

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2024.02.010.

马林, 梁勇, 张雅芹, 等. 基于 RSEI 的山东省不同土地覆盖区生态环境质量变化特征及驱动因素[J]. 水土保持研究, 2024, 31(2): 389-400.

Ma Lin, Liang Yong, Zhang Yaqin, et al. Spatiotemporal Change and Driving Factors of the Eco-Environment Quality of Different Land Covers in Shandong Province Based on RSEI[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2024, 31(2): 389-400.

基于 RSEI 的山东省不同土地覆盖区生态环境质量 变化特征及驱动因素

马林¹, 梁勇², 张雅芹², 李云鹏²

(1. 济南市土地储备中心, 济南 250099; 2. 济南市勘察测绘研究院, 济南 250101)

摘要: [目的]厘清城市化建设的持续推进下山东省目前的生态环境质量时空状况及其演化的主要驱动因子, 对认清山东省生态环境现状及后期制定切实可靠的保护战略和制度至关重要。[方法]基于 1991—2021 年的综合指标——遥感生态指数(remote sensing ecological index, RSEI)并辅以 Sen 趋势法、变异系数法、Hurst 指数法和地理探测器对山东省生态环境质量变化特征及其变化的驱动因子进行了探究。[结果](1) 1991—2000 年山东省生态环境质量总体为下降趋势, 变化较为稳定; 2001—2010 年 RSEI 总体呈增加趋势, 以稳定变化趋势为主; 2011—2021 年 RSEI 变化大部分区域呈稳定状态, 林地和耕地区域 RSEI 为增加趋势, 其他土地利用类型均为减小趋势。(2) RSEI 未来一段时期内以增加趋势为主, 且不同土地利用类型区域未来一段时间内变化趋势与过去 31 a 相反。(3) 1990—2000 年、2001—2010 年土地利用变化对山东省 RSEI 空间分布变化的影响最大, 2011—2021 年 RSEI 空间分布变化受到湿度变化和土地利用变化的影响较大, 且土地利用与其他因子间的交互作用对 RSEI 的影响均较大。[结论]山东省不同时段、不同生态环境质量对环境因子的敏感性存在显著差异, 这是因为不同区域人类活动强度、方式和不同区域生态环境脆弱性存在差异。生态环境质量的可视化表达可以较好地反映生态环境质量时空演化特征, 为维护人-生态环境平衡的决策制定提供重要的参考信息。

关键词: 山东省; 遥感生态指数; 土地利用; 驱动因子

中图分类号: Q948

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2024)02-0389-12

Spatiotemporal Change and Driving Factors of the Eco-Environment Quality of Different Land Covers in Shandong Province Based on RSEI

Ma Lin¹, Liang Yong², Zhang Yaqin², Li Yunpeng²

(1. Jinan Land Reserve Center, Jinan 250099, China;

2. Jinan Survey and Mapping Research Institute, Jinan 250101, China)

Abstract: [Objective] The aim of this study is to clarify the temporal and spatial status of ecological environment quality and the main driving factors of its evolution under the continuous promotion of urbanization in Shandong Province, which is of great importance for recognizing the status quo of ecological environment in Shandong Province and formulating reliable protection strategies and systems in the later stage. [Methods] Based on remote sensing ecological index; a comprehensive index from 1991 to 2021, with the help of Sen trend method, coefficient of variation method, Hurst index method and geographical detector, the characteristics and driving factors of ecological environment quality change in Shandong Province were explored. [Results] (1) From 1991 to 2000, the ecological environment quality in Shandong Province showed the decreasing trend and the change was relatively stable. From 2001 to 2010, RSEI showed the increasing trend, mainly stable change trend.

收稿日期: 2023-04-23

修回日期: 2023-05-15

资助项目: 山东省自然科学基金青年项目“农林复合模式对黄河故道潮土表层土壤有机碳累积的影响机制”(ZR2021QD1085)

第一作者: 马林(1982—), 男, 山东肥城人, 本科, 高级经济师, 主要从事土地资源开发与利用研究。E-mail: maling_2021@163.com

通信作者: 梁勇(1980—), 男, 山东济宁人, 硕士, 高级工程师, 主要从事遥感影像解译、地理信息分析研究。E-mail: 106909280@qq.com

<http://stbcyj.paperonice.org>

From 2011 to 2021, RSEI changes in most areas showed the stable state, and RSEI in woodland and cultivated land areas showed the increasing trend, while other land use types showed the decreasing trend. (2) RSEI will mainly increase in the future period, and the change trend of different land use types in the future period is opposite to that in the past 31 years. (3) Land use change had the greatest impact on the spatial distribution of RSEI in Shandong Province during 1990—2000 and 2001—2010, and the spatial distribution of RSEI during 2011—2021 was greatly affected by humidity change and land use change, and the interaction between land use and other factors had a greater impact on RSEI. [Conclusion] There are significant differences in the sensitivity of ecological environment quality to environmental factors at different periods in Shandong Province, which is caused by the differences in the intensity and mode of human activities in different regions and the vulnerability of ecological environment in different regions. The visual expression of ecological environment quality can reflect the temporal and spatial evolution characteristics of ecological environment quality, and provide important reference information for the decision making of maintaining human-ecological environment balance.

Keywords: Shandong Province; remote sensing ecological index; land use; driving factors

我国工业化和城市化进程的不断推进,给人类带来了许多福祉同时也使很多区域面临着各种各样的生态问题,对区域经济及社会的可持续发展也产生了显著影响,目前已成为政府及学术界关注的焦点^[1-2]。山东省作为我国经济强省和全球变化较为敏感的生态系统地带,在过去 30 a 的发展过程中土地覆盖类型发生了巨大变化^[3-4]。因此,定量描述和评价城镇化和气候双重影响下山东省生态变化特征及其变化的主要驱动因子对指导当前生态文明建设具有重要作用。

目前国内外学者对山东省生态环境监测与评估的大多数研究均使用单一生态因子^[3-5]。如孙汇颖等^[3]基于土地利用类型指标发现 2000—2018 年山东省生境环境质量主要受到土地利用变化的影响;刘玉红等^[4]基于植被初级生产力(NPP)指数发现山东省 2000—2015 年 NPP 呈增加趋势,降水量是影响植被 NPP 变化的主导因子;庄会波等^[5]基于归一化植被指数(NDVI)指标发现山东省 1998—2018 年植被覆盖度呈增加趋势,但不同地形区域存在差异;也有很多学者采用地表温度(LST)、归一化差异不透水表面指数(NDBSI)、裸土指数(BI)分别探究了山东省城市热岛效应、不透水表面面积及裸土区域等变化情况从而反映山东省生态环境质量等^[6-9]。以上研究虽可以在一定程度上反映山东省生态环境质量情况,但由于山东省生态系统的复杂性和多样性,仅采用一个或两个生态指标来评估生态系统的状况存在片面性。因此有学者研究发现通过主成分分析(PCA)方法整合绿色、湿度、干燥和热量生成的完全基于遥感的生态指数(RSEI)可以实现快速、高精度的监测区域生态

环境质量及其变化情况^[10-14]。RSEI 不仅可以反映区域植被覆盖、土壤湿度状况,还可以反映地表干旱程度和地表热量情况,能对区域生态环境状况进行客观定量评价,成为区域生态环境质量监测和评估的新方法^[15-19]。如张静等^[10]基于 RSEI 对西安市生态环境质量监测发现 RSEI 可以很好反映西安市生态环境质量;罗镕基等^[11]基于改进的 RSEI 对甘肃省古浪县生态环境质量监测发现 RSEI 能较好地综合各分量指标信息全面准确反映古浪县生态质量状况;Yang 等^[20]也基于 RSEI 对长江流域生态环境变化特征及其驱动因素发现长江流域整体生态质量有所改善,RSEI 能较好地反映区域生态环境质量状况。

