

# 基于理想点法的矿区生态环境敏感性评价

王占军<sup>1</sup>, 张悦国<sup>2</sup>, 石嵩云<sup>3</sup>, 陈亚恒<sup>1</sup>

(1. 河北农业大学 资源与环境科学学院, 河北 保定 071001;  
2. 河北省易县水务局, 河北 保定 074200; 3. 河北省保定市土地开发整理中心, 河北 保定 071001)

**摘要:** [目的] 对河北省保定市涞源县 13 个主要矿区进行生态环境敏感性评价, 旨在为矿区生态环境评价和治理提供理论基础和技术保障。[方法] 通过 PSR 框架模型建立矿区生态环境敏感性评价指标体系, 并引入理想点(TOPSIS)法。[结果] (1) 空间布局上, 涞源县南部矿区生态环境质量较差, 中部矿区中等, 而北部矿区较好; (2) 具体矿区上, 塔崖驿乡矿区、东团堡乡矿区生态环境敏感性最好, 而乌龙沟乡矿区最差。[结论] 引入 TOPSIS 法进行小尺度县域矿区范围内生态环境敏感性评价, 评价过程简便易行, 可操作性强, 且不受评价指标个数的影响, 评价结果更加准确、客观、实用, 能很好地反映涞源县各矿区生态环境的优劣程度及区域差异。

**关键词:** 生态环境; 敏感性; 理想点法; 矿区

文献标识码: B

文章编号: 1000-288X(2015)02-0225-06

中图分类号: X821

DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2015.02.043

## Eco-environment Sensitivity Evaluation of Mining Areas Based on TOPSIS

WANG Zhanjun<sup>1</sup>, ZHANG Yueguo<sup>2</sup>, SHI Songyun<sup>3</sup>, CHEN Yaheng<sup>1</sup>

(1. College of Resources and Environmental Science, Agricultural University of Hebei, Baoding, Hebei 071001, China; 2. Yixian Water Authority, Baoding, Hebei 174200, China; 3. Land Exploitation and Consolidation Center of Baoding, Baoding, Hebei 071001, China)

**Abstract:** [Objective] This paper aimed to provide the theoretical basis and technical support for evaluation and management of ecological environment in mining area based on a evaluation case study of the ecological sensitivities of 13 major mining areas in Laiyuan County of Baoding City, Hebei Province. [Methods] PSR model was applied for ecological sensitivity evaluation. And also technique for order preference by similarity to ideal solution(TOPSIS) method was introduced into the evaluation process. [Results] (1) The space layout of the ecological environment quality in Laiyuan County showed a radial incremental feature existed from the southeast to the northwest; (2) In term of the sensitivity difference of the mining area, the ecological environmental sensitivities of township of Tayayi and Dongtuanbao mining were better, and the sensitivity of Wulonggou mining area was worse. [Conclusion] The introduced evaluation of the TOPSIS method for the evaluation of ecological sensitivity of mining area had some obvious advantages. It can make the evaluation process simple, operable and less relayed on the evaluation index number. All of these make the evaluation result more accurate, objective and practical, and furthermore, the results can well describe expound the merits of each mine's ecological level and regional difference.

**Keywords:** eco-environment; sensitivity; TOPSIS; mining area

近年来,我国国民经济正处于快速、持续、健康发展的阶段,对矿产资源的需求持续增加<sup>[1]</sup>。矿产资源的过度开发导致了一系列的生态环境问题,矿区生态退化和环境污染等问题越来越严重,然而矿区生态环境保护与恢复治理的工作却进展非常缓慢,加强矿区生态环境的保护管理已经刻不容缓<sup>[2]</sup>,区域范围内生态环境敏感性评价受到了国内外学者的重视和关注。

目前,国内外关于生态环境敏感性的研究主要针对于区域生态环境问题的形成及影响因素分析研究<sup>[3-7]</sup>,生态系统对酸沉降的敏感性研究<sup>[8-9]</sup>,自然流域生态系统敏感性及其恢复力分析研究<sup>[6,10]</sup>等方面;研究对象多集中于自然流域、生态环境保护区范围内及国家、省域大尺度上的研究区域<sup>[11-15]</sup>,而针对县域及典型矿区小尺度范围内的研究还相对较少;研究方法主

