

# 非线性理论和模糊证据权方法在内蒙古达来庙草原覆盖区钼多金属矿产预测中的应用

王佳营<sup>1,2</sup>, 张晓军<sup>3\*</sup>, 姚春亮<sup>3</sup>, 张祺<sup>1,2</sup>, 谢瑜<sup>1,2</sup>, 李光耀<sup>1,2</sup>, 丁宁<sup>4</sup>

(1. 中国地质调查局天津地质调查中心, 天津 300170; 2. 华北地质科技创新中心, 天津 300170;

3. 中国地质大学资源学院, 武汉 430074; 4. 中国地震局第一监测中心, 天津 300180)

**摘要:** 内蒙古达来庙地区是重要的钼多金属矿成矿区, 草原覆盖面积达研究区总面积的58.44%。本文对达来庙地区已知矿床(点)地质特征、控矿要素进行总结, 建立了研究区钼多金属矿综合信息找矿模型。在GeoDAS GIS平台上, 利用非线性理论、奇异性理论以及分形滤波技术, 实现了对该区隐伏构造、隐伏岩体、物化探异常等弱缓信息的提取。在找矿模型的构建以及找矿信息提取的基础上, 确定9个预测变量, 开展基于模糊证据权方法的综合信息矿产预测, 圈定成矿远景区25个, 对覆盖区找矿具有指示意义。

**关键词:** 找矿模型; 矿产预测; 非线性理论; 模糊证据权; 达来庙

**中图分类号:** P618.65

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1672-4135(2019)03-0174-11

内蒙古达来庙地区位于西伯利亚板块与华北板块结合部位的晚古生代增生带, 属古亚洲成矿域, 额济纳旗-兴安岭成矿区, 二连-东乌旗成矿带<sup>[1]</sup>。近年来, 相继发现乌兰德勒钼铜多金属矿床(大型)、达来敖包钼多金属矿床(中型)、乌花敖包钼矿床(大型)、准苏吉花钼矿床(小型)、乌日尼图钼矿床(中型)等一系列钼多金属矿床(点)<sup>[2-6]</sup>, 是内蒙古新发现的一条重要钼矿带<sup>[4]</sup>。该地区地形较平坦, 大部分为草原覆盖区, 岩石出露较差。

非线性理论是21世纪科学研究的核心领域<sup>[7]</sup>。大量国内外研究成果表明, 将非线性理论应用于矿床学理论和矿产资源预测具有非常广阔的前景<sup>[8-10]</sup>。“证据权”法是一种离散的多元统计方法, 20世纪80年代末, 加拿大数学地质学家Agterberg和Bonham-Carter等将证据权法发展并开始应用于矿产资源评价领域<sup>[11,12]</sup>, 该方法在矿产资源预测中取得了丰硕的成果<sup>[13-15]</sup>。在此基础上, Cheng and Agterberg开发了模糊证据权方法, 弥补了普通证据权方法在图层离散化时损失部分信息的不足<sup>[16]</sup>。成秋明<sup>[17,18]</sup>将非线性

理论特别是分形/多重分形理论、奇异性理论、广义自相似理论及模糊证据权方法引入到矿产资源评价领域, 建立了较为完善的基于GeoDAS GIS平台的找矿信息提取和成矿预测方法, 并将该技术应用于云南镇沅金矿、个旧锡铜矿的矿产资源预测以及新疆天山沙漠覆盖区、内蒙古大兴安岭草原覆盖区、福建武夷山植被和火山岩覆盖区的矿产预测中, 显示了较好的前景<sup>[8,13,19-23]</sup>。

本文利用非线性理论、广义自相似理论、局部奇异性理论以及S-A分形滤波技术, 在GeoDAS GIS平台上开展了对内蒙古达来庙草原覆盖区微弱、低缓找矿信息的识别和提取, 并基于模糊证据权方法开展了综合信息矿产预测, 圈定成矿远景区, 指导本区下一步找矿工作。

## 1 研究区地质概况

达来庙地区位于内蒙古自治区中东部, 行政区划隶属内蒙古自治区锡林郭勒盟苏尼特左旗, 北部与蒙古国接壤。研究区大地构造位置位于西伯利亚

收稿日期: 2019-04-13

资助项目: 中国地质调查局地质调查项目“硬岩型铀钍等矿产资源远景调查与勘查示范(DD20160129)”; 中国地质调查局地质调查项目“鄂尔多斯、柴达木等盆地砂岩型铀矿调查(DD20190119)”; 国家自然科学基金项目“内蒙古赵井沟过铝质花岗岩浆演化与钼钽等元素富集机制(41502082)”

作者简介: 王佳营(1986-), 男, 工程师, 硕士, 毕业于中国地质大学(武汉)矿产普查与勘探专业, 从事矿床学研究工作, Email: cugwjy@qq.com; 通讯作者: 张晓军(1974-), 男, 副教授, 博士, 从事矿床学和矿产勘查评价等方面的教学和研究工作, E-mail: zhxj\_p@sina.com。

板块与华北板块结合部位的晚古生代增生带,属古亚洲成矿域、额济纳旗-兴安岭成矿区、二连-东乌旗晚古生代-中生代成矿带,中生代受滨太平洋构造域叠加<sup>[1]</sup>,成矿地质条件优越。研究区断裂活动强烈,以北东向、北东东向断裂为主,北西向次之,近东西向和近南北向为次级断裂。区内侵入岩较为发育,呈北东向展布。岩浆侵入活动主要集中于华力西期和燕山期。华力西期岩性以酸性侵入岩为主,如二长花岗岩、花岗闪长岩、碱性花岗岩等<sup>[24-26]</sup>;燕山期岩体主要有二长花岗岩、正长花岗岩、花岗斑岩等。出露的地层主要为古生界和中新生界:古生界地层有奥陶系乌宾敖包组( $O_1w$ )、泥盆系泥鳅河组( $D_1n$ )、石炭-二叠系宝力高庙组( $C_2P_1b$ )、二叠系大石寨组( $P_1d$ )、哲斯组( $P_1z$ )、林西组( $P_2l$ ),以石炭-二叠系宝力高庙组最为发育;中新生界主要为上侏罗统陆相火山岩;第三系为泥岩、细砂岩、砂砾岩等,第四系主要为砂砾层、洪、冲积物等。研究区地形平坦,第三系第四系覆盖严重(图1、图2),研究区总面积1.975万 $km^2$ ,其中,第三系第四系覆盖面积达1.154万 $km^2$ ,占研究区总面积的58.44%。

## 2 空间数据库建立和工作流程

### 2.1 空间数据库建立

空间数据库的构建是将各个用于信息提取和预测的地质、矿产、化探、物探、遥感等原始信息统一集成到一个地理信息系统平台。本次研究主要借助ArcGIS系统作为数据集成、数据管理和数据分析的平台。

地质数据库:本次研究共搜集了研究区范围内6幅1/20万标准图幅,包括了地层、侵入岩、岩脉、断裂、矿点、1/20万重砂异常等MAPGIS图层文件(\*.wt、\*.wl、\*.wp)。

矿产数据库:研究区矿床(点)的搜集主要有以下几个途径:1/20万区域地质报告、1/5万矿产调查报告<sup>①</sup>、野外新发现等,共搜集到矿床(点)43个,包括钼、钨、铜、铅、锌、金、银、铁等,属性信息包括经度、纬度、矿产编号、矿产地名称、矿种、矿床规模、赋矿围岩、与矿化有关的岩体、成矿时代、成因类型、矿体形态、控矿构造、矿石构造、矿石矿物、脉石矿物、蚀变类型、找矿标志等。

