

湘江流域极端降水变化及其对输沙量影响

康子晗,莫淑红,王晶晶,蒋凯鑫,姜宇博

(西安理工大学旱区水工程生态环境全国重点实验室,西安 710048)

摘要: [目的] 为探究湘江流域极端降水的变化及其对输沙量的影响因素。[方法] 收集湘江流域 1965—2018 年及其周边 13 个气象站的日降水数据,采用 RClimDex 模型进行选取并计算 7 个极端降水指数。通过线性拟合法和 5 a 滑动平均法进行空间分布特征趋势分析,辅助计算各指数 Cv 值、Spearman 相关系数和 Kendall 相关系数。时间特征从指数线性变化与 5 a 滑动平均过程线初步观察,使用 M-K 突变检验法、Lee-Heghinian 检验法和有序聚类法对湘江流域年平均输沙量进行突变检验。双累积曲线定量分析极端降水指数对该时段输沙量变化的贡献率。[结果] 1) 流域各极端降水指标 54 a 年际变化趋势除 CWD(连续有雨日数)外均表现为增加趋势。极端降水事件历时延长,降水量与降水强度显著增加。2) 各降水指数的空间分布情况与地形特点基本一致,均呈流域西南部向东北部逐渐增加趋势,7 个指数均在南岳站出现最大值。3) 流域输沙量在 1984 年和 1997 年发生突变,1985—1997 年,极端降水量指标 R99P(极强降水量)对流域输沙量减少的影响最大,贡献率为 10.5%;1998—2018 年,极端降水量指标 R95P(强降水量)对输沙量的减少有所改变,贡献率为 18.1%,但整个变化期内各极端降水指数对输沙量减少的影响均 < 20%。[结论] 极端降水对流域输沙量的减少产生一定影响,但人类活动仍是导致输沙量减小的主要因素。

关键词: 湘江流域; 极端降水指数; RClimDex 模型; 输沙量; 人类活动

中图分类号: P426.6

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2025)02-0179-12

Variation of Extreme Precipitation and Its Influence on Sediment Transport in Xiangjiang River Basin

KANG Zihan, MO Shuhong, WANG Jingjing, JIANG Kaixin, JIANG Yubo

(State Key Laboratory of Water Engineering Ecology and Environment in Arid Area,
Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

Abstract: [Objective] To explore the variation of extreme precipitation in Xiangjiang River basin and its influencing factors on sediment transport. [Methods] Daily precipitation data from 13 meteorological stations in Xiangjiang River basin and its surrounding areas during 1965—2018 were collected, and seven extreme precipitation indices were selected and calculated using the RClimDex model. The spatial distribution characteristics were analyzed by linear fitting method and five-year moving average method, and the Cv value of each index, Spearman correlation coefficients and Kendall correlation coefficients were calculated. The temporal characteristics were observed from the linear exponential change and the five-year moving average process line. M-K mutation test, Lee-Heghinian test and ordered clustering method were used to test the mutation of the average annual sediment transport in Xiangjiang River basin. The contribution rate of extreme precipitation index to the variation of sediment transport during this period was quantitatively analyzed by double accumulation curve. [Results] 1) The interannual variation trend of extreme precipitation indices in the basin during 54 years showed an increasing trend except for CWD (consecutive wet days). The duration of extreme precipitation events was

收稿日期: 2024-09-11

修回日期: 2024-10-18

录用日期: 2024-10-25

网络首发日期 (www.cnki.net): 2025-02-18

资助项目: 国家自然科学基金项目 (U2040208, 52179024)

第一作者: 康子晗 (2000—), 女, 硕士研究生, 主要从事变化环境下的水文响应研究。E-mail: 13571435612@163.com

通信作者: 莫淑红 (1972—), 女, 博士, 教授, 主要从事水文水资源研究。E-mail: moshuhong@xaut.edu.cn

<http://stbxb.alljournal.com.cn>

prolonged, and the precipitation and precipitation intensity increased significantly. 2) The spatial distribution of each precipitation index was basically consistent with the topographic characteristics, and the trend was gradually increasing from the southwest to the northeast of the basin, and the maximum values of the seven indices were found at Nanyue Station. 3) Abrupt changes occurred in 1984 and 1997. During 1985—1997, the extreme precipitation index R99P (extremely wet days) had the greatest impact on the reduction of sediment transport in the basin, with a contribution rate of 10.5%. During 1998—2018, the same extreme precipitation index R95P (very wet days) had a change in the reduction of sediment transport. The contribution rate was 18.1%, but the influence of extreme precipitation index on sediment transport reduction was less than 20%. [Conclusion] Extreme precipitation has a certain effect on the reduction of sediment transport in the basin, but human activities are still the main factor leading to the reduction of sediment transport.

Keywords: Xiangjiang River basin; extreme precipitation index; RClimDex model; sediment transport; human activity

Received: 2024-09-11

Revised: 2024-10-18

Accepted: 2024-10-25

Online (www.cnki.net): 2025-02-18

在全球气候变暖的背景下,极端降水事件频繁发生^[1],导致严重的水土流失,使流域土壤遭受侵蚀,并随着水文过程形成河流输沙^[2]。目前,已有较多有关极端降水事件对输沙量的影响研究,如周才钰等^[3]研究发现,黄河中游极端降雨对输沙量的影响存在明显的阶段性,二次突变后极端降雨对输沙量的贡献率最大为大雨量,最小为暴雨量;任玉玲^[4]通过研究黄土高原历史时期极端气候和流域水沙的时空变化特征,得出极端降水与流域径流量的相关性强于输沙量,但人类活动仍是近年来流域减水减沙的主要因素。现有研究说明极端降水的时空变化导致泥沙在数量与空间方面发生改变,尽管由于区域位置及研究方法的不同,泥沙对降水变化的响应存在差异,但其对流域的产沙过程均具有至关重要的作用。因此,通过对极端降水指数与输沙量之间关系的分析,为流域的水土保持工作与资源合理开发利用提供科学依据。

流域泥沙演变是由多种自然因素和人为因素耦合作用驱动的^[5],泥沙定量归因识别分析和贡献分离是变化环境下的水文响应过程等领域的研究热点之一^[6]。目前国内外学者针对泥沙定量归因识别分析和贡献分离的研究方法主要有2类:经验统计和模型模拟^[7]。统计方法包括沙量历时曲线、多元统计回归和气候弹性分析等。其中,水沙关系变化及其基础上的特征时段划分是进行贡献分离的前提^[8]。CHENG等^[9]将研究时段划分为基准期和变化期,各期的水沙特征值可进行气候变化和人类活动的影响量化。模型模拟具有多因素影响的分析优势,类型众多。WANG等^[10]采用SWAT模型分析了汾河流域气候变化、土地利用对径流泥沙变化的相对贡献,

表明人类活动是径流泥沙变化的主要驱动因素,其中水坝水库修建是人类活动的主要途径。综上可知,使用科学的评价方法对泥沙进行定量归因分析和贡献分离计算,可为流域水文循环提供科学支持。

湘江是长江的支流,也是洞庭湖水系水土流失最严重的区域,其生态环境和水文特征对区域的可持续发展至关重要。目前对于湘江流域极端降水与输沙量变化的研究较少。隆院男等^[11]探讨水土保持措施和水利工程建设与湘江流域水沙演变的关系表明,流域输沙显著减小主要受人类活动的影响,流域内水土保持措施和水库拦沙对输沙减小贡献率高达90%;冯畅等^[12]研究发现,湘江中上游输沙量减小的主要原因是水土保持工程及河道采砂活动等高强度人类活动。之前的研究多是单一针对研究湘江流域的极端降水事件特征或输沙量变化情况,缺少将二者综合考虑的研究成果;同时,湘江流域在生态、经济等方面均具有不可替代的重要性,而输沙量的变化又直接关系到河流的地貌演变、生态系统稳定及水利设施的安全运行。因此,为进一步认识湘江流域极端降水是否对输沙量的变化规律产生影响,本研究采用RClimDex模型分析湘江流域极端降水指标时空变化特征及对湘江流域输沙量影响,通过建立拟合方程定量计算极端降水对输沙量减少的贡献率,以期为流域水资源开发利用和区域社会经济可持续发展提供参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

