

DOI: 10.5846/stxb201911292589

杨兆青, 陆兆华, 刘丹, 袁明扬, 王菲, 荣正阳, 黄玉凯. 煤炭资源型城市生态安全评价——以锡林浩特市为例. 生态学报, 2021, 41(1): 280-289.

Yang Z Q, Lu Z H, Liu D, Yuan M Y, Wang F, Rong Z Y, Huang Y K. Ecological security evaluation on the coal resource-based city: a case of Xilinhot City. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(1): 280-289.

煤炭资源型城市生态安全评价 ——以锡林浩特市为例

杨兆青¹, 陆兆华^{1,2,*}, 刘 丹¹, 袁明扬¹, 王 菲¹, 荣正阳¹, 黄玉凯³

1 中国矿业大学(北京) 恢复生态研究所, 北京 100083

2 滨州学院 山东省黄河三角洲生态环境重点实验室, 滨州 256603

3 神华宝日希勒能源有限公司, 呼伦贝尔 021025

摘要:煤炭资源型城市生态安全评价能够协调人口、资源和环境之间的矛盾,保障城市可持续发展。基于 PSR 模型,以煤炭资源型城市锡林浩特市为研究区域,从生态环境和社会经济方面共选取了 33 个指标因子,构建了煤炭资源型城市的生态安全评价指标体系,运用熵权 TOPSIS 法进行了城市生态安全综合评价,并通过障碍度模型对城市生态安全的主要障碍因子进行了研究。研究结果表明:(1)2008—2017 年锡林浩特市生态安全水平总体呈缓慢上升趋势。生态安全综合评价指数从 0.464 上升到 0.553,安全等级由较不安全转为临界安全状态;(2)10 年间 PSR 三大指数表现出不同变化特征。压力指数呈下降后上升再小幅下降的变化趋势,状态指数呈波动上升趋势,响应指数呈快速上升趋势;(3)子系统的障碍度分析表明压力系统的障碍度最大,是影响煤炭资源型城市生态安全的首要因素。子系统的障碍度变化趋势表现为:压力系统和状态系统的障碍度均不同程度增大,响应系统的障碍度越来越小;(4)单项指标的障碍度分析表明影响该资源型城市生态安全的主要障碍因子集中在压力系统和状态系统,10 年间最大障碍因子经历了从城镇化率到矿区面积的演变。

关键词:煤炭资源型城市;生态安全评价;PSR 模型;熵权 TOPSIS 法;障碍度;锡林浩特市

Ecological security evaluation on the coal resource-based city: a case of Xilinhot City

YANG Zhaoqing¹, LU Zhaohua^{1,2,*}, LIU Dan¹, YUAN Mingyang¹, WANG Fei¹, RONG Zhengyang¹, HUANG Yukai³

1 Institute of Restoration Ecology, China University of Mining and Technology, Beijing, Beijing 100083, China

2 Shandong Provincial Key Laboratory of Eco-Environmental Science for Yellow River Delta, Binzhou University, Binzhou 256603, China

3 Shenhua Group Baorixile Energy Co., Ltd., Hulunbuir 021025, China

Abstract: The ecological security evaluation of a coal resource-based city can help manage the imbalance between a population, resources, and the environment, so as to ensure sustainable development of the city. The entropy weight TOPSIS (Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution) model was used to evaluate the ecological security of Xilinhot, a coal resource-based city; an obstacle factor of the city was then diagnosed through an obstacle degree model. The entropy weight TOPSIS method helps fully utilize original data, enabling a comprehensive assessment of the ecological security of an urban ecosystem, revealing each indicator level as well as the key factors affecting a system. An eco-security evaluation index system involving 33 indexes was established under a PSR (Press-State-Response) model based on aspects of ecological environment and social economy. The results showed that: (1) The development of ecological security levels in Xilinhot city, as a whole, increased gradually from 2008 to 2017. The safety level changed from less safe to critical as the

基金项目:“十三五”国家重点研发计划项目(2016YFC0501108)

收稿日期:2019-11-29; 网络出版日期:2020-11-19

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: luzhaohua@cumt.edu.cn

index increased from 0.464 to 0.553; (2) The three PSR indices showed different characteristics in the last 10 years. The pressure index trend demonstrated an increase, following a decrease; decreasing slightly thereafter. The state index increased in a fluctuating manner, and the response index demonstrated rapid growth; (3) The subsystem obstacle degree indicated that the pressure system was the primary factor affecting the ecological security of the coal resource-based city. The obstacle degree of the pressure and state system increased by an annual average of 6.04% and 2.11%, respectively, but that of the response system decreased by 11.15%; (4) Considering the index layer, the main factors affecting ecological security are attributed to the pressure and state systems. In 2008—2012, the obstacle degree of urbanization rate was maximum; in 2013—2017, the first obstacle factors changed, and mineral area became the major obstacle factor.

