

文章编号: 1673-3363-(2013)01-0057-06

# 基于可拓论的科学采矿评价方法

李东印, 李化敏, 周英

(河南理工大学能源科学与工程学院, 河南 焦作 454000)

**摘要** 为了推动科学采矿的量化评价, 提出了“安全开采、绿色开采、高回收率开采、集约化高效开采、智能化开采和完全成本开采”等6个反映科学采矿的内涵指标, 及“资源禀赋条件、安全技术保障、科学管理保障、经济与社会效益”等4个与科学采矿息息相关的外延指标, 构建了“10-42-63”结构的科学采矿评价指标体系。论述了科学采矿与可拓论之间的关系, 同时, 以可拓论、主观动态赋权方法、线性加权综合方法、专家定参方法等为手段, 提出了科学采矿等级的评价方法, 研发了适用于各种类型井工矿井评价的ESSM软件, 可分别或同时计算被评价矿井的科学采矿等级和科学采矿指数。

**关键词** 科学采矿; 可拓论; 科学采矿等级; 评价方法

中图分类号 TD 353

文献标志码 A

## Study on the evaluation method of scientized mining by extension theory

LI Dong-yin, LI Hua-min, ZHOU Ying

(School of Energy Science and Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo, Henan 454000, China)

**Abstract** In order to promote quantitative evaluation of scientized mining, this paper proposes six connotative indexes which can inflect the scientific mining, such as safety mining, green mining, high-recovery mining, intensive & high-efficiency mining, intellectualized mining and absorption-cost mining. By the way, four extension indexes which are closely related to scientized mining as follows, resource endowments, security technology guarantee, scientific management guarantee, economic and social benefits, at last the “10-42-63” structure evaluation system of scientized mining has been built. Having discussed the relationship between scientific mining and extension theory, meanwhile, the theory based on the methods as follows: extension theory, subjective dynamic determining weights method, linear weighted integrated method and expert setting parameter method. The assessment method of the scientized mining grade is proposed, research and develop ESSM, a soft applicable to evaluate all types of underground mine, which can calculate scientized mining coefficient(ScMC)and scientized mining rank(ScMR)separately or simultaneously is founded.

**Key words** scientized mining; extension theory; scientized mining grade; evaluation indexes system

科学采矿是在安全、环保前提下, 最大限度地  
高效采出煤炭资源的开采技术<sup>[1]</sup>, 是人类认识自然

和开发利用自然资源理念的升华, 是采矿技术、发  
展方式, 乃至煤炭行业命运的重大变革, 是一种全

收稿日期: 2011-03-22

基金项目: 国家自然科学基金项目(51074066); 河南理工大学博士基金项目

作者简介: 李东印(1970-), 男, 河南省封丘县人, 副教授, 从事煤矿开采理论方面的研究。

E-mail: lidongyin@126.com

Tel: 13939170537

新的采矿模式，科学采矿必将对煤炭工业未来前景产生深远影响。自钱鸣高院士提出科学采矿的理念后，科学采矿内涵得到了不断丰富和发展<sup>[1-13]</sup>。笔者曾在早期的研究中构建了科学采矿评价指标体系，并提出了科学采矿指数的概念<sup>[11-13]</sup>。

### 1 科学采矿评价指标体系的发展

通过系统分析煤炭开采历史的演化进程，结合前期的研究成果，本文提出了以“安全开采、绿色开采、高回收率开采、集约化高效开采、智能化开采和完全成本开采”等 6 个反映科学采矿的内涵指标，及以“资源禀赋条件、安全技术保障、科学管理保障、经济与社会效益”等 4 个与科学采矿息息相关的外延指标。进一步丰富了科学采矿的内涵，拓展了科学采矿的外延。科学采矿核心内涵与主要外延的关系如图 1 所示。

