

doi: 10.6046/zrzyyg.2023203

引用格式: 奥勇,汪雅,王晓峰,等. 2001—2020年间河南省郑州市生态环境质量时空变化及驱动因素分析[J]. 自然资源遥感, 2025, 37(1): 102–112. (Ao Y, Wang Y, Wang X F, et al. Spatiotemporal changes of ecological quality and their driving factors in Zhengzhou City over the last 20 years[J]. Remote Sensing for Natural Resources, 2025, 37(1): 102–112.)

2001—2020年间河南省郑州市生态环境质量 时空变化及驱动因素分析

奥勇^{1,2,3}, 汪雅¹, 王晓峰^{1,2,3}, 吴京盛¹, 张亦恒¹, 李雪娇¹

(1. 长安大学土地工程学院, 西安 710054; 2. 陕西省土地整治重点实验室, 西安 710054;
3. 自然资源部退化及未利用土地整治工程重点实验室, 西安 710054)

摘要:生态环境质量是地区发展水平的重要组成部分,客观定量地对其进行长时序动态监测与分析,可为城市可持续发展和生态环境建设提供科学依据。基于 Landsat 遥感影像,通过主成分分析法构建遥感生态指数(remote sensing ecological index, RSEI)作为评价指标,运用 Sen+Mann-Kendall 趋势分析、Hurst 指数、地理探测器探究河南省郑州市 2001—2020 年生态环境质量时空变化特征以及各驱动因子影响程度。研究表明:①2001—2020 年间郑州市整体生态环境质量处于中等水平,生态环境指数呈先下降再上升再下降趋势,空间分布表现为东部平原低、西南山地丘陵高。除 2010 年受高温影响生态环境质量恶化面积大幅增加外,区域总体生态环境质量以不变和轻微改善为主。②2001—2020 年间郑州市生态环境质量变化趋势显著,上升趋势区域占比 56.34%,下降趋势区域占比 42.26%。结合 Hurst 指数,东部生态环境质量下降趋势区域未来变化以持续性特征为主,西南部生态环境质量上升趋势区域未来变化以反持续性特征为主。③驱动力分析表明,2001—2020 年间土地利用类型和人口密度是影响郑州市生态环境质量变化的主要因子,其解释力强度明显高于其他因素。高程和年均降水等自然因素影响逐渐减弱,而反映城市化水平的夜间灯光指数影响力逐渐增强。研究可为郑州市生态环境评价与保护工作提供科学依据。

关键词:生态环境质量; 遥感生态指数; Sen+Mann-Kendall; Hurst 指数; 地理探测器

中图法分类号: X 821; TP 79 **文献标志码:** A **文章编号:** 2097-034X(2025)01-0102-11

0 引言

良好的生态环境是人类生存和可持续发展的基础,对整个人类社会的高质量发展起着至关重要的作用。随着人类活动的增强与城市化进程的快速发展,大气^[1]、土壤污染^[2]、植被退化^[3]、热岛效应^[4]等环境问题日益凸显,对人类生存与发展构成严重威胁。因此,及时准确地对生态环境质量变化进行动态监测逐渐成为学术界与政府相关部门的关注重点,为城市的可持续发展与生态环境保护措施的制定提供参考。

目前,学者们对生态环境质量监测和评价的方法不断发展。我国现行的生态环境综合指标评价标准《生态环境状况评价技术规范》(HJ 192—2015)利用生态状况指数(eco-environment index, EI)计算

区域生态环境质量^[5],但该指数依赖大量统计数据,数据收集难度大,指标权重的设定主观性强,且只适用于县级以上单位,得到的结果为一个具体数值,数据无法可视化,不能有效反映生态环境质量的空间分布和变化特征^[6-7]。而遥感技术凭借实时快速、大规模监测等优势,成为区域生态环境评价的重要手段,在生态环境领域得到了广泛应用。如利用植被指数监测区域植被覆盖度变化^[8],利用建筑指数和地表温度(land surface temperature, LST)评价城市热岛效应^[9],或利用水体指数提取河流信息评价水环境等^[10]。但实际上,生态环境是一个多因素构成的复杂系统,需要利用综合指标来对生态环境进行全面、准确地综合评价。近年来,许多学者探索基于遥感的综合生态指数来评价区域生态环境质量^[11]。其中,集成了归一化植被指数(normalized difference vegetation index, NDVI)、缨帽变换湿度分

收稿日期: 2023-07-11; 修订日期: 2023-09-27

基金项目: 陕西省土地整治重点实验室开放基金项目“污损土地遥感调查与评估研究”(编号: 2018-JC08)和自然资源部“退化及未利用土地整治工程重点实验室”开放基金项目“土壤重金属污染快速识别技术”(编号: SXDJ2019-8)共同资助。

第一作者: 奥勇(1965-),男,博士,副教授,主要从事生态遥感方面研究。Email: aoyong@chd.edu.cn。

量(wetness, Wet)、LST和归一化建筑和裸土指数(normalized difference building and soil index, NDBSI)4个生态指标的遥感生态指数(remote sensing ecological index, RSEI)^[12]完全基于遥感技术,综合多个指标,客观定量地获取地表信息,能够直观可视化地反映区域生态环境质量空间变化,在生态环境监测领域应用十分广泛^[13-15]。王丽春等^[16]等借助RSEI指数实现对玛纳斯湖湿地生态环境的监测和评价,发现日益增强的人类活动使玛纳斯河流域人口、经济与生态环境之间的关系严重失调;赵管乐等^[17]利用RSEI模型,对典型干热河谷区攀枝花市生态环境质量进行分析,指出其生态环境的下降与降水量存在密切关系;权文婷等^[18]基于RSEI对水库流域生态环境变化监测,得到经济发展的同时也要平衡好生态环境治理问题。

郑州市是河南省的省会,也是中原城市群的核心城市、国家重要的中心城市和综合交通枢纽。现有对郑州市生态环境的研究主要集中于黄河流域流经区域的生态环境保护方面^[19-20],但随着郑州城市化进程的加快,其生态环境质量不断发生变化,对郑州市整体生态环境状况的长时序监测与分析具有重要意义。因此,本文采用主成分分析方法构建RSEI模型,对郑州市2001—2020年的生态环境状况进行监测,分析其时空格局与演变趋势,并探究影响生态环境质量变化的关键因素,为郑州市生态环境保护与综合治理提供科学参考。

1 研究区概况与数据源

1.1 研究区概况

郑州市地处河南省中北部(34°16′~34°58′N, 112°42′~114°14′E,图1),黄河中、下游分界处,全市总面积约7 567 km²,下辖1个县、5个县级市、6个区,其中金水区、惠济区、中原区、二七区和管城回族区为郑州市主城区。郑州市地形总趋势西南高、

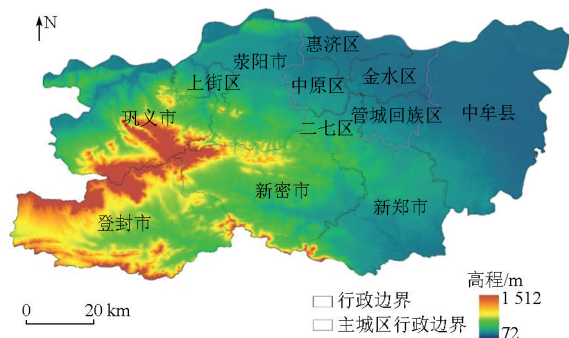


图1 研究区域概况示意图

Fig.1 Location of the study area

东北低,横跨中国第二级和第三级地貌台阶,西部多山地丘陵,东部平原地势平坦,整体平均海拔约108 m。郑州市地处暖温带,四季分明,属温带大陆性季风气候,降水集中在夏季6—8月份,年平均降水量为600~700 mm,境内流域面积较大(≥100 km²)的河流有29条,地跨黄河、淮河2大流域,其中黄河在郑州市境内的支流有伊洛河、汜水河和枯河,淮河在郑州市境内支流有颍河、贾鲁河、运粮河等。

