

毛程燕,潘欣,马依依,等. 浙江一次江淮气旋后部强对流暴雨过程诊断研究[J]. 热带气象学报, 2021, 37(4): 530-540.

文章编号: 1004-4965(2021)04-0530-11

浙江一次江淮气旋后部强对流暴雨过程诊断研究

毛程燕¹, 荆思佳¹, 潘欣¹, 马依依¹, 李浩文²

(1. 衢州市气象局, 浙江 衢州 324000; 2. 广州市气象台, 广东 广州 511430)

摘 要: 利用地面降水观测、NCEP/NCAR FNL再分析、ECMWF模式预报场和FY-2H静止卫星TBB资料,对2020年6月30日浙江省一次暴雨过程进行了综合分析。结果表明:(1) 200 hPa南亚高压强高空辐散、中纬度低槽东移、副热带高压带状稳定的阻塞形势、江淮气旋后部冷空气与暖湿气流交汇形成的冷式切变等共同提供了有利的环境条件;(2) 对流层中低层水汽通量向高空伸展、700 hPa正的垂直螺旋度中心都对暴雨落区有示踪作用,高层正水汽通量散度强于低层负水汽通量散度,垂直螺旋度和垂直速度中心几乎重合,先低层强辐合后强垂直上升运动均为本次暴雨的发生提供了重要的水汽和动力条件;(3) 暴雨发生在MPV、MPV1和MPV2为正负过渡的零值区,为对流不稳定和斜压不稳定相结合区域, θ_{se} 线密集区与地面近乎垂直,湿位涡的高值中心位于 θ_{se} 梯度最大处,高空湿位涡下传触发了位势不稳定能量的释放,引起大范围的强对流暴雨;(4) 850 hPa冷切变线附近的降水云团,是由多个块状对流云团合并加强形成完整的带状积雨云团,而上游不断有新生对流云团生成东移补充消散的老单体,触发阶段对流云后向传播,扰动发展阶段对流云团合并过程,形成对流云串的“列车效应”。

关 键 词: 强对流暴雨;冷式切变;垂直螺旋度;湿位涡;积雨云

中图分类号: P426.62

文献标志码: A

Doi: 10.16032/j.issn.1004-4965.2021.051

1 引 言

每年6月中旬—7月中旬是长江流域的梅雨期,过程集中、暴雨频发,尤其是2020年,梅期长、雨量大、强降雨区域重叠,其中浙江中北部梅雨期降水量为1951年以来第一位。对于梅汛期暴雨,国内很多专家都对其进行了深入探索研究^[1-3]。持续的强降水除了需要完整畅通的水汽通道^[4-5],还需要良好的动力场和热力场结构的配置^[6-7]。自1980年以来,关于位涡的理论和应用获得了蓬勃发展,尤其是在暴雨和台风研究中取得了很大进展和突破^[8-10]。Hoskins等^[11]提出应用等熵位涡来诊断冷空气在强降水落区和增幅方面的贡献,毛

程燕等^[12]在分析一次梅雨锋暴雨时也提出等熵位涡的演变和形态对冷空气活动有较好的视踪作用。而湿位涡是一个综合反映水汽作用和大气动力、热力属性的物理量,湿对称不稳定广泛应用于不同季节的各类降水中^[13-14],湿位涡与湿对称不稳定性有良好的对应关系^[15-17]。其中肖云清等^[18]在分析贺兰山东麓暴雨时指出,对流层中低层湿斜压项负极值中心的强度和变化对暴雨预报有指示意义;周玉淑^[19]在研究广义湿位涡与江淮流域暴雨关系时提出,湿位涡的正负及强弱变化对暴雨落区预报有一定的指导作用,葛战旗等^[20]研究沙澧河流域的暴雨时发现,高层冷空气的楔状入侵促进暖湿气流抬升使对流不稳定加强,伴随着湿位涡正压项MPV1的显著变化。近年来,随着观

收稿日期: 2020-08-24;修订日期: 2020-12-18

基金项目: 浙江省气象局一般项目(2020YB19)资助

通讯作者: 李浩文,男,湖南省人,工程师,博士,从事中短期预报研究。E-mail: lihaowen@mail3.sysu.edu.cn

测资料的增加和观测仪器的更新,应用卫星遥感资料研究暴雨云团演变特征也越来越多。张端禹等^[21]和张芹等^[22]应用FY-2G云顶亮温产品分析了暴雨的对流云活动,发现对流云合并加强和深对流云中心区的降雨量有明显加大趋势;王雪芹等^[23]分析暴雨时指出云团的合并是造成暴雨范围和强度增大的主要原因之一;刘新伟等^[24]利用FY-2E辐射亮温研究高原切变线对降水影响时发现TBB低值时段正好与短时强降水发生的时段相对应。而“风云”二号H(FY-2H)卫星是2018年6月5日发射成功的静止轨道气象卫星,每15 min一次地球全圆盘观测、每6 min一次区域观测,大大提高了对暴雨落区、强度的预报精度,TBB的演变特征可反映对流云团的发展阶段、演变趋势,对于未来降水变化进行有效研判。

针对2020年6月29—30日发生在浙江省的一次大暴雨过程,由于模式预报显著偏弱,事先对其量级预估存在明显不足,29日夜里不断有对流系统发展,衢州市气象局和多个区县台站在30日凌晨到上午先后发布了暴雨红色预警信号,而在分析研判本次过程时发现,此次形势与2019年6月6日同样发生在浙江省的一次大暴雨过程非常相似,当时江山市气象局也全网发布了暴雨红色预警信号,虽有如此相似的形势,降水落区和范围却

相差很大,值得深入思考。而对于这类低压后部的强对流暴雨,目前模式预报都存在明显不足,量级、落区都比较难以把握,因此本文利用了我国FY-2H卫星TBB资料和美国NCEP再分析资料,从动力、热力条件 and 对称不稳定等方面进行了综合分析,探讨其形成发展机理,对于未来这类暴雨预报提供一些借鉴,提高其预报和服务效果。

2 资料与方法

2.1 资料来源

本文采用美国气象环境预报中心(National Centers for Environmental Prediction)NCEP FNL逐6 h全球再分析资料($1^{\circ} \times 1^{\circ}$)、欧洲中心ECMWF模式细网格预报资料($0.125^{\circ} \times 0.125^{\circ}$)、我国FY-2H静止卫星云顶亮温(Temperature of Black Body, TBB)资料(时间分辨率为30 min、空间分辨率为 $0.1^{\circ} \times 0.1^{\circ}$)(<http://satellite.nsmc.org.cn/portalsite/Data>)和浙江省常规观测和区域站自动观测气象资料。研究区域范围为 $105^{\circ} \sim 135^{\circ} \text{E}$, $18^{\circ} \sim 40^{\circ} \text{N}$ 。

