

郭蕾, 李谢辉, 刘雨亭. 城市化对川渝地区极端气候事件的影响. 应用气象学报, 2023, 34(5): 574-585.

DOI: 10.11898/1001-7313.20230506

城市化对川渝地区极端气候事件的影响

郭蕾¹⁾ 李谢辉^{1)2)*} 刘雨亭¹⁾

¹⁾(成都信息工程大学大气科学学院, 成都 610225)

²⁾(中国气象局兰州干旱气象研究所, 兰州 730020)

摘 要

为探讨城市化对川渝地区极端气候事件的影响, 利用 1971—2020 年川渝地区 46 个气象站的逐日气温和降水数据, 以及社会经济、人口、土地利用、夜间灯光遥感数据, 将气象站划分为城市站、城乡站和乡村站 3 类, 得到近 50 年 21 个极端气候指数的时间序列, 分析城市化对极端气候事件的影响和贡献率。结果表明: 近 50 年川渝地区 3 类气象站极值指数和暖指数均呈上升趋势, 而冷指数均呈下降趋势, 极端降水量和极端降水强度均呈增加趋势。城市化影响对城乡站和城市站的最高和最低气温最小值、霜冻、热夜日数和日较差, 以及城市站的冷夜和暖夜日数均影响较大, 对其余指数的影响较小。城市化影响对城乡站和城市站的中雨日数、1 d 和 5 d 最大降水量、强降水量和年降水量的贡献率均为 100.00%, 对城乡站大雨日数、城乡站和城市站特强降水量的贡献率较大, 而对其余指数的影响相对较小。

关键词: 极端温度指数; 极端降水指数; 城市化影响; 城市化影响贡献率; 川渝地区

引 言

IPCC 第 6 次评估报告 (AR6) 指出人类活动导致极端气候事件更频繁和强烈^[1]。在全球气候进一步增暖背景下, 降水日数明显减少使区域性持续高温过程增长显著、增幅最大^[2]。2021 年 7 月河南特大暴雨累积雨量大、小时雨强极强、强降水集中、雨强骤然增长, 同时局部短时暴雨超过引发滑坡的临界降水强度造成次生地质灾害^[3]。2018 年联合国《世界城市化展望报告》提出, 近 30 年全球城市化水平从 39% 上升到 52%, 并预测到 2050 年全球城镇化率将由目前的 55% 达到 68%^[4]。城市化对气候的影响主要表现为温室气体的排放与土地利用类型的改变等^[5-6], 城市化发展的差异导致温度变化的不均匀性并加剧气温变化的非均匀性^[7], 因此城市化率的增加势必对城市气候产生重要影响。

国内外学者在城市化对极端气候事件的研究方面取得了大量成果。针对极端温度事件, Karl 等^[8]

发现 20 世纪美国城市热岛效应使区域平均温度升高 0.06℃, 日最低温度升高 0.13℃。Sun 等^[9]揭示近 60 年三分之一的中国平均变暖趋势和约 45% 的夜间极端高温的升高均由城市化影响造成。唐国利等^[10]利用 1961—2004 年我国西南地区 322 个气象站的气温观测数据, 发现城市化对该区域气温趋势的相对影响较强, 城市热岛增温贡献率为春季最大。任国玉等^[11]利用 1962—2011 年石家庄站逐日平均、最低和最高气温得出城市化对基于最低气温的极端气温指数影响明显, 对基于最高气温的极端气温指数影响较小, 城市化对冷夜和暖夜日数的影响分别为 $-1.13 \text{ d} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$ 和 $1.48 \text{ d} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$, 相应的城市化贡献率为 28.32% 和 37.76%。

在城市化对极端降水事件影响方面, Shepherd 等^[12]分析美国部分城市降水变化得出, 城市平均降雨量增加 5.6%, 集中城镇化模式下降雨的空间分布更加集中, 降雨中心的范围和强度更大。Wu 等^[13]研究 1971—2016 年小时降水和土地利用数据得出大部分站点城市化与突发性极端降雨频繁发生

2023-03-22 收到, 2023-06-25 收到再改稿。

资助项目: 中国气象局干旱气象科学研究基金项目 (IAM202201), 云南省科技厅重点研发计划 (202203AC100005, 202203AC100006)

* 通信作者, 邮箱: lixiehui325328@163.com

为正相关,强城市热岛引起的较大对流有效位能为暴雨的对流启动和强化提供了能量。何玉秀等^[14]研究发现 1976—2015 年太湖平原地区的极端降水频率与强度均呈上升趋势,城市地区极端降水剧烈且城市化贡献率为 11%~53%,而城乡地区极端降水日数呈下降趋势,且降水更加集中。

川渝地区位于我国西南部,地形地貌复杂,气候类型多样,内有国务院在西部地区重点培育和发展的成渝经济圈。城市化发展对川渝地区的极端气候事件产生重要影响,如张小玲等^[15]基于 1960—2018 年成都地面气象站气温数据发现极端高温事件在成都市表现为显著增加,城市化对暖夜指数、最低气温和冷夜指数的贡献率分别为 26.88%,34.00%和 45.81%。黄晓远等^[16]利用 UEWA-5 模拟分析发现 5 个极端降水指数的高值区位于四川盆地西缘,预估 1995—2060 年 5 个极端降水指数均呈增大趋势。Wang 等^[17]发现 1994—2015 年的快速城市化对热岛效应和潜在城市地表特征的改变导致川渝地区夏季极端降水的增强。

进入 21 世纪,川渝地区极端气候事件呈现频发且强度增大趋势^[18],随着成渝经济圈的快速发展与人口集中,城市化效应更加明显。目前川渝地区城市化对极端气候事件的具体影响研究还较少,因此本文利用 1971—2020 年川渝地区 46 个气象站的逐

日气温和降水数据,社会经济、人口、土地利用、夜间灯光遥感数据等,通过层次聚类等方法,将气象站划分为乡村站、城乡站和城市站 3 类,通过计算 21 个极端气候指数,采用线性趋势等方法分析城市化进程中川渝地区内极端气候事件的时空变化特征,以及城市化对川渝地区极端气候事件的影响及贡献率。该研究结果可为川渝地区在城市化发展中,减少灾损、合理城市规划和城市可持续发展提供参考依据。

1 数据和方法

1.1 研究区概况

川渝地区(26°03′~34°19′N,97°22′~110°39′E)为青藏高原与长江中下游平原的过渡带,西部为高原和山地,中东部为盆地和丘陵,总面积为 $5.68 \times 10^5 \text{ km}^2$ 。该区域存在显著立体气候资源,但气象灾害频发。区域内人口众多,城镇化率高。截至 2020 年,城区面积达到 $1.05 \times 10^4 \text{ km}^2$,常住人口约为 1.16 亿。近 20 年国内生产总值 GDP 由 5.8×10^3 亿元增长到 7.36×10^4 亿元,城镇化率由 31.15% 上升至 63.12%^[19]。川渝地区地理位置和高程分布如图 1 所示。

