

汤中立,段俊,徐刚,等.小岩体成(大)矿理论与实践[J].地球科学与环境学报,2023,45(5):1015-1025.

TANG Zhong-li, DUAN Jun, XU Gang, et al. Theory and Practice of Small Intrusive Mineralization [J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2023, 45(5): 1015-1025.

DOI:10.19814/j.jese.2023.09001

· 庆贺汤中立院士从事地质工作七十周年专辑 ·

小岩体成(大)矿理论与实践

汤中立,段俊,徐刚,钱壮志,闫海卿,焦建刚,陈阳阳

(长安大学 地球科学与资源学院,陕西 西安 710054)

摘要:镍、铜、铂族、钨、锡、钼等关键矿产主要产于小岩体和/或附近的围岩中。系统阐述了小岩体成(大)矿的机制,并以岩浆型 Cu-Ni-PGE 硫化物矿床为例,总结成矿理论的主要科学问题;依据小岩体成(大)矿理论指导找矿突破实例,针对镁铁—超镁铁质岩体,从地质、物探、化探、遥感等信息中总结成矿要素,提出了快速筛选含矿岩体的评价方法。大量勘查成果表明:小岩体成(大)矿理论对地质找矿具有重要指导意义。

关键词:岩浆(热液)矿床;小岩体成(大)矿;成矿机制;找矿突破;Cu-Ni-PGE 硫化物矿床;镁铁—超镁铁质岩体;成矿要素;评价方法

中图分类号:P612

文献标志码:A

文章编号:1672-6561(2023)05-1015-11

Theory and Practice of Small Intrusive Mineralization

TANG Zhong-li, DUAN Jun, XU Gang, QIAN Zhuang-zhi, YAN Hai-qing,

JIAO Jian-gang, CHEN Yang-yang

(School of Earth Science and Resources, Chang'an University, Xi'an 710054, Shaanxi, China)

Abstract: In the new round of strategic breakthrough in mineral prospecting, critical mineral resources, such as Ni, Cu, PGE, W, Sn and Mo, are mainly produced in the small intrusions and/or their adjacent country rocks. The mechanism of “small intrusive mineralization” was systematically explained; the main scientific issues of the theoretical system, such as the characteristics of the source and the evolution process of the ore-forming magma and/or hydrothermal fluid, the mass balance of the ore-bearing intrusion, and the emplacement depth, uplift height, erosion degree of the ore deposits, were discussed. By introducing examples of mineral prospecting breakthroughs guided by the theory of “small intrusive mineralization”, a three-step evaluation method for mafic-ultramafic intrusion was proposed to screen out the ore-bearing intrusion quickly and economically by grasping the key information elements from a variety of geology, geophysics, geochemistry, and remote sensing imagery. Exploration results to date indicate that the theory of “small intrusive mineralization” has enormous prospective potential.

Key words: magmatic (hydrothermal) deposit; small intrusive mineralization; metallogenic mechanism; prospecting breakthrough; Cu-Ni-PGE sulfide deposit; mafic-ultramafic intrusion; metallogenic element; evaluation method

收稿日期:2023-09-01;修回日期:2023-09-09

投稿网址: <http://jese.chd.edu.cn/>

基金项目:中国工程院战略研究与咨询项目(2023-XZ-20);陕西省自然科学基金基础研究计划项目(2023-JC-YB-224, 2022JM-169)

作者简介:汤中立(1934-),男,安徽安庆人,教授,博士研究生导师,理学博士,中国工程院院士, E-mail: zytangzl@chd.edu.cn.

0 引 言

近年来,我国矿产资源供需和安全环境发生了重大变化,保障国家矿产资源安全的重要性越发凸显。根据战略性矿产国内找矿行动“十四五”实施方案,新一轮找矿突破战略行动将突出紧缺战略性矿产,并强调大力推进科技创新,加大勘查特别是精查力度,全面推进绿色勘查,支撑战略性新兴产业发展,不断增强国家战略性矿产资源保障能力。

