

# 2007年淮河流域致洪暴雨及其中尺度系统特征的分析

赵思雄<sup>1</sup> 张立生<sup>1,2</sup> 孙建华<sup>1</sup>

1 中国科学院大气物理研究所, 北京 100029

2 中国科学院研究生院, 北京 100049

**摘要** 针对2007年6~7月的淮河致洪暴雨, 采用NCEP资料、卫星TBB (Temperature of Black Body) 资料、地面加密资料和1h的降水资料对此次暴雨过程进行了详细的分析, 得到结果如下: 1) 2007年6~7月主汛期的暴雨带主要位于淮河流域, 而不是像通常那样集中在长江中下游。时间长达30余天, 超过2003年(持续20余天)。2) 整个汛期从6月19日开始至7月26日结束, 根据影响系统和雨区分布的不同, 可将降水分为3个阶段。其中, 第2阶段(6月29日~7月10日)降水最强, 影响最大, 与梅雨的降水有更多相似。在第2阶段中又有4次降水过程, 其中第4次过程(7月7~9日)降水最强, 导致10日在王家坝开闸泄洪。3) 高纬度的阻塞形势(西阻型)有利于环流的稳定维持和暴雨的持续发生。4) 副热带高压稳定在26°N, 有利于雨带维持在32°N, 另外南海季风涌沿副高西侧将大量水汽输送至淮河流域。5) 在阻高和副高之间的西风带上, 巴尔喀什湖为低槽区, 不断有小股冷空气经我国西北和黄河上游沿偏西路径移至淮河流域, 西风槽加深甚至在中国大陆出现切断低压, 这在过去淮河暴雨期间不太多见, 表明存在明显的中低纬度的相互作用。与此同时, 在7月8日高空急流入口区(右侧)与低空急流出口区(左侧)相迭置耦合, 非常有利于垂直运动的加强和暴雨的发生。6) 在暴雨期间有中尺度低压(扰动)的发生发展, 并有与之相关的中尺度云团、雨团甚至更小的中尺度对流系统出现, 致使8日寿县24h降水量达262mm之多。该次强暴雨与淮河流域前期多场强降雨形成的高水位“遭遇”, 引发了严重的洪水, 其影响超过了2003年, 成为了1954年以来淮河流域最严重的洪涝。

**关键词** 淮河流域 致洪暴雨 季风涌 西风槽 中尺度涡旋(扰动)

**文章编号** 1006-9585 (2007) 06-0713-15 **中图分类号** P458 **文献标识码** A

## Study of Heavy Rainfall and Related Mesoscale Systems Causing Severe Flood in Huaihe River Basin during the Summer of 2007

ZHAO Si-Xiong<sup>1</sup>, ZHANG Li-Sheng<sup>1,2</sup>, and SUN Jian-Hua<sup>1</sup>

1 *Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029*

2 *Graduate University of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049*

**Abstract** The research on the heavy rainfall causing the flood in Huaihe River basin during June and July 2007 is focused on, using NCEP data, TBB (Temperature of Black Body) data, dense surface data, 1-hour precipitation amount and so on. The following conclusions are drawn:

(1) The main rainband was located in Huaihe River basin during rainy season of June and July 2007 rather than in the Yangtze River basin as usual. The rainy period lasted for more than 30 days which was longer than that in

**收稿日期** 2007-10-04 收到, 2007-10-15 收到修定稿

**资助项目** 灾害性天气国家重点实验室开放课题“2007年淮河流域致洪暴雨中尺度涡旋(扰动)发生发展及其机理研究”和国家重点基础研究发展规划项目2004CB418301

**作者简介** 赵思雄, 男, 1940年出生, 研究员, 主要从事灾害性天气动力学诊断分析与中尺度数值模拟等研究。

E-mail: zhaosx@mail.iap.ac.cn

Huaihe River basin in 2003. The latter was only more than 20 days.

(2) The rainy season in Huaihe River basin in 2007 covered the period from June 19 to July 26 which can be divided into three stages. Among them, the second stage (29 June—10 July) was related with the strongest rainfall, which was, in many ways, similar to the Meiyu banded rainfall. There were four obvious precipitation processes in the second stage. Among them, the fourth precipitation process (7 - 9 July) is the severest in which the highest water level in Huaihe River appeared.

(3) The block high pressure systems near Ural mountain in high latitudes was very favorite the stable maintenance of the circulation systems which was very helpful for the occurrence of the sustaining heavy rainfall.

(4) The axis of west pacific subtropical high was basically near 26°N, and the northwest edge of west pacific subtropical high was main rainband position along about 32°N just near the Huaihe River.

(5) Between the block high and the subtropical high, the westlies existed in the middle latitude. A trough in westlies was located near Balkhash lake from where cold air passed through northwest China and upper reach of the Yellow River, finally arrived to the Huaihe River basin. The trough in July 7—9, deepened and even the cut-off low pressure system formed in the trough, which was unusual in Huaihe River during summer season. It means that cold air activity was obvious. In addition, the coupling between upper level jet and low level jet can also be noticed during July 7—9, which could benefited significantly the enhance of the upward motion in Huaihe River.

(6) During the rainy period, some mesoscale vortexes (disturbances) related with the strong mesoscale rainy clusters, cloudy clusters and mesoscale convective systems (MCS) formed and developed one after another, which produced the strong heavy rainfall, even the precipitation amount of 262 mm · d<sup>-1</sup> in Shou County, Anhui Province. Based on the high water level, The strong rainfall made the severest flood in Huaihe River since 1954.

**Key words** Huaihe River basin, heavy rainfall related with flood, monsoon surge, trough in westlies, mesoscale vortex (disturbances)

## 1 引言

对于夏季我国江淮流域和日本的梅雨 (Meiyu/Baiu), 国内外的气象学者已有大量的研究<sup>[1~11]</sup>。它们不但与欧美的锋面气旋等降水不同<sup>[12]</sup>, 而且与我国华南的锋前暖区暴雨以及高原东侧西南涡的暴雨也不同<sup>[13, 14]</sup>。过去的研究结果表明, 夏季 6~7 月的降水, 多数年份集中于长江流域或江淮流域, 20 世纪 90 年代多为长江流域<sup>[15~19]</sup>, 而在淮河流域的降水则偏少。进入 21 世纪, 情况有了一些变化, 2003 年淮河流域出现了大洪水, 2005 年又发生了强降水, 而 2007 年再次发生了自 1954 年以来淮河流域全流域性的强降水。2007 年的雨带基本集中于淮河流域, 而长江流域降水偏少。为此, 我们有必要对 2007 年淮河流域的大暴雨进行深入研究。

针对近年来淮河流域暴雨频发的现象, 人们不断在思考, 这是否是气候上某种变化的重要信号? 对于这一点当然还需继续关注并作更进一步

的研究。但就对具体的暴雨过程及其降水预报而言, 它们可能主要涉及该年夏季环流的特点及短期的变化, 还可能涉及相关的中尺度涡旋及中尺度对流系统 (MCS) 的发生发展。这里有一些科学问题值得深入探讨。比如, 为何 2007 年的强降水出现在淮河流域而不在长江流域, 大尺度环流有哪些有利条件? 中低纬度系统有无相互作用? 如有, 是以何具体形式出现的? 为何此次暴雨持续时间长, 达 30 余天? 而在这 30 余天中, 至少在 3 个阶段它又呈现了明显不同的降水特征, 即第 1 阶段 (6 月 19~28 日) 雨带偏于淮河以北, 第 2 阶段 (6 月 29 日~7 月 10 日) 和第 3 阶段 (7 月 11~26 日) 雨带集中于淮河干流。第 2 阶段以持续性强降水为主, 而第 3 阶段以过程降水为主。他们之间有何不同点? 尤其是 7 月上旬后期 (7~9 日) 强暴雨的发生, 是否有中尺度涡旋 (扰动) 的发生发展? 而其中的中尺度云团和雨团 (尤其是 MCS) 的特征又如何? 为何 7 月 8 日的降水量达到最强, 寿县一天竟达 262 mm。为了回答这些问题, 本文做了针对性研究。以期在一定程

度上说明这次淮河致洪暴雨为何发生？以及如何发生？

## 2 雨情、水情和灾害

2007 年汛期在淮河流域发生了长时间的较强降水。降水集中的时间大约始于 6 月 19 日，止于 7 月 26 日，长达 38 天。淮河流域的累计降水平均在 500 mm 以上，淮河干流大部分地区降水大于 600 mm（图 1a）。降水量超过了 1991 年和 2003 年，为 1954 年以来的最大降水年。这样的降水在不同的阶段，其时空分布的特点有较大的差异（图 1b~d）。2007 年汛期淮河流域的降水，大体可分为 3 个阶段：6 月 19~28 日为第 1 阶段，降水主要位于淮河以北，中心集中于山东南部的沂沭泗水系，降水量一般在 100 mm 以上；6 月 29

日~7 月 10 日为第 2 阶段，降水主要集中于淮河流域干流，普遍在 400 mm 以上，属于连续性降水，为主降水期；7 月 11~26 日为第 3 阶段，主要为过程性降水。图 1c 和 1a 比较，可见主要的降水区很相似，表明第 2 阶段的降水贡献最大。从雨带的走向看也更接近于梅雨锋雨带。而第 3 阶段除受副高影响淮河流域雨带仍然维持外，雨区分布呈复杂的形式，向北伸展至黄河流域，向西南伸至湘、鄂（图 1d）。这也许与西风带扰动在中国大陆上活跃有关。

