

肖志祥,黎金玲,罗小莉. 1415 号台风“海鸥”广西极端暴雨预报偏差分析及地形订正[J]. 气象研究与应用,2021,42(4):14–20.  
Xiao zhixiang,Li jinling,Luo xiaoli. Bias analysis and topographic correction of Guangxi extreme rainstorm forecast of Typhoon Kalmaegi [J].Journal of Meteorological Research and Application,2021,42(4):14–20.

# 1415 号台风“海鸥”广西极端暴雨预报偏差分析及地形订正

肖志祥<sup>1</sup>, 黎金玲<sup>2</sup>, 罗小莉<sup>3</sup>

(1.广西壮族自治区气象科学研究所, 南宁 530022; 2.河池市气象局, 广西 河池 547099;  
3.广西壮族自治区气候中心, 南宁 530022)

**摘要:** 利用地面自动站降水资料、ERA5 再分析资料、广西壮族自治区气象台降水落区和 ECMWF 模式预报数据对 1415 号台风“海鸥”在广西暴雨预报偏差进行了分析,并开展了地形降水订正研究。结果表明,对“海鸥”强降水落区预报准确,但大暴雨以上量级降水明显偏弱,大暴雨和特大暴雨漏报严重。降水经地形订正后,大暴雨以上降水 TS (BS)评分由 0.19(0.27)大幅度提升到 0.35(0.53)且暴雨及以下量级降水评分无明显改变,但地形降水订正方法对特大暴雨仍无明显订正技巧;偏南风、东北风及偏东风在广西复杂地形下均会产生地形降水,实际业务预报中应加以考虑,有助于提升对强降水开始时间的预报效果。

**关键词:** “海鸥”;台风降水;偏差;地形订正;风向

**中图分类号:** P458.1<sup>+</sup>21 **文献标识码:** A **doi:** 10.19849/j.cnki.CN45-1356/P.2021.4.03 **OSID:**

## 引言

暴雨可引发山洪暴发、江河泛滥、水库决堤,是台风引起的三大危害之一。7503 号台风深入内陆造成河南省著名的“75·8”特大暴雨,造成 60 多个水库垮坝,超 2.6 万人死亡<sup>[1]</sup>。此后,登陆台风引发的暴雨受到前所未有的关注<sup>[2-4]</sup>。0908 号台风“莫拉克”在台湾造成日降水量 1533.5mm 的极端降水<sup>[5]</sup>,导致数十亿元经济损失,并有 600 人因此死亡,是我国最强的暴雨。

台风降水不仅与它自身的结构和性质有关,还受到下垫面特性、环境场的相互作用、地形抬升辐合等因素的影响。台风涡旋内部结构、周围环境大气的影响及下垫面的强迫作用是影响台风暴雨落区的三个主要因子<sup>[4]</sup>。何立富等<sup>[6]</sup>指出地形抬升造成的辐合作用是暴雨增幅的重要因子,异常强暴雨主要分布在山脉迎风坡上。“双台风”的天气尺度系统和中尺度系统相互作用也在极端降水中扮演重要角色<sup>[7]</sup>。1415 号台风“海鸥”给广西带来了严重的风雨影响,

313.55 万人受灾,因灾死亡 5 人,直接经济损失 27.93 亿元<sup>[8]</sup>。本文对“海鸥”的预报情况进行介绍,并开展初步的地形降水订正技术研究,以期为今后台风暴雨预报提供参考思路。

## 1 数据和方法

利用广西 90 个国家地面观测站降水、ERA5 再分析资料、广西壮族自治区气象台主观降水落区及 ECMWF 预报数据对“海鸥”的强降水预报偏差进行分析。地形迎风坡降水率的计算公式为:

$$R(t)=$$

$$\int_{h_s}^{h_{90}} \left[ u(h,t) \times \frac{\partial H(x,y)}{\partial x} + v(h,t) \times \frac{\partial H(x,y)}{\partial y} \right] \frac{d\rho_w}{dz} dz \quad (1)$$

