引文格式：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. doi:10. 3969/j.issn. 1672-4623.2024.10.013

源于遥感生态指数的郑州市生态质量评价

杨保东[1]，吴　立[1*]，骆　磊[2]，胡晓思[1]
（1. 安徽师范大学地理与旅游学院江淮流域地表过程与区域响应安徽省重点实验室，安徽 芜湖 241002；
2. 中国科学院空天信息创新研究院，北京 100094）

摘　要：生态环境质量评价对城市发展规划有着重要指导意义。选取2004、2009年LandsatTM影像和2015、2021年LandsatOLI影像，基于遥感生态指数对郑州市生态环境质量进行评价。研究结果表明：遥感生态指数（RESI）能够客观反映郑州市生态环境质量，在2004—2021年间郑州市生态退化严重，RESI均值由0.54下降到0.44，退化总面积为4 934.05 km²，占比高达67%；从空间分布上看，郑州市中牟县地区及4个主城区（中原区、金水区、二七区、管城回族区）生态质量有较为明显的改善，东部地区生态退化严重；绿度和湿度对遥感生态指数起正向作用，热度和干度对遥感生态指数起反向作用；利用地理探测器对绿度、湿度、干度、热度分析影响生态环境的主导因素发现4个指标因子对RESI的解释力都很显著，绿度和热度是影响研究区生态环境变化的主导因素。

关键词：遥感生态指数；生态环境变化；地理探测器；郑州市
中图分类号：P237　　**文献标志码：**B　　**文章编号：**1672-4623（2024）10-0050-05

Ecological Quality Evaluation of Zhengzhou City Based on Remote Sensing Ecological Index

YANG Baodong[1], WU Li[1], LUO Lei[2], HU Xiaosi[1]
(1. Provincial Key Laboratory of Earth Surface Processes and Regional Response in the Yangtze-Huaihe River Basin, School of Geography and Tourism, Anhui Normal University, Wuhu 241002, China;
2. Institute of Aerospace Information Innovation, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China)

Abstract: Ecological environment quality evaluation has important guiding significance for urban development planning. In this paper, we selected Landsat TM images in 2004 and 2009 and Landsat OLI images in 2015 and 2021 to evaluate the ecological environment quality of Zhengzhou based on remote sensing ecological index (RESI). The result shows that RESI can objectively reflect the ecological environment quality of Zhengzhou City. From 2004 to 2021, the ecological degradation of Zhengzhou City was serious, and the mean value of RESI decreased from 0.54 to 0.44. The total degraded area was 4 934.05 km², accounting for 67%. From the perspective of spatial distribution, the ecological qualities of Zhongmou County and the four main urban areas (Zhongyuan District, Jinshui District, Erqi District, Guancheng Hui Nationality District) have been improved obviously, while the ecological degradation is serious in the eastern part of Zhengzhou. Greenness and humidity have positive effects on RESI, while heat and dryness have negative effects on RESI. Based on the analysis of leading factors affecting the ecological environment of greenness, humidity, dryness and heat by geographical detector, it is found that the four index factors have significant explanatory power to RESI, and greenness and heat are the leading factors affecting the change of ecological environment in the study area.

Key words: RESI, ecological environment change, geographic detector, Zhengzhou City

当前国内对城市生态评价方法主要有层次分析法、灰色关联分析法、植被指数[1]等，但都有其不足之处[2-3]。因此选取适合的评价方法对于准确评价城市生态质量至关重要。遥感技术具有大面积同步观测、时效性强的特点，能够有效的探测城市的生态环境变化。遥感技术与遥感数据在区域生态评价中得到越来越广泛的应用，已成为区域生态评价不可缺少的技术手段和数据来源[4]。但是单一的遥感生态指标难以客观全面的分析生态环境质量，徐涵秋[5]在2013年提出一种快速、客观、简便测评城市生态质量水平的指标——遥感生态指数，该指标可以综合反映、定量刻画城市生态质量及其变化。

