

基于区域自动站降水数据的厦门暴雨过程空间划分及强度评估研究

池艳珍¹, 吴伟杰², 王彦明², 郑伟鹏^{3,4,5}

1 厦门市海峡气象开放重点实验室 厦门 361012

2 厦门市气象服务中心 厦门 361012

3 中国科学院大气物理研究所地球系统数值模拟科学中心 北京 100029

4 中国科学院大学地球与行星科学学院 北京 100049

5 中国科学院大气物理研究所大气科学和地球流体力学数值模拟国家重点实验室(LASG) 北京 100029

摘要: 区域自动气象站的广泛应用极大地提高了当前气象监测的覆盖面和精密度, 能够为中小尺度灾害性天气监测预警和区域气象服务、气候分析等科研和业务应用提供重要的数据支撑。本文基于 2015~2021 年厦门市国家气象站和区域自动气象站逐日降水资料, 对厦门市暴雨空间范围、强度和天气背景等进行分析, 得到如下主要结论: (1) 基于各区暴雨站数的面积权重, 研制了暴雨过程空间范围划分指标, 根据过程日最大值将暴雨过程划分为局地暴雨、部分暴雨、大部暴雨及全域暴雨; 综合考虑评估因子之间的独立性及站点非均匀分布, 基于不同量级暴雨站数的面积权重和致灾影响, 研制了暴雨过程强度评估指标, 利用百分位法确定暴雨过程强度等级, 实现暴雨过程空间范围和强度的紧密关联。(2) 受山、海、湾、城地形地貌特点影响, 厦门市降水的区域非均匀、局地性特点突出, 平均年降水量、暴雨频次分布呈现从沿海向内陆递增, 暴雨频次与地形的分布密切相关。(3) 2015~2021 年期间, 共出现局地、部分、大部及全域暴雨过程 106、37、16 和 5 场; 各月均出现暴雨过程, 但集中于主汛期 5~9 月, 以 6 月和 8 月为最多; 164 场暴雨过程包括特强、强、较强和一般强度分别为 8、24、33 和 99 场, 总强度和平均强度均以 2016 年居首位、2020 年最弱, 8 场特强暴雨的空间范围均在大部以上, 而 99 场一般暴雨均为局地暴雨。(4) 部分暴雨以上过程的主要影响系统包括冷暖空气、台风等热带低值系统、偏南气流、热带辐合带北抬、低层切变线及强对流等, 大部以上特别是全域暴雨则主要由冷暖空气活动及台风(含热带低压)造成。在简述大部以上暴雨类型天气背景基础上, 对 2015 年 12 月 9 日的罕见冬季全域特强暴雨进行了详细分析。本文所得结果可为开展监测评估、预报预警和精细化气象服务提供参考。

关键词 暴雨过程 区域自动气象站 空间类型 强度评估

文章编号

中图分类号 P467

文献标识码 A

doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.2402.23044

收稿日期 2023-03-14; 网络预出版日期

作者简介: 池艳珍, 女, 1972 年出生, 正研级高工, 主要从事气候监测预测业务及研究。E-mail: cyz0605@126.com

通讯作者: 郑伟鹏, E-mail: zhengwp@mail.iap.ac.cn

资助项目: 福建省自然科学基金 2021J01465, 厦门市社会发展领域指导项目 3502Z20214ZD4012

Funded by Natural Science Foundation of Fujian (Grant 2021J01465), Social Development Guidance Program of Xiamen (Grant 3502Z20214ZD4012)

Spatial classification and intensity assessment of heavy rainfall based on precipitation data of automatic weather stations over Xiamen

CHI Yanzhen¹, WU Weijie², WANG Yanming², and ZHENG Weipeng^{3, 4, 5}

1 Xiamen Key Laboratory of Strait Meteorology, Xiamen, 361012, China

2 Xiamen Meteorological Service Center, Xiamen, 361012, China

3 Earth System Numerical Simulation Science Center, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China

4 College of Earth and Planetary Sciences, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

5 State Key Laboratory of Numerical Modeling for Atmospheric Sciences and Geophysical Fluid Dynamics, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China

Abstract The widely use of automatic weather station has greatly improved the accuracy of meteorological monitoring, providing important support for forecasting and warning, meteorological services, climate analysis and scientific research. Based on the daily precipitation data of the national and automatic weather station in 2015-2021, the multi-scale spatial and temporal distribution of precipitation, the spatial category and intensity characteristics of heavy rainfall, and a brief weather background were analyzed. The main conclusions are as follows: (1) Based on the area-density weights of the rainstorm stations in each district, the spatial classification index of the heavy rainfall is developed with 4 categories of local, partial, wide-range and territory-coverage considering the independence of the assessment factors and the non-uniform distribution of the stations. Based on the area weight of the number of rainstorm stations and the disaster-causing effects of different magnitude rainfall, the assessment index of heavy rainfall intensity is developed. By using the percentile method to determine the intensity grade of heavy rainfall, the spatial range and intensity of heavy rainfall are closely connected. (2) The precipitation in Xiamen was characterized by significant regional heterogeneity and local characteristics due to the topographic and geomorphological characteristics of mountains, sea, bays and city. The mean annual precipitation and heavy rainfall frequency increased gradually from the coast to inland, and the frequency of rainstorm was closely related to the distribution of topography. (3) In 2015-2021, there were 106, 37, 16 and 5 rainstorms of the aforementioned category in Xiamen, respectively. Heavy rainfall occurred in every month, and concentrated in the main flood season from May to September, with peaking in June and August. There were 8 extremely heavy, 24 heavy, 33 relatively heavy and 99 general cases, and the total and average intensity ranked firstly in 2016 and the weakest in 2020. The spatial category of the

8 extremely heavy events was wide-range or territory-wide scale, while the 99 general heavy rainfall were local-range events. (4) The main influencing systems of the regional torrential rain processes included warm-cold air activities, tropical cyclones, southerly stream, northward uplift of convergence zone, low-level wind shear and strong convection, etc. The wide-range especially the territory-wide heavy rainfall caused mainly by warm-cold air activities and tropical cyclones. A rare territory-coverage winter heavy rainfall event occurred on 9th Dec 2015 due to the impacting of weak cold air and the strong warm moist airflow.

Keywords: heavy rainfall, automatic weather station, spatial classification, intensity assessment

1 引言

随着全球气候变暖的加剧影响,持续高温热浪、极强寒潮、极端强降水、超强台风等极端天气气候事件对我国的影响日益凸显(Zhai et al.,2005;张庆云等,2008;史文丽等,2013;翟盘茂等,2017; Zhou et al.,2018;Liu and Wang,2020;Wang et al.,2021)。暴雨或极端强降水作为最严重、最易发生灾害的气象灾害,始终最受关注。高涛和谢立安(2014)在综述中国极端降水研究的基础上,从海—气相互作用角度对影响长江流域极端降水的物理机制和过程进行了总结。蔡悦幸等(2018)对比了华南地区前后汛期极端降水事件变化及可能成因,指出大气环流和前冬海温异常变化可能是影响华南前汛期极端降水的重要因素,而后汛期极端降水的主要原因是局地海温增加;杨涵洧等(2021)分析得出中国东部夏季极端降水 1990 年前后发生年代际转变,华南和华东地区的极端降水量和降水日数增加,重要驱动因素之一为西太平洋暖池区异常升温造成的海陆温差减小。福建省地处欧亚大陆东南侧,受热带季风和副热带季风的共同影响,是我国雨量最充沛的区域之一,也是我国暴雨和区域持续性强降水的频发区(Chen and Zhai,2013, 2014)。暴雨的形成主要包括冷暖空气交绥的锋面暴雨、热带天气系统所致暴雨及局地热对流所致暴雨(林毅和刘爱鸣,1997;周海光,2008;何芬等,2010;鹿世瑾和王岩,2012;黄惠镕等,2021),此外还有冷空气与热带天气系统如台风共同导致的暴雨(林毅等,2003;秦思等,2021)。刘爱鸣等(2003)利用高度场滑动分区切比雪夫展开方法构建福建省前汛期区域暴雨预报模型,并在实际预报业务中进行检验应用。厦门市位于福建省南部,为东南沿海重要的经济区域、港口及风景旅游城市,也是暴雨频繁发生且影响严重的地区,一年四季均可能出现暴雨过程。以往研究主要关注暴雨过程多尺度特征、环流系统演变和预报概念模型研制等,秦丽等(2010)指出,闽南地区近 50 年暴雨日集中在 5~9 月、大

暴雨日集中期为 6~9 月,总暴雨日整体上增多,强度增强、连续性增长;郭林等(2003)将闽南地区非台风短时区域暴雨的影响系统归纳为冷式切变线(或槽)影响型、南风系统型、副热带高压型(又分为弱冷空气影响型和暖区型),陈素盆和黄翠仙(2004)对厦门雨季和台风季的连续性暴雨成因进行分析,归纳了相应的影响系统。张伟等(2017)揭示了 2015 年 5 月 20 日由低层的冷暖空气在闽南沿海交汇形成的切变线引起一次暴雨过程中尺度对流系统的三维风场结构特征。锋前西南(偏南)暖湿气流在闽南沿海形成风速辐合或低空急流偏强且长时间维持是引起厦门暴雨的有利形势(陈健康等,2019;胡雅君等,2020;黄美金等,2022)。热带低值系统(含台风、热带低压、东风波等)是造成厦门市暴雨的常见系统(赵玉春和王叶红,2017);2016 年超强台风“莫兰蒂”直接登陆厦门,受其影响,厦门市出现大范围暴雨到大暴雨、局部特大暴雨,损失极为严重(池艳珍等,2017;赵玉春等,2018;赵玉春和王叶红,2019;王叶红等,2019)。