2.2 湿位涡计算方法

吴国雄等^[25]证明,满足准静力平衡时, P 坐标系中湿位涡MPV可分解为垂直分量MPV₁和水平分量MPV₂,其表达式见式(1)~式(3)。

$$\text{MPV} = \text{MPV}_1 + \text{MPV}_2 = -g(\zeta + f) \frac{\partial \theta_{\text{sc}}}{\partial p} + g \left(\frac{\partial v}{\partial p} \frac{\partial \theta_{\text{sc}}}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial p} \frac{\partial \theta_{\text{sc}}}{\partial y} \right) \quad (1)$$

$$\text{MPV}_1 = -g(\zeta + f) \frac{\partial \theta_{\text{sc}}}{\partial p} \quad (2)$$

$$\text{MPV}_2 = g \left(\frac{\partial v}{\partial p} \frac{\partial \theta_{\text{sc}}}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial p} \frac{\partial \theta_{\text{sc}}}{\partial y} \right) \quad (3)$$

式中 θ_{sc} 为假相当位温, f 为科氏参数,MPV₁为湿位涡的垂直分量(湿正压项),MPV₂为水平分量(湿斜压项)。MPV₁受垂直方向的绝对涡度和对流稳定度影响,即表示惯性稳定度和对流稳定性的作用,当大气为对流不稳定时,MPV₁<0,有利于暴雨的发生发展,当大气为对流稳定时,MPV₁>0,则不利于暴雨发生发展;MPV₂受垂直风切变和水平方向的假相当位温梯度影响,其正值区移动方向可作为低空急流和暖湿气流活动的示踪^[10],低层MPV₂<0时,表示水平湿斜压性增强,垂直涡度增大。MPV₂负值区越强,表明大气斜压性增强,越

有利于降水增大。湿位涡单位为PVU,1 PVU= $10^{-6} \text{m}^2 \cdot \text{K}/(\text{s} \cdot \text{kg})$ 。

3 前期预报偏差分析

3.1 模式预报情况

29日20时(除标明外均为北京时,下同)欧洲中心ECMWF模式预报500 hPa江淮流域气温为 0°C 附近(图1a),江南中北部气温呈南低北高,与实况气温(北低南高)相反,因而预报的冷空气南下影响较弱,而且预报浙江北部700 hPa和850 hPa

均以西风动量为主,中南部则为西南分量,与实况西北风和西南风的辐合强度相比也是偏弱的,ECMWF 预报 28 日 20 时降水大值中心偏离到江西北部,对于浙江来说强降水落区在北部一带,与实况相比落区有明显偏差(图 1b),29 日 20 时起报的 24 小时降水进行了显著调整,与实况相比无论落区是量级都还是比较接近的。而 GFS 模式的预

报效果则更差,在 28 日 20 时起报的 850 hPa 为一致的西南风(图 1c),且在浙江中部有风速辐散,浙江省面上并没有报出明显降水(图 1d),29 日 20 时起报的降水虽有调大趋势,但也基本预报在 20 mm 以下,因而事先对本次过程量级的预估存在明显不足,对公众预报和服务效果也不佳。

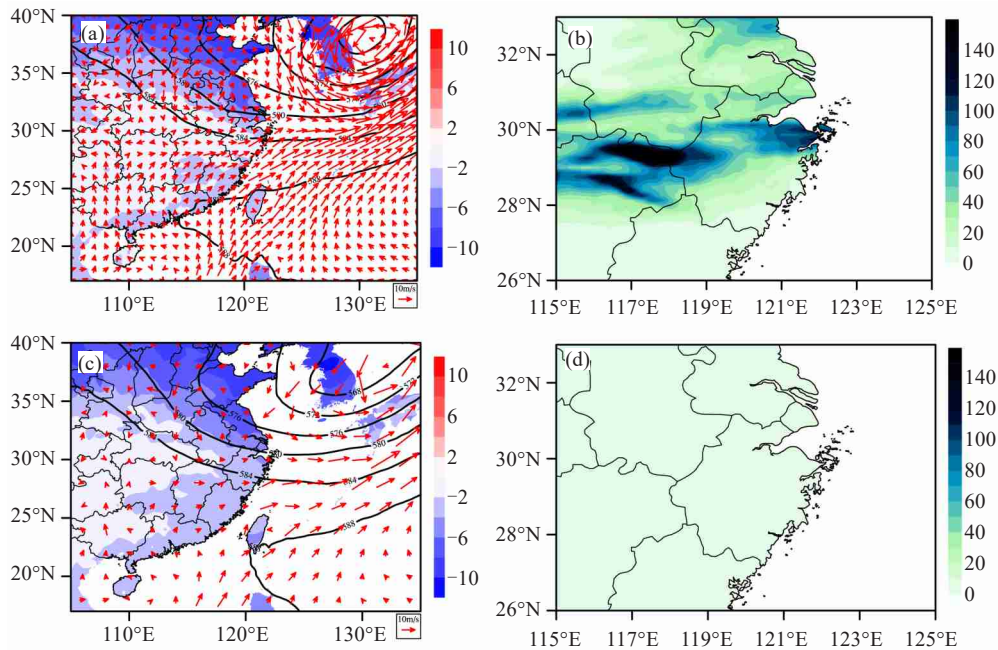


图1 2020年6月29日20时500 hPa高度场(等值线,单位:dagpm)、850 hPa风场(箭头,单位:m/s)和温度场(阴影,单位:°C)的ECMWF模式预报(a)和GFS模式预报(c)及29日20:00—30日20:00对应的ECMWF(a)和GFS(d)模式降水预报

3.2 相似形势落区差别大

在分析“6.30”过程时发现,此次过程与2019年6月6日(简称“6.6”过程)影响浙江省的一次大暴雨的形势非常相似(图2a),两次过程都是高空冷槽后部、江淮气旋入海后冷切南压过程中出现的强对流暴雨,渤海低压位置相近(图2b),850 hPa西南急流都达到了24 m/s以上,700 hPa以下风切变

(20 m/s)和K指数都相仿(图略),但不同之处是今年“6.30”的588 dagpm位置比“6.6”的稍偏北一些,副热带高压势力更强,主要在华南北部到福建一带,588 dagpm与584 dagpm更靠近,能量也更充足一些,且副热带高压脊线位置比较高,使得冷空气在下摆过程中在浙江中部滞留,而渤海区域低压强度更强、冷空气势力也较强。

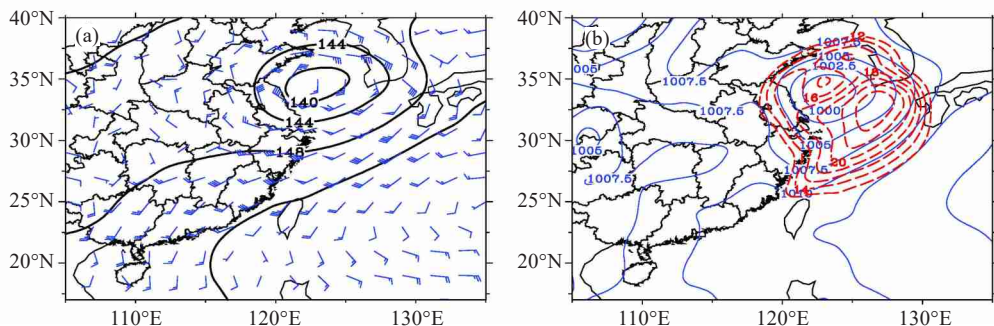


图2 2019年6月6日20时850 hPa风场和高度场(a)和700 hPa急流(虚线,≥12 m/s)和海平面气压场(单位:hPa)(b)

