沙 漠 与 绿 洲 气 象
Desert and Oasis Meteorology
第 17 卷 第 2 期
2023 年 4 月

龚俊强,叶妍婷,蔡晓冬,等.一次近海快速增强型台风引发金华东部极端强降水成因分析[J].沙漠与绿洲气象,2023,17(2):154-161.
doi:10.12057/j.issn.1002-0799.2023.02.020
开放科学(资源服务)标识码(OSID):

一次近海快速增强型台风引发金华东部极端强降水成因分析

龚俊强,叶妍婷,蔡晓冬,黄嘉仪
(金华市气象局,浙江 金华 321000)

摘 要:利用多种观测资料和 ERA5 逐时再分析资料,对 2020 年第 4 号台风“黑格比”(Hagupit)登陆后引发金华东部极端强降水成因进行分析。结果表明:(1)台风主体环流内部中小尺度对流系统的活动是金华东部强降水事件发生的直接原因。棠溪站位于对流活动中心区域(TBB≤-50 ℃),附近回波强度一直维持在 35 dBZ 以上,最大回波顶高≥15 km,≥45 dBZ 的强回波伸展高度在 5 km 左右,低于 0 ℃层高度,符合热带海洋型强降水回波特征。(2)低空急流和地形抬升作用是本次强降水过程发生的重要原因。(3)高低空散度的良好配置增强了棠溪站上空的垂直上升运动,促使雨强猛增。(4)低空尤其是 925 hPa 强烈的水汽输送为强降水的产生和维持提供了充沛的水汽条件。(5)充足的不稳定能量也为强降水的发生提供了有利的环境条件。棠溪站处于假相当位温高能区(>356 K),且 K 指数一直维持在 37 ℃以上,有利于对流活动的发生和强降水的出现。本次极端强降水过程是在强烈上升运动、水汽的持续输送、地形抬升和不稳定能量释放的共同作用下引起的。

关键词:台风“黑格比”;极端强降水;特征;成因
中图分类号:P458.3 **文献标识码**:A **文章编号**:1002-0799(2023)02-0154-08

台风的灾害主要由大风、暴雨和风暴潮造成,其中台风暴雨灾害发生最为频繁。厘清台风暴雨机理是人们长期以来的研究目标[1],前人已开展了大量研究,并取得了丰硕成果。

陈联寿等[2-4]指出,台风暴雨的强度和落区受台风内部中尺度系统、大尺度环境场和下垫面等多种因素的共同影响。其中,中尺度系统是造成台风暴雨的直接原因,比如中尺度辐合线能够直接触发暴雨对流的发生发展[5-8]。大尺度环境场对台风暴雨的形成和维持也有重要作用。研究表明,持续的水汽输送为暴雨提供了有利的背景条件,有利于台风维持较长的生命史和稳定降水[9-10]。此外,中、低纬环流系统和双台风相互作用也在台风降水过程中发挥着至关重要的作用[11-13]。同时,台风和冷空气结合也可促使降水增加,进而引发暴雨[14-17]。也有研究指出,台风非对称性、风场非均匀性、螺旋雨带发展及地形作用等对台风暴雨落区也有重要影响[18-20]。

2020 年第 4 号台风“黑格比”在我国近海快速增强,随后登陆浙江。由于当时各种模式对其强度预估不足,暴雨预报较实况偏低,登陆后引发的极端强降水给部分地区造成严重损失。快速增强型台风的强度和暴雨预报至今仍是难题,前人对于此类台风的研究较少,本文针对该个例,采用多种资料对“黑格比”台风强降水特征及成因进行分析,以期为提高快速增强型台风暴雨形成机理的认识和提升台风降水预报水平提供参考。

收稿日期:2021-11-10;**修回日期**:2022-02-06
基金项目:金华市气象局天气预报服务及智能网格订正技术研究创新团队;金华市科技局项目(2022-4-078)
作者简介:龚俊强(1994—),男,助理工程师,主要从事中尺度气象学研究。E-mail:2546078756@qq.com

1 资料与方法

本文使用资料包括:(1)浙江省自动站逐小时降水资料;(2)国家卫星气象中心提供的 FY-2G(星下点为 105° E)相当黑体亮度温度(Black Body Temperature,简称"*TBB*")资料;(3)金华雷达基本反射率资料;(4)欧洲数值预报中心(European Centre for Medium-Range Weather Forecasts,简称"ECMWF")提供的 ERA5 再分析资料,水平分辨率为 0.25°,时间分辨率为 1 h。基于以上资料,采用天气学诊断方法对"黑格比"登陆后引发金华东部极端强降水的成因进行分析。