6 月的降水对淮河流域的水情影响并不严重，而从 6 月 29 日起降水显著增强，连续的降水导致淮河干流水位持续上涨。7 月 3 日 20 时（北京时，下同），王家坝出现超警戒水位（27.50 m），6 日 5 时出现洪峰，水位达 28.38 m。10 日上午超保证水位（29.30 m），10 日 10 时 28 分王家坝开闸

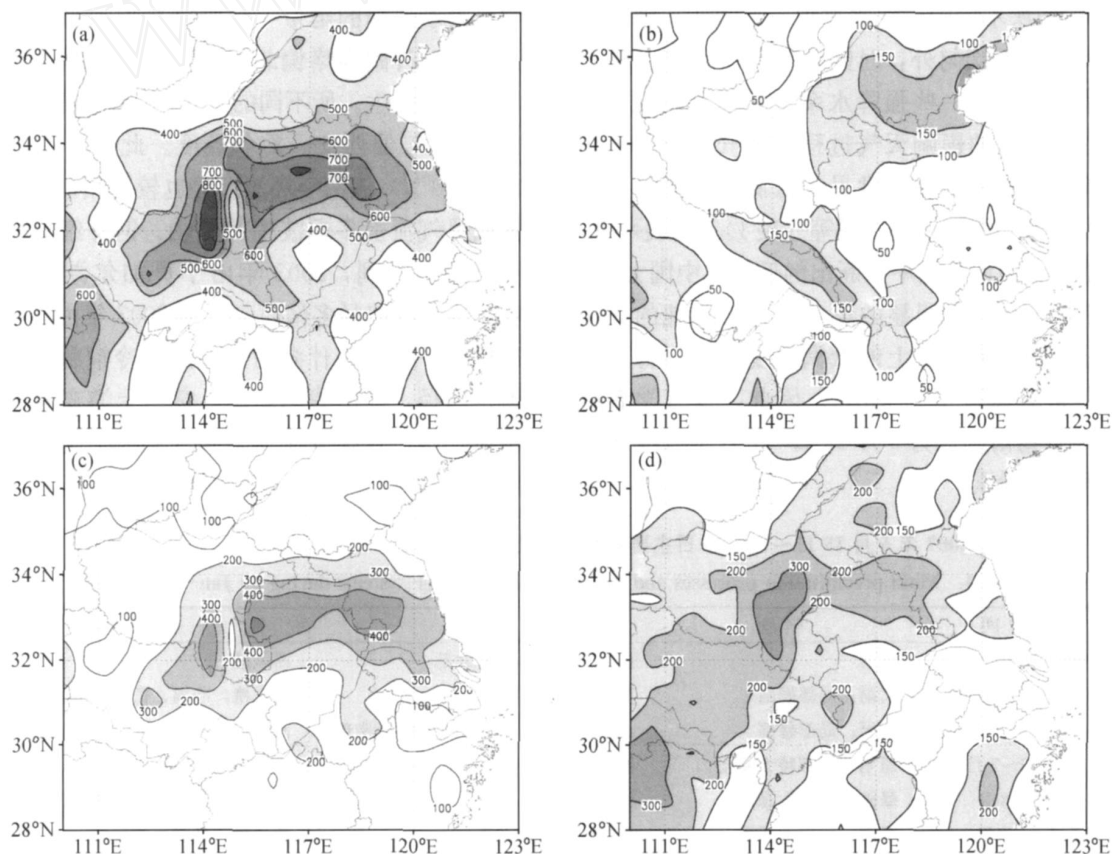


图 1 2007 年 6~7 月降水量（单位：mm）：(a) 6 月 19 日~7 月 26 日；(b) 6 月 19~28 日；(c) 6 月 29 日~7 月 10 日；(d) 7 月 11~26 日

Fig. 1 Accumulated precipitation amount during the different periods of Jun - Jul 2007 (units: mm): (a) 19 Jun - 26 Jul; (b) 19 - 28 Jun; (c) 29 Jun - 10 Jul; (d) 11 - 26 Jul

泄洪。此后水位仍偏高，至 28 日 20 时，水位为 27.49 m，退至警戒水位以下。在 6~7 月有 4 次洪峰通过王家坝，它们分别在 6 日 5 时、11 日 4 时、17 日 11 时和 27 日 3 时，其水位分别达到 28.38、29.59、28.95 和 28.04 m。总体而言，王家坝共经历 4 次洪峰，最高达 29.59 m，超警戒水位运行达 25 天。在该年的暴雨期间，淮河流域共启用王老坡、蒙洼、上六坊堤、下六坊堤、南润段、邱家湖、石姚段、姜唐湖、洛河洼和荆山湖等 10 处行蓄洪区。据初步统计，江苏受灾 425 万人，安徽 1 642.9 万人。关于雨情、水情等更详细的情况可参阅文献 [20]。

3 主要降水过程及影响系统

初步分析表明，上述 3 个阶段暴雨期间，每一阶段又包含有不同的天气过程。初步统计，共包含有 11 次不同的强降水过程。这表明，降水除了空间分布不均匀外，时间分布也不均匀。降水非常集中，多以一些强降水系统的形式出现。每一阶段中具体的影响天气过程和天气系统并不相同。除在淮河梅雨期间常见的低涡切变线外，还涉及中纬度的西风槽和冷涡等（表 1）。由表可见，西风槽甚至由西风槽中切断出的低涡对中国大陆 6~7 月的降水也有明显的影响，并不单纯的或主要类似于通常梅雨锋上的低涡切变线等（梅雨的特点在第 2 阶段更为突出）。因此，也有学者将 2007 年的梅雨期定为 6 月 19 日~7 月 10 日，第 3 阶段为黄淮暴雨。

4 致洪暴雨期的环流特征

2003 和 2007 年汛期的共同特点是主要降水都集中在淮河流域，长江流域降水偏少。该两个年份的降水均给淮河流域带来了严重的洪涝灾害，相比较而言 2007 年比 2003 年更强，持续时间也更长。为了弄清这两年的环流特征，对 2007 年 6 月 19 日~7 月 26 日和 2003 年 6 月 21 日~7 月 11 日淮河流域暴雨期间的 500 hPa 环流形势作了平均（图 2）。从环流形势看，它们存在着共同的特点：一是该两年中高纬度区域（50~60°N）均存在着阻塞高压，所不同的是 2007 年为西阻，而 2003 年为双阻。尽管如此，中高纬度阻塞形势的维持都十分有利于西风带系统的稳定维持，并有利于持续性降水的出现。另一特点是该两年西太平洋副高均稳定维持在 26°N 附近，已有的研究表明，夏季汛期的雨带一般维持在副热带高压西北边缘，这种副高略偏北的形势十分有利于淮河流域暴雨的发生。所不同的是 2003 年副高西伸脊点比 2007 年偏西 1~2 个经度。此外，在中纬度（30~40°N）该两年环流形势也较为相似，即平直的风气气流上多短波槽的活动。但仔细分析每日天气图可见到，2003 年由于贝加尔湖有低槽存在，冷空气路径多偏西北。而 2007 年由于中纬度冷槽偏于巴尔喀什湖附近，因而冷槽和冷空气多偏西路径，即沿我国新疆、黄河上游东移至淮河流域。这一点在 3 个阶段的平均图，尤其是第 2 阶段的环流平均图上有清楚的反映（图 2c）。

表 1 2007 年 6 月 19 日~7 月 26 日主要降水过程及其影响系统

Table 1 Main precipitation processes and its influencing weather systems during 19 Jun - 26 Jul 2007

时间	强度	范围	主要影响系统
1 6 月 19~20 日	暴雨	山东南部，苏、皖北部	西风槽
2 6 月 21~23 日	大雨，局部暴雨	苏、皖中北部	西风槽，冷涡，低涡，地面气旋
3 6 月 26~28 日	大雨，局部暴雨	山东南部，苏、皖北部，河南南部	西风槽，低涡
4 6 月 29~7 月 1 日	暴雨，局部特大暴雨	淮河干流	冷涡，切变线
5 7 月 2~3 日	暴雨，局部大暴雨	淮河干流	西风槽，低涡，切变线，地面气旋
6 7 月 4~6 日	暴雨，局部大暴雨	苏皖豫中部和北部	西风槽，低涡，切变线，地面倒槽
7 7 月 7~9 日	暴雨，局部特大暴雨	淮河干流	西风槽，低涡，切变线，地面倒槽
8 7 月 13~15 日	暴雨，局部大暴雨	河南中、南部，苏皖北部	西风槽，低涡
9 7 月 19~20 日	暴雨，局部大暴雨	河南中部、江苏中部	西风槽，低涡，切变线
10 7 月 22~23 日	暴雨	河南南部、江苏中部	冷涡，低涡
11 7 月 24~25 日	暴雨	河南东南部，苏、皖北部	冷涡，低涡

