

基于未确知测度的矿产预测评价方法

何虎军^{1,2}, 杨兴科¹, 刘渭¹, 罗云之¹, 范阅¹

1. 长安大学地球科学与资源学院, 西安 710054
2. 长安大学西部矿产资源与地质工程教育部重点实验室, 西安 710054

摘要 分析了矿产定量预测与未确知评价的意义, 针对矿产定量预测与未确知评价存在不确定的特点, 将未确知测度理论引入矿产定量预测与未确知评价中, 提出了基于未确知测度理论的矿产定量预测与未确知综合评价模型。从实际地质条件出发, 考虑影响成矿有利度的7项因素, 根据实测数据建立各影响因素的未确知测度函数。该模型针对矿产定量预测与未确知评价中的诸多不确定影响因素, 根据实际情况, 分别对其进行定性、定量分析, 并利用信息熵理论确定了各指标权重, 依照置信度识别准则对成矿有利度进行了等级判定, 并对其进行了排序。将该方法应用于青海虎头崖矿田3个矿带的成矿有利度评价。研究表明, 该方法科学合理, 意义明确, 为今后矿产定量预测与未确知评价提供了一定的借鉴意义。

关键词 不确定性; 矿产预测评价; 虎头崖矿田; 铁多金属; 未确知测度

中图分类号 P628

文献标志码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2014.20.007

Mineral Resources Predication and Evaluation Methods Based on Uncertainty Measure Theory

HE Hujun^{1,2}, YANG Xingke¹, LIU Wei¹, LUO Yunzhi¹, FAN Yue¹

1. School of Earth Science and Resources, Chang'an University, Xi'an 710054, China
2. Key Laboratory of Western Mineral Resources and Geological Engineering, Ministry of Education; Chang'an University, Xi'an 710054, China

Abstract The significance of quantitative prediction of mineral resources and uncertainty evaluation was analyzed. Based on their uncertainty characteristics, uncertainty measure theory was introduced into quantitative prediction of mineral resources and uncertainty evaluation in this paper, and a prediction and evaluation model was proposed. Based on practical geological conditions, seven factors that influence the mineralizing favorability degree were taken into account and uncertainty measure function was established based on the in-situ data. The uncertainty problems in quantitative prediction of mineral resources and uncertainty evaluation were solved by qualitative analysis and quantitative analysis, respectively. Information entropy theory was used to calculate the index weight of factors, credible degree recognition criteria were used to judge the mineralizing favorability degree, and the order was arranged. This model was employed to evaluate three ore belts in Hutouya mine field in Qinghai. The results show that uncertainty measure method is reasonable and can provide reference for quantitative prediction of mineral resources and uncertainty evaluation in the future.

Keywords uncertainty; mineral resources predication and evaluation; Hutouya mine field; Fe polymetallic deposit; uncertainty measure

矿产资源作为重要的自然资源, 是人类社会存在与发展的物质和能量基础。自20世纪以来, 社会与经济持续性发展对固体矿产资源的需求持续增长, 极大地促进了矿业地质勘查工作的发展。长期大规模的勘查和开采活动, 使资源的勘

收稿日期: 2014-03-24; 修回日期: 2014-05-15

基金项目: 中国地质调查局地质调查工作项目(1212011220937)

作者简介: 何虎军, 副教授, 研究方向为矿产定量预测评价、找矿勘探与计算机应用等, 电子信箱: hsj2010@chd.edu.cn

引用格式: 何虎军, 杨兴科, 刘渭, 等. 基于未确知测度的矿产预测评价方法[J]. 科技导报, 2014, 32(20): 49-53.

