

闽江流域生态环境质量动态变化及其驱动力

程诺^{1,2}, 高文晶^{1,2}, 杨鸿飞¹, 王帆^{1,2}, 赖日文^{1,2}

(1.福建农林大学 林学院, 福建 福州 350002; 2.福建农林大学

“3S”技术与资源优化利用福建省高等学校重点实验室, 福建 福州 350002)

摘要: [目的] 探究闽江流域生态环境质量动态变化的驱动因子及相互作用, 为该流域生态环境质量改善和实现人与自然和谐发展提供理论支持。[方法] 选用 2001—2020 年的 MODIS 系列遥感数据, 基于 Google Earth Engine(GEE)平台计算闽江流域的遥感生态指数(RSEI), 结合趋势分析研究闽江流域生态环境质量的时空变化, 最后通过地理探测器探测 RSEI 的驱动因子。[结果] ①RSEI 计算结果中 4 个生态指标的第一主成分平均贡献率达到 69.01%, 说明 RSEI 能够充分反映闽江流域生态环境质量状况。②闽江流域生态环境质量良好且向好发展。2001—2020 年闽江流域的 RSEI 均值由 0.618 上升到 0.701, 生态环境质量等级优良的面积比例增加了 19.16%, 流域 90.28% 的地区生态环境质量有所改善。[结论] 闽江流域生态环境质量受多个因子共同影响, 其中海拔和夜间灯光对闽江流域生态环境质量解释度较高, 是主要的影响因素和驱动力, 因子间的相互作用均会加大对生态环境质量的影响。

关键词: 遥感生态指数; Google Earth Engine; 闽江流域; Theil-Sen 估算法; 地理探测器

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2023)02-0310-09

中图分类号: TP79, X87

文献参数: 程诺, 高文晶, 杨鸿飞, 等. 闽江流域生态环境质量动态变化及其驱动力[J]. 水土保持通报, 2023, 43(2): 310-318. DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2023.02.036; Cheng Nuo, Gao Wenjing, Yang Hongfei, et al. Dynamic change and driving factors of ecological environment quality in Minjiang River basin [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2023, 43(2): 310-318.

Dynamic Change and Driving Factors of Ecological Environment Quality in Minjiang River Basin

Cheng Nuo^{1,2}, Gao Wenjing^{1,2}, Yang Hongfei¹, Wang Fan^{1,2}, Lai Riwen^{1,2}

(1.College of Forestry, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou,

Fujian 350002, China; 2.University Key Lab for Geomatics Technology & Optimize

Utilization in Fujian Province, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou, Fujian 350002, China)

Abstract: [Objective] The driving factors and interaction of dynamic changes ecological environmental quality in the Minjiang River basin were studied in order to provide theoretical support for improving the quality of the ecological environment and for realizing human and natural development. [Methods] MODIS remote sensing data were obtained from 2001 to 2020 to calculate the remote sensing ecological index (RSEI) of the Minjiang River basin based on the Google Earth Engine (GEE) platform. The spatio-temporal changes in ecological environmental quality for the Minjiang River basin were studied in combination with trend analysis, and the driving factors of RSEI were identified by geographical detectors. [Results] ① The average contribution rate of the first principal component of the four ecological indicators reached 69.01% in the RSEI calculation results, indicating that RSEI could fully reflect the ecological environmental quality of the Minjiang River basin. ② The ecological environment of the Minjiang River basin was in the good quality category, and exhibited improvement over time. From 2001 to 2020, the average RSEI of the Minjiang River basin increased from 0.618 to 0.701. The proportion of area with excellent and good ecological environmental

收稿日期: 2022-07-22

修回日期: 2022-08-15

资助项目: 国家自然科学基金项目“南方红壤侵蚀区林下水土流失区遥感判别研究”(41901387); 地方政府横向项目“平潭综合试验区绿岛花城建设总体规划”(KH190110A)

第一作者: 程诺(2000—), 男(汉族), 安徽省阜阳市人, 硕士研究生, 研究方向为地理信息系统应用。Email: 1258860474@qq.com。

通讯作者: 赖日文(1970—), 男(汉族), 福建省南平市人, 博士, 副教授, 主要从事森林经营管理和 3S 技术教学科研。Email: fjlw@126.com。

quality increased by 19.16%, and the regional ecological environmental quality improved for 90.28% of the area of the Minjiang River basin. [Conclusion] The ecological environmental quality of the Minjiang River basin was jointly affected by multiple factors, among which altitude and nighttime light were the main influencing factors and driving forces with a high degree of explanation. The interaction between factors will increase the impact on ecological environmental quality.

Keywords: remote sensing ecological index; Google Earth Engine; Minjiang River basin; Theil-Sen estimation; geodetector

改革开放以来,中国经济高速发展,城镇化和工业化进程不断加快,然而人类活动的高度放大加剧了人地矛盾、消耗了大量的自然资源,一系列的生态环境问题随之产生,如水土流失、地下水污染、生物多样性丧失等^[1],诸多的生态环境问题使得中国的生态安全面临着严峻挑战。党的十九大会议提出中国经济将由高速发展转向高质量发展,强调了经济发展过程中建设生态文明和保护生态环境的重要性,明确了要走“绿水青山就是金山银山”的可持续发展道路。生态环境质量代表着生态系统的健康性和完整性,它是生态系统内部循环以及外在环境特征的综合表现^[2]。因此,对生态环境质量进行监测和评价并分析其时空动态是实现区域可持续发展的热点问题。

2006 年国家原环境保护部颁发《生态环境状况评价技术规范》,引导生态环境质量监测与评价工作从定性向定量转变。传统监测方法受限于统计数据的粗粒度和滞后性,无法对区域生态环境质量进行实时、精细的监测,而遥感(RS)和地理信息系统(GIS)以其多维、多特征、规律性和快速性成为目前研究和监测区域生态环境质量最有效的工具^[3]。近年来众多专家及学者基于 RS 和 GIS 提出了各种生态环境质量监测与评价的指标和模型,监测与评价指标包括归一化差值植被指数(normalized difference vegetation index, NDVI)^[4]、植被净初级生产力(net primary production, NPP)^[5]、植被覆盖度^[6](fractional vegetation coverage, FVC)以及生态安全综合指数(ecological safety index, ESD)^[7]等,这些指标均能一定程度上反映生态环境质量的优劣,但使用单一指标无法全面解释生态环境质量状况^[8]。监测与评价模型主要有 InVEST 模型^[9]、SolVES 模型^[10]、MaxEnt 模型^[11]以及 PSR 模型^[12]等,模型的优势在于评价流程的系统性较强,但使用这些模型进行生态环境质量评价工作存在评价结果较为片面、易受主观因素影响的缺陷^[13],这些缺陷会一定程度上降低评价结果的可信度。2013 年徐涵秋^[14]提出了一种完全基于遥感数据,可以综合植被生长状况、地表温度、湿度分量以及建筑指数对生态系统质量进行快速、客观评测的遥感生态指数(remote sensing ecological index,

