# 钦江流域植被覆被变化及其水沙效应

李建明[1], 黎树式[2,3,4], 王梦竹[1], 陈银薪[1]

〔1.北部湾大学 海洋学院, 广西 钦州 535011; 2.广西海洋环境灾害过程与生态保护技术重点实验室, 广西 钦州 535011; 3.平陆运河河口海湾生态系统广西野外科学观测研究站, 广西 钦州 535000; 4.北部湾海洋发展研究中心(北部湾大学), 广西 钦州 535011〕

**摘　要:** [目的] 研究钦江流域植被覆被变化特征及其水沙效应,为流域治理和河流水沙调控提供科学依据。[方法] 基于2000—2021年逐月与逐年的水沙、NDVI和降水数据,以及2000—2024年逐年植被生长季的NDVI、降水与气温数据,通过相关分析、偏相关分析、多元线性回归模型分析等方法,分析钦江流域植被覆被年际和季节变化及其水沙效应。采用多元回归残差分析探讨植被覆被变化的驱动因素。[结果] ①2000—2021年钦江流域植被持续恢复,NDVI呈上升趋势,与输沙量形成显著负相关关系;植被与降水可有效解释输沙量变化。年降水量增加1 mm,年均NDVI增加0.1时,年输沙量减少3.05×10$^4$ t。②钦江流域NDVI的季节变化表现为:夏季>秋季>春季>冬季,植被对水沙过程的调节具有明显季节差异:夏季植被拦沙作用最强,输沙量与NDVI负相关;与春、冬季则呈正相关,体现出植被水土保持效应的季节非对称性。③气候变化与人类活动对植被变化的总贡献率均超过90%,气温升高和植树造林是促进植被恢复的主要因素。降水丰富和气温较高的中下游区域贡献率要高于上游,而城镇的扩张对植被覆被具有抑制作用。[结论] 钦江流域的植被恢复减沙效果明显。多元线性回归模型可以较好地模拟输沙量的变化,在北部湾河流流域具有一定的实用性。未来需重点关注城镇区域的生态建设。

**关键词:** NDVI; 植被覆被变化; 水沙效应; 多元回归分析; 钦江流域

**文献标识码:** A　　**文章编号:** 1000-288X(2026)04-0183-12　　**中图分类号:** S157.1, P333

**文献参数:** 李建明, 黎树式, 王梦竹, 等.钦江流域植被覆被变化及其水沙效应[J].水土保持通报,2026,46(4):183-194. Li Jianming, Li Shushi, Wang Mengzhu, et al. Vegetation cover change and its water-sediment effects in Qinjiang River basin [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation,2026,46(4):183-194.

**DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2026.04.007**　　**CSTR:32312.14.stbctb.2026.04.007**

# Vegetation cover change and its water-sediment effects in Qinjiang River basin

Li Jianming[1], Li Shushi[2,3,4], Wang Mengzhu[1], Chen Yinxin[1]

〔1.*College of Marine Sciences, Beibu Gulf University, Qinzhou, Guangxi* 535011, *China*; 2.*Guangxi Key Laboratory of Marine Environmental Disaster Processes and Ecological Protection Technology, Qinzhou, Guangxi* 535011, *China*; 3.*Guangxi Pinglu Canal Estuary and Gulf Ecosystem Observation and Research Station, Qinzhou, Guangxi* 535000, *China*; 4.*Beibu Gulf Marine Development Research Center* (*Beibu Gulf University*), *Qinzhou, Guangxi* 535011, *China*〕

**Abstract:** [Objective] The vegetation cover change characteristics and their water-sediment effects in Qinjiang River basin were investigated in order to provide scientific support for river basin management and river water-sediment regulation. [Methods] Based on the monthly and annual data of water and sediment, NDVI, and precipitation from 2000 to 2021, as well as the annual NDVI, precipitation, and temperature data during the vegetation growing season from 2000 to 2024, this study used correlation analysis, partial correlation analysis, and multiple linear regression model analysis to analyze the interannual and seasonal changes of vegetation cover

**收稿日期:**2025-09-29　　**修回日期:**2026-01-14　　**采用日期:**2026-01-16

**资助项目:**广西自然科学基金项目"平陆运河建设背景下钦江河口咸潮入侵变化及其机制研究"(2025GXNSFHA069274); 国家自然科学基金项目"北部湾南流江三角洲潮滩响应热带气旋的动力地貌过程"(42366008)。

**第一作者:**李建明(2000—),男(布依族),贵州省晴隆县人,硕士研究生,研究方向为流域-河口陆海相互作用。Email:3014742773@qq.com。

**通信作者:**黎树式(1980—),男(壮族),广西南宁市人,博士,教授,硕士研究生导师,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。

and their water-sediment effects. In addition, multiple regression residual analysis was used to explore the driving factors of vegetation cover change. [Results] ① From 2000 to 2021, vegetation cover in the Qinjiang River basin showed continuous improvement, with NDVI exhibiting an increasing trend and a significant negative correlation with sediment load. The multiple linear regression results indicated that vegetation cover and precipitation effectively explained sediment load changes: an increase of 1 mm in annual precipitation combined with an increase of 0.1 in the annual mean NDVI was associated with a reduction of $3.05\times10^4$ t in annual sediment load. ② Seasonal changes in NDVI in the Qinjiang River basin followed the order of summer > autumn > spring > winter. The regulation of water-sediment processes by vegetation exhibited pronounced seasonal differences. Vegetation showed the strongest sediment retention effect in summer, with a negative correlation between NDVI and sediment load, whereas positive correlations were observed in spring and winter, indicating the distinct seasonal asymmetry of soil and water conservation effects. ③ Climate change and human activities jointly accounted for more than 90% of the total contribution to vegetation cover change. Temperature increase and afforestation were the main drivers of vegetation restoration. The middle and lower reaches, characterized by abundant precipitation and high temperature, showed greater contribution than the upper reaches. In contrast, urban expansion exerted an inhibitory effect on vegetation cover. [Conclusion] Vegetation restoration in Qinjiang River basin exhibits a significant sediment reduction effect. The multiple linear regression model can effectively simulate sediment load changes, demonstrating potential applicability in other river basins within the Beibu Gulf region. Future attention should be paid to ecological construction in urban areas. The findings can provide scientific support for water-sediment regulation, ecological restoration, and river basin management under the background of the Pinglu Canal construction.

**Keywords: NDVI; vegetation cover change; water-sediment effects; multiple regression analysis; Qinjiang River basin**

植被作为陆地生态系统的重要组成部分,连接土壤圈、大气圈与生物圈,其覆盖变化对区域水文过程与土壤侵蚀强度具有深远影响[1]。已有研究表明,植被覆被改善通常伴随河流水沙量的下降[2]。它通过削弱降水溅蚀,延缓汇流时间,增强土壤团粒稳定性等途径,在抑制土壤侵蚀方面发挥关键作用。地表径流经河网汇入干流,使得流域植被覆被变化与河流水沙过程息息相关。植被不仅可以减少河流输沙量,而且在长期尺度上影响河流水文地貌格局的演变[3]。现有研究多集中于年尺度上流域水沙与NDVI响应关系,以及与径流的响应方面。例如,邵步粉等[4]在鄱阳湖流域建立了归一化植被指数与径流量变化间的响应模型,指出年径流量与年均NDVI呈正相关;然而Liu Peng等[5]研究发现,在某些情况下随植被覆被增加,径流量反而呈现减少趋势;与输沙的响应方面,Liu Peng等[6]研究表明,NDVI增加10%估计导致输沙量减少约32.6%,说明NDVI与输沙量呈负相关,并且植被增长降低了输沙贡献;进一步考虑降水因素后,Ma Yiming等[7]在长江上游的相关研究发现,降水是驱动径流变化的主要因素,NDVI与水沙迁移量呈负相关,植被的增加有利于减少水沙迁移。可见,识别植被、降水与水沙过程的耦合机制,对于制定针对性的水土保持措施具有重要意义。

