

太原城市群生态环境质量监测及驱动力分析

刘晋, 陈天伟, 刘鹏, 贾相莘

(桂林理工大学 测绘地理信息学院, 广西 桂林 541006)

摘要: [目的] 研究太原城市群 2002—2021 年生态环境质量变化状况, 为城市可持续发展及绿色转型提供科学建议。[方法] 基于 GEE 平台与 MODIS 影像, 利用主成分分析法耦合绿度、湿度、热度、干度构建生态遥感指数 (RSEI), 结合稳定性分析、空间自相关分析研究太原城市群生态环境质量变化的空间性质, 并利用地理探测器量化分析多种因子对 RSEI 的影响。[结果] 各年份第一主成分贡献率均高于 75%, 表明基于第一主成分提取 RSEI 能够综合表征研究区生态环境质量; 2002—2021 年, 太原城市群生态环境质量总体呈现上升趋势, 从 0.433 提高到 0.488, 增长率约为 0.002 9/a。生态改善面积所占比例为 17.1%, 主要分布在西北部的岚县、静乐县; 研究区生态环境质量变化存在明显空间自相关, Moran' I 指数为 0.729, 高高集聚与低低集聚区域与生态改善、退化区域基本重合; 太原城市群生态环境质量与气候因子中的相对湿度、气温、潜在蒸散量有显著相关性。[结论] 2002—2021 年太原城市群生态环境质量得到改善, 植被覆盖和城市扩张因素影响较大, RSEI 能够有效监测研究区生态环境质量变化。

关键词: 太原城市群; 生态环境质量; RSEI; 主成分分析; 地理探测器

文献标识码: B **文章编号:** 1000-288X(2023)04-0154-08 **中图分类号:** X87, X821, X171.1

文献参数: 刘晋, 陈天伟, 刘鹏, 等. 太原城市群生态环境质量监测及驱动力分析[J]. 水土保持通报, 2023, 43(4):154-161, 210. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2023.04.019; Liu Jin, Chen Tianwei, Liu Peng, et al. Monitoring and analyzing driving forces of ecological environmental quality in Taiyuan urban agglomeration [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2023, 43(4):154-161, 210.

Monitoring and Analyzing Driving Forces of Ecological Environmental Quality in Taiyuan Urban Agglomeration

Liu Jin, Chen Tianwei, Liu Peng, Jia Xiangping

(College of Geomatics and Geoinformation, Guilin University of Technology, Guilin, Guangxi 541000, China)

Abstract: [Objective] The changes in ecological environmental quality in the Taiyuan urban agglomeration from 2002 to 2021 were studied in order to provide scientific recommendations for sustainable urban development and green transformation. [Methods] We used the GEE platform, MODIS images, and principal component analysis to construct the ecological remote sensing index (RSEI) by coupling greenness, humidity, heat, and dryness. The spatial properties of ecological quality changes in the Taiyuan urban agglomeration were studied by using combining stability analysis and spatial autocorrelation analysis. The influence of various factors on RSEI was quantified by geographic detectors. [Results] The contribution rate of the first principal component was greater than 75% in all years, indicating that RSEI values extracted based on the first principal component could comprehensively characterize the ecological environmental quality in the study area. The ecological environmental quality of the Taiyuan urban agglomeration showed an overall upward trend from 2002 to 2021, increasing from 0.433 to 0.488, with a growth rate of about 0.0029/yr. The ecological improvement area accounted for 17.1%, mainly located in Lanxian County and Jingle County in the northwest. There was obvious spatial autocorrelation in the change of ecological environmental quality in the study area, and the Moran's I index was 0.729. The high-high and low-low aggregation areas basically coincided with the

收稿日期: 2022-11-22

修回日期: 2022-12-29

资助项目: 国家自然科学基金项目“地下管线多尺度几何语义建模研究”(41861050); 广西壮族自治区自然科学基金项目“熵函数融合地统计原理构造格网 DEM 插值模型的研究”(2017GXNSFAA198308)

第一作者: 刘晋(1997—), 男(汉族), 山西省吕梁市人, 硕士研究生, 研究方向为生态遥感。Email: 1443218557@qq.com。

通讯作者: 陈天伟(1965—), 男(汉族), 广西壮族自治区桂林市人, 硕士, 教授, 主要从事空间数据建模方面的研究。Email: ctw@glut.edu.cn。

ecological improvement and degradation areas, respectively. The ecological environmental quality of the Taiyuan urban agglomeration was significantly correlated with the climatic factors of relative humidity, air temperature, and potential evapotranspiration. [Conclusion] The ecological environmental quality of the Taiyuan urban agglomeration has improved from 2002 to 2021, and the vegetation coverage and urban expansion factors have had great impacts. RSEI can effectively monitor changes in the ecological environmental quality in the study area.

Keywords: Taiyuan urban agglomeration; ecological environmental quality; RSEI; principal component analysis; geodetector

在城市化进程加快的时代背景下,城市群则成为城市化发展的重要载体,也是国家经济发展和区域发展的重心^[1]。党的二十大报告提出,中国城市群的发展状态呈现高度差异化,中西部地区的城市群与都市圈,当前要继续做大做强中心城市,加强中心城市的发展动能,从而带动区域尺度的都市圈发展。但是中心城市的快速发展势必会引起人口大量涌入中心城市,主城区辖区面积受限,人口密度上升,生态用地被迫减少,从而造成一系列生态环境问题^[2-4]。因此研究城市群的生态环境质量变化与变化驱动力对于城市建设的绿色转型、生态与经济的协调发展有重大意义。

