

DOI:10.13870/j.cnki.stbxb.2024.05.017

赵晓燕, 谈树成, 张素, 等. 基于遥感生态指数改进模型的沱江流域生态环境质量时空变化及驱动力研究[J]. 水土保持学报, 2024, 38(5): 151-163.
ZHAO Xiaoyan, TAN Shucheng, ZHANG Su, et al. Analysis of spatial and temporal changes and driving forces of ecological environment quality in Tuojiang River Basin based on RSEI Improved modeling[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2024, 38(5): 151-163.

基于遥感生态指数改进模型的沱江流域生态环境质量时空变化及驱动力研究

赵晓燕^{1,2}, 谈树成³, 张素⁴, 李永平⁵, 吴汉¹, 王超²

(1. 内江师范学院地理与资源科学学院, 四川 内江 641000; 2. 云南大学国际河流与生态安全研究院, 昆明 650500; 3. 云南大学地球科学学院, 昆明 650500; 4. 大连大学生命健康学院, 辽宁 大连 116000; 5. 内江师范学院国际教育学院, 四川 内江 641000)

摘要: [目的] 沱江流域面临严重的水土流失、水环境污染和土壤侵蚀等生态环境问题, 开展流域生态环境质量评价对推动长江上游生态环境保护和流域社会经济高质量发展具有重要意义。[方法] 基于谷歌地球引擎平台, 选取 2000—2020 年的 Landsat 遥感影像, 以绿度、湿度、热度、干度、生物丰度指数构建生态环境质量评价模型, 采用变异系数、一元线性回归和空间自相关分析方法对流域内生态环境质量的时空演变格局进行分析, 并运用最优参数地理探测器模型 (optimal parameter geographic detector model, OPGD) 对其驱动力进行探测。[结果] (1) 2000—2020 年, 沱江流域生态环境质量多年平均值为 0.66, 等级以良为主, 占比为 63.01%。成都周边区县、内江、自贡、泸州等城镇地区生态环境质量较差, 呈现南北低中间高的空间分布格局。(2) 沱江流域生态环境质量总体呈下降趋势, 生态环境质量变差的趋势显著, 轻微退化和显著退化面积占比分别为 19.75% 和 5.88%。人口密度大, 社会经济发展水平高的城镇化地区, 生态环境质量以较高波动为主, 占比为 18.15%。(3) 2000—2020 年沱江流域全局自相关莫兰指数范围为 0.769~0.870, 主要分布在第 1 象限和第 3 象限, 局部自相关的高—高集聚区和低—低集聚区范围随时间呈显著变化, 景观斑块破碎化明显。(4) OPGD 结果表明, 土地利用类型、坡度、高程、夜间灯光为流域生态环境质量变化的主要驱动因子, 人口密度、气温和 GDP 为次要驱动因子, 降水量和坡向因子影响较小。土地利用类型与其他因子交互作用增强对流域内生态环境质量变化的影响。[结论] 改进的遥感生态指数模型对开展区域生态环境质量评价提供新方法, 研究结果为生态环境保护提供参考。

关键词: 生态环境质量; 改进遥感生态指数模型; 时空分析; 驱动力; 地理探测器模型; 沱江流域
中图分类号: X826; X835 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-2242-(2024)05-0151-13

Analysis of Spatial and Temporal Changes and Driving Forces of Ecological Environment Quality in Tuojiang River Basin Based on RSEI Improved Modeling

ZHAO Xiaoyan^{1,2}, TAN Shucheng³, ZHANG Su⁴, LI Yongping⁵, WU Han¹, WANG Chao²

(1. School of Geography and Resource Science, Neijiang Normal University, Neijiang, Sichuan 641000, China; 2. Institute of International Rivers and Ecological Security, Yunnan University, Kunming 650500, China; 3. School of Earth Science, Yunnan University, Kunming 650500, China; 4. College of Life and Health, Dalian University, Dalian, Liaoning 116000, China; 5. Office of International Exchange and Cooperation, Neijiang Normal University, Neijiang 641000, China)

Abstract: [Objective] Tuojiang River Basin is facing serious ecological and environmental problems such as soil erosion, water environment pollution and soil erosion. It is of great significance to carry out the

收稿日期: 2024-04-17 修回日期: 2024-05-15 录用日期: 2024-06-10 网络首发日期 (www.cnki.net): 2024-08-12
资助项目: 国家自然科学基金青年基金项目 (42207413); 沱江流域生态工程治理背景下水土环境时空变化研究项目 (TJGZL2020-07); 云南省教育厅科技创新团队项目 (CY22624109)
第一作者: 赵晓燕 (1990—), 女, 博士研究生, 主要从事景观生态学和生态系统服务研究。E-mail: 843358083@qq.com
通信作者: 谈树成 (1970—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事灾害地质、环境地质与矿产地质研究。E-mail: shchtan@ynu.edu.cn

<http://stbxb.alljournal.com.cn>

evaluation of the ecological and environmental quality of this basin in order to promote the ecological environmental protection of the upper reaches of the Yangtze River and the high-quality sustainable development of the basin's socio-economy. [Methods] Based on the Google Earth Engine platform, Landsat remote sensing images from 2000 to 2020 were selected to construct an ecological environment quality evaluation model with NDVI, WET, LST, NDBSI, and AI indices, and the coefficient of variation, one-way linear regression, and spatial autocorrelation analysis methods were used to analyze the spatial and temporal evolution pattern of ecological environment quality in the watershed, and to detect the driving force using the optimal parameter Geographic Detector Model(OPGD). [Results] (1) During the period of 2000—2020, the multi-year average value of ecological environmental quality in the Tuojiang River Basin is 0.66, and the grade is mainly good, accounting for 63.01%. The ecological environment quality in the surrounding districts and counties of Chengdu, Neijiang, Zigong, Luzhou and other towns and regions is poor, showing a spatial distribution pattern of low north-south and high middle. (2) The ecological environment quality of the Tuojiang River Basin is generally on a declining trend, and the trend of deterioration of ecological environment quality is significant, with the ratio of slightly degraded and significantly degraded areas being 19.75% and 5.88%. The urbanized areas with high population density and high level of socio-economic development are dominated by higher fluctuations in ecological environment quality, accounting for 18.15%. (3) The global autocorrelation Moran index of Tuojiang River Basin during 20 years ranged from 0.769 to 0.870, which was mainly distributed in the first and third quadrants, and the ranges of local autocorrelation high-high agglomerations and low-low agglomerations showed significant changes over time, with obvious fragmentation of the landscape patches. (4) The OPGD results show that land use type, slope, elevation, and nighttime lighting are the main drivers of ecological quality change in the watershed, population density, temperature, and GDP are secondary drivers, and precipitation and slope orientation factors are less influential. Land use type interacted with other factors to enhance the influence on the change of ecological environment quality in the watershed. [Conclusion] The improved remote sensing eco-index model provides a new method for regional ecological environment quality evaluation, and the results of the study provide a reference for ecological environment protection.

Keywords: ecological environment quality; improved remote sensing ecological index model; spatio-temporal analysis; driving forces; the geographic detector model; Tuojiang River Basin

Received: 2024-04-17

Revised: 2024-05-15

Accepted: 2024-06-10

Online(www.cnki.net): 2024-08-12

生态环境是指影响人类生产、生活和生态系统可持续发展的水、土地、气候及生物资源的总和,是人类赖以生存的基础,能为社会经济可持续发展提供环境支持^[1]。工业革命以来,人类对生态环境的干扰破坏力度增大,生态环境出现环境污染、生物多样性锐减、全球气候变暖和臭氧层空洞等一系列生态环境问题,使得人们逐渐意识到生态环境保护的重要性和迫切性。2000年11月26日,国务院印发《全国生态环境保护纲要》,纲要指出要对重要生态功能区、重点资源开发区及生态良好地区开展生态环境保护,防止生态环境破坏和生态功能退化,推动社会经济可持续高质量发展^[2]。沱江流域作为四川省开发历史早、产业基础好、人口和城镇聚集的重要支流,不仅以全省4.5%的面积养育22%的人口,创造1/4的地区生产总值,

而且也是水环境污染严重的流域^[3]。然而,目前尚未看到关于沱江流域生态环境质量时空演变及驱动力研究的报道。因此,研究沱江流域生态环境质量时空变化和驱动力对推动区域社会经济可持续发展和生态环境保护具有重要意义。

目前,针对区域生态环境质量评价常使用压力-状态-响应模型^[4-5](pressure-state-response, PSR)、地理加权回归模型^[6]、生态足迹模型和生态环境指数^[7-8](ecological environment index, EI)。其中,PSR模型从社会、经济、环境和制度方面来测量环境质量,EI模型从生物丰度、植被覆盖、水网密度、土地和环境污染维度来衡量环境质量。然而,PSR和EI模型存在指标难获取、结果为固定值的不足^[9],不能定量分析生态环境质量的时空分布。2013年,徐涵秋^[9]基于