查环境及技术手段发生了根本性变化。矿产勘查过程经历了“找矿人”勘探、传统找矿、理论勘查及目前的以高新技术为代表的科学找矿阶段,矿产资源预测与评价作为矿产勘查工作中一项非常重要的工作,自始至终地贯穿于矿产勘查的全过程^[1,2]。

近年来,国内外对矿产资源定量预测评价方法的研究相当活跃,提出了许多矿产资源定量预测评价方法,例如证据加权法^[3]、模糊证据权法^[4]、模糊逻辑法^[5]、神经网络法^[6]、证据理论法^[7]等。虽然目前发展为许多方法体系,但基本趋势都是试图以GIS作为分析空间矿产资源分布的工具和手段,或者是以GIS为工具,研究多源信息定量模型。然而,由于矿产资源定量预测评价是内外多种因素综合作用的结果,具有随机性、模糊性、灰性和未确知性,如何将这些不确定的信息考虑在内并进行分析,是值得研究的一个重要问题。矿产资源定量预测评价受多种不确定性因素的影响,例如勘查目标的不确定性、矿床产出的空间位置的不确定性和矿产资源潜力的不确定性等^[8,9]。在这方面,未确知数学理论提供了一个比较好的途径。

未确知信息及其数学处理理论由哈尔滨建筑工程学院王光远^[10]于1990年提出,它是一种不同于模糊信息、随机信息和灰色信息的新的不确定性信息。在此基础上,刘开第等^[11]多位学者对未确知数学进行了系统研究,建立了未确知数学理论,并将该理论运用到社会科学和自然科学中。在未确知数学的应用研究中,成果最多的是未确知测度评价模型的应用。本文在前人对矿产资源定量预测与不确定性评价研究的基础上,借鉴未确知评价模型的理论和思想,将未确知数学理论运用到矿产资源定量预测与未确知评价问题中,以为矿产资源定量预测与不确定性评价提供一种新思路。

1 矿产预测中的不确定评价算法

1.1 未确知测度

设 x_1, x_2, \dots, x_n 是 n 个对象,即指标空间 $X = [x_1 x_2 \dots x_n]$, 每个评价对象有 m 个单向评价指标空间,即 $I = [I_1 I_2 \dots I_m]$, 则 x_i 可表示为一个 m 维向量 $x_i = [x_{i1} x_{i2} \dots x_{im}]$ 。对 x_i 有 p 个评价等级,评价等级空间 $U = [C_1 C_2 \dots C_p]$, 其中 C_k 表示第 k 个评价等级,设 k 级比 $k+1$ 级强,级 $C_k > C_{k+1}$, 则称 $[C_1 C_2 \dots C_p]$ 为评价空间 U 上的一个有序分割类。

1.2 单指标未确知测度

根据未确知测度的定义及“非负有界性、可加性、归一性”^[11,12]三条测量准则构造单指标测度函数 $\mu_{ijk} = \mu(x_{ij} \in C_k)$, $i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, m; k = 1, 2, \dots, p$ 。从而构造单指标测度评价矩阵 $[\mu_{ijk}]_{m \times p}$, 即

$$[\mu_{ijk}]_{m \times p} = \begin{bmatrix} \mu_{i11} & \mu_{i12} & \dots & \mu_{i1p} \\ \mu_{i21} & \mu_{i22} & \dots & \mu_{i2p} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \mu_{im1} & \mu_{im2} & \dots & \mu_{imp} \end{bmatrix} \quad (1)$$

在构建单指标测度评价矩阵时,首先要构建单指标测度函数,目前,单指标测度函数的构建方法主要有直线型、指数型、抛物线型、正弦型等。不管采用什么形式的模拟函数,“非负、归一、可加”的限制条件是必须被满足的。应根据具体指标的变化特点选用适当的未确知测度函数,直线型未确知测度函数是目前应用最广、最简单的测度函数,故本文也采用直线型未确知测度函数。

在区间 $[a_i, a_{i+1}]$ 上对应的未确知测度函数的表达式为

$$\mu_i(x) = \begin{cases} \frac{-x}{a_{i+1} - a_i} + \frac{a_{i+1}}{a_{i+1} - a_i} & a_i < x < a_{i+1} \\ 0 & x > a_{i+1} \end{cases} \quad (2)$$

$$\mu_{i+1}(x) = \begin{cases} 0 & x \leq a_i \\ \frac{x}{a_{i+1} - a_i} - \frac{a_i}{a_{i+1} - a_i} & a_i < x < a_{i+1} \end{cases}$$

