

DOI:10.13718/j.cnki.xsxb.2022.11.012

一种对数型区域暴雨过程 综合强度评估模型的应用研究^①

张驰¹, 白莹莹¹, 崔童², 郭渠¹, 唐红玉¹, 杨宝钢¹

1. 重庆市气候中心, 重庆 401147; 2. 国家气候中心, 北京 100081

摘要: 利用重庆 2016—2020 年 2092 站的 1 h, 3 h, 6 h, 12 h 和 24 h 五类滑动小时累积降水数据, 分别以 45 mm, 95 mm, 145 mm, 195 mm 和 245 mm 为极端阈值, 运用对数型区域暴雨综合强度评估模型, 对 50 场典型暴雨过程进行评估, 并设定站数分类条件, 将所有区域暴雨过程以综合强度 0.9 等量划为极端密集类(EC)和正常疏散类(ND), 前者根据单站过程空间分布分为全域型(REC)、西部型(WEC)、东部型(EEC)、中西部型(MWEC)和中东部型(MEEC). 研究发现: ①极端密集类各型的平均区域综合强度由强至弱依次为 WEC, MEEC, REC, MWEC, EEC, 该类区域综合强度与单站数、强区间站数均呈显著性正相关. ②单站点分布较广的 REC 和 MWEC/MEEC 下对应“东少西多”和“中间偏少”态的致灾力为最强, 相比而言, WEC/EEC 体现为分片区聚集成灾, 虽影响范围较小但短时极端强降水在重庆西部地区的致灾概率较东部更大、破坏力也更强. ③5 年间所有区域暴雨过程中, 区域综合强度与极端 3 h 幂平均小时雨强和极端均值都呈显著性正相关, 且系数都在 0.77 及以上, 强区间对数强度与区域综合强度也呈显著正相关, 且站点位置与过程中大暴雨及以上量级的落区良好匹配.

关键词: 区域暴雨过程; 综合强度; 强区间; 评估模型

中图分类号: P49

文献标志码: A

文章编号: 1000-5471(2022)11-0086-11

Application Research on a Logarithmic Comprehensive Intensity Assessment Model of Regional Rainstorm Process

ZHANG Chi¹, BAI Yingying¹, CUI Tong²,
GUO Qu¹, TANG Hongyu¹, YANG Baogang¹

1. Chongqing Climate Center, Chongqing 401147, China;

2. National Climate Center, Beijing 100081, China

Abstract: By using 5 types of running hourly accumulated precipitation data from 2092 meteorological stations in Chongqing from 2016 to 2020 and setting 45mm, 95mm, 145mm, 195mm and 245mm as 1h, 3h, 6h, 12h and 24h running cumulative precipitation extreme thresholds respectively to calculate 50 compre-

① 收稿日期: 2022-05-23

基金项目: 重庆市科委社会与民生创新专项(cstc2017shmsA20012); 重庆市气象局技术攻关项目(ZHCXTD-201909, YWJSGG-202125)共同资助.

作者简介: 张驰, 高级工程师, 硕士, 主要从事地气相互作用及气候监测诊断的研究.

hensive intensity of regional rainstorm process with the logarithmic assessment model, then according to the stations' number classification conditions, all regional rainstorm processes were distinguished as Extreme Concentration(EC) and Normal Dispersion(ND) categories with a comprehensive intensity of 0.9. The EC category further was divided into Regional EC (REC), Western EC(WEC), Eastern EC(EEC), Midwest EC(MWEC) and Mideast EC(MEEC) types. Finally it was found that, ①The order of the averaged regional comprehensive intensity from strong to weak above five EC types was: WEC, MEEC, REC, MWEC, EEC. The regional comprehensive intensity had a significant positive correlation with the number of stations and the one in the larger numerical interval [2,2.8] for all the EC types. ②The areas covered by REC and MWEC/MEEC were wider, and their disaster-causing forces corresponding to the patterns of "less in the east and more in the west" and "less in the middle" were both the strongest. Although WEC/EEC mostly patched a cluster of disasters, and their scope of influence were smaller, the short-term extreme heavy precipitation was also likely to cause more disasters and be more destructive in the western part of Chongqing than in the eastern part. ③For all the regional rainstorm processes, the regional comprehensive intensity had a significant positive correlation with the extreme 3-hour Power Mean hourly rainfall intensity and the extreme mean value, and the coefficients were all 0.77 and above. The logarithmic intensity of the stations in the larger numerical interval [2,2.8] was also significantly positively correlated with the regional comprehensive intensity, and the positions of those stations were well matched with the area of the very heavy rainstorm and above in the process.

Key words: regional rainstorm process; comprehensive intensity; larger numerical interval; assessment model

在气候变暖背景下,全球各地极端降水过程呈总体增强态势,美国、英国、日本、澳大利亚、南非、印度等国的极端降水事件均呈显著上升或增多的趋势^[1-6].近 50 年中国各地降水量虽没有明显的变化,但西南地区年降水量“西增东减”的分布形势却日益凸显,这与降水日数的增减关系密切^[7].有研究^[8]指出,西南 4 省(市)(川、渝、滇和黔)的极端降水强度在大部地区为增大趋势,而区域平均极端降水日数为下降趋势.地处青藏高原和川西高原共同地形作用下的西南地区,天气尺度和中尺度系统的综合配置往往是引起区域内短时强降水过程的直接诱因^[9-12],特别在西南涡影响下^[13-14]极端降水事件时有发生,过程中强降水的密集区往往灾损重、社会民生影响大^[15-16].为此迫切需要构建一种区域暴雨综合强度评估模型,既能满足气象灾害预警,以及气候监测业务对空间上局地极端强降水的高分辨需求,又能为重庆各级政府或公众媒体提供短时区域暴雨过程强度评估服务,具有十分重要的现实意义^[17].

之前国内学者相关工作多是基于地面台站日降水资料展开的中国各地区暴雨过程年际变率分析.20 世纪 60 年代以来,中国区域暴雨有 10 年的周期振荡,华南地区最为多发,长江中下游地区的暴雨综合强度呈微弱增强趋势,而四川盆地区域暴雨频次呈缓慢减少趋势^[18-20].其中,区域暴雨过程的判识及综合指标的确立常需引入暴雨(或大雨)站次、极端日降水量、过程累积(或日平均)降水量、影响范围和持续时间等因子,极端阈值的筛选则常用广义极值分布(GEV)、百分位法和概率分布转换等方法^[21-25].降水强度的精细化定量评估是气象现代化重要方向之一,而降水日数据可能高估(低估)长时弱降水(短时强降水)过程的强度,极端降水过程中采用小时尺度数据可留存更精确的细节信号^[26].为统一小时—日尺度下降水过程强度表征因子的量纲,王莉萍等^[27]将累计总雨量换算为平均日降水量,提取过程中的最大值,最大小时降水量也等效转换为日降水量;Zheng 等^[28]利用 GEV 法得到 50 a 中国大陆地区国家站五类极端滑动累积降水量升序排列的第 70 个和第 90 个百分位划分极端 1—3 级,1 h,3 h,6 h,12 h 和 24 h 降水量达 2 级的阈值分别为 75 mm,125 mm,160 mm,195 mm,230 mm;重庆站点 1 h,3 h,6 h 累积降水量阈值基本处全国极端 1 级范围内,12 h,24 h 则在较强的极端 2 级;极端过程较强的地区主要在华南—东南沿海和华北东部—

江淮地区^[29]. 四川盆地短时降水率一般为 18~36 mm/h, 其极端值受地形影响较大^[30]. Lu 等^[31]研究表明以幂函数表征极端降水事件的时长和面积范围是可行的, 在此基础上本研究尝试以对数函数形式结合滑动小时累积雨量数据构建重庆单站及区域暴雨天气过程强度评估模型, 通过历史个例回算, 并借鉴气候监测业务中突显极端降水过程的单站影响及区域致灾效应, 进一步落实气象防灾减灾、保护人民生命财产安全的关键作用.