湘江流域(24°31'48"~29°01'36"N, 110°30'12"~114°01'48"E)坐落于长江中游南岸,其源头位于广西壮族自治区兴安县。湘江自永州市流入湖南省,由

南向北依次流经永州市、衡阳市、湘潭市、株洲市、长沙市和岳阳市,在岳阳市湘阴县濠河口汇入洞庭湖,而后再汇入长江(图 1)。干流全长 856 km,总流域面积 9.47 万 km²,干流出口控制站湘潭站的集水面积为 8.16 万 km²,占湘江流域总面积的 86.2%。2022 年,湘潭站多年平均输沙量 800 万 t。流域内土壤土质较为疏松,抗蚀能力较弱,容易遭受降雨和流水的侵蚀。

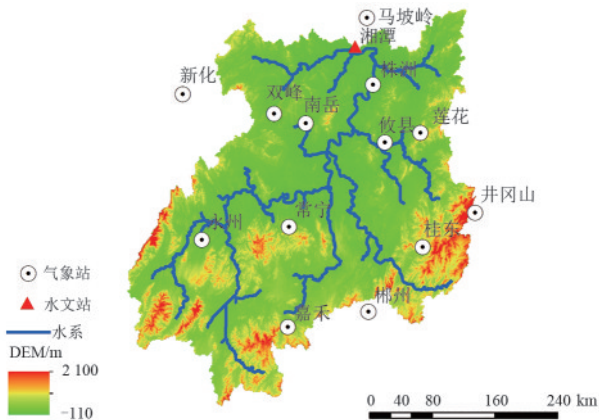


图 1 湘江流域概况

Fig. 1 Overview map of the Xiangjiang River basin

1.2 数据来源

湘江流域及其周边 13 个气象站点的日降水要素

表 1 湘江流域极端降水指标

Table 1 Indices of extreme precipitation in Xiangjiang River basin

降水指标	指标名称	指标定义	单位
CWD	连续有雨日数	最长连续降水日数	d
R20	较强降水日数	日降水量≥20 mm 的日数	d
R95P	强降水量	日降水量大于 1974—2018 年 95% 分位点的平均降水量	mm
R99P	极强降水量	日降水量大于 1974—2018 年 99% 分位点的平均降水量	mm
Rx1day	1 d 最大降水量	1 a 中最大日降水量	mm
Rx5day	5 d 最大降水量	1 a 中连续 5 d 的最大降水量	mm
SDII	降水强度	年内降水总量/降水日数	mm/d

1.4 研究方法

1.4.1 突变检验方法 1)M-K 法广泛应用于时间序列数据分析,能够准确有效地检测数据趋势发生明显变化的时刻,对于研究气候变化、水资源管理、生态环境演变等领域具有重要意义^[15]。通过假定时间序列随机独立,定义统计量 S_k (样本累积数),计算 S_k 的平均值和方差,再将 S_k 标准化^[16]。给定显著性水平 $\alpha=0.05$,绘制统计量序列 UF_k 和 UB_k 曲线图和 ± 1.962 条直线在 1 张图上,若 UF_k 和 UB_k 出现交点,而且交点出现在 2 个置信度直线之间,则此交点对应时间序列为可能突变开始时间。

2) Lee-Heghinian 检验法是 1977 年由 Lee 和 Heghinian 基于贝叶斯理论提出的一种应用于平均值

数据来源于国家气象科学数据中心(<https://data.cma.cn/>)。流域边界和水系数据来源于中国科学院计算机网络信息中心地理空间数据云平台(<https://www.gscloud.cn/>)。文中流域 30 m 分辨率的土地利用数据,来源于中国科学院资源环境科学与数据中心(<https://www.resdc.cn/>)。

1.3 RClimDex 模型与极端降水指标

RClimDex 模型是基于 R 语言的极端气候研究工具^[13],此模型只需输入逐日降水、最高气温等基础信息,便能够计算得出 27 个核心极端气候指数。考虑到极端气候指数的计算对缺测值较为敏感,所以在该模型中假定:若 1 个月内出现 3 d 及以上或者 1 a 内出现 15 d 及以上缺测值时,则不计算该月或该年的极端气候指数,将其设为缺测值^[14]。为阐释流域极端降水的时空演变特点,借助加拿大气象研究中心开发的 RClimDex 模型软件,对气候数据进行质量控制处理并计算极端气候指数。结合湘江流域实际状况共选取 7 个极端降水指标(表 1),其中, CWD 与 R20 为降水历时指标, R95P、R99P、Rx1day、Rx5day 为降水量指标, SDII 为降水强度指标。

发生变异的检验技术。该检验法能够对数据进行较为全面的分析,在考虑总体为正态分布的情况下,对于序列 X_t 和可能的分割点 τ ,假设 τ 的先验分布为均匀分布^[17],推得 τ 的后验条件的概率密度函数,由此确定最可能的变异年份。

3)有序聚类法是采用有序分类的方法来推求最可能的干扰点,其原理是使同类之间离差平方和达到最小,而类别之间离差平方和达到最大。有序聚类法是检验水文序列变异点的常见方法之一,被广泛应用于降雨等水文序列的变异特征分析^[17]。通过设定水文时间序列,其可能分割点为 τ ,分割点 τ 前后 2 个序列的离差平方和,满足上述条件的 τ 为序列最可能的分割点,即水文序列的变异点。

1.4.2 双累积曲线法 双累积曲线可以有效地检测 2 个变量关系中的变化点^[18]。当双累积曲线出现明显的转折或斜率变化时,说明 2 个变量之间的关系发生变化。双累积曲线法可以进行极端降水指数对流域输沙量变化的贡献率分析^[19]。将流域输沙量全部时段分为基准期和变化期,基准期后的累积极端降水指数为分节点分段带入基准期的(累积极端降水指数-累积输沙量)双累积线性拟合回归方程,求得仅受极端降水指数影响的年平均输沙计算值。其中基准期和变化期的输沙量实测值之差即为实际总减沙量,计算值之差为极端降水指数的影响量。极端降水指数影响量与实际总减沙量的比值即为极端降水指数对输沙量变化的影响贡献率。

1.4.3 Brune 拦沙率法 Brune 拦沙率公式主要基于对水库泥沙淤积过程的经验观察和分析,通过考虑水库的面积、运行时间及入库流量等因素来估算拦沙率,最早根据美国 40 余座水库的淤积资料得到,后期在其他国家的水库拦沙计算中发现其依然可以提供较好的拦沙计算结果。对于单个水库拦沙率,计算公式^[20]为:

$$TE=1-\frac{0.05}{\sqrt{\Delta\tau_j}}$$

(1)

$$\Delta\tau_j=\frac{V}{Q}$$

(2)

