

李加顺, 赵伟华, 刘丽, 等. 1960—2020年滇中地区极端降水指标时空演变规律研究[J]. 水利水电技术(中英文), 2025, 56(1): 1-14. DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2025.01.001

LI Jiashun, ZHAO Weihua, LIU Li, et al. Variation characteristics of extreme precipitation indicators in central Yunnan Province from 1960 to 2020[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2025, 56(1): 1-14. DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2025.01.001

1960—2020年滇中地区极端降水指标 时空演变规律研究

李加顺^{1,2}, 赵伟华³, 刘丽^{1,2}, 周彩霞¹

(1. 云南省水利水电科学研究院, 云南 昆明 650228; 2. 云南省水土流失防治与绿色发展重点实验室, 云南 昆明 650228; 3. 长江水利委员会长江科学院, 湖北 武汉 430010)

摘要:【目的】极端降水是产生洪涝灾害的首要原因之一, 对农业生产有重要影响, 为探讨云南省滇中地区极端降水指标的时空演变规律, 【方法】利用1960—2020年滇中地区44个气象站日降水数据, 采用Mann-Kendall趋势分析、Sen斜率估计、连续小波分析研究了极端降水指标的年内、年际及周期性变化特征。【结果】结果显示: 60年来, 发现在年内1d最大降水量(Rx1day)、5d最大降水量(Rx5day)、降水强度(SDII)、中雨以上日数(R10)、大雨以上日数(R20)、持续湿期日数(CWD)、强降水量(R95p)和特强降水量(R99p)均呈现先增加后减小的趋势; 持续干期日数(CDD)表现为先减小后增加的趋势。在年尺度上, Rx1day、SDII、R99p呈显著增加的趋势, CDD、Rx5day、R10、R20、R95p和总降水量(PRCPTOT)变化趋势不显著, CWD呈显著减小的趋势; Rx1day、Rx5day、R10、R20、R95p、R99p和PRCPTOT高值区位于滇中地区的西北部、东北部及东南部, 低值区位于滇中地区的中偏西部; SDII高值区位于滇中地区的西北部, 低值区位于滇中地区的中偏西部; CDD呈自西北向东南逐渐减小的趋势; CWD高值区位于滇中地区的西北部、东南部和中部, 低值区位于滇中地区的中偏西部; 小波分析显示Rx1day、Rx5day、R10、R20、SDI、CDD、CWD、R95p、R99p和PRCPTOT均存在8a内的周期特性。【结论】结果表明: Mann-Kendall趋势分析对于降水要素时间序列变化趋势和突变点分析, 能发挥重要的作用; Sen斜率估计针对降水要素长时间序列数据的趋势分析, 起到至关重要的作用; 连续小波分析能够推断出降水要素存在的周期性变化, 有很大的推广应用价值。通过对滇中地区极端降水指标时空演变规律研究, 可为滇中地区灌溉排水规划及防灾减灾提供参考依据。

关键词: 极端降水指标; Mann-Kendall趋势分析; Sen斜率估计; 连续小波分析; 滇中地区; 气候变化; 时空分布; 降雨

DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2025.01.001

开放科学(资源服务)标志码(OSID):

中图分类号: P426.6

文献标志码: A

文章编号: 1000-0860(2025)01-0001-14



收稿日期: 2024-07-02; 修回日期: 2024-09-02; 录用日期: 2024-09-03; 网络出版日期: 2024-10-21

基金项目: 国家自然科学基金项目(52009118)

作者简介: 李加顺(1983—), 男, 高级工程师, 硕士, 主要从事水土保持及水资源方向研究。E-mail: 155196556@qq.com

通信作者: 刘丽(1982—), 女, 高级工程师, 学士, 主要从事水土保持及水资源方向研究。E-mail: 79212903@qq.com

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

Variation characteristics of extreme precipitation indicators in central

Yunnan Province from 1960 to 2020

LI Jiashun^{1,2}, ZHAO Weihua³, LIU Li^{1,2}, ZHOU Caixia¹

(1. Yunnan Water Science Research Institute, Kunming 650228, Yunnan, China; 2. Yunnan Key Laboratory of Soil Erosion Prevention and Green Development, Kunming 650228, Yunnan, China; 3. Changjiang River Scientific Research Institute, Wuhan 430010, Hubei, China)

Abstract: [Objective] Extreme precipitation is an important fact that lead to flood-waterlogging disaster and has an important impact on agricultural production. To explore the spatiotemporal evolution law of extreme precipitation indicators in the central area of Yunnan Province. [Methods] Based on the daily precipitation date at 44 stations from 1960 to 2020, the variation trends and period characteristics of extreme precipitation indices in central Yunnan Province is nalyzed. [Results] The result showed: Over the past 60 years, maximum 1-day precipitation (Rx1day), maximum 5-day precipitation (Rx5day), simple daily intensity index (SDII), ≥ 10 mm precipitation days (R10), days ≥ 20 mm precipitation days (R20), maximum consecutive wet days (CWD), very wet day precipitation (R95p), and Extremely wet day precipitation (R99p) exhibit an initial increasing trend followed by a subsequent decreasing trend. Conversely, maximum consecutive dry days (CDD) demonstrates an initial decreasing trend before transitioning into an increasing trend. Rx1day, SDII and R99p had a significant increasing trend, while CDD, Rx5day, R10, R20, R95p and Total precipitation amount (PRCPTOT) showed no significant change trend, and CWD had a significant decreasing trend. The high values of Rx1day, Rx5day, R10, R20, R95p, R99p and PRCPTOT are located in the northwest, northeast and southeast of the central Yunnan region, and the low values are located in the west-central Yunnan region. The high value of SDII is located in the northwest of the central Yunnan region, and the low value is located in the central western part of the central Yunnan region. The CDD exhibited a gradient of decrease from the northwest to the southeast. The high value of CWD is located in the northwest, southeast and central part of the central Yunnan region, and the low value is located in the west-central part of the central Yunnan region. Wavelet analysis shows that Rx1day, Rx5day, R10, R20, SDI, CDD, CWD, R95p, R99p and PRCPTOT all have periodicity within 8a. [Conclusion] Mann Kendall trend analysis can play an important role in analyzing the time series trends and mutation points of precipitation elements; The slope estimation of Sen plays a crucial role in trend analysis of long-term precipitation data; Continuous wavelet analysis can infer the periodic changes in precipitation elements, which has great value for promotion and application. By studying the spatiotemporal evolution of extreme precipitation indicators in central Yunnan, reference can be provided for irrigation and drainage planning, disaster prevention and reduction in the region.

Keywords: extreme precipitation indices; Mann-Kendall trend analysis; Sen slope estimation; continuous wavelet analysis; central Yunnan Province; climate change; spatiotemporal distribution; rainfall

0 引言

气候变暖大背景下, 极端天气和气候事件频发对人类社会财产安全造成严重影响^[1-3]。降水是全球气候系统、物质和能量循环中最重要的变量之一, 降水的时空变化可以直接或间接影响水文、生态及生物地球化学过程^[4-5]。而极端降水一方面可能引发洪涝、干旱等自然灾害, 影响作物正常生长, 导致作物减产; 另一方面对于地形陡峭、植被覆盖率低的地区可引发严重的土壤侵蚀^[6-7]。不同的区域气候特征、气候驱动力等存在巨大差异, 致使极端降水变化特征不同^[8-9]。因此, 迫切需要探讨区域尺度极端降水的变化特征, 对于变化环境下区域水资源管理、旱涝灾害的控制和预防具有重要的意义。

政府间气候变化专门委员会(IPCC)第六次评估报告指出, 预计在未来 20 年全球气温将升高

1.5 °C^[10]。气候变暖引起全球水循环过程加剧, 致使全球季风区极端降水显著增强^[11], KARL 等^[12]研究发现, 美国日降水量超过 50.8 mm 的极端天气从 20 世纪初的 9% 增加到了 80—90 年代的 11%, KARL 等^[13]进一步指出 20 世纪初美国降水增加 8% 来自于日极端降水事件。KUNKEL 等^[14]同样指出 1~7 d 短期极端降水对于美国降水长期变化的重要性。在澳大利亚大部分地区, 强降水事件有增加趋势^[15-16]。NEW 等^[17]分析了月平均雨量观测数据, 结果表明, 全球陆地(不包括南极大陆)降水 200 年内增加了约 9 mm, 其中日最大降水有很大贡献。ROY 等^[18]发现, 1910—2000 年印度极端降水频率存在明显增加的趋势。全球陆地观测数据显示, 在过去的 50~100 a, 中纬度地区强降水频率普遍增加^[19]。东亚地区暴雨日增加, 极端降水事件频发^[20]。在中国, 降水频率和强度均呈增加趋势, 但区域差异明显。长江

中下游、东南地区和西北的部分区域极端降水有增加趋势, 而华北、东北和西南的部分地区有减少趋势^[21]。黄河中上游地区降水频率有所下降, 而降水强度在1990年之前显著下降, 1990年以后显著上升^[3]。金沙江流域大部分地区极端降水事件频发, 高海拔地区极端降水量增加显著^[22]。新疆地区持续干燥日数呈下降趋势, 而最大1日降水量、强降水量、总降水量和大雨日数增加显著^[23]。华北和西南地区连续性极端降水量和降水频次呈不显著的减少趋势^[24]。滇中地区短时强降水事件月累积频次都表现为单峰型, 主要集中在5—10月, 其中6—8月为短时强降水事件高发期^[25], 而对于极端降水频率、强度和持续时间等时空演变规律的研究较为缺乏。