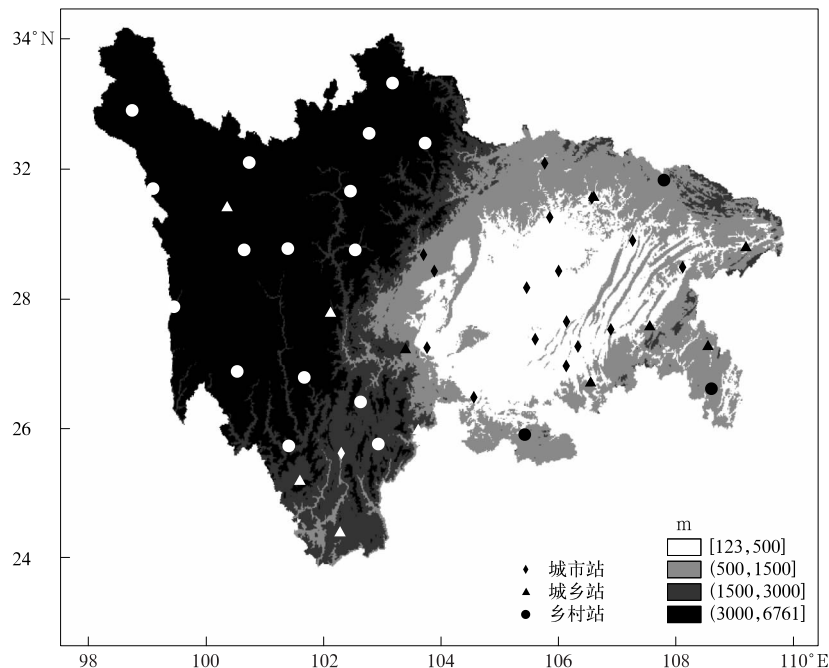


图 1 研究区地理位置和高程(填色)分布

Fig. 1 Geographical location and elevation(the shaded) of the target area

1.2 数据

所用气象站数据来源于中国气象数据共享网提供的中国地面气候资料日值数据集(V3.0), 时间长度为1971—2020年, 包括46个气象站; 土地利用、中国人口和GDP空间分布公里网格数据集均来自于中国科学院资源环境科学与数据中心^[20-21], 水平分辨率为1 km×1 km; DMSP-OLS夜间灯光遥感数据来源于国家地球系统科学数据中心, 水平分辨率为1 km×1 km。

1.3 研究方法

1.3.1 气象站分类

综合考虑人口、GDP经济、土地利用和夜间灯光遥感4种数据对气象站进行分类, 即提取气象站周围5 km缓冲区内反映人口、经济发展、城市用地规模和人类活动强度的数据, 利用层次聚类方法对

气象站进行聚类分析, 结合谷歌地图(Google Earth)验证划分结果, 川渝地区46个气象站分为15个城市站、12个城乡站和19个乡村站(图1)。

1.3.2 极端气候指数

对某特定范围和时间尺度的天气气候现象, 当指标满足极端性标准, 即高于(或低于)上限(或下限)末端的阈值时, 称为极端天气气候事件^[22]。21世纪初气候变化检测和指数专家组(expert team on climate change detection and indices, ETCCDI)发布27个具有代表性的极端气候指数, 并用于研究全球或区域极端气候变化^[23]。

本文根据研究区特点选出12个极端温度指数和9个极端降水指数共21个极端气候指数, 并对极端气候指数分类, 具体见表1。

表1 极端气候指数定义

Table 1 Definitions of extreme climate indices

指数类型	分类	名称	指数缩写	定义	单位
	极值指数	最高气温最大值	TXx	每月平均日最高气温最大值	°C
		最低气温最大值	TNx	每月平均日最低气温最大值	°C
		最高气温最小值	TXn	每月平均日最高气温最小值	°C
		最低气温最小值	TNn	每月平均日最低气温最小值	°C
极端温度指数	绝对指数	霜冻日数	FD0	一年中日最低气温小于0°C的日数	d
		夏季日数	SU25	一年中日最高气温大于25°C的日数	d
		热夜日数	TR20	一年中日最低气温大于20°C的日数	d
	相对指数	冷夜日数	TN10P	日最低气温小于10%分位值的日数	d
		冷昼日数	TX10P	日最高气温小于10%分位值的日数	d
		暖夜日数	TN90P	日最低气温大于90%分位值的日数	d
		暖昼日数	TX90P	日最高气温大于90%分位值的日数	d
	其他指数	月平均日较差	DTR	日最高气温和日最低气温之差的月平均值	°C
极端降水指数	绝对指数	中雨日数	R10mm	日降水量大于10 mm的日数	d
		大雨日数	R25mm	日降水量大于25 mm的日数	d
		1 d最大降水量	RX1DAY	一年中最大日降水量	mm
		5 d最大降水量	RX5DAY	一年中连续5 d最大日降水量	mm
	相对指数	强降水量	R95P	日降水量大于95%分位值的年累积降水量	mm
		特强降水量	R99P	日降水量大于99%分位值的年累积降水量	mm
	降水强度	SDII	年降水量与湿日日数(日降水量大于1 mm)的比值	mm·d ⁻¹	
	持续指数	持续湿期	CWD	日降水量大于1 mm的最大持续降水日数	d
其他指数	年降水量	PRCPTOT	日降水量大于1 mm的日累积量值	mm	

1.3.3 城市化影响和贡献率

参考周雅清等^[24]的研究, 主要利用城市化贡献率定量描述极端气候事件趋势变化的城市化影响。

城市化影响(ΔA_{j1})表达式为

$$\Delta A_{j1} = A_j - A_1. \quad (1)$$

式(1)中, A_1, A_j ($j=2, 3$) 分别代表乡村站、城乡站与城市站极端气候指数的变化趋势。 $\Delta A_{j1} > 0$, 表

示城市化影响使指数上升; $\Delta A_{j1} = 0$, 表示城市化影响为0; $\Delta A_{j1} < 0$, 表示城市化影响使指数下降。

城市化影响贡献率(E_{j1})表达式为

$$E_{j1} = \left| \frac{\Delta A_{j1}}{A_j} \right| \times 100\% = \left| \frac{A_j - A_1}{A_j} \right| \times 100\%. \quad (2)$$

E_{j1} 反映城市化影响占城市站极端气候指数变化趋

势的百分比。 $E_{j1}=0$,表示城市化对指数没有贡献; $E_{j1}=100\%$,表示指数的变化趋势完全归因于城市化影响。若 $E_{j1}>100\%$,即存在未知的局地因子影响,认为是 100% [25]。

2 研究结果

2.1 极端温度指数时间序列

图2为1971—2020年川渝地区极端温度指数的时间序列,表2为极端温度指数年代际变化率。由图2和表2可知,4个极值指数呈上升趋势,且均达到0.01显著性水平,上升趋势明显,其中最高气

温最大值和最低气温最小值的上升趋势最大,均为 $0.37\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot(10\text{ a})^{-1}$,最低气温最大值的上升趋势较小,为 $0.24\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot(10\text{ a})^{-1}$;对于绝对指数,霜冻日数呈下降趋势,夏季日数和热夜日数均呈增加趋势,且3个指数均达到0.01显著性水平,变化趋势明显,其中霜冻日数的变化率为 $-2.68\text{ d}\cdot(10\text{ a})^{-1}$,夏季日数的增加率为 $3.82\text{ d}\cdot(10\text{ a})^{-1}$;对于相对指数,冷夜日数、冷昼日数呈下降趋势,变化率分别为 $-3.24\text{ d}\cdot(10\text{ a})^{-1}$ 和 $-1.85\text{ d}\cdot(10\text{ a})^{-1}$,暖夜日数、暖昼日数则呈上升趋势,上升率分别为 $2.97\text{ d}\cdot(10\text{ a})^{-1}$ 和 $3.39\text{ d}\cdot(10\text{ a})^{-1}$,且4个指数均达到0.01显著性水平;对于其他指数,月平均日较差呈

