

文章编号: 1674-9057(2014)04-0635-06

doi:10.3969/j.issn.1674-9057.2014.04.006

# 矿产资源开发效率模糊综合评价模型

## ——以攀西地区钒钛磁铁矿为例

罗德江<sup>1,2,3</sup>, 姚霖<sup>2</sup>, 魏友华<sup>3</sup>

(1. 北京大学 地球与空间科学学院, 北京 100871; 2. 中国国土资源经济研究院, 北京 101149;

3. 成都理工大学 管理科学学院, 成都 610059)

**摘要:** 矿产资源开发效率综合评价是一项涉及多模糊因素的多层次的复杂系统工程。通过分析钒钛磁铁矿开发效率的影响因素, 从矿产资源开发利用水平、矿山地质环境恢复与治理、人员效率与开发利用效益等4个方面构建指标体系; 根据钒钛磁铁矿开发效率影响因素及综合评价结果具有模糊性这一特点, 建立了开发效率综合评价两级模糊综合评价模型。通过调研收集了攀西钒钛磁铁矿开发效率的相关数据, 并应用两级模糊综合评价模型进行了评价。评判结果反映了攀西钒钛磁铁矿开发利用的现状, 同时也显示攀西地区的钒钛磁铁矿开发利用处于较高的水平。

**关键词:** 钒钛磁铁矿; 开发效率; 指标体系; 模糊综合评价模型

**中图分类号:** TD989

**文献标志码:** A

矿产资源是自然资源的重要组成部分, 是人类赖以生存、社会赖以发展的物质基础, 具有初始禀赋的有限性和消耗不可逆性<sup>[1-2]</sup>。经过60多年来的大力建设和发展, 我国的矿产资源开发利用水平得到了极大的提高。但是与欧美矿业发达国家相比, 我国的矿产资源开发效率还有一定的差距。提高矿产资源开发利用效率, 对实现建设资源节约型、环境友好型和谐社会的宏伟目标具有重要的意义, 因此应加强矿产资源开发利用效率评价的研究。

目前对单种矿产资源、能源、水资源等开发利用评价研究较多, 但对矿产资源开发利用效率评价指标体系与方法的研究较少<sup>[3]</sup>。如: 王边莲等<sup>[4]</sup>提出应用BP神经网络方法对铁金矿的各个开发利用方案进行评价; 丁其光等<sup>[5]</sup>采用开采回采率、选矿回收率、矿产综合利用指数、矿产综合利用率、三废利用等指标建立了矿产资源开发效率评价模型, 对钒钛磁铁矿和镍多金属矿进行了评价; 吴仲雄

等<sup>[6]</sup>应用层次分析法对广西8种主要矿产资源的开发利用进行了评价, 得到了优先发展顺序的排序; 安贵鑫等<sup>[7]</sup>以DEA方法为基础提出了石油企业开发效率评价的理论模型, 并进行了实证研究。针对矿产资源开发效率评价研究现状, 本文在以往评价指标体系与评价方法研究的基础上, 应用模糊综合评价法对钒钛磁铁矿开发效率进行评价。

## 1 攀西地区钒钛磁铁矿资源开发现状

### 1.1 攀西钒钛磁铁矿资源概况

钒钛磁铁矿是一种铁、钒、钛等多种元素共生的复合矿, 是我国重要的战略资源, 主要分布在我国攀西、承德和马鞍山地区<sup>[8]</sup>。攀西地区是我国钒钛磁铁矿的主要成矿带, 该成矿带南北长约300 km, 东西宽10~30 km, 面积约6 000 km<sup>2</sup>, 是世界上同类矿床的重要产区之一<sup>[9]</sup>。攀西地区的攀枝花矿区、红格矿区、白马矿区和太和矿区的等4个矿区构成了特大型矿床, 矿体厚度达数十米

收稿日期: 2014-05-14

基金项目: 中国地质调查局项目 (12120113092300)

作者简介: 罗德江 (1976—), 男, 博士, 副教授, 地球探测与信息技术专业, ldj3428@126.com。

引文格式: 罗德江, 姚霖, 魏友华. 矿产资源开发效率模糊综合评价模型——以攀西地区钒钛磁铁矿为例 [J]. 桂林理工大学学报, 2014, 34 (4): 635-640.