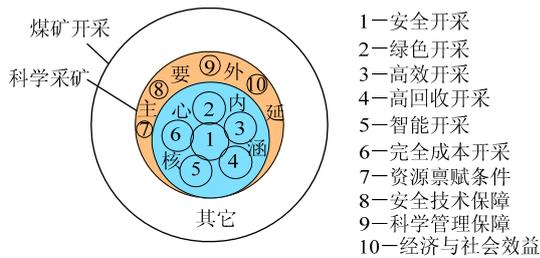


图 1 核心内涵与主要外延之间的关系  
Fig.1 The relation between core connotation and main denotation

为了对科学采矿进行定量评价，推动科学采矿的进一步发展，本文以科学采矿的核心内涵与主要外延为基础，既充分考虑科学采矿的本质，又客观面对煤炭资源的禀赋条件、安全保障和社会责任等因素，丰富和完善了科学采矿评价指标体系，将原来提出的“5-33-64”的评价指标体系结构<sup>[11-13]</sup>调整为“10-42-63”结构(图 2)。该体系既从安全、环保、生态、资源回收等方面对煤矿开采技术提出了要求，又以发展的眼光考虑了开采条件、社会责任和企业安全文化对煤矿生产的影响，比较充分地反映了和谐社会与煤炭资源可持续发展的基本要求，有利于促进煤炭行业的科学发展。

### 2 基于可拓论的科学采矿等级计算方法

#### 2.1 可拓论简介

我国学者蔡文于 20 世纪末创立了可拓学。可拓学是可拓论、可拓方法、可拓工程结合起来的产物<sup>[14-15]</sup>。可拓论研究事物拓展的可能性和开拓创新

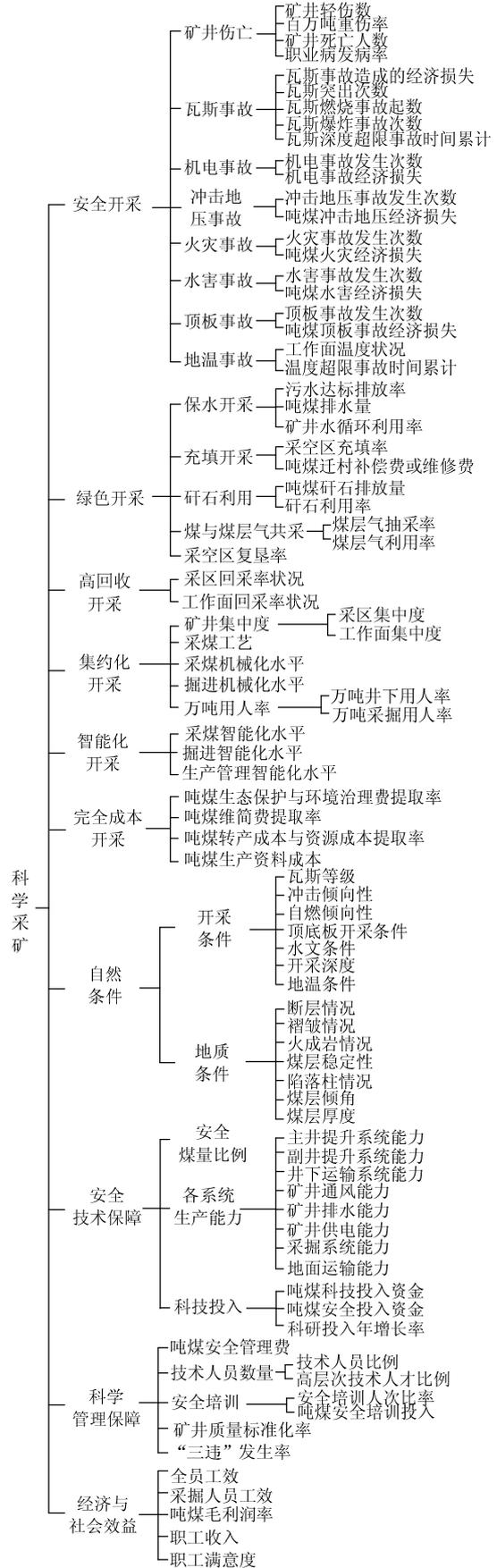


图 2 科学采矿评价指标体系  
Fig.2 The system of scientized mining evaluation indexes

的规律，是可拓学的基本理论。可拓论的 3 个支柱是基元理论、可拓集合理论和可拓逻辑。作为一种能够解决矛盾问题的新兴科学，可拓论在军事、电力和岩土等领域取得了成功应用，也给煤炭行业的专家、学者提供了研究煤炭问题的新思路。

