

基于遥感生态指数的焦作市 生态环境动态监测与评价

张娟, 文广超, 王恩营, 谢洪波, 刘正疆

(河南理工大学 资源环境学院, 河南 焦作 454000)

摘 要: [目的] 探究河南省焦作市其近 20 a 来生态环境质量演化特征, 可为该市及其他资源枯竭型城市生态建设提供科学参考。[方法] 选取 2000, 2006, 2009, 2014 和 2019 年 5 期 Landsat 影像数据, 耦合绿度、湿度、温度及干度 4 个指标, 通过主成分分析法建立遥感生态指数 (RSEI) 评价模型, 对焦作市生态环境质量进行定量评价。[结果] ① 2000—2014 年, 焦作市生态环境质量呈倒“U”形曲线, 2014—2019 年生态环境质量好转; ② 城镇人口占比增幅变缓及产业结构由第二产业向第三产业转变改善了焦作市生态环境质量; ③ 回归分析中所选 4 个指标中对焦作市生态环境变化影响的重要程度表现为: 干度 > 湿度 > 绿度 > 热度。[结论] 遥感生态指数对资源枯竭型城市生态环境质量可进行有效监测与评价。

关键词: 生态环境质量; 遥感生态指数; 人类活动胁迫; 资源枯竭型城市; 河南省焦作市

文献标识码: B

文章编号: 1000-288X(2020)06-0107-08

中图分类号: X821

文献参数: 张娟, 文广超, 王恩营, 等. 基于遥感生态指数的焦作市生态环境动态监测与评价[J]. 水土保持通报, 2020, 40(6): 107-114. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2020.06.016; Zhang Juan, Wen Guangchao, Wang Enying, et al. Dynamic monitoring and evaluation of ecological environment at Jiaozuo City based on remote sensing ecological index [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2020, 40(6): 107-114.

Dynamic Monitoring and Evaluation of Ecological Environment at Jiaozuo City Based on Remote Sensing Ecological Index

Zhang Juan, Wen Guangchao, Wang Enying, Xie Hongbo, Liu Zhengjiang

(Institute of Resource and Environment, He'nan Polytechnic University, Jiaozuo, He'nan 454000, China)

Abstract: [Objective] The evolution of ecological environment at Jiaozuo City, He'nan Province in the past 20 years was studied in order to provide reference for the transformation of other resource exhausted cities. [Methods] The data of five Landsat image data are selected, which included images in 2000, 2006, 2009, 2014 and 2019. The index system including four indicators of green degree, humidity, temperature and dryness, and a evaluation model of remote sensing ecological index (RSEI) was established by principal component analysis, which could evaluate quantitatively the ecological environment quality of Jiaozuo City. [Results] ① From 2000 to 2014, the ecological environment of Jiaozuo City can be presented by shape of an inverted “U”, and the quality of ecological environment rose in the next five years. ② The slow urbanization process and the transformation of industrial structure from the secondary industry to the tertiary industry have improved the ecological environment quality of Jiaozuo City. ③ In the regression analysis, the importance of the four selected indicators on the ecological environment in Jiaozuo City was: dryness > humidity > greenness > heat. [Conclusion] Remote sensing ecological index can effectively monitor and evaluate the ecological environment quality of resource exhausted cities.

Keywords: ecological environment quality; remote sensing ecological index; human activity stress; resource exhausted city; Jiaozuo City of He'nan Province

收稿日期: 2020-11-03

修回日期: 2020-12-01

资助项目: 旱区地下水文与生态效应教育部重点实验室开放基金项目“面向生态的旱区区域地下水资源评价研究”(2014G1502022); 河南理工大学博士基金项目“巴音河流域下游溢出带变迁的动力学机制及其生态效应”(B2020-54)

第一作者: 张娟(1994—), 女(汉族), 山西省吕梁市人, 硕士研究生, 研究方向为生态遥感。Email: 820669374@qq.com。

通讯作者: 文广超(1979—), 男(汉族), 河南省西平县人, 博士, 副教授, 主要从事流域水文过程与生态环境保护、地学信息技术与 3S 集成应用等方面的教学与科研工作。Email: wengc366@163.com。