滇中地区是云南省重要的农业区之一, 受地理位置、气候、地貌等因素的影响, 该地区遭受极端降水风险高于云南省其他区域。以往研究主要集中在滇中地区的短时强降水时空分布特征, 对于极端降水指标的变化规律研究较少。研究极端降水频率、强度和持续时间等的变化规律, 对于该地区制定科学减灾战略至关重要。基于此, 本研究利用滇中地区日降水数据, 统计计算极端降水指标, 在此基础上分析滇中地区极端降水指标年内、年际变化及周期性变化特征, 并探讨不同时间尺度降水强度及降水频率对总降水量的影响, 以期为自然灾害防御等提供参考数据。

1 数据与方法

1.1 研究区概况

滇中地区位于云南省中部(99°33'E—104°43'E, 22°53'N—27°05'N), 国土面积约为 $1.5 \times 10^5 \text{ km}^2$ (见图1)。研究区属高原山地季风气候, 日照充足, 干湿季分明。最热月平均温度为19~22℃, 最冷月平均温度为6~8℃^[26]。年降水量约为955.0 mm, 其中5—10月降水量约占年总降水量的85%以上^[26]。该地区是云南省重要的粮食、蔬菜、水果生产基地之一^[27], 受季风影响, 旱、涝灾害频发, 严重影响农业生产。

1.2 数据

本文采用44个站点的气象数据来自中国气象数据共享中心(available at www.nmic.gov.cn/), 时间序列为1960—2020年(见图1)。通过绘制降水时间序列图, 通过目视判断的方法查询可能存在的错误数据, 其中错误和缺失的数据通过使用相一致长时间序列的均值进行插补^[28]。根据滇中地区的气候特征, 并依据世界气象组织(World Meteorological Organization,

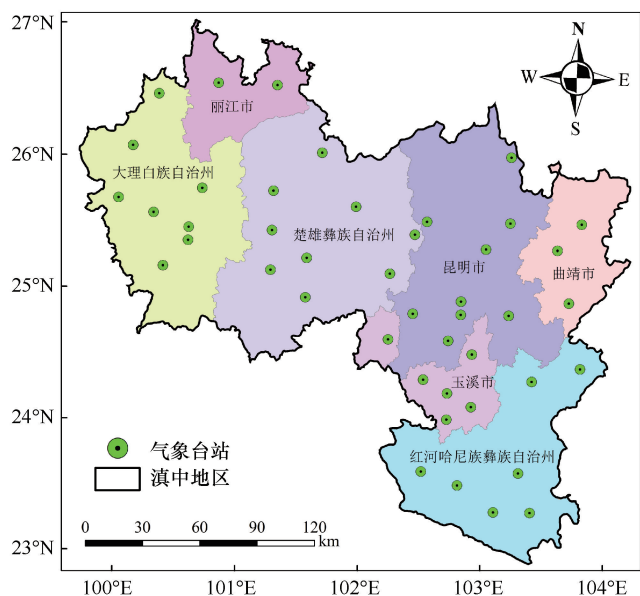


图1 研究区范围及气象站位置

Fig. 1 Scope of the research area and location of meteorological stations

WMO)以及气候变化检测和指数专家组(ETCCDI)推荐的“气候变化检测和指标体系”^[29], 选取10个极端降水指数, 主要包括1 d最大降水量(Rx1day)、5 d最大降水量(Rx5day)、中雨以上日数(R10)、大雨以上日数(R20)、降水强度(SDII)、持续干期日数(CDD)、持续湿期日数(CWD)、强降水量(R95p)、特强降水量(R99p)、年总降水量(PRCPTOT)(见表1)。

1.3 方法

1.3.1 Mann-Kendall 趋势分析

Mann-Kendall 趋势分析是一种非参数时间序列趋势检测方法, 不需要样本遵循一定分布, 被广泛应用于水文、气象要素变化趋势研究^[28]。本文采用Mann-Kendall 趋势分析对滇中地区极端降水指标的时间序列进行趋势分析。检验统计量 S 计算如下

$$S = \sum_{k=1}^{n-1} \sum_{j=k+1}^n \text{sgn}(S_j - S_k) \quad (1)$$

$$\text{sgn}(S_j - S_k) = \begin{cases} 1 & (X_j - X_k) > 0 \\ 0 & (X_j - X_k) = 0 \\ -1 & (X_j - X_k) < 0 \end{cases} \quad (2)$$

如果数据集是完全独立分布的, 则 S 的平均值为零, S 的方差如下

$$\text{Var}(s) = \left[n(n-1)(2n+1) - \sum_t t(t-1)(2t+5) \right] / 15 \quad (3)$$

表1 极端降水指数定义

Table 1 Definition of Extreme Precipitation Index

代码	指数名称	指数定义	单位
Rx1day	1 d 最大降水量	最大1日降水量	mm
Rx5day	5 d 最大降水量	最大5日降水量	mm
R10	中雨以上日数	日降水量 ≥ 10 mm 的日数	d
R20	大雨以上日数	日降水量 ≥ 20 mm 的日数	d
SDII	降水强度	年降水总量与湿日数(日降水量 ≥ 1.0 mm)的比值	mm/d
CDD	持续干期日数	日降水量 < 1 mm 的最大持续日数	d
CWD	持续湿期日数	日降水量 > 1 mm 的最大持续日数	d
R95p	强降水量	日降水量 $> 95\%$ 分位值的年累计降水量	mm
R99p	特强降水量	日降水量 $> 99\%$ 分位值的年累计降水量	mm
PRCPTOT	年总降水量	日降水量 > 1 mm 的年累计降水量	mm

式中, n 为数据集长度; t 为任何给定时间范围。

对于长时间序列, 统计值 S 可以转为 Z , 公式如下

$$Z = \begin{cases} \frac{S - 1}{\sqrt{\text{Var}(s)}} & S > 0 \\ 0 & S = 0 \\ \frac{S + 1}{\sqrt{\text{Var}(s)}} & S < 0 \end{cases} \quad (4)$$

在双边的趋势检验中, 在给定的 α 置信水平上, 如果 $|Z| > Z_{1-\alpha/2}$, 则原假设是不可接受的, 即在 α 置信水平上, 时间序列数据存在明显的上升或下降趋势。对于统计量 Z , 大于 0 时是上升趋势; 小于 0 时是下降趋势。

1.3.2 Sen 斜率估计

Sen 斜率估计能够较好估算时间序列的趋势度, 被广泛应用于识别水文时间序列的线性趋势分析^[28]。计算公式为

$$\beta = \text{Median}\left(\frac{x_j - x_i}{j - i}\right), \quad \forall j > i \quad (5)$$

式中, Median 为取中值函数; x_j 和 x_i 为时间序列数据; β 大于 0 表示时间序列呈现上升趋势, β 小于 0 表示时间序列呈现下降趋势。

1.3.3 小波分析

小波分析能够解析和推断气象及水文时间序列中存在的周期性变化特征^[30]。本研究使用 Morlet 小波分析极端降水指标的周期性变化特征。对于时间序列, 小波变换为

$$W_f(a, b) = |a|^{-1/2} \int_R f(t) \bar{\psi}\left(\frac{t-b}{a}\right) dt \quad (6)$$

式中, a 为尺度因子, 反映小波的周期长度; b 为平移因子, 反应时间上的平移。

对于给定的能量有限信号, 离散小波变换形式为

$$W_f(a, b) = |a|^{-1/2} \Delta t f(k\Delta t) \bar{\psi}\left(\frac{k\Delta t - b}{a}\right) \quad (7)$$

通过对小波方差进行计算可以实现对时间序列主周期数值的确定, 其中该数据的积分形式可以通过下式表示

$$\text{Var}(a) = \int_{-\infty}^{\infty} |W_f(a, b)|^2 db \quad (8)$$

1.3.4 降水强度及降水频率对总降水影响

总降水量在一定时期内的变化是由降水频率和强度的变化引起的。本研究基于多元线性回归的方法来检验降水强度及降水频率对总降水的重要性^[31]。计算公式为

$$\text{PRCPTOT} = aR_1 + b\text{SDII} + c \quad (9)$$

式中, PRCPTOT 为不同时间尺度总降水量 (mm); R_1 为降水频率 (d), 即降水量大于 1 mm 的天数; SDII 为降水强度 (mm/d); a 、 b 、 c 为回归系数。

在总降水量变化中, 降水频率和强度变化贡献计算公式为

$$SR_1 = a\sigma_{R_1} \quad (10)$$

$$SSDII = b\sigma_{SDII} \quad (11)$$

式中, SR_1 和 $SSDII$ 分别为总降水量中, 降水频率和降水强度的贡献; σ_{R_1} 和 σ_{SDII} 分别为降水频率和降水强度标准差。

2 结果分析

2.1 极端降水指标时间变化特征

根据计算结果统计分析, Rx1day、Rx5day、R10、R20、SDII、CWD、R95p、R99p、PRCPTOT 均呈现先增加后减小的趋势, 最大值均出现在夏季, 分别为 59.8 mm、103.4 mm、16.3 d、7.7 d、9.0 mm·d⁻¹、7.1 d、113.6 mm、55.4 mm 和 504.5 mm; 最小值均出现在冬季, 分别为 14.3 mm、20.6 mm、1.1 d、0.3 d、3.0 mm·d⁻¹、2.2 d、13.6 mm、13.2 mm 和

