

台风“烟花”浙江极端降水成因分析

沈晓玲¹, 李锋²

(1.浙江省绍兴市气象局,浙江 绍兴 312000; 2.浙江省诸暨市气象局,浙江 诸暨 311800)

摘要: 利用浙江省常规气象观测资料、ERA5逐小时再分析资料($0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$)和卫星云图等资料,分析2106号台风“烟花”在浙北东部沿海和浙西北山区产生极端降水的原因。结果表明:台风“烟花”引导气流弱,移动速度慢,其螺旋云带和本体云系范围广,台风强度维持时间长,影响浙江时间长达7 d,是造成此次极端降水的主要原因,但降水效率不高。西南急流和偏东急流为台风提供持续强盛的水汽输送,925 hPa水汽通量辐合区对未来6 h强降水落区和降水强度有一定指示意义。浙北东部沿海四明山一带和浙西北山区有中尺度辐合带长时间维持,导致中尺度对流系统不断发展,“列车效应”是造成极端降水的重要原因。此次降水地形增幅作用明显,山脉迎风坡地形使水汽辐合抬升,对流和锋生加剧,降水系统移速减慢,持续时间变长,降水量增大。

关键词: 极端降水;急流;中尺度辐合带;地形

中图分类号: P458.1⁺21 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-0239(2022)05-0037-11

1 引言

由台风引发的极端降水是我国的主要灾害性天气之一,许多专家学者已对台风降水开展了深入研究^[1-3]。台风暴雨可分为5个落区:眼壁暴雨、螺旋雨带暴雨、小涡暴雨、倒槽暴雨和切变暴雨。台风造成的极端暴雨有一个显著特点,即极端暴雨多产生在登陆或近海台风的维持和停滞阶段^[4-6]。西南气流的水汽输送对台风降水至关重要,其携带的水汽能使台风雨带中的强对流活动加强,使暴雨增幅^[7-8]。钱燕珍等^[9]通过对比台风“菲特”、台风“杜鹃”和台风“莫兰蒂”造成宁波强降水的成因,指出远距离、范围小的台风减弱后云系扩散,与冷空气、副热带高压(以下简称副高)或其他台风等相互作用,有利于持续性强降水的形成。台风暴雨还与地形密切相关,低层气流受地形引导和阻挡作用,可加速辐合与抬升,有利于强降水的维持和加强^[10-12]。万小雁等^[13]对比了在乐清以北登陆的1909号超强台风“利奇马”和9015号台风“阿贝”引起的温州强

降水的分布特征,指出台风过程累积雨量与台风中心距离和地形高度有显著相关关系,北部乐清和永嘉交界的迎风坡出现历史极值降水现象的概率大。刘晓波等^[14]对1614号台风“莫兰蒂”和1616号台风“马勒卡”双台风形势下长三角地区出现大暴雨过程的成因进行了诊断分析,认为苏皖地区高空槽后冷空气侵入、浙江—上海沿海地区形成东北—西南向温度锋区以及浙江中北部沿海交界地带特殊山脉地形的强迫作用,使得中尺度对流系统发展并维持。

浙江地势西高东低,尤其是浙北多山脉分布,台风影响时常常引发强降水。在2106号台风“烟花”影响期间,浙北出现罕见极端降水,多项记录破历史极值。本文利用浙江省常规气象观测资料、欧洲中心第五代大气再分析全球气候数据(The fifth generation atmospheric reanalysis of the global climate of European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, ERA5)逐小时再分析资料($0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$)和卫星云图资料等,分析了此次台风极端降水的特

收稿日期: 2021-10-08; 修回日期: 2021-12-31。

基金项目: 浙江省气象局科研项目(2021YB25)。

作者简介: 沈晓玲(1980-),女,高级工程师,学士,主要从事中短期预报研究。E-mail: 13893561@qq.com

征和成因,以期今后台风暴雨预报提供一定参考。

2 台风“烟花”概况和极端降水特点

2.1 概况

2106号台风“烟花”于7月18日02时(北京时,下同)在西北太平洋洋面生成,生成后移动路径多变,经历了北移、西折、南落和停滞等多种路径(见图1a),21日11时加强为强台风,中心风力为14级(42 m/s)。23日夜间台风进入东海,维持台风级别(13级),正面向浙江沿海移动。25日12时30分台风在浙江舟山普陀区第一次登陆,登陆时中心附近最大风力为38 m/s(13级),中心最低气压为965 hPa。

台风登陆后在舟山本岛滞留5 h,然后沿杭州湾南岸海岸线缓慢移动16 h,于26日09时50分在浙江嘉兴平湖市沿海再次登陆,登陆时中心附近最大风力为28 m/s(10级),中心最低气压为978 hPa。登陆后台风继续向西北方向移动,在嘉兴市缓慢移动7 h,26日17时移出浙江后基本沿着浙江与江苏省界缓慢西北行,继续给浙江北部地区带来暴雨,局地大暴雨。台风“烟花”移速慢,尤其在浙江省滞留期间移速仅为6 km/h,且为1949年有气象记录以来首个在浙江省内两次登陆的台风。

台风“烟花”影响期间风雨潮“三碰头”,浙北地区持续出现暴雨或特大暴雨以及长时间的10级以上大风,台风影响范围大,致灾强度强。根据浙江省风雨影响综合评估结果,有37个县(区、市)382个

