

# 基于证据权重法的虹螺山—五指山地区钼成矿远景预测

姚永龙<sup>1</sup>, 王永春<sup>2</sup>, 于孔超<sup>3</sup>, 边祥山<sup>2</sup>

(1. 辽宁省第三地质大队, 辽宁 朝阳 122000;

2. 辽宁工程技术大学 资源与环境工程学院, 辽宁 阜新 123000;

3. 辽宁省第四地质大队, 辽宁 阜新 123000)

**摘 要:** 文章在阐述辽西虹螺山—五指山地区钼矿床成矿特征、建立该区空间数据库的基础上, 提取了 12 个成矿有利证据因子, 应用证据权重法对研究区进行了多源综合信息的成矿远景预测; 确定了 3 级 17 处远景区, 其中包括目前尚未发现矿产地的远景区 6 处。

**关键词:** 证据权重法; 成矿远景预测; 虹螺山—五指山地区; 钼矿; 辽宁省

**中图分类号:** P612; P618.65 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-1412(2011)03-0283-06

## 0 引言

成矿远景预测是应用地质理论, 综合基础地质、地球物理、地球化学和遥感地质等基础资料获得地质找矿信息, 总结成矿地质条件和矿床赋存规律, 建立矿床模型, 圈定不同级别的成矿远景区<sup>[1]</sup>。目前, 随着地表露头矿床和易识别矿床的日益减少, 以合适的成矿预测理论为指导来寻找外围及深部隐伏矿床已成为地质工作者的重要任务。

本文以辽西虹螺山—五指山地区为研究区, 以证据权重法为成矿预测方法, 以 MapGIS 软件为信息处理平台, 在对一系列原始地质信息进行提取与综合评价的基础上, 进行区内钼矿床的成矿远景预测。

## 1 区域地质背景

虹螺山—五指山地区位于辽宁省西部, 为一构造岩浆岩带, 其大地构造位置位于华北地台北缘燕山台褶带的山海关台拱与辽西台陷的过渡部位。该区南东部边界大致为青龙—葫芦岛大断裂, 北西部

边界为女儿河和要路沟—葫芦岛大断裂。沿要路沟—女儿河区域断裂与其他方向断裂交汇部位形成了区域上规模较大的五指山岩体、宽邦岩体、碱厂岩体、旧门岩体和虹螺山岩体, 构成了一条十分醒目的 NE 向展布的构造—岩浆活动带, 即八家子—杨家杖子构造岩浆岩带, 区内已发现的杨家杖子—钢屯钼矿正处于该成矿带北东段的虹螺山岩体西缘。

## 2 证据权重法简介

证据权重法是 20 世纪 80 年代末期由加拿大数学地质学家 Bonham-Carter 和 Agterberg 提出并开始应用在矿产资源预测领域, 经改进最终形成的、较为完善的基于 GIS 模拟的成矿预测方法<sup>[2]</sup>。其基本原理是把每一种成矿信息都看作为成矿预测的一个证据因子, 而每一个证据因子对成矿预测的贡献是由该因子的权重来确定的。

在评价预测工作中应用证据权重法需要掌握下列 5 类基础数据:

①预测区的总面积(或单元网格数)A; ②区内含矿预测区总面积(或单元网格数)D; ③第  $i$  个证

收稿日期: 2010-05-10; 改回日期: 2011-07-19

基金项目: 辽宁省国土资源厅科技项目“虹螺山—五指山多金属矿产资源评价与研究”资助。

作者简介: 姚永龙(1985-), 男, 山东日照人, 硕士, 现就职于辽宁省第三地质大队, 从事固体矿产勘查与评价工作。通信地址: 辽宁省朝阳市长江路四段 29 号, 辽宁省第三地质大队; 邮政编码: 122000; E-mail: yaoyl\_2046@163.com

据因子的总面积(或单元网格数) $B_i$ ;④第*i*个证据因子不存在的面积(或单元网格数) $\bar{B}_i$ ;⑤不含矿的预测区面积 $\bar{D}$ 。

