引文格式：李开放,周万蓬,赵智坤,等. 基于RSEI的亳州市生态环境质量时空变化与驱动力分析[J]. 地理空间信息, 2026, 24(5): 62-68. doi:10.3969/j.issn. 1672-4623.2026.05.012

基于RSEI的亳州市生态环境质量时空变化与驱动力分析

李开放[1,2]，周万蓬[1,2*]，赵智坤[1,2]，曾琦琪[1,2]，孟　聪[1,2]
（1. 东华理工大学 江西省数字国土重点实验室，江西 南昌 330013；2. 东华理工大学 核资源与环境国家重点实验室，江西 南昌 330013）

摘　要：为科学评估亳州市生态环境质量时空演变特征及其驱动因素，选取2000年、2006年、2010年、2016年和2021年5期Landsat遥感影像数据构建遥感生态指数（RSEI），采用差值变化分析和地理探测器等方法分析2000—2021年亳州市生态环境质量时空变化特征和驱动因子。结果表明：①2000—2021年亳州市生态环境质量呈逐渐变好趋势，RSEI均值增幅达37.45%；②亳州市整体生态环境质量改善、保持不变、恶化区域占比分别为61.84%、18.50%、19.66%；③植被覆盖度对亳州市生态环境影响最大，植被覆盖度、年均气温和年均降水是影响生态环境变化的主导因素。结合地理探测器模型与多源遥感数据，系统解析了自然与人文因子的交互作用机制，为农业生态区的可持续管理提供了方法学参考。

关键词：RSEI；生态环境变化；地理探测器；亳州市
中图分类号：TU984　　**文献标志码：**B　　**文章编号：**1672-4623（2026）05-0062-07

Spatio-temporal Changes and Driving Force Analysis of Ecological Environment Quality in Bozhou City, Anhui Province, China Based on RSEI

LI Kaifang[1,2], ZHOU Wanpeng[1,2], ZHAO Zhikun[1,2], ZENG Qiqi[1,2], MENG Cong[1,2]
(1. Key Laboratory for Digital Land and Resources of Jiangxi Province, East China University of Technology, Nanchang 330013, China;
2. Jiangxi Provincial Key Laboratory of Genesis and Prospect for Strategic Minerals, East China University of Technology, Nanchang 330013, China)

Abstract: In order to scientifically evaluate the spatio-temporal evolution characteristics of ecological environment quality and the driving factors, we selected Landsat remote sensing image data of five periods in 2000, 2006, 2010, 2016 and 2021 to build a remote sensing ecological index (RSEI), and used the difference change analysis method and GeoDetector to analyze the spatio-temporal change characteristics and driving factors of ecological environment quality in Bozhou City, Anhui Province, China from 2000 to 2021. The results show that ①from 2000 to 2021, the ecological environment quality of Bozhou City shows a gradual improvement trend, the average RSEI with an increase of 37.45%. ②The improvement area, unchanged area, and deterioration area of ecological environment quality in Bozhou City accounted for 61.84%, 18.50%, 19.66%, respectively. ③The vegetation coverage has the greatest impact on the ecological environment in Bozhou City. The interactive detection shows that vegetation coverage and average annual temperature and precipitation are the leading factors affecting the changes of ecological environment. Combining GeoDetector model with multi-source remote sensing data, we systematically analyzed the interaction mechanism between natural and human factors, providing a methodological reference for the sustainable management of agricultural ecological zones.

Key words: RSEI, ecological environment change, GeoDetector, Bozhou City

生态环境是人类生存和发展的重要物质基础和空间[1]。随着国民经济的快速增长，城镇工业化规模的不断扩张和人口规模的急剧增长加大了人类对生态环境的影响，从而导致生态系统退化[2]、生物多样性锐减[3]、濒危物种灭绝、温室效应加重等问题。了解和掌握生态环境时空变化趋势是生态环境保护的重要前提，对城市的生态文明建设和可持续发展具有重要意义。生态环境质量评价作为早期的生态环境评价方法[4-7]，往往基于单一遥感指标进行评价，只能反映生态系统中某一个问题，而仅凭单一指标评价复合生态环境是不完善的。因此，徐涵秋[8]首次提出遥感生态指数（RESI）的概念，利用主成分分析技术集成植被指数（NDVI）、湿度分量（WET）、地表温度（LST）和建筑裸土指数（NDBSI）4个评价指标，分别代表绿度、湿度、热度和干度4大生态要素[9]。多重指标既能对区域生态环境进行客观定量评价，又能对生态环境演变进行时空性分析和可视化显示[10]。RSEI中的湿度、绿度、热度、干度指标原始数据均可从遥感影像

基金项目：江西省数字国土重点实验室开放基金资助项目（DLLJ202005）。
第一作者简介：李开放（1998—），硕士研究生，研究方向为环境遥感，E-mail：likaifang828@163.com。
通信作者：周万蓬（1973—），博士，副教授，研究方向为区域地质、遥感地质等，E-mail：wpzhou@ecut.edu.cn。