Key Words: coal resource-based city; ecological security evaluation; PSR model; entropy weight TOPSIS method; obstacle degree; Xilinhot City

本文基于对生态系统为人类提供完善的生态服务功能的理解,认为生态安全是指一个国家或地区的生态环境状况能持续满足人类生存和发展需求,人类生存和发展不受或少受生态环境状况的制约与威胁的状态^[1]。一方面生态环境系统是由生物、土壤、水体、空气、地质和地貌等在内的自然要素组成的整体环境综合系统,其所提供的生态服务满足了人类各种需求,另一方面,人类经济社会系统对生态环境系统提供的服务功能也会进行适当的调整,既满足了日益变化的发展需要,又不损害生态环境系统的潜力^[1]。因此,生态安全是对维护和保障生态环境系统和社会经济系统之间协调、稳定、健康和可持续发展关系的探讨。生态安全评价是根据研究对象和研究目的,对特定时空范围内生态安全状况的定性和定量描述^[2]。

人类社会已进入生态文明发展阶段,生态文明的核心就是人与自然和谐发展,而生态安全评价的目的便是正确处理经济社会发展与生态环境保护之间的相互关系,这正是生态文明建设的应有之意。城市的形成是人类从认识自然到改造自然,并与自然和谐共处的过程,是社会发展的趋势和文明的标志,预计 2025 年世界城市化率将达到 62.5%,中国将达到 60%左右,城市发展对自然资源和生态容量的过度占用也给生态环境造成胁迫,生态安全问题逐渐显现^[3]。生态安全是国家安全的重要基石^[4],而城市又是国家社会经济和文化发展的中心,因此城市生态安全是维护国家长治久安的重要保障。资源型城市建设和发展过程中资源、环境和人口矛盾更为突出,城市生态系统更加脆弱,城市生态安全面临很大的威胁,因此,探讨资源型城市生态安全变得尤为重要。煤炭资源型城市是因煤炭资源开发而形成和发展起来的城市,且煤炭及相关产业为当地国民经济的发展做出了巨大贡献^[5]。煤炭工业是支撑我国经济建设和社会发展的基础产业,而且煤炭在我国一次能源结构中的主体能源地位将长期保持不变,但其开发利用伴随的生态破坏和环境污染等生态安全问题较为突出,如土地挖损、塌陷和占压^[6];植被破坏,生物量减少,多样性降低^[7];引发水环境灾害^[8];矿区及周围土壤重金属超标^[9];排土场扬尘污染^[10]、煤炭利用排放二氧化碳等有害气体等,生态环境难以承载这种粗放的经济增长方式,不利于区域的可持续发展。

目前,大多数学者开展了煤矿区尺度的生态环境安全相关研究^[7-12],但立足于煤炭资源型城市的生态安全研究鲜有报道^[13-16],而且评价方法还存在一些不足,已有研究多采用综合加权指数评价法,指标权重确定了指标地位间的差异,加权求和得出评价对象的综合水平,但不能反映评价对象与理想状态之间的差距;指标安全阈值的划分标准难以统一,参照其它地区数值会导致评价结果可信度降低;部分研究仅对城市生态安全整体做出评估,缺乏对影响因子的深入研究。在社会经济发展、自然资源利用、环境状态改变等方面影响下,城市生态安全的最佳状况是呈动态变化的,最佳的城市生态安全状态就是最接近生态安全最优状态,远离生态安全最劣状态,而关于多目标决策的 TOPSIS 法就是测度评价对象与正、负理想解的距离,该方法既有利于多指标之间的对比,也有利于不同年份之间的分析^[17]。熵权法是依据指标反映的客观信息来反映其相对重要程度,客观性较强,评价结果准确、可靠。鉴于此,本文选择我国东部草原区典型的煤炭资源型城市锡林浩特市进行实证研究,采用熵权 TOPSIS 法对 2008—2017 年锡林浩特市生态安全状况进行综合评价,选择这 10

年时间尺度反映的是该市经历从高速发展到高质量发展,由煤炭基地向煤电一体化建设的转型阶段;同时,引入障碍度模型对影响城市生态安全状况的主要障碍因素进行诊断,为提升城市生态安全指明具体方向和着力点,以期对锡林浩特市的城市管理决策和可持续发展规划提供依据。

1 研究区概况

锡林浩特市位于内蒙古自治区锡林郭勒盟,东经 $115^{\circ}13'$ — $117^{\circ}06'$,北纬 $43^{\circ}02'$ — $44^{\circ}52'$,是锡林郭勒盟政治、经济、文化中心。属中温带半干旱大陆性气候,冬季漫长而寒冷,夏季短促而凉爽,年平均气温为 1.7°C ,无霜期 100d 左右。年均降水量不足 300mm,且降水分布不均,由东南向西北方向逐渐递减。锡林浩特市是我国“两屏三带”生态安全战略格局北方防沙带的重要组成部分,是生态脆弱区,也是我国大型煤炭基地胜利煤田的所在城市。该市煤炭储量约为 300 多亿 t,煤炭产量占锡林郭勒盟全盟的 30.63%,以露天开采为主^[18],这种矿采方式对生态环境的破坏最为直接和明显。随着煤炭资源的大规模开发,该市以动力煤为主的煤电一体化产业得到了一定发展,2017 年煤炭开采业产值占地区生产总值的 17.81%,在当地经济结构中占有重要地位,但煤炭资源的开发利用在促进社会经济发展的同时,也给当地草原生态系统和城市生态安全带来了巨大挑战。

2 数据来源与评价方法

2.1 数据来源

本研究数据主要来源于 2009—2018 年的《锡林郭勒盟统计年鉴》、《锡林浩特市国民经济和社会发展统计公报》、《中国城市建设统计年鉴》,以及相关政府部门的历年统计数据。部分数据通过借助遥感影像获得,如矿区面积、植被覆盖度。