1.2 数据源及其预处理

本研究所用的研究区矢量边界数据来源于中国科学院地理科学与资源研究所(<https://www.resdc.cn/>)。遥感影像数据为Landsat系列影像,来源于美国地质调查局(<http://glovis.usgs.gov/>),由于部分年份影像质量不佳,因此选取2001年、2006年、2010年的Landsat5 TM和2015年、2020年的Landsat8 OLI共5期的遥感影像,空间分辨率为30 m。为保证研究数据的可靠性,所选遥感影像的云量均低于2%,月份集中在5—10月,该时期植被生长状况良好,影像质量佳。在ENVI中对影像进行辐射定标、大气校正、几何纠正、拼接和裁剪、水体掩模等预处理工作。其他数据来源分别为:年平均气温、降水数据来源于国家地球系统科学数据中心(<http://www.geodata.cn/>),空间分辨率为1 000 m;DEM数据来源于地理空间数据云(<https://www.gscloud.cn/>),空间分辨率为90 m,通过ArcGIS从中提取出坡度数据;土地利用类型数据来源于中国科学院地理科学与资源研究所(<https://www.resdc.cn/>),空间分辨率为1 000 m;人口密度以及GDP数据来源于郑州市统计年鉴;夜间灯光数据来源于国家青藏高原科学数据中心(<https://data.tpdc.ac.cn/>),空间分辨率为1 000 m。

2 研究方法

2.1 RSEI

RSEI通过主成分分析方法集成绿度(用NDVI表示)、湿度(用Wet表示)、热度(用LST表示)和干度(用NDBSI表示)4个表征生态环境的指标得到^[12],各指标计算公式见表1。该方法克服了传统单一指标评价的缺点,同时因其完全基于遥感信息获得,避免了主观因素的干预,结果更加客观合理。由于各指标分量之间存在量纲差异,为避免对计算结果造成影响,在进行主成分分析前,需对各指标分量进行归一化处理,使其值映射在[0,1]区间内,计算公式为:

$$NI_i = (I_i - I_{\min}) / (I_{\max} - I_{\min}), \quad (1)$$

式中: NI_i 为归一化处理后的指标值; I_i 为像元 i 处对应的指标值; $I_{\min}$, $I_{\max}$ 分别为对应指标的最小值和最大值。对归一化后的 4 个指标分量进行主成分变换, 对取得的第一主成分 PC1 进行减值运算, 得到初始生态指数 ($RSEI_0$), 而后对 $RSEI_0$ 进行归一化处理最终得到遥感生态指数 ($RSEI$), 其值处于 $[0, 1]$ 区间内, 值越接近于 1, 表明生态环境质量越好。计算公式^[12]为:

表 1 指标计算公式

Tab.1 Indicators calculation equation

指标	计算公式	说明
绿度 (NDVI)	$NDVI = (\rho_{NIR} - \rho_R) / (\rho_{NIR} + \rho_R)$	ρ_{NIR} 为近红外波段反射率; ρ_R 为红光波段反射率
湿度 (Wet)	$Wet_{TM} = 0.0315\rho_B + 0.2021\rho_G + 0.3102\rho_R +$ $0.1594\rho_{NIR} - 0.6806\rho_{SWIR1} - 0.6109\rho_{SWIR2}$ $Wet_{OLI} = 0.1511\rho_B + 0.1973\rho_G + 0.3283\rho_R +$ $0.3407\rho_{NIR} - 0.7117\rho_{SWIR1} - 0.4559\rho_{SWIR2}$	$\rho_B, \rho_G, \rho_R, \rho_{NIR}, \rho_{SWIR1}$ 和 ρ_{SWIR2} 分别为 TM 与 OLI 数据的蓝、绿、红、近红外、短波红外 1 和短波红外 2 波段的反射率数据
热度 (LST)	$LST = K_2 / \ln(K_1 / T + 1)$ $L_A = [\varepsilon T + (1 - \varepsilon)L \downarrow] \tau + L \uparrow$ $T = [L_A - L \uparrow - \tau(1 - \varepsilon)L \downarrow] / \tau \varepsilon$	L_A 为热红外辐射亮度值; T 为黑体热辐射亮度; ε 为地表比辐射率; τ 为大气透过率; $L \uparrow$ 为大气上行辐射亮度; $L \downarrow$ 为大气下行辐射亮度; K_1, K_2 为传感器定标参数
干度 (NDBSI)	$NDBSI = (SI + IBI) / 2$ $SI = [(\rho_{SWIR1} + \rho_R) - (\rho_{NIR} + \rho_B)] / [(\rho_{SWIR1} + \rho_R) + (\rho_{NIR} + \rho_B)]$ $IBI = \left[\frac{2\rho_{SWIR1}}{\rho_{SWIR1} + \rho_R} - \left(\frac{\rho_{NIR}}{\rho_{NIR} + \rho_R} + \frac{\rho_G}{\rho_G + \rho_{SWIR1}} \right) \right] /$ $\left[\frac{2\rho_{SWIR1}}{\rho_{SWIR1} + \rho_R} + \left(\frac{\rho_{NIR}}{\rho_{NIR} + \rho_R} + \frac{\rho_G}{\rho_G + \rho_{SWIR1}} \right) \right]$	SI 为裸土指数; IBI 为建筑指数; $\rho_B, \rho_G, \rho_R, \rho_{NIR}, \rho_{SWIR1}$ 分别为 TM 与 OLI 数据的蓝、绿、红、近红外和短波红外 1 波段的反射率数据

2.2 Sen+Mann-Kendall 趋势分析

Sen+Mann-Kendall 法同时结合了 Sen 趋势估算与 Mann-Kendall 显著性检验, 可有效检验趋势变化的显著性, 减少噪声干扰, 提高检验结果准确度^[21]。

Sen 斜率 (Theil-Sen Median) 估算法是一种非参数统计的趋势分析算法, 对测量误差和离群数据不敏感, 能够避免时间序列数据可能存在的数据缺失或异常等情况的影响^[22], 计算效率较高。其计算公式为:

$$\beta = \text{Median} \left(\frac{X_j - X_i}{j - i} \right), \forall j > i, \quad (4)$$

式中: β 为 $RSEI$ 变化趋势; $\text{Median}()$ 为中值函数; X_i, X_j 分别为第 i, j 时间序列的 $RSEI$ 值; i, j 为时间序列数。当 $\beta > 0$ 时, 表示 $RSEI$ 呈上升趋势; 当 $\beta < 0$ 时, 表示 $RSEI$ 呈下降趋势。

