

DOI: 10.5846/stxb202204020848

王永祥, 徐园园, 杨佳嘉, 陈裕鑫, 魏佳轩, 周娟, 张未来, 程武学. 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. 生态学报, 2023, 43(15): 6278-6292.

Wang Y X, Xu Y Y, Yang J J, Chen Y X, Wei J X, Zhou J, Zhang W L, Cheng W X. Dynamic monitoring and spatio-temporal pattern evolution analysis of eco-environmental quality in Chongqing based on remote sensing. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(15): 6278-6292.

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

王永祥^{1,2}, 徐园园^{1,2}, 杨佳嘉^{1,2}, 陈裕鑫^{1,2}, 魏佳轩^{1,2}, 周娟^{1,2}, 张未来^{1,2}, 程武学^{1,2,*}

1 四川师范大学地理与资源科学学院, 成都 610066

2 四川师范大学西南土地资源评价与监测教育部重点实验室, 成都 610066

摘要: 长江流域是我国重要的生态屏障之一, 重庆市作为长江上游最后一道关口, 研究其生态质量发展对于有效保护长江流域生态环境具有重要指导意义。基于 2011—2021 年间的 Landsat 影像等数据, 计算遥感生态指数 (Remote sensing based ecological index, RSEI), 并采用 Sen (Theil-Sen median) 趋势分析法和 MK (Mann-Kendall) 检验研究其变化趋势以及利用 Hurst 指数模型分析 RSEI 的持续特征。利用空间转移矩阵和重心迁移模型研究其在空间上分布特征的变化情况, 最后使用降水、风速、近地表气温、海拔等辅助数据为影响因素, 结合地理探测器进一步探究 RSEI 变化驱动力, 探讨重庆市 2011—2021 的 RSEI 空间分布及演变趋势。结果表明: (1) 重庆市多年平均 RSEI 为 0.593, 使用等间距法将其划分的等级为差、较差、中等、良、优的面积占比分别为 2.48%、8.28%、38.32%、41.87%、9.05%。从整体来看重庆市生态质量水平较高, 重庆市年际 RSEI 以显著趋势波动增长。(2) RSEI 等级为差的地区空间上主要集中于重庆西部; 较差等级主要围绕差一级的周围; 中等等级主要位于重庆市中西部; 有超过一半的区域 RSEI 等级为良或优, 分布在重庆市中北部地区。(3) 利用 Hurst 指数与 Sen 氏趋势分析结果利用 ArcGIS 叠加分析, 结果共计有总体 53.3% 的 RSEI 会保持增长的可持续性。(4) 通过因子探测, 本文发现以近地表气温、海拔为主的自然因素以及以土地利用为主的人为因素是影响重庆市 RSEI 空间分布的主要影响因素。(5) 从 RSEI 空间分布变化来看 2011—2021 年重庆市生态环境质量主要发生了“较差→中等”、“较差→良”、“中等→良”、“良→优”这四个路径, 整体上重庆市生态环境得到优化。

关键词: 遥感生态指数; 重庆市; 趋势分析; 时空变化; 长江上游

Dynamic monitoring and spatio-temporal pattern evolution analysis of eco-environmental quality in Chongqing based on remote sensing

WANG Yongxiang^{1,2}, XU Yuanyuan^{1,2}, YANG Jiajia^{1,2}, CHEN Yuxin^{1,2}, WEI Jiaxuan^{1,2}, ZHOU Juan^{1,2}, ZHANG Weilai^{1,2}, CHENG Wuxue^{1,2,*}

1 College of Geography and Resource Science, Sichuan Normal University, Chendu 610066, China

2 Key Laboratory of Evaluation and Monitoring of Southwest Land Resources, Ministry of Education, Sichuan Normal University, Chendu 610066, China

Abstract: In this study, we take Chongqing, an upstream city of the Yangtze River as the study area. This paper calculated the Remote sensing-based ecological index (RSEI) based on Landsat images from 2011—2021 and utilized Theil-Sen estimator and MK (Mann-Kendall) test to study its trend. In this study, the long-term dynamics of RSEI were analyzed

基金项目: 藏东南冻融水力侵蚀交错带砾石空间分布格局及对土壤侵蚀影响机制 (32060370); 精准扶贫视角下凉山州农村留守人群犯罪空间分异特征及对策研究 (18YJC850004)

收稿日期: 2022-04-02; 采用日期: 2022-12-02

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: cwx714826@163.com

within the Hurst index model. The spatial shift matrix and the center of gravity shift model were used to investigate the changes in the spatial distribution characteristics of RSEI. Finally, the auxiliary data such as precipitation, wind speed, near-surface air temperature, and elevation were used as influencing factors and combined with geographic probes, these factors were included in the further investigation of the driving forces of RSEI changes; This investigation shall indicate the spatial distribution and evolution trends of RSEI in Chongqing from 2011 to 2021. The results showed that: (1) the multi-year average RSEI of Chongqing was 0.593, and the percentages of areas classified as poor, relatively poor, moderate, good, and excellent using the equal spacing method were 2.48%, 8.28%, 38.32%, 41.87%, and 9.05%, respectively. As a whole, the ecological quality level of Chongqing was high, and the interannual RSEI of Chongqing was increasing with a significant trend fluctuation. (2) The areas with poor RSEI grades were spatially concentrated in western Chongqing; the relatively poor grades were mainly around the poor level; the medium grades were mainly located in the central and western Chongqing; more than half of the areas with good or excellent RSEI grades were distributed in the central and northern Chongqing. (3) The results produced in Theil-Sen estimator and Hurst index model were analyzed using the ArcGIS overlay, indicating that a total of 53.3% of the overall RSEIs that would remain sustainable in terms of growth. (4) From the factor detection, natural factors, mainly near-surface temperature and elevation, and anthropogenic factors, mainly land use, were the main influencing factors on the spatial distribution of RSEI in Chongqing. (5) During the course of ten years, the spatial distribution of RSEI saw general improvements in all surveyed groups, and the overall ecological environment of Chongqing was optimized.

Key Words: Remote sensing based ecological index; Chongqing City; trend analysis; time and space change; upper Yangtze River

长江是我国第一大河,长江上游流域的自然生态环境十分复杂,由于其处在我国东西部交汇区,因此对我国战略意义十分重大^[1]。但是在过去,由于多年的人为破坏,长江上游的生态环境质量下降较为严重,这就与我国的可持续发展战略相悖,政府决定建立长江上游生态屏障^[2]。而重庆地处长江上游和三峡库区腹心地带,是长江上游的中心城市,嘉陵江与长江在此交汇,地理环境较为典型。重庆也是长江上游生态屏障的最后一道关口,对长江中下游地区生态安全承担着不可替代的作用,修复好重庆市生态环境的重要性不言而喻。近年来,近年来由于重庆市始终将修复长江生态环境工作摆在压倒性位置,推出了一系列符合地方条件的生态修复措施^[3-5],例如“两岸青山,千里林带”、“清水绿岸”等,国家也出台了长江经济带“共抓大保护、不搞大开发”方针等保护生态环境^[6],因此有必要对重庆市生态质量变化进行监测,并分析其驱动因素。关于生态质量的评价,近年来已有较多研究,在指数的选择上,有学者选取生物多样性指数^[7]、植被覆盖度指数^[8-9],等单因素构建模型评估生态质量亦或是使用层析分析方法^[10-11]、主成分分析法^[12]等向多种因素人为赋予权重。对于重庆市生态环境质量前期已有相关研究,周启刚^[13]等人分别选取归一化植被指数(NDVI)、归一化建筑指数(NDBI)、图斑破碎度模型评估重庆市生态空间质量,表明研究区生境质量呈波动上升趋势。任彦霓^[14]等人结合遥感和POI数据探究重庆市主城区生态环境质量格局,发现生态环境质量受城市建设影响显著。本研究在前人研究的基础上,选取了遥感生态指数对重庆市生态环境质量进行评估,通过构建RSEI模型可以避免因人为主因素导致的权重不均,因此较适用于生态质量评价当中。

遥感生态指数^[15](RSEI)是由我国学者徐涵秋提出的用于评价区域生态质量的遥感指数,由于其研究在生态环境变化方面的优势以及弥补了生态环境状况指数(Ecological Environment Index, EI)当中由于土壤侵蚀模数和环境质量指数难以获取到的不足^[16],常被应用于大范围^[17-19]、长时间序列^[20-23]的生态环境保护研究。国内外学者利用这一指数进行了广泛又深入的研究,Karimi^[24]等人利用伊朗阿拉斯巴兰保护区和美国、欧洲13个城市的Landsat多时相影像、国家土地覆盖数据库(NLCD)、不透水性和高分辨率层不透水性(HRLI)数据为研究对象,基于RSEI指数建立陆面生态状况模型。Liao等人利用Modis影像对中国2000—2017年生态环境质量进行了评价^[25]。赵管乐^[26]等人利用RSEI研究了典型干热河谷区的生态环境变化。卢卓^[27]等使用不同分辨率Landsat卫星影像与Sentinel-2A卫星影像计算RSEI时的精度进行了对比。RSEI可

