

基于 ANP 和指标权重敏感性分析的矿区生态安全评价

史红伟¹, 田磊²

(1. 水利部建设管理与质量安全中心 水利工程管理处, 北京 100038; 2. 北京市南水北调团城湖管理处, 北京 100195)

摘要: 以山西省长治市潞安王庄矿区为研究对象, 基于压力-状态-响应(PSR)模型框架建立了一套生态安全评价指标体系, 对矿区这一典型的复合生态系统进行生态安全评价。根据指标体系的结构特点, 采用网络层次分析法(ANP)确定指标权重, 并对评价结果进行权重敏感性分析来确定影响矿区生态安全的敏感性因子。评价结果表明: (1) 王庄矿区生态安全综合指数从2006年的0.512增加至2010年的0.644, 总体呈逐年上升趋势, 2009年以后生态安全状况处于较安全水平, 矿区近几年所采取的响应政策对这种状况的改变起到了关键的作用; (2) 生态安全综合指数对GDP增长率、废水循环利用率、人均绿化面积等9个指标表现出相对敏感性, 主要是因为这些指标权重较大并且变化较为明显。矿区应当特别针对处于低水平的相对不敏感性指标和呈下降趋势的相对敏感性指标采取相应措施, 以进一步改善矿区的生态安全状况。

关键词: 矿区生态安全; 评价; PSR模型; ANP; 权重敏感性分析

中图分类号: X826

文献标识码: A

Ecological Security Assessment of Mining Area Based on ANP and Weights Sensitivity Analysis

SHI Hongwei¹, TIAN Lei²

(1. Water Conservancy Project Management Office, Center of construction management & quality & safety supervision, Ministry of water resources, Beijing 100038, China; 2. Tuancheng Lake Management Office of Beijing City for South to North Water Diversion Project, Beijing 100195, China)

Abstract: This paper evaluated the ecological security of a typical composite ecological system with the case study of Lu An Wangzhuang mining area in Changzhi, Shanxi Province. Based on the pressure-state-response (PSR) model, the evaluation index system was assumed. According to the structural characteristics of the index system, the weights of the indicators were calculated by Analytic Network Process method (ANP), and weights sensitivity analysis was used to determine sensitive factors which affected the ecological security of the mining area. The evaluation results reveals that: (1) the ecological security integrated index of Wangzhuang mining area showed an increasing trend year by year, from 0.560 in 2006 to 0.712 in 2010. Ecological security became relatively safe in this area after 2009 and responsive actions in recent years played a key role to this change; (2) Due to greater weights and more changeable values, 9 indicators such as GDP increasing rate, Waste water recycling rate, Per capita green area shows relatively sensitivity to ecological security integrated index. More attentions should be paid to insensitive indicators in low level and sensitive indicators which have downward trend in order to further improve the ecological security of this mining area.

Key words: ecological security of coal mine area; assessment; PSR model; ANP; weights sensitivity analysis

收稿日期: 2020-05-01

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(41271304); 国家自然科学基金重点项目(41130744)

作者简介: 史红伟(1970-), 男, 安徽六安人, 硕士, 高级工程师, 主要从事水利工程及河湖管理等方面研究。

随着全球生态环境问题的日益严峻,对生态安全的研究已经成为国内外研究的热点^[1]。我国对生态安全的研究起步于20世纪90年代,目前研究主要集中在区域水平上^[2],在城市生态系统^[3-5]、水环境生态系统^[6-8]和土地资源^[9-10]等方面作了大量的研究和探索,但对矿区生态安全的研究尤其是量化评价和分析相对较少。矿区是由资源、经济、环境和社会等子系统构成的复合生态系统,近年来,随着矿产资源开发利用程度的加大,以资源开采为原动力的矿区生态环境问题已逐渐成为影响区域社会经济发展和人民生活最突出、最严重的问题之一^[11],因此,了解矿区的生态安全状况对矿区的可持续发展就显得尤为重要。