### 2.2 可拓论与科学采矿的关系

在科学采矿的评价指标中无处不存在着矛盾及其转化，这些矛盾问题均符合可拓论。例如：“安全开采”指标中，安全与隐患之间的关系可以用可拓论中的可拓集合与论域之间的关系表达(如图 3)。本来安全的煤矿生产状态如果有违章发生，或有不可预知的地质因素出现，就会转化为不安全状态；反之，对于存在安全隐患的状态，如果能做到有针对性的预防和控制，就会使隐患转化为可控条件下的安全，甚至转化为安全状态。

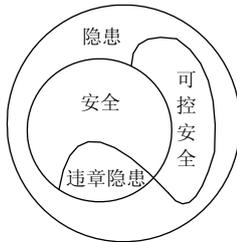


图 3 安全与隐患的可拓关系

Fig.3 Extension relation between safety and hidden danger

### 2.3 科学采矿等级的划分方法

为了能清晰地表达被评价矿井属于人们所划定的哪一类科学采矿水平的矿井，本文提出了科学采矿等级(ScMR)的概念，并将其分为 5 类，如表 1 所示。

表 1 科学采矿等级分类表

Table 1 ScMR classification

类别	科学采矿水平	描述
I	极好	矿井现状符合科学采矿核心内涵要求，安全技术保障程度高，安全文化建设良好。
II	良好	矿井现状符合科学采矿核心内涵要求，安全技术保障程度较高，安全文化建设好。
III	中等	矿井现状基本符合科学采矿核心内涵要求，安全技术保障程度较高，安全文化建设较好。
IV	合格	矿井现状基本符合科学采矿核心内涵要求，安全技术保障程度较高，安全文化建设一般。
V	不合格	矿井现状不符合科学采矿核心内涵要求，安全技术保障程度不高，安全文化建设较差。

### 2.4 ScMR 的计算过程

#### 2.4.1 计算流程

科学采矿评价指标体系所涉及的指标众多，指标的性质不同，其量化方法分别采用了标准取值

法、开关函数法、拟合函数法、定性取值法等手段，对于区域性指标，采用专家定参法，由评价专家组共同商定指标拟合函数中的关键参数。

对于评价指标权重的确定，采用多专家参与的“主观动态专家赋权法”<sup>[11-13]</sup>实现。ScMR 的计算需要多个专家(至少 7 人)共同参与，要求每位专家独立地为所有指标赋权，系统按照“计算平均值→均方差筛选→再平均→归一化”的流程，给评价指标赋予动态权重。ScMR 的计算流程如图 4 所示。

