

2010—2020年陕西省神木市生态环境质量 时空演变及其驱动因素

孙维婕, 何璐, 于强, 苗禹琳, 赵际凯, 刘维

(北京林业大学 精准林业北京市重点实验室, 北京 100083)

摘要: [目的] 陕西省神木市是黄河流域生态保护建设的重要地区。分析该地区生态环境质量变化, 为资源型城市神木市的生态环境治理、修复及绿色发展提供科学依据。[方法] 选取2010、2015与2020年共3期Landsat遥感影像, 利用主成分分析方法构建遥感生态指数(RSEI)作为生态环境评价指标, 分析神木市生态环境质量时空演变格局, 并通过地理探测器探究该地区生态环境驱动机制。[结果] ①神木市生态环境质量持续恶化, RSEI指数下降幅度达到12.47%, 在2010—2015年间下降最快; 神木市生态环境质量很差与较差的面积增加幅度达到15.29%。②神木市生态环境质量恶化以西北部的风沙区率先增强, 随后转向地势较低的东南部和东北部。同时, 神木市生态环境质量以较差和一般为主, 两者总和占据神木市总面积的67.09%。③植被覆盖度与绿色度、湿度、干度及热度4个指标因素均表现出显著的驱动性, 其中植被覆盖度解释力最高(达到62.4%), 是神木市生态环境质量的主要驱动力; 多因子交互也均表示出协同增强的作用, 夜间灯光、人口密度、热度与植被覆盖度交互作用最强。[结论] 神木市生态环境质量总体仍在进一步恶化, 尽管前期退化得到遏制, 但恶化区域在逐渐扩大, 提高植被覆盖度可以有效增强神木市生态环境质量。为此应进一步落实植被绿化等生态保护措施, 提升神木市高品质生态环境质量。

关键词: 神木市; 生态环境质量; 遥感生态指数; 时空格局; 地理探测器

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2024)01-0284-09

中图分类号: P964, X821

文献参数: 孙维婕, 何璐, 于强, 等. 2010—2020年陕西省神木市生态环境质量时空演变及其驱动因素[J]. 水土保持通报, 2024, 44(1): 284-292. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2024.01.028; Sun Weijie, He Lu, Yu Qiang, et al. Spatial-temporal evolution of ecological environmental quality and driving factors in Shenmu City of Shaanxi Province from 2010 to 2020 [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2024, 44(1): 284-292.

Spatial-temporal Evolution of Ecological Environmental Quality and Driving Factors in Shenmu City of Shaanxi Province from 2010 to 2020

Sun Weijie, He Lu, Yu Qiang, Miao Yulin, Zhao Jikai, Liu Wei

(Beijing Key Laboratory of Precision Forestry, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China)

Abstract: [Objective] The changes of ecological environmental quality were analyzed at Shenmu City of Shaanxi Province, an important area for ecological protection and construction in the Yellow River basin, in order to provide a scientific basis for ecological environmental management, restoration, and green development in this resource-based city. [Methods] Landsat remote sensing images in 2010, 2015, and 2020 were selected, and the remote sensing ecological index (RSEI) was constructed as an ecological environmental evaluation index by using the principal component analysis method to analyze the spatial and temporal evolution pattern of ecological environmental quality in Shenmu City. The ecological environmental driving mechanism in the area was determined by Geodetector. [Results] ① The ecological environmental quality of Shenmu City deteriorated over time, with the decline in RSEI reaching 12.47%, decreasing the fastest from 2010 to 2015. The area with poor ecological environmental quality in Shenmu City increased by 15.29%. ② The ecological environmental quality in Shenmu City deteriorated first in the sandy area in the

收稿日期: 2023-06-27

修回日期: 2023-08-28

资助项目: 国家自然科学基金项目“基于生态安全格局的荒漠绿洲区生态保护红线划定方法研究”(42071237)

第一作者: 孙维婕(1999—), 女(汉族), 山东省临沂市人, 硕士研究生, 研究方向为3S技术在资源环境中的应用。Email: sunweijie@bjfu.edu.cn。

通信作者: 于强(1987—), 男(汉族), 吉林省长春市人, 博士, 副教授, 主要从事3S技术在生态环境中的应用的研究。Email: yuqiang@bjfu.edu.cn。

northwest (enhanced by wind), and then shifted to the southeast and northeast where the elevation was lower. Meanwhile, the dominant ecological environmental quality in Shenmu City was categorized as poor and fair. The area of those two categories occupied 67.09% of the total area of Shenmu City. ③ The four indicator factors of vegetation cover and greenness, humidity, dryness, and heat were identified as significant drivers of ecological environmental quality in Shenmu City. Vegetation cover was the main driver of ecological environmental quality, accounting for 62.40% of the variation in ecological environmental quality. The multi-factor interactions also all indicated synergistic enhancement, and the interaction between night light, population density, heat, and vegetation coverage was the strongest. [Conclusion] The overall ecological environmental quality in Shenmu City has been deteriorating over time. Although the previous degradation has been contained, the area of deteriorating ecological environmental quality is gradually expanding. Increasing vegetation cover can effectively enhance the ecological environmental quality in Shenmu City. Therefore, ecological protection measures such as vegetation greening should be further implemented to improve the ecological environmental quality in Shenmu City.