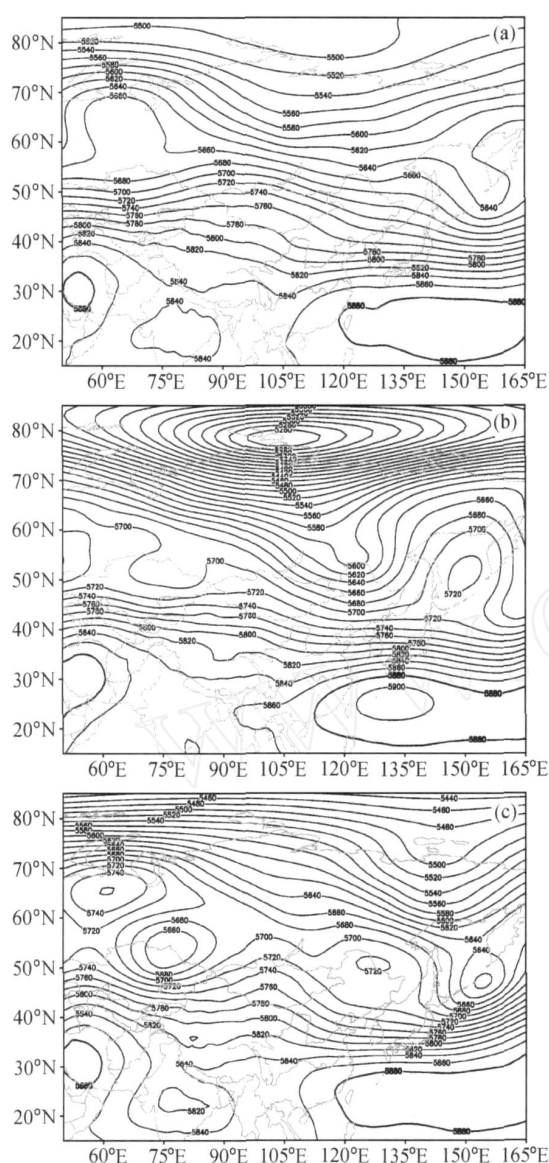


图2 500 hPa 平均高度场 (单位: gpm): (a) 2007 年 6 月 19 日~7 月 26 日; (b) 2003 年 6 月 21 日~7 月 11 日; (c) 2007 年 6 月 29 日~7 月 10 日

Fig. 2 Average geopotential height at 500 hPa (units: gpm): (a) 19 Jun - 26 Jul 2007; (b) 21 Jun - 11 Jul 2003; (c) 29 Jun - 10 Jul 2007

除了中高纬度和副热带系统的影响外, 我们对夏季风的状况也作了分析 (图 3)。从图 3a 可以看到, 2007 年南海季风于 5 月 21 日爆发后, 6 月中旬前主要活跃在华南和江南一带, 6 月 19 日前后向北推进到 30°N 以北, 但强度偏弱。6 月 29 日~7 月 10 日季风涌携带大量水汽汇集于 32°N 附近, 7 月 16 日前后又有一次季风涌活动, 26 日以后, 季风涌向北推进达到 38°N, 此后雨带也随

之北移。这表明, 我国大陆上的雨带与季风涌的确存在一定的关系。从 2003 年 (图 3b) 的情况分析来看, 该年的 6~7 月也有 3 次季风涌活动。但 2007 年与 2003 年 6~7 月的季风涌的活动, 存在一定的差异, 2003 年尽管也有 3 次季风涌的活动, 但其间歇期较短, 而 2007 年的 3 次季风涌的间歇期相对比较长, 这也许在一定程度上可以解释为何 2007 年淮河致洪暴雨期长达 30 余天, 而 2003 年的暴雨期则只有 20 余天的原因。因而, 我们可以认为, 2007 年的淮河致洪暴雨似乎与 1991 年的江淮暴雨有更多的类似之处, 它们都属于雨期持续时间较长的一类, 这也许与季风扰动长时间的持续影响有关。

为了探讨季风活动的影响, 我们又分析了 1971~2007 年东亚季风区 (20~40°N, 110~125°E) 6~7 月的平均风速值, 并使用了有关季风指数的定义<sup>[21]</sup>。由图 4 可以看出, 2007 和 2003 年同属于较强季风年。由过去的统计知, 如其他条件有利, 强季风年雨带有偏北的可能性, 甚至达到华北。上述 2007 和 2003 年夏季雨带不在长江而在淮河, 均属较强季风年 (偏强而不是最强), 其是否有一定关系, 这需要继续做更进一步的研究。

## 5 第 2 阶段暴雨的分析

如前所述, 2007 年暴雨可大体分为 3 个阶段, 每个阶段具有不同的特点, 限于篇幅本文集中对其中一个阶段的一个特定过程进行探讨, 未能涉及到的内容在后续的研究中进行。本文主要讨论 2007 年 6 月 29 日~7 月 10 日的致洪暴雨。为何首先选择这一阶段? 理由是因为这一阶段的暴雨多集中在淮河干流, 且雨强最大, 其梅雨的特征也更清楚; 另外, 造成的影响也最为明显, 致使 7 月 10 日 12 时 28 分王家坝开闸泄洪, 蒙洼蓄洪区蓄洪。

表 1 中我们注意到, 第 2 阶段即从 6 月 29 日至 7 月 10 日, 共有 4 场暴雨过程, 基本都集中在淮河干流, 它们分别是 6 月 29 日~7 月 1 日、7 月 2~3 日、4~6 日和 7~9 日, 尤其是最后一次过程导致险情加重。需要强调的是, 7 月 7~9 日的降水过程为 2007 年淮河流域降水最强的一次。

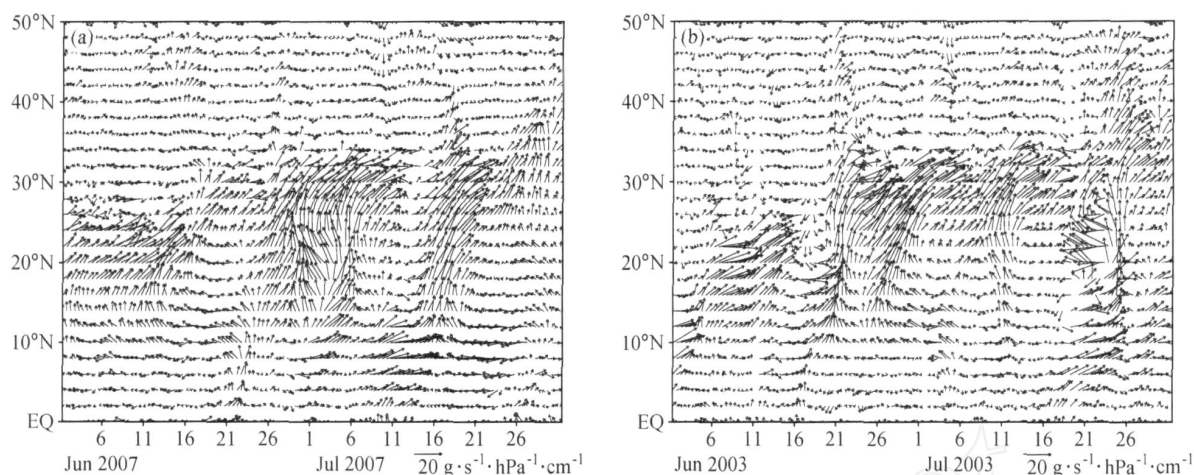


图3 (a) 2007 年和 (b) 2003 年 6~7 月 110~120°E 平均的 850 hPa 水汽通量

Fig. 3 Average moisture flux at 850 hPa between 110 - 120°E during Jun - Jul: (a) 2007; (b) 2003

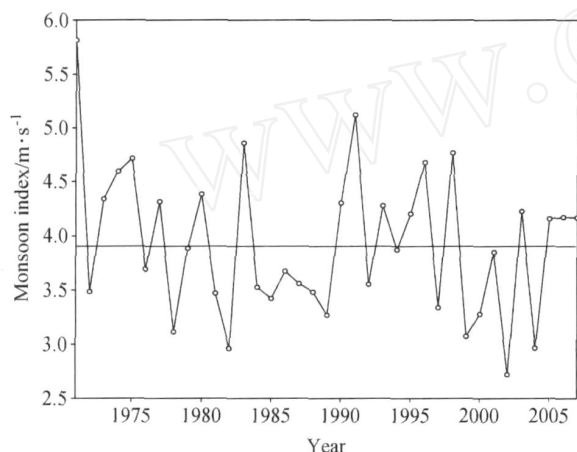


图4 1971~2007 年东亚季风区 (20~40°N, 110~120°E) 6~7 月平均风速 (季风指数)。直线为 1971~2000 年的平均季风指数值

Fig. 4 Average wind speed (monsoon index) in East Asian Monsoon Area (20 - 40°N, 110 - 120°E) in Jun - Jul, 1971 - 2007. The horizontal line is average of monsoon index during 1971 - 2000

图5 给出了2007年7~9日每24 h的雨量, 可以发现在淮河流域上连续3天出现暴雨, 给淮河干流的安全度汛造成了巨大的压力。其中, 安徽寿县8日降水量达262 mm, 为该次过程日降水量最大值, 安徽阜阳站的日降水量也超过了200 mm。正是由于如此强的降水, 加上前期6月29日~7月6日强降水形成的高水位, 导致了王家坝10日开闸泄洪。从逐日的环流图上(图6)可以清楚地看到, 其与整个淮河致洪暴雨过程平均环流图(图2)不同, 后者中纬度系统在平均图上比较平

