

<http://www.geojournals.cn/georev/ch/index.aspx>

# 区域性矿产资源开发系统 发展规划优化模型及其系统经济评价

钟自然

裴荣富 吴良士

(中国地质科学院研究生部, 北京)

(中国地质科学院矿床地质研究所, 北京)



区域性矿产资源的勘查开发活动是受多种因素影响的多目标系统, 研究这类系统的优化与经济评价问题是矿产经济学领域的重要课题。本文以宜昌地区磷矿资源开发规划为例, 应用系统工程的观点和方法通过系统分析建立优化模型, 借助于微机模拟出4套优化系统方案, 并利用最新研制的系统经济评价微机软件对这些开发方案进行了总体经济效益评价。

矿产资源勘查开发活动实质上是一个将地下或地表的矿产资源转化为社会所需要的矿产品的过程, 是一个受地质、技术、经济、社会、政策等多种因素影响的复杂的动态工程系统。如何以最快的速度, 最少的人力、物力、财力, 最充分地利用资源, 并取得最好的经济效益, 是该系统投资决策中急待解决的问题。

为合理解决这一问题, 笔者认为必须应用系统工程的观点和方法, 通过系统分析建立优化模型, 并借助电子计算机模拟寻优, 以保证矿产勘查开发达到最优化, 避免技术上的重大失误和经济上的严重损失。

区域性矿产资源开发系统是由多个矿山或生产单元组成的, 其投资费用高, 建设周期长, 影响因素多。目前国内解决此类系统的优化和经济评价问题的先例尚少。现以宜昌地区磷矿资源的开发规划为例, 对此进行探索性研究。

## 一、宜昌磷矿资源开发系统分析

宜昌磷矿为一大型海相沉积磷块岩型矿床, 位于湖北省鄂西山区, 矿床中心地段距宜昌市120km。整个矿床分布面积约300km<sup>2</sup>, 自北西向南东可划分为10个矿段, 有6个矿段已提交详勘报告, 其中樟Ⅲ矿段和桃坪河矿段已建成4座中小型矿山, 设计开采总规模为71万吨/年(商品原矿)。

### (一) 系统目标分析

宜昌磷矿资源开发系统的目标应体现国家和社会对该系统投入产出的要求。这些要求集中表现在系统的产品产量、固定资产投资和经济效益三个方面。

根据农业部门对磷肥需求的预测, 我国目前和今后一段时期内磷矿产品的供需矛盾仍将十分突出。我国磷矿产品不可能大量依靠进口, 而西南地区的运力又限制了云贵磷矿资源的开发规模。因此, 利用宜昌磷矿资源的地理、交通优势, 加快开发步伐, 是缓解我国磷矿产品急缺的重要途径。但我国建设资金十分紧张, 国家对拟建工程项目的经济效益的要求又越来越高, 故要求该系

统以最少的投资生产最大数量的磷矿产品,并取得最佳的经济效益。这三个目标既息息相关,又相互矛盾,彼此不能互相取代。三个目标的最优化不可能在同一系统中同时实现,只能达到决策者相互满意的程度。

## (二) 系统环境分析

系统的外部约束通常来自环境。对宜昌磷矿资源开发系统影响最大的外部环境主要有:

1. 国家对该系统的产量要求和投资限制;
2. 外部供电能力限制: 系统的电力负荷不得超过宜昌地区电力部门可向该系统提供的供电能力;
3. 外部供水能力限制: 已建成的中小型矿山和拟建的地方子矿供水水源充足,对系统不构成约束。大型矿山外部供水能力对系统的约束,可根据矿床南部的坦荡河枯水年迳流量按一定比例加以考虑;
4. 外部运输条件: 利用长江外运磷矿产品潜力巨大,部分产品还可通过焦枝铁路运往华北,故长途外运能力对系统无约束。短途运输有多种方案,运输方式的选择和运输设施的投资费用,视开发总规模的大小和系统构成的不同而异。
5. 地方小矿发展的政策性约束: 兼顾国家与地方利益,对地方小矿加以扶持疏导,对其开采规模加以控制。
6. 采选工艺技术水平及其可靠性: 主要考虑重介质选矿工艺技术的可靠性及选精矿产品中 $Cl^{-}$ 对运输和制肥设备可能存在的腐蚀性。
7. 磷矿产品的市场需求对产品方案的约束: 本系统可生产磷精矿、料浆法磷铵原料、黄磷炉料和商品原矿4种产品。考虑到料浆法磷铵原料只宜就近建厂消化,热法加工电耗太大,故对料浆法磷铵原料和黄磷炉料的产量应加以限制。

