

台风“摩羯”(2018年)登陆台州并造成台州大暴雨的成因分析

倪钟萍¹, 魏雪¹, 贺立夫², 裘杭培¹

(1. 台州市气象局, 浙江台州 318000; 2. 台州市路桥区气象局, 浙江台州 318050)

摘要: 利用自动站气象要素资料、FNL全球分析资料和台州雷达资料,分析台风“摩羯”(2018年)登陆台州并造成台州大暴雨的原因。结果表明:涡度趋势分析发现,登陆前正相对涡度趋势大值区位于台州南部—温州北部地区,指示台风“摩羯”向其沿海靠近,最后登陆于台州南部的温岭沿海,其主要贡献是涡度平流项即副热带高压对台风的引导作用。台风“摩羯”给台州带来的大暴雨主要位于黄岩、仙居、临海和天台交界的山区,为台风本体带来的降水,东—东南风急流配合深厚的水汽条件以及台风的不对称结构和台州西部山区的地形增幅作用造成了局地大暴雨。此次过程中,雨量最大的天柱林场地区81%时次的降水是在回波强度达25 dBZ以上时产生的,回波最强达47 dBZ时6 min雨量为6.1 mm,25~40 dBZ的回波强度平均产生1.25 mm/6 min的降水;“摩羯”台风降水的回波强度不强,但较强降水持续近11 h,累计雨量达大暴雨。

关键词: 登陆台风;大暴雨;涡度趋势;雷达

中图分类号: P444 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-0239(2022)04-0037-10

1 引言

浙江境内的台风灾害多由降水、大风和风暴潮等原因引起。在台风灾害年中,受灾程度与台风过程的降水总量关系最密切,台风过程的降水总量是造成台风灾害的重要原因^[1-3]。台风降水不仅与台风自身结构有关,还和冷空气作用、西风槽、水汽输送、中尺度系统和山脉地形等因子有关。端义宏等^[4]指出,地形、下垫面、大尺度环境场以及台风移向等因素的综合作用可能会导致登陆台风降水的时空分布发生变化、降水强度突然增强或减弱以及降水空间分布呈现出明显的非对称性。低空急流的长时间持续和冷空气的影响造成了2016年台风“鲑鱼”的极端降水^[5];东北冷涡后部南下的冷空气为2012年台风“海葵”带来的特大暴雨提供了有力的热动力条件,同时促进了降水的发展^[6];2013年的“菲特”台风暴雨包括台风远距离降水、台风倒槽和内螺旋雨带降水以及台风外部螺旋雨带降水以及

台风残留低压环流和冷空气相互作用产生的降水^[7];2016年台风“尼伯特”造成的南通地区的大暴雨到特大暴雨过程是在台风残留低压、高空冷涡低槽和副热带高压共同作用下产生的^[8]。冷空气作用方式的不同,会造成台风带来的强降水分布的显著差异^[9]。李英等^[10]用中尺度模式MM5V3研究了不同方向的水汽输送对台风在陆上维持和降水的影响,发现外界持续的水汽输送有利于台风气旋性环流在陆地上维持,减缓其登陆后的强度衰减,也有助于台风雨带中的强对流活动,使雨量加强,且南边界水汽输送对台风维持和降水的影响最为明显。黄克慧等^[11]从暴雨形成的基本条件出发,分析发现浙江东南沿海地区低层东南风急流的建立和维持、高层强辐散和浙江沿海暖平流的“配料”有利于浙江台风暴雨甚至特大暴雨的形成。另外,在有利的环境背景下,中尺度对流系统的发展会造成区域性大暴雨^[12-13]。归纳来说,台风暴雨的强度和分布与台风本身的动力条件与结构、地形作用以及台风四

收稿日期: 2021-05-11; 修回日期: 2021-08-12。

基金项目: 浙江省气象局青年项目(2020QN39)。

作者简介: 倪钟萍(1987-),女,高级工程师,硕士,主要从事天气预报和研究工作。E-mail: violet0044@163.com

周的环境流场3个条件有关^[14]。

台州地处东南沿海,是受台风影响严重的地区之一。台州地形西高东低,西部境内有括苍山、大雷山和天台山等主要山峰(见图1)。自西南部入境的括苍山脉位于仙居、黄岩和临海接壤地区,主峰高1 382.4 m;大雷山位于台州市中西部,在仙居、天台和临海三县(市)结合部形成主峰,高1 229.4 m;天台山地处宁波、绍兴、金华和台州四市的交接地带,山脉呈西南—东北走向,其主峰华顶山在天台县东北,海拔1 098 m。一般地形越高、地形尺度越大则区域暴雨增幅越大^[15]。陈宏义等^[16]总结出温台地区“长驱直袭型”台风主要的雨量中心位于北雁荡—括苍山南坡一带,次雨量中心位于三门、天台和临海三县(市)接壤地区。裘杭培等^[17]分析指出,2009年台风“莫拉克”影响期间,山区降水量达到平原地区的2~3倍,同时由于地形挤夹作用,括苍山脉迎风岙(黄岩长潭库区)成为台风“莫拉克”在台州的强降水中心。

直接登陆台州的台风往往给台州带来明显风雨影响,特别是台州西部山区对台风降水有增幅作用。近年来,气象工作者对台风带来的台州大暴雨分析多以个例为主。2018年第14号台风“摩羯”登

陆台州温岭,是自2005年后时隔12 a再次登陆台州的台风。虽然登陆时台风强度不强、影响时间短,但风雨影响集中,西部山区有大暴雨。2004年后区域自动站的加密建设使暴雨分布特征研究更加精细化,对台风“摩羯”登陆台州及其给台州造成大暴雨的特征和原因进行分析,有利于积累样本,给以后相似台风带来的降水精细化预报提供参考。