从“6.6”过程降水情况来看(图3a),强降水主要集中在浙江西部,尤其是衢州中南部、丽水西部出现了大暴雨,其他地区降水均在50 mm以下,强降水范围并不大。而“6.30”过程(6月29日20:00—30日20:00)浙江省中南部均出现了暴雨到大暴雨天气,全省平均雨量为38.0 mm(图3b)。由于副热带高压稳定少动形成了阻塞形势,系统移动缓慢,降水效率较高,上游不断有新生对流发展东移,出现了明显的“列车效应”。30日01时左右,强降水回波自西向东随700 hPa引导气流逐渐影响浙江,衢州、金华、丽水、绍兴、宁波等大部分地区都出现了暴雨以上天气,尤其是浙江西部,大部分地区出现了大暴雨天气,衢州市面雨量为139.5

mm,有2个乡镇24 h雨量超过250 mm(特大暴雨),236个乡镇超过100 mm(大暴雨)。30日14时以后随着江淮气旋东移入海,对流层中低层逐渐转西北气流,浙江全省降雨渐止。对比两次过程,“6.6”大暴雨过程系统南压速度更快,其强降水落区更小、降水比较集中、落区更小、对流性也更强,而“6.30”过程强降水持续时间则更长、暴雨范围也更广。

在分析了模式预报和对比了历史个例后,对“6.30”过程降水基本倾向于偏弱预报,而实际本次过程浙江中部和西部都出现了暴雨、大暴雨天气,因此有必要重新审视一下本次过程,对于未来预报提供一定的调整思路。

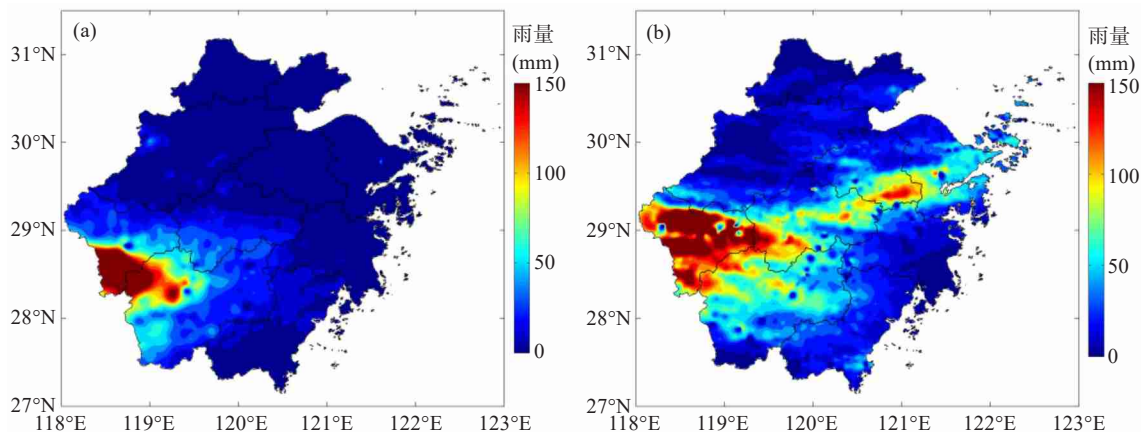


图3 浙江省2019年6月6日08:00—7日08:00(a)和2020年6月29日20:00—30日20:00(b)降水空间分布

4 结果分析

4.1 大尺度环流背景和影响系统

29日20时,200 hPa南亚高压位于江南、华南上空,高压脊位于27°N附近,高空西风急流位于华北到黄淮地区上空(图4a),浙江省为典型的梅雨环流形势。此时浙江省处于南亚高压控制下,高空强烈的辐散气流有利于低层湿空气源源不断辐合抬升;500 hPa中高纬为两槽一脊环流形势(图4b),贝加尔湖以北为稳定的阻塞高压,华北冷涡位置偏南(40°N以南),位于渤海湾一带,中纬度环流经向度大,底部冷空气南下,形成冷暖空气对峙,贝加尔湖以东至东亚沿岸为宽广的低槽,浙江中部有小扰动,500 hPa有冷空气向下渗透,比预报偏强,副热带高压从日本以南延长至华南地区

呈东西带状分布,588 dagpm线北界位于福建中部至华南上空,120°E处脊线位于22°N附近。30日08时南亚高压略有南压,浙江中北部处于高空槽槽底,而588 dagpm线也东退南压,高空槽东移缓慢,强降水维持时间较长;高空冷空气从西北地区沿着冷槽南下抵达江南地区,与副热带高压西部的西南暖湿气流交汇(图略)。

与此同时,850 hPa江淮气旋东移入海后加强,气旋后部偏北急流携带冷空气不断影响,西北急流与西南暖湿气流形成的冷式切变位于浙江中部,大暴雨发生在850 hPa冷切变南压过程中,浙江上空为南海输送来的西南水汽、江淮气旋带来的海上水汽、华北冷空气三支气流相互交汇(图4c)。29日夜间,850 hPa急流强度减弱,但急流带形态变窄,雨带位置与急流轴中心相对应,呈东北-西南向,随着急流轴南压而南移,其中02—05

时,急流变窄导致风的垂直切变增大,雨带增强;江淮气旋继续东移,其后部偏北风影响的主要是浙江东部沿海城市,而浙江中部偏西急流则维持18 m/s(图4d),02时之前东段雨带位于切变北侧,与显著北风对应,西段雨带位于切变南侧。05时以后急流减弱,鄱阳湖上有小扰动东移,雨带转成东西向,形成“列车效应”;30日08—11时,虽然急

流减弱以偏西气流为主,但其上有小扰动发展东移并不断有弱冷空气渗透,700 hPa浙江西部有西北风和西南风辐合,降水维持,05—11时梅雨带位于切变线南侧。14时以后850 hPa转为西北风,降水显著减弱。因此,本次梅汛期暴雨过程主要是暖湿气流叠置高空冷空气渗透产生的强降水。