式中:TE 为水库拦沙率,%; $\Delta\tau_j$ 为水库滞水系数;V 为水库库容,10⁶ m³;Q 为坝址多年平均径流量,10⁶ m³。

2 结果与分析

2.1 湘江流域极端降水指数变化分析

2.1.1 各站极端降水指数统计特征 通过 RCLIMDEX 模型分析获得 13 个气象站 1965—2018 年的极端降水指数(表 2)。由于 R99P 年最小值有 0 出现,极值比不做计算,各指数中年代平均值、极值比和变异系数除个别站点值较大,其他站点差异较小。各站的降水量指标 CWD 与 R20 变异系数相差不大,每站的降水量指标 R95P、R99P、Rx1day 与 Rx5day 变异系数除 R99P 外基本一致,数据特征产生差异可能是收集资料的时间序列差异导致。湘江流域极端降水指数的统计特征基本一致,可使用各站点数据转换后的流域面平均数据进行后续极端降水指数的时空变化特征分析。

表 2 各站极端降水指数统计特征

Table 2 Statistical characteristics of extreme precipitation indices at each station

站点	年代平均值							极值比							变异系数						
	CWD	R95P	Rx1day	SDII	R20	R99P	Rx5day	CWD	R95P	Rx1day	SDII	R20	R99P	Rx5day	CWD	R95P	Rx1day	SDII	R20	R99P	Rx5day
马坡岭	7.5	375.5	102.6	12.7	21.1	122.5	163.4	4.0	10.3	4.9	2.0	3.2	3.7	3.4	2.0	2.6	7.3	4.2	0.9	3.0	
新化	7.7	363.3	92.5	12.3	21.5	114.6	164.3	2.6	15.3	3.8	1.8	4.0	3.7	4.0	2.2	2.9	8.0	4.0	1.1	3.4	
双峰	7.2	344.5	92.1	11.9	20.1	109.3	155.8	2.4	6.0	3.6	1.5	3.2	3.2	4.5	2.2	3.3	8.9	4.3	1.0	4.0	
南岳	9.5	538.4	126.3	13.8	30.1	181.3	197.1	2.3	8.1	4.6	1.8	2.8	4.1	4.4	2.1	2.9	7.8	4.6	1.3	3.2	
攸县	8.2	377.1	98.0	12.2	22.1	122.7	164.2	2.8	17.4	5.6	1.8	3.0	4.3	4.3	2.3	2.5	8.0	3.6	1.0	3.0	
株洲	7.7	361.7	95.9	12.5	21.7	114.3	159.5	2.6	11.7	5.2	1.7	2.6	3.4	3.7	2.4	2.6	8.2	4.5	1.0	3.4	
莲花	8.6	410.8	105.1	12.7	23.8	135.2	186.1	2.6	16.3	4.6	1.7	3.1	4.5	4.2	2.0	2.6	8.4	3.9	1.1	2.8	
永州	7.8	355.5	88.6	12.0	21.6	110.0	147.5	3.3	8.4	4.0	1.7	3.0	4.6	4.0	2.0	2.9	7.1	4.2	1.0	2.8	
常宁	8.4	348.7	82.5	11.4	20.9	105.4	139.7	2.6	10.2	4.7	1.7	2.9	4.2	4.0	2.1	2.7	7.8	4.0	0.9	2.9	
桂东	9.5	395.9	87.1	12.4	26.1	121.2	165.5	3.8	22.4	4.5	1.9	2.9	4.2	3.6	2.0	3.1	7.1	3.9	1.2	2.8	
井冈山	10.5	459.6	93.4	12.3	29.1	143.6	169.8	3.8	10.9	3.2	1.9	3.8	3.6	3.6	2.0	3.4	7.7	3.9	1.1	3.3	
郴州	8.6	378.6	97.2	11.5	21.6	127.6	159.4	2.6	24.8	7.0	2.0	3.6	6.0	4.4	1.8	2.0	6.3	3.4	0.9	2.2	
嘉禾	8.2	338.2	85.5	12.0	21.1	103.5	146.3	2.8	12.8	3.7	1.7	3.3	3.8	3.9	2.2	3.3	8.0	3.8	1.0	3.2	

2.1.2 极端降水指数时间变化特征分析 通过流域 1965—2018 年的 7 个极端降水指数绘制各降水指数多年变化过程图,得到流域整体极端降水变化情况;分别计算各项指数的变异系数(CV)、Spearman 相关系数、Kendall 相关系数检验各极端降水指数在统计年间的显著性变化。由图 2 和表 3 可知,湘江各极端降水指标年际变化趋势呈相似的波动规律,各极端降水指数的变异系数为 0.1~0.5,1965—2018 年各极

端降水指数除 CWD 呈下降趋势,其余 6 个指数均表现为上升趋势,变化程度不一。从降水持续时间来看,CWD 指数的缓慢下降说明流域连续有雨日数呈减少趋势;R20 呈缓慢增加趋势,即全年日降水量超过 20 mm 的天数逐渐增加。从降水量分析,R95P、Rx1day、Rx5day 在统计年呈显著上升趋势,R99P 的变异系数较大,说明流域的极强降水量存在明显年际变化。SDII 指数变异系数最小,线性变化呈显著

增加趋势。各极端降水指数中,R20、R95P、R99P、SDII均在2002年出现最大值,说明流域在2002年出现过持续时间较长的极端降水事件。2002年湖南省暴雨频繁,湘江发生7次较大洪水过程,出现历史上

第3高洪水位,流域的降水表现为雨季持续长量大、暴雨范围广雨强大、降水量年内分配不均。总体来看,流域内的极端降水事件呈持续时间延长的态势,降水量与降水强度也有显著增加。

