

浙东地形对台风性质的影响 ——以1909号台风“利奇马”为例

王凯, 李渊, 高丽, 翁之梅, 郭九华

(台州市气象局, 浙江台州 318000)

摘 要: 采用WRF中尺度模式设计地形敏感性实验,模拟了台风“利奇马”的登陆和降水过程,分析了浙东地形对台风降水、路径、强度和结构等的影响。研究表明:浙东地形对台风降水的影响最为显著,浙东区域存在两个明显的雨量最大值区,分别对应北侧天台山和四明山,南侧括苍山。区域平均雨量增幅约为50 mm,雨量最大值区可达30%。山地地形的强迫作用可以促进低层辐合和垂直上升运动,加强局地台风涡旋,从而增强台风降水并影响降水分布。海岸线喇叭口地形对降水增强也有一定的贡献。在不同的台风降水阶段,地形的影响作用也不同,强降水阶段地形影响更显著,降水效率的差异也越大。沿海小地形可以产生较大的雨量波动,海拔高度越高,雨量越大。环境风场与地形的交角是地形增幅作用的重要影响因素,浙东的北侧区域虽然地形海拔高度低,但是受台风环流的偏东风影响时间更长,雨量增幅比南侧区域更显著。此外,浙东地形在一定程度上能减慢台风移速,减弱台风强度,对台风结构也有一定影响。

关键词: 数值模拟;地形;台风;强降水

中图分类号: P444 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-0239(2022)01-0011-10

1 引言

浙江作为我国东南沿海受台风影响最大的省份之一,建国以来共有45个台风登陆。登陆台风往往会带来强风和暴雨等灾害,造成巨大的经济损失和人员伤亡,威胁社会稳定。台风研究一直是一线防灾减灾工作的重中之重。随着“21世纪海上丝绸之路”建设的开展和深入,沿线各国对海洋环境安全保障的需求也日益增强^[1]。持续开展台风研究,进一步细化和强化台风预报预警服务工作,对响应“21世纪海上丝绸之路”的建设也具有重要参考价值。

地形是台风暴雨的重要影响因子。国内外众多研究已表明,台风登陆期间,地形会对台风降雨量产生明显影响^[2-5]。袁金南等^[6]研究发现地形辐合

作用会加剧中尺度对流系统的发生和发展,从而影响台风降水。Wu等^[7]研究认为,台风和地形的相互作用是造成暴雨和严重洪涝的最重要因素之一。浙东地区西侧多山,东侧临海,地势西高东低,极易在台风过程中出现强降水过程。数值模拟是台风研究的基本手段,广泛应用于台风地形的影响分析。朱红芳等^[8]使用天气预报(Weather Research and Forecasting, WRF)模式研究了1211号台风“海葵”中的地形降水增幅作用,结果发现降水中心强度与地形高度相关性较好。钮学新等^[9]使用第五代中尺度模式(Mesoscale Model 5, MM5)对0216号台风,降水及影响降水的机制进行了数值模拟试验,结果表明,地形作用使迎风坡降水中心雨量增加,背风坡雨量减少,从而使降水分布更不对称且更不均匀。Tuleya等^[10]和Bender等^[11]对登陆台风作了理

收稿日期: 2021-01-19; 修回日期: 2021-04-28。

基金项目: 浙江省气象局预报员专项(2019YBY14)。

作者简介: 王凯(1988-),女,工程师,硕士,主要从事台风预报等相关研究。E-mail:wk20061349002@126.com

想化模拟,指出山脉对登陆台风的路径、衰减速度及降水分布均有影响。张建海等^[12]通过0505号台风“海棠”的地形数值模拟研究,发现台风登陆期间的异常路径是地形诱生低压发生发展的结果,沿海地形不仅通过辐合抬升产生暴雨增幅,对台风强度也有一定的影响。项素清等^[13]研究认为台风“利奇马”低层强西北急流垂直于东北—西南走向的北山山体,山体的抬升作用触发了不稳定能量的释放,激发了中尺度雨团不断生成,导致降水量增大;山体的阻挡作用使降水系统移动减慢,降水持续时间变长,累积雨量更大。王凯等^[14]在台风“利奇马”极端降水过程中,验证了浙东地形对台风存在地形阻滞作用和动力抬升作用,因此延长了降水时长,提升了降水增幅。石顺吉等^[15]则认为在较强垂直切变的作用下,逆切变一侧的下沉运动会抑制陆地摩擦和地形抬升所形成的对流发展,从而影响强热带风暴“莲花”的降水空间分布。

前人的研究大多基于地形对台风影响的原理开展定性分析和讨论。本文则在地形数值模拟的基础上,研究浙东地形对台风的作用,定量计算地形产生的降水增幅;并对比分析台风不同降水阶段的地形影响和南北不同高度地形的降水增幅差异,讨论地形高度和环境风场对台风降水的作用。此外,浙东地形对台风路径、移速、强度和结构等也有不可忽视的影响。

2 台风概况

2019年第9号台风“利奇马”(1909)于西北太平洋洋面生成后稳定西北行,强度不断加强,以超强台风级在浙江台州温岭城南登陆,是1949年以来登陆浙江的第三个超强台风,仅次于0608号台风“桑美”和5612号台风“温黛”。台风“利奇马”登陆后,穿过台州市、金华市、绍兴市、杭州市和湖州市等地,在浙江境内滞留达20 h,导致浙江全省普降暴雨,浙东沿海地区出现大暴雨,局部特大暴雨,局地出现极端降水。国家级气象站温岭、北仑和玉环均破历史最大台风过程雨量纪录;临海括苍山站雨量达834.3 mm,创当地台风过程雨量新纪录。