在新一轮找矿突破战略行动中,紧缺金属矿产包括铁、锰、铬、铜、铝、金、镍、钴、锂、锆、钨、铌、钼、铍、镱等。据不完全统计,世界上最大的巨型镍、铜、钨、锡、钼、铌、钽、锆、锂、金、金刚石矿床主要产于小岩体和/或附近围岩中^[1-4],有些矿种如铁、铬、钴、金、银、铅、锌、铂族等都有小岩体成巨型、超大型、大型矿床实例。为什么许多金属矿产都产出于小岩体和/或附近的围岩中?小岩体成(大)矿的机制是什么?主要的科学问题有哪些?如何通过成矿理论指导新的找矿突破?长安大学岩浆矿床科研团队围绕“小岩体成(大)矿”理论,以我国与幔源、壳源岩浆相关的典型小岩体矿床为对象,开展小岩体矿床的成矿背景、成矿机制、成矿规律与成矿模式以及找矿突破等方面的综合研究,系统探讨了上述科学问题 and 应用难题。从理论认识角度确定找矿方向,有效地指导勘查部署,促进找矿突破,以地质科技创新支撑引领实施新一轮找矿突破战略行动,这也是长安大学岩浆矿床科研团队深入学习党的二十大精神、认真贯彻落实习近平总书记关于保障国家能源资源安全重要指示精神的使命担当。

1 小岩体成(大)矿理论的概念与内涵

“小岩体成(大)矿”是指在地壳浅部、超浅部的规模相对较小的侵入体内部和/或附近围岩中,形成与小岩体有关的大型、超大型甚至巨型矿床^[5-9]。小岩体的地表出露面积一般为 1 km² 左右或更小,最大可达几平方千米,最小为几千平方米;镁铁质岩浆和长英质岩浆作用形成的小岩体中都有可能形成大的矿床^[6]。镁铁质岩浆作用形成的矿床包括岩浆型 Cu-Ni-PGE 硫化物矿床(如俄罗斯 Norilsk-Talnakh、中国甘肃金川、加拿大 Voisey’s Bay 等)、Fe-V-Ti 氧化物矿床(如中国四川攀枝花、河北大庙等)和金刚石矿床(如中国辽宁瓦房店地区以及山东蒙阴地区的金刚石矿床)。长英质岩浆作用形成的矿床包括 Cu-Mo-Au 斑岩型小岩体矿床(如中国安徽沙

坪沟、陕西金堆城、河南上房沟等)、W-Sn 小岩体矿床(如中国湖南柿竹园、江西西华山等)、Nb-Ta 小岩体矿床(如中国广西栗木、江西宜春)等。小岩体成(大)矿并非意味着巨量成矿物质主要来自小岩体自身,而是指深部熔融形成的含矿岩浆经历了复杂的上侵、演化与就位的过程,致使巨量矿质聚集或耦合到包含小岩体在内的现存空间的一种成矿作用。

镁铁质小岩体成(大)矿的机制为:地幔橄榄岩部分熔融形成镁铁质岩浆上侵到地壳深部的阶段性岩浆房,经过初步的分异和成矿物质的预富集,自上而下形成不含矿岩浆、含矿岩浆、富矿岩浆和矿浆,这些岩浆和矿浆分批次脉动式上侵。一般早期上侵的不含矿或含贫矿的岩浆分布范围很大或较大,后期脉动式侵入的含矿岩浆、富矿岩浆和矿浆依次就位于现存较小的空间成岩成矿,形成小岩体成(大)矿。富矿岩浆和矿浆多就位于岩体的底部或尾部,体现出尾羽成矿的特征。这个模式简要概括为深部熔离(预富集)→分期贯入→终端岩浆房聚集成矿(图 1)。

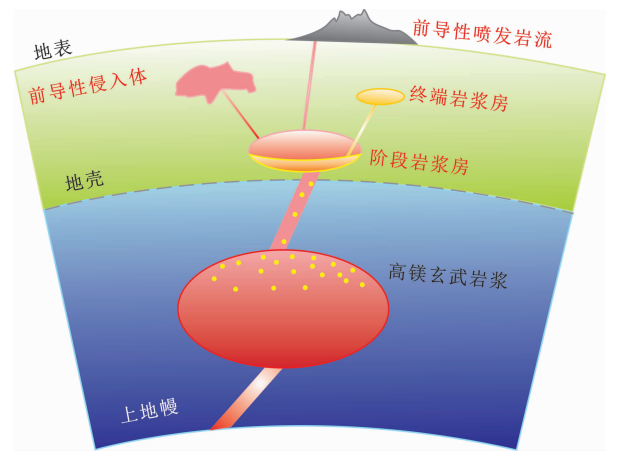


图 1 镁铁—超镁铁质小岩体成矿模式
Fig. 1 Mineralization Model of Mafic-ultramafic Small Intrusive