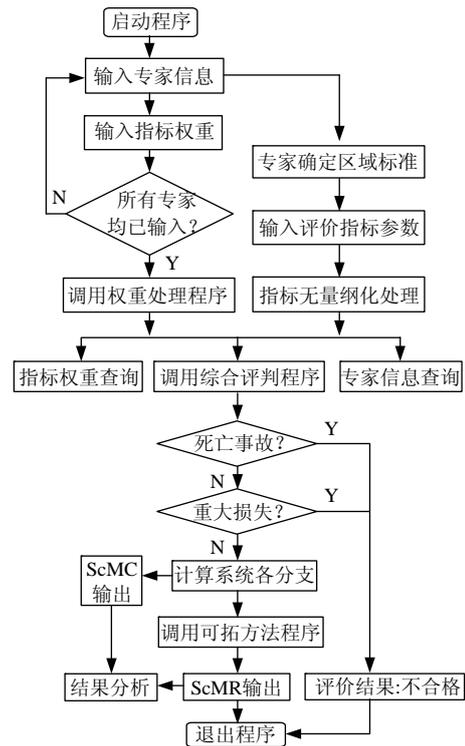


图 4 计算流程图

Fig.4 The flowchart of calculated model

#### 2.4.2 ScMR 的形成过程

##### 1) 第 1 步：确定经典域

评价对象各等级关于对应指标所取的数值范围，称之为经典域。经典域可表示为：

$$R_{ji} = (S_j, C_i, V_{ji}) =$$

$$\begin{bmatrix} S_j & c_1 & V_{j1} \\ & c_2 & V_{j2} \\ & \vdots & \vdots \\ & c_n & V_{jn} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_j & c_1 & \langle a_{j1}, b_{j1} \rangle \\ & c_2 & \langle a_{j2}, b_{j2} \rangle \\ & \vdots & \vdots \\ & c_n & \langle a_{jn}, b_{jn} \rangle \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中： $S_j$ 为所划分的第  $j$  个等级； $C_i(i=1,2,\dots,n)$ 为等级  $S_j$  的评价指标； $V_{ji}$ 为  $S_j$  关于指标  $C_i$  所确定的量值范围。

规定综合评判法得到的 10 个一级测度的分类标准如表 2 所示。

表 2 科学采矿核心内涵一级指标单因素分类标准

Table 2 Standard classification of scientized mining first level indexes

指标	I 类	II 类	III 类	IV 类	V 类
$N_1$	1.00-0.90	0.90-0.80	0.80-0.70	0.70-0.60	0.60-0.00
$N_2$	1.00-0.80	0.80-0.70	0.70-0.55	0.55-0.45	0.45-0.00
$N_3$	1.00-0.85	0.85-0.75	0.75-0.65	0.65-0.50	0.50-0.00
$N_4$	1.00-0.95	0.95-0.90	0.90-0.70	0.70-0.60	0.60-0.00
$N_5$	1.00-0.60	0.60-0.50	0.50-0.40	0.40-0.20	0.20-0.00
$N_6$	1.00-0.65	0.65-0.60	0.60-0.50	0.50-0.45	0.45-0.00
$W_1$	1.00-0.80	0.80-0.70	0.70-0.60	0.60-0.40	0.40-0.00
$W_2$	1.00-0.95	0.95-0.90	0.90-0.80	0.80-0.70	0.70-0.00
$W_3$	1.00-0.90	0.90-0.80	0.80-0.70	0.70-0.60	0.60-0.00
$W_4$	1.00-0.85	0.85-0.70	0.70-0.60	0.60-0.50	0.50-0.00

注：表中  $N_1$ -安全开采； $N_2$ -绿色开采； $N_3$ -资源回收； $N_4$ -高效开采； $N_5$ -智能化开采； $N_6$ -完全成本开采； $W_1$ -自然条件； $W_2$ -安全技术保障； $W_3$ -科学管理保障； $W_4$ -经济与社会效益。

则按表 2 表达各类物元，I 类—“科学采矿水平极好”物元  $R_1(j=1)$  表示为式(2)。

$$R_1 = \begin{bmatrix} N_1 & (0.90,1.0) \\ N_2 & (0.80,1.0) \\ N_3 & (0.85,1.0) \\ N_4 & (0.95,1.0) \\ N_5 & (0.60,1.0) \\ N_6 & (0.65,1.0) \\ W_1 & (0.80,1.0) \\ W_2 & (0.95,1.0) \\ W_3 & (0.90,1.0) \\ W_4 & (0.85,1.0) \end{bmatrix} \quad (2)$$