2 "黑格比"登陆后降水分布特征

2020 年第 4 号台风"黑格比"(Hagupit)8 月 1 日 20 时(北京时,下同)在我国台湾岛东南洋面生成,分别在 8 月 3 日 02 和 14 时加强为强热带风暴和台风,20 时快速加强为强台风。8 月 4 日 03:30 前后在浙江省乐清市沿海登陆,登陆时中心附近最大风力达 13 级(38 m/s,台风级)。登陆后其强度缓慢减弱,陆上强热带风暴级以上强度维持时间长达近 13.5 h,在浙江省滞留时间>17 h。

从图 1a 可知,2020 年 8 月 2 日 08 时—5 日 08 时,台风"黑格比"所引发的强降水主要集中在台风本体环流经过的浙江东部地区,其中温州北部、台州、金华东部、绍兴东部和嘉兴东部累计降水量在200 mm 以上,局地累计降水在 300 mm 以上。全省最大累计降水量出现在温州乐清龙西砩头,为 551.9 mm。位于金华东部的的磐安、永康东部累计降水量在 250 mm 以上,其中永康西溪镇棠溪站为 390.4 mm(突破历史极值,为永康地区单日最大降水),居全省第三、金华第一。

从棠溪站逐小时降水量变化(图 1b)可知,13 时降水量高达 100.4 mm,为此次台风过程全省最大小时雨强,突破该站历史极值。同时短时强降水(≥20 mm)持续时间长达 6 h(09—14 时),30 mm 以上持续时间达 5 h(10—14 时),50 mm 以上雨强持续 3 h(12—14 时)。该过程为金华东部有气象记录以来最大降水过程,导致永康多地受灾严重。

浙江省地形图(图 1c)显示,棠溪站位于永康东部山地丘陵地带,海拔在 350~1 000 m,地形走向为东北—西南向。棠溪站附近黄寮尖为永康第一高峰,海拔 930 m 左右,其东侧为磐安境内的大盘山。

3 中尺度特征

3.1 *TBB* 显示的中尺度云团特征

从 FY-2G 卫星 *TBB* 资料(图 2)可以看出,"黑格比"体积较小,登陆后云团主要覆盖浙江东南部地区。云顶亮温<-50 ℃的区域主要位于台风中心南侧,表明对流活动主要位于台风中心南侧,非对称结构特征明显。在短时强降水维持期间(09—14 时),随着"黑格比"北上,-50 ℃以下区域呈缩减趋势,表明台风主体环流对流活动趋于减弱。而在此期间,棠溪站附近云顶亮温一直维持在-50 ℃以下,始终位于对流活动中心;15 时之后,该对流活动中心减弱移出,棠溪站降水也显著减弱。可见,棠溪站强降水主要是由台风主体环流内部强对流云团的维持引起。

3.2 雷达回波特征

由金华雷达 0.5°仰角反射率因子演变(图 3)可知,在台风北上过程中,≥35 dBZ 的较强回波区主要位于台风中心南侧,最大回波强度≥45 dBZ。随着台风北上,由于地形摩擦削弱作用,台风主体结构有所削弱,较强回波区范围逐渐减小。4 日 09 时,台风中心南侧台州西部一带有一条≥45 dBZ 的带状强

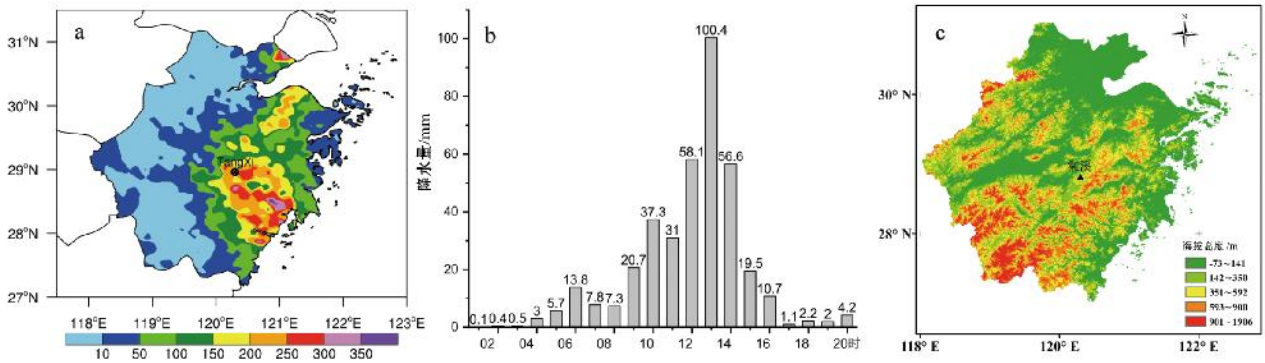

图 1 8 月 2 日 08 时—5 日 08 时浙江省累计降水量(a,单位:mm)、永康棠溪自动站 8 月 4 日逐时降水量时间序列(b,单位:mm)及浙江省地形(c)