长英质小岩体成(大)矿的机制为:地壳内形成中酸性岩浆,上侵到上地壳约 5 km 时达到浮力平衡,形成深部预富集岩浆房;在岩浆房中,大量富挥发性组分和致矿金属的岩浆对流向岩浆房头(顶部)部集中,促使这里的岩浆注入浅部—超浅部地壳(3 km 以深至几百米深度),并形成流体的外壳;去气后的高密度携矿岩浆流体下沉,残留空间由新鲜的、富流体的、低密度岩浆再次注入,并向外壳释放新的流体和热;当这些流体冷却时,不断堆积金属成矿物质,如此循环直至岩浆固结,矿体主要位于小岩体头部(图 2)。



图2 长英质小岩体成矿模式

Fig. 2 Mineralization Model of Felsic Small Intrusive

2 理论指导找矿范例

2.1 镁铁质小岩体成(大)矿的找矿突破范例

在镁铁质岩浆成矿与找矿过程中,需依照镁铁质小岩体成(大)矿机制——尾部成矿特征,由上而下、由外而内、由浅而深、由早到晚划分清楚前导性喷出岩、前导性侵入岩、继发性侵入岩(相)、继发性贫矿体(相)、继发性富矿体(相)和晚期岩浆体。前导性岩浆往往指示了岩浆深部预富集作用的存在;继发性岩浆指示了现存成矿作用的空间意义,甄别继发性岩浆(体)是找矿突破的必然途径。这一划分过程体现在野外和室内各项具体工作中。此外,物探、化探和遥感技术在寻找镁铁—超镁铁质岩体及矿体中有相当重要的作用,在勘查选区确定和隐伏矿体找寻过程中应充分利用。

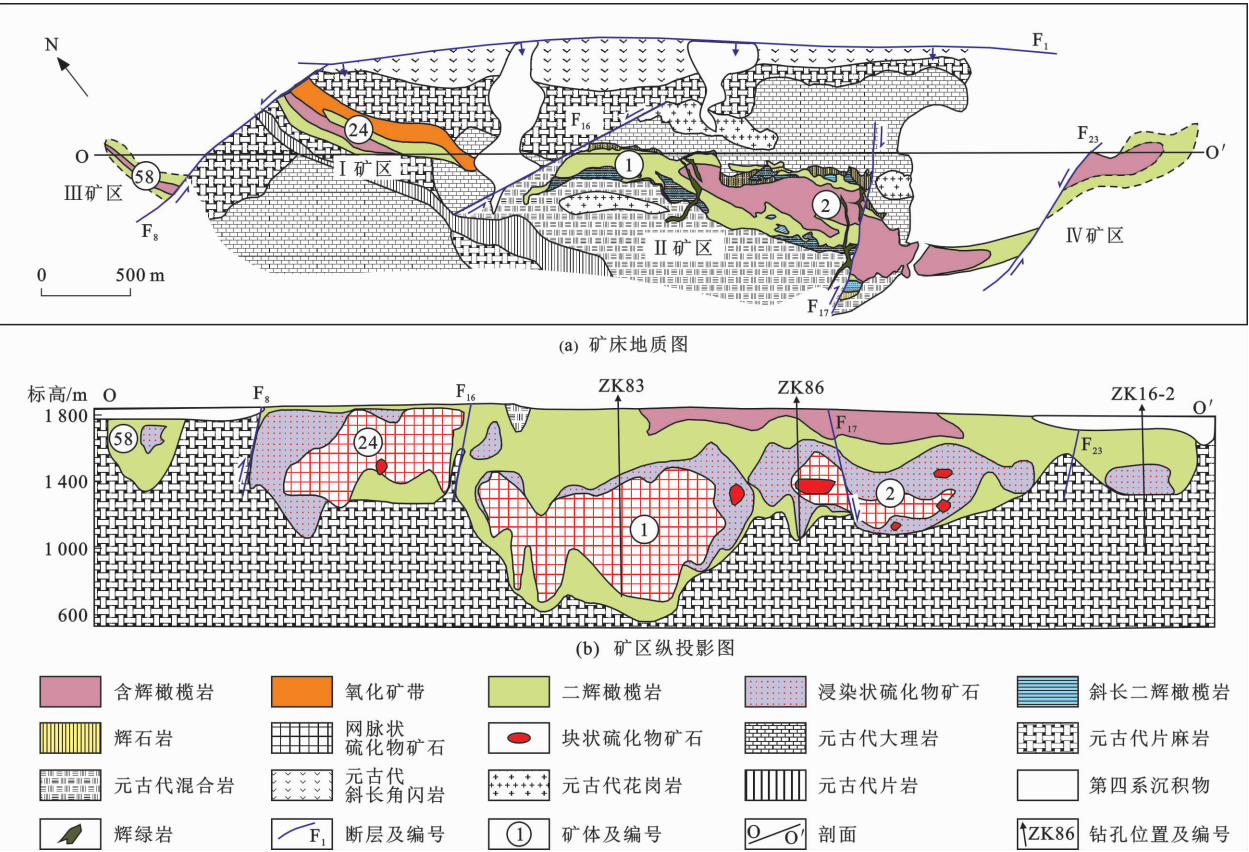
甘肃金川岩浆型 Cu-Ni-PGE 硫化物矿床是中国最大、世界第三大的岩浆硫化物矿床,含有超过 5×10^8 t 硫化物矿石(Ni 品位为 1.1%,Cu 品位为 0.7%)^[10]。金川含矿镁铁—超镁铁质岩体东西长约 6 500 m,宽 20~527 m,出露面积约 1.34 km²,最大延深大于 1 100 m。岩体以 NW—SE 向侵入于前震旦系白云质大理岩及混合岩中。勘探者根据硫化铜镍矿体被发现和勘探先后,由西向东依次划分为Ⅲ、Ⅰ、Ⅱ、Ⅳ等 4 个矿区(图 3)。Ⅱ矿区的找矿突破是应用“小岩体成(大)矿”理论指导岩浆硫化物矿床勘查的最好范例。

