

云南高原岩溶区极端降水变化规律研究

曾学梅, 丁文荣

(云南师范大学 旅游与地理科学学院, 云南 昆明 650500)

摘要: 利用云南高原岩溶区9个气象站1960–2017年逐日降水量数据,通过MATLAB软件计算了6个极端降水指数,基于反距离加权插值、线性倾向估计、Mann–Kendall突变检验以及Morlet连续小波变换等技术方法,探讨了云南高原岩溶区极端降水的演化规律。结果表明:云南高原岩溶区1960–2017年各极端降水指数中,CDD、RX1day、RX5day、SDII主要呈缓慢的上升趋势,CWD呈显著的下降趋势,PRCPTOT整体减少趋势不显著;1960–2017年间仅有CDD和PRCPTOT发生了显著突变,突变年份分别为2006年以及2000年,其余4个指数CWD、RX1day、RX5day、SDII无明显突变现象;各极端降水指数周期性震荡较为明显,CDD、CWD、RX1day、RX5day分别存在28~30a、26~30a、27~30a、27~30a的主周期,SDII与PRCPTOT在27~30a时间尺度上周期最为明显;1960–2017年云南高原岩溶区各极端降水指数空间差异较为明显,除CDD表现为由南向北逐渐递增趋势外,其余5个指数表现为由北向南逐渐递增的相反趋势;1960–2017年间,CDD、CWD、RX1day、RX5day以及SDII均与PRCPTOT呈一致的极显著正相关,相关系数均达0.98以上。极端降水的这些变化可为未来岩溶水资源管理、生态环境建设等方面提供参考。

关键词: 极端降水; 气候变化; 云南高原; 岩溶区

中图分类号: P426.6

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2020)02-0028-08

Study on the variation characteristics of extreme precipitation events of karst area in Yunnan Plateau

ZENG Xuemei, DING Wenrong

(College of Tourism and Geography, Yunnan Normal University, Kunming 650500, China)

Abstract: Using the daily precipitation data from nine meteorological stations in the karst area of the Yunnan Plateau from 1960 to 2017, six extreme precipitation indexes were calculated by MATLAB. Based on inverse distance weighted interpolation, linear tendency estimation, Mann–Kendall abrupt change test and Morlet continuous wavelet transform, we explored the evolution of extreme precipitation events in the karst area of the Yunnan plateau. The results showed that among the extreme precipitation indexes in the karst area of the Yunnan plateau from 1960 to 2017, CDD, RX1day, RX5day, and SDII mainly showed a slow upward trend, CWD showed a significant downward trend, and the overall decrease of PRCPTOT was not significant. Only CDD and PRCPTOT had undergone significant abrupt changes in this period, which happened in 2006 and 2000, whereas the remaining four indexes CWD, RX1day, RX5day, and SDII had no obvious abrupt changes. The periodic fluctuations of each extreme precipitation index were obvious, manifested as major cycles of 28–30 a, 26–30 a, 27–30 a, and 27–30 a for CDD, CWD, RX1day, and RX5day, respectively. In comparison, SDII and PRCPTOT are most obvious at the 27–30 a scale. The spatial differences of extreme precipitation indexes in the karst area of the Yunnan Plateau from 1960 to 2017 were obvious. All the indexes increased from north to south with the exception of CDD showing the opposite trend. From 1960–2017, CDD, CWD, RX1day, RX5day, and SDII all had a very significant positive correlation with PRCPTOT, with the correlation coefficient of 0.98

收稿日期: 2019-09-27; 修回日期: 2019-12-23

基金项目: 国家自然科学基金项目(41761105)

作者简介: 曾学梅(1993-), 女, 云南大理人, 硕士研究生, 主要从事岩溶水文与水资源方面的研究工作。

通讯作者: 丁文荣(1979-), 男, 云南昆明人, 博士, 副教授, 主要从事水文水资源方面的研究工作。

and above. These changes of extreme precipitation events can provide some reference for future karst water resources management and ecological environment construction.

Key words: extreme precipitation; climate change; Yunnan Plateau; karst area

1 研究背景

气候变暖的背景下,极端天气气候事件在全球范围内发生的频率越来越高,由此引发的极端降水事件对人民生命财产、区域社会经济发展以及生态环境提出了新的挑战^[1-2]。目前,国内外学者分别从不同时空尺度开展了大量有关极端降水变化趋势和规律的研究,表明不同区域的极端降水变化规律各具特点,同一区域指数变化不同^[3-11]。

云南岩溶高原地处中国的西南地区,地质状况条件复杂,在我国气候区中属于湿润区,但由于河谷深切,常年处于“干旱”或“半干旱”的状态^[12]。加之岩溶区易形成石漠化,基岩裸露高,地表植被稀少、生态环境脆弱、抗逆和人为干扰能力差等特点,形成了岩溶区无雨则旱,有雨则涝的特有恶性循环,对区内生态文明建设构成了严重阻碍。以往对云南地区降水变化的研究多集中在短时强降水^[13]、日极端降水^[14]、雨日数^[15]、降水与气温变化特征^[16-17]以及降水异常的气候成因^[18]等单方面,针对岩溶区多种极端降水指数系统的研究成果鲜见。鉴此,本文以云南高原3个岩溶片区9个气象站点为研究对象,选取6个极端降水指数,从不同维度研究极端降水变化规律,以期对岩溶区水资源管理、水土流失防治、生态环境整体改善提供科学依据。