城市生态质量的评价对于人类社会的可持续发展有着重要的导向作用，目前多数学者的研究对象主要

收稿日期：2023-02-28。
项目来源：国家自然科学基金面上项目（41771221）。
第一作者简介：杨保东（1998—），硕士研究生，主要研究方向为遥感与应用，E-mail：ybd5422705@163.com。
通信作者：吴立（1985—），博士，教授，主要研究方向为自然地理学，E-mail：jedi-wuli@163.com。

集中在上海、北京等发达地区以及西北环境脆弱地区，缺乏对中部地区城市生态质量的研究。鉴于此，本文基于遥感生态指数对郑州市2004—2021年生态环境质量变化趋势和特征进行分析，并通过地理探测器分析其主要影响因素，为该地区环境治理和发展规划提供一定的科学依据，从而有效推动城市可持续发展，达到人与自然的和谐相处。

1　研究区域与研究方法

1.1　研究区概况

研究区为河南省郑州市，下辖6个区、5个县级市、1个县，总面积约7 446 km^2，常住人口约1 074万人。地理坐标为112°42′~114°13′E，34°16′~34°58′N，北邻黄河，西依嵩山，东面与开封市相连，西面为洛阳市，南面与许昌市接壤，北面为焦作市和新乡市。郑州市属北温带大陆性季风气候，年平均气温在14~14.3℃之间，年平均降雨量约640.9 mm。郑州市横跨中国二、三级地貌台阶，地势西南高东北低，西南部属于第二级地貌台阶前缘，东部平原为第三级地貌台阶的组成部分，山地与平原之间是低山丘陵地带。

1.2　数据及预处理

数据来自地理空间数据云(http://www.gscloud.cn)，Landsat影像具有良好的时空分布特征和光谱分辨率特征，适用于环境质量的监测[6-7]。本文选取了4期Landsat系列遥感影像，日期分别为2004-06-27Landsat5 TM影像、2009-06-25Landsat5 TM影像、2015-09-25Landsat8OLI影像和2021-09-30Landsat8OLI影像。所获取影像成像时间均处于夏季6—9月份且云层含量较少。为了提高影像精度利用二次多项式模型和最邻近法[8]对数据做几何校正，使其误差小于1个像元，同时根据Landsat系列卫星用户手册和大气校正模型在ENVI5.3软件中进行辐射定标和大气校正，根据郑州市矢量文件裁剪出研究区域影像。

1.3　遥感生态指数

遥感生态指数是一种综合评价城市生态质量的指数[9]。在诸多自然因素中遥感生态指数选择绿度、湿度、干度、热度4个重要指标，通过主成分变换来构建。其中分别用植被指数、地表温度、缨帽变换的湿度分量以及建筑和裸土指数来表征绿度、热度、湿度、干度，各指标公式如下：

1）绿度指标：归一化植被指数（NDVI）是应用最广泛的植被指数，可以很好地反映植被生长状况，能直观地反映出地表植被的覆盖度，是快速获取植被生长状况的有效手段[10]，故选用NDVI代表绿度，表达式为：

$$\mathrm{NDVI}=\left(\rho_{\mathrm{NIR}}-\rho_{\mathrm{red}}\right)/\left(\rho_{\mathrm{NIR}}+\rho_{\mathrm{red}}\right) \tag{1}$$

