

# “温比亚”台风登陆前后大暴雨特征及成因分析

王毅<sup>1</sup>, 钱燕珍<sup>1</sup>, 段晶晶<sup>1</sup>, 郭宇光<sup>1</sup>, 方艳莹<sup>2</sup>

(1. 宁波市气象台, 浙江 宁波 315012; 2. 宁波市气象服务中心, 浙江 宁波 315012)

**摘要:** 利用中尺度自动站加密资料、雷达和卫星资料以及NCEP全球分析资料, 诊断分析1818号台风“温比亚”登陆前后大暴雨特征及其成因。结果表明: (1) 台风登陆前后, 降水具有时间集中、局地性强、雨强大等中尺度降水特征, 强降水集中在距台风中心100 km以内的台风前进方向的左前部和后部, 主要由两个移动性雨团和1个相对少动雨团产生, 距台风中心25~50 km的降水量中心小时降水量普遍较大; (2) 杭州湾区域地面辐合一方面加强了低空水汽辐合, 另一方面促进了上升运动的发展和维持, 使得中尺度对流雨团在宁波东北部至舟山一带发展加强, 同时引导气流偏弱和地形作用导致台风在舟山附近移速减慢, 延长了影响时间, 造成了杭州湾附近区域的大暴雨; (3) 地面辐合的增强和减弱对应于其后1 h降水的增大和减小; 水汽通量散度的减小、增大与降水的增大、减小有较好的对应关系, 水汽通量散度在 $-16 \times 10^{-5} \text{ g}/(\text{cm}^2 \cdot \text{hPa} \cdot \text{s})$ 以下的时段降水较强; 垂直螺旋度大值中心所对应区域未来6 h有强降水, 垂直螺旋度的减小对应于该区域其后6 h降水的减弱。

**关键词:** “温比亚”台风; 大暴雨; 成因; 诊断分析

**中图分类号:** P732.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-0239(2020)03-0062-10

## 1 引言

我国是世界上受台风影响最严重的国家之一, 台风伴随的狂风、暴雨、风暴潮等有时给沿海地区造成严重灾害<sup>[1]</sup>。台风暴雨还可能引发山洪、内涝等次生灾害, 从而造成较大的经济损失和社会影响。因此, 台风暴雨机理的研究成为国内外许多气象学者长期关注的课题<sup>[2]</sup>, 台风暴雨与台风结构有关, 还与大尺度环流背景、中尺度系统、水汽条件、局地地形、层结稳定度、边界层辐合和高层出流等许多方面关系密切<sup>[3]</sup>。

台风暴雨往往出现在对流发展旺盛的区域, 中尺度对流系统是产生大暴雨的必要条件。钱燕珍等<sup>[4]</sup>分析0509号台风“麦莎”特大暴雨及其结构特征发现, 中尺度“降水细胞”频繁再生与移动对构成台

风特大暴雨和灾害起重要作用。盛芳等<sup>[5]</sup>指出是否存在中小尺度对流活动是台风“尼伯特”(1601)和“莫兰蒂”(1614)降水强度存在差异的不可或缺的因素。段晶晶等<sup>[6]</sup>和叶龙彬等<sup>[7]</sup>研究发现, 台风环流内部对流系统活跃是产生强降水的重要原因, 地形抬升对中尺度对流系统的发生发展起到关键作用。持续的水汽输送是产生大暴雨的另一必要条件。已有的研究表明<sup>[8-11]</sup>, 长时间、大量的水汽输送有利于台风的发展和维持, 中低层水汽辐合是台风产生暴雨的主要原因。

2018年18号台风“温比亚”在东海生成, 经舟山、杭州湾登陆上海, 这一路径的台风在历史上极为少见。台风登陆前后的降水具有雨强大、局地性明显等中尺度降水特征, 为雨量预报带来了一定的难度。本文利用中尺度自动站资料、雷达资料、卫

收稿日期: 2019-04-30; 修回日期: 2019-08-01。

基金项目: 浙江省气象局预报员专项(2018YBY03); 浙江省宁波市科技局项目(2014C50024); 浙江省宁波市自然科学基金项目(2018A610210)。

作者简介: 王毅(1984-), 男, 工程师, 硕士, 主要从事天气预报及服务。E-mail: wangyi229@yeah.net

通信作者: 钱燕珍(1968-), 女, 正研级高级工程师, 本科, 主要从事台风等灾害性天气预报及研究。E-mail: qian-y-z@163.com

星资料和美国国家环境预报中心(National Centers for Environmental Prediction, NCEP)全球分析资料等,诊断分析台风“温比亚”登陆前后降水的中尺度特征及大暴雨成因,为以后相似台风的雨量、暴雨落区预报提供参考。

## 2 台风概况及降水变化特征

### 2.1 台风概况

2018年18号台风“温比亚”于8月15日14:00(北京时,下同)在距离浙江省象山县东偏南方向约480 km的东海海面上生成。生成后,“温比亚”向西北转偏西方向移动,强度有所增强,16日21:00加强为强热带风暴,最强时中心气压982 hPa,近中心最大风速25 m/s,17日04:05以热带风暴级在上海浦东新区南部沿海登陆,登陆后继续向西偏北方向移动,强度逐渐减弱。

台风“温比亚”具有以下3个方面的特点:一是台风在东海生成,靠近陆地,在海上发展时间有限,

登陆前短暂加强到强热带风暴级;二是台风移向偏西分量较大,从生成到影响浙江沿海间隔时间短,只有不到24 h;三是台风登陆前后的12 h内降水集中,杭州湾附近区域普遍出现暴雨。

### 2.2 雨情

“温比亚”在经舟山、杭州湾登陆上海进入江苏南部的过程中,给所经过地区带来大范围暴雨。8月16日21:00—17日10:00,舟山大部、宁波北部、绍兴北部、杭州东部、湖州大部、嘉兴南部以及上海至江苏南部的部分地区降水量在50 mm以上,出现暴雨;其中69站降水量超过100 mm,出现大暴雨;最大是舟山定海马目社区自动站167.3 mm。由浙北至苏南地区部分自动站逐时降水量(见表1)可见,强降水出现时间比较集中,大多数站点1 h雨量超过10 mm的时间在4~5 h,且基本上是持续出现。雨团移动性特征比较明显,主要是由东向西,其次是由南向北。降水强度大,很多站出现了小时雨量30 mm以上的暴雨,最大的达85 mm。台风“温比亚”登陆前后的降水表现出降水集中、局地性强、雨

