

于翊, 赵思雄. 2013. 武汉地区少梅年一次局地强降水中尺度系统特征的分析[J]. 气候与环境研究, 18 (1): 1-11, doi: 10.3878/j.issn.1006-9585.2012.10159. Yu Fei, Zhao Sixiong. 2013. Mesoscale analysis of a local extreme precipitation event in Wuhan area during poor Meiyu season [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 18 (1): 1-11.

武汉地区少梅年一次局地强降水中尺度系统特征的分析

于翊^{1,2} 赵思雄¹

1 中国科学院大气物理研究所, 北京 100029

2 中国科学院大学, 北京 100049

摘 要 2000 年以来长江流域未见到很典型的梅雨暴雨, 尽管如此, 所谓“不典型”的区域性致洪暴雨仍时有发生, 甚至造成严重洪涝。利用 NCEP 资料、常规和 SCHeREX 计划期间的 6 h 一次的高空探测资料和大量的地面自动站资料、多普勒雷达、FY-2C 卫星黑体温度资料及 NOAA 的 CMORPH 资料, 分析了 2009 年 6 月 29 日 00:00 (协调世界时, 下同) 至 30 日 00:00 引发武汉严重洪涝的强降水。结果表明, 尽管中高纬环流和槽脊系统有“错位”现象, 但东亚地区鞍形场的存在有利于高原东侧中尺度低压(扰动)的发生发展。随着高原槽东移和西太平洋副热带高压突然西伸, 在四川—重庆地区诱生出中尺度涡旋及明显的低空急流, 同时上层冷干、下层暖湿空气叠置而形成较强的位势不稳定层结, 在低层辐合场的触发下, 使致洪暴雨得以发生。该年有较好的水汽输送条件, 主要源地在南中国海。因此, 即使在大尺度环流不是非常“典型”的情况下, 一旦武汉地区存在有利的天气尺度和中尺度系统, 且有足够的水汽供应, 暴雨仍有可能发生。

关键词 暴雨 中尺度系统 融合降水资料 城市气象灾害

文章编号 1006-9585 (2013) 01-0001-11

中图分类号 P458

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2012.10159

Mesoscale Analysis of a Local Extreme Precipitation Event in Wuhan Area during Poor Meiyu Season

YU Fei^{1,2} and ZHAO Sixiong¹

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

2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049

Abstract Since 2000, the main Meiyu front rainband moved northward to the Huaihe River basin. The poor or no Meiyu occurred in the Yangtze River very often, due to the anomaly of the atmospheric circulation. However, in poor Meiyu season, a heavy rainfall still occurred in Wuhan area during 0000 UTC 29 June–0000 UTC 30 June 2009. The mentioned above case is diagnosed by using NCEP data, operational observation from China Meteorological Administration, four times per day SCHeREX sounding, automatic weather stations data, radar data, FY-2C Black Body Temperature (TBB), and CMORPH data. It is noticed that the Baikal trough as cold air source favorable the heavy rainfall occurrence has been replaced by the ridge. However, the other favorable factors still benefit the precipitation. They have been noticed that: 1) Existence of col pressure field in East Asia provided the important condition for

收稿时间 2010-12-25 收到, 2012-08-02 收到修定稿

资助项目 国家科技部重点基础研究发展计划项目 2009CB421401, 国家自然科学基金项目 40930951

作者简介 于翊, 男, 1983 年出生, 博士, 主要从事灾害性天气机理、中小尺度动力学与数值模拟的研究。E-mail: yuf@cma.gov.cn

通讯作者 赵思雄, E-mail: zhaosx@mail.iap.ac.cn

formation of mesoscale disturbance to the eastern part of the Tibetan Plateau. 2) Eastward shifting trough from the Tibetan Plateau intensified the vertical motion in the middle reaches of the Yangtze River and a meso low formed between Chongqing City and Hubei Province which was very helpful for heavy rainfall in Wuhan. 3) Westward extending of the West Pacific Subtropical High forced the low level jet to intensify in Jiangxi and Hunan provinces and Low Level Jet (LLJ) transported very rich moisture to the Wuhan area. 4) Overlaying of the cold and dry in upper troposphere on the warm and moist in low troposphere produced the significant potential instability. High Convective Available Potential Energy (CAPE) value was released and the convection was initiated due to the triggering of the mesoscale disturbance. 5) The small meso- β scale convective systems relating directly with the heavy rainfall in Wuhan have been revealed.

Keywords Heavy rainfall, Mesoscale convective system, CMORPH data, Urban meteorological disaster

1 引言

暴雨是长江流域的重要灾害天气之一。在通常的情况下,将6月中旬至7月上旬的一段称为梅雨期暴雨。武汉地处长江中游,在该期间经常有暴雨发生。对于梅雨,国内外学者已有大量的研究(陶诗言等, 1980; Ninomiya et al., 1988; 丁一汇, 1993; 赵思雄等, 1998, 2004),多数情况下,有一条东西向的梅雨锋分布。然而自2000年以来,特别是在2003年和2007年,汛期主雨带移至淮河流域,长江流域基本上处于少梅或空梅的状态(张庆云等, 2004; 赵思雄等, 2007),但这并不意味着长江流域没有暴雨发生。值得注意的是,有时暴雨还相当强。2009年长江流域的梅雨季比较短促,据湖北省的统计,大体始于6月28日而终于7月7日,前后大约持续了一周多的时间,属于“少梅年”。然而6月29~30日在武汉发生了27年来最强的降水,引发城市严重的内涝,给人民生活 and 交通运输带来了很大不便。而6月29~30日间鹤峰24 h降水量更是达到313 mm,超过了1981年6月26日历史上最大的雨量,创历史新高。因武汉地处江汉平原,可以收集到的资料较为丰富,因此,本文集中对武汉的这场强降水进行了研究。

近年长江“空梅”、少梅,而在2009年基本不出现典型梅雨环流型的情况下,这种强暴雨为何得以发生?其中的科学问题,应深入探讨:1)这次短历时的强降水是在何种环流形势下发生的?2)何种中尺度系统在降水过程中起作用?3)在环流非典型的情况下,其水汽供应是如何进行的?

本次暴雨过程中,环流较为特殊,大的系统亦不明显,因而重点分析和揭示中尺度对流系统的活动。由于中尺度发生发展过程中风场有很好的代表

性,本项研究中对风场尤其是低层的风场做了充分的考虑。另外还结合水汽的分布,计算了低层的水汽通量散度,并利用6 h的加密探空资料,对大气层结的状况做了分析,这是与降水直接有关的两个重要因子。

2 资料及分析方法

本文采用了2008~2009年我国南方暴雨野外科学试验(SCHeREX计划)获得的长江流域的地面加密自动站观测资料和6 h一次时间加密的探空资料、NCEP的再分析资料、NOAA的融合降水数据(CPC Morphing Technique, CMORPH)、FY-2C卫星黑体亮温资料以及多普达雷达组合反射率资料,目的在于进行综合分析,并更好地抓住和确认中尺度对流系统的活动与演变。