其中, $h_s$  为地面高度, $h_{90}$  为饱和湿空气(相对湿度大于 90%)所在高度, $u$  和  $v$  分别为随高度和时间变化的纬向风、经向风, $\rho_w$  为实际空气中的水汽密度。设定地形高度小于 200m 的降水效率(E)为 15%,200~500m 地形降水效率为 20%,500m 以上则取 25%。模

收稿日期: 2021-11-10

基金项目: 国家自然科学基金项目(41905077)、广西气象科研计划项目(桂气科 2021ZL05)、广西台风与海洋预报服务创新团队项目、广西重点研发计划(桂科 AB21075005)

作者简介: 肖志祥(1986—),男,博士,高级工程师,主要从事天气气候研究。E-mail: xiaozx\_gx@163.com

式总降水量为模式预报降水量与地形降水量之和,即  $P_t = P_m + R(t) \times E$ 。详细的推导及相关假定见<sup>[9-11]</sup>。

## 2 暴雨过程概况及偏差分析

台风“海鸥”于9月16日09时在海南文昌第二次登陆,中心最低气压为960hPa,中心附近最大风速为  $42\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,在越南北部广宁省以台风强度第三次登陆后“海鸥”迅速减弱消亡。“海鸥”在整个生命史期间路径相对稳定,主要向西北偏西方向移动。16日,“海鸥”在北部湾东部地区,强降水出现在北部湾沿海地区,最大降水为北海129.1mm。17日,“海鸥”继续向西北方向移动,强降水范围迅速扩大,桂西南及沿海地区降水达到暴雨以上量级,大部地区达到大暴雨,最大降水为防城港220.2mm。“海鸥”在越南登陆后迅速减弱,在广西的降水过程主要发生在9月16日和17日。从过程总降水量看,桂西南及沿海地区累积降水量大部地区超过100mm,最大为防城港292.3mm。

台风暴雨最重要的两个因素是雨强和暴雨落区<sup>[4]</sup>。对于16日降水,从广西壮族自治区气象台24h主观预报来看(图1a),暴雨范围偏大,北海大暴雨预报

偏弱,但是强降水落区是准确的。48h预报(17日降水)的暴雨落区也与实况极为相符,但是桂西南及沿海地区的大暴雨漏报,雨强严重偏小。17日降水24h预报(图1c)将河池西部地区的暴雨调小,沿海地区加强为大暴雨,但总体上暴雨落区仍与48h预报相似(图1b),桂西南地区的大暴雨仍然漏报。因此,广西壮族自治区气象台对16—17日的暴雨落区是准确的,但是雨强偏弱。

对比广西壮族自治区气象台主观预报(图1a—c)与ECMWF模式预报(图1d—f),发现无论是暴雨落区还是雨强调整,主观预报与模式结果都非常相似。可见,ECMWF模式预报结果对预报员有着非常大的影响,预报员主要参考了模式预报的结果。16日广西大部地区ECMWF预报降水量偏大,而在桂东及沿海强降水局地预报降水量偏小,北海降水量偏小64.8mm。17日降水的偏差也主要集中在桂东北(大瑶山、海洋山结合部谷地)、桂西南(崇左、百色南部)及沿海(防城港、钦州)等强降水地区,最大偏差超过130mm。因此,全球模式预报“海鸥”雨强偏弱在很大程度上影响了预报员的预报效果。

