

文章编号:2096 - 5389(2018)05 - 0006 - 08

一次由列车效应引发的暴雨过程分析

蓝俊倩¹, 张浩川², 廖君钰¹, 沈杭锋³, 王健疆¹

(1. 浙江省衢州市气象局, 浙江 衢州 324000; 2. 94855 部队气象台, 浙江 衢州 324000;
3. 浙江省杭州市气象局, 浙江 杭州 310051)

摘 要:利用自动站资料、探空资料、NCEP 再分析资料以及雷达资料,对 2016 年 6 月 26 日浙西地区一次暴雨过程的列车效应特征、物理量特征以及中尺度特征进行诊断分析。结果表明:暴雨产生于中低层暖切及地面低压倒槽的背景场中。强降水时段内回波在江西地区生成并沿同一路径东移影响浙西地区,产生列车效应,同时雷达速度场的低层辐合区有利于列车效应中东移回波增强并产生强烈降水。中低层湿度增加、垂直上升速度增大以及暖式切变线的加强有利于水汽辐合抬升的加强,使得列车效应增强,有利于降水的增大。26 日 11 时以后衢州中北部地区列车效应的产生与维持与中低层正涡度和水汽通量辐合在这个区域的持续作用密不可分。Barnes 滤波显示中尺度辐合线的维持和移动与列车效应的维持和生消有较好地对应关系,同时地面加密风场中稳定的低压环流有利于列车效应回波源地的维持,实际业务中应加强对地面加密风场和低层中尺度辐合线的分析。

关键词:暴雨;列车效应;Barnes 滤波;中尺度辐合

中图分类号:P458.1+21.1 **文献标识码:**A

Analysis of a heavy rainfall process caused by train effect

LAN Junqian¹, ZHANG Haochun², LIAO Junyu¹, SHEN Hangfeng³, WANG Jianjiang¹

(1. Quzhou Meteorology Bureau, Quzhou 324000, China; 2. Meteorological Observatory of Unit 94855, Quzhou 324000, China; 3. Hangzhou Meteorology Bureau, Hangzhou 310051, China)

Abstract: Based on the automatic station data, sounding data, NCEP reanalysis data and radar data, the characteristics of train effect, physical quantity and meso - scale of the heavy rainfall process in western Zhejiang Province on June 26, 2016 were studied. The results show that the heavy rain occur in the background field of the low - level warm shear and the surface low pressure inverted trough. During the period of heavy precipitation, echoes are generated in the Jiangxi region and move eastward along the same path to affect the West Zhejiang, producing the train effect. Meanwhile, the low - level convergence zone of the radar velocity field contributes to more intense eastward - moving echos of train effect, which, as a result, produces heavy precipitation. The increase of humidity in the low level and the vertical velocity plus the strengthening of the warm shear line contributes to the enhancement of water vapor convergence uplift, increasing the intensity of the train effect for more precipitation. The occurrence and duration of the train effect in the central and northern Quzhou since 11 a. m. on June 26 is closely associated with the sustainable influence of positive vorticity in the low level and water vapor flux convergence on the region. Barnes wave filtration shows that the maintenance and movement of meso - scale convergence line correspond well with the maintenance and generate - disappear mechanism of the train effect. Meanwhile, the stable low - pressure circulation in the ground - encrypted wind field is beneficial to the maintenance of train echo source. In conclusion, the analysis of the ground encrypted wind field and the low - level meso - scale convergence line should be strengthened in the practical work.

Key words: heavy rainfall; train effect; Barnes wave filtration; meso - scale convergence

收稿日期:2017 - 10 - 17

第一作者简介:蓝俊倩(1988—),女(畲族),工程师,主要从事中短期天气预报预测工作,E-mail:jessica19880117@126.com。

资助项目:国家自然科学基金项目 41575047 资助:浙西山地暴雨形成的宏观机理研究。

5 物理量场特征分析

为更好地了解列车效应产生时的环境场特征,下面从水汽、动力和能量条件方面对这次暴雨过程进行物理量诊断分析。

5.1 湿度和垂直运动分析

对衢州站上空(119°E,29°N)的相对湿度、风向风速和垂直速度随时间的变化作时序图(图 5a)。由图分析可知,25 日在 500~600 hPa 之间存在相对湿度<80%的区域,同时,低层湿度条件在 80%~95%之间,但没有较好的垂直速度配合,因此 25 日白天衢州站仅出现 1.1 mm 降水。从 25 日 20 时以后低层开始出现垂直上升速度且在 26 日 08 时前后达到最强,08 时后 700~800 hPa 相对湿度开始增大且湿层厚度也逐渐加大,至 14 时 500~850 hPa 相对湿度增大至 95%以上,对比 25 日夜里至 26 日白天衢州站的逐小时降水量(图 5b)可以发现强降水时段正好对应于 800 hPa 以下有上升速度维持且湿层深厚的时段。风向风速的演变显示在 26 日 02 时较 25 日 20 时 600 hPa 以下风速增大,风向随高度顺转明显说明暖平流强度也开始加大。

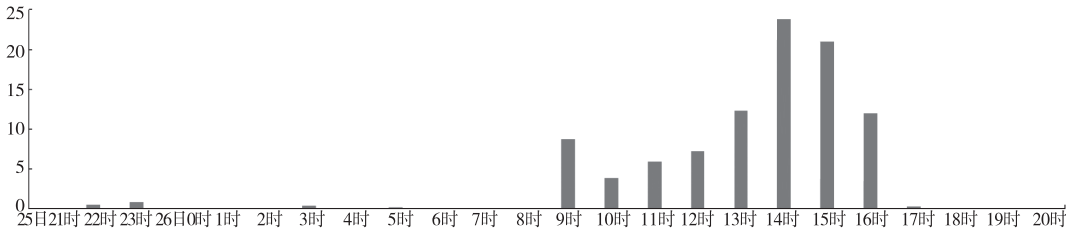


图 5 (b) 6 月 25 日 21 时—26 日 20 时衢州站逐小时雨量分布图
Fig. 5 (b) Rainfall distribution at Quzhou station hour by hour

