

澜沧江流域植被变化与驱动因素的定量分析

赖 翀, 王小燕

(赣州市水利电力勘测设计研究院, 江西 赣州 341000)

摘 要: [目的] 分析澜沧江流域植被变化的时空演变规律, 明确驱动因素, 为流域生态保护和管理工作提供科学依据。[方法] 基于归一化差异植被指数(NDVI), 采用 Theil-Sen 趋势分析和 Mann-Kendall 检验对 2000—2023 年间的植被变化进行系统分析, 并结合最优参数地理探测器探讨了自然因素与人类活动对植被空间差异的综合影响。[结果] 2000—2023 年, 澜沧江流域植被呈现出明显的改善趋势, 大部分区域(74.61%) NDVI 值呈上升趋势, 特别是在云南省等低海拔地区, 植被恢复明显。然而, 流域北部和高海拔地区的植被表现为下降趋势, 占比为 25.39%。在空间分布上, 呈现“南高北低”的空间分布格局。高程、土地利用类型和温度是影响植被空间分异的主导因子, 其解释力均超过 50%。且这些因子间交互作用解释力均高于单因子, 相互作用共同决定了流域内不同区域植被的分布模式。另外, 随着高程的增加, NDVI 的改善趋势明显下降, 植被恢复和生长受到气候条件的严重限制。[结论] 未来需要加强高海拔地区的生态保护与修复, 实施适应性管理措施, 制定更有效的政策以应对气候变化和人类活动对流域生态环境带来的影响。

关键词: 澜沧江流域; 归一化差异植被指数(NDVI); 时空变化; 驱动因素; 地理探测器

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2025)04-0382-10

中图分类号: Q948, X87

文献参数: 赖翀, 王小燕. 澜沧江流域植被变化与驱动因素的定量分析[J]. 水土保持通报, 2025, 45(4): 382-391. Lai Chong, Wang Xiaoyan. Quantitative analysis of vegetation change and driving factors in Lancang River basin [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2025, 45(4): 382-391. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2025.04.017; CSTR: 32312.14.stbctb.2025.04.017.

Quantitative analysis of vegetation change and driving factors in Lancang River basin

Lai Chong, Wang Xiaoyan

(Ganzhou Institute of Water Resources and Electric Power Investigation and Design, Ganzhou, Jiangxi 341000, China)

Abstract: [Objective] The spatio-temporal evolution law of vegetation changes in the Lancang River basin was analyzed, in order to clarify the driving factors, and provide a scientific basis for the ecological protection and management of the basin. [Methods] The normalized difference vegetation index (NDVI) in conjunction with Theil-Sen trend analysis and the Mann-Kendall test were employed to systematically examine vegetation changes from 2000—2023. Furthermore, optimal parameter Geodetector was used to explore the combined effects of natural factors and human activities on spatial vegetation heterogeneity. [Results] During 2000—2023, the Lancang River basin exhibited a notable trend of vegetation improvement. In approximately 74.61% of the region, the NDVI values increased, with particularly marked recovery in low-altitude areas such as Yunnan Province. However, in northern and high-altitude regions of the basin, vegetation showed a declining trend, accounting for 25.39% of the area. The spatial distribution revealed a pattern of ‘higher in the south, lower in the north’. Elevation, land use type, and temperature were identified as the dominant factors influencing vegetation spatial variation, each explaining more than 50% of the variance. Moreover, the interaction among these factors exhibited greater explanatory power than any single factor, jointly shaping the vegetation distribution patterns across different areas of the basin. Additionally, the NDVI improvement trend significantly declined with increasing

收稿日期: 2025-02-26

修回日期: 2025-04-03

采用日期: 2025-04-03

资助项目: 国家重点研发计划项目“西南高山峡谷区水土流失综合防治技术与示范”(2022YFF1302903)

第一作者: 赖翀(1995—), 男(汉族), 江西省赣州市人, 本科, 中级工程师, 主要从事水土保持植被研究。Email: 850831425@qq.com。

通信作者: 王小燕(1991—), 女(汉族), 贵州省遵义市人, 本科, 中级工程师, 主要从事水土保持植被研究。Email: 1414046230@qq.com。

elevation, indicating that vegetation recovery and growth were severely constrained by climatic conditions at higher altitudes. [Conclusion] Strengthening ecological conservation and restoration efforts in high-altitude regions, along with implementing adaptive management strategies, will be essential for formulating more effective policies to mitigate the ecological impacts of climate change and human activities on the basin.

Keywords: Lancang River basin; normalized differential vegetation index (NDVI); spatio-temporal change; driving factors; geographical detector

植被在地球生态系统中发挥着至关重要的作用。作为地球生态的基础,植被通过光合作用吸收二氧化碳、释放氧气,对调节大气成分和减缓气候变化起到了重要作用^[1-3]。植被的健康程度直接影响生物多样性、土壤保持和水资源循环等关键生态功能。植被变化不仅会影响自然环境,还对人类社会经济活动产生深远影响^[4-5]。植被的变化,尤其是森林、草地等生态系统的退化,可能会导致水土流失、生态退化,甚至引发自然灾害。因此,及时、有效地监测和分析植被变化,成为保障生态安全和实现区域可持续发展的迫切需求^[6-7]。

传统的植被研究方法多依赖于地面调查和点位数据采集,但这些方法存在空间分布不均,时间周期长和数据获取难度大的问题,难以实现对大范围地区的长期连续监测。遥感技术的应用为植被研究提供了新的手段,遥感数据通过卫星平台提供高时空分辨率的地表信息,能够覆盖广泛的区域,及时反映植被的生长状况及变化趋势^[8-9]。通过遥感技术,研究者能够获取流域范围内的植被动态变化数据,为植被变化的分析提供了更为精准和高效的手段。在遥感技术中,归一化植被指数(NDVI)被广泛应用于植被变化的监测^[10-11]。NDVI作为衡量植被生长状况的重要指标,能够反映植被健康状况及其动态变化。NDVI值通过红光和近红外光的反射差异计算得出,具有良好的植被敏感性,能够准确监测植被的变化^[12-14]。因此,基于NDVI的遥感数据分析为植被时空变化的研究提供了可靠的数据支持。此外,还可以与地理信息系统(GIS)结合,进一步分析植被变化的空间分布、驱动因素和空间异质性,为区域生态变化研究提供深入的空间分析工具^[15]。

澜沧江流域地形复杂多样,气候差异显著,生态环境脆弱,是我国西南地区重要的水系和生态区域。流域内植被变化直接关系到区域水文过程、土壤保持、生物多样性保护以及生态系统恢复能力^[16]。近年来,在全球变化背景下,该流域植被变化的时空特征及其驱动机制逐渐成为生态学领域的重要研究热点^[17]。已有研究表明,气候变化和人类活动共同驱动了植被时空格局变化^[18]。对黄河源区、长江流域上游、三江源区等类似的高原山地与峡谷地区研究

