

张原, 王率, 雷俊杰, 等. 高海拔水电开发对生态环境质量的影响及其驱动因子研究[J]. 水利水电技术(中英文), 2025, 56(8): 175-191. DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2025.08.013

ZHANG Yuan, WANG Shuai, LEI Junjie, et al. Study on effect of high-altitude hydropower development on ecological environment quality and its driving forces [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2025, 56(8): 175-191. DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2025.08.013

高海拔水电开发对生态环境质量的影响及其驱动因子研究

张原¹, 王率², 雷俊杰¹, 付松宇¹, 徐定辉³, 刘牵³, 裴向军^{1,4},
李凇¹, 陈果^{1,4}, 唐晓鹿^{1,4}

(1. 成都理工大学生态环境学院, 四川成都 610059; 2. 成都理工大学地理与规划学院, 四川成都 610059; 3. 华能西藏雅鲁藏布江水电开发投资有限公司, 西藏拉萨 850000; 4. 天府永兴实验室, 四川成都 610213)

摘要:【目的】准确评估水电开发对高海拔生态敏感区的生态环境影响, 对于维护该地区的生态安全屏障具有重要意义。基于此, 提出一种改进型遥感生态指数(*IRSEI*)模型研究青藏高原某水电建设对区域生态环境质量的影响。【方法】以青藏高原某水电站为研究对象, 鉴于高海拔地区土壤脆弱、地形复杂的生态环境特性, 构建归一化差值山地植被指数(*NDMVI*), 同时引入土壤侵蚀模数作为土壤侵蚀指标, 提出一种针对高海拔水电开发区的改进型遥感生态指数(*IRSEI*), 采用 Theil-Sen 斜率估计、Mann-Kendall 趋势分析、*Hurst* 指数等方法, 评估 *IRSEI* 的时空动态及其驱动因素。【结果】*IRSEI* 使用 *NDMVI* 替代 *NDVI* 并引入土壤侵蚀指标, 更适用于地形复杂地区的生态质量监测: 水电开发对流域内景观结构造成严重影响, 特别是草地和林地, 导致其面积降低; *IRSEI* 均值由水电站建设前的 0.53 下降为建设后的 0.42, 建设第二年生态质量退化最显著, 在运行期回升至 0.57; 流域林地和草地 *IRSEI* 等级主要为优和良, 建设用地和耕地等区域主要为差和较差; 未来 *IRSEI* 发展趋势趋于稳定, 维持不变的区域面积占比 60% 以上; 年均降水量、年均温度、*NDVI* 和土地利用类型变化是研究区 *IRSEI* 空间分异的主控因子。【结论】工程建设期, 水电开发对研究区景观格局和 *IRSEI* 造成严重影响。水电站运行期间, 研究区生态环境整体呈现良性变化, 生态恶化区域主要集中在城镇区域。未来应加强该流域的生态系统治理力度, 并综合人类活动和气候变化开展生态保护与修复工作。研究成果可为因地制宜落实流域生态保护与高质量发展提供理论依据和数据支持。

关键词: 水电开发; 青藏高原; 谷歌地球引擎(GEE); 改进遥感生态指数; 地理探测器; *Hurst* 指数; 影响因素

DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2025.08.013

中图分类号: X87

文献标志码: A

开放科学(资源服务)标志码(OSID):

文章编号: 1000-0860(2025)08-0175-17



收稿日期: 2024-10-24; 修回日期: 2025-01-20; 录用日期: 2025-01-21; 网络出版日期: 2025-03-06

基金项目: 青藏高原华能集团在建工程项目(JC2022/D01); 西藏基地与人才项目(XZ202401JD0003); 国家自然科学基金(32271856)

作者简介: 张原(1999—), 男, 硕士研究生, 主要从事生态遥感应用研究。E-mail: 18880972717@163.com

通信作者: 唐晓鹿(1986—), 男, 研究员, 博士研究生导师, 博士, 主要从事生态地质环境与碳循环研究。E-mail: lxt2010@163.com

©Editorial Department of Water Resources and Hydropower Engineering. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license.

Study on effect of high-altitude hydropower development on ecological environment quality and its driving forces

ZHANG Yuan¹, WANG Shuai², LEI Junjie¹, FU Songyu¹, XU Dinghui³, LIU Qian³, PEI Xiangjun^{1,4}, LI Lin¹, CHEN Guo^{1,4}, TANG Xiaolu^{1,4}

(1. College of Ecology and Environment, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, Sichuan, China; 2. College of Geography and Planning, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, Sichuan, China; 3. Huaneng Tibet Yarlung Zangbo River Hydropower Development Investment Co., Ltd., Lhasa 850000, Xizang, China; 4. Tianfu Yongxing Laboratory, Chengdu 610213, Sichuan, China)

Abstract: [Objective] Accurately assessing the ecological and environmental effects of hydropower development in high-altitude, ecologically sensitive regions is essential for maintaining the ecological security barriers of these areas. Therefore, an improved Remote Sensing Ecological Index (*IRSEI*) model is proposed to study the effect of hydropower construction on regional ecological environment quality in a specific area of the Qinghai-Xizang Plateau. [Methods] Taking a hydropower station in the Qinghai-Xizang Plateau as the study object, and considering the fragile soil and complex topography of high-altitude regions, a normalized difference mountain vegetation index (*NDMVI*) was established. At the same time, soil erosion modulus was introduced as a soil erosion indicator. An improved remote sensing ecological index (*IRSEI*) for high-altitude hydropower development areas was proposed. The spatiotemporal dynamics of the *IRSEI* and its driving factors were analyzed using method such as Theil-Sen slope estimation, Mann-Kendall trend analysis, and *Hurst* exponent. [Results] By replacing *NDVI* with *NDMVI* and incorporating the soil erosion indicator, *IRSEI* was more suitable for ecological quality monitoring in areas with complex topography. The results showed that hydropower development significantly affected the landscape structure of the basin, particularly grasslands and forests, leading to a reduction in their area. The average *IRSEI* value decreased from 0.53 before hydropower construction to 0.42 after construction, with the most significant ecological degradation occurring in the second year of construction. During the operational period, the value increased to 0.57. The *IRSEI* grades of forests and grasslands in the basin were mainly excellent and good, while construction and cultivated land areas were mainly poor and very poor. The future development trend of *IRSEI* was expected to stabilize, with more than 60% of the basin area remaining unchanged. The main controlling factors for the spatial differentiation of *IRSEI* in the study area were annual precipitation, average annual temperature, *NDVI*, and land use changes. [Conclusion] During the construction phase, hydropower development significantly affects the landscape pattern and *IRSEI* of the study area. During the operation of the hydropower station, the ecological environment of the study area shows an overall positive change, with ecological deterioration mainly concentrated in urban areas. In the future, it is essential to enhance ecological restoration in this basin, taking into account human activities and climate change, and ecological protection and restoration efforts should be carried out. The research findings provide theoretical and data support for implementing targeted ecological protection and promoting high-quality development in the basin.

Keywords: hydroelectric development; Qinghai-Xizang Plateau; Google Earth Engine (GEE); improved remote sensing ecological index; geodetector; *Hurst* exponent; influencing factors

0 引言

随着世界经济的快速增长和城市化步伐的加快,对能源和资源的需求不断增长,水能作为一种清洁的可再生能源日益受到重视^[1]。青藏高原平均海拔4 000 m,是除极地之外冰川最为丰富且集中的地区,被誉为“亚洲水塔”。丰富的水资源赋予该地区巨大的水力发电潜力,可开发水电资源约为110 GW,是我国主要的水电开发基地之一^[2]。由于青藏高原特殊的地理环境和气候条件,使其具有明显的环境脆弱性和敏感性。不合理的人类活动易造成生态系统的破

坏,并导致一系列生态环境问题^[3]。由于水电工程规模浩大,以及高寒环境的脆弱性和敏感性,施工过程中路基修建、取弃土场、施工便道等临时工程用地不可避免地对本原生植被和生境造成破坏。因此,高海拔地区水电建设和运营带来的生态效应需要进行合理评估。

Landsat 影像凭借其长时间序列、广泛覆盖和高分辨率特点,广泛应用于土地利用变化、生态监测等领域。国内外学者针对遥感指数监测和评价环境质量的可行性展开了大量研究,如归一化植被指数(Normalized Difference Vegetation Index, *NDVI*)被广泛

用于监测长时间序列区域的生态状况;温度植被干旱指数(Temperature Vegetation Dryness Index, *TVDI*)和地表温度(Land Surface Temperature, *LST*)被用于评估区域环境热条件;运用标准化降水蒸散发指数(Standardized Precipitation Evapotranspiration Index, *SPEI*)进行干旱度评估等。然而,单一指标难以全面反映复杂生态系统特性,为此许多研究整合了各种指标的概念模型,如社会统计、遥感数据和气象数据^[4],以全面评估生态环境质量。其中徐涵秋^[5]提出的遥感生态指数(Remote Sensing Ecological Index, *RSEI*)综合了绿度、湿度、干度和热度这4个指标,相比单一指标分析能更加全面、准确和客观的表征生态质量状态,目前已在城市^[6]、流域^[7]和区域^[8]等不同空间尺度上的生态环境质量评价中得到应用。

青藏高原作为“地球第三极”,在全球生态系统中占据核心地位^[9]。其广袤的草地、荒漠和湿地不仅为多样化的区域生物提供了重要生境,还在水土保持、生物多样性保护、防风固沙、碳汇功能及气候调节等关键生态系统服务中发挥着重要作用。作为“亚洲水塔”,青藏高原的冰川和多年冻土储存了大量淡水资源,为长江、黄河、雅鲁藏布江等流域提供稳定的水源供给,并支撑下游地区的经济发展。然而,高寒环境使这些生态系统极其脆弱,自我调节和修复能力较弱,对外界干扰和气候变化敏感^[10]。因此,保护青藏高原的生态完整性不仅关乎区域环境的稳定性,更是全球生态平衡和可持续发展的关键所在。

*RSEI*在青藏高原的应用主要集中于生态环境质量的动态监测^[9]、大型工程建设的影响评估^[10]等方面。尽管*RSEI*已广泛用于青藏高原的生态环境监测,但一些学者发现传统的*RSEI*并未充分考虑该地区的特殊环境条件,导致常规*RSEI*在该地区的适用性较差。高海拔水电开发区通常位于山地河谷地带,地形起伏大、坡度陡峭,且具有显著的垂直高差和复杂的地貌特征。这些地形条件使得遥感影像中绿度指标的提取容易受到地形效应的影响,特别是在高山和峡谷区域,陡峭的坡面和岩石裸露地带导致植被覆盖不均匀,传统绿度指数的提取精度较低。归一化差值山地植被指数(Normalized Difference Mountain Vegetation Index, *NDMVI*)引入了红光波段和近红外波段的反射率最小值,能更好地适应陡峭地形和复杂植被分布的特点,减少地形影响,提高植被绿度提取的准确性^[11]。青藏高原地区土壤稀薄且易受侵蚀,水电开发加剧了土壤侵蚀,导致土壤肥力下降并加剧生态退化。该区域独特的高海拔气候和复杂地形使得土壤形

成缓慢,且开发活动对土壤结构的扰动加剧了水土流失,削弱了生态系统的稳定性。尽管遥感生态指数(*RSEI*)已广泛用于生态环境评估,但其未充分考虑土壤侵蚀的影响,限制了其在高海拔地区的应用。因此,土壤侵蚀模数(Soil Erosion Modulus, *SEM*)应作为关键指标纳入*RSEI*框架。土壤侵蚀模数(*SEM*)基于修订通用土壤损失公式(RUSLE)计算而来,能够反映研究区的土壤侵蚀程度。

