

余贞寿,冀春晓,董美莹,等,2017. 浙江时间多尺度台风暴雨增幅特征的统计研究[J]. 气象,43(12):1496-1506.

浙江时间多尺度台风暴雨增幅特征的统计研究^{*}

余贞寿^{1,2} 冀春晓¹ 董美莹¹ 邱金晶¹

1 浙江省气象科学研究所,杭州 310008

2 中国气象科学研究院灾害天气国家重点实验室,北京 100081

提 要: 本文提出基于欧拉坐标方法的多时间尺度热带气旋(TC)暴雨增幅及极端暴雨增幅的概念来研究沿海地区 TC 暴雨增幅,从浙江省内 67 个国家级台站的整点时刻逐小时降水资料提取 1973—2015 年影响浙江的 135 个 TC 个例的逐 1、3、6、12、24 h(1~24 h)降水增量样本,结合 TC 中心位置和强度信息,统计得到:浙江 1~24 h 时间分辨率下出现 TC 极端暴雨增幅阈值分别为 29.1、51.9、88.3、103.9 和 123.9 mm;不同时间分辨率下浙江 TC 暴雨增幅频次具有比较一致的月际变化、年际变化、长期线性趋势特征,不同长时的 TC 暴雨增幅的日变化不尽相同;浙江发生 TC 暴雨增幅和极端暴雨增幅主要出现频率最高的地区是温州南部和台州南部。影响浙江台风 9 类路径都有可能发生 TC 暴雨增幅,除了舟山以北登陆类外,其他路径也均有可能发生 TC 极端暴雨增幅,TC 暴雨增幅和 TC 极端暴雨增幅均以椒江到福清登陆类路径占比最多;TC 中心位于浙江温台交界附近和福建东北部沿海时浙江最易发生 TC 暴雨增幅和极端暴雨增幅;不同分辨率下 TC 暴雨增幅和 TC 极端暴雨增幅发生频率最高的离 TC 中心距离是不同的,但 TC 暴雨增幅极大值均出现在距离台风中心 600~700 km 范围内;不同时间分辨率的 TC 暴雨增幅和 TC 极端暴雨增幅出现频率最高的是 TC 的东北象限,其次是西北象限,增幅极大值均出现在东北象限。另外,TC 暴雨增幅和极端暴雨增幅均与 TC 强度有一定关系,从各时长平均来看,最易发生 TC 暴雨增幅的是强热带风暴级,最易发生 TC 极端暴雨增幅的是热带低压级。

关键词: 热带气旋,多时间尺度,暴雨增幅,极端暴雨增幅,沿海地区

中图分类号: P456

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2017.12.005

Statistical Analysis on Multi-Timescale Heavy Rainfall Reinforcement Associated with Tropical Cyclone in Zhejiang Province

YU Zhenshou^{1,2} JI Chunxiao¹ DONG Meiyang¹ QIU Jinjing¹

1 Zhejiang Institute of Meteorological Sciences, Hangzhou 310008

2 State Key Laboratory of Severe Weather, Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081

Abstract: In this study, a new concept of multi-timescale heavy rainfall reinforcement (HRR) and extreme heavy rainfall reinforcement (EHRR) associated with tropical cyclones (TCs) based on Euler coordinate method are defined to study coastal areas. The 1 h, 3 h, 6 h, 12 h, and 24 h accumulated rainfall increment data of 135 TCs which influenced Zhejiang Province from 1973 to 2015 are extracted from hourly precipitation data of 67 national stations in Zhejiang Province, and the TC center location and intensity information of the above-mentioned precipitation samples are also extracted from the China Meteorological Administration tropical cyclone best track datasets. Statistical results show that the thresholds of EHRR are 29.1, 51.9, 88.3, 103.9 and 123.9 mm over 1 h, 3 h, 6 h, 12 h, and 24 h, respectively. The frequencies of HRR under different temporal resolutions have similar seasonal variation, interannual variation and

^{*} 灾害天气国家重点实验室开放课题(2014LASW-B06)、国家自然科学基金项目(41375056)、中国气象局省级气象研究所科技创新发展项目(台风强降水精细化预报和灾害风险评估)和浙江省气象科技计划项目(2013ZD01)共同资助

2016 年 12 月 28 日收稿; 2017 年 7 月 20 日收修定稿

第一作者:余贞寿,主要从事数值预报技术应用与台风研究. Email: yuzhenshou@163.com

long-term linear trend, but the diurnal variation is different. The HRR and EHRR occur mainly in the eastern coastal area of Zhejiang in which the southern part of Wenzhou and the southern part of Taizhou are the highest frequency areas. HRR is likely to occur with 9 kinds of typhoon tracks which influenced Zhejiang. Except for the tracks by which TCs landed north of Zhoushan, EHRR could happen with the other tracks. The kind of track by which TC landed between Jiaojiang and Fuqing occupies the most percent of frequency of HRR and EHRR. Most of the TC centers concentrate in the border of Wenzhou and Taizhou in Zhejiang and northeast coast of Fujian when HRR and EHRR happened. The high frequency of HRR and EHRR at different timescales has different distance away from the TC center, but the maximum value of TC HRR appears in the range of typhoon center 600—700 km. The highest frequency of HRR and EHRR occurs in the northeast quadrant under different temporal resolutions, followed by the northwest quadrant, and the most significant reinforcements occur in the northeast quadrant. In addition, HRR and EHRR are related to the intensity of TC. On average, the most likely occurrence of RRTC is the strong tropical storm level, and ERRTC is the tropical depression level.

Key words: tropical cyclone (TC), multi-timescale, heavy rainfall reinforcement, extreme heavy rainfall reinforcement, coastal areas

引 言

台风是自然界中最强烈的造雨系统,我国排名前六位的破历史纪录的特大暴雨都是由台风造成的(Chen et al, 2010)。台风强降水能够引发城市内涝、山洪、泥石流和山体滑坡等,对人民群众的生命财产安全造成极大威胁,给国家的经济建设带来严重影响,因此,人们对于台风暴雨的关注一直以来有增无减。统计表明,多数热带气旋(TC)登陆后,因陆面摩擦耗能及水汽供应终止,TC强度会逐渐减弱,与其相伴的降水也趋于减弱(李英等, 2004),但在一定条件下,有些TC的降水强度在衰减之后会突然加强(Chen, 2006),这种降水减弱后再度加强的现象就称为登陆TC降水增幅(Dong et al, 2010),但这种现象不仅仅只发生在登陆TC中,非登陆TC也会出现,因此,可以把TC引发降水出现后时间段内比前时间段更强的降水统称为“台风降水增幅”,当降水量级达到暴雨标准时,称之为“台风暴雨增幅”,这种强暴雨常常是大面积洪涝、山洪、泥石流等重大灾害的直接诱因。当前,对于台风暴雨增幅的科学认知有限,对于这一突变现象的预报难度很大,台风暴雨增幅的突发性和高强度往往是造成预报失败和导致国民生命和财产重大损失的重要原因。因此,台风暴雨增幅研究是气象防灾减灾工作的一项重要内容,多年来该领域研究受到气象学