EI模型提出的遥感生态指数(remote sensing ecological index, RSEI),具有指标易获取、不需设定权重、结果可视化的优点,能够实时、快速、准确地实现区域生态环境质量评价而被学者们广泛推崇。已有学者采用遥感生态指数针对城市群^[10-12]、流域^[13]、自然保护区^[14]、交通道路^[15]、干旱区^[16]的生态环境质量开展了广泛研究并取得丰硕的成果。然而,RSEI模型未考虑到EI模型中的生物丰度指数,缺乏对生物多样性和生物资源的测量。改进的遥感生态指数(MRSEI)在绿度、湿度、热度、干度指标的基础上,参考《生态环境状况技术评价规范》(HJ 192—2015)^[17]计算生物丰度,已有学者将其应用于生态环境质量评价中,经模型对比检验发现,研究结果更加科学、客观和精准^[17-18]。由于生态环境变化受到自然因素和人类活动的综合影响,其影响作用机制非常复杂,影响因素与生态环境质量之间并非存在线性关系。最优参数地理探测器模型是在相关研究^[19]提出的地理探测器模型的基础上增加参数优化模块,通过参数优化解决可变区域单元问题和驱动因子的分区效应,在此基础上探测生态环境变化与驱动因子的内在关系。该方法不仅能识别解释变量空间分异变化的主要驱动因子,而且能对驱动因子的交互关系进行探测。已有学者将其应用于地质灾害^[20]、植被覆盖^[19]、乡村空间格局^[21]、流感发病率^[22]等研究领域中,并体现较好的适用性。然而,该方法在生态环境质量评价方面应用较少。

综上所述可知,尽管已开展许多关于生态环境质量评价的研究,但目前还没有学者在遥感生态指数的基础上考虑生物丰度指数对区域生态环境质量进行研究,并结合最优参数地理探测器模型对生态环境质量变化的驱动力进行更加精确的定量探测。沱江流域作为四川省重要经济建设带和长江上游生态屏障区,区内产业集中、人口密度大、城镇化水平高,但由于人类活动,造成植被退化、水环境污染和土壤侵蚀等生态环境问题,目前尚未看到有关沱江流域生态环境质量的研究报道。因此,本研究基于2000—2020年的Landsat影像数据,采用改进的遥感生态指数对沱江流域的生态环境质量开展评价研究。此外,运用变异系数和一元线性回归方法对其时空演变特征进行分析。采用最优参数地理探测器模型对其驱动机制进行探测。通过完善评价指标和改进评价模型,从全方面定量科学地研究沱江流域生态环境质量的演变规律和驱动力,以期流域社会经济可持续高质量发展和长江上游生态环境保护提供理论依据。

1 研究区概况与数据源

1.1 研究区概况

沱江是长江上游重要的一级支流,流经四川省经济发达的腹部地区,发源于绵竹市断头岩大黑湾,向南流经成都市的金堂县、简阳市、资阳市、内江市、自贡市和泸州市汇入长江(图1)。沱江全长712 km,流域面积为 $3.29 \times 10^4 \text{ km}^2$,形状瘦长,流域最宽的地区主要集中在自贡和内江,地形以上游山地、中游平原和下游丘陵为主,地势自西北向东南倾斜,地质构造简单,岩性主要以三叠、侏罗、白垩纪的砂岩、砂质黏土为主,流域内水系发达。气候以上游高原性季风气候和中下游亚热带季风气候为主,降水量由北向南逐渐增多,其多年平均降水量1200 mm,年径流量为 $351 \times 10^8 \text{ m}^3$,年平均气温 17°C 。沱江流经四川省城镇最为集聚、人口密度最大、经济实力最强的区域,不仅是四川省重要的工业集聚地,也是农副产品的保障基地,拥有四川省经济发展“金腰带”的称号。由于该流域开发历史早,人类生产生活和工业发展对区域生态环境的影响大,流域内水环境污染、植被退化、水土流失、自然资源破坏等生态环境问题严重,导致流域生态系统服务功能退化,严重影响流域社会经济的高质量可持续发展和长江上游的生态安全。因此,探究沱江流域生态环境质量的时空演变规律和驱动机制,有利于推进流域经济的健康发展和生态环境保护。



注:基于标准地图服务系统下载的审图号GS(2019)3333号的标准地图制作,底图未做修改。

图1 沱江流域区位

Fig. 1 Tuojiang river basin location

1.2 数据源与预处理

本研究的时段为 2000—2020 年,数据主要有 Landsat5 TM 和 Landsat8 OLI/TIRS 遥感影像,空间分辨率为 30 m,下载于谷歌地球引擎平台(<https://earthengine.google.com/>);数字高程模型选用 2019 年生成的 30 m DEM (ASTER DEM V3) 数据,并借助 ArcGIS 10.7 软件提取坡度、坡向、高程指标;气温为 1982—2022 年的年平均气温,降水量为 1901—2022 年的逐月降水量数据,气温和降水量数据的空间分辨率 1 000 m;夜间灯光数据为 2000—2022 年空间分辨率为 500 m 全球范围的类 NPP-VIIRS,以上数据均来自国家地球系统科学数据中心(<http://www.geodata.cn/>);GDP 和人口密度数据空间分辨率为 1 000 m,下载于中国科学院资源环境科学数据中心(<https://www.resdc.cn/>);土地利用类型数据来源于自然资源部发布的 2020 版 30 m 全球土地覆被数据(<https://www.globallandcover.com/>)。本文所使用的数据均通过 ArcGIS 平台按研究区进行掩膜提取并定义统一投影坐标。考虑到遥感影像质量受流域内气象条件的影响,故选取 5—10 月,云量<20%,质量较高的 Landsat 遥感影像。基于 Google Earth Engine 平台,对影像进行拼接、裁剪、镶嵌等预处理,便于后续改进遥感生态指数的计算和分析。为了探究流域内生态环境质量变化的驱动力,结合前人研究成果^[23-26]和实地调研,选取坡度、坡向、高程、气温、降水量、人口密度、GDP、夜间灯光和土地利用类型为影响植被覆盖变化的因子,参与最优参数地理探测器模型的计算,驱动因子见图 2。

2 研究方法

2.1 RSEI 改进模型的构建

遥感生态指数是基于 EI 指标而创建的模型^[9],具有指标易获取、无需设定权重、能对其空间分布进行可视化分析的优点,而被学者广泛应用于区域生态环境质量评价。由于沱江流域地处亚热带季风气候区,地形以平原和丘陵为主,人类活动强度大,生态系统复杂,生物物种量丰富。此外,传统的 RSEI 模型缺乏对 EI 指标中生物丰度的测量^[9],在综合研究区特征、前人相关研究^[17-18]和传统模型的基础上,构建绿色度、湿度、热度、干度、生物丰度指数的改进遥感生态指数,其表达式为:

$$\text{MRSEI} = f(\text{NDVI}, \text{WET}, \text{LST}, \text{NDBSI}, \text{AI}) \quad (1)$$

式中:MRSEI 为改进的遥感生态指数。其中,NDVI 表示绿色度,WET 表示湿度,LST 表示热度,NDBSI 表示干度,AI 表示生物丰度。绿色度、湿度、热度、干度和生物丰度的计算公式分别为:

$$\text{NDVI} = \frac{\rho_{\text{NIR}} - \rho_{\text{Red}}}{\rho_{\text{NIR}} + \rho_{\text{Red}}} \quad (2)$$

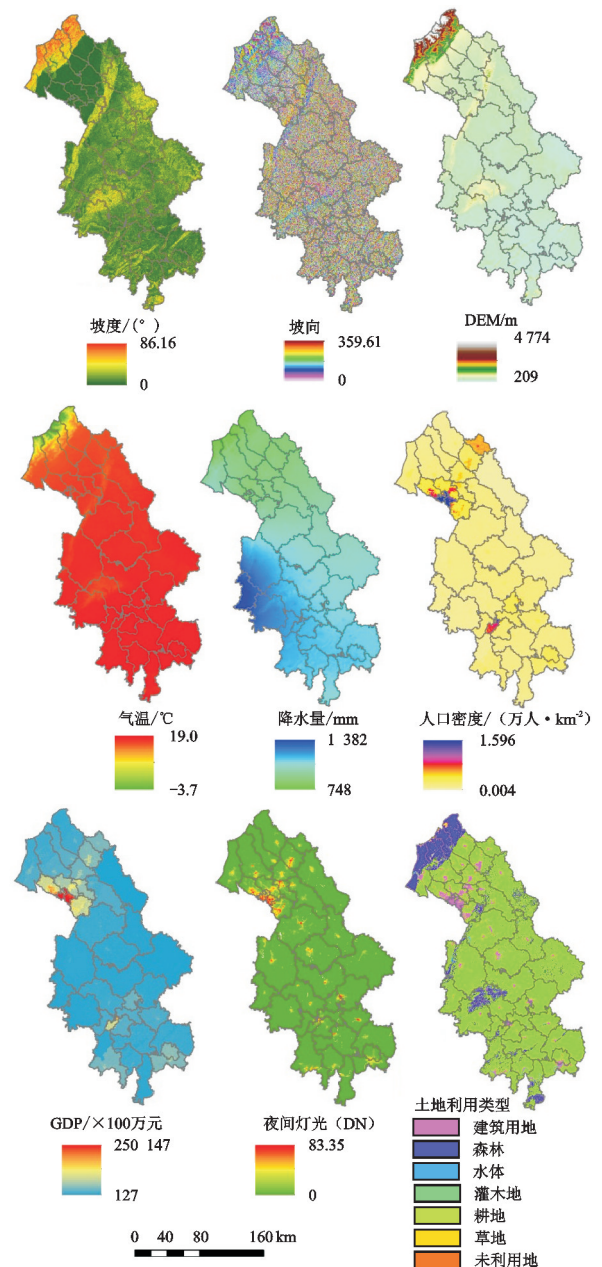


图 2 影响因子空间分布

Fig. 2 Spatial distribution of impact factors

$$\text{Wet}_{\text{TM}} = 0.031 \ 5\rho_{\text{Blue}} + 0.202 \ 1\rho_{\text{Green}} + 0.310 \ 2\rho_{\text{Red}} + 0.159 \ 4\rho_{\text{NIR}} - 0.680 \ 6\rho_{\text{SWIR1}} - 0.610 \ 9\rho_{\text{SWIR2}} \quad (3)$$

