

# 矿区生态环境质量预警方法研究

高建广<sup>1</sup>, 杨静<sup>2</sup>, 房孝敏<sup>2</sup>

(1. 山东科技大学 资源与环境工程学院, 山东 青岛 266590; 2. 山东科技大学 化学与环境工程学院, 山东 青岛 266590)

**摘要:**从预警指标体系、预测模型、预警模型三个方面,系统研究了矿区生态环境质量的预警方法。构建了以矿区大气质量、矿区水环境质量、矿区噪声环境质量、矿区生态质量为一二级指标的预警指标体系;运用灰色系统理论,建立了预警指标GM(1,1)灰色预测模型;在对预警指标进行无量纲化和赋权的基础上,建立了赋权综合预警模型。  
**关键词:**矿区;生态环境质量;预警;指标体系

中图分类号:X822.5

文献标志码:A

文章编号:1672-3767(2011)06-0097-06

## Study on Early Warning Method for Ecological Environment Quality in Mining Areas

GAO Jianguang<sup>1</sup>, YANG Jing<sup>2</sup>, FANG Xiaomin<sup>2</sup>

(1. College of Resources and Environmental Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao, Shandong 266590, China; 2. College of Chemical and Environmental Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao, Shandong 266590, China)

**Abstract:** The warning methods of ecological environment quality in mining areas were studied from three aspects of index system of early warning, forecasting model and warning model in the paper. The index system of early warning was constructed taking the qualities of air, water, noise, ecology in the mining area as prime indices; based on the grey theory, the GM(1,1) prediction model for the ecological environment in mining areas was established and based on making the dimensionless and assignment of each warning index, a comprehensive assigned warning model was formed.

**Key words:** mining area; ecological environment quality; early warning; index system

由于地下矿产资源的开采、运输等生产环节对地表和矿区周围环境的破坏与影响,矿区及周围的生态环境具有脆弱性,因此各级政府对矿区生态环境的变化与治理极为重视。对矿区生态环境的状况及时提出预警,是加强矿区生态环境建设的基础<sup>[1-3]</sup>。对矿区生态环境状况正确合理的预警,有赖于建立一套合理、科学、可行的矿区生态环境质量预警的指标体系和预警方法。本研究以重要性、敏感性、层次性和实用性为选取原则,建立了一套矿区生态环境质量预警指标体系,并对矿区生态环境质量的预测模型、预警方法进行了较深入系统的研究。

## 1 矿区预警指标体系的建立

### 1.1 矿区的主要生态环境问题

在资源开采过程中,由于直接挖损、采掘引起地表塌陷和废弃煤矸石堆积等原因,大量的土地被破坏和占用,绿色植物大幅度减少,耕地数量急剧下降,并引起空气、水体和土壤的污染。煤炭开发造成的生态环境影响归纳起来主要有环境污染和生态破坏两大类。

收稿日期:2011-11-09

基金项目:“十二五”山东省矿区循环经济与节能减排研究基地项目。

作者简介:高建广(1969—),男,山东泰安人,副教授,博士研究生,主要从事资源经济与管理方面的研究。

E-mail:skdgjg@163.com.

### 1.1.1 环境污染

矿区环境污染主要包括空气污染、水污染和噪声污染。

空气污染主要以煤烟型污染为主,主要污染物是  $\text{SO}_2$  和总悬浮颗粒(total suspended particulate, TSP),特别是粒度小于  $10\ \mu\text{m}$  的呼吸性粉尘对人体健康的危害最大。空气污染物主要来自矿井排风、煤层瓦斯抽放、煤矿矸石山的自燃和区内工业窑炉、矸石电厂、居民生活燃煤、取暖锅炉等排放的烟尘和  $\text{SO}_2$  等污染物。

水污染主要由选煤厂、矿局所属生产厂以及生活区排出的工业废水、选煤水、生活污水、医院污水等造成。这些废水通过废水外排、渗透污染、渗流污染、径流污染等途径严重污染了地表水和地下水。