收稿日期:2014-03-06

修回日期:2014-03-25

第一作者:王占军(1987—),男(汉族),河北省涞水县人,硕士,研究方向为土地资源规划与利用、矿山生态治理。E-mail:wangzhanjun0702@163.com。

通信作者:陈亚恒(1973—),男(汉族),河北省顺平县人,博士,教授,主要从事土地评价、土地资源管理和可持续利用方面的研究。E-mail:chenyaheng@126.com。

要有层次分析法、变异系数法、GIS 空间分析法等<sup>[14,16]</sup>,研究方法正处于探索、发展阶段,依然存在着较大的人为主观性,导致研究结果难以准确地反映研究区的生态环境现状。因此,针对小尺度范围内的研究对象,如何引入科学、合理的评价方法,构建一套具有代表性、针对性的指标体系将是以后研究的热点问题。TOPSIS 法已经广泛的应用于工程设计、经济管理、医疗和军事等诸多领域中的方案择优决策上,如舒欢<sup>[17]</sup>基于组合赋权—TOPSIS 模型对水利工程建设方案优选决策方法进行实证研究;崔和瑞<sup>[18]</sup>运用熵权 TOPSIS 法对配电网可靠性进行研究,为构建科学的评价体系提供有力的保障;韩瑞玲<sup>[19]</sup>运用 TOPSIS 法对辽宁省循环经济进行生态效率分析研究,综合评价了辽宁省循环经济发展轨迹;陈西蕊<sup>[20]</sup>运用 PSR—TOPSIS 法对区域土地资源生态安全进行动态分析,为陕西省土地资源的可持续利用提供科学参考,而该方法在区域生态环境评价研究方面相对较少。因此,本研究通过对涞源县 13 个主要矿区生态环境现状实地调查与踏勘,以新一轮的土地利用总体规划遥感影像数据为基本数据,在“压力—状态—响应”(PSR)结构模型支撑下建立了一套矿区生态环境敏感性评价体系,引入 TOPSIS 法对涞源县主要矿区生态环境敏感性进行评价研究,旨在为矿区生态环境评价和治理提供理论基础和技术保障。

## 1 研究区概况

涞源县位于河北省保定市西北部,东西横距 61 km,南北纵距 71.5 km,国土面积 2 431.18 km<sup>2</sup>。研究区地处太行山北段,属全山区县,主要地形为山地,整体地势西北高,东南低,境内群山起伏,沟谷纵横。研究区属于暖温带大陆性季风气候,四季分明,日照充足,年平均气温 12.1℃,无霜期 215 d,最大冻土厚度 34 cm,年平均风速 3.3 m/s,年平均日照时数 2 257.4 h,年平均降水量为 515.1 mm,降水量各月份分配不均,降水多集中于 7—9 月份,占全年降水量的 60%,年蒸发量 2 052 mm。研究区土壤类型主要为褐土和棕壤土,分别占该县总面积的 73.5% 和 25.3%,大多土质较为贫瘠,部分石沙混杂,不宜耕作。涞源县矿产资源丰富,现已探明的矿产共 43 种,主要有铁、铜、铅、锌、金、银、钼、石棉、大理石、石灰石和白云岩矿等。全县不同规模矿山 87 座,分布于该县 13 个乡镇,以行政单位为单元组成了 13 个主要矿区。

## 2 评价方法及体系构建

### 2.1 评价方法的确定

#### 2.1.1 TOPSIS 法的基本原理 TOPSIS 法即理想

点法,是一种多目标决策方法,该方法的基本原理是在数量有限的研究对象方案中,找出最优方案或正理想方案及最劣方案或负理想方案,然后在此基础上,分别衡量其他研究对象的方案对于二者的距离,得到研究对象方案和最劣方案两者的相对接近度,作为研究对象优劣程度的依据<sup>[17-20]</sup>。所以本研究采用该方法对矿区生态环境敏感性进行综合评价,评价过程简便易行,可操作性强,不受评价指标数量的影响,能很好地反映涞源县各矿区生态环境的优劣程度及区域差异。

