

近50年来滇东岩溶地区极端降水变化分析

帅静然, 丁文荣*

云南师范大学地理学部, 云南 昆明

收稿日期: 2022年5月12日; 录用日期: 2022年6月15日; 发布日期: 2022年8月31日

摘 要

以滇东岩溶地区3个典型气象站1970~2020年逐日降水数据为基础, 选取4个极端降水指标, 并采用Sen's斜率法分析、CV值分析、Mann-Kendall突变检验等方法, 对比分析了滇东岩溶地区的极端降水事件特征。结果表明: 1) 会泽站RX1day呈显著上升趋势且幅度最大, 泸西站RX5day和CWD显著下降, 3个站点CWD均下降, 会泽站和泸西站的CDD均呈上升趋势, 砚山站趋势不明显; 2) 3个站点四个指标的CV值变化范围分别在0.30~0.35、0.29~0.40、0.30~0.45和0.25~0.35之间, 泸西站波动最大, 砚山站波动最小; 3) Mann-Kendall突变检验中砚山站突变点较多且集中, 这是砚山站点与另外两个站点相比最显著的区别, 表明砚山站极端降水事件发生的概率较高。综上, 总体上降水减少、气候变干旱, 所有分析结果均符合气候变化大背景影响下的极端降水时空分布变化趋势。

关键词

岩溶石漠化, 极端降水, 气候变化, 滇东南

Analysis on Temporal Variation of Extreme Precipitation in Karst Area of Eastern Yunnan in Recent 50 Years

Jingran Shuai, Wenrong Ding*

Faculty of Geography, Yunnan Normal University, Kunming Yunnan

Received: May 12th, 2022; accepted: Jun. 15th, 2022; published: Aug. 31st, 2022

Abstract

Based on the daily precipitation data of three typical meteorological stations in the Karst area of eastern

作者简介: 丁文荣, 云南昆明人, 出生于1979年9月, 博士, 副教授, 研究方向: 水文与水资源, Email: dingwenrong@163.com

*通讯作者。

文章引用: 帅静然, 丁文荣. 近50年来滇东岩溶地区极端降水变化分析[J]. 水资源研究, 2022, 11(4): 346-356.

DOI: 10.12677/jwrr.2022.114038

Yunnan from 1970 to 2020, four extreme precipitation indexes are selected, and the characteristics of extreme precipitation events are compared and analyzed by using the Sen's slope and CV value analysis methods as well as Mann Kendall mutation test. The results show that: 1) RX1day of Huize station shows a significant upward trend and the amplitude is the largest, RX5day and CWD of Luxi station decrease significantly, CWD of three stations decreases, CDD of Huize station and Luxi station shows an upward trend, and Yanshan station has no upward trend; 2) The variation range of CV values of the four indicators of the three stations is 0.30~0.35, 0.29~0.40, 0.30~0.45 and 0.25~0.35 respectively. The fluctuation of Luxi station is the largest and that of Yanshan station is the smallest; 3) In Mann Kendall mutation test, there are many concentrated mutation points at Yanshan station, which is the most significant difference between Yanshan station and the other two stations, indicating that the probability of extreme precipitation events at Yanshan station is high. In conclusion, in general, the precipitation decreases and the climate become arid. All the analysis results are in line with the temporal and spatial distribution trend of extreme precipitation under the influence of climate change.

Keywords

Karst Rocky Desertification, Extreme Precipitation, Climate Change, Southeast Yunnan

Copyright © 2022 by author(s) and Wuhan University.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 研究背景

随着社会经济的不断发展, 人类活动时刻影响着全球气候的变化, CO₂ 排放量持续增加, 气温不断上升, 气候变化正在加剧水循环, 这会带来更强的降雨和洪水。在许多地区这意味着更严重的干旱[1]。全球化干旱日益严重, 人类的生存环境受到威胁, 各国专家和学者对此展开研究。干旱在诸多自然灾害中以波及范围大、程度深, 损坏最为严重著称, 严重的还会影响国家的粮食安全和社会稳定。因此实时检测、预测、评估干旱研究越来越重要。近年来西南岩溶地区发生干旱事件的强度和频率随着全球气候的不断变化均呈上升趋势, 严重影响了当地的经济的发展并引起了广泛关注。随着全球气候的不断变化, 水循环也受到了一定的影响。降水作为水循环的重要组成要素, 受大气环流、人类活动等因素的影响, 时空分布不均匀。变化环境下, 全球及区域水循环加剧, 旱涝灾害事件增多, 降水的时空变化对区域水资源、水安全、生态环境以及经济社会发展产生深远影响。研究区域极端降水时空演变特征对区域水资源利用及水旱灾害防治等具有重要意义[2]。

岩溶区极端降水事件时空分布变化的研究是当前地学界的一个难点。极端降水事件会造成岩溶区域水土流失严重从而进一步加剧区域气候变化。自 20 世纪 80 年代以来, 国内外学者[3]-[13]针对降水时空分布变化规律方面的问题做了很多研究。虽然在上述方面取得了许多成果, 但有关岩溶区极端降水时空分布变化规律的研究当前取得的成就还是初步性的、阶段性的, 造成水资源时空分布不均的驱动因素仍然存在, 人为干扰活动依然严重。相关研究大都以广西、四川等地为例, 而对岩溶区面积占全省总面积 28.2%的云南研究相对较少。近年来国内外对造成极端降水的原因、降水时空演化规律、极端降水事件发生的频次等方面的研究较多, 但对岩溶区的相关研究仍待进一步深入。

因此, 为解释滇东岩溶区近 50 年来极端降水的历史变化特征并服务现今的水资源管理, 本文利用云南省滇东岩溶区 3 个典型站点 1970~2020 年逐日降水观测数据, 选取 4 个极端降水指标来分析该区域降水事件变化规律, 为云南岩溶区水资源规划、防灾减灾, 推动区域协调发展等提供科技支撑。