目前,国内外针对高海拔地区水电开发的研究主要集中于水电开发后对景观格局变化的分析、单一植被指数的影响研究,以及环境地质问题的评估^[12-15]。然而,关于水电开发对区域生态环境质量的综合影响仍然缺乏,在多生态因子融合分析与长期动态变化评估方面尚有空白。本文以青藏高原某水电站为研究对象,基于谷歌地球引擎(Google Earth Engine, *GEE*),对土地利用类型进行监督分类,分析流域施工前(2008—2015年)、施工期(2015—2020年)和施工后(2020—2022年)不同土地利用类型的时空变化和转移特征;结合Landsat数据,在*RSEI*的基础上引入归一化差值山地植被指数(*NDMVI*)和土壤侵蚀模数(*SEM*),运用主成分分析构建改进型遥感生态指数(Improved Remote Sensing Ecological Index, *IRSEI*),并分析流域2008—2022年生态环境质量时空变化格局;基于*IRSEI*动态变化特征,结合Hurst指数预测*IRSEI*未来趋势;通过地理探测器探讨流域生态环境质量变化的驱动因素。研究成果将为阐明高海拔水电开发对区域生态环境质量的影响及促进高海拔水电开发区域生态环境保护与修复具有重要的意义。

1 材料与方法

1.1 研究区概述

研究区位于青藏高原东南缘(见图1),属高原温带半干旱季风型气候区,光照充足,辐射强,日温差大,雨季集中。年均气温8.9℃,年均降水492.7mm,降水集中在5月,占全年降水量的93%。研究区林木资源丰富,森林覆盖占县域的30.35%,林木储量为133.8万m³。水电站开始建设时间为2015年8月,于2020年11月竣工。

1.2 数据来源

1.2.1 遥感数据

Landsat数据源于Google Earth Engine(*GEE*)平台上提供的陆地卫星地表反射率产品,其中2008—2012年为Landsat 5遥感影像,2013—2022为Landsat 8遥感影像,空间分辨率为30m,时间分辨率为

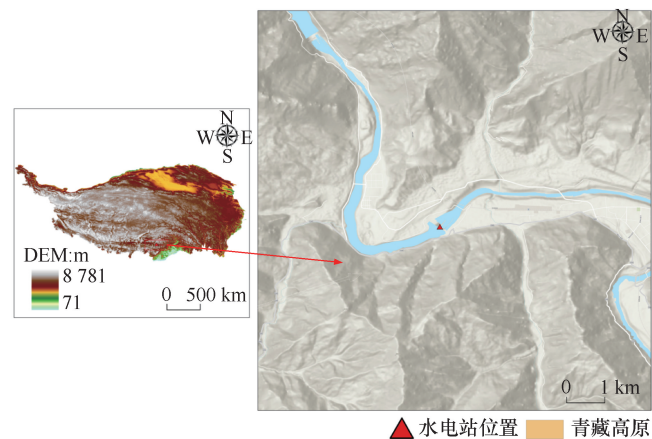


图1 研究区示意

Fig. 1 Schematic diagram of study area

16 d。基于 Landsat 多时相影像,利用 CFMASK 算法生成的质量评估波段 QA 进行批量去云处理,并进行水体掩膜,仅保留影像中有效的地表反射信息。选择每年 6—9 月(植被最优生长季)的多时相影像,通过中值合成方法生成无云影像,作为后续生态指数计算的基础光谱数据。生态指数的计算基于标准化公式,包括归一化差值山地植被指数(NDMVI)、湿度指数(WET)、归一化差异不透水表面指数(Normalized Difference Built-Up and Soil Index, NDBSI)和地表温度(Land Surface Temperature, LST),相关公式如表 1 所列。土壤侵蚀指标来源于阎继宁提供的《1990—2022 年中国大陆 30 m 年土壤水土流失数据集》(来源网址: <https://www.scidb.cn/en/detail/dataSetId=9d14070a664f4d368ca107c5e9d6b746>),分辨率为 30 m。

1.2.2 地理探测器影响因子

年均气温来自美国国家海洋和大气管理局,年均降水来自 CHIRPS 数据集,数字高程模型数据来源于地理空间数据云,坡度、坡向由 DEM 在 ArcGIS 中计算得到,归一化植被指数(NDVI)、植被覆盖度(Fractional Vegetation Cover, FVC)数据由 GEE 提取得到,人口密度数据来源于美国能源部橡树岭国家实验室,离水电站的距离由 ArcGIS 软件中的欧氏距离计算得到。为确保数据的空间分辨率一致,减小尺度效应带来的影响,统一重采样为 30 m。

1.3 土地利用类型分类

根据《土地利用现状分类》(GB/T 21010—2017),基于 GEE 平台,结合随机森林模型(Random Forest, RF),将研究区土地利用类型分为 6 类:草地、林地、耕地、水域、建设用地和未利用地。基于 Google

Earth 高清影像以及高分辨率遥感影像数据,进行目视解译获取样本点,手动对感兴趣区域进行采样并选取训练样本,选取时尽量对 6 种地类进行覆盖,遵循随机、均匀的原则,每种样本选取数量为 100~400 个。在得到每一期土地类型的分类结果后,使用验证样本,采取基于混淆矩阵的精度评价方法对分类的结果进行精度评价。

1.4 研究方法

1.4.1 集水区划定

本研究基于 SWAT (Soil and Water Assessment Tool) 水文循环模型,进行河网提取和子流域划分,利用模块内 Burn-in 算法引入实际矢量河网图层,在此基础上结合 D8 算法对结果进行进一步调整和验证,最后确定集水区的范围^[16]。

1.4.2 IRSEI 指数构建

借助 GEE 平台,基于 Landsat 数据计算得到湿度、绿度、热度、干度四项指标,数据集获取的土壤侵蚀模数导入 GEE,通过主成分分析法完成 IRSEI 指数构建。由于所得到的各指标在范围和大小上不完全统一,直接用于计算主成分分析会导致权重失衡,因此需要进行归一化处理,将各项指标值的范围统一在 0~1 之间,归一化的公式为

$$I = \frac{(I_i - I_{\max})}{(I_{\max} - I_{\min})} \quad (1)$$

式中, I 为像元归一化之后的值; I_i 为像元 i 的各指标的值; I_{\min} 为各指标的最小值; I_{\max} 为各指标的最大值。

通过对湿度、绿度、热度、干度、土壤侵蚀模数五个生态环境指标的归一化处理,进行主成分分析(PCA),提取第一主成分(PC1)。PC1 是解释四个指标方差的主要成分,包含了各个生态指数关联性最高的信息量^[17]。为了确保较高的 IRSEI 值代表较好的生态环境条件,采用 1 减去贡献率较高的主成分 PC1 的方式获得初始的遥感生态指数 $IRSEI_0$ ^[18],具体计算公式为

$$IRSEI_0 = 1 - \{PC1[f(NDMVI, WET, LST, NDBSI, SEM)]\} \quad (2)$$

同样地,为了指标的对比更加方便,对 $IRSEI_0$ 进行归一化,为

$$IRSEI = \frac{(IRSEI_0 - IRSEI_{0\min})}{(IRSEI_{0\max} - IRSEI_{0\min})} \quad (3)$$

式中, $IRSEI_{0\min}$ 为归一化前 $IRSEI_0$ 的最小值; $IRSEI_{0\max}$ 为归一化前 $IRSEI_0$ 的最大值。归一化之后 IRSEI 值的范围在 0~1 之间, IRSEI 的值越接近 1,

表1 改进遥感生态指数计算公式

Table 1 Calculation formulas for Improved Remote Sensing Ecological Index

指标	计算公式	说明
绿度 (NDMVI)	$NDMVI = \frac{NIR - RED + RED_{Min} - NIR_{Min}}{NIR + RED - RED_{Min} - NIR_{Min}}$	式中, NIR 、 RED 、 NIR_{Min} 、 RED_{Min} 分别是 TM 和 OLI 影像近红外、红以及对应的最小值
湿度 (WET)	TM 数据: $WET = 0.2BLUE + 0.3GREEN + 0.4RED + 0.5NIR - 0.3SWIR1 - 0.4SWIR2$ OLI 数据: $WET = 0.1511BLUE + 0.1973GREEN + 0.3283RED + 0.3407NIR - 0.7117SWIR1 - 0.4559SWIR2$	式中, $BLUE$ 、 $GREEN$ 、 RED 、 NIR 、 $SWIR1$ 、 $SWIR2$ 分别是 TM 和 OLI 影像蓝、绿、红、近红外、中波红外 1、中波红外 2 波段的反射率 ^[5]
干度 (NDBSI)	$IBI = \frac{\frac{2SWIR1}{SWIR1 + NIR} - \left(\frac{NIR}{NIR + RED} + \frac{GREEN}{GREEN + SWIR1} \right)}{\frac{2SWIR1}{SWIR1 + NIR} + \left(\frac{NIR}{NIR + RED} + \frac{GREEN}{GREEN + SWIR1} \right)}$ $SI = \frac{(SWIR1 + RED) - (NIR + BLUE)}{(SWIR1 + RED) + (NIR + BLUE)}$ $NDBSI = \frac{IBI + SI}{2}$	式中, IBI 表示建筑物指数, SI 表示裸土指数, $BLUE$ 、 $GREEN$ 、 RED 、 NIR 、 $SWIR1$ 、 $SWIR2$ 分别是 TM 和 OLI 影像蓝、绿、红、近红外、中波红外 1、中波红外 2 波段的反射率 ^[5]
热度 (LST)	$T = \frac{K_2}{\ln\left(\frac{K_1}{L_6} + 1\right)}$ $LST = \frac{T}{1 + \ln\epsilon\left(\frac{\lambda T}{\rho}\right)} - 273$	式中, T 为传感器温度, ρ 为常数 ($\rho = 1.438 \times 10^{-2} \text{mK}$), ϵ 为地表比辐射率, K_1 和 K_2 为卫星定标参数, λ 为热红外波段中心波长 (μm), L_6 为热红外波段的亮温 ^[6]
土壤侵蚀模数 (SEM)	$SEM = R \times K \times L \times S \times C \times P$	数据集获取

说明其生态质量越好。参考徐涵秋等^[5-6]的研究,将研究区 $IRSEI$ 等级划分为差 (0~0.2)、较差 (0.2~0.4)、中等 (0.4~0.6)、良 (0.6~0.8) 和优 (0.8~1.0) 五个生态等级。

1.4.3 趋势分析

为了更好地了解研究区生态环境质量状况,本文采用 Theil-Sen Median 分析和 Mann-Kendall 检验评估研究区域的 $RSEI$ 趋势,对研究区不同年份的 $RSEI$ 分级结果进行分析。公式^[19]为

$$\beta = \text{Median}\left(\frac{X_j - X_i}{j - i}\right) \quad (4)$$

表2 Mann-Kendall (MK) 检验方法显著性统计

Table 2 Significance statistics of Mann-Kendall (MK) test

β	Z	趋势类别	趋势特征
$\beta > 0$	$2.58 < Z$	4	极显著变好
	$1.96 < Z \leq 2.58$	3	显著变好
	$1.65 < Z \leq 1.96$	2	明显变好
	$Z \leq 1.65$	1	略微变好
$\beta = 0$	Z	0	无明显变化
	$Z \leq 1.65$	-1	略微变差
$\beta < 0$	$1.65 < Z \leq 1.96$	-2	明显变差
	$1.96 < Z \leq 2.58$	-3	显著变差
	$2.58 < Z$	-4	极显著变差