图1为8月9日00时—11日00时(世界时,下同)台风“利奇马”过程雨量分布。图中可以看出,

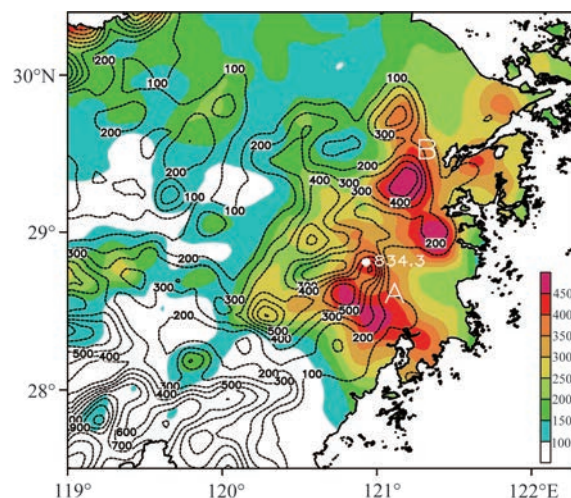


图1 台风“利奇马”过程雨量(填色为2019年8月9日00时—11日00时雨量,单位:mm;黑色虚线为浙江省自动站海拔高度,单位:m)

Fig.1 The precipitation of typhoon "Lekima" (shaded area is precipitation from 00 UTC on 9 to 00 UTC on 11 August, 2019, unit: mm; black dotted line is the height of the automatic station in Zhejiang Province, unit: m)

全省降水分布存在明显的空间特点,东北多,西南少,浙东沿海和浙西北山区均有雨量大值区。东部沿海雨量大值区更显著,分布与地形高度密切相关,存在两个强降水中心,分别对应沿海山地地形。A区对应台州括苍山脉,B区对应台州天台山和宁波四明山,过程雨量较大的点均位于高海拔山区,其中,雨量极值点括苍山站位于括苍山脉最高峰米筛浪,海拔1 383 m。

3 数值模拟方案设计和资料介绍

前期研究中,我们采用WRF对浙江东南沿海登陆的多个历史台风进行了地形敏感性实验。结果表明,浙江东部括苍山脉对这一类型的台风降水有显著的增幅作用,山脉迎风坡雨量与地形高度密切相关,当地形高度加倍时,台州地区的平均雨量增幅近50%,具体见表1。为了进一步分析地形对台风“利奇马”降水分布的影响,文中同样采用了WRF4.0模式对台风“利奇马”整个降水过程进行数值模拟,并设计地形敏感性实验和控制实验对比分析。模拟过程中控制实验保持原有的地形特征,敏感性实验将浙东区域(120°~122°E, 28°~30°N)的

表 1 历史台风个例台州地区地形敏感性实验雨量增幅

(单位:%)

Table 1 Increase of rainfall in sensitivity experiments of typhoon cases(unit:%)

台风名称	地形减半	地形加倍	无地形
0414 号“云娜”	-8.4	13.7	-21.0
0509 号“麦莎”	-29.8	47.4	-33.6
0808 号“凤凰”	-35.4	39.7	-72.9
0908 号“莫拉克”	-34.6	81.7	-50.2
平均增幅	-27.1	45.6	-44.4

地形高度消减为 100 m 以下,即区域内大于 100 m 的高度值改为 100 m。

数值模拟采用双层网格嵌套,第一重格距为 9 km,第二重格距为 3 km,模拟中心为 28°N,120°E;模拟初始时刻为 2019 年 8 月 7 日 00 时,积分 96 h;初始场资料为美国国家环境预报中心/美国国家大气研究中心(National Centers for Environmental Prediction/National Center for Atmospheric Research, NCEP/NCAR)提供的全球分析和预报数据(FiNaL operational global analysis and forecast data, FNL) 1°×1°全球再分析资料(网址:https://rda.ucar.edu/datasets/ds083.2/);地形资料分辨率为 5 km。两层网格的参数化方案均为 WSM6 类冰雹方案、Betts-Miller-Janjic 方案和 Noah 陆面过程方案。

文中所用的实况资料为浙江省自动站实时观测资料,包括逐小时降水量和自动站海拔高度;台风实况路径和强度资料为中国天气台风网(网址:http://typhoon.weather.com.cn)提供的 1909 号台风定位信息。

4 数值模拟结果分析

图 2 是本次数值模拟结果。从图 2a 中可以看到,控制实验和地形实验均较好地模拟了台风“利奇马”的登陆过程,台风路径及登陆点位置与实况基本一致,地形实验的台风路径在登陆后靠近浙东山脉时出现小幅的东北偏移。图 2b 为台风强度对比,图中可以看到模拟实验的台风中心气压值前期均较实际观测值略偏高,初始气压与实况相差近 40 hPa,后期差距逐步减小,偏差基本维持在 10 hPa

左右。由此可见,模式对台风初始时刻的描述仍有待进一步提高。

控制实验的过程雨量分布较好地还原了实况的降水分布特征(见图 2c)。强降水主要出现在浙东地区,存在的两个明显的雨量最大值分别与浙东地形相对应,此外,浙西北也有一个雨量最大值。过程雨量的大小与实况比较接近,浙东两个最大值区的雨量值基本在 400 mm 左右。对比地形实验,当浙江东部的地形消减之后,台风的路径和强度均未发生显著变化(见图 2a 和 2b),但是浙江东部雨量明显减小(见图 2d),括苍山、天台山和四明山附近的雨量最大值中心基本消失,雨量值都减小到 300 mm 以下,降水分布变的更加均匀。通过计算可知,模拟区域内的平均雨量由 261 mm 减小为 212 mm,南北两个最大值区附近的雨量分别减小了 31.0% 和 39.1%。由此可见,浙东地形对本次强降水的产生和分布都有重要影响。另外,在地形削减区域的边界附近,由于地形高度的改变,出现了类似山地的高度差,从而造成局部雨量增大,其中,浙南地区由于本身海拔较高,削减区域边界附近的雨量增加更明显。

4.1 地形对台风降水的影响

4.1.1 降水分布特征

从模拟结果的组合反射率分布可以看出,本次台风的主要降水过程大致可分成 3 个阶段:台风外围分散回波影响、外层强回波影响和内层强回波影响。图 3 为台风“利奇马”3 个阶段各时刻的组合反射率和后 3 h 累计雨量。通过控制实验和地形实验的对比,可以很好地说明地形在台风降水各阶段的影响作用。