中直接获得[11]。利用RSEI评价生态环境质量可避免主观因素导致的权重定义误差[12]，且RSEI模型更加简洁，计算量更小。本文利用RSEI模型结合地理探测器分析了亳州市2000—2021年生态环境质量变化及其驱动因素，可为当地生态环境保护提供数据参考。

1　研究区概况与数据来源

1.1　研究区概况

亳州市地处安徽省西北部、华北平原南端，是皖豫两省交界处，地理范围为32°51′~35°05′N、115°53′~116°49′E[13]，下辖涡阳县、蒙城县、利辛县和谯城区，占地面积为8 374 km^2；境内地势较平坦，西北高、东南低，地貌特征为大平小不平；季风较明显，光照时间长，降水充足，季节分明，为农业与中药材种植提供了良好条件；辖区内河流属淮河水系，涡河为主干流，还包括西淝河、茨淮新河、北淝河小区域水域等。充足的水资源与适合耕种的土地为保障粮食和区域经济发展提供了资源支撑。

1.2　数据来源与预处理

本文的遥感数据选用地理空间数据云（https://www.gscloud.cn/）提供的5景LandsatL1T产品数据，影像时间跨度为21年，分辨率为30 m。为获取植被旺盛和作物长势较好的影像，本文选取5—9月云量最少的影像（表1）。为避免水体对指数的影响，本文采用修正后的归一化水体指数对水体进行掩膜提取并剔除。植被覆盖度（FVC）来源于国家青藏高原数据中心，年均降水量（PRE）、年均气温（TEM）来源于国家地球系统科学数据中心，DEM来源于地理空间数据云，人口密度（PEO）来源于LandScan网站，夜间灯光（NPP-VIIRS）数据来源于参考文献[14]，已更新至2000—2023年全球范围500 m分辨率的类NPP-VIIRS夜间灯光数据，土地利用（LUCC）数据来源于中国科学院地理科学与资源研究所，行政区划边界来源于资源环境数据与科学平台。

利用ArcGIS10.8软件对所有数据进行投影坐标矫正；采用最邻近重采样方法将所有数据的空间分辨率重采样至1 000 m；对数据进行掩膜提取和离散化处理，创建像元大小为1 km×1 km的网格，为后续地理探测做准备。采用自然断点法对驱动因子进行分层，通过最大化层内同质性和层间异质性来确保分组的科学性与可解释性。根据各因子数据的分布特征，本文将FVC、NPP-VIIRS、DEM分为10类；2000—2010年LUCC数据分为4类、2016—2021年LUCC数据分为6类；PEO分为9类；PRE、TEM分为15类。

表1　遥感影像数据

卫星类型	成像日期	云量/%	传感器类型	波段数
Landsat7	2000-09-14	0	ETM+	8
Landsat5	2006-05-02	6.00	TM	7
Landsat5	2010-09-18	0.02	TM	7
Landsat8	2016-09-02	0.60	OLI	11
Landsat8	2021-07-30	1.21	OLI	11

2　研究方法

2.1　RSEI及其归一化

RSEI是评价区域生态质量的综合指标，由NDVI、WET、LST和NDBSI四个地表参数组成。由于各地表参数的量纲不统一，将影响实验过程中的指标数值，因此需进行归一化处理，将范围统一至0~1区间，以消除量纲影响[15]。对各指标进行归一化后，再通过ENVI5.6软件将其合成一个新的图层，然后对新图层进行主成分分析，最后得到初始RSEI（RSEI$_0$），RSEI越接近1，表明生态环境质量越好，反之则越差[16-17]。

绿度指标通常用NDVI表示[18]，计算公式为：

$$NDVI=(\rho_{NIR}-\rho_{RED})/(\rho_{NIR}+\rho_{RED})$$

式中，ρ_{NIR}为近红外波段；ρ_{RED}为红外波段。

为了有效减少数据冗余，更加精确地反演土壤湿度，采用缨帽变换的湿度分量进行计算[19]。其计算公式为：

$$WET=B_1\rho_{BLUE}+B_2\rho_{GREEN}+B_3\rho_{RED}+B_4\rho_{NIR}+B_5\rho_{SWIR1}+B_6\rho_{SWIR2}$$

式中，ρ_{BLUE}、ρ_{GREEN}、ρ_{RED}、ρ_{NIR}、ρ_{SWIR1}、ρ_{SWIR2}分别为蓝光、绿光、红光、近红外、中红外1和中红外2波段；B_1、B_2、B_3、B_4、B_5、B_6为波段参数，对应TM传感器分别为0.031 5、0.202 1、0.310 2、0.159 4、−0.680 6、−0.610 9，对应OLI传感器分别为0.151 1、0.197 3、0.328 3、0.340 7、−0.711 7、−0.455 9，对应ETM+传感器分别为0.262 6、0.214 1、0.092 6、0.065 6、−0.762 9、−0.538 8。

