

doi:10.3799/dqkx.2012.133

构建覆盖区综合地质找矿思路和流程的探索： 以内蒙古锡林郭勒西北部为例

徐启东^{1,2}, 张晓军^{1,2}, 尚恒胜³, 杨振¹, 左仁广², 姚春亮¹, 刘锐¹

1. 中国地质大学资源学院, 湖北武汉 430074

2. 中国地质大学地质过程与矿产资源国家重点实验室, 湖北武汉 430074

3. 内蒙古自治区地质调查院, 内蒙古呼和浩特 010020

摘要: 覆盖区矿产预测和地质找矿是一项具有探索性的研究课题, 需要解决覆盖区各种致矿信息存在的“弱缓”、“叠加复合”、“缺失和不完整”等缺陷, 从而有效地获得指示覆盖层之下矿化体的致矿信息. 识别优势矿种和矿化类型、建立区域成矿—找矿模型, 采用多重分形预测理论和方法, 都将有利于强化和提取现有资料和数据中的致矿信息. 提出了一个初步的覆盖区综合地质找矿流程框架, 并结合实际研究工作认识, 以内蒙古锡林郭勒西北部为例, 介绍了采用这种覆盖区综合地质找矿流程进行草原覆盖区综合地质找矿的做法及其初步结果.

关键词: 草原覆盖区; 似斑岩型矿床; 成矿—找矿模型; 非线性定量预测; 区域成矿学; 成矿要素.

中图分类号: P612; P622

文章编号: 1000-2383(2012)06-1252-07

收稿日期: 2012-07-19

New Approach of Integrated Geological Prospection in Covered Areas: A Case Study from Northwestern Xilinguole, Inner Mongolia

XU Qi-dong^{1,2}, ZHANG Xiao-jun^{1,2}, SHANG Heng-sheng³, YANG Zhen¹,
ZUO Ren-guang², YAO Chun-liang¹, LIU Rui¹

1. Faculty of Earth Resources, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

2. State Key Laboratory of Geological Processes and Mineral Resources, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

3. Geological Survey Institute of Inner Mongolia, Hohhot 010020, China

Abstract: Geological prospection in covered areas is an important issue, which is confronted with a series of problems to be worked out, such as overcoming ore-generated messages faults ranging from weak to sluggish, overlapping, absent to uncompleted faults and to gain effectively the ore-generated information associated with ore bodies in the covered areas. Identifying the main ore elements and type of mineralization, establishing a regional model of ore genesis-prospection and using the method of nonlinear integrated prediction should be better to strengthen and extract mineralized information from the existing geological data. A primary framework of a new approach on integrated geological prospection in covered areas is presented in this paper. With a case study of Northwestern Xilinguole of Inner Mongolia, it shows the approach and result in detail of its application to grassland-covered area for integrated geological prospection.

Key words: grassland-covered area; porphyry-like deposit; ore genesis-prospecting model; nonlinear integrated prediction; regional metallogeny; ore-forming factor.

在不同的地理及地质覆盖区开展矿产预测和地质找矿, 已经是世界上许多国家都在进行探索的工作方向与目标(Butt *et al.*, 2000; 谢学锦和王学求,

2003; Cameron *et al.*, 2004; 庄道泽等, 2004; 张义等, 2005; Mokhtari *et al.*, 2009; 成秋明, 2011; Muntean and Taufen, 2011; Anand and Robert-

基金项目: 中国地质调查局综合研究项目(No. 1212011085470); 教育部长江学者和创新团队发展计划(No. IRT0755).

作者简介: 徐启东(1957—), 男, 教授, 主要从事矿床学和地球化学方面的研究. E-mail: xuqd@cug.edu.cn

son, 2012). 从地质历史的发展来看, 中国大陆是一个区域构造活动性大于稳定性的地域, 各种不同的造山事件使得不同规模的新生代盆地和山间夷平堆积发育, 造成了不同规模的新生代地层和堆积物覆盖了大面积的前新生代地质体, 形成了大量的地理覆盖区. 据估计, 在这类地理覆盖区中所发现各类金属矿产地的数量仅是非地理覆盖区的 5% 左右, 具有非常大的矿产资源潜力. 因此, 在地表矿产勘查几近完成时, 开展不同类型地理覆盖区的矿产预测和地质找矿, 就是一个必然的选择.