Mann-Kendall 法作为一种非参数的时间序列趋势显著性检验方法, 不需要测量值符合正态分布, 也不受缺失值和异常值的干扰^[23], 因此, 结合该方法对 Sen 序列趋势进行显著性检验。检验统计量 s 计算公式为:

$$RSEI_0 = 1 - \{PC1[f(NDVI, WET, NDBSI, LST)]\}, \quad (2)$$

$$RSEI = (RSEI_0 - RSEI_{0min}) / (RSEI_{0max} - RSEI_{0min}), \quad (3)$$

式中: $RSEI_0$ 为 $RSEI$ 初始值; $PC1$ 为 4 个指标分量经主成分变换后得到的第一主成分; $RSEI$ 为最终遥感生态指数; $RSEI_{0min}$ 和 $RSEI_{0max}$ 分别为对应 $RSEI_0$ 的最小值和最大值。

$$s = \sum_{i=1}^n \sum_{j=i+1}^n \text{sgn}(x_j - x_i), \quad (5)$$

式中: $\text{sgn}()$ 为函数符号, 计算公式为:

$$\text{sgn}(x_j - x_i) = \begin{cases} 1 & (x_j - x_i > 0) \\ 0 & (x_j - x_i = 0) \\ -1 & (x_j - x_i < 0) \end{cases}. \quad (6)$$

使用检验统计量 Z 进行趋势检验, 计算公式为:

$$Z = \begin{cases} \frac{s-1}{\sqrt{V(s)}} & (s > 0) \\ 0 & (s = 0) \\ \frac{s+1}{\sqrt{V(s)}} & (s < 0) \end{cases}, \quad (7)$$

式中: 方差 $V(s) = n(n-1)(2n+5)/18$; n 为序列中数据个数。对数据采用双边趋势检验, 显著水平定为 0.05, 当 $|Z| > 1.96$ 时 $RSEI$ 变化趋势显著, 当 $|Z| \leq 1.96$ 时 $RSEI$ 变化趋势不显著^[24]。

2.3 Hurst 指数

Hurst 指数是定量描述长时间序列数据长期持续性的有效方法, 在水文学^[25] 和生态学^[26] 等领域广泛应用。本文采用重标极差 (rescaled range, $R/$

S) 分析法对 Hurst 指数进行计算,从而分析研究区 RSEI 可持续性特征。

对于给定时间序列 $\{RSEI_t\}, t = 1, 2, \dots, n$, 定义该时间序列均值序列,其计算公式为:

$$\overline{RSEI_T} = \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T RSEI_t, T = 1, 2, \dots, n, \quad (8)$$

对于 T 内的所有时刻, t 时刻的累计离差为:

$$X(t, T) = \sum_{i=1}^t (RSEI_i - \overline{RSEI_T}), 1 \leq t \leq T. \quad (9)$$

定义极差序列 R 为:

$$R_t = \max_{0 \leq t \leq T} X(t, T) - \min_{0 \leq t \leq T} X(t, T), t = 1, 2, \dots, n, \quad (10)$$

定义标准差序列 S 为:

$$S = \sqrt{\frac{1}{T} \sum_{t=1}^T [RSEI_t - \overline{RSEI_T}]^2}, t = 1, 2, \dots, n. \quad (11)$$

对于极差数列 R 与标准差序列 S 之间的比值 R/S , 若存在 $R/S \propto t^H$, 则分析的给定时间序列 $\{RSEI_t\}$ 存在 Hurst 现象, H 称为 Hurst 指数, H 值的大小可以反映时间序列的随机性或持续性特征。当 $0 < H < 0.5$ 时, 表明 RSEI 序列数据具有反持续性, 未来与过去的变化趋势相反, 且 H 值越接近 0, 反持续性越强; 当 $H = 0$ 时, 表明 RSEI 序列数据具有随机性, 即未来与过去的变化趋势相互独立; 当 $0.5 < H < 1$ 时, 表明 RSEI 序列数据是一个持续性序列, 未来与过去的变化趋势正相关, 且 H 值越接近 1, 持续性越强。

2.4 地理探测器

地理探测器是由王劲峰等^[27]提出的用于检验空间分异性以及各因素之间相互影响程度的空间统计分析模型。本研究选取因子探测和交互探测来探究影响郑州市生态环境质量空间分异的因素以及各因素之间的相互作用关系。

1) 因子探测。因子探测可用于检验各自变量因子对因变量空间分异性的解释程度。其计算公式为:

$$q = 1 - \frac{1}{N \sigma^2} \sum_{h=1}^L N^h \sigma_h^2, h = 1, 2, \dots, L, \quad (12)$$

式中: q 为驱动因子对因变量的解释力程度; L 为驱动因子或自变量的分级数; N^h , N 分别为不同分级区域和全区域的样本数; σ_h^2 , σ^2 分别为不同分级区域和全区域的因变量方差。 q 值越大, 说明该驱动因子对因变量的解释力越高。

2) 交互探测。交互探测可用于检验不同驱动因子之间是否具有交互作用以及对因变量空间分异性的影响, 即因子间的相互作用会增强还是减弱对因变量空间分异性的解释力, 不同 q 值范围对应的交互作用分为以下 5 种类型, 如表 2 所示。

表 2 因子交互作用类型

Tab.2 Types of factors interaction

q 值范围	交互作用类型
$q(X_1 \cap X_2) < \min[q(X_1), q(X_2)]$	非线性减弱
$\min[q(X_1), q(X_2)] < q(X_1 \cap X_2) < \max[q(X_1), q(X_2)]$	单线性减弱
$\max[q(X_1), q(X_2)] < q(X_1 \cap X_2) < q(X_1) + q(X_2)$	双因子增强
$q(X_1 \cap X_2) = q(X_1) + q(X_2)$	相互独立
$q(X_1 \cap X_2) > q(X_1) + q(X_2)$	非线性增强

3 结果与分析

3.1 RSEI 检验

对研究区各个年份的 4 个分量指标进行主成分分析, 得到不同年份第一主成分载荷与贡献率。由表 3 可知, 4 个分量指标中的绿度指标 (NDVI) 与湿度指标 (WET) 为正值, 热度指标 (LST) 与干度指标 (NDBSI) 为负值, 说明绿度、湿度对遥感生态指数 (RSEI) 具有正向影响, 而热度、干度对 RSEI 为负向影响。从分量指标数值大小来看, 绿度与干度载荷的绝对值大于湿度和热度, 说明绿度和干度对 RSEI 的贡献度更高, 影响更大。同时, 研究区 5 个年份第一主成分 PC1 特征值贡献率的平均值为 80.04%, 其中最高值为 85.13% (2010 年), 最低值为 76.18% (2001 年), 各年贡献率均超过 75%, 表明 PC1 能够集成 4 个指标的主要特征信息, 可用于构建 RSEI。

表 3 不同年份第一主成分载荷与贡献率

Tab.3 Load and contribution rate of the PC1 in different years

年份	第一主成分 PC1				贡献率/%
	绿度 NDVI	湿度 WET	热度 LST	干度 NDBSI	
2001 年	0.716	0.277	-0.304	-0.608	76.18
2006 年	0.648	0.292	-0.341	-0.646	78.03
2010 年	0.668	0.319	-0.362	-0.674	85.13
2015 年	0.730	0.285	-0.324	-0.617	81.39
2020 年	0.667	0.317	-0.310	-0.624	79.46
平均值	0.686	0.298	-0.328	-0.634	80.04

为验证 RSEI 模型的适用性, 以《生态环境状况评价技术规范》(HJ 192—2015) 中的 EI 指数^[5]为参考进行对比分析。通过国家生态环境部发布的环境状况公报及查阅相关资料^[28]得知, 2015—2020 年

郑州市 EI 值域为 61.4~63.5,因其是百分制,为方便对比将其换算为小数 0.614~0.635。而实际计算得到的 2015—2020 年郑州市 RSEI 值域为 0.605~0.613,与 EI 指数的差值小于 0.04,且各市区县环境质量等级相对一致,因此通过构建 RSEI 模型评价郑州市生态环境质量与标准 EI 指数评价结果没有明显差异,可用于表征区域生态环境质量变化状况。