表明,温度、降水、高程和土地利用变化等因素共同影响植被的分布与变化特征,尤其是温度升高和降水变化显著影响了植被生长状态,而农业扩展、城镇建设等人类活动则加剧了区域生态环境的脆弱性和生态压力^[19-20]。此外,随着水电开发等人类活动的加剧,流域的生态系统也面临着严峻的挑战。水电开发不仅改变了水文条件,还直接或间接地影响了流域植被的生长状态和分布模式。系统分析澜沧江流域特有植被的响应机制,并进一步探讨人类活动的影响,对于制定更加有效的生态保护和修复策略具有重要意义。

尽管已有研究深入揭示了高原山地和峡谷地区植被变化的总体特征,但针对澜沧江流域这一跨越多个气候带、纬度梯度明显且高程垂直差异显著的特殊生态区域,现有研究在数据的空间精度和时间连续性、驱动机制的精细化分析及定量表达方面仍存在不足。此外,以往研究通常侧重单一驱动因子的作用分析或对多个驱动因子的简单叠加效应探讨,而缺乏对不同因子间交互作用及其综合影响机制的深入定量研究。因此,本研究在数据选取上强化了高空间精度和长时间序列的结合,并通过引入最优参数地理探测器模型定量分析多因子间交互作用,更为系统和深入地揭示了澜沧江流域植被变化及其驱动机制。

本研究基于2000—2023年高空间分辨率的NDVI遥感数据,分析澜沧江流域植被变化的时空特征,并结合自然和人类活动的多源数据,定量评估气候、地形、土地利用及社会经济因素对植被变化的综合影响。研究通过非参数趋势分析(Theil-Sen法)和显著性检验(Mann-Kendall检验),识别了不同区域植被变化的动态趋势;同时,运用最优参数地理探测器模型量化分析了单因子及其交互作用对植被空间格局的解释力,明确了自然和人类活动因子在不同区域中的作用机制。研究旨在揭示澜沧江流域植被变化及其多驱动因素间的复杂相互作用关系,为流域生态保护策略制定、土地资源管理和区域可持续发展提供科学依据与决策参考,同时也为类似山区流域的植被变化监测与生态恢复提供方法借鉴。

1 材料与方 法

1.1 研究区概况

澜沧江流域位于中国西南地区,发源于青海省,流经西藏自治区和云南省,地理坐标为 $93^{\circ}51'04''-101^{\circ}44'42''E, 21^{\circ}06'46''-33^{\circ}48'43''N$ (图1),面积约 $1.65 \times 10^5 \text{ km}^2$ 。流域南北跨度较大,地形复杂多样,北部以高原山地为主,海拔高度多在4 000 m以上,气候寒冷干燥,属于典型的高原寒温带气候;中游地区以高山峡谷为主,表现出明显的垂直气候带,气候特征由温带逐渐向亚热带过渡;南部主要为低山丘陵地貌,海拔较低,气候温暖湿润,属于典型的亚热带季风气候。这种复杂的地形与多样的气候带分布导致了澜沧江流域内明显的南北和垂直差异,使流域内植被分布及其生长状态表现出显著的空间异质性。

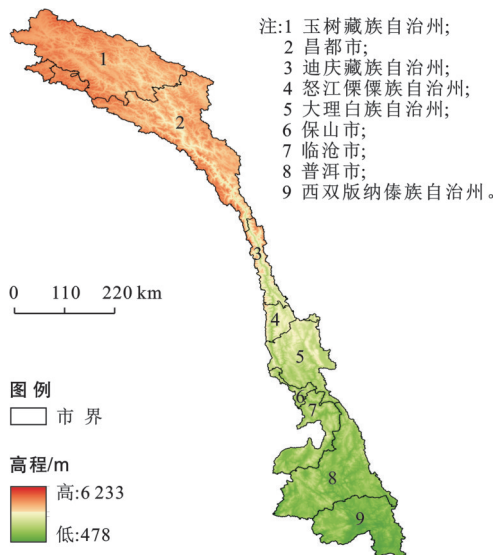


图1 澜沧江流域地形及政区分布

Fig.1 Topography and political district distribution of Lancang River basin

1.2 数据来源及处理

本研究采用的NDVI数据源自MODIS植被指数产品(MOD13Q1),该数据由美国宇航局(NASA)发布,具有全球范围内长期连续监测的高可靠性和广泛认可性。选取的数据时段为2000—2023年,空间分辨率为250 m,时间分辨率为16 d。为避免云层、大气扰动和传感器噪声的影响,本研究采用最大值合成法(MVC),以此生成逐年的NDVI最大值数据集。此外,研究还选取了包括高程、坡度、温度、降水、日照时数、蒸散发、相对湿度、国内生产总值、人口密度及土地利用类型在内的10个驱动因子。各因子的具体来源、空间分辨率及时间范围详见表1。所

有数据在分析前均进行了空间统一投影(WGS84坐标系),并通过ArcGIS进行数据预处理,统一空间分辨率至250 m,以确保空间匹配的一致性和分析结果的科学性与准确性。

表1 数据来源

Table 1 Sources of data

| 类别 | 影响因子 | 缩写 | 分辨率 | 来源 |
|--------|--------|-------|-------|---|
| 遥感影像 | | | 250 m | https://earthengine.google.com |
| 自然因子 | 高程 | Ele | 30 m | |
| | 坡度 | Slope | 30 m | |
| | 温度 | Tem | 1 km | |
| | 降水 | Pre | 1 km | https://www.resdc.cn |
| | 日照时数 | Ssd | 1 km | |
| | 蒸散发 | Evp | 1 km | |
| | 相对湿度 | Rhu | 1 km | |
| 人类活动因子 | 国内生产总值 | GDP | 1 km | |
| | 人口密度 | Pop | 1 km | https://www.resdc.cn |
| | 土地利用类型 | Lucc | 30 m | |

1.3 研究方法

1.3.1 NDVI变化趋势分析

NDVI变化趋势分析主要包括两个方面。首先,计算2000—2023年每个像元NDVI变化的斜率,以定量评价NDVI随时间的变化速率;其次,对计算得到的斜率进行趋势显著性检验,识别变化趋势是否具有统计学意义。本研究使用Theil-Sen方法计算NDVI变化斜率(θ),该方法属于非参数估计,不要求数据满足正态分布,尤其适用于处理时序数据,能有效降低异常值对斜率计算的影响。此外,采用Mann-Kendall趋势检验评估各像元NDVI时间序列变化趋势的显著性。根据计算结果,本研究将NDVI变化趋势划分为以下4种类型:显著减少($\theta < 0, p < 0.05$),不显著减少($\theta < 0, p \geq 0.05$),不显著增加($\theta > 0, p \geq 0.05$)和显著增加($\theta > 0, p < 0.05$)^[21-23]。

