

卫仁娟, 钟馨, 史雯雨, 等. 1961—2022年四川省极端气候变化特征及其影响因素[J]. 水利水电技术(中英文), 2025, 56(7): 124-139. DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2025.07.009

WEI Renjuan, ZHONG Xin, SHI Wenyu, et al. Variation characteristics and influential factors of extreme climate in Sichuan Province from 1961 to 2022[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2025, 56(7): 124-139. DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2025.07.009

1961—2022年四川省极端气候变化特征及其影响因素

卫仁娟¹, 钟馨¹, 史雯雨¹, 郭蕾蕾¹, 赵璐², 崔宁博²

(1. 四川水利职业技术学院, 四川 崇州 611200; 2. 四川大学水利水电学院, 四川 成都 610065)

摘要:【目的】研究全球变暖背景下四川省极端气候变化特征,以期减轻极端气候灾害对区域社会经济、农业生产、生态环境等的不良影响。【方法】利用1961—2022年四川省40个气象站点的数据(包括逐日降水量、日最高气温和日最低气温),计算了20个极端气候指数,采用线性趋势法、局部加权回归法、Mann-kendall趋势检验法和皮尔逊相关分析等方法及Arcgis软件分析了四川省川东盆地山地区、川西高山高原区和川西南山地区三个分区极端气候指数的变化趋势及其影响因素。【结果】结果显示:四川省极端气温指数以增暖为主要变化特征,增温趋势显著;极端降水指数以增加为主要变化特征,但变化趋势不显著。【结论】结果表明:(1)1961—2022年四川省极端暖(冷)事件增加(减少),且呈现“低温上升比高温明显、夜间增暖高于白天、暖日数高于冷日数”的特征;空间上,四川省各分区极端气温指数均呈现变暖趋势,且变暖趋势在川西高山高原区、川西南山地区等高海拔区域更显著。(2)四川省降水量以增加为主,降水量的集中程度增大;空间上,川西高山高原区具有湿润化倾向,川东盆地山地区和川西南山地区具有干旱化倾向。极端降水指数表现出“西湿化东干化”的变化特征。(3)大部分极端气候指数与年平均气温、年降水量、经度和海拔呈现显著相关性,而与纬度相关性较低。大气环流因子中大西洋年代际振荡指数(AMO)对四川省极端气候影响最显著。全球变暖背景下极端气候变化特征的分析对四川省防洪抗旱具有重要意义。

关键词: 四川省; 极端气温; 极端降水; 变化趋势; 影响因素; 气候变化; 时空分布

DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2025.07.009

开放科学(资源服务)标志码(OSID):

中图分类号: P33; P429

文献标志码: A

文章编号: 1000-0860(2025)07-0124-16



Variation characteristics and influential factors of extreme climate in Sichuan Province from 1961 to 2022

WEI Renjuan¹, ZHONG Xin¹, SHI Wenyu¹, GUO Leilei¹, ZHAO Lu², CUI Ningbo²

(1. Sichuan Water Conservancy Vocational College, Chengdu 611200, Sichuan, China; 2. College of Water Resource and Hydropower, Sichuan University, Chengdu 610065, Sichuan, China)

收稿日期: 2024-08-31; 修回日期: 2024-10-24; 录用日期: 2024-10-25; 网络出版日期: 2024-12-09

基金项目: 四川省科技计划资助项目(2022NSFSC1125, 2024NSFSC0832); 中国工程院战略研究与咨询项目“四川季节性干旱区农业绿色高效用水机制与抗旱减灾战略研究”(2023-DFZD-31); 国家自然科学基金项目“南方季节性干旱区滴灌猕猴桃园耗水规律与蒸发蒸腾量模拟研究”(52109060)

作者简介: 卫仁娟(1988—), 女, 副教授, 博士, 主要从事水文学及水资源研究。E-mail: 137271395@qq.com

通信作者: 郭蕾蕾(1992—), 女, 副教授, 博士, 主要从事水文地质、环境地质研究。E-mail: guoleilei0701@163.com

赵璐(1986—), 女, 副教授, 博士, 主要从事水文学及水资源研究。E-mail: 2648335717@qq.com

©Editorial Department of Water Resources and Hydropower Engineering. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license.

Abstract: [Objective] The characteristics of extreme climate change in Sichuan Province under the background of global climate change were studied, with the objective of mitigating the adverse impact on regional social economy, agricultural production, ecological environment and other aspects. [Methods] Based on the meteorological observation datasets including daily precipitation, maximum temperature and minimum temperature at 40 stations in Sichuan Province, 20 different extreme climate indices were calculated. Linear trend analysis, Local weighted regression analysis, Mann-kendall trend test, Pearson correlation analysis and ARCGIS software were used to analyzed the temporal and spatial variations of climate extremes in the mountain area of the eastern Sichuan Basin, the west Sichuan alpine plateau area and the southwest Sichuan mountain area, and the influential factors were discussed. [Results] In Sichuan Province, the extreme temperature indices were characterized by increasing trend, which were significant. The extreme precipitation indices were characterized by wetting, but the trends were not significant. [Conclusion] (1) Extreme warm (cold) events increased (decreased) in Sichuan province from 1961 to 2022, and showed the characteristics of “the rise of low temperature was more obvious than that of high temperature, the warming at night was higher than that of daytime, and the number of warm days were higher than that of cold days”. Spatially, the extreme temperature indices showed increasing trend in all regions of Sichuan province, and the increasing trend was more significant in high altitude areas such as the west Sichuan alpine plateau area and the southwest Sichuan mountain area. (2) In Sichuan province, the precipitation and the concentration of precipitation increased. Spatially, the west Sichuan alpine plateau area had a tendency of wetting, the mountain area of the eastern Sichuan Basin and the southwest Sichuan mountain area had a tendency of drying. The extreme precipitation indices showed a change characteristic of “west wetting and east drying”. (3) Most of the extreme climate indices were significantly correlated with annual mean temperature, annual precipitation, longitude and altitude, while the correlation with latitude was low. The extreme climate change in Sichuan Province mainly influenced by the Atlantic multidecadal oscillation (AMO) and the AMO had the most significant influence on the extreme climate. The analysis of the changing characteristics of extreme climate indices under the background of global warming is of great significance for flood control and drought relief in Sichuan Province.

Keywords: Sichuan Province; extreme temperature; extreme precipitation; changing trends; influential factors; climate change; spatiotemporal distribution

0 引言

极端气候事件的变化是世界气候研究计划(WCRP)重大科学挑战之一,也是政府间气候变化专门委员会(IPCC)评估报告的重点内容^[1-2]。在气候变暖背景下,极端气候事件发生频率、强度、持续时间均在改变。气候系统的异常变化改变了全球水文循环,导致干旱、洪涝等极端水文事件频发,因其对生态环境、社会经济等的影响而被广泛关注^[2-4]。IPCC《管理极端事件和灾害风险推进气候变化适应特别报告》(SREX)^[5]将极端气候事件定义为:出现某个变量值高于(或低于)该变量观测值范围的上限(或下限),通常在特定的地区和年内某个时间段内,低于(高于)观测资料概率密度函数10%(90%)分位值的小概率事件称为极端事件。实际应用过程中,极端气候事件的定义是多方面的。世界气象组织(WMO)“气候变化检测与极端气候事件指标专家组(Expert Team on Climate Change Detection and Indices, ETCCDI)”定义了27个极端气候事件核心指数(包括16个温度指数和11个降水指数)及计算程序(<http://etccdi.pacificclimate.org/>),这些指标能够

反映出极端气候强度、频率和持续性等方面的变化,具有统计上的稳健性、较弱的极端性、高信噪比和适用性强等特点,在国际上已得到广泛应用^[5-6]。

近年来,国内外学者针对极端气候事件已从全球^[5-7]、区域^[8-13]、国内不同行政区^[14-16]、流域^[17-18]等空间尺度上对极端气候事件的阈值划分、时空分布特征、影响因素、形成机理等方面开展研究。在全球气候变暖的背景下,不同空间尺度上的极端暖事件大都呈现增加趋势,极端冷事件呈现减少趋势;相对于极端气温事件,极端降水事件变化特征较为复杂。国内极端气候的研究始于20世纪末期,我国极端高温(低温)事件的频率和持续性增大(减小),对全球气候变暖响应敏感。极端降水量级和强度指数呈现增加趋势,持续性指数呈现减少趋势,空间上极端降水事件存在明显区域变化特征^[14]。目前在我国许多区域和流域也开展了极端气候变化的研究^[4-18],区域极端气候的总体变化趋势与全球和全国趋势基本一致,但变化程度和时间趋势具有区域差异。

四川省是中国的农业大省,也是西南地区的经济文化中心,省内地形变化大,地势西高东低,由于其

特殊的地形,使得四川省的气候变化多样。目前,针对四川省极端气候事件变化特征开展了部分研究^[19-21],但能够全面分析的较少。孙文慧等^[19]仅对四川省极端气温事件的时空分布特征进行研究;甘露等^[20]和段汀等^[21]分别采用不同时间尺度的降水数据研究四川省极端降水事件时空演变特征,得出的结论略有不同;孙晨等^[22]对四川地区极端气温和降水均做了分析,但采用的气象资料较久远,并且仅对四川省整个区域进行研究,没有细化到各气候分区。近几年,四川省发生了多起极端天气事件,例如,2022年四川省遭遇大范围长时间极端高温干旱天气,出现了历史同期的“极端高温”和“极端降水”叠加局面。在四川省复杂的地形和气候背景下,亟待采用最新的气象资料深入研究四川省极端气候在川东盆地山地区、川西高山高原区和川西南山地区不同分区的变化趋势,探讨极端气候要素空间异质性及其可能的影响因素。本研究将有助于加深对气候变化背景下四川省极端气候事件的认识,为研究区生态保护、防灾减灾、水资源管理及经济社会发展提供参考依据。

1 研究区概况

四川省位于我国西南部,地理位置介于东经 $97^{\circ}21'—108^{\circ}31'$ 和北纬 $26^{\circ}03'—34^{\circ}19'$ 之间,地处长江上游,地势西高东低,地貌类型以平原、丘陵、山地和高原为主。