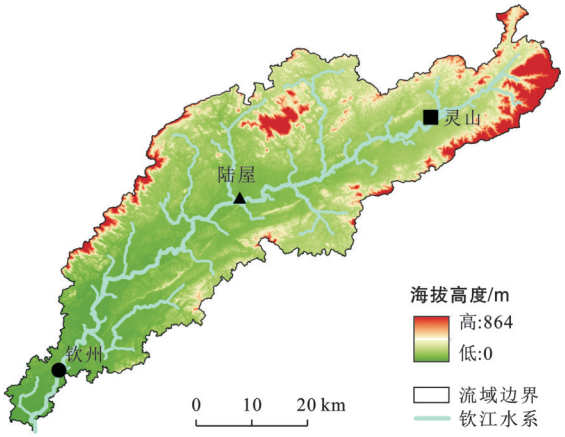
钦江流域位于广西南部,属亚热带季风气候区,汛期降水集中;流域上游土层浅薄,水土流失敏感性高[8]。近几十年来,该区域在城市化扩张、退耕还林政策及农业集约化等因素的驱动下,流域植被覆盖呈现“总体改善但局部退化”的复杂格局;研究表明,1990—2008年林地减少导致径流量和输沙量分别增加0.17%和4.01%[9];在平陆运河的建设过程中,其对河流水沙过程和沿岸植被产生重要影响。此外,植被具有相对稳定的物候特征,降水则呈现较强的年内波动性,当遇到高强度的季节性降水,将容易引发土壤侵蚀,可能导致河流水沙增加。在北部湾河流流域,对于降水、植被覆被特征与河流水沙在年际和季节尺度上的动态耦合关系研究较少,缺乏对三者间的多元定量分析。因此,识别并量化这种季节尺度的响应关系,对于深入理解流域水沙过程及其调控机制具有重要的科学意义。基于此,本文基于钦江流域2000—2021年逐月和逐年的水沙、NDVI、降水数据,应用相关分析、偏相关分析和多元线性回归模型等方法,在分析植被年际和季节的变化及其与水沙响应关系的基础上,揭示流域植被与水沙、降水的定量关系;基于钦江流域2000—2024年逐年植

被生长季的NDVI、降水、气温数据,通过多元线性回归残差分析探究流域植被覆被变化的驱动因子,以期为流域治理和水沙调控提供科学依据。

# 1　材料与方法

## 1.1　研究区概况

钦江发源于广西钦州市灵山县,位于108°30′—109°30′E,21°50′—22°36′N。干流全长约179 km,流域面积约2 500 km$^2$,流域海拔高差约864 m,地势分布呈东北高西南低,流经灵山县、钦北区和钦南区等区域,最终注入茅尾海(图1)。钦江流域位于北回归线以南,属于亚热带季风气候,降水充沛,年均降水量在1 600 mm左右,平均温度约22 ℃。此外,1965—2021年钦江的多年平均径流量约为$1.00\times10^9$ m$^3$左右,平均输沙量约为$2.01\times10^5$ t[10]。




注:基于自然资源部标准地图网站下载的审图号为GS(2024)0650号的标准地图制作,底图无修改。下同。

**图1　钦江流域地形图**

**Fig.1　Topographic map of Qinjiang River basin**

## 1.2　数据来源

本研究使用的数据有2个时间序列,逐月与逐年的输沙量($S$)、径流量($R$)、NDVI($V$)、降水量($P$)数据为2000—2021年;逐年植被生长季的NDVI、降水量、气温数据为2000—2024年。2000—2021年输沙量和径流量数据来源于《广西河流泥沙公报》,陆屋水文站的实测数据,经日数据计算得到月、年输沙量以及月、年径流量,输沙量2009年缺失。NDVI数据通过GEE(Google Earth Engine)云计算平台提取,先运用掩膜算法去除云层、阴影干扰,然后进行辐射定标、大气校正等预处理,以提高数据质量,再通过特定波段组合得到2000—2024年月均、植被生长季、年均NDVI。月、植被生长季、年降水量以及植被生长季的气温数据来源于国家青藏高原科学数据中心(https://data.tpdc.ac.cn);NDVI、降水量、气温数据,时间分辨率为16 d,空间分辨率为1 km。通过常乐水文站获取钦江流流域2000—2020年的水沙数据,通过同样的方法获取和处理2000—2020年的降水量和年均NDVI数据,进一步提高数据的可靠性和模型的适用性。

在钦江水沙与NDVI的响应特征中,探讨NDVI的年际变化时,取每一年的平均值表示植被覆盖度特征;探讨季节变化时,根据《气候季节划分》(GB/T 42074—2022)将3,4,5月划分为植被物候春季,6,7,8月划分为植被物候夏季,9,10,11月划分为秋季,12,1,2月划分为冬季。2月植被处于休眠与土壤脆弱期,4月植被处于复苏与春汛侵蚀期,7月植被处于鼎盛与暴雨侵蚀期,10月植被处于衰退与凋落物保护期。结合广西的植被生长情况[11],春季选取4月、夏季选取7月、秋季选取10月、冬季选取2月来表示不同季节的植被覆被特征;植被生长季为4—10月。在探讨气候变化和人类活动对植被覆被影响时,降水量、NDVI、气温为2000—2024年逐年植被生长季时段的数据。

## 1.3　研究方法

### 1.3.1　突变检验

为减少误差,本文使用累积距平法、曼-肯德尔(Mann-Kendall)检验及Pettitt检验对水沙突变进行分析,在得出水沙在年际变化中的变异年份后,进一步分析突变年份前后各因子间的相关性。

累积距平法通过计算径流量或输沙量的累积距平值来构建累积距平序列曲线。依据累积距平曲线的变化特征,当曲线斜率发生改变时,其拐点所对应的年份即被认定为水文序列发生转折的关键时间点[12]。计算公式为

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

$$\bar{x}=\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}x_i\tag{2}$$

式中:$Y_t$表示第$t$年的累积距平值;$x_i$为第$i$年径流量(m$^3$)或输沙量(t);$\bar{x}$表示径流量或输沙量多年平均值;$n$表示年序列长度。

曼-肯德尔(Mann-Kendall)突变检验是一种非参数检验,广泛运用于水文数据分析[13]。计算公式为

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

$$r_i=\begin{cases}0 & (x_i>x_j)\\ 1 & (x_i\leqslant x_j)\end{cases}\quad(j=1,2\cdots i)\tag{4}$$

$$UF_k=\frac{\left[S_k-E(S_k)\right]}{\sqrt{\mathrm{var}(S_k)}}\quad(k=1,2\cdots n)\qquad(5)$$

式中：$S_k$（定义为对$i$，所有$j(j\leqslant i)$中满足$x_i>x_j$的个案数累计值）用来检测突变。在原序列满足独立同分布的前提下，对$S_k$进行标准化处理，即$E(S_k)$，var$(S_k)$，得到正向统计量序列UF。将原序列反序后，按同法计算得到反向统计量序列UB。在分析中，UF与UB两条曲线在置信区间内的交点，即被认定为序列突变发生的统计时间点，置信阈值为0.05。

Pettitt检验是通过检测时间序列均值发生变化的时间来确定突变点的非参数检验[14]。其优点在于能够识别突变点并进行显著性检验；但也存在局限性。通常仅能识别出序列中最为明显的单一突变点。计算公式为

$$U_t,Y=U_{t-1},Y+\sum_{i=1}^{n}\mathrm{sgn}\left(x_i-x_j\right)\qquad(6)$$

$$K_t,Y=\max\left|U_t,Y\right|\qquad(1\leqslant t\leqslant Y)\qquad(7)$$

$$p=2\exp\left(\frac{-6_t^2,Y}{Y^3+Y^2}\right)\qquad(8)$$

式中：$U_t,Y$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；$K_t,Y$为突变发生时间$t$对应的统计值；$p$为显著性概率。通过统计量序列$U_t,Y$计算得到其绝对值的最大值$K_t,Y$，并依据其对应的显著性概率$p$判断突变是否存在：当$p\leqslant0.05$时，认为序列存在突变点，且该$K_t,Y$对应的时刻即为突变时间。