式中，ρ_{NIR}为近红外波段；ρ_{red}为红外波段。

2）湿度指标：湿度是表示大气干燥程度的物理量，其与植被种类、分布状况及地表土壤中的水分均紧密相关[11]，是评价地区生态质量的重要指标。遥感生态指数中采用缨帽变换中的湿度分量表示湿度，其表达式为：

$$\begin{aligned}\mathrm{WET}_{\mathrm{TM}}=&0.031\,5\rho_{\mathrm{blue}}+0.202\,1\rho_{\mathrm{green}}+0.310\,2\rho_{\mathrm{red}}\\&+0.159\,4\rho_{\mathrm{NIR}}-0.680\,6\rho_{\mathrm{swir1}}-0.610\,9\rho_{\mathrm{swir2}}\end{aligned} \tag{2}$$

$$\begin{aligned}\mathrm{WET}_{\mathrm{OLI}}=&0.151\,1\rho_{\mathrm{blue}}+0.197\,2\rho_{\mathrm{green}}+0.328\,3\rho_{\mathrm{red}}\\&+0.340\,7\rho_{\mathrm{NIR}}-0.711\,7\rho_{\mathrm{swir1}}-0.455\,9\rho_{\mathrm{swir2}}\end{aligned} \tag{3}$$

式中，ρ_{blue}、ρ_{gree}、ρ_{red}、ρ_{NIR}、ρ_{swir1}、ρ_{swir2}分别为Landsat影像的蓝波段、绿波段、红波段、近红外波段、短红外1波段和短红外2波段的反射率。

3）热度指标：遥感生态指数中选取地表温度表示热度指标，选取Landsat系列卫星中热红外波段计算地表温度，但必须要通过比辐射率校正。其表达式为：

$$L_\lambda=\left[\varepsilon B\left(T_S\right)+\left(1-\varepsilon\right)L\downarrow\right]\tau+L \tag{4}$$

$$B\left(T_S\right)=\frac{\left[L_\lambda-L\uparrow-\tau\left(1-\varepsilon\right)L\downarrow\right]}{\tau\varepsilon} \tag{5}$$

$$T_S=\frac{K_2}{\ln\left[\frac{K_1}{B\left(T_S\right)}+1\right]} \tag{6}$$

式中，T_S为地表真实温度；L_λ为热红外辐射亮度值；$B\left(T_S\right)$为黑体辐射亮度值；ε为地表比辐射率；τ为大气在热红外波段的透过率；$L\uparrow$与$L\downarrow$是大气向上和向下辐射亮度；τ、$L\uparrow$、$L\downarrow$可根据遥感影像成像时间和中心经纬度在NASA的网站(http://atmcorr.gsfc.nasa.gogv)查询. K_1和K_2为定标参数。

4）干度指标：城市快速发展中，大量不透水建设用地取代植被覆盖地，加剧了城市干化程度。同时，部分裸土地区也会对城市干化造成影响，因此，选用建筑指数（IBI）[12]和裸土指数（SI）[13]合成干度指标（NDBSI），其表达式为：

$$\mathrm{IBI}=\frac{\frac{2\rho_{\mathrm{swir1}}}{\rho_{\mathrm{swir1}}+\rho_{\mathrm{NIR}}}-\left[\frac{\rho_{\mathrm{NIR}}}{\rho_{\mathrm{NIR}}+\rho_{\mathrm{red}}}+\frac{\rho_{\mathrm{green}}}{\rho_{\mathrm{green}}+\rho_{\mathrm{swir1}}}\right]}{\frac{2\rho_{\mathrm{swir1}}}{\rho_{\mathrm{swir1}}+\rho_{\mathrm{NIR}}}+\left[\frac{\rho_{\mathrm{NIR}}}{\rho_{\mathrm{NIR}}+\rho_{\mathrm{red}}}+\frac{\rho_{\mathrm{green}}}{\rho_{\mathrm{green}}+\rho_{\mathrm{swir1}}}\right]} \tag{7}$$

$$S_I=\frac{(\rho_{swir1}+\rho_{red})-(\rho_{blue}+\rho_{NIR})}{(\rho_{swir1}+\rho_{red})+(\rho_{blue}+\rho_{NIR})} \quad (8)$$

$$NDBSI=\frac{S_I+IBI}{2} \quad (9)$$

5）构建遥感生态指数：将4个指标进行归一化处理，使各指标数值在0~1之间后进行波段合成。为避免人为主观影响，采用主成分分析法，借助ENVI软件计算出主成分信息。为使更大的数值代表更好的生态，采用1减去PC1获得初始遥感生态指数$RESI_0$，其计算公式如下：

