环境工程技术学报
Journal of Environmental Engineering Technology

2000—2021年抚仙湖流域生态环境质量时空演变及驱动因素

刘石玉 刘红豪 李俊 孙荣卿 张小辉 韩多 张俊洋 周伟东 马小才 李跃军

Study on the spatio-temporal evolution and driving factors of ecological environment quality in the Fuxian Lake basin from 2000 to 2021

LIU Shiyu, LIU Honghao, LI Jun, SUN Rongqing, ZHANG Xiaohui, HAN Duo, ZHANG Junyang, ZHOU Weidong, MA Xiaocai, LI Yuejun

在线阅读 View online: https://www.hjgcjsxb.org.cn/article/doi/10.12153/j.issn.1674-991X.20250410

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

滇中高原湖泊流域生态环境质量时空演变趋势及驱动因素

Spatiotemporal evolution trend and driving factors of eco-environmental quality in lake basins of the central Yunnan Plateau

环境工程技术学报. 2025, 15(3): 860-871. https://doi.org/10.12153/j.issn.1674-991X.20240592

基于退耕还林工程的生态环境质量动态变化研究

Research on the dynamic changes of ecological environment quality based on the project of converting cropland to forest: taking Lanping County in Yunnan Province as an example

环境工程技术学报. 2023, 13(1): 359-367. https://doi.org/10.12153/j.issn.1674-991X.20210726

京津冀地区生态系统服务价值时空变化及驱动因子分析

Spatio-temporal change and driving factor analysis of ecosystem service value in the Beijing-Tianjin-Hebei Region

环境工程技术学报. 2022, 12(4): 1114-1122. https://doi.org/10.12153/j.issn.1674-991X.20210269

2005—2019年辽宁省城镇化与生态环境质量耦合协调时空分异及影响因子研究

Spatial-temporal differentiation and influencing factors of coupling coordination between urbanization and eco-environmental quality in Liaoning Province from 2005 to 2019

环境工程技术学报. 2022, 12(4): 1123-1133. https://doi.org/10.12153/j.issn.1674-991X.20210385

基于参数最优地理探测器的福州市生境质量时空格局与驱动力分析

Analysis of spatiotemporal heterogeneity of habitat quality and their driving factors based on optimal parameters-based geographic detector for Fuzhou City, China

环境工程技术学报. 2023, 13(5): 1921-1930. https://doi.org/10.12153/j.issn.1674-991X.20230083

低山丘陵县域生态系统服务价值的时空分异及影响因素分析

Spatial and temporal variation and impact factors analysis of ecosystem service value in low-mountain counties: taking Dexing City in Jiangxi Province as an example

环境工程技术学报. 2023, 13(2): 704-714. https://doi.org/10.12153/j.issn.1674-991X.20220247

关注微信公众号，获得更多资讯信息

刘石玉, 刘红豪, 李俊, 等.2000—2021 年抚仙湖流域生态环境质量时空演变及驱动因素 [J].环境工程技术学报, 2026, 16(1): 100-112.
LIU S Y,LIU H H,LI J,et al.Study on the spatio-temporal evolution and driving factors of ecological environment quality in the Fuxian Lake basin from 2000 to 2021[J].Journal of Environmental Engineering Technology, 2026, 16(1): 100-112.

2000—2021 年抚仙湖流域生态环境质量时空演变及驱动因素

刘石玉[1,2], 刘红豪[1,2*], 李俊[1,2], 孙荣卿[1,2], 张小辉[1,2], 韩多[1,2], 张俊洋[1,2], 周伟东[1,2], 马小才[1,2], 李跃军[1,2]
1.中国地质调查局昆明自然资源综合调查中心
2.金沙江高山峡谷区水土资源演化与固碳增汇效应云南省野外科学观测研究站

摘要 为定量揭示典型高原深水型湖泊生态环境质量的时空演变规律及驱动机制, 以云南省抚仙湖流域为例, 基于 2000—2021 年 Landsat 系列遥感数据, 构建遥感生态指数(RSEI), 结合地理探测器进行建模分析, 结果显示: RSEI 模型在抚仙湖流域具有较高的适用性, 第一主成分(PC1)贡献率稳定高于 65%, 各指标载荷方向符合生态学理论(绿度、湿度为正相关, 干度、热度为负相关)。流域生态环境质量呈现退化—改善—稳定的三阶段演变规律, 2000—2006 年显著退化(RSEI 均值下降), 2006—2015 年逐步改善(显著变好区域占比提升至 5.5%), 2015 年后进入稳定期(无明显变化区域占比达 32.6%); 空间上表现为以湖体为核心的梯度分布格局, Moran's *I* 指数(0.25~0.33)显示生态质量具有弱空间正相关性, 且 2015 年后高等级生态区(RSEI>0.6)面积显著扩大; 驱动分析表明, 年均降水量(影响因子 q=0.418)和叶面积指数(q=0.411)是主导因子, 其交互作用(年均降水量∩叶面积指数, q=0.701)对生态质量的空间分异影响最强, 而人类活动(如夜间灯光指数)的贡献逐年增强。研究验证了 RSEI 模型在深水型湖泊流域的适用性, 揭示了多因子协同驱动下生态环境质量的时空异质性。

关键词 抚仙湖流域; 遥感生态指数(RSEI); 地理探测器; 生态环境质量; 驱动机制
中图分类号: X87 **文章编号:** 1674-991X(2026)01-0100-13 **doi:** 10.12153/j.issn.1674-991X.20250410

Study on the spatio-temporal evolution and driving factors of ecological environment quality in the Fuxian Lake basin from 2000 to 2021

LIU Shiyu[1,2], LIU Honghao[1,2*], LI Jun[1,2], SUN Rongqing[1,2], ZHANG Xiaohui[1,2], HAN Duo[1,2], ZHANG Junyang[1,2], ZHOU Weidong[1,2], MA Xiaocai[1,2], LI Yuejun[1,2]
1.Kunming Comprehensive Natural Resources Investigation Center, China Geological Survey
2.Yunnan Provincal Field Scientific Observatory for Evolution of Soil and Water Resources and Carbon Sequestration Effect in the High Mountain-Canyon Area of Jinsha River

Abstract Using the Fuxian Lake basin in Yunnan Province as a case study, this study quantitatively revealed the spatiotemporal evolution patterns and driving mechanisms of ecological environment quality in typical highland deep-water lakes. Based on Landsat series remote sensing data from 2000 to 2021, we constructed a Remote Sensing Ecological Index (RSEI) and conducted modelling analysis using Geodetector. Results indicated that the RSEI model demonstrated high applicability within the Fuxian Lake basin, with the first principal component (PC1) consistently contributing over 65% of variance. The loadings of all indicators aligned with ecological theory (greenness and wetness are positively correlated; aridity and thermal intensity are negatively correlated). The basin's ecological environment quality exhibited a three-stage evolution pattern of "degradation-improvement-stabilisation": significant degradation occurred between 2000 and 2006 (declining RSEI mean), gradual improvement followed from 2006 to 2015 (the proportion of significantly improved areas rising to 5.5%), and a stabilisation phase commenced post-2015 (with areas showing no significant change accounting for 32.6%). Spatially, a gradient distribution pattern centred on the lake body was observed. Moran's *I* index (0.25-0.33) indicated a weak positive

收稿日期: 2025-07-30
基金项目: 中国地质调查局项目(DD20230512, DD20251299)
作者简介: 刘石玉(1998—), 女, 助理工程师, 主要从事湖泊调查研究, 2908794663@qq.com
* **通信作者:** 刘红豪(1989—), 男, 工程师, 长期从事水文地质、环境地质调查研究, liuhonghao@mail.cgs.gov.cn

spatial correlation in ecological quality, with areas of high ecological quality (RSEI > 0.6) significantly expanding after 2015. Driving factor analysis indicated that annual precipitation (impact factor q=0.418) and leaf area index (q=0.411) were dominant factors, with their interaction (annual precipitation ∩ leaf area index, q=0.701) exerting the strongest influence on spatial differentiation of ecological quality. Contributions from human activities (e.g., night-time light index) had progressively increased annually. This study validates the applicability of the RSEI model in deep-water lake basins and reveals the spatiotemporal heterogeneity of ecological environment quality driven by multiple synergistic factors.

