Geographical Science Research 地理科学研究, 2026, 15(5), 983-990
Published Online October 2026 in Hans. https://www.hanspub.org/journal/gser
https://doi.org/10.12677/gser.2026.155089

Hans汉斯

集成多源遥感数据与机器学习的三峡库区生态环境质量评估

梁友嘉[1,2*]，孙　佳[2]，刘丽珺[3]

[1]武汉理工大学资源与环境工程学院，湖北　武汉
[2]卫星遥感数字化应用创新重点实验室，重庆
[3]武汉商学院人工智能与大数据学院，湖北　武汉

收稿日期：2026年8月24日；录用日期：2026年10月19日；发布日期：2026年10月29日

摘　要

三峡库区是长江上游重要生态屏障，库区生态环境质量变化对区域可持续发展具有重要影响。利用2000~2020年多源遥感数据、Google Earth Engine平台与机器学习模型，对库区生态环境质量进行综合评估。构建的随机森林模型预测精度良好($R^2 = 0.89$)；库区生态环境质量存在先降后升趋势，空间差异明显；生物丰富度和土壤湿度改善明显，降水量与工业产值是驱动生态环境质量变化的核心驱动因子；尽管当下生态保护区占比高(64.50%)，但部分区域未来存在生态环境质量退化风险。建议关注生态质量持续退化的库区西南部和长江沿岸城市区域，权衡库区生态保护修复与可持续发展关系。

关键词

三峡库区，机器学习，遥感生态指数，生态环境质量，时空演变

Integrating Multi-Source Remote Sensing Data and Machine Learning for Assessment of Eco-Environmental Quality in the Three Gorges Reservoir Area

Youjia Liang[1,2*], Jia Sun[2], Lijun Liu[3]

[1]School of Resources and Environmental Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan Hubei
[2]Key Laboratory of Remote Sensing Application and Innovation, Chongqing
[3]School of Artificial Intelligence and Big Data, Wuhan Business University, Wuhan Hubei

[*]通讯作者。

文章引用: 梁友嘉, 孙佳, 刘丽珺. 集成多源遥感数据与机器学习的三峡库区生态环境质量评估[J]. 地理科学研究, 2026, 15(5): 983-990. DOI: 10.12677/gser.2026.155089

Received: August 24, 2026; accepted: October 19, 2026; published: October 29, 2026

Abstract

The Three Gorges Reservoir Area is an important ecological barrier in the upper reaches of the Yangtze River, and changes in its eco-environmental quality have a significant impact on regional sustainable development. This study used multi-source remote sensing data from 2000 to 2020, the Google Earth Engine platform, and machine learning models to comprehensively assess the eco-environmental quality of the reservoir area. The constructed random forest model achieved good prediction accuracy (R^2 = 0.89). The eco-environmental quality of the reservoir area showed a trend of first decreasing and then increasing, with marked spatial differences. Biological richness and soil moisture improved significantly. Precipitation and industrial output were the core drivers of changes in eco-environmental quality. Although the proportion of ecological protection areas is currently high (64.50%), some areas face the risk of future degradation in eco-environmental quality. It is recommended to focus on the southwestern part of the reservoir area and urban areas along the Yangtze River, where ecological quality continues to degrade, and to balance the relationship between ecological protection and restoration and sustainable development in the reservoir area.

Keywords

Three Gorges Reservoir Area, Machine Learning, Remote Sensing Ecological Index, Ecological Environment Quality, Spatiotemporal Change

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.
This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).
http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/
Open Access

1. 引言

三峡库区位于大巴山、川东及川鄂湘黔隆起褶皱带三大构造单元的交会地带，地形地貌复杂，生态环境敏感[1]，其生态安全不容忽视。受气候变化和人类活动影响，库区面临植被退化、水土流失等生态环境问题挑战[2]；叠加大规模移民安置和生态补偿[3]、城镇化和生态保护等政策[4]，生态环境质量变化明显。传统生态环境质量评估方法往往依赖单一指标，难以全面反映库区生态环境的复杂性和动态性[5]。发展综合评估方法对于深入理解库区生态环境演变规律、指导后续生态保护实践具有重要意义。