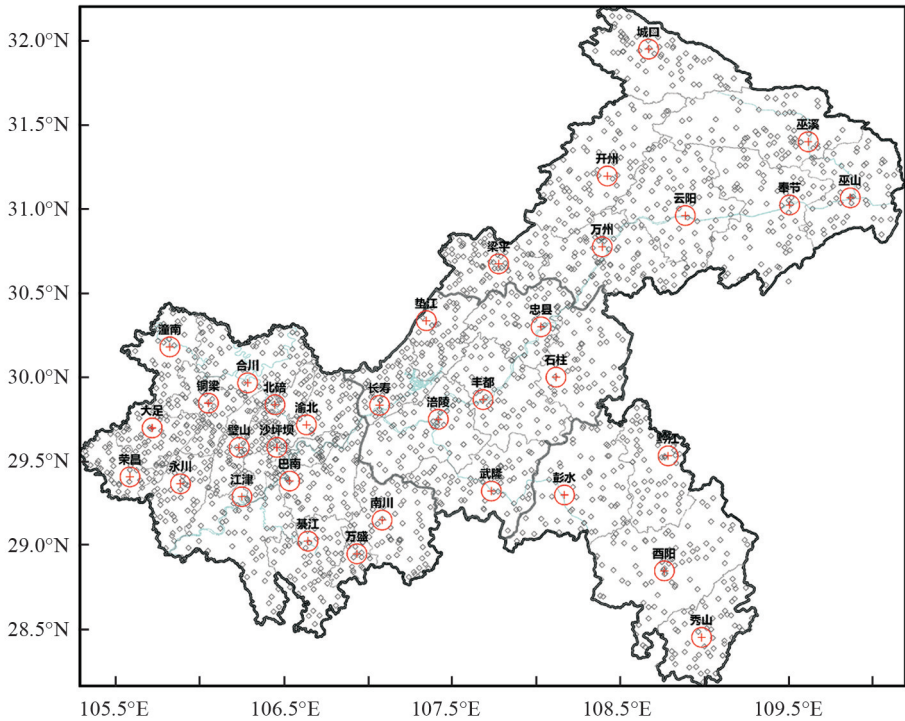
1 资料和方法

1.1 重庆气象站点数据介绍

本研究主要利用重庆国家级气象观测站(简称国家站)和区域自动观测站(简称区域站)2 类站点的 5 类滑动小时累积雨量数据进行研究(表 1), 重庆区域范围内的两类站点总站数为 2 092 个, 它们分布密集且均匀. 本研究将重庆的长寿、涪陵、丰都、垫江、武隆、石柱和忠县等 7 个行政区(县)定义为中部地区, 该地区以东(西)为重庆东(西)部地区(图 1). 其中, 区域站小时数据均源于国家气象信息中心的全国综合气象信息共享平台(CIMISS), 并经过重庆市气象信息与技术保障中心质量控制, 具体使用时我们对极端大值进行了再次复核.

表 1 重庆气象站点信息表

站点类型	数据类型	时间类型	建站时间	实验时段	数量/个
国家站	站点	1 h, 3 h, 6 h, 12 h, 24 h	1951 年以后	2016—2020 年	34
区域站	站点	1 h, 3 h, 6 h, 12 h, 24 h	2007 年以后	2016—2020 年	2 058



审图号: GS(2019)1822 号

(红色大圆小十字点为国家站; 灰色小菱形点为区域站; 粗灰色实线为中部地区边界)

图 1 重庆市国家站和区域站空间分布图

1.2 重庆单站暴雨过程强度评估模型

单站暴雨过程强度评估模型见公式(1):

$$I = \lg \left[\sum_n \frac{S_n}{\left(N_n^{X_0} + \frac{1}{1\,000} \right) \times T_n} + 1 \right] \quad n = 1, 3, 6, 12, 24 \quad (1)$$

式中: I 为单站暴雨过程强度, $I > 0$ 表示该站出现单站暴雨过程, I 值越大过程越强, 反之亦然; T_1 (1 h), T_3 (3 h), T_6 (6 h), T_{12} (12 h), T_{24} (24 h) 分别表示 5 类不同时长. 参考上海中心城区小时累积雨量达 30 ~ 40 mm 时开始出现暴雨积水、达 50 mm 时积涝会显著增多, 北京城区道路出现积水的阈值则为 40 mm/h^[32-33], 结合重庆近些年灾情较重的区域暴雨过程, 综合考虑小时降水阈值既要突出降水序列中的极端个例, 同时需保留强度近于极端的有效信号, 本研究设定 5 类时长的滑动小时累积降水量阈值分别为 $R_1 = 45$ mm, $R_3 = 95$ mm, $R_6 = 145$ mm, $R_{12} = 195$ mm, $R_{24} = 245$ mm, 其中, R_1, R_3 和 R_{24} 分别接近暴雨 (24 h 降雨 50 mm)、大暴雨 (24 h 降雨 100 mm) 和特大暴雨 (24 h 降雨 250 mm) 量级^[34], 且 R_{12}, R_{24} 均对应我国极端 2 级阈值范围内, R_1, R_3, R_6 则均为 1 级^[28]. N_n, S_n ($n = 1, 3, 6, 12, 24$) 分别表示 5 类时长各自达阈值的时次和总雨量, 当 N_n 在任意一类时长的时次大于 0 时, 利用公式 (1) 可得到该单站的暴雨过程强度. 重庆 2016—2020 年 5 年内 50 次区域暴雨过程中能达到 R_n ($n = 1, 3, 6, 12, 24$) 各时长阈值的站数均值占总站数的比值分别为 14.6‰, 5.2‰, 1.9‰, 0.59‰, 0.27‰. $X_0 = 1/2$ 为时次权重 (通过幂平均适当放大 N_n 值较大单站的雨强), $1/1\,000$ 为避错因子, 即在保证正常运算精度的前提下避免分母或真数为零的情况发生.