3.2 生态环境质量时空变化

通过主成分分析计算得到郑州市 2001—2020 年的 RSEI 均值分别为 0.608,0.596,0.565,0.613 和 0.605,总体表现为先下降再上升再下降的趋势。为更准确地定量评价郑州市 RSEI 的时空变化,根据《生态环境评价技术规范》(HJ 192—2015),将郑州市 RSEI 以 0.2 为间隔,划分为差[0,0.2]、较差

(0.2,0.4]、中等(0.4,0.6]、良(0.6,0.8]、优(0.8,1]这 5 个生态环境质量等级。由图 2 可知,郑州市多年生态环境质量总体处于中等水平,并表现出较为显著的地理分异,生态质量较差等级区域不断向东部转移。2001 年郑州市生态环境质量较差区域主要分布在西南部登封市、巩义市、新密市等山地丘陵地区与市中心区域,东、西部平原的新郑市、中牟县和荥阳市等地生态质量较好;2006—2020 年,登封市、巩义市和新密市等西南部山地丘陵地区环境质量得到明显改善,生态环境质量等级由较差转变为以中等和良为主;而主城区与新郑市、中牟县等东部平原地区生态环境相较于 2001 年逐渐恶化,较差等级区域不断向东扩张,整体生态环境质量等级以中等和较差为主。

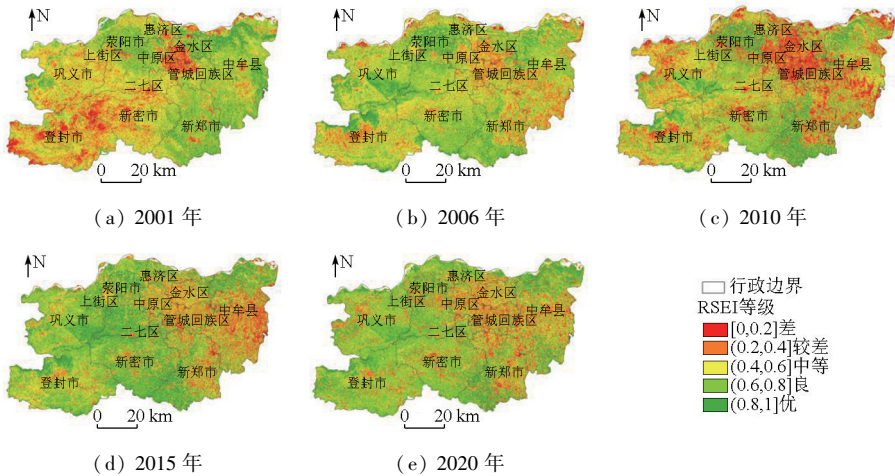


图 2 2001—2020 年郑州市 RSEI 等级分布

Fig.2 Distribution of RSEI in Zhengzhou City from 2001 to 2020

由表 4 可知,2001—2020 年郑州市生态环境质量等级总体以中等和良为主,占总面积的 50% 以上。评级为差与较差区域的面积变化具有一定的波动性,2010 年与 2020 年呈增加趋势,其中 2010 年较差等级面积增至最大,达到 1 702.43 km²,占总面积的 22.96%,2001—2020 年间总体呈下降趋势;中

等区域所占面积逐渐减少,由 33.64% 下降到 21.05%;良和优等级的区域面积占比呈明显的上升趋势,由 39.85% 上升到 58.10%,面积增加了 1 352.72 km²。综上所述,郑州市 2001—2020 年生态环境质量优、良等级面积持续增加,中等、较差等级面积不断减少,生态环境质量不断改善。

表 4 2001—2020 年郑州市生态环境质量等级面积与占比

Tab.4 Areas and proportions of ecological environment quality levels in Zhengzhou City from 2001 to 2020

等级	2001 年		2006 年		2010 年		2015 年		2020 年	
	面积/km ²	占比/%	面积/km ²	占比/%	面积/km ²	占比/%	面积/km ²	占比/%	面积/km ²	占比/%
差	469.67	6.33	130.67	1.76	797.53	10.76	395.93	5.34	416.12	5.61
较差	1 495.85	20.17	1 269.94	17.13	1 702.43	22.96	1 114.97	15.04	1 129.83	15.24
中等	2 494.00	33.64	2 328.42	31.40	1 951.10	26.31	1 624.60	21.91	1 560.85	21.05
良	2 217.18	29.90	2 581.36	34.82	1 912.03	25.79	2 369.05	31.95	2 836.95	38.26
优	737.75	9.95	1 104.06	14.89	1 051.36	14.18	1 909.90	25.76	1 470.70	19.84

3.3 生态环境质量演变分析

表 5 为郑州市生态环境质量等级变化情况。由表 5 可知,2001—2006 年,不变和改善面积占总面积的 77.61%,其中轻微改善(级差为 1)的面积占比

为 33.10%,生态环境质量呈现稳中向好趋势。2006—2010 年,生态环境质量恶化面积占总面积的 41.99%,改善面积占比 15.51%,较 2001—2006 年分别增加了 19.6% 和降低了 29.92%,整体生态环境呈

恶化趋势。2010—2015年,郑州市生态环境处于改善趋势,质量改善面积占比52.92%并以轻度改善为主。2015—2020年,郑州市生态环境质量等级不变面积占比45.51%,质量改善和恶化面积分别占比

30.25%和24.24%,差值为6.01%,生态环境质量仍处于改善趋势但改善幅度减弱。总的来说,2001—2020年近20a间郑州市生态环境呈现改善趋势,质量等级以不变和轻度改善为主。

表5 2001—2020年郑州市生态环境质量等级变化情况

Tab.5 Changes of ecological environment quality levels in Zhengzhou City from 2001 to 2020

变化类型	级差	2001—2006年		2006—2010年		2010—2015年		2015—2020年	
		面积/km ²	占比/%	面积/km ²	占比/%	面积/km ²	占比/%	面积/km ²	占比/%
恶化	-4	13.46	0.18	27.97	0.38	28.86	0.39	27.93	0.38
	-3	112.02	1.51	122.13	1.65	133.68	1.80	123.85	1.67
	-2	447.65	6.04	470.84	6.35	320.10	4.32	386.55	5.21
	-1	1 086.67	14.66	2 492.23	33.61	763.36	10.30	1 259.32	16.98
不变	0	2 385.91	32.18	3 150.79	42.50	2 244.54	30.27	3 373.99	45.51
改善	1	2 454.52	33.10	962.53	12.98	2 671.43	36.03	1 711.14	23.08
	2	829.84	11.19	157.67	2.13	989.91	13.35	381.61	5.15
	3	79.16	1.07	27.74	0.37	216.73	2.92	121.01	1.63
	4	5.22	0.07	2.55	0.03	45.84	0.62	29.05	0.39

从生态环境质量等级变化的空间分布(图3)来看,2001—2006年,郑州市生态环境质量恶化区域主要分布在金水区、中牟县和新郑市等东部平原地区,改善区域主要位于西南部登封市、巩义市和新密市等山地丘陵区,其中明显改善区域位于山脉高海拔地区。2006—2010年,郑州市生态环境质量以不变和轻微恶化为主,生态环境恶化区域主要位于主城区和西南丘陵地区,空间分布较为分散,没有明显改善区域。2010—2015年,郑州市生态环境质量显著提升并以轻度改善为主,明显改善区域主要位于