1.3.2 最优参数地理探测器模型

为了分析植被空间分异驱动因素的影响,使用了最优参数地理探测器模型。该模型能够定量评估多个自变量与因变量之间的关系,并通过因子探测器与因子交互作用探测器,深入分析影响植被变化的自然和人类活动因素^[24-26]。

(1) 因子探测器。因子探测器用于定量分析单一因子对NDVI变化的解释力,计算每个影响因子的 q 值, q 值越大,表示该因子对NDVI空间差异的影响力越强。本研究选择了表1中的10个因素作为自变量,通过空间分布的分层统计来评估它们对植被空间格局的影响。

(2) 交互作用探测器。分析多个因素之间的交互作用的影响。通过计算交互作用 q 值,揭示了不同因素之间的相互作用是如何增强或减弱其对植被变化的影响,作用关系判别依据见表2。

表2 交互作用判别依据

Table 2 Discriminant basis of interaction relation

| 判断依据 | 作用关系 |
|--|-------|
| $q(X_1 \cap X_2) < \min[q(X_1), q(X_2)]$ | 非线性减弱 |
| $q(X_1 \cap X_2) > \max[q(X_1), q(X_2)]$ | 双因子增强 |
| $q(X_1 \cap X_2) = q(X_1) + q(X_2)$ | 独立 |
| $q(X_1 \cap X_2) > q(X_1) + q(X_2)$ | 非线性增强 |

1.3.3 分箱统计法

为揭示各驱动因子对NDVI空间异质性的影响,采用等距分箱统计法对连续变量进行离散化处理。每个变量按其取值范围划分为100个固定宽度的区间,其中土地利用类型直接按类别进行分组统计,然后计算每个区间内NDVI的均值,进而构建因子与NDVI均值的响应关系曲线。这一过程在Python 3.11.9中完成。

1.3.4 主导因子对NDVI时间变化的影响分析

选取解释力较高的高程和土地利用类型作为主要分析因子,分别从不同高程梯度和土地利用变化的角度,探讨其对NDVI年际变化趋势的影响机制。分析方法如下:

(1) 将澜沧江流域高程数据利用ArcGIS自然断点分类法划分为10个等级。然后利用ArcGIS的分区统计工具计算不同高程等级区域内各像元NDVI的年际变化斜率(θ),以分析不同高程梯度下植被变化趋势的差异。

(2) 采用2000年和2023年土地利用数据,建立土地利用类型转移矩阵,量化不同时期土地利用类型的转移情况。同时,利用分区统计方法分别计算各种土地利用转化类型区域内NDVI变化斜率,分析土地利用类型变化对植被NDVI时间趋势的具体影响。

2 结果与分析

2.1 NDVI时空变化特征

图2表明,2000—2023年澜沧江流域NDVI均值呈现波动上升趋势,年增长速率为0.0016/a($R^2=0.67, p<0.05$)。NDVI均值最大值在2020年,为0.6673,最小值出现在2001年,为0.6270。图3表明,2000—2023年澜沧江流域NDVI变化斜率由北向南存在增长的趋势,变化范围为-0.0038~0.0035,大部分地区(74.61%)NDVI呈现上升趋势($\theta>0$),其

中显著上升($p<0.05$)的区域面积占比为27.38%,主要分布在云南省境内,特别是普洱市。NDVI呈现下降趋势($\theta<0$)的区域面积占比为25.39%,主要分布于青海玉树州和西藏自治区昌都市境内,显著下降($p<0.05$)的区域较少,面积占比仅3.32%。

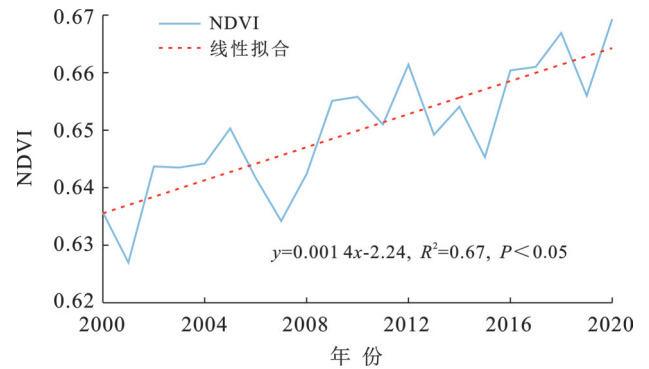


图2 2000—2023年澜沧江流域NDVI时间序列变化
Fig.2 Time series change of NDVI in Lancang River basin from 2000 to 2023

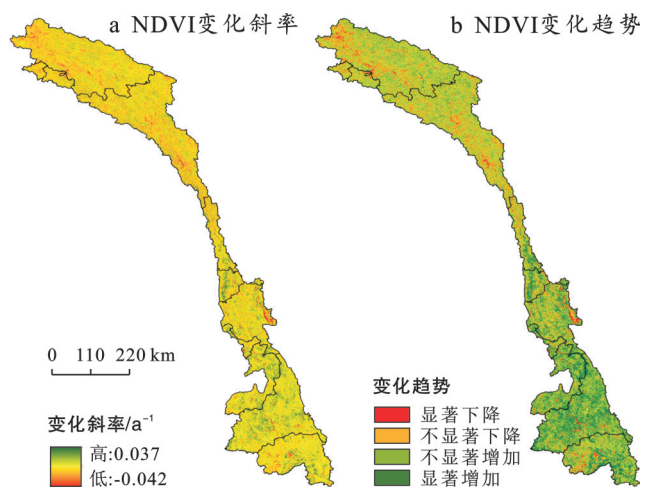


图3 2000—2023年澜沧江流域NDVI变化趋势空间分布
Fig.3 Spatial distribution of change trends rake ration in NDVI in Lancang River basin from 2000 to 2023

2.2 NDVI空间分布格局

2000—2023年澜沧江流域植被覆盖呈现明显的空间差异,呈现“南高北低”的空间分布格局(图4)。低、中低和中等植被覆盖的区域主要分布在玉树州西北部和昌都市南部,面积占比分别为4.51%,7.31%和14.42%。中高植被覆盖的区域面积占比为28.24%,主要集中在玉树州东部和昌都市北部。高植被覆盖的区域面积占比为45.52%,分布于云南省境内。总体而言,澜沧江流域植被覆盖较高,NDVI>0.6的区域占比达73.76%,特别是云南省境内,大部分区域为高植被覆盖;然而在青海玉树州和西藏自治区的昌都市等高海拔、生态环境相对脆弱的地区,存在部分区域植被覆盖率较低。