1.3 多指标综合测度

根据信息熵权理论即 $v_{ij} = 1 + \frac{1}{\lg p} \sum_{k=1}^p \mu_{ijk} \lg \mu_{ijk}$, $w_j = v_j / \sum_{i=1}^n v_j$ 确定的指标权重,得到评价对象的多指标综合测度 $\mu_{ik} = \sum_{j=1}^m w_j \mu_{ijk}$ ($i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, m; k = 1, 2, \dots, p$), 其中 $0 \leq \mu_k \leq 1, \sum_{k=1}^p \mu_{ik} = 1$, 则称 μ_{ik} 为未确知测度, $[\mu_{i1} \mu_{i2} \dots \mu_{ip}]$ 为 x_i 的多指标综合测度评价向量。

1.4 置信度识别准则及排序

若 $C_1 > C_2 > \dots > C_p$, 引入置信度识别准则,设 λ 为置信度 ($\lambda \geq 0.5$, 通常取 $\lambda = 0.6$ 或 0.7), $k_0 = \min \left\{ k: \sum_{i=1}^k \mu_{ii} \geq \lambda, 1 \leq k \leq p \right\}$, 则认为 x_i 属于 C_{k_0} 。如果令 C_{k_0} 的分值为 n_{i_0} , 则 $n_{i_0} > n_{i+1}$, 且有 $q_{x_i} = \sum_{i=1}^p n_{i_0} \mu_{ii}$, 称 $q = [q_{x_1} q_{x_2} \dots q_{x_n}]$ 为未确知重要度向量,可按 q_{x_i} 的大小对 x_i 的活动区重要性进行排序。

2 青海虎头崖矿田成矿预测分析

以青海虎头崖砂卡岩型铁多金属矿床的成矿预测为实例,介绍基于未确知测度理论在矿产预测评价中的应用。

2.1 区域地质背景

虎头崖多金属矿田地处青海格尔木市以西 350 km 的狼牙山一景忍一带,地理坐标为东经 $91^\circ 30' \sim 91^\circ 49'$, 北纬 $37^\circ 02' \sim 37^\circ 06'$ 。矿田位于祁漫塔格山北坡,昆北断裂以南,那陵郭勒河断裂以北,属祁漫塔格结合带。

区内出露的地层划分为 4 个构造层:以金水口群白沙河组、长城系小庙群、蓟县系狼牙山组为主的古-中元古界基底构造层;以奥陶系-志留系滩间山群为主的下古生界构造层;以泥盆系牦牛山组、石炭系大干沟组、缙敖苏组为主的上古生界构造层;以上三叠统鄂拉山组为主的中生界构造层。区域构造活动显著,总体上, NW 向和近 EW 向深断裂将本区明显划分出不同的构造单元。NW 向次级断裂是主要控岩、控

矿构造,NW—近EW和NE向断裂控制着矿体,而近SN向断裂大多显示为成矿后构造。

岩浆活动强烈,具有活动时间长、多旋回性和较明显的分带性(自西向东有加里东期—华力西期—印支—燕山期变化趋势)。其中,以中晚印支期小岩体、岩脉、岩枝及不规则状产出的中酸性花岗质侵入岩对区内铁、铜、铅、锌、钼、钨、锡等多金属成矿作用意义最大。

虎头崖矿田主要为矽卡岩型的铁、铜、铅、锌多金属矿

床,根据矿化类型和矿体集中产出的部位,可将该矿田划分为产于似斑状二长花岗岩、花岗闪长岩与上石炭统缙敖苏组、下石炭统大干沟组碳酸盐岩接触带或近东西向断裂破碎带附近的矽卡岩型铁、锡多金属矿体(I、II、III矿带)和产于石英斑岩、似斑状二长花岗岩与上石炭统缙敖苏组、奥陶—志留纪滩间山群、蓟县系狼牙山组的接触带和断裂破碎带中的铜、铅、锌多金属矿体(IV、V、VI、VII矿带)^[13-15](图1)。本次评价选择I、II、III矿带作为评价对象。