1 覆盖区地质找矿的基本问题

覆盖区地质找矿同样涉及找什么、何处找、如何找的基本问题. 但由于覆盖层的影响, 地表地质不能简单指示深部地质特征, 显现的各种致矿信息存在“弱缓”、“叠加复合”、“缺失和不完整”等缺陷(成秋明等, 2010, 中国地质调查局覆盖区矿产综合预测计划项目 2010 年工作进展汇报), 需要解剖其中的问题, 采用不同的研究思路和技术方法去改善和突破这些制约.

何处找和找什么? 这里涉及 2 个层面: 一是选择在哪个区域开展地质找矿工作, 二是在一个特定的区域内如何进行地质找矿, 它们都是区域成矿学问题. 对于后一个层面而言, 对一个特定区域的成矿地质背景进行深入研究, 理清这一区域不同时期主要构造事件性质和产物的空间结构, 获得这一特定区域可能发生的地质—地球化学过程和物质的再循环方式对成矿系统提供的边界条件和限制, 可以给出这一区域成矿地质背景的基本约束. 不同的构造事件性质和机制与不同成矿系统之间的耦合, 将会在不同的地域形成优势的矿化类型和矿种. 判断和识别优势矿化类型和矿种及相关矿化空间分布间的成因关系, 建立区域成矿—找矿模型, 提炼区域找矿模型的主要成矿要素, 可以强化覆盖区成矿地质条件有利地段致矿信息的显示程度和弱化致矿信息“叠加复合”的效应. 因此, 开展上述的区域成矿地质背景和区域成矿—找矿模型研究, 就有可能为勘查区覆盖地段建立预测数学模型、综合信息成矿预测提供成矿学依据和约束条件.

如何找? 覆盖区地质找矿问题存在两类研究方向. 一是采用一些专门或特殊的方法和技术来强化各种矿化异常信息. 如在覆盖厚度不大的情况下, 采用甚低频电磁方法等发现和查明与矿化有关的断

裂、破碎带、蚀变这样一些控矿要素来间接找矿(董英君等, 2008; 程培生和汤正江, 2009); 对土壤化探样品进行元素动态测量分析等深穿透地球化学方法来强化异常、圈定矿化异常范围(Mann *et al.*, 1998; 谢学锦和王学求, 2003; 王硕等, 2011). 二是采用各种数据处理方法来改善和强化各种矿化异常信息. 根据深部矿化体的成矿及相关元素由于蒸发和毛细管迁移等机理可以不同程度地进入到上部覆盖层的认识, 对覆盖区已有的各种地质—地球物理—地球化学等资料和数据再进行再开发, 进一步强化和提取这类有用的致矿信息, 用于地质找矿. 成秋明等提出的以“局部奇异性—广义自相似性—分形谱系”为核心的多重分形矿产资源预测理论和方法, 为分解复杂背景和叠加异常、弱异常提取等问题提供了新的思路和方法, 成为了“覆盖区矿产综合预测”项目的主要学术思想, 就是第 2 类研究方向的典型做法(成秋明, 2007; Cheng, 2008; 成秋明等, 2009a).

2 覆盖区综合地质找矿的思路和流程

采用各种地质—地球物理—地球化学—遥感资料和数据对地理及地质覆盖区进行矿产预测和地质找矿都属于间接找矿工作, 这类间接找矿工作的实质是对具备基本的成矿地质条件或称之为基本的成矿要素及其组合地段的识别. 矿床的形成是一类非平衡态的随机事件, 存在某类矿床形成的基本成矿要素及其组合的地段, 未必一定形成具有工业意义的这类矿床, 但通过对基本的成矿要素及其组合地段的识别, 将后续工作聚焦在这些具备基本的成矿要素及其组合的地段, 至少可以提高寻找这类矿床的概率. 当然, 对所识别出来的这些具备基本的成矿要素及其组合的地段进一步进行其他方面的识别和分类, 优中选优, 则可以进一步提高找矿概率.

从上述认识出发, 笔者认为, 对地理覆盖区进行综合地质找矿工作, 可以大致按照 3 个步骤进行: (1) 在中小比例尺资料和数据尺度, 主要对研究区内优势矿床类型基本成矿要素及其组合地段进行识别和确定; (2) 根据优势矿床类型找矿模型的成矿要素组合和周边地质条件, 对所识别出来的基本成矿要素及其组合地段进行进一步筛选, 优中选优, 分级选出其中有利成矿要素及其组合地段, 对其进行中大比例尺资料和数据尺度的地质—物探—化探工作, 开展成矿要素和找矿标志的精细探查, 探查覆盖区