至 200 m 以上, 延伸数百米至千余米。攀西地区钒钛磁铁矿探明储量 93.96 亿 t, 其中钒的储量以  $V_2O_5$  计为 2 348 万 t, 钛资源量为 8.7 亿 t, 约占全国各类铁矿资源的 1/5, 是国内著名的三大综合利用矿产资源之一<sup>[10-11]</sup>。至 2012 年底, 攀西地区已实施的整装勘查项目累计探获钒钛磁铁矿新增储量 20 多亿 t, 使攀西地区钒钛磁铁矿的储量达到约 130 亿 t。

攀西钒钛磁铁矿为多金属共(伴)生矿, 矿石中除铁、钛、钒外, 还共(伴)生多种有益的元素, 如经济价值较高的铬、钴、镍、钨、镓等<sup>[12]</sup>; 攀西钒钛磁铁矿的矿物组成复杂, 已知的就有 90 多种矿物, 主要是铁、钛、铬的氧化物和各种硅酸盐类矿物等, 还有少量的硫、砷化物、磷酸盐矿物等, 但这些矿物嵌布致密, 难于分离, 综合利用难度大<sup>[10,13]</sup>。

### 1.2 攀西钒钛磁铁矿开发利用现状

攀西作为我国钒钛磁铁矿资源最丰富、最集中的地区, 经过 40 多年的发展, 其钒钛磁铁矿资源开发与综合利用已取得了显著成就, 特别是最近几年, 开发势头强劲, 进入了快速发展阶段, 矿山“三率”和矿产资源综合利用水平都得到了显著的提高, 已成为我国钒钛产业发展最好, 钒钛资源开发利用水平最高、开发前景最广阔的地区<sup>[9]</sup>。

目前攀西钒钛磁铁矿开发利用已形成了较大的规模。攀西地区年产钒钛磁铁矿精矿 1 000 多万 t, 选铁尾矿中回收钛精矿 100 多万 t, 对尾矿中钛的选矿回收率一般在 30% 以上, 开发了钛白粉、海绵钛、钛锭等产品; 在钒的综合利用方面, 现已开发出钒渣、高钒铁、三氧化二钒、五氧化二钒、钒氮合金等系列产品, 钒资源利用率达到 60%<sup>[9]</sup>。攀西钒钛磁铁矿除铁、钒、钛以外, 与钒钛磁铁矿共(伴)生的有益元素由于技术经济的原因, 基本未加以利用, 这些金属都是国民经济发展紧缺的、必需的, 经济损失巨大。

攀西地区作为西南地区钢铁产业、我国钒钛产业发展的主要原料基地, 钒钛磁铁矿的综合利用得到了国家的高度重视, 国土资源部发布了《四川攀西钒钛磁铁矿资源合理开发利用“三率”指标要求(试行)》(2012 年), 制定了攀西地区钒钛磁铁矿开采回采率、选矿回收率、综合利用

率等相关指标, 提出要对伴生的钛、钒、铬及硫化物等有用组分进行综合利用。该文件的出台对提高攀西地区钒钛磁铁矿资源综合利用水平、促进产业升级具有重大的作用。

## 2 基于模糊综合法的矿产资源开发效率评价模型构建

### 2.1 评价方法的选择

矿产资源开发效率综合评价利用数学方法对矿产资源开发效率的多个指标信息进行综合, 从而给每个矿山赋予一个评价价值, 以此来判断开发效率的高低。由于矿产资源开发效率综合评价是一个复杂的系统工程, 涉及的因素多, 且作为标度各因素指标的界限具有模糊性, 往往不能用一个具体的数值来表示, 只能用一个数值区间来表示; 其次是评价结果也具有模糊性, 如开发效率“高”、“低”也是就综合评价值在一定的区间而言的。模糊方法将定性描述和定量分析有机地结合起来, 对具有多因素、模糊性且存在一定的主观性的矿产资源开发效率综合评价具有良好的性能。因此本文应用模糊综合评价法对攀西地区钒钛磁铁矿开发效率进行评价和分析。