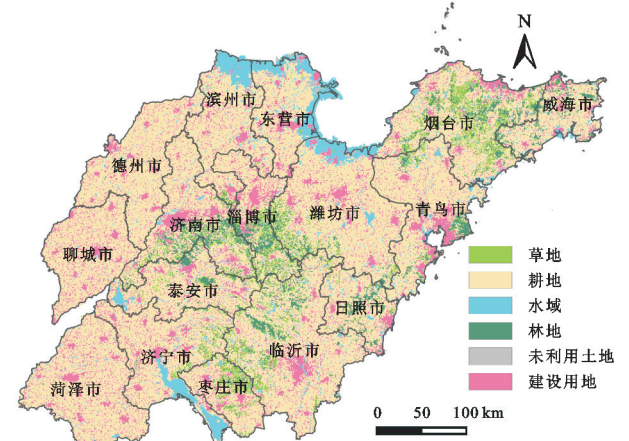
因此,本文基于 Landsat 数据计算 NDVI(绿色度)、WET(湿度)、LST(热量)和归一化差异累积和裸土指数(NDBSI)(干燥度),然后基于 PAC 法获得 1991—2021 年山东省 RSEI 时间序列数据,并基于 RSEI 时序数据探究山东省不同土地覆盖区域生态环境质量空间分布特征、变化趋势及环境因素和土地利用转移变化对 RSEI 的驱动情况,以期为山东省生态环境保护战略与经济可持续发展战略的协调发展提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

山东省地处我国东部沿海,黄河下游,濒临渤海与黄海(114.79°—122.7°,34.38°—38.4°),省内地势中部多山地,西南、西北地势低洼平坦,东部丘陵起伏,总面积约 155 800 km²。气候属于暖温带湿润半湿润季风性气候,植被类型以温带阔叶林、温带针

叶林和温带针叶阔叶混交林为主, 全年平均降水量达到 710 mm, 年平均气温 11~14℃, 年均日照时长为 2 290~2 890 h, 降水集中, 雨热同季。山东省作为我国主要的粮食产区之一, 全省农业总产值连续位居全国第一位, 截至 2022 年底, 全省人口 1.02 亿, 生产总值为 87 435 亿元^[8-9]。山东省地处三大经济圈的交汇处, 连接了华东与华中地区, 经济发展迅速, 土地利用变化对区域生态环境质量产生了显著的影响(图 1)。



注: 基于标准地图服务系统下载的审图号 GS(2019)1822 号的标准地图制作, 底图未做修改, 下同。

图 1 山东省土地类型空间分布

Fig. 1 Spatial distribution of land types in Shandong Province

1.2 数据源及预处理

(1) Landsat 数据。本文使用 Google Earth Engine (GEE) 平台提供 1991—2021 年的 30 m 空间分辨率的 Landsat 系列数据提供的地表反射率数据构建 RSEI 指数需要的归一化差异植被指数 (NDVI)、缨帽变换的湿度分量 (WET)、归一化差异不透水表面指数 (NDBSI) 和地表温度 (LST)。GEE 平台提供的 Landsat 的 T2_SR 产品已经过辐射定标、大气校正等预处理, 在构建 RSEI 时通过多次对比试验最终选择每年的 3—10 月份的数据构建每年的 RSEI, 因为该阶段能更好地体现 RSEI 指数的特性。

(2) 土地利用数据 (LUCC)。本文土地利用数据来源于中国科学院资源环境科学数据平台 (<http://www.resdc.cn>), 该数据集是由多个研究所基于 Landsat 系列的遥感影像结合人机交互目视解译方法获取, 其二级分类包括草地、林地、耕地、建设用地、水域和未利用地, 分辨率为 30 m。其中耕地和建设用地平均分类精度达到 85% 以上, 其他土地利用类型平均分类精度达到 75% 以上, 可满足本文研究需求。本文采用 1990 年、2010 年、2020 年的土地利用数据。

1.3 研究方法

1.3.1 遥感生态指数 在反映生态质量的诸多自然因

素中, 绿色、湿度、热度、干度可谓是与人类生存息息相关的 4 个重要指标, 也是人类直观感觉生态条件优劣的重要因素, 因此常被用于评价生态系统。因此徐涵秋等^[21]提出的遥感生态指数 (RSEI) 从反映生态质量的众多自然因素中选择与人类生存相关的 4 个因素作为生态评价因素, 该指数利用主成分分析耦合了表示地表植被覆盖和生长情况的绿色指数 (NDVI)、表示土壤的湿度状况的湿度 (WET) 指数、表示地表干旱程度的干燥度指数 (NDBSI) 和反映地表热度情况的热量指数 (LST)^[16-18]。其中, NDVI 和 NDBSI 指标可以反映生态环境对人类活动引起的土地覆盖变化的生态响应, LST 和 WET 揭示了生态质量对代表气候变化的响应, 4 个生态指标综合起来能够直观地反映区域生态环境恶劣情况^[21], 4 个指标的计算如下:

(1) 绿色指标。NDVI 是应用最广泛的植被指数之一, 许多生态学研究均证明了其有用性^[12-13]。因此, 本文选择 NDVI 作为绿色指数, 计算公式为:

$$NDVI = (\rho_{nir} - \rho_{red}) / (\rho_{nir} + \rho_{red}) \tag{1}$$

式中: ρ_{nir} 为遥感图像的近红外波段; ρ_{red} 为红光波段。

(2) 热度指标。热度指标由地表温度 (LST) 表示, 虽然 Landsat 8 TIRS 传感器中有两个热红外波段, 但由于波段 11 的辐射校准问题, 本文仅选择了波段 10 来反演 LST^[21]。当然, 对于 TM, 我们仍然得到了基于波段 6 的 LST。首先, 将数字 (DN) 值转换为传感器孔径处的光谱辐射亮度 (L_λ), 计算公式见 (2):

$$L_\lambda = G_{rescale} \cdot Q_{cal} + B_{rescale} \tag{2}$$

式中: $G_{rescale}$ 为特定于频带的重新缩放增益因子; Q_{cal} 为量化的校准像素值 (DN); $B_{rescale}$ 为不同于频带的重缩放偏置因子。传感器处光谱辐射亮度 (L_λ) 可使用公式 (3) 转换为传感器亮度温度下的有效辐射亮度。

$$T_\lambda = K_2 / \ln \left(\frac{K_1}{L_\lambda} + 1 \right) \tag{3}$$

式中: T_λ 为传感器亮度温度下的有效值, K_1 [TM 波段 6 为 607.76 W/(m² · sr · μm), TIR 波段 10 为 774.89 W/(m² · sr · μm)] 和 K_2 (TM 波段 4 为 260.56 K, TIR 波段 10 为 1 321.08 K) 分别是校准常数 1, 2。最后, 使用 T_λ 获得 LST。

$$LST = T_\lambda \left(1 + \frac{\lambda T}{\rho} \cdot \ln \epsilon \right) \tag{4}$$

式中: λ 为发射辐射的波长 (TM 波段 6 为 11.435 μm, TIR 波段 10 为 10.9 μm); ρ 为常数 (1.438 × 10⁻² mK); ϵ 为表面发射率, 可通过使用 Sobrino 模型的 NDVI 估算^[21]。

(3) 湿度指标。对地表湿度信息较为敏感的缨

帽变换湿度分量(TCW)已被证明对植被、水和土壤湿度条件较为敏感^[11]。因此,本文选择 TCW 作为湿度指数(WET),并且可以分别使用方程(5)和(6)来估计 Landsat TM 和 Landsat 8 的湿度指数^[12]。

$$WET_{tm} = 0.0315\rho_1 + 0.2013\rho_2 + 0.3102\rho_3 + 0.1594\rho_4 - 0.6806\rho_5 - 0.6109\rho_6 \quad (5)$$

$$WET_{oli} = 0.1511\rho_1 + 0.1973\rho_2 + 0.3283\rho_3 + 0.3407\rho_4 - 0.7117\rho_5 - 0.4559\rho_6 \quad (6)$$

式中: ρ_i ($i=1,2,3,\dots,6$) 分别为 TM 和 OLI 传感器对应的蓝光波段、绿光波段、红光波段、近红外波段、短波红外波段 1 和短波红外波段 2。

(4) 干度指标。由于建设用地和裸露土壤会对区域生态环境造成严重危害。因此,本文选择了归一化差异不透水表面指数(NDBSI)结合基于指数的建成指数(IFI)和土壤指数(BSI)表征研究区干燥度^[21]。

$$NDBSI = (BSI + IFI) / 2 \quad (7)$$

$$BSI = [(S_1 + \rho_{red}) - (\rho_{blue} + \rho_{nir})] / [(S_1 + \rho_{red}) + (\rho_{blue} + \rho_{nir})] \quad (8)$$

$$IFI = \left\{ \frac{2S_1}{S_1 + \rho_{nir}} - \left(\frac{\rho_{nir}}{\rho_{nir} + \rho_{red}} + \frac{\rho_{green}}{\rho_{green} + S_1} \right) \right\} / \left\{ \frac{2S_1}{S_1 + \rho_{nir}} - \left[\frac{\rho_{nir}}{\rho_{nir} + \rho_{red}} + \rho_{green} / (\rho_{green} + S_1) \right] \right\} \quad (9)$$