CMORPH全球格点降水数据是由NOAA气候预报中心(CPC),利用融合技术所进行的全球降水分析得到的,它有很高的时间和空间分辨率,可达到30 min的时间间隔和0.0727经/纬度的空间间隔。近几年来,该资料融合进了美国国防气象卫星(Defense Meteorological Satellite Program, DMSP)的13、14和15号卫星所搭载的特种微波图像仪(Special Sensor Microwave Imager, SSM/I),NOAA的15、16、17和18号卫星所搭载的先进微波探测器元件-B(Advanced Microwave Sounding Unit-B, AMSU-B),地球观测系统Agua卫星上所搭载的先进微波扫描仪(Advanced Microwave Scanning Radiometer-Earth Observing System, AMSR-E),以及热带测雨卫星(Tropical Rainfall Measuring Mission, TRMM)等所搭载的微波图像仪(TRMM Microwave Imager, TMI)的微波资料所反演的降水。在缺少微波资料时,利用地球静止卫星的高时间分辨率的红

外资料来确定降水的位置,而降水的强度通过插值方法获取。这份资料不但具有同微波资料那样与降水相关程度较高的优点,而且具有和红外资料那样高时间分辨率的特点 (Joyce et al., 2004)。之前国外有学者利用该资料进行过历史降水变率的分析 (Ebert et al., 2007; Tian et al., 2007; Zeweldi and Gebremichael, 2009), 本文将对其用于天气分析中的可能性做些探讨。

3 降水过程及环流特征

2009 年 6 月 29 日 00:00 (协调世界时, 下同) 至 30 日 00:00 武汉出现了大暴雨的过程。武汉 24 h 降水量超过 147 mm, 是自 1982 年 6 月以来最大的日降水量, 是历史同期的第 3 位。从图 1 可见, 此次大暴雨期间主要有两个峰值, 一个集中在 6 月 29 日 00:00 前后, 而另一个出现在 29 日 12:00 至 30 日 00:00 之间, 29 日 16:00 至 22:00 这 6 h 期间, 超过 100 mm。其中每小时雨量多达 15 mm 以上, 甚至 20 mm 以上。如此强的降水给武汉造成了严重的内涝, 由于雨势太急, 排水网管来不及抽排, 全市较严重渍水处多达 260 多处, 积水最深超过 0.5 m, 车辆通行困难。从 30 日早上上班期间开始, 全市呈现交通拥堵, 道路不畅的状况一直持续到 13:00。

一般说来, 每年初夏时节 (6 月下旬至 7 月下旬), 在长江中下游和江淮地区, 常常会出现一条稳定的多雨带, 形成降水非常集中的特殊持续阴雨

天气, 这一时期长江中下游暴雨频繁出现, 这是该地区洪涝灾害最集中的时期。之所以如此, 有其特殊的环流背景, 即在对流层中层 (500 hPa 上), 中高纬地区为双阻型 (阻塞高压出现在乌拉尔山和鄂霍次克海) 或单阻型 (在乌拉尔山或鄂霍次克海出现一个阻塞高压)。无论双阻型或单阻型, 这都有利于环流的稳定维持。与此同时, 在贝加尔湖至西伯利亚一带为低槽区, 这利于北方冷空气南下至江淮流域。上述分布是江淮梅雨典型的环流形势。

然而, 2009 年的情况有显著的不同。首先, 自 2000 年以后梅雨期雨带北移至淮河流域, 长江流域多为少梅或空梅。2009 年入汛以来西太平洋副热带高压较常年偏弱, 西伸脊点较常年偏东, 导致入梅偏迟, 而后副热带高压再次北跳, 出梅又偏早, 整个梅雨期较短。该年长江流域平均降水量较常年同期明显偏少, 我国七大江河均没有一条发生过大的流域性洪涝。干旱少雨与短期的暴雨交替, 是 2009 年的一大特点。可以注意到, 6 月 12~27 日湖北出现持续性高温天气, 27 日武汉达 37.5 °C, 其间 ≥ 35 °C 日数达 8 d, 之后 7 月 6~20 日再现高温。但是两段高温之间的这次短时暴雨, 仍造成了严重的灾害和影响。

2009 年欧亚地区中高纬度未出现典型的梅雨天气形势。200 hPa 上高空急流已明显北推, 主体维持在 40°N 左右, 基本呈东西向平直分布 (如图 2a 所示)。500 hPa 上不是两脊一槽型, 而是两槽一脊型。两个槽中分别有闭合低压, 一个位于蒙古国

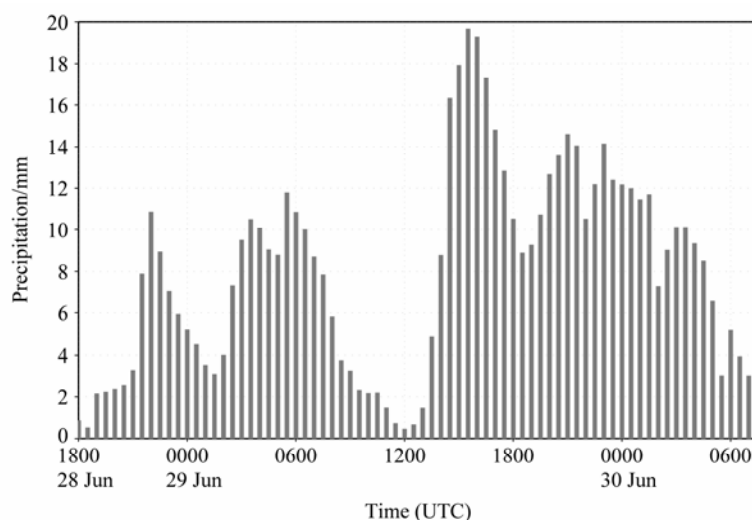


图1 2009年6月28日18:00至30日12:00武汉每小时降水量

Fig. 1 Hourly precipitation amount at Wuhan station during the period from 1800 UTC 28 Jun to 1200 UTC 30 Jun 2009