式中, X_j 和 X_i 为第 j 个和 i 个时间的样本序列值, Median 代表取中值,若 β 大于零,则生态环境质量

呈增长趋势,反之下降, β 等于零时,生态环境质量呈恒定不变状态。

Mann-Kendall (MK) 检验是一种非参数的时间序列趋势性检验方法,其不需要测量值服从正态分布,不受缺失值和异常值的影响,适用于长时间序列数据的趋势显著检验^[20-21]。公式为

$$Z = \begin{cases} \frac{S - 1}{\sqrt{\text{Var}(S)}} & , S > 0 \\ 0 & , S = 0 \\ \frac{S + 1}{\sqrt{\text{Var}(S)}} & , S < 0 \end{cases} \quad (5)$$

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=n+1}^n \text{sign}(IRSEI_j - IRSEI_i) \quad (6)$$

$$\text{Var}(S) = \frac{n(n-1)(2n+5)}{18} \quad (7)$$

$$\text{sign}(IRSEI_j - IRSEI_i) = \begin{cases} 1, & (IRSEI_j - IRSEI_i > 0) \\ 0, & (IRSEI_j - IRSEI_i = 0) \\ -1, & (IRSEI_j - IRSEI_i < 0) \end{cases} \quad (8)$$

式中, n 为时间序列的长度; $IRSEI_j$ 和 $IRSEI_i$ 分别为 i 年和 j 年的 $IRSEI$ 值; S 为假设的检验统计量, $\text{Var}(S)$ 为 S 统计量的方差; Z 为标准检验统计量,服从均值为 0, 方差为 1 的正态分布。

Z 为正值表示上升趋势, 负值表示下降趋势。本研究给定显著性水平 $\alpha = 0.05$, 则临界值 $Z_{1-\alpha/2} = \pm 1.96$, 当 Z 的绝对值大于 1.65、1.96 和 2.58 时, 表示趋势分别通过了信度为 90%、95% 和 99% 的显著性检验, 即 $|Z| > 1.96$ 时, $IRSEI$ 的变化是显著的, Mann-Kendall (MK) 检验趋势划分如表 2 所列。

1.4.4 Hurst 分析

Hurst 指数分析是一种用于评估时间序列的长期依赖性的方法。它最初由物理学家 Hurst 在 20 世纪 50 年代提出, 并在金融、气象学、地球科学等领域得到广泛应用^[22-24]。本研究采用 Hurst 分析对 $IRSEI$ 的未来趋势进行了预测分析, $IRSEI$ 平均序列为

$$\overline{IRSEI}_\tau = \frac{1}{\tau} \sum_{t=1}^{\tau} IRSEI_t, \tau = 1, 2, \dots, n \quad (9)$$

每个平均 $IRSEI$ 的累计偏差计算公式为

$$X(t, \tau) = \sum_{i=1}^{\tau} (IRSEI_t - \overline{IRSEI}_\tau), 1 \leq t \leq \tau \quad (10)$$

S 的标准差序列定义为

$$S(\tau) = \left[\frac{1}{\tau} \sum_{i=1}^{\tau} (IRSEI_t - \overline{IRSEI}_\tau)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (11)$$

$$\frac{R_\tau}{S_\tau} = (c\tau)^H \quad (12)$$

式中, c 为缩放参数; H 的值是通过取方程两边的对数并使用最小二乘法^[25]拟合得到的。

赫斯特指数分为三类(见表 3)。当 $Hurst \geq 0.5$ 时, 过去的趋势将在未来继续; 当 $0 \leq Hurst < 0.5$ 时, 未来趋势与过去趋势相反; 当 $Hurst = 0.5$ 时, 未来趋势与过去趋势无关^[26]。

表 3 Hurst 趋势判定

Table 3 Hurst trend determination

Hurst	趋势	结果
$0 \leq Hurst < 0.5$	反持续性	未来趋势与之前相反
$Hurst = 0.5$	无关	随机
$0.5 < Hurst < 1$	持续性	未来趋势与之前相同

1.4.5 地理探测器

根据地理探测器的基本理论, 如果一个自变量对一个因变量有显著影响, 它们的地理分布将是相似的^[27]。本研究借助地理探测器使用因子检测器和交互检测器来研究影响生态环境质量的驱动因素。

因子检测器用于确定自变量对因变量的解释程度, q 的计算公式为

$$q = 1 - \frac{\sum_{h=1}^L N_h \sigma_h^2}{N \sigma^2} \quad (13)$$

式中, q 为因子的影响程度; L 为因变量或自变量; N_h 和 N 分别为第 h 层和整个区域中的像元数量; σ_h^2 和 σ^2 分别为图层 h 和整个区域的因变量的方差。

交互作用检测器通过比较一个和两个因子的 q 值来确定不同因子之间的交互作用。交互作用的主要类型包括非线性衰减、单因子非线性弱化以及双因子、独立和非线性增强^[27]。

根据以往的研究和因子选择原则, 本研究选择了气候、植被、地形和人类活动四类因子, 温度(X_1)、降水量(X_2)、 $NDVI$ (X_3)、 FVC (X_4)、高程(X_5)、坡向(X_6)、坡度(X_7)、土地利用类型(X_8)、距离水电站的距离(X_9)、人口密度(X_{10}) 10 个因子作为影响 $IRSEI$ 的地理探测器因子, 依次代表 X_1 — X_{10} 。数据采用自然断点法进行分类, 通过建立 500 m × 500 m 网格, 生成 852 个采样点, 随后, 使用地理探测器进行分析。

2 结果与分析

2.1 集水区提取

集水区作为基本的地貌单元, 是地貌演化的缩影, 亦是地表过程中物质和能量运输的容器^[28]。合理确定水电开发的生态影响范围, 评估其对生态系统的潜在影响具有重要意义。基于此, 本文提取了小流域的集水区, 作为区域生态质量评价的基本单元, 提取结果如图 2 所示。

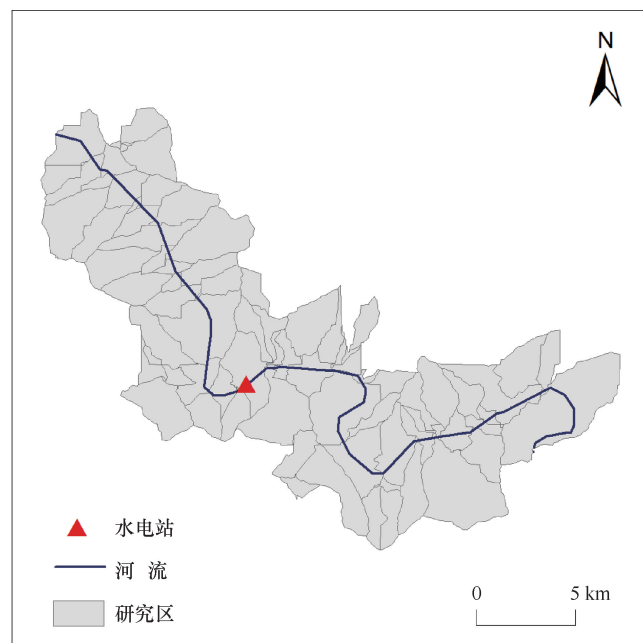


图 2 研究区划分

Fig. 2 Division of study area

2.2 改进 RSEI 的有效性 与 适用性 分析

基于 5 个生态指标的主成分分析结果表明(见表 4), 15 个年份中 PC1 贡献率平均值 76.05%, 说明第一主成分可以表征 5 个指标的大部分特征, 可用于研究区域生态环境状况。此外, 在各年份中, 5 个生态指标的载荷值(特征向量)呈现出稳定且规律的特征。其中, NDMVI 和 WET 的载荷值为正, 显示出对生态环境质量起正面效应; 相反, NDBSI、LST 和土壤侵蚀模数的载荷值为负, 表明它们在生态环境质量评价中具有负向影响, 这与研究区的实际情况相符。

RSEI 和 IRSEI 的对比表明(见图 3、表 4、表 5), IRSEI 和 RSEI 总体趋势一致。IRSEI 通过引入 NDMVI 代替 NDVI 并增加土壤侵蚀指标, 在生态质量的表达上具有更强的区分能力。特别是在山地沟壑地区, IRSEI 能够更加清晰地反映生态状况, 对裸地和土壤侵蚀严重区域的分级更加细致, 空间异质性表达更为明显。相比常规 RSEI, IRSEI 更全面地反映了高海拔复杂环境下的生态系统质量特征。由此可见, IRSEI 模型在高海拔水电开发区域的生态环境质量评估中具有良好的适用性和有效性。

2.3 土地利用类型变化特征

选择 GLC_FCS30 土地利用数据集^[29]作为验证样本, 将土地利用类型重分类为 6 类, 建立混淆矩阵进行精度验证。验证结果显示, 研究区土地利用类型分类 Kappa 值均为 0.7 以上, 总体精度均在 75% 以上, 具有较高可信度。

研究区以草地为主, 占比超 60%。自 2008 年, 草地面积由 61.62% 降至 58.39%, 其中水电站建设

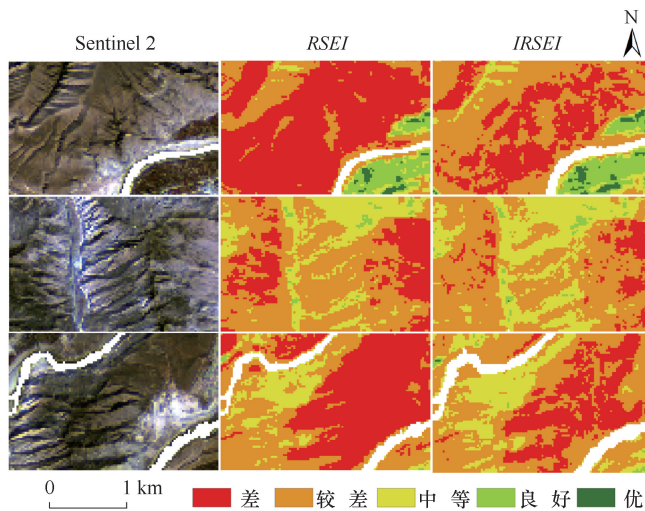


图 3 RSEI 和 IRSEI 对比

Fig. 3 Comparison of RSEI and IRSEI

完成后降幅达 3.62%; 林地主要分布于中高海拔, 长期占比约 29%, 变化不明显; 耕地集中于中部和中下部城镇区域, 占比增长 1.42%。建设用地增幅最大, 由 1.96% 增长至 3.48%, 近乎翻倍, 未利用地和水域面积持续减少, 反映出上游河道拓宽及工程弃渣场增加。

2.4 IRSEI 时空特征

2.4.1 生态环境质量时间特征

2008—2022 年, 研究区生态环境质量整体呈恶化趋势, 2020 年达到最低点(IRSEI 均值为 0.42, 较 2008 年的 0.53 下降 19.9%), 随后显著回升[见图 5(a)]。各指标变化显示, NDMVI、WET 和 LST 均值上升[见图 5(b)、图 5(f)、图 5(d)], 而 NDBSI 下降[见图 5(e)]。在 2020 年之前, 水电站建设和城镇扩