遥感技术拥有大范围、重返周期短、数据完备的优势,近年各类遥感指数被广泛应用于不同生态背景下的环境监测评价中。如植被指数(NDVI, RVI, DVI)^[5]、归一化差分水体指数(NDWI)^[6]、裸土指数(MBSI)等^[7]。但单一遥感指数对于评价复杂的地面综合生态状况是不全面、不准确的。2006年生态环境部首次发布《生态环境状况评价技术规范》一文,其中提出使用综合性生态环境状况指数(EI)来反映区域生态环境质量,但该指数存在权重设定不客观,监测数据难以获取等缺点^[8]。2013年,徐涵秋^[9]提出利用主成分分析法,耦合绿度、湿度、热度、干度4个指标构建城市生态遥感指数RSEI,该方法解决了生态指标的客观赋权问题,完全依赖遥感影像,能够快速实现对区域生态环境的定量评估。随后众多学者从方法、数据、指标选取3个方面对其RSEI进行改进。如柯利娜^[10]采用熵权法构建RSEI,金佳琦^[11]使用MODIS数据提取RSEI,张静^[12]加入气溶胶光学厚度(AOD)构建ARSEI等。RSEI已被应用于不同地物特征下的区域生态环境质量评价中,如海岛^[13]、垦区^[14]、矿区^[15]、湿地等^[16]地理区域。综上所述,生态遥感指数的发展,趋向于生态代表性指标多元化,应用的区域类型广泛化,集成方法多样化。但使用遥感影像会存在云遮盖,影像拼接繁琐等问题,限制了对生态环境大范围、长时间监测的研究。GEE遥感云计算平台存储了大量主流卫星所获取的遥感影像,能够提供封装好的去云、影像拼接融合算

法,具有强大的计算能力^[17],可以改善遥感数据多云、时间不一致等问题。《中华人民共和国国民经济和社会发展第十二个五年规划》中指定太原城市群为国家重点建设的14个城市群之一。太原城市群是山西省的引擎发展区,也是资源型经济转型示范区。刘海龙^[18]探究了太原城市群三生空间的空间格局发展规律,但对生态空间的研究并不深入,其他学者也未对此区域进行长时间序列的生态环境质量评价与监测。因此本文利用GEE平台调用2002—2021年6月的MODIS影像集构建生态遥感指数(RSEI),分析太原城市群生态环境质量的时空格局变化,并利用地理探测器工具分析引起生态环境质量变化的驱动因素,为解决太原城市群发展过程中的生态环境问题提供科学依据。

1 研究区概况

太原城市群地处山西省境中央,西起吕梁东至太行,处于华北地区黄河流域中部,位于北纬 $36^{\circ}50'$ — $38^{\circ}40'$,东经 $111^{\circ}21'$ — $113^{\circ}08'$ 。属于温带半干旱季风型气候,昼夜温差大,无霜期较长,日照充足,降雨多集中于夏季。地形特征“中间低,东西高”,地貌类型丰富,有山地、丘陵、盆地等,以盆地为主(忻定盆地和太原盆地)。研究区内耕地面积约 $7\ 800\ \text{km}^2$,所占比例37.9%;林地面积约为 $6\ 100\ \text{km}^2$,比例为29.5%;草地面积约 $0.49\ \text{km}^2$,比例为23.5%;建设用地约 $1\ 800\ \text{km}^2$,所占比例为8%;水体与未利用地占比最小;总面积约 $2.08 \times 10^4\ \text{km}^2$ 。太原城市群是以太原为中心,以太原盆地城镇密集区为主体构成的中小城市群,是山西经济最发达的地区。研究区包括太原市的古交市、尖草坪区、晋源区、娄烦县、清徐县、万柏林区、小店区、杏花岭区、阳曲县、迎泽区,晋中市的介休市、平遥县、祁县、太谷县、榆次区,吕梁市的交城县、岚县、文水县、孝义市、汾阳市,忻州市的静乐县^[18]。

2 数据源及预处理

本文数据源主要由3部分构成:MODIS产品数据集、自然因子、人类活动因子。MODIS产品数据

集基本信息如表 1 所示。MOD13A1 V6 产品提供两个植被指数 (NDVI, EVI), MOD11A2 V6 产品提供地表温度和反射率值。MOD09A1 V6 产品提供 Terra MODIS 波段 1—7 的表面光谱反射率估计值, 并针对气体、气溶胶和瑞利散射等大气条件进行了校正。利用 GEE 平台筛选出 2002—2021 年 6 月的 MODIS 各类产品数据, 进行云掩膜与水体掩膜处理, 采用像元级最小云量合成方法拼接出覆盖研究区的遥感影像。

表 1 MODIS 数据源信息

Table 1 MODIS data source information

数据产品	时间分辨率/d	空间分辨率/m	波段数	数据来源
MOD13A1 V6	16	500	1	GEE 平台
MOD11A2 V6	8	1 000	1	GEE 平台
MOD09A1 V6	8	500	7	GEE 平台

自然因子包含气候、地形两类。气候选用月均气温、月降雨量、月均相对湿度、潜在蒸散量, 时间与遥感影像一致, 均来源于国家科技基础条件平台——国

$$WET = 0.114 7 \times b_1 + 0.248 9 \times b_2 + 0.240 8 \times b_3 + 0.313 2 \times b_4 - 0.312 2 \times b_5 - 0.641 6 \times b_6 - 0.508 7 \times b_7 \quad (1)$$

$$NDBSI = \frac{\left\{ \frac{(b_6 + b_1) - (b_2 + b_3)}{(b_6 + b_1) - (b_2 + b_3)} + \frac{2 \times b_6 / (b_6 + b_2) - [b_2 / (b_2 + b_1) + b_4 / (b_4 + b_6)]}{2 \times b_6 / (b_6 + b_2) - [b_2 / (b_2 + b_1) + b_4 / (b_4 + b_6)]} \right\} / 2}{2} \quad (2)$$

式中: b_1 — b_7 分别代表 MOD09A1 V6 产品中的红、近红外、蓝、绿、近红外 2, 短波红外 1, 短波红外 2 等 7 个波段信息。

在 RSEI 模型构建的过程要做以下 3 步处理。

(1) 遥感数据全部重采样至 500 m, 保持一致的空间分辨率;

