北京林业大学学报
JOURNAL OF BEIJING FORESTRY UNIVERSITY

中国境内兴凯湖流域植被时空演变及影响因素

罗文笛 杨倩 马玥 李锦涛 王瑶

Spatiotemporal evolution and influencing factors of vegetation in the Xingkai Lake Basin in China

Luo Wendi, Yang Qian, Ma Yue, Li Jintao, Wang Yao

引用本文:
罗文笛, 杨倩, 马玥, 李锦涛, 王瑶. 中国境内兴凯湖流域植被时空演变及影响因素[J]. 北京林业大学学报, 2025, 47(12):109–117. doi: 10.12171/j.1000–1522.20250336
Luo Wendi, Yang Qian, Ma Yue, Li Jintao, Wang Yao. Spatiotemporal evolution and influencing factors of vegetation in the Xingkai Lake Basin in China[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2025, 47(12):109–117. doi: 10.12171/j.1000–1522.20250336

在线阅读 View online: https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20250336

您可能感兴趣的其他文章
Articles you may be interested in

黄土高原植被净初级生产力时空变化特征及驱动因子分析
Spatial and temporal variation and driving forces for the net primary productivity of vegetation on the Loess Plateau
北京林业大学学报, 2023, 45(8): 29–42. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20220381

基于土地利用变化的陕北地区生境质量时空演变及其驱动因素
Spatial–temporal evolution of habitat quality in northern Shaanxi Province of northwestern China based on land use change and its driving factors
北京林业大学学报, 2022, 44(6): 85–95. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20210437

黄河下游城市区域绿色空间时空演变的规律与机制
Law and mechanism of spatio–temporal evolution of urban greenspace in the lower reaches of the Yellow River
北京林业大学学报, 2023, 45(3): 113–126. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20220129

黄河流域生态系统服务价值时空异质性及驱动因素分析
Spatiotemporal heterogeneity and driving factors of ecosystem service value in the Yellow River Basin
北京林业大学学报, 2024, 46(6): 70–81. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20230226

黄土高原青藏高原过渡带植被NPP时空变化及其驱动力
Spatiotemporal changes and driving forces of vegetation NPP in transition zone between the Loess Plateau and Qinghai Tibet Plateau: a case study of Datong County, Qinghai Province of northwestern China
北京林业大学学报, 2025, 47(1): 39–50. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20240193

基于LUCC追踪分析的生态系统服务价值时空变化研究
Spatio–temporal variation of ecosystem service value based on LUCC trajectories: a case study of Bosten Lake Watershed
北京林业大学学报, 2021, 43(7): 88–99. https://doi.org/10.12171/j.1000–1522.20210017

DOI:10.12171/j.1000−1522.20250336

中国境内兴凯湖流域植被时空演变及影响因素

罗文笛[1,2] 杨 倩[2] 马 玥[1] 李锦涛[1,2] 王 瑶[2,3]
（1. 吉林建筑大学，吉林 长春 130118；2. 中国科学院东北地理与农业生态研究所，吉林 长春 130102；
3. 辽宁工程技术大学，辽宁 阜新 123000）

摘要:【目的】揭示中俄跨境兴凯湖流域这一重要生态过渡带的植被覆盖时空演变规律，识别气候变化、土壤地形与人类活动的相对贡献率，为区域生态系统健康管理及差异化保护策略制定提供科学依据。**【方法】**以中国境内兴凯湖流域为研究对象，采用归一化植被指数（NDVI）作为植被覆盖的量化指标，运用趋势分析、偏相关性分析及地理探测器等方法，系统评估植被变化的时空格局及其影响因素。**【结果】**（1）NDVI 呈西南向东北递减格局，年均增速 0.001（$p < 0.05$），改善区占 62.9%，退化区占 4.8%，西南部老爷岭山地改善最为显著；（2）地理探测器分析表明，土壤类型（$q = 0.223$）和高程（$q = 0.102$）主导 NDVI 空间分异；偏相关分析揭示，降水是年际波动的关键气候因子（偏相关系数 0.21）。（3）人类活动对植被改善与退化的贡献率分别达 96.75% 与 95.91%，主导流域植被动态。**【结论】**人类活动是兴凯湖流域植被变化的首要驱动力，其效应方向取决于土地利用方式，生态工程促进恢复，城市化导致退化。研究结果为跨境生态区差异化管理提供了数据支撑。

关键词：兴凯湖流域；遥感；植被 NDVI；地理探测器；人类活动；驱动机制；时空演化
中图分类号：S771.8 **文献标志码：**A **文章编号：**1000−1522(2025)12−0109−09
引文格式：罗文笛，杨倩，马玥，等. 中国境内兴凯湖流域植被时空演变及影响因素［J］. 北京林业大学学报，2025，47(12)：109−117. Luo Wendi, Yang Qian, Ma Yue, et al. Spatiotemporal evolution and influencing factors of vegetation in the Xingkai Lake Basin in China［J］. Journal of Beijing Forestry University, 2025, 47(12): 109−117.

Spatiotemporal evolution and influencing factors of vegetation in the Xingkai Lake Basin in China

Luo Wendi[1,2] Yang Qian[2] Ma Yue[1] Li Jintao[1,2] Wang Yao[2,3]
(1. Jilin Jianzhu University, Changchun 130118, Jilin, China;
2. Northeast Institute of Geography and Agroecology, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130102, Jilin, China;
3. Liaoning Technical University, Fuxin 123000, Liaoning, China)

Abstract: ［**Objective**］This study aims to reveal the spatio-temporal evolution of vegetation cover in the transboundary Xingkai Lake Basin between China and Russia, a critical ecological transition zone, and to identify the relative contributions of climate change, soil-terrain factors, and human activities, thereby providing a scientific basis for regional ecosystem health management and differentiated conservation strategies. ［**Method**］Taking the Xingkai Lake Basin in China as research object, the normalized difference vegetation index (NDVI) was used as a quantitative indicator of vegetation cover. Trend analysis, partial correlation analysis, and the geographical detector model were utilized to systematically evaluate the spatio-temporal patterns of vegetation changes and their influencing factors. ［**Results**］(1) NDVI exhibited a