表 4 IRSEI 主成分分析结果

Table 4 Principal component analysis results of IRSEI

年 份	第一主成分 PC1					特征值	贡献率
	NDMVI	WET	NDBSI	LST	SEM		
2008	0.413 8	0.529 1	-0.517 9	-0.468 2	-0.247 8	0.148 8	74.01
2009	0.460 4	0.503 9	-0.508 6	-0.431 4	-0.298 8	0.154 2	76.67
2010	0.456 7	0.520 1	-0.524 3	-0.391 6	-0.304 5	0.147 0	78.79
2011	0.492 1	0.505 9	-0.525 6	-0.403 9	-0.250 0	0.149 3	72.32
2013	0.475 5	0.509 9	-0.546 9	-0.360 3	-0.291 6	0.153 5	74.18
2014	0.476 6	0.513 5	-0.529 3	-0.300 1	-0.372 9	0.148 8	79.98
2015	0.463 8	0.503 4	-0.533 3	-0.368 7	-0.333 4	0.157 0	75.67
2016	0.480 1	0.521 2	-0.548 2	-0.327 9	-0.299 8	0.148 5	74.75
2017	0.468 4	0.503 7	-0.531 3	-0.344 2	-0.355 2	0.154 0	76.52
2018	0.430 4	0.511 2	-0.555 2	-0.341 9	-0.358 2	0.148 1	79.54
2019	0.477 8	0.492 6	-0.530 6	-0.355 0	-0.348 5	0.158 3	76.59
2020	0.433 6	0.509 2	-0.528 0	-0.399 6	-0.338 1	0.151 4	71.77
2021	0.468 1	0.502 9	-0.534 3	-0.376 3	-0.317 6	0.158 8	76.94
2022	0.487 7	0.501 8	-0.533 2	-0.332 9	-0.339 5	0.159 0	77.08

表 5 RSEI 主成分分析结果
Table 5 Principal component analysis results of RSEI

年 份	第一主成分 PC1				特征值	贡献率
	NDVI	WET	NDBSI	LST		
2008	0.520 8	0.493 1	-0.271 1	-0.642 0	0.132 1	65.52
2009	0.479 1	0.491 8	-0.409 5	-0.600 8	0.147 4	68.67
2010	0.399 3	0.524 0	-0.485 7	-0.574 6	0.137 0	66.65
2011	0.417 9	0.556 0	-0.469 8	-0.543 6	0.140 5	65.09
2013	0.389 8	0.564 2	-0.528 2	-0.500 7	0.129 5	67.54
2014	0.354 2	0.510 8	-0.557 9	-0.549 9	0.097 4	71.21
2015	0.385 9	0.575 7	-0.482 8	-0.535 2	0.126 8	65.12
2016	0.364 4	0.546 8	-0.534 1	-0.531 9	0.107 3	62.72
2017	0.374 1	0.547 5	-0.522 0	-0.536 5	0.113 6	65.40
2018	0.438 0	0.623 6	-0.515 0	-0.392 5	0.083 1	57.98
2019	0.361 8	0.573 5	-0.522 1	-0.517 4	0.136 1	61.17
2020	0.497 6	0.541 6	-0.456 9	-0.500 4	0.093 1	62.98
2021	0.358 5	0.589 8	-0.514 5	-0.508 8	0.128 3	68.18
2022	0.358 6	0.558 7	-0.550 2	-0.506 5	0.128 0	69.68

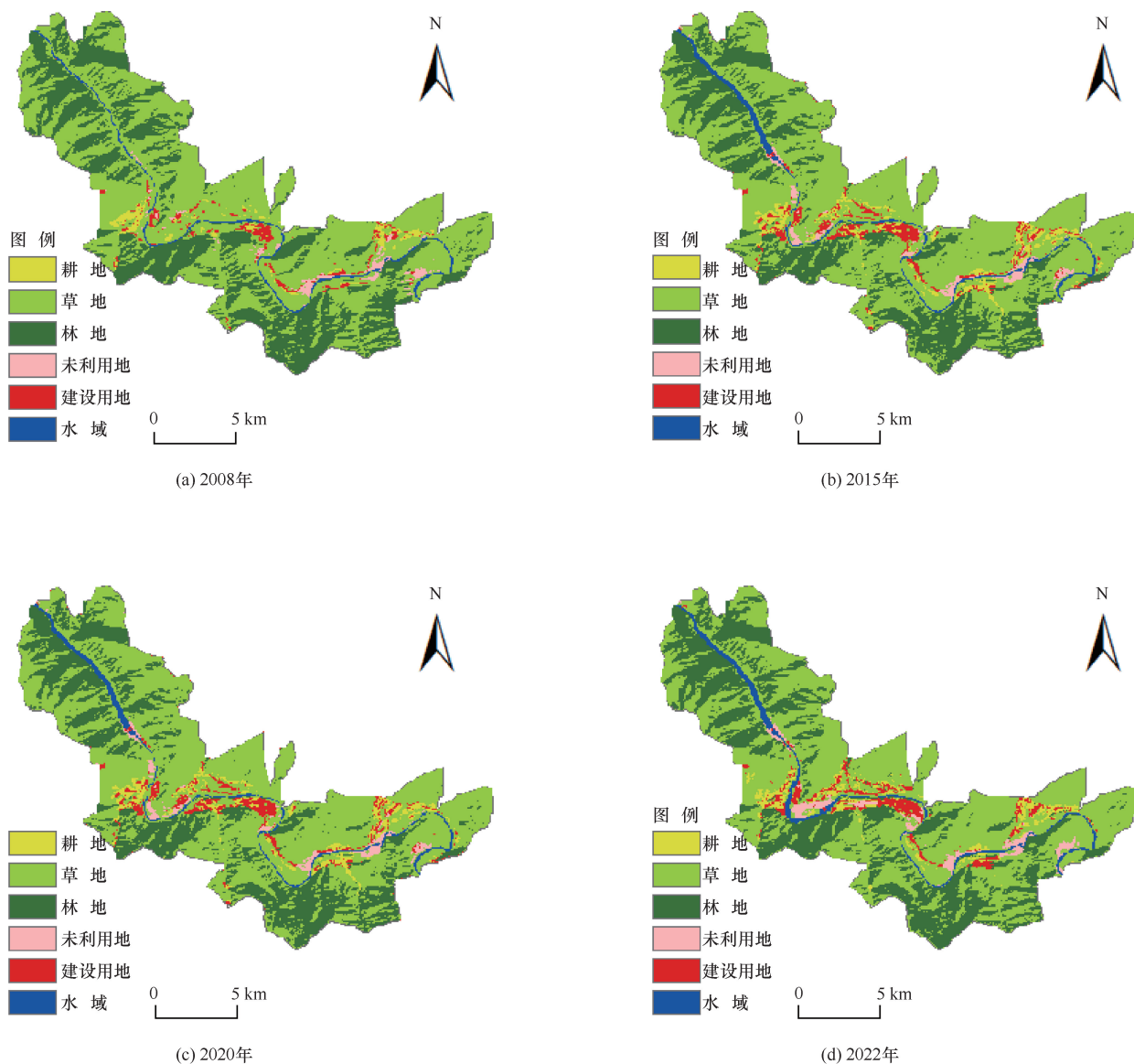


图 4 土地利用现状
Fig. 4 Current status of land use

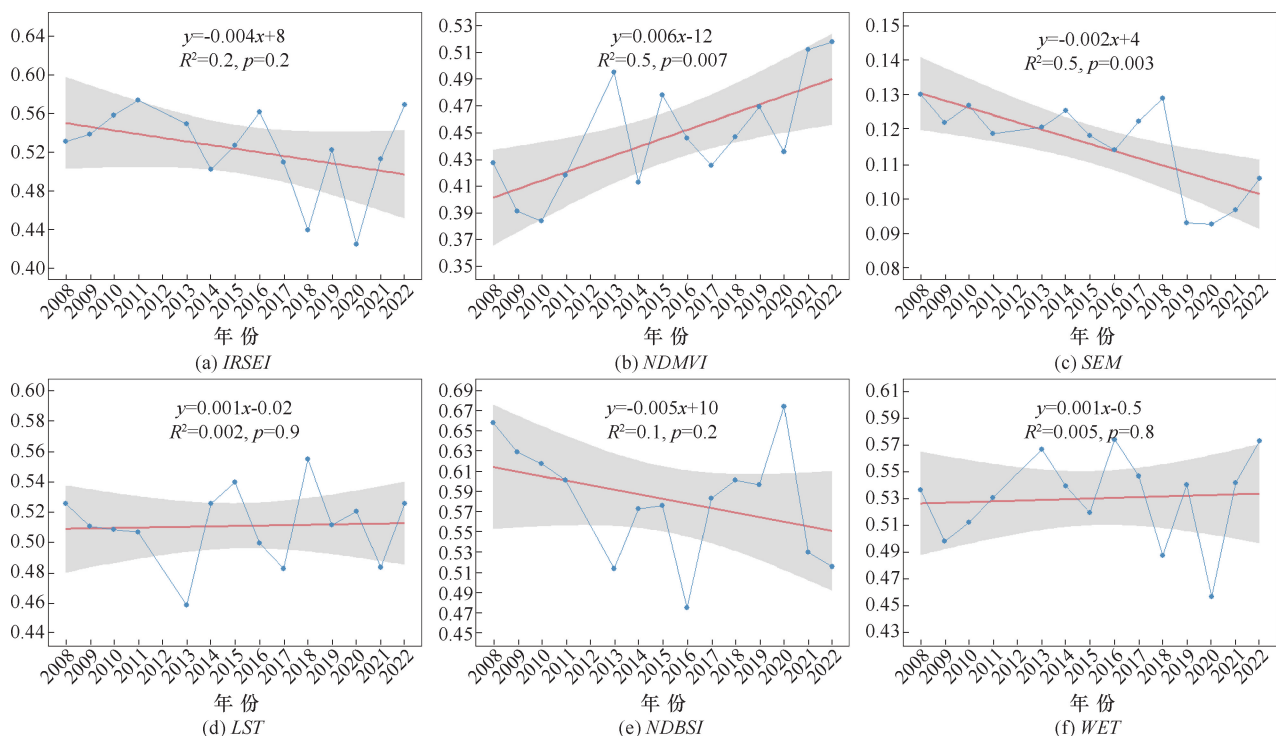


图5 $IRSEI$ 及各个指标均值年际变化

Fig. 5 Interannual variation in $IRSEI$ and mean values of each indicator

张导致不透水表面增长, $NDBSI$ 显著升高; 2020年后, $NDBSI$ 逐渐降低。土壤侵蚀在建设初期急剧上升, 建设后期减弱, 但运行阶段回升。这表明水电开发对生态环境的影响具有阶段性和复杂性。

2.4.2 生态环境质量空间特征

2008—2015年, 水电站建设前, $IRSEI$ 恶化区域主要集中在下游城镇地区, 而上游区域的生态环境逐渐改善(见图6)。2015—2020年建设期间, $IRSEI$ 恶化趋势蔓延至水电站周边, 上游区域生态质量也有所下降, 呈现以水电站为中心向外扩展的模式, 表明水电站建设对周边生态环境质量具有负面影响。2020年水电站竣工, 至2022年运行期间, 水电站附近的生态环境质量显著改善, 下游区域 $IRSEI$ 逐步回升。