NDBSI为城市建筑指数（IBI）和裸土指数（*SI*）的平均值，范围为[−1,1]，值越大，表示越干燥[20]。

$$SI=[(\rho_{SWIR1}+\rho_{RED})-(\rho_{NIR}+\rho_{BLUE})]/[(\rho_{SWIR1}+\rho_{RED})+(\rho_{NIR}+\rho_{BLUE})]$$

$$IBI=2\rho_{SWIR1}/(\rho_{SWIR1}+\rho_{NIR})-[\rho_{NIR}/(\rho_{NIR}+\rho_{RED})+\rho_{GREEN}/(\rho_{GREEN}+\rho_{NIR})]/2\rho_{SWIR1}/(\rho_{SWIR1}+\rho_{NIR})+\left[\rho_{NIR}/(\rho_{NIR}+\rho_{RED})+\rho_{GREEN}/(\rho_{GREEN}+\rho_{NIR})\right]$$

热度指标通过经地表比辐射率校正后的LST表示，计算公式为：

$$LST=\frac{T}{\left[1+\left(\frac{\lambda\times T}{\xi}\right)\ln\varepsilon\right]}-273$$

$$T=\frac{K_2}{\ln(K_1/L_6+1)}$$

$$L=\text{Gain}\times DN+\text{Bias}$$

式中，T 为传感器处温度；L_6 为辐射定标后的热红外波段反射率；K_1、K_2 为定标参数，K_1 在 Landsat TM、Landsat ETM、Landsat OLI 中分别为 774.89、666.09、774.89 W/(m²·μm·sr)，K_2 在 Landsat TM、Landsat ETM、Landsat OLI 中分别为 1 260.56、1 282.71、1 321.08 K；Gain、Bias 为热红外波段的增益值和偏置值；λ 为热红外波段中心波长；ε 为地表比辐射，具体指标见参考文献[21]。

2.2 地理探测器

地理探测器是分析因变量和自变量空间分布格局一致性的工具，以度量因变量对自变量的解释能力，通过 q 值表示，越接近1，因子的解释力越强[22-23]。根据科学性和研究区的可用性，本文以研究区自然人文影响因子为自变量，RSEI 为因变量，利用地理探测器进探测[24]，q 值越大，表明影响因子对 RSEI 空间分异特征的解释力越强[25]。

交互探测器主要是探测因子之间的交互作用，即判断不同因子之间组合是否会影响因变量 Y 的解释力。首先计算每个影响因子的 q 值，再求出每两个影响因子相互作用的 q 值，最后进行比较。根据研究需求，本文主要采用因子探测和交互探测两种方法来揭示亳州市生态环境空间的影响因素，从多源数据多角度分析各因子之间的交互作用对亳州市生态环境的影响。

3 研究结果与分析

3.1 RSEI 主成分分析结果

亳州市 2000—2021 年 RSEI 与各分量指标的主成分分析结果见表2，可以看出，第一主成分（PC1）对 RSEI 的贡献率为67.00%~89.00%，说明 PC1 包含了各指标的大多数信息，因此基于 PC1 的 RSEI 评价亳州市生态环境质量是可行的。2000—2021 年 NDVI、WET 的荷载值为正值，表明这两个指标对生态环境质量起到正向效应，与现实情况相符，指标值越高，说明该地区地表 FVC 越高，土壤水分充足，对生态环境起到积极作用[26]；NDBSI 和 LST 的荷载值均为负值，与对生态环境起负向效应的情况相符。其他主成分的指标值不存在规律性，很难解释生态环境现象，因此本文通过 PC1 构建 RSEI。

表2 亳州市2000—2021年主成分分析结果

年份	指标	第1主成分	第2主成分	第3主成分	第4主成分
2000	NDVI	0.472	0.553	0.560	0.396
	WET	0.538	−0.073	−0.704	0.458
	NDBSI	−0.532	−0.253	0.137	0.796
	LST	−0.452	0.790	−0.414	0.021
	特征值	0.208 2	0.022 2	0.010 4	0.000 8
	贡献率/%	86.17	9.19	4.29	0.34
2006	NDVI	0.492	0.436	0.629	0.415
	WET	0.527	0.029	−0.725	0.442
	NDBSI	−0.538	−0.269	0.083	0.795
	LST	−0.437	0.858	−0.269	0.023
	特征值	0.208 8	0.019 3	0.007 1	0.001 2
	贡献率/%	88.34	8.17	2.99	0.50
2010	NDVI	0.562	0.422	−0.493	0.513
	WET	0.464	−0.141	0.792	0.370
	NDBSI	−0.635	−0.089	−0.002	0.767
	LST	−0.256	0.891	0.359	−0.107
	特征值	0.143 5	0.043 7	0.020 1	0.003 9
	贡献率/%	67.94	20.70	9.49	1.87
2016	NDVI	0.517	0.338	0.668	0.414
	WET	0.490	0.064	−0.717	0.492
	NDBSI	−0.589	−0.238	0.102	0.766
	LST	−0.382	0.908	−0.172	0.012
	特征值	0.177 0	0.034 1	0.011 9	0.000 7
	贡献率/%	79.13	15.26	5.30	0.30
2021	NDVI	0.538	0.123	0.731	0.400
	WET	0.524	0.164	−0.679	0.487
	NDBSI	−0.607	−0.161	0.050	0.776
	LST	−0.259	0.965	0.031	−0.004
	特征值	0.168 4	0.026 1	0.015 1	0.000 8
	贡献率/%	80.06	12.39	7.19	0.36