1.3.2 多元线性回归模型与偏相关分析

多元线性回归模型是研究多个自变量对因变量的综合影响，基于自变量的线性组合实现对因变量的预测与解释[18]。利用多元线性回归方程构建起钦江河流水沙、植被覆被特征、降水量三者的综合响应关系。方程如下：

$$Y=b_1x_1+b_2x_2+b_3\qquad(9)$$

式中：$Y$是多元线性回归模型中的因变量；$x_1$，$x_2$为多元线性回归模型中的自变量；$b_1$，$b_2$是回归系数，$b_3$是常数项。在回归方程中，先对模型整体进行显著性检验，当$p<0.05$时，再对方程的各个系数进行$t$检验，当各个系数的$p$值都小于0.05时，说明方程成立且具有统计学意义，具有较好的实用性[15]。同时本研究已对多元线性模型中的NDVI、降水量进行共线性检验，不存在多重共线性。

偏相关分析通常用于分析两变量间的相关性，同时消除其他变量影响。即当两个变量与另外变量相关时，使一个变量固定，探讨另外两个变量的相关性[16]。此外，通过互相关法分析在季节尺度上NDVI变化对降水变化的滞后时间，分别计算春季（3—5月）、夏季（6—8月）、秋季（9—11月）的平均NDVI与对应时段内降水量的相关系数。分析中考虑滞后1～3个月，共3种时间梯度，并以最大相关系数（$R_{\max}$）所对应的时间梯度作为NDVI对气候响应的最优滞后时间。冬季由于植被稀疏，故未被考虑。

1.3.3 多元线性回归残差分析

首先采用一元线性回归计算NDVI的年际变化趋势，并将其斜率定义为NDVI的年际变化趋势率（slope）[17]。其计算公式为

$$\mathrm{slope}=\frac{n\sum_{i=1}^{n}(i\mathrm{NDVI}_i)-\sum_{i}^{n}i\sum_{i=1}^{n}\mathrm{NDVI}_i}{n\sum_{i=1}^{n}i^2-\sum_{i=1}^{n}i}\quad(i=1,2\cdots n)\qquad(10)$$

式中：slope为年均NDVI一元线性方程的斜率；$i$为年序号；$n$为年数；$\mathrm{NDVI}_i$为第$i$年的年均NDVI；slope＞0表示年NDVI随时间递增，slope＜0则表示随时间递减。

再建立气温、降水和NDVI的线性模型，拟合得到特定气候条件下的NDVI预测值$\mathrm{NDVI_{CC}}$，用以表示自然因素对植被的影响；进一步计算NDVI实际值与预测值的残差（$\mathrm{NDVI}_{HA}$）并分析其变化趋势，用以表示人类活动对植被的影响[17]。计算公式如下：

$$\mathrm{NDVI_{CC}}=aT+bP+c\qquad(11)$$

$$\mathrm{NDVI_{HA}}=\mathrm{NDVI_{obs}}-\mathrm{NDVI_{CC}}\qquad(12)$$

式中：$\mathrm{NDVI_{CC}}$表示回归模型中的NDVI预测值；$\mathrm{NDVI_{obs}}$为基于遥感影像的观测值；$a$，$b$，$c$为模型系数；$T$为年均温（℃），$P$为年降水量（mm）。

最后结合$\mathrm{NDVI_{HA}}$和$\mathrm{NDVI_{CC}}$的线性趋势率，对植被NDVI变化驱动因素进行判定和贡献率计算（表1），$\mathrm{NDVI_{CC}}$与$\mathrm{NDVI_{obs}}$分别表示在气候变化和人类活动作用下生长季NDVI的线性变化趋势[17]。

## 2 结果与分析

### 2.1 钦江水沙及归一化植被指数年际变化特征

2000—2021年钦江水沙呈减少趋势，径流量每年减少约$1.79\times10^7$ m$^3$，输沙量每年减少约4 600 t。植被则呈现出波动式增长趋势，NDVI年均增长率为0.008/a（图2），表明钦江流域的植被逐步得到改善。已有研究指出，近40 a来广西年平均气温以0.255 ℃/10 a的速率波动式缓慢增长，温度升高有利于植被光合作用，从而促进植被生长[18]。此外，研究期间实施的退耕还林、沿海防护林等生态工程建设，有利于水土保持，使得钦江的输沙量和径流量有所减少[9]。

**表 1　植被覆被 NDVI 变化的驱动因子贡献率量化方法**

**Table 1　Quantification methods for contribution rates of driving factors to NDVI change of vegetation cover**

| $S_1$ | 驱动因子 | 驱动因子的判别标准 | | 驱动因子的贡献率/% | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | $S_1$ | $S_2$ | 气候变化 | 人类活动 |
| >0 | $C_C$ & $H_A$ | >0 | >0 | $\frac{S_2}{S_1}$ | $\frac{S}{S_1}$ |
| | $C_C$ | >0 | <0 | 100 | 0 |
| | $H_A$ | <0 | >0 | 0 | 100 |
| <0 | $C_C$ & $H_A$ | <0 | <0 | $\frac{S_2}{S_1}$ | $\frac{S}{S_1}$ |
| | $C_C$ | <0 | >0 | 100 | 0 |
| | $H_A$ | >0 | <0 | 0 | 100 |

注:$C_C$表示气候变化;$H_A$表示人类活动;$S_1$表示 NDVI 观测值斜率;$S_2$表示 NDVI 预测值斜率;$S$表示 NDVI 残差的斜率。

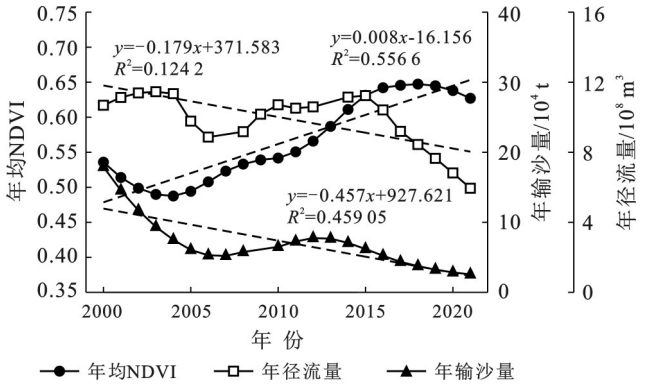



**图 2　钦江流域 2000—2021 年河流水沙及年均 NDVI 年际变化趋势**

**Fig.2　Interannual change trends of river water-sediment conditions and annual average NDVI in Qinjiang River basin (2000—2021)**

## 2.2　钦江水沙年际变化与植被覆被变化的响应关系

利用钦江流域的年均 NDVI 和年输沙量、年径流量制作散点图,去除异常值,并进行线性拟合(图 3)。年均 NDVI 与年输沙量、年径流量与年输沙量具有显著的相关性($p<0.05$),相关系数分别为 −0.483,0.652,并且年径流量与年输沙量的相关性达到了极显著相关水平($p<0.01$);在变化趋势上,年径流量和年输沙量都随着年均 NDVI 的增加而减少,但仅有年输沙量与年均 NDVI 呈显著性负相关($p<0.05$)(表 2)。线性拟合表明,年均 NDVI 每增加 0.1,年输沙量减少 $3.65\times10^4$ t(图 3)。

已有研究表明[19],M-K 突变检验会出现在水沙序列增大或减少的前一年,或者存在虚假突变。因此,综合累积距平法、M-K 检验、Pettitt 检验 3 种检验的共同检验结果表明,年径流量的突变年份发生在 2017 年,年输沙量的突变年份发生在 2013 年(表 3)。

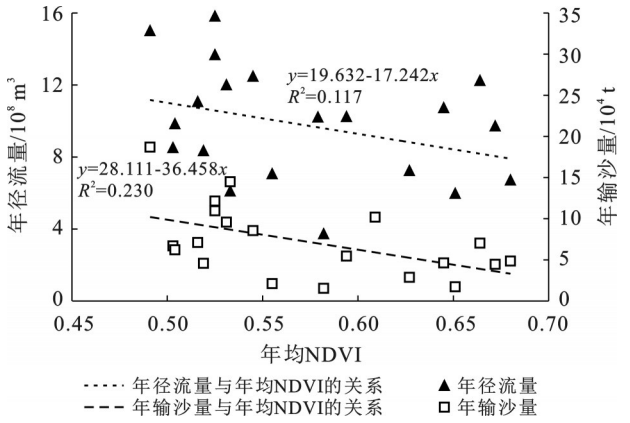



**图 3　钦江水沙与年均 NDVI 的关系**

**Fig.3　Relationship between water-sediment conditions and annual average NDVI in Qinjiang River basin**

**表 2　钦江水沙年际变化与植被覆被变化的相关系数($r$)**

**Table 2　Correlation coefficients ($r$) between interannual water-sediment change and vegetation cover change in Qinjiang River basin**

| 项 目 | 年径流量 | 年输沙量 | NDVI |
|---|---|---|---|
| 年径流量 | 1.000 | 0.652** | −0.197 |
| 年输沙量 | 0.652** | 1.000 | −0.483* |
| NDVI | −0.197 | −0.483* | 1.000 |