2. 研究区概况与数据来源

2.1. 研究区概况

云南省 129 个县(市、区)总面积为 39.4 万 km²，其中岩溶区 119 个，总面积为 11.1 万 km²，占云南省总面积的 28.2%。滇东地区有 51 个县(市、区)的岩溶面积超过云南省省总面积的 30%，岩溶区面积 67,779 km²，占国土总面积的 53.9%。岩溶山区地表干旱缺水严重[14]。

会泽、泸西、砚山站点坐落于滇东岩溶片区，该区位于 23°36'21"N~26°25'4"N 和 103°17'50"E~104°20'13"E 之间，北与滇东北高原相连，南与文山壮族苗族自治州接壤，东临广西，西为滇中高原。整体地势较为平缓，北高南低，自北向南依次为温带高原季风气候、北亚热带季风气候、中亚热带季风气候，高温高湿，雨热同期。年均温 12.7℃~16.1℃，降雨量为 817~1008 mm。地带性土壤为棕壤或红壤。

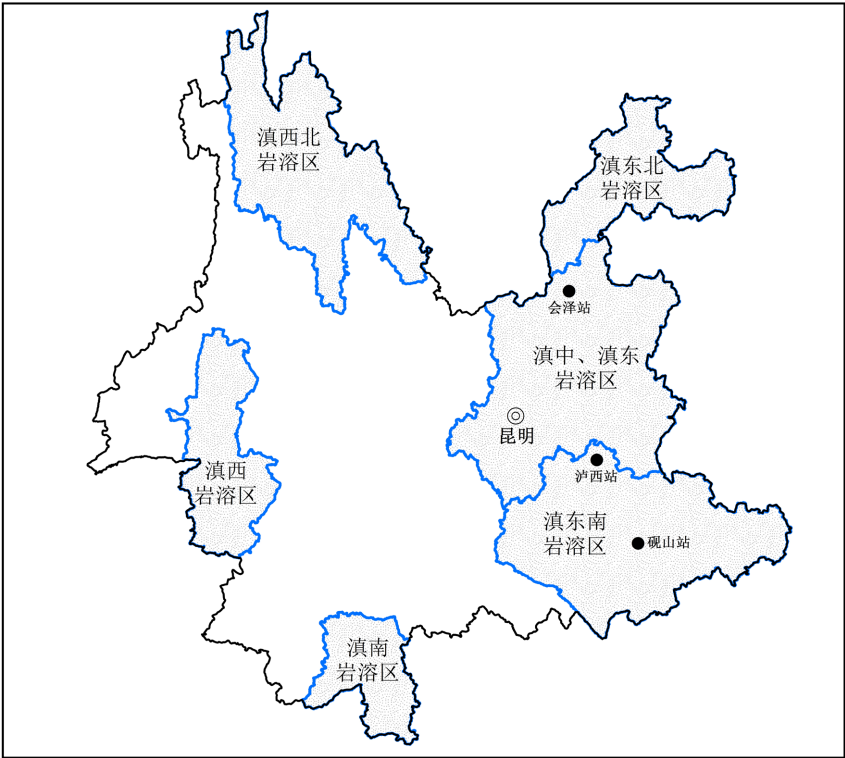


Figure 1. Study area and meteorological stations
图 1. 研究区及气象站点

本研究选择的典型站点会泽、泸西、砚山位于云南省东部(图 1)，属岩溶石漠化区，石漠化比例分别为 4.66%、22.45%、37.65%，三个站点的海拔分别为 2110.5 m、1704.3 m 和 1561.1 m (表 1)。

Table 1. Geographical location and surrounding environment of meteorological station
表 1. 气象站地理位置及周边环境

站点	经度	纬度	海拔/m	植被 NDVI*	石漠化比例%
会泽	103°17'	26°25'	2110.5	0.405	4.66
泸西	103°46'	24°32'	1704.3	0.528	22.45
砚山	104°20'	23°37'	1561.1	0.351	37.65

注：*以气象站为中心的半径 3 km 内植被 NDVI 平均值。

2.2. 数据来源

本文数据来源于云南省气象局资料中心和中国气象局国家气象信息中心(<http://data.cma.cn>), 选取了会泽、泸西、砚山 3 个滇东片区典型气象站点的逐日降水量数据资料进行分析, 这些资料均经过严格的质量控制, 能满足研究的要求。

3. 研究方法

采用气候变化和指数专家团法(以下简称 ETCCI)、Mann-Kendall 突变检验法和 Sen's 斜率分析法, 结合变差系数 CV 来分析该区域极端降水变化规律。表 2 为从 ETCCI 法中选取的最长持续干旱时间(以下简称 CDD)、最长持续降水日数(以下简称 CWD)、日最大降水量(以下简称 RX1day)和连续 5 日最大降水(以下简称 RX5day) 4 个极端降水指数。降水数据的计算基于 Matlab 完成。参考 Abdila W. P., Gabriela-Victoria Harpa, Shawn M. Milrad 等[15] [16] [17]的方法, 基于分析该区域降水事件特征及时空分布规律。

Table 2. Selected extreme precipitation indexes and their definitions

表 2. 选取的各极端降水指数及其定义

指数名称	缩写名称与单位	定义
最长持续干旱时间	CDD/d	日降水量小于 1 mm 的最大持续天数
最长持续降水日数	CWD/d	日降水量大于或等于 1 mm 的最大持续天数续日数
日最大降水量	RX1day/mm	每年最大 1 日的降水量
连续 5 日最大降水量	RX5day/mm	年内连续 5 日的最大降水量

1) M-K 检验法。曼(H.B. Mann)和肯德尔(M.G. Kendall)提出了原理并发展了这一方法。它可以客观反映时间变化趋势, 不受个别异常值干扰。具体计算方法及参数如下[18] [19]:

构造时间序列 X , 具 n 个样本量:

$$S_k = \sum_{i=0}^k ri, ri = \begin{cases} 1, & xi > xjj = 1, 2, \dots, i \\ 0, & else \end{cases} \quad (1)$$

