

长江流域植被变化影响因素与水沙关系研究

刘新波¹, 刘旭婷², 韩剑桥², 李雨晨¹, 杨磊³, 安日辉³

(1. 中国长江电力股份有限公司, 武汉 430010; 2. 武汉大学,

武汉 430072; 3. 中国长江三峡集团有限公司武汉科创园, 武汉 430010)

摘要: [目的] 系统探讨长江流域植被变化的时空特征、主导驱动因子及其与水沙过程的耦合关系, 为流域生态保护与资源管理提供科学依据。[方法] 基于2001—2020年长江流域归一化植被指数(Normalized Difference Vegetation Index, NDVI)、气象数据和水沙数据, 采用趋势分析、相关性分析和残差分析等方法, 定量评估气候因子与人类活动对植被演变的影响, 并分析了NDVI与年输沙量、年径流量之间的关系。[结果] 长江流域NDVI整体呈波动上升趋势, 年均增长速率为0.0017/a。其中, 中上游地区NDVI上升显著(分别为0.0017/a和0.0019/a), 而下游区域呈显著下降趋势(-0.0009/a)。温度对植被生长的促进作用最为显著, 降水和太阳辐射的影响则表现出明显的区域差异。退耕还林等生态工程显著提升了中上游地区的植被覆盖度, 而城市扩张导致下游地区植被退化; 植被改善显著降低了中上游年输沙量并提高了年径流量, 下游水沙过程则主要受水库调控影响。[结论] 长江流域植被变化具有显著的时空异质性, 受气候变化和人类活动的共同驱动, 生态工程有效提升了流域生态质量, 并通过调节水沙过程增强了生态系统调节功能, 对流域可持续发展具有重要意义。

关键词: 植被动态; 气候变化; 人类活动; 水沙变化; 长江流域

中图分类号: Q948

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2026)02-0050-08

Study on influencing factors of vegetation change and water-sediment relationship in Yangtze River Basin

Liu Xinbo¹, Liu Xuting², Han Jianqiao², Li Yuchen¹, Yang Lei³, An Rihui³

(1. China Yangtze Power Co., Ltd., Wuhan 430010, China; 2. Wuhan University, Wuhan 430072,

China; 3. Wuhan Science and Technology Innovation Park, China Three Gorges Corporation, Wuhan 430010, China)

Abstract: [Objective] This study systematically investigates the spatiotemporal characteristics of vegetation change in the Yangtze River Basin, its main driving factors, and the coupling relationship with water-sediment processes, providing a scientific basis for ecological protection and resource management in the river basin. [Methods] Based on normalized difference vegetation index (NDVI), meteorological data, and water-sediment data in the Yangtze River Basin from 2001 to 2020, trend analysis, correlation analysis, and residual analysis were applied to quantitatively assess the impact of climatic factors and human activities on vegetation evolution. Additionally, the relationships between NDVI, annual sediment load, and annual runoff were analyzed. [Results] The NDVI in the Yangtze River Basin showed an overall fluctuating upward trend, with an average annual growth rate of 0.0017/a. Among them, the middle and upper reaches demonstrated significant NDVI increases (0.0017/a and 0.0019/a, respectively), while a notable decline (-0.0009/a) was observed in the lower reaches. Temperature

收稿日期: 2025-05-13

修回日期: 2025-05-27

接受日期: 2025-06-04

资助项目: 中国长江电力股份有限公司“流域水体含沙量动态遥感与输沙量变化趋势分析研究”(合同编号: Z242302046)

第一作者: 刘新波(1990—), 男, 山西省大同市人, 博士研究生, 高级工程师, 主要研究方向: 湖库水体要素监测与预警遥感技术。E-mail: liu_xinbo@ctg.com.cn

通信作者: 韩剑桥(1987—), 男, 河南省禹州市人, 博士研究生, 副研究员, 主要研究方向: 水土流失治理和生态修复研究。E-mail: hjq13@163.com

<https://stbeyj.publish.founderss.cn>

had the most significant promoting effect on vegetation growth, while the impact of precipitation and solar radiation exhibited distinct regional differences. Ecological projects such as Grain-for-Green Program significantly improved vegetation cover in the upper and middle reaches, while urban expansion led to vegetation degradation in the lower reaches. Vegetation recovery substantially reduced annual sediment load and increased runoff in the upper and middle reaches, while water-sediment processes in the lower reaches were mainly regulated by reservoirs. [Conclusion] Vegetation changes in the Yangtze River Basin show significant spatiotemporal heterogeneity and are jointly driven by climate change and human activities. Ecological projects have effectively enhanced ecological quality and ecosystem regulatory functions through water-sediment process regulation, which is crucial for sustainable development of the river basin.

Keywords: vegetation dynamics; climate change; human activities; water-sediment variations; Yangtze River Basin

长江是亚洲第一大河,发源于青藏高原,流经多个省份最终注入东海,其流域面积约占中国陆地总面积的18.8%,在生态系统功能维持与社会经济发展中具有重要地位^[1]。作为流域生态系统的关键组成,植被在气候调节、水土保持与生态平衡方面发挥着核心作用。近年来,随着退耕还林、天然林保护等生态工程的实施,长江流域植被覆盖度显著提升^[2]。但同时,全球变暖引发的水热条件变化也深刻影响了区域植被动态^[3]。