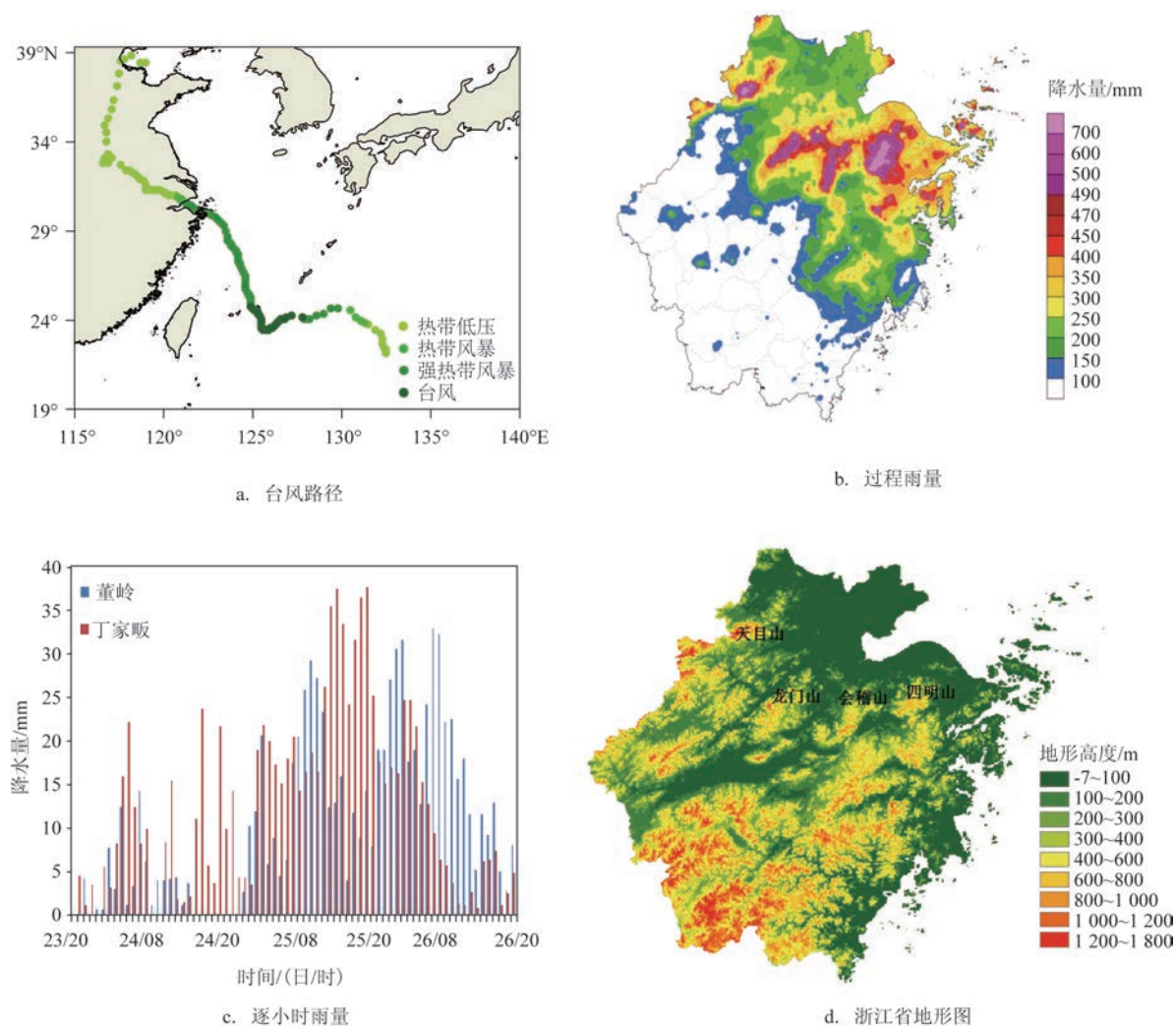


图1 台风“烟花”路径和过程实况及浙江省地形图

Fig.1 The track and process of typhoon "In-Fa" and topographic map of Zhejiang Province

乡镇(街道)的致灾等级为“特重”,11个县(市、区)47个乡镇(街道)的致灾等级为“严重”。

2.2 极端降水特点

台风“烟花”影响范围大,移速慢,在尚未进入东海时其外围云系已开始影响浙江。台风过程自22日开始,至28日结束,风雨影响时间长达7 d,破浙江省登陆台风影响时间最长纪录。22日08时—28日08时,全省平均雨量为191 mm,破浙江省登陆台风的降雨纪录;宁波、舟山、绍兴、湖州、嘉兴和杭州6个地区的过程雨量超过200 mm(见图1b),均破1951年以来浙江省登陆台风的降雨纪录;20个县(市、区)的过程雨量超过300 mm,单站最大降雨出现在余姚大岚镇丁家畈,过程雨量为1 034 mm,破浙江省登陆台风过程雨量极值;27个国家级气象站的过程雨量破1951年以来浙江省登陆台风的降雨纪录。

图1c为过程雨量最大的丁家畈站(位于四明山一带,靠近台风登陆点)和董岭站(位于天目山一带,距离台风登陆点较远)的小时雨量分布。从图中可以看到,降水可以分为两个阶段:第一阶段为23日前半夜,受台风“烟花”外围环流影响开始产生降水,丁家畈站小时雨量多不足20 mm,董岭站不足15 mm。第二阶段从24日02时起,受台风螺旋云带和台风本体云系影响,降水加强,丁家畈站降水主要集中在25日02时—26日08时,累积雨量为665 mm,占过程雨量的64%,25日14—20时小时雨量多超过30 mm,最大为37.4 mm;董岭站降水主要集中在25日08时—26日14时,累积雨量为592 mm,占过程雨量的61%,小时雨量超过30 mm的持续时间短,最大为32.8 mm。

综上所述,与1909号台风“利奇马”在括苍山站产生81.5 mm的小时雨量相比,此次过程降水效率整体不高,持续时间长是导致极端降水的主要原因。另外,从浙江省地形图(见图1d)可以看到,浙北山脉呈东北—西南向分布,浙西北为天目山,浙东自西向东分别为龙门山、会稽山和四明山,此次过程的4个雨量中心与4座山脉正好相对应,可见降水量与地形密切相关。下面重点就浙北东部沿海和浙西北山区的极端降水成因进行分析。

3 极端降水成因分析

3.1 环流背景

台风的移动路径直接关系到降水的落区和强度^[15]。台风“烟花”进入东海后,24日08时(图略)50°N以北高纬地区为西风带槽脊,台风“烟花”东侧西太平洋上为2108号台风“尼伯特”,其中心位于25.3°N,149.5°E,西侧海南岛上为2107号台风“查帕卡”,其中心位于19.3°N,107.1°E,副高断裂成南北两部分,北部位于日本南部海面,范围偏小,南部位于20°N以南的西太平洋上,大陆高压西进北抬至38°N,95°E附近。台风“烟花”处在鞍型场中,引导气流弱,主要受内力作用向西北方向缓慢移动。25日14时台风“烟花”第一次登陆后,西风带槽脊和副高位置少动,台风“尼伯特”中心北移至30.1°N,150.8°E,但仍维持热带风暴强度,两个台风的中心距离超过2 000 km,两者之间直接作用较小;台风“查帕卡”减弱为热带低压,两者之间距离1 200 km左右,受藤原效应作用,台风“烟花”受向西、向北的作用力,有利于其继续向西北方向移动。26日08时台风“查帕卡”减弱消亡,中高纬西风槽南压至37°N,副高588线东退至135°E以东,台风“烟花”东北侧仍为反气旋性环流,在其西侧东南气流的引导下,台风缓慢向西北方向移动。28日08时台风“尼伯特”减弱为低压环流,副高受台风“尼伯特”北上挤压东退至150°E以东,并与南环副高合并。台风“烟花”北上与西风槽结合,在槽前西南气流引导下转向偏北方向移动,逐渐远离浙江,对浙江的影响也趋于减弱,浙北地区转为分散性阵雨天气。

3.2 水汽条件

极端降水的产生与水汽密切相关。从850 hPa水汽通量分布图中可以看到(图略),台风“烟花”主要有两支水汽通道,一支为台风“查帕卡”南侧的西南急流,水汽来源于孟加拉湾和南海,水汽通量达30~40 g/(cm·hPa·s),另一支为台风“尼伯特”北侧的东风急流,水汽来源于西太平洋,水汽通量为10~20 g/(cm·hPa·s)。西南急流与东风急流持续强盛的水汽输送使得对流不稳定能量释放增强,有利于台风“烟花”强度维持并在台风北侧汇合后向浙江