### 2.2 攀西钒钛磁铁矿开发效率模糊综合评价模型的构建

攀西地区钒钛磁铁矿开发效率综合评价的因素众多, 且因素之间还存在着不同的层次。根据对该矿开发效率的分析, 将其影响因素分为矿产资源开发利用水平、矿山地质环境恢复与治理、人员效率与开发利用效益等 4 项一级评价指标, 每个一级指标又分别由若干个二级指标构成, 因此需要建立两级模糊综合评价模型。根据模糊综合评价法的基本原理<sup>[14-15]</sup>, 建立了两级模糊综合评价模型, 并利用该模型对攀西地区钒钛磁铁矿开发效率进行综合评价, 其具体步骤如下。

① 确定攀西地区钒钛磁铁矿开发效率评价结果等级  $V$ 。

开发效率评价结果为 4 个等级: 高、较高、一般、低, 故评价结果集合为

$$V = \{v_1, v_2, v_3, v_4\} = \{\text{高, 较高, 一般, 低}\} \quad (1)$$

② 确定攀西地区钒钛磁铁矿开发效率评价因素  $U$ 。设矿产资源开发利用水平、矿山地质环境恢

复与治理、人员效率与开发利用效益等 4 项一级评价指标分别为  $U_1$ 、 $U_2$ 、 $U_3$  和  $U_4$ ，它们是因素论域的 4 个子集，满足

$$U = \bigcup_{i=1}^4 U_i, U_i \cap U_j = \emptyset, i \neq j. \quad (2)$$

每一个一级指标  $U_i, i = 1, 2, 3, 4$ ，又分别由若干个二级指标构成

$$\begin{aligned} U_1 &= \{u_{11}, u_{12}, \cdots, u_{1n_1}\}; \\ U_2 &= \{u_{21}, u_{22}, \cdots, u_{2n_2}\}; \\ U_3 &= \{u_{31}, u_{32}, \cdots, u_{3n_3}\}; \\ U_4 &= \{u_{41}, u_{42}, \cdots, u_{4n_4}\}. \end{aligned}$$

③ 确定各层级指标的权重值。权重值包括一级指标相对于总目标层的权重  $w_B$  和二级指标相对于一级指标的权重  $w_C$ ：

$$w_B = (w_1, w_2, w_3, w_4); \quad (3)$$

$$w_C = (w_{C1}, w_{C2}, w_{C3}, w_{C4}); \quad (4)$$

$$w_{Ci} = (w_{Ci1}, w_{Ci2}, \cdots, w_{Cin_i}), i = 1, 2, 3, 4。$$

④ 根据各指标特征确定各指标的隶属度函数，建立隶属度矩阵  $R$ 。

⑤ 进行分层模糊综合评价。矿产资源开发效率综合评价可分为 2 级：二级指标层对一级指标层（准则层）和准则层对目标层的评价。二级指标层对一级指标层（准则层）的模糊评价为

$$B_i = W_{Ci} \circ R_i, i = 1, 2, 3, 4; \quad (5)$$

准则层对目标层的模糊评价为

$$S = B \circ w_B = (s_1, s_2, s_3, s_4), \quad (6)$$

对  $S$  进行归一化，再根据最大隶属度原则可确定各矿山开发效率等级。

⑥ 计算开发效率总得分。根据矿产资源开发效率等级规定基数，结合模糊评价的结果  $S$  进行综合考虑<sup>[16]</sup>，得到更直观的最终综合评价得分（ $Q$ ）：

$$Q = 90s_1 + 70s_2 + 50s_3 + 30s_4。 \quad (7)$$

### 3 攀西地区钒钛磁铁矿开发效率评价

#### 3.1 构建评价指标体系

矿产开发利用效率的影响因素众多，既有矿床规模、矿石性质等矿石自然属性方面的因素，又有矿山规模、矿产开发形式、矿产品价格等经济、技术因素<sup>[1]</sup>。因此矿产资源开发利用效率评价的指标是多方面、多层次的，如矿产资源开发利用的“三率”指标、经济投入指标、人员投入指标、经济效益指标等<sup>[3,5]</sup>，要建立科学、合理、实

用的指标体系是矿产资源开发利用效率评价的难点之一。基于相关的研究成果<sup>[3,5,17-18]</sup>并结合攀西地区钒钛磁铁矿资源的特点，根据简明精炼原则与操作性强原则，确定矿产资源开发利用效率评价指标体系，该指标体系可分为 2 个层次和 4 个方面，见图 1。