2 研究区概况

云南高原岩溶区位于云南省的中东部,具体包括滇中、滇东南、滇东北3个岩溶片区($101^{\circ}15'54'' \sim 106^{\circ}11'54''E, 22^{\circ}26'38'' \sim 28^{\circ}40'33''N$),全省岩溶面积为110 875.7 km²,滇东南、滇中、滇东北3个岩溶区占全省岩溶面积的2/3,云南高原岩溶区分布见图1。研究区属亚热带高原季风气候,四季年较差小,干、湿季节分明,其中夏秋半年为湿季,冬春半年为干季。地貌类型丰富多样,以溶蚀盆地、石丘、中山山地、石牙、石笋、溶洞等为主。随着气候类型的变化,形成以山原红壤为主,兼有石灰岩地区特有的土类石灰土、紫色土等多种土壤类型及亚热带季风常绿阔叶林、温性湿润性常绿阔叶林以及华山松/云南松林^[19]等植被类型分布。近年来随着人口的剧增,土地资源愈发紧缺,人、水、地之间的矛盾愈发突出,水资源短缺已经成为制约区域经济发展的重要障碍。

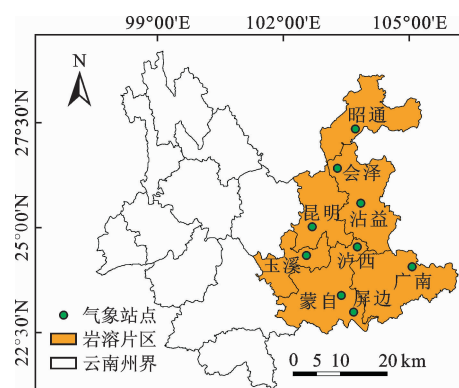


图1 云南高原岩溶区及气象站点分布

3 资料来源与研究方法

3.1 资料来源

根据王宇等^[20]划分云南省岩溶区的方法,云南高原包括滇东北、滇中以及滇东南3个片区。遵循可得性、均衡性、科学性、连续性等资料获取原则,获取研究区9个气象站点1960-2017年的逐日降水量数据。其中滇东南4个站点,滇中4个站点,滇东北1个站点,研究区气象站点分布见图1。站点数据来源于国家气象局和云南省气象局。所用站点平均高程为1 693 m,其中会泽站海拔最高,为2 110.5 m,广南站海拔最低,为1 249.6 m。

3.2 研究方法

本文采用气候变化检测和指数专家团(简称ETCCDI)推荐的6个极端降水指数探究极端降水变化规律,极端降水指数的计算基于MATLAB软件完成,选取的6个极端降水指数及其定义见表1。时间维度上运用倾向分析^[21-22]、Mann-Kendall突变检验法^[23]、Morlet连续小波分析法^[24]、滑动平均法^[25]对各极端降水指数的年际变化、突变现象、周期性变化以及波动特征进行分析,空间维度上基于ARCGIS空间分析软件对各极端降水指数进行反距离插值(IDW)^[26-27],并运用IBM SPSS Statistics 21软件对各极端降水指数与年总降水量的关系进行一致性分析。

4 结果与分析

4.1 极端降水指数年际变化趋势分析

图2为云南高原岩溶区1960-2017年各极端

降水指数年际变化。

由图 2 可知,CDD、RX1day、RX5day、SDII 4 个指数整体上呈上升趋势,其余两个指数 CWD、PRCPTOT 主要呈下降趋势,下降速率分别为 0.32 d/10a、14.78 mm/10a。具体来看:1960-2017 年云南高原岩溶区 CDD 上升趋势较为明显,速率为 0.66 d/10a,持续干旱时间最长为 71 d,出现在 1984 年,最短为 2000 年的 23 d(图 2(a));CWD 波动比较剧烈,持续降水日数波动范围为 5~11 d(图 2(b));

RX1day 以 0.23 mm/10a 年的速度缓慢增长,1987 年的日最大降水量为 52.6 mm,是研究时段内的最低值,1999 年达到峰值,为 97 mm;RX5day 增长速度较 RX1day 迅速,为 0.54 mm/10a,增长速度为 RX1day 的 1.4 倍;SDII 强度最大出现在 2014 和 2015 年,为 12.2 mm/d,强度最低出现在 2011 年,比强度最大年份少 3.6 mm/d;PRCPTOT 在 1961 年降水量最多,为 1 194.3 mm,2011 年降水量最少,仅为 675.4 mm。

