

梁卫, 吴俊杰, 段炼. 2018. 2011 年梅雨期长江中下游地区两次暴雨过程数值模拟对比分析[J]. 气象与减灾研究, 41(2): 97-104.

Liang Wei, Wu Junjie, Duan Lian. 2018. Numerical simulation and comparison of two rainstorms in the Middle and Lower Reaches of the Yangtze River during Meiyu period in 2011[J]. Meteorology and Disaster Reduction Research, 41(2): 97-104.

2011 年梅雨期长江中下游地区 两次暴雨过程数值模拟对比分析

梁 卫¹, 吴俊杰², 段 炼²

1. 中国民用航空华东地区空中交通管理局江西分局 气象台, 江西 南昌 330114
2. 中国民用航空飞行学院, 四川 德阳 618307

摘 要: 基于 WRF 数值预报模式, 对 2011 年梅雨期 6 月 9—10 日和 14—15 日长江中下游地区两次暴雨过程(分别简称“6·10”过程和“6·14”过程)进行数值模拟, 重点对比分析了暴雨期间西南涡的活动与高低空急流耦合配置之间的关系。结果表明: 1) 西南涡的活动和高低空急流耦合配置与暴雨活动关系密切, 是造成两次暴雨过程范围和强度差异的重要因素。2) “6·10”过程中, 一个浅薄的西南涡系统受青藏高原浅槽东移北缩减弱影响, 向东北方向移动, 同时西南低空急流位置偏北, 导致暴雨区位置偏北; “6·14”过程中, 一个深厚的西南涡系统受高空浅槽东移发展加深影响, 沿长江缓慢东移, 伴随西南低空急流位置偏南, 降水缓慢向东移动, 导致暴雨区位置偏南。3) 两次过程的强降水中心均位于高低空急流耦合区, “6·10”过程中, 在长江中下游地区形成的高低空急流耦合区范围偏小且强度偏弱, 因此辐合上升运动偏弱, 不利于形成大范围的强降水; “6·14”过程中, 在长江下游地区形成大范围高低空急流耦合的环流形势, 强烈的辐合上升运动配合充足的水汽供应, 最终形成大范围强降水。

关键词: 梅雨期暴雨, 西南涡, 高低空急流, 数值模拟

中图分类号: P458.1⁺ 21.1

文献标识码: A

文章编号: 1007-9033(2018)02-0097-08

doi: 10.12013/qxyjzjy2018-014

Numerical Simulation and Comparison of Two Rainstorms in the Middle and Lower Reaches of the Yangtze River during Meiyu Period in 2011

Liang Wei¹, Wu Junjie², Duan Lian²

1. Meteorological observatory, Jiangxi Air Traffic Management Bureau, Nanchang 330114, China

2. Civil Aviation Flight University of China, Deyang 618307, China

Abstract: Based on WRF numerical model, two rainstorms occurred during 2011 Meiyu period were simulated. Comparative analysis of their circulation and physical fields showed that: 1) The movement of southwest vortex and the coupling of two jets at upper and lower levels were closely related to the rainstorms, which mainly caused the differences between two rainfalls. 2) For the process of “6·10”, a flimsy southwest vortex system moved towards northeast as the weakened trough of Plateau moved eastward, and both of the southwest jet stream at lower level and the rainfall occurred at north; for the process of “6·14”, a deep southwest vortex moved slowly along the Yangtze river valley as the enhanced trough moved eastward, and both of the jet stream at lower level and the rainfall were located in the south. 3) The strong precipitation centers of two proces-

收稿日期: 2017-09-26; 修订日期: 2018-02-05.

基金项目: 中国民用航空飞行学院重点项目(编号: ZJ2014-02); 民航空管科技项目(编号: 0121702).

作者简介: 梁 卫, 硕士, 工程师, 主要从事航空气象预报研究, E-mail: 332308254@qq.com.

吴俊杰(通信作者), 博士, 副教授, 主要从事航空气象研究, E-mail: sysu_126@126.com.

ses were in the coupling areas of jet streams at upper and lower levels. The range and intensity of the coupling area of "6·10" was smaller and weaker, thus the convergence ascending motion was also weaker, which could not cause heavy rain. On the contrary, during the process of "6·14", the coupling area coverage of jet streams along the Yangtze River valley was larger, and the strong convergence ascending motion provided plenty of moisture, leading to the wide range and heavy rain.

Key words: Meiyu rainfall; southwest vortex; jet streams at upper and lower levels; numerical simulation