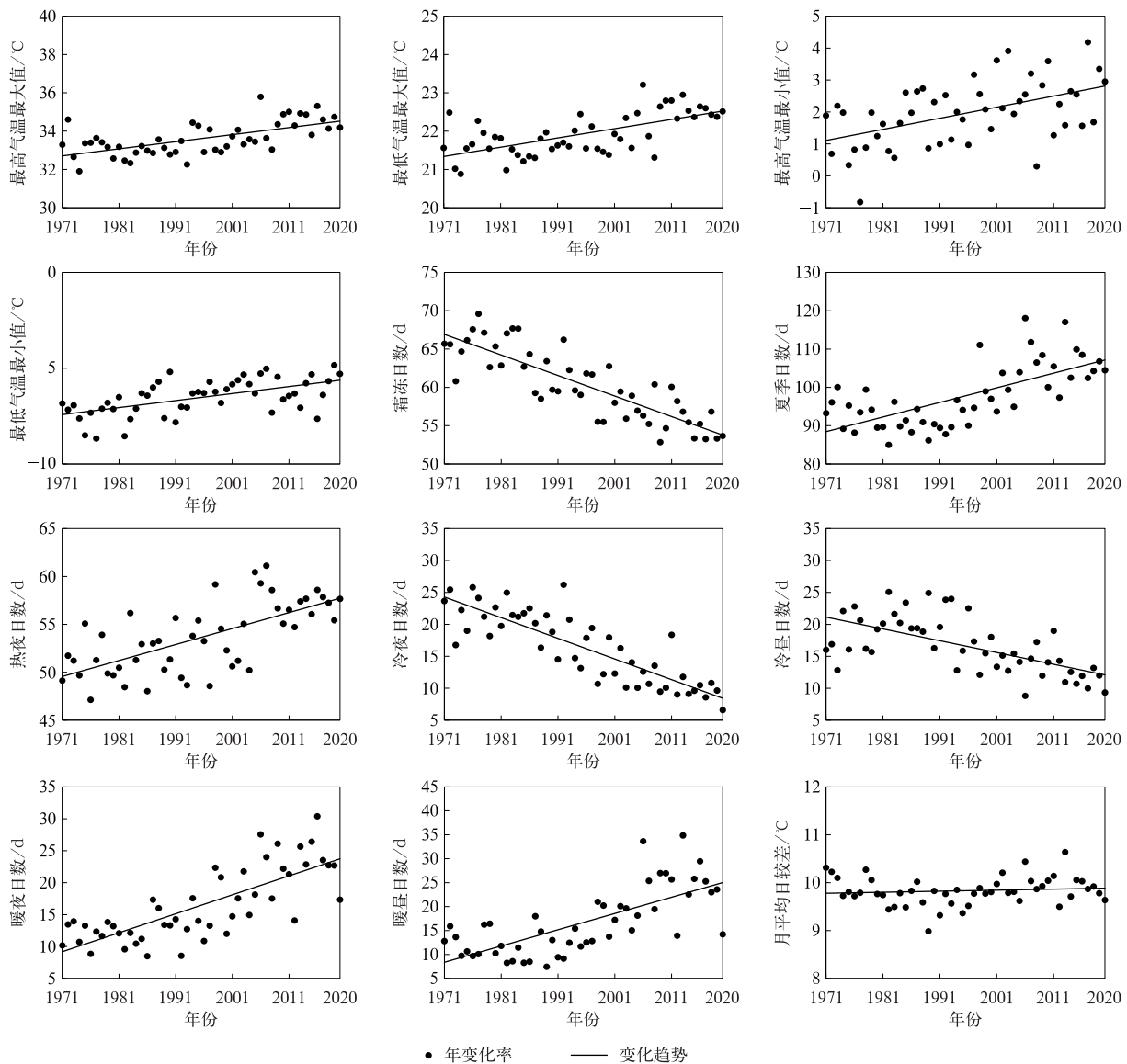


图2 1971—2020年川渝地区极端温度指数时间序列

Fig. 2 Time series of extreme temperature indices in Sichuan-Chongqing Region in 1971—2020

上升趋势,上升率为 $0.02^{\circ}\text{C} \cdot (10\text{ a})^{-1}$,仅达到 0.1 显著性水平,即最高和最低气温月平均日较差上升不显著。可知,全球变暖背景下川渝地区整体极值指数呈显著上升趋势,其中代表极端高温事件指数的最高气温最大值、夏季和热夜日数、暖夜日数、暖昼日数在近 50 年均呈上升趋势,而霜冻日数、冷夜日数、冷昼日数则呈下降趋势,且变化趋势均较显著。

表 2 川渝地区极端温度指数年代际变化率

Table 2 Interdecadal change rates of extreme temperature indices in Sichuan-Chongqing Region

分类	指数	变化率
极值指数	最高气温最大值	$0.37^{\circ}\text{C} \cdot (10\text{ a})^{-1}$
	最低气温最大值	$0.24^{\circ}\text{C} \cdot (10\text{ a})^{-1}$
	最高气温最小值	$0.35^{\circ}\text{C} \cdot (10\text{ a})^{-1}$
	最低气温最小值	$0.37^{\circ}\text{C} \cdot (10\text{ a})^{-1}$
绝对指数	霜冻日数	$-2.68\text{ d} \cdot (10\text{ a})^{-1}$
	夏季日数	$3.82\text{ d} \cdot (10\text{ a})^{-1}$
	热夜日数	$1.67\text{ d} \cdot (10\text{ a})^{-1}$
相对指数	冷夜日数	$-3.24\text{ d} \cdot (10\text{ a})^{-1}$
	冷昼日数	$-1.85\text{ d} \cdot (10\text{ a})^{-1}$
	暖夜日数	$2.97\text{ d} \cdot (10\text{ a})^{-1}$
	暖昼日数	$3.39\text{ d} \cdot (10\text{ a})^{-1}$
其他指数	月平均日较差	$0.02^{\circ}\text{C} \cdot (10\text{ a})^{-1}$ *

注: * 表示达到 0.1 显著性水平,未标注表示达到 0.01 显著性水平。

2.2 极端温度指数的城市化影响和城市化影响贡献率

图 3 为 1971—2020 年川渝地区不同类型气象站极端温度指数的时间序列,表 3 为川渝地区不同类型气象站极端温度指数的变化趋势和城市化影响及贡献率。

由图 3 和表 3 可知,3 类气象站的最高气温最大值和最小值、最低气温最大值和最小值均呈上升趋势,其中,除城市站的最高气温最小值和最低气温最小值达到 0.05 显著性水平外,其余均达到 0.01 显著性水平,上升趋势明显,乡村站的最低气温最小值增加最显著,城市站的最低气温最小值增加较不明显;城市化影响使最高气温最大值呈上升趋势,城市站的城市化影响贡献率为 12.20%;城市化影响使城乡站的最低气温最大值呈下降趋势,城市站的最低气温最大值呈上升趋势,可能与成渝城市群工业发达和污染物排放量较高有关,加之盆地地形不利于污染物的稀释扩散,大气环境容量远小于平原城市,使区域性大气污染较为严重,城市站和城乡站的城市化发展程度不同,规模存在差异,从而对极端气温变化趋势影响不同^[25-26]。城乡站和城市站最低

气温最大值的城市化影响贡献率分别为 13.33% 和 23.33%;城市化影响使城乡站的最高气温最小值呈上升趋势,城市站的最高气温最小值呈下降趋势,城乡站和城市站的城市化影响贡献率均为 40.00%;城市化影响使城乡站和城市站的最低气温最小值均呈下降趋势,对应城市化影响贡献率分别为 42.86% 和 100.00%。

总之,3 类气象站的 4 个极值指数均呈上升趋势,最高气温最大值、最低气温最大值在城市站的上升趋势最明显,最低气温最小值在乡村站的上升趋势最明显,最高气温最小值在城乡站的上升趋势最明显。城市化对城乡站的最高气温最大值和最低气温最大值影响较小,城市化影响贡献率分别为 2.44%~13.33%,对城乡站和城市站的最高气温最小值以及城乡站的最低气温最小值影响较大,城市化影响贡献率约为 40.00%,而城市化影响对城市站的最低气温最小值贡献率达 100.00%。