Key words　Fuxian Lake basin; remote sensing ecological index (RSEI); geodetector; ecological environment quality; driving mechanisms

高原深水型湖泊因兼具水资源储备、气候调节及生物多样性维持等多重生态功能，成为生态环境研究的重要对象[1]。当前国际学界对高原深水型湖泊的研究，多集中于气候变化下的水位波动、水质演化及生态系统响应等方面[2]，如 Aguilar-Lome 等[3] 通过遥感数据监测的的喀喀湖近 20 年湖面水温，揭示了水温变化规律及其与气候变化的关联；孙亚勇等[4] 综合运用多源卫星遥感数据，系统监测了湖北省典型湖泊的水域面积时空变化，揭示了气象干旱与人类活动对湖泊水域面积萎缩的影响机制；Zhang 等[5] 通过多指标古湖沼学记录与生态系统模型，揭示了人类世时期气候变暖与大气营养沉降对青藏高原东南部高山湖泊生态系统的协同胁迫效应。但针对高原深水型湖泊流域尺度生态环境质量的时空动态评估，尤其是结合多源遥感数据开展长期、连续的监测研究仍较为有限，且对自然与人类活动多因子交互驱动机制的量化分析存在明显短板[6]。

抚仙湖作为我国最大的深水型淡水湖泊和珠江源头重要组成部分，其生态安全对珠江流域水资源供给与区域生态稳定具有不可替代的战略意义。近年来，学者围绕抚仙湖开展了一系列研究，涵盖水质污染溯源、湖滨带生态修复及流域土地利用变化对湖泊生态的影响等领域，如蒋尖尖等[7] 通过实地采样分析，指出农业面源污染是抚仙湖总氮超标主要来源；李思楠等[8] 基于 GIS 技术探讨了流域城镇化进程与流域土地利用时空变化特征。然而，现有研究多聚焦单一环境要素或短期时间尺度，缺乏对抚仙湖流域整体生态环境质量近 20 年演变特征的系统评估，且未能充分整合遥感技术优势，实现生态环境质量的空间可视化表达与驱动机制的深度解析，难以满足当前流域生态精准保护与管理的需求[9]。

在生态环境质量评价方法体系中，不同方法因原理与适用场景差异，存在各自局限性：人工神经网络虽能建立非线性关系，但空间表达受限[10]；生态足迹法关注资源利用但忽略区域差异[11]；综合指数法全面但权重确定主观[12]。相比之下，徐涵秋等[13] 提出的遥感生态指数（RSEI），通过耦合绿度（NDVI）、湿度（WET）、干度（NDBSI）和热度（LST）四大关键指标，构建了无需人工赋权的客观评价模型，既克服了传统方法主观性强的缺陷，又能基于遥感影像的空间连续性，精准呈现生态环境质量的空间分布与梯度差异。其核心优势在于：一是指标选取的科学性，绿度指标直接反映植被覆盖度与生态系统生产力，湿度指标表征区域水分条件（如湖泊、湿地及土壤湿度），干度指标关联裸地、建筑用地等人类活动干扰区域，热度指标则响应区域热环境变化，四大指标共同构成了高原湖泊流域生态系统“植被—水分—干扰—热环境”的完整评价体系，与高原深水型湖泊流域生态系统结构特征高度契合[9]；二是空间表征的适用性，RSEI 基于 Landsat 等中分辨率遥感数据构建，空间分辨率达 30 m，既能捕捉流域内湖泊、林地、农田等不同景观类型的生态差异，又能实现长时间序列的动态对比，这一特点恰好满足抚仙湖流域长期生态监测的需求；三是方法推广的可行性，RSEI 所需数据（Landsat 系列影像）可通过公共平台免费获取，且计算流程标准化，在青藏高原纳木错、云贵高原洱海等类似高原湖泊流域的应用中，已证实其能有效识别生态环境质量的时空变化规律[14]，为该方法在抚仙湖流域的应用及向其他高原深水型湖泊流域的推广提供了实践依据。

本研究基于 2000—2021 年 Landsat 系列数据，采用改进的 RSEI 模型评估抚仙湖流域生态环境质量时空演变特征，通过主成分分析和 Pearson 相关性检验验证模型适用性，结合地理探测器量化年均降水量、叶面积指数等自然社会因子的驱动效应，研究生态环境质量阶段性演变规律，解析空间异质性特征及其形成机制，阐明多因子交互作用对生态环境质量的影响，以期为抚仙湖流域生态环境保护提供参考。

1　研究区与研究方法

1.1　研究区概况

抚仙湖位于云南省玉溪市澄江市、江川区和华宁县境内，地处云贵高原东缘，是中国最大的深水型淡水湖泊，也是珠江源头南盘江流域的重要组成部分。抚仙湖流域面积约 674.69 km^2，湖面海拔 1 722.5 m，平均水深 89.6 m，最大水深达 155 m，蓄水量约 206.2 亿 m^3，占全国淡水湖泊蓄水总量的 9.16%。流域地势呈现西北高、东南低的特点，周边以山地和丘陵为主，土壤类型以红壤和黄壤为主，植被覆盖以亚热带常绿阔叶林和针叶林为主。抚仙湖流域[15]（图 1）地处亚热带高原季风气候区，年均气温为 15.5~17.3 ℃，年降水量为 800~1 100 mm，降水季节分布不均，雨季（5—10 月）占全年降水量的 80%以上[8]。流域内水质长期保持在Ⅰ类，是我国重要的战略水资源储备区。

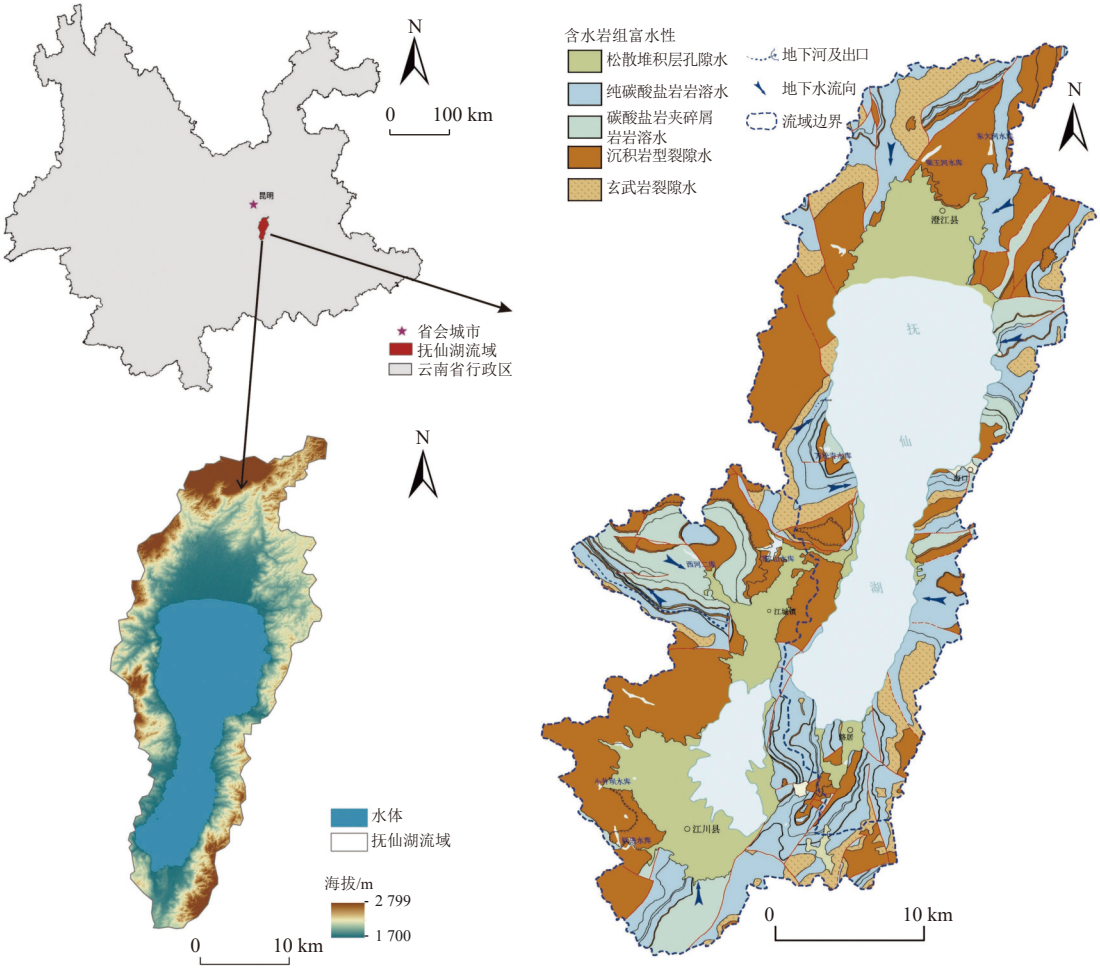


图 1　抚仙湖流域概况

Fig.1　Overview of the Fuxian Lake basin

近年来，受流域内农业面源污染、旅游业快速发展和城镇化进程加快的多重影响，抚仙湖的生态环境面临严峻挑战。具体而言，随着区域经济社会发展，抚仙湖流域城镇化进程显著加快[16]。澄江市城区规模不断扩大，旅游地产和康养项目快速发展，城镇建成区面积较 2000 年扩大了 2.3 倍，城镇化率从 2000 年的 28.5% 提升至 2021 年的 52.8%[17]。工业化进程以资源型加工业为主，主要集中在磷化工、食品加工和旅游工艺品制造等领域，对流域环境构成潜在压力[18]。农业生产方面，流域内耕地面积约占总面积的 18.6%，主要种植烤烟、蔬菜、花卉等高附加值经济作物，化肥施用强度达 480 kg/hm^2，农药使用量较全国平均水平高出 25%，农业面源污染成为流域氮磷污染的主要来源[19]。畜禽养殖以散养为主，养殖废物资源化利用率不足 60%，进一步加剧了面源污染负荷[20]。抚仙湖流域旅游业蓬勃发展，年接待游客量从 2000 年的 60 万人次增长至 2021 年的 500 万人次，旅游收入年均增长率达 15.8%[21]。环湖区域酒店、民宿和旅游设施快速增加，旅游旺季日污水产生量达 1.2 万 t，给污水处理设施带来巨大压