2.1.2 矿区生态环境敏感性评价基本思路 通过理想点法分别计算出研究对象生态压力、生态状态和生态响应的 3 个子系统的评价值  $C_p, C_s, C_r$ ,用来表示子系统的优劣和差异,进一步为进行涞源县主要矿区生态环境区域差异分析提供依据。根据生态压力、生态状态和生态响应 3 个子系统的全部评价指标,通过理想点法综合计算出研究对象的生态协调度指数  $C$ ,以此作为涞源县主要矿区生态环境优劣程度评价的依据。最后,通过 SPSS 软件进行聚类分析,划分涞源县 13 个主要矿区生态环境敏感性等级。

#### 2.1.3 TOPSIS 法评价的具体步骤

(1) 评估矩阵的构建。在生态压力子系统下对  $n$  个研究对象(即白石山镇矿区,南屯乡矿区,银坊镇矿区,走马驿镇矿区,北石佛乡矿区,水堡镇矿区,金家井乡矿区,东团堡乡矿区,王安镇镇矿区,塔崖驿乡矿区,乌龙沟乡矿区,杨家庄镇矿区,烟煤洞乡矿区)选择  $m$  个评价指标,在相关数据支持下得到原始数据矩阵,其中各元素为  $X_{ij} (i=1,2,\dots,m; j=1,2,\dots,n)$ :

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

(2) 评价指标正向化。如果第  $i$  个评价指标是正指标,则将每个矿区的该评价指标实际值除以 13 个矿区里最大的指标值;如果第  $i$  个评价指标是逆指标,则用 13 个矿区的该评价指标中最小指标值分别除以每个矿区的实际值,进而得到一个评价指标正向化的无量纲矩阵  $Z_{m \times n}$ ,其中各元素为  $Z_{ij} (i=1,2,\dots,m; j=1,2,\dots,n)$ 。

(3) 无量纲矩阵的标准化。对于得到的无量纲矩阵里各元素  $Z_{ij}$  进行标准化处理,得到其标准化矩阵:

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

$$r_{ij} = Z_{ij} / \sqrt{\sum_{j=1}^n Z_{ij}^2} \quad (i=1,2,\dots,m; j=1,2,\dots,n) \quad (3)$$

(4) 正负理想点(最优和最劣方案)的确定。对于生态压力子系统下的  $m$  个指标,每个评价指标取 13 个矿区里的最大值,从而得到正理想点为  $r_i^+ = \max_j r_{ij}$ ,取最小值得到负理想点为  $r_i^- = \min_j r_{ij}$  ( $i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n$ )。

计算生态压力子系统下每个矿区的实际指标值和最优值及最劣值的欧式距离:

$$S_j^+ = \sqrt{\sum_{i=1}^m (r_{ij} - r_i^+)^2} \quad (4)$$

$$S_j^- = \sqrt{\sum_{i=1}^m (r_{ij} - r_i^-)^2} \quad (5)$$

(5) 生态压力评价价值  $C_{pj}$  的计算。以每个矿区生态环境敏感性实际值与最优值的相对接近度作为评价价值,则:

$$C_{pj} = S_j^- / (S_j^+ + S_j^-), 0 < C_{pj} < 1 (j = 1, 2, \dots, n) \quad (6)$$

可知  $C_{pj}$  值越大,生态压力理想度越好,即生态压力较小,反之较大。

同理,按上述步骤可计算出 13 个矿区在生态状态子系统下的生态状态评价价值  $C_s$ ,可知  $C_s$  值越大,生态状态越优;也可计算出 13 个矿区在生态响应子系统下的生态响应评价价值  $C_r$ ,可知  $C_r$  值越大,生态响应越好;最后可计算出整个研究区在生态 PSR 系统下的 13 个主要矿区生态协调度指数(生态综合质量评价价值)  $C$ ,可知  $C$  值越大,生态质量越优。

### 2.2 评价体系的构建

“压力—状态—响应”(PSR)结构模型是评价矿区生态环境质量和生态环境发展协调度的一种方法<sup>[21-22]</sup>。该模型主要是从生态压力、生态状态和生态响应三方面,以矿区生态环境特性为基础,对矿山生态环境敏感性进行评价。根据科学性、针对性、层次性、可量化性、可持续性原则,从评价目的层、评价因子层、评价指标层、指标属性 4 个角度,运用特尔菲