3.2 亳州市生态质量分析

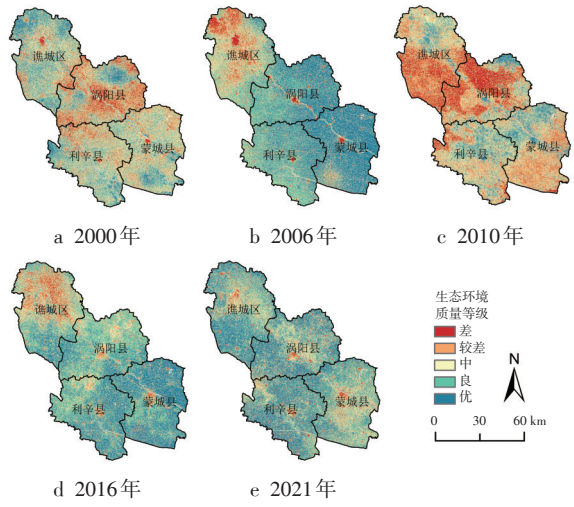
2000—2021 年亳州市 4 个指标和 RSEI 均值见表3，可以看出，NDVI 均值整体呈波动上升趋势，由 0.532 增至 0.792，增幅达到 48.87%；WEI 与其相似，但上升速率较慢。NDVI 与 WEI 的上升，可能与“十三五”期间全市修复废弃矿山有关，随着植树造林、生态防护等措施的实施，FVC 增加。LST 均值的变化趋势与前两者完全相反，2010 年 LST 达到最大值 0.580，但 2021 年降至 0.339，其间波动较大，整体呈下降趋势；NDBSI 与　其相似，均呈下降趋势，但幅度波动较小。RSEI 均值呈逐渐上升趋势，表明亳州市生态环境质量在 21 年间有较明显的提升。

表3 亳州市RSEI与各指标均值

年份	NDVI	WET	NDBSI	LST	RSEI
2000	0.532	0.528	0.536	0.483	0.510
2006	0.665	0.686	0.403	0.349	0.650
2010	0.634	0.618	0.437	0.580	0.575
2016	0.770	0.652	0.347	0.423	0.670
2021	0.792	0.663	0.331	0.339	0.701

3.3　生态环境等级与时空变化分析

1）生态环境质量等级变化分析。为进一步对RSEI进行可视化分析，参考《生态环境质量评价技术规范》和相关研究[27]将5期主成分变化后的RSEI划分为5个等级，即优(0.8,1.0]、良(0.6,0.8]、中(0.4,0.6]、较差(0.2,0.4]、差(0,0.2]。亳州市生态环境质量等级和各等级的面积见图1、表4。2000年亳州市中部涡阳县生态环境质量以差为主，环境恶化较严重，北部谯城区与南部利辛县、蒙城县以中、良为主；2006年生态环境质量差等级向北部转移，谯城区以差为主，且相对集中，涡阳县、蒙城县、利辛县整体生态环境以良、优为主，东南部蓝色较深，西南部以浅篮色为主；2010年等级再次出现变化，北部地区生态环境质量好转，由差向较差、中等转变，中南部部分地区则由良、优转向中、较差；2016年整体生态环境等级与2021年相似，除小区域的城镇地区等级为差外，大多数区域以良、优为主，中等次之。



a 2000年　b 2006年　c 2010年　d 2016年　e 2021年

图1　亳州市生态环境质量等级差值变化

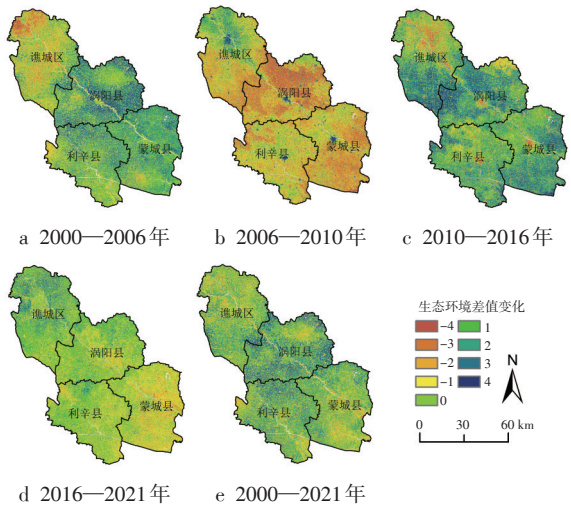
审图号：GS(2024)0650

表4　亳州市2000—2021年生态环境质量等级面积

RSEI等级	2000年		2006年		2010年		2016年		2021年	
	面积/km²	占比/%	面积/km²	占比/%	面积/km²	占比/%	面积/km²	占比/%	面积/km²	占比/%
差	879.01	10.47	486.96	5.74	441.89	5.22	376.92	4.45	356.47	4.35
较差	1 816.48	21.63	881.15	10.39	1 127.08	13.32	697.56	8.24	563.64	6.87
中	2 606.67	31.04	1 445.01	17.03	2 525.80	29.85	1 461.95	17.26	1 174.54	14.32
良	2 194.47	21.13	3 144.27	37.06	3 583.65	42.35	3 208.92	37.89	2 924.05	35.66
优	900.85	10.73	2 526.76	29.78	783.83	9.26	2 723.79	32.16	3 431.87	38.80
合计	8 397.48	100	8 484.16	100	8 462.25	100	8 469.14	100	8 450.58	100