直, 而在图6上500 hPa有一明显低槽存在, 其在我国西北至华北一带形成, 并逐渐向东移动, 应该说此西风带短波槽和低涡对此次淮河降水过程产生的是间接影响, 也就是说, 与冷槽和低涡有关的冷空气卷入对这一阶段的暴雨的确有影响。但是, 在淮河流域暴雨期间, 我国内陆地区西风带产生切断低压并对暴雨产生影响的个例, 在过去并不多见<sup>[22]</sup>。可以注意到, 7日8时该切断低压中心在蒙古国中东部, 强度5700 gpm, 而8日8时, 移至中蒙边境, 中心值减为5680 gpm, 9日8时, 移至华北北部, 中心值进一步降低, 为5660 gpm。

从200和850 hPa的急流分布(图6)看到, 200 hPa在淮河以北39°N附近存在明显的急流带, 850 hPa在淮河以南也维持着一条低空急流带, 淮河流域正好位于高空急流入口区右侧以及低空急流出口区左侧。这种高低空急流叠加区有利于上升运动增强, 在7月8日最为明显, 对强降雨的产生非常有利。这表明这次暴雨过程有明显的高低空急流的相互作用存在。

为了考察冷空气的影响, 本文还对7~9日850 hPa锋生函数作了计算(图7)。可以看到, 在淮河流域存在一条较为明显的锋生函数大值带状区, 其中心与强暴雨中心有较好的对应关系。表明此次淮河致洪暴雨期间弱冷空气的作用不可忽视, 这与通常梅雨锋期间锋生区非常弱, 且有时候分析不出锋生区, 有较大的不同。又从垂直剖面(图8)上可以看到, 在32°N附近, 即接近淮河

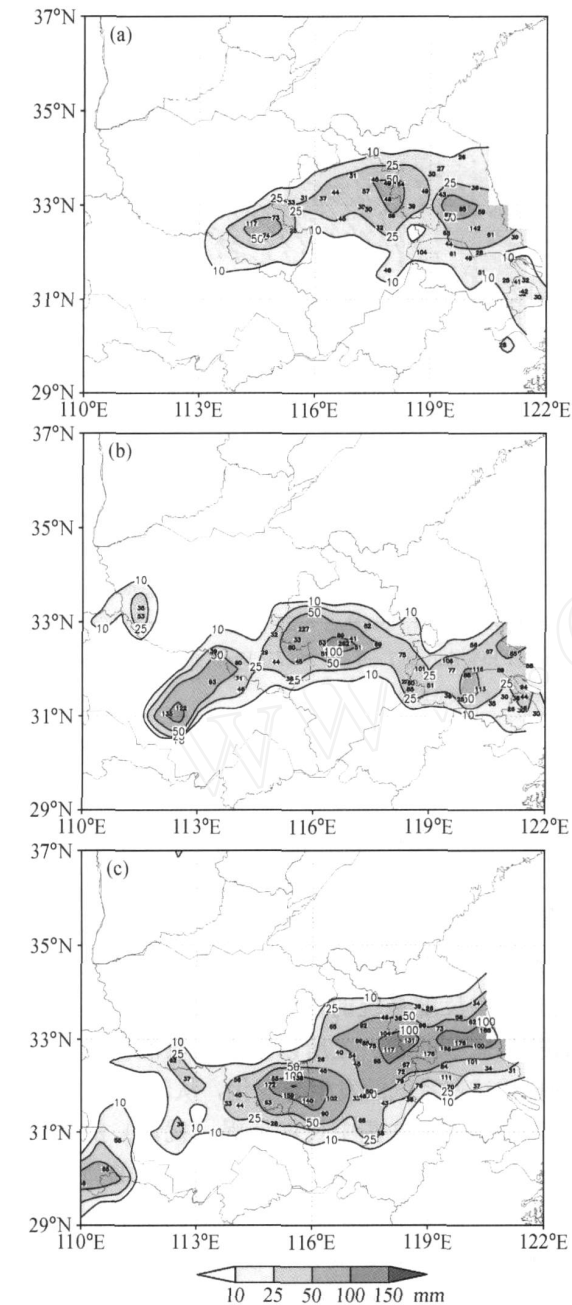


图5 2007 年 7 月 (a) 7 日、(b) 8 日和 (c) 9 日的 24 h 降水量。数字代表站点降水量  
Fig. 5 24 h precipitation amount on (a) 7 Jul, (b) 8 Jul, (c) 9 Jul 2007. Number represents precipitation amount at various stations

流域的纬度，7 月 7~9 日平均 场为一上升区。这一大尺度上升运动的特征，对于对流活动的发展非常有利，可能与锋生环流的增强有关。锋生区的存在表明了有一定弱斜压性的贡献，这也许与该年夏季中纬度系统的存在和活跃有关。说明该次暴雨过程亦存在中、低纬度系统的相互作用。

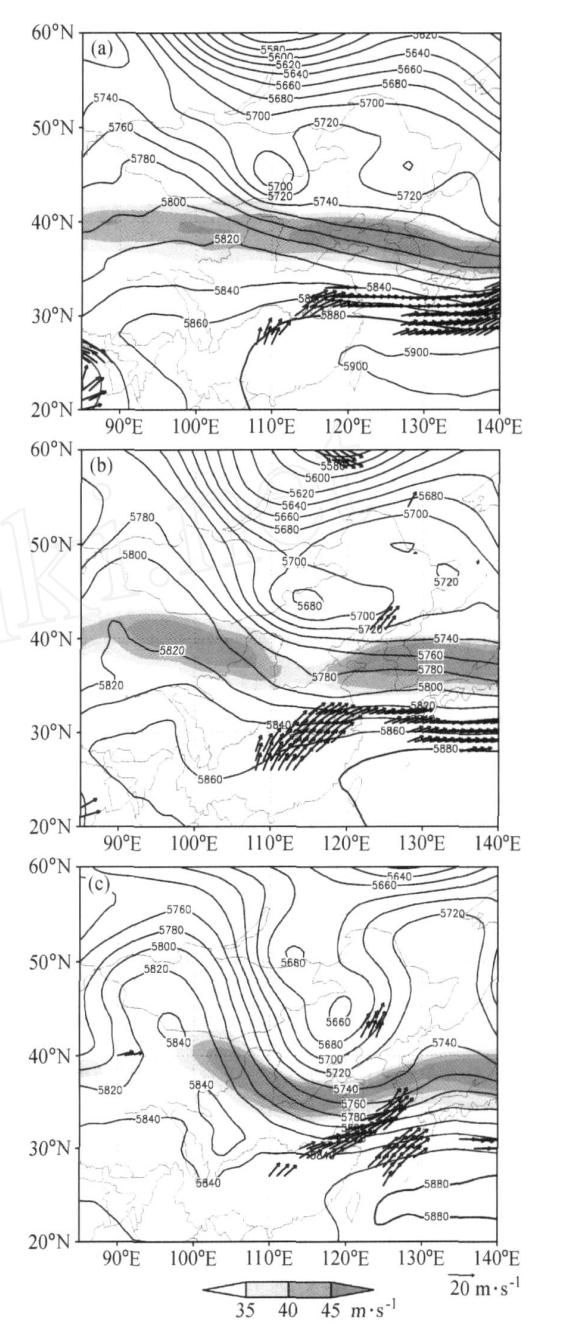


图6 2007 年 7 月 (a) 7 日、(b) 8 日和 (c) 9 日平均的 500 hPa 高度场 (单位: gpm)、200 hPa 急流 (阴影) 与 850 hPa 急流 (箭头, 大于  $12 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ )  
Fig. 6 Daily average geopotential height at 500 hPa (units: gpm), upper level jet at 200 hPa (shaded), low level jet (vector, wind speed larger than  $12 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ) at 850 hPa in 2007: (a) 7 Jul; (b) 8 Jul; (c) 9 Jul

前面提到偏南的暖湿气流将水汽源源不断地输送到淮河流域的暴雨区。但需要指出的是，暴雨的发生不仅决定于水汽的通过能力（水汽通



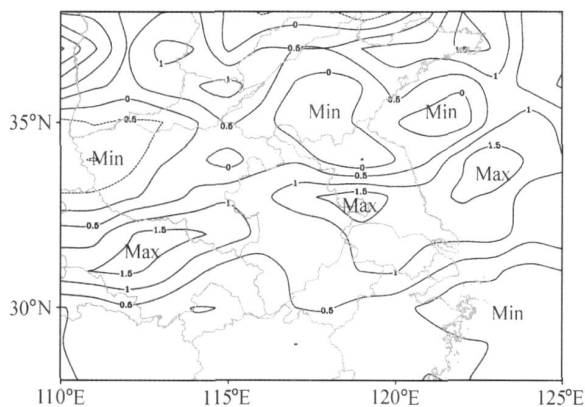


图 7 2007 年 7 月 7~9 日 850 hPa 平均锋生函数 (单位:  $10^{-10} \text{ K} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ )

Fig. 7 Average frontogenesis function at 850 hPa during 7 - 9 Jul 2007 (units:  $10^{-10} \text{ K} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ )

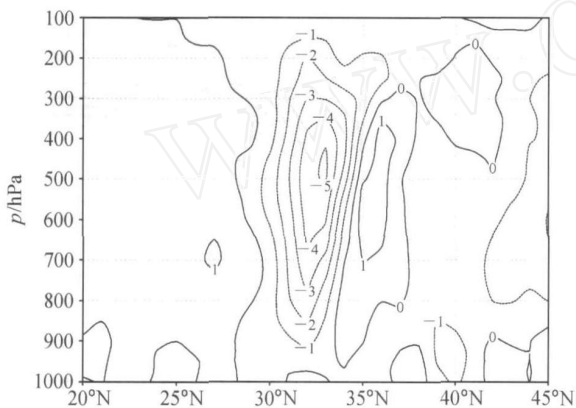


图 8 2007 年沿 118°E 剖面的 7~9 日平均垂直速度 (单位:  $10^{-3} \text{ hPa} \cdot \text{s}^{-1}$ )

Fig. 8 Average vertical velocity (units:  $10^{-3} \text{ hPa} \cdot \text{s}^{-1}$ ) along 118°E during 7 - 9 Jul 2007

量), 而且决定于水汽的集中能力 (即, 水汽通量散度)。为此, 本文对 7 月 7~9 日的水汽通量进行了分析。从图 9 可以看出, 一个很明显的水汽通量辐合大值带正位于江淮流域之间, 这表明在该区域有足够的水汽可用作成云致雨的丰富“原料”。

## 6 第 2 阶段第 4 场大暴雨过程的中尺度对流系统的分析

上面已对该年第 2 阶段的暴雨作了探讨。但是, 应该强调, 夏季在淮河流域东西走向的降水带内, 降水中心的分布很不均匀, 常常是沿降水

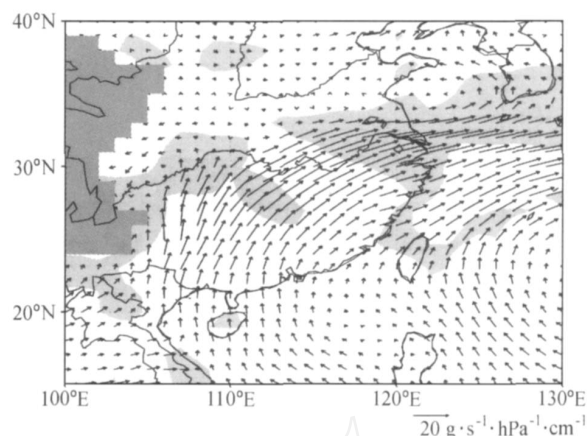


图 9 2007 年 7 月 7~9 日 850 hPa 平均水汽通量 (箭头) 和水汽通量散度 (浅色阴影, 小于  $-2 \times 10^{-6} \text{ g} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2}$ )。左侧深色阴影是地形高于 1500 m 的区域

Fig. 9 Average moisture flux (vector) and divergence of moisture flux (light shadow, less than  $-2 \times 10^{-6} \text{ g} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{hPa}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2}$ ) at 850 hPa during 7—9 Jul 2007. Deep shadow represents topography higher than 1500 m

带有一个或多个大暴雨中心存在, 这在 7~9 日 (即第 2 阶段第 4 次过程) 每天的降雨量 (图 5) 上已有很好的反映。而这些 24 h 降水量的最大中心又常与该时段内一个或多个中尺度涡旋 (扰动) 同时或相继的发生发展相联系。我们对强暴雨区的预报有时不够理想, 经常是因为未能很好地描写这些中尺度系统的发生和演变, 这是当今暴雨预报的瓶颈问题。之所以难于在数值模式中正确地描述这些系统的发生与变化, 从动力学上讲, 是因为我们对这些中尺度低涡 (扰动) 的发生发展过程尚未完全明了, 尚需进行深入的研究。另外更主要的原因是缺乏中尺度观测资料。因此作为重要的一步, 是要设法搜集更为详实的资料, 揭露和确认一些重要的基本事实。

从 7 月 7~9 日 NCEP 资料分析的 850 hPa 流场 (图 10) 可以知道, 在这次较强的降水中, 对流层低层主要存在着两次中尺度低涡 (扰动) 的发生发展。一是约在 7 日 8 时至 8 日 14 时之间, 为中尺度涡旋 A (图 10a~e), 另一约在 8 日 14 时至 9 日 14 时之间, 为中尺度涡旋 B (图 10f~h)。在图 10 中的中尺度涡旋 A 和图 11 中的雨团 C1、C2 相对应, 而中尺度涡旋 B 与雨团 C3 相对应。这两次低涡均是从无到有发生发展, 且均有非常明显的正涡度的大值中心相伴随。又, 为了



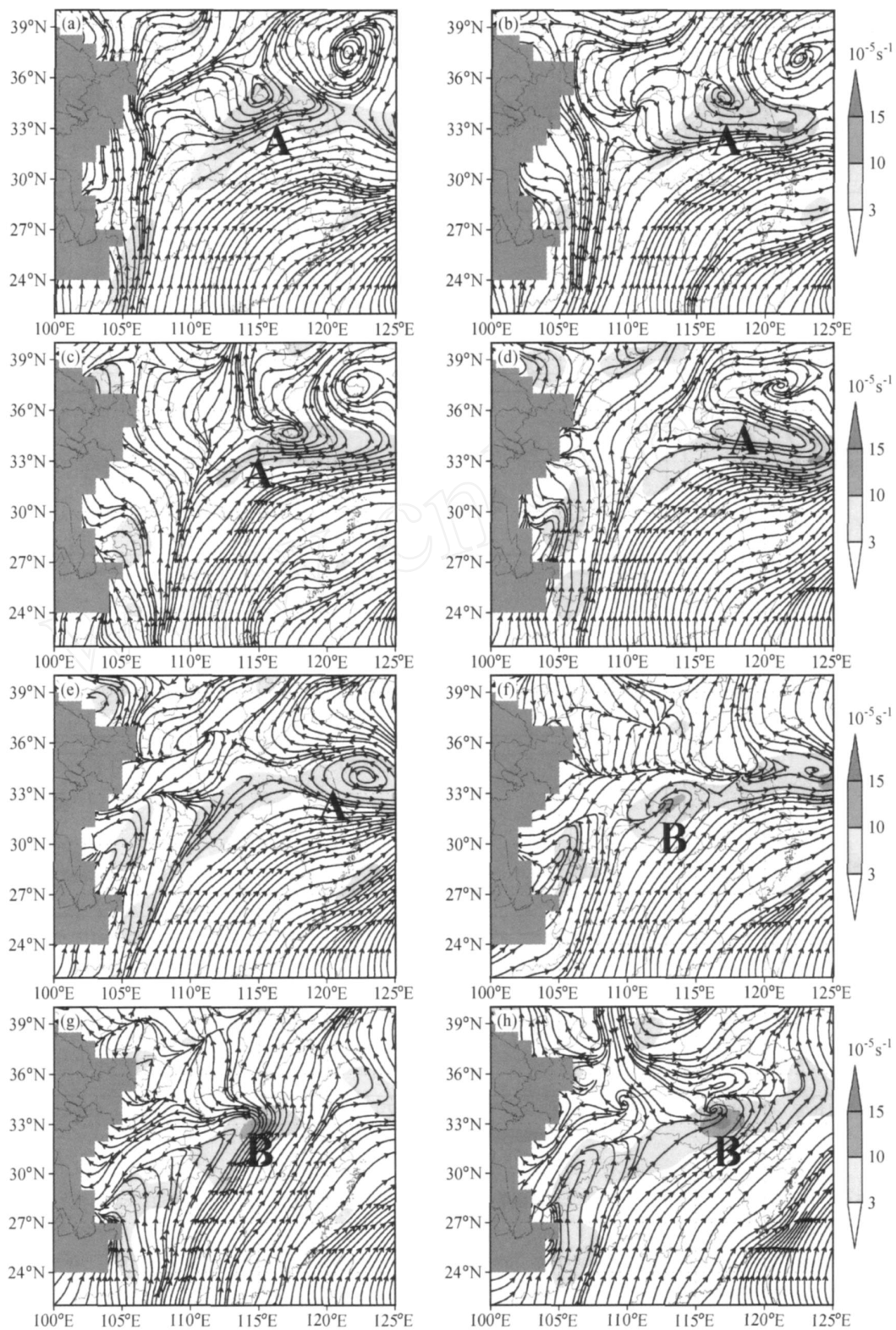


图 10 2007 年 7 月 7~9 日 850 hPa 流场和涡度场 (浅色阴影): (a) 7 日 8 时; (b) 7 日 14 时; (c) 7 日 20 时; (d) 8 日 2 时; (e) 8 日 8 时; (f) 8 日 14 时; (g) 8 日 20 时; (h) 9 日 2 时。左侧深色阴影是地形高于 1 500 m 的区域, A 和 B 为低涡

Fig. 10 Streamline and vorticity (light shadow) at 850 hPa, during 7—9 July 2007: (a) 0800 LST 7; (b) 1400 LST 7; (c) 2000 LST 7; (d) 0200 LST 8; (e) 0800 LST 8; (f) 1400 LST 8; (g) 2000 LST 8; (h) 0200 LST 9. Deep shadow represents topography higher than 1 500 m. A and B represents vortex