以更好的对研究区域生态环境质量进行定量、客观地评价,具有一定的学术价值。又由于生态环境质量研究的对象存在范围广、要素多等特点,因此相对于其他传统的研究手段,遥感的独特之处在于能够在空间和时间层面上反映地面事物的变化,结合遥感和 GIS 技术可以高效地提取、反演出生态环境质量评价所需的指标,最终通过可视化表达直观地展示评价结果。此外,本文在现有 RSEI 研究当中使用较多的 Sen 趋势分析、曼-肯德尔检验方法^[28]监测长时间变化趋势的基础上,引入可以衡量时间序列统计相关性^[29]的 Hurst 指数,对重庆市多年 RSEI 未来持续性进行预测。再使用地理探测器对影响地理现象空间分布差异的自然、气候、人类活动因素进行探测,得到了影响重庆市 RSEI 空间分异的驱动因素,为后续重庆市生态环境治理提供一定的理论支撑。

传统的遥感影像研究需要进行收集遥感数据再进行预处理,之后利用相关软件进行计算,再进行后处理,步骤较为繁杂,尤其是在进行长时间序列研究时,需要消耗大量时间在数据处理阶段^[30]。谷歌地球引擎 (Google Earth Engine, GEE) 平台是当前使用较为广泛的处理大量遥感数据的平台,由于没有硬件设备的限制,这就使得 GEE 在处理大范围,长时间序列数据上具有一定的优势,可以节省大量时间且效率较高,广泛为学者关注使用。近年来我国也推出了便于学习和研究的遥感平台如 PIE-Engine 和 AI Earth,将会更进一步提高相关领域研究效率^[31-32]。本研究对一些主流遥感平台进行优选,使用 GEE 云平台,调用海量多源遥感影像数据和方法,不仅可以提高计算效率,还为长时间序列生态环境质量变化检测与可持续发展等研究提供数据基础和技术支持。

1 研究区概况

重庆位于中国西南部、长江上游地区,地跨东经 105°11′—110°11′、北纬 28°10′—32°13′之间的青藏高原与长江中下游平原的过渡地带。东邻湖北、湖南,南靠贵州,西接四川,北连陕西;长江横贯全境,流程 691km,与嘉陵江、乌江等河流交汇,研究区位置如图 1 所示。辖区东西长 470km,南北宽 450km,幅员面积

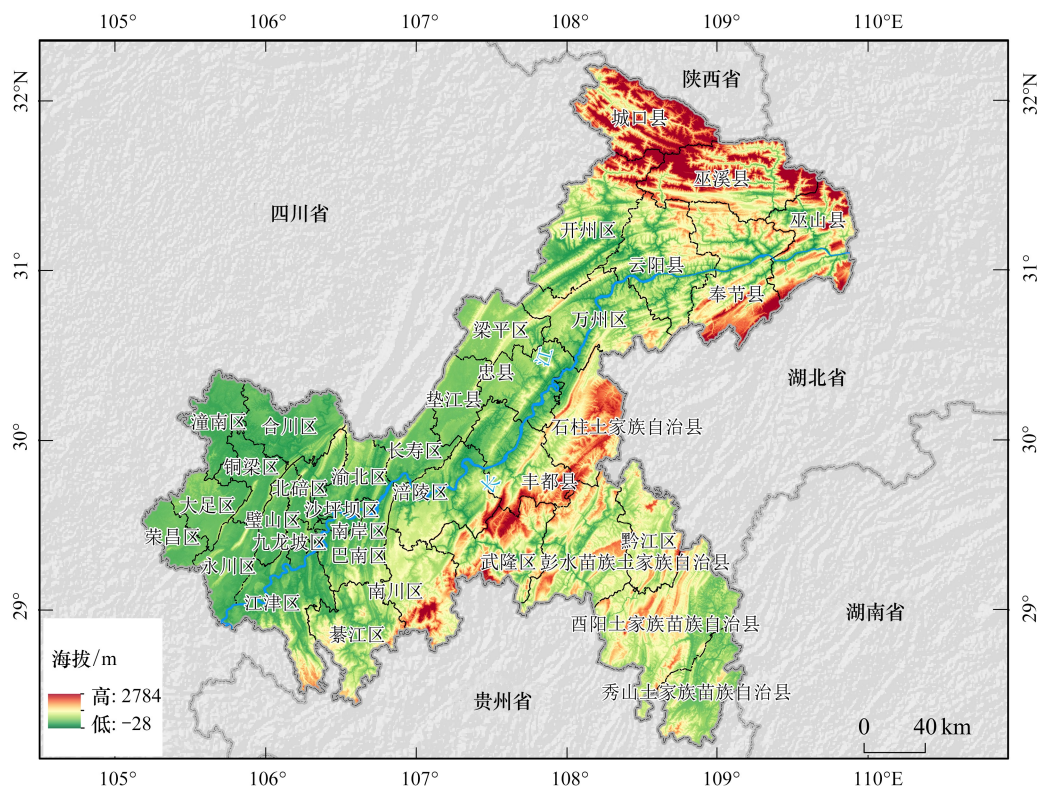


图 1 研究区概况

Fig.1 Study area overview

8.24 万 km²。重庆地势由南北向长江河谷逐级降低,西北部和中部以丘陵、低山为主,东南部靠大巴山和武陵山两座大山脉,坡地较多,有“山城”之称。总的地势是东南部、东北部高,中部和西部低,由南北向长江河谷逐级降低。

2 材料与方法

2.1 数据来源

遥感数据来自于美国谷歌公司免费地理计算云平台 Google Earth Engine (GEE) 当中所收录的 Landsat 数据,2011 年遥感影像采用“LANDSAT/LT05/C01/T1_SR”数据集当中收录的 Landsat5-TM 影像,2013、2015、2017、2021 数据均采用“LANDSAT/LC08/C01/T1_SR”。图 2 表示了将 GEE 服务器当中研究区范围的 Landsat8 数据进行去云处理后的影像可用性,可以看出由南向北可用性逐渐增加。

由于 2021 年数据较难获取,本文使用 2020 年数据与重庆市 2020 年 RSEI 数据进行空间分布影响因素研究。气候数据中降水、风速、近地表气温数据来自于国家科技基础条件平台—国家地球系统科学数据中心 (<http://www.geodata.cn>),分辨率均为 1km;地表数据来自于中国科学院计算机网络信息中心地理空间数据云平台 (<http://www.gscloud.cn>) 的 ASTER GDEM 数字高程数据数据集,分辨率为 30m;人口密度数据来源于 WorldPOP 平台 (<https://www.worldpop.org>) 的 Population Density 数据集,分辨率为 1km;LUCC 数据来自于国家基础地理信息中心全球地表覆盖数据产品服务网站 (DOI:10.11769),分辨率为 30m;夜间灯光数据来自于美国国家海洋和大气管理局地球观测小组的数据平台 (<https://ngdc.noaa.gov>),分辨率为 1km。

2.2 研究方法

2.2.1 遥感生态指数

遥感生态指数是将国家环保部颁布的 EI 指数当中属性的空间展现方式进行了一定程度的修正^[33],采用植被指数、裸土指数、湿度、地表温度分别对应代表绿度、干度、湿度和热度,遥感生态指数 (RSEI) 就可以表示为:

$$RSEI = f(\text{Greenness}, \text{Wetness}, \text{Heat}, \text{Dryness})$$

其遥感定义为:

$$RSEI = f(VI, WET, LST, SI)$$

上述两式当中,Greenness 为绿度,Wetness 为湿度,Heat 为热度,Dryness 为干度,VI 为植被指数,Wet 为湿度,LST 为地表温度,SI 为裸土指数。