者高度关注,早在 20 世纪 90 年代,85-906-07 课题组(1996)首次提出了“台风暴雨增幅”概念,并分析了热带气旋暴雨突然增幅气候特征后,指出有 21% 的 TC 发生降水强度和范围增幅。陈久康等(1996)数值研究得到,热带气旋环流与西风槽结合可造成热带气旋外围暴雨加强,增强西风槽的强度可导致暴雨增强。唐章敏和胡洛林(1996)分析了华东北部 10 次增幅和 7 次非增幅过程的暴雨和前期条件的异同点的基础上,提出登陆台风北移华东北部发生暴雨增幅的概念模型。钮学新等(2005)对台风森拉克(2002 年)数值模拟试验研究指出冷空气入侵台风外围可以使得其外围及倒槽暴雨明显增幅,入侵台风中心后,中心附近非绝热加热迅速减小,中心附近降水减弱,但其外围及倒槽暴雨仍会明显增幅。热带风暴 Bilis(2006 年)在登陆和深入内陆过程都发生了明显的降水增幅,诱发浙江、福建、江西、湖南、广东等地严重洪涝、滑坡和泥石流,造成 843 人死亡和 348.29 亿人民币的经济损失(Gao et al, 2009);有关台风暴雨增幅研究主题也引起广泛关注,近年来,从西南季风(卢山等, 2008; Gao et al, 2009; 卢珊等, 2012)、地形(王晓芳和胡伯威, 2007; 叶成志和李昀英, 2011)、水汽来源(戴竹君等, 2014)、云微物理(任晨平和崔晓鹏, 2014)等方面对“碧利斯”暴雨增幅进行研究。Zhou et al(2013)研究了“莫兰蒂”北上减弱后杭州突发特大暴雨的成因是弱冷空气侵入 TC 残涡环流激发 MCS 造成。沈

杭锋等(2014)分析台风海葵(2012年)引发浙西山区大暴雨的成因时指出浙江西北部山区地形对于暴雨有明显的增幅作用。刘继晨等(2016)对台风海葵(2012年)数值模拟研究发现台风登陆后的水成物的分布与转化过程引起降水效率的提高,是台风登陆后降水维持和增幅的直接原因。Dong et al (2010)借鉴拉格朗日移动坐标的研究思路,通过追踪 TC 强降水区强度变化,提出登陆 TC 降水增幅的概念标准,并利用 57 年的逐日 TC 降水资料,统计登陆 TC 降水增幅的气候特征,并且指出,21 世纪以来,降水增幅强度呈增加趋势。由于 TC 暴雨增幅发生还具有降水累积叠加效应,有可能成为“压垮骆驼的最后一根稻草”,若不能提前预报预警,甚至有可能会酿成远比 TC 登陆时造成灾害严重得多,所以,自 TC 暴雨增幅概念(85-906-07 课题组,1996)提出以来,该研究主题引起广泛关注,也取得丰硕成果,但目前研究仍存在许多局限性(董美莹等,2009),其中一个重要方面是:现有的 24 h 甚至更长时间尺度的热带气旋降水突然增幅概念不再能满足当今业务的对更短时间尺度的降水突然增幅概念需求,此外,由于海上缺乏资料导致无法利用传统的暴雨增幅概念来判断沿海省份 TC 暴雨增幅特征,最近台风菲特(201323)虽未在浙江省登陆,但却给浙江带来历史罕见的特大暴雨造成浙江直接经济损失达 276 亿,死亡人数 7 人(周福等,2014);许映龙等(2015)对台风菲特的特点和预报难点及强风雨成因进行了综合分析;谢慧敏等(2016)分析了双台风作用对“菲特”极端暴雨形成的作用。Yu et al (2015)研究表明“菲特”登陆减弱后在长三角地区发生了明显的暴雨增幅是这次直接经济损失破历史记录的重要原因之一,开展沿海地区台风暴雨增幅特征及预报技术研究,对提高此类暴雨现象的预报能力和防灾减灾工作具有重要的意义。由于缺乏海上 TC 降水资料,是无法考虑暴雨落区随着台风移动发生变化的,本文拟采用暴雨落区是不随台风移动发生变化的,这样既可以针对站点,也可以针对某个关注的区域从时间前后变化来定义暴雨增幅,称为欧拉式暴雨增幅定义,把之前考虑暴雨落区是随 TC 移动而变化的,称为拉格朗日式暴雨增幅定义(如 Dong et al,2010)。相比而言,拉格朗日式暴雨增幅定义对上下游都要有 TC 降水资料才能判断是

否符合暴雨增幅标准,也导致目前研究中大多研究以内陆降水增幅为主,欧拉式暴雨增幅定义更合适缺乏 TC 移动上游无观测资料或者固定台站预报,实际工作需要含有更短时间尺度的降水突然增幅的多尺度概念及其影响机制。因此,我们从实际的业务需求出发,以受台风严重影响的沿海省份浙江为例开展台风多时间尺度暴雨增幅特征研究。

1 资料和处理方法

本文采用的台风路径资料来自中国气象局上海台风所整编的 CMA 热带气旋最佳路径数据集(Ying et al,2014),为了方便后面统计 TC 位置,采用线性内插方法对热带气旋路径资料进行插值处理成每小时一次的路径资料。

降水资料来自中国气象局国家气象信息中心提供的 1973—2015 年浙江及周边(江苏、上海、安徽、江西、福建)的 293 个台站逐日降水资料和浙江省境内 67 个国家级台站的整点时刻逐小时降水资料,选择的站点分布如图 1 所示。降水资料处理方法如下:

首先定义影响浙江 TC 为:受 TC 影响,浙江全省 67 个国家级台站中有一个及以上的日降水量(08—08 时) ≥ 50 mm,或有一个及以上台站的过程降水量 ≥ 100 mm。

其次,提取影响浙江台风降水资料方法如下:先从中国气象局上海台风所整编的 CMA 热带气旋最佳路径数据集获取西北太平洋区域每个台风的起止时间,采用了中国气象局国家气象信息中心提供的 1973—2015 年浙江及周边的 293 个台站逐日降水资料,采用 Ren et al(2007)提出的 TC 降水天气图客观识别法(OSAT)来识别出 1973—2015 年浙江区域的 TC 的过程降水(TC_TR)和日降水(TC_DR),根据 TC_TR 和 TC_DR 确定影响浙江的 135 个 TC 及其大致时间,再从 1973—2015 年浙江省境内 67 个国家级台站的整点时刻逐小时降水资料集滑动匹配 TC_TR 来确定影响浙江台风的个例具体降水时间。

