

北部湾典型入海河流水沙变化及其对 土地利用景观格局的响应

许珊珊¹, 杨夏玲¹, 黎树式², 王梦竹³, 覃新松⁴

(1. 南宁师范大学 地理科学与规划学院, 广西 南宁 530100; 2. 广西北部湾海洋环境变化与灾害研究
重点实验室, 广西 钦州 535011; 3. 北部湾大学 海洋学院, 广西 钦州 535011; 4. 广西沿海水文中心, 广西 钦州 535000)

摘要: [目的] 研究人类活动影响下中小河流水沙变化特征, 为流域水土保持和航道水沙管理提供科学支撑。[方法] 基于南流江、钦江流域 1965—2021 年近 60 a 的水沙数据和相关土地利用数据, 利用景观指数、水沙突变检验等方法, 分析景观格局对流域水沙变化的影响。[结果] ①南流江和钦江流域的径流量和输沙量呈逐渐下降趋势。输沙量下降趋势比径流量的明显, 径流量和输沙量的突变点都发生在 21 世纪 00 年代。②钦江流域的林地比例由 1990 年的 38% 增加至 2020 年的 41.6%, 南流江的耕地向林地转移面积逐渐增大。退耕还林政策取得成效, 水沙变化也呈现逐渐减少的趋势。③两个流域的水沙变化与景观破碎化程度呈负相关关系、与斑块聚集度呈正相关关系。[结论] 总体上南流江和钦江流域内土地利用变化格局保持较稳定, 水沙变化受土地利用变化影响较明显, 因此相关部门应该继续加强对生态用地的保护和管理。为了防止水土流失, 应该避免人类活动对景观格局的过度干扰, 合理规划景观空间配置。

关键词: 北部湾; 水沙变化; 土地利用; 景观格局

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2024)04-0298-11

中图分类号: S157.1, F301.2

文献参数: 许珊珊, 杨夏玲, 黎树式, 等. 北部湾典型入海河流水沙变化及其对土地利用景观格局的响应 [J]. 水土保持通报, 2024, 44(4): 298-308. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2024.04.031; Xu Shanshan, Yang Xialing, Li Shushi, et al. Changes of water and sediment in typical rivers entering sea in Beibu Gulf and their response to land use landscape pattern [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2024, 44(4): 298-308.

Changes of Water and Sediment in Typical Rivers Entering Sea in Beibu Gulf and Their Response to Land Use Landscape Pattern

Xu Shanshan¹, Yang Xialing¹, Li Shushi², Wang Mengzhu³, Qin Xinsong⁴

(1. School of Geography and Planning, Nanning Normal University, Nanning,

Guangxi 530100, China; 2. Guangxi Key Laboratory of Marine Environment Change and Disaster in

Beibu Gulf, Beibu Gulf University, Qinzhou, Guangxi 535011, China; 3. College of Marine Science, Beibu Gulf University, Qinzhou, Guangxi 535000, China; 4. Guangxi Coastal Hydrology Center, Qinzhou, Guangxi 535000, China)

Abstract: [Objective] The water and sediment changes in small and medium-sized rivers under the influence of human activities were analysed to provide scientific support for soil and water conservation and waterway water and sediment management in the watersheds. [Methods] The influence of landscape patterns on water and sediment changes in the basins was analysed based on water and sediment data and land use of the Nanliu and Qinjiang River basins from 1965 to 2021 using the landscape index, water-sediment mutation test, and other methods. [Results] ① Runoff and sediment transport in the Nanliu and Qinjiang River basins showed a gradual downward trend. The decreasing trend of sediment transport was more evident than that of runoff, and sudden change points in both runoff and sediment transport occurred in the 00s of the 21st century. ② The

收稿日期: 2023-12-13

修回日期: 2024-04-06

资助项目: 北部湾大学海洋科学广西一流学科“平陆运河建设背景下钦州湾动力地貌对水沙变化的响应”(DRB006); 《广西北部湾河口海岸研究与实践》教材建设项目(DTC003); 国家自然科学基金项目“北部湾南流江三角洲滩响应对热带气旋的动力地貌过程”(42366008)

第一作者: 许珊珊(1999—), 女(汉族), 广西壮族自治区平南县人, 硕士研究生, 研究方向为流域—河口陆海相互作用。Email: 878992195@qq.com。

通信作者: 黎树式(1980—), 男(壮族), 广西壮族自治区南宁市人, 博士, 教授, 硕士生导师, 主要从事流域—河口陆海相互作用、海岸带综合管理研究。Email: lishushi120@163.com。

proportion of forestland in the Qinjiang River basin increased from 38% in 1990 to 41.6% in 2020, and the transfer area of cultivated land to forestland in the Nanliujiang River gradually increased. The policy of returning farmland to forests was effective, and the water-sediment change also showed a trend of gradual reduction. ③ The water-sediment changes in the two watersheds were negatively correlated with the degree of landscape fragmentation and positively correlated with the degree of patch aggregation. [Conclusion] In general, the land-use change within the Nanliu and Qinjiang River basins remained stable, and the water-sediment change was more obviously affected by land-use change; therefore, the relevant departments should strengthen the protection and management of eco-lands. Excessive interference of landscape patterns by human activities should be avoided, and landscape spatial configurations should be rationally planned to prevent soil erosion.

Keywords: Beibu Gulf; water and sediment change; land use; landscape pattern

景观格局受人类活动和自然因素的影响,通常通过改变景观结构和空间格局来改变水文过程和径流路径,改变了水文过程和径流路径,进而对河流水沙变化产生深刻影响。在气候变化和人类活动的影响下,河流的水循环过程发生着变化^[1]。通常改变流域水文特征进而影响地表蒸发、下渗能力、表层覆被的截留、填挖量和径流路径,从而影响整个流域的产汇流过程^[2]。同时景观格局的变化也会影响区域生态系统的水循环过程,而土地是景观的载体,土地利用变化也是景观格局演变的直接驱动力^[3]。探讨土地利用和景观格局的变化对水沙变化的影响,可为流域内土地利用和景观规划提供理论支撑。随着城镇化的发展,建设用地扩张和人口需求带来的资源被快速开发,越来越多不合理的人类活动对土地资源进行掠夺,导致水土流失^[4],如对森林进行乱砍滥伐、不科学的采砂活动等。相反,加固河岸、土壤保持措施和沙坝工程等会导致水沙减少^[5-7]。此外,水沙变化也受降雨、土壤侵蚀、植被覆盖度、和极端天气等自然因素的影响^[8-10],从景观配置和土地利用的角度来看,可以通过研究景观格局的变化以及对径流量和输沙量的影响来揭示人类活动对径流量和输沙量变化过程的影响^[11]。目前,中国景观格局对水沙影响的研究主要围绕黄土高原地区进行探讨^[12-13],如王计平等^[14]分析了黄河中游水沙变化对景观格局的响应;Yang等^[13]比较了黄土高原不同地区土地利用/覆被变化引起的景观格局变化和对径流量和输沙量的影响。从而建立景观格局与径流量、输沙量之间的关系,对多沙粗沙区水土流失的治理和生态环境的保护具有深刻意义。而南方红壤丘陵区是仅次于黄土高原的水土流失严重区,其人口密集和城镇化发展较快,且夏季高温多雨、大量的雨水冲刷地表,易发生洪涝灾害,也是我国主要的水土流失治理区^[2-3,15],其景观格局与水沙变化关系如何?未来将从哪些方面着手解决流域内水沙治理问题?这些科学问题都有待进行深入的探讨。