资源枯竭型城市是指矿产资源开发已进入晚期阶段,资源型城市生态环境问题—土地资源滥用^[1]、水资源破坏^[2]、大气污染^[3]、城市热岛效应等^[4]逐步凸显,是我国城市发展过程中不可避免的问题。中国先后于 2008,2009,2012 年分 3 批确定资源枯竭型城市,焦作市作为首批资源枯竭型城市,是中部地区资源枯竭型城市的典型代表^[5]。近年来,随着焦作市生态环境建设力度的加大,其生态环境明显改善,“国家森林城市”、“全国水生态文明城市”和“国家文明城市提名城市”等一系列称号的获得,充分印证了其生态环境建设的成效。研究焦作市生态环境演化特征对未来生态环境改善具有重要的现实意义,也可以为其他资源枯竭型城市的转型升级提供建设参考。随着遥感技术的发展,监测城市生态环境的方法逐渐增多,学者开始将多个遥感指数耦合监测生态环境质量。王万同^[6]通过对多源遥感数据在生态系统服务价值遥感模型中分析,对中原城市群实现了逐年逐像元的动态监测;徐涵秋^[7]首次提出遥感生态指数(RSEI),其综合考虑植被覆盖、城市建设和地表温度等因素,采用遥感手段可获取的因子,客观评价区域生态状况;茹克亚·萨吾提^[8]采用遥感解译指标对新疆天山北坡经济带的阜康市进行了生态环境监测;魏力辉^[9]基于遥感生态指数对矿区生态环境进行了有效评价;魏伟^[10]在综合考虑武威市土地实际状况的基础上,利用遥感数据,借助 GIS 和 RS 技术,选取土壤侵蚀、土壤荒漠化、土壤含水量和土壤盐渍化 4 个指数,构建武威市土地生态敏感性评价体系;白培勋^[11]提出了一种基于无人机遥感技术的监测方法,通过规划无人机飞行航线、原始航拍数据获取及处理、水土保持生态建设基本监测信息提取等步骤可实现快速有效监测;王俊华^[12]采用人机交互解译方法提取多龙矿集区有关人类活动、水文、荒漠化、金属氧化物污染及草地覆盖等信息,分析研究区生态环境现状。前人在生态环境评价与动态监测方面做了大量工作,但是针对资源枯竭型城市开展生态环境动态监测与评价相关研究的报道还不多见。为此,本研究选取典型资源枯竭型城市—焦作市为研究区,选用 Landsat 的 5 期影像数据,耦合绿度、湿度、温度及干度指标,基于 RSEI 模型定量得到了焦作市近 20 a 的生态环境动态变化特征,结合人类活动胁迫综合指数剖析了社会经济强度对生态环境的影响规律,分析得到了不同生态指标对生态环境影响的重要程度,以期为进一步改善焦作市生态环境现状提供参考,同时为其他资源型城市生态环境监测与评价提供科学依据。

1 研究方法

1.1 研究区概况

研究区面积为 4 071 km²,地理位置为 35°10′—35°21′N,113°4′—113°26′E,位于河南省西北部,与山西省晋城市接壤,北依太行山,南临黄河。地貌分为山区和平原两大部分,总体北高南低,由西北向东南呈阶梯式递减,天然形成的平均坡度为 2‰,由南部平原到北部山区,高程为 80~1 200 m 之间,高差起伏较大。焦作市辖沁阳、孟州市两市,修武、武陟、温县、博爱 4 县及市区。沁阳、博爱县、市区、修武县北部均为高山,生态环境质量较好,其中修武县经过治理,部分村庄成为集旅游、休闲于一体的模范村庄;黄河流域横穿孟州市、温县、武陟县南部,生态环境质量近几年有所好转;中部区域受人类活动影响最大,生态环境质量较差。

1.2 数据源

本文数据来源包括遥感数据和基础地理信息数据两部分,数据来源表述为:①焦作市行政区划图:来自国家基础地理信息中心,用于分析研究区范围;②Landsat 系列影像数据:来源于美国地质勘探局官方网站(<https://www.usgs.gov>),影像数据清晰,覆盖区云量较少。影像数据产品类型为 Level 1T 地形矫正影像,为提高不同时相研究结果的准确性,对遥感数据进行辐射定标、大气校正等^[13]预处理。影像数据详见表 1。③人口、经济数据:来源于 2000,2006,2009,2014 和 2019 年的《焦作市统计年鉴》。

表 1 Landsat 系列影像数据介绍

年份	遥感数据	成像时间	轨道号	云量
2000	Landsat5TM	20050531	124/036	0
2006	Landsat5TM	20060617	124/036	0
2009	Landsat7ETM	20090703	124/036	0.87
2014	Landsat8OLI	20140607	124/036	23.63
2019	Landsat8OLI	20190707	124/036	0.67

1.3 研究方法

1.3.1 因子介绍 在反映生态环境质量诸多因素中,绿度、湿度、热度、干度是人类直观感知生态环境优劣的重要因素,常被用于评价生态环境。

(1) 绿度指标:归一化植被指数(NDVI)是表征植被生长情况的因子,广泛应用于监测植被和生态环境状况^[14]。

$$NDVI=\frac{\rho_{NIR}-\rho_{Red}}{\rho_{NIR}+\rho_{Red}} \tag{1}$$

式中: ρ_{Red} , ρ_{NIR} 分别为 TM,ETM,OLI 数据中红、近

红外波段的反射率。

(2) 湿度指标:植被种类、分布状况及地表土壤

中的水分均和湿度指标紧密相关^[15],本文湿度指标^[16]用缨帽变换中的湿度分量 WET 表示。

TM: WET=0.031 5×ρ_{Blue}+0.202×ρ_{Green}+0.310 2×ρ_{Red}+
0.159 4×ρ_{NIR}−0.680 6×ρ_{SWIR1}−0.610 9×ρ_{SWIR2}

(2)

ETM: WET=0.262 6×ρ_{Blue}+0.214 1×ρ_{Green}+0.092 6×ρ_{Red}+
0.065 6×ρ_{NIR}−0.762 9×ρ_{SWIR1}−0.538 8×ρ_{SWIR2}

(3)

OLI: WET=0.151 1×ρ_{Blue}+0.197 2×ρ_{Green}+0.328 3×ρ_{Red}+
0.340 7×ρ_{NIR}−0.711 7×ρ_{SWIR1}−0.455 9×ρ_{SWIR2}

(4)

(3) 干度指标:裸露地和建筑用地会造成地表的“干化”,生态环境受二者面积及分布情况影响较大,

所以干度指标(NDSI)综合考虑裸土指数(SI)和建筑指数(IBI)。

SI=〔(ρ_{SWIR1}+ρ_{Red})−(ρ_{NIR}+ρ_{Blue})〕/〔(ρ_{SWIR1}+ρ_{Red})+(ρ_{NIR}+ρ_{Blue})〕

(5)