5.2 水汽通量和涡度场分析

由于强降水时段内 500~700 hPa 之间有显著的湿度增加和湿层增厚现象,为更好的探究强降水的水汽来源,对强降水时段前中低层的风场和水汽通量场进行分析。26 日 02 时 700 hPa(图 6a)在赣皖交界处有水汽通量的大值区存在,在偏西风的作用下向衢州中北部地区输送水汽,25 日 20 时(图 6b)850 hPa 在江西北部地区有水汽通量极值中心存在,此时衢州地区水汽通量较小,在偏西气流的作用下水汽由江西北部地区向浙西地区不断输送,使得浙西地区水汽通量不断增大,26 日 08 时 700 hPa(图 6c)和 850 hPa(图 6d)衢州中北部地区均出现 18 g/(cm·hPa·s)的水汽通量大值中心且 850 hPa 有风速的辐合存在,有利于水汽在此处辐合。可见江西北部及赣皖交界地区是本次强降水的水汽源地,通过偏西风的输送使得浙西地区水汽

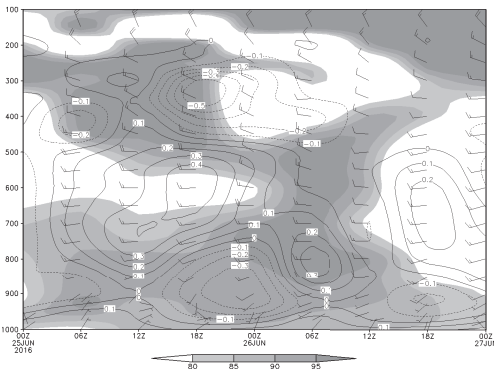


图 5 (a) 衢州站相对湿度、垂直速度和风向风速垂直剖面时序图(阴影为相对湿度 80% 以上的区域,等值线为垂直速度,单位 $\text{Pa} \cdot \text{s}^{-1}$)
Fig. 5 (a) Quzhou station relative humidity, vertical velocity and vertical wind wind speed profile sequence diagram (the shadow is the area with relative humidity above 80%, the contour line is the vertical speed, and unit: $\text{Pa} \cdot \text{s}^{-1}$)

可见列车效应影响时段内 500 hPa 以下湿度显著增加并且低层垂直上升速度增大,同时中低层西南风风速的增加和暖平流的加强有利于暖式切变线的加强从而增强低层水汽辐合抬升,进而使列车效应增强,是降水增大的重要原因。

增加并在风场的作用下辐合产生强降水。
对强降水时段以及前后各个时段不同高度层的水汽通量散度和涡度场进行分析发现:衢州地区 850 hPa、925 hPa 在强降水开始前和强降水时段内一直维持正涡度和弱的水汽通量辐合。但 700 hPa、600 hPa 在 25 日 20 时之后至强降水开始之前,维持负涡度控制,并且水汽通量辐合强度均较弱。26 日 08 时 600 hPa(图 7a)、700 hPa(图 7c)在衢州北部地区开始出现正涡度,同时西北部位于安徽江西交界处的水汽通量辐合的大值区逐渐东移影响衢州中北部,致使该地区在其后水汽通量辐合强度显著加强,至 26 日 14 时(图 7b、图 7d)这两个层次的正涡度控制区均处于衢州东北部,同时北部地区仍然维持 10^{-4} 左右量级的水汽通量辐合强度,这也是 14 时以后衢州东北部地区强降水继续维持的原因之一。