南流江和钦江是北部湾两大典型的中小型山溪型独流入海河流,具有流速快、流量小的特点,相关学者曾探讨过极端天气^[16-17]、植被覆盖、降雨等^[18-19]对流域水沙变化的影响。此外,流域的水沙变化易受景观格局结构变化的影响,北部湾河流流域的景观格局与水沙变化之间的关系如何?同时选择这两个相邻的流域进行分析并进行系统对比也可以更好地研究流域的空间相似性和空间异质性并实现协同治理。鉴于此,本文基于南流江和钦江两大典型入海河流流域的土地利用数据和水沙数据,探讨其水沙变化对土地利用和景观格局的响应关系。预期成果将为流域内水沙治理、景观格局的优化调控提供科学保障。

1 研究区概况

南流江流域和钦江流域是位于广西北部湾两个相邻的流域。南流江是广西北部湾的第一大河流,全长 278 km,流域面积达 9 700 km²,流域范围为东经 109°00′—110°30′,北纬 21°30′—23°00′^[20]。土地利用类型主要以林地和耕地为主,中上游以平原丘陵为主,下游以平原为主。南流江的多年平均径流量为 5.18×10⁹ m³。受南亚热带季风气候的影响,春夏季多降雨、水源丰沛,因此 4—9 月为流域的洪季,1—3, 10—12 月为枯季。

钦江流域的范围为东经 108°30′—109°30′,北纬 21°50′—22°36′,总长 179 km,流域总面积为 2 457 km²^[16]。土地利用类型主要以耕地和林地为主,以平原和山地景观呈现,林地主要分布在流域的东北部和北部的边缘地带。钦江的多年平均径流量为 1.00×10⁹ m³,多年平均输沙量为 2.00×10⁵ t,气候条件与南流江流域相似。

2 数据与方法

2.1 数据来源

文中使用到的 1965—2021 年的水沙数据来自《中国水文年鉴:珠江流域水文资料》(水利部珠江水

利委员会)和广西沿海水文中心,两个流域有部分年份的径流量和输沙量数据缺失。南流江流域的水沙数据源于南流江下游的常乐水文站,钦江流域的水沙数据源于钦江中游的陆屋水文站数据。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,分辨率为 30 m,两个流域 1990—2020 年间隔为 10 a 的 4 期土地利用数据,分别是 1990,2000,2010 和 2020 年的土地利用数据。

2.2 方法

2.2.1 土地利用转移矩阵 土地利用转移矩阵既可揭示土地利用结构,又揭示各地类的转换信息^[21]。其计算公式为:

$$S_{ij} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & \cdots & S_{1n} \\ S_{21} & S_{22} & \cdots & S_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ S_{n1} & S_{n2} & \cdots & S_{nn} \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: S_{ij} 表示从 i 类土地转移到 j 类土地的面积 (km^2); n 表示转移前和转移后的土地利用类型的数量; i, j 分别表示转移前和转移后的土地利用类型。

2.2.2 累积距平法 累积距平法适用于对长时间序列的数据进行判断拐点年份,是由曲线直观判断离散数据点变化趋势的一种非线性统计方法^[22]。该方法的核心是以平均值为参考,判断数据的离散程度,若累积距平增大,表明离散程度数据大于平均值,反之小于平均值。对于长时间序列数据,在某一时刻 t 的累积距平可表示为:

$$\hat{Y}_t = \sum_{i=1}^t (x_i - \bar{x}) \quad (t=1, 2 \cdots n) \quad (2)$$

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (3)$$

式中: \hat{Y}_t 为累积距平值; x_i 为径流量 (m^3) 或输沙量 (t); \bar{x} 为径流量或输沙量的多年平均值; n 为总年数。

2.2.3 Mann-Kendall 检验 Mann-Kendall 突变检验法是一种广泛应用于水文数据分析的非参数检验方法^[23],简称为 $M-K$ 检验,计算表达式为:

$$S_k = \sum_{i=1}^k r_i \quad (k=2, 3 \cdots n) \quad (4)$$

$$r_i = f(x) = \begin{cases} 1, & x_i > x_j \\ 0, & x_i \leq x_j \end{cases} \quad (j=1, 2 \cdots i) \quad (5)$$

$$UF_k = \frac{S_k - \bar{S}_k}{\sqrt{\text{Var}(S_k)}} \quad (k=1, 2 \cdots n) \quad (6)$$

式中: S_k 为实践序列中第 i 个数值大于第 j 个数值的数量的累计值; $UF_1 = 0$, $x_1, x_2 \cdots x_n$ 相互独立,

且连续同分布; \bar{x}_k 为秩序列的平均值; $\text{Var}(S_k)$ 为秩序列的方差。把序列 x 倒置形成一个新序列 $x_n, x_{n-1} \cdots x_1$, 对其进行与 UF 相同的运算得到 UB, UF_i 和 UB_i 曲线交点在置信线之间,交点对应的时刻便是突变开始的时间。

2.2.4 Pettit 检验 Pettit 法是一种基于 Mann-Whitney 统计函数的非参数检验方法^[24],Pettit 检验方法具有以下优点:①它属于非参数检验方法,所以对序列的异常值不敏感;②可以通过近似极限分布计算检测统计 p 值。该检验法提出了基于 Mann-Whitney 双样本检验的 U 统计量。

$$U_t, N = U_{t-1}, N + \sum_{i=1}^n \text{sgn}(x_i - x_j) \quad (7)$$

$$K_t, N = \max |U_t, N| \quad (1 \leq t \leq N) \quad (8)$$

$$p = 2 \exp \left(\frac{-6_t^2, N}{N^3 + N^2} \right) \quad (9)$$

式中: U_t, N 为 t 时刻 x_i 大于或小于 x_j 个数的累计值; x_t 为 t 时刻对应的值。 K_t, N 为突变发生时间 t 对应的统计值; p 为显著性概率。一般情况下,认为当 $p \leq 0.05$ 时数据存在突变点,最大值所对应的时间为可能的突变时间。

2.2.5 景观格局指数 研究区特征可划分为斑块、类型、景观,通过斑块、类型、景观 3 个尺度的景观指数对景观格局进行反映,可以更加准确地表征景观在空间上的配置和属性,参考前人的经验^[25],因此采用了板块个数、斑块结合度、聚集度等 6 个景观指数对两个流域的景观格局进行探讨(表 1)。