回波，此后该强回波带逐渐北移影响金华东部。在强降水发生期间，棠溪站附近一直维持着≥35 dBZ 的回波强度，其中 12—14 时，棠溪站附近回波增强至 45 dBZ 以上，对应棠溪站连续 3 h 出现≥50 mm 雨强的短时强降水事件。

进一步选取最大小时雨强出现前后的 12、13 时，沿图 4 中黑实线（强回波带）做反射率因子的垂直剖面。结果显示，该区域最大回波顶高≥15 km，强度>35 dBZ 的强回波伸展高度达 7 km，显示该区域对流发展十分活跃，这对强降水的触发和维持都极为有利。13 时剖面（图 4b）显示，该强回波带上至少排列着 4 个对流单体。在棠溪站附近，≥45 dBZ 的强回波伸展高度在 5 km 左右，低于 0 ℃层高度（4 日 08 时金华 0 ℃层高度为 5~6 km），质心较低，降水效率更高，属于典型的热带海洋型强降水回波[21]。

台风主体环流内部中小尺度对流系统的活动是导致金华东部强降水事件发生的直接原因。

4 低空急流和地形抬升作用

暴雨的产生和低空急流关系密切。低空急流不仅可以增大层结不稳定度，促进不稳定能量释放，还可为暴雨区提供水汽来源[22-23]。从 850 hPa 风场演变（图 5）来看，暴雨初始阶段（09—11 时），棠溪站位于 850 hPa 低空急流的左侧，而暴雨通常出现在这一区域。12 时，棠溪站附近风速增强至急流强度（≥12 m/s）以上，13 时达 16~18 m/s，14 时进一步增强至 18~20 m/s。同时伴有西北风与偏西风的风向辐合，该辐合区随着台风中心的北移而逐渐靠近棠溪站，对应该站 12—14 时连续 3 h 出现≥50 mm 的雨强。可见，低空急流在本次强降水过程中起到了重要作用。

此外，近地面风向与 850 hPa 基本一致，并与该区域的山脉走向形成较大的夹角，而棠溪站恰好位于山前迎风坡，气流在此处受到地形抬升作用更易爬升形成降水。王凯等[24]研究指出，浙东地形对台风“利奇马”有阻滞和辐合抬升两方面作用，从而导致降水增强，降水增幅最高可达 25%。

5 垂直运动特征

暴雨的发生需要满足强烈的垂直上升运动。由棠溪站（120.3°E，28.96°N）上空散度和垂直速度时序图（图 6）可知，8 月 4 日 05—16 时，棠溪站上空低层850 hPa 以下一直为散度负值区，而高空 600 hPa