地球化学数据库:研究区的化探数据分析点共



图1 内蒙古达拉庙地区地貌景观

Fig.1 Landscape of Dalaimiao area, Inner Mongolia

a. 地形平坦;b. 第四系覆盖厚度

4 921个,数据点间距1~2.5 km不等,分析元素种类为全岩分析,包括Ag、As、Au、B、Ba、Be、Bi、Cd、Co、Cr、Cu、F、Hg、La、Li、Mn、Mo、Nb、Ni、P、Pb、Sb、Sn、Sr、Th、Ti、U、V、W、Y、Zn、Zr、 $Al_2O_3$ 、CaO、 $Fe_2O_3$ 、 $K_2O$ 、MgO、 $Na_2O$ 、 $SiO_2$ ,共39种。

地球物理数据库:重力数据点为Excel文件,包括经度、纬度、重力值三项,共3 549个数据点;航磁数据点也为Excel文件,包括经度、纬度、磁场值三项,共984个数据点。

### 2.2 矿产预测流程

在系统研究达拉庙地区区域地质特征和典型矿床地质特征的基础上,全面分析控矿因素,构建综合预测模型,进而提取地质、地球化学、地球物理、遥感、重砂等有用找矿信息,以GeoDAS GIS预测软件为平台,运用局部奇异性原理提取弱缓异常,运用分形滤波技术区分背景与异常,运用模糊证据权方法进行

<sup>①</sup>陶继雄.内蒙古达拉庙地区战略性矿产远景调查报告.内蒙古自治区地质调查院.2009.

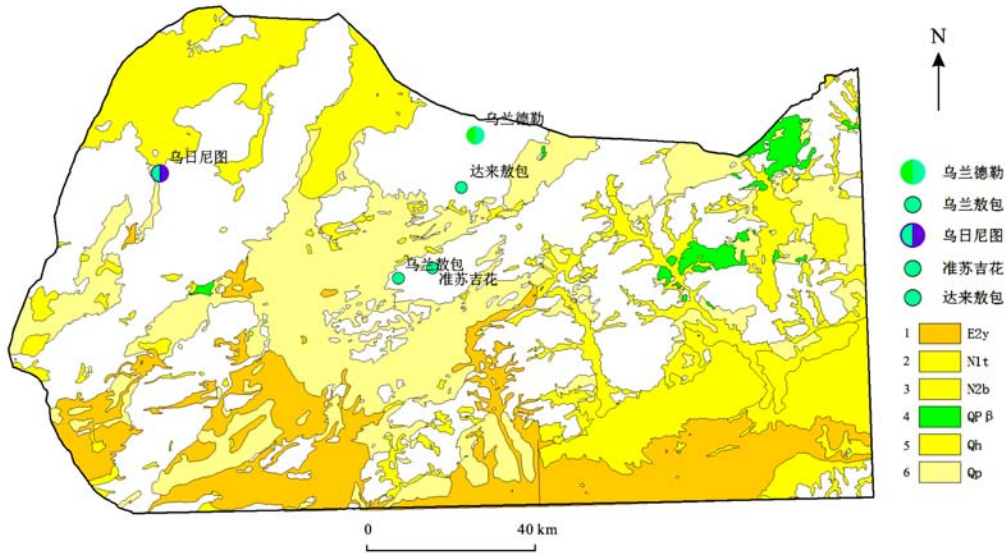


图2 内蒙古达来庙地区第三系第四系覆盖分布图

Fig.2 Tertiary and quaternary coverage map of Dalaimiao area, Inner Mongolia

- 1.始新统伊尔丁曼哈组细砂岩、砂砾岩夹砂质泥岩;2.中新统通古尔组泥岩、泥质粉砂岩;3.上新统宝格达乌拉组粉砂质泥岩、含砾粗砂岩;4.更新统玄武岩;5.全新统洪冲积物;6.更新统坡积物

信息综合,形成预测后验概率图,为进一步的矿产勘查工作部署提供依据,具体的研究思路流程见图3。

### 3 综合信息找矿模型的构建

研究区现已发现的矿床(点)共43个,其中大型矿床2个,中型矿床2个,小型矿床1个,多数为受构造裂隙控制的斑岩型和热液型矿化。在已知控矿构造走向的19个矿床(点)中(表1),有5个矿床(点)受NW向构造裂隙控制,8个矿床(点)受NE向构造裂隙控制,5个矿点(蚀变带)受近EW向构造控制,1个

矿点受近SN向构造裂隙控制。此外,从断裂的表现形式来看,多数断裂为石英脉、硅化脉、石英斑岩脉所充填,因此,在该区找矿应十分关注受断裂控制的石英脉、硅化脉、石英斑岩脉、花岗斑岩脉等脉体。

统计了现已发现的43个矿床(点)的赋矿围岩,共有29个矿床(点)发育于地层当中,其中分布于上石炭-下二叠统宝力高庙组(C<sub>2</sub>P<sub>1b</sub>)地层中的矿床(点)数为19个,其中包括1个大型、1个中型、1个小型矿床;分布于下泥盆统为泥鳅河组(D<sub>1n</sub>)地层中的有8个矿点,分布于下奥陶统乌宾敖包组(O<sub>1w</sub>)地层

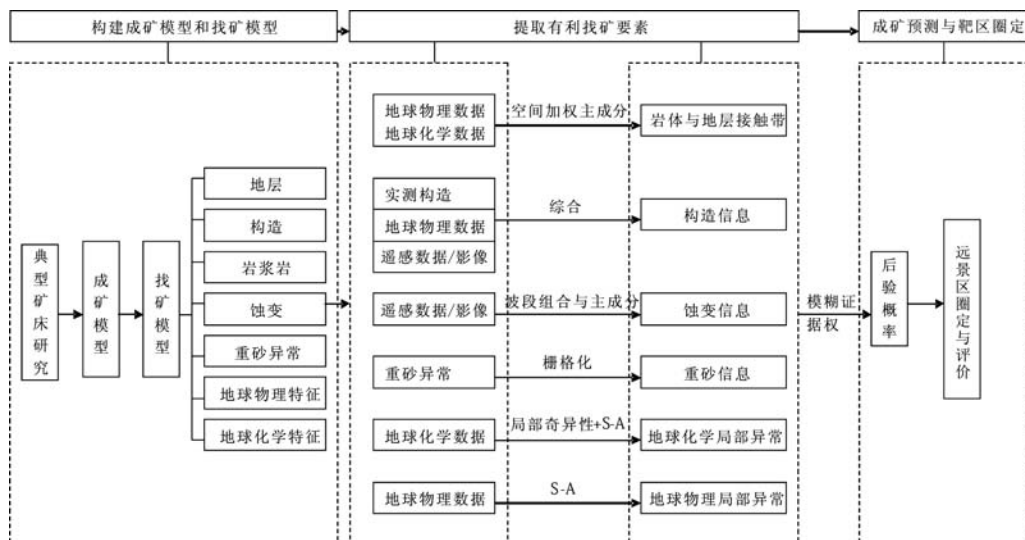


图3 内蒙古达来庙地区综合预测流程图

Fig.3 Flowchart of mineral prediction for Dalaimiao area, Inner Mongolia

表1 内蒙古达拉庙地区已知矿床(点)特征一览表

Tab.1 Table of characteristics of mineral deposits in Dalaimiao area, Inner Mongolia