从 8 月 9 日 06 时的反射率和降水图可以看出,在台风主体影响前,台风外围的分散环流首先出现在浙东地区,并产生相对较弱的降水。对比图 3a 可知,有无浙东地形均有分散回波出现,但有地形时山地附近的局地回波更强。但从其后 3 h 的累计雨量来看,两者降水效率均不高,雨量差异也不明显。当台风北侧的强回波影响时(8 月 9 日 12 时),对比图 3a 可知,两次实验都表现为回波面积大且强度高,分布形态也相似,但降水效率在有地形时更显著,浙东山地附近的雨量高于其他地区,尤其是北

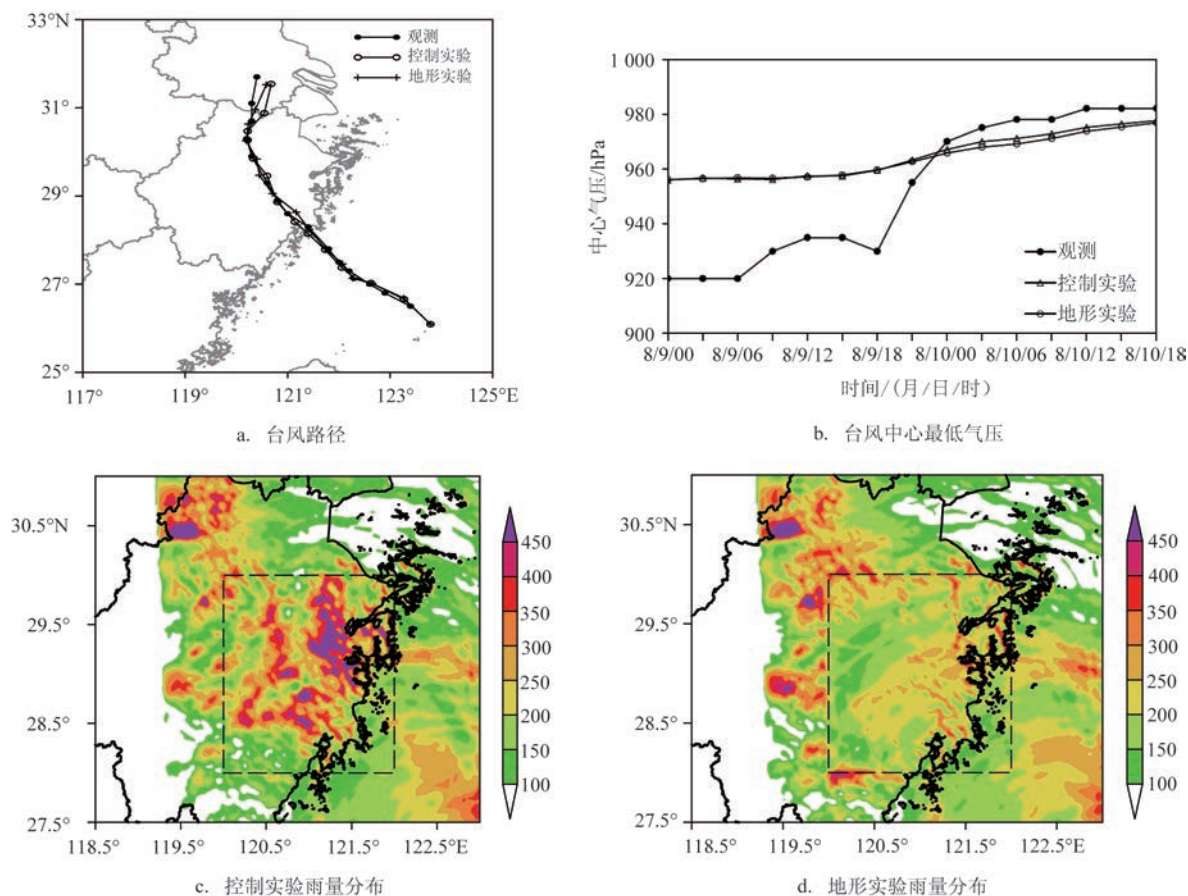


图2 台风路径、强度和过程累计降雨量的数值模拟结果(虚线方框为浙东区域($120^{\circ}\sim 122^{\circ}\text{E}$, $28^{\circ}\sim 30^{\circ}\text{N}$))

Fig.2 Numerical simulation results of typhoon track, intensity and process cumulative rainfall(the dotted box is the eastern Zhejiang area($120^{\circ}\sim 122^{\circ}\text{E}$, $28^{\circ}\sim 30^{\circ}\text{N}$))

侧天台山和四明山一带, 3 h 雨量超过 100 mm。当台风内层回波影响时(8月9日18时), 控制实验在内层回波的北侧边缘有更加明显的回波发展。对比图3b的雨量分布, 控制实验的雨量显著高于地形实验, 降水分布与地形高度相对应, 出现南北两个大值区; 无地形时, 同一位置回波发展较弱, 降水效率也弱于前者, 降水呈环状均匀分布, 与同时刻的台风内层环流形态相对应。

由上可知, 在台风不同降水阶段, 地形作用的影响也有所不同, 回波越强, 地形影响越明显, 降水差异也越大。

4.1.2 物理量场分析

从水平流场上看, 低层辐合是降水产生的重要原因。根据两次实验 850 hPa 散度分布对比可知(见图4), 当台风靠近浙东沿海时, 控制实验在浙东山

地附近均出现了明显的辐合, 辐合区位置与前3 h 的 50 mm 降水落区也有较好的对应; 反观地形实验, 浙东辐合区的大小和强度均弱于前者, 强降水的范围也明显缩小, 其中, 南部地区的强辐合区域基本消失, 北部区域虽然强度减弱但仍存在一定的辐合。当台风登陆后, 即台风内层环流影响时, 两次实验的对比更加显著, 控制实验在台州西部山地附近有明显的强辐合区和强降水对应分布, 地形实验则明显辐合, 降水强度更弱, 降水分布也更接近台风环流形态。可见, 浙东山地地形能加强低层的环流辐合, 促进上升运动和水汽输送, 进而增强台风降水强度, 影响降水分布。