力[22]。作为滇中地区的重要生态屏障, 抚仙湖的生态健康状况对区域水资源安全、生物多样性保护及经济社会可持续发展具有重要影响。

1.2　数据来源

为探究抚仙湖流域生态环境质量时空演变, 采用 Level 2 级 Landsat 系列遥感影像为主要数据源, 选取 2000 年、2003 年、2006 年、2009 年、2012 年、2015 年、2018 年、2021 年共 8 期遥感数据, 通过地理空间数据云(http://www.gscloud.cn/)获取。由于研究区 4—12 月为多云期, 故下载的数据日期集中在 2—3 月, 云量低于 5%, 避免因植物生长趋势不同在反演绿度、湿度指标时造成影响, 丰水期选择 6—8 月, 丰枯期各解译 1 次, 基于 ENVI 平台对遥感影像进行辐射定标、大气校正、几何校正、裁剪等预处理。

进一步为探究抚仙湖流域生态环境质量的空间分异性和驱动机制, 选取了自然指标(年均气温、坡向、土壤类型、叶面积指数、高程、年均降水量、坡度)和社会指标(人口密度数据、夜间灯光指数)分析生态环境质量的空间异质性及驱动机制。数据的获取途径如表 1 所示。

表 1　数据来源

Table 1　Detail of the data sources

数据类型	驱动因子	空间分辨率	数据来源
自然指标	高程	30	高程、坡度、坡向数据基于地理空间数据云获取的DEM数据计算得出
	坡度	30	
	坡向	30	
	年均温度	1 000	国家科技基础条件平台——国家地球系统科学数据中心(http://www.geodata.cn)
	年均降水量	1 000	
	土壤类型	1 000	中国科学院资源环境科学与数据中心(https://www.resdc.cn)
社会指标	人口密度	1 000	美国能源部橡树岭国家实验室(https://landscan.ornl.gov)
	夜间灯光指数	500	美国国家海洋和大气管理局(NOAA)国家环境信息中心(https://www.ngdc.noaa.gov)

1.3　研究方法

1.3.1　生态环境质量评价方法

生态环境质量评价方法一般采用定性评价和定量评价两种方法[23]。定性评价通常选择对生态环境影响较大的指标, 并根据指标的大小或程度对生态环境进行评价。定量评价采用公式或模型来计算指标体系, 并根据计算结果的大小对生态环境进行评价, 一般有层次分析法、主成分分析法(PCA)、熵值法、模糊综合评价法、灰色关联度分析法和人工神经网络评价法。相比之下采用主成分分析法进行高原湖泊流域评价指标体系的构建更合适, 在主成分分析中各项指标的权重根据原始数据特征确定[24]。

1.3.2　RSEI 生态指数模型

RSEI 模型选用绿度、湿度、热度和干度 4 个与生态环境密切相关的生态指标, 基于主成分分析方法对 4 个指标进行耦合, 并选用第一主成分(PC1)构建 RSEI 模型。RSEI 模型的构造完全基于遥感技术, 各指标的权重由主成分变换生成的荷载值来客观确定[24]。

1.3.2.1　绿度指标

植被是构成陆地生态系统的主体, 对于维持生态平衡、调节水循环、促进物质和能量流动具有重要作用, 并常作为气候变化的指示器应用于生态系统的动态监测和评估。选用归一化差异植被指数(NDVI)表征绿度, NDVI 是根据植被在红光和近红外波段的不同吸收和反射特性构建的, 与植被生长状况密切相关, 是应用最广泛的植被指数[25], 其计算公式如下:

$$\mathrm{NDVI}=(P_{\mathrm{NIR}}-P_{\mathrm{Red}})/(P_{\mathrm{NIR}}+P_{\mathrm{Red}}) \tag{1}$$

式中 P_{NIR} 和 P_{Red} 分别为近红外波段和红波段的光谱反射率。

1.3.2.2　湿度指标

K-T 变换称之为缨帽变换, 是一种应用于多光谱遥感数据的正交变换方法[26], 在遥感技术中采用缨帽变换当中的湿度分量来表征湿度指标[27], 计算公式如下:

$$\begin{aligned}\mathrm{WETTM}=&0.031\,5P_{\mathrm{Blue}}+0.202\,1P_{\mathrm{Green}}+\\&0.310\,2P_{\mathrm{Red}}+0.159\,4P_{\mathrm{NIR}}-\\&0.680\,6P_{\mathrm{SWIR1}}-0.610\,9P_{\mathrm{SWIR2}}\end{aligned} \tag{2}$$

$$\begin{aligned}\mathrm{WETOLI}=&0.151\,1P_{\mathrm{Blue}}+0.197\,2P_{\mathrm{Green}}+\\&0.328\,3P_{\mathrm{Red}}+0.340\,7P_{\mathrm{NIR}}-\\&0.711\,7P_{\mathrm{SWIR1}}-0.455\,9P_{\mathrm{SWIR2}}\end{aligned} \tag{3}$$

式中: WETTM 和 WETOLI 分别为 Landsat 5 TM 的湿度分量和 Landsat 8 OLI 的湿度分量; P_{Blue}、P_{Green}、P_{SWIR1} 和 P_{SWIR2} 分别为蓝、绿、短波红外 1 和短波红外 2 波段的光谱反射率。

1.3.2.3　干度指标

随着城市的快速扩张, 城区的干燥化对地区的生态环境质量产生了负面影响。采用土壤指数(SI)和建筑指数(IBI)来构建干度指标 NDBSI, 计算公式如下:

$$\mathrm{NDBSI}=(\mathrm{SI}+\mathrm{IBI})/2 \tag{4}$$

$$\begin{aligned}\mathrm{SI}=&[(P_{\mathrm{SWIR1}}+P_{\mathrm{Red}})-(P_{\mathrm{Blue}}+P_{\mathrm{SWIR1}})]/\\&[(P_{\mathrm{SWIR1}}+P_{\mathrm{Red}})+(P_{\mathrm{Blue}}+P_{\mathrm{NIR}})]\end{aligned} \tag{5}$$

$$\begin{aligned}\mathrm{IBI}=&2P_{\mathrm{SWIR1}}/(P_{\mathrm{SWIR1}}+P_{\mathrm{NIR}})-[P_{\mathrm{NIR}}/(P_{\mathrm{NIR}}+P_{\mathrm{Red}})+\\&P_{\mathrm{Green}}/(P_{\mathrm{Green}}+P_{\mathrm{SWIR1}})]/2P_{\mathrm{SWIR1}}/(P_{\mathrm{SWIR1}}+P_{\mathrm{NIR}})+\\&[P_{\mathrm{NIR}}/(P_{\mathrm{NIR}}+P_{\mathrm{Red}})+P_{\mathrm{Green}}/(P_{\mathrm{Green}}+P_{\mathrm{SWIR1}})]\end{aligned}\tag{6}$$

1.3.2.4 热度指标

陆地表面温度(LST)在地表与大气能量交换中扮演着重要角色,本文采用覃志豪等[28]提出的单窗算法反演地表温度,计算公式如下:

$$\mathrm{LST}=a(1-C-D)+[b(1-C-D)+C+D]\times\mathrm{T6}/10-D\times\mathrm{Ta}/C\tag{7}$$

式中:LST 为地表温度,K;Ta 为大气温度,K;T6/10 为热红外波段的亮度温度,K;a=−67.355,b=0.459,C=$\varepsilon\tau$,D=(1−τ)[1+(1−ε)τ],ε 为地表比辐射率,τ 为大气透射率。ε 计算公式如下:

$$\varepsilon_{\mathrm{surface}}=0.962\,5+0.061\,4\mathrm{Pv}-0.046\mathrm{Pv}^2\tag{8}$$

$$\varepsilon_{\mathrm{building}}=0.958\,9+0.086\mathrm{Pv}-0.067\,1\mathrm{Pv}^2\tag{9}$$

式中:$\varepsilon_{\mathrm{surface}}$ 为自然表面像元的比辐射率;$\varepsilon_{\mathrm{building}}$ 为城镇区表面像元的比辐射率;Pv 为植被覆盖度。

1.3.2.5 RSEI 模型构建

RSEI 模型是采用主成分分析方法对绿度、湿度、干度、热度 4 项指标进行耦合构成的[29],由于每个指标具有不同的单位和数值范围,因此需要将 4 个指标的值分别归一化到 [0,1]:

$$\mathrm{NI}_i=(I_i-I_{\min})/(I_{\max}-I_{\min})\tag{10}$$

式中:i 为某一指标;NI_i 为指标归一化之后的值;I_i 为指标值;$I_{\max}$ 与 $I_{\min}$ 分别为该指标像元的最大值与最小值。

对各项指标归一化后,对其进行主成分分析。从主成分分析的结果中提取第一主成分 PC1,当 PC1 在生态质量较好的地区为高值,而在环境质量较差的地区为低值时:

$$\mathrm{PC1}=\mathrm{RSEI0}\tag{11}$$

当 PC1 在生态质量较差的地区为高值,而在环境质量较好的地区为低值时:

$$1-\mathrm{PC1}=\mathrm{RSEI0}\tag{12}$$

通过对 RSEI0 归一化得到 RSEI,当 RSEI 越接近 1 时,生态环境质量越好;当 RSEI 越接近 0 时,生态环境质量越差。

1.3.3 地理探测器模型

生态环境质量受自然因素和人为因素的综合影响,但各因素对生态环境质量空间异质性的影响程度以及各因素之间的相互作用往往难以量化。地理探测器模型能有效揭示地理现象空间分异的驱动机制,其核心指标为 q 统计量。q 值用于度量某个驱动因子对生态环境质量空间异质性的解释程度,其值域为 [0,1],值越大表示该因子对生态环境质量空间分布的影响越强[30]。因此,本研究基于因子检测法和交互作用检测法,选择地理探测器模型来揭示抚仙湖流域生态环境质量变化的驱动因素,选取 8 个自然指标和社会指标,对 RSEI 的空间异质性及驱动机制进行分析,并基于叶面积指数及年均降水量矩阵分析其生态环境效应。