Keywords: Shenmu City; ecological environmental quality; remote sensing ecological index; spatio-temporal pattern; Geodetector

陕西省神木市作为资源型城市,矿产资源的持续性开发导致一系列地质结构破坏和植被退化等生态问题^[1]。同时,作为重要的黄河中下游生态区,其生态环境的保护占有重要地位^[2]。长期以来,神木市的社会发展常常以牺牲环境为代价来换取经济上的增长,同时,当地生态环境自身的脆弱性加快了神木市生态环境质量下降^[3-5]。从生态环境保护的角度出发,对神木市生态环境质量进行时空动态监测和驱动机制探究,达到准确认知神木市生态环境质量状况及变化趋势,有利于加强对神木市生态环境防护与治理,为黄河流域生态区可持续发展提供理论支持。

生态环境是自然因素与社会因素组成的复合系统,是人类社会持续性发展的基石^[6]。传统方法普遍是通过模糊评判法、层次分析法、国家颁发的《生态环境状况质量评估体系》以及遥感指数的 4 种评价体系^[7-8],其中前三者在指标选取时均受到空间可视化的局限性且权重设定具有人为主观性,不能准确反映研究区的整体评价结果。遥感技术具有信息量大,覆盖面广的特点,为生态环境监测提供了高效便捷的技术手段^[9]。当前遥感指数的应用以归一化植被指数、叶面积指数、土地利用类型等单一指标来量化生态环境质量。然而,由于影响因子的复杂性,单一指标不能充分表征生态环境质量。遥感生态指数(remote sensing environment index, RSEI)在生态环境质量评估中应用最为广泛^[10]。该方法通过主成分分析法将绿度指标(normalized difference vegetation index, NDVI)、干度指标(normalized difference build-up soil index, NDBSI)、湿度指标(wetness, WET)和热度指标(land surface temperature, LST)等 4 个指标形成一个完全依靠自然因子的综合指数表征区域的生态环境质

量。RSEI 指数易获取,且能全面、直观和快速的评估区域生态环境质量。如今已有众多研究基于 RSEI 指数评估区域生态环境,如城市^[11]、湿地^[12]、岛屿^[13-14]、沙漠^[15]等多种生态系统。同时,当前研究鲜有涉及到对不同驱动力影响神木市生态环境质量过程的定量分析,因此,本文引入地理探测器进行分析。地理探测器基于空间统计学,既能够分析单一因子对变量的影响,也可解释各因子变量的交互作用,该方法能够有效揭示神木市生态环境质量演变过程中的驱动力。

神木市正处在资源型城市转型发展中且位于黄河“几字弯”中下游生态脆弱区,实现黄河流域生态保护和绿色高质量协调发展对新时代的神木具有重要意义。当下众多神木市的生态环境质量评估多是基于植被覆盖度^[16]、土地利用^[17]及景观格局^[18]的角度出发,缺乏对神木市生态环境质量时空演变规律掌握与驱动因子的研究。鉴于此,本文借助谷歌地球引擎(Google Earth Engine, GEE)获取 2010, 2015 及 2020 年的 Landsat 遥感影像,建立神木市遥感生态指数(RSEI),进而探究近 2010—2020 年神木市的生态环境质量时空演变格局。通过地理探测器,从自然地形、气候植被与人文三大因素,对神木市生态环境质量的驱动力因素进行探测,确定引起生态环境质量演变的主要驱动因子,从而准确、全面地掌握和评估神木市生态环境质量的发展趋势,为神木市的生态保护和高质量发展提供强有力的科学支撑。

1 数据来源及方法

1.1 研究区概况

神木市位于陕西省榆林市北部,介于 109°40′—110°54′E, 38°13′—39°27′N 之间,与山西省、内蒙古

自治区毗邻,地处黄河中游,深居毛乌素沙漠腹地、黄土丘陵区 and 内蒙古高原之间的过渡地带,是陕西省面积最大的县(市)(图 1)。神木市属于温带半干旱大陆性气候,冬冷夏热,春冬干旱,年均气温 9.2℃,年均降雨量约为 441.9 mm,降雨集中在 7—9 月。神木市地貌类型复杂,地势西北高东南低,西北部是风沙草滩区,东南部是黄土丘陵沟壑区,两者分别为总面积的 49% 和 51%^[19]。神木市地域辽阔,煤炭资源丰富,总体面积 7 635 km²,探明储量 5.60×10¹⁰ t 多,是中国最大的煤炭生产县(市)。神木市作为煤炭资源型城市和黄河中下游生态区,其经济发展与生态质量紧密相关,坚持生态优先绿色发展成为神木市经济发展的必经之路^[20-21]。

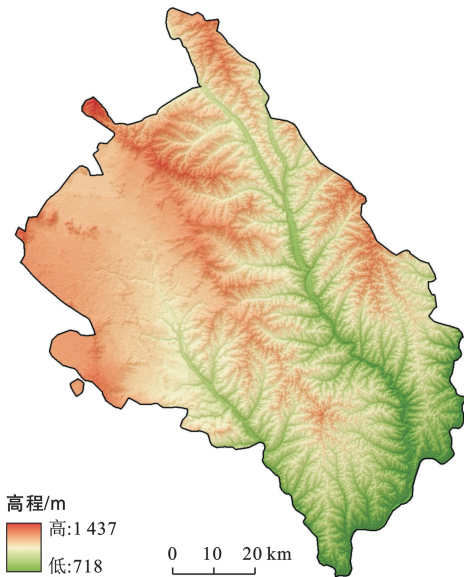


图 1 陕西省神木市地形

Fig.1 Topography of Shenmu City, Shaanxi Province

1.2 数据来源

土地利用/土地覆盖变化(land-use and land-cover change, LUCC)数据来自资源环境科学与数据中心(<https://www.resdc.cn/>),空间分辨率为 30 m×30 m;数字高程模型(digital elevation model, DEM)来源 SRTM 数据集(<https://lpdaac.usgs.gov/>),空间分辨率为 30 m×30 m,利用 ArcGIS 10.2 软件中的坡面工具进行坡面数据的获取;植被指数(NDVI)、湿度指数(WET)、建筑物—裸地指数(NDBSI)

及热度指数(LST)数据均在谷歌地球引擎(GEE)获取,选择 Landsat 7,8 标准大气顶部反射率 TOA 影像集合,云量阈值设置在 10% 以下,通过均值合成每年植被生长季 6—9 月的时相数据,空间分辨率为 30 m×30 m。其中,2010 年为 Landsat-7 ETM 图像,2015 年和 2020 年为 Landsat-8 OLI 图像;人口密度数据(Population Data)来源世界人口(WorldPop, <https://hub.worldpop.org/>),空间分辨率是 100 m×100 m;气象数据来源于时空三极环境大数据平台(<http://poles.tpdc.ac.cn>)提供的《中国 1 km 分辨率逐月降水量/平均气温数据集》,空间分辨率约为 1 km×1 km;夜间灯光数据来源 NPP/VIIRS 夜间灯光数据,来源于美国 NOAA 网站(<https://www.ngdc.noaa.gov/eog/viirs/>),空间分辨率为 500 m×500 m;研究区行政区划来自中国基础地理信息系统。上述数据均通过 ArcGIS 统一采样为 30 m×30 m 分辨率和一致投影,并采用研究区矢量边界进行裁剪。