2 资料与方法

2.1 数据简介

文中所用资料包括中央气象台台风路径资料、美国国家环境预报中心(National Centers for Environmental Prediction, NCEP)6 h一次的FNL(Final Operational Global Analysis)全球分析资料(分辨率为 $1.0^{\circ} \times 1.0^{\circ}$)、自动站气象要素资料以及台州站雷达资料等。

2.2 方法介绍

台风趋于向正涡度趋势最大值处移动^[18],对流层中层用时间导数求得的相对涡度的局地变化与



注:圈1:12日14—20时雨量 ≥ 50 mm区域;圈2:12日20时—13日02时雨量 ≥ 100 mm区域;圈3:13日02—08时雨量 ≥ 50 mm区域,T表示天柱林场站

图1 台风“摩羯”带来的台州降水不同时段的大值区

Fig.1 Areas with heavy precipitation in Taizhou at different time periods caused by typhoon "Yagi"

绝热无摩擦下涡度方程右边各项之和代表的相对涡度的局地变化和所有涡度的源汇项在量级上是相似的,所以对流层中层可近似用方程右边各项之和代表相对涡度的局地变化。

涡度趋势分析^[19-20]利用 P 坐标中绝热无摩擦条件下的涡度方程:

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} = -\vec{V} \cdot \nabla \zeta - (\zeta + f) \cdot \nabla \vec{V} - \omega \frac{\partial \zeta}{\partial p} - v\beta - \left(\frac{\partial \omega}{\partial x} \cdot \frac{\partial v}{\partial p} - \frac{\partial \omega}{\partial y} \cdot \frac{\partial u}{\partial p} \right)$$

式中,方程左边表示总的相对涡度的局地变化,右边各项分别表示相对涡度平流项、散度项、涡度垂直输送项、beta效应项和涡度倾侧项,用以分析涡度趋势对台风运动的指示作用及涡度方程右边各项对总的涡度局地变化的贡献。

2.3 台风“摩羯”概况

2018年第14号台风“摩羯”于8月8日14时(北京时间,下同)在西北太平洋生成,生成初始做逆时针旋转移动,随后整体向西北方向移动,12日17时在近海加强为强热带风暴,12日23时35分前后在浙江温岭沿海登陆,登陆时中心附近最大风力10级(28 m/s,强热带风暴级),中心最低气压980 hPa。登陆后继续向西北方向移动,13日08时进入安徽境内,13日23时减弱为热带低压。

台风“摩羯”对台州的主要影响时段在8月12日14时—13日08时,全市普降大到暴雨,台州西部山区局部降下大暴雨,全市面雨量72.7 mm。累计降水较大的有天台天柱林场(海拔924 m,降水188.8 mm)、仙居下各(海拔142 m,降水178.3 mm)和临海括苍山(海拔1383 m,降水167.8 mm),降水极值出现在仙居、天台和临海接壤的大雷山山区以及仙居、黄岩和临海接壤的括苍山脉一带;沿海海面极大风力为12~13级,最大风力出现在温岭三蒜(37.5 m/s,13级)。

3 涡度趋势分析台风“摩羯”登陆台州成因

台风路径预报的好坏不仅在很大程度上决定了风雨及强对流天气预报的好坏,而且对防台抗台

起着十分关键的作用^[21-22],因此提高台风尤其是登陆台风路径预报的水平 and 能力是我国气象服务的重要任务之一。台风运动主要受大尺度基本气流的引导^[23],副热带高压和西风槽是主要的影响系统。

正的相对涡度趋势大值区能指示台风的运动方向。经计算,台风“摩羯”在移动过程中向正涡度趋势大值区移动(见图2),临近登陆及登陆后正涡度趋势中心值相较于台风在海上运动时的正涡度趋势中心值大。登陆前正涡度趋势大值区在路径西北偏西方向,引导台风的偏西分量加大,特别在临近登陆前的12日20时,温州北部—台州南部一带沿海出现正涡度趋势大值中心,指示台风向其靠近,并最终在台州南部的温岭沿海登陆。

我们对比分析了相对涡度平流项、散度项、涡度垂直输送项、beta效应项和涡度倾侧项等各项对相对涡度局地变化的贡献,发现平流项贡献最大,即环境气流对涡度场的输送对涡度的局地变化作用最明显。由环境场叠加低层涡度场可见(见图3),台风中心附近是正的相对涡度大值区,台风与副热带高压之间的挤压作用使台风环流附近出现不对称风场结构,台风环流东北侧存在东南风急流,将附近的相对涡度向西北方向输送,台风即向西北方向运动。临近登陆时刻东南急流加强(见图3b),且向西分量略有加大,使台风路径沿西北略偏西方向运动,登陆后大风区一直维持在台风前进方向右侧,台风继续向西北方向移动。因此台风“摩羯”的移动主要受副热带高压的引导。副热带高压与台风环流相互作用造成的不对称风场结构在台风东北侧维持东南急流,使台风整体向西北方向运动,临近登陆时正涡度趋势大值区位于台州南部—温州北部一带,指示台风向其沿海靠近,最终登陆于台州南部的温岭沿海。

4 台风“摩羯”给台州带来大暴雨成因分析

台风“摩羯”对台州的主要影响时段在8月12日14时—13日08时,全市普降大到暴雨,局部大暴雨,雨量分布为西部山区多,沿海少,约16%的站点出现大暴雨,主要位于台州西部的大雷山山区和括苍山脉一带。累计雨量最大的为天台天柱林场,