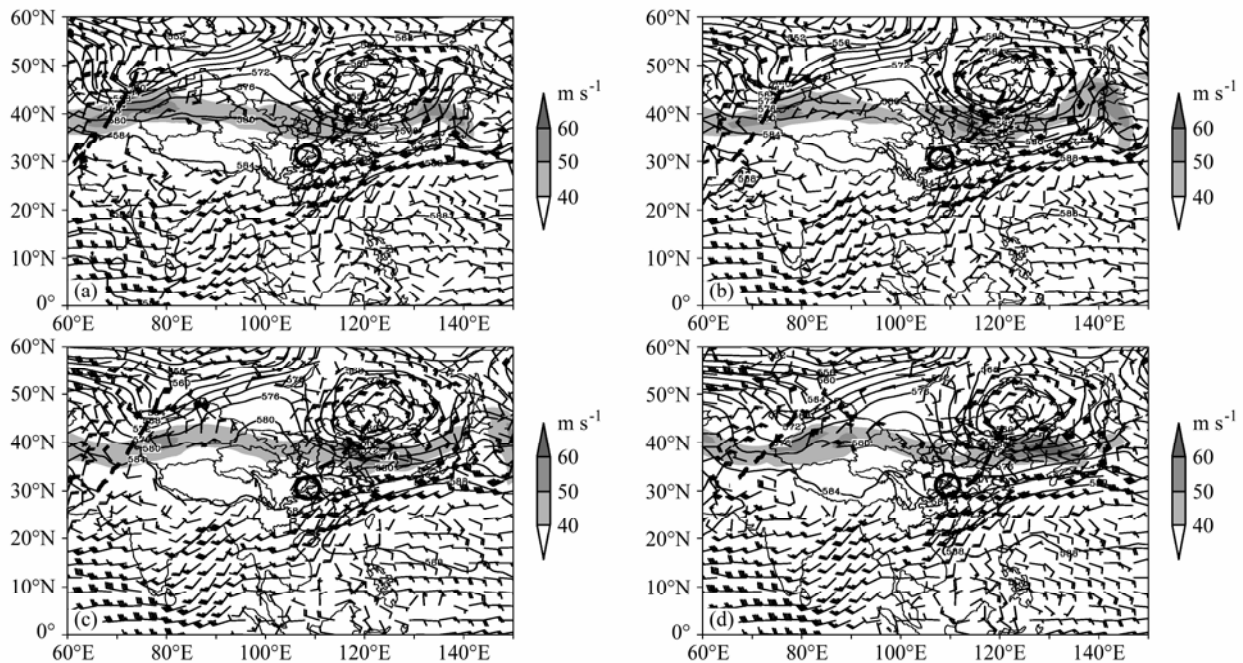


图2 2009年6月29日 (a) 00:00、(b) 06:00、(c) 12:00、(d) 18:00天气形势综合图(阴影为200 hPa高空急流;实线为500 hPa等高线,单位: dagpm;风羽为850 hPa风,长横杠表示风向,一条短横杠代表 $4\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,半条短横杠代表 $2\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$)

Fig. 2 Weather pattern maps of (a) 0000 UTC, (b) 0600 UTC, (c) 1200 UTC, and (d) 1800 UTC on 29 Jun 2009 (shading areas denote upper level jets at 200 hPa; solid lines denote geopotential height isolines at 500 hPa, units: dagpm; bars denote wind at 850 hPa, each short and long barb represents $2\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ and $4\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, respectively)

东部,另一个位于巴尔喀什湖附近。在这两者之间,贝加尔湖为一高压脊,在6月29日00:00,5680 gpm等高线到达贝加尔湖南侧,而到6月30日00:00,5760 gpm线已向北伸至贝加尔湖,表明了该高压脊处于增强的阶段。由于该高压脊的存在,使冷空气难以沿偏北和偏西北路径到达长江流域,因而不利于通常所说的江淮流域梅雨的发生。不过,应注意到该年东北低涡活动频繁。东北低涡对长江流域的降水会有什么影响?一方面,东北低涡频发,表明了环流系统的稳定;另外,东北低涡、副高、大陆高压脊及高原东侧的气压低值区之间在东亚地区形成了明显的鞍形场。在这种大背景下有利于高原东侧扰动的生成。事实表明,邻近青藏高原的扰动非常值得关注。可以见到,在中纬度,一个低槽正沿高原向东移动。6月28日00:00,该槽位于 100°E 附近(图略),而29日00:00,槽已移到 105°E ,尤其值得注意的是在850 hPa风场上在该低槽前出现了气旋性的闭合环流,正好位于四川东部和重庆一带。可以清楚地看到在该涡旋的东南方,华南到湖南—江西一带有较强的西南气流区存在(最大风速为 $16\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$)。而到29日12:00(如图2c所示),西南风的大值区(大于 $15\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$)前沿已达江西,

武汉在其左前方。30日00:00,西南风大值区已进入湖北境内。尽管此时闭合涡旋已不明显,但低空急流增强的趋势仍清楚可见。这支低空急流的增强,与副热带高压的西伸有很明显的关系。6月29日00:00,500 hPa上5880 gpm线还在福建沿海,而30日00:00,已伸入大陆,到达福建和广东两省。副热带高压西伸正好与高原槽的东移不期而遇,低空急流的加强可能因上述两系统相对位置的变化,由动力因素的强迫所致。

从以上分析可以看出,与以往造成长江中下游流域持续性强降水的环流特征(张顺利等,2002)相比有所不同,此次降水过程中,中高纬度冷空气影响较弱。造成武汉地区局地强降水的直接影响系统可能是中尺度的涡旋(及其东侧的切变线)。这类中尺度涡旋与传统的温带气旋有很大不同(Palmén and Newton, 1969; 赵琳娜和赵思雄, 2004),未见到有很明显的锋面,而风场上的特征比气压场的特征更清楚。这类涡旋多见于长江中上游,甚至出现在四川东部和重庆,但又不是传统意义上的西南涡,因为它们的发生源地不同(陈忠明等, 2004)。人们已经注意到在三峡地区附近常有涡旋生成,因此,对于这类涡旋要做具体的分析。

由于其生成在四川、重庆、湖北边界附近, 与长江最薄弱的荆江段以及位于江汉平原的武汉距离近, 预报时效短, 因而, 需要特别地关注。

4 中尺度对流云团的特征及演变

已有的研究(孙建华等, 2004; 张小玲等, 2004)表明, 中尺度对流系统(Mesoscale Convective System, MCS)是梅雨锋暴雨的直接制造者, 中尺度涡旋(扰动)是影响梅雨锋暴雨的主要中尺度系统, 中尺度涡旋与中尺度对流系统的发生发展有着密切的关系。已经注意到梅雨锋上反复发生的暴雨过程多与梅雨锋和中低层切变线上自西向东相继移经长江中下游的低层气旋性涡旋(扰动)有直接关系(赵思雄, 1988; 胡伯威和彭广, 1996)。然而, 在一些情况下, 即使在非典型的梅雨锋降水期, 中尺度涡旋尽管不是反复发生, 但仍是不可忽视的。它们提供的低层辐合场, 可使垂直运动增强, 在有利的水汽环境下, 可使中尺度对流系统发生发展, 从而使暴雨得以形成(赵思雄等, 2007)。

为了更好地了解这些中尺度系统对武汉强降水的影响, 首先看一下多普勒雷达回波的综合反射率(图 3a-d)。整体看来, 武汉(30°35'N, 114°19'E)以西有一强回波区 A_1 , 其沿一条东西分布的云带移

动发展: 00:00 在 113°E 以西, 15:00 移至 113.7°E, 17:00 移至 114.3°E, 17:30 到达 114.4°E。强回波的移动与图 1 中降水峰值出现的时间大体是对应的, 表明在大的低涡切变的背景下, 中尺度的强对流系统对降水有重要贡献。

为了分析中小尺度系统的影响, 本节又对 FY-2C 卫星云图的 1 h 平均的相当黑体亮温 (Black Body Temperature, TBB) 和 1 h 累积降水量进行了分析。如图 1 所示, 28 日武汉出现了第一次雨峰, 本文集中分析 29 日 12:00 后至 30 日 00:00 的第二个雨峰。在 29 日 12:00, 沿 30°N~31°N 纬度带内, 113°E 以西有一片强降水区域, 此时距武汉还有 100 多千米, 而从 TBB 云图上看, 其大值区已偏于强降水区之东侧, 已很接近武汉(图 4a)。至 15:00, 云团 A_2 中 TBB 的最冷云区已达武汉上空(图 4b)。1 h 降水量是表示累积降水量, 而 1 h 平均 TBB 是表示过去 1 h 时段内平均的云顶的黑体温度, 这二者之间的意义严格上讲是存在一些差异的。降水是从云中降落到地面的量, 而 FY-2C 观测到的 TBB 低值区的云中未必都将云水全部降至地面。因此, 降水量和 TBB 既是密切相关, 又不完全是一回事。此后, 即 29 日 17:00, 强降水区与云团 A_2 的 TBB 最冷云区, 均到达武汉上空, 二者非常接近(图 4c)。18:00 后, 降水大值区仍在武汉, 而 TBB 区域已较