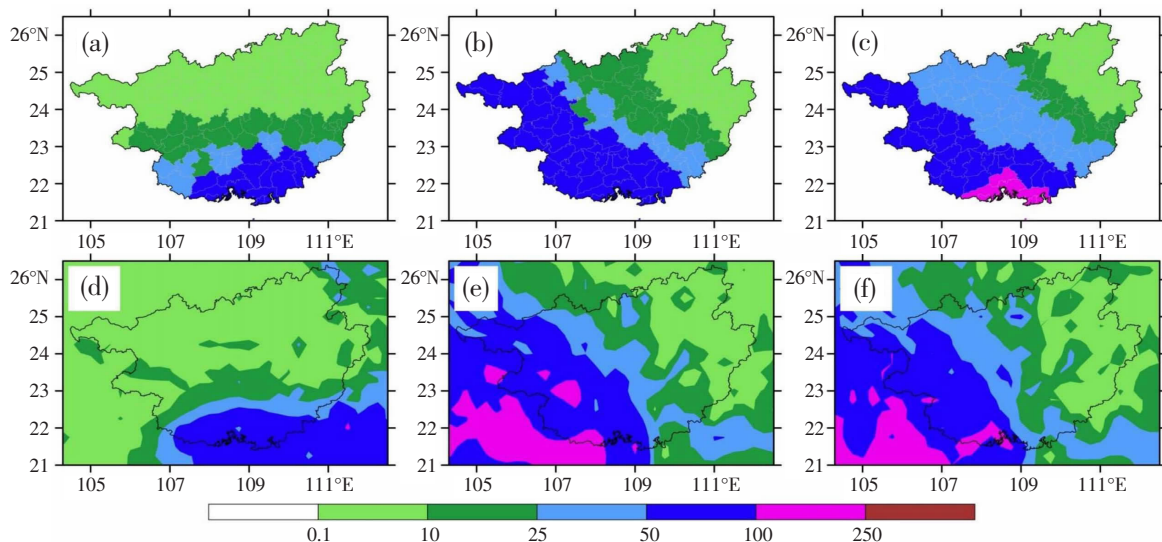


图1 广西气象台主观预报(a—c)及ECMWF模式预报(d—f)降水量(单位:mm)

(a)15日20时预报24h(16日);(b)15日20时预报48h(17日);(c)16日20时预报24h(17日);  
(d)14日20时预报48h(16日);(e)14日20时预报72h(17日);(f)15日20时预报48h(17日)

由于17日降水强度强、范围更广、偏差也更大,因此主要对17日降水偏差进行分析。图2为925hPa环流场及ECMWF的预报偏差。“海鸥”于16日23时左右在越南北部登陆,可以看到16日20时“海鸥”位于北部湾海上,广西大部地区受偏东气流影响(图2a)。“海鸥”登陆后,17日02时广西转受台

风东侧的偏南气流影响为主(图2b)。从预报偏差来看,模式风场在陆地上的偏差极小,16日20时偏差主要是在北部湾沿岸海面上(图2c),这是由于模式预报的“海鸥”中心环流偏北所致。17日02时风场的偏差主要是在越南北部及广西的崇左地区(图2d)。此外,模式预报的850hPa急流、500hPa副高的