(1) 绿度指标

当前研究中,归一化植被指数 (NDVI) 是使用最为广泛的一项植被指数,因此在本文当中也选择 NDVI 作为植被指数进行计算:

$$NDVI = \frac{\rho_{NIR} - \rho_{Red}}{\rho_{NIR} + \rho_{Red}}$$

其中 ρ_{NIR} 代表 Landsat 影像的近红外波段的辐射率, ρ_{Red} 代表红光波段的辐射率。

(2) 湿度指标

湿度指数反映了自然界当中各类事物如植被、水体、裸土的湿度,是生态环境监测当中一个十分重要的指

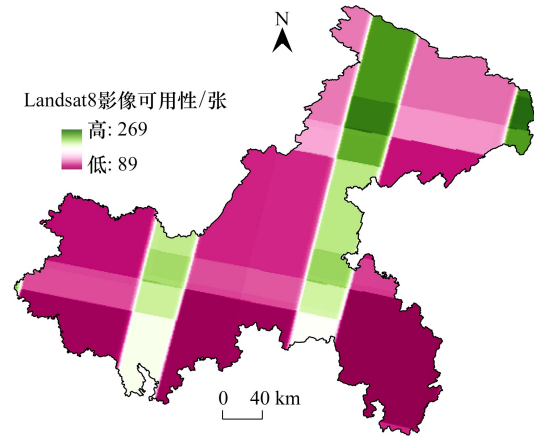


图 2 Landsat8 影像可用性

Fig.2 Landsat8 image availability

标。本研究中采用的计算方法为:

$$\text{Wet}_{\text{TM}} = 0.0315\rho_{\text{Blue}} + 0.2021\rho_{\text{Green}} + 0.3102\rho_{\text{Red}} + 0.1594\rho_{\text{NIR}} - 0.6806\rho_{\text{SWIR1}} - 0.6109\rho_{\text{SWIR2}}$$

$$\text{Wet}_{\text{OLI}} = 0.1511\rho_{\text{Blue}} + 0.1972\rho_{\text{Green}} + 0.3283\rho_{\text{Red}} + 0.3407\rho_{\text{NIR}} - 0.1777\rho_{\text{SWIR1}} - 0.4559\rho_{\text{SWIR2}}$$

上述两个式子当中, Wet_{TM} 指 Landsat TM 传感器所获取影像计算湿度指标的方法, Wet_{OLI} 指 Landsat OLI 传感器所获取影像计算湿度指标的方法。而 ρ_{Blue} 、 ρ_{Green} 、 ρ_{Red} 、 ρ_{NIR} 、 ρ_{SWIR1} 、 ρ_{SWIR2} 分别代表了遥感影像的蓝、绿、红光波段以及近红外、短波红外 1、短波红外 2 波段的辐射率。

(3) 热度指标

热度指标用地表温度来代替。

$$\text{LST} = \frac{T}{\left[1 + \left(\frac{\lambda T}{\rho} \right) \ln \varepsilon \right]}$$

$$T = \frac{K_2}{\ln \left(\frac{K_1}{L} + 1 \right)}$$

$$L = \text{gain} \times \text{DN} + \text{offset}$$

式中, DN 为像元灰度值; gain 和 offset 为波段的增益和偏置, 其数值可以再遥感影像头文件中获取得到; K_1 和 K_2 为定标参数; λ 为波段的中心波长; ε 代表地表辐射率。

(4) 干度指标

干度指标的计算方法为:

$$\text{NDBSI} = \frac{\text{SI} + \text{IBI}}{2}$$

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

$$\text{IBI} = \frac{2\rho_{\text{SWIR1}} + (\rho_{\text{SWIR1}} + \rho_{\text{NIR}}) - \left[\frac{\rho_{\text{NIR}}}{\rho_{\text{NIR}} + \rho_{\text{Red}}} + \frac{\rho_{\text{Green}}}{\rho_{\text{Green}} + \rho_{\text{SWIR1}}} \right]}{\frac{2\rho_{\text{SWIR1}}}{\rho_{\text{SWIR1}} + \rho_{\text{NIR}}} + \left[\frac{\rho_{\text{NIR}}}{\rho_{\text{NIR}} + \rho_{\text{Red}}} + \frac{\rho_{\text{Green}}}{\rho_{\text{Green}} + \rho_{\text{SWIR1}}} \right]}$$

式中, ρ_{Blue} 、 ρ_{Green} 、 ρ_{Red} 、 ρ_{NIR} 、 ρ_{SWIR1} 、 ρ_{SWIR2} 分别为对应于各影像的蓝波段、绿波段、红波段、近红外波段、短波红外 1 波段和短波红外 2 波段的辐射率。

2.2.2 Sen 氏趋势分析法与 MK 检验

本文采用了 Sen 斜率趋势分析重庆市在 2011—2021 年以来 RESI 的变化趋势, 与传统的采用最小二乘法计算线性回归趋势相比, Sen 氏趋势分析法可以有效避免计算时时间序列上数据的缺失和数据分布对结果的影响, 还可以消除异常值对时间序列的干扰^[34]。Sen 氏斜率计算公式如下:

$$Q = \text{median} \frac{\text{RSEI}_i - \text{RSEI}_j}{i - j}$$

式中, Q 为计算得到的斜率, i, j 为之间序列数且 $0 < i < j < n$, RSEI_i 、 RSEI_j 分别代表在 i 和 j 时间的重庆市的 RESI 数值, 当 Q 小于 0 时表示数值为下降趋势, 当 Q 大于 0 时表示数值为上升趋势。MK 检验法是一种非参数检验方法, 与传统的检验方法相比 MK 检验法可以更好的适应于顺序变量的检验因此广泛应用于水文、气象、生态要素的趋势分析当中^[35—36], 计算公式如下:

$$Z_{MK} = \begin{cases} \frac{S-1}{\text{VAR}(S)} & \text{if } S > \varepsilon \\ 0 & \text{if } S \leq \varepsilon \\ \frac{S-1}{\text{VAR}(S)} & \text{if } S > \varepsilon \end{cases}$$

$$S = \sum_{j=1}^{n-1} \sum_{i=j+1}^n (x_i - x_j)$$

$$\text{sgn}(x) = \begin{cases} 1 & \text{if } |x_i - x_j| > \varepsilon \\ 0 & \text{if } |x_i - x_j| \leq \varepsilon \\ -1 & \text{if } |x_i - x_j| < \varepsilon \end{cases}$$

$$\text{VAR}(S) = \frac{1}{18} (n(n-1)(2n+5) - \sum_{k=1}^p q_k(q_k-1)(2q_k+5))$$

式中, S 表示统计量由 $\text{sgn}(x)$ 总和得到, $\text{VAR}(S)$ 表示方差, n 表示数据量, Z_{MK} 表示简言之, q_k 表示相同数据组的个数, ε 表示误差值。因此, 本文在像元尺度上采用 Sen 氏趋势分析与 MK 检验相结合, 分析重庆市 RSEI 在像元尺度上的变化趋势及显著性; 在区域尺度上则采用线性回归分析 RSEI 变化的总体趋势。

2.2.3 Hurst 指数

Hurst 指数是一项普遍应用于水文、地质、气候领域的描述时间序列的方法, 后来也逐渐有学者将其用于 RSEI 的研究。其计算方法为:

对于给定的时间序列 $\{RSEI_{(t)}\}, 1, 2, \dots, n$, 定义均值序列:

$$\overline{RSEI}_{(T)} = \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T RSEI_{(t)} \quad T = 1, 2, \dots, n$$

累计离差:

$$X_{(t,T)} = \sum_{i=1}^t (RSEI_{(i)} - \overline{RSEI}_{(T)}) \quad 1 \leq t \leq T$$

极差:

$$R_{(T)} = \max X_{(t,T)} - \min X_{(t,T)} \quad T = 1, 2, \dots, n$$

标准差为:

$$S_{(T)} = \left[\frac{1}{T} \sum_{t=1}^T (RSEI_{(t)} - \overline{RSEI}_{(T)})^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad T = 1, 2, \dots, n$$

再根据上述公式求取:

$$\frac{R_{(T)}}{S_{(T)}} \cong \frac{R}{S}$$

若 $R/S \propto T^H$, 说明要分析的这一序列里存在 Hurst 现象。 H 为 Hurst 指数, 通过 $\log(R/S)_n = a + H \times \log(n)$, 用最小二乘法拟合可以得到。如果 $0 < H < 0.5$, 说明在这个时间序列当中 RSEI 具有反持续性, 即未来的趋势与过去相反, 当 H 越接近于 0 时, 序列反持续性越强。同理, 如果 $0.5 < H < 1$, 说明在这个时间序列当中 RSEI 具有正相关性, 即未来的趋势与过去相同, 当 H 越接近于 1 时, 序列正相关性越强。当 $H = 0.5$ 时, 表明 RSEI 的变化趋势在该时间序列内时随机序列, 无明显相关性。

2.2.4 空间转移矩阵与重心迁移模型

空间转移矩阵是一种定量描述状态转移的方法, 该方法研究的运动过程只与运动的始末状态有关, 可以反映出某一要素在某一时间间隔中空间格局的变化^[37-38]。空间转移矩阵不仅可以反映各类要素的面积变化, 还可以计算出某要素的转入和转出情况, 因此常用于土地利用等方面的研究^[39]。而重心迁移模型可以较好的反映某要素在时空演变过程当中的变化特征。