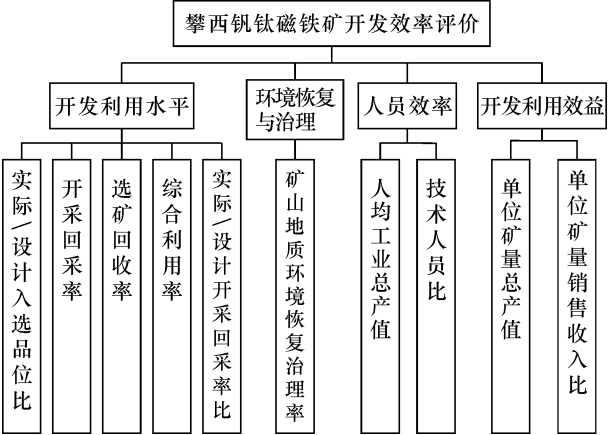


图 1 钒钛磁铁矿开发效率综合评价指标体系  
Fig. 1 Index system of vanadium titanium magnetite

① 开发利用水平（ $DUG$ ）。开采回采率（ $R_{mr}$ ）、选矿回收率（ $M_r$ ）、矿产资源综合利用率（ $T_{m\text{m}}$ ）是构成矿产资源开发效率的核心内容，也是评价矿产资源开发利用中资源充分合理利用的重要技术经济指标，即投入开发的矿产资源中的每一种有用组分是否都得到了充分合理的回收。攀西钒钛磁铁矿的综合利用是其开发利用的特色与重点之一，因为除铁以外，还有可综合利用的与铁共（伴）生的钒、钛及其他有益（用）元素。除“三率”指标外，还设计了实际入选品位（ $G_a$ ）与设计入选品位（ $G_d$ ）之比（ $R_g$ ）、实际开采回采率（ $R_a$ ）与设计开采回采率（ $R_d$ ）之比（ $R_r$ ）两个指标：

$$R_g = G_a/G_d; \quad (8)$$

$$R_r = R_a/R_d。 \quad (9)$$

② 环境恢复与治理（ $ERI$ ）。为了最大限度地利用有限的矿产资源和保护环境，企业应投入资金和技术力量对废弃物加以利用和对矿山进行恢复治理，因此选取矿山恢复治理率（ $G_e$ ）作为环境投入的指标。

③ 人员效率（ $EE$ ）。专业技术人员是企业的中流砥柱，企业要提高竞争力、提高矿产资源开发效率都离不开专业技术人员，因此在人员效率方面设计了人均工业总产值（ $P_{io}$ ）和技术人员比（ $R_l$ ）两个

指标:

$$P_{io} = I_o/N_e;$$
(10)

$$R_t = N_t/N_e。$$
(11)

式中:  $I_o$  为矿山工业总产值;  $N_e$  为矿山从业人数;  $N_t$  为技术人员数。

④ 开发利用效益( $DUE$ )。在矿产资源开发利用效益方面, 应考虑单位矿量工业总产值( $U_{co}$ )、单位矿量销售收入( $U_{pr}$ ) 等作为开发利用经济效益的评价指标:

$$U_{co} = C_o/Q_o;$$
(12)

$$U_{pr} = P_r/Q_o。$$
(13)

式中:  $C_o$  为企业总产值;  $Q_o$  为生产矿石量;  $P_r$  为矿产品销售收入。

3.2 评价指标权重的确定

评价指标权重是影响矿产资源开发效率评价结果的关键因素之一。目前确定权重的方法可分为客观法和主观法: 前者通过某一数理方法确定权重, 具有客观性但没有充分考虑专家的知识 and 经验; 后者则充分利用专家经验和知识对指标的重要性作出独立的判断。本研究采用如德尔菲法(Delphi method) 确定评价指标权重, 再利用两级模糊评价模型对矿产资源开发效率进行评价。

矿产资源开发效率评价指标体系是一个相互关联的多层树状结构(图1), 专家按照权重值与指标对矿产资源开发效率影响程度大小呈正比的原则, 从上到下对具有同一父因素结点的同层指标在0~1 范围内进行打分, 并保证同一层各指标权重值之和为1。在确定指标体系后, 针对各指标的重要性进行专家问卷, 最终确定的指标权重如表1 所示。从表中可以看出, “三率” 指标是矿产