由表4可知，亳州市各年份的总面积并不相等，主要由于生成RSEI时对水体进行了掩膜提取并剔除，水体面积并未计算在内。研究区生态环境质量明显变好，其中差、较差等级面积共减少了1 775.38 km²，占比减少了20.88%；生态等级不变区域的面积减少了1 432.13 km²，占比由31.04%降至14.32%；良、优等级面积整体呈持续增加趋势，良等面积占比由21.13%增至35.66%，优等面积占比由10.73%增至38.80%，增幅超2.6倍，2021年良、优等级面积超过研究区总面积的74.46%。2000—2021年亳州市生态环境质量优、良等级面积持续增加，差、较差等级面积持续减少，说明21年间亳州市整体生态环境质量得到大幅改善。

2）生态环境质量动态变化趋势分析。为进一步分析亳州市近21年的生态环境质量空间差异变化情况，以生态环境等级图为基础，对5个年份的RSEI进行差值变化检测（图2），并对结果进行重分类。将生态环境差值划分为变差（包括明显恶化−4、−3、−2和轻微恶化−1）、不变0、变好（包括轻微改善+1和明显改善+2、+3、+4）3个类别，5个等级，并对各级别变化面积及其占比进行统计。结果表明（表5），2000—2006年生态环境质量改善面积为4 657.60 km²，占比为55.49%，集中在亳州市南部；质量不变区域占比为16.11%；质量恶化区域占比为28.39%，主要分布在亳州市北部谯城区一带。2006—2010年质量轻微恶化与明显恶化的区域明显增加，占比分别为22.11%、21.77%，质量不变区域的面积为2 367.27 km²，占比为28.44%。2010—2016年和2016—2021年的生态环



a 2000—2006年　b 2006—2010年　c 2010—2016年　d 2016—2021年　e 2000—2021年

图2　RSEI差值变化检测

审图号：GS(2024)0650

表5 亳州市2000—2021年RSEI差值检测

类别	极差	2000—2006年		2006—2010年		2010—2016年		2016—2021年		2000—2021年	
		面积/km²	占比/%	面积/km²	占比/%	面积/km²	占比/%	面积/km²	占比/%	面积/km²	占比/%
明显恶化	−4、−3、−2	1 147.97	13.68	1 812.33	21.77	508.92	6.03	417.55	4.96	655.71	7.83
轻微恶化	−1	1 235.11	14.72	1 840.60	22.11	1 337.31	15.85	1 576.31	18.71	990.38	11.83
不变	0	1 352.51	16.11	2 367.27	28.44	2 542.85	30.14	3 599.96	42.72	1 548.61	18.50
轻微改善	+1	1 514.37	18.04	1 527.92	18.35	2 291.74	27.16	2 064.45	24.50	1 865.25	22.28
明显改善	+2、+3、+4	3 143.23	37.45	776.28	9.33	139.20	1.65	767.86	9.11	3 312.87	39.57

境质量整体呈现稳中改善、持续向好的趋势，质量改善区域占比为33.61%与47.98%。相较于2010—2016年，2016—2021年质量不变区域占比约为42.72%，表明该时期整个研究区生态环境质量趋向于改善。2011—2015年亳州市进入加强环保体系建设时期，逐步完善相关生态环境法律法规，落实各种环境保护政策，采取了空气质量改善、水资源保护、固废处理和退耕还林等措施。2016年以来，亳州市采取污染防治攻坚和绿色发展等保护环境措施，开展“蓝天保卫战”与生态文明建设，同时启动相应的湿地生态修复、生态公园建设、生态廊道建设等重点工程。2000—2021年亳州市整体生态环境质量改善面积为5 178.12 km²，占比为61.84%；质量不变区域面积为1 548.61 km²，占比为18.50%；质量恶化区域面积占比约为19.66%，主要表现为轻微恶化（11.83%），仅有7.83%的区域出现明显恶化。生态环境的改善得益于各项生态环境治理和保护措施，也得益于农业信息化项目、生态文明建设、乡村振兴相关政策的实施。

3.4 生态环境质量成因分析

1）单因子探测分析。为更好地探析亳州市生态环境质量变化的主要驱动机制，本文采用地理探测器模型，根据相关研究[28-29]结合亳州市实际情况，分析了自然与人文因子对生态环境质量的影响作用。自然因子包括FVC、PRE、TEM、DEM，人文因子包括PEO、NPP-VIIRS、LUCC。通过计算多年q值均值（表6）得出各因子对研究区生态环境影响程度的排序为FVC>TEM>DEM>PRE>NPP-VIIRS>PEO>LUCC。FVC、TEM、DEM、PRE对亳州市RSEI的空间分异特征具有显著影响；NPP-VIIRS、PEO、LUCC对生态环境质量变化的影响较小。从单因子探测来看，自然因子对亳州市生态环境质量的影响大于人文因子，但人为活动同样会对自然因子造成影响，如人口密度增加将影响气候、建设用地、水资源等，因此会间接影响生态环境。