深部重要地质体形态或构造位置的空间产状等信息,为验证靶区的选定提供依据;(3)对成矿要素和标志的精细探查结果较好地地段进行选择,对与成矿要素和找矿标志有较好响应的各种异常复合部位进行工程验证,确定基本成矿要素及其组合地段的存在,从中发现具有工业潜力的矿产地,提供后续的普查找矿目标。

结合对大兴安岭南草原覆盖区进行矿产预测和地质找矿研究工作的实践,初步提出一个覆盖区综合地质找矿流程的框架(图 1):

(1)预测工作区需要具备相应尺度、配套的地质—地物—地化—遥感等资料和数据,1:20 万~1:5 万的地质图、区域化探数据、航磁及重力数据属于基础资料,这是预测工作的前提。

(2)区域成矿地质背景的深入研究,提供区域构造演化、主要构造事件性质和产物的分布等认识,这些对成矿系统发育的边界条件和优势矿化类型的确定等,提供了区域成矿学方面的基本约束。

(3)区域优势矿化类型成矿—找矿模型的建立和基本成矿要素的确定。根据区域优势矿种和矿化类型的成因类型提供的基本成矿条件,结合所在区域的成矿背景,建立符合区域成矿地质背景的区域找矿模型,确定基本的成矿要素及其组合,由此可转化构建成矿预测的数学模型,这是后续成矿预测和地质找矿的基础。

(4)采用预测工作区地质图件、区域化探数据、航磁及重力数据和成矿预测的数学模型,应用多重分形矿产资源预测方法和软件(GeoDAS)计算综合异常和推断深部地质体,从获得的一批预测模型的综合异常在地质图件中的分布位置,结合周边地质条件和基本的成矿要素及其组合间的关联程度,筛选确定下一步开展成矿要素精细探查的选区。

(5)在成矿要素精细探查选区开展中大比例尺地质—地物—地化等工作,选择与不同矿床类型矿床物性和有效指示元素及其组合相适应的地物和地化方法,根据各种异常的分布和分带特征,结合有关元素迁移进入覆盖层的规律和与相似矿床的这些异常特征进行对比,选取能够较好显示基本的成矿要素及其组合有利空间配置并反映相应矿化的地段,作为进一步工程验证的目标靶区。

(6)靶区的工程验证。采用钻探等重型山地工程对目标靶区进行施工,获取岩心等直接地质实物,系统整理,识别和比较基本的成矿要素空间配置及其矿化显示与区域找矿模型之间的吻合程度,或验证

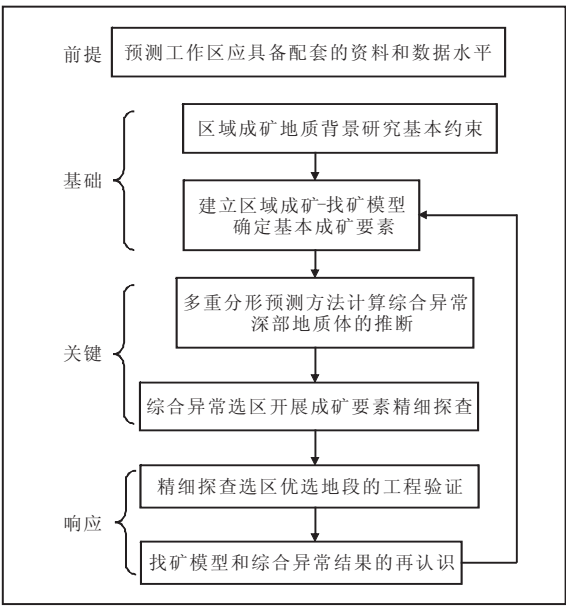


图 1 覆盖区综合地质找矿流程的框架
Fig. 1 Framework of circuit on integrated geological prospecting in covered areas

结果不理想的分析与反思。如果达到矿产地要求,则按规定提交有关部门开展后续地勘工作。

(7)区域找矿模型的修改和有效的找矿标志组合筛选,综合异常结果的再认识,使之能够更好地用于后续的地质找矿工作。

3 内蒙古锡林郭勒西北部综合地质找矿的实践

内蒙古锡林郭勒西北部在晚古生代古亚洲洋闭合之前,属于西伯利亚陆块群的一部分,奥陶系和泥盆系的海相沉积岩和火山—沉积岩类组成的构造岩片被海西期的花岗岩类侵入体交织在一起,构成了这一地区的基底岩系。中生代的陆相沉积和陆相—火山沉积形成了一系列的山间堆积盆地,这一时期燕山早期花岗岩类侵入到以上各类岩石之中,燕山晚期的花岗岩类则呈隐伏状小岩体出现在地表以下深部。新生代的大规模断陷盆地沉积,造成了本地区大面积的地理覆盖(图 2)。