从地面风场上也可以看出地形的影响作用。图5b是控制实验和地形实验的地面风场差。由于地形强迫, 在山地东侧有东北偏东的风矢量差, 其

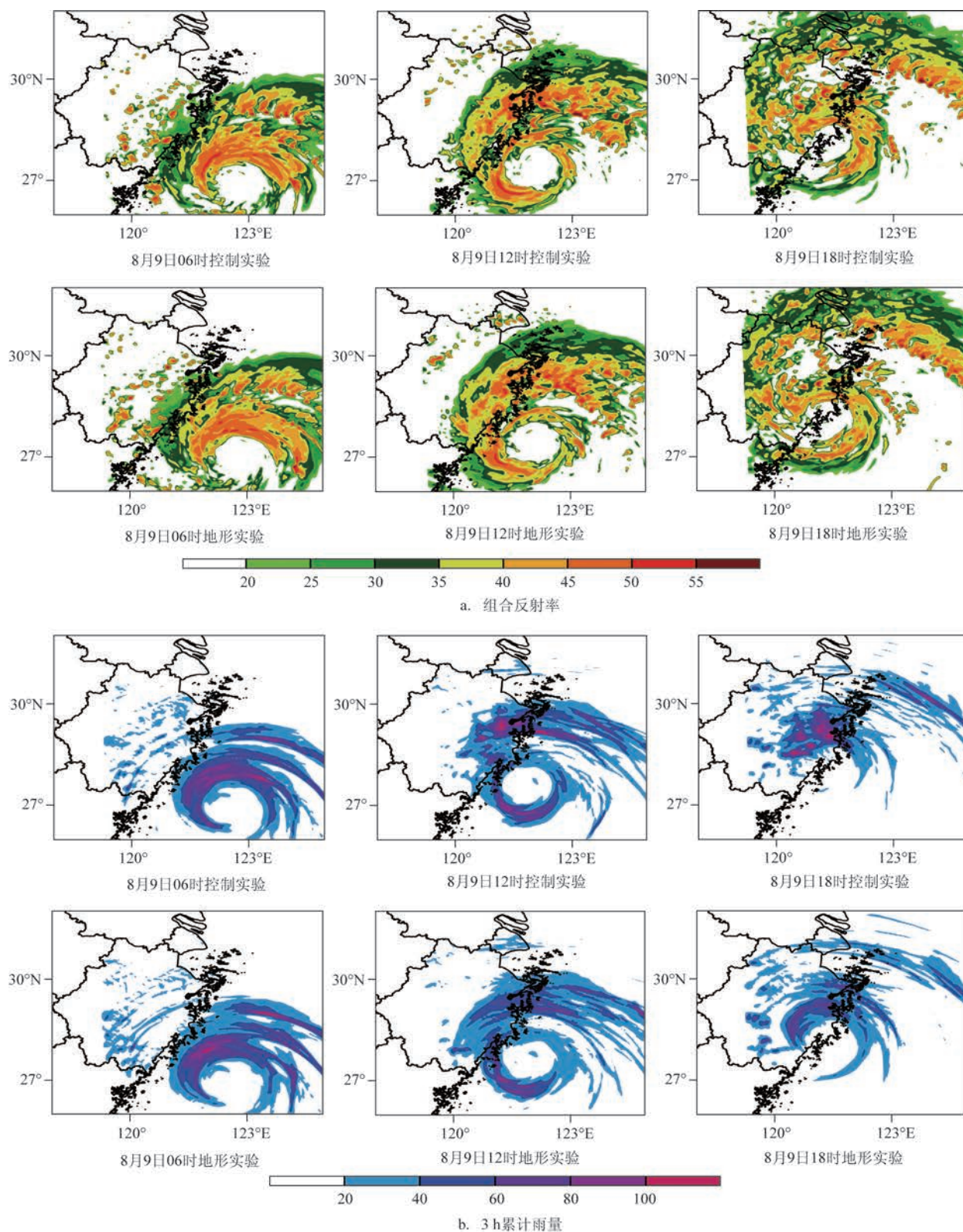


图3 控制实验与地形实验组合反射率分布和3 h 累计雨量分布(组合反射率单位:dbz;雨量单位:mm)

Fig.3 Combined reflectance distribution and 3-hour accumulated rainfall distribution of control experiment and terrain experiment (combined reflectance unit: dbz; rainfall unit: mm)