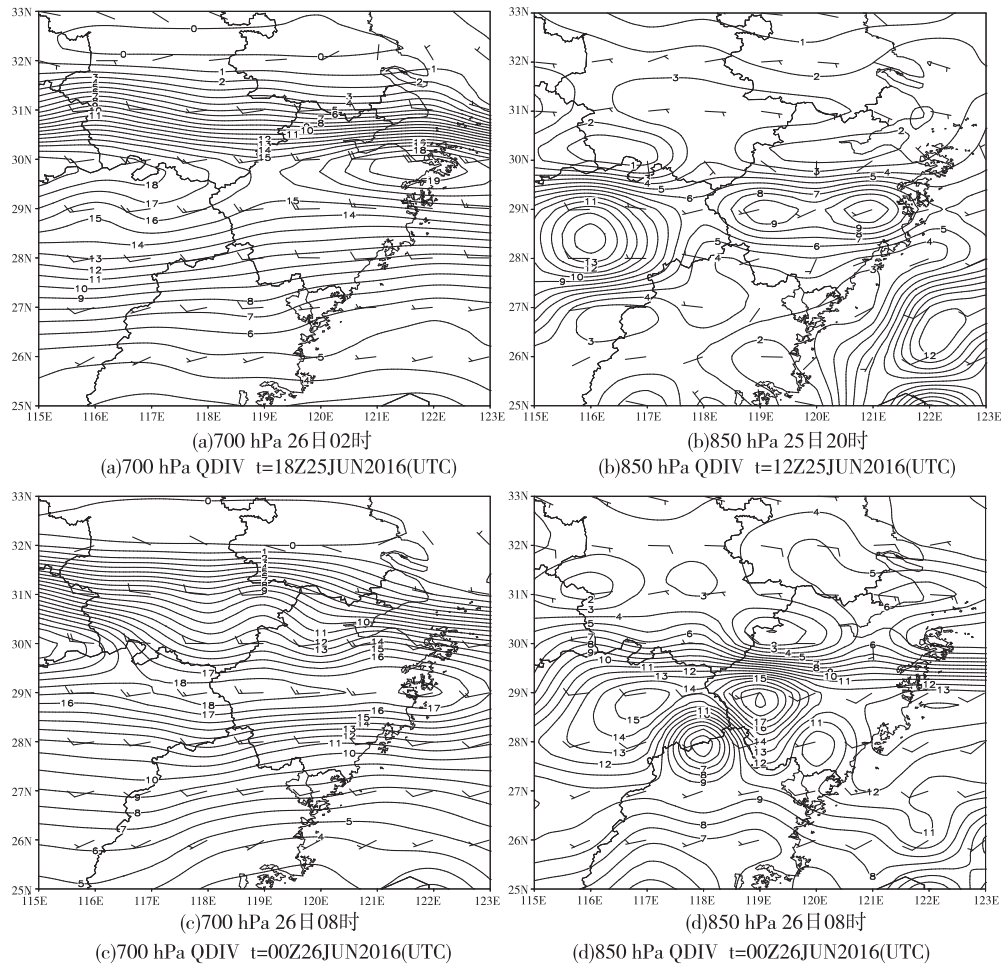


图6 水汽通量(等值线)及风场分布图(水汽通量单位: $\text{g}/(\text{cm} \cdot \text{hPa} \cdot \text{s})$)

Fig.6 water vapor flux (contour) and wind field distribution(water vapor flux unit: $\text{g}/(\text{cm} \cdot \text{hPa} \cdot \text{s})$)

本次暴雨过程中,08 时以后中层正涡度的出现和水汽通量辐合的增加对衢州中北部地区强降水的出现有重要的作用,特别是 11 时以后中北部地区列车效应的产生与维持与中低层动力和水汽条件在这个区域的持续作用密不可分。

5.3 能量场分析

分析强降水时段内能量场信息发现(图略):26 日白天衢州地区无明显的对流有效位能影响;从该时段内假相当位温的垂直分布来看,在 800 hPa 上下存在一个高能舌,800 hPa 以下呈现明显的对流性稳定特征,800 hPa 以上至 500 hPa 有弱的对流性不稳定。

能量场总体偏弱是本次强降水过程中没有产生对流性降水的原因,但是中层弱对流性不稳定的维持配合该层次内涡度和水汽通量对降水的有利作用,有助于降水在衢州中北部较长时间的维持。

6 中尺度特征分析

暴雨往往不是由天气尺度系统直接产生的,而

是由天气尺度系统所诱发的中小尺度系统诱发的。利用 Barnes 带通滤波器对本次暴雨进行中尺度滤波分析,滤波参数采用 $C1 = 5\ 000\ \text{km}$, $C2 = 70\ 000\ \text{km}$, $G = 0.35$,这种带通滤波器对波长在 $300 \sim 800\ \text{km}$ 之间的中尺度系统有较好的保留作用。

分别对 26 日 08 时和 14 时两个时段的 925 hPa 流场进行中尺度滤波发现,26 日 08 时(图 8a)在江西东北部至浙西衢州中部地区有中尺度辐合线存在,此后浙西地区在中尺度辐合线及其北侧产生了显著的列车效应,14 时(图 8b)中尺度辐合南压至丽水西北部地区,江西地区中尺度辐合线消失,故此江西地区再无强的回波单体产生,列车效应也随着之前产生的单体东移后逐渐减弱消失,这表明中尺度辐合线维持和移动与列车效应的维持和生消有较好地对应关系。

结合地面自动站整点 2 min 风向风速图发现,26 日 10 时(图 8c)至 14 时(图 8d)在衢州西侧的江西地区有稳定的低压环流存在,结合前面雷达反射率分析我们也发现这一时段内江西婺源地区不断