输送,为浙北东部沿海的极端降水提供了充沛的水汽和不稳定能量^[16]。26日08时东风急流减弱,其输送的水汽通量也减弱至 $10\text{ g}/(\text{cm}\cdot\text{hPa}\cdot\text{s})$ 以下,但台风东侧的东南风急流仍维持,西南急流输送的水汽通量中心仍达 $30\sim40\text{ g}/(\text{cm}\cdot\text{hPa}\cdot\text{s})$ 。由此可见,西南急流的强度和对应的水汽通量均大于东风急流,因此,来自孟加拉湾和南海的水汽输送对极端降水起着更重要的作用。

从925 hPa水汽通量散度图中可以看到(见图2),台风“烟花”第一次登陆前结构较对称,25日08时水汽通量散度辐合大值中心位于台风西侧,也就是浙北东部沿海,呈西北—东南向带状分布,辐合中心强度超过 $12\times10^{-7}\text{ g}/(\text{cm}^2\cdot\text{hPa}\cdot\text{s})$,未来6 h强降雨落区与水汽通量散度辐合中心相对应,最大雨量

为宁波余姚丁家畈的 127 mm 。25日20时,水汽通量散度分布呈现非对称性发展,但辐合中心仍位于台风西侧,中心强度维持,同时在浙西北出现水汽通量辐合副中心,强度为 $10\times10^{-7}\text{ g}/(\text{cm}^2\cdot\text{hPa}\cdot\text{s})$,未来6 h强降雨落区仍在辐合区内,且与山脉走向平行。26日08—20时,水汽通量散度分布的非对称性更加明显,辐合带位置少动,由于台风强度减弱,降水强度也减弱,未来6 h未出现 50 mm 以上降水。降水大值区仍与辐合带有较好对应,特别是在26日20时后,随着台风北上,杭州湾南岸地区转为台风后部,气压上升,但该地区仍存在水汽辐合,中心强度仍维持 $12\times10^{-7}\text{ g}/(\text{cm}^2\cdot\text{hPa}\cdot\text{s})$,为持续降水提供了充足的水汽条件。由此可见,台风登陆前925 hPa水汽分布结构对称,登陆后水汽辐合中心始终位于台

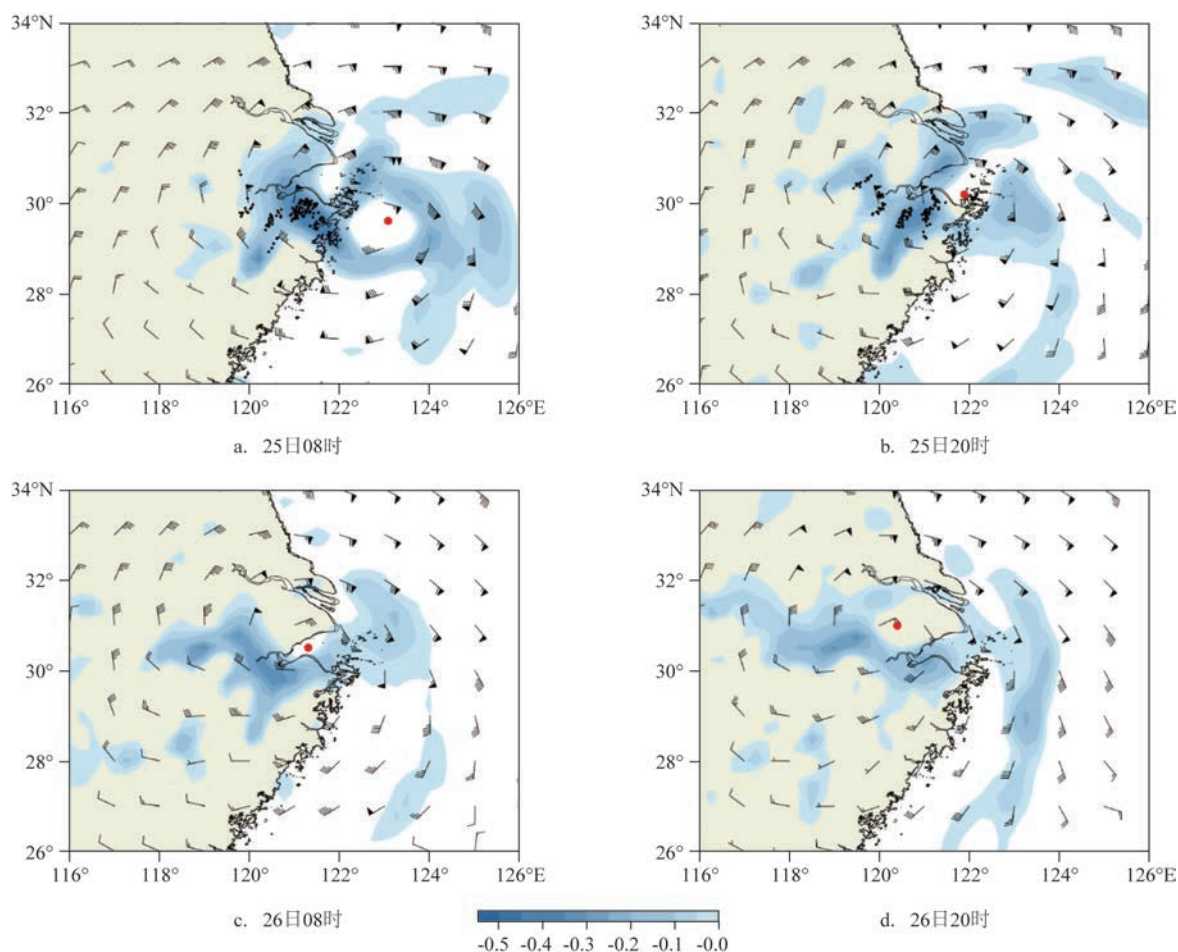


图2 不同时刻925 hPa风场(单位: m/s)、水汽通量散度(阴影,单位: $10^{-7}\text{ g}/(\text{cm}^2\cdot\text{hPa}\cdot\text{s})$)、未来6 h 50 mm以上降水站点(黑点)和台风中心位置(红点)分布

Fig.2 The distribution of wind(unit: m/s), water vapor flux divergence(shaded area, unit: $10^{-7}\text{ g}/(\text{cm}^2\cdot\text{hPa}\cdot\text{s})$) of 925 hPa, precipitation station of more than 50 mm in the next 6 hours(black spot), location of typhoon center(red dot) in different time

风西侧,具有明显的不对称性,有利于其西侧中尺度对流雨带的发展,水汽通量散度辐合区与未来6 h的强降水落区相对应,辐合强度与降水强度也有一定的对应,在今后的预报中可作为参考。