式中: $S_1, \rho_{red}, \rho_{green}, \rho_{nir}, \rho_{blue}$ 分别为 TM 和 OLI 对应的短波红外、红光、绿光、近红外和蓝光波段。

(5) 构建 RSEI。通过主成分变化(PCA)对以上 4 个指标空间坐标轴旋转从而去掉各指标间的相关性,把 4 个指标的主要信息集中到 1~2 个主成分上,从而构建 RSEI。这种方法最大优点是综合指标的权重不是人为确定的,而是根据每个指标对 PC1 的贡献自动客观地确定。因此,在计算中避免了由于权重设置而导致的可能的偏差,该权重设置因个人和方法而异,这大大提高了结果的客观性和可信度。在预处理后需要对 4 个指标进行归一化以实现量纲统一,然后采用 PCA 方法将 NDVI, LST, WET, NDBSI 的信息集中到第一、二主成分上^[21]。

指标归一化公式见(10):

$$NI_i = (I_i - I_{min}) / (I_{max} - I_{min}) \quad (10)$$

式中: NI_i 为各指标归一化结果; I_i 为各指标在第 i 像元的值; I_{min} 和 I_{max} 分别为各指标最小值和最大值。

为了使 PC1 大的数值代表好的生态条件,进一步用 1 减去 PC1,获取初始 RSEI, RSEI 计算公式见公式(11)~(12):

$$RSEI_0 = 1 - PC1[f(NDVI, WET, LST, NDBSI)] \quad (11)$$

为了便于指标的度量和比较,同样对 $RSEI_0$ 进行归一化:

$$RSEI = (RSEI_0 - RSEI_{0min}) / (RSEI_{0max} - RSEI_{0min}) \quad (12)$$

式中: $RSEI_{0max}, RSEI_{0min}$ 分别为 $RSEI_0$ 最大值和最小值。 $RSEI$ 值越接近 1,生态越好,反之,生态越差。

本文基于文献[14]将 $RSEI$ 划分为 $RSEI < 0.2$ (差), $0.2 \leq RSEI < 0.4$ (较差), $0.4 \leq RSEI < 0.6$ (中等), $0.6 \leq RSEI < 0.8$ (良好)和 $RSEI \geq 0.8$ (优)5 个等级。

1.3.2 RSEI 变化趋势分析 采用 Sen 趋势法探究 1991—2021 年山东省 RSEI 变化趋势和变化速率。Sen 斜率的计算公式如下^[22]:

$$\beta = \text{Median} \left(\frac{x_j - x_i}{j - i} \right) \quad \forall j > i \quad (13)$$

式中: β 为 RSEI 变化趋势;Median 为取中值函数;当 $\beta > 0$ 时, RSEI 呈增加趋势; $\beta < 0$ 时, RSEI 呈减小趋势。

1.3.3 稳定性分析 研究使用变异系数 C_v 分析 RSEI 近 31 a 的持续的稳定性, C_v 越大表明 RSEI 的变化越不稳定^[20]。

$$C_v = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (X_i - X_{mean})^2} / X_{mean} \quad (14)$$

式中: C_v 为变异系数; X_i 为第 i 年对应的 RSEI 值; X_{mean} 为基于 1991—2021 年的 RSEI 均值。本文根据自然断裂法将 RSEI 的稳定性分为 5 类:低波动变化 (< 0.049)、较低波动变化 ($0.049 \sim 0.1$)、中波动变化 ($0.1 \sim 0.185$)、较高波动变化 ($0.185 \sim 0.392$) 和高波动变化 ($0.392 \sim 1$)。

1.3.4 未来趋势分析 Hurst 指数是根据 RSEI 的长时间序列数据预测未来数据的变化趋势,基于重标极差(R/S)的 Hurst 指数是一种定量表述时间序列信息长期依赖性的有效方法^[23]。本文基于 Hurst 指数研究 RSEI 未来的趋势,若 $0 \leq \text{Hurst} < 0.5$,说明 RSEI 将来总体趋势和过去趋势相反;若 $\text{Hurst} = 0.5$,表明 RSEI 互相独立且没有依赖性,现在不会影响未来; $0.5 < \text{Hurst} \leq 1$,表明未来 RSEI 总体趋势与过去总体趋势相同,越接近 1,持续性越强^[23]。

1.3.5 地理探测器 本文利用地理探测器度量 RSEI 的空间分布特性,以及探测不同因子与 RSEI 的相关性程度,用 q 值解释这个程度^[24]。公式如下:

$$q = 1 - \frac{\sum_{h=1}^L N_h \delta_h^2}{N \delta^2} \quad (15)$$

式中: q 为影响因子对 RSEI 时空变化的解释力; h 为

不同驱动因子的分类或分区数据; L 为影响因子的样本数量; N_h 和 N 分别为 h 和整个区域的单元数; δ_h^2 和 δ^2 为 h 和整个区域的方差。 q 值越大,代表该因子对 RSEI 影响程度越大。并使用交互作用探测识别不同因子之间的相互作用,并评估他们的组合效应以观测任何一对因素共同作用是否会增加或降低对 RSEI 空间分布的解释力^[24]。

2 结果与分析

2.1 生态环境整体分析

由山东省 RSEI 主成分分析结果(表 1)可知,

表 1 各指标第一主成分及贡献率

Table 1 First principal component and contribution rate of each indicator

年份	NDVI	WET	NDBSI	LST	贡献率/%	年份	NDVI	WET	NDBSI	LST	贡献率/%
1991	0.491	0.466	-0.735	-0.053	88.640	2007	-0.429	-0.483	0.700	0.306	88.781
1992	-0.246	-0.638	0.701	0.204	88.468	2008	-0.498	-0.325	0.802	0.055	88.940
1993	-0.290	-0.572	0.753	0.149	90.598	2009	-0.290	-0.547	0.698	0.359	89.701
1994	0.401	0.475	-0.754	-0.210	85.281	2010	-0.410	-0.426	0.806	-0.002	86.770
1995	0.269	0.660	-0.680	-0.170	85.406	2011	0.819	0.324	-0.455	-0.132	82.533
1996	0.600	0.401	-0.689	0.069	84.350	2012	0.529	0.243	-0.805	-0.112	83.541
1997	0.115	0.644	-0.601	-0.460	81.048	2013	0.537	0.409	-0.738	0.013	87.695
1998	0.318	0.535	-0.689	-0.371	85.370	2014	0.741	0.261	-0.610	-0.101	93.195
1999	0.424	0.458	-0.748	-0.226	88.355	2015	0.518	0.366	-0.771	-0.050	88.659
2000	-0.408	-0.514	0.716	0.238	90.259	2016	0.409	0.384	-0.784	-0.265	93.049
2001	-0.167	-0.758	0.629	0.044	89.232	2017	0.475	0.333	-0.783	-0.225	88.670
2002	-0.245	-0.699	0.672	0.004	95.997	2018	0.483	0.377	-0.764	-0.203	89.420
2003	0.270	0.456	-0.840	0.118	84.902	2019	-0.446	-0.517	0.695	0.223	85.614
2004	-0.136	-0.673	0.677	0.264	84.045	2020	0.662	0.682	-0.288	-0.119	91.310
2005	0.357	0.469	-0.743	-0.317	87.702	2021	0.584	0.130	-0.800	-0.050	95.746
2006	-0.056	0.679	-0.633	-0.367	83.062						

2.2 各指标时序变化特征

由图 2 可知,RSEI 总体以每年 0.000 5 的速率减小,即生态环境质量轻微退化。NDVI 每年以 0.003 1 的速率增加,WET,LST,NDBSI 分别以 0.002/a,0.008/a,0.008 6/a 的速率下降。虽然具有正效益的 NDVI 指标呈增加趋势和具有负效益的 LST,NDBSI 呈减小趋势,但具有正效益的 WET 却呈减小趋势,经过主成分分析的 4 个遥感指标在抵消了部分生态效益的不同影响后,将导致 RSEI 指标下降,且从各指标曲线走势来看,RSEI 曲线走势与 4 种指标走势均不一致,由此可见 RSEI 变化是 4 种指标共同变化引起。

