

新世纪俄罗斯找矿地球化学

唐金荣^{1, 2)}, 金玺²⁾, 周平²⁾, 朱丽丽²⁾, 杨宗喜²⁾, 施俊法^{2)*}

1) 中国地质大学(北京)海洋学院, 北京 100083;

2) 中国地质调查局发展研究中心, 北京 100037

摘要: 在系统跟踪研究国内外地质期刊文献的基础上, 梳理了新世纪找矿地球化学面临形势和存在的重大问题, 全面总结了近十年来, 俄罗斯有关找矿地球化学基础理论和方法论、区域地球化学调查方法与应用, 以及地质-地球化学找矿模型的研制与应用等众多方面的思路和做法。研究认为, 俄罗斯首创的多目标地球化学填图技术可有效地提高国家地质图的质量, 为矿产资源量的综合评价和生态环境的评估及一系列基础问题的解决, 提供详细的信息。同时, 还指出俄罗斯地球化学家为解决新世纪的找矿问题, 加大了技术创新, 重点聚焦于提高地球化学找矿信号的衬度和强度, 提高运用地质-地球化学找矿模型的效用, 完善处理地球化学数据的计算技术, 以实现地球化学场与地质、地球物理场的综合等, 诸创新点和思路值得参考借鉴。
关键词: 找矿地球化学; 俄罗斯; 新世纪; 矿产勘查

中图分类号: P622.3; P632 文献标志码: A doi: 10.3975/cagsb.2012.02.03

Geochemical Mineral Exploration in the New Century: Russian Experience

TANG Jin-rong^{1, 2)}, JIN Xi²⁾, ZHOU Ping²⁾, ZHU Li-li²⁾, YANG Zong-xi²⁾, SHI Jun-fa²⁾

1) School of Marine Sciences, China University of Geosciences, Beijing 100083;

2) Development Research Center, China Geological Survey, Beijing 100037

Abstract: Based on studies of geological literature both in China and abroad, this paper analyzes the situation and important problems facing the exploration geochemistry in the new century, and summarizes last decade's basic theories and methodologies related to the exploration geochemistry, regional geochemical survey methods and applications as well as the ideas and practices in the establishment and application of geological-geochemical exploration models and quite a few other aspects developed in Russia. The authors' researches show that the technology of multi-target geochemical mapping initiated by Russian experts can effectively improve the quality of the geological map of China and provide detailed information for the comprehensive evaluation of the mineral resources, the assessment of the ecological environment, and the solution of a number of basic problems. Meanwhile, this paper also points out that, for solving the mineral prospecting problems in the new century, Russian geochemists have strengthened the technical innovation work with emphasis placed on enhancing the contrast and intensity of the geochemical exploration signal and the effectiveness of the geological-geochemical exploration model and perfecting the calculative techniques for geochemical data processing so as to realize the integration of the geochemical field with the geological and geophysical fields. It is held that Russian geoscientists' innovative ideas and experience mentioned above are worthy of being used as reference.

Key words: geochemical mineral exploration; Russian; new century; mineral exploration

20 世纪初由克拉克(美)、戈尔德施密特(挪威) 和维尔纳茨基(俄)正式创立的地球化学学科, 已诞

本文由地质矿产调查评价专项“国外地质调查战略情报编译与专题研究”项目(编号: 1212011120175)资助。

收稿日期: 2012-01-09; 改回日期: 2012-01-11。责任编辑: 魏乐军。

第一作者简介: 唐金荣, 男, 1978年生。博士研究生。主要从事地质科技情报与战略研究。E-mail: jinrongt@163.com。

*通讯作者: 施俊法, 男, 1964年生。博士, 研究员。主要从事地质调查与发展战略研究。E-mail: shijunfa@163.com。

生了 100 余年。费尔斯曼(俄)从理论地球化学的实际应用出发,首次在大学设立“应用地球化学”课程,至今已近 100 年。应用地球化学的主要发展方向“地球化学探矿”(化探),于 20 世纪 30 年代在苏联和北欧产生,迅速在全世界推广和应用,发展成一门成熟学科,迄今也近 80 年。中国化探走过 60 年发展历程,从“学生”变成在许多方面领先的开拓者,备受世界关注。面对新世纪的找矿任务,许多国家都在总结经验,探索未来,思考进一步发展之路。本文重点介绍俄罗斯学者在新世纪头十年间对找矿地球化学发展的思考,以飨读者。

1 新世纪的找矿形势与找矿地球化学的地位

费尔斯曼在提出“应用地球化学”时就曾指出:“矿床学是现代地球化学的一个部分,没有地球化学和矿物学分析方法,矿床学就不能发展……,找矿问题,实际上是个纯地球化学问题”(Кременецкий, 2006)。到 20 世纪末,不同国家通过地球化学找矿都发现了数以百计的工业矿床,可谓成绩辉煌。俄罗斯的地球化学家对中国化探的找矿成就尤为羡慕和赞赏(Кременецкий, 2006, 2008; Головин et al., 2004)。