涉及的计算公式主要有:

$$(1) O_{\text{先验}} = P_{\text{先验}} / (1 - P_{\text{先验}});$$

$$(2) O_{\text{后验}} = \exp\{\ln(O_{\text{先验}}) + \sum_{i=1}^n W_i^k\};$$

$$(3) P_{\text{后验}} = O_{\text{后验}} / (1 + O_{\text{后验}}).$$

其中, $O_{\text{先验}}$ 为先验成矿有利度; $P_{\text{先验}} = D/A$ 为研究区内矿床(点)出现的先验成矿概率值; $O_{\text{后验}}$ 为后验成矿几率; $P_{\text{后验}}$ 为后验成矿概率值。 $W_i^k$ 为权重值,当第*i*个证据因子存在时,其权重定义为正权, $W_i^k$ 为 $W_i^+ = \ln \frac{P(B_i|D)}{P(\bar{B}_i|\bar{D})}$ ;当第*i*个证据因子不存在时,

其权重定义为负权, $W_i^k$ 为 $W_i^- = \ln \frac{P(\bar{B}_i|D)}{P(\bar{B}_i|\bar{D})}$ ;当第*i*

个证据因子在某网格单元内缺乏资料时, $W_i^k$ 取值为0。相关系数 $C = W_i^+ - W_i^-$ 的大小表征某证据因子找矿指示性的好坏;若 $C = 0$ ,表示该证据因子对有矿与无矿无指示意义; $C > 0$ ,表示该证据因子的出现有利于成矿; $C < 0$ ,表示该证据因子的出现不利于成矿。对证据因子进行提取并建立证据权预测模型后,根据后验概率值 $P_{\text{后验}}$ 对区内钼矿产进行远景预测并确定预测远景区级别。

### 3 成矿地质特征分析及证据因子提取

#### 3.1 成矿地质特征

虹螺山—五指山地区钼矿研究始于上世纪50—60年代,相继勘查评价了杨家杖子、兰家沟等大中型钼矿。随着研究程度的提高,逐步摸清了该区钼矿的成矿规律,并初步建立了该区钼矿床的矿床预测模型。

在对虹螺山—五指山地区各钼矿地质特征进行

统计分析后认为,该区钼矿的赋矿地层为中元古界和下古生界,其中以寒武系和奥陶系为主,成因上与燕山期花岗岩关系密切,主要控矿构造为NE向、NNE向及近EW向的断裂构造,并在有利的地球物理及地球化学条件下形成。

#### 3.2 有利成矿证据因子的提取

为了统一、有效地提取各成矿证据因子,保证预测评价的准确性,在MapGIS 6.7操作平台上依据统一的坐标系统和比例尺建立了虹螺山—五指山地区的空间数据库,主要包括基础地质数据库、矿产地质数据库、遥感影像数据库、地球物理数据库和地球化学数据库。

##### 3.2.1 地层证据因子的提取

区内共有20类地层出露,属华北地层区燕山分区。为确定有利成矿地层,将矿产地质子数据库中的钼矿床(点)文件与基础地质子数据库中的地层文件进行相交分析后加以统计(图1),并进行了含矿地层找矿有利度分析<sup>[3-4]</sup>(表1)。

从图1和表1可以看出,单位矿产当量以奥陶系和寒武系最为显著,其次为高于庄组。这与研究区内大中型矿床主要产于奥陶系和寒武系地层中相吻合。故提取奥陶系、寒武系和高于庄组3类地层为有利的地层证据因子。

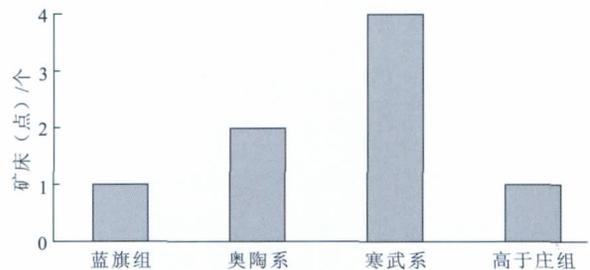


图1 虹螺山—五指山地区地层中钼矿床(点)分布统计直方图

Fig. 1 Statistical histogram of molybdenum deposits in strata of Hongluoshan-Wuzhishan area

表1 虹螺山—五指山地区含矿地层找矿有利度分析

Table 1 Statistical histogram of Mo ore-bearing strata in Hongluoshan-Wuzhishan area

地层	钼矿床(点)个数				矿产当量 (个)	地层面积 (km <sup>2</sup> )	单位矿产当量 (个/km <sup>2</sup> )
	大型	中型	小型	矿(化)点 合计			
蓝旗组				1	1	265.74	0.004
奥陶系	1			1	126	54.35	2.318
寒武系		3		1	76	164.13	0.463
高于庄组			1	1	5	164.02	0.031