$$\text{Wet}_{\text{OLI}} = 0.151 \ 1\rho_{\text{Blue}} + 0.197 \ 2\rho_{\text{Green}} + 0.328 \ 3\rho_{\text{Red}} + 0.340 \ 7\rho_{\text{NIR}} - 0.711 \ 7\rho_{\text{SWIR1}} - 0.455 \ 9\rho_{\text{SWIR2}} \quad (4)$$

$$\text{LST} = Tb + C_i \quad (5)$$

$$\text{SI} = \frac{(\rho_{\text{SWIR1}} + \rho_{\text{Red}}) - (\rho_{\text{Blue}} + \rho_{\text{NIR}})}{(\rho_{\text{SWIR1}} + \rho_{\text{Red}}) + (\rho_{\text{Blue}} + \rho_{\text{NIR}})} \quad (6)$$

$$\text{BI} = \frac{\frac{2\rho_{\text{SWIR2}}}{\rho_{\text{SWIR1}} + \rho_{\text{NIR}}} - \left(\frac{\rho_{\text{NIR}}}{\rho_{\text{NIR}} + \rho_{\text{Red}}} + \frac{\rho_{\text{Green}}}{\rho_{\text{Green}} + \rho_{\text{SWIR1}}} \right)}{\frac{2\rho_{\text{SWIR2}}}{\rho_{\text{SWIR1}} + \rho_{\text{NIR}}} + \left(\frac{\rho_{\text{NIR}}}{\rho_{\text{NIR}} + \rho_{\text{Red}}} + \frac{\rho_{\text{Green}}}{\rho_{\text{Green}} + \rho_{\text{SWIR1}}} \right)} \quad (7)$$

$$NDBSI = \frac{IBI + SI}{2} \quad (8)$$

$$AI = A \times (0.35 \times \text{Forest} + 0.21 \times \text{Grassland} + 0.28 \times \text{Water} + 0.11 \times \text{Cropland} + 0.04 \times \text{Built} + 0.01 \times \text{Unused}) / \text{Area} \quad (9)$$

式中: W_{etTM} 和 W_{etOLI} 分别为 Landsat 5 TM 和 Landsat 8 OLI 传感器获取影像的湿度分量计算方法。 ρ_{Blue} 、 ρ_{Green} 、 ρ_{NIR} 、 ρ_{Red} 、 ρ_{SWIR1} 和 ρ_{SWIR2} 分别为 Landsat 影像的蓝光、绿光、近红外、红光、短波红外 1 和短波红外 2 波段的反射值; Tb 为 TIRS 传感器通道的大气顶层反射值; ϵ 为地表比辐射率; A_i 、 B_i 、 C_i 由线性回归确定,具体见参考文献[10]; AI 为丰度归一化指数,林地、草地、水体、耕地、建筑用地、未利用地分别表示为该地类的面积; $Area$ 为所有地类的总面积,具体见参考文献[19]。

2.2 空间分析方法

空间自相关作为一种地理学统计方法,主要用于度量某位置数据与周围邻近单元数据在空间上的依赖关系,主要包括全局自相关(Moran's I 指数)和局部自相关(LISA)。莫兰指数(Moran's I)用于描述某种现象的整体分布情况,判断这种现象在空间分布上的集聚效应,但不能具体指出集聚的具体位置。LISA 指数能推算出某现象集聚的具体位置或范围,不仅通过显著性大小来检定某现象的空间集聚地区,而且能度量空间单元对整个研究区空间自相关的影响程度,影响程度大的地区就是某现象的集聚地区。Moran's I 指数和 LISA 的计算公式为:

$$\text{Moran's } I = \frac{n \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n W_{ij} Z_i Z_j}{\sum_{i \neq j} W_{ij} \sum_{i=1}^n Z_i^2} \quad (10)$$

$$\text{LISA} = \frac{n Z_i}{\sum_{i=1}^n Z_i^2} \sum_{j=1}^n W_{ij} Z_j \quad (11)$$

式中: n 为生态环境评价单元的总个数; W_{ij} 为评价单元的权重值; Z_i 和 Z_j 分别表示第 i 个生态环境评价单元和第 j 个生态环境质量等级的属性值。

2.3 最优参数地理探测器模型(OPGD)

最优参数地理探测器模型是在相关研究[19]提出的地理探测器模型的基础上增加参数优化模块,由单因子探测、交互探测、风险探测和生态探测组成。OPGD 模型可以探测自变量不同尺度空间单元 q 值的大小,当解释变量 q 值在某一空间单元达到最大时,该空间单元则为自变量的最佳空间尺度。此外,该模型还采用自然断点法、相等间隔分类、分位数分类、几何间隔分类和标准差分类多种方法对自变量进行离散化处理,通过计算分类方法对自变量断点数组组合对应的 q 值来确定最优的离散方法和间断数。其优点是解决依靠经验或统

一离散方法对不同自变量定量分析效果不佳的缺点,通过最优的空间尺度和分区间隔,缩小自变量的组内方差,增加组间的显著性差异,精准定量地分析自变量对因变量的驱动机制,提高研究结果的精度和科学性[19]。其中,单因子探测、交互探测、风险探测和生态探测相关原理和公式见参考文献[27]。

本研究借助 ArcGIS 的空间分析工具,采用随机点创建渔网,网格大小设置为 1 km,将自变量和因变量的值进行处理,以便在 OPGD 模型中运用。采用 R 语言中的 GD 包,运用不同离散方法对驱动因子的分区间隔点进行探测发现,坡度、高程和人口密度为 8 个区间的自然断点法分类,坡向为 8 个区间的分位数分类,气温为 8 个区间的标准差分类,降水量为 7 个区间的标准差分类,GDP 为 4 个区间的几何间隔分类,夜间灯光为 8 个区间的几何间隔分类(图 3)。

3 结果与分析

3.1 RSEI 模型与 MRSEI 模型的对比

通过对研究区 2020 年 RSEI 模型和 MRSEI 模型的指标进行主成分分析(表 1),从表 1 可以看出,2020 年 PC1 对 RSEI 模型和 MRSEI 模型的贡献率分别为 65.78% 和 78.32%,两者均 $> 65\%$,说明 PC1 包含各指标的大部分信息。根据统计学原理,当主成分累计超过 75%,可表征大部分信息[28]。且 MRSEI 模型的第 1 主成分贡献率远大于 RSEI 模型,故采用改进的 MRSEI 模型来评价沱江流域生态环境质量更合理。同时,PC1 中 NDVI、WET 和 AI 为正值,对生态环境质量起正向作用;NDBSI 和 LST 为负值,对生态环境质量起负向作用,与 LI 等[18] 研究结果一致,符合实际情况。

3.2 沱江流域生态环境质量时空变化特征

运用 ArcGIS 软件的空间分析工具计算 2000—2020 年沱江流域生态环境质量的平均值,采用无量纲数据 0~1 表示生态环境质量的优劣,MRSEI 值越接近 1,表示生态环境质量越好。本研究的 MRSEI 值主要集中 0.3~0.9,尤其在 0.5~0.7 分布密集,符合正态分布。参考相关研究[25],将研究区生态环境质量划分为 5 个等级,分别是差[0~0.45)、较差[0.45~0.55)、中等[0.55~0.65)、良[0.65~0.75)和优[0.75~1],见图 4(a)。通过计算 2000 年和 2020 年沱江流域生态环境质量变化的差值,得到图 4(b)。沱江流域 2000—2020 年生态环境质量 MRSEI 平均值为 0.66,有 71% 的区域面积 MRSEI 值 > 0.65 ,生态环境质量整体较好,在空间分布上呈现“南北低、中间高”的分布格局。沱江流域生态环境质量较差的地区集中在北部的金牛区、郫都区、彭州市、新都区、都

江堰市、什邡市、绵竹市及南部的内江、自贡、泸州部分城镇地区。这些地区城镇化发展较快,人口密集,工农业发展水平高,人类生产活动对区域生态环境的干扰破坏力度大,生态环境质量差。通过对 2000 年和 2020 年沱江流域 MRSEI 的差值分析发现,研究

区生态环境质量整体有所下降,有 18.67% 的区域生态环境质量变差,3.52% 的区域变好,77.81% 的区域不变,需重点关注生态环境质量变差的区域,研究其变化的内在驱动力,采取措施力争达到社会经济发展与生态环境保护的平衡点。

