出了台风低压的位置) a. 21日 02时,图中阴影为 20日 20时—21日 20时雨量;b. 22日 14时,图中阴影为 21日 20时—22日 20时雨量; c. 22日 20时,图中阴影为 21日 20时—22日 20时雨量;d. 23日 08时,图中阴影为 22日 20时—23日 20时雨量

炙

由 35°N 以南逐渐北抬至 35°N 附近,并于 21 日夜间开始与台风低压所对应的高位涡区相 结合。图 2b 表明,在 22 日 14 时,与冷空气 所对应的高位涡舌中 0.8PVU 等值线南端 已位于陕西中部到山西南部,并在河南省的 西北部地区与台风低压环流中的 0.8PVU 等值线相连结,与之相应的冷温槽也从山西 北部伸至河南省西北部。对照图 1b 可知,大 暴雨区同样位于河南省的西北部地区,表明 冷空气的楔入确实使得台风低压的降水强度 增加。此种形势一直持续到 22 日 20 时(图 2c),位涡及温度演变特征显示,冷空气的影 响在22日白天更为明显,12小时降水量(图 略)也表明22日白天的降水量比21日夜间 更大,21日夜间只有一个站降水量超过 100mm, 而 22 日白天降水量超过 100mm 的 共有三个站,并且有一个站在 200mm 以上。

## 3.3 第三阶段暴雨

从 22 日夜间开始,强降雨区逐渐向东北 方向移动,高位涡舌在与台风低压高位涡区 相连结后继续向东北方向移动。图 2d 显示, 23 日 08 时,从山西东南部向东南方向延至 河南东部、安徽北部为一 0.8PVU 的位涡高 值区,而此时冷温槽位于渤海湾到山东西北 部一带,对比逐时雨量可知,23 日 05 时之前 河南省东北部仍维持较强降水,说明冷空气 在 23 日凌晨仍对暴雨的形成产生作用,之后 逐渐东移。

综合以上讨论可知,对等熵位涡以及温 度的分析验证了对三个暴雨阶段的天气学分 析,在后两个暴雨阶段中,冷空气的侵入对暴 雨起到了增幅作用。它的物理机制可理解 为,代表台风北侧倒槽中的高位涡暖湿气流 向北输送,代表高层冷空气的高位涡气流扰 动沿着中纬度西风带向东传播,二者在河南 省的西北部交汇,形成斜压锋区,产生湿斜压 不稳定,触发了不稳定能量的释放,使得暴雨 增幅。

#### 4 雨区发展的剖面图分析

#### 4.1 位涡与位温剖面图分析

19日08时,在台风海棠登陆之前,与台 风相对应的是一高位涡"柱",图 3a 为沿 120° E所做的位涡与位温剖面图,由于低层摩擦 较小且发展较为旺盛,此位涡柱基本呈上下 竖直状态,从近地面一直延伸到 200hPa 附 近,最强中心位于 450hPa 高度,强度超过了 2.6PVU。随着台风登陆之后,台风强度逐 渐减弱。在暴雨第一阶段产生前后(21日02 时),沿暴雨区中心附近115°E作一垂直剖面 (图 3b),从图中可以看到,在 26°N,400hPa 附近仍有对应着台风低压的高位涡中心,而 在其北侧,32°N则有一台风外围的高位涡 区,此高位涡区是在台风东北侧发展起来并 在东南急流的作用下向北输送。剖面图同时 表明,此高位涡区与台风中心的高位涡区相 连,与冷空气没有关系。

另外,图 3a 与图 3b 中的等位温线表明, 在台风登陆之前,台风中心从高层到低层均 呈暖心结构。登陆之后,由于降水蒸发的冷 却作用,台风中心在低层呈现冷心结构,而在 600hPa 以上为弱的暖心结构。

在第二个阶段,考察其位涡及位温的垂 直结构,在22日02时沿暴雨中心所在的经 度113.5°E作垂直剖面(图3c),可以看到, 在台风低压的北侧,从39°N的400hPa高度 处有一向下向南倾斜伸展的带状高位涡区, 此高位涡区即表明了冷空气的活动,其南端 与台风环流高位涡区在35°N的700hPa高 度附近交汇,此区域即为大暴雨的发生区。 说明弱冷空气在中低层的入侵,有利于加强 台风内部暖湿气流的抬升,对强降雨产生增 幅作用。

随着冷空气进一步向东北方向移动,22



**图 3** 位涡与位温剖面图 (实线为位涡,虚线为位温,图 a 中标出了台风中心,图 b、c、d 中横坐标下的横线表示暴雨落区, c 与 d 中的叉号表示冷空气与台风环流的交汇点) a. 19 日 08 时(沿 120°E), b. 21 日 02 时(沿 115°E), c. 22 日 02 时(沿 113.5°E), d. 22 日 20 时(沿 115°E)