注:计算矿产当量时大、中、小型矿床及矿(化)点的相应权系数分别为125,25,5,1。

3.2.2 构造证据因子的提取

区内与钼矿床的形成关系较为密切的断裂构造主要为 NE 向的要路沟—葫芦岛断裂、青龙—葫芦岛断裂, NNE 向的女儿河断裂、八百垄—北大山断裂、南安—寺儿堡断裂, 近 EW 向的黑鱼沟断裂、画眉山—葫芦岛断裂、富有屯—团山子断裂, 以及次一级的 NE 向、NNE 向断裂。并将根据地球物理资料推测的 NE 向和近 EW 向构造、根据遥感影像解译的 NE 向构造合并到原有地面断裂构造中, 作为一类证据因子进行提取。为确定最为理想的断裂影响带, 将矿产地数据库中的钼矿床(点)文件与基础地质数据库中的断裂构造文件进行相交分析, 并应用 MapGIS 对断裂构造进行 Buffer 分析, 经计算, 当缓冲半径为 1.68 km 时断裂构造的成矿相关系数 C 值最大, 故选择缓冲半径为 1.68 km 的断裂影响带为成矿有利的构造证据因子(图 2)。

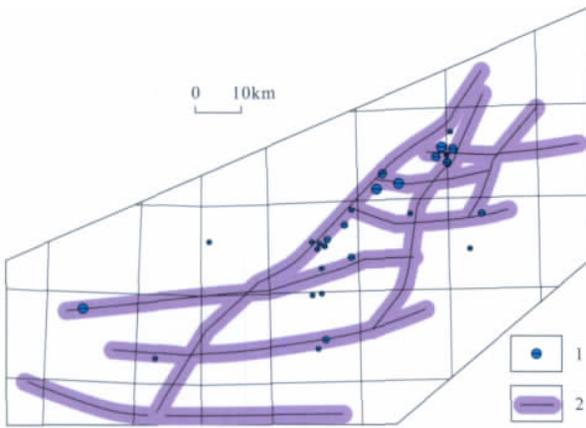


图 2 虹螺山—五指山地区有利的断层影响带证据层  
Fig. 2 Evidence layer about beneficial faulting zone in Hongluoshan-Wuzhishan area  
1. 钼矿床(点) 2. 断裂构造影响带

从图 2 可以看出, 所有大、中、小型矿床及大部分矿(化)点均落在断裂缓冲区内, 因此认为提取缓冲半径为 1.68 km 的断裂影响带为成矿有利的构

造证据因子是合理的。

3.2.3 侵入岩证据因子的提取

研究区内侵入岩属绥中—北镇侵入岩带南西端的虹螺山—五指山构造岩浆岩带, 由养马甸子—笊篱头子岩浆岩带和杨家杖子—虹螺山岩浆岩带构成, 在平面上构成一个“卜”字型。对钼矿床(点)文件与侵入岩文件进行相交分析后(图 3), 进行含矿侵入岩找矿有利度分析<sup>[3-4]</sup>(表 2)。

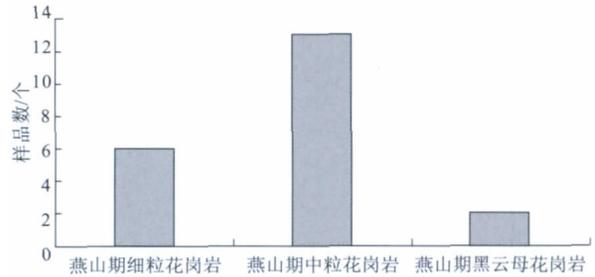


图 3 虹螺山—五指山地区侵入岩中钼矿床(点)分布统计直方图

Fig. 3 Statistical histogram of molybdenum deposit distribution in intrusive rock of Hongluoshan-Wuzhishan area

由图 3 和表 2 可以看出, 单位矿产当量以燕山期细粒花岗岩最为显著, 其次为燕山期中粗粒花岗岩。这与前面所述本区钼矿的形成与燕山期侵入岩关系密切的成矿模式相一致。故提取这 2 类侵入岩作为成矿有利的侵入岩证据因子。

3.2.4 地球物理证据因子的提取

通过对前人资料的分析, 认为本区钼成矿有利的地球物理证据因子主要为剩余布格重力负场和航磁负场。NE 向的虹螺山—圣宗庙—五指山重力负场区对区内钼矿的形成具有控制作用, 目前已发现的大、中型钼矿均位于其内(图 4); 而大致与女儿河断裂平行的钢屯—杨家杖子—大杨树沟 NE 向航磁负场区与区内钼矿形成关系密切, 包络了大多数钼矿产地(图 5)。