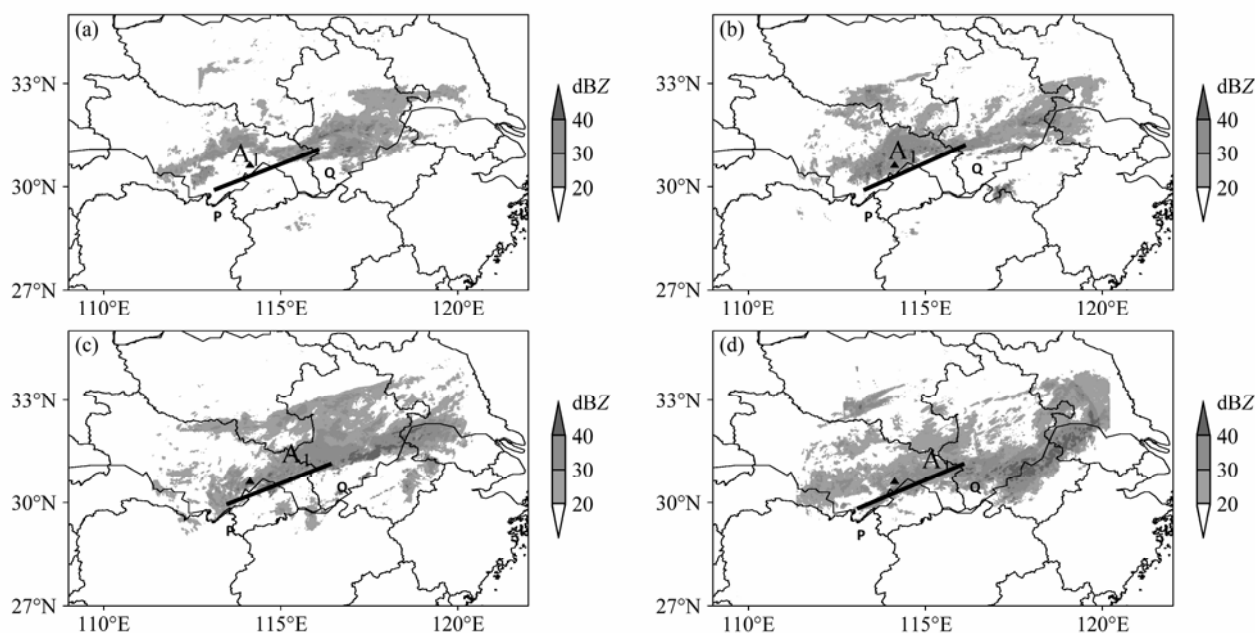


图3 2009年6月29日 (a) 12:00、(b) 15:00、(c) 17:00、(d) 17:30多普勒雷达组合反射率 (A_1 为雷达强回波区的大体位置, $\blacktriangle$ 为武汉探空站位置, P-Q表示强对流系统移过武汉的路径)

Fig. 3 Doppler radar reflectivity at (a) 1200 UTC, (b) 1500 UTC, (c) 1700 UTC, and (d) 1730 UTC on 29 Jun 2009 (A_1 stands for the location of strong echo areas, $\blacktriangle$ is for Wuhan sounding station and P-Q represents the path of the strong convective system passed through Wuhan)

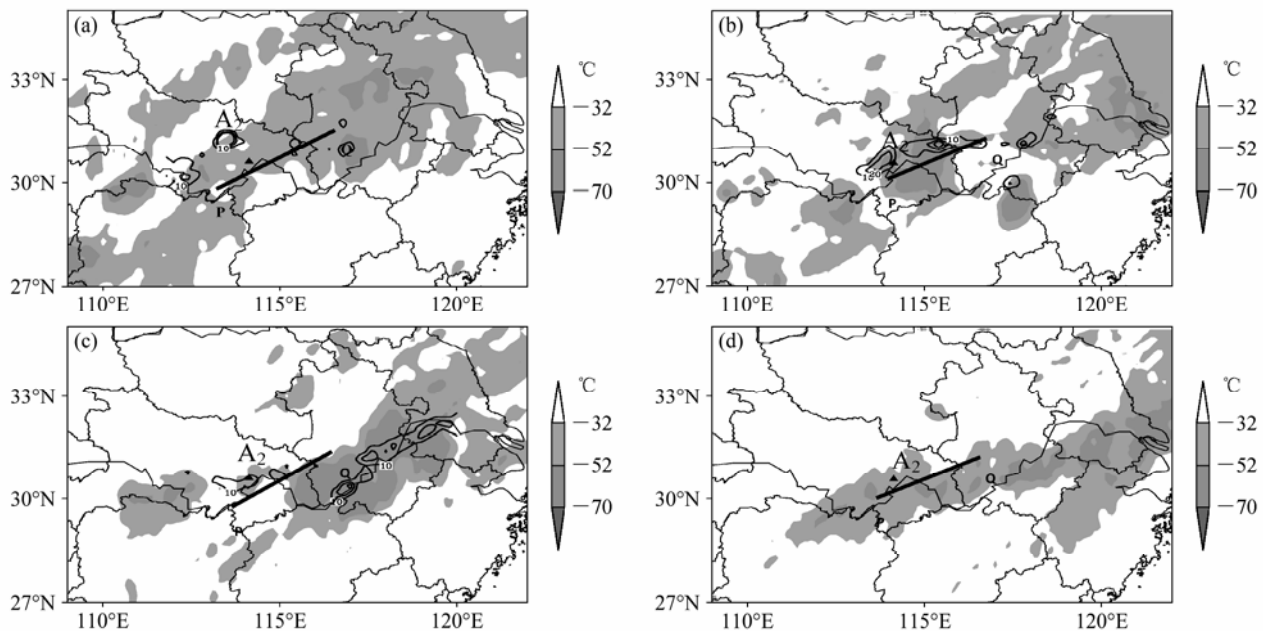


图4 2009年6月29日 (a) 12:00、(b) 15:00、(c) 17:00、(d) 18:00 FY-2C卫星TBB (阴影) 和地面自动站1 h雨量 (实线, 单位: mm) (A_2 为对流云团的大体位置, ▲为武汉探空站位置, P-Q表示强对流系统移过武汉的路径)

Fig. 4 Black body temperature (TBB) retrieval by FY-2C satellite (shadings) and hourly precipitation amount by automatic weather stations (solid lines, units: mm) at (a) 1200 UTC, (b) 1500 UTC, (c) 1700 UTC, and (d) 1800 UTC on 29 Jun 2009 (A_2 stands for the location of clouds, ▲ is for Wuhan sounding station and P-Q represents the path of the strong convective system passed through Wuhan)

快地向东移动。这意味着, 在未来的时期内, 武汉的降水有可能减弱 (图 4d)。从上述资料的细致分析中, 可以看到武汉在 29 日 12:00 至 30 日 00:00 之间, 中尺度对流系统的发生发展、移动演变及降水的过程。

