

# 气旋冷暖区暴雨对比分析

孙兴池<sup>1</sup> 王业宏<sup>1</sup> 迟竹萍<sup>2</sup>

(1. 山东省气象中心, 济南 250031; 2. 山东省气象科学研究所)

**提 要:** 利用常规资料及MM5的模拟分析结果, 对山东两次气旋影响产生不同暴雨落区的天气过程进行了对比分析。研究了气旋冷区和暖区暴雨的高低空系统配置、相当位温的水平及垂直分布、垂直运动及散度的垂直分布。结果表明: 冷区暴雨具有明显后倾结构和较强斜压锋区, 暴雨出现在850hPa $\theta$ 暖湿舌后部密集区, 其垂直运动沿锋面大范围抬升, 动力条件更强; 而暖区暴雨高低空系统重合, 暴雨出现在850hPa $\theta$ 暖湿舌里。这些特征可为暴雨落区预报提供参考。

**关键词:** 气旋 冷区暴雨 暖区暴雨

## Comparison of Heavy Rain in Cool/Warm-section of Cyclone

Sun Xingchi<sup>1</sup> Wang Yehong<sup>1</sup> Chi Zhuping<sup>2</sup>

(1. Shandong Meteorological Observatory, Jinan 250031, 2. Shandong Institute of Meteorology)

**Abstract:** Using meteorological data and MM5 numerical simulation, the characteristics are analyzed for two heavy rain events caused by cyclone in Shandong Province. The upper-and low-layer system, horizontal and vertical distribution of equivalent potential temperature, vertical motion, and divergence are studied for the two heavy rains. The results show that in cool section heavy rain occurred behind the warm and moist tongue of 850hPa, it has apparent back slantwise structure, strongly baroclinic frontal zone, and stronger dynamic conditions; but in warm section heavy rain occurred in the warm and moist tongue of 850hPa. It provides an excellent reference for forecasting heavy rain.

**Key Words:** cyclone cool-section rainstorm warm-section rainstorm

## 引 言

研究和实践表明,产生暴雨的物理机制非常复杂,陶诗言<sup>[1]</sup>明确指出,大气中暴雨的发生发展与低空流场的辐合、垂直运动的发展有关。丁一汇对暴雨和强对流发生的条件作了对比分析<sup>[2]</sup>指出,暴雨发生在低层辐合、高层辐散的强上升运动区,无辐散层在 550~600hPa,且边界层辐合具有重要意义,暖区暴雨与低空急流有关,而冷区暴雨与中纬度斜压锋区有关。

山东地处中纬度,冷暖空气常在山东交汇,形成大范围暴雨过程,暴雨是水资源的重要组成部分,但雨量过分集中时,会造成严重洪涝灾害。因此,暴雨落区预报十分重要。在实际业务中,当同样处于 500hPa 高空槽前、850hPa 低空急流前方和对流层低层低涡位置基本一致的环流背景下,暴雨落区却各有不同。因此,准确预报暴雨落区是目前天气预报的难点。气旋是影响山东产生暴雨的主要天气系统<sup>[3]</sup>,即使同样路径的气旋,其暴雨落区也不尽相同,当暴雨出现在

气旋后部冷区时,暴雨往往出现在鲁西、鲁西北等沿黄河地区;而当暴雨出现在气旋前部暖区时,暴雨往往出现在鲁南、鲁东南及半岛一带。因此,准确预报暴雨区相对于气旋的位置,对暴雨的落区预报很重要。而暴雨区相对于气旋的位置与高、低空系统的相互配置、冷暖空气的相互作用、物理量场等密切相关。2003 年 4 月 17 日的冷区暴雨和 2004 年 7 月 16—18 日的暖区暴雨即具有一定的代表性。

