

石漠化影响下的局地气候响应研究

曹怡钦, 丁文荣*

云南师范大学地理学部, 云南 昆明

收稿日期: 2022年6月19日; 录用日期: 2022年7月18日; 发布日期: 2022年7月25日

摘要

石漠化是严峻的生态环境问题, 云南省是我国石漠化最为严重的省份之一。本文分别获取云南省石漠化、非石漠化区各5个站点的1970~2017年逐日降水量、年平均和月平均气温资料, 采用变差系数Cv值、Theil-Sen Median趋势分析、Mann-Kendall检验, 通过对比分析法, 探究局地气候对石漠化的响应规律。结果表明: 1) 石漠化区降水Cv值高于非石漠化区, 降水波动性较非石漠化区更明显; 2) 石漠化区RX5和RX1有增加的趋势, 但最长持续降水时间却是减少的, 最长干旱时间趋势仍然增加, 石漠化区降水量与降水时长、干旱程度的变化并不一致, 较非石漠化地区更为反常; 3) 石漠化区RX5、RX1、CDD发生突变的时间以及变化趋势达显著的时间均早于非石漠化区, 且石漠化区变化趋势较非石漠化区显著, 石漠化区和非石漠化区CWD均在70年代开始有突变发生, 石漠化区除耿马站点外均在90年代减少趋势达到显著; 4) 石漠化地区年均温高于相对阈值的年份频数大于非石漠化地区, 极端气温出现的频率较非石漠化区更高, 石漠化区气温的Cv值高于非石漠化区, 气温的年际波动更大, 非石漠化区年均气温总体上呈现先下降后上升的变化趋势, 而石漠化区年均气温变化趋势在上升和下降之间反复变化, 较非石漠化区变化更剧烈。

关键词

石漠化, 气候响应, 降水变化, 气温变化, 云南

Local Climate Response to Rocky Desertification

Yiqin Cao, Wenrong Ding*

Faculty of Geography, Yunnan Normal University, Kunming Yunnan

Received: Jun. 19th, 2022; accepted: Jul. 18th, 2022; published: Jul. 25th, 2022

Abstract

Rocky desertification is a severe ecological and environmental problem, Yunnan province is one of

*通讯作者。

the most serious rocky desertification provinces in China. Daily precipitation, annual and monthly mean temperature data from 1970 to 2017 were obtained from 5 stations in rocky desertification and non-rocky desertification areas in Yunnan Province. Coefficient of variation Cv value, Theil-Sen Median trend analysis and Mann-Kendall test were used. The response of local climate to rocky desertification was studied by comparative analysis. The results show that: 1) The Cv value of precipitation in rocky desertification area is higher than that in non-rocky desertification area, and the precipitation fluctuation is more obvious than that in non-rocky desertification area. 2) RX5 and RX1 showed an increasing trend in the rocky desertification area, but the longest sustained precipitation time decreased, while the trend of the longest drought time still increased. Precipitation in the rocky desertification area was not consistent with the change of precipitation time and drought degree, which was more abnormal than that in the non-rocky desertification area. 3) The rocky desertification area RX5, RX1, CDD mutations of time and change trend of significant time is earlier than the non-rocky desertification area, and the trend of rocky desertification area change significantly from the non-rocky desertification area, rocky desertification area and the rocky desertification area CWD began to have a mutation in the 70 s, and the decreasing trend of rocky desertification area, in addition to the Gengma Station, was significant in the 90 s; 4) The annual average temperature in rocky desertification area is higher than that in non-rocky desertification area, and the frequency of extreme temperature is higher than that in non-rocky desertification area. The Cv value of temperature in rocky desertification area is higher than that in non-rocky desertification area, and the interannual fluctuation of temperature is larger. The annual average temperature in non-rocky desertification area shows a general trend of decreasing first and then increasing. However, the trend of annual average temperature in rocky desertification area changed repeatedly between rising and falling, which was more severe than that in non-rocky desertification area.

Keywords

Rocky Desertification, Climate Response, Precipitation Change, Temperature Change, Yunnan

Copyright © 2022 by author(s) and Hans Publishers Inc.

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

全球气候变化对人类社会有着巨大影响, 一直是众多组织和科研机构的重要研究内容。IPCC 第五次评估报告指出, 在全球气候变暖背景下, 极端事件将在 21 世纪变得更加频繁[1]。气候变化受多种因子的作用和制约, 气候也对环境变化有不同的响应。石漠化是在脆弱地质环境和人类不合理经济活动相互作用下, 造成的地表呈现类似荒漠景观的土地退化过程[2]。石漠化地区有严重的土壤侵蚀现象, 地表露出大面积的基岩, 直接导致土地生产力低下, 严重制约生态建设和经济发展。石漠化不仅带来水土流失加剧、旱涝灾害频发、土壤肥力下降、生物多样性降低甚至丧失等生态问题[3] [4], 还会带来人口贫困以及经济与科技文化落后等一系列社会经济问题[5] [6] [7]。这种生态退化现象阻碍着生态文明建设的推进, 不利于区域的高质量发展。我国西南喀斯特地区地质环境极其脆弱, 石漠化导致的土地退化对农业、林业、畜牧业的生产力造成威胁, 成为西南岩溶地区严重的环境问题之一[8]。石漠化与气候变化两大问题关系到人类的生存与发展, 因此, 研究石漠化影响下的局地气候响应, 能够为改善区域生态环境提供参考。