(2) 得到各分量指标后, 进行归一化处理, 解决尺度不一致的问题^[20]。

$$NI_i = \frac{I - I_{\min}}{I_{\max} - I_{\min}} \quad (3)$$

(3) 使用主成分分析计算生态遥感指数的随机性源于特征向量方向的差异^[21], 因此需要保证不同时相下相同的 PCA 分量序列, 并基于先验知识进行反转, 使其结果符合客观事实。将得到的 RSEI 进行归一化处理, RSEI 值接近 0 代表生态环境质量差, 接近 1 代表生态环境质量好。

$$RSEI_0 = PC1(NDVI, WET, LST, NDBSI) \quad (4)$$

$$RSEI = 1 - RSEI_0 \quad (5)$$

3.2 稳定性分析与相关性分析

3.2.1 稳定性分析 采用 CV 变异系数反映 RSEI 数据的离散性, 以单个像元 RSEI 值的时间序列作为

家地球系统科学数据中心 (<http://www.geodata.cn>), 通过 496 个独立气象观测点数据进行验证, 结果可信, 空间分辨率均为 1 km。地形因子包括高程与坡向。DEM 数据来源于国家基础地理信息中心 (<https://www.webmap.cn/>), 坡向由 DEM 数据计算求得, 空间分辨率为 1 km。人类活动因子使用夜间灯光数据表示, 数据来源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>), 空间分辨率 1 km。根据研究区边界数据对自然与人类活动因子进行裁剪。

3 研究方法

3.1 生态遥感指数构建

RSEI 模型是利用主成分分析将绿度 (NDVI)、湿度 (WET)、热度 (LST)、干度 (NDBSI) 等 4 个指标进行耦合, 集中到第一主成分, 最大程度描述综合性的城市地表生态环境质量状况。其中 MOD13A1 V6 产品代表绿度分量, MOD11A2 V6 产品代表热度分量, 湿度与干度通过 MOD09A1 V6 产品的波段运算获得^[19], 计算公式为:

一组数据, 逐像元运算得到变异系数图, 评估研究区时间尺度上生态环境质量变化的稳定程度^[22]。计算公式为:

$$C_V = \frac{Std}{Mean} \quad (6)$$

式中: Std 为数据标准差; Mean 为数据平均值。结果分类: $C_V < 10\%$ 表弱变异, $10\% < C_V < 100\%$ 为中等程度变异, $C_V > 100\%$ 为强变异。

3.2.2 空间相关性分析 空间自相关分析能够研究某种地理现象在空间上的集聚或分散程度。本研究采用全局空间自相关 (Global Moran's I) 和局部空间自相关 (Local Moran's I) 揭示 RSEI 的空间格局^[23]。并绘制 LISA 聚类图, 将空间集聚情况可视化, 包含高高集聚、低低集聚、高低集聚、低高集聚、不显著 5 类集聚模式。计算公式为:

$$Global \ Moran's \ I = \frac{m \times \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m \omega_{ij} (D_i - \bar{D})(D_j - \bar{D})}{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m \omega_{ij} (D_i - \bar{D})^2} \quad (7)$$

$$Local \ Moran's \ I = \frac{(D_i - \bar{D}) \times \sum_{j=1}^m \omega_{ij} (D_j - \bar{D})}{\sum_{i=1}^m (D_i - \bar{D})^2} \quad (8)$$

式中: m 代表采样点数量; D_i 表示某个点的 RSEI 变化值; \bar{D} 表示所有数据均值; ω_{ij} 则为空间权重。Moran's I 取值范围介于 -1 与 1 之间,数值接近 -1 ,表示负相关性越高;数值靠近 1 ,表示正相关性越高; 0 值则表示不相关。

3.3 地理探测器

地理探测器是空间数据探索性分析的有力工具,能够对遥感、气象、地理等数据的空间分异性做出有效解释^[24]。本研究联合地形、气候、人类活动等因子探究影响太原城市群生态环境质量的驱动因素和不同因子间的共同驱动力,并作因子间交互作用类型分类^[24]。单因子影响力公式为:

$$q = 1 - \left(\frac{\sum_{h=1}^{10} N_h \sigma_h^2}{N \sigma^2} \right) \quad (9)$$

式中: q 的值域为 $[0, 1]$,其值越大说明属性的空间分

异性越明显,即影响力更强; σ_h^2, σ^2 分别为层 h 和全区 y 值的方差; N_h, N 表示层 h 和全区域采样点数。

4 结果与分析

4.1 RSEI 模型检验

依据绿度、湿度、热度、干度指标,通过主成分分析构建 RSEI。表 2 为主成分分析结果。NDVI 与 WET 对 PC_1 荷载值均大于 0 ,LST 与 NDBSI 对 PC_1 荷载值均小于 0 ,表明绿度与湿度指标对生态环境起正向作用,热度与干度指标对生态环境起负向作用。20 a 间 PC_1 方差贡献度最低 75.14% ,最高 86.92% ,表明对研究区的生态环境质量建模过程中信息利用率较高,集合大部分特征,RSEI 能够很大程度上反映太原城市群的真实生态环境质量空间分布以及随时间的变化趋势。

表 2 各指标对 PC_1 荷载值的主成分分析结果

Table 2 Principal component analysis results of each index on PC_1 load value

年份	NDVI	WET	LST	NDBSI	特征值	贡献率/%
2002	0.618	0.321	-0.345	-0.628	0.081	82.84
2003	0.617	0.314	-0.332	-0.638	0.085	85.66
2004	0.633	0.252	-0.402	-0.610	0.074	81.89
2005	0.605	0.306	-0.373	-0.632	0.078	85.80
2006	0.593	0.227	-0.360	-0.683	0.077	86.23
2007	0.654	0.250	-0.367	-0.610	0.084	85.17
2008	0.768	0.178	-0.554	-0.463	0.044	77.37
2009	0.611	0.269	-0.389	-0.634	0.079	86.91
2010	0.714	0.243	-0.528	-0.486	0.056	86.92
2011	0.719	0.314	-0.498	-0.346	0.060	79.28
2012	0.579	0.269	-0.451	-0.622	0.077	85.57
2013	0.847	0.167	-0.405	-0.335	0.038	75.14
2014	0.718	0.268	-0.474	-0.431	0.050	79.20
2015	0.542	0.419	-0.410	-0.601	0.096	83.31
2016	0.609	0.238	-0.458	-0.600	0.065	85.32
2017	0.679	0.203	-0.583	-0.395	0.052	79.71
2018	0.741	0.286	-0.559	-0.335	0.040	78.46
2019	0.743	0.314	-0.492	-0.324	0.063	82.03
2020	0.507	0.327	-0.525	-0.599	0.069	80.91
2021	0.633	0.306	-0.531	-0.478	0.048	77.22