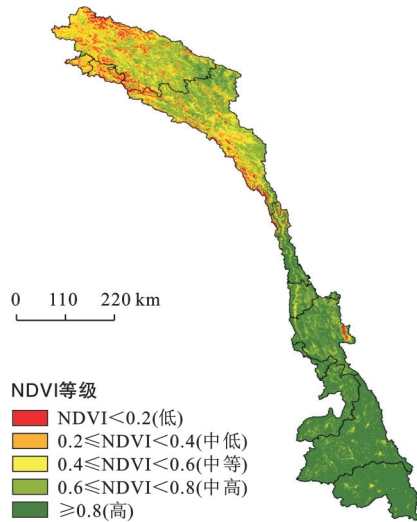
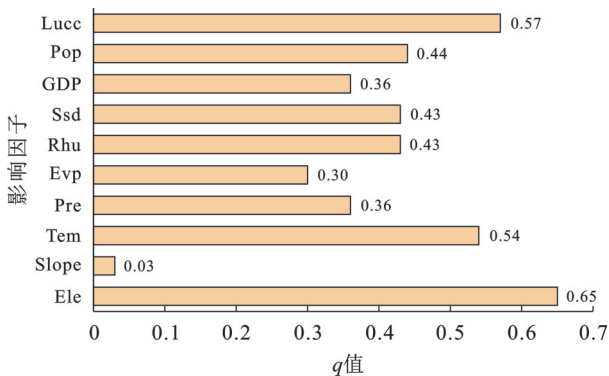


图 4 2000—2023 年澜沧江流域 NDVI 均值的空间分布特征
Fig.4 Spatial distribution characteristics of mean NDVI in Lancang River basin from 2000 to 2023

2.3 NDVI 空间异质性的驱动因子探测与分析

2.3.1 NDVI 空间差异的主导因子识别

NDVI 空间分异影响因子解释力排序为: Ele > Lucc > Tem > Pop > Rhu = Ssd > GDP = Pre > Evp > Slope。Ele, Lucc 和 Tem 为主导因子, 解释力超过 50% (图 5)。其中高程解释力最高, 为 65%。Pop, Rhu, Ssd, GDP, Pre 和 Evp 的解释力超过 30%, 是次要因子。Slope 的解释力微弱, 仅 3%。总体而言, 自然和人类活动因子均产生了较强的影响, 特别是 Ele 和 Lucc, 起到了主导作用。



注: 图中各影响因子名称见表 1。下同。

图 5 单因子探测的 q 值

Fig.5 The q-values of single-factor probe

2.3.2 因子交互作用对 NDVI 空间差异解释力

研究进一步采用交互探测器评估了因子间相互作用 (图 6)。Ele ∩ Lucc 相互作用的解释力最高, 为 74%; 其次是 Ele ∩ Pre 和 Ele ∩ Rhu 的解释力均为 71%; Ele 与其他因子之间的解释力也均超过 67%。Tem 与 Lucc 以及其他因子的交互作用的解释力均超过了 50%。进一步确认了 Ele, Tem 和 Lucc 的主导

作用。另外, 交互作用分析显示, 影响因子之间的交互作用普遍呈现增强效应。交互作用如 Slope 与 Ele, Tem, Evp, GDP 及 Pop 的表现为非线性增强, 而其他因子间则为双因子增强。尽管 Slope 在单因子探测中影响较弱, 但在与其他因子的交互显著增强了其解释力, 表明 Slope 在与其他关键因子共同作用下, 对于植被分布和的影响不可忽视。