3 结果与分析

3.1 钦江流域水沙变化特征

1965—2021 年,钦江流域平均径流量为 $1.00 \times 10^9 \text{ m}^3$,多年平均输沙量为 $2.00 \times 10^5 \text{ t}$ 。南流江的平均径流量为 $5.18 \times 10^9 \text{ m}^3$,是钦江平均径流量的 5.18 倍;多年平均输沙量为 $7.57 \times 10^5 \text{ t}$,是钦江的多年平均输沙量 3.28 倍。主要是由于南流江盘地比钦江的大,且支流众多,其河道的水容量比钦江的多^[17]。南流江的最大径流量和最大输沙量分别发生在 2002 和 1966 年,分别为 $8.85 \times 10^9 \text{ m}^3$, $1.66 \times 10^6 \text{ t}$ 。钦江的年最大径流量和最大输沙量都发生在 1981 年,分别为 $1.60 \times 10^8 \text{ m}^3$, $6.90 \times 10^5 \text{ t}$ 。两个流域的年平均降雨量在总体上基本保持稳定变化不明显。如图 1—2 所示,两个流域有相似的水文变化趋势,年径流量和年输沙量都呈现下降的趋势,但输沙量的下降趋势明显比径流量的大,说明南流江和钦江的水沙变化可能受外部多方面的因素影响较大。

表 1 景观格局指数
Table 1 Landscape pattern indexes

景观指数	计算公式	物理意义	生态学意义
斑块个数(NP)	$NP=N$	N 为景观的斑块数量	景观的斑块个数
斑块密度(PD)	$PD=\frac{1}{A}\sum_{i=1}^MN_i$	A 为流域内景观的总面积(km^2); M 为流域内空间分辨率上景观要素类型的总数	景观的破碎化程度和空间异质性程度,在一定程度上反映出人为对景观的干扰程度
最大斑块指数(LPI)	$LPI=\frac{\max(a_1,a_2\cdots a_n)}{A}\times 100\%$	a_n 为第 n 块斑块的面积; A 为流域内景观的总面积(km^2)	指数值的大小决定景观中优势种、内部种的丰度等生态特征,指数值的变化可以看出干扰的强度,反映人类活动的方向和强弱
斑块结合度(COHESION)	$COHESION=(1-\frac{\sum_{j=1}^mP_{ij}}{\sum_{j=1}^mP_{ij}\sqrt{a_{ij}}})(1-\frac{1}{\sqrt{A}})\times 100\%$	P_{ij} 为斑块周长; a_{ij} 为斑块面积; A 为景观总面积(km^2)	其中一种斑块与周围相邻的斑块在空间上的连接程度
香浓多样性指数(SHDI)	$SHDI=-\sum_{i=1}^m[P_i\ln(P_i)]$	P 为斑块类型占景观总面积的比例; i 为斑块个数	景观中各类斑块的复杂性和景观异质性,其中强调稀有斑块类型对信息的贡献
聚集度(AI)	$AI=\left[\frac{g_{ii}}{\max_{i\rightarrow j}g_{ij}}\right]\times 100\%$	i 为类型斑块的相似邻接斑块数量	描述该种类型斑块的聚合情况,聚集度值越高,该类型斑块的聚合程度越高

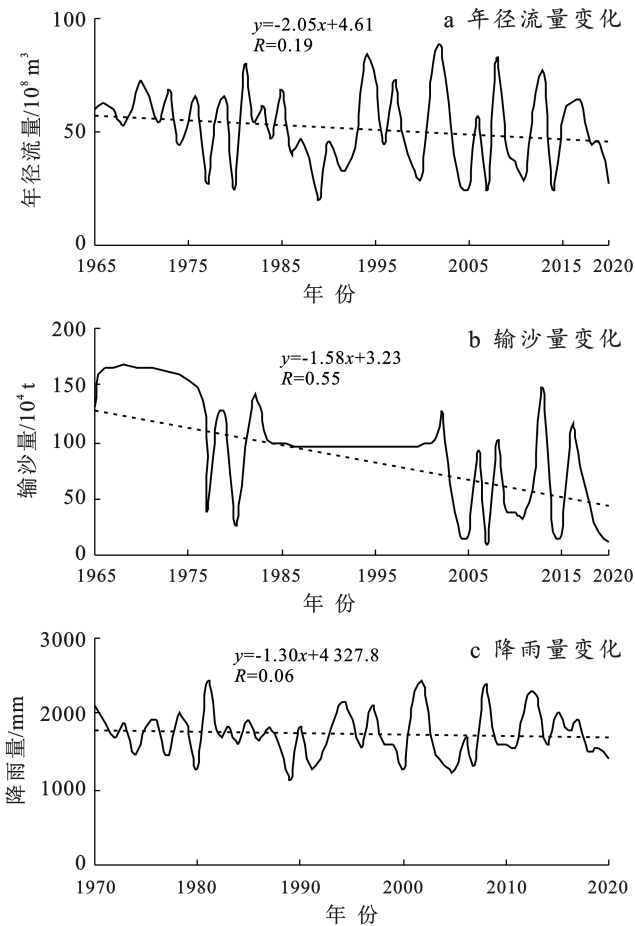


图 1 南流江水沙年际变化趋势

Fig.1 Inter-annual trends in water and sediment changes in Nanliu River

由图 3—4 可知,南流江和钦江流域的输沙量与径流量显著相关,南流江的相关性系数 R 为 0.75,钦江的相关性系数 R 为 0.71。两个流域的水沙相关性系数几乎相等。降雨量对径流量的影响是不容忽视

的,南流江的径流量与降雨量之间呈显著性正相关关系, R 为 0.91;钦江的径流量与降雨量之间呈略微正相关关系, R 为 0.34。降雨会冲刷地表和河岸,对土壤造成侵蚀,部分泥沙将会被带进河道,因此降雨在一定程度上也会对输沙量产生影响。