为进一步探究各指标之间的相关性以及分析 RSEI 的变化机制,在研究区内随机生成 10 000 个点,提取 2021 年 RSEI 以及各分量指标值,并计算各指标间 Pearson 相关系数。各指标间均有明显的正负相关性,有利于提高主成分分析过程中的信息利用率。其中 NDVI 和 WET 与 RSEI 的 Pearson 相关系数分别为 0.95 和 0.74 ,表明二者增大有利于生态环境质量提高。NDBSI 与 RSEI 的 Pearson 相关系数为 -0.95 ,说明太原城市群生态变化主要受植被、裸土、建筑的动态变化影响。NDBSI 与 LST 相关系数为

0.70 ,表明城区扩张能够对热岛效应做出一定解释。

4.2 太原市城市群生态环境质量时空变化分析

4.2.1 太原市城市群生态环境质量时间变化特征

利用 GEE 平台求得研究区内 2002—2021 年 RSEI 均值(如图 1 所示)。太原城市群整体生态环境质量呈现上升趋势,从 0.433 增长至 0.488 ,增幅达到 12.7% ,增长率为 $0.0029/a$,说明山西省实施的生态保护、修复政策发挥作用,但整体生态环境质量仍然较差。其中 2005—2008 年 RSEI 值存在连续 3 a 持续上升的现象,从 0.359 增长至 0.493 ,增幅达到 39% 。将时间序

列分段来看,太原城市群生态环境质量呈现“上升—下降—上升—下降”的波动变化情况。2019年RSEI值达到最高0.503,2005年RSEI值最低为0.359。

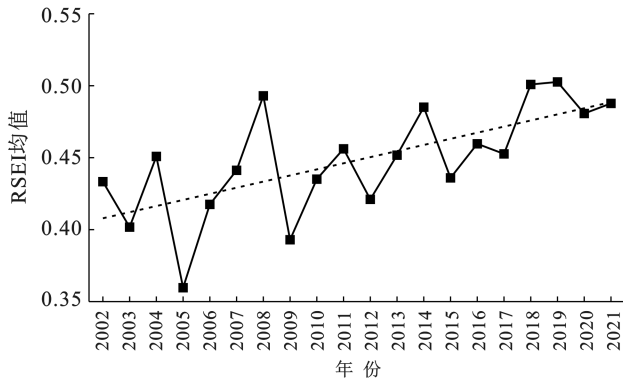


图1 2002—2021年研究区内RSEI均值变化

Fig.1 Changes in mean value of RSEI in study area from 2002 to 2021

取2002,2012和2021年3a的RSEI影像进行分析,这3a的RSEI均值分别为0.433,0.421,0.488。本文根据前人研究将RSEI以0.2为间隔,分为5个等级:极差(0~0.2)、差(0.2~0.4)、中(0.4~0.6)、良(0.6~0.8)、优(0.8~1.0)。

如表3所示,生态环境质量为差的面积一直占有较大比重,在2012年比重接近50%,其次为中、良,极差和优等面积比例最小。因此研究区整体RSEI均值偏小,符合黄土高原地区生态脆弱,水土受侵蚀的客观事实。2002—2021年优等面积呈现减少趋势,减少面积为945.93 km²。其余等级均呈现“增长—减少—增长”趋势。到2021年时,中和差等面积接近,良等级面积增加,各生态等级比例结构相对另外两个年份更加合理,表明在2012年后,太原城市群的生态环境质量得到了明显改善。

表3 研究区生态环境质量等级面积统计

Table 3 Statistics of ecological quality grade area in study area

项目	2002年		2012年		2021年	
	面积/km ²	比例/%	面积/km ²	比例/%	面积/km ²	比例/%
极差	276.07	1.32	1 503.97	7.23	467.66	2.25
差	8 472.06	40.73	10 263.3	49.34	7 505.61	36.08
中	6 782.36	32.61	4 958.59	23.84	7 785.97	37.43
良	3 990.55	19.19	3 571.44	17.17	4 707.73	22.63
优	1 278.96	6.15	502.7	2.42	333.03	1.61

4.2.2 太原市城市群生态环境质量空间变化特征

图2反映了太原城市群生态环境质量等级空间分布状况。由图2可知,从地貌来看,太原城市群RSEI等级为优和良的区域主要分布在西部吕梁地区山脉,以及太原盆地、忻定盆地边缘高海拔区域,且RSEI在盆地地区有中部高、四周低的空间异质特征,这些区域人口比重低,多为植被高覆盖区,拥有良好的自然条

件。生态环境质量等级为中的区域围绕在优良区域周围。生态环境质量差与极差的区域主要分布在太原城市群南部、东南部及西北部等地势低下、平缓区,这些区域则有较高的人口密度,人类活动频繁,建成区面积大。从县(区)级行政区域来看,岚县、静乐县、汾阳市、介休市、平遥县、榆次区及太原主城区中生态环境质量情况较差,其余县(区)生态环境质量情况较好。

