

李进,丁婷,赵思楠,等. 2015. 2013 年 6 月 7 日浙江省中北部暴雨过程诊断分析. 气象, 41(10):1215-1221.

2013 年 6 月 7 日浙江省中北部暴雨过程诊断分析^{* 1}

李 进¹ 丁 婷² 赵思楠³ 单晓龙⁴

1 91867 部队气象台, 义乌 322000
2 国家气候中心, 北京 100081
3 61741 部队, 北京 100094
4 东华软件股份公司气象与公共服务事业部, 北京 100081

提 要: 利用欧洲中期预报中心(ECMWF)ERA Interim 全球再分析资料(0.75°×0.75°)对 2013 年 6 月 7 日发生在浙江省中北部的暴雨过程进行了相关诊断分析。结果表明:这次暴雨是在高空短波小槽东移加深,底层西南涡东移发展的形势下发生的,同时浙江中北部暴雨区位于高低空急流耦合带;暴雨发生前 700 hPa 以下蕴含有大量的不稳定能量,随着西南涡的靠近而触发不稳定能量释放;对大气变量物理分解的环境场分析发现此次区域性暴雨过程具有一定的背景环境支持,同时在瞬变扰动场的异常下而诱发了暴雨,暴雨落区位于 850 hPa 扰动暖切辐合线上。

关键词: 暴雨, 西南涡, 高低空急流耦合, 大气变量物理分解

中图分类号: P458 **文献标志码:** A **doi:** 10.7519/j.issn.1000-0526.2015.10.004

Diagnostic Analysis on the Torrential Rain Process over the Middle and Northern Parts of Zhejiang Province on 7 June 2013

LI Jin¹ DING Ting² ZHAO Sinan³ SHAN Xiaolong⁴

1 91867 Troops Meteorological Observatory of PLA, Yiwu 322000
2 National Climate Centre, Beijing 100081
3 61741 Troops of PLA, Beijing 100094
4 Department of Meteorology and Public Services, DHC Software Co., LTD, Beijing 100081

Abstract: The torrential rainfall in the middle and northern parts of Zhejiang Province on 7 June 2013 was diagnosed based on the latest ECMWF ERA-Interim global reanalysis data with 0.75°×0.75° resolution. The results show that the torrential rain was caused by two developing eastward-moving systems—an upper-level shortwave trough and a low-level southwest vortex, and the torrential rainfall area over the middle and northern of Zhejiang are located in the coupling area of the upper-level and low-level jet streams. A large amount of instability energy was stored below 700 hPa before the occurrence of rainstorm, which was triggered by the southwest vortex close to the torrential rainfall area. The analysis of environmental fields by means of physical decomposition of atmospheric variables shows that background ambient was in favor of this regional rainstorm, causing the instantaneous anomaly field to trigger the torrential rainfall at last. The torrential rainfall is obviously located in the anomalous warm convergence shear line at 850 hPa.

Key words: torrential rain, southwest vortex, up-and-low jet stream coupling, physical decomposition of atmospheric variables

^{*} 国家自然科学基金青年科学基金项目(41205039)和公益性行业(气象)科研专项(GYHY201306033 和 GYHY201206017)共同资助
2014 年 5 月 14 日收稿; 2015 年 4 月 24 日收修定稿
第一作者:李进,从事天气气候研究. Email:li_jin@pku.edu.cn