1.3 研究方法

1.3.1 RSEI 生态指数构建 遥感生态指数(RSEI)是基于湿度、绿色、热度与干度等自然因子形成的指标来快速客观评估区域生态状况的综合生态指数。在 RSEI 中,湿度指数(WET)可以较好地反映出地表植被、水体和土壤的湿度情况^[22];绿色指标(NDVI)用于检测植物生长状况、植被覆盖度等植被自身的生长指标^[23];干度指标(NDBSI)是以建筑指数(ABI)和土壤指数(SI)^[24]为基础,充分表达建设用地和裸地的情况;热度指标(LST)通过计算传感器温度得到地表热辐射强度,进而转换为地表温度^[25],是生态过程和气候变化的重要指标。

(1) 湿度指标。

$$WET = a_1 B_{blue} + a_2 B_{green} + a_3 B_{red} + a_4 B_{nir} - a_5 B_{swir1} - a_6 B_{swir2} \quad (1)$$

式中: B_{blue} 、 B_{green} 、 B_{red} 、 B_{nir} 、 B_{swir1} 、 B_{swir2} 为 Landsat 数据在蓝光、绿光、红光、近红外、短波红外 1 和短波红外 2 的反射率, a_1 、 a_2 、 a_3 、 a_4 、 a_5 、 a_6 为常数项,且在 Landsat7 TM 与 Landsat8 OLI 影像中具有差异。

(2) 绿色指标。

$$NDVI = (B_{nir} - B_{red}) / (B_{nir} + B_{red}) \quad (2)$$

(3) 干度指标。

$$ABI = \frac{2B_{swir1} / (B_{swir1} + B_{nir}) - [B_{nir} / (B_{nir} + B_{red}) + B_{green} / (B_{green} + B_{swir1})]}{2B_{swir1} / (B_{swir1} + B_{nir}) + [B_{nir} / (B_{nir} + B_{red}) + B_{green} / (B_{green} + B_{swir1})]} \quad (3)$$

$$SI = \frac{(B_{swir1} + B_{red}) - (B_{nir} + B_{blue})}{(B_{swir1} + B_{red}) + (B_{nir} + B_{blue})} \quad (4)$$

$$NDBSI = \frac{SI + ABI}{2} \quad (5)$$

(4) 热度指标。

$$LST = T / [1 + (\lambda T / \xi) \cdot \ln \epsilon] - 273.15 \quad (6)$$

式中: T 为传感器处热度值; λ 为中心波长; ξ 为常数; ϵ 为地表比辐射率。

为了避免 4 个指标量纲不一致导致的误差,在计算遥感生态指数(RSEI)之前需进行归一化处理^[26]:

$$ND_i = \frac{D_i - D_{\min}}{D_{\max} - D_{\min}} \quad (7)$$

式中: ND_i 是归一化处理后的指标; D_i 为 RSEI 的分量指标; D_{\max} 为指标的最大值; D_{\min} 为指标的最小值。

1.3.2 主成分分析 主成分分析是指将原各波段所包含的主要有效信息在去掉多波段影像中的冗余信息后,通过线性变换,将原始的多个波段压缩成另一组独立的集成波段,最大限度地聚焦原始波段中包含的主要有效信息。主成分分析在很大程度上避免了人为因素造成的误差,使复杂问题简单化,能够得出科学有效的计算结果,实现了指标权重的客观性^[27]。其公式为:

$$RSEI_0 = 1 - PC_1[f(NDVI, WET, LST, NDBSI)] \quad (8)$$

$$RSEI = \frac{RSEI_0 - RSEI_{0\min}}{RSEI_{0\max} - RSEI_{0\min}} \quad (9)$$

式中: $RSEI_0$ 是遥感生态指数的初始值; $RSEI_{0\min}$, $RSEI_{0\max}$ 为目标年份的 $RSEI_0$ 的最小值和最大值;

RSEI 为最终的遥感生态指数。

1.3.3 地理探测器 地理探测器是地学中常用的一种探测空间分异性及其驱动因素的统计学方法,能够从因子探测和交互探测角度探究神木市生态环境质量的驱动机制。地理探测器计算公式为^[28]:

$$q = 1 - \frac{\sum_{h=1}^L N_h \sigma_h^2}{N \sigma^2} = 1 - \frac{SSW}{SST} \quad (10)$$

$$SSW = \sum_{h=1}^L N_h \sigma_h^2 \quad (11)$$

$$SST = N \sigma^2 \quad (12)$$

式中: $h=1, 2, \dots, L$ 为变量的分层; N 和 N_h 分别为全部样本数和层 h 分类样本数; σ^2 和 σ_h^2 分别代表全区域和层 h 的 RSEI 方差。SSW 和 SST 分别表示层内方差和区域总差。

q 的值域是 $[0, 1]$, 它的值大小对应着因变量的空间分异程度,值越大则表示对神木市生态环境质量的解释力越强。

交互探测可以评估探测不同因子间的交互作用关系,评估不同因子组合对神木市生态环境质量的影响力是否存在变化,具体分类详见表 1^[29]。

表 1 神木市生态环境质量交互作用类型

Table 1 Interaction types of eco-environment quality at Shenmu City

q 值范围	交互类型
$q(X_1 \cap X_2) < \min[q(X_1), q(X_2)]$	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
$q(X_1 \cap X_2) > \max[q(X_1), q(X_2)]$	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

本文选择 RESI 的 4 个分量指标(WET、NDVI、NDBSI、LST)、自然地形因素(高程、坡度),气候植被因素(气温、降雨量、土地利用、植被覆盖度)、人文因素(人口密度、夜间灯光)共 12 种影响因子作为神木市生态环境质量的潜在驱动因子。其中,在自然地形因素方面,在不同的地形因素下植被生长差异性大,对生态环境产生不同的影响;在气候植被因素(气温、降雨量、土地利用、植被覆盖度)方面,气温与降雨量是植被生长的基础要素,不同的土地利用影响生态环境质量的空间分布,植被覆盖度是影响地表植被状况的重要指标。在人文方面,人口密度和夜间灯光是表征人类活动强度和城市化建设的重要指标,对生态环境质量产生重要影响。