Ⅱ矿区含矿超镁铁质岩体位于Ⅰ矿区岩体东延部分,岩体长约 2 000 m,平均宽 300 m,西部仅宽

20 m,而东部宽达 500 m,平面上呈大型透镜体(图 3)。Ⅱ矿区为金川镁铁—超镁铁质岩体中出露面积最大的岩体,绝大部分出露于地表,尤其是西段出露甚好,且呈现了较好的岩浆分异作用。在金川Ⅰ矿区找矿突破之后,经过前后几年的地质填图和钻孔勘探表明,Ⅱ矿区岩体西部在超过 200 m 深度处呈尖灭状态,有封闭趋势。此外,当时物探资料表明,Ⅱ矿区 200 m 以上有零星的激发极化异常,没有矿化体显示,而 200 m 以下因激发极化技术的局限性导致其显示不了准确的信息。

1965 年,祁连山地质队技术负责人主持编制Ⅱ矿区深部找矿设计方案时,认为虽然Ⅱ矿区西段岩体在超过 200 m 深度处封闭尖灭了,但呈现出一种不自然的状态。当时,他们推测含矿岩体有可能从钻孔控制点之间向深部“漏”下去了。因此,在Ⅱ矿区西部设计了一批深度 400~550 m 的钻孔,寻找漏向深部“岩枝”中的矿体。在这种理论思想的指导下,首先施工的 6 个钻孔中有 5 个位于西部,分别是 2 行钻孔 ZK21、12 行钻孔 ZK22、26 行钻孔 ZK23、8 行钻孔 ZK24、16 行钻孔 ZK26。其中,12 行钻孔 ZK22 预计深度为 530 m,计划打到岩枝中矿体后将于 460 m 深度处穿过去进入底盘围岩;但实际钻至 371 m 深度时,钻孔穿过了超镁铁质岩体,见到了下盘围岩白色大理岩,且超镁铁质岩体有继续封闭的迹象。按照设计见到底盘围岩 30 m 就得终孔的原则,钻孔施工部门提出终孔。大理岩是矿体的“底盘”,预示着钻孔 ZK22 和其他钻孔一样没有希望。形势极为严峻!是停钻还是继续钻进?

祁连山地质队技术负责人和地勘组坚持应继续打下去,通过对已有资料的综合分析认为,白家咀子铜镍矿(现为金川 Cu-Ni-PGE 硫化物矿床)是岩浆熔离矿床,有用组分通常在岩体底部相对凹陷部位富集。已经结束勘探的Ⅰ矿区矿体直接出露地表,矿体最大延伸超过 500~600 m,且Ⅰ矿区部分含矿岩枝贯入到底盘围岩中。与Ⅰ矿区相比,Ⅱ矿区地表虽然无矿,但是两个矿区岩石特征和成矿条件相似;此外,Ⅱ矿区岩体规模较大,且岩浆分异更好。虽然Ⅱ矿区东部已经施工的 19 个钻孔都未见矿,只见到了大理岩,钻孔 ZK22 中虽然见到超过 30 m 矿化橄榄辉石岩,但含矿最好的纯橄榄岩未找到。那么这个钻孔中所见橄榄辉石岩是不是一个分枝岩体呢?如果推测正确,则目前打到的岩体并不是含矿的主岩体。如果含矿岩体在更深的部位,那Ⅱ矿区西段靠近Ⅰ矿区的钻孔 ZK22 将是最有希望的。此