引言

暴雨是影响我国的主要气象灾害之一,它具有突发性与局地性的特点,常给人们的生命和财产造成极其严重的损害(陶诗言,1980),因此在全球变暖各类极端气候事件频繁发生的气候背景下,探究暴雨的发生、落区及预报一直都是气象工作者的研究热点。孙建华等(2013)对 2012 年 7 月 21 日发生在北京地区特大暴雨过程的天气形势、水汽来源和中尺度对流系统的特征进行了研究,发现“7.21”北京暴雨是高低空与中低纬系统共同配合的结果。何斌等(2013)诊断分析 2008 年影响浙赣皖地区一次梅雨锋暴雨过程时表明,对流层底层高温高湿、中高层冷空气入侵造成暴雨区上空大气层结处于极不稳定状态。刘淑媛等(2002)分析发现,西南涡东移生成的中尺度对流系统及西南低空急流造成 1998 年 6 月 28—29 日及 7 月 2 日淮海流域的暴雨过程。王成鑫等(2013)利用 WRF 模式在考虑地形因素下对四川盆地 2010 年 7 月 16—18 日的暴雨过程进行模拟,发现模式能很好地模拟强降水中心及解释暴雨发生的动力因子。郑婧等(2014)分析了梅雨锋短时暴雨的多尺度环境场。陈忠明(1993)及李彩玲等(2010)在暴雨分析中都发现压能场与暴雨落区有较好的指示及预测意义。钱维宏等(2013)和 Qian(2013)研究发现暴雨落区位于 850 hPa 瞬变非对称扰动风切变线附近。

浙江省于 2013 年 6 月 7 日进入梅雨季节(浙江

省气候中心,2013),在浙江省中北部出现了一次区域性暴雨过程,仅杭州一市就有 29 个乡镇约 2.8 万人受灾,农作物受灾 2.62 hm²,供电中断及冲毁堰坝等造成直接经济总损失 5475 万元(杭州市林业局,2013)。这次暴雨过程主要发生在浙江北部区域(图 1),其中杭州平均降雨量 99.1 mm,嘉兴 79.2 mm,宁波 79.2 mm,绍兴 67.6 mm,舟山 58.3 mm;浙江省 200 mm 以上的观测站有 4 站,150 mm 以上有 23 站,杭州清凉峰站达到 229.6 mm,为这次暴雨过程的观测最大值。这次暴雨过程是在何种天气形势及水汽条件下发生的?暴雨过程中大气能量场、环境场及扰动场有何特征?本文对此做进一步分析。

1 资料和方法

本文所使用的降水数据来自中国气象局整编的《中国地面气候资料日值数据集(V3.0)》中浙江省的 23 个基准、基本气象站的逐日降水量资料,日(24 h)降水量的统计时段为北京时间前日 20 时至当日 20 时。风场、温度及湿度等气象要素资料来源于欧洲中期天气预报中心(ECMWF)ERA-Interim 的全球再分析资料,空间分辨率是 0.75°×0.75°经纬度格距,时间分辨率是 6 h,包含世界时 00、06、12 及 18 时 4 个时次。

首先利用 ERA-Interim 再分析资料对 2013 年 6 月 7 日前后浙江省及周边区域的天气形势及假相当位温 θ_{se} 场进行相关分析研究;然后利用大气变量物理解析法(钱维宏等,2012a;2012b;2015)对 2013 年 6 月 5—9 日 00、06、12 及 18 时(世界时)的 ERA-Interim 相关再分析资料进行全球尺度的物理解析,分解中的气候资料长度为 1981—2010 年,从而更进一步地探讨暴雨的成因及落区。

2 天气形势分析

2.1 天气形势及水汽条件分析

沿时间轴纵向分析 250 hPa 对流层顶层的风场、温度及湿度场,结果显示 2013 年 6 月 5 日 08 时在西风急流分支副热带急流通过青藏高原及阿尔泰山脉后出现一小短波槽波动,短波槽在东移过程中不断发展加深,并且槽前伴有急流中心;对应于高空

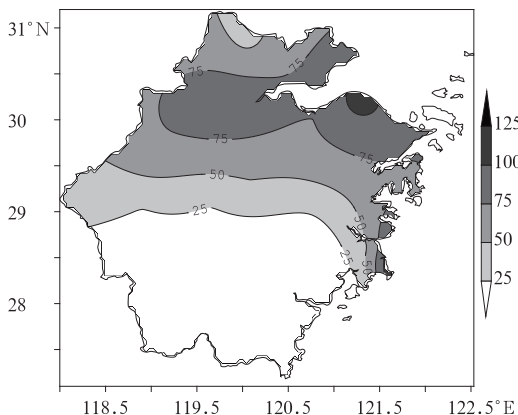


图 1 浙江省 2013 年 6 月 7 日
日降水量分布(单位: mm)