2.5 生态环境质量动态变化特征

水电站建设前, 研究区生态质量整体趋于稳定, 退化的面积占比为 3.52%, 改善区域占比

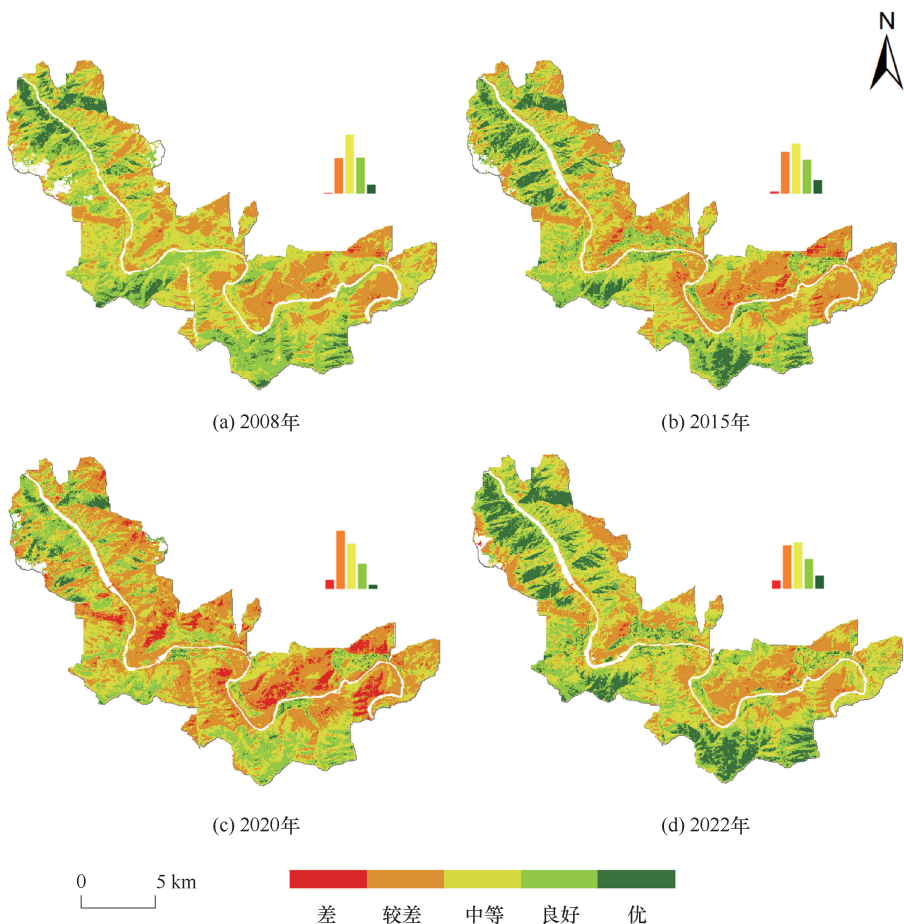


图6 不同阶段的 $IRSEI$ 空间分布

Fig. 6 Spatial distribution of $IRSEI$ at different stages

表6 IRSEI变化面积

Table 6 Variation in IRSEI area

时间	类别	等级	等级面积/km ²	比例/%	类面积/km ²	比例/%
2008—2015年	退化	显著变差	0.10	0.04	8.55	3.52
		变差	8.45	3.48		
	不变	无显著变化	228.53	94.03	228.53	94.03
		变好	5.72	2.35		
2015—2020年	退化	显著变差	0.03	0.01	29.30	12.05
		变差	29.27	12.04		
	不变	无显著变化	210.24	86.54	210.24	86.54
		变好	3.40	1.40		
2020—2022年	退化	显著变差	0.00	0.00	14.47	5.95
		变差	14.47	5.95		
	不变	无变化	152.30	62.66	152.30	62.66
		变好	76.27	31.38		
改善	显著变好	0.00	0.00	76.27	31.38	

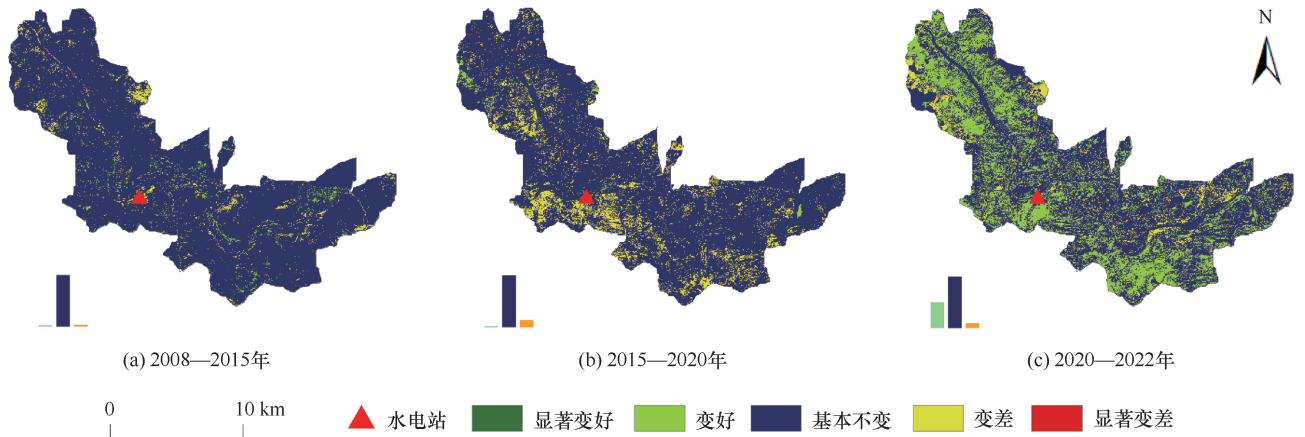


图7 水电开发不同阶段 IRSEI 变化特征

Fig. 7 Characteristics of IRSEI variation at different stages of hydropower development

为 2.11%。生态质量退化的区域不仅分布在城镇区域, 在高海拔地区也零散分布; 改善的区域主要分布在西北部和东南部的高海拔区(见表 6 和图 7)。

从水电站施工期间, 受水电开发影响, 研究区 29.30 km² 的区域生态质量退化, 主要集中分布在水电站周围和人类活动较为频繁的下游地区; 改善区域占比为 3.40%, 主要分布在西北部高海拔地区; 无显著变化区域占比为 86.54%。

水电站建设完成到运行时期, 研究区的生态环境质量逐渐变好, 其中 31.38% 的区域改善, 主要分布在研究区的草地和林地; 退化区域占比 5.95%, 在中游及下游的城镇区域有零星分布。

2.6 生态环境质量未来变化趋势预测

研究区 Hurst 指数为 0.103~0.730, 均值 0.520, 其中 41.64% 的区域小于 0.5, 8.34% 的区域大于 0.5 [见图 8(a)]。未来 IRSEI 整体稳定, 66.96% 的区域

基本不变(见表 7)。改善区域占 19.47%, 集中于水电站上游、东南部林地及中部耕地和草地。退化区域占 13.57%, 集中于水电站下游及城镇, 反映人类活动对城镇生态影响显著, 而对自然生态区域影响较小。

表7 IRSEI 未来变化趋势

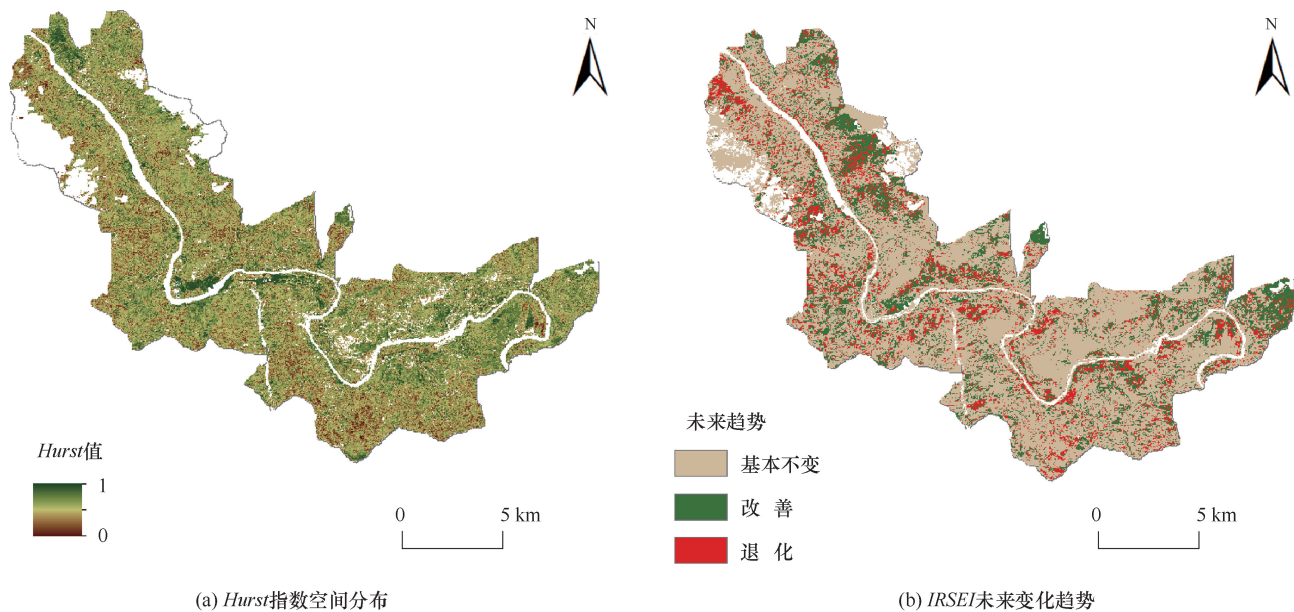
Table 7 Future change trends of IRSEI

未来变化趋势	百分比/%
退化	13.57
改善	19.47
基本不变	66.96

2.7 地理探测器分析结果

2.7.1 因子探测器分析结果

因子检测器结果显示(见图 9), 研究区 IRSEI 空间分异的主要驱动因子依次为 NDVI (X_3 , q 均值 0.95)、坡向 (X_6 , 0.92)、FVC (X_4 , 0.89)、年均气温 (X_1 , 0.86)、与水电站距离 (X_9 , 0.80) 和高