$$RESI_0=1-PC1 \quad (10)$$

$$RESI=\frac{RESI_0-RESI_{0_min}}{RESI_{0_max}-RESI_{0_min}} \quad (11)$$

式中，$RESI_{0_max}$为$RESI_0$最大值；$RESI_{0_min}$为$RESI_0$最小值；RESI为遥感生态指数；PC1为主成分分量中的第一主成分，其值越大表示该地区生态质量越好，越小则表示该地区生态质量越差[14]。

2 结果分析

2.1 生态质量变化分析

对研究区2004、2009、2015、2021年4个年份指标进行主成分分析，结果见表1。结果显示在每个年份的4个主成分分量中第一主成分贡献率均为70%以上，这表明PC1集中了4个指标的绝大部分特征，可以用PC1来表征生态环境质量水平。在PC1中，显示为正值的是绿度和湿度，显示为负值的是干度和热度，表明在城市生态环境质量中绿度和湿度指标对环境起到改善作用，而干度和热度指标对生态环境起到负向作用；除PC1外其他3个主成分分量占比较低，且各指标正负随机分布，不具备合理解释生态环境状况可能性。

为了更好地反映研究区生态环境质量，以0.2为间隔将RESI划分为5个等级[15]，即0~0.2表示生态质量差，0.2~0.4表示生态质量较差，0.4~0.6表示生态质量一般，0.6~0.8表示生态质量良，0.8~1表示生态质量为优，对各生态质量等级进行统计。由表2可以看出，2004—2021年间RESI均值经历了先下降再上升的过程。从空间分布上表现为2004年和2009年郑州市生态环境较好，仅有登州市西南部分及郑州市5个市区位置生态环境质量较差。2015年和2021郑州市生态环境质量总体较差，其中2015年巩义市中部地区、西南部地区以及登封市南部地区环境质量恶化严重，优良生态等级地区主要集中在中牟县地区。

用差值法将2004、2009、2015、2021年4个年份RESI指数值进行差值变化检测，将结果划分为5个等级（−1.0~−0.2，−0.2~−0.05，−0.05~0.05，0.05~0.2，

表1 主成分分析结果

年份	指标	PC1	PC2	PC3	PC4
2004	NDVI	0.938	0.273	0.048	0.207
	WET	0.932	0.298	0.001	−0.206
	NDBSI	−0.379	0.701	−0.604	0.011
	LST	−0.424	0.633	0.648	−0.005
	特征值	0.148 8	0.023 5	0.006 4	0.000 9
	特征值贡献率	82.85	13.08	3.54	0.53
2009	NDVI	0.777	0.102	0.064	0.618
	WET	0.606	0.621	−0.054	−0.429
	NDBSI	−0.474	0.715	−0.466	0.219
	LST	−0.538	0.217	0.785	0.217
	特征值	0.171 5	0.025 2	0.007 1	0.001
	特征值贡献率	83.72	12.29	3.48	0.51
2015	NDVI	0.832	0.296	−0.268	0.464
	WET	0.706	−0.043	0.696	−0.123
	NDBSI	−0.163	−0.701	0.677	0.153
	LST	−0.870	0.117	0.028	0.478
	特征值	0.221 8	0.048 4	0.031 2	0.012 6
	特征值贡献率	70.62	15.41	9.98	4.02
2021	NDVI	0.862	−0.081	0.083	−0.493
	WET	0.570	0.364	−0.710	0.197
	NDBSI	−0.645	−0.618	0.223	0.391
	LST	−0.349	0.745	0.540	0.174
	特征值	0.291 5	0.055 1	0.031	0.007 9
	特征值贡献率	75.61	14.29	8.05	2.05

