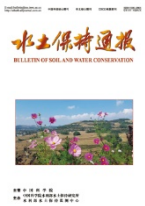


水土保持通报
Bulletin of Soil and Water Conservation
ISSN 1000-288X,CN 61-1094/X

《水土保持通报》网络首发论文

题目：基于RSEI改进模型的生态环境质量评价及驱动机制——以湖南省桃江县为例
作者：陈创，聂平静，黄凤寸，樊东，向莉，曾剑，陈方伟，胡庚辛
DOI：10.13961/j.cnki.stbctb.20240528.002
网络首发日期：2024-05-30
引用格式：陈创，聂平静，黄凤寸，樊东，向莉，曾剑，陈方伟，胡庚辛．基于RSEI改进模型的生态环境质量评价及驱动机制——以湖南省桃江县为例[J/OL]．水土保持通报．https://doi.org/10.13961/j.cnki.stbctb.20240528.002

网络首发：在编辑部工作流程中，稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定，且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式（包括网络呈现版式）排版后的稿件，可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定；学术研究成果具有创新性、科学性和先进性，符合编辑部对刊文的录用要求，不存在学术不端行为及其他侵权行为；稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准，正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性，录用定稿一经发布，不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容，只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认：纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊（光盘版）》电子杂志社有限公司签约，在《中国学术期刊（网络版）》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版，以单篇或整期出版形式，在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊（网络版）》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物（ISSN 2096-4188，CN 11-6037/Z），所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

DOI：10.13961/j.cnki.stbctb.20240528.002　网络首发时间：2024-05-30 13:10:51
网络首发地址：https://link.cnki.net/urlid/61.1094.X.20240528.1508.004

基于 RSEI 改进模型的生态环境质量评价及驱动机制
——以湖南省桃江县为例

陈 创[1,2]，聂平静[1]，黄凤寸[1]，樊 东[3]，向 莉[1]，曾 剑[1]，陈方伟[1]，胡庚辛[1]

〔1.中国地质调查局长沙自然资源综合调查中心，湖南 长沙 410600；
2.中国地质大学(北京)，北京 100083；3.昆明理工大学国土资源工程学院，云南 昆明 650031〕

摘　要：[目的] 为了更好对丘陵地区生态质量进行监测和评价，本文在湿度、干度、热度因子基础上，引入核归一化植被指数(kNDVI)，提出了适用于高植被区的改进型遥感生态指数(MRSEI)，并探索其生态质量影响因素，为桃江县兼顾发展与生态提供科学支撑。[方法] 针对植被指数(NDVI)在植被茂密区的饱和性缺陷，借助改进型遥感生态指数量化了桃江县 2000—2021 年生态环境质量时序变化，并利用最优化参数的地理探测器模型对植被覆盖度、降水、气温、土地利用、海拔、人口密度等 6 个影响因子进行了驱动力分析。[结果] ①与遥感生态指数相比，改进的遥感生态指数模型能够避免高植被覆盖区 NDVI 饱和性缺陷问题，可以更准确地监测桃江县生态环境。②研究区 2000 至 2021 年 5 期的 MRSEI 均值分别为 0.77，0.84，0.83，0.75 和 0.79，生态环境质量整体表现良好，具有转好—转差—转好的变化特征。③从生态环境质量成因分析来看，土地利用是影响研究区生态环境质量的关键因子，交互式探测中，土地利用和海拔交互作用最强。[结论] 改进的 RSEI 模型能对高植被地区生态环境质量进行准确的评价，桃江县 2000—2021 年生态环境质量总体处于良好水平且呈上升趋势，生态环境质量变化主要受到自然和人为因素双重影响。

关键词：核归一化植被指数(kNDVI)；生态环境质量；改进型遥感生态指数(MRSEI)；GEE；地理探测器；驱动机制

文章编号：1000-288X(2024)03-0000-00　**中图分类号：**X830

文献参数：陈创，聂平静，黄凤寸，等.基于 RSEI 改进模型的生态环境质量评价及驱动机制[J].水土保持通报，2024，44(3)Chen Chuang，Nie Pingjing，Huang Fengcun，et al. Ecological environmental quality evaluation and driving mechanism using modified RSEI model [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation，2024，44(3)

Ecological Environmental Quality Evaluation and Driving Mechanism Using Modified RSEI Model
—A case study of Taojiang County，Hunan Province

Chen Chuang[1,2]，Nie Pingjing[1]，Huang Fengcun[1]，
Fan Dong[3]，Xiang Li[1]，Zeng Jian[1]，Chen Fangwei[1]，Hu Gengxin[1]

(1.*Changsha Center of Natural Resources Comprehensive Survey*，*China Geological Survey*，*Changsha*，*Hunan* 410600，*China*；2.*China University of Geosciences*，*Beijing* 100083，*China*；3.*School of Land and Resources Engineering*，*Kunming University of Science and Technology*，*Kunming*，*Yunnan* 650031，*China*)

Abstract：[Objective] In order to better monitor and evaluate the ecological quality of hilly areas，it is necessary to construct an accurate remote sensing ecological index of middle and high vegetation areas，and explore the influencing factors of its ecological quality in order to provide scientific support for the balance between development and ecology in Taojiang County. [Method] In order to address the saturation issue of the normalized difference vegetation index (NDVI) in densely vegetated areas，the kernel normalized

资助项目：中国地质调查局项目“洞庭湖湿地生态修复综合调查”(DD20230478)；湖南省重点研发计划项目“洞庭湖区地表基质成层过程碳源汇效应与固碳潜力研究”(2023SK2066)。
第一作者：陈创(1993—)，男(汉族)，湖南省衡阳市人，学士，助理工程师，研究方向为生态环境遥感。Email：cgscs_chenchuang@163.com。
通信作者：聂平静(1996—)，女(土家族)，湖南省湘西州人，硕士研究生，工程师，主要研究方向为定量遥感。Email：niepj.19s@igsnrr.ac.cn。

difference vegetation index (kNDVI) was introeluced and integrated with humidity, dryness, and heat factors to formulate a modified remote sensing ecology index (MRSEI). By utilizing this index, the ecological environmental quality and its temporal variation in Taojiang County from 2000 to 2021 were quantified. Additionally, a parameter-optimized geographic detector model was employed to analyze the driving forces of six influencing factors, including vegetation coverage, precipitation, temperature, land use, altitude, and population density. [Results] ① Compared with the RSEI model, the MRSEI model more effectively addressed the issue of NDVI saturation in areas with high vegetation cover, enabling a more precise monitoring of the ecological environment in Taojiang County. ② The average RSEI values for the five periods from 2000 to 2021 in the study area were 0.77, 0.84, 0.83, 0.75, and 0.79, respectively, indicating a satisfactory performance in ecological environmental quality with a trend of improvement-deterioration-improvement. ③ From the analysis of the factors influencing ecological environmental quality, land use emerged as a key determining factor in the study area. In the interactive factor detection analysis, the interaction between land use and elevation was the strongest. [Conclusion] The improved RSEI model could accurately evaluate the eco-environmental quality in high-vegetation areas. The eco-environmental quality of Taojiang County was generally at a good level and showed an upward trend from 2000 to 2021. The change of eco-environmental quality was mainly affected by both natural and human factors.

Keywords: kernel normalized diference vegetation index; ecological environmental quality; modified remote sensing ecology index; google earth engine; geographical detector; driving mechanism

随着城市的扩张、人类活动的加剧与资源过度开采等一系列问题,造成了许多区域乃至全球范围内的生态环境问题。中国“十四五”规划提出,要坚持“生态优先、绿色发展”。因此,监测区域生态环境质量及其变化趋势,对于强化生态环境治理、支撑区域规划以及实现区域可持续发展目标等具有十分重要的意义。

桃江县是国家重点生态功能区,矿产资源储量丰富,由于多年来的无序开采和保护手段滞后导致生态环境受到了严重的破坏[1],随着水源涵养能力的下降、植物群落的日益衰退以及水土流失的不断加剧,生态问题日益突出。生态过程相对于生态系统中人口迁移、土地利用变化等具有滞后性,短时间内难以判断其因果联系。因此,开展长时间序列、大空间尺度的遥感生态监测是非常必要的。

近年来,遥感生态指数(remote sensing ecology index, RSEI)[2]在生态环境监测和评价方面得到广泛应用。不同地区的生态环境具有独特特点,因此在特定区域分析时,需要适度改进 RSEI。一些学者提出了多型改进的遥感生态指数以解决这一问题。张伟等[3]针对干旱生态环境的特点,在 RSEI 模型的基础上引入盐度和水网密度(WND)构建改进型遥感生态指数(ERSEI),结果表明改进后的方法可以充分反应西北干旱区生态环境质量的变化。李晶等[4]基于黄河流域煤矿水土侵蚀易发区域,在顾及绿、湿、干、热因子的基础上引入土壤侵蚀因子(erosion),研究结果可以全面客观的揭示山西省及煤炭国家规划矿区生态环境及其变化。上述各型遥感生态指数根据实际情况提出了改进方案,然而在南方丘陵高植被覆盖地区,应用分析时需考虑植被对其生态环境的重要影响,优化绿度指数计算方式,对结果准确性有提高作用。