进入 21 世纪,地质找矿的形势如何,找矿地球化学的地位如何,是思考找矿地球化学发展策略的前提。

1.1 找矿难度空前加大,化探作用尤显突出

进入新世纪,找矿难度空前加大。Кременецкий (2006)从理论上作了生动的描述:若地壳的平均厚度为 25 km,以体积计,世界上所有矿产的总储量加预测资源量,未必能占地壳最上部几千米的百万分之几,资源总量是有限的。在世界矿产的总储量中,全部金属矿床储量的相对份额仅占 11.5%。而人类历史发展至今,地壳中 80%的金属矿和烃类矿产储量已被发现并部分开采,换言之,“干草垛”里的“绣花针”现已几乎全部被找到。新世纪的找矿必将更加艰难。

另一方面,科技进步已改变了“矿石”的概念。例如,20~30 年前,金矿开采对象是金粒粗大、平均品位不到 4~5 g/t 的砂矿和原生矿,现在用生物淋滤和堆浸法,已可利用平均品位不大于 1 g/t 的细粒分散状金矿。因此,璠莫夫称,“矿石就是相对背景而言含有某些组分(单个矿物、矿物结合体和不形成独立矿物相的微量元素)的异常含量和(或)异常分布量的岩石”(Кременецкий, 2006)。对矿石概念的这

种表述方式,凸显出了地球化学方法在当代地质找矿中的重要地位。

1.2 化探纳入地质调查基本程序,作为区域找矿的开路先锋

进入新世纪,俄罗斯更加突出了“从区域到局部,依次缩小靶区”的找矿思路,着力加强化探在区域找矿中的作用。这突出表现在俄罗斯国家地质图编图计划上。这项计划要求,在编制第三代 1:100 万国家地质图和第二代 1:20 万国家地质图的各幅图件时,都要有相应的地球化学底图,即把地球化学调查纳入地质调查的基本程序,从而带动和促进了区域地球化学调查和研究。该计划的目的是,通过编制这两种基础地质图,落实和推动领土的多功能地质研究,提高矿产资源增量,提高陆地和大陆架地质研究程度及灾害性地质作用研究水平。尤其在区域矿产资源量的预测和进一步工作靶区的选择上,要充分发挥地球化学方法的效用,作为区域找矿的开路先锋。

目前,编制地球化学底图的信息主要有三类来源:①回溯(存档)地球化学信息和一些区段的补充地球化学调查信息;②同步地球化学调查信息;③超前地球化学调查(当前即指多目标地球化学填图)信息,需要指出的是这里所指的“同步”和“超前”都相对地质填图的先后而言。要求所编制的地球化学底图能解决关系到矿产勘查和生态调查的 14 项重要问题(Головин et al., 2010)。据 2010 年文献,俄罗斯已编制出 119 幅第三代 1:100 万国家地质图的地球化学底图,占国土面积的 58%,其中,根据多目标地球化学填图信息编制的 31 幅(250 万 km²),通过总结、分析和重新解释原有地球化学资料而编制的 88 幅(990 万 km²)(Морозов, 2010);在 2000—2009 年间,编制出第二代 1:20 万国家地质图约 614 幅(编者推算),基本上均有地球化学底图。目前,这项工作还在继续推进,但地球化学底图的质量尚不尽人意,正在探讨解决办法。

1.3 找矿地球化学(化探)由辅助手段变成主导的勘查方法

俄罗斯学者认为,20 世纪的地球化学找矿成绩突出,但主要是在远景明显的地区(已知成矿区或带)进行的;就方法论说,可归结为在已知矿结和矿田内经验式地圈定地球化学异常,与同类已知客体(标准客体)类比,从而查明新矿床。所以,过去的地球化学方法,在很大程度上被当作地质填图或普查-勘探的辅助手段(Кременецкий, 2008)。

进入新世纪,露头矿和易发现矿床几乎被发现

殆尽, 需要在半掩蔽区和掩蔽区查明金属矿和油气田。在这种条件下, 直接的地质路线观察已力不能及, 地球化学找矿成了查明新区的主导方法。这就要求: 一方面, 必须加大地球化学探测的深度, 改进和解决地球化学方法本身存在的问题; 另一方面, 应该把地球化学工作与地质、地球物理和遥感工作结合起来, 构成改进的地下资源地质调查工作程序。在这些程序中, 地球化学工作被公认为起主导勘查作用(Кременецкий, 2008; Морозов, 2010)。

1.4 大力提倡多学科综合研究, 揭示地球化学场的地质内涵

在新世纪的找矿形势下, 地球化学调查要起主导作用, 并不等于化探“唯我独尊”、“单打独斗”。俄罗斯地球化学家一贯认为, 地球化学场是成岩作用、构造作用、成矿作用和表生作用的历史产物, 不同级次和不同介质中的地球化学异常, 具有不同的地质内涵。要提高地球化学找矿效果, 不能就异常论异常, 应该甚至必须把地球化学资料与地质、地球物理和遥感资料结合起来, 进行深入的综合研究, 才能揭示异常的地质意义, 判定地球化学异常的性质。近十年来在俄刊上发表的化探文献, 突出地反映着这种指导思想。尽管这种综合研究思路和方法在俄罗斯的实行尚不尽人意, 但被俄罗斯地球化学家们认定为提高找矿效果的必由之路。