由于降水是非正态分布参量,具有很强的突发性和局地性,以往的暴雨特征、成因分析和气候影响评价评估一般基于国家级气象站资料开展(彭丽英等,2006;鲍名和黄荣辉,2006;邹燕等,2014),但由于国家级气象站主要布设在市、县,空间距离较远,无法很好地刻画暴雨的局地特征。如 2018 年 5 月 7 日,受强盛的偏南暖湿气流影响,厦门市区、翔安区南部共 38 站出现短时暴雨以上降水,思明区科技中学站日雨量高达 291 毫米(胡雅君等,2020;黄美金等,2022);17 站出现小时雨强 50.0mm 以上的极端降水(李建等,2013a,2013b;吴伟杰等,2019),最大小时雨强达 $107.5\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$,最大三小时雨量为 274mm,但厦门站和同安站两个国家站的当日降水量仅为 45.5mm 和 25.7mm。再如 2020 年 9 月 7 日,同安区和翔安区出现大暴雨,其中翔安区马巷灌溉站最大小时雨强高达 $99.6\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$,而厦门站和同安站该日总降水量仅为 13.2mm 和 25.6mm。由此可见,仅使用常规国家气象站资料不能精确反映降水的空间分布信息、极端性及其高影响,在对地方政府的气象服务中尤为被动。随着区域自动站网建设的日趋完善,自动站降水资料得到及时广泛的应用,对区域降水的监测评估、短时强降水的机理分析提供支撑(Wu et al.,2019;Li et al.,2019;伍红雨等,2020;Jiang et al.,2020;Gao et al.,2021;Zhang et al.,2022)。因此,开展基于区域自动气象观测站(以下简称区域站)资料的精细化监测、评估及相关研究,特别是细致分析极端降水的特征和成因,可以有效补充国家气象站站的时间和空间观测密度(吴薇等,2021),对于提升精细化气象服务能力显得极其重要。

由于地域及经济发展程度差异,各地区域站网密度不同且每年有效站点数量不同。随着厦门市气象现代化建设的逐步推进,依托 2015 年“第一届全国青年运动会”及 2017

年“金砖国家领导人厦门会晤”气象保障服务契机,厦门市气象观测资料采集、传输处理及共享时效得到提升,为进一步增强气象灾害监测、预警及应急响应能力提供了有力支撑。然而,如何客观评价暴雨过程的时空特征仍是一个需要加以研究的课题。因此,本文拟在分析厦门市降水精细化时空分布的基础上,研制不同空间范围类型的暴雨过程监测和强度评估指标,分析其时空多尺度变化特征,以期为区域性气象监测评估及暴雨过程的预报预警服务提供参考依据。本文章节安排如下:第二节简要介绍所采用的资料、处理方法以及所研制的暴雨过程评估指标,第三节为厦门市降水的特征分析,第四节综合评估暴雨过程的时空分布和强度特征,第五节为主要结论。

2 资料及处理

2.1 资料来源

根据“厦门市区域站基本信息表”,2014年前厦门市区域站数量较少且空间分布不均匀,区域代表性较弱,2015年后站点的数量总体上呈现出增加的趋势,尤其是2021年,区域站的数量显著增多,且空间分布更趋合理,因此本文选取了2015~2021年降水监测站点的各站逐日降水资料(含国家气象站,图1为2015年和2021年的站点分布及地形)开展暴雨过程的分析。各站建站以来的最大日降水量和最大小时雨量也作为降水分析参考数据。

为归纳暴雨过程的影响天气系统,使用了2015~2021年NCAR/NCEP的逐日再分析数据集(水平分辨率 $2.5^{\circ}\times 2.5^{\circ}$;Kalnay et al.,1996)和相应的1991~2020年气候态平均、2015年NOAA-CIRES-DOE的20世纪逐日再分析数据集V3(水平分辨率 $1.0^{\circ}\times 1.0^{\circ}$),要素包括海平面气压、位势高度、速度、绝对湿度和整层可降水量等;中国气象局热带气旋资料中心的最佳台风路径资料(Ying et al.,2014; Lu et al.,2021)用于评估台风等天气过程的影响。

2.2 资料处理

本文所用的区域站数据经过了初步质量检查和可靠性评估,主要包括:(1)剔除区域站中数据缺测过多的站点;(2)对逐日及小时降水数据进行合理性分析,对明显不合理数据采取气候极值检查、时间和空间一致性检查;(3)选取了2015年9月29日及12月9日两次典型暴雨过程,参考吴薇等(2021)评估区域站降水资料的可靠性方法,验证了区域站降水资料的代表性和可靠性。表1给出2015~2021年经过初步质控的最少和最多降水观测站点数,2017年和2021年降水监测站数差异较大,前者和“金砖国家领导人厦门会晤”气象保障服务需求相联系,后者主要与集美区政府部门对降水实时

监测需求有关。

表 1 厦门市 2015~2021 年降水监测站点数

Table1 Precipitation monitoring stations in Xiamen during 2015-2021

年份	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
最多	84	105	139	153	149	148	182
最少	65	93	89	145	145	143	141

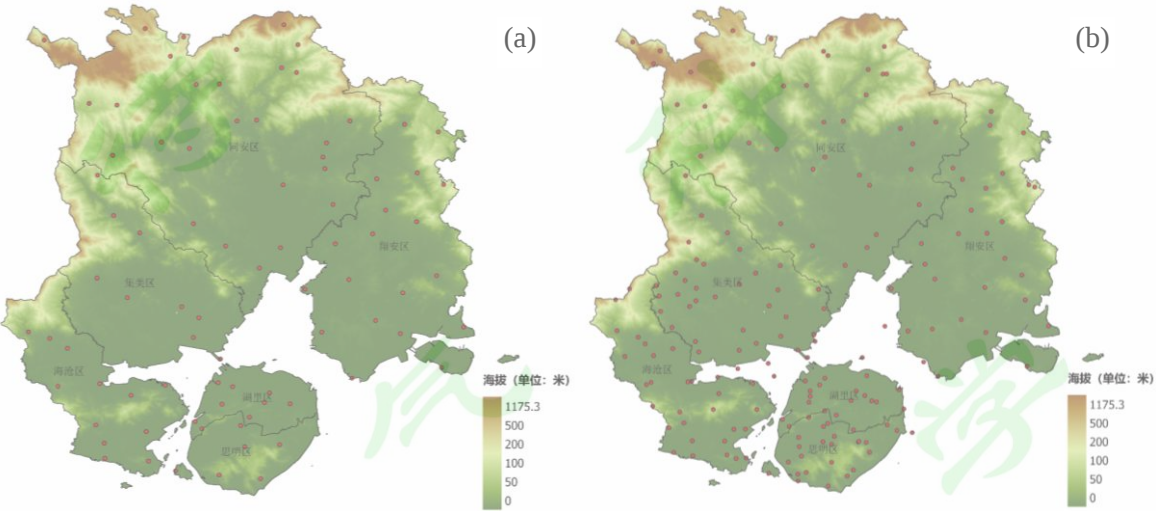


图 1 2015 年(a)和 2021 年(b)厦门市降水监测站点分布

Fig.1 Distribution of rainfall monitoring stations over Xiamen in 2015(a) and 2021(b)

2.3 暴雨过程评估指标定义

2.3.1 暴雨过程空间划分指标

根据国家标准《降水量等级》（乔林等，GB/T 28592-2012），定义厦门市暴雨过程为1个以上站点出现日降水量达暴雨以上的天气过程，若暴雨过程不间断，为同一个过程。从图1可以看出厦门市区域站在岛外(同安、集美、翔安、海沧区)的分布相对岛内(思明和湖里区)稀疏, 因此评估暴雨空间范围仅用暴雨以上站次或比例是不够客观的。结合业务服务可操作性和实用性, 本文采用面积加权的站点百分率来进行暴雨过程空间范围划分。考虑到区域站的布设进度差异, 逐年各区站点数不尽相同, 另外由于缺测或站点维护等原因, 每日有效站数也不同, 为了尽可能客观定量描述站点面积权重, 计算逐日各区的站点面积权重 w_{ij} 如下：

$$w_{ij} = \frac{DS_j / M_{ij}}{\sum_{j=1}^{j=6} (DS_j / M_{ij})} \quad (1)$$

式中, DS_j 为各区面积, M_{ij} 为逐日各区有效测站总数。

基于上述权重系数, 以当日厦门市各区日降水量达到暴雨以上量级的站数占当日有效测站总数的加权百分率之和 (SR_i) 构建暴雨过程空间划分指标:

$$SR_i = 100 \times \sum_{j=1}^{j=6} \frac{N_{ij}}{M_{ij}} \times w_{ij} \quad (2)$$

式中, N_{ij} 为当日各区日降水量达到暴雨以上量级的站数。 SR_i 取值范围为 0~100%。

根据暴雨持续过程中逐日 SR_i 最大值, 将厦门市暴雨过程空间范围划分为局地、部分、大部 and 全域共 4 类, 见表 2。

表 2 暴雨过程空间范围划分表

Table2 Spatial classification of heavy rainfall

暴雨过程	SR_i 取值范围
局地暴雨过程	$SR_i < 10.0\%$
部分暴雨过程	$10.0\% \leq SR_i < 50.0\%$
大部暴雨过程	$50.0\% \leq SR_i < 85.0\%$
全域暴雨过程	$85.0\% \leq SR_i$

2.3.2 暴雨过程强度指标

暴雨过程综合强度的客观定量化评估是暴雨预报分析、预警服务的重要基础, 邹燕等(2014)根据福建省区域性暴雨过程最大日降水量、最大过程降水量、范围和持续时间共 4 项指标, 采取加权形式构建了综合强度评估模型, 在历史事件检验和业务中取得较为合理的应用效果, 在多个省、市气象部门拓展应用(吴慧等,2017;叶殿秀等,2019;伍红雨等,2021), 但该模型存在评估因子间相互不独立的现象。梅平等(2021)基于暴雨可能造成灾害的累积效应提出降雨衰减指数, 通过建立相当强度指标判定暴雨日, 并以暴雨过程的过程强度和影响范围作为评价指标, 建立区域暴雨过程致灾强度的综合评估模型, 该模型充分考虑了暴雨灾害的累积效应及致灾严重程度, 但忽略了站点分布非均匀