编号	矿床(点)名称	矿种	矿床规模	成因类型	成矿时代	控矿构造	断裂形式
1	阿拉盖乌拉	铜	矿点	热液型		SN	石英脉
2	乌兰德勒钼铜矿床	钼、铜	大型	斑岩型	134.1±3.3 Ma <sup>[2]</sup>	NW	石英脉
3	乌兰德勒矿区东北Mo矿化点	钼	矿点	热液型		NW	石英脉
4	准苏吉花钼矿床	钼	小型	斑岩型	298.1±3.6 Ma <sup>[4]</sup>	NW	石英脉
5	乌日尼图钼钨多金属矿床	钼、钨、铅、 锌、铜	中型	热液石英脉 <sup>[28]</sup>	134±14 Ma <sup>[27]</sup>	NW	石英脉
6	额很乌苏音迪Cu、Pb、Zn矿化点	铜铅锌	矿点	热液型		NW	石英脉
7	乌兰德勒矿区西Mo矿化点	钼	矿点	热液型		NE	石英脉
8	乌花敖包钼矿床	钼	大型	斑岩型	139.2±3.4 Ma 或晚于 <sup>[29]</sup>	NE	
9	达拉敖包钼矿床	钼铜	中型	斑岩型		NE	石英脉
10	沙腊格楚鲁Pb、Zn矿化点	铅锌	矿点	热液型		NE	石英脉
11	查干多尔博勒东南Pb、Zn矿化点	铅锌	矿点	热液型		NE	石英脉
12	达拉敖包北赛音呼都格Ag、Pb、Zn矿 化蚀变带	银铅锌	矿点	热液型		NE	硅化、褐铁矿化
13	白音额尔登尼大队东北Pb、Zn矿化点	铅锌	矿点	热液型		NE	
14	阿敏乌苏构造蚀变带(Pb、Zn)	铅锌	矿点	热液型		NE	石英斑岩脉
15	乌兰德勒矿区北西W、Bi矿化点	钨铋	矿点	热液型		EW	石英脉
16	好来伊和东Cu、Pb、Zn矿化点	铜铅锌	矿点	热液型		EW	石英脉
17	阿尔尚德北Mo蚀变带	钼	矿点	热液型		EW	石英斑岩脉
18	白音宝力格Pb、Zn矿化点	铅锌	矿点	热液型		EW	褐铁矿化
19	查干敖包西南Cu、Pb、Zn矿化点 (蚀变带)	铜铅锌	矿点	热液型		EW	石英斑岩脉

中为乌日尼图中型矿床,分布于林西组(P<sub>2</sub>l)地层中矿点1个(图4)。由此可见,该区矿产主要产于二叠纪之前的各个老地层当中,在中生界和新生界地层中不成矿。

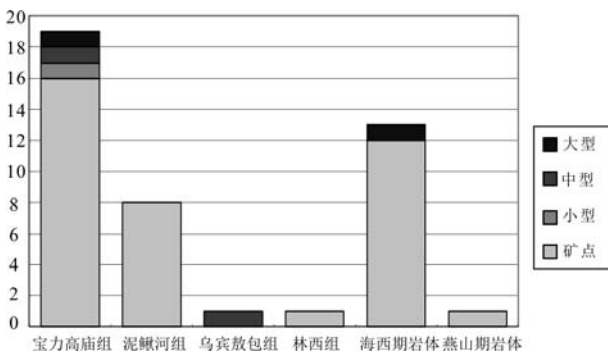


图4 各地质体中发育矿床(点)数统计柱状图

Fig.4 Statistical histogram showing the number of ore deposits in various geological bodies

研究区岩浆侵入活动主要集中于华力西期和燕山期,相对应本区早二叠世和早白垩世两期成矿作用,准苏吉花斑岩型钼矿床成矿时代为 298.1±3.6 Ma<sup>[4]</sup>,而乌日尼图钼钨多金属矿床和乌兰德勒钼铜矿床的成矿时代均为早白垩世<sup>[2,21]</sup>,两期成矿均与酸性侵入体有关。在已知的43个矿床(点)当中,赋矿围岩为石炭—二叠纪岩体的有13个矿床

(点)。表明本区华力西期和燕山期岩体都与成矿关系密切,或充当围岩或充当母岩。区内发育大量的岩脉,有些岩脉与成矿无关,有些则关系密切。岩脉代表了岩浆、热液沿构造裂隙流动最后沉淀结晶的一种表现形式,富含成矿物质的岩浆、热液才能形成与成矿有关的岩脉。在统计的43个矿床(点)当中,9个矿床(点)与石英脉有关,7个矿床(点)与石英斑岩脉有关,1个与花岗斑岩脉有关,1个与花岗细晶岩脉有关。因此,在本区找矿应该重视石英脉、石英斑岩脉、花岗斑岩脉、花岗细晶岩脉等中酸性岩脉的产出。

本文统计了已发现的43个矿床(点)产出位置(图5,图6),其中产在岩体中离岩体地层接触带较远的矿床(点)有9个(距接触带距离大于4 km),多为钼、钨、铋等高温元素矿化。距接触带距离2~3 km的矿床数2个,距离在1~2 km的矿床数为4个,距离在0.5~1 km的矿床(点)数10个,距离0.5 km以下的矿床(点)数14个,成矿元素铜、铅、锌、钼等均能发生矿化。

通过对典型矿床特征、控矿要素、地球化学、地球物理等找矿信息的详细分析,现将研究区钼多金属矿产成矿预测的综合信息找矿模型列表归纳(表2)。

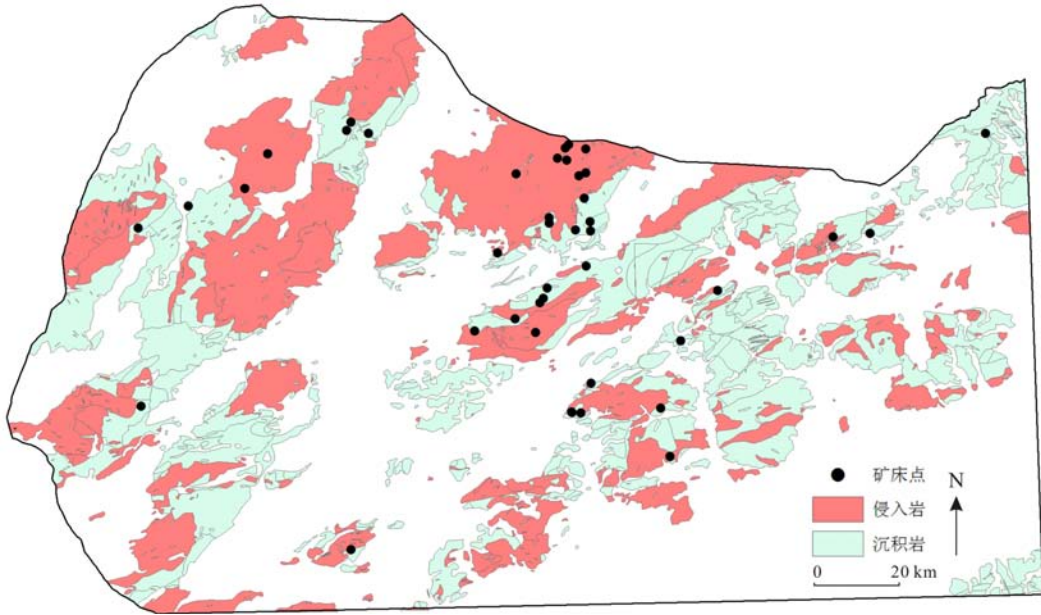


图5 内蒙古达拉庙地区矿床(点)与地层、岩体的分布位置

Fig.5 Distribution of ore deposits, strata and rock masses in Dalaimiao area, Inner Mongolia