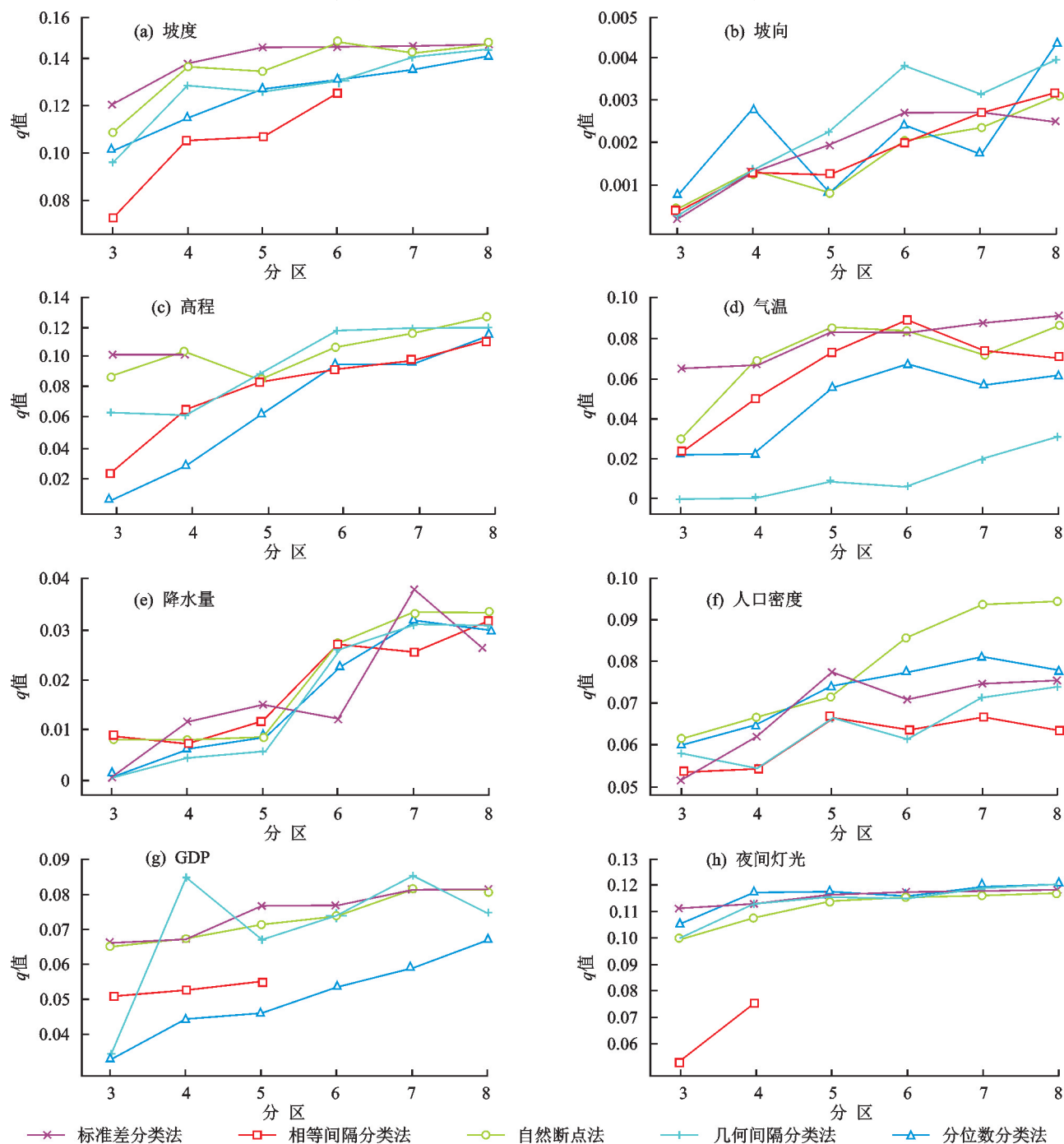


图 3 基于最优参数地理探测器的自变量分区效应

Fig. 3 Independent variable partitioning effects based on optimal parametric geographic detector

通过拟合沱江流域 2000—2020 年的 MRSEI 值的趋势变化及采用 Slope 函数对生态环境质量进行线性回归分析(图 5)可知,沱江流域 2000—2020 年生态环境质量整体呈下降趋势,从 2000 年 0.731 下降到 2020 年的 0.561,下降幅度为 $-0.009/a$ 。研究区生态环境质量变化趋势特征以基本稳定和轻微改善

为主,占比分别为 29.67% 和 29.61%。

然而,生态环境质量变差的趋势显著,轻微退化和显著退化区域面积占比分别为 19.75% 和 5.88%,主要分布在城镇化水平高、人口密度大、工农业生产活动集中的地区,尤其是成都市、内江市和泸州市等地。

表 1 主成分分析结果						
Table 1 Principal component analysis results						
模型	指标	PC1	PC2	PC3	PC4	PC5
RSEI	NDVI	0.468	0.251	−0.145	−0.143	
	WET	0.203	−0.136	0.091	0.016	
	NDBSI	−0.296	0.641	−0.266	−0.131	
	LST	−0.089	−0.194	0.243	−0.114	
	特征值	3.450	0.561	0.164	0	
	特征值累计贡献率/%	65.780	82.420	89.160	100.000	
MRSEI	NDVI	0.453	0.264	−0.412	−0.241	0.103
	WET	0.216	0.178	−0.191	−0.219	0.241
	NDBSI	−0.321	0.265	−0.456	0.361	−0.264
	LST	−0.103	−0.213	0.293	0.168	0.008
	AI	0.378	0.295	−0.238	0.135	−0.184
	特征值	4.210	0.501	0.300	0.233	0
	特征值累计贡献率/%	78.320	87.650	93.230	97.560	100.000

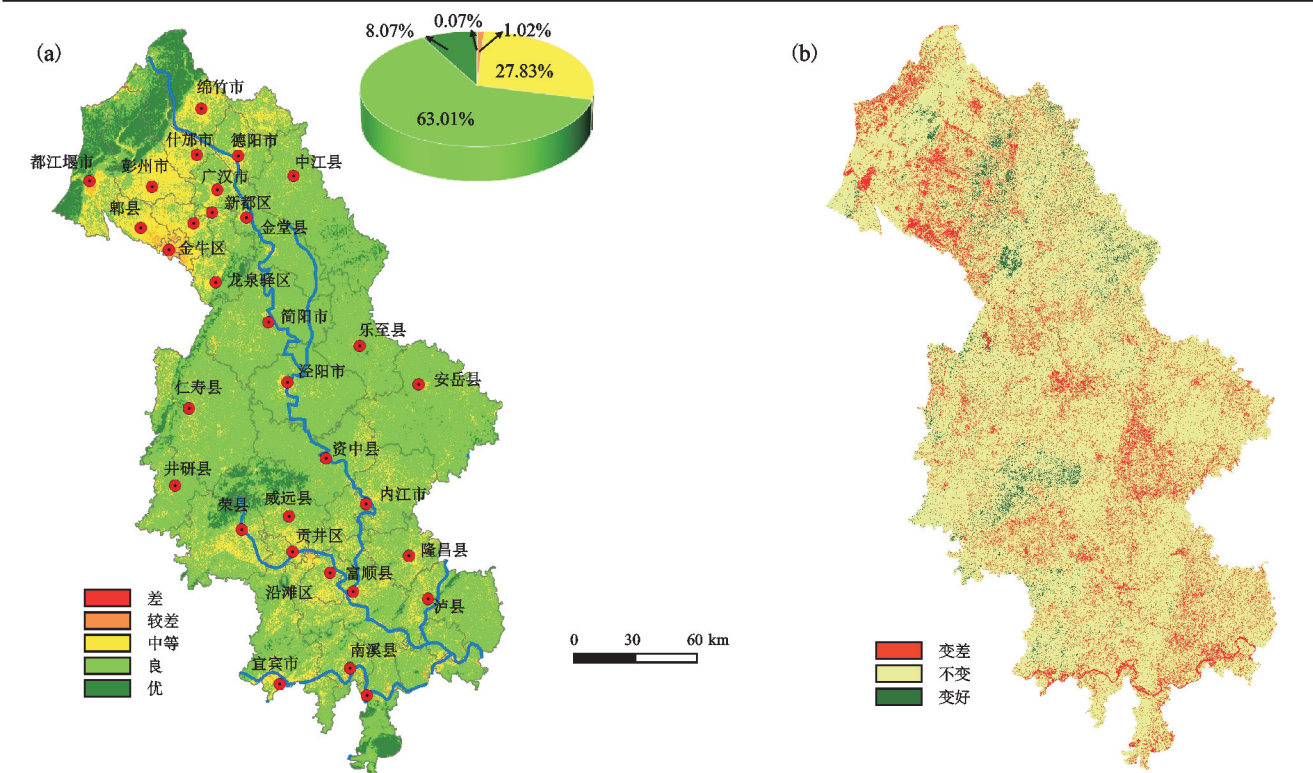


图 4 2000—2020 年沱江流域生态环境质量空间分布及变化

Fig. 4 Spatial distribution and change of ecological environment quality in Tuojiang River Basin from 2000 to 2020

3.3 沱江流域生态环境质量变化稳定性分析

运用变异系数法对沱江流域生态环境质量变化的稳定性程度进行分析。按照自然断点法将其划分为低波动、较低波动、中等波动、较高波动和高波动(图 6)。沱江流域生态环境质量在空间上以低波动和较低波动为主,占比分别为 17.14%和 39.80%。主要分布在坡度较大、海拔较高、土地利用类型为林地和耕地的区域。高波动和较高波动的面积占比分别为 3.64%和 18.15%,主要分布在人口稠密、土地利用类型为建筑用地的城镇地区,尤其是岷山的东南坡、成都市的周边区县、仁