2.2.5 地理探测器

地理探测器是一种能揭示地理现象空间分异差异和分析自变量与因变量之间相互作用的数学模型^[40], 相比传统的相关系数模型, 其不仅能实现定量数据分析, 也能完成定性数据的处理, 同时又能对各变量之间的交互作用进行分析^[41-42]。本文引入地理探测器分析自然与人类因素对于重庆市 RSEI 分布的影响。地理探测器用 q 值表示影响程度大小, 取值范围为 0—1, q 的计算方法为^[43]:

3 结果与分析

3.1 RSEI 空间分布格局

首先计算重庆市多年平均 RSEI, 参考相关研究^[44-46], 利用等间距法将计算结果重分类为 5 级, 分别赋予差、较差、中等、良、优, 最终得到如图所示的重庆市 RSEI 空间分布图如图 3 所示。RSEI 等级为差的地区整体占比 2.48%, 空间上主要集中于重庆西部即渝北区、沙坪坝区等, 在大足区、铜川区等也有零星等级较差的区域分布, 较差等级的区域占比 8.28%, 在上图当中体现得并不多, 主要围绕差一级的周围、西部边缘、中部和北部有些许分布。中等等级占比 38.32% 主要位于重庆市中西部且分布较为集中, 也是面积最大的等级。良与优分布的区域较为相似, 在重庆市中部和北部分布较多, 占比分别为 41.87% 和 9.05%。总体来说, 重庆市多年平均 RSEI 大于 0.6 的区域占比为 50.92%, 有超过一半的区域 RSEI 等级为良或优。

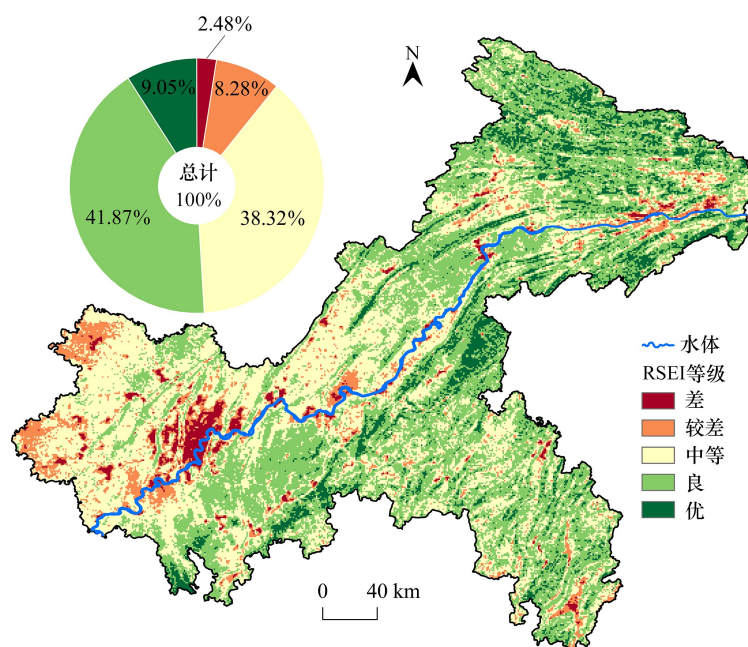


图 3 2011—2021 年重庆市 RSEI 空间分布格局

Fig.3 Spatial distribution pattern of RSEI in Chongqing from 2011 to 2021

3.2 RSEI 空间分布变化

以 2 年为间隔, 分别以 2011、2013、2015、2017、2019、2021 年为刻度, 计算出重庆市 RSEI 等级为优、良、中等、较差、差的重心, 以时间顺序从前向后连接绘制出重心迁移图并以不同颜色表示如图 4。总体上来说 RSEI 不同等级的重心分布与 RSEI 的空间分布格局具有较高的一致性, 重心迁移路线也能较好的表示出 RSEI 在空间上的分布格局变化。重庆市 RSEI 等级为差一级的重心从重庆市中部逐渐向北部移动, 且 2019—2021 年幅度最大表明在这一时间段内其变化速率较快, 北部生态质量下降较为明显。从重庆市 RSEI 空间分布图来看, 较差一级的分布整体上与差一级的较为同步, 从上图可也可以出 RSEI 等级为中等的重心迁移也从重庆市中部向北部变化。中等和良一级的变化幅度不是很大, 中心分布集中与丰都县、石柱土家族自治县。等级

为优一级的与之前时间段相比在 2019—2021 年幅度较大,迁移方向向西部变化。

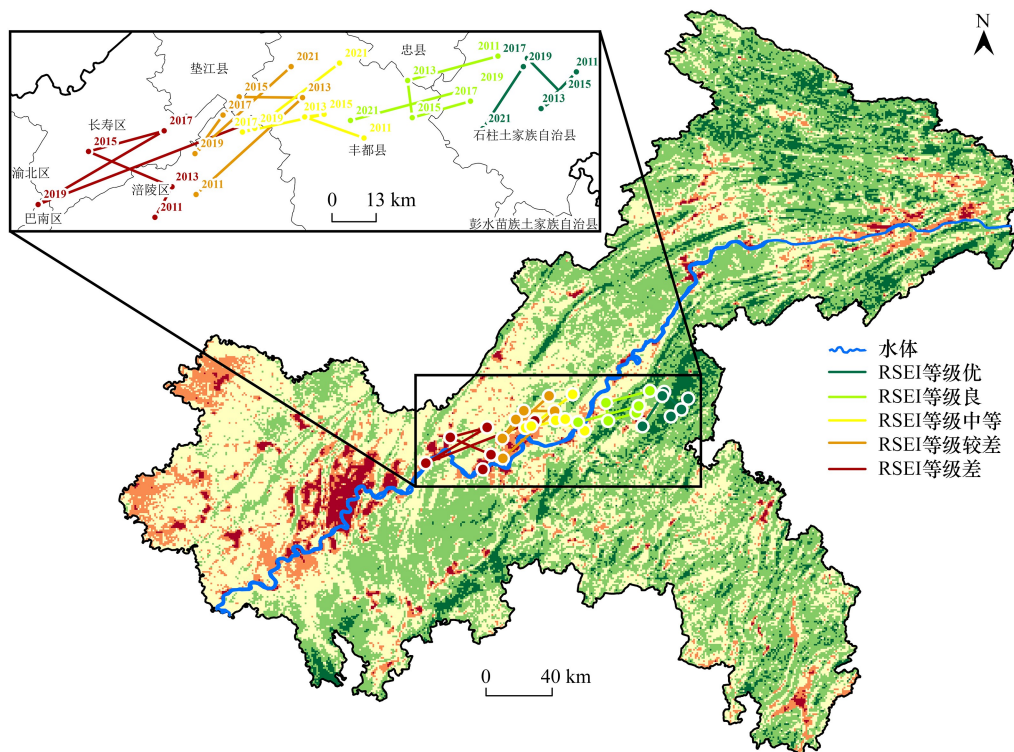


图 4 2011—2021 年 RSEI 不同等级重心迁移

Fig.4 Migration of Different Levels of Center of Gravity for RSEI 2011—2021

再计算重庆市 2011—2021 年 RSEI 等级转移矩阵,得到结果如下表 1 所示。差一级减少较为明显,减少了 6429.88km²,较差一级减少了 9761.41km²,其中有 5566.30km²转为中等,7834.42km²转为良,较差一级分布的区域大部分得到了改善,生态质量提升。优一级整体增加了 4168.55km²。图 5 为不同等级的 RSEI 转移路径。可以看到,2011—2021 年重庆市 RSEI 主要发生了“较差→中等”、“较差→良”、“中等→良”、“良→优”这四个路径,整体来看重庆市生态环境得到优化。

表 1 重庆市 RSEI 转移矩阵/km²

Table 1 Chongqing RSEI Transfer Matrix

时段 Period of time	初始类型 Initial types	转换类型 Transform types					总计 Gross
		差 Poor	较差 Less favourable	中等 Moderate	良 Good	优 Excellent	
2011—2021	差	1317.40	2083.69	3346.53	2791.70	787.80	10327.12
	较差	551.11	1618.48	5566.30	7834.42	1829.10	17399.42
	中等	439.98	1418.53	5854.93	11434.47	3777.71	22925.62
	良	425.66	1093.85	3670.53	9502.13	6175.56	20867.74
	优	1163.10	1423.43	2301.90	3513.19	3995.85	12397.47
	总计	3897.24	7637.99	20740.20	35075.92	16566.02	83917.37