2 结果与分析

2.1 RESI 模型的构建与检验

基于主成分分析结果,在 2010、2015、2020 年,第一

主成分(PC_1)的贡献率为 78.39%, 78.51%, 75.41%, 均超过 75.00%, 说明 PC_1 相对其他主成分具有 4 个主要指标的大部分特征信息,从而选择 PC_1 来建立 RSEI 模型;同时,4 个指标对 PC_1 贡献率的正负与数值大小较为稳定(见表 2),能够真实合理地表征神木市的生态环境质量状况。

通过皮尔逊相关分析校验 RSEI 模型的准确性,在 2010、2015、2020 年 3 期分析结果中,湿度指标、绿度指标与 RESI 指数呈正向关系,相关性均达到 70.00% 以上,而干度指标与热度指标总体呈负相关,表明对生态环境起到负向作用(见表 3),各分量指标与 RSEI 指数均在 0.01 水平上呈现极显著相关。

2.2 神木市生态环境质量时空变化特征

神木市在 2010—2020 年的近 11 a 间,RSEI 指数由 0.481 降至 0.421,下降幅度达到 12.47%。这表明神木市的生态质量总体较差,且呈现持续恶化趋势(见表 4)。

表 2 神木市 2010—2020 年 RSEI 主成分分析结果

Table 2 Results of principal component analysis of RSEI in Shenmu City from 2010 to 2020

年份	指标	第一主成分	第二主成分	第三主成分	第四主成分
2010	WET	0.738	0.105	0.457	0.855
	NDVI	0.473	0.623	-0.570	0.094
	NDBSI	-0.319	0.715	0.155	0.001
	LST	-0.540	-0.295	-0.665	0.509
	特征值	0.020	0.004	0.001	0.000
	贡献率/%	78.39	16.48	3.72	1.41
2015	WET	0.739	-0.113	0.460	0.840
	NDVI	0.525	-0.524	-0.688	0.158
	NDBSI	-0.316	-0.721	0.092	0.067
	LST	-0.513	0.440	-0.552	0.514
	特征值	0.022	0.005	0.001	0.000
	贡献率/%	78.51	17.13	3.00	1.36
2020	WET	0.803	-0.069	-0.346	0.914
	NDVI	0.408	-0.453	0.661	0.089
	NDBSI	-0.449	-0.830	-0.079	0.026
	LST	-0.446	0.318	0.661	0.393
	特征值	0.014	0.004	0.001	0.000
	贡献率/%	75.41	19.23	4.52	0.84

表 3 神木市 2010—2020 年 RESI 及其分量指标相关系数统计

Table 3 Statistics of correlation coefficients of RESI and its component indicators in Shenmu City from 2010 to 2020

指标	年份	WET	NDVI	NDBSI	LST
RSEI	2010	0.785**	0.715**	0.150**	0.170**
	2015	0.853**	0.830**	-0.153**	-0.158**
	2020	0.851**	0.840**	-0.110	-0.363**

注: ** 指在 0.01 水平上相关性显著。

从不同指标来看,湿度指标连年下降,反映神木市土壤和地表植被含水量减少,生态环境在进一步恶化;绿度指标连续上升,说明神木市当局注重植被覆盖率的提高,但绿度相对湿度指标对生态指数 RSEI 贡献率较低,因此生态环境整体仍然是处于恶化程度。干度指标与热度指标则分别是先降后升和先升后降,但总体上依旧是上升趋势,表明了神木市的城市化建设有所加快,不透水面和裸土面积有所增加,地表温度也逐渐升高,对生态环境是负面影响(表 4)。

进一步根据《生态环境评价技术规范》(HJ/T 192—2015)的标准,以 0.2 为间隔,将神木市 RSEI 生态指数划分为 5 个等级: I 很差(0.0~0.2], II 较差(0.2~0.4], III 一般(0.4~0.6], IV 较好(0.6~0.8], V 很好(0.8~1.0],进而得到神木市不同年份生态环境质量等级的空间分布(图 2)和面积变化(表 5)。根据表 5,从时间尺度来看,2010 年神木市生态环境质量以一般为主,占据 40.58%,其次是较差和较好,分别占比 24.44% 和 21.33%;至 2015 年,神木市生态环境

质量严重恶化,很差和较差等级的面积占比显著提高,其他等级面积占比均下降;在 2020 年,神木市生态环境质量很差和较差等级的面积占比总和达到 48.09%,相对 2010 年和 2015 年,分别提高了 15.29% 和 9.18%。在近 11 年神木市生态环境质量 5 个等级的变化幅度分别是 3.92%, 11.38%, -6.06%, -7.71%, -1.53%, 神木市生态环境质量出现较大程度的下降,其中较差等级的面积出现显著扩增。

表 4 神木市 2010—2020 年 RSEI 与其分量指标统计

Table 4 Statistics of RSEI and its component indicators in Shenmu City from 2010 to 2020

指标	2010 年		2015 年		2020 年	
	均值	标准差	均值	标准差	均值	标准差
WET	0.892	0.020	0.836	0.026	0.816	0.026
NDVI	0.565	0.076	0.614	0.075	0.696	0.074
NDBSI	0.519	0.057	0.499	0.003	0.603	0.066
LST	0.489	0.095	0.524	0.098	0.516	0.081
RSEI	0.481	0.197	0.448	0.202	0.421	0.196

表 5 神木市 2010—2020 年生态环境质量等级及面积变化

Table 5 Changes of ecological environment quality grade and area in Shenmu City from 2010 to 2020