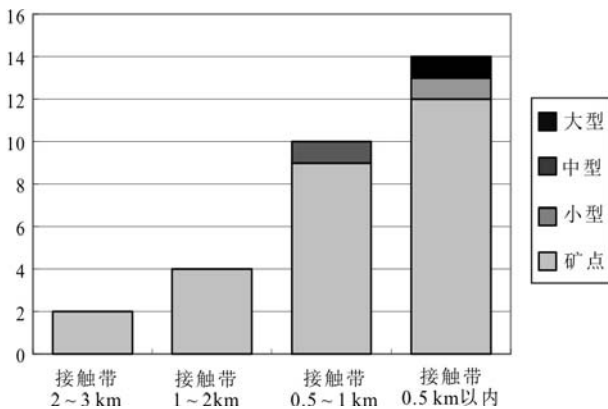


图6 岩体接触带3 km 范围内各矿床(点)分布统计柱状图

Fig.6 Statistical histogram of the distribution of each ore deposit within 3 km of the rock mass contact zone

### 4 空间信息提取

受篇幅所限,本文仅对构造、岩体、岩体与地层接触带、地球化学等找矿信息进行简要介绍,详细的弱缓信息提取过程将在后续论文中进行介绍。

#### 4.1 地质找矿信息提取

构造信息提取:前文研究表明,NE向大型断裂为本区控岩、导矿构造,控制岩体、异常带、矿床的分布;NE向、NW向和近EW向断裂为主要的储矿构造,控制着矿体分布;两组或多组断裂交汇部位易成矿。但受覆盖影响,实测构造数量较少,且分布不均,本文通过地质、地球物理、遥感等综合信息对本

区隐伏断裂构造进行推断解译。对实测及综合推断断裂构造进行缓冲区分析(buffer分析),选择多环方式,环间距250 m,共15环。当缓冲距离为1 km时,有53%的矿床(点)落入断裂缓冲区,当缓冲距离为2 km时,有95%的矿床(点)都落入了缓冲区内。在ArcGIS软件中对断裂构造进行相交点分析,得到2组或2组以上断裂的相交点,对得到的相交点做buffer分析,选择多环方式,环间距250 m,共20环。当缓冲半径设置为3 km时,有79%的矿床(点)落入缓冲区内。

岩体信息提取:研究区华力西期和燕山期隐伏细粒花岗岩、石英斑岩、花岗斑岩等小岩体与成矿关系密切,而研究区由于覆盖造成岩体范围边界不清,因此,选用合适的数据组合实现隐伏岩体的推断是本次覆盖区成矿预测的关键。本文主要选取了能够代表中酸性岩体特征的K<sub>2</sub>O、Na<sub>2</sub>O、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、MgO、CaO、Mn、V、P等地球化学元素以及经奇异性分析的重力数据和S-A分解的航磁数据,运用主成分分析方法,选取代表中酸性岩体的主成分,并结合地质事实,综合全面的解译隐伏岩体,隐伏岩体的解译的详细过程另文发表。

岩体与地层接触带的提取:通过对隐伏岩体和地层的解译,实现了对覆盖层的揭盖,对新得到的研究区覆盖层揭盖地质图,分别提取岩体(海西期、印支期和燕山期)和老地层(二叠纪以及更早的地层)

表2 内蒙古达拉庙地区钼多金属矿产找矿模型表

Tab.2 Prospecting model for molybdenum polymetallic minerals in Dalaimiao area, Inner Mongolia

找矿要素分类		要素显示特征
区域成矿背景	区域构造	位于西伯利亚板块东南大陆边缘晚古生界增生带。断裂构造以北东向为主,北西向次之,近东西向和近南北向断裂为次级断裂
	地球物理场	区域重力场表现为北东向;区域航磁表现为北东向,东南高、西北低
	地球化学场	成矿元素 Ag、As、Bi、Hg、Mo、W 等具有高的背景场
地质找矿要素	地层	石炭-下二叠统宝力高庙组(C <sub>2</sub> P <sub>2</sub> b)、下泥盆统为泥鳅河组(D <sub>1</sub> n)、下奥陶统乌宾敖包组(O <sub>1</sub> w)、林西组(P <sub>2</sub> l)等二叠纪之前地层是主要的赋矿围岩。中生界和新生界地层与成矿关系不大。
	构造	NE向断裂构造为控岩、导矿构造,控制岩体、异常带、矿床的分布;NE向、NW向和近EW向等次级断裂为储矿构造;两组或两组以上断裂交汇部位易于成矿。重视断裂控制的石英脉、硅化脉、石英斑岩脉、花岗斑岩脉等脉体的产出
	岩浆岩	华力西期和燕山期岩体都与成矿关系密切,或充当围岩或充当母岩。其中,细粒花岗岩、石英斑岩、花岗斑岩等小岩体与斑岩型矿化关系密切,重视硅化带、石英脉、石英斑岩脉等与成矿有关的热液脉体
	围岩蚀变组合	硅化、钾化、绢云岩化、绿泥石化、绿帘石化等斑岩型、热液型典型蚀变带特征
	主要重砂矿物	锡石、白钨矿、泡钨矿
	其他地质因素	岩体与地层接触带部位3 km范围内有利于成矿
地球化学找矿要素	钼钨铜铅锌多金属矿床	选取 Ag、As、Bi、Cd、Cu、Hg、Mo、Pb、Sb、W、Zn 等元素占主导的主成分(PCA1)
	钼钨矿床	选取 W、Mo、Bi、Pb 等元素占主导的主成分(PCA3)
地球物理找矿要素	岩体地表异常特征	东南区岩体具高磁性高重力、西北区岩体具低磁性低重力的特征
	断裂构造地表异常特征	注意重力异常梯级带与大型断裂的关系

在GeoDAS软件中做交界分析,得到岩体与地层的接触带,根据已知矿床(点)对与接触带的距离变化范围,设定缓冲方式为多环,环间距200,共20环。当缓冲距离为1 km时,有58%的矿床(点)落入缓冲区内,当缓冲距离为2 km时,有65%的矿床(点)落入缓冲区内,当缓冲距离为3 km时,有76%的矿床(点)落入缓冲区内。这些矿床(点)中,多数矿床(点)离接触带距离在3 km以内,离接触带比较远的主要是乌兰德勒钼铜矿床附近发现的一些矿点,这些矿点与乌兰德勒矿床性质较为相似,都产在华力西期岩体当中,可能与深部隐伏小岩体有关。