## 1 过程概况

2003 年 4 月 17 日,由于强冷、暖空气在山东剧烈交汇,引发了春季罕见的大范围狂风暴雨和急剧降温过程(以下简称 03.4.17 过程)。17 日 06 时—19 日 06 时(北京时,下同),全省平均雨量为 45.5mm,鲁西、鲁北、鲁中出现暴雨或大暴雨(图 1a),泰山雨量最大为 145.0mm,禹城次之为 120.2mm。此次过程降温剧烈,18 日最高气温较冷空气影响前的 16 日骤降 20℃ 以上。

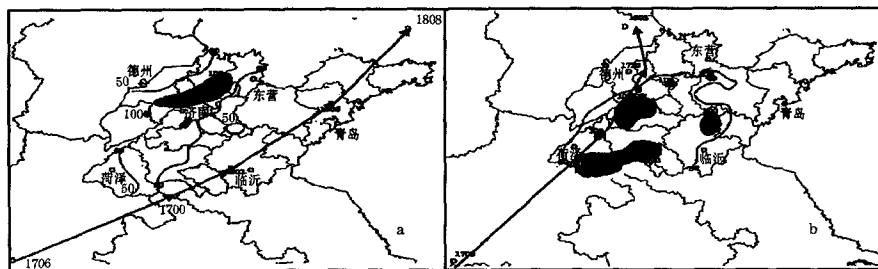


图 1 2003.4.17 过程(a)和 2004.7.17 过程总雨量(b)及气旋移动路径(箭头)  
实线为 50mm 以上雨区,影区为 100mm 以上雨区

2004 年 7 月 16—18 日,受气旋影响,山东出现入汛以来最强的降水过程(以下简称 04.7.17 过程):鲁南和鲁中地区普降暴雨,部分地区出现了大暴雨(图 1b)。16 日

06 时—18 日 06 时,全省平均降水量为 53.5mm。降水量以泰山最大,为 238.0mm,其次是东平,为 158.1mm。

以上两次大范围暴雨过程均受气旋影

响, 所不同的是暴雨落区, 前者发生在气旋后部强劲的东北风(冷区)当中, 而后者发生在气旋前部弱东南风(暖区)当中。

## 2 500hPa 环流形势特点

### 2.1 03.4.17 过程 500hPa 形势特点

此次过程前期(14日08时起), 东欧北部到新地岛为阻塞高压, 脊前西西伯利亚地区为深厚低涡, 亚洲为纬向环流, 中高纬度地区处于低涡南侧偏西气流之中, 不断有小槽分裂东移, 而中低纬度地区从青藏高原上空至华东沿海也呈多波动态势。由于西西伯利亚深厚低涡南侧不断有冷平流和正涡度输送到青藏高原上空, 使得高原上不断有南支槽东移。16日08时, 高原槽移至四川盆地东侧。与此同时, 低涡移至贝加尔湖附近, 涡后横槽从贝加尔湖伸至威海, 东—西向横跨40个经距。至过程发生前16日20时, 横槽转竖, 我国新疆以东为槽前西南气流, 南支槽前西南气流加大, 西南急流从华南伸向山东。鲁西地区17日20时6小时最大雨量(禹城)达64mm。

### 2.2 04.7.17 过程 500hPa 形势特点

此次过程前期(12日08时起), 乌拉尔山及以东地区为两槽两脊型, 新疆高压和西太平洋副高呈对峙态势, 乌拉尔山为深低涡, 从东北到华北为两高之间的深厚低值系统, 山东处在副高边缘和华北低涡前。13日08时, 新疆高压脊向东北发展与贝加尔湖高压脊合并, 形成阻塞高压, 阻高前低涡加强, 低涡后部伴随明显横槽, 形势稳定。12日起山东始终处于两高之间从东北到华北的低压带中, 并伴随着横槽的活动出现降水的脉动。16日20时, 贝加尔湖出现冷平流, 阻高呈减弱趋势, 至17日20时, 阻高