气候变化对流域植被的正负效应并存^[4]。一方面,气温上升有助于植被生长,改善流域内植被覆盖状况^[5]。另一方面,气温上升和降水模式改变也加剧了干旱、洪涝等极端气候事件的发生,导致植被出现退化现象。例如,金沙江、岷沱江流域受气温上升导致植被受干旱影响较大^[6],青藏高原与四川盆地过渡带则因降水减少出现退化现象^[7],中下游如太湖流域则因洪涝灾害频发影响植被恢复^[6]。此外,人类活动对植被变化也呈双重作用:生态工程提升了中上游植被覆盖^[8-9],而城市扩张、农业开垦与放牧等则加剧了植被破坏,尤其在长江三角洲表现显著^[10]。

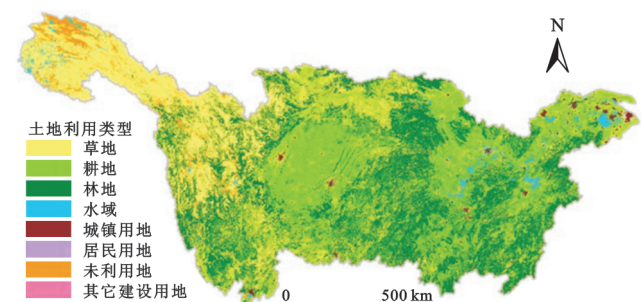
植被也是调控长江流域水沙关系的重要因素之一。植被通过拦截降雨、削弱地表径流的侵蚀能力,降低水土流失,从而减少泥沙输送量^[11]。同时,植被覆盖度的提高还能通过改变流域水文过程,进一步调节水沙关系^[12]。随着生态建设工程的深入实施和气候变化的持续影响,长江流域的植被状况不断改善,其对水沙关系的调节作用亦逐渐增强^[13]。但受地形复杂、气候多样与人类干扰影响,流域不同区域的植被—水沙耦合机制仍不明晰。

因此,本文基于2001—2020年长时序遥感数据,结合气象与水沙观测资料,分析长江流域植被的时空演变特征,采用残差法量化气候与人类活动对植被变化的贡献,并探讨其与水沙变化之间的耦合关系,旨在为流域生态管理与植被恢复提供科学支撑。

1 研究区与数据

1.1 研究区概况

长江流域地处 $90^{\circ}33'—122^{\circ}25'E, 24^{\circ}30'—35^{\circ}45'N$,跨青海、四川、重庆等11个省(市、自治区),总面积约180万 km^2 。流域地势西高东低,从青藏高原6000余米高海拔逐渐过渡至东部近海平面,地貌类型依次由高原、盆地转为平原。气候类型从上游的高原气候过渡至中下游的亚热带季风气候,水热条件差异显著。上游区域地处青藏高原,植被以山地草甸、高寒草原和原始森林为主,海拔高、人口稀疏,气候成为植被生长的主要限制因素^[14];中游涵盖四川盆地、云贵高原,林地和农田占主导,近年来退耕还林等生态工程显著改善了区域植被状况^[15];下游为典型平原区,植被以常绿阔叶林和针叶林为主,城镇密集、水网发达,植被动态受人类活动干扰显著(图1)。



注:基于标准地图服务系统下载的标准图号GS(2023)2767号的标准地图制作,底图未做修改,下同。

图1 长江流域土地利用类型

Fig. 1 Land use types of Yangtze River Basin

1.2 数据来源

本研究采用美国国家航空航天局提供的2001—2020年1 km空间分辨率的归一化植被指数(Normalized Difference Vegetation Index, NDVI)数据(<http://neo.sci.gsfc.nasa.gov/>)分析长江流域植被时空变化特征。同时,使用国家地球系统科学数据中心

(<https://www.geodata.cn/aboutus.html>)提供的 1 km 气象数据(气温、降水、太阳辐射),探讨气候变化对长江流域植被动态的影响。此外,收集长流域干流主要水文站(寸滩站、宜昌站与大通站)的 2001—2020 年年径流量和年输沙量数据,分析长江流域上中下游植被变化与水沙关系的耦合特征。

2 研究方法

2.1 趋势分析

利用基于最小二乘法的线性回归模型分析 2001—2020 年长江流域植被(NDVI)的时空变化特征^[16]:

$$\theta_{\text{slope}} = \frac{n \sum_{i=1}^n ix_i - \sum_{i=1}^n i \sum_{i=1}^n x_i}{n \sum_{i=1}^n i^2 - \left(\sum_{i=1}^n i \right)^2} \quad (1)$$

式中: n 是研究年份数; x 是第 i 年的 NDVI; θ_{slope} 是 NDVI 长期趋势。2001—2020 年长江流域的斜率的显著性采用 t 检验,其中 $p < 0.05$ 代表具有统计学意义。

2.2 偏相关分析

偏相关分析能够在控制其余变量的条件下分析因变量与某一变量的相关关系^[17],因此本研究采用偏相关分析法量化 2001—2020 年长江流域植被动态(NDVI)与气候要素(气温、降水和太阳辐射)之间的关系^[18]:

$$r_{ab, \hat{c}p}^2 = \frac{R_{a(b, c, \dots, p)}^2 - R_{a(c, \dots, p)}^2}{1 - R_{a(c, \dots, p)}^2} \quad (2)$$

式中: $r_{ab, \hat{c}p}^2$ 表示在控制了 $\hat{c}p$ 变量的影响条件下,变量 a 和变量 b 的偏相关系数,其中 a 为 NDVI,变量 b, c 等为各气候因子^[19]; $R_{a(b, c, \dots, p)}^2$ 和 $R_{a(c, \dots, p)}^2$ 分别表示变量 a 与变量 (b, c, \dots, p) 、变量 (c, \dots, p) 的回归分析决定系数。

2.3 皮尔逊相关

采用皮尔逊(Pearson)相关分析研究长江流域植被指数 NDVI 与水沙变化(年径流量和年输沙量)的关系:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (3)$$