1.3 重庆区域暴雨过程综合强度评估模型

区域暴雨过程综合强度评估模型见公式 (2):

$$RI = \sum_{n=1}^2 \left[\lg \left(\frac{RS_n}{Z_n + \frac{1}{1\,000}} + \frac{1}{1\,000} \right) \right] \times Z_n^{X_n} \quad (2)$$

式中: RI 为区域暴雨过程综合强度, $RI > 0$ 表示重庆出现区域暴雨过程, RI 值越大区域过程越强, 反之亦然. 具体算法为: 对重庆区域内所有 $I > 0$ 的单站进行区间划分, 由公式 (1) 得到单站 1 h, 3 h, 6 h 滑动小时数据同时达到阈值的最小过程强度为 2.0, 所以 Z_1 和 Z_2 分别设为 I 值在常区间 (0, 2) 和强区间 [2, 2.8] 的站数, RS_1 和 RS_2 则对应 Z_1 和 Z_2 个站点的 I 值之和, $X_1 = 1/6$ 和 $X_2 = 1/3$ 均为空间上的站数权重 (突出强区间的幂结果), $1/1\,000$ 为避错因子. 其中, $n = 1$ 和 $n = 2$ 时对应的 RI 子项值分别称为常区间对数强度和强区间对数强度, 当上述强区间和常区间对数强度中任意一个大于 0 时, 便可利用公式 (2) 算出区域暴雨过程综合强度.

2 结果分析

2.1 2016—2020 年重庆区域暴雨过程时空分析

由公式 (1)、公式 (2) 得到 2016—2020 年气象业务服务中所有区域暴雨过程的综合强度排位. 由表 2 可知, 区域综合强度序列与最大 1 h, 3 h, 6 h 雨强 (即单站中能达到对应时长阈值的时次幂平均小时雨强的极大值)、极端均值序列的相关系数分别为 0.76, 0.80, 0.68, 0.77, 且均通过 99.9% 的信度检验, 由此可见, 区域综合强度与极端雨强关系密切, 特别是极端 1 h、3 h 幂平均小时雨强和极端均值都很突出. 综合考虑, 通过某次区域过程中达到阈值的单站数及其较极端的强区间站数来表征重庆区域暴雨过程的影响范围和站点强度, 由公式 (2) 推算: 极端强区间站数为 4 站、常区间站数为 36 站时, 区域综合强度可到 0.9 以上, 因此, 设定站数分类条件, 即能 (或不能) 同时满足 $Z_2 \leq 4$ 和 $1 \leq Z_1 + Z_2 \leq 40$ 时, 表 2 中区域暴雨过程综合强度 0.9 可以等量划分为 2 类数据, 前 25 位归为较强的极端密集类 (Extreme Concentration, EC), 后 25 位则为较弱的正常疏散类 (Normal Dispersion, ND); 空间分型如表 3 所示, 极端密集类可下分 5 型, 即全域型 (Regional Extreme Concentration, REC)、西部型 (WEC)、东部型 (EEC)、中西部型 (MWEC) 和中东部型 (MEEC), 由于正常疏散类的强度和致灾能力较 EC 类均偏弱, 本研究在此不作分型且仅给出均值.

表 2 重庆 2016—2020 年区域暴雨过程综合强度排位、各时长极端平均小时雨强及极端均值

年份	区域 暴雨 名称	资料时段	区域 综合 强度	最大 1 h /mm·h ⁻¹	最大 3 h /mm·h ⁻¹	最大 6 h /mm·h ⁻¹	最大 12 h /mm·h ⁻¹	最大 24 h /mm·h ⁻¹	极端 均值 /mm·h ⁻¹
2020	“7.15”	7月14日20时—18日14时	1.622	112.8	96.6	85.8	80.6	66.1	88.4
2017	“6.8”	6月8日20时—10日08时	1.590	116.3	96.5	76.4	58.0	—	86.8
2020	“6.11”	6月11日14时—14日20时	1.513	105.3	85.5	70.5	65.9	48.9	75.2
2016	“6.1”	5月31日20时—6月2日20时	1.346	174.8	111.8	92.1	67.9	50.6	99.4
2018	“9.20”	9月19日20时—21日14时	1.324	95.0	72.1	60.0	16.4	—	60.9
2020	“7.25”	7月25日14时—26日20时	1.300	92.5	68.9	54.2	32.5	—	62.0
2016	“6.19”	6月18日18时—20日14时	1.280	91.3	89.4	73.4	57.3	33.5	69.0
2016	“6.24”	6月23日18时—25日08时	1.279	111.6	91.4	72.7	53.3	—	82.3
2016	“7.18”	7月18日14时—20日08时	1.273	144.4	100.5	79.4	56.5	28.8	81.9
2019	“6.21”	6月20日20时—22日20时	1.255	94.5	73.7	55.7	—	—	74.6
2017	“9.26”	9月26日20时—28日15时	1.254	122.9	105.2	84.4	47.9	23.7	76.8
2018	“7.2”	7月2日17时—6日14时	1.251	147.5	116.0	84.5	65.2	49.5	92.5
2020	“6.27”	6月26日20时—28日14时	1.195	106.2	93.1	88.7	75.2	58.4	84.3
2019	“7.22”	7月22日14时—23日14时	1.186	86.2	52.8	—	—	—	69.5
2017	“9.17”	9月17日22时—20日14时	1.161	115.7	88.7	70.9	52.3	—	81.9
2019	“4.19”	4月19日08时—21日20时	1.154	109.6	83.1	59.5	—	—	84.1
2017	“8.7”	8月7日20时—9日08时	1.066	102.6	64.4	36.2	—	—	67.7
2018	“8.21”	8月21日20时—23日14时	1.047	91.3	81.2	56.1	23.1	—	62.9
2017	“9.8”	9月8日20时—10日20时	1.024	115.3	90.1	72.1	56.0	—	83.4
2018	“6.18”	6月17日02时—19日14时	1.010	71.7	64.6	59.5	48.2	—	61.0
2019	“7.31”	7月29日08时—31日20时	0.993	83.4	51.6	—	—	—	67.5
2018	“5.21”	5月21日16时—22日20时	0.979	84.5	59.0	53.6	—	—	65.7
2017	“7.13”	7月13日20时—16日08时	0.977	72.9	55.4	44.7	29.2	—	50.6
2018	“4.21”	4月21日20时—22日20时	0.972	88.5	61.2	—	—	—	74.9
2020	“7.1”	6月30日14时—7月2日14时	0.954	84.2	56.6	—	—	—	70.4
2020	“3.27”	3月26日20时—28日08时	0.885	82.0	71.4	54.9	—	—	69.4
2019	“8.6”	8月6日08时—8日08时	0.879	110.8	92.4	71.4	56.4	—	82.8
2019	“8.28”	8月27日14时—29日14时	0.876	74.6	48.7	24.3	—	—	49.2
2020	“6.17”	6月16日20时—18日08时	0.856	86.7	62.9	55.0	—	—	68.2
2019	“6.5”	6月4日20时—5日20时	0.829	80.9	53.4	—	—	—	67.2
2016	“6.30”	6月30日02时—7月1日10时	0.811	58.3	59.3	65.8	55.0	40.2	55.7
2017	“7.5”	7月5日20时—9日08时	0.713	63.0	46.1	35.1	—	—	48.1
2019	“6.28”	6月27日20时—29日08时	0.644	71.3	54.6	—	—	—	63.0
2018	“4.4”	4月4日20时—6日08时	0.636	69.5	55.3	49.4	28.8	—	50.8
2020	“6.20”	6月19日20时—23日08时	0.631	73.5	55.9	—	—	—	64.7
2019	“6.15”	6月14日20时—17日08时	0.609	61.0	49.3	—	—	—	55.2
2020	“7.12”	7月10日20时—13日20时	0.607	53.0	58.8	44.5	—	—	52.1
2017	“5.20”	5月20日14时—23日08时	0.594	70.8	52.1	—	—	—	61.5
2018	“5.4”	5月4日20时—6日20时	0.572	64.1	46.7	—	—	—	55.4
2016	“7.13”	7月13日19时—15日08时	0.417	81.9	31.8	—	—	—	56.9
2019	“6.7”	6月7日20时—9日20时	0.398	72.0	32.2	—	—	—	52.1
2019	“5.18”	5月18日00时—20日09时	0.375	62.5	49.3	—	—	—	55.9
2016	“6.27”	6月26日20时—28日20时	0.340	94.5	58.3	—	—	—	76.4
2017	“10.3”	10月3日08时—5日08时	0.317	—	32.4	44.9	41.3	—	39.5
2018	“4.12”	4月12日20时—13日20时	0.300	56.0	—	—	—	—	56.0
2017	“5.2”	5月2日14时—3日14时	0.295	51.4	32.7	36.6	—	—	40.2
2019	“10.7”	10月6日20时—7日20时	0.270	47.8	—	—	—	—	47.8
2019	“10.4”	10月3日20时—6日08时	0.249	45.5	—	—	—	—	45.5
2020	“6.2”	6月1日20时—2日20时	0.238	52.8	—	—	—	—	52.8
2017	“6.3”	6月3日20时—5日08时	0.021	—	—	—	—	10.2	10.2