Fig. 1 The distribution of daily precipitation in
Zhejiang on 7 July 2013 (unit: mm)

短波槽 500 hPa 在黄河上游兰州附近有一低涡生成,随后向东南长江入海口附近移动并发展增强,低涡冷切变线前部有西南急流生成并增强,同时自印度洋孟加拉湾伴随有较强的水汽通量输送通道;而 850 hPa 表现为来自孟加拉湾和南海上空的低空急流与沿高原东侧南下的冷空气在川南西昌附近相遇,生成一西南涡并沿偏东路径移动发展,低涡冷切变线前部西南急流将印度洋及南中国海上空的暖湿气流源源不断地向暴雨区输送;分析低层 925 及 1000 hPa 发现浙江省这次暴雨的水汽输送通道有两支来源,一支同中上层随西南急流来自孟加拉湾及南中国海上空,另一支随东南急流从中国东海上空持续地向浙江暴雨区大量输送水汽。

谢义炳等(1980)指出研究暴雨这种特殊的大气运动时需考虑高低纬及高低层之间的相互作用,通常中高纬的系统表现在高层,低纬的系统表现在低层,因此浙江省这次暴雨过程主要是由于中高纬高层东移发展的小短波槽波动与低纬低层东移的西南

涡相互作用的结果。

2.2 高低空急流耦合分析

许多学者在研究暴雨时都发现高低空急流耦合对暴雨的发生具有至关重要的作用,金春荣(2012)指出高低空急流耦合是低空和高空的强风带交叉而成的形势,蕴含着容易发生强对流的物理特征;孙淑清(1978)及 Matsumoto(1972)认为暴雨区多落在低空急流左侧;朱乾根(1975)认为急流的左侧经常有切变线和低涡活动,伴有大量的降水带(在雨带中并有暴雨中心生成),是辐合上升运动区。浙江省这次暴雨过程从高层到低层共有三支急流带共同作用,在高空 250 hPa 主要受高空西风急流轴的右后侧辐散区控制(图 2a),中低空 700 hPa 主要受西南急流左前侧强辐合区影响(图 2b),而低空 925 hPa 前期主要受东南急流左侧辐合区控制(图 2c),在低涡的暖切西南部对应水汽通量的大值中心,浙江中北部的暴雨区位于低涡暖切附近水汽通量的辐合

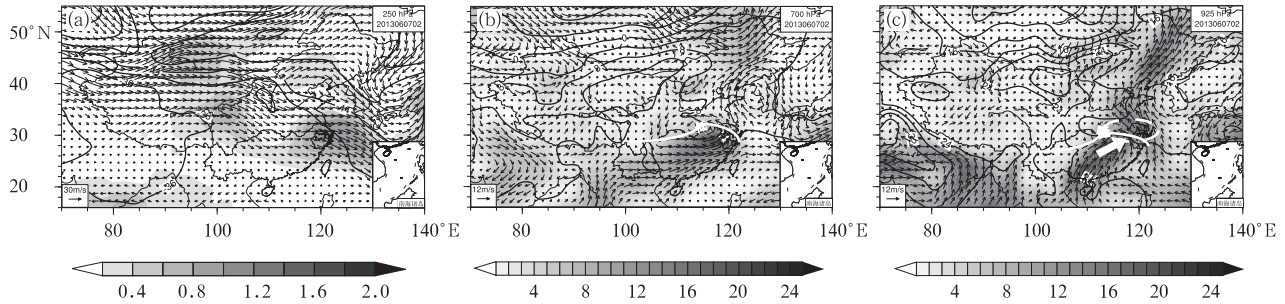


图 2 2013 年 6 月 7 日 02 时空高(a) 250 hPa、(b) 700 hPa 及 (c) 925 hPa 三层的温度、水汽通量及风场分布
[等值线为等温线(单位:℃),填充区域为水汽通量(单位:g·cm⁻¹·kg⁻¹),曲箭头为风场,白色实线为低涡的冷暖切变,白色断线表示水汽通量辐合区,白色箭头表示水汽通量大值中心输送方向,浙江北部的实心圆点表示日降水量≥50 mm 站点,空心圆点表示 25 mm≤降水量≤50 mm 站点]