研究区内已经具备了 1:20 万的地质图件和 1:20 万的水系沉积物地球化学测量分析的网格化数据和相应的航磁和重力测量的网格化数据,部分 1:5 万的地质图件和区内已经发现和进行勘查工作的一组矿床和矿点的系统资料,满足了在该区进行上述矿产预测和地质找矿研究工作的前提。

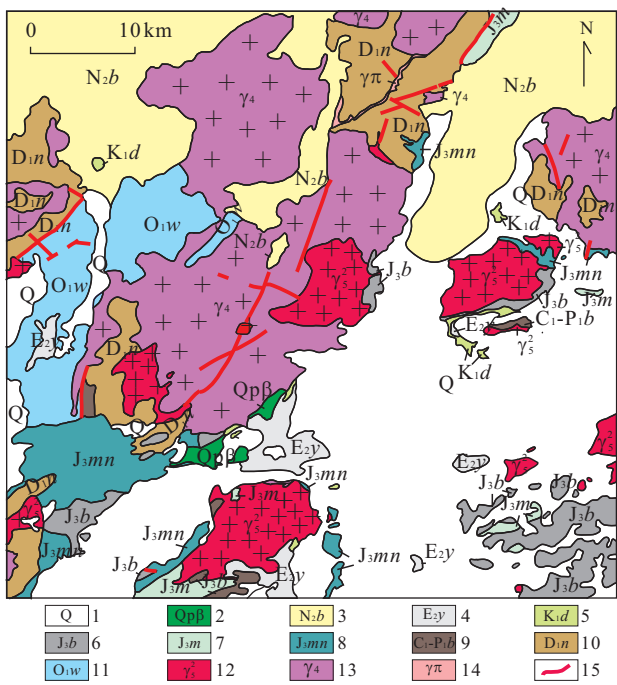


图 2 内蒙古锡林郭勒西北部地区地质图(根据相关 1 : 20 万地质图修编)

Fig. 2 The geological map of Northwestern Xilinguole, Inner Mongolia

1. 第四系;2. 第四纪玄武岩;3. 宝格达乌拉组;4. 伊尔丁曼哈组;5. 大磨拐河组;6. 白音高老组;7. 满克头鄂博组;8. 马尼吐组;9. 宝力高庙组;10. 泥鳅河组;11. 乌宾敖包组;12. 燕山早期花岗岩;13. 海西期花岗岩;14. 脉岩;15. 断层

对该区的成矿地质背景进行分析研究表明,二连浩特—东乌旗成矿带的矿化以 Zn、Cu、Ag、W、Sn、Mo 等多金属为主,主要为各种热液矿化,典型的有朝不愣 Zn-Fe 多金属矿床、阿尔哈达 Ag-Pb-Zn 矿床、吉林宝力格 Ag 矿床和沙麦 W 矿床等,它们的形成时代都为中生代,与燕山期的岩浆活动有着不同程度的关联. 这是由于进入中生代,随着中国东部不断受到古太平洋板块深部作用和中国东部大陆拼合后隆升的共同影响,大面积发育了晚侏罗世—早白垩世的北东向构造—岩浆带叠加于古生代造山带之上的结果(李兆鼎等,2003; 李锦轶,2004; 刘建明等,2004; 葛肖虹和马文璞,2007; 葛良胜等,2009; 张允平和李景春,2010). 近年来,在锡林郭勒西北部地区陆续发现乌日尼图、乌兰得勒、乌兰敖包和准苏吉花等热液型 Mo-W 多金属矿床,说明二连浩特—东乌旗成矿带发育的金属矿化类型和矿种更为丰富、前景广阔,也表明这一地带不同地段存在成矿作用的差异性. 位于西段的锡林郭勒西北部地区 Mo、W 可能是优势矿种,以乌日尼图矿床为代表的矿床

类型可能是区域发育的主要矿床类型. 笔者确定,将此类矿化用来建立符合区域成矿地质背景的区域找矿模型.