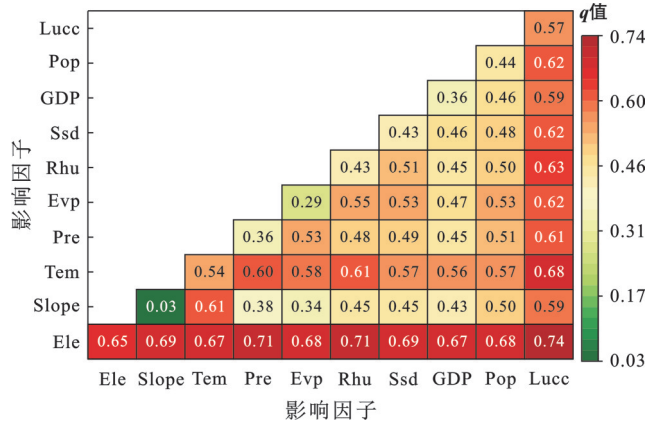


图 6 交互探测的 q 值

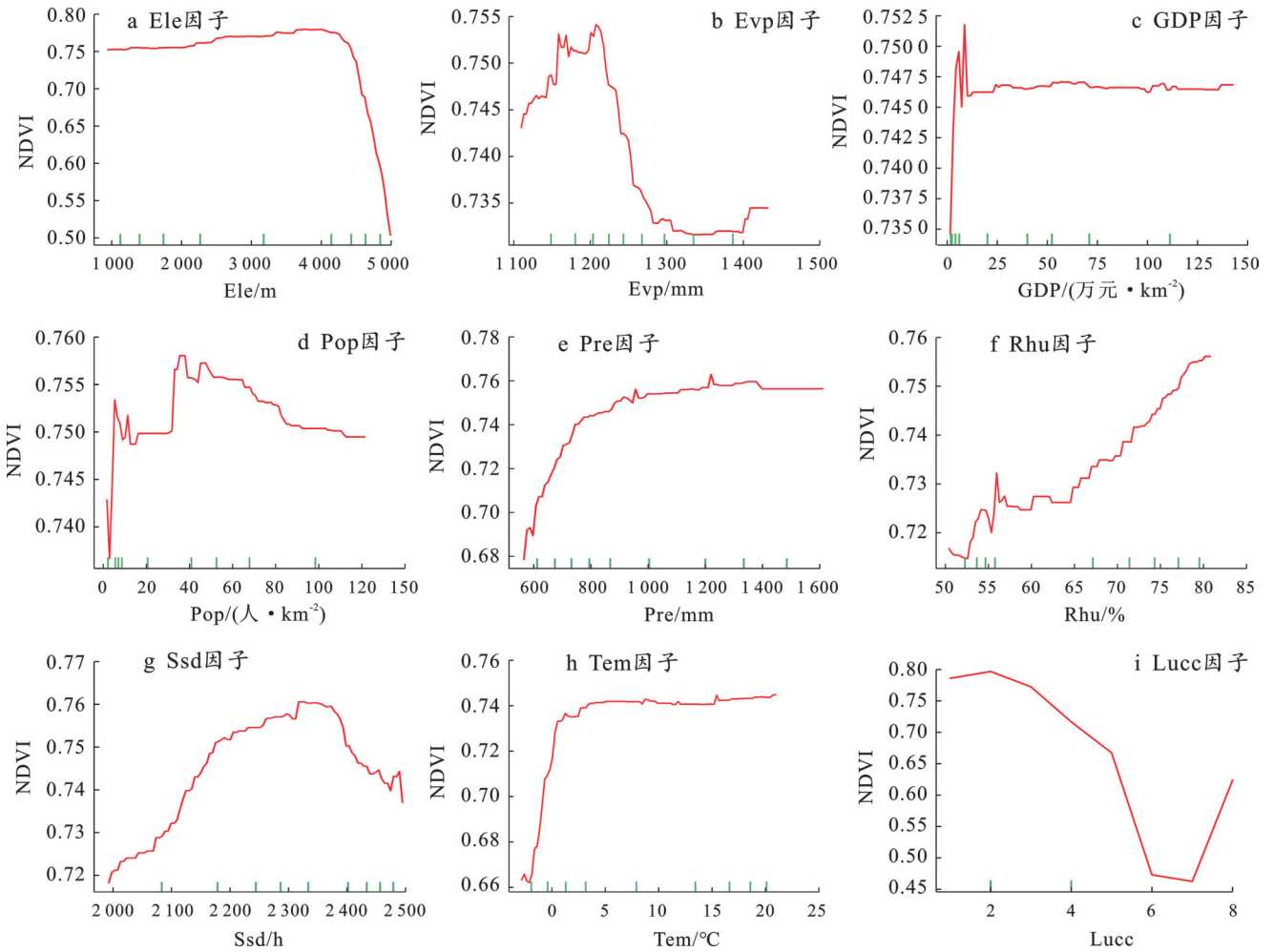
Fig.6 The q-values of interaction probe

2.3.3 不同因子影响下 NDVI 均值变化趋势

图 7 反映了 NDVI 在不同因子影响下的变化趋势。当 Ele 低于 4 000 m 时, NDVI 区域稳定, 而超过 4 000 m, 随着 Ele 的增加, NDVI 显著下降。表明 Ele 较高时, 由于气候条件更加严苛, 植被健康度可能会下降。当 Evp 低于 1 200 mm 时, NDVI 随之增大而上升, 超过这一临界值后, NDVI 随着 Evp 增加而下降。GDP 对 NDVI 的影响较小, 变化趋势几乎平稳。当 Pop 低于 40 人/km² 时, NDVI 随 Pop 的增加而上升, 超过临界值后随 Pop 的增加而下降, 表明人口增加过度对植被造成负面影响。Pre 与 NDVI 正相关, Pre 增加时, NDVI 也随之上升。这表明 Pre 对植物生长起到了积极的促进作用, 植物在水分充足的环境中生长更健康。Rhu 增加时, NDVI 也随之增加, 说明较高的 Rhu 有助于植物的生长和健康。Rhu 较高时, 植物能够更好地保持水分, 促进生长。当 Ssd 低于 2 350 h, 随着 Ssd 的增加, NDVI 略有上升。这表明太阳辐射是植物生长的重要因素, 长时间的阳光照射有助于提高植物的光合作用, 从而促进植被健康。当 Tem 低于 5 °C 时, NDVI 随温度增加而上升, 但当 Tem 超过该临界值时, NDVI 趋于平稳。过高或过低的 Tem 都会对植物生长发育造成压力, 影响其健康。在土地利用方面, 林地和草地的 NDVI 较高, 而建设用地的 NDVI 值最低。显示出城市化等土地变化活动对植被健康产生了负面影响。

总体而言,气候和环境因素对植被健康有显著影响,表现为正相关或非线性关系。人类活动因素

对NDVI有负面影响,特别是城市化和土地开发等导致植被覆盖减少。



注:Lucc因子中1,2,3,4,5,6,7,8分别代表耕地、林地、灌木林地、草地、水域、冰雪、裸地和建设用地。

图7 不同因子影响下NDVI均值变化趋势

Fig.7 Trends in average NDVI change under influence of different factors

2.4 主导因子对NDVI时间变化的影响

2.4.1 高程对NDVI时间变化的影响

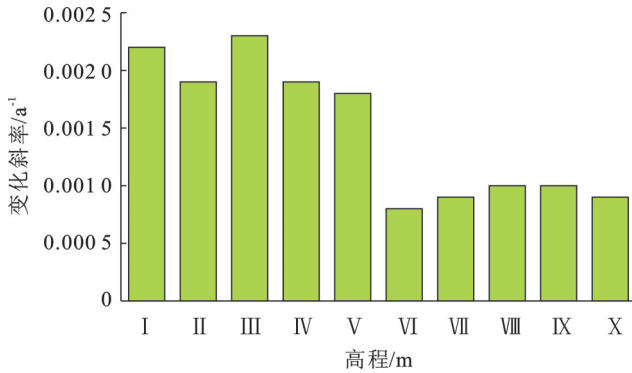
不同高程梯度下NDVI的变化斜率存在明显差异(图8)。当高程低于V级时,NDVI变化斜率介于0.0018/a至0.0023/a之间,其中Ⅲ级NDVI变化斜率最高,为0.0023/a。当高程超过V级后,NDVI变化斜率迅速下降,介于0.007/a至0.0010/a之间,其中,Ⅵ级NDVI变化斜率最低,为0.007/a。这表明随着海拔升高,植被生长状况的改善斜率逐渐减弱,尤其在高海拔地区尤为明显。

2.4.2 土地利用变化对NDVI时间变化的影响

澜沧江流域的土地利用主要由林地和草地组成,且在2000—2023年期间,二者的占比均超过85%。空间分布上,上游地区以草地为主,中下游则以林地为主(图9)。期间15547.81 km²的土地发生

了转变,耕地、草地和冰雪面积出现下降趋势,其中耕地和草地减少尤为明显,分别为1215.81 km²和3179.63 km²(表3)。其余土地利用类型呈现增长趋势,特别是林地和裸地,分别增加了2007.25 km²和2543.38 km²。耕地转出面积最大,达4857.56 km²,其中大部分转变为林地,面积为3815.56 km²,主要受退耕还林政策影响;其次是草地,转出4626.94 km²,主要转化为林地和裸地,面积分别为1319.75 km²和2478.06 km²。林地转出面积为3708.81 km²,其中转为耕地的面积最大,达到2893.43 km²。不同土地利用变化下NDVI变化斜率的统计结果表明(表4),在裸地和建设用地转化为林地和耕地时,NDVI变化斜率表现为显著的正值,超过0.0067/a,表明这些土地转变促进了植被的恢复和生长。特别是裸地转变为林地,通常伴随着植被的人工恢复和生态修复,这