(a) Hurst指数空间分布

(b) IRSEI未来变化趋势

图 8 研究区 IRSEI 的 Hurst 指数及未来变化趋势

Fig. 8 Hurst exponent of IRSEI in study area and future change trend

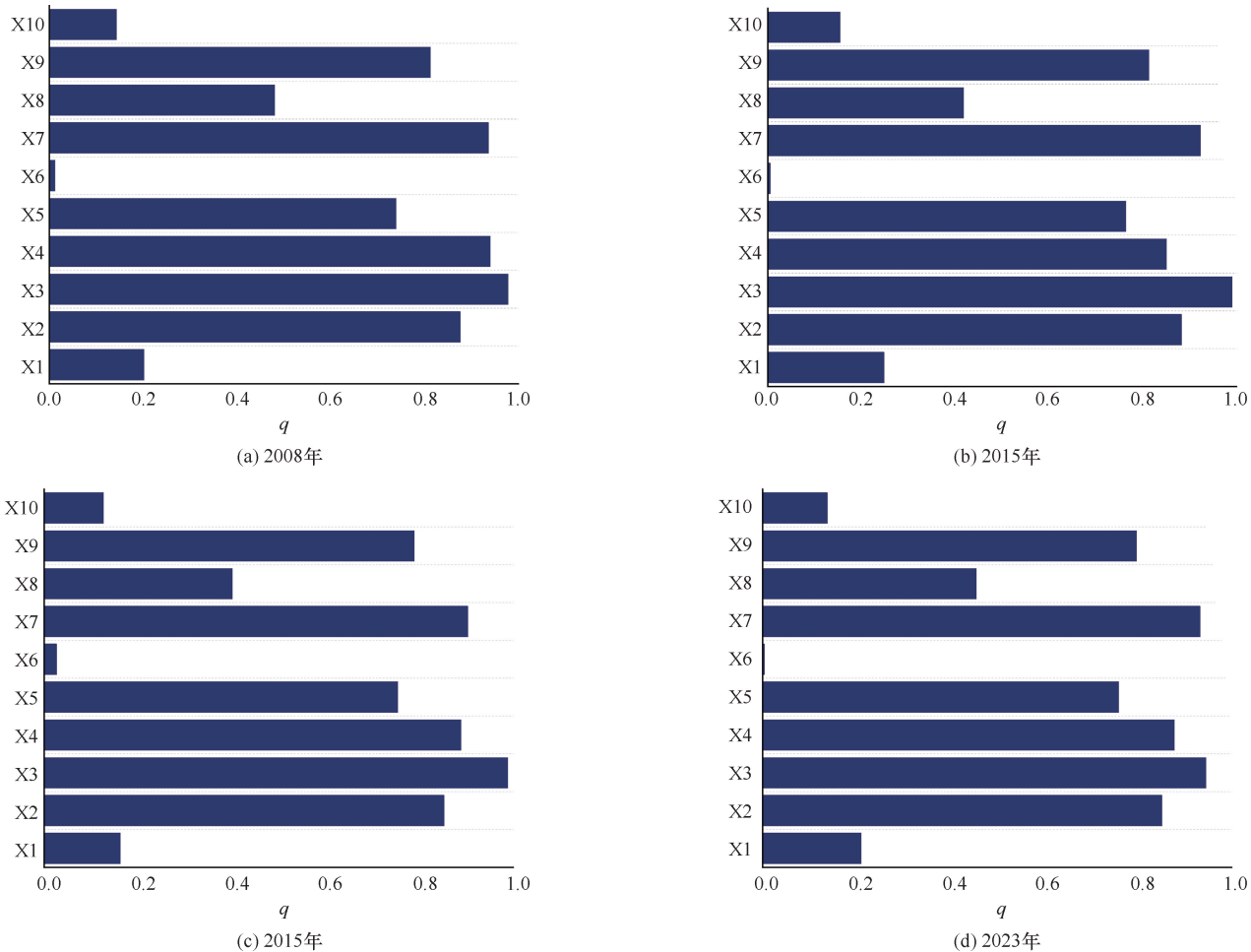


图 9 各因子探测 q 值

Fig. 9 Each factor's q values

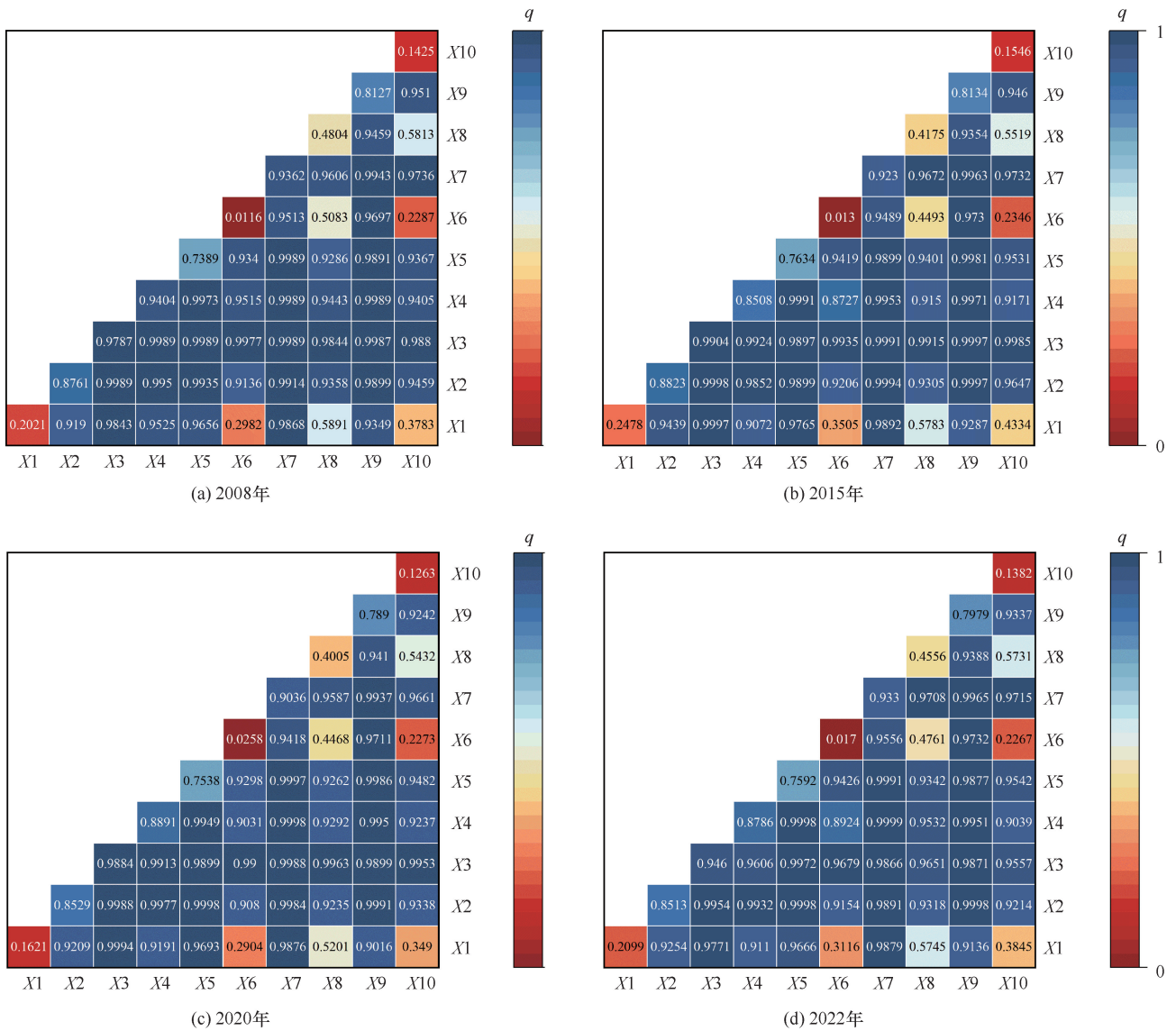


图 10 交互探测结果

Fig. 10 Interaction detection results

程(X_5 , 0.75)。这些因子具有较高的解释力, 是影响研究区生态环境质量空间分异的关键因素。其次, 年降水量(X_2 , q 均值 0.26)、土地利用类型(X_8 , 0.41)和人口密度(X_{10} , 0.17)对 $IRSEI$ 的空间分异也起到了重要作用, 但其解释力相对较低。其他因子的解释力较弱, 对研究区生态环境质量空间分异的影响较小, 作用不显著。

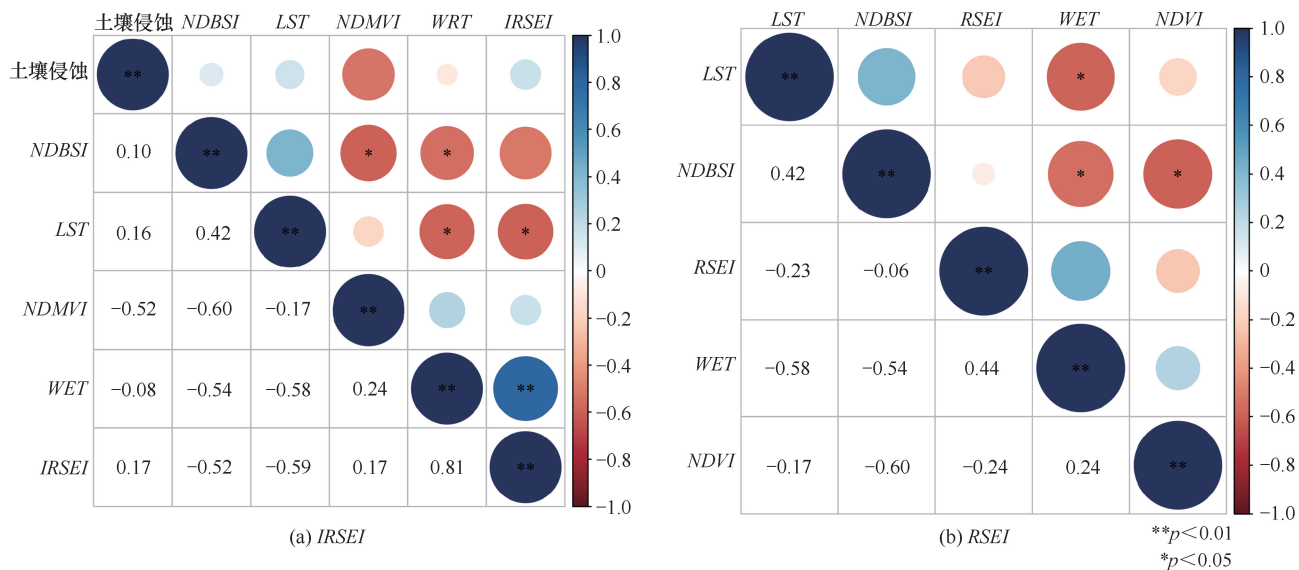
2.7.2 交互探测分析结果

交互探测结果如图 10 所示, 结果表明, 两个影响因子的综合作用大于单一因子的影响。年均气温、 $NDVI$ 、 FVC 和土地利用类型的交互作用对 $IRSEI$ 有显著影响。此外, 水电站距离与 $NDVI$ 、 FVC 、高程的交互作用也较强, 表明人为和自然因子的交互作用增强了 $IRSEI$ 的解释力。

3 讨论

3.1 $IRSEI$ 模型优势

针对高海拔水电开发区的生态特征, 本研究在常规 $RSEI$ 模型基础上提出了改进模型($IRSEI$)。两者总体趋势一致, 主成分分析表明 $IRSEI$ 的第一主成分贡献率显著高于 $RSEI$, 对局部土地利用类型反演更精确, 更符合实际分布情况。新增的土壤侵蚀模数和归一化差值山地植被指数($NDMVI$)在 $IRSEI$ 模型中的相关性显著[见图 11(a)], 表明这两个因子对高海拔水电开发区生态环境质量的评价具有重要作用。而常规 $RSEI$ 模型未能纳入这些关键因子, 导致其在青藏高原等高海拔区域的适用性较差。这一结果与 YAN 等^[30]的研究一致, 表明常规 $RSEI$ 在复杂地形

图 11 *IRSEI* 和 *RSEI* 与各指标相关性系数Fig. 11 Correlation coefficients of *IRSEI* and *RSEI* with each indicator

和特殊环境下存在局限性。PENG 等^[31]也发现, 常规 *RSEI* 模型未能有效捕捉到高海拔区域特殊的生态特征, 尤其在植被稀疏地区, 模型解释力较弱。因此, *IRSEI* 通过综合多生态因子, 弥补了常规 *RSEI* 在高海拔地区应用的不足。

3.2 高海拔水电开发区土地利用时空变化特征

本研究发现, 水电开发显著影响了研究区土地利用类型, 尤其体现在建设用和未利用地面积的同步增长, 以及草地面积的显著减少。这一结果与 ARUHO 等^[32]的研究一致。他们通过对乌干达 Kyambura 流域的研究指出, 水电开发引发的土地利用变化包括城市化用地扩张和植被覆盖减少, 主要与流域开发和工程建设相关。这表明, 不论在高海拔的青藏高原, 还是在热带地区的乌干达, 水电开发对土地利用类型的扰动和重塑具有相似影响。然而, 本研究进一步揭示了高海拔地区特殊的土地利用变化特征。例如, 在水电站建设期间, 弃渣场的形成和河道扩张显著增加了未利用地和水域面积, 这在复杂地形的青藏高原尤为明显。此外, 本研究还指出, 施工期间林地面积回升, 可能反映了高海拔地区对生态修复的更高响应能力。