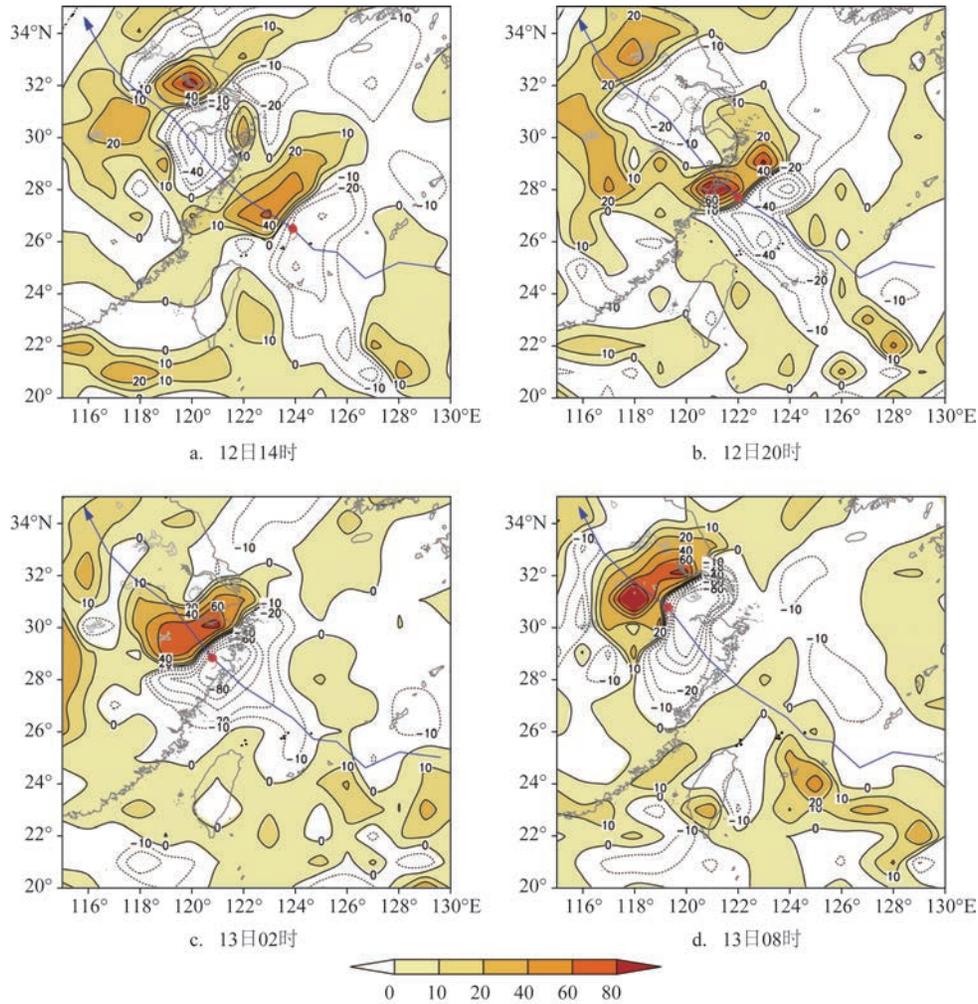


图2 700 hPa相对涡度局地变化(阴影表示正涡度趋势区,单位:10⁻¹⁰/s²)和台风路径

Fig.2 The local variation of the relative vorticity at 700 hPa (shading area indicates the positive vorticity tendency, unit:10⁻¹⁰/s²) and the track of typhoon "Yagi"

降水 188.8 mm, 海拔 925 m, 位于天台、仙居和临海接壤处的大雷山山区。分时段统计来看, 12 日 14—20 时主要降水在温岭、路桥、临海和三门的沿海地区, 其中路桥和温岭交界地区的累计雨量达 50 mm 以上(见图 1 中圈 1), 最大为路桥农垦场(61.7 mm); 另外, 天台地区和大雷山山区雨量在 25~40 mm。12 日 20 时—13 日 02 时, 台风向西北方向运动, 登陆温岭前后的暴雨区主要在西部山区, 大暴雨中心位于括苍山脉(见图 1 中圈 2), 6 h 雨量最大值为括苍山西北坡的仙居下各(降水 132.5 mm, 海拔 142 m); 大雷山山区雨量在 50~90 mm; 其他地区降水相对较少。台风于 13 日 03 时移出台州境内并继续向西北方向运动, 08 时进入安徽境内, 13 日 02—08 时,

暴雨区出现在台州西部的天台、仙居和临海接壤的大雷山山区及天台西北部山区(见图 1 中圈 3), 6 h 雨量最大值为天台天柱林场, 为 66.6 mm。

分析各时段降水在台风影响期间降水所占的比例(图略), 结果表明台州东部大部分沿海地区的降水主要出现在 12 日 14—20 时, 占比大部分超过 50%, 临海、椒江和三门个别地区 90% 以上的降水集中在该时段。黄岩、天台大部分地区、仙居、临海部分地区及路桥温岭交界地区的降水主要出现在台风登陆前后的 12 日 20 时—13 日 02 时, 仙居和黄岩个别站点 80% 以上降水集中在该时段。而 13 日 02 时后降水趋于减弱, 仙居、天台和临海交界处大雷山山区的个别站点有 40%~50% 的降水出现在该时