Fig. 2 The distribution of temperature, water vapor flux and original wind fields on (a) 250 hPa, (b) 700 hPa and (c) 925 hPa at 02:00 BT 7 June 2013

[The isograms are isotherm (unit: ℃), shaded area is water vapor flux (unit: g·cm⁻¹·kg⁻¹) and curly vectors are winds. White solid lines indicate the cold-warm front shear, white dashed line indicates the convergence region of water vapor flux, white arrow indicates the transport direction of maximum values of water vapor flux, solid dots in northern Zhejiang indicate stations with daily precipitation more than 50 mm, and hollow dots indicate the daily precipitation is more than or equal to 25 mm, but less than 50 mm]

区内,这样在高中低空急流相互作用下形成深厚的上升气流柱,再加之中低空急流向暴雨区持续不断提供暖湿空气构成了对流不稳定层结的增长,从而造成这次区域性强降水。

3 能量场分析

一般假相当位温能较好地表示大气的能量和稳

定程度,假相当位温的变化可以反映大气能量的释放情况(肖鹏等,2013)。图 3 为沿 120°E 假相当位温 and 垂直速度的垂直剖面,图 3a 中可以看出暴雨发生前 850 hPa 以下存在一条高温高湿的 θ_{se} 高能区伸展到 32°N 附近,而在其上层 700 hPa 附近覆盖一层干冷的大气,造成浙江中北部上空中低层大气出现 $\partial\theta_{se}/\partial z < 0$,从而储藏有大量的不稳定能量有待释放;同时发现在中高空存在一条向北倾斜的 θ_{se} 锋

面,锋面的前部首先出现较强的上升气流,说明中空有较强的冷空气南侵,从而进一步增强暴雨区上空的不稳定程度;随着低层西南涡向暴雨区靠近,触发中低层不稳定能量的释放而出现较强的上升气流(图 3b);这次暴雨过程的最大上升气流出现在图 3b 中 500 hPa 附近,中心值大于 $1.2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,图中也可

看出上升气流柱呈现一个“V”型结构,外围气流从 30°N 南北两侧的中空下沉,在接近上升气流柱时再随之转为上升气流,由于外围的干冷气流在下沉过程中存在下沉增温,应该对暴雨区的上升气流有一定的促进作用,具体还需做更进一步的研究。