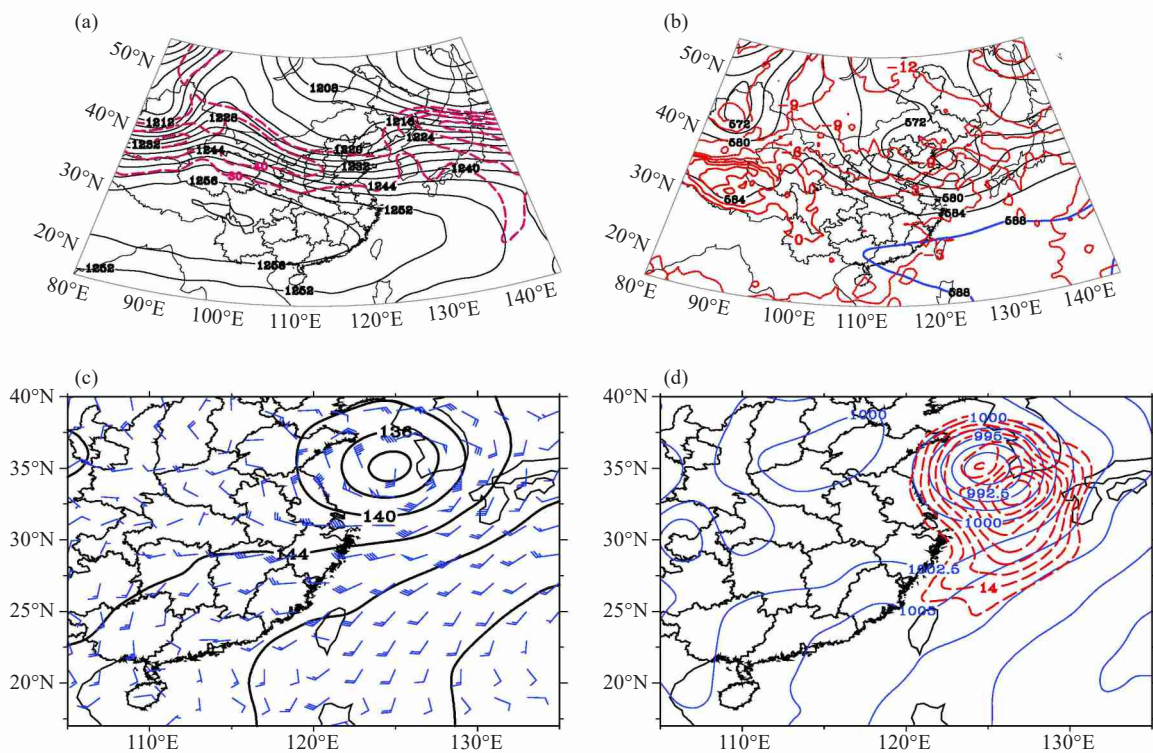


图4 2020年6月29日20时200 hPa高度场(等值线,单位:dagpm)及急流(虚线, ≥ 30 m/s)(a)、500 hPa高度场(单位:dagpm)(b)、850 hPa风场和高度场(c)和29日20时700 hPa急流(虚线, ≥ 12 m/s)和海平面气压场(单位:hPa)(d)

4.2 水汽输送分析

作水汽通量的经向剖面,发现在29日20时(大暴雨前)浙江中部上空500 hPa高度以下有显著的水汽通量分布(图5a),中心强度为 $24 \text{ g}/(\text{cm} \cdot \text{hPa} \cdot \text{s})$ (800 hPa附近), 35°N 以南为完整的水汽通道,水汽大值区逐渐向高纬、高空伸展; 30°N 附近800 hPa以下有强水汽通量散度的负中心存在,中心强度为 $-4 \times 10^{-7} \text{ g}/(\text{cm}^2 \cdot \text{hPa} \cdot \text{s})$ (900 hPa附近),800 hPa以上为强水汽通量散度正中心,中心强度为 $6 \times 10^{-7} \text{ g}/(\text{cm}^2 \cdot \text{hPa} \cdot \text{s})$ (650 hPa附近),高层水汽辐散强于低层水汽辐合,有利于近地层水汽源源不断吸纳进来,夜间850 hPa衢州市上空水汽通量散度持续辐合。30日02时(图略),水汽通量大值

中心位于 29°N 附近,中心值仍为 $24 \text{ g}/(\text{cm} \cdot \text{hPa} \cdot \text{s})$,范围有所减小;水汽通量散度中心位于 $29 \sim 30^\circ \text{N}$ 附近,随高度先向北再向南倾斜,有三个强度中心,分别位于950 hPa、800 hPa、750 hPa高度。30日08时(图5b),水汽通量位置向低纬偏移,强度有所减弱,800 hPa高度上水汽通量中心值为 $16 \text{ g}/(\text{cm} \cdot \text{hPa} \cdot \text{s})$,水汽通量散度中心随之南移,有多个水汽辐合中心,最大强度增至 $-5 \times 10^{-7} \text{ g}/(\text{cm} \cdot \text{hPa} \cdot \text{s})$ 、影响范围明显扩大,浙江中南部上空由低层到500 hPa均为强负值区。以上分析表明,浙江中南部地区出现暴雨区,不仅需要大量的水汽输送,还需要强烈的水汽辐合。

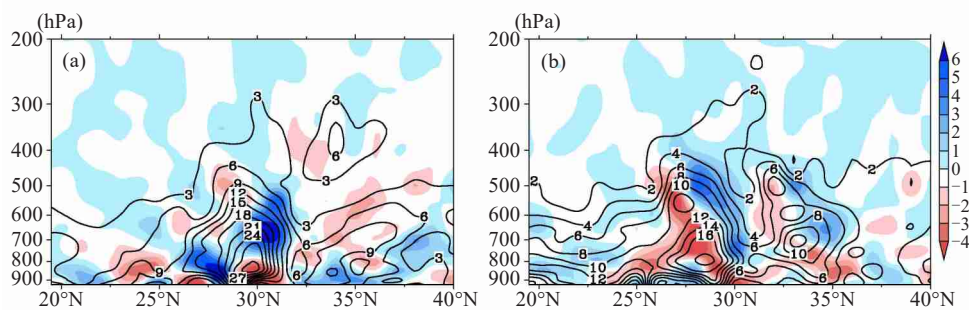


图5 2020年6月29日20时(a)和30日08时(b)水汽通量(等值线,单位: $\text{g}/(\text{cm}\cdot\text{hPa}\cdot\text{s})$)和水汽通量散度(阴影,单位: $10^{-7}\text{g}/(\text{cm}^2\cdot\text{hPa}\cdot\text{s})$)沿 119°E 的经向垂直剖面

4.3 动力诊断分析

垂直速度是反映大气垂直输送的物理量,垂直螺旋度是描述大气环境风场旋转程度和运动强弱的特征量,因此都是反映大气运动动力机制的重要指标^[20]。由垂直速度的剖面可见(图6a),29日08:00—30日20:00时段内,对流层中低层呈现“+—”分布,29日20时之前,650 hPa以下为一致的正值区,对流层中低层以下沉运动为主,但此时由低层向中层逐渐出现负散度,650 hPa以下为正垂直螺旋度区(图6b),中心强度为 $25\times 10^{-7}\text{hPa}/\text{s}^2$,逐渐转为有利于强降水的条件;20时以后450 hPa以下垂直速度为一致的负值区,最大上升运动中心位于600 hPa附近($-5\text{Pa}/\text{s}$),750 hPa以下负散度区逐渐向高空延展,与此同时,垂直螺旋度转为弱的负值区,与垂直速度配合并不是特别好。30日02时,700 hPa以下垂直速度又转为正值区,900 hPa以下有弱辐散出现,此时垂直螺旋度为零值附