法建立 PSR 框架下的矿区生态环境敏感性评价指标体系(表 1)。

表 1 PSR 框架下的矿山生态环境敏感性评价体系

目标	评价因子	评价指标	指标属性
涞源县 矿山 生态 压力	生态 压力	矿山个数 $X_1$	负指标
		主要矿种 $X_2$	负指标
		开采方式 $X_3$	负指标
		生产规模 $X_4$	负指标
		矿区面积 $X_5$	负指标
涞源县 生态 环境 敏 感 性 评 价 体 系	生态 状 态	植物覆盖率 $X_6$	正指标
		占用破坏土地面积 $X_7$	负指标
		有毒性矿山个数 $X_8$	负指标
		地质灾害次数 $X_9$	负指标
		景观破坏程度 $X_{10}$	负指标
		废弃物存量 $X_{11}$	负指标
涞源县 生态 响 应	生态 响 应	矿区居民人均 GDP $X_{12}$	正指标
		年环境治理投入资金比例 $X_{13}$	正指标
		矿山经济贡献率 $X_{14}$	正指标
		科技环保人员比例 $X_{15}$	正指标
		区位权重 $X_{16}$	正指标

注:其中主要矿种分“岩石矿”、“煤矿”、“金属矿”3 个等级;开采方式分“露天”、“地下”2 个等级;景观破坏程度分“轻微”、“较轻”、“较重”、“严重”4 个等级。

## 3 结果与分析

### 3.1 研究区域和数据来源

以涞源县 13 个主要矿区为研究样本,2009 年为评价年份,将 16 个具体指标设置为相应的分析变量,建立数据文件。数据主要来自《河北省 2009 年国民经济和社会发展公报》,《2010 年河北统计年鉴》,《涞源县土地利用总体规划 2010—2020 年》,《涞源县环保局网站等。通过构建评估矩阵,得到 2009 年涞源县 13 个矿区的生态指标属性值(表 2—3)。

表 2 涞源县 2009 年主要矿区生态环境敏感性指标属性值

指标	白石山镇	南屯乡	银坊镇	走马驿镇	北石佛乡	水堡镇	金家井乡
$X_1$	4	12	6	4	2	5	2
$X_2$	煤、铁、铜	锌钼、铁	金、铁	铁	石灰岩	铁、钾长石	石灰岩
$X_3$	地下	地下、露天	地下、露天	地下、露天	露天	地下	露天
$X_4$	4 小型	3 中型,9 小型	6 小型	2 中型,2 小型	1 大型,1 中型	3 中型,2 小型	1 大型,1 中型
$X_5$	2.349 4	1.170 4	1.047 4	3.528 2	4.702 1	13.367 2	0.629 4
$X_6$	9.89%	4.20%	16.00%	6.85%	13.27%	4.32%	26.36%
$X_7$	1.36	1.53	1.541	4.25	0.35	16	0.22
$X_8$	1 有,3 无	10 有,2 无	无	2 有,2 无	无	3 有,2 无	无
$X_9$	9	1	0	0	0	0	0
$X_{10}$	严重	较轻	较重	较轻	较轻	较轻	较轻
$X_{11}$	74.8	122.03	121.44	148.7	56	132.25	50
$X_{12}$	1 200	1 000	900	700	1 000	700	900
$X_{13}$	1.19%	0.80%	0.46%	0.90%	0.76%	0.30%	0.67%
$X_{14}$	18.10%	18.10%	10.19%	17.25%	9.76%	23.99%	5.63%
$X_{15}$	1.81%	1.81%	1.02%	1.73%	0.98%	2.40%	0.56%
$X_{16}$	10	10	8	7	10	6	9