就生态环境质量空间分异影响因素而言,自然要素和社会经济要素相互作用共同驱动土地利用类型互相转换,从而使生态环境质量发生改变[5]。地理探测器是研究空间分异性的工具,近年来在探究生态环境质量变化空间分异特征得到了广泛应用。施智勇等[6]使用地理探测器对闽江流域近 12 a 的生态环境质量变化原因进行分析,发现干度和热度是生态环境质量时空变化的关键驱动因子。田智慧等[7]引入地理探测器模型剖析鄱阳湖流域不同影响因素对生态环境空间分异性的影响,发现人口密度是鄱阳湖流域生态环境质量变化中驱动力最大的影响因子。然而,地理探测器是一种以栅格为基础的空间统计模型,由于样本的离散程度和样本个数等因素的影响,太多的样本会导致样本的分散性,太小的样本则不能很好的体现空间异质性[8]。需要优化离散法并结合已有的先验知识对其进行分类。

针对以上问题,本研究采用 GEE 云计算平台[9]在绿度、湿度、干度、热度因子的基础上,引入 kNDVI(核归一化植被指数)替换 NDVI 作为遥感生态指数计算时的绿度因子。kNDVI 是由 Camps-Valls 等[10]提出的一种基于机器学习和核方法理论改进的核归一化植被指数(kernel normalized diference vegetation index,kNDVI)。该指数在各种应用场景、生物群落和气候带中均优于增强型植被指数(enhanced

vegetation index,EVI)和归一化植被指数,且能更好地抵抗饱和、偏差以及复杂的物候周期。研究证明了改进后的 RSEI 模型对高植被覆盖区生态环境质量评价偏高的问题起到修正作用,在描述中、高植被地区生态环境质量时信息熵更大,刻画信息更丰富,与实际复杂地表环境相呼应,更符合实际情况。最后,利用最优化参数地理探测器模型[11],揭示生态环境质量的空间分异特征,以期明确桃江县生态环境质量变化的主要影响因素,为桃江县进一步开展生态环境修复和可持续发展提供参考依据。

1　研究区概况及数据来源

1.1　研究区概况

桃江县(111°35′—112°18′E,28°12′—28°41′N)地处湘中偏北资江中下游,国土面积 2 068 km²,人口 87 万,全县城镇建成区面积为 57.38 km²,城镇化率为 50.22%;境内地形复杂,山、丘、岗、平呈犬牙状分布,平均海拔 200 m,高海拔地区分布在西南部,东北部以平原为主(图 1),年平均气温(11 ℃～18 ℃),2021 年降水量为 1 602.1 mm。土地利用以耕、林地为主,其中,林业用地占国土面积的 63.89%,拥有竹林 115 万亩,面积居全国第三、全省第一,是中国十大竹乡之一,森林覆盖率达 64.15%[12],区内植被覆盖度高,且具有多种矿物储量,自然资源十分丰富,是中国重点生态功能区之一。

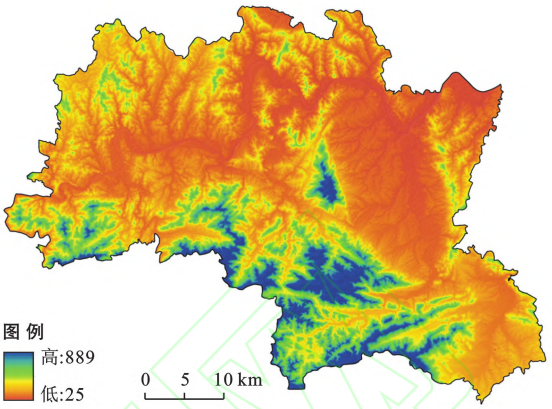


图 1　研究区地形图

Fig.1　Topographic map of the study area

1.2　数据来源及预处理

如表 1 中所显示,本研究所使用的数据有:Landsat 5/8 卫星遥感影像、降水、气温、DEM、土地利用、植被覆盖度和人口密度等数据。基于 GEE 调用经过大气校正和辐射校正的地表反射率 Landsat 5 TM/8 OLI 数据集,然后进行最小云量的筛选。先空间插值保证同一尺度,然后采用渔网分析提取 6 个因子像元值对其进行定量的驱动因素分析。

表 1　数据来源详细说明

Table 1　Detailed description of data sources

数据类型	数据名称	空间分辨率	时间范围	数据源
影像数据	Landsat 5 TM	30 m	2000 年 4 月—10 月	美国地质调查局(https://www.usgs.gov/)
	Landsat 5 TM		2004 年 4 月—10 月	
	Landsat 5 TM		2010 年 4 月—10 月	
	Landsat 8 OLI		2014 年 4 月—10 月	
	Landsat 8 OLI		2021 年 4 月—10 月	
基础数据	植被覆盖度数据	0.5 km	2000,2010,2021 年	(https://data.tpdc.ac.cn/)
	降水数据	1 km	2000,2010,2021 年	(https://data.tpdc.ac.cn/)
	气温数据	1 km	2000,2010,2021 年	NCAS(https://crudata.uea.ac.uk/cru/d)
	人口密度数据	1 km	2000,2010,2021 年	(https://hub.worldpop.org/)
	土地利用数据	30 m	2000,2010,2021 年	CLDC(https://doi.org/10.5281/zenodo.5816591)
	DEM	30 m	2000 年	NASA.NIMA(http://srtm.csi.cgiar.org/srtmdata/)

2　研究方法

2.1　改进 RSEI 模型

针对 RSEI 模型中归一化植被指数(NDVI)出现的饱和性问题[13],选取核归一化植被指数(kNDVI)、湿度(WET)、干度(NDSI)、热度(LST)四个指标,通过主成分分析法构建改进的 RSEI 模型。为避免水体面积大对 WET 的影响,在研究过程中,使用修正的归一化水体指数(Modified Normalized Difference Water Index, MNDWI)[14]将研究区的水体进行剔除。

2.1.1　指标选取

(1) 绿度。NDVI 通常被用来反映一个地区的植被生长状况,同时也是使用最广泛的指标[15-16]。但基

于 NIR 和 Red 比值的 NDVI 算式是以其易饱和为代价来减少大气的影响，主要表现在对大气干扰的处理有限，在低植被覆盖区易受土壤背景和植被冠层的影响而偏高，在植被高覆盖区则容易饱和[17]。为避免 NDVI 存在的缺陷，建立了核归一化植被指数(kNDVI)，kNDVI 通过应用机器学习和核方法理论，能够更好地处理饱和效应，提供更准确的植被覆盖信息，其计算公式为：

$$\mathrm{kNDVI}=\tanh\left[\left(\frac{\mathrm{NIR}-\mathrm{red}}{2\sigma}\right)^2\right] \tag{1}$$

式中：σ 是一个长度尺度参数，可以通过调整来反映 NDVI 对植被密度的非线性敏感性。NIR 为近红外波段；red 为红光波段；tanh 为双曲正切函数。一个合理的选择是取平均值 $\sigma=0.5(\mathrm{NIR}+\mathrm{red})$，则 kNDVI 的公式为：

$$\mathrm{kNDVI}=\tanh(\mathrm{NDVI}^2) \tag{2}$$

(2) 湿度。缨帽变换[18]是以土壤、植被等在多光谱中的空间信息分布结构为基础，对图像进行的一种经验性的线性正变交换，其中的一个成分是水分，能够更好地反映植物、土壤的水分状况，而且它易于操作。因为 Landsat TM 和 Landsat OLI 数据的各波段长度范围之间存在着一定程度的差别，比如，Landsat TM 数据的红色波段波长范围是 0.63～0.69 um，而 Landsat OLI 数据的红外波段波长范围是 0.63～0.68 um。所以，以 Landsat 系列卫星数据为基础，反演的湿度分量具有不同的经验[19-20]公式为：

$$\mathrm{WET}=0.151\,1\rho_{\mathrm{blue}}+0.197\,3\rho_{\mathrm{green}}+0.328\,3_{\mathrm{red}}+0.3404\rho_{\mathrm{nir}}-0.711\,7\rho_{\mathrm{swir1}}-0.455\,9\rho_{\mathrm{swir2}} \tag{3}$$

式中：ρ_{blue}，ρ_{green}，ρ_{red}，ρ_{nir}，ρ_{swir1}，ρ_{swir2} 分别为蓝波段、绿波段、红波段、近红波段、短波红外 1、短波红外 2。