近,垂直输送明显减弱。30日08时,垂直速度有两个负值中心,分别为700 hPa附近($-6\text{Pa}/\text{s}$)和450 hPa附近($-4\text{Pa}/\text{s}$),即对流层整层为强烈的上升运动,而600 hPa以下为较强的负散度区(辐合区),600 hPa以上为辐散区,而此时的垂直螺旋度为强的正值,强度中心为 $20\times 10^{-7}\text{hPa}/\text{s}^2$ (位于700 hPa),浙江中南部上空为风向风速辐合运动中心,低值系统增强,垂直螺旋度、垂直速度与低空辐合高空辐散的配置良好,为浙江中南部地区暴雨提供了有利的动力条件。14时以后700 hPa以下仍为强的负散度区,700 hPa处散度中心为 $-5\times 10^{-5}\text{s}^{-1}$,而此时大气层中转为多个垂直速度正值中心,尤其是800 hPa以下有下沉运动中心,对应的垂直螺旋度为零值,表明低层大气虽有辐合条件,但垂直输送显著减弱,这与14时以后雨势明显减弱有较好的对应关系。

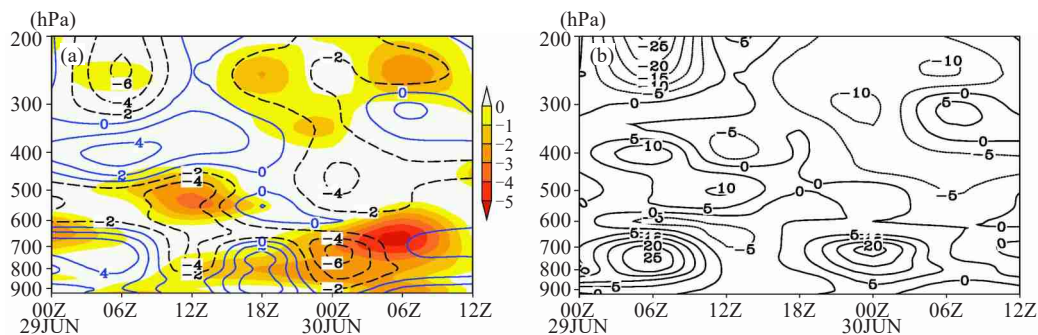


图6 2020年6月29日08时—30日20时垂直速度(等值线,单位: Pa/s)与散度(阴影为辐合区,单位: 10^{-5}s^{-1})(a)和垂直螺旋度(单位: $10^{-7}\text{hPa}/\text{s}^2$)(b)的时间-高度剖面(剖面为 119°E , 29°N)

4.4 湿位涡诊断分析

4.4.1 湿位涡正压项(MPV1)的垂直分布

为了揭示干冷空气从高空向低空传输对强降水的影响,主要探究了湿位涡正压项的垂直分布对浙中南暴雨的作用。沿着暴雨中心 119°E 作湿

位涡正压项剖面,29日20时暴雨发生前(图7a), 30°N 及以南600 hPa以下为一致的弱负值区,说明在对流层中低层为一致的弱对流不稳定区,600 hPa以上为正值区,其上受干冷气流控制则为对流稳定区,这种配置有利于低层低值系统进一步发

展。25~30°N之间950 hPa以下有两个负值中心,分别为-1.0 PVU(30°N)、-2.0 PVU(25°N),暴雨中心发生在27~29°N,偏离MPV1中心(29°N)的负值区内。30~35°N有高值的MPV1从对流层中层向低层倾斜伸展,分别在500 hPa、700 hPa、900 hPa附近形成3个强度中心,分别为-1.2 PVU、-0.6 PVU、-1.8 PVU;29日02时暴雨期间(图7b),30°N附近500 hPa以下转为强负值区,700 hPa中心强度为-1.4 PVU,30°N及以南对流层低层有强对流不稳定,表明强降水区上空为强的对流不稳定区。对流层高层(400 hPa)的高值MPV1进一步向下延展至900 hPa附近,从对流层高层至低层形成一个贯通稳定的倾斜传输带,高

值MPV1向低层逐渐输送,表明有气旋后部冷空气向低空传输堆积,侵入的冷空气在低层形成冷垫,强迫暖湿气流抬升,对流不稳定增强和潜热量释放,从而触发暴雨的发生发展。30日08时(图略),600 hPa以下为负值区,30°N上空MPV1中心下压至750 hPa附近(-1.4 PVU),30°N以南850 hPa为0 PVU区,暴雨发生在MPV1的正负过渡的零值区附近,并未出现在正涡度附近。由此可见,高值MPV1从对流层中层向下传输侵入降水区,使降水区稳定度明显下降,冷垫上的暖湿气流抬升,触发了不稳定能量释放和潜热加热,从而对强降水起显著的增幅作用,MPV1的分布对暴雨落区有良好的示踪作用。

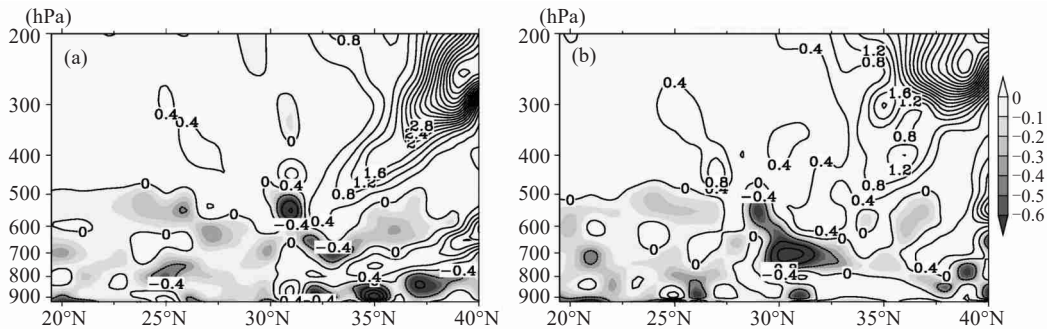


图7 2020年6月29日20时(a)、30日02时(b)湿位涡正压项MPV1(单位:PVU)沿119°E的经向垂直剖面图
阴影区为MPV1≤0。

4.4.2 等压面上湿斜压项(MPV2)的水平分布

29日20时(图8a),30~34°N之间600 hPa以下为密集的等值线覆盖,表明系统斜压性增强,有两个负值中心分别位于650 hPa和900 hPa,强度分别为-0.6 PVU和-1.0 PVU,说明30°N以北低层垂直风切变较强,南侧风切变较小;且负值区随高度向北倾斜延伸,浙江中部地区(29°N)为零值附近,反映了低空由于风向辐合产生了弱的暖湿气流。30日02时(图8b),MPV2负值中心南移、范