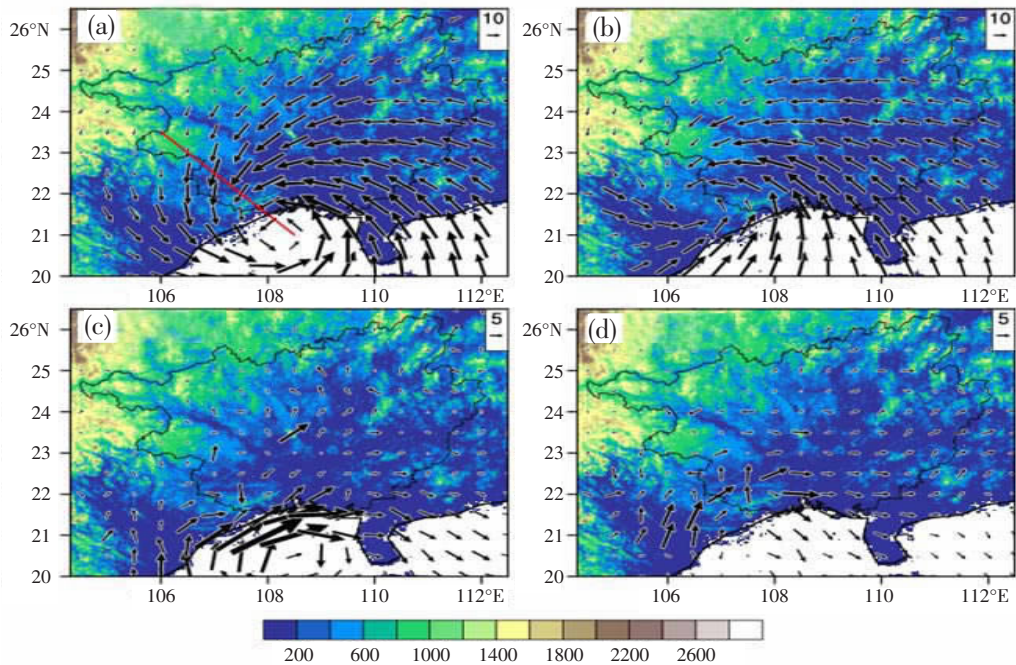


图2 16日20时(a)和17日02时(b)925hPa环流场;(c)16日20时ECMWF减去ERA5;(d)17日02时ECMWF减去ERA5(阴影为地形高度,单位:m;a中红色实线表示从21.0°N、108.5°E到23.5°N、106.0°E)

位置和范围偏差也较小。

以上分析表明,无论是风向还是风速,ECMWF在广西境内的预报偏差均较小,台风暴雨落区也较准确。沿桂西南的强降水带(图2a红色实线)的

850hPa垂直速度和散度随时间的演变如图3所示。17日02时十万大山以南受偏南气流影响,山前气流受地形抬升影响形成宽广而强烈的上升运动(图3a),但是ECMWF预报的十万大山南面的上升运动