程度的影响。

为了充分融合评估因子之间的独立性及其空间范围类型及其站点分布非均匀特征, 根据不同量级降水的致灾特点, 参考高建芸等(2013)研制暴雨指数方法, 以不同量级暴雨强度为评估指标, 构建逐日强度指数 Id_i 如下:

$$Id_i = \sum_{j=1}^{j=6} 100 \times \frac{(a \times Nt_{ij} + b \times Nd_{ij} + c \times Nb_{ij})}{M_{ij}} \times w_{ij} \quad (3)$$

式中, Nt_{ij} , Nd_{ij} , Nb_{ij} 分别为暴雨过程某日各区特大暴雨、大暴雨和暴雨站数, a, b, c 分别是各量级暴雨的致灾权重, 本文取 $a=5.0, b=2.0, c=1.0$ 。

暴雨过程总强度 I_t 定义为:

$$I_t = \sum_{i=1}^{i=N} Id_i \quad (4)$$

式中, N 为暴雨过程的持续天数。

暴雨总强度等级评估标准按照百分位法, 分别取 95 百分位、80 百分位和 60 百分位点的总强度值, 对应的强度阈值分别为 115.87、35.8 和 10.19, 将暴雨过程总强度划分为特强、强、较强和一般 4 个等级。

应当指出的是, 当站点数足够多且空间分布均匀时, 面积权重系数 w_{ij} 没有必要设置, 而在站点数较少且分布不均匀时, 设置面积权重系数 w_{ij} 有利于客观评价暴雨过程的空间范围及强度。

3 厦门市降水多尺度特征

3.1 年降水量空间分布

如图 1 所示, 厦门市的地形由西北向东南倾斜, 西北部多中低山, 从西北往东南, 依次分布着高丘、低丘、阶地、海积平原和滩涂, 南面为厦门岛。图 2a 给出了 2015~2021 年平均各站年降水量的空间分布, 可见, 降水总体分布呈现从沿海向内陆递增。由于近 5 年厦门市降水总体偏少, 岛内及各区的低海拔地区年降水量相对较小不足 1100 毫米, 而靠山地区则较大, 大值区位于同安区西北部山区, 高于 1600 毫米。岛内的背风坡一侧站点的降水量较迎风坡小一些。再从各站暴雨平均频次(图 2b)可知, 其分布特点与年降水量非常相似, 总体由西北向东南递减, 且与地形的分布密切关联, 高值区分布在海沧区的东方庵、集美区北部、同安区西北部及翔安区的东北部。

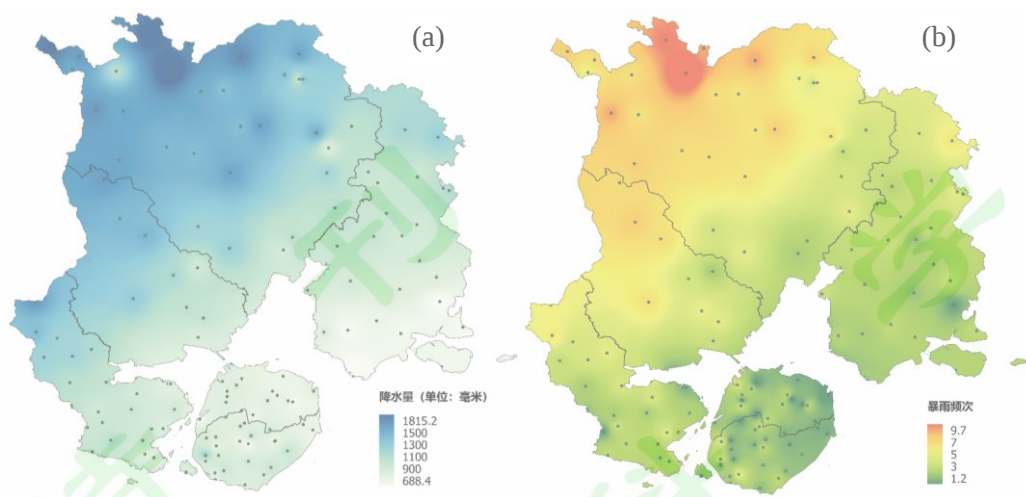


图 2 2015~2021 年平均降水量(a, 单位:mm)和暴雨频次(b)分布

Fig.2 Distribution of annual mean precipitation (a, unit: mm) and heavy rain days (b) in Xiamen during 2015-2021.

3.2 日降水与小时降水极值分布

各站建站以来最大日降水量及最大小时降水量的空间分布如图 3, 最大日降水量绝大多数测站超过 100.0mm。与图 1 中站点地形分布相吻合, 厦门市降水的区域非均匀特征显著、局地性特点突出。思明区南部、海沧区北部、集美区西北部、同安区北部及中心城区、翔安区东北部靠山地区为高值区, 而湖里区大部、海沧区南部及集美、同安、翔安 3 区南部靠海湾地区为低值区 (图 3a)。其中, 厦门站的 315.7mm (2000 年 6 月 18 日) 为最大, 其次是同安区云顶山站 292.1mm (2014 年 6 月 16 日), 思明区的科技中学 291.0mm (2018 年 5 月 7 日) 位列第 3。

最大小时降水量介于 38.3 (湖里区灯塔公园) ~ 116.0mm (海沧区鳌冠村), 总体分布特征与最大日降水量相似 (图 3b)。雨强大于 90.0mm·h⁻¹ 的大值区更为集中, 主要出现在思明区南部 (滨海街道、科技中学、城市学院)、海沧区北部和东部 (溪头水库、鳌冠村、海翔大道)、集美区西北部和中部分 (坂头水库、城市环境研究所)、同安区北部和中部分 (小坪村、凤南中学、溪林村、汪前村等) 和翔安区中部分 (马巷灌漑站、海洋学院)。分析造成各站最大小时雨强的环流系统, 主要由 1614 号超强台风“莫兰蒂”、2018 年 5 月 7 日和 2021 年 8 月 11 日暖区暴雨、2021 年 8 月上旬热带辐合带北抬及台风影响。

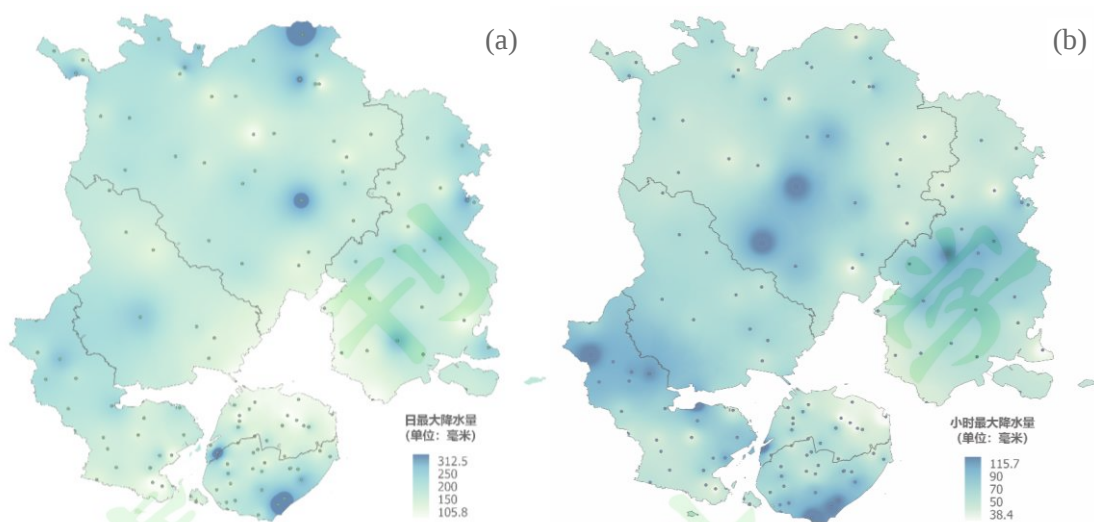


图 3 厦门市最大日降水量(a) 和最大小时降水量 (b) 分布 (单位: mm)

Fig.3 Maximum daily (a) and hourly (b) precipitation in Xiamen (units: mm)

4 暴雨过程特征分析

4.1 暴雨过程频次特征

2015~2021 年厦门市逐年暴雨过程总频次分别是 27、28、15、23、24、22 和 25 场, 平均每年 23.4 场, 以 2016 年为最多, 2017 年以来暴雨过程总体较少。从暴雨过程的季节分布(图 4)来看, 厦门市每个月均有暴雨过程发生, 包括冬季(12-2 月)6 场、早春季(3-4 月)13 场、雨季(5-6 月)53 场、夏季(7-9 月)82 场和秋季(10-11 月)10 场; 月际分布上以 6 月和 8 月各 29 场为最多, 2 月 1 场为最少。可见, 暴雨过程集中于主汛期(5-9 月), 占 82.3%, 与秦丽等(2010)基于国家气象站的分析结论相吻合。

4.2 不同空间型暴雨过程时频特征

根据第二节定义的暴雨过程空间划分指标, 表 3 给出了 2015~2021 年间各类型暴雨过程发生频次。可见, 164 场暴雨过程中局地、部分、大部及全域分别为 106、37、16 和 5 场, 分别占 65%、22%、10%和 3%, 总体符合各类型暴雨过程概率分布。7 年平均局地暴雨 15.1 场, 部分暴雨 5.3 场, 大部暴雨 2.3 场, 全域暴雨 0.7 场, 即平均每年发生 8.3 场部分暴雨以上(含 3 场大部暴雨以上)过程。