主城区与西部山地丘陵区,恶化区域主要分布在荥阳市、中牟县和新郑市等低海拔平原地区。2015—2020年,郑州市生态环境质量以不变为主,轻微恶化区域主要分布在荥阳市、登封市和新郑市等中部地区,东、西两侧区域以轻度改善为主。总的来看,2001—2020年郑州市生态环境质量等级变化的空间分布特征与2001—2006年和2010—2015年相似,主城区与西南山地丘陵区环境质量以改善为主,东、西部平原地区环境质量以恶化为主,且恶化区域分布较为分散,没有明显汇集区。

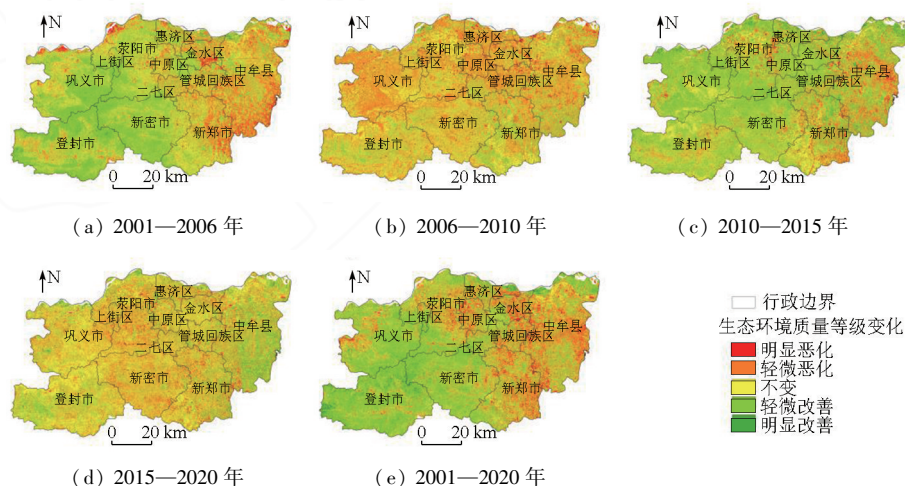


图3 2001—2020年郑州市生态环境质量等级变化空间分布

Fig.3 Spatial distribution of change in ecological quality grade of Zhengzhou City from 2001 to 2020

3.4 生态环境质量发展趋势

Sen趋势估算与Mann-Kendall显著性检验相结合得到郑州市RSEI变化趋势和变化显著性,由图4可知,2001—2020年近20a间郑州市RSEI变化以轻微上升趋势为主,上升趋势区域面积占比达到全市总面积的56.34%,主要分布在巩义市、登封市和新密市等西南部海拔较高地区,该区域生态环境质

量逐年改善。但随着郑州城市化的快速发展和土地利用方式的转变,人类活动对生态环境的影响加剧,主城区周边以及荥阳市、中牟县和新郑市等东、西部平原地区RSEI呈不断下降趋势,占全市总面积的42.26%。RSEI保持稳定不变的区域仅占全市总面积的1.4%,生态环境质量变化稳定区域很少,郑州市整体生态环境质量变化趋势较为显著。

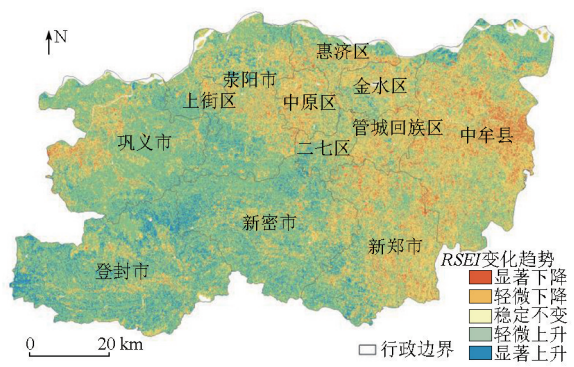


图 4 2001—2020 年郑州市 RSEI 变化趋势
Fig.4 Change trend of RSEI in Zhengzhou City from 2001 to 2020

采用 Hurst 指数来进一步分析郑州市 RSEI 变化趋势的可持续性特征,如图 5 所示。2001—2020 年郑州市 RSEI 的 Hurst 指数值在 0.056~0.99 之间,平均值为 0.67,表现为以持续性为主。Hurst 指数值低于 0.5 的区域面积为 1 072.27 km²,占总面积 14.46%,主要分布在西南部箕山和嵩山山脉地区,该区域 RSEI 未来变化趋势反持续性特征较为明显。Hurst 指数值高于 0.5 的区域分布广泛,占总面积 85.54%,其中高于 0.7 的区域占 50.38%,主要分布在人类活动较强的主城区周边以及荥阳市、中牟县和新郑市等东、西部平原地区,RSEI 未来变化表

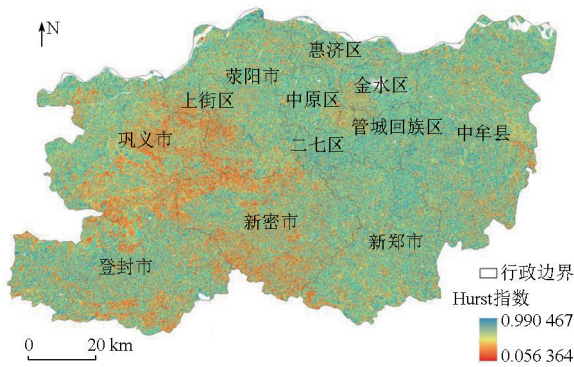


图 5 2001—2020 年郑州市 RSEI 变化 Hurst 指数
Fig.5 Change of RSEI and Hurst index in Zhengzhou City from 2001 to 2020

现出较强的持续性特征。结合图 4 总体分析,2001—2020 年间 RSEI 上升趋势的区域未来表现具有反持续性特征,而 RSEI 下降趋势的区域未来将保持持续性特征。这表明郑州市生态环境质量受人类活动扰动较大,未来整体生态环境质量具有持续性下降趋势,政府需不断加强地区生态保护工程建设,尤其是表现出持续性下降趋势的东、西部平原地区。

3.5 生态环境质量驱动因子分析

相关研究表明生态环境质量变化受多种自然因素和人文因素共同影响^[29-31],结合研究需要,本文选取覆盖气象(气温、降水),地形(高程、坡度),社会经济(人口密度、国内生产总值(gross domestic product,GDP))和人为干扰(土地利用类型、夜间灯光数据)等方面共 8 种典型驱动因子作为自变量 X ,研究区 RSEI 作为因变量 Y ,探究郑州市生态环境质量变化的驱动机制。为整合不同数据源自变量因子的空间特征,利用 ArcGIS 软件创建研究区 1 km×1 km 格网,提取格网中心点处变量值,根据 q 值最大化原则,采用分位数断点法和自然断点法将连续变量最优离散化,从而得到最佳探测结果。

3.5.1 单因子探测分析

因子探测结果如表 6 所示,所选自变量因子均对因变量 RSEI 的空间分异性具有显著影响($P < 0.05$),不同驱动因子各年 q 值的变化具有一定波动性。土地利用类型与人口密度对因变量 RSEI 的解释力最强,平均值分别为 0.257 和 0.246,不同年份的 q 值排序交替位列前 2 名,明显高于其他因子;坡度因子的多年 q 值均保持在 0.1 以下,最高值仅为 2010 年的 0.096,对多年 RSEI 变化没有明显的驱动作用;高程、夜间灯光数据、年均气温、GDP 和年均降水这 6 个驱动因子的 q 均值依次降低,介于 0.1~0.2 之间,对 RSEI 空间分异性解释力一般,其中高程和年均气温的 q 值分别从 2001 年的 0.264 和 0.232 逐渐降至 2020 年的 0.137 和 0.123,排序也分别从第 1 和第 3 分别降至第 3 和第 5,二者对 RSEI