收稿日期: 2025−09−01 **修回日期:** 2025−11−05
基金项目: 吉林省产业技术研究与开发专项（2023C036-1），国家自然科学基金项目（42201433）。
第一作者: 罗文笛。主要研究方向：植被遥感。Email: luowd061@163.com 地址：130118 吉林省长春市南关区新城大街 5088 号吉林建筑大学。
责任作者: 杨倩，副研究员。主要研究方向：农业遥感。Email: yangqian@iga.ac.cn 地址：130102 吉林省长春市高新北区盛北大街 4888 号中国科学院东北地理与农业生态研究所。
本刊网址: http://j.bjfu.edu.cn; http://journal.bjfu.edu.cn

spatial pattern of decreasing from southwest to northeast, with an average annual increase rate of 0.001 (p < 0.05). Improvement areas accounted for 62.9% of the basin, while degradation areas comprised 4.8%, with the most significant enhancement observed in the Laoyeling Mountainous region in the southwest. (2) Geographical detector analysis indicated that soil type (q = 0.223) and elevation (q = 0.102) dominated the spatial differentiation of NDVI, while partial correlation analysis revealed that precipitation was the key climatic factor driving inter-annual variability (partial correlation coefficient = 0.21). (3) Human activities contributed 96.75% to vegetation improvement and 95.91% to vegetation degradation, dominating the basin's vegetation dynamics. [**Conclusion**] Human activities constitute the primary driving force of vegetation change in the Xingkai Lake Basin, with their effect direction contingent upon land-use patterns: ecological restoration projects promote vegetation recovery, whereas urbanization leads to degradation. This study provides data support for differentiated management of transboundary ecological regions.

Key words: Xingkai Lake Basin; remote sensing; vegetation NDVI; geographical detector; human activities; driving mechanism; spatio-temporal evolution

植被作为陆地生态系统的核心组成部分，其覆盖状况与动态变化不仅是衡量区域生态健康的关键指标，更对跨境生态系统的稳定性具有深远影响。尤其在调节气候、保持水土和维持生物多样性等方面，植被发挥着至关重要的作用。兴凯湖流域作为中俄跨境生态区的重要组成部分，是东北亚地区关键的生态过渡带，其在生物多样性保护、水资源调控及区域生态安全维系中具有不可替代的战略地位[1]。在当前全球气候变化加剧与人类活动强度持续增加的背景下，开展高精度、长时序的植被动态监测显得尤为迫切[2]。近年来，极端气候事件频发，叠加土地利用变更、城市化扩张等人为干扰，使得植被覆盖状况成为评估生态系统韧性与健康程度的重要依据[3]。

遥感技术因其覆盖范围广、时间序列长、数据获取便捷等优势，已成为植被监测的重要数据源之一[4]。在众多植被指数中，归一化植被指数（normalized difference vegetation index，NDVI）被广泛认为是评估植被生长状况和覆盖度的最佳指标[5]。目前，学术界常用的 NDVI 数据集包括 MODIS NDVI、SPOT-VGT NDVI 和 GIMMS NDVI。三者在时空分辨率、数据处理方法和传感器参数等方面存在显著差异，各具优势。其中，MODIS NDVI 和 SPOT-VGT NDVI 具有较高的空间分辨率，适用于精细化的空间分析[6−7]；而 GIMMS NDVI 则具有较长的时间序列，能够更好地支持长期趋势分析[8]。石淞等[9]基于 MODIS NDVI 数据，王亭月[10]进一步利用 MODIS NDVI 数据计算了植被覆盖度，均得到黑龙江省植被状况整体较好。张佳琦等[11]使用 MODIS NDVI 与同期降水、平均气温数据在三江平原流域计算了植被覆盖度的变化趋势，得出 NDVI 与降水的相关性最高。宋硕等[12]基于 MOD16 产品，结合气温、降水和归一化植被指数数据，得到与气温和降水相比，NDVI 是驱动银川市 2000—2020 年蒸散量上升的主要因素。张峰源等[13]利用 SPOT vegetation NDVI 数据、植被类型分布数据及气温与降水资料，分析得到东北森林生长季 NDVI 在 2000—2019 年呈上升趋势，但白天和夜间不对称升温导致的差异性响应使该区域植被未来面临退化风险。

现有兴凯湖流域的研究多来源于黑龙江省整体植被变化监测，对兴凯湖流域的针对性分析较为缺乏。且现有研究在探讨植被变化驱动机制时，多未综合自然因素与人类活动的交互影响，缺乏多尺度驱动机制的系统解析。本文基于 2000—2023 年的 MODIS 遥感数据、土壤数据、气象数据及地形数据，采用趋势分析、时序分析与地理探测器等多种方法，多维度揭示兴凯湖流域植被时空演变特征及驱动机制。通过 NDVI 评估植被的稳定性与变化趋势；借助地理探测器和偏相关分析量化自然与人为因子的贡献，明确降水、土壤类型及人类活动对植被变化的独立与交互影响，为跨境生态区的差异化管理和生态修复提供科学依据。

1 研究区概况与研究数据

1.1 研究区概况

兴凯湖流域（43°49′ ~ 45°55′ N，129°51′ ~ 133°30′ E）位于中国东北地区，地处中俄边境，总面积约为 22 265 km^2。兴凯湖是中国东北地区最大的淡水湖，也是亚洲重要的湿地生态系统之一[14]。流域地形地貌复杂，西部以山地和丘陵为主，平均海拔 200 ~ 500 m；东部为广阔的平原和湿地，海拔多在 50 m 以下。兴凯湖流域地处温带季风气候区，四季分明，降水充沛。流域内植被类型多样，包括森林、草地、湿地等，生态系统丰富且脆弱[15]。作为中俄跨