生态安全评价即对生态安全状况进行定性或定量描述,是进行生态安全研究的基础,而权重的确定则是综合评价问题的核心。层次分析法(The Analytic Hierarchy Process, AHP)是一种应用十分广泛的权重确定方法,但是AHP法未能考虑指标间的依存关系,只是将复杂的问题进行系统化以进行评价^[12],而在AHP法基础上提出的网络层次分析法(The Analytic Network Process, ANP)能较好地解决指标间存在较强联系时权重的计算问题。本文以山西省长治市潞安王庄矿区为例,利用“压力-状态-响应”(Press-State-Response, PSR)模型结合网络层次分析法确定生态安全的评价指标体系及权重,并对评价结果进行权重的敏感性分析以研究各因子对生态安全的影响程度。通过评价分析矿区2006—2010年的生态安全状况,为促进矿区生态环境的恢复和实现可持续发展提供重要的理论依据,并为今后矿区生态安全评价指标体系构建和评价方法的研究提供依据。

1 研究区域概况

王庄煤矿(113°02′19″—113°09′51″E, 35°52′45″—35°57′00″N)始建于1958年,1966年12月正式投产。矿区位于我国规划的13个大型煤炭基地之一的晋东南基地潞安矿区内,沁水煤田东部边缘中段,总面积79.68 km²,包括井田和后备区,其中井田南北长11 km,东西宽4.6 km,面积51 km²;后备区南北长6.3 km,东西宽4.6 km,面积28.68 km²。矿区内四季分明,年平均气温9.5℃,平均降雨量678 mm,多集中在夏季,全年无霜期148 d。王庄矿区探明的可采储量4.01亿t,年核定安全生产能力达到710万t以上。多年的煤炭持续开采在促

进当地社会、经济发展的同时,也给矿区生态环境带来了多方面、不同程度的破坏,产生了一系列的生态环境问题。近年来,矿区逐步实施了多项生态环境治理工程,形成了较为完善的生态环境综合治理体系。目前,矿区污染物排放得到初步有效控制,总体环境质量有所好转^[11,13]。

2 研究数据及方法

本研究的指标数据来源于2006至2010年度王庄煤矿企业环境统计报表以及矿区社会经济调查统计结果。

2.1 矿区生态安全评价指标体系构建

PSR模型按照事物发展的因果逻辑来确定评价的指标体系:人类活动对系统造成压力,改变了环境的状况,而环境状况的改变影响人类的生存和发展,并驱使人类对这种变化采取相应对策来调整自身行为^[14]。该模型能够深刻地反映生态系统、自然系统和社会系统三者之间的相互作用机理,注重指标之间的因果联系,具有较高的综合性和灵活性,被广泛承认和使用^[15]。矿区生态系统是典型的社会-经济-自然复合生态系统,在进行生态安全评价时必须充分考虑矿区生态系统的自然属性和社会属性^[16],因此,较适合采用PSR模型框架来建立评价指标体系。

按照PSR模型以矿区生态系统为对象建立生态安全评价指标体系,应当能较为全面地反映矿区生态安全的基本状况和主要特征。以潞安王庄矿区为例,王庄煤矿经过多年的发展,产量和规模不断扩大,煤矿开采主要引起的生态与环境问题有:废弃物占压土地(主要是矸石山占压土地)、大气环境污染问题、水环境污染问题等等^[11]。矿区发展的压力主要有人口压力、经济增长压力以及主要由煤矸石堆积产生的生态环境压力,在这些压力的影响下,生态安全状态发生改变,最突出地体现在生态环境状况和矿区居民生活状况的改变上,具体表现在矿区的空气质量、地表水质量、职业病等方面的变化。针对矿区的经济、社会发展压力和生态环境问题,王庄煤矿近年来采取了多项响应措施,包括提高“三废”的处理率、降低能耗和水耗、对矸石山进行植被恢复等。遵循系统评价的完整性、科学性、可操作性等基本原则,建立基于PSR模型的矿区生态安全评价指标体系(图1)。