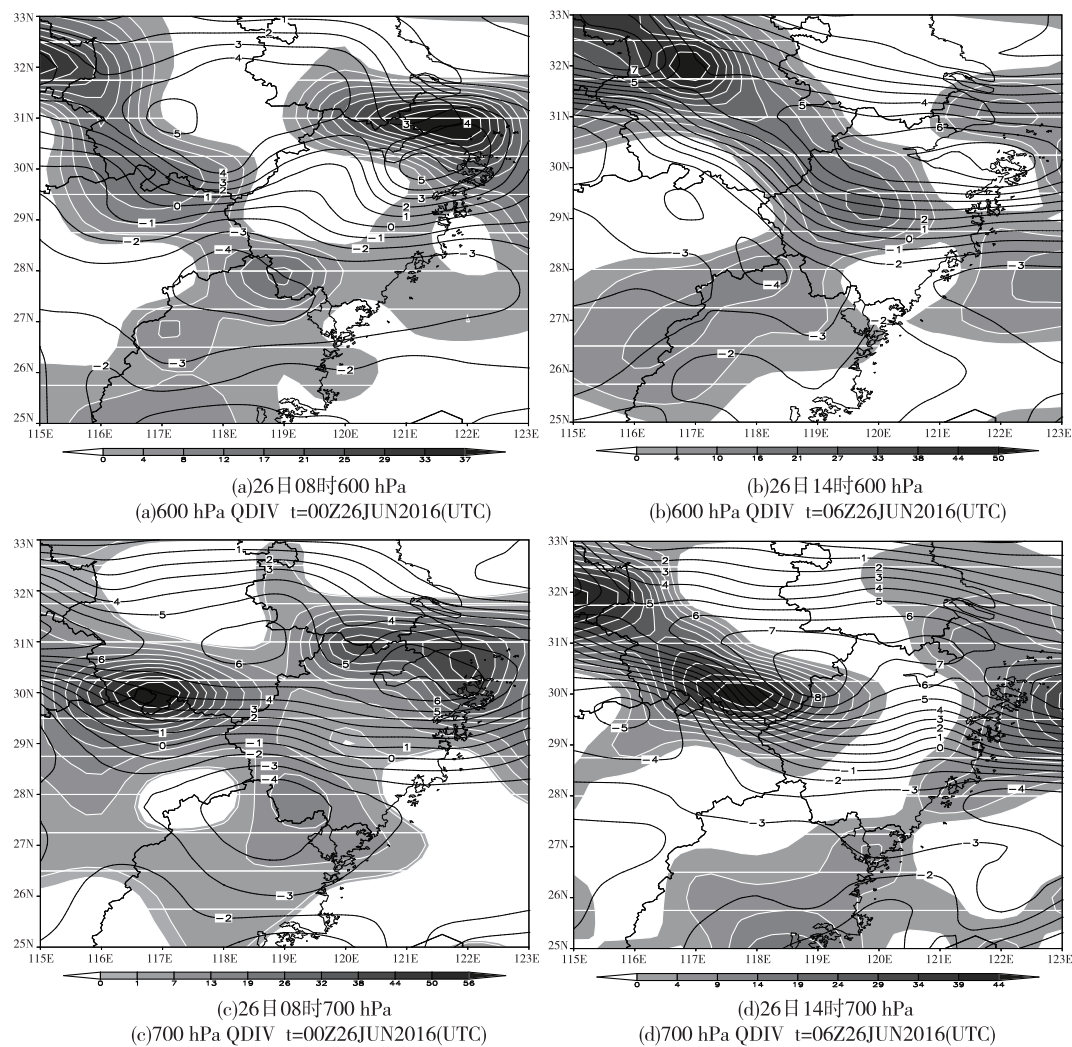


图 7 暴雨时段内涡度(等值线)及水汽通量散度(阴影区)分布
(涡度单位: $10^{-5} s^{-1}$;水汽通量散度单位: $10^{-5} g/(cm^2 \cdot hPa \cdot s)$)

Fig. 7 VAorticity (contour) and water vapor flux divergence (shadow region) distribution in rainstorm period
(vorticity unit: $10^{-5} s^{-1}$; Water vapor flux divergence unit: $10^{-5} g/(cm^2 \cdot hPa \cdot s)$)

有回波单体生成并接连沿中尺度辐合线向东移动影响浙西地区,可见位于低压环流东南部的婺源地区有着较好的辐合上升条件,是本次列车效应的源地,不断为列车效应提供新的回波单体,而 925 hPa 的中尺度辐合线的稳定维持则为列车效应提供同一移动路径,因此在今后业务中应特别关注地面加密风场和低层中尺度辐合线对回波单体产生和移动路径的影响分析。

7 结论

- ①本次暴雨主要由中低层暖式切变和地面低压倒槽诱发,深厚的湿层为暴雨的产生提供了充足的水汽保障。
- ②雷达产品显示江西婺源地区不断有新的回波生成并向东沿着同一路径影响浙西地区,雷达速

度场的低层辐合区有利于产生强烈的辐合上升运动,从而使列车效应中东移回波增强并产生强烈降水。

③列车效应影响时段内湿度显著增加且低层垂直上升速度增大,暖式切变线的加强有利于低层水汽辐合抬升的增强,进一步增强列车效应,是降水增大的重要原因。26 日 11 时以后衢州中北部地区列车效应的产生与维持与中低层正涡度和水汽通量辐合在这个区域的持续作用密不可分。

④地面自动站风场中稳定的低压环流有利于列车效应新生单体源地的维持,Barnes 滤波得到的中尺度辐合线的维持和移动与列车效应的维持和生消有较好地对应关系。在今后业务中应特别关注地面加密风场和低层中尺度辐合线对回波单体产生和移动路径的影响分析。