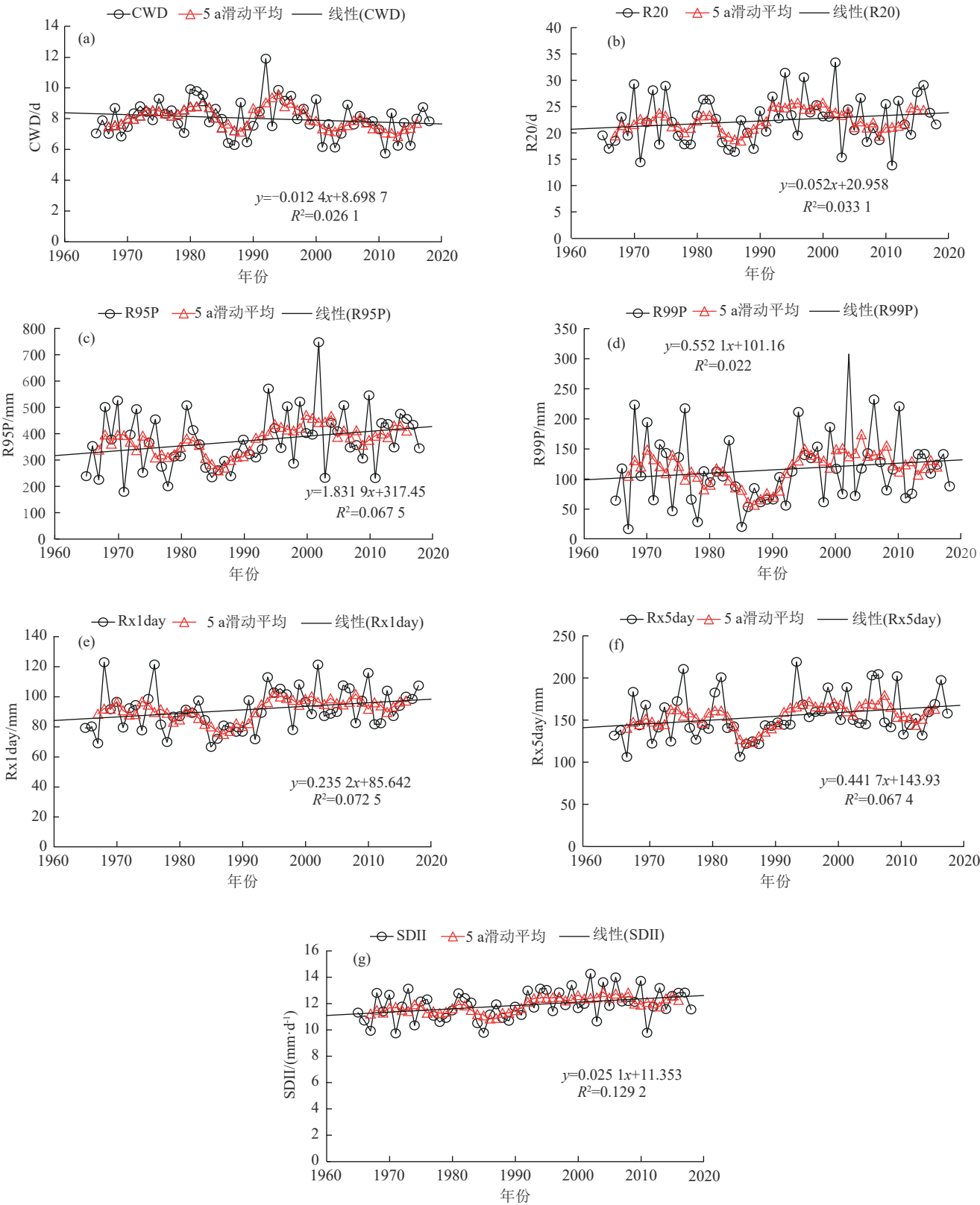


图 2 湘江流域极端降水指数趋势变化

Fig. 2 Trends of extreme precipitation indices in Xiangjiang River basin

<http://stbcbx.alljournal.com.cn>

表 3 各极端降水指数参数统计

指数	Cv	T	U	显著性	趋势
CWD	0.5	1.1	1.1	不显著	↓
R20	0.2	1.6	1.6	不显著	↑
R95P	0.3	1.9	2.0	显著	↑
R99P	0.5	1.3	1.3	不显著	↑
Rx1day	0.2	2.4	2.3	显著	↑
Rx5day	0.2	2.5	2.6	显著	↑
SDII	0.1	2.8	2.7	显著	↑

2.1.3 极端降水指数空间变化特征分析 从图 3 可以看出,流域各极端降水指数的空间分布不均。

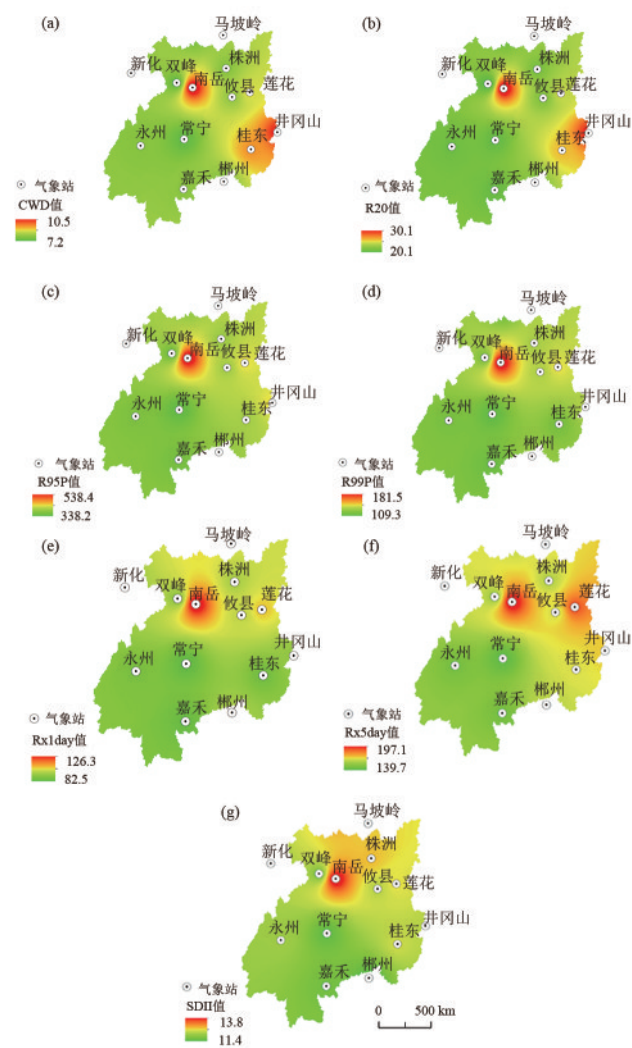


图 3 湘江流域极端降水指数空间分布

Fig. 3 Spatial distribution of extreme precipitation indices in Xiangjiang River basin

CWD 与 R20 的极端降水持续时间从流域东部井冈山站和西北部南岳站开始向西南部减小, R95P、R99P、Rx1day 的降水量均表现为从流域西南部向北部逐渐增加趋势,而 Rx5day 的降水量流域呈西南部最小,东部、西北部与北部较小,中部最大的

特点,SDII 的降水强度在流域中北部最高,东部较高,西南部最低。7 个指数均在南岳站出现最大值,说明南岳站发生的极端降水事件数量最多、强度最大,且持续时间最长,与邹浩^[21]的研究结果一致。主要是由于湘江流域总体呈西南高、东北低的地形特点,地势自西南向东北倾斜,而南岳站高程为 1 265.9 m,该气象站处于副热带高压区的边缘。整体而言,流域极端降水的空间分布情况与地形特点基本一致,均为从流域西南部向东北部逐渐增加的趋势。

2.2 湘江流域输沙量变化特征

2.2.1 输沙量年际变化特征分析 从线性变化来看,流域年平均输沙量呈下降趋势,多年平均输沙量为 829.03 万 t,22 个年份的输沙量高于多年平均输沙量,其余年份低于多年平均输沙量(图 4)。M-K 趋势检验法得出相关检验值为 4.55,通过显著性检验,综合分析输沙量过程线与 5 a 滑动平均过程线,说明流域输沙量在 54 a 整体呈显著下降趋势。

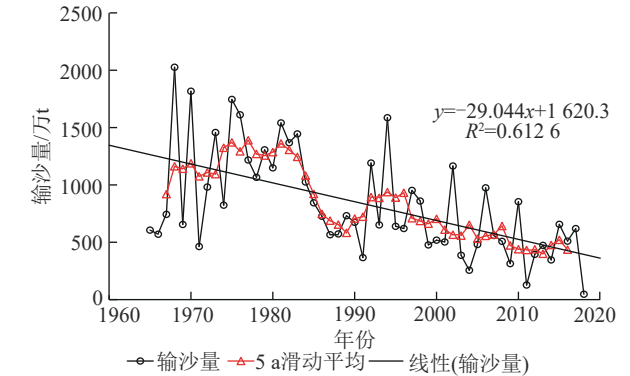


图 4 湘江流域年输沙量趋势变化

Fig. 4 Trend of annual sediment transport of Xiangjiang River basin

2.2.2 输沙量突变特征分析 通过 M-K 突变检验法对湘江流域年平均输沙量进行初步突变检验, UF_k 和 UB_k 曲线在 1997 年产生交点,并且在置信度直线之间,初步判断 1997 年可能是流域输沙量突变时间,突变前后输沙量减少 35%(图 5)。采用 Lee-Heghinian 检验法、有序聚类检验法对流域输沙量进行突变检验,检验值 $|T|$ 均为 5.3, >1.64 ,且均在 1984 年达到极值,即输沙量在 1984 前后平均值发生显著跳跃,突变前后输沙量减少 30%,与隆院男等^[11]的研究结果基本一致,其中突变年份 1998 年与本文有差异可能与数据序列不同有关。据查阅^[11],在输沙量突变年份前后,湖南省在 1983 年共建设 11 个大型水库,库容达到近 40 亿 m^3 。湘江支流耒水的东河水库在 1986 年 8 月开始蓄水,1992 年