2 多目标地球化学填图技术被视为俄罗斯的创新工艺

对于提高区域地球化学填图的质量, 俄罗斯已形成了明显的思路: 要提高地球化学工作的效果, 不能只着眼于改进具体探测方法, 而要创新整套技术工艺。近 20 年来, 俄罗斯稀有金属矿物学、地球化学和结晶化学研究所(ИМГРЭ)创建并改进了一套全新的技术——多目标地球化学填图技术。通过在不同景观区的 6 个试验场(46 万 km²)和 8 个地区开展生产性试验, 证明了这套工艺的实用性和有效性, 被俄罗斯地球化学工作者誉为“一套原理全新、举世无双的技术”。

多目标地球化学填图的创新之处在于: 将按网格的随机取样, 改为在依据多因素划分的准同类地区内进行确定性取样, 样品密度可以放稀, 如, 1:100 万比例尺填图 1 个样/100 km², 使采样点减少到原来的 1/10; 在一个取样点上对 3~5 种介质采样, 如, 基岩、A-B-BC 诸层土壤、底积物、地表水、苔藓、针叶等; 用精密分析手段(感应耦合等离子光谱、质谱、X 射线荧光、原子吸收等)分析样品, 元

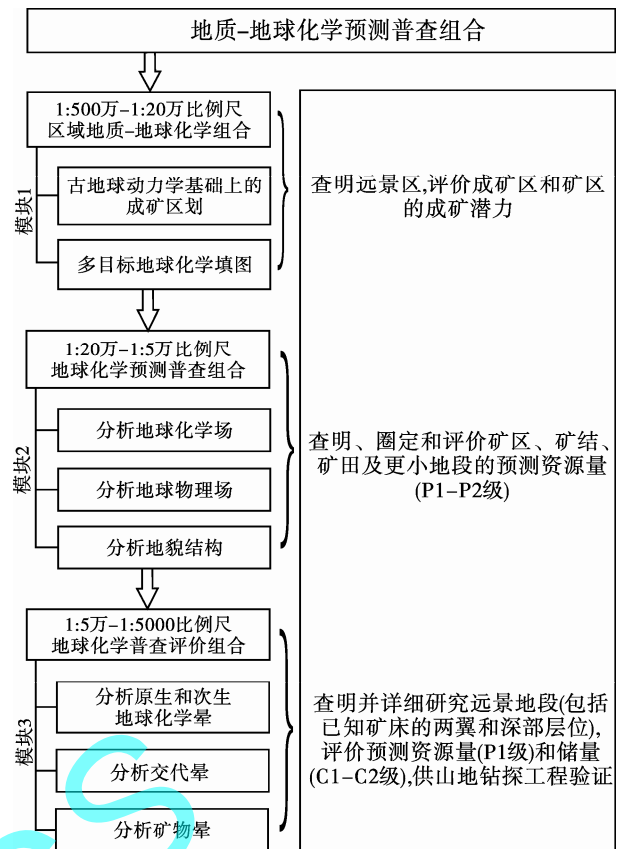


图 1 地质-地球化学预测普查组合结构图

(Кременецкий, 2006)

Fig. 1 Composite structure diagram of geological-geochemical prediction and reconnaissance (Kremenetskiy, 2006)

素数可达 50 种; 以地理信息系统为基础整理数据, 用“多元场法”、“地质扫描”、“地质场”等方法处理数据和筛选异常(Головин et al., 2004; Морозов et al., 2008)。

这套技术与传统技术相比的优越性, 突出表现在以下两个方面:

(1) 有效提高国家地质图地球化学底图的质量: 目前依三类信息源编制的地球化学底图, 满足度不同, 质量参差不齐。例如, 到 2009 年底, 就第三代 1:100 万国家地质图而言, 已编成的 62 幅(占国土和大陆架面积的 38.5%)中只有 49 幅具地球化学底图(占 79%), 其中合格和基本合格的 36 幅(合格率 58.1%); 正编制的 56 幅中只有 38 幅具地球化学底图(占 67.9%), 其中合格和基本合格的 18 幅(合格率 32.1%)。而就第二代 1:20 万国家地质图而言, 情况更差, 经审查合格的地球化学底图仅有 51 幅(占已编地质图的 8.3%)(Головин et al., 2010)。必须说明的是, 凡依据多目标地球化学填图信息编制的底图, 质量全部合格, 而不合格的底图主要是依据其他资料信息编制的。

(2)充分保证多方面地质调查对地球化学信息的需要:多目标地球化学填图按标准的格局同步采集岩、土、底积物和水等样品,获取的信息量大,可全面查明和圈定各层级地球化学场的不均一结构,一致性地反映出非均一性的自然分量和人为分量,并在地球化学底图上对它们进行区分、解释和评价。因此,依靠多目标地球化学填图信息,能圈定新的潜在成矿区和矿结,对矿产资源量作客观的综合评价,能评价环境的生态地球化学状况,解决一系列基础地质问题。