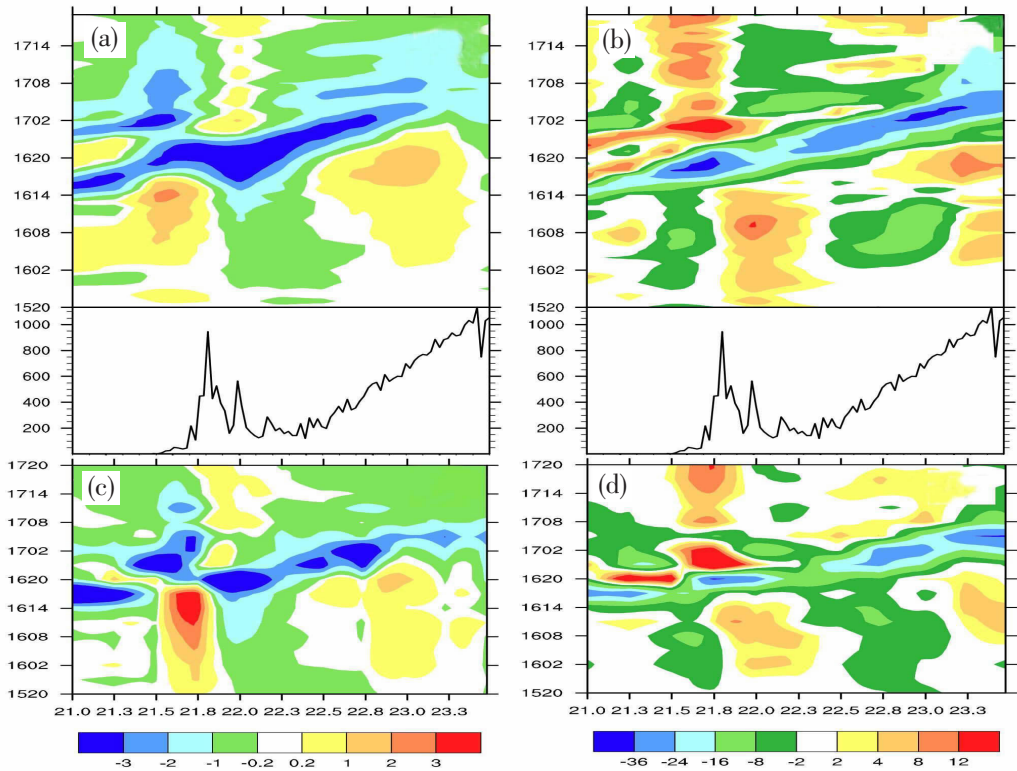


图3 ERA5(a—b)和ECMWF(c—d)预报的850hPa垂直速度(a,c的单位: $\text{Pa}\cdot\text{s}^{-1}$ )及散度(b,d的单位: $\text{s}^{-1}$ )沿剖面(图5a红色实线)随时间的演变,横坐标为纬度,纵坐标为时间,中间一行纵坐标表示地形高度(单位:m)



区较窄(图 3c)。十万大山北面(崇左盆地)从 16 日 14 时开始出现强烈的上升运动(图 3a),而 ECMWF 预报的十万大山北面强上升运动偏弱、范围较小(图 3c)。模式对十万大山附近的强辐合区预报也偏弱(图 3b,d)。同样地,ECMWF 预报的右江河谷以南的垂直速度、散度偏弱。可见,ECMWF 对强降水区的上升运动、辐合位置、时间演变预报效果较好,暴雨落区预报准确。强度偏弱、范围偏小、持续时间短这几个因素可能是导致大暴雨漏报的主要原因。ECMWF 预报暴雨量级偏差主要集中在由沿海到桂西北地形复杂地区:即沿海-十万大山-崇左盆地-右江河谷以南,地形起伏非常强烈。研究表明<sup>[12]</sup>,地形对台风降水的增幅可达 50mm 以上。因此,针对地形进行降水订正是解决“海鸥”预报降水偏弱的有效途径。

3 台风暴雨地形订正方法

图 4 为根据公式(1)计算得到的 17 日“海鸥”地形降水增量。可以看到,地形降水增量中心主要在桂西南、沿海十万大山及桂西北,这三个区域都是模式预报降水偏弱的地区(图 1)。地形降水增量在右江河谷以南地区最大可达 16mm 以上,其次是十万大山附近约为 4~8mm,大瑶山东部地区 2~4mm。

BS=1 表示预报无偏差,BS>1 表示预报存在湿偏差,反之则是干偏差。ETS 表示相对随机预报的预报技巧,ETS≤0 说明无预报技巧,ETS>0 表示相对

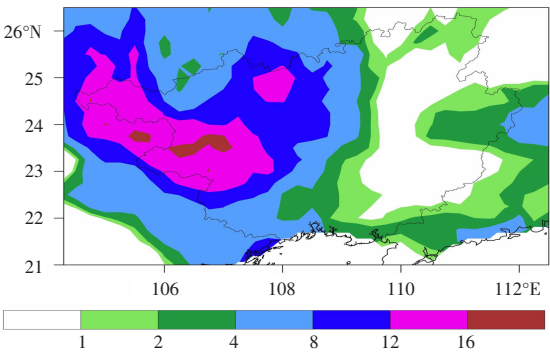


图 4 17 日台风地形降水量  
(ECMWF14 日 20 时起报,单位:mm)

随机预报具有预报技巧,ETS=1 为理想预报。表 1 为 17 日降水地形订正前后的 TS、BS 和 ETS 评分对比。可以看出,在大暴雨以下量级经地形订正后 TS 评分有微弱的下降,大雨和暴雨量级湿偏差有所增强。但是,大暴雨以上量级 TS 评分从 0.19 提升至 0.35,BS 评分从 0.27 大幅度提升至 0.53。订正后对大暴雨的预报技巧显著提升。同时,降水均方根误差从 42.38mm 下降到 40.48mm,降水绝对偏差从 -12.25mm 降低至 -6.99mm。这说明地形降水订正方法可以显著提升大暴雨以上量级降水评分,对提升“海鸥”强降水预报效果是有效的,有助于提升防灾、减灾效果。但地形订正对此次特大暴雨过程仍无订正技巧,预报员需进一步参考区域高分辨率模式产品。