0 引言

梅雨期暴雨是我国长江中下游地区和日本等地初夏常见和影响广泛的一种重要灾害性天气,它主宰了上述地区的旱涝情况。研究(王作述,1986;余贞寿,2012)表明,在长江中下游地区梅雨期重大暴雨天气过程中,西南低涡扮演了重要的角色,其引起的暴雨天气的强度、频数和范围仅次于台风及其残留低压。已有较多的研究分析了西南涡对我国暴雨的影响,如韦统健等(1996)研究发现,对流层中低层有两支不同性质的气流流入低涡区,降水区主要发生在低涡移动方向右侧的二象限。西南涡东移诱发的低空急流是引发暴雨的重要中尺度天气系统(周海光和郭富德,2007;李晓容等,2012)。陶诗言(1965)指出,暴雨通常发生在低空急流的左前侧,利用低空急流的位置可进行暴雨预报。Andrew等(2010)研究发现,低空急流的位置、强度和频率的年际变化对极端降水事件的产生有重要影响。早期研究(高守亭和陶诗言,1991)表明,我国暴雨往往发生于高空西南急流右后方,并且高低空急流耦合对长江中下游地区的梅雨期暴雨也存在重要影响(朱乾根等,2001)。寿绍文等(2003)从非地转风方程出发,研究了高空急流与降水的关系,指出高空急流的入口区南侧更有利于强降水的产生。Zhang等(2006)指出,对流层顶西风急流东西向位置和强度变化发生的时段大体对应着长江中下游地区的梅雨期。不少学者(许爱华,2003;金米娜,2009;陈娟,2014)在研究江西暴雨时也发现高低空急流耦合作用对暴雨的形成具有非常重要的作用。

为进一步研究影响长江中下游地区梅雨期暴雨的各系统之间是如何配置的,文中基于WRF的数值模拟和诊断,重点对比分析2011年梅雨期发生在长江中下游地区的两次暴雨过程中西南涡的活动与高低空急流耦合配置之间的关系,以期对梅雨期暴雨预报提供可行依据。

1 暴雨实况与模式资料简介

1.1 暴雨实况

文中使用的实况资料为中国气象局提供的730

站3h一次的地面观测降水数据以及每日2次(00、12时)的高空气象观测数据。

2011年6月9日00时(UTC,下同)850hPa高度层上(图略),四川盆地南部有一个西南涡随高原低槽东移出川后,沿切变线快速东移影响长江中下游地区。9日12时—10日12时,长江中下游地区出现暴雨和强雷暴天气(简称"6·10"过程),雨区呈现西南—东北向分布,其中日雨量超过50mm的有67站,超过100mm的有14站,超过200mm的有1站(雨量达256mm),最大降水中心位于江西省西北地区和湖北省东南地区。

6月13日12时,500hPa高度层上四川盆地南部再次出现西南低涡,于14日白天沿切变东移。14日06时—15日06时长江中下游地区普降暴雨(简称"6·14"过程),多站大暴雨,局地特大暴雨,雨区呈西南西—东北东方向分布,其中日雨量超过50mm的有131站,超过100mm的有42站,超过200mm的有2站(263mm和264mm)。强降水区主要分布在长江中下游南侧,呈东西向分布,强降水中心位于江西省东北地区,其中德兴站过程累积降水达323.1mm,打破了当地建站以来日雨量的历史记录。与"6·10"过程相比,"6·14"过程的暴雨范围偏大且强度偏强。

1.2 模式资料简介

文中使用NCEP/NCAR $1^\circ \times 1^\circ$ 每日4次的再分析资料,运用中尺度非静力模式WRF 3.0(Skamarock,2005)对2011年"6·10"和"6·14"两次暴雨过程进行数值模拟。WRF模式是由美国多单位联合研制的新一代细网格中尺度模式,文中模式采用粗细嵌套网格方案,粗细网格水平分辨率分别为60km和20km,以(28.5°N,116°E)为中心,格点数分别为 50×70 和 70×91 ,每3h和1h分别输出一。模式中采用云辐射和混合冰相显式水汽方案等非绝热物理过程,粗细网格均采用Kain-Fritsch积云对流参数化方案,侧边界采用张弛逼近边界条件。垂直分层19层,最高层气压为100hPa。"6·10"过程积分起始时间为2011年6月9日06:00,"6·14"过程积分起始时间为2011年6月14日

00:00,两次过程积分步长均为 180 s,积分36 h。

分析“6·10”和“6·14”暴雨过程实况和数值模拟的降水量分布(图 1)可见,降水场实况和模拟结果较为吻合。其中,“6·10”过程降水主要位于长江北侧,中心位置分别位于(110°E,28°N)、(114.8°E,29.5°N)和(118.2°E,31.6°N),中心降水量分别在 200、120 和 90 mm 以上,与实况降水中心相比,两者位置对应非常好,但模拟降水场的降水强度偏强;“6·14”过程中降水沿长江南侧分布,中心位置分别

位于(117.5°E,28.8°N)和(112.5°E,27.5°N),中心降水量分别在 200 和 150 mm 以上,前一中心位置的模拟与实况吻合较好,后一中心位置的降水模拟值偏大。两次暴雨过程中,500 hPa高度场的数值模拟与实况基本一致(图 2),其中“6·10”过程模拟效果更好,而“6·14”过程副热带高压比实况略偏强、偏东,但长江流域的环流形势与实况基本一致。总体而言,WRF 3.0 模式对两次暴雨过程具有很好的模拟能力,说明文中的试验方案可行。