4.2 地球化学数据处理与弱缓异常提取

对主要成矿元素进行主成分分析,得到了寻找钼多金属矿床的两个成矿元素组合:一个是Ag-As-Bi-Cd-Cu-Hg-Mo-Pb-Sb-W-Zn组合(PCA1主成分),用以寻找钼钨铜铅锌多金属矿产;另一个是W-Mo-Bi-Pb组合(PCA3主成分),用以寻找单纯以钼钨等高温元素成矿的矿产。研究区覆盖区域的地球化学元素含量整体偏低,达不到异常级别,但是其地球化学空间分布是完整的,依旧是满足面积-密度的幂率分布关系的,因此,利用局部奇异性原理,获得其奇异性指数分布图,可以有效地提取覆盖区域的弱缓异常。分别对两个组合异常图进行奇异性分析,得到图7和图8。

5 基于模糊证据权法的矿产预测

5.1 预测变量的确定

在建立本区找矿模型和对各个找矿信息进行提取的基础上,采用数据驱动与知识驱动相结合的方式,确定了以下用于本区成矿预测的有利预测变量9个(表3)。

5.2 设置训练参数

应用模糊证据权方法,需要定义预测研究区。研究区可以分成两个子区域:训练集区域和预测区域。前者意味着在此区域要有足够的已知训练集来计算证据权和定义证据图层,换言之,就是要通过训练区域的数据来建立模型,所建立模型对预测区域预测是非常关键的,通常在预测区域的已知矿点是很少的,在许多矿点已知的假设下,一般训练区域和预测区域是同一块区域。

本文选择已知的43个矿床(点)作为训练集,选择整个达拉庙地区作为训练区域,同时也是预测区域。为了建立运行模糊证据权方法需要设置相关的参数,以GeoDAS为平台,设定预测面积单元为1 km<sup>2</sup>,选择43个已知矿床(点)作为训练图层。保存训练参数以备后用。

5.3 计算模糊证据权重

在训练参数设置的基础上,对各个证据图层进

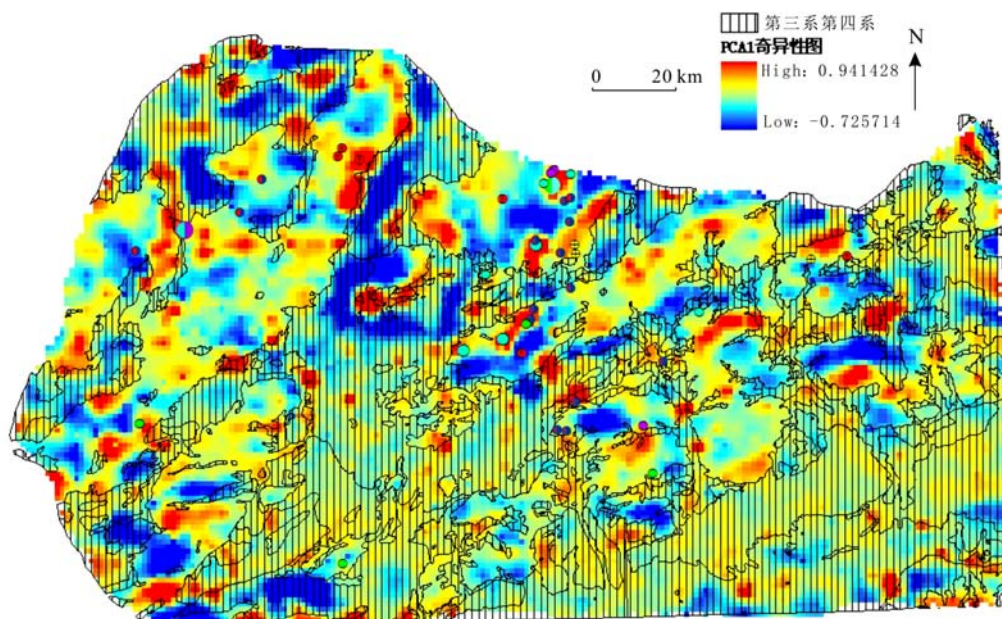


图7 内蒙古达来庙地区PCA1奇异性异常图

Fig.7 Singularity anomaly graph of PCA1 in Dalaimiao area, Inner Mongolia

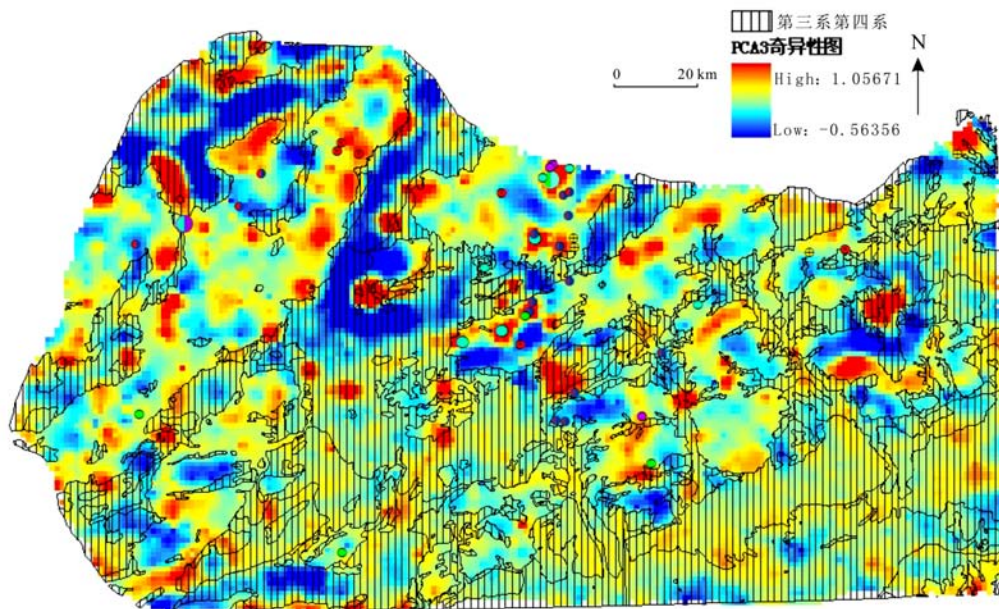


图8 内蒙古达来庙地区PCA3奇异性异常图

Fig.8 Singularity anomaly graph of PCA3 in Dalaimiao area, Inner Mongolia

表3 内蒙古达来庙地区有利预测变量表

Tab.3 Favorable prediction variable scale in Dalaimiao area, Inner Mongolia

编号	预测变量	有利度
1	综合断裂构造buffer分析	95%的矿床(点)分布于2 km缓冲区内
2	综合断裂相交点buffer分析	79%的矿床(点)分布于3 km缓冲区内
3	遥感解译铁染蚀变	蚀变异常与化探异常、已知矿床(点)吻合较好
4	遥感解译羟基蚀变	蚀变异常与已知矿床(点)吻合较好
5	石英脉等脉体buffer分析	多数矿床(点)与石英脉、石英斑岩脉等脉体有关
6	岩体与地层接触带buffer分析	76%的矿床(点)分布于3 km缓冲区内
7	地球化学PCA1主成分奇异性指数	异常高值区与已知矿床(点)吻合度高
8	地球化学PCA3主成分奇异性指数	异常高值区与已知矿床(点)吻合度高
9	重砂异常	高温矿物重砂对本区寻找钨钼矿床有利