对乌日尼图矿床的研究表明,这是一个与燕山晚期隐伏的细粒花岗岩(140 Ma 左右侵入)有关的中高温热液矿床,细粒花岗岩的顶部近接触带部分普遍发育浸染状的辉钼矿化,在其近接触带和远离接触带的围岩中(围岩可以是奥陶纪和泥盆纪的变质沉积岩类,其他矿床的围岩也可为海西期和燕山早期的花岗岩类),矿化发育在这些围岩中北东走向的一系列低角度密集断裂裂隙带中,呈石英—氧化物—硫化物细脉及网脉产出,辉钼矿、白钨矿、黑钨矿、黄铜矿、闪锌矿等分布其中,蚀变以硅化、绢云母化、绿泥石化为主. 从已圈定的矿体可知,具有近岩体以 Mo 矿化为主、远岩体以 W 矿化为主的分带性. 大致具有广义的斑岩型矿床的某些特征,可称之为似斑岩型矿床或称乌日尼图式矿床. 结合乌兰德勒、乌兰敖包和准苏吉花等矿床的资料,笔者认为,深部燕山晚期小岩体与其上部和边部断裂裂隙带为这类矿化的基本成矿要素,应是用于中小比例尺矿产预测和地质找矿的基本找矿模型.

与传统的做法不同,多重分形矿产资源预测理论和方法将矿化找矿模型的基本成矿要素作为分解复杂背景和叠加异常、弱异常提取的原点,以此构筑对应于不同成矿要素的不同化探和物探等数据的提取和组合结构,形成相应的综合异常值的融合计算方程,获得综合异常图(成秋明等,2009b),这在相关研究中取得了较好效果(Gonçalves *et al.*, 2001; 邹林等,2004; 李文昌等,2006). 图 3 表述了乌日尼

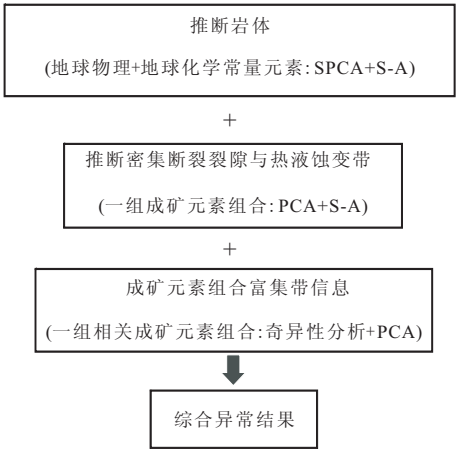


图 3 乌日尼图式矿化综合异常的构成

Fig. 3 Constitute of integrated anomaly on porphyry-like pattern of mineralization

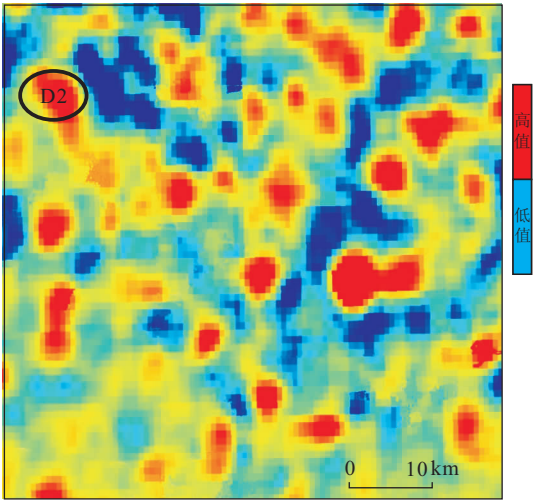


图 4 内蒙古锡林郭勒西北部地区乌日尼图式矿化的综合异常图(图中 D2 为选择进行成矿要素精细探查的选区)

Fig. 4 The integrated anomaly map of porphyry-like deposit from northwestern Xilinguole, Inner Mongolia