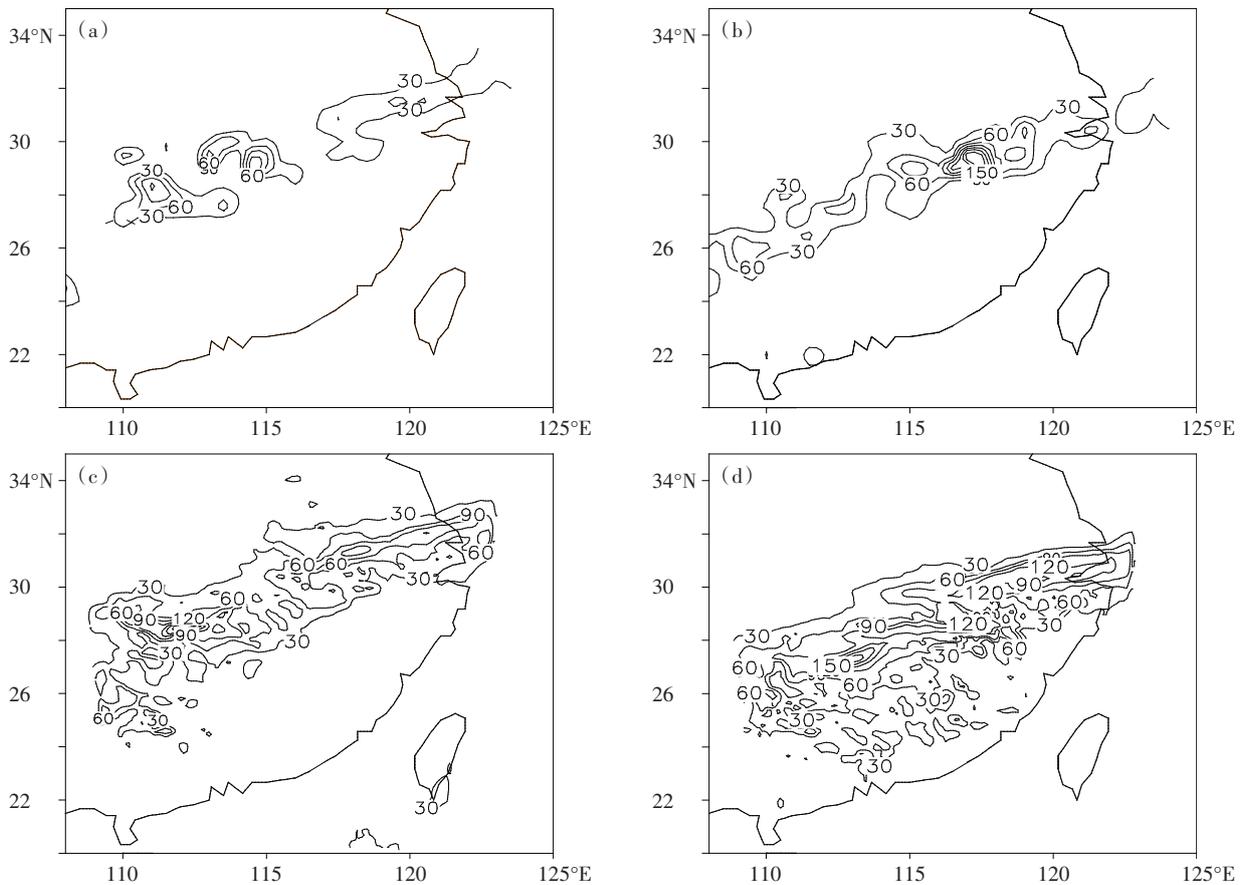


图 1 2011 年 6 月 9 日 12 时—10 日 12 时 UTC(a,c)和 14 日 06 时—15 日 06 时 UTC(b,d)实况(a,b)和数值模拟(c,d)降水量分布(单位:mm)

Fig. 1 Precipitation distributions of observed (a,b) and simulated (c,d) for the period of 12:00 UTC 9 to 12:00 UTC 10 June 2011 (a,c) and 06:00 UTC 14 to 06:00 UTC 15 June 2011 (b,d) (unit:mm)

2 天气系统发展演变对比分析

2.1 高原低槽

在“6·10”过程中,500 hPa 高度层环流发生了调整(图 2a),位于贝加尔湖东部的高压脊在 9 日 12 时已东移至蒙古地区,青藏高原东部和贝加尔湖地区上空各有一低槽东移,形成阶梯槽的环流形势。由于两槽相距太近,不利于高原低槽进一步发展,导

致其在东移过程中北缩减弱。在“6·14”过程中,青藏高原低槽东移(图 2b)温度槽落后于高度槽,在冷平流作用下低槽发展加深。与“6·10”过程相比,“6·14”过程的高原槽位置偏南且强度偏强。

2.2 西南涡

2.2.1 发展演变

分析两次过程 850 hPa 高度层上西南涡中心位置的移动分布(图3)分析可见,“6·10”过程中西南

低涡移动位置偏北,而“6·14”过程偏南。9日09时西南涡位于鄂西地区,沿北缩高空槽向东北方向缓慢移动,10日00时移至苏皖交界处。随后高空槽加速东移,引导西南涡加速东移入海。受位于日本上空稳定少动的东北低涡的阻挡,入海后的西南

涡缓慢东移。“6·14”过程中,由于高空引导槽平稳东移,对应该过程西南涡也缓慢东移,14日03时,西南涡位于重庆东部,之后沿长江缓慢东移经过鄂—皖—苏地区,于15日06时到达东部沿海。由第2.2节分析结果可知,“6·10”过程降水区偏北,