注：“—”表示无单站的滑动小时数据能达到对应时长的阈值。

表 3 重庆 2016—2020 年区域暴雨过程综合强度评估具体信息

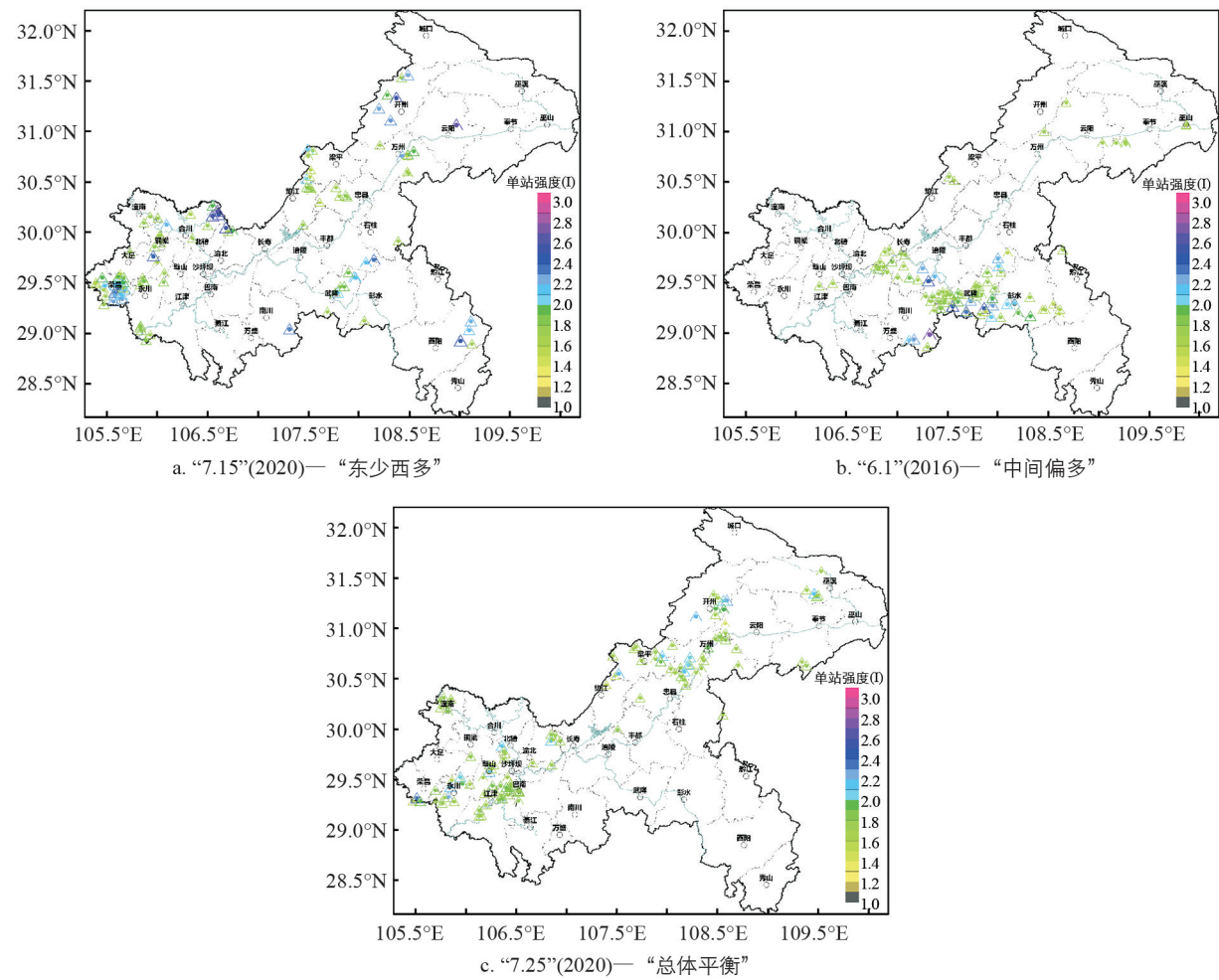
分类	分型	区域暴雨 名称(年份)	区域 综合 强度	单站数	强区 间站数	强区间 对数 强度	主要聚集地(站数)	最强单站(单站强度)
极端 密集类	全域型	“7.15”(2020)	1.622	101	35	1.139	荣昌(18)合川(9)	云阳梅峰水库(2.643)
		“6.1”(2016)	1.346	88	16	0.868	武隆(36)彭水(10)	南川大有(2.697)
		“7.25”(2020)	1.300	113	14	0.787	中心城区(27)万州(19)	荣昌清升(2.302)
		“6.19”(2016)	1.280	45	15	0.858	万盛、酉阳(各 9)	江津珞璜(2.534)
		“6.27”(2020)	1.195	31	11	0.791	永川(10)大足(6)	大足邮亭(2.625)
		“8.7”(2017)	1.066	59	6	0.598	垫江(14)长寿(12)	垫江白家(2.224)
		“7.31”(2019)	0.993	73	4	0.503	中心城区(18)开州(10)	巴南石家(2.113)
		“7.13”(2017)	0.977	33	5	0.561	巫溪(7)永川、荣昌(各 4)	荣昌峰高阳岩(2.205)
		均值	1.222	67.9	13.3	0.763	—	—
	西部型	“6.8”(2017)	1.590	81	33	1.126	中心城区(32)合川(24)	合川保合(2.529)
		“6.24”(2016)	1.279	52	15	0.829	永川(24)大足(7)	永川红庆村(2.519)
		“4.19”(2019)	1.154	32	11	0.762	綦江(13)永川(5)	万盛南门(2.389)
		“7.1”(2020)	0.954	29	5	0.546	大足(7)江津(6)	大足凉风村三社(2.152)
		均值	1.244	48.5	16	0.816	—	—
	东部型	“9.20”(2018)	1.324	59	19	0.876	梁平(30)万州(10)	酉阳米旺(2.319)
		“9.26”(2017)	1.254	58	14	0.807	秀山(29)开州(12)	万州高峰(2.582)
		“9.8”(2017)	1.024	29	5	0.627	万州(7)彭水(5)	石柱龙潭(2.511)
		“6.18”(2018)	1.010	20	7	0.654	巫山(9)奉节(8)	巫山两坪(2.270)
		“5.21”(2018)	0.979	26	6	0.588	梁平(7)开州(6)	开州七圣(2.218)
		均值	1.118	38.4	10.2	0.710	—	—
	中西部型	“7.18”(2016)	1.273	68	14	0.806	荣昌(18)永川(10)	荣昌双河大石(2.582)
		“7.22”(2019)	1.186	71	11	0.708	合川(12)涪陵(11)	合川云门(2.134)
		“8.21”(2018)	1.047	60	5	0.580	丰都(14)梁平、忠县(各 7)	丰都新建(2.403)
		均值	1.169	66.3	10	0.698	—	—
	中东部型	“6.11”(2020)	1.513	85	26	1.041	开州(18)酉阳(13)	酉阳铜鼓(2.553)
		“6.21”(2019)	1.255	51	14	0.806	开州(10)涪陵(9)	涪陵百胜(2.334)
		“7.2”(2018)	1.251	54	11	0.796	涪陵(11)彭水(6)	酉阳杉岭(2.579)
		“9.17”(2017)	1.161	29	11	0.762	长寿(8)垫江、酉阳(各 6)	垫江胡家湾(2.496)
		“4.21”(2018)	0.972	21	6	0.582	黔江(7)长寿、酉阳(各 3)	长寿石回(2.178)
		均值	1.230	48	13.6	0.797	—	—
正常 疏散类		该类的总体均值	1.200	54.72	12.76	0.760	—	—
		该类的总体均值	0.534	10.36	1.08	0.247	—	—