秩序列 S_k 是第 i 时刻数值大于 j 时刻数值个数的累计数。时间序列随机独立的情况下, 统计量 UF_k 为:

$$UF_k = \frac{Sk - E(Sk)}{\sqrt{Var(sk)}}, k = 1, 2, \dots, n \quad (2)$$

式中: $E(S_k)$ 为均值、 $Var(S_k)$ 为方差。

$X_1, X_2, \dots, X_n$ 相互独立, 相同连续分布, 计算公式如下:

$$E(S_k) = \frac{n(n-1)}{4}, Var(S_k) = \frac{n(n-1)(2n+5)}{72} \quad (3)$$

UF 和 UB 是按照标准正态分布的算法, 将时间序列 X 分布按照顺序和逆序排列之后得到的统计量。若 UF 值 > 0 , 呈上升趋势, 反之呈下降趋势。当 UF 超过的临界值 ± 1.96 时, 则通过了 95% 的置信度检验, 呈显著上升或下降趋势, 超过临界线的范围即为突变时间区域。若 UF 和 UB 在临界线之间出现交点, 交点所在时刻即为突变时刻。该点即为突变点[20]。

2) Sen's 斜率法。该方法可以减少噪声对序列变化趋势的干扰。对于时间序列 $X(X_1, X_2, \dots, X_n)$, 计算公式如下[21]:

$$\beta = \text{median}\left(\frac{x_j - x_i}{j - i}\right), \forall j > i \tag{4}$$

式中：Median 为中值函数。当 $\beta > 0$ 时，呈上升趋势；当 $\beta = 0$ 时，序列趋势不明显；当 $\beta < 0$ 时，呈下降趋势。

3) 变差系数 CV。它可以表示序列总体的离散程度，计算公式为[22]：

$$CV = \frac{S}{M} \times 100\% \tag{5}$$

式中：S 为标准差，M 为平均数。

4. 结果分析

4.1. 极端降水指数的 Sen’s 斜率法分析

表 3 为滇东岩溶地区会泽站、泸西站和砚山站三个典型站点的 Sen’s 斜率结果，可以发现：3 个站点的 RX5day、RX1day、CWD 和 CDD 四个指数中，会泽站的 RX1day、泸西站的 RX5day 和 CWD 通过了置信水平为 0.05 的显著性检验，分别呈显著上升和下降趋势。会泽站的 RX1day 增加幅度最大，达 4.82 mm/10a，泸西站的 RX5day 减少幅度最大，达-9.31 mm/10a。

Table 3. Sen’s slope of three typical stations in Karst area of eastern Yunnan

表 3. 滇东岩溶地区 3 个典型站点 Sen’s 斜率

Sen’s	RX5day	RX1day	CWD	CDD
会泽	0.02	0.48*	-0.05	0.11
泸西	-0.93*	-0.41	-0.07*	0.11
砚山	-0.25	0.15	-0.06	0.00

注：*为达到 0.05 置信水平。

从 CWD 指数来看，3 个站点的最长降水时间均呈下降趋势，其多年平均值分别为-0.48 d/10 a、-0.69 d/10 a 和-0.56 d/10 a。从 CDD 指数来看，会泽站和泸西站的最长干旱时间均呈上升趋势，其多年平均值分别为 1.143 d/10 a 和 1.071 d/10 a，而砚山站却无上升或下降趋势。总体上降水减少，气候变干旱，符合气候变化大环境下的趋势。

4.2. 极端降水指数的 CV 值分析

表 4 为滇东岩溶地区会泽站、泸西站和砚山站三个典型站点的不均匀系数结果，可以发现：3 个站点的 RX5day、RX1day、CWD 和 CDD 四个指数的不均匀系数 CV 变化范围分别在 0.30~0.35、0.29~0.40、0.30~0.45 和 0.25~0.35 之间，其中泸西站 CWD 指数的不均匀系数最大，达 0.432，砚山站的 CDD 指数的不均匀系数最小，达 0.2524。

Table 4. CV values of three typical stations in Karst area of eastern Yunnan

表 4. 滇东岩溶地区 3 个典型站点 CV 值

CV	RX5day	RX1day	CWD	CDD
会泽	0.34	0.29	0.31	0.34
泸西	0.35	0.39	0.43	0.29
砚山	0.30	0.33	0.41	0.25

4.3. 极端降水指数的 Mann-Kendall 突变检验

本研究选取滇东岩溶地区 3 个典型站点会泽站、泸西站和砚山站, 利用其 1970~2020 年逐日降水数据的 RX5day、RX1day、CWD 和 CDD 四个指标进行 Mann-Kendall 突变检验, 检验结果显示, 发现 3 个站点的 RX5day 指标整体上会泽站呈先上升后下降趋势、泸西站呈下降趋势、砚山站呈先下降后上升趋势; RX1day 指标会泽站整体呈上升趋势、泸西站呈先上升后下降趋势、砚山站呈先上升后平稳趋势; CWD 指标会泽站呈先上升后下降趋势, 泸西站和砚山站呈下降趋势; CDD 指标会泽站和泸西站呈先下降后上升趋势, 砚山站呈先上升后下降趋势。

对比会泽站和泸西站, 砚山站的 RX5day 指数于 1983 年之后有波动但整体上呈平稳趋势, 其突变点较多且比较集中, 这是砚山站点与另外两个站点相比最显著的区别, 表明砚山站极端气候发生的概率较高。会泽站只有 RX1day 在 1994 有一个突变点、泸西站只有 RX5day 和 CWD 仅出现一个突变点, 分别在 1985 年和 1972 年发生突变, 这种情况可能是由于大背景下的气候条件的影响。