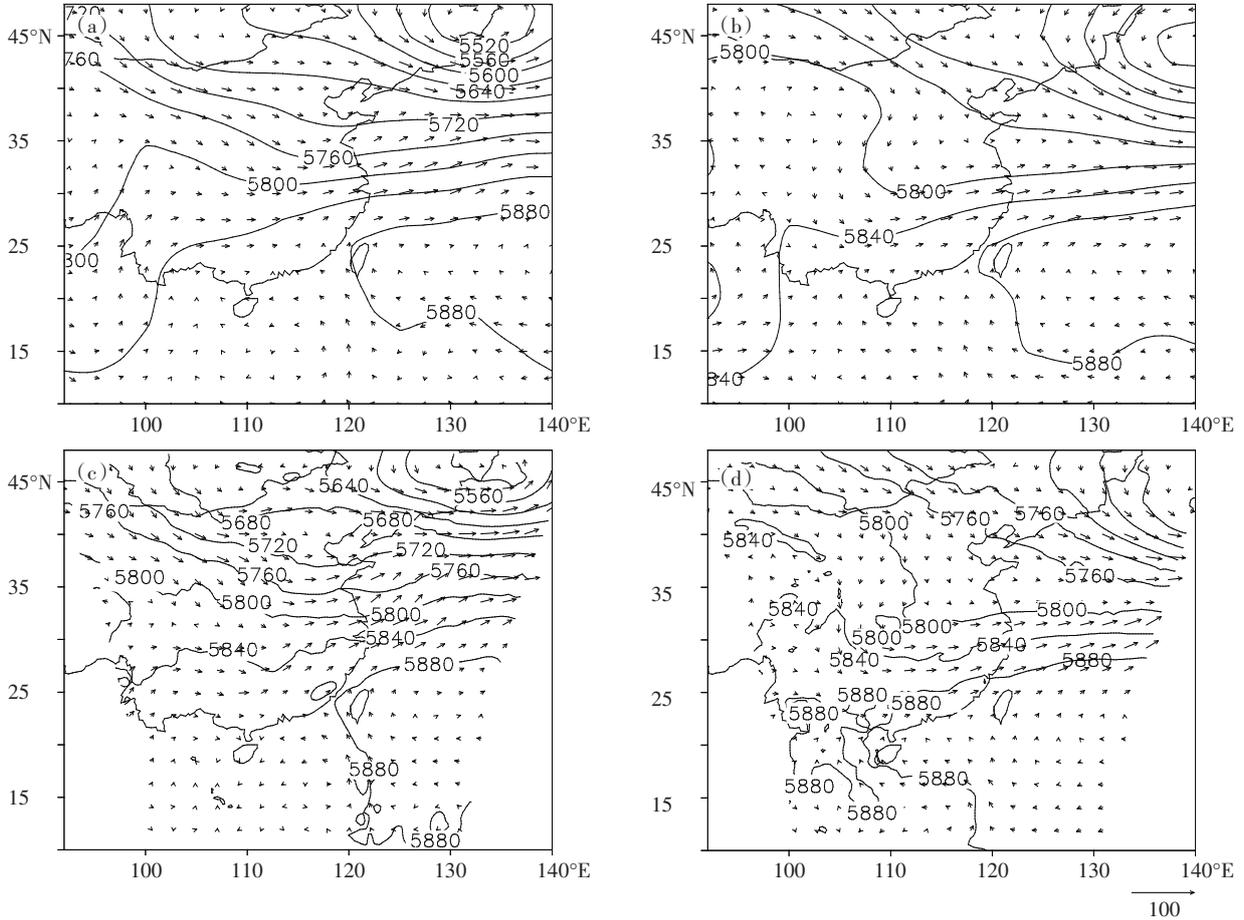


图2 2011年6月10日00时UTC(a,c)、14日12时UTC(b,d)500 hPa高度层实况(a,b)和数值模拟(c,d)风场(箭头,单位:m/s)、位势高度场(实线,单位:gpm)

Fig. 2 The observed (a, b) and simulated (c, d) 500 hPa wind fields (arrow vector; unit: m/s) and geopotential height fields (solid line; units: gpm) at 00:00 UTC 10 June (a, c) and 12:00 UTC 14 June 2011

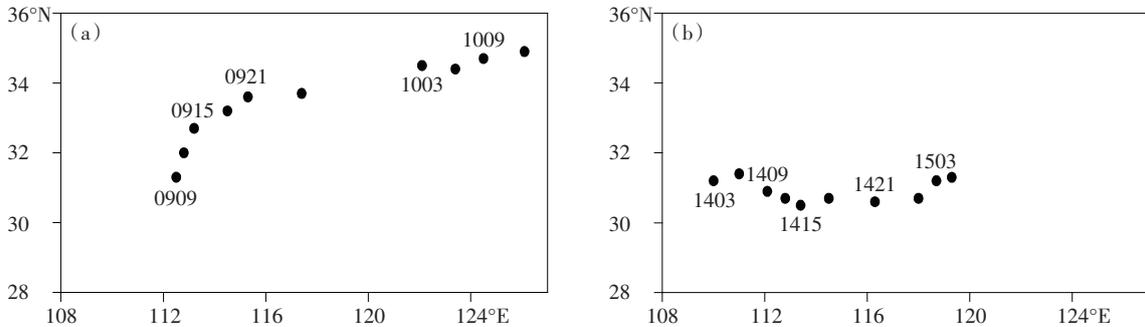


图3 2011年6月9日09时—10日12时UTC(a)和14日03时—15日06时UTC(b)850 hPa高度层上西南低涡中心位置随时间分布(图中数字表示日时)