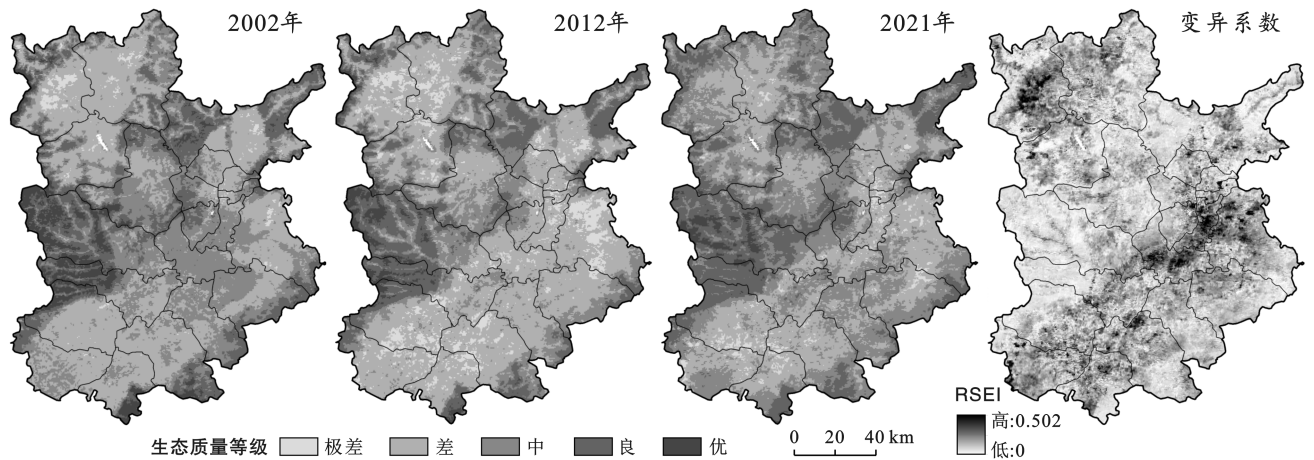


图2 研究区生态环境质量等级空间分布

Fig.2 Spatial distribution of ecological quality grades in study area

将各年 RSEI 值分级后进行作差值运算,级差为负,表明生态退化,级差为 0,表明生态稳定,级差为正,表明生态环境质量改善。由图 3 与表 4 可得,2002—2012 年,生态退化的面积比例 34%,且主要集中在清徐县、小店区、榆次区西部及太古县西北部;2012—2021 年,生态改善面积比例 32.35%,主要分布在研究区北部的岚县,中部交城县、清徐县、南部的孝义市、祁县、太谷县等地区;2002—2021 年,生态改善区域大多分布在太原城市群北部的岚县与静乐县,退化区域则主要分布于小店区及与榆次区、清徐县接壤部分,符合太原经济重心南移、建成区向南扩张的现实趋势。利用 C_v 稳定性分析求得 RSEI 值 19 a 间的变异系数,由图 2(变异系数)可知, C_v 最大值为 0.502,均值 0.129。太原城市群中 55% 的区域为弱变异区域 ($C_v < 10\%$),45% 的区域为中等强度变异

($10\% < C_v < 100\%$)。变异系数较大的部分集中在岚县、小店区、清徐县、榆次区的城区密集区域,且这些区域对应的生态环境质量等级为差,表明人类剧烈活动会明显降低生态环境质量。综上所述,2002—2021 年太原城市群整体生态系统并不稳定。

为探索太原城市群生态变化的空间分异性,对 2002—2021 年 RSEI 变化图进行重采样,得到 22 405 个样点,并计算了样本点的全局与局部空间自相关性。Moran' I 指数值达到 0.727,表明研究区内生态环境变化存在明显的空间相关性,呈现集聚分布,而不是离散、互斥、随机的。图 4 显示,高高集聚(生态变好)和低低集聚(生态变差)区与图 3 描述的生态环境质量变化区域一致;显著性水平小于 0.01 的区域与 RSEI 变异程度分布一致,表明研究区内这些区域生态环境质量变化明显。

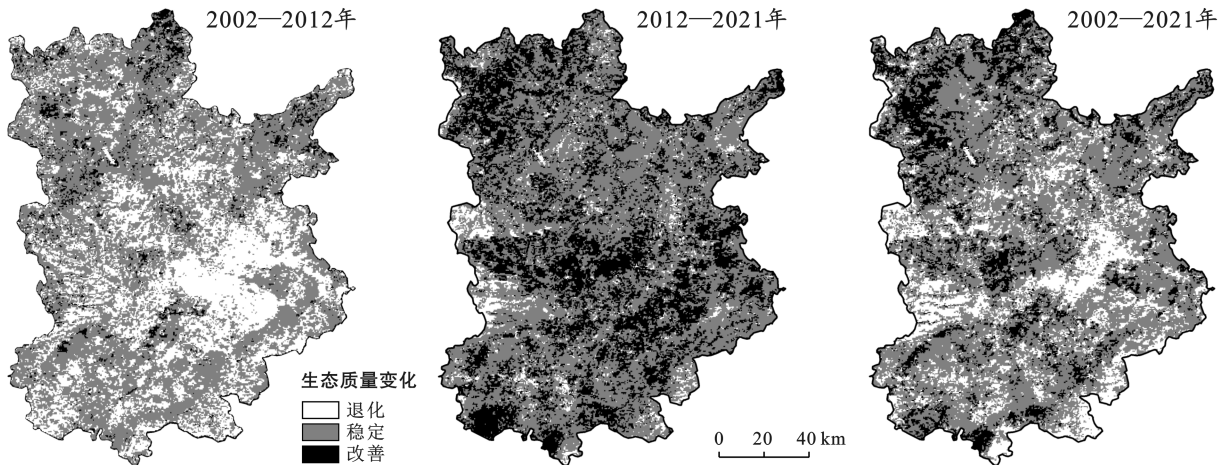


图 3 研究区生态环境质量差值变化分布

Fig.3 Distribution of ecological quality difference change in study area

表 4 研究区生态环境质量差值变化统计结果

Table 4 Statistical results of ecological quality difference change in study area

生态环境质量变化	2002—2012 年		2012—2021 年		2002—2021 年	
	面积/km ²	比例/%	面积/km ²	比例/%	面积/km ²	比例/%
退化	7 071.35	34.00	1 161.60	5.58	3 556.78	17.10
稳定	12 701.90	61.07	12 909.60	62.07	13 141.60	63.18
改善	1 026.70	4.94	6 728.83	32.35	4 101.65	19.72