4.3.1. 会泽站极端降水指数的 Mann-Kendall 突变检验

图 2 为识别检验会泽站 1970~2020 年 RX5day、RX1day、CWD 和 CDD 四个指标突变检验结果, 发现 RX5day 的 UF 和 UB 两条曲线于 1976 年、1988 年、1991 年、1994 年和 2015 年附近出现交点, 且交点在临界线之间, 表明会泽站 RX5day 序列在上述年份可能发生突变, 其中突变年份多发生在 1988~1994 年间, 在此期间会泽站 RX5day 呈下降趋势, 在 1976 年和 2015 年发生突变后呈上升趋势。如图 2(b)所示, RX1day 的 UF 和 UB 曲线在 1994 年附近相交, 且交点在临界线之间, 即在 1994 年左右发生突变, 突变后呈上升趋势。如图 2(c)所示, CWD 的 UF 和 UB 两条曲线在置信区间内出现多个交点, 交点分别发生在 1971 年、1978 年、1983 年、1988 年和 1992 年附近, 说明会泽站 CWD 序列在上述年份可能发生突变, 其中 1988~1994 年发生突变比较频繁, 1994 年突变后会泽站 CWD 呈下降趋势。如图 2(d)所示, CDD 的 UF 和 UB 曲线在 2005 年和 2019 年相交, 且交点在临界线之间, 说明会泽站 CDD 序列在 2005 年和 2019 年发生突变, 突变后会泽站 CDD 呈上升趋势。

4.3.2. 泸西站极端降水指数的 Mann-Kendall 突变检验

图 3 为泸西站 1970~2020 年 RX5day、RX1day、CWD 和 CDD 四个指标突变检验结果, 发现: RX5day、RX1day、CWD 的 UF 和 UB 两条曲线分别在临界线之间在 1985 年、1975 年和 1985 年、1972 年附近出现交点, 表明泸西站 RX5day、RX1day、CWD 序列在以上各自所述年份前后发生了突变, 均在突变后呈下降趋势。此外, CWD 的 UF 曲线在 1975 年以后超出置信上限, 呈显著下降趋势, 1980 年后又回复到临界线之间; 最后 UF 曲线在 2003 年以后又超出置信上限, 呈显著下降趋势。如图 3(d)所示, CDD 的两条曲线在置信区间内出现多个交点, 交点分别发生在 1975 年、1977 年、1992 年和 1998 年, 表明泸西站 CDD 序列在 1975 年、1977 年、1992 年和 1998 年可能发生突变, 其中 1998 年突变后泸西站 CDD 呈上升趋势, 其他突变点突变后 CDD 呈下降趋势。

4.3.3. 砚山站极端降水指数的 Mann-Kendall 突变检验

图 4 为砚山站 1970~2020 年 RX5day、RX1day、CWD 和 CDD 四个指标突变检验结果, 发现: RX5dayUF 和 UB 两条曲线于 1973 年、1980 年、1983 年、1988 年、1991 年、1993 年、2005 年和 2007 年附近出现交点, 且交点在临界线之间, 表明砚山站 RX5day 序列在上述年份均发生了突变, 其中 1980~1993 年频繁交替出现交点, 是由于 1980~1993 年降水年际间变化较大。如图 4(b)所示, RX1day 的 UF 和 UB 曲线在置信区间内相交, 交点发生在 1982 年、1984 年、1992 年、1994 年、1996 年、2003 年、2009 年、2011 年、2015 年和 2018 年附近, 说明砚山站 RX1day 序列在以上年份可能发生突变, 其中 1992 年、1994 年和 2015 年突变后呈下降趋势, 其他年份突变后呈上升趋势。如图 4(c)所示, CWD 的 UF 和 UB 曲线在置信区间内相交, 交点发生在 1972 年、1974 年、1979~1984 年, 说明砚山站 CWD 序列在上述年份可能发生突变, 突变后呈下降趋势。此外, UF 曲线