表 1 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 < 1mm 的最大持续日数
最长持续降水日数	CWD/d	日降水量 ≥ 1mm 的最大持续日数
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 日最大降水量
降水强度	SDII/(mm · d ⁻¹)	年内降水量与日降水量 ≥ 1mm 日数之比
年总降水量	PRCPTOT/mm	年内日降水量 ≥ 1mm 的累积降水量

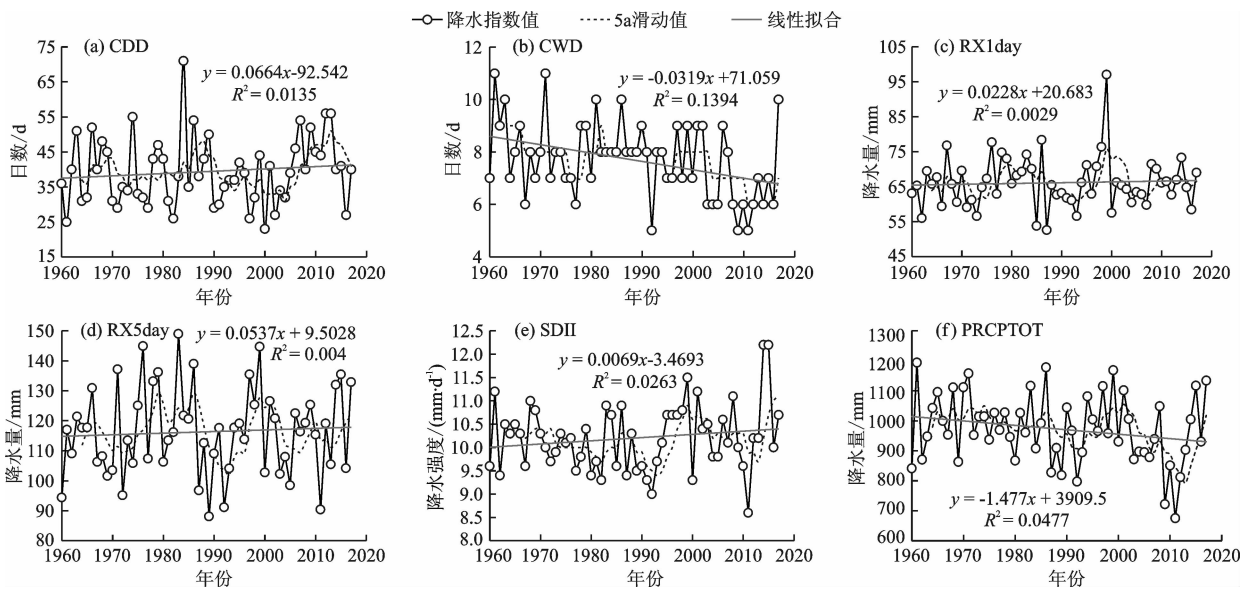


图 2 1960-2017 年云南高原岩溶区各极端降水指数年际变化

图 2 中 5a 滑动值的年际变化表明,1970 年以前 CDD 整体呈上升态势,1970-1973 年呈下降倾向,1973-1987 年又表现为波动增加态势,而 1985 年至 21 世纪初整体回落,而后再呈增长态势,2013 年后整体又滑落。CWD 除经历 3 个平稳期(1982-1993 年、1997-2003 年、2004-2010 年)外,波动起伏较剧烈。RX1day 与 RX5day 波动态势较一致,经历 1965、1972、1986、1993、1998、2006 年 6 个时间点 7 个阶段,1~7 阶段表现为“上升-下降-上升-

下降-上升-下降-上升”趋势;SDII 与 PRCPTOT 也经历 1980 年前、1980-1986 年、1986-1993 年、1993-1998 年、1998-2012 年、2012 年以后 6 个阶段,1~6 阶段呈“减少-增加”的趋势循环变化。

运用 M-K 检验法对各极端降水指数的趋势进行显著性检验知,仅 CWD 在 0.05 的显著性水平内变化显著,其余指数趋势变化不明显。

4.2 极端降水指数突变分析

云南高原岩溶区 1960-2017 年各极端降水指

数 Mann-Kendall 突变检验情况见图3。从图3中UF曲线可知,CDD在1967年以前整体呈不显著的波动上升态势,之后下降趋势较为明显,2006年以后整体又呈不显著的增长趋势(图3(a))。CWD在1963年以前持续降水日数总体处于偏高的态势,1963年以后持续降水日数总体呈偏低的态势(图3(b))。RX1day突变现象较为复杂,1960-2017年UF、UB曲线共存在7个可能突变的点,时间分别发生于1973、1988、1994、2000、2007、2011以及2015年,其中2000、2011以及2015年突变现象明显(图3(c))。RX5day在研究时段内也存在7个较为明显的可能突变点,年份分别为1967、1973、1987、1994、2000、2014以及2016,其中UF曲线