完全崩溃, 演变为位于新疆的移动性高压脊。此次过程主要降水集中在阻高崩溃过程当中, 鲁西南地区17日08时6小时最大雨量(定陶)达96mm。

## 3 低层形势对比

### 3.1 03.4.17 过程低层形势特点

2003年4月17日的强降水过程是由强烈发展的对流层低涡影响造成的。在700hPa上, 17日08时从河套伸向四川盆地的深槽在20时发展为位于山西南部(36.1°N、112.0°E)的低涡, 并向东北方向移动, 于18日08时位于42.0°N、120.4°E。而850hPa低涡中心17日08时位于四川北部(31.7°N、105.8°E), 山东处于涡前西南气流当中, 且涡前西南急流在山东辐合; 由于低涡前后分别存在较强的暖平流和冷平流, 低涡获得发展向东北移出, 17日20时移至河南西北部(35.0°N、113.0°E), 后经渤海移入辽宁营口附近(40.8°N、122.0°E)。在垂直方向上低涡自下而上向西北倾斜, 较强降水出现在850hPa涡前和地面冷锋后东北风之间的区域。

### 3.2 04.7.17 过程低层形势特点

此次过程发生在汛期副高强盛时期, 在700hPa图上, 蒙古地区的西风带高压与副热带高压呈对峙之势, 山东处在两高之间的低压区内, 且有东北风与西南风之间的切变线自河北向鲁西北靠近。17日08时, 原位于四川东北部的西南低涡沿切变线移至鲁西地区, 后继续向北移动进入河北。在850hPa图上, 亦表现为西南低涡沿切变线向东北移动经鲁西进入华北地区。18日20时, 700hPa和850hPa低涡位置重合, 皆位于河北北部。

### 4 相当位温 $\theta_e$ 对比

#### 4.1 03.04.17 过程相当位温 $\theta_e$ 分布

2003 年 4 月 17 日 20 时的相当位温图上 (图 2), 500、700、850hPa 三层都有  $\theta_e$  密集区存在, 该密集区即为冷、暖气团交界的锋区, 且从低层到高层呈明显的后倾结构。

在 500hPa  $\theta_e$  图上 (图 2a), 锋区在 45°N 以北, 华北地区为 330K 的高  $\theta_e$  区控制, 是春季大陆暖脊的位置, 该高值区与南方的高  $\theta_e$  区之间有小于 325K 的低值区间隔, 说

明此次过程南方暖湿气团主要影响 500hPa 以下的对流层低层。从 700hPa  $\theta_e$  场 (图 2b) 可看出,  $\theta_e$  密集区在 40~45°N 之间, 山东为大于 330K 的高值区控制, 该高值区与我国南方北上的  $\theta_e$  高值区相联系, 而位于蒙古的干冷空气  $\theta_e$  值在 285K 以下; 在 850hPa  $\theta_e$  场上 (图 2c),  $\theta_e$  密集区比 700hPa 更偏南, 位于 36~42°N 之间, 山东大部为大于 335K 的高值区控制, 且与 700hPa 相似, 都与南方暖湿气流相联系, 锋区北侧为  $\theta_e$  低于 285K 的强大的冷气团。500~850hPa 纬向锋区从北向南依次倾斜 3~5 个纬距。

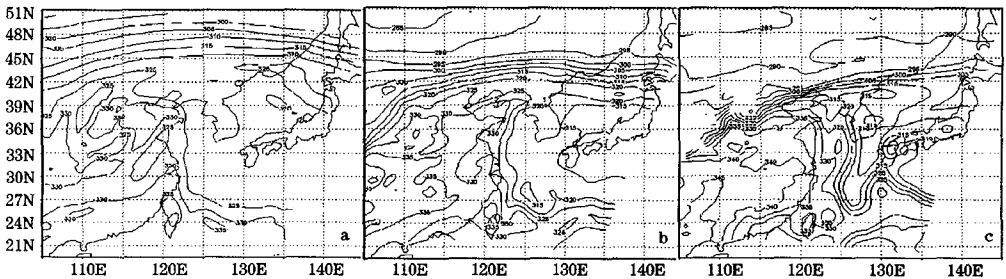


图 2 2003 年 4 月 17 日 20 时 500 (a)、700 (b)、850hPa (c)  $\theta_e$  水平分布

#### 4.2 04.7.17 过程相当位温 $\theta_e$ 分布

在 2004 年 7 月 17 日 08 时 850hPa  $\theta_e$  图上 (图 3c), 渤海为东西向的  $\theta_e$  低值区, 330K 的低值中心位于渤海西岸, 鲁北和半