2.2 评价方法

2.2.1 基于 PSR 模型的指标体系构建

PSR 模型是由联合国经济合作开发署提出的压力 (Pressure)-状态 (State)-响应 (Response) 的概念模型^[19-20],其基本含义是人类活动对环境施加压力(如煤炭开采等),导致环境状态发生变化(如植被破坏、地下水污染等),采取措施对环境恶化做出响应(如加大环保投入等)。本文基于煤炭资源型城市的可持续发展目标,按照“四级叠加,逐层收敛,统一排序”的原则,构建出层次结构清晰、指标关系明确的综合评价指标体系^[14]。目标层综合反映城市生态安全总体水平。准则层的压力、状态、响应 3 个子系统相互制约、相互影响,正是制定决策和实施对策的全过程。要素层由生态环境和社会经济两属性构成,体现了自然环境和人类活动的相互作用对城市生态安全的影响。根据要素层的特征和含义进而确定可直接度量的指标层,指标选取也充分考虑了指标数据的科学性、代表性、实用性和可获得性。在广泛总结相关文献的基础上^[13-15,21],并结合锡林浩特市实际情况,构建了包含 33 个指标的煤炭资源型城市生态安全评价指标体系,如表 1 所示。该指标体系特别设置了“耗煤发电指数”,即用规模以上工业企业火力发电量与原煤消耗量比值近似表示该地区煤电一体化建设效益,体现煤炭清洁高效利用的程度,还有“矿区生态环境治理面积”指标,这些都是煤炭资源型城市生态系统具有代表性的指标。另外,将“人均耕地面积”设置为负向指标,即认为该指标越小对该地区矿业城市生态安全越好,这是因为考虑到本地草原生态系统的原生性及稳定性,耕地设定为限制因子更为合理。

2.2.2 熵权 TOPSIS 法

TOPSIS (Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution,逼近于理想值的排序方法)由 Wang 和 Yoon 于 1981 年首次提出^[22],是一种多目标决策方法,其原理是将各指标的最优值和最劣值分别作为正理想解和负理想解,根据评价对象靠近正理想解和远离负理想解的程度来评估城市生态安全水平。本文将熵权法和 TOPSIS 法的运算理念相结合,对评价对象和正、负理想解的计算进行了改进,建立熵权 TOPSIS 模型^[17],

基于该模型对煤炭资源型城市进行生态安全评价。其计算步骤如下:

设有 n 个年份($j=1,2,\cdots,n$)、 m 个评价指标($i=1,2,\cdots,m$),形成评价矩阵:

$$X = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1n} \\ x_{21} & x_{22} & \cdots & x_{2n} \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ x_{m1} & x_{m2} & \cdots & x_{mn} \end{bmatrix} \quad (1)$$

表 1 锡林浩特市生态安全评价指标体系及权重

Table 1 Index system and weights of ecological security evaluation in Xilinhot City					
目标层 Target layer	准则层 Criterion layer	要素层 Factor layer	指标层 Index layer	性质 Character	权重 Weight
锡林浩特市生态安全 Ecological security in Xilinhot City	压力系统 Pressure system (0.3995)	生态环境 Ecological environment (0.2521)	人均原煤产量 p1	-	0.0244
			人均发电量 p2	-	0.0243
			矿区面积 p3	-	0.0557
			工业废水排放量 p4	-	0.0305
			工业废气排放量 p5	-	0.0338
			工业 SO ₂ 排放量 p6	-	0.0396
			工业烟(粉)尘排放量 p7	-	0.0288
			一般工业固废产生量 p8	-	0.0150
			社会经济 Social economy (0.1474)	-	0.0320
			人口密度 p9	-	0.0168
			人口自然增长率 p10	-	0.0313
			人均 GDPp11	-	0.0239
			规模以上工业企业单位产值能耗 p12	-	0.0201
			规模以上工业原煤消费量 p13	-	0.0234
			煤炭采掘业产值占能源工业产值比重 p14	-	0.0258
	状态系统 State system (0.3516)	生态环境 Ecological environment (0.1833)	人均草地面积 s1	+	0.0168
			人均耕地面积 s2	+	0.0252
			植被覆盖度 s3	+	0.0351
			人均地表水资源 s4	+	0.0351
			人均地下水资源 s5	-	0.0153
			人均城市道路面积 s6	+	0.0301
			空气质量优良率 s7	+	0.0335
			城镇居民人均可支配收入 s8	+	0.0351
			农牧区居民人均可支配收入 s9	-	0.0467
			城镇居民恩格尔系数 s10	+	0.0530
			城镇化率 s11	+	0.0141
	响应系统 Response system (0.2488)	生态环境 Ecological environment (0.1232)	建成区绿化覆盖率 r1	+	0.0160
			一般工业固废综合利用率 r2	+	0.0289
			城市污水处理率 r3	+	0.0200
			生活垃圾无害化处理率 r4	+	0.0441
			矿山生态环境治理面积 r5	+	0.0368
			耗煤发电指数 r6	+	0.0312
			环保投资占 GDP 比重 r7	+	0.0576
			第三产业占 GDP 比重 r8	+	

(1) 指标标准化

各指标的单位不同,使数据之间的可比性较差,需对原始指标数据进行标准化处理。本文采用极差变换

法将原始数据统一转化到 $[0, 1]$ 区间之内,得到标准化矩阵 Y ,其过程如下:

$$\text{正向指标: } Y_{ij} = \frac{x_{ij} - \min(x_{ij})}{\max(x_{ij}) - \min(x_{ij})} \quad (2)$$

$$\text{负向指标: } Y_{ij} = \frac{\max(x_{ij}) - x_{ij}}{\max(x_{ij}) - \min(x_{ij})} \quad (3)$$

式中, x_{ij} 、 Y_{ij} —第 j 年第 i 指标的原始值和标准化值; $\min(x_{ij})$ 、 $\max(x_{ij})$ —各指标原始值中的最小值、最大值。