四川省处于低纬度地区,属暖湿的亚热带东南季风和干湿季分明的亚热带西南季风交替影响地区。气候大体可分为三个区域:平武—都江堰—泸定—盐源一线以西的高山高原区为川西北高山高原温带—寒带气候区,该线以东的北部为川东盆地山地中亚热带气候区、南部高山区为川西南山地半湿润气候区。其中,川东盆地山地区气候的主要特点:春旱、夏热、秋雨,冬暖、阴天多、日照少、风速小、湿度小、雨量丰沛、无霜期长,多年平均气温 $16\sim 18\text{ }^{\circ}\text{C}$;川西南山地区为干湿季分明的亚热带西南季风气候,气候干燥,云雾少,日照强,干湿季分明,年平均气温 $4\sim 10\text{ }^{\circ}\text{C}$,

气温年较差小,日较差大;川西北高山高原区由于地势高亢,高差悬殊,气候垂直分布异常明显,为高寒气候类型,具有气候寒冷、气温低、干燥、少雨、辐射强、云雾少、日照多、温差大等特点,最冷月均温度 $-11.3\sim 6.3\text{ }^{\circ}\text{C}$,最热月均温度一般在 $14\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右。受季风环流和复杂地形的综合作用,四川省降水局地性差异极为明显,全省多年平均降雨量为 $1\ 003.1\text{ mm}$ 。空间分布上,降雨量从东南向西北减少,川东盆地山地区、川西南山地区多于川西北高山高原区;时间分布上,5—10月降水量占全年降水量的 $80\%\sim 90\%$ 。

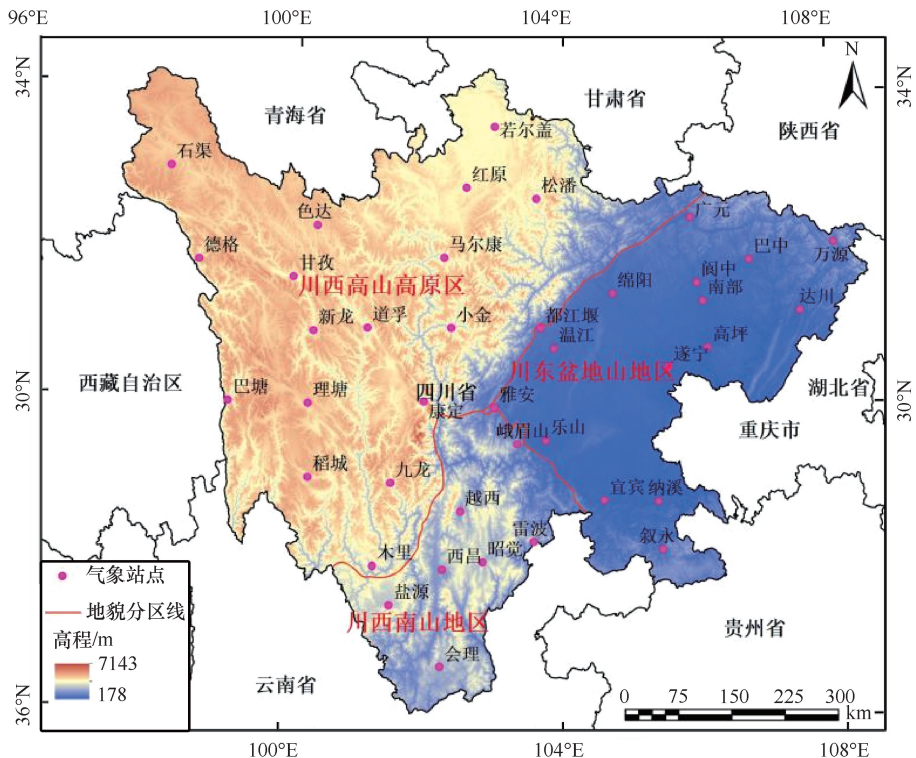
研究区及气象站点的分布情况如图1所示。

2 资料和方法

2.1 资料

(1)气象数据:本文选取的气象数据包括四川省序列较为完整的40个气象站点1961—2022年的逐日气象资料,包括日降水量(P)、日最高气温(T_{\max})、日最低气温(T_{\min})。该气象数据来自中国气象局科学数据共享服务网(<http://cdc.cma.gov.cn/>),并对缺失数据进行了插补。

(2)大气环流指数:本文选取的大气环流因子包括北极涛动(Arctic Oscillation Index, AO)、大西洋年



行政边界审图号: GS(2024)0650号,对底图边界无修改

图1 四川省地貌分区及气象站点分布

Fig. 1 Geomorphologic division and meteorological station distribution of Sichuan Province

代际振荡 (Atlantic Multi-decadal Oscillation Index, *AMO*)、西太平洋指数 (Western Pacific Index, *WPI*)、太平洋年代际振荡 (Pacific Decadal Oscillation Index, *PDO*) 等, 逐月资料来源于美国国家海洋与大气管理局 (National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA) (<https://www.esrl.noaa.gov/psd/data/climateindices/list/>)。

2.2 方法

本文根据 ETCCDI 推荐的极端气候核心指数 (<http://etccdi.pacificclimate.org/indices.shtml>), 结合研究区气候特点, 选取了 10 个极端气温指数和 10 个极端降水指数, 根据指标特性, 将极端气温指数分为绝对指数、百分比指数和持续指数, 将极端降水指数分为降水量级指数、降水强度指数和降水持续指数。

首先使用 RCLIMDEX 软件 (<http://etccdi.pacificclimate.org/software.shtml>) 对数据进行质量控制并计算极端气候指数。在统计分析时, 通过 ARCGIS 进行泰森多边形分析计算各站点所代表的权重, 采用加权平均法计算四川省及各分区极端气候指数。运用线性分析法、局部加权回归法^[23]和 Mann-Kendall 趋势检验法^[24]分析各指数的总体变化趋势。在使用 M-K 趋势检验时为减少时间序列不独立对趋势检验的影响, 采用 pre-whitened 方法计算自相关系数 r 和消除相关性, 若 $|r| > 0.1$, 采用“pre-whitened”消噪, 产生新的序列用于分析检验; 若 $|r| \leq 0.1$, 将原始序列用于

分析检验^[25-26]。最后, 获得各站点气候指数变化趋势的空间分布图。文中还采用 Pearson 相关系数分析了极端气候指数与年平均气温、年降水量、经纬度、海拔及常用的大气环流因子之间的相关关系, 进而讨论影响四川省极端气候变化的可能因素。

3 结果与分析

3.1 四川省极端气候指数时间变化特征

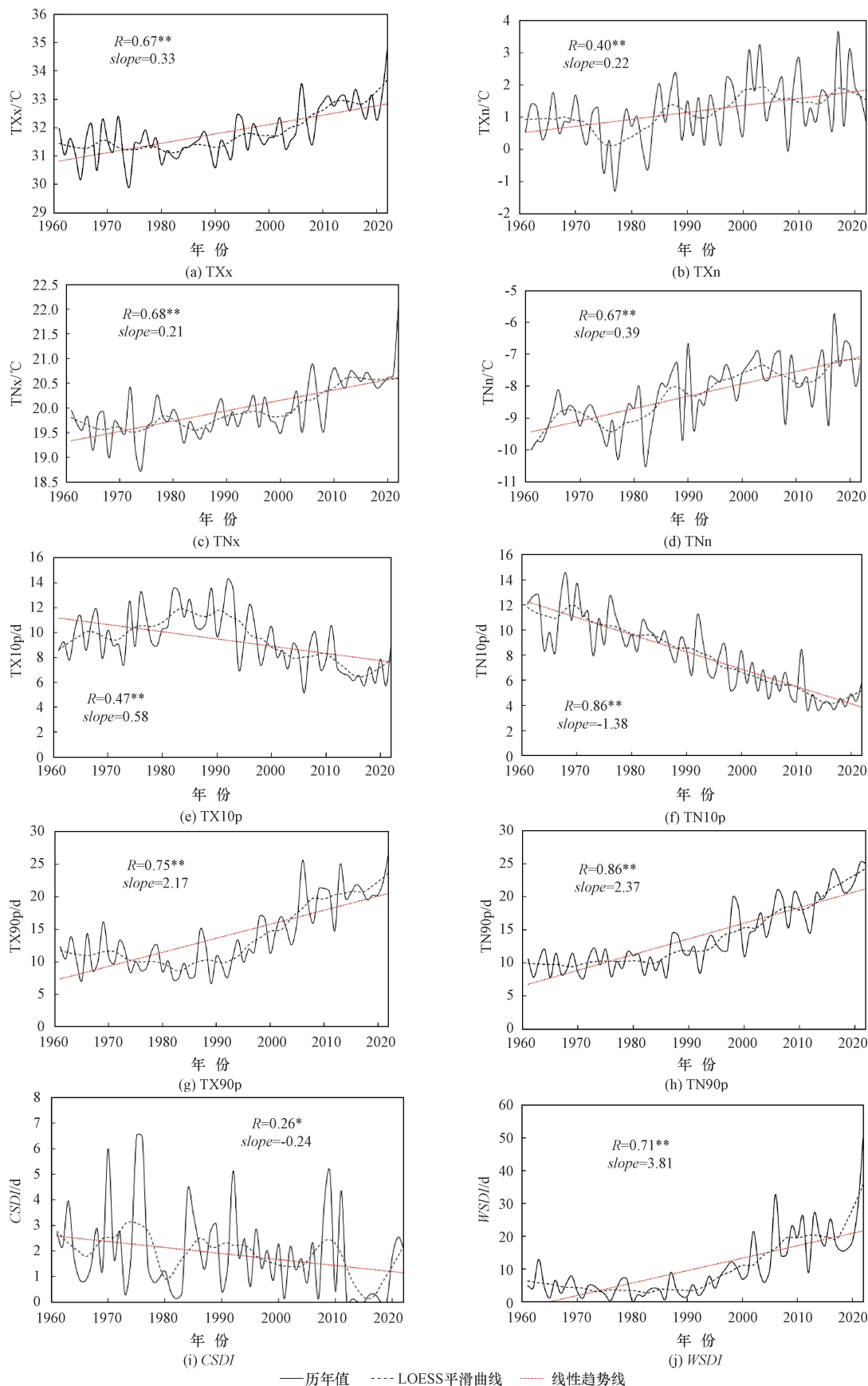
3.1.1 极端气温指数时间变化特征

四川省极端气温指数变化特征如图 2 所示。1961—2022 年, 四川省增温趋势明显, 从全省平均看, TX_x、TX_n、TN_x、TN_n 等绝对指数的年际变率分别为 0.33, 0.22, 0.21, 0.39 °C/10 a [见图 2(a)—(d)], 不同的极端气温绝对指数均表现显著上升趋势, 且呈现“低温上升比高温明显”的特征。暖昼日数 TX_{90p}、暖夜日数 TN_{90p} 年际变化率分别为 2.17, 2.37 d/10 a, 冷昼日数 TX_{10p}、冷夜日数 TN_{10p} 年际变化率分别为 -0.58, -1.38 d/10 a, 极端暖事件显著增加, 极端冷事件显著下降, 且呈现“夜间增暖高于白天, 暖日数高于冷日数”的特征。持续指数亦呈现显著变化趋势, 持续暖期 *WSDI* 表现为显著增加趋势, 年际变化率为 3.81 d/10 a, 持续冷期 *CSDI* 呈现下降趋势, 年际变化率为 -0.24 d/10 a。综上所述, 1961—2022 年四川省极端气温升高, 极端指数主要呈现增暖的变化特征, 极端暖(冷)事件增加

