

DOI:10.13870/j.cnki.stbxb.2025.02.019

CSTR:32310.14.stbxb.2025.02.019

杨程高歌,王海鹏,田鹏,等.赣江流域输沙时空变化特征及其影响因素分析[J].水土保持学报,2025,39(2):200-208,217.

YANG Chenggaoge, WANG Haipeng, TIAN Peng, et al. Spatiotemporal variation characteristics and attribution analysis of sediment transport in the Ganjiang river basin[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2025, 39(2): 200-208, 217.

赣江流域输沙时空变化特征及其影响因素分析

杨程高歌^{1,2}, 王海鹏², 田鹏², 汤崇军³, 谢梅香², 毕博²,

赵广举², 耿韧², 周璐², 尤俊坚²

(1.流域水土保持江西省重点实验室,南昌 330029; 2.南京水利科学研究院水文水资源与水利工程科学
国家重点实验室,南京 210029; 3.江西省水利科学院,南昌 330029)

摘要: [目的] 探究赣江流域输沙时空变化特征,定量探讨气候变化及人类活动对流域泥沙变化的贡献,为赣江流域的水土流失防治和水沙资源治理提供参考。[方法] 基于赣江流域上、中、下游15个主要水文站1960—2020年输沙监测数据及流域内降雨资料,采用线性趋势法、Mann-Kendall趋势检验和Pettitt突变检验法分析流域输沙时空变化特征,结合双累积曲线法量化驱动因素对河流泥沙变化的贡献。[结果] 1) 赣江流域1960—2020年上、中、下游水文站年输沙量呈极显著减少趋势($|Z| > 2.58$)。外洲站、峡江站和上游4站输沙速率减少依次为21.43万、16.61万、8.12万 t/a,并分别于1994年、1992年、1998年发生年输沙量突变。2) 流域年平均输沙模数在空间分布上表现为南高北低,在时间变化上呈上游先增后减,中游、下游减小趋势。较1960—1987年,2001—2020年上、中、下游平均输沙模数减幅分别为51.32%、104.95%、105.03%。3) 流域输沙时空变化受到地形、水土保持措施等影响,人类活动是赣江流域输沙量减少的主导因素。[结论] 赣江流域侵蚀产沙量已显著减少,但上游仍是未来水土流失治理的重点区域。

关键词: 输沙量; 输沙模数; 驱动因素; 时空变化; 赣江

中图分类号: P333.4

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2025)02-0200-09

Spatiotemporal Variation Characteristics and Attribution Analysis of Sediment Transport in the Ganjiang River Basin

YANG Chenggaoge^{1,2}, WANG Haipeng², TIAN Peng², TANG Chongjun³, XIE Meixiang²,
BI Bo², ZHAO Guangju², GENG Ren², ZHOU Lu², YOU Junjian²

(1. Jiangxi Key Laboratory of Watershed Soil and Water Conservation, Nanchang 330029, China; 2. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China;
3. Jiangxi Academy of Water Science and Engineering, Nanchang 330029, China)

Abstract: [Objective] The aim of this study was to investigate the spatial and temporal variation of sediment transport in the Ganjiang River Basin, and to explore the contribution of climate change and human activities to sediment changes of the basin quantitatively, in order to provide a reference for soil erosion control, water and sediment resource management. [Methods] Data of sediment transport monitoring and precipitation history from 1960 to 2020 at 15 main hydrological observation stations located in upper, middle and lower reaches of the Ganjiang River Basin were collected. The spatial and temporal changes of sediment transport were analyzed by the linear trend method, Mann-Kendall trend test and Pettitt mutation test were used in combination with double mass curve to quantitatively analyze the contribution of the influencing factors. [Results] 1) Annual sediment transport in the upper, middle and lower reaches of the Ganjiang River Basin showed a significant decreasing trend from

收稿日期: 2024-08-28

修回日期: 2024-11-01

录用日期: 2024-11-07

网络首发日期(www.cnki.net): 2025-01-06

资助项目: 国家自然科学基金项目(42477377, U2243211); 安徽省自然科学基金项目(2308085US04); 南京水利科学研究院中央级公益性科研院所基本科研业务费专项(Y923005, Y924003, Re923003); 江西省水利科学院开放研究基金项目(2023SKTR06); 江西省重大专项(2022KSG01010)

第一作者: 杨程高歌(2000—), 女, 硕士研究生, 主要从事土壤侵蚀与水土保持研究。E-mail: cggyang01@163.com

通信作者: 耿韧(1990—), 男, 博士, 高级工程师, 主要从事土壤侵蚀与水土保持研究。E-mail: rgeng@nhri.cn

http://stbxb.alljournal.com.cn

1960 to 2020 ($|Z| > 2.58$). The reduction rate of Waizhou, Xiajiang and four stations of the upper reaches were 2.143×10^5 , 1.661×10^5 and 0.812×10^5 t/a, respectively, and there were mutations in sediment transport in 1994, 1992 and 1998. 2) The multi-year average sediment transport modulus of the sub-basins were high in the south and low in the north, and the temporal variation showed a trend of increasing first and then decreasing in the upper reaches, and decreasing in the middle and lower reaches. Compared with 1960—1987, the average sediment transport modulus in the upper, middle and lower reaches decreased by 51.32%, 104.95% and 105.03%, respectively from 2001 to 2020. 3) The temporal and spatial variation of sediment load in the basin was affected by the topography, soil and water conservation measures, etc. Human activities were the leading factor for the reduction of sediment transport in the Ganjiang River Basin. [Conclusion] The sediment production from erosion in the Ganjiang River Basin has significantly reduced, but the upper reaches are still the key areas for soil erosion control in the future.

Keywords: sediment load; sediment transport modulus; influencing factors; spatial and temporal variation; Ganjiang River Basin

Received: 2024-08-28

Revised: 2024-11-01

Accepted: 2024-11-07

Online(www.cnki.net): 2025-01-06

河流系统是地球上重要且极为活跃的自然系统之一。随着气候变化与人类活动影响的加剧,全球河流水沙通量不断发生不同程度的改变,直接影响河流水沙运移及河流生态系统的物理、化学和生物过程^[1-2]。河流水沙变化由此得到学者们的广泛关注。国际上众多学者^[3-4]已对不同区域、不同气候类型和自然地理条件下诸多流域的水沙变化开展广泛研究。1950s以来,我国对河流水沙治理重视度逐步提升,使得我国河流水沙研究得到完善,并在水沙关系调控^[5-6]、挟沙能力^[7]等方面取得丰硕成果。河流输沙量作为表征流域河道整治、水土流失等的重要指标,研究环境改变下河流输沙变化,揭示河流泥沙的变化规律、剖析其影响因素与贡献程度,对于保护河流生态系统、建设水沙调控体系等均有重要作用^[8-9]。