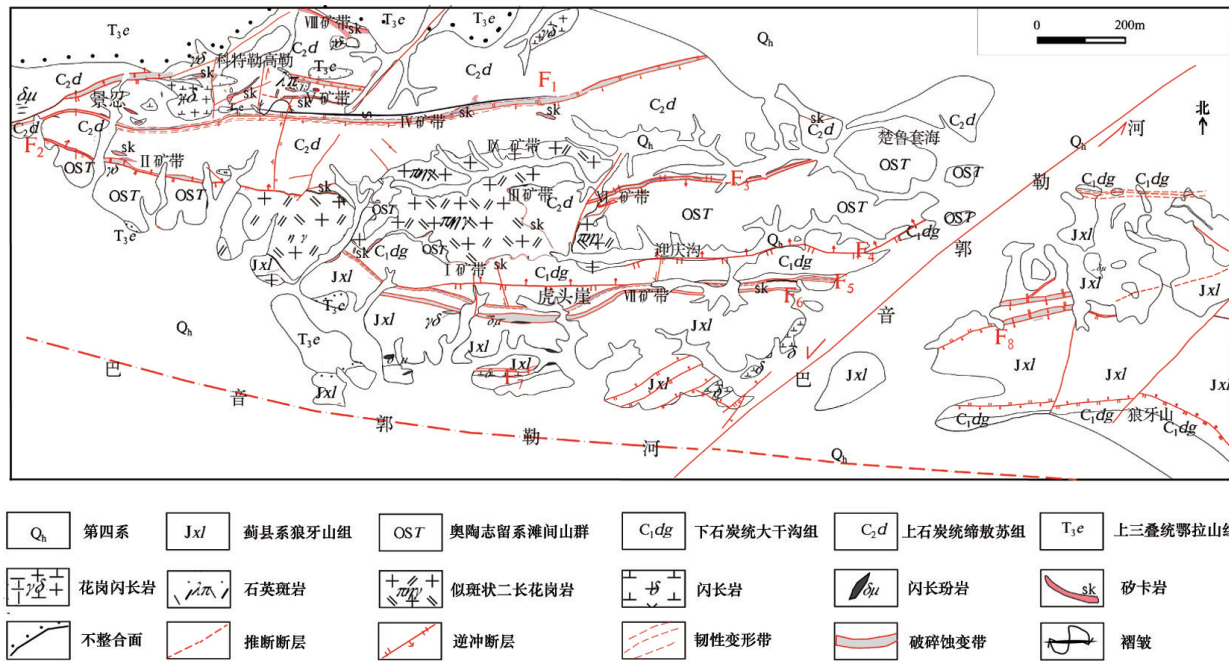


图1 虎头崖矿田地质简图

Fig.1 Simplified geological map of Hutouya mine field

2.2 成矿预测评价指标体系构建

由于影响成矿预测的因素多且复杂,在查阅了大量相关文献的基础上,结合在该区的野外地质矿产调查及青海虎头崖矿田矽卡岩型铁多金属矿床的主要控矿因素,最终选取7项因素作为成矿有利度的评价影响因子,即有利地层、含矿比率、构造条件、侵入岩条件、矿化蚀变条件、磁异常(地球物理找矿信息)、Fe平均品位(地球化学找矿信息),分别用 $x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6, x_7$ 表示,其中有利地层、构造条件、侵入岩条件、矿化蚀变条件,用半定量化的方法进行取值,其分级标准及赋值情况见表1。对有含矿比率、磁异常、Fe平均品位,用实测值进行评价,其分级标准见表2。对各评价指标进行分级及取值,评判集为 $[C_1 C_2 C_3]$,即1,2,3级,分别表示有利、一般和不利。I、II和III矿带基本情况见表3。