表 1 本文选用的极端气候指数

Table 1 The extreme climate indices selected in the paper

指数类型	指数名称	指数缩写	单位	
极端气温指数	绝对指数	极端最高气温	TX _x	°C
		最低气温极大值	TN _x	°C
		最高气温极小值	TX _n	°C
		极端最低气温	TN _n	°C
	百分比指数	冷昼日数	TX _{10p}	d
		冷夜日数	TN _{10p}	d
		暖昼日数	TX _{90p}	d
		暖夜日数	TN _{90p}	d
	持续指数	持续暖期	<i>WSDI</i>	d
		持续冷期	<i>CSDI</i>	d
极端降水指数	降水量级指数	湿天总降水量	PRCPTOT	mm
		日最大降水量	RX1day	mm
		5 d 最大降水量	RX5day	mm
		强降水量	R95p	mm
		极强降水量	R99p	mm
	降水强度指数	降水强度	SDII	mm/d
		中雨天数	R10mm	d
		大雨天数	R25mm	d
	持续指数	持续干期	CDD	d
		持续湿期	CWD	d



slope 表示各指数的十年变化趋势; * 和 **表示通过了 0.05 和 0.01 的显著性水平检验

图 2 1961—2022 年四川省极端气温指数变化趋势

Fig. 2 Changing trend of extreme temperature indices in Sichuan province from 1961 to 2022

(减少), 持续暖(冷)事件增加(减少), 与全国及全球变暖一致, 四川省亦呈现变暖趋势。

3.1.2 极端降水指数时间变化特征

四川省极端降水指数变化特征如图3所示。1961—2022年, 四川省极端降水量级指数(PRCPTOT、RX1day、RX5day、R95p和R99p)和强度指数(SDII、R10mm和R25mm)均呈增加趋势, 其中SDII以0.10mm/d/10a的变率显著增加, 通过0.01显著性水平检验。持续干期CDD以0.301d/10a的变率增加, 而持续湿期CWD以0.126d/10a的变率显著降低, 通过0.05显著性水平检验。量级指数(PRCPTOT、RX1day、RX5day、R95p和R99p)的年际变化率分别为1.40, 0.73, 0.29, 5.15, 2.70mm/10a, 反映出近62a四川省降雨量以增加为主, RX1day和RX5day的上升趋势反映出降雨量的集中程度增大, 不利于四川省水利工程的运行和管理。R10mm和R25mm的年际变化率分别为0.038d/10a和0.068d/10a, 也呈现增加趋势, 表现为降雨强度不断增大。持续干期增加, 持续湿期降低, 反映出四川省具有干旱化增加的倾向。总之, 1961—2022年四川省极端降水指数以不显著的增加趋势为主要变化特征, 降雨量增加, 降雨集中程度增大。

3.2 四川省极端气候指数变化趋势空间分布与区域差异

3.2.1 极端气温指数变化趋势空间分布与区域差异

极端气温指数变化趋势空间分布如图4所示, 各分区极端气温指数变化趋势如表2所列。

四川省所有站点绝对指数TX_x、TX_n、TN_x、TN_n的M-K趋势率Z值变化范围分别为-0.134~7.16、-1.18~6.03、-0.170~7.11、-0.651~6.17, 呈现上升趋势站点的比例分别为97.5%、87.5%、97.5%、95.0%。大部分站点极端低温指数TN_x和TN_n的增幅大于极端高温指数TX_x和TX_n, 且极端低温指数TN_n和TN_x在川西高山高原区(0.639℃/10a和0.278℃/10a)的上升速率大于川东盆地山地区(0.214℃/10a和0.212℃/10a)和川西南山地区(0.303℃/10a和0.140℃/10a)(见表2), 极端高温指数尤其是TX_x指数的增幅在川东盆地山地区(0.366℃/10a)和川西南山地区(0.334℃/10a)较川西高山高原区(0.294℃/10a)大。冷昼日数(TX10p)和冷夜日数(TN10p)有不同程度的减少, M-K趋势率Z值分别为-6.80~1.85、-8.30~0.346, 呈现下降趋势站点的比例分别为87.5%、97.5%, TX10p和TN10p在川西高山高原区和川西南山地区

下降趋势最明显(-0.792d/10a和-1.895d/10a), 均通过0.01显著性水平检验; 暖昼日数(TX90p)和暖夜日数(TN90p)呈现出不同程度的增加趋势, Z值分别为-0.73~8.09、0.21~8.35, 且在川西南山地区上升趋势最明显(2.603d/10a和3.384d/10a); 持续冷期CSDI的Z值变化范围为-3.80~1.35, 其中, 72.5%的站点呈现减少趋势, 川西高山高原区下降趋势表现最明显(-0.407d/10a); 持续暖期WSDI的Z值变化范围为1.00~8.24, 所有站点均呈现增加趋势, 川西高山高原区(3.448d/10a)和川西南山地区(4.719d/10a)变化幅度高于川东盆地山地区。上述指数变化均反映出四川省各分区气候变暖的特征, 且变暖趋势在川西高山高原区和川西南山地区更显著。综上, 四川省各分区极端气候指数均呈现变暖趋势, 且变暖趋势在川西高山高原区、川西南山地区等高海拔区域更显著, 表明气温变暖趋势受海拔因素的影响。

3.2.2 极端降水指数变化趋势空间分布与区域差异

极端降水指数变化趋势空间分布如图5所示, 各分区极端降水指数变化趋势如表3所列。

年降水量PRCPTOT的M-K趋势率Z值变化范围为-2.19~3.54, 川西高山高原区年降水量呈现普遍增加趋势, 仅木里站呈现不显著下降趋势, 川东盆地山地区和川西南山地区年降水量呈现增加趋势的站点比例分别为43.8%和57.1%, 宜宾站年降水量显著减少。三个分区PRCPTOT的年际变率分别为-3.684、11.937、-4.065mm/10a, 表明川西高山高原区近62年年总降水量增加趋势显著, 川东盆地山地区和川西南山地区年总降水量降低。1d最大降水量RX1day和连续5d最大降水量RX5day的Z值变化分别为-1.76~2.43和-2.15~2.73, 川西高山高原区增加趋势的站点最多, 占比分别为100%和88.2%, 川西南山地区和川东盆地山地区RX1day增加趋势的站点占比分别为71.4%和75%, RX5day增加趋势的站点占比分别为50%和62.5%。三个分区RX1day的年际变率均呈现增加趋势, RX5day在川西高山高原区年际变率为-1.346mm/10a, 表明川西高山高原区5d最大降水量减少, 最大降水量集中程度减小。强降水量R95p和极强降水量R99p的Z值变化分别为-2.56~2.98和-1.33~2.90, 川西高山高原区R95p和R99p增加趋势的站点占比分别为88.2%和94.1%, 川西南山地区为85.7%和42.9%, 川东盆地山地区为68.8%和62.5%。R95p和R99p在三个分区均呈现增加趋势, 强降水量和极强降水