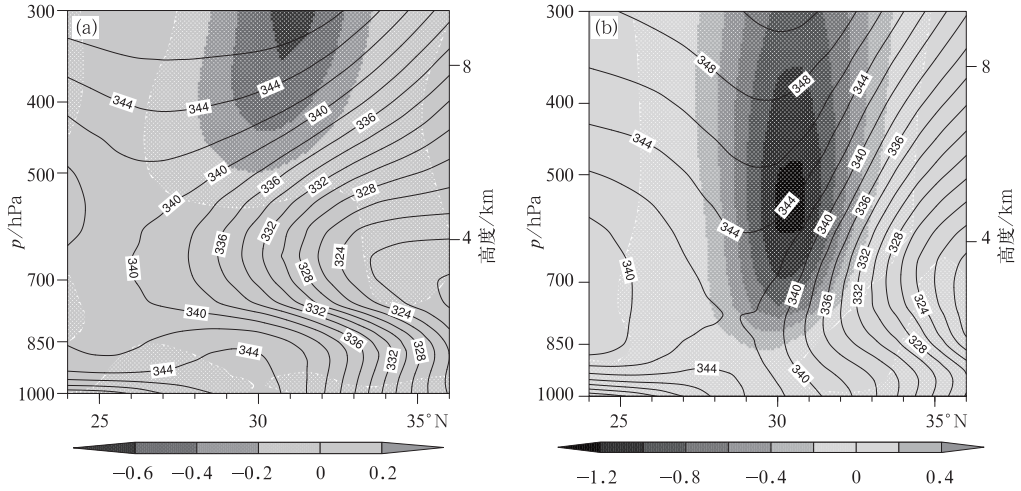


图 3 2013 年 6 月 6 日 20 时(a)及 6 月 7 日 08 时(b)假相当位温及垂直速度沿 120°E 的垂直剖面
[等值线为假相当位温 θ_{se} (单位: K),填充区域为垂直速度(单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$),
其中负值区为灰度小圆点填充区,正值为灰度填充区]

Fig. 3 The vertical profile of pseudo-equivalent temperature and vertical speed along 120°E (a) at 20:00 BT 6 June and (b) at 08:00 BT 7 June 2013, respectively
(Isograms are pseudo-equivalent temperature θ_{se} (unit: K), shaded areas are vertical speed (unit: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$), in which the shaded area with gray dots indicate negative value, and the gray shaded area is positive)

4 大气变量物理分解场分析

近年来钱维宏(2011;2012a;2012b;2013)、钱维宏等(2013)和 Qian 等(2013)利用大气变量物理分解法将全球大气变量物理分解为 4 个部分:纬圈平均的对称气候、非对称气候、纬圈平均的瞬变对称扰动(又称行星尺度瞬变扰动)和瞬变非对称扰动,其中纬圈平均对称气候项表示不同地理纬度带上太阳高度角(辐射)变化引起的大气变量响应,非对称气候项则反映大尺度上海陆热力对比随时间变化引起的大气变量日循环和年循环变化,而纬圈平均的瞬变对称扰动项表示的是不同纬度上大气运动特征的振动,如瞬变对称扰动风在中纬度地区反映西风指数循环的变化,在高纬度地区反映南极涛动和北极涛动指数的变化,瞬变非对称扰动则反映的是天气尺度上各种异常大气变量的变化。

4.1 环境变量场的分析

大气变量物理分解前两项气候变量场与行星尺度瞬变对称扰动场合称为环境变量场(钱维宏等, 2013),分析 2013 年 6 月 5—9 日浙江省及周边高空的环境温度、湿度及风场,发现 250 hPa 环境风场中的高空西风急流轴在苏南到浙北一带活动,6 日 14 时急流轴北抬至苏南长江入海口附近,同时浙北暴雨区开始位于高空急流右侧的辐散区内,而 7 日 20 时急流轴又开始南压至浙北地区;中空 500 和 700 hPa 在 6 日暴雨发生前西南暖湿气流发生突然增强北抬,随之水汽通量也有一个增强北抬的过程;低空 850 hPa 环境风场和湿度场与中空相似暖湿气流暴雨发生前增强北抬,7 日暴雨发生时环境风场上有一西南地区东伸的暖切变线位于浙北区域,7 日晚这一暖切逐渐北抬离开浙北,而此时浙北的暴雨也逐渐减弱结束;分析近地面的环境风场发现 6 月

6—7 日浙江北部特别是东北部出现东南气流突然增强,在 8 日浙北暴雨结束后风场增强区已北移至黄海附近,图 4 为近地面 1000 hPa 的环境变量场,图中发现 6 日 14 时暴雨发生前西南地区的“暖舌”东伸,江浙东部沿海开始出现锋生(图 4a),即等温线开始变得密集,同时长江下游地区开始处于水汽辐合区内,而在 7 日 20 时暴雨逐渐结束前出现

锋消(图 4b),同时发现湿度场与增强的东南气流有较好的配置。因此环境场上这种高低空配置对浙江省北部这次暴雨过程提供了重要的背景场,说明这次区域性暴雨事件并不是偶然发生的,而是具有一定环境背景场的,所以今后日常业务预报中预报员也应重视环境变量场的变化。