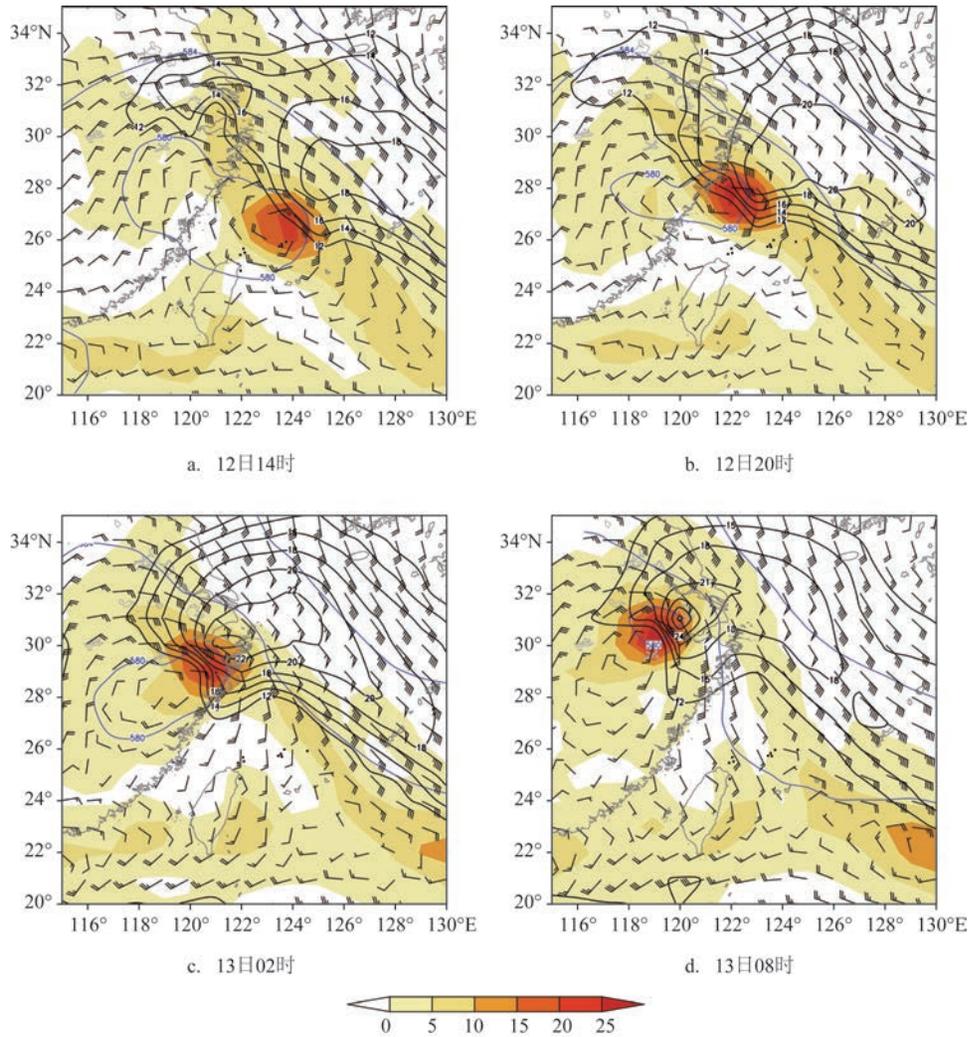


图3 850 hPa涡度场(阴影为正涡度区,单位: $10^{-5}/s$)、700 hPa风场(黑实线表示12 m/s以上大风,单位:m/s)和500 hPa高度场(蓝线,单位:dagpm)

Fig.3 The vorticity fields at 850 hPa (shading area indicates the positive vorticity tendency, unit: $10^{-5}/s$), wind fields at 700 hPa (solid black line indicates the wind speed exceeding 12 m/s, unit: m/s) and height fields at 500 hPa (blue line, unit: dagpm)

段。台风“摩羯”给台州带来的大暴雨主要集中在临近台风登陆及台风经过台州期间。

台风“摩羯”给台州带来的降水主要为台风倒槽和主体降水,由水汽通量和水汽通量散度结果可见(见图4),08时浙江沿海由偏北风输送水汽,水汽通量辐合大值区位于舟山及以东海面,东南沿海水汽通量辐合小,降水不明显。14时台风倒槽至浙江沿海,在东南风急流的输送下,台州—温州沿海有水汽通量辐合大值区,对应14时开始台州东部沿海出现的较明显降水。20时开始随着台风靠近,由东南偏东风输送水汽,浙江东部沿海为广泛的水汽通

量辐合区,其大值区位于台州南部—温州中北部,台州大部分地区有较明显降水。东南或东风水汽输送时间短,随着台风登陆后深入内陆,台州地区转为偏南风水汽输送(见图4d),水汽通量辐散区降水明显减弱,仅台州西部个别地区有较明显降水。

以 $122^{\circ}E, 28^{\circ}N$ 代表台州东南沿海, $121^{\circ}E, 29^{\circ}N$ 代表台州内陆。由风场、垂直速度场和相对湿度场的时间-垂直剖面图可见(见图5),14时台风中心位于 $123.9^{\circ}E, 26.5^{\circ}N$,台州处于台风环流外围,台州沿海和内陆上空均为东北风转东南风,400 hPa以下均为高湿区,300 hPa附近均有干层,存在不稳定层结,