(3) 干度。以裸土指数(SI)与建筑指数(IBI)相结合的方法，构建了一种干度指标 NDSI 来表征该区域的干度程度。建筑用地和裸露的土壤均会造成地表干化，地表干化一定程度上会造成区域生态环境污染。干度指标同时考虑建筑用地与裸土的影响，即由建筑指数[21]和裸土指数[22]平均算出。公式为：

$$\mathrm{SI}=\frac{(\rho_{\mathrm{swir1}}+\rho_{\mathrm{red}})-(\rho_{\mathrm{nir}}+\rho_{\mathrm{blue}})}{(\rho_{\mathrm{swir1}}+\rho_{\mathrm{red}})+(\rho_{\mathrm{nir}}+\rho_{\mathrm{blue}})} \tag{4}$$

$$\mathrm{IBI}=\frac{2\rho_{\mathrm{swir1}}/(\rho_{\mathrm{swir1}}+\rho_{\mathrm{nir}})-[\rho_{\mathrm{nir}}/(\rho_{\mathrm{nir}}+\rho_{\mathrm{red}})+\rho_{\mathrm{green}}/(\rho_{\mathrm{green}}+\rho_{\mathrm{swir1}})]}{2\rho_{\mathrm{swir1}}/(\rho_{\mathrm{swir1}}+\rho_{\mathrm{nir}})+[\rho_{\mathrm{nir}}/(\rho_{\mathrm{nir}}+\rho_{\mathrm{red}})+\rho_{\mathrm{green}}/(\rho_{\mathrm{green}}+\rho_{\mathrm{swir1}})]} \tag{5}$$

$$\mathrm{NDSI}=\frac{\mathrm{SI}+\mathrm{IBI}}{2} \tag{6}$$

式中：NDSI 为干度指标；IBI 为建筑指数；SI 为裸土指数；ρ_{blue}，ρ_{green}，ρ_{red}，ρ_{nir}，ρ_{swir1} 分别为 Landsat 数据蓝波段、绿波段、红波段、近红波段、短波红外 1 波段的反射率。

(4) 热度。热度指标是使用辐射传输方程法反演得到，将 Landsat 热红外波段结合地表比辐射率及大气参数得到地表亮温，再经过普朗克函数获得该指标，其公式为：

$$L_\lambda=[\varepsilon B(\mathrm{LST})+(1-\varepsilon)L_\downarrow]\tau+L_\uparrow \tag{7}$$

$$B(\mathrm{LST})=\frac{[L_\lambda-L_\uparrow-\tau(1-\varepsilon)L_\downarrow]}{\tau\varepsilon} \tag{8}$$

$$\mathrm{LST}=\frac{K_2^2}{\ln\left[\frac{K_1}{B(\mathrm{LST})}+1\right]} \tag{9}$$

式中：L_λ 为热红外辐射亮度值；ε 为地表比辐射率；LST 为真实地表温度；$B(\mathrm{LST})$ 为黑体热辐射亮度；τ 为透过率；$L_\uparrow$ 和 $L_\downarrow$ 分别为大气向上、向下辐射亮度。LandsatTM：$K_1=774.89$ W/(m^2·μm·sr)，$K_2=1\ 260.56$ K；LandsatOLI：$K_1=774.89$ W/(m^2·μm·sr)，$K_2=1\ 321.08$ K。

2.1.2 RSEI 改进模型构建 以 kNDVI，WET，NDSI，LST 4 个指标构成 RSEI 改进模型(图 2)，因为每个指标具有不同的单位和数值范围，需对其数值进行归一化处理，然后采用主成分分析(PCA)对以上 4 个指标进行耦合，并使用第一主成分(PC1)建立改进的 RSEI。为统一各指标量纲，需要将各指标标准化(式 10)，然后进行主成分分析，将方差最大的第一个主成分作为 RSEI 初始值(RSEI_0)(式 11)，为了便于指标的度量和比较，可同样对 RSEI_0 进行归一化处理(式 12)。使用等间距法，将其分为差(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)一共 5 个等级，对桃江县的生态环境质量的变化情况进行分析。

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

式中：NI_i 为第 i 年归一化后的值；以 kNDVI 为例，则 I_i 为第 i 年 kNDVI，$I_{\min}$ 为第 i 年 kNDVI 的最小值，$I_{\max}$ 为第 i 年 kNDVI 的最大值。

$$\mathrm{MRSEI}_0=1-\{\mathrm{PC1}[f(\mathrm{kNDVI},\mathrm{WET},\mathrm{NDBSI},\mathrm{LST})]\} \tag{11}$$

$$\mathrm{MRSEI}=(\mathrm{RSEI}_0-\mathrm{RSEI}_{0-\min})/(\mathrm{RSEI}_{0-\max}-\mathrm{RSEI}_{0-\min}) \tag{12}$$

式中：RSEI_0 为 RSEI 初始值；PC1 为 kNDVI，WET，LST 和通过 NDSI 主成分变换后获得的第一主成分；$\mathrm{RSEI}_{0-\min}$，$\mathrm{RSEI}_{0-\max}$ 分别为 RSEI 初始值的最小值、最大值。

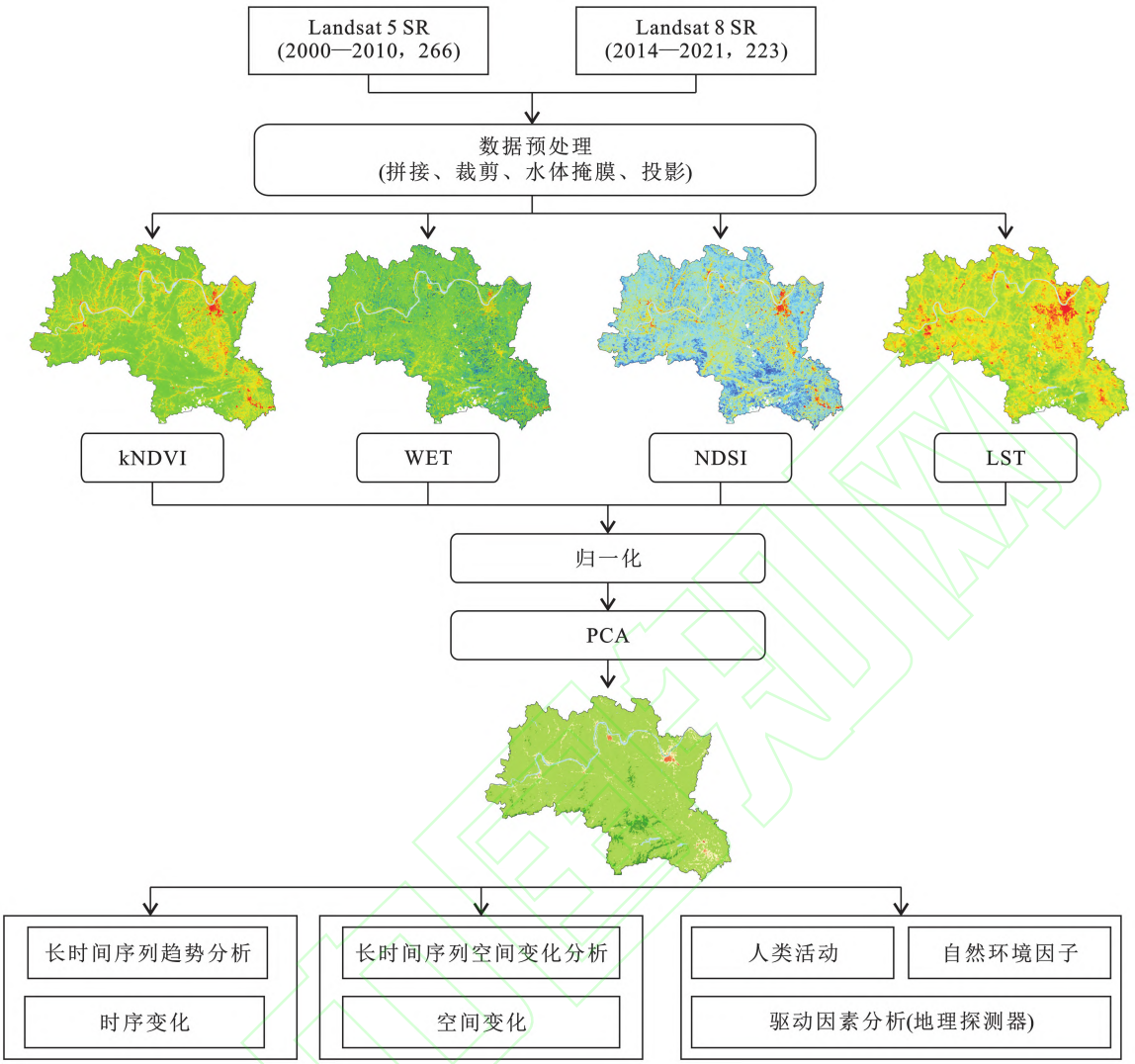


图 2　研究技术路线图

Fig.2　Flow chart of this study

2.2　地理探测器

地理探测器是一种新的统计学方法,可以用来研究空间分异度及其驱动因素,通过分析变量的空间异质性来定量探测自变量对因变量的影响程度。其中 4 种探测方法分别为:因子探测、交互作用探测、风险区探测及生态探测[23]。