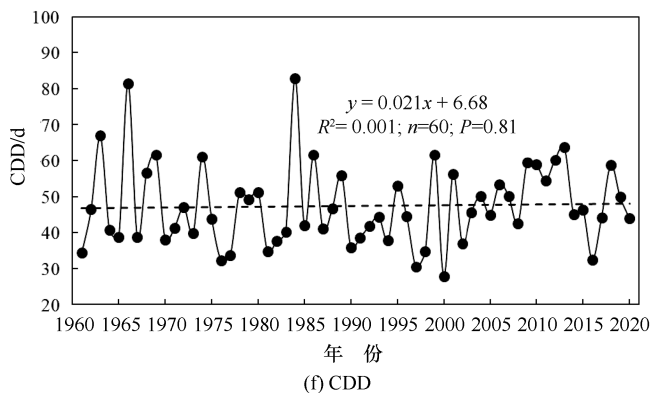
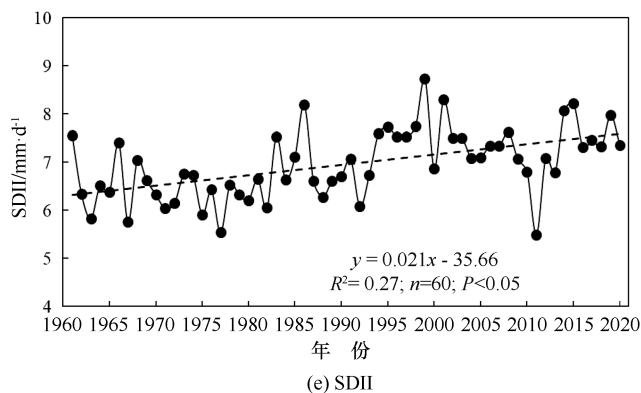
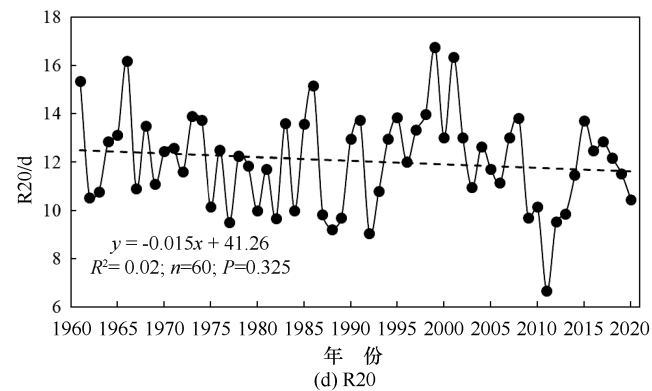
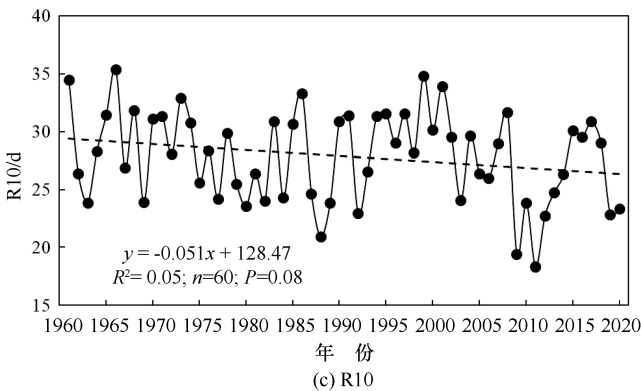
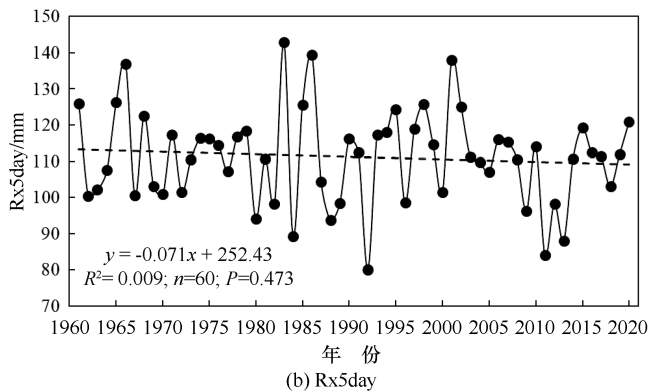
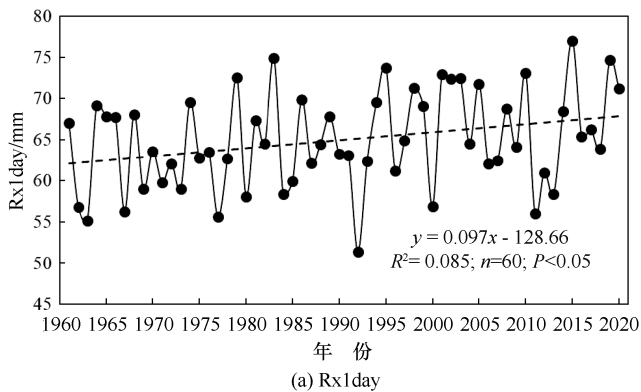
40.2 mm。CDD 表现为先减小后增加的趋势, 最大值为 42.0 d, 出现在冬季; 最小值为 9.0 d, 出现在夏季。以上结果表明, 极端多雨发生在夏季, 极端少雨发生在冬季。

年际尺度 $Rx1day$ 、 $SDII$ 、 $R99p$ 呈显著增加的趋势, 增加速率为 $1.04 \text{ mm} \cdot 10 \text{ a}^{-1}$ 、 $0.23 \text{ mm} \cdot \text{d} \cdot 10 \text{ a}^{-1}$ 和 $1.03 \text{ mm} \cdot 10 \text{ a}^{-1}$; 多年平均值分别为 65.0 mm、 $6.9 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$ 和 67.5 mm [见图 2(a)(e)(i) 和表 2]。 CDD 呈不显著增加的趋势, 增加速率为 $0.91 \cdot \text{d} \cdot 10 \text{ a}^{-1}$, 多年平均值为 47.4 d [见图 2(f) 和表 2]。 $Rx5day$ 、 $R10$ 、 $R20$ 、 $R95p$ 和 $PRCPTOT$ 呈不显著减小的趋势, 减小速率分别为 $0.52 \text{ mm} \cdot 10 \text{ a}^{-1}$ 、 $0.45 \text{ d} \cdot 10 \text{ a}^{-1}$ 、 $0.13 \text{ d} \cdot 10 \text{ a}^{-1}$ 、 $2.16 \text{ mm} \cdot 10 \text{ a}^{-1}$ 和 $3.64 \text{ mm} \cdot 10 \text{ a}^{-1}$; 多年平均值分别为 111.2 mm、27.9 d、12.0 d、8.2 d、213.3 mm 和 880.2 mm [见图 2(b)(c)(d)

(h)(j) 和表 2]。 CWD 呈显著减小的趋势, 减小速率为 $2.16 \text{ d} \cdot 10 \text{ a}^{-1}$, 多年平均值为 7.8 d [见图 2(g) 和表 2]。

2.2 极端降水指标空间变化特征

根据 Mann-Kendall 趋势分析, 结合多元线性回归检验, 以及 GIS 作图, 滇中地区极端降水指标空间变化如图 3 所示。 $Rx1day$ 、 $Rx5day$ 、 $R10$ 、 $R20$ 、 $R95p$ 、 $R99p$ 和 $PRCPTOT$ 高值区位于滇中地区的西北部、东北部及东南部, 低值区位于滇中地区的中偏西部 [见图 3(a)(b)(c)(d)(h)(i)(j)]。 $SDII$ 高值区位于滇中地区的西北部, 低值区位于滇中地区的中偏西部 [见图 3(e)]。 CDD 呈自西北向东南逐渐减小的趋势; CWD 高值区位于滇中地区的西北部、东南部和中部, 低值区位于滇中地区的中偏西部 [见图 3(f)、(g)]。这说明, 滇中地区极端降水指标空



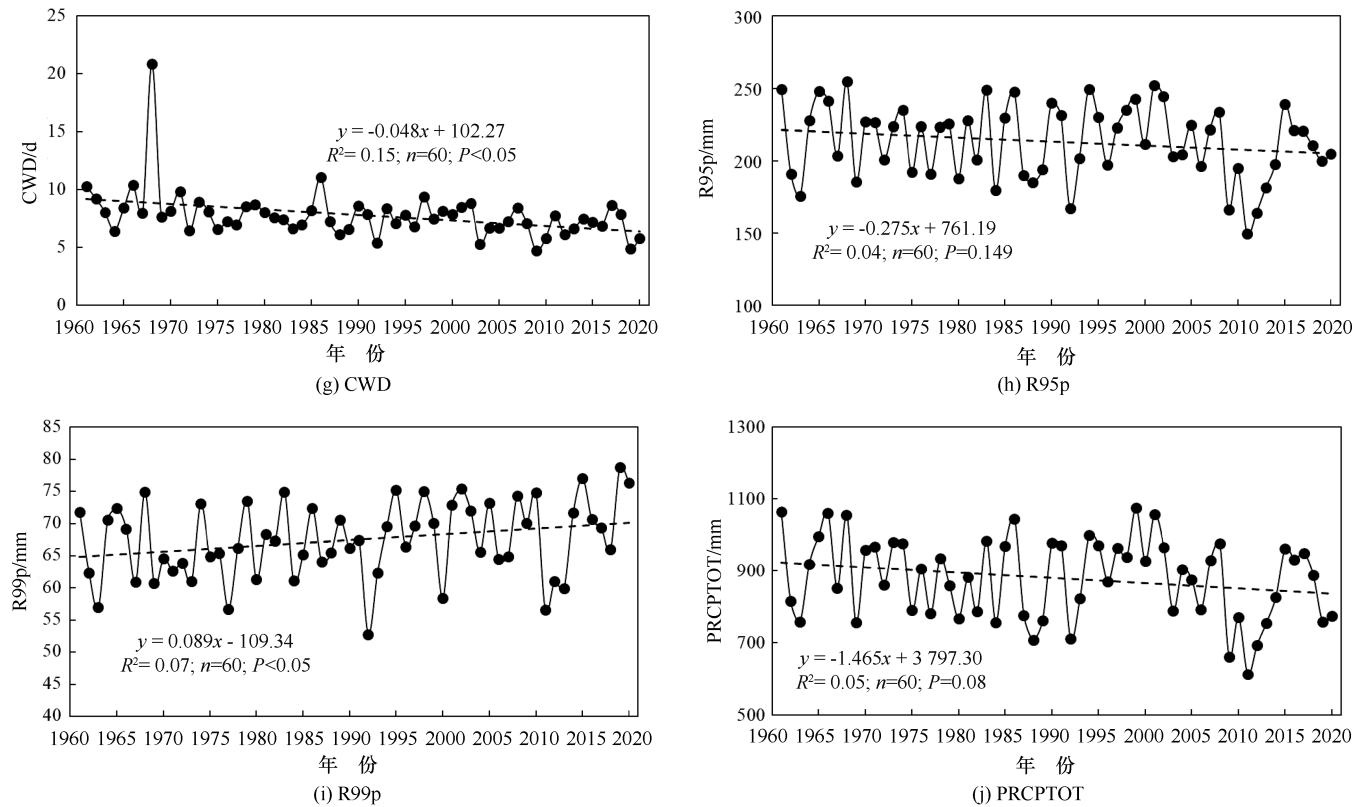


图2 滇中地区极端降水指标年际变化

Fig. 2 The interannual variation of extreme precipitation indicators in the central Yunnan region