(2) 确定指标权重,构建加权决策矩阵

选择客观熵权法对指标进行赋权,其意义在于某一指标值的差异程度越大,熵值越小,权重就越大,说明该指标提供的有效信息越多^[23],该方法较为成熟,本文就不再赘述。指标权重向量 $W=(W_1, W_2, \dots, W_i)$,结合标准化矩阵 Y ,得到加权规范化矩阵 V :

$$V = YW = [v_{ij}]_{m \times n} \quad (4)$$

(3) 确定正理想解(V^+)和负理想解(V^-)

$$V_i^+ = \{\max V_{ij} | i = 1, 2, \dots, m\} = \{V_1^+, V_2^+, \dots, V_m^+\} \quad (5)$$

$$V_i^- = \{\min V_{ij} | i = 1, 2, \dots, m\} = \{V_1^-, V_2^-, \dots, V_m^-\} \quad (6)$$

(4) 各年份评价指标到正、负理想解的距离 T^+ 和 T^-

$$T_j^+ = \sqrt{\sum_{i=1}^m (V_{ij} - V_i^+)^2}, \quad T_j^- = \sqrt{\sum_{i=1}^m (V_{ij} - V_i^-)^2} \quad (7)$$

(5) 计算各年份评价对象与理想解的贴近度 C_j

$$C_j = \frac{T_j^-}{T_j^- + T_j^+} \quad (8)$$

用贴近度表示城市生态安全指数, C_j 值越大,表示城市生态安全越接近最优安全状态,相应的生态等级就越高,其取值范围为 $[0, 1]$ 。

2.2.3 生态安全等级划分

参考资源型城市生态安全等级划分的相关文献^[13,15,24],并结合锡林浩特市实际情况,将研究区生态安全划分为5个等级,如表2所示。

表2 煤炭资源型城市生态安全分级标准

Table 2 Evaluation criterion of ecological security in coal resource-based city

安全等级 Safety level	贴近度 Close degree	等级含义 Mean of level
I (理想安全)	$[1-0.85]$	生态环境系统基本未受干扰破坏,人与自然和谐相处,生态环境和社会经济协调发展,区域可持续发展能力强
II (较安全)	$(0.85-0.7]$	生态环境受到较小破坏,生态环境系统结构和功能尚好,一般干扰下可恢复
III (临界安全)	$(0.7-0.5]$	生态环境系统的服务功能已有退化,但尚可维持基本功能,受干扰后易恶化,生态问题显现
IV (较不安全)	$(0.5-0.25]$	生态环境受到较大破坏,生态环境系统结构和功能退化,受外界干扰后较难恢复,易发生生态灾害
V (很不安全)	$(0.25-0]$	生态破坏和环境污染严重,生态环境系统结构残缺不全,功能丧失,生态恢复与重建困难,难以实现可持续发展

2.2.4 障碍度模型

依据贴近度表示生态安全值可以反映研究区整体生态安全状况,但是无法直观的描述影响生态安全状况的重要因子,因此引入障碍度模型,对锡林浩特市生态安全状况产生障碍的影响因子进行诊断和分析,以便有针对性地作出相应的决策和调控。障碍度模型是建立在综合评价基础上的数学统计模型,其具体方法是引入

因子贡献度(F_i)、指标偏离度(I_{ij})和障碍度(O_{ij} 、 B_j)3个基本变量对障碍因素进行诊断^[25],计算公式如下:

$$F_i = W_i \times U_k, I_{ij} = 1 - Y_{ij} \quad (9)$$

$$O_{ij} = \frac{F_i I_{ij}}{\sum_{i=1}^m (F_i I_{ij})} \times 100\%, B_j = \sum O_{ij} \quad (10)$$

式中, W_i 为单项指标权重; U_k 为单项指标所属准则层的权重($k=1,2,3$); F_i 为单项指标对总目标的贡献大小; I_{ij} 为单项指标实际值与最优目标值之差; O_{ij} 、 B_j 为分别表示单项指标和子系统对保障城市生态安全的阻碍程度。

3 结果与分析

3.1 指标权重分析

熵权法的客观赋权方式避免了人为因素的干扰,使指标权重确定更具科学性。指标赋予的权重越大,其在生态安全综合评价中的作用就越大。从本研究中各指标权重来看,第三产业占GDP比重、矿区面积、城镇化率、城镇居民恩格尔系数和矿山生态环境治理面积的权重位居前五。第三产业占GDP比重的赋权最大,说明产业优化是提升城市生态安全的有效措施,体现了对资源型城市产业结构调整的重要性;锡林浩特市以露天煤炭开采为主,采矿作业区对当地草原生态系统造成了很大扰动和破坏,因而矿区面积权重值较大;城镇化率和城镇居民恩格尔系数分别反映了社会发展水平和人民生活质量,揭示了煤炭资源型城市中煤炭及相关产业发展带来的社会和经济效应,这两项指标的权重排名亦比较靠前;矿山生态环境治理面积指标位于权重前五,体现了当地政府对矿山生态环境保护和恢复的重视程度。