赣江是鄱阳湖流域的第一大河,由南至北纵贯江西全境。赣江流域输沙变化对鄱阳湖水文特征及生态环境有重要影响,同时也影响到长江下游的水沙变化。多年来,有关赣江流域输沙的研究通常包含年际变化和年内变化。顾朝军等^[10]分析外洲水文站输沙量变化过程表明,1962—2013年外洲站输沙量经历平沙期-丰沙期-平沙期-枯沙期4个阶段;高鹏等^[11]、涂安国等^[12]均对外洲站输沙和径流变化趋势进行研究并认为,造成输沙减少的主要驱动因素是人类活动;张颖等^[13]分析外洲站水沙年内分配变化规律指出,赣江水沙年内分配不均的情况随年份推移趋于均匀;刘星根等^[14]在外洲水文站的基础上,增添上中游的输沙研究,较全面地分析赣江上中下游的水沙年际变化特点。以往对赣江流域输沙变化的研究主要聚焦于流域输沙的年际变化,且以下游外洲站较为丰富,缺乏对流域输沙时间和空间变化

的综合考量。赣江流域上中游属水土流失严峻的赣南区域,其产沙量不仅影响下游输沙状况,也与鄱阳湖的入湖水沙有一定关联,因此流域输沙的时空变化特征有待进一步探讨。

本文以赣江流域输沙时空变化作为切入点,采用线性趋势法、Mann-Kendall趋势检验和Pettitt突变检验法分析流域输沙变化,根据流域DEM数据划分子流域并进行输沙模数空间分析,借助双累积曲线法定量探讨赣江流域输沙与气候变化和人类活动的关系,以补充对赣江流域输沙时空差异研究方面的不足。可为揭示鄱阳湖流域及长江中下游水沙变化规律提供科学依据,对赣江流域的水土流失防治、水沙资源治理开发等有重要的实际意义。

1 研究区概况

赣江流域($24^{\circ}29' \sim 29^{\circ}11'N$, $113^{\circ}30' \sim 116^{\circ}40'E$)位于长江中下游南岸,流域面积81 592 km²,系长江主要支流之一、江西省最大河流(图1)。地处我国南方典型亚热带季风湿润气候区,四季变化分明,4—6月多梅雨,多年平均降水量1 400~1 800 mm。流域内地形特征南高北低,东西两侧高中部低,其南部地貌为花岗岩低山丘陵,中部为吉泰红岩丘陵盆地,北部为赣江下游平原。总体以山地、丘陵为主,兼有部分低丘岗地和少量平原。

赣江流域以峡山、峡江和外洲水文站为分界点,将流域划分为上游、中游和下游区域^[15]。上游主要有平江、桃江、上犹江等支流,分别汇入章水和贡水,是水土流失重点区域;中游、下游主要支流包括孤江、乌江、锦江等,汇入赣江。根据上、中、下游分区,以贡水-峡山站、章江-坝上站、桃江-居龙滩站、平江-翰林桥站(称“上游4站”)为上游分界点,

集水面积 34 194.50 km²;以干流水文站峡江站、外洲站为中游、下游分界点,集水面积分别为 62 651.76、81 591.29 km²。

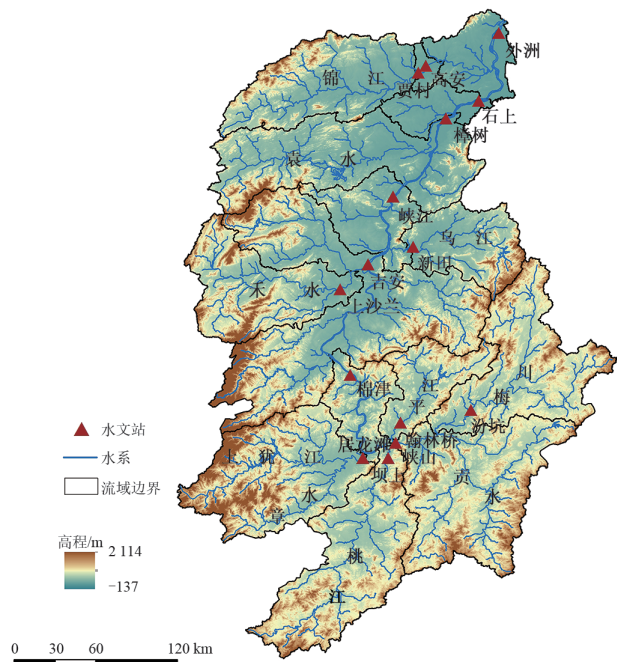


图 1 研究区概况

Fig. 1 Schematic diagram of the study area

2 数据与方法

2.1 数据搜集与整理

本文从《长江流域水文资料》^[16]收集并整理赣江流域 15 个主要水文站年输沙监测数据。包括 1960—2020 年外洲水文站数据,及上游居龙滩、坝上、峡山、翰林桥、汾坑,中游棉津、上沙兰、吉安、新田、峡江,下游樟树、石上、贾村、高安共 14 个水文站 1960—1987 年和 2001—2020 年内的数据。坝上、居龙滩、翰林桥、峡山、吉安 5 站 1988—2000 年数据摘自先前研究^[17]。峡江水文站缺失的年输沙量数据采用“上下游相关法”^[18],根据吉安站 1960—2020 年输沙数据插补完整,插补数据精度可靠(吉安-峡江站输沙相关关系较好, $R^2=0.9849$)。

基于 ASTER GDEM 30 m 分辨率数字高程数据提取流域边界和水系并划分子流域,整理研究区 12 个气象站日降雨资料和流域内 51 个雨量站降雨数据,利用算术平均法计算流域面平均降雨量。输沙资料来源于《长江流域水文资料》^[16],降雨数据来源于国家气象信息中心(<http://data.cma.cn/>)和《长江流域水文资料》^[16],30 m 分辨率的 DEM 数据来源于地理空间数据云(<http://www.gscloud.cn/>)。

2.2 研究方法

2.2.1 Mann-Kendall 趋势检验 非参数 Mann-

Kendall 秩次相关检验法(M-K 检验法)通过构造序列来检验时间数据序列的突变情况^[19]。本研究采用该方法判断赣江流域年输沙量变化是否显著。M-K 检验法对于给定的时间序列 $X(x_1, x_2, \dots, x_n)$,即为 n 个变量随机分布的独立样本,检验的统计度量 S :

$$S = \sum_{i=2}^n \sum_{j=1}^{i-1} \text{sgn}(x_i - x_j) \quad (1)$$

式中: x_i 和 x_j 分别为序列上第 i 年和第 j 年的数据值; $\text{sgn}(x_i - x_j)$ 为符号函数,取值为

$$\text{sgn}(x_i - x_j) = \begin{cases} 1 & x_i - x_j > 0 \\ 0 & x_i - x_j = 0 \\ -1 & x_i - x_j < 0 \end{cases} \quad (2)$$