在系统优化过程中对上述诸因素或在设计替代方案时加以考虑,并量化在系统的投入与产出之中,或作为系统的约束条件置于优化模型之中。

## (三) 系统结构分析

宜昌磷矿有6个矿段勘探程度较高,建设条件较好,是一期开发对象。其中树崆坪、店子坪、樟I矿段西部、丁西为拟建矿山,它们均已设计有多个不同的开发方案;樟III矿段已建成生产能力为30万吨/年的矿山,必须作为组成要素之一纳入系统;桃坪矿段已建成3座小型矿山,现已设计出3种二期扩建改造方案,故必有其中之一进入该系统;在上述正规矿山设计范围之外,设计了10—15个小矿开采点,构成“小矿群”。根据宜昌磷矿的特点,笔者将上述矿山(开采点)归并为树崆坪、店子坪(包括樟I矿段西部)、樟III、丁西、桃坪河、小矿群等6个生产单元。现将各生产单元的替代方案综合列于表1。首先设定,这些替代方案在技术上都是可行的。

根据决策者对该系统各目标的不同要求,系统组成要素中哪些生产单元入选,哪些替代方案入选,存在各种不同的选择和组合,从而构成系统优化问题,并在一定程度上决定了优化方法的选择<sup>[1]</sup>。

宜昌地区磷矿资源开发系统优化的主要任务之一,就是保证该系统在对应于系统目标和环境因素约束的条件下,实现系统组成要素的最优组合,并给出最优系统输出的系统结构<sup>[1]</sup>。

## 二、系统优化模型及其算法研究

以上分析可知,宜昌磷矿资源开发系统的优化属于相互冲突的多目标系统优化问题。笔者认为,应用线性规划解决此类问题有很多局限性,采用目标规划(goal programming)模型对该

表 1 宜昌区域性磷矿资源开发系统各生产单元替代方案  
Table 1 Alternative engineering projects in Yichang regional phosphate rock deposits development system

项 目 序 号	生 产 单 元	替代方案		服务年限 (年)	产 品 产 量			*单位 基本折旧 (元/吨)	单位产品 成本 (元/吨)	单位产品 价格 (元/吨)	各替代 方案固定 资产投资 (万元)	模型决 策变量
		编 号	开发规模 (万吨/年)		实物量 (万吨)	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> 品位 (%)	纯P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> 量 (万吨)					
1	店子坪	I	采选150	23	97.48	31.5	30.83	14.63	68.45	110	32219	x <sub>1</sub>
		II	采选180	19	117.17	31.5	37.03	14.32	66.37	110	36226	x <sub>2</sub>
		III	采150 选20	23 18	130 12.13	24.62 32.5	35.95	7 14.63	24.8 68.45	36.2 115	20677	x <sub>3</sub>
2	树垭坪	I	采选100	26	57.27	31.5	18.04	16.63	77.23	110	20729	x <sub>4</sub>
		II	采选150	17	85.91	31.5	27.06	16.28	74.76	110	28324	x <sub>5</sub>
3	丁西	I	采选100	23	55.66	31.5	17.53	17.1	78.12	110	20908	x <sub>6</sub>
		II	采 60	31	60	24.30	14.58	7	24.9	34.8	7854	x <sub>7</sub>
		III	采选150	15	83.49	31.5	26.30	16.74	75.96	110	28309	x <sub>8</sub>
4	桃坪河	I	采60	9	30	28.19	13.19	7	24.5	37	9788	x <sub>10</sub>
			选30	33	15.25	31	11.53	78.21	110			
		II	采45	9 10	15 30	28.96 27.60	16.62	7 7	24.5 24.5	38 37	6062	x <sub>9</sub>
III	采选70	5 30	41 36.51	28 31	11.32	7 18.3	24.5 78.21	37 110	14109	x <sub>11</sub>		
5	樟Ⅲ	I	采30	28	30	28.83	8.65	7	24.5	46	6648	x <sub>12</sub>
6	小矿群	I	采95	17	95	31	29.45	7	19.4	40.5	9149	x <sub>13</sub>
		II	采100	17	100	31	31	7	19.4	40.5	9631	x <sub>14</sub>
		III	采120	17	120	31	37.2	7	19.4	40.5	11662	x <sub>15</sub>