3.3 RSEI 空间分布的地理探测

一般来说,影响 RSEI 在空间上分布的因素可分为气候因素、地表因素以及人为因素。本文在上述三类因素当中选取相应代理变量,形成如下表 2 所示的影响因子表。由于地理空间数据在计算时较为依赖尺度选取,选择不同尺度计算,得到的结果也会不同,为了获取本研究的最佳研究尺度,格网大小依据经验公式而来:

基于采样点的数量确定样本数量。本研究中 RSEI 结果斑块均数大致为 5 万个,经过测试发现用 2km×2km 的正方形对研究区进行等间距采样,将会生成 2.3 万个样区。因此本文选取 2km 尺度格网进行采样,最后在地理探测器当中进行计算。另外,在现有研究当中不难发现植被覆盖及其表征指数 NDVI 也在生态环境当中有举足轻重的角色,但是考虑到在计算 RSEI 指数时,NDVI 已单独作为一种计算因子加入其中,因此在利用地理探测器探测影响因素时不另做探测。

根据因子探测,计算上述各类因子对 RSEI 的影响大小,结果如表 3 所示。各因子对于 RSEI 的影响程度排序为:近地表气温 X3>土地利用类型 X8>海拔 X4>近地表风速 X2>坡度 X5>夜间灯光 X9>降水量 X1>坡向 X6>人口密度 X7。表 3 当中 q 为因子的解释力, q 的值位于 0 到 1 之间,且 q 值越大表示该因子的解释力越强。从各因子解释力来看,近地表气温、土地利用类型、海拔三个因子的解释力都大于 0.25,分别是 0.349, 0.284, 0.259,这三个因子是主要影响因子。坡度的解释力为 0.205,为次要影响因子。其余各因子的解释力都小于 0.2,表明对重庆市 RSEI 空间分布影响较为微弱。

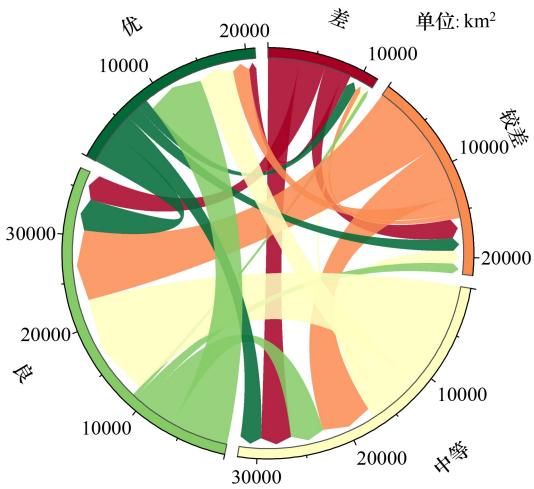


图 5 不同等级 RSEI 转移路径
Fig.5 Different levels of RSEI transfer paths

表 2 重庆市 RSEI 影响因子
Table 2 Chongqing RSEI impact factors

气候因素 Climatic factors	地表因素 Surface factors	人类活动因素 Human activities factors
降水 Precipitation(X1)	海拔 Altitude(X4)	人口密度 Population density(X7)
近地表风速 Near-surface wind speed(X2)	坡度 Slope(X5)	土地利用类型 Land-use type(X8)
年均温 Annual mean temperature(X3)	坡向 Aspect(X6)	夜间灯光强度 Nighttime light intensity(X9)

表 3 因子探测结果
Table 3 Factor detection results

因子 Factors	X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7	X8	X9
解释力 q q statistic	0.042	0.186	0.349	0.259	0.205	0.003	0.036	0.284	0.143
P	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000

重庆市 RSEI 各影响因子在地理探测器中的生态探测如表 4 所示。根据统计检验,海拔与各气候因素对 RSEI 空间分布的影响具有显著性差异,与其他因子无显著性差异;近地表气温与除海拔外的其他因子无显著差异;土地利用类型与近地表气温、日海拔之间无显著差异;人口密度坡向因子之间有显著差异。总的来说,以近地表气温、海拔为主的自然因素以及以土地利用为主的人为因素是影响重庆市 RSEI 空间分布的主要影响因素。

3.4 RSEI 时间变化趋势

3.4.1 区域尺度 RSEI 变化趋势

图 6 是基于线性回归的重庆市区域尺度全年 RSEI 均值变化情况,从总体上来看,重庆市 RSEI 整体较高,多年均值为 0.593,平均年际变化率达到 0.00759/a,全年 RSEI 标准误为 0.0239 在 2011—2021 年呈波动上升趋势。

表 4 探测因子对于 RSEI 影响差异的统计显著性

Table 4 Statistical significance of the differences in the effects of detection factors on RSEI

	X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7	X8	X9
X1									
X2	N								
X3	N	Y							
X4	Y	Y	Y						
X5	Y	N	N	N					
X6	N	N	N	N	N				
X7	N	N	N	N	N	Y			
X8	Y	Y	N	N	Y	Y	Y		
X9	Y	N	N	N	N	Y	Y	N	

采用显著性水平为 0.05 的 F 检验, Y 表示两种因子在 RSEI 空间分布影响上存在显著差异; N 表示无显著性差异

图 7 为重庆市 39 个区县从 2011 年到 2021 年以来 RSEI 的变化趋势, 由该热力图可以发现, 2011 年的时候较多区县颜色为红色、橙色, 较明显的有: 渝中区、大渡口区、江北区、沙坪坝区、九龙坡区、南岸区、北碚区、荣昌区等, 表明这些区县在 2011 年的时候 RSEI 较低, 环境质量较差, 到 2021 年, 红色及橙色区域明显减少, 先前为红色、橙色区域的大部分转为了蓝色。虽然大渡口区 and 渝中区的颜色仍为橙色, 但是和 2011 年相比已经改善了许多。同时从热力图也可以看到有些区县的 RSEI 有所减少, 如: 城口县、垫江县等。整体来看, 热力图当中大部分区县由红色为主转为蓝色, 证明与 2011 年相比, 2021 年重庆市生态环境质量有了大幅度提高。

3.4.2 像元尺度 RSEI 变化趋势

总体上看, 全年 RSEI 在近 12 年当中以增长趋势为主, 如图 8 所示, 共占总体的 75.89%。从 RSEI 变化显著性来看, 极显著增长区域分布在南部、西南部以及北部的开州区、云阳区等地, 达全市面积 14.41%, 显著增长的分布区域大致与极显著增长的相同, 共计有 20.19%。城口县、巫溪县为极显著退化等级的主要分布区, 说明此区域在近 12 年当中生态质量水平下降较为严重。RESI 增长和退化的速度也不尽相同, 快速增长区主要分布在西南部、南部各地, 占总面积的 16.64%。有大致三分之一的区域为缓慢增长, 同时也是重庆市 RSEI 变化趋势中占比最大的一个等级, 表明重庆市实施的一系列生态环境建设工程已见成效。同时我们也应看到: 重庆市多为喀斯特地貌, 也是全国 8 个石漠化严重发生地区之一, 北部城口县、巫溪县 RSEI 退化较快, 根据前人研究^[47-48], 这三个地方同样也是石漠化高敏感区, 土壤绝对允许侵蚀量小, 当表土流失后, 必然导致大片石灰岩裸露, 生态质量水平大幅度下降需要实施一系列环境保护措施, 因此针对当地特点实施相应的生态修复政策十分必要^[49]。

3.5 RSEI 时间变化可持续性

根据 Hurst 指数的原理当 $H > 0.5$ 即表明重庆市 RSEI 将呈正持续性也就是变化趋势与大致相同, 当 $H < 0.5$ 表示重庆市 RSEI 呈反持续性即变化趋势大致相反。基于这一原理, 利用 Matlab 对重庆市 2011、2013、2015、2017、2019、2021 年的 RSEI 栅格数据逐像元计算 Hurst 指数如图 9 所示, 再利用 Hurst 指数与 Sen 氏趋势分析结果利用 ArcGIS 叠加分析、重分类。在将来, 重庆市 RSEI 有 1.19% 继续快速退化, 这些区域主要集中于重庆市中部武隆区、涪陵区、丰都县交界处以及北部的城口县、巫溪县等地, 有 2.88% 的 RSEI 属于继续缓慢降低。“出现波动”说明当前无法用 Hurst 指数推断将来的可持续性。共计有总体 53.3% 的 RSEI 会保持增长