随着遥感技术快速发展，三峡库区生态环境质量评估从单一指标向基于多源遥感数据的综合评估方法演进，如生态环境指数(EI)和遥感生态指数(RSEI) [6]。RSEI 作为集成绿度、湿度、干度和热度四大生态维度的综合指标，能全面地评价生态环境质量变化；与 Google Earth Engine (GEE)平台的云端计算能力结合，为基于多源遥感数据协同处理与 RSEI 高效分析提供了技术支持。例如，结合 RSEI 指数与 GEE 分析三峡库区重庆段生态环境质量[7]-[9]。生态功能评估模型也被广泛应用于库区生境质量评估，如综合水源涵养评估模型与 RSEI 指数[10]，并引入耦合协调度模型诊断两者的协同关系和分析驱动机制。

近年来，生态系统服务开始用于生态环境质量评估。如，生态服务价值评估表明三峡库区生态价值稳定增加[11]，调节服务价值占比最高，支持服务次之，供给和文化服务所占比例较低[12]。生态系统服务估算结果差异大，建立统一的基础国土数据平台和优化价值评估逻辑面临方法挑战。长江流域生态环

境保护工作持续推进，至 2025 年底，长江干流重庆段水质连续 9 年保持II类，长江干流重庆段监测鱼类较禁捕前增加 52 种，生物多样性稳步恢复，湿地生态系统稳定性和服务功能显著增强。

本研究结合 GEE、随机森林模型与 SHAP 分析方法，在改进 RSEI 指数基础上构建适用于三峡库区的生态环境质量综合评估指标体系，揭示 2000~2020 年生态环境质量变化特征，并预测 2021~2050 年潜在变化趋势，为库区生态保护与规划提供科学依据。

2. 材料与方法

2.1. 研究区概况

三峡库区位于长江上游，总面积约 5.8×10^4 km^2，气候多样且生态环境脆弱。库区包括山地、丘陵和平原等多种地貌类型，以森林、草地、湿地等生态系统为主，广泛分布马尾松、杉木、柏木等[13]，在保持水土、调节气候等方面发挥着重要作用。植被与河流湿地、湖泊湿地等构成了重要野生动物栖息地，发挥净化水质、调节洪水、维持生物多样性等功能。由于地形陡峭、降雨集中，水土流失严重，工业废水、生活污水和农业面源污染对库区水质造成威胁，影响水生生物的生存和人类健康[14]。土地利用导致野生动物栖息地减少，一些珍稀物种面临生存危机。评估库区生态环境的演变趋势和影响因素，对实现生态环境保护以及可持续发展具有决定作用。

2.2. 数据及预处理

本研究从地理空间数据云平台(http://www.gscloud.cn)收集 30 m 分辨率数字高程和 Landsat8 系列卫星影像，对影像进行云掩膜预处理：解析 QA_PIXEL 波段的云与云影标志位第 3、4 位，剔除无效像元，利用多影像均值合成法填补云区空缺，生成无云基底图；对热红外波段 ST_B10 辐射定标，采用 GEE 实现。人类活动指数源于中国 1-km 格网地表人类活动强度数据集(1980~2023, DOI:10.3974/geodb.2026.06.01.V1)；生物丰度指数源于中国 1-km 生物丰度指数数据集(DOI:10.3974/geodp.2017.01.09)；植被覆盖度(FVC)源于 2000~2024 年中国 FVC 数据集(500 m, https://data.ipeh.com.cn)；土壤湿度指数选用 2000~2020 年中国土壤湿度/水分数据集(1 km, https://poles.tpdc.ac.cn)。获取的中国土地利用类型分布数据包括耕地、林地、灌木、草地、水域、荒地和建筑用地(https://zenodo.org/records/12779975)。降水数据来源于 1901~2025 年中国 1 km 分辨率逐月降水量数据集(https://www.geodata.cn)，工业生产总值来源于国家统计局网站(https://www.stats.gov.cn)。