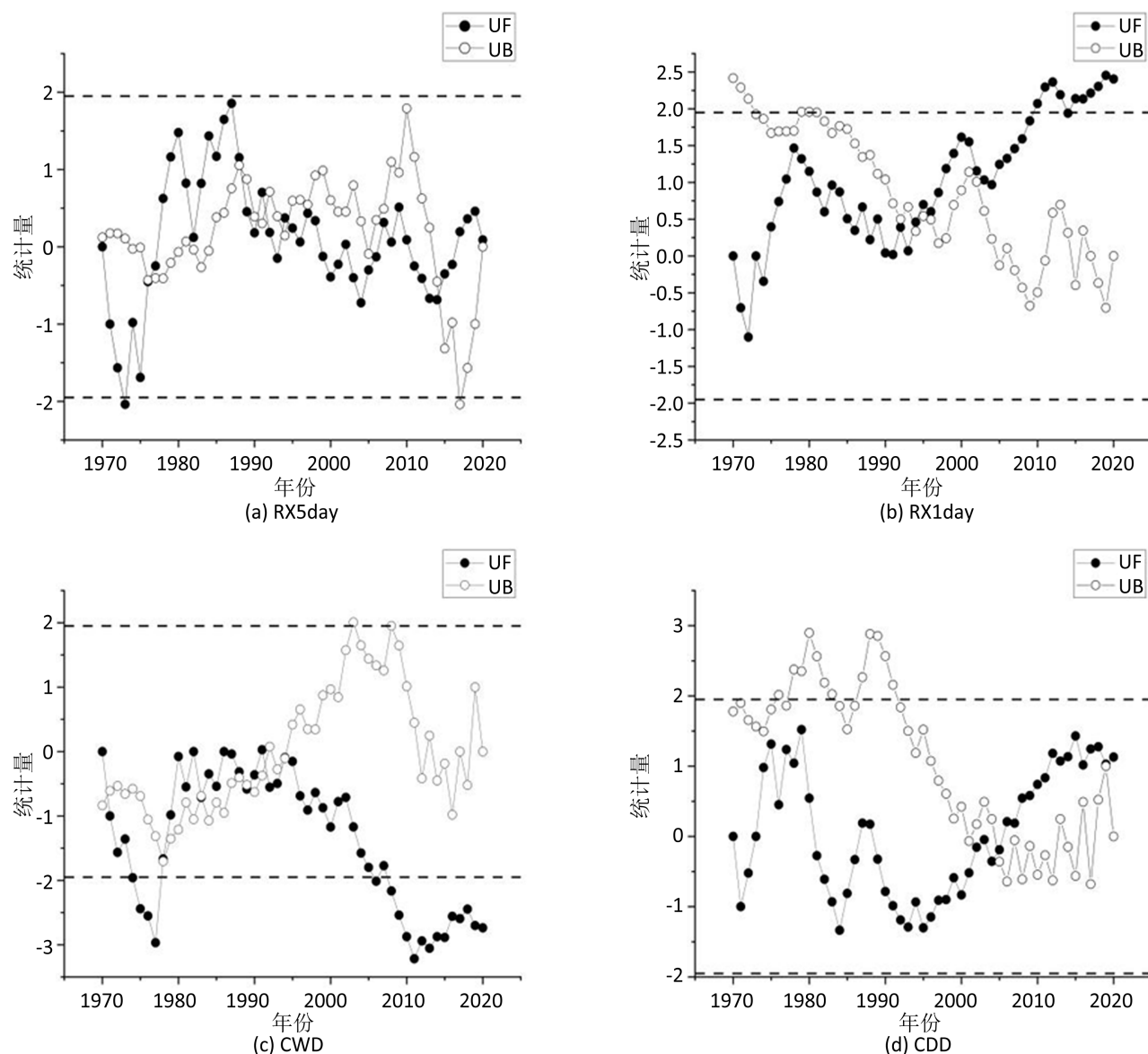


Figure 2. Mann Kendall catastrophe test of extreme precipitation index at Huize station

图 2. 会泽站极端降水指数的 Mann-Kendall 突变检验

在 1993 年以后超出置信上限，呈显著下降趋势，1980 年后又回复到临界线之间；最后 UF 曲线在 2003 年以后又超出置信上限，表明该地区的 CWD 序列呈显著下降趋势。如图 4(d)所示，CDD 的两条曲线在置信区间内出现多个交点，交点分别发生在 1972 年、2000 年、2002 年、2008 年、2011 年、2013 年、2015 年、2017 年和 2019 年，交点在临界线之间，表明砚山站 CDD 序列在上述年份可能发生突变，其中 1972 年、2008 年突变后砚山站 CDD 呈上升趋势，其他突变点突变后 CDD 呈下降趋势。

5. 结论与展望

5.1. 结论

本文基于滇东岩溶区 3 个典型站点 1970~2017 年的逐日降水数据，计算 4 个极端降水指标，分析其降水变化趋势，得到以下结论：

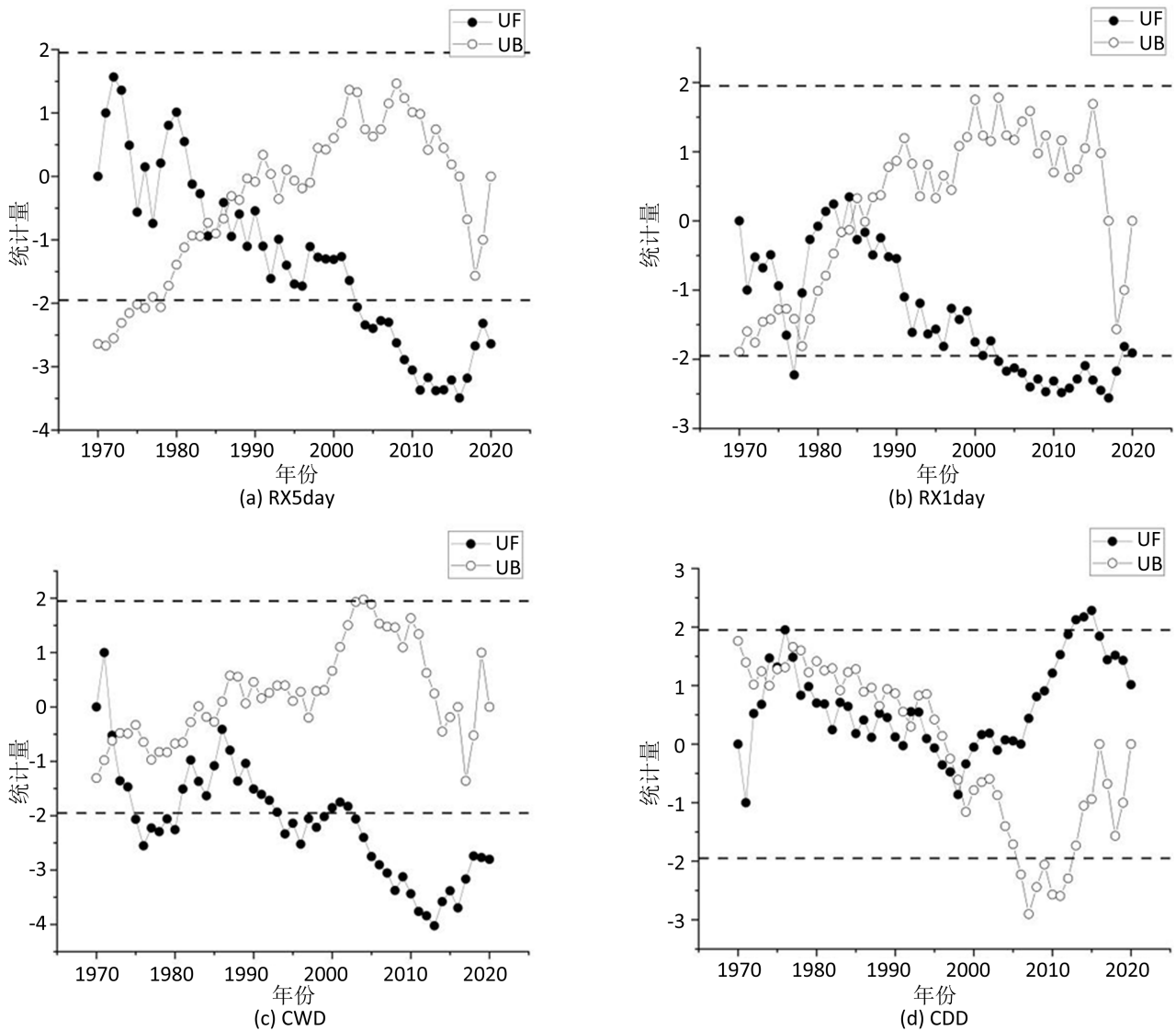


Figure 3. Mann-Kendall catastrophe test of extreme precipitation index of Luxi station