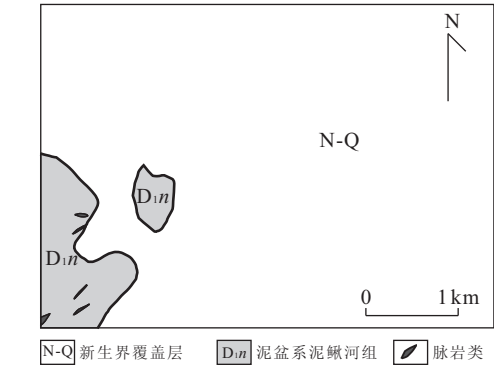


图 5 D2 成矿要素精细探查选区

Fig. 5 D2 advanced exploring position of ore-forming factor



图 6 D2 成矿要素精细探查选区的地表景观

Fig. 6 The surface of D2 advanced exploring position of ore-forming factor

图式矿化综合异常的构成融合的结构,主要是从如何推断岩体、如何推断密集断裂裂隙带、如何指示矿化富集部位这 3 个方面来融合计算综合异常值. 采用 GeoDAS 软件计算获得了锡林郭勒西北部地区乌日尼图式矿化区域综合异常图(图 4),对图中综合异常高值分布位置进行解剖分析,根据周边地质条件,常规区域化探异常与多重分形计算的化探异常及综合异常的比较,推断岩体的识别等找矿标志含义,从预测研究区内的综合异常高值分布位置中提出了 12 个可进行成矿要素精细探查的选区. 其中图 4 中标定的 D2 选区作为首选,这是因为该选区在常规区域化探异常中无显示,但在多重分形计算的化探异常及综合异常中都有良好的显示,而多重分形计算的岩体推断图中没有明显显示,这说明海西期和燕山早期的花岗岩类没有对这处综合异常造成明显影响,该处综合异常主要反映了推断密集断裂裂隙带和指示矿化富集部位信息的良好融合,也可能间接指示了相关的燕山晚期隐伏细粒花岗岩体的存在. 因此,D2 选区可能更好地显示了乌日尼图式矿化的基本成矿要素组合特征.

图 5 是对 D2 选区框定范围进行 1 : 5 万地质填图的结果,图 6 是该选区中部的覆盖面貌. 从这两图中可以清楚地看到,仅在南部一角有少量 D_{1n} 的变质砂板岩出露外,90% 以上的部分都被新生界所覆盖. 笔者对该选区开展了 12 个金属元素的 1 : 2.5 万覆盖层土壤地球化学测量,其中 Mo、W、Cu 出现了较好的面状分布集中区,虽然含量值范围较之基岩区常规的区域化探含量范围要低,但与已知的乌日尼图矿区的化探结果相当. 图 7 是根据乌日尼图矿区经验圈定的 Mo、W、Cu 这 3 个成矿元素的异常范围,参考这一化探异常结果,布置了 3 条高精度磁法剖面 and EH4 剖面,探查深部地质体的性质. 根据上述结果的解译和分析,选定了进行钻探工程验证的位置,这一步骤的工作正在开展.

虽然后续的步骤尚未完成,但对草原覆盖区采用新的思路和流程进行综合地质找矿探索的主要和关键性步骤已经完成,并取得了初步的效果. 建立区域优势矿化类型的成矿—找矿模型、采用多重分形矿产资源预测理论和方法来改善和强化各种矿化异常信息的研究方向,对于充分利用现有的各类 1 : 20 万~1 : 5 万的资料和数据,对它们进行再开发,应该是一条经济且有效的覆盖区矿产勘查路径,值得继续深化研究和在实际勘查工作中推广应用,以期形成一套更为完善和实用的方案和工作流程.