云南省是我国石漠化最为严重的地区之一, 滇东北、滇中、滇东南、滇西北和滇西是集中分布区, 其中, 滇东南石漠化面积分布最广、石漠化程度严重[9]。有关石漠化和气候变化关系的研究主要集中在石漠化区内的气候特征、石漠化对生态系统自我调节作用和气候变化的影响等方面。有学者通过石漠化

区归一化植被指数 NDVI 的变化, 分析其与气温、降水的关系[10] [11] [12], 有学者从石漠化地区各生境生态因子的差异和特点分析其对石漠化演替进程的影响[13]-[18], 集中于研究石漠化的恢复、治理与环境因子、生态因子之间的作用与关系, 最终都落在石漠化的生态效应上。此外, 多数学者对石漠化与气候关系的研究主要集中在石漠化地区内部[19] [20] [21] [22], 分析石漠化地区降水、气温的年际或季节变化趋势及波动特征。均以发生石漠化的地区为研究区域, 缺少非石漠化地区的气候特征作为比较。鉴于此, 本文选取我国云南省石漠化区和非石漠化区典型站点, 通过对比其降水和气温上的变化差异, 揭示局地气候对石漠化过程的响应规律, 进而为石漠化区植被恢复与社会经济持续发展提供参考。

2. 研究区概况与数据方法

2.1. 研究区概况

依据典型性、数据可得性和连续性, 在云南岩溶区和非岩溶区甄选了 10 个站点(图 1)。其中, 泸西、广南、砚山站点选自中亚热带高原山地石漠化区, 屏边、耿马站点则位于南亚热带中低山河谷盆地石漠化区[23], 耿马位于滇西, 属横断山区南部, 泸西、广南、砚山和屏边位于滇东南, 多峰丛洼地。澜沧、江城、勐腊、思茅、景东位于云南省南部, 属非石漠化区。澜沧、江城、勐腊、思茅均位于北回归线以南, 从热量带划分上处于热带的北部边缘。西南、东南季风带来暖湿气流, 气候温暖湿润, 年温差小。受季风影响, 降水充沛但时空分布不均。在适宜的气温和降水条件下, 植被覆盖率高, 森林资源丰富。

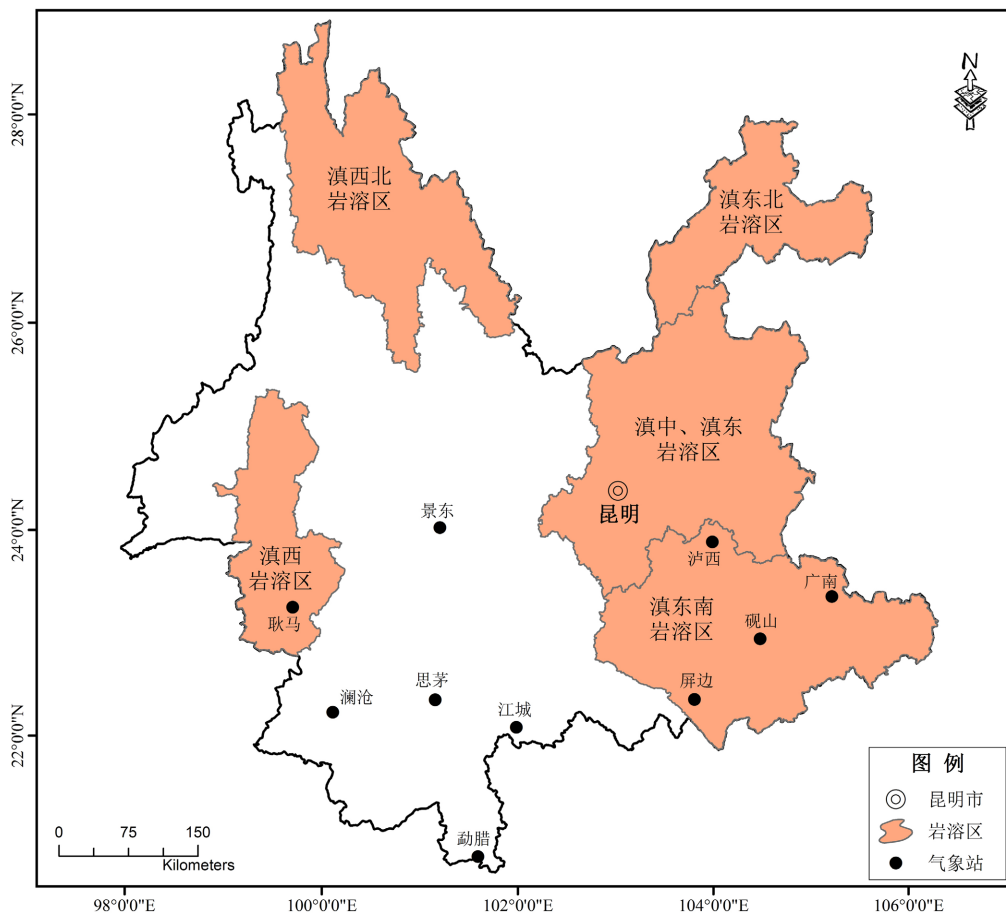


Figure 1. Distribution of stations in rocky desertification and non-rocky desertification area
图 1. 石漠化区和非石漠化区站点分布

表 1 为所选站点地理位置及周边环境情况, 泸西、广南、屏边、砚山、耿马的石漠化比例分别为 22.45%、50.31%、42.33%、37.65% 和 21.35%。

Table 1. Geographical locations and surrounding environment of meteorological stations