最后采用基于时间滑动累积方法(余贞寿,2014)获得了各个站点 1973—2015 年间 135 个影响浙江 TC 的逐 1 h 至 24 h 时长的降水资料。

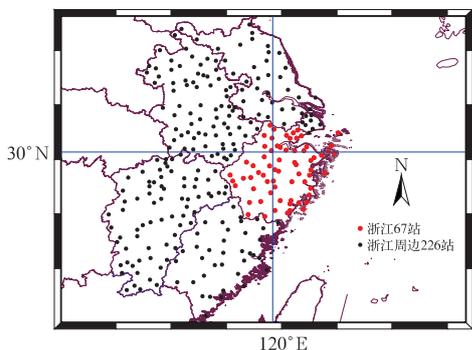


图 1 浙江及其周边 293 个降水台站分布
Fig. 1 Spatial distribution of the selected 293 rain gauge stations in Zhejiang and the adjacent areas

2 TC 暴雨增幅及极端暴雨增幅定义

欧拉式 TC 暴雨增幅定义,借鉴 85-906-07 课题组(1996)和蔡义勇等(2015)对 TC 降水的处理方法,把影响浙江 TC 的各时长降水处理成的各时长的降水增量序列,如果某站某时刻的值大于上一时刻的值,则称该站该时刻发生了 TC 降水增幅,如果还满足相应的时间尺度的暴雨标准,则称该站该时刻发生了 TC 暴雨增幅(HRR);如果某时刻的值大于给定的阈值(即当降水增量超过某个阈值),则称为该站该时刻发生了 TC 极端暴雨增幅(EHRR)。

本文分别利用 1、3、6、12 和 24 h 降水资料计算出 1973—2015 年每个影响浙江的热带气旋降水期间各时刻的降水增量 $\Delta R_t = R_t - R_{t-1} (t = 2, 3, \dots)$, 式中 R_t 为 t 时刻受 TC 影响浙江省境内国家级台站降水,TC 暴雨增幅样本取 ΔR_t 大于对应时间尺度的暴雨标准值,本文中各时间尺度暴雨标准参照《中华人民共和国国家标准-降水量等级》(中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准

化管理委员会,2006;2012),1、3、6、12 和 24 h 的暴雨标准分别取 15、20、25、30 和 50 mm。目前国际上通常采用的是取某个百分位值作为极端降水阈值,超过这个阈值的值被认为是极值,该事件被认为是极端事件,Zhai et al. (2005)采用超过气候标准期中日降水量序列的第 95 个百分位数的天数,作为台站极端强降水气候事件的度量。蔡义勇等(2015)研究发现当 TC 暴雨增幅超过 95%的暴雨增幅样本的值以上暴雨增幅个例均造成严重台风灾害,因此,本文极端暴雨增幅阈值取 TC 暴雨增幅样本序列的第 95 个百分位数的降水增幅值,超过阈值的样本称为极端暴雨增幅。

3 结果分析

3.1 TC 极端暴雨增幅阈值确定

本文选取了 1973—2015 年这 43 年间影响浙江的 135 个热带气旋个例,计算得到发生 1、3、6、12 和 24 h 暴雨增幅的 TC 个例数分别为 86、118、108、104 和 48 个,年均 2、2.74、2.51、2.42 和 1.12 个,得到暴雨增幅样本数分别为 592、1075、623、444 和 77 个。由表 1 可见,1、3、6、12 和 24 h 时间分辨率下 TC 出现极端暴雨增幅阈值分别为 29.1、51.9、88.3、103.9 和 123.9 mm,阈值以上样本数分别为 31、54、33、23 和 4 个。1、3、6、12 和 24 h 时间分辨率下,满足极端暴雨增幅条件的热带气旋个数分别为 18、28、19、13 和 3 个,年均 0.42、0.65、0.44、0.3 和 0.07 个,其中出现极端暴雨增幅站次数最多的分别为 201323、201323、201323、200505 和 199909 号 TC,1、3、6 和 24 h 时间分辨率下,最大强度的暴雨增幅分别为 85.8、228.8、314.9 和 316.2 mm,都是 199909 号 TC“温蒂”引发,而 12 h 暴雨增幅最大强

表 1 不同时间分辨率下 TC 暴雨增幅和 TC 极端暴雨增幅概况
Table 1 Profiles of HRR and EHRR associated with TCs at different temporal resolutions

项目	时间分辨率/h				
	1	3	6	12	24
EHRR 阈值/mm	29.1	51.9	88.3	103.9	123.9
HRR 次数	592	1075	623	444	77
出现 HRR 的 TC 个数	86	118	108	104	48
出现 HRR 最多的 TC 编号	201323	201323	201323	200505	199909
出现 EHRR 的 TC 个数	18	28	19	13	3
出现 EHRR 最多的 TC 编号	201323	201323	201323	200505	199909
出现最大 HRR/mm(相应的 TC 编号)	85.8(199909)	228.8(199909)	314.9(199909)	203.7(200505)	316.2(199909)

度 203.7 mm,是由 200505 号 TC“海棠”引发的。

3.2 TC 暴雨增幅年际、月际、日变化特征

从图 2a 可见,1973—2015 年间不同时间分辨率下浙江 TC 暴雨增幅频次具有一致的年际变化特征,年际变化幅度大小依次为 3、6、12、1 和 24 h,不同时间分辨率下浙江 TC 暴雨增幅频次都与影响浙江的 TC 个数之间有显著相关性,相关系数均在 0.9 以上(通过 0.01 的显著性检验),从线性趋势看,虽然影响浙江的 TC 个数是略有下降趋势,但不同时间分辨率下浙江 TC 暴雨增幅均有增加趋势。以 3 h 的浙江 TC 暴雨增幅为例用小波分析方法分析其变化周期特征,从图 2b 可见,1975 年前后、1985—1995 年和 2005—2015 年这三个时段 2~3 a 周期的年际变化特征明显,1995 年以来 6~8 a 的年均变化也较明显,另外,3 h 的浙江 TC 暴雨增幅还具有 16 a 周期的年代际变化特征。由图 2c 可见,浙江 1 年中的 5—11 月都有 TC 暴雨增幅发生的可能性,从增幅发生频率看,均呈单峰型分布,3、6、12 和 1 h

的峰值出现在 8 月,而 24 h 的峰值出现在 9 月。不同时间分辨率下浙江 TC 暴雨增幅发生频率的日变化(图 2d)可见,1、3 和 6 h 分辨率的 TC 暴雨增幅主要发生在下午到前半夜,而且呈双峰值分布,如 3 和 6 h 的峰值出现在 15—16 时和 21—22 时,12 h 的 TC 暴雨增幅除了下午到前半夜易发生外,03—04 时是另一个易发生时段;24 h 的 TC 暴雨增幅与前面 1、3、6 和 12 h 的均不同,它最易发生的时段为凌晨到上午。