外,现有物探资料表明,Ⅱ矿区岩体除了与Ⅰ矿区含矿岩体有相似的高极化率、高磁化率、高重力布格异常和低电阻率之外,Ⅱ矿区磁法异常图中在最宽异常峰值区域还有一个小的波峰(图 4),因此应该将每一个异常峰值都逐一定性,而不能简单地分类定性,也许这一小的峰值就代表下部的含矿岩枝。

按照上述勘探思想,勘探者继续向深部钻探。当钻至 410.71 m 深度时,钻机穿过大理岩后又见到了超镁铁质岩体,这就是所期待的第二个“岩枝”!当钻机钻到孔深 566.71 m 时,见到下部岩枝中的隐伏富矿体——海绵状铜镍矿!随后便是几次修改设计,多次追加进尺并换上了千米大钻,一直钻至 924.87 m 深度才穿透岩体和矿体。钻孔 ZK22 终孔深度为 944.38 m,矿体厚度为 358.16 m,从而取得了Ⅱ矿区深部找矿的重大突破。最终,Ⅱ矿区探明的地质储量为:矿石量 $32\,867.8\times 10^4$ t,镍金属量 4 099 882 t,铜金属量 2 676 987 t。其中,工业储量镍金属量为 2 412 326.7 t,铜金属量为 1 551 729.9 t;远景储量镍金属量为 1 687 555.6 t,铜金属量为 1 125 257.4 t。

金川Ⅱ矿区钻孔 ZK22 之所以能打到 924.87 m,皆因地质勘探者对此钻孔的目标具有明确认识:一定要打到继发性岩浆产物的海绵状纯橄榄岩富矿体,因为这才是岩浆尾部成矿的主要标志。正因为对尾部成矿规律有这种信心,所以在上部见到橄榄辉石岩后又进入大理岩时,坚持不能停钻,一定要继续钻下去,直到见到了厚大的纯橄榄岩海绵状富矿体后才完满终孔。

2.2 长英质小岩体成(大)矿的找矿突破范例

在长英质岩浆成矿与找矿过程中,运用各种地质、物探、化探方法判别确定小岩体头部可能隐伏地下的位置,是达到找矿突破的重要途径。典型范例是安徽沙坪沟超过 200×10^4 t 巨型钼矿床,安徽省地质矿产勘查局 313 地质队利用此方法找到隐伏于地下 200 m 的小岩体头部厚大富钼矿体。

沙坪沟超大型钼矿所处的银沙地区,位于秦岭—大别斑岩型小岩体钼矿带东延部分。在 20 世纪 50 年代到 80 年代期间,前人先后开展过区域地质调查、物化探普查及铅锌矿普查工作。1977~1981 年,安徽省地质矿产勘查局 313 地质队首次在