1967年前超出显著水平,说明1967年以前RX5day增加趋势较显著(图3(d))。

由图3(e)可以得出,指数SDII的UF、UB曲线在0.05的置信区间内存在3个可能突变的点:1961、2014及2015年,1961年UF曲线冲出零值线,表明突破之前低水平的发展状态开始向较高的水平发展,1961-2014年UF曲线持续在零值线以下,且于1980-1994年两次超出了0.05的置信水平线,表明在此期间偏低现象较为显著,2016年SDII又由相对偏低期转为相对偏高期,偏高现象不明显。PRCPTOT在2000年突变现象最为明显,2000年以前整体呈波动下降态势,2000年以后总降水量有显著的减少趋势(图3(f))。

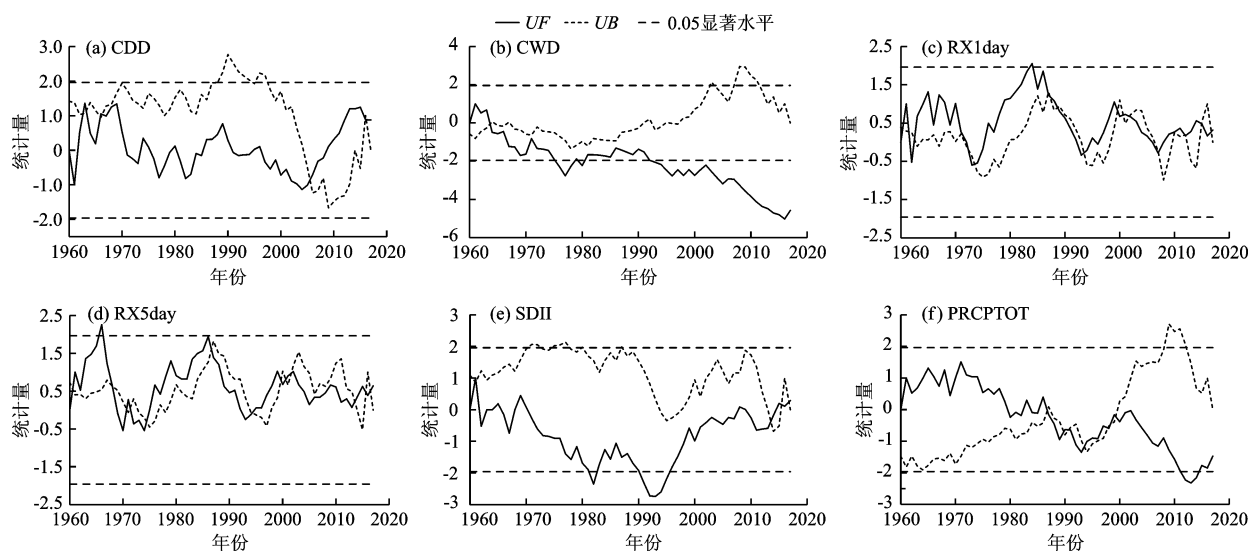


图3 1960-2017年云南高原岩溶区各极端降水指数M-K突变检验

但是,采用滑动T检验后,发现仅CDD和PRCPTOT存在突变点,突变点分别为2006年以及2000年。

4.3 极端降水指数周期性分析

图4为1960-2017年云南高原岩溶区各极端降水指数小波系数及方差图。

由图4(a)可知,CDD存在28~30、22、15~16、8~10a周期变化,其中28~30a时间尺度的周期贯通整个时域,且存在两个明显的高值与低值中心,高、低值中心分别为1960和2015年以及1975和2003年;8~10a时间尺度上的周期局部性较为明显,主要发生在1960-1987年以及2015年;22a与15~16a时间尺度上出现了两个较明显的干旱中心,分别为1997和1986年。CWD周期性变化主要集中在26~30和21~23a时间尺度上,其中26~30a周期具有全时域特征,21~23a时间尺度上

2000-2005年震荡较强(图4(b))。由图4(c)、4(d)可以看出,RX1day和RX5day的周期存在异同点,都具有27~30a时间尺度上贯穿全时域的周期以及局部震荡较强的22~23a的周期,不同之处是RX5day在15~16a时间尺度上还存在局部的短周期,即1977-1987年和2004-2015年两个时间段。由图4(e)可以看出,SDII存在27~30、21a时间尺度的周期变化,27~30a时间尺度上周期变化最为明显,21a时间尺度上存在1个高的与1个低的强度中心,时段分别为1987-1993年与1998-2004年。由图4(f)可知,PRCPTOT存在27~30、21a周期变化,27~30a时间尺度上存在3个湿润中心和两个干旱中心,湿润中心集中在1960、1995-2000、2015年3个时间段,干旱中心集中在1975、2005-2015年两个时间段;21a时间尺度上1985-2003年震荡较明显。