表 3 涑源县 2009 年主要矿区生态环境敏感性指标属性值

指标	东团堡乡	王安镇镇	塔崖驿乡	乌龙沟乡	杨家庄镇	烟煤洞乡
X <sub>1</sub>	2	4	1	10	34	1
X <sub>2</sub>	铁	金、铅、锌	花岗岩	硫铁矿、铅、锌	石灰岩、铁	石棉
X <sub>3</sub>	地下	地下、露天	露天	地下	地下、露天	地下
X <sub>4</sub>	2 小型	1 大型, 3 小型	1 小型	10 小型	1 大型, 1 中型, 32 小型	1 小型
X <sub>5</sub>	0.043	0.407 3	0.038 4	3.920 1	3.071 2	2.599 7
X <sub>6</sub>	34.26%	7.75%	22.01%	14.23%	10.69%	5.66%
X <sub>7</sub>	0.012	1.77	0.5	0.589	4.032	3.2
X <sub>8</sub>	无	1 有, 3 无	无	9 有, 1 无	1 有, 33 无	无
X <sub>9</sub>	0	0	0	0	27	0
X <sub>10</sub>	较轻	较轻	较轻	较重	较重	较轻
X <sub>11</sub>	76	32.8	27	70.66	526.4	180
X <sub>12</sub>	700	800	800	700	1 300	600
X <sub>13</sub>	0.50%	0.61%	0.26%	0.25%	0.62%	0.23%
X <sub>14</sub>	3.33%	18.94%	1.69%	3.78%	36.27%	7.97%
X <sub>15</sub>	0.33%	1.89%	0.17%	0.38%	3.23%	0.80%
X <sub>16</sub>	4	5	4	5	9	3

3.2 运算结果

根据上述构建的评价方法与模型, 基于所得资料和数据, 对 2009 年涑源县 13 个主要矿区的生态环境敏感性评价进行测算(表 4, 图 1)。

表 4 涑源县主要矿区生态环境敏感性评价

矿区名称	敏感度评 价值 C	生态压力 评价值 C <sub>p</sub>	生态状态 评价值 C <sub>s</sub>	生态响应 评价值 C <sub>r</sub>
白石山镇	0.291 3	0.144 3	0.180 7	0.624 0
南屯乡	0.231 2	0.035 0	0.134 8	0.556 5
银坊镇	0.248 9	0.097 6	0.312 4	0.312 9
走马驿镇	0.254 4	0.106 7	0.229 8	0.507 8
北石佛乡	0.343 2	0.310 8	0.348 7	0.399 7
水堡镇	0.261 5	0.092 9	0.223 6	0.518 7
金家井乡	0.344 0	0.279 2	0.409 5	0.303 6
东团堡乡	0.527 4	0.459 7	0.761 8	0.131 6
王安镇镇	0.298 2	0.104 0	0.350 1	0.472 2
塔崖驿乡	0.549 7	0.995 8	0.448 2	0.072 4
乌龙沟乡	0.176 5	0.064 0	0.260 3	0.099 2
杨家庄镇	0.318 8	0.067 8	0.137 8	0.788 0
烟煤洞乡	0.359 8	0.461 3	0.287 8	0.153 6

3.3 涑源县矿区生态环境敏感性的区域差异分析

3.3.1 矿区生态环境敏感性整体空间分布规律 空间布局上, 涑源县 2009 年生态环境敏感度大致是南部矿区中度敏感, 中部矿区一般敏感, 北部矿区潜在敏感。这与涑源县经济发展水平由中部向南北递减的规律并不一致。北部矿区经济水平较落后, 这是因为矿区发展而带来的资源消耗和生态环境的破坏较少, 故生态环境敏感程度较中部矿区要轻。而中部矿区, 由于自然禀赋、区位条件、人力资源都很优越, 因此发展迅速, 虽然在发展过程中对生态环境造成了一定的破坏, 但是随着中部矿区有关部门环保意识的加强, 强化了环境保护和生态修复工作, 因此生态环境不断改善, 生态环境敏感程度也相对较轻。南部矿区则由于经济实力限制, 尚处于追求经济快速发展和生态环境敏感性快速提高而不能两全的尴尬境地, 故其生态发展既没有北部矿区的原生态, 又不如中部矿区的生态建设。该县 13 个主要矿区的生态敏感程度如图 2 所示。