资源开发利用效率的核心内容, 因此占有较大的权重, 其次是人均工业总产值、单位矿量总产值, 它们反映了矿山的产出效益, 也占有较大的权重。

3.3 开发效率等级的划分标准

根据各个评价指标对矿产资源开发效率的影响程度, 并依据已有的行业标准和工业指标等相关资料如《四川攀西钒钛磁铁矿资源合理开发利用“三率” 指标要求(试行)》建立了攀西地区钒钛磁铁矿开发效率评价的评分标准(表2)。在开发效率评价指标的评分标准中, 由于人均工业总产值、技术人员比、单位矿量销售收入等没有行业标准, 故用指标的最大值除该指标值作归一化处理, 最大值对应了该行业的较高水平。

3.4 攀西钒钛磁铁矿开发效率评价

根据攀西地区钒钛磁铁开发利用的相关资料, 选取攀西地区的10 个钒钛磁铁矿矿山作为评价的对象, 记为KF01、KF02、…、KF10(表3)。在10 个

表1 评价指标权重

Table 1 Weight of evaluation index				
目标层	一级指标	权重	二级指标	权重
攀西地区钒钛磁铁矿开发效率综合评价	DUG	0.55	$R_g$	0.05
			$R_{mr}$	0.15
			$M_r$	0.15
			$T_{rm}$	0.10
			$R_r$	0.10
	ERI	0.05	$G_e$	0.05
	EE	0.15	$P_{io}$	0.10
			$R_t$	0.05
	DUE	0.25	$U_{co}$	0.10
			$U_{pr}$	0.15

表2 评价指标的评分标准

Table 2 Evaluation standards of index						
目标层	一级指标	二级指标	高	较高	一般	低
攀西地区钒钛磁铁矿开发效率综合评价	DUG	$R_g$	$\geq 100\%$	90% ~ 100%	80% ~ 90%	< 80%
		$R_{mr}$	$\geq 94\%$	85% ~ 94%	80% ~ 85%	< 80%
		$M_r$	$\geq 70\%$	65% ~ 70%	60% ~ 65%	< 60%
		$T_{rm}$	$\geq 65\%$	55% ~ 65%	45% ~ 55%	< 45%
		$R_r$	$\geq 1$	0.9 ~ 1	0.8 ~ 0.9	< 0.8
	ERI	$G_e$	$\geq 50\%$	30% ~ 50%	10% ~ 30%	< 10%
	EE	$P_{io}$	$\geq 0.8$	0.6 ~ 0.8	0.4 ~ 0.6	< 0.4
		$R_t$	$\geq 0.8$	0.6 ~ 0.8	0.4 ~ 0.6	< 0.4
	DUE	$U_{co}$	$\geq 0.8$	0.6 ~ 0.8	0.4 ~ 0.6	< 0.4
		$U_{pr}$	$\geq 0.8$	0.6 ~ 0.8	0.4 ~ 0.6	< 0.4

表 3 开发效率评价数据  
Table 3 Data of development efficiency evaluation

矿山 编号	实际入选 品位比	开采回 采率	选矿回 收率	综合利 用率	实际开采 回率比	矿山恢 复治理率	人均工业 总产值比	技术人 员比	单位矿量 总产值	单位矿量 销售收入
KF01	1.005 0	0.931 6	0.705 0	0.488 0	0.991 0	0.168 0	0.853 6	0.282 9	1.538 6	1.458 7
KF02	1.000 0	0.918 0	0.841 0	0.950 0	1.005 0	0.833 0	0.123 6	0.374 4	0.818 7	1.066 3
KF03	0.922 0	0.953 0	0.812 0	0.678 0	1.003 0	0.000 0	0.179 4	1.247 9	0.450 3	0.586 5
KF04	1.000 0	0.895 0	0.894 0	0.900 0	1.000 0	1.000 0	0.270 7	0.615 6	0.939 5	1.143 2
KF05	1.153 0	0.962 0	0.780 0	0.890 0	1.048 0	0.718 0	1.552 8	0.940 1	3.396 2	1.732 7
KF06	1.054 0	0.933 0	0.597 0	0.564 0	0.993 0	0.327 0	6.169 5	0.407 7	1.290 8	1.473 8
KF07	1.244 0	0.921 0	0.651 0	0.880 0	1.047 0	0.100 0	1.580 0	0.648 9	1.136 1	1.479 7
KF08	1.000 0	0.850 0	0.150 0	0.850 0	0.176 0	0.667 0	0.097 7	1.189 7	0.686 6	0.876 2
KF09	1.304 0	0.800 0	0.850 0	0.850 0	0.941 0	0.286 0	0.236 7	0.416 0	3.878 0	2.696 6
KF10	0.785 0	0.849 0	0.664 0	0.900 0	0.903 0	0.002 0	1.801 8	1.780 4	2.045 0	2.663 4