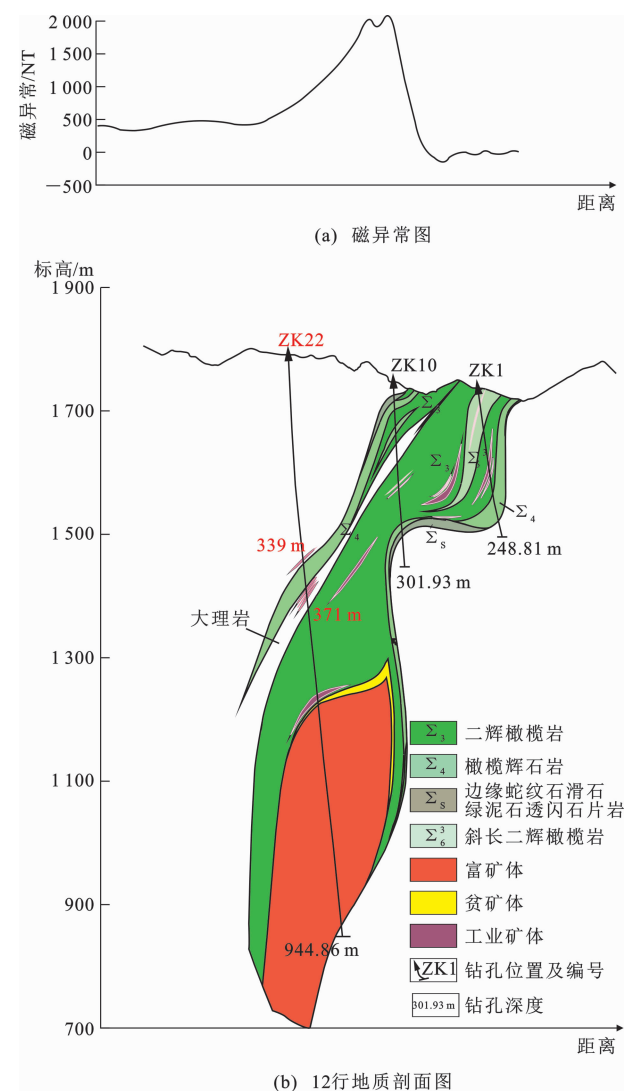


图 4 金川 Cu-Ni-PGE 硫化物矿床Ⅱ矿区 12 行地质剖面及磁异常图

Fig. 4 Geological Section and Magnetic Anomaly Diagram of Line 12 in Segment II of Jinchuan Cu-Ni-PGE Sulfide Deposit

爆破角砾岩中发现了钼矿化,该区被认为是寻找爆破角砾岩型钼、多金属及稀有矿产的远景区,但始终未获得找矿突破。

2001 年开始,安徽省地质矿产勘查局 313 地质队在充分对比同处于秦岭—大别成矿带东段的河南栾川、汤家坪等典型斑岩小岩体钼矿的基础上,在有利的构造部位(邻近桐柏—桐城断裂和六安断裂的 EW 向与 NE 向两组构造形成网格状构造发育),重点针对小岩体、蚀变带和化探异常(地表石英正长岩中围绕隐伏钼矿体周边 Pb-Zn 异常发育)开展工作。摸清地表含钼石英正长岩小岩体的分布范围和蚀变带后,他们布孔钻探验证,自 512.16 m 深度处至终孔(1 201.09 m 深度处)连续见厚 688.93 m

的钼矿,平均品位为 0.10%,从而取得岩体上部围岩全岩矿化的新认识,突破了以前脉状矿化的束缚(图 5)。详查勘探结果显示:唯一的隐伏主矿体受花岗斑岩穹窿控制,分布于斑岩体头部及与石英正长岩接触带中,呈蘑菇状椭球体,厚度大、品位高、保存完整、矿化连续。矿体具有长英质斑岩小岩体矿床的典型特征。

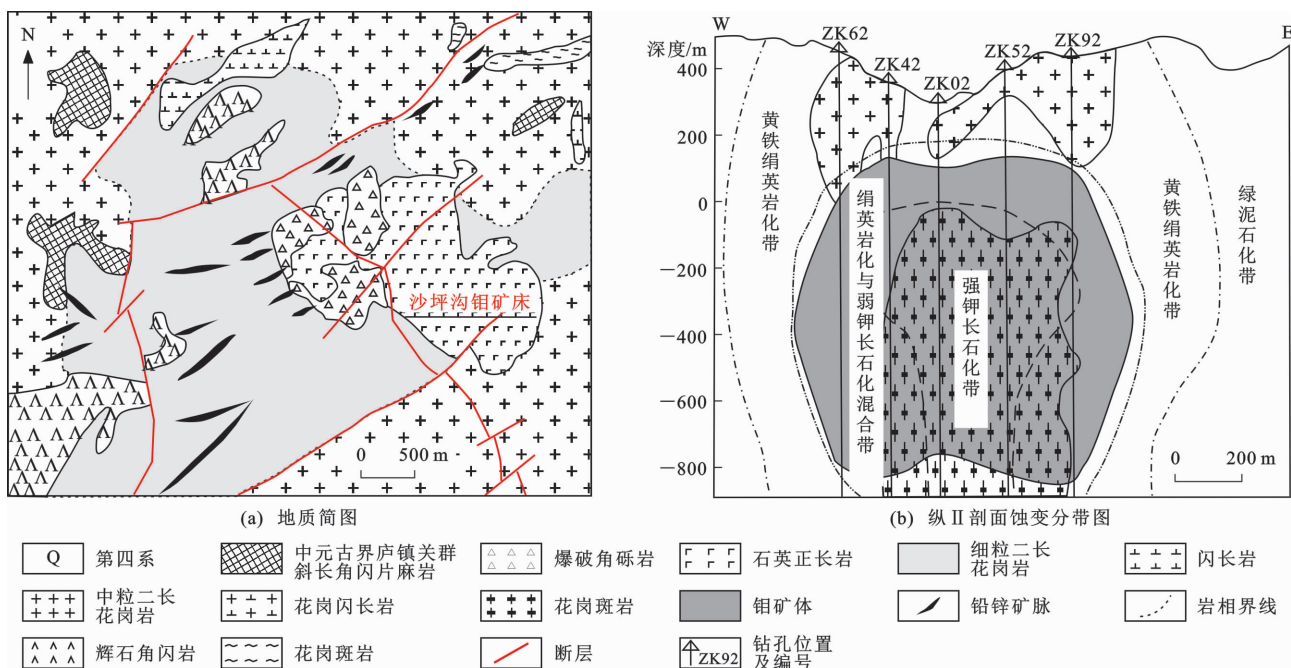
沙坪沟超大型斑岩钼矿的勘查突破,是在有利成矿区带中,依据区域典型斑岩小岩体钼矿找矿成果对比取得的,是区域性“就矿找矿”的典型实例。正如安徽省地质矿产勘查局 313 地质队在总结找矿经验材料中所讲:“本次钼矿勘查是在进行区域成矿条件对比基础上,在有利的构造部位,重点针对小岩体、蚀变带和化探异常开展勘查工作,最后取得突破的。”这就是矿床勘探者抓住了有长英质小岩体成(大)矿头部特征,钻探验证实现了重大突破。沙坪沟超大型钼矿勘查实践对今后具有类似特征的有利隐伏区的“攻深找盲”工作起到很大的启示作用。