2.3. 生态环境质量评估

基于空间分析与多准则评价方法对 2000~2020 年三峡库区 26 个区县生态环境质量进行区划分析。对 RSEI 扩展，构建了分别揭示库区土壤健康状况、热环境状况、人类干扰程度、生物多样性、土壤水分条件以及植被生长状况的生态环境质量评价体系。地表温度(LST)指数为：LST = DN × 0.00341802 + 149.0 − 273.15；利用坡度分析工具从数字高程中获取坡度图，根据 FVC 评价土壤侵蚀程度(表 1)，对坡度重分类和统计各区县侵蚀土壤面积，计算土壤侵蚀指数 $S = (0.005S_{微} + 0.025S_{轻} + 0.07S_{中} + 0.1S_{强} + 0.3S_{极强} + 0.5S_{剧烈})/S_{区域}$。土壤湿度指数采用库区 2000~2020 年 6 月土壤湿度均值，计算利用 ArcGIS pro 软件完成。结合各县区 6 个指数和熵权法-Topsis 法评估生态环境质量(图 1)。

熵权法分配各指标对应权重，根据指标数据的离散程度和信息熵值确定权重，以确保评价结果的客观性和准确性[15]：对人类活动指数，LST 和土壤侵蚀指数正向化(该指标在数据中的最大值减去原指标值)，计算指标在各县区比重 p_{ij}，即第 i 个对象在第 j 指标的值与其所有对象值之和的比例，计算每个指标信息熵(式 1)，根据信息熵计算冗余度 $d_j = 1 - E_i$，然后得到权重，确保所有权重之和为 1。

Figure 1. Eco-environmental quality assessment model
图 1. 生态环境质量评估模型

Table 1. Classification criteria for soil erosion intensity
表 1. 土壤侵蚀强度评价标准

FVC 指数	坡度					
	≤5˚	>5˚~8˚	>8˚~15˚	>15˚~25˚	>25˚~35˚	>35˚
>75	微度	微度	微度	微度	微度	微度
>60~75	微度	轻度	轻度	轻度	中度	中度
>45~60	微度	轻度	轻度	中度	中度	强度
>30~45	微度	轻度	中度	中度	强度	极强度
≤30	微度	中度	中度	强度	极强度	剧烈

$$E_j = -\frac{1}{\log(m)}\sum p_{ij}\log\left(p_{ij}\right)$$

其中，m 是对象的数量，E_i 表示第 j 个指标信息熵，值越大说明该指标的信息越不确定，相应权重越小；反之权重越大。TOPSIS 法显示了每个对象相对优劣，用于逼近理想解排序[16]：将标准化的数据乘以各个指标权重，得到加权标准化矩阵，确定指标的最大/最小值，计算每个对象与极值的欧几里得距离，根据距离计算综合得分，值越高说明该对象越接近理想解。根据得分排名对三峡库区生态环境质量提出改善建议。

2.4. 机器学习模型构建

选取 RSEI 历史值、降水量、土地利用类型、工业生产总值共四个特征变量，采用方差膨胀因子 VIF 检验排除多重共线性(VIF < 5)。再采用随机森林(RF)模型模拟生态环境质量演变。RF 构建多决策树并综合其预测结果提高模型稳定性和准确性[17]，利用网格搜索法确定最优超参数(最大深度 = 15，树数量 = 200)，采用五折交叉验证评估模型性能，基于 Pycharm 平台构建：对三峡库区 2000~2020 综合得分 Excel 表进行数据清洗，设年份为整数索引；对各区县得分序列进行三次样条插值，补齐 2000~2020 年逐年数据；再将时间序列转为监督学习样本，每组用连续 3 年预测第 4 年；最后进行模型训练与预测，使用 RF 回归器对各区县建模，用历史 80%样本训练和 2018~2020 年数据递归预测未来 30 年(2021~2050)，每次将预测值加入序列后继续预测下一年，并加入小的正态分布噪声模拟波动，避免模型陷入静态预测。并利用 SHAP (SHapley Additive exPlanation)方法量化特征变量在模型中的重要性。