表6 单因子探测结果

影响因子	2000年		2006年		2010年		2016年		2021年	
	q值	排序	q值	排序	q值	排序	q值	排序	q值	排序
FVC	0.063 0	3	0.160 2	3	0.054 9	3	0.218 7	1	0.235 9	1
LUCC	0.002 1	5	0.001 5	7	0.003 2	7	0.005 9	7	0.024 0	6
PEO	0.000 6	7	0.042 0	6	0.009 4	6	0.050 4	6	0.055 1	3
TEM	0.107 1	1	0.233 4	1	0.097 0	1	0.116 1	2	0.032 0	5
PRE	0.037 5	4	0.088 6	4	0.048 6	4	0.105 1	4	0.048 8	4
NPP-VIIRS	0.001 6	6	0.043 5	5	0.024 4	5	0.107 2	3	0.124 6	2
DEM	0.080 5	2	0.180 2	2	0.056 2	2	0.071 0	5	0.004 0	7

2）多因子交互探测分析。为分析不同影响因子共同作用对RSEI的影响，本文采用多因子交互探测分析。结果表明，研究区2000—2021年因子交互探测结果均为双因子增强和非线性增强，说明交互探测作用强于单因子作用[30]。由图3可知，2000年和2010年PRE和TEM的交互作用对RSEI的影响最大，解释力分别为q_{2000}=0.176 2和q_{2010}=0.177 8；2006年FVC与TEM的交互作用对RSEI的影响最大，解释力为q_{2006}=0.385 5；2016年、2021年FVC和PRE的相互作用对RSEI的解释力最大，解释力分别为q_{2016}=0.327 3和q_{2021}=0.266 8；总体来看，2000—2021年FVC与TEM的交互作用对亳州市生态环境质量变化起主要作用。交互探测分析可知，LUCC、PEO、DEM单因子解释力较弱，但与FVC、PRE、TEM等因子交互作用后具有较强的解释力，说明各影响因子对生态环境的影响并不局限于单个因子，也不是两个因子的简单叠加，而是一种相互加强或非线性加强的效果。

RSEI模型集成了NDVI、WET、LST和NDBSI四个生态环境指标，可以很好地反映亳州市2000—2021年生态环境质量变化情况。值得注意的是，2010年PC1贡献率显著下降至67.94%（图4），RSEI均值与NDVI