表 2 虹螺山—五指山地区含矿侵入岩找矿有利度分析

Table 2 Beneficial degree of Mo ore-bearing intrsive rock in Hongluoshan-Wuzhishan area

侵入岩	钼矿床(点)个数					矿产当量 (个)	侵入岩面积 (km <sup>2</sup> )	单位矿产当量 (个/km <sup>2</sup> )
	大型	中型	小型	矿(化)点	总和			
燕山期细粒花岗岩	2	1	1	2	6	282	47.11	5.986
燕山期黑云母花岗岩				2	2	2	199.17	0.01
燕山期中粗粒花岗岩		1	3	9	13	49	416.02	0.118

注: 计算矿产当量时大、中、小型矿床及矿(化)点的相应权系数分别为 125, 25, 5, 1。

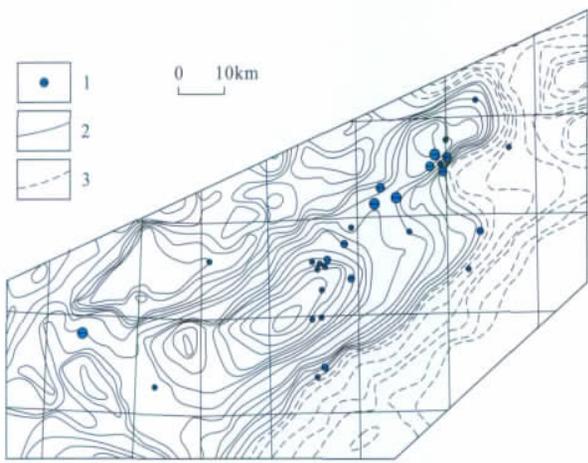


图4 虹螺山—五指山地区剩余布格重力异常等值线示意图

Fig. 4 Residual Bouguer gravity anomaly contour map of Hongluoshan-Wuzhishan area  
1. 钼矿床(点) 2. 正值线 3. 负值线

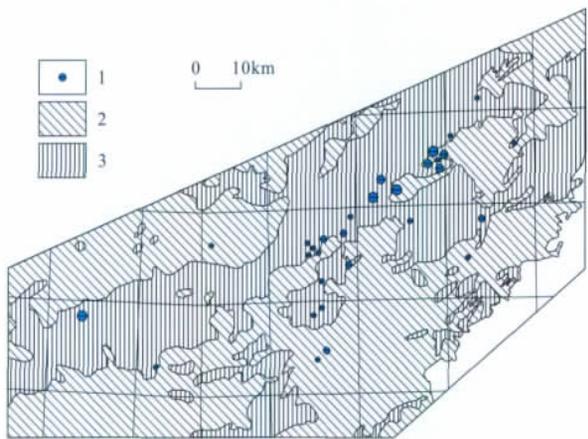


图5 虹螺山—五指山地区航磁平面示意图

Fig. 5 Aeromagnetic plane sketch of Hongluoshan-Wuzhishan area  
1. 钼矿床(点) 2. 航磁正值场 3. 航磁负值场

### 3.2.5 地球化学证据因子的提取

通过对已收集地球化学资料的解读和统计分析,认为对本区钼成矿有利的地球化学证据因子主要为地球化探异常及重砂异常。化探异常方面主要为钼元素异常,通过计算当异常值为  $0.88 \times 10^{-6}$  时  $C$  值最大为 2.25,故以此异常值为下限提取钼化探异常证据因子;重砂异常方面则主要为含钼、铅、锌元素的重矿物异常。

基于以上分析,提取 5 类共 12 个成矿有利证据因子作为本区的成矿远景预测模型建模因子。

## 4 证据权预测模型的建立

证据权重法预测模型是根据已知矿床(点)与各种控矿成矿条件之间的条件概率来确定每种条件的权重值,然后对全区进行预测<sup>[5]</sup>。为保证每个网格单元内有、且只有 1 个矿点产出,结合本研究区的面积、勘探程度以及矿点分布情况,以  $2 \text{ km} \times 2 \text{ km}$  的规格对研究区进行网格划分,得到 1 850 个网格单元,并在每个单元内提取各证据因子。

(1)对前述各证据因子文件与网格单元文件进行相交分析及二元模式识别,存在证据因子的网格单元赋值为 1,不存在证据因子的网格单元赋值为 0,并将赋值结果保存为网格单元的属性数据。