注：中心城区包含沙坪坝、渝北、北碚、巴南及其余市区的所有站点。

2.1.1 全域型(REC)

全域型在重庆极端密集类中占比为 32%，区域综合强度均值达 1.222，分型中排第三位，但单站数均值却为最多(表 3). 该型又可分“东少西多”“中间偏多”和“总体平衡”3 种形态，归因可能是由中—大尺度天气系统如低涡或冷(暖)切变线等造成的. 其中，①“东少西多”形态：2020 年“7.15”单站数和强区间站数的东—西对比值分别为 25：55 和 11：19，荣昌和合川聚集的单站分别为最多和次多(图 2a)；②“中间偏多”

形态：2016 年“6.1”密集影响中部的武隆、涪陵、丰都和长寿的 48 个站(强区间 10 个站)，相比而言，在渝东的彭水—黔江和梁平—云阳—奉节—巫山共 23 个站(强区间 3 个站)，渝西的中心城区、璧山和南川总计 17 个站(强区间 3 站)(图 2b)，2017 年“8.7”与之类似，主要密集影响重庆中部的垫江—长寿—丰都—石柱—忠县一线 30 个站(强区间 5 个站)，而在渝西部和东部分别有 12 个站和 17 个站(图略)，上述 2 例中东部与西部的站数之和都不及中部，可见中部地区在全域中的主体优势；③“总体平衡”形态：2020 年“7.25”的单站数和强区间站数在中东部分别为 53 个站、7 个站，西部分别为 60 个站、7 个站(图 2c)，2019 年“7.31”、2017 年“7.13”也很相似，二者单站数(强区间站数)在中东部和西部的比值依次为 36(3)：37(1)、18(2)：15(3)(图略)，全域站点分布基本平衡、极端强区间站数也很接近。REC 三态平均强度由强到弱依次为“东少西多”(7.15, 6.19, 6.27)、“中间偏多”(6.1, 8.7)、“总体平衡”(7.25, 7.13, 7.31)(表 3)。