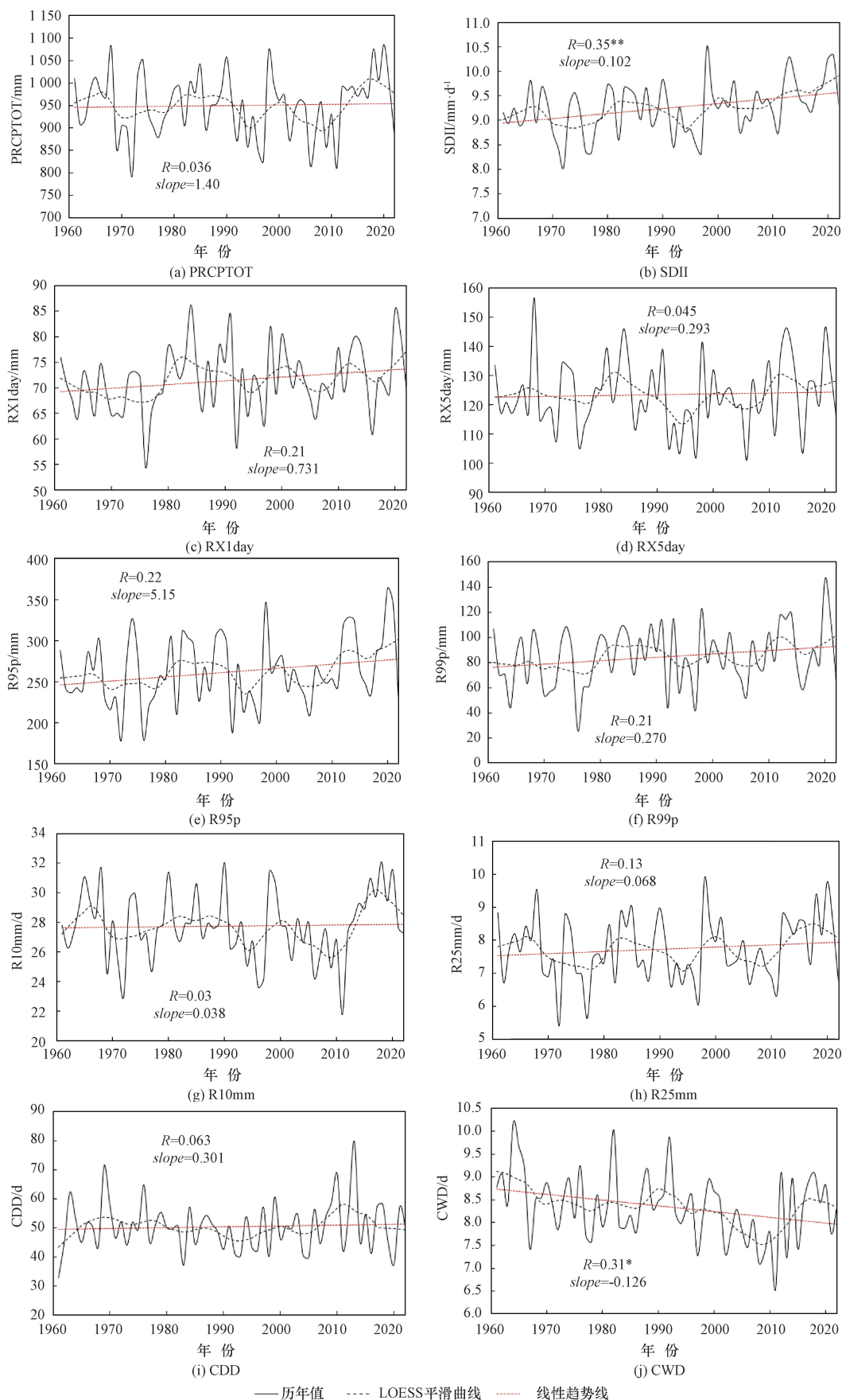
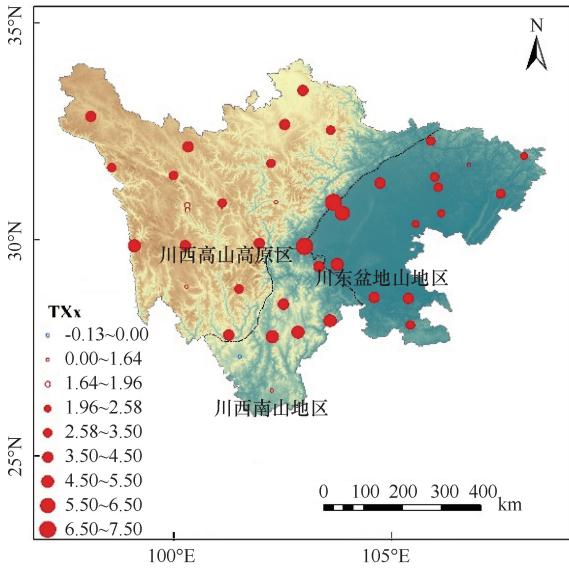
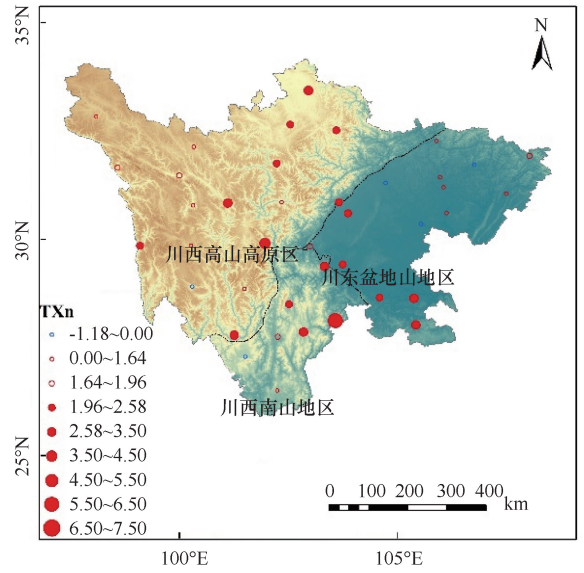


图3 1961—2022年四川省极端降水指数变化趋势

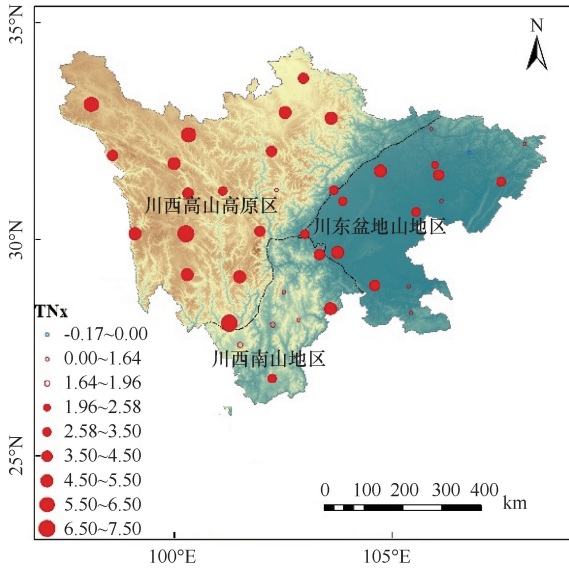
Fig. 3 Changing trend of extreme precipitation indices in Sichuan province from 1961 to 2022