因此,俄罗斯的许多学者极力主张,在区域地球化学调查中增加超前多目标地球化学填图技术的投资比例,以提高地球化学底图的满足度和质量,为各级次异常地球化学场的解释和应用提供信息保障。俄罗斯不少文章也反映了多目标地球化学填图技术对解决不同问题的独特作用和效果,包括在俄罗斯国家重大工程中的应用等(如: Головинет al., 2004, 2010; Липилин et al., 2006; Кременецкий, 2008; Морозовet al., 2008)。

需要指出的是,俄罗斯多目标地球化学填图工作与我国已开展的多目标地球化学调查在内涵、做法上都不相同,各有特点和特长。

3 新世纪俄罗斯找矿地球化学面临的问题和解决途径

新世纪的找矿需要开辟原先未知的新区,特别是在掩伏和半掩伏区找矿,地球化学方法必须创新。多目标地球化学填图技术在很大程度上就是应这种需求产生的,为获取优质、全面的区域地球化学资料创造了前提,而在从区域到矿床(体)的具体找矿过程中,找矿地球化学仍面临着许多问题。俄罗斯地球化学家根据他们国家的具体情况,提出了下述主要问题和解决途径(Кременецкий, 2006, 2008)。

3.1 改善取样方法和分析技术,提高地球化学找矿信号的衬度和强度

俄罗斯学者常把找矿归结为查明和判定地质-地球物理-地球化学不均一性问题,地球化学异常是多种不均一性的集中体现,因此,提高地球化学信号(异常)的强度和衬度,对查明和圈定与成矿有关的不均一性具关键意义。在前苏联的化探工作中,一直用近似定量光谱分析作为样品分析方法的主体。俄罗斯地球化学工作者吸收国外经验、特别是中国经验后,才明确了样品分析精度的重要性。他们的解决办法是:在选择取样网时要考虑拟寻客体

的拟预测参数;从地球化学全样中分离出超细($50 \sim 1 \mu\text{m}$)轻粒级(富集活动态矿质)和重粒级(富集寄宿在矿物相中的成矿元素),用精密的分析方法(电感耦合等离子光谱、原子吸收、X射线荧光等)测定成矿和指示元素(包括 Au、Ag、Pt、Pd 等),使测试精度接近或低于其克拉克值的水平。

应该指出的是,因为资金问题,俄罗斯目前这种样品分析方法主要用于多目标地球化学填图,效果甚佳,而在其他类型的区域和找矿地球化学工作中,近似定量分析方法仍在广泛使用。但值得注意的是,俄罗斯学者在解决提高地球化学信号衬度和强度问题时,不仅考虑样品分析方法,还考虑地质、地球物理信息,构成综合性解决方案。

3.2 依据成矿新理念部署超前地球化学工作

到哪儿找矿?一直是部署找矿工作的关键问题。过去,成矿远景区(成矿省、成矿带、成矿区等)是依据地质-构造成矿区划得出的。进入新世纪,面对远景不明区,特别是大片覆盖区,要回答这个问题就需要有新的理念。首先,要更新和扩展诸如“层控型”、“非岩浆成因型”等非传统成矿理念,识别和划分相关成矿单元。其次,要重视作为成矿基本特征的“不均一性”理念,这个理念是:在地壳不同深度于不同时期(成矿前、成矿中、成矿后)发生的地质过程,形成了岩石成分与状态异常的多层级不均一性体系;这些不均一性(特征值在空间内的矢向变化)在地球化学场和地球物理场中的反映,体现为场的结构特征(一套准均一单元在场内的分布状况);按自然体系的自组织法则,每个准均一单元又由更小级次的准均一单元构成。第三,要特别重视这种不均一性的地球化学方面,即不同级次地球化学分带性的研究和应用。第四,要不断改进不同级次地质-地球化学找矿模型的建立和运用。这些理念凸显了地球化学方法在新世纪找矿工作中的重要作用,既是部署超前地球化学工作的依据,也是不同阶段地球化学工作的研究方法和研究内容。

3.3 强化地球化学数据处理和解释

在俄罗斯学者看来,地球化学数据处理技术与其说是计算机处理问题,倒不如说是数据处理的地质理念问题。根据上述理念,处理区域性调查数据的计算机方法的任务,便成了查明地球化学场和地球物理场的不均一性及其相互影响,并将它们分级次归并成一系列类别的任务。这一任务可借助“地质扫描”、“结构分析”、“地质场”等计算机程序自动实现(图 1)。例如,用“地质扫描”程序研究地球化学场的空间结构问题,通过分类函数在坐标空间

内划分出相关元素及其含量分布近似的特征区;用“结构分析”程序研究地球物理(重、磁)数据和地貌结构数据,按不同性质的层(自下而上),即地球物理层(重、磁不均一性)→地质层(地层、岩浆、构造不均一性)→地球化学层(元素组合不均一性)→地貌结构层(地貌形态不均一性),以给定概率划分各自的类别区,确定其空间分布,最终建立起多层次的不均一性立体全貌;用“地质场”程序分析在每个层中查明和圈定的不均一性,建立地-物-化综合找矿模型,预测远景区(Кременецкий, 2008)。这套程序已被纳入俄罗斯联邦地球化学数据库的应用程序模块(Головин et al., 2004)。