表2 生态质量等级与面积统计

RESI等级	2004年		2009年		2015年		2021年	
	面积/km²	百分比/%	面积/km²	百分比/%	面积/km²	百分比/%	面积/km²	百分比/%
差	60.04	0.79	100.33	1.33	1 980.47	26.16	1 674.79	22.12
较差	1 078.46	14.25	1 543.54	20.39	2 502.17	33.05	3 097.93	40.92
一般	3 018.04	39.87	3 096.03	40.90	1 378.50	18.21	951.62	12.57
良	3 239.49	42.79	2 562.83	33.86	366.45	4.84	79.68	1.05
优	173.94	2.30	267.25	3.53	1 342.38	17.73	1 765.94	23.33
平均值	0.56		0.54		0.42		0.44	

0.2~1.0）分别对应显著退化区、轻微退化区、稳定区、轻微改善区、显著改善区[16]（如表3）。

表3　生态环境变化情况

类别	2004—2009年		2009—2015年		2015—2021年		2004—2021年	
	面积/km^2	百分比/%	面积/km^2	百分比/%	面积/km^2	百分比/%	面积/km^2	百分比/%
显著退化	800.59	0.11	3 661.12	0.48	1 219.12	0.16	3 827.71	0.51
轻微退化	2 185.47	0.29	1 252.01	0.17	1 951.25	0.26	1 106.34	0.15
基本不变	2 357.55	0.30	508.47	0.07	2 133.78	0.28	494.17	0.07
轻微改善	1 866.21	0.25	619.74	0.08	989.88	0.13	627.72	0.08
显著改善	3 60.15	0.05	1 528.63	0.20	1 275.93	0.17	1 514.03	0.2

从表3可看出，2004—2021年间生态退化面积为4 934.05 km^2占比67%；生态改善面积为2 141.75 km^2占比28%；基本不变的面积为494.17 km^2占比为7%；其中生态显著退化面积达到总面积一半以上，退化面积为3 827.71 km^2时而生态改善的区域仅为20%，面积为1 514.03 km^2生态环境面临严峻挑战。同时从时空上分析研究区生态质量变化发现2009—2015年是整个研究时段生态恶化速率最高的年段。除郑州市主城区和登封市北部山区以外，其余地区皆有不同程度的环境退化，东部中牟县环境恶化面积最大、恶化程度最高。2015—2021年段是研究区生态环境改善较为明显的时间段，其中改善区域集中在登封市和巩义市以及荥阳地区。从整个研究时段来看，中牟县、惠济区及新郑市东部地区区域环境显著退化，登封市及新密市中部区域较为稳定或轻微改善；显著改善区域主要集中在登封市与巩义市交界区域。

2.2　生态质量影响因素分析

地理探测器是探测空间分异性以及揭示其背后驱动因子的一种新的统计学方法，此方法无线性假设，明确的物理含义[17]。本文引用地理探测器，从绿度、湿度、干度、热度中分析影响生态环境的主导因素。其中，将NDVI、WET、NDBSI、LST4个指标作为自变量因子，RESI作为因变量因子，对自变量因子进行离散化处理，采用了自然断点法将4个指标分为5类[18]。地理探测器结果如表4所示，p值是因子解释力，p值越小表示该指标因子对RESI的解释力越大；q值为影响力值，其值越大表示该指标因子对RESI的影响越大。结果显示2004、2009、2015年及2021年p值均为0，表示NDVI、WET、NDBSI、LST4个指标因子对RESI的解释力都很大。q值在不断发生变化，其中4个研究年份中2004、2009、2021年热度与绿度q值排名较高，表明绿度和热度是研究区生态环境变化的主导因子，热度和绿度的变化与人口密度、植被覆盖面积、城市建筑面积、下垫面变化、工厂及居民排热等因素密不可分。2009年与2004年相比，各指标因子q值变化不大；2015年与2009年相比，绿度大幅下降、干度和热度都基本不变、湿度小幅上升，表明2009—2015年研究区生态环境严重退化的原因是植被覆盖度的下降，而湿度的小幅上升仍不能抵消植被覆盖度下降而导致的环境退化。2021年与2015年相比，绿度q值上升、热度q值有所下降，说明2015—2021年研究区生态环境变好的原因是植被覆盖面积增加。