\* 包括矿山“维简费”在内

系统进行描述和优化运算较合适。

该模型对系统的产量和投资这两个互相矛盾的目标，引入目标偏离量的概念，把对目标函数求极值问题转化为对目标偏离量求极值问题。同时还引入优先级的概念，根据各目标量纲和重要程度的不同，将所有目标分别安排在不同的优先级上来处理<sup>[2,3,1]</sup>。

### (一) 系统的目标函数

1. 第一优先级目标函数： $\text{Min} = P(n_1 - p_1)$ ;
2. 第二优先级目标函数： $\text{Min} = P(n_2 - p_2)$ ;
3. 第三优先级目标函数： $\text{Max} = P(npv)$

式中：

$n_1$ ——系统总产量不足产量目标期望值的差额； $p_1$ ——系统总产量超过产量目标期望值的余额； $n_2$ ——系统实需总投资少于国家对系统投资限额的数额； $p_2$ ——系统实需总投资超出投资限额的数额； $npv$ ——系统的净现值。

## (二) 系统的约束条件

$$1. \text{ 系统总产量目标约束: } \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^{n_i} \sum_{k=1}^{k_{ij}} \sum_{l=1}^{l_{ijk}} x_{ijk} \cdot q_{ijkl} \cdot \beta_{ijkl} + n_1 - p_1 = Q_0$$

式中:

$m$ ——生产单元的个数;  $n_i$ —— $i$ 生产单元规模方案的个数;  $k_{ij}$ —— $i$ 生产单元 $j$ 规模工艺方案个数;  $l_{ijk}$ —— $i-j-k$ 方案的产品个数;  $q_{ijkl}$ —— $i-j-k$ 方案 $l$ 产品的产量;  $\beta_{ijkl}$ —— $i-j-k$ 方案 $l$ 产品的 $P_2O_5$ 含量;  $Q_0$ ——系统产量目标期望值

$$2. \text{ 系统总投资目标约束: } \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^{n_i} \sum_{k=1}^{k_{ij}} x_{ijk} \cdot I_{ijk} + n_2 - p_2 = I_0$$

式中:

$I_{ijk}$ —— $i-j-k$ 方案所需要的投资额;  $I_0$ ——系统投资目标期望值。

$$3. \text{ 系统产品产量低限约束: } \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^{n_i} \sum_{k=1}^{k_{ij}} x_{ijk} \cdot q_{ijkl} \cdot \beta_{ijkl} \geq q$$

式中:

$q$ ——宜昌地区对磷矿产品的总需求量。

$$4. \text{ 系统外部供电能力约束: } \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^{n_i} \sum_{k=1}^{k_{ij}} x_{ijk} \cdot E_{ijk} \leq E_0$$

式中:

$E_{ijk}$ —— $i-j-k$ 方案的电力负荷;  $E_0$ ——电力部门计划供给该系统的总电量。

$$5. \text{ 系统外部供水能力约束: } \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^{n_i} \sum_{k=1}^{k_{ij}} x_{ijk} \cdot W_{ijk} \leq W_0$$

式中:

$W_{ijk}$ —— $i-j-k$ 方案的耗水量;  $W_0$ ——外部供水水源最大供水能力。

6. 系统始端条件约束

7. 小矿群发展政策约束

(6、7两组约束在模型展开式中用数学表达式描述)

8. 变量互斥性约束:

$$(1) \text{ } i \text{ 生产单元同一规模的不同工艺方案互斥。即: } \sum_{k=1}^{k_{ij}} x_{ijk} \leq 1$$

$$(2) \text{ } i \text{ 生产单元,不同规模方案互斥。即: } \sum_{j=1}^{n_i} x_{ijk} \leq 1$$

$$9. \text{ 变量整型约束: } x_{ijk} = \begin{cases} 0, & i-j-k \text{ 方案未被选中} \\ 1, & i-j-k \text{ 方案被选中} \end{cases}$$

目前求解目标规划问题主要有三种方法,即:权和法、多阶段法和序列法<sup>[4]</sup>。鉴于各种方法的特点和利用微机软件实现模型运算的现实条件,国外大多采用序列法求解。我国在微机上解算目标规划问题的先例不多,利用混合整数规划软件在微机上解算目标规划问题更少见。笔者采用混合整数规划微机软件,应用序列法原理在MC-68000微机上求解宜昌磷矿资源开发系统混合整数目标规划模型,取得了比较满意的结果。计算程序框图如图1所示。