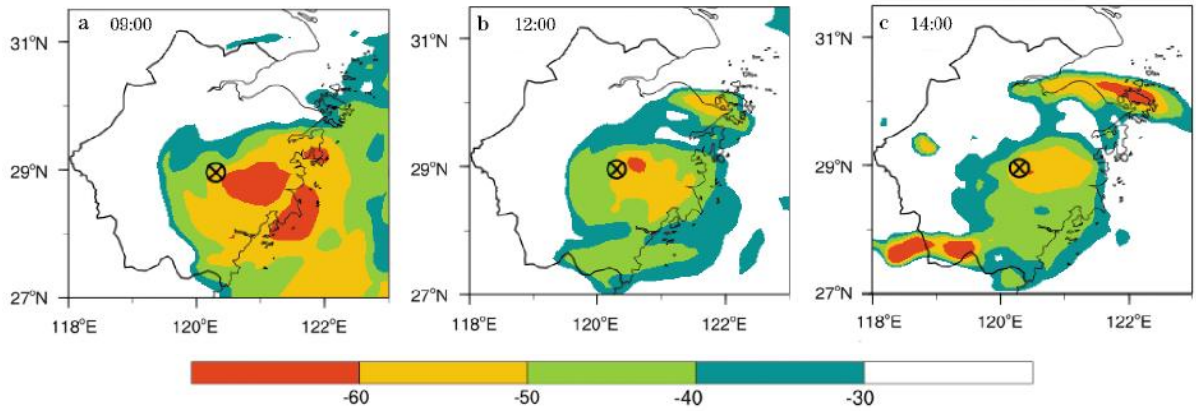

图 2 8 月 4 日 09—14 时 FY-2G 卫星 *TBB*（单位：℃）逐时分布

（黑色十字圈为棠溪站所在位置）

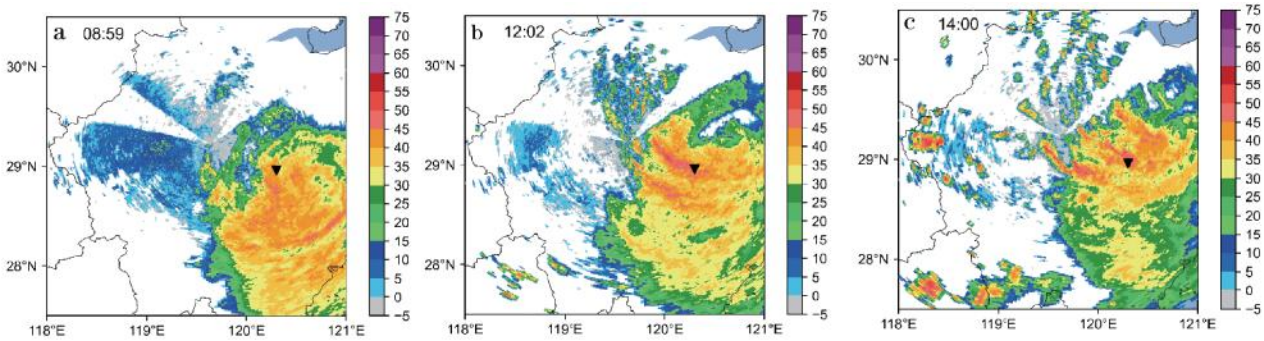

图 3 8 月 4 日 09—14 时金华雷达 0.5°仰角反射率因子（单位：dBZ）

（黑色倒三角为棠溪站所在位置）

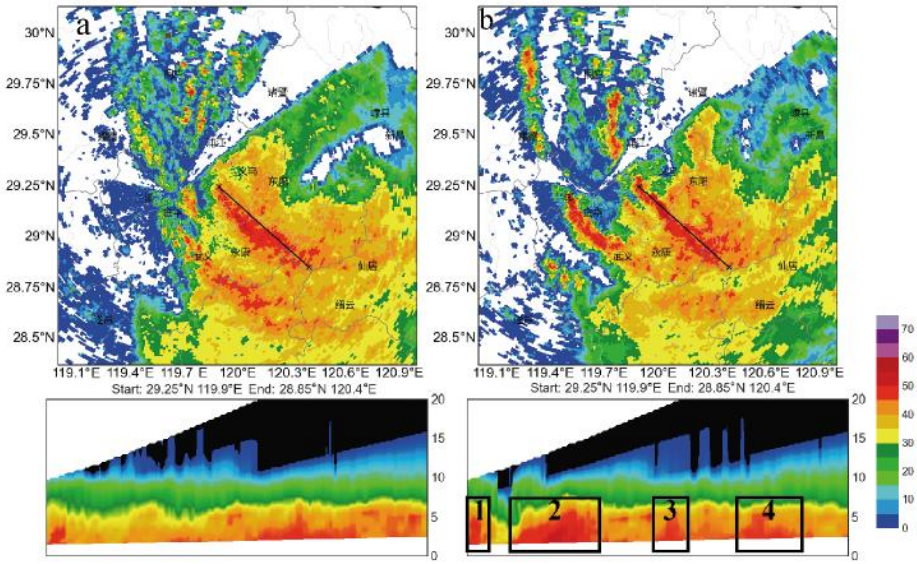

图 4　8 月 4 日 12 时(a)和 13 时(b)金华雷达 0.5°仰角反射率因子及沿图中黑实线的反射率因子垂直剖面(单位:dBZ)

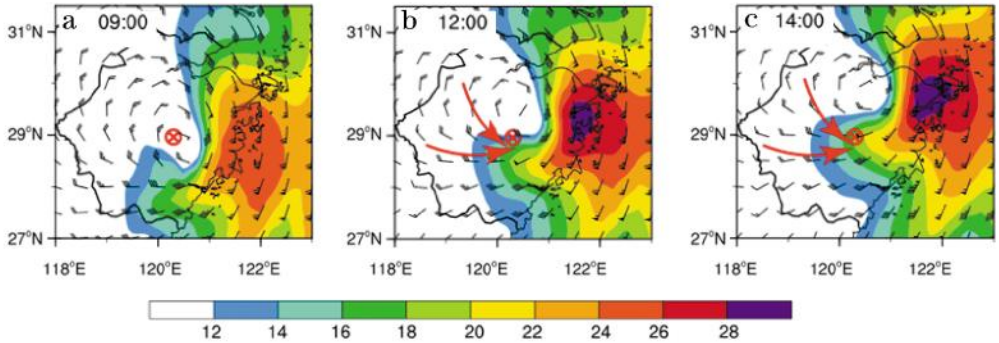

图 5　8 月 4 日 09—14 时 850 hPa 水平风场(风标,单位:m/s,填色:≥12 m/s)
(红色十字圈为棠溪站所在位置)