行模糊证据权重的计算,每个用于预测的证据图层都是分类表示的,我们以化探PCA3主成分奇异性图层为例,根据栅格属性值大小,将全区自动分成19类,普通证据权方法一般是以对比度C与C的标准偏差S(C)的比值t(学生分布t值,  $t=C/S(C)$ )的极大值作为各证据层二值化的阈值,该阈值将各证据图层分成截然的二值图,即阈值之前的分类部分对成矿有利,赋值为1,阈值之后的分类部分对成矿不利,赋值为0。而对于模糊证据权,证据层将由隶属度函数(MSF)进行重分类,MSF可在闭区间[0,1]上任意取值,其图形表现为一条渐变曲线。一般根据t值大小来确定各分类(Value)的MSF取值,GeoDAS提供的曲线拟合功能能够实现MSF的自动取值(图9),表4中PCA3奇异图一列,分类值19~15隶属度MSF值为1,10~6为0,中间的14~11根据线性拟合分别得到了1~0之间的值。隶属度函数确定以后,便可以计算模糊证据权重以及相关的统计量。

其他证据图层的模糊证据权重计算方法同此,得到的MSF与模糊证据权重见表4。

5.4 后验概率计算

用于成矿预测的各个证据图层如图10,根据各证据图层的模糊证据权重,选择预测区与训练区相同,进行后验概率的计算。得到后验概率图(图11),

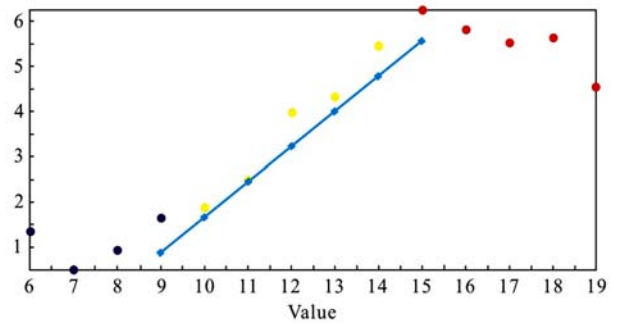


图9 PCA3 分类值Value—学生值t散点图

Fig.9 Scatter diagram of PCA3 classification of value and students value t

并对后验概率值进行分级。

5.5 成矿远景区预测

根据所得后验概率值,可以把研究区大致分为4级:A级,后验概率值为0.262~0.996,属于高有利地段,用红色色块表示;B级,后验概率值为0.168~0.262,属于中有利地段,用黄色色块表示;C级,后验概率值为0.023~0.168,属于低有利地段,用浅蓝色色块表示;D级,后验概率值为0~0.023,属于不利找矿地段,用白色色块表示(图11)。

根据后验概率大小、面积及矿床(点)的分布情况,在研究区共圈定25个成矿远景区(图11),其中I级远景区4个,II级远景区8个,III级远景区13个。

表4 各证据图层隶属度(MSF)与模糊证据权计算表

Tab.4 Table of membership of each evidence layer (MSF) and calculation of fuzzy weights of evidence

分类值 Value	PCA3 奇异图		PCA1 奇异图		断裂buffer		断裂交点buffer		岩体地层交界buffer		岩脉buffer		铁染蚀变		羟基蚀变		重砂异常	
	隶属度 MSF	证据 权重	隶属度 MSF	证据 权重	隶属度 MSF	证据 权重	隶属度 MSF	证据 权重	隶属度 MSF	证据 权重	隶属度 MSF	证据 权重	隶属度 MSF	证据 权重	隶属度 MSF	证据 权重	隶属度 MSF	证据 权重
1	-	-	-	-	1	0.38	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	0.7
2	-	-	-	-	1	0.38	-	-	1	0.58	1	1.6	0	1.64	0	-5.24	-	-
3	-	-	-	-	1	0.38	1	1.78	1	0.58	1	1.6	0	1.64	0	-5.24	-	-
4	-	-	0	-0.81	1	0.38	1	1.78	1	0.58	1	1.6	0	1.64	0	-5.24	-	-
5	-	-	0	-0.81	1	0.38	1	1.78	1	0.58	1	1.6	0	1.64	0	-5.24	-	-
6	0.0	-0.33	0	-0.81	1	0.38	1	1.78	1	0.58	1	1.6	1	1.08	0.33	1.58	-	-
7	0.0	-0.33	0	-0.81	1	0.38	1	1.78	1	0.58	1	1.6	1	1.08	0.67	1.73	-	-
8	0.0	-0.33	0	-0.81	1	0.38	1	1.78	1	0.58	1	1.6	1	1.08	1	1.79	-	-
9	0.0	-0.33	0	-0.81	0.8	0.36	1	1.78	1	0.58	1	1.6	1	1.08	1	1.79	-	-
10	0.0	-0.33	0	-0.81	0.6	0.31	1	1.78	1	0.58	1	1.6	1	1.08	1	1.79	-	-
11	0.2	-0.16	0.17	-0.64	0	-1.18	1	1.78	1	0.58	1	1.6	1	1.08	-	-	-	-
12	0.4	0.06	0.33	-0.44	0	-1.18	1	1.78	1	0.58	0.8	1.44	-	-	-	-	-	-
13	0.6	0.36	0.5	-0.18	-	-	1	1.61	1	0.58	0.6	1.25	-	-	-	-	-	-
14	0.8	0.83	0.67	0.18	-	-	1	1.39	1	0.58	0.4	1.01	-	-	-	-	-	-
15	1.0	1.86	0.83	0.7	-	-	0	1.11	1	0.58	0.2	0.72	-	-	-	-	-	-
16	1.0	1.86	1	2	-	-	0	0.71	1	0.5	0	0.32	-	-	-	-	-	-
17	1.0	1.86	1	2	-	-	0	0.04	0	0.31	0	0.32	-	-	-	-	-	-
18	1.0	1.86	1	2	-	-	0	0.04	0	-0.7	0	0.32	-	-	-	-	-	-
19	1.0	1.86	1	2	-	-	0	0.04	0	-0.7	0	0.32	-	-	-	-	-	-
20	-	-	-	-	-	-	0	0.04	0	-0.7	0	0.32	-	-	-	-	-	-