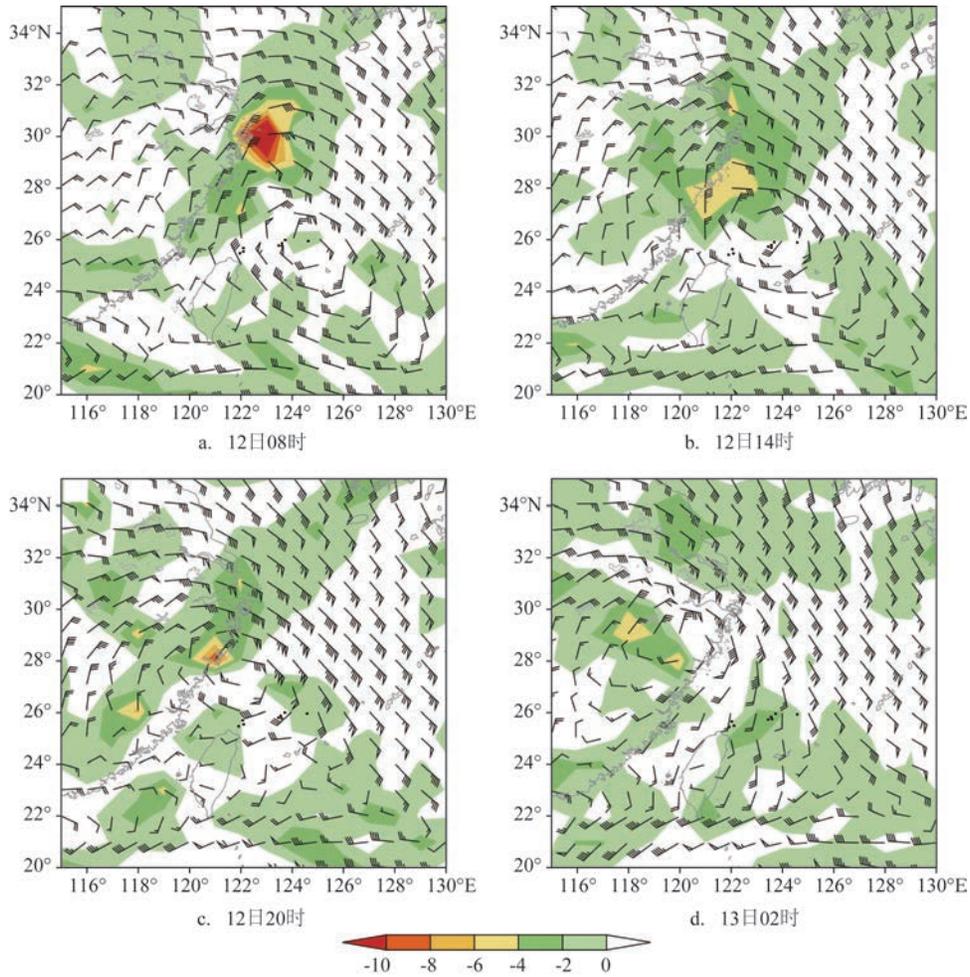


图4 850 hPa水汽通量(风向杆,单位: $g/(cm \cdot hPa \cdot s)$)和水汽通量散度(单位: $10^6 g/(cm^2 \cdot hPa \cdot s)$,阴影代表 ≤ 0)
 Fig.4 The distribution of vapor flux (barb, unit: $g/(cm \cdot hPa \cdot s)$) and vapor flux divergence (unit: $10^6 g/(cm^2 \cdot hPa \cdot s)$), shading area indicates the vapor flux divergence less than or equal to 0) at 850 hPa

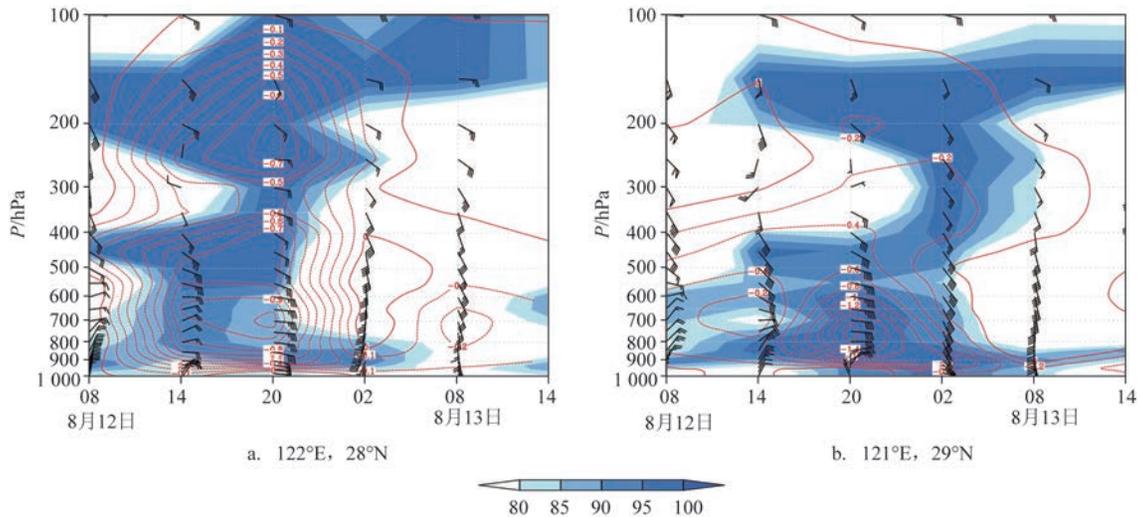


图5 风场(单位: m/s)、垂直速度场(单位: Pa/s ,红线代表 ≤ 0)和相对湿度场(单位: $\%$,阴影代表 $\geq 80\%$)的时间-垂直剖面图
 Fig.5 The section of the wind field (unit: m/s), vertical velocity field (red line indicates the vertical velocity less than or equal to 0, unit: Pa/s) and relative humidity field (shading area indicates the relative humidity greater than or equal to 80%, unit: $\%$)

沿海地区的湿度比内陆地区大,垂直上升运动也比内陆地区强。结合地面流场和雷达组合反射率因子可见(见图6a),台风倒槽已经进入浙江境内,倒槽顶附近有降水回波,台州东部海域和靠近台风中心的区域回波更强,东部沿海开始出现明显降水。20时台风中心位于122.0°E,27.7°N,台州东南沿海处于台风环流内,低层转为偏东风,高空为东一东南风急流,湿层深厚,垂直运动强,而台州内陆近地层仍为偏北风,800~350 hPa为东一东南风急流,750 hPa附近为最大垂直上升运动层,垂直速度达-1.7 Pa/s,有上干下湿的不稳定层结。此时台风倒槽继续西进,121°E附近出现明显的地面辐合线(见图6b),台风环流、台风倒槽顶和地面辐合线附

近有明显的降水回波,台州大部分地区出现明显降水,加上东一东南风急流与大雷山脉和括苍山脉几乎成正交,地形摩擦辐合和抬升作用明显,山区雨量明显大于平原。13日02时台风中心在台州境内,台州沿海已转为偏南风,水汽输送条件变差,台州内陆上空为一致的东南风急流,湿层较厚,台风本体降水回波位于内陆地区,且强降水回波位于台风环流的南侧和东侧。随着台风继续西北方向移动,降水回波主要影响仙居和天台,大雷山区降水仍较明显,其他地区降水明显减弱。13日08时台风移出浙江,台州降水趋于结束。