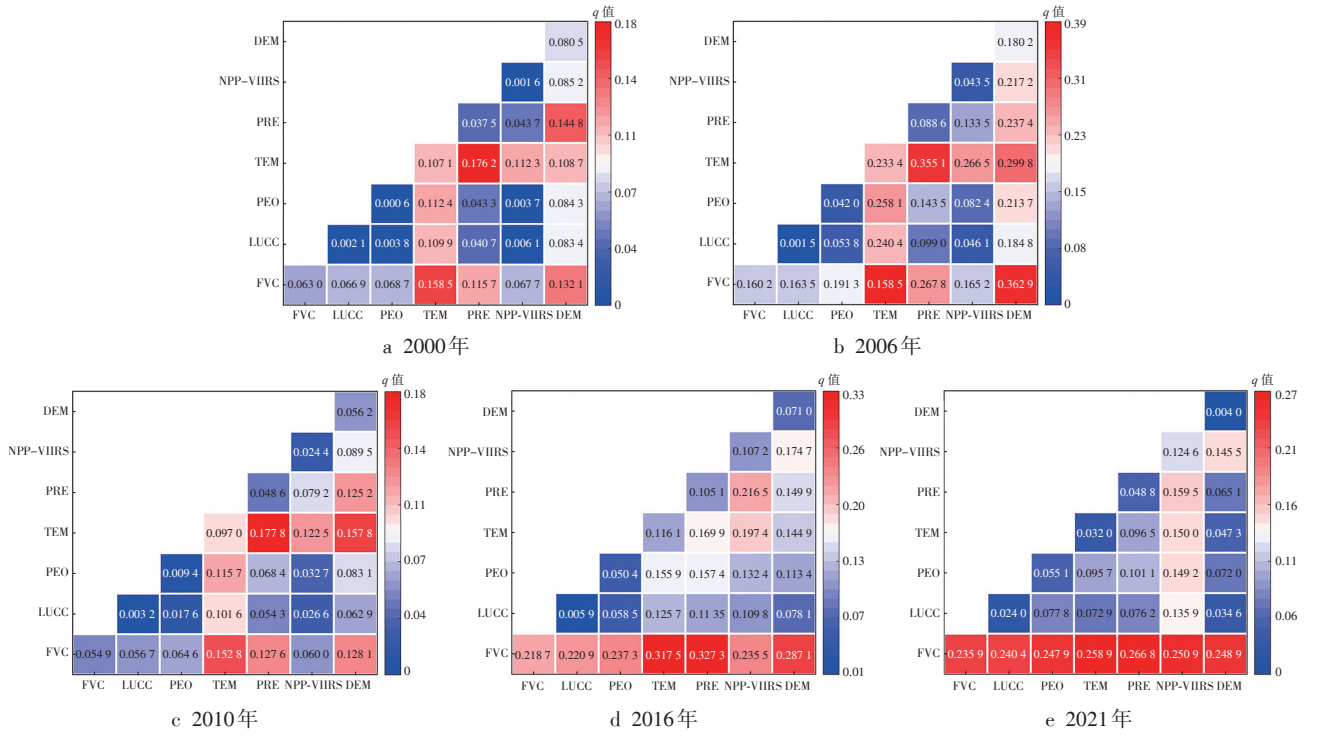


图3　亳州市2000—2021年影响因子交互探测结果

和WET均值变化一致，但在2006—2010年整体指标发生较大变化，对生态环境起促进作用的NDVI和WET均值下降，起负效应的LST和NDBSI均值增大，与此同时RSEI均值也出现相同下降趋势，这可能与该年极端气候事件导致指标异常波动有关。气象数据显示，2010年亳州市遭遇罕见干旱，导致NDVI和WET指标偏离常态，进而影响主成分权重分配。尽管如此，PC1贡献率仍高于65.00%，表明其能有效解释生态指标的主要信息，RSEI模型的稳健性未受显著影响。

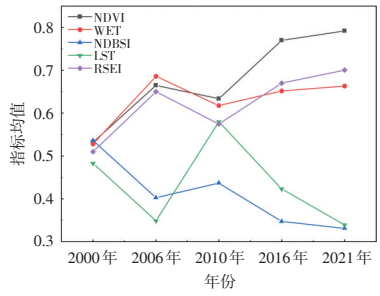


图4　亳州市2000—2021年各指标与RSEI均值变化

交互探测结果表明，FVC与气候因子的协同交互作用主导着生态质量的变化，生态环境的改善也离不开相关政策的实施。2010年《亳州市林业发展报告》中指出，亳州市自2003年实施退耕还林工程以来，累计退耕面积达120 km²，FVC年均增长率达2.10%，但同期PRE下降8.00%，2010年RSEI均值短暂下降至0.575。值得注意的是，在干旱胁迫条件下，FVC与PRE的交互作用对遏制生态退化发挥了关键作用；“十二五”期间，亳州市出台《生态市建设规划》，推行城市绿化覆盖率不低于35.00%的政策，到2016年，谯城区绿化面积增加18.00%，NDVI均值由0.634升至0.770。同时，PRE回升，植被与降水的交互作用推动RSEI均值提升至0.670；在“十三五”期间，亳州市实施“蓝天保卫战”与“中药材生态种植示范区”建设，限制建设用地扩张，并通过滴灌技术提高农业用水效率，缓解了高温对植被的影响。FVC与PRE的交互作用持续主导生态改善，2021年生态环境质量达到较高水平，RSEI均值达到0.701。

4　结　论

本文基于RSEI模型分析了亳州市21年间生态环境质量的变化情况，并利用地理探测模型探测了各因子间相互作用对亳州市生态环境质量分异特征的影响，得出以下结论：

1）亳州市2000—2021年5期RSEI均值分别为0.510、0.650、0.575，0.670和0.701，呈现上升、下降再上升的变化特征，良、优等级后期占比最大，表明生态环境质量呈向好趋势。

2）2006—2010年亳州市生态环境质量轻微恶化与明显恶化区域面积较大，但整体生态环境趋于向好；2000—2021年亳州市整体生态环境质量改善面积占比为61.84%，质量不变区域占比为18.50%。

3）地理探测器结果表明，2000—2021年各自然和人文影响因子的q值排序为：FVC>TEM>DEM>

PRE>NPP-VIIRS>PEO>LUCC，FVC是影响生态环境质量空间分异特征的主导因子。交互探测结果表明，各因子在交互作用下呈现协同增强效应，其中FVC、PRE和TEM交互作用下对RSEI的空间分异性具有较强的解释性。

4）亳州市生态环境质量变化受自然和人文因子的双重影响，在促进亳州市社会经济发展的同时，更要注重可持续发展，正确处理社会发展与生态环境之间的关系，推动绿色发展、加快相应环境修复。例如，在涡阳县、蒙城县等生态脆弱区域，推广中药材与防护林混种模式，提升植被覆盖度、优化农业土地利用；建立防水预测系统，优化农业灌溉布局，减少干旱对生态的冲击；开展生态旅游融合，整合高RSEI值区域的芍药花海、湿地公园，打造中药生态康养走廊，推动当地社会与生态环境的协调发展。