噪声污染主要包括煤矿生产、运输、加工、利用过程中产生的程度不同的各种噪声,例如风机、风扇和风阀的空气动力噪声,锻铆机械、振动筛和溜槽的机械噪声,以及电机、电焊机等的电磁性噪声。噪声严重干扰环境,危害人体健康。

### 1.1.2 生态破坏

采矿活动对其所在地的生态环境造成极大的破坏,影响最严重的是土地资源和绿色植被的破坏。在矿区,土地破坏最常见的两种形式是土地塌陷和土地占用。据统计,到2008年,调查矿山面积  $5.8\ \text{万}\ \text{km}^2$  中,压占和破坏的土地面积约  $1.45\ \text{万}\ \text{km}^2$  (其中,耕地约  $0.3\ \text{万}\ \text{km}^2$ ,林地约  $0.14\ \text{万}\ \text{km}^2$ ,草地约  $0.17\ \text{万}\ \text{km}^2$ ,其他  $0.84\ \text{万}\ \text{km}^2$ ),致使矿区植被覆盖率降低,生态环境严重恶化。

## 1.2 预警指标体系建立的原则

矿区生态环境质量预警就是对矿区未来生态环境处于什么样的水平进行及时预报,矿区生态环境质量预警指标体系的建立应遵循以下原则<sup>[4]</sup>。

1) 重要性原则 所选指标必须是衡量矿区生态环境的重要指标,能够充分反映矿区生态环境质量状况,为生态环境预警和决策提供不可缺少的信息。

2) 实用性原则 所选预警指标必须简洁、实用、可行,既要适应矿区的生态环境管理水平,又要考虑指标的易测易得,所需要的资料要易于调查和收集。

3) 层次性原则 矿区生态环境系统是一个复杂的大系统,因此矿区生态环境预警的指标体系应该分成大系统、子系统和预警因子等不同层次,便于突出重点。

4) 敏感性原则 所选指标必须对生态环境质量的变化敏感,从而通过这些指标能及时了解矿区生态环境的变化,真正起到“报警器”的作用。

## 1.3 预警指标体系的建立

立足矿区生态环境质量现状,依据预警指标体系建立的原则,建立矿区生态环境质量预警指标体系如图1所示。

矿区生态环境质量预警指标体系分为目标层和指标层,指标层又分为一级指标和二级指标,整个指标体系共计8个单项指标。

### 1) 矿区大气质量预警指标

矿区大气污染主要以煤烟型污染为主要特征,以  $\text{SO}_2$  和 TSP 为主要污染物。TSP 中又以粒径小于  $10\ \mu\text{m}$  的颗粒物( $\text{PM}_{10}$ , particulate matter  $<10\ \mu\text{m}$ ) 对人体的危害最大,故选取  $\text{SO}_2$  浓度( $\text{mg}/\text{m}^3$ ) 和  $\text{PM}_{10}$  浓度( $\text{mg}/\text{m}^3$ ) 为矿区大气质量的代表性预警指标。

### 2) 矿区水环境质量预警指标

矿区水体污染的污染物主要来自煤炭开采排出的矿井水和生活污水,故以化学需氧量(chemi-

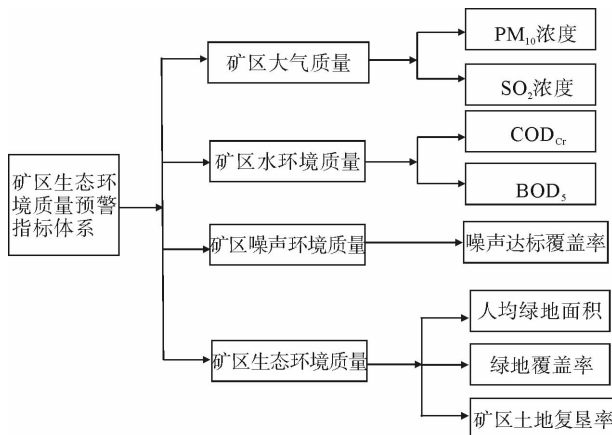


图1 矿区生态环境质量预警指标体系图

Fig. 1 Early warning index system of ecological environment quality in mining areas

cal oxygen demand)COD<sub>Cr</sub> (mg/m<sup>3</sup>)和生化需氧量(biochemical oxygen demand)BOD<sub>5</sub> (mg/m<sup>3</sup>)为代表性预警指标。