根据决策者对系统各目标的不同要求,笔者对模型参数作了相应变动,模拟出4套系统方

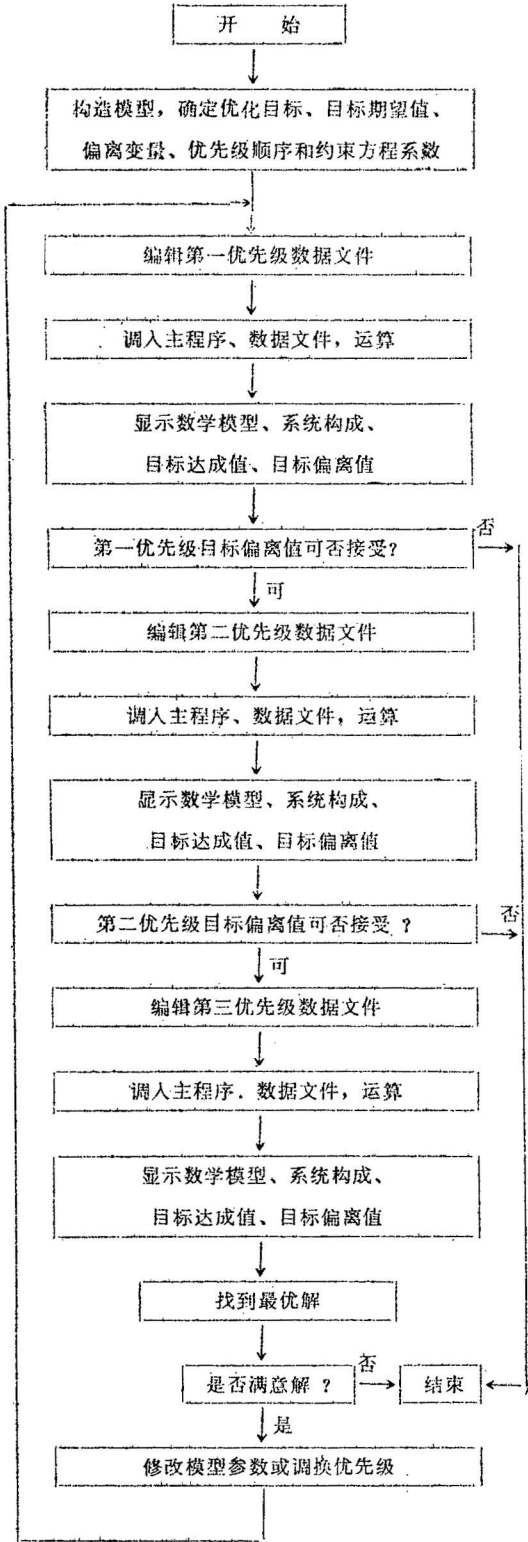


图 1 序列法求解目标规划模型计算框图

Fig. 1 Computer algorithm flow chart based on the goal programming technique

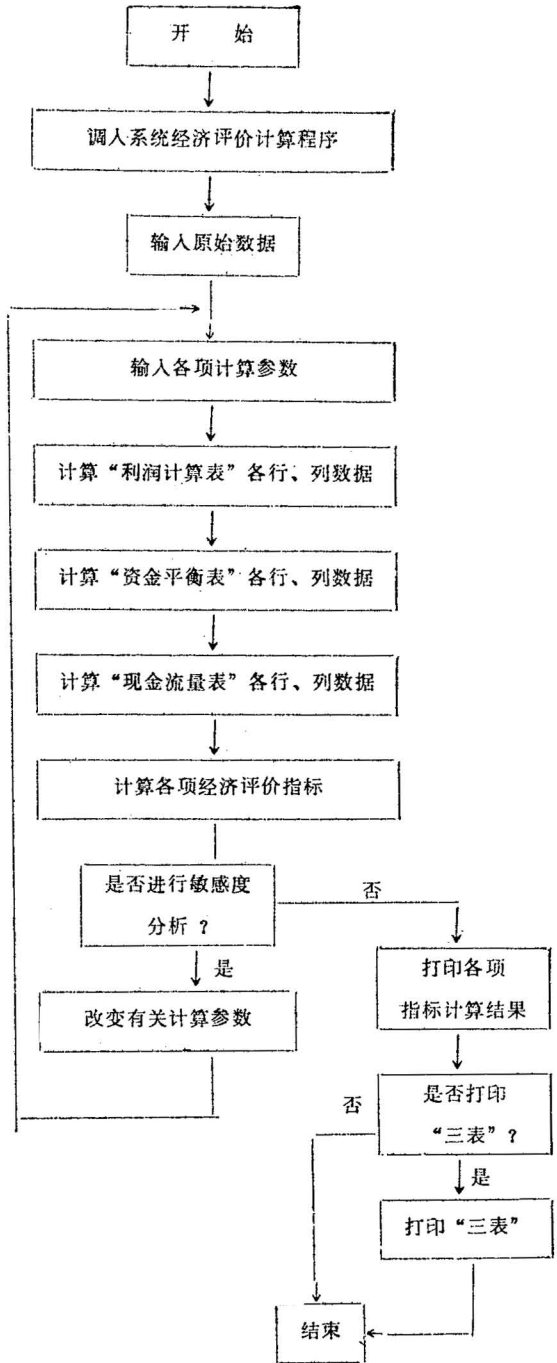


图 2 系统经济评价计算框图

Fig. 2 Calculating flow chart of system economic evaluation

案。它们均系在尽可能接近产量、投资目标期望值和满足系统内、外部约束条件下经济效益最佳的优化方案。

各系统方案的特点见表2。

### 三、系统经济评价

笔者认为,进行矿床开发的经济评价首先必须满足两个前提:其一,矿床开发方案(评价的对象)必须是优化方案;其二,评价指标体系(评价的尺度)必须准确反映开发方案的经济效益。据此对宜昌磷矿资源的开发进行了系统分析和系统优化,模拟出4套优化系统方案,从而为系统经济评价奠定了科学的基础。

对系统的盈利性,笔者设置了内部收益率( $irr$ )、投资回收期( $d$ )、净现值( $npv$ )、净现值率( $npvr$ )、投资利润率( $oo$ )、投资利税率( $obr$ )等6项指标进行考察。对系统的投资借款偿还能力用借款偿还期( $w$ )指标考察<sup>[1]</sup>。