综合来看,台州主要受“摩羯”台风倒槽和台风环流的先后影响,降水自东向西发展,登陆前东部

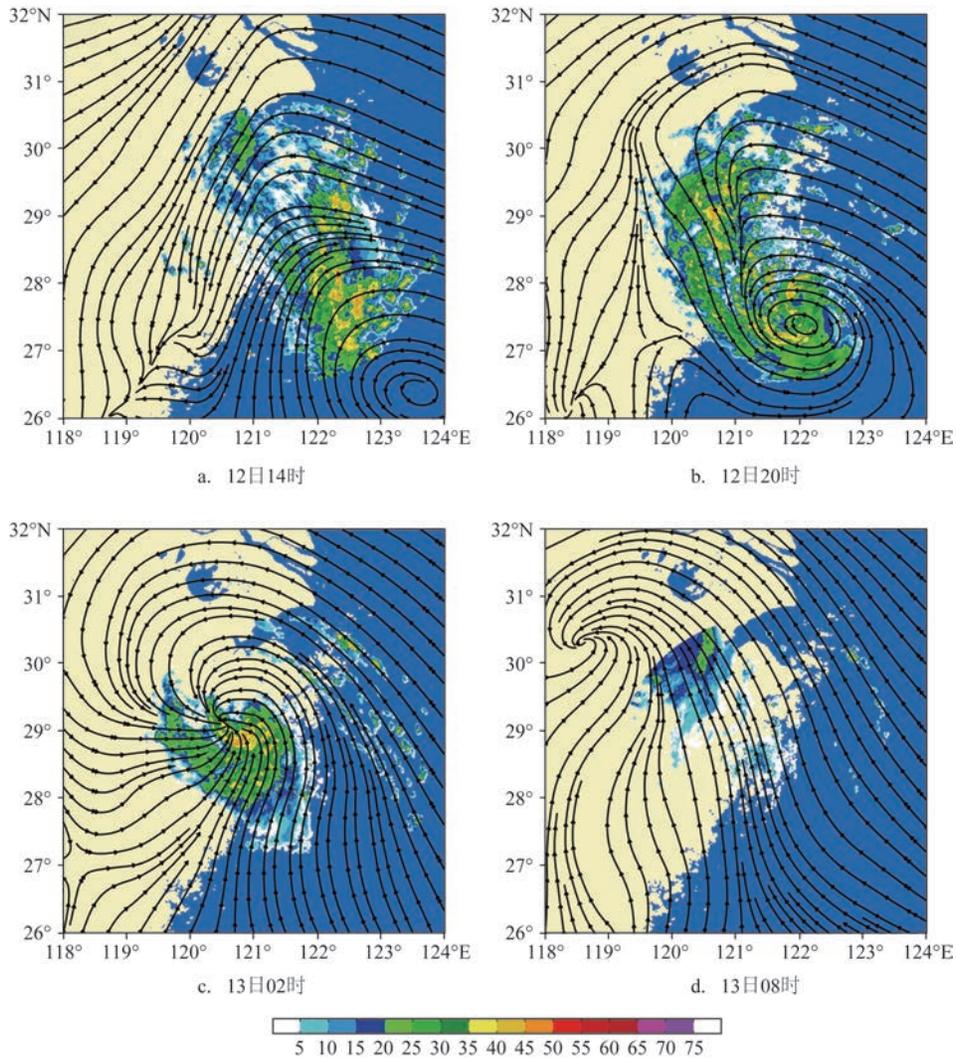


图6 1 000 hPa流场和台州站雷达组合反射率因子(单位:dBZ)

Fig.6 The flow field at 1 000 hPa and the composite reflectivity (unit: dBZ) of Taizhou Radar

沿海降水较明显,临近登陆直到台风移出台州主要为台风本体带来的降水。东—东南风急流配合深厚的水汽条件,加上台州西部山区的地形增幅作用,给黄岩、仙居、临海和天台交界地区的山区带来大暴雨,其降水分布与前人研究的登陆闽中北—浙中南的多数台风在台州的降水分布大体一致。

5 雷达反射率因子与降水效率关系

台风“摩羯”带来的降水雨量最大为大雷山区的天台天柱林场站,过程雨量为188.8 mm。利用6 min或5 min一次的雷达组合反射率因子变化和分钟降水资料计算某回波时刻后至下一回波时刻的6 min或5 min的过程降水量,分析自动站附近回波的强度与降水效率的关系。从图7中可见,最大降水雨强出现在13日02:21—02:27,为7.2 mm/6 min,此时回波强度达46 dBZ,13日02—03时雨强达50.6 mm,此时台风中心紧擦天柱林场附近移出台州,进入金华境内。在台风“摩羯”影响期间,天柱林场地区约81%时次的降水是在回波强度达25 dBZ以上时产生的,回波最强达47 dBZ,6 min内雨量为6.1 mm。整个过程中回波强度达40 dBZ以上时至下一时刻平均能产生4 mm左右降水;25~40 dBZ的回波强度平均能产生1.25 mm的降水,且其中96%时次

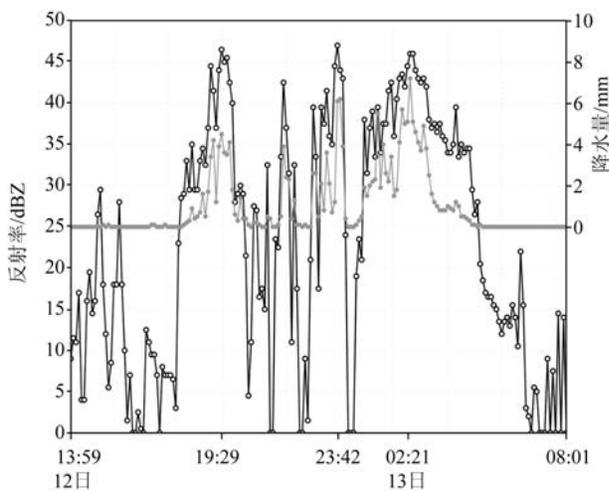


图7 天柱林场附近雷达组合反射率因子变化(黑线,单位:dBZ)与降水量变化(灰线,单位:mm)

