



## 黑龙江省煤炭资源保障安全预警研究\*

商宇航<sup>1,2</sup>, 郝传波<sup>1,2</sup>

(1. 黑龙江科技学院资源与环境学院, 哈尔滨, 150027; 2. 黑龙江科技学院系统工程研究所, 哈尔滨, 150027)

**摘要:**应用突变理论,从黑龙江省煤炭资源储量、生产能力、勘探程度、开发条件、环境五个方面的现状及发展趋势进行分析,建立煤炭资源保障安全预警模型,划分了预警界限。在对资源储量、建设投资、煤炭供需预测等方面综合研究的基础上,进行黑龙江省煤炭资源保障安全预警分析,给出了相应的警度预报。未来黑龙江省的煤炭资源保障安全形势较为严峻,应加强地质勘探,加大矿山建设投资,填补安全欠账,引进专业人才,改善开采条件和开采技术,提高煤炭采出率,建设高产高效矿井。

**关键词:**突变理论;煤炭资源;预警;黑龙江省

中图分类号:F426.21(235) 文献标识码:B 文章编号:1001-0076(2010)02-0053-05

### Research on Early Warning to Safety Assurance of Coal Resources in Heilongjiang Province

SHANG Yu-hang, HAO Chuan-bo

(College of Resource and Environment Engineering, Heilongjiang Institute of Science & Technology, Harbin 150027, China)

**Abstract:** In terms of the catastrophe theory, this article carried on the analysis of the current situation and the trend of resource reserves, production capacity, exploration degree, development conditions and environment of Heilongjiang coal resources. Then the model of early warning to safety assurance of the coal resource was established and the early warning boundary had been divided. Based on the comprehensive analysis of several aspects, such as resource reserves, construction investment, coal supply and demand prediction, the early warning to safety assurance of Heilongjiang coal resources had been deeply analyzed. Meanwhile, this paper presented the corresponding degree forecast. In view of the severe circumstance of safety assurance of Heilongjiang coal resources in the future, geological exploration and mine construction and safety investment should be reinforced. On the other hand, what we also have to do better was involved in the following fields, to introduce professionals, to improve the condition and technology of exploiting, to promote the output of coal, as well as to build the mine with high-yield and high-effect.

**Key words:** catastrophe theory; coal resources; early warning; Heilongjiang province

煤炭资源是我国的主要生产和消费能源,也是黑龙江省 GDP 增长的重要支撑之一,进行煤炭资源

保障安全预警研究,预报未来煤炭资源系统中是否出现异常及其异常程度,对黑龙江省的经济发展和

\* 收稿日期:2009-09-28;修回日期:2009-11-11

基金项目:黑龙江省科技厅攻关项目(GC08D212);黑龙江省教育厅研究生创新基金项目(YJSCX2009-068HLJ)

作者简介:商宇航(1983-),男,黑龙江省林甸人,硕士研究生在读,研究方向:矿业系统工程。

黑龙江省煤炭产业的自身发展都具有重要意义。依据各预警指标表示的警情,判断整个煤炭资源系统的警情实际上是一个多目标决策问题,多目标评价决策分析是系统工程领域的重点和难点问题之一<sup>[1]</sup>。常用综合评价方法均需要选取权重,指标之间的复杂关系致使权重的取值带有很大主观性,且计算十分繁琐,也难以使其协调统一<sup>[2]</sup>。突变理论无需主观确定权重,减少了决策过程中的主观因素和人为因素的影响,是复杂系统评价的有效方法。

### 1 突变理论与初等突变模型

突变理论是 20 世纪 70 年代以法国数学家 Rene Thom 为代表创立的一门研究突变现象的数学学科<sup>[3]</sup>。主要描述由渐变、量变发展为突变、质变的不连续过程,以拓扑学为工具,以结构稳定性理论为基础,用势函数注的存在与消失来判断事物的渐变与突变过程,用形象而精确的数学模型来描述质量互变过程,在自然科学与社会科学领域,都获得了广泛的应用。其核心理论是分类定理:认为自然界中一切的突变模式,可以通过系统的控制空间和行为空间的维数分类。