围缩小,浙江中部750 hPa以下两个强度中心均为-0.8 PVU,且两个中心的高度均降低,本次大暴雨过程并未出现在强的斜压中心,而是在其南侧零值附近的弱正值区。30日08时(图略),MPV2又向高空伸展至600 hPa,29°N附近等值线变密集梯度加大,暴雨出现在低层MPV2的零等值线附近,说明大气低层为弱大气湿斜压性和不强的风垂直切变,浙中西地区西南暖湿气流也不强盛。

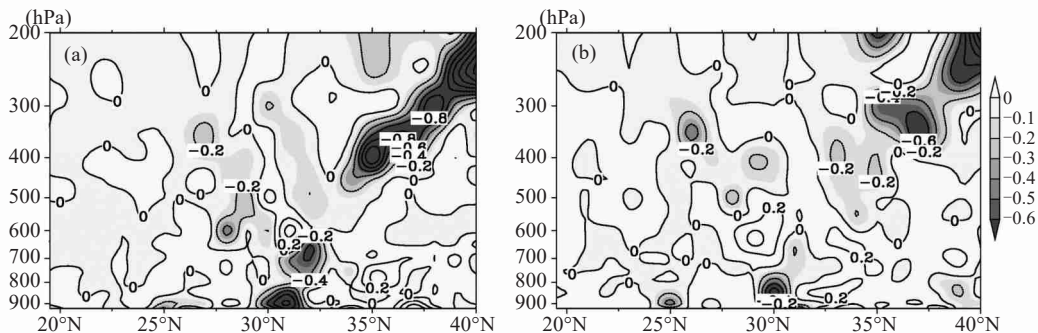


图8 2020年6月29日20时(a)、30日02时(b)湿位涡斜压项MPV2(单位:PVU)沿119°E的经向垂直剖面图
阴影区为MPV2≤0。

4.4.3 湿位涡演变与强对流降水机制

假相当位温表征大气热力、湿度的综合参量,其垂直分布反映了大气中能量的分布状况。为揭示暴雨的形成演变机制,研究冷空气与湿位涡对暴雨的作用,制作了假相当位温与湿位涡的剖面图进行综合分析。30日02时(图9a),暴雨区北侧600 hPa附近有一个 θ_{sc} 低值中心(325 K),表明此时有冷空气从对流层中层侵入。在冷暖空气交汇处等 θ_{sc} 线非常密集,且与地面近乎垂直,说明30°N附近有很强的锋区,浙江北部地区锋生作用明显,锋区缓慢南压,锋区内斜压性强,冷暖空气对峙,有利于产生对流不稳定,从而增强降水,暴雨区上空等 θ_{sc} 线呈漏斗状下凹,有利于对流层中高层冷空气沿等熵面下滑,较小的 θ_{sc} 干空气侵入到较大的 θ_{sc} 暖湿空气上空,导致对流不稳定显著增强,大暴雨位于高能舌一侧。30日08时,等值线密集区位置稳定少变,暖湿气流在冷垫上不断抬

升触发对流,而14时等值线随高度显著南倾(图9b),浙中南一带中低层受一致的冷空气控制,降水趋于结束。由于湿位涡具有守恒性,异常高的MPV1区往往出现异常低的MPV2,所以冷空气越强,斜压性也越强,正压湿位涡也就越小。MPV的高值中心位于 θ_{sc} 密集带上,大于-1 PVU,当 θ_{sc} 线高度降低并南压时,MPV大值区也随之降低和南压(800 hPa以下)。等 θ_{sc} 线坡度越陡,高空干冷空气向低层侵入越显著,锋区则越强,大气斜压性也越强,MPV负值也越大,越有利于大范围暴雨的产生。由此可见,高空干冷气流呈倾斜的漏斗状向低层侵入,带动高空的高位涡向低层移动,与暖湿气流交汇、对流不稳定加大,有利于强降水的维持,衢州市大暴雨位于涡度零线附近,而杭州湾附近降水发展与正涡度相对应,但东移南压速度较快,累计雨量不大。

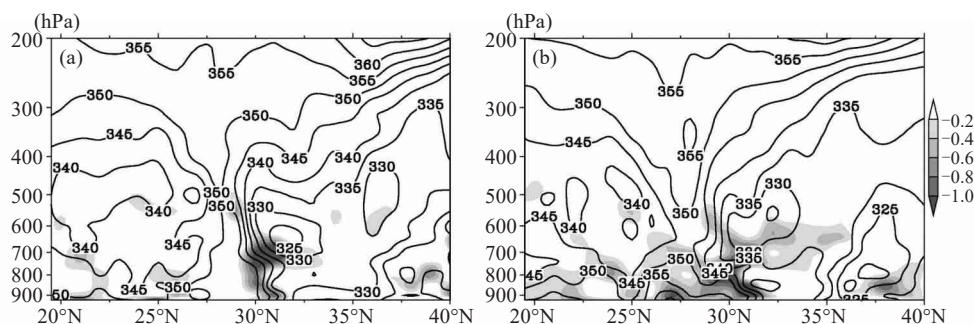


图9 2020年6月30日02时(a)和14时(b)假相当位温(等值线,单位:K)和湿位涡MPV(阴影,单位:PVU)沿119°E的经向垂直剖面图

4.5 中尺度对流云团活动特征

本次强降水过程主要影响时段是6月29日夜到30日上午,前半夜主要是浙江北部有分散的对流性降水,后半夜开始主要影响浙江中南部,零点前后衢州市开化县开始有对流发展起来,降水效率很高。选取该时段内FY-2H的云顶亮温演变特征加以分析,发现30日00—05时为急流的触发阶段,急流在云团的后侧激发出来,对流云为后向传播。06—11时为急流扰动发展阶段,对流云团发展合并,上游江西鄱阳湖的东南侧有两个小扰动相配合,不断有对流云发展并沿着700 hPa引导气流东移,形成明显的“列车效应”^[27]。29日20:00浙江北部和西部地区有多个对流云团发展(图10a),最低云顶亮温约为-60℃,之后对流云团逐

渐东移南压并逐渐增强,云团尺度也逐渐扩展;23:00左右丽水市和衢州市交界处发展成积雨云团(图10b),最大云顶亮温为-70℃,说明此时此处云顶伸展高度较高,对流发展旺盛,该区域降水显著增强。30日02:00—04:00积雨云有所减弱(图10c),TBB减小;04:00又再次显著加强(图10d),形成一条相对完整的东北-西南走向的带状积雨云带,横跨整个浙江省,宽度150 km以上,06:00以前云带位置都稳定少动,不断有新的对流单体新生,降水效率高,浙江中部出现大范围强降水。06:00以后,浙江东部对流云团移出,但浙江西部上游江西省仍有强对流云团发展并东移影响,“列车效应”现象维持,其中08:00左右衢州、丽水、金华三市交界处云顶亮温为-70℃(图10e),持续的对流