2.3 RSEI 的空间分布特征

从山东省 RSEI 的空间分布来看(图 3),1991 年山东省威海市、烟台市、济宁与临沂市交界处,济宁市与泰安市交界处生态环境质量表现为优等级,聊城南

1991—2021 年的第一主成分贡献率均达到 80% 以上,说明第一主成分集中了 NDVI,LST,WET 和 NDBSI 指标的大部分特征信息,能够较好地展示该区域内的生态环境特征情况。从各指标的载荷来看,NDVI 和 WEI 的载荷值成正比,表示绿度和湿度越高,土壤水分充足,地表植被覆盖越高,生态环境越好。绿度和湿度越低,土壤水分不足,地表植被覆盖降低,生态环境恶劣。LST 与 NDBSI 的载荷值成正比,干度和热度越高,表示土壤沙化、荒漠化、岩石裸露等问题越严重,干度和热度越低,表示土壤沙化、荒漠化、岩石裸露等问题得到缓解。

部与菏泽北部生态环境质量表现为较差等级。1996 年生态环境质量较 1991 年整体有所改善,大部分地区表现良好等级和优等级,济宁东南部表现为较差等级。2001 年山东省大部分地区生态质量环境表现较差,其中烟台、威海、青岛南部表现为差等级。2006 年相较于 2001 年生态环境质量有明显提升,山东省中部、东部、北部表现为良好等级,南部部分地区表现为较差等级。2011 年相较于 2006 年,山东省整体生态环境质量有恶化趋势,其中德州、聊城、济南、滨州等地区大部分表现为差等级,菏泽、淄博、临沂大部分地区表现为较差等级。2016 年山东省整体生态环境质量有较大改善,大部分地区表现为良好等级,相较于 2011 年,生态环境质量有显著提升。2021 年山东省生态环境质量严重下滑,其中聊城、德州表现为差等级,济南北部、滨州中南部、淄博北部表现为较差等级,烟台、青岛和潍坊东南部表现为较差等级。从生

态环境特征总体来看,1991—2020年山东省生态环境质量整体表现为下降趋势。

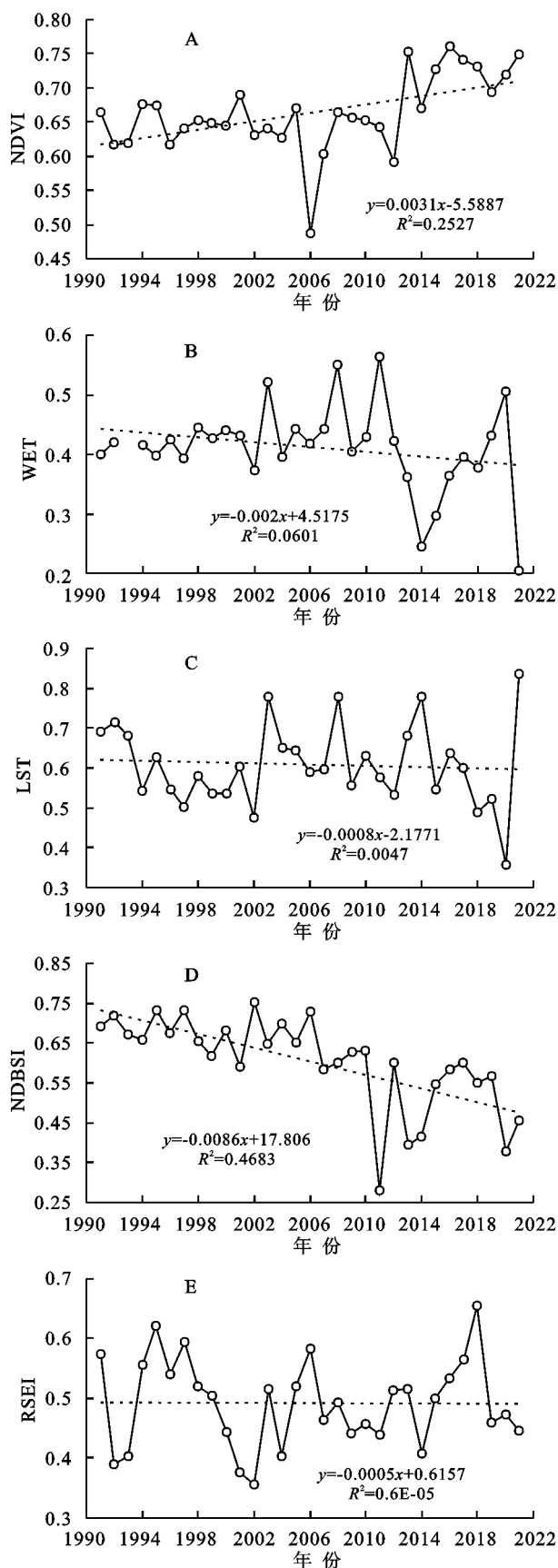


图2 4个指标和RSEI时序曲线

Fig. 2 Four indicators and RSEI time series curve

图4显示了每隔5a的RSEI统计结果,1991—2021年RSEI的结果值在0~1范围内均有分布,均值在1991—2001年为下降趋势,2006—2021年呈“增—减—增—减”趋势。从分布来看,2001年RSEI范围分布集中在0.1~0.6,分布相对集中且低于其他年份,均值为7个年份中最低年份(0.37);2006年RSEI集中在0.4~0.8,分布集中且高于其他年份,均值为7个年份中最高(0.59)。从不同等级占比来看,良等级占比与RSEI均值变化特征一致,1991—2001年减少,2006—2021年呈“增—减—增—减”趋势,但较差等级变化特征与良等级呈相反趋势,中等级占比保持稳定不变。

2.4 RSEI变化趋势

由图5,图6A可知,不同时间段山东省RSEI变化为稳定状态的区域占主体地位,其他趋势具有时空差异。其中,1991—2000年14.33%的区域RSEI呈上升趋势,集中在日照市、临沂市和菏泽市南部地区,19.66%的区域RSEI呈下降趋势,集中在泰安市、济南市、莱芜市、淄博市。2001—2010年RSEI呈增加上升趋势的区域较1991—2000年增加了30.69%,转变区域主要集中在山东省西部大部分城市和东北部的威海市和烟台市。2011—2021年73.6%的区域RSEI变化呈稳定状态,仅有13.58%和12.82%的区域RSEI表现为上升和下降趋势,呈上升趋势的区域零星分布在中部部分城市,呈下降趋势的区域零星分布在东部和东北部部分城市。

基于1991—2000年、2001—2010年、2011—2021年山东省生态环境质量变异性计算结果和实际情况,将变异划分为5个等级[变化相对稳定(≤ 0.2)、低波动变化(0.2~0.25)、较低波动变化(0.25~0.3)、较高波动变化(0.3~0.4)、高波动变化(> 0.4)](图6B、图7)。1991—2000年RSEI变异系数属于变化相对稳定、低波动变化和较低波动变化的区域占比为69.859%,较高波动变化和高波动变化占30.141%,较高波动变化的区域主要分布在山东省北部和东部地区。2001—2010年RSEI呈变化相对稳定、低波动变化和较低波动变化的区域占比为60.354%,较高波动变化和高波动变化占39.646%,其中呈高波动变化的区域较1991—2000年增加9.248%,这些区域集中在东北部的威海市、烟台市和东部的青岛市和日照市和中部的泰安市,这些区域主要土地利用类型为草地、林地和建设用地。2011—2021年仅有25.582%的区域为较高和高波动变化,集中在西部的聊城市和德州市,其他区域均以低波动变化为主。