注:*表示显著相关即 $p<0.05$,**表示极显著相关 $p<0.01$。下同。

钦江水沙与植被覆被的相关性在变异年份前后有较大的变化(表 4)。年径流量与年均 NDVI 在 2017 年前由正相关转变为负相关,相关性有所增强。Wu Luhua 等[20]研究表明,年径流的变化主要受年降水量的影响。2017 年之后降水量有逐渐减少的趋势,可能是由于降水量减少所引起的径流量减少所致,而受植被影响较小[10];年输沙量与年均 NDVI 在突变年份 2013 年之后的负相关性有所增强。有研究表明,2000—2010 年耕地转为林地面积为 4.53 km²,2010—2020 年耕地转变为林地面积为 80.59 km²,森林覆盖率大幅度增加[21]。此外,植被改善最为明显的时间出现在 2012 年[22],在植被恢复之初,地表枯落物层尚薄,拦沙截流能力较弱,且根系加固土壤、团聚体稳定性的提高需要一定时间,此后土壤入渗能力与抗剪强度逐渐增强,表现为退耕还林、植树造林等生态工程措施的减沙效果在水沙数据上呈现出一定的滞后性[23]。

## 2.3　归一化植被指数季节变化特征

钦江流域 2000—2024 年四季的 NDVI 整体呈上升的趋势,夏季比秋季略高,春季和冬季上升的趋势

更明显;4—10月为植被生长季,植被的生长受气温和降水等因素的影响较大。而由于钦江流域处于北回归线以南,且在4—10月光合作用较强且降雨充沛,植被生长季NDVI值更大(图4)。综合分析,钦江流域NDVI的季节变化为:夏季>秋季>春季>冬季。

**表3 2000—2021年钦江水沙突变检验**

**Table 3 Abrupt change tests for water-sediment conditions in Qinjiang River basin (2000—2021)**

| 项目 | 累积距平法 | M-K检验 | Pettitt检验 |
|---|---|---|---|
| 径流量 | 2003,2007,2010,2017 | 2005,2007,2018 | 2017 |
| 输沙量 | 2003,2010,2013 | 2004,2008,2010,2014 | 2013 |

**表4 钦江水沙年际变化与植被覆被变化的变异特征**

**Table 4 Characteristics of interannual water-sediment change and vegetation cover change in Qinjiang River basin**

| 项目 | 变异年份 | 变异年份之前 $r(R, V)/r(S, V)$ | 变异年份之后 $r(R, V)/r(S, V)$ |
|---|---|---|---|
| 径流量 | 2017 | $r(R, V)=0.027$ | $r(R, V)=-0.478$ |
| 输沙量 | 2013 | $r(S, V)=-0.212$ | $r(S, V)=-0.307$ |

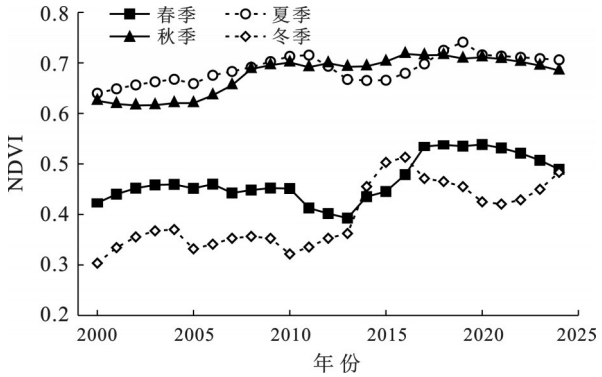



**图4 钦江流域月均NDVI的季节变化特征**

**Fig.4 Seasonal change characteristics of monthly average NDVI in Qinjiang River basin**

## 2.4 钦江水沙季节变化与不同植被物候季节的响应关系

钦江水沙在春、夏两季(3—8月)与月均NDVI整体上呈负相关,且在7月时月输沙量和月均NDVI表现为显著负相关($p<0.05$)(图5);一般来说,4—10月是植被生长季,植被的增加有利于拦截泥沙,可起到减少水土流失的作用。5月出现月输沙量、月径流量和月均NDVI呈正相关的情况。因为5月钦江流域正处于由春季向夏季过渡的时期,植被NDVI有所升高,此时植被进入较快生长期。但此阶段植被尚未完全郁闭,地表覆盖度和根系固土能力仍处于相对较低水平,形成的水土保持结构仍有不足。此外,受亚热带季风气候影响,春汛期降水集中且降雨强度较大,降水对产流产沙过程的主导作用明显增强。在此背景下,NDVI的升高主要表征的是植被生长状态的改善,而非其拦截径流,固持泥沙能力的同步增强。强降水条件下地表径流迅速形成并携带松散表层土壤向河道汇集,从而导致径流量与输沙量同步增加,表现为NDVI与水沙过程的阶段性正相关关系[24]。径流量和输沙量在秋、冬两季(1—2,9—12月)与月均NDVI呈正相关,且在2月时径流量与月均NDVI表现为显著正相关($p<0.05$)。综合分析,钦江水沙与月均NDVI在春季和夏季呈负相关,秋季和冬季呈正相关,但相关性普遍不显著。其原因可能是多因子间的共线性降低了对NDVI的解释力[25],气温、蒸散、土壤湿度、土壤性质等要素共同作用于植被生长与泥沙径流,形成掩蔽效应。

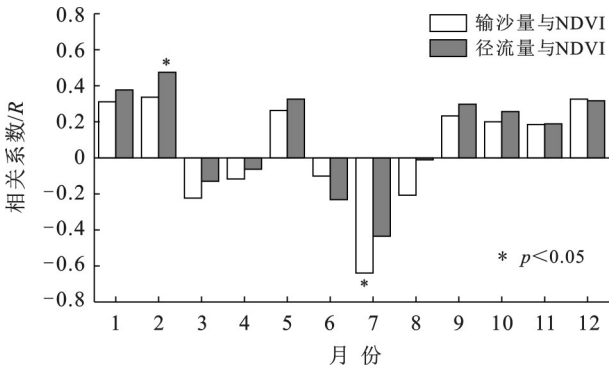



**图5 钦江水沙季节变化与植被覆被变化的相关系数**

**Fig.5 Correlation coefficients between seasonal water-sediment change and vegetation cover change in Qinjiang River basin**

由于植被在夏季和冬季变化最为明显,因此选取夏季和冬季进行详细分析。在冬季,线性拟合表明,月均NDVI每增加0.1,径流量增加$1.37\times10^7$ m$^3$,输沙量增加5 800 t(图6a),但水沙与月均NDVI的相关性不显著。在物候方面,植被夏季的情况则与冬季相反。水沙随着植被覆被的增加而减少,其中月输沙量与月均NDVI的线性拟合达到显著水平($p<0.05$),表现为夏季月均NDVI每增加0.1,月径流量减少$1.26\times10^8$ m$^3$,月输沙量减少$3.31\times10^4$ t(图6b)。综合分析,钦江水沙季节性波动较大,与月均NDVI的线性拟合

效果普遍不显著。其原因可能是随着退耕还林效果显现,植被覆盖持续增长。当NDVI升高至一定水平后,水文调控作用趋于饱和。NDVI在较高水平时对产流产沙的边际调节作用减弱(饱和效应),从而掩盖季节性差异,线性拟合效果减弱[26];仅输沙量与月均NDVI在夏季(7月)达到显著水平($p<0.05$)。