云发展影响,使得这一带出现暴雨到大暴雨天气。10:00以后积雨云团南压(图10f),主要影响丽水

市,13:00对流云团减弱消散,云顶亮温升高,降水强度减弱,以残留的层状云弱降水为主。

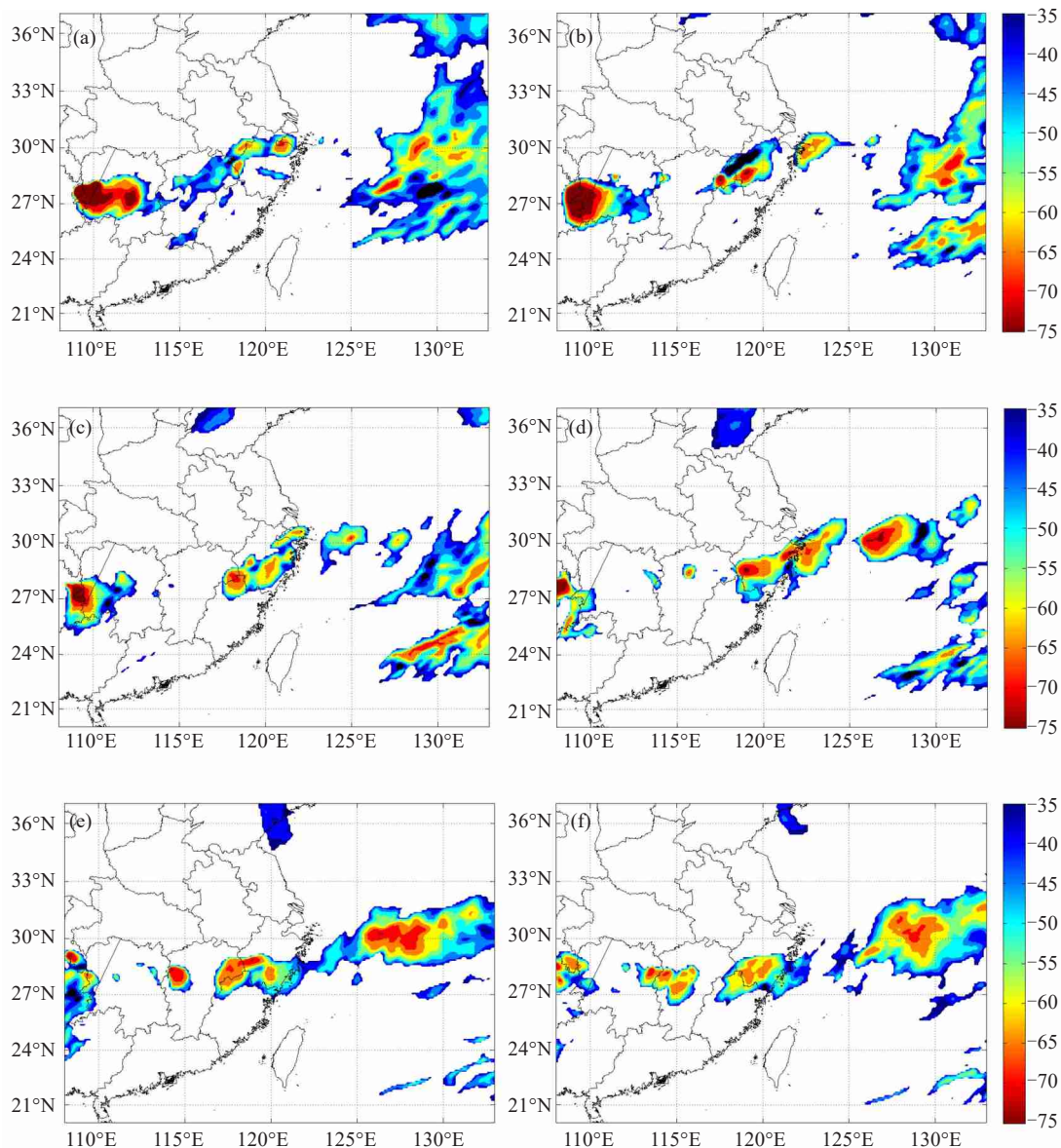


图10 2020年6月29日20:00(a)、23:00(b)、30日01:00(c)、04:00(d)、08:00(e)、10:00(f)FY-2H云顶亮温演变(单位:°C)

5 结 论

本次过程是一次江淮气旋后部冷空气影响形成的大暴雨过程,对500 hPa的冷空气势力预报偏弱,700 hPa和850 hPa西风动量为主,ECMWF和GFS模式预报的降水也显著偏弱,因而事先对其量级预估不足,对公众预报和服务效果不佳。本文分析得出如下结论。

(1) 本次暴雨过程由多个天气系统相互作用。

500 hPa中高纬为两槽一脊环流形势,东亚地区为宽广的低槽,江淮气旋后部不断有冷空气南下影响江南地区,200 hPa南亚高压西北侧偏东风与西北气流之间辐散区,高空强辐散和低空冷式切变辐合叠置,浙江省位于南亚高压脊线北侧,副热带高压带状分布、梅雨锋稳定,系统少动,降水效率高,雨带与西南急流相对应,其上有小扰动,急流变窄雨带增强,大暴雨发生在850 hPa冷切变南压过程中。

(2) 本次过程水汽、动力和热力条件相互配

合。暴雨出现前,对流层中低层增湿显著,水汽通量向高纬、高空延展,高层水汽辐散强于低层水汽辐合,有利于近地层水汽不断吸纳进来,而低层显著的负散度先于垂直运动出现也对暴雨有预示作用;垂直螺旋度率先转为有利于降水的条件,比垂直速度提前出现,发生暴雨时垂直螺旋度和垂直速度中心几乎重合,垂直螺旋度减小时雨势也减弱。因此水汽通量和垂直螺旋度对暴雨落区和强度有示踪作用。

(3) 湿位涡理论和 θ_{se} 综合分析,能较好地解释本次大暴雨的形成、发展机制,是一次对流不稳定和斜压不稳定引起、动力和热力共同作用产生的大暴雨过程。大暴雨发生在MPV1和MPV2为正负过渡的零值区附近,对流不稳定和斜压不稳定相结合区域,高空干冷气流带动高空的高位涡向低层输送,低层锋区增强、大气斜压性加大,增强

了对流不稳定,从而引起显著的降水增幅;而冷暖空气交汇处等 θ_{se} 梯度很大,MPV的高值中心即位于 θ_{se} 最密集处。

(4) 本次暴雨也同时受多个中小尺度对流系统影响,不断有新的对流单体发展东移。江西一带的两个小扰动和急流脉动的配合下,850 hPa冷式切变附近的降水云团不断激发出来,多个块状对流云团合并为完整的带状积雨云团,降水云团出现“增强-减弱-再增强-减弱消散”阶段,触发阶段对流云后向传播,扰动发展阶段对流云团合并过程,形成显著的“列车效应”。

(5) 本次暴雨过程和“6.6”暴雨过程都是高空冷槽后部、江淮气旋入海后冷切南压过程中出现的强对流暴雨,但“6.30”低压强度更强、冷空气势力也更强、系统南压速度更缓慢,因此强降水持续时间更长、暴雨范围更广。