境生态区的重要组成部分，兴凯湖流域在生物多样性保护、水资源管理和区域生态安全方面具有重要地位，长期以来备受关注[16]。

1.2　数据来源

1.2.1　遥感数据

在 google earth engine（GEE）云平台获取 Terra/MODIS 月度（16 d 合成）NDVI 数据，并进行预处理，空间分辨率 1 km，时间跨度 2000—2023 年。为准确表征年度植被生长峰值，选取北半球夏季植被最茂盛的 6—9 月作为研究时段，采用最大值合成法（maximum value composition，MVC）对月度数据进行整合，生成植被旺盛期 NDVI 数据集，有效消除云层、气溶胶等干扰因素的影响，确保植被生长状况评估的科学性和可靠性。

1.2.2　影响因素

基于地理探测器模型，选取 2 个气象因子、3 个土壤因子和 3 个地形因子，分析其对植被时空分布特征的影响（表 1）。为确保空间尺度一致性，所有辅助数据（原始分辨率均高于 1 km）在 ArcGIS 或 GEE 平台中重采样至 1 km。分类数据（土壤类型）采用最邻近法，连续数据（高程、坡度、坡向）采用双线性插值法。

气象资料源自国家地球系统科学数据中心（https://www.geodata.cn/main/）[17]，包括逐月降水与气温数据，分辨率为 1 km。该数据基于英国国家大气科学中心发布的全球 0.5°气候数据和 WorldClim 高分辨率气候数据，通过 Delta 空间降尺度方案生成，降水和气温的精度分别为 0.1 mm 和 0.1 ℃。

土壤因子数据包含土壤类型和土壤湿度，土壤类型数据来自资源环境科学与数据中心（https://www.resdc.cn/），空间分辨率为 30 m，时间为 2015 年。兴凯湖流域常见的土壤类型有暗棕壤、沼泽土和草甸土等。土壤湿度数据来自国家青藏高原科学数据中心（https://data.tpdc.ac.cn/home）[18]，数据集以中国气象局提供的 1 648 个站点 10 层土壤湿度为基准，使用 ERA5_Land 气象强迫数据、叶面积指数（leaf area index，LAI）、土地覆盖类型、高程（digital elevation model，DEM）和土壤特性作为协变量，通过机器学习生成，单位为 0.001 m^3/m^3。

地形因子数据来源于美国国家航空航天局（National Aeronautics and Space Administration，NASA）、国防部国家测绘局（National Imagery and Mapping Agency，NIMA）等机构联合发布的 SRTM30 m 数据集，本文提取了研究区的高程、坡度与坡向数据。

2　研究方法

2.1　趋势分析

2.1.1　Theil-Sen 斜率估计

Theil-Sen 斜率估计[19−20]可以有效处理少量离群值和缺失值。本研究采用 Theil-Sen 中位数斜率计算 NDVI 时序趋势。该方法通过计算时间序列中所有可能点对的斜率中位数，建立具有统计稳健性的趋势表征体系。斜率大于 0，表示植被覆盖度呈现上升趋势，若小于 0，则表示植被覆盖度呈现下降趋势。

2.1.2　Mann-Kendall 检验

结合 Mann-Kendall（MK）非参数检验[21−22]评估趋势显著性。该检验无需数据分布假设，通过构造秩序列检测时序单调趋势，在 $\alpha = 0.05$ 水平下判定显著性。

2.2　空间驱动力分析

2.2.1　偏相关分析

采用像元尺度偏相关分析剔除变量间共线性干扰，定量评估 NDVI 与气候因子的独立关联。通过 Spearman 秩相关系数[23−26]衡量单调关系，通过显著性检验（$p < 0.05$）判定相关关系的可靠性。

2.2.2　残差趋势分析

本研究通过构建残差序列的趋势分析框架，量化植被动态中未被气候因子解释的变化成分。首先

表 1　主要数据参数及来源

Tab. 1　Main data parameters and their sources

数据类型	参数	时间分辨率	空间分辨率	数据来源
植被指数	MODIS-NDVI	月	1 km × 1 km	https://code.earthengine.google.com/
气象因子	气温	月	1 km × 1 km	https://www.geodata.cn/main/
	降水	月	1 km × 1 km	https://www.geodata.cn/main/
土壤因子	土壤类型		30 m × 30 m	https://www.resdc.cn
	土壤湿度	d	1 km × 1 km	https://data.tpdc.ac.cn/home
地形因子	高程		30 m × 30 m	https://www.nasa.gov/
	坡度		30 m × 30 m	https://www.nasa.gov/
	坡向		30 m × 30 m	https://www.nasa.gov/

从 NDVI 观测值中剔除气温、降水和土壤湿度影响的线性成分，生成标准化残差序列；随后基于中位数斜率估计残差变化的长期趋势，并通过 Mann-Kendall 检验趋势的统计显著性。这种双重稳健的统计策略，既保证了趋势估计的可靠性，又为识别人类活动等非气候驱动因素提供了量化依据[27−29]。

$$\mathrm{NDVI}_t = \beta_0 + \beta_1 T_t + \beta_2 P_t + \beta_3 S_t + \epsilon_t \quad (1)$$

式中：T_t、P_t、S_t 分别为气温、降水、土壤湿度观测值；β_0 为截距项，β_1、β_2、β_3 为回归系数；ϵ_t 为残差项，代表未被气候因子解释的 NDVI 变化；t 为时间序列索引，代表特定年份。

2.2.3 地理空间探测器

采用地理探测器[30−32]量化因子解释力。通过 q 值定量评估因子对目标变量的解释力。

$$q = 1 - \frac{\sum_{h=1}^{L} N_h \sigma_h^2}{N\sigma^2} \quad (2)$$

式中：$q \in [0,1]$，值越大表明因素对目标变量的解释力越强；L 为区域分类数量；N_h 为第 h 个区域的样本数量；σ_h^2 表示第 h 个区域目标变量的方差；N 为研究区的总样本数量；σ^2 为研究区域内目标变量的总体方差。

3 结果与讨论

3.1 2000—2023 年植被 NDVI 时空变化

兴凯湖流域 NDVI 的年际波动性呈现出与人类活动强度密切相关的空间格局（图 1）。西南老爷岭等区域 NDVI 年际波动较低，这主要得益于该区域森林生态系统稳定，人为干扰较少，自然植被得以较好保存。相反，在虎林市、鸡西市、密山市等城市化进程较快的区域，NDVI 值年际变化较高，呈现显著的空间异质性。然而，长期（2000—2023 年）时序分析表明，兴凯湖流域植被整体仍呈稳步上升趋势（图 1）。