寿县、内江市、资中县及宜宾市的江安县。

3.4 沱江流域生态环境质量空间自相关分析

为了分析沱江流域生态环境质量变化的空间分异特性,采用 1 km×1 km 的栅格单元对流域内 2000—2020 年的 MRSEI 进行重采样,得到 41 346 个采样点,并计算采样点的全局自相关和局部自相关。结果表明,2000 年、2005 年、2010 年、2015 年和 2020 年的全局自相关的 Moran's *I* 指数分别为 0.870,0.832,0.845,0.775,0.769,显著性水平 *p* 值均<0.01,表明研究结果具有可信度。Moran's *I* 指数分布在第 1 象限,表明 MRSEI 较

好的采样点具有高-高属性相集聚,分布在第 3 象限表明 MRSEI 较差的采样点具有低-低属性相集聚,而 Moran's I 指数越接近 0,表明 MRSEI 值随机分布,不存在空间自相关。然而,研究中 Moran's I 指数聚集在第 1 象限和第 3 象限,表明沱江流域生态环境质量变化在空间分布上具有极强的集聚性,具有正相关或负相关关系,即质量优或差的区域在空间上存在集聚现象。

为了进一步分析沱江流域生态环境质量变化在空间上集聚的具体位置或范围,采用 LISA 指数分析区内 MRSEI 值的集聚现象。由图 7 可知,具有正相关性的高-高聚集区主要分布在流域的源头、井研县、荣县、中江县南部等地区,这些地区坡度大、海拔高,以林地和草地为主,人类社会经济活动小,对生态环境的干扰和破坏程度小,生态环境质量好。具有负相关性的低-低聚集区主要分布在成都市的周边区县、内江市、资中县、江安县和南溪县等地区,这些区域人口密度大、城镇化发展水平高、地势平坦、坡度小、地类以建筑用地和未利用地为主,社会经济发展快,人类活动作用于生态环境的强度和频率高,生态环境质量差。

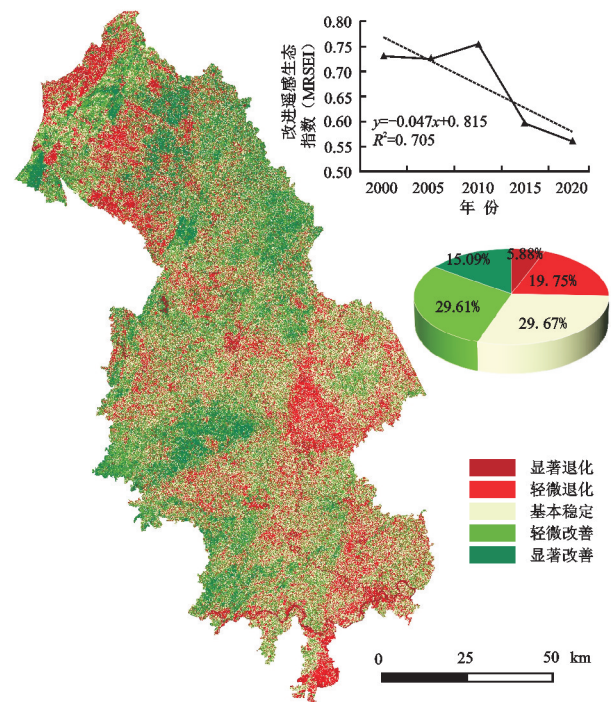


图 5 沱江流域生态环境质量时间变化特征

Fig. 5 Characteristics of temporal changes in ecological quality in the Tuojiang River Basin

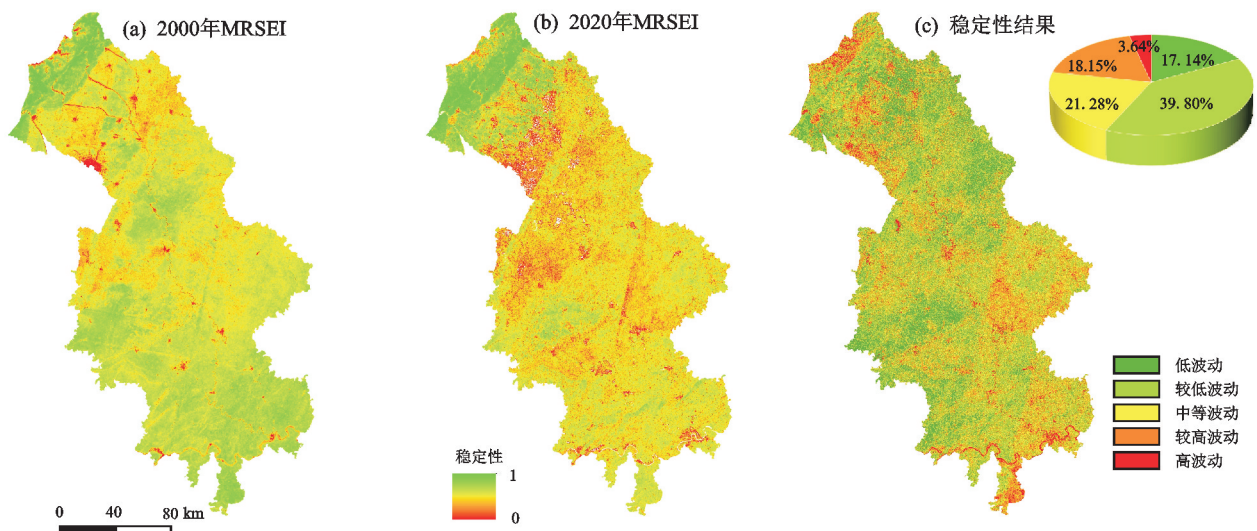


图 6 沱江流域生态环境质量稳定性分析

Fig. 6 Stability analysis of ecological environment quality in Tuojiang River Basin

2000—2020 年,高-高集聚区和低-低集聚区面积先增大后减少,景观斑块逐渐破碎化,尤其是流域的上游地区变化显著,表明区域内生态环境质量变差。因此,应加强对区域生态环境的保护,找准生态环境保护和社会经济发展的平衡点,推动流域社会经济高质量和可持续发展。

3.5 沱江流域生态环境质量变化驱动力分析

本研究选取坡度、坡向、高程、气温、降水量等自然因素和人口密度、GDP、夜间灯光和土地利用类型等人

为因素作为沱江流域生态环境质量变化的影响因子。将 2020 年的 MRSEI 值作为因变量,影响因子作为自变量输入到最优参数地理探测器模型中进行单因子探测、交互探测、生态探测的计算。单因子探测结果显示,除坡向因子 p 值为 0.083 外,其余影响因子 p 值为 0,均通过显著性检验(表 2)。各驱动因子对生态环境质量变化的贡献值降序排列为土地利用类型>坡度>高程>夜间灯光>人口密度>气温>GDP>降水量>坡向。土地利用类型对生态环境质量变化的解释力最强, q 值为 0.275,其次是坡度、高程和夜间灯光, q 值分别为 0.144,0.136 和 0.121,为研究区生态环境质量

变化的主要驱动因子。人口密度、气温、GDP 和降水量等自然和人为因素为次要驱动因子。坡向对生态环境质量变化的影响较小,可以忽略不考虑。综上所述,沱江流域生态环境质量变化受到自然因素和人为

因素的双重影响,尤其是区域内不同土地利用的方式对生态环境的破坏程度有所差异,说明人类活动作用于地表的下垫面,通过改变下垫面的性质来影响区域生态系统的结构和功能,进而影响生态环境的质量。

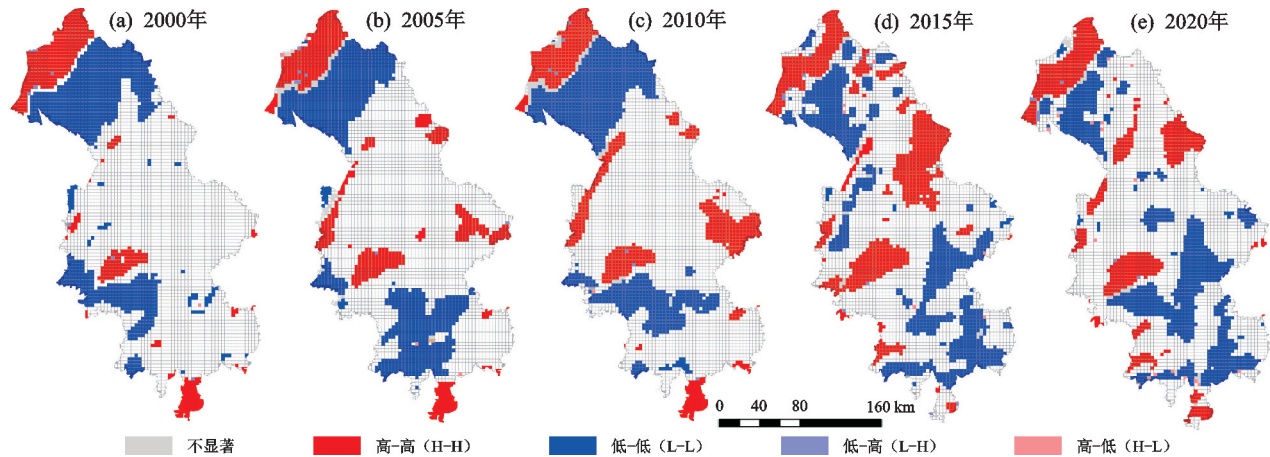


图 7 沱江流域生态环境质量的 LISA 聚类图

Fig. 7 LISA clustering map of ecological quality in the Tuojiang River Basin

表 2 沱江流域生态环境质量变化驱动因子的 q 值和 p 值

Table 2 q -values and p -values of the drivers of ecological quality change in the Tuojiang River Basin									
驱动因子	土地利用类型	坡度	高程	夜间灯光	人口密度	气温	GDP	降水量	坡向
q 值	0.275	0.144	0.136	0.121	0.090	0.092	0.085	0.038	0.004
p 值	0	0	0	0	0	0	0	0	0.083