初等突变论主要研究势函数,并根据势函数将临界点分类,进而研究临界点附近的不连续特征。在多目标决策中常用的突变势函数有以下几种:

- (1) 尖点突变:  $f_{ab}(x) = \frac{1}{4}x^4 + \frac{1}{2}ax^2 + bx$
- (2) 燕尾突变:  $f_{abc}(x) = \frac{1}{5}x^5 + \frac{1}{3}ax^3 + \frac{1}{2}bx^2 + cx$
- (3) 蝴蝶突变:  $f_{abcd}(x) = \frac{1}{6}x^6 + \frac{1}{4}ax^4 + \frac{1}{3}bx^3 + \frac{1}{2}cx^2 + dx$
- (4) 印第安茅舍突变:  $f_{abcde}(x) = \frac{1}{7}x^7 + \frac{1}{5}ax^5 + \frac{1}{4}bx^3 + \frac{1}{3}cx^2 + \frac{1}{2}dx + ex$

各式中,  $x, y$  (即  $f(x)$ ) 为状态变量;  $a, b, c, d, e$  为控制变量。

突变理论是利用落在分叉集内的控制变量会使系统的状态发生突变这一性质来构建评价模型,根据分叉集特点,转化为归一化公式,如燕尾突变的函数为:

$$f_{abc}(x) = \frac{1}{5}x^5 + \frac{1}{3}ax^3 + \frac{1}{2}bx^2 + cx$$

$$\text{其平衡曲面为: } x^4 + ax^2 + bx + c = 0 \dots\dots\dots \text{①}$$

$$\text{其奇点集为: } 4x^2 - 2ax + b = 0 \dots\dots\dots \text{②}$$

于①、②两式消去  $x$ , 得出分歧集为:

$$4096a^6 + 46629b^4 + 4096c^3 = 0$$

$$\text{计算出分解形式的分歧方程集: } \begin{cases} a = -6x^2 \\ b = 8x^3 \\ c = -3x^3 \end{cases}$$

$$\text{得出燕尾突变的归一化公式为: } \begin{cases} x_a = \sqrt{a} \\ x_b = \sqrt[3]{b} \\ x_c = \sqrt[4]{c} \end{cases}$$

同理可得各个突变模型的归一化公式参见表 1。

表 1 初等突变函数归一化公式

Tab. 1 The normalized formula of primary catastrophe function

函数名称	控制维数	状态变量	归一化公式
尖点突变	2	1	$x_a = \sqrt{a}, x_b = \sqrt[3]{b}$
燕尾突变	3	1	$x_a = \sqrt{a}, x_b = \sqrt[3]{b}, x_c = \sqrt[4]{c}$
蝴蝶突变	4	1	$x_a = \sqrt{a}, x_b = \sqrt[3]{b}, x_c = \sqrt[4]{c}, x_d = \sqrt[5]{d}$
印第安茅舍突变	5	1	$x_a = \sqrt{a}, x_b = \sqrt[3]{b}, x_c = \sqrt[4]{c}, x_d = \sqrt[5]{d}, x_e = \sqrt[6]{e}$

进行系统评价时,首先将复杂系统目标分解为多层指标,再将突变理论与模糊数学相结合,产生突变模糊隶属函数,最后由归一公式量化计算出一个总系统参数,即总隶属函数,进行综合评价。

### 2 煤炭资源保障安全预警指标和预警区间

遵照既能反映黑龙江省煤炭资源的生产、使用及发展状态的主要情况,又便于获取统计数据进行分析的原则选取预警指标。对黑龙江省煤炭资源生产、开发、勘探、储量、能源消费的现状与发展趋势进行分析,将资源保障安全评价因素划分为目标层、指标层、方案层 3 个层次<sup>[4]</sup>,建立黑龙江省煤炭资源保障安全预警指标体系,如图 1 所示。