全面竣工。上世纪90年代之后,湖南省举办大型水利建设竞赛,掀起水利工程修复、水库除险保安、灌区配套挖潜等水利建设高潮^[12]。综上可知,流域

输沙量的减少与水利工程建设等人类活动密切相关,可将1984年和1997年确定为湘江流域输沙量突变年份。

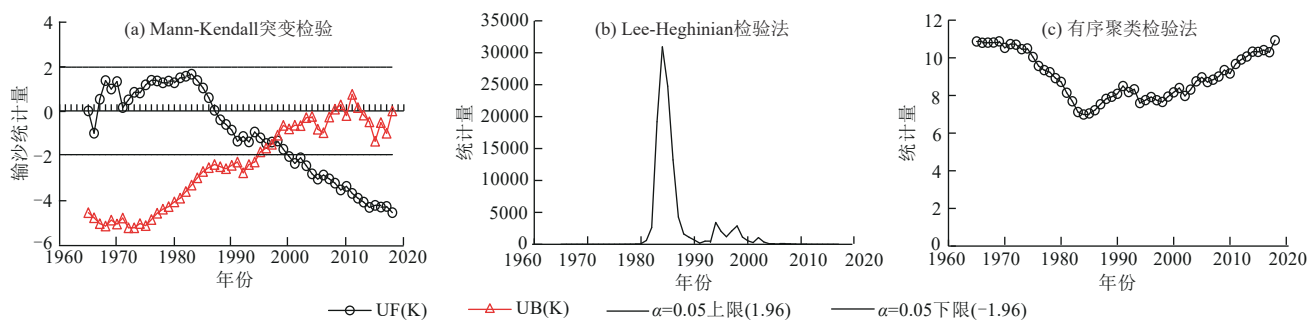


图5 湘江流域年平均输沙量突变检验

Fig. 5 Abrupt change test map of annual sediment transport in Xiangjiang River basin

2.3 极端降水指数对流域输沙量减少的贡献率分析

以初步确定的突变年份将湘江1965—2018年输沙量序列分为3个时间段,分别是基准期1965—1984年、变化期(I)1985—1997年和变化期(II)1998—2018年。建立极端降水指数与流域年输沙量的双累积关系曲线,并进行线性拟合,通过双累积曲线法进行极端降水指数对流域输沙量减少的贡献率分析。

湘江流域1965—2018年各极端降水指数与输沙量的双累积关系曲线在1984年、1997年之后发生较为明显的偏移(图6),说明在变化期人类活动对输沙量减少的影响增加。从表4可以看出,在变化期(I),各降水指数对流域输沙量减少的贡献率为0.7%~10.5%,极强降水量R99P对输沙量减少的贡献率最高,为10.5%,说明在1965—1984年流域降水量相较于降水强度与持续时间2个方面对输沙量减少的影响程度更大。变化期(II)贡献率计算结果说明极端降水对输沙量减少的影响相较于变化期(I)更明显,为1.0%~18.1%,影响最大的极端降水指数变为R95P,贡献率为18.1%。总体来看,湘江流域在2个变化期均为极端降水量对输沙量减少的影响最大,但各极端降水指数对输沙量减少的影响均<20%,人类活动是导致湘江流域输沙量减少的主要因素。

3 讨论

3.1 极端降水对输沙量的影响

根据前文对极端降水指数计算,主要从降水量、降水历时及降水强度3个方面分析流域极端降水现象特征,通过极端降水指标对流域输沙量的影响计算,得出流域极端降水事件在不同年代、代表不同方面的指标对输沙量的影响程度表现不一。短期内大量降水对地表的冲刷侵蚀力极强,能够快

速将大量土壤带走,导致入河泥沙量改变。结合湘江地区地形特点,流域地形起伏较大,植被覆盖相对较少,在极端降水的加强作用下,土壤侵蚀更为严重,极端降水所增加的坡面产流进一步加大对表土的冲刷力度,致使坡面产沙量增多。坡面产流的增加使得坡面的挟沙能力增强,从而提高侵蚀泥沙进入河流的可能性。而坡面产流增加所引发的河川径流增多,再度增强河流的输沙能力^[22]。大量泥沙从上游地区被冲刷下来进入湘江干流,中下游地区地势相对较为平缓,水流速度减慢,河流的输沙能力相对较弱,泥沙容易在中下游地区沉积,导致输沙量减少。湘江流域降水具有季节性^[23],而极端降水事件往往集中在某些特定时期,导致大量的泥沙在极端降水发生的时间段内被输送到河流,而非极端降水时期的输沙量相对较少。综上,极端降水可以改变流域输沙量。

3.2 人类活动对输沙量的影响

3.2.1 土地利用变化 流域内主要土地利用类型有林地、耕地、建设用地和水域等,流域在1980—2018年的土地利用类型见图7。流域面积占比最大的土地利用类型为耕地、林地,建设用地由1 072 km²增大为2 734 km²,增加2.55倍。说明1980—2018年人类活动频繁,城镇化建设增长迅速。土地利用转移矩阵可以直观反映2个不同年代之间土地利用类型的相互转换情况^[24]。2002年起,全流域开始实施退耕还林措施,故将流域土地利用相互转化以2000年为分界点,分为1980—2000年、2000—2018年2个阶段,计算2个阶段的土地利用转移矩阵(表5、表6)。1980—2000年,流域内水域和城乡、工矿、居民用地呈增长趋势,主要来源于耕地、林地、草地3种土地利用类型的转换,土地利用类型转出面积大小依次为耕地>林地>草地。2000—2018年与1980—

2000 年相比,城乡、工矿、居民用地的面积大幅度增加。湘江流域土地利用类型总体没有发生较大变化,仅在数量上发生大幅度变动。林地、耕地及建筑用地始终是该流域主要的土地利用类型,水域位居其后。就输沙量而言,林地能够有效减少并拦蓄径流中的泥沙^[25],使输沙量减小,而耕地存在大量裸露

地表,加之农业耕作等人类活动的影响,导致水土流失严重。根据湖南省水土保持规划^[26]可知,1997 年后,耕地及其他用地的面积呈逐渐减少的趋势,而林地和建筑用地的面积则大幅增加,导致流域输沙量减少。因此,湘江流域输沙量总体上呈减小趋势,与林地的增加导致拦蓄的泥沙增加有关。