表 1. 所选站点地理位置及周边环境

站点 Station	经度 Longitude	纬度 Latitude	海拔 Altitude/m	归一化植被 指数 NDVI	石漠化比例 Ratio of rocky desertification/%
泸西	E 103°46'	N 24°32'	1704.3	0.528	22.45
广南	E 105°04'	N 24°04'	1249.6	0.531	50.31
屏边	E 103°41'	N 22°59'	1414.1	0.739	42.33
砚山	E 104°20'	N 23°36'	1542.2	0.351	37.65
耿马	E 99°24'	N 23°32'	1120.1	0.843	21.35
澜沧	E 99°56'	N 22°34'	1054.8	0.63	//
江城	E 101°51'	N 22°35'	1120.5	0.809	//
勐腊	E 101°34'	N 21°29'	631.9	0.806	//
思茅	E 100°59'	N 22°47'	1202.3	0.585	//
景东	E 100°50'	N 24°27'	2083.5	0.432	//

注: “//” 表示无石漠化发育。

2.2. 数据来源

为客观揭示局地气候对石漠化的响应规律, 依据资料的连续性、准确性及最长时段性等标准, 分别获取符合条件的石漠化区和非石漠化区站点 1970~2017 年的逐日降水量、年平均气温和月平均气温资料进行分析。数据来自国家气象信息中心(<http://data.cma.cn/site/index.html>), 均经过严格的质量控制, 能满足研究的要求。

2.3. 研究方法

气候变化检测和指数联合专家组定义了极端降水指数。为探究石漠化背景下极端降水变化规律, 本文采用其中的 4 个指数(表 2)。降水和气温数据的数理统计基于 Matlab 完成。结合变差系数 Cv 值分析降水指标和月平均气温的离散程度, 通过 Sen 斜率分析降水指标的变化趋势及显著性, 采用 Mann-Kendall 检验法分析降水指标和年平均气温。得到石漠化区与非石漠化区的降水、气温特征及差异, 通过对比分析, 找到局地气候对石漠化的响应规律。

Table 2. Selected extreme precipitation index and their definitions

表 2. 选取的各极端降水指数及其定义

指数名称/单位 Index name/Unit	缩写 Abbreviation	定义 Definition
最长持续干旱时间/d	CDD	日降水量 < 1 mm 的最大持续日数
最长持续降水时间/d	CWD	日降水量 ≥ 1 mm 的最大持续日数
日最大降水量/mm	RX1	每年最大 1 日的降水量
5 日最大降水量/mm	RX5	年内连续 5 日的最大降水量

1) 变差系数

变差系数又称变异系数、离散系数, 用于分析序列总体的离散程度, 可以表示序列的相对变化(波动)程度, 其计算公式如下[24]:

$$Cv = \frac{S}{\bar{x}} = \frac{1}{\bar{x}} \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{t=1}^n (x_t - \bar{x})^2} \quad (1)$$

式中: S 表示标准差, \bar{x} 为平均数, x_t 表示第 t 年的气温或降水数值。Cv 值越高, 序列的波动越大。

2) Theil-Sen Median 趋势分析

Theil-Sen Median 趋势分析又称 Sen 斜率估计, 是一种稳健的非参数统计法。该方法计算效率高, 对于测量误差和离群数据不敏感, 常运用于长时间序列数据的趋势分析[25]。其计算公式如下:

$$\beta = \text{median} \left(\frac{x_j - x_i}{j - i} \right), \quad \forall j > i \quad (2)$$

式中: x_j 和 x_i 为时间序列数据。 $\beta > 0$ 表示降水呈现增加趋势; $\beta < 0$ 表示降水呈现减少趋势。

3) Mann-Kendall(M-K)检验

Mann-Kendall 是一种非参数统计检验法, 由 Mann 和 Kendall 提出并在 20 世纪中叶进一步完善。其优点是不需要测量值服从正态分布, 也不要求趋势是线性的, 并且不受缺失值和异常值的影响[26]。该方法在趋势显著检验中得到了十分广泛的应用, 还能很好地与 Theil-Sen Median 趋势分析结合起来, 判断长时间序列的数据变化趋势[27]。此外, 也能检验时间序列是否发生了突变。其统计检验方法如下:

对于具有 n 个样本量的时间序列 X_1, X_2, \dots, X_n , 构造一秩序列:

$$S_k = \sum_{i=1}^k R_i \quad (k = 2, 3, \dots, n) \quad (3)$$

式中: R_i 表示 X_i 大于 X_j ($1 \leq j < i$) 的累积数。在时间序列随机独立的假设下, 定义统计量:

$$UF_k = \frac{S_k - E(S_k)}{\sqrt{\text{Var}(S_k)}} \quad (k = 1, 2, \dots, n) \quad (4)$$

式中: 当 $k = 1$ 时, $UF_1 = 0$ 。 $E(S_k)$, $\text{Var}(S_k)$ 是累积数 S_k 的均值和方差, 在 X_1, X_2, \dots, X_n 相互独立, 且有相同连续分布时, 它们可由下式算出:

$$E(S_k) = \frac{n(n-1)}{4} \quad (5)$$

$$\text{Var}(S_k) = \frac{n(n-1)(2n+5)}{72} \quad (6)$$

按时间序列 X 逆序 X_n, X_{n-1}, \dots, X_1 , 再重复上述过程, 同时使 $UB_k = -UF_k$, $k = n, n-1, \dots, 1$, 且当 $k = 1$ 时, $UB_1 = 0$ 。

若 $UF > 0$, 则序列呈上升趋势, 反之下降, 当它们超过临界置信水平线时(检验置信水平 $\alpha = 0.05$ 时, 置信水平线为 ± 1.96), 表明变化趋势显著。如果 UF 和 UB 曲线出现交点, 且交点在临界线之间, 那么交点对应的便是突变开始时间。