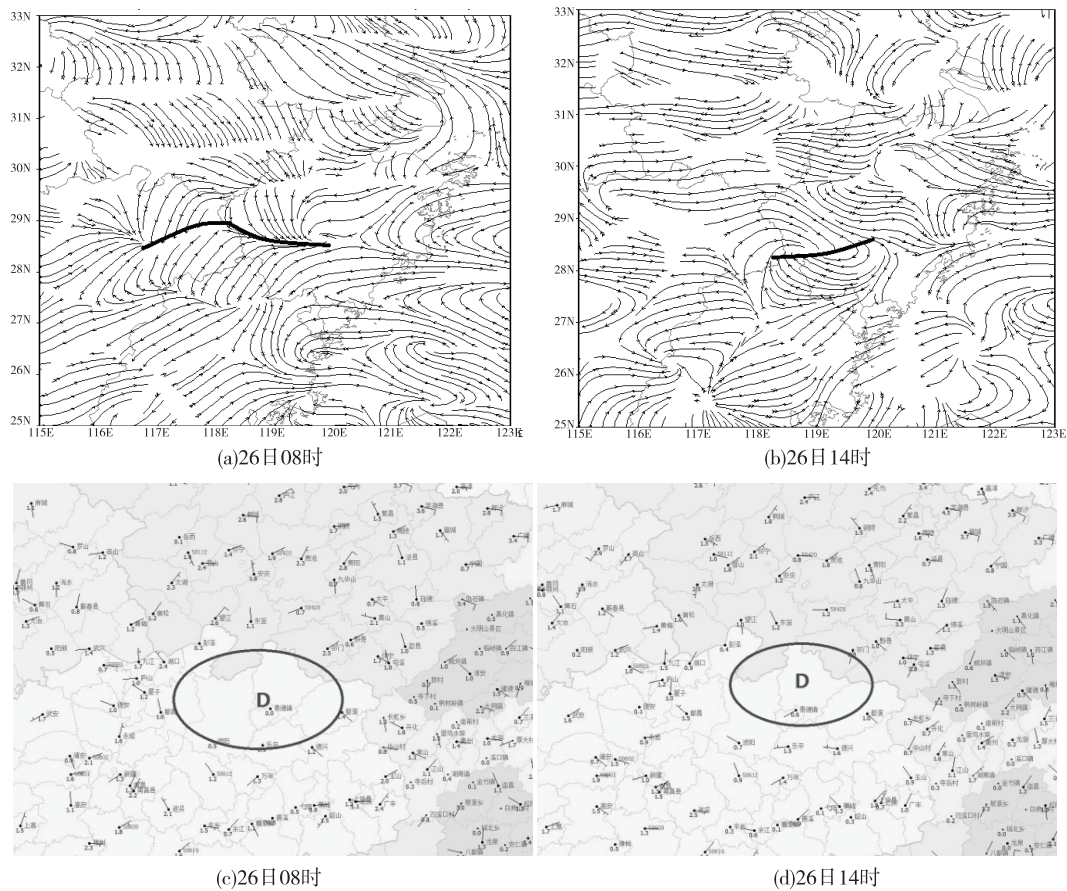


图 8 Barnes 中尺度滤波后的 925 hPa 流场(a)、(b)及地面整点 2 min 风向风速(c)(d)
Fig.8 wind speed (c) (d) of 925 hPa flow field (a) (b) after Barnes mesoscale filtering

参考文献

[1] 柯文华,俞小鼎,林伟旺,等. 一次由“列车效应”造成的致洪暴雨分析研究[J]. 气象,2012,38(5):552-560.
[2] 孙继松,何娜,郭锐,等. 多单体雷暴的形变与列车效应传播机制[J]. 大气科学,2013,37(1):137-148.
[3] 张家国,周金莲,湛伟,等. 大别山西侧极端降水中尺度对流系统结构与传播特征[J]. 气象学报,2015,73(2):291-304.
[4] 冯晋勤,汤达章,曹长尧. 福建西部山区短时暴雨雷达回波特征及中小尺度系统分析[J]. 气象,2014,40(3):297-304.
[5] 徐珺,杨舒楠,孙军,等. 北方一次暖区大暴雨强降水成因探讨

[J]. 气象,2014,40(12):1455-1463.
[6] 王福侠,俞小鼎,王宗敏,等. 河北暴雨的多普勒天气雷达径向速度特征[J]. 气象,2014,40(2):206-215.
[7] 毛文书,彭骏,周强,等. 基于 Barnes 滤波原理的降水场客观分析及尺度分离[J]. 成都信息工程学院学报,2008,23(6):668-672.
[8] 张启绍,芦阿咪,张一平. 河南一次局地强降水过程的中尺度分析[J]. 气象与环境科学,2016,39(1):74-81.
[9] 张虹,李国平,王曙东. 西南涡区域暴雨的中尺度滤波分析[J]. 高原气象,2014,33(2):361-371.

文章编号:2096 - 5389 (2018)05 - 0006 - 08

一次由列车效应引发的暴雨过程分析

蓝俊倩¹, 张浩川², 廖君钰¹, 沈杭锋³, 王健疆¹

(1. 浙江省衢州市气象局, 浙江 衢州 324000; 2. 94855 部队气象台, 浙江 衢州 324000;
3. 浙江省杭州市气象局, 浙江 杭州 310051)

摘 要:利用自动站资料、探空资料、NCEP 再分析资料以及雷达资料,对 2016 年 6 月 26 日浙西地区一次暴雨过程的列车效应特征、物理量特征以及中尺度特征进行诊断分析。结果表明:暴雨产生于中低层暖切及地面低压倒槽的背景场中。强降水时段内回波在江西地区生成并沿同一路径东移影响浙西地区,产生列车效应,同时雷达速度场的低层辐合区有利于列车效应中东移回波增强并产生强烈降水。中低层湿度增加、垂直上升速度增大以及暖式切变线的加强有利于水汽辐合抬升的加强,使得列车效应增强,有利于降水的增大。26 日 11 时以后衢州中北部地区列车效应的产生与维持与中低层正涡度和水汽通量辐合在这个区域的持续作用密不可分。Barnes 滤波显示中尺度辐合线的维持和移动与列车效应的维持和生消有较好地对应关系,同时地面加密风场中稳定的低压环流有利于列车效应回波源地的维持,实际业务中应加强对地面加密风场和低层中尺度辐合线的分析。

关键词:暴雨;列车效应;Barnes 滤波;中尺度辐合

中图分类号:P458.1+21.1 **文献标识码:**A

Analysis of a heavy rainfall process caused by train effect

LAN Junqian¹, ZHANG Haochun², LIAO Junyu¹, SHEN Hangfeng³, WANG Jianjiang¹

(1. Quzhou Meteorology Bureau, Quzhou 324000, China; 2. Meteorological Observatory of Unit 94855, Quzhou 324000, China; 3. Hangzhou Meteorology Bureau, Hangzhou 310051, China)

Abstract: Based on the automatic station data, sounding data, NCEP reanalysis data and radar data, the characteristics of train effect, physical quantity and meso - scale of the heavy rainfall process in western Zhejiang Province on June 26, 2016 were studied. The results show that the heavy rain occur in the background field of the low - level warm shear and the surface low pressure inverted trough. During the period of heavy precipitation, echoes are generated in the Jiangxi region and move eastward along the same path to affect the West Zhejiang, producing the train effect. Meanwhile, the low - level convergence zone of the radar velocity field contributes to more intense eastward - moving echos of train effect, which, as a result, produces heavy precipitation. The increase of humidity in the low level and the vertical velocity plus the strengthening of the warm shear line contributes to the enhancement of water vapor convergence uplift, increasing the intensity of the train effect for more precipitation. The occurrence and duration of the train effect in the central and northern Quzhou since 11 a. m. on June 26 is closely associated with the sustainable influence of positive vorticity in the low level and water vapor flux convergence on the region. Barnes wave filtration shows that the maintenance and movement of meso - scale convergence line correspond well with the maintenance and generate - disappear mechanism of the train effect. Meanwhile, the stable low - pressure circulation in the ground - encrypted wind field is beneficial to the maintenance of train echo source. In conclusion, the analysis of the ground encrypted wind field and the low - level meso - scale convergence line should be strengthened in the practical work.