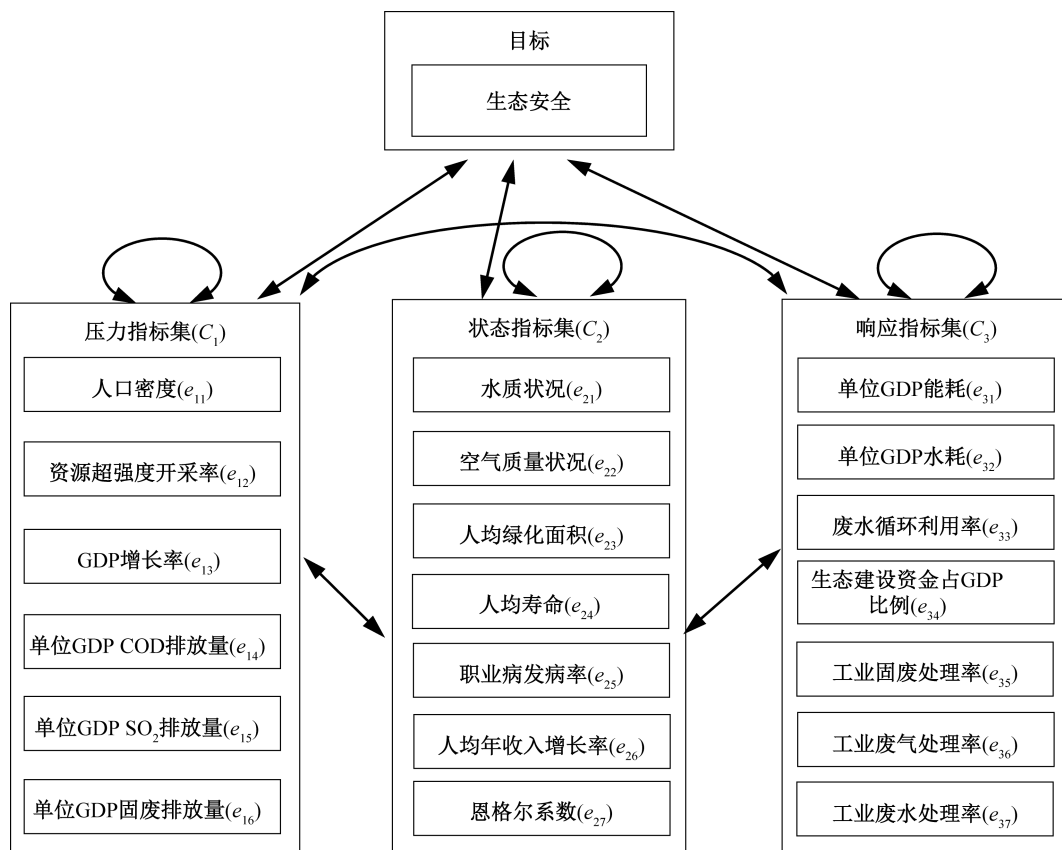


图1 ANP 结构的生态安全指标体系

Fig. 1 Ecological security index system of ANP structure

2.2 指标权重的确定

传统的层次分析法(AHP)将复杂的系统问题进行层次化,同一层次元素彼此独立,只考虑上层元素对下层元素的支配作用,且不相邻的两层次中的元素也不存在支配和从属关系,而在处理实际问题时,系统中的每个元素都有可能影响其它元素,这使得AHP法的应用存在一定的局限性。在AHP基础上提出的网络层次分析法(ANP)不仅考虑了系统中各层次之间的联系,还考虑了各层元素之间的相互影响,在解决系统问题时更加科学、合理^[17-19]。根据上文分析,在利用PSR模型框架建立的生态安全指标体系中,依据因果逻辑关系建立的压力、状态和响应指标之间联系较强,所以本文采用ANP法来确定各生态安全指标的权重。

ANP结构中包含控制层和网络层,控制层包含问题的目标及决策准则,网络层为控制层支配的元素。控制层中可以没有决策准则,但至少有一个控制目标,网络层中各元素之间通过对比间接优势度来反映相互之间的联系。间接优势度即给出一个评判准则,另两个元素在这一准则下对

第三个元素的影响程度进行比较。ANP法确定各生态安全指标权重的计算过程如下:

(1)以生态安全为总准则,以压力、状态、响应指标集 $C_i (i=1,2,3)$ 中的指标 $e_{ij} (j=1, \dots, n_j, n_j$ 为指标集中指标的个数)为次准则,以 C_j 中的元素 e_{ji} 按其影响 e_{ij} 的影响力大小按照1~9标度法进行间接优势度比较,构造判断矩阵 W_{ij} 并计算归一化特征向量 $(w_{i1}^{(j)}, \dots, w_{in_i}^{(j)})$ 。

(2)利用判断矩阵 W_{ij} 的归一化特征向量 $(w_{i1}^{(j)}, \dots, w_{in_i}^{(j)})$ 构造超矩阵 W 。

(3)在生态安全准则下,对各指标集 C_j 的重要性进行比较,求得加权矩阵 A 。对超矩阵 W 的元素进行加权,即 $W' = A \cdot W$, W' 为加权超矩阵。

(4)计算加权超矩阵 W' 的极限矩阵 W^∞ ,其特征向量即为各指标权重。

ANP模型的计算方法较为复杂,具体计算过程参考文献^[19],本文利用Expert Choice公司开发的Super Decision 2.0软件建立评价建模,通过矩阵计算,求得各指标权重。

2.3 指标数据的标准化

生态安全评价指标体系中存在效益型指标

(数值越大越安全的指标,例如人均绿化面积)和经济型指标(数值越小越安全的指标,例如资源超强度开采率),采用最小-最大规范化方法对指标进行处理,所有指标标准化后的得分将介于 $[0,1]$ 之间。

对于效益型指标,标准化公式为:

$$f = \begin{cases} 1 & x_{ij} \geq x_{\max}, \\ (x - x_{\min}) / (x_{\max} - x_{\min}) & x_{\max} \geq x_{ij} \geq x_{\min}, \\ 0 & x_{ij} \leq x_{\min} \end{cases}$$

对于成本型指标,标准化公式为:

$$f = \begin{cases} 0 & x_{ij} \geq x_{\max}, \\ 1 - (x - x_{\min}) / (x_{\max} - x_{\min}) & x_{\max} \geq x_{ij} \geq x_{\min}, \\ 1 & x_{ij} \leq x_{\min} \end{cases}$$

式中: x_{ij} 为指标实际值, $x_{\max}$ 和 $x_{\min}$ 分别为各指标参考标准的最大值和最小值。 $x_{\max}$ 和 $x_{\min}$ 的确定主要依据来源于四个方面^[20]: (1) 国家、行业和地方规定的标准; (2) 区域背景和本底标准; (3) 类比标准,选取未受到干扰的相似生态系统作为类比标准; (4) 科学研究已判定的标准。参考相关国家标准和文献^[20-23]确定各指标的标准值如下表:

表 1 生态安全指标评价体系及其标准
Tab. 1 Ecological security index evaluation system and its criteria

编号	指标	标准值	
		$x_{\max}$	$x_{\min}$
1	人口密度(e_{11})/(人·km ⁻²)	500	200
2	资源超强度开采率(e_{12})/%	30	0
3	GDP 增长率(e_{13})/%	50	0
4	单位 GDP COD 排放量(e_{14})/(kg·万元 ⁻¹)	6	1.5
5	单位 GDP SO ₂ 排放量(e_{15})/(kg·万元 ⁻¹)	7	0.2
6	单位 GDP 固废排放量(e_{16})/(kg·万元 ⁻¹)	2 500	1 000
7	水质状况(e_{21})	IV	I
8	空气质量状况(e_{22})	III	I
9	人均绿化面积(e_{23})	25	5
10	人均寿命(e_{24})	80	65
11	职业病发病率(e_{25})	2	0
12	人均年收入增长率(e_{26})	20	5
13	恩格尔系数(e_{27})	60	30
14	单位 GDP 能耗(e_{31})	1.5	0.1
15	单位 GDP 水耗(e_{32})	150	50
16	废水循环利用率(e_{33})	90	20
17	生态建设资金 GDP 比例(e_{34})	5	0
18	工业固废处理率(e_{35})	100	70
19	工业废气处理率(e_{36})	100	70
20	工业废水处理率(e_{37})	100	70