式中: n 是研究年份数; x 是第 i 年的 NDVI; y 是第 i 年的年径流量或年输沙量; \bar{x} 为 NDVI 的均值; \bar{y} 为长江流域年径流量或年输沙量的均值。

2.4 残差分析

利用残差分析(RESTREND)方法计算气候要

素(气温、降水、太阳辐射)和人类活动对长江流域植被动态(NDVI)的贡献^[20]:

$$\begin{aligned} \theta_{\text{slope}} &= C(\text{Tem}) + C(\text{Pre}) + C(\text{Rad}) + \text{UF} \\ &\approx \left(\frac{\partial \text{NDVI}}{\partial \text{Tem}} \right) \times \left(\frac{\partial \text{Tem}}{\partial n} \right) + \left(\frac{\partial \text{NDVI}}{\partial \text{Pre}} \right) \times \\ &\quad \left(\frac{\partial \text{Pre}}{\partial n} \right) + \left(\frac{\partial \text{NDVI}}{\partial \text{Rad}} \right) \times \left(\frac{\partial \text{Rad}}{\partial n} \right) + \text{UF} \end{aligned} \quad (4)$$

其中 θ_{slope} 是长期 NDVI 趋势; $C(\text{Tem})$ 、 $C(\text{Pre})$ 、 $C(\text{Rad})$ 和 UF 分别是温度、降水和太阳辐射以及人类活动对年 NDVI 变化的贡献; n 是研究年份数; $C(\text{Tem})$ 由 $\left(\frac{\partial \text{NDVI}}{\partial \text{Tem}} \right) \times \left(\frac{\partial \text{Tem}}{\partial n} \right)$ 计算得出; $\left(\frac{\partial \text{NDVI}}{\partial \text{Tem}} \right)$ 和 $\left(\frac{\partial \text{Tem}}{\partial n} \right)$ 分别是 NDVI 与温度之间的线性回归曲线的斜率以及温度随年份变化的线性回归曲线的斜率。

3 结果与分析

3.1 长江流域植被和水沙时空变化特征

长江流域地形自西向东呈现显著的变化,东西长、南北窄的地理特征使得气候、地势和人口分布等方面存在较大区域差异,从而导致流域内部植被覆盖的差异。整体而言,长江流域 2001—2020 年植被 NDVI 呈波动上升趋势,上升斜率为 0.001 7/a(图 2A)。其中,中游区域植被 NDVI 上升趋势最为显著,为 0.001 9/a,上游区域植被 NDVI 上升速率次之,为 0.001 7/a。下游地区的 NDVI 则呈下降趋势,速率为 -0.000 9/a。综上可知,2001—2020 年长江流域植被 NDVI 整体呈改善形式。除下游区域外,其他区域 NDVI 整体上均呈上升趋势。

由图 2B 可知,2001—2020 年长江流域 NDVI 以增加趋势为主,占流域总面积的 91.29%,其中呈显著上升的面积占 56.90%,集中分布在长江中游地区,植被 NDVI 呈下降趋势的面积占 1.93%,主要分布在长江中游与下游交界处以及长江下游城市群。由此可见,长江流域上中下游植被 NDVI 呈上升趋势的面积均大于呈下降趋势的面积。

长江流域上中下游年输沙量与年径流量时间变化趋势如图 3 所示。其中,上游年径流量和年输沙量在 2001—2020 年变化速率分别为 23.569 亿 m^3/a 和 -0.090 7 亿 t/a ,呈不显著增长和显著减少趋势;中游年径流量和年输沙量在研究期间变化速率分别为 42.577 亿 m^3/a 和 -0.088 亿 t/a ,其变化趋势均显著;下游年径流量和年输沙量在 2001—2020 年分别呈不显著增加(69.308 亿 m^3/a)和显著减少趋势(-0.060 1

亿 t/a)。由此可见,近 20 年以来,长江流域年输沙量和年径流量随着植被状况的改善不断变化,其中上游

的年输沙量和下游的年径流量变化最为明显,而中游区域的变化逐渐减弱。

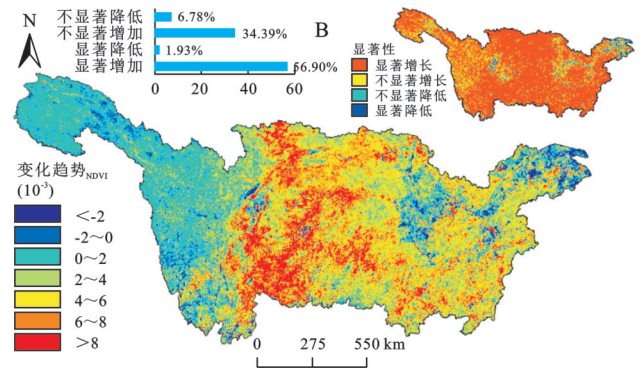
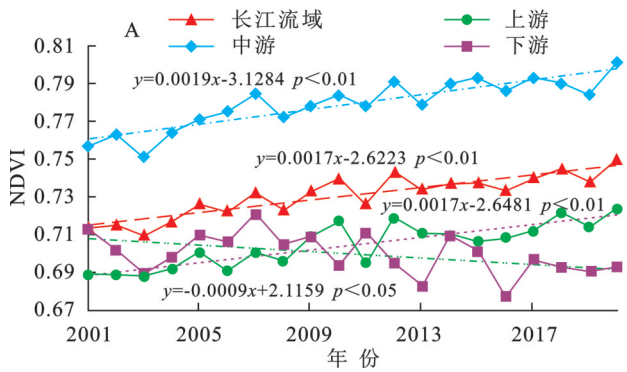