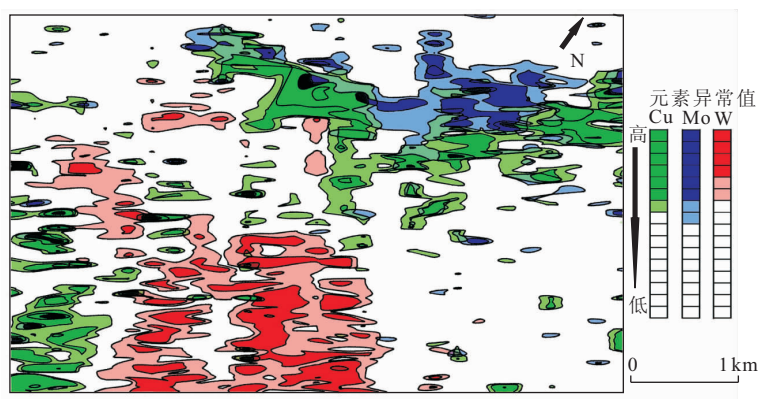


图 7 D2 成矿要素精细探查选区 1 : 2.5 万土壤化探结果中的 Mo, W, Cu 异常分布

Fig. 7 Mo, W, Cu geochemical anomalies of D2 advanced exploring position

References

- Anand, R. R., Robertson, I. D. M., 2012. The role of mineralogy and geochemistry in forming anomalies on interfaces and in areas of deep basin cover: implications for exploration. *Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis*, 12(1): 45–66. doi: 10.1144/1467-7873/10-RA-067
- Butt, C. R. M., Lintern, M. J., Anand, R. R., 2000. Evolution of regolith and landscapes in deeply weathered terrain: implications for geochemical exploration. *Ore Geology Reviews*, 16(3–4): 167–183. doi: 10.1016/S0169-1368(99)00029-3
- Cameron, E. M., Hamilton, S. M., Leybourne, M. I., et al., 2004. Finding deeply buried deposits using geochemistry. *Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis*, 4(1): 7–32. doi: 10.1144/1467-7873/03-019
- Cheng, P. S., Tang, Z. J., 2009. The application of the integrated geophysical-geochemical technique to the anomaly inspection in the Da Hinggan Ling landscape region. *Geophysical & Geochemical Exploration*, 33(5): 497–500 (in Chinese with English abstract).
- Cheng, Q. M., 2007. Singular mineralization processes and mineral resources quantitative prediction: new theories and methods. *Earth Science Frontiers*, 14(5): 42–53 (in Chinese with English abstract).
- Cheng, Q. M., 2008. Non-linear theory and power-law models for information integration and mineral resources quantitative assessments. *Mathematical Geosciences*, 40(5): 503–532. doi: 10.1007/s11004-008-9172-6
- Cheng, Q. M., 2011. Singularity modeling of geo-anomalies and recognition of anomalies caused by buried sources. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 36(2): 307–316 (in Chinese with English abstract).
- Cheng, Q. M., Zhang, S. Y., Zuo, R. G., et al., 2009a. Progress of multifractal filtering techniques and their applications in geochemical information extraction. *Earth Science Frontiers*, 16(2): 185–198 (in Chinese with English abstract).
- Cheng, Q. M., Zhao, P. D., Zhang, S. Y., et al., 2009b. Application of singularity theory in prediction of tin and copper mineral deposits in Gejiu district, Yunnan, China: information integration and delineation of mineral exploration targets. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 34(2): 243–252 (in Chinese with English abstract).
- Dong, Y. J., Wang, G., Song, Y. K., et al., 2008. Application of very low frequency electromagnetic method to exploration work in grassland-capped areas. *Mineral Deposits*, 27(1): 49–56 (in Chinese with English abstract).
- Ge, L. S., Zhang, W. Z., Yuan, T. S., et al., 2009. Gold and multimetal metallization and exploration in east part of south Gobi-Dongwuqi metallogenic belt across the border of China and Mongolia. Geological Publishing House, Beijing, 12–141 (in Chinese).
- Ge, X. H., Ma, W. P., 2007. Mesozoic-Cenozoic tectonic framework of southern Northeast Asia. *Geology in China*, 34(2): 212–228 (in Chinese with English abstract).
- Gonçalves, M. A., Mateus, A., Oliveira, V., 2001. Geochemical anomaly separation by multifractal modelling. *Journal of Geochemical Exploration*, 72(2): 91–114. doi: 10.1016/S0375-6742(01)00156-X
- Li, J. Y., 2004. Structural characteristics of crustal “mosaicking and superimposition” of the continent of China and its evolution. *Geological Bulletin of China*, 23(9–10): 986–1004 (in Chinese with English abstract).
- Li, W. C., Li, L. H., Yin, G. H., 2006. Different data-processing methods for geochemical data from southern part of “Sanjiang (Three River)” region in southwestern China and their application results. *Mineral Deposits*, 25(4): 501–

510 (in Chinese with English abstract).