表1 8月16日22:00—17日10:00浙北至苏南地区部分自动站逐时降水量(单位:mm)

时间	地区(位置)						
	舟山	宁波	宁波	杭州	嘉兴	无锡	上海
	马目社区 (121.93°E 30.15°N)	大树东 (121.98°E 29.93°N)	周巷 (121.13°E 30.18°N)	龙虎村 (120.42°E 30.28°N)	河山镇 (120.37°E 30.63°N)	和桥 (119.90°E 31.48°N)	南汇 (121.78°E 31.05°N)
22:00	4.9	13.2	6.1	18.0	3.0	0.1	8.2
23:00	4.0	37.5	0.9	0.2	10.3	8.8	9.0
00:00	0.7	64.3	3.6	0	0.2	1.9	3.6
01:00	13.9	20.9	5.2	2.3	1.6	5.4	1.3
02:00	85.0	9.7	14.4	0.7	0.3	3.8	—
03:00	14.1	3.7	33.7	12.2	12.9	19.4	—
04:00	3.6	8.8	12.4	26.6	5.0	2.1	1.0
05:00	22.2	1.3	2.7	2.3	5.1	5.6	7.0
06:00	17.8	0.7	23.8	8.7	11.7	10.1	28.0
07:00	1.1	—	16.6	26.8	3.1	3.1	14.7
08:00	—	—	8.9	16.0	37.5	0.2	8.0
09:00	—	—	1.5	7.7	27.9	6.1	7.0
10:00	—	—	—	2.5	8.5	59.6	12.5
合计	167.3	160.1	129.8	124.0	127.1	126.2	100.3

强大、雨团移动性特征明显等中尺度降水特征。

### 2.3 雨团活动特征

分析“温比亚”西移靠近陆地过程中的云图特征(图略),发现其结构松散、云系破碎,密闭云区不明显。8月16日20:00前后,台风中心附近对流云团开始发展加强,强对流云团边发展边逆时针旋转,密闭云区发展扩大,直至覆盖整个杭州湾及其周边地区。云团的发展移动在雷达组合反射率图上(见图1)也有所反映,16日20:00前后强回波先是出现在台风的西侧,接着移到台风的西南侧,然后移到台风的东南侧。回波形状也有变化,回波走向先是南北向为主,接着是西北-东南走向,再后来是东西向为主。特别值得注意的是,从16日21:00—17日05:00,有强回波不断在雷达东北方向50 km以内发生、发展,回波呈片状,范围约 $40 \times 40$  km,强度超过

45 dBz,正是这一强回波造成宁波东北部至舟山出现本次过程的最大累计降水量。

为进一步分析造成强降水的对流云团如何发展、移动,本文采用跟随台风中心的移动坐标方法。Riehl<sup>[12]</sup>在研究中以台风前进方向为 $0^\circ$ ,将台风划分为右前、右后、左前、左后4个象限,建立了台风移动坐标并观察到台风不同方位的结构特征。陈联寿等<sup>[13]</sup>和李英等<sup>[14]</sup>研究表明,采用台风移动坐标,对揭示台风结构特征和诊断台风暴雨落区很有意义。

将台风“温比亚”的中心位置始终置于坐标原点、移动方向作为 $0^\circ$ 方位角,把每小时的大降水量中心相对于台风中心的方位和距离绘制在图上。由图2可见,大降水量中心在移动坐标系的左前象限最多,左后和右后象限次之,右前象限最少。强降水集中在台风前进方向的左前部和后部,是“温

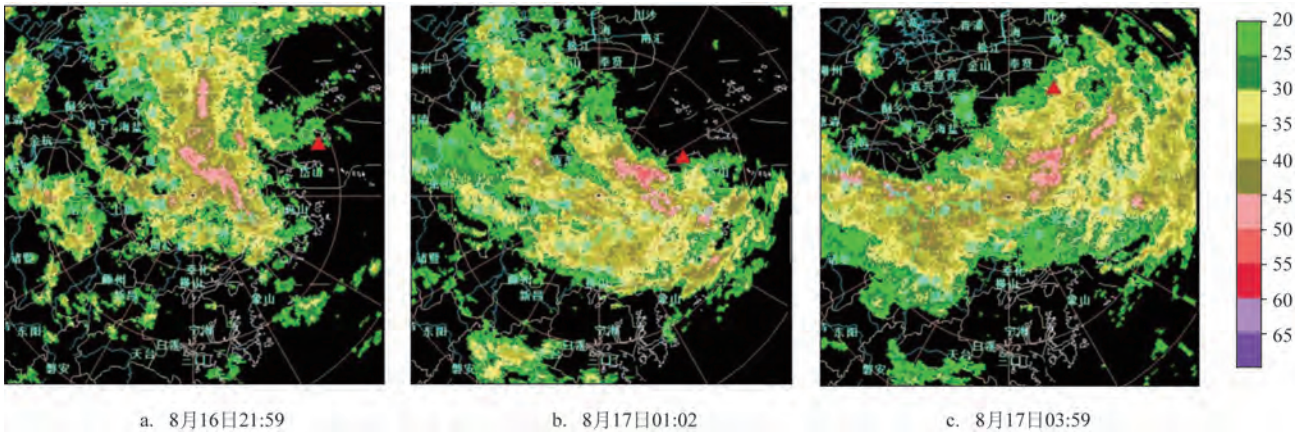


图1 雷达回波组合反射率(单位:dBz,红色三角形代表台风中心位置)