以上维持着散度正值区,对应高层辐散、低层辐合,辐散中心位于 500~600 hPa,辐合中心位于 925 hPa 附近。垂直速度场显示该站上空均为负值,表明该站维持着较长时间的强烈垂直上升运动。从时间演变来看,09 时 600 hPa 以上辐散区散度明显增大,10—14 时中心强度增大至 $1.2\times10^{-4}\cdot s^{-1}$ 以上,其中 11—13 时增至 $1.6\times10^{-4}\cdot s^{-1}$ 以上,高层辐散显著增强。此时段 925 hPa 附近散度降至 $-1.6\times10^{-4}\cdot s^{-1}$ 以下,低层辐合显著增强,同时垂直速度中心降至 -2.8 Pa/s 左右,对应此时段降水显著增强。高低空散度的良好配置增强了棠溪站上空的垂直上升运动,促使雨强猛增,对强降水事件的发生起到了至关重要的作用。

6　水汽输送条件

除了垂直上升运动,充足的水汽条件也是暴雨产生的重要因素。从 850 hPa 水汽通量(图 7a~7c)来看,“黑格比”的水汽通量分布呈现出明显的非对称

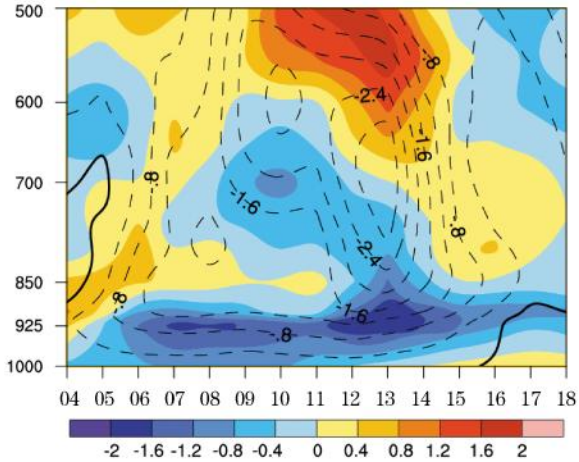

图 6　8 月 4 日 04—18 时棠溪站上空散度(阴影,单位:$10^{-4}\cdot s^{-1}$)和垂直速度(等值线,单位:Pa/s)高度—时间剖面

性特征,大值中心主要位于台风中心东侧,即浙江东部沿海地区。08—14 时,台风中心东侧的水汽通量输送有所增强,由 08 时的 36 g/(cm·hPa·s)以上增强至 14 时的 40 g/(cm·hPa·s)以上。在此期间,“黑格比” 南侧有来自于南海的西南水汽输送通道,为“黑格比”源源不断地供应水汽,使得“黑格比”在陆上能够维持较长时间的强热带风暴级以上强度。

从棠溪站上空的相对湿度时序图(图 7d)来看,04 时之前,80%以上的高湿区主要位于 700 hPa 以下,04 时之后,随着台风的登陆和靠近,整层相对湿度明显增大,08—13 时,300 hPa 以下相对湿度基本都在 95%以上,湿层增湿增厚显著,有利于减少深对流过程中的过度蒸发,增大降水强度[23]。从水汽通量散度演变图(图 7e)可知,04—15 时,850 hPa 以下均为一致的负值区,水汽通量辐合中心位于 925 hPa。06—14 时,925 hPa 附近的水汽通量散度降至-2.5×10^{-4} g/(cm^2·hPa·s)以下,水汽通量辐合明显,为强降水的产生和维持提供了充沛的水汽条件。

7 不稳定能量条件

7.1 假相当位温

由 850 hPa 假相当位温和风场分布(图 8a~8c)可知,09—14 时, 浙江大部假相当位温都在 352 K 以上, 其中棠溪站附近的假相当位温一直维持在 356 K 以上,不稳定能量充足。12 时开始,浙西地区假相当位温增至 356 K 以上,此后继续增加至 358 K 以上。在西北风和偏西风的辐合带动下,≥356 K 的高能区不断向东拓展,13 时起, 随着低层辐合区的北移, 棠溪站附近的高能区与之连接并有继续汇合的趋势。由此可见, 在低空急流和风向辐合的作用下,不稳定能量源源不断的往棠溪站附近输送,为强降水的产生提供了充足的能量。

由棠溪站上空的假相当位温时序图 (图 8d)可知,假相当位温随高度增加而递减,存在较大的不稳定能量。在强降水发生期间(13—14 时),850 hPa 以上假相当位温向下传递, 有利于增强低层的对流不稳定,促进强降水的产生。同时低层假相当位温等值线较为密集,存在能量锋区,在适当条件的触发下,也有利于强降水的出现。