3.2 生态安全综合评价结果

3.2.1 整体生态安全状况

由图1可知,2008—2017年锡林浩特市生态安全综合值在0.377—0.553之间,生态安全状态从较不安全转为临界安全。城市生态安全状况演变可分为3个阶段。

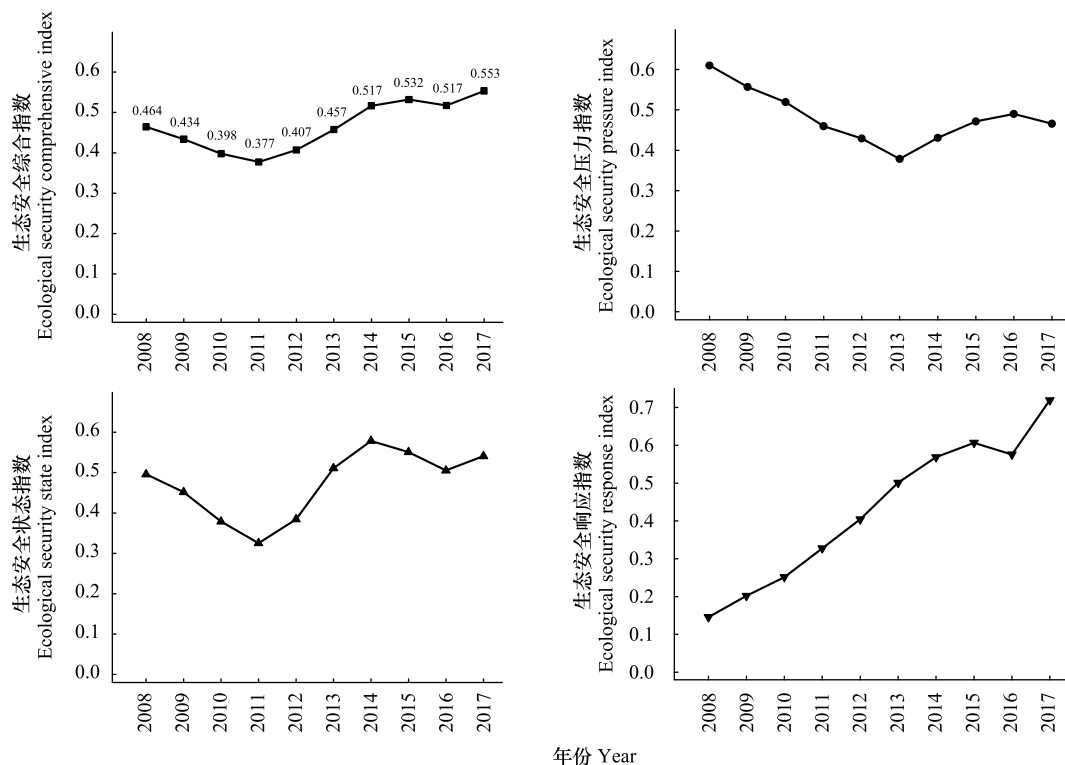


图1 2008—2017年锡林浩特市生态安全指数变化趋势

Fig.1 Change tendency of ecological security index of Xilinhot City from 2008 to 2017

第一阶段是 2008—2011 年,生态安全下降期。城市生态安全水平处于较不安全状态且安全水平逐年下降,生态安全综合指数降至研究期内最小值 0.377,年均递减率为 6.68%,结合表 2 可知,该地区生态环境系统结构和功能有所退化,生态环境已经受到严重损害,这几年锡林浩特市处于由传统农牧业城市向新型资源型城市转型的过渡期,煤炭开采已成为该市经济发展的主要动力,进而出现城市产业结构不合理、经济发展过度依赖资源和环境污染加剧等问题^[26],城市可持续发展受到严峻挑战。

第二阶段是 2011—2015 年,生态安全快速上升期。城市生态安全状态有所好转,生态安全综合值从 2011 年的 0.377 逐步上升到 2015 年的 0.532,年均增长率为 8.94%,生态安全水平从较不安全水平显著提升 to 临界安全水平。究其原因,一方面因为 2012 年国内煤炭黄金十年结束,锡林浩特市煤炭开采强度有所收敛,2013 年煤炭开采量较 2012 年减少将近 1000 万 t^[18],煤炭开采引发的生态环境问题也随之减弱;另一方面,该市矿山企业积极响应煤炭工业发展的“十二五”规划,按照建设环境友好型矿区的要求,积极开展矿山地质环境治理工作,成效显著,五年内共计投入治理资金 5.6 亿元,恢复治理面积达 17km²,此外该市政府还从调结构、控新增、减存量三个方面入手,将燃煤锅炉整治、涉气企业脱硫和脱硝设施改造等纳入重点减排工作,努力完成减排目标任务。

第三阶段是 2015—2017 年,生态安全波动稳定期。城市生态安全水平呈波动变化且小幅上升,仍处于临界安全水平,未来年份生态安全值可能在 0.55 左右浮动。“十三五”时期,国家优化煤炭生产开发布局,考虑到内蒙古东部生态环境脆弱,水资源短缺的问题,控制褐煤生产规模,限制远距离外运,主要保证锡盟煤电基地用煤需求,煤炭工业发展规划的出台和本地矿山企业的认真落实,使得锡林浩特市生态安全水平呈相对稳定趋势发展。

目前,锡林浩特市生态安全水平虽有好转,但仍属于低级别的临界安全等级,生态环境脆弱,生态安全水平有待进一步提高。

3.2.2 各子系统生态安全状况

压力系统生态安全指数呈先下降后上升,再小幅下降的趋势,表明该市生态安全压力先增大后减小再稍微增大(负向指标,数值越小,生态安全压力越大)^[27],人类对生态系统的干扰很不稳定。根据压力指数的变化情况可分为 3 个阶段:第一阶段是 2008—2013 年,压力指数逐年下降,年均递减率为 9.10%。期间,压力系统中人均原煤产量、人均发电量、矿区面积、规模以上工业原煤消费量、煤炭采掘业产值占能源工业产值比重都在持续增长,工业废弃物排放量大,虽然人均 GDP 有所提高,但也无法抵消煤炭工业快速发展给城市生态安全带来的负面影响。第二阶段是 2013—2015 年,压力指数逐年上升。期间,人均原煤产量、工业废水排放量、工业烟(粉)尘排放量的减幅较明显,分别为 36.87%、60.45%和 54.48%,虽然来自人口自然增长率方面的压力以 140.20%的速率增长,但压力指数仍以年均 11.58%的增长率上升,生态安全压力逐渐减小。第三阶段是 2015—2017 年,压力指数小幅下降,年均递减率仅达 0.60%。期间,工业 SO₂排放量和工业烟(粉)尘的排放量显著减少,减幅分别为 80.56%和 91.84%,但受其他指标共同作用,该阶段压力系统对城市生态安全仍存在微弱的负面影响。