不仅增加了绿化面积,还改善了区域生态环境。然而,林地和耕地向水域和建设用地的转变则表现出显著的负向变化,NDVI变化斜率低于-0.007 6/a,说明这些转变显著破坏了植被生长。尤其是在林地转变为裸地和建设用地的过程中,原有的植被被去除或受到破坏,导致植被覆盖率下降。



注:图中罗马数字代表不同高程范围,分别为: I (482~1 064 m); II (1 065~1 448 m); III (1 449~1 860 m); IV (1 861~2 336 m); V (2 337~2 902 m); VI (2 903~3 552 m); VII (3 553~4 106 m); VIII (4 107~4 493 m); IX (4 494~4 844 m); X (4 845~6 265 m)。

图 8 澜沧江流域不同高程 NDVI 变化斜率
Fig.8 Rate ratio of NDVI change at different elevations in Lancang River basin

3 讨论

通过对 NDVI 时序分析,表明澜沧江流域整体植被覆盖在研究时段内呈现出一定的波动上升趋势。

这一变化与该区域的气候变暖趋势和降水量变化密切相关。高温和适宜的降水为植被生长提供了良好的环境条件,尤其是在云南省及其他低海拔地区,植被恢复情况尤为显著^[27]。然而,澜沧江流域的北部和高海拔地区,如青海玉树州和西藏昌都市,植被呈现明显的下降趋势,表明这些区域的植被生长更易受到低温、降水不足及地形因素的显著制约^[28]。此外,从空间分布来看,澜沧江流域的植被变化呈现出明显的“南高北低”空间格局。云南省尤其是普洱市等低海拔地区植被覆盖率较高,而青海、西藏等高海拔地区尽管近年来有所变暖,但由于较低的降水和严酷的气候条件,植被恢复效果并不明显^[29]。

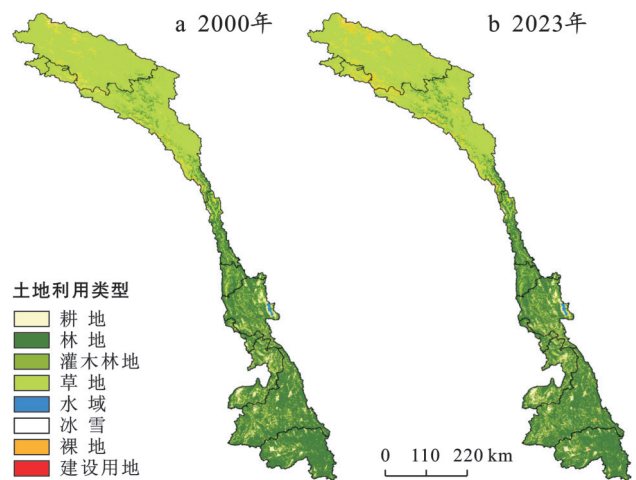


图 9 2000—2023 年澜沧江流域土地利用空间格局演变
Fig.9 Evolution of land use spatial pattern in Lancang River basin from 2000 to 2023

表 3 2000—2023 年澜沧江流域土地利用类型转移矩阵

Table 3 Transition matrix of land use patterns of land use patterns in Lancang River basin from 2000 to 2023 单位:km²

| 土地利用类型 | 2023 年 | | | | | | | | 合计 |
|--------|----------|----------|----------|----------|--------|--------|----------|-------|-----------|
| | 耕地 | 林地 | 灌木林地 | 草地 | 水域 | 冰雪 | 裸地 | 建设用地 | |
| 耕地 | — | 3 815.56 | 293.19 | 536.88 | 148.50 | 0.00 | 0.38 | 63.06 | 4 857.56 |
| 林地 | 2 893.44 | — | 616.19 | 182.75 | 12.19 | 0.00 | 0.06 | 4.19 | 3 708.81 |
| 灌木林地 | 221.44 | 574.44 | — | 207.56 | 2.69 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 1 006.13 |
| 草地 | 513.56 | 1 319.75 | 177.88 | — | 64.69 | 44.38 | 2 478.06 | 28.63 | 4 626.94 |
| 水域 | 12.81 | 5.75 | 0.00 | 27.88 | — | 1.31 | 28.00 | 0.88 | 76.63 |
| 冰雪 | 0.00 | 0.13 | 0.00 | 24.94 | 14.19 | — | 630.94 | 0.00 | 670.19 |
| 裸地 | 0.19 | 0.38 | 0.00 | 467.19 | 11.13 | 115.19 | — | 0.00 | 594.06 |
| 建设用地 | 0.31 | 0.06 | 0.00 | 0.13 | 7.00 | 0.00 | 0.00 | — | 7.50 |
| 合计 | 3 641.75 | 5 716.06 | 1 087.25 | 1 447.31 | 260.38 | 160.88 | 3 137.44 | 96.75 | 15 547.81 |

在未来生态保护与管理中,应实施差异化的植被保护与恢复策略。针对云南省等低海拔地区,应继续加强生态保护力度,合理规划土地利用方式,减少因城市化与农业扩张造成的植被破坏;而对高海拔的青海、西藏地区,应更多关注气候变化带来

的生态脆弱性,通过加强人工辅助恢复措施(如人工造林、植被培育、封育管理等),并结合适应性生态修复技术,提升高海拔地区生态系统的稳定性和韧性,最终实现整个澜沧江流域生态系统的可持续发展^[30]。

表4 2000—2023年澜沧江流域土地利用变化下NDVI变化趋势
Table 4 NDVI trends under land use changes in Lancang River basin from 2000 to 2023

单位: a^{-1}

| 土地利用类型 | 2023年 | | | | | | | | |
|--------|-------|---------|---------|---------|----------|----------|---------|----------|----------|
| | 耕地 | 林地 | 灌木林地 | 草地 | 水域 | 冰雪 | 裸地 | 建设用地 | |
| 2000年 | 耕地 | — | 0.003 7 | 0.003 2 | -0.001 4 | -0.004 6 | — | -0.015 5 | -0.007 6 |
| | 林地 | 0.001 3 | — | 0.001 6 | 0.000 8 | -0.005 6 | — | -0.023 7 | -0.008 0 |
| | 灌木林地 | 0.002 3 | 0.003 1 | — | 0.001 3 | -0.004 1 | — | — | — |
| | 草地 | 0.003 3 | 0.002 6 | 0.003 4 | — | -0.000 1 | 0.001 7 | -0.001 4 | -0.001 3 |
| | 水域 | 0.003 4 | 0.003 6 | — | 0.001 9 | — | 0.002 0 | 0.004 6 | -0.001 1 |
| | 冰雪 | — | 0.001 4 | — | 0.002 1 | 0.003 6 | — | 0.001 5 | — |
| | 裸地 | 0.007 5 | 0.009 3 | — | 0.001 4 | 0.003 5 | 0.001 7 | — | — |
| | 建设用地 | 0.006 7 | 0.008 6 | — | -0.000 5 | -0.000 9 | — | — | — |