3.3 动力条件

由200 hPa风场演变图可知(图略),24日08时中纬度高空急流在118°E附近分为两支气流,一支为偏北气流,另一支为偏西气流。台风“烟花”北侧的西南气流北上并入台风“尼伯特”环流,台风处于高空气流的分流区中,两侧辐散极不均匀,西侧和北侧辐散较强,辐散强度达 $12 \times 10^{-5}/s$,东侧和南侧辐散较弱,这种分布有利于台风的非对称性发展。26日08时高空急流仍分为两支,中心向东发展,台风处于急流入口区右侧,有利于高空正涡度平流发展,抽吸作用加强,这是台风强度能长时间维持的原因之一;另一方面台风西北侧的强辐散仍维持,辐散强度为 $8 \times 10^{-5}/s$,直至影响结束。由此可见,在台风登陆后,高空分流区和强辐散均有利于上升运动加强,使台风西侧和北侧螺旋云带得以维持,并造成浙北东部沿海暴雨和大暴雨。

沿120°E散度和垂直速度的垂直剖面图显示,25日08时(图略)暴雨区上空(29°~30°N)的辐合集中在700 hPa以下,中心位于950 hPa附近,中心辐合强度达 $-16 \times 10^{-5}/s$,中高层为辐散,中心位于600 hPa附近,辐散强度达 $8 \times 10^{-5}/s$,垂直速度分布与散度场相对应,中低层以上升运动为主。26日08

时(见图3a)低层辐合明显增强,中心辐合强度增大至 $-20 \times 10^{-5}/s$,高度降至800 hPa以下,中层辐散中心也降至800 hPa附近,辐散强度增强,同时850 hPa垂直上升速度增强至1.5 m/s。由此可见,台风登陆前后浙北东部沿海辐合主要出现在边界层,特别是登陆后低层辐合高层辐散的环境条件更有利于强降水发生,但垂直速度发展并不旺盛,因此此次过程的整体降水效率不高。浙西北山区的散度和垂直速度也存在类似分布(见图3b),台风登陆前后暴雨区上空(30.5°~31°N)的辐合均集中在850 hPa以下,辐合中心位于950 hPa附近,辐合强度为 $-20 \times 10^{-5}/s$,对应的垂直上升速度仅为1 m/s,850 hPa向上以辐散为主。

3.4 不稳定条件

沿30°N假相当位温纬向剖面图显示,24日08时浙北东部沿海暴雨中心(121°E)上空850 hPa以上大气处于稳定层结状态(见图4a),850 hPa以下为高温高湿大气, θ_{se} 最大位于边界层,为356 K,且随高度增加而减小,表明大气处于弱不稳定层结或中性层结状态,不利于垂直运动强烈发展,这与24日实况小时雨量多不足20 mm相对应。25日08时120°E以东边界层 θ_{se} 增大至360 K以上(见图4b),表明低层有暖湿平流输送,同时600~500 hPa存在352 K的干冷中心, θ_{se} 差值达10 K,大气不稳定性明显增强,有利于提高降水效率,这是25日暴雨区持续出现30~50 mm/h短时强降水的重要原因之一。

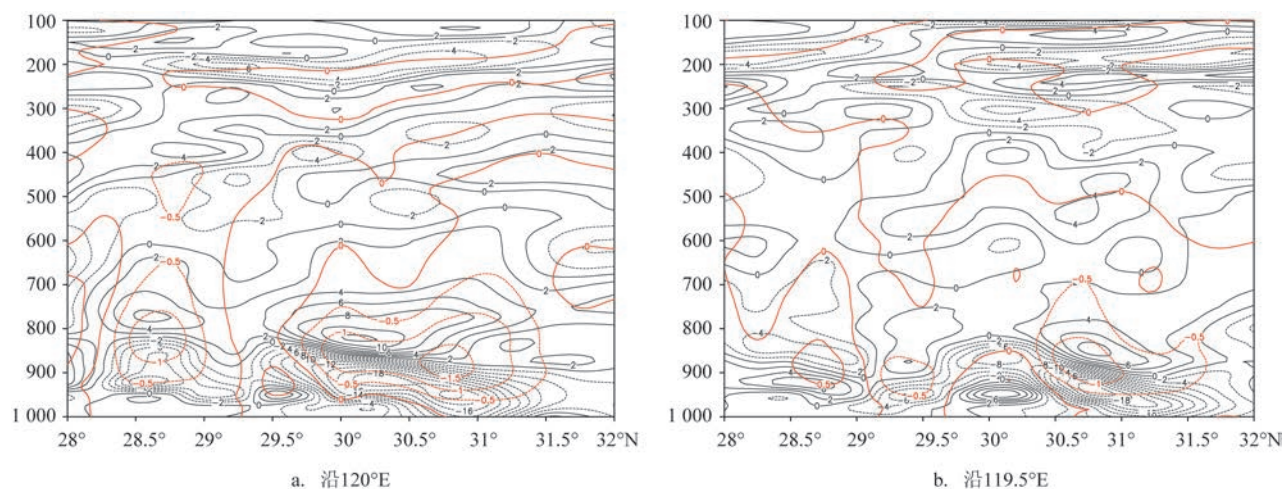


图3 26日08时散度(黑线,单位: $10^{-5}/s$)和垂直速度(红线,单位:m/s)的垂直剖面

Fig.3 The vertical profiles of divergence(black line, unit: $10^{-5}/s$) and vertical velocity(red line, unit: m/s)

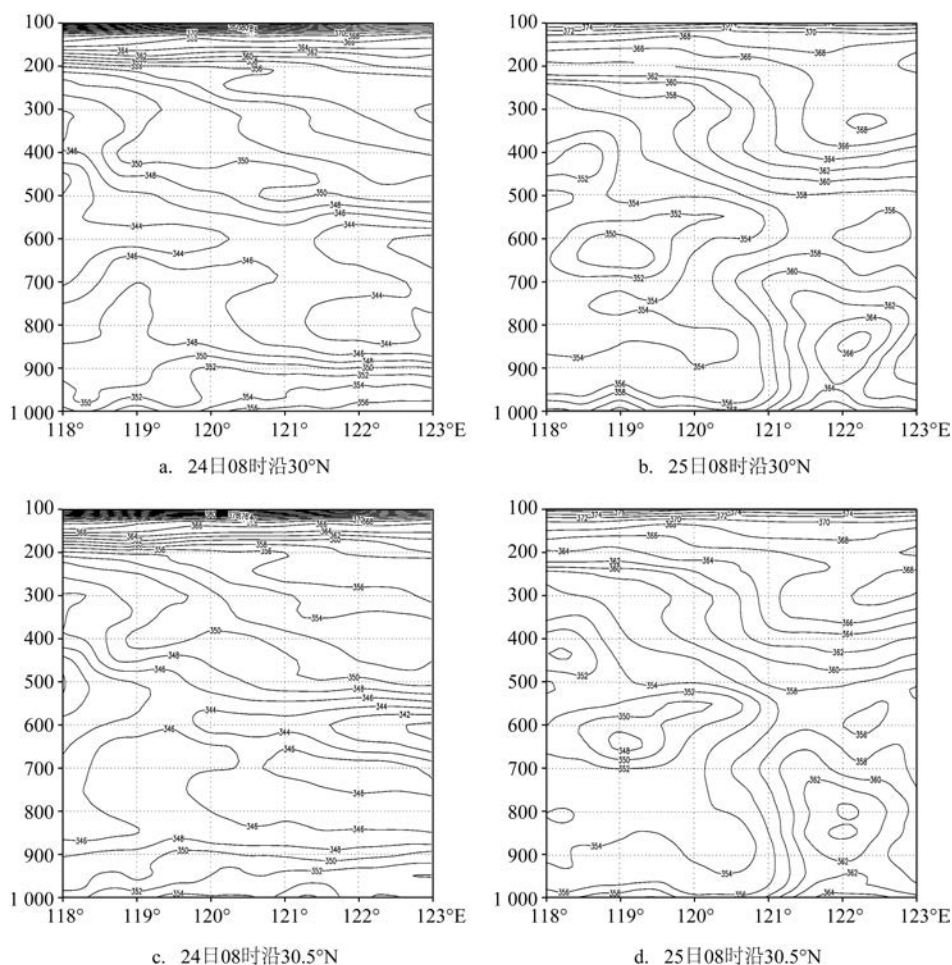


图4 假相当位温垂直分布(单位:K)