决定系统经济性的根本要素是现金流入、流出的状况。 $irr$ 是现金流入、流出最终结果的综合体现,其值不受外部参数的影响而完全取决于系统本身的现金流量,它反映了系统经济性的本质。 $npv$ 是能够直接反映系统给国民经济带来实质利益大小的数量指标,但对反映系统资金占用的效率问题却无能为力。 $irr$ 却反映了系统资金占用的效率<sup>[1]</sup>。因此,在考察各系统方案的经济效益时,以 $irr$ 和 $w$ 作为主要评价指标,其它指标均为辅助指标。但在我国目前建设资金紧张的情况下,为实现有限投资的净贡献最大化,应采用 $npvr$ 指标,辅以 $npv$ 指标。

由前文分析可知,本系统是由基建期、投产期、生产期不同,建设类型(包括新建、已建和扩建)不同的多工程或多生产单元的复杂系统,故利用目前国内应用较成熟的项目经济评价软件对其进行评价时,对不少问题要作近似处理,从而影响评价结果的精度。笔者利用最新研制的系统经济评价微机软件,实现了对上述系统的经济评价。系统经济评价计算程序框图如图2所示。

各系统方案经济评价指标计算结果详见表2。由表2可知,各系统方案 $irr$ 为9.48—11.50%, $w$ 为20.2—21.6年(自建设开始年算起),可见系统模型优化的各系统方案均具较好的经济效益。对比各系统方案的 $npvr$ 和 $npv$ 指标可知,从系统经济效益的角度看,pj-j3-535系统方案最优。

系统经济评价所采用的数据大部分来自估算和预测,有一定程度的不确定性。为分析其对经济评价指标的影响,笔者以pj-j3-535系统方案为例,选择产品价格、产品成本、产品产量和固定资产投资等四种主要的综合影响因素,分各因素单独变化和同时变化两种情况进行了不确定性分析。分析结果表明,产品价格为最敏感因素,产品成本为较敏感因素。当产品价格和产品产量分别减少10%,而产品成本和固定资产投资增加10%时,系统的 $irr$ 仍可达到3.15%。可见该系统具有较强的承担风险能力。

### 四、简要评述

根据以上讨论的结果,笔者建议将产量指标、投资指标、经济效益指标、开发规模、产品方案和主要工艺技术特点等作为系统投资决策的依据,决策者可按特定的决策标准选择一个合意的系统方案。

综合考虑各项评价指标和各系统方案的特点,本文推荐pj-j3-535系统方案作为宜昌磷矿资源的开发方案。该方案磷矿产品产量较高,单位投资水平低,投资总额相对较低,经济效益较好,并具有较强的承担风险能力。同时,丁西、桃坪河两个生产单元可不建造矿厂,避免了厂址布局较困难的问题。其不足之处是必须损失一部分下贫矿资源。

表 2 宜昌地区磷矿资源开发系统

Table 2 Optimal planning scenarios of Yichang

系统方案代号	评价指标 系统构成	开发规模 (万吨/年)	产品产量		产 品			
			实物量 (万吨)	纯P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> 量 (万吨)	磷 精 矿		料浆法磷铵原料	
					产 量 (万吨)	品 位 (%)	产 量 (万吨)	品 位 (%)
p <sub>1</sub> -j <sub>1</sub> -690	x <sub>2</sub> , x <sub>5</sub> , x <sub>8</sub> , x <sub>10</sub> , x <sub>12</sub> , x <sub>15</sub>	采: 690 选: 510	481.82	149.43	301.82	31.5	100	30.16
p <sub>1</sub> -j <sub>2</sub> -575	x <sub>2</sub> , x <sub>4</sub> , x <sub>6</sub> , x <sub>9</sub> , x <sub>12</sub> , x <sub>15</sub>	采: 575 选: 380	425.10	131.07	230.10	31.5	105	29.74
p <sub>1</sub> -j <sub>3</sub> -535	x <sub>2</sub> , x <sub>4</sub> , x <sub>7</sub> , x <sub>9</sub> , x <sub>12</sub> , x <sub>15</sub>	采: 535 选: 280	429.44	128.12	174.44	31.5	115	26.34
p <sub>1</sub> -j <sub>4</sub> -470	x <sub>3</sub> , x <sub>4</sub> , x <sub>11</sub> , x <sub>12</sub> , x <sub>15</sub>	采: 470 选: 190	385.91	111.16	105.91	31.5	140	25.08