IBI={2ρ_{SWIR1}/(ρ_{SWIR1}+ρ_{NIR})−〔ρ_{NIR}/(ρ_{NIR}+ρ_{Red}+ρ_{Green})/(ρ_{Green}+ρ_{SWIR1})〕}/
{2ρ_{SWIR1}/(ρ_{SWIR1}+ρ_{NIR})+〔ρ_{NIR}/(ρ_{NIR}+ρ_{Red}+ρ_{Green})/(ρ_{Green}+ρ_{SWIR1})〕}

(6)

NDSI=(SI+IBI)/2

(7)

(4) 热度指标:采用地表温度表示,本研究采用大气校正法反演 LST。选择影像的热红外波段进行辐射定标后求得黑体辐射亮度,再利用普朗克函数求出 LST^[19]。

区间外的数据设置为最值,这样可以有效避免极端值对归一化的影响^[20]。研究区有大片水域时会影响湿度指标结果,从而影响试验数据的准确性。焦作市除黄河、沁河两条大型河流,还有丹河、大沙河等水域,因此需对研究区的水域做掩膜处理。提取水体信息方法为改进归一化水体指数^[21],结合 Google Earth 选择合适的阈值提取水体。

$L_{\lambda} = [\epsilon B(LST) + (1 - \epsilon) L \uparrow] \tau + L \downarrow$

(8)

$B(LST) = [L_{\lambda} - L \downarrow - \tau(1 - \epsilon)L \uparrow] / \tau \epsilon$

(9)

$LST = K_2 / \ln[K_1 / B(T_s) + 1]$

(10)

式中:ρ_{Red},ρ_{Green},ρ_{Blue},ρ_{NIR},ρ_{SWIR1},ρ_{SWIR2}分别为 TM, ETM,OLI 数据中红、绿、蓝、近红外、短波红外 1,短波红外 2 波段的反射率;L_λ为热红外辐射亮度值;B(LST)为黑体辐射亮度;LST 为地表真实温度;ε为地表比辐射率;τ,L↓,L↑为大气剖面参数。

4 个因子归一化后耦合进行主成分变换,将获取的 PC₁ 做减法运算,得到初始生态指数 RSEI₀。为便于比较不同年份间的 RSEI₀,对 RSEI₀ 进行归一化处理。

RESI₀=(1−PC₁)

(11)

RSEI=(RSEI₀−RSEI_{Min})/
(RSEI_{Max}−RSEI_{Min})

(12)

式中:RSEI 值在 0~1 之间;RSEI 值越高,表示生态质量越好。

1.3.2 遥感生态指数 遥感生态指数由徐涵秋提出,可用来量化评价区域生态环境质量,分析其时空变化情况。计算遥感生态指数时需要对各因子归一化,其目的是减少量纲不统一造成的误差,使指标具备时空一致性。因子归一化时,可能会受到个别极端值的影响,使归一化结果产生误差。本文采取方法是选取累积 5%,95%的 DN 值作为置信区间,且将

主成分分析的优点是根据 4 个指标对主成分(PC)的贡献率确定权重,减少主观性,各年份主成分分析结果详见表 2。第一主成分(PC₁)具有以下特征:PC₁ 的贡献率均大于 75%,PC₁ 包含了 4 个指标中大部分特征,可用于创建遥感生态指数 RSEI。

表 2 研究区 2000—2019 年遥感生态指数主成分分析结果

主成分	2000 年		2006 年		2009 年		2014 年		2019 年	
	特征根	贡献率/%	特征根	贡献率/%	特征根	贡献率/%	特征根	贡献率/%	特征根	贡献率/%
PC ₁	0.23	76.51	0.33	79.99	0.26	76.07	0.30	75.43	0.31	79.20
PC ₂	0.06	17.19	0.07	17.93	0.07	20.18	0.08	20.97	0.07	17.04
PC ₃	0.01	4.68	0.01	1.52	0.01	2.71	0.01	2.20	0.01	2.28
PC ₄	0.01	1.62	0.00	0.56	0.01	1.04	0.01	1.40	0.01	1.48

1.3.3 人类活动胁迫综合指数 人类活动强度对城市生态环境变化起着重大影响,而人类活动胁迫^[22]

是指人类活动使生态环境朝着不好方向演变的各种因素,分析人类活动胁迫综合指数将生态环境优劣与

社会经济、人口等信息相关联,可弥补遥感生态指数未考虑经济、人口等因素的不足。本文选取城镇人口密度、第一产业增加值密度、第二产业增加值密度及第三产业增加值密度来衡量人类活动强度。

城镇人口密度:单位国土面积内年末城镇人口总数,宏观上评估人口给焦作市生态环境带来的压力,计算公式为:

$$\text{UPD}_{i,t}=(\text{UP}_{i,t}\times 10\,000)/A \tag{15}$$

式中: $\text{UPD}_{i,t}$ 为第*i*个县(区)第*t*年人口密度(人/ km^2); $\text{UP}_{i,t}$ 为第*i*个县(区)第*t*年年末常住城镇人口总数(万人); A_i 为第*i*个县(区)国土面积(km^2)。

产业增加值密度:单位国土面积内 GDP 产业增加值数据,从宏观层面评估产业结构对焦作市生态环境的影响。

$$\text{DGDP}_{i,t}=\text{GDP}_{i,t}/A \tag{16}$$

式中: $\text{DGDP}_{i,t}$ 代表了第*i*县(区)第*t*年 GDP 密度(万元/ km^2); $\text{GDP}_{i,t}$ 为第*i*县(区)第*t*年份 GDP 万元。