4 新世纪俄罗斯找矿实践中的一些做法和经验

以上所述基本上属于战略性的思考和部署,在俄罗斯的新世纪找矿工作中,已出现了许多实施这些思考和部署的具体经验。下面,对这些做法和经验作简要的归纳和介绍。

4.1 完善选择地球化学预测-普查工作部署区的方法

以前的工作都部署在传统的成矿省、成矿带、成矿区内,如今的部署要以“新区”作为工作对象。这就要涉及研究和建立地壳深部地质-地球化学模型和矿床(包括油气田)矿上分带模式的问题,包括各种类型矿床的成矿作用理论,成矿温压条件与地球化学异常的关联对比,上置晕形成机制及探测方法研究,地球化学和地球物理不均一性形成机制的模拟,以及相关信息的分类、评价准则等课题。然而在实际操作中,目前可行的办法,仍以成矿作用理论推定部署找矿的新区。不过,与以往不同,新世纪俄罗斯特别重视综合成矿分析,将地幔柱-板块构造、构造运动和地球动力学环境、矿床形成和富集模型综合起来研究新成矿客体,该方法在俄罗斯被称为“综合性成矿区划法”(Головин et al., 2004)。

这种方法与根据构造岩浆演化阶段和成矿分类单元(主要依据矿床和矿点的发育面积划分)进行的成矿区划有本质上的区别。综合性成矿区划法要使用:直接标志,即成矿标志和地球化学标志;直接(和间接)前提,即地质前提(建造、矿石建造、构造)和地球物理前提(重、磁场);间接前提,即普通地质知识和理论模型。地球化学标志是预测不同级次区域资源量的基本依据,多目标地球化学填图为此提供了更好的资料,利用“地质扫描”、“地质场”程序把地球化学数据与其他学科资料结合起来分析,

可得出不同级次地球化学场的综合评价等级,为成矿区划和相应资源量预测提供依据。据称,利用1:100万和1:20万多目标地球化学填图资料和这种方法,查明了一系列远景成矿区和潜在矿区、矿田及其成矿潜力。

4.2 深入研究不同级次地球化学场的地质内涵

在现今找矿形势下,俄罗斯强调要采用地质-地球化学-地球物理信息综合运用方法,分阶段地组织找矿工作。20世纪80年代就已形成的“预测-普查组合”工作体系,以逐次查明成矿区和成矿带、矿田和矿结、矿床和矿体为目标,按三个阶段确定彼此有别的方法组合、指标体系和判定准则,较好地体现了这一指导思想(图1)。其中,查明和研究地球化学异常及其分带性,贯穿着这套工作的全过程,对提高找矿效果有举足轻重的意义。

4.2.1 地球化学分带规律的理论依据充分

地球化学异常是一系列物理-化学作用的产物。它们不仅仅是成矿作用过程的直接结果,而且还可以直接或间接地反映岩浆作用、沉积作用、变质分异作用、矿液交代-沉淀作用、风化侵蚀作用。这些作用的发生过程中会经历一系列的平衡状态,每个平衡状态均会按通用的物理-化学规律发生元素沉淀,故而产生分带性。不过,从区域范围内考察,产生分带性的地质作用和因素较多,不一定全与成矿作用相关;而从近矿的局部范围内考察,地球化学异常及其分带性则主要取决于成矿作用,且规律性较强。针对后一种情况,奥夫钦尼科夫提出了成矿作用标准性规则:“尽管金属和热液的来源五花八门,聚矿地质条件多种多样,作为化学过程的成矿作用,却是在标准的物理和化学环境条件下,在标准的温度和压力变程内,从标准的成矿溶液中发育并生成标准的矿物共生组合”(Кременецкий, 2008)。所以,地球化学异常和分带性不同程度地反映着成矿作用和成矿客体的空间位置,是一种普适的找矿标志。

总的看来,任何一个地球化学场都会出现不同数量的异常,就大范围说,异常的性质取决于岩石产物的形成过程,就小范围说,异常性质取决于成矿过程。国内外的经验都表明,矿体和矿区原生晕规律最为清楚,找矿效果最佳。而区域性地球化学异常反映的找矿信息,需在综合考虑成岩作用、变质作用、构造作用和表生作用的情况下,才能真正辨析出来。用某种或某些方法圈定出了数百甚至上千平方千米的地球化学异常,只能说划分出了某种远景区,离找到矿床还相距甚远,必须结合地质和

地球物理资料作综合研究,才能辨明异常性质,逐步接近矿床。进一步研究不同级次地球化学场,揭示和查明它们与成矿作用和成矿环境的内在联系,总结和完善的以分带性为基础的找矿准则,已成为必行之事。

4.2.2 不同级次分带性有不同的地质 - 找矿意义

长期以来,一些化探工作者的观念中存在着两种倾向:其一,在某种程度上只把异常分带视为一种地球化学现象或规律,且往往孤立地进行研究,忽视它们与地质和地球物理特征的联系;其二,忽视不同级次地球化学场及其分带性的地质内涵差异,似乎只要查明了成矿元素的异常,就一定是成矿客体本身的反映,甚至用矿床(体)异常的评价准则去评价区域异常。