RSEI)。RSEI 基于遥感影像的光谱特性,耦合了与生态环境质量优劣有直接相关的 4 大生态要素指标,通过标准化处理消除了各分量指标量纲的差异并使用主成分分析法将各分量指标的信息压缩到了第一主成分中。RSEI 模型所需数据易获得、评价结果全面且客观、适用性强并具有扩展性和可视化的优势,自提出以来已经被广泛应用于城市^[15]、山区^[16]、矿区^[17]、自然保护区^[18]、石漠化地区^[19]、综合实验区^[20]等地区的生态环境质量研究。但由于 RSEI 指标选取的全面性,导致其长时间序列的研究数据量大、处理工作繁琐,以至于现有的 RSEI 研究多是通过选取固定时间节点,对小范围地区的生态环境状况进行分析,对大范围长时序的生态环境质量研究比较匮乏。

Google Earth Engine(GEE)是一个集遥感科学分析及地理空间数据可视化的综合性平台^[21],该平台存储了大量的遥感影像数据集,并可以在线进行调用、运算和变化检测等地理分析,能够大幅度提高数据处理的工作效率。本研究通过 GEE 平台计算闽江流域 2001—2020 年的 RSEI 并进行趋势分析,得到闽江流域生态环境质量状况及变化动态,最后使用地理探测器探寻影响闽江流域生态环境质量变化的驱动因子及因子间的交互作用,为针对性地改善闽江流域生态环境质量,实现人与自然的和谐发展提供理论支持。

1 研究区概况

闽江流域位于福建省西北部,处在 116°23′—119°43′E,25°23′—28.19′N 之间,流域流经福建省 7 个地级市的 29 个县市区,所占总面积约 6.10×10^4 km²。闽江流域属亚热带季风气候,年平均气温 16.1~18.5 °C,年平均降水量 1 700 mm。闽江流域具有涵养水源、水土保持以及生物多样性保护等生态服务功能,在中国东南地区生态安全中有着举足轻重的地位,是中国重要的生态屏障^[22]。闽江流域生态环境质量状况将直接影响到流域生态服务功能,对其进行动态监测有利于实现流域生态资源的合理配置。

2 数据来源与研究方法

2.1 数据来源与预处理

本研究采用中分辨率成像光谱仪 (moderate-resolution imaging spectroradiometer, MODIS) 数据对闽江流域的生态环境质量进行监测和评价。MODIS 数据来源于 GEE 平台中的 MODIS 系列遥感产品,借助 GEE 平台对 MODIS 数据进行调用、裁

剪与拼接、去云并筛选 5—10 月植被生长旺盛季节的影像等预处理工作。为避免水体影响湿度指数计算中各波段的比重,对研究区修正归一化水体指数 (modified normalized difference water index, MNDWI) >0.2 的区域进行水体掩膜^[23]。其他数据包括福建省行政区矢量数据、DEM 数据、气象数据、夜间灯光数据、人口数据、国内生产总值数据以及土地利用数据,数据类型及来源详见表 1。

表 1 数据类型及来源
Table 1 Data types and sources

数据类型	数据介绍	数据来源
MODIS 数据	MODIS09A1, MODIS11A1 以及 MODIS19A1 数据产品	GEE 平台 MODIS 系列遥感产品 (https://developers.google.com/earth-engine/datasets/catalog/modis)
矢量数据	福建省行政区域边界及水系数据	中国科学院资源环境数据中心 (https://www.resdc.cn/)
DEM 数据	30 m 分辨率 GDEM V2 数据集	地理空间数据云平台 (http://www.gscloud.cn/)
气象数据	1 km×1 km 月平均气温与降水量合成数据	国家地球系统科学数据中心 (https://www.geodata.cn/)
夜间灯光数据	DMSP/OLS 数据及 NPP/VIRRS 数据	美国国家海洋和大气管理局网站 (https://ngdc.noaa.gov)
人口数据	1 km×1 km 人口密度格网数据	世界人口数据网站 (https://www.worldpop.org/)
国内生产总值数据	1 km×1 km 国内生产总值格网数据	中国科学院资源环境数据中心 (https://www.resdc.cn/)
土地利用数据	7 种一级地类土地覆盖数据	中国科学院资源环境数据中心 (https://www.resdc.cn/)

2.2 研究方法

2.2.1 RSEI 计算 RSEI 是由绿度、热度、湿度和干度 4 个指标通过主成分分析并归一化后的结果,它能够定量刻画区域的生态环境质量^[14]。RSEI 的计算通过 GEE 平台的 Java Script 编程完成,具体计算方法为:

(1) 绿度指标。绿度指标 NDVI 能够反映区域的植被生长状况,通过 MODIS13A1 产品计算得到,计算公式为:

$$NDVI = \frac{NIR - Red}{NIR + Red} \quad (1)$$

式中: NIR 为 MODIS13A1 数据的近红外波段; Red 为红波段。

(2) 热度指标。区域热度将直接影响到生态过程,热度指标 LST 使用 MODIS11A2 地表温度反射率产品计算得到,计算公式为:

$$LST = 0.02 \times DN - 273.5 \quad (2)$$

式中: DN 表示地表温度数据的灰度值。

(3) 湿度指标。湿度反映区域植被和土壤的湿度分量,湿度指标 Wet 是使用 MODIS09A1 产品各波段通过缨帽变化后计算得到。计算公式为:

$$Wet = 0.011 \ 47B_1 + 0.248 \ 9B_2 + 0.240 \ 8B_3 + 0.313 \ 2B_4 - 0.312 \ 2B_5 - 0.641 \ 6B_6 - 0.508 \ 7B_7 \quad (3)$$

式中: B_1 — B_7 代表 MODIS09A1 产品数据中的第 1 到第 7 波段。

(4) 干度指标。干度代表着区域建筑情况以及

地表干化程度,干度指标 NDBSI 通过 MODIS09A1 产品计算建筑指数 IBI 和土壤指数 SI 合成得到,计算公式为:

$$SI = \frac{[(SWIR + Red) - (Blue + NIR)]}{[(SWIR + Red) + (Blue + NIR)]}$$

$$IBI = \frac{\frac{2SWIR}{SWIR + NIR} - \left[\frac{NIR}{NIR + Red} + \frac{Green}{Green + SWIR} \right]}{\frac{2SWIR}{SWIR + NIR} + \left[\frac{NIR}{NIR + Red} + \frac{Green}{Green + SWIR} \right]} \quad (4)$$

$$NDBSI = \frac{SI + IBI}{2} \quad (5)$$

式中: SWIR, Red, Green, NIR, Blue 分别表示 MODIS19A1 产品的短波红外、红光、绿光、近红外和蓝光波段。

(5) 综合指数构建。通过主成分分析 (principal component analysis, PCA) 方法构建 RSEI, 将 4 个生态指标的信息压缩到各主成分中,可以避免主观因素对结果造成的影响。使用 1 减去第一主成分 (PC1) 得到初始生态遥感指数 $RSEI_0$, 再对其进行归一化得到 RSEI。具体计算公式为:

$$RSEI_0 = 1 - PC_1 [f(NDVI, LST, Wet, NDBSI)]$$

$$RSEI = \frac{(RSEI_0 - RSEI_{min})}{(RSEI_{max} - RSEI_{min})} \quad (6)$$

式中: RSEI 代表生态遥感指数,取值为 $[0, 1]$ 。RSEI 值越大代表生态环境质量越好,反之越差。RSEI_{min} 为 RSEI 最小值, RSEI_{max} 为 RSEI 最大值。