1.3.4 Pearson 相关性检验

Pearson 相关性检验是一种用于量化 2 个连续变量之间线性关系强度和方向的参数统计方法。该方法通过计算 Pearson 相关系数(r,取值介于–1~1)来评估变量间的关联程度,其中 1 表示完全正相关,–1 表示完全负相关,0 表示无线性相关。该检验要求数据满足双变量正态分布、线性关系和同方差性等前提条件,其核心原理是通过协方差与标准差的比值来消除量纲影响。

2 结果与分析

2.1 RSEI 模型的适宜性检验

2.1.1 主成分分析

为检验 RSEI 模型对抚仙湖流域生态环境的可行性,对 2000—2021 年(每期数据间隔 3 年,共 8 期)同期 NDVI、WET、NDBSI 和 LST 数据进行主成分分析。

基于主成分分析结果(表 2),对 RSEI 模型在抚仙湖流域的适用性进行了检验。RSEI 模型通过整合 NDVI、WET、NDBSI 和 LST 4 个指标,利用主成分分析提取第一主成分(PC1)构建生态环境质量指数。以下从特征值贡献率、指标载荷一致性及时间稳定性三方面分析其适宜性:1)PC1 解释能力。2000—2021 年,PC1 的贡献率始终高于 65%(68.50%~71.87%),表明 PC1 能够有效综合 4 个指标的大部分信息,符合 RSEI 模型要求(通常需>60%)。其中 2015 年贡献率最高(71.87%),2021 年略低但仍达 68.95%,说明模型在时间序列上具有稳定的解释力。2)指标载荷方向一致性。绿度和湿度在 PC1 中均为正载荷(NDVI 为 0.510 1~0.697 4,WET 为 0.192 8~0.394 5),与生态环境质量呈正相关;干度和热度均为负载荷(NDBSI 为−0.543 5~0.683 5,LST 为−0.444 8~0.715 4),反映其对生态的负面影响,各指标在 PC1 中的方向与理论预期一致,验证了 RSEI 模型指标选择的合理性。3)时间稳定性与异常分析。PC1 的贡献率及指标载荷方向在 2000—2021 年保持稳定,未出现显著波动,表明模型适用于长期生态评估。

表 2　主成分分析结果

Table 2　Principal component analysis results

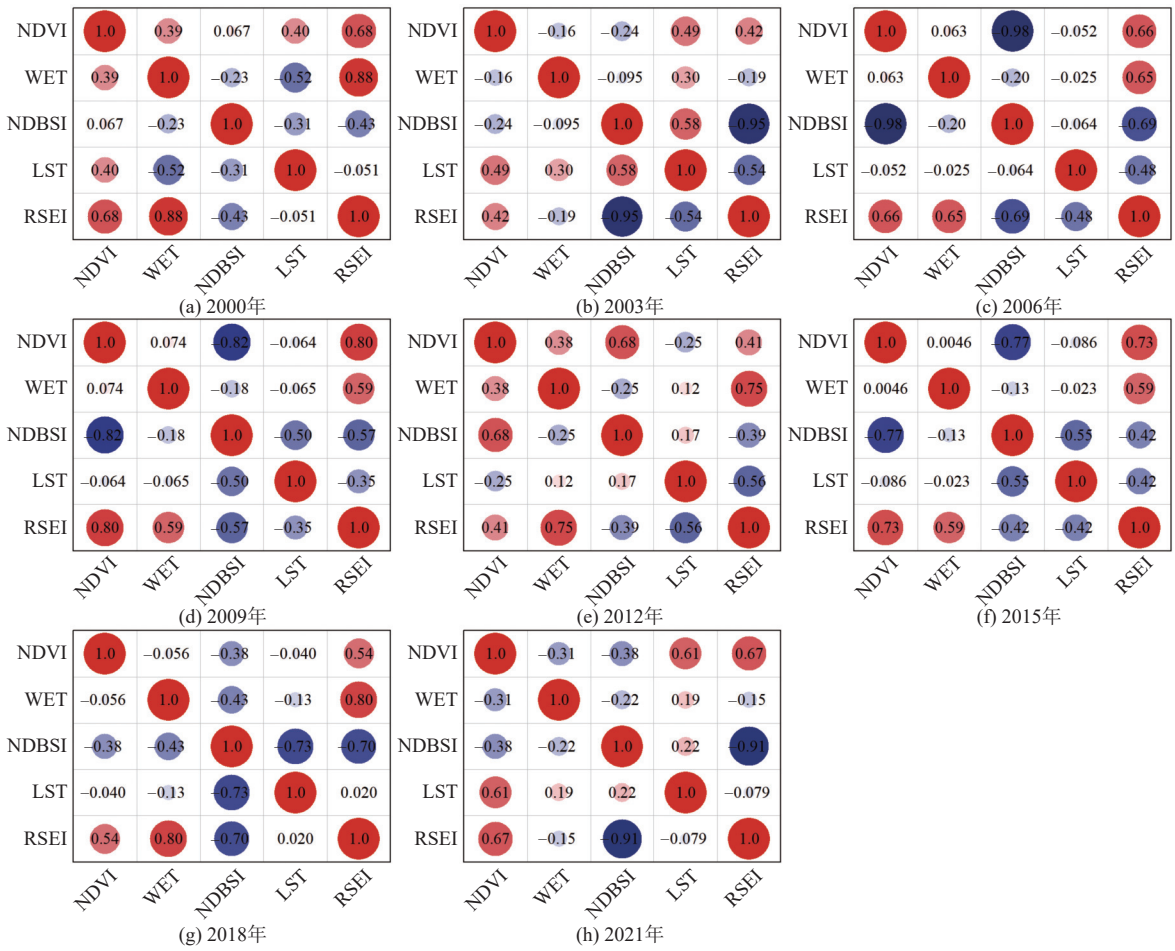
年份	主成分	NDVI	WET	NDBSI	LST	特征值	特征值贡献率/%
2000	PC1	0.651 7	0.394 5	−0.683 5	−0.334 7	0.025 5	70.00
	PC2	0.746 8	−0.447 7	0.463 3	−0.109 8	0.007 6	20.65
	PC3	−0.303 0	−0.135 1	0.185 3	−0.932 4	0.003 6	8.68
	PC4	−0.140 7	−0.822 2	−0.545 6	0.080 9	0.000 2	0.66
2003	PC1	0.566 4	0.288 9	−0.471 1	−0.715 4	0.022 4	68.50
	PC2	0.795 8	−0.369 0	0.447 6	−0.119 1	0.007 6	20.96
	PC3	−0.360 3	−0.144 8	0.297 2	−0.872 3	0.006 2	9.92
	PC4	0.147 1	0.880 8	0.446 7	−0.054 8	0.000 2	0.62
2006	PC1	0.665 1	0.315 9	−0.678 0	−0.421 5	0.025 3	65.08
	PC2	−0.815 8	0.241 7	−0.293 9	−0.435 5	0.008 8	21.60
	PC3	−0.154 2	0.296 1	−0.506 4	0.795 1	0.006 5	12.87
	PC4	−0.116 4	−0.887 9	−0.444 3	0.025 1	0.000 2	0.44
2009	PC1	0.611 7	0.338 9	−0.660 5	−0.363 8	0.032 1	70.84
	PC2	−0.655 5	0.202 5	−0.210 7	−0.655 5	0.008 0	17.02
	PC3	−0.350 5	0.351 8	−0.561 8	0.586 3	0.006 9	11.73
	PC4	−0.133 9	−0.882 1	−0.451 3	0.014 8	0.000 2	0.41
2012	PC1	0.510 1	0.254 1	−0.638 9	−0.500 9	0.030 7	69.41
	PC2	0.218 6	0.238 1	−0.394 1	0.860 3	0.009 2	19.59
	PC3	0.820 5	−0.381 3	0.416 6	0.087 9	0.006 8	10.57
	PC4	−0.136 9	−0.846 9	−0.512 7	0.034 3	0.000 2	0.43
2015	PC1	0.549 6	0.303 1	−0.640 3	−0.461 9	0.028 9	71.87
	PC2	−0.741 9	0.121 1	−0.116 9	−0.649 1	0.007 4	17.01
	PC3	−0.372 9	0.377 9	−0.594 5	0.603 8	0.006 8	10.66
	PC4	−0.092 1	−0.876 3	−0.472 1	0.026 8	0.000 2	0.46
2018	PC1	0.675 8	0.331 9	−0.633 4	−0.309 1	0.020 3	68.94
	PC2	0.732 3	−0.309 1	0.554 6	0.246 1	0.006 9	21.47
	PC3	−0.029 2	−0.170 9	0.339 6	−0.920 0	0.004 9	9.06
	PC4	0.078 5	0.908 9	0.409 4	−0.014 9	0.000 2	0.53
2021	PC1	0.697 4	0.192 8	−0.543 5	−0.444 8	0.021 0	68.95
	PC2	−0.668 7	0.248 8	−0.264 8	−0.681 4	0.008 2	24.42
	PC3	−0.249 4	0.281 1	−0.721 9	0.581 1	0.015 8	6.37
	PC4	−0.065 1	−0.939 3	−0.336 9	0.007 9	0.000 1	0.26