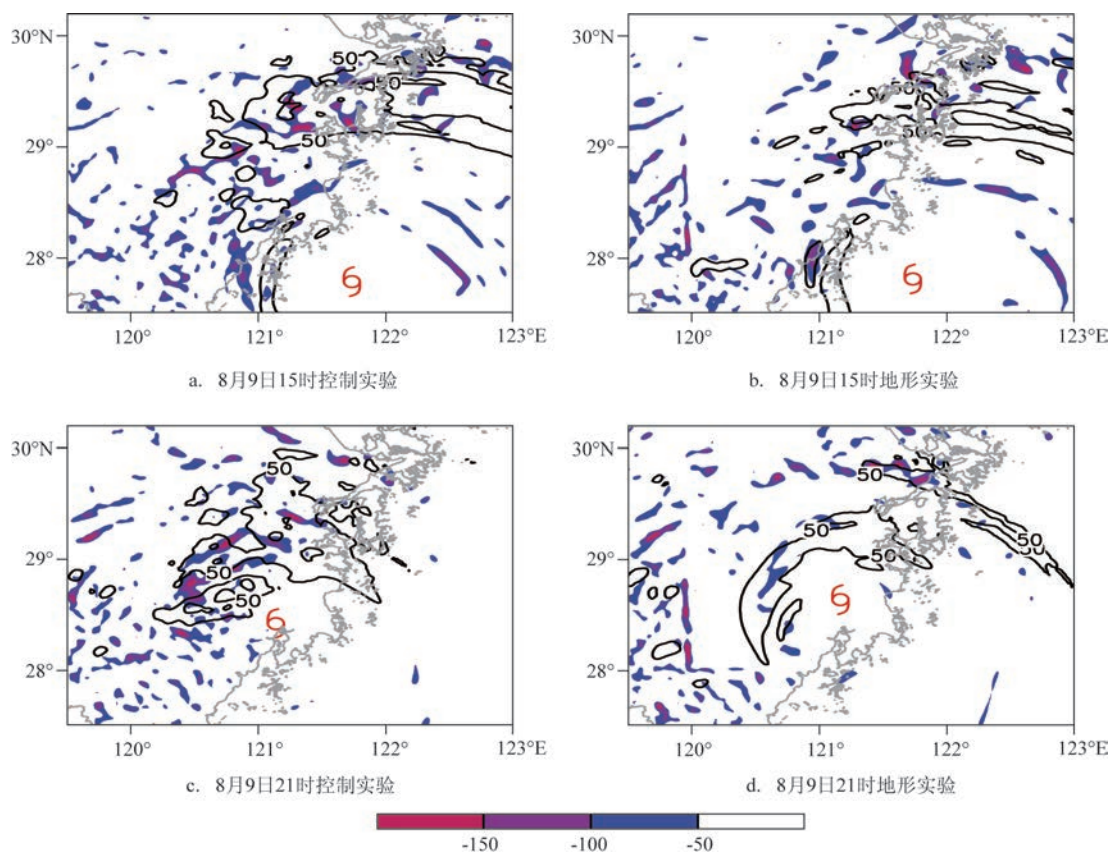


图4 控制实验、地形实验散度与前3 h雨量对比(等值线为前3 h雨量,单位:mm;填色图为850 hPa散度,单位: $10^{-5}/s$)
 Fig.4 Divergence and the previous 3-hour rainfall comparisons of control experiment and terrain experiment (the contour is the rainfall in the previous 3 hours, unit: mm; the color filled is divergence on 850 hPa, unit: $10^{-5}/s$)

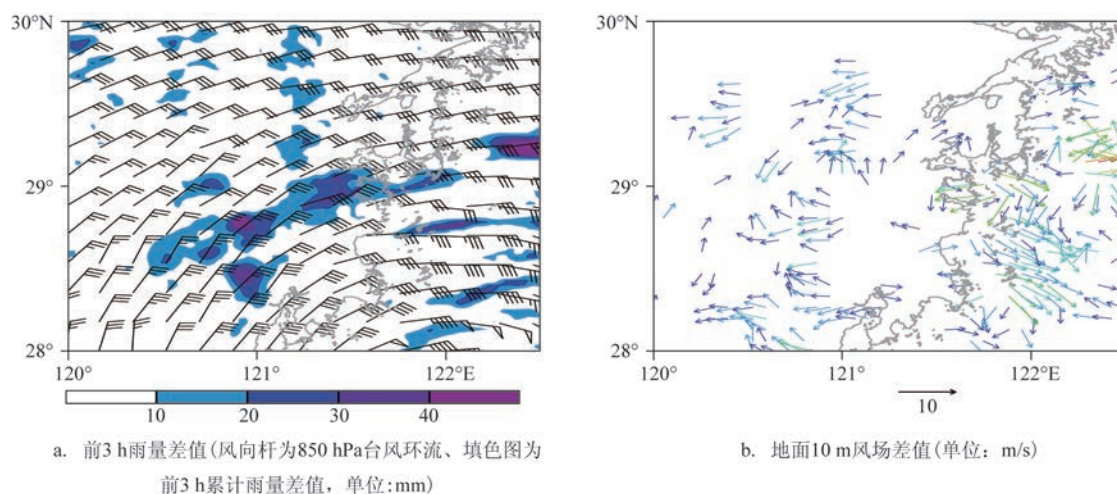


图5 8月9日12时控制实验和地形实验雨量差与地面风场差

Fig.5 The rainfall difference and surface wind difference between the control experiment and terrain experiment at 12 UTC on 9 August

与台风环流的风向一致,与同一时刻的累计雨量差的落区基本对应,进一步说明了山地地形强迫对台

风降水的增强作用。另外,我们还可以看到在三门湾喇叭口海岸地形附近,也有明显的地形强迫形成

的风矢量差,强度甚至强于陆上山地东侧的差值,对应的三门沿海也有明显累计雨量差,可见喇叭口海岸地形对降水也有一定的增强作用。当地形被削减之后,山地的强迫作用基本消失,但海岸线地形的影响仍然残存,这与图4b中北部地区强辐合区的存在也是一致的。

从垂直流场上看,地形的强迫抬升作用对降水也有重要影响。我们在浙东两个雨量中心分别沿 29.4°N 和 28.7°N 做了垂直剖面,如图6所示,矢量为 $w \times 30$ 后与 u 方向水平速度的合成,填色部分为位涡。图中可以看到,控制实验中,山地地形东侧向上的垂直速度明显增大,速度增强区可以上升到400 hPa左右的高度。此外,强垂直上升区还对应着位涡高值区,并且略微向地形方向倾斜。对比地形实验结果,地形高度削减后,同一位置的强上升运动和位涡大值区均未出现。位涡的明显增大表示台风涡旋的增强,可见地形的强迫抬升会增强局地的台风涡旋,从而促进台风降水。

4.1.3 降水增幅及差异分析

由物理量场的讨论可知,地形可以通过增强水平辐合和垂直抬升作用来增强台风降水。不考虑海岸线地形影响时,过程雨量与地形高度大致呈正相关分布(见图7a)。近海小地形会产生较大的降水波动,雨量随地形高度的增大而增大。当地形高度较大时,雨量增幅略有减小。地形实验中把100 m以上的地形去掉后,近海的小地形仍然存在,降雨量仍有类似波动,之后平稳地维持在200 mm左右,在原先的地形最高处,雨量减少最多可达400 mm左右。