3.3.2 各矿区生态环境敏感性等级分析 具体矿区内, 生态环境潜在敏感的矿区为塔崖驿乡矿区、东团堡乡矿区。塔崖驿乡矿区、东团堡乡矿区两个矿区位于涑源县北部地区, 由于两个矿区矿山个数较少且无毒性, 景观破坏程度最轻, 植被覆盖率最高等综合原因, 在生态压力和生态影响方面都有很大的优势, 虽然生态响应方面适中, 但是综合矿区生态环境敏感性处于最优地位。由此可知, 处理好资源开发与经济发展的关系至关重要, 保持矿区生态环境安全稳定, 坚持可持续发展理念, 在发展经济的同时要注重环境保

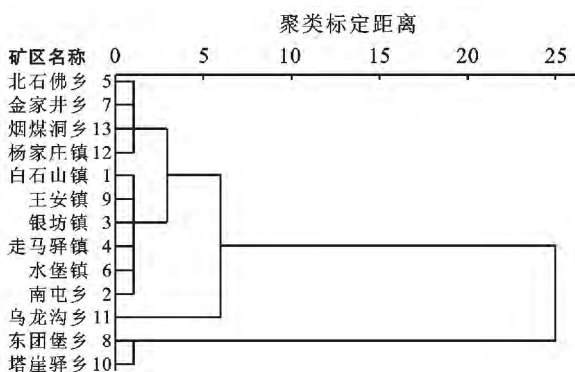


图 1 生态环境敏感性评价结果聚类分析

护,能动地调控和协调生态环境、社会文化和经济发展三者的关系,使矿区生态环境的生态功能得到高效

发挥,经济社会实现持续平稳发展,以保证自然资源实现永续利用,人类物质文化生活水平得到提高。

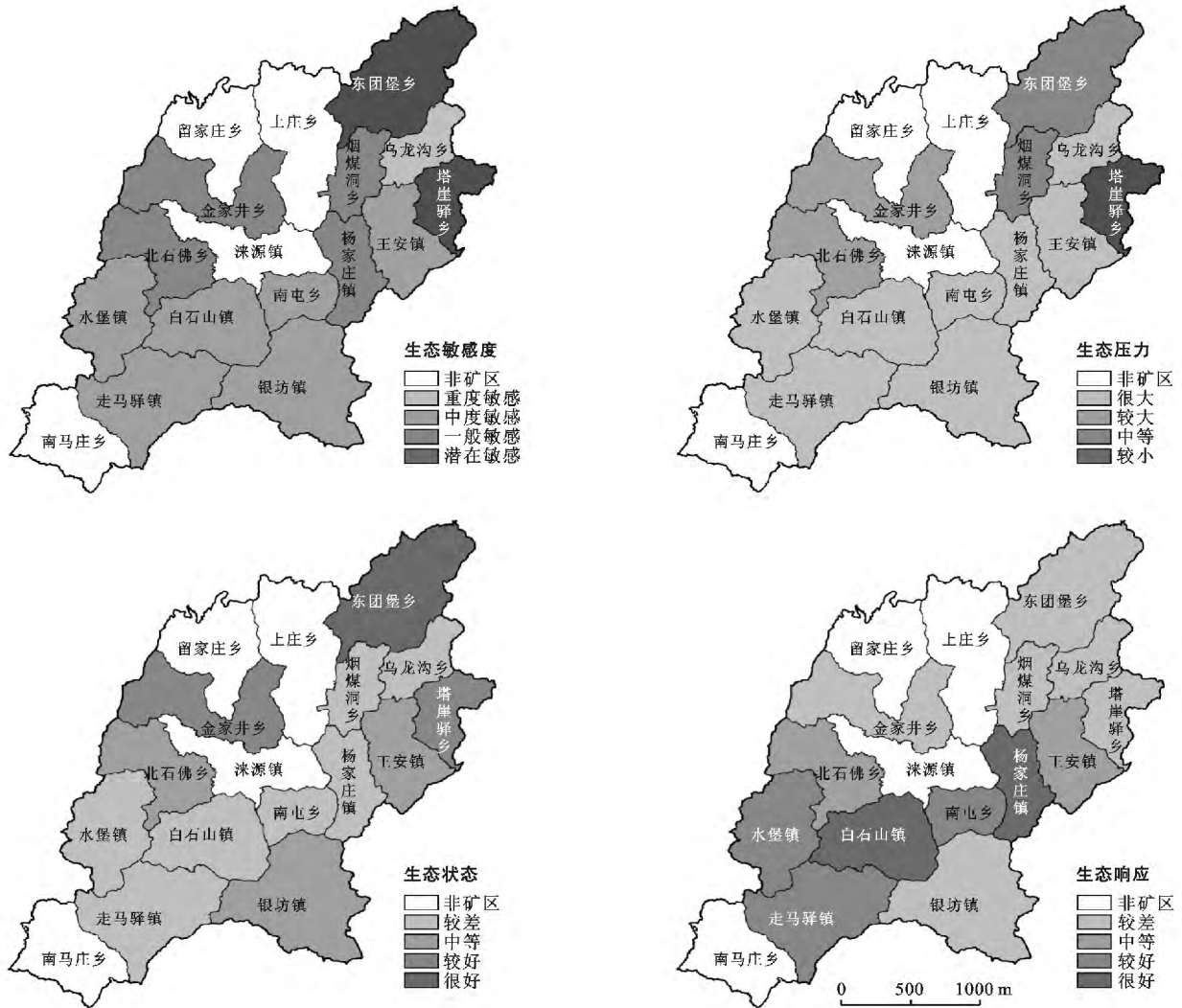


图 2 涑源县主要矿区生态环境敏感性分布图

矿区生态环境一般敏感的是烟煤洞乡矿区、金家井乡矿区、北石佛乡矿区、杨家庄镇矿区、王安镇镇矿区、白石山镇矿区。这 6 个矿区作为涑源县的核心矿区,处于县城周边矿区化、工业化的集聚阶段,人口密度大,一定程度上超过了矿区生态系统的容量和资源承载力,生态压力很大;然而,由于政府高度重视生态文明,加大环保投入,着力改善矿区生态环境,有着积极的生态响应,且目前生态状态较好,故这 6 个矿区生态环境敏感性在全县居中。由此可见,创建生态环境友好型矿区,首要任务是坚定环保理念,发展清洁生产和循环经济,走低碳环保之路,把建设“资源节约型、环境友好型社会”的口号落到实处,贯穿于生产和生活的每一个环节。