表 1 订正前后 17 日各降水量级 TS、BS 和 ETS 评分

降水量级		≥0.1mm	≥10mm	≥25mm	≥50mm	≥100mm	≥250mm
TS	订正前	1	0.78	0.77	0.70	0.19	0
	订正后	1	0.77	0.76	0.67	0.35	0
BS	订正前	1	0.99	1.09	1.06	0.27	0
	订正后	1	1	1.15	1.12	0.53	0
ETS	订正前	0	0.32	0.58	0.56	0.15	0
	订正后	0	0.28	0.55	0.51	0.30	0

图 5 为 17 日台风地形增幅降水最大值出现时间及其对应的风场和降水量的空间分布。“海鸥”于 16 日 23 时左右在越南北部登陆,随后广西主要受偏南、偏东气流的影响。从图 5a 可以看到,沿海地区的地形降水出现在 17 日 02 时前后,主要是“海鸥”东部偏南气流加大,受海陆分布及地形抬升影响,随

后地形降水向广西内陆推进。“海鸥”于 17 日 14 时停止编号,台风完整环流迅速瓦解,所以 17 日 14 时后广西台风地形降水全部由峰值减弱。从地形降水强度看,其空间分布(图 5b)与总地形降水(图 4)非常相似,主要集中在十万大山-崇左盆地-右江河谷南岸一线及桂东北大瑶山、海洋山结合部谷地。右

江河谷南岸的地形降水强度最大,可超过  $3\text{mm}\cdot(3\text{h})^{-1}$ ,这可能是由于狭长地形缓慢抬升作用(图 3)。从地形降水强度最大出现时的低空风场看(图 3c),十万

大山以南主要是偏南气流爬坡引起,而崇左盆地、右江河谷南岸及大瑶山、海洋山东部地区主要受偏东气流的作用。

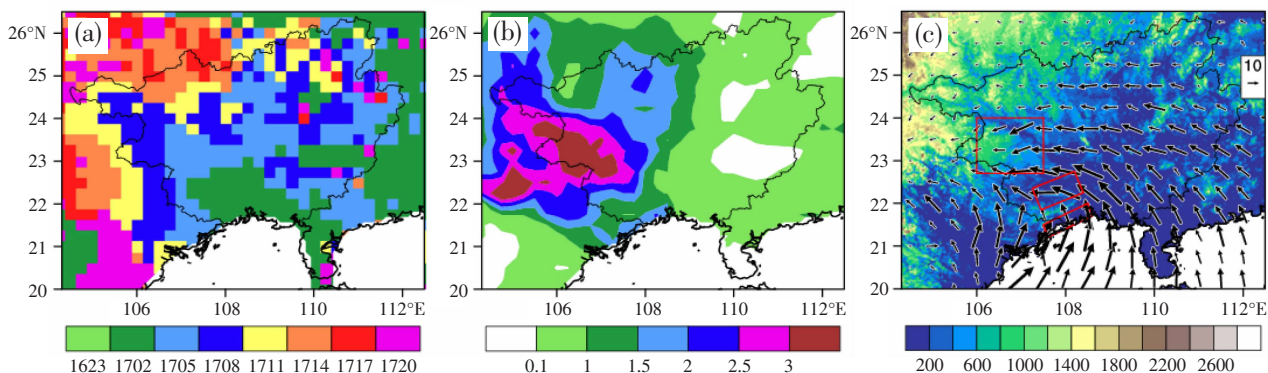


图 5 17 日台风地形降水最大值出现的时间(a,北京时:ddhh)及其对应的地形降水最大值(b,单位: $\text{mm}\cdot(3\text{h})^{-1}$ )和 925hPa 风场(c)

(c)中红色方框分别表示十万大山以南(Region1),十万大山以北崇左盆地(Region2)及右江河谷南岸(Region3)