3.3 高海拔水电开发区 *IRSEI* 时空变化特征

水电开发对生态环境的影响具有滞后性和累积性, 这一结论已在多个研究中得到验证^[33-34]。水电站建设第一年, 研究区 *IRSEI* 呈现上升趋势, 随着水电站建设规模的扩大, 2016 年至 2019 年期间, *IRSEI* 急剧下降, 水电开发的负面影响逐渐显现。这表明大

规模建设活动对生态环境的破坏并非即时显现, 而是需要一段时间的积累才能完全体现。ALSALEH 等^[35]研究表明, 水电开发初期的环境干扰会在一定时间后通过生态系统的逐步变化和累积性影响表现出来, 这与本研究的结果一致。

2019 年后的 *IRSEI* 回升现象可以归因于水电站建设完成后生态系统的自我恢复和生态修复措施的实施。SHI 等^[36]的研究表明, 水电站建设后生态系统经历了较长的恢复期, 受到生态修复措施和区域水文条件变化等多重因素影响。他们指出, 水电开发带来的影响不仅体现在水文变化上, 还涉及到生态系统服务功能的恢复, 且这一过程通常是循序渐进的。因此, 虽然生态质量有所回升, 但恢复仍具有滞后性, 且受多种因素制约。后续研究需在长时间尺度内持续监测和评估, 以确保生态环境的稳定性和可持续发展。

此外, 本研究的结果发现, 水电开发前后部分高海拔林地的空间分布面积未发生显著变化, 但 *IRSEI* 却呈现退化趋势。进一步分析两块异常区域显示, 水电建设后, 土壤侵蚀模数 (*SEM*) 和地表温度 (*LST*) 均有所上升, 表明水土流失和热环境恶化程度加剧, 这些负面因子对生态系统施加了直接压力。同时, 湿度指数 (*WET*) 和归一化山地植被指数 (*NDMVI*), 即对 *IRSEI* 具有正向作用的指标, 表现出下降趋势, 反映出水分条件和植被覆盖的减弱 (见图 12)。这些结果表明, 尽管水电开发未直接破坏林地的空间分布, 但其引发的局地水文循环变化、土壤侵蚀加剧以及局部热环境恶化已经削弱了林地的生态质量。

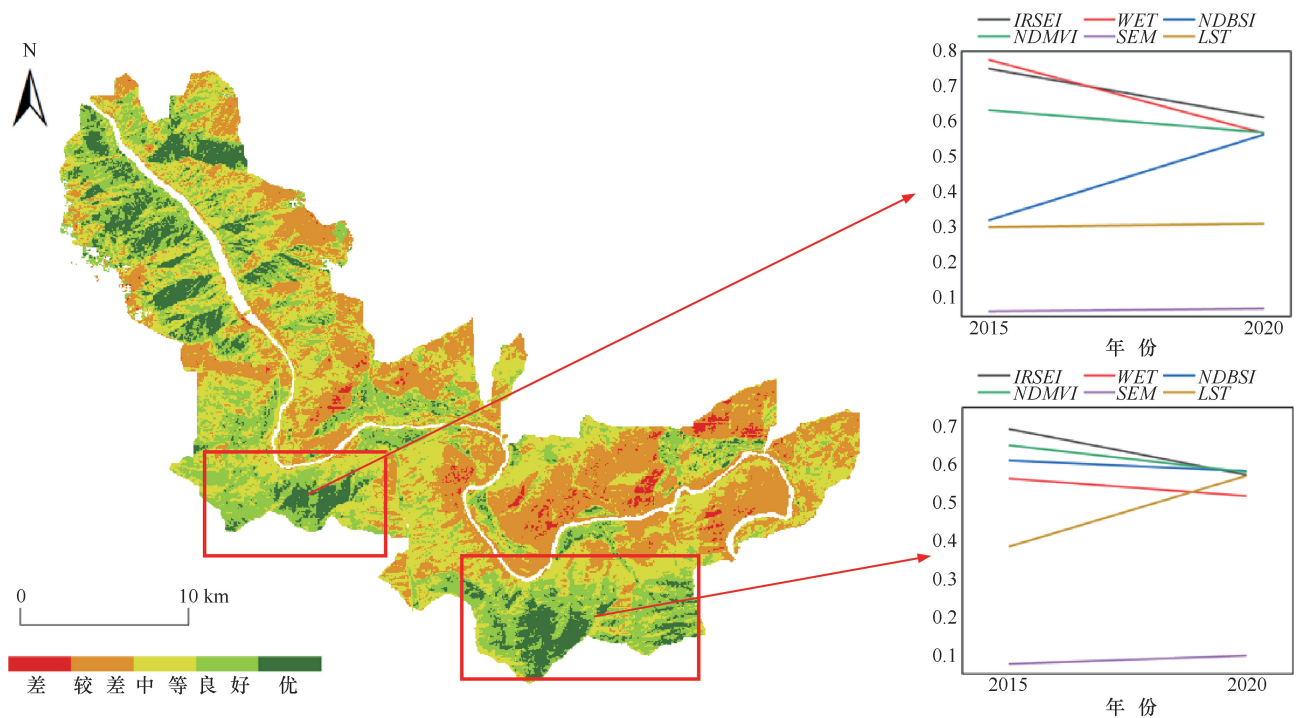


图 12 高海拔林地各指标变化情况

Fig. 12 Variation in each indicator of high-altitude forests

高海拔地区土壤层薄且敏感, 水电开发引发的土壤侵蚀和养分流失会迅速恶化土壤条件。相比之下, 植被由于生命周期较长且具备一定的生态恢复能力, 其响应通常滞后于土壤。张景华等^[37]的研究表明, 澜沧江流域植被生长对气候变化的响应存在显著的滞后效应, 且随着纬度升高, 植被对气候因子响应的滞后时间逐渐缩短。LIU 等^[38]的研究进一步指出, 水电开发对生态环境的影响具有累积效应, 不同生态组分的响应存在时间差异, 其中土壤通常最先对环境压力作出反应, 而植被的反应则有较长的滞后期。因此, 即使林地的分布面积未发生显著变化, 累积的环境压力已对其生态质量产生负面影响。这种现象进一步表明, 水电开发对生态环境的影响具有显著的滞后性和累积性。

3.4 水电开发对生态环境影响的不确定性

研究结果显示, 水电开发期间的生态环境恶化区域不仅限于开发区, 还广泛分布于周边城镇区域, 并在部分高海拔林地中表现出退化。这表明水电开发对区域生态系统具有直接和间接影响, 反映了其生态效应的不确定性。一方面, 水电开发通常伴随着区域基础设施建设、交通线路改造及城镇化扩张, 进一步加剧了城镇区域的生态压力^[38]; 另一方面, 高海拔林地生态系统因其较高的脆弱性, 对气候波动和人为干

扰的响应可能导致局部生态退化^[39]。

生态环境恶化区域的时空异质性表明, 人类活动对自然生态系统产生了多重影响, 水电开发的生态效应具有复杂的传递性和累积性^[40]。这与刘琦等^[41-42]的研究一致。刘琦等研究发现, 水电站建设过程中, 景观生态风险受到自然和人为因素的共同影响, 其中人为干扰加剧了生态风险的空间分异。QIN 等^[42]研究金沙江中下游梯级水电开发对水生环境的影响时指出, 水库的建设和运行不仅改变了电站附近的水文和水质条件, 还通过水流传递影响到远离电站的下游区域。同时, 河流生态系统的连通性被破坏, 对上游和下游生物栖息地造成了隔离和损害, 削弱了流域整体的生态功能。这些研究结果表明, 水电开发的生态影响具有区域性扩展效应, 其复杂性和传递性使得影响超出了电站的直接建设范围。

3.5 高海拔水电开发区 IRSEI 时空变化的影响因素

自然因素中, 气候因子对植被生长的影响尤为关键, 其中降水、湿度和温度是重要的驱动因素^[36]。WANG 等^[43]的研究显示, 特别是在降水量减少的地区, 气候变化显著影响植被生长, 年均气温与植被指数的交互作用对生态环境质量有显著影响。由于当地降水较少, 降水和湿度对生态环境质量的直接影响较小, 热量条件对植被生长的影响更为重要。因此, 当

热度(年均气温)与绿度(*NDVI*)交互作用对研究区的生态环境影响较大;此外,海拔高度通过影响地表热量分布,导致植被生长的垂直分异,使热度与高程的交互作用成为空间分异的关键因素。在人为因素方面,地类变化会对生态环境产生影响,四期 *IRSEI* 分布分析显示,林地和草地的生态环境质量等级主要集中在“优”和“良”区域,而建设用地和未利用地则以“差”和“较差”为主,这与余慧婕等^[44]的研究一致。无论是城镇扩张和工程开挖,还是退耕还林、保护林草等举措,都会对研究区的景观格局产生影响,进而影响生态环境质量。

3.6 不足与展望

本研究在 *IRSEI* 驱动因素的选择上仍存在局限性,未充分考虑社会经济因素的影响。同时,由于研究区域较小,部分因子空间分辨率较低,可能影响地理探测器分析的精度。尽管本文评估了水电开发的生态影响,但由于运行时间较短,尚未充分反映其对流域生态质量的长期影响,因此评估结果仍有限。后续研究应进一步延长研究时段,覆盖更广的时间尺度,以全面揭示水电工程对生态环境变化的影响。

4 结论

通过提出改进型遥感生态指数(*IRSEI*)对研究区2008—2022年生态环境质量进行了动态监测。主要结论包括:

水电开发对研究区主要地类产生显著影响,进而影响 *IRSEI*,运行期间生态修复措施与植被自然恢复逐步改善了生态环境质量;未来 *IRSEI* 整体趋于稳定,改善区域集中在高海拔林地,恶化区域主要位于城镇;驱动因素分析显示,自然条件与人为活动的交互作用显著影响了生态质量空间分异。本研究为高海拔地区生态环境监测提供了科学依据,并为水电开发的生态保护与管理提供重要参考。

参考文献(References):

- [1] 秦卫华,刘鲁君,徐河谷,等.小南海水利工程对长江上游珍稀特有鱼类自然保护区生态影响预测[J].生态与农村环境学报,2008,24(4):23-26.
- QIN W H, LIU L J, XU W G, et al. Prediction of ecological impacts of the planned Xiaonanhai power dam on the rare and endemic fishes nature reserve in the upper reaches of the Yangtze River[J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2008, 24(4): 23-26.
- [2] PANG M Y, ZHANG L X, BAHAJ A S, et al. Small hydropower development in Tibet: Insight from a survey in Nagqu Prefecture[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2018, 81: 3032-3040.