图 2 2001—2020 年长江流域 NDVI 时间变化和空间变化趋势

Fig. 2 Temporal and spatial variation trends of NDVI in Yangtze River Basin (2001—2020)

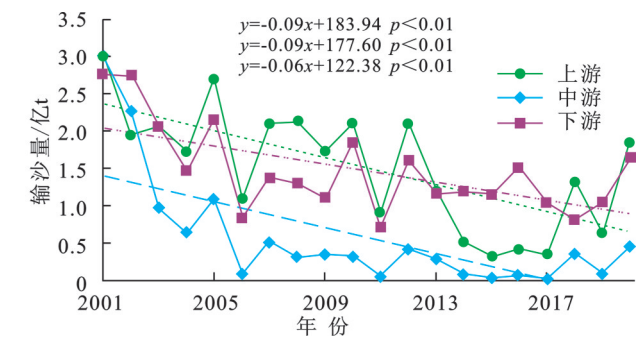
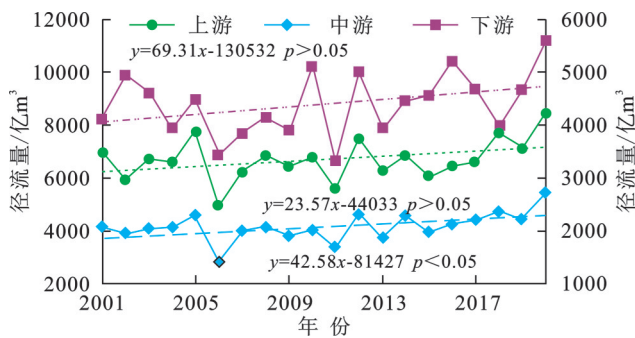


图 3 长江流域 2001—2020 年年径流量与年输沙量时间变化特征

Fig. 3 Temporal variation characteristics of annual runoff and annual sediment load in Yangtze River Basin (2001—2020)

3.2 长江流域植被动态与气候要素关系

本研究采用偏相关分析方法探讨气候要素(气温、降水和太阳辐射)与长江流域植被动态之间的关系,结果如图 4 所示。长江流域绝大部分区域的植被(94.86%)与气温呈显著正相关关系,表明气温上升有助于植被生长。而气温与 NDVI 呈显著负相关区域主要分布于长江上游的金沙江流域和岷—沱江流域等区域,说明上述区域气温上升可能导致干旱加剧,从而抑制植被生长,如图 4A 所示。

3.3 长江流域植被变化的贡献量化

本研究通过残差分析方法定量分离了气象要素和人类活动对长江流域植被变化的贡献,如图 5 所示。2001—2020 年人类活动和气候变化总体上对长江流域植被生长起到了促进作用。气温对植被生长的正向促进作用覆盖了约 83% 的研究区域(图 5A)。然而,在上游源区的青藏高原和岷—沱江流域的部分区域,气温呈现负贡献,可能与气温升高导致的干旱加剧有关。降水对植被生长的正贡献主要分布在长江上游和中游区域,占比约为 57%,其中上游岷—沱江流域的贡献最为突出。而长江下游部分区域则表现出了降雨负贡献,可能与极端降水事件及其引发的洪涝灾害有关(图 5B)。综上所述,气温降低和降水增加有助于长江上游岷—沱江流域植被的生长,但在下游地区,降温与增雨可能抑制了植被的生长。上述结果进一步揭示了气象要素对长江流域不同区域植被动态变化的异质性影响。此外,太阳辐射对 NDVI 的正贡献约占流域的 80%(图 5C)。

图 4B 展示了长江流域 NDVI 与降水的偏相关关系。总体来看,长江流域约 23.97% 的地区降水与 NDVI 呈显著正相关的关系,主要分布在长江上游和中游汉江等地,表明降水增加有利于植被的生长。然而,长江中游城市群与下游区域植被与降水呈显著负相关,占研究区的 20.63%。这说明在这些区域,降水可能导致洪涝灾害,从而抑制植被的正常生长,甚至导致植被死亡。

由图 4C 可看出,长江流域仅约 3.95% 的区域 NDVI 与太阳辐射呈显著正相关,表明太阳辐射的增加仅对长江流域小部分地区的植被生长具有促进作用。相反,长江上中下游地区,尤其是上游源区的青藏高原,NDVI 与太阳辐射呈显著负相关,占流域总面积的 82.37%。在这些区域,太阳辐射的增加可能抑制了植被生长。

整体而言,人类活动对长江流域的植被生长呈正贡献,约占研究区域的 86%(图 5D)。这表明 1999 年以来大规模实施的植树造林等生态建设活动显著改善了长江流域植被覆盖。但在长江上游源头区,人类活动对植被的生长有抑制作用,这可能由于源头区海