3. 结果与分析

3.1. 降水的 Cv 值分析

表 3 为降水指数 CWD 和 RX1 的 Cv 值, 从表中可知, 石漠化区泸西、耿马、砚山最长持续降水日

数 CWD 的 Cv 值分别为 0.44、0.38 和 0.44, 而非石漠化区澜沧、景东、思茅则分别为 0.35、0.35 和 0.37。可见, 石漠化区最长持续降水日数的 Cv 值大于非石漠化区, 石漠化区降水波动性较非石漠化区更明显。石漠化区泸西、耿马、砚山最大 1 日降水量 RX1 的 Cv 值在 0.30~0.40 之间, 非石漠化区澜沧、景东、思茅则介于 0.30~0.34 之间。说明石漠化区每年最大 1 日降水量的波动较非石漠化区更大。

Table 3. Cv value of CWD and RX1

表 3. 降水指数 CWD 和 RX1 的 Cv 值

站点 Station	Cv 值 Coefficient of variation	
	CWD	RX1
泸西	0.44	0.40
耿马	0.38	0.30
砚山	0.44	0.34
澜沧	0.35	0.30
景东	0.35	0.34
思茅	0.37	0.32

Table 4. Cv value of RX5 and CDD

表 4. 降水指数 RX5 和 CDD 的 Cv 值

站点 Station	Cv 值 Coefficient of variation	
	RX5	RX1
泸西	0.27	0.34
屏边	0.27	0.34
耿马	0.29	0.41
澜沧	0.24	0.41
江城	0.25	0.44
景东	0.30	0.37

从表 4 中可知, 石漠化区泸西、屏边、耿马连续 5 日最大降水量 RX5 的变差系数分别为 0.27、0.27 和 0.29, 非石漠化区澜沧、江城、景东则分别为 0.24、0.25、0.30。可见, 除景东外, 非石漠化区澜沧、江城 RX5 的变差系数均小于石漠化区, 总体上, 石漠化区 RX5 波动性大于非石漠化区。石漠化区 CDD 变差系数总体上偏低, 在最长持续干旱时间上石漠化区和非石漠化区的 Cv 值对比不明显。

3.2. 降水的 Sen 斜率分析

表 5 为降水指标的 Sen 指数, 从表中可知, 石漠化区广南、屏边、耿马的 RX5 呈增加趋势, 但均未达到 0.05 的置信水平, 而泸西、砚山的 RX5 呈减少趋势, 其中泸西达到显著减少; 除景东外, 非石漠化区 RX5 均呈减少趋势, 其中思茅达到显著减少水平。石漠化区泸西 RX1 的 Sen 指数为-0.59, 减少趋势达到 0.05 的置信水平, 其余站点 RX1 均呈增加趋势; 非石漠化区除景东的 RX1 增加外均呈减少趋势, 但都未达到显著水平。从连续 5 日和最大 1 日降水量看, 泸西均呈减少趋势且都达到 0.05 置信水平, 是石漠化区降水减少最显著的站点。

Table 5. Sen index of precipitation index
表 5. 降水指标的 Sen 指数

站点 Station	Sen 指数 Sen index			
	RX5	RX1	CWD	CDD
泸西	-0.69*	-0.59*	-0.12*	0.14
广南	0.12	0.18	-0.12*	0.14*
屏边	0.37	0.19	-0.22*	0.00
砚山	-0.26	0.07	-0.13*	0.09
耿马	0.42	0.27	-0.21*	0.35*
澜沧	-0.04	-0.04	-0.13	0.32*
江城	-0.60	-0.10	-0.33*	0.41*
勐腊	-0.12	-0.53	-0.06	0.67*
思茅	-1.01*	-0.25	-0.18*	0.47*
景东	0.25	0.48	-0.14*	0.37*

注: *表示达到 0.05 置信水平。

石漠化区和非石漠化区 CWD 均呈减少趋势, 而石漠化区减少趋势均达到了 0.05 的置信水平, 可见石漠化区最长持续降水日数的减少趋势较非石漠化区更显著。石漠化区除屏边的 CDD 无明显增减趋势外均增加, 其中, 广南和耿马 CDD 增加趋势达到 0.05 显著水平。非石漠化区 CDD 也呈上升趋势达到显著水平。

结合以上结果可以发现, 从总体上看, 虽然石漠化区最大 5 日降水量和最大 1 日量有增加的趋势, 但最长持续降水时间却是减少的, 最长干旱时间趋势仍然增加, 可见石漠化区降水量与降水时长、干旱程度的变化并不一致, 较非石漠化地区更为反常; 非石漠化地区的最大 5 日和最大 1 日降水量呈减少趋势, 最长持续降水时间的变化趋势也减少, 最长干旱时间趋势增加, 降水量与降水时长、干旱程度变化一致。

3.3. 降水的 M-K 检验分析

在用 Sen 斜率进行总体趋势分析后, 进一步采用 M-K 检验方法, 结果显示, 非石漠化区最大 5 日降水量 RX5 发生突变的时间集中在 80 和 90 年代。从图 2 可知, 江城 1970~1989 年间 UF 曲线在 0 值附近上下波动, RX5 基本保持稳定, 1989 年发生突变, 此后 UF 曲线位于 0 值以下, 表明 RX5 从 1989 年后一直呈减少趋势, 但未超过置信区间, 减少趋势不显著; 勐腊 1970~1975 年间 RX5 基本保持稳定, 1975~1986 年呈增加趋势, 从 1986 年发生突变后 RX5 减少, 但减少趋势并不显著。石漠化区则从 70 年代开始就有突变发生。其中, 砚山 RX5 在 1973 年发生突变, 由增加趋势转为减少, 并于 1976~1978 年间减少趋势达到显著水平; 泸西 1982 年往后 RX5 由增加趋势转为减少, 在 1985 年发生突变, 2008 年以后 RX5 减少趋势显著。可见, 石漠化区最大 5 日降水量发生突变的时间以及减少趋势达显著的时间均早于非石漠化区, 且石漠化区减少趋势较非石漠化区显著。