人类活动胁迫综合指数:采用主成分分析法定量评估焦作市不同时段社会经济活动强度,计算城镇人口密度及各个产业增加值密度参量,据此计算人类活动胁迫综合指数。

$$\text{HPI}=\sum_{g=1}^k(\lambda_g/\sum_{g=1}^m\lambda_g)F_g \tag{17}$$

式中:HPI 指人类活动胁迫综合指数; λ_g 指特征根; F_g 指主成分分量(特征根和主成分分量可使用 SPSS 软件计算得到)。

2 结果与分析

2.1 焦作市遥感生态指数

根据遥感生态指数计算公式,可得 2000,2006,2009,2014 和 2019 年中 RSEI 均值分别为 0.607,0.651,0.447,0.348 和 0.370,2000—2014 年焦作市生态环境呈倒“U”形变化,2014—2019 年焦作市生态环境逐步好转。将各年份生态指数以 0.2 为间隔分为 5 级^[23],统计结果如图 1 所示。从图 1 可以看出,较差(0.2~0.4)面积先降后升,优等(0.8~1)面积先升后降,拐点均发生在 2006 年;差等(0~0.2)面积先升后降,良(0.6~0.8)面积先降后升,拐点发生在 2014 年;中等(0.4~0.6)面积 2006 占比最低,为 12.6%,2000—2019 年由 34.1%降到 20.8%。较差面积和优面积的变化使得 2006 年 RSEI 值最高,差等面积下降和良面积、中等面积上升使得 2014—2019 年 RSEI 值上升,生态环境质量得以改善。

从图 2 可以看出,2000—2006 年生态环境质量差的区域集中在北部山区,2000 年以前北部山区缺

乏统一规划,被肆意开采,生态环境质量差。2000 年以后,政府开始对北部山区矿山进行整治,如焦作市关停北山采石场,并将采石场打造成一处综合性公园——缝山针公园,生态环境质量得以改善^[24];2009—2019 年期间,焦作市出台首部地方性法规——《焦作市北山生态环境保护条例》,焦作市政府投入了资金支持、加大了管理力度,对北山生态环境保护范围、保护管理体制、保护规划、保护区进行了明确规定,生态环境质量由差、较差转变为良、优。2006—2009 年期间,城区由于人类活动强度增大,生态环境质量发生恶化趋势。环境治理过程中焦作市政府针对城区不断加强治理力度,多措并举,大力推动焦作市自资源型城市向生态型旅游城市转变,主要体现在:①根据《河南省南太行地区山水林田湖草生态保护修复工程实施方案》确定的“一山一渠两流域”的总体布局,将黄河流域保护区及北部山区作为重点修复区域,采取管控、修山、治水、护渠、复绿、整地、扩湿等综合性治理措施,按照“一区一策”方案,焦作市相关部门从自身实际情况出发,开展了大量的生态保护工作,包括北部山区历史遗留矿山生态恢复治理、流域水生态环境治理;②焦作市近年来不断加大对南水北调中线工程总干渠生态带、山区生态体系、生态廊道网络建设等重点生态工程的投入。例如,南水北调沿线 50 m 绿化带、黑臭水体改造工程和中原沿线太极养生绿化等工程,生态环境保护与建设取得一定成效。

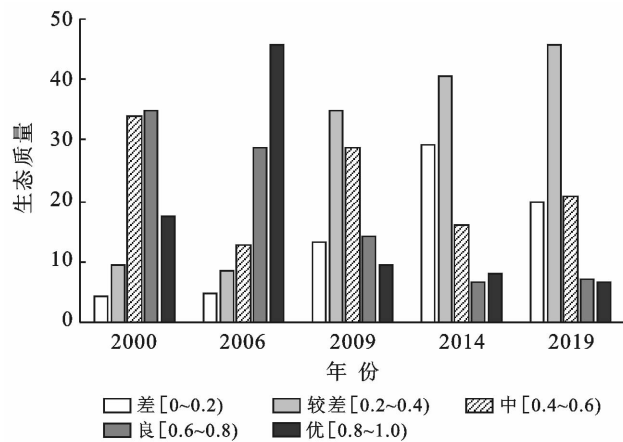


图 1 焦作市生态质量环境分级

焦作市各县区 RSEI 变化如图 3 所示。分阶段来看,2000—2014 年期间,除温县,其余县区在 2006 年 RSEI 值最高,和焦作市整体变化规律一致,符合倒“U”形变化。2014—2019 年,除博爱、修武县及市区,其余县区 RSEI 值均增加。市区、修武、武陟县高于 2019 年 RSEI 均值,沁阳市、温县遥感生态指数值较低,应重点治理,以提高焦作市整体生态环境质量。