3. 结果

3.1. 历史时期生态环境质量变化

根据评估模型得到各指标权重：FVC 指数(0.2208)、生物丰度指数(0.1973)、LST 指数(0.1810)、土壤湿度指数(0.1702)、人类活动指数(0.1296)和土壤侵蚀指数(0.1011)。利用模型得到 2000~2020 年三峡库区各县区生态环境质量分布变化(图 2)。分值在空间上呈现空间异质性，东部低海拔平原地区、西部丘陵地带生态环境质量相对较好。如石柱土家族自治县，巫溪县，巴东县，兴山县等，这些地区以山区为主，植被覆盖和生态系统相对完整，较少的人类活动保持了良好生态平衡。生态环境质量较差的区域主要分布在西南部和长江沿岸城市化进程较快的地区，如重庆主城区，由于城市化速度快，土地开发和人类活动频繁，导致生态环境受破坏，面临着污染、绿地胁迫和生物多样性下降等问题。

2000~2020 年生态环境质量整体经历了先降后升趋势。生物丰度指数(0.219 → 0.226)和土壤湿度指数(42.007 → 68.433)增加，LST 持续降低。人类活动指数先降(56.376 → 53.693)后升，FVC 在 2010 年提升，2015 年之后下降，生态恢复措施的效果不稳定，土壤侵蚀指数也存在类似趋势。指数波动表明生态环境保护与开发之间仍需长期权衡，反映了库区生态环境质量的动态性和复杂性。

SHAP 特征重要性排序依次为降水量(50.65%)、工业生产总值(30.38%)、年份(12.27%)、土地利用类型(6.70%)。降水是影响植被和土壤湿度的核心要素，其波动直接关联生态系统的健康与稳定；工业生产总值反映了人类活动的强度与经济发展水平，对生态环境质量产生影响；年份捕捉了气候变化、政策调整等时间相关因素对生态质量的影响；土地利用变化会影响生态系统结构–功能，建设用地扩张 1769.13 km^2，形成沿长江干流蔓延的城镇化廊道，生态用地净减少 2.36%，林地转为建设用地可能导致生物多样性减少和土壤侵蚀加剧。

3.2. 未来时期生态环境质量变化

RF 测试集 R^2 达到 0.89，模型预测显示，未来 54.3%区域生态质量将持续退化。中西部丘陵地带地形

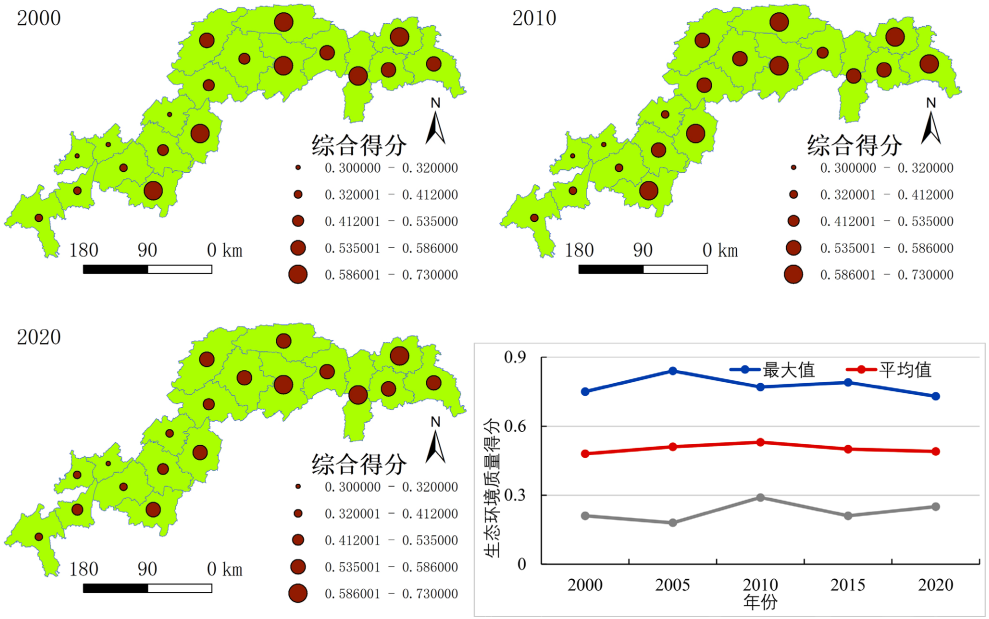


Figure 2. Spatial distribution and temporal dynamics of eco-environmental quality in the Three Gorges Reservoir Region, 2000~2020
图 2. 三峡库区 2000~2020 年生态环境质量分布和时序变化