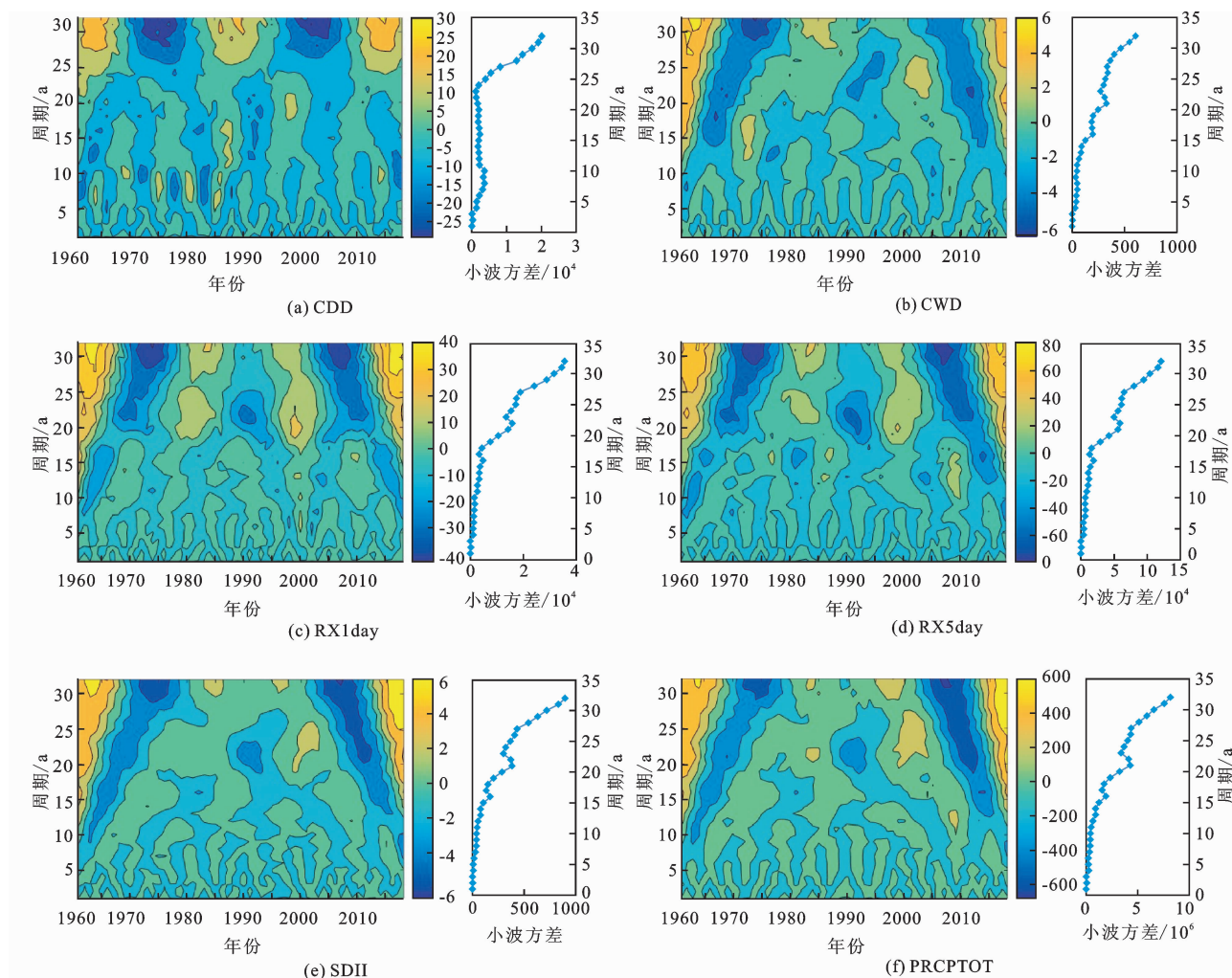


图4 1960-2017年云南高原岩溶区各极端降水指数小波系数、方差图

4.4 极端降水指数空间分布

1960-2017年云南高原岩溶区各极端降水指数空间分布如图5所示。由图5可知,1960-2017年云南高原岩溶区各极端降水指数空间差异较为明显。从站点层面来看,最长持续干旱时间CDD年均值最高可达44 d,昭通站表现最为突出,昆明站次之,屏边站最低,为27 d,持续干旱现象由滇东北及滇中西部像滇中东部、滇东南岩溶区缓解(图5(a));CWD屏边站最高,持续降水日数达11 d,会泽站最低,比屏边站少4 d,CWD由研究区最南端向中西部、中东部、北部逐渐递减(图5(b));RX1day与RX5day的空间分布较为相似,降水量均为屏边站最高,沾益、昆明站次之,昭通站最低,总体上由滇东南和滇中向滇东北岩溶区递减(图5(c)、5(d))。由图5(e)可以看出,降水强度SDII均值介于8.2~12.7 mm/d之间,降水强度由大到小排列为屏边站>广南站>昆明站>沾益站>玉溪站>泸西站>蒙

自>会泽站>昭通站,空间差别较明显。由图5(f)可知,1960-2017年屏边站年总降水量PRCPTOT最多,广南站次之,昭通站最低,空间上由滇东北向滇中、滇东南岩溶区逐渐递增。从整体看,云南高原岩溶区极端降水指数除CDD表现为由南向北逐渐递增趋势外,其余5个指数均表现为由南向北逐渐递减的相反趋势。