为了进一步地分析和确认中尺度对流系统, 这里尝试使用 CMORPH 资料做些讨论。最近有研究表明通过与雨量计资料对比, CMORPH 资料有可能较好地表征降水的时空分布特征 (Shen et al., 2010)。因此, 本节采用空间分辨率为 0.25° 、时间分辨率为 1 h 的 CMORPH 资料与地面加密自动站 1 h 雨量资料进行了对比, 以探索其用于我国长江流域降水分析的潜力。分析发现, 该 CMORPH 资料在本例中大体可反映雨带的分布特征 (图 5)。尽管严格地讲, A_3 与降水中心位置还有些许偏差, 但它仍能反映出一个中尺度雨团自西向东移经过武汉的过程。

在此基础上还将 CMORPH 降水资料与我国 FY-2C 卫星的 TBB 资料及多普勒雷达的组合反射率资料进行了对比, 均取 $30^\circ\text{N}\sim 31^\circ\text{N}$ 的范围平均, 以覆盖武汉地区。发现其 3 h 平均的资料可明确反映出在 29 日有一条雨带 (即沿 P-Q 走向) 维持在

武汉附近。另外, 注意到, 尽管 30 min 平均和 3 h 平均的 CMORPH 资料 (为便于比较, 经换算二者统一采用 $\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 为单位) 均可反映引发武汉强降水中尺度系统的特征, 但前者的结构更为细致, 甚至强中心也更为明显。若用图 6c 和 6d 中的卫星与雷达资料来比较, 其带状的 TBB 低温区及带状的雷达强回波区, 均与图 6a 和 6b 中 P-Q 的走向较一致。由此, 可以认为 CMORPH 资料在暴雨天气分析中, 可能有一定的参考价值。当然, 这还需要更多的暴雨个例来进一步证实。特别要注意到, 云中的水未必全都可到达地面, 而成为真实观测到的降水量。同时, 由于雨滴在降落过程中尚存在蒸发等现象, 对除暴雨之外的一般降水, 即相对较弱的降水, CMORPH 资料的适用程度如何? 尚需做更多的分析与研究。

通过上述资料显示出, 此次武汉地区的强降水过程, 与以往揭示的西南涡东移产生的暴雨、梅雨锋上 β 中尺度对流性暴雨、梅雨锋东部 (115°E 以东) 的初生气旋暴雨和梅雨锋西段深厚高空低压槽前部的持续性强暴雨等长江流域梅雨暴雨类型 (高坤和徐亚梅, 2001; 孙建华等, 2004; 张小玲等, 2004) 不同。本研究中, 其直接降水系统是四

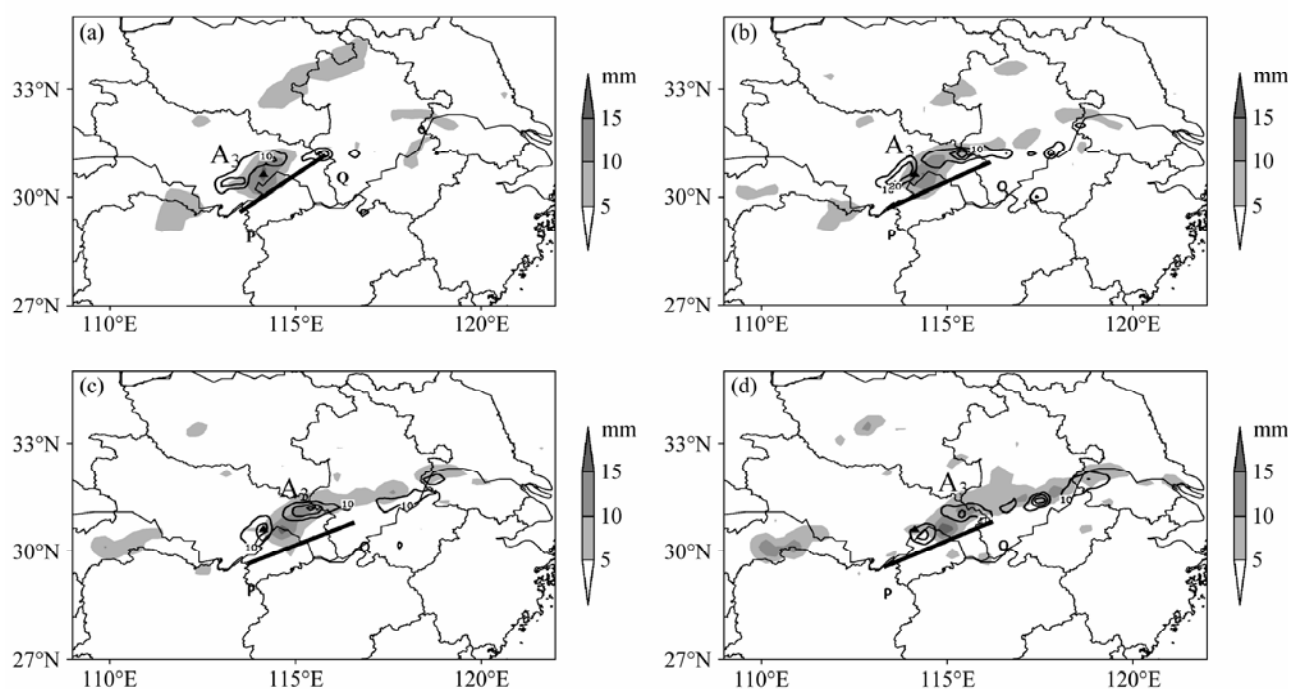


图5 2009年6月29日 (a) 14:00、(b) 16:00、(c) 19:00、(d) 23:00 CMORPH降水量 (阴影) 和自动站1 h雨量 (实线, 单位: mm) (▲为武汉探空站位置, P-Q表示强对流系统移过武汉的路径)

Fig. 5 Precipitation amount by CMORPH (shadings) and hourly precipitation amount by automatic weather stations (solid lines, units: mm) at (a) 1400 UTC, (b) 1600 UTC, (c) 1900 UTC, and (d) 2300 UTC on 29 Jun 2009 (▲ is for Wuhan sounding station and P-Q represents the path of the strong convective system passed through Wuhan)