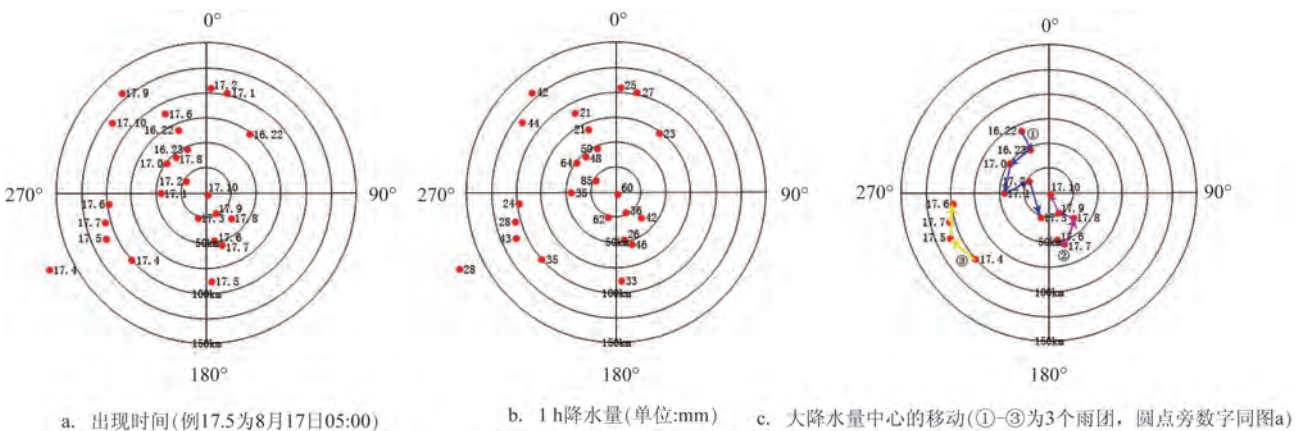


图2 相对于台风“温比亚”移动坐标系的大降水量中心分布



比亚”降水的特点。另外,大降水量大都分布在距台风中心 100 km 以内,距台风中心 25~50 km 的降水量中心小时降水量普遍较大,“温比亚”的强降水主要出现在离台风中心较近的区域。

将图 2a 大降水量中心按时间顺序连线得到图 2c,分析主要雨团的移动特征。由图 2c 可见,8 月 16 日 22:00—17 日 10:00,主要有两个移动性雨团和 1 个相对少动雨团活动于台风的左前、左后和右后象限。雨团①于 16 日 22:00 生成于距台风中心 70 km 附近的左前象限,随后逆时针向台风中心转入至 25 km 半径内,17 日 03:00 移动到台风后部并结束其生命史,历时 5 h。这是台风登陆前在舟山定海马目社区附近造成最大 1 h 降水量(17 日 01:00—02:00) 85.0 mm 的雨团(见表 1)。雨团②于 17 日 06:00 生成于距台风中心 50 km 附近的右后象限,之后逆时针转入至台风中心附近,17 日 10:00 结束其生命史,历时 4 h。这是台风登陆后造成无锡和桥附近最大 1 h 降水量(17 日 09:00—10:00) 59.6 mm 的雨团(见表 1)。雨团③于 17 日 04:00 生成于台风的左后象限,17 日 05:00—07:00 在距台风中心 100 km 外稳定少动,历时 3 h。这是台风登陆前后造成宁波余姚沈湾附近最大 1 h 降水量(17 日 04:00—05:00) 42.5 mm 的雨团。

由以上分析可知,持续时间较长、局地性强的中尺度对流雨团造成了宁波东北部至舟山的局地大暴雨,那么中尺度对流雨团发展的条件是什么?

### 3 暴雨成因和落区的诊断分析

#### 3.1 环流背景

图 3 给出了“温比亚”登陆前后的环流形势及对流的水平结构情况。“温比亚”活动期间,中高纬地区呈两槽一脊形势,副高处于调整期。8 月 16 日 14:00 西太平洋副热带高压逐渐加强西伸,并与华北高压连接,形成东西向的高压坝,台风向北的移动受到遏制而逐渐转向西行。16 日 20:00 台风西行靠近舟山,对流云团发展加强,深对流主要出现在台风中心附近,低于 $-70^{\circ}\text{C}$ 的冷云顶范围逐渐扩大,到 17 日 02:00 低于 $-70^{\circ}\text{C}$ 的冷云顶范围覆盖整个杭州湾及其沿岸地区,这与台风强度略微增强有关,也

可能与地面辐合抬升有关。同时,由于副高脊线同经度在 $38^{\circ}\text{N}$ 以北,位置偏北,副高南侧的偏东气流对台风移动的引导偏弱。再加上靠近陆地后,周围岛屿众多,舟山群岛附近就有 1 390 多个大小不同的岛屿,特殊的地形会产生摩擦、抬升等各种作用,致使 16 日 22:00—17 日 03:00 台风在经过舟山时移速减慢。对流云团在杭州湾及其沿岸地区发生、发展并长时间停留,造成该区域的降水特别强(见表 1)。17 日 08:00 随着台风登陆并继续西行,对流云团西移并缓慢减弱,台风对杭州湾区域的降水影响趋于结束(见表 1)。

从图 3 中还可以看出,低空偏南气流位于台风“温比亚”的东部,为台风提供了充足的水汽供应,使台风在经过舟山群岛的过程中强度得以维持,造成杭州湾及其沿岸地区暴雨强度强、范围大。另外,南海海面上空有 1816 号台风“贝碧嘉”缓慢西移,西太平洋洋面上空有 1819 号台风“苏力”生成发展,但“贝碧嘉”与“温比亚”之间的距离超过 1 500 km,“苏力”与“温比亚”更是相距 2 000 km 以上,850 hPa 风场上台风之间也没有建立起急流,总体来看这两个台风对“温比亚”的影响作用很小。

#### 3.2 地面辐合

常规观测资料的时间分辨率较低,在 6 h 左右,而地面中尺度自动站资料的更新频次达到分钟级,这类资料的充分应用,对于分析中尺度天气系统有很好的作用<sup>[15-16]</sup>。已有的研究表明,近地层或低层风场辐合往往是台风产生强降水的动力机制<sup>[17-18]</sup>。分析地面中尺度自动站风场资料发现,台风中心进入舟山后,杭州湾区域地面风场存在明显的辐合。以 16 日 23:00 地面中尺度自动站风场为例(见图 4),杭州湾北部为东北风,杭州湾南部为西北风,两者存在气旋式风切变,导致地面风场辐合。8 月 16 日 20:00—17 日 02:00,地面风场辐合始终位于 $30^{\circ}\sim 30.5^{\circ}\text{N}$ 之间的杭州湾东南部,对应时段内与其相邻的宁波东北部至舟山一带的降水也最为明显(见表 1)。