Key words: heavy rainfall; train effect; Barnes wave filtration; meso - scale convergence

收稿日期:2017 - 10 - 17

第一作者简介:蓝俊倩(1988—),女(畲族),工程师,主要从事中短期天气预报预测工作,E-mail:jessica19880117@126.com。

资助项目:国家自然科学基金项目 41575047 资助:浙西山地暴雨形成的宏观机理研究。

1 引言

暴雨是最常见的气象灾害之一,同时还会带来山洪、泥石流、山体滑坡等次生灾害,对人民群众的生命财产安全产生严重威胁。目前数值预报对天气系统影响明显的暴雨过程已有较好的预报效果,但是对于天气尺度系统较弱而中小尺度系统强烈发展引发的暴雨过程预报还不尽理想。2016年6月26日浙西地区的暴雨过程就属于后者,这次过程不论在量级上还是落区上均与数值预报有较大的差异,降水云系不断生成东移影响衢州中北部地区形成强降水,这种“列车效应”模式的暴雨在该地区发生较少,因此值得认真总结分析。

所谓“列车效应”是指^[1]某区在一段时间内频繁地、接连不断地生成空间尺度不大的对流单体,而每生成一个对流单体即沿着某一方向移动,接着在同一地方生成新的对流单体继续沿着同一方向移动,从而形成由一系列对流单体排列组成类似于“列车”的排列,这一“列车”对其下游某一地区可以造成接连不断的“持续”影响,从而造成强降水。孙继松等^[2]指出“列车效应”一般发生在低空暖湿气流或低空急流附近,环境大气表现为条件性静力不稳定。张家国等^[3]研究发现后向传播类的中尺度对流系统因少动或明显的列车效应可产生极端降水。冯晋勤等对福建西部山区暴雨分析发现^[4],产生“列车效应”的对流雨带的回波强度 >40 dBz,持续0.5 h即能造成大于 $20\text{ mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 的短时暴雨。徐珺等^[5]指出暖区暴雨的雷达回波具有明显的后向传播、列车效应和热带降水型特点。河北暴雨的多普勒雷达径向速度分析表明^[6]中尺度辐合线、中尺度辐合是主要类型暴雨共有的主要速度特征和常见的中尺度影响系统,列车效应是造成局地暴雨、大暴雨的关键原因。对于列车效应的研究均表明,列车效应是在暖区环境中有利于对流系统产生高效率降水的一种回波组织和移动方式,本文旨在通过对实例的分析来加深其对业务的指导。同时我们也知道天气尺度系统并不是产生暴雨的直接系统,中小尺度系统的分析对于了解暴雨的发生演变极为重要。利用中尺度滤波方法^[7-9]将暴雨期间的中尺度系统保留下来,有利于更好地了解暴雨发生时段内的中尺度特征,从而为暴雨的预报分析提供参考依据。

2 天气实况

2016年6月25—26日浙江中部地区出现了一

次暴雨过程,其中衢州中北部、金华中部、绍兴和宁波大部分地区出现了50 mm以上的降水,从空间分布来看强降水带主要集中在浙西地区且呈现“一”字型分布(图1),特别是衢州、金华西北部地区降水强度南北差异显著,从时间分布来看,主要降水时段在26日白天,尤其是浙西地区衢州、开化、龙游3站的26日白天12 h累积雨量分别为95.1 mm、87.5 mm、72.8 mm,均已达到大暴雨量级。

暴雨过程降水比较集中的时间段为26日08—16时,分析该时段内衢州地区小时雨强 10 mm/h 以上的降水区域分布变化,可以看出在07—10时有明显降水集中区南压特征,而11—16时小时强降水带一直维持在衢州中北部地区,特别是12—15时均出现了小时雨强在 20 mm/h 以上的降水。16时虽然 10 mm/h 以上的降水明显减弱,但强降水区域仍然有强度在 $5\sim10\text{ mm/h}$ 之间的降水存在,强降雨带在衢州中北部维持长达6 h,造成显著的区域性暴雨天气。

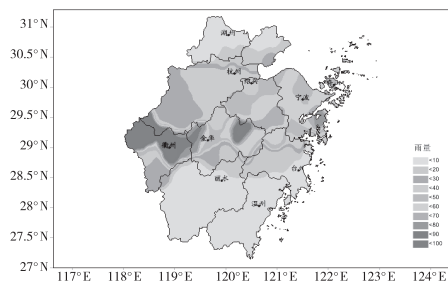


图1 浙江区域25日20时—26日20时24 h累积降水

Fig. 1 Accumulated precipitation in Zhejiang region from 20:00 on 25th to 20:00 on 26th

3 环流形势

从环流形势的演变看,200 hPa(图略)在浙江区域处于南亚高压东部脊区前的西北气流之中,为强降水提供有利的高空辐散条件,500 hPa中高纬呈现两脊一槽型,浙江中部地区一直处于588线边缘,25日08时从朝鲜半岛到我国的苏皖南部有低槽东移影响,20时槽底逐渐过境转偏西气流,26日02时(图2a)浙西地区转受高压脊前西北气流控制;700 hPa 25日在长江中下游地区有切变线影响,26日(图2b)切变线随低槽东移后,北部有高压脊控制,在苏皖中部有两高之间的切变形成;850 hPa 25日涡切位于湘赣北部,26日(图2c)暖式切变线位于浙江北部至安徽南部地区。地面图上25日白天伴随高层槽切东移,地面有弱冷锋东移南压入海,25日20时在江西东北部有地面倒槽开始发展,02时(图2d)倒槽进一步加强,05时前后倒槽头部有对流云团开