状态系统生态安全状况呈波动上升趋势,2008—2017 年状态指数以年均 0.97%的速率上升。其中,生态环境方面的人均地表水资源量和人均地下水资源量逐年减少,人均草地面积在波动中减少,人均耕地面积变幅不大,人均城市道路面积增幅达 25.60%;来自社会经济方面的城镇居民人均可支配收入和农牧区居民人均可支配收入逐年增长,增幅分别高达 193.93%和 275.55%,由此看来,该市社会经济发展对提升城市状态系统生态安全的贡献更大。

响应系统生态安全基本呈快速上升的变化趋势,由 2008 年的最小值 0.146 逐步提高到 2017 年的最大值 0.719,年均增长率为 19.41%,响应指数日益增大,有利于城市生态安全的提升。这 10 年间锡林浩特市政府加大了对生态环境保护的财政支持,环保投资占 GDP 比重由 1.36%提高到 3.20%,同时也注重经济转型升级,合理进行产业布局,第三产业占 GDP 比重由 27.72%提高到 49.20%,其中现代服务业比重明显上升;耗煤

发电指数不断增大,10年间增加了0.6倍,可见煤电一体化建设颇有成效;2017年,该市建成区绿化覆盖率(36.19%)、一般工业固废综合利用率(100%)、城市污水处理率(94.69%)、生活垃圾无害化处理率(100%)均高于国家卫生城市标准,这些都有利于生态安全响应指数的整体提高。

3.3 生态安全保障因子诊断

3.3.1 单项指标的障碍度

本文给出了2008—2017年指标层障碍度排序前五位的因子,如表3所示。2008—2017年阻碍锡林浩特市生态安全状况的障碍因素中主要集中在压力系统和状态系统方面。2008年阻碍城市生态安全的障碍因素主要包括城镇化率、第三产业占GDP比重、人均GDP、农牧区居民人均可支配收入、城镇居民人均可支配收入等;2012年阻碍城市生态安全状况的障碍因素主要包括城镇化率、城镇居民恩格尔系数、矿区面积、工业SO₂排放量、第三产业占GDP比重等;2017年阻碍城市生态安全状况的障碍因素主要包括矿区面积、工业废气排放量、人口密度、人均地下水资源、人均地表水资源等。从单项指标变化趋势上看,2008—2017年矿区面积、工业废气排放量、人口密度、人均地下水资源量和人均地表水资源量指标障碍度上升幅度较大。

表3 2008—2017年锡林浩特市生态安全主要障碍因素排序

Table 3 Order of main obstacle on ecological security in Xilinhot City from 2008 to 2017

年份 Year	项目 Item	指标排序 Index order				
		1	2	3	4	5
2008	障碍因素	s11	r8	p11	s9	s8
	障碍度/%	10.45	8.26	7.20	7.11	6.80
2009	障碍因素	s11	r8	s9	p11	s8
	障碍度/%	9.56	7.16	6.24	6.13	5.74
2010	障碍因素	s11	s10	r8	p6	s9
	障碍度/%	9.39	8.27	6.74	6.08	5.45
2011	障碍因素	s11	s10	r8	p4	p6
	障碍度/%	7.60	7.41	6.38	5.86	5.66
2012	障碍因素	s11	s10	p3	p6	r8
	障碍度/%	8.71	7.86	7.53	7.30	6.55
2013	障碍因素	p3	p6	s10	r8	p7
	障碍度/%	10.59	8.65	8.20	6.50	6.29
2014	障碍因素	p3	p6	p5	s5	s4
	障碍度/%	12.82	8.08	7.49	6.35	6.05
2015	障碍因素	p3	p6	s5	s4	p9
	障碍度/%	14.58	9.34	7.55	7.35	7.34
2016	障碍因素	p3	p5	p9	s5	s4
	障碍度/%	13.86	7.69	7.54	7.39	7.28
2017	障碍因素	p3	p5	p9	s5	s4
	障碍度/%	14.77	8.96	8.48	8.19	7.89

2008—2012年排名第一的障碍因素是城镇化率,2012年前锡林浩特市城镇化率基本保持在86%左右,阻碍了城市生态安全状况的改善。城镇化率越低,一方面说明地区社会经济发展薄弱,另一方面意味着人类活动范围广,进而对人类聚集区以外的自然生态环境干扰就越大,区域社会经济和生态环境方面的安全状况也就随之降低。2012年后该市城镇化率基本保持在90%左右,城镇化率的障碍度逐年降低,这是因为锡林浩特市大力推进新型城镇化,巩固全盟主中心城市的引领地位。2012—2017年排名第一的障碍因素是矿区面积,这5年该市露天采矿面积以年均5.49%的增长速率不断扩大。草原露天开采区对草地生态系统的剧烈扰动将导致自然生态系统结构和功能的受损,加之城市化的快速推进,共同对区域环境质量、景观生态等产生重大影响^[28]。