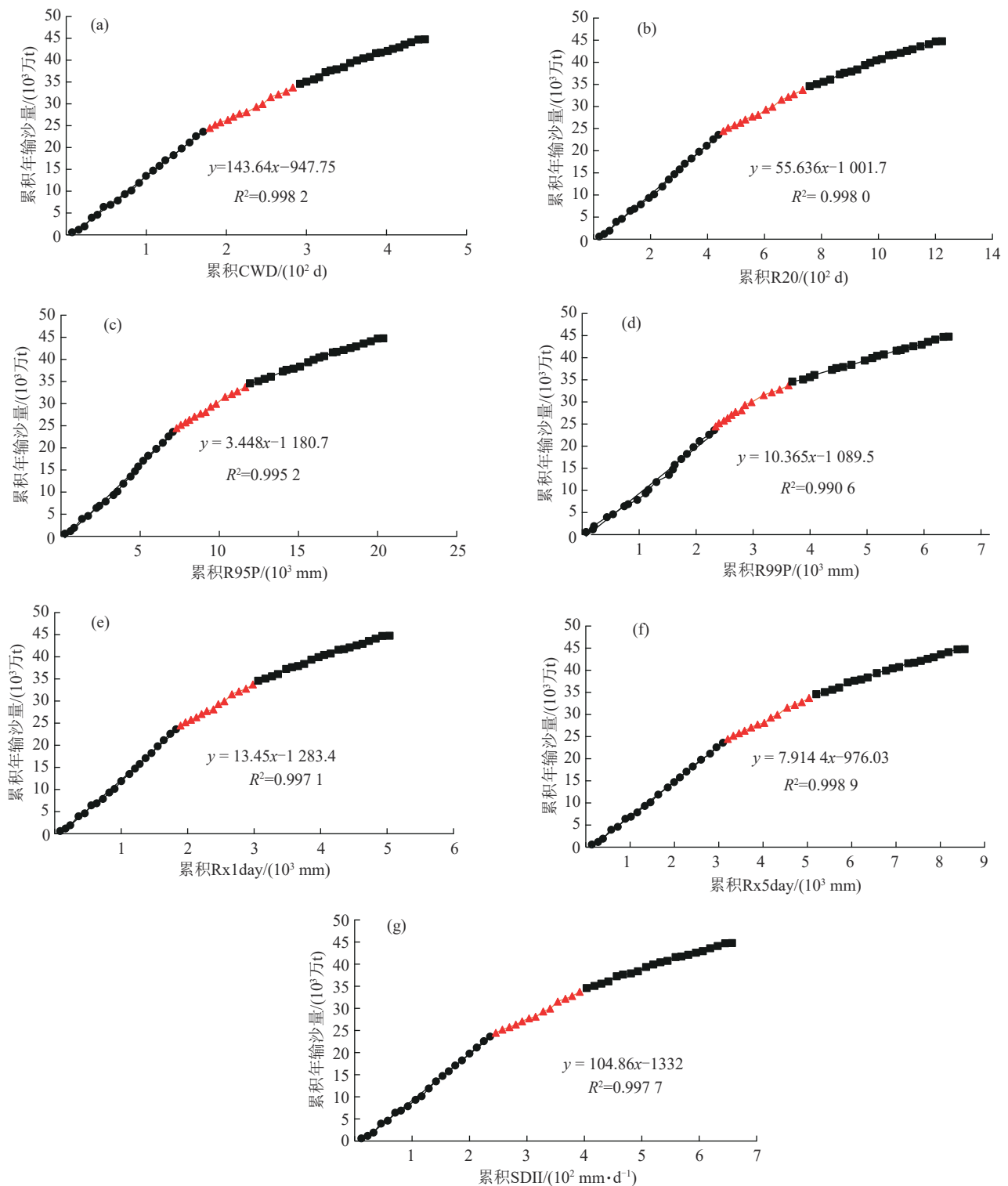


图 6 年输沙量-各极端降水指数双累积曲线

Fig. 6 Double accumulation curve of annual sediment transport and extreme precipitation indices

<http://stbxb.alljournal.com.cn>

表 4 基准期与变化期各极端降水指数对流域输沙量贡献率

Table 4 Contribution rates of extreme precipitation indices to sediment transport in the base period and change period						
极端降水指数	时段	实测平均 输沙量/万 t	计算平均 输沙量/万 t	实测减少 总量/万 t	降水指数 影响量/万 t	降水指数 贡献率/%
CWD	基准期	1 180.9	1 180.8			
	变化期(Ⅰ)	778.6	1 203.3	402.3	22.6	5.6
	变化期(Ⅱ)	525.2	1 174.3	655.7	6.5	1.0
R20	基准期	1 180.9	1 169.5			
	变化期(Ⅰ)	778.6	1 207.3	402.3	37.7	9.4
	变化期(Ⅱ)	525.2	1 241.6	655.7	72.0	11.0
R95P	基准期	1 180.9	1 159.0			
	变化期(Ⅰ)	778.6	1 180.9	402.3	21.9	5.4
	变化期(Ⅱ)	525.2	1 278.0	655.7	119.0	18.1
R99P	基准期	1 180.9	1 147.1			
	变化期(Ⅰ)	778.6	1 104.9	402.3	42.2	10.5
	变化期(Ⅱ)	525.2	1 214.4	655.7	67.2	10.3
Rx1day	基准期	1 180.9	1 163.1			
	变化期(Ⅰ)	778.6	1 176.1	402.3	13.0	3.2
	变化期(Ⅱ)	525.2	1 230.9	655.7	67.9	10.3
Rx5day	基准期	1 180.9	1 175.6			
	变化期(Ⅰ)	778.6	1 178.5	402.3	2.9	0.7
	变化期(Ⅱ)	525.2	1 234.6	655.7	59.1	9.0
SDII	基准期	1 180.9	1 169.2			
	变化期(Ⅰ)	778.6	1 204.7	402.3	35.5	8.8
	变化期(Ⅱ)	525.2	1 251.3	655.7	82.1	12.5

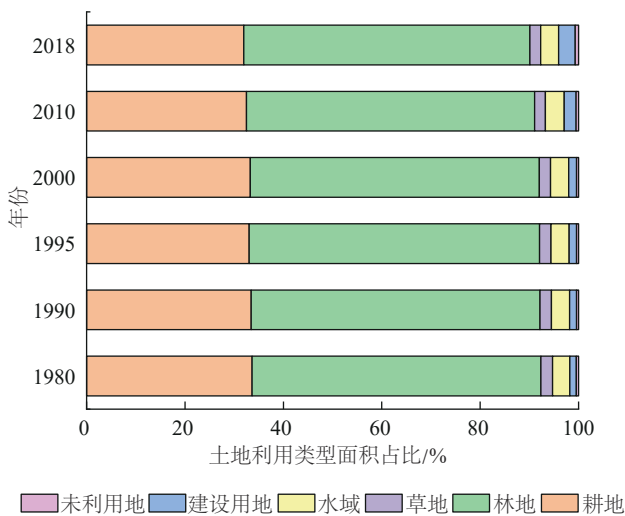


图 7 不同年代土地利用类型面积占比
Fig. 7 Area proportion of land use types in different years

表 5 1980 年和 2000 年的土地利用类型转移矩阵

Table 5 Transfer matrix of land use types in 1980 and 2000							km ²
年份	土地利用类型	2000 年					
		耕地	林地	草地	水域	城乡、工矿、居民用地	未利用土地
1980 年	耕地	26 905.7	86.3	2.2	128.4	156.2	0.8
	林地	36.4	47 502.3	14.6	14.5	46.2	1.1
	草地	0.9	42.2	1 853.0	2.7	0.6	0.3
	水域	37.6	1.2	0.1	2 832.0	2.9	1.2
	城乡、工矿、居民用地	0.3	0.1	0	0.1	1 081.9	0
	未利用土地	0.1	3.6	0	20.2	0.1	330.4

3.2.2 水库建设对湘江流域输沙量的影响 1980—2018年,湘江流域水资源消耗量不断增大,生态工程措施、水利工程建设等活动日益频繁,湘江流域的泥沙发生显著的改变。河流水沙过程通过修建水库进行调节,该过程拦蓄部分径流和泥沙,而泥沙在通过水库时进行堆积造成淤积情况,从而减少进入下游的输沙量。结合湖南省水利统计年鉴^[12],由图 8 可知,随着水库总累计库容的不断增加,对流域输沙量带来显著影响。在 1983—1993 年,水库库容大幅度增加,输沙量曲线斜率明显大于 1993 年,说明水库在蓄水的同时,也拦蓄大量泥沙,减少泥沙入河量。1993—2014 年,水库库容基本没有变化,输沙量曲线也近似于直线,而 2014 年后水库库容减少,输沙量剧减,可能与流域内长期水土保持工程建设、水利设施兴建、河道采砂等人类活动导致的拦沙减沙效应有关。