通过预警指标得到警情分析结果,对比确定的预警区间转化为警度。在对黑龙江省煤炭资源开发历史、发展趋势研究的基础上,将警度划分为无警、轻警、中警、重警 4 个级别,表示黑龙江省煤炭资源保障安全程度,如表 2 所示。

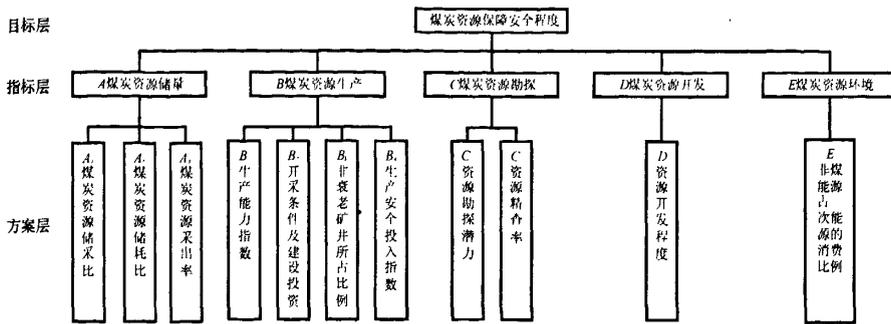


图 1 黑龙江省煤炭资源保障安全预警指标体系

Fig.1 The indexes system of early warning to safety assurance of Heilongjiang coal resources

表 2 预警指标的预警区间

Tab.2 The warning bounds of warning index

预警指标	无警	轻警	中警	重警
A <sub>1</sub> 煤炭资源储采比	A <sub>1</sub> > 50	40 < A <sub>1</sub> < 50	30 < A <sub>1</sub> < 40	A <sub>1</sub> < 30
A <sub>2</sub> 煤炭资源储耗比	A <sub>2</sub> > 50	40 < A <sub>2</sub> < 50	30 < A <sub>2</sub> < 40	A <sub>2</sub> < 30
A <sub>3</sub> 煤炭资源采出率	A <sub>3</sub> > 0.46	0.41 < A <sub>3</sub> < 0.46	0.36 < A <sub>3</sub> < 0.41	A <sub>3</sub> < 0.36
B <sub>1</sub> 煤炭生产能力指数	B <sub>1</sub> > 1	0.80 < B <sub>1</sub> < 1	0.60 < B <sub>1</sub> < 0.80	B <sub>1</sub> < 0.60
B <sub>2</sub> 开采条件及建设投资	B <sub>2</sub> > 0.9	0.8 < B <sub>2</sub> < 0.9	0.7 < B <sub>2</sub> < 0.8	B <sub>2</sub> < 0.7
B <sub>3</sub> 非衰老矿井所占比例	B <sub>3</sub> > 0.80	0.70 < B <sub>3</sub> < 0.80	0.60 < B <sub>3</sub> < 0.70	B <sub>3</sub> < 0.60
B <sub>4</sub> 生产安全投入指数	B <sub>4</sub> > 1	0.90 < B <sub>4</sub> < 1	0.80 < B <sub>4</sub> < 0.90	B <sub>4</sub> < 0.80
C <sub>1</sub> 煤炭资源勘探潜力	C <sub>1</sub> > 0.71	0.66 < C <sub>1</sub> < 0.71	0.61 < C <sub>1</sub> < 0.66	C <sub>1</sub> < 0.61
C <sub>2</sub> 尚未利用资源精查率	C <sub>2</sub> > 0.11	0.09 < C <sub>2</sub> < 0.11	0.07 < C <sub>2</sub> < 0.09	C <sub>2</sub> < 0.07
D 煤炭资源的开发程度	D > 0.90	0.85 < D < 0.90	0.80 < D < 0.85	D < 0.80
E 非煤能源占一次能源的消费比例	E > 0.33	0.31 < E < 0.33	0.29 < E < 0.31	E < 0.29