始发展并逐渐东移影响浙西地区。26 日白天低压倒槽头部一直维持在浙西西部地区,有利于降水形成和维持。同时 25 日 20 时衢州站探空(图 2e)显示湿层深厚,K 指数达 39,层结资料(图 2f)显示 850 hPa 和 700 hPa 的比湿分别为 15.25 g/kg、8.96 g/kg,抬升凝结高度(LCL)987.3 hPa,0℃层高度 550 hPa

左右,暖云厚度大,出现有利于产生降水的探空层结特征。

本次降水过程湿层深厚,高层辐散有抽吸作用,中低层有暖切配合,同时地面有低压倒槽发展维持并不断触发降水云团生成东移,是强降水产生的有利背景场条件。

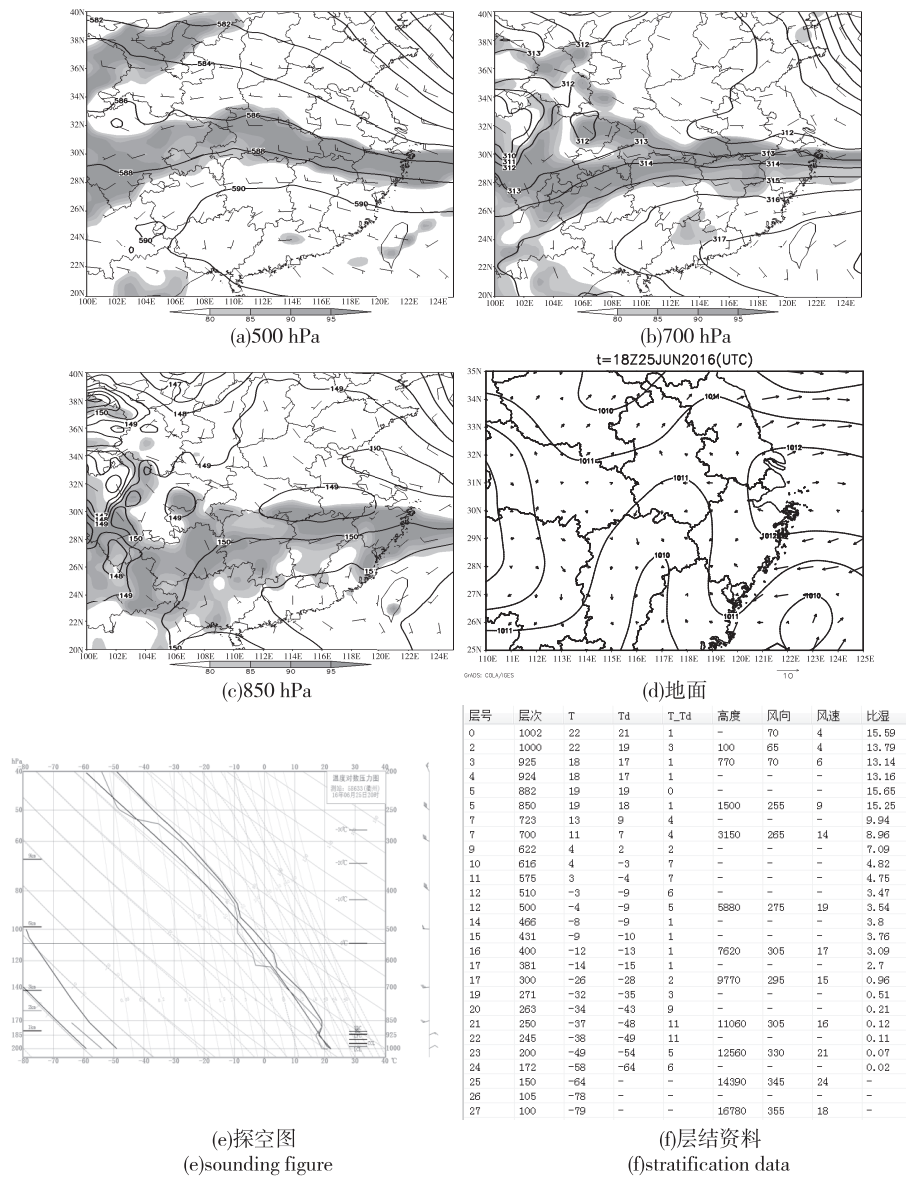


图 2 2016 年 6 月 26 日 02 时形势场及 6 月 25 日 20 时衢州站探空资料和层结资料(a) (b) (c) 中实线为等高线,单位:10 pm;阴影区域为相对湿度,单位:% (d) 中实线为海平面气压等值线,单位:hPa;箭头为风场
Fig. 2 the situation field at 2:00 on June 26, 2016 and the Quzhou station at 10:00 on June 25, 2016 (a) (b) (c) the solid line is contour line, unit: 10 gpm;The shadow area is relative humidity, unit: % (d) the solid line is the isobars of sea - level pressure, unit: hPa;The arrow is the wind field

4 雷达特征分析

下面通过分析衢州地区多普勒雷达组合反射率产品来进一步揭示本次过程的列车效应特征。10 时 10 分(图 3a)主回波带 M(黑色椭圆框区域)正在影响浙西地区并以东移为主略有南压,此时在其西

北部江西婺源附近有两块分散的回波 A1、A2(红色椭圆框区域)处于发展中;10 时 53 分(图 3b)随着主体回波的东移,A1、A2 回波紧随其后东移至开化西部并发展合并为 A,此时在婺源地区又有回波 B 开始发展;11 时 11 分(图 3c)回波 A 进一步发展,最大强度 48 dBz,东移至开化东部与常山交界处,回