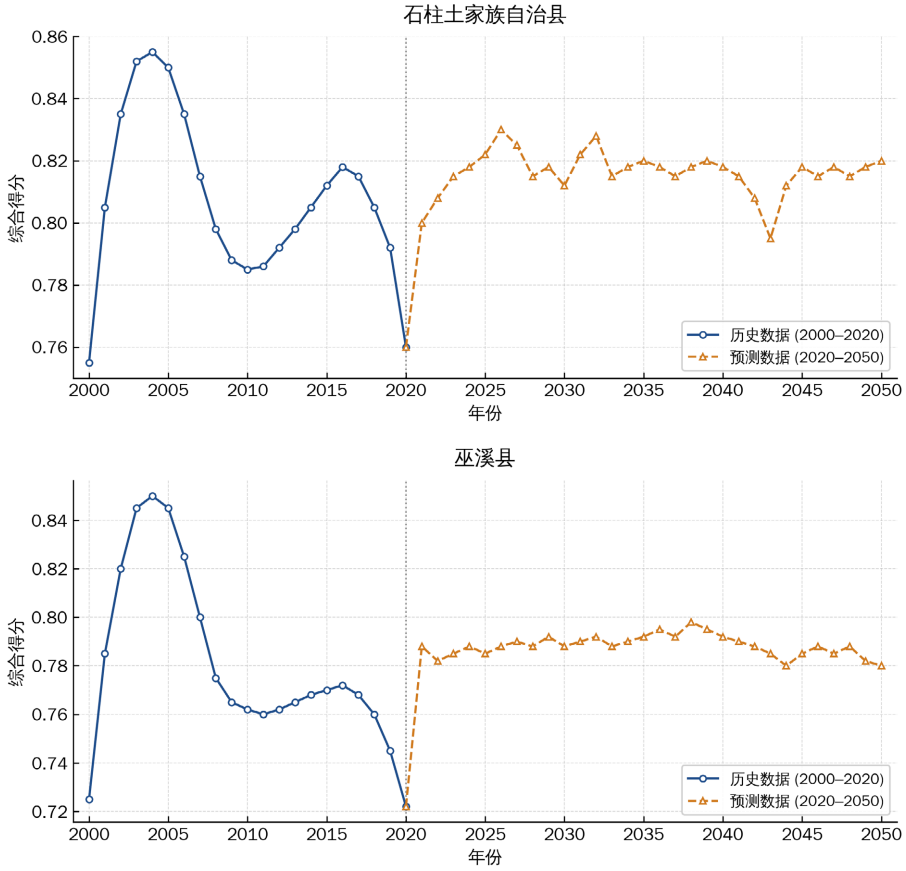
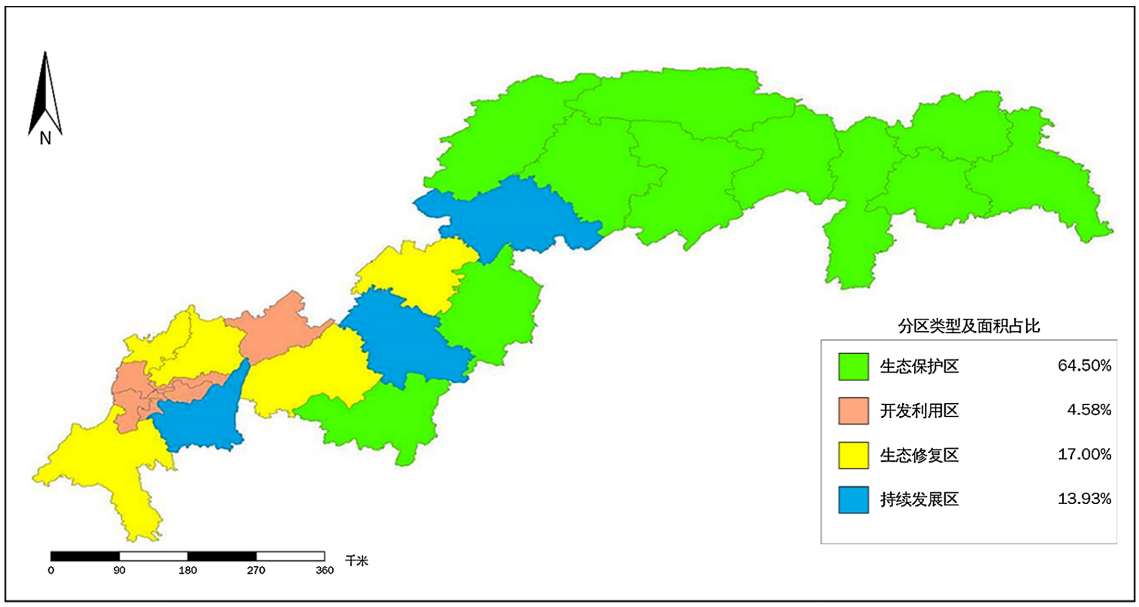