为研究雨量与地面辐合的匹配关系,将位于宁波和舟山交界处的宁波大榭东自动站( $121.98^{\circ}\text{E}$ 、 $29.93^{\circ}\text{N}$ )作为降水代表站、大洋山测站( $122.08^{\circ}\text{E}$ 、 $30.60^{\circ}\text{N}$ )和慈溪测站( $121.28^{\circ}\text{E}$ 、 $30.20^{\circ}\text{N}$ )分别作为

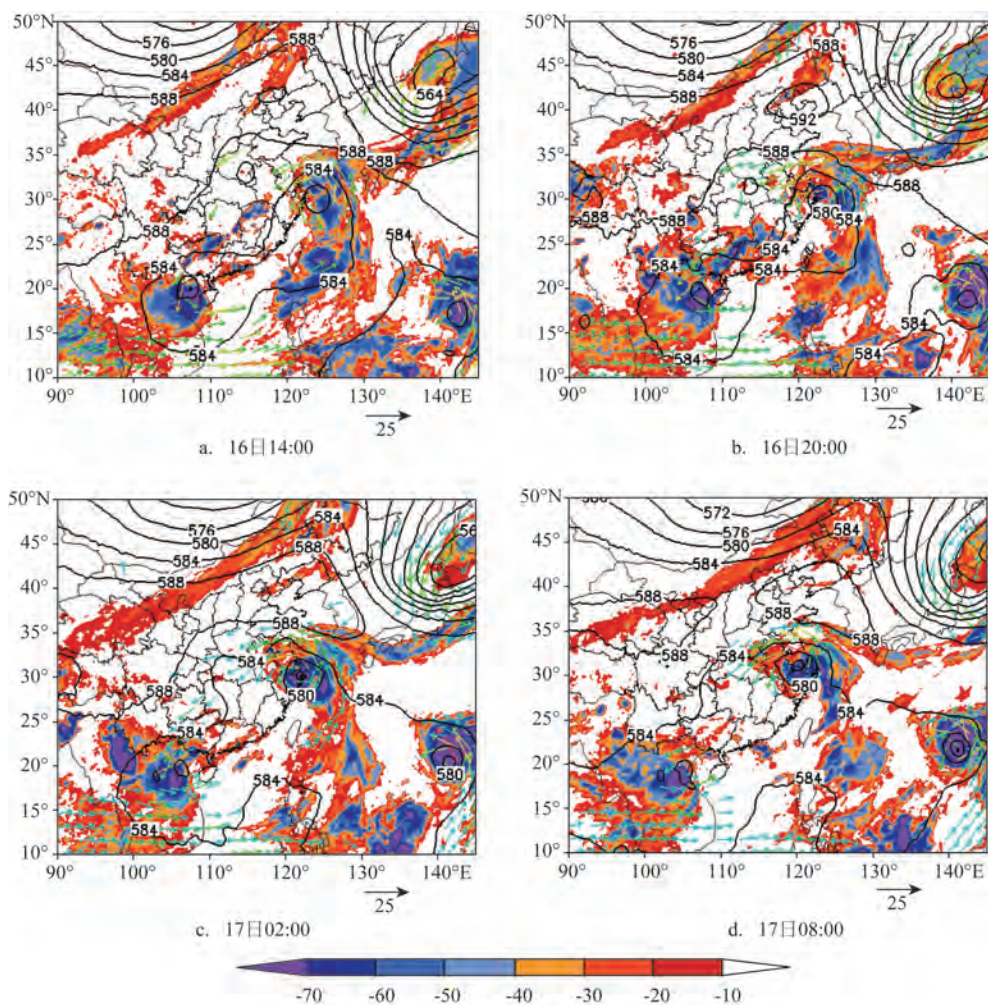


图3 台风“温比亚”环流形势(填色:亮温,单位:°C;等值线:500 hPa高度场,单位:dagpm;矢量箭头:850 hPa>12 m/s的区域)

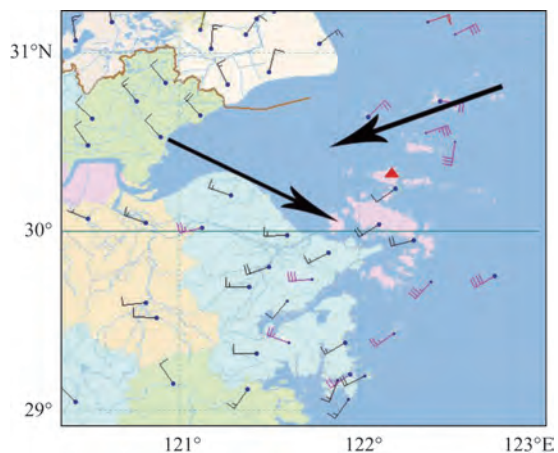


图4 8月16日23:00地面中尺度自动站2 min平均风向风速(风向杆,单位:m/s;红色三角形代表台风中心所在位置,黑色箭头表示杭州湾区域的风向)

杭州湾北部和杭州湾南部地面风场代表站,将大榭东逐时降水量、大洋山和慈溪逐时整点2 min平均风向风速及其风切变绘制成图5。分析图5发现,8月16日20:00杭州湾北部为偏北风,杭州湾南部为弱西北风,两者存在气旋式风切变,风切变在10 m/s以下。16日21:00杭州湾北部转为东北风,风力明显增大,杭州湾南部的西北风也略有增大,风切变则增强到14 m/s,地面辐合得到加强,随后自16日22:00开始大榭东自动站1 h雨量均大于10 mm,降水明显增强。16日23:00杭州湾北部风场的偏东分量和杭州湾南部风场的偏西分量都有所加大,杭州湾南部风力小幅增强,此时风切变达到最大值18.5 m/s,强烈的地面辐合加强了上升运动,17日00:00大榭东自动站1 h雨量达到最大值64.3 mm。17日00:00杭州湾北部风力明显减弱,风切变则减小至