(6) 年均 RSEI 计算。对研究期内筛选出的每一

幅影像进行 RSEI 的计算,通过计算各年所有影像 RSEI 的均值合成该年份年均 RSEI 影像,对得到的年均值 RSEI 影像进行重采样、定义坐标系等操作并下载最终结果。

2.2.2 Theil-Sen&Mann-Kendall 趋势分析 对 RSEI 进行趋势分析以探究福建省生态环境质量变化的时空特征。一般的回归方法要求数据符合正态分布,易受到异常值的干扰^[24]。泰尔森估算法(Theil-Sen estimator)为非参数统计中一种拟合直线的稳健模型,可以减少异常值的影响且具有更好的鲁棒性^[25],是一种判断长时序数据变化趋势的重要方法。计算公式如下:

$$Q_{RSEI} = \text{median} \frac{RSEI_j - RSEI_i}{j - i} \quad (7)$$

式中: Q_{RSEI} 表示时间序列数据的趋势变化;median 为中值函数; $RSEI_i, RSEI_j$ 分别表示时间序列 i, j 的 RSEI 值。

Mann-Kendall 趋势检验可为泰尔森趋势分析进行显著性检验,通过统计量值 Z 的大小判断数据的趋势显著性^[26]。计算过程为:

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \text{sign}(RSEI_j - RSEI_i) \quad (8)$$

$$\text{sign}(RSEI_j - RSEI_i) = \begin{cases} +1 & (RSEI_j - RSEI_i > 0) \\ 0 & (RSEI_j - RSEI_i = 0) \\ -1 & (RSEI_j - RSEI_i < 0) \end{cases} \quad (9)$$

当 $n \geq 10$ 时, S 近似服从标准正态分布,使用检验统计量 Z 进行趋势检验:

$$Z = \begin{cases} S - \frac{1}{\sqrt{\text{var}(S)}} > 0 \\ S + \frac{1}{\sqrt{\text{var}(S)}} < 0 \end{cases} \quad (10)$$

式中: var 代表方差。结果使用基于 0.05 置信度的双尾检验,趋势检验类别详见表 3。

2.2.3 驱动因子探测 地理探测器是由王劲峰^[27]等人创建的探寻地理现象空间分异性并揭示其背后驱动因子的工具。本研究使用因子探测器探寻 RSEI 的驱动因子,通过 q 值度量所选取的因子对 RSEI 的解释程度,并使用交互作用探测器探究各因子对 RSEI 的交互作用。

$$q = \frac{\sum_{h=1}^L N_h \sigma_h^2}{N \sigma^2} = 1 - \frac{SSW}{SST} \quad (11)$$

$$SSW = \sum_{h=1}^L N_h \sigma_h^2, SST = N \sigma^2$$

式中: $h=1, 2, 3 \dots$; L 为 RSEI 驱动因子的分层, N_h, N 分别为层全区的单元数; σ_h^2, σ^2 分别为层 h 和全区 Y 值的方差; SSW, SST 分别为层内方差之和与全区总方差。 q 的取值为 $[0, 1]$,值越大说明影响因子对 RSEI 的解释程度越大,反之越小。

3 结果与分析

3.1 RSEI 计算结果分析

闽江流域 2001—2020 年 RSEI 主成分分析结果如表 2 所示。2001—2020 年闽江流域 RSEI 第一主成分(PC_1)平均贡献率可以达到 69.01%,反映 PC_1 包含了 4 个生态指标的大部分信息,能够充分地反映闽江流域生态环境质量状况。 PC_1 中,绿度和湿度的载荷值为正,热度和干度的载荷值为负,说明绿度和湿度对区域生态环境质量有优化作用,热度和干度对区域生态质量有破坏作用。绿度和湿度平均载荷的绝对值之和大于热度和干度平均载荷的绝对值之和,绿度和湿度对闽江流域生态环境质量的优化作用比热度和干度的破坏作用要强。平均载荷绝对值表现为:绿度 > 湿度 > 干度 > 热度,说明对闽江流域生态环境质量影响最大的生态指标是绿度指标,区域植被生长状况越好,对生态环境质量的正面影响越大。

表 2 闽江流域 2001—2020 年 RSEI 主成分分析结果(PC_1 中各生态指标载荷及贡献率)

Table 2 Results of Principal component analysis of RSEI in Minjiang River basin from 2001 to 2020 (Load and contribution rate of ecological indicators in PC_1)

年份	绿度	热度	干度	湿度	贡献率/%	年份	绿度	热度	干度	湿度	贡献率/%
2001	0.65	-0.51	-0.27	0.49	60.71	2011	0.87	-0.35	-0.25	0.23	62.04
2002	0.66	-0.61	-0.34	0.24	82.54	2012	0.60	-0.73	-0.25	0.18	74.37
2003	0.73	-0.51	-0.34	0.29	68.54	2013	0.83	-0.29	-0.37	0.28	67.21
2004	0.59	-0.77	-0.11	0.21	75.80	2014	0.84	-0.35	-0.35	0.21	71.18
2005	0.72	-0.61	-0.33	0.32	56.92	2015	0.77	-0.41	-0.21	0.19	67.42
2006	0.60	-0.76	-0.11	0.24	72.87	2016	0.64	-0.71	-0.13	0.28	60.65
2007	0.82	-0.31	-0.37	0.30	62.31	2017	0.78	-0.56	-0.17	0.28	71.75
2008	0.84	-0.48	-0.21	0.11	67.95	2018	0.81	-0.55	-0.13	0.12	80.53
2009	0.82	-0.53	-0.09	0.18	64.61	2019	0.68	-0.70	-0.15	0.21	76.20
2010	0.72	-0.50	-0.38	0.30	59.14	2020	0.86	-0.46	-0.18	0.15	79.31

3.2 生态环境质量时空变化分析

3.2.1 闽江流域生态环境质量时间变化 图 1 展示了闽江流域 2001—2020 年 RSEI 的年均值变化趋势及拟合结果, RSEI 的值在 0.548~0.748 之间波动, 最低值和最高值分别出现在 2004 和 2014 年。总体上看, RSEI 由 0.618 上升到 0.701, 上升了 13.43%, 上升速率为 $3.74 \times 10^{-3}/a$ 。