拔较高,植被稀疏,生态环境脆弱,人类的过度放牧等破坏了生态平衡,不利于植被的生长。在长江下游的

城市群区域,也出现了人类对植被生长的负贡献作用,可能是近二十年来急剧的城市扩张导致的。

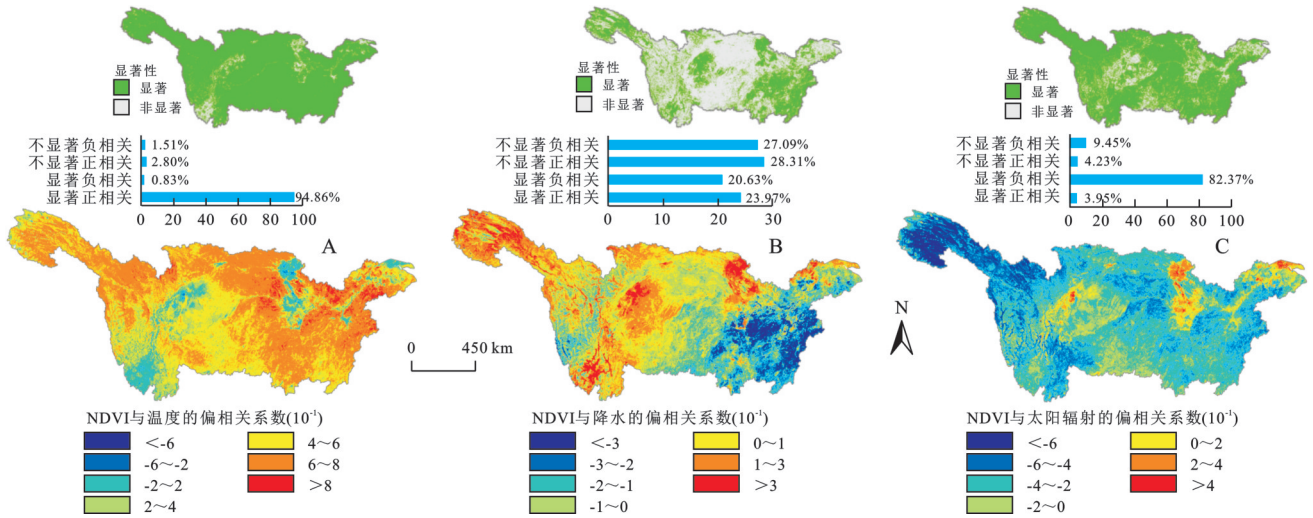


图 4 长江流域 NDVI 与气象要素包括气温、降水和太阳辐射的偏相关系数空间分布图

Fig. 4 Spatial distribution of partial correlation coefficients between NDVI and meteorological factors, including temperature, precipitation, and solar radiation in Yangtze River Basin

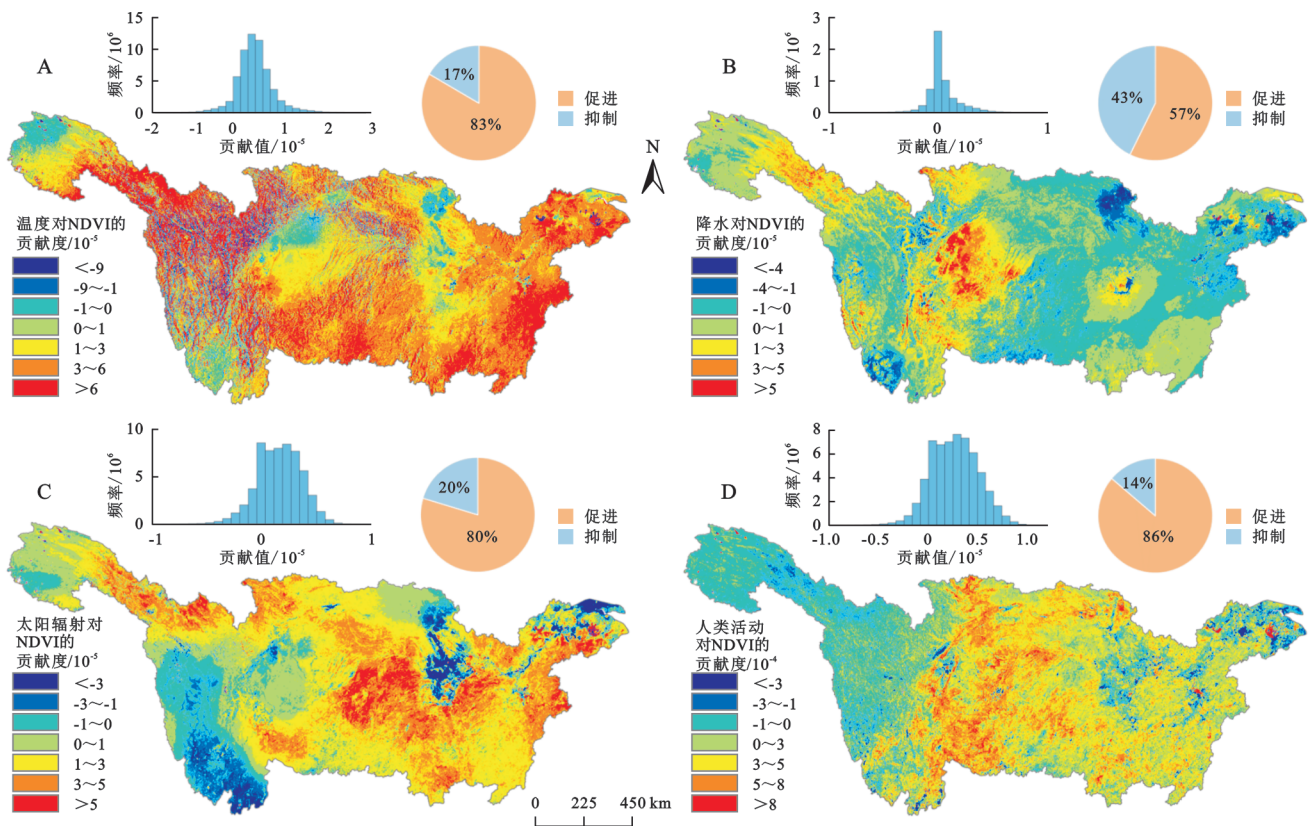


图 5 长江流域植被动态变化影响因素包括温度、降水、太阳辐射和人类活动的贡献分离图

Fig. 5 Contribution partitioning of influencing factors of vegetation dynamics in Yangtze River Basin, including temperature, precipitation, solar radiation, and human activities