Fig. 3 The time series of center location of southwest vortex at 850 hPa during 09:00 UTC 9 to 12:00 UTC 10 June (a), and 03:00 UTC 14 to 06:00 UTC 15 June 2011 (b)

而“6·14”过程降水区偏南。对比降水分布演变(图略)可以看出,两次过程的降水区均位于西南涡的东南侧,因此,降水中心与西南涡的位置移动存在很好的对应关系。

2.2.2 结构强度

分析两次过程中受西南涡影响时江西省北部地区的平均涡度垂直廓线(图 4)可见,“6·10”过程中,1 000—500 hPa 高度层涡度值为正,最大值位于

850 hPa,达 $2.7 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ 。“6·14”过程中,14 日 12 时 1 000—400 hPa 高度层涡度值为正,最大值位于 700 hPa 高度层,达 $4 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$,15 日 00 时,随着西南涡进一步东移发展,正涡度发展至 300 hPa 高度层以上,最大值仍位于 700 hPa,达 $5 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$ 。综上,“6·10”过程中,低涡系统浅薄,而“6·14”过程中整个对流层涡度基本为正值,涡旋度大,低涡系统深厚。

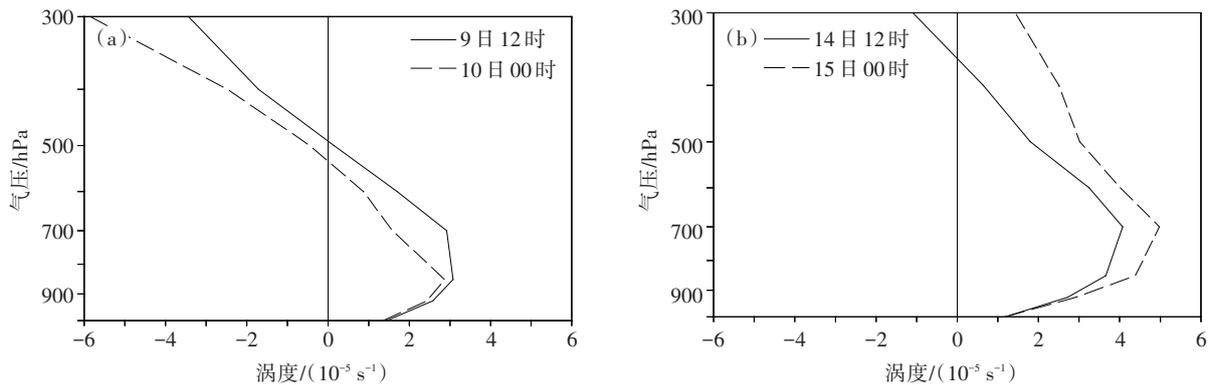


图 4 2011 年 6 月 9 日 12 时、10 日 00 时 UTC(a)和 14 日 12 时、15 日 00 时 UTC(b)江西省北部地区(113.5°—118.5°E,28.5°—31°N)平均涡度的垂直廓线(单位: 10^{-5} s^{-1})

Fig. 4 The vertical profiles of average vorticity in the north of Jiangxi province (113.5° - 118.5°E, 28.5° - 31°N) at 12:00 UTC 9 and 12:00 UTC 10, June 2011 (a) and at 12:00 UTC 14, and 00:00 UTC 15 June 2011 (b)(unit: 10^{-5} s^{-1})