矿区生态环境敏感性有待提高的是水堡镇矿区、走马驿镇矿区、银坊镇矿区、南屯乡矿区。这 4 个矿

区的生态压力都较大,主要是因为随着全县经济的向南发展,矿区配套基础设施建设跟不上,同时矿区化又滞后于工业发展,工业发展能耗大,经济结构不合理,模式粗放等。在生态状态方面,水堡镇矿区、走马驿镇矿区、银坊镇矿区较差,南屯乡矿区最差,面对这种严峻的压力和状态,这 4 个矿区的响应都不积极,尤其是南屯乡矿区。由此可见,生态环境友好型矿区的建设需要强大的驱动力,要充分发挥中部矿区的辐射和带动作用,南北之间也要加强各种交流和资源共享、互通有无,达到各矿区协调、稳定发展的目的。

矿区生态环境严重敏感的是乌龙沟乡矿区。虽然乌龙沟乡矿区位于涑源县偏北部,但是由于矿区内矿山数量较大,且有一定的毒性,使得矿区生态压力很大。生态状态中等,生态响应也处于最差等级。乌龙沟乡矿区作为重工业矿区,经济粗放,单位 GDP 能

耗大,生产效率不够高,矿区人民生活水平较低,基础设施建设不到位,故整个矿区生态环境敏感性为该县最劣。

## 4 结论

(1) 引入 TOPSIS 法进行小尺度县域矿区范围内生态环境敏感性评价,评价过程简便易行,可操作性强,且不受评价指标个数的影响,评价结果更加准确、客观、实用,能很好地反映涞源县各矿区生态环境的优劣程度及区域差异。

(2) 矿区生态环境敏感性评价结果显示,空间布局上,涞源县北部矿区生态环境潜在敏感,中部矿区一般敏感,而南部矿区中度敏感;具体矿区上,塔崖驿乡矿区和东团堡乡矿区两个矿区生态环境最好,为潜在敏感;而乌龙沟乡矿区最差,为严重敏感。