2015—2017 年矿区面积、人均地下水资源量、人均地表水资源量和人口密度均位于障碍因子前五的行列。具体表现为煤电基地大力建设过程中,工矿用地不断扩大;露天开采使地表沉陷,在一定程度上改变地面降水的径流与汇水条件,因此间接影响矿区周围的地表水量;煤炭挖掘深度加大,地下蓄水构造被破坏,同时矿井水污染地下水,导致地下水资源流失严重和污染加剧;煤电一体化发展提升了区域经济实力,人口快速聚集,人口密度增加,导致局部生态压力也随之增大^[29]。

3.3.2 各子系统的障碍度

根据单项指标障碍度计算结果,进一步计算出锡林浩特市生态安全各子系统的障碍度(图 2)。2008—2017 年压力系统障碍度最大,其次是状态系统、响应系统。可见,改善煤炭资源型城市生态安全状况必须从压力系统入手,同时注重提高状态系统和响应系统的生态安全水平。从各子系统的障碍度变化趋势来看,压力系统的障碍度大幅上升,状态系统的障碍度呈波动上升趋势,而响应系统的障碍度呈大幅下降趋势,其中,压力系统和状态系统的障碍度分别以年均 6.04% 和 2.11% 的速度增加,响应系统的障碍度以年均 18.48% 速度下降。

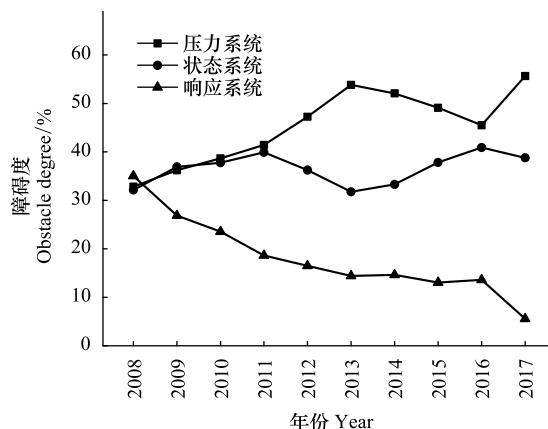


图 2 2008—2017 年锡林浩特市各子系统障碍度

Fig.2 Obstacle degree of subsystem in Xilinhot City from 2008 to 2017

4 结论与讨论

(1) 2008—2017 这 10 年间典型煤炭资源型城市锡林浩特的生态安全经历了缓慢下降-快速上升-波动稳

定 3 个时期,总体由较不安全转为临界安全状态,呈现向好但尚不稳定的态势,目前该市生态安全处于临界安全等级区间 $[0.7—0.5]$ 内,整体生态安全水平属于较低级别的安全,有待进一步提高。

(2) 研究期内锡林浩特市生态安全的各子系统生态安全变化态势有较大差异。其中压力指数呈大幅下降后上升再小幅下降的变化趋势,状态指数呈波动上升趋势,响应指数总体呈快速上升趋势。煤炭资源型城市生态安全压力指数与煤炭开发利用的方式、强度和规模以及煤炭能源支撑下的社会、经济发展等因素密切相关,锡林浩特市必须进一步加快能源及产业结构调整 and 转型升级步伐,充分发挥煤电一体化经济-社会-生态效益共赢优势。生态安全状态系统反映了人类活动对城市生态系统结构和功能的改变,锡林浩特市生态安全状态指数波动变化,呈不稳定态势,煤电基地建设使矿区及周围生态环境状态发生一定变化,造成地下水结构受损、植被破坏、土地沙化和草地退化等,今后需加强水资源监管和水土保持工作,严格落实草原生态建设。生态安全响应系统表明了人类积极采取环保措施以恢复环境质量和防止环境恶化,锡林浩特市生态安全响应指数变化态势良好,归因于该市强化环保执行力,使得环境治理成效显著。今后在不断提升各子系统生态安全水平的同时,还需注重子系统间的协调发展。

(3) 从各子系统的障碍度来看,研究期内压力系统是影响城市生态安全的首要因素,其次是状态系统和响应系统。子系统障碍度的变化趋势显示,压力系统和状态系统的障碍度分别以年均 6.04% 和 2.11% 的速度增加,响应系统的障碍度以年均 11.15% 速度下降。压力系统障碍度上升速度快于状态系统障碍度的上升速度,因此未来应更加关注压力系统对城市生态安全的影响。

(4) 从各指标的障碍度来看,研究期内最大障碍因子经历了从城镇发展带动下的城镇化率到煤炭资源开采对土地资源的占用,即不断扩大的矿区面积的演变。影响锡林浩特市生态安全的主要障碍因子包括矿区面积、工业废气排放量、人口密度、人均地下水资源量和地表水资源量等。因此,探索科学化、高效化、集约化的矿区土地利用方式,稳步推进矿山生态修复工作;加强大气重点污染源监察,革新废气处理工艺,继续推进燃煤锅炉改造淘汰专项整治工作,严格落实工业 SO_2 减量排放,有效控制煤炭露采粉尘污染,降低露天煤矿草原

的粉尘污染风险;协调人口数量与资源承载力的关系,缓解人口快速扩张对局部生态环境的压力,利用产业布局促使人口合理分布;提高矿井水生态利用率,控制地下水超采,加快推进锡林河周边废弃矿坑治理,恢复地表植被,达到涵养水源的目的,逐步恢复地上-地下良好的水分循环系统等措施是提升锡林浩特煤炭资源型城市生态安全的重要举措。