图 3. 泸西站极端降水指数的 Mann-Kendall 突变检验

1) 对 Sen's 斜率的分析, 3 个站点的 RX5day、RX1day、CWD 和 CDD 四个指数中, 会泽站的 RX1day、泸西站的 RX5day 和 CWD 通过了置信水平为 0.05 的显著性检验, 分别呈显著上升和下降趋势。会泽站的 RX1day 增加幅度最大。从 CWD 指数来看, 3 个站点的最长降水时间均呈下降趋势。从 CDD 指数来看, 会泽站和泸西站的最长干旱时间均呈上升趋势, 而砚山站却无上升或下降趋势。总体上降水减少, 气候变干旱, 符合气候变化大环境下的趋势。

2) 对 CV 值的分析, 3 个站点的 RX5day、RX1day、CWD 和 CDD 四个指数的不均匀系数 CV 变化范围分别在 0.30~0.35、0.29~0.40、0.30~0.45 和 0.25~0.35 之间, 其中泸西站 CWD 指数的不均匀系数最大, 达 0.43, 砚山站的 CDD 指数的不均匀系数最小, 达 0.25。

3) 对 Mann-Kendall 突变检验的结果分析, 3 个站点的 RX5day 指标整体上会泽站呈先上升后下降趋势、泸西站呈下降趋势、砚山站呈先下降后上升趋势; RX1day 指标会泽站整体呈上升趋势、泸西站呈先上升后下降趋势、砚山站呈先上升后平稳趋势; CWD 指标会泽站呈先上升后下降趋势, 泸西站和砚山站呈下降趋势。对比会

泽站和泸西站, 砚山站的 RX5day 指数于 1983 年之后有波动但整体上呈平稳趋势, 其突变点较多且比较集中, 这是砚山站点与另外两个站点相比最显著的区别, 表明砚山站极端降水事件发生的概率较高。会泽站只有 RX1day 在 1994 有一个突变点、泸西站只有 RX5day 和 CWD 仅出现一个突变点, 分别在 1985 年和 1972 年发生突变, 均符合气候变化大背景影响下的极端降水时空分布变化趋势。

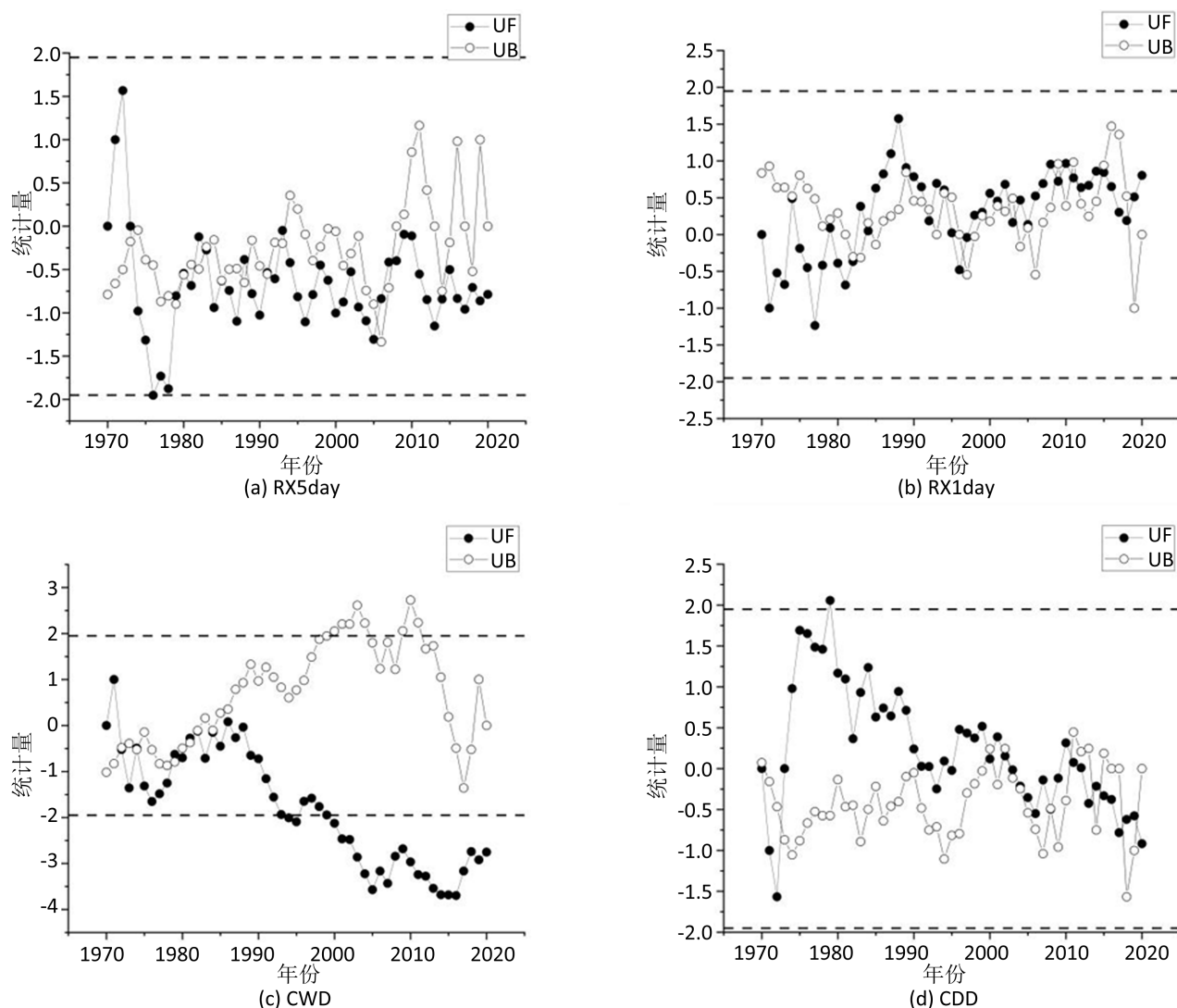


Figure 4. Mann Kendall catastrophe test of extreme precipitation index at Yanshan Station