表 6 2000 年和 2018 年的土地利用类型转移矩阵
Table 6 Transfer matrix of land use types in 2000 and 2018 km²

年份	土地利用类型	2018 年					
		耕地	林地	草地	水域	城乡、工矿、居民用地	未利用土地
2000 年	耕地	24 666.1	1 149.6	22.8	262.0	865.0	15.5
	林地	952.4	45 829.7	89.2	89.4	670.3	4.7
	草地	24.6	130.5	1 653.1	43.1	18.2	0.3
	水域	156.2	60.0	3.0	2 491.3	32.2	255.1
	城乡、工矿、居民用地	91.7	25.6	0.4	15.9	1 154.3	0.0
	未利用土地	2.9	1.5	0.2	32.9	0.4	296.0

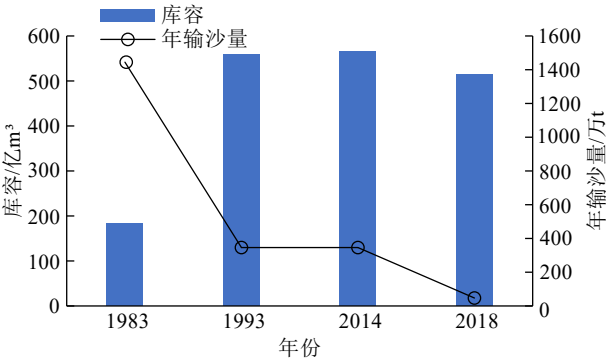


图 8 湖南省水库库容统计

Fig. 8 Statistic of reservoir capacity in Hunan Province

流域水库拦沙等人类活动是长江流域输沙量变异的主要因素,其中水库拦沙作用明显^[27]。对湘江流域研究期内进行蓄水的 7 座大型水库进行拦沙率计算,通过各水库坝址多年平均径流量与总库容计算出水库滞水系数,结合拦沙率公式计算湘江流域各大型水库的拦沙率^[28]。由表 7 可知,各水库拦沙率均在 77% 以上,其中涪天河水库、东江水库、洮水水库和株树桥水库的拦沙率均在 90% 以上,东河水库高达 96.5%,说明水库进行蓄水后,拦沙作用明显,流域输沙量剧变。

表 7 水库拦沙率计算

Table 7 Calculation of sediment retention rate of reservoirs

水电站名称	开始蓄水时间(年-月)	多年平均径流量/亿 m ³	总库容/亿 m ³	水库滞水系数	拦沙率/%
涪天河	1970-08	26.0	15.1	0.6	93.4
双牌	1967-01	97.3	6.9	0.1	81.2
欧阳海	1970-06	20.9	4.2	0.2	88.9
东江	1986-08	45.4	92.7	2.0	96.5
洮水	2011-10	11.0	5.3	0.5	92.8
青山垅	1974	25.1	1.2	0.0	77.1
株树桥	1990-11	5.5	2.8	0.5	93.0

4 结 论

1)研究期内,湘江极端降水指标 CWD 呈减少趋势,其余指标年际变化趋势均表现为增加趋势。流

域极端降水事件特点为持续时间延长,降水量与降水强度显著增加。

2)各降水指数的空间分布较为不均,7 个指数均在南岳站出现最大值,流域极端降水的空间分布情况与地形特点基本一致,均为从流域西南部向东北部逐渐增加的趋势。

3)人类活动是导致湘江流域输沙量减小的主要因素。流域输沙量在 2 个变化期内主要是极端降水量指标对输沙量的减少造成影响,但各极端降水指数对输沙量减少的贡献率均<20%。

参考文献:

[1] 董伯纲,于洋.近 60 年山西省极端降水时空变化特征[J].水土保持学报,2022,36(1):135-141.
DONG B G, YU Y. Tempo-spatial variation characteristics of extreme precipitation in Shanxi Province in recent 60 years [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2022,36(1):135-141.

[2] 尚海鑫,胡春宏,夏军强,等.降雨量和水土保持对皇甫川输沙量变化的贡献率分析[J].水土保持学报,2023,37(2):199-207.
SHANG H X, HU C H, XIA J Q, et al. Contributions of rainfall and soil and water conservation to the variation in sediment discharge of the Huangfuchuan River basin [J].Journal of Soil and Water Conservation,2023,37(2): 199-207.

[3] 周才钰,何毅,穆兴民,等.黄河中游极端降雨对输沙量影响的时序分析[J].人民黄河,2019,41(3):6-10.
ZHOU C Y, HE Y, MU X M, et al. Time series analysis of rainfall extremes change on sediment discharge in the middle Yellow River[J].Yellow River,2019,41(3): 6-10.

[4] 任玉玲.黄土高原极端气候变化及对河流泥沙影响的评估与预测[D].陕西 杨凌:西北农林科技大学,2022.
REN Y L. Evaluation and prediction of extreme climate change in Loess Plateau and its influence on river water and sediment [D].Yangling, Shaanxi: Northwest A&F University,2022.