注:“-”表示无值



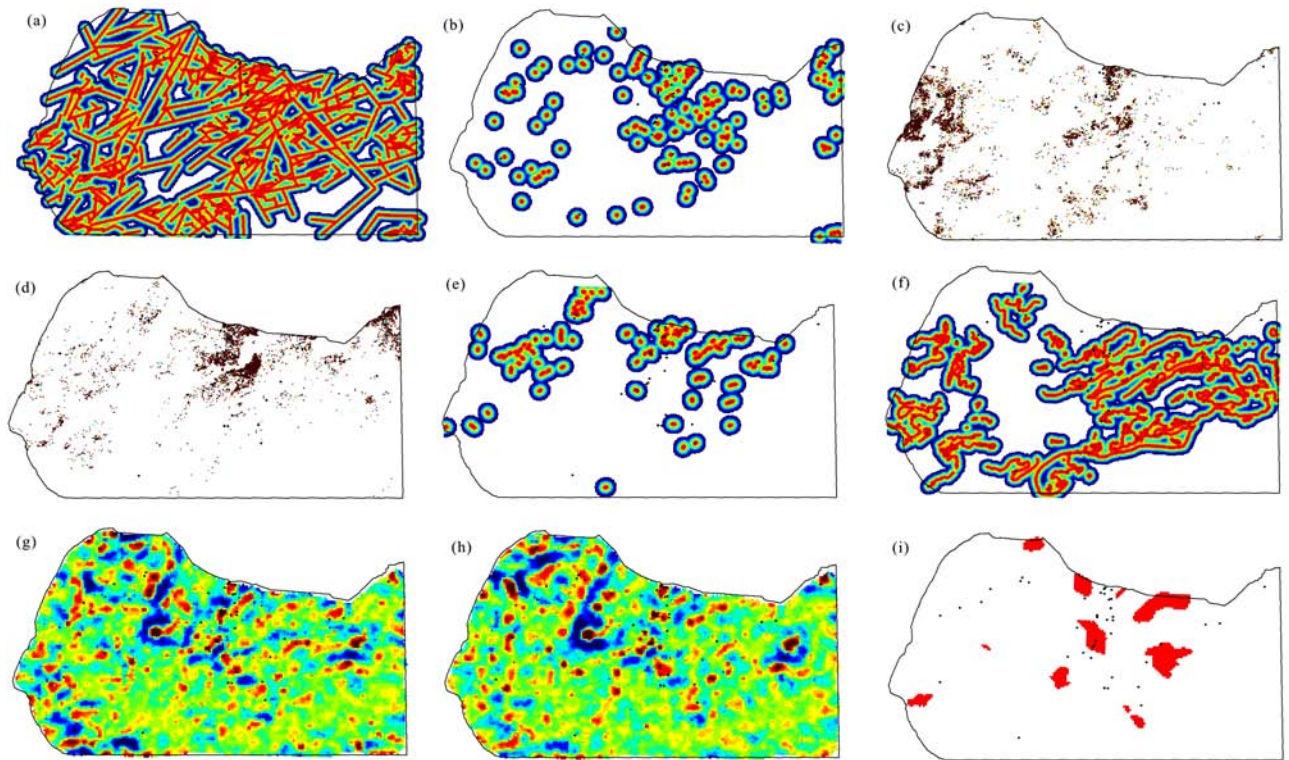


图10 用于达来庙地区成矿预测的证据图层

Fig.10 Evidence layers for mineral prediction in Dalaimiao area, Inner Mongolia

a.综合断裂构造buffer分析;b.综合断裂相交点buffer分析;c.遥感解译铁染蚀变;d.遥感解译羟基蚀变;e.石英脉、石英斑岩脉buffer分析;f.岩体与地层接触带buffer分析;g.地球化学PCA1主成分奇异性指数;h.地球化学PCA3主成分奇异性指数;i.重砂异常

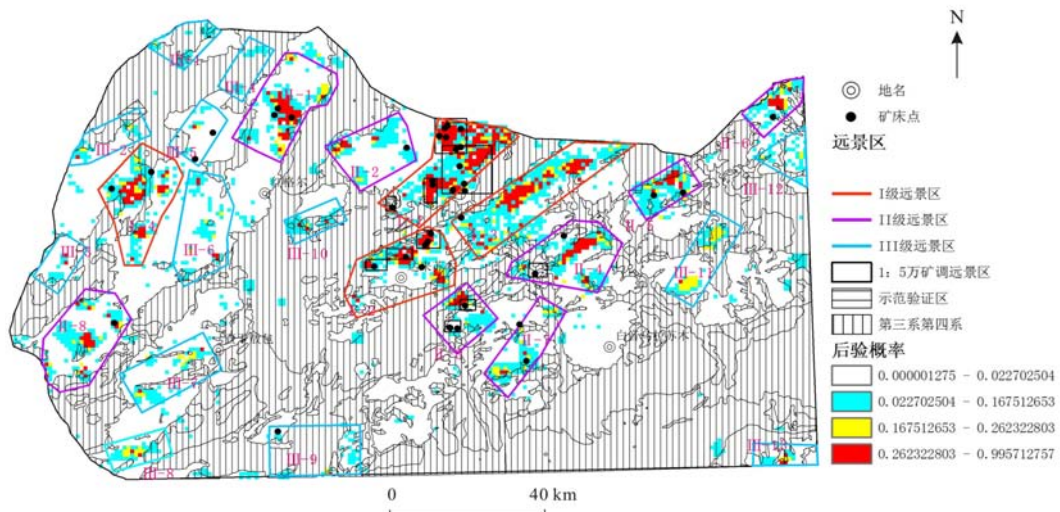


图11 达来庙地区找矿后验概率图及远景区分级图

Fig.11 Map of posterior probability and hierarchical prospective area in Dalaimiao area, Inner Mongolia

远景区呈NE向展布,与本区构造线方向一致。II-3、II-4、II-5、II-6四个远景区呈现非常好的等距性分布,而且4个远景区规模、形态都非常相似,可能受区域NE向构造-岩浆-成矿事件控制。此外,III级远景区虽整体找矿前景不如I、II级远景区大,但分布在

覆盖区中的III级远景区应该加以重视,也是本次预测工作的重点,对以后覆盖区找矿起到指示作用。

### 6 结论

通过对达来庙地区已知矿床(点)地质特征、控

矿要素的总结,建立了研究区钼多金属矿综合信息找矿模型。

利用非线性理论、奇异性理论和分形滤波技术实现了对隐伏构造、隐伏岩体、物化探异常等弱信息的提取。

确定9个预测变量,基于模糊证据权方法进行综合信息矿产预测,圈定I级远景区4个,II级远景区8个,III级远景区13个。远景区总体呈NE向展布,部分具有等距性分布特征,认为可能受区域NE向构造-岩浆-成矿事件的控制,并指出在草原覆盖区域圈定的远景区应加以重视,对覆盖区找矿起到指示作用。