然而实践证明,不同级次异常地球化学场的形成机理不同,且每个级次地球化学场的异常结构都对应着特征有异的地球化学分带。Григоров(2009)明确提出,地球化学工作效果欠佳的原因,在于没有研究清楚不同级次的成矿系统与地球化学场的特征和形成机制间的关系。通过研究,他提出地球化学场的异常结构(АСП)应分为两级:第一级(АСП-1)与成矿区、大型矿田和矿结关联,成矿系统是开放式的物理-化学系统,元素主要作径向迁移,在前缘出现韵律式分带,地球化学场的结构表现为二节(环节)离心型、离心-向心型和带状韵律型。第二级(АСП-2)主要与矿床和矿体对应,成矿系统是封闭的成矿热液系统(成矿室),成矿物质的搬运和分异与对流循环机制有关,地球化学场的异常结构为三节(环节)的离心-向心结构,从成矿作用的本质上阐明了不同级次地球化学场的区别。

Абисалов(2009)针对含金岩浆系统的“成矿室”提出了一种“层-极模型”,认为矿致地球化学异常场的形成与地质构造紧密相关,由构造决定的成矿体系沿上升方向会出现有规律的间隔性分叉,分叉数量随接近地表而增大,从而构成一个多层级的体系。整体的大范围分叉体系,大体相当于矿结和矿田级次,形成分散矿化带、重砂晕和较低的金异常;而高层级(和)的体系则相当于矿床和矿体范围,是所谓“成矿室”的发育部位(图2)。在“成矿室”内,下部2/3的矿质向上部1/3聚集,形成多层级的金属含量垂直分带模式,其内发生规律性变化:金的浓集克拉克值增大,矿物共生组合减少,金粒变大,成色增高,自下而上主要分布亲石元素→亲铁元素→亲铜元素(地球化学谱)等(图3)。这个研究案

例也说明了不同级次地球化学异常与成矿系统之间的联系。

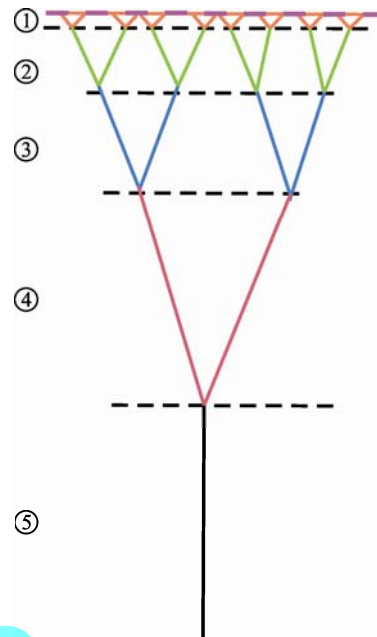


图2 成矿岩浆系统的结构分带示意图
(圈内的数字为层号; Абисалов, 2009)

Fig. 2 Structure zoning diagram of metallogenic magma system (figures in the circle are level numbers; Abisalov, 2009)



图3 N层“成矿室”内成矿物质重新分布示意图
(金的浓度克拉克值 $KK_3 \ll KK_2 \gg KK_1$; Абисалов, 2009)

Fig. 3 Diagram of metallogenic material re-distribution in the “mineralization chamber” of Level N (Clarke value of gold concentration $KK_3 \ll KK_2 \gg KK_1$; Abisalov, 2009)

4.3 研究改进区域和成矿客体预测资源量评价方法

20 世纪 70 年代索洛夫夫提出的依据分散流测量资料评价预测资源量的方法(Соловов, 1985), 一直被作为资源评价的基本地球化学方法, 并写入了工作规范。进入新世纪, 这种方法在不断改进与完善。首先, 深入研究预测公式中的关键系数。例如, 分散流与次生晕的对应系数(k'), 次生晕与原生晕的对应系数(k), 因测区景观条件的变化会有较大变异, 使预测资源量往往偏高。为解决这一问题, 莫斯科大学就次生晕与分散流的定量关系进行了模型研究, 提出改进方案(Воробьев, 2009)。全俄地质勘探研究所针对出露区、半覆盖区和覆盖区的景观特点, 提出要研究不同级次异常中矿石比例(α)与晕面积(S)和元素克拉克值的关系, 关系系数值与景观条件的关系, 拟预测矿化的延深(H)和侵蚀截面深度(g)的确定等问题, 改进资源量预测公式(Соколов, 2010)。其次, 尽管资源量预测工作已纳入了地球化学工作规范, 但具体规定比较原则, 执行者往往只注意“资源量计算”, 而忽视了异常场的多层次结构、数据不均一性、参数选择依据等问题, 致使预测值与实际偏差较大。例如, Скрыбин 等(2009)的文章就涉及到依据中、大比例尺化探资料预测铬铁矿资源量时出现的问题。Абисалов(2010)的文章对此问题进行了深入研究, 提出了修改与完善规范的建议。鉴于索洛夫夫的方法也被我国的地球化学家们广泛采用, 这些文章很值得阅读和参考。