岛北部为  $\theta_e$  密集带, 该密集带是干冷空气与暖湿气流的交界面, 其北侧低  $\theta_e$  区范围较小, 其相邻的华北—东北即为高  $\theta_e$  区, 说明干冷空气弱而浅薄。相反, 从我国西南

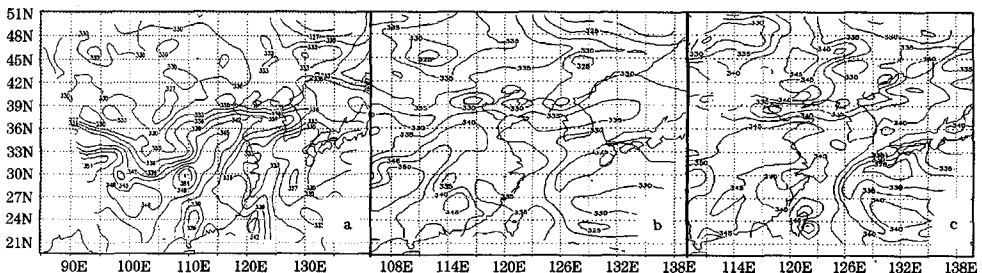


图 3 2004 年 7 月 17 日 08 时 500 (a)、700 (b)、850hPa (c)  $\theta_e$  水平分布 (单位: K)

地区到山东为大范围的  $\theta_e$  高值区, 除鲁北外, 山东大部处在 340K 的高值区控制之下, 暖湿气流大范围影响山东。

500hPa $\theta_e$  密集区 (图 3a) 与 850hPa 相似, 都沿渤海和山东北部呈东西向分布, 上下层  $\theta_e$  密集区重合是此次过程的特点。其北侧低  $\theta_e$  区范围较小, 且中心零散, 从西南地区到山东为  $\theta_e$  高值区, 该高值区与副高边缘大举北上的暖湿气流相对应。

以上分析可以看出, 暖区暴雨 (04. 7. 17 过程) 低层冷空气较弱; 高低层系统几乎重合; 三层都处于有组织北上的南方暖湿气团里。而冷区暴雨 (03. 4. 17 过程) 具有明显的后倾结构, 南方暖湿气流主要在 700hPa 以下, 冷空气十分强大, 主导系统为锋区。

## 5 垂直环流及 $\theta_e$ 垂直分布对比

由于两次过程都有近东西向的  $\theta_e$  密集区, 因此, 沿暴雨区附近 (117°E) 作经向垂直剖面。

### 5.1 03. 4. 17 过程垂直环流及 $\theta_e$ 垂直分布

由 2003 年 4 月 17 日 20 时垂直环流及  $\theta_e$  垂直分布 (图 4) 可看出,  $\theta_e$  密集区位于 36~39°N 之间, 是冷暖空气交界的锋区, 其北侧为庞大的干冷空气, 南侧为暖湿空气, 暖湿区 340K 线仅到达 800hPa, 说明此次过程暖湿空气较为浅薄, 主要集中在对流层下层。与强冷空气相联系的斜压锋区随高度向北 (冷区) 倾斜, 在 30°N 附近为潜在对流不稳定区, 上升运动从对流不稳定区的北缘沿着锋面大范围爬升, 在地面锋面北侧高空为广阔的上升运动区, 强降水出现在锋后。