对于绝对指数,3 类气象站的霜冻日数均呈减少趋势,夏季和热夜日数均呈增加趋势,3 类气象站的霜冻、夏季和热夜日数均达到 0.01 显著性水平,变化趋势显著;城市化影响使 3 个绝对指数均呈上升趋势,城市化影响对霜冻日数的贡献率在城乡站和城市站均为 100.00%,城市化影响对夏季日数的贡献率在城乡站和城市站分别为 20.25% 和 18.77%,城市化影响对热夜日数的贡献率在城乡站和城市站分别为 46.79% 和 83.93%,差异较大。

对于相对指数,3 类气象站的冷夜和冷昼日数均呈减少趋势,暖夜和暖昼日数则呈增加趋势,均达到 0.01 显著性水平,变化趋势显著;城市化影响使冷夜和冷昼日数均呈上升趋势,对城乡站贡献率分别为 19.62% 和 6.67%,对城市站的贡献率分别为 46.54% 和 38.00%;城市化影响使暖夜日数呈下降趋势,暖昼日数呈上升趋势,对城乡站贡献率分别为 1.30% 和 20.44%,对城市站的贡献率分别为 41.99% 和 21.53%。

对于其他指数,月平均日较差也呈增加趋势,但仅城乡站和城市站达到 0.05 显著性水平,城市化影响对二者的贡献率均为 100.00%。

综合以上对绝对指数、相对指数和其他指数分析可知,3 类气象站中代表极端高温事件指数的夏季和热夜日数、暖夜和暖昼日数均呈上升趋势,而霜冻日数、冷夜和冷昼日数均呈下降趋势。城市站的热夜和暖昼日数上升趋势最明显,乡村站的霜冻、冷

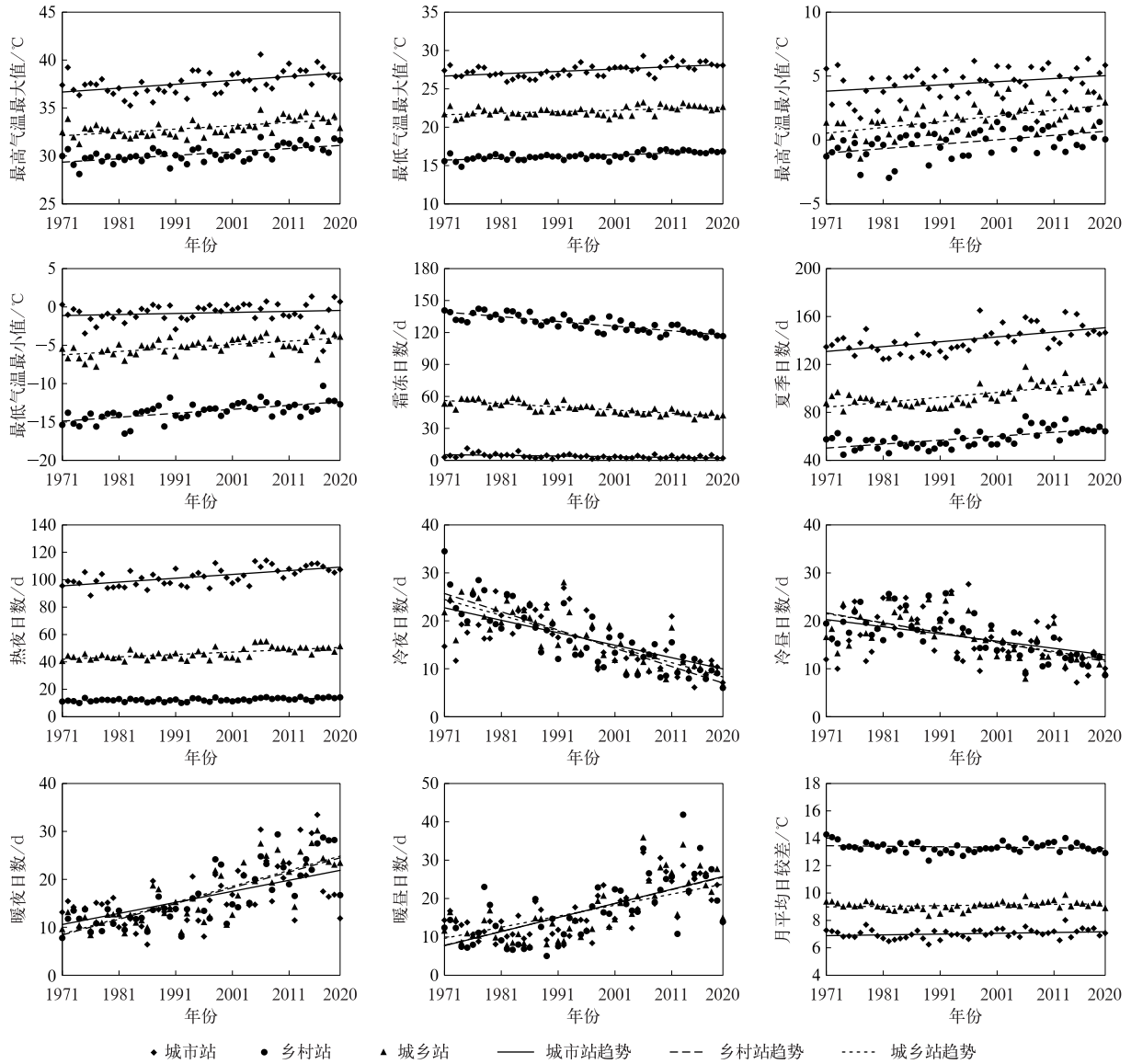


图3 1971—2020年川渝地区不同类型气象站极端温度指数时间序列
 Fig. 3 Time series of extreme temperature indices at different types of meteorological stations in Sichuan-Chongqing Region in 1971–2020

表3 极端温度指数的城市化影响
 Table 3 Urbanization effects of extreme temperature indices

分类	指数	A_1	A_2	A_3	ΔA_{21}	ΔA_{31}	$E_{21}/\%$	$E_{31}/\%$
极值指数	最高气温最大值	0.36	0.35	0.41	0.01	0.05	2.44	12.20
	最低气温最大值	0.23	0.19	0.30	-0.05	0.06	13.33	23.33
	最高气温最小值	0.35	0.45	0.25**	0.10	-0.10	40.00	40.00
	最低气温最小值	0.51	0.45	0.14**	-0.06	-0.37	42.86	100.00
绝对指数	霜冻日数	-4.41	-2.99	-0.65	1.42	3.76	100.00	100.00
	夏季日数	3.29	4.11	4.05	0.82	0.76	20.25	18.77
	热夜日数	0.45	1.76	2.80	1.31	2.35	46.79	83.93
相对指数	冷夜日数	-3.81	-3.30	-2.60	0.51	1.21	19.62	46.54
	冷昼日数	-2.07	-1.97	-1.50	0.10	0.57	6.67	38.00
	暖夜日数	3.28	3.31	2.31	-0.03	-0.97	1.30	41.99
	暖昼日数	2.88	3.63	3.67	0.75	0.79	20.44	21.53
其他指数	月平均日较差	-0.04***	0.05**	0.06**	0.09	0.01	100.00	100.00

注: ** 表示达到 0.05 显著性水平, *** 表示未达到 0.05 显著性水平, 未标注表示达到 0.01 显著性水平。

昼和冷夜日数以及月平均日较差下降趋势最明显,城乡站的夏季和暖夜日数上升趋势最明显。城市化对城乡站的暖夜日数基本无影响,对城乡站和城市站的霜冻、热夜日数和月平均日较差,以及城市站的冷夜和暖夜日数均影响较大,城市化影响贡献率均在40%以上,其余指数的城市化影响贡献率为6.67%~38.00%。