2015 年共 11 场部分暴雨以上过程, 含 3 场大部和 2 场全域暴雨, 其中 1 场为冬季全域暴雨过程。2016 年部分暴雨以上过程 15 场, 含 5 场大部和 1 场全域暴雨过程, 其中 9 场部分暴雨含 2 场冬季暴雨。2017 年含 3 场部分和 2 场大部暴雨过程, 后者包括了 1 场冬季暴雨(陈健康等,2019)。2018 年部分、大部和全域暴雨为 3、3 和 1 场, 其中, 冬季大部暴雨 1 场。2019 年出现部分暴雨 8 场, 大部和全域暴雨各 1 场。2020 年仅 4 场

部分暴雨,无大部暴雨以上过程,但出现 1 场冬季暴雨。2021 年含部分暴雨 4 场和大部暴雨 2 场。可见,7 年共出现 6 场部分以上的冬季暴雨过程,呈明显增加趋势。

表 3 2015~2021 年厦门市各类暴雨过程频次信息

Table3 Frequency of heavy rainfall events over Xiamen during 2015-2021

年份	局地暴雨	部分暴雨	大部暴雨	全域暴雨	总过程
2015	16	6	3	2	27
2016	13	9	5	1	28
2017	10	3	2	0	15
2018	16	3	3	1	23
2019	14	8	1	1	24
2020	18	4	0	0	22
2021	19	4	2	0	25
总计	106	37	16	5	164

从 2015~2021 年厦门市暴雨过程空间范围频次的月际分布(图 4)可以看到,厦门市部分暴雨以上过程除 11 月外各月均出现,仍以 5-9 月为频发期,其中,8 月 17 场为最多;大部暴雨以上过程多发于 6-9 月,以 8 月和 9 月的 4 场居首位,2 月、10 月和 11 月无大部暴雨以上过程。

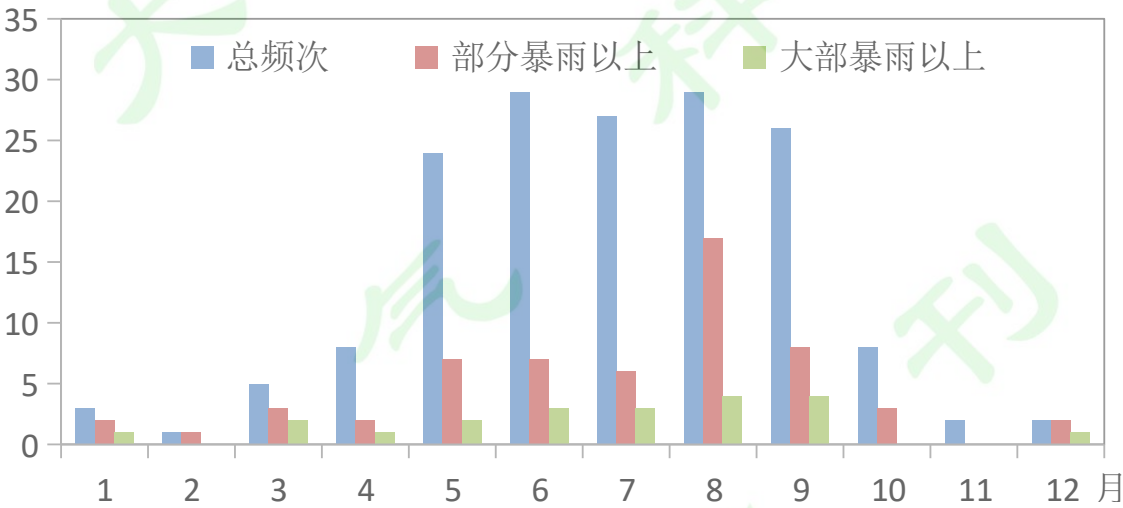


图 4 2015~2021 年厦门市暴雨过程频次的月际分布

Fig.4 Seasonal variation of heavy rainfall events in Xiamen during 2015-2021

4.3 暴雨过程强度评估

基于第二节定义的暴雨过程综合强度指标,计算了厦门市 2015~2021 年 164 场暴雨过程总强度,确定特强暴雨过程 8 场、强暴雨过程 24 场、较强暴雨过程 33 场和一般

暴雨过程 99 场。比较逐年所有暴雨过程总强度之和、平均总强度发现,2016 年均居第一位、2015 年次之、2018 年居第三位,最弱为 2020 年,均居最后一位。

表 4 2015~2021 年特强暴雨过程一览表

Table4 Extra severe heavy rainfall events during 2015-2021

等级 排名	年份	开始 时间	结束 时间	暴雨站 次数	大暴雨站 次数	空间范围类 型	总强度
1	2021	08-01	08-06	252	114	大部	252.39
2	2016	09-15	09-18	52	76	全域	201.46
3	2018	08-28	08-31	113	84	全域	156.33
4	2015	07-20	07-21	63	27	大部	138.31
5	2015	12-09	12-10	58	24	全域	129.36
6	2017	07-31	08-02	95	18	大部	126.1
7	2018	06-20	06-23	137	15	大部	120.82
8	2015	09-29	09-29	57	24	全域	115.87

表 4 给出了 8 场特强暴雨过程评估结果,空间范围均在大部暴雨以上,包括 4 场大部暴雨和 4 场全域暴雨。年际分布上,以 2015 年 3 场为最多、2018 年 2 场次之,2016、2017 和 2021 年各 1 场,持续时间最长 6 天、最短 1 天。2021 年 8 月 1~6 日持续性暴雨过程总强度 252.39 位列第一,暴雨及大暴雨总站数分别为 252 站次和 114 站次,最强降水 5 日 SR_i 为 73.54%(大部暴雨),全市 84 站次出现大暴雨;2016 年 9 月 15~18 日暴雨过程总强度位列第二,共出现 4 天持续性暴雨,暴雨及大暴雨总站数分别为 52 站次和 76 站次,最强降水 15 日 SR_i 高达 95.47(全域暴雨)。对比排名前两位的暴雨过程,由于持续时间和站点总数差异,2021 年暴雨过程的总暴雨以上站数远高于 2016 年,但从最大范围暴雨站分布来看(图略),2016 年 9 月 15 日暴雨以上 98 站均匀分布在全境,而 2021 年 8 月 5 日暴雨以上 148 站较集中于岛内的思明区和湖里区、岛外的海沧区和集美区,结合图 1 站点和表 1 站数分布差异,进一步佐证了基于站点面积权重确定划分暴雨空间范围指标的科学性。

可见,暴雨过程的总强度与暴雨过程空间类型关系密切,再从 24 场强过程对应的空间类型来看,13(11)场为大部以上(部分)暴雨;33 场较强过程包括 26 场部分暴雨和 7 场局地暴雨,而 99 场一般暴雨过程均为局地暴雨。

4.4 暴雨过程天气背景概述

厦门市位于华南自然气候带，91%暴雨过程发生在汛期（3-10月），而汛期又通常划分为前汛期和后汛期。根据国家气候中心对 2015~2021 年华南汛期监测结果（《中国雨季监测 华南汛期》，QXT395-2017），统计了逐年前、后汛期厦门市暴雨过程空间范围、对应强度等级和主要天气背景，弱冷空气（日最低气温 48 小时降幅低于 6℃，《冷空气等级》，GB/T 20484-2017）、西南暖湿气流及低层切变线引起的暴雨过程主要出现在前汛期，且强等级、大部暴雨以上暴雨过程相对较少；而后汛期受台风（热带低压）、热带辐合带北抬等影响，暴雨过程强度强、空间范围广，同时可见强对流引发的暴雨过程较多。

2015~2021 年 21 场大部暴雨以上过程的基本信息及主要影响天气系统由表 5 给出，可见大部暴雨以上影响天气系统主要为冷空气（8 场）、台风及热带低压（9 场）和西南暖湿气流（2 场），尤其 5 场全域暴雨分别由 2 场冷空气和 3 场台风或热带低值系统造成，可见强对流天气过程一般不容易造成大部暴雨。结合从表 4 和表 5，8 场特强暴雨的影响天气系统以台风居多 (5/8)，还包括冷暖空气对峙、热带辐合带北抬及西南暖湿气流影响。

表 5 2015~2021 年大部暴雨以上过程及影响天气系统

Table5 Wide-range rainstorms and major weather systems during 2015-2021

年份	开始时间	结束时间	持续时间 d	空间类型	主要影响天气系统
2015	5 月 19 日	5 月 20 日	2	大部	冷空气影响
2015	7 月 20 日	7 月 21 日	2	大部	热带辐合带北抬
2015	8 月 24 日	8 月 24 日	1	大部	台风影响
2015	9 月 29 日	9 月 29 日	1	全域	台风影响
2015	12 月 9 日	12 月 10 日	2	全域	冷空气影响
2016	3 月 23 日	3 月 23 日	1	大部	冷空气影响
2016	4 月 13 日	4 月 13 日	1	大部	冷空气影响
2016	5 月 21 日	5 月 22 日	2	大部	西南暖湿气流
2016	7 月 9 日	7 月 11 日	3	大部	台风影响
2016	9 月 15 日	9 月 18 日	4	全域	台风影响
2016	9 月 28 日	9 月 30 日	3	大部	台风影响
2017	6 月 17 日	6 月 18 日	2	大部	低层切变线

2017	7月31日	8月2日	3	大部	台风影响
2018	1月7日	1月8日	2	大部	冷空气影响
2018	6月20日	6月23日	4	大部	西南暖湿气流
2018	8月28日	8月31日	4	全域	热带低压影响
2018	9月7日	9月8日	2	大部	冷空气影响
2019	3月9日	3月9日	1	全域	冷空气影响
2019	8月25日	8月26日	2	大部	台风影响
2021	6月21日	6月22日	2	大部	冷空气影响
2021	8月1日	8月6日	6	大部	热带辐合带北抬及台风影响