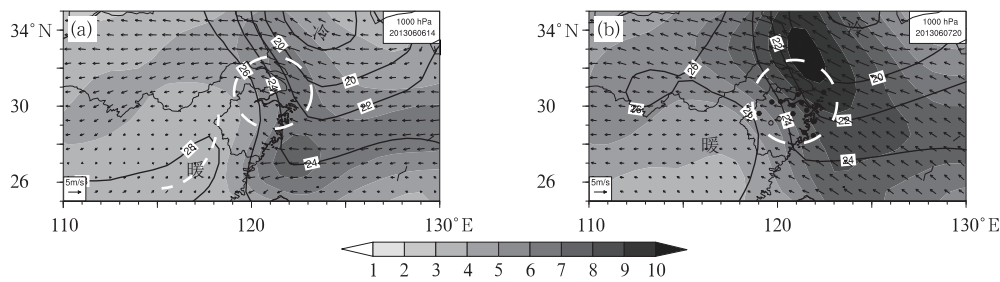


图 4 2013 年 6 月 6 日 14 时(a)和 7 日 20 时(b)浙江省及周边 1000 hPa 的环境温度、水汽通量及风场分布

(白色断线表示水汽通量辐合区,白色点虚线表示暖脊,图中的其他元素标识同图 2,但为大气变量物理分解所得环境场)

Fig. 4 The distribution 1000 hPa environmental temperature, water vapor flux and winds around Zhejiang (a) at 14:00 BT 6 June, (b) at 20:00 BT 7 June 2013

(White dashed line indicates the convergence region of water vapor flux, white dotted line indicates warm ridge. The other marks are same as in Fig. 2, but for atmospheric variables after physical decomposition)

4.2 瞬变扰动变量场的分析

大气变量物理分解第 4 项瞬变扰动项可以清晰地反映出在大尺度的环境背景场下何种天气尺度的大气变量异常造成或加剧极端事件的发生。图 5 为暴雨过程中浙江省附近高低空各层温度、湿度及风场的瞬变扰动项的空间分布,图中可看出暴雨区上空 250 hPa 为一反气旋性扰动风环流中心,处于高空扰动辐散区内,500 hPa 处于气旋性扰动风环流的第 4 象限,在正扰动涡度区域内,850 hPa 处于气旋性扰动风环流的暖切辐合线上,低层 925 hPa 位于暖切辐合线的前端,与 850 hPa 一样位于正水汽通量扰动辐合区内,这种高层强烈扰动辐散,低层强烈扰动辐合的配置结构从而造成了暴雨区出现强盛的上升气流;从扰动湿度场可以看出暴雨区在中低层随着西南及东南扰动急流有强盛的水汽输送,并且有强烈的正水汽通量扰动辐合;而扰动温度场的垂直结构来看暴雨区上空中层多为暖性异常,下层多为冷性异常,这应该由于暴雨区中高层潜热释

放及底层冷空气侵入造成。因此在一个容易造成区域性暴雨的大气环境背景上叠加这样的高低空瞬变扰动场便诱发了浙江省这次入梅时间的暴雨过程。

5 结 论

本文主要对 2013 年浙江省入梅的首场暴雨过程从天气形势、能量场及大气变量物理分解场做了相关分析,结果发现:

- (1) 这次暴雨是在高空短波小槽东移加深,低层西南涡东移发展的天气形势下发生,暴雨发生时浙江北部处于高低空急流耦合区,共受三支急流影响,高空处于西风急流轴的右后侧,中低空 500~850 hPa 处于西南急流轴的左侧,而 925 hPa 以下近地面主要位于东南急流轴的左侧,因此这次暴雨的水汽来源主要有三地:孟加拉湾、南中国海及东海上空。
- (2) 暴雨发生前高空 700 hPa 以下出现并储藏有大量的大气不稳定能量,随着低层西南涡向暴雨