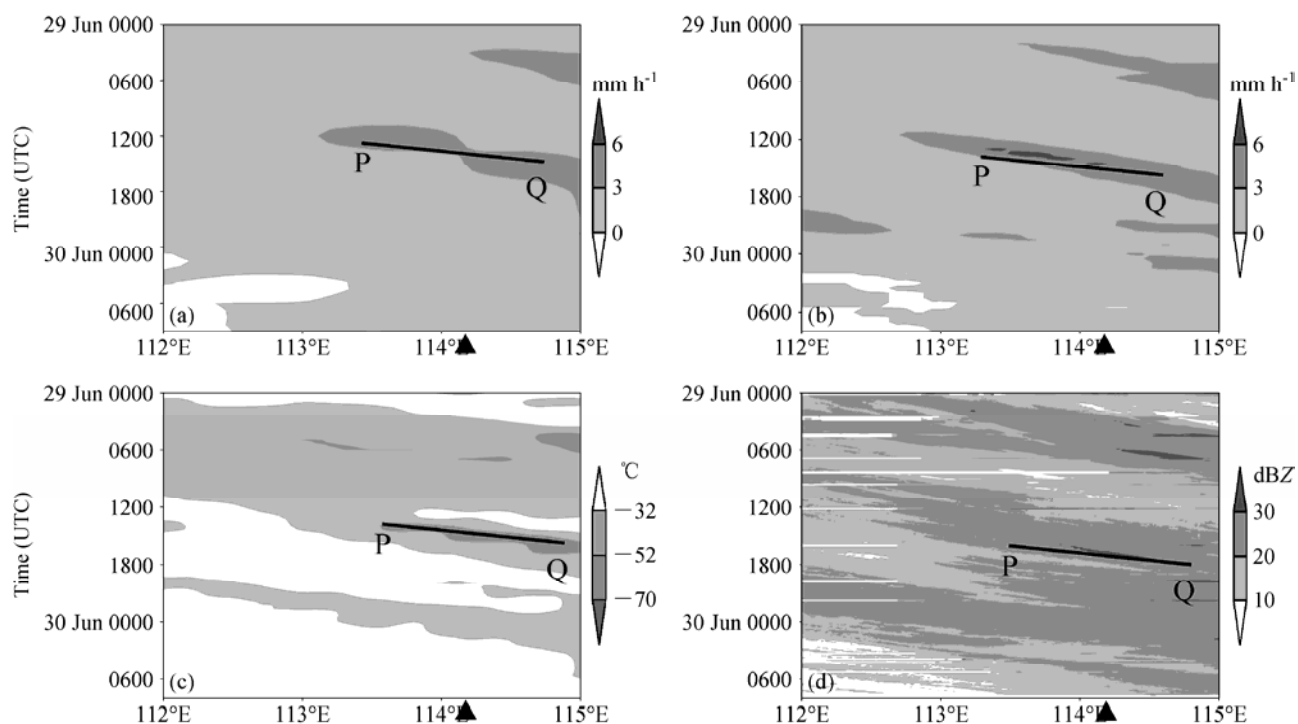


图6 30°N~31°N范围平均的 (a) CMORPH 3 h和 (b) CMORPH 30 min平均降水率、(c) FY-2C卫星TBB、(d) 多普勒雷达组合反射率 (▲为武汉探空站位置, P-Q表示强对流系统移过武汉的路径)

Fig. 6 CMORPH average (a) 3-h and (b) 30-min precipitation rate, (c) TBB retrieval by FY-2C satellite, and (d) Doppler radar composite reflectivity (▲ is for Wuhan sounding station and P-Q represents the path of the strong convective system passed through Wuhan)

川—重庆地区生成并向东移动的 β 中尺度涡旋，此涡旋尺度较小，在武汉地区有局地性的发展增强。可见，在鞍形场背景下，也可能触发中尺度涡旋，并引发暴雨。

5 水汽供应与潜势不稳定状况分析

已经知道，强烈暴雨的发生是多种尺度系统及其相互作用的结果。上述研究已指出，鞍形场有利于中尺度扰动的生成，又由特殊观测资料揭示了中尺度对流系统的发生发展。但这些系统所处环境的热力和动力条件如何？为此本节对这些强降水过程的水汽供应和层结状况作了分析。水汽供应是一个关键的因子。在少梅年，即以干旱为背景之年，长江流域为何还有强降水发生？为此，需要对 2009 年 6 月 28~29 日期间的水汽供应情况——主要是水汽的集中能力，而不仅是水汽的通过能力做一分析，因此对水汽通量和水汽通量散度进行了计算。由于水汽主要集中于对流层低层，从图 7 上可以看出，29 日 00:00 开始，武汉周边间断出现较强的水汽辐合大值区，其中 00:00 至 06:00 期间出现的水汽辐合对应于第一次降水高峰，12:00 之后水汽辐合又进一步增强，这对应了造成武汉暴雨的另一个

降水高峰。这表明，大范围的环流形势对于梅雨锋和持续性的强降水的维持不利。特别是 2009 年印度季风爆发虽然偏早，但强度偏弱，向北推进缓慢，这无疑会使梅雨期雨量偏少。但对于 2009 年 6 月 29~30 日这样的区域性突发强降水，中尺度涡旋的动力作用及必要的水汽供应是足以保证其发生、发展的。从图 7 上可以看到，此次强降水过程的确有明显的水汽输送，主要的水汽源区是南中国海等地。

除水汽条件外，垂直方向上的抬升作用亦非常重要。为此，又对武汉站 6 h 一次时间加密的探空曲线和一些物理参数进行了分析计算，包括对流有效位能 (Convective Available Potential Energy, CAPE) 等 (图 8)。可以看到，从 28 日以后武汉整层增湿，这可能是对流输送所致。CAPE 在 20 日 06:00 为 $1242 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$ ，已达到可能发生较强对流的潜势不稳定的程度，至 29 日 00:00 开始明显减少，达到只有 $70 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$ ，而在 12:00 出现强降水，表明在这之前一段时间已有明显的对流混合出现，CAPE 的减少不是对流发生的原因，而正是对流混合导致的结果。可以知道，在武汉地区环境的热力动力状况的确非常有利于强对流的发生及暴雨的出现。

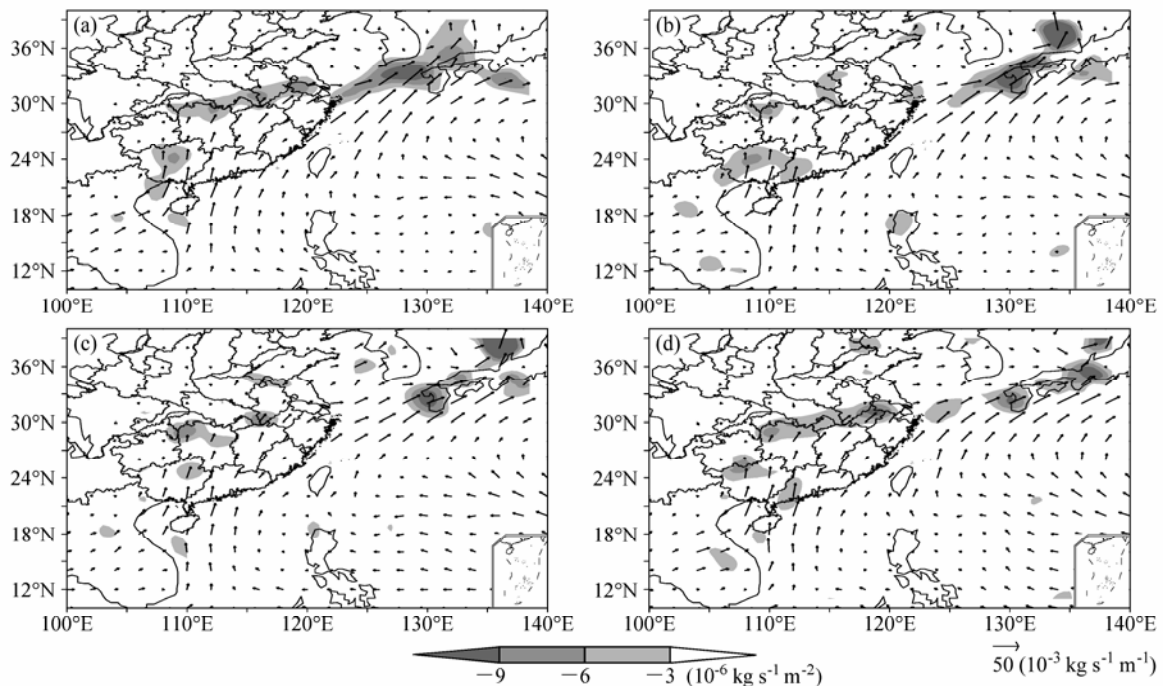


图7 2009年6月29日 (a) 00:00、(b) 06:00、(c) 12:00、(d) 18:00地面至850 hPa积分水汽通量(箭头)和水汽通量散度(阴影)