4.5 极端降水指数相关性分析

1960-2017年云南高原岩溶区极端降水指数相关性分析结果见表2。由表2可知,1960-2017年云南高原岩溶区各极端降水指数与年总降水量PRCPTOT相关性较好,相关系数均在0.99($p < 0.01$)以上,相关程度由强至弱的排序为CWD>RX1day>RX5day>SDII>CDD。此外,由表2还可以看出,云南高原岩溶区各极端降水指数间也存在较好的相关性,如CDD与SDII、CWD与RX1day、SDII与RX5day相关系数也达到了0.99,在0.01

的显著性水平上为极显著相关。

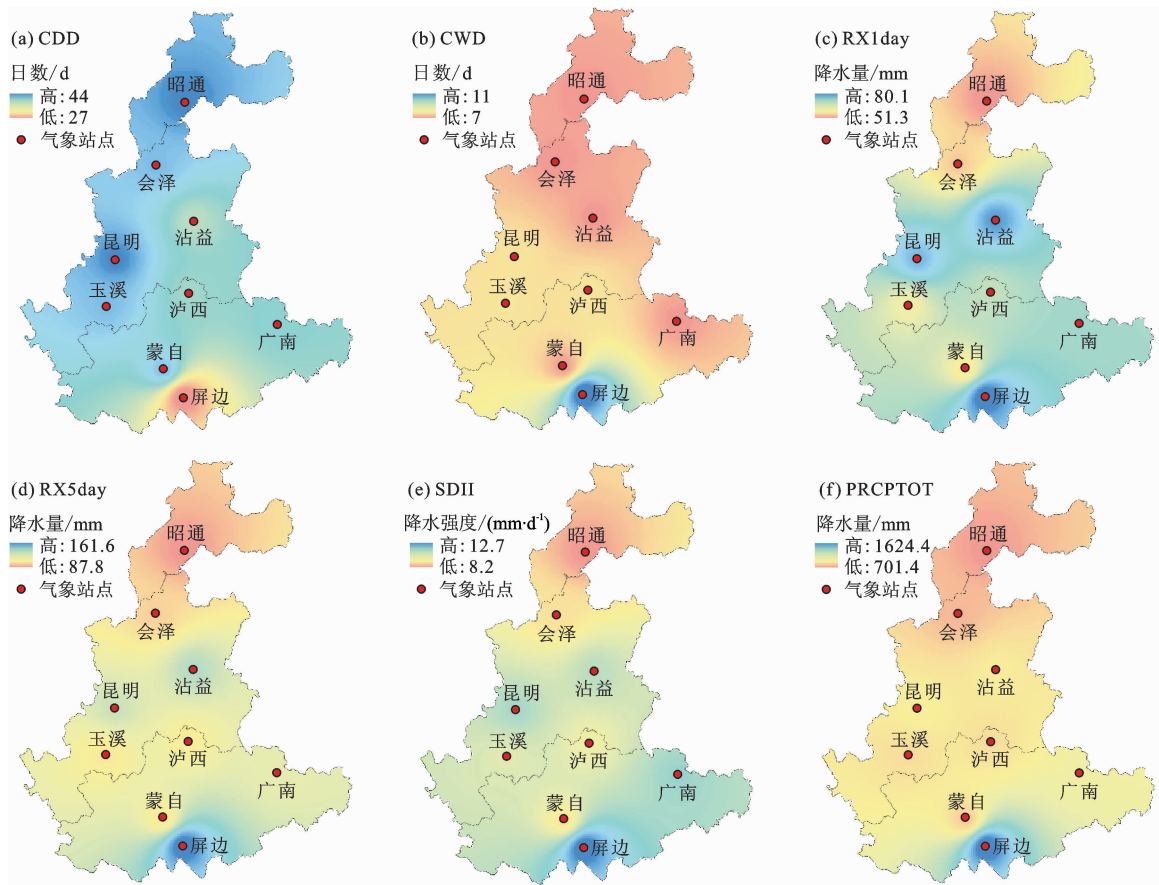


图 5 1960 – 2016 年云南高原岩溶区各极端降水指数空间分布

表 2 1960 – 2017 年云南高原岩溶区极端降水指数相关性分析

指数	PRCPTOT	CDD	CWD	RX1day	RX5day	SDII
PRCPTOT	1					
CDD	0.986**	1				
CWD	0.999**	0.988**	1			
RX1day	0.998**	0.993**	0.999**	1		
RX5day	0.995**	0.998**	0.997**	0.999**	1	
SDII	0.993**	0.999**	0.994**	0.997**	0.999**	1

注: ** 表示 在 0.01 水平(双侧)上显著相关。

究其原因,持续湿润日数 CWD 这个表征干旱状态的指数^[28]与年总降水量 PRCPTOT 关系较为密切,持续湿润日数增加或减少,年总降水量也会随着增加或减少,这与 2009 – 2010 年云南遭遇特大干旱所表现出来的特征^[29]以及本文 CWD 与 PRCPTOT 在 2009 – 2010 年变化趋势一致(图 2)。此外,从指数性质来说,CDD、CWD 为持续性指数,RX1day、SDII 及 RX5day 为强度指数,除与总降水量关系密切外,各指数间也联系紧密。