Fig.4 The vertical distribution of potential pseudo-equivalent temperature(unit:K)

26日08时边界层 θ_{se} 再次减小(图略),120°~121°E之间不稳定层结仅存在于975 hPa以下,降水也随之减弱,小时雨量降至10 mm以下。

浙西北山区暴雨中心(119.5°E、30.5°N)上空 θ_{se} 的演变过程(见图4c—d)与浙北东部沿海相似,台风登陆前后大气不稳定性增大,650 hPa干冷中心与边界层暖湿中心的假相当位温差达12 K,这种差异一直维持到26日20时,持续时间比浙北东部沿海长12 h,这是导致董岭站25日夜里—26日白天降水较丁家畈偏强的原因之一。

4 极端降水形成机制

4.1 中尺度对流云团活动特征

中尺度对流系统的形成和发展有利于产生台

风暴雨,并对台风暴雨垂直运动场的强迫起主要作用^[17]。从风云四号(FY-4A)卫星反演的云顶亮温(Black Body Temperature, TBB)演变可以看到(图略),22日08时台风“烟花”外围云系已经开始影响浙江沿海,但强度较弱,小时雨量在20 mm以下,13时起降水强度增强,最大小时雨量超过30 mm。24日02时台风“烟花”靠近浙江,中心密闭云区范围较小,云系不紧致,台风眼较大,北侧螺旋云带发展并不旺盛,浙江沿海云带TBB强度在-30℃以上,但在西进过程中已造成沿海地区20~30 mm/h的短时强降水。24日08时中心密闭云区范围增大,云系紧致,台风眼小而清晰,影响杭州湾南岸的螺旋云带得到发展,TBB增强至-40℃左右,08—09时中尺度雨团造成绍兴东龙小时雨量达56 mm,可见对流云团TBB的强度变化及大值中心位置与小时雨量

的强度及落区相对应。24日14时台风“烟花”本体云系开始影响沿海,其西侧密闭云区范围显著增大,TBB增强至 -60°C 以上并缓慢向西北方向移动,第一次登陆后仍维持台风强度,造成浙江东部沿海和浙西北山区出现持续性暴雨和大暴雨,部分地区特大暴雨,绍兴牛团仓站25日14时—26日14时24 h雨量达436 mm。26日下午起台风“烟花”北上并受地形阻挡和地面摩擦等作用,台风强度减弱,其螺旋云带和密闭云区范围减小,TBB强度减小,降水随之减弱。综上分析可知,台风“烟花”移速慢、其螺旋云带和本体云系范围广和台风强度维持时间长是造成此次极端降水的主要原因。

4.2 中尺度辐合带

从地面流场分析,当台风本体云系尚未影响浙江时,地面以辐散气流为主,降水为分散性阵雨。随着台风移近,25日08时浙北东部沿海四明山一带有明显的中尺度辐合带生成(见图5a),呈东北—西南走向,与四明山基本平行,辐合带两侧分别为偏东风和偏北风。结合图2a的分析结果来看,未来6 h强降水区正好位于中尺度辐合带上,累计最大降水达110 mm。与此同时,在浙西北也有中尺度辐合带形成,辐合带由西南风和偏东风构成,与浙西北天目山区的强降水正好对应,未来6 h最大降水达138 mm。由此可见,中尺度辐合带能触发对流,加强辐合上升运动,从而产生强降水。25日14时四明山一带有中尺度辐合带维持,会稽山附近又有新的中尺度辐合带生成。新辐合带由偏东风和偏西风

汇合而成,两条辐合带上未来6 h最大降水分别达200 mm和113 mm,而天目山附近的中尺度辐合带演变为中尺度低压,降水强度有所减弱,未来6 h最大降水为68 mm。26日08时四明山和会稽山一带的中尺度辐合带分别减弱和消亡(见图5c),对应降水也明显减弱,天目山一带的中尺度辐合带仍维持,对应湖州中南部未来6 h出现最大为101 mm的强降水。

综上分析可知,中尺度辐合带与中尺度雨带有较好的对应关系。中尺度辐合带的长时间维持,导致中尺度对流系统不断发展,在浙北东部沿海和浙西北山区形成“列车效应”,造成这些地区出现暴雨和大暴雨。

4.3 地形对降水的增幅作用

浙江省位于我国东南沿海,地势自西南向东北呈阶梯状倾斜,地形复杂。浙北山脉自西向东分别为天目山、龙门山、会稽山和四明山,特殊地形容易导致降水分布不均匀。董美莹等^[18]研究表明,山脉地形对台风近地层环流有强迫作用,可促使迎风坡气流的上升运动加强,从而产生强降水。

从图1d可以看到,浙北东部和浙西北的4座山脉均呈东北—西南走向,台风登陆前和登陆时均位于山脉右侧,为偏东或东南气流,与山脉走向近乎垂直。从浙北东部山区垂直速度纬向剖面图中可以看到(见图6a),四明山脉迎风坡上升运动明显强于平原地区,且集中在中低层,中心垂直速度达2.5 m/s。在浙西北山区也存在同样的分布(见图



图5 地面流场分布

Fig.5 The distribution of surface stream field

6c), 偏东气流在 120°E 附近的迎风坡受到抬升, 在 700 hPa 形成上升运动中心, 由于天目山海拔较高, 在山前 500 hPa 附近又形成上升运动中心。由此可见, 山脉对气流的抬升作用非常明显, 且有利于降水增幅。从不同高度站点的降水量分析来看, 宁波余姚的丁家畈、森林公园、东岗和华山水库 4 个站点的海拔高度均在 450 km 以上, 25 日 08—20 时 12 h 雨量均超过 200 mm, 但其周围低海拔站点的雨量仅为 100 mm 左右, 地形作用产生的降水增幅超过 100%。随着台风的北上西进, 25 日 20 时 (见图 6b) 浙北东部山脉处于台风西南侧并转受西北气流影响, 西北气流仍与山脉走向垂直并受山体阻挡, 气流在山脉西侧受动力抬升作用产生强烈的辐合上升运动, 将水汽向高空输送, 从而产生强降水。浙西北山区由于地理位置偏西, 26 日 08 时上升运动