### 3) 矿区噪声环境质量预警指标

矿区噪声环境质量预警指标选取噪声达标覆盖率,计算方法为

$$\text{噪声达标覆盖率}\% = \frac{\text{达标覆盖区面积}}{\text{矿区总面积}} \times 100\%。$$

矿区可分为生活居住区、生产区和交通区,各区域噪声达标阈值参考《GB12348-9 工业企业厂界噪声标准》确定,具体数据如表 1 所示。

### 4) 矿区生态质量预警指标

#### ① 人均绿地面积

绿色植物不仅能通过光合作用调节矿区空气中的 O<sub>2</sub>和 CO<sub>2</sub>含量,改善小气候,而且具有保护土壤,防止水土流失的作用。人均绿地面积直接反映了矿区的生态环境状况。从改善小气候和保护环境的要求考虑,矿区人均公共绿地面积不应少于 9 m<sup>2</sup>。

#### ② 绿地覆盖率

绿色植物在矿区具有多种多样的生态服务功能,绿地覆盖率的多少直接标志着矿区生态质量好坏。从改善小气候和保护环境的要求考虑,矿区绿地覆盖率不小于 30%。

#### ③ 矿区土地复垦率

矿区土地复垦是指将矿区废弃地重新开发利用。该指标表征对煤矿开采后所遗留的土地资源复垦与综合利用的程度。其计算公式为

$$\text{矿区土地复垦率}\% = \frac{\text{矿区废弃土地复垦面积}}{\text{矿区废弃土地总面积}} \times 100\%。$$

表 1 矿区噪声达标阈值取值表

Tab. 1 Noise threshold values in mining areas

区域	对应国标中区域	噪声昼间达标阈值/dBA
矿区生活居住区	居民、文教区	55
矿区办公区	居住、商业、工业混合区	60
矿区生产区	工业集中区	65
矿区交通	交通干线道路两侧	70

## 2 矿区生态环境质量预测模型

矿区生态环境质量预警就是对矿区未来生态环境的状态进行预测,并用不同的信号进行预警,提示人们及时采取措施。预警时需要评价预警指标未来的数据,因此,在预警前首先要对预警指标的发展趋势进行预测。也就是说,预测是预警的前提。

目前,常采用的预测方法大多是数理统计中的回归分析、方差分析和主成分分析等系统分析方法,这些方法的不足之处为:①要求有大量数据,数据少就难以找到统计规律;②要求样本服从某个典型的概率分布;③可能会出现量化结果与定性分析结果不符的现象,导致系统的关系和规律遭到歪曲和颠倒。

灰色系统理论把客观对象视为一个灰色的物质系统,在研究系统的变化规律时,通过抓住系统的表征信息,利用灰数生成,灰色建模的信息加工手段,研究系统内部因素间的变化规律,利用得到的灰色模型,来预测系统未来的发展,较好地克服了上述不足。本文采用 GM(1,1)灰色预测模型<sup>[5]</sup>进行矿区生态环境质量各指标的预测。

设非负原始数据数列为  $\mathbf{X}^{(0)}$ ,即

$$\mathbf{X}^{(0)} = (x^{(0)}(1), x^{(0)}(2), \dots, x^{(0)}(n))。 \tag{1}$$

对  $\mathbf{X}^{(0)}$  作一次累加,得到生成数列

$$\mathbf{X}^{(1)} = (x^{(1)}(1), x^{(1)}(2), \dots, x^{(1)}(n))。 \tag{2}$$

其中,  $x^{(1)}(k) = \sum_{i=0}^k x^{(0)}(i)。$

根据灰色理论,对应于  $x^{(0)}(n)$  关于时间  $t$  的白化形式的一阶一元微分方程为

$$\frac{dx^{(1)}}{dt} + ax^{(1)} = u. \quad (3)$$

通过将式(3)进行离散化,整理得到

$$x^{(0)}(k+1) = a \left[ -\frac{1}{2}(x^{(1)}(k) + x^{(1)}(k+1)) \right] + u, \quad (4)$$