将 S 标准化得到正态分布变量 Z ,即M-K趋势检验的统计结果:

$$Z = \begin{cases} \frac{S-1}{\sqrt{n(n-1)(2n+5)/18}} & S > 0 \\ 0 & S = 0 \\ \frac{S+1}{\sqrt{n(n-1)(2n+5)/18}} & S < 0 \end{cases} \quad (3)$$

式中:若 $Z > 0$,表明数据序列为增加趋势;若 $Z < 0$,则数据序列为减少趋势;若 $|Z| > 1.64, 1.96, 2.58$ 时,表示数据序列趋势分别通过 90%, 95%, 99% 的显著检验。

2.2.2 Pettitt 突变检验 Pettitt 突变检验是一种非参数检验方法,在水文要素序列发生趋势性变化的基础上,依据序列平均值变化规律判断其发生突变的具体时间,检验结果可能得到多个突变点,需依据实际情况及具体原因确定最佳突变点^[19]。该方法以 Mann-Whitney 统计函数 $U_{i,T}$ 为基础,可得到连续数据序列最显著突变点及可能突变点的显著性,即

$$P(t) = \max |U_{i,T}| \quad (4)$$

$$P(t) = 2 \exp \left(\frac{-6U_{i,T}^2}{T^3 + T^2} \right) \quad (5)$$

式中: $t=2, \dots, T$ 。当 $p \leq 0.05$ 时,认为该点出现显著突变。

2.2.3 输沙模数计算 输沙模数表征流域侵蚀产沙强度,本研究用于量化分析各子流域区间产沙及空间差异。将提取的流域边界和水系根据 15 个主要水文站控制的集水区间分别划分子流域,划分出居龙滩、汾坑、汾坑-峡山、上游 4 站-棉津、吉安-峡江、峡江-樟树等 15 个子流域(图 1)。某一水文站控制的集水区间的来沙量即为该区间的输沙量,由各区间的输沙量和集水面积计算得出相应的输沙模数^[20]。如峡山区间来沙量为峡山-汾坑输沙量,峡江区间来沙量为峡江-吉安-新田输沙量。

2.2.4 双累积曲线 双累积曲线法适用于检验长时

间水文气象序列数据的一致性和准确性,已广泛应用在河流水沙长期演变趋势及突变点分析。所谓双累积曲线是同一时期内一个变量的连续累积值与另一个变量连续累积值的关系图^[21]。其中,年降水量-年输沙量双累积曲线可用于研究人类活动引起河流输沙变化的突变时间和趋势性强度,若累积曲线的斜率在某点出现明显偏离,可说明该点对应的年份发生突变^[22],将突变点前后的年份分别作为基准期、变化期。建立基准期年累积降水量-年累积输沙量的直线回归方程:

$$\sum S = a \sum P + b \quad (6)$$

根据所得直线回归方程拟合出变化期的模拟年累积输沙量,计算得到变化期模拟年输沙量(S'_2)。变化期的实测输沙量(S_2)与基准期实测输沙量(S_1)的差值即输沙变化总量(ΔS),主要由气候变化和人类活动2部分组成。计算人类活动和气候变化对输沙影响的贡献率:

$$\Delta S = S_2 - S_1 \quad (7)$$

$$\eta_H = \frac{S_1 - S'_2}{\Delta S} \quad (8)$$

$$\eta_C = \frac{S'_2 - S_1}{\Delta S} \quad (9)$$

式中: S_1 为基准期实测年输沙量; S_2 为变化期实测年

输沙量; S'_2 为变化期模拟年输沙量; ΔS 为输沙变化总量; η_H 、 η_C 分别为人类活动和气候变化对输沙变化的贡献率。

3 结果与分析

3.1 输沙量时间变化

3.1.1 输沙量年际变化趋势 由输沙量线性变化趋势(图2)可知,赣江流域上游4站(坝上、居龙滩、峡山、翰林桥)、中游峡江站、下游外洲站1960—2020年输沙量均呈显著下降趋势($p < 0.05$)。上游4站和峡江站多年平均输沙量分别为564.65万、688.46万t,年输沙量分别以每年8.12万、16.61万t的速率减少($p < 0.05$);2010—2020年的年平均输沙量分别为321.95万、363.22万t,相比1960—1969年分别减少49.57%、63.66%。外洲站多年平均输沙量为783.10万t,输沙量最大值达1830.0万t(1973年),最小值为99.4万t(2018年);输沙量平均值从1960—1969年的1153.9万t锐减至2010—2020年的224.31万t,减幅达到80.56%。流域年输沙量以21.43万t/a的速率减少,呈显著下降趋势($p < 0.05$)。流域内输沙量的大量减少主要受到80年代初赣江流域水土流失治理的影响,水土保持工程兴建、土壤植被状况改善,使得赣江流域泥沙输送呈减少态势^[23]。

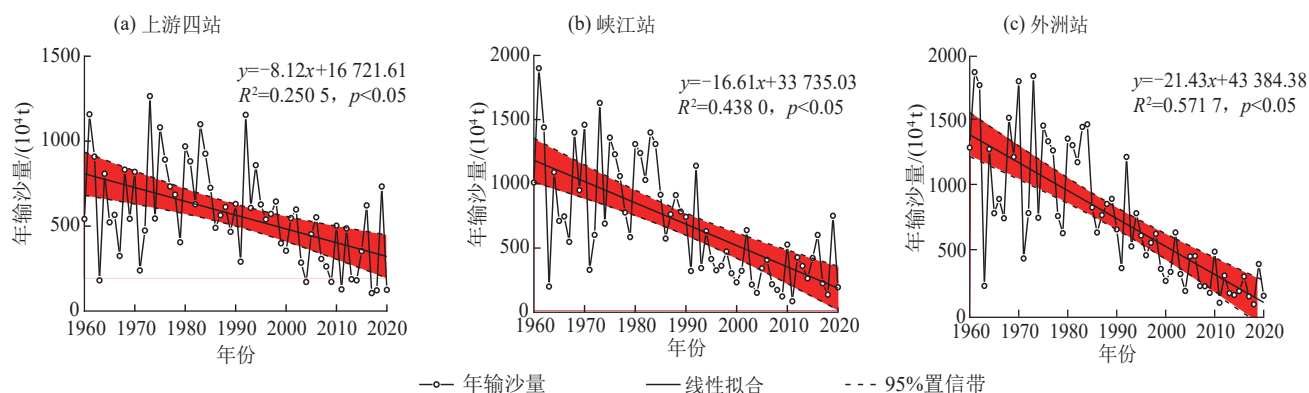


图2 赣江1960—2020年主要水文站年输沙量线性变化趋势分析

Fig. 2 Linear trend analysis of annual sediment load in the Ganjiang River basin from 1960 to 2020

流域内上游4站、中游峡江站、下游外洲站1960—2020年输沙量序列M-K的检验结果(表1)表明,各水文站输沙量呈极显著减少趋势($p < 0.01$),均通过99%的显著检验。其中外洲站输沙量减少趋势最显著($Z = -7.08$),峡江站次之($Z = -5.80$),上游四站减少趋势最缓($Z = -4.67$)。