7.2 对流指数

对流指数对于强降水的产生有一定的指示作用。由对流有效位能(Convective Available Potential Energy,简称“*CAPE*”)和 *K* 指数演变(图 9)可知,*CAPE* 高值区主要位于浙江南部,随着台风的北上,

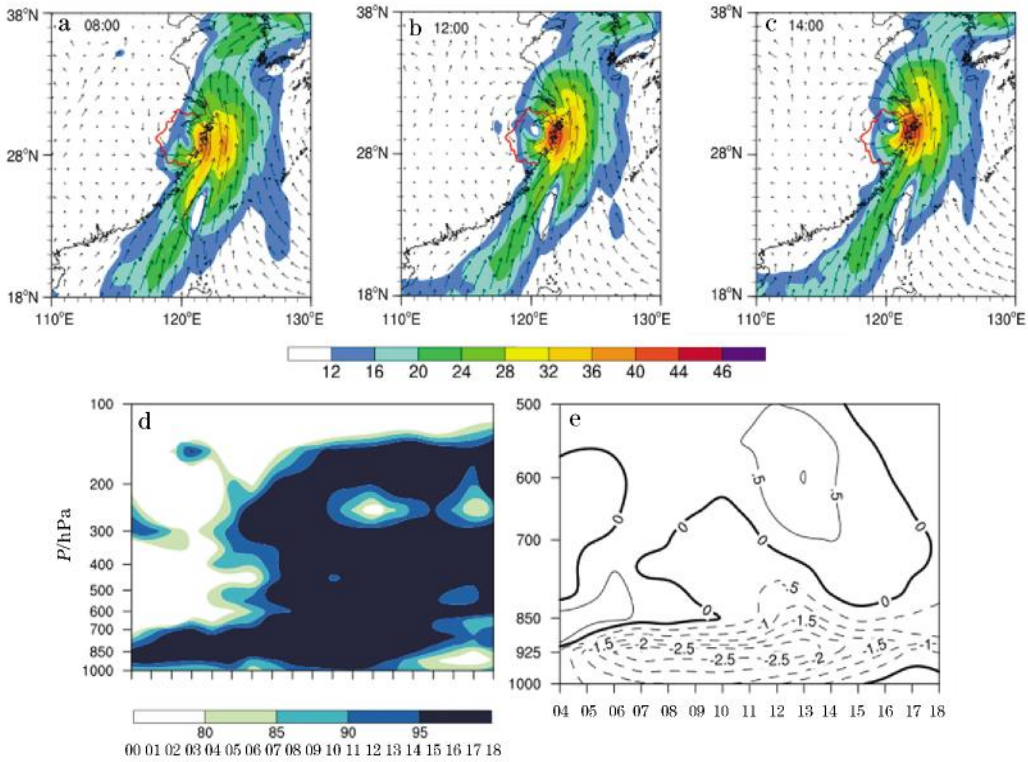

图 7 8 月 4 日 08—14 时 850 hPa 水汽通量(a、b、c,阴影,单位:g/(cm·hPa·s))、00—18 时相对湿度高度—时间剖面(d,阴影,单位:%)和 04—18 时水汽通量散度(e,等值线,单位:10^{-4} g/(cm^2·hPa·s))高度—时间剖面