15 m/s 以下,大榭东自动站之后 1 h 雨量也明显减小。自 17 日 01:00 开始,杭州湾北部的偏东风快速减小并转为西北风,风切变也显著减小,17 日 02:00 起大榭东自动站 1 h 雨量减小至 10 mm 以下。

杭州湾区域地面风场辐合的维持、加强为中尺度对流雨团的发生、发展提供了抬升条件,是台风“温比亚”造成宁波东北部至舟山局地大暴雨的动力机制,地面辐合的增强和减弱对应于其后 1 h 降水的增大和减小。

### 3.3 水汽条件

持续而充足的水汽供应是台风造成暴雨的重要条件,水汽通量及其散度和降水强度之间有一定的相关性<sup>[19-21]</sup>。从 8 月 16 日 20:00 950 hPa 水汽通量分布(见图 6a)来看,台风的水汽主要来源于南海,

其次来源于东偏北气流的输送。水汽通量存在明显的不对称分布,台风北部的水汽通量明显大于台风南部。水汽通量的大值中心位于台风北部,最大值超过  $60 \text{ g}/(\text{cm} \cdot \text{hPa} \cdot \text{s})$ ,杭州湾附近区域的水汽通量在  $25 \text{ g}/(\text{cm} \cdot \text{hPa} \cdot \text{s})$  以上。台风北侧水汽通量大值中心附近流出的气流输送到杭州湾两岸,有利于这一区域降水的加强。

分析各高度层暴雨区( $30^{\circ} \sim 31^{\circ}\text{N}$ 、 $121^{\circ} \sim 122^{\circ}\text{E}$ )水汽通量散度的时空演变(见图 6b),可见从 8 月 16 日 14:00—17 日 14:00,暴雨区低空一直维持负水汽通量散度,存在水汽的辐合。随着台风“温比亚”西行进入杭州湾,水汽通量散度逐渐减小,水汽辐合加强,并在 17 日 02:00 前后水汽通量散度达到最小值  $-20 \times 10^{-5} \text{ g}/(\text{cm}^2 \cdot \text{hPa} \cdot \text{s})$  以下,最小值中心出现在 950 hPa 以下,台风登陆后水汽通量散度逐渐增大,

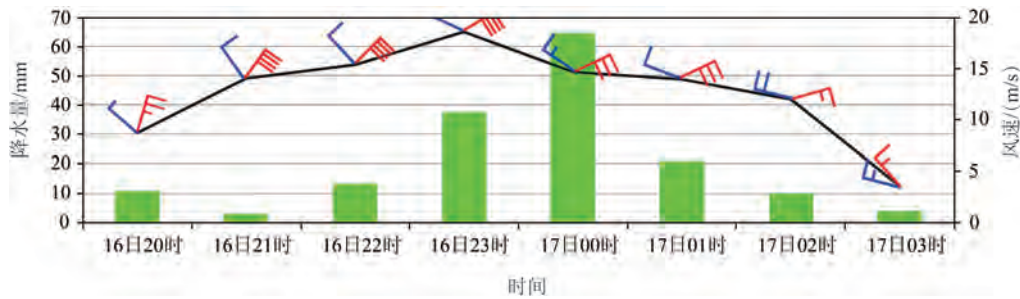
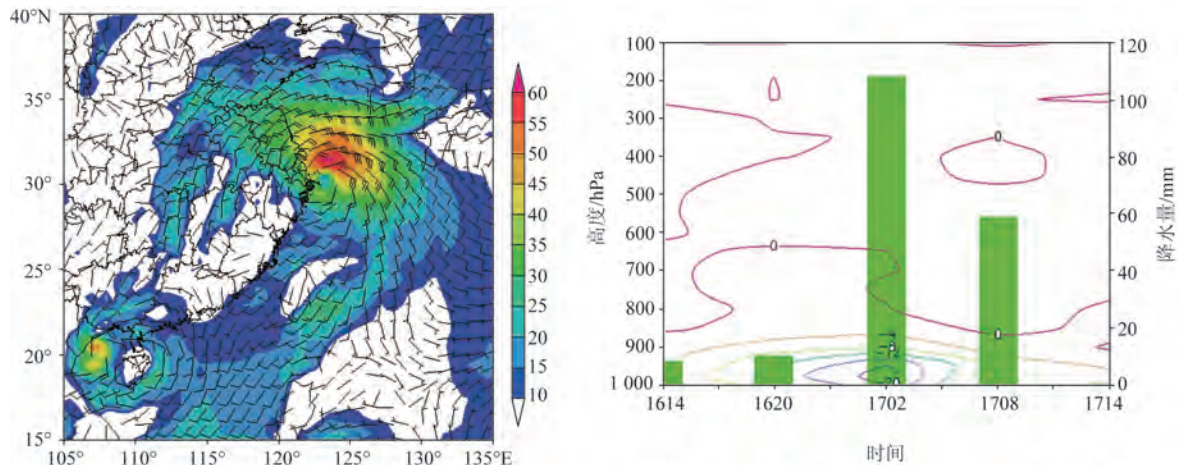


图5 8月16日20:00—17日03:00大榭东逐时降水量(柱形,单位:mm)和大洋山(红色风向杆,单位:m/s)、慈溪(蓝色风向杆,单位:m/s)逐时整点2 min 平均风向风速及其风切变(折线,单位:m/s)



a. 8月16日20:00 950 hPa水汽通量(填色,单位: $\text{g}/(\text{cm} \cdot \text{hPa} \cdot \text{s})$ )及风场(风向杆,单位:m/s)  
b. 8月16日14:00—17日14:00  $30^{\circ} \sim 31^{\circ}\text{N}$ 、 $121^{\circ} \sim 122^{\circ}\text{E}$ 区域平均的水汽通量散度(等值线,单位: $10^{-5} \text{ g}/(\text{cm}^2 \cdot \text{hPa} \cdot \text{s})$ )时间-垂直剖面图及马目社区逐6 h累计降水量(柱形)