- [3] 胡宜刚,李睿,辛玉琴,等.青藏铁路植被恢复和“黑土型”退化草地治理的实践与启示[J].草业科学,2015,32(9):1413-1422.
- HU Y G, LI R, XIN Y Q, et al. Management and restoration of degradation vegetation on the Tibetan Plateau[J]. Pratacultural Science, 2015, 32(9): 1413-1422.
- [4] WAN W, LIU Z, LI K J, et al. Drought monitoring of the maize planting areas in Northeast and North China Plain[J]. Agricultural Water Management, 2021, 245: 106636.
- [5] 徐涵秋.城市遥感生态指数的创建及其应用[J].生态学报,2013,33(24):7853-7862.
- XU H Q. A remote sensing Urban ecological index and its application[J]. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(24): 7853-7862.
- [6] 赵祖伦,赵卫权,苏印,等.1991—2020年贵阳市生态质量演变及空间分异定量归因[J].环境科学,2025,46(1):367-377.
- ZHAO Z L, ZHAO W Q, SU Y, et al. Spatio-temporal evolution patterns and spatial differentiation attribution of ecological quality in Guiyang from 1991 to 2020[J]. Environmental Science, 2025, 46(1): 367-377.
- [7] 倪春雨,何文,姚月锋.基于Landsat 8的漓江流域生态环境质量及其影响因素分析[J].科学技术与工程,2024,24(12):5227-5238.
- NI C Y, HE W, YAO Y F. Analysis of ecological environment quality and its influencing factors of the Lijiang River Basin based on Landsat 8[J]. Science Technology and Engineering, 2024, 24(12): 5227-5238.
- [8] 白婷,崔涵.基于GEE云计算的祁连山自然保护区生态环境质量评价[J].甘肃林业科技,2024,49(1):14-18.
- BAI T, CUI H. Evaluation of ecological environment quality in Qilian Mountain national nature reserve based on GEE cloud computing[J]. Journal of Gansu Forestry Science and Technology, 2024, 49(1): 14-18.
- [9] 张云霞.2000—2020年青藏高原生态质量时空变化及其影响因素[D].兰州:兰州大学,2023.
- ZHANG Y X. Spatiotemporal Changes of Ecological Quality and Its Influencing Factors on the Qinghai-Tibet Plateau from 2000 to 2020 [D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2023.
- [10] HU Y P, YANG X, GAO X, et al. Analysis of spatio-temporal evolution and driving factors of eco-environmental quality during highway construction based on RSEI[J]. Land, 2024, 13(4): 504.
- [11] 陈学兄,常庆瑞,毕如田,等.基于山地植被指数估算临县植被覆盖度[J].应用基础与工程科学学报,2020,28(2):310-320.
- CHEN X X, CHANG Q R, BI R T, et al. Estimation of vegetation coverage based on normalized difference mountain vegetation index (NDMVI) in Lin County, Shanxi Province [J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2020, 28(2): 310-320.
- [12] 杨友刚,雷世兵.青藏高原原易贡藏布流域水电开发重大工程地质问题及对策[J].工程地质学报,2024,32(5):1759-1770.

- YANG Y G, LEI S B. Gigantic engineering geological problems and countermeasures of hydropower development in Yigongzangbu Basin of Tibetan Plateau[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2024, 32(5): 1759-1770.
- [13] 汪东川, 张威, 王志恒, 等. 拉西瓦水电站建设对区域景观格局与生境质量的影响[J]. *水土保持学报*, 2021, 35(3): 200-205.
- WANG D C, ZHANG W, WANG Z H, et al. Impact of Laxiwa Hydropower Station construction on the regional landscape pattern and habitat quality[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2021, 35(3): 200-205.
- [14] 刘云龙, 何理, 聂倩文, 等. 水电能源开发对雅鲁藏布江流域景观格局的影响[J]. *水力发电*, 2020, 46(2): 1-5.
- LIU Y L, HE L, NIE Q W, et al. Impact of hydropower development on the landscape pattern of Yarlung Zangbo River Basin[J]. *Water Power*, 2020, 46(2): 1-5.
- [15] 王伟, 张杰, 刘敏, 等. 水电开发对长江上游生态环境的影响及其对策[J]. *水力发电*, 2021, 47(1): 23-28.
- WANG W, ZHANG J, LIU M, et al. Impact of hydropower development on the ecological environment in the upper Yangtze River and countermeasures [J]. *Hydroelectric Power*, 2021, 47(1): 23-28.
- [16] 宋瑞明, 宁亚伟, 李敬茹. 基于 DEM 的中小流域数字河网提取与分析[J]. *中国水利*, 2022(12): 61-64.
- SONG R M, NING Y W, LI J R. DEM-based extraction and analysis of digital river network in small and medium-sized basins[J]. *China Water Resources*, 2022(12): 61-64.
- [17] 秦璐, 陈炳乾, 于洋, 等. 基于遥感生态指数的矿井关闭前后生态环境时空变化规律研究[J]. *金属矿山*, 2023(3): 242-249.
- QIN L, CHEN B Q, YU Y, et al. Study on the spatio-temporal variation regularity of ecological environment before and after mine closure based on remote sensing ecological index [J]. *Metal Mine*, 2023(3): 242-249.
- [18] 刘索玄, 袁艳斌, 赵峰, 等. 基于遥感生态指数(RSEI)的水电开发区生态环境变化分析: 以清江中下游地区为例[J]. *生态与农村环境学报*, 2019, 35(11): 1361-1368.
- LIU S X, YUAN Y B, ZHAO H, et al. Analysis of ecological environment changes in hydropower development zone based on RSEI: A case study in the middle and lower reaches of the Qingjiang River, China[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2019, 35(11): 1361-1368.
- [19] SEN P K. Estimates of the regression coefficient based on Kendall's tau[J]. *Journal of the American Statistical Association*, 1968, 63(324): 1379-1389.
- [20] MASROOR M, REHMAN S, AVTAR R, et al. Exploring climate variability and its impact on drought occurrence: Evidence from Godavari Middle sub-basin, India [J]. *Weather and Climate Extremes*, 2020, 30: 100277.
- [21] JIANG L L, GULI · JIAPAER, BAO A M, 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.
- [22] WU J F, TAN X Z, CHEN X H, et al. Dynamic changes of the dryness/wetness characteristics in the largest river basin of South China and their possible climate driving factors [J]. *Atmospheric Research*, 2020, 232: 104685.
- [23] MOHAMMED I N, BOLTEN J D, SRINIVASAN R, et al. Satellite observations and modeling to understand the Lower Mekong River Basin streamflow variability[J]. *Journal of Hydrology*, 2018, 564: 559-573.
- [24] LI J, WANG J L, ZHANG J, et al. Dynamic changes of vegetation coverage in China-Myanmar economic corridor over the past 20 years [J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2021, 102: 102378.
- [25] MANDELROT B B, WALLIS J R. Noah, Joseph, and operational hydrology[J]. *Water Resources Research*, 1968, 4(5): 909-918.
- [26] ZHU X, WEI S Y, WU Y J. Eco-environmental assessment and trend analysis of the Yangtze River middle reaches megalopolis based on a modified remote sensing ecological index [J]. *Sustainability*, 2024, 16(18): 8118.
- [27] 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.
- [28] 戚梦, 陈楠, 林德蔚, 等. 引入集水区复杂网络的中国地貌识别研究[J]. *地球信息科学学报*, 2023, 25(5): 909-923.
- QI M, CHEN N, LIN S W, et al. Geomorphic recognition of China considering complex network of catchments [J]. *Journal of Geo-Information Science*, 2023, 25(5): 909-923.
- [29] ZHANG X, ZHAO T, XU H, et al. GLC_FCS30D: The first global 30-m land-cover dynamic monitoring product with a fine classification system from 1985 to 2022 using dense time-series Landsat imagery and continuous change-detection method [J]. *Earth System Science Data Discussions*, 2023, 2023: 1-32.
- [30] YAN Y M, CAO J X, GU Y F, et al. An evaluation of ecosystem quality and its response to aridity on the Qinghai-Tibet Plateau [J]. *Remote Sensing*, 2024, 16(18): 3461.
- [31] PENG X F, ZHANG S Q, PENG P H, et al. Unraveling the ecological tapestry: A comprehensive assessment of Changtang nature reserve's ecological and environmental using RSEI and GEE [J]. *Land*, 2023, 12(8): 1581.
- [32] ARUHO TUSINGWIIRE M, TUMUTUNGIRE M D, SEMPEWO J I, et al. Impacts of climate and land use/cover change on mini-hydropower generation in River Kyambura watershed in South Western part of Uganda [J]. *Water Practice & Technology*, 2023, 18(6): 1576-1597.
- [33] YU L, JIA B Y, WU S Q, et al. Cumulative environmental effects of

- hydropower stations based on the water footprint method; Yalong River Basin, China[J]. *Sustainability*, 2019, 11(21): 5958.
- [34] WANG Y K, ZHANG N, WANG D, et al. Investigating the impacts of cascade hydropower development on the natural flow regime in the Yangtze River, China[J]. *Science of The Total Environment*, 2018, 624: 1187-1194.
- [35] ALSALEH M, ABDULWAKIL M M, ABDUL-RAHIM A S. Land-use change impacts from sustainable hydropower production in EU28 region: An empirical analysis[J]. *Sustainability*, 2021, 13(9): 4599.
- [36] SHI L, FAN H J, YANG L Y, et al. NDVI-based spatial and temporal vegetation trends and their response to precipitation and temperature changes in the Mu Us Desert from 2000 to 2019[J]. *Water Science and Technology*, 2023, 88(2): 430-442.
- [37] 张景华, 封志明, 姜鲁光, 等. 澜沧江流域植被 NDVI 与气候因子的相关性分析[J]. *自然资源学报*, 2015, 30(9): 1425-1435.
ZHANG J H, FENG Z M, JIANG L G, et al. Analysis of the correlation between NDVI and climate factors in the Lancang River Basin[J]. *Journal of Natural Resources*, 2015, 30(9): 1425-1435.
- [38] LIU Q Q, WANG S J, LI B, et al. Dynamics, differences, influencing factors of eco-efficiency in China: A spatiotemporal perspective analysis[J]. *Journal of Environmental Management*, 2020, 264: 110442.
- [39] 张庭康, 王军邦, 叶辉, 等. 高寒生态系统脆弱性及其对气候变化和人类活动的响应[J]. *生态学报*, 2024, 44(1): 154-170.
ZHANG T K, WANG J B, YE H, et al. Vulnerability of alpine ecosystems and its response to climate change and human activities[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2024, 44(1): 154-170.
- [40] 贾建辉, 陈建耀, 龙晓君, 等. 水电开发对河流生态系统服务的效应评估与时空变化特征分析: 以武江干流为例[J]. *自然资源学报*, 2020, 35(9): 2163-2176.
JIA J H, CHEN J Y, LONG X J, et al. Evaluating the cumulative impacts of the hydropower development on the river ecosystem services in terms of spatial and temporal aspects: A case study in the mainstream of the Wujiang River[J]. *Journal of Natural Resources*, 2020, 35(9): 2163-2176.
- [41] 刘琦, 刘世梁, 赵清贺, 等. 漫湾水电站建设的景观生态风险时空分异及影响因子研究[J]. *安全与环境学报*, 2012, 12(6): 113-118.
LIU Q, LIU S L, ZHAO Q H, et al. Landscape ecological risk and the influential factors of Manwan Hydropower Station under construction[J]. *Journal of Safety and Environment*, 2012, 12(6): 113-118.
- [42] QIN Y, WANG F, ZHANG S Y, et al. Impacts of cascade hydropower development on aquatic environment in middle and lower reaches of Jinsha River, China: A review[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2024, 31(42): 54363-54380.
- [43] WANG J F, WANG X X, JI Y H, et al. Climate factors determine the utilization strategy of forest plant resources at large scales[J]. *Frontiers in Plant Science*, 2022, 13: 990441.
- [44] 余慧婕, 张方敏, 马赫, 等. 基于遥感生态指数的淮河流域生态环境质量时空演化及其驱动因素分析[J]. *环境科学*, 2024, 45(7): 4112-4121.
YU H J, ZHANG F M, MA H, et al. Spatio-temporal evolution and driving factors of ecological environment quality in the Huaihe River Basin based on RSEI[J]. *Environmental Science*, 2024, 45(7): 4112-4121.

(责任编辑 王海锋)