(5)本文基于 PSR 模型构建煤炭资源型城市评价指标体系,运用熵权 TOPSIS 法能够充分利用原始数据的信息,客观真实反映现实情况,获取可靠的生态安全水平的综合诊断结果,基本达到预期的研究目的。由于数据的可获取性和连续性等,环境污染指标(如重金属污染等)缺乏连续年份数据,导致指标体系不全面。

参考文献(References):

- [1] 左伟,王桥,王文杰,刘建军,杨一鹏. 区域生态安全评价指标与标准研究. 地理学与国土研究, 2002, 18(1): 67-71.
- [2] 汪朝辉,田定湘,刘艳华. 中外生态安全评价对比研究. 生态经济, 2008, (7): 44-49.
- [3] 施晓清,赵景柱,欧阳志云. 城市生态安全及其动态评价方法. 生态学报, 2005, 25(12): 3237-3243.
- [4] 曲格平. 关注生态安全之一:生态环境问题已经成为国家安全的热门话题. 环境保护, 2002, (5): 3-5.
- [5] 夏青,梁钰. 煤炭资源型城市生态环境状况评价与调控. 数学的实践与认识, 2007, 37(10): 70-77.
- [6] 范英宏,陆兆华,程建龙,周忠轩,吴钢. 中国煤矿区主要生态环境问题及生态重建技术. 生态学报, 2003, 23(10): 2144-2152.
- [7] 韩煜,王琦,赵伟,史娜娜,肖能文,张周爱,全占军. 草原区露天煤矿开采对土壤性质和植物群落的影响. 生态学杂志, 2019, 38(11): 3425-3433.
- [8] 王强民,孙洁,刘基,杨建. 神府榆矿区地表水化学特征及水环境质量评价. 干旱区资源与环境, 2018, 32(9): 190-195.
- [9] 刘巍,杨建军,汪君,王果,曹月娥. 准东煤田露天矿区土壤重金属污染现状评价及来源分析. 环境科学, 2016, 37(5): 1938-1945.
- [10] 崔克强,王学中,何友江,孟凡. 锡林浩特露天煤矿排土场扬尘排放及污染. 干旱区资源与环境, 2017, 31(6): 160-165.
- [11] 崔旭,葛元英,白中科. 黄土区大型露天煤矿区生态承载力评价研究——以平朔安太堡露天煤矿为例. 中国生态农业学报, 2010, 18(2): 422-427.
- [12] 李保杰,顾和和,纪亚洲. 矿区土地生态风险时空分异研究. 中国矿业大学学报, 2015, 44(3): 573-580.
- [13] 丁翔,白中科. 煤矿城市土地生态安全评价与预测:以山西省朔州市为例. 中国矿业, 2018, 27(3): 81-86.
- [14] 杨嘉怡,曾旗. 基于组合模型的煤炭城市生态安全预警研究——以焦作市为例. 地域研究与开发, 2018, 37(3): 113-119.
- [15] 吴艳霞,邓楠. 基于 RBF 神经网络模型的资源型城市生态安全预警——以榆林市为例. 生态经济, 2019, 35(5): 111-118.
- [16] 袁磊,雷国平,张小虎. 资源型城市土地生态安全评价——以大庆市为例. 地域研究与开发, 2009, 28(6): 80-85.
- [17] 雷勋平, Qiu R, 刘勇. 基于熵权 TOPSIS 模型的区域土地利用绩效评价及障碍因子诊断. 农业工程学报, 2016, 32(13): 243-253.
- [18] 伊如. 锡林浩特市煤炭资源开发与生态环境保护研究——基于马克思生态思想的视角[D]. 呼和浩特:内蒙古师范大学, 2016.
- [19] Walz R. Development of environmental indicator systems: experiences from Germany. Environmental Management, 2000, 25(6): 613-623.
- [20] Jin X D, Chen Y. The evaluation of land ecological safety of Chengchao iron mine based on PSR and MEM. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2018, 111: 012006.
- [21] 徐嘉兴,赵华,李钢,吴立新,傅建春. 矿区土地生态评价及空间分异研究. 中国矿业大学学报, 2017, 46(1): 192-200.
- [22] Kwang C L, Yoon K. Multiple Attribute Decision Making. Berlin: Springer, 1981.
- [23] 张锐,刘友兆. 我国耕地生态安全评价及障碍因子诊断. 长江流域资源与环境, 2013, 22(7): 945-951.
- [24] 杨勇,任志远,赵昕,张艳芳. 西部资源型城市生态安全评价与对策——以铜川市为例. 生态学杂志, 2006, 25(9): 1109-1113.
- [25] 匡丽花,叶英聪,赵小敏,郭熙. 基于改进 TOPSIS 方法的耕地系统安全评价及障碍因子诊断. 自然资源学报, 2018, 33(9): 1627-1641.
- [26] 李慧琴,齐晓明,庞树江,贾小红. 新型资源型城市产业结构调整研究——以锡林浩特市为例. 干旱区资源与环境, 2015, 29(11): 61-67.
- [27] 张军以,苏维词,张凤太. 基于 PSR 模型的三峡库区生态经济区土地生态安全评价. 中国环境科学, 2011, 31(6): 1039-1044.
- [28] 关春竹,张宝林,赵俊灵,李建楠. 锡林浩特市露天煤矿区土地利用的扰动分析. 环境监控与预警, 2017, 9(2): 14-18.
- [29] 马一丁,付晓,田野,王辰星,吴钢. 锡林郭勒盟煤电基地开发生态脆弱性评价. 生态学报, 2017, 37(13): 4505-4510.