4.3 生态环境质量变化驱动因素分析

为分析引起太原市城市群生态环境质量变化的驱动因素,引入地理探测器工具,操作如下:使用 ArcGIS 10.2 在研究区生成 1.5 km×1.5 km 渔网,提取 5 160 个点,将 RSEI 值作为因变量,2021 年的 NDVI, WET, LST, NDBSI 指标及高程、坡向、月降雨、月均气温、月均相对湿度、潜在蒸散量、灯光强度等因子作为自变量,自变量采用自然断点法进行分级,通过渔

网点进行自变量与因变量匹配,作因子探测分析。 p 值均为 0,表明各指标显著性高,对因变量的解释力充足。 q 值代表自变量对 RSEI 的影响力。由图 5 得,绿色、热度、干度的 q 值分别为 0.863, 0.685 和 0.810,影响力较大,其中干度与热度在指标相关性分析中存在明显正相关性,表明地表的植被覆盖与城区不透明面扩张是引起研究区生态环境质量变化的主要驱动力。气候因子中月降雨 q 值较小,月均气温、

月均相对湿度、潜在蒸散量 q 值分别为 0.438, 0.518 和 0.580, 对 RSEI 有中等程度影响, 属于次要驱动因

素。地形因子中的坡向 q 值为 0.034, 影响力最小, 在后续研究中可以不纳入驱动因素的考虑范围。

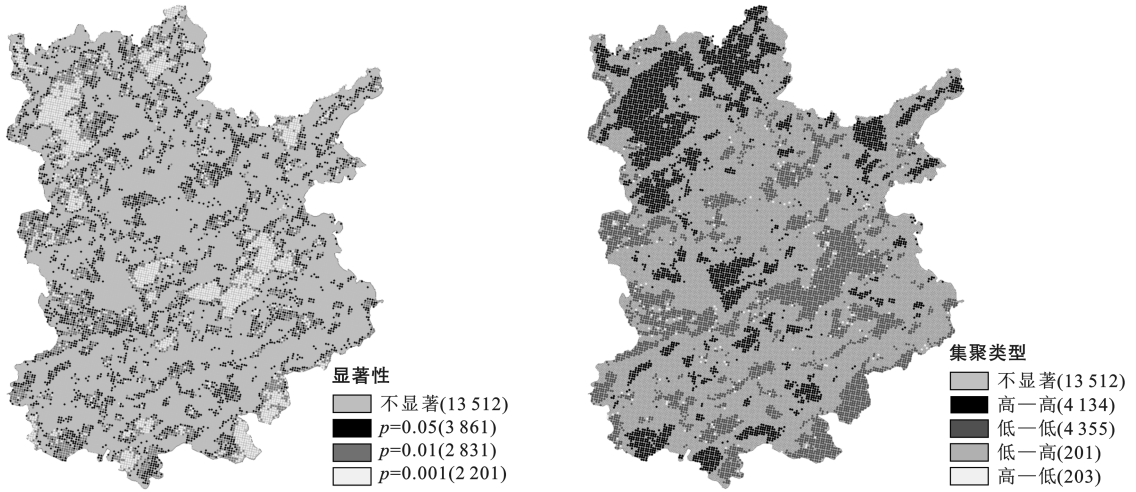


图 4 研究区显著性和局部空间自相关

Fig.4 Significance and local spatial autocorrelation of study area

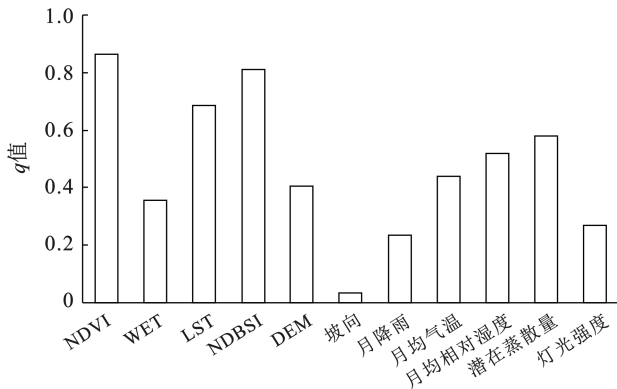


图 5 研究区因子探测结果 (q 值)

Fig.5 Factor detection result (q value) in study area

生态环境质量的变化不是简单的单因子驱动, 图 6 显示了各因子对 RSEI 的交互影响力。从每一行看, 单因子对 RSEI 的影响力均比与其他因子的交互影响力小。其中 90.9% 表现为双因子增强, 9.1% 表现为非线性增强。不存在独立起作用的因子。绿度 \cap 干度、干度 \cap 热度交互影响力最大, q 值达到 0.902, 印证上述植被与城区建设较大幅度影响太原城市群生态环境的观点。代表人类活动的夜间灯光强度, 单因子影响力最弱, 但是与其他环境因子交互影响力大于 0.5 的部分比例超过 50%, 表明夜间灯光强度是造成该区域生态变化的间接因素。

5 讨论

太原城市群是以太原盆地城镇密集区为主体构成的城市群, 位于山西省中东部经济最发达的地方, 但发展仍然滞后。未来仍需要在产业结构上做出调

整, 向资源节约型和环境友好型的城市群靠近。研究发现在 2012 年后, 太原城市群生态环境质量稳定上升, 波动较小, 这表明生态保护政策的出台对环境改善有明显的作用。客观评价太原城市群的生态环境变化有助于打造人与自然互惠共生的生态城市。