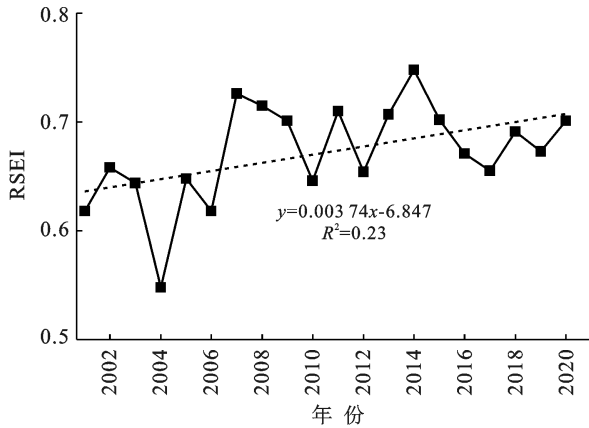


图 1 闽江流域 RSEI 年际变化趋势

Fig.1 Interannual variation trend of RSEI in Minjiang River basin

参照前人的研究^[26]将生态环境质量划分为优 ($0.8 < RSEI \leq 1$)、良 ($0.6 < RSEI \leq 0.8$)、中等 ($0.4 < RSEI \leq 0.6$)、较差 ($0.2 < RSEI \leq 0.4$) 和差 ($0 \leq RSEI \leq 0.2$) 5 个等级。统计 2001—2020 年闽江流域生态环境质量各等级的面积比例(图 2)。可以看出闽江流域生态环境质量整体较好, 等级为优和良的平均面积所占比例达到 74.41%, 较差和差的面积比例始终低于 10.86%。2001—2020 年生态环境质量等级优的面积比例先增加后减少, 等级优和良的面积比例增加了 19.16%。综上, 闽江流域生态环境质量状况良好且向好发展, 但优质的生态环境面积较少。

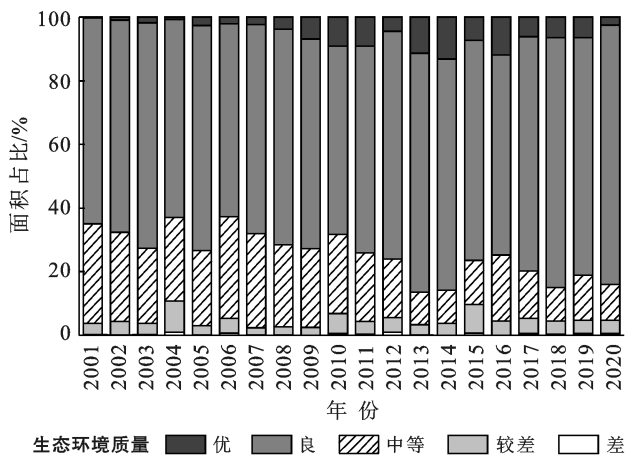


图 2 闽江流域生态环境质量各等级面积比例

Fig.2 Area proportion of ecological environment quality in Minjiang River basin

3.2.2 闽江流域生态环境质量空间变化 图 3 为 2000—2020 年闽江流域生态环境质量的空间变化情况。选取研究期初始(2001 年)、末尾(2020 年)以及研究期内 RSEI 最小值(2004 年)和最大值(2014 年)出现的年份作为闽江流域生态环境质量空间变化分析的时间节点。2001—2004 年闽江流域 RSEI 有所下降, 生态环境质量恶化情况主要发生在闽江及其支流河岸带以及沿海城市地区, 包括崇阳溪、富屯溪和沙溪流域以及闽江入海端周围地区。2004—2014 年闽江流域 RSEI 呈波动上升的态势, 闽江及各支流的河岸带生态环境质量有所改善, 且顺昌县、将乐县、武夷山市等地区的生态环境质量有所提升, 生态环境质量优良的面积显著增加。2014—2020 年闽江流域 RSEI 经历了先下降后上升的变化, 总体上有所下降。这主要是由于将乐县等部分地区优质生态环境质量轻微退化, 且仓山区以及仙游县等东南沿海城市地区的生态环境质量有所恶化所造成的。总体来看, 2001—2020 年闽江流域整体生态环境质量有一定改善。

3.2.3 闽江流域生态环境质量趋势变化 闽江流域 RSEI 趋势分析结果如图 4a 所示。可以看出闽江流域大部分区域的 RSEI 以 $0.002 \sim 0.004/a$ 的速率上升, 这与 RSEI 年际变化结果相对一致。RSEI 下降情况主要发生在闽江流域东南区域, 下降速率最快的区域集中在建阳区、延平区及永泰县等地的中心城区。图 4b 展示了闽江流域 RSEI 趋势变化的显著性检验结果, 对各类检验结果进行统计得到表 3。可以看出闽江流域生态环境质量以微显著改善、显著改善以及微显著退化为主, 其中微显著改善的区域面积达到 $40\,809.47 \text{ km}^2$, 占闽江流域总面积的 66.90%, 显著改善的区域面积为 $10\,711.89 \text{ km}^2$, 占闽江流域总面积的 17.56%, 微显著退化的区域面积为 $5\,371.46 \text{ km}^2$, 占闽江流域总面积的 8.81%。而闽江流域生态环境质量无显著变化的区域面积比例仅有 0.38%, 可见闽江流域生态环境质量状况并不稳定。

总体来看, 闽江流域 90.28% 的地区生态环境质量有所改善, 其中 5.82% 的地区生态环境质量得到了极显著改善(表 3), 包括闽西北以及闽中部分地区, 如武夷山市和顺昌县等。这些地区地形起伏大且植被覆盖度高, 受人类活动影响较少, 所以生态环境条件较好。9.34% 的地区生态环境质量有所下降, 其中 0.23% 的地区生态环境质量极显著下降, 集中在闽东南沿海地区, 如永泰县和仓山区等。其原因在于该类地区城市发展造成的不透水面面积不断增加, 区域的地表温度攀升导致热岛效应^[28-29], 从而严重影响区域的生态环境质量。