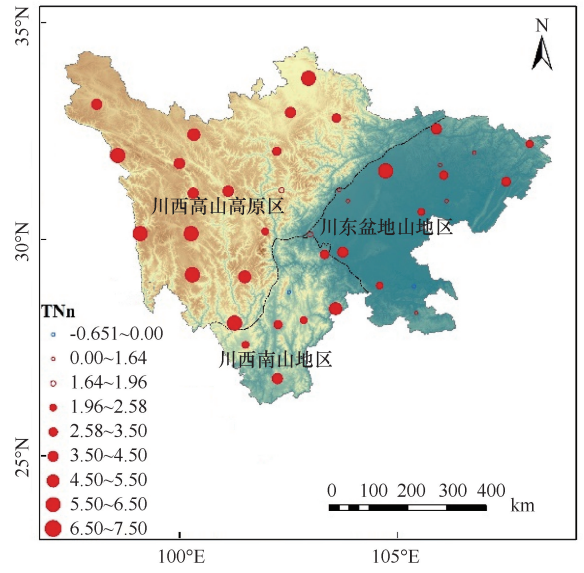
(a) TXx



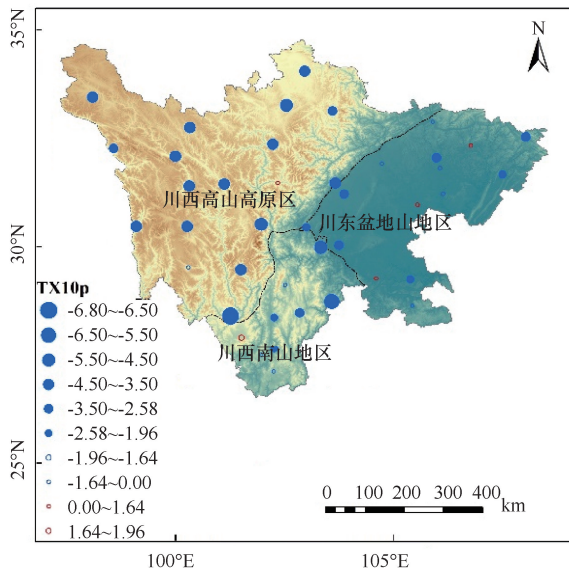
(b) TXn



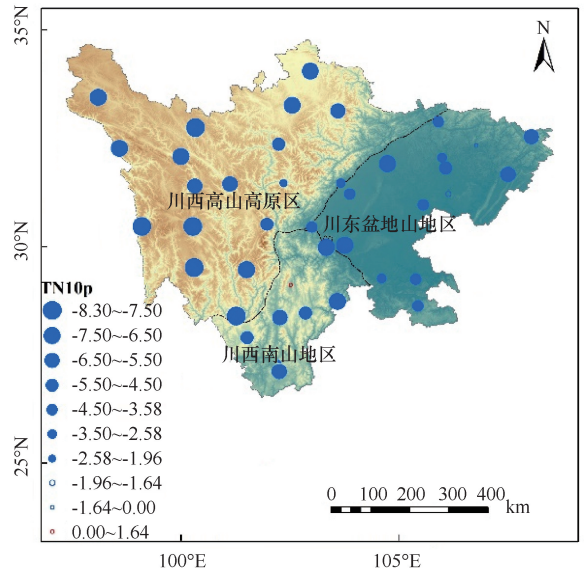
(c) TNx



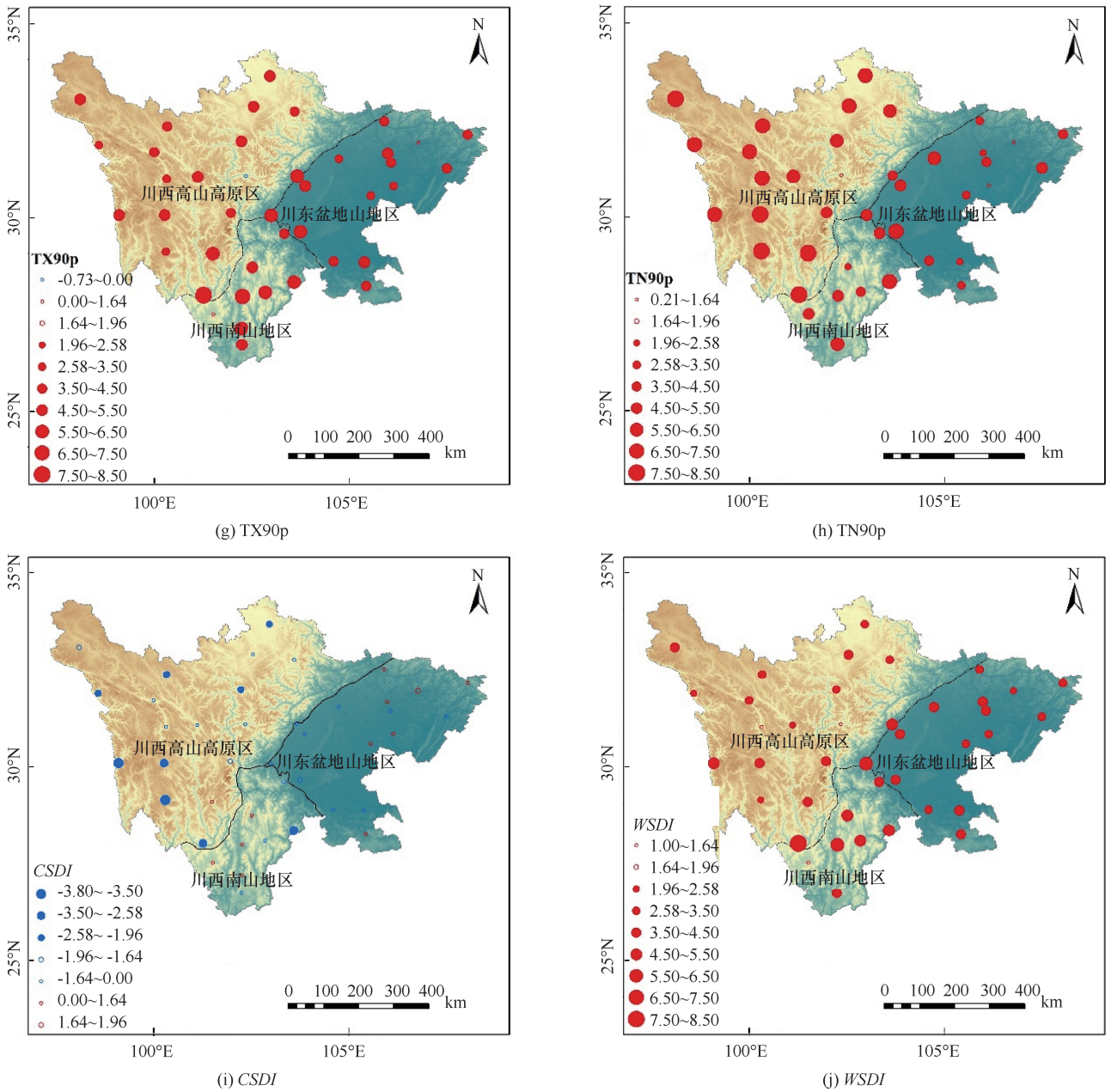
(d) TNn



(e) TX10p



(f) TN10p



蓝色站点表示下降趋势站点；红色站点表示上升趋势站点；实心站点表示变化趋势通过 0.05 显著性水平的检验；空心站点表示变化趋势未通过 0.05 显著性水平的检验

图 4 1961—2022 年四川省极端气温指数变化趋势的空间分布

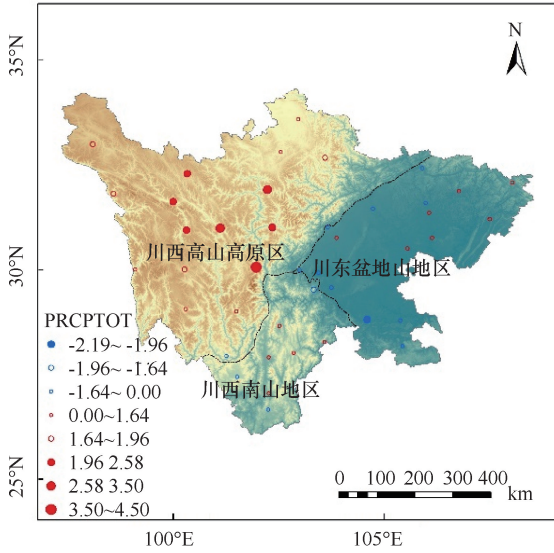
Fig. 4 Changing trends spatial distribution of extreme temperature indices in Sichuan Province from 1961 to 2022

表 2 四川省各分区极端气温指数变化趋势率

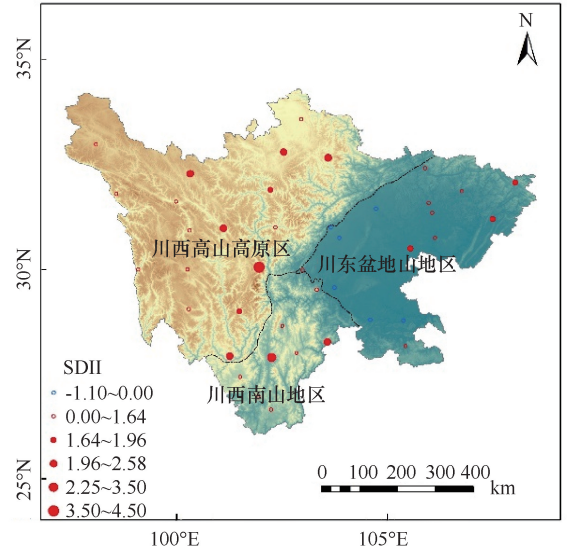
Table 2 Trend rate of extreme temperature indices in different regions of Sichuan province

四川省分区	极端气温指数变化趋势率									
	绝对指数				百分比指数				持续指数	
	TXx	TXn	TNx	TNn	TX10p	TN10p	TX90p	TN90p	WSDI	CSDI
川东盆地山区	0.366 **	0.111	0.212 **	0.214 **	-0.375	-1.015 **	1.869 **	1.589 **	3.264 **	-0.012
川西高山高原区	0.294 **	0.268 **	0.278 **	0.639 **	-0.583 **	-1.895 **	2.024 **	2.128 **	3.448 **	-0.407 **
川西南山区	0.334 **	0.266 **	0.140 **	0.303 **	-0.792 **	-1.222 **	2.603 **	3.384 **	4.719 **	-0.29