3.1.2 输沙量突变特征 Pettitt突变检验结果表明,各站年输沙量突变年份存在差异(表2)。赣江流域外洲站输沙量于1994年发生显著性变化($p < 0.01$),上游4站输沙和中游峡江站年分别在1998年和1992

年发生显著性变化。该突变结果与刘星根等^[14]研究计算所得输沙突变年份相近,因输沙数据时间序列的不同而出现较小差异。

对比分析赣江流域各站输沙变化特征发现,外洲站1960—1994年多年平均输沙量为1049.8万t,而1995—2020年降低至318.6万t,减幅为69.65%;峡江站1993—2020年输沙量减少57.27%,上游4站1999—2020年输沙量减少49.48%。赣江流域中、下游年输沙量减幅较大,输沙量减少主要与1990年赣江中游赣江流域库容最大的大(1)型水库一万安水

库下闸蓄水密切相关。与发生突变前相比,各水文站变化期输沙量变异系数均增大,表明发生突变后年输沙量波动更为明显。

表 1 赣江流域 1960—2020 年主要水文站年输沙量 M-K 趋势检验

Table 1 M-K trend test of annual sediment load in the Ganjiang River basin from 1960 to 2020

水文站	集水面积/ (10 ⁴ km ²)	年平均变化率/ (10 ⁴ t)	Z 值
上游四站	3.42	-8.12	-4.67**
峡江站	6.27	-16.61	-5.80**
外洲站	8.16	-21.43	-7.08**

注:*表示序列趋势通过 95% 的显著性检验;**表示序列趋势通过 99% 的显著性检验。

表 2 赣江主要水文站不同时期输沙量变化特征

Table 2 Variation characteristics of sediment load in different periods in the Ganjiang River basin

水文站	年份	年平均输沙量/ (10 ⁴ t)	变化率/%	CV
上游 4 站	1960—1998	687.28	-	0.38
	1999—2020	347.24	49.48	0.55
峡江站	1960—1992	933.99	-	0.45
	1993—2020	399.09	57.27	0.50
外洲站	1960—1994	1049.80	-	0.42
	1995—2020	318.60	69.65	0.53

3.2 输沙模数时空变化

对比分析各区间输沙模数的年代变化与空间分异特征,结果(图 3)表明,赣江流域输沙模数总体呈上游至下游逐步减少的空间分布状况。各集水区间输沙模数随时间变化整体呈减小趋势,部分区域 1960—1987 年略有升高。

就时间变化而言,上游输沙模数先增后减,中游、下游呈减小趋势。赣江上游 1980—1987 年增至最大 229.73 t/km², 2010—2020 年平均输沙模数相比最大值减少 59.0%。相比 1960—1969 年,上游各区间 2010—2020 年平均输沙模数减少程度由大到小依次为居龙滩区间(64.11%)、翰林桥区间(58.92%)、坝上区间(58.02%)、峡山区间(47.34%)和汾坑区间(17.98%)。赣江中游 2010—2020 年平均输沙模数(14.50 t/km²)较 1960—1969 年(126.87 t/km²)减少 88.57%,且 2001—2009 年平均输沙模数为负值。吉安-峡江区间 2010—2020 年平均输沙模数增大,可能由于 20 世纪赣江流域采砂泛滥。据统计^[24],2009 年吉水县墨潭-峡江县巴邱镇流域仅第 2 季度有采砂船 23 艘,且有不断增长之势;采砂引起沉积泥沙再悬浮,提高水体悬浮泥沙

浓度,且采掘坑缘口附近局部水流流速提高,使得水流的挟沙能力加大、被冲走的泥沙量增加^[25-27]。除该区间外,其他区间输沙模数均表现为不同程度的减小,或出现负值。下游峡江-外洲区间 1960—1969 年平均输沙模数 81.52 t/km², 2010—2020 年减少至负值。1960—1969 年樟树-外洲区间输沙模数 608.60 t/km², 1970—1979 年降至负数;下游其他集水区间平均输沙模数出现小幅增加后减小。下游各集水区间输沙模数变化一方面受来沙量的影响,另一方面,得益于 1960s 末至 1980s 赣江上中游陆续建设白云水库、长冈水库、老营盘水库等^[28]拦截泥沙作用。

就空间分布而言,上游中部和东南部输沙强度较高,1960—1987 年各区间输沙模数大小依次为翰林桥区间(389.76 t/km²)、汾坑-峡山区间(259.15 t/km²)、居龙滩区间(169.93 t/km²)、坝上区间(161.94 t/km²)和汾坑区间(155.83 t/km²)。翰林桥区间输沙模数最大(389.76 t/km²),可达汾坑区间的 2.5 倍;2001—2020 年,输沙强度较高区域逐渐由中部、东南部向南部转移。中游输沙强度较高区域由中部逐渐转变为东、西两侧,1960—1987 年中游南侧上游 4 站-棉津区间侵蚀产沙最为严重,平均输沙模数 587.69 t/km²。赣江下游 1960—1969 年输沙强度较高区域主要是北侧、东北侧,1970—1987 年南部峡江-樟树区间输沙强度逐渐增大,2001—2020 年下游输沙强度较高区域主要在北部,且较多区域输沙模数减少为负值。

纵观全域,1960—1987 年间赣江流域上游、中上游输沙模数明显偏高,棉津站以上区域平均输沙模数均>100 t/km²,特别是上游翰林桥区间、上游 4 站-中游棉津区间,年平均输沙模数分别为 389.76、412.65 t/km²。2001—2020 年侵蚀程度有所缓和,上游区域输沙模数下降程度较小,但仍较高于中游及下游区域,上游 4 站-棉津、棉津-吉安区间多年平均值出现负值。可见,1960—2020 年赣江流域上游、中上游侵蚀产沙量虽有下降,但仍可视作赣江流域重要侵蚀产沙区域。

3.3 输沙变化驱动因素分析

为识别赣江流域输沙变化的主要驱动因素,结合水文站年输沙量序列的突变分析结果,采用年降雨量-年输沙量双累积曲线对输沙量变化进行归因分析(图 4)。上游 4 站、峡江站和外洲站累积输沙量与累积降雨量的关系分别于 1998 年、1992 年、1994 年发生突变,依据突变点分别将各水文站研究期分为 2 个阶段。基准期:上游 4 站(1960—1998 年)、峡江站

(1960—1992 年)、外洲站(1960—1994 年);变化期:上游 4 站(1999—2020 年)、峡江站(1993—2020 年)、外洲站(1995—2020 年)。