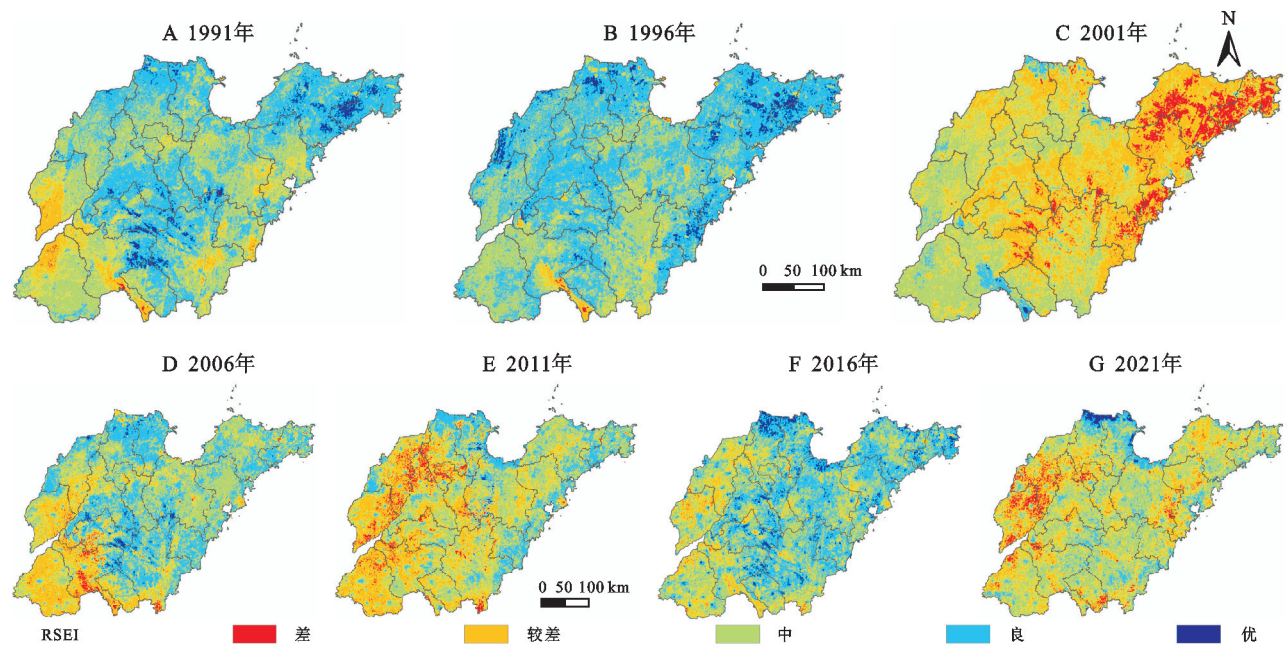


图 3 RSEI 的空间分布

Fig. 3 Spatial distribution map of RSEI

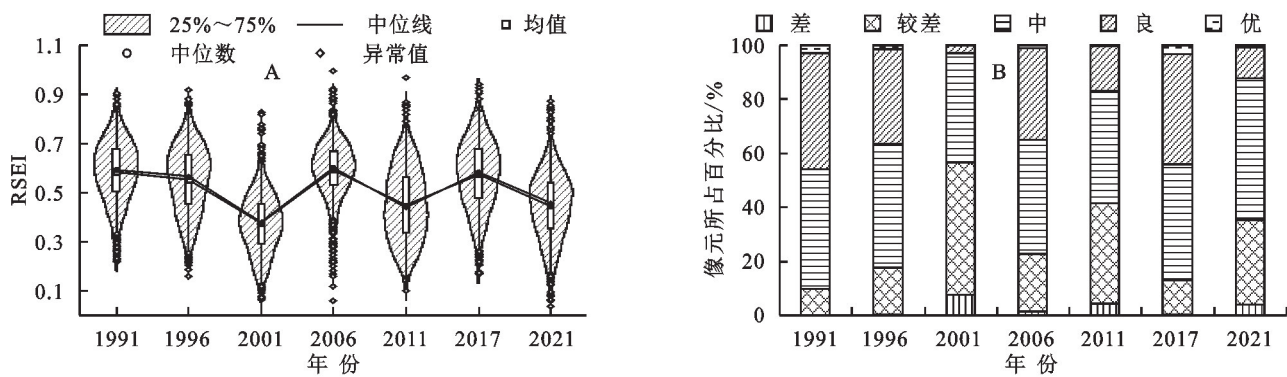


图 4 RSEI 的空间统计

Fig. 4 Spatial statistics of RSEI

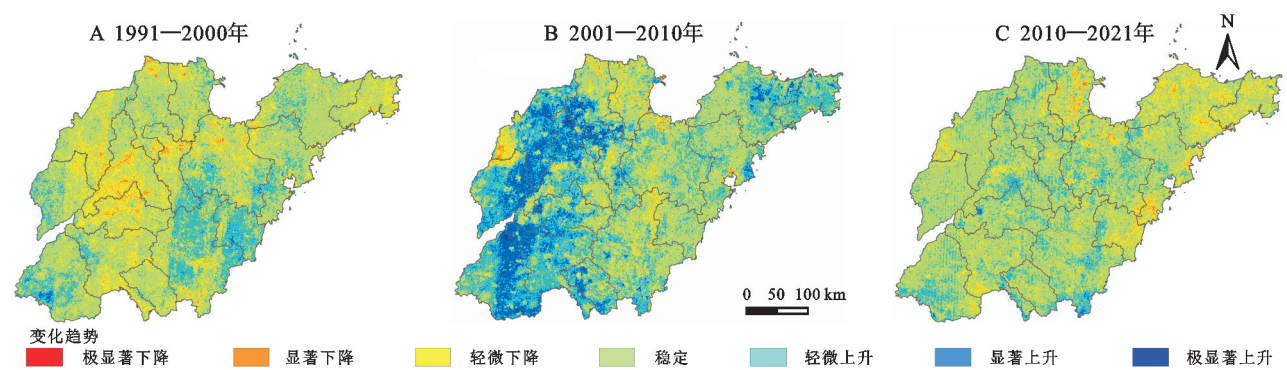


图 5 各阶段 RSEI 的趋势分布

Fig. 5 Trend distribution of RSEI in each stage

从不同土地利用覆盖区域 RSEI 变化速率和变异性可知(表 2),1991—2000 年除草地区域 RSEI 未变化,其他区域 RSEI 均为下降趋势,且建设用地区域 RSEI 下降速率最快(0.091/a),其次为林地(0.070/a)。但从 RSEI 变异性来看,不同土地利用区域 RSEI 均为较低波动变化,且草地 RSEI 波动性>未利用地>减少用地>耕

地>林地。2001—2010 年不同土地利用区域 RSEI 均为增加趋势,且林地区域 RSEI 增加速率最大(0.158/a),其次为耕地区域(0.155/a),未利用地 RSEI 增加速率最小(0.053/a)。但从变异性来看,未利用地 RSEI 波动性>草地>耕地>建设用地>林地。2011—2021 年林地和耕地区域均为增加趋势,增加速率分别为 0.021/a,

0.019/a,其他土地利用类型均为减小趋势,且未利用地减小速率最大(0.080/a)。从变异性来看,耕地 RSEI 变异性最大(变异系数为 0.284),其次为林地(变异系数为

0.270),草地变异性最小(变异系数为 0.236),其次为未利用地(变异系数为 0.237)。总体来看,2001—2010 年 RSEI 变化较大,且波动性也为 3 个时间段最大。

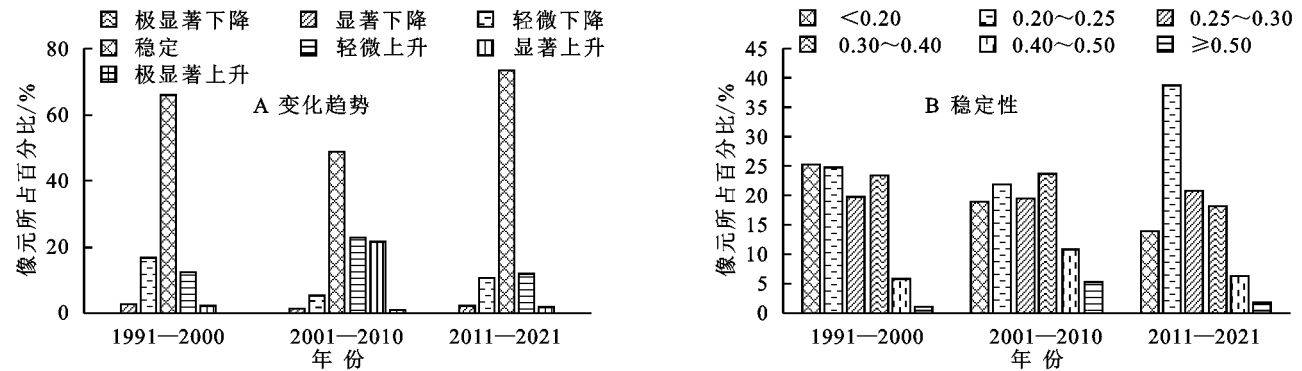


图 6 各阶段 RSEI 变化趋势和稳定性所占像元百分比
Fig. 6 Statistical chart of the changes trends of RSEI and stability at each stage