Fig. 7 Integral moisture flux (vector) and convergence of integral moisture fluxes (shadings) from surface to 850 hPa at (a) 0000 UTC, (b) 0600 UTC, (c) 1200 UTC, and (d) 1800 UTC on 29 Jun 2009

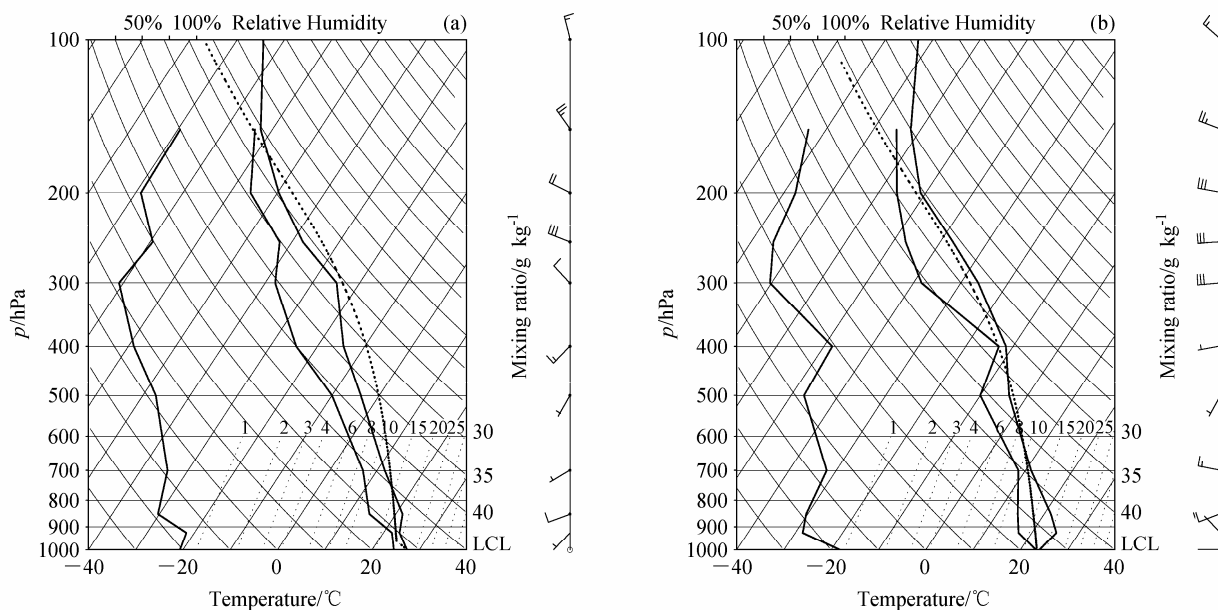


图8 2009年6月(a)28日06:00和(b)29日00:00武汉站6h加密的探空曲线

Fig. 8 Upper air sounding profiles at Wuhan station in 6-h interval at (a) 0600 UTC 28 Jun and (b) 0000 UTC 29 Jun 2009

6 结论与讨论

本文对2009年6月29~30日一次引发武汉严重城市内涝的区域性强降水进行了分析,并初步揭示了在长江流域“少梅年”的大背景下,该次强降水发生的原因:

(1) 进入21世纪后,夏季梅雨雨带主要偏向淮河流域,并在一些年引发了淮河流域的洪涝灾害。这是因为大的环流形势出现了调整。在此期间,长江流域出现的梅雨期降水的环流型不够典型,甚至根本就没有像样的带状梅雨锋区存在(张立生等,2007)。2009年即属于“不典型”的降水之类,特别是在500 hPa高度场上中高纬度通常在贝加尔湖的槽区,反而成为了脊区,出现了明显的“错位”,不利于冷空气的大量向南输送。但由于东北冷涡的频发和稳定维持,东亚地区存在明显的鞍形场,这种大背景下有利于高原东移扰动的发展,对本例中四川—重庆—湖北交界区中尺度涡旋的发生发展很有利,仍然引发了武汉地区的强降水。夏季长江流域的强降水,从致灾的角度可分为持续性大范围的梅雨期降水与突发性或区域性的强降水两大类。2009年6月29~30日武汉地区的强降水应属于后者。即使是区域性的,但对其带来的严重后果仍不可低估,尤其是在城市化快速发展的今天,对这类

灾害系统引发的城市气象灾害进行研究很有必要。

(2) 副热带系统的活动是一个很重要的因素。在6月28~30日期间,在500 hPa高原槽东移的同时,西太平洋副热带高压西伸,东西方向上两个系统相互靠拢,致使长江流域暖性切变加强,并在川渝地区生成闭合涡旋。该涡旋尺度较小,不但与温带气旋有差异,而且与长江中下游的中尺度涡旋比较要弱一些。这类中尺度涡旋是暴雨的直接影响系统,尤其是在宜昌、武汉等中游区段。

(3) 在中尺度涡旋及其东侧的切变线上,有一些中尺度对流系统发生发展,多普勒雷达、FY-2C卫星TBB及1 h降水资料可以确认它们的存在及活动。为了更好地分析这些系统,本文还使用了CMORPH资料。从分析知道,这类中尺度系统,多属于 β 中尺度的范围,即使在少梅年,这些 β 中尺度系统仍有发生的可能。就中尺度而言,在区域或局地的条件有利时即可发生,它不仅仅是丰梅年,诸如1998年等年份(贝耐芳和赵思雄,2002)所独有的特点。本文还使用了CMORPH资料,获得了一些结果。该资料在暴雨分析中,到底可用到何种程度,尚需作更多的检验。

(4) 低空急流的加强是中纬度和副热带区域的环流调整所致。低空急流在本例中有明显的贡献,它使大量水汽被输送到长江流域。在少梅年这种比较“干燥”的背景下,水汽供应是一个重要问题。

由分析资料得知,水汽主要来源于南中国海。低层暖湿和上层冷干的层结结构,是一种很强的位势不稳定环境。加之,6 h 一次时间加密的探空资料揭示,CAPE 显著偏大,一旦被触发(如低层辐合扰动之类)即可能引发强烈的降水。

上述不“典型”环流背景下的梅雨,仍有可能引发区域性的严重洪涝灾害。它涉及到一系列的难题,诸如副热带高压突然的西伸以及中尺度低压发生发展,尤其是高原东侧扰动的生成等问题,这些都需要进一步关注并做深入的讨论 (Takahashi, 2003)。另外,这次过程中鹤峰的强降水已超过了武汉,由于其地处湖北西部山区,资料所限,尚未做更多的涉及。今后,更应注意收集武汉上游方面更多资料信息,以便对三峡库区和江汉平原等工农业发达区域的中尺度系统有更多的了解,从而对预报的改进提供有益的帮助。

参考文献 (References)