主成分分析结果证实, RSEI 模型在抚仙湖流域具有较高的适用性, PC1 能够稳定反映生态环境质量变化, 且指标载荷符合生态学意义, 可为后续研究提供可靠方法支撑。

2.1.2　Person 相关性检验

为验证 RSEI 模型对抚仙湖流域生态环境的综合表征能力, 基于 2000—2021 年同期 NDVI、WET、NDBSI 和 LST 数据, 计算了各指标间的相关系数(图 2)。通过分析 RSEI 与各分项指标的动态相关性, 可系统评估模型对植被覆盖、水分条件、地表干热环境等关键生态要素的响应机制及其时序稳定性, 进而揭示 RSEI 在复杂环境变化中的综合解释力。

图 2 的 Pearson 相关性分析结果显示, NDVI 与 RSEI 始终呈正相关, 其相关系数由 2000 年的 0.68 波动变化, 在 2009 年达到最高值 0.80, 2018 年为 0.54, 表明植被覆盖对生态质量具有持续稳定的正向贡献; WET 与 RSEI 的相关性整体较高, 尤其在 2000 年达 0.88, 2018 年仍维持在 0.80, 说明湿度是影响 RSEI



注: 不同颜色代表不同相关系数。

图 2　抚仙湖流域 2000—2021 年 NDVI、WET、LST、NDBSI、RSEI 相关系数矩阵

Fig.2　Correlation coefficient matrix of NDVI, WET, LST, NDBSI, and RSEI in the Fuxian Lake basin from 2000 to 2021

变化的关键因子。NDBSI 与 RSEI 在多数年份呈负相关, 如 2000 年为−0.43, 2012 年进一步降至−0.39, 反映出地表干度对生态质量的抑制作用。LST 与 RSEI 的关系则表现出一定的年际变异, 2000 年为微弱负相关(−0.051), 2006 年转为较强负相关(−0.48), 而在 2018 年却呈现正相关(0.020), 可能与当年高温干旱气候对植被生长产生胁迫有关。整体上, RSEI 与各指标间的相关性在时序上具有一定波动性, 但仍保持了绿度、湿度为正相关, 干度、热度为负相关的基本格局, 说明 RSEI 能够有效综合多源遥感信息, 实现对抚仙湖流域生态环境质量的稳定表征。

综上所述, 通过主成分分析和 Pearson 相关性检验对 RSEI 模型在抚仙湖流域的适用性的系统验证, 表明 RSEI 模型能够有效整合多源遥感指标信息, 在长时间尺度上稳定表征抚仙湖流域的生态环境质量变化, 具有可靠的适用性。

2.2　抚仙湖流域生态环境质量时空变化分析

2.2.1　生态环境质量的时间变化特征

为了动态分析抚仙湖流域生态环境质量变化, 对 8 期的 RSEI 数据进行差值处理, 得到 RSEI 取值区间为 [−1,1], 并将其划分为 7 类: 显著变差(−1, −0.3]、明显变差(−0.3, −0.15]、略微变差(−0.15, −0.05]、无明显变化(−0.05, 0.05)、略微变好 [0.05, 0.15)、明显变好 [0.15, 0.3)和显著变好 [0.3, 1)。将抚仙湖流域生态环境质量变化类型划分为 7 类, 是因为 RSEI 差值(ΔRSEI)通常呈近似正态分布, 以均值 0 为中心, 区间(−0.05, 0.05)覆盖变化不显著的范围, 可有效排除随机波动干扰; 两侧按变化幅度以 0.05、0.15 和 0.3 为界逐步划分, 分别对应轻微、明显和显著变化等级, 既符合标准差分级原则, 又能体现变化程度的连续性。

2000—2021 年抚仙湖流域生态环境质量整体呈现改善趋势, 改善区域(显著变好+明显变好)占比 25.16%, 略高于退化区域(显著变差+明显变差)的 23.67%, 无明显变化区域占比 27.10%, 表明近 1/3 的流域生态状况保持稳定(表 3)。

分阶段分析, 2003—2006 年是生态退化最严重的时期, 显著变差面积占比达 8.1%, 明显变差占比

表 3　抚仙湖流域 RSEI 变化等级的面积及比例

Table 3　Area and proportion of RSEI change levels in the Fuxian Lake basin

年份	面积及占比	显著变差	明显变差	略微变差	无明显变化	略微变好	明显变好	显著变好
2000—2003	面积/hm²	2 900.15	4 340.32	6 540.56	14 500.48	9 450.29	6 000.5	2 350.44
	占比/%	6.25	9.35	14.79	31.24	20.37	12.93	5.07
2003—2006	面积/hm²	3 800.21	5 500.89	7 600.74	13 500.67	8 450.13	5 800.28	2 300.52
	占比/%	8.10	11.72	16.19	28.77	1 8.00	1 2.31	4.91
2006—2009	面积/hm²	4 000.35	6 000.12	7 800.98	14 000.89	8 800.76	5 900.34	2 450.61
	占比/%	8.52	13.01	15.00	30.11	17.17	10.85	5.34
2009—2012	面积/hm²	3 500.27	5 100.45	7 250.32	14 750.34	9 350.43	6 100.12	2 550.21
	占比/%	7.56	11.02	10.58	31.9	20.23	13.19	5.52
2012—2015	面积/hm²	3 300.14	5 300.56	7 450.78	14 500.89	9 200.67	6 050.34	2 500.48
	占比/%	7.23	11.11	16.12	28.74	20.09	11.24	5.47
2015—2018	面积/hm²	3 100.25	5 200.43	7 350.34	14 650.76	9 100.56	6 000.12	2 450.39
	占比/%	6.80	11.40	16.12	32.14	14.98	13.17	5.39
2018—2021	面积/hm²	2 850.67	5 000.45	7 150.89	14 800.34	8 900.12	5 900.45	2 350.34
	占比/%	6.30	11.06	15.51	32.59	16.34	13.02	5.18
2000—2021	面积/hm²	7 552.89	4 297.41	11 058.12	9 606.24	7 283.47	7 832.7	4 855.68
	占比/%	1 4.36	9.31	11.06	27.10	13.01	14.64	10.52

11.72%, 可能与这一时期的气候变化或人类活动干扰有关。在此期间, 云南地区连续遭遇严重干旱, 降水量较常年均值偏低 30% 以上[31], 湖泊水文补给锐减, 水位下降导致浅水区湿地萎缩及水生植被退化[32]; 同时, 流域内城镇化与旅游业进入高速发展期, 环湖区域建设用地快速扩张, 磷化工企业废水排放及农业面源污染负荷持续增加, 叠加干旱导致的水体自净能力下降, 进一步加剧了湖泊富营养化与生态功能退化[22]。2015—2018 年略微变好区域占比降至 14.98%, 表明生态改善速度放缓, 需警惕潜在的生态退化风险。2018—2021 年数据显示, 流域生态进入相对稳定期, 退化趋势进一步减缓(显著变差占比降至 6.3%), 但无明显变化区域占比达 32.59%, 为历史最高, 这一现象可能反映生态修复进入平台期。总体而言, 抚仙湖流域生态环境质量呈现向好趋势, 但仍需动态调整治理策略, 以应对潜在的生态波动和气候变化影响。

2000—2021 年抚仙湖流域 RSEI 生态等级面积变化特征表明(图 3), 流域生态环境质量整体呈波动改善趋势: 早期(2000—2006 年)生态环境显著退化, 其中 2003—2006 年达到退化峰值(显著变差面积占比 8.1%); 中期(2009—2015 年)在生态工程实施后明显改善, 显著变好比例从不足 0.1% 提升至 5.5%; 近期(2015—2021 年)进入相对稳定期, 无明显变化区域占比达 32.6%。这种变化趋势与植被恢复(NDVI 提升)和干热环境改善(NDBSI、LST 降低)密切相关, 同时反映出生态工程措施(例如生态修复与水源涵养工程、“三退三还”工程)的有效性及其效益临界。研究结果表明, 流域生态环境整体向好但仍存在空间差异, 未来需针对不同区域特点优化管理策略, 重点关注早期退化区的持续修复和稳定区的长期监测。

2.2.2　生态环境质量的空间变化特征

将 RSEI 指数划分为 5 个级别: 差, 0~0.2; 较差

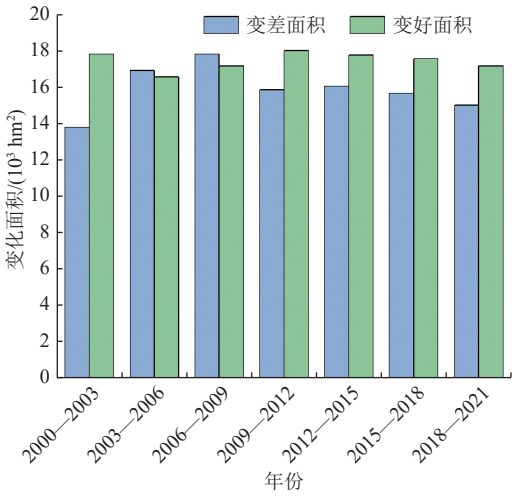


图 3　抚仙湖流域 2000－2021 年抚仙湖流域 RSEI 生态等级面积变化特征

Fig.3　Changes in the area of RSEI ecological grades in the Fuxian Lake basin from 2000 to 2021