表2 滇中地区极端降水统计指标

Table 2 Statistical indicators of extreme precipitation in the central Yunnan region

指标	Z	β	均值
Rx1day	2.41	1.04	65.0
Rx5day	-0.27	-0.52	111.2
R10	-1.45	-0.45	27.9
R20	-0.61	-0.13	12.0
SDII	4.56	0.23	6.9
CDD	0.56	0.91	47.4
CWD	-2.96	-0.32	7.8
R95p	-0.95	-2.16	213.3
R99p	2.54	1.03	67.5
PRCPTOT	-1.44	-3.64	880.2

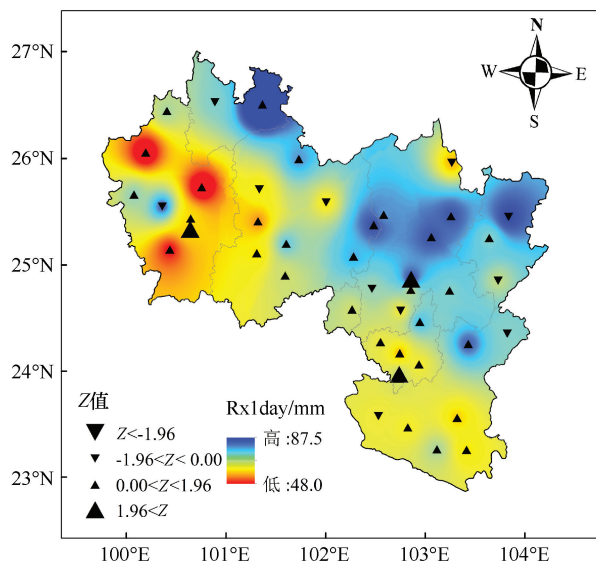
间变化明显,西北部比中偏西部更容易发生暴雨和干旱。

Rx1day 介于 48.0~87.5 mm, R99p 介于 50.1~57.9 mm, 均存在 3 个站点呈显著增加的趋势[见图 3(a)(i)和图 4]。Rx5day 介于 80.9~155.0 mm, 各站点变化趋势均不显著[见图 3(b)和图 4]。R10 介于 18.2~34.2 d, 5 个站点表现为显著减小的趋势[见图 3(c)和图 4]。R20 介于 7.6~16.4 d, R95p 介于 127.5~267.9 mm, 均存在 2 个站点呈显著减小的趋

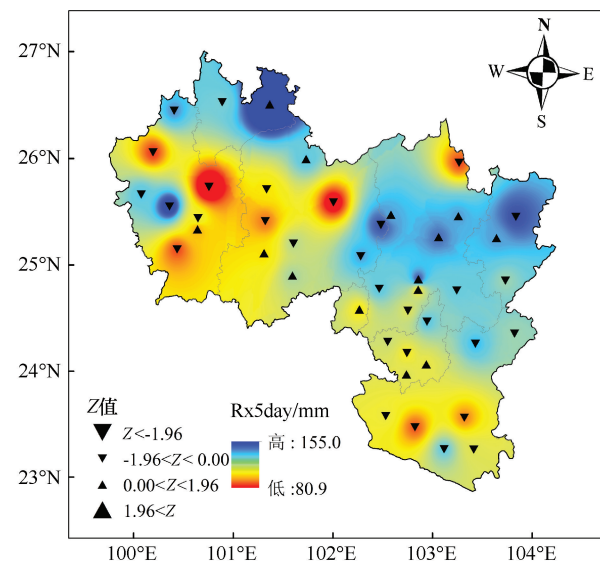
势[见图 3(d)(h)和图 4]。SDII 介于 5.6 d~110.4 d, 29 个站点表现为显著增加的趋势[见图 3(e)和图 4]。CDD 介于 35.5~73.1 d, 1 个站点表现为显著减小的趋势, 2 个站点表现为显著增加的趋势[见图 3(f)和图 4]。CWD 期介于 6.3~12.2 d, 19 个站点表现为显著减小的趋势[见图 3(g)和图 4]。PRCPTOT 介于 558.7~1081.3 mm, 4 个站点表现为显著减小的趋势, 5 个站点表现为显著增加的趋势[见图 3(j)和图 4]。

2.3 极端降水指标周期性变化特征

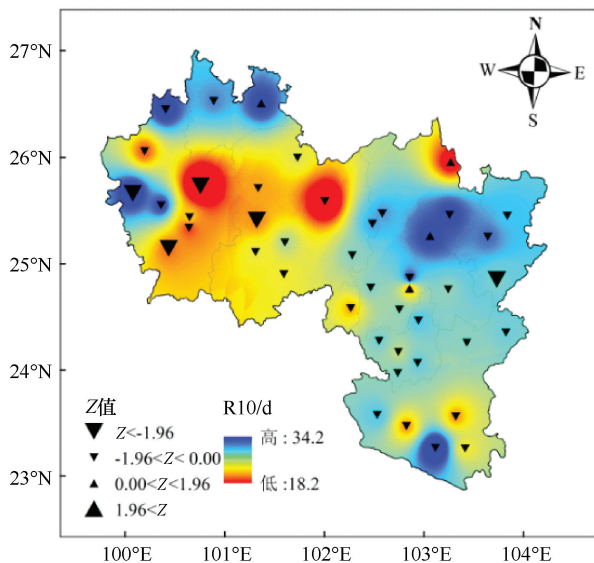
滇中地区极端降水指标功率谱如图 5 所示。Rx1day 在 1993—2000 年和 2011—2017 年分别表现出 3~4 a 和 5~6 a 的显著周期震荡[见图 5(a)]。Rx5day 在 1982—1998 年和 1998—2010 年分别表现出 2~4 a 和 19~21 a 的显著周期震荡[见图 5(b)]。R10 在 1986—1992 年、1992—1997 年和 2012—2014 年分别表现出 4~5 a、30 a 和 8 a 的显著周期震荡[见图 5(c)]。R20 在 1987—1993 年和 2007—2012 年分别表现出 4~5 a、7~8 a 的显著周期震荡[见图 5(d)]。SDII 在 1983—1986 年和 1999—2001 年分别表现出 2~3 a 的显著周期震荡[见图 5(e)]。CDD 在 1962~