由于“海鸥”在不停地移动,其环流也随时间变化,风场与地形的夹角也随时间变化,造成地形降水的风向并不一致。因此,选取十万大山以南(图 5c, Region1)、十万大山以北崇左盆地(图 5c, Region2)以及右江河谷南岸(图 5c, Region3)三个降水偏差较大的地区,分析地形降水的风场的随时间演变(图 6)。图 6 表明三个地区地形降水的出现时间、峰值以及风向的贡献并不相同。十万大山南麓(图 6a)地形降水在 16 日 20 时出现,此时低层(925~700hPa)风向开始转为偏东风,与十万大山形成一定夹角。16 日 23 时,低空东南气流最大且与十万大山夹角最大,十万大山南麓出现峰值降水(1.3mm),随后地形降水随风速减小而减小。崇左盆地地形降水(图 6b)最早出现在 16 日 14 时,此时“海鸥”还在北部湾海上,随着“海鸥”西行,东北气流开始加大,盆地东北方向地形海拔最低,气流进入盆地后辐合抬升形成地形降水。16 日 23 时崇左盆地转受东南气流影响,气流沿右江河谷南岸地形爬升,出现地形降水峰值。因此,崇左盆地地形降水主要由两部分组成:峰值以前是东北气流降水和峰值以后的东南气流降水。右江河谷南岸的地形降水强度最大,峰值降水在 17 日 05 时(图 6c),主要由峰值降水前的偏东气流及峰值降水后的东南气流贡献。可见,不同区域地形降水受台风位置移动的影响,在实际业务预报中需考虑复杂地形对降水的增幅作用,避免因强降水出现时间的错误导致预报偏差。

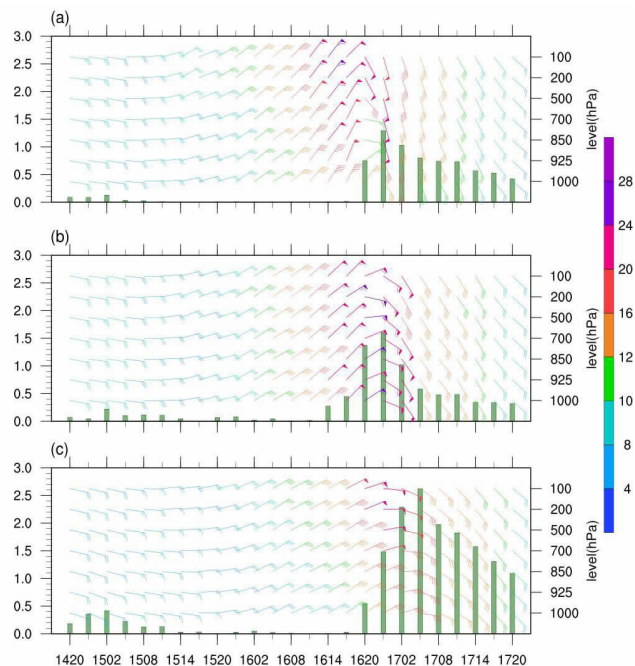


图 6 三个区域平均的地形降水量(绿色柱状,单位: $\text{mm}\cdot(3\text{h})^{-1}$ )和风场(矢量,颜色表示风速,单位: $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ )随时间的演变

## 4 结论与讨论

本文对台风“海鸥”暴雨预报偏差进行了分析,发现“海鸥”暴雨预报落区准确,主要是强度的偏差,引入地形增幅降水可有效提升“海鸥”降水预报效果,主要结论为:

(1) “海鸥”地形增幅降水与强降水区叠加,主要集中在十万大山-崇左盆地-右江河谷南岸一线,

最大日增幅降水量可达 16mm 以上。

(2) 地形订正后,在不显著改变小雨、中雨、大雨及暴雨评分基础上,大暴雨以上降水 TS(ETS/BS) 评分由 0.19 (0.15/0.27) 大幅度提升到 0.35 (0.30/0.53),但对于特大暴雨仍无订正能力。