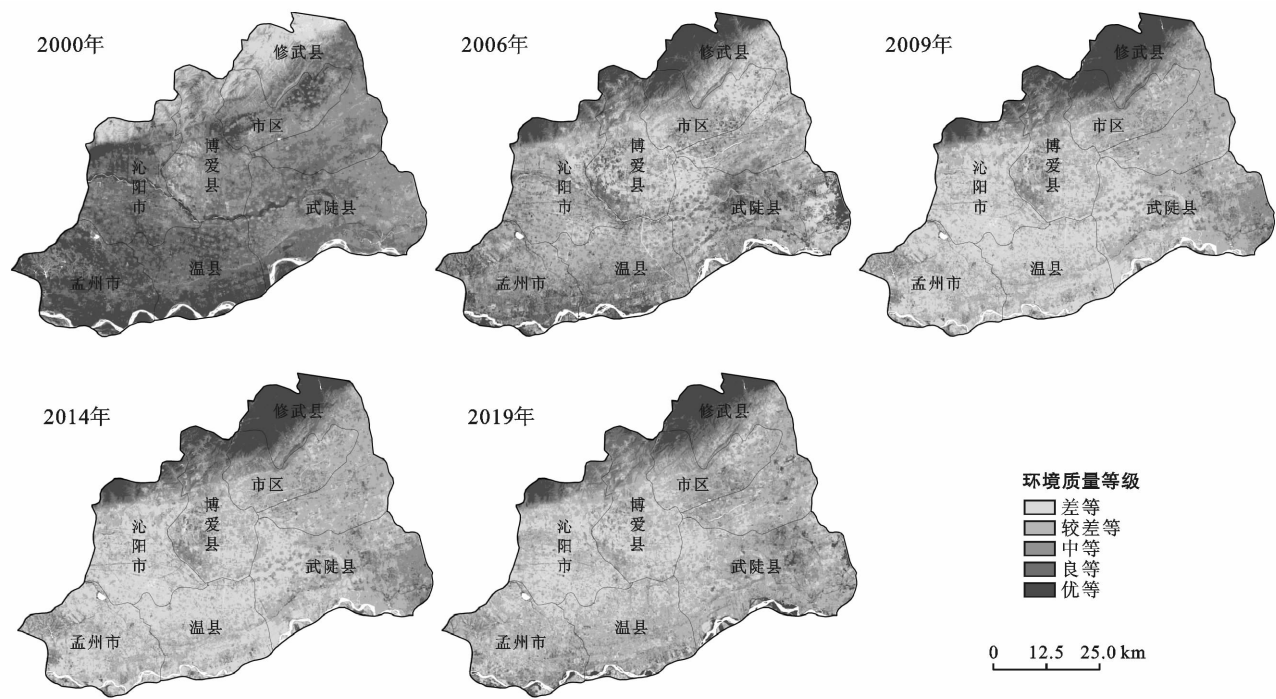


图 2 焦作市生态环境质量等级分布

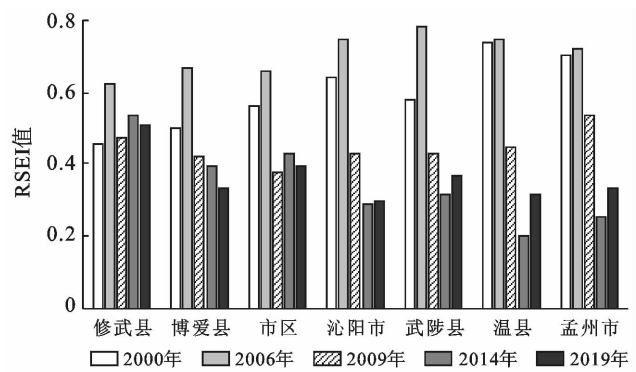


图 3 焦作市各县区 2000—2019 年 RSEI 指数变化

2.2 焦作市生态环境质量变化分析

将 RSEI 进行差值运算,得到 2000—2019 年焦作市生态环境变化动态图(图 4),其中红色代表生态环境质量恶化,绿色代表生态环境质量好转,黄色为生态环境质量稳定。变化区域分为北部山区和南部平原,自焦作市转型以来,焦作市政府不断加强对北部山区环境治理,因此北部山区生态环境质量不断提高,呈现好转。2000—2006 年期间,沁阳、博爱、市区、修武、武陟等区域好转,在此期间大力实施天然林保护、退耕还林、北山绿化等工程,5 a 完成造林 $6.06 \times 10^5 \text{ hm}^2$,关闭污染严重企业 357 家,2005 年市区空气质量优良以上天数达 286 d,比 2000 年增加近 200 d;省控出境河流断面水质平均达标率达到 91%;2006—2009 年期间,南部平原地区出现大面积恶化情况,原因是焦作市作为全国老工业城市,转型初期工业布局不合理,城区产业结构存在不足,城镇化率

达到 45.3%,未利用土地大幅减少,建设用地急剧增加;2009—2014 年期间整体恶化区域明显变少,经济结构调整升级,示范区和产业集聚区规模不断扩大,关闭污染企业 104 家;自 2014—2019 年以来,焦作市生态环境质量呈上升趋势,主要归功于政府对生态环境治理的重视以及有力的政策支持,如焦作市根据“创建国家生态园林城市”的战略部署,建设了如焦作森林动物公园、大沙河湿地公园等生态公园,同时制定了《焦作市黄河滩区开发整理规划和实施方案》,将武陟县、孟州、温县境内的黄河滩地规划建设为 4 大生态农业园区,使该地区生态环境得以改善。

2.3 人类活动胁迫综合指数对生态环境影响

由人类活动胁迫综合指数公式可得 2000—2019 年焦作市人口、经济因素占比变化情况(表 3),分析人类活动综合胁迫指数可得到,2000—2006 年期间增幅最小,仅为 3.05%,生态环境质量提高;2006—2009 年增幅为 82.71%,生态环境大面积恶化;2009—2014 年增幅变缓,为 37.45%,生态环境面积恶化变缓;2014—2019 年,胁迫增幅较 2009—2014 年变低,为 35.43%,加上政府对生态环境的重视,生态环境好转。2006—2009 年第二产业占比增加,同期生态环境大面积恶化,第二产业的工业“三废”便是导致环境污染的重要原因;2009 年之后,焦作市政府大力支持旅游产业,第一、二产业占比下降,以旅游业为主的第三产业占比上升,产业结构的调整使得焦作市由“黑色印象”向“绿色主题”转变,极大地改善了生