与基准期相比,变化期上游 4 站、峡江站、外洲站输沙变化总量分别达到 49.48%、64.55%、69.65% (表 3)。变化期内,气候变化导致上游 4 站输沙量增加 0.05×10^6 t,峡江站、外洲站分别增加 0.61×10^6 、 0.68×10^6 t;人类活动引起的上游 4 站、峡江站、外洲站输沙量分别减少 3.45×10^6 、 6.09×10^6 、 7.99×10^6 t。人类活动的减沙贡献率最大为峡江站(109.65%),其次为外洲站(109.33%)、上游 4 站(101.50%),说明赣江流域输沙量的减少主要由人类活动导致,且流域上游、中游的输沙减少受人类活动的影响程度最明显。

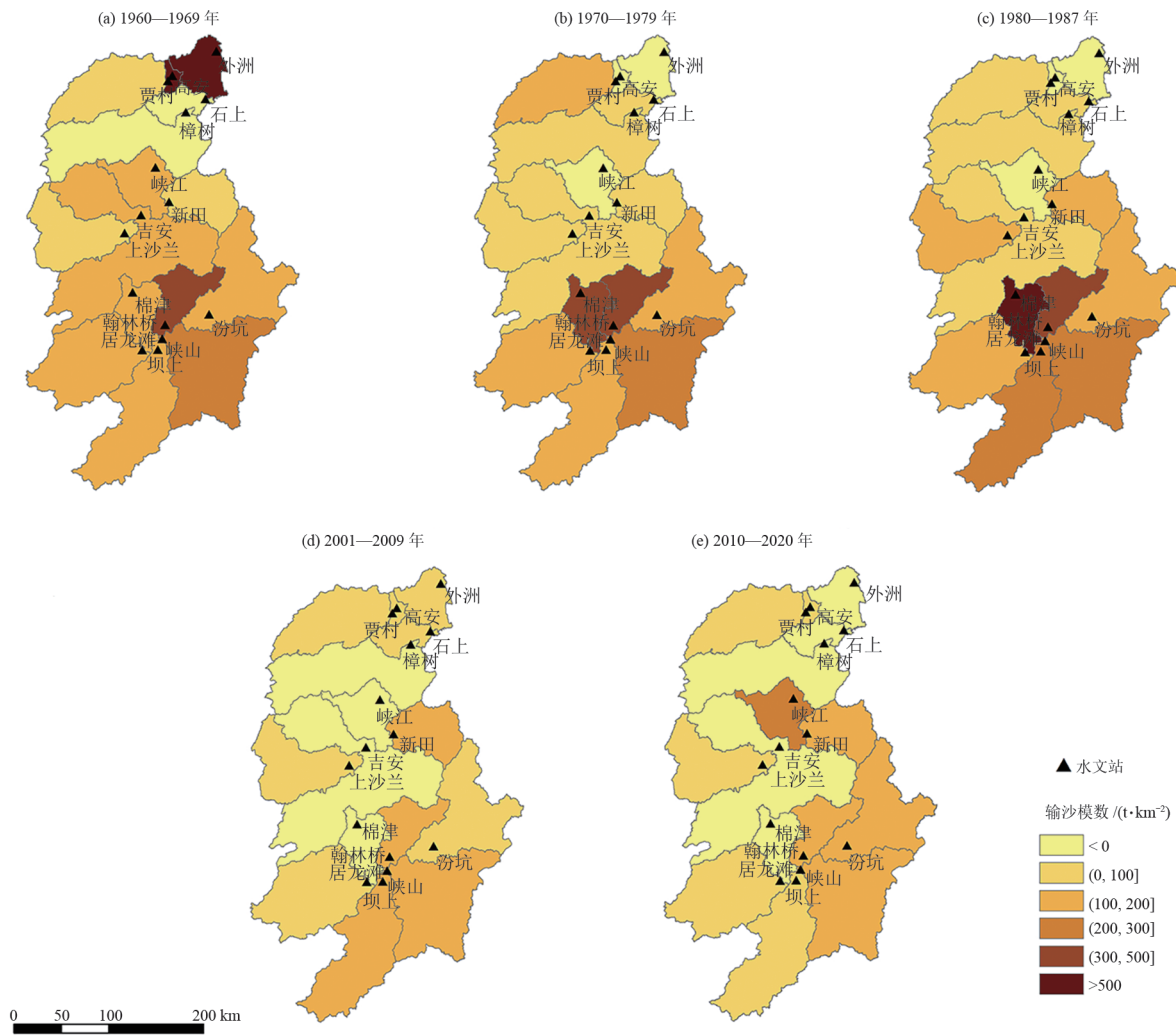


图 3 赣江流域不同时段输沙模数空间分布

Fig. 3 Spatial distribution of sediment transport modulus in different periods in the Ganjiang River basin

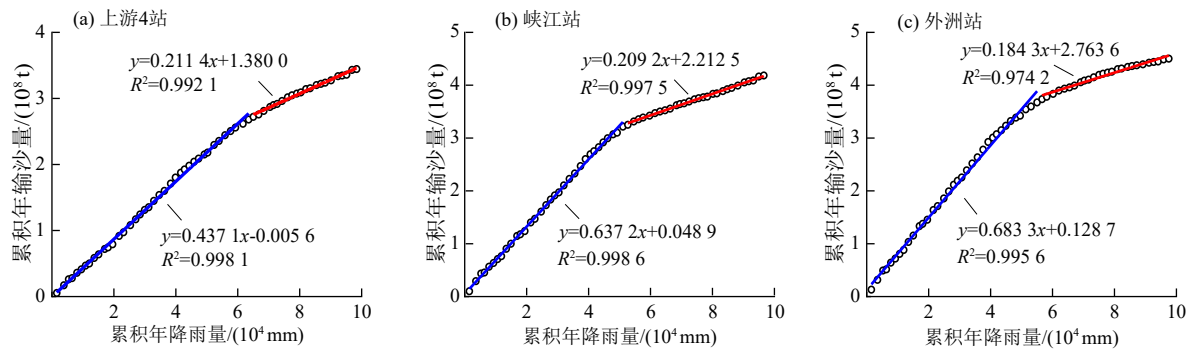


图 4 赣江流域 1960—2020 年主要水文站年降雨量-年输沙量双累积曲线

Fig. 4 Double mass curves of annual precipitation and sediment load in the Ganjiang River basin from 1960 to 2020

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

表 3 降水量和人类活动对流域输沙量减少的贡献率

Tab.3 Contribution rates of precipitation and human activities on sediment load reduction

水文站	年份	输沙量		输沙变化		气候变化		人类活动	
		实测值/ (10 ⁶ t)	计算值/ (10 ⁶ t)	变化量/ (10 ⁶ t)	占比/%	变化量/ (10 ⁶ t)	占比/%	变化量/ (10 ⁶ t)	占比/%
上游 4 站	1960—1998	6.87	7.13	-	-	-	-	-	-
	1999—2020	3.47	6.92	3.40	49.48	-0.05	-1.50	3.45	101.50
峡江站	1960—1992	9.75	10.01	-	-	-	-	-	-
	1993—2020	3.45	10.35	6.29	64.55	-0.61	-9.65	6.90	109.65
外洲站	1960—1994	10.50	11.11	-	-	-	-	-	-
	1995—2020	3.19	11.18	7.31	69.65	-0.68	-9.33	7.99	109.33