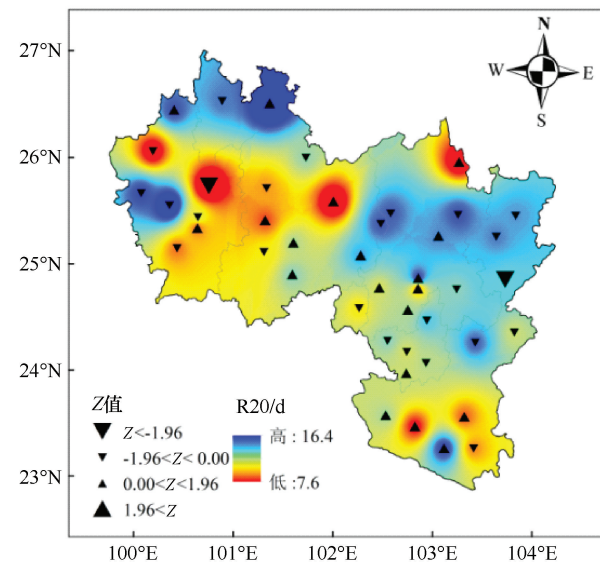
(a) Rx1day



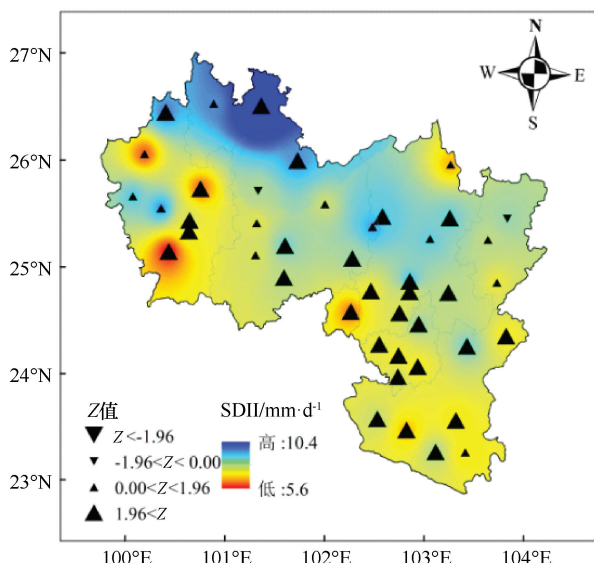
(b) Rx5day



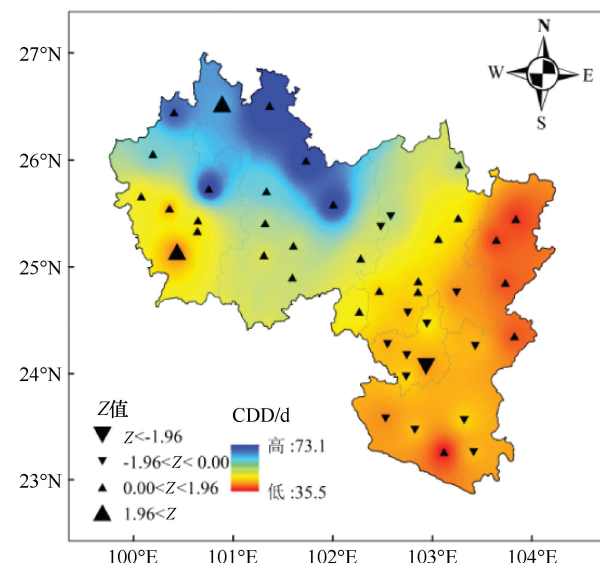
(c) R10



(d) R20



(e) SDII



(f) CDD

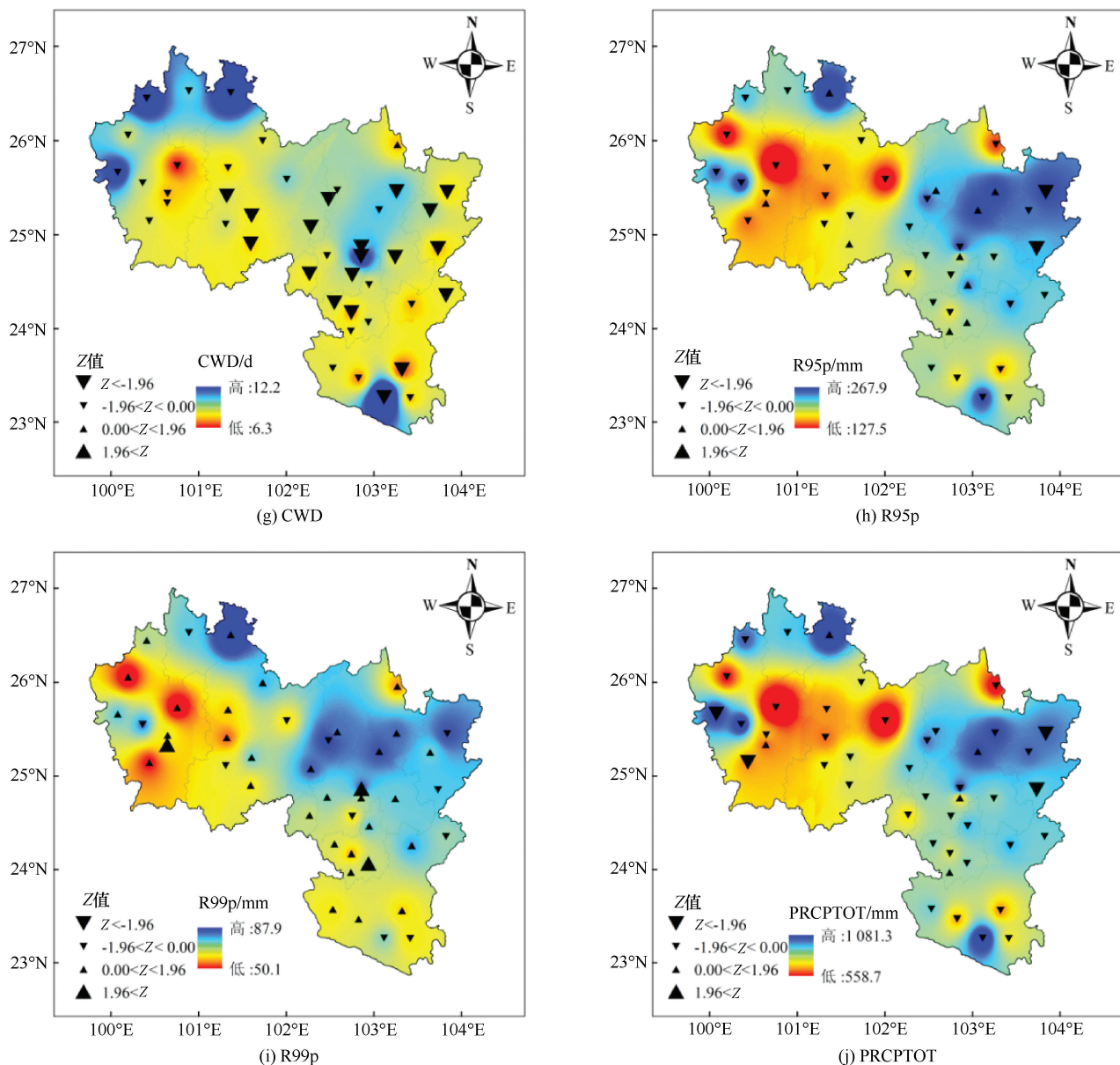


图3 滇中地区极端降水空间变化

Fig. 3 The spatial variation of extreme precipitation in the central Yunnan region

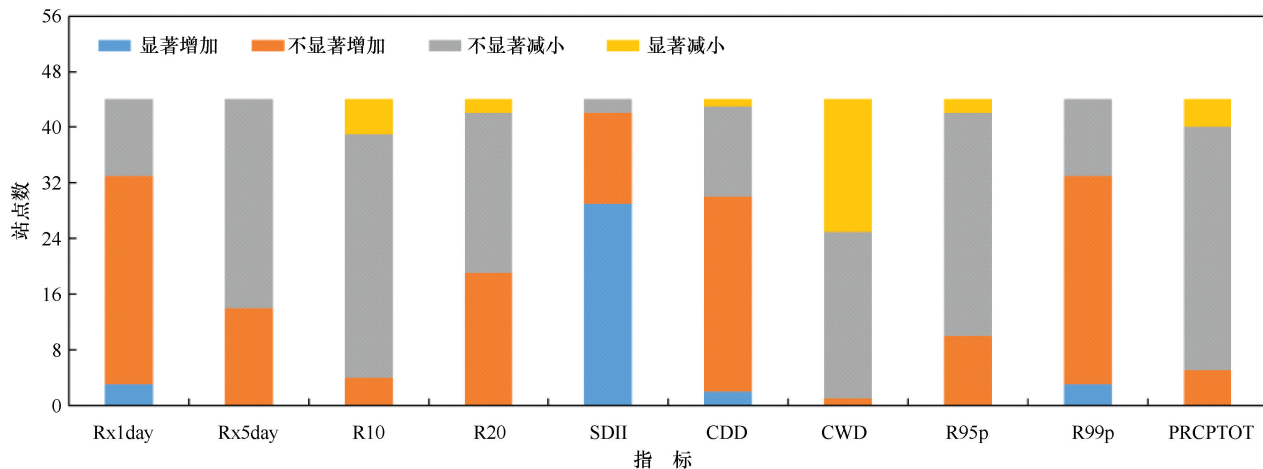


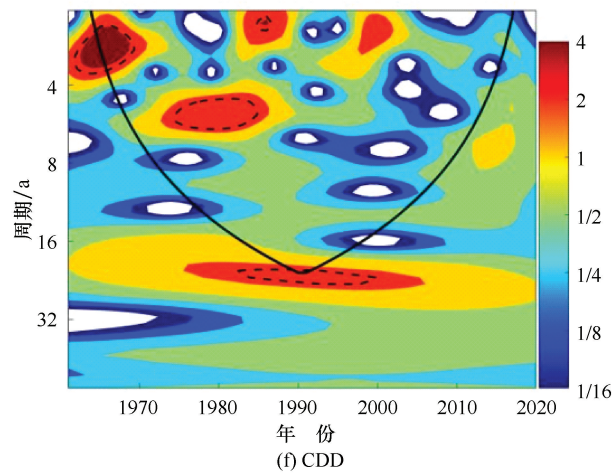
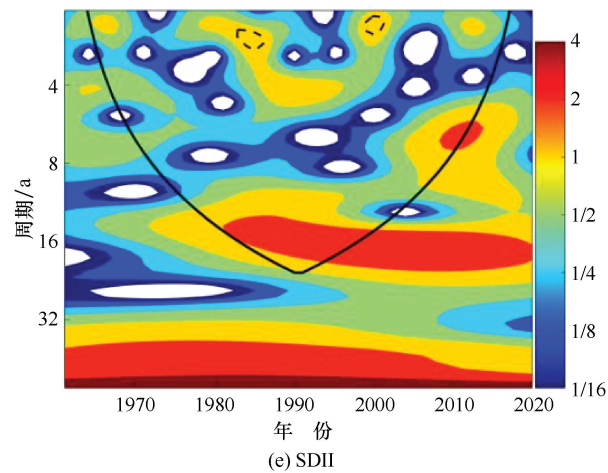
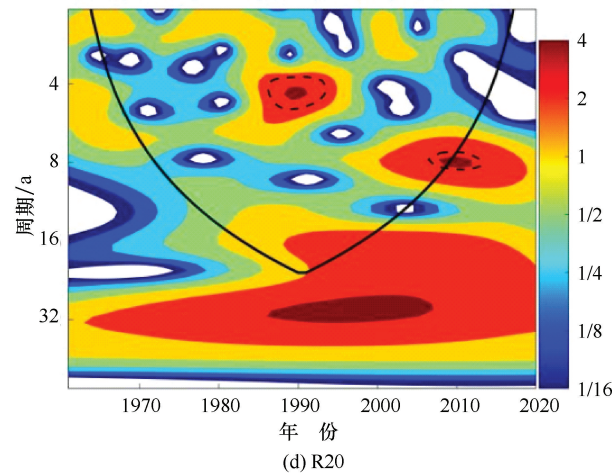
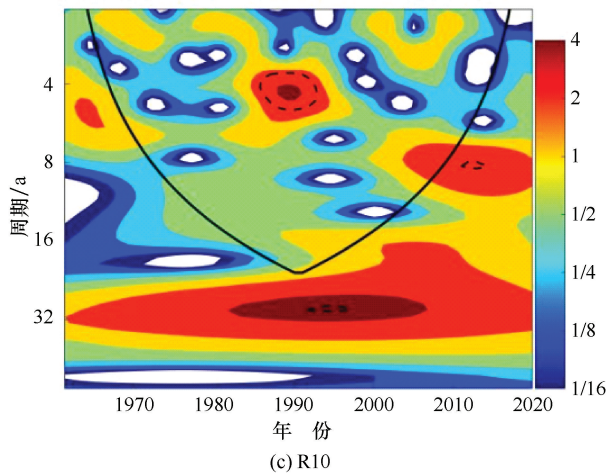
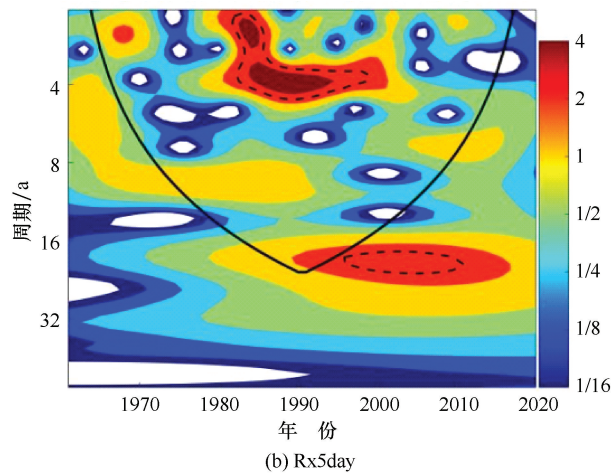
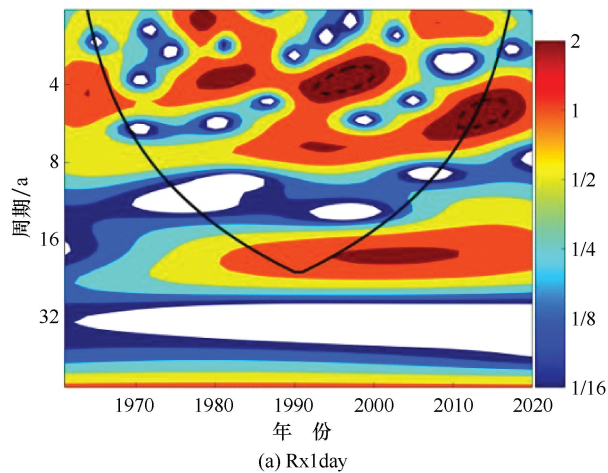
图4 滇中地区不同变化趋势站点个数