图 2 采用 Theil-Sen 斜率估计和 Mann-Kendall 检验对 2000—2023 年 NDVI 最大值序列进行逐像元分析。参考贺振等[33]分类标准，将植被变化趋势划分为 5 个等级（表 2）。结果显示：呈下降趋势的区域占总面积的 4.8%，其中快速下降（1.1%）和缓步下降（3.7%）区域主要集中分布于虎林市、鸡西市、密山市等城市化区域，这些区域的人类活动强度显著高于周边地区。植被覆盖保持稳定的区域占比 32.3%，而呈现改善趋势的区域占比高达 62.9%（缓步升高 62.6%、快速升高 0.3%）。改善区域呈现明显的聚集性，形成了以老爷岭等山地生态系统为核心的高值斑块，这与该地区良好的自然植被本底高度吻合。

2000—2023 年间，研究区 NDVI 呈现由西南向东北逐渐递增的空间格局。流域 NDVI 年最大值平均以 0.001 的速率显著上升，植被变化以改善为主导，改善区域面积占比（62.9%）远高于退化区域（4.8%）。该结果与张乐[34]与王亭月[10]基于 MODIS 数据的黑龙江省 NDVI 研究结论一致，即大部分地

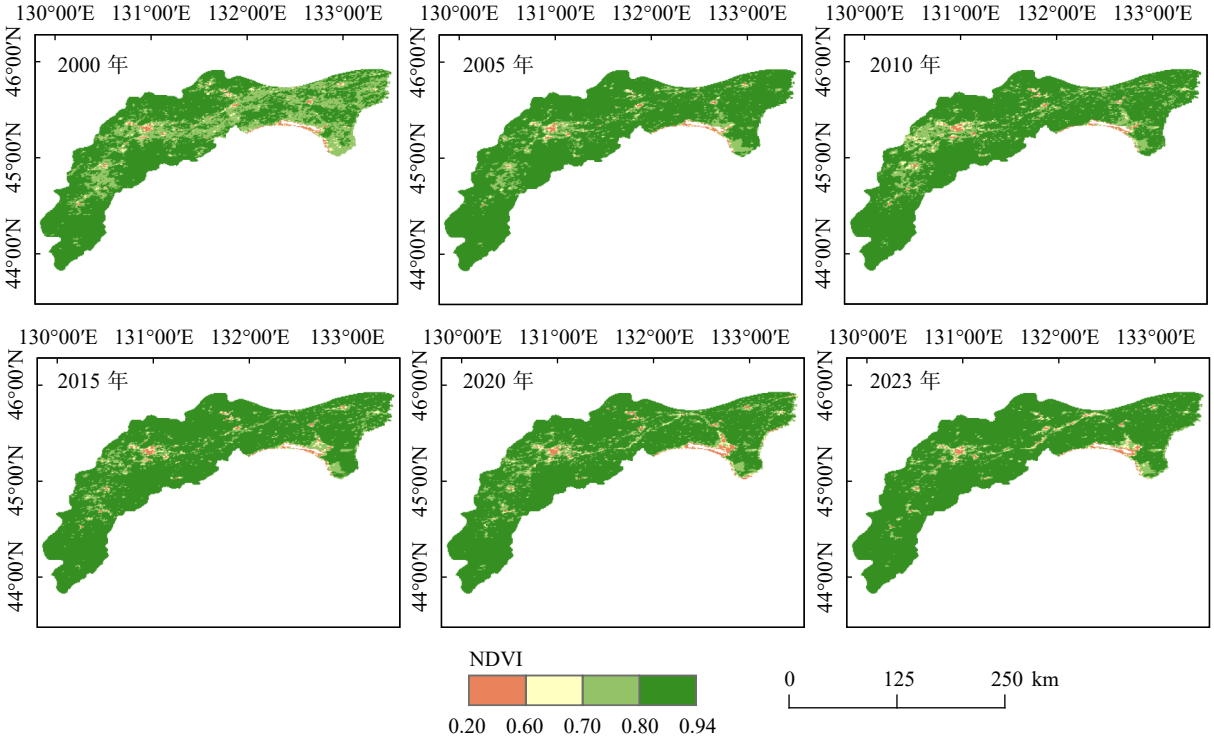


图 1 兴凯湖流域 2000—2023 年 NDVI 年最大值时空分布

Fig. 1 Spatiotemporal distribution of the annual maximum NDVI in the Xingkai Lake Basin from 2000 to 2023

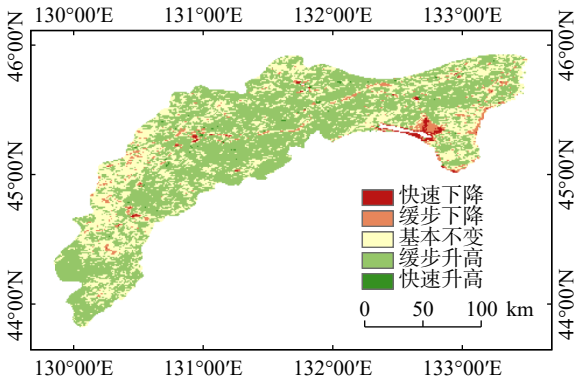


图 2　兴凯湖流域 2000—2023 年 NDVI 年最大值变化趋势空间分布

Fig. 2　Spatial distribution of the variation trend of annual maximum NDVI in the Xingkai Lake Basin from 2000 to 2023

表 2　NDVI 年最大值变化速率等级划分

Tab. 2　Classification of changing rates of yearly maximum NDVI

NDVI年变化速率	变化趋势	面积/km²	占比/%
≤ −0.005	快速下降	245	1.1
(−0.005, −0.001]	缓步下降	824	3.7
(−0.001, 0.001]	基本不变	7 096	32.3
(0.001, 0.005]	缓步升高	13 945	62.6
＞0.005	快速升高	61	0.3