单因子探测器可以用于探测因变量 RSEI 值的空间异质性,以及探测某个因子对因变量的空间分异性的解释程度,即影响因子 x_i 对 RSEI 空间分异特征存在多大程度上的解释力,计算公式为:

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

式中:L 为自变量 x_i 的分层数;N_h 和 N 为层内和区域内的样本数;σ_h^2 和 σ^2 分别为类别 h 和全区 y 值的方差,当 $\sigma^2\neq 0$ 时,模型成立;$q\in[0,1]$,q 值越大,表明 x_i 对 RSEI 空间分异特征的解释力越强。

交互作用探测:探测不同因子之间交互作用,评估每两自变量间交互效应是否会增强或减少对因变量的解释能力,也存在自变量对因变量的影响是相互独立的情况。探测因子间交互作用如表 2 所示。

表 2　交互作用关系

Table 2　Interaction relationship

关系描述	交互作用
$q(X_1\cap X_2)<\mathrm{Min}[q(X_1),q(X_2)]$	非线性减弱
$\mathrm{Min}[q(X_1),q(X_2)]<q(X_1\cap X_2)<\mathrm{Max}[q(X_1),q(X_2)]$	单因子非线性减弱
$q(X_1\cap X_2)>\mathrm{Max}[q(X_1),q(X_2)]$	双因子增强
$q(X_1\cap X_2)=q(X_1)+q(X_2)$	相互独立
$q(X_1\cap X_2)>q(X_1)+q(X_2)$	非线性增强

根据研究需求，本文采用地理探测器中的单因子探测器、交互探测器来揭示桃江县生态环境质量空间分异的影响因子，并分析各因子之间对于生态环境状况的交互作用，从多个角度定量分析各因子对生态环境质量的影响程度。

3 结果与分析

3.1 RSEI 改进模型

结合 Landsat 5/8 影像数据的质量，选取 2000，2004，2010，2014，2021 年 5 期以时间间隔为 5 年左右的数据，以期采用多期次数据获得更全面、深入的信息，更好地研究目标时空变化规律。基于 GEE 平台进行各指标计算及归一化处理，将 4 个生态因子通过主成分变换耦合得到 4 个主成分，形成 4×4 的特征向量矩阵[24]和每个主成分的特征值，再利用主成分特征值除以所有主成分特征值总和便得到该主成分的贡献率。如表 3 所示，PC1 对 RSEI 的贡献率在 66%至 80%之间，这说明 PC1 包含了各个指标的大多数信息[25]，且 PC1 贡献率易受到影像质量、研究区特点的影响[26]。同时，5 期数据 PC1 中的 kNDVI，WET 均为正值，kNDVI 与植物生物量、叶面积指数和植被覆盖度密切相关，是反映植被密度和健康状况的指标[27]。WET 反映土壤和植被的湿度，对植被生长、灾害防治和区域生态环境保护有明显正向作用。而代表热度的 LST 和干度的 NDSI 则为负值，在一定程度上反映出了现实中的干度和温度协同对生态环境起负向作用[28]。此外，绿度指标对 RSEI 贡献量最大，其次是 WET，NDSI 和 LST，成为 RSEI 中 PC1 的首要贡献者，且各个主分量的方差贡献和数值幅度的相对稳定性，说明第一主成分可用于创建最终的 RSEI。4 个指标对 PC1 均有相对稳定的贡献率，在对指标降维的情况下，最大限度集中了各指标特征[29]，依然能够解释生态环境状况。

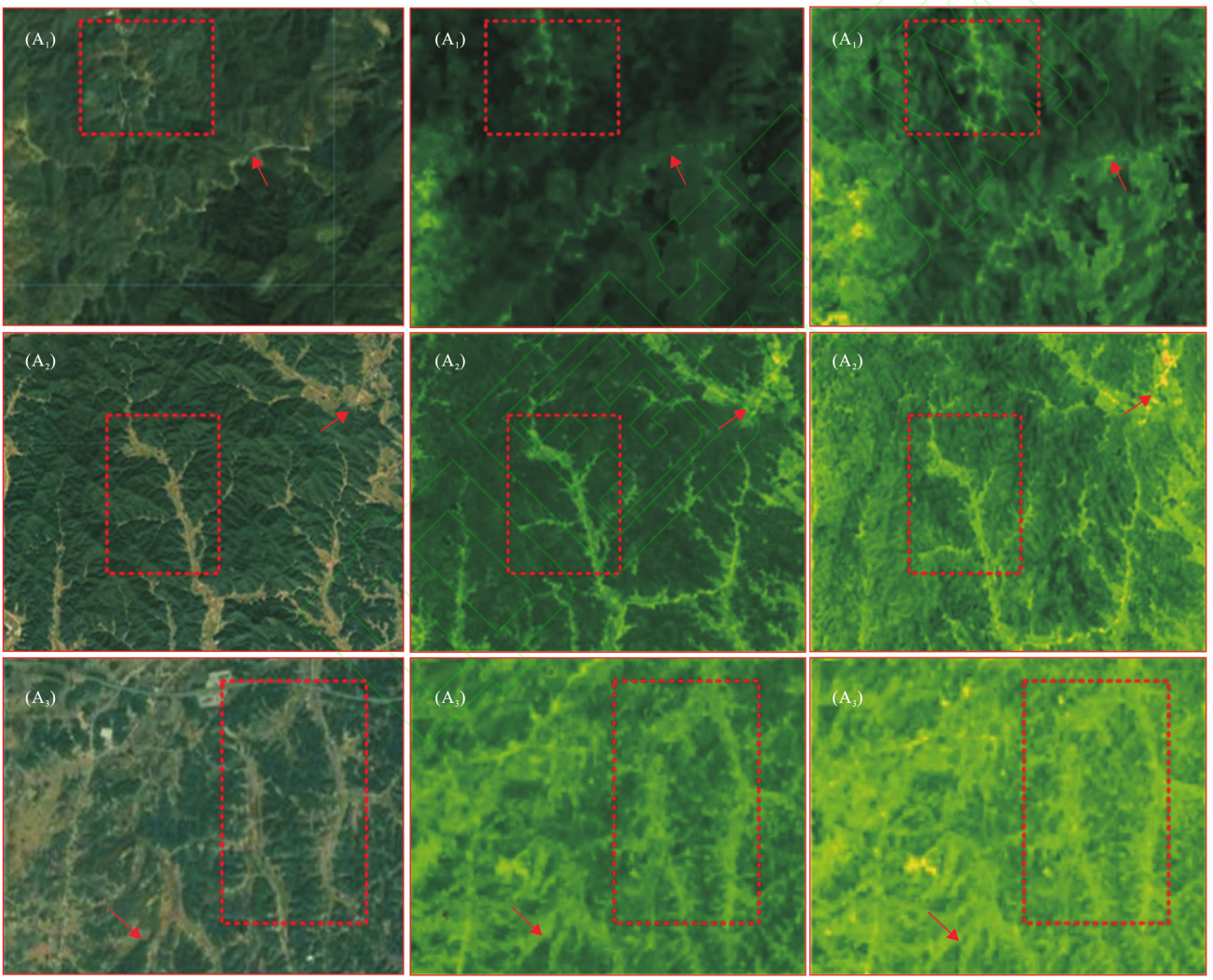
表 3 2000—2021 年各指标的主成分分析结果

Table 3 Principal component analysis results of each ind-ex from 2000 to 2021

年份	指标	PC1	PC2	PC3	PC4
2000	kNDVI	0.110	0.246	−0.131	−0.954
	WET	0.105	−0.667	−0.732	−0.083
	NDSI	−0.904	−0.371	0.211	−0.020
	LST	−0.399	0.597	−0.634	0.287
	特征值	0.007 8	0.002 9	0.001 0	0.000 4
	特征值贡献率/%	66.50	24.65	8.47	0.38
2004	kNDVI	0.899	−0.401	−0.037	0.172
	WET	0.005	0.362	−0.196	0.911
	NDSI	−0.153	−0.433	0.089	0.019
	LST	−0.410	−0.721	−0.415	0.373
	特征值	0.005 9	0.001 7	0.003 3	0.000 1
	特征值贡献率/%	73.91	21.60	4.16	0.33
2010	kNDVI	0.066	0.609	0.706	0.355
	WET	0.035	−0.110	0.522	−0.845
	NDSI	−0.971	−0.221	0.081	0.039
	LST	−0.227	0.754	−0.471	−0.398
	特征值	0.003 5	0.001 3	0.000 4	0.000 1
	特征值贡献率/%	71.46	27.41	0.86	0.27
2014	kNDVI	0.915	−0.369	−0.085	0.140
	WET	0.007	0.350	−0.045	0.936
	NDSI	−0.075	−0.335	0.924	0.170
	LST	−0.397	−0.793	−0.371	0.276
	特征值	0.010 4	0.001 8	0.000 7	0.000 1
	特征值贡献率/%	80.66	13.66	5.43	0.24
2021	kNDVI	0.486	−0.411	−0.747	0.191
	WET	0.075	0.008	−0.297	0.952
	NDSI	−0.531	−0.839	0.116	0.001
	LST	−0.689	−0.356	−0.584	0.240
	特征值	0.005 9	0.001 8	0.000 8	0.000 1
	特征值贡献率/%	69.36	21.59	8.84	0.21