2.3 高低空急流耦合

分析 10 日 00 时和 14 日 12 时 200 hPa 高度层风场可见(图 5),在“6·10”过程中 200 hPa 高度层

上,30°N 以北为低压区,以南为高压区,长江中下游地区处于槽底平直西风带中。高空急流横跨 30°—42°N 区域,呈东西向分布,稳定少动,大于 50m/s

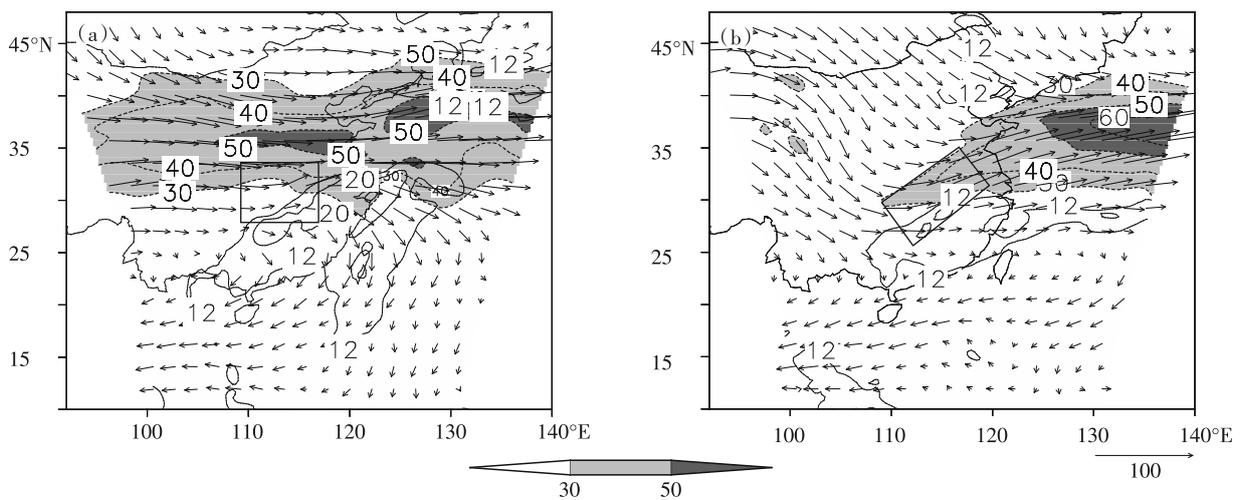


图 5 2011 年 6 月 10 日 00 时 UTC(a)和 14 日 12 时 UTC(b)200 hPa 风场(箭头,单位:m/s)、高空西风急流区(阴影,单位:m/s)和 850 hPa 低空急流区(等值线,单位:m/s)(黑色实线方框表示高低空急流耦合区)

Fig. 5 The 200 hPa wind field (arrow vector; unit:m/s), the upper-level westerly jet (shadow) and the lower-level jet stream (contour) at 00:00 UTC 10 Jun 2011 (a) and 12:00 UTC 14 Jun 2011 (b)(Black box presents the coupling region of jets at upper and lower level)

的急流核位于黄河下游地区和黄海—日本海地区,长江中下游地区位于急流核南侧。同时,该过程有一支宽度近 1 000 km 的西南低空急流位于 850 hPa 高度层上,呈东北—西南向分布于我国东南沿海一带上空。“6·10”过程中,高低空急流耦合区位于湖北省和江西省西北地区,这些区域与该过程强降水中心有很好的对应关系。对于“6·14”过程,200 hPa 高度层上的高空槽向南加深至 30°N 以南,长江中下游地区位于槽前西南气流中。高空急流位于槽前,随高空槽东移而东移,其主体位于西太平洋上空,核心区风速大于 60 m/s;同时有一支宽度约 500 km 的西南低空急流,呈东西向分布。高空急流随高空槽东移而东移,高低空急流耦合区位于长江下游南侧,主要是江西省北部地区(特别是东北地区,高空急流与低空急流相交区域)和安徽省南部地区,同样与强降水区有非常好的对应关系。

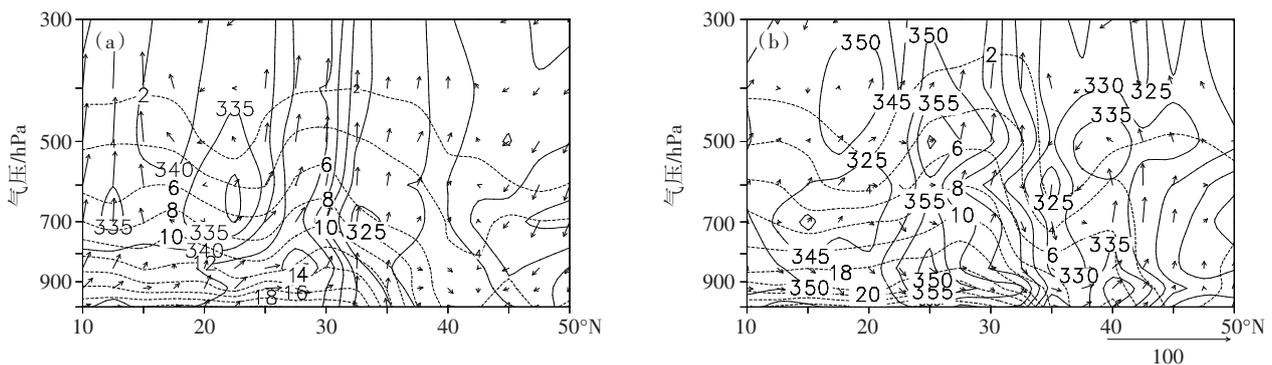


图 6 2011 年 6 月 10 日 00 时 UTC(a)和 14 日 12 时 UTC(b)假相当位温(实线,单位:K)、比湿(虚线,单位:g/kg)和垂直风(箭头,单位:m/s)沿 115.5°E 的垂直剖面

Fig. 6 The vertical section of pseudo-equivalent potential temperature (solid line; unit:K), specific humidity (dashed line; unit:g/kg) and horizontal wind (arrow vector; unit:m/s) along 115.5°E at 00:00 UTC 10 (a) and 12:00 UTC 14 (b) June 2011

3.2 水汽输送

分析 10 日 00 时和 14 日 12 时 850—700 hPa 的累积水汽通量和水汽通量散度(图 7)可见,两次过程的水汽辐合区与降水范围、降水中心位置具有很好的对应关系。10 日 00 时,辐合中心位于江西省西北部至湖北省,最大值为 -2.5×10^{-4} g/($\text{cm}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{hPa}$);而 14 日 12 时,强的水汽辐合中心位于江西省中北部至安徽省西南部地区,辐合值最大达到 -4.4×10^{-4} g/($\text{cm}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{hPa}$)。“6·10”过程中,水汽主要来源于南海和东海南部地区,水汽通量最大值达 200 g/($\text{cm} \cdot \text{s} \cdot \text{hPa}$);而“6·14”过程中,水汽输送主要来自南海地区,水汽通量较