2.3.1 生态安全综合指数的计算

生态安全综合指数的计算如下:

$$Q = \sum_{i=1}^{20} w_i \cdot f_i$$

式中: f_i 为指标实际值标准化后的数值, w_i 为相应指标的权重。

综合指数越大,生态安全状况越好,根据生态安全指数将生态安全状态划分为 5 个等级(表 2):

表 2 生态安全水平等级标准

Tab. 2 Ecological security level standard

指数区间	等级	状态
0~0.20	V	不安全
0.20~0.40	IV	较不安全
0.40~0.60	III	一般
0.60~0.80	II	比较安全
0.80~1.00	I	安全

2.3.2 评价结果的敏感性分析

敏感性分析是在投资项目评价和企业经营管理决策中常用的一种不确定分析方法^[24]。敏感性分析用于研究因素变化对目标的影响程度,并以分析决策的风险大小。对矿区的生态安全评价结果进行敏感性分析,能够找出影响矿区生态安全的关键因素,分析生态安全变化趋势并预测生态风险,为矿区生态建设和可持续发展提出科学的理论指导。敏感性分析方法包括指标属性值和权重的敏感性分析,本文采用权重的敏感性分析,以敏感性系数来表征指标的敏感性大小^[24],矿区生态安全评价的权重的敏感性分析计算过程如下:

(1) 指标最小权重变化量的计算

对于任意两年的生态安全综合指数 Q_a 、 Q_b ,假设 $Q_a > Q_b$,改变单个指标的权重,由 w_i 变为 w'_i ,当综合指数的大小关系发生改变,即 $Q_a \leq Q_b$ 时,若 w'_i 存在,且 $|w_i - w'_i|$ 为最小值时,则定义 $h_{i,a,b} = |w_i - w'_i|$ 为引起综合指数对排序发生改变的指标最小权重变化量。 $h_{i,a,b}$ 的计算公式为:

$$h_{i,a,b} = \left| \frac{Q_a - Q_b}{f_a - f_b} \right|,$$

f_a 和 f_b 分别为同一指标不同年份中的指标标准化值。

为保证修改后权重的合理性, w'_i 必须满足: $0 < w'_i = w_i - h_{i,a,b} < 1$,并重新进行规范化,计算方法为:

$$w_i = \frac{w_i}{w_i + \sum_{i=1}^{i-1} w_i + \sum_{j=h+1}^n w_j}, 1 \leq i, j \leq n, i \neq j$$

$$w_j = \frac{w_j}{w_i + \sum_{i=1}^{i-1} w_i + \sum_{j=h+1}^n w_j}, 1 \leq i, j \leq n, i \neq j$$

(2) 指标敏感性系数的计算

在同一指标的所有年份的两两比较结果中,取 $D = \min \{ |h_{i,j,k}| \}$, 设 $F = 1/D$, F 即为指标的敏感性系数, F 值越大, 综合值变化对指标权重变化的敏感程度越高, 该指标也越敏感, 敏感性系数的计算在 Excel 2010 软件中进行。

3 评价结果及分析

3.1 王庄矿区生态安全评价指标权重计算

在 Super Decision 2.0 软件中以生态安全为目标层, 以各具体压力、状态、响应指标为网络层建立网络层次分析模型, 通过输入指标间的间接优势度矩阵来计算各指标权重, 再对个别权重进行微调整后, 最终计算结果如表 3。可以看出, GDP 增长率和人均绿化面积的权重较大, 说明这两个指标分别是主要的压力驱动和状态指示因子。

表 3 生态安全评价指标权重			
Tab. 3 The weight of ecological security evaluation index			
目标层	权重	指标层	权重
压力 C_1	0.333	人口密度(e_{11})	0.040
		资源超强度开采率(e_{12})	0.066
		GDP 增长率(e_{13})	0.116
		单位 GDP COD 排放量(e_{14})	0.035
		单位 GDP SO_2 排放量(e_{15})	0.012
		单位 GDP 固废排放量(e_{16})	0.064
生态 安全 状态 C_2	0.333	水质状况(e_{21})	0.080
		空气状况(e_{22})	0.027
		人均绿化面积(e_{23})	0.103
		人均寿命(e_{24})	0.054
		职业病发病率(e_{25})	0.030
		人均年收入增长率(e_{26})	0.012
		恩格尔系数(e_{27})	0.007
响应 C_3	0.334	单位 GDP 能耗(e_{31})	0.043
		单位 GDP 水耗(e_{32})	0.031
		废水循环利用率(e_{33})	0.074
		生态建设资金 GDP 比例(e_{34})	0.066
		工业固废处理率(e_{35})	0.062
		工业废气处理率(e_{36})	0.049
		工业废水处理率(e_{37})	0.029