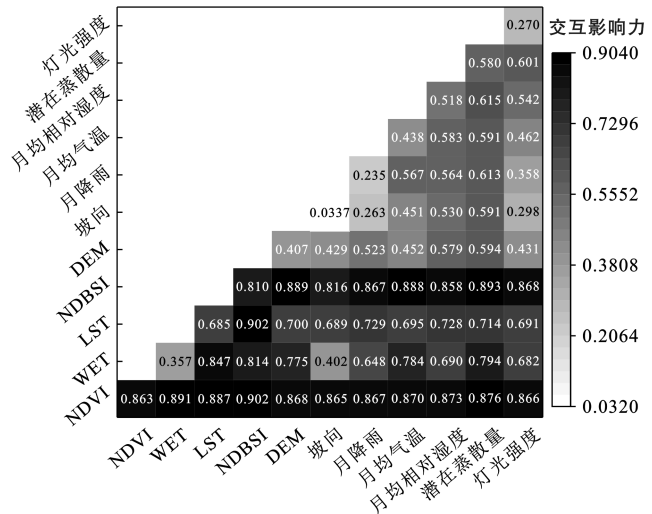


图 6 各因子对 RSEI 的交互探测结果
Fig.6 Interaction detection results of RSEI among various factors

在开展大范围生态环境变化的研究时, 势必会受到数据源影响, 存在大量云层覆盖, 从而影响评估结果。GEE 云平台能够通过云掩膜、中值合成等算法得到完整的无云影像, 很大程度上弥补了因云覆盖问题导致的影像缺失, 且能够通过 GEE 平台快速完成 RSEI 及各指标分量的运算, 提高大范围生态环境监测的效率。在以往的研究中, 多以特定年份进行区域

生态环境质量研究,容易对生态变化趋势做出误判,GEE能够就现有数据做出以年、季、月等不同时间尺度下的快速评价。

关于计算RSEI使用到的指标分量,通常使用NDVI,WET,LST,NDBSI,指标间相关性及各指标对于RSEI的驱动作用与前人研究一致,但影响程度不同。由上述结果分析得,太原城市群的生态环境主要由NDVI与NDBSI影响,即退耕还林、水土流失和建成区飞速扩张等是生态环境变化的原因,变化最明显的区域就是山西转型综合改革示范区^[25]和太忻一体化经济区,两地作为山西中部城市群发展的南北引擎,各类产业整合于此,但产业结构仍需调整,耕地被占用,生态用地减少,人类活动强度加大,导致两地生态环境质量急剧下降。反观岚县,地处吕梁山生态脆弱区,过去19 a间,岚县实施“十大”造林绿化工程,并提出“大生态”战略^[26],政策推动下,2020年该县林草覆盖率达到43%,生态环境大幅好转。

相邻年份间土地利用变化并不明显,但气候情况可能存在巨大差距,2004—2005年6月月均降雨量由730.17 mm下降到417.52 mm,同比下降42.8%,同时月均气温由19.3℃上升到21.7℃,二者的共同作用提高了气候干燥度,改变土壤物理特性,间接使得2004—2005年RSEI值发生大幅下降。由地理探测器可知,联合气候,地形,人类活动等因子后,发现存在其他对RSEI影响力较高的因子,如月均相对湿度,潜在蒸散量等,均比WET高。所以对于不同的地理区域,需考虑加入不同代表性指数构成新的综合生态指数,RSEI并不具有普适性。综合生态指数的耦合方法目前以客观赋权法(主成分分析和熵权法)为主,但主成分分析法存在特征向量的不唯一性,熵权法无法考虑指标间的横向影响,可能存在权重失真的情况,因此关于耦合方法还需要进一步研究。

综上所述,研究区应依托地形条件,在守住生态保护红线的基础上,加强植被恢复的力度,严格整顿采煤区,关闭不合法不合规的工业场所。农业生产区要保持土壤结构,严防土地盐渍化。在建成区扩张过程中应着重加强绿度空间布局合理性,扩大公园、绿地的建设规模,增加城市生态用地,调节气候因子,形成良性循环,逐步提高生态环境质量。

6 结论

(1) 2002—2021年太原市城市群生态环境质量总体得到改善,趋势线显示未来生态环境质量将向好的方向发展。

(2) 该区RSEI存在明显的空间异质性与空间自

相关性。生态环境质量较好的区域主要分布在山脉、盆地边缘等海拔较高区域,生态环境质量较差地区分布在盆地中心等地势平缓区,各生态环境质量等级集聚明显。

(3) 植被覆盖与城市扩张是研究区内RSEI变化的主导因素,在城市发展过程中要进一步优化城市空间结构,调节人地矛盾。

(4) 影响生态环境质量的因素是多方面的,每个因素有不同程度的影响力,后续的分析建模需充分考虑地形、气候以及空气质量等因素特性。

[参 考 文 献]

- [1] 柏卓彤,陆化普.基于中心城市辐射与带动作用的城市群发展研究[C].2022世界交通运输大会(WTC2022)论文集(运输规划与交叉学科篇),2022:603-610.
- [2] 翟玉鑫,张飞龙,马丽娜.近40年新疆三生用地转型及其生态环境效应演变[J].土壤通报,2022,53(3):514-523.
- [3] 张玉凤,李双双,延军平.秦岭—淮南北城市生态安全变化特征及其影响因素[J].长江流域资源与环境,2021,30(11):2736-2745.
- [4] 宓泽锋,曾刚,周灿,等.长三角城市群生态文明建设问题及潜力研究:基于5大城市的比较[J].长江流域资源与环境,2018,27(3):463-472.
- [5] 皮伟强.基于地面高光谱植被指数地表微斑块阈值分类[D].内蒙古呼和浩特:内蒙古农业大学,2018.
- [6] 陈雨焯,王培娟,张源达,等.基于3种遥感指数的东北春玉米干旱识别对比[J].应用气象学报,2022,33(4):466-476.
- [7] 胡荣明,李少杰,马春笑,等.基于遥感影像的铜川市不透水层覆盖变化研究[J].西安科技大学学报,2020,40(3):449-457.
- [8] Hou J, Rusuli Y. Assessment of soil salinization risk by remote sensing-based ecological index (RSEI) in the Bosten Lake watershed, Xinjiang in Northwest China [J]. Sustainability, 2022,14(12):7118.
- [9] 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.
- [10] 柯丽娜,徐佳慧,王楠,等.基于遥感生态指数的滨海湿地生态质量变化评价:以辽东湾北部区为例[J].生态环境学报,2022,31(7):1417-1424.
- [11] 金佳琦.基于遥感生态指数的多源遥感影像沙漠环境监测[D].山东济南:山东大学,2021.
- [12] 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.
- [13] Liu C, Yang M, Hou Y, et al. Spatiotemporal evolution of island ecological quality under different urban densities: a comparative analysis of Xiamen and Kinmen Islands, Southeast China [J]. Ecological indicators, 2021,124:107438.