注：数据来源于《西南典型地区矿产资源综合评价与区划》(成都理工大学),2013。

评价对象中，KF01、KF05、KF06、KF07、KF10 为大型矿山，其余为小型矿山，大小型矿山各占 50%。考虑到攀西钒钛磁铁矿主要分布在攀枝花市，因此在攀枝花市选取了 KF01、KF03、KF04、KF06、KF07、KF10 等 6 个评价对象，在凉山州选取了 4 个评价对象。目前从攀西钒钛磁铁矿资源开发利用来看，大型矿山的开发效率和综合利用水平总体上要高于小型矿山。

利用构建的两级模糊综合评价模型对 10 个钒钛磁铁矿开发效率进行评价，评价结果如表 4 所示。根据最大隶属度原则，分别给出了 10 个矿山的评价结论。为了更直观的反映各矿山开发效率，利用式(7)计算各矿山的总得分（表 4），根据评价总得分分级标准(高：总得分≥70；较高：60≤总得分<70；一般：50≤总得分<60；低：总得分<50)给出了各评价对象的开发效率评价结果。

表 4 钒钛磁铁矿开发效率综合评价结果  
Table 4 Efficiency evaluation of vanadium titanium magnetite development

序 号	评价矿 山编号	最终评价结果				总得分	评价 结论
		高	较高	一般	低		
1	KF01	0.193 5	0.263 7	0.311 3	0.231 5	58.38	一般
2	KF02	0.330 3	0.169 2	0.208 5	0.292 0	60.76	较高
3	KF03	0.329 6	0.205 8	0.157 0	0.307 6	61.15	较高
4	KF04	0.309 4	0.179 4	0.237 4	0.273 8	60.49	较高
5	KF05	0.430 2	0.313 1	0.177 3	0.079 4	71.88	高
6	KF06	0.224 5	0.329 8	0.313 6	0.132 0	62.93	较高
7	KF07	0.292 8	0.292 3	0.226 5	0.188 4	63.79	较高
8	KF08	0.144 4	0.170 5	0.234 1	0.420 9	49.26	低
9	KF09	0.381 0	0.238 2	0.234 7	0.146 0	67.08	较高
10	KF10	0.312 3	0.265 2	0.252 3	0.170 1	64.39	较高

在评价结论中，“较高”占 70%，“高”、“一般”与低各占 10%，表明整体上攀西钒钛磁铁矿开发效率处于较高的水平，也反映出大型矿山的开发效率总体上要高于小型矿山。

4 结束语

矿产资源开发效率综合评价是一项复杂的系统工程，且影响因素较多。本文通过对攀西地区钒钛磁铁矿开发效率影响因素的分析，从矿产资源开发利用水平、矿山地质环境恢复与治理、人员效率、开发利用效益 4 个方面建立了评价指标体系。根据矿产资源开发效率综合评价影响因素与评价结果具有模糊性，以及评价指标多级等特征，采用两级模糊评价模型对选取的攀西地区 10 个钒钛磁铁矿矿山开发效率进行了评价，评判结果较准确地反映了攀西钒钛磁铁矿开发利用现状。

本文建立了攀西钒钛磁铁矿开发效率综合评价的指标体系，由于矿产资源的多样性以及矿产资源开发效率影响因素的复杂性，要建立科学、实用的指标体系还需要深入的研究；其次是在模糊综合评价中隶属度函数的选取、指标体系评分标准的确定等方面受到人的主观因素的影响，如何减少此类影响、提高评价的科学性也是今后工作中应深入研究的问题。

参考文献：

[1] 原振雷,冯进城,薛良伟. 矿产资源开发利用的经济学特性及其优化配置[J]. 中国矿业, 2006, 15(4): 34–36.  
[2] 麦笑宇,曹佳宏,余永富. 矿产资源开发利用评价技术研究展望 [J]. 矿冶工程, 2002, 22 (4): 44–46.