II 类—“科学采矿水平良好”物元  $R_2(j=2)$  表示为：

$$R_2 = \begin{bmatrix} S_2 & N_1 & (0.80,0.90) \\ & N_2 & (0.70,0.80) \\ & N_3 & (0.75,0.85) \\ & N_4 & (0.90,0.95) \\ & N_5 & (0.50,0.60) \\ & N_6 & (0.60,0.65) \\ & W_1 & (0.70,0.80) \\ & W_2 & (0.90,0.95) \\ & W_3 & (0.80,0.90) \\ & W_4 & (0.70,0.85) \end{bmatrix} \quad (3)$$

按同样的方法可表示 III、IV、V 类物元。

2) 第 2 步：确定节域。节域可表示为：

$$R_{pi} = (S_p, C_i, V_{pi}) = \begin{bmatrix} S_p, & c_1, & V_{p1} \\ & c_2, & V_{p2} \\ & \vdots & \vdots \\ & c_n, & V_{pn} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_p, & c_1, & \langle a_{p1}, b_{p1} \rangle \\ & c_2, & \langle a_{p2}, b_{p2} \rangle \\ & \vdots & \vdots \\ & c_n, & \langle a_{pn}, b_{pn} \rangle \end{bmatrix}$$

式中： $P$  为全体评价等级； $C_i$  为等级  $S_j$  的评价指标； $V_{pi}$  为  $P$  关于指标  $C_i$  的量值范围，即  $P$  的节域。

3) 第 3 步：确定待评物元

针对待评价的矿井，待评物元  $R_d$  来自采用线性加权综合评判法<sup>[11-13]</sup>，计算得到的 10 个一级测度的计算值，即

$$R_d = (S_d, C_i, V_i) = \begin{bmatrix} S_d, & c_1, & V_1 \\ & c_2, & V_2 \\ & \vdots & \vdots \\ & c_n, & V_n \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中： $S_d$  为待评价对象(等级)； $C_i$  为等级  $S_j$  的评价指标； $V_i$  为  $S_d$  关于指标  $C_i$  的量值。

4) 第 4 步：确定关联函数

根据可拓方法，待评对象的特征  $C_i$  关于第  $j$  个等级的关联函数为：

$$k_j(V_i) = \begin{cases} \frac{\rho(V_i, V_{ji})}{\rho(V_i, V_{pi}) - \rho(V_i, V_{ji})}, & V_i \notin V_{ji} \\ \frac{\rho(V_i, V_{ji})}{\rho(V_i, V_{pi}) - \rho(V_i, V_{ji}) + a_{ji} - b_{ji}}, & V_i \in V_{ji} \end{cases}$$

式中  $\rho(V_i, V_{ji})$  为点  $V_i$  与区间  $V_{ji}$  的距离，即

$$\rho(V_i, V_{ji}) = \left| V_i - \frac{a_{ji} + b_{ji}}{2} \right| - \frac{b_{ji} - a_{ji}}{2}$$

第 1 个评价指标安全开采  $N_1$  与 I 类物元  $R_1$  的关联函数值记为  $K_{11}$ ， $N_1$  与 II 类物元  $R_2$  的关联函数值记为  $K_{21}$ ，以此类推，有  $K_{31}$ ， $K_{41}$ ， $K_{51}$  等关联函数值。从而得到一个有关联函数值  $K_{ij}$ (其中  $i=1, 2, \dots, 10, j=1, 2, \dots, 5$ )组成的关联矩阵  $G$ 。

5) 第 5 步：确定评定对象等级

科学采矿 10 个一级指标的权重值由主观动态专家赋权系统产生，记为  $\alpha = \alpha_{1 \times 9}$ ，即  $\alpha_i$  为特征  $C_i$  的权重系数， $R_d$  关于第  $j$  个等级的关联度为  $K_j(R_d)$ ，采用模型  $M(\cdot, +)$  计算，即

$$K_j(R_d) = \sum \alpha_i \cdot K_j(V_i) \quad (5)$$

(其中  $i=1,2,\dots,10, j=1,2,\dots,5$ )