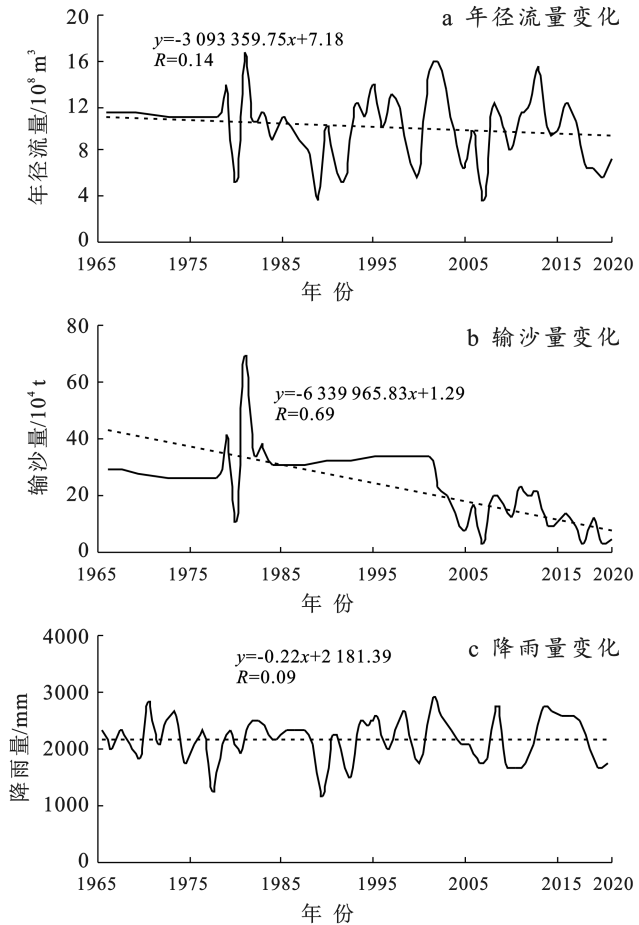


图 2 钦江流域水沙年际变化趋势

Fig.2 Interannual trends of water and sediment changes in Qianjiang River basin

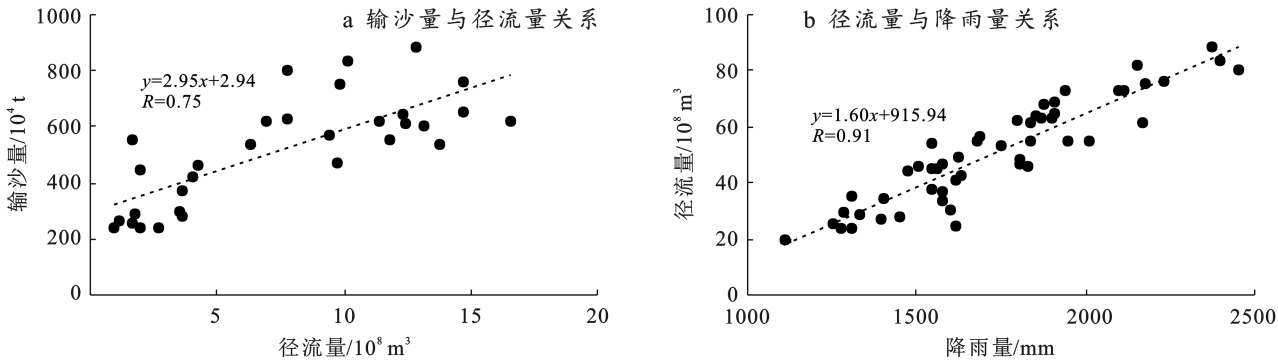


图 3 南流江流域的水沙关系

Fig.3 Water-srdiment relationships in Nanliu River basin

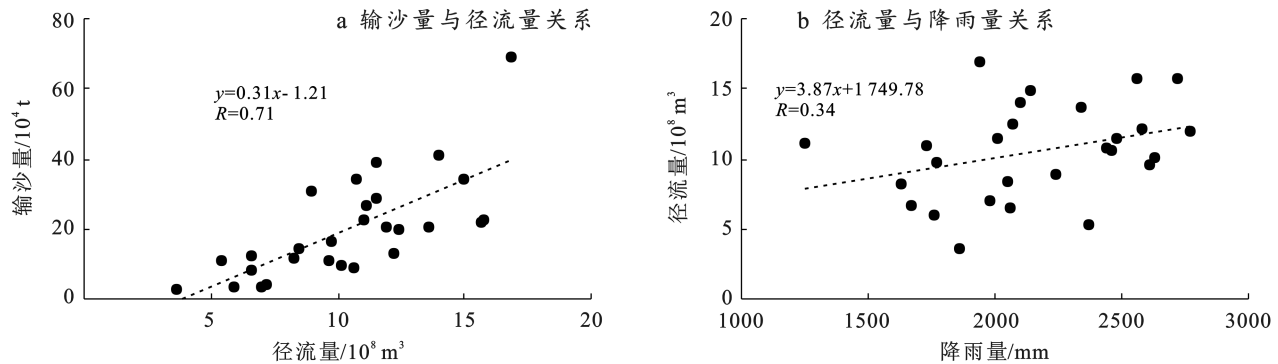


图 4 钦江流域的水沙关系

Fig.4 Water-srdiment relationships in Qinjiang River basin

为了避免由于方法问题产生误差,同时利用 Matlab 软件进行累积距平检验、M-K 检验、Pettitt 检验,对南流江和钦江流域的水沙突变特征进行分析。

由表 2 对比发现,Pettitt 检验的突变点具有较高的敏感性,且与累积距平方法得出的结果具有对应相同点,其南流江水沙的相同突变年份为 2002 年,钦江水沙的相同突变年份为 2003 年。而在 M-K 检验中,钦江输沙量的突变点出现在 2004 年,而径流量突

点则出现在 00 年代前,可能是出现了虚假突变点;南流江的径流量突变点则出现在 2003 年,比 2002 年增大了一个年份。历史学者研究钦江水沙突变表明 M-K 突变检验会出现在水沙序列增大或减少的前一个年份,或存在虚假的突变点^[26]。因此综合在两个流域的水沙突变中,对水沙的检验都有结果显示钦江流域的水沙突变年份为 2003 年,而南流江流域的水沙突变年份为 2002 年,因此两个流域的水沙突变发生在 21 世纪 00 年代。

表 2 南流江和钦江流域水沙突变检验

Table 2 Water-sediment mutation test of Nanliu River and Qinjiang River basin				
河 流	水 沙	累积距平	M-K 检验	Pettitt 检验
钦 江	径流量	1983,1991,2000,2003,2007,2013 年	1978,1983,1994 年	2003 年
	输沙量	1983,2002,2003,2007,2013 年	2004,2008,2011 年	2003 年
南流江	径流量	1991,2002 年	1980,1984,2003,2008,2012,2014 年	2002 年
	输沙量	1976,1984,2002 年	1980,2001,2002,2016 年	2002 年

3.2 土地利用与景观格局演变

由图 5—6 可知,钦江流域的土地利用类型主要以耕地和林地为主,耕地沿着钦江主要分布在流域的中间地带,林地主要分布在钦江的边缘地带。耕地面积占比逐年减小,其所占比例 1990—2020 年减少了 5.9%。南流江流域的土地利用类型主要以林地和耕

地为主,林地面积占流域面积的 60%左右。钦江流域的林地面积则有缓慢增加趋势,南流江流域的林地面积则保持较稳定。而建设用地均有明显的扩张趋势,钦江的建设用地占地面积 1990—2020 年增加了 2.5%;南流江的建设用地占地面积 1990—2020 年增加了 1.9%。