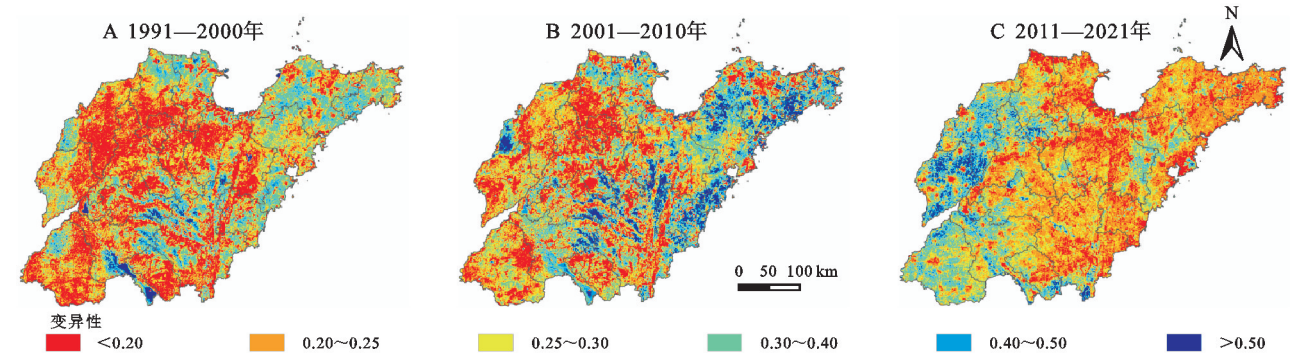


图 7 各阶段 RSEI 的变化稳定性分布
Fig. 7 Stability distribution of RSEI changes in different stages

表 2 不同土地利用类型下各阶段 RSEI 变化速率和变异性

Table 2 Statistical chart of RSEI rate of change and variability in different land use types at different stages

时期	变化速率/a					变异系数/a				
	草地	林地	耕地	建设用地	未利用地	草地	林地	耕地	建设用地	未利用地
1991—2000 年	0.000	−0.070	−0.035	−0.091	−0.056	0.293	0.250	0.256	0.257	0.280
2001—2010 年	0.137	0.158	0.155	0.129	0.053	0.318	0.256	0.292	0.288	0.329
2011—2021 年	−0.068	0.021	0.019	−0.020	−0.080	0.236	0.270	0.284	0.238	0.237

2.5 RSEI 未来趋势分析

从图 8 可知,山东省 Hurst 指数(H)分布以 0.3~0.4 区间为主, $H>0.5$ 的区域仅占 0.77%。零星分布在山东省烟台市和威海市,其他区域 H 均小于 0.5,表明未来一段时期内山东省 RSEI 的变化趋势与 1991—2021 年变化趋势为相反趋势。其中反持续性显著减少($0\leq H<0.4$)占 79.82%,反持续性减少不显著($0.4\leq H<0.5$)占 19.41%。从不同土地类型区域 RSEI 的 H 来看,不同土地利用类型区域未来一段时间内变化特征均与过去呈相反趋势,且不同土地类型区域的 RSEI 均小于 0.4,这表明不同土地类型区域的反持续性均较显著。

2.6 RSEI 对驱动因素的响应

2.6.1 土地覆盖变化 从不同阶段山东省土地利用转移矩阵可知(图 9,表 3):1990—2000 年耕地和未利用面积以减少为主,分别减少了 1 111,941 个像元,而水域和建设用地面积以增加为主,分别增加了 461,318 个像元,发生转移的区域零星分布在整个山东省。2000—2010 年耕地和未利用地仍为大面积减少,分别减少了 1 808,523 个像元,建设用地面积大幅度增长,增加了 2 791,发生土地利用转移的区域也零星分布在山东省整个区域,且在滨州市最北部建设用地显著增加。2010—2020 年不同土地利用类型均发生了较大的转移,其中以草地和未利用地大面积减少、建设用地大面积增加为主,其中在滨州市北部、潍

坊市北部等水域区域的建设用地转移为水域,中部的济南市、淄博市和枣庄市济宁市交汇处和东北部的烟台市新增草地面积大于减少草地面积。

2.6.2 不同阶段 4 个生态指标对 RSEI 交互作用探测结果 为了探究不同环境因子对山东省不同时间段内 RSEI 空间分布的影响,采用地理探测器分析不同阶段不同因子对 RSEI 的解释力(表 4)。从表 4—5 可知,1990—2000 年、2001—2010 年 LUCC 对 RSEI 空间分布变化的解释力最强, q 值分别为 0.184 2、0.184 0,但与 2001—2010 年相比,WET 和 NDVI 对 RSEI 的影响较大。2011—2021 年 RSEI 空间分布变化受到 WET 的影响最大,其次为 LUCC,NDBSI 和 NDVI 对其影响较小。

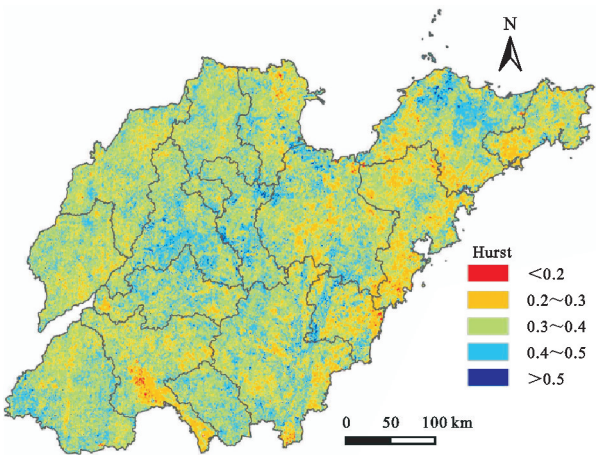


图 8 RSEI 的 Hurst 指数分布
Fig. 8 Distribution map of hurst index for RSEI

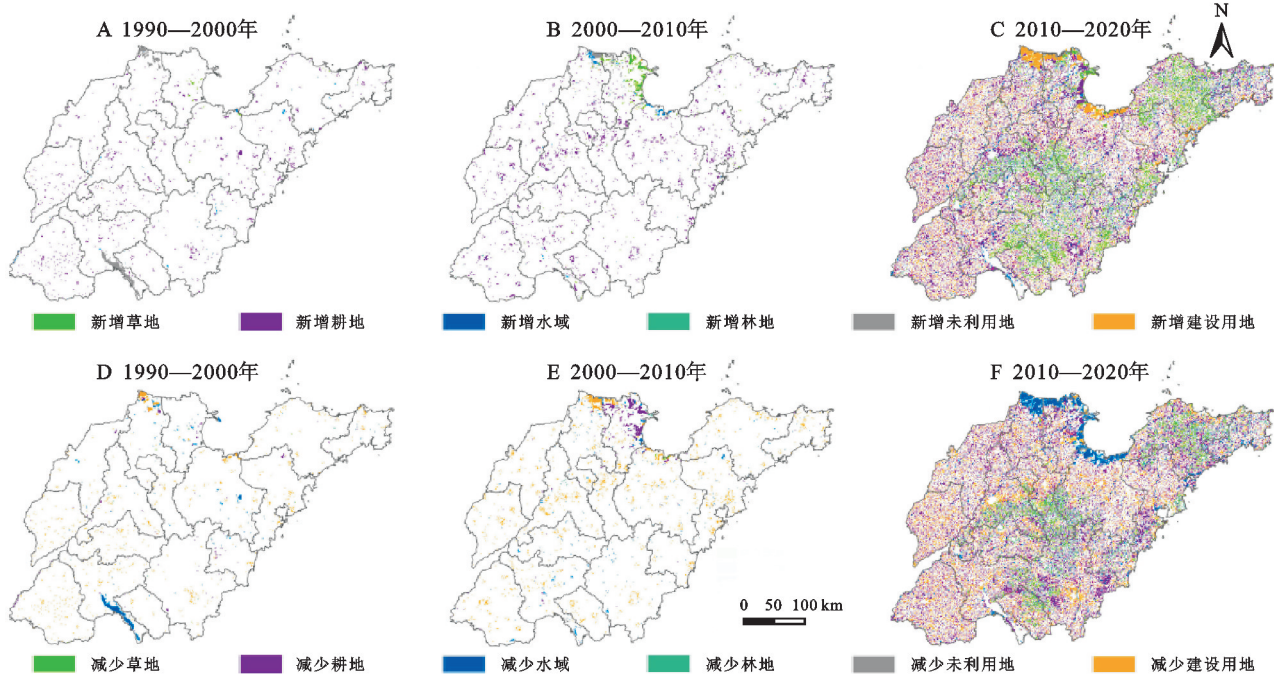


图 9 各阶段山东省土地利用类型的转换变化
Fig. 9 Transformation change of land use types in Shandong Province at different stages