- [5] ZENG F, MA M G, DI D R, et al. Separating the impacts of climate change and human activities on runoff: A review of method and application [J]. *Water*, 2020, 12(8):e2201.
- [6] SUN P C, WU Y P, WEI X H, et al. Quantifying the contributions of climate variation, land use change, and engineering measures for dramatic reduction in stream-flow and sediment in a typical loess watershed, China [J]. *Ecological Engineering*, 2020, 142:e105611.
- [7] MARUFFI L, STUCCHI L, CASALE F, et al. Soil erosion and sediment transport under climate change for Mera River, in Italian Alps of Valchiavenna [J]. *Science of the Total Environment*, 2022, 806:e150651.
- [8] 武磊. 基于流域对比的水沙时空动态及其归因分析 [D]. 兰州: 兰州大学, 2023.
- WU L. Spatio-temporal dynamics of water and sediment and their attribution analysis based on basin correlation [D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2023.
- [9] CHENG S, YU X X, LI Z W, et al. Using four approaches to separate the effects of climate change and human activities on sediment discharge in karst watersheds [J]. *Catena*, 2022, 212:e106118.
- [10] WANG J F, LI Y W, WANG S, et al. Determining relative contributions of climate change and multiple human activities to runoff and sediment reduction in the eastern Loess Plateau, China [J]. *Catena*, 2023, 232:e107376.
- [11] 隆院男, 唐蓉, 蒋昌波, 等. 近60年湘江流域水沙特性及其对人类活动的响应 [J]. *农业工程学报*, 2018, 34(24): 132-143.
- LONG Y N, TANG R, JIANG C B, et al. Variability characteristics of runoff-sediment discharge and their response to human activities in Xiang River basin in recent 60 years [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2018, 34(24): 132-143.
- [12] 冯畅, 曾佳圆, 杨柳, 等. 湘江流域干流水沙变化特征分析 [J]. *水生态学杂志*, 2023, 44(1): 56-64.
- FENG C, ZENG J Y, YANG L, et al. Variation of annual runoff, sediment discharge and water level in Xiangjiang River [J]. *Journal of Hydroecology*, 2023, 44(1): 56-64.
- [13] ZHANG X B, YANG F. RCLim Dex (1.0) User Manual [M]. Ontario Canada: Climate Research Branch Environment Downswiew, 2004.
- [14] 陈昌春, 张余庆, 王腊春, 等. 基于RCLimDex模型的江西省极端降水时空变化研究 [J]. *中国农村水利水电*, 2013(11): 41-45.
- CHEN C C, ZHANG Y Q, WANG L C, et al. Research on the change of extreme precipitation in Jiangxi Province based on RCLimDex model [J]. *China Rural Water and Hydropower*, 2013(11): 41-45.
- [15] 王晓风. 流域水文气象要素演变特征及径流变化的气候响应 [J]. *水上安全*, 2024(5): 64-66.
- WANG X F. Evolution characteristics of hydrometeorological elements and climate response of runoff change in river basin [J]. *Maritime Safety*, 2024(5): 64-66.
- [16] 黄晓东, 马英, 李雨馨, 等. 1980—2020年青藏高原积雪时空变化特征 [J]. *冰川冻土*, 2023, 45(2): 423-434.
- HUANG X D, MA Y, LI Y X, et al. Spatiotemporal variation characteristics of snow cover over the Tibetan Plateau from 1980 to 2020 [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2023, 45(2): 423-434.
- [17] 郭明, 杨志勇, 周政辉, 等. 非一致性条件下嘉陵江上游水文频率分析 [J]. *华北水利水电大学学报(自然科学版)*, 2018, 39(1): 42-47.
- GUO M, YANG Z Y, ZHOU Z H, et al. Analysis of hydrological frequency in upper reaches of Jialing River under inconsistent environment [J]. *Journal of North China University of Water Resources and Electric Power (Natural Science Edition)*, 2018, 39(1): 42-47.
- [18] 胡彩虹, 王艺璇, 管新建, 等. 基于双累积曲线法的径流变化成因分析 [J]. *水资源研究*, 2012, 1(4): 204-210.
- HU C H, WANG Y X, HUAN X J, et al. Analysis of causes of runoff change based on double accumulation curve method [J]. *Water Resources Research*, 2012, 1(4): 204-210.
- [19] 王晶晶, 莫淑红, 张竞哲. 基于RCLimDex模型的嘉陵江流域极端降水分析及其对输沙量的影响研究 [J]. *长江流域资源与环境*, 2024, 33(12): 2778-2788.
- WANG J J, MO S H, ZHANG J Z. Analysis of extreme precipitation and its impact on sediment transport in Jialing River basin based on RCLimDex model [J]. *Resources and Environment in the Yangtze River Basin*, 2024, 33(12): 2778-2788.
- [20] 段炎冲, 李丹勋, 王兴奎. 长江上游梯级水库群拦沙效果分析 [J]. *四川大学学报(工程科学版)*, 2015, 47(6): 15-23.
- DUAN Y C, LI D X, WANG X K. Analysis of the sediment trapping by reservoirs in the upper Yangtze River [J]. *Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition)*, 2015, 47(6): 15-23.
- [21] 邹浩. 湘江流域径流对气候变化与人类活动的响应 [D]. 长沙: 长沙理工大学, 2018.
- ZOU H. Response of runoff to climate change and human activities in Xiangjiang River basin [D]. Changsha: Changsha University of Science and Technology, 2018.
- [22] 赵利祥, 郭忠录, 聂小飞, 等. 极端降雨事件对南方红壤区径流和输沙的影响: 基于赣江支流濂江上游流域的长序列分析 (1984—2020年) [J]. *湖泊科学*, 2023, 35(6): 2133-2143.

- ZHAO L X, GUO Z L, NIE X F, et al. Effects of extreme rainfall events on runoff and sediment in the southern red soil area: A long series analysis based on the upper Lianjiang River of Ganjiang River (1984—2020) [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2023, 35(6): 2133-2143.
- [23] 龙晓琴, 廖春花, 谭诗琪, 等. 湘江流域面雨量气候特征分析[J]. *水利科技与经济*, 2022, 28(2): 8-12.
- LONG X Q, LIAO C H, TAN S Q, et al. Analysis of the characteristics of the heavy rainfall and inflow on the surface in Xiangjiang River [J]. *Water Conservancy Science and Technology and Economy*, 2022, 28(2): 8-12.
- [24] 朱金凤, 宋克鹏, 张浩. 30年间听水河流域土地利用变化分析[J]. *资源节约与环保*, 2022(2): 14-16.
- ZHU J F, SONG K P, ZHANG H. Analysis of land use change in Xinchui River basin during 30 years [J]. *Resource Conservation and Environmental Protection*, 2022(2): 14-16.
- [25] 孔维健, 周本智, 傅懋毅, 等. 不同土地利用类型水土保持特征研究[J]. *南京林业大学学报(自然科学版)*, 2009, 33(4): 57-61.
- KONG W J, ZHOU B Z, FU M Y, et al. Effects of different land-use on characteristics of soil and water conservation [J]. *Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition)*, 2009, 33(4): 57-61.
- [26] 王睿. 湖南省水土保持规划简介[J]. *中国水土保持*, 2018(2): 73-74.
- WANG R. Soil and water conservation planning in Hunan Province [J]. *Soil and Water Conservation in China*, 2018(2): 73-74.
- [27] 吕超楠, 金中武, 林木松, 等. 岷江流域水库建设对水沙输移的影响[J]. *长江科学院院报*, 2020, 37(8): 9-15.
- LÜ C N, JIN Z W, LIN M S, et al. Impact of reservoir construction on water and sediment transport in Minjiang River basin [J]. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2020, 37(8): 9-15.
- [28] 周小青, 屈星. 考虑多控制断面最小流量需求的湘江流域水库群多目标联合优化调度研究[J]. *小水电*, 2023(4): 18-23.
- ZHOU X Q, QU X. Research on multi-objective joint optimization scheduling of reservoirs in the Xiangjiang river basin considering the minimum flow demand of multiple control sections [J]. *Small Hydro Power*, 2023(4): 18-23.
- (上接第 178 页)
- [33] SARKER S, VEREMYEV A, BOGINSKI V, et al. Critical nodes in river networks [J]. *Scientific Reports*, 2019, 9(1): e11178.
- [34] SIMONE A. Vulnerability assessment of urban drainage network using relevance-based centrality metrics [J]. *River*, 2023, 2(1): 39-51.
- [35] ABBASI A, HOSSAIN L, LEYDESDORFF L. Betweenness centrality as a driver of preferential attachment in the evolution of research collaboration networks [J]. *Journal of Informetrics*, 2012, 6(3): 403-412.
- [36] BUCKLEY M C, CRONE E E. Negative off-site impacts of ecological restoration: Understanding and addressing the conflict [J]. *Conservation Biology*, 2008, 22(5): 1118-1124.
- [37] 胡尊乐, 汪姗, 费国松. 基于分形几何理论的河湖结构连通性评价方法[J]. *水利水电科技进展*, 2016, 36(6): 24-28.
- HU Z L, WANG S, FEI G S. Evaluation method of structural connectivity for rivers and lakes based on theory of fractal geometry [J]. *Advances in Science and Technology of Water Resources*, 2016, 36(6): 24-28.
- [38] 门宝辉, 刘菁苹. 联系数-图论耦合的城市河网水系连通性评价[J]. *水力发电学报*, 2023, 42(1): 65-76.
- MEN B H, LIU J P. Evaluation of urban river network connectivity by coupling connection number and graph theory [J]. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2023, 42(1): 65-76.
- [39] LAN T, ZHANG H, LI Z L. Exploring the evolution of road centrality: A case study of Hong Kong from 1976 to 2018 [J]. *Applied Geography*, 2022, 146: e102767.
- [40] IMBERGER M, HATT B E, BROWN S, et al. Headwater streams in an urbanizing world [J]. *Freshwater Science*, 2023, 42(3): 323-336.
- [41] BURROW A K, LANCE S. Restoration of geographically isolated wetlands: An amphibian-centric review of methods and effectiveness [J]. *Diversity*, 2022, 14(10): e879.
- [42] BUNN S E, ARTHINGTON A H. Basic principles and ecological consequences of altered flow regimes for aquatic biodiversity [J]. *Environmental Management*, 2002, 30(4): 492-507.