3.2　改进 RSEI 与 RSEI 对比分析

在构建改进 RSEI 模型时,本研究还提取区内 2021 年的 RSEI,结果表明(图 3):在同一区域内,从局部而言,改进后的 RSEI 在在丘陵复杂地形中高、中植被覆盖 A_1,A_2 系列中可见图像复杂度更高,信息熵更大,反映信息更丰富;在中植被覆盖 A_2 系列中,传统 RSEI 在林地与耕地交接区 RSEI 值变化较剧烈,而改进后模型 RSEI 值在林地区域与耕地过渡地带表现更缓和,与真实情况中林地、耕地中间地带生态环境质量与两者相近符合;总体上,改进前,RSEI 的均值介于 0.8～0.9 之间,改进后的 RSEI 均值在 0.75～0.84 之间,相较传统 RSEI 更低,有效降低了较高植被覆盖区传统 RSEI 值计算偏高问题。且使用改进后的 RSEI 得到的相对评价结果更符合实际情况。因此,改进的 RSEI 模型,能够控制对密集植被区域的敏感性[30],可以对较高植被地区的生态状况评价偏高问题起到修正作用,更符合丘陵地区植被茂密、地形复杂的实际生境情况。



a 地表影像　　b RSEI　　c MRSEI

图 3　改进 RSEI 模型与 RSEI 结果对比

Fig.3　Comparison between the modified RSEI model and RSEI results

为了进一步验证改进 RSEI 的适用性,将所得结果与研究区部分区域进行相关性分析。由(图 4)可以看出,RSEI 与改进 RSEI 在高植被覆盖区(A_1)、中度植被覆盖区(A_2)、低植被覆盖区(A_3)的相关系数分别为 0.943,0.876 和 0.794,且 $P<0.01$。通过分析,证明改进的 RSEI 和 RSEI 一样都能反映生态质量变化情况。利用 MATLAB 软件对研究区局部细节进行信息熵计算,当熵值越大,所表达的信息越多。高植被覆盖区(A_1)RSEI 与改进的

RSEI 熵值分别是 4.673 和 4.739;对整个研究区而言,RSEI 与改进的 RSEI 熵值分别是 7.181 和 7.305。综上分析,RSEI 与改进的 RSEI 对比,后者刻画的细节更为丰富,且纹理的复杂程度更高,表明了改进 RSEI 在高植被覆盖区的适用性。

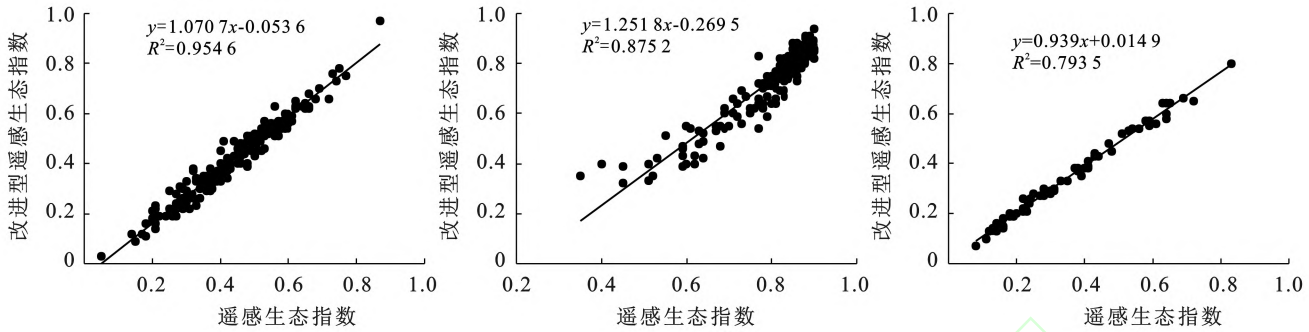


图 4 高、中、低植被覆盖下 RSEI 与 MRSEI 的相关系数

Fig.4 Correlation coefficients between MRSEI and improved RSEI under high, medium, and low vegetation cover

3.3 桃江县生态环境质量时空变化

采取等差分级的方法，以 0.2 为间隔，将 MRSEI 依次分为差、较差、中等、良、优 5 个等级。桃江县各生态级别面积比例见表 4。从时序生态等级面积变化来看，桃江县 2000—2010 年，生态环境“优良”面积比例增加了 20.58%，“中等”减少了 43.85%，“较差”和“差”的面积比例略有减少；2010—2021 年，生态环境级别为“优良”的面积占比减少了 13.8%，中等面积增加 13.38%，生态环境“较差”和“差”的面积比例略有减少；2000—2021 年，生态环境为“优”及“良”的面积比重由 49.46%增加至 81.62%，生态级别为“中等”面积减少 30.47%“较差”和“差”的面积略有减少。

表 4 桃江县 2000—2021 年生态环境评价等级面积及比例

Table 4 Area and proportion of each ecological environment quality level in Taojiang County from 2000 to 2021

RSEI 等级	2000 年		2004 年		2010 年		2014 年		2021 年	
	面积/km²	百分比/%	面积/km²	百分比/%	面积/km²	百分比/%	面积/km²	百分比/%	面积/km²	百分比/%
差(0～0.2)	2.42	0.13	0.35	0.02	0.27	0.01	19.55	1.02	0.02	0.00
较差(0.2～0.4)	44.9	2.34	8.46	0.44	8.39	0.44	188.06	9.80	16.9	0.88
中等(0.4～0.6)	921.05	47.97	137.72	7.14	79.15	4.12	905.11	47.14	335.97	17.50
良(0.6～0.8)	892.01	46.46	1 550.09	80.32	1 729.93	90.10	771.83	40.20	1 513.13	78.81
优(0.8～1.0)	59.54	3.10	233.31	12.09	102.19	5.32	35.37	1.84	53.91	2.81

对桃江县五期 MRESI 均值进行空间统计(图 5)，依次为 0.77，0.84，0.83，0.75 和 0.79，桃江县 21 a 间的生态环境质量呈现上升—下降—上升的趋势。从时间尺度上来看：总体呈上升趋势，2000 年至 2010 年生态质量稳步增长，但 2010 年至 2014 年生态环境质量出现明显的下降；从空间尺度上看(图 6)：桃江县生态质量整体上一直是西南高于其他地区，综合来看生态级别为“优”和“良”的区域主要分布在鸬鹚渡、松木塘和高桥镇，这些地区土地利用以林地和灌木林地为主，生态环境质量相对较高。生态级别为“差”和“较差”的区域主要分布在桃花江、浮秋山、沾溪、马迹塘、石牛江镇和灰山港镇一带，土地利用以耕地、建设用地和裸地为主，生态环境质量相对较低。

将研究区 MRSEI 趋势变化分为 5 个等级(图 7)，即明显改善、微弱改善、不变、微弱恶化以及明显恶化。2000—2010 年桃江县 MRSEI 趋势变化以微弱改善和不变为主(表 5)，其中，微弱改善面积约为 969.32 km²，占该地区总面积的 50.49%，不变的区域面积为 914.98 km²，占总面积的 47.66%，微弱恶化面积约为 34.85 km²，占该地区总面积的 1.82%。微弱改善主要集中在桃江县西北以及西南部等区域，2000—2005 年桃江县实施了退耕还林、长防林和生态补偿等林业工程[31]，该工程增加了植被的面积，从而改善了局部生态环境质量。