Fig.7 Variation of the composite reflectivity (black, unit: dBZ) and precipitation (grey, unit: mm) at Tianzhu Forest Farm

雨量在3 mm以下。回波强度整体不强,但较强降水持续时间较长,累计降水量达大暴雨。

6 小结

(1)台风“摩羯”影响台州的主要时段在12日14时—13日08时,台州普降大到暴雨,局部大暴雨,全市面雨量72.7 mm,大暴雨主要出现在西部山区。受台风倒槽和台风本体环流影响,台州自东向西出现较明显降水。

(2)台风登陆位置比预报位置略偏南,正相对涡度趋势变化的大值区,能指示台风的移动。12日20时,台州南部—温州北部出现正涡度趋势大值区,指示台风向其沿海靠近,并最终登陆于台州南部的温岭沿海。台风“摩羯”的路径主要受副热带高压的引导,其与台风环流相互作用造成不对称风场结构,即台风东北侧的东南风急流使台风向西北方向运动,临近登陆时东南风急流加强且向西分量略有加大,引导台风向台州南部沿海登陆。

(3)台风自身结构、影响时间和地形作用会影响台风降水分布。台风“摩羯”给台州带来的大暴雨主要位于黄岩、仙居、临海和天台交界的山区,主要发生于登陆前后和台风经过台州期间,为台风本体带来的降水,东—东南风急流配合深厚的水汽条件,以及台风结构的不对称性、台州西部山区的摩擦辐合和强迫抬升作用造成了山区的局地大暴雨。随着台风快速深入内陆,沿海和内陆逐渐转为偏南风,降水结束较快。

(4)通过分析单站雨量极值的天柱林场地区雷达回波与降水效率的关系发现,回波强度整体不强,降水效率有限,但较强降水持续较长,累计降水量达大暴雨级别。在此次过程中,天柱林场地区81%时次的降水是在回波强度达25 dBZ以上时产生的,回波最强达47 dBZ,6 min内雨量为6.1 mm,25~40 dBZ的回波强度平均能产生1.25 mm/6 min的降水。

参考文献:

- [1] 刘庭杰, 施能, 顾骏强. 浙江省台风灾害的统计分析[J]. 灾害学, 2002, 17(4): 64-71.
LIU T J, SHI N, GU J Q. A statistical analysis of typhoon disasters in Zhejiang province[J]. Journal of Catastrophology, 2002, 17(4):

- 64-71.
- [2] 张娇艳, 吴立广, 张强. 全球变暖背景下我国热带气旋灾害趋势分析[J]. 热带气象学报, 2011, 27(4): 442-454.
ZHANG J Y, WU L G, ZHANG Q. Tropical cyclone damages in China under the background of global warming[J]. Journal of Tropical Meteorology, 2011, 27(4): 442-454.
- [3] 王镇铭, 杜惠良, 杨诗芳. 浙江省天气预报手册[M]. 北京: 气象出版社, 2013.
WANG Z M, DU H L, YANG S F. Weather forecast manual in Zhejiang province[M]. Beijing: China Meteorological Press, 2013.
- [4] 端义宏, 陈联寿, 梁建茵, 等. 台风登陆前后异常变化的研究进展[J]. 气象学报, 2014, 72(5): 969-986.
DUAN Y H, CHEN L S, LIANG J Y, et al. Research progress in the unusual variations of typhoons before and after landfalling[J]. Acta Meteorologica Sinica, 2014, 72(5): 969-986.
- [5] 范爱芬, 彭霞云, 娄小芬, 等. 台风“鲇鱼”极端降水分析[J]. 气象科技, 2019, 47(1): 79-88.
FAN A F, PENG X Y, LOU X F, et al. Extreme precipitation analysis of typhoon Megi[J]. Meteorological Science and Technology, 2019, 47(1): 79-88.
- [6] 吴海英, 陈海山, 曾明剑, 等. 冷空气对台风“海葵”(1211)倒槽特大暴雨作用分析[J]. 热带气象学报, 2014, 30(5): 871-880.
WU H Y, CHEN H S, ZENG M J, et al. Analysis on the functions of cold air in a super heavy rainfall caused by a reverse trough of typhoon Haikui(1211)[J]. Journal of Tropical Meteorology, 2014, 30(5): 871-880.
- [7] 刘建勇, 周冠博, 顾思南, 等. 台风菲特暴雨诊断分析[J]. 气象科技, 2014, 42(6): 1047-1056.
LIU J Y, ZHOU G B, GU S N, et al. Diagnosis of heavy rainfall associated with typhoon Fitow[J]. Meteorological Science and Technology, 2014, 42(6): 1047-1056.
- [8] 张树民, 王坤, 孙刚, 等. 台风尼伯特(1601)残留低压局地大暴雨成因分析[J]. 气象科技, 2018, 46(1): 139-148.
ZHANG S M, WANG K, SUN G, et al. Effect of residual low of typhoon Nepartak on a local extraordinary rainstorm[J]. Meteorological Science and Technology, 2018, 46(1): 139-148.
- [9] 杨舒楠, 陈涛, 刘建勇. 两次台风暴雨冷空气影响对比分析[J]. 气象科技, 2018, 46(2): 324-335.
YANG S N, CHEN T, LIU J Y, et al. Comparative analysis of TC rainstorms induced by cold air intrusion of two TC cases[J]. Meteorological Science and Technology, 2018, 46(2): 324-335.
- [10] 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.
- [11] 黄克慧, 陈宣森, 楼茂园, 等. 台风倒槽浙江暴雨的“配料法”研究[J]. 科技通报, 2019, 35(9): 12-21.
HUANG K H, CHEN X M, LOU M Y, et al. Study of ingredients-based methodology of Zhejiang torrential rainfall in typhoon inverted trough[J]. Bulletin of Science and Technology, 2019, 35(9): 12-21.
- [12] 方艳莹, 钱燕珍, 申华羽, 等. 1822号台风“山竹”引起浙江东北部大暴雨成因分析[J]. 海洋预报, 2020, 37(4): 86-96.
FANG Y Y, QIAN Y Z, SHEN H Y, et al. Causes analysis on the heavy rainfall in northeastern Zhejiang related to the typhoon “Mangkut”(1822)[J]. Marine Forecasts, 2020, 37(4): 86-96.
- [13] 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.
- [14] 陈联寿, 丁一汇. 西太平洋台风概论[M]. 北京: 科学出版社, 1979.
CHEN L S, DING Y H. Introduction to Western Pacific typhoon [M]. Beijing: Science Press, 1979.
- [15] 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.
- [16] 陈宏义, 袁鸿生. 温台地区长驱直袭型热带气旋登陆前后降水分布特征初探[C]//第28届中国气象学会年会——S12热带气旋. 厦门: 中国气象学会, 2011.
CHEN H Y, YUAN H S. A preliminary analysis on the distribution of precipitation before and after the tropical cyclone direct landfall in Wenzhou and Taizhou[C]//The 28th Annual Meeting of the Chinese Meteorological Society—S12 Tropical Cyclone.
- [17] 裘杭培, 李恭彪. 台风“莫拉克”引发降水成因初步分析[C]//第27届中国气象学会年会灾害天气研究与预报分会论文集. 北京: 中国气象学会, 2010: 2608-2613.
QIU H P, LI G B. A preliminary analysis on the causes of precipitation caused by typhoon “Morakot” [C]//The Proceedings of the 27th Annual Meeting of the Chinese Meteorological Society on Disaster Weather Research and Forecast. Beijing: Chinese Meteorological Society, 2010: 2608-2613.
- [18] CHAN J C L. An observational study of the physical processes responsible for tropical cyclone motion[J]. Journal of the Atmospheric Sciences, 1984, 41(6): 1036-1048.
- [19] WU L G, NI Z P, DUAN J J, et al. Sudden tropical cyclone track changes over the Western North Pacific: a composite study[J]. Monthly Weather Review, 2013, 141(8): 2597-2610.
- [20] 段晶晶, 吴立广, 倪钟萍. 2004年台风“艾利”与“米雷”路径异常变化分析[J]. 气象学报, 2014, 72(1): 1-11.
DUAN J J, WU L G, NI Z P. Analysis of unusual changes in