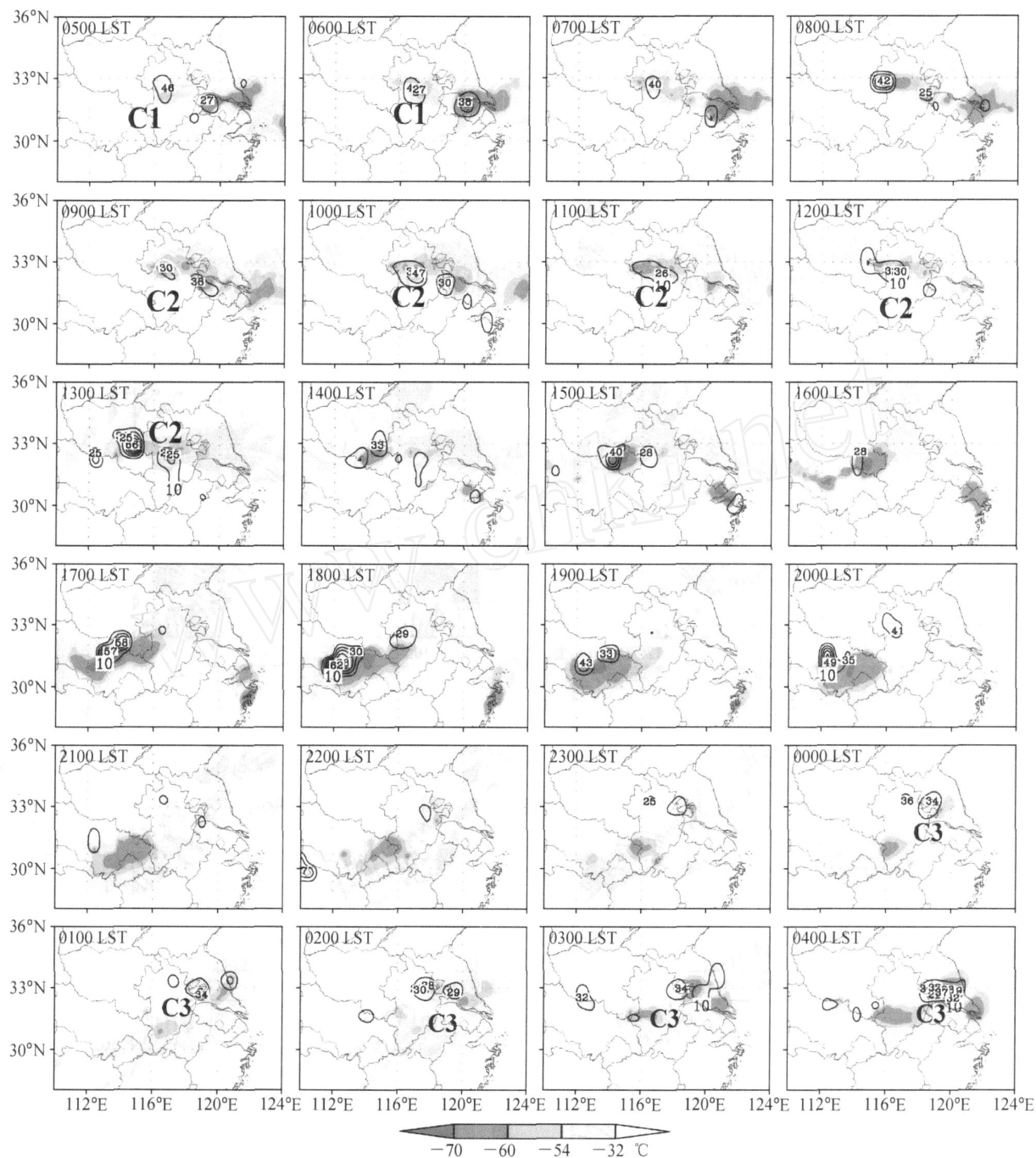


图 11 2007 年 7 月 8 日 5 时~9 日 4 时 FY-2 卫星 1 h 间隔的 TBB (阴影) 和每小时降水量 (等值线, 单位: mm)。C1 和 C2 为影响寿县的雨团, C3 为影响兴化的雨团

Fig. 11 TBB (shaded) and hourly precipitation amount (line, units: mm) from 0500 LST to 0400 LST 9 Jul 2007. Rain cluster C1 and C2 influence Shou County and C3 influence Xinghua

弄清地面上系统的情况, 我们对地面气压场也做了分析 (图 12), 它们有时有对应的低压出现 (但并非全部如此)。可以看出, 对于第二个低涡, 地面有明显的低压中心与之配合, 而且在低涡生成前, 在低涡产生的地区 (河南桐柏山附近) 地面

已经有明显的扰动存在 (但第一个低压无明显的气压场相对应)。这表明, 对中尺度系统而言, 风场扰动 (或涡旋) 相对于气压场而言更加敏感, 可以提供更多有用的信息, 这是由中尺度适应问题所决定的<sup>[23, 24]</sup>。因此, 在中尺度分析中要充分

利用风场的信息, 尤其是它的辐合中心。

7~9 日期间降水过程主要是由 10 个中尺度对流云团直接造成的 (表 2), 生命史短则 5 h, 长则 13 h。这些云团有相当一部分与涡旋 A 和涡旋 B 有联系。但其中移入淮河干流或在当地发展并停滞少动的云团则更加值得注意。为此, 我们对出现于 7 月 8~9 日沿淮河干流的几个云团给予了更多的关注。

从每小时一次的 TBB (Temperature of Black Body) 图上可以更加清楚地揭示云团的高时空演变特征 (图 11), 表 2 中给出的是 7 日 10 时至 9 日 13 时的情况, 而图 11 则把时间缩短为 8 日 5 时至 9 日 4 时, 即更加锁定强暴雨发生前的时段, 并与强降雨团作了对比。可见, 的确有一系列水平尺度较小的中尺度云团存在, 并在淮河流域一带发生发展, 且 1 h 的降水量图 (图 11) 上发现, 诸如雨团 C1、C2 和 C3 与这些云团也有较好的对应关系 (这里把 1 h 降水量 10 mm, 生命史 2 h

且范围达到或超过几十公里的雨区称为雨团<sup>[31]</sup>。

同时, 从单站的每小时降水分布还可更细致的辨认降水雨团的分布情况。图 13 给出了安徽寿县 (32.33°N, 116.47°E) 和江苏兴化 (32.56°N, 119.50°E) 两站 7 月 7~9 日每小时的降水量分布。可以看到, 寿县主要降雨团在 8 日 5~13 时, 其最大值达到约  $46 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ , 这与 1 h 降水图上的雨团 C1 和 C2 相对应, 而兴化则主要反映了另一雨团 C3 的发展和演变, 这个雨团则主要出现在 8 日 22 时~9 日 7 时之间, 且 9 日 5 时 1 h 的降水量达到了 40 mm 以上, C1、C2 和 C3 与卫星 TBB 资料云团图上系统的分布比较一致, 是一次相当强的降水过程。在图 13 中, C2 就包含了两峰值, C3 中亦存在 2~3 个峰值。它们常由较小的 或中尺度系统组成 (将用其他资料在以后的文章中再作分析)。

应该强调指出, 在卫星 TBB 图上的云团与 1 h 雨量图 (图 11) 上的雨团一般来说有较好的对

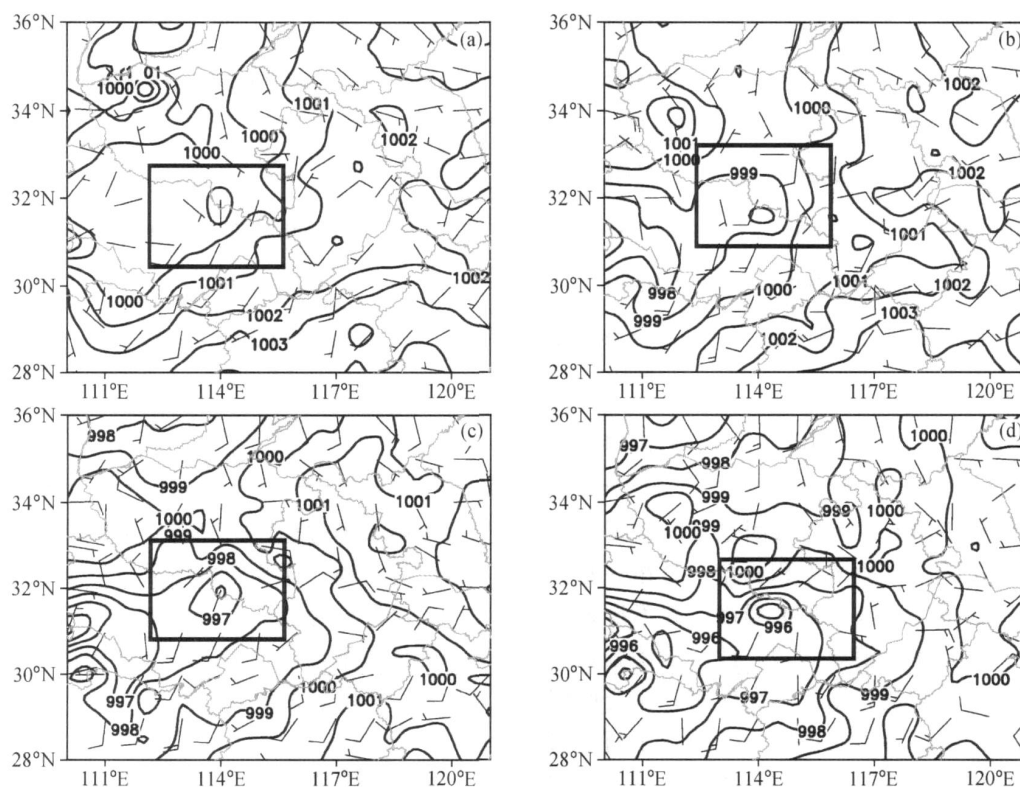


图 12 2007 年 7 月 8 日 8~17 时地面风场 (单位:  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ) 和海平面气压场 (单位: hPa): (a) 8 时; (b) 11 时; (c) 14 时; (d) 17 时。矩形为低压所在区域