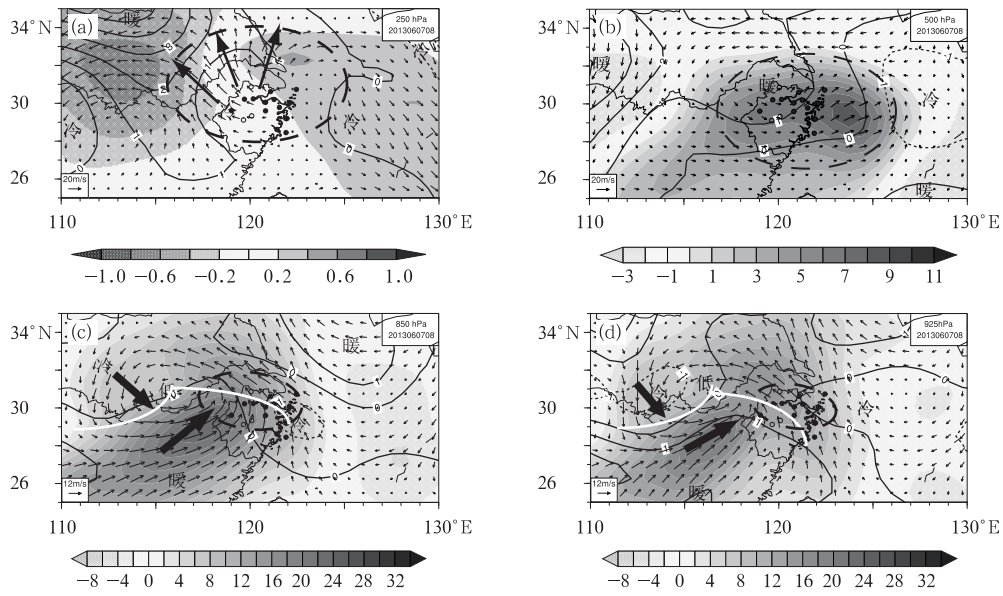


图 5 2013 年 6 月 7 日 08 时浙江及周边 250 hPa(a)、500 hPa(b)、850 hPa(c) 及 925 hPa(d) 的温度、水汽通量及风场的瞬变扰动分布 (实线表示正的温度扰动, 而虚线表示负的; 灰度填充值表示正的水汽通量扰动, 灰度圆点填充值表示负值; 曲箭头为扰动风场; 图 a 中断线表示高空扰动辐散区, 细箭头表示辐散气流; 图 b 中断线表示正扰动涡度区; 图 c、d 中白色实线为扰动气流辐合线; 断线表示水汽通量扰动辐合区; 粗箭头表示冷暖扰动平流方向; 浙江北部的实心圆点及空心圆点同图 2)

Fig. 5 The distribution of instantaneous anomalous temperature, water vapor flux and winds around Zhejiang at 250 hPa (a), 500 hPa (b), 850 hPa (c) and 925 hPa (d) at 08:00 BT 7 June 2013, respectively (Solid and dashed lines indicate positive and negative anomalous temperatures, respectively. Shaded area with gray dots indicates negative anomalous water vapor flux and the shadow without gray dots indicates asymmetric positive values. Curly vectors are anomalous winds. Dashed line in Fig. 5a is for the upper-level anomalous divergence area, the thin arrows indicate the divergence windstrems and in Fig. 5b for the positive anomalous vorticity region. In Figs. 5c and 5d, white solid lines represent the convergence lines of anomalous winds, dashed line indicates the convergence area of water vapor flux anomaly, and thick arrows indicate the advection direction of cold-warm temperature anomaly. The solid and hollow dots in northern Zhejiang are same as in Fig. 2)

区的靠近而触发不稳定能量的释放;同时 θ_{se} 锋区南侧的上升气流柱呈现一个“V”型结构特征,上升气流柱周边中空的干冷气流下沉增温应该对暴雨区的上升气流有一定促进作用。