3 物理量场对比分析

3.1 锋区特征

分析 2011 年 6 月 10 日 00 时和 14 日 12 时沿 115.5°E 的假相当位温、比湿和垂直风场的垂直剖面(图 6)可见,10 日 00 时锋区位于 30°—35°N,而 14 日 12 时,锋区位于 28°—32°N,明显偏南、偏强。两次过程的比湿场表现较为相似,江西省北部地区 700 hPa 高度层的比湿均在 10 g/kg 左右,满足暴雨的触发条件。但分析风场垂直剖面发现,“6·10”过程中浅层锋区以南受上升气流控制,以北为较弱的下沉气流,环流补偿作用较弱,造成降水区位于锋区以南且强度偏弱,降水范围偏小;而“6·14”过程中上升气流位于锋区附近,配合两侧较强的下沉气流,环流补偿强盛,使得锋区附近有很强的辐合上升,导致降水强度及范围明显大于“6·10”过程。

“6·10”过程偏大,最大值达 300 g/($\text{cm} \cdot \text{s} \cdot \text{hPa}$),同时伴随较强的东海北部水汽回流,两支水汽汇合于江西省北部至长江中下游地区,导致“6·14”降水过程的范围与强度均明显大于“6·10”过程。

4 结论

文中采用中尺度数值模式 WRF V3.0,对 2011 年梅雨期两次暴雨过程进行数值模拟,对比分析两次暴雨的天气系统发展演变和物理量场特征发现:

1) 西南涡的活动和高低空急流的耦合配置与暴雨活动关系密切,两者是造成两次暴雨过程范围和强度差异的重要因素。

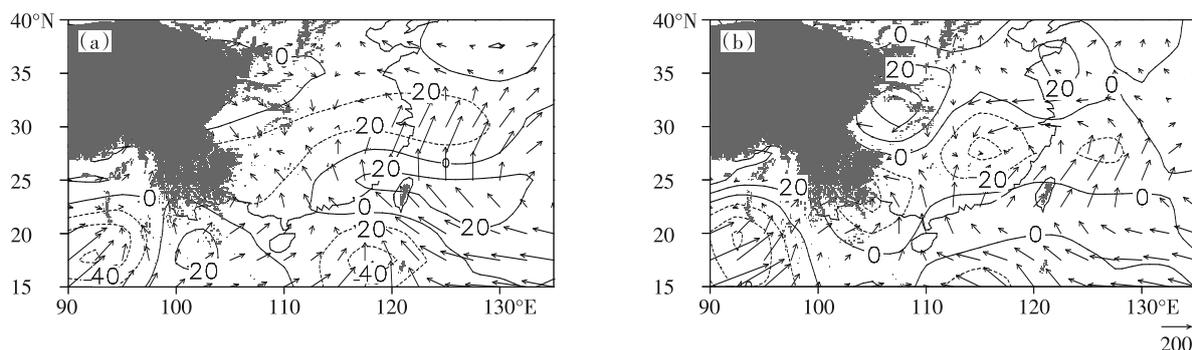


图7 2011年10日00时UTC(a)和14日12时UTC(b)850—700 hPa累积水汽通量(箭头,单位: $\text{g}/(\text{cm} \cdot \text{s} \cdot \text{hPa})$)和水汽通量散度(实线,单位: $10^{-5} \text{g}/(\text{cm}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{hPa})$)(阴影为青藏高原高于700 hPa高度区域)

Fig. 7 The accumulative water vapor flux (arrow vector; unit: $\text{g}/(\text{cm} \cdot \text{s} \cdot \text{hPa})$) and water vapor flux divergence (solid line; unit: $10^{-5} \text{g}/(\text{cm}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{hPa})$) of 850 - 700 hPa at 00:00 UTC 10 (a) and 12:00 UTC 14 (b) June 2011 (The shaded part presents higher than the 700 hPa height in Qinghai Tibet Plateau)

2) “6·10”过程中存在一个浅薄的西南低涡系统,受青藏高原浅槽东移北缩减弱影响向东北方向移动,同时西南低空急流位置偏北,暴雨区位置偏北。“6·14”过程存在一个深厚的西南低涡系统,受高空浅槽东移发展加深影响,沿长江流域缓慢东移,同时西南低空急流位置偏南,暴雨区位置偏南。

3) 两次过程的强降水中心均位于高低空急流耦合区,相对于“6·14”过程,“6·10”过程中长江中下游地区形成的高低空急流耦合区范围偏小且强度偏弱,导致辐合上升运动偏弱,因此暴雨范围偏小、强度偏弱;“6·14”过程中,长江下游地区形成大范围高低空急流耦合的环流形势,强烈的辐合上升运动配合充足的水汽供应,最终在该地区形成大范围强降水。

参考文献 (References)