3.4 长江流域植被动态与水沙变化的关系

在长江流域的上游、中游和下游,NDVI 与年径流量和年输沙量的关系存在显著差异(图 6)。在上游,NDVI 与年径流量呈正相关($R^2=0.339, p<0.01$) (图 6A),与年输沙量呈不显著负相关($R^2=0.0806,$

$p>0.05$) (图 6D)。在中游,NDVI 对年径流量的正相关关系减弱($R^2=0.1585, p>0.05$) (图 6B),但与年输沙量的负相关关系增强($R^2=0.4399, p<0.01$) (图 6E)。而在下游区域,NDVI 与年径流量的关系由中上游的正相关转变为不显著的负相关($R^2=0.2678,$

$p > 0.05$) (图6C), 与年输沙量几乎无相关性 ($R^2 = 0.0048, p > 0.05$) (图6F)。这表明, 植被覆盖对水文

过程的影响随流域位置的变化而表现出显著的区域性差异。

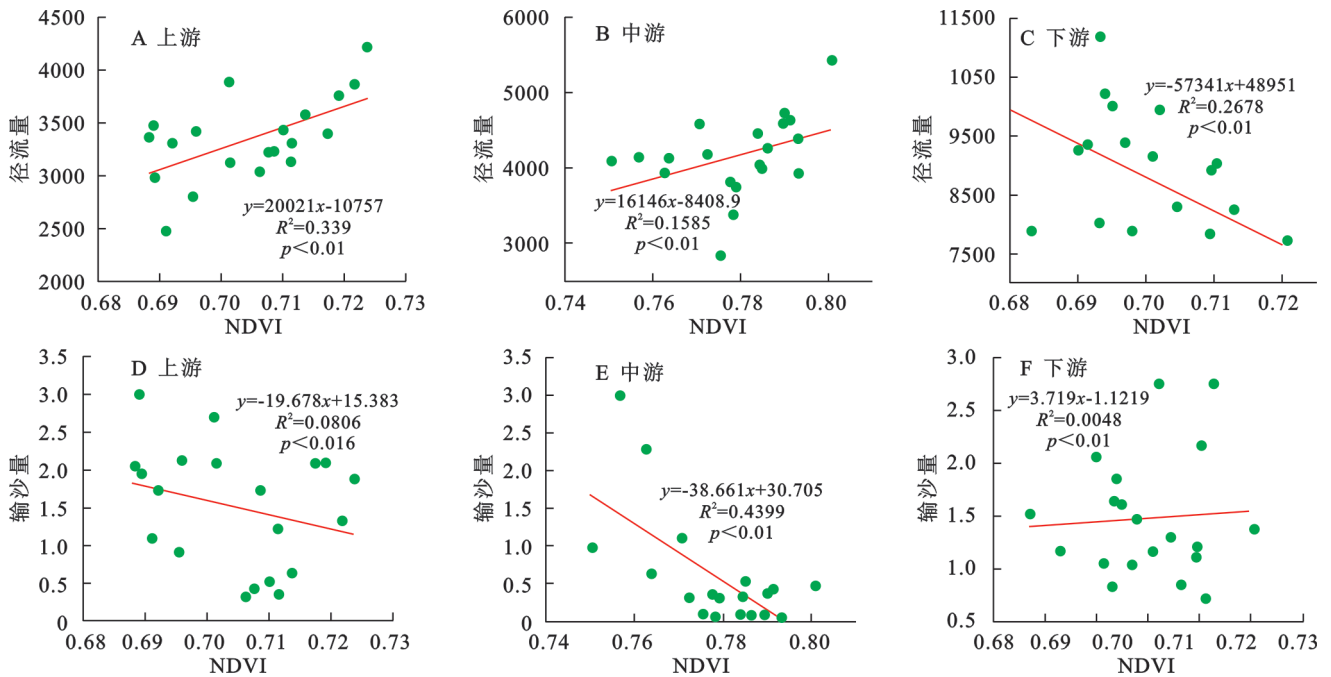


图6 长江流域植被变化与年径流量和年输沙量的相关性

Fig. 6 Correlation between vegetation changes and annual runoff and annual sediment load in Yangtze River Basin

4 讨论

人类活动与气候变化是影响长江流域植被动态的主要因素^[21],但二者及其驱动机制存在复杂交互作用。其中,温度是主导因子(图4,5),主要促进青藏高原草地与部分林地生长,降水则主要影响四川盆地农作物发育。由于土地利用、地形地貌等区域差异显著,气候因子对植被的时滞响应和空间累积效应导致其影响具有明显空间异质性^[9,15]。如草地分布广泛的金沙江流域比林地密集的嘉陵江、汉水流域对气候变化更敏感^[22]。长江上游地势西高东低,跨越多种地貌类型,太阳辐射随海拔升高增强^[23],春秋季有助于提升NDVI,但夏季加剧草地蒸腾作用,使其提前枯黄,NDVI反而下降^[24]。在控制其他气候因子后,山区林地NDVI也普遍与太阳辐射呈显著负相关。

相较于气候变化,人类活动对长江流域植被变化的贡献更为显著。流域中部与东南部地区NDVI与人类活动呈正相关,尤以陕西南部和四川东部最为突出,植被改善难以仅由气候变解释,表明造林等生态工程发挥了关键作用^[8]。然而,四川西南部常绿人工林替代原有落叶阔叶林,生态效果较差,反致NDVI下降^[25]。在长江三角洲,城市扩张、人口增长与产业集中加剧生态压力,进一步导致植被退化^[26]。可见,人类活动对植被变化既有积极推动,也可能带来负面影响,呈现双重效应。