令  $\Phi = [\hat{a} \quad \hat{u}]^T$  为辨识参数向量,展开式(4)即得

$$Y = B\Phi. \quad (5)$$

这里,

$$Y = [x^{(0)}(2), x^{(0)}(3), \dots, x^{(0)}(n)]^T, B = \begin{bmatrix} -\frac{1}{2}[x^{(1)}(1) + x^{(1)}(2)] & 1 \\ -\frac{1}{2}[x^{(1)}(2) + x^{(1)}(3)] & 1 \\ \vdots & \vdots \\ -\frac{1}{2}[x^{(1)}(n-1) + x^{(1)}(n)] & 1 \end{bmatrix}.$$

利用最小二乘法解式(5)得

$$\Phi^* = [a^* \quad u^*]^T = (B^T B)^{-1} B^T Y.$$

代入式(3)求出离散解:

$$\hat{x}^{(1)}(k+1) = \left[ x^{(1)}(1) - \frac{u^*}{a^*} \right] e^{-a^*k} + \frac{u^*}{a^*}. \quad (6)$$

由式(6),将累计结果还原,即可得 GM(1,1) 模型的时间对应函数:

$$\hat{x}^{(0)}(k+1) = \hat{x}^{(1)}(k+1) - \hat{x}^{(1)}(k) = (1 - e^{-a^*}) \left[ x^{(1)}(1) - \frac{u^*}{a^*} \right] e^{-a^*k}. \quad (7)$$

利用式(6)计算预测值的精度:

$$\epsilon(k) = \frac{x^{(0)}(k) - \hat{x}^{(0)}(k)}{x^{(0)}(k)} \times 100\% = \frac{e(k)}{x^{(0)}(k)} \%, k = 1, 2, \dots, n. \quad (8)$$

### 3 矿区生态环境质量的预警方法

#### 3.1 矿区生态环境质量的预警模型——赋权综合预警模型

利用 GM(1,1) 灰色预警模型,得到矿区生态环境预警指标体系中各单指标的预测值,为了预测矿区生态环境的整体状况,本研究采用加权平均模型,建立矿区生态环境赋权综合预警模型。模型表达式为

$$R = \sum_{i=1}^m \gamma(x_i) \cdot \omega_i. \quad (9)$$

其中: $R$ — 矿区生态环境预警综合指数; $m$ — 预警指标的个数; $\gamma(x_i)$ — 预警指标的无量纲化数值; $\omega_i$ — 预警指标的权重。

##### 3.1.1 预警指标的无量纲化

在矿区生态环境综合预警模型的计算中, $\gamma(x_i)$  为预警指标的无量纲化数值。因为各个预警指标的物理意义彼此不同,单位不同,对评价对象的作用趋势也不一致,各个指标之间不具有可比性,所以,需要进行无量纲化处理,使指标之间便于比较和计算预警综合指数。

设  $\gamma(x_i)$  ( $i = 1, 2, \dots, n$ ) 为第  $i$  个评价指标的无量纲化值, $a_i, b_i$  分别为各指标的上(下)限,则

1) 对于越大越安全的(即发展型)指标, $b_i$  为指标的下限, $a_i$  为指标的上限,

$$\gamma(x_i) = \begin{cases} 1, & x_i \geq a_i \\ 0, & x_i \leq b_i \\ \frac{x_i - b_i}{a_i - b_i}, & b_i < x_i < a_i \end{cases};$$