2.3 极端降水指数时间变化趋势

图4为1971—2020年川渝地区极端降水指数的时间序列,表4为由线性趋势估计的川渝地区极端降水指数年代际变化率。由图4和表4可知,对于绝对指数,中雨日数和大雨日数均呈上升趋势,变化率分别为 $0.14 \text{ d} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$ 和 $0.15 \text{ d} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$,1 d最大降水量和5 d最大降水量均呈下降趋势,变化率分别

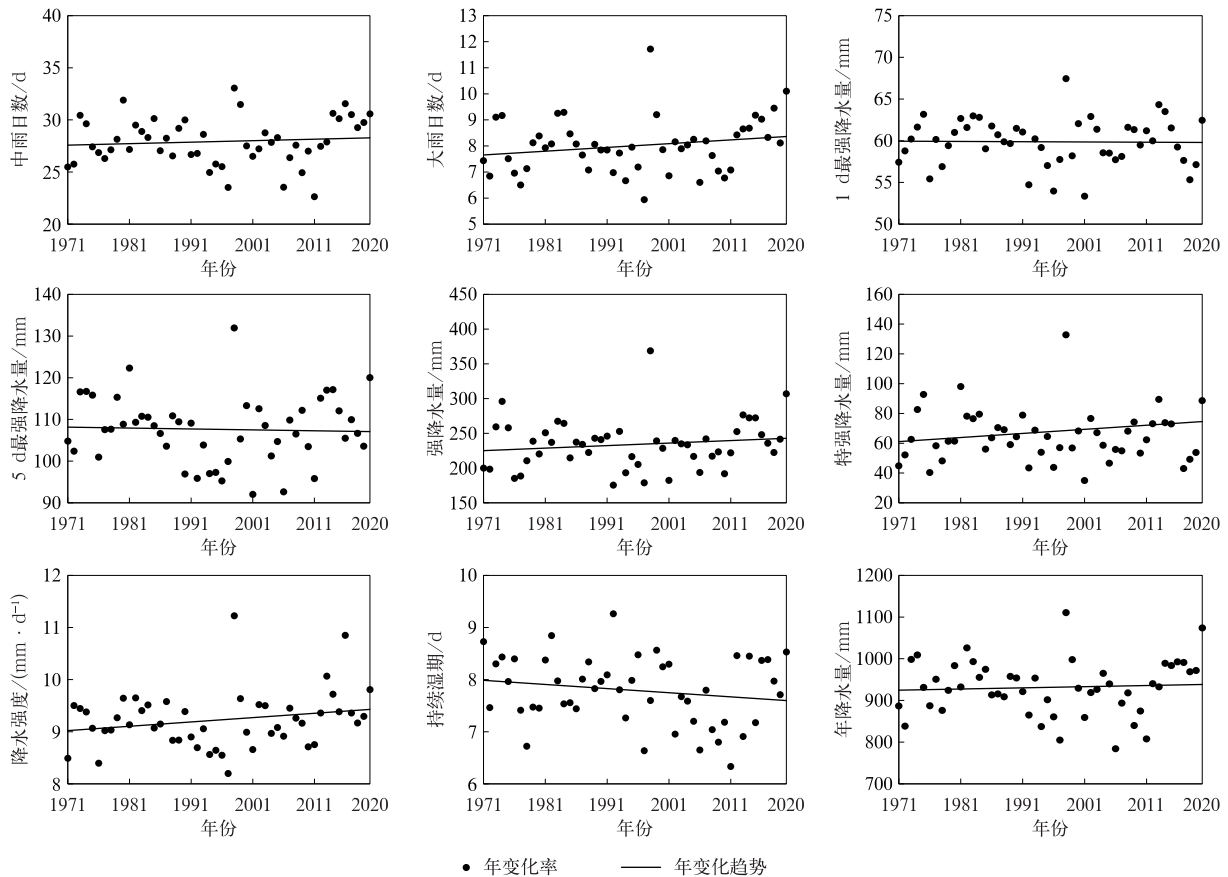


图4 1971—2020年川渝地区极端降水指数时间序列

Fig. 4 Time series of extreme precipitation indices in Sichuan-Chongqing Region in 1971—2020

为 $-0.03 \text{ mm} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$ 和 $-0.22 \text{ mm} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$,但只有大雨日数达到0.05显著性水平,下降趋势明显;对于相对指数,强降水量、特强降水量和降水强度均呈上升趋势,变化率分别为 $3.63 \text{ mm} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$, $2.75 \text{ mm} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$ 和 $0.08 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$,且均达到0.1显著性水平,增加趋势较显著;对于持续指数,持续湿期呈下降趋势,但未达到0.1显著性水平;对于其他指数,年降水量也呈增加趋势,增加率为 $2.77 \text{ mm} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$,且达到0.1显著性水平。综上可知,代表极端降水量和极端降水强度的年降水量、大雨日数、强降水量、特强降水量和降水强度均呈增加趋势,表明近50年川渝地区极端降水量和

极端降水强度均呈增加趋势。

表4 川渝地区极端降水指数年代际变化率

Table 4 Interdecadal change rates of extreme precipitation indices in Sichuan-Chongqing Region

分类	指数	变化率
绝对指数	中雨日数	$0.14 \text{ d} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$
	大雨日数	$0.15 \text{ d} \cdot (10 \text{ a})^{-1} **$
	1 d最大降水量	$-0.03 \text{ mm} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$
	5 d最大降水量	$-0.22 \text{ mm} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$
相对指数	强降水量	$3.63 \text{ mm} \cdot (10 \text{ a})^{-1} *$
	特强降水量	$2.75 \text{ mm} \cdot (10 \text{ a})^{-1} *$
	降水强度	$0.08(\text{mm} \cdot \text{d})^{-1} \cdot (10 \text{ a})^{-1} *$
持续指数	持续湿期	$-0.08 \text{ d} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$
其他指数	年降水量	$2.77 \text{ mm} \cdot (10 \text{ a})^{-1} *$

注: * 和 ** 分别表示达到0.1、0.05显著性水平。

2.4 极端降水指数的城市化影响和城市化影响贡献率

图 5 为 1971—2020 年川渝地区不同类型气象站极端降水指数的时间序列,表 5 为川渝地区不同类型气象站的极端降水指数变化趋势和城市化影响及贡献率。

由图 5 和表 5 可知,对于绝对指数,乡村站的中雨日数呈增加趋势,且达到 0.05 显著性水平,城乡站呈减少趋势,城市站呈增加趋势,但未达到 0.05 显著性水平;3 类气象站的大雨日数均呈增加趋势,其中乡村站达到 0.01 显著性水平,而城乡站仅达到 0.1 显著性水平;乡村站的 1 d 和 5 d 最大降水量均