0.2~0.4; 中等, 0.4~0.6; 良好, 0.6~0.8; 优秀, 0.8~1.0。一方面采用 0.2 为固定间隔是一种广泛用于生态环境质量分级的等间距划分原则, 其计算简便且易于在不同区域和研究间进行比较, 符合遥感指数评价的通用规范; 另一方面, 5 级分类能够清晰区分出从极度退化(差)到近乎自然状态(优秀)的生态质量连续谱, 其中中等可视为生态系统的临界状态, 良好与优秀分别对应健康和高功能生态系统, 而差和较差则明确标识出需优先修复的区域。研究区 2000—2021 年 RSEI 各等级的空间分布和面积变化如图 4 所示。

抚仙湖流域生态环境质量空间差异显著, 呈现以湖体为核心向周边梯度变化的格局。2000 年, 湖体及近湖植被茂密区以良好→优秀等级(RSEI 0.6~1.0)为主, 呈现深绿色; 流域边缘及部分人类活动频繁区域, 差→较差等级(RSEI 0~0.4)占比高, 多为蓝、浅蓝色。2012 年后, 良好→优秀等级的绿色斑块快速扩张, 从湖体周边向流域中下部、边缘蔓延, 蓝色低等级区域持续收缩, 反映生态改善的空间传导效应—湖体生态屏障与植被恢复协同作用, 带动周边及边缘区生态质量提升, 生态向好格局逐步强化。

从面积变化趋势进行分析, 2000—2009 年, 生态质量提升缓慢, 差→较差等级面积占主导, 仅局部因自然波动出现小幅增减; 2012 年是关键转折点, 中等→优秀等级(RSEI 0.4~1.0)面积加速增长, 差等级(0~0.2)占比断崖式下降。至 2021 年, 优秀→良好等级成为流域主体特征, 差等级近乎消失, 印证生态修复工程、植被保护政策成效显著, 生态质量从局部改善转向全域优化, RSEI 等级结构持续向高值端跃迁。

生态环境质量的空间变化特征表明, 2000—2021 年, 抚仙湖流域生态环境质量经历缓慢僵持→快速突破→全面提升阶段。空间上, 以湖体为核心的生态辐射效应逐步显现, 高等级生态区从孤立斑块向连片网络发展; 时间维度上, 2012 年后政策驱动与自然恢复协同发力, 推动生态质量跨越式提升。RSEI 等级变化直观反映出, 流域生态治理既抓住湖体生态本底优势, 又通过空间传导实现全域改善, 为高原湖泊流域生态保护提供了以点带面、梯度修复的实践范例, 后续需持续巩固高等级生态区, 防范边缘区质量反弹, 维持生态向好趋势。

2.3 抚仙湖流域生态环境质量空间关联性特征

2.3.1 生态环境质量总体变化趋势

2000—2021 年抚仙湖流域历年 RSEI 呈现退化—改善—稳定趋势(图 5), RSEI 均值在 2000—2006 年显著下降, 2006—2015 年稳步回升, 2015 年后趋于稳定, 这一变化与生态保护工程的实施时段高度吻合。空间分析表明生态环境质量具有较弱的空间正相关性(Moran's *I* 指数为 0.25~0.33), 其空间聚集特征在 2000—2009 年增强, 2009 年后呈波动减弱趋势。研究结果不仅验证了生态工程措施的有效

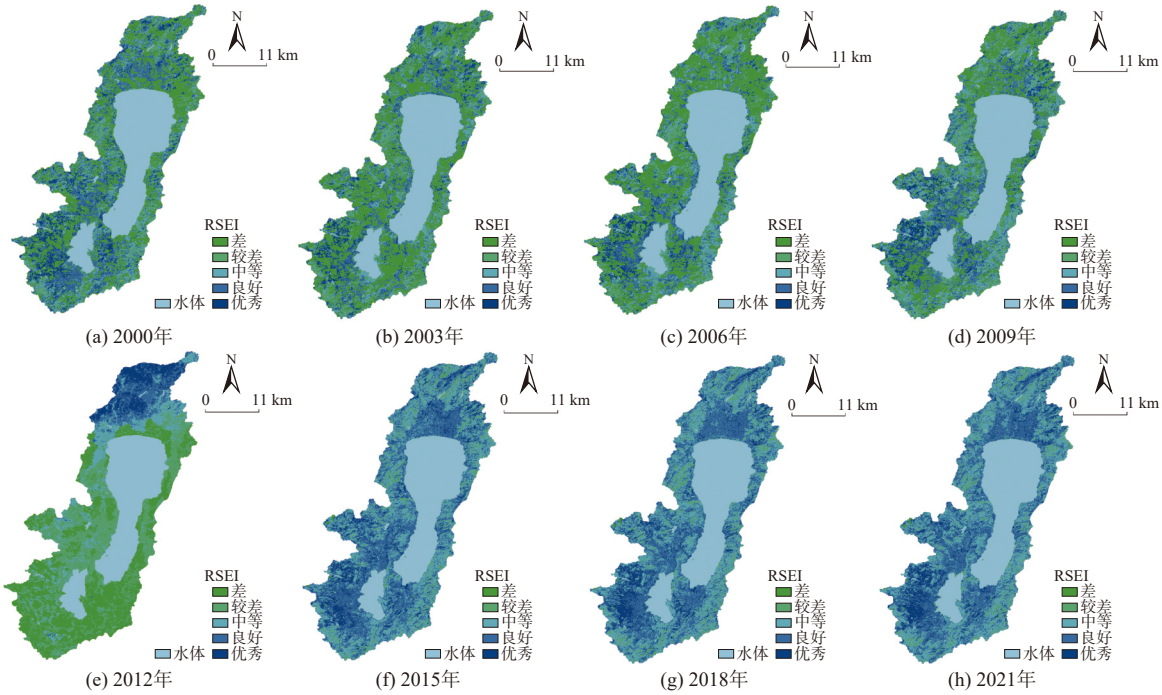


图 4 抚仙湖流域 2000—2021 年生态环境质量等级分布

Fig.4 Distribution of ecological environment quality grades in the Fuxian Lake basin from 2000 to 2021

性, 也揭示了生态环境演变的时空异质性, 为流域差异化生态管理和可持续发展提供了重要依据。

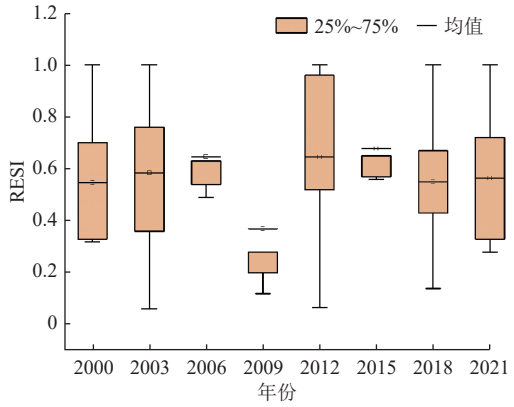


图 5　2000—2021 年抚仙湖流域 RSEI 箱型图

Fig.5　Box plot of RSEI in the Fuxian Lake basin from 2000 to 2021

2.3.2　抚仙湖流域生态环境质量全局空间自相关分析

表 4 为抚仙湖流域生态环境质量的 Moran's *I* 指数。抚仙湖流域 Moran's *I* 指数的 *Z* 值均大于 180, *P* 均小于 0.01, 说明随机产生此聚类模式的可能性小于 1%。抚仙湖流域 Moran's *I* 指数均为正值, 但都小于 0.35, 这表明在整体上, 抚仙湖流域生态环境质量之间存在较弱的正相关和一定的内在联系, 生态环境质量的空间分布呈较弱的聚集性, 而不是随机性。Moran's *I* 值在 2005—2009 年整体呈上升的趋势, 在 2009—2021 年呈现波动式下降趋势, 表明生态环境质量的空间聚集特征在 2000—2009 年增强, 在 2009—2021 年逐渐减弱。Moran's *I* 在 2018 年达到最低值(0.25), 说明 2018 年抚仙湖流域生态环境质量的空间聚集特征最低, 之后空间聚集特征呈增强的趋势。

2.4　生态环境质量驱动因素分析

2.4.1　单因子探测

单因子探测器揭示了 9 个影响因子对 RESI 的影响程度。表 5 为抚仙湖流域因子分析结果, 不同影响因子的 *q* 值在各年份均有不同程度的变化。

从抚仙湖流域的因子分析结果来看, 2000 年、2012 年、2021 年对 RSEI 影响最大的因子是年均降水量和叶面积指数, 按影响因子平均 *q* 值大小排序: 年均降水量(0.418)>叶面积指数(0.411)>年均温度(0.232)>夜间灯光指数(0.214)>高程(0.183)>坡度(0.143)>人口密度(0.111)>土壤类型 (0.080)>坡向(0.019)。可以看出年均降水量因子的平均 *q* 值最大, 这表明年均降水量是影响抚仙湖流域生态环境质量空间分异的主要因素。2000—2021 年, 坡向因子的平均 *q* 值最低, 2000 年、2012 年、2021 年的排序都是 9, 这表明与水域距离对生态环境质量的影响最小。2000—2021 年, 年均降水量因子的解释强度呈现持续增强的趋势, *q* 从 0.390 提升至 0.449, 这说明随着抚仙湖流域年均降水量的变化, 抚仙湖流域生态环境质量受到的影响越来越大。