- typhoon Aere (2004) and Meari (2004) [J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 2014, 72(1): 1-11.
- [21] 许映龙, 刘震坤, 董林, 等. 2002年西北太平洋和南海热带气旋路径主客观预报评价[J]. *气象*, 2005, 31(6): 43-46.
- XU Y L, LIU Z K, DONG L, et al. Verification of subjective and objective track forecast of Tropical cyclones over Northwest Pacific and South China Sea in 2002[J]. *Meteorological Monthly*, 2005, 31(6): 43-46.
- [22] 倪钟萍, 吴立广, 张玲. 2005—2010年台风突变路径的预报误差及其环流背景[J]. *气象*, 2013, 39(6): 719-727.
- NI Z P, WU L G, ZHANG L. Analysis on Forecasting errors and associated circulations of sudden typhoon track changes during 2005-2010[J]. *Meteorological Monthly*, 2013, 39(6): 719-727.
- [23] 陈联寿. 热带气旋研究和业务预报技术的发展[J]. *应用气象学报*, 2006, 17(6): 672-681.
- CHEN L S. The evolution on research and operational forecasting techniques of tropical cyclones[J]. *Journal of Applied Meteorological Science*, 2006, 17(6): 672-681.

Causes analysis of typhoon "Yagi" (2018) making landfall and causing heavy rainfall in Taizhou

NI Zhongping¹, WEI Xue¹, HE Lifu², QIU Hangpei¹

(1. Taizhou Meteorological Bureau, Taizhou 318000, China; 2. Luqiao Meteorological Bureau, Taizhou 318050, China)

Abstract: The reason for typhoon "Yagi" (2018) making landfall and causing heavy rainfall in Taizhou is analyzed using the meteorological data of medium-scale automatic meteorological stations, global Final Analysis (FNL) analysis data and radar data in Taizhou. The results show that the positive relative vorticity tendency with large value before the landfall is located between the south of Taizhou and the north of Wenzhou, indicating that the typhoon approaches the coast of Wenzhou and Taizhou. The landing of typhoon "Yagi" in the coast of Wenzhou in southern Taizhou in the end is mainly due to the vorticity advection, which is the guiding effect of the subtropical high on typhoon "Yagi". The heavy rainfall caused by typhoon "Yagi" is mainly located in mountainous areas at the junction of Huangyan, Xianju, Linhai and Tiantai, which is caused by the typhoon itself. The local heavy rainfall is caused by the east-southeast wind jet bring deep water vapor, the asymmetry structure of typhoon and the topographic amplification effect of the western mountainous area of Taizhou. During this process, the heaviest rainfall locates in the Tianzhu Forest Farm area, and 81% of the precipitation is generated when the echo intensity is above 25 dBZ. When the echo is the strongest at 47 dBZ, the rainfall in 6 min is 6.1 mm, and the echo intensity of 25~40 dBZ produces 1.25 mm of precipitation per 6 min on average. The echo intensity of typhoon "Yagi" precipitation is not strong. However, the heavy rainfall lasts for nearly 11 hours and causes the heavy rain.

Key words: landfall typhoon; heavy rainfall; vorticity tendency; radar