区植被稳定或改善，仅少数区域退化。

3.2　影响因素分析

3.2.1　土壤与地形因子对植被动态的影响

3.2.1.1　土壤类型与地形因子

土壤类型对兴凯湖流域植被 NDVI 空间分异的解释力最强（q = 0.223，p < 0.001），高程次之（q = 0.102，p < 0.001），坡向（q = 0.064，p < 0.05）与坡度（q = 0.012，p < 0.05）影响较弱（图 3）。该结论与 Yuan 等[35]和 Huo 等[36]在相近区域的地理探测器研究结果一致，即土壤类型与地形因子是植被格局的关键驱动因素。

交互作用检测表明（图 3），土壤类型与地形因子的协同作用对 NDVI 空间分布具有显著增强效应，且土壤类型在交互作用中起主导作用。其中，高程与坡度的交互作用解释力最强（q = 0.409，p < 0.01），远高于二者独立解释力。高程与坡度交互作用解释力（q = 0.155，p < 0.05）略高于二者独立解释力，而高程与坡向交互作用解释力（q = 0.115，p < 0.05）则与单因子作用相近。

基于 2000—2023 年 NDVI 均值与土壤类型的叠加分析（表 3），5 类土壤的植被覆盖度排序为暗棕壤（37.48%）＞草甸土（26.47%）＞白浆土（20.50%）＞沼泽土（11.17%）＞水稻土（3.26%）。暗棕壤 NDVI 均值最高，表明其土壤理化性质对植被生长具有显著促进作用。

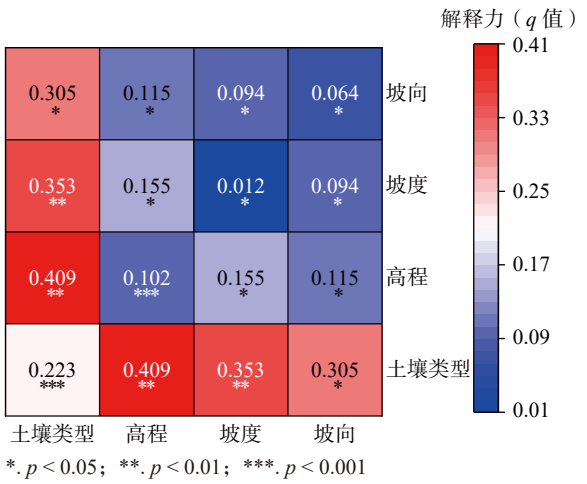


图 3　土壤类型与地形因子及其交互作用对 NDVI 的解释力

Fig. 3　The explanatory of soil types and topographic factors and their interactions on NDVI

表 3　各类土壤类型的平均 NDVI

Tab. 3　Mean NDVI values of various soil types

土壤类型	平均NDVI	面积占比/%
暗棕壤	0.86	37.48
白浆土	0.84	20.50
草甸土	0.83	26.47
沼泽土	0.82	11.17
水稻土	0.80	3.26

3.2.1.2　土壤湿度

2000—2023 年研究区土壤湿度平均值为 0.31 m^3/m^3，空间分布呈“南北高、中部低”格局，西南与东北部地区（约 0.36 m^3/m^3）显著高于中部地区（约 0.27 m^3/m^3），但时间序列上整体变化趋势不显著（p > 0.05）。控制降水和气温的影响后，NDVI 与土壤湿度的平均偏相关系数为−0.01，仅 5.25% 的流域面积通过显著性检验。其中，东北部的城区附近集中表现为显著负相关，而西南部则以正相关为主。偏相关系数大于 0.2 的区域占研究区总面积的 19.92%，主要分布在西南部（图 4）。上述结果表明，排除气象因子干扰后，土壤湿度与 NDVI 整体相关性不显著，且对 NDVI 的影响呈强烈地形依赖性。该结论与张强等[37]关于东北区域 NDVI 对土壤湿度敏感性较低的判断一致。但本研究进一步揭示，西南山地局部可能存在水分限制性响应。这表明土壤湿度的影响具有明显的空间异质性，可能受局部植被类型及地下水位影响。

3.2.2　气候变化对植被动态的影响

基于 2000—2023 年 6—9 月平均气温与降水数

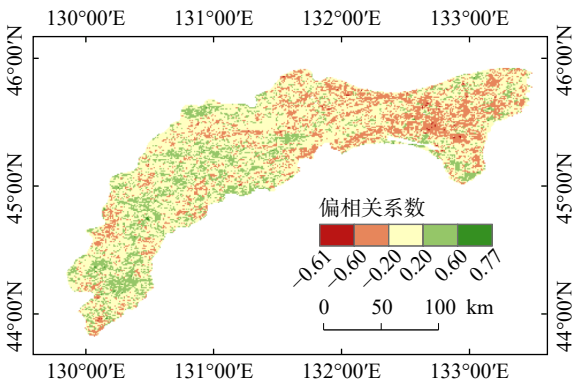
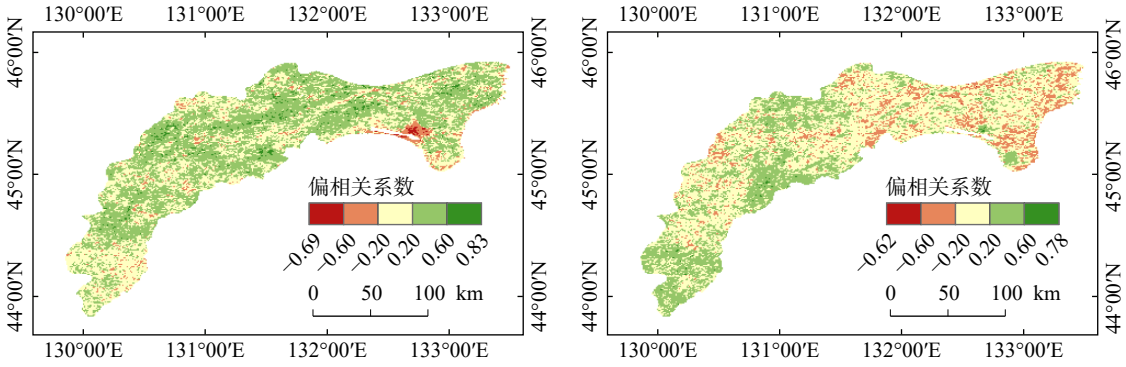