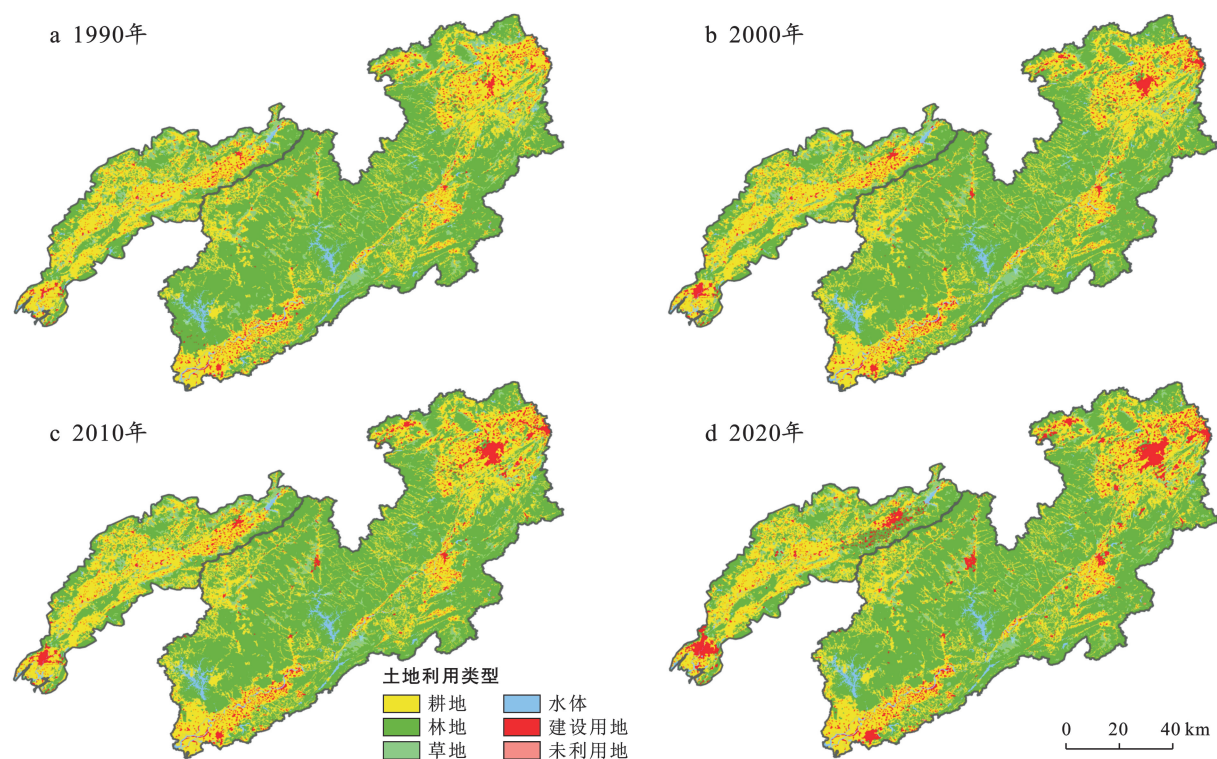


图 5 钦江流域和南流江流域土地利用类型变化

Fig.5 Change of land use types of Qinjiang River and Nanliu River basin

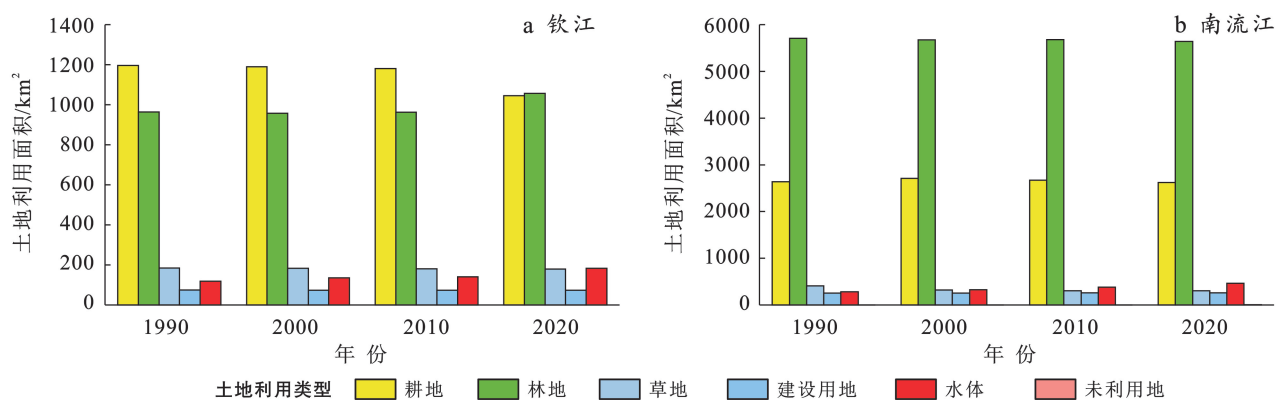


图 6 钦江流域和南流江流域土地利用面积类型统计

Fig.6 Land use area type statistics of Qinjiang River and Nanliu River basin

由图 7 可得,钦江流域与南流江流域土地利用转移变化有相似之处,较明显的是耕地的转出。钦江流域 1990—2000 年耕地主要转为建设用地,转出面积为 10.45 km²;林地转为耕地次之,转出面积为 6.34 km²。2000—2010 年,耕地主要转为林地和建设用地,分别为 4.53 和 3.91 km²。2010—2020 年耕地转为林地的面积最多,为 80.59 km²,其次是转为建设用地,为 26.79 km²。南流江的土地利用变化主要为耕地、林地、建设用地之间的转换。建设用地的转入面积由减少变为增大,而林地的转入面积逐个阶段增大,其中 2010—2020 年林地的转入面积最大,为 94.79 km²。耕地的转出面积逐渐增大,2000—2010 年为转折点,耕地开始由原先的增

加变为减少,向林地转移的面积增多。2000—2010 年耕地向林地转移的面积为 15 km²,是 1990—2000 年的 3 倍;2010—2020 年耕地向林地转移的面积为 94.79 km²,是 2000—2010 年的 6.3 倍。综上所述,自 2001 年起,广西地区开始实行退耕还林政策取得成效,部分耕地转化为林地,20 a 间实现了生态经济双丰收,植被的增加有助于涵养水源、保持水土。与上述自 20 年代后钦江的输沙量逐渐下降相对应。

景观格局指数可以从生态景观学的角度反映了流域内的土地利用的结构和空间配置。本文利用 Fragstats 4.2 软件对两个流域的 4 期土地利用进行景观指数运算,结果详见表 3—4。钦江流域的 NP

(斑块指数)、PD(斑块密度指数)都呈逐年上升趋势,说明钦江流域的景观破碎化程度在逐渐变大,可能来源于人为干扰导致斑块有分裂的现象。LPI(大型斑块面积)在 1990—2010 年期间有小幅减小的趋势,但 2020 年的 LPI 减小至 20.629 8,LPI 的减少量是 2010 年的 45%。LSI(形状指数)、SHDI(香浓多样指数)呈缓慢上升的趋势,但变化不明显,说明钦江流域

的斑块形状变化呈缓慢变多的趋势。PAFRAC(面积分维数)、COHESION(斑块凝聚度指数)保持较稳定,CONTAG(蔓延度指数)有缓慢下降的趋势,DIVISION(景观分离度指数)有逐渐上升的趋势。综上所述,钦江流域的景观破碎程度逐渐变高,1990—2010 年总体上比较集聚、保持稳定,2010—2020 年破碎化程度有所增加。



图 7 钦江流域和南流江流域土地利用转移矩阵图

Fig.7 Land use transfer matrix of Qinjiang River and Nanliu River basin

在景观水平上,南流江流域的 NP(斑块数量)和 PD(斑块密度指数)呈先减后增的趋势,说明南流江流域的景观破碎化程度从 20 世纪 90 年代后有减少的趋势,自 20 年代后有增加的趋势,连续性有增强的趋势。从景观形状指数上看,南流江的 LPI(大型斑块面积)有下降的趋势,特别在 2010 年呈现明显减少的趋势,减少了 2000 年的 44%。LSI(形状指数)、

PAFRAC(面积分维数)、DIVISION(景观分离度指数)、SHDI(香浓多样性指数)有逐渐增加的趋势,COHESION(斑块凝聚度指数)保持较稳定呈略下降的趋势。CONTAG(蔓延度指数)呈波动上升趋势。说明南流江流域的景观形状越来越复杂化,大斑块景观逐渐被分散,整个景观格局朝破碎化、复杂化方向发展。与钦江流域的景观格局发展趋势相似。