非石漠化区最大 1 日降水量 RX1 发生突变的时间集中在 1980 年前后, 石漠化区则集中在 70 和 80 年代。从 Sen 斜率总体趋势分析结果可知, 非石漠化区景东站点和石漠化区泸西站点 RX1 变化趋势不同于各自同区的其他站点, 进一步对它们的 M-K 检验结果进行分析, 结果为图 3, 图中景东 1983 年发生突

变, $RX1$ 由减少趋势转为增加, 1990 年开始达到显著水平, 并在此后多次显著增加; 泸西 1970~1980 年 $RX1$ 呈减少趋势, 之后 UF 曲线在 0 值附近波动, 从 1985 年开始 $RX1$ 一直呈减少趋势, 1988 年发生突变, 并于 2003 年以后减少趋势都保持显著水平。作为石漠化区和非石漠化区 $RX1$ 变化趋势与同区显著区别的站点, 泸西最大 1 日降水量总体呈减少趋势且在 2000 年以后达到显著; 景东则呈增加趋势并于 90 年代开始达到显著。

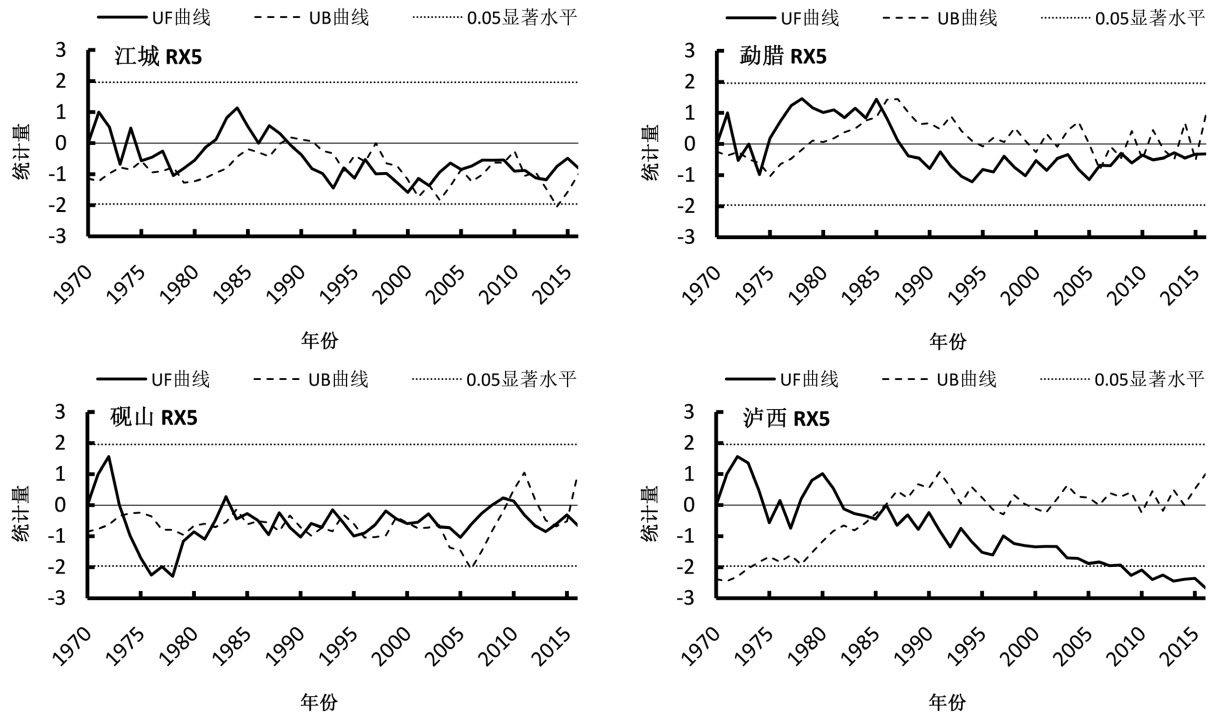


Figure 2. M-K test of $RX5$ in rocky desertification area and non-rocky desertification area
图 2. 石漠化区和非石漠化区 $RX5$ 的 M-K 检验

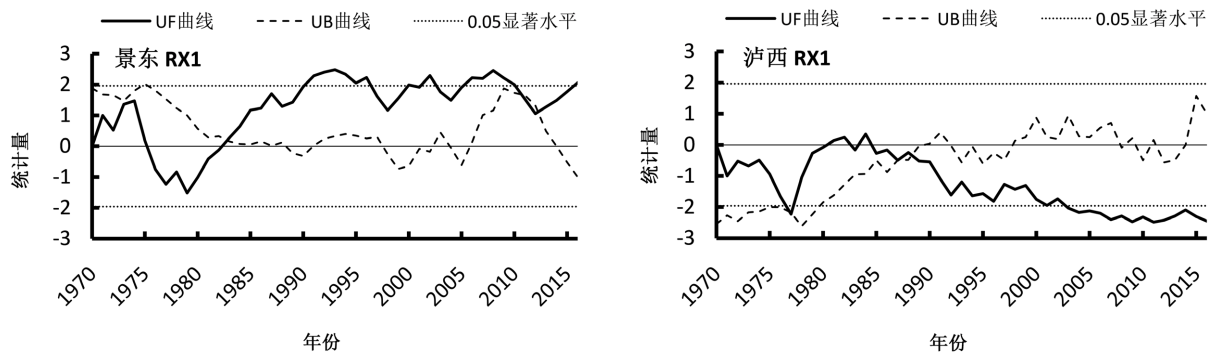


Figure 3. M-K test of $RX1$ in rocky desertification area and non-rocky desertification area
图 3. 石漠化区和非石漠化区 $RX1$ 的 M-K 检验