图 4 2000—2023 年兴凯湖流域 NDVI 与土壤湿度偏相关系数

Fig. 4 Partial correlation coefficients between the NDVI and soil moisture in the Xingkai Lake Basin from 2000 to 2023

据，NDVI 与气候因子的空间关联特征如图 5 所示。降水呈西南（124.85 mm）向东北（94.15 mm）递减格局，平均降水量为 102.78 mm。而气温呈反向梯度，东北气温（19.9 ℃）显著高于西南（15.4 ℃），平均温度 18.68 ℃。逐像元偏相关分析表明，NDVI 与降水的平均偏相关系数（0.21）显著高于气温（0.08），且降水显著相关区（$p < 0.05$）占研究区的 19%，表明其为植被动态的主导气候因子。空间分异上，NDVI 与降水高敏感区（> 0.2）占研究区的 55.19%，集中于老爷岭山地；NDVI 与气温显著相关区仅占 7.5%，其高敏感区（> 0.2）占研究区的 31.60%。总体而言，降水对植被的正向调控范围广且显著性高，而气温影响有限，可能归因于地形驱动局地水热再分配。该结论与石淞等[9]、张佳琦等[11]在黑龙江省及三江平原的类似研究一致，均证实降水是区域 NDVI 变化的首要驱动因子。但本研究进一步揭示，老爷岭山区和平原区对降水响应的空间分异，可能反映了地形对降水有效的调节作用。



a NDVI 与降水偏相关系数　　b NDVI 与气温偏相关系数

图 5 2000—2023 年兴凯湖流域 NDVI 与降水、气温偏相关系数

Fig. 5 Partial correlation coefficients between the NDVI, precipitation and temperature in the Xingkai Lake Basin from 2000 to 2023

3.2.3 人类活动对于植被时空演化的影响

采用残差趋势分析人类活动对兴凯湖流域 NDVI 变化的独立影响。将人类活动影响下 2000—2023 年 NDVI 残差变化趋势划分为 5 类（图 6）：快速降低（≤−0.005）、缓步降低（−0.005，−0.001]、基本稳定（−0.001，0.001]、缓步增长（0.001，0.005] 和快速增长（> 0.005）。结果显示，缓步增长区域占 36.40%，快速增长区域占 0.04%，主要集中在西南部，反映出适度人类活动可能提高植被覆盖度；基本稳定区占 59.32%，分布于流域中部自然植被区，表明这些区域受人类干扰相对较小；缓步降低区占 3.74%，快速降低区占 0.50%，其空间分布与人类活动密集区高度吻合，主要集中于鸡西、密山、虎林等城市建成区，印证了高强度人类活动的抑制效应。

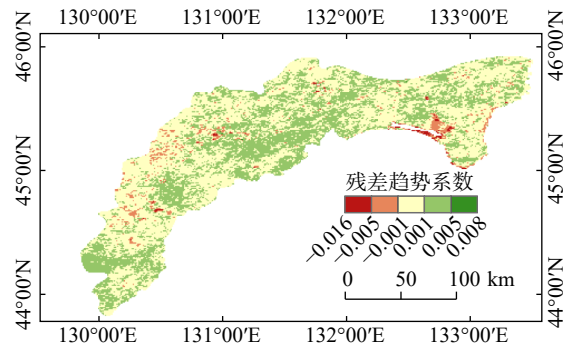
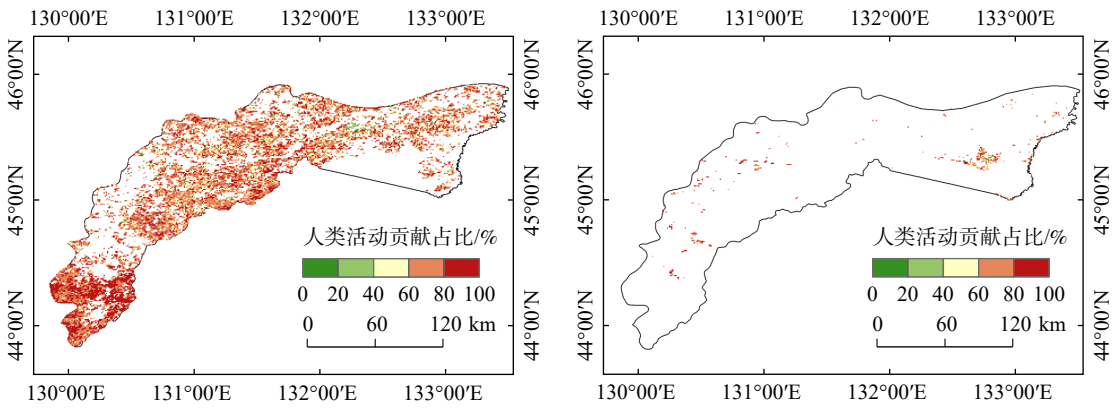


图 6 2000—2023 年兴凯湖流域人类活动对 NDVI 影响的空间分布

Fig. 6 Spatial distribution of the impacts of human activities on NDVI in the Xingkai Lake Basin from 2000 to 2023

基于残差趋势分析区分气候因子与人类活动对植被变化的相对贡献。该方法首先通过多元回归拟合气候因子对植被的影响，以残差序列的趋势表征人类活动净效应；随后提取通过显著性检验（$p < 0.05$）的像元用于制图。图 7 中像元值表示该像元植被变化归因于人类活动贡献的百分比，值越接近 100%，表示人类活动的主导作用越强；值越接近于 0，表示气候因子的主导作用越强。图 7 显示，在研究期间，兴凯湖流域约 62.9% 的区域发生了显著植被改善，其中约 96.75% 的改善面积主要由人类活动



a 促进作用　　b 抑制作用

图 7　基于残差趋势分析的植被变化驱动因素空间分布

Fig. 7　Spatial distribution of drivers for vegetation change based on residual trend analysis