表 3 钦江流域景观格局指数

Table 3 Landscape pattern indexes of Qinjiang River basin

年份	NP	PD	LPI	LSI	PAFRAC	CONTAG	COHESION	DIVISION	SHDI
1990	2 054	0.809 3	38.583 4	39.917 2	1.417 3	57.045 6	99.782 0	0.842 1	1.159 8
2000	2 059	0.811 3	37.451 4	40.039 7	1.416 8	56.663 5	99.773 4	0.850 7	1.171 1
2010	2 068	0.814 8	37.327 6	40.457 1	1.406 6	56.482 0	99.774 4	0.851 5	1.174 8
2020	2 141	0.843 6	20.629 8	41.794 3	1.416 7	55.087 9	99.663 5	0.929 6	1.209 9

表 4 南流江流域景观格局指数

Table 4 Landscape pattern indexes of Nanliu River basin

年份	NP	PD	LPI	LSI	PAFRAC	CONTAG	COHESION	DIVISION	SHDI
1990	5 449	0.586 4	36.027 2	67.357 4	1.476 0	66.563 0	99.867 0	0.836 0	1.000 9
2000	5 418	0.583 1	34.659 6	68.060 2	1.479 5	66.688 9	99.862 8	0.845 6	0.995 6
2010	5 331	0.573 7	19.131 6	69.104 6	1.500 3	66.409 8	99.827 4	0.906 9	1.002 7
2020	5 442	0.585 7	19.072 0	69.944 8	1.491 1	65.705 0	99.824 8	0.908 4	1.024 9

3.3 水沙变化对景观格局的响应

利用 Canoco 软件对钦江流域的景观指数与水沙进行冗余度分析。冗余度分析可以反映两个变量集之间的线性关系,并将两个变量集表示在同一个直角坐标系中,直观地反映两个变量集之间的相关关系,通过冗余度分析,可以直观地反映景观指数与水沙的关系,进而揭示景观格局与水沙的响应关系。图中,景观格局指数用红色箭头表示,箭头的长度越长表示对模型的贡献率越大,箭头长度越短代表贡献越小。箭头与排序轴的夹角的余弦值表示相关性的 大小,夹角越小相关性越大;景观格局指数箭头连线在径流量、输沙量箭头连线上的投影越长,则对水沙变化的影响越大。

由图 8 可知,两个流域的 COHESION, LPI, CONTAG 与输沙量、径流量呈显著正相关,说明斑块结

合度越小、最大斑块指数越小、斑块越联通,径流量和输沙量的减小的幅度越小。南流江的 COHESION, LPI,CONTAG 与径流量相关性较输沙量的大,钦江流域的 SHDI,DIVISION,NP,PD,LSI 与输沙量、径流量呈极显著的负相关关系,而南流江的 SHDI, DIVISION,LSI,PARAC 与南流江流域的输沙量、径流量呈极显著的负相关关系。即香浓多样性指数越大、分离度越大、斑块破碎化程度越高,径流量的减幅越大,有助于减少泥沙进入河流,随之输沙量减少。有学者^[25]表明,景观格局多样性的提高能削弱土壤侵蚀的形成与运输能力。其中区别在于,南流江的 NP,PD 与径流量呈正相关关系,与输沙量的相关性不强。这可能是由于南流江的耕地向林地转移面积逐渐增加,植被对降雨起到截留作用,进而增大了南流江流域内的水文调蓄能力。

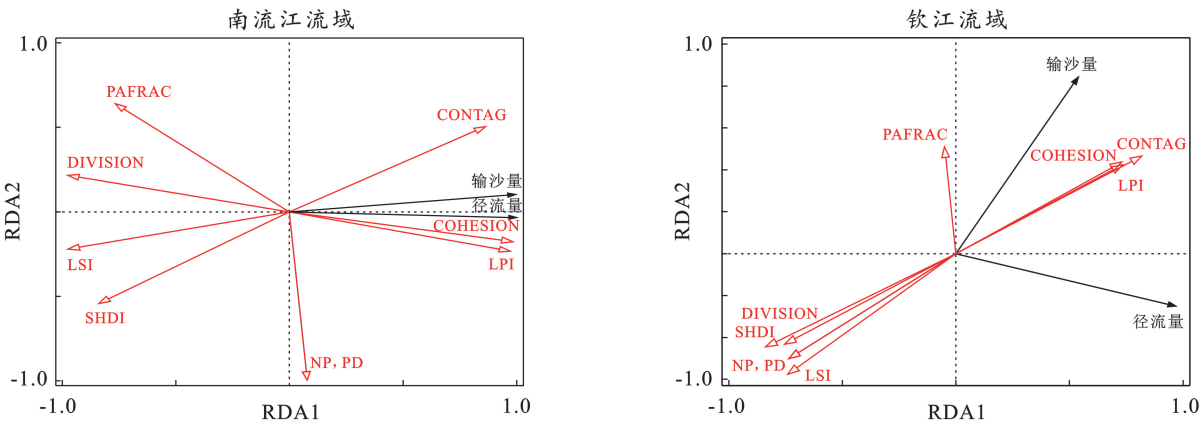


图 8 南流江和钦江流域水沙变化与景观格局指数的冗余度分析(RDA)

Fig.8 Redundancy analysis of water-sediment changes and landscape pattern indices in Nanliu and Qinqiang River basins (RDA)

4 讨论

4.1 影响流域水沙变化的因素

作为北部湾两个典型的山溪型入海河流,南流江是广西北部湾独流入海第一大河,其水沙变化将对区域水资源管理具有重要的意义。其次,正在建设中的平陆运河届时将沿着钦江进入北部湾海域,运河修建工程需要进行疏浚、改道等工程将扰动河床,也必将引起水沙的变化。因此本文将两个流域水沙变化对

景观格局的响应进行探讨,其中研究表明两个流域的水沙皆有逐渐下降的趋势,历史学者们也曾对南流江和钦江流域的水沙变化进行了相关探讨,相关研究与 Zhao^[27]、黎树式^[18]与莫剑等^[26]学者研究结果一致。其中,钦江的输沙量下降的相关性系数较南流江的相关性系数大,水沙变化受景观格局的影响较大,钦江的斑块密度指数较南流江的均高出 0.2 以上,由流域的水沙变化与景观格局的冗余度分析可得,流域内斑块密度越大导致水沙的减幅越大,对泥沙有一定的阻

滞作用,因此钦江的输沙量下降较南流江的大。此外,流域的水沙变化也会受到其他因素的影响,有部分学者也进行了相关的研究并认为:水沙变化受气候变化与人类活动的双重影响,如降雨量和气温^[18]、植被覆盖度^[26]是影响流域水沙变化的关键因素。2002 年南流江上游的玉林市和下游的合浦县对南流江两岸实施了河堤改造建设工程,也是影响水沙下降的重要因素^[20]。南流江和钦江流域属于典型亚热带季风气候区,夏季高温多雨、多发洪涝灾害。热带气旋、洪水等极端天气对流域的水沙变化也具有重要的贡献作用^[16,28],且朱文轩等^[29]研究表明南流江洪灾发生的频次呈波动上升趋势。本研究结果表明,土地利用变化和景观格局的变化也在一定程度上对流域的水沙变化产生影响。但存在一定的不足之处:没有具体量化景观格局对两个流域水沙变化的贡献,未来仍需进一步量化景观格局对水沙变化的影响。