4 讨论

赣江流域输沙时空变化与自然因素、人类活动密切相关,其年输沙量受人类活动影响呈显著减少趋势,与以往研究^[11]结果相似。人类活动削弱流域产沙能力,在泥沙减少的过程中起主导作用,主要得益于水利枢纽工程建设、水土保持工程措施的有效实施。水利枢纽工程拦蓄水流,流速被迫减小,使水流挟沙能力减弱,起到拦截泥沙的作用。据统计^[28],截至 2018 年底赣江流域已修建完成大中型水库共 132 座。大型水库建设与流域输沙量有强相关性。在 20 世纪 80 年代,大型水库油罗口水库、万安水库竣工,极大减少赣江中游下游泥沙量。其中万安水库是赣江流域内库容最大的大(1)型水库,竣工后多年平均入库泥沙量 742 万 t/a,多年平均泥沙淤积 400 万 t/a^[29],明显控制中游和下游的泥沙量,使输沙模数呈负值。

20 世纪 80 年代,赣江作为水土流失重点地区纳入全国 8 片水土保持重点治理工程、全国水土保持重点建设工程等国家级水保重点治理项目,累计完成 420 余条小流域综合治理,治理区域的拦沙效率达 60% 以上^[10]。20 世纪初期,国家水土保持重点建设工程、国债水土保持项目大力推进。赣南 15 个县市 42 个小流域被纳入鄱阳湖重点治理工程,直接促使上游项目区内水土流失面积减少 28.97%;同时在生态修复试点工程建设下,植被覆盖度大幅提高,以安远县项目区为例,其植被覆盖率年平均提高 15%^[30]。赣江尤其是上游区域,由于特殊的地质条件极易发生崩岗侵蚀,采取水平梯田整地和梯田田坎、田埂植草护坡等措施,既防治流域水土流失又可提高经济收入。流域内植树造林、退耕还林等措施大幅提升流域森林覆盖率,直接弱化坡面产流产沙能力^[31]。流域产沙能力削弱,使得 90 年代上游 4 站、中游峡江站、下游外洲站年输沙量发生突变。较 1960—1987 年,2001—2020 年中、下游年均输沙模数减幅(104.95%、105.03%)明显高于上游(51.32%)。可见,水库修建、梯田整地等

水土保持工程措施对中、下游减沙成效显著,上游仍是未来水土流失治理的重点区域。

赣江流域地形多样,包括西部和南部的山地、中部的丘陵及东北部的低山和丘陵地带,是引起侵蚀产沙空间差异的主要因素。本研究发现,赣江流域输沙模数整体呈南高北低的分布格局。上游集水面积(34 194.50 km²)占外洲站集水面积的 41.9%,而多年平均输沙量占比却达到 76.5%,是重点侵蚀区域,与刘星根等^[14]研究结果相同。其主要受地形地貌的影响,赣江上游山脉环绕,河流由于地势存在落差,易使流速增大,进而加大侵蚀产沙量,同时受地形影响上游水系呈树状向心形分布(图 1),促使河流挟沙汇聚,也造成上游区域、上游 4 站-中游棉津区间侵蚀产沙较为严重的现象。赣江上游位于赣南地区,是中国“两屏三带”生态安全战略格局的组成区域。上游中部和东南部侵蚀产沙程度较高,可能是由于上游“外围高、中间低”的海拔特点。上游西部高海拔区域集中,高海拔地区受人类活动影响小;上游中部和东南部海拔相对西部平缓,人类活动干扰集中,土壤侵蚀恶化和改善程度明显^[32]。因此,上游各集水区间平均输沙模数的时间变化和空间差异明显。

侵蚀产沙空间差异与土壤保持功能、植被覆盖等因素相关。赣江山地丘陵地区土壤基本在花岗岩母质风化物上发育而来,透水性差且含有大量石英砂^[33],特别是植被减少或遭破坏时土壤抵抗侵蚀的能力降低,容易产生坡面水蚀,造成流域内以山地丘陵为主的上游地区输沙强度明显高于中游和下游。20 世纪 60~80 年代,赣江多数集水区间输沙模数逐渐增大,侵蚀产沙加剧,与肖洋等^[34]分析输沙量年际变化趋势所得结论相同,原因为中华人民共和国成立后大炼钢铁、动乱破坏、林业“三定”政策造成三次对森林的破坏。经过空间对比发现,60~80 年代上、中游积水区间侵蚀加剧更为严重。一方面是山地丘陵区土壤侵蚀作用;另一方面,则是受植被覆盖影响。由于赣江流域上、中游生态系统类型以针叶林、常绿阔叶林为主,而赣江下游则

以水田为主,因此,中华人民共和国成立后3次对森林的破坏对上、中游集水区间造成的后果更为明显。

从多角度来看,水土流失与自然因素、人类活动等密切相关^[35]。后续研究仍需进一步探讨赣江流域自然要素变化、社会经济发展等对河流输沙量变化的影响。

5 结论

1)1960—2020年赣江流域上、中、下游水文站年输沙量呈极显著减少趋势($|Z| > 2.58$)。输沙减少速率由大到小为外洲站21.43万t/a、峡江8.12万t/a、上游4站16.61万t/a,年输沙量在1994年、1992年、1998年发生突变,突变前后输沙量减幅分别为69.65%、57.27%、49.48%。

2)赣江流域多年平均输沙模数在空间分布上表现为南高北低;在时间变化上呈上游先增后减,中游、下游减小趋势。较1960—1987年,2001—2020年上、中、下游年平均输沙模数减幅分别为51.32%、104.95%、105.03%,上游、中上游可视为流域主要侵蚀产沙区域。

3)人类活动是赣江流域输沙量减少的主导因素,且对上、中、下游贡献率均超过100%。赣江流域输沙量时空变化受到水库修建、梯田整地等水土保持措施影响,同时与地形地貌、植被覆盖等因素紧密相关。

参考文献:

- [1] YANG S L, XU K H, MILLIMAN J D, et al. Decline of Yangtze River water and sediment discharge: Impact from natural and anthropogenic changes [J]. *Scientific Reports*, 2015, 5: e12581.
- [2] STOVER S C, MONTGOMERY D R. Channel change and flooding, Skokomish River, Washington [J]. *Journal of Hydrology*, 2001, 243(3/4): 272-286.
- [3] MILLIMAN J D, FARNSWORTH K L, JONES P D, et al. Climatic and anthropogenic factors affecting river discharge to the global ocean, 1951—2000 [J]. *Global and Planetary Change*, 2008, 62(3/4): 187-194.
- [4] WALLING D E, FANG D. Recent trends in the suspended sediment loads of the world's rivers [J]. *Global and Planetary Change*, 2003, 39(1/2): 111-126.
- [5] GENG R, YE Z X, TIAN P, et al. Variation of runoff-sediment relationship at flood event scale in three typical watersheds of the Loess Plateau [J]. *Catena*, 2024, 235: e107679.
- [6] 胡春宏,张晓明.近十年我国江河泥沙变化、泥沙调控与泥沙资源化利用研究[J].*中国水利*, 2022(19): 24-28.