Fig. 12 Surface wind (units:  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ) and sea level pressure (units: hPa) during 0800—1700 LST 8 July 2007: (a) 0800 LST; (b) 1100 LST; (c) 1400 LST; (d) 1700 LST. Rectangle frame represents the region of low pressure

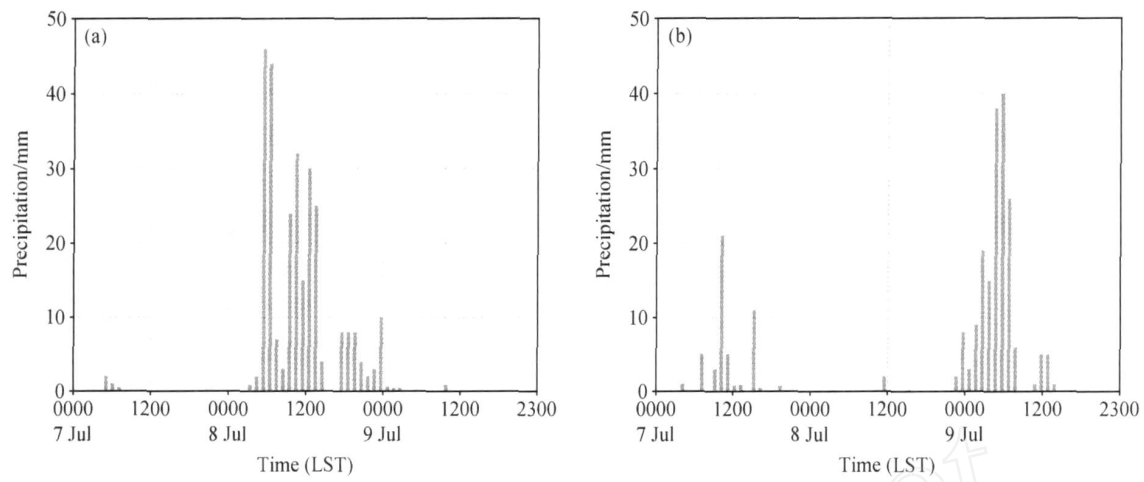


图 13 2007 年 7 月 7 日 0 时~9 日 23 时的逐时降水量：(a) 安徽寿县；(b) 江苏兴化  
Fig. 13 Hourly precipitation amount from 0000 LST 7—2300 LST 9 Jul 2007: (a) Shou County, Anhui Province; (b) Xinghua, Jiangsu Province

表 2 2007 年 7 月 7~9 日 MCS 的活动情况  
Table 2 The mesoscale convective systems during 7 - 9 Jul 2007

	生成时间	生成地点	消亡时间	消亡地点	影响区域	相关雨团
1	7 日 9 时	河南信阳	7 日 20 时合并，			
2	7 日 17 时	安徽西部	8 日 8 时消亡	上海东部	安徽中部，江苏中南部	
3	7 日 19 时	湖北东北部	8 日 2 时	安徽南部	河南东南部，安徽南部	
4	8 日 1 时	安徽阜阳	8 日 8 时合并，			
5	8 日 6 时	安徽阜阳	14 时消亡	上海东部	安徽中部，江苏南部	C1, C2
6	8 日 13 时	河南信阳	8 日 18 时	江苏中部	河南南部，安徽中部	
7	8 日 22 时	洪泽湖附近	9 日 4 时	上海	江苏中南部	
8	9 日 1 时	洪泽湖附近	9 日 5 时合并，			
9	9 日 1 时	河南信阳	12 时消亡	上海	河南南部，安徽南部， 江苏中南部	C3
10	9 日 3 时	河南南部	9 日 13 时	南京	河南南部，安徽南部， 江苏中南部	

应关系，但也不尽然。因为云团是某时刻瞬间的信息，而雨团是某时段的累积雨量，且在一些特殊情况下，低温仅反映云顶的温度，并不反映云体的强大，尤其是在消散阶段，此时云团强，而雨团的强度反而较弱，因此，在使用时应全面综合考虑。又云团、雨团在动力学上的意义尚不很明确，尤其是它们和中尺度对流系统（MCS）的关系，只不过是它们在实际应用中比较方便。一般而言，云团和雨团发展时期，它们对应的关系较好，且与它们相关的 MCS 亦会处于活跃的发展过程中。

上述分析表明，在 7 月 7~9 日期间（即第 2

阶段的第 4 场过程）的确有一系列的中尺度云团和雨团的活动。这些中尺度云团和雨团是强烈降水的直接影响系统，正是在中尺度涡旋（扰动）有利的环境下，使这些云团和雨团此起彼伏，频繁生消，引发了大暴雨。

7 结论和讨论

2007 年 6~7 月淮河流域出现了严重的致洪暴雨，引起全国上下及广大气象工作者的广泛关注。本文利用尽可能搜集到的常规和特殊加密资料对

该致洪暴雨的环流背景, 尤其是其第 2 阶段持续强降水期间的影响系统及中尺度涡旋、雨团和云团的特征, 做了分析, 获得如下结果:

(1) 大尺度环流背景非常有利于暴雨的发生: 首先, 2007 年高纬地区为很明显的阻塞高压维持的形势。尽管 2007 年为西阻型, 2003 年为双阻型, 但是这种阻塞形势的维持表明环流形势趋于稳定, 非常有利于持续暴雨的发生。另, 副热带高压平均轴线稳定维持在  $26^{\circ}\text{N}$  附近, 已有的研究表明副热带高压的北缘, 即为夏季中国大陆雨带之所在, 由此, 这种形势对于淮河雨带的形成和维持十分有利。

(2) 西风带小槽的作用: 在阻塞高压和副热带高压之间的中纬度地区, 中国大陆上空维持较为平直的风气流, 可以注意到, 巴尔喀什湖附近为低压槽区, 小股弱冷空气不断从该槽中分裂, 而成小波动形式沿西风带经我国西北地区向东移动。这种西来的小槽引导弱冷空气沿偏西路径, 而不像 2003 年的偏北路径影响我国黄淮地区。这在该致洪暴雨第 2 阶段的后期 (7 月 7~9 日) 的平均锋生函数计算结果中反应得很明显, 淮河流域为锋生区, 表明了弱冷空气和斜压性对暴雨的发生有一定的贡献, 这与多数梅雨锋暴雨的例子有些差异。从每日 500 hPa 图上可见, 这些小槽在东移过程中不断加深, 甚至在中国大陆上产生切断低压, 这在过去的梅雨期间是少见的。在这一过程中, 尤其是 7 月 8 日高空急流入口区右侧与低空急流出口区左侧, 上下叠置, 出现了高低空急流的耦合, 使该区域的垂直运动稳定增强, 有利于暴雨的发生与维持。

(3) 与季风涌有关的暖湿偏南气流有较大的贡献: 南海季风涌有较为明显的影响。2007 年与 2003 年 6 月和 7 月同样存在 3 次明显的季风涌活动。但前者季风涌之间间歇时间较后者长, 这可能是 2007 年淮河暴雨持续长达 30 余天, 而 2003 年仅维持 20 余天的原因。2007 年 6~7 月, 季风涌向北推进达到  $32^{\circ}\text{N}$  附近, 正好与锋生区的位置相近, 这一结果表明, 有明显的中低纬系统的相互作用存在, 这可为该年暴雨易发生于淮河流域而不在长江流域提供一些可能的解释。

(4) 洪峰与暴雨相互叠加使灾情加重: 通过对该致洪暴雨第 2 阶段中第 4 次暴雨过程 (7 月 7

~9 日) 的分析, 表明与第 1 阶段雨区集中于淮河以北不同, 第 2 阶段主要集中于淮河干流, 这对淮河流域构成的威胁更为严重, 且强暴雨的时段更为集中。这样的特定的时间和空间分布, 强暴雨与前期 (6 月 29 日~7 月 6 日) 已有的强降水造成的高水位相叠加, 致使 7 月 10 日王家坝开闸泄洪。