表 3 各阶段山东省土地利用类型转换像元统计

时期	增加	增加	增加	增加	增加	增加	减少	减少	减少	减少	减少	减少
	耕地	林地	草地	水域	建设用地	未利用地	耕地	林地	草地	水域	建设用地	未利用地
1990—2000 年	227	11	10	629	329	3	1338	4	82	168	11	944
2000—2010 年	780	44	55	671	2860	78	2588	63	785	382	69	601
2010—2020 年	24667	4871	5252	6622	19386	517	25267	5666	9881	3445	15352	1704

从交互探测结果可知(表 5),不同阶段环境因子的交互作用产生的 q 值均大于单独因子的 q 值,即不同环境因子的交互作用会增加对 RSEI 空间分布变化的解释。其中 1990—2000 年 LUCC 与其他因子之间的交互作用对 RSEI 的影响均大于其他因子彼此间的交互作用,解释率均在 30%以上,LST 与其他因子间对 RSEI 的解释力均在 15%以上。2001—

2010 年 LUCC 与其他因子之间的交互作用对 RSEI 也均大于其他因子之间的交互作用,解释力均在 30%以上。2011—2021 年 RSEI 的空间分布变化主要受到 $LST \cap LUCC$, $WET \cap NDBSI$, $NDVI \cap NDBSI$ 和 $WET \cap LUCC$ 的交互作用,其对 RSEI 空间分布变化的解释力均在 10%以上,其他因子之间的交互作用对 RSEI 的影响较小。

表 4 不同因子对不同阶段 RSEI 变化的 q 驱动力值Table 4 q driving force values of different factors on

RSEI changes at different stages

时期	LST	NDBSI	WET	NDVI	LUCC
1990—2000 年	0.0301	0.0236	0.0218	0.0237	0.1841
2001—2010 年	0.0268	0.0289	0.0096	0.0179	0.1839
2011—2021 年	0.0140	0.0043	0.0289	0.0042	0.0141

表 5 不同因子对不同阶段 RSEI 变化的交互作用

Table 5 Interaction diagram of different factors on RSEI

changes at different stages

时期	项目	LST	NDBSI	WET	NDVI	LUCC
1990—2000 年	LST	0.030				
	NDBSI	0.185	0.024			
	WET	0.162	0.090	0.022		
	NDVI	0.169	0.128	0.071	0.024	
	LUCC	0.428	0.312	0.396	0.330	0.184
2001—2010 年	LST	0.027				
	NDBSI	0.095	0.029			
	NDVI	0.115	0.102	0.010		
	WET	0.062	0.055	0.056	0.018	
	LUCC	0.315	0.372	0.415	0.310	0.184
2011—2021 年	LST	0.014				
	NDBSI	0.054	0.004			
	NDVI	0.075	0.146	0.029		
	WET	0.050	0.170	0.069	0.004	
	LUCC	0.182	0.049	0.152	0.050	0.014

3 讨论与结论

山东省作为我国经济强省和农业大省,其生态的好坏直接关系到人民生活水平。但随着城镇化快速发展,城市用地的快速扩张,导致其他土地利用覆盖类型发生了显著变化(尤其是生态用地)^[3-6]。虽然山东省实施了一系列生态文明建设(如生态优先、绿色低碳发展、黄河流域生态保护与高质量发展策略等),但山东省生态环境质量对地形地貌、气候变化和人类活动的响应过程是一个复杂的动态过程,不同地貌条件会导致热量和水分的空间差异,进而使得生态环境质量变化存在明显空间差异^[7]。因此,亟需厘清生态工程实施和城镇化快速发展背景下,山东省生态环境质量时空演变及其主要驱动因子。因此,本文利用 1991—2021 年的 Landsat 数据计算 RSEI 指数,并辅以 Sen、变异系数法、Hurst 法、随机森林对山东省生态环境质量变化特征及其变化的驱动因子进行分析,主要结论如下:

(1) 1991—2021 年山东省生态环境质量总体以

下降趋势为主,且以每年 0.000 5 的速率减小,NDVI 每年以 0.003 1 的速率增加,WET,LST,NDBSI 分别以 0.002/a,0.008/a,0.008 6/a 的速率下降。1991—2000 年在日照市、临沂市和菏泽市南部地区呈改善趋势,泰安市、济南市、莱芜市、淄博市为下降趋势;2001—2010 年 RSEI 呈增加趋势的区集中在山东省西部和东北部;2011—2021 年 RSEI 变化大部分区域呈稳定状态。孙汇颖等^[3]基于 InVest 对山东省 2000—2018 年生境质量研究同样也发现近 20 a 山东省生境环境质量总体为下降趋势;庄会波等^[5]基于 NDVI 指数研究了山东省 1982—2018 年植被覆盖度变化特征,发现近 30 a 山东省 NDVI 均呈增加趋势。以上研究结论与本文结论相一致,这表明山东省生态环境质量仍在恶化,需要大力推进生态文明建设和城市化绿色发展理念从而改善山东生态环境质量。

(2) 1991—2000 年山东省生态环境质量变化以稳定趋势为主,变化以低波动变化为主,且除草地区域生态环境质量为上升趋势,其他区域均为下降趋势,但草地区域生态环境质量变化波动性>未利用地>减少用地>耕地>林地。2001—2010 年生态环境质量仍以稳定变化趋势为主,但在山东省西部大部分城市和东北部的威海市和烟台市以增加趋势为主,且不同土地利用区域生态环境均为增加趋势,未利用地波动性>草地>耕地>建设用地>林地。2011—2021 年生态环境质量变化呈稳定状态,但林地和耕地区域生态环境质量为增加趋势,其他土地利用类型均为减小趋势,耕地波动性>林地>减少用地>未利用地>草地。

(3) 山东省生态环境质量未来一段时期内的变化趋势以增加趋势为主,且不同土地利用类型区域未来一段时间内变化特征均与过去呈相反趋势。

(4) 1990—2000 年、2001—2010 年土地利用变化对山东省生态环境质量空间分布变化的影响最大,2010—2021 年生态环境质量空间分布变化受到湿度变化和土地利用变化的影响较大。不同阶段不同环境因子的交互作用会增加对生态环境质量的影响。1990—2000 年、2001—2010 年土地利用与其他因子之间的交互作用对生态环境质量的影响均较大,2011—2021 年生态环境质量的空间分布变化主要受到地表温度和土地利用、湿地和干度、绿度和干度以及土地利用和湿度的交互作用。

20 世纪以来,随着山东省新旧动能转换重大工程实施,城市用地面积快速扩张,青连高速、鲁南高速等交通干线相继开通,山东省土地利用空间格局发生了巨大变化^[25]。土地利用变化是人类活动最直接的

反映,本研究发现土地利用是驱动 1991—2010 年山东省生态环境质量发生变化的主要驱动因子,同样本文也发现这一阶段山东省建设用地面积快速扩张,而作为特殊的半人工自然生态系统的耕地面积快速收缩,因此造成这一阶段生态环境遭到破坏。这一发现已在吴健生^[26]、李胜鹏^[27]、孙汇颖等^[3]的研究结果中得以证明。近年来,随着人类我国生态文明建设战略的实施以及人们对生态意识的增强,生态环境质量较前 20 a 有所改善,且 2010—2021 年之后土地利用变化对山东省生态环境质量的影响较小^[8]。但目前山东省生态环境质量仍以中等及以下等级为主,因此仍需要进一步加强生态文明建设,在城市群中增加能够提升生态环境质量的绿色植物,如提高交通道路边、小区内部植被覆盖度等,从而增加城市绿地率,构建国土空间安全格局,改善山东省生态环境质量。

参考文献(References):