参考文献

[1] 王小宇,廉琦,张磊,等.基于遥感生态指数的纳雍鬃岭矿山生态修复区生态环境质量评价[J].环境生态学,2024,6(8):15-22

[2] 钟旭珍,王金亮,邓云程,等.怒江—萨尔温江流域植被覆盖时空变化趋势及驱动力[J].生态学报,2023,43(24):10182-10201

[3] 郑舒元,刘国华,万凌凡,等.生物多样性保护与可持续发展背景下的生态安全[J].科技导报,2024,42(18):46-57

[4] 蒋文君,赵红梅,唐豪.鄱阳湖区地表干旱与城市表面热岛的关系研究[J].华中师范大学学报(自然科学版),2017,51(4):555-560

[5] 王君,杨晓梅,隋立春,等.西安市1995—2016年植被覆盖度动态变化监测及景观格局分析[J].生态科学,2019,38(6):81-91

[6] 杨辰,沈润平,郁达威,等.利用遥感指数时间序列轨迹监测森林扰动[J].遥感学报,2013,17(5):1246-1263

[7] Brehaut L,Danby R K. Inconsistent Relationships Between Annual Tree Ring-widths and Satellite-measured NDVI in a Mountainous Subarctic Environment[J]. Ecological Indicators,2018,91:698-711

[8] 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

[9] 张燕,梁进一,韦玲霞.兰州市生态环境质量时空变化及驱动力分析[J].干旱区资源与环境,2023,37(10):65-74

[10] 李胤,王玉军,宋珂,等.基于遥感生态指数与地理探测器的长江干流岸带(江苏段)2000—2020年生态质量时空变化及其驱动因子分析[J].遥感技术与应用,2024,39(6):1478-1489

[11] 徐涵秋.区域生态环境变化的遥感评价指数[J].中国环境科学,2013,33(5):889-897

[12] 李娟,张永福,余婷婷,等.基于遥感生态指数的阿克苏地区生态质量时空变化及其驱动力[J].水土保持学报,2023,37(6):333-340

[13] 朱正华.精密水准测量在地面沉降监测中的必要性分析:以皖北平原亳州市地面沉降监测为例[J].西部资源,2022(3):106-108

[14] Chen Z, Yu B, Yang C, et al. An Extended Time-series (2000-2018) of Global NPP-VIIRS-like Nighttime Light Data from a Cross-sensor Calibration[J]. Earth System Science Data Discussions,2020,20:12-34

[15] Jing Y Q,Zhang F,He Y F,et al. Assessment of Spatial and Temporal Variation of Ecological Environment Quality in Eibnur Lake Wetland National Nature Reserve, Xinjiang, China[J]. Ecological Indicators,2020,110:e105874

[16] Xu H, Wang M, Shi T, et al. Prediction of Ecological Effects of Potential Population and Impervious Surface Increases Using a Remote Sensing Based Ecological Index (RSEI)[J]. Ecological Indicators,2018,93:730-740

[17] Yue H, Liu Y, Li Y, et al. Eco-environmental Quality Assessment in China's 35 Major Cities Based on Remote Sensing Ecological Index[J]. IEEE Access,2019,7:51295-51311

[18] 赵梓萌,孟翔晨.天津市土地利用/覆被变化对城市热岛的影响[J].地理空间信息,2024,22(11):66-72

[19] 杨保东,吴立,骆磊,等.源于遥感生态指数的郑州市生态质量评价[J].地理空间信息,2024,22(10):50-54

[20] 么廷禹,王东升,邰姗姗.基于遥感生态指数的鞍山市生态环境质量变化研究[J].环境科学与技术,2024,47(12):199-210

[21] 杨永健.基于遥感生态指数的生态质量变化分析:以福建为例[D].西安:长安大学,2019

[22] 周繁,付明花.运用地理探测器和地理加权回归模型分析城市渍水成因[J].地理空间信息,2025,23(1):66-69

[23] 李妍,张国钦,吝涛,等.乡镇遥感生态指数时空变化及影响因子研究:以天津市蓟州区为例[J].生态学报,2022,42(2):474-486

[24] 陈创,聂平静,黄凤寸,等.基于RSEI改进模型的生态环境质量评价及驱动机制研究:以湖南省桃江县为例[J].水土保持通报,2024,44(3):159-170

[25] 孔胃,梁勇,吴闯,等.基于地理探测器的济南市生态环境评价及影响因素分析[J].测绘与空间地理信息,2022,45(12):45-48

[26] 李琴,詹聪,张金生,等.基于遥感生态指数的赣抚平原灌区生态环境质量变化评价[J].长江流域资源与环境,2024,33(6):1340-1353

[27] 高小龙,闫浩文,王桂钢,等.兰州市削山造地区域生态变化遥感评价方法[J].遥感技术与应用,2022,37(4):1012-1020

[28] Yuan B,Fu L,Zou Y,et al. Spatiotemporal Change Detection of Ecological Quality and the Associated Affecting Factors in Dongting Lake Basin,Based on RSEI[J]. Journal of Cleaner Production,2021,302:126995

[29] 武爱彬,陈辅国,尤海舟,等.京津冀地区植被净初级生产力时空变化特征及影响因素分析[J].环境科学,2025,46(11):6957-6968

[30] 刘笑,郭鹏,祁佳峰,等.基于MRSEI模型的阿勒泰市生态环境时空变化及驱动力分析[J].干旱区研究,2023,40(6):1014-1026