态环境。城镇人口占比在 2000 年最低,此时中部县(区)生态环境质量好;随着城镇人口占比不断增加,使得中部区域环境质量不断变差;2014 年中共中央、

国务院颁布了《国家新型城镇化规划(2014—2020 年)》,在此期间焦作市城镇人口占比仅提高 1%,速度变缓,生态环境好转。

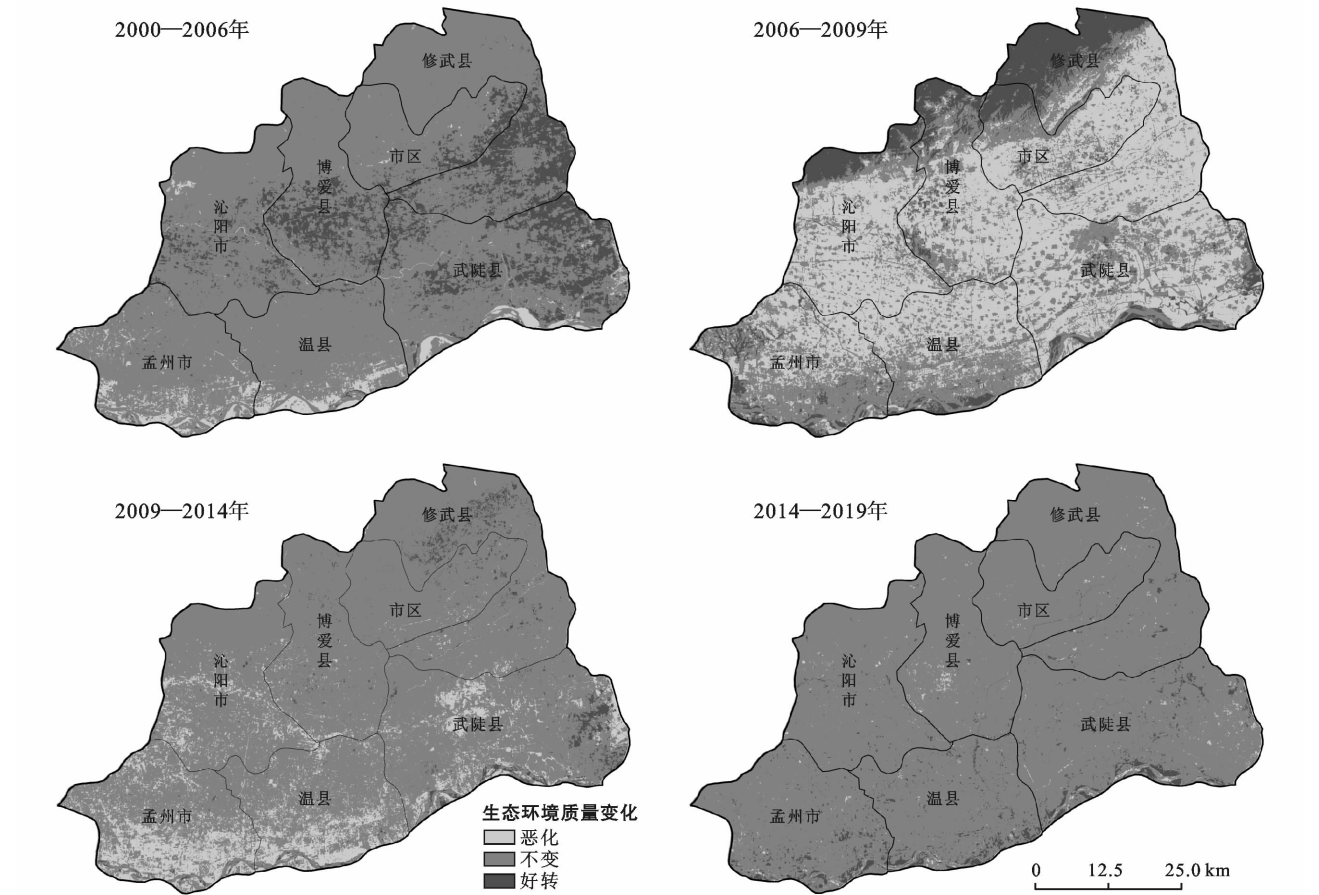


图 4 焦作市 2000—2019 年生态环境变化

表 3 焦作市 2000—2019 年社会经济强度因素占比变化情况

项 目	2000 年	2006 年	2009 年	2014 年	2019 年
人类活动胁迫综合指数	314.19	583.67	1 066.40	1 465.75	1 985.04
城镇人口比例	0.30	0.40	0.47	0.58	0.59
第一产业增加值密度比例	0.17	0.10	0.08	0.07	0.06
第二产业增加值密度比例	0.51	0.62	0.69	0.61	0.57
第三产业增加值密度比例	0.32	0.28	0.23	0.32	0.38

2.4 建模与验证

利用 RSEI 建立生态模型,可明确不同指标的重要程度,对生态环境变化趋势进行分析与验证。提取各年份指标及 RSEI 的 DN 值,将 RSEI 作因变量,绿度、湿度、干度、热度 4 个相关因子作自变量进行逐步回归分析。共取 16 342 个样点,贯穿全影像的采点可保证回归分析结果具有代表和客观性,避免样本数量过少和取样不均而导致结果产生误差。

2000 年回归方程为:
 $RSEI=0.468+0.252\times NDVI+0.296\times WET-0.327\times NDSI-0.191\times LST$ ($R^2=0.998$) (18)