研究通过地理探测器定量分析了澜沧江流域植被变化的驱动因素,明确了自然和人类活动因素的主导作用及其交互效应。分析结果显示,高程、土地利用和温度是影响植被空间格局的主要驱动因素,其中高程与其他因子之间的交互作用尤为显著。这与已有研究多强调单一因子作用或简单叠加效应的观点不同,本研究明确指出因子间交互作用的重要性^[31-32]。例如,坡度在单独分析时解释力较低,但与高程和土地利用等因子交互后,其对植被空间分异的解释力显著增强。因此,在未来生态研究与管理中,应更加关注不同驱动因素之间的协同效应,而不仅仅是单一因子^[33]。同时,研究也强调了人类活动因素在澜沧江流域植被变化中的显著作用,尤其是土地利用类型的转化和城市化进程的影响。部分地区的城市建设和农业扩展显著压缩了植被生长空间,导致区域生态系统的退化趋势明显。此外,水电开发作为人类活动的重要组成部分,对流域植被产生了深远影响。水电建设改变了流域的水文条件,包括水流速度、洪水频率和水位波动,这些变化直接或间接地影响了植被的生长和分布。特别是在大规模水库建设和水电项目实施的区域,水电开发导致了大片土地的淹没、生态栖息地的丧失以及水质的变化,从而加剧了流域内植被的退化。总的来说,水电开发与土地利用转型及城市化进程相互作用,共同加剧了澜沧江流域生态环境的压力^[34]。因此,在经济发展过程中需要更加注重土地资源的可持续利用,加强生态保护力度,避免生态风险进一步扩大。

另外,研究在驱动因子的选择和数据精细化方面仍存在一定局限性,未能纳入更精细化的社会经济因子、具体的土地政策或生态管理措施。未来研究应进一步扩展驱动因素的范围,增加社会经济与生态工程因素的分析,并结合高分辨率遥感数据与实地调查,加强微观尺度植被动态研究,以深入揭示

局部生态变化机理,推动区域生态管理策略更加精细化和有效化。

4 结论

本研究基于遥感数据,系统分析了澜沧江流域2000—2023年植被变化的时空特征及其驱动因素,并重点探讨了主导因子对植被变化的影响。研究结果表明。

(1) 在时间变化上,74.61%的区域NDVI呈现上升趋势,尤其是在云南省等低海拔区域,植被生长得到了较好的恢复。NDVI呈现下降趋势的区域为25.39%,集中分布在流域北部和高海拔地区。

(2) 自然因素,如气候变化和地形特征是影响植被变化的主要驱动因素。气候和地形的相互作用共同决定了流域内不同区域植被的分布模式。

(3) 人类活动引起的土地利用变化,尤其是农业扩展和城市化进程,对植被变化产生了负面影响。

总之,澜沧江流域植被变化受到自然因素和人类活动双重影响。气候变化和地形特征为流域植被变化的基础条件,而人类活动则在一定程度上加剧了植被的退化或促进了植被的恢复。

参考文献(References)

- [1] Pandey R, Sharma J, Singh R, et al. Vegetation characteristics based climate change vulnerability assessment of temperate forests of western Himalaya [J]. *Forests*, 2022,13(6):848.
- [2] Zhang Rongrong, Qi Junyu, Leng Song, et al. Long-term vegetation phenology changes and responses to pre-season temperature and precipitation in northern China [J]. *Remote Sensing*, 2022,14(6):1396.
- [3] Yu Linfei, Leng Guoyong, Python A. Varying response of vegetation to sea ice dynamics over the Arctic [J]. *Science of the Total Environment*, 2021,799:149378.

- [4] 莫兴国,刘苏峡,胡实.黄河源区气候—植被—水文协同演变及成因辨析[J].地理学报,2022,77(7):1730-1744.
Mo Xingguo, Liu Suxia, Hu Shi. Co-evolution of climate-vegetation-hydrology and its mechanisms in the source region of Yellow River [J]. Acta Geographica Sinica, 2022,77(7):1730-1744.
- [5] 金钊.黄土高原小流域退耕还林还草的生态水文效应与可持续性[J].地球环境学报,2022,13(2):121-131.
Jin Zhao. Ecohydrological effects and sustainability of the grain for green project on the Chinese Loess Plateau [J]. Journal of Earth Environment, 2022,13(2):121-131.
- [6] Pearson R G, Phillips S J, Lorant M M, et al. Shifts in Arctic vegetation and associated feedbacks under climate change [J]. Nature Climate Change, 2013,3(7):673-677.
- [7] Zeng Yelu, Hao Dalei, Huete A, et al. Optical vegetation indices for monitoring terrestrial ecosystems globally [J]. Nature Reviews Earth & Environment, 2022,3(7):477-493.
- [8] 赖金林,齐实,廖瑞恩,等.2000—2019年西南高山峡谷区植被变化对气候变化和人类活动的响应[J].农业工程学报,2023,39(14):155-163.
Lai Jinlin, Qi Shi, Liao Ruien, et al. Vegetation change responses to climate change and human activities in south-west alpine canyon areas of China from 2000 to 2019 [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2023,39(14):155-163.
- [9] 姜欣彤,黎曙,周祖昊,等.基于高程分段的黄河源区NDVI和水热条件空间分布格局[J].南水北调与水利科技(中英文),2020,18(4):39-53.
Jiang Xintong, Li Shu, Zhou Zuhao, et al. Distribution pattern of NDVI and hydrothermal conditions in the Yellow River Headwaters based on elevation section [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2020,18(4):39-53.
- [10] Zheng Chen, Tang Xuguang, Gu Qing, et al. Climatic anomaly and its impact on vegetation phenology, carbon sequestration and water-use efficiency at a humid temperate forest [J]. Journal of Hydrology, 2018, 565: 150-159.
- [11] Jasechko S, Sharp Z D, Gibson J J, et al. Terrestrial water fluxes dominated by transpiration [J]. Nature, 2013,496(7445):347-350.
- [12] Ma Bo, Wang Shanshan, Mupenzi C, et al. Quantitative contributions of climate change and human activities to vegetation changes in the upper White Nile River [J]. Remote Sensing, 2021,13(18):3648.
- [13] 魏晓旭,魏伟,刘春芳.近40年青海省草地植被时空变化及其与人类活动的关系[J].生态学杂志,2021,40(8):2541-2552.
Wei Xiaoxu, Wei Wei, Liu Chunfang. Spatiotemporal variation of grassland vegetation and its relationship with human activities in Qinghai Province in recent 40 years [J]. Chinese Journal of Ecology, 2021,40(8):2541-2552.
- [14] 杜佳梦,包刚,佟斯琴,等.1982—2015年蒙古国植被覆盖变化及其与气候变化和人类活动的关系[J].草业学报,2021,30(2):1-13.
Du Jiameng, Bao Gang, Tong Siqin, et al. Variations in vegetation cover and its relationship with climate change and human activities in Mongolia during the period 1982—2015 [J]. Acta Prataculturae Sinica, 2021,30(2):1-13.
- [15] 薛晓玉,王晓云,段含明,等.北方农牧交错带植被NPP的时空变化及其驱动因子分析[J].水土保持研究,2021,28(2):190-197.
Xue Xiaoyu, Wang Xiaoyun, Duan Hanming, et al. Temporal and spatial changes of NPP and its causes in the agricultural pastoral ecotone of northern China [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2021,28(2):190-197.
- [16] 王静,姚顺波,刘天军.退耕还林背景下降水利用效率时空演变及驱动力探讨[J].农业工程学报,2020,36(1):128-137.
Wang Jing, Yao Shunbo, Liu Tianjun. Spatio-temporal evolution and driving forces of rainfall use efficiency in land restoration [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2020,36(1):128-137.
- [17] 段禾祥,杨靖,杨茜,等.澜沧江中段典型河谷植被景观格局的空间尺度效应研究[J].西南林业大学学报(自然科学),2023,43(2):126-132.
Duan Hexiang, Yang Jing, Yang Qian, et al. Study on spatial scale effect of vegetation landscape patterns in typical valleys of the middle Lancang River [J]. Journal of Southwest Forestry University (Natural Sciences), 2023,43(2):126-132.
- [18] 张甜甜,易桂花,张廷斌,等.澜沧江流域2000—2017年植被NDVI时空特征及其对气候因子的响应[J].测绘与空间地理信息,2020,43(3):49-53.
Zhang Tiantian, Yi Guihua, Zhang Tingbin, et al. Spatial-temporal variation in NDVI and its response to climate in the Lancang river basin from 2000 to 2017 [J]. Geomatics & Spatial Information Technology, 2020,43(3):49-53.
- [19] 和春兰,陈超,许林艳.澜沧江下游流域植被净初级生产力(NPP)时空变化及其驱动因素分析[J].云南地理环境研究,2021,33(3):66-74.
He Chunlan, Chen Chao, Xu Linyan. Spatial and temporal patterns of planting NPP and its driving factors in lower reaches of Lancang River [J]. Yunnan Geographic Environment Research, 2021,33(3):66-74.
- [20] 范娜,谢高地,张昌顺,等.2001年至2010年澜沧江流