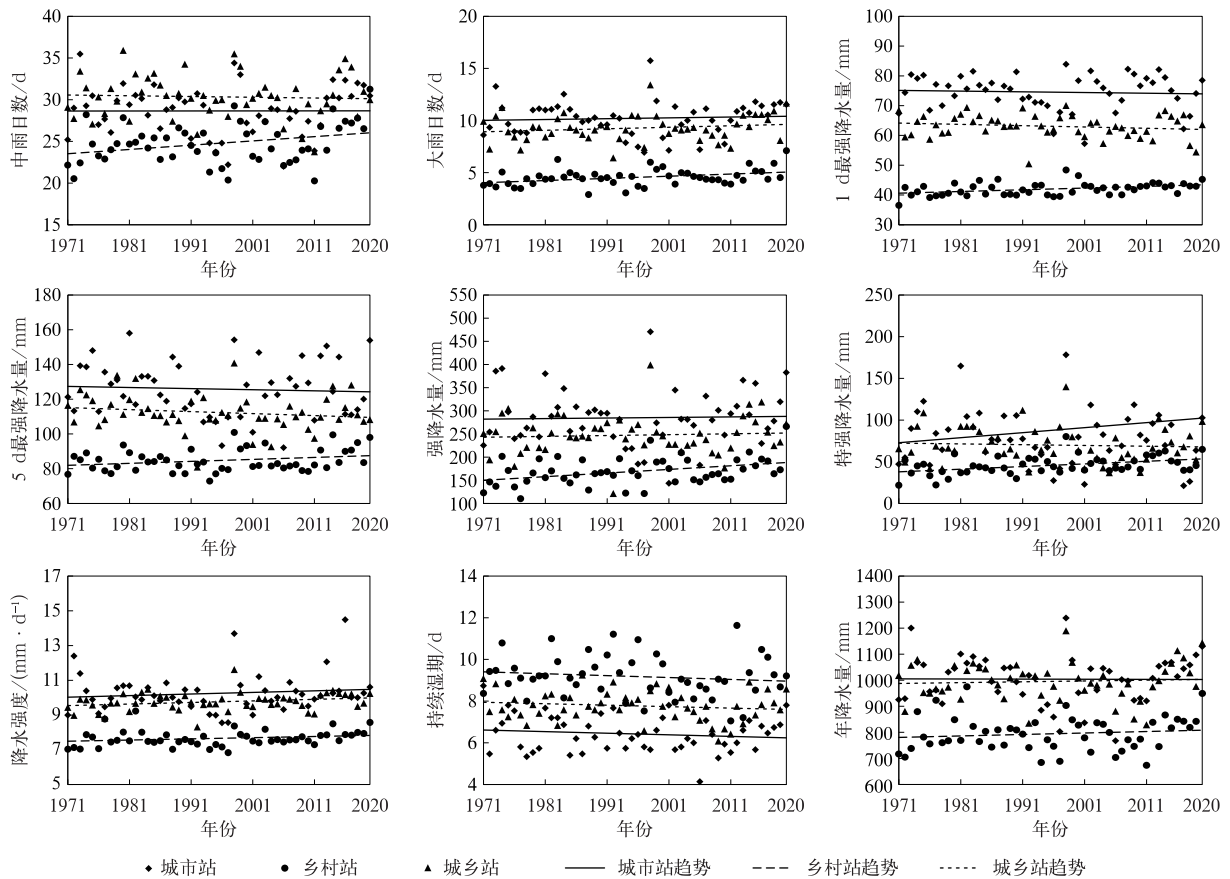


图 5 1971—2020 年川渝地区不同类型气象站极端降水指数时间序列
Fig. 5 Time series of extreme precipitation indices at different types of meteorological stations in Sichuan-Chongqing Region in 1971–2020

表 5 极端降水指数的城市化影响

Table 5 Urbanization effects of extreme precipitation indices

分类	指数	A_1	A_2	A_3	ΔA_{21}	ΔA_{31}	$E_{21}/\%$	$E_{31}/\%$
绝对指数	中雨日数	0.51**	-0.09	0.01	-0.60	-0.50	100.00	100.00
	大雨日数	0.21***	0.15*	0.08	-0.06	-0.13	75.00	100.00
	1 d 最大降水量	0.57***	-0.43	-0.24	-1.00	-0.81	100.00	100.00
	5 d 最大降水量	1.13*	-1.14	-0.64	-2.27	-1.77	100.00	100.00
相对指数	强降水量	7.85***	1.84	11	-6.01	-6.65	100.00	100.00
	特强降水量	3.15***	-0.94	6.04	-4.09	2.89	67.72	47.85
	降水强度	0.07***	0.09**	0.09	0.02	0.02	22.22	22.22
持续指数	持续湿期	-0.09	-0.07	-0.08	0.02	0.01	25.00	12.50
其他指数	年降水量	5.62**	3.17	-0.47	-2.45	-6.09	100.00	100.00

注: *、** 和 *** 分别表示达到 0.1、0.05 和 0.01 显著性水平。

呈增加趋势,而城乡站和城市站均呈减少趋势,且乡村站的1 d最大降水量达到0.01显著性水平,5 d最大降水量达到0.1显著性水平,而城乡站和城市站均未达到0.1显著性水平。城市化影响的4个绝对指数在城乡站和城市站均呈减少趋势,对中雨日数、1 d和5 d最大降水量3个指数,城市化影响对城乡站和城市站贡献率均为100.00%,而对大雨日数,城市化影响对城乡站和城市站的贡献率分别为75.00%和100.00%。

对于相对指数,除城乡站的特强降水量指数,其余3类气象站的强降水量、特强降水量和降水强度均呈增加趋势,且城乡站的降水强度达到0.05显著性水平,乡村站的强降水量、特强降水量和降水强度均达到0.01显著性水平,增加趋势明显。城市化影响的城乡站和城市站的强降水量均呈减少趋势,且对二者的贡献率均为100.00%;城市化影响使城乡站的特强降水量呈减少趋势,使城市站的特强降水量呈增加趋势,城市化影响贡献率分别为67.72%和47.85%;城市化影响的城乡站和城市站的降水强度均略有增加,且城市化影响对二者的贡献率相同,均为22.22%。

对于持续指数,3类气象站持续湿期均呈下降趋势,但未达到0.1显著性水平;城市化影响使城乡站和城市站的持续湿期均呈上升趋势,贡献率分别为25.00%和12.50%。

对于其他指数,年降水量在乡村站和城乡站呈增加趋势,在城市站呈减少趋势,但只有乡村站达到0.05显著性水平;城市化影响使城乡站和城市站的年降水量均呈减少趋势,且贡献率均为100.00%。

综合以上分析可知,乡村站中,除持续湿期呈不显著的下降趋势外,其余8个指数均呈增加趋势;城乡站中,大雨日数、强降水量、降水强度和年降水量呈增加趋势,而中雨日数、1 d和5 d最大降水量、特强降水量和持续湿期则呈减少趋势;城市站中,1 d和5 d最大降水量、持续湿期和年降水量呈减少趋势,其余5个指数则呈增加趋势。但城乡站和城市站的变化趋势大部分均未达到0.1显著性水平,而乡村站除持续指数未达到0.1显著性水平外,其他指数基本均达到0.05显著性水平,变化趋势明显。城市化影响使城乡和城市站点的中雨、大雨日数、1 d和5 d最大降水量、强降水量和年降水量均呈下降趋势,使降水强度和持续湿期呈上升趋势,城乡站的特强降水量呈下降趋势,城市站的特强降水量呈

上升趋势。城市化影响对中雨日数、1 d和5 d最大降水量、强降水量和年降水量的贡献率最大,对城乡站和城市站的贡献率均为100.00%;城市化影响对城市站大雨日数的贡献率也为100.00%;城乡站对大雨日数、特强降水量和城市站对特强降水量的城市化影响贡献率分别为75.00%、67.72%和47.85%;但城市化影响对城乡站和城市站的降水强度和持续湿期的贡献率为12.50%~25.00%。

3 结论与讨论

本文基于1971—2020年川渝地区46个气象站的逐日降水和气温数据,计算21个极端气候指数,采用线性趋势法分析极端气候指数变化趋势,并运用Mann-Kendall非参数法检验其显著性水平,通过划分气象站类型,计算极端气候指数的城市化影响和城市化影响贡献率,探讨城市化对川渝地区极端气候事件的影响,得到主要结论如下:

1) 近50年最高气温最大值和最小值、最低气温最大值和最小值、夏季和热夜日数、暖昼和暖夜日数均呈上升趋势,而霜冻日数、冷昼和冷夜日数则均呈下降趋势,且变化趋势都较显著。极端降水指数中代表极端降水量和极端降水强度的年降水量、大雨日数、强降水量、特强降水量和降水强度均呈增加趋势,表明近50年川渝地区极端高温和极端降水均呈增加趋势。