(2)对钼矿床(点)文件与网格单元文件进行相交分析及二元模式识别,存在钼矿床(点)的网格单元赋值为 1,不存在钼矿床(点)的网格单元赋值为 0,同样将赋值结果保存为网格单元的属性数据。

(3)在提取完证据因子及各网格单元属性数据后,分别计算出各证据因子与本区钼矿成矿的相关程度和预测评价证据权重值(表 3),并以此对区内网格单元进行成矿概率计算。

表3 虹螺山—五指山地区证据因子权重参数  
Table 3 Weight parameters of evidence factors of Hongluoshan-Wuzhishan area

序号	证据因子	$W^+$	$W^-$	$C$
1	奥陶系	2.53	-0.15	2.68
2	寒武系	2.03	-0.09	2.12
3	高于庄组	1.75	-0.21	1.96
4	NNE 向构造	3.45	-0.09	3.54
5	近 EW 向构造	0.97	-0.05	1.02
6	NE 向构造	0.52	-0.11	0.63
7	燕山期细粒花岗岩	2.43	-0.23	2.66
8	燕山期中粗粒花岗岩	0.97	-0.05	1.02
9	重力负场	0.44	-0.39	0.83
10	航磁负场	0.34	-0.32	0.66
11	钼化探异常	1.85	-0.4	2.25
12	钼铅锌重砂异常	1.42	-0.06	1.48

## 5 成矿远景预测及结果评价

运用上述预测模型计算出研究区内各网格单元的后验成矿概率值。根据区内各单元后验成矿概率

值的具体分布情况,结合后验概率值求拐点的方法<sup>[6]</sup>对研究区进行 3 级远景区划分:Ⅰ级远景区为  $P_{\text{后验}} > 0.8$  的区域,Ⅱ级远景区为  $0.6 < P_{\text{后验}} \leq 0.8$

的区域,Ⅲ级远景区为  $0.4 < P_{\text{后验}} \leq 0.6$  的区域。据此作出虹螺山—五指山地区钼矿床成矿远景预测图(图 6)。

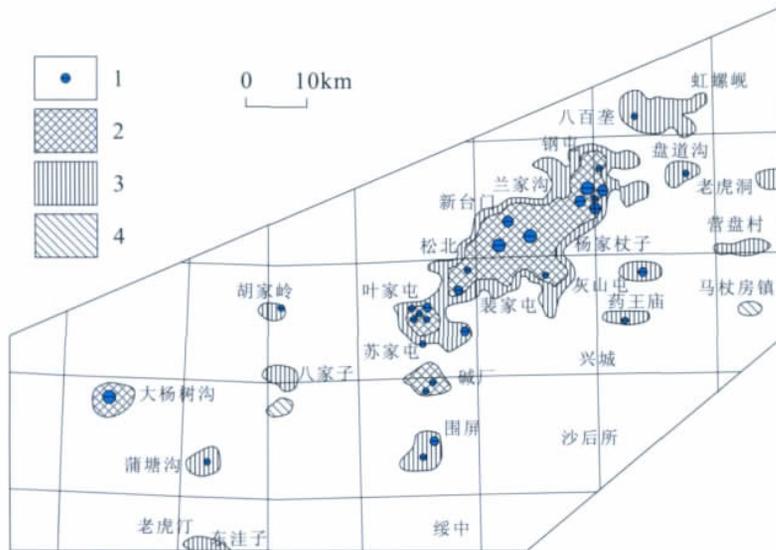


图 6 虹螺山—五指山地区钼矿床成矿远景预测图

Fig. 6 Molybdenum prospect prognosis map of Hongluoshan-Wuzhishan area

1. 钼矿床(点) 2. Ⅰ级远景区 3. Ⅱ级远景区 4. Ⅲ级远景区

由图 6 可以看出,本次预测圈定的Ⅰ级远景区有钢屯—裴家屯预测区、叶家屯—苏家屯预测区、碱厂预测区和大杨树沟预测区(4 个),共有矿产地 19 处,其中大型矿床 3 处、中型矿床 5 处、小型矿床 2 处,典型矿床有兰家沟钼矿、杨家杖子钼矿和大杨树沟钼矿(大型矿床);Ⅱ级远景区有八百垡预测区、盘道沟预测区、老虎洞预测区、营盘村预测区、灰山屯预测区、药王庙预测区、围屏预测区、胡家岭预测区、八家子预测区、蒲塘沟预测区及东洼子预测区(11 个),共有矿产地 10 处,其中有小型矿床 3 处,典型矿床为灰山屯钼矿、任虎山沟钼矿和围屏钼矿(小型矿床);Ⅲ级远景区有马杖房镇预测区和八家子南部预测区 2 个,其中尚未发现钼矿产地。