各指标的含义及取值方法说明:

(1) 煤炭资源储采比 = 煤炭资源经济的基础储量/预测期间煤炭资源开采量,这是从煤炭资源的生产角度考虑煤炭资源的安全问题。考虑到黑龙江省煤炭资源的勘探程度和资源潜力,认为煤炭资源储采比大于 50 a 为无警状态,并以 10 a 为间距,划分预警界限。

(2) 煤炭资源储耗比 = 煤炭资源经济的基础储量/预测期间煤炭资源消耗需求量,这是从本省角度考虑煤炭资源的使用安全问题。考虑同(1),认为煤炭资源储耗比大于 50 a 为无警状态,并以 10 a 为间距,划分预警界限。

(3) 煤炭资源采出率表示最终采出资源量与消耗资源储量之比,煤炭资源采出率的提高可以提高煤炭资源的保障程度。根据国家对于矿井采出率要达到 46% 的要求,以采出率大于 46% 为无警状态,并以 5% 为间距,划分预警界限。

(4) 煤炭生产能力指数 = 本期煤炭实际生产能

力/本期煤炭消费需求量,生产能力 100% 满足需求为无警状态,并以 20% 为间距划分预警界限。

(5) 矿山开采条件主要考虑煤炭资源的开采难易性、运输条件和其它基础设施条件、矿山开采、矿山建设投资增长率等,根据上述条件的情况以一定的量化指标表示矿山开采条件的优劣程度。分别以 0.9、0.8、0.7 作为无警、轻警、中警、重警的预警界限。

(6) 衰老矿井所占比例决定着煤炭资源开采规模和持续时间,为了便于处理数据,将所有预警指标统一为越大越好型,用“非衰老矿井所占比例”表示衰老矿井所占比例。

(7) 煤矿安全事故频发造成了巨大损失,据统计:直接损失和间接损失的比例约为是 1 : 6,解决安全投入问题是黑龙江省煤炭资源保障的重要环节。安全投入 100% 满足生产要求为无警状态,并以 10% 为间距划分预警界限。

(8) 保有储量中资源量的比例在一定程度上反

映了资源的勘探潜力,煤炭资源勘探潜力越大对资源保障越有利。我国煤炭资源储量中资源量的比例为71%,以比例大于71%为无警状态,并以5%为间距划分预警界限。

(9)提高煤炭资源的精查率,可以提高煤炭资源的保障能力,全国尚未利用煤炭资源的精查率为11%,以2%为间距划分预警界限。

(10)保有储量占累计探明储量的比例表示煤炭资源的开发程度,保有储量所占比例越高对保障能力的提高越有利。全国煤炭资源保有储量和累计探明煤炭资源储量的比例约为90%,以5%为间距,划分预警界限。

(11)由于煤炭热值较低且污染最为严重,所以应尽可能降低煤炭占一次能源的消费比例,为了便于比较和处理数据,用“非煤炭能源占一次能源消费比例”来表示煤炭占一次能源消费比例。全国能源消费结构中,煤炭平均为67%,相应非煤为33%,分别以0.33、0.31、0.29作为无警、轻警、中警、重警

的预警界限。

### 3 煤炭资源保障安全突变预警模型

黑龙江省煤炭资源保障安全预警指标体系中,指标性质皆为越大越好型,依据突变理论综合评判的要求,对各指标统一量纲和取值范围,利用公式  $(x_i - x_{min}) / (x_{max} - x_{min})$  将数据转化为0~1之间的隶属值。结合黑龙江省煤炭资源的实际情况,规则化计算时假设各指标最大值  $A_1$ 、 $A_2$  均为60,  $A_3$  为0.6,  $B_1$  为120%,  $B_2$  为100%,  $B_3$  为90%,  $B_4$  为120%,  $C_1$  为80%,  $C_2$  为15%,  $D$  为100%,  $E$  为0.4, 计算结果如表3所示<sup>[5]</sup>。