3.2 王庄矿区生态安全综合评价

利用各年份标准化后的指标数据及权重, 对压力、状态、响应指数及生态安全综合指数进行计

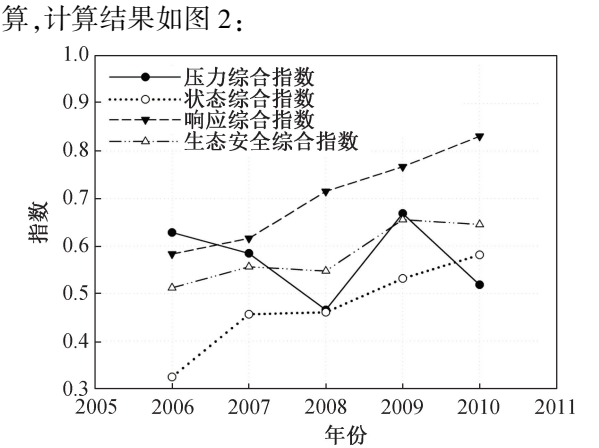


图 2 2006—2010 年王庄矿区生态安全状况
Fig. 2 Ecological security of Wangzhuang Mining area from 2006 to 2010

(1) 压力综合指数

从图 2 可以看出, 王庄矿区的生态安全压力综合指数在最近 5 年的得分介于 0.450~0.700 之间, 平均值为 0.571, 除 2009 年外, 总体得分有所下降, 表明矿区目前面临的生态安全压力相对较小, 但存在着压力负荷略有加重的趋势。人口增长、资源超强度开采和 GDP 增长是生态安全压力增加的主要原因, 其中, 矿区的煤炭资源开发一直处于超强度生产的状态, 超强度开采率在 2006 年仅为 3%, 而到 2010 年已达到 15.52%, 超额定生产能力 110 万 t, 长期的超强度开采虽然促进了 GDP 的持续增长, 但也给矿区生态安全带来了很大的压力, 如单位 GDP 固废的排放量一直处于较高的水平。图 2 所反应的情况与王庄矿区目前所面临的实际的生态安全状况是一致的。

(2) 状态综合指数

生态安全状态指数从 2006 年的 0.324 上升到 2010 年的 0.582, 年均增长率为 15.77%, 说明矿区生态安全现状不断好转。状态指标中, 人均绿化面积的增幅最大, 由 11 m²/人增加到 20.4 m²/人, 主要得益于矿区内两座主要矸石山之一的西矸石山在 2008 年后得到生态重建和景观恢复。区域内环境质量状况良好, 矿区及生活区后 4 年的大气和地表水环境质量都分别达到了《环境空气质量标准》(GB 3095—1996) 和《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002) 中的二级标准。矿区通过各种有效措施, 在不断改善生态环境状况的同时还实现了良好的经济、社会效益, 具体表现在人均寿命增加、人均年收入的持续增长和职业病发病率的有效控制等方面。

(3) 响应指数

响应指数也呈逐年上升趋势,从2006年的0.583增加到2010年的0.831,年均增长率为9.25%,主要原因是近年来矿区在生态修复和节能减排等方面的投入力度的不断加大:投入生态建设的资金比例由2006年的零投入到2010年的0.26%;废水循环利用率增幅较大,由2006年的37.00%增加到2010年的68.61%;工业三废处理方面,固废和废气处理率接近100%,废水处理率在2010年时也达到81%。

(4) 生态安全综合指数

总体上,在2006—2010年间,王庄矿区生态安全综合指数总体上呈上升趋势,从2006年的0.512上升到2010年的0.644,生态安全状况得到不断改善,2009年以前矿区的生态安全状态都处于一般水平,而2009年以后已经处于比较安全的水平。矿区所采取的一系列响应措施取得了良好的效果,到2010年,除个别指标(单位GDP固排放量等)得分较低外,其余指标均已处于较高水平,压力是制约生态安全状况进一步改善的主要原因。