2006 年回归方程为:
 $RSEI=0.478+0.263\times NDVI+0.306\times WET-0.311\times NDSI-0.110\times LST$ ($R^2=0.998$) (19)
2009 年回归方程为:
 $RSEI=0.479+0.287\times NDVI+0.308\times WET-0.319\times NDSI-0.191\times LST$ ($R^2=0.998$) (20)
2014 年回归方程为:
 $RSEI=0.499+0.260\times NDVI+0.316\times WET-0.350\times NDSI-0.207\times LST$ ($R^2=0.998$) (21)
2019 年回归方程为:
 $RSEI=0.325+0.325\times NDVI+0.345\times WET-0.416\times NDSI-0.111\times LST$ ($R^2=0.998$) (22)

结果分析可知,指标均参与运算未被剔除,可证明所选指标的合理性。系数表示不同因子对遥感生态指数的影响,系数值越大,影响程度越深。从回归系数来看,4个指标对焦作市生态环境变化影响的重要程度表现为:干度>湿度>绿度>热度。未利用地大幅减少,建设用地面积较快增长,人类活动强度增加,使得焦作市受干度指标影响最大。当因子系数为正,遥感生态指数随因子增大而增大,反之相反。NDVI和WET系数为正,说明植被和水域的增加可以对生态环境起正面影响,LST和NDSI系数为负,说明地表温度升高及建筑物增加会破坏生态环境。不同年份正负回归系数分别为: +0.548, -0.518; +0.569, -0.421; +0.595, -0.530; +0.576, -0.557; +0.670, -0.527。对比不同年份正负回归系数可知,2000—2006年,正回归系数增加,负回归系数绝对值减少,生态环境质量好转;2006—2009年,正回归系数增加,负回归系数绝对值减少,负回归系数值变化幅度远大于正回归系数,生态环境质量恶化;2009—2014年,正回归系数减少,负回归系数绝对值增加,生态环境质量恶化;2014—2019年,正回归系数增加,负回归系数绝对值减少,生态环境质量好转。模型预测与主成分分析结果相符,验证了该方法的可靠性。

3 讨论

(1) 生态环境变化趋势。王冠等^[25]运用三维生态足迹模型,以焦作市为例研究资源型城市转型过程中生态环境变化,其认为2000—2014年焦作市生态环境总体呈现倒“U”形变化趋势,与本文利用RSEI模型评价结果基本一致,区别在于本文分析结果中倒“U”形峰值出现时间不同,造成差异的原因是受遥感影像时间分辨率、云量等因素影响,导致选取的影像时间间隔较大。因此客观认识遥感技术对于生态环境评价及其可应用范围,区域生态环境动态监测与评价的具体问题具有重要的现实意义。

(2) 指标因子排序。指标因子权重受所评价地区地理、人类活动、经济等因素综合影响,因此对不同区域生态环境质量评价,指标因子的排序也会不同,需要遵循“因地制宜”的原则。张元培^[26]在对钟祥市作为研究区时得出植被对生态指数贡献度最大;张乃明^[27]研究新疆干旱区时指出干度指数、湿度指标对RSEI指数的贡献度中最小;程志峰^[28]对苏锡常城市群进行逐步回归方程中得出绿度在4个指标中所占权重最大。焦作市北部山区植被覆盖度较高,但曾经历多年的矿山开采活动导致生态环境较为脆弱^[29],

水土流失比较严重,且面积只占焦作市总面积的20.22%,近年来伴随南部平原地区城市化进程加快,人类活动强度和城市建设用地占比激增,因此综合分析认为干度指标对焦作市整体生态环境变化的影响最大。

(3) 胁迫综合指数。本文选取人类活动强度中的城镇人口及产业结构增加值密度占比来计算胁迫综合指数,进而对焦作市生态环境变化进行定量分析,前人尚未考虑加入胁迫综合指数对遥感生态指数模型进行分析。谢正观^[30]指出焦作市产业结构不合理限制了焦作市生态环境的进一步发展。崔木花^[31]以安徽省为例,指出产业结构优化升级对生态环境质量改善有着重要促进作用。因此针对焦作市的具体情况,应该科学、合理地调整产业结构,大力发展第三产业。

4 结论及建议

4.1 结论

(1) 2000,2006,2009,2014年焦作市遥感生态指数分别为0.607,0.651,0.447和0.348,生态环境处于先上升后下降趋势;2014—2019年焦作市遥感生态指数上涨幅度为63.22%;

(2) 2000—2019年期间,焦作市生态环境转变与社会经济强度、政策支持有关,第二产业占比降低及城镇人口占比稳定均有助于改善焦作市生态环境;

(3) 焦作市生态环境质量受干度影响最大,湿度次之,绿度和热度影响最小。干度对生态环境变化影响最大,主要原因是城市化进程中建设用地不断提高;

4.2 建议

(1) 2019年沁阳市、温县遥感生态指数低于焦作市遥感生态指数均值,治理重点应在沁阳市、温县,以期提高焦作市整体生态环境质量;

(2) 在焦作市未来发展过程中应注意合理规划、利用土地,恢复植被,减轻地表干化的程度;

(3) 应注意焦作市流域水环境问题,打好“碧水蓝天”保卫战;武陟县、沁阳市、温县旅游资源丰富,例如太行山猕猴自然保护区、神农山、青天河等,应大力发展旅游业,增加第三产业占比,提高生态环境质量。

[参 考 文 献]

- [1] 李万钰,陈晓勇,易洁,等.基于遥感生态指数的赣江新区生态质量评价[J].东华理工大学学报(自然科学版),2020,43(1):83-89.
- [2] 王森.浅析快速城市化进程带来的环境资源问题[J].现代经济信息,2017(2):33-33.