石漠化区和非石漠化区最长持续降水时间 CWD 均在 70 年代开始有突变发生, 此外, 石漠化区除耿马站点外均在 90 年代减少趋势达到显著。从图 4 可知, 石漠化区泸西 CWD 在 1972 年往后一直呈减少趋势, 1979 年突变, 1990 年往后减少趋势一直保持在显著水平; 非石漠化区勐腊 1970~1980 年间 CWD 先减少后增加, 1977 年发生一次突变, 1980 往后减少, 1991~1996、2003~2011 年间达到显著。可见, 与勐腊相比, 泸西 CWD 显著减少的持续时间更长。

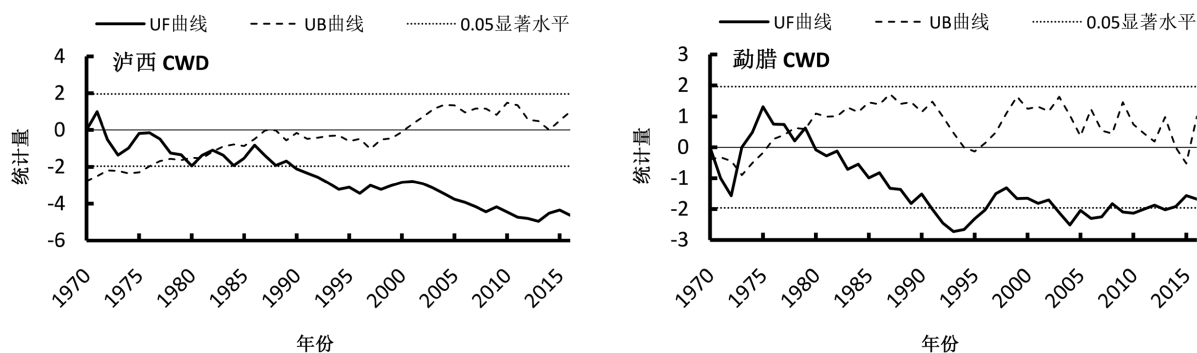


Figure 4. M-K test of CWD in rocky desertification area and non-rocky desertification area

图 4. 石漠化区和非石漠化区 CWD 的 M-K 检验

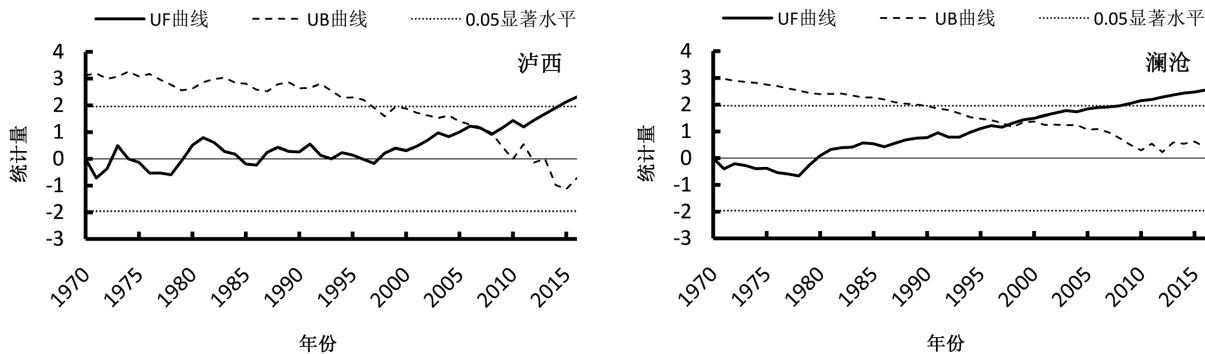
非石漠化区除景东站点外 CDD 均在 1980 年前后发生突变, 澜沧发生突变的时间为 1979 年, 勐腊突变发生时间为 1980 年, 江城和思茅 1981 年发生突变; 石漠化区 CDD 从 70 年代开始至 2000 年以后均有突变发生, 屏边和泸西发生突变的年份分别为 1972 年和 2005 年, 砚山、广南、耿马均在 80 年代发生突变, 时间分别为 1980 年、1983 年、1988 年。此外, 非石漠化区除勐腊外均在 2000 年以后增加趋势达到显著, 而石漠化区从 80 年代开始增加趋势就能够达到显著。可见, 石漠化区 CDD 发生突变的时间较非石漠化区更分散, 增加趋势达到显著的时间也早于非石漠化区。

3.4. 气温变化特征

选用云南省气象站 1970~2017 年石漠化区泸西、广南和非石漠化区澜沧、江城的年平均和月平均气温数据, 筛选出夏、冬两个季节的月均气温数据。通过计算百分位值和 C_v 值, 并采用 Mann-Kendall 检验, 对比分析石漠化地区与非石漠化地区的气温变化特征。