图 5 为冷空气、台风(含热带低压)、西南暖湿气流和热带辐合带北抬导致大部暴雨以上典型过程的环流形势或影响路径。从 2018 年 1 月 8 日冷空气影响的主要环流分布(图 5a)来看,亚洲中高纬为“两槽一脊”分布,脊区位于巴尔喀什湖以东至贝加尔湖以西,东亚大槽偏深偏强,有利于引导脊前槽后的冷空气大举南倾,西北太平洋副热带高压(以下简称西太副高)偏西偏强,有利于引导水汽向华南及华东输送;对应地面海平面气压正距平到达华南地区;低层 850hPa 福建全省为一致的偏北风,西太副高西侧转向的西南气流与偏北风辐合,引发大部暴雨。图 5b 给出了 9 场台风或热带低压引起大部暴雨以上的台风路径,可见,主要为西北路径(如 2015 年 21 号超强台风“杜鹃”、2016 年 14 号超强台风“莫兰蒂”等)和南海生成后向东北移动影响厦门市(如 2017 年 10 号热带风暴“海棠”和 2021 年 9 号台风“卢碧”)两类路径,仅 2015 年 15 号超强台风“天鹅”为转向路径。2016 年 5 月 21 日(图 5c),华南沿海至福建低层为强盛的西南暖湿气流,整层大气可降水量超过 50mm,福建省南部低层存在明显的风速辐合,为典型的暖区暴雨(何立富等,2016;刘瑞鑫等,2019)。热带辐合带北抬典型影响如图 5d 所示,对流层中层为高空槽控制;2015 年 7 月 18 日 850hPa 热带辐合带位于 22°N 以南的南海北部,厦门市主要受东南气流影响,20 日热带辐合带北抬至 24°N 以北且呈东北西南向分布,福建省全境受西南气流控制;整层大气可降水量超过 60mm,水汽条件充沛。

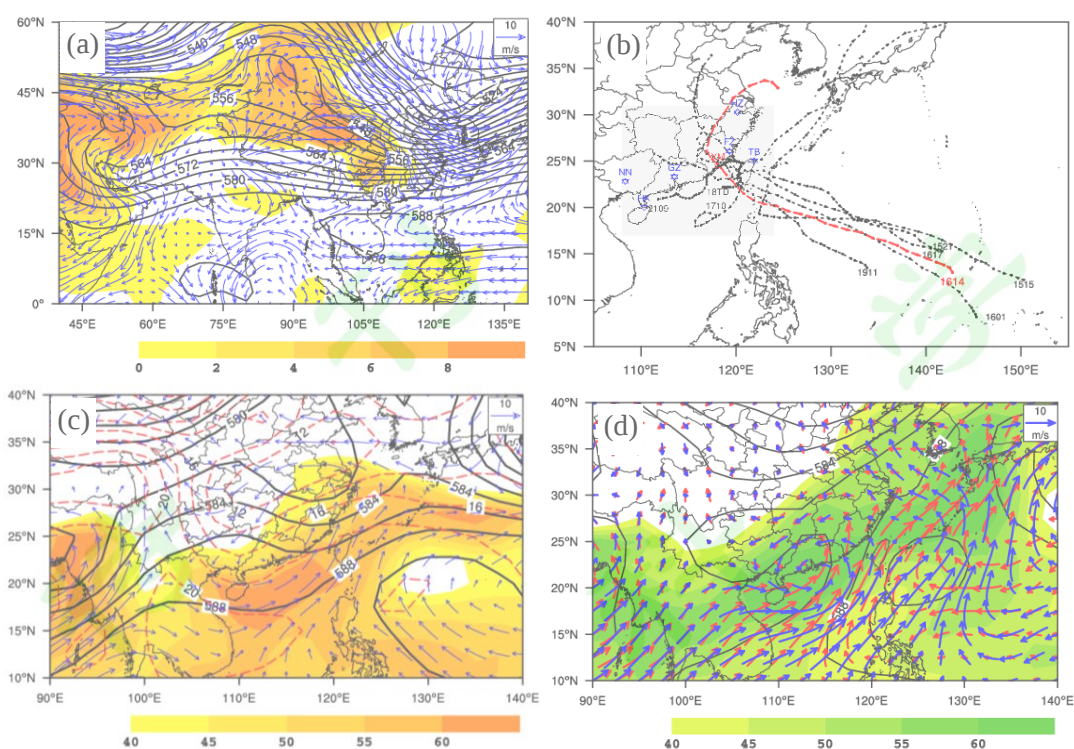


图5 厦门市典型大部暴雨以上过程的主要天气系统(a.2018年1月8日冷空气影响,填色为海平面气压距平:hPa,黑实线为500hPa位势高度场:dagpm,蓝色矢量为850hPa水平风场:m.s⁻¹; b.登陆或影响厦门台风路径,红色为登陆台风; c.2016年5月21日西南气流影响,填色为可降水量:mm,黑色实线为500hPa位势高度场:dagpm,红色虚线为850hPa温度场:℃,蓝色矢量为850hPa水平风场:m.s⁻¹; d.热带辐合带北抬影响,填色为可降水量:mm,黑色实线为500hPa位势高度场:dagpm,红色(蓝色)矢量为2015年7月20日(7月18日)925hPa水平风场:m.s⁻¹)

Fig.5 Major weather systems of wide-range rainstorm cases (a. cold-air impacting case on 8th Jan 2018, positive sea level pressure anomalies are shaded, black solid lines are geopotential heights at 500hPa with 4dagpm interval, and blue vectors are horizontal wind anomalies at 850hPa; b. typhoon tracks of landing (red line) or impacting over Xiamen; c. same as a., but for southerly stream impact on 21st May 2016, while the precipitable water is shaded, and red dotted lines indicated 850hPa temperature with 4℃ interval, and blue vectors are horizontal wind at 925hPa; d. same as c. but for northward uplift of tropical convergence zone case, while red and blue vectors are horizontal wind at 925hPa on 20th July and 18th July, respectively)

2015年12月9~10日厦门市出现全域特强暴雨(表4和表5),实属罕见。从12月9日厦门市降水量分布(图6a)看到,全市仅3站未达暴雨量级,24站达大暴雨量级,但集中分布在岛内,最大值120.0mm出现在思明区科技中学,厦门站为113.2mm。从逐小时降水演变(图略)来看,降水从9日凌晨开始,10日上午减弱结束,主要出

现在 9 日 17-19 时，最大雨强达 $17.5\text{mm}\cdot\text{h}^{-1}$ 。分析各时次厦门 S 波段多普勒雷达资料可知，此次暴雨过程为典型系统性降水过程，不断有强回波中心由漳州市沿东北方向或从海上移近影响厦门市。从 1705BST 的反射率分布(图 6b)来看，厦门市全域回波范围较大，中心位于岛内，强度超过 50dBZ。

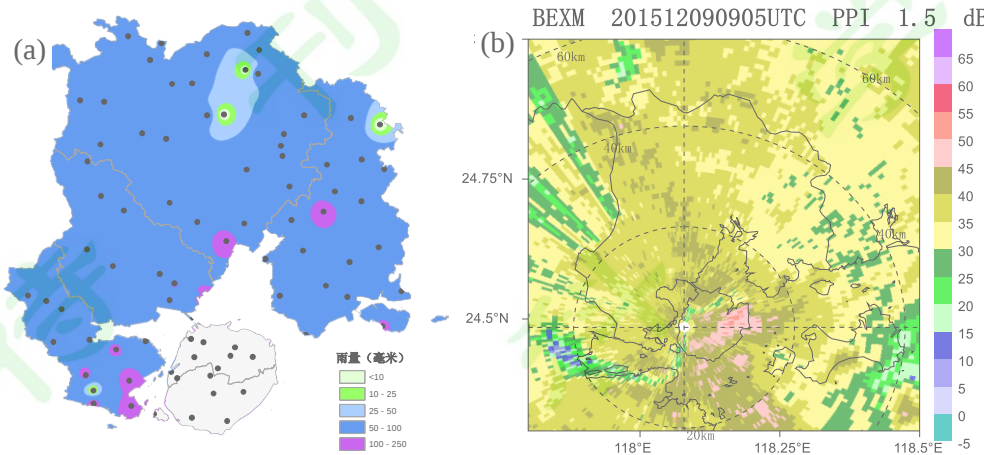


图 6 2015 年 12 月 9 日厦门市降水量分布(a,单位:mm)和 1705BST 厦门多普勒雷达反射率(b,1.5°仰角,单位: dBZ)

Fig.6 Distribution of precipitation on 9th Dec 2015 over Xiamen (a, units: mm) and reflectivity of Xiamen Doppler Radar at 1705BST(b, 1.5° elevation ,units: dBZ)

从 12 月 7 日 500hPa 位势高度分布(图 7a)可见, 欧亚中高纬总体呈“两脊一槽”的环流形势, 贝加尔湖附近槽区比较浅薄, 我国新疆北部、东北地区为脊区, 乌拉尔山以东至巴尔喀什湖西侧为平直西风带气流, 低纬南支槽发展。受超强 El Ni ño 事件影响, 西太副高呈带状分布, 强度异常偏强、西伸脊点偏西。海平面气压场上, 我国大部分地区受高压控制, 中心位于东北和华北, 1020hPa 等压线向南贯穿至南海北部, 福建全域高于 1024hPa。12 月 9 日(图 7b), 500hPa 中高纬为“两槽一脊”分布, 贝加尔湖为脊区控制, 脊前有横槽发展, 高原短波槽东移与南支槽合并加深, 位于 105°E 以东, 槽前 700hPa 广西区东部至福建省中部以北一带存在低空急流(图略), 风速达 $12\sim 16\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$; 西太副高稳定维持强盛, 588 线位于南海北部广东沿海附近, 有利于引导暖湿水汽向我国中东部输送, 厦门市位于南支槽前、西太副高北缘的上升气流区域。海平面气压场上, 高压东移入海, 强度较前期明显减弱, 福建省南部低于 1020hPa。850hPa 水平风场(图 8a), 南海北部的热带扰动随西太副高环流北上, 福建省中南部至华南沿海有较强的向岸风辐合, 为降水的发生提供了动力和热力条件。500hPa 垂直速度场上, 我国南方存在明显的上升运动。再看地面至 300hPa 垂直积分的水汽输送通量散度分布(图 8b), 厦门市位于水汽输送辐合高值区, 整层可降水量可达 48.7mm, 水汽充沛。综