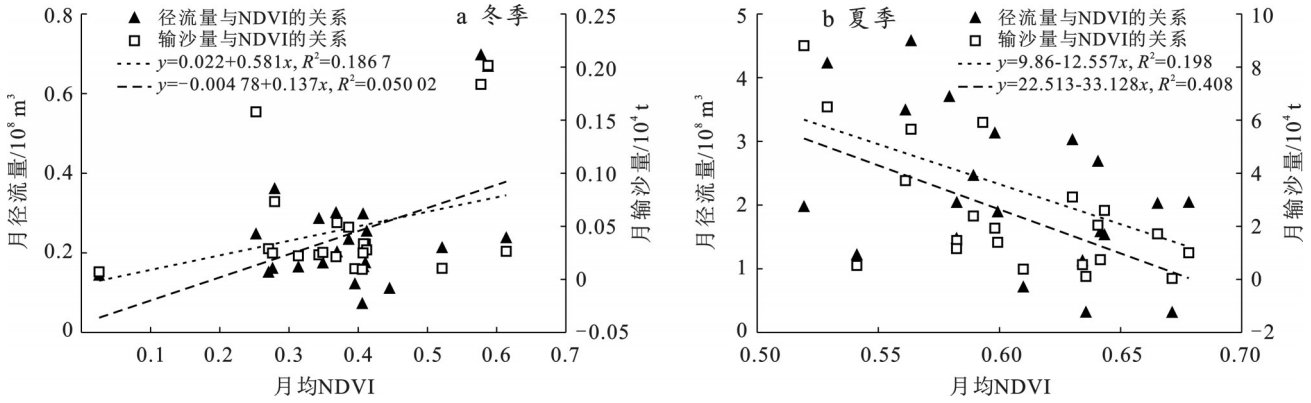



**图6　物候植被冬季(2月)河流水沙与月均NDVI的关系(a)以及物候植被夏季(7月)河流水沙与月均NDVI的关系(b)**

**Fig.6　Relationship between river water-sediment conditions and monthly average NDVI of phenological vegetation in winter (February) (a) and summer (July) (b)**

### 2.5　钦江水沙与植被覆被和降水量的综合响应关系

#### 2.5.1　钦江水沙年际变化与植被覆被和降水量的综合响应关系

已有研究表明,钦江水沙与降水量存在显著的相关性[21]($p<0.05$)。偏相关分析恰好可剔除其他变量影响以探究另外两个变量的相关性。因此采用偏相关分析的方法,将降水量作为控制变量进一步探讨NDVI与河流水沙的相关性,更好地说明NDVI对水沙的影响。

钦江流域年均NDVI和降水量呈不显著的负相关性;偏相关分析表明,年径流量和年均NDVI呈不显著的负相关,年输沙量和年均NDVI呈显著负相关($p<0.05$),相关系数为−0.465(表5),进一步说明植被的恢复具有减少水土流失,降低泥沙量的作用。

**表5　钦江水沙年际变化与NDVI、降水量的相关系数$r$**

**Table 5　Correlation coefficients ($r$) between interannual water-sediment change, NDVI, and precipitation in Qinjiang River basin**

| 相关系数 | $r(V, P)$ | $r(\mathrm{RV}, P)$ | $r(\mathrm{SV}, P)$ |
|---|---|---|---|
| 数值 | −0.109 | −0.165 | −0.465* |

注:$r(V, P)$表示年均NDVI与年降水量的相关系数;$r(\mathrm{RV}, P)$表示将年降水量固定后年均NDVI与年径流量的偏相关系数;$r(\mathrm{SV}, P)$表示将年降水量固定后年均NDVI与年输沙量的偏相关系数。下同。

在钦江水沙年际变化与降水量、年均NDVI的拟合方程中,$p$值均小于0.05(表6)。但在进行$t$检验时,只有因变量为输沙量的回归方程中各项系数显著性水平达到0.05,检验值$F$为5.371,说明因变量为输沙量的回归方程具有统计学意义。在多元线性回归模型中,当年降水量增加1 mm, NDVI增加0.1时,年输沙量减少$3.05\times10^4$ t。这说明植被增加带来的减沙效益明显。

**表6　钦江水沙年际变化与NDVI、降水量的多元线性关系**

**Table 6　Multiple linear relationships of interannual water-sediment changes with NDVI and precipitation in Qinjiang River basin**

| 多元线性回归方程 | $R^2$ | $P$ |
|---|---|---|
| $R=0.007\,P-6.825\,V-0.527$ | 0.374 | <0.01 |
| $S=0.006\,P-30.574\,V+12.562$ | 0.294 | <0.05 |

结果显示,计算的年输沙量与实测的年输沙量相关性显著($p<0.005$),相关系数为正,并且$R^2$达到0.601,符合实际意义,说明相关性具有统计学意义(图7)。因此,多元线性回归模型可以较好地模拟植被覆被和降水量对钦江输沙量的影响状况,具有较好的实用性。

#### 2.5.2　钦江水沙季节变化与植被覆被和降水量的综合响应关系

月降水量和月均NDVI在4—7月呈负相关,且在6月呈显著负相关($p<0.05$),1—3月,8—12月呈不显著正相关(图8)。偏相关分析表明,月径流量与月均NDVI在2月和5月呈显著正相关($p<0.05$),在7月、8月呈不显著负相关。月输沙量与月均NDVI在5月呈显著正相关($p<0.05$),在3月、7月、8月呈负相关,其中在7月相关性显著($p<0.05$)(图8)。综合分析,植被覆被与降水在春夏之交时段呈负相关;在控制降水量的情况下,钦江水沙与植被覆被在夏

季呈负相关，与植被覆盖度在春、冬季呈正相关，说明夏季植被形成较为有效的水土保持结构之后的拦沙截流作用最明显。

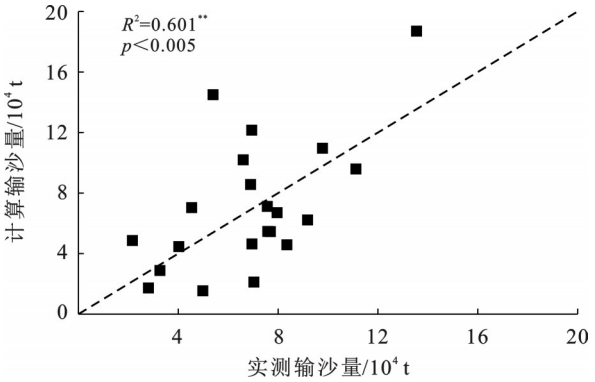



**图 7 计算的钦江流域年输沙量与实测的年输沙量的相关性**

**Fig.7 Correlation between calculated and measured annual sediment load in Qinjiang River basin**

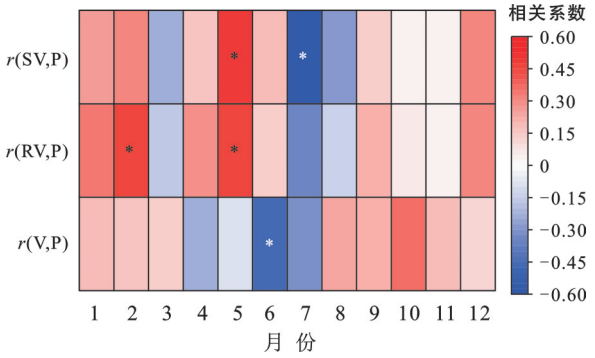



**图 8 钦江水沙季节变化与 NDVI、降水量的相关性**

**Fig.8 Correlation of seasonal water-sediment change with NDVI and precipitation in Qinjiang River basin**

在以径流量为因变量的多元线性回归方程中，有 1，4，5，6，7，9，10，11，12 月 $p$ 值小于 0.05。经计算，检验值 $F$ 为 8.871；再对各项系数进行 $t$ 检验，自变量各项系数最终显著性水平都小于 0.05，仅 5 月具有统计学意义。在以输沙量为因变量的多元线性回归方程中，有 1，4，5，6，7，11 月 $p$ 值小于 0.05。经计算，检验值 $F$ 为 18.242；再对各项系数进行 $t$ 检验，自变量各项系数显著性水平都小于 0.05，仅 5 月（表 7）具有统计学意义。综合分析，钦江水沙季节变化与 NDVI、降水量的多元线性关系普遍不显著，通过时滞互相关法计算得出钦江流域春、秋季植被对降水变化滞后近 1 个月（表 8），不显著原因可能是钦江流域植被对降水变化存在滞后现象，这种时间错配导致 NDVI 与降水在季节尺度上存在交互干扰，可能使多元线性回归的显著性被削弱；仅有 5 月的多元线性回归模型成立，表现为降水量增加 1 mm，月均 NDVI 增加 0.1，径流量和输沙量分别随之增加 $1.96\times10^7$ m³，2 400 t。