(5) 中尺度涡旋 (扰动) 是强暴雨的直接影响系统: 由于强烈的暴雨需要有在较短时间内快速的水汽供应和集中, 同时需要有较强的上升运动, 将这一大量的水汽输送向对流层中上层成云致雨。因此, 仅靠大尺度系统是难以完成的。在对 7~9 日的暴雨过程进行分析的过程中, 本文的结果揭示出, 仅该过程的两天内至少有两次中尺度涡旋 (扰动) 的发生发展。这些中尺度涡旋 (扰动) 的发生发展是当今中尺度动力学研究的关键问题, 也是强烈暴雨预报的瓶颈问题。这些中尺度涡旋有可能触发暴雨, 它们是暴雨的直接影响系统。而在涡旋中出现的中尺度云团和雨团, 甚至更小的中尺度对流系统, 其生命史为数小时, 水平尺度为数十公里, 为暴雨的直接制造者。没有这些中尺度系统的影响, 这类强烈暴雨不可能发生。7~9 日安徽寿县和江苏兴化每小时降水量和云图特征可清楚揭示这些中尺度云团的存在。也正是这些雨团使 7 月 8 日寿县 24 h 的降水量达到了 262 mm 之多。而这些中尺度系统正好出现于淮河流域的上述大尺度有利环境 (水汽通量辐合区, 锋生区, 上升运动区) 之中。

如上所述, 中尺度系统发生于大尺度环境的有利背景下。但是, 这仅表明了一种可能性, 要使这些中尺度系统发生发展起来, 还需有一定的触发机制, 这可能涉及到它们是受大气运动自身的强迫 (如不同尺度的上升运动区), 还是受外界条件的强迫 (如地形等抬升), 需要做更进一步的研究。而且, 对于 2007 年 6~7 月这样复杂的致洪暴雨, 我们仅对其第 2 阶段做了一些探讨, 其他阶段诸多的过程如何? 2007 年淮河致洪暴雨与 2003 年的情况又有何异同? 也都需要认真讨论。总之, 本文是一个初步的分析研究结果, 要在一篇文章中把持续 30 余天的 2007 年淮河流域致洪暴雨的诸多问题完全弄清是很困难的事情, 因此, 今后还应继续作更深入的探讨。

## 参考文献 (References)

- [1] 陶诗言. 中国之暴雨. 北京: 科学出版社, 1980. 1~255  
Tao Shiyan. *Heavy Rainfall in China* (in Chinese). Beijing: Science Press, 1980. 1~255
- [2] 丁一汇. 1991 年江淮流域持续性特大暴雨研究. 北京: 气象出版社, 1993. 1~255  
Ding Yihui. *Study of Strong Heavy Rainfall in Yangtze-Huai River in 1991* (in Chinese). Beijing: China Meteorological Press, 1993. 1~255
- [3] 赵思雄, 陶祖钰, 孙建华, 等. 长江流域梅雨锋暴雨机理的分析研究. 北京: 气象出版社, 2004. 1~281  
Zhao Sixiong, Tao Zuyu, Sun Jianhua, et al. *Study on Mechanism of Heavy Rainfall on Meiyu (Baiu) Front in Yangtze River Valley* (in Chinese). Beijing: China Meteorological Press, 2004. 1~281
- [4] 张庆云, 王会军, 林朝晖, 等. 中国天气气候异常成因研究—2003 年. 北京: 气象出版社, 2004. 1~170  
Zhang Qingyun, Wang Huijun, Lin Zhaozhui, et al. *Study on Anomalous Weather and Climate in China—2003* (in Chinese). Beijing: China Meteorological Press, 2004. 1~170
- [5] 矫梅燕, 姚学祥, 周兵, 等. 2003 年淮河大水天气分析与研究. 北京: 气象出版社, 2004. 1~215  
Jiao Meiyuan, Yao Xuexiang, Zhou Bin, et al. *Analysis and Research of Heavy Rainfalls Causing Flood in Huaihe River in 2003* (in Chinese). Beijing: China Meteorological Press, 2004. 1~215
- [6] Akiyama T. A medium scale cloud cluster in a Baiu front. *J. Meteor. Soc. Japan*, 1984, **62**: 485~504
- [7] Matsumoto S, Ninomiya K, Yoshizumi S. Characteristic features of "Baiu" front associated with heavy rainfall. *J. Meteor. Soc. Japan*, 1971, **49**: 267~281
- [8] Ninomiya K, Murach H. Large scale circulation over East Asia during Baiu period of 1979. *J. Meteor. Soc. Japan*, 1986, **64**: 409~429
- [9] Ninomiya K. Large and meso-scale characteristics of Meiyu/Baiu front associated with intense rainfalls in 1-10 July 1991. *J. Meteor. Soc. Japan*, 2000, **78**: 141~157
- [10] 孙建华, 张小玲, 齐琳琳, 等. 2002 年 6 月 20~24 日梅雨锋中尺度对流系统发生发展分析. 气象学报, 2004, **63** (4): 423~438  
Sun Jianhua, Zhang Xiaoling, Qi Linlin, et al. An analysis on MCSs In Meiyu front during 20—24 June 2002. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 2004, **63** (4): 423~438
- [11] 董佩明, 赵思雄. 引发梅雨锋暴雨的频发型中尺度低压(扰动)的诊断研究. 大气科学, 2004, **28** (6): 876~891  
Dong Peiming, Zhao Sixiong. A diagnostic study of mesoscale lows (disturbances) on Meiyu front and associated heavy rainfall. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2004, **28** (6): 876~891
- [12] Petterssen S, Smebye S J. On the development of extratropical cyclones. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 1971, **97**: 457~482
- [13] Zhao Sixiong, Bei Naifang, Sun Jianhua. Mesoscale analysis of a heavy rainfall event over Hong Kong during a pre-rainy season in South China. *Adv. Atmos. Sci.*, 2007, **24** (4): 555~572
- [14] 赵思雄, 傅慎明. 2004 年 9 月川渝大暴雨期间西南低涡结构及其环境场的分析. 大气科学, 2007, **31** (6): 1059~1075  
Zhao Sixiong, Fu Shenming. An analysis on the southwest vortex and its environment fields during heavy rainfall in Eastern Sichuan province and Chongqing in September 2004. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2007, **31** (6): 1059~1075
- [15] 赵思雄, 孙建华, 陈红, 等. 1998 年 7 月长江流域特大洪水期间暴雨特征的分析研究. 气候与环境研究, 1998, **3** (4): 368~381  
Zhao Sixiong, Sun Jianhua, Chen Hong, et al. Study of heavy rainfall in the Yangtze River during July 1998. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 1998, **3** (4): 368~381
- [16] 陶诗言, 张庆云, 张顺利. 1998 年长江流域洪涝灾害的背景和大尺度环流条件. 气候与环境研究, 1998, **3** (4): 290~299  
Tao Shiyan, Zhang Qingyun, Zhang Shunli. The great floods in the Changjiang River valley in 1998. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 1998, **3** (4): 290~299
- [17] 黄荣辉, 徐予红, 王鹏飞, 等. 1998 年长江流域特大洪涝特征及其成因探讨. 气候与环境研究, 1998, **3** (4): 300~313  
Huang Ronghui, Xu Yuhong, Wang Pengfei, et al. The features of the catastrophic flood over the Changjiang River basin during the summer of 1998 and cause exploration. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 1998, **3** (4): 300~313
- [18] 李泽椿, 郭进修, 董立清. 天气预报在 1998 年夏抗洪防灾中的作用—暴雨成灾引起的气象科学问题的思考. 气候与环境研究, 1998, **3** (4): 335~338  
Li Zechun, Guo Jinxiu, Dong Liqing. The positive role of weather forecasting in combating flooding and disaster reduction during summer 1998. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 1998, **3** (4): 335~338

- [19] 李吉顺, 王昂生. 1998 年长江流域洪涝灾害分析. 气候与环境研究, 1998, **3** (4): 390~397  
Li Jishun, Wang Angsheng. The analysis of flooding disaster in the changjiang river valley in 1998. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 1998, **3** (4): 390~397
- [20] 赵琳娜, 杨晓丹, 齐丹, 等. 2007 年汛期淮河流域致洪暴雨的雨情和水情特征分析. 气候与环境研究, 2007, **12** (6): 728~737  
Zhao Linna, Yang Xiaodan, Qi Dan, et al. The analysis of precipitation and flooding features in the Huaihe River basins during the summer of 2007. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 2007, **12** (6): 728~737
- [21] Wang Huijun. Instability of the East Asian monsoon-EN-SO relations. *Adv. Atmos. Sci.*, 2002, **19**: 1~11
- [22] Zhao Sixiong, Sun Jianhua. Study on cut-off low pressure systems causing flood in northeast Asia. *Meteorology and Atmospheric Physics*, 2007, **96**: 159~180
- [23] 叶笃正, 李麦村. 大气运动的适应问题. 北京: 科学出版社, 1965  
Ye Duzheng, Li Maicun. *Adjustment Problem of Atmospheric Motion* (in Chinese). Beijing: Scientific Press, 1965
- [24] 曾庆存. 数值天气预报的数学物理基础. 北京: 科学出版社, 1979. 1~543  
Zeng Qingcun. *Bases on Mathematics and Physics of Numerical Weather Prediction* (in Chinese). Beijing: Scientific Press, 1979. 1~543