中心才西进至天目山西侧。综上所述, 山脉迎风坡的抬升作用会触发不稳定能量的释放并激发中尺度雨团形成, 不断生成的中尺度雨团导致累积降水量增大, 同时地形的阻挡作用会使台风系统移速减慢, 降水持续时间变长, 降水量增大^[15]。

在发展剧烈的复杂天气系统中, 湿 Q 矢量散度场特征可以直观地反映台风降水的强弱变化, 台风系统的中尺度特性在湿 Q 矢量散度场的垂直剖面图中会表现得更为明显^[19]。从图 7 可以看出, 25 日 08 时 121°E 上空湿 Q 矢量存在两个辐合中心, 分别位于 1 000 hPa 和 200 hPa, 最大辐合强度为 $50 \times 10^{-14}/(\text{hPa} \cdot \text{s}^3)$, 表明台风在临近登陆前高低层对流同时发展; 25 日 20 时低层辐合中心西进至 121°E 以西, 强度加强至 $80 \times 10^{-14}/(\text{hPa} \cdot \text{s}^3)$, 同时在 500 hPa 附近存在强度为 $-60 \times 10^{-14}/(\text{hPa} \cdot \text{s}^3)$ 的辐散中心。台风低

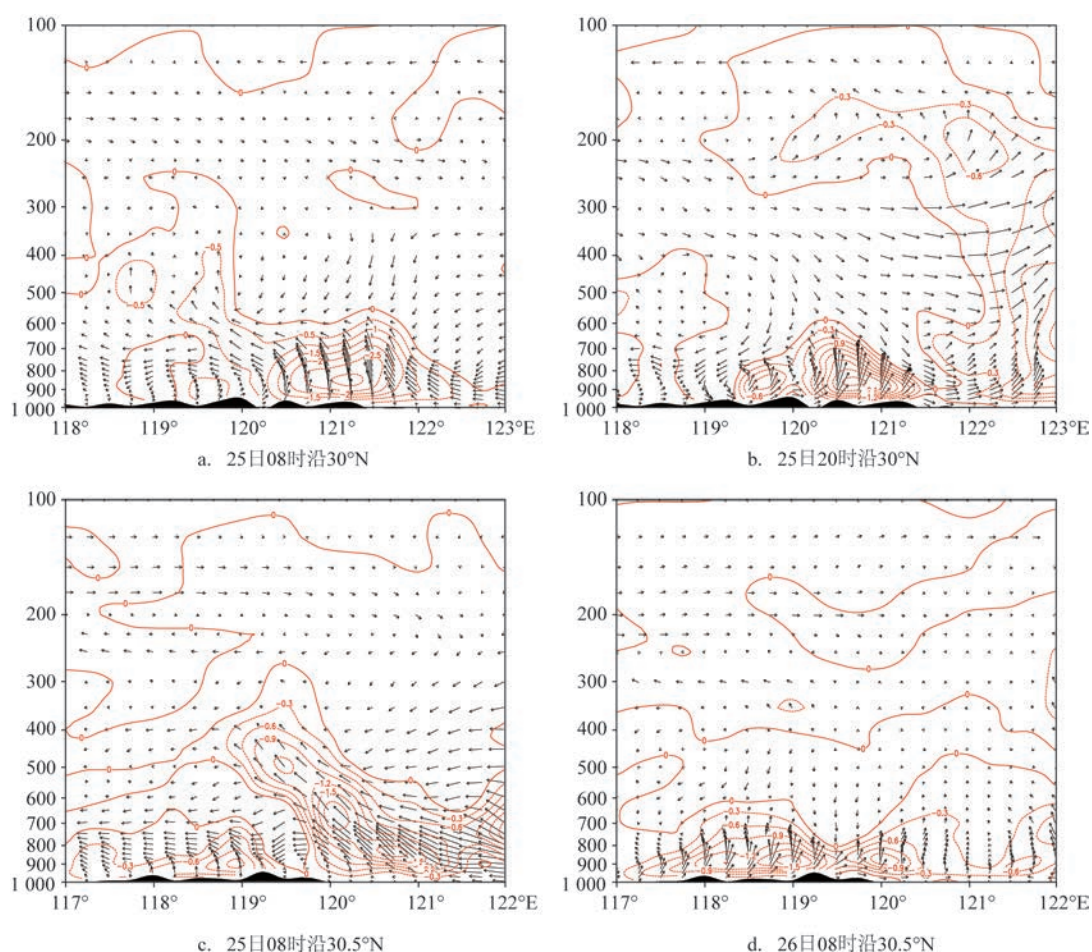
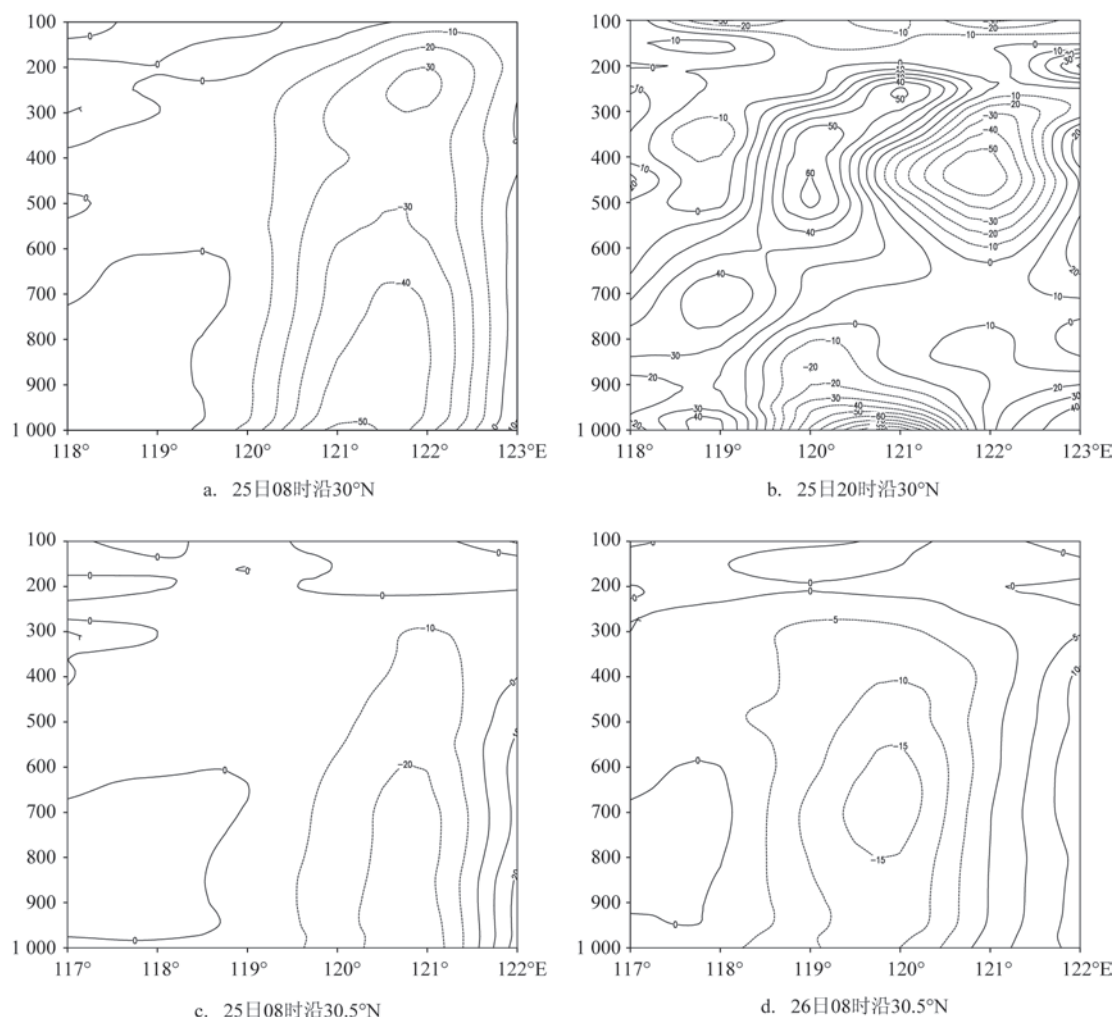