图 4. 砚山站极端降水指数的 Mann-Kendall 突变检验

5.2. 前景展望

气候变化在宏观上主要表现为全球大气变暖和降水频率变化, 当前分析极端降水时空变化对区域的影响已成为重点研究内容。全球增温和人类活动的剧烈作用导致全球极端降水气候事件日益频发, 已危害到人类社会经济健康发展。极端降水气候事件自 1950 年以来愈发频繁[3]。区域连续降雨、大暴雨等极端事件的发生频次和强度都呈现或多或少的增强趋势, 极端降水气候事件的研究已成为当今社会的焦点问题。降水异常变化不仅影响人类社会经济健康发展及自然生态环境系统平衡状态, 更是增加了干旱、洪涝等自然灾害发生的风险。研究极端降水事件发生的时空分布变化规律, 对岩溶区水资源利用及水旱灾害防治等具有重要意义。

全球气候正经历着前所未有的变化,根据现有的评估可以发现,目前在复合型极端事件发生发展机理认识方面还存在不足。同时,未来仍需进一步完善跨学科跨部门跨区域研究,加强对复合型极端事件形成机理、预估及其对生态系统,经济社会影响风险的评估,提高对区域气候变化的适应能力。IPCC 最新发布的《气候变化与土地特别报告》(SRCCL),对岩溶区荒漠化展开了探讨。发现随着全球气温不断变暖,岩溶区荒漠化和土地退化威胁着粮食安全。气候不断变化,极端事件发生的概率和严重程度会随之提高。面对气候变化尤其是极端事件给土地带来的巨大压力,我们必须采取相关措施来减轻她所造成的负面影响。如:坚持土地管理可持续性,减少所有行业的 CO₂ 等温室气体排放等,才有可能到 21 世纪末将全球平均升温控制在相对工业化前水平 2℃ 以内。由此减轻气候变化对土地和粮食系统的负面影响[23] [24] [25] [26]。

基金项目

国家自然科学基金项目(41761105)资助。

参考文献

- [1] IPCC. 第六次评估报告第一工作组报告发布[N]. 中国气象报, 2021-08-10(001).
IPCC. Sixth assessment report working group I report released. China Meteorological News, 2021-08-10(001). (in Chinese)
- [2] 付铁文, 徐宗学, 陈浩, 等. 粤港澳大湾区 1961-2014 年降水时空演变特征分析[J]. 水资源保护, 2022, 38(4): 56-65, 74.
FU Tiewen, XU Zongxue, CHEN Hao, et al. Analysis of temporal and spatial variations of precipitation in Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area during 1961-2014. Water Resources Conservation, 2022, 38(4): 56-65, 74. (in Chinese)
- [3] 何文静. 滇中岩溶区植被对气候变化的响应研究[D]. 昆明: 云南师范大学, 2021.
HE Wenjing. Responses of vegetation to climate change in karst area of central Yunnan. Kunming: Yunnan Normal University, 2021. (in Chinese)
- [4] 张菁, 张珂, 王晟, 等. 陕甘宁三河源区近 1971-2017 年极端降水时空变化分析[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2021, 49(3): 288-294.
ZHANG Jing, ZHANG Ke, WANG Sheng, et al. Temporal and spatial variation of extreme precipitation in the Headwaters region of Shanxi-Gansu-Ningxia during 1971-2017. Journal of Hohai University (Natural Science Edition), 2021, 49(3): 288-294. (in Chinese)
- [5] 阮俞理, 莫崇勋, 孙桂凯. 岩溶区流域月、季尺度降雨变化特征及其与台风相关性分析[J]. 水力发电, 2021, 47(1): 27-33.
RUAN Yuli, MO Chongxun and SUN Guikai. Analysis of monthly and seasonal rainfall variation and its correlation with Typhoon in Karst basin. Hydraulic Power, 2021, 47(1): 27-33. (in Chinese)
- [6] 王莉萍, 王铸, 马杰, 等. 近 40a 我国主要城市群降水过程时空分布特征[J]. 暴雨灾害, 2021, 40(6): 589-598.
WANG Liping, WANG Zhu, MA Jie, et al. Spatial and temporal distribution of precipitation processes in Major Urban agglomerations in China in recent 40 years. Heavy Rain and Disasters, 2021, 40(6): 589-598. (in Chinese)
- [7] 龙彦羲, 邹睿, 尹义星, 等. 江淮地区夏、冬季和年极端降水发生时间的时空特征及影响因素[J]. 水电能源科学, 2021, 39(11): 1-4.
LONG Yanxi, ZOU Rui, YIN Yixing, et al. Temporal and spatial characteristics and influencing factors of summer, winter and annual extreme precipitation in Jianghuai Region. Water and Power Energy Science, 2021, 39(11): 1-4. (in Chinese)
- [8] 毛春艳, 戴丽, 杨广斌, 等. 1960-2016 年喀斯特山区干旱时空动态分析[J]. 水资源与水工程学报, 2021, 10(1): 12-21.
MAO Chunyan, DAI Li, YANG Guangbin, et al. Temporal and spatial dynamics of drought in Karst mountainous areas during 1960-2016. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2021, 10(1): 12-21. (in Chinese)
- [9] 覃方灵, 敖天其, 陈婷, 等. 近 56 年岷江降水时空演变特征分析[J]. 水力发电, 2021, 47(7): 24-29.
QIN Fangling, AO Tianqi, CHEN Ting, et al. Analysis of temporal and spatial evolution characteristics of precipitation in Minjiang River in recent 56 years. Hydroelectric Power, 2021, 47(7): 24-29. (in Chinese)
- [10] 周珍. 基于 Mann-Kendall 的嘉陵江流域降水量时空分布规律研究[J]. 水资源开发与管理, 2021(3): 25-28+42.
ZHOU Zhen. Spatial-temporal distribution of precipitation in Jialing River Basin based on Mann-Kendall model. Water Resources Development and Management, 2021(3): 25-28+42. (in Chinese)
- [11] 郭嘉兵, 李金文, 马金珠, 等. 甘肃省 1961-2018 年降水量时空分布与变化研究[J]. 灌溉排水学报, 2021, 40(3): 142-148.
GUO Jiabing, LI Jinwen, Ma Jinzhu, et al. Study on spatial and temporal distribution and change of precipitation in Jiangsu Province from 1961 to 2018. Journal of Irrigation and Drainage, 2021, 40(3): 142-148. (in Chinese)
- [12] 王可欣, 楼俊伟, 俞涵婷. 近 50a 浙江降水分布的时空特征[J]. 浙江气象, 2021, 42(1): 11-16.