- [1] Wang Y F. Analysis on the evolution of spatial relationship between population and economy in the Beijing-Tianjin-Hebei and Shandong region of China[J]. *Sustainable Cities and Society*, 2022,83:103948.
- [2] Li Y H, Jia L R, Wu W H, et al. Urbanization for rural sustainability: Rethinking China's urbanization strategy[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2018,178:580-586.
- [3] 孙汇颖,宫巧巧,刘庆果,等.基于土地利用变化的山东省生境质量时空演变特征[J].*土壤通报*,2022,53(5):1019-1028.
Sun H Y, Gong Q Q, Liu Q G, et al. Spatio-temporal evolution of habitat quality based on the land-use changes in Shandong Province[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2022,53(5):1019-1028.
- [4] 刘玉红,张筠,张春华,等.2000—2015 年山东省植被净初级生产力时空变化及其对气候变化的响应[J].*生态学杂志*,2019,38(5):1464-1471.
Liu Y H, Zhang J, Zhang C H, et al. Spatial and temporal variations of vegetation net primary productivity and its responses to climate change in Shandong Province from 2000 to 2015[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2019,38(5):1464-1471.
- [5] 庄会波,季好,高振勇,等.1998—2018 年山东省植被覆盖变化及其水文响应规律研究[J].*中国农村水利水电*, 2021(10):8-14,20.
Zhuang H B, Ji Y, Gao Z Y, et al. Research on vegetation cover changes and hydrological responses in Shandong Province from 1998 to 2018[J]. *China Rural Water and Hydropower*, 2021(10):8-14,20.
- [6] 宋鹏飞,季民,刘泽群,等.山东省植被覆盖度变化与气候因子相关性分析[J].*测绘科学*,2020,45(3):81-86.
Song P F, Ji M, Liu Z Q, et al. Correlation analysis of vegetation coverage change and climate factors in Shandong Province[J]. *Science of Surveying and Mapping*, 2020,45(3):81-86.
- [7] 刘晨曦,陈关州,王铜,等.山东省植被覆盖度长时序动态监测与分析[J].*山东农业大学学报:自然科学版*, 2021,52(4):585-594.
Liu C X, Chen G Z, Wang T, et al. Long-term dynamic monitoring and analysis of vegetation coverage in Shandong Province[J]. *Journal of Shandong Agricultural University: Natural Science Edition*, 2021,52(4):585-594.
- [8] 王雨枫,陈泽文.山东省城市土地集约利用的时空格局演变研究[J].*应用基础与工程科学学报*,2022,30(6):1420-1427.
Wang Y F, Chen Z W. Study on the evolution of urban land intensive utilization spatio-temporal patterns in Shandong Province[J]. *Journal of Basic Science and Engineering*, 2022,30(6):1420-1427.
- [9] 曲衍波,姜广辉,张佰林,等.山东省农村居民点转型的空间特征及其经济梯度分异[J].*地理学报*,2017,72(10):1845-1858.
Qu Y B, Jiang G H, Zhang B L, et al. Spatial characteristics of rural residential land transition and its economic gradient differentiation[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2017,72(10):1845-1858.
- [10] 张静,杨丽萍,贡恩军,等.基于谷歌地球引擎和改进型遥感生态指数的西安市生态环境质量动态监测[J].*生态学报*,2023,43(5):2114-2127.
Zhang J, Yang L P, Gong E J, et al. Dynamic monitoring of eco-environmental quality in Xi'an based on GEE and adjusted RSEI[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2023,43(5):2114-2127.
- [11] 罗镔基,王宏涛,王成.基于改进遥感生态指数的甘肃省古浪县生态质量评价[J].*干旱区地理*,2023,46(4):539-549.
Luo R J, Wang H T, Wang C. Ecological quality evaluation of Gulang County in Gansu Province based on improved remote sensing ecological index[J]. *Arid Land Geography*, 2023,46(4):539-549.
- [12] 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.
- [13] 曹灿,孙瑞,吴志祥,等.基于 SWAT 模型的南渡江流域土地利用/覆被变化的径流响应[J].*水土保持研究*, 2022,29(4):167-175.
Cao C, Sun R, Wu Z X, et al. Responses of stream-

- flow to land use/cover changes in Nandu River Basin based on SWAT model[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2022,29(4):167-175.
- [14] 胡珂,韩念龙,于森,等.基于遥感生态指数的三亚市土地利用变化模拟[J].*中国水土保持科学(中英文)*, 2023,21(1):101-109.
- Hu K, Han N L, Yu M, et al. Land use change simulation in Sanya City based on remote sensing ecological index[J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2023,21(1):101-109.
- [15] 刘英,党超亚,岳辉,等.改进型遥感生态指数与 RSEI 的对比分析[J].*遥感学报*, 2022,26(4):683-697.
- Liu Y, Dang C Y, Yue H, et al. Comparison between modified remote sensing ecological index and RSEI[J]. *National Remote Sensing Bulletin*, 2022,26(4):683-697.
- [16] 魏雨涵,钱建平,范伟伟,等.基于 RSEI 的漓江流域生态环境质量动态监测[J].*中国水土保持科学(中英文)*, 2021,19(1):122-131.
- Wei Y H, Qian J P, Fan W W, et al. Dynamic monitoring of ecological environment quality in Lijiang River Basin based on RSEI[J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2021,19(1):122-131.
- [17] 钟欣呈,许泉立.基于 RSEI 模型的玉溪市生态环境变化监测与评价[J].*水土保持研究*, 2021,28(4):350-357.
- Zhong X C, Xu Q L. Monitoring and evaluation of ecological environment changes in Yuxi City based on RSEI model[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2021,28(4):350-357.
- [18] 李立,肖桂荣.基于 RSEI 的武夷山国家公园生态环境质量变化分析[J].*福建农业科技*, 2021,52(5):63-70.
- Li L, Xiao G R. Analysis on the change of ecological environmental quality in Wuyishan National Park based on RSEI[J]. *Fujian Agricultural Science and Technology*, 2021,52(5):63-70.
- [19] 王丽霞,赵蕊,刘招,等.基于 RSEI 的延河流域生态环境质量监测与预估[J].*干旱区研究*, 2022,39(3):943-954.
- Wang L X, Zhao R, Liu Z, et al. Monitoring and prediction of ecological environmental quality in the Yanhe River Basin based on the remote sensing ecological index[J]. *Arid Zone Research*, 2022,39(3):943-954.
- [20] Yang X Y, Meng F, Fu P J, et al. Spatiotemporal change and driving factors of the Eco-Environment quality in the Yangtze River Basin from 2001 to 2019[J]. *Ecological Indicators*, 2021,131:108214.
- [21] 徐涵秋.城市遥感生态指数的创建及其应用[J].*生态学报*, 2013,33(24):7853-7862.
- Xu H Q. A remote sensing urban ecological index and its application[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, 33(24):7853-7862.
- [22] 汪攀,刘毅敏. Sen's 斜率估计与 Mann-Kendall 法在设备运行趋势分析中的应用[J].*武汉科技大学学报*, 2014,37(6):454-457,472.
- Wang P, Liu Y M. Application of Sen's slope estimation and Mann-Kendall method in the trend analysis of equipment operation[J]. *Journal of Wuhan University of Science and Technology*, 2014,37(6):454-457,472.
- [23] 徐思瑜,于海明,徐誉维,等.基于 RSEI 指数的吉林省四平市生态环境质量变化分析[J].*城市地质*, 2022,17(4):477-484.
- Xu S Y, Yu H M, Xu Y W, et al. Analysis of ecological environment quality change based on RSEI index in Siping City, Jilin Province[J]. *Urban Geology*, 2022, 17(4):477-484.
- [24] Wang J F, Li X H, Christakos G, et al. Geographical detectors-based health risk assessment and its application in the neural tube defects study of the Heshun region, China[J]. *International Journal of Geographical Information Science*, 2010,24(1):107-127.
- [25] Zhang T Z, Gao Y, Li C, et al. How human activity has changed the regional habitat quality in an eco-economic zone: Evidence from Poyang Lake eco-economic zone, China[J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2020,17:6253.
- [26] 吴健生,曹祺文,石淑芹,等.基于土地利用变化的京津冀生境质量时空演变[J].*应用生态学报*, 2015,26(11):3457-3466.
- Wu J S, Cao Q W, Shi S Q, et al. Spatio-temporal variability of habitat quality in Beijing-Tianjin-Hebei Area based on land use change[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2015,26(11):3457-3466.
- [27] 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.
- Li S P, Liu J L, Lin J, et al. Spatial and temporal evolution of habitat quality in Fujian Province, China based on the land use change from 1980 to 2018[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2020, 31(12):4080-4090.