HU C H, ZHANG X M. Research on changes in river

water and sediment in China in the past decade, water and sediment regulation, and utilization of sediment resources [J]. *China Water Resources*, 2022(19): 24-28.

- [7] 费祥俊,吴保生,傅旭东.两相非均质流输沙平衡关系及挟沙力研究[J].*水利学报*, 2015, 46(7): 757-764.
- FEI X J, WU B S, FU X D. Equilibrium sediment transport relation and sediment carrying capacity of two-phase heterogeneous flows [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2015, 46(7): 757-764.
- [8] ZHAO G J, MU X M, JIAO J Y, et al. Evidence and causes of spatiotemporal changes in runoff and sediment yield on the Chinese Loess Plateau [J]. *Land Degradation and Development*, 2017, 28(2): 579-590.
- [9] 胡春宏,王延贵,张燕菁,等.中国江河泥沙变化趋势与主要影响因素[J].*水科学进展*, 2010, 21(4): 524-532.
- HU C H, WANG Y G, ZHANG Y J, et al. Variation tendency of runoff and sediment load in China major rivers and its causes [J]. *Advances in Water Science*, 2010, 21(4): 524-532.
- [10] 顾朝军,穆兴民,高鹏,等.赣江流域径流量和输沙量的变化过程及其对人类活动的响应[J].*泥沙研究*, 2016, 41(3): 38-44.
- GU C J, MU X M, GAO P, et al. Variation of runoff and sediment discharge and response to human activities in the Ganjiang River [J]. *Journal of Sediment Research*, 2016, 41(3): 38-44.
- [11] 高鹏,穆兴民,王飞.近60年赣江水沙变化及其驱动因素分析[J].*中国农村水利水电*, 2012(1): 56-59.
- GAO P, MU X M, WANG F. An analysis of streamflow and sediment discharge in Ganjiang River trend and driving force [J]. *China Rural Water and Hydropower*, 2012(1): 56-59.
- [12] 涂安国,杨洁,李英,等.人类活动对赣江入湖泥沙量的影响[J].*水土保持学报*, 2013, 27(2): 76-79.
- TU A G, YANG J, LI Y, et al. Effect of human activities on sediment load evolution into Poyang Lake from Ganjiang River [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2013, 27(2): 76-79.
- [13] 张颖,宋成成,肖洋,等.近50年来赣江流域水沙年内分配变化分析[J].*水文*, 2013, 33(3): 80-84.
- ZHANG Y, SONG C C, XIAO Y, et al. Variation of annual runoff and sediment distribution in Ganjiang River basin over past 50 years [J]. *Journal of China Hydrology*, 2013, 33(3): 80-84.
- [14] 刘星根,李昌彦,吴敦银.近60年赣江水沙变化特征及影响因素分析[J].*长江流域资源与环境*, 2015, 24(11): 1920-1928.
- LIU X G, LI C Y, WU D Y. Changing characteristic and its impact factor analysis of streamflow and sediment of Ganjiang River basin during past 60 years [J].

- Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2015, 24(11):1920-1928.
- [15] 郭强,叶许春,刘佳,等.土地利用变化对流域水文过程时空分异的影响:以赣江流域为例[J].长江流域资源与环境,2020,29(12):2747-2759.
- GUO Q, YE X C, LIU J, et al. Impact of land use change on spatio-temporal differentiation of watershed hydrological processes: A case study of Ganjiang River basin [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2020, 29(12):2747-2759.
- [16] 中华人民共和国水利部水文局. 中华人民共和国水文年鉴. 长江流域水文资料, 鄱阳湖区(赣江水系)[M]. 6卷, 17册. 北京: 中华人民共和国水利部, 1964—2021.
- Ministry of Water Resources of the People's Republic of China. Annual Hydrological Report P.R China. Hydrological data of Changjiang River basin, Poyanghu basin (Ganjiang stream) [M]. Volumes 6, Volumes 17. Beijing: Ministry of Water Resources of the People's Republic of China, 1964—2021.
- [17] 刘星根. 赣江流域水沙变化特征分析[D]. 南昌: 江西师范大学, 2016.
- LIU X G. Study on characteristics of runoff and sediment in the Ganjiang River basin [D]. Nanchang: Jiangxi Normal University, 2016.
- [18] 史楷生. 年径流系列的插补、延长方法[J]. 山西水利科技, 2012(3):11-12.
- SHI K S. On interpolation and prolongation methods of annual runoff[J]. Shanxi Hydrotechnics, 2012(3):11-12.
- [19] 田小靖, 赵广举, 穆兴民, 等. 水文序列突变点识别方法比较研究[J]. 泥沙研究, 2019, 44(2):33-40.
- TIAN X J, ZHAO G J, MU X M, et al. Comparison study on hydrological time series change-point testing methods [J]. Journal of Sediment Research, 2019, 44(2):33-40.
- [20] 兰泽凡, 耿韧, 赵广举, 等. 窟野河流域水沙变化及其驱动因素[J]. 水土保持研究, 2024, 31(4):95-104.
- LAN Z F, GENG R, ZHAO G J, et al. Runoff and sediment load variation and driving factors in the Kuye River basin[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2024, 31(4):95-104.
- [21] 程思, 于兴修, 李振炜, 等. 流域输沙量变化归因分析方法综述[J]. 地理科学进展, 2021, 40(12):2140-2152.
- CHENG S, YU X X, LI Z W, et al. Review on the methods to separate the impacts of climate and human activities on sediment discharge [J]. Progress in Geography, 2021, 40(12):2140-2152.
- [22] 穆兴民, 张秀勤, 高鹏, 等. 双累积曲线方法理论及在水文气象领域应用中应注意的问题[J]. 水文, 2010, 30(4):47-51.
- MU X M, ZHANG X Q, GAO P, et al. Theory of double mass curves and its applications in hydrology and meteorology [J]. Journal of China Hydrology, 2010, 30(4):47-51.
- [23] 胡巍巍, 郑明国. 1970年以来赣江流域水沙变化及归因分析[J]. 山地学报, 2021, 39(6):821-829.
- HU W W, ZHENG M G. Water and sediment changes in the Ganjiang River basin of China since 1970 and its attribution analysis [J]. Mountain Research, 2021, 39(6):821-829.
- [24] 郭锦浙. 规范赣江淘金采砂船刻不容[J]. 中国水运, 2009(8):28-29.
- GUO J Z. The standardization of gold washing and sand mining boats on can river is a task which brooks no delay [J]. China Water Transport, 2009(8):28-29.
- [25] GUO L C, SU N, TOWNEND I, et al. From the headwater to the delta: A synthesis of the basin-scale sediment load regime in the Changjiang River [J]. Earth-Science Reviews, 2019, 197:e102900.
- [26] 郭国锋, 崔丽娟. 基于遥感技术的鄱阳湖采砂对水体透明度的影响[J]. 生态学报, 2008, 28(12):6113-6120.
- WU G F, CUI L J. Remote sense-based analysis of sand dredging impact on water clarity in Poyang Lake [J]. Acta Ecologica Sinica, 2008, 28(12):6113-6120.
- [27] 毛野. 初论采沙对河床的影响及控制[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2000, 28(4):92-96.
- MAO Y. A study on the effect of sand-gravel extraction on riverbed and its control [J]. Journal of Hohai University, 2000, 28(4):92-96.
- [28] 胡强, 王姣, 刘颖, 等. 水库建设对赣江流域水沙情势的影响[J]. 人民长江, 2021, 52(4):1-5.
- HU Q, WANG J, LIU Y, et al. Effect of reservoir construction on runoff and sediment characteristics in Ganjiang River [J]. Yangtze River, 2021, 52(4):1-5.
- [29] 江辉, 刘瑶, 陈晓玲, 等. 1965—2011年赣江中上游年输沙量变化及影响因素[J]. 人民长江, 2017, 48(24):66-70.
- JIANG H, LIU Y, CHEN X L, et al. Variation characteristics of annual sediment discharge and its influential factors in middle-upper Ganjiang River during 1965—2011 [J]. Yangtze River, 2017, 48(24):66-70.
- [30] 宋月君, 杨洁, 汪邦稳. 赣南水土保持生态建设工程 30 年实践总结[J]. 中国水土保持, 2011(12):37-39.
- SONG Y J, YANG J, WANG B W. Summary of 30-year practice of soil and water conservation ecological construction project in Gannan [J]. Soil and Water Conservation in China, 2011(12):37-39.
- [31] YE X C, ZHANG Q, LIU J, et al. Distinguishing the relative impacts of climate change and human activities on variation of streamflow in the Poyang Lake catchment, China [J]. Journal of Hydrology, 2013, 494:83-95.