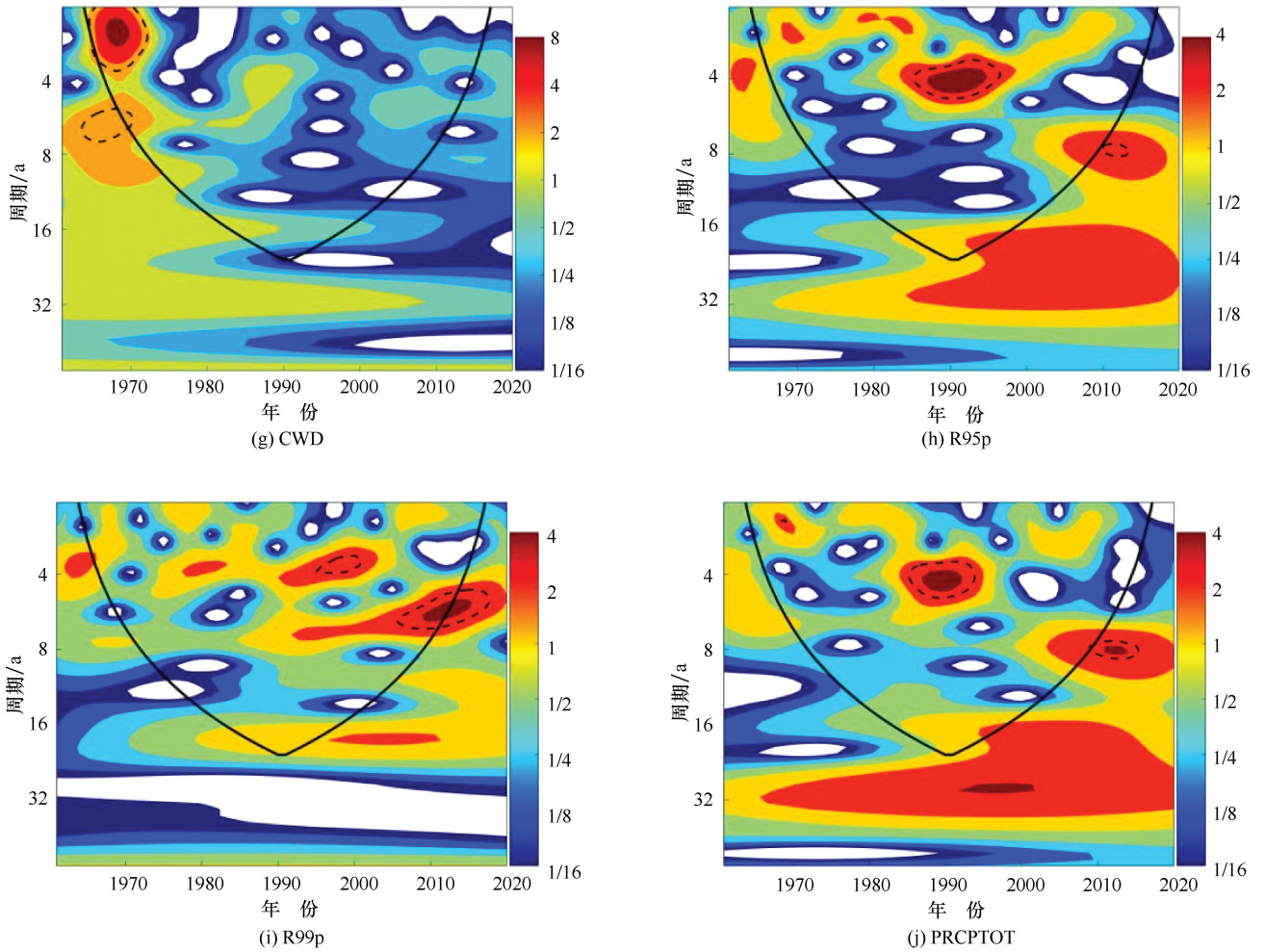
Fig. 4 Number of stations with different changing trends in the central Yunnan region

1969年、1975—1984年、1985—1986年和1983—1999年分别表现出3~4 a、5~6 a、2~3 a和21~23 a的显著周期震荡[见图5(f)]。CWD在1964—1972年分别表现出2~4 a和6~7 a的显著周期震荡[见图5(g)]。R95p在1986—1996年和2010—2013年分别表现出4~5 a和7~8 a的显著周期震荡[见图5(h)]。R99p在1996—2000年和2006—

2017年分别表现出4 a左右和5~7 a的显著周期震荡[见图5(i)]。PRCPTOT在1986—1993年和2009—2015年分别表现出4~5 a和8 a左右的显著周期震荡[见图5(j)]。

综上所述, Rx1day、Rx5day、R10、R20、SDII、CDD、CWD、R95p、R99p、PRCPTOT均存在8 a内的周期特性。





红色表示能量密度的高值；蓝色表示能量密度的低值；黑色实线为小波边界效应影响锥曲线，曲线范围之外的功率谱因边界效应的影响而不作探讨；黑虚线范围之内代表超过了置信水平为 95% 红色噪音标准谱的检验

图 5 滇中地区极端降水指标连续小波变换小波功率谱

Fig. 5 Continuous wavelet transform wavelet power spectrum of extreme precipitation indicators in the central Yunnan region

3 讨论

3.1 局地气候变化与极端降水指标相关性

降水是反映局地气候变化重要要素之一，而极端降水指数对区域小气候较为敏感。与我国及云南省降水等级划分标准不同，在指标中 Rx1day、Rx5day、SDII 为强度指数，R10、R20 为绝对指数，CDD、CWD 和 PRCPTOT 为持续指数，R95p、R99p 相对指数；被广泛应用于云南省、西南诸河的降水变化特征研究^[34-35]。在极端降水指数中，总降水量是反映区域小气候特征的基本要素^[3,21]。以往研究表明总降水量与 CDD 呈负相关关系，而与其他极端降水指标呈显著正相关关系^[3]。与以往研究一致，本研究统计分析显示总降雨量与 Rx1day、Rx5day、R10、R20、SDII、CWD、R95p 和 R99p 呈显著的正相关关系；而与 CDD 呈不显著的负相关关系。相关系数大小排序

依次为 $R10 > R95p > R20 > Rx5day > CWD > SDII > R99p > Rx1day$ (见表 3)。在极端降水指标中 R10、R20 和 R95p 相关系数均超过了 0.90，这些指标的增加(减少)可以较好地反映年降水量的增加(减少)。

温度升高对区域水循环过程的影响除体现年降水量变化外，还体现在对降水强度和频率等方面^[3,23]。有研究表明，在气温相对较低时，极端降水会随气温升高而增加，而当气温高于一定数值时则又表现出下降趋势^[32-33]。与以往研究结果不同，在滇中地区 Rx1day、SDII、R99p 与气温表现为显著的正相关关系，而 R10、CWD 与气温表现为显著的负相关关系，Rx5day、R20、R95p 与气温表现为不显著的负相关关系，CDD 与气温表现为不显著的正相关关系(见表 3)。这说明，滇中地区在平均气温较高年份，1 d 最大降水量、降水强度、特强降水量会增加，意味着该地区可能经历短时强降雨，导致短期的涝灾。然而