4.4 大力推进地球化学找矿模型研究与应用

地球化学找矿模型的构建与应用, 是俄罗斯近数十年来地质找矿工作的一大亮点, 其最大的特点是通过找矿模型的建立与应用实现了地质、地球物理与地球化学的综合。俄罗斯学者认为地球化学资料解释水平低的原因, 在于现在找矿模型粗浅而墨守成规, 只适合简单的地质、地球物理和景观地球化学环境。皮图里克 20 年前就指出: “要提高地球化学工作的效果, 必须从数字处理和异常解释转向概念模型的建造和检验, 以保障把地球化学场(而不是单个异常)和成矿系统形成的基本成矿作用问题与地球化学问题统一起来”(Кременецкий, 2009)。

以矿石建造理论为基础, 以不同级次标准客体为研究对象, 建立了不同级次不同矿床类型的地质-地球化学找矿模型, 一直是俄罗斯地球化学找矿工作的重点(Скрыбин et al., 2009; Галюк et al., 2009; Ворошилов et al., 2009)。Кременецкий(2009)对有关地质-地球化学找矿模型的总体性问题和解决办法作了论述, 指出完善找矿模型需要: 深入研究矿床

地球化学场的理论, 查明场区的层级; 将矿质浓集作用的时-空层级与地球化学场的层级关联起来; 评价成矿系统的含矿性与其构造-聚矿因素的依从关系。依此思路, 他探讨了不同级次(从成矿区到矿体)地球化学场的特征, 认为不同规模的同成因类型矿床之间具有地质、几何形态和地球化学相似性(图 4), 并指出建模时应做好调查和研究, 明确找矿模型的要素。

总的来看, 进入新世纪, 俄罗斯地球化学找矿模型研究出现了许多新进展, 可归纳为以下两点: 一是研究向精细化方向发展, 即针对不同地区、不同景观条件, 根据已知的标准客体, 建立一整套适合不同级次的找矿模型, 包括成矿带和成矿区以及矿田中出现不同类型矿床的地质地球化学找矿模型, 所选参数及考虑的因素较多; 二是重视模型参数的定量描述和综合性定量指标的研究, 这不仅体现在不同级次地球化学场的描述和划分上, 尤其体现在矿床和客体原生晕异常模型的表述上, 力图与成矿过程中矿质运移沉淀机制结合起来, 表征综合指标随深度的变化, 以提高预测准确性和可靠性。

4.5 开展覆盖区找矿的方法组合和新技术研究

开展技术组合和新技术方法的研究, 是提高找矿信息的强度和衬度重要方式, 也是解决覆盖区找矿问题的关键。从文献分析来看, 俄罗斯当前的覆盖区找矿方法研制存在两种发展途径。一种是将地球化学研究与地质构造-景观地貌研究相结合, 制定大比例尺地球化学找矿技术。Цыганов 等(2002)在北乌拉尔某金成矿区的大比例尺预测普查中, 以航空照片判读为主确定与成矿有关的地质构造格局, 以基元景观的划分和研究为基础搞清控制元素分布

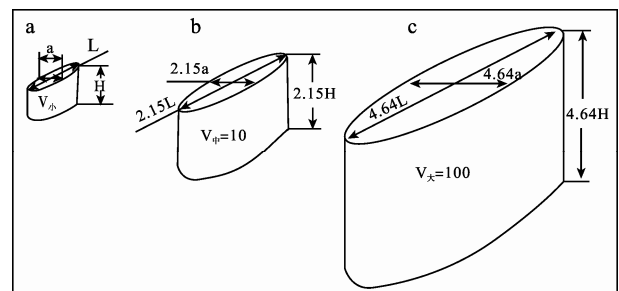


图 4 不同级次成矿客体几何特征及其关系 (Кременецкий, 2009)

Fig. 4 Geometric features and their relationship of metallogenic objects at different levels (Kremenetskiy, 2009)
成矿客体(a:b:c)的比例为 1:10:100 时, 其相似性轮廓的线性(s)和面性尺度(V):

$$a-s=1, V=1; b-s=4.64, V=10; c-s=21.5, V=100$$

When the proportion of the metallogenic objects (a:b:c) is 1:10:100, the linear (s) and planar scale (V) of its similarity outline are a-s=1, V=1; b-s=4.64, V=10; c-s=21.5, V=100

的因素,以累乘晕方法强化与矿有关的地球化学异常,三者结合起来判断异常性质和下伏矿化的侵蚀截面水平。其成果表明这种技术方案是可行途径。另一种技术路径类似我国及西方国家重点的研发,提取可反映深部矿化信息的物质组成的发展思路。近十年,俄罗斯重点发展的此类方法有:土壤金属有机酸盐法、热磁地球化学法、土壤吸附元素法和金属部分提取法等(Алексеев et al., 2008)。虽然这些方法在 20 世纪 70 年代就已成型,但近年成功应用的案例较多,特别是地电化学法(部分技术提取法)与重、磁勘探的结合,颇富新意。此外,有些文章中也提到,俄罗斯工作者和中国地球化学工作者合作,在研制“用过滤器抽取和分析土壤气体”的方法(即地气法)(Кременецкий, 2006, 2008);在许多成矿区进行土壤(风化产物)活动态离子提取法的试验研究,认为此类方法有助于查明新矿区和工业矿体(Чекваидзе et al., 2009)。

致谢:国土资源部信息中心吴传壁研究员为本文的撰写给予了的悉心指导,提出了宝贵的修改意见,在此表示衷心感谢!