图6 950 hPa水汽通量分布和各高度层暴雨区水汽通量散度的时空演变

水汽辐合减弱。对比同时段逐6 h降水量发现,水汽通量散度的减小、增大与降水的增大、减小有较好的对应关系,水汽通量散度在 $-16 \times 10^{-5} \text{g}/(\text{cm}^2 \cdot \text{hPa} \cdot \text{s})$

以下的时段降水较强。低空水汽辐合的加强一方面与台风靠近过程中水汽输入的增加有关,另一方面,杭州湾区域地面辐合加强的作用也尤为重要。

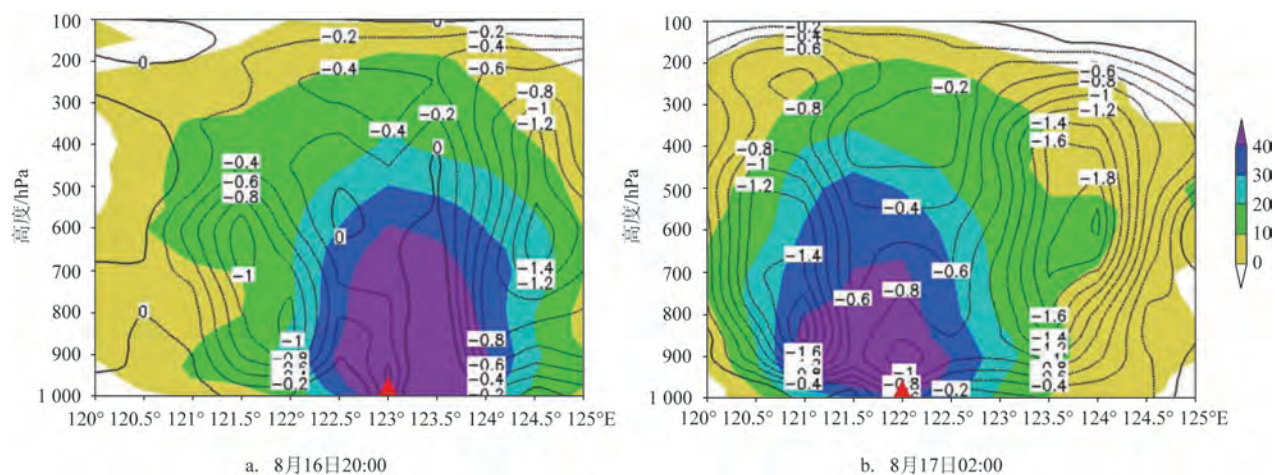


图7 沿30.5°N的涡度剖面(填色,单位: $10^{-5}/\text{s}$ )和垂直速度剖面(等值线,单位: $\text{Pa}/\text{s}$ ,红色三角代表台风中心所在经度)

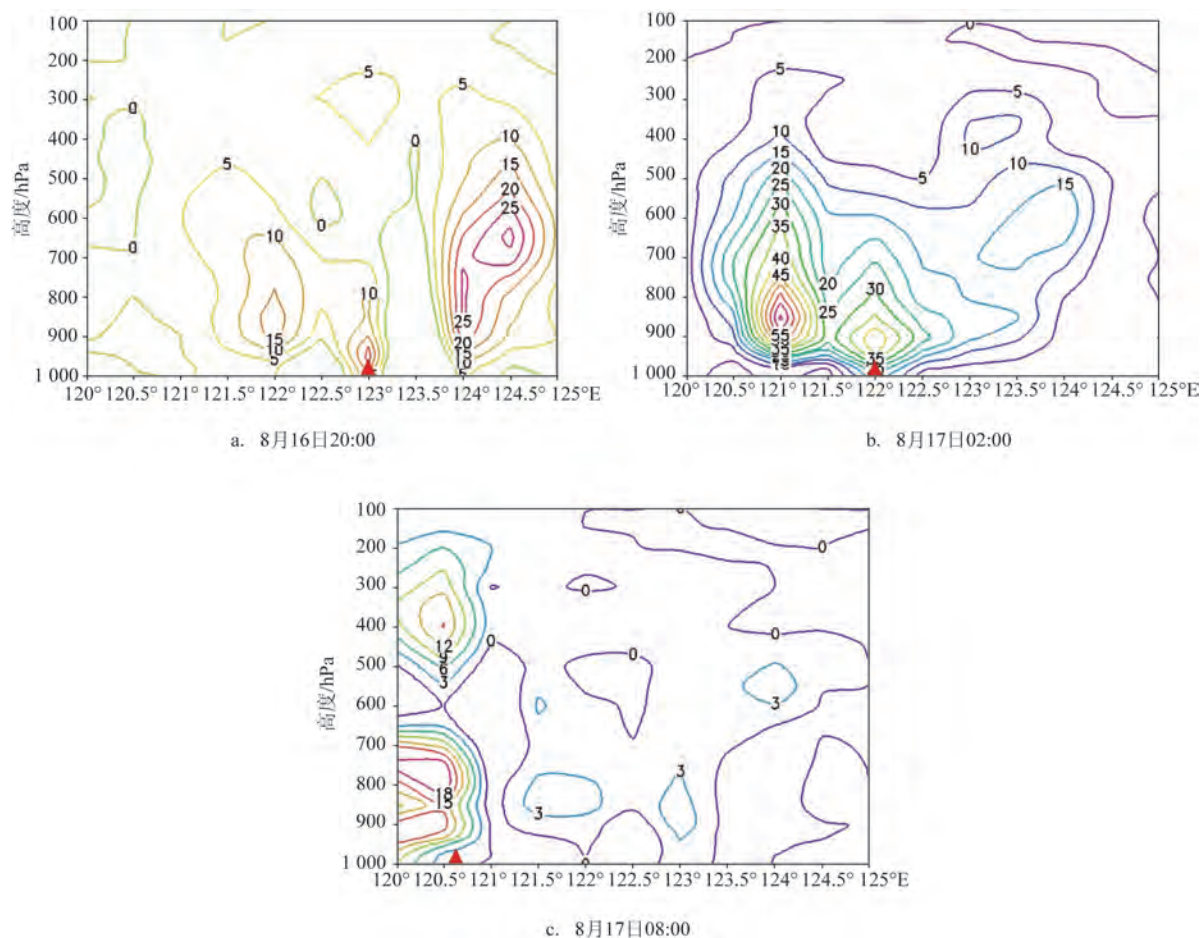


图8 沿30.5°N的垂直螺旋度剖面(单位: $10^{-5}\text{Pa}/\text{s}^2$ ,红色三角形代表台风中心所在经度)