RSEI 分级	2010 年		2015 年		2020 年	
	面积/km ²	比例/%	面积/km ²	比例/%	面积/km ²	比例/%
I(很差)	617.59	8.35	900.01	12.17	907.39	12.27
II(较差)	1 807.70	24.44	1 977.78	26.74	2 649.40	35.82
III(一般)	3 002.07	40.58	2 897.69	39.17	2 553.83	34.52
IV(较好)	1 577.58	21.33	1 329.00	17.97	1 007.48	13.62
V(很好)	392.45	5.31	292.82	3.96	279.30	3.78

从空间上来看,神木市生态环境质量以较差和一般等级为主,3 期平均占据区域总面积的 29.00% 和 38.09%。神木市生态环境质量自西北向东南逐渐好转,生态环境质量很差和较差等级的区域集中在西北部地区,较好和很好的在东部和南部地区。神木市生态质量空间分异随不同年份有略微变化,神木市西北部地区生态环境质量在 2010 年达到最差,在 2020 年得到改善,而东南部和南部地区的生态环境质量退化愈加显著(图 2)。

2.3 神木市生态环境质量驱动力分析

本文选择 RSEI 生态指数的 4 个分量指标,并结合神木市自然地形、气候植被及人为因素对生态环境的影响,筛选出 12 个潜在的驱动力因子(详见表 6)。通过 ArcGIS 10.2 创建 2.5 km×2.5 km 网格对各因子均匀采样,并导入到 R Studio 软件里以 q 值最大为标准^[30],将连续性因子以分位数法、自然断点法、几何法或等间距距离散化为 4—9 类,输入到探测器从而得到最优化的地理探测结果。

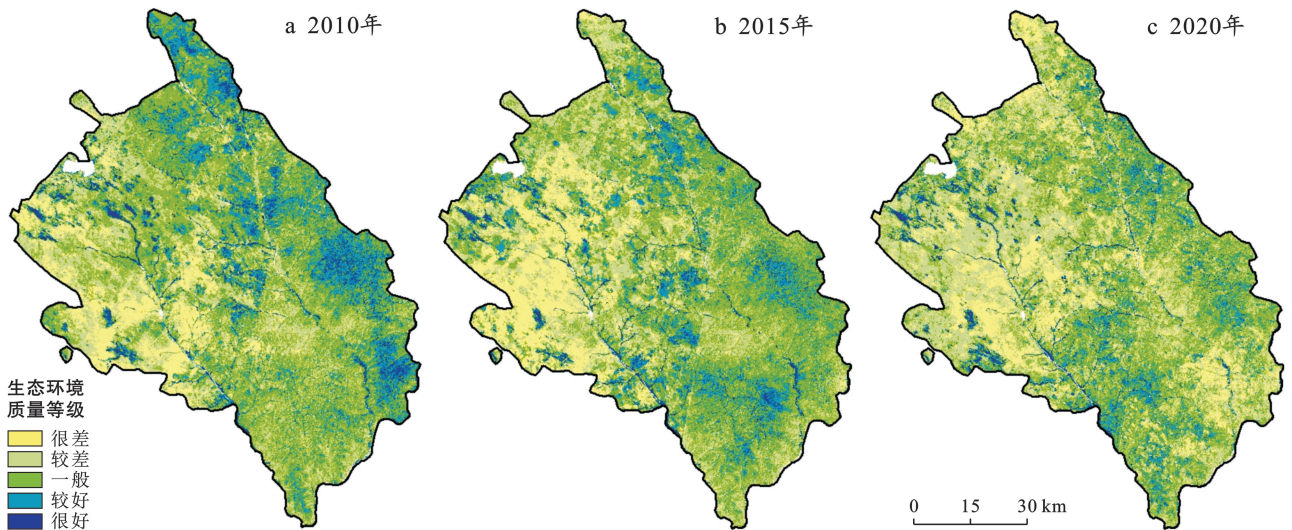


图 2 神木市 2010—2020 年生态环境质量分级

Fig.2 Grading of ecological environment quality in Shenmu City from 2010 to 2020

表 6 神木市影响生态环境质量驱动力因子

Table 6 Driving factors affecting ecological quality in Shenmu City

要素	代码	因子	
模型因素	X_1	湿度指标	
	X_2	绿度指标	
	X_3	干度指标	
	X_4	热度指标	
自然地形因素	X_5	高程	
	X_6	坡度	
	X_7	气温	
气候植被因素	X_8	降雨量	
	X_9	土地利用	
	X_{10}	植被覆盖度	
	人文因素	X_{11}	人口密度
		X_{12}	夜间灯光

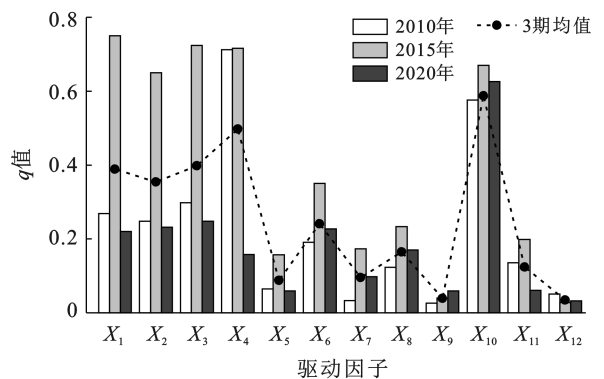


图 3 神木市 2010—2020 年单因子探测变化

Fig.3 Changes of single factor detection in Shenmu City from 2010 to 2020

2.3.1 单因子探测结果 将 2010, 2015 与 2020 年 3 期因子探测的平均 q 值按降序排列(图 3): 植被覆盖度(0.624) > 热度指标(0.529) > 干度指标(0.423) > 湿度指标(0.413) > 绿度指标(0.377) > 坡度(0.256) > 降雨量(0.175) > 人口密度(0.132) > 气温(0.101) > 高程(0.094) > 土地利用(0.042) > 夜间灯光(0.037)。植被覆盖度是神木市生态环境质量的最主要驱动力, 达到 62.4% 的解释力。同时, RSEI 的 4 个分量指标解释力降序依次为热度、干度、湿度与绿度, 与前文中热度与干度均是负向作用, 湿度与绿度为正向作用相一致。因此, 热度与干度是神木市生态环境质量的负向主要驱动力。除此之外, 自然地形因素(坡度、高程)解释力最高为 25.6%, 气候因素(降雨量、气温)解释力最高为 17.5%, 而人文因素解释力最弱, 人口密度为 13.2%, 夜间灯光仅 3.7%。