黑龙江省煤炭资源保障预警指标体系结构图1中,同层指标按重要程度先后排列,  $A_1$ 、 $A_2$ 、 $A_3$  构成燕尾突变,  $B_1$ 、 $B_2$ 、 $B_3$ 、 $B_4$  构成蝴蝶突变,  $C_1$ 、 $C_2$  构成尖点突变,  $A$ 、 $B$ 、 $C$ 、 $D$ 、 $E$  构成印第安茅舍突变。应用各突变的模糊隶属度函数及“互补性原则”得出预警界限总指标,如表4所示。

表3 预警界限规则化  
Tab.3 The normalized warning bounds

预警指标	无警	轻警	中警	重警
$A_1$ 煤炭资源储采比	[1,0.83]	(0.83,0.67]	(0.67,0.50]	(0.50,0]
$A_2$ 煤炭资源储耗比	[1,0.83]	(0.83,0.67]	(0.67,0.50]	(0.50,0]
$A_3$ 煤炭资源采出率	[1,0.77]	(0.77,0.68]	(0.68,0.60]	(0.60,0]
$B_1$ 煤炭生产能力指数	[1,0.83]	(0.83,0.67]	(0.67,0.50]	(0.50,0]
$B_2$ 开采条件及建设投资	[1,0.90]	(0.90,0.80]	(0.80,0.70]	(0.70,0]
$B_3$ 非衰老矿井所占比例	[1,0.89]	(0.89,0.78]	(0.78,0.67]	(0.67,0]
$B_4$ 生产安全投入指数	[1,0.83]	(0.83,0.75]	(0.75,0.67]	(0.67,0]
$C_1$ 煤炭资源勘探潜力	[1,0.89]	(0.89,0.83]	(0.83,0.76]	(0.76,0]
$C_2$ 尚未利用资源精查率	[1,0.73]	(0.73,0.60]	(0.60,0.47]	(0.47,0]
$D$ 煤炭资源的开发程度	[1,0.90]	(0.90,0.85]	(0.85,0.80]	(0.80,0]
$E$ 非煤能源占一次能源的消费比例	[1,0.83]	(0.83,0.78]	(0.78,0.73]	(0.73,0]

表4 煤炭资源保障预警指标  
Tab.4 the index of early warning to safety assurance of coal resources

资源保障预警指标	状况				生产				开发		勘探	环境
指标代号	A				B				C		D	E
底层指标代号	$A_1$	$A_2$	$A_3$	$B_1$	$B_2$	$B_3$	$B_4$	$C_1$	$C_2$	D	E	
指标数值	0.83	0.83	0.77	0.83	0.90	0.89	0.83	0.89	0.73	0.90	0.83	
底层指标突变级数代号	$X_{A1}$	$X_{A2}$	$X_{A3}$	$X_{B1}$	$X_{B2}$	$X_{B3}$	$X_{B4}$	$X_{C1}$	$X_{C2}$	$X_D$	$X_E$	
底层指标突变级数值	0.911	0.939	0.937	0.911	0.965	0.971	0.963	0.943	0.900	0.900	0.830	
中间变量指标值	0.929				0.953				0.922		0.900	0.830
中间变量突变级数值	0.964				0.984				0.980		0.980	0.970
总指标	0.976											

由此得到无警和轻警的界限为0.976。由上述计算方法可得轻警和中警以及中警和重警的界限分别为0.958和0.939。

#### 4 黑龙江省煤炭资源保障安全预警

截止到2008年底,黑龙江省煤炭资源累计探明储量为245亿吨,保有储量为217亿吨,其中,经济基础储量111b+121b+122共有68亿吨,资源量145亿吨。2010~2025年,年开采量保守预测约为1亿吨,年消耗量保守预测约为6900万吨,黑龙江