表 6 因子探测结果

Tab.6 Results of single detection

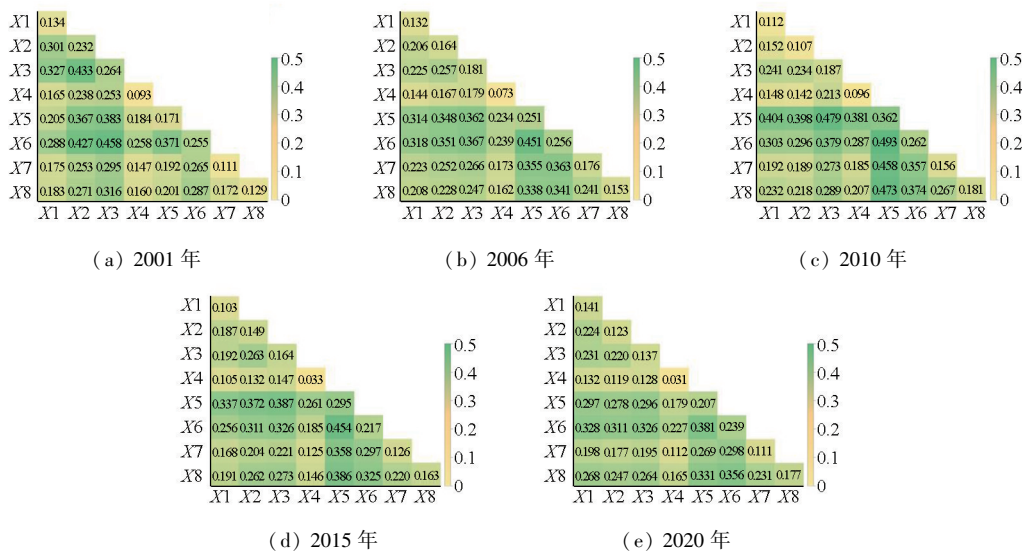
因子类型	2001 年		2006 年		2010 年		2015 年		2020 年		2000—2020 年	
	q 值	排序	q 值	排序	q 值	排序	q 值	排序	q 值	排序	q 值	排序
年均降水	0.134	5	0.132	7	0.112	6	0.103	7	0.141	4	0.124	7
年均气温	0.232	3	0.164	5	0.107	7	0.149	6	0.123	6	0.155	5
高程	0.264	1	0.181	3	0.187	3	0.164	3	0.137	5	0.186	3
坡度	0.093	8	0.073	8	0.096	8	0.033	8	0.031	8	0.065	8
土地利用类型	0.171	4	0.251	2	0.362	1	0.295	1	0.207	2	0.257	1
人口密度	0.255	2	0.256	1	0.262	2	0.217	2	0.239	1	0.246	2
GDP	0.111	7	0.176	4	0.156	5	0.126	5	0.111	7	0.136	6
夜间灯光数据	0.129	6	0.153	6	0.181	4	0.163	4	0.177	3	0.161	4

的解释力强度呈下降趋势,而夜间灯光数据的 q 值从 2001 年的 0.129 升至 2020 年的 0.177,解释力强度呈逐渐上升趋势。探测结果表明,社会经济、人为干扰因子对生态环境质量变化的影响大于气象和地形因子,并且随着城市化的快速发展,人类活动对生态环境的影响力也逐渐增强。

3.5.2 因子交互探测分析

对驱动因子进行交互探测分析,结果如图 6 所示,各因子间的交互作用均表现为非线性增强和双因子增强这 2 种交互类型,表明因子间协同作用对郑州市生态环境质量变化产生的影响力高于原有单因子,并呈现出一定的规律性。土地利用类型与人口密度的交互值除 2001 年为 0.371 外,其余 4 个年

份均为最高值,其交互作用对区域生态环境质量的影响最显著;并且高程、土地利用类型和人口密度与任一因子的交互值,明显高于该因子与其他因子之间的交互值,说明这 3 个因子对郑州市生态环境质量的变化起着关键作用;对比单因子探测结果,坡度因子与其他因子的交互值得到显著提升,且均表现为非线性增强效果,说明解释力低的单因子与其他因子交互作用下影响力更明显;夜间灯光数据与其他因子交互作用的影响力逐渐提高,尤其是与年均气温和年均降水的交互影响,说明城市化发展对区域气温与降水等自然因素的干扰加剧,进而更加显著地影响区域生态环境质量。



X1 为年平均降水; X2 为年平均气温; X3 为高程; X4 为坡度; X5 为土地利用类型; X6 为人口密度; X7 为 GDP; X8 为夜间灯光数据

图 6 2001—2020 郑州市 RSEI 驱动因子交互探测结果

Fig.6 Interaction detection results of RSEI influencing factors in Zhengzhou City from 2001 to 2020

4 讨论与结论

4.1 讨论

本研究通过主成分分析法集成绿色、湿度、热度和干度指标构建 RSEI 模型,定量客观的对郑州市 2001—2020 年近 20 a 间综合生态环境质量进行监测,并对监测结果进行趋势分析与驱动力检验,深入探究其时空变化特征及规律。

研究结果表明,利用第一主成分构建 RSEI 模型能够有效表征区域整体生态环境质量。2001—2020 年郑州市 RSEI 均值整体处于中等水平,呈现先下降再上升再下降趋势,2010 年最低值,2015 年最高值,这与卢楠楠^[32]和 Guo 等^[33]对郑州市生态环境的研究结果基本一致。从 RSEI 时空分布和演变来看,与 2001 年郑州市生态环境质量西南部较

差,东部较好情况相比,2006—2020 年,郑州市西南部山地丘陵地区环境质量得到明显改善,生态环境质量等级由较差转变为以中等和良为主;而主城区与东部平原地区生态环境逐渐恶化,且较差等级区域不断向东扩张,恶化区域分散分布在城镇周边。造成这种明显地理分异的原因主要是郑州市实施的“十年造林绿化规划”,植树造林,恢复森林植被,郑州市西部荒山丘陵沟壑区的荒山绿化取得了显著成效,生态环境质量逐渐增强。而主城区与东部平原地区随着社会经济发展城市与耕地不断扩张,人类活动不断增强对区域生态环境质量造成一系列干扰,生态环境质量逐渐恶化。从 RSEI 发展趋势来看,2001—2020 年间郑州市整体生态环境质量变化以轻微上升趋势为主,占总面积 56.34%,主要分布在西南部海拔较高地区,但该区域的 Hurst 指数值多低于 0.5,表现为反持续性特征;而呈下降趋势的

区域主要分布在主城区周边及东、西部平原等地区,其 Hurst 指数值普遍高于 0.5,多表现为持续性特征,由此来看,由于城镇不断扩张,未来郑州市整体生态环境质量可能会有所下降,尤其是人类活动频繁的东部平原地区。对影响区域生态环境质量的驱动因子进行探测,发现郑州市生态环境质量的变化受多种因子的共同作用,其中反映地表覆被变化情况和人类活动强弱的土地利用类型和人口密度因子解释力最强,对郑州市生态环境质量变化起主导作用;同时反映区域城市化发展水平的夜间灯光指数影响力逐渐增强,高程和年均降水等自然因子影响力逐渐减弱,进一步说明城镇化建设和人类活动对郑州市生态环境的干扰加剧,发展的同时也应兼顾生态保护需要,实现经济与生态环境的协调发展。