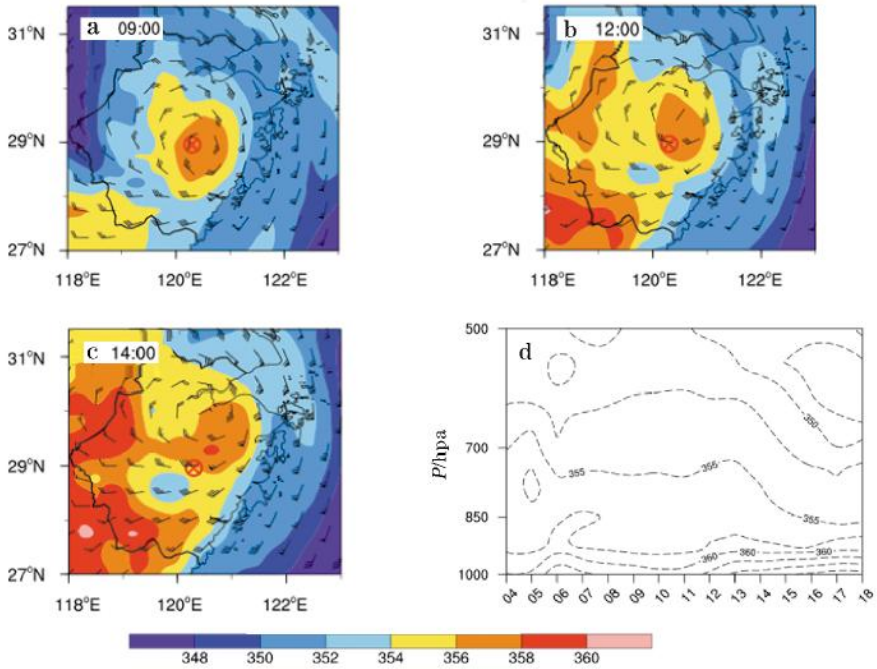

图 8　8 月 4 日 09—14 时(a、b、c)850 hPa 假相当位温(阴影,单位:K)和风场(风标,单位:m/s)和 04—18 时假相当位温(d,虚线,单位:K)高度—时间剖面

(红色十字圈为棠溪站所在位置)

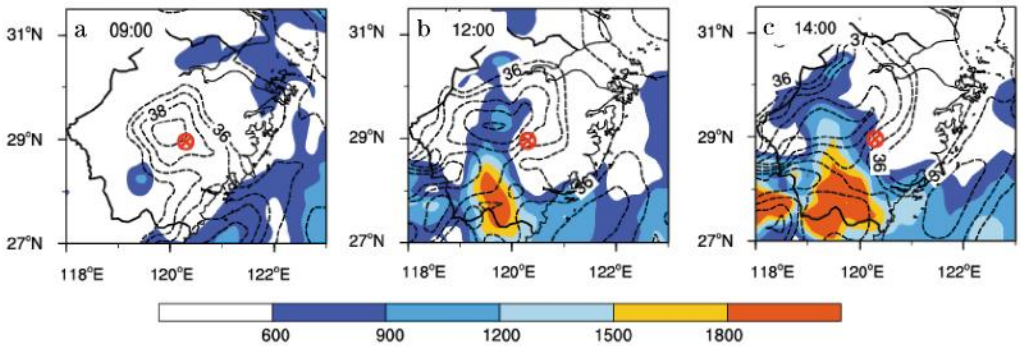

图 9　8 月 4 日 09—14 时对流有效位能(*CAPE*)(单位:J/kg,阴影:≥600 J/kg)和 *K* 指数(虚线,单位:℃)

(红色十字圈为棠溪站所在位置)

高值区不断向北、向东扩展,大值中心在1 800 J/kg以上。13 时之前棠溪站附近的 *CAPE* 值不高,在600 J/kg 以下,13 时起,随着低层西北风和偏西风辐合的增强,*CAPE* 增至600~900 J/kg,对流条件有所转好。从 *K* 指数来看,强降水发生期间,棠溪站附近 *K* 指数一直维持在 37 ℃以上,有利于对流活动的发生和强降水的出现。

8　结论与讨论

利用浙江省自动站逐小时降水资料、FY-2G 卫星 *TBB* 资料、金华雷达反射率资料、ERA5 逐时再分析资料对"黑格比"台风登陆后引发金华东部极端强降水成因进行了分析,得出如下主要结论:

(1)台风主体环流内部中小尺度对流系统的活动是金华东部强降水事件发生的直接原因。强降水发生期间,棠溪站始终位于对流活动中心区域(*TBB*≤-50 ℃),附近回波强度一直维持在 35 dBZ 以上,最大回波顶高≥15 km,≥45 dBZ 的强回波伸展高度在 5 km 左右,低于 0 ℃层高度,符合典型的热带海洋型强降水回波特征。

(2)低空急流和地形抬升作用是本次强降水过程发生的重要原因。强降水发生期间,棠溪站附近 850 hPa 风速增强至急流强度(≥12 m/s),同时伴有西北风与偏西风的风向辐合,配合该区域地形的抬升作用,强降水随之产生。

(3)强降水发生期间,棠溪站上空高层辐散、低

层 925 hPa 辐合均明显增强，高低空散度的良好配置增强了棠溪站上空的垂直上升运动，促使雨强猛增，对强降水事件的发生起到了至关重要的作用。

（4）强降水发生期间，低空尤其是 925 hPa 强烈的水汽输送为强降水的产生和维持提供了充沛的水汽条件。

（5）充足的不稳定能量也为强降水的发生提供了有利的环境条件。强降水发生期间，棠溪站上空附近处于假相当位温高能区（>356 K），且棠溪站附近 *K* 指数一直维持在 37 ℃以上，存在较大的不稳定能量，有利于对流活动的发生和强降水的出现。

综上，本次极端强降水过程是在强烈上升运动、水汽的持续输送、地形抬升和不稳定能量释放的共同作用下引起的。

参考文献：

[1] 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.

[2] 陈联寿.登陆台风特大暴雨成因分析[J].气象，1977，3（11）：10-12.