省矿井采出率为50%左右,考虑到生产条件和技术进步,2020年以后采出率比当前提高5%。黑龙江省是东北三省主要的煤炭供应基地,生产能力指数取110%,黑龙江省煤矿开采条件普遍较差,建设投资不足,安全欠账严重,衰老矿井比例较大。黑龙江省尚未利用煤炭资源的精查率为10%,煤炭是黑龙江省主要消费能源,煤炭资源占一次能源消费比例将维持在34%左右<sup>[6]</sup>。依据上述分析,黑龙江省煤炭资源保障安全预警指标取值及其对应警度如表5所示。

表5 黑龙江省煤炭资源保障安全预警

Tab.5 The early warning to safety assurance of Heilongjiang coal resources

预警指标	2010		2015		2020		2025	
	取值	警度	取值	警度	取值	警度	取值	警度
A <sub>1</sub> 煤炭资源储采比	34	中警	29	重警	24	重警	19	重警
A <sub>2</sub> 煤炭资源储耗比	49	轻警	44	轻警	39	中警	34	中警
A <sub>3</sub> 煤炭资源采出率	0.50	无警	0.50	无警	0.55	无警	0.55	无警
B <sub>1</sub> 煤炭生产能力指数	1.10	无警	1.1	无警	1.1	无警	1.1	无警
B <sub>2</sub> 开采条件及建设投资	0.55	重警	0.60	重警	0.65	重警	0.70	轻警
B <sub>3</sub> 非衰老矿井所占比例	0.75	轻警	0.65	中警	0.55	重警	0.45	重警
B <sub>4</sub> 生产安全投入指数	0.55	重警	0.60	重警	0.65	重警	0.70	重警
C <sub>1</sub> 煤炭资源勘探潜力	0.67	重警	0.57	重警	0.47	重警	0.37	重警
C <sub>2</sub> 尚未利用资源精查率	0.10	轻警	0.11	轻警	0.12	无警	0.13	无警
D 煤炭资源的开发程度	0.89	轻警	0.87	轻警	0.84	中警	0.82	中警
E 非煤能源占一次能源的消费比例	0.34	无警	0.34	无警	0.34	无警	0.34	无警
总系统	0.965	轻警	0.959	轻警	0.955	中警	0.934	重警

#### 5 结语

通过表5可以看出:未来黑龙江省的煤炭资源保障安全形势较为严峻,煤炭可采储量、开采条件及建设投资、衰老矿井比例、安全投入指数、资源勘探潜力几项指标的警情较为严重。这种局面是黑龙江省在很长一段时期内在地质勘探、安全生产等方面投资严重不足造成的,短期内难以改善。针对提高黑龙江省煤炭资源的保障能力,提出两点建议:

(1)加强地质勘探,科学部署战略性、基础性、公益性煤炭资源调查评价与勘查,大力推进商业性煤炭资源勘查,寻找新的煤炭资源勘查开发基地,解决黑龙江省目前无长远基地问题,采用“科研引路、物探先行、综合分析、钻探验证”的方法,科学地寻找煤炭资源。

(2)加大矿山建设投资,填补安全欠账,并加大

安全投资力度,引进专业人才,改善开采条件和开采技术,提高煤炭采出率,建设高产高效矿井。

#### 参考文献:

- [1] 熊锐,曹银生.多目标决策的层次分析法[J].系统工程理论与实践,1992,12(11):58-62.
- [2] 史志富,张安,刘海燕,等.基于突变理论与模糊集的复杂系统多准则决策[J].系统工程与电子技术,2006,28(7):1010-1013.
- [3] 凌复华.突变理论及其应用[M].上海:上海交通大学出版社,1987.
- [4] 王文杰,张云鹏.矿山安全管理的模糊综合评价[J].河北理工学院学报,2006,28(4):1.
- [5] 侯运炳,张文,扬新华,等.河北省煤炭资源安全预警研究[J].煤炭学报,2008,33(5):562-563.
- [6] 黑龙江省统计局.2007黑龙江省经济统计年鉴[M].北京:中国统计出版社.2008.