2.3 构造单指标测度函数

根据单指标测度函数的定义和表1,表2的分级标准及表3的具体取值,构建单指标测度函数,以便求得各评价指标的

表1 定性指标分级与赋值

Table 1 Classification criterion of qualitative indexes and valuation

等级	赋值	控矿因素			
		有利地层	构造条件	侵入岩条件	矿化蚀变条件
有利 (C_1)	3	缙敖苏组/ 狼牙山组	近EW断 裂/NE断 裂/NWW 断裂	石英斑岩/ 似斑状二长 花岗岩	透辉石, Ca- Fe榴石, 符山 石, 绿帘石, 透 闪石; 磁铁矿 黄铁矿, 褐铁 矿, 硅化, 钾化, 绿泥石, 角岩, 萤石, 绢云母 方解石, 高岭 土, 硬石膏, 石 英
一般 (C_2)	2	大干沟组/ 滩间山群	接触带 构造	钾长花岗 岩/花岗闪 长岩	
不利 (C_3)	1	鄂拉山组	近SN断裂	闪长玢岩	

表2 定量指标分级标准

Table 2 Survey results of evaluation indexes of mineralizing favorability degree

等级	控矿因素		
	含矿比率/%	磁异常/nT (地球物理找矿信息)	Fe平均品位/% (地球化学找矿信息)
有利(C ₁)	>63.82	>3199	>60
一般(C ₂)	20.96	3199~1250	60
不利(C ₃)	<15.22	<1250	<20

表3 成矿有利度评价指标调查统计表

Table 3 Survey statistics table of metallogenic favourability degree evaluation index

矿带	地层条件		构造条件	侵入岩条件	矿化蚀变条件	磁异常/nT	Fe平均品位/%
	有利地层	含矿比率/%					
I	大干沟组	20.96	接触带构造	钾长花岗岩	磁铁矿,透辉石,钙铁榴石,绿泥石,透闪石	磁异常幅值高达5129	26.27
II	绉敖苏组	63.82	NWW断裂	似斑状二长花岗岩	磁铁矿,褐铁矿,孔雀石,绿泥石,符山石,透辉石,钙铁榴石,绿帘石	磁异常强度在4584~5053	27.72
III	绉敖苏组	63.82	接触带构造	似斑状二长花岗岩	褐铁矿,钙铁榴石,绿帘石,透辉石,符山石,孔雀石	磁异常幅值起伏较大,峰值为3199	30.40

测度值。其中定性指标即有利地层、构造条件、侵入岩条件、矿化蚀变条件的单指标测度函数如图2所示;定量指标即含矿比率的单指标测度函数如图3所示,地球物理找矿信息、地球化学找矿信息的单指标测度函数构建方法相同。

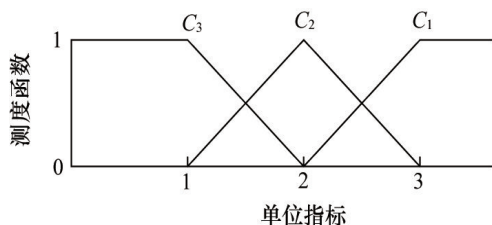


图2 有利地层、构造条件、侵入岩条件、矿化蚀变条件的单指标测度函数

Fig. 2 Single index measure function of favorable strata, tectonic conditions, intrusive rock and mineralization and alteration condition

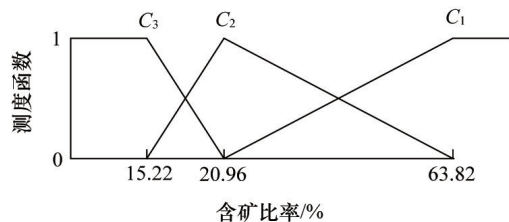


图3 含矿比率的单指标测度函数

Fig. 3 Single index measure function of ore bearing ratio

由表3中的取值,根据各指标的单指标测度函数,可以计算出3个矿带的单指标测度评价矩阵。以I矿带为例进行评判,可求得单指标测度评价矩阵为

$$\mu_{A_1} = [\mu_{1jk}]_{7 \times 3} = \begin{bmatrix} 0 & 1.0000 & 0 \\ 0 & 1.0000 & 0 \\ 0 & 1.0000 & 0 \\ 0 & 1.0000 & 0 \\ 1.0000 & 0 & 0 \\ 1.0000 & 0 & 0 \\ 0 & 0.3135 & 0.6865 \end{bmatrix} \quad (3)$$