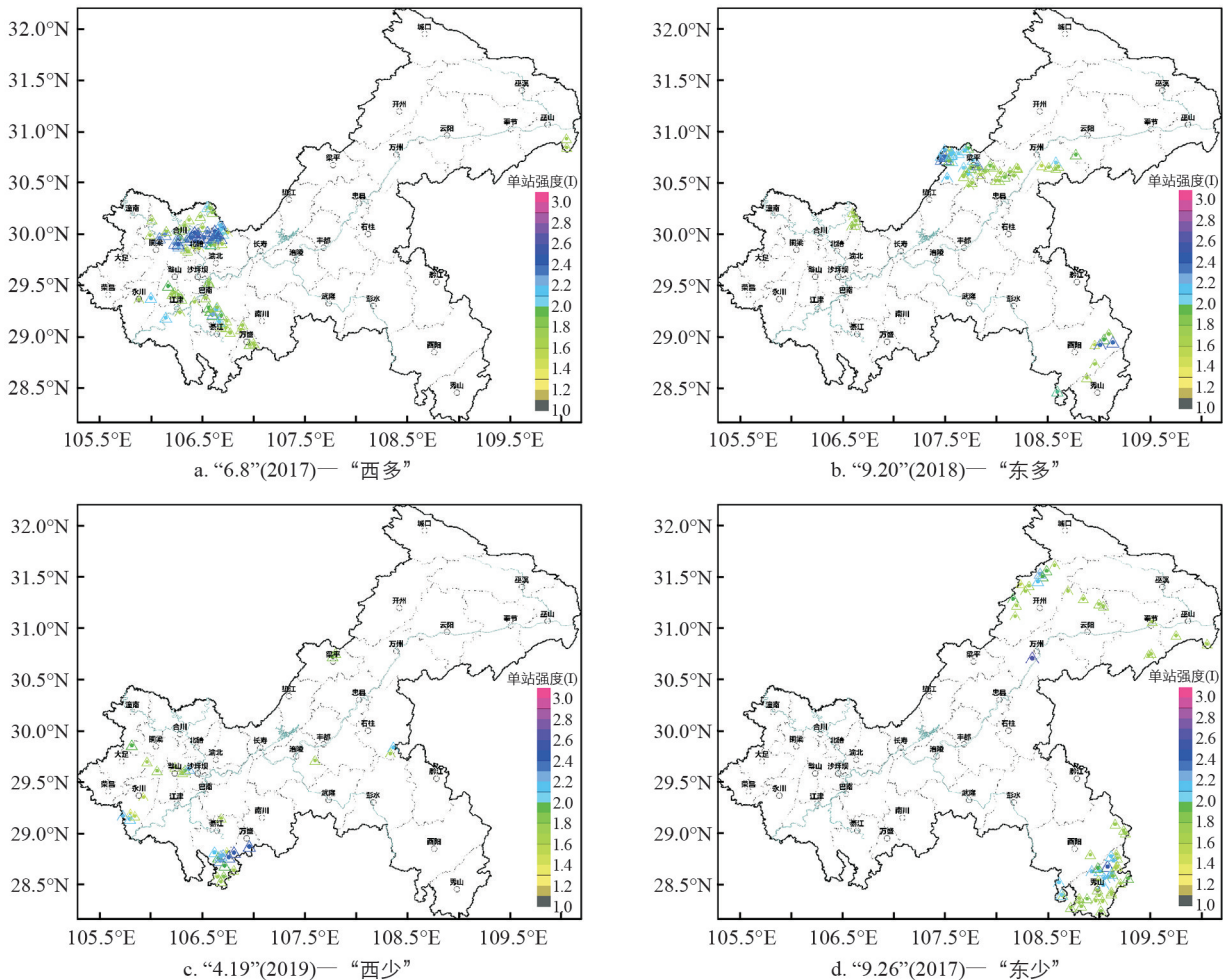
审图号：GS(2019)1822 号

图 2 重庆全域型区域暴雨过程的单站强度空间分布态

2.1.2 西部型和东部型(WEC 和 EEC)

西部型和东部型在重庆极端密集类中占比分别为 16%和 20%，西部型的单站数和强区间站数均值较东部型分别偏多 10.1 个和 5.8 个，西部型、东部型的区域综合强度分别为最强和最弱，二者反差明显(表 3)。2017 年“6.8”和 2018 年“9.20”分别为西部型和东部型的最强过程，前者 79 个站点集中于渝西的中心城区和合川、璧山、铜梁、永川、江津、綦江、万盛，占单站数的 97.5%，含所有 33 个强区间站，合川保合最强，后者则主要分布在渝东的梁平—万州—云阳—线 41 个单站及酉阳 7 个站、秀山 1 个站，包含所有 19 个强区间站，最强站为酉阳米旺(图 3a—b)。对比而言，2019 年“4.19”有 23 个单站(占比 71.9%)聚集在渝

西部的綦江、万盛、中心城区、永川, 且含 10 个强区间站, 万盛南门最强; 2017 年“9.26”有 58 个站、100% 的单站在渝东部的秀山、酉阳、开州、万州、云阳、奉节和巫山, 含所有 14 个强区间站, 万州高峰最强(图 3c-d). 将上述两型逐一分析可见, WEC 和 EEC 型均呈典型的片区式聚集, 短时极端降水成灾的概率较大, 西部型尤其值得重点关注.



审图号: GS(2019)1822 号

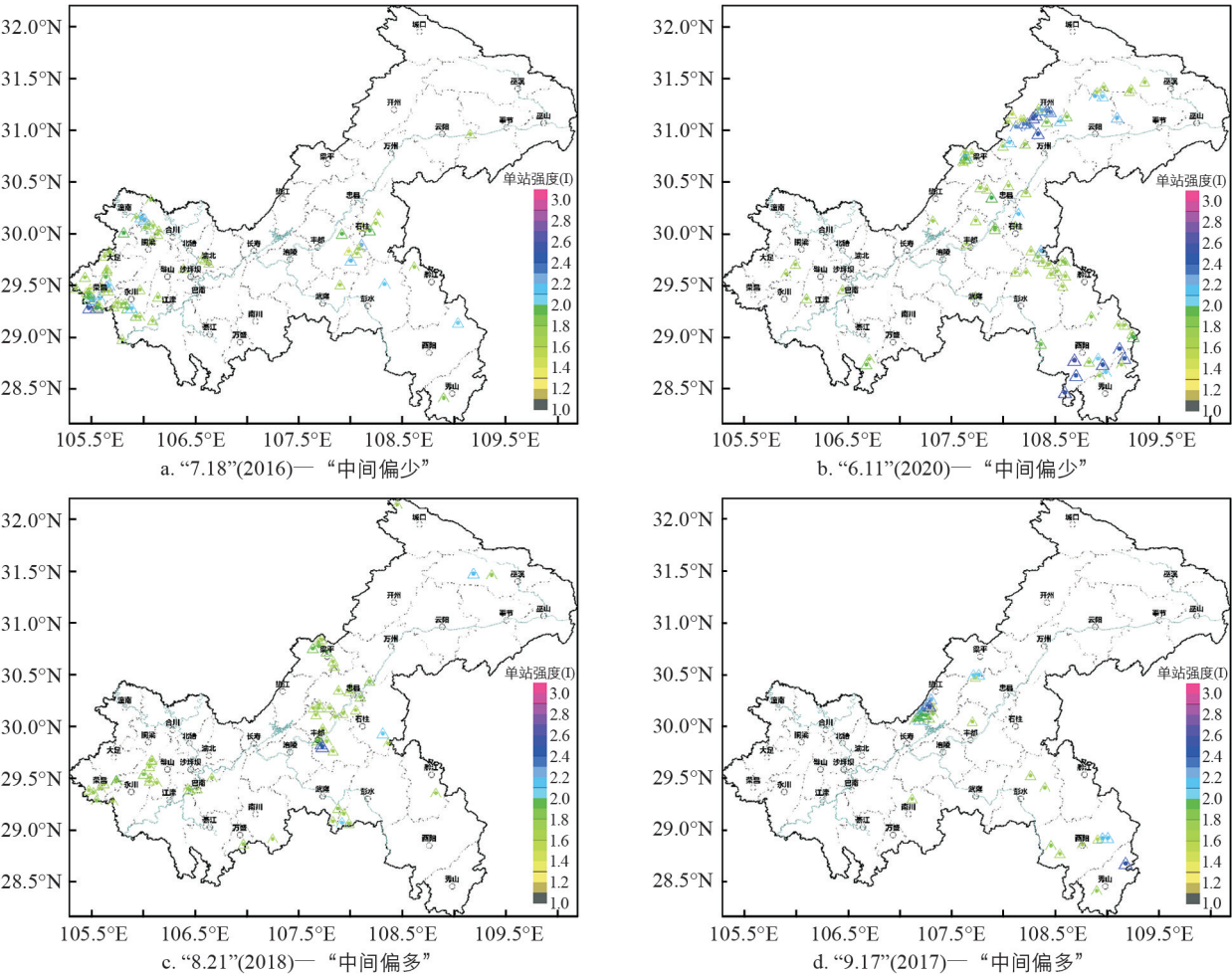
图 3 重庆西部型(a, c)和东部型(b, d)区域暴雨过程的单站强度空间分布态

2.1.3 中西部型和中东部型(MWEC 和 MEEC)