## 参 考 文 献

- [1] 国家计划委员会, 1987, 建设项目经济评价方法与参数. 中国计划出版社.
- [2] D. K. 辛哈, 1986, 发展中国家开采矿物资源的最优化技术. 第12届世界采矿大会论文集.
- [3] S. M. 李, 1986, 决策分析的目标规划. 宣家骥等译, 清华大学出版社.
- [4] 陈景艳, 1987, 目标规划与决策管理. 清华大学出版社.
- [5] A. B. 克鲁舍夫斯基, 1986, 经济数学模型与方法手册. 孟昭利译, 清华大学.
- [6] Labys, W. C., Field, F. R. and Clark, J., 1985, Mineral Model. In: William A. Vogely (ed.), Economics of the Mineral Industries. pp. 337-377.

## OPTIMIZATION AND ECONOMIC EVALUATION MODELS FOR REGIONAL MINERAL RESOURCES DEVELOPMENT PLANNING SYSTEM

Zhong Ziran

(Graduate School, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing)

Pei Rongxiu and Wu Liangshi

(Institute of Mineral Deposits, CAGS, Beijing)

### Abstract

In the past few years, the studies on the optimization techniques of a single-objective system and project economic evaluation methods have made great advances. However, how to solve the optimization problems of multiple-and-conflicting-goal system? How to perform system analysis at the regional mineral development level, and now to conduct a total economic evaluation of such a system? This paper focuses on the rather satisfying answer of these questions. The Yichang regional phosphate rock deposits development planning system, as a study case, is illustrated in detail.

各优化系统方案比较表

## phosphate rock deposits development system

方 案				投 资			经 济 效 益						
黄磷炉料		商品原矿		投资总额	单位P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	单位原矿	<i>irr</i>	<i>d</i>	<i>w</i>	<i>npr</i>	<i>nper</i>	<i>oo</i>	<i>chr</i>
产量	品位	产量	品位		投资	投资				( <i>ic</i> = 10%)			
(万吨)	(%)	(万吨)	(%)	(万元)	(万元/吨)	(万元/吨)	(%)	(年)	(年)	(万元)		(%)	(%)
30	28.83	50	31	143167	958	207	10.04	13.8	21.6	188	0.002	4.42	5.20
30	28.83	60	31	121378	926	211	10.82	13.3	21.2	3924	0.049	4.77	5.62
30	28.83	110	31	107417	838	201	11.50	12.9	20.2	6319	0.089	4.80	5.62
30	28.83	110	31	89829	808	191	9.48	12.8	20.3	2018	0.03	5.41	6.41

The whole process of mineral resources development, in the opinion of the authors, can be thought of as a complex engineering system of conversing mineral reserves into economically usable commodities, which involves a chain of a wide range of activities in exploration, development, beneficiation, transportation, etc. and is influenced by all kinds of factors inside and outside the system. As a result of a system analysis, it is thought that three goals need to be reached in the system in discussion. In terms of the nature of the system problems, a mathematical model based on the goal programming technique is developed to optimize the planning system. Based upon the studies on the algorithm for the model solution, the concepts of "priority level" and "deviation variable" are applied in the model. With the help of microcomputer, four alternative planning scenarios are formed corresponding to the four predetermined expected objective levels.

In the optimization model, only one economic indicator is chosen to consider the profitability of the planning system owing to the limitations of the model solution techniques. So the system economic evaluation model (SEM) is developed to comprehensively study the economic feasibility of the optimal planning scenarios. Besides, sensitivity analysis is conducted to identify how much the changes in key parameters impact on the system.

The above two models will provide the information concerning three types of indicators—production, needed investment and profitability of the optimal planning system—and concerning the optimal system structure for the decision makers' reference.

## 作者简介

钟自然, 1962年8月生, 1988年于中国地质科学院研究生部获硕士学位, 主攻矿产经济学。现在中国地质大学(北京)攻读博士学位。