总体来看, 在神木市 3 期探测中, 除 RSEI 分量指标因素外, 其他 8 个驱动因子解释力的变化特征并不明显(图 3)。这也表明神木市的驱动力机制具有稳定性。植被覆盖率在这 8 个驱动因子中 q 值最高, 对生态环境质量的促进作用最大, 坡度次之, 也是影响生态环境质量的重要因素, 土地利用、夜间灯光及人口密度数据 q 值最低, 对生态环境质量解释力最低。神木市多山丘, 山丘植被较少被开发利用, 因此植被覆盖率是影响生态环境质量的主要因素。坡度因子 q 值略高于高程, 是神木市生态环境质量影响力最高的自然地形因子, 在坡度较小的区域, 因人类活动频繁而对生态环境质量容易产生影响。而当地的城市化建设与人口密度对于生态环境质量的影响较小。

2.3.2 交互探测结果 通过交互探测分析因子间的交互作用(图 4)。本文的 12 个因子均对 RSEI 生态指数具有增强作用, 其中任意两个因子比单因子具有更强的解释力。其中, 植被覆盖度与其他因子间多存

在线性增强效果,夜间灯光与其他因子间多存在非线性增强效果。在 2020 年,人口密度也与其他因子间表现出非线性增强效果。这表明单因子探测结果解释力低的因子,与其他因子共同作用影响力的增强效果会更加明显。热度指标与植被覆盖度的交互作用最显著,在 2010 与 2015 年解释力均达到 95%,而 2020 年降至 76%。

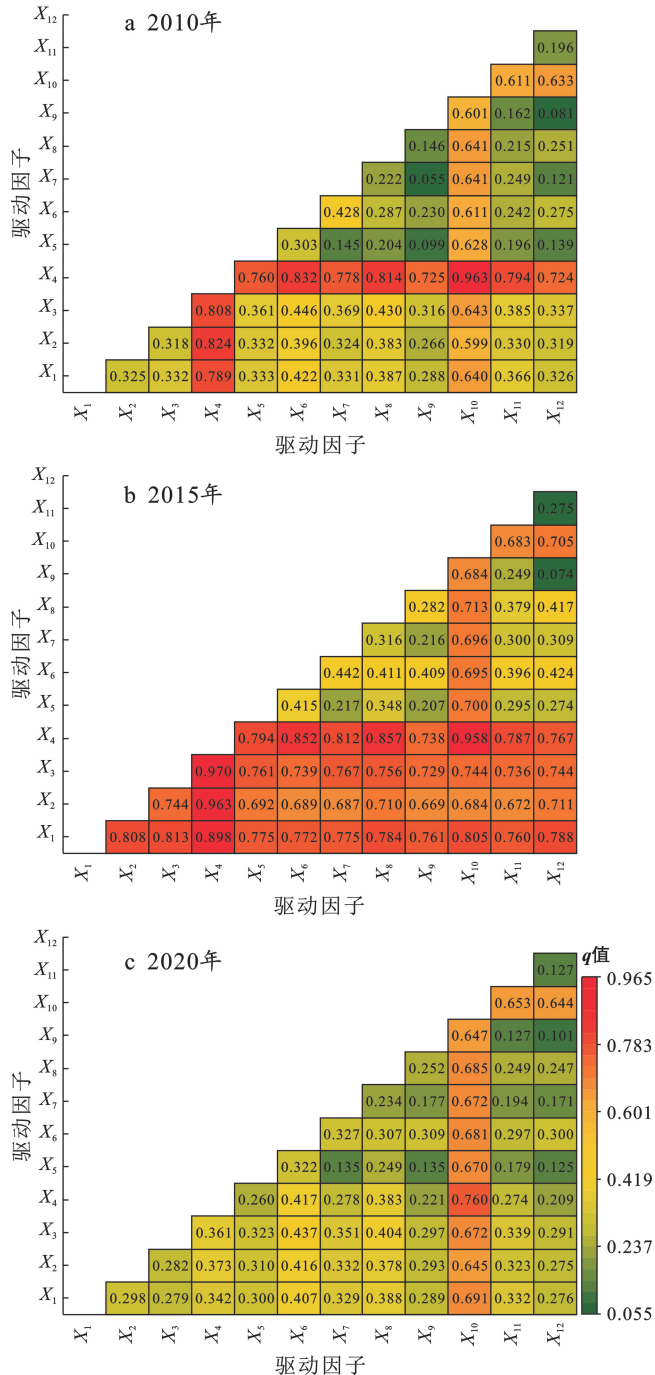


图 4 神木市 2010—2020 年生态环境质量驱动因子交互探测结果

Fig. 4 Factor interaction detection results of eco-environment quality at Shenmu City from 2010 to 2020

在 2010、2015 与 2020 年三期交互探测中(图 4), 2010 年,热度指标与其余 10 个因子(不含植被覆盖度,2015 与 2020 年同上)均表现出较高的交互作用,解释力均超过 72%;植被覆盖度次之,解释力均超过 59%,最高达到 96.3%。在 2015 年,RSEI 的 4 个分量指标的交互作用解释力均超过 66%,同时,植被覆盖度的交互作用解释力均超过 68%,最高达到 95.8%,相比 2010 年得到普遍增强。在 2020 年,RSEI 的 4 个分量指标交互解释力均下降至不超过 76%,植被覆盖度的交互解释力最高仅达到 76%。

3 讨论

本文利用 RSEI 遥感生态指数评估 2010—2020 年神木市生态环境质量状况,所得结论与石玉琼等^[31]基于景观生态风险研究结果基本一致。2010—2015 年神木市生态环境质量在急剧恶化,在 2015 年恶化程度最为严峻,至 2020 年得到一定程度的改善,尽管绿度指标在持续上升,但湿度指标在持续下降且对 RSEI 指数具有最高的贡献率,因此整体仍旧处于恶化程度。同时,神木市生态环境质量西北恶化最为严重,进而转移到东南区域,这与邓目丽等^[16]关于神木市植被覆盖度变化的研究结果相似,这也表明植被覆盖度能够在很大程度上解释神木市生态环境质量的时空演变格局。神木市严酷的自然条件决定了土地利用程度较低,且地表植被生长环境受到风沙和干旱的严重影响,其中,草地的分布最为广泛,也是最易受侵扰的地类^[32]。并且神木市作为资源型城市,煤矿开发主要是在西北部区域,这两者综合决定了神木市生态环境质量西北部的恶化程度。