为了探测自然因素和人为因素中任意 2 个因子交互作用对区域生态环境质量的影响,采用 OPGD 模型中的 5 种交互方式对驱动因子进行交互探测(图 8)。探测结果显示,任意 2 个因子交互作用均增强对区域生态环境质量的影响,交互关系为双因子增强和非线性增强。对于沱江流域而言,土地利用类型与其他任意因子交互作用均达到最大影响值,解释力 q 值均 >0.286 ,尤其是与高程交互作用时 q 值最大,为 0.320,表明区域内不同的土地利用方式与海拔有着密切关系,两者相互作用对生态环境质量变化有着显著的影响力。其次,土地利用类型与气温、人口密度、夜间灯光、降水量、GDP 和坡向交互作用均大于单因子对生态环境质量变化的影响力,表明在人口密度大、夜间灯光强、人均收入水平高、气温和降水量适中的地区,土地利用类型以建筑用地和耕地为主,人类经济活动强度大,对生态环境的破坏力度大,区域生态环境质量差。

风险探测结果(图 9)显示,驱动因子的不同分类区间对生态环境质量的影响有显著差异,因子分类值的 q 值越大表示生态环境质量越好。图 9 显示自然因子中,当坡度为 $22.8^{\circ}\sim 32.8^{\circ}$,坡向为东南方向,高程为 1 380~2 010 m,气温为 $13.1\sim 13.9^{\circ}\text{C}$,降水量为 753~851 mm 时,绿度、湿度、丰度指数大,热度和干度指数小,生态环境质量优。社会因子中,当人均 GDP 为 88 100~250 000 元/年,人口密度为 1.2~1.6 万人/km,夜间灯光

指数为 26.4~83.3 Lux 和土地利用类型为未利用地时,人类活动对生态环境的干扰破坏力度大,生态结构破坏,功能下降,区域生态环境质量差。

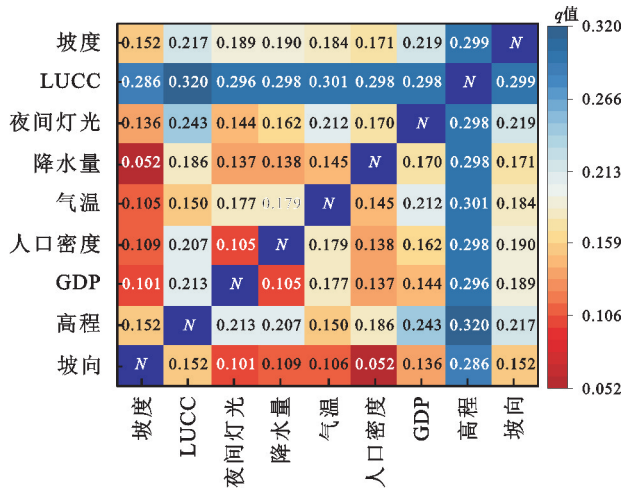


图 8 驱动因子交互作用探测结果

Fig.8 Driver interaction detection results

图 10 为各驱动因子不同分类区间对生态环境质量变化的风险矩阵, Y 表示显著相关, N 表示显著不相关。除坡向因子外,其他因子大部分分类区间对生态环境质量变化呈显著相关。不同地类对生态环境质量变化显著性低,尤其是耕地与水体、耕地与未利用地,耕地与建筑用地。这些表明驱动因子的范围不同,对生态环境质量的空间分布显著性不同。

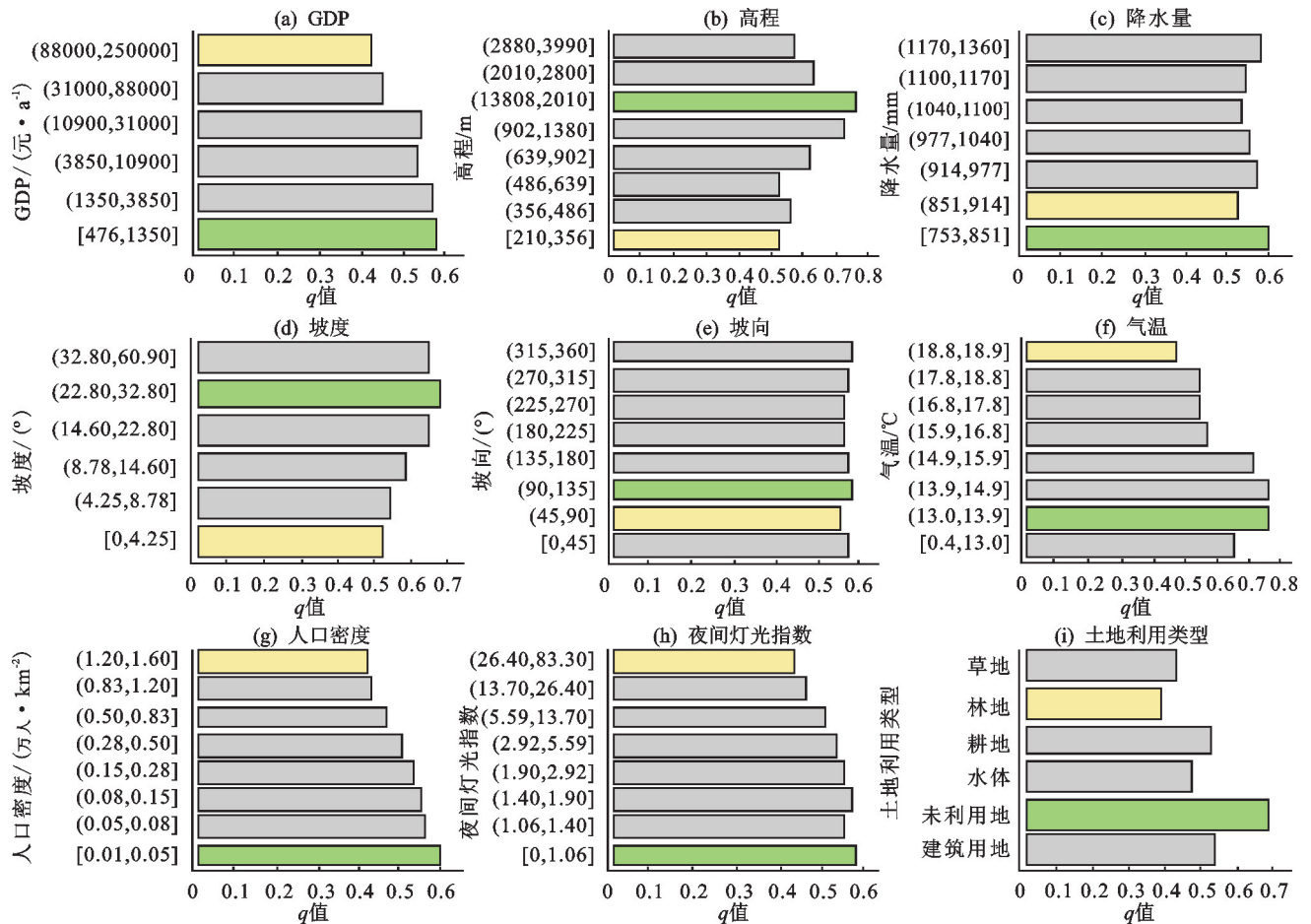


图 9 驱动因子不同分类区间生态环境质量的风险探测结果

Fig. 9 Statistical results of ecological quality in different classification intervals of drivers

4 讨论

4.1 沱江流域生态环境质量变化总体特征

本研究以绿度、湿度、热度、干度、丰度指标构建生态环境质量评价模型,采用线性回归、变异系数和空间自相关分析方法对沱江流域 2000—2020 年生态环境质量变化的时空特征进行深入分析。本研究表明,沱江流域生态环境质量平均值从 2000 年的 0.731 下降到 2020 年的 0.561,在 2010 年出现高值突变点为 0.755,说明流域内 MRSEI 值整体上波动下降,生态环境质量变差。

从空间上看,沱江上游的成都市周边区县、中下游的资中县、内江市、泸州市和宜宾的长宁县等地生态环境质量呈显著退化或轻微退化趋势,为高波动或较高波动地区,局部空间自相关 LISA 值显示为低-低聚集区,生态环境质量差,这可能与人类社会经济活动密切相关。结合图 2 和表 1 可以看出,流域内土地利用类型主要以耕地为主,占比为 81%,且为流域生态环境质量变化的主要驱动因子。