植被不仅可以通过冠层截留、根系吸收和气孔蒸腾等直接影响水循环,还可以通过冠层的垂直结构和水平分布间接影响各种水文过程,导致水分和能量的重新分配^[27]。降水增加是年径流量增加的主要驱动力,而植被则可以通过降低地表水的流速、增加入渗时间和入渗量增加地表年径流量。因此,随着长江流域植被覆盖度的增加,其年径流量也呈增加趋势,尤其是在中上游区域。长江退耕还林等生态修复工程导致植被覆盖率增加,这与减少泥沙、防止水土流失和保持土壤质量密切相关^[28]。林冠通过雨水拦截降低雨滴动能,减缓溅蚀,植被结构也影响河道水动力过程,包括改变流速分布、剪应力和湍流特性,同时根系增强河岸稳定性^[29]。因此,NDVI与年输沙量普遍呈负相关,长江流域产沙显著减少,但在下游区域,年径流和输沙变化主要受三峡水库等水利工程调控,植被影响相对较弱,相关性不显著^[30]。

5 结论

本文采用偏相关分析与残差分析等方法,系统探讨了长江流域植被变化的时空特征及其气候与人类驱动因素,并进一步分析了植被与水沙变化之间的关系。主要结论如下:

(1) 2001—2020年在气候变化与人类活动双重作用下,长江流域NDVI显著上升(增速0.0019/a),其中上游与中游地区增长明显(均为0.0017/a),而

下游地区则呈显著下降趋势(下降速率0.000 9/a)。

(2) 温度是植被增长的主导因子,94.86%的区域NDVI与温度显著正相关。降水主要在中上游地区(约24%)促进植被生长,但在中游城市群和下游局部区域,降水引发洪涝,抑制植被。太阳辐射虽整体促进植被增长(正贡献达80%区域),但其高时效性使NDVI与之多呈负相关。

(3) 退耕还林等生态工程显著提升了中上游植被覆盖,而下游城市群受城市扩张等人类活动影响,植被退化明显。

(4) 中上游地区植被改善有效增强水分入渗、减缓径流,进而提升年径流量并降低年输沙量;但在下游,受三峡水库等工程调节影响,NDVI与径流、输沙之间的关系不显著。

本研究揭示了气候与人类活动对长江流域植被动态及其水沙过程的综合影响机制,为理解流域生态系统演变提供了理论依据,也为区域植被管理与生态保护策略制定提供了科学支撑。

参考文献(References):

- [1] Zhang J, Zhang Z F, Liu S M, et al. Human impacts on the large world rivers: would the Changjiang (Yangtze River) be an illustration [J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 1999,13(4):1099-1105.
- [2] 石培礼,吴波,程根伟,等.长江上游地区主要森林植被类型蓄水能力的初步研究[J].*自然资源学报*,2004,19(3):351-360.
- Shi P L, Wu B, Cheng G W, et al. Water retention capacity evaluation of main forest vegetation types in the Upper Yangtze basin [J]. *Journal of Natural Resources*, 2004,19(3):351-360.
- [3] 宋新章,江洪,张慧玲,等.全球环境变化对森林凋落物分解的影响[J].*生态学报*,2008,28(9):4414-4423.
- Song X Z, Jiang H, Zhang H L, et al. A review on the effects of global environment change on litter decomposition [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2008,28(9):4414-4423.
- [4] Wang H, Liu G H, Li Z S, et al. Impacts of drought and human activity on vegetation growth in the grain for green program region, China [J]. *Chinese Geographical Science*, 2018,28(3):470-481.
- [5] 孙颖,易浪,尹少华.洞庭湖流域植被覆盖变化及其协同治理[J].*经济地理*,2022,42(4):190-201.
- Sun Y, Yi L, Yin S H. Vegetation cover change in Dongting Lake Basin and its coordination governance [J]. *Economic Geography*, 2022,42(4):190-201.
- [6] 张亮,丁明军,张华敏,等.1982—2015年长江流域植被覆盖度时空变化分析[J].*自然资源学报*,2018,33(12):2084-2097.
- Zhang L, Ding M J, Zhang H M, et al. Spatiotemporal variation of the vegetation coverage in Yangtze River Basin during 1982-2015 [J]. *Journal of Natural Resources*, 2018,33(12):2084-2097.
- [7] 崔利芳,王伦澈,屈赛,等.气温、降水量和人类活动对长江流域植被NDVI的影响[J].*地球科学*,2020,45(6):1905-1917.
- Cui L F, Wang L C, Qu S, et al. Impacts of temperature, precipitation and human activity on vegetation NDVI in Yangtze River Basin, China [J]. *Earth Science*, 2020,45(6):1905-1917.
- [8] Qu S, Wang L C, Lin A W, et al. What drives the vegetation restoration in Yangtze River basin, China: climate change or anthropogenic factors [J]. *Ecological Indicators*, 2018,90:438-450.
- [9] Jiang W X, Niu Z G, Wang L C, et al. Impacts of drought and climatic factors on vegetation dynamics in the Yellow River Basin and Yangtze River Basin, China [J]. *Remote Sensing*, 2022,14(4):930.
- [10] Cao Y, Wang Y C, Li G Y, et al. Vegetation response to urban landscape spatial pattern change in the Yangtze River Delta, China [J]. *Sustainability*, 2020,12(1):68.
- [11] 陈涛,牛瑞卿,李平湘,等.密云水库流域植被覆盖度变化对输沙量的影响[J].*生态环境学报*,2010,19(1):152-159.
- Chen T, Niu R Q, Li P X, et al. Impact of vegetation coverage change on sediment loads in Miyun Reservoir Basin [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2010,19(1):152-159.
- [12] 郑明国,蔡强国,陈浩.黄土丘陵沟壑区植被对不同空间尺度水沙关系的影响[J].*生态学报*,2007,27(9):3572-3581.
- Zheng M G, Cai Q G, Chen H. Effect of vegetation on runoff-sediment relationship at different spatial scale levels in Gullied-hilly Area of the Loess Plateau, China [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2007,27(9):3572-3581.
- [13] 陈松生,张欧阳,陈泽方,等.金沙江流域不同区域水沙变化特征及原因分析[J].*水科学进展*,2008,19(4):475-482.
- Chen S S, Zhang O Y, Chen Z F, et al. Variations of runoff and sediment load of the Jinsha river [J]. *Advances in Water Science*, 2008,19(4):475-482.
- [14] 张顾萍,陈国民,邵怀勇,等.近16年金沙江流域植被覆盖时空特征及其对气候的响应[J].*长江流域资源与环境*,2021,30(7):1638-1648.
- Zhang G P, Chen G M, Shao H Y, et al. Spatial-temporal characteristics of vegetation coverage and its response to climate from 2000 to 2015 in Jinsha River Basin, China [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2021,30(7):1638-1648.
- [15] 易浪,孙颖,尹少华,等.2000—2019年长江流域植被覆盖时空演化及其驱动因素[J].*生态学报*,2023,43(2):