本文通过 GEE 平台构建 RSEI 遥感生态指数极大地提高了生态环境质量的评估效率,同时结合地理探测器定量分析了潜在的影响因子对神木市生态环境质量的影响,研究结果可为神木市的生态环境治理提供相关参考。然而,本文依旧存在很大的局限性,首先仅选择了 3 期影像,不能细致地分析神木市生态环境质量的演变格局,仅得到了阶段性的结果。同时,由于数据分辨率的问题,使其对驱动机制的研究结果产生微量影响,在今后的研究中需尽量使用同一分辨率遥感数据并对数据获取及数据处理方法等方面进一步改进,其次本研究后期考虑进行多期影像的连续性分析,纳入更多的自然与人文因素,获取更高精度的研究数据,并利用地理加权回归等多个模型比较分析,以达到更为完善的驱动机制探索,为神木市生态环境保护提供更多参考。

4 结论

(1) 神木市生态环境质量在2010—2020年呈现下降趋势,RSEI指数由0.481下降至0.421,下降幅度达到12.47%。在2010—2015年是神木市生态环境质量恶化最为严峻的阶段,2015—2020年恶化得到缓解,RSEI指数下降幅度是前者的50%。神木市生态环境质量很差和较差等级范围显著扩增,两者增加幅度总和达到15.29%。

(2) 神木市生态环境质量在空间上以较差和一般为主,占据神木总面积的29.00%和38.09%,总和达到67.09%。同时,较差和较好分别是增减变化最显著的等级,变化幅度分别是11.38%和-7.71%。神木市生态环境质量恶化程度在西北部的风沙区率先增强,随后转向东南部与东北部。

(3) 通过地理探测器对神木市生态环境质量的驱动力机制探究,植被覆盖度是最为显著的驱动因子,且高于RSEI指数的4个分量指标。这表明植被覆盖度相对于地表湿度、植被状况、裸露用地及地表温度四大度量指标,很大程度上决定了神木市生态环境质量。其次是坡度因子,而高程、土地利用及夜间灯光对生态环境质量影响较弱,解释力均小于10%。交互作用相比单因子对生态环境质量的影响更为显著。

[参 考 文 献]

- [1] 刘晓琼,刘彦随,任日照.陕西榆林能源重化工基地生态环境问题及防治对策[J].灾害学,2010,25(2):129-133.
Liu Xiaoqiong, Liu Yansui, Ren Rizhao. Ecological and environmental problems and countermeasures for the prevention and control of energy and heavy chemical industry base in Yulin, Shaanxi [J]. Journal of Catastrophology, 2010,25(2):129-133.
- [2] 杨泽康,田佳,李万源,等.黄河流域生态环境质量时空格局与演变趋势[J].生态学报,2021,41(19):7627-7636.
Yang Zekang, Tian Jia, Li Wanyuan, et al. Spatial and temporal patterns and evolutionary trends of ecological quality in the Yellow River basin[J]. Acta Ecologica Sinica, 2021,41(19):7627-7636.
- [3] Meng Fanxin, Guo Jinling, Guo Zhangiang, et al. Urban ecological transition: the practice of ecological civilization construction in China [J]. Science of The Total Environment, 2021,755:142633.
- [4] Wang Yan, Wang Li, Shao Hongbo. Ecological footprint analysis applied to a coal-consumption county in China [J]. CLEAN-Soil, Air, Water, 2014, 42(7): 1004-1013.
- [5] 孙亚军,张梦飞,高尚,等.典型高强度开采矿区保水采煤

关键技术与实践[J].煤炭学报,2017,42(1):56-65.

Sun Yajun, Zhang Mengfei, Gao Shang, et al. Key technology and practice of water preservation coal mining in typical high-intensity mining mines [J]. Journal of China Coal Society, 2017,42(1):56-65.

- [6] 薛明月.黄河流域经济发展与生态环境耦合协调的时空格局研究[J].世界地理研究,2022,31(6):1261-1272.
Xue Mingyue. Spatio-temporal pattern of coupling and harmonization of economic development and ecological environment in the Yellow River basin [J]. World Regional Studies, 2022,31(6):1261-1272.
- [7] 崔仁泽,宋川,王宜新,等.生态环境质量评价现状分析及展望[J].环境科学与管理,2022,47(10):186-189.
Cui Renze, Song Chuan, Wang Yixin, et al. Analysis of the current status and prospect of ecological environment quality assessment [J]. Environmental Science and Management, 2022,47(10):186-189.
- [8] 马永康,姜怡,凌成星,等.基于RSEI指数的雄安新区生态质量评价[J].四川林业科技,2022,43(4):8-16.
Ma Yongkang, Jiang Yi, Ling Chengxing, et al. Evaluation of ecological quality in Xiong'an New Area based on RSEI index [J]. Journal of Sichuan Forestry Science and Technology, 2022,43(4):8-16.
- [9] 陈利军,刘高焕,励惠国.中国植被净第一性生产力遥感动态监测[J].遥感学报,2002,6(2):129-135.
Chen Lijun, Liu Gaohuan, Li Huiguo. Remote sensing dynamic monitoring of net primary productivity of vegetation in China [J]. National Remote Sensing Bulletin, 2002,6(2):129-135.
- [10] 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 Hanqiu. Creation of urban remote sensing ecological index and its application [J]. Acta Ecologica Sinica, 2013,33(24):7853-7862.
- [11] An Min, Xie Ping, He Weijun, et al. Spatiotemporal change of ecologic environment quality and human interaction factors in three gorges ecologic economic corridor, based on RSEI [J]. Ecological Indicators, 2022,141:109090.
- [12] 王丽春,焦黎,来凤兵,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 Lichun, Jiao Li, Lai Fengbing, et al. Evaluation of ecological changes in the wetland of Manas Lake, Xinjiang based on remote sensing ecological index [J]. Acta Ecologica Sinica, 2019,39(8):2963-2972.
- [13] 李思政,王柳柱,赵晟,等.基于GEE平台的舟山岛生态环境质量动态评价[J].水土保持通报,2023,43(2):293-302.
Li Sizheng, Wang Liuzhu, Zhao Sheng, et al. Dynamic