Figure 3. Projected composite scores for typical districts and counties in the Three Gorges Reservoir Region
图 3. 三峡库区典型区县综合得分预测

复杂、人类活动干扰持续增加，需加强生态保护与修复工作。如石柱县(0.76 → 0.82)和巫溪县(0.72 → 0.78)的生态环境质量分值各增加 7.9%和 8.3%；武隆区和万州区的分值骤降至 0.42 以下，这可能与库区水调节导致的地表覆盖变化有关(图 3)。未来，降水量是首要驱动因子，凸显了水文过程在生态系统中的重要性，需针对西部丘陵地带等脆弱区域实施重点保护，同时关注生态改善区域的经验推广。

3.3. 库区生态管理建议

根据 2020 年生态环境质量综合评分，利用聚类分析将 26 个区县分为开发利用区(4.58%)、生态修复区(17%)、持续发展区(13.93%)和生态保护区(64.50%)，生态环境质量评分逐级增加(图 4)。重庆市主城区为开发利用区，越靠近主城区，人口活动密度越大，区域生态环境质量越差，库区生态保护区面积占比大，整体生态环境质量良好。建议对石柱土家族自治县、巫溪县等生态保护区，禁开发、限人类活动以维护这些区域的生态完整性和稳定性；在保护区域之间建立生态廊道，增强生态系统的稳定性和韧性；对生态环境脆弱且人类活动干扰严重的地区实施生态移民政策，减轻生态环境压力。在开发利用区和生态修复区，通过植树造林、荒地绿化增加植被覆盖度，改善生态环境；恢复湿地生态系统的功能和生物多样性，为水生生物提供栖息地；落实水土保持措施，提升土地的生态功能和可持续利用能力。城市化进程中推广绿色基础设施建设，如绿色屋顶、雨水收集系统、城市森林等，改善城市环境质量。



注：该图基于自然资源部标准底图服务网站下载的审图号为 GS(2016)2887 号的标准地图制作，底图无修改。

Figure 4. Ecological function zoning of the Three Gorges Reservoir Region
图 4. 三峡库生态功能分区

4. 结论

本研究对三峡库区生态环境质量动态进行了综合评估与预测。随机森林模型具有良好预测精度；降水量、工业产值是核心驱动因子，未来部分区域生态质量将持续退化，预测结果为西部丘陵地带生态修复和东部平原区可持续发展提供了差异化决策依据，有助于制定针对性的生态保护措施和资源分配方案。未来研究重点包括：(1) 加强地面监测数据、社会经济数据与遥感数据的融合，基于自然－人类活动耦合机制构建更完善的库区生态环境质量动态评估体系；(2) 加强库区生态系统服务功能的权衡－协同研究，

为生态保护与民生改善的共赢目标提供理论支持；(3) 建立常态化监测机制，结合机器学习和人工智能技术提升生态环境质量预测预警能力，完善生态恢复潜力评估方法，为生态修复措施和生态管理分区提供方法依据。本研究建议在人类干扰高强度区域严格控制开发强度，在中高海拔生态敏感区加强植被恢复与水源涵养能力提升，以促进库区生态系统的整体协调与可持续发展。

基金项目

卫星遥感数字化应用创新重点实验室开放课题(LRSAI-2025012)资助。

参考文献

[1] 周晓艳, 何依依, 黄欣, 等. 三峡库区生境质量的地形梯度效应及对土地利用变化的响应[J]. 农业工程学报, 2021, 37(11): 259-267.