4.2 土地利用变化对水沙的影响

土地利用改造是人类活动干扰的重要指标,许多研究表明:建设用地的增加、林地的减少均会导致径流量和输沙量的增加^[30],反之林地的增加会导致径流量和输沙量的减少。两个流域的土地利用总体上变化不明显,由突变检验可得,南流江和钦江流域的水沙突变发生在 21 世纪 00 年代。由土地利用分布图可得,两个流域的耕地主要是沿着河流分布,耕地的土地利用类型转换可能会对水沙变化产生较大的影响。南流江和钦江流域的土地利用变化主要是耕地、林地、建设用地之间的转移。与此同时,广西地区退耕还林政策取得相应成效,耕地向林地转移面积逐渐增加,由 2000—2010 年的 4.53 km² 增至 2010—2020 年的 80.59 km²。退耕还林工程带来林地的增加,极大地改变了地表土地利用,有效控制了水土流失,降低了泥沙的连通性,对泥沙进入河流起一定程度上的阻滞作用,导致进入河道的水沙量锐减^[31]。

4.3 景观格局对水沙变化的影响

景观格局指数是从土地利用类型斑块内部结构反映斑块的面积、密度、邻近度、多样性和集聚性等。文中探讨了南流江和钦江流域的景观格局对水沙变化的影响,研究结果表明南流江的景观指数相对而言,景观破碎化呈波动上升,大斑块面积有下降趋势。钦江流域的景观格局整体上没有剧烈的变化,但两个流域的大型斑块面积自 20 年代以来有剧烈下降的趋势。总体上流域的景观破碎化程度有逐渐增加的趋势,斑块形状缓慢变多。但钦江流域的斑块凝聚度、结合度等都有逐渐减少的趋势。而钦江的水沙变化与景观破碎化程度呈负相关关系、与斑块聚集度呈正

相关关系。此外,也曾有学者对皇甫川流域的景观格局对水沙变化的影响进行探讨,得出相似的结果,景观斑块数量越多,斑块破碎化程度越高,斑块的形状越复杂,流域径流的减幅越大。反之,也有相关观点指出:景观的复杂程度(LSI)是影响水沙变化最重要的景观格局指数,人类活动越频繁、景观越破碎、越复杂,水土流失越严重^[32]。景观斑块越连通,流域的输沙量减幅越小^[33]。有学者^[34]从回归方程和相应的景观指数中发现,通过降低流域之间的物理连通性,可以减少流域侵蚀,因此导致流域内的输沙量下降。

5 结论

(1) 南流江和钦江流域的径流量和输沙量呈现逐渐下降的趋势,径流量和输沙量的突变点都发生在 21 世纪 00 年代,输沙量的下降趋势比径流量的明显。钦江的输沙量下降幅度比南流江的大。

(2) 两个流域的土地利用变化格局保持较稳定,土地利用主要是林地、耕地和建设用地之间的转换,水沙变化受土地利用变化较明显。退耕还林政策取得成效,耕地向林地转移面积的增加,水沙变化也呈现逐渐减少的趋势。

(3) 南流江和钦江流域的景观格局总体上变化不大,南流江 2000—2010 年的大斑块面积较 1990—2000 年减少了 44%。钦江流域 2010—2022 年的大斑块面积较 2000—2010 年的减少了 45%。土地利用变化会影响景观格局的演变,主要是由于建设用地的扩建,破坏了原有的景观格局,景观破碎化程度有增加的趋势。

(4) 南流江和钦江流域的景观指数与径流量和输沙量的相关性比较强,土地利用和景观格局的变化会影响水沙变化。两个流域的水沙变化与景观破碎化程度呈负相关关系、与斑块聚集度呈正相关关系。为了防止水土流失,相关部门应该加强合理规划景观空间配置,避免不合理的人类活动对景观格局的过度干扰。

参考文献(References)

- [1] 梁音,杨轩,潘贤章,等.南方红壤丘陵区水土流失特点及防治对策[J].中国水土保持,2008(12):50-53.
Liang Yin, Yang Xuan, Pan Xianzhang, et al. Characteristics of soil and water loss and countermeasures for prevention and control of hilly red soil region in south [J]. Soil and Water Conservation in China, 2008(12): 50-53.
- [2] Liu Mingliang, Tian Hanqin, Chen Guangsheng, et al. Effects of land-use and land-cover change on evapotrans-

- piration and water yield in China during 1900—2000 [J]. *Jawra Journal of the American Water Resources Association*, 2008,44(5):1193-1207.
- [3] Shi Peng, Zhang Yan, Li Zhanbin, et al. Influence of land use and land cover patterns on seasonal water quality at multi-spatial scales [J]. *CATENA*, 2017,151:182-190.
- [4] Zou Yarong, Zhang Zengxiang, Zhou Quanbin, et al. Analysis of the relationship between soil erosion and land use based on GIS [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2002,9(1):67-70.
- [5] 杨江洁,戴志军,梅雪菲,等.密西西比河入海水体悬沙浓度变化过程研究[J].*海洋学报*,2022,44(7):71-81.
Yang Jiangjie, Dai Zhijun, Mei Xuefei, et al. Variations of suspended sediment concentration of the Mississippi River delivered from land into sea [J]. *Haiyang Xuebao*, 2022,44(7):71-81.
- [6] Dai Zhijun, Liu J T. Impacts of large dams on downstream fluvial sedimentation: An example of the Three Gorges Dam (TGD) on the Changjiang (Yangtze River) [J]. *Journal of Hydrology*, 2013,480:10-18.
- [7] Yang Shilun, Milliman J D, Xu K H, et al. Downstream sedimentary and geomorphic impacts of the Three Gorges Dam on the Yangtze River [J]. *Earth-Science Reviews*, 2014,138:469-486.
- [8] 黄晨璐.祖厉河流域水沙演变规律及其成因分析[J].*水文*,2021,41(2):101-108.
Huang Chenlu. Analysis of water and sediment evolution law and its causes in Zuli River basin [J]. *Journal of China Hydrology*, 2021,41(2):101-108.
- [9] Huang Yuanguang, Yang Haifei, Wang Ya ping, et al. Swell-driven sediment resuspension in the Yangtze Estuary during tropical cyclone events [J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2022,267:107765.
- [10] 杨守业,印萍.自然环境变化与人类活动影响下的中小河流沉积物源汇过程[J].*海洋地质与第四纪地质*, 2018,38(1):1-10.
Yang Shouye, Yin Ping. Sediment source-to-sink processes of small mountainous rivers under the impacts of natural environmental changes and human activities [J]. *Marine Geology & Quaternary Geology*, 2018,38(1):1-10.
- [11] Bakker M M, Govers G, van Doorn A, et al. The response of soil erosion and sediment export to land-use change in four areas of Europe: The importance of landscape pattern [J]. *Geomorphology*, 2008,98(3/4): 213-226.
- [12] 张学霞,陈丽华.黄土高原地区流域景观格局对水土流失的影响分析[J].*北京林业大学学报*,2008,30(S2): 95-102.
- Zhang Xuexia, Chen Lihua. Effects of watershed landscape pattern on soil and water loss in the Loess Plateau Region [J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2008,30(S2):95-102.
- [13] Yang Yuanyuan, Li Zhanbin, Li Peng et al. Variations in runoff and sediment in watersheds in loess regions with different geomorphologies and their response to landscape patterns [J]. *Environmental Earth Sciences*, 2017,76(15):1-11.
- [14] 王计平,杨磊,卫伟,等.黄土丘陵区景观格局对水土流失过程的影响:景观水平与多尺度比较[J].*生态学报*, 2011,31(19):5531-5541.
Wang Jiping, Yang Lei, Wei Wei, et al. Effects of landscape patterns on soil and water loss in the hilly area of Loess Plateau in China: Landscape-level and comparison at multiscale [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, 31(19):5531-5541.
- [15] 廖凯涛,胡建民,宋月君,等.南方红壤丘陵区流域植被景观格局变化及水沙响应关系[J].*水土保持学报*, 2019,33(3):36-42.
Liao Kaitao, Hu Jianmin, Song Yuejun, et al. Effects of vegetation landscape patterns on runoff and sediment in red soil hilly region of Southern China [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2019,33(3):36-42.
- [16] 许珊珊,杨夏玲,黎树式,等.北部湾钦江响应极端天气的水沙变化过程[J].*热带地理*,2023,43(11):2135-2145.
Xu Shanshan, Yang Xialing, Li Shushi, et al. Variations in the characteristics of water and sediment in response to extreme weather conditions in the Qinjiang River of the Beibu gulf [J]. *Tropical Geography*, 2023, 43(11):2135-2145.
- [17] Tang Runan, Dai Zhijun, Zhou Xiaoyan, et al. Tropical cyclone-induced water and suspended sediment discharge delivered by mountainous rivers into the Beibu Gulf, South China [J]. *Geomorphology*, 2021,389: 107844.
- [18] 黎树式,黄鹄.近50年钦江水沙变化研究[J].*广西科学*,2018,25(4):409-417.
Li Shushi, Huang Hu. Variations of runoff and sediment in Qinjiang River in the past 50 years [J]. *Guangxi Sciences*, 2018,25(4):409-417.
- [19] 莫剑.南流江流域降雨变化和人类活动的水沙响应研究[D].广西 南宁:南宁师范大学,2020.
Mo Jian. Study on the response of runoff and sediment to precipitation change and human activities in Nanliujiang River basin [D]. Nanning, Guangxi: Nanning