### 5.2 04. 7. 17 过程垂直环流及 $\theta_e$ 垂直分布

由 2004 年 7 月 17 日 08 时垂直环流及

$\theta_e$  垂直分布 (图 4b) 可看出, 对流层中下层等  $\theta_e$  线呈哑铃状分布, 在 500~700hPa 之间有两个  $\theta_e$  低值中心分别位于 30°N 和 40°N 附近, 其间在 35°N 附近为  $\theta_e$  线明显上凸的舌状高值区, 该高值区与低空西南急流不断将暖湿气流输送到山东有关, 340K 高度达 600hPa, 与高层漏斗状下伸的 340K 线对接, 这种上下贯通的  $\theta_e$  结构有利不稳定能量的积累, 高值区内  $\theta_e$  随高度减小, 呈现潜在不稳定结构。其北侧 37°N 附近, 为高低层几乎重合的  $\theta_e$  密集区, 为北方干冷空气与暖湿气团的分界面, 即锋区所在, 锋区垂直方向陡立, 具有中性稳定层结。从垂直环流上可以清楚看出, 大范围上升运动位于锋区南侧高  $\theta_e$  区内, 因而降水出现在锋前暖区内。

以上分析可见, 在暖区暴雨中, 与暖湿空气相对应的  $\theta_e$  高值区水平范围较大, 垂直高度也较高, 而冷空气则比较弱, 低层锋区较陡, 垂直方向上锋区位置几乎重合, 主要上升运动在锋前暖湿舌造成的不稳定区, 也是强降水的位置。而在冷区暴雨中, 暖湿气团较为浅薄, 冷空气势力强大, 且锋面坡度较小, 暖湿空气从弱暖湿舌的北部边缘沿着锋面大范围爬升, 垂直方向从地面锋面到对流层上层, 水平方向从 33~48°N 整个大尺度锋面上为大范围上升运动区, 强降水出现在地面锋后高空为广阔的上升运动区的位置。

## 6 散度的垂直分布对比

### 6.1 03. 4. 17 过程散度的垂直分布

在 2003 年 4 月 17 日 20 时散度的垂直分布图上 (图 5a), 暴雨区附近 (117°E) 无辐散层在 500hPa, 500hPa 以下为辐合,

最大辐合位于 800~600hPa, 辐合中心大于  $-6 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ , 500hPa 以上为辐散, 最大

辐散出现在 300hPa 左右, 辐散中心大于  $9 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ 。

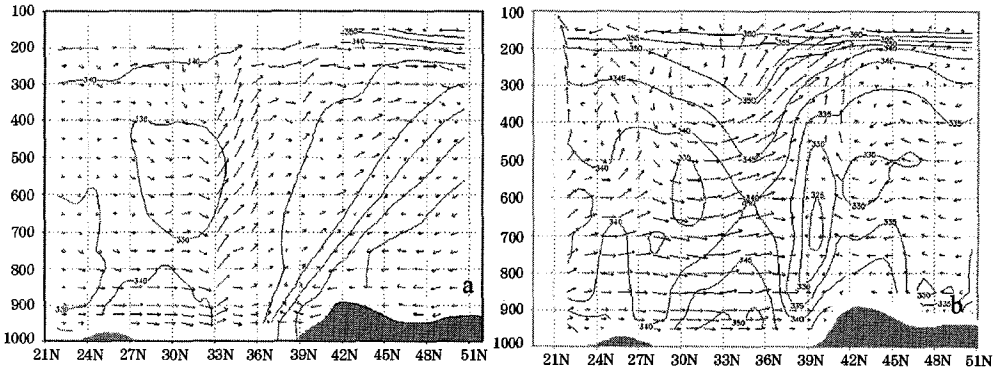


图 4 2003 年 4 月 17 日 20 时 (a) 和 2004 年 7 月 17 日 08 时 (b) 垂直环流及  $\theta_e$  垂直分布  
其中矢量线为  $v$  和  $w \times 100$  的矢量合成, 实线为  $\theta_e$  等值线 (单位: K)