则模型计算结果为：

$$S = \alpha \cdot G = (K_1(R_d), K_2(R_d), K_3(R_d), K_4(R_d), K_5(R_d)) \quad (6)$$

$$\text{令 } S_i = K_i(R_d) = \max(K_1(R_d), K_2(R_d), K_3(R_d), K_4(R_d), K_5(R_d))$$

采用可拓方法计算后的综合评价结果分别与 ScMR (I ~ V 类) 之间存在一一对应关系, 即关联度。关联度的大小表示对象符合标准等级的程度, 其值越大, 符合的程度越高。

### 3 实例应用

为了实现对不同矿井的科学采矿评价, 以科学采矿评价指标体系为基础, 以科学采矿评价方法为手段, 以微软 Visual Studio 2010 开发环境下的 VB.net 编程语言和 ACCESS 数据库为工具, 研发了“煤炭资源科学采矿评价系统”, 简称“ESSM”。ESSM 的首面如图 5 所示。



图 5 ESSM 首页

Fig.5 Homepage of ESSM

以位于准格尔煤田最北部的、设计生产能力 1 000 万 t/a 的某矿井为例, 计算矿井的科学采矿等级。矿井采用斜井多水平开拓方式。主采煤层为 6 煤, 为低瓦斯, 为易自燃煤层。2 个盘区 2 个回采工作面生产。主斜井安装胶带输送机, 提升能力 2 100 万 t/a; 副斜井为无轨胶轮车运输。采用混合式通风方式, 矿井总进风量 180 m<sup>3</sup>/s; 矿井最大涌水量 159 m<sup>3</sup>/h, 最大涌水量 409 m<sup>3</sup>/h; 井下大巷运输能力 2 000 万 t/a; 地面为铁路运输。

采用文献[11-13]中的量化方法, 按照上述步骤, 将矿井实际参数输入 ESSM 软件后, ScMR 的解算结果为:

$$S = (-0.2834, -0.3643, -0.2135, -0.2479, -0.3212)$$

则该矿井 ScMR 为“中等”, 输出结果如图 6。



图 6 示例矿井 ScMR 计算结果

Fig.6 ScMR result of the example coal mine

同时, ESSM 计算软件采用作者提出的科学采矿指数的计算方法<sup>[11]</sup>, 直接输出 ScMC, 并用雷达图表达 10 个一级评价指标的计算结果(图 7)。



图 7 示例矿井 ScMC 计算结果

Fig.7 ScMC result of the example coal mine

### 4 结论

1) 优选了“10-42-63”的科学采矿评价指标, 丰富和完善了科学采矿评价指标体系。

2) 以科学采矿评价指标体系为基础, 以可拓方法和线性加权综合法为手段, 采用多种指标量化手段, 引入多专家参与的主观动态专家赋权方法, 提出了科学采矿等级(ScMR)的计算方法。

3) 开发了用于科学采矿评价的 ESSM 计算软件, 可同时或分别计算被评价矿井的科学采矿等级(ScMR)和科学采矿指数(ScMC), 所得评价结论可以为煤炭管理部门提出可操作的量化依据。

### 参考文献:

[1] 钱鸣高, 缪协兴, 许家林. 论科学采矿[J]. 采矿与安全工程学报, 2008, 25(1): 1-10.  
 QIAN Ming-gao, MIAO Xie-xing, XU Jia-lin, et al. On scientized mining[J]. Journal of Mining & Safety Engineering, 2008, 25(1): 1-10.

[2] 许家林, 钱鸣高. 绿色开采的理念与技术框架[J]. 科技导报, 2007, 25(7): 61-65.