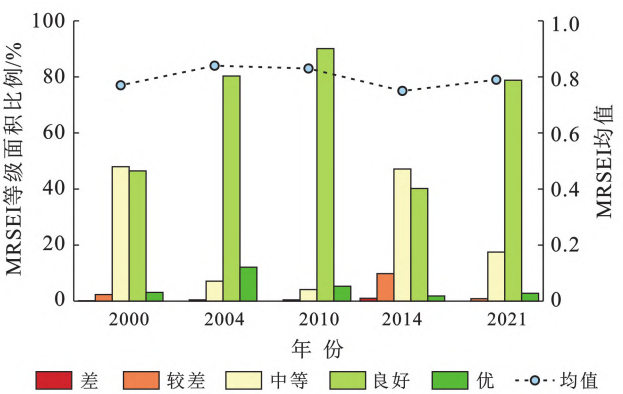


图 5 桃江县 2000—2021 年 MRSEI 各等级面积比例

Fig.5 Proportion of MRSEI grades in Taojiang County from 2000 to 2021

微弱恶化区主要分布在桃江县中部和东南部,期间该地区依然从事采矿活动,对桃江县生态环境质量状况的影响较大。2010—2021 年桃江县 MRSEI 趋势变化以微弱恶化和不变为主,其中,不变的面积为 1 474.05 km^2,占总面积的 76.78%;微弱恶化面积约为 375.52 km^2,占该地区总面积的 19.56%;微弱改善面积为 69.08 km^2,占该地区总面积的 3.6%。微弱恶化区主要分布在桃花江镇—灰山港镇一带,随着经济的发展和人口的增加,桃江县对建设用地的需求不断增加,从而导致城镇地区生态环境质量下降。微弱改善区分布在桃江县南部以及中部等区域,根据桃江县生态建设历程,从 2011 年开始,区内大量矿山相继关闭,启动覆土复绿修复治理。2014 年以来桃江县还陆续开展了湿地生态修复、生态廊道建设等重点工程,这些重点工程对改善生态环境质量效果明显。森林覆盖率从 2010 年的 57.47%提高至 2021 年的 64.15%。由此可见,城镇化对桃江县生态环境质量产生一定的负面影响,但重点工程使生态环境质量得以改善。

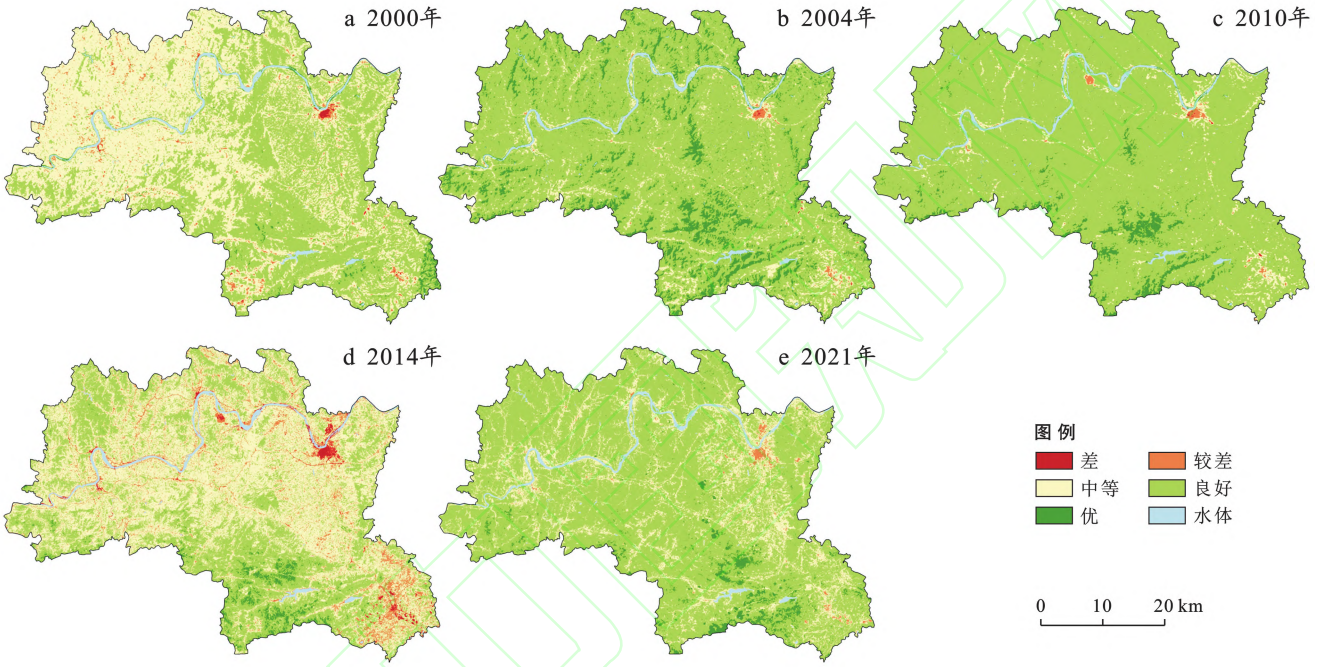


图 6　2010—2021 年桃江县 MRSEI 等级空间分布

Fig.6　Spatial distribution of MRSEI levels in Taojiang County from 2000 to 2021

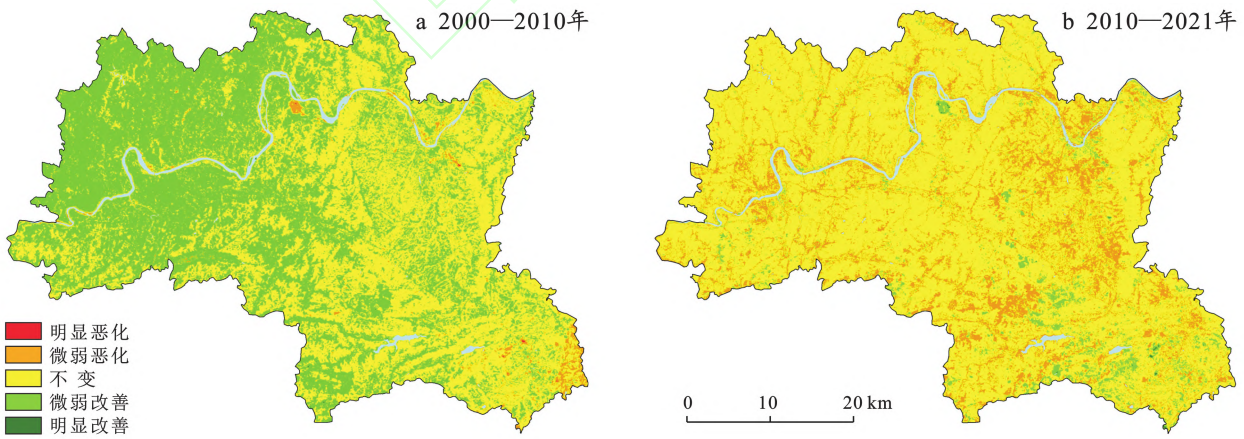


图 7　桃江县生态环境质量变化监测图

Fig.7　Monitoring chart of ecological environment quality change in Taojiang County

3.4　桃江县生态环境质量空间分异特征影响因素分析

3.4.1　单因子探测分析　为了进一步明确桃江县生态环境质量变化的主要影响因素,本研究采用最优化参数的地理探测器模型(R 包),较 Excel 版的优势是能自动计算出最佳离散化分类方法和最佳的离散分类数。根据国内外相关研究[32-33],结合桃江县丘陵地貌地理条件,探讨人为及自然因素对生态环境质量影响作用,选取海拔(DEM)、土地利用类型(LUCC)、植被覆盖度(FVC)、平均降水量(pre)、平均气温(tmp)、人口密度(Pop)6 个因子进行因子探测以及交互探

测。以桃江县 2000,2010,2021 年 MRSEI 模型计算结果作为因变量 Y,使用创建格网点的方法提取了网格内的相关属性。其中利用创建渔网功能创建研究区 1 km×1 km 格网并提取空间上对应的 Y 和 X 属性值作为数据源,采用因子探测、交互作用探测方法分析桃江县生态环境质量的主导影响因子及各因子间的交互作用。

采用单因子探测器探究各因子对生态环境质量空间分异特征的解释力。从表 6 可以看到:所有探测因子 ρ 值都为 0,这说明所选探测因子对生态环境质量的空间分异特征都有显著影响,都可以将其作为影响因素,对其分异性进行分析[34]。且 q 值越大意味着该影响因子对研究区生态环境质量空间分异性的贡献力越大。综合 2000,2010,2021 年 q 值从高到低依次为 LUCC>DEM>Pop>FVC>Pre>temp,说明土地利用对 RSEI 的空间分异特征具有最强解释力;而气温因子对空间分异特征解释力最弱,这表明,影响桃江县生态环境质量的第一主导因素是土地利用,其次为海拔、人口密度、植被覆盖度,而降水和气温因子的 q 值均小于 0.1,解释力偏弱,对生态环境质量空间分布的影响较小。

表 5 桃江县 2000—2021 年生态环境分级面积变化监测

Table 5 Monitoring of changes in ecological environment classification area in Taojiang County from 2000 to 2021

RSEI 变化	2000—2010		2010—2021	
	面积/km²	百分比/%	面积/km²	百分比/%
明显恶化	0.13	0.01	0.33	0.02
微弱恶化	34.85	1.82	375.52	19.56
不 变	914.98	47.66	1 474.05	76.78
微弱改善	969.32	50.49	69.08	3.60
改 善	0.64	0.03	0.95	0.05