3.3 TC 暴雨增幅的空间分布特征

图 3 给出 1973—2015 年影响浙江的 135 个热带气旋在浙江发生 TC 暴雨增幅和极端暴雨增幅频次的空间分布,由图 3a 可见,发生 1 h 的 TC 暴雨增幅频率较高的主要位于浙江东部沿海地区,其中温州的苍南、平阳和文成、泰顺的东部,台州的温岭、玉环,台州的临海、三门为 1 h 的 TC 暴雨增幅频率最高的地区;而发生 1 h 的 TC 极端暴雨增幅地区主要分布在 1 h 的 TC 暴雨增幅频率较高的地区,但

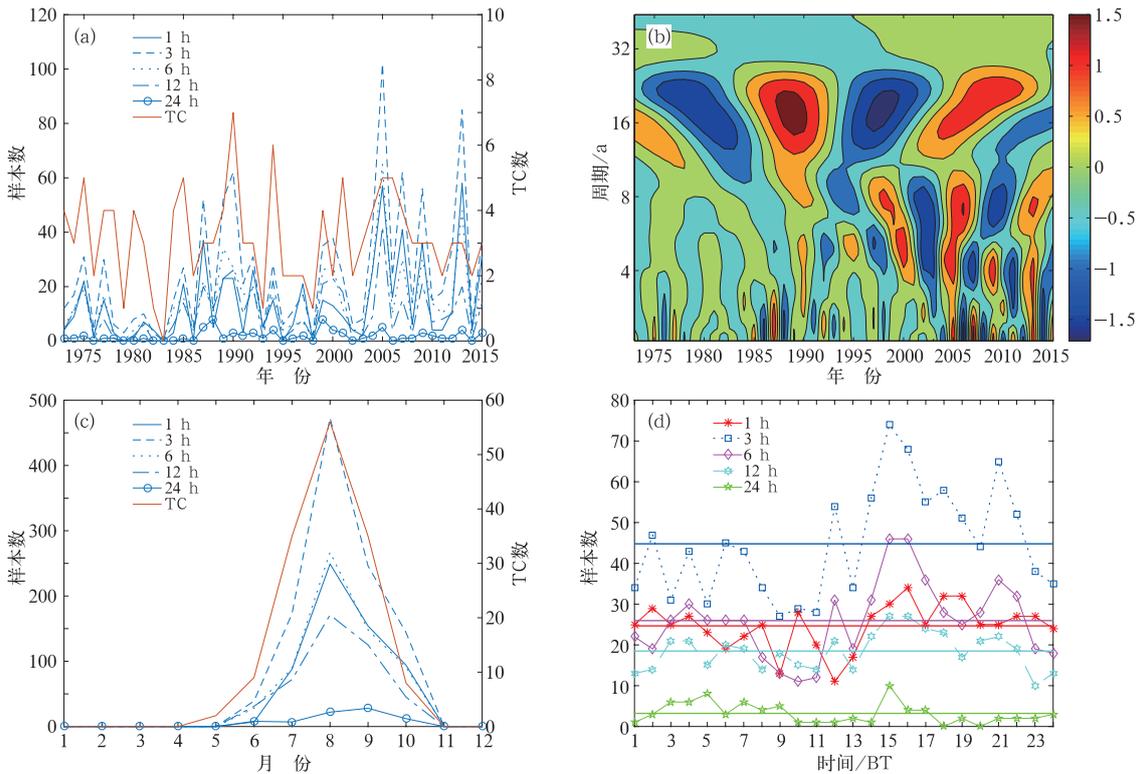


图 2 不同时间分辨率下 TC 暴雨增幅发生频率的年际变化(a)、
年际变化的小波分析(b)、月变化(c)和日变化(d)

Fig. 2 The interannual variation (a), wavelet analysis of interannual variation (b),
seasonal variation (c) and diurnal variation (d) of the frequency of HRR
occurrence under different temporal resolutions

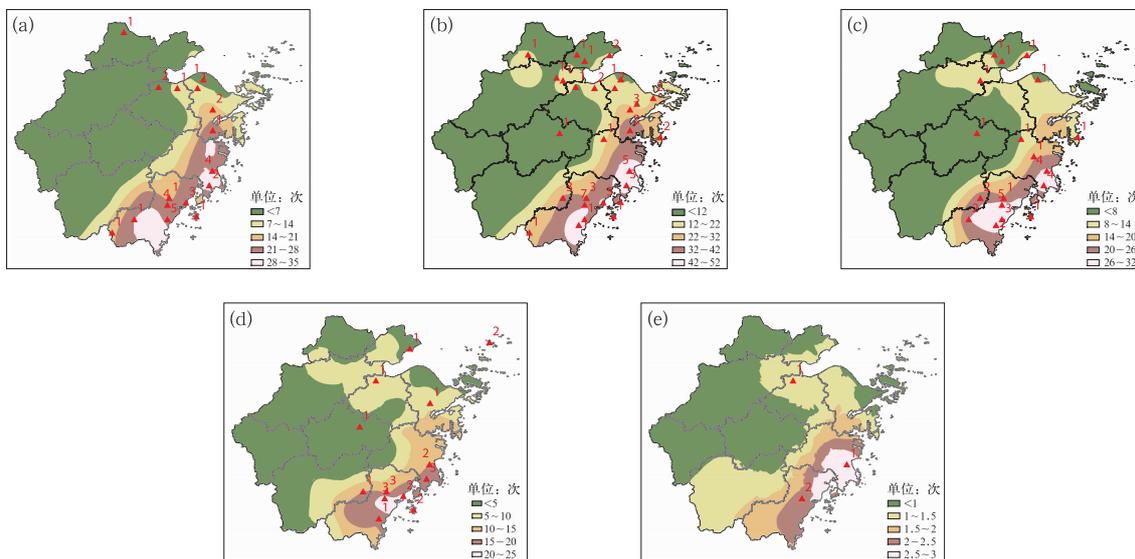


图 3 不同时间分辨率下 TC 暴雨增幅(极端暴雨增幅,红色三角形)发生频率空间分布

(a) 1 h, (b) 3 h, (c) 6 h, (d) 12 h, (e) 24 h

Fig. 3 The spatial distribution of the frequency of HRR (EHRR, red triangle) under different temporal resolutions

(a) 1 h, (b) 3 h, (c) 6 h, (d) 12 h, (e) 24 h

也并不是完全一致,比如 1 h 的 TC 极端暴雨增幅频率最高的在瓯江南岸的温州市区及瑞安,但这地区并不是 1 h 的 TC 暴雨增幅频率最高的地区。3 h 的 TC 暴雨增幅主要发生在浙江东部沿海地区、钱塘江口沿岸地区、浙江西北部天目山区,其空间分布特征类似于 201323 号菲特过程降水量强降水中心分布特征,增幅频率最高的地区与 1 h 的类似范围偏小,3 h 的 TC 极端暴雨增幅主要发生地区与 3 h 的 TC 暴雨增幅比较一致(图 3b)。6 h 的 TC 暴雨增幅(图 3c)也主要分布在浙江东部沿海地区及钱塘江口两岸地区,出现频率高值中心位于瓯江南岸的温州市区、瑞安、平阳及文成东部(较 1 和 3 h 的略有北移)、台州的温岭、玉环地区,6 h 的 TC 极端暴雨增幅区与 6 h 的 TC 暴雨增幅区类似,但是钱塘江口南岸的 6 h 的 TC 极端暴雨增幅频率比 3 h 的明显减少;12 h 的 TC 暴雨增幅和 12 h 的 TC 极端暴雨增幅分布(图 3d)类似于 6 h 的,频率略低于 6 h 的。24 h TC 暴雨增幅分布(图 3e)与 12 h 类似,但范围进一步减小,出现频率最高的位于温州乐清、台州的温岭、玉环等地区,24 h TC 极端暴雨增幅发生 4 站次,分别为温州站 2 次,台州洪家站 1 次,绍兴站 1 次。