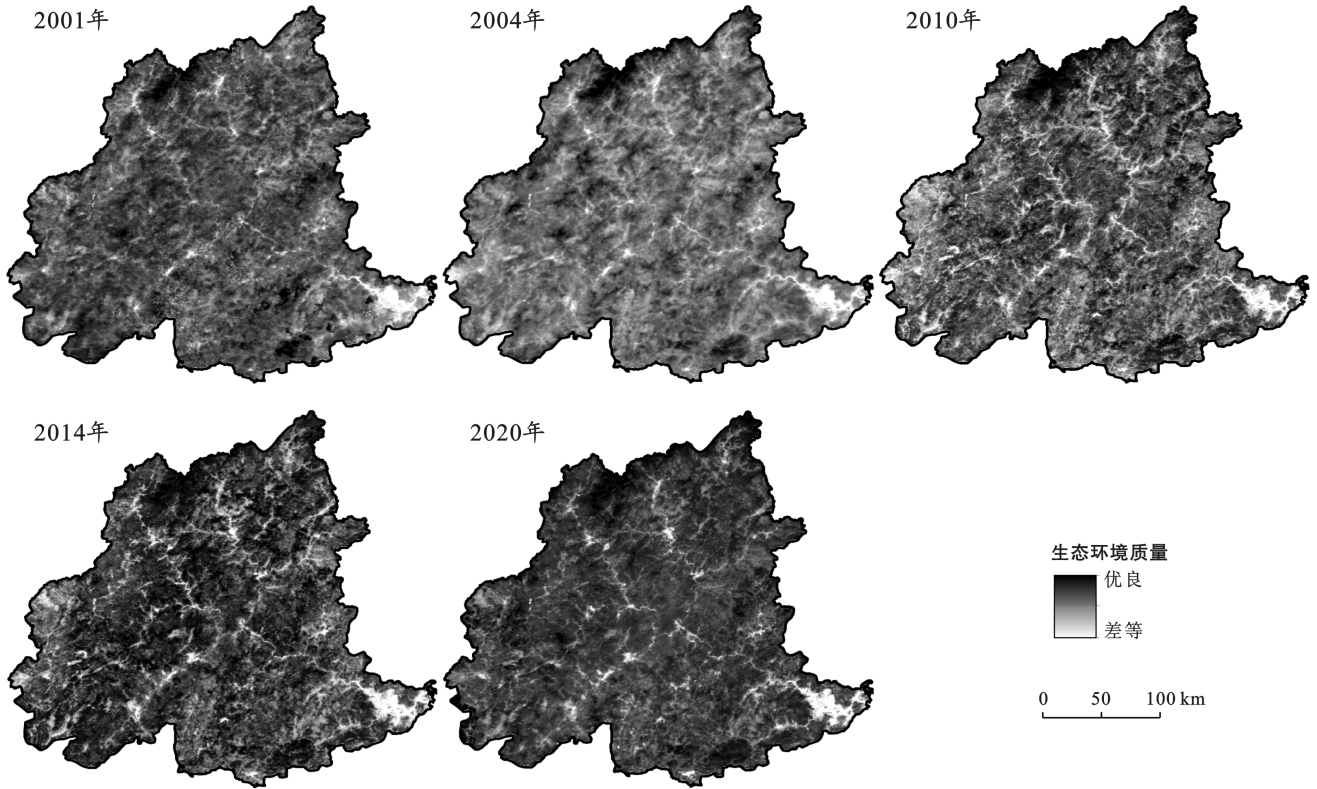


图 3 闽江流域生态环境质量空间分布

Fig.3 Spatial distribution of ecological environment quality in Minjiang River basin

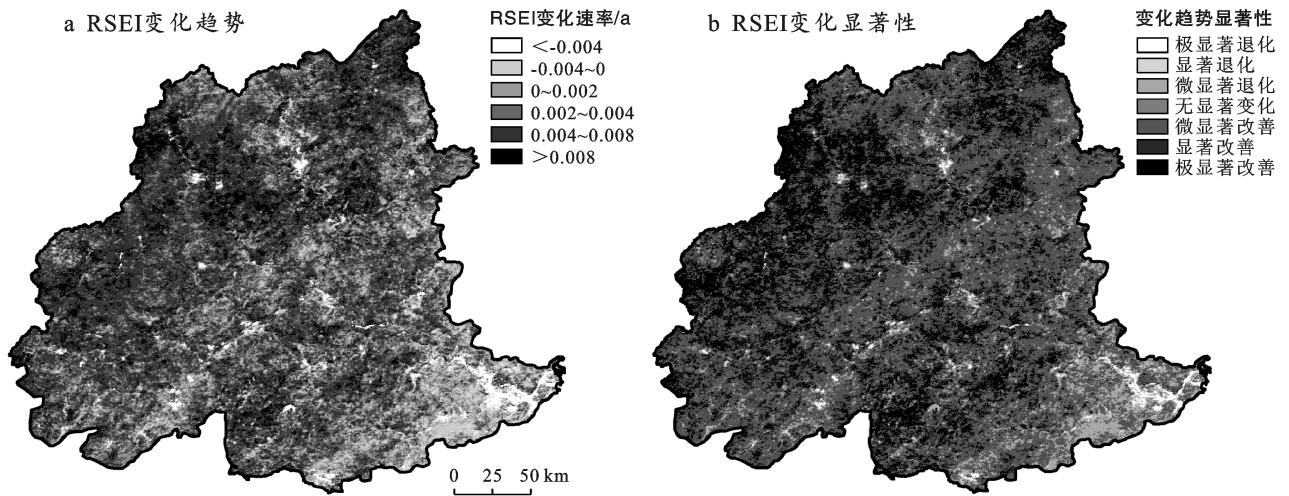


图 4 闽江流域 2001—2020 年 RSEI 变化趋势及显著性空间分布

Fig.4 Spatial distribution of RSEI in Minjiang River basin from 2001 to 2020

3.3 驱动因子探测结果分析

本研究以研究期初始(2001年)、中期(2010年)以及末尾(2020年)作为驱动因子探测时间节点,选择RSEI作为因变量Y,选取人为因子[人口密度(population density, PD)、国内生产总值(gross domestic product, GDP)、夜间灯光(nighttime light, NTL)、土地利用(land Use, LU)]以及自然因子(海拔(elevation, EL)、坡度(slope, SL)、气温(tempera-

ture, TEM)、降水量(precipitation, PRE)作为自变量X。通过排列组合确定合适的分类方法、离散化级数以及整合空间单元大小后^[30],采用自然间断点分级法将自变量栅格数据重分类为20类,并对研究区创建3 km×3 km大小的渔网对自变量和因变量栅格数据进行空间整合,选取渔网中心点作为地理探测器模型样本点,共计6 732个样本点。去除由于水体掩膜而导致的异常点,最终得到了6 566个有效样本

点。使用 ArcGIS 10.8 软件中的按点提取多个值提取样本点自变量的值与因变量的类别输入到地理探测器模型中进行因子探测,得到各因子对 RSEI 的解释度(表 4)。

因子探测结果中所有探测因子的 p 值均为 0,说明所选择的驱动因子对于 RSEI 的空间分异特征具有显著影响。所选 8 个驱动因子的 q 值平均大小排序为:海拔>气温>夜间灯光>坡度>土地利用>人口密度>降水量,说明海拔以与夜间灯光分别是自然因子和人为因子中解释生态环境质量空间分异的主导因子,且相较于人为因子,自然因子对闽江流域生态环境质量的影响更大。

表 3 闽江流域生态环境质量趋势检验类别及面积比例
Table 3 Categories and area ratios of ecological environment quality trend inspection in Minjiang River basin