中西部型和中东部型在重庆极端密集类中占比分别为 12% 和 20%, 中东部型(排第 2 位)较中西部型(排第 4 位)总体偏强 0.061, 强区间站数均值也偏多 3.6 个(表 3). 上述两型以重庆中部为关键区, 大体可划为以下 2 种形态, ①“中间偏少”形态: 2016 年“7.18”主要影响渝西的中心城区—合川—潼南—大足—荣昌—永川一线的 49 个站(含 10 个强区间站), 而在中部地区仅有石柱—丰都—武隆共计 11 个站(含 2 个强区间站), 2020 年“6.11”与之类似, 中部的忠县、石柱和丰都也仅有 15 个站、含 2 个强区间站, 而在东部的梁平—开州—万州—云阳—奉节—巫溪及彭水—黔江—酉阳—秀山累计有 62 个站、含 24 个强区间站(图 4a-b); ②“中间偏多”形态: 2018 年“8.21”在中部的忠县—石柱—丰都—武隆沿线 25 个站含 3 个强区间站, 而在渝西的荣昌—大足—永川—铜梁—璧山—中心城区一线有 19 个站且无强区间站, 2017 年“9.17”与之相似, 中部长寿、垫江、忠县和丰都总计 17 个站, 含 7 个强区间站, 而在东部的酉阳、秀山、彭水和梁平总计 11 个站, 含 4 个强区间站(图 4c-d). 综合 MWEC 和 MEEC 的两态强度对比得到, “中间偏少”(7.18, 6.11, 7.22, 6.21, 4.21, 7.2)明显强于“中间偏多”(8.21, 9.17).

2.1.4 正常疏散类(ND)

2016—2020 年重庆区域暴雨过程中正常疏散类区域过程综合强度、强区间对数强度分别较极端密集类偏弱 0.666、0.513, 单站数、强区间站数也分别偏少 44.4 次、11.7 次(表 3), 由此可见, 疏散类相对密集类明显偏弱, 但仍不能忽略局地极端强降水的影响, 如表 2 中 2019 年“8.6”过程属于 ND 类, 这次过程中极端 1 h、3 h、6 h、12 h 幂平均小时雨强可达到 110.8 mm/h、92.4 mm/h、71.4 mm/h 和 56.4 mm/h, 其中, 忠县洋渡镇单站强度达 2.521, 为 ND 类中最强单站, 另外还有 2016 年“6.30”大足骑胜村(2.443)、2020 年“3.27”彭水潘龙山(2.317)、2018 年“4.4”丰都高镇(2.310)等(表略).

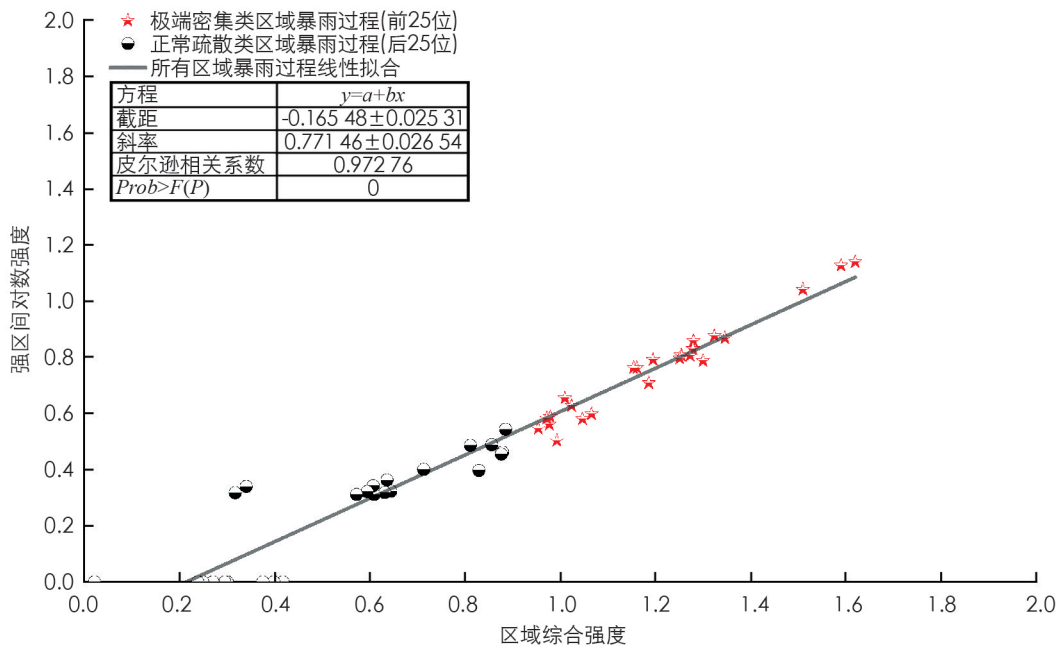


审图号: GS(2019)1822 号

图 4 重庆中西部型(a, c)和中东部型(b, d)区域暴雨过程的单站强度空间分布态

2.2 2016—2020 年重庆区域暴雨过程线性拟合

表 3 中重庆极端密集类区域过程的综合强度序列与单站数、强区间站数的相关系数分别为 0.71、0.97, 且均呈显著性正相关(通过 99.9% 的信度检验). 图 5 为 5 年间区域暴雨过程强区间对数强度和区域综合强度的线性回归, 44 个散点分布于趋势线附近, 显著的正相关(皮尔逊系数=0.973 和 $p=0$)可通过 99% 的信度检验, 这说明所有极端密集类区域暴雨过程和多数正常疏散类过程的区域综合强度均由 [2, 2.8] 强区间站决定, 强区间站的对数强度较常区间起更明显的主导作用, 同时保留对无强区间站(即强区间对数强度为零, 如 ND 类中的 2016 年“7.13”、2017 年“5.2”“6.3”、2018 年“4.12”、2019 年“6.7”“5.18”“10.4”“10.7”和 2020 年“6.2”等 9 次过程)过程的评估能力, 这与区域暴雨过程综合强度评估模型设计的初衷一致(表 2).



红白五角星为表 2 前 25 位 EC 类过程, 黑白圆点为后 25 位 ND 类过程.

图 5 重庆 2016—2020 年区域暴雨过程综合强度与强区间对数强度的线性拟合

3 结论和讨论

1) 本研究显示, 重庆 2016—2020 年 50 场区域暴雨过程可分为两大类, 在不考虑下垫面及城乡排水差异的前提下, 应重点考虑极端密集类的致灾效应, 但不能忽视正常疏散类的局地突发影响. 其中, 极端密集类下分各型的平均区域综合强度由强至弱依次为 WEC, MEEC, REC, MWEC, EEC, 极端密集类的区域综合强度与单站数、强区间站数均呈显著正相关关系, 后者相关系数达 0.97.

2) 单站点分布范围相对较广的全域型可分为“东少西多”“中间偏多”“总体平衡”3 态, 而中西部型和中东部型极端密集类都分为“中间偏少”“中间偏多”两态, 其中, REC 和 MWEC/MEEC 下对应“东少西多”和“中间偏少”的致灾力为最强, 相比而言, WEC/EEC 体现为分片区聚集成灾, 虽影响范围较小但短时极端强降水不可忽视, 尤其是重庆西部地区, 致灾概率较东部更大、破坏力也更强.