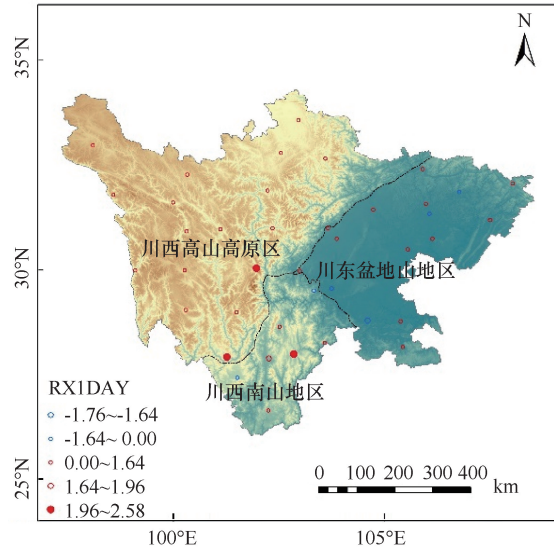
注：* 和 ** 分别表示通过了 0.05 和 0.01 的显著性水平检验。



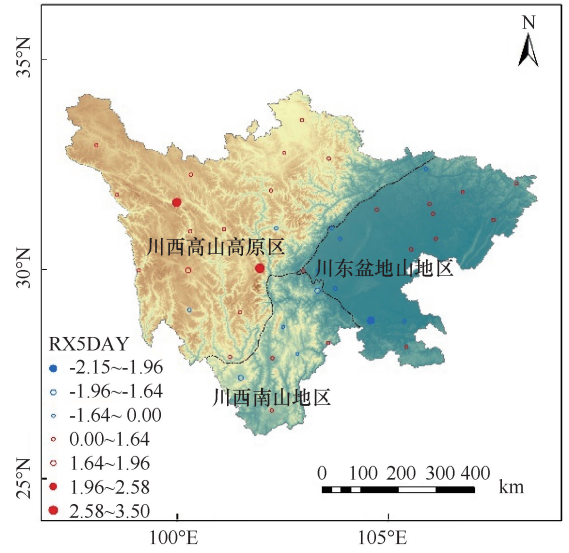
(a) PRCPTOT



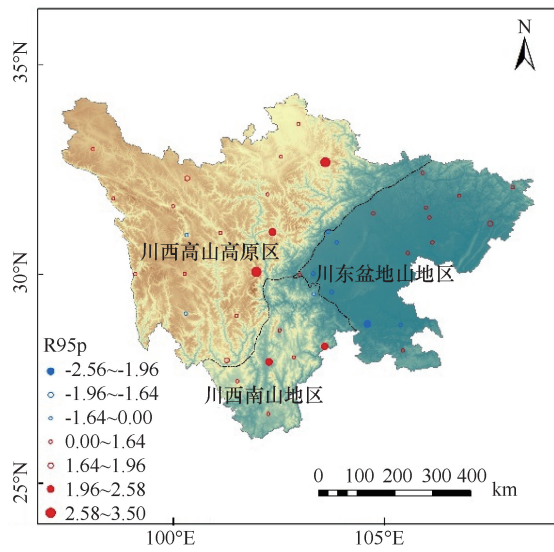
(b) SDII



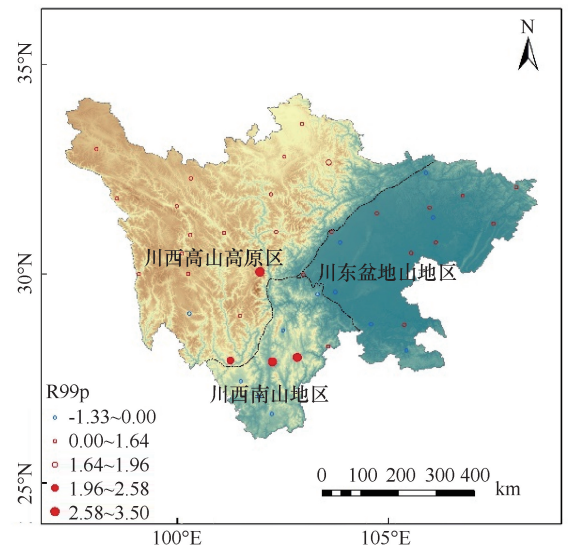
(c) RX1DAY



(d) RX5DAY



(e) R95p



(f) R99p

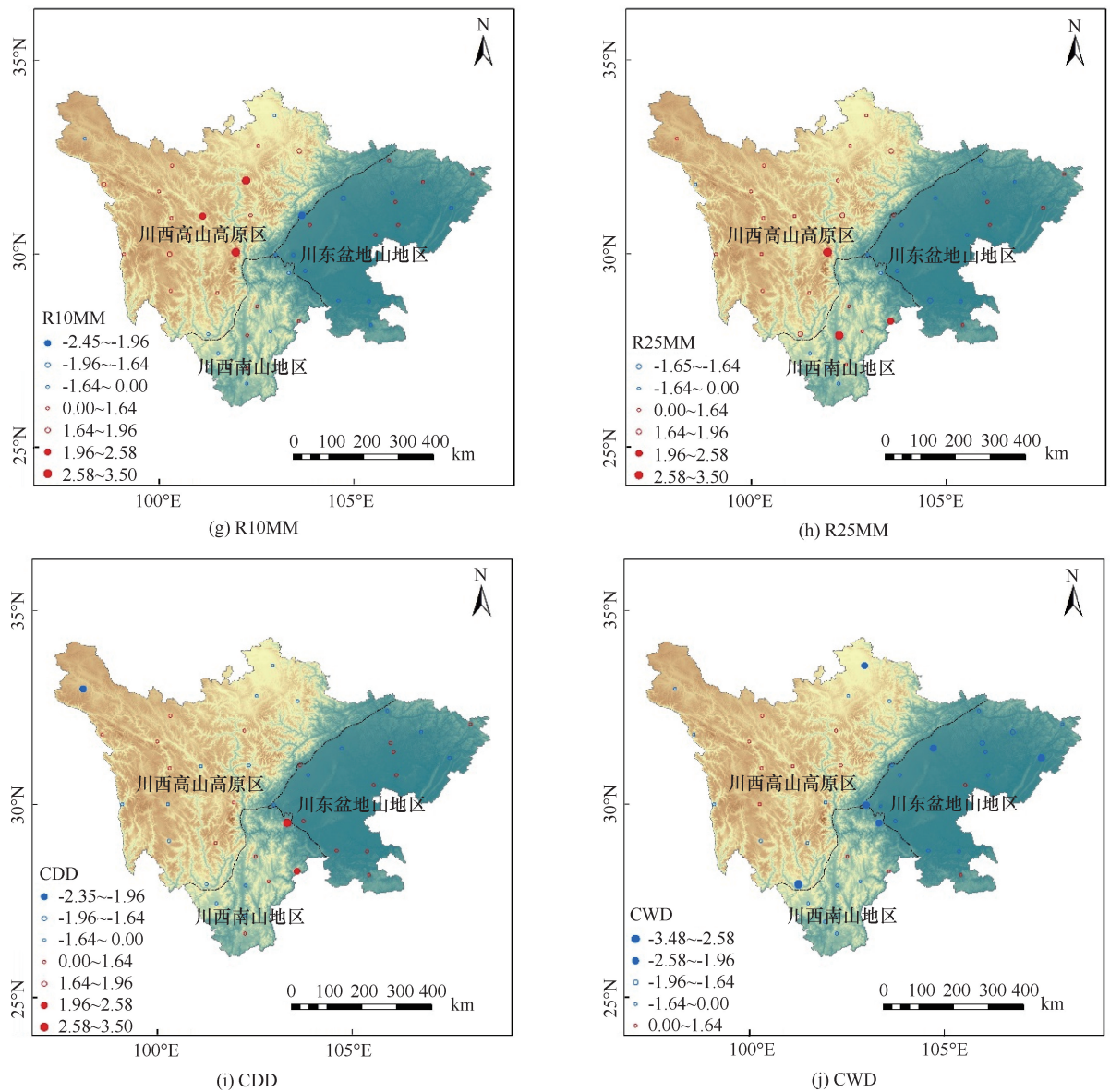


图5 1961—2022年四川省极端降水指数变化趋势的空间分布

Fig. 5 Changing trends spatial distribution of extreme precipitation indices in Sichuan province from 1961 to 2022

表3 四川省各分区极端降水指数变化趋势率

Table 3 Trend rate of extreme precipitation index in different regions of Sichuan province

四川省分区	极端降水指数变化趋势率									
	降水量级指数					降水强度指数			持续指数	
	PRCPTOT	RX1day	RX5day	R95p	R99p	SDII	R10mm	R25mm	CDD	CWD
川东盆地山地区	-3.684	1.148	1.38	4.625	3.654**	0.096	-0.227	-0.038	-0.015	-0.175
川西高山高原区	11.937**	0.447	-1.346	5.75**	1.403	0.088	0.524**	0.1	-0.348	-0.043
川西南山地区	-4.065	0.599	0.846	5.082	3.035	0.122	-0.182	0.142	1.266	-0.158

量增加。

降水强度 SDII 的 Z 值变化范围为 -1.10~3.82, 川西高山高原区和川西南山地区所有站点降水强度均呈现增加趋势, 其中 33.3% 的站点增加趋势通过 0.05 显著性水平检验, 川东盆地山地区 62.5% 的站点降水强度呈现增加趋势。三个分区 SDII 均呈现增

加趋势, 表明降水强度均增强, 且在川西南山地区强度变化最显著 [$0.122 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$]; 中雨日数 R10 mm 和大雨日数 R25 mm 的 Z 值变化范围分别为 -2.45~3.38 和 -1.64~2.97, 川西高山高原区增加趋势的站点占比最多, 中雨天数变化趋势最显著, 趋势率为 0.524 d/10 a。

持续干期 CDD 的 Z 值变化范围为-2.34~3.01, 川西高山高原区 68.8%的站点呈现下降趋势, 石渠站下降显著, 通过 0.05%显著性水平检验; 川西南山地区仅有 2 个站点 CDD 指数呈现下降趋势, 其余 5 个站点 CDD 指数呈现增加趋势, 峨眉山站和雷波站上升趋势显著, 通过 0.05%显著性水平检验; 川东盆地山地区仅 37.5%的站点 CDD 呈现下降趋势。持续湿润指数 CWD 的 Z 值变化范围为-3.49~1.58, 川东盆地山地区和川西南山地区均仅 2 个站点 CWD 指数呈现增加趋势, 其余站点呈现下降趋势, 且峨眉山、雅安、绵阳、达川呈现显著减少趋势, 趋向干旱化, 川西高山高原区 41.2%的站点呈现增加趋势。CDD 在川西高山高原区减少趋势(-0.348 d/10 a)大于 CWD 减少趋势(-0.043 d/10 a), 表明川西高山高原区具有湿润化倾向, CDD 在川西南山地区呈现增加趋势(1.266 d/10 a), CWD 呈现减少趋势(-0.158 d/10 a), 川西南山地区具有干旱化倾向; 川东盆地山地区 CDD 和 CWD 变化趋势率分别为-0.015 d/10 a 和-0.175 d/10 a, 具有干旱化倾向。

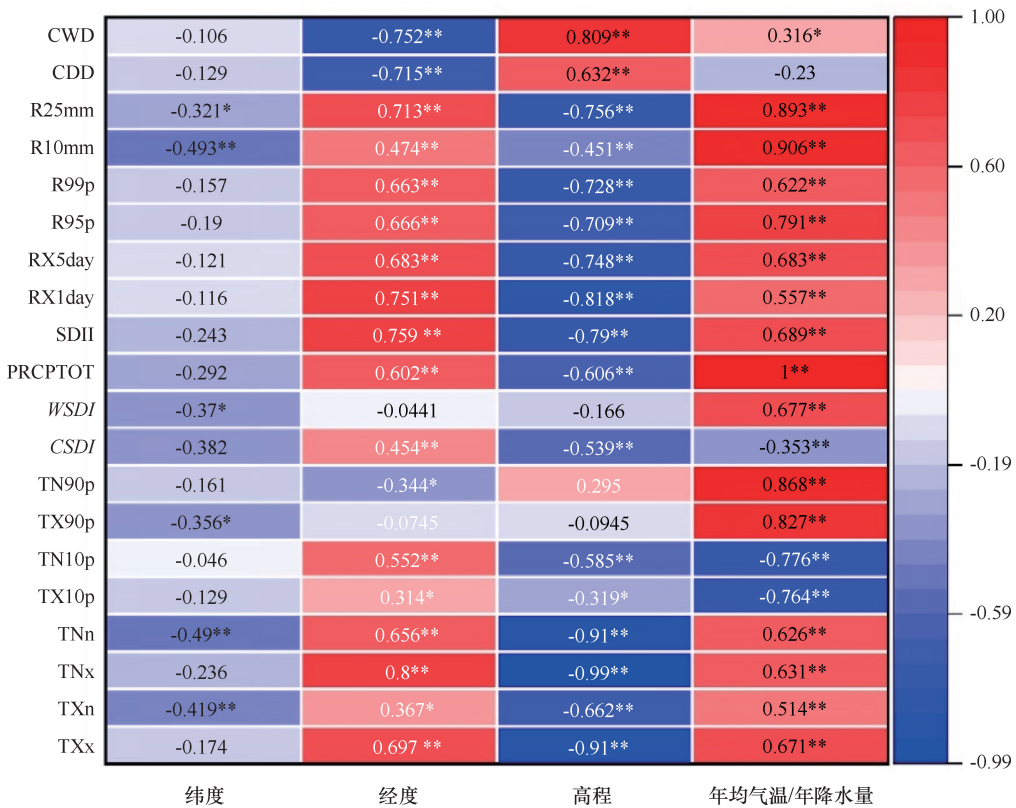
综上, 川西高山高原区的量级指数和强度指数以

增大趋势为主(RX5day)除外, CDD 和 CWD 呈减少趋势且 CWD 减幅较小, 表明川西高山高原区具有湿润化倾向; 川东盆地山地区降水指数在大部分站点以减少趋势为主, 具有干旱化倾向; 川西南山地区降水量级指数 PRCPTOT 下降趋势明显, 且持续干旱指数 CDD 增大明显, 具有干旱化倾向。由此可见, 不同降水指数的变化特征空间差异明显, 空间差异表现为“西湿化和东干化”的特征。

3.3 四川省极端气候影响因素分析

3.3.1 四川省极端气候与年平均气温、年总降水量的关系

四川省极端气温指数与年平均气温, 极端降水指数与年降水量的相关关系如图 6 所示。从图中可以看出, 极端冷指数(TX10P、TN10P)、持续冷期(CSDI)与年平均气温呈显著负相关关系, 均通过 0.01 显著性水平检验, 除上述三个指数外, 其余极端气温指数与年平均气温均呈现显著正相关关系, 相关系数变化范围为 0.514~0.868, 相关性较好, 表明不同极端气温暖指数对平均气温增暖呈现正向响应, 但响应有所差异。极端降水指数中除持续干期(CDD)与年降水量呈现不显著的负相关外, 其余极



* 和 ** 分别表示通过了 0.05 和 0.01 的显著性水平检验

图 6 四川省极端气候指数与经纬度、高程、均值的相关关系

Fig. 6 Correlation between extreme climate indices and longitude, latitude, elevation, mean temperature and annual precipitation

端降水指数均与年降水量呈现显著正相关关系, 且通过 0.01 显著性水平检验(CWD 指数除外), 表明极端降水指数与年降水量密切相关, 极端降水能较好地反映年总降水量的变化。