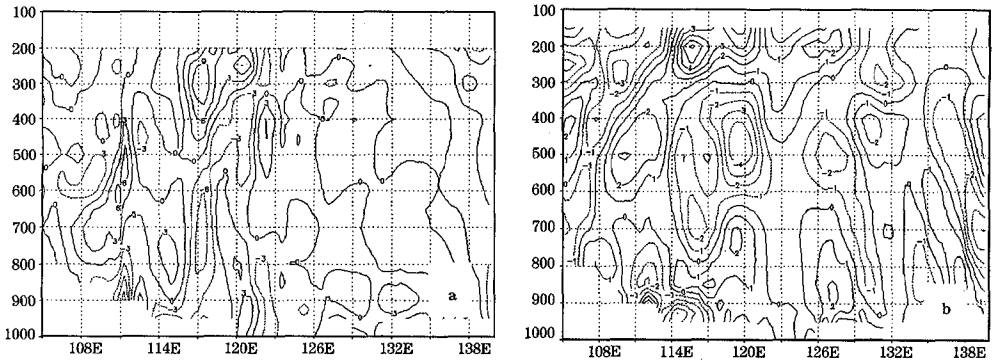


图 5 2003 年 4 月 17 日 20 时 (a) 和 2004 年 7 月 17 日 08 时 (b) 散度的垂直分布 (单位:  $10^{-5} \text{ s}^{-1}$ )

### 6.2 04.7.17 过程散度的垂直分布

在 2004 年 7 月 17 日 08 时散度的垂直分布图上 (图 5b), 暴雨区附近 ( $115^\circ\text{E}$ ) 近地面 (900hPa) 为辐合区, 辐合中心在 900hPa 以下, 强度在  $-4 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$  以上; 600hPa 以上为辐散, 最大辐散层位于 200hPa, 散度中心在  $6 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$  以上。此次过程主要辐合区在边界层, 无辐散层在 600hPa 附近, 200hPa 具有明显的辐散抽吸作用。由于此过程发生在汛期深厚的暖湿气团中, 边界层的辐合具有重要意义。

可见, 与 04.7.17 过程相比, 由于 03.4.17 过程发生在干季, 其辐合层较高, 而最大辐散层则较低, 低层辐合和高层辐散都较强, 这可能与水汽条件差, 需要更强的动力条件有关。

### 7 小结

(1) 暖区暴雨  $\theta_e$  密集带较弱, 且高低层重合, 850~500hPa 三层  $\theta_e$  高值区与西南地区北上的高  $\theta_e$  区连为一体, 山东三层  $\theta_e$  高值都在 340K 以上, 鲁南地区 850hPa  $\theta_e$

值达 345K 以上，强降水出现在 850hPa  $\theta_e$  暖湿舌内。而冷区暴雨  $\theta_e$  密集带较强，且高低层呈倾斜形势， $\theta_e$  比暖区暴雨小，850hPa 鲁南、鲁东南高值为 335K，强降水出现在 850hPa  $\theta_e$  暖湿舌后部的密集区内。

(2) 当高空槽具有明显后倾结构且斜压锋区较强时，高空西南气流沿低层冷空气爬升，可能在地面气旋后部冷区产生暴雨。而当冷空气较弱时，大气的斜压性不明显，暴雨发生在深厚的暖湿气团里，因而也就出现在气旋前部暖区中。

(3) 暖区暴雨在对流层低涡影响山东时，700 和 850hPa 低涡位置逐渐靠近，有

重合趋势。而冷区暴雨在垂直方向上始终保持后倾结构。

(4) 冷区暴雨由于地面已转北风，暖湿空气在冷垫上辐合上升，因此辐合层较高，低层辐合更强，高层辐散也更明显。

### 参考文献

- 1 陶诗言. 中国之暴雨 [M]. 北京: 气象出版社, 1980: 225.
- 2 丁一汇等. 暴雨和强对流发生条件的对比分析 [J]. 大气科学, 1981, 5 (4).
- 3 曹钢锋, 张善君, 朱官忠等. 山东天气分析与预报 [M]. 北京: 气象出版社, 1988: 159.