通过计算所选站点年均温的第 95 个百分位值, 发现石漠化地区高于相对阈值的年份频数大于非石漠化地区, 由此可以推测石漠化地区极端气温出现的频率更高。进一步研究显示, 石漠化区气温的 C_v 值均高于非石漠化区, 从季节上看, 所选站点气温的 C_v 值都是冬季高于夏季。其中, 广南的 C_v 值最大, 夏季为 0.02、冬季为 0.12, 说明广南相对于其他站点气温的年际变化较大。由此可推断石漠化地区由于石漠化现象严重, 植被 NDVI 指数较低, 地表裸露导致地表接受太阳辐射的强度较大, 吸热散热变化快, 相比非石漠化地区夏冬两季温差变化较大。

由图 5 泸西和澜沧, 广南和江城的 M-K 检验结果对比分析可知, 石漠化区年均气温变化趋势在上升和下降之间反复变化, 较非石漠化区变化更剧烈。总体上, 非石漠化区年均气温变化趋势为先下降后上升, 1970~1979 年间下降, 1980 年往后上升; 而石漠化区年均气温变化趋势在上升和下降之间反复变化。广南 1970~1986 年间气温升降变化趋势最为反复, 1970~1987 年除 1971、1976~1978, 1985~1986 年外均上升,



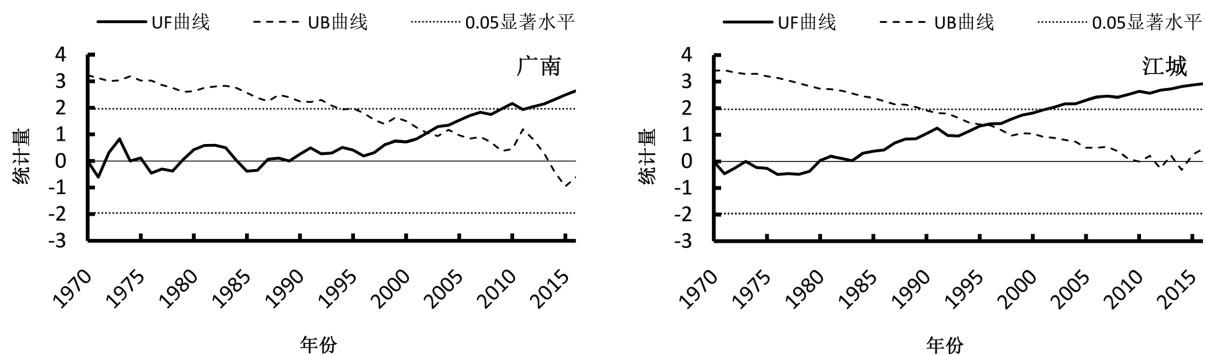


Figure 5. M-K test of annual mean temperature in rocky desertification area and non-rocky desertification area

图 5. 石漠化区和非石漠化区年均气温 M-K 检验

1987 往后一直呈上升趋势。泸西 1970~1979 年除 1973 年上升外均呈下降趋势, 1979~1996 年除 1985 和 1986 年下降外均上升, 1997 年往后一直呈上升趋势。此外, 非石漠化区于 90 年代后期发生突变, 其中, 澜沧和江城发生突变的时间分别为 1998 年和 1996 年; 石漠化区发生突变的时间集中在 2000 年以后, 其中, 泸西的年均气温于 2008 年突变, 广南为 2002 年。

4. 结论

1) 石漠化区 CWD 的 C_v 值(0.38~0.44)大于非石漠化区(0.35~0.37), $RX1$ 的 C_v 值(0.30~0.40)波动较非石漠化区(0.30~0.34)更大, 除景东外, 非石漠化区 $RX5$ 的变差系数(0.24~0.25)小于石漠化区(0.27~0.29)。石漠化区 CDD 变差系数总体上偏低, 在最长持续干旱时间上石漠化区和非石漠化区的 C_v 值对比不明显。而石漠化区降水 C_v 值高于非石漠化区, 降水波动性较非石漠化区更明显。

2) 从总体上看, 虽然石漠化区 $RX5$ 和 $RX1$ 有增加的趋势, 但最长持续降水时间却是减少的, 最长干旱时间趋势仍然增加, 可见石漠化区降水量与降水时长、干旱程度的变化并不一致, 较非石漠化地区更为反常; 非石漠化地区的最大 5 日和最大 1 日降水量呈减少趋势, 最长持续降水时间的变化趋势也减少, 最长干旱时间趋势增加, 降水量与降水时长、干旱程度变化一致。

3) 非石漠化区 $RX5$ 和 $RX1$ 发生突变的时间分别集中在 80~90 年代和 1980 年前后, 石漠化区则从 70 年代开始就有突变发生, 发生突变的时间早于非石漠化区。石漠化区和非石漠化区 CWD 均在 70 年代开始有突变发生。非石漠化区除景东站点外 CDD 均在 1980 年前后发生突变, 石漠化区 CDD 从 70 年代开始至 2000 年以后均有突变发生, 石漠化区 CDD 发生突变的时间较非石漠化区更分散, 增加趋势达到显著的时间也早于非石漠化区。

4) 石漠化区年均温高于相对阈值的年份频数大于非石漠化区, 极端气温出现的频率较非石漠化区更高。石漠化区气温的 C_v 值均高于非石漠化区, 气温的年际波动较非石漠化区更大。从季节上看, 所选站点气温的 C_v 值都是冬季高于夏季。非石漠化区年均气温在 90 年代后期发生突变, 总体上呈现先下降后上升的变化趋势, 而石漠化区于 2000 年以后发生突变, 年均气温变化趋势在上升和下降之间反复变化, 较非石漠化区变化更剧烈。

基金项目

国家自然科学基金项目(41761105)资助。

参考文献

[1] IPCC Working Group I (2013) Working Group I Contribution to the IPCC Fifth Assessment Report. Climate Change

2013: The Physical Science Basis. Summary for Policymakers.