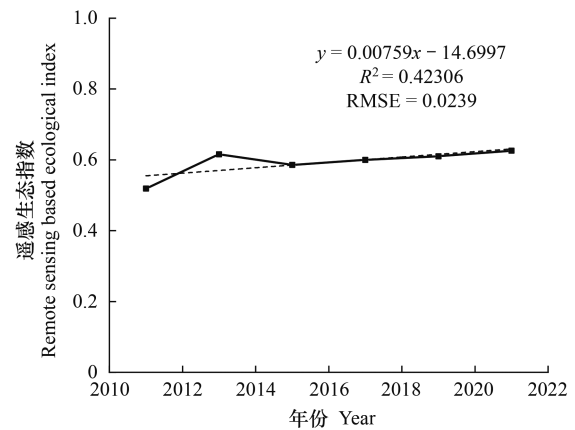


图 6 2011—2021 年 RSEI 区域尺度变化趋势

Fig.6 Regional scale trends of RSEI, 2011—2021

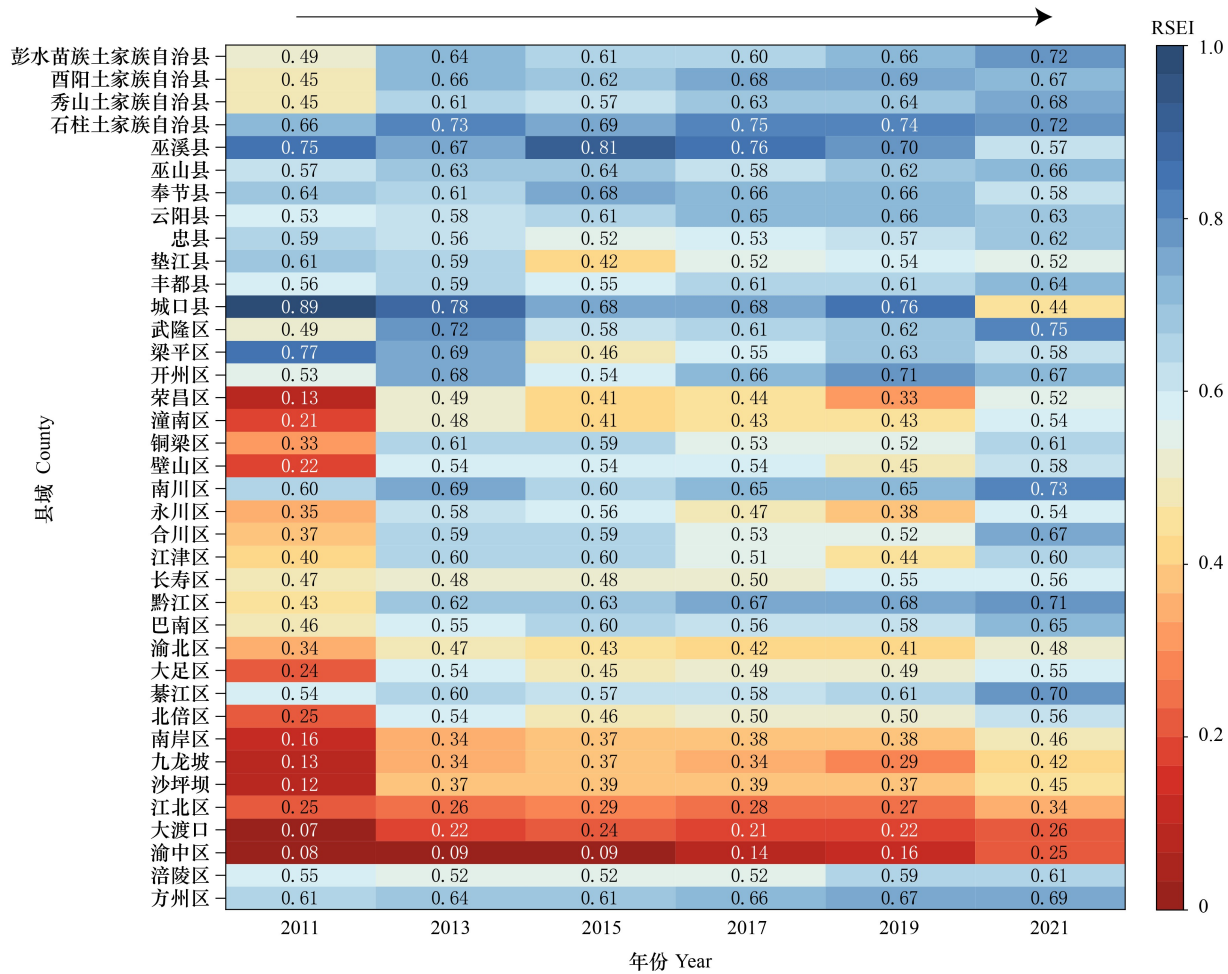


图7 不同县区 RSEI 变化趋势
Fig.7 Trend of RSEI in different counties of Chongqing

的可持续性,即在未来会继续缓慢或者快速增长。

4 讨论与结论

4.1 讨论

综上所述,利用 GIS 和 RS 技术,计算 RSEI 并对重庆市生态环境质量变化做出客观真实评价具有一定理论意义和现实意义。一方面,相较于前期学者的研究方法,RSEI 避免了因为人为主观因素,如技术限制、数据限制而导致的权重设置不均,可以更好地对重庆市生态环境质量进行较为定量、客观的评价,结合 GIS 和 RS 技术可以高效的提取、反演出生态质量评价所需的指标,具有一定的学术价值。研究重庆市生态质量现状及发展趋势对于完善当下生态文明建设具有重要的理论意义,本研究在分析了生态环境质量现状的基础上,结合相关指数及地理探测器,对重庆市生态环境质量状况及发展态势进行研究,对其影响因素进行探测。可以弥补区域生态环境质量现状研究的不足,丰富区域生态环境质量的理论研究,加深对生态文明建设的思考与理解。

另一方面,在当前时代背景下,研究重庆市 RSEI 变化成因,可以较大程度上探寻在山地地区影响生态环境质量的因素,由此可以为山地地区采取何种措施保护生态环境、提升生态环境质量提供一定建议,有利于更好的践行可持续发展战略以及更好的探索“绿水青山就是金山银山”实现路径。生态环境质量评价可以为区域生态环境保护与管理工作提供决策建议,有助于区域生态环境可持续发展。针对重庆市进行生态环境质量