3.3.2 四川省极端气候与地形因子的关系

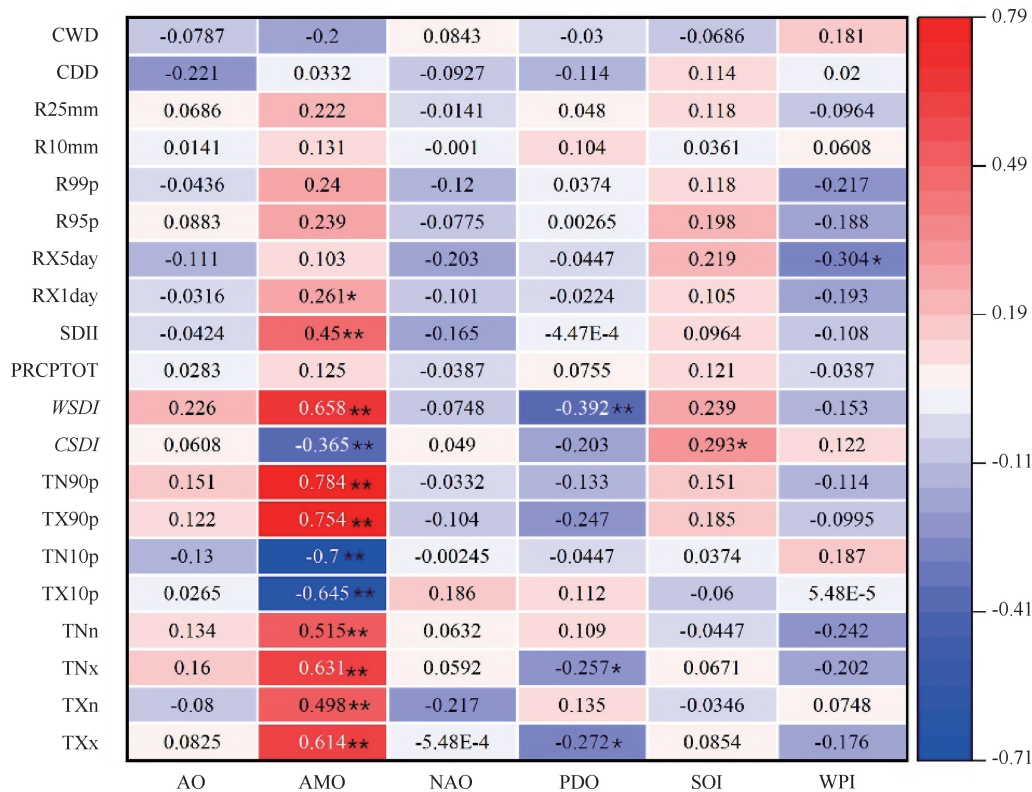
选取经、纬度、海拔三个地形因子, 采用 Pearson 相关系数分析各气象站点地形因子和极端气候事件的相关关系(见图 6)。所有极端气候指数与纬度均呈现负相关, 仅与 R10 mm、TNn、TXn 的相关关系通过 0.01 显著性水平检验, 表明了极端气候事件从东向西递减的空间分布特征, 但相关关系不显著。除 TN90p、TX90p、WSDI、CWD、CDD 指数与经度呈现负相关关系, 其余指数均与经度呈现正相关, 且大部分指数与经度的相关关系通过 0.01 显著性水平检验(除 WSDI、TN90p、TX90p、TX10p、TXn), 表明四川省极端气候事件与经度存在更为显著的相关关系, 大部分极端降水指数与经度的正相关关系符合降水由沿海向内陆、从东南向西北递减的规律。大部分极端气候指数与海拔呈现显著负相关关系, 仅极端降水指数 CWD、CDD 和极端气温指数 TN90p 与海拔呈现正相关关系, 说明海拔也是影响极

端气候事件的重要因子。四川省地形复杂, 地形的显著变化导致极端气候事件空间差异明显。

3.3.3 大气环流影响因素

相关研究得出与长江流域极端气候有显著相关关系的大尺度环流因子包括大西洋年代际振荡指数(AMO)、北极涛动(AO)^[27-29]、北大西洋涛动(NAO)^[29-30]等, 四川省位于长江上游, 本文选取常见的大气环流指数北极涛动指数(AO)、大西洋年代际振荡指数(AMO)、北大西洋涛动指数(NAO)、南方涛动指数(SOI)、西太平洋副热带高压(WPI)和太平洋年代际涛动指数(PDO), 分析与上述极端指数的相关关系, 探讨四川省极端气候事件的大气环流影响因素。极端气候指数与大气环流指数的相关关系见图 7 所示。

AMO 与所有气温指数均显著相关($P < 0.01$), 其中与暖指数呈正相关, 与冷指数呈负相关; 除了 AMO 之外, AO 与大部分极端气温指数呈现正相关, 仅与 TN10p 和 TXn 呈现负相关, 相关关系均不显著; NAO 与大部分极端气温指数呈现不显著负相关关系; PDO 与多个极端气温指数的相关关系较显著, 例如与 WSDI、TNx 和 TXx 呈现显著负相关($P < 0.05$);



* 和 ** 分别表示通过了 0.05 和 0.01 的显著性水平检验

图 7 四川省极端气候指数与大气环流因子的相关关系

Fig. 7 Correlation between extreme climate indices and atmospheric circulation indices

SOI 和 WPI 与极端气温指数的相关关系有正有负, 相关性较差。上述大气环流因子中 AMO、WPI 是与极端降水指数相关关系最好的大气环流因子, 其中 AMO 与大部分极端降水指数正相关, WPI 与大部分极端降水指数负相关。上述分析与多位学者的研究结论一致^[21-31], AMO 和中国极端气候指数显著相关, 主要原因是与 AMO 有关的中纬度西风异常和罗斯贝波的传播影响东亚地区的温度变化, 同时 AMO 和 PDO 对 ENSO 振幅具有调制作用, 与东亚大气环流和我国气候的年代际变化关系密切^[32]。

4 结果讨论

本研究揭示了四川省极端气候的时空变化特征及可能影响因素, 同时结合四川省地貌与气候分区分析各区域极端气候的变化, 在一定程度上代表结合自然地理特征分区开展极端气候变化研究的需要。作为近年来的研究热点, 在气候变暖背景下, 因频发的极端气候事件对生态环境、社会经济和人体健康等的影响而受到广泛关注^[2-3]。

就四川省而言, 1961—2022 年四川省极端气温指数以增暖为主要变化特征, 就本文讨论的 10 种极端气温指数, 在全省的平均变化趋势均显示出对全球气候变暖的敏感响应^[33]。四川省极端气温变化呈现“低温上升比高温明显、夜间增暖高于白天、暖日数高于冷日数”的特征, 这与长江流域、全国及我国其他地区极端气温变化研究结果一致^[14,34], 表明极端气温的变化始于极端低温, 气候变暖是当前的气候新常态, 气候变暖引起气候稳定性差、气候极端趋势化。空间上, 极端气温变暖趋势在川西高山高原区、川西南山地区等高原山区更显著, 这与极端气温指数对海拔的依赖性有关^[17-19]; 同时, 随着气候变暖高海拔山区积雪消融加速, 地表吸收更多的太阳辐射导致高海拔山区变暖增强; 在极端气温指数中, TXx 指数在川东盆地山地区高于川西高山高原区和川西南山地区, 这可能与川东盆地山地区人口密度大及城市化发展造成的热岛效应有关^[17,34]。

1961—2022 年四川省极端降水指数以增加为主要变化特征, 降水强度 SDII 的变化趋势最显著。这与全球变暖背景下, 全球、区域尺度和我国极端降水事件呈现普遍增加趋势的结论一致, 究其原因也是对气候变暖的敏感响应, 在气候变暖的背景下, 大气持水能力增加, 水循环持续增强, 总降水量增加与降水极端性增强^[28]。但此结论与甘露等^[20]、孙晨等^[22]对四川省极端降水研究结论有所不同, 而与段汀等^[21]

采用 2007—2020 年对四川省极端降水研究结论相同, 主要原因可能在于数据时间长短的限制, 甘露等、孙晨等采用的数据年代较久远, 而四川省极端降水增加主要发生 2000 年以后。空间上, 由于各分区自然地理条件差异造成极端降水指数差异明显, 极端降水在川西高山高原区以增加为主而在川东盆地山地区以减少为主, 在川西南山地区总降水量减少, 降水强度增加, 与罗玉等^[35]的研究结论一致。高山高原区降水指数变化趋势与海拔高度存在一定的相关性, 影响极端降水变化趋势的因子复杂, 还需进一步深入探析。

本文探讨了研究区极端气候事件与大气环流因子的相关关系, 包括大西洋年代际振荡、北极涛动、太平洋年代际振荡等, 得出了一些较为重要的结论。然而, 由于四川省特殊的地理位置和地形特点, 不同大气环流对研究区气候影响的物理机制仍需进一步厘清, 其影响过程和影响程度仍不清楚。因此, 气候异常变化背景下, 多因素共同影响的极端气候事件演变仍将是未来研究的重点。

5 结论

(1) 时间尺度上 1961—2022 年, 四川省增温趋势明显, TXx、TXn、TNx、TNn、TX90p、TN90p、TX10p、TN10p、WSDI 和 CSDI 的年际变率分别为 0.33、0.22、0.21、0.39 °C/10 a、2.17、2.37、-0.58、-1.38、3.81 和 -0.24 d/10 a, 四川省极端气温升高, 极端暖(冷)事件增加(减少), 且呈现“低温上升比高温明显”、“夜间增暖高于白天, 暖日数高于冷日数”的变化特征。

四川省极端降水指数 PRCPTOT、RX1day、RX5day、R95p、R99p、SDII、R10mm、R25mm、CDD 和 CWD 的年际变率分别为 1.40、0.73、0.29、5.15、2.70 mm/10 a、0.10 mm · d⁻¹ · (10 a)⁻¹、0.038、0.068、0.301、-0.126 d/10 a, 近 62 a 四川省降水量以增加为主, 降水量的集中程度增大, 极端降水指数以不显著的增加趋势为主要变化特征。

(2) 空间尺度上, 四川省各分区极端气温指数均呈现变暖趋势, 且增暖趋势在川西高山高原区、川西南山地区等高海拔区域更显著。

对极端降水指数, 川西高山高原区的量级指数和强度指数以增大趋势为主 (RX5day) 除外, 持续指数 CDD 和 CWD 呈减少趋势且 CWD 减幅较小, 具有湿润化倾向; 川东盆地山地区和川西南山地区具有干旱化倾向, 极端降水指数表现出“西湿化东干化”的变化特征。因此, 随着气候变暖, 川西高山高原区应

加强防范极端气候变化所引发的自然灾害。

(3)大部分极端气候指数与年平均气温、年降水量、经度和海拔呈现显著相关性,而与纬度相关性较低。大气环流因子中大西洋年代际振荡指数(AMO)对四川省极端气候影响最显著。

参考文献(References):

[1] 周波涛, 钱进. IPCC AR6 报告解读: 极端天气气候事件变化[J]. 气候变化研究进展, 2021, 17(6): 713-718.
ZHOU Botao, QIAN Jin. Changes of weather and climate extremes in the IPCC AR6[J]. Climate Change Research, 2021, 17(6): 713-718.