3.4 发生 TC 暴雨增幅(极端暴雨增幅)的台风路径特征

在 1973—2015 年间共有 135 个 TC 影响浙江,

其中发生 TC 暴雨增幅的有 129 个(图略),占比达 95.6%;从浙江多时间尺度 TC 暴雨增幅发生时 TC 中心位置分布(图略)可见,从台湾以东洋面到中国东海、南海北部及中国大陆东南部的 TC 都有可能发生暴雨增幅,甚至是从南海登陆到越南的 TC 也可能在浙江发生暴雨增幅,发生增幅时 TC 中心空间分布将在下节讨论。余贞寿(2014)把影响浙江台风按登陆情况划分为 9 类路径,表 2 给出发生暴雨增幅的 TC 在这 9 类路径的占比情况,所有时长的 TC 暴雨增幅占比最多路径均为椒江到福清登陆类;从同一时长 TC 暴雨增幅看,发生 1、3、6 h TC 和 24 h 暴雨增幅的 TC 移动路径占比前三位的分别是:椒江到福清登陆类,福清到厦门登陆西行类和福清到厦门登陆北上类,而 12 h TC 暴雨增幅的 TC 移动路径占比前 3 位的分别是:椒江到福清登陆类,福清到厦门登陆西行类和厦门到湛江登陆北上类;舟山到椒江登陆类随时长增加占比反而减小,厦门到湛江登陆北上类随时长增加占比会增大。TC 极端暴雨增幅与 TC 暴雨增幅路径分布上有很大不同,舟山以北登陆类没有出现 TC 极端暴雨增幅现象,除了 3 h 外,厦门到湛江登陆西行类也很少出现 TC 极端暴雨增幅现象;与 TC 暴雨增幅相比,福清到厦门登陆西行类会比福清到厦门登陆北上类发生 1、3 和 6 h TC 极端暴雨增幅概率明显增多;对于 24 h TC 极端暴雨增幅来说,只有厦门到湛江登陆北

表 2 不同时间分辨率下 TC 暴雨增幅在各类路径中分布

Table 2 The percentage of tracks of TC HRR at different temporal resolution

路径类别	不同时长 HRR 的路径占比/%				
	1 h	3 h	6 h	12 h	24 h
舟山以北登陆(A)	1.2	0.8	0.9	1.0	0.0
舟山到椒江登陆(B)	7.0	6.8	5.6	3.8	2.1
椒江到福清登陆(C)	36.0	32.2	32.4	30.8	29.2
福清到厦门登陆北上(D)	14.0	13.6	13.9	13.5	16.7
福清到厦门登陆西行(E)	17.4	16.1	16.7	17.3	16.7
厦门到湛江登陆北上(F)	9.3	12.7	13.0	14.4	14.6
厦门到湛江登陆西行(G)	4.7	5.1	5.6	6.7	6.3
近海转向路径(H)	8.1	11.0	10.2	10.6	12.5
南海西行类(S)	2.3	1.7	1.9	1.9	2.1

表 3 不同时间分辨率下 TC 极端暴雨增幅在各类路径中分布

Table 3 The percentage of tracks of TC EHRR at different temporal resolution

路径类别	不同时长 EHRR 的路径占比/%				
	1 h	3 h	6 h	12 h	24 h
舟山以北登陆(A)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
舟山到椒江登陆(B)	5.6	7.1	5.3	7.7	0.0
椒江到福清登陆(C)	38.9	39.3	36.8	46.2	33.3
福清到厦门登陆北上(D)	5.6	10.7	15.8	7.7	0.0
福清到厦门登陆西行(E)	27.8	21.4	21.1	0.0	0.0
厦门到湛江登陆北上(F)	11.1	7.1	10.5	15.4	66.7
厦门到湛江登陆西行(G)	0.0	3.6	0.0	0.0	0.0
近海转向路径(H)	5.6	7.1	5.3	7.7	0.0
南海西行类(S)	5.6	3.6	5.3	15.4	0.0

上类和椒江到福清登陆类发生过 TC 极端暴雨增幅。

3.5 发生 TC 暴雨增幅(极端暴雨增幅)时台风中心位置的空间分布特征

图 4 给出不同时间分辨率下在浙江发生 TC 暴雨增幅和极端暴雨增幅时 TC 中心位置的空间分布特征及发生暴雨增幅站次最多的前三位的 TC 路径,由图 4a 可见,发生 1 h 的 TC 暴雨增幅时 TC 中心主要位于浙江和福建沿海以及近海地区,有 3 个大值中心,分别位于浙江温台交界附近、浙闽交界沿海附近和福建闽江口附近,发生暴雨增幅站次最多的是 201323 号 TC“菲特”,53 站次,其次是 200505 号 TC“海棠”,27 站次,紧随其后的是 198712 号 TC“杰拉德”,25 站次;发生 3、6、12 h 的 TC 暴雨增幅时 TC 中心分布比较类似(图 4b~4d),大值中心由 1 h 的 3 个减为 2 个,主要位于浙江温台交界附近和福建东北部沿海;但是发生暴雨增幅站次最多的前三位的 TC 个例是不一样的,如发生 3 h 暴雨增幅(图 4b)站次最多的前三位分别是 201323、200908 和 200505,而发生 6 h 暴雨增幅(图 4c)站次

最多的前三位分别是 201323、200505 和 200010,对于 12 h 暴雨增幅(图 4d)而言,排在前三位的分别是 200505、201323 和 200010;发生 24 h 的 TC 暴雨增幅时 TC 中心分布比较散(图 4e),有 1 个大值中心位于台湾海峡北部,暴雨增幅站次最多的前三位分别是 199909、198712 和 201323。从 1、3、6 和 12 h 分辨率下在浙江发生 TC 极端暴雨增幅时 TC 中心位置分布与发生 TC 暴雨增幅时类似,但 24 h TC 极端暴雨增幅时发生时 TC 中心位置发生在福建东北部、中部及广东东部沿海地区。