表 6 单因子探测结果

Table 6 Results of single-factor detection

探测因子	2000 年			2010 年			2021 年		
	q 值	p 值	q 排序	q 值	p 值	q 排序	q 值	p 值	q 排序
DEM	0.269	0.00	1	0.255	0.00	2	0.204	0.00	2
LUCC	0.224	0.00	2	0.435	0.00	1	0.440	0.00	1
FVC	0.070	0.00	4	0.169	0.00	4	0.076	0.00	4
Pre	0.043	0.00	6	0.032	0.00	5	0.023	0.00	5
tmp	0.043	0.00	5	0.026	0.00	6	0.016	0.00	6
Pop	0.100	0.00	3	0.181	0.00	3	0.094	0.00	3

注:DEM 为海拔指标,LUCC 为土地利用指标 ,FVC 为植被覆盖度指标,pre 为平均降水量指标,tmp 为平均气温指标,Pop 为人口密度指标。

3.4.2 交互探测分析 利用交互探测器研究各探测因子的交互作用与 MRSEI 空间分异特征的关系。结果表明:研究区 2000,2010 和 2021 年因子交互探测结果均为双因子增强和非线性增强两类,表明交互式探测作用效果要高于单个因子的作用效果[35]。从图 8 可以看出,桃江县目标年份土地利用和海拔是交互作用最强的组合,即土地利用的显著变化增加了海拔作为自变量对生态环境的解释力。土地利用与其他因子交互作用也产生了较高的 q 值。通过上述分析可以发现,虽然人口密度、降水、气温等单因子解释力较低,但与土地利用、海拔等因子的交互作用解释力较强,均大于单因子的解释力,交互作用呈现双协同作用和非线性协同作用[36]。因此,各影响因子对生态环境质量在空间分布上的影响并不是单边的,也不是两个因素的简单相加,它有一种互相加强或非线性加强的效果[37],这表明生态环境质量受到多因子协同作用的影响。

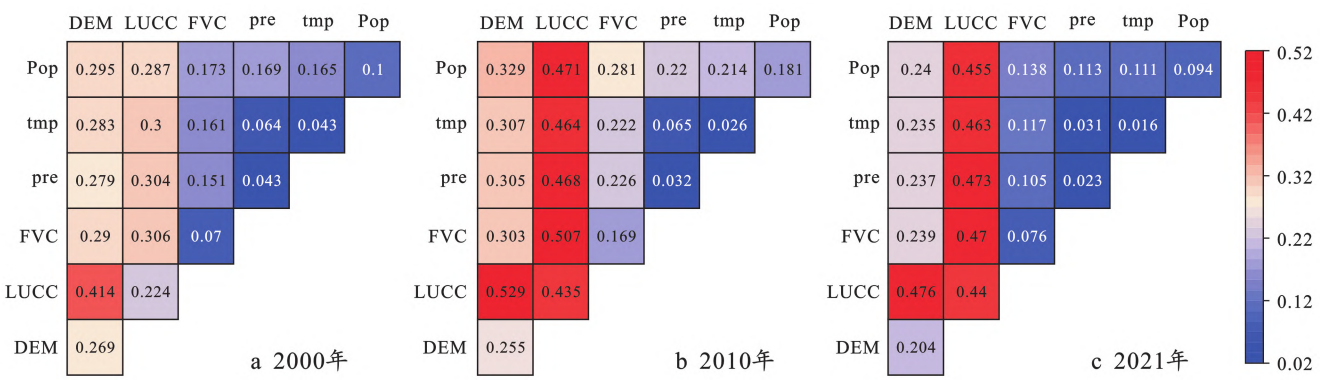


图 8 因子交互探测结果

Fig.8 Results of iactor interaction detection

4 讨论

利用改进 RSEI 模型对桃江县 21 a 间生态环境质量进行动态评价,结果表明,研究区生态环境质量呈现上升—下降—上升的趋势,这与前人研究的演变趋势基本一致[38],同时也验证了改进 RSEI 的全面性和合理性。但是,本文还存在以下不足之处:本研究所选取的 5 期遥感图像数据,时间跨度过大,无法对年份之间的数据进行分析,下一步利用 Sen 斜率估计和 MK 检验分析长序列时间尺度下生态环境质量时空变化。

另外,本文选取的指标还不够全面,对因子之间交互作用的复杂机理探讨不够深入,未来可纳入能反映区域自然和人文发展状况的多源指标,利用多尺度地理加权回归模型(MGWR),在县区级精细尺度上探究生态环境质量与影响因素的时空关系。

5 结论

本文基于 GEE 云平台构建 RSEI 改进模型,分析了桃江县 21 a 间生态环境质量,并利用最优化参数的地理探测器模型,探测了桃江县生态环境质量分异特征的影响因素。得到以下结论:

(1) 与 RSEI 模型相比,改进的 RSEI 模型能够避免高植被覆盖区 NDVI 饱和性缺陷,可以更准确、更丰富地反映南方丘陵等高植被覆盖地带生态环境质量信息,同时也验证了改进 RSEI 的全面性和合理性,其结果可为同类地貌相关研究提高参考。研究区 2000 至 2021 年 5 期 MRSEI 均值分别为 0.77,0.84,0.83,0.75 和 0.79,生态环境质量呈现上升—下降—上升的变化特征,中等及以上在各时期所占比例最大。表明整体生态环境较好。

(2) 根据单因子探测器分析结果来看,土地利用是影响生态环境质量空间分异特征的主导因子。原因是区域内经济快速发展和人类活动强度的上升,直接影响土地利用类型,如城镇用地和交通用地增多以及矿山开采等,进而对 MRSEI 产生间接影响。利用交互探测器分析各因子对生态环境质量的交互作用,发现各因子间的交互作用呈现双协同作用和非线性协同作用,且土地利用与海拔的交互作用对生态环境质量的影响最明显。

(3) 桃江县生态环境质量变化受到自然因素和人为因素的双重影响,在促进桃江县社会经济的发展的同时,要树立绿色可持续发展理念,正确处理生态与发展、生态与效益的关系,提高土地利用效率与灵活性、优化城市空间布局合理性,推动县域绿色环保发展、同时加快环境修复如历史遗留矿山复垦工作。通过提升土地的规划科学性、利用卫星监控等方式创新土地利用监管、鼓励多元化土地利用方式、例如开发当地农家乐旅游特色、提高原生态土地资源经济效益、加强土地整合重组提高集约利用率,推动当地生态与环境协调发展。

参考文献(References)

[1] 吴能杰.益阳市矿山地质环境保护与恢复治理研究[J].世界有色金属,2020(13):189-191.
Wu Nengjie. Study on the protection and restoration of mining geological environment in Yiyang City [J]. World Nonferrous Metals, 2020(13):189-191.

[2] 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 Hanqiu. A remote sensing urban ecological index and its application [J]. Acta Ecologica Sinica,2013,33(24):7853-7862.

[3] 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 Wei, Du Peijun, Guo Shanchuan, et al. Enhanced remote sensing ecological index and ecological environment evaluation in arid area [J]. National Remote Sensing Bulletin, 2023,27(2):299-317.

[4] 李晶,李生财,郭伟,等.基于改进遥感生态指数的山西省及煤炭矿区生态环境分析[J].金属矿山,2023(1):30-39.
Li Jing, Li Shengcai, Guo Wei, et al. Ecological environment analysis of Shanxi Province and coal mining areas based on modified remote sensing ecological index [J]. Metal Mine, 2023(1):30-39.

[5] Wang Yin, Wang Yang, Xu Wenzhe, et al. Eco-environmental effect and driving factors of changing "production-living-ecological space" in northern Xinjiang, China [J]. Frontiers in Ecology and Evolution, 2023,11:1248702.

[6] 施智勇,胡晓婷,谢慧黎,等.基于 RSEI 的生态环境质量评价及驱动力分析:以闽江流域(福州段)为例[J].测绘通报,2023(2):28-33.
Shi Zhiyong, Hu Xiaoting, Xie Huili, et al. Eco-environmental quality assessment and driving force analysis based on RSEI: A case study of the Minjiang River Basin (Fuzhou section) [J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2023(2):28-33.

[7] 田智慧,尹传鑫,王晓蕾.鄱阳湖流域生态环境动态评估及驱动因子分析[J].环境科学,2023,44(2): 816-827.
Tian Zhihui, Yin Chuanxin, Wang Xiaolei. Dynamic monitoring and driving factors analysis of ecological environment quality in Poyang Lake basin [J]. Environmental Science, 2023,44(2):816-827.

[8] Jelinski D E, Wu Jianguo. The modifiable areal unit problem and implications for landscape ecology [J]. Landscape Ecology, 1996,11(3):129-140.

[9] Gorelick N, Hancher M, Dixon M, et al. Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone [J]. Remote Sensing of Environment, 2017,202:18-27.

[10] Camps-Valls G, Campos-Taberner M, Moreno-Martínez Á, et al. A unified vegetation index for quantifying the terrestrial biosphere [J]. Science Advances, 2021, 7(9):eabc7447.