对于南北两个雨量大值区,在不同阶段,地形对降水的影响也存在差异。图7b所示,我们在南北两个强降水中心附近分别选取 $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$ 的区域求雨量平均,阴影区即为地形产生的雨量增幅。地形对降水的增幅作用与垂直作用与风密切相关,风速越大,地形作用产生的垂直上升运动越显著,降水也越强。从台风逐渐靠近到登陆的过程中,风力逐

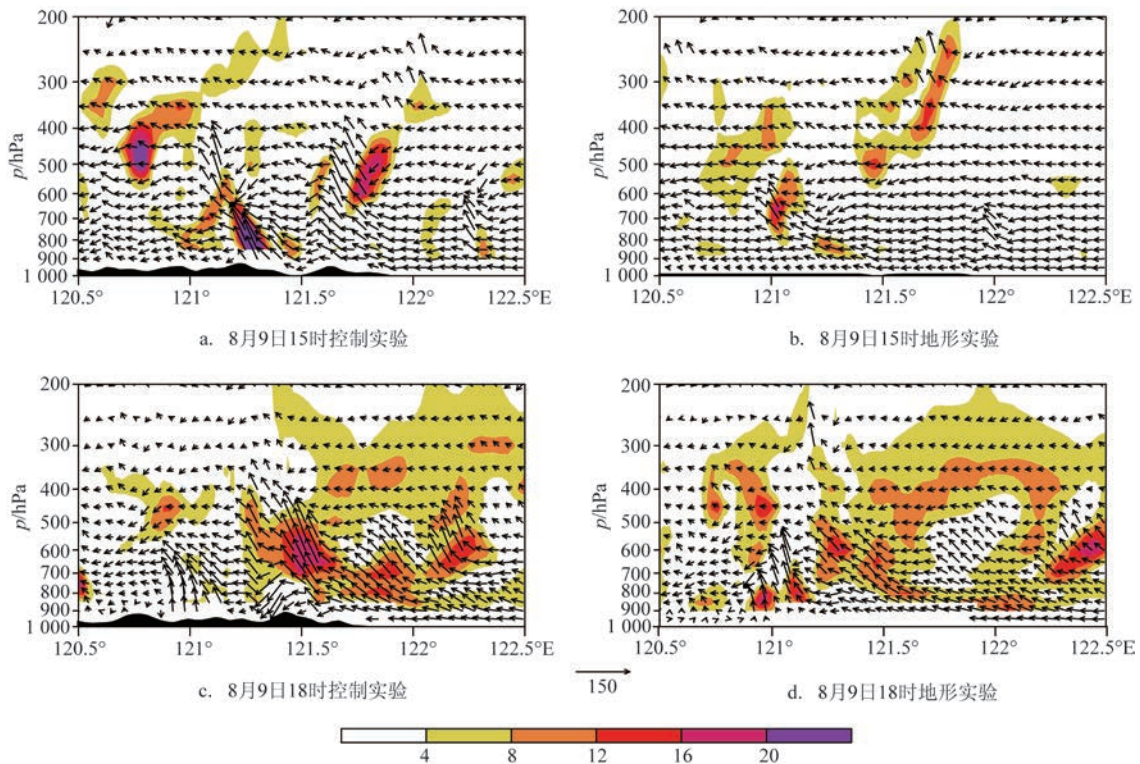


图6 控制实验和地形实验合成垂直流场和位涡的纬向剖面(矢量箭头为 $w \times 30$ 与 u 的合成,单位:m/s;填色图为位涡,单位:PVU)

Fig.6 The synthesized vertical flow and the zonal profile of potential vorticity of the control experiment and the terrain experiment (the vector arrow is the combination of $w \times 30$ and u , unit: m/s, the color filled is potential vorticity, unit: PVU)

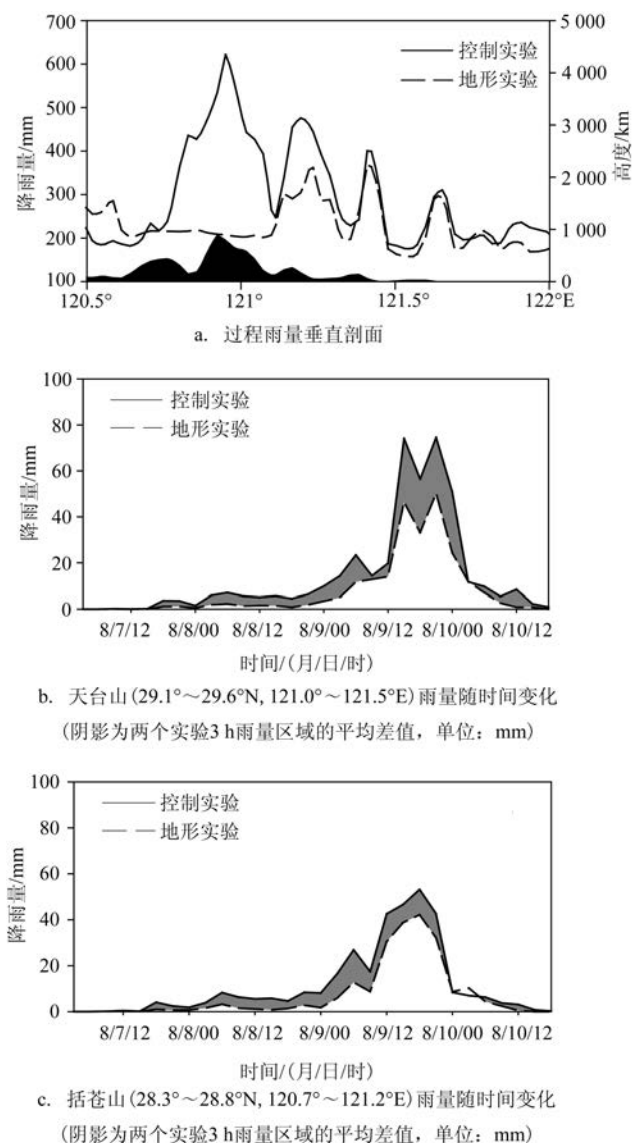


图7 控制实验和地形实验雨量分布对比

Fig.7 Comparison of rainfall distribution between control experiment and terrain experiment