表 4　生态环境质量的 Moran's *I* 指数

Table 4　Moran's *I* index for ecological environment quality

年份	Moran's *I*值	*Z*统计量	*P*
2000	0.28	215.42	0
2003	0.32	230.32	0
2006	0.31	225.47	0
2009	0.33	239.36	0
2012	0.27	210.11	0
2015	0.26	205.98	0
2018	0.25	185.35	0
2021	0.28	214.8	0

2.4.2　交互探测器

表 6 为抚仙湖流域交互探测器结果。从表 6 可以看出, 因子交互作用均呈现双因子相互增强, 并且大部分呈现双因子非线性增强, 表明因子交互作用对抚仙湖流域生态环境质量变化的影响高于原有不同因子单独产生的影响。

2000—2021 年, 年均降水量因子与其他因子的交互作用最强, 叶面积指数因子与其他因子的交互作用强度次之。2000 年, 在年均降水量与其他因子交互作用中, 年均降水量∩叶面积指数(0.501)的影响力最大, 其次是叶面积指数∩夜间灯光指数(0.479)。在年均降水量与除叶面积指数的其他因子交互作用中, 年均降水量∩夜间灯光指数(0.477)的影响力最大, 其次是年均降水量∩坡向(0.461)。2012 年, 在年均降水量与其他因子交互作用中, 年均降水量∩叶面积指数(0.601)的影响力最大, 其次是叶面积指数∩夜间灯光指数(0.579)。在年均降水量与除叶面积指数的其他因子交互作用中, 年均降水量∩夜间灯光指数(0.577)的影响力最大, 其次是年均降水量∩坡向(0.561)。2021 年, 在年均降水量与其他因子交互作用中, 年均降水量∩叶面积指数(0.701)的影响力最大, 其次是叶面积指数∩夜间灯光指数(0.679)。在年均降水量与除叶面积指数的其他因子交互作用中, 年均降水量∩夜间灯光指数(0.467 7)的影响力最大, 其次是年均降水量∩坡向(0.661)。结合抚仙湖的因子分析结果可以看出, 2000—2021 年年均降水量∩叶面积指数对 RSEI 的影响力最大,

表 5 单因子探测结果

Table 5 Single—factor detection result

影响因子	2000年		2012年		2021年		平均值
	q	排序	*q*	排序	*q*	排序	
X1(年均温度)	0.237	3	0.240	3	0.220	3	0.232
X2(坡向)	0.018	9	0.020	9	0.020	9	0.019
X3(夜间灯光指数)	0.218	4	0.235	4	0.190	4	0.214
X4(土壤类型)	0.080	8	0.088	8	0.073	8	0.080
X5(叶面积指数)	0.456	1	0.401	2	0.376	2	0.411
X6(高程)	0.184	5	0.188	5	0.176	5	0.183
X7(年均降水量)	0.390	2	0.415	1	0.449	1	0.418
X8(人口密度)	0.109	7	0.099	7	0.126	6	0.111
X9(坡度)	0.158	6	0.145	6	0.125	7	0.143

表 6 抚仙湖流域交互探测器结果

Table 6 Results from the interactive detector in the Fuxian Lake basin

年份	影响因子	X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7	X8	X9
2000年	X1(年均温度)	0.225								
	X2(坡向)	0.261	0.019							
	X3(夜间灯光指数)	0.306	0.280	0.229						
	X4(土壤类型)	0.247	0.142	0.251	0.085					
	X5(叶面积指数)	0.462	0.443	0.479	0.421	0.398				
	X6(高程)	0.307	0.242	0.328	0.244	0.451	0.182			
	X7(年均降水量)	0.439	0.461	0.477	0.431	0.501	0.450	0.415		
	X8(人口密度)	0.280	0.167	0.263	0.174	0.453	0.261	0.452	0.124	
	X9(坡度)	0.288	0.204	0.278	0.189	0.461	0.268	0.464	0.210	0.147
2012年	X1(年均温度)	0.325								
	X2(坡向)	0.361	0.119							
	X3(夜间灯光指数)	0.406	0.380	0.329						
	X4(土壤类型)	0.347	0.242	0.351	0.185					
	X5(叶面积指数)	0.562	0.543	0.579	0.521	0.498				
	X6(高程)	0.407	0.342	0.428	0.344	0.551	0.282			
	X7(年均降水量)	0.539	0.561	0.577	0.531	0.601	0.550	0.515		
	X8(人口密度)	0.380	0.267	0.363	0.274	0.553	0.361	0.552	0.224	
	X9(坡度)	0.388	0.304	0.378	0.289	0.561	0.368	0.564	0.310	0.247
2021年	X1(年均温度)	0.425								
	X2(坡向)	0.461	0.219							
	X3(夜间灯光指数)	0.506	0.480	0.429						
	X4(土壤类型)	0.447	0.342	0.451	0.285					
	X5(叶面积指数)	0.662	0.643	0.679	0.621	0.598				
	X6(高程)	0.507	0.442	0.528	0.444	0.651	0.382			
	X7(年均降水量)	0.639	0.661	0.677	0.631	0.701	0.650	0.615		
	X8(人口密度)	0.480	0.367	0.463	0.374	0.653	0.461	0.652	0.324	
	X9(坡度)	0.488	0.404	0.478	0.389	0.661	0.468	0.664	0.410	0.347

坡向因子对 RSEI 的影响越来越小。

抚仙湖流域生态环境质量受自然和社会指标的综合影响, 其中年均降水量是影响 RSEI 空间异质性的主导因素, 对 RSEI 的平均解释力最高。这主要是因为不同降水量会导致绿度、湿度及干热程度差异显著。此外, 高程与年均降水量的交互作用在 2000 年、2012 年和 2021 年均呈现非线性增强的协同作用, 表明年均降水量在不同高程分布条件下, 会对生态环境质量产生更为显著的影响。

3　讨论

本研究基于 RSEI 模型和地理探测器, 揭示了抚仙湖流域生态环境质量时空演变特征及其驱动机制。研究发现, 抚仙湖流域生态环境质量呈现退化—改善—稳定的三阶段演变规律, 这一变化与流域内生态保护政策的实施时段高度吻合。2003—2006 年的显著退化(显著变差面积占比达 8.1%)主要集中在流域西北部农业区和东部旅游开发区, 这与同期农业面源污染激增及旅游设施无序扩张[33] 密切相关。而 2009 年后改善最显著的地区(显著变好比例 5.5%)多位于退耕还林工程实施区和环湖生态修复带, 验证了人为干预措施的有效性。

空间上, 生态环境质量呈现以湖体为核心的梯度分布格局(Moran's *I* 指数 0.25~0.33), 这种独特的空间分异模式与抚仙湖深水特征[34] 密切相关。湖体作为稳定的生态核心区, 其热容量大、温度变化小的特点形成了稳定的微气候环境; 而边缘区受人类活动干扰强烈, 尤其在旅游旺季(夜间灯光指数 q 值达 0.214)生态压力显著。

驱动机制分析揭示了水文—植被协同效应的主导作用(年均降水量∩叶面积指数, q=0.701)。在抚仙湖流域, 这种协同效应表现出明显的海拔分异: 海拔 1 800~2 000 m 区域, 降水与植被的协同效应最强(q=0.75), 这与该区域作为主要水源涵养带的生态功能相符; 而海拔 1 500 m 以下的干热河谷区, 虽然协同效应值较低(q=0.65), 但通过人工植被恢复仍实现了生态质量显著提升。

基于研究结果, 建议采取以下针对性措施: 1)在西北部农业区推广生态农业模式, 建设缓冲带削减面源污染; 2)对东部旅游区实施游客容量控制和夜间照明管理, 并制定严格的夜间照明管理规范, 以最大程度减少光污染对当地夜间生态系统的干扰; 3)在南部干热河谷区优选抗旱树种, 增强植被恢复的可持续性; 4)建立湖体核心区—过渡带—边缘区的梯度保护体系, 优化生态安全格局。未来研究可结合高分辨率遥感和社会经济数据, 进一步量化不同管理情景下的生态响应, 为流域可持续发展提供决策支持。

4　结论

(1)基于绿度、湿度、干度和热度指标的主成分分析表明, 第一主成分(PC1)贡献率在 2000—2021 年稳定保持在 68.50%~71.87%, 各指标载荷方向与生态学理论一致(绿度、湿度为正, 干度、热度为负), 验证了 RSEI 模型在抚仙湖这类高原深水型湖泊流域生态环境评价中具有较好的适用性与可靠性。

(2)抚仙湖流域生态环境质量呈现退化—改善—稳定的三阶段演变特征: 2000—2006 年快速退化期主要受农业面源污染和旅游开发影响; 2006—2015 年改善期与生态保护工程实施密切相关; 2015—2021 年进入相对稳定期, 反映生态系统达到新的平衡状态。

(3)多因子驱动机制发现, 水文—植被协同效应(降水∩叶面积指数, q=0.70)主导环境质量变化, 且生态工程强化了自然因子的作用; 夜间灯光指数(q=0.21)对人为活动的表征优于传统人口密度指标, 凸显旅游照明的潜在影响; 坡向因子(q=0.02)作用微弱, 与抚仙湖环形地形密切相关。

参考文献

[1] 张朋兴, 金笛, 杨帆. 滇中高原湖泊流域生态环境质量时空演变趋势及驱动因素 [J]. 环境工程技术学报, 2025, 15(3): 860-871.
ZHANG P X, JIN D, YANG F. Spatiotemporal evolution trend and driving factors of eco-environmental quality in lake basins of the central Yunnan Plateau[J]. Journal of Environmental Engineering Technology, 2025, 15(3): 860-871.