**表 7 钦江水沙季节变化与 NDVI、降水量的多元线性关系**

**Table 7 Multiple linear relationships of seasonal water-sediment change with NDVI and precipitation in Qinjiang River basin**

| 月份 | 多元线性回归方程 | $R^2$ | $P$ |
|---|---|---|---|
| 1 | $R$=0.004 $P$+0.505 $V$−0.075 | 0.520 | $p$<0.01 |
| | $S$=0.002 $P$+0.127 $V$−0.061 | 0.662 | $p$<0.01 |
| 2 | $R$=0.001 P+0.556 $V$−0.030 | 0.163 | $p$>0.05 |
| | $S$=0.001 P+0.138 $V$−0.023 | 0.030 | $p$>0.05 |
| 3 | $R$=0.001 $P$−0.233 $V$+0.286 | 0.048 | $p$>0.05 |
| | $S$=0.001 $P$−0.178 $V$+0.143 | 0.049 | $p$>0.05 |
| 4 | $R$=0.005 $P$+0.651 $V$−0.324 | 0.663 | $p$<0.01 |
| | $S$=0.003 $P$+0.352 $V$−0.339 | 0.475 | $p$<0.01 |
| 5 | $R$=0.003 $P$+1.932 $V$−0.972 | 0.428 | $p$<0.05 |
| | $S$=0.005 $P$+2.305 $V$−1.964 | 0.633 | $p$<0.01 |
| 6 | $R$=0.006 $P$+2.048 $V$−1.600 | 0.432 | $p$<0.05 |
| | $S$=0.010 $P$+7.020 $V$−5.726 | 0.244 | $p$<0.05 |
| 7 | $R$=0.005 $P$−6.878 $V$+4.150 | 0.523 | $p$<0.01 |
| | $S$=0.005 $P$−27.39 $V$+16.805 | 0.467 | $p$<0.01 |
| 8 | $R$=0.005 $P$−2.247 $V$+1.645 | 0.188 | $p$>0.05 |
| | $S$=0.004 $P$−6.633 $V$+4.597 | 0.025 | $p$>0.05 |
| 9 | $R$=0.004 $P$+3.291 $V$−2.221 | 0.321 | $p$<0.05 |
| | $S$=0.004 $P$+2.241 $V$−1.749 | 0.185 | $p$>0.05 |
| 10 | $R$=0.009 $P$+1.151 $V$−0.754 | 0.260 | $p$<0.05 |
| | $S$=0.007 $P$+0.526 $V$−0.525 | 0.154 | $p$>0.05 |
| 11 | $R$=0.009 $P$+0.069 $V$−0.148 | 0.829 | $p$<0.01 |
| | $S$=0.005 $P$+0.046 $V$−0.180 | 0.724 | $p$<0.01 |
| 12 | $R$=0.007 $P$+0.956 $V$−0.469 | 0.294 | $p$<0.05 |
| | $S$=0.001 $P$+0.339 $V$−0.176 | 0.122 | $p$>0.05 |

**表 8 钦江流域植被对降水响应的季节性滞后特征**

**Table 8 Seasonal lag characteristics of vegetation response to precipitation in Qinjiang River basin**

| 滞后/月 | 相关系数 | | |
|---|---|---|---|
| | 春季 | 夏季 | 秋季 |
| 0 | −0.288 | −0.459* | 0.354 |
| 1 | 0.510* | −0.147 | 0.491* |
| 2 | 0.415* | −0.357 | −0.308 |
| 3 | 0.127 | −0.074 | −0.260 |

同理进行进一步验证，多元回归方程 5 月径流量和输沙量的计算值与实测值具有较好的拟合度（图 9），$R^2$ 分别达到 0.692 和 0.818。这说明多元线性回归模型可以较好地拟合钦江径流泥沙的变化情况。

## 3 讨 论

### 3.1 气候变化和人类活动对植被覆被变化的影响

气候变化对钦江流域植被覆被变化的贡献率为

正的约占流域面积95%;其中,气候变化的贡献率在40%～60%范围的占流域面积50%以上,相对较低20%～40%的贡献率占流域面积的近20%,主要分布于陆屋北部和钦江上游等山地区域,海拔上升的同时气温降低,贡献率相较之下有所降低;贡献率在60%以上的约占流域面积15%,主要分布于陆屋镇及钦江下游(图10a),根据《钦州市水资源公报》,钦江流域下游降水量普遍高于上游,此时降水将是驱动植被增长的主要因素。植被对气温呈正敏感性,近40 a来广西年平均气温呈缓慢增长趋势[18],因此,气温可能是钦江流域植被覆被升高的直接因素。此外,钦江流域属于亚热带季风气候,降水充沛,长期来看,有利于植被的生长[1,18],二者共同驱动植被的增加,占比超过流域总面积95%,植被恢复后能有效抑制泥沙的流失。短期的强降雨虽对植被的变化影响不明显,但会对河流水沙产生较大影响[10]。气候变化对钦江流域植被的抑制作用约占流域面积的5%,主要分布于城镇区域。

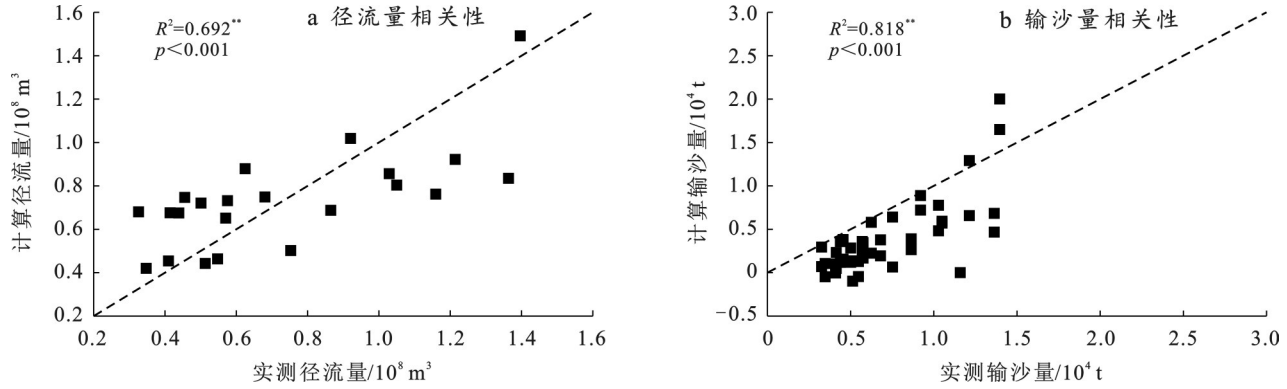



**图9　多元线性回归模型5月计算的径流量与实测的径流量的相关性(a)以及5月计算的输沙量与实测输沙量的相关性(b)**

**Fig.9　Correlation between calculated and measured runoff in May (a), and correlation between calculated and measured sediment load in May (b) based on multiple linear regression model**

人类活动对钦江流域植被覆被变化的贡献率为正的约占流域面积92%。其中,人类活动的贡献率在40%～60%范围的占流域面积的50%以上;贡献率在60%以上的约占流域面积16%,主要分布于陆屋镇的东侧以及钦江的上游等流域的边缘地带。2000年以来实施的封山育林、退耕还林政策以及人工造林等方式,增加的林地也位于坡度较高的流域边缘[10],森林面积逐步上升起到涵养水源的同时也起到固沙作用。因此,钦江水沙含量也随之降低[9]。人类活动对钦江流域植被覆被变化的贡献率为负的约占流域面积8%,主要分布于钦州、灵山、陆屋等城镇区域(图10b)。由于城镇化加速及建设用地扩张导致不透水地表蔓延,对自然植被造成空间上的挤压,导致区域植被覆盖度降低[27]。2000年之后,钦州市、灵山县等区域建设用地呈向外扩张的趋势[21],也会导致流域下垫面的植被类型发生变化,会直接影响其水沙过程[6]。近年来,平陆运河的建设也会对沿岸植被与河床造成一定的影响,可能导致河流泥沙含量发生变化。