渐增大,地形降水作用逐渐增强。图中可以看出两个区域平均雨量的分布都在9日00时后存在3个峰值,与上述3个降水阶段相对应。前期两者的增幅比较接近,南区略大,量值在10 mm左右。9日12时后,南区雨量逐渐增大,但雨量增幅仍维持在10 mm左右,北区雨量增幅达20 mm以上,明显强于南区。由此可见,这一阶段北部山区附近的地形增幅作用比南部山区更显著,而实际上,北部山区的地形高度明显小于南部。这是由于环境风场与地形的交角是地形增幅作用的重要影响因素,当环境风场为

偏东方向时,与浙东地形的交角接近垂直,地形增幅作用最显著。台风登陆前后,北侧区域一直位于台风中心的东北侧,台风环流的偏东风影响时间长,南侧区域则位于台风中心偏西南侧,台风影响环流以北到东北风为主,偏东风影响时间短,北侧的雨量增幅强于南侧。

4.2 地形对台风路径、强度和结构的影响

地形对台风降水的影响是地形影响中最直观且最显著的部分,此外,地形对台风路径、强度和结构等的影响也同样存在。

浙东地形尺度相对较小,对台风移向和移速的影响虽弱但仍存在。从模拟与实况的台风路径对比中可知,地形削减后,台风出现了短时的小幅东北偏移。从图8中可以看出,同一时刻控制实验的台风中心位于29°N以南(见图8a),而地形实验中台

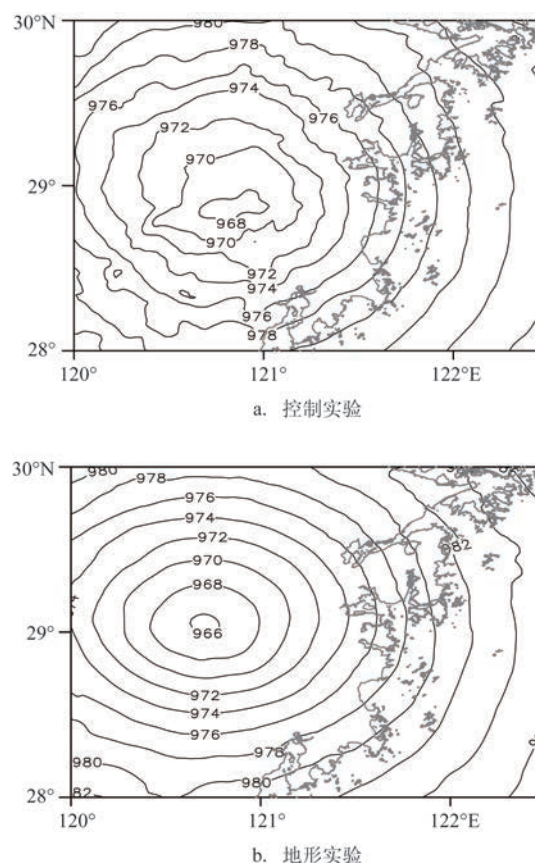
图8 8月10日00时控制实验和地形实验海平面气压场
(单位:hPa)

Fig.8 Sea level pressure of the control experiment and terrain experiment at 0000 UTC on 10 August(unit: hPa)

风中心则位于 29°N 以北(见图8b),可见去掉地形后,地面的摩擦阻挡作用减弱,台风北移的速度略有加快。

从图2中两次实验的中心最低气压值对比可知,从8月10日00时开始,地形实验中心最低气压比控制实验偏低2 hPa左右。图8为8月10日00时的海平面气压场,可见控制实验中台风中心气压值为968 hPa,去掉地形后,中心气压增强到966 hPa,低层环流场的结构也出现了较明显的变化。地形实验中,高度场环流更加平滑和对称,控制实验中等压线产生明显波动,整个流场分布有不对称性,环流中心附近有向西南方向的凸起,同时梯度也略有增大,而这一位置刚好位于括苍山脉附近。此外,从8月9日18时的位涡垂直剖面图可以看出(见图6c和6d),由于地形作用,控制实验的中低层存在位涡增强区;相反在高层300~400 hPa左右的区域,地形实验的位涡值较控制实验明显增强。由此可见,地形的存在使得台风本身的涡旋强度有所减弱。这也表明,浙东地形虽然尺度和高度有限,但仍对台风的强度和结构产生一定的影响。

5 小结

本文采用WRF模式成功模拟了台风“利奇马”的登陆和降水过程,通过地形敏感性实验削减了浙东区域的地形高度,对比控制实验,分析了浙东地形对台风降水、路径、强度和结构等方面的影响。结论如下:

(1)浙东地形对台风降水有显著影响,台风“利奇马”影响期间存在两个明显的雨量最大值区,分别对应北侧天台山和四明山,南侧括苍山。当浙东区域的地形削减后,降水分布则更均匀,雨量大值区也基本消失,区域内平均雨量减少约50 mm,雨量大值区雨量减少约30%。

(2)浙东山地地形能通过地形强迫作用,加强低层的环流辐合和垂直上升运动,促进水汽输送,同时还能加强局地的台风涡旋,从而增强台风降水,影响降水分布。海岸线喇叭口地形对降水增强也有一定的贡献。

(3)台风不同降水阶段,地形的影响作用也不同。强降水阶段地形影响更显著,降水效率的差异

也越大。

(4)浙东沿海小地形能产生较大的雨量波动,地形海拔高度越高,雨量越大。环境风场与地形的交角是地形增幅作用的重要影响因素,北侧区域虽然地形海拔高度低,但是受台风环流的偏东风影响时间更长,因此雨量增幅比南侧区域更显著。

(5)浙东地形在一定程度上还能使台风移动减慢,强度减弱,对台风结构也有一定影响。

参考文献:

- [1] 王晶. 我国海洋环境安全保障技术服务“海上丝路”建设[N]. 中国自然资源报, 2020-04-17.
Wang J. China's marine environmental security technology serves of the construction of Maritime Silk Road[N]. China Natural Resources News, 2020-04-17.
- [2] 陈联寿, 罗哲贤, 李英. 登陆热带气旋研究的进展[J]. 气象学报, 2004, 62(5): 541-549.
Chen L S, Luo Z X, Li Y. Research advances on tropical cyclone landfall process[J]. Acta Meteorologica Sinica, 2004, 62(5): 541-549.
- [3] 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.
- [4] 何立富, 梁生俊, 毛卫星, 等. 0513号台风泰利异常强降雨过程的综合分析[J]. 气象, 2006, 32(4): 84-90.
He L F, Liang S J, Mao W X, et al. Analysis of torrential rain event of landing Typhoon Tailim[J]. Meteorological Monthly, 2006, 32(4): 84-90.
- [5] 冀春晓, 薛根元, 赵放, 等. 台风Rananim登陆期间地形对其降水和结构影响的数值模拟试验[J]. 大气科学, 2007, 31(2): 233-244.
Ji C X, Xue G Y, Zhao F, et al. The numerical simulation of orographic effect on the rain and structure of Typhoon Rananim during landfall[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2007, 31(2): 233-244.
- [6] 袁金南, 黄燕燕, 刘春霞, 等. 陆地摩擦对登陆热带气旋路径和强度影响的模拟研究[J]. 热带气象学报, 2007, 23(6): 531-537.
Yuan J N, Huang Y Y, Liu C X, et al. A simulation study of the influence of land friction on landfall tropical cyclone track and intensity[J]. Journal of Tropical Meteorology, 2007, 23(6): 531-537.
- [7] Wu C C, Yen T H, Kuo Y H, et al. Rainfall simulation associated with typhoon Herb (1996) near Taiwan. Part I: the topographic effect[J]. Weather and Forecasting, 2002, 17(5): 1001-1015.
- [8] 朱红芳, 王东勇, 娄珊珊, 等. 地形对台风“海葵”降水增幅影响的研究[J]. 暴雨灾害, 2015, 34(2): 160-167.
Zhu H F, Wang D Y, Lou S S, et al. Numerical test of topography

- effect on rainfall amplification associated with typhoon Haikui[J]. *Torrential Rain and Disasters*, 2015, 34(2): 160-167.
- [9] 钮学新, 杜惠良, 刘建勇. 0216 号台风降水及其影响降水机制的数值模拟试验[J]. *气象学报*, 2005, 63(1): 57-68.
- Niu X X, Du H L, Liu J Y. The numerical simulation of rainfall and precipitation mechanism associated with typhoons sinlaku (0216)[J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 2005, 63(1): 57-68.
- [10] Tuleya R E, Bender M A, Kurihara Y. A simulation study of the landfall of tropical cyclones[J]. *Monthly Weather Review*, 1984, 112(1): 124-136.
- [11] Bender M A, Tuleya R E, Kurihara Y. A numerical study of the effect of a mountain range on a landfalling tropical cyclone[J]. *Monthly Weather Review*, 1985, 113(4): 567-583.
- [12] 张建海, 陈红梅, 诸晓明. 台风 Haitang(0505)登陆过程地形影响的数值模拟试验[J]. *海洋通报*, 2006, 25(2): 1-7.
- Zhang J H, Chen H M, Zhu X M. A numerical study on the effects of orography during the landfall process of Typhoon Haitang[J]. *Marine Science Bulletin*, 2006, 25(2): 1-7.
- [13] 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.
- [14] 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.
- Wang K, Qi D, Gao L, et al. Analysis of the effects of the topography of eastern Zhejiang on the extreme precipitation of typhoon "Lekima" [J]. *Journal of the Meteorological Sciences*, 2021, 41(2): 162-171.
- [15] 石顺吉, 林秀斌, 吴陈锋, 等. 强热带风暴“莲花”(0903)非对称降水结构分析[J]. *海洋预报*, 2010, 27(5): 64-71.
- Shi S J, Lin X B, Wu C F, et al. Analysis of asymmetric rainfall structure due to strong tropical storm Linfa (0903) [J]. *Marine Forecasts*, 2010, 27(5): 64-71.

The influences of topography of eastern Zhejiang on typhoon properties —a case study of typhoon "Lekima" (1909)

WANG Kai, LI Yuan, GAO Li, WENG Zhimei, GUO Jiuhua

(Taizhou Meteorological Bureau, Taizhou 318000 China)

Abstract: In this paper, sensitive experiments are conducted using WRF to simulate the landing and precipitation processes of typhoon "Lekima" (1909), and to analyze the influence of topography of eastern Zhejiang Province on typhoon precipitation, path, strength and structure. The results show that the topography of eastern Zhejiang has the most significant influence on typhoon precipitation. There are two significant precipitation areas in eastern Zhejiang Province, which are Tiantai Mountain and Siming Mountain in the north and Kuocang Mountain in the south. The precipitation increase is about 50 mm on regional average with a maximum by 30% in the heavy rainfall area. The forcing effect of mountain topography can promote the low-level convergence and vertical upward movement and strengthen the local typhoon vortex, and thereby increase the typhoon precipitation and affect the precipitation distribution. The horn-like topography also contributes to the enhancement of precipitation. The influence of topography is different in different precipitation stages of typhoon. The influence is more significant in heavy precipitation stage, and the difference of precipitation efficiency is also greater. Small coastal topography can cause large rainfall fluctuations, and the higher the altitude, the greater the rainfall. The intersection angle of the environmental wind and the topography is an important factor affecting the increase of precipitation. Although the altitude on the north side of eastern Zhejiang is low, the increase of precipitation is more significant than that on the south side since it is influenced by the easterly wind of the typhoon circulation for a longer time of period. In addition, the topography of eastern Zhejiang can slow down the typhoon movement to a certain extent, and weaken the typhoon intensity and have a certain impact on the typhoon structure.

Key words: numerical simulation; topography ; typhoon; heavy rain fall