- WANG Kexin, LOU Junwei and YU Hanting. Spatial-temporal characteristics of precipitation distribution in Zhejiang province in recent 50 years. *Journal of Zhejiang Meteorology*, 2021, 42(1): 11-16. (in Chinese)
- [13] 苏锦兰, 张万诚, 宋金梅, 等. 云南小时降水的时空分布变化研究[J]. *气象*, 2021, 47(2): 133-142.
SU Jinlan, ZHANG Wancheng, SONG Jinmei, et al. Spatial-temporal variation of hourly precipitation in Yunnan. *Meteorological Monthly*, 2021, 47(2): 133-142. (in Chinese)
- [14] 张贵, 王宇. 滇东岩溶高原区岩溶水资源保护利用分析[C]//岩溶资源与油藏岩溶储层研究学术研讨会. 昆明: 云南科技出版社, 2014: 20-22.
ZHANG Gui, WANG Yu. Analysis on protection and utilization of karst water resources in karst highland area of eastern Yunnan. In *Academic Seminar on Karst Resources and Karst Reservoir*. Kunming: Yunnan Science and Technology Press, 2014: 20-22. (in Chinese)
- [15] ABDILA, W. P., NUGROHO, B. D. A. Trend analysis of extreme precipitation indices in the southern part of Java. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2021, 653(1): 75-86. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/653/1/012032>
- [16] HARPA, G.-V., CROITORU, A.-E., DJURDJEVIC, V. and HORVATH, C. Future changes in five extreme precipitation indices in the lowlands of Romania. *International Journal of Climatology*, 2019, 39(15): 253-264.
<https://doi.org/10.1002/joc.6183>
- [17] MILRAD, S. M., ATALLAH, E. H., GYAKUM, J. R. and KLEPATZKI, J. The extreme precipitation index (EPI): A coupled dynamic-thermodynamic metric to diagnose midlatitude floods associated with flow reversal. *Weather and Forecasting*, 2019, 34(5): 12-23. <https://doi.org/10.1175/WAF-D-18-0156.1>
- [18] 艾萍, 吴军澜, 王雪娇, 等. 基于 Mann-Kendall 法的水温时间序列检验[J]. *水利水电技术*, 2014, 45(2): 10-16.
AI Ping, WU Junlan, WANG Xuejiao, et al. Water temperature time series test based on Mann-Kendall method. *Water Resources and Hydropower Technology*, 2014, 45(2): 10-16. (in Chinese)
- [19] 陈中平, 徐强. Mann-Kendall 检验法分析降水量时程变化特征[J]. *科技通报*, 2016, 32(6): 47-50.
CHEN Zhongping, XU Qiang. Mann-Kendall test for analysis of temporal variation of precipitation. *Science and Technology Bulletin*, 2016, 32(6): 47-50. (in Chinese)
- [20] 丁文荣. 横断山区典型干旱河谷干湿状况演变特征及影响因素研究[J]. *水电能源科学*, 2019, 37(11): 6-10.
DING Wenrong. Evolution characteristics and influencing factors of dry and wet conditions in typical arid valleys in Hengduan Mountains. *Water and Power Energy Science*, 2019, 37(11): 6-10. (in Chinese)
- [21] SEN, K. P. Estimates of the regression coefficient based on Kendall's tau. *Journal of the American Statistical Association*, 1968, 63(324): 1379-1389. <https://doi.org/10.1080/01621459.1968.10480934>
- [22] 徐建华. 现代地理学中的数学方法[M]. 北京: 高等教育出版社, 2002.
XU Jianhua. *Mathematical methods in modern geography*. Beijing: Higher Education Press, 2002. (in Chinese)
- [23] 黄萌田, 周佰铨, 翟盘茂. 极端天气气候事件变化对荒漠化、土地退化和粮食安全的影响[J]. *气候变化研究进展*, 2020, 16(1): 17-27.
HUANG Mengtian, ZHOU Baiquan and ZHAI Panmao. Effects of extreme weather and climate events on desertification, land degradation and food security. *Climate Change Research*, 2020, 16(1): 17-27. (in Chinese)
- [24] 翟盘茂, 周佰铨, 陈阳, 等. 气候变化科学方面的几个最新认知[J]. *气候变化研究进展*, 2021, 17(6): 7-15.
ZHAI Panmao, ZHOU Baiquan, CHEN Yang, et al. Some new understandings of climate change science. *Advances in Climate Change Research*, 2021, 17(6): 7-15. (in Chinese)
- [25] 余荣, 翟盘茂. 关于复合型极端事件的新认识和启示[J]. *大气科学学报*, 2021, 44(5): 645-649.
YU Rong, ZHAI Panmao. New understanding and Enlightenment of compound extreme events. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2021, 44(5): 645-649. (in Chinese)
- [26] IPCC. *Climate change 2007: Impacts, adaptation and vulnerability*. Cambridge: Cambridge University Press, 2007.