日夜间在河南、河北、山东三省交界处又形成 了第三个阶段的暴雨。如图 3d 所示为 22 日 20 时沿暴雨中心所在经度 115°E 附近所作 的剖面图,从图示可知,此时高位涡冷空气与 台风高位涡区的交汇点位于 36°N,高度在 500hPa之间,比第二阶段暴雨期间高位涡交 汇点高度略高,并形成一个较为独立的高位 涡区,其中心强度超过 1.1PVU。此区域所 在纬度恰好是暴雨发生区。位涡的发展演变 也表明,在暴雨的发展过程中,此高位涡区有 明显的向下传播。

#### 4.2 位涡与急流的关系

图 4 所示为三个暴雨阶段中沿暴雨区中 心所在经度作的位涡与纬向风及位温的垂直 剖面图。从图 4a 可以看到,在 21 日 02 时, 台风中心的北侧 33°N 附近,在 600~800hPa 之间和 900hPa 附近分别有 15m • s<sup>-1</sup>的东风 急流,其中 600~800hPa 之间的东风急流轴位 于 700hPa 附近,中心最大风速达 17 m·s<sup>-1</sup>。 在东风急流的南侧分别对应着位涡高值中 心,暴雨就产生在东风急流轴的南侧。而在 图 4b(22 日 02 时)和图 4c(22 日 20 时)中中 低空的东风急流已不存在。

在图 4a 中 200hPa 的高空西风急流位于 50°N 以北,而在图 4b 和图 4c 中西风急流有 明显的南移。已有的研究表明,平流层大气 的层结稳定度比对流层大好几倍,是一个高 位涡"库",在高空急流附近,对流层顶发生断 裂,其南北的层结稳定度陡变,而且其南北侧 的涡度也有很大的差别,因而,在高空急流附 近有非常大的经向位涡梯度。只要出现大振 幅的波动和经向气流,就可以把高纬度地区 具有高位涡的平流层气团远远地输送到中低 纬地区的对流层中。图 4b 和图 4c 中西风急 流的明显南移更有利于高位涡的向南输送。



#### 5 结 语

通过对 2005 年台风海棠在河南所造成 的暴雨过程的三个阶段中位涡和等熵位涡的 分析,可以得出以下结论: (1)海棠在河南所造成的三场暴雨,分 别是由东南急流和台风内部的高位涡(第一 阶段)以及冷空气从高纬度对流层顶输送高 位涡与台风北侧的高位涡气流相结合(第二、 三阶段)而产生的。

(2) 台风在登陆之前呈现为一较为完整 的高位涡柱,且从上至下均为暖心结构。登 陆之后,由于地面摩擦及降水的蒸发作用,位 涡柱结构变得不规整,且在低层呈冷心结构。

(3) 弱冷空气在中低层入侵有利于台风 内部暖湿气流的抬升,对降水产生增幅作用。

(4)高空西风急流南移过程中,从高层 及高纬度地区向低层和低纬度输送高位涡对 暴雨的加强具有重要的作用。

#### 参考文献

- [1] 陈联寿,丁一汇.西太平洋台风概论[M].北京:科学 出版社,1979.
- [2] 邹树峰,顾润源,朱官忠,等.影响我国北方热带气旋的若干统计特征[J]. 气象,1997,23(7):42-45.
- [3] 侯定臣,庄小兰,黄燕波.9012 号台风暴雨过程的位 涡分析[J].南京气象学院学报,1997,20(1):64-70.
- [4] 程正泉,陈联寿,徐祥德,等.近10年中国台风暴雨研 究进展[J]. 气象,2005,31(12):3-9.
- [5] 边清河,丁治英,董金虎. "96.8"华北暴雨数值模拟与
  稳定性分析[J]. 气象,2006,32(8):17-22.
- [6] 杨宇红,沈新勇,林两位,等.0418 号台风艾莉暴雨成 因分析[J]. 气象,2006,32(7):81-87.
- [7] 75.8 暴雨研究会战领导小组.1975 年 8 月河南特大 暴雨研究报告[R].37-44.
- [8] 朱洪岩,陈联寿,徐祥德.中低纬度环流系统的相互作 用及其暴雨特征的模拟研究[J].大气科学,2000,24 (5):669-675.
- [9] 于玉斌,姚秀萍.对华北一次特大台风暴雨过程的位 涡诊断分析[J].高原气象,2000,19(1):111-120.
- [10] 寿绍文、励申申、姚秀萍.中尺度气象学[M].北京:气象出版社,2003:276-285.
- [11] 徐晶,王东生,杨克明.2003 年 7 月 4-7 日淮河流域特 大暴雨等熵位涡分析[J]. 气象,2004,30(1):33-37.