- evaluation of Zhoushan Island's ecological environment quality based on GEE platform [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2023,43(2):293-302.
- [14] 徐涵秋, 张好. 海岛型城市扩展的生态效应分析: 以厦门岛为例[J]. *地理科学*, 2015,35(7):867-872.
Xu Hanqiu, Zhang Hao. Analysis of the ecological effect of island-type urban expansion: Taking Xiamen Island as an example [J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2015,35(7):867-872.
- [15] 毕卫华, 钱倬珺, 王辉, 等. 基于 RSEI 的采煤塌陷积水对生态环境的影响研究[J]. *中国矿业*, 2021,30(12):38-44.
Bi Weihua, Qian Jonjun, Wang Hui, et al. Research on the impact of coal mining collapse water on ecological environment based on RSEI [J]. *China Mining Magazine*, 2021,30(12):38-44.
- [16] 邓目丽, 蒋馥根, 孙华, 等. 神木市植被覆盖度时空动态变化分析[J]. *森林与环境学报*, 2021,41(6):611-619.
Deng Muli, Jiang Fugen, Sun Hua, et al. Spatial and temporal dynamics of vegetation cover in Shenmu City [J]. *Journal of Forest and Environment*, 2021,41(6):611-619.
- [17] 封建民, 郭玲霞, 陈玲侠. 近 10 年来神木县土地利用变化和生态效应的地形特征分异研究[J]. *水土保持研究*, 2016,23(3):132-136.
Feng Jianmin, Guo Lingxia, Chen Lingman. Study on topographic feature differentiation of land use change and ecological effect in Shenmu County in the past 10 years [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2016,23(3):132-136.
- [18] 吴金华, 刘思雨, 白帅. 基于景观生态安全的神木市生态廊道识别与优化[J]. *干旱区研究*, 2021,38(4):1120-1127.
Wu Jinhua, Liu Siyu, Bai Shuai. Identification and optimization of ecological corridors in Shenmu City based on landscape ecological security [J]. *Arid Zone Research*, 2021,38(4):1120-1127.
- [19] 彭鹏. 神木市土地利用/覆盖变化及驱动力分析[D]. 甘肃 兰州, 甘肃农业大学, 2017.
Peng Peng. Analysis of LUCC and driving forces in Shenmu City [D]. Lanzhou, Gansu; Gansu Agricultural University, 2017.
- [20] 王峰. 资源型城市转型可持续发展研究: 西安: 以陕西神木为例[D]. 陕西 西安, 长安大学, 2014.
Wang Feng. Study on the sustainable development of resource city transformation: Taking Shenmu of Shanxi Province as an example [D]. Xi'an, Shaanxi; Chang'an University, 2014.
- [21] 王涛. 基于循环经济的神木县兰炭产业可持续发展研究[D]. 陕西 西安, 西北大学, 2012.
Wang Tao. The research of sustainable development of Shenmu coke industry based on circular economy [D]. Xi'an, Shaanxi: Northwest University, 2012.
- [22] Crist E P. A TM Tasseled Cap equivalent transformation for reflectance factor data [J]. *Remote Sensing of Environment*, 1985,17(3):301-306.
- [23] Goward S N, Xue Yongkang, Czajkowski K P. Evaluating land surface moisture conditions from the remotely sensed temperature/vegetation index measurements: An exploration with the simplified simple biosphere model [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2002,79(2-3):225-242.
- [24] Rikimaru A, Roy P S, Miyatake S. Tropical forest cover density mapping [J]. *Tropical ecology*, 2002,43(1):39-47.
- [25] Nichol J. Remote sensing of urban heat islands by day and night [J]. *Photogrammetric engineering and remote sensing*, 2005,71(5):613-621.
- [26] 钟欣呈, 许泉立. 基于 RSEI 模型的玉溪市生态环境变化监测与评价[J]. *水土保持研究*, 2021,28(4):350-357.
Zhong Xincheng, Xu Quanli. Monitoring and evaluation of ecological environment changes in Yuxi City based on RSEI model [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2021,28(4):350-357.
- [27] 刘超, 吴丹丹, 杨考. 一种新的高维数据降维方法[J]. *统计与咨询*, 2012(4):16-17.
Liu Chao, Wu Dandan, Yang Kao. A new method for dimensionality reduction of high-dimensional data [J]. *Statistics and Consultation*, 2012(4):16-17.
- [28] 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 Jinfeng, Xu Chengdong. Geoprobes: principles and prospects [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2017,72(1):116-134.
- [29] Wang Jinfeng, Zhang Tonglin, Fu Bojie. A measure of spatial stratified heterogeneity [J]. *Ecological indicators*, 2016,67:250-256.
- [30] Cao Feng, Ge Yong, Wang Jinfeng. Optimal discretization for geographical detectors-based risk assessment [J]. *GIScience & Remote Sensing*, 2013,50(1):78-92.
- [31] 石玉琼, 王宁练, 李团胜, 等. 榆林市景观生态风险及其时空分异[J]. *干旱区研究*, 2019,36(2):494-504.
Shi Yuqiong, Wang Ninglian, Li Tuansheng, et al. Landscape ecological risk and its spatio-temporal differentiation in Yulin City [J]. *Arid Zone Research*, 2019,36(2):494-504.
- [32] 封建民, 郭玲霞. 陕西省神木县土地利用格局和生态服务价值变化[J]. *水土保持通报*, 2014,34(6):293-298.
Feng Jianmin, Guo Lingxia. Changes in land use pattern and ecological service value in Shenmu County, Shaanxi Province [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2014,34(6):293-298.