β	Z	趋势类别	特征趋势	面积/km ²	面积比例/%
$\beta > 0$	$2.58 < Z$	3	极显著改善	3 549.42	5.82
	$1.96 < Z \leq 2.58$	2	显著改善	10 711.89	17.56
	$0 < Z \leq 1.96$	1	微显著改善	40 809.47	66.90
$\beta = 0$	0	0	无显著变化	233.57	0.38
	$0 < Z \leq 1.96$	-1	微显著退化	5371.46	8.81
$\beta < 0$	$1.96 < Z \leq 2.58$	-2	显著退化	185.67	0.30
	$2.58 < Z$	-3	极显著退化	138.70	0.23

表 4 闽江流域 RSEI 单因子探测结果

Table 4 Results of single-factor detection of RSEI in Minjiang River basin

因子	2001 年			2010 年			2020 年		
	q 值	p 值	q 值排序	q 值	p 值	q 值排序	q 值	p 值	q 值排序
PD	0.162	0	7	0.137	0	6	0.226	0	6
GDP	0.165	0	6	0.132	0	7	0.128	0	7
NTL	0.279	0	3	0.187	0	5	0.233	0	5
LU	0.187	0	4	0.217	0	4	0.275	0	3
EL	0.375	0	1	0.245	0	3	0.555	0	1
SL	0.181	0	5	0.264	0	1	0.247	0	4
TEM	0.334	0	2	0.248	0	2	0.303	0	2
PRE	0.096	0	8	0.101	0	8	0.062	0	8

为进一步分析各因子间的相互作用对 RSEI 的影响程度,使用交互因子探测器进行因子间的交互作用探测。交互探测结果(图 5)表明,双因子的交互作用均增强了对 RSEI 的解释能力,其中除降水量和国内生产总值与部分因子间的交互作用为非线性增强外,其他因子间的交互作用的结果均为双因子增强。交互作用平均解释度最大值为海拔∩坡度,其次为海拔∩国内生产总值,最小值为国内生产总值∩人口密度。海拔与夜间灯光作为单因子探测中的主导因子,在与其他因子交互探测的结果中平均解释力达到 0.474,依旧对 RSEI 的解释起主导作用,这说明海拔与人类活动强度对闽江流域生态环境质量的影响显著。而单因子探测结果中 q 值最小的降水量与其他因子产生交互作用后,对 RSEI 的解释力有显著上升,这说明一定降水量与其他因子的共同作用会对闽江流域生态环境质量产生较大影响。

4 讨论

2001—2020 年闽江流域 RSEI 的年均最小值和最大值分别出现在 2004 和 2014 年,原因在于 2004

年“海峡西岸经济区”的成立引导福建省经济快速发展,城市范围不断扩张即建设用地快速侵占周围的草地和林地^[31],造成闽江流域生态环境质量急剧下降。而 2014 年国务院印发《国务院关于支持福建省深入实施生态省战略加快生态文明先行示范区建设的若干意见》将福建省确立为生态文明示范区,并从优化土地开发到生态文明建设等方面推出了各项政策措施^[32],加之福建省的积极响应致使闽江流域生态环境质量显著改善。

结合 RSEI 的计算结果对闽江流域生态环境质量变化显著的区域进行分析。闽西北是中国重要的森林产区,拥有白砂林场、洋口林场等国有林场,部分地区还被辟为自然保护区,如武夷山国家自然保护区。这些地区此前植被覆盖度虽高,但存在大面积的人工林和纯林,林分结构不合理导致森林的生物多样性低、生态效益较差,生态系统抗干扰能力弱^[33-34]。近年来通过近自然经营、森林抚育以及针阔混交的方法对林分结构进行了改善,绿度和湿度指标上升,生态环境质量有所提高。生态环境质量显著下降的区域主要集中在闽东南沿海地区,生态环境质量的下降主要