### 3.4 涡度和上升运动

正涡度和强烈的上升运动能为台风暴雨的形成提供有利的动力条件<sup>[22-24]</sup>。30.5°N穿过杭州湾地面辐合区域,此纬度上宁波东北部至舟山的大暴雨落区位于122°E附近。沿30.5°N作涡度和垂直速度的剖面(见图7),分析台风垂直结构与降水的关系。分析涡度剖面发现两个时次的涡度分布较为相似,涡度大值区(大于 $30 \times 10^{-5}/s$ 的区域)均位于台风中心附近,垂直方向上从近地面伸展到500 hPa,8月16日20:00—17日02:00,122°E附近上空的涡度数值增加超过1倍,表明强降水区域上空的涡度显著增强。从垂直速度剖面可以看出,8月16日20:00在122°E附近的850 hPa低空存在上升运动的大值中心,强度(垂直速度的绝对值)达1 Pa/s以上。8月17日02:00,该上升运动大值中心仍然存在,强度(垂直速度的绝对值)维持在1 Pa/s以上,所在高度略下降到900 hPa附近,表明强降水区域上空始终维持着较强的上升运动。这与杭州湾区域地面辐合的维持、加强密切相关,而上升运动发展高度不高可能与辐合来自于地面和台风强度不强等因素有关。涡度增强和持续较强的上升运动,有利于中尺度对流雨团的发展和维持,导致大暴雨集中出现在宁波东北部至舟山。

### 3.5 垂直螺旋度

螺旋度是表征流体边旋转边沿旋转方向运动特性的物理量,是衡量风暴入流气流强弱及入流方向上涡度大小的参数<sup>[25]</sup>。台风是一种具有较强螺旋性的天气系统,其发生、发展本质上是一种螺旋性结构建立与发展的过程<sup>[26]</sup>。已有的研究表明,垂直螺旋度对台风暴雨落区有较好的指示意义<sup>[27-29]</sup>。本文以 $P$ 坐标下的垂直螺旋度进行分析:

$$H_p = \left( \frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y} \right) (-\omega) = -\zeta \cdot \omega$$

式中: $\zeta$ 为相对涡度的垂直分量; $\omega$ 为 $P$ 坐标中的垂直速度。

沿30.5°N做垂直螺旋度的剖面,进一步分析台风垂直结构与降水的关系。由图8可知,对于所关注的杭州湾区域(121°~122°E),8月16日20:00—

17日02:00垂直螺旋度发生了显著增大,这表明伴随台风“温比亚”的西移,杭州湾区域流体旋转增强,且对流系统中有涡度输入。121°E和122°E上空存在垂直螺旋度的大值中心,其正好分别与余姚至慈溪和宁波东北部至舟山随后6 h的强降水落区相对应,17日08:00杭州湾区域的垂直螺旋度大幅减小,其后6 h这一带的降水也趋于结束(见表1)。垂直螺旋度对强降水落区预报有一定的指示意义,并且有6 h左右的提前量。

## 4 结论

本文利用中尺度自动站资料、雷达资料、卫星资料和NCEP全球分析资料等,对2018年18号台风“温比亚”登陆前后降水的中尺度特征及大暴雨成因进行了诊断分析,得出以下主要结论:

(1)台风“温比亚”登陆前后,杭州湾附近区域出现的暴雨、局部大暴雨表现出降水集中、局地性强、雨强大、雨团移动性特征明显等中尺度降水特征。强降水集中在距台风中心100 km以内的台风前进方向的左前部和后部,主要由两个移动性雨团和1个相对少动雨团产生,距台风中心25~50 km的降水量中心小时降水量普遍较大。

(2)在有利的环流背景下,杭州湾区域地面辐合一方面加强了低空水汽辐合,另一方面促进了上升运动的发展和维持,使得中尺度对流雨团在宁波东北部至舟山一带发展加强,同时引导气流偏弱和地形作用导致台风在舟山附近移速减慢,延长了影响时间,造成了杭州湾附近区域的大暴雨。

(3)地面风场、水汽通量散度和垂直螺旋度可作为判断雨势增强、减弱及暴雨落区的参考。地面辐合的增强和减弱对应于其后1 h降水的增大和减小;水汽通量散度的减小、增大与降水的增大、减小有较好的对应关系,水汽通量散度在 $-16 \times 10^{-5} g/(cm^2 \cdot hPa \cdot s)$ 以下的时段降水较强;垂直螺旋度大值中心所对应区域未来6 h有强降水,垂直螺旋度的减小对应于该区域其后6 h降水的减弱。