中雨以上日数、持续湿期日数会减少, 5 d 最大降水量、大雨以上日数、强降水量会有所减少, 持续干期日数会有所增加, 意味着降雨持续日数少, 总降雨量偏少, 导致持续干旱。

3.2 降水频率及降水强度对总降水量的影响

降水频率及降水强度对不同时间尺度总降水量有重要影响^[31]。滇中地区降水频率及降水强度对总降水量的影响如图 6、图 7 所示。在季节尺度上, 春

表 3 滇中地区极端降水指标与年总降水量和年平均气温相关系数

Table 3 The correlation coefficient between extreme precipitation indicators and annual total precipitation and annual average temperature in the central Yunnan region

要素	Rx1day	Rx5day	R10	R20	SDII	CDD	CWD	R95p	R99p
总降水量	0.42*	0.74*	0.98*	0.95*	0.50*	-0.19	0.65*	0.95*	0.45*
气温	0.40*	-0.07	-0.30*	-0.11	0.51*	0.20	-0.46*	-0.21	0.37*
相关关系	正相关	不显著的负相关	负相关	不显著的负相关	正相关	不显著的正相关	负相关	不显著的负相关	正相关

注: *表示 $P < 0.05$ 。

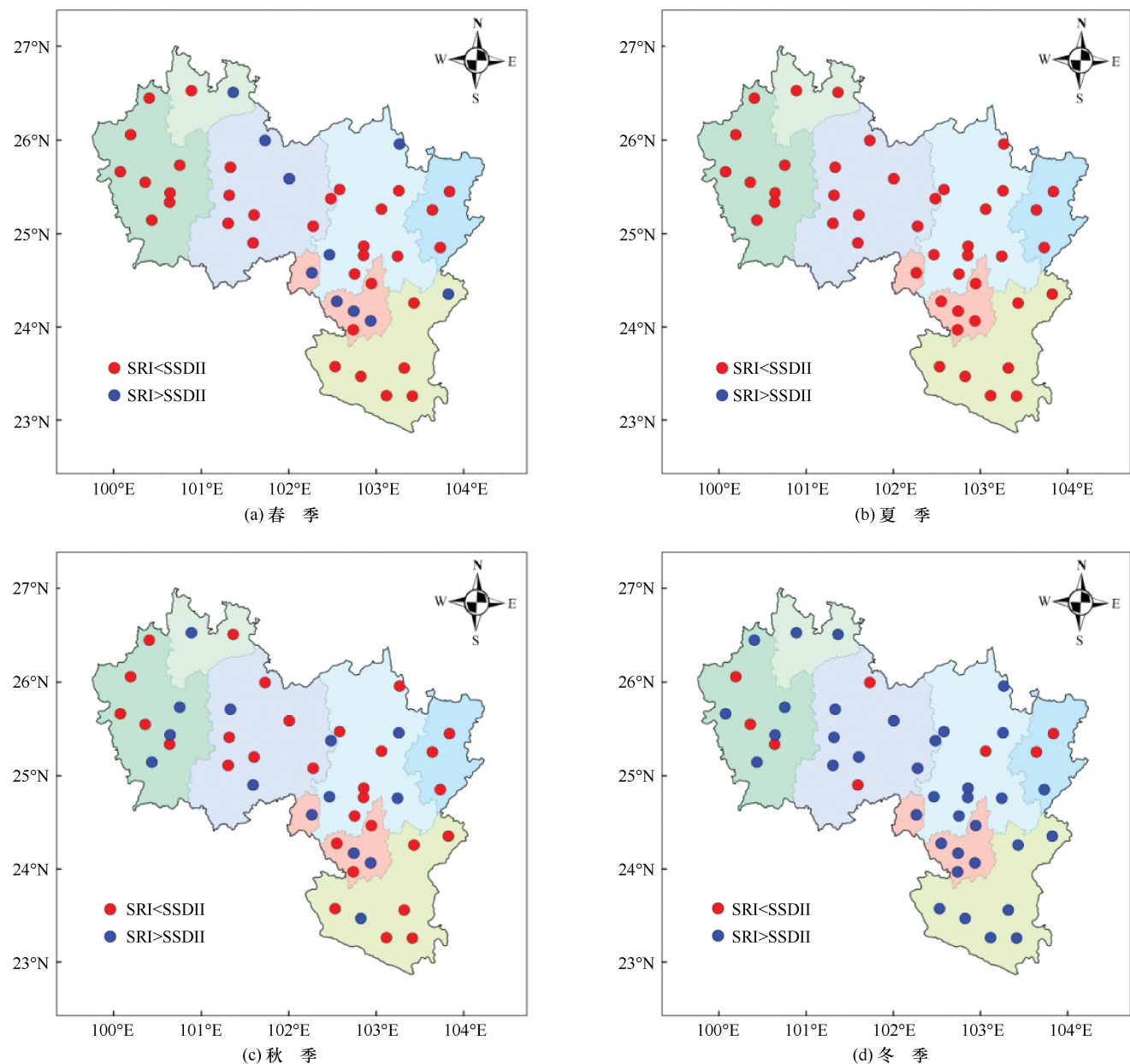


图 6 不同季节滇中地区降水频率及降水强度对总降水量贡献。

Fig. 6 The contribution of precipitation frequency and intensity to total precipitation in central Yunnan during different seasons

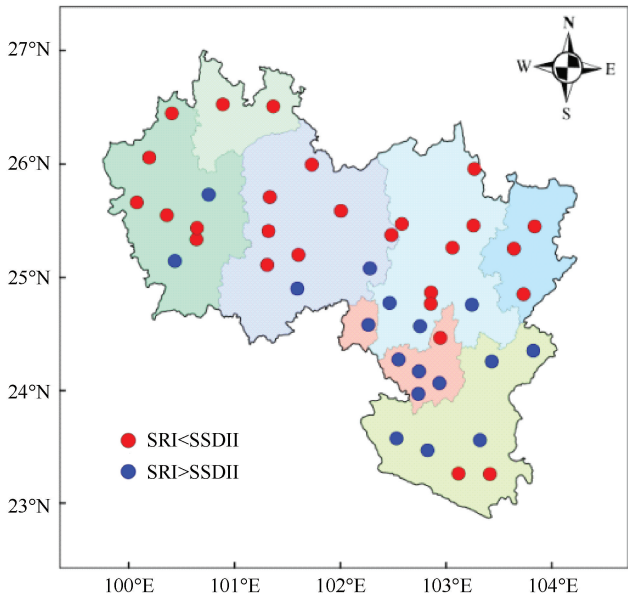


图7 年尺度滇中地区降水频率及降水强度对总降水量贡献
Fig. 7 Annual scale contribution of precipitation frequency and intensity to total precipitation in the central Yunnan region

季, 10个站点降水频率对总降水的贡献大于降水强度, 位于滇中地区的北部和中部; 其他站点降水强度对总降水的贡献大于降水频率, 位于滇中地区的大部。夏季, 各站点降水强度对总降水的贡献均大于降水频率。秋季, 14个站点降水频率对总降水的贡献大于降水强度, 其他站点降水强度对总降水的贡献大于降水频率。冬季, 8个站点降水强度对总降水的贡献大于降水频率, 位于滇中地区的中北部, 其他站点降水频率对总降水的贡献大于降水强度。在年尺度上, 17个站点降水频率对总降水的贡献大于降水强度, 位于滇中地区的中南部; 其他站点降水频率对总降水的贡献小于降水强度, 绝大部分站点位于滇中地区的中北部。

4 结论

本研究通过使用滇中地区 1961—2020 年降水数据, 采用 Mann-Kendall 趋势分析、Sen 斜率估计、连续小波分析研究了不同时间尺度极端降水指标的时空变化特征和周期性变化特征。得到以下结论。

(1) 年内尺度 Rx1day、Rx5day、R10、R20、SDII、CWD、R95p、R99p、PRCPTOT 均呈现先增加后减小的趋势, CDD 表现为先减小后增加的趋势。年际尺度 Rx1day、SDII、R99p 呈显著增加的趋势, CDD 呈不显著增加的趋势, Rx5day、R10、R20、R95p 和 PRCPTOT 呈不显著减小的趋势, CWD 呈显著减小的趋势。

(2) Rx1day、Rx5day、R10、R20、R95p、R99p 和 PRCPTOT 高值区位于滇中地区的西北部、东北部及东南部, 低值区位于滇中地区的中偏西部。SDII 高值区位于滇中地区的西北部, 低值区位于滇中地区的中偏西部。CDD 呈自西北向东南逐渐减小的趋势; CWD 高值区位于滇中地区的西北部、东南部和中部, 低值区位于滇中地区的中偏西部。

(3) Rx1day、Rx5day、R10、R20、SDII、CDD、CWD、R95p、R99p、PRCPTOT 均存在 8 a 内的周期特性; 但不同的指标, 显著周期所处的时间段不同。

参考文献 (References):

[1] IPCC SREX. Managing the risks of extreme events and disasters to advance climate change adaptation [M]. London: Cambridge University Press, 2012.

[2] 夏军. 变化环境下长江流域滨海城市供水安全与适应性对策 [J]. 南水北调与水利科技 (中英文), 2024, 22(2): 209-214.
XIA J. Watersecurity and adaptive management for coastal cities of Yangtze River basin under changing environment [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2024, 22(2): 209-214.

[3] 贺山峰, 陈超冰, 李铮, 等. 黄河中上游极端降水特征及其对区域气候变化的敏感性 [J]. 资源科学, 2024, 46(3): 524-537.
HE Shanfeng, CHEN Chaobing, LI Zheng, et al. Characteristics of extreme precipitation and its sensitivity to regional climate change in the upper and middle reaches of the Yellow River Basin [J]. Resource Science, 2024, 46(3): 524-537.