表4　研究区4个影响因子的地理探测结果

指标因子	2004年			2009年			2015年			2021年		
	q	p	q排序	q	p	q排序	q	p	q排序	q	P	q排序
NDVI	0.648	0	1	0.670	0	1	0.226	0	4	0.534	0	1
WET	0.240	0	4	0.248	0	4	0.428	0	2	0.269	0	4
NDBSI	0.475	0	3	0.308	0	3	0.323	0	3	0.309	0	3
LST	0.641	0	2	0.581	0	2	0.603	0	1	0.480	0	2

3　讨　论

本文利用遥感生态指数对郑州市生态环境质量进行评价，结果表明2004—2021年间郑州市生态质量总体呈现退化趋势，生态环境变化表现出空间异质性，具体来看退化区域集中在中牟县、惠济区及新郑市东部地区，而登封市与巩义市交界区域生态环境有着良好改善，这与郑州市城市发展模式存在密切联系。根据《郑州市土地利用总体规划（2006—2020年）》[19]，郑州市依托中部崛起战略加快城镇化、工业化和农业现代化进程，着重建设发展东部地区汽车、能源等产业，位于郑州市东部地区的中牟县计划到2020年各项建设用地达25 111.06 hm^2，居于全市最高水平，建筑面积激增导致植被覆盖面积减少、地面硬化面积增加，生态环境质量下降。而郑州市西部山区和中部丘陵区域实施山区生态治理型土地利用模式，加强生态建设，提高森林覆盖率，生态环境质量保持在较好的水平。

对比前人研究，吴克宁[20]等基于PSR模型对郑州市主城区的生态环境质量指数评价结果显示较低，接近中度警情的值域，与本文中2004年生态环境质量分级图中所示内容相符，反映RESI指数有较高的准确性；段彦博[21]等以土地利用变化为基础对郑州市生态系统服务价值研究中发现，生态系统服务价值与林地覆盖面积呈显著正相关，郑州市生态系统服务价值在

2004—2014年间呈现明显的西高东低、南高北低分布形态，与本文利用RESI模型生态环境质量空间分布基本一致。研究区域发生变化时，生态环境质量发生变化的主导因素也会随之改变，Zhang[22]等研究中国阿克苏北部地区时指出湿度指数和热量指数是影响该地区生态环境质量最大的2个主要因素。郑州市中西部山区植被覆盖率较高，整体生态环境保护较好，东部地区高耗能产业大规模发展，城镇化发展迅速，结合前文分析本文认为绿度和热度指标对郑州市生态环境影响最大。

4 结 论

基于遥感卫星影像对郑州市2004—2021年城市生态质量评价，以绿度、湿度、干度、热度4个指标进行主成分分析并构建遥感生态指数，评价结果客观反映了郑州市17 a来生态环境质量及其变化情况：①2004—2021年间郑州市生态环境质量呈现先下降后上升的趋势。17 a间郑州市生态环境质量总体退化明显，在2004—2021年间郑州市生态退化严重，RESI均值由0.54下降到0.44，退化总面积为4 934.05 km^2，占比高达67%；生态改善面积为2 141.75 km^2，占总面积28%。②从空间分布上看，郑州市中西部地区生态质量有良好的改善，郑州市主城区生态变化较为稳定。生态退化的地区主要集中在东部及东北部区域，且退化程度属于显著退化。③主成分分析表明，绿度和湿度对生态指数起正向作用，热度和干度对生态指数起反向作用；从地理探测器结果看，4个指标对生态环境质量均为显著相关，其中绿度和热度对生态环境质量的变化起主导作用。