2) 川渝地区3类气象站极值指数均呈上升趋势,最高和最低气温最大值、热夜和暖昼日数以及日较差在城市站的上升趋势最明显,霜冻、冷夜和冷昼日数以及日较差在乡村站的下降趋势最明显。城市化对城乡站的最高气温最大值和暖夜日数基本无影响,对城乡站和城市站的最高和最低气温最小值、霜冻、热夜日数和日较差,以及城市站的冷夜和暖夜日数均影响较大。

3) 川渝地区乡村站,除1 d和5 d最大降水量、持续湿期呈不显著的下降趋势外,其余指数均呈显著增加趋势。城市化影响使城乡站和城市站的中雨和大雨日数、1 d和5 d最大降水量、强降水量和年降水量均呈下降趋势,使降水强度和持续湿期呈上升趋势。城市化影响对城乡站和城市站的中雨日数、1 d和5 d最大降水量、强降水量和年降水量的贡献率均为100.00%。

由于城市发展通过改变下垫面粗糙度和土地利

用类型引起辐射特性变化,白天城市地区吸收更多的太阳辐射,夜间由于地面长波辐射增多,城市人类活动释放的大量人为热和温室气体使城市建设用地形成热岛^[27]。近20年川渝地区城镇化率由31.15%上升至63.12%,成渝经济圈的推进促进了城市快速发展,使在全球变暖背景下川渝城市化对区域极端气候事件产生较大的影响。本文研究结果体现了城市化影响的共性,即城市化影响加速暖(冷)指数的增加(减少),然而由于地理位置和周围环境等影响,城市化对各区域极端气候事件的影响存在差异^[28-29],特别是川渝地区的复杂地形和多样的气候类型,导致本研究中城市化对不同类型气象站不同极端气候指数的影响表现出较大差异。

全球气候变暖背景下,局地气候变化对极端降水事件的形成可能并非决定因素。城市化进程对降水影响的可能机制包括城市工业污染导致的气溶胶凝结核增加、排放^[30];城市下垫面粗糙度的增加可加强垂直对流运动、增加不稳定能量,对暴雨的增幅作用明显^[31];由于城市冠层会减弱对流运动和水汽输送,人类活动排放温室气体引起动力和热力条件变化,改变大气稳定性和湍流,增加城市蒸发以及下风向降水等多种因素的共同作用^[32-33]。本文气象站类型的划分仍存在部分站代表性不强等问题,后续还需要改进方法,提高划分精度和研究结果精确性。

参考文献

- [1] 姜彤,翟建青,罗勇,等.气候变化影响适应和脆弱性评估报告进展:IPCC AR5到AR6的新认知.大气科学学报,2022,45(4):502-511.
Jiang T,Zhai J Q,Luo Y, et al. Advances in climate change impact adaptation and vulnerability assessment reporting: New perceptions from IPCC AR5 to AR6. *Trans Atmos Sci*, 2022,45(4):502-511.
- [2] 林爱兰,谷德军,彭冬冬,等.近60年我国东部区域性持续高温过程变化特征.应用气象学报,2021,32(3):302-314.
Lin A L,Gu D J,Peng D D, et al. Climatic characteristics of regional persistent heat event in in the eastern China during recent 60 years. *J Appl Meteor Sci*,2021,32(3):302-314.
- [3] 宝兴华,夏茹娣,罗亚丽,等.“21·7”河南特大暴雨气象和水文雨量观测对比.应用气象学报,2022,33(6):668-681.
Bao X H,Xia R D,Luo Y L, et al. Comparative analysis on meteorological and hydrological rain gauge observations of the extreme heavy rainfall event in Henan Province during July 2021. *J Appl Meteor Sci*,2022,33(6):668-681.
- [4] United Nations, Department of Economic and Social Affairs, Population Ddivision. World Urbanization Prospects: The 2018 Revision. New York: United Nations, 2018.
- [5] 彭艳玉,刘煜,缪育聪.温室气体对亚洲夏季风影响的数值研究.应用气象学报,2021,32(2):245-256.
Peng Y Y,Liu Y,Miao Y C. A numerical study on impacts of greenhouse gases on Asian summer monsoon. *J Appl Meteor Sci*,2021,32(2):245-256.
- [6] 罗鑫玥,陈明星.城镇化对气候变化影响的研究进展.地球科学进展,2019,34(9):984-997.
Luo X Y,Chen M X. Research progress on the impact of urbanization on climate change. *Adv Earth Sci*, 2019, 34(9): 984-997.
- [7] 王钊,罗慧,李亚丽,等.近50年秦岭南北不均匀增温及对城市化响应.应用气象学报,2016,27(1):85-94.
Wang Z,Luo H,Li Y L, et al. Effects of urbanization on temperatures over the Qinling Mountains in the past 50 years. *J Appl Meteor Sci*,2016,27(1):85-94.
- [8] Karl T,Diaz H,Kukla G. Urbanization: Its detection and effect in the United States climate record. *J Climate*, 1988,1: 1099-1123.
- [9] Sun Y,Hu T,Zhang X, et al. Contribution of global warming and urbanization to changes in temperature extremes in Eastern China. *Geophys Res Lett*, 2019,46:11426-11434.
- [10] 唐国利,任国玉,周江兴.西南地区城市热岛强度变化对地面气温序列影响.应用气象学报,2008,19(6):722-730.
Tang G L,Ren G Y,Zhou J X. Change of urban heat island intensity and its effect on surface mean air temperature records in Southwest China. *J Appl Meteor Sci*, 2008,19(6): 722-730.
- [11] 任国玉,张雷,卞韬,等.城市化对石家庄站日气温变化的影响.地球物理学报,2015,58(2):398-410.
Ren G Y,Zhang L,Bian T, et al. Urbanization effect on change of daily temperature at Shijiazhuang Weather Station. *Chinese J Geophys*,2015,58(2):398-410.
- [12] Shepherd J,Pierce H,Negri A. Rainfall modification by major urban areas: Observations from spaceborne rain radar on the TRMM satellite. *J Appl Meteor Climatol*. 2002,41(7): 689-701.
- [13] Wu M W,Luo Y L,Chen F, et al. Observed link of extreme hourly precipitation changes to urbanization over coastal South China. *J Appl Meteor Climatol*, 2019,58:1799-1819.
- [14] 何玉秀,许有鹏,李子贻,等.城镇化对极端降水的影响及其贡献率研究——以太湖平原地区为例.湖泊科学,2022,34(1): 262-271.
He Y X,Xu Y P,Li Z Y, et al. The impacts and its contribution rate of urbanization on extreme precipitation, 1976—2015: A case study in the Lake Taihu Plain Region. *Lake Sci*, 2022,34(1):262-271.
- [15] 张小玲,刘梦娜,青泉,等.1960—2018年成都地区极端气温变化及城市化贡献分析.高原山地气象研究,2022,42(1): 10-17.
Zhang X L,Liu M N,Qing Q, et al. Extreme temperature