上所述，正是由于弱冷空气与强盛的暖湿气流在厦门市上空对峙，为降水的发生提供了动力、水汽和能量条件，导致出现罕见的冬季全域暴雨过程。

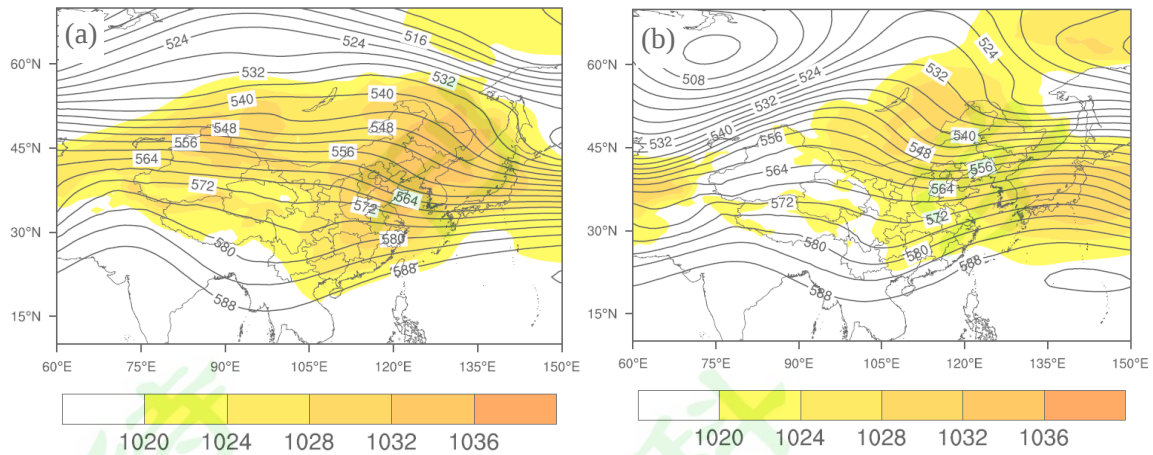


图 7 2015 年 12 月 7 日(a)和 9 日(b)500hPa 位势高度场(等值线,单位: dagpm)及海平面气压场分布(阴影,单位:hPa)

Fig.7 Distribution of geopotential height(contours in 4dagpm interval) and sea level pressure (shaded in 4hPa interval) on 7th Dec 2015(a) and 9th Dec 2015(b).

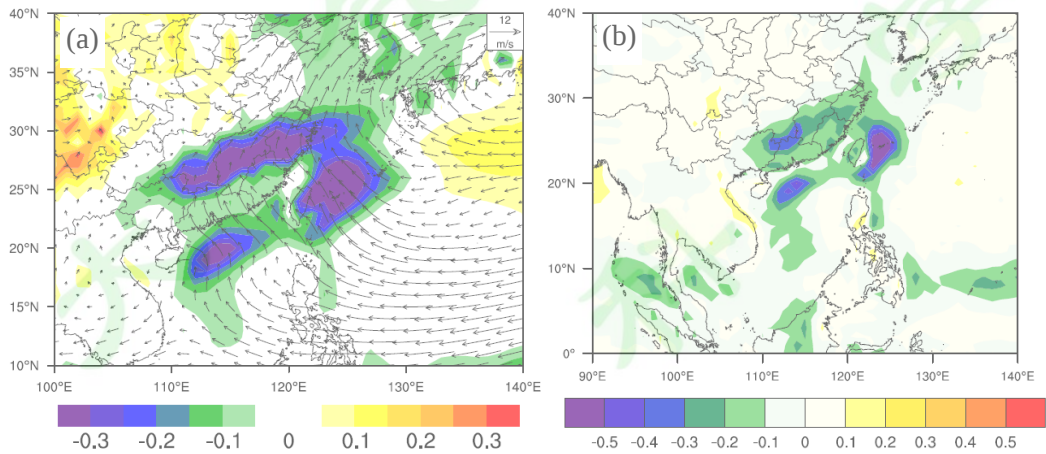


图 8 2015 年 12 月 9 日(a)850hPa 水平风场(矢量,单位: $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$),500hPa 垂直速度(阴影,单位: $\text{Pa}\cdot\text{s}^{-1}$)和(b)地面至 300hPa 垂直积分的水汽输送通量散度(阴影,单位: $10^{-5}\text{Kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)

Fig.8 Distribution of (a) wind field at 850hPa (vector,units: $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$), vertical velocity at 500hPa(shaded areas, units: $\text{Pa}\cdot\text{s}^{-1}$) and (b)moisture flux divergence integrated from the surface up to 300 hPa (shading, units: $10^{-5}\text{Kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$) on 9th Dec 2015.

6 主要结论和讨论

本文通过研制暴雨过程评估指标，分析了厦门市降水的多尺度特征，评估了暴雨过程的时空分布和强度特征，并对暴雨过程的天气背景及前后汛期主要差异等进行了概述，得出的主要结论如下：

(1)基于各区暴雨站数的面积权重，研制了暴雨过程空间范围划分指标，将暴雨过程划分为局地暴雨、部分暴雨、大部暴雨及全域暴雨；综合考虑评估因子之间的独立性

及站点非均匀分布特征,基于不同量级暴雨站数的面积权重和致灾影响,研制了暴雨过程强度评估指标,利用百分位法确定暴雨过程强度等级,实现暴雨过程空间范围和强度的紧密关联。

(2)2015~2021 年共出现局地暴雨、部分暴雨、大部暴雨及全域暴雨过程分别为 106、37、16 和 5 场,占比 65%、22%、10%和 3%,总体符合各类型强降水概率分布;厦门市各月均出现暴雨过程,但集中出现在主汛期 5-9 月,以 6 月和 8 月为最多,大部暴雨以上过程多发于 6-9 月,以 8 月和 9 月居多;近 7 年冬季暴雨过程呈明显增加趋势,包括 3 场部分暴雨、2 场大部暴雨和 1 场全域暴雨。

(3)164 场暴雨过程包括特强 8 场、强 24 场、较强 33 场和一般 99 场,暴雨过程总强度和平均强度均以 2016 年最强、2020 年最弱;暴雨过程的总强度与暴雨过程空间类型关系密切,24 场强过程包括 13(11)场为大部(部分)暴雨;33 场较强过程包括 26 场部分暴雨和 7 场局地暴雨,而 99 场一般暴雨过程均为局地暴雨。

(4)58 场部分暴雨以上过程的天气背景主要包括冷空气、台风(含热带低压)、偏南暖湿气流、热带辐合带北抬、强对流和低层切变等。其中,21 场大部暴雨以上过程影响天气系统包括冷空气(8 场)、台风及热带低压(9 场)和西南暖湿气流(2 场),尤其 5 场全域暴雨分别由 2 场冷空气和 3 场台风或热带低压系统造成,强对流天气过程一般不容易造成大部暴雨。前、后汛期暴雨过程空间类型、强度和主要影响环流存在明显差异,在概述大部暴雨以上过程 4 类天气影响系统基础上,分析发现 2015 年 12 月罕见冬季特强暴雨过程为弱冷空气与强盛的暖湿气流在厦门市上空对峙所引发。

本文基于气象观测站点分布非均匀特征,对暴雨过程空间范围类型进行精细化划分,以及融合评估因子之间的独立性、致灾影响及空间范围类型所建立的强度评估指标,不仅能丰富灾害性天气实时监测和影响评价等服务产品内容、增强服务针对性,同时结合精细化数值预报产品和灾害风险影响模型,提升对灾害性天气的预报预警及灾害预估能力,满足“监测精密、预报精准、服务精细”业务服务需求。此外,空间划分方法及强度评估指标可以推广到其他区域,不断提高区域站数据的利用价值。但目前暴雨过程总强度评估因子的权重存在一定的主观性,今后应进一步探讨如何提高其客观性。