(下转第 217 页)

- tion of two typical community types of desert steppe[J]. *Soil and Water Conservation in China*, 2019(7):61-65.
- [24] 张信宝,曹植菁,艾南山.溪洛渡水电工程拦沙对三峡水库富营养化潜在影响的初步研究[J].*长江流域资源与环境*, 2009, 18(2):170-174.
- ZHANG X B, CAO Z J, AI N S. Potential impact of sediment retaining by xiluodu hydropower project to the eutrophication of Three Gorges reservoir [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2009, 18(2): 170-174.
- [25] 罗专溪,朱波,汪涛,等.紫色土坡地泥沙养分与泥沙流失的耦合特征[J].*长江流域资源与环境*, 2008, 17(3): 379-383.
- LUO Z X, ZHU B, WANG T, et al. Artificially simulated coupling characteristics of different sediment nutrient with sediment losses in slopeland of purple soil, China [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2008, 17(3):379-383.
- [26] 王彬俨,文安邦,严冬春.三峡水库干流消落带泥沙沉积影响因素[J].*中国水土保持科学*, 2016, 14(1):12-20.
- WANG B Y, WEN A B, YAN D C. Factors influencing sedimentation in the riparian zone of the Three Gorges Reservoir, China [J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2016, 14(1):12-20.
- [27] 张志永,程郁春,程丽,等.三峡库区万州段消落带植被及土壤理化特征分析[J].*水生态学杂志*, 2016, 37(2):24-33.
- ZHANG Z Y, CHENG Y C, CHENG L, et al. Characteristics of vegetation and soil in the water level fluctuation zone of the Wanzhou Region of Three Gorges Reservoir [J]. *Journal of Hydroecology*, 2016, 37(2):24-33.
- [28] 常超,谢宗强,熊高明,等.三峡水库蓄水对消落带土壤理化性质的影响[J].*自然资源学报*, 2011, 26(7):1236-1244.
- CHANG C, XIE Z Q, XIONG G M, et al. The effect of flooding on soil physical and chemical properties of riparian zone in the Three Gorges Reservoir [J]. *Journal of Natural Resources*, 2011, 26(7):1236-1244.
- [29] 郑晓岚,杨玲,宋娇,等.水库消落带土壤颗粒组成分及其空间分异特征[J].*水土保持研究*, 2022, 29(1):66-71.
- ZHENG X L, YANG L, SONG J, et al. Fractal characteristics and spatial variation of soil particle composition in the reservoir riparian zone [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2022, 29(1):66-71.
- [30] 石孝洪.三峡水库消落区土壤磷素释放与富营养化[J].*土壤肥料*, 2004(1):40-42.
- SHI X H. Eutropication and phosphorus release of soil in drawdown area of Three Gorges reservoir [J]. *Soils and Fertilizers*, 2004(1):40-42.
- [31] 谢婷婷,刘明辉,袁中勋,等.不同泥沙埋深对几种一年生草本枯落物分解及养分动态特征的影响[J].*生态学报*, 2020, 40(21):7755-7766.
- XIE T T, LIU M H, YUAN Z X, et al. Effects of different simulative sediment depths on litter decomposition and nutrient dynamic change of several annual herbaceous plants [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2020, 40(21):7755-7766.
- [32] 李强.泥沙掩埋和干旱对三峡库区消落带狗牙根生长恢复的影响[J].*生态学报*, 2016, 36(1):200-208.
- LI Q. Influence of sand burial and drought on growth recovery of *Cynodon dactylon* in a water-level-fluctuating zone of the Three Gorges Reservoir [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2016, 36(1):200-208.
- [33] 李桂森.赣江山地丘陵荒地资源的特征与开发利用方向[J].*山地研究*, 1987, 5(3):161-167.
- LI G S. The characteristics of uncultivated land resources of Ganjiang mountain-hill region and the ways for development and utilization [J]. *Journal of Mountain Research*, 1987, 5(3):161-167.
- [34] 肖洋,张汶海,张颖.赣江中下游近60年水沙时空分布特征[J].*水文*, 2014, 34(6):86-92.
- XIAO Y, ZHANG W H, ZHANG Y. Spatial and temporal distribution characteristics of runoff and sediment discharge in middle and lower reaches of Ganjiang River in recent 60 years [J]. *Journal of China Hydrology*, 2014, 34(6):86-92.
- [35] 张卓佩,牛健植,樊登星,等.黄河中游多沙粗沙区土壤水蚀时空变化及动态驱动力分析[J].*水土保持学报*, 2024, 38(2):85-96.
- ZHANG Z P, NIU J Z, FAN D X, et al. Analysis of spatial and temporal evolution and dynamic driving force of soil water erosion in the middle reaches of the Yellow River in the rich and coarse sediment area [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2024, 38(2):85-96.

(上接第208页)