### 3.2　局限与展望

本研究可加深对植被覆被变化及自然因素和人为因素对其影响的认识,与刘明霞等[28]对赣南流域的研究结果存在相似和不同之处。相似之处在于植树造林、封山育林对植被恢复作用明显,气候变化和人类活动对植被生长的抑制作用主要位于城镇区域;不同之处在于赣南流域上游主要受温度影响,较高的温度利于植被生长。此时降水的影响较小。而钦江流域上游受温度和降水的共同影响,相对较低的温度和降水使其驱动植被生长的贡献率不如下游区域。

同时,植被变化的水沙效应与其他流域研究结果相比具有相似之处。在年尺度上,本研究发现年均NDVI与年输沙量显著负相关,与Liu Peng等[6]研究发现的NDVI与输沙负相关结论一致,均支持植被恢复能够抑制泥沙、产流的结论。季节尺度上的响应则较为复杂,本研究发现夏季NDVI与输沙呈负相关,而春季、冬季相关性为正,这一季节性差异与三峡库区研究的结论部分一致。夏季的植被减沙效益更明显[22]。但在春汛或植被尚未完全建立保护层时,降水主导产沙产流,导致NDVI与输沙量、径流量相关性减弱或反向[24]。本研究中年尺度的多元线性回归模型通过显著性检验,具有统计学意义,有较好的实用性;在灞河流域,李洋洋等[15]通过水沙、降水、气温以及蒸发量建立起气候-水沙多元线性回归模型,与实际的径流泥沙相比,也有较好的拟合效果;在北部湾另一条入海流域南流江,两流域间的降水

和 NDVI 相关性 $R^2$ 分别达到 0.979($p<0.01$)，0.815($p<0.01$)。结果表明计算的年输沙量与实测的年输沙量相关性显著($p<0.01$)(图 11)，具有统计学意义。这说明该数据具有一定的可靠性，模型能够合理刻画相邻流域输沙变化趋势，具有一定的区域适用性。

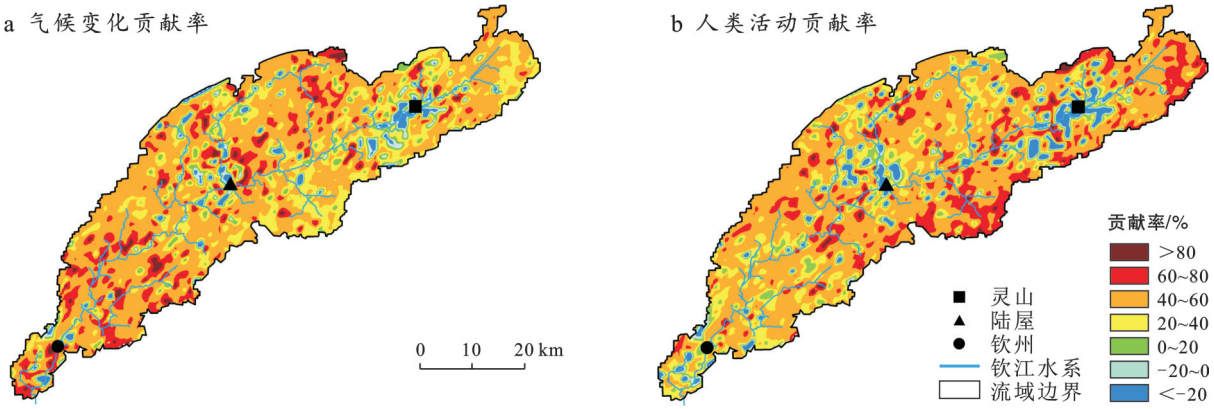



**图 10 气候变化(a)和人类活动(b)对钦江流域植被覆被变化贡献率的空间分布**
**Fig.10 Spatial distribution of contribution rates of climate change (a) and human activities (b) to vegetation cover change in Qinjiang River basin**

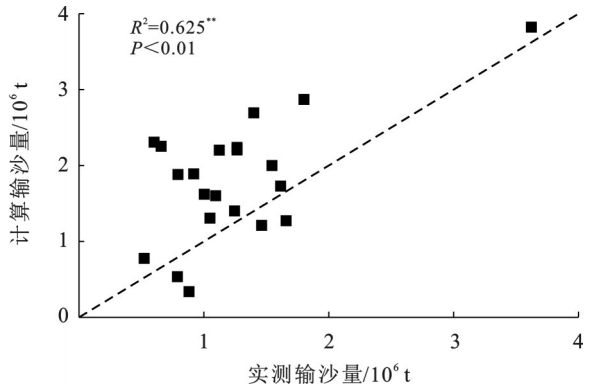



**图 11 南流江计算的年输沙量与实测的年输沙量的相关性**
**Fig.11 Correlation between calculated and measured annual sediment load in Nanliu River basin**

当流域间的气候或土地利用类型差异过大时，模型效果可能出现一定差异。与黄河流域及黄土区的研究相比，钦江流域具有春夏降雨集中度较高，易受热带气旋影响的特征[8]，每年约受到 5 个热带气旋的影响，在热带气旋影响下，降水过程具有历时短，强度大，峰值集中的典型特征。已有研究表明，热带气旋过境期间钦江水沙变化明显。钦江平均流量是正常天气的 9.06 倍，平均输沙量是正常天气的 23 倍[10]。此时强降雨往往成为主导产流产沙的因子；具体表现在中低强度降雨条件下，植被通过削弱降雨溅蚀，增强土壤入渗和延缓坡面汇流，可有效降低径流量与泥沙输出；而当降雨强度超过一定阈值后，土壤入渗迅速饱和，超渗产流占据主导，径流能量将明显增强，植被冠层截留与根系固土作用的边际减沙效应明显减弱。在此背景下，降雨成为驱动水沙变化的主导因子，植被的调控作用呈现弱化趋势[29]，从而出现季节上或特定月份(如 5 月)NDVI 与输沙呈正相关的现象。影响产流产沙的因子除植被与降水之外，还有诸如地形、土壤性质、土地利用等，这些因素共同及交互作用于降水驱动的水文过程，也导致降水要素中影响径流输沙的关键因子存在不同程度的差异，体现出复杂的水文过程[30]。多元线性拟合可能无法认识这种复杂的关系，需要用水文模型展开植被覆被变化与水沙关系的时空变化上的探究[29]，这也是本研究后续的重点。此外，本研究所采用的 1 km 空间分辨率难以有效捕捉河谷地带等细微空间差异，可能导致拟合精度有所降低。后续研究中将引入更高分辨率的数据，以提升分析的精细度与准确性。

## 4 结 论

(1) 2000—2021 年钦江流域植被呈持续改善趋势，NDVI 与输沙量呈显著负相关关系，表明植被恢复对减沙具有重要作用；输沙量和径流量突变后植被与水沙的相关性增强，进一步说明植被建设的水土保持效益。在年尺度上，多元线性模型能较好地拟合输沙量的变化，在北部湾河流流域具有较好的实用性。

(2) 钦江流域 NDVI 季节变化表现为：夏季>秋季>春季>冬季。由于春、秋季降水和植被存在 1 个月的时间错配，NDVI 与降水在季节尺度上存在交互干扰，以及 NDVI 与水沙的关系表现为“饱和效应”，对水沙过程的调节呈现明显季节差异，在夏季植被拦沙能力最强，输沙量与 NDVI 呈负相关，春、冬季 NDVI 与水沙表现为正相关，也导致多元线性回归模

型拟合效果不佳。

(3)气候变化和人类活动对植被覆被变化的贡献率都达到90%以上,气温升高和植树造林是其主要驱动因素。降水丰富和气温较高的中下游区域贡献率要高于上游。抑制作用集中于城镇扩张区。未来需重点关注城市化区域覆盖破碎化导致的植被退化问题。

## 参考文献(References)


[1] 廖春贵,胡宝清,熊小菊,等.广西植被时空变化及其对气候响应[J].森林与环境学报,2018,38(2):178-184.
Liao Chungui, Hu Baoqing, Xiong Xiaoju, et al. Spatial-temporal variation of vegetation and relations with climate change in Guangxi [J]. Journal of Forest and Environment, 2018,38(2):178-184.