- XU Jia-lin, QIAN Ming-gao. Concept of green mining and its technical framework[J]. *Science & Technology Review*, 2007, 25(7): 61-65.
- [3] 钱鸣高, 许家林, 缪协兴, 等. 煤矿绿色开采技术[J]. *中国矿业大学学报*, 2003, 32(4): 343-348.  
QIAN Ming-gao, XU Jia-lin, MIAO Xie-xing. Green technique in coal mining[J]. *Journal of China University of Mining & Technology*, 2003, 32(4): 343-348.
- [4] 钱鸣高. 绿色开采的概念与技术体系[J]. *煤炭科技*, 2003(4): 1-3.  
QIAN Ming-gao. Technological system and green mining concept[J]. *Coal Science and Technology*, 2003(4): 1-3.
- [5] 钱鸣高. 对中国煤炭工业发展的思考[J]. *中国煤炭*, 2005, 31(6): 5-10.  
QIAN Ming-gao. Consideration on the development of China's coal industry[J]. *China Coal*, 2005, 31(6): 5-10.
- [6] 钱鸣高. 煤炭产业特点与科学发展[J]. *中国煤炭*, 2006, 32(11): 5-8.  
QIAN Ming-gao. Characteristics of coal industry and scientific development[J]. *China Coal*, 2006, 32(11): 5-8.
- [7] 钱鸣高, 许家林. 煤炭工业发展面临几个问题的讨论[J]. *采矿与安全工程学报*, 2006, 23(2): 1-5.  
QIAN Ming-gao, XU Jia-lin. Discussion of several issues concerning the development of coal industry in China[J]. *Journal of Mining & Safety Engineering*, 2006, 23(2): 1-5.
- [8] 钱鸣高, 曹胜根. 煤炭开采的科学技术与管理[J]. *采矿与安全工程学报*, 2007, 24(1): 1-6.  
QIAN Ming-gao, CAO Sheng-gen. Scientific technique and management in coal mining[J]. *Journal of Mining & Safety Engineering*, 2007, 24(1): 1-6.
- [9] 钱鸣高, 缪协兴, 许家林. 资源与环境协调(绿色)开采[J]. *煤炭学报*, 2007, 32(1): 1-7.  
QIAN Ming-gao, MIAO Xie-xing, XU Jia-lin. Green mining of coal resources harmonizing with environment[J]. *Journal of China Coal Society*, 2007, 32(1): 1-7.
- [10] 钱鸣高. 煤炭的科学开采及有关问题的讨论[J]. *中国煤炭*, 2008, 34(8): 5-10.  
QIAN Ming-gao. On scientized coal mining[J]. *China Coal*, 2008, 34(8): 5-10.
- [11] 李东印, 李化敏, 周英. 煤炭资源科学采矿评价方法探讨[J]. *煤炭学报*, 2012, 37(4): 543-547.  
LI Dong-Yin, LI Hua-Min, ZHOU Ying, et al. Discussion on evaluation method of the coal scientized mining[J]. *Journal of China Coal Society*, 2012, 37(4): 543-547.
- [12] 李东印, 周英, 李化敏, 等. 基于主观动态权重的科学采矿评价模型构建[J]. *采矿与安全工程学报*, 2012, 29(2): 172-177.  
LI Dong-Yin, ZHOU Ying, LI Hua-Min, et al. Evaluation model on the coal scientized mining coefficient by the subjective dynamic weight[J]. *Journal of Mining & Safety Engineering*, 2012, 29(2): 172-177.
- [13] 李东印, 许灿荣. 煤炭资源科学采矿指数计算方法探讨[J]. *煤炭工程*, 2012(1): 70-72.  
LI Dong-yin, XU Can-rong. Discussion on the coal scientized mining coefficient calculation method[J]. *Coal Engineering*, 2012(1): 70-72.
- [14] 蔡文, 杨春燕. 可拓工程方法[M]. 北京: 科学出版社, 2000.
- [15] 蔡文. 创意的革命—今天你可拓了吗? [M]. 北京: 科学出版社, 2010.

## 《采矿与安全工程学报》2012年第5~6期 Ei 收录情况

根据 Ei 中国信息部发布的最新收录结果, 本刊 2012 年第 5~6 期共发表论文 50 篇, 其中 Ei Compendex 收录论文 50 篇, 收录率为 100%。