(下转第210页)

- [16] 刘孝富,舒俭民,张林波.最小累积阻力模型在城市土地生态适宜性评价中的应用:以厦门为例[J].生态学报,2010,30(2):421-428.
- [17] Lin Qian, Mao Jiaying, Wu Jiansheng, et al. Ecological security pattern analysis based on InVEST and least-cost path model: a case study of Dongguan water village [J]. Sustainability, 2016,8(2):172.
- [18] 张豆,渠丽萍,张桀漓.基于生态供需视角的生态安全格局构建与优化:以长三角地区为例[J].生态学报,2019,39(20):7525-7537.
- [19] 谢花林,姚干,何亚芬,等.基于 GIS 的关键性生态空间辨识:以鄱阳湖生态经济区为例[J].生态学报,2018,38(16):5926-5937.
- [20] 陈昕,彭建,刘焱序,等.基于“重要性—敏感性—连通性”框架的云浮市生态安全格局构建[J].地理研究,2017,36(3):471-484.
- [21] 尹海伟,孔繁花,祈毅,等.湖南省城市群生态网络构建与优化[J].生态学报,2011,31(10):2863-2874.
- [22] 谭华清,张金亭,周希胜.基于最小累积阻力模型的南京市生态安全格局构建[J].水土保持通报,2020,40(3):282-288,296,325.
- [23] Su Yongxian, Chen Xiuzhi, Liao Jishan, et al. Modeling the optimal ecological security pattern for guiding the urban constructed landexpansions [J]. Urban Forestry & Urban Greening, 2016,19(6):35-46.
- [24] 王李睿,邓西鹏,王晨,等.基于生态系统服务重要性与生态敏感性的生态空间划设:以福建省永春县为例[J].生态学杂志,2022,41(1):166-173.
- [25] 邓红兵,陈春娣,刘昕,等.区域生态用地的概念及分类[J].生态学报,2009,29(3):1519-1524.
- [26] 陈竹安,况达,危小建,等.基于 MSPA 与 MCR 模型的余江县生态网络构建[J].长江流域资源与环境,2017,26(8):1199-1207.
- [27] 张艺璇,位宏,那嘉明,等.基于 MCR 模型的城市生态安全格局构建:以甘肃省平凉市为例[J].南京师大学报(自然科学版),2021,44(3):54-62.
- [28] 李航鹤,马腾辉,王坤,等.基于最小累积阻力模型(MCR)和空间主成分分析法(SPCA)的沛县北部生态安全格局构建研究[J].生态与农村环境学报,2020,36(8):1036-1045.
- [29] 朱军,李益敏,余艳红.基于 GIS 的高原湖泊流域生态安全格局构建及优化研究:以星云湖流域为例[J].长江流域资源与环境,2017,26(8):1237-1250.
- [30] 吴茂全,胡蒙蒙,汪涛,等.基于生态安全格局与多尺度景观连通性的城市生态源地识别[J].生态学报,2019,39(13):4720-4731.
- [31] 赵宇豪,罗宇航,易腾云,等.基于生态系统服务供需匹配的深圳市生态安全格局构建[J].应用生态学报,2022,33(9):2475-2484.
- [32] 汉瑞英,赵志平,肖能文,等.基于最小累积阻力差值模型的北京市生态安全格局构建[J].水土保持通报,2022,42(3):95-102.

(上接第 161 页)

- [14] 代云豪,管瑶,刘孟琴,等.1990—2020 年阿拉尔垦区生态环境质量动态监测与评价[J].水土保持通报,2022,42(2):122-128.
- [15] 李蕊,陈国清,李玮贤,等.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[J].水土保持通报,2021,41(3):143-151.
- [16] Qureshi S, Alavipanah S K, Konyushkova M, et al. A remotely sensed assessment of surface ecological change over the Gomishan Wetland, Iran [J]. Remote Sensing, 2020,12(18):2989-.
- [17] 何天星,田宁,周锐,等.基于 GEE 和 RSEI 的长三角一体化示范区生态环境质量动态评估[J].生态学杂志,2023,42(2):436-444.
- [18] 刘海龙,王跃飞,谢亚林,等.太原城市群三生空间时空演变特征及功能[J].水土保持通报,2020,40(5):310-318,327.
- [19] 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.
- [20] 徐涵秋,李春强,林梦婧.RSEI 应使用主成分分析或核主成分分析? [J].武汉大学学报(信息科学版),2023,48(4):506-513.
- [21] Li Ning, Wang Jiayao, Qin Fen. The improvement of ecological environment index model RSEI [J]. Arabian Journal of Geosciences, 2020,13:1-14.
- [22] 王芳,李文慧,林妍敏,等.1990—2020 年黄河流域典型生态区生态环境质量时空格局及驱动力分析[J].环境科学,2023,44(5):2518-2527.
- [23] 吴小波,范晓雨,刘晓敬,等.基于 Google Earth Engine 云平台的成渝城市群生态环境质量时空变化[J].生态学杂志,2023,42(3):759-768.
- [24] 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.
- [25] 余伟伟,苏晓杰.开发区转型发展与城市空间结构重组的互动:以山西转型综合改革示范区为例[J].城乡规划,2021(S1):28-35.
- [26] 徐补生,赵建军,马跃.岚县“大生态”战略加快绿化步伐[N].山西日报,2011-05-20(01).