生态环境是一个涉及多方面的复杂系统,气候、地形和生物等都会对质量产生一定影响。本研究驱动机制分析主要选取气象和地形因子代表自然要素,土地利用类型和典型社会经济因子代表人文要素,后续研究可进一步结合光照、生态保护工程、人口迁徙等指标提高因子覆盖度,从而更全面的检验生态环境影响因素。

4.2 结论

1)主成分分析结果表明,不同年份第一主成分贡献率均在 75%以上,RSEI 能够精准高效地表征区域生态环境质量。2001—2020 年郑州市整体生态环境质量处于中等水平,生态环境指数呈先下降再上升再下降趋势,空间分布表现为东部平原低、西南山地丘陵高。除 2010 年受高温影响生态环境质量恶化面积大幅增加外,区域总体生态环境质量以不变和轻微改善为主。

2)2001—2020 年郑州市生态环境质量变化趋势显著,上升趋势区域占比 56.34%,下降趋势区域占比 42.26%。结合 Hurst 指数,东部生态环境质量下降趋势区域未来变化以持续性特征为主,西南部生态环境质量上升趋势区域未来变化以反持续性特征为主。

3)驱动力分析表明,2001—2020 年 20 a 间土地利用类型和人口密度是影响郑州市生态环境质量变化的主要驱动因子,其解释力强度明显高于其他因素。高程和年均降水等自然因素影响逐渐减弱,而反映城市化水平的夜间灯光数据影响力逐渐增强,人类活动对区域生态环境的影响进一步加深。

参考文献 (References):

[1] 熊欢欢,梁龙武,曾 赠,等.中国城市 PM2.5 时空分布的动态比较分析[J].资源科学,2017,39(1):136-146.

Xiong H H,Liang L W,Zeng Z,et al.Dynamic analysis of PM2.5 spatial-temporal characteristics in China[J].Resources Science, 2017,39(1):136-146.

[2] Zeng S Y, Ma J, Yang Y J, et al.Spatial assessment of farmland soil pollution and its potential human health risks in China[J].Science of the Total Environment, 2019, 687: 642-653.

[3] 罗红霞,戴声佩,李茂芬,等.海南岛植被覆盖变化驱动因子及相对作用评价[J].国土资源遥感,2020,32(1):154-161.doi: 10.6046/gtzyyg.2020.01.21.

Luo H X,Dai S P,Li M F, et al.Relative roles of climate changes and human activities in vegetation variables in Hainan Island[J]. Remote Sensing for Land and Resources, 2020, 32(1): 154-161. doi: 10.6046/gtzyyg.2020.01.21.

[4] 胡楠林,任志彬,董禹麟,等.中国城市群热岛效应时空演变及其影响因素分析[J].地理科学,2022,42(9):1534-1545.

Hu N L,Ren Z B,Dong Y L, et al.Spatio-temporal evolution of heat island effect and its driving factors in urban agglomerations of China[J].Scientia Geographica Sinica, 2022, 42(9): 1534-1545.

[5] 中华人民共和国环境保护部.HJ 192—2015 生态环境状况评价技术规范[S].北京:中国环境科学出版社,2015.

Ministry of Environmental Protection of the People's Republic of China.HJ 192—2015 Technical criterion for ecosystem status evaluation[S].Beijing:China Environmental Science Press, 2015.

[6] Jing Y,Zhang F,He Y, et al.Assessment of spatial and temporal variation of ecological environment quality in Ebinur Lake Wetland National Nature Reserve, Xinjiang, China[J].Ecological Indicators, 2020, 110: 105874.

[7] 张 洁,杨燕琼.珠江三角洲城市群生态状况变化遥感评价[J].西北林学院学报,2019,34(1):184-191.

Zhang J,Yang Y Q.Remote sensing evaluation on the change of ecological status of Pearl River Delta urban agglomeration[J].Journal of Northwest Forestry University, 2019, 34(1): 184-191.

[8] 张芳宁,杨亮洁,杨永春.1981—2016 年黄土高原植被 NDVI 变化及对气候和人类活动的响应[J].水土保持研究, 2023, 30(2): 230-237.

Zhang F N,Yang L J,Yang Y C.Change of vegetation NDVI and its response to climatic and human activities in the Loess Plateau during 1981—2016[J].Research of Soil and Water Conservation, 2023, 30(2): 230-237.

[9] 王 阳,孙然好.区域气候背景对城市热岛效应的影响规律[J].生态学报,2021,41(11):4288-4299.

Wang Y, Sun R H.Impacts of regional climate on urban heat islands in China[J].Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(11): 4288-4299.

[10] 温小乐,徐涵秋.福州城市扩展对闽江下游水质影响的遥感分析[J].地理科学,2010,30(4):624-629.

Wen X L,Xu H Q.Remote sensing analysis of impact of Fuzhou City expansion on water quality of lower Minjiang River, China[J]. Scientia Geographica Sinica, 2010, 30(4): 624-629.

[11] Musse M A, Barona D A, Santana Rodriguez L M.Urban environmental quality assessment using remote sensing and census data [J].International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2018, 71: 95-108.