原因是城市扩张、人口集聚造成的不透水面面积增加,植被覆盖度降低,热度和干度指标上升,最终导致生态

环境质量下降。可以通过构建绿色屋顶、改进绿色通道^[34]等措施降低热度,从而改善区域生态环境质量。

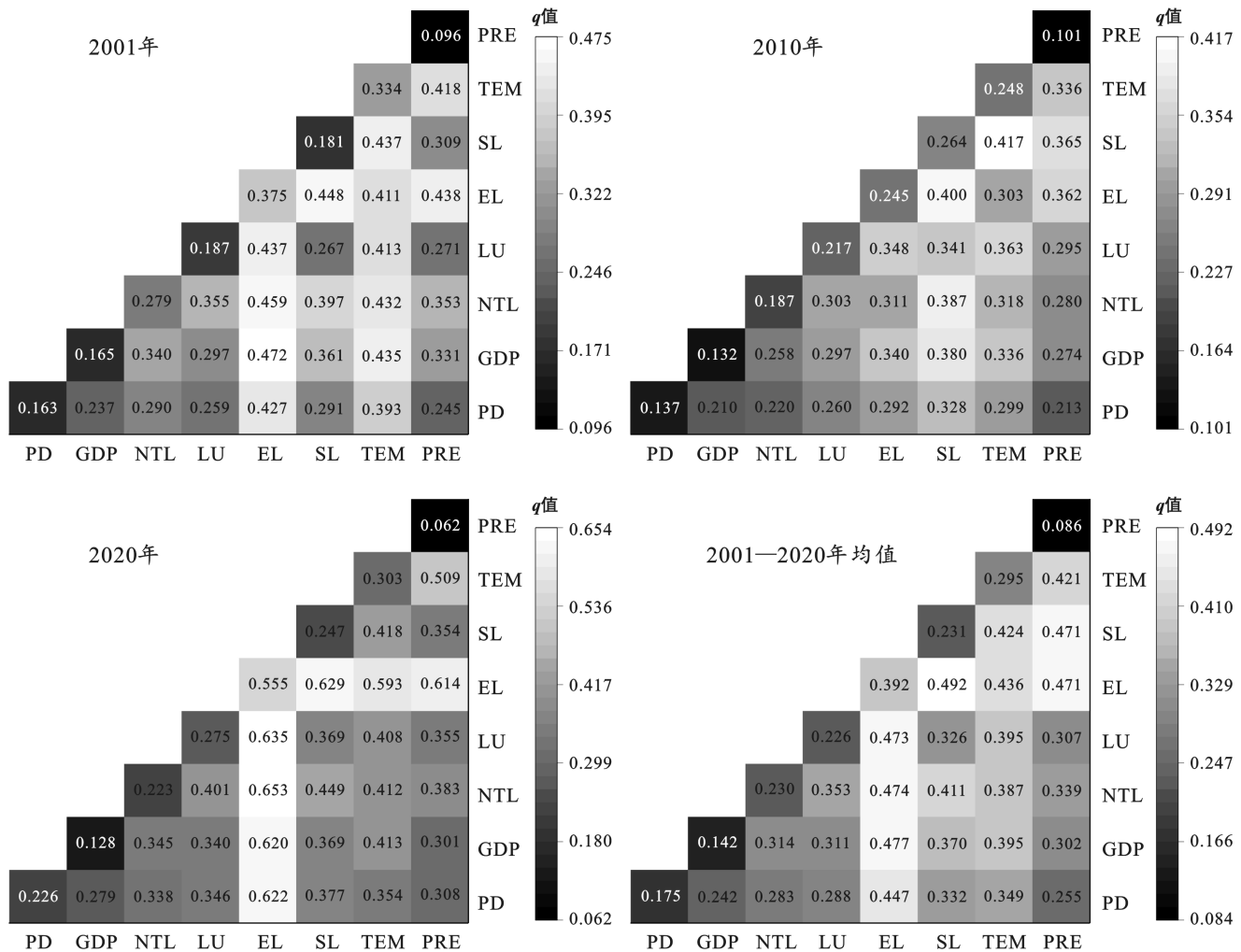


图 5 闽江流域 RSEI 交互探测结果

Fig.5 Results of interactive detection of RSEI in Minjiang River basin

生态环境质量状况会受到人类活动和自然要素的共同影响。本研究采用地理探测器探测闽江流域生态环境质量变化的驱动因子,在因子的选取上综合了人为因素和自然因素,相对全面。探测结果表明海拔与夜间灯光分别是对闽江流域生态环境质量解释度最高的自然因子与人为因子,而降水量对闽江流域生态环境质量的解释度最低。闽江流域的生态环境质量变化趋势呈梯度分布,这与 Xu^[35]等人的研究结论基本一致,流域整体 RSEI 变化速率从西北到东南逐渐下降,与闽江流域西北—东南的海拔走向基本吻合。海拔不同会引起水热条件的差异,高海拔地区受人类活动影响小,地表平均气温较低、蒸散量小,水热条件好,对生态环境质量有正向作用;低海拔地区适合人类居住,平均气温较高,蒸散量大,会对生态环境质量造成负面影响。闽江流域植被覆盖度高,林冠层

降水截留能力强,且流域土壤类型以赤红壤和红壤为主,保水能力较差,因此降水量对于闽江流域生态环境质量的影响较小。夜间灯光可综合反映区域发展水平、碳排放量以及道路建设情况^[36],能够很好地代表人类活动强度,夜间灯光对闽江流域生态环境质量解释度较高反映出闽江流域经济社会发展进程中的生态文明建设还有待加强。

本研究使用 MODIS 系列数据对闽江流域的生态环境质量状况进行了全面的评价和分析,不足之处在于本研究研究的单元较大、时间跨度较大,无法了解小尺度下区域生态环境质量的实时变化。生态环境质量的研究具有复杂性,未来可以考虑将高时间分辨率与空间分辨率的遥感影像进行融合以实现区域生态环境质量状况进行实时、精细地监测。

5 结论

(1) 2001—2020 年闽江流域 RSEI 的 PC_1 平均贡献率达到 69.01%，其中绿度和湿度对闽江流域生态环境质量有优化作用，热度和干度对闽江流域生态环境质量有破坏作用，且绿度和湿度的优化作用比干度和湿度的破坏作用要强。4 个生态指标中对生态环境质量影响力大小排序为：绿度 > 湿度 > 干度 > 湿度，这与闽江流域的自然环境条件基本一致。

(2) 闽江流域生态质量良好且逐步向好发展，2001—2020 年流域 RSEI 由 0.618 上升到 0.701，总体上升了 13.3%。流域生态环境质量等级为优和良的平均面积比例达到 74.41%，2020 年相较于 2001 年等级优良的区域面积比例增加了 19.16%。20 a 内流域 90.28% 的区域生态环境质量均有所改善，仅有 9.34% 的区域生态环境质量有所下降，主要集中在闽江流域东南部。

(3) 闽江流域生态环境质量受自然因素和人为因素共同影响，且自然因素对流域生态环境质量影响更大，各因素间的相互作用均会增加对流域生态环境质量的影响。夜间灯光为影响闽江流域生态环境质量的主导人为因子，反映闽江流域经济与城市的建设与其生态环境质量休戚相关。因此，在闽江流域后续的发展中要统筹好社会经济建设与生态文明建设工作。

[参 考 文 献]

[1] Gao Lin, Ma Chuanming, Wang Qixin, et al. Sustainable use zoning of land resources considering ecological and geological problems in Pearl River Delta Economic Zone, China [J]. *Scientific Reports*, 2019, 9(1):16052.

[2] 刘栩位, 周启刚, 周浪, 等. 基于 RSEI 的三峡库区重庆段水土保持生态功能区生态环境质量动态监测[J]. *水土保持研究*, 2021, 28(5):278-286.

[3] Wu Zijing, Li Zhijian, Zeng Hui. Using remote sensing data to study the coupling relationship between urbanization and eco-environment change: A case study in the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay area [J]. *Sustainability*, 2020, 12(19):7875.

[4] Choudhary K, Shi Wenzhong, Boori M S, et al. Agriculture phenology monitoring using NDVI time series based on remote sensing satellites: A case study of Guangdong, China [J]. *Optical Memory and Neural Networks*, 2019, 28(3):204-214.

[5] 刘杰, 汲玉河, 周广胜, 等. 2000—2020 年青藏高原植被净初级生产力时空变化及其气候驱动作用[J]. *应用生态学报*, 2022, 33(2):1-8.

[6] 何利平, 简季. 四川省 2009—2020 年植被覆盖度时空变化

遥感动态监测[J]. *水土保持通报*, 2022, 42(2):203-209.

[7] 廖柳文, 秦建新. 环长株潭城市群湿地生态安全研究[J]. *地球信息科学学报*, 2016, 18(9):1217-1226.

[8] 王建, 赵牡丹, 李健波, 等. 基于 MODIS 时序数据的秦巴山区生态环境质量动态监测及驱动力分析[J]. *山地学报*, 2021, 39(6):830-841.

[9] 冯文彬, 林媚珍, 龚建周, 等. 基于 FLUS-InVEST 模型的中山市生境质量时空分异特征[J]. *生态科学*, 2022, 41(3):16-23.

[10] 张红娟, 高艳, 华亚伟, 等. SolIVES 模型价值转移方法对不同空间尺度的响应评估[J]. *生态学报*, 2019, 39(24):9233-9245.

[11] 张玺国, 周雄冬, 徐梦珍, 等. 西藏地质灾害易发性及水能开发适宜度影响[J]. *地理学报*, 2022, 77(7):1603-1614.

[12] Duan Linsen, Xiang Mingshun, Yang Jin, et al. Eco-environmental assessment of earthquake-stricken area based on pressure-state-response (P-S-R) model [J]. *International Journal of Design & Nature and Eco-dynamics*, 2020, 15(4):545-553.