[2] Hansen, M.C., Potapov, P.V., Moore, R., Hancher, M., Turubanova, S.A., Tyukavina, A., *et al*. (2013) High-Resolution Global Maps of 21st-Century Forest Cover Change. *Science*, **342**, 850-853. https://doi.org/10.1126/science.1244693

[3] 谈琰, 祁向坤, 黄浩城, 等. 水库移民后资源承载力与生态治理成效评估——以三峡库首秭归县为例[J]. 农业现代化研究, 2025, 46(6): 1231-1241.

[4] He, Y., Liang, Y., Shen, C., Bu, X. and Wang, J. (2025) Spatial and Temporal Trade-Offs between Carbon Storage and Crop Production in Chinese Terrestrial Ecosystems, 1995-2100. *Journal for Nature Conservation*, **87**, Article 126989. https://doi.org/10.1016/j.jnc.2025.126989

[5] 李辉, 贾玉婷, 周启刚, 等. 三峡库区生态安全评价研究进展与展望[J]. 三峡生态环境监测, 2025, 10(3): 22-36.

[6] 张鹏, 齐实, 赖金林, 等. 基于 RSEI 的金沙江流域生态环境质量时空变化及驱动因素分析[J]. 环境科学, 2026, 47(1): 408-419.

[7] Gorelick, N., Hancher, M., Dixon, M., Ilyushchenko, S., Thau, D. and Moore, R. (2017) Google Earth Engine: Planetary-Scale Geospatial Analysis for Everyone. *Remote Sensing of Environment*, **202**, 18-27. https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.06.031

[8] 向万淋, 姬翠翠, 周伟. 2000-2020 年三峡库区生态环境质量综合评估[J]. 环境污染与防治, 2024, 46(1): 99-103.

[9] 焦欢, 何宗, 郭强, 等. 基于遥感生态指数的三峡库区(重庆段)生态环境质量时空演变及驱动机制研究[J]. 三峡生态环境监测, 2025, 10(3): 55-66.

[10] 张娜, 刘茜, 尹锴, 等. 基于 RSEI 的三峡库区乡村聚落生态环境质量动态监测[J]. 生态科学, 2024, 43(5): 7-14.

[11] 王清荣, 李阳兵, 赵雯欣, 等. 近 30 年来三峡库区土地利用与生态环境效应研究热点演变及展望——基于 Citespace 的文献可视化分析[J]. 生态学报, 2024, 44(5): 2159-2172.

[12] 黄进, 郭晓燚, 阚如良, 等. 基于感知异质性的三峡库区生态系统文化服务价值评估与空间分异[J]. 生态学报, 2026, 46(12): 6352-6368.

[13] Chen, Z. and Ming, T. (2025) Spatio-Temporal Evolution of Ecological Environment Quality in the Three Gorges Reservoir Area: From the Perspective of Synergistic Effects of Natural and Human Activities. *Environmental Monitoring and Assessment*, **197**, Article No. 1144. https://doi.org/10.1007/s10661-025-14595-1

[14] Guo, X.J., Liu, J., Liu, D., *et al*. (2021) Density Currents Reduce Nitrous Oxide Emissions in a Tributary Bay of Three Gorges Reservoir. *Water Research*, **190**, Article 116750. https://doi.org/10.1016/j.watres.2020.116750

[15] 冯冬冬, 吴亮. 基于改进熵权的 TOPSIS 模型在中国贵州省水质评价中的应用[J]. 武汉大学学报(自然科学英文版), 2025, 30(3): 302-312.

[16] Li, P.Y., Qian, H., Wu, J.H., *et al*. (2013) Sensitivity Analysis of TOPSIS Method in Water Quality Assessment: I. Sensitivity to the Parameter Weights. *Environmental Monitoring and Assessment*, **185**, 2453-2461. https://doi.org/10.1007/s10661-012-2723-9

[17] Lao, Y., He, X., Liang, Y., Tian, J., Huang, J. and Yin, Z. (2024) Accurately Uncovering the Regional Ecological Restoration Priorities: A Multidimensional Approach to Eco-Dynamic Sustainable Management. *Environmental and Sustainability Indicators*, **24**, Article 100497. https://doi.org/10.1016/j.indic.2024.100497