本文用上述物理量诊断单个台风,结论存在一定的局限性,有待更多个例的证实。对于杭州湾特殊地形对该台风造成暴雨的作用,拟用数值试验做进一步研究。



## 参考文献:

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] 钱燕珍, 王继志, 郑铮, 等. 台风麦莎(Matsa)特大暴雨及其结构特征分析[J]. 气象科技, 2010, 38(5): 543-549.
- [5] 盛芳, 杨旺文, 吴松涛. 相似路径超强台风“尼伯特”(1601)和“莫兰蒂”(1614)对金华降水影响对比分析[J]. 海洋预报, 2017, 34(6): 73-82.
- [6] 段晶晶, 钱燕珍, 周福, 等. 台风灿鸿造成浙江东北部大暴雨地形作用的数值模拟研究[J]. 气象, 2017, 43(6): 686-695.
- [7] 叶龙彬, 湛芸, 李晟祺, 等. 1513号台风“苏迪罗”不同阶段降水的中尺度特征分析[J]. 热带气象学报, 2018, 34(3): 371-382.
- [8] 范爱芬, 娄小芬, 彭霞云. 一次副高控制下登陆的台风强降雨过程分析[J]. 海洋预报, 2017, 34(4): 66-75.
- [9] 曹宗元, 陈淑琴, 刘飞, 等. 相似路径台风“天鹅”(1515)和“珊珊”(0613)降水差异分析[J]. 海洋预报, 2018, 35(3): 48-56.
- [10] 方艳莹, 钱燕珍, 郭宇光, 等. “灿鸿”台风大暴雨的水汽诊断分析[J]. 浙江气象, 2016, 37(3): 7-10, 26.
- [11] 郭宇光, 钱燕珍, 方艳莹, 等. “杜鹃”登陆减弱后所致的宁波大暴雨成因分析[J]. 暴雨灾害, 2018, 37(4): 356-363.
- [12] Riehl. Tropical meteorology[M]. London: McGraw-Hill Publishing Company Ltd, 1954: 281-283.
- [13] 陈联寿, 徐祥德, 解以扬, 等. 台风异常运动及其外区热力不稳定非对称结构的影响效应[J]. 大气科学, 1997, 21(1): 83-90.
- [14] 李英, 陈联寿, 徐祥德. 登陆热带气旋维持的次天气尺度环流特征[J]. 气象学报, 2004, 62(3): 257-268.
- [15] 李欣, 龚佃利, 盛日锋. 自动气象站观测资料的中尺度分析及业务应用[J]. 气象科学, 2009, 29(1): 121-125.
- [16] 李燕, 刘晓初, 赛瀚, 等. 大连地区一次局地大暴雨过程中尺度特征及加密自动气象站数据的应用[J]. 气象与环境学报, 2018, 34(3): 9-17.
- [17] 周福, 钱燕珍, 朱宪春, 等. “菲特”减弱时浙江大暴雨过程成因分析[J]. 气象, 2014, 40(8): 930-939.
- [18] 王承伟, 齐铎, 徐玥, 等. 冷空气入侵台风“灿鸿”引发的东北暴雨分析[J]. 高原气象, 2017, 36(5): 1257-1266.
- [19] 许映龙, 张玲, 高栓柱. 我国台风预报业务的现状及思考[J]. 气象, 2010, 36(7): 43-49.
- [20] 陈有利, 钱燕珍, 潘灵杰, 等. 一次与台风相关联的浙江东北部暴雨成因及预报难点分析[J]. 干旱气象, 2018, 36(2): 272-281.
- [21] 赵宇, 李静, 杨成芳. 与台风“海鹰”相关暴雨过程的水汽和干侵入研究[J]. 高原气象, 2016, 35(2): 444-459.
- [22] 沈安云, 唐晓东, 吴海英, 等. 1513号“苏迪罗”台风残涡强降水分布特征研究[J]. 气象科学, 2018, 38(4): 453-463.
- [23] 梁艳, 刘峰, 林群, 等. 1617号台风“鲇鱼”造成温州南部大暴雨成因分析[J]. 浙江气象, 2018, 39(2): 13-18.
- [24] 高安宁, 李菁, 陈见, 等. 台风“威马逊”近海加强及引发广西异常暴雨分析[J]. 气象科技, 2016, 44(4): 653-658, 668.
- [25] 高守亭. 大气中尺度运动的动力学基础及预报方法[M]. 北京: 气象出版社, 2007: 35-39.
- [26] 陈华, 谈哲敏. 热带气旋的螺旋度特性[J]. 热带气象学报, 1999, 15(1): 81-85.
- [27] 覃昌柳, 黎惠金, 张丁丁. 1311号台风“尤特”水汽和螺旋度分析[J]. 应用海洋学学报, 2016, 35(4): 459-468.
- [28] 曹楚, 王忠东, 林念萍, 等. 2013年“菲特”台风暴雨的水汽和螺旋度分析[J]. 广东气象, 2014, 36(5): 41-45.
- [29] 汪亚萍, 崔晓鹏, 冉令坤, 等. 动力因子对2006“碧利斯”台风暴雨的诊断分析[J]. 大气科学, 2015, 39(4): 747-756.

## Analysis on the characteristics and reasons of the heavy rainfall caused by landfalling typhoon “Rumbia”

WANG Yi<sup>1</sup>, QIAN Yan-zhen<sup>1</sup>, DUAN Jing-jing<sup>1</sup>, GUO Yu-guang<sup>1</sup>, FANG Yan-ying<sup>2</sup>

(1. Ningbo Meteorological Observatory, Ningbo 315012 China; 2. Ningbo Meteorological Service Center, Ningbo 315012 China)

**Abstract:** Based on the intensified automatic station data, radar, satellite and NCEP re-analysis data, the characteristics and reasons of heavy rainfall before and after landfalling typhoon “Rumbia” (2018) are analyzed in this study. The results show that the precipitation revealed mesoscale precipitation characteristics of short period, strong locality and heavy rainfall. Heavy rainfall mainly located in the left front and back of the typhoon moving direction within 100 km from the typhoon center, which was mainly generated by two moving rain mass and one relatively static rain mass. The hourly precipitation within 25~50 km from the typhoon center was

generally large. The convergence of surface wind over Hangzhou bay strengthened the convergence of water vapor flux in lower air layers and boosted and sustain the ascending motion, which intensified the mesoscale convective rain mass between northeast of Ningbo and Zhoushan. Meanwhile, the weak steering flow and terrain effect made typhoon “Rumbia” slow down near Zhoushan, which extended the impact time and caused heavy rainfall around Hangzhou bay. The strengthened and weakened convergence of the surface wind caused the increased and decreased precipitation in 1 hour, respectively. The decrease or increase of the water vapor flux was corresponding to the increase or decrease of the rainfall. The rainfall was strong when the divergence of water vapor flux was below  $-16 \times 10^{-5} \text{ g}/(\text{cm}^2 \cdot \text{hPa} \cdot \text{s})$ . Heavy rainfall would occur in 6 hours around the center of large vertical helicity. The decrease of the vertical helicity indicated the decrease of rainfall in 6 hours.

**Key words:** typhoon “Rumbia”; heavy rainfall; causes; diagnosis