波 *B* 发展呈现长条状由婺源进入开化西部地区;11 时 42 分(图 3d)回波 *A* 东移经过常山北部到达衢州,回波 *B* 主要位于开化境内,仍呈带状,强度有所增大,最大强度为 48 dBz,*B* 回波西侧婺源地区又有分散性的回波 *C*₁、*C*₂ 发展;12 时 00 分(图 3e)回波 *A* 已移过衢州继续向东进入龙游境内,回波 *B* 范围进一步扩大,48 dBz 的红色强回波区也增大,带状回波宽度增加,主要影响开化、常山北部及衢州西部地区,回波 *B* 区域的西北侧婺源东部地区原来的 *C*₁ 和 *C*₂ 回波已合并发展为回波 *C*;12 时 30 分(图 3f)回波 *B* 较强的区域主要在常山北部和衢州西北部地区,回波 *C* 发展扩大开始影响开化西部;12 时 48 分(图 3g)回波 *B* 继续东移,强区域位于衢州,回波 *C* 东移并逐渐与回波 *B* 相接,形成一个更大更宽

的带状回波,回波 *C* 之后婺源地区又有新回波 *D* 发展;13 时 25 分(图 3h)回波 *B* 已东移至衢州东侧龙游境内,回波 *C* 主体影响常山北部及衢州,回波 *D* 进入开化西北部,婺源东北部回波 *E* 开始生成;14 时 07 分(图 3i)回波 *C* 移动至衢州,最大强度达 53 dBz,回波 *D* 位于常山北部强度略有增强并与回波 *C* 相接,回波 *E* 相对分散并开始影响开化,婺源北部有弱回波 *F* 生成;14 时 37 分(图 3j)回波 *D* 移至衢州,最大强度 43 dBz,回波 *E* 范围扩大位于常山北部,回波 *F* 进入开化境内,强度略有增大。其后婺源地区没有回波生成发展,回波 *D*、回波 *E*、回波 *F* 依次沿着其前方回波路径东移影响并移出后,列车效应结束,持续降水结束。

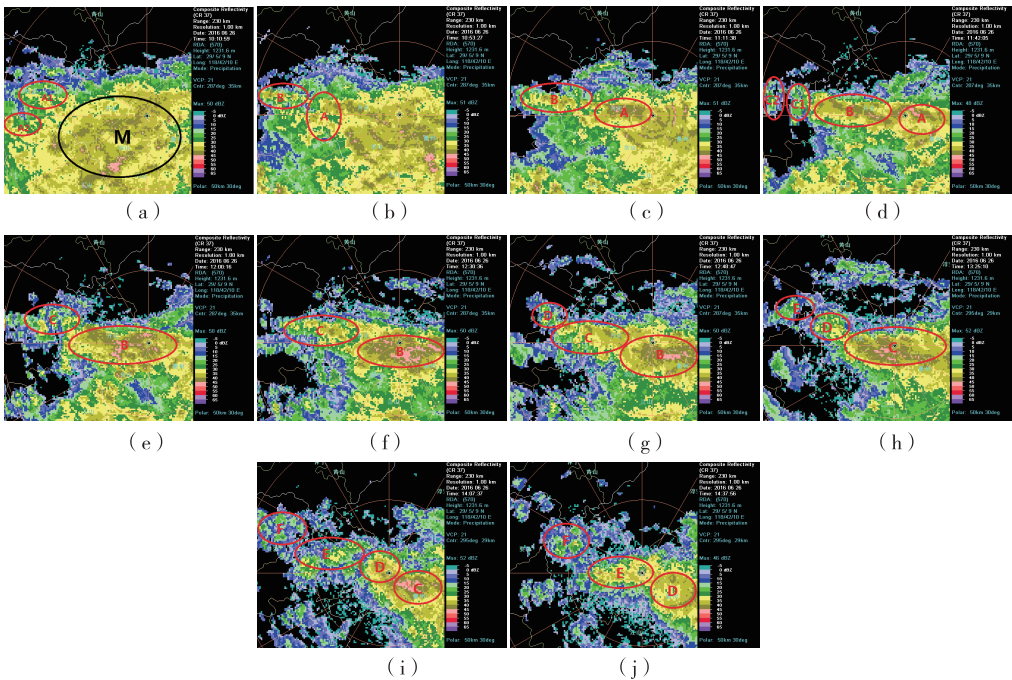


图 3 各时次雷达组合反射率产品
Fig. 3 Reflectivity products of different time periods

同时我们注意到上述分析中回波 *B* 和回波 *C* 东移经过常山北部和衢州时都有明显的发展,强度增强且回波区域增大,配合 12—14 时内各时次径向速度产品(图 4)可以发现对应的时间段内常山北部

至衢州存在显著的径向速度辐合区,非常有利于该区域辐合上升运动的加强,从而有利于列车效应中东移的回波在该区域增强并产生强烈的降水。

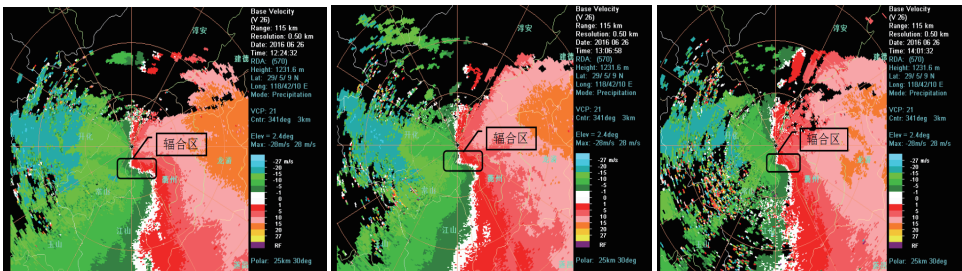


图 4 各时次 2.4° 仰角径向速度产品(时间从左到右依次为 12 时 24 分、13 时 06 分、14 时 01 分)
Fig. 4 2.4° Angle radial velocity products of each time(time order from left to right;12:24,13:06,14:01)