References:

- КРЕМЕНЕЦКИЙ А А. 2006. Прикладная геохимия: современные проблемы и решения[J]. Разведка и охрана недр, (7): 24-33.
- КРЕМЕНЕЦКИЙ А А. 2008. Поисковая геохимия: состояние, проблемы, решения[J]. Разведка и охрана недр, (4-5): 4-13.
- ГОЛОВИН А А, ГУСЕВ Г С, КИЛИПКО В А, КРИНОЧКИН Л А. 2004. Современные региональные геолого-геохимические методы выявления и оценки новых металлогенических объектов[J]. Разведка и охрана недр, (3): 25-31.
- ГОЛОВИН А А, МЕЖЕЛОВСКИЙ Н В, ЧЕПКАСОВА Т В. 2010. Региональное геохимическое изучение росии: результаты, эффективность, проблемы[J]. Разведка и охрана недр, (5): 6-13.
- МОРОЗОВ А Ф. 2010. О результативности и перспективах развития региональных гео химических работ[J]. Разведка и охрана недр, (5): 3-5.
- МОРОЗОВ А Ф, КРЕМЕНЕЦКИЙ А А, ГОЛОВИН А А. 2008. Геохимическое картирование приграничных территорий России[J]. Горный журнал, (5): 12-16.
- ЛИПИЛИН А В, МИХАЙЛОВ Б К, КРЕМЕНЕЦКИЙ А А, ГОЛОВИН А А. 2006. Прогнозно- геохимические работы в новых национальных проектах росии[J]. Разведка и охрана недр, (9-10): 63-71.
- ЦЫГАНОВ А Е, ЮШКО Н А, КУБАНЦЕВ И А, ТЕЛЕШЕВ А А. 2002. Технология геохимических поисков на перекрытых территориях с использованием геолого-структурного и ландшафтно-геохимического картирования[J]. Разведка и охрана недр, (5): 26-33.
- АЛЕКСЕЕВ С Г, ВОРОШИЛОВ Н А, ВЕШЕВ С А, ШТОКАЛЕНКО М Б. 2008. Опыт использования наложенных ореолов рассеяния при прогнозе и поисках месторождений на закрытых территориях[J]. Разведка и охрана недр, (4-5): 93-99.
- ЧЕКВАИДЗЕ В Б, МИЛЯЕВ С А, ИСААКОВИЧ И З. 2009. Комплексная петрографо- минералогическая методика при интерпретации и оценке литохимических аномалий золоторудных полей[J]. Разведка и охрана недр, (5): 33-39.
- ГРИГОРОВ С А. 2009. Отражение в геохимическом поле рудообразующей системы в качестве объекта геохимических поисков[J]. Разведка и охрана недр, (5): 9-13.
- АБИСАЛОВ Э Г. 2009. Ярусно-полярная модель золотоносной рудно- магматической системы[J]. Разведка и охрана недр, (5): 30-33.
- СОЛОВОВ А П. 1985. Геохимические методы поисков месторождений полезных ископаемых[M]. Недр.
- КРЕМЕНЕЦКИЙ А А. 2009. Поисковые геолого-геохимические модели рудных месторождений: проблемы и решения[J]. Разведка и охрана недр, (5): 3-7.
- ВОРОБЬЕВ С А. 2009. Модели количественной взаимосвязи вторичных ореолов и потоков рассеяния. Разведка и охрана недр, (5): 19-22.
- СОКОЛОВ С В. 2010. Прогноз и оценка ресурсного потенциала рудных полей, узлов и районов по потокам рассеяния на стадиях регионального изучения недр[J]. Разведка и охрана недр, (5): 48-53.
- СКРЯБИН В Ю, Терентьев Р А, Полякова Т Н, Лебединский С В. 2009. Поисковая геолого-геохимическая модель и сравнительная ресурсная оценка хромитовых руд в системе: рудное тело-вторичный ореол-поток рассеяния[J]. Разведка и охрана недр, (5): 41-48.
- АБИСАЛОВ Э Г. 2010. О качестве прогнозных оценок ресурсов полезных ископаемых по геохимическим данным[J]. Разведка и охрана недр, (5): 58-63.
- ГАЛЮК С В, МЕНЧИНСКАЯ О В. 2009. Поисковая модель потоков рассеяния месторождений золото-кварц-малосульфидного типа[J]. Разведка и охрана недр, (5): 23-26.
- ВОРОШИЛОВ В Г. 2009. Поисковая геолого-геохимическая модель золото-скарновых месторождений южной Сибири[J]. Разведка и охрана недр, (5): 37-41.