- [3] 崔秀萍. 经济发展中城市化与大气污染曲线拟合相关性研究:以内蒙古呼和浩特市为例[J]. 干旱区资源与环境, 2017, 31(11): 44-49.
- [4] 张杨, 江平. 基于 RS 和 GIS 的武汉市热岛效应时空演变研究[J]. 现代城市研究, 2018 (1): 119-125.
- [5] 陶晓燕. 资源枯竭型城市生态安全评价及趋势分析:以焦作市为例[J]. 干旱区资源与环境, 2014, 28(2): 53-59.
- [6] 王万同, 孙汀, 王金霞, 等. 基于多源遥感数据的区域生态系统服务价值年际动态监测:以中原城市群为例[J]. 地理科学, 2019, 39(4): 680-687.
- [7] 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.
- [8] 茹克亚·萨吾提, 阿不都艾尼·阿不里, 李虎, 等. 基于遥感生态指数模型的阜康市生态环境动态变化监测与评价[J]. 水土保持研究, 2020, 27(1): 283-289, 297.
- [9] 魏力辉, 万大娟, 毕军平, 谢军. 锡矿山锑矿区生态环境质量遥感动态监测与评价[J]. 环境科学与技术, 2020, 43(06): 230-236.
- [10] 魏伟, 周陶, 郭泽呈, 等. 基于遥感指数的干旱内陆河流域土地生态敏感性时空演变特征:以石羊河流域武威市为例[J]. 生态学杂志, 2020, 39(9): 3068-3079.
- [11] 张杨, 江平. 基于 RS 和 GIS 的武汉市热岛效应时空演变研究[J]. 现代城市研究, 2018(1): 119-125.
- [12] 王俊华, 代晶晶, 令天宇, 等. 基于 RS 与 GIS 技术的西藏多龙矿集区生态环境监测研究[J]. 地质学报, 2019, 93(4): 957-970.
- [13] 张浩, 杜培军, 罗洁琼, 等. 基于遥感生态指数的南京市生态变化分析[J]. 地理空间信息, 2017, 15(2): 58-62, 10.
- [14] 韩富圆, 王天明, 孙阳. 基于 Landsat 遥感数据武汉地区植被覆盖度动态变化监测分析[J]. 测绘与空间地理信息, 2019, 42(4): 90-92.
- [15] 聂艳, 马泽玥, 周道峰, 等. 阿克苏河流域土壤湿度反演与监测研究[J]. 生态学报, 2019(14): 12.
- [16] Baig M H A, Zhang L, Shuai T, et al. Derivation of a tasselled cap transformation based on Landsat 8 at satellite reflectance [J]. Remote Sensing Letters, 2014, 5(5): 423-431.
- [17] 吴溪, 郭斌, 陈忠升, 等. 基于 Landsat 影像的环胶州湾不透水面格局演变过程[J]. 资源科学, 2018, 40(11): 2260-2269.
- [18] 程志峰, 何祺胜. 基于 RSEI 的苏锡常城市群生态环境遥感评价[J]. 遥感技术与应用, 2019, 34(3): 531-539.
- [19] 徐涵秋, 林中立, 潘卫华. 单通道算法地表温度反演的若干问题讨论:以 Landsat 系列数据为例[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2015, 40(4): 487-492.
- [20] 王井利, 马畅, 张宁. 基于遥感归一化指数的生态环境破坏和恢复能力的监测与评价[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2018, 34(4): 676-683.
- [21] 裴亮, 潘丽. 基于 Landsat 8 卫星 OLI 影像的合肥市水体信息提取方法研究[J]. 测绘与空间地理信息, 2018, 41(9): 143-146.
- [22] 郎勇设, 柳辉, 王耀宗, 等. 宁夏人类活动生态系统胁迫分析及对策研究[J]. 管理观察, 2016(20): 62-65.
- [23] 吴强, 王心源, 骆磊. 基于遥感生态指数的黄山世界遗产地生态环境评价[J]. 水土保持通报, 2020, 40(3): 142-146.
- [24] 郭二旺. 焦作市北山采石场生态修复实践[J]. 中国水土保持, 2008 (6): 26-26.
- [25] 王冠. 资源型城市转型生态可持续性分析:以河南省焦作市为例[J]. 生态经济, 2016, 32(4): 53-56.
- [26] 张元培, 吴颖, 罗军强, 等. 基于遥感生态指数的钟祥市生态变化分析[J]. 资源环境与工程, 2019, 33(4): 474-480.
- [27] 张乃明, 陈冬花, 邢菲, 等. 基于遥感生态指数的新疆干旱区博乐市生态变化分析[J]. 水土保持通报, 2019, 39(1): 154-159, 166.
- [28] 程志峰, 何祺胜. 基于 RSEI 的苏锡常城市群生态环境遥感评价[J]. 遥感技术与应用, 2019, 34(3): 531-539.
- [29] 王世东, 郭磊. 焦作市北山资源枯竭型地区在经济转型过程中的生态脆弱性评价[J]. 生态学杂志, 2020, 39(10): 3442-3451.
- [30] 谢正观, 孙永辉. 资源型城市的再次转型研究:以焦作市为例[J]. 安徽农业科学, 2014, 42(1): 197-199, 201.
- [31] 崔木花. 安徽省产业结构演变的生态环境效应[J]. 经济地理, 2020, 40(8): 131-137, 152.