2) 对于越小越安全的(即约束型) 指标,  $a_i$  为指标的下限,  $b_i$  为指标的上限,

$$\gamma(x_i) = \begin{cases} 1, x_i \leq b_i \\ 0, x_i \geq a_i \\ \frac{a_i - x_i}{a_i - b_i}, b_i < x_i < a_i \end{cases} .$$

对于发展型指标(如人均绿地面积),当基础数据  $x_i$  越大时,对矿区生态环境质量越有利;对于约束型指标(如  $\text{SO}_2$  含量),当指标值  $x_i$  越小时,对矿区生态环境质量越有利。指标上下限的确定主要根据国家的相关质量标准如《GB3095-1996 环境空气质量标准》、《GB3838-2002 地表水环境质量标准》等确定。各预警指标的隶属度函数如下。

①  $\text{SO}_2$  浓度( $\text{mg}/\text{m}^3$ , 标准状况),以其日均值进行计算,隶属度函数为

$$\gamma_{\text{SO}_2}(x) = \begin{cases} 1.25 - 5x, 0.05 < x < 0.25 \\ 0, x > 0.25 \\ 1, x \leq 0.05 \end{cases} ;$$

②  $\text{PM}_{10}$  浓度( $\text{mg}/\text{m}^3$ , 标准状况),以其日均值进行计算,隶属度函数为

$$\gamma_{\text{PM}_{10}}(x) = \begin{cases} 1.25 - 5x, 0.05 < x \leq 0.25 \\ 0, x > 0.25 \\ 1, x \leq 0.05 \end{cases} ;$$

③ 化学需氧量( $\text{COD}_{\text{Cr}}$ ,  $\text{mg}/\text{m}^3$ ),隶属度函数为

$$\gamma_{\text{COD}_{\text{Cr}}}(x) = \begin{cases} 1, x \leq 10 \\ 15 - 0.5x, 10 < x \leq 20 \\ 1 - 0.025x, 20 < x \leq 40 \\ 0, x > 40 \end{cases} ;$$

④ 生化需氧量( $\text{BOD}_5$ ,  $\text{mg}/\text{m}^3$ ) 的隶属度函数为

$$\gamma_{\text{BOD}_5}(x) = \begin{cases} 1, x \leq 2 \\ 1.5 - 0.25x, 2 < x \leq 4 \\ 1 - 0.125x, 4 < x \leq 6 \\ 0.625 - 0.0625x, 6 < x \leq 10 \\ 0, x > 10 \end{cases} ;$$

⑤ 矿区噪声达标区覆盖率(%),隶属度函数为

$$\gamma_{\text{噪声达标覆盖率}}(x) = \begin{cases} 0, x < 10 \\ 0.1x - 1, 10 \leq x < 20; \\ 1, x \geq 20 \end{cases}$$

⑥ 绿地覆盖率(%),隶属度函数为

$$\gamma_{\text{绿地覆盖率}}(x) = \begin{cases} 0, x < 15\% \\ 6.67x - 1, 15\% \leq x < 30\%; \\ 1, x \geq 30\% \end{cases}$$

⑦ 人均绿地面积( $\text{m}^2$ ),隶属度函数为

$$\gamma_{\text{人均绿地面积}}(x) = \begin{cases} 0, x < 2 \\ 0.14x - 0.286, 2 \leq x < 9; \\ 1, x \geq 9 \end{cases}$$

⑧ 矿山土地复垦率(%),隶属度函数为

$$\gamma_{\text{矿山土地复垦率}}(x) = \begin{cases} 0.02x - 0.8, 40 < x \leq 90 \\ 1, x > 90 \\ 0, x \leq 40 \end{cases} .$$

### 3.1.2 预警指标权重 $w_i$ 的确定

采用层次分析法(analytic hierarchy process, AHP)<sup>[6]</sup>, 通过比较调查, 对 20 位专家进行咨询, 对咨询的结果进行整理后得出判断矩阵, 然后计算其特征根和特征向量, 并检验判断矩阵的一致性, 确定预警指标的权重(表 2)。