[13] 汪东川, 陈星, 孙志超, 等. 格尔木长时间序列遥感生态指数变化监测[J]. *生态学报*, 2022, 42(14):1-12.

[14] 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.

[15] 王美雅, 徐涵秋. 中外超大城市生态质量遥感评价[J]. *生态与农村环境学报*, 2021, 37(9):1158-1167.

[16] 胡克宏, 张震. 陕西秦岭山区留坝县生态质量时空特征及影响因素分析[J]. *生态与农村环境学报*, 2021, 37(6):751-760.

[17] 岳辉, 刘英, 朱蓉. 基于遥感生态指数的神东矿区生态环境变化监测[J]. *水土保持通报*, 2019, 39(2):101-107.

[18] 褚馨德, 贾伟, 张峻豪, 等. 基于 RSEI 模型的祁连山自然保护区生态环境质量评价[J]. *环境监测管理与技术*, 2022, 34(1):38-42.

[19] Wen Xiaole, Ming Yanli, Gao Yonggang, et al. Dynamic monitoring and analysis of ecological quality of pingtan comprehensive experimental zone, a new type of sea island city, based on RSEI [J]. *Sustainability*, 2020, 12(1):1-14.

[20] 周斯怡, 殷晓洁, 汤瑞权, 等. 长江上游典型石漠化地区生态环境质量评价[J]. *浙江农林大学学报*, 2022, 39(4):783-791.

[21] 黄仲良, 何敬, 刘刚, 等. 面向 GEE 平台的遥感影像分析与应用研究进展[J]. *遥感技术与应用*, 2022, 37(2):1-8.

[22] Zhang Shihe, Zhong Quanlin, Cheng Dongliang, et al. Coupling coordination analysis and prediction of landscape ecological risks and ecosystem services in the Min River basin [J]. *Land*, 2022, 11(2):1-18.

- the Detroit Region [J]. *Economic Geography*, 1970, 46(2):234-240.
- [13] 张崇森,李森,张力喆,等.基于 PSR 模型的城市生态安全评价与贡献度研究:以铜川市为例[J].*安全与环境学报*,2019,19(3):1049-1056.
- [14] 金辉,王思.基于 PSR 模型的武汉城市圈生态安全评价及态势研究[J].*安全与环境学报*,2020,20(1):352-363.
- [15] 贾洪文,张伍涛,盘业哲.科技创新、产业结构升级与经济高质量发展[J].*上海经济研究*,2021,392(5):50-60.
- [16] 曹佳蕾,李婷.基于熵权 GC-TOPSIS 的区域科技创新能力评价与实证[J].*统计与决策*,2020,36(15):171-174.
- [17] 白俊红,蒋伏心.考虑环境因素的区域创新效率研究:基于三阶段 DEA 方法[J].*财贸经济*,2011,359(10):104-112,136.
- [18] 黄磊,吴传清.外商投资、环境规制与长江经济带城市绿色发展效率[J].*改革*,2021,325(3):94-110.
- [19] 熊曦,肖俊.武陵山片区城镇化与生态环境耦合协调度时空分异研究:以 6 个中心城市为例[J].*生态学报*,2021,41(15):5973-5987.
- [20] 杨雪荻,白永平,车磊,等.甘肃省生态安全时空演变特征及影响因素解析[J].*生态学报*,2020,40(14):4785-4793.
- [21] 何刚,王雯雯,夏业领,等.基于正态云模型的区域生态安全评价[J].*安全与环境学报*,2018,18(2):807-813.
- [22] 中华人民共和国中央人民政府.国务院关于印发全国资源型城市可持续发展规划(2013—2020 年)的通知[EB/OL]. http://www.gov.cn/zwgk/2013-12/03/content_2540070.htm.
- [23] 黄河东.基于 PSR 模型和改进 TOPSIS 法的中国城市群生态质量比较研究[J].*生态经济*,2016,32(6):164-167,200.
- [24] 陈阳,逮进,于平.技术创新减少环境污染了吗?:来自中国 285 个城市的经验证据[J].*西安交通大学学报(社会科学版)*,2019,39(1):73-84.
- [25] L Anselin. Local indicator of spatial association-LISA [J]. *Geographical Analysis*, 1995, 27(2):93-115.
- [26] Elhorst J P. Heidelberg; Springer [M]: Heidelberg; Springer, 2014.
- [27] 汪艳涛,张娅娅.生态效率区域差异及其与产业结构升级交互空间溢出效应[J].*地理科学*,2020,40(8):1276-1284.
- [28] 马骏,周盼超.产业升级对提升长江经济带生态效率的空间效应研究[J].*南京工业大学学报(社会科学版)*,2020,19(2):73-88,112.
- [29] 向阳,罗胤晨,于哲浩,等.城市制造业集聚演变及其对生态环境的影响研究:基于成渝地区双城经济圈的实证分析[J].*调研世界*,2022(3):20-29.

(上接第 318 页)

- [23] 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.
- [24] 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.
- [25] Sun Bo, Zhou Qiming. Expressing the spatio-temporal pattern of farmland change in arid lands using landscape metrics [J]. *Journal of arid environments*, 2016, 124(1): 118-127.
- [26] 胡琦,马雪晴,胡莉婷,等.Matlab 在气象专业教学中的应用:气象要素的 M-K 检验突变分析[J].*实验室研究与探索*,2019,38(12):48-51.
- [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.
- [28] 王志超,何新华.基于植被覆盖度和遥感生态指数的成都市锦江区生态质量评估[J].*生态与农村环境学报*,2021,37(4):492-500.
- [29] 林荣平,祁新华,叶士琳.沿海河谷盆地城市热岛时空特征及驱动机制[J].*生态学报*,2017,37(1):294-304.
- [30] 李琛,吴映梅,高彬斌,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.
- [31] 李胜鹏,柳建玲,林津,等.基于 1980-2018 年土地利用变化的福建省生境质量时空演变[J].*应用生态学报*,2020,31(12):4080-4090.
- [32] 刘雅芳.生态文明建设是否抑制了碳排放?来自福建生态文明先行示范区建设的经验证据[J].*中南林业科技大学学报(社会科学版)*,2021,15(3):31-38.
- [33] 叶宝鉴,陈永滨,马良,等.福建省两种林分类型物种结构特征[J].*江西农业大学学报*,2020,42(1):84-91.
- [34] Park J, Shin Y, Kim S, et al. Efficient plant types and coverage rates for optimal green roof to reduce urban heat island effect [J]. *Sustainability*, 2022, 14(4): 1-17.
- [35] Xu Hanqiu, Wang Yifan, Guan Huade, et al. Detecting ecological changes with a remote sensing based ecological index (RSEI) produced time series and change vector analysis [J]. *Remote Sensing*, 2019, 11(20): 23-45.
- [36] 陈颖彪,郑子豪,吴志峰,等.夜间灯光遥感数据应用综述和展望[J].*地理科学进展*,2019,38(2):205-223.