图6 地形(黑色阴影)、垂直速度(红线,单位:m/s)和风场(单位:m/s)垂直分布

Fig.6 The vertical distribution of terrain (black shaded area), vertical velocity (red line, unit: m/s) and wind field (unit: m/s)

图7 湿Q矢量散度(单位: $10^{-14}/(\text{hPa} \cdot \text{s}^3)$)垂直分布Fig.7 The vertical distribution of Q vector divergence(unit: $10^{-14}/(\text{hPa} \cdot \text{s}^3)$)

层对流发展,高层对流减弱,这与暴雨中心附近未来12 h最大降水从25日08时的327 mm减弱至20时的232 mm一致。研究表明湿Q矢量散度辐散的强弱变化代表了锋生作用的强弱^[19],结合图1d的地形分布发现,湿Q矢量散度辐合中心分布与垂直速度基本一致,迎风坡湿Q矢量散度辐合增强,锋生作用增强,有利于产生强降水。浙西北山区湿Q矢量散度场分布也有类似情况(见图7c、d),25日08时200 hPa以下为湿Q矢量辐合,辐合中心位于 $120^{\circ} \sim 121^{\circ}\text{E}$,辐合强度为 $20 \times 10^{-14}/(\text{hPa} \cdot \text{s}^3)$,辐合中心分布与垂直速度基本一致;26日08时辐合中心西进至 $119^{\circ} \sim 120^{\circ}\text{E}$,强度略有减弱,这也与浙西北山区暴雨中心附近未来12 h最大降水由25日08时的206 mm

减弱至26日08时的168 mm一致。另外,整个过程中浙北东部沿海的湿Q矢量散度辐合值均大于浙西北山区,表明对流和锋生发展更旺盛,这是浙北东部沿海降水量大于浙西北山区的原因之一。

5 结论

(1)台风“烟花”影响范围大,移动速度慢,影响浙江时间长达7 d,破浙江省登陆台风影响时间最长纪录,也是首个在浙江省内两次登陆的台风。台风“烟花”引发的暴雨过程范围广,总量大,多个气象站和市、县的降雨量破浙江省登陆台风降水纪录,极端降水集中在浙北东部沿海和浙西北山区。

(2)台风“烟花”处在鞍型场中,引导气流弱是其移速慢的主要原因,其螺旋云带和本体云系范围广、台风强度维持时间长是造成此次极端降水的主要原因,但降水效率整体不高。

(3)西南急流和偏东急流为台风提供了持续强盛的水汽输送,925 hPa水汽通量辐合区对未来6 h强降水落区和降水强度有一定指示意义。

(4)浙北东部沿海四明山一带和浙西北山区的中尺度辐合带长时间维持,导致中尺度对流系统不断发展并形成“列车效应”,是造成暴雨和大暴雨的重要原因。

(5)登陆前台风处于高空气流的分流区中,大气处于弱不稳定层结或中性层结状态,登陆后台风处于高空分流区和强辐散区中,大气不稳定性明显增强,有利于台风西侧和北侧的螺旋云带的维持,因此造成浙北东部沿海的暴雨和大暴雨。

(6)此次极端降水地形增幅作用明显,山脉迎风坡地形使水汽辐合抬升,促进了上升运动发展,使对流和锋生加剧,同时由于地形的阻挡作用,系统移速减慢,降水持续时间变长,降水量增大。

参考文献:

- [1] 程正泉, 陈联寿, 徐祥德, 等. 近10年中国台风暴雨研究进展[J]. 气象, 2005, 31(12): 3-9.
CHENG Z Q, CHEN L S, XU X D, et al. Research progress on typhoon heavy rainfall in China for last ten years[J]. Meteorological Monthly, 2005, 31(12): 3-9.
- [2] 陈联寿, 孟智勇. 我国热带气旋研究十年进展[J]. 大气科学, 2001, 25(3): 420-432.
CHEN L S, MENG Z Y. An overview on tropical cyclone research progress in China during the past ten years[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2001, 25(3): 420-432.
- [3] 李慧芹, 李江南, 于艳, 等. 一次海南秋季台风暴雨的特征和成因分析[J]. 热带气象学报, 2018, 34(1): 133-144.
LI H Q, LI J N, YU Y, et al. Analysis of the characteristics and causes of an autumn typhoon rainstorm in Hainan[J]. Journal of Tropical Meteorology, 2018, 34(1): 133-144.
- [4] 陈联寿, 孟智勇, 丛春华. 台风暴雨落区研究综述[J]. 海洋气象学报, 2017, 37(4): 1-7.
CHEN L S, MENG Z Y, CONG C H. An overview on the research of typhoon rainfall distribution[J]. Journal of Marine Meteorology, 2017, 37(4): 1-7.
- [5] 陈联寿, 许映龙. 中国台风特大暴雨综述[J]. 气象与环境科学, 2017, 40(1): 3-10.
CHEN L S, XU Y L. Review of typhoon very heavy rainfall in China[J]. Meteorological and Environmental Sciences, 2017, 40(1): 3-10.
- [6] 潘劲松, 周玲丽, 陆玮, 等. 两个相似路径台风残余造成局地特大暴雨的成因机制和能量收支对比分析[J]. 大气科学, 2019, 43(6): 1399-1412.
PAN J S, ZHOU L L, LU W, et al. Comparative analyses of mechanisms and energy budgets of local extreme rainfall events caused by remnant clouds of two typhoons with similar tracks[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2019, 43(6): 1399-1412.
- [7] 李英, 陈联寿, 徐祥德. 水汽输送影响登陆热带气旋维持和降水的数值试验[J]. 大气科学, 2005, 29(1): 91-98.
LI Y, CHEN L S, XU X D. Numerical experiments of the impact of moisture transportation on sustaining of the landfalling tropical cyclone and precipitation[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2005, 29(1): 91-98.
- [8] 许映龙, 张玲, 高拴柱. 我国台风预报业务的现状及思考[J]. 气象, 2010, 36(7): 43-49.
XU Y L, ZHANG L, GAO S Z. The advances and discussions on China operational typhoon forecasting[J]. Meteorological Monthly, 2010, 36(7): 43-49.
- [9] 钱燕珍, 潘灵杰, 段晶晶, 等. 三个登陆台风间接造成宁波大暴雨特征分析[J]. 气象与环境学报, 2019, 35(5): 37-45.
QIAN Y Z, PAN L J, DUAN J J, et al. Analysis on the characteristics of heavy rainfall in Ningbo indirect caused by three landing typhoons[J]. Journal of Meteorology and Environment, 2019, 35(5): 37-45.
- [10] 黄惠镛, 赵玉春, 苟爱萍, 等. 2013年相似路径台风“苏力”与“潭美”造成福建暴雨落区差异的成因[J]. 暴雨灾害, 2021, 40(2): 136-146.
HUANG H R, ZHAO Y C, XUN A P, et al. Causality analysis of difference of heavy rainfall distribution in Fujian caused by typhoons Soulik and Trami along similar tracks in 2013[J]. Torrential Rain and Disasters, 2021, 40(2): 136-146.
- [11] 王毅, 钱燕珍, 段晶晶, 等. “温比亚”台风登陆前后大暴雨特征及成因分析[J]. 海洋预报, 2020, 37(3): 62-71.
WANG Y, QIAN Y Z, DUAN J J, et al. Analysis on the characteristics and reasons of the heavy rainfall caused by landfalling typhoon “Rumbia”[J]. Marine Forecasts, 2020, 37(3): 62-71.
- [12] 董加斌, 黄新晴. 台风“莫兰蒂”登陆前后引起的浙江沿海地区强降水过程分析[J]. 应用海洋学学报, 2019, 38(2): 198-205.
DONG J B, HUANG X Q. An analysis on the rainfall process induced by typhoon Meranti in the coast of Zhejiang Province[J]. Journal of Applied Oceanography, 2019, 38(2): 198-205.
- [13] 万小雁, 何萍, 陈莹, 等. 乐清以北登陆台风“利奇马”和“阿贝”造成温州强降水差异的环境场特征分析[J]. 气象科学, 2021, 41(2): 153-161.

- WAN X Y, HE P, CHEN Y, et al. Analysis of environmental field characteristics for the difference of heavy rainfall in Wenzhou caused by typhoon "Lekima" and "Abe" landed on north of Yueqing[J]. *Journal of the Meteorological Sciences*, 2021, 41(2): 153-161.
- [14] 刘晓波, 储海. 双台风形势下长三角地区一次大暴雨过程的成因分析[J]. *暴雨灾害*, 2019, 38(2): 97-106.
- LIU X B, CHU H. Cause analysis of an extremely heavy rainfall event under binary typhoons pattern in Yangtze River delta[J]. *Torrential Rain and Disasters*, 2019, 38(2): 97-106.
- [15] 项素清, 周梅, 徐亚钦, 等. “利奇马”台风的特点及极端强降水的成因分析[J]. *海洋预报*, 2020, 37(5): 76-85.
- XIANG S Q, ZHOU M, XU Y Q, et al. The characteristics of typhoon "Lekima" and the cause of extreme rainfall[J]. *Marine Forecasts*, 2020, 37(5): 76-85.
- [16] 郑铮, 潘灵杰, 钱燕珍, 等. 台风“利奇马”造成浙江沿海极端降水的演变特征[J]. *干旱气象*, 2021, 39(2): 269-278.
- ZHENG Z, PAN L J, QIAN Y Z, et al. Evolution characteristics of extreme heavy precipitation in coast of Zhejiang Province caused by typhoon Lekima[J]. *Journal of Arid Meteorology*, 2021, 39(2): 269-278.
- [17] 林毅, 陈思学, 吕思思. 1601号“尼伯特”台风特大暴雨的中尺度系统特征与成因分析[J]. *暴雨灾害*, 2017, 36(6): 542-549.
- LIN Y, CHEN S X, LYU S S. Mesoscale system characteristics and cause analysis of an excessive rainstorm event triggered by super typhoon Nepartak[J]. *Torrential Rain and Disasters*, 2017, 36(6): 542-549.
- [18] 董美莹, 陈联寿, 程正泉, 等. 地形影响热带气旋“泰利”降水增幅的数值研究[J]. *高原气象*, 2011, 30(3): 700-710.
- DONG M Y, CHEN L S, CHENG Z Q, et al. Numerical study of topography effect on rainfall reinforcement associated with tropical cyclone "Talin" [J]. *Plateau Meteorology*, 2011, 30(3): 700-710.
- [19] 韩芙蓉, 鹿翔, 梁亮. “莫兰蒂”台风暴雨的湿Q矢量和垂直螺旋度分析[J]. *海洋预报*, 2020, 37(1): 67-74.
- HAN F R, LU X, LIANG L. Analysis of wet ageostrophic Q-Vector and vertical helicity of rainstorm of typhoon "Meranti"[J]. *Marine Forecasts*, 2020, 37(1): 67-74.

Analysis of extreme precipitation in Zhejiang caused by typhoon "In-Fa"

SHEN Xiaoling¹, LI Feng²

(1. Shaoxing Meteorological Bureau of Zhejiang, Shaoxing 312000, China; 2. Zhuji Meteorological Bureau of Zhejiang, Zhuji 311800, China)

Abstract: Using the conventional meteorological observation data of Zhejiang Province, the hourly reanalysis data of ERA5(0.25×0.25) and satellite cloud map data, the extreme precipitation process caused by typhoon "In-Fa" (2106) in the eastern coast of northern Zhejiang and the mountainous area of northwestern Zhejiang is analyzed. The results show that typhoon "In-Fa" has weak guiding airflow, moves slowly with wide range of spiral cloud belt and main cloud system, and maintains for a long time affecting Zhejiang for up to 7 days, which are the main reasons of the extreme precipitation. However, the precipitation efficiency is not high. The southwest jet flow and easterly jet flow provide sustained and strong water vapor transport for the typhoon, and the convergence area of 925hPa water vapor flux has certain indicating significance for the falling area and precipitation intensity of heavy precipitation in the next 6 hours. In the Siming Mountain area along the eastern coast of northern Zhejiang and the mountainous area of northwestern Zhejiang, the mesoscale convergence zone is maintained for a long time, resulting in the continuous development of mesoscale convective system, and the "train effect" is an important reason for extreme precipitation. The enhancement effect of topography for precipitation is significant. The windward slope topography of the mountain makes the convergence and uplift of water vapor, and the convection and frontogenesis intensifies. Therefore, the precipitation system slows down with the longer duration, resulting in increased precipitation.

Key words: extreme precipitation; jet flow; mesoscale convergence zone; topography