参 考 文 献:

- [1] 刘梅,张备,俞剑蔚,等. 江苏梅汛期暴雨高空能量输送及高低空要素耦合特征[J]. 高原气象,2012,31(3):777-787.
- [2] 张红华,姚秀萍,高媛,等. 2016年江淮地区梅汛期首场持续性暴雨的持续原因初探[J]. 热带气象学报,2018,34(5):674-684.
- [3] 郑婧,陈娟,徐星生,等. 一次低空急流加强下的暴雨过程成因分析[J]. 干旱气象,2020,38(3):411-422.
- [4] 周慧,蔡荣辉,尹冬德,等. 2016年7月湖南一次极端持续性暴雨成因分析[J]. 干旱气象,2018,36(1):56-63.
- [5] 高守亭,周玉淑,冉令坤. 湿空气动力学理论及应用研究进展[J]. 大气科学学报,2020,43(1):169-180.
- [6] 刘国强,佟欣怡,杨莲梅,等. 巴州地区一次罕见短时强降水过程诊断分析[J]. 气象与环境学报,2017,33(6):16-24.
- [7] 任丽,关铭,李有缘,等. 一次暴雨过程受不同系统影响的动力热力场结构特征[J]. 气象科技,2019,47(6):959-968.
- [8] 高万泉,周伟灿,李玉娥. 华北一次强对流暴雨的湿位涡诊断分析[J]. 气象与环境学报,2011,27(1):1-6.
- [9] 廖玥,王咏青,张秀年. 台风“Chanchu”变性过程位涡及锋生特征分析[J]. 气象科学,2019,39(1):12-22.
- [10] 覃武,赵金彪,黄荣成,等. 台风“山竹”登陆结构变化及造成广西强降水异常分布的成因分析[J]. 热带气象学报,2019,35(5):587-595.
- [11] HOSKINS B J, MCINTYRE M E, ROBERTSON A W. On the use and significance of isentropic potential vorticity maps[J]. Quart J Roy Meteor Soc, 1985, 111(470):877-946.
- [12] 毛程燕,李浩文,龚理卿,等. 2018年一次非典型梅雨锋暴雨过程诊断分析[J]. 气象与环境学报,2019,35(6):8-13.
- [13] 邓承之,张亚萍,方德贤,等. 一次纬向暴雨过程的湿对称不稳定与锋生分析[J]. 气象,2019,45(11):1 527-1 538.
- [14] 崔恒立,王东仙,吴梦雯. 一次西南涡暴雨的湿位涡诊断分析[J]. 高原山地气象研究,2019,39(3):14-19.
- [15] 刘璐,冉令坤,周玉淑,等. 北京“7.21”暴雨的不稳定性及其触发机制分析[J]. 大气科学,2015,39(3):583-595.
- [16] 王晨曦,邓莲堂,范广洲,等. 一次华北锋面带状降水过程中的对流-对称不稳定诊断分析[J]. 气象,2018,44(12):1 518-1 528.
- [17] 李瑞萍,王秀明,夏扬,等. 一次夏季冷锋后暴雨的形成机制探析[J]. 气象,2019,45(1):50-60.
- [18] 肖云清,沈新勇,张晓露,等. 贺兰山东麓两次局地暴雨过程的湿位涡诊断分析[J]. 暴雨灾害,2020,39(2):148-157.
- [19] 周玉淑. 广义湿位涡在江淮流域暴雨分析和预报中的应用[J]. 大气科学,2009,33(5):1 101-1 110.
- [20] 葛战旗. 2013年8月沙澧河流域一次连续暴雨过程成因分析[J]. 气象与环境科学,2017,40(4):90-99.
- [21] 张端禹,崔春光,徐明,等. 2015年湖北省梅雨期一次暴雨过程对流云活动分析[J]. 气象与环境学报,2017,33(2):8-17.

- [22] 张芹, 苏莉莉, 张秀珍, 等. 山东一次暖区暴雨的环境场特征和触发机制[J]. 干旱气象, 2019, 37(6): 933-943.
- [23] 王雪芹, 徐卫红, 向朔育, 等. 基于FY-4卫星资料分析暴雨云系特征[J]. 高原山地气象研究, 2020, 40(1): 36-40.
- [24] 刘新伟, 叶培龙, 伏晶, 等. 高原切变线形态演变对高原边坡一次降水过程的影响分析[J]. 高原气象, 2020, 39(2): 245-253.
- [25] 吴国雄, 蔡雅萍. 湿位涡和倾斜涡度发展[J]. 气象学报, 1995, 53(4): 387-405.
- [26] 苟阿宁, 王玉娟, 张家国, 等. 一次梅雨锋附近“列车效应”致灾大暴雨过程观测分析[J]. 气象, 2019, 45(8): 1 052-1 064.

DIAGNOSTIC RESEARCH OF SEVERE CONVECTIVE RAINSTORM EVENT AT THE BACK OF A JIANG-HUAI CYCLONE IN ZHEJIANG PROVINCE

MAO Chengyan¹, JING Sijia¹, PAN Xin¹, MA Yiyi¹, LI Haowen²

(1. Quzhou Meteorological Bureau, Quzhou 324000, China;

2. Guangzhou Meteorological Observatory, Guangzhou 511430, China)

Abstract: Based on surface precipitation observational data, NCEP/NCAR FNL reanalysis data, ECMWF model prediction field data and FY-2H geostationary satellite TBB data, the present study analyzed a rainstorm process in Zhejiang Province on June 30, 2020. The results show that: (1) Favorable conditions for the process include the strong upper-air divergence of the 200 hPa South Asian High, the eastward movement of the low trough in the middle latitudes, the stable blocking of the subtropical high, and the cold shear formed by the intersection of the cold air and the warm and wet air at the back of the Changjiang River-Huaihe River Cyclones (Jianghuai Cyclones). (2) The expansion area of water vapor flux in the mid-low troposphere and the vertical helicity at 700 hPa are both good indicators for heavy rain. The positive water vapor flux divergence at the upper troposphere is stronger than the negative one at the lower troposphere. The vertical helicity and the vertical velocity center almost coincide. The strong low-level convergence followed by the strong vertical upward movement provide good water vapor and dynamic conditions for the rainstorm. (3) The rainstorm area is located near the transition zone of the positive and negative value of MPV, MPV1 and MPV2. This zone is also the conjoint area of convective and baroclinic instability. The region in which the isentropic of θ_{se} densely distributed is almost perpendicular to the ground. The high-altitude cold air flow drives the high-potential vortex to the lower level, causing regional severe convective rainstorm. (4) The precipitating cloud near the cold shear line at 850 hPa has been consolidated from multiple massive convective clouds into a completely banded cumulonimbus cloud, and newborn convective clouds move eastward continually from the upstream, forming a significant “train effect”.

Key words: severe convective rainstorm; cold shear; vertical helicity; moist potential vorticity; cumulonimbus cloud