3.6 TC 暴雨增幅与 TC 相对位置关系

图 5 给出了不同时间分辨率下 TC 暴雨增幅、极端暴雨增幅和增幅极大值与台风中心距离和相对方位的关系,把暴雨落区离台风中心的距离在 1000 km 以内的以 100 km 为间隔划分,1000 km 以外的同作为一类,由图 5a 可见,1 h TC 暴雨增幅和 TC 极端暴雨增幅主要发生在距离台风中心较近处,发生 500 km 内次数占总次数分别达到 80.9% 和 73.3%,1 h TC 暴雨增幅出现次数最多在距离 TC 中心 0~100 km 范围内,其次是在距离 TC 中心

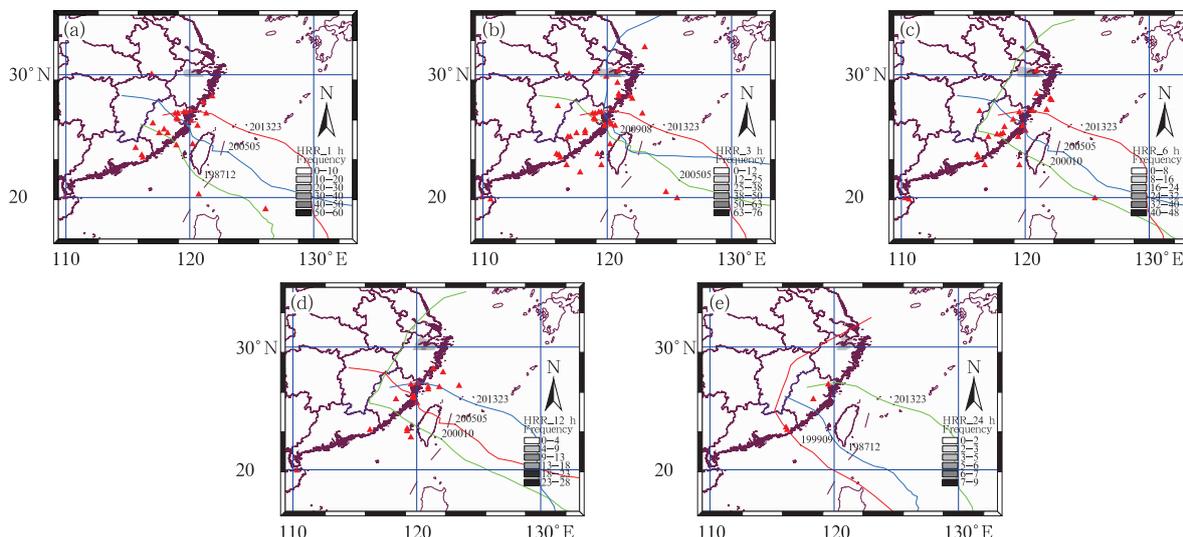


图 4 不同时间分辨率下 TC 暴雨增幅(极端暴雨增幅,红色“▲”号)发生时台风中心位置的空间分布及发生暴雨增幅站次最多的前三位的 TC 路径
 (a) 1 h, (b) 3 h, (c) 6 h, (d) 12 h, (e) 24 h
 (路径颜色代表:红色,第一位;蓝色,第二位;绿色,第三位)

Fig. 4 Spatial distribution of TC centers when HRR (EHRR, red triangle) occurred at different temporal resolutions and induced the highest HRR occurrence frequency in the top three of the TC path
 (a) 1 h, (b) 3 h, (c) 6 h, (d) 12 h (e) 24 h
 (the path color, red: ranked first, blue: ranked second, green: ranked third)

200~300 km,之后随着距离增加而减少,但并不是线性下降,它最易发生在距离台风中心 300~400 km 范围内;1 h TC 暴雨增幅极大值达 85.8 mm,出现在距离台风中心在距离台风中心 600~700 km 范围内。从相对于台风方位(图 5f)看,4 个象限均有可能发生 1 h TC 暴雨增幅,出现频率最高的是东北象限,其次是西北象限,1 h TC 极端暴雨增幅只发生在东北象限和西北象限,极大增幅值出现在东北象限。从 3 和 6 h TC 暴雨增幅在各个距离范围分布(图 5b,5c)与 1 h TC 暴雨增幅类似,3 和 6 h TC 暴雨增幅极大值也出现在在距离台风中心在距离台风中心 600~700 km 范围内,分别为 228.8 和 314.9 mm;3 和 6 h TC 极端暴雨增幅在距离台风中心 100 km 内的频次最高,其次是在距离台风中心 200~300 km 范围内。对于 12 h TC 暴雨增幅(图 5d),在距离台风中心 200~300 km 内出现的频次超过在距离 TC 中心 0~100 km 范围内的,成为最易发生区域,12 h TC 暴雨增幅极大值 203.7 mm,也出现在此区域,而 12 h TC 极端暴雨增幅也是在距离台风中心 200~300 km 内的频次最高;对于 24 h TC 暴雨增幅(图 5e)在各个距离区间分布

完全不同于 1、3、6 和 12 h TC 暴雨增幅,其在各个区间上出现次数差异比较小,略占优势的有 0~100、400~500 和 600~700 km,24 h TC 极端暴雨增幅在 600~700 km 内出现频次最高,24 h TC 暴雨增幅极大值也出现在此区域,为 316.2 mm。由此可见,从 3~24 h TC 暴雨增幅和 TC 极端暴雨增幅在 TC 的各个象限分布(图 5g,5j)与 1 h TC 暴雨增幅和 TC 极端暴雨增幅情况类似,出现频率最高的是东北象限,其次是西北象限,极大增幅值均出现在东北象限。

3.7 TC 暴雨增幅与 TC 强度关系

为了分析 TC 暴雨增幅与 TC 强度关系,按国家标准定义的 TC 强度等级,统计了发生 1~24 h 不同时间分辨率下 TC 暴雨增幅和 TC 极端暴雨增幅在各个强度等级内频次数,计算了各个强度等级所占发生 TC 暴雨增幅和 TC 极端暴雨增幅比例,由图 6 可见,TC 各个强度等级上都有 TC 暴雨增幅发生的可能,1、3、12 和 24 h TC 暴雨增幅发生比例最高的为强热带风暴级,6 h TC 暴雨增幅发生比例最高的为热带低压级;TC 暴雨增幅发生在强台风