3 主要科学问题

众所周知,成矿系统是在一定的时空域中,控制矿床形成和保存的全部地质要素和成矿作用动力过程,以及所形成的矿床系列、异常系列构成的整体,是具有成矿功能的一个自然系统^[11-13]。对于与小岩体成(大)矿相关的矿床,主要的科学问题包括成矿岩浆(热液)演化的物理化学过程,小岩体与大矿床之间的质量平衡,含矿岩体的就位深度、隆升高度、剥蚀程度等。下面以岩浆型 Cu-Ni-PGE 硫化物矿床为例阐述小岩体成(大)矿理论的主要科学问题。

3.1 地幔部分熔融形成富 Cu-Ni-PGE 玄武质岩浆

在常见的地幔橄榄岩中,Ni 主要赋存于橄榄石晶体中,而 PGE 和 Cu 主要赋存于小的硫化物颗粒中。随着地幔部分熔融作用的开始(部分熔融程度低于 10%),Ni 将在硅酸盐岩浆、残留的橄榄石晶体与硫化物颗粒之间分配,PGE 和 Cu 则完全保留在残留的硫化物颗粒中。随着部分熔融程度的升高(约 15%),地幔岩石中硫化物颗粒被完全溶解,Ni 将在镁铁质岩浆与残余的橄榄石晶体之间分配,而 PGE 和 Cu 将完全溶解在镁铁质幔源岩浆中。因此,岩浆型 Cu-Ni-PGE 硫化物矿床成矿的原生岩浆一般为来自地幔的中等深度经中等程度熔融形成的拉斑质苦橄岩浆和较大深度经高等或中等程度部分熔融的科马提岩浆,这些岩浆具有较高的温度(1 400 ℃~1 600 ℃)以及较高的亲铜元素含量;而



图件引自文献[14]

图 5 沙坪沟钼矿地质简图及纵 II 剖面蚀变分带图

Fig. 5 Geological Sketch Map and No. II Geological Vertical Section Showing Distribution of Alteration Zones in Shapinggou Molybdenum Deposit

地幔浅部—超浅部低程度熔融形成的玄武质岩浆和碱性苦橄质岩浆很难形成该类矿床(图6)^[15]。

3.2 硫化物熔离作用

岩浆型 Cu-Ni-PGE 硫化物矿床形成的首要条件是岩浆演化过程中达到硫饱和。Li 等给出了硫化物饱和时岩浆中 S 含量 (Sulfur Content at Sulfide Saturation, SCSS) 计算公式, 其是温度、压力、熔体组分等岩浆物理化学组分的函数^[16]。当岩浆中的 S 含量大于硫化物饱和时岩浆中的 S 含量, 硫化物将会从硅酸盐岩浆中熔离^[17-18]。

研究表明:硫化物饱和时岩浆中 S 含量随温度的降低而降低^[19];与此相反,其随着压力的降低呈指数升高^[20]。自然界中,随着岩浆向地壳运移,压力降低导致的硫溶解度的升高量远远大于温度降低导致的硫溶解度的降低量,也就是说岩浆在上升过程中硫的溶解度是逐渐升高的。因此,大部分玄武质岩浆在上升过程中不可能达到硫化物饱和,除非这些岩浆经历至少 60% 的分离结晶或者岩浆组分发生变化^[21]。