[2] IPCC. Summary for policymakers of climate change 2013: the physical science basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on climate change [R]. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2013.

[3] 贾朝阳, 郭亮, 崔嵩, 等. 松花江流域 NPP 时空演变及其对极端气候的响应机制[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2024, 22(1): 131-147.
JIA Z Y, GUO L, CUI S, et al. Spatial-temporal evolution of NPP and its response to extreme climate in Songhua River basin [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2024, 22(1): 131-147.

[4] 侯承志, 黄丹青, 桂东伟, 等. 1961—2019年中国北方沙漠沙地极端气候变化特征及其影响因素[J]. 地理学, 2023, 43(8): 1495-1505.
HOU Chengzhi, HUANG Danqing, GUI Dongwei, et al. Spatiotemporal variations of climate extremes and influential factors in deserts and sandy fields of northern China from 1961 to 2019 [J]. Scientia Geographica Sinica, 2023, 43(8): 1495-1505.

[5] FIELD C B, BARROS V, STOCKER T F, et al. IPCC, 2012: Managing the risks of extreme events and disasters to advance climate change adaptation [M]//IPCC. A Special Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, United Kingdom and New York, USA.: Cambridge University Press, 2012: 582.

[6] ALEXANDER L V, ZHANG X B, PETERSON T C, et al. Global observed changes in daily climate extremes of temperature and precipitation [J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2006, 111(D5): D05109.

[7] DONAT M G, ALEXANDER L V, YANG H, et al. Global land-based datasets for monitoring climatic extremes [J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 2013, 94(7): 997-1006.

[8] PETERSON T C, ZHANG X, BRUNET-INDIA M, et al. Changes in North American extremes derived from daily Weather data [J]. Journal of Geophysical Research, 2008, 113(D7): D07113.

[9] ANDRADE C, LEITE S M, SANTOS J A. Temperature extremes in Europe: Overview of their driving atmospheric patterns [J]. Natural Hazards and Earth System Science, 2012, 12(5): 1671-1691.

[10] MUTAI B, NGAINA J. Observational evidence of climate change on extreme events over east Africa [J]. Global Meteorology, 2013, 2

(e2): 6-12.

[11] FENG R, YU R, ZHENG H, et al. Spatial and temporal variations in extreme temperature in Central Asia [J]. International Journal of Climatology, 2018, 38(S1): e388-e400.

[12] ZOLINA O, KAPALA A, SIMMER C, et al. Analysis of extreme precipitation over Europe from different reanalyses: a comparative assessment [J]. Global & Planetary Change, 2004, 44(1-4): 129-161.

[13] 郑芳, 李芳然, 甘义群, 等. 极端气候事件对洞庭湖水文连通性变化的影响 [J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2024, 22(1): 67-79.
ZHENG F, LI F R, GAN Y Q, et al. The impact of extreme climatic events on hydrological connectivity of Dongting Lake [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2024, 22(1): 67-79.

[14] 曹晴, 郝振纯, 傅晓洁, 等. 1960—2017年中国极端气候要素时空变化分析 [J]. 人民黄河, 2020, 42(2): 11-17.
CAO Qing, HAO Zhenchun, FU Xiaojie, et al. Analysis of Spatial-Temporal changes of extreme climate elements in China from 1960 to 2017 [J]. Yellow River, 2020, 42(2): 11-17.

[15] 郑玉萍, 高路, 张江燕, 等. 福州市极端气候变化趋势研究 [J]. 福建师范大学学报(自然科学版), 2017, 33(2): 96-104.
ZHENG Yuping, GAO Lu, ZHANG Jiangyan, et al. Variations of extreme climate events in Fuzhou [J]. Journal of Fujian Normal University(Natural Science Edition), 2017, 33(2): 96-104.

[16] 陈成豪, 李彤彤, 冯杰, 等. 海口市极端降雨事件演变趋势分析 [J]. 水资源与水工程学报, 2016, 27(3): 6-10.
CHEN Chenghao, LI Tongtong, FANG Jie, et al. Analysis of temporal evolution law of extreme rainstorm events in Haikou City [J]. Journal of Water Resources & Water Engineering, 2016, 27(3): 6-10.

[17] 王琼, 张明军, 王圣杰, 等. 1962—2011年长江流域极端气温事件分析 [J]. 地理学报, 2013, 68(5): 611-625.
WANG Qiong, ZHANG Mingjun, WANG Shengjie, et al. Extreme temperature events in Yangtze River basin during 1962—2011 [J]. ACTA Geographica Sinica, 2013, 68(5): 611-625.

[18] 吴琛, 王景才, 林慧, 等. 淮河中上游流域极端气候变化特征及其对干旱的影响 [J]. 水文, 2022, 42(4): 68-75.
WU Chen, WANG Jingcai, LIN Hui, et al. Change Characteristics of extreme climate elements and its impact on drought in the upper and middle reaches of Huai river basin [J]. Journal of China Hydrology, 2022, 42(4): 68-75.

[19] 孙文慧, 韩琳, 刘雪宇. 1969—2019年四川省极端气温事件时空分布特征 [J]. 水利水电技术(中英文), 2023, 54(7): 113-127.
SUN Wenhui, HAN Lin, LIU Xueyu. Spatial and temporal distribution characteristics of extreme temperature events in Sichuan Province from 1969 to 2019 [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2023, 54(7): 113-127.

[20] 甘露, 刘睿, 冀琴, 等. 四川省极端降水事件时空演变特征 [J]. 山地学报, 2021, 39(1): 10-24.
GAN Lu, LIU Rui, JIN Qin, et al. Spatio-temporal evolution

- characteristics analysis of extreme precipitation in Sichuan Province, China[J]. *Mountain Research*, 2021, 39(1): 10-24.
- [21] 段汀, 陈权亮, 王悦, 等. 2007—2020年四川省极端降水的时空演变特征[J]. *云南大学学报(自然科学版)*, 2022, 44(2): 317-327.
- DUAN Ting, CHEN Quanliang, WANG Yue, et al. Spatial and temporal variations of extreme precipitation in Sichuan Province from 2007 to 2020[J]. *Journal of Yunnan University: Natural Sciences Edition*, 2022, 44(2): 317-327.
- [22] 孙晨, 程志刚, 毛晓亮, 等. 近44 a四川地区极端气候变化趋势及特征分析[J]. *兰州大学学报(自然科学版)*, 2017, 53(1): 119-126.
- SUN Chen, CHENG Zhigang, MAO Xiaoliang, et al. Extreme climate change trend and features in Sichuan for the latest 44 years[J]. *Journal of Lanzhou University: Natural Sciences*, 2017, 53(1): 119-126.
- [23] CLEVELAND W S, DEVLIN S J. Locally weighted regression: an approach to regression analysis by local fitting[J]. *Journal of the American Statistical Association*, 1988, 83(403): 596-610.
- [24] 陈四宾, 汪宏星. 1984—2021年渭河流域气温和降水时空分布特征分析[J]. *水利发展研究*, 2024, 24(10): 96-105.
- CHEN Sibin, WANG Hongxing. Analysis of temporal and spatial distribution of temperature and precipitation in Weihe River Basin from 1984 to 2021[J]. *Water Resources Development Research*, 2024, 24(10): 96-105.
- [25] 詹存, 梁川, 赵璐. 川中丘陵区季节性干旱时空分布特征及成因分析[J]. *农业工程学报*, 2013, 29(21): 82-90.
- ZHAN Cun, LIANG Chuan, ZHAO Lu. Temporal and spatial distribution characteristics and causes analysis of seasonal drought in hilly area of central Sichuan[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2013, 29(21): 82-90.
- [26] 江田汉, 邓莲堂. Hurst指数估计中存在的若干问题: 以在气候变化研究中的应用为例[J]. *地理科学*, 2004, 24(2): 177-182.
- JIANG Tianhan, DENG Liantang. Some problems in estimating a hurst exponent—a case study of applicatings to climatic change[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2004, 24(2): 177-182.
- [27] GONG D, YANG J, KIM S, et al. Spring Arctic Oscillation-East Asian summer monsoon connection through circulation changes over the western North Pacific[J]. *Climate Dynamics*, 2011, 37(11/12): 2199-2216.
- [28] 高涛, 谢立安. 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*, 2014, 29(5): 577-589.
- GAO Tao, XIE Li'an. Study on progress of the trends and physical causes of extreme precipitation in China during the last 50 years[J]. *Advances in Earth Science*, 2014, 29(5): 577-589.
- [29] ZHAO G, MU X, HÖRMANN G, et al. Spatial patterns and temporal variability of dryness/wetness in the Yangtze River Basin, China[J]. *Quaternary International*, 2011, 282(19): 5-13.
- [30] ZHOU B J, LIANG C, ZHAO P, et al. Analysis of precipitation extremes in the source region of the Yangtze River during 1960—2016[J]. *Water*, 2018, 10: 1691.
- [31] SHI J, CUI L, WEN K, et al. Trends in the consecutive days of temperature and precipitation extremes in China during 1961—2015[J]. *Environmental Research*, 2018, 161: 381-391.
- [32] WANG J L, YANG B, LJUNGQVIST F C, et al. The relationship between the Atlantic Multidecadal Oscillation and temperature variability in China during the last millennium [J]. *Journal of Quaternary Science*, 2013, 28(7): 653-658.
- [33] ZHANG P, REN G, XU Y, et al. Observed changes in extreme temperature over the global land based on a newly developed station daily dataset[J]. *Journal of Climate*, 2019, 32(24): 8489-8509.
- [34] 吴光伟, 常允新, 王庆兵, 等. 近55年来山东省极端气温事件时空分布特征[J]. *水利水电技术(中英文)*, 2023, 54(2): 19-32.
- WU Guangwei, CHANG Yunxin, WANG Qingbing, et al. Temporal and spatial distribution characteristics of extreme temperature events in Shandong Province in recent 55 years [J]. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 2023, 54(2): 19-32.
- [35] 罗玉, 陈超, 马振峰, 等. 四川盆地夏季区域性极端降水事件特征及其成因[J]. *西南大学学报(自然科学版)*, 2019, 41(5): 128-138.
- LUO Yu, CHEN Chao, MA Zhenfeng, et al. Characteristics and causes of regional extreme precipitation events in summer over Sichuan [J]. *Journal of Southwest University (Natural Science Edition)*, 2019, 41(5): 128-138.

(责任编辑 王海锋)