- Li, Z. N., Quan, H., Li, Z. T., et al., 2003. Meso-Cenozoic volcanic rocks and their deep process in Eastern China. Geological Publishing House, Beijing (in Chinese).
- Liu, J. M., Zhang, R., Zhang, Q. Z., 2004. The regional metallogeny of Da Hinggan Ling, China. *Earth Science Frontiers*, 11(1): 269—277 (in Chinese with English abstract).
- Mann, A. W., Birrell, R. D., Mann, A. T., et al., 1998. Application of the mobile metal ion technique to routine geochemical exploration. *Journal of Geochemical Exploration*, 61(1—3): 87—102. doi: 10.1016/S0375—6472(97)00037—X
- Mokhtari, A. R., Cohen, D. R., Gatehouse, S. G., 2009. Geochemical effects of deeply buried Cu-Au mineralization on transported regolith in an arid terrain. *Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis*, 9(3): 227—236. doi: 10.1144/1467—7873/09—203
- Muntean, J., Taufen, P., 2011. Geochemical exploration for gold through transported alluvial cover in Nevada: examples from the Cortez mine. *Economic Geology*, 106(5): 809—833. doi: 10.2113/econgeo.106.5.809
- Wang, S., Yan, C. H., Peng, M. S., 2011. Study on the geochemical prospecting method in the arid-semiarid grassland areas. *Geology and Resources*, 20(2): 128—132 (in Chinese with English abstract).
- Xie, X. J., Wang, X. Q., 2003. New progress on deep-penetrating geochemistry. *Earth Science Frontier*, 10(1): 225—238 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, Y., Nie, F. J., Sun, B. B., et al., 2005. Geochemical debris survey method in shallow-covered areas in east-central Inner Mongolia and its application in ore target screening. *Geology in China*, 32(4): 696—705 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, Y. P., Li, J. C., 2010. Tectonic framework and main characteristics of north China and its northward areas in Late Paleozoic-Early Mesozoic period. *Geology in China*, 37(4): 916—930 (in Chinese with English abstract).
- Zhuang, D. Z., Meng, G. X., Chen, S. Y., et al., 2004. Preliminary test of the induced polarization method in 1 : 50 000 reconnaissance in a metallogenic belt—from the demonstration of 1 : 50 000 rapid electric reconnaissance in the east Tianshan copper metallogenic belt, Xinjiang. *Geological Bulletin of China*, 23(7): 707—713 (in Chinese with English abstract).
- Zou, L., Peng, S. L., Yang, Z. A., et al., 2004. Multifractal study of geochemical (anomaly) fields in the A'ercituoshan area, Qinghai. *Geology in China*, 31(4): 436—441 (in Chinese with English abstract).
- ### 附中文参考文献
- 程培生, 汤正江, 2009. 综合物化探技术在大兴安岭地区区域化探异常查证工作中的应用. *物探与化探*, 33(5): 497—500.
- 成秋明, 2007. 成矿过程奇异性与矿产预测量化的新理论与新方法. *地学前缘*, 14(5): 42—53.
- 成秋明, 2011. 地质异常的奇异性度量与隐伏源致矿异常识别. *地球科学——中国地质大学学报*, 36(2): 307—316.
- 成秋明, 张生元, 左仁广, 等, 2009a. 多重分形滤波方法和地球化学信息提取技术与进展. *地学前缘*, 16(2): 185—198.
- 成秋明, 赵鹏大, 张生元, 等, 2009b. 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. *地球科学——中国地质大学学报*, 34(2): 243—252.
- 董英君, 王戈, 宋玉坤, 等, 2008. 甚低频电磁法在草原覆盖区矿产勘查中的应用. *矿床地质*, 27(1): 49—56.
- 葛良胜, 张文钊, 袁士松, 等, 2009. 蒙古南戈壁—中国东乌旗跨国境成矿带东段金多金属成矿与找矿. 北京: 地质出版社, 12—141.
- 葛肖虹, 马文璞, 2007. 东北亚南区中—新生代大地构造轮廓. *中国地质*, 34(2): 212—228.
- 李锦轶, 2004. 中国大陆地壳“镶嵌与叠覆”的结构特征及其演化. *地质通报*, 23(9—10): 986—1004.
- 李文昌, 李丽辉, 尹光候, 2006. 西南三江南段地球化学数据不同方法处理及应用效果. *矿床地质*, 25(4): 501—510.
- 李兆鼎, 权恒, 李之彤, 等, 2003. 中国东部中、新生代火成岩及其深部过程. 北京: 地质出版社.
- 刘建明, 张锐, 张庆洲, 2004. 大兴安岭地区的区域成矿特征. *地学前缘*, 11(1): 269—277.
- 王硕, 严长华, 彭明生, 2011. 干旱—半干旱草原覆盖区地球化学找矿方法研究. *地质与资源*, 20(2): 128—132.
- 谢学锦, 王学求, 2003. 深穿透地球化学新进展. *地学前缘*, 10(1): 225—238.
- 张义, 聂凤军, 孙彬彬, 等, 2005. 内蒙古中东部浅覆盖区化探岩屑测量方法研究及靶区优选应用. *中国地质*, 32(4): 696—705.
- 张允平, 李景春, 2010. 华北及其以北地区晚古生代—早中生代构造格架主体特点. *中国地质*, 37(4): 916—930.
- 庄道泽, 孟贵祥, 陈蜀雁, 等, 2004. 成矿带 1 : 5 万激发极化法普查的初步尝试——以东天山铜矿带 1 : 5 万电法快速普查示范为例. *地质通报*, 23(7): 707—713.
- 邹林, 彭省临, 杨自安, 等, 2004. 青海阿尔茨托山地区地球化学(异常)场的多重分形研究. *中国地质*, 31(4): 436—441.