- Andrew J M, Daran L R, James O P, et al. 2010. Global precipitation extremes associated with diurnally varying low-level jets[J]. *J Climate*, 23(19):5065-5084
- 陈娟,尹洁,陈云辉,等. 2014. 2013年5月14—16日江西暴雨过程成因及非常规资料特征分析[J]. *气象与减灾研究*, 37(1):39-48.
- Chen J, Yin J, Chen Y H. 2014. Analysis on causes and the characteristics of unconventional data of the rainstorm from 14 to 16 May 2013 in Jiangxi[J]. *Meteor Disaster Reduction Res*, 37(1):39-48.(in Chinese)
- 高守亭,陶诗言. 1991. 高空急流加速和低层锋生[J]. *大气科学*, 15(2):11-21.
- Gao S T, Tao S Y. 1991. The lower layer frontogenesis induced by the acceleration of upper jet stream[J]. *Chinese J Atmos Sci*, 15(2):11-21.(in Chinese)
- 金米娜. 2009. 江西省汛期暴雨气候特点及预报方法综合分析[J]. *气象与减灾研究*, 32(1):72-75.
- Jin M N. 2009. Compreh-

sive analysis on climatic characteristics and forecast methods of heavy rainfall in Jiangxi during flood-season[J]. *Meteor Disaster Reduction Res*, 32(1):72-75.(in Chinese)

Kalnay E, Kanamitsu M, Kistler R, et al. 1996. The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project[J]. *Bull Amer Meteor Soc*, 77(3):437-471.

李晓容,濮梅娟,王啸华,等. 2012. 江苏一次大暴雨过程的诊断与中尺度分析[J]. *气象科学*, 32(1):53-61.

Li X R, Pu M J, Wang X H, et al. 2012. A diagnose and mesoscale analysis of a torrential rain process in Jiangsu province[J]. *J Meteor Sci*, 32(1):53-61.(in Chinese)

寿绍文,励申申,姚秀萍. 2003. 中尺度气象学[M]. 北京:气象出版社:276-286.

Shou S W, Li S S, Yao X P. 2003. *Mesoscale Meteorology*[M]. Beijing: China Meteorological Press: 276-286.(in Chinese)

Skamarock W C. 2005. A description of the advanced research WRF version 3[J]. *Near Technical*, 113:7-25.

陶诗言. 1965. 中国夏季副热带天气系统若干问题的研究[M]. 北京:科学出版社:1-146.

Tao S Y. 1965. Study of some problems of summer subtropical weather system in China[M]. Beijing: China Science Press:1-146.(in Chinese)

王作述. 1986. 一次西南低涡暴雨的数值试验研究[C]//85-906-08课题组. 暴雨科技、业务试验和天气动力学理论的研究. 北京:气象出版社:257-267.

Wang Z S. 1986. A numerical study of a Southwest Vortex Rainstorm[C]//85-906-08 research group. *Research on Rainstorm science and technology, business study and synoptic dynamics theory*. Beijing: China Meteorological Press:257-267.(in Chinese)

韦统健,薛建军. 1996. 影响江淮地区的西南涡中尺度结构特征[J]. *高原气象*, 15(4):456-463.

Wei T J, Xue J J. 1996. The mesoscale structure characteristics of southwest vortex over Jianghuai river areas[J]. *Plateau Meteor*, 15(4):456-463.(in Chinese)

余贞寿,冀春晓,倪东鸿,等. 2012. 台风“韦帕”(0713)引发华东暴雨

- 过程的诊断比较[J]. 气象科学, 32(1):101-109. Yu Z S, Ji C X, Ni D H, et al. 2012. Comparative analysis of rainstorm course over east China induced by typhoon Wipha (0713)[J]. *J Meteor Sci*, 32(1):101-109.(in Chinese)
- 许爱华, 许彬, 刘晓晖. 2003. 2003年4月9—13日连续暴雨和强对流天气过程分析及灾情评述[J]. 气象与减灾研究, 26(3):13-16. Xu A H, Xu B, Liu X H. 2003. Analysis of a weather process with continuous heavy rain and severe convective on 9 - 13 April 2003 and comments on disaster situation[J]. *Meteor Disaster Reduction Res*, 26(3):13-16.(in Chinese)
- Zhang Y C, Kuang X Y, Guo Wei D, et al. 2006. Seasonal evolution of the upper troposphere westerly jet core over East Asia[J]. *Geophys Res Lett*, 33(11):317-324.
- 朱乾根, 周伟灿, 张海霞. 2001. 高低空急流耦合对长江中游强暴雨形成的机理研究[J]. 南京气象学院学报, 24(3):308-314. Zhu Q G, Zhou W C, Zhang H X. 2001. Mechanism of the formation of torrential rain by coupled high/low level jets over the middle reaches of the Yangtze river[J]. *Trans Atmos Sci*, 24(3):308-314.(in Chinese)
- 周海光, 郭富德. 2007. 梅雨锋暴雨中尺度对流系统结构模型的双多普勒雷达研究[J]. 大气科学学报, 30(1):1-8. Zhou H G, Guo F D. 2007. Meso- β and- γ -scale structure of heavy rain on Meiyu front detected by dual-Doppler radar[J]. *Trans Atmos Sci*, 30(1):1-8.(in Chinese)