- [2] 王世杰. 喀斯特石漠化概念演绎及其科学内涵的探讨[J]. 中国岩溶, 2002, 21(2): 101-105.
- [3] 王宇, 张贵. 滇东岩溶石山地区石漠化特征及成因[J]. 地球科学进展, 2003, 18(6): 933-938.
- [4] 熊康宁, 李晋, 龙明忠. 典型喀斯特石漠化治理区水土流失特征与关键问题[J]. 地理学报, 2012, 67(7): 878-888.
- [5] 熊康宁, 池永宽. 中国南方喀斯特生态系统面临的问题及对策[J]. 生态经济, 2015, 31(1): 23-30.
- [6] Jiang, Z.C., Lian, Y.Q. and Qin, X.Q. (2014) Rocky Desertification in Southwest China: Impacts, Causes, and Restoration. *Earth-Science Reviews*, **132**, 1-12. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2014.01.005>
- [7] 黄金国, 魏兴琥, 王兮之. 粤北岩溶山区土地石漠化成因及其生态经济治理模式[J]. 水土保持研究, 2013, 20(4): 105-109.
- [8] Wang, S.J., Liu, Q.M. and Zhang, D.F. (2010) Karst Rocky Desertification in Southwestern China: Geomorphology, Landuse, Impact and Rehabilitation. *Land Degradation and Development*, **15**, 115-121. <https://doi.org/10.1002/ldr.592>
- [9] 丁文荣, 何文静, 曾学梅. 云南典型非岩溶区和岩溶石漠化区降水特征[J]. 中国水土保持科学, 2022, 20(1): 33-40.
- [10] 王家录, 李维杰, 王勇, 等. 2005-2014年重庆石漠化地区NDVI的时空变化及其与气候因子相关性分析[J]. 水土保持研究, 2021, 28(2): 217-223.
- [11] Deng, Y.H., Wang, S.J., Bai, X.Y., et al. (2018) Relationship among Land Surface Temperature and LUCC, NDVI in Typical Karst Area. *Scientific Reports*, **8**, 1038-1045. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-19088-x>
- [12] 曹洋, 熊康宁, 董晓超, 等. 关岭-贞丰石漠化治理示范区植被覆盖变化及其对气候因子的响应[J]. 中国岩溶, 2018, 37(6): 850-858.
- [13] 吴良林, 周世武, 郑士科. GIS支持下的土地石漠化与山地气候空间相关性分析[J]. 安徽农业科学, 2012, 40(23): 11787-11790.
- [14] 严小冬, 谷晓平, 王备, 等. 贵州石漠化区域气候效应的数值模拟[J]. 中国农业气象, 2011(S1): 157-160.
- [15] 熊华, 于飞. 喀斯特中度石漠化地区不同生境小气候变化特征[J]. 贵州农业科学, 2013, 41(8): 103-105.
- [16] 崔高仰, 熊康宁. 喀斯特地区不同程度石漠化综合治理的小气候效应[J]. 广东农业科学, 2015, 42(1): 143-150.
- [17] 李生, 薛亮, 王佳, 等. 石漠化地区裸岩表面温度和空气温湿度动态变化[J]. 生态学杂志, 2019, 38(2): 436-442.
- [18] 容丽, 王世杰, 杜雪莲, 等. 喀斯特低热河谷石漠化区环境梯度的小气候效应-以贵州花江峡谷区小流域为例[J]. 生态学杂志, 2006(9): 1038-1043.
- [19] 张斌, 舒成强, 税伟, 等. 云贵高原北坡石漠化地区近50a降水波动分析-以四川省兴文县为例[J]. 长江流域资源与环境, 2009, 18(12): 1156-1161.
- [20] 张勇荣, 周忠发, 马士彬. 近20年贵州喀斯特山区石漠化与气候变化特征分析[J]. 环境科学与技术, 2014, 37(4): 192-197.
- [21] Lian, Y., You, J., Lin, K., et al. (2015) Characteristics of Climate Change in Southwest China Karst Region and Their Potential Environmental Impacts. *Environmental Earth Sciences*, **74**, 937-944. <https://doi.org/10.1007/s12665-014-3847-8>
- [22] Liu, B.J., Chen, C.L., Lian, Y.Q., et al. (2015) Long-Term Change of Wet and Dry Climatic Conditions in the Southwest Karst Area of China. *Global and Planetary Change*, **127**, 1-11. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2015.01.009>
- [23] 刘鹏, 王妍, 刘宗滨, 等. 云南省县域尺度的石漠化分布与区划[J]. 浙江农林大学学报, 2019, 36(5): 965-973.
- [24] Jiang, W.G., Yuan, L.H., Wang, W.J., et al. (2015) Spatio-Temporal Analysis of Vegetation Variation in the Yellow River Basin. *Ecological Indicators*, **51**, 117-126. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2014.07.031>
- [25] 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.
- [26] 魏凤英. 现代气象统计诊断与预测技术[M]. 北京: 气象出版社, 2007.
- [27] 袁丽华, 蒋卫国, 等. 2000-2010年黄河流域植被覆盖的时空变化[J]. 生态学报, 2013, 33(24): 7799-7806.