3) 对所有区域暴雨过程而言, 区域综合强度与极端 1 h, 3 h, 6 h 幂平均小时雨强、极端均值的相关系数分别为 0.76, 0.80, 0.68, 0.77, 区域综合强度与极端雨强关系密切; 单站过程强度在 $[2, 2.8]$ 强区间的站点主导区域暴雨过程的综合强度, 其对数强度与区域综合强度呈显著正相关, 5 年间 88% 的区域过程评估均可适用.

讨论: 本研究发现, 研究区域暴雨过程的强区间站与对应过程中大暴雨及以上量级的落区有较好匹配, 常区间站则对应暴雨—大暴雨量级(图略). 需注意的是, 公式(1)–(2)设计时, X_0, X_1, X_2 3 个幂指数之和恰为 1.0, 说明单站过程的时次和区域过程的站数各为 1/2 等权重. 单站暴雨过程评估模型中 5 类不同时长选取的阈值可根据研究或业务对常规或极端事件要求作相应调整, 实际应用时建议根据各自需求用百分位数法来划定单站暴雨过程和区域暴雨过程的强度等级. 本研究主要针对极端降水过程的单站和区域强度进行评估, 并未与实际灾情关联, 且重庆范围内的区域站多位于城市楼房、公园、郊区或乡镇僻静地区, 城市排水管网不一、下垫面情况复杂, 因此, 单站强度评估模型的应用对市郊、山地或道路两侧等高风险次生灾害区域具有指示意义.

参考文献:

[1] IWASHIMA T, YAMAMOTO R. A Statistical Analysis of the Extreme Events: Long-Term Trend of Heavy Daily Pre-

- precipitation [J]. Journal of the Meteorological Society of Japan, 1993, 71(5): 637-640.
- [2] KARL T, KNIGHT R. Secular Trends of Precipitation Amount, Frequency, and Intensity in the United States [J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 1998, 79(2): 231-241.
- [3] SUPPIAH R, HENNESSY K J. Trends in Total Rainfall, Heavy Rain Events and Number of Dry Days in Australia, 1910—1990 [J]. International Journal of Climatology, 1998, 18(10): 1141-1164.
- [4] MASON S J, WAYLEN P R, MIMMACK G M, et al. Changes in Extreme Rainfall Events in South Africa [J]. Climatic Change, 1999, 41(2): 249-257.
- [5] ROY S S, BALLING R C Jr. Trends in Extreme Daily Precipitation Indices in India [J]. International Journal of Climatology, 2004, 24(4): 457-466.
- [6] OSBORN T J, HULME M, JONES P D, et al. Observed Trends in the Daily Intensity of United Kingdom Precipitation [J]. International Journal of Climatology, 2000, 20(4): 347-364.
- [7] 王展, 申双和, 刘荣花. 近 40a 中国不同量级降水对年降水量变化的影响性分析 [J]. 气象与环境科学, 2011, 34(4): 7-13.
- [8] 袁文德, 郑江坤, 董奎. 1962—2012 年西南地区极端降水事件的时空变化特征 [J]. 资源科学, 2014, 36(4): 766-772.
- [9] 丁一汇. 暴雨和中尺度气象学问题 [J]. 气象学报, 1994, 52(3): 274-284.
- [10] 钱维宏, 江漫, 单晓龙. 大气变量物理解析原理及其在区域暴雨分析中的应用 [J]. 气象, 2013, 39(5): 537-542.
- [11] 张虹, 李国平, 王曙东. 西南涡区域暴雨的中尺度滤波分析 [J]. 高原气象, 2014, 33(2): 361-371.
- [12] 钱维宏, 单晓龙, 朱亚芬. 天气尺度扰动流场对区域暴雨的指示能力 [J]. 地球物理学报, 2012, 55(5): 1513-1522.
- [13] 李国平. 青藏高原动力气象学 [M]. 第 2 版. 北京: 气象出版社, 2007.
- [14] 张海霞, 周伟灿, 黄昌兴. 长江流域不同区域暴雨发生机理的比较研究 [J]. 南京气象学院学报, 2002, 25(1): 21-27.
- [15] 丁一汇. 中国气象灾害大典—综合卷 [M]. 北京: 气象出版社, 2008.
- [16] 马力. 中国气象灾害大典—重庆卷 [M]. 北京: 气象出版社, 2008.
- [17] 程炳岩. 重庆市气候业务技术手册 [M]. 北京: 气象出版社, 2012.
- [18] 孔锋, 刘凡, 吕丽莉, 等. 1961—2010 年中国大尺度区域暴雨时空分布特征研究 [J]. 长江流域资源与环境, 2017, 26(4): 631-640.
- [19] 梅平, 张强, 邹旭恺. 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, 2021, 41(1): 128-135.
- [20] 王春学, 马振峰, 秦宁生, 等. 四川盆地区域性暴雨过程的识别及时空变化特征 [J]. 气象科技, 2016, 44(5): 776-782.
- [21] 席官臣. 雅安区域暴雨的气候特征 [J]. 高原山地气象研究, 1992, 12(1): 7-15.
- [22] 袁慧敏, 王秀荣, 范广洲, 等. 长江中下游沿江地区暴雨过程综合评估模型及应用 [J]. 气象, 2012, 38(10): 1189-1195.
- [23] 邹燕, 叶殿秀, 林毅, 等. 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, 2014, 25(3): 360-364.
- [24] 罗梦森, 熊世为, 梁宇飞. 区域极端降水事件阈值计算方法比较分析 [J]. 气象科学, 2013, 33(5): 549-554.
- [25] 郑国, 薛建军, 范广洲, 等. 淮河流域暴雨事件评估模型 [J]. 应用气象学报, 2011, 22(6): 753-759.
- [26] 李建, 宇如聪, 孙激. 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, 2013, 32(1): 11-16.
- [27] 王莉萍, 王秀荣, 张立生, 等. 一种区域降水过程综合强度评估方法的探索和应用 [J]. 气象, 2018, 44(11): 1479-1488.
- [28] ZHENG Y G, XUE M, LI B, et al. Spatial Characteristics of Extreme Rainfall over China with Hourly through 24-Hour Accumulation Periods Based on National-Level Hourly Rain Gauge Data [J]. Advances in Atmospheric Sciences, 2016, 33(11): 1218-1232.
- [29] 吴梦雯, 罗亚丽. 中国极端小时降水 2010—2019 年研究进展 [J]. 暴雨灾害, 2019, 38(5): 502-514.
- [30] 王佳津, 陈朝平, 龙柯吉, 等. 四川区域暴雨过程中短时强降水时空分布特征 [J]. 高原山地气象研究, 2015, 35(1): 16-20.
- [31] LU E, ZHAO W, GONG L, et al. Determining Starting Time and Duration of Extreme Precipitation Events Based on Intensity [J]. Climate Research, 2015, 63(1): 31-41.
- [32] 史军, 穆海振, 杨涵洧, 等. 上海中心城区暴雨内涝阈值研究 [J]. 暴雨灾害, 2016, 35(4): 344-350.
- [33] 尤凤春, 扈海波, 郭丽霞. 北京市暴雨积涝风险等级预警方法及应用 [J]. 暴雨灾害, 2013, 32(3): 263-267.
- [34] 丁一汇, 张建云. 暴雨洪涝 [M]. 北京: 气象出版社, 2009.