#### 参考文献:

- [1] 邵积东,王守光,赵文涛,等.内蒙古中部地区重要成矿区带成矿地质特征及找矿潜力分析[J].西部资源,2008(01):59-61.
- [2] 陶继雄,王弢,陈郑辉,等.内蒙古苏尼特左旗乌兰德勒钼铜多金属矿床辉钼矿-钼-钨同位素定年及其地质特征[J].岩矿测试,2009,28(03):249-253.
- [3] 赵志军,刘立华,魏雅玲,等.内蒙古达拉庙包钼多金属矿地质特征及找矿潜力浅析[J].西部资源,2014(02):102-105.
- [4] 刘翼飞,聂凤军,江思宏,等.内蒙古苏尼特左旗准苏吉花钼矿床成岩成矿年代学及其地质意义[J].矿床地质,2012,31(01):119-128.
- [5] 陶继雄,王弢,陈郑辉,等.内蒙古乌兰德勒钼铜多金属矿区细粒二长花岗岩SHRIMP锆石U-Pb年龄及意义[J].地质通报,2017,36(09):1525-1530.
- [6] 杨增海,王建平,刘家军,等.内蒙古乌日尼图钼铜矿床成矿流体特征及地质意义[J].地球科学(中国地质大学学报),2012,37(06):1268-1278.
- [7] 成秋明.非线性成矿预测理论:多重分形奇异性-广义自相似性-分形谱系模型与方法[J].地球科学,2006(03):337-348.
- [8] 成秋明,赵鹏大,陈建国,等.奇异性理论在个旧锡铜矿产资源预测中的应用:成矿弱信息提取和复合信息分解[J].地球科学(中国地质大学学报),2009,34(02):232-242.
- [9] Raines G L. Are Fractal Dimensions of the Spatial Distribution of Mineral Deposits Meaningful?[J].Natural Resources Research.2008,17(2):87.
- [10] Cheng Q. Non-Linear Theory and Power-Law Models for Information Integration and Mineral Resources Quantitative Assessments[J]. Mathematical Geosciences. 2008, 40 (5): 503-532.
- [11] Agterberg F P. Computer programs for mineral exploration [J]. Science. 1989, 245(4913): 76-81.
- [12] Bonhamcarter G. Geographic information systems for geoscientists : modelling with GIS[J].Computer Methods in the Geosciences Pergamon/elsevier. 1994, 4(4): 1-2.
- [13] 成秋明,赵鹏大,张生元,等.奇异性理论在个旧锡铜矿产资源预测中的应用:综合信息集成与靶区圈定[J].地球科学(中国地质大学学报),2009,34(02):243-252.
- [14] 滕菲,张燕,张素荣,等.利用证据权重法进行综合信息矿产资源预测—以大兴安岭北部地区为例[J].地质调查与研究,2014,37(4):269-273.
- [15] 陈永清,夏庆霖,黄静宁,等.“证据权”法在西南“三江”南段矿产资源评价中的应用[J].中国地质,2007,34(1):132-141.
- [16] 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.
- [17] Cheng Q. GIS-based multifractal anomaly analysis for prediction of mineralization and mineral deposits[M].2006: 285-296.
- [18] Cheng Q. Non-Linear Theory and Power-Law Models for Information Integration and Mineral Resources Quantitative Assessments[J]. Mathematical Geosciences. 2008, 40 (5): 503-532.
- [19] 成秋明,陈志军,Ali Khaled.模糊证据权方法在镇沅(老王寨)地区金矿资源评价中的应用[J].地球科学(中国地质大学学报),2007(02):175-184.
- [20] 成秋明,张生元,左仁广,等.多重分形滤波方法和地球化学信息提取技术与进展[J].地学前缘,2009,16(02):185-198.
- [21] 张生元,成秋明,张素萍,等.加权证据权模型和逐步证据权模型及其在个旧锡铜矿产资源预测中的应用[J].地球科学(中国地质大学学报),2009,34(02):281-286.
- [22] 成秋明.覆盖区矿产综合预测思路与方法[J].地球科学(中国地质大学学报),2012,37(06):1109-1125.
- [23] 周顶,陈永清,赵彬彬.奇异值分解技术及地球化学块体方法在南黄岗—甘珠尔庙成矿带找矿中的应用[J].中国地质,2014,41(2):621-637.
- [24] 陶继雄,李文圣,柴辉,等.内蒙古苏尼特左旗白音乌拉地区霓石碱性花岗岩地质特征及构造环境[J].地质调查与研究,2017,40(01):13-21.
- [25] 田强国,吴煜,高凯,等.内蒙古苏尼特左旗阿尔善黑云二长花岗岩LA-ICP-MS锆石U-Pb年龄及其地质意义[J].地质调查与研究,2017,40(04):263-273.
- [26] 杨永胜,孙柏年,康鸿杰,等.内蒙古苏尼特左旗北大布锡勒图岩体主微量元素地球化学特征及成因探讨[J].中国地质,2011,38(2):301-316.
- [27] 白珏,张可.内蒙古乌日尼图钼铜矿床辉钼矿-钼-钨同位素定年及其地质意义[J].矿产勘查,2013,4(06):671-677.
- [28] 杨增海,王建平,刘家军,等.内蒙古苏尼特左旗乌日尼图钼铜矿床同位素地球化学特征[J].现代地质,2013,27(01):13-23.
- [29] 孔维琼,刘翠,邓晋福,等.内蒙古二连浩特地区乌花敖包钼矿区火成岩特征和LA-ICP MS锆石年代学研究[J].地学前缘,2012,19(05):123-135.

# Application of nonlinear theory and fuzzy weights of evidence method in metallogenic prediction for Mo polymetallic deposits in the Dalaimiao grassland-covered area, Inner Mongolia

WANG Jia-ying<sup>1,2</sup>, ZHANG Xiao-jun<sup>3\*</sup>, YAO Chun-liang<sup>3</sup>, ZHANG Qi<sup>1,2</sup>,  
XIE Yu<sup>1,2</sup>, LI Guang-yao<sup>1,2</sup>, DING ning<sup>4</sup>

(1. Tianjin Center, China Geological Survey, Tianjin 300170, China;

2. North China Center for Geoscience Innovation Precambrian Research Centre, China Geological Survey, Tianjin 300170, China;

3. Faculty of Earth Resources, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China;

4. The First Monitoring and Application Center, China Earthquake Administration Tianjin 300180, China)

**Abstract:** The Dalimiao area of Inner Mongolia is an important molybdenum polymetallic mineralization area, covering an area of 58.44% of the total area of the study area. In this paper, the geological characteristics and ore controlling elements of the known deposits (points) in Dalaimiao area are summarized, and a comprehensive information ore-prospecting model for molybdenum polymetallic deposits in the study area is established. On the platform of GeoDAS GIS, the weak information such as hidden structure, hidden rock mass and physicochemical exploration anomaly can be extracted by using nonlinear theory, singularity theory and fractal filtering technology. Based on the construction of ore-prospecting model and the extraction of ore-prospecting information, comprehensive information mineral prediction based on fuzzy evidential weight method was carried out by the 9 prediction variables, and 25 potential ore-forming areas were delineated, which is of guiding significance for ore-prospecting in the covered areas.

**Key words:** prospecting model; mineral prediction; nonlinear theory; fuzzy weights of evidence; Dalaimiao

## 《地质调查与研究》征订启事

经国家科委和新闻出版署批准, 我刊《前寒武纪研究进展》于2003年起更名为《地质调查与研究》。办刊宗旨: 本刊为地质科学领域中的学术性刊物, 执行党的基本路线及国家的出版政策法规, 坚持“百花齐放, 百家争鸣”的双百方针, 面向地质调查和研究工作, 为地质调查和研究成果提供交流载体, 推动我国地质调查和研究工作的开展, 为我国的经济建设和发展服务。主要刊登内容: 地质调查和研究中的新认识、新成果、新进展, 地区性、专业性焦点、难点问题讨论, 新理论、新技术、新方法、新工艺的研究和引进。内容涉及基础地质、矿床地质、同位素地质年代、第四纪地质、水资源与环境、灾害地质、城市地质、农业地质、地球物理勘查、地球化学勘查、地质调查信息等领域, 以及国民经济和社会发展对地质工作的需求等方面的文章, 亦刊登国外相关领域的研究动态和成果。主要开设栏目: 基础地质、矿产资源、水文地质、灾害地质、环境地质、技术方法、地质调查成果快报等, 非常适合地质工作者、地质院校师生和有关单位的管理者阅读参考。

本刊为80页的季刊, 每期约12万字, 铜版纸印刷, 公开发行, 可全年订阅, 也可分期订阅。订阅办法: 1) 单位和个人均可向我刊编辑部订阅; 2) 邮局汇款地址: 天津市河东区大直沽八号路4号编辑部, 邮编: 300170; 3) 银行信汇: 天津市河东区工商行大直沽分理处, 账号: 0302040109006621382。

联系电话: 022-84112950。

本刊编辑部