- 贝耐芳, 赵思雄. 2002. 1998 年“二度梅”期间突发强暴雨系统的中尺度分析 [J]. 大气科学, 26 (4): 526–540. Bei Naifang, Zhao Sixiong. 2002. Mesoscale analysis of severe local heavy rainfall during the second stage of the 1998 Meiyu season [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 26 (4): 526–540.
- 陈忠明, 闵文彬, 崔春光. 2004. 西南低涡研究的一些新进展 [J]. 高原气象, 23 (S1): 1–5. Chen Zhongming, Min Wenbin, Cui Chunguang. 2004. New advances in southwest China vortex research [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 23 (S1): 1–5.
- 丁一汇. 1993. 1991 年江淮流域持续性特大暴雨研究 [M]. 北京: 气象出版社, 1–255. Ding Yihui. 1993. Study of Strong Heavy Rainfall in Yangtze-Huaihe River in 1991 [M] (in Chinese). Beijing: China Meteorological Press, 1–255.
- Ebert E E, Janowiak J E, Kidd C. 2007. Comparison of near-real-time precipitation estimates from satellite observations and numerical models [J]. Bull. Amer. Meteor. Soc., 88: 47–64.
- 高坤, 徐亚梅. 2001. 1999 年 6 月下旬长江中下游梅雨锋低涡扰动的结构研究 [J]. 大气科学, 25 (6): 740–756. Gao Kun, Xu Yamei. 1999. A simulation study of structure of mesovortexes along Meiyu front during 22–30 June 1999 [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 25 (6): 740–756.
- 胡伯威, 彭广. 1996. 暖切变型江淮梅雨锋结构及其形成和维持机制 [J]. 大气科学, 20 (4): 463–472. Hu Bowei, Peng Guang. 1996. The structure of the warm shear-line type Jianghuai Meiyu front and the mechanism of its formation and maintenance [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 20 (4): 463–472.
- Joyce R J, Janowiak J E, Arkin P A, et al. 2004. CMORPH: A method that produces global precipitation estimates from passive microwave and infrared data at high spatial and temporal resolution [J]. Journal of Hydrometeorology, 5 (3): 487–503.
- Ninomiya K, Akiyama T, Ikawa M. 1988. Evolution and fine structure of a long-lived meso- α -scale convective system in a Baiu front zone. Part I: Evolution and meso- β -scale characteristics [J]. J. Meteor. Soc. Japan, 66: 331–350.
- Palmén E, Newton C W. 1969. Atmospheric Circulation Systems: Their Structure and Physical Interpretation [M]. New York: Elsevier, 1–603.
- Shen Y, Xiong A Y, Wang Y, et al. 2010. Performance of high-resolution satellite precipitation products over China [J]. J. Geophys. Res., 115: D02114, doi: 10.1029/2009JD012097.
- 孙建华, 张小玲, 齐琳琳, 等. 2004. 2002 年中国暴雨试验期间一次低涡切变上发生发展的中尺度对流系统研究 [J]. 大气科学, 28 (5): 675–691. Sun Jianhua, Zhang Xiaoling, Qi Linlin, et al. 2004. A study of vortex and its mesoscale convective system during China Heavy Rainfall Experiment and Study in 2002 [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 28 (5): 675–691.
- Takahashi H. 2003. Observational study on the initial formation process of the Mei-yu frontal disturbance in the eastern foot of the Tibetan Plateau in middle-late June 1992 [J]. Journal of the Meteorological Society of Japan, 81 (6): 1303–1327.
- 陶诗言等. 1980. 中国之暴雨 [M]. 北京: 科学出版社, 1–225. Tao Shiyun, et al. 1980. Rainstorm in China [M] (in Chinese). Beijing: Science Press, 1–225.
- Tian Y D, Peters-Lidard C D, Chaudhury B J, et al. 2007. Multitemporal analysis of TRMM-based satellite precipitation products for land data assimilation applications [J]. Journal of Hydrometeorology, 8: 1165–1183.
- Zeweldi D A, Gebremichael M. 2009. Evaluation of CMORPH precipitation products at fine space-time scales [J]. Journal of Hydrometeorology, 10: 300–307.
- 张立生, 孙建华, 赵思雄, 等. 2007. 长江中游暖切变型暴雨的分析研究 [J]. 气候与环境研究, 12 (2): 165–180. Zhang Lisheng, Sun Jianhua, Zhao Sixiong, et al. 2007. A study on heavy rainfall associated with warm shear line in the middle reaches of the Yangtze River in summer [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 12 (2): 165–180.
- 张庆云, 王会军, 林朝晖, 等. 2004. 中国天气气候异常成因研究 [M]. 北京: 气象出版社, 1–179. Zhang Qingyun, Wang Huijun, Lin Zhaohui, et al. 2004. Study on the Genesis of Anomal Weather and Climate in China [M] (in Chinese). Beijing: China Meteorological Press, 1–179.
- 张顺利, 陶诗言, 张庆云, 等. 2002. 长江中下游致洪暴雨的多尺度条件 [J]. 科学通报, 47 (6): 467–473. Zhang Shunli, Tao Shiyun, Zhang Qingyun, et al. 2002. Multiple scale conditions for flood producing heavy rainfall in the middle and lower reaches of Changjiang River [J]. Chinese Science Bulletin (in Chinese), 47 (6): 467–473.
- 张小玲, 陶诗言, 张顺利. 2004. 梅雨锋上的三类暴雨 [J]. 大气科学, 28 (2): 187–205. Zhang Xiaoling, Tao Shiyun, Zhang Shunli. 2004. Three types of heavy rainstorms associated with the Meiyu front [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 28 (2): 187–205.
- 赵琳娜, 赵思雄. 2004. 一次引发华北和北京沙尘暴天气的快速发展气旋的诊断研究 [J]. 大气科学, 28 (5): 722–735. Zhao Linna, Zhao Sixiong. 2004. A diagnostic study of rapid developing cyclone in North

- China [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 28 (5): 722–735.
- 赵思雄. 1988. 梅雨锋上扰动发生发展的能量分析 [J]. 大气科学, 12 (特刊): 503–510. Zhao Sixiong. 1988. Energetics of cyclogenesis on Meiyu (Baiu) front [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 12 (s1): 503–510.
- 赵思雄, 孙建华, 陈红, 等. 1998. 1998 年 7 月长江流域特大洪水期间暴雨特征的分析研究 [J]. 气候与环境研究, 3 (4): 368–381. Zhao Sixiong, Sun Jianhua, Chen Hong, et al. 1998. Study of heavy rainfall in the Changjiang River during July 1998 [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 3 (4): 368–381.
- 赵思雄, 陶祖钰, 孙建华, 等. 2004. 长江流域梅雨锋暴雨机理的分析研究 [M]. 北京: 气象出版社, 1–281. Zhao Sixiong, Tao Zuyu, Sun Jianhua, et al. 2004. Study on Mechanism of Formation of Development of Heavy Rainfall on Meiyu Front in Yangtze River [M] (in Chinese). Beijing: China Meteorological Press, 1–281.
- 赵思雄, 张立生, 孙建华. 2007. 2007 年淮河流域致洪暴雨及其中尺度系统特征的分析 [J]. 气候与环境研究, 12 (6): 713–727. Zhao Sixiong, Zhang Lisheng, Sun Jianhua. 2007. Study of heavy rainfall and related mesoscale systems causing severe flood in Huaihe River basin during summer 2007 [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 12 (6): 713–727.