- Normal University, 2021.
- [20] Li Shushi, Yang Xialing, Huang Hu, et al. Variations in the suspended sediment concentration in mountain-type rivers flowing into the sea in the past 60 years: Taking Nanliu River in Beibu Gulf as an example [J]. *Frontiers in Earth Science*, 2022,10:49.
- [21] Wei Xing, Cai Shuqun, Ni Peitong, et al. Impacts of climate change and human activities on the water discharge and sediment load of the Pearl River, Southern China [J]. *Scientific Reports*, 2020,10(1):16743.
- [22] 王随继, 闫云霞, 颜明, 等. 皇甫川流域降水和人类活动对径流量变化的贡献率分析: 累积量斜率变化率比较方法的提出及应用[J]. *地理学报*, 2012,67(3):388-397. Wang Suiji, Yan Yunxia, Yan Ming, et al. Contributions of precipitation and human activities to the runoff change of the Huangfuchuan drainage basin: Application of comparative method of the slope changing ratio of cumulative quantity [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2012,67(3):388-397.
- [23] 魏凤英. 现代气候统计诊断与预测技术[M]. 北京: 气象出版社, 1999. Wei Fengying. *Modern Weather Forecasting Techniques and Statistical Diagnosis* [M]. Beijing: Meteorological Press, 1999.
- [24] Pettitt A N. A non-parametric approach to the change-point problem [J]. *Journal of the Royal Statistical Society: Series C (Applied Statistics)*, 1979,28(2):126-135.
- [25] Ouyang Wei, Skidmore A K, Hao Fanghua, et al. Soil erosion dynamics response to landscape pattern [J]. *Science of the Total Environment*, 2010,408(6):1358-1366.
- [26] Zhao Yinjun, Wang Sheng, Li Jiaxu, et al. Changes in the hydrological and sediment regimes of two neighboring catchments in the past sixty years [J]. *Catena*, 2023,230:107248.
- [27] 莫剑, 卢远, 王丹媛, 等. 广西钦江流域水沙年际变化规律分析[J]. *水利水电技术*, 2020,51(1):130-138. Mo Jian, Lu Yuan, Wang Danyuan, et al. Analysis of interannual water-sediment variation law of Qinjiang River Basin in Guangxi [J]. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 2020,51(1):130-138.
- [28] 杨夏玲, 黎树式, 许珊珊, 等. 近 60 年来极端天气影响下南流江入海水沙变化[J]. *热带海洋学报*, 2023,42(4):91-103. Yang Xialing, Li Shushi, Xu Shanshan, et al. Variations in water and sediments of the Nanliu River flowing into the sea under the influence of extreme weather in the past 60 years [J]. *Journal of Tropical Oceanography*, 2023,42(4):91-103.
- [29] 朱文轩, 梁志勇, 黎树式, 等. 北部湾南流江洪灾时空变化特征及其风险评估[J]. *水电能源科学*, 2023,41(6):78-81. Zhu Wenxuan, Liang Zhiyong, Li Shushi, et al. Temporal and spatial variation characteristics of flood in Nanliu River of Beibu gulf and its risk assessment [J]. *Water Resources and Power*, 2023,41(6):78-81.
- [30] Joshi B R, Yadav S M. Effect on sediment delivery ratio by changes in land use land cover and construction of hydraulic structures at sub basin scale [J]. *Journal of Applied Water Engineering and Research*, 2022,10(1):52-63.
- [31] 刘强, 穆兴民, 赵广举, 等. 延河流域水沙变化及其对降水和土地利用变化的响应[J]. *干旱区资源与环境*, 2021,35(7):129-135. Liu Qiang, Mu Xingmin, Zhao Guangju, et al. Runoff and sediment changes and their responses to precipitation and land use change in the Yanhe River Basin [J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2021,35(7):129-135.
- [32] 李亚娇, 沈昕昕, 李家科, 等. 汉江流域上游景观格局变化及水沙响应关系[J]. *西安理工大学学报*, 2022,38(4):538-550. Li Yajiao, Shen Bingxin, Li Jiake, et al. Changes of landscape pattern and response relationship between water and sediment in the upper reaches of Hanjiang River Basin [J]. *Journal of Xi'an University of Technology*, 2022,38(4):538-550.
- [33] 刘蓓蕾, 李鹏, 杨媛媛, 等. 皇甫川流域水沙变化对景观格局的响应[J]. *水土保持研究*, 2021,28(5):102-107. Liu Beilei, Li Peng, Yang Yuanyuan, et al. Response of variation of runoff and sediment to landscape pattern in Huangfuchuan basin [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2021,28(5):102-107.
- [34] Zhang Shanghong, Fan Weiwei, Li Yueqiang, et al. The influence of changes in land use and landscape patterns on soil erosion in a watershed [J]. *Science of the Total Environment*, 2017,574:34-45.