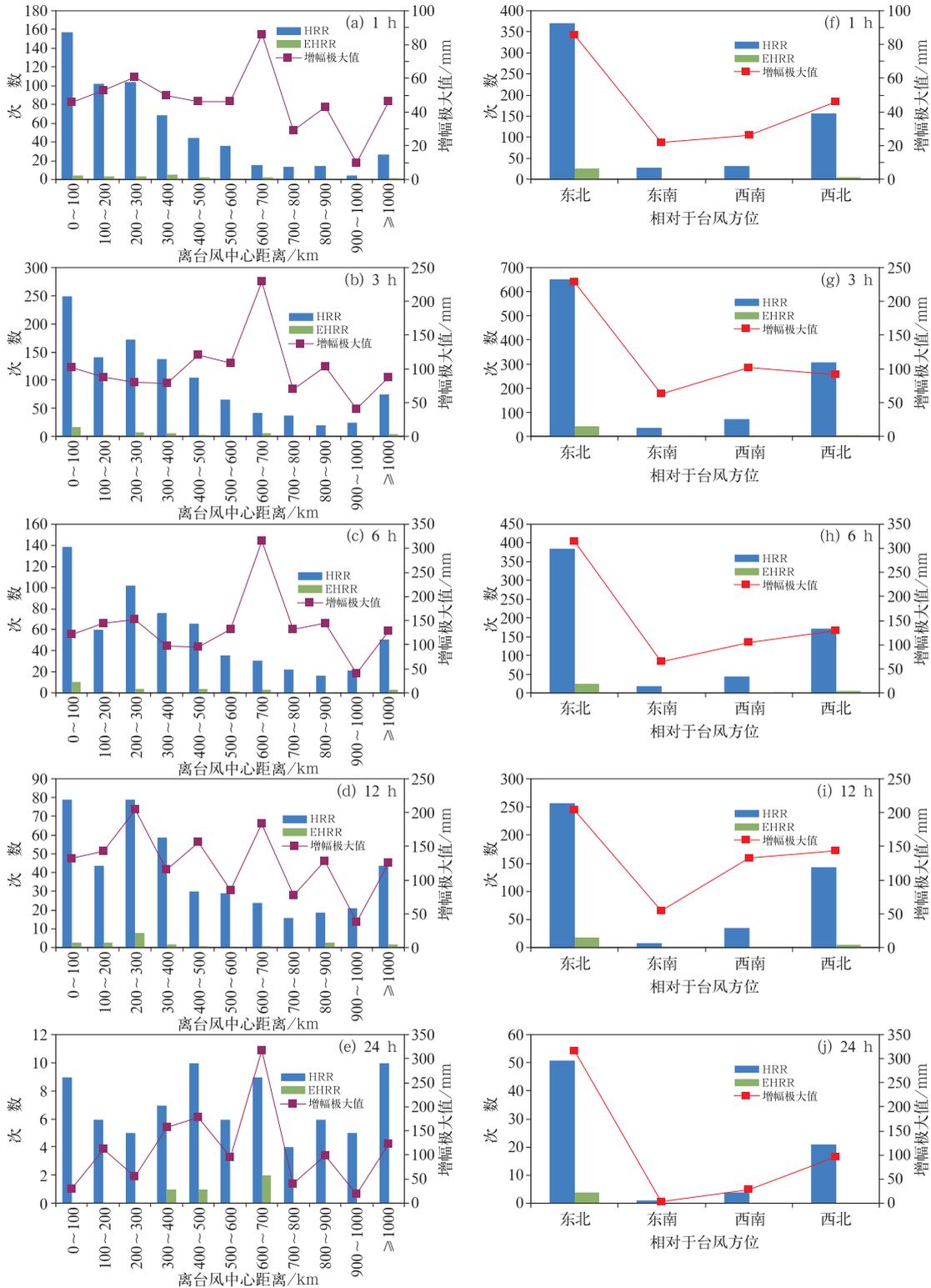


图 5 不同时间分辨率下 TC 暴雨增幅、极端暴雨增幅和增幅极大值与台风中心距离(a~e)和相对方位(f~j)的关系

(a, f) 1 h, (b, g) 3 h, (c, h) 6 h, (d, i) 12 h, (e, j) 24 h

Fig. 5 The relationship between the HRR, EHRR, the maximum value of HRR and the distance away from TC center (a~e) and they appeared in the direction of TC (f~j)

(a, f) 1 h, (b, g) 3 h, (c, h) 6 h, (d, i) 12 h, (e, j) 24 h

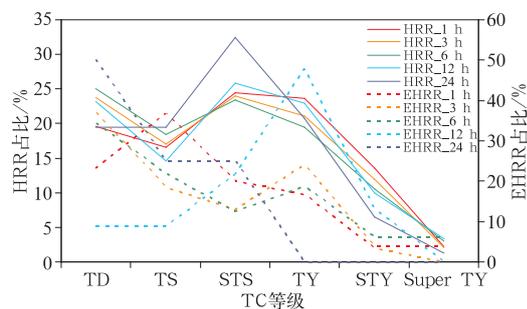


图 6 不同时间分辨率下 TC 暴雨增幅(实线)、TC 极端暴雨增幅(虚线)与 TC 强度的关系

(TD:热带低压;TS:热带风暴;STS:强热带风暴;
TY:台风;STY:强台风;super TY:超强台风)

Fig. 6 Correlation between TC HRR (solid line), EHRR (dash line) and TC intensity at different temporal resolution

(TD: tropical depression; TS: tropical storm;

STS: severe tropical storm; TY: typhoon;

STY: severe typhoon; super TY: super typhoon)

级及以上的比例迅速下降。3 和 6 h TC 极端暴雨增幅在各个 TC 强度等级上均有发生,1 和 12 h TC 极端暴雨增幅在超强台风级未有发生过,24 h 极端暴雨增幅在台风级及以上均未发生过,1 h TC 极端暴雨增幅发生比例最高的为热带风暴级,占比 36.7%,3、6 和 24 h TC 极端暴雨增幅发生比例最高的均为热带低压级,占比分别为:37%、34.4%和 50%,12 h TC 极端暴雨增幅发生比例最高的为台风级,占比 47.8%。

4 结论与讨论

本文针对过去热带气旋(TC)暴雨增幅概念和适用范围的不足以及历史资料局限性,提出基于欧拉坐标方法的多时间尺度 TC 暴雨增幅及极端暴雨增幅概念,通过对 1973—2015 年间影响浙江的 135 个热带气旋个例的 67 个台站逐小时降水资料和台风移动路径和强度资料统计分析,得到如下结果:

(1) 浙江 1、3、6、12、24 h 时间分辨率下出现 TC 极端暴雨增幅阈值分别为 29.1、51.9、88.3、103.9 和 123.9 mm。

(2) 不同时间分辨率下浙江 TC 暴雨增幅频次具有一致的年际变化特征,均有线性增加趋势,5—11 月都有 TC 暴雨增幅发生的可能性,1、3、6 和 12 h 以 8 月为峰值,24 h 以 9 月为峰值的呈单峰型

月际变化,不同时间分辨率下浙江 TC 暴雨增幅发生具有明显的日变化特征,但不同长时的 TC 暴雨增幅的日变化不尽相同。

(3) 浙江发生 TC 暴雨增幅和极端暴雨增幅主要出现在浙江东部沿海地区,其中温州南部和台州南部为出现频率最高的地区。

(4) 影响浙江台风 9 类路径都有可能发生 TC 暴雨增幅,除了舟山以北登陆类外,其他路径也均有可能发生 TC 极端暴雨增幅,TC 暴雨增幅和 TC 极端暴雨增幅均以椒江到福清登陆类路径占比最多。