[3] 陈联寿.登陆热带气旋暴雨的研究和预报[C]//中国气象学会.第十四届全国热带气旋科学讨论会论文集.北京：中国气象学会，2007.

[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.

[5] 周海光.强热带风暴碧利斯（0604）引发的特大暴雨中尺度结构多普勒雷达资料分析[J].大气科学，2008，32（6）：1289-1308.

[6] 沈杭锋，高天赤，周春雨，等.台风海葵引发浙西山区大暴雨的成因[J].气象，2017，40（6）：733-743.

[7] 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.

[8] 陈淑琴，李英，范悦敏，等.台风“山竹”（2018）远距离暴雨的成因分析[J].大气科学，2021，45（3）：573-587.

[9] 娄小芬，马昊，黄旋旋，等.台风“利奇马”造成浙江极端降水的成因分析[J].气象科学，2020，40（1）：78-88.

[10] 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.

[11] 胡坚.华东地区台风暴雨的诊断研究[J].大气科学，1991，15（3）：113-119.

[12] 许映龙，吕心艳，张玲，等.1323 号强台风“菲特”特点及预报难点分析[J].气象，2015，41（10）：10.

[13] 谢惠敏，任福民，李国平，等.超强台风丹娜丝对 1323 号强台风菲特极端降水的作用[J].气象，2016，42（2）：156-165.

[14] 周玲丽，翟国庆，王东海，等.0713 号“韦帕”台风暴雨的中尺度数值研究和非对称性结构分析[J].大气科学，2011，35（6）：1046-1056.

[15] 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）：13-21.

[16] 陈宏，杨晓君，尉英华，等.干冷空气入侵台风“海棠”残余低压引发的华北地区大暴雨分析[J].暴雨灾害，2020，39（3）：241-249.

[17] 任丽，唐熠，杨艳敏，等.两个相似路径台风深入内陆所致暴雨对比分析[J].暴雨灾害，2021，40（5）：484-493.

[18] 潘佳文，杨奇志，魏鸣，等.台风“苏迪罗”螺旋雨带造成福州特大暴雨成因分析[J].热带气象学报，2018，34（6）：774-782.

[19] 杨舒楠，曹勇，陈涛，等.台风苏迪罗登陆次日分散性暴雨成因及预报着眼点[J].气象，2019，45（1）：40-51.

[20] 黄惠镕，赵玉春，荀爱萍，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.

[21] 俞小鼎.短时强降水临近预报的思路与方法[J].暴雨灾害，2013，32（3）：202-209.

[22] 黄小彦，孙继松，刘文婷.地形作用下低空急流的演变与强降水对流风暴系统的相互作用[J].气象学报，2020，78（4）：551-567.

[23] 苏爱芳，吕晓娜，崔丽曼，等.郑州“7·20”极端暴雨天气的基本观测分析[J].暴雨灾害，2021，40（5）：445-454.

[24] 王凯，齐铎，高丽，等.浙东地形对台风“利奇马”极端降水的影响分析[J].气象科学，2021，41（2）：162-171.

Cause Analysis on Extreme Rainfall in Eastern Jinhua Caused by an Offshore Rapidly Enhanced Typhoon

GONG Junqiang, YE Yanting, CAI Xiaodong, HUANG Jiayi
(Jinhua Meteorological Bureau, Jinhua 321000, China)

Abstract Based on multiple observation data and ERA5 hourly reanalysis data, the causes of extreme rainfall in eastern Jinhua after the landing of typhoon "Hagupit" in 2020 are analyzed. The results show that: (1) The activity of small and medium-scale convective systems is the direct cause of extreme rainfall in eastern Jinhua. Tangxi station is located in the central area of convective activity ($TBB \leqslant -50$ ℃), the echo intensity nearby remains above 35 dBZ, the height of maximum echo is more than 15 km, and the strong echo extension height of above 45 dBZ is about 5 km, which is lower than the height of 0 ℃ layer. It is in line with the echo characteristics of tropical marine heavy precipitation. (2) Low-level jet and topographic uplift are important reasons for extreme rainfall. (3) The well-suited configuration of divergence enhances the vertical upward movement over Tangxi station and increases hourly rainfall. (4) The strong water vapor transport at a low level especially 925 hPa, provides abundant water vapor for producing and maintaining extreme rainfall. (5) Sufficient unstable energy also provides favorable conditions for extreme rainfall. Tangxi station is located in the large value area of pseudo equivalent potential temperature (exceed 356 K), and the K index remains above 37 ℃, which is conducive to the occurrence of convective activities and extreme rainfall. Extreme rainfall is caused by the joint action of strong upward movement, continuous transportation of water vapor, topographic uplift and unstable energy release.

Key words typhoon "Hagupit"; extreme rainfall; characteristic; cause