- 域植被覆盖动态变化分析[J].资源科学,2012,34(7):1222-1231.
- Fan Na, Xie Gaodi, Zhang Changshun, et al. Spatial-temporal dynamic changes of vegetation cover in Lancang River basin during 2001—2010 [J]. Resources Science, 2012,34(7):1222-1231.
- [21] 韩继冲,喻舒琳,杨青林,等.1999—2015年长江流域上游植被覆盖特征及其对气候和地形的响应[J].长江科学院院报,2019,36(9):51-57.
- Han Jichong, Yu Shulin, Yang Qinglin, et al. Responses of vegetation coverage in the upper reaches of the Yangtze River basin to climate and topography from 1999 to 2015 [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2019,36(9):51-57.
- [22] 李霞,张国壮,陈永昊,等.农牧交错带辽河流域2010—2019年植被覆盖变化及驱动因素分析[J].农业工程学报,2022,38(22):63-72.
- Li Xia, Zhang Guozhuang, Chen Yonghao, et al. Vegetation cover change and driving factors in the agropastoral ecotone of Liaohe River basin of China from 2010 to 2019 [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2022,38(22):63-72.
- [23] 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 Lang, Sun Ying, Yin Shaohua, 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.
- [24] 王劲峰,徐成东.地理探测器:原理与展望[J].地理学报,2017,72(1):116-134.
- Wang Jinfeng, Xu Chengdong. Geodetector: Principle and prospective [J]. Acta Geographica Sinica, 2017,72(1):116-134.
- [25] 高思琦,董国涛,蒋晓辉,等.基于地理探测器的三江源植被变化及自然驱动因子分析[J].水土保持研究,2022,29(4):336-343.
- Gao Siqi, Dong Guotao, Jiang Xiaohui, et al. Analysis of vegetation coverage changes and natural driving factors in the three-river headwaters region based on geographical detector [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2022,29(4):336-343.
- [26] 王晓蕾,石守海,陈江朝霞.黄河流域植被覆盖度变化及驱动因素[J].中国环境科学,2022,42(11):5358-5368.
- Wang Xiaolei, Shi Shouhai, Chenjiang Zhaoxia. Change and driving factors of vegetation coverage in the Yellow River basin [J]. China Environmental Science, 2022,42(11):5358-5368.
- [27] 袁泽申,陈晨晨,李伯根,等.澜沧江中下游流域植被NDVI时空演变特征[J].人民珠江,2022,43(10):104-112.
- Yuan Zeshen, Chen Chenchen, Li Bogen, et al. Spatial-temporal evolution characteristics of NDVI in middle and lower reaches of Lancang River basin [J]. Pearl River, 2022,43(10):104-112.
- [28] Liu Xinliang, Li Yong, Shen Jianlin, et al. Landscape pattern changes at a catchment scale: A case study in the upper Jinjing River catchment in subtropical central China from 1933 to 2005 [J]. Landscape and Ecological Engineering, 2014,10(2):263-276.
- [29] Banti M A, Kiachidis K, Gemitzi A. Estimation of spatio-temporal vegetation trends in different land use environments across Greece [J]. Journal of Land Use Science, 2019,14(1):21-36.
- [30] 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.
- [31] 何玉杰,孔泽,户晓,等.水热条件分别控制了温带草地NDVI的年际变化和增长趋势[J].生态学报,2022,42(2):766-777.
- He Yujie, Kong Ze, Hu Xiao, 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.
- [32] 马炳鑫,和彩霞,靖娟利,等.1982—2019年中国西南地区植被变化归因研究[J].地理学报,2023,78(3):714-728.
- Ma Bingxin, He Caixia, Jing Juanli, et al. Attribution of vegetation dynamics in southwest China from 1982 to 2019 [J]. Acta Geographica Sinica, 2023,78(3):714-728.
- [33] Zhao Yu, Feng Qi. Identifying the spatiotemporal pattern and driving factors of vegetation dynamics in Shaanxi Province, China [J]. Geocarto International, 2022,37(27):17890-17916.
- [34] Ryan J G, McAlpine C A, Ludwig J A. Integrated vegetation designs for enhancing water retention and recycling in agroecosystems [J]. Landscape Ecology, 2010,25(8):1277-1288.