[2] 胡春宏, 马巍, 杨智, 等. 云南深水型高原湖泊水生态系统演变与保护研究 [J]. 水利发展研究, 2025, 25(8): 1-11.
HU C H, MA W, YANG Z, et al. Research on the evolution and protection of water ecosystem in Yunnan deep-water plateau lakes[J]. Water Resources Development Research, 2025, 25(8): 1-11.

[3] AGUILAR-LOME J, SOCCA-FLORES R, GÓMEZ D. Evaluation of the Lake Titicaca's surface water temperature using LST MODIS time series (2000-2020)[J]. Journal of South American Earth Sciences, 2021, 112(1): 103609.

[4] 孙亚勇, 叶艳, 沈依铭, 等. 基于卫星遥感的湖泊面积变化监测在旱情分析中的应用: 以湖北省为例 [J]. 卫星应用, 2025(7): 38-42.
SUN Y Y, YE Y, SHEN Y M, et al. Application of lake area change monitoring based on satellite remote sensing in drought analysis: a case study of Hubei Province[J]. Satellite Application, 2025(7): 38-42.

[5] ZHANG C, KONG X, XUE B, et al. Synergistic effects of climate warming and atmospheric nutrient deposition on the alpine lake ecosystem in the south-eastern Tibetan Plateau during

the Anthropocene[J]. Frontiers in Ecology and Evolution, 2023, 11: 1119840.
[6] ASSESSMENT M E. Ecosystems and human well-being: synthesis[M]. Washington, DC: Island Press, 2005.
[7] 蒋尖尖, 胡文, 陈静敏. 抚仙湖流域水环境问题与保护治理研究 [J]. 环境科学导刊, 2025, 44(S1): 23-26.
JIANG J J, HU W, CHEN J M. Research on water environment issues and protection governance in Fuxian Lake Basin[J]. Environmental Science Survey, 2025, 44(S1): 23-26.
[8] 李思楠, 赵筱青, 谭琨, 等. 基于 GIS 的抚仙湖流域土地利用时空变化研究 [J]. 人民长江, 2019, 50(6): 63-69,87.
LI S N, ZHAO X Q, TAN K, et al. Study on spatiotemporal changes of land use in Fuxian Lake Basin based on GIS[J]. People's Yangtze River, 2019, 50(6): 63-69,87.
[9] 牛远, 胡小贞, 王琳杰, 等. 抚仙湖流域山水林田湖草生态保护修复思路与实践 [J]. 环境工程技术学报, 2019, 9(5): 482-490.
NIU Y, HU X Z, WANG L J, et al. Ideas and practices of ecological protection and restoration of mountains-rivers-forests-farmlands-lakes-grasslands in Fuxian Lake Basin[J]. Journal of Environmental Engineering Technology, 2019, 9(5): 482-490.
[10] 李春艳, 华德尊, 陈丹娃, 等. 人工神经网络在城市湿地生态环境质量评价中的应用 [J]. 北京林业大学学报, 2008, 30(S1): 282-286.
LI C Y, HUA D Z, CHEN D W, et al. Application of artificial neural network in eco-environmental quality assessment of urban wetland[J]. Journal of Beijing Forestry University, 2008, 30(S1): 282-286.
[11] 赵子霖, 李松敏, 朱鸿政. 天津市水资源生态足迹与生态承载力分析 [J]. 天津农学院学报, 2025, 32(5): 88-93.
[12] ZHAO Z L, LI S M, ZHU H Z. Analysis of water resource ecological footprint and ecological carrying capacity in Tianjin[J]. Journal of Tianjin Agricultural University, 2025, 32(5): 88-93.
[13] 徐涵秋, 邓文慧. MRSEI 指数的合理性分析及其与 RSEI 指数的区别 [J]. 遥感技术与应用, 2022, 37(1): 1-7.
XU H Q, DENG W H. Rationality analysis of MRSEI and its difference with RSEI[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2022, 37(1): 1-7.
[14] 邹佳俊. 洱海流域土地利用变化及其生态环境质量评价 [D]. 昆明: 昆明理工大学, 2021.
[15] 李俊, 张小辉, 盛益之, 等. 滇中抚仙湖流域地表-地下水系统水化学特征及形成机制 [J/OL]. 地学前缘, 2025, 32(1): 1-18.
LI J, ZHANG X H, SHENG Y Z, et al. Hydrochemical characteristics and formation mechanism of surface water-groundwater system in the Fuxian Lake Basin, central Yunnan[J/OL]. Earth Science Frontiers, 2025, 32(1): 1-18.
[16] 云南省统计局. 云南统计年鉴 2022[M]. 北京: 中国统计出版社, 2022.
[17] 澄江市人民政府. 澄江市国民经济和社会发展统计公报 (2000-2021)[R]. 澄江: 澄江市统计局, 2022.
[18] 贺能琴, 陈毅良, 李俊. 抚仙湖径流区畜禽养殖污染防治工程实施前后污染负荷研究 [J]. 环境科学导刊, 2015, 34(6): 36-38.
HE N Q, CHEN Y L, LI J. Study on pollution load before and after implementation of livestock and poultry breeding pollution prevention project in Fuxian Lake runoff area[J]. Environmental Science Survey, 2015, 34(6): 36-38.
[19] 国家环境保护总局. 全国面源污染普查技术报告 [R]. 北京: 中国环境科学出版社, 2021.
[20] 云南省农业农村厅. 云南省畜禽养殖污染防治规划 (2018—2025)[A]. 昆明: 云南省人民政府, 2018.
[21] 云南省文化和旅游厅. 云南省旅游业发展报告 (2000—2021)[R]. 昆明: 云南省旅游局, 2022.
[22] 李松志, 李源, 陈烈, 等. 基于旅游调控规划的湖泊旅游环境评价研究: 以云南高原湖泊为例 [J]. 人文地理, 2005, 20(4): 69-73,8.
LI S Z, LI Y, CHEN L, et al. Study on environmental assessment of lakes tourism based on adjustive and manipulative planning: a case study of plateau in Yunnan[J]. Human Geography, 2005, 20(4): 69-73,8.
[23] PEARSON K. Principal components analysis[J]. The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science, 1901, 6(2): 559-572.
[24] 徐涵秋, 李春强, 林梦婧. RSEI 应使用主成分分析或核主成分分析 [J]. 武汉大学学报 (信息科学版), 2023, 48(4): 506-513.
XU H Q, LI C Q, LIN M J. Should RSEI use PCA or kPCA[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2023, 48(4): 506-513.
[25] 何安良, 周江文. 基于 RSEI 模型的长沙市生态环境质量评价 [J]. 江西科学, 2021, 39(2): 256-262.
HE A L, ZHOU J W. Evaluation of ecological environment quality in Changsha City based on RSEI model[J]. Jiangxi Science, 2021, 39(2): 256-262.
[26] XU H. A new index for delineating built-up land features in satellite imagery[J]. International Journal of Remote Sensing, 2008, 29(14): 4269-4276.
[27] 宋挺, 段峥, 刘军志, 等. Landsat 8 数据地表温度反演算法对比 [J]. 遥感学报, 2015, 19(3): 451-464.
SONG T, DUAN Z, LIU J Z, et al. Comparison of four algorithms to retrieve land surface temperature using Landsat 8 satellite[J]. Journal of Remote Sensing, 2015, 19(3): 451-464.
[28] 覃志豪, ZHANG M H, KARNIELI A, 等. 用陆地卫星 TM6 数据演算地表温度的单窗算法 [J]. 地理学报, 2001, 56(4): 456-466.
QIN Z H, ZHANG M H, KARNIELI A, et al. Mono-window algorithm for retrieving land surface temperature from Landsat TM6 data[J]. Acta Geographica Sinica, 2001, 56(4): 456-466.
[29] 丁凤, 徐涵秋. 基于 Landsat TM 的 3 种地表温度反演算法比较分析 [J]. 福建师范大学学报 (自然科学版), 2008, 24(1): 91-96.
DING F, XU H Q. Comparison of three algorithms for retrieving land surface temperature from Landsat TM thermal infrared band[J]. Journal of Fujian Normal University (Natural Science Edition), 2008, 24(1): 91-96.
[30] 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 J F, XU C D. Geodetector: principle and prospective[J]. Acta Geographica Sinica, 2017, 72(1): 116-134.
[31] 云南省气象局. 云南气候公报 (2003—2006 年)[R]. 昆明: 云南省气象局, 2007.
[32] 张虎才, 常凤琴, 陈光杰, 等. 抚仙湖近现代沉积速率变化及其对流域人类活动的响应 [J]. 第四纪研究, 2010, 30(3): 535-544.
ZHANG H C, CHANG F Q, CHEN G J, et al. Sedimentation rates of Fuxian Lake in modern times and their response to human activities in the watershed[J]. Quaternary Sciences, 2010, 30(3): 535-544.
[33] ZHANG Y, LI X, WANG Z, et al. Comparative study of ecological indices for alpine lake basins on Qinghai-Tibet Plateau[J]. Ecological Indicators, 2020, 112: 106131.
[34] 抚仙湖管理局. 2006 年抚仙湖农业面源污染年度报告 [R]. 澄江: 抚仙湖管理局, 2007.