从 2000 年以来,沱江流域秉承优越的地理区位优势开发历史早,是四川省工业的聚集地和农副产品的生产基地,吸引大量的人口涌入,人口密集,城镇化发展

速度快,人类社会经济活动对区域环境破坏严重,主要表现在水环境污染、植被破坏、水土流失及自然资源破坏。在地势平坦和海拔较低的丘陵和盆地地区,适宜农耕,农耕使土壤松软,在季风强降雨的作用下,水土流失严重。该地区也适宜城镇的建设,建筑用地面积增加,破坏植被,改变下垫面的性质,节水保水差,在全球变暖的背景下,气温异常高值频繁,出现干旱等气象灾害。与此同时,结合图 4、图 5 和图 6 可以发现,沱江源头地区生态环境质量高,空间自相关显示为高-高聚集区,但近年来呈现波动大、显著退化的趋势。通过查阅资料分析可知,这是由于源头地区海拔高、坡度大、地处龙门山褶皱断裂带、地势陡峻,沟谷纵横,是崩塌、滑坡、泥石流、山洪等自然灾害的易发区,同时受汶川地震和芦山地震的影响,灾害活动尤为频繁。2008 年什邡市发生“8·13”泥石流灾害,2012 年“8·18”和 2013 年“7·11”,彭州市均发生过山洪灾害,绵竹市在汶川地震后地质灾害发生的频率增加^[29]。

整体而言,在自然因素和人类活动的双重影响下,沱江流域生态环境质量下降,要在未来的开发中注意生态环境保护和区域可持续发展的协调。

4.2 MRSEI 模型的适应性分析

通过对 2020 年基于 RSEI 模型与 MRSEI 模型的沱江流域生态环境质量评价结果分析可知,RSEI 模型与 MRSEI 模型的标准差分别为 0.114 和 0.205,根据 XU 等^[17]和唐盼丽^[28]的研究,标准差越大,越能表征数据的离散程度表明,增加生物丰度指数后的 MRSEI 模型更能反映区域的差异性。通过将 Landsat 影像与 RSEI 和

MRSEI 模型的局部细节对比(图 11),结合图 1 可知,1,3 处为旌阳市区和雁江市区,人口密集,建筑用地占比大,生态环境质量差;2 处为威远县的新场镇地区,地势较大,人口稀疏,林地和耕地占比大,生态环境质量好。通过对比分析可以看出,基于 MRSEI 模型的沱江流域生态环境质量评价结果优于 RSEI 模型,更贴合实际情况,对区域评价的适应性更好。

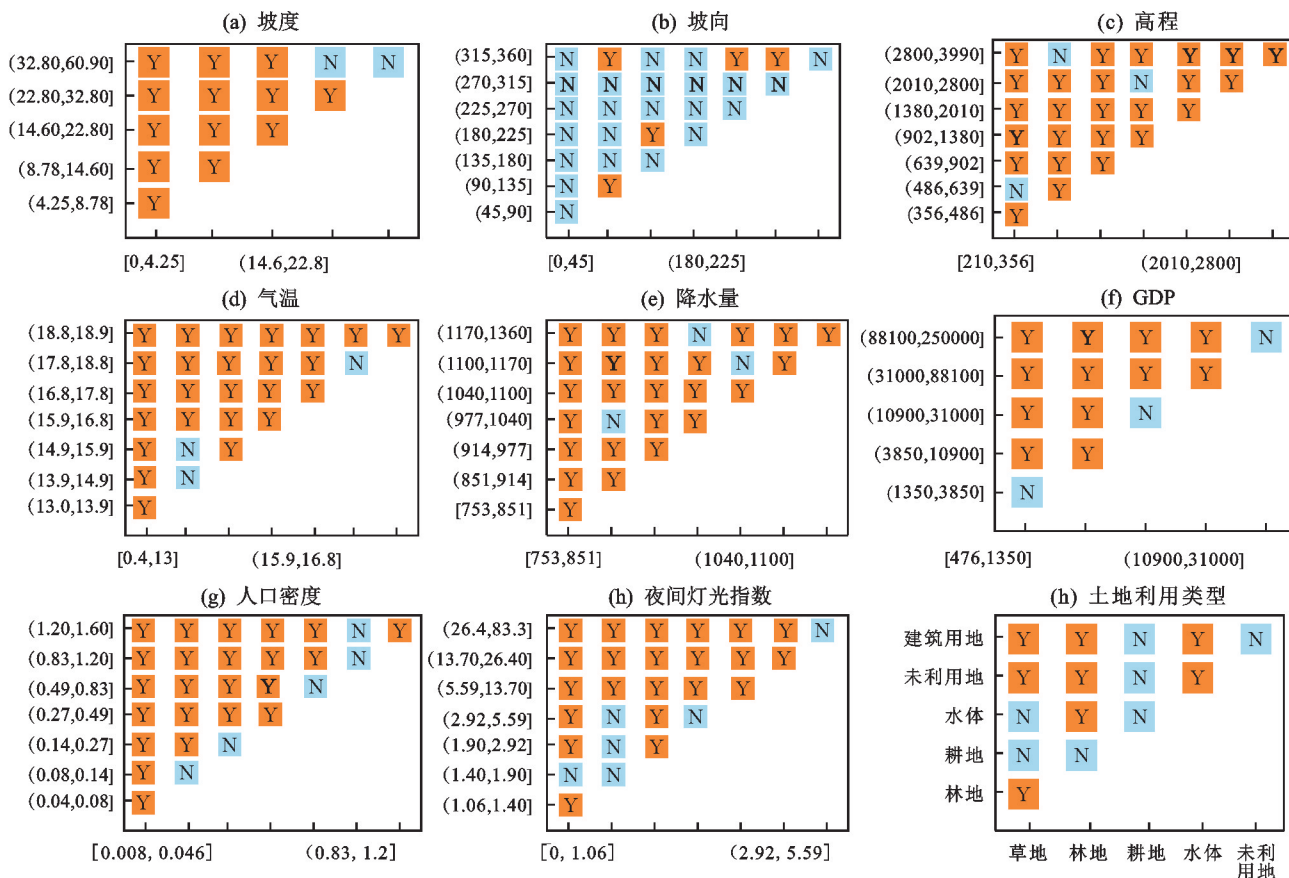
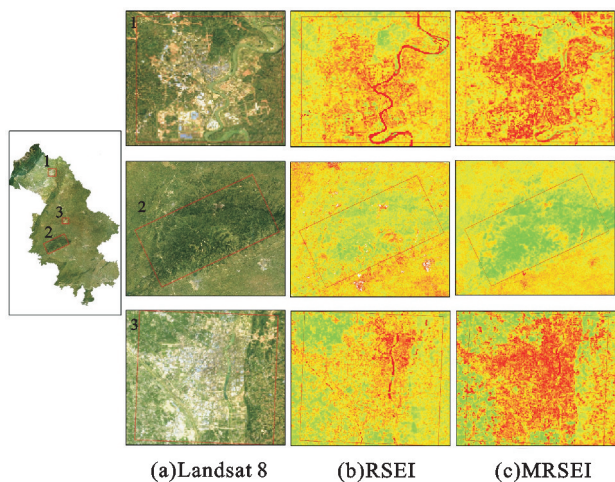


图 10 各驱动因子不同分类区间对生态环境质量变化的风险矩阵

Fig. 10 Risk matrix of ecological environment quality changes for different classification intervals of driving factors



注:1,2,3 分别为旌阳市区、威远县新场镇地区、雁江市区。

图 11 2020 年的 Landsat 影像与 RSEI 和 MRSEI 模型的局部细节对比

Fig. 11 Comparison of 2020 Landsat imagery with RSEI and MRSEI models in localized detail

5 结论

(1)2000—2020 年,沱江流域生态环境质量整体较好,多年平均值为 0.66。按照自然断点法将其划分为差、较差、中等、良和优 5 个等级,占比分别为 0.07%,1.02%,27.83%,63.01%和 8.07%。MRSEI 值从 2000 年的 0.731 下降到 2020 年的 0.561,表明流域生态环境质量总体下降,变差的区域占比为 18.687%。

(2)线性回归分析表明,研究区生态环境质量变差的趋势显著,轻微退化和显著退化的占比为 19.75%和 5.88%,主要分布在城镇化水平高、人口密度大、工农业生产活动集中的地区,生态环境质量稳定性以高波动为主,质量较差。

(3)沱江流域生态环境质量呈显著正相关。高-高集聚区主要分布在流域的源头、井研县、荣县和中江县南部地区,低-低集聚区分布在成都市的周边区县、内江市、资中县、江安县和南溪县等地区。景观斑

块逐渐破碎,尤其是流域的上游地区,区域内生态环境质量变差。

(4)OPGD 探测显示,驱动因子对生态环境质量变化的贡献值降序排列为土地利用类型>坡度>高程>夜间灯光>人口密度>气温>GDP>降水量>坡向。自然因素和人为因素交互作用增强对生态环境质量的影响。因此,要充分发挥人类的主观能动性,找准生态保护和经济发展的平衡点,推动流域社会经济的高质量可持续发展,做好长江上游生态环境保护屏障的建设。

参考文献:

- [1] 赵其国,黄国勤,马艳芹.中国生态环境状况与生态文明建设[J].生态学报,2016,36(19):6328-6335.
ZHAO Q G, HUANG G Q, MA Y Q. The ecological environment conditions and construction of an ecological civilization in China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36 (19): 6328-6335.
- [2] 赵锐,任昕芸,苏伟洲,等.价值核算体系融合物质流分析的沱江流域生态系统生产总值分配研究[J].云南农业大学学报(自然科学),2023,38(3):520-528.
ZHAO R, REN X Y, SU W Z, et al. Study on distribution of Tuojiang River Basin ecosystem product by value accounting system combined with material flow analysis [J]. Journal of Yunnan Agricultural University (Natural Science), 2023, 38(3): 520-528.
- [3] 张天翼,潘洪义,姚材仪,等.基于服务簇的沱江流域生态系统服务权衡/协同关系演变[J/OL].生态与农村环境学报,2023. DOI: 10.19741/j.issn.1673-4831.2023.0570.
ZHANG T Y, PAN H Y, YAO C Y, et al. Evolution of ecosystem service trade-offs and synergies in the Tuojiang River Basin based on ecosystem service Bundles[J/OL]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2023. DOI: 10.19741/j.issn.1673-4831.2023.0570.
- [4] WANG F, LU Y, LI J, et al. Evaluating environmentally sustainable development based on the PSR framework and variable weigh analytic hierarchy process[J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2021, 18(6): e2836.
- [5] LIU L, ZHANG Q, WANG C L, et al. Comprehensive eco-environmental impact assessment of urban planning based on pressure—state—response model[J]. Applied Ecology and Environmental Research, 2019, 17 (6): 14455-14463.
- [6] 范金明,张超,钱慧,等.云南生态环境质量演变过程及驱动力分析[J].西南林业大学学报(自然科学),2024,44(5):1-8.
FAN J M, ZHANG C, QIAN H, et al. Analysis on the evolution process of ecological environment quality and driving force of Yunnan, China[J]. Journal of Southwest Forestry University (Natural Sciences), 2024, 44(5): 1-8.
- [7] WANG C L, JIANG Q O, SHAO Y Q, et al. Ecological environment assessment based on land use simulation: A case study in the Heihe River Basin[J]. Science of the Total Environment, 2019, 697: e133928.
- [8] YANG W P, LI D. Spatio-temporal evolution of ecological environment quality in China from a concept of strong sustainability [J]. Environmental Science and Pollution Research International, 2022, 29 (19): 28769-28787.
- [9] 徐涵秋.区域生态环境变化的遥感评价指数[J].中国环境科学,2013,33(5):889-897.
XU H Q. A remote sensing index for assessment of regional ecological changes[J]. China Environmental Science, 2013, 33(5): 889-897.
- [10] 王渊,赵宇豪,吴健生.基于 Google Earth Engine 云计算的城市群生态质量长时序动态监测:以粤港澳大湾区为例[J].生态学报,2020,40(23):8461-8473.
WANG Y, ZHAO Y H, WU J S. Dynamic monitoring of long time series of ecological quality in urban agglomerations using Google Earth Engine cloud computing: A case study of the Guangdong-Hong KongMacao Greater Bay Area, China [J]. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40 (23): 8461-8473.
- [11] 吴小波,范晓雨,刘晓敬,等.基于 Google Earth Engine 云平台的成渝城市群生态环境质量时空变化[J].生态学杂志,2023,42(3):759-768.
WU X B, FAN X Y, LIU X J, et al. Temporal and spatial variations of ecological quality of Chengdu-Chongqing Urban Agglomeration based on Google Earth Engine cloud platform[J]. Chinese Journal of Ecology, 2023, 42(3): 759-768.
- [12] 郑子豪,吴志峰,陈颖彪,等.基于 Google Earth Engine 的长三角城市群生态环境变化与城市化特征分析[J].生态学报,2021,41(2):717-729.
ZHENG Z H, WU Z F, CHEN Y B, et al. Analyzing the ecological environment and urbanization characteristics of the Yangtze River Delta Urban Agglomeration based on Google Earth Engine[J]. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(2): 717-729.
- [13] 冯荣荣,张凯莉,韩佳宁,等.沱河流域生态环境质量的遥感评价及影响因子分析[J].生态与农村环境学报,2022,38(7):860-871.
FENG R R, ZHANG K L, HAN J N, et al. Remote sensing evaluation and influence factor analysis of ecological environment quality in the Fenghe River watershed [J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2022, 38(7): 860-871.
- [14] 杨绘婷,徐涵秋.基于遥感空间信息的武夷山国家级自然保护区植被覆盖度变化与生态质量评估[J].应用生态

- 学报,2020,31(2):533-542.
- YANG H T, XU H Q. Assessing fractional vegetation cover changes and ecological quality of the Wuyi Mountain National Nature Reserve based on remote sensing spatial information[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2020,31(2):533-542.
- [15] 傅楷翔,贾国栋,余新晓,等.基于改进遥感生态指数的青藏公路那(曲)安(多)段生态环境评估及驱动机制分析[J].环境科学,2024,45(3):1586-1597.
- FU K X, JIA G D, YU X X, et al. Ecological environment assessment and driving mechanism analysis of Nagqu and amdo sections of Qinghai-Xizang highway based on improved remote sensing ecological index[J]. Environmental Science, 2024,45(3):1586-1597.
- [16] 张伟,杜培军,郭山川,等.改进型遥感生态指数及干旱区生态环境评价[J].遥感学报,2023,27(2):299-317.
- ZHANG W, DU P J, GUO S C, et al. Enhanced remote sensing ecological index and ecological environment evaluation in arid area[J]. National Remote Sensing Bulletin, 2023,27(2):299-317.
- [17] XU D, YANG F, YU L, et al. Quantization of the coupling mechanism between eco-environmental quality and urbanization from multisource remote sensing data[J]. Journal of Cleaner Production, 2021,321:e128948.
- [18] LI W J, AN M, WU H L, et al. The local coupling and telecoupling of urbanization and ecological environment quality based on multisource remote sensing data[J]. Journal of Environmental Management, 2023,327:e116921.
- [19] ZHAO X Y, TAN S C, LI Y P, et al. Quantitative analysis of fractional vegetation cover in southern Sichuan urban agglomeration using optimal parameter geographic detector model, China[J]. Ecological Indicators, 2024,158:e111529.
- [20] 张若婧,陈跃红,张晓祥,等.基于参数最优地理探测器的江西省山洪灾害时空格局与驱动力研究[J].地理与地理信息科学,2021,37(4):72-80.
- ZHANG R J, CHEN Y H, ZHANG X X, et al. Spatial-temporal pattern and driving factors of flash flood disasters in Jiangxi Province analyzed by optimal parameters-based geographical detector [J]. Geography and Geo-Information Science, 2021,37(4):72-80.
- [21] 李琛,吴映梅,高彬,等.高原湖泊乡村聚落空间分异及驱动力探测:以环洱海地区为例[J].经济地理,2022,42(4):220-229.
- LI C, WU Y M, GAO B P, et al. Spatial differentiation and driving factors of rural settlement in plateau lake: A case study of the area around the Erhai[J]. Economic Geography, 2022,42(4):220-229.
- [22] SONG Y Z, WANG J F, GE Y, et al. An optimal parameters-based geographical detector model enhances geographic characteristics of explanatory variables for spatial heterogeneity analysis: Cases with different types of spatial data[J]. GIScience and Remote Sensing, 2020, 57(5): 593-610.
- [23] YAN Y B, CHAI Z Y, YANG X D, et al. The temporal and spatial changes of the ecological environment quality of the urban agglomeration on the northern slope of Tianshan Mountain and the influencing factors [J]. Ecological Indicators, 2021,133:e108380.
- [24] 王永祥,徐园园,杨佳嘉,等.基于 Landsat 的重庆市生态环境质量动态监测及其时空格局演变分析[J].生态学报,2023,43(15):6278-6292.
- WANG Y X, XU Y Y, YANG J J, et al. Dynamic monitoring and spatio-temporal pattern evolution analysis of eco-environmental quality in Chongqing based on remote sensing [J]. Acta Ecologica Sinica, 2023,43(15):6278-6292.
- [25] 李光哲,王浩,曹银璇,等.长株潭城市群生态环境质量时空演变及影响因素分析[J].自然资源遥感,2023,35(4):244-254.
- LI G Z, WANG H, CAO Y X, et al. Spatio-temporal evolution and influencing factors of ecological environment quality in the Changsha-Zhuzhou-Xiangtan urban agglomeration[J]. Remote Sensing for Natural Resources, 2023,35(4):244-254.
- [26] 陈炜,黄慧萍,田亦陈,等.基于 Google Earth Engine 平台的三江源地区生态环境质量动态监测与分析[J].地球信息科学学报,2019,21(9):1382-1391.
- CHEN W, HUANG H P, TIAN Y C, et al. Monitoring and assessment of the eco-environment quality in the Sanjiangyuan Region based on google earth engine [J]. Journal of Geo-Information Science, 2019, 21(9): 1382-1391.
- [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] 唐盼丽.基于 RS 和 GIS 的城市化与生态环境近远程耦合协调关系研究[D].武汉:武汉理工大学,2022.
- TANG P L. Local and telecoupling coordination relationship between urbanization and eco-environment based on RS and GIS[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2022.
- [29] 李璇琼,梁延龙.地质灾害引发土地利用响应机制研究:以四川绵竹为例[J].西北地质,2022,55(1):236-248.
- LI X Q, LIANG Y L. Land use response mechanism caused by geological disaster: Taking Mianzhu City as an example[J]. Northwestern Geology, 2022,55(1):236-248.