### 3.1.3 矿区生态环境综合预警

对于矿区生态环境预警的预报方法, 采用一组类似于交通信号灯的标志, 根据计算出的 R 值, 对照矿区综合预警分级表, 将预测出的矿区生态环境质量状态直观地表示出来, 用以判断矿区生态环境的状况。绿灯表示质量状况很好; 蓝灯表示质量状况尚可; 黄灯表示质量状况不好, 处于警戒水平; 红灯表示质量状况很差, 处于警报水平, 需要发出警报, 提醒大家要积极采取措施加以控制。矿区综合预警等级划分标准如表 3 所示。

## 3.2 矿区生态环境综合预警中的一票否决

需要特别说明的是, 在使用矿区生态环境综合预警模型时, 由于  $PM_{10}$  浓度、 $SO_2$  浓度、 $COD_{Cr}$ 、 $BOD_5$  四个指标对矿区

生态环境质量影响特别巨大, 故规定若这四个指标中的任何一个指标无量纲化后的数值小于 0.3, 则无论其他指标多么好, 综合预警模型也将发出红灯警报, 称之为矿区生态环境综合预警中的一票否决。

## 4 结语

本研究从预警指标体系、预测模型、预警模型三个方面, 递进地研究了矿区生态环境质量的预警方法。构建了以矿区大气质量、矿区水环境质量、矿区噪声环境质量、矿区生态质量为一组指标的预警指标体系; 运用灰色系统理论, 建立了预警指标 GM(1,1) 灰色预测模型; 在对预警指标进行无量纲化和赋权的基础上, 建立了赋权综合预警模型。矿区生态环境质量预警方法的系统研究, 对保护矿区的生态环境, 实现矿区的可持续发展具有重要意义。

### 参考文献:

- [1] 席旭东. 矿区资源循环利用模式研究[M]. 北京: 煤炭工业出版社, 2006.
- [2] 杨静, 王立芹. 矿区生态安全评价指标体系的研究[J]. 山东科技大学学报: 自然科学版, 2005, 24(3): 36-39.  
YANG Jing, WANG Liqin. Study on index system for ecological safety evaluation in mining areas[J]. Journal of Shandong University of Science and Technology: Natural Science, 2005, 24(3): 36-39.
- [3] 王广成, 闫旭骞. 矿区生态系统健康评价指标体系研究[J]. 煤炭学报, 2005, 30(4): 534-538.  
WANG Guangcheng, YAN Xuqian. Study on indicator system of ecosystem health assessment in a typical mine area[J]. Journal of China Coal Society, 2005, 30(4): 534-538.
- [4] 杨静. 矿区生态环境评价和预警的指标体系及方法的研究[D]. 青岛: 山东科技大学, 2004.
- [5] 刘晓敏. 灰色预测与一元线性回归预测的比较[J]. 四川理工学院学报: 自然科学版, 2009, 22(2): 107-109.  
LIU Xiaoxu. Comparing for grey forecast and forecast of one element linear regression[J]. Journal of Sichuan University of Science & Engineering: Natural Science Edition, 2009, 22(2): 107-109.
- [6] 胡永宏. 综合评价方法[M]. 北京: 科学出版社, 2000.

表 2 矿区预警指标的权重表

Tab. 2 The weights of early warning in mining area

预警指标	权重
$PM_{10}$ 浓度	0.157
$SO_2$ 浓度	0.154
$COD_{Cr}$	0.145
$BOD_5$	0.142
矿区噪声达标区覆盖率	0.090
植被覆盖率	0.102
人均绿地面积	0.101
矿山土地复垦率	0.109

表 3 矿区综合预警等级划分标准表

Tab. 3 The standard of grade division for comprehensive warning in mining area

级别 数值	I 级 绿灯, 优	II 级 蓝灯, 良	III 级 黄灯, 警戒水平	IV 级 红灯, 警报水平
综合指数 R 值	1.0 ~ 0.8	0.8 ~ 0.6	0.6 ~ 0.3	0.3 ~ 0