## 6 结论

(1)区内所有矿床(点)都落在Ⅰ级、Ⅱ级预测远景区范围之内,说明本次预测评价对已知矿床(点)没有遗漏。而且所划分远景区的级别与其内产出的钼矿床(点)规模及数量对应良好,说明本次预测是成功的,预测结果是可靠的。

(2)本次工作还圈定了 6 处目前尚未发现矿床(点)的预测区(张相公屯—虹螺岬一带、老虎洞一带、营盘村—影壁山一带、马杖房一带、八家子一带、老虎汀—东洼子一带),经地质资料分析,这些预测区与已知矿床(点)在成矿条件上具有一定的相似性,具有较好的找矿前景。

(3)区内钼成矿有利地层为奥陶系、寒武系和高于庄组;控矿侵入岩以燕山期中酸性侵入岩为主;控矿构造为缓冲半径为 1.68 km 的 NE 向、NNE 向及近 EW 向的断裂构造影响带;矿床(点)多发育在线状、环状构造的交叉、密集地区,而且剩余布格重力负场和航磁负场、钼元素化探异常、含钼铅锌重矿物异常也对找矿具有指示意义。

(4)基于证据权重法的成矿远景预测,借助 MapGIS 软件的数据库处理功能,对研究区进行了有效的综合信息预测,并将预测结果以可视化图表的形式直观地表达出来,从而保证了预测过程的便捷性和预测结果的准确性。

## 参考文献:

[1] 肖克炎,张晓华,陈郑辉,等. 成矿预测中证据权重法与信息量

- 法及其比较[J]. 物探化探计算技术, 1999, 21(3): 223-226.
- [2] 严冰, 阳正熙, 王小春. 证据权法在四川宁南地区铅锌成矿预测中的应用[J]. 世界地质, 2005, 24(3): 253-258.
- [3] 池顺都, 周顺平, 吴新林. GIS支持下的地质异常分析及金属矿产经验预测[J]. 地球科学——中国地质大学学报, 1997, 22(1): 99-103.
- [4] 池顺都, 吴新林. 云南元江地区铜矿GIS预测时的找矿有利度和空间相关性分析[J]. 地球科学——中国地质大学学报, 1998, 23(1): 75-78.
- [5] 刘世翔, 薛林福, 鄒瑞卿, 等. 基于GIS的证据权重法在黑龙江省西北部金矿成矿预测中的应用[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2007, 37(5): 889-894.
- [6] Boloneus D E, Raines G L, Causey J D, et al. Assessment method for epithermal gold deposits in Northeast Washington State using weights-of-evidence GIS modeling [R]. Open File Report 01-501, Reston: USGS, 2001.

## Molybdenum ore prediction in Hongluoshan-Wuzhishan area based on the weight evidence method

YAO Yong-long<sup>1</sup>, WANG Yong-chun<sup>2</sup>, YU Kong-chao<sup>3</sup>, BIAN Xiang-shan<sup>2</sup>

(1. No.3 Battalion Bureau Geological And Mineral Resources Exploration, Liaoning Province, Chaoyang 122000, Liaoning China; 2. College of resource and environment, Liaoning Technical University, Fuxin 123000, Liaoning, China; 3. No. 4 Battalion Bureau Geological And Mineral Resources Exploration, Liaoning Province, Fuxin 123000, Liaoning, China)

**Abstract:** Based on the systematic analysis of metallogenetic characteristics of the molybdenum deposits in Hongluoshan~Wuzhishan area in the west of Liaoning Province as well as the establishment of the geodatabase 12 favorable ore-forming factors are extracted and the weight evidence method applied to multi-source-information-based ore potential prediction of the study area. 3 levels of prospective area are defined and seventeen prospects delineated of which six are undiscovered prospects.

**Key Words:** the weight evidence method; ore prediction; Hongluoshan-Wuzhishan area; molybdenum deposit; Liaoning province

## 《地质找矿论丛》理事会一届二次会议在天津召开



2011年8月20日在天津召开了《地质找矿论丛》理事会一届二次会议。罗天明副理事长主持了会议,参加会议的理事和理事单位代表审议了理事会一年来的工作报告和经费使用情况,大家对《地质找矿论丛》出版质量和编辑部的工作给予充分的肯定,并对今后的工作提出具体意见和安排。

(李树良)