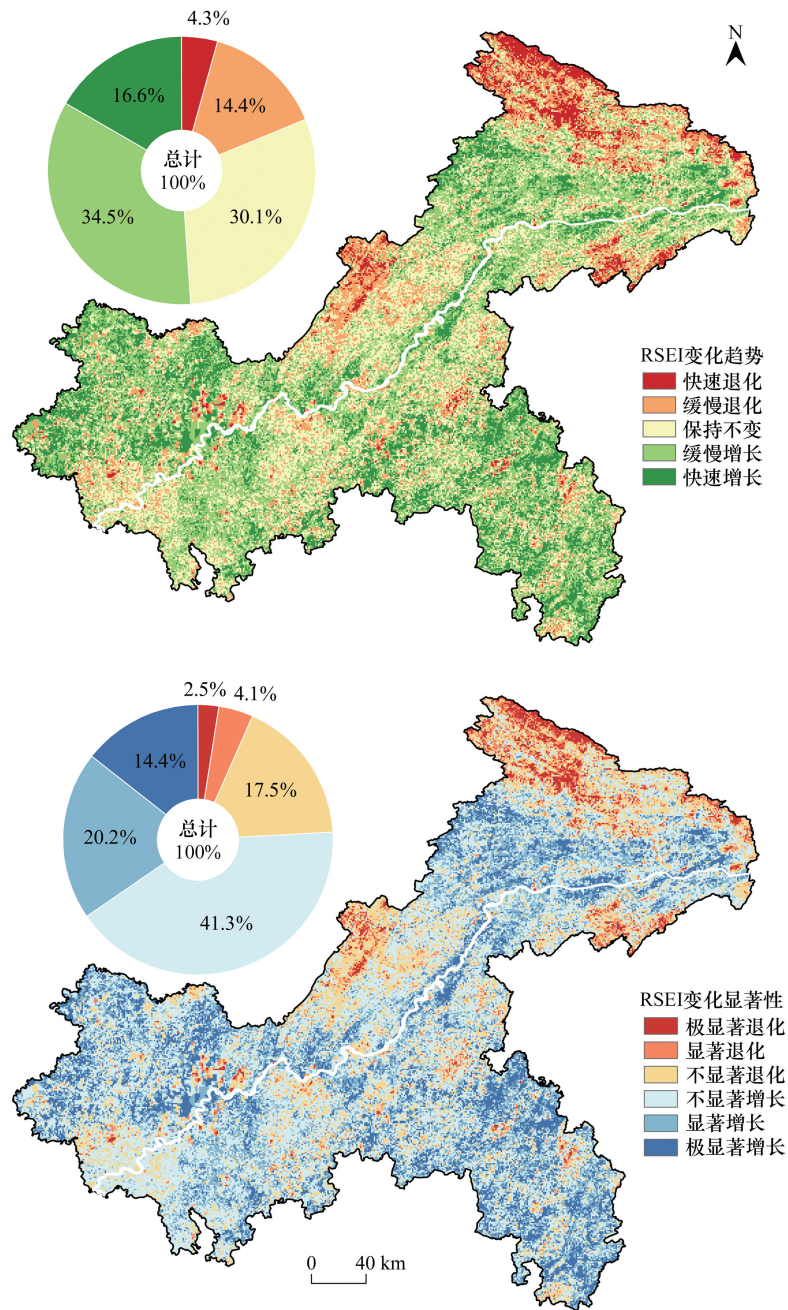


图 8 像元尺度 RSEI 变化趋势与变化显著性

Fig.8 The trend of RSEI at the image metric scale and its significance of change

现状分析及趋势模拟,对于改善自然生态环境,提升城市生态影响力有着重要意义,探讨和完善生态文明制度体系建设提供参考依据。研究成果虽然较好的表现出了重庆市 RSEI 变化趋势,但仍存在些许不足,在计算 RSEI 时,每一年的 RSEI 采用最大合成法将生长期所有的遥感影像进行合成,仍然避免不了云雾的影响,这就会对结果造成一定的影响出现异常值。今后的研究可以选取更长时间序列的时间数据来降低数据误差带来的影响。另外,本研究只采用了 2020 年一年的数据进行重庆市 RSEI 影响因素探测,探测结果也没有与 Sen 趋势分析、Hurst 指数的得到的结果进行关联分析,将在今后的研究中进一步分析 RSEI 影响因素变化与 RSEI 变化的相关性。

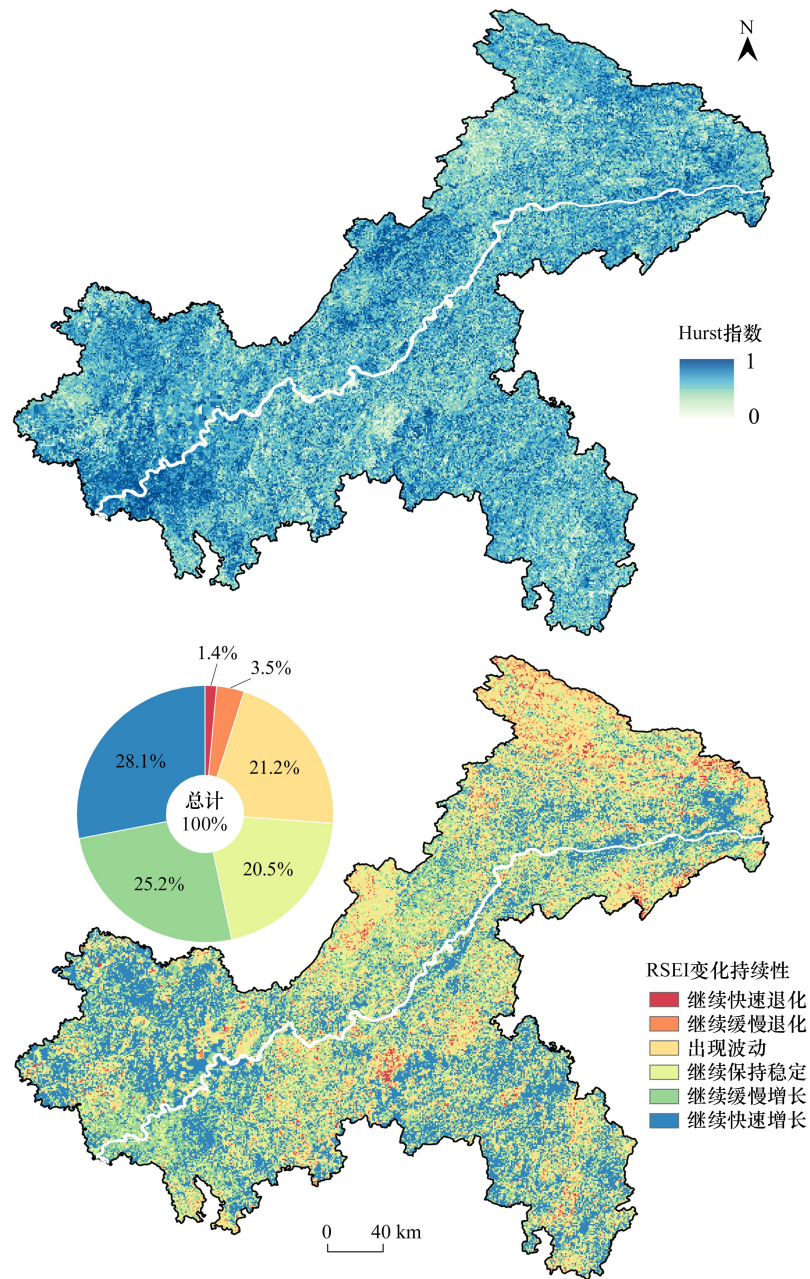


图9 2011—2021年重庆市RSEI变化Hurst指数及未来变化趋势
Fig.9 Chongqing RSEI Change Hurst Index 2011—2021 and its future trend

4.2 结论

通过对重庆市生态遥感指数在时间和空间上的研究发现重庆市生态环境质量正在稳步提升,生态环境也在不断优化,在自然恢复的基础上,人类活动也有一定的正反馈作用,表明重庆市生态修复措施的效果正在显现,具体结论如下:

(1)重庆市2011—2021年整体平均RSEI有50.92%为优和良,表明重庆市这一时间段生态环境整体质量较高,在空间上表现为东北部较高,西南部较低。

(2)从RSEI变化趋势来看,2011—2021年间重庆市RSEI呈波动趋势上升,平均年际变化率达到0.00759/a,全年RSEI标准误为0.0239。同时,极显著增长区域面积达14.41%,显著增长面积为20.19%,广泛

分布于各区县,以快速增长为主,说明生态建设成效明显,但是,在重庆市北部也有快速退化与缓慢退化的区域,全域共计 18.7%,重庆北部以城口县为代表的县区以溶岩地貌为主,近些年来生态质量下降较为明显。说明在治理生态环境的同时也不能轻视对石漠化的治理。

(3)从 RSEI 变化可持续性来看,重庆市 RSEI 变化总体持续性较强。在东北部、北部出现了明显的反持续性特征。在未来可能出现波动的区域占 21.2%,主要分布在中部、北部,说明该区域需进一步加强生态建设工作,防止生态质量水平下降。有 53.3%的区域将呈正持续性,要注意对这些区域生态质量水平的保持。

(4)使用地理探测器对自然、气候、人类活动三个方面进行因子探测,本文发现,重庆市 RSEI 空间分布由近地表气温、土地利用类型、海拔三个因子主要决定,其因子解释力均超过 25%,表明这三种驱动因素是重庆市生态质量发生变化的主要影响因素。

(5)从 RSEI 空间变化来看 2011—2021 年重庆市 RSEI 主要发生了“较差→中等”、“较差→良”、“中等→良”、“良→优”这四个路径,整体上重庆市生态环境得到优化。其演进过程已与重庆市及长江上游生态环境相关研究相印证^[50—51]。

参考文献 (References):