2.4 计算多指标测度评价矩阵

用信息熵理论确定各评价指标权重, I矿带评价指标权重

$$\omega_1 = [w_1 \ w_2 \ w_3 \ w_4 \ w_5 \ w_6 \ w_7] = [0.155 \ 0.155 \ 0.155 \ 0.155 \ 0.155 \ 0.155 \ 0.07] \quad (4)$$

根据单指标测度矩阵及多指标测度计算公式得出多指标测度向量为

$$\mu_1 = \omega_1 \cdot \mu_{A_1} = [0.31 \ 0.64 \ 0.05] \quad (5)$$

2.5 置信度识别

取置信度 $\lambda = 0.6$, $k_0 = 0.95 > 0.6$, 即该矿带成矿有利度分级为2级一般。同理,对其他2个矿带进行评价。评价结果如表4所示。

表4 未确知测度模型评价结果

Table 4 Evaluation results of uncertainty measure model

矿带	综合未确知测度			评判结果
	C ₁	C ₂	C ₃	
I	0.31	0.64	0.05	2
II	0.9	0.04	0.06	1
III	0.75	0.2	0.05	2

2.6 成矿有利度排序

根据排序公式,因为 $C_1 > C_2 > C_3$, 取 $n_i = 8 - 2q$, $1 \leq q \leq 3$, 则有

$$q = [q_1 \quad q_2 \quad q_3] = [4.52 \quad 5.68 \quad 5.40] \quad (6)$$

对3个矿带的成矿性按有利度进行排序,则成矿有利度程度从大到小依次为II,III,I矿带。

3 结论

1) 矿产资源定量化预测评价受多种不确定性因素的影响,既有内部因素又有外部因素,针对目前对矿产资源定量化预测评价和分析采用的理论方法存在的缺点和不足及矿产资源定量化预测评价存在各种不确定信息,运用未确知测度评价模型对矿产成矿有利度进行了尝试评判。

2) 根据成矿有利度的影响因素和分级标准,运用未确知测度理论建立了成矿有利度评价指标的未确知测度函数,利用信息熵理论计算各指标的权重,按照置信度识别准则对成矿有利度进行了评价,并对其进行排序。

3) 实例分析表明,未确知测度评价模型更加科学合理,不仅确定了成矿有利度的等级,还可以对成矿有利度的等级进行排序,为矿产资源定量化预测与未确知评价提供了一种新思路,具有重要的理论和现实意义。

参考文献(References)