[2] 吴钦孝,赵鸿雁,刘向东,等.森林枯枝落叶层涵养水源保持水土的作用评价[J].土壤侵蚀与水土保持学报,1998,4(2):24-29.
Wu Qinxiao, Zhao Hongyan, Liu Xiangdong, et al. Evaluation on role of forest litter to water source conservation and soil and water conservation [J]. Journal of Soil Erosion and Soil and Water Conservation, 1998, 4(2):24-29.

[3] 张寒,王琳.流域生态水文过程与植被响应研究进展[J].中国农学通报,2021,37(8):66-71.
Zhang Han, Wang Lin. Review of watershed eco-hydrological processes and vegetation responses [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2021, 37(8): 66-71.

[4] 邵步粉,周锁铨,顾婷婷,等.鄱阳湖流域NDVI时空变化及其与地表径流的关系[J].中国农业气象,2010,31(2):288-294.
Shao Bufen, Zhou Suoquan, Gu Tingting, et al. Spatio-temporal changes of NDVI and their relationships with runoff in the Poyang Lake basin [J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2010,31(2):288-294.

[5] Liu Peng, Jiang Zhongcheng, Li Yanqing, et al. Landscape pattern changes affect runoff and sediment yield in the Nandong underground river system in southwest China [J]. Sustainability, 2023,15(1):835.

[6] Liu Peng, Jiang Zhongcheng, Li Yanqing, et al. Quantitative study on improved budyko-based separation of climate and ecological restoration of runoff and sediment yield in Nandong underground river system [J]. Water, 2023,15(7):1263.

[7] Ma Yiming, Li Mingyue, Yao Huaming, et al. Change of NDVI in the upper reaches of the Yangtze River and its influence on the water-sand process in the Three Gorges reservoir [J]. Sustainability, 2025,17(2):739.

[8] 李鸿儒,卢远,何文.钦江流域土地利用/覆被变化对径流产沙的影响[J].中国水土保持,2016(4):40-43.
Li Hongru, Lu Yuan, He Wen. Impact of land use and land cover change on runoff and sediment yield of Qinjiang River basin [J]. Soil and Water Conservation in China, 2016(4):40-43.

[9] 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.

[10] 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.

[11] 许颖,张润泽,郭兵.2000—2020年中国植被时空变化格局及其对气候作用的滞后响应分析[J].自然资源遥感,2025,37(5):254-266.
Xu Ying, Zhang Runze, Guo Bing. Spatiotemporal variations of 2000—2020 vegetation in China and their time-lag responses to climate [J]. Remote Sensing for Natural Resources, 2025,37(5):254-266.

[12] 周园园,师长兴,范小黎,等.国内水文序列变异点分析方法及在各流域应用研究进展[J].地理科学进展,2011,30(11):1361-1369.
Zhou Yuanyuan, Shi Changxing, Fan Xiaoli, et al. Advances in the research methods of abrupt changes of hydrologic sequences and their applications in drainage basins in China [J]. Progress in Geography, 2011, 30(11):1361-1369.

[13] Hirsch R M, Slack J R, Smith R A. Techniques of trend analysis for monthly water quality data [J]. Water Resources Research, 1982,18(1):107-121.

[14] 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.

[15] 李洋洋,白洁芳,周维博,等.灞河流域气候因子对水沙变化的影响[J].水资源保护,2017,33(5):98-105,122.
Li Yangyang, Bai Jiefang, Zhou Weibo, et al. Impact of climate factors on variations of water and sediment in Bahe River basin [J]. Water Resources Protection, 2017,33(5):98-105,122.

[16] 邱海军,曹明明.基于SPOT VEGETATION数据的中国植被覆盖时空变化分析[J].资源科学,2011,33(2):335-340.

Qiu Haijun, Cao Mingming. Spatial and temporal variations in vegetation cover in China based on SPOT vegetation data [J]. Resources Science, 2011,33(2):335-340.

[17] 金凯,王飞,韩剑桥,等.1982—2015年中国气候变化和人类活动对植被NDVI变化的影响[J].地理学报,2020,75(5):961-974.
Jin Kai, Wang Fei, Han Jianqiao, et al. Contribution of climatic change and human activities to vegetation NDVI change over China during 1982—2015 [J]. Acta Geographica Sinica, 2020,75(5):961-974.

[18] 韦小茶,周秋文,张继,等.1982—2016年广西NDVI时空变化及其影响因素[J].山地学报,2020,38(4):520-531.
Wei Xiaocha, Zhou Qiuwen, Zhang Ji, et al. Spatial-temporal changes of NDVI and its influence factors in Guangxi, China during 1982—2016 [J]. Mountain Research, 2020,38(4):520-531.

[19] 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.

[20] Wu Luhua, Wang Shijie, Bai Xiaoyong, et al. Quantitative assessment of the impacts of climate change and human activities on runoff change in a typical Karst watershed, SW China [J]. Science of the Total Environment, 2017,601/602:1449-1465.

[21] 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.
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.

[22] Zhou Guoqing, Zhou Xiao, Song Tianyi, et al. 22-year dynamic analysis of vegetation cover in Karst area: A case study in Guangxi, China [J]. International Journal of Digital Earth, 2025,18(1):2497097.

[23] Du Min, Mu Xingmin, Zhao Guangju, et al. Changes in runoff and sediment load and potential causes in the Malian River basin on the Loess Plateau [J]. Sustainability, 2021,13(2):443.

[24] Zhou Ji, Fu Bojie, Gao Guangyao, et al. Effects of precipitation and restoration vegetation on soil erosion in a semi-arid environment in the Loess Plateau, China [J]. Catena, 2016,137:1-11.

[25] 杨艳萍,陈建军,覃巧婷,等.2000—2018年广西植被时空变化及其对地形、气候和土地利用的响应[J].农业工程学报,2021,37(17):234-241.
Yang Yanping, Chen Jianjun, Qin Qiaoting, et al. Temporal and spatial variation of vegetation and its response to topography, climate and land use in Guangxi during 2000—2018 [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2021, 37(17):234-241.

[26] Gu Yingxin, Wylie B K, Howard D M, et al. NDVI saturation adjustment: A new approach for improving cropland performance estimates in the Greater Platte River basin, USA [J]. Ecological Indicators, 2013,30:1-6.

[27] 任鹏飞,甘淑,谢显奇,等.基于ETM+遥感探测山地城市不透水面及其动态分析[J].水土保持通报,2013,33(5):109-112.
Ren Pengfei, Gan Shu, Xie Xianqi, et al. Dynamic analysis of mountain city impervious surface based on $ETM^+$ fused image [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2013,33(5):109-112.

[28] 刘明霞,刘友存,陈明,等.2000—2018年赣江上游植被覆盖度时空演化及其对气候变化的响应[J].水土保持通报,2020,40(5):284-290.
Liu Mingxia, Liu Youcun, Chen Ming, et al. Spatio-temporal evolution of vegetation coverage and its response to climate change in upper reaches of Ganjiang River basin during 2000—2018 [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2020,40(5):284-290.

[29] 张莉,苗连朋,温仲明.基于MMF模型估算植被与降雨变化对水沙的影响:以延河流域为例[J].自然资源学报,2015,30(3):446-458.
Zhang Li, Miao Lianpeng, Wen Zhongming. Estimating the effect of vegetation and precipitation on runoff and sediment using the MMF model: A case study in the Yanhe River basin [J]. Journal of Natural Resources, 2015,30(3):446-458.

[30] 宁珍,高光耀,傅伯杰.黄土高原流域水沙变化研究进展[J].生态学报,2020,40(1):2-9.
Ning Zhen, Gao Guangyao, Fu Bojie. Changes in streamflow and sediment load in the catchments of the Loess Plateau, China: A review [J]. Acta Ecologica Sinica, 2020,40(1):2-9.