参考文献

- 鲍名,黄荣辉.2006.近 40 年我国暴雨的年代际变化特征[J].*大气科学*,30(6): 1057-1067. Bao Ming,Huang Ronghui.2006. Characteristics of the interdecadal variations of heavy rain over China in the last 40 years[J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 30(6):1057-1067. doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.2006.06.01
- 蔡悦幸,陆希,杨崧.2018.华南地区前后汛期极端降水事件对比分析[J].*中山大学学报(自然科学版)*,57(1):83-92.Cai Yuexing,Lu Xi,Yang Song.2018. Comparison of extreme precipitation events in early and latter rainy seasons over South China[J].*Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni(in Chinese)*,57(1):83-92. doi:1013471/jcnkiactasnus201801012
- 陈健康,赵玉春,陈赛,等.2019.闽中南罕见冬季锋前暴雨个例特征分析[J].*气象*, 45(2):228-239. Chen Jiankang, Zhao Yuchun, Chen Sai, et al.2019. Characteristic analysis on a winter prefrontal torrential rain in central and southern Fujian[J].*Meteor Mon(in Chinese)*,45(2):228-239. doi:10.7519/j.issn.1000-0526.2019.02.008.
- 陈素盆,黄翠仙.2004.厦门连续性暴雨天气气候特征[J].*河南气象*,04:13-15.Chen Supen, Huang Cuixian.2004.Climate features of continuous storm over Xiamen[J]. *Meteorology of Henan(in Chinese)*,04:13-15.doi: 10.3969/j.issn.1673-7148.2004.04.009
- Chen Y, Zhai P M.2013. Persistent extreme precipitation events in China during 1951-2010[J]. *Climate Res.*, 57,143–155. doi:10.3354/cr01171
- Chen Y, Zhai P M.2014. Two types of typical circulation pattern for persistent extreme precipitation in central–eastern China [J]. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 140, 1467–1478. doi:10.1002/qj.2231
- 池艳珍,何芬,唐振飞.2017.2016 年登陆和影响福建台风成因分析及预测[J].*气象*, 43(10):1287-1295.Chi Yanzhen,He Fen,Tang Zhenfei,2017.Cause analysis and forecast assessment on typhoon landing and impacting Fujian in 2016[J].*Meteor Mon(in Chinese)*,43(10):1287-1295. doi:10.7519/j.issn.1000-0526.2017.10.013
- 高建芸,陈彩珠,周信禹.2013.2010 年福建前汛期典型持续性暴雨过程的低频特征分析[J].*气象科技进展*,3(1):39-45.Gao Jianyun,Chen Caizhu, Zhou Xinyu, et al.2013.Analysis of low-frequency features on typical persistent heavy rainfall during pre-flood season in Fujian province in 2010[J].*Advances in Meteorological Science and Technology(in Chinese)*,3(1):39-45.doi:10.3969/j.issn.2095-1973.2013.01.006
- 高涛,谢立安.2014.近 50 年来中国极端降水趋势与物理成因研究综述[J].*地球科学进展*,29(5):577-589.Gao Tao,Xie Li'an.2014.Study on progress of the trends and physical causes of extreme precipitation in China during the last 50 years[J]. *Advances in Earth Science(in Chinese)*,29(5):577-589.doi: 1001-8166(2014)05-0577-13
- 郭林,陈礼斌,施碧霞,等.2003.闽南地区短时区域暴雨的天气及多普勒雷达资料概念模型[J].*气象*,29(5):41-45.Guo Lin,Chen Libin,Shi Bixia,et al.2003. Regional heavy rain conception models

- with synoptic and doppler radar data in southern Fujian province[J]. *Meteor Mon(in Chinese)*, 29(5):41-45. doi:10.7519/j.issn.1000-0526.2003.5.010
- Gao Y., T.W. Wu, J. Wang, et al. 2021. Evaluation of GPM dual-frequency precipitation radar (DPR) rainfall products using the rain gauge network over China[J]. *J. Hydrometeor.*, 22, 547-559. doi:10.1175/JHM-D-20-0156.1
- 何芬, 赖绍钧, 池艳珍, 等. 2010. 福建省冬季暴雨过程及其环流特征[J]. *气象科技*, 38(03):306-310. He Fen, Lai Shaojun, Chi Yanzhen, et al. 2010. Winter rainstorms and its circulation characteristics in Fujian province[J]. *Meteorological Science and Technology (in Chinese)*, 38 (03): 306-310. doi: 10.3969/j.issn.1671-6345.2010.03.006
- 何立富, 陈涛, 孔期. 2016. 华南暖区暴雨研究进展[J]. *应用气象学报*, 27(5):559-569. He Lifu, Chen Tao, Kong Qi. 2016. A review of studies on prefrontal torrential rain in South China [J]. *Journal of Applied Meteorological Science (in Chinese)*, 27(5):559-569. doi:10.11898/1001-7313.20160505
- 黄惠镭, 赵玉春, 苟爱萍, 等. 2021. 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*, 40(2):136-146. Huang Huirong, Zhao Yuchun, Xun Aiping, et al. 2021. Causality analysis of difference of heavy rainfall distribution in Fujian caused by Typhoons Soulik and Trami along similar tracks in 2013 [J]. *Torrential Rain and Disasters (in Chinese)*, 40(2):136-146. doi: 10.3969/j.issn.1004-9045.2021.02.004
- 黄美金, 俞小鼎, 林文, 等. 2022. 福建沿海冷锋前暖区和季风槽大暴雨环境背景与对流系统特征[J]. *气象*, 48(5): 605-617. Huang Meijin, Yu Xiaoding, Lin Wen, et al. 2022. Environmental background and convective system characteristics of the prefrontal and the monsoon trough torrential rains in Fujian coastal area[J]. *Meteor Mon(in Chinese)*, 48(5):605-617. doi:10.7519/j.issn.1000-0526.2022.012801
- Jiang X.L., Y.L. Luo, D.L. Zhang, et al. 2020. Urbanization enhanced summertime extreme hourly precipitation over the Yangtze river delta[J]. *J. Climate*, 33, 5809-5826. doi: 10.1175/JCLI-D-19-0884.1
- Kalnay E., Kanamitsu M., Kistper R, et al. 1996. The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project[J]. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 77(3):437-472. doi: 10.1175/1520-0477(1996)077
- 李建, 宇如聪, 孙激. 2013a. 中国大陆地区小时极端降水阈值的计算与分析[J]. *暴雨灾害*, 32(1):11-16. Li Jian, Yu Rucong, Sun Wei. 2013a. Calculation and analysis of the thresholds of hourly extreme precipitation in mainland China[J]. *Torrential Rain and Disasters (in Chinese)*, 32(1):11-16. doi: 10.3969/j.issn.1004-9045.2013.01.002
- 李建, 宇如聪, 孙激. 2013b. 从小时尺度考察中国中东部极端降水的持续性和季节特征[J]. *气象学报*, 71(4):652-659. Li Jian, Yu Rucong, Sun Wei. 2013b. Duration and seasonality of the hourly extreme rainfall in the central-eastern part of China [J]. *Acta Meteorologica Sinica (in Chinese)*, 71(4):652-659. doi:10.11676/qxxb2013.052
- Li J., N.N. Li, R.C. Yu, et al. 2019. Regional differences in hourly precipitation characteristics along the

- western coast of South China[J].*J. Appl. Meteor Climatol.*,58,2717-2732. doi: 10.1175/JAMC-D-19-0150.1
- 林毅,刘爱鸣.1997.9608 台风外围对流云团造成闽南暴雨成因分析[J].*气象*, 23(10): 35-38.Lin Yi,Liu Aiming.1997.An analysis of heavy rain in southern Fujian caused by mesoscale convective cloud cluster[J].*Meteor Mon (in Chinese)*, 23(10):35-38. doi:10.7519/j.issn.1000-0526.1997.10.008
- 林毅,刘铭,蔡义勇.2005.福建中南部台风远距离突发性暴雨成因分析[J].*气象*, 31(10):68-71.Lin Yi,Liu Ming,Cai Yiyong. 2005.Formation analysis of sudden heavy rain far from typhoon[J].*Meteor Mon (in Chinese)*, 31(10):68-71. doi:10.7519/j.issn.1000-0526.2005.10.016
- Liu L.,Wang Y.Q.2020.Trends in landfalling tropical cyclone-induced precipitation over China[J].*J. Climate*,33,2223-2235. doi:10.1175/JCLI-D-19-0693.1
- 刘瑞鑫,孙建华,陈鲍发.2019.华南暖区暴雨事件的筛选与分类研究[J].*大气科学*, 43(1):119-130. Liu Ruixin, Sun Jianhua, Chen Baofa.2019.Selection and classification of warm-sector heavy rainfall events over South China [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*,43(1):119-130. doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.1803.17245
- 鹿世瑾,王岩.2012.福建气候(第二版)[M].北京:气象出版社.Lu Shijin, Wang Yan. 2012. Fujian climate (2nd edition)[M] . Beijing:Meteorological Press.
- Lu,X.Q.,H.Yu,M.Ying,et al.2021. Western north Pacific tropical cyclone database created by the China Meteorological Administration [J]. *Adv.Atmos. Sci.*, 38(4):690–699. doi:10.1007/s00376-020-0211-7
- 梅平,张强,邹旭恺.2021.区域暴雨强度等级综合评估研究—以长江中下游为例[J].*气象科学*,41(1):128-135.Mei Ping,Zhang Qiang,Zou Xukai. 2021.Research on comprehensive intensity evaluation of regional rainstorm process-along the middle and lower reaches of Yangtze river[J]. *Journal of the Meteorological Sciences (in Chinese)*,41(1):128-135. doi: 10.12306/2019jms.0023
- 彭丽英,王谦谦,马慧.2006.华南前汛期暴雨气候特征的研究[J].*南京气象学院学报*, 29(2):249-253.Pen Liying,Wang Qianqian,Ma Hui.2006.A study on the climatic features of the rainfall of rainstorms in the preflood season in South China[J].*Journal of Nanjing Institute of Meteorology(in Chinese)*, 29(2):249-253. doi:10.3969/j.issn.1674-7097.2006.02.016
- 乔林,李延香,符娇兰,等.2012.降水量等级(GB/T 28592-2012)[S].北京:中国标准出版社.Qiao Lin, Li Yanxiang, Fu Jiaolan,et al. 2012.Grade of precipitation(GB/T 28592-2012) [S]. Beijing: China Standard Press.
- 秦丽,张立凤,骆凯.2010.闽南金三角地区暴雨的气候特征[J].*广东气象*,32(2):21-24. Qin Li, Zhang Lifeng, Luo Kai. 2010. Climatic characteristics of torrential rain in the Golden Triangle region of southern Fujian [J]. *Meteorology of Guangdong (in Chinese)*, 32(2):21-24. doi:10.3969/j.issn.1007-6190.2010.02.008
- 秦思,姚美,任福民,等.2021.强台风“菲特”(1323) 极端降水研究进展[J].*海洋气象学报*,41(1):11-18. Qin