- change and urbanization contribution in Chengdu from 1960 to 2018. *Plateau Mountain Meteor Res*, 2022, 42(1): 10-17.
- [16] 黄晓远, 李谢辉. 基于 CMIP6 的西南暴雨洪涝灾害风险未来预估. *应用气象学报*, 2022, 33(2): 231-243.
Huang X Y, Li X H. Future projection of rainstorm and flood disaster risk in Southwest China based on CMIP6 models. *J Appl Meteor Sci*, 2022, 33(2): 231-243.
- [17] Wang H, Yan Y, Long K, et al. Relationships between rapid urbanization and extreme summer precipitation over the Sichuan-Chongqing Area of China. *Earth Sci*, 2022, 10. DOI: 10. 3389/feart. 2022. 909547.
- [18] 罗辉, 肖逸祥, 匡秋明, 等. 四川盆地暖区暴雨的雷达回波特征及分类识别. *应用气象学报*, 2020, 31(4): 460-470.
Luo H, Xiao D X, Kuang Q M, et al. Radar echo characteristics and recognition of warm-sector torrential rain in Sichuan Basin. *J Appl Meteor Sci*, 2020, 31(4): 460-470.
- [19] 中华人民共和国国家统计局. 中国统计年鉴 2021. 北京: 中国统计出版, 2021.
National Bureau of Statistics of the People's Republic of China. *China Statistical Yearbook 2021*. Beijing: China Statistics Press, 2021.
- [20] 付晶莹, 江东, 黄耀欢. 中国公里网格人口分布数据集. 全球变化科学数据出版系统, 2014.
Fu J Y, Jiang D, Huang Y H. China Km-grid Population Distribution Dataset. Global Change Scientific Data Publishing System, 2014.
- [21] 黄耀欢, 江东, 付晶莹. 中国公里网格 GDP 分布数据集. 全球变化科学研究数据出版系统, 2014.
Huang Y H, Jiang D, Fu J Y. China Km-grid GDP Distribution Dataset. Global Change Scientific Data Publishing System, 2014.
- [22] Alexander L, Zhang X, Peterson T, et al. Global observed changes in daily climate extremes of temperature and precipitation. *J Geophys Res Atmos*, 2006, 111. DOI: 10. 1029/2005JD006290.
- [23] WMO. 2010; Report of the Meeting of the Management Group of the Commission for Climatology. Geneva, 2010.
- [24] 周雅清, 任国玉. 城市化对华北地区极端气温事件频率的影响. *高原气象*, 2014, 33(6): 1589-1598.
Zhou Y Q, Ren G Y. Urbanization effect on long-term trends of extreme temperature events in North China. *Plateau Meteor*, 2014, 33(6): 1589-1598.
- [25] 杨永安, 许肖云, 胡艳丽, 等. 成渝地区典型中小城市 VOCs 污染特征、臭氧生成潜势及来源分析. *中国环境监测*, 2023, 39(2): 125-138.
Yang Y A, Xu X Y, Hu Y L, et al. Analysis of pollution characteristics, Ozone formation potential and sources of ambient VOCs on typical small and medium-sized cities in Chengdu-Chongqing Region. *Environ Monit China*, 2023, 39(2): 125-138.
- [26] Cao C, Lee X H, Liu S D, et al. Urban heat islands in China enhanced by haze pollution. *Nat Commun*, 2016, 7. DOI: 10. 1038/ncomms12509.
- [27] 肖丹, 陈静, 陈章, et al. 成都精细下垫面信息对城市气象影响的模拟试验. *气象*, 2011, 37(3): 298-308.
Xiao D, Chen J, Chen Z, et al. Effect simulation of Chengdu underlying surface information on urban meteorology. *Meteor Mon*, 2011, 37(3): 298-308.
- [28] Zhao L, Li X H, Smith R B, et al. Strong contributions of local background climate to urban heat islands. *Nature*, 2014, 511: 216-219.
- [29] 赵旋, 吴遥, 冯勇, 等. 成都城市化发展对局地气候的影响. *高原山地气象研究*, 2021, 41(4): 100-107.
Zhao X, Wu Y, Feng Y, et al. Influence of Chengdu urban development on local climate. *Plateau Mountain Meteor Res*, 2021, 41(4): 100-107.
- [30] Han W C, Li Z Q, Wu F, et al. The mechanisms and seasonal differences of the impact of aerosols on daytime surface urban heat island effect. *Atmos Chem Phys*, 2020, 20(11): 6479-6493.
- [31] 王成鑫, 高守亭, 冉令坤, 等. 四川地形扰动对降水分布影响. *应用气象学报*, 2019, 30(5): 586-597.
Wang C X, Gao S T, Ran L K, et al. Effects of topographic perturbation on the precipitation distribution in Sichuan. *J Appl Meteor Sci*, 2019, 30(5): 586-597.
- [32] 袁宇锋, 翟盘茂. 全球变暖与城市效应共同作用下的极端天气气候事件变化的最新认知. *大气科学学报*, 2022, 45(2): 161-166.
Yuan Y F, Zhai P M. Latest understanding of extreme weather and climate events under global warming and urbanization influences. *Trans Atmos Sci*, 2022, 45(2): 161-166.
- [33] 刘海知, 徐辉, 包红军, 等. 机器学习分类算法在降雨型滑坡预报中的应用. *应用气象学报*, 2022, 33(3): 282-292.
Liu H Z, Xu H, Bao H J, et al. Application of machine learning classification of algorithm to precipitation-induced landslides forecasting. *J Appl Meteor Sci*, 2022, 33(3): 282-292.

Impacts of Urbanization on Extreme Climate Events in Sichuan-Chongqing Region

Guo Lei¹⁾ Li Xiehui¹⁾²⁾ Liu Yuting¹⁾

¹⁾ (School of Atmospheric Sciences, Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610225)

²⁾ (Institute of Arid Meteorology, CMA, Lanzhou 730020)

Abstract

Based on daily precipitation and temperature data as well as population, gross domestic product (GDP), land use and land cover change (LUCC), night lighting remote sensing data of 46 meteorological stations in Sichuan and Chongqing Region from 1971 to 2020, 21 extreme climate indices are calculated using RCLimDex software, and the interannual variation trends of these indices are analyzed using linear trend method. The Mann-Kendall nonparametric method is used to test the significance levels of all indices. These meteorological stations are categorized to further investigate the impact of urbanization on extreme climate indices, especially the impact of urbanization on extreme climate events in Sichuan and Chongqing. It's found that the monthly maximum value of daily maximum temperature (TX_x), maximum value of daily minimum temperature (TN_x), minimum value of daily maximum temperature (TX_n), minimum value of daily minimum temperature (TN_n), summer days (SU25), occurrence of hot nights (TR20), warm nights (TN90P) and warm days (TX90P) all show an increasing trend in the last 50 years, while the frost days (FD0), cold nights (TN10P) and cold days (TX10P) show a decreasing trend, and the changes are all significant. The annual total precipitation in wet days (PRCPTOT), very heavy precipitation days (R25mm), very wet days (R95P), extremely wet days (R99P) and simple precipitation intensity index (SDII), which represent the extreme precipitation and the intensity of extreme precipitation, all show an increasing trend, indicating that the extreme high temperature and extreme precipitation in Sichuan and Chongqing Region have been increasing. The extreme indices show an increasing trend in all three types of meteorological sites. The increasing trend of TX_x, TN_x, TR20, TX90P and daily temperature range (DTR) are most obvious in urban stations, and FD0, TN10P, TX10P and DTR are most obvious in rural stations. Urbanization has basically no effects on TX_x and TN90P at rural-urban sites, but has a greater effect on the monthly TX_n, TN_n, FD0, TR20 and DTR at rural and urban sites, as well as the number of TN10P and TN90P at urban sites. In Sichuan and Chongqing Region, among the rural sites, all indices show a significant increasing trend except for the monthly maximum 1-day precipitation (RX1DAY), monthly maximum 5-day precipitation (RX5DAY) and consecutive wet days (CWD), which show a non-significant decreasing trend. The influence of urbanization causes a decreasing trend in the number of heavy precipitation days (R10mm), R25mm, RX1DAY, RX5DAY, R95P and PRCPTOT in urban-rural and urban sites, and causes an increasing trend in SDII and CWD. The urbanization effects contribute 100.00% to R10mm, RX1DAY, RX5DAY, R95P and PRCPTOT for both urban-rural and urban sites.

Key words: extreme temperature index; extreme precipitation index; urbanization impact; contribution rate of urbanization impact; Sichuan-Chongqing Region