- [1] 孔令桥,张路,郑华,徐卫华,肖懿,欧阳志云.长江流域生态系统格局演变及驱动力.生态学报,2018,38(3):741-749.
- [2] 潘开文,吴宁,潘开忠,陈庆恒.关于建设长江上游生态屏障的若干问题的讨论.生态学报,2004,24(3):617-629.
- [3] 罗旭,邓伟,周渝,刘婷.“十四五”生态环境保护问题与对策——以重庆市合川区为例.环境影响评价,2021,43(3):23-26.
- [4] 杨庆媛,毕国华.平行岭谷生态区生态保护修复的思路、模式及配套措施研究——基于重庆市“两江四山”山水林田湖草生态保护修复工程试点.生态学报,2019,39(23):8939-8947.
- [5] 孙顺强,戴碧涛,刘新元,王恺.重庆市生态文明建设发展评价.生态经济,2018,34(5):212-217.
- [6] 杨桂山,徐昔保.长江经济带“共抓大保护、不搞大开发”的基础与策略.中国科学院院刊,2020,35(8):939-950.
- [7] 张琳,宋创业,袁伟影,贾元,桑佳文,吴冬秀.基于地面调查的植被生态质量综合评估指标体系构建.生态学报,2023,43(1):1-12.
- [8] 彭燕,何国金,张兆明,江威,欧阳志云,王桂周.赣南稀土矿开发区生态环境遥感动态监测与评估.生态学报,2016,36(6):1676-1685.
- [9] 石焱,张微,任景明,张建平.生态敏感区旅游开发适宜性评价及生态制图方法.生态学报,2015,35(23):7887-7898.
- [10] 曹建军,刘永娟.GIS支持下上海城市生态敏感性分析.应用生态学报,2010,21(7):1805-1812.
- [11] 韩贵锋,赵珂,袁兴中,孙荣.基于空间分析的山地生态敏感性评价——以四川省万源市为例.山地学报,2008,26(5):531-537.
- [12] 吴宜进,赵行双,奚悦,刘慧,李畅.基于 MODIS 的 2006—2016 年西藏生态质量综合评价及其时空变化.地理学报,2019,74(7):1438-1449.
- [13] 周启刚,李剑,孟浩斌,张晓媛,庞敏.基于遥感解释的重庆市重要生态空间质量评价.水土保持研究,2021,28(6):292-300.
- [14] 任彦霓,周廷刚,李洪忠,谢舒蕾,尹振南.基于遥感和 POI 数据的重庆市主城区城市生态环境格局研究.地球物理学进展,2021,36(2):766-778.
- [15] 徐涵秋.区域生态环境变化的遥感评价指数.中国环境科学,2013,33(5):889-897.
- [16] 徐涵秋.城市遥感生态指数的创建及其应用.生态学报,2013,33(24):7853-7862.
- [17] 褚馨德,贾伟,张峻豪,李净.基于 RSEI 模型的祁连山自然保护区生态环境质量评价.环境监测管理与技术,2022,34(1):38-42.
- [18] 刘索玄,袁艳斌,赵峰,李倩.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.生态与农村环境学报,2019,35(11):1361-1368.
- [19] 木哈代思·艾日肯,张飞,刘康,阿依努尔·玉山江.基于天宫二号及 Landsat8 城镇生态环境现状评价.国土资源遥感,2020,32(4):209-218.
- [20] 李蕊,陈国清,李玮贤,蒙荣,王明玖,郭洋楠.基于遥感生态指数的神东矿区 1995-2020 年生态环境质量的时空变化特征分析.水土保持通报,2021,41(3):143-151.
- [21] 李婷婷,马超,郭增长.基于 RSEI 模型的贺兰山长时序生态质量评价及影响因素分析.生态学杂志,2021,40(4):1154-1165.
- [22] 潘洪义,李加安,张琴.基于 RSEI 的地震区生态环境质量恢复研究——以汶川县为例.长江流域资源与环境,2021,30(3):745-757.
- [23] 汪东川,陈星,孙志超,辛燕,王海庆,柴华,王鸿艺.格木木长时间序列遥感生态指数变化监测.生态学报,2022,42(14):5922-5933.
- [24] Firozjaei M K, Fathololoumi S, Kiavarz M, Biswas A, Homae M, Alavipanah S K. Land Surface Ecological Status Composition Index (LSESCI): a novel remote sensing-based technique for modeling land surface ecological status. Ecological Indicators, 2021, 123: 107375.

- [25] Liao W H, Jiang W G. Evaluation of the spatiotemporal variations in the eco-environmental quality in China based on the remote sensing ecological index. *Remote Sensing*, 2020, 12(15): 2462.
- [26] 赵管乐, 彭培好. 基于 RSEI 的典例干热河谷区——四川省攀枝花市生态环境变化分析. *山地学报*, 2021, 39(6): 842-854.
- [27] 卢卓, 侯金龙, 鲁晗. 卫星影像分辨率对城市生态环境质量评价的影响研究. *绿色科技*, 2021, 23(22): 173-177, 181-181.
- [28] 苏嘉亮, 晏晨然, 雷雨, 王芸, 赵鹏祥. 陕西省生态环境质量长时序动态监测. *生态学报*, 2023, (2): 1-15. (2022-09-26). <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2031.Q.20220922.1504.020.html>.
- [29] 黄豪奔, 徐海量, 林涛, 夏国柱. 2001—2020 年新疆阿勒泰地区归一化植被指数时空变化特征及其对气候变化的响应. *生态学报*, 2022, 42(7): 2798-2809.
- [30] 宁晓刚, 常文涛, 王浩, 张翰超, 朱乾德. 联合 GEE 与多源遥感数据的黑龙江流域沼泽湿地信息提取. *遥感学报*, 2022, 26(2): 386-396.
- [31] 冯凯东, 毛德华, 王宗明, 蒲海光, 杜保佳, 仇志强. 基于 GEE 和遥感大数据的 1986—2015 年全球城镇用地扩张占用水体时空特征. *地理科学*, 2022, 42(1): 143-151.
- [32] 盛艳玲, 张荫, 乔纪纲. 基于 GEE 的亚马逊生态区火灾变化特征及与降水关系. *生态学杂志*, 2021, 40(8): 2553-2562.
- [33] Boori M S, Choudhary K, Paringer R, Kupriyanov A. Eco-environmental quality assessment based on pressure-state-response framework by remote sensing and GIS. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 2021, 23: 100530.
- [34] 袁丽华, 蒋卫国, 申文明, 刘颖慧, 王文杰, 陶亮亮, 郑华, 刘孝富. 2000—2010 年黄河流域植被覆盖的时空变化. *生态学报*, 2013, 33(24): 7798-7806.
- [35] 魏光辉, 邓丽娟. 基于 MK 与 SR 非参数检验方法的干旱区降水趋势分析. *西北水电*, 2014, (4): 1-4.
- [36] 张宝庆. 黄土高原干旱时空变异及雨水资源化潜力研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2014.
- [37] 郝慧梅, 郝永利, 任志远. 近 20 年关中地区土地利用/覆盖变化动态与格局. *中国农业科学*, 2011, 44(21): 4525-4536.
- [38] 吴琳娜, 杨胜天, 刘晓燕, 罗娅, 周旭, 赵海根. 1976 年以来北洛河流域土地利用变化对人类活动程度的响应. *地理学报*, 2014, 69(1): 54-63.
- [39] 原丽娟, 毕如田, 徐立帅, 朱洪芬. 沁河流域植被覆盖时空分异特征. *生态学杂志*, 2019, 38(4): 1093-1103.
- [40] 王劲峰, 徐成东. 地理探测器: 原理与展望. *地理学报*, 2017, 72(1): 116-134.
- [41] 彭文甫, 张冬梅, 罗艳玫, 陶帅, 徐新良. 自然因子对四川植被 NDVI 变化的地理探测. *地理学报*, 2019, 74(9): 1758-1776.
- [42] 祝聪, 彭文甫, 张丽芳, 罗瑶, 董永波, 王梅芳. 2006—2016 年岷江上游植被覆盖度时空变化及驱动力. *生态学报*, 2019, 39(5): 1583-1594.
- [43] Wang J F, Li X H, Christakos G, Liao Y L, Zhang T N, Gu X, Zheng X Y. Geographical detectors-based health risk assessment and its application in the neural tube defects study of the Heshun Region, China. *International Journal of Geographical Information Science*, 2010, 24(1): 107-127.
- [44] Boori M S, Choudhary K, Paringer R, Kupriyanov A. Spatiotemporal ecological vulnerability analysis with statistical correlation based on satellite remote sensing in Samara, Russia. *Journal of Environmental Management*, 2021, 285: 112138.
- [45] Fan C, Gui F, Wang L Z, Zhao S. Evaluation of environmental quality based on remote sensing data in the coastal lands of Eastern China. *Journal of Coastal Research*, 2020, 36(6): 1229-1236.
- [46] 何安良, 周江文. 基于 RSEI 模型的长沙市生态环境质量评价. *江西科学*, 2021, 39(2): 256-262.
- [47] 王艳强, 朱波, 王玉宽, 刘德绍, 魏世强. 重庆市石漠化敏感性评价. *西南农业学报*, 2005, 18(1): 70-73.
- [48] 吴文彬, 孙书豪, 王存鑫. 重庆市石漠化治理中几个问题的分析. *农村经济与科技*, 2017, 28(11): 195-196.
- [49] 吴协保, 宁小斌, 黄俊威, 吴照柏, 刘伟, 刘庭威. 长江经济带石漠化土地现状及分布特点. *中南林业调查规划*, 2021, 40(1): 67-72.
- [50] 章程焱, 杨少康, 董晓华, 赵程铭, 薄会娟, 刘冀. 基于 RSEI 指数的长江上游流域生态环境质量时空演变及影响因子研究. *水土保持研究*, 2022: 1-8.
- [51] 刘祖英, 王兵, 赵雨森, 牛香. 长江中上游地区退耕还林成效监测与评价. *应用生态学报*, 2018, 29(8): 2463-2469.