(如生态恢复工程)所驱动。同时，约 1.85% 的区域出现显著植被退化，其中 95.91% 的退化面积由人类活动(如城市化扩张)导致。上述结果凸显了人类活动在区域生态环境演变中兼具建设性与破坏性的双重作用。结果与赵维清等[38]研究得到的城市化区域人类活动抑制 NDVI，林地区域人类活动促进 NDVI 结论一致，揭示了地形与土地利用类型对人类活动效应的调控作用。

4　结　　论

本研究基于 2000—2023 年多源遥感数据揭示了兴凯湖流域植被覆盖时空演变特征及驱动机制。

(1)植被动态趋势。NDVI 呈西南向东北递减格局，老爷岭等西南部山地植被覆盖显著高于东北部平原。2000—2023 年生长季 NDVI 以每年 0.001 速率显著上升($p < 0.05$)，改善区占 62.9%，退化区仅占 4.8%，表明流域植被状况总体呈增加趋势。

(2)驱动因子贡献。在显著变化区中，人类活动对植被改善的贡献率达 96.75%，对退化的贡献率为 95.91%。残差分析表明，生态工程在西南部山地促进植被恢复，而城市化在东北部平原导致局部退化，凸显人类活动的双重效应。降水是植被年际波动的关键气候因子(偏相关系数 0.21)，但其直接贡献受地形再分配过程调控，在改善区中气候因素贡献率不足 5%。

(3)地理探测器分析表明，土壤类型与地形因子是影响兴凯湖流域 NDVI 空间分布的主要因素，土壤类型与高程的交互作用可解释 41% 的空间变异。

综上，兴凯湖流域植被变化由人类活动主导，但其效应方向取决于土地利用方式。未来管理应优化土地利用格局，强化山地生态保育与平原区可持续城市化管控。

参　考　文　献

[1] 刘武江, 张川, 杨松, 等. 基于“三生空间”的生态隔离带研究进展 [J]. 江苏农业科学, 2020, 48(14): 25−32.
Liu W J, Zhang C, Yang S, et al. Research progress of ecological isolation zone based on “ production-life-ecology space” [J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2020, 48(14): 25−32.

[2] Hao F, Zhang X, Ouyang W, et al. Vegetation NDVI linked to temperature and precipitation in the upper catchments of Yellow River[J]. Environmental Modeling & Assessment, 2012, 17(4): 389−398.

[3] 吕立刚, 逯玲君, 龙花楼, 等. 耕地利用绿色转型的内涵、进展与展望 [J]. 农业工程学报, 2025, 41(15): 1−12.
Lü L G, Lu L J, Long H L, et al. Conceptual connotation, research progress and prospect of green transition of farmland use[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2025, 41(15): 1−12.

[4] Xu Y, Yang J, Chen Y. NDVI-based vegetation responses to climate change in an arid area of China[J]. Theoretical and Applied Climatology, 2016, 126(1): 213−222.

[5] Li S, Yang S, Liu X, et al. NDVI-based analysis on the influence of climate change and human activities on vegetation restoration in the Shaanxi-Gansu-Ningxia Region, Central China[J]. Remote Sensing, 2015, 7(9): 11163−11182.

[6] Tarnavsky E, Garrigues S, Brown M E. Multiscale geostatistical analysis of AVHRR, SPOT-VGT, and MODIS global NDVI products[J]. Remote Sensing of Environment, 2008, 112(2): 535−549.

[7] Fensholt R, Proud S R. Evaluation of earth observation based global long term vegetation trends: comparing GIMMS and MODIS global NDVI time series[J]. Remote Sensing of Environment, 2012, 119: 131−147.

[8] Bai Y, Yang Y, Jiang H. Intercomparison of avhrr GIMMS3g, Terra MODIS, and SPOT-VGT NDVI products over the Mongolian Plateau[J]. Remote Sensing, 2019, 11(17): 2030.

[9] 石淞, 李文, 林晓鹏, 等. 黑龙江省植被 NDVI 时空变化及影响因素 [J]. 水土保持研究, 2023, 30(5): 294−305.

Shi S, Li W, Lin X P, et al. Spatiotemporal variations of vegetation NDVI and influencing factors in Heilongjiang Province[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2023, 30(5): 294−305.

[10] 王亭月. 2012—2018 年黑龙江省植被覆盖度动态变化分析 [J]. 国土与自然资源研究, 2020(4): 16−21.
Wang T Y. Dynamic analysis of vegetation coverage from 2012 to 2018 in Heilongjiang Province[J]. Territory & Natural Resources Study, 2020(4): 16−21.

[11] 张佳琦, 张勃, 马彬, 等. 三江平原 NDVI 时空变化及其对气候变化的响应 [J]. 中国沙漠, 2019, 39(3): 206−213.
Zhang J Q, Zhang B, Ma B, et al. Spatial-temporal variation of NDVI in Sanjiang Plain and its response to climate change[J]. Journal of Desert Research, 2019, 39(3): 206−213.

[12] 宋硕, 赵婉凝, 李少然, 等. 基于 MOD16 的银川地表蒸散量时空特征及影响因素分析 [J]. 北京林业大学学报, 2024, 46(7): 18−26.
Song S, Zhao W N, Li S R, et al. Spatio-temporal characteristics and influencing factors of evapotranspiration in Yinchuan City of northwestern China based on MOD16 [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2024, 46(7): 18−26.

[13] 张峰源, 苏远航, 刘滨辉. 东北森林生长季 NDVI 对昼夜不对称增温及降水变化的响应特征 [J]. 北京林业大学学报, 2023, 45(2): 34−48.
Zhang F Y, Su Y H, Liu B H. Response characteristics of NDVI to asymmetric diurnal temperature increase and precipitation changes during the forest growing season in Northeast China [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2023, 45(2): 34−48.

[14] 徐新良, 庄大方, 张树文. 基于 3S 技术的土地利用/土地覆盖变化野外采样框架设计:以东北地区黑龙江省为例 [J]. 遥感技术与应用, 2002, 17(3): 135−139.
Xu X L, Zhuang D F, Zhang S W. Field sampling design for land-use and land-cover changes based on3S technology: taking Heilongjiang Province as an example [J]. Remote Sensing Technology and Application, 2002, 17(3): 135−139.