(3) 对这次暴雨过程中温度、湿度及风场物理分解的环境场分析发现,暴雨发生时高空处于西风急流轴右侧辐散区,中低空西南气流出现突然增强北抬,近地面有东南气流增强并伴有锋生过程,存在水汽通量辐合,这些都为这次区域暴雨的发生提供了较好的背景环境。

(4) 对大气变量的瞬变扰动场的分析发现,叠加在环境背景上的高层扰动反气旋性环流,中底层强烈扰动气旋性环流以及低空扰动急流输送的水汽扰动异常共同诱发了这次区域性暴雨的发生,暴雨落区位于 850 hPa 气旋性扰动环流的暖切辐合线

上。

参考文献

陈忠明. 1993. 压能场在暴雨分析中的应用. 应用气象学报, 4(4): 498-503.

何斌, 何锋, 范晓红, 等. 2013. 一次长江中下游梅雨锋暴雨过程的诊断分析. 高原气象, 32(4): 1074-1083.

杭州市林业局. 2013. 汛情通报——全市普降大到暴雨局部大暴雨. 林水简报, 7: 1-2.

金春荣. 2012. 暴雨分析与预报技术. 沙漠与绿洲气象, 6(5): 73-74.

刘淑媛, 郑永光, 王洪庆, 等. 2002. 1998 年 6 月 28 日—7 月 2 日淮河流域暴雨分析. 气象学报, 60(6): 774-779.

李彩玲, 寿绍文, 陈艺芳. 2010. 台风“风神”暴雨落区的诊断分析. 热带气象学报, 26(2): 250-256.

钱维宏. 2011. 基于大气变量物理分解的低温雨雪冰冻天气的中期预报系统和方法. 中国, CN10222174A. 2011-10-19.

钱维宏. 2012a. 天气尺度瞬变扰动的物理解析原理. 地球物理学报,

55(5):1439-1448.

钱维宏, 2012b. 中期-延伸期天气预报原理. 北京:科学出版社, 410.

钱维宏, 2013. 中国区域暴雨扰动环流图集. 北京:气象出版社, 224.

钱维宏, 江漫, 单晓龙, 2013. 大气变量物理解析原理及其在区域暴雨分析中的应用. 气象, 39(5):537-542.

钱维宏, 张广文, 黄静, 2015. 不同资料大气扰动分量对 2010 年台风鲇鱼强度变化的描述. 气象, 41(7):806-815.

孙建华, 赵思雄, 傅慎明, 等, 2013. 2012 年 7 月 21 日北京特大暴雨的多尺度特征. 大气科学, 37(3):705-718.

孙淑清, 1978. 低空急流及其与暴雨的关系, 暴雨文集, 长春:吉林人民出版社.

陶诗言, 1980. 中国之暴雨. 北京:气象出版社.

王成鑫, 高守亭, 梁莉, 等, 2013. 动力因子对地形影响下的四川暴雨落区的诊断分析. 大气科学, 37(5):1099-1110.

谢义炳, 张谭, 1980. 暴雨分析工作中的基本观点和一些看法. 暴雨文集. 长春:吉林出版社.

肖鹏, 夏利, 于竹娟, 等, 2013. 副高边缘两次大暴雨天气过程物理量特征分析. 高原山地气象研究, 33(2):18-23.

浙江省气候中心, 2013. 浙江省气候影响评价. 6:1-11.

郑婧, 孙素琴, 吴静, 等, 2014. 梅雨锋短时大暴雨的多尺度环境场分析. 气象, 40(5):570-579.

朱乾根, 1975. 低空急流与暴雨. 气象科技, 8:12-18.

Matsumoto S. 1972. Unbalanced low-level jet and solenoidal Circulation associated with heavy rainfalls, J Meteor Soc Jap, 50(3): 194-203.

Qian W H, Li J, Shan X L. 2013. Application of synoptic-scale anomalous winds predicted by medium-range weather forecast models on the regional heavy rainfall in China in 2010. Science China: Earth Sciences, doi: 10.1007/s11430-013-4586-5.