[12] 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.
- [13] Karbalaie Saleh S, Amoushahi S, Gholipour M. Spatiotemporal ecological quality assessment of metropolitan cities: A case study of central Iran[J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2021, 193(5): 305.
- [14] Airiken M, Zhang F, Chan N W, et al. Assessment of spatial and temporal ecological environment quality under land use change of urban agglomeration in the North Slope of Tianshan, China[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2022, 29(8): 12282–12299.
- [15] 李世杰, 冯微微, 王珍, 等. 近十年洞庭湖流域生态环境状况时空动态特征及影响因素[J]. *自然资源遥感*, 1–10. doi: 10.6046/zrzyyg.2022375.
- Li S J, Feng H H, Wang Z, et al. Spatial and temporal dynamic characteristics and influencing factors of ecological environment in Dongting Lake Basin in recent 10 years[J]. *Remote sensing of natural resources*, 1–10. doi: 10.6046/zrzyyg.2022375.
- [16] 王丽春, 焦黎, 黎风兵, 等. 基于遥感生态指数的新疆玛纳斯湖湿地生态变化评价[J]. *生态学报*, 2019, 39(8): 2963–2972.
- Wang L C, Jiao L, Lai F B, et al. Evaluation of ecological changes based on a remote sensing ecological index in a Manas Lake wetland, Xinjiang[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, 39(8): 2963–2972.
- [17] 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[J]. *山地学报*, 2021, 39(6): 842–854.
- Zhao G Y, Peng P H. RSEI-based evaluation on ecological environment changes in typical dry hot valley: Panzhihua City, Sichuan, China[J]. *Mountain Research*, 2021, 39(6): 842–854.
- [18] 权文婷, 张树誉, 刘艳, 等. 基于遥感生态指数的陕西省东庄水库流域生态环境变化监测与评价[J]. *水土保持通报*, 2022, 42(5): 96–104, 113.
- Quan W T, Zhang S Y, Liu Y, et al. Monitoring and evaluation of ecological environment changes in Dongzhuang Reservoir basin in Shaanxi Province based on remote sensing ecological index[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2022, 42(5): 96–104, 113.
- [19] 李元应, 郑琳琳. 基于黄河流域生态环境保护视域下郑州与焦作绿色城市建设问题探究[J]. *现代园艺*, 2022, 45(8): 158–160.
- Li Y Y, Zheng L L. On the construction of green cities in Zhengzhou and Jiaozuo from the perspective of ecological environment protection in the Yellow River basin[J]. *Contemporary Horticulture*, 2022, 45(8): 158–160.
- [20] 尚明宇, 王富强, 马尚钰. 郑州市土地利用/覆被变化模拟预测及其水源涵养量计算评估[J]. *水利水电技术(中英文)*, 2023, 54(1): 75–86.
- Shang M Y, Wang F Q, Ma S Y. Prediction of land use/cover change and evaluation of water conservation function in Zhengzhou City[J]. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 2023, 54(1): 75–86.
- [21] 王佃来, 刘文萍, 黄心渊. 基于Sen+Mann-Kendall的北京植被变化趋势分析[J]. *计算机工程与应用*, 2013, 49(5): 13–17.
- Wang D L, Liu W P, Huang X Y. Trend analysis in vegetation cover in Beijing based on Sen+Mann-Kendall method[J]. *Computer Engineering and Applications*, 2013, 49(5): 13–17.
- [22] 李超, 李雪梅. 2000—2018年中国植被生态质量时空变化特征[J]. *长江流域资源与环境*, 2021, 30(9): 2154–2165.
- Li C, Li X M. Characteristics of spatio-temporal variation of ecological quality for vegetation in China from 2000–2018[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2021, 30(9): 2154–2165.
- [23] 王巨. 基于时序NDVI植被变化检测与驱动因素量化方法研究——以河西地区为例[D]. 兰州: 兰州大学, 2020.
- Wang J. Methods for detecting vegetation changes and quantifying the driving factors using NDVI timeseries by taking Hexi as a case area[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2020.
- [24] 康帅直, 穆琪, 赵永华, 等. 黄土高原神府资源开采区生态环境质量时空格局特征[J]. *生态学报*, 2023, 43(7): 2781–2792.
- Kang S Z, Mu Q, Zhao Y H, et al. Temporal and spatial pattern characteristics of ecological environmental quality in Shenfu mining area of Loess Plateau[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2023, 43(7): 2781–2792.
- [25] 孔晶晶, 咎梅, 王雪梅, 等. 新疆玛纳斯河流域植被水分利用效率时空格局及影响因素研究[J]. *水资源与水工程学报*, 2022, 33(6): 196–203, 212.
- Kong J J, Zan M, Wang X M, et al. Spatiotemporal pattern of vegetation water use efficiency and its influencing factors in Manas River basin, Xinjiang[J]. *Journal of Water Resources and Water Engineering*, 2022, 33(6): 196–203, 212.
- [26] Wu S, Gao X, Lei J, et al. Ecological environment quality evaluation of the Sahel region in Africa based on remote sensing ecological index[J]. *Journal of Arid Land*, 2022, 14(1): 14–33.
- [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.
- Wang J F, Xu C D. Geodetector: Principle and prospective[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2017, 72(1): 116–134.
- [28] 邢昱, 赵颖, 唐敏, 等. 河南省“十三五”期间生态环境质量变化趋势[J]. *中国环境监测*, 2022, 38(6): 40–49.
- Xing Y, Zhao Y, Tang M, et al. Trends in eco-environmental quality in Henan Province during the 13th Five-Year Plan period[J]. *Environmental Monitoring in China*, 2022, 38(6): 40–49.
- [29] 田智慧, 尹传鑫, 王晓蕾. 鄱阳湖流域生态环境动态评估及驱动因子分析[J]. *环境科学*, 2023, 44(2): 816–827.
- Tian Z H, Yin C X, Wang X L. Dynamic monitoring and driving factors analysis of ecological environment quality in Poyang Lake basin[J]. *Environmental Science*, 2023, 44(2): 816–827.
- [30] 王栋华, 田义超, 张亚丽, 等. 峰丛洼地流域植被覆盖度时空演变及其归因[J]. *中国环境科学*, 2022, 42(9): 4274–4284.
- Wang D H, Tian Y C, Zhang Y L, et al. Spatiotemporal evolution and attribution of vegetation coverage in the peak-cluster depression basins[J]. *China Environmental Science*, 2022, 42(9): 4274–4284.
- [31] Gao P, Kasimu A, Zhao Y, et al. Evaluation of the temporal and spatial changes of ecological quality in the Hami oasis based on RSEI[J]. *Sustainability*, 2020, 12(18): 7716.
- [32] 卢楠楠. 基于遥感的不透水面监测及其对生态环境质量的影响——以郑州开封地区为例[D]. 开封: 河南大学, 2022.
- Lu N N. Monitoring of impervious surface based on remote sensing and its impact on ecological environment quality[D]. Kaifeng:

Henan University, 2022.

[33] Guo H, Zhang B, Bai Y, et al. Ecological environment assessment

based on remote sensing in Zhengzhou[J]. IOP Conference Series;

Earth and Environmental Science, 2017, 94:012190.

Spatiotemporal changes of ecological quality and their driving factors in Zhengzhou City over the last 20 years

AO Yong^{1,2,3}, WANG Ya¹, WANG Xiaofeng^{1,2,3}, WU Jingsheng¹, ZHANG Yiheng¹, LI Xuejiao¹

(1. School of Land Engineering, Chang'an University, Xi'an 710054, China; 2. Shaanxi Key Laboratory of Land Consolidation, Xi'an 710054, China; 3. Key Laboratory of Degraded and Unused Land Consolidation Engineering, Ministry of Natural Resource, Xi'an 710054, China)

Abstract: Ecological quality is an important indicator of a regional development level. Objective, quantitative dynamic monitoring and analysis of long-term ecological quality can provide a scientific basis for urban sustainable development and ecological construction. Based on Landsat remote sensing images, this study constructed the remote sensing ecological index (RSEI) as an evaluation index using principal component analysis. Accordingly, this study explored the spatiotemporal change characteristics of ecological quality in Zhengzhou from 2001 to 2020, as well as the extent of influence of various driving factors, using the Sen+Mann-Kendall trend analysis, the Hurst index, and geographical detectors. The results indicate that from 2001 to 2020, Zhengzhou maintained moderate ecological quality overall. The RSEI showed downward, upward, and then downward trends sequentially. Spatially, the eastern plains showed lower ecological quality, whereas the southwestern mountainous and hilly areas exhibited higher ecological quality. The regional ecological quality remained unchanged predominantly or saw slight improvements over these years except for 2010, when the area of zones with ecological quality deteriorating significantly increased due to high temperature. From 2001 to 2020, the ecological quality in Zhengzhou exhibited significant trends, with 56.34% of areas showing an upward trend and 42.26% exhibiting a downward trend. These results, along with the Hurst index, reveal that the downward trend in ecological quality in the eastern part is primarily characterized by sustainable changes in the future, while the upward trend in ecological quality in the southwestern partition is primarily characterized by anti-sustainable changes in the future. Driving force analysis indicates that over the 20 years, primary factors influencing changes in ecological quality in Zhengzhou included land use type and population density, whose explanatory power is significantly stronger than other factors. The impact of natural factors, such as elevation and average annual precipitation, has gradually diminished, while the influence of the night light index, which reflects the urbanization level, has progressively increased. The results of this study will provide a scientific basis for the evaluation and preservation of ecosystems in Zhengzhou.

Keywords: ecological quality; remote sensing ecological index; Sen-Mann-Kendall; Hurst index; geodetector

(责任编辑: 李 瑜)