3.3 指标权重的敏感性分析

对矿区生态安全的评价结果进行权重敏感性分析,分析结果如表4:

表4 指标敏感性分析结果

Tab. 4 Results of sensitivity analysis of indicators

排名	指标	敏感性系数	指标类型
1	GDP 增长率(e_{13})	8.443	压力
2	废水循环利用率(e_{33})	4.631	响应
3	人均绿化面积(e_{23})	4.333	状态
4	单位GDP 固废排放量(e_{16})	3.105	压力
5	生态建设资金占GDP 比例(e_{34})	2.446	压力
6	工业废水处理率(e_{37})	1.552	响应
7	资源超强度开采率(e_{12})	1.357	响应
8	人口密度(e_{11})	1.259	压力
9	恩格尔系数(e_{27})	0.166	状态

敏感性分析的结果表明,影响王庄矿区生态安全综合指数变化的敏感性因子是GDP增长率、废水循环利用率、人均绿化面积等9个指标,而其余11个指标权重在[0,1]之间变化时,生态安全综合指数排序并不发生改变,表现出相对不敏感性。从总体上看,压力指标对综合指数的影响最大,其次是响应指标,状态指标最小。敏感性系数最大的指标是GDP增长率,这与该指标的权重及

变化规律有关,王庄矿区近几年GDP都保持了高速增长,但在2009年增长速度出现骤减,大大地增加了指标权重的敏感性。资源超强度开采率和人口密度的变化趋势与综合指数相反,是这两个压力指标表现出敏感性的主要原因,矿区应当根据这些具体情况采取相应措施以减小所面临的生态安全压力,例如合理的控制人口增长速度和经济发展速度,避免出现煤矿的超强度开采现象等。响应指标中,有3个指标都表现出敏感性且敏感性系数较高,这说明矿区针对生态安全现状做出了积极的响应,在生态建设、工业废水处理、废水循环利用三个方面投入的力度越来越大。状态指标中只有人均绿化面积这一指标具有敏感性,主要由于该指标的权重和变化幅度最大,而其余指标变化幅度均不大。指标得分变化幅度不大,可能使指标表现出相对不敏感性,例如压力指标中的单位GDP COD排放量、单位GDP SO₂排放量,响应指标中的单位GDP能耗、单位GDP水耗和工业废气处理率得分一直处于较高水平,而状态指标中人均年收入增长率则稳定在较低水平,对于这些指标应当引起重视并采取相应措施加以改善。

4 结论

1) 本文基于PSR模型结合王庄矿区实际情况建立矿区生态安全综合评价指标体系,定量计算并分析了矿区最近几年的生态安全状况,评价结果与实际情况基本相符,为矿区这一特殊区域的生态安全评价提供了很好的借鉴。由于数据搜集的原因,本文提出的指标体系忽略了一些因素如地表塌陷、地下水状况等,这些因素对矿区生态安全同样具有重要的影响,在今后的评价过程中不容忽视。另外,从王庄矿区评价结果可以看出,矿区生态安全的压力主要来源于人为的自然资源超强度开采,节能减排和生态恢复措施是实现矿区经济效益、生态效益和社会效益平衡的有效手段。

2) 根据PSR模型的特点,考虑系统内部各个因素之间的相互影响,采用网络层次分析法确定各指标的权重,更加真实地反映了矿区生态系统的特征,与传统的层次分析法确定权重相比更加科学合理。然而网络层次分析法本身的原理及运算过程较为复杂,虽然利用相关软件解决了超矩阵计算的问题,但是在构造比较矩阵时,依然存在着主观性强和指标较多引起的比较次数过多的缺点,本文对20个指标采用1~9标度法进行了上百

次的指标间接优势度主观比较,不仅十分繁琐,所得结果与实际情况也出现了不可避免的偏差。

参考文献:

- [1] 彭建,赵会娟,刘焱序,等. 区域生态安全格局构建研究进展与展望[J]. 地理研究, 2017, 36(3): 407-419.
- [2] 赵廷宁,张玉秀,曹兵,等. 西北干旱荒漠区煤炭基地生态安全保障技术[J]. 水土保持学报, 2018, 32(1): 1-5.
- [3] 杨俊,李雪铭,张云,等. 基于因果网络模型的城市生态安全空间分异——以大连市为例[J]. 生态学报, 2008, 28(6): 2774-2783.
- [4] 王明全,王金达,刘景双. 城市生态安全评价研究——以长春市为例[J]. 干旱区资源与环境, 2007, 21(3): 72-76.
- [5] 朱翔,朱云,翟云波,等. 长株潭地区水环境生态安全评价[J]. 湖南大学学报:自然科学版, 2011, 38(1): 72-77.
- [6] 李昊,南灵,李世平. 基于面板数据聚类分析的土地生态安全评价研究——以陕西省为例[J]. 地域研究与开发, 2017, 36(6): 136-141.
- [7] 冯宁,毛锋,李晓阳,等. 滇池生态安全综合评估研究[J]. 环境科学, 2010, 31(2): 282-286.
- [8] 张小虎,雷国平,袁磊,等. 黑龙江省土地生态安全评价[J]. 中国人口资源与环境, 2009, 31(2): 282-286.
- [9] 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[J]. 中国环境科学, 2011, 31(6): 1039-1044.
- [10] 刘克功. 矿区生态环境系统重构与可持续发展研究: 潞安集团公司王庄煤矿实践[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 2009.
- [11] 唐荣彬,陈勇,黄冉冉,等. 基于区域背景——斑块状态的矿业城市资源型生态关键地段识别[J]. 工业安全与环保, 2017, 43(11): 84-88.
- [12] 王庆林,朱宗泽,张永领. 山西省王庄煤矿生态恢复模式研究[J]. 水土保持研究, 2010, 17(5): 265-272.
- [13] NIEMEIJER David, GROOT Rudolf S de. A Conceptual Framework for Selecting Environmental Indicator sets [J]. Ecological Indicators, 2008, 8(1): 14-25.
- [14] 冯莹雪,史芳,曹颖. 矿业棕地公园生态安全格局建构与评价分析[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2017, 49(10): 177-181.
- [15] SATTY T L. Decision Making with Dependence and Feedback[M]. Pittsburgh: RWS Publication, 1996.
- [16] SATTY T L. Fundamentals of the Analytic Network Process-Dependence and Feedback in Decision-making with a Single Network[J]. Journal of Systems Science and Systems Engineering, 2004, 13(2): 129-157.
- [17] 王莲芬. 网络分析法(ANP)的理论与算法[J]. 系统工程理论与实践, 2001, 21(3): 44-50.
- [18] 欧定华,夏建国,欧晓芳. 基于 GIS 和 RBF 的城郊区生态安全评价及变化趋势预测——以成都市龙泉驿区为例[J]. 地理与地理信息科学, 2017, 33(1): 49-58.
- [19] 齐艳领. 采矿塌陷区生态安全综合评价研究——以唐山南部采矿煤炭塌陷区为例[D]. 唐山: 河北理工大学, 2005.
- [20] 刘元慧,李纲. 基于 PSR 模型和遥感的矿区生态安全评价——以兖州矿区为例[J]. 测绘与空间地理信息, 2010, 33(5): 134-138.
- [21] 蔡毅,刑岩,胡丹. 敏感性分析综述[J]. 北京师范大学学报:自然科学版, 2008, 44(1): 9-16.
- [22] CHATZIMOOURATIDIS Athanasios I, PILAVACHI Petros A. Sensitivity Analysis of the Evaluation of Power Plants Impact on the Living Standard Using the Analytic Hierarchy Process[J]. Energy Conversion and Management, 2008; 49(12): 3599-3611.
- [23] JESSOP Alan. Sensitivity and Robustness in the Selection Problems[J]. Computers & Operations Research, 2004, 31(4): 607-622.
- [24] 蒋艳,向学军,李宁. 多目标决策中的敏感性分析[J]. 三峡大学学报:自然科学版, 2004, 26(5): 444-449.

(责任编辑 王利君)