- 798-811.
- Yi L, Sun Y, Yin S H, et al. Spatial-temporal variations of vegetation coverage and its driving factors in the Yangtze River Basin from 2000 to 2019[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2023,43(2):798-811.
- [16] Mao D H, Wang Z M, Luo L, et al. Integrating AVHRR and MODIS data to monitor NDVI changes and their relationships with climatic parameters in North-east China [J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2012,18:528-536.
- [17] 王永财,孙艳玲,王中良.1998—2011年海河流域植被覆盖变化及气候因子驱动分析[J].*资源科学*,2014,36(3):594-602.
- Wang Y C, Sun Y L, Wang Z L. Spatial-temporal change in vegetation cover and climate factor drivers of variation in the Haihe River Basin 1998—2011 [J]. *Resources Science*, 2014,36(3):594-602.
- [18] Gu Z J, Duan X W, Shi Y D, et al. Spatiotemporal variation in vegetation coverage and its response to climatic factors in the Red River Basin, China[J]. *Ecological Indicators*, 2018,93:54-64.
- [19] 穆少杰,李建龙,陈奕兆,等.2001—2010年内蒙古植被覆盖度时空变化特征[J].*地理学报*,2012,67(9):1255-1268.
- Mu S J, Li J L, Chen Y Z, et al. Spatial differences of variations of vegetation coverage in Inner Mongolia during 2001—2010[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2012, 67(9):1255-1268.
- [20] Wang J, Wang K L, Zhang M Y, et al. Impacts of climate change and human activities on vegetation cover in hilly Southern China[J]. *Ecological Engineering*, 2015, 81:451-461.
- [21] 刘海,黄跃飞,郑粮.气候与人类活动对丹江口水源区植被覆盖变化的影响[J].*农业工程学报*,2020,36(6):97-105.
- Liu H, Huang Y F, Zheng L. Effects of climate and human activities on vegetation cover changes in Danjiangkou Water Source Areas [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2020, 36(6):97-105.
- [22] Ghebregabher M G, Yang T B, Yang X M, et al. Assessment of NDVI variations in responses to climate change in the Horn of Africa[J]. *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science*, 2020, 23(3): 249-261.
- [23] Blumthaler M, Ambach W, Ellinger R. Increase in solar UV radiation with altitude[J]. *Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology*, 1997, 39(2): 130-134.
- [24] 何玉杰,孔泽,户晓,等.水热条件分别控制了我国温带草地 NDVI 的年际变化和增长趋势[J].*生态学报*, 2022,42(2):766-777.
- He Y J, Kong Z, Hu X, et al. Water and heat conditions separately controlled inter-annual variation and growth trend of NDVI in the temperate grasslands in China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2022,42(2):766-777.
- [25] Hua W J, Chen H S, Zhou L M, et al. Observational quantification of climatic and human influences on vegetation greening in China[J]. *Remote Sensing*, 2017,9(5):425.
- [26] Aldieri L, Vinci C P. Green economy and sustainable development: The economic impact of innovation on employment[J]. *Sustainability*, 2018,10(10):3541.
- [27] Liu J B, Gao G Y, Wang S, et al. The effects of vegetation on runoff and soil loss: Multidimensional structure analysis and scale characteristics[J]. *Journal of Geographical Sciences*, 2018,28(1):59-78.
- [28] Wang Y C, Li B Y. Dynamics arising from the impact of large-scale afforestation on ecosystem services [J]. *Land Degradation & Development*, 2022, 33(16): 3186-3198.
- [29] 郝由之,假冬冬,张幸农,等.植被对河道水流及岸滩形态演变影响研究进展[J].*水利水电工程学报*,2022(3):1-11.
- Hao Y Z, Jia D D, Zhang X N, et al. Advances in research on the influence of vegetation on river flow and bank morphology evolution [J]. *Hydro-Science and Engineering*, 2022(3):1-11.
- [30] Yang Y P, Zheng J H, Zhang H Q, et al. Impact of the Three Gorges Dam on riverbed scour and siltation of the middle reaches of the Yangtze River[J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2022,47(6):1514-1531.