### [ 参 考 文 献 ]

- [1] 任忠宝,王世虎,唐宇,等. 矿产资源需求拐点理论与峰值预测[J]. 自然资源学报, 2012, 27(9): 1480-1489.
- [2] 陶知翔,成先雄,赵美珍. 矿山环境问题与防治对策[J]. 金属矿山, 2008, 37(1): 103-106.
- [3] 孙才志,杨磊,胡冬玲. 基于 GIS 的下辽河平原地下水生态敏感性评价[J]. 生态学报, 2011, 31(24): 7428-7440.
- [4] Carrington D P, Gallimore R G, Kutzbach J E. Climate sensitivity to wetlands and wetland vegetation in mid-Holocene North Africa[J]. *Climate Dynamics*, 2001, 17(2/3): 151-157.
- [5] Horne R, Hickey J. Ecological sensitivity of Australian rainforests to selective logging[J]. *Australian Journal of Ecology*, 1991, 16(1): 119-129.
- [6] Muzik I. Sensitivity of hydrologic systems to climate change[J]. *Canadian Water Resources Journal*, 2001, 26(2): 233-252.
- [7] Rodriguez E, Vila L. Ecological sensitivity atlas of the Argentine continental shelf[J]. *International Hydrographic Review*, Monaco, 1992, 69(2): 47-53.
- [8] Tao Fulu, Feng Zongwei. Terrestrial ecosystem sensitivity to acid deposition in South China[J]. *Water, Air, and Soil Pollution*, 2000, 118(3/4): 231-243.
- [9] Driscoll C T, Lawrence G B, Bulger A J, et al. Acidic deposition in the Northeastern United States: Sources and inputs, ecosystem effects, and management strategies: The effects of acidic deposition in the northeastern United States include the acidification of soil and water, which stresses terrestrial and aquatic biota[J]. *BioScience*, 2001, 51(3): 180-198.
- [10] 王月健,徐海量,王成,等. 过去 30a 玛纳斯河流域生态安全格局与农业生产力演变[J]. 生态学报, 2011, 31(9): 2539-2549.
- [11] 宋晓龙,李晓文,白军红,等. 黄河三角洲国家级自然保护区生态敏感性评价[J]. 生态学报, 2009, 29(9): 4836-4846.
- [12] 钟林生,唐承财,郭华. 基于生态敏感性分析的金银滩草原景区旅游功能区划[J]. 应用生态学报, 2010, 21(7): 1813-1819.
- [13] 杨月圆,王金亮,杨丙丰. 云南省土地生态敏感性评价[J]. 生态学报, 2008, 28(5): 2253-2260.
- [14] 吴金华,李纪伟,朱鸿儒. 基于 ArcGIS 区统计的延安市土地生态敏感性评价[J]. 自然资源学报, 2011, 26(7): 1180-1188.
- [15] 黄静,崔胜辉,李方一,等. 厦门市土地利用变化下的生态敏感性[J]. 生态学报, 2011, 31(24): 7441-7449.
- [16] 曹建军,刘永娟. GIS 支持下上海城市生态敏感性分析[J]. 应用生态学报, 2010(7): 1805-1812.
- [17] 舒欢,刘文娜. 基于组合赋权—TOPSIS 模型的水利工程建设方案优选决策方法[J]. 工程管理学报, 2013, 27(4): 83-86.
- [18] 崔和瑞,梁丽华,王立红. 基于熵权 TOPSIS 分析的配电网可靠性评估指标体系[J]. 农业工程学报, 2011, 27(1): 172-175.
- [19] 韩瑞玲,佟连军,宋亚楠. 基于生态效率的辽宁省循环经济分析[J]. 生态学报, 2011, 31(16): 4732-4740.
- [20] 陈西蕊,张蓉珍. 基于 PSR-TOPSIS 法的区域土地资源生态安全动态分析:以陕西省为例[J]. 贵州农业科学, 2011, 39(1): 223-227.
- [21] 郭旭东,邱扬,连纲,等. 基于 PSR 框架,针对土壤侵蚀小流域的土地质量评价[J]. 生态学报, 2004, 24(9): 1884-1894.
- [22] 贺三维,潘鹏,王海军,等. 基于 PSR 和云理论的农用地生态环境评价[J]. 自然资源学报, 2011, 26(8): 1346-1352.