参考文献

[1] 李广东,方创琳. 城市生态-生产-生活空间功能定量识别与分析[J]. 地理学报, 2016, 71(1): 49-65

[2] 程朋根,岳琛. 多源数据支持下的城市生态环境评价及其与人类活动的关系[J]. 武汉大学学报(信息科学版),2022,47(11): 1 927-1 937

[3] Samuel N G, Yong K X, Kevin P C. Evaluating Land Surface Moisture Conditions from the Remotely Sensed Temperature/Vegetation Index Measurements[J]. Remote Sensing of Environment,2002,79(2):225-242

[4] 欧阳志云,张路,吴炳方,等. 基于遥感技术的全国生态系统分类体系[J]. 生态学报,2015,35(2):219-226

[5] 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):7 853-7 862

[6] Sirous H, Qihao W, Ali D, et al. Seasonal Variations of the Surface Urban Heat Island in a Semi-arid City[J]. Remote Sensing,2016,8(4):352-352

[7] Firozjaei M K, Sedighi A, Kiavarz M, et al. Automated Built-up Extraction Index: A New Technique for Mapping Surface Built-up Areas Using Landsat8OLI Imagery[J]. Remote Sensing,2019,11(17):1 966-1 986

[8] 李粉玲,常庆瑞,申健,等. 黄土高原沟壑区生态环境状况遥感动态监测:以陕西省富县为例 [J]. 应用生态学报,2015,26(12):3 811-3 817

[9] 成方妍,刘世梁,尹艺洁,等. 基于MODIS NDVI的广西沿海植被动态及其主要驱动因素[J]. 生态学报,2017,37(3):788-797

[10] 何国兴,韩天虎,柳小妮,等. 甘肃省草地植被NDVI时空变化特征及驱动因素研究[J]. 草地学报,2021,29(5):1 004-1 013

[11] 聂艳,马泽玥,周逍峰,等. 阿克苏河流域土壤湿度反演与监测研究[J]. 生态学报,2019,39(14):5 138-5 148

[12] Xu H. A New Index for Delineating Built-up Land Features in Satellite Imagery[J]. International Journal of Remote Sensing,2008,29(14):4 269-4 276

[13] Rikimaru A, Roy P S, Miyatake S. Tropical Orest Cover Density Mapping[J]. Tropical Ecology,2002,43(1):39-47

[14] Liu Z, Xu H, Li L, et al. Ecological Change in the Hangzhou Area Using the Remote Sensing Based Ecological Index[J]. Journal of Basic Science & Engineering,2015,23(4):728-739

[15] 刘栩位,周启刚,周浪,等. 基于RSEI的三峡库区重庆段水土保持生态功能区生态环境质量动态监测[J]. 水土保持研究,2021,28(5):278-286

[16] 孙从建,张文强,李新功,等. 基于遥感影像的黄土高原沟壑区生态效应评价[J]. 农业工程学报,2019,35(12):165-172

[17] 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

[18] 张华,宋金岳,李明,等. 基于GEE的祁连山国家公园生态环境质量评价及成因分析[J]. 生态学杂志,2021,40(6):1 883-1 894

[19] 郑州市自然资源和规划局. 郑州市土地利用总体规划(2006-2020年) [EB/OL]. (2010-12-22) [2022-08-01]:http://zrzyhghj.zhengzhou.gov.cn/

[20] 吴克宁,关小克,冯新伟,等. 基于PSR模型的郑州市生态环境质量灰色预警[J]. 河南农业科学,2007(6): 83-85

[21] 段彦博,雷雅凯,马格,等. 郑州市生态系统服务价值时空变化特征[J]. 浙江农林大学学报,2017,4(3):511-519

[22] Zhang Y, Zhao L J, Niu K, et al. Environmental Monitoring in Northern Aksu, China Based on Remote Sensing Ecological Index Model[J]. Open Journal of Applied Sciences,2022,12(5):757-768