综上所述,本文所选的极端降水指数能够表征

云南高原岩溶区的降水变化情况。

5 结论与讨论

本研究基于云南高原岩溶区 9 个站点 1960 – 2017 年的逐日连续降水量数据,运用倾向分析、Morlet 连续小波变换、插值分析等方法,从时间和空间两个维度分析了云南高原岩溶区极端降水的变化特征,得到以下主要结论:

(1) 云南高原岩溶区 1960 – 2017 年各极端降水指数中,CDD、RX1day、RX5day、SDII 主要呈小幅

上升趋势,而 PRCPTOT 整体呈减少趋势,CWD 呈显著的下降趋势,减少和下降的速率分别为 14.78 mm/10a、0.32 d/10a。从 5 a 滑动平均值看,除 CWD 经历 3 个平稳期,波动起伏较剧烈外,CDD、RX1day、RX5day 普遍经历“上升-下降-上升-下降-上升-下降”的趋势,SDII 与 PRCPTOT 在 1~6 阶段呈“减少-增加”的趋势循环变化。Mann-Kendall 非参数显著性结果表明,仅 CWD 达到了 0.05 的显著性水平。

(2) Mann-Kendall 方法结合滑动 T 检验的结果显示,1960-2017 年间仅有 CDD 和 PRCPTOT 两个指数发生了显著突变,突变年份分别为 2006 年以及 2000 年。

(3) 云南高原岩溶区 1960-2017 年各极端降水指数周期性振荡较为明显,其中 CDD、CWD 周期分别在 28~30 a、26~30 a 时间尺度上具全时域特征;RX1day 与 RX5day 的周期存在异同点,27~30 a 时间尺度上周期贯穿全时域,15~16 a 时间尺度上 RX5day 存在局部的短周期;SDII 在 27~30 a 时间尺度上周期最为明显;PRCPTOT 在 27~30 a 时间尺度上出现 3 个湿润中心和两个干旱中心,21 a 时间尺度上局部震荡较明显。

(4) 1960-2017 年云南高原岩溶区各极端降水指数空间差异较为明显,除 CDD 表现为由南向北逐渐递增趋势外,其余 5 个指数均表现为由南向北逐渐递减的相反趋势。CDD、CWD、RX1day、RX5day 以及 SDII 均与 PRCPTOT 呈一致的正相关,相关系数均超过 0.98,在 0.01 的显著性水平上为极显著相关。

本文通过对云南高原岩溶区各极端降水指数的趋势、突变、周期以及空间变化特征的研究,表明 1960-2017 年来云南高原岩溶区的极端降水事件整体上呈小幅的增加趋势,具体表现为总量 (PRCPTOT) 减少、频率 (SDII) 增加、强度 (RX1day 与 RX5day) 增大、干旱 (CDD 与 CWD) 日数增多。由此说明干旱、洪涝等灾害性事件仍然是云南高原岩溶区所面临的问题,这与吴兴国^[30]对云南岩溶区的相关研究结论一致。此外,由于降水频率和强度的增加,石漠化地区水土流失的情况会加重,因而在石漠化综合治理时植被的有效恢复仍是重点所在。

本文研究也表明,石漠化区降水极端化是趋势,这与非石漠化区^[15-16,31-32]是否一致、是否具备相同的变化数量级,仍有待加强进一步研究。

参考文献:

- [1] IPCC. Climate Change 2013: The physical science basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [M]. New York: Cambridge University Press, 2013.
- [2] TIAN Qing, YANG Shilun. Regional climatic response to global warming: Trends in temperature and precipitation in the Yellow, Yangtze and Pearl River basins since the 1950s [J]. Quaternary International, 2017, 440: 1-11.
- [3] 程诗悦,秦伟,郭乾坤,等. 近 50 年我国极端降水时空变化特征综述[J]. 中国水土保持科学,2019,17(3): 155-161.
- [4] 任正果,张明军,王圣杰,等. 1961-2011 年中国南方地区极端降水事件变化[J]. 地理学报,2014,69(5): 640-649.
- [5] 孔锋,王铸,刘凡,等. 全球、大洲、区域尺度暴雨时空格局变化(1981-2010 年)[J]. 北京师范大学学报(自然科学版),2016,52(2): 228-234.
- [6] 王少平,姜逢清,吴小波,等. 1961-2010 年西北干旱区极端降水指数的时空变化分析[J]. 冰川冻土,2014,36(2): 318-326.
- [7] 贺振,贺俊平. 1960 年至 2012 年黄河流域极端降水时空变化[J]. 资源科学,2014,36(3): 490-501.
- [8] LI Zhi, ZHENG Fenli, LIU Wenzhao, et al. Spatial distribution and temporal trends of extreme temperature and precipitation events on the Loess Plateau of China during 1961-2007 [J]. Quaternary International, 2010, 226(1-2): 92-100.
- [9] LI Zongxing, HE Yuanqing, WANG Puyu, et al. Changes of daily climate extremes in southwestern China during 1961-2008 [J]. Global and Planetary Change, 2012, 80: 255-272.
- [10] 罗玉,范广洲,周定文,等. 西南地区极端降水变化趋势[J]. 气象科学,2015,35(5): 581-586.
- [11] 袁文德,郑江坤,董奎. 1962-2012 年西南地区极端降水事件的时空变化特征[J]. 资源科学,2014,36(4): 766-772.
- [12] 王凤,寸春发,张绍良. 浅谈云南高原地区岩溶裂隙水的基本特征[J]. 广东科技,2013,22(2): 68-69.
- [13] 李华宏,胡娟,闵颖,等. 云南短时强降水时空分布特征分析[J]. 灾害学,2017,32(3): 57-62.
- [14] 张素凡. 云南日极端降水概率特征研究[D]. 昆明: 云南农业大学,2017.
- [15] 符传博,吴洞,丹利. 近 50 年云南省雨日及降水量的气候变化[J]. 高原气象,2011,30(4): 1027-1033.
- [16] 刘瑜,赵尔旭,黄玮,等. 云南近 46 年降水与气温变化趋势的特征分析[J]. 灾害学,2010,25(1): 39-44 + 63.