[4] WANG X, CUI G N, WU F F, LI C H. Analysis of temporal-spatial precipitation variations during the crop growth period in the Lancang River Basin, southwestern China [J]. Ecological Engineering, 2015, 76: 47-56.

[5] 曲学斌, 金林雪, 红梅, 等. 基于 VCI 的内蒙古生长季干旱变化及对气候响应 [J]. 排灌机械工程学报, 2023, 41(10): 1058-1064.
QU Xuebin, JIN Linxue, HONG Mei, et al. Drought change in growing season of Inner Mongolia and its response to climate based on VCI [J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2023, 41(10): 1058-1064.

[6] 武洁, 石正国, 解小宁, 等. 全球极端降水对不同外强迫的敏感性响应: 基于 PDRMIP 模拟试验 [J]. 科学通报, 2024, 69(15): 2093-2106.
WU Jie, SHI Zhengguo, XIE Xiaoning, et al. Sensitivity of global extreme precipitation to different climate forcings: A PDRMIP multimodel study (in Chinese) [J]. Chinese Science Bulletin, 2024, 69(15): 2093-2106.

[7] 罗兴树, 章数语, 郭园, 等. 极端降水对陕西省农业生产的影响 [J]. 南水北调与水利科技 (中英文), 2024, 22(2): 339-

- 347.
- LUO X S, ZHANG S Y, GUO Y, et al. The impact of extreme precipitation on agricultural production in Shanxi Province [J]. *South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology*, 2024, 22(2): 339-347, 398.
- [8] 艾婉秀, 赵珊珊, 陈鲜艳, 等. 1961—2020年三峡库区极端降水的变化特征研究[J]. *长江流域资源与环境*, 2024, 33(3): 625-633.
- AI Wanxiu, ZHAO Shanshan, CHEN Xianyan, et al. Characteristics of extreme precipitation in the Three Gorges Reservoir region during 1961—2020[J]. *Resources and Environment in The Yangtze Basin*, 2024, 33(3): 625-633.
- [9] 林程, 吴辉明, 龙岗河流域 2023 年“9·7”极端特大暴雨洪涝反演分析[J]. *水利发展研究*, 2024, 24(10): 117-125.
- LIN Cheng, WU Huiming. Inverse analysis of flood caused by 2023 “9·7” extreme rainstorm in Longgang River Basin [J]. *Water Resources Development Research*, 2024, 24(10): 117-125.
- [10] IPCC. *Climate Change: The Physical Science Basis. Contribution of working group I to the Sixth assessment report of the intergovernmental panel on climate change*[R]. Interlaken: IPCC, 2021.
- [11] ZHANG W, ZHOU T. Significant increases in extreme precipitation and the associations with global warming over the Global Land Monsoon regions [J]. *Journal of Climate*, 2019, 32(24): 8456-8488.
- [12] KARL T R, KNIGHT R W, PLUMMER N. Trends in high frequency climate variability in the twentieth century[J]. *Nature*, 1995, 377: 217-220.
- [13] KARL T R, KNIGHT R W. Secular trends of precipitation amount, frequency, and intensity in the United States [J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 1998, 79: 231-241.
- [14] KUNKEL K E, ANDSAGER K, EASTERLING D R. Long-term trends in extreme precipitation events over the Conter-minous United States and Canada [J]. *Journal of Climate*, 1999, 12(7): 2515-2527.
- [15] SUPPIAH R, HENNESSY K. Trends in seasonal rainfall, heavy rain-days, and number of dry days in Australia 1910—1990 [J]. *International Journal of Climatology*, 1998, 18: 1141-1155.
- [16] HAYLOCK M, NICHOLLS N. Trends in extreme rainfall indices for an updated high quality data set for Australia, 1910—1998 [J]. *International Journal of Climatology*, 2000, 20: 533-1541.
- [17] NEW M, TODD M, HULME M, et al. Precipitation measurements and trends in the twentieth century [J]. *International Journal of Climatology*, 2001, 21: 1899-1922.
- [18] ROY S S, BAILING R C. Trends in extreme daily rainfall indices in India [J]. *International Journal of Climatology*, 2004, 24: 457-466.
- [19] GROISMAN P Y, KNIGHT R W, EASTERLING D R, et al. Trends in intense precipitation in the climate record [J]. *International Journal Of Climatology*, 2005, 18(8): 1326-1349.
- [20] GAO X, ZHAO Z. Change of extreme vents in regional climate simulations over east Asia [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2002, 19(5): 927-942.
- [21] 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, 19(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, 19(5): 577-589.
- [22] 冯胜航, 王党伟, 秦蕾蕾, 等. 金沙江流域径流变化特征及成因 [J]. *南水北调与水利科技(中英文)*, 2023, 21(2): 248-257.
- FENG S H, WANG D W, QIN L L, et al. The characteristic and cause of runoff variation in Jinsha River basin [J]. *South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology*, 2023, 21(2): 248-257.
- [23] 谢培, 张玉虎, 乔飞. 新疆极端降水时空特征及其对 ENSO 影响的响应研究 [J]. *气象研究与应用*, 2019, 40(3): 5-12.
- XIE Pei, ZHANG Yuhu, QIAO Fei. Spatial and temporal characteristics of extreme precipitation in Xinjiang and its response to ENSO [J]. *Journal of Meteorological Research and Application*, 2019, 40(3): 5-12.
- [24] 卢珊, 胡泽勇, 王百朋, 等. 近 56 年中国极端降水事件的时空变化格局 [J]. *高原气象*, 2020, 39(4): 683-693.
- LU Shan, HU Zeyong, WANG Baipeng, et al. Spatio-temporal patterns of extreme precipitation events over China in recent 56 years [J]. *Plateau Meteorology*, 2020, 39(4): 683-693.
- [25] 周泓, 纳丽佳, 杨轸然. 滇中地区的短时强降水时空分布特征 [J]. *云南地理环境研究*, 2022, 34(5): 70-77.
- ZHOU Hong, NA Lijia, YANG Keran. Temporal and spatial characteristics of flash heavy rain in central Yunnan [J]. *Yunnan Geographical Environment Research*, 2022, 34(5): 70-77.
- [26] 曹言, 王杰, 王树鹏, 等. 气候变化下滇中地区水稻需水量与灌溉需水指数时空变化研究 [J]. *干旱地区农业研究*, 2020, 38(5): 226-235.
- CAO Yan, WANG Jie, WANG Shupeng, et al. Temporal and spatial variation analysis of water and irrigation requirement index of rice in central Yunnan Province under climate change [J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2020, 38(5): 226-235.
- [27] 张雷, 李允亮, 王杰, 等. 不同灌溉方式对生菜蒸发蒸腾量及作物系数的影响 [J]. *安徽农业大学学报*, 2023, 50(6): 1092-1097.
- ZHANG Lei, LI Youliang, WANG Jie, et al. Effects of different irrigation methods on evapotranspiration and crop coefficient of *Lactuca sativa* [J]. *Journal of Anhui Agricultural University*, 2023, 50(6): 1092-1097.
- [28] 王远宁, 吴灏, 王盼盼, 等. 1960—2017 年江淮地区降水的时空变化特征 [J]. *水土保持研究*, 2023, 30(4): 236-244, 255.
- WANG Yuanning, WU Hao, WANG Panpan, et al. Spatiotemporal

- variability of precipitation in the Jianghuai region during 1960—2017 [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2023, 30(4): 236-244, 255.
- [29] 游庆龙, 康世昌, 闫宇平, 等. 近45年雅鲁藏布江流域极端气候事件趋势分析[J]. *地理学报*, 2009, 64(5): 592-600.
YOU Qinglong, KANG Shichang, YAN Yuping, et al. Trends in daily temperature and precipitation extremes over the Yarlung Zangbo river basin during 1961—2005[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2009, 64(5): 592-600.
- [30] 王晓莹, 景元书, 鲁永新. 近40年云南省极端降水时空变化特征分析[J]. *科学技术与工程*, 2021, 21(30): 12822-12832.
WANG Xiaoying, JING Yuanshu, LU Yongxin. Analysis of the spatial and temporal variability of extreme precipitation in Yunnan Province in the last 40 years[J]. *Science Technology and Engineering*, 2021, 21(30): 12822-12831.
- [31] LI Xin, WANG Xuan, BABOVI V. Analysis of variability and trends of precipitation extremes in Singapore during 1980—2013 [J]. *International Journal of Climatology*, 2018, 38: 125-141.
- [32] ALLEN M R, INGRAM W J. Constraints on future changes in climate and the hydrologic cycle[J]. *Nature*, 2002, 419: 224-232.
- [33] UTSUMI N, SETO S, KANAE S, et al. Does higher surface temperature intensify extreme precipitation[J]. *Geophysical Research Letters*, 2011, 38(16): 239-255.
- [34] 吴利华, 成鹏, 董李勤, 等. 1951—2017年丽江极端气温和降水事件的变化特征[J]. *南京信息工程大学学报(自然科学版)*, 2022, 14(3): 253-266.
WU Lihua, CHENG Peng, DONG Liqin, et al. Variation characteristics of extreme temperature and precipitation events of Lijiang from 1951 to 2017[J]. *Journal of Nanjing University of Information Science & Technology(Natural Science Edition)*, 2022, 14(3): 253-266.
- [35] 江洁, 周天军, 张文霞. 近60年来中国主要流域极端降水演变特征[J]. *大气科学*, 2022, 46(3): 707-724.
JIANG Jie, ZHOU Tianjun, ZHANG Wenxia. Temporal and Spatial Variations of Extreme Precipitation in the Main River Basins of China in the Past 60 Years[J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 2022, 46(3): 707-724.

(责任编辑 王海锋)