- Si, Yao Mei, Ren Fumin, et al. 2021. Research progress on extreme precipitation of Typhoon FITOW (2013)[J]. *Journal of Marine Meteorology* (in Chinese), 41(1):11-18. doi:10.19513/j.cnki.issn2096-3599.2021.01.002
- 史文丽, 闵锦忠, 费建芳, 等. 2013. 全球变暖背景下对流性降水变化特征及影响因子分析[J]. *气候与环境研究*, 18(1):32-42. Shi Wenli, Min Jinzhong, Fei Jianfang, et al. 2013. Analysis of characteristics of convective precipitation under global warming and its impact factors[J]. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 18(1):32-42. doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2012.11036
- 王叶红, 赵玉春, 罗昌荣, 等. 2019. 双雷达风场反演拼图在登陆台风“莫兰蒂”(1614)强降水精细预报中的同化应用试验[J]. *气象学报*, 77(4):617-644. Wang Yehong, Zhao Yuchun, Luo Changrong, et al. 2019. Assimilation experiment for the application of dual-radar retrieval wind mosaics in detailed heavy precipitation forecast produced by landfall Typhoon “Meranti” (1614) [J]. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 77(4):617-644. doi:10.11676/qxxb2019.041
- 王遵亲, 王东阡, 池艳珍, 等. 2017. 中国雨季监测指标 华南汛期(QX/T 395-2017)[S]. 北京: 气象出版社. Wang Zunya, Wang Dongqian, Chi Yanzhen, et al. 2017. Grade of Precipitation(QX/T 395-2017) [S]. Beijing: Meteorological Press.
- Wang Z. Y., Liu Y. J., Wang G. F., et al. 2021. Factors responsible for the increase of winter low temperature extremes from the mid-1990s to the early 2010s in northern China[J]. *J. Appl. Meteor Climatol.*, 60, 1207-1218. doi: 10.1175/JAMC-D-20-0225.1
- 伍红雨, 李芷卉, 李文媛, 等. 2020. 基于区域自动气象站的广东极端强降水特征分析[J]. *气象*, 46(6):801-812. Wu Hongyu, Li Zhihui, Li Wenyuan, et al. 2020. Characteristics analysis of extremely severe precipitation based on regional automatic weather stations in Guangdong[J]. *Meteor Mon* (in Chinese), 46(6):801-812. doi:10.7519/j.issn.1000-0526.2020.06.007
- 伍红雨, 郭尧, 邹燕, 等. 2021. 华南区域性暴雨过程的客观评估及异常机理分析[J]. *暴雨灾害*, 40(03):306-315. Wu Hongyu, Guo Yao, Zou Yan, et al. 2021. Objective assessment and anomaly mechanism analysis of regional rainstorm process in South China[J]. *Torrential Rain and Disasters* (in Chinese), 40(03):306-315. doi: 10.3969/j.issn.1004-9045.2021.03.009
- 吴慧, 邹燕, 朱晶晶, 等. 2017. 海南省区域性暴雨过程综合强度评估方法研究[J]. *气象研究与应* 用, 38(03):8-12. Wu Hui, Zou Yan, Zhu Jingjing, et al. 2017. Study on comprehensive assessment method of regional rainstorm process in Hainan Province[J]. *Meteorological Research and applications* (in Chinese), 38(03):8-12. doi:10.1673-8411(2017)03-0008-05
- Wu M. W., Y. Luo, F. Chen, et al. 2019. Observed link of extreme hourly precipitation changes to urbanization over coastal South China[J]. *J. Appl. Meteor Climatol.*, 58, 1799-1819. doi: 10.1175/JAMC-D-18-0284.1
- 吴薇, 郭旭, 尹娟, 等. 2021. 四川省区域自动气象站资料的质量评估[J]. *气象与环境科学*, 44(1):104-111. Wu Wei, Guo Xu, Yin Juan, et al. 2021. Quality assessment of regional automatic

- weather station data in Sichuan province[J]. *Meteorological and Environmental Sciences (in Chinese)*,44(1):104-111. doi:10.16765/j.cnki.1673-7148.2021.01.013
- 吴伟杰,郑伟鹏,郑秀云,等.2019.1980~2017 年厦门地区小时尺度极端降水特征分析[J].*气候与环境研究*,24(3):359-368. Wu Weijie, Zheng Weipeng, Zheng Xiuyun, et al.2019. Characteristics of extreme hourly precipitation in Xiamen during 1980-2017[J].*Climatic and Environmental Research (in Chinese)*, 24(3):359-368. doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2019.18139
- 杨涵洧,龚志强,王晓娟,等.2021.中国东部夏季极端降水年代际变化特征及成因分析[J].*大气科学*,45(3):683-696. Yang Hanwei, Gong Zhiqiang, Wang Xiaojuan, et al.2021. Analysis of the characteristics and causes of interdecadal changes in the summer extreme precipitation over eastern China[J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 45(3):683-696. doi 10.3878/j.issn.1006-9895.2007.19247
- Ying, M., W. Zhang, H. Yu, et al. 2014. An overview of the China Meteorological Administration tropical cyclone database. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, 31,287-301. doi: 10.1175/JTECH-D-12-00119.1
- 叶殿秀,王遵娅,高荣,等.2019.1961-2016 年我国区域性暴雨过程的客观识别及其气候特征[J].*气候变化研究进展*,15(6):575-583. Ye Dianxiu, Wang Zunya, Gao Rong, et al.2019. Objective identification and climatic characters of the regional rainstorm event in China from 1961 to 2016[J]. *Climate Change Research (in Chinese)*, 15(6):575-583. doi: 10.12006/j.issn.1673-1719.2018.172
- Zhai,P.M.,X.Zhang,H.Wan,et al.2005.Trends in total precipitation and frequency of daily precipitation extremes over China[J].*J. Climate*, 18,1096–1108. doi:10.1175/JCLI-3318.1
- 翟盘茂,余荣,周伯铨,等.2017.1.5℃增暖对全球和区域影响的研究进展[J].*气候变化研究进展*,13(5):465-472. Zhai Panmao, Yu Rong, Zhou Baiquan, et al.2017. Research progress in impact of 1.5℃ global warming on global and regional scales[J].*Climate Change Research(in Chinese)*,13(5):465-472. doi:10.12006/j.issn.1673-1719.2017.159
- 张庆云,陶诗言,彭京备.2008.我国灾害性天气气候事件成因机理的研究进展[J].*大气科学*, 32(4):815-825. Zhang Qingyun, Tao Shiyan, Peng Jingbei.2008. The studies of meteorological disasters over China[J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 32(4):815-825. doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.2008.04.10
- Zhang S.J.,Z.M.Liang,D.H.Wang,et al.2022.Nocturnal convection initiation over inland South China during a record-breaking heavy rainfall event[J].*Mon. Wea. Rev.*,150,2935-2957. doi: 10.1175/MWR-D-21-0264.1
- 张伟, 罗昌荣, 郑辉.2017.双雷达反演闽南地区一次暴雨过程三维风场结构特征研究[J].*气象与环境科学*,40(4):76-82. Zhang Wei,Luo Changrong,Zheng Hui.2017. Characteristics analysis of 3-dimensional wind structure of a heavy rainfall event in southern Fujian using dual_radar retrieval[J]. *Meteorological and Environmental Sciences (in Chinese)*,40(4):76-82. doi:10.16765/j.cnki.1673-7148.2017.04.011

- 赵玉春,王叶红.2017.2013 年“苏力”台风西行登陆引发闽南大暴雨成因的模拟研究[J].[气候与环境研究](#),22(3):365-380. Zhao Yuchun, Wang Yehong. 2017. A numerical investigation of the formation mechanism for the extremely heavy-rain event in southern Fujian induced by westward-moving Typhoon Soulik in 2013[J]. [Climatic and Environmental Research \(in Chinese\)](#), 22 (3):365-380. doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2017.16181
- 赵玉春,王叶红,陈健康,等.2018.“莫兰蒂”台风(2016)登陆前后精细结构及其引发福建特大暴雨的模拟研究[J].[暴雨灾害](#),37(2):135-148.Zhao Yuchun, Wang Yehong, Chen Jiankang, et al. 2018.Numerical investigation on detailed structure of Typhoon“Meranti”(2016) and extreme heavy rainfall event induced by it before and after landfall in Fujian[J]. [Torrential Rain and Disasters \(in Chinese\)](#),37(2):135-148. doi: 10.3969/j.issn.1004-9045.2018.02.005
- 赵玉春,王叶红.2019.台湾岛地形对登陆台风“莫兰蒂”(1614)强对流雨带发展影响的模拟研究[J].[大气科学](#),43(1):27-48.Zhao Yuchun, Wang Yehong.2019.A numerical study of Taiwan island impacts on the development of the intensive convective rain-band of landfalling Typhoon “Meranti” (1614)[J]. [Chinese Journal of Atmospheric Sciences \(in Chinese\)](#), 43(1):27-48.doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.1802.17217
- Zhou B.T.,Wang Z.Y.,Shi Y.,et al.2018.Historical and future changes of snowfall events in China under a warming background[J].[J. Climate](#), 31,5873-5889. doi: 10.1175/JCLI-D-17-0428.1
- 周海光.2008.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](#),32(6): 1289-1308.Zhou Haiguang.2008. Analysis of mesoscale structure Doppler radar data of heavy rainfall caused by Tropical Storm Bilis (0604)[J] . [Chinese Journal of Atmospheric Sciences \(in Chinese\)](#), 32(6):1289-1308. _doi: 10.3878/j.issn.1006-9895.2008.06.05
- 周庆亮,李延香,林玉成,等.2017.冷空气等级(GB/T 20484-2017)[S].北京:中国标准出版社.Zhou Qingliang, Li Yanxiang, Lin Yucheng, et al. 2017. Grade of cold air (GB/T 20484-2017) [S]. Beijing: China Standard Press.
- 邹燕,叶殿秀,林毅,等.2014.福建区域性暴雨过程综合强度量化评估方法[J].[应用气象学报](#),25(3):360-364.Zou Yan, Ye Dianxiu,Lin Yi, et al.2014. A quantitative method for assessment of regional heavy rainfall intensity[J].[Journal of Applied Meteorological Sciences\(in Chinese\)](#), 25(3):360-364.