(3) 台风移动的特性,使得不同区域风向随时间变化,偏南气流、东北气流、偏东气流均可贡献地形降水,在业务应用中需考虑风向与地形的关系。

影响台风极端降水的因素较多,且地形降水订正公式存在诸多假定条件,地形降水订正结果仍存在一定误差。但考虑地形降水订正仍有助于提升对极端降水的预报效果,这对于台风暴雨落区预报准确的个例提升效果更明显。对中小地形非常复杂的广西,考虑地形对极端暴雨的影响在业务预报中有重要指示作用。

#### 参考文献:

- [1] 李泽椿,湛云,张芳华,等.由河南“75·8”特大暴雨引发的思考[J].气象与环境科学,2015,38(3):1-12.
- [2] 陶祖钰,田佰军,黄伟.9216 号台风登陆后的不对称结构和暴雨[J].热带气象学报,1994,10(1):69-77.
- [3] 程正泉,陈联寿,徐翔德,等.近 10 年中国台风暴雨研究进展[J].气象,2005,31(12):1-9.
- [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] Chang Y L, Yeh H C, Liu G R, et al. Monsoon Effect Simulation on Typhoon Rainfall Potential-Typhoon Morakot (2009)[J]. Terrestrial Atmospheric and Oceanic Sciences, 2017, 28(1): 11-21.
- [6] 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.
- [7] Xu H X, Du B. The Impact of Typhoon Danas (2013) on the Torrential Rainfall Associated with Typhoon Fitow(2013) in East China [J]. Advances in Meteorology, 2015, 1-11.
- [8] 赖珍权,翟丽萍,古文保.1415 号台风“海鸥”的卫星云图及雷达资料分析[J].气象研究与应用,2017,38(2):10-13.
- [9] 徐燚,钱浩,罗玲,余晖.基于 ECMWF 模式预报的台风降水地形订正方法[J].气象学报,2019,77(4):674-685.
- [10] Smith R B. The influence of Mountains on the Atmosphere [J]. Advances in Geophysics, 1979, 21: 87-230.
- [11] Yu C K, Cheng L W. Distribution and Mechanisms of Orographic Precipitation Associated with Typhoon Morakot (2009)[J]. Journal of the Atmospheric Sciences, 2013, 70(9): 2894-2915.
- [12] 杨仁勇,闵锦忠,冯文.海南岛地形对南海西行台风降水影响的数值试验[J].热带气象报,2013,29(3):474-480.

## Bias analysis and topographic correction of Guangxi extreme rainstorm forecast of Typhoon Kalmaegi

Xiao zhixiang<sup>1</sup>, Li jinling<sup>2</sup>, Luo xiaoli<sup>3</sup>

(1. Guangxi Institute of Meteorological Sciences, Nanning 530022, China;

2. Hechi Meteorological Bureau, Hechi Guangxi 547099; 3. Guangxi Climate Center, Nanning 530022, China)

**Abstract:** Based on the precipitation data of ground automatic station, reanalysis data of ERA5, precipitation falling area of Guangxi Meteorological Observatory and ECMWF model prediction data, the rainstorm prediction deviation of Typhoon Kalmaegi in Guangxi was analyzed, and the topographic precipitation correction was carried out. The results show that the prediction of heavy precipitation area is accurate, but the precipitation above downpour is obviously underestimated, downpour and torrential rain are seriously underreported. After the topographic correction of precipitation, the TS (BS) score of precipitation above downpour is greatly increased from 0.19(0.27) to 0.35 (0.53), and the precipitation score of rainstorm and below has no obvious change, but the topographic precipitation correction method still has no obvious correction skills for torrential rain. The southerly wind, northeast wind and easterly wind will produce topographic precipitation under the complex terrain of Guangxi. It should be considered in the actual operational prediction, which will help to improve the prediction effect of the start time of heavy precipitation.

**Key words:** Kalmaegi; typhoon precipitation; deviation; topographic correction; wind direction