[11] Ju Hongrun, Zhang Zengxiang, Zuo Lijun, et al. Driving forces and their interactions of built-up land expansion based on the geographical detector-a case study of Beijing, China [J]. International Journal of Geographical Information Science, 2016,30(11):2188-2207.

[12] 湖南省桃江县林业局.绿色明珠耀湘中:湖南省桃江县创建全国绿化模范单位(县、市、区)纪实[J].国土绿化,2013(9):20-21.
The pearl of green shines in Hunan Province: On-the-spot report on the establishment of national greening model units (counties, cities and districts) in Taojiang County, Hunan Province [J]. Land Greening, 2013(9): 20-21.

[13] 李茂林,闫庆武,李桂娥.基于 EVI 的锡林郭勒生态脆弱性评价[J].测绘通报,2022(10):21-27.
Li Maolin, Yan Qingwu, Li Guie. The evaluation of ecological vulnerability of Xilingol based on EVI [J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2022(10):21-27.

[14] 徐涵秋.利用改进的归一化差异水体指数(MNDWI)提取水体信息的研究[J].遥感学报,2005,9(5):589-595.
Xu Hanqiu. A study on information extraction of water body with the modified normalized difference water index (MNDWI) [J]. Journal of Remote Sensing, 2005,9(5):589-595.

[15] Samuel N. Goward, 曾晓梅.卫星生物气候学研究[J].气象科技,1990,18(2):33-38.
goward S, Zeng Xiaomei. Study on satellite bioclimatology [J]. Meteorological Science and Technology, 1990,18 (2):33-38.

[16] 赵桔超,朱彦辉,段国辉,等.基于 MOD13Q1 数据分析 2001—2015 年西双版纳植被变化特征[J].生态学杂志,2019,38(4):1083-1092.
Zhao Juchao, Zhu Yanhui, Duan Guohui, et al. Spatial and temporal dynamics of vegetation in Xishuangbanna from 2001 to 2015 based on MOD13Q1 data [J]. Chinese Journal of Ecology, 2019,38(4):1083-1092.

[17] 白燕英,高聚林,张宝林.基于 NDVI 与 EVI 的作物长势监测研究[J].农业机械学报,2019,50(9):153-161.
Bai Yanying, Gao Julin, Zhang Baolin. Monitoring of crops growth based on NDVI and EVI [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(9):153-161.

[18] 周家香,朱建军,左廷英.IKONOS 图像的缨帽变换方法[J].矿山测量,2006(1):13-14.
Zhou Jiaxiang, Zhu Jianjun, Zuo Tingying. A method of the tasseled cap transformation for IKONOS images [J]. Mine Surveying, 2006(1):13-14.

[19] Huang C, Wylie B, Yang L, et al. Derivation of a tasselled cap transformation based on Landsat 7 at-satellite reflectance [J]. International Journal of Remote Sensing, 2002,23(8):1741-1748.

[20] Crist E P. A TM Tasseled Cap equivalent transformation for reflectance factor data [J]. Remote Sensing of Environment,1985,17(3):301-306.

[21] Rikimaru A, Roy P S, Miyatake S. Tropical forest cover density map** [J]. Tropical ecology, 2002, 43 (1): 39-47.

[22] 徐涵秋.一种快速提取不透水面的新型遥感指数[J].武汉大学学报(信息科学版),2008,33(11):1150-1153.
Xu Hanqiu. A new remote sensing index for fastly extracting impervious surface information [J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2008,33 (11):1150-1153.

[23] 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 Jinfeng, Xu Chengdong. Geodetector: Principle and prospective [J]. Acta Geographica Sinica, 2017,72 (1):116-134.

[24] 汪孝贤,张秀霞,李旺平,等.基于遥感生态指数(RSEI)改进模型的祁连山国家级自然保护区生态环境质量评价[J].生态与农村环境学报,2023,39(7):853-863.
Wang Xiaoxian, Zhang Xiuxia, Li Wangping, et al. Assessment of ecological environment quality in Qilian Mountain national nature reserve based on improved RSEI model [J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2023,39(7):853-863.

[25] 单薇,金晓斌,孟宪素,等.基于多源遥感数据的土地整治生态环境质量动态监测[J].农业工程学报,2019,35 (1):234-242.
Shan Wei, Jin Xiaobin, Meng Xiansu, et al. Dynamical monitoring of ecological environment quality of land consolidation based on multi-source remote sensing data [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2019,35(1):234-242.

[26] 程琳琳,王振威,田素锋,等.基于改进的遥感生态指数的北京市门头沟区生态环境质量评价[J].生态学杂志,2021,40(4):1177-1185.
Cheng Linlin, Wang Zhenwei, Tian Sufeng, et al.

Evaluation of eco-environmental quality in Mentougou District of Beijing based on improved remote sensing ecological index [J]. Chinese Journal of Ecology, 2021, 40(4):1177-1185.

[27] Gupta K, Kumar P, Pathan S K, et al. Urban Neighborhood Green Index: A measure of green spaces in urban areas [J]. Landscape and Urban Planning, 2012, 105(3):325-335.

[28] Badgley G, Field C B, Berry J A. Canopy near-infrared reflectance and terrestrial photosynthesis [J]. Science Advances, 2017,3(3):e1602244.

[29] 张华,宋金岳,李明,等.基于 GEE 的祁连山国家公园生态环境质量评价及成因分析[J].生态学杂志,2021,40(6):1883-1894.

Zhang Hua, Song Jinyue, Li Ming, et al. Eco-environmental quality assessment and cause analysis of Qilian Mountain National Park based on GEE [J]. Chinese Journal of Ecology, 2021,40(6):1883-1894.

[30] Ye Xi, Kuang Honghai. Evaluation of ecological quality in southeast Chongqing based on modified remote sensing ecological index [J]. Scientific Reports, 2022,12(1):15694.

[31] 李建华.保土治水优化生态环境:桃江县全面实施生态环境建设示范工程[J].湖南林业,1999(11):15.

Li Jianhua. Protecting Soil, Controlling Water and Optimizing Ecological Environment: Taojiang County fully implements the demonstration project of ecological environment construction [J]. Forestry and Ecology, 1999(11):15.

[32] Yuan Baodong, Fu Lina, Zou Yeai, et al. Spatiotemporal change detection of ecological quality and the associated affecting factors in Dongting Lake Basin, based on RSEI [J]. Journal of Cleaner Production, 2021,302:126995.

[33] 郝兴明,陈亚宁,李卫红.塔里木河流域近 50 年来生态环境变化的驱动力分析[J].地理学报,2006,61(3):262-272.

Hao Xingming, Chen Yaning, Li Weihong. The driving forces of environmental change during the last 50 years in the Tarim River Basin [J]. Acta Geographica Sinica, 2006,61(3):262-272.

[34] 邓楚雄,郭方圆,黄栋良,等.基于 INVEST 模型的洞庭湖区土地利用景观格局对生境质量的影响研究[J].生态科学,2021,40(2):99-109.

Deng Chuxiong, Guo Fangyuan, Huang Dongliang, et al. Research on the impact of land use and landsacpe pattern on habitat quality in Dongting Lake Area based on INVEST model [J]. Ecological Science, 2021,40(2):99-109.

[35] 刘笑,郭鹏,祁佳峰,等.基于 MRSEI 模型的阿勒泰市生态环境时空变化及驱动力分析[J].干旱区研究,2023,40(6): 1014-1026.

Liu Xiao, Guo Peng, Qi Jiafeng, et al. Spatio-temporal changes and driving forces in the ecological environment of Altay City determined using an MRSEI model [J]. Arid Zone Research, 2023,40(6):1014-1026.

[36] 梁巧玲,史正涛,陈越豪,等.基于遥感生态指数的元谋干热河谷生态环境动态监测及其驱动力分析[J].水土保持通报,2022,42(6):146-154.

Liang Qiaoling, Shi Zhengtao, Chen Yuehao, et al. Ecological environmental dynamic monitoring and driving force analysis of Yuanmou dry-hot valley based on remote sensing ecological index [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2022,42(6):146-154.

[37] 吕晨,蓝修婷,孙威.地理探测器方法下北京市人口空间格局变化与自然因素的关系研究[J].自然资源学报,2017,32(8):1385-1397.

Lü Chen, Lan Xiuting, Sun Wei. A study on the relationship between natural factors and population distribution in Beijing using geographical detector [J]. Journal of Natural Resources, 2017,32(8):1385-1397.

[38] 杨华,纪千夫,宋启迪,等.基于 MODIS 数据的洞庭湖生态经济区生态环境质量演变研究[J].城市建筑,2023,20(11):16-22.

Yang Hua, Ji Qianfu, Song Qidi, et al. Research on the evolution of ecological environment quality in Dongting Lake ecological economic zone based on MODIS data [J]. Urbanism and Architecture, 2023,20(11):16-22.