- [17] 罗燕,田永丽,戴敏,等. 云南近50年极端气温及降水事件变化特征与区域气候变暖的关系[J]. 云南大学学报(自然科学版),2015,37(6):870-877.
- [18] 姚愚,晏红明. 云南1月降水异常的气候成因分析[J]. 气象,2018,44(12):1583-1592.
- [19] 谷勇,陈芳,李昆,等. 云南岩溶地区石漠化生态治理与植被恢复[N]. 科技导报,2009,27(5):75-80.
- [20] 王宇,彭淑惠,杨双兰. 云南岩溶区As、Cd元素异常特征[J]. 中国岩溶,2012,31(4):377-381.
- [21] 宁晓菊,张丽君,杨群涛,等. 1951年以来中国无霜期的变化趋势[J]. 地理学报,2015,70(11):1811-1822.
- [22] 丁文荣,曾学梅. 云南岩溶区降水变化的气候特征[J]. 水资源与水工程学报,2019,39(1):7-12.
- [23] 郭湘宇,吴正方,杜海波,等. 福建省极端降水时空变化特征及其环流因素分析[J]. 资源科学,2017,39(6):1084-1098.
- [24] 胡建桥,王亮明,刘辉,等. 1961-2016年西宁市极端降水事件变化特征[J]. 水利水电技术,2018,49(8):101-107.
- [25] 魏凤英. 现代气候统计诊断与预测技术[M]. 北京:气象出版社,2007.
- [26] 李玮,段利民,刘廷玺,等. 1961-2015年内蒙古高原内陆河东部流域极端降水时空变化特征分析[J]. 资源科学,2017,39(11):2153-2165.
- [27] 陈学凯,徐建新,胡娟萍,等. 1961-2012年贵州省极端降水时空变化特征[J]. 水资源与水工程学报,2015,26(4):50-56+61.
- [28] 时光训,刘健,马力,等. 1970-2014年长江流域极端降水过程的时空变化研究[J]. 水文,2017,37(4):77-85.
- [29] 郑建萌,张万诚,陈艳,等. 2009-2010年云南特大干旱的气候特征及成因[J]. 气象科学,2015,35(4):488-496.
- [30] 吴兴国. 云南岩溶区的石漠化和综合治理[J]. 绿色科技,2014(11):34-35.
- [31] 程建刚,王学锋,范立张,等. 近50年来云南气候带的变化特征[J]. 地理科学进展,2009,28(1):18-24.
- [32] FAN Hui, HU Jinming, HE Daming. Trends in precipitation over the low latitude highlands of Yunnan, China[J]. Geographical Sciences, 2013, 23(6):1107-1122.

(上接第27页)

- [57] 段诚. 典型库岸植被缓冲带对陆源污染物阻控能力研究[D]. 武汉:华中农业大学,2014.
- [58] 陈淑芬. 多级渠塘-湿地复合生态处理系统削减坡地排水中氮磷负荷研究[D]. 北京:中国地质大学,2014.
- [59] 朱九龙. 南水北调中线工程水源区生态补偿优先系数研究[J]. 水电能源科学,2017,35(7):113-116+100.
- [60] 朱九龙. 南水北调中线水源区生态补偿标准与资金分配方式[J]. 水电能源科学,2017,35(4):157-160.
- [61] 周晨,丁晓辉,李国平,等. 南水北调中线工程水源区生态补偿标准研究——以生态系统服务价值为视角[J]. 资源科学,2015,37(4):792-804.
- [62] 李国平,王奕淇,张文彬. 南水北调中线工程生态补偿标准研究[J]. 资源科学,2015,37(10):1902-1911.
- [63] 李雪松,李婷婷. 南水北调中线工程水源区市场化生态补偿机制研究[J]. 长江流域资源与环境,2014,23(S1):66-72.