[15] 刘芳芳, 于洪贤. 兴凯湖自然保护区生态质量模糊综合评价 [J]. 野生动物, 2009, 30(3): 152−155,160.
Liu F F, Yu H X. Fuzzy comprehensive evaluation on ecological quality of Xingkai Lake Nature Reserve[J]. Chinese Journal of Wildlife, 2009, 30(3): 152−155,160.

[16] 郜玉青, 曹永强, 么嘉棋, 等. 基于卫星遥感的兴凯湖水资源特征变化研究 [J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2024, 22(4): 397−410.
Gao Y Q, Cao Y Q, Yao J Q, et al. Study on the change of water resources characteristics of Xingkai Lake based on satellite remote sensing[J]. Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2024, 22(4): 397−410.

[17] Peng S, Ding Y, Liu W, et al. 1 km monthly temperature and precipitation dataset for China from 1901 to 2017[J]. Earth System Science Data, 2019, 11(4): 1931−1946.

[18] Li Q, Shi G, Shangguan W, et al. A 1 km daily soil moisture dataset over China using in situ measurement and machine learning[J]. Earth System Science Data, 2022, 14(12): 5267−5286.

[19] Yang Y, Wang S, Bai X, et al. Factors affecting long-term trends in global NDVI[J]. Forests, 2019, 10(5): 372.

[20] Yu H, Bian Z, Mu S, et al. Effects of climate change on land cover change and vegetation dynamics in Xinjiang, China[J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2020, 17(13): 4865.

[21] Neeti N, Eastman J R. A contextual Mann-Kendall approach for the assessment of trend significance in image time series[J]. Transactions in GIS, 2011, 15(5): 599−611.

[22] Liu Z, Wang H, Li N, et al. Spatial and temporal characteristics and driving forces of vegetation changes in the Huaihe River Basin from 2003 to 2018[J]. Sustainability, 2020, 12(6): 2198.

[23] Chu H, Venevsky S, Wu C, et al. NDVI-based vegetation dynamics and its response to climate changes at Amur-Heilongjiang River Basin from 1982 to 2015[J]. Science of The Total Environment, 2019, 650: 2051−2062.

[24] Hou J, Du L, Liu K, et al. Characteristics of vegetation activity and its responses to climate change in desert/grassland biome transition zones in the last 30years based on GIMMS3g[J]. Theoretical and Applied Climatology, 2019, 136(3): 915−928.

[25] Yang R, Li X, Mao D, et al. Examining fractional vegetation cover dynamics in response to climate from 1982 to 2015 in the Amur River Basin for SDG 13[J]. Sustainability, 2020, 12(14): 5866.

[26] He X, Yu Y, Cui Z, et al. Climate change and ecological projects jointly promote vegetation restoration in Three-River Source Region of China[J]. Chinese Geographical Science, 2021, 31: 1108−1122.

[27] Wang J, Xie Y, Wang X, et al. Driving factors of recent vegetation changes in Hexi Region, northwest China based on a new classification framework[J]. Remote Sensing, 2020, 12(11): 1758.

[28] Jiang L, Guli·Jiapaer, Bao A, et al. Vegetation dynamics and responses to climate change and human activities in Central Asia[J]. Science of The Total Environment, 2017, 599: 967−980.

[29] Cai H, Yang X, Xu X. Human-induced grassland degradation/restoration in the central Tibetan Plateau: the effects of ecological protection and restoration projects[J]. Ecological Engineering, 2015, 83: 112−119.

[30] Liu Y, Tian Z, He X, et al. Short-term effects of indoor and outdoor air pollution on the lung cancer morbidity in Henan Province, Central China[J]. Environmental Geochemistry and Health, 2022, 44(8): 2711−2731.

[31] Liu C, Li W, Wang W, et al. Quantitative spatial analysis of

vegetation dynamics and potential driving factors in a typical alpine region on the northeastern Tibetan Plateau using the Google Earth Engine[J]. Catena, 2021, 206: 105500.

[32] Guo Y, Zhang X, Wang Q, et al. Temporal changes in vegetation around a shale gas development area in a subtropical karst region in southwestern China[J]. Science of The Total Environment, 2020, 701: 134769.

[33] 贺振, 贺俊平. 近 32 年黄河流域植被覆盖时空演化遥感监测 [J]. 农业机械学报, 2017, 48(2): 179−185.
He Z, He J P. Remote sensing on spatio-temporal evolution of vegetation cover in the Yellow River Basin during 1982−2013[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(2): 179−185.

[34] 张乐. 黑龙江省多年冻土区 NDVI 时空变化及驱动因素分析 [J]. 科学技术创新, 2021(34): 148−150.
Zhang L Analysis of NDVI spatiotemporal changes and driving factors in permafrost regions of Heilongjiang Province[J]. Scientific and Technological Innovation, 2021(34): 148−150.

[35] Yuan L, Chen X, Wang X, et al. Spatial associations between NDVI and environmental factors in the Heihe River Basin[J]. Journal of Geographical Sciences, 2019, 29(9): 1548−1564.

[36] Huo H, Sun C. Spatiotemporal variation and influencing factors of vegetation dynamics based on geodetector: a case study of the northwestern Yunnan Plateau, China[J]. China Ecological Indicators, 2021, 130: 108005.

[37] 张强, 肖风劲, 牛海山, 等. 我国北方植被指数对土壤湿度的敏感性分析 [J]. 生态学杂志, 2005, 24(7): 715−718.
Zhang Q, Xiao F J, Niu H S, et al. Analysis of vegetation index sensitivity to soil moisture in Northern China[J]. Chinese Journal of Ecology, 2005, 24(7): 715−718.

[38] 赵维清, 李经纬, 褚琳, 等. 近 10 年湖北省植被指数时空变化特征及其驱动力 [J]. 生态学报, 2019, 39(20): 7722−7736.
Zhao W Q, Li J W, Chu L, et al. Analysis of spatial and temporal variations in vegetation index and its driving force in Hubei Province in the last 10 years[J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(20): 7722−7736.

（责任编辑　孟　瑶
责任编委　孟　平）