[3] 赵军伟, 郭敏, 赵恒勤. 矿产资源开发利用效率评价构想 [J]. 中国矿业, 2012, 21 (8): 60-63.

[4] 王边莲, 杨润高, 秦国真. BP 神经网络方法在矿产资源综合开发利用评价中的应用 [J]. 中国市场, 2011 (15): 118-119.

[5] 丁其光, 徐明. 矿产开发利用效率评价指标及方法初探 [J]. 矿产综合利用, 2012 (1): 53-55.

[6] 吴仲雄, 赵文彬. 广西优势矿产资源开发利用评价 [J]. 中国矿业, 2006, 15 (12): 91-94.

[7] 安贵鑫, 彭修娟, 张在旭. 基于 DEA 的石油资源开发效率评价 [J]. 工业技术经济, 2009, 28 (1): 65-68.

[8] 邓君, 薛逊, 刘功国. 攀钢钒钛磁铁矿资源综合利用现状与发展 [J]. 材料与冶金学报, 2007, 6 (2): 83-86.

[9] 谭其尤, 陈波, 张裕书, 等. 攀西地区钒钛磁铁矿资源特点与综合回收利用现状[J]. 矿产综合利用, 2011(6): 6-9.

[10] 杨省贵, 张平. 可持续发展与攀西钒钛资源综合利用 [J]. 金属矿山, 2002 (7): 31-34.

[11] 刘克敏. 攀西钒钛磁铁矿的综合利用及其工艺流程 [J]. 四川冶金, 1990 (1): 3-17.

[12] 刘熙光, 邱克辉, 张其春, 等. 关于钒钛磁铁矿综合利用可持续发展问题的探讨 [J]. 中国矿业, 2000, 10 (4): 21-23.

[13] 傅文章. 攀西钒钛磁铁矿资源特征及综合利用问题的基本分析 [J]. 矿产综合利用, 1996 (1): 27-33.

[14] 刘合香. 模糊数学理论及其应用 [M]. 北京: 科学出版社, 2012.

[15] 邓俊国, 李加林, 王占利, 等. 旅游资源多级模糊综合评价探讨——以河北省涞源县为例 [J]. 资源科学, 2004, 26 (1): 76-82.

[16] 贺志勇, 张娟, 王存宝, 等. 高速公路隧道安全性的综合评价 [J]. 华南理工大学学报: 自然科学版, 2008, 36 (2): 58-63.

[17] 乐毅, 余永富, 张泾生. 中国锰矿资源开发利用评价体系研究 [J]. 金属矿山, 2009 (10): 15-20.

[18] 傅中良. 关于矿产资源综合开发利用评价指标体系的建立 [J]. 矿产保护与利用, 1991 (4): 12-16.

Fuzzy comprehensive evaluation model of mineral resources development efficiency

—A case from vanadium-titanium magnetite mine in Panxi district

LUO De-jiang<sup>1,2,3</sup>, YAO Lin<sup>2</sup>, WEI You-hua<sup>3</sup>

(1. School of Earth and Space Sciences, Peking University, Beijing 100871, China; 2. Chinese Academy Land & Resource Economics, Beijing 101149, China; 3. College of Management Science, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, China)

**Abstract:** The evaluation of mine development efficiency is a complex system engineering which involves lots of factors in different levels, important for saving and protection of mineral resources. There are the factors affecting the efficiency of vanadium titanium magnetite development. They are the level of mineral resources development and utilization, mine geo-environment recovery and management, personal efficiency and the development and utilization of economic benefits. According to the fuzziness of influencing factor and evaluation in vanadium-titanium magnetite mine development, a fuzzy comprehensive evaluation model is established from a comprehensive evaluation for vanadium-titanium magnetite mine in Panxi district. The evaluation reflects the present situation of vanadium-titanium magnetite mine development in Panxi region, and shows the high level of development and utilization.

**Key words:** vanadium-titanium magnetite mine; development efficiency evaluation; index system; fuzzy comprehensive evaluating model