- [1] 肖克炎, 张晓华, 王四龙, 等. 矿产资源GIS评价系统[M]. 北京: 地质出版社, 2000.
Xiao Keyan, Zhang Xiaohua, Wang Silong, et al. Mineral resource assessment system based on GIS[M]. Beijing: Geological Press, 2000.
- [2] 叶天竺. 固体矿产预测评价方法技术[M]. 北京: 中国大地出版社, 2004.
Ye Tianzhu. Solid mineral prediction and assessment method[M]. Beijing: China Land Press, 2004.
- [3] Agterberg F P. Combining indicator patterns in weights of evidence modeling resource evaluation[J]. *Nonrenewable Resources*, 1992, 1(1): 39-50.
- [4] Cheng Q, Agterberg F P. Fuzzy weights of evidence method and its application in mineral potential mapping[J]. *Natural Resources Research*, 1999, 8(1): 27-35.
- [5] Ping A, wool M M, Andy R. Application of fuzzy set theory to integrated mineral exploration[J]. *Canada of Journal of Exploration Geophysics*, 1991, 27(1): 1-11.
- [6] Singer D A, Kouda R. Examining risk in mineral exploration[J]. *Natural Resources Research*, 1999, 8(2): 111-122.
- [7] An P. Spatial reasoning techniques and integration of geophysical and geological information for resource exploration[D]. Manitoba: The University of Manitoba, 1992.
- [8] 左仁广. 基于地质异常的矿产资源定量化预测与不确定性评价[D]. 武汉: 中国地质大学, 2009.
Zuo Renguang. Geonomaly-based mineral resources quantitative prediction and uncertainty Evaluation[D]. Wuhan: China University of Geosciences, 2009.
- [9] 张善明, 吕新彪, 唐小春, 等. 矿产预测中的不确定性评估方法与应用——以广西大瑶山矿区为例[J]. *地球信息科学学报*, 2010, 12(3): 342-347.
Zhang Shanming, Lv Xinbiao, Tang Xiaochun, et al. Evaluation of information uncertainty in mineral resource prediction and assessment [J]. *Journal of Geo-information Science*, 2010, 12(3): 342-347.
- [10] 王光远. 论未确知性信息及其数学处理[J]. *哈尔滨建筑工程学院学报*, 1990, 23(4): 52-58.
Wang Guangyuan. Uncertainty information and its mathematical treatment[J]. *Journal of Harbin Architecture and Engineering Institute*, 1990, 23(4): 52-58.
- [11] 刘开第, 吴和琴, 庞彦军, 等. 不确定性信息数学处理及应用[M]. 北京: 科学出版社, 1999.
Liu Kaidi, Wu Heqin, Pang Yanjun, et al. Mathematics treatment and application of uncertainty information[M]. Beijing: Science Press, 1999.
- [12] He H J, Su S R, Wang X J, et al. Evaluation on activity of active faults based on uncertainty measure theory[J]. *Disaster Advances*, 2012, 5(4): 1281-1286.
- [13] 刘渭, 杨兴科, 王守良, 等. 青海省祁漫塔格矿带虎头崖矿田构造控矿特征[J]. *中国地质*, 2014, 41(1): 222-234.
Liu Wei, Yang Xingke, Wang Shouliang, et al. Characteristics of ore-controlling structures of the Hutouya orefield in the Qimantage metallogenic belt, Qinghai Province[J]. *Geology in China*, 2014, 41(1): 222-234.
- [14] 丰成友, 李东生, 吴正寿, 等. 东昆仑祁漫塔格成矿带矿床类型、时空分布及多金属成矿作用[J]. *西北地质*, 2010, 43(4): 10-17.
Feng Chengyou, Li Dongsheng, Wu Zhengshou, et al. Major types, time-space distribution and metallogenesis of polymetallic deposits in the Qimantage metallogenic belt, eastern Kunlun area[J]. *Northwestern Geology*, 2010, 43(4): 10-17.
- [15] 丰成友, 王雪萍, 舒晓峰, 等. 青海祁漫塔格虎头崖铅锌多金属矿区年代学研究及地质意义[J]. *吉林大学学报: 地球科学版*, 2011, 41(6): 1806-1817.
Feng Chengyou, Wang Xueping, Shu Xiaofeng, et al. Isotopic chronology of the Hutouya skarn Lead-Zinc polymetallic ore district in Qimantage area of Qinghai province and its geological significance[J]. *Journal of Jilin University: Earth Science Edition*, 2011, 41(6): 1806-1817.

(责任编辑 赵业玲)

《科技导报》“卷首语”栏目征稿

“卷首语”栏目每期邀请一位中国科学院院士和中国工程院院士就重大科技现象、事件,以及学科发展趋势、科学研究热点和前沿问题等,撰文发表个人的见解、意见和评论。本栏目欢迎院士投稿,每篇文章约2000字,同时请提供作者学术简历、工作照和签名电子文档。投稿邮箱:kjdbjb@cast.org.cn。