(5) 不同时间分辨率下在浙江发生 TC 暴雨增幅和极端暴雨增幅时的 TC 中心位置主要分布在浙闽沿海及近海地区,浙江温台交界附近和福建东北部沿海,是浙江 TC 暴雨增幅及极端暴雨增幅最高发地区。

(6) 不同时间分辨率下 TC 暴雨增幅(极端暴雨增幅)频次与 TC 中心距离关系不尽相同,但各时间分辨率的 TC 暴雨增幅极大值均出现在距离台风中心 600~700 km 范围内。不同时间分辨率的 TC 暴雨增幅和 TC 极端暴雨增幅出现频率最高的是 TC 的东北象限,其次是西北象限,极大增幅值均出现在东北象限。

(7) TC 暴雨增幅和极端暴雨增幅均与 TC 强度有一定关系,从各时长平均来看,最易发生 TC 暴雨增幅的是强热带风暴级,最易发生 TC 极端暴雨增幅的是热带低压级。

本文针对过去由于海上缺乏资料导致无法沿用拉格朗日式暴雨增幅定义来判断沿海省份 TC 降水是否发生暴雨增幅,另一方面,实际台站预报服务中只关注本区域是否发生增幅,而且需要比日降水更短时间尺度的暴雨增幅判断标准,因此,这里提出基于欧拉坐标方法的多时间尺度 TC 暴雨增幅及极端暴雨增幅概念,以浙江省为例,探讨了这种定义下暴雨增幅特征,分析了是否会增幅、在什么时候增幅以及在哪里增幅问题,但为何会发生 TC 暴雨增幅及 TC 极端暴雨增幅还未有涉及,下一步将对沿海 TC 暴雨增幅影响机制开展研究。

参考文献

- 85-9 06-07 课题组,1996. 台风科学、业务试验和天气动力学理论的研究(第四分册)[M]. 北京:气象出版社:1-9.
蔡义勇,王宏,郑秋萍,2015. 福建省热带气旋暴雨突然增幅特征分析[J]. 暴雨灾害,34(1):34-40.
陈久康,丁治英,陶祖钰,等,1996. 中低纬度环流系统相互作用对登

- 陆台风暴雨突然增幅的影响[M]//85-906-07 课题组. 台风科学、业务试验和天气动力学理论的研究(第四分册)[M]. 北京:气象出版社:52-54.
- 戴竹君,王黎娟,管兆勇,等,2014. 登陆热带风暴“Bilis”维持和暴雨增幅与低纬水汽输送的关系及其数值试验[J]. 热带气象学报,30(1):45-54.
- 董美莹,陈联寿,郑沛群,等,2009. 登陆热带气旋暴雨突然增幅和特大暴雨之研究进展[J]. 热带气象学报,25(4):495-502.
- 李英,陈联寿,张胜军,2004. 登陆我国热带气旋的统计特征[J]. 热带气象学报,20(1):14-23.
- 刘继晨,钟玮,刘爽,等,2016. 登陆台风内降水效率变化对降水增幅影响的分析[J]. 热带气象学报,32(2):193-206.
- 卢山,吴乃庚,薛登智,2008. 南海季风槽影响下热带气旋暴雨增幅的研究[J]. 气象,34(6):53-59.
- 卢珊,王黎娟,管兆勇,等,2012. 低纬季风涌影响登陆台风“榴莲”(0103)和“碧利斯”(0604)暴雨增幅的比较[J]. 大气科学学报,35(2):175-185.
- 钮学新,杜惠良,刘建勇,2005. 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,63(1):57-68.
- 任晨平,崔晓鹏,2014. 碧利斯(0604)暴雨增幅的云微物理成因[J]. 中国科学:地球科学,44(9):2077-2088.
- 沈杭锋,高天赤,周春雨,等,2014. 台风海葵引发浙西山区大暴雨的成因[J]. 气象,40(6):733-743.
- 唐章敏,胡洛林,1996. 华东北部台风暴雨增幅前期条件的诊断及概念模式[J]. 南京气象学院学报,19(1):130-134.
- 王晓芳,胡伯威,2007. 地形对 0604 号“碧利斯”登陆台风暴雨的影响[J]. 暴雨灾害,26(2):3-8.
- 谢慧敏,任福民,李国平,等,2016. 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,42(2):156-165.
- 许映龙,吕心艳,张玲,等,2015. 1323 号强台风菲特特点及预报难点分析[J]. 气象,41(10):1222-1231.
- 叶成志,李昉英,2011. 湘东南地形对“碧利斯”台风暴雨增幅作用的分析[J]. 暴雨灾害,30(2):122-129.
- 余贞寿,2014. 温州台风暴雨雨强图集[M]. 北京:气象出版社:1-3.
- 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会,2006. GB/T 19201-2006 热带气旋等级[S]. 北京:中国标准出版社.
- 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会,2012. GB/T 28592-2012 降水量等级[S]. 北京:中国标准出版社.
- 周福,钱燕珍,朱宪春,等,2014. “菲特”减弱时浙江大暴雨过程成因分析[J]. 气象,40(8):930-939.
- Chen L S, 2006. Observations and forecasts of rainfall distribution [C]//Report on Topic 0.3 of Sixth International Workshop on Tropical Cyclones. San José, Costa Rica:WMO:36-42.
- Chen L S, Li Y, Cheng Z Q, 2010. An overview of research and forecasting on rainfall associated with landfalling tropical cyclones[J]. Adv Atmos Sci,27(5):967-976.
- Dong M Y, Chen L S, Li Y, et al, 2010. Rainfall reinforcement associated with landfalling tropical cyclones[J]. J Atmos Sci,67(11):3541-3558.
- Gao S Z, Meng Z Y, Zhang F Q, et al, 2009. Observational analysis of heavy rainfall mechanisms associated with Severe Tropical Storm Bilis (2006) after its landfall[J]. Mon Wea Rev,137(6):1881-1897.
- Ren F M, Wang Y M, Wang X L, et al, 2007. Estimating tropical cyclone precipitation from station observations[J]. Adv Atmos Sci,24(4):700-711.
- Ying M, Zhang W, Yu H, et al, 2014. An overview of the China Meteorological Administration tropical cyclone database[J]. J Atmos Oceanic Technol,31(2):287-301.
- Yu Z S, Ji C X, Xu J, et al, 2015. Numerical simulation and analysis of the Yangtze River Delta Rainstorm on 8 October 2013 caused by binary typhoons[J]. Atmos Res,166:33-48.
- Zhai P M, Zhang X B, Wan H, et al, 2005. Trends in total precipitation and frequency of daily precipitation extremes over China [J]. J Climate,18(7):1096-1108.
- Zhou L L, Du H L, Zhai G Q, et al, 2013. Numerical simulation of the sudden rainstorm associated with the remnants of Typhoon Meranti (2010)[J]. Adv Atmos Sci,30(5):1353-1372.