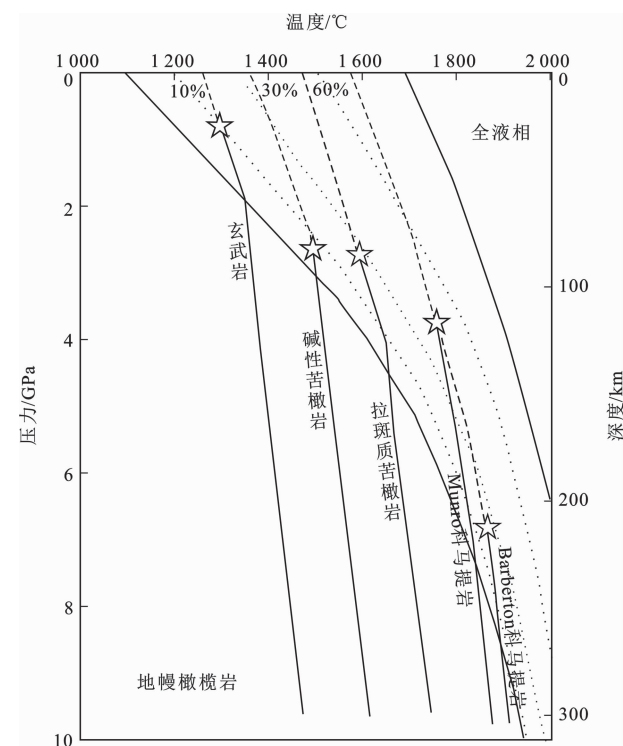
随着岩浆温度、压力等物理条件的降低,镁铁质岩浆中橄榄石、斜方辉石、单斜辉石等硅酸盐矿物将开始结晶,残余岩浆中 S 含量将逐渐升高,同时岩浆中的 Ni 也大多分配进入结晶的橄榄石晶体中,因此即使高程度分离结晶作用使得岩浆中硫达到饱和,

也很难使得亲铜元素发生富集。此外,岩浆在上升侵位的过程中往往会同化周围的地壳物质,使得自身组分发生变化。如果同化混染富铁质地层,岩浆中 Fe 含量的升高将使得岩浆中硫溶解度升高^[22];同化富硅长英质组分,岩浆中 Si 含量的升高将使得硫的溶解度降低^[13]。如果同化碳酸盐岩地层,将导致岩浆中氧逸度升高。当氧逸度为 1.5~2.0 时,岩浆中硫化物(S^{2-})是不稳定的,最终将被氧化形成硫酸盐(S^{6+})^[17-18,23],因此,大多数岩浆型 Cu-Ni-PGE 矿床形成时的母岩浆具有还原性质^[24-29]。如果岩浆同化的围岩物质中富含硫(如石膏地层),那么岩浆中的 S 含量就会上升,使得岩浆中 S 含量超过其溶解度,这将是促使岩浆中硫化物发生熔离的最有效手段^[30]。

总之,岩浆型 Cu-Ni-PGE 硫化物矿床成矿过程中,岩浆源区组分和供应数量、供应速度发生变化,或岩浆演化过程中加入某些成矿物质,或岩浆温度、压力、氧逸度等参数发生变化,都会导致岩浆中硫溶解度、亲铜元素在硅酸盐岩浆与硫化物熔体之间的分配发生变化。因此,物理化学条件的变化对矿质含量、矿质组分等都有明显的控制和影响,同时还直接影响到成矿作用机制的变化。

3.3 小岩体与大矿床之间的质量平衡

已有的勘查结果表明:大型—超大型矿床往往



图中百分数代表地幔橄榄岩部分熔融程度;实线代表固相地幔橄榄岩部分熔融上升过程;虚线代表液相玄武质岩浆上升过程;星点代表玄武质岩浆从地幔源区分离时的温度和压力条件;

图件引自文献[15]

图 6 地幔橄榄岩部分熔融示意图

Fig. 6 Schematic Diagram of Partial Melting of Mantle Peridotites

与小岩体紧密联系在一起,这是一种客观存在。但是,从理想的岩浆(热液)体系质量平衡角度来看,小岩体无论如何也不可能提供如此数量的成矿物质来满足形成大型—超大型矿床的要求。

本文仍然以岩浆型 Cu-Ni-PGE 硫化物矿床为例,亲铜元素 Ni、Cu、PGE 在硫化物熔体与硅酸盐岩浆之间的分配系数的数量级分别为 10^2 、 10^3 、 10^5 ^[31-33],因此当早期形成的硫化物熔体不断与后期通过的岩浆发生相互作用时,硫化物熔体中亲铜元素含量将逐渐升高。基于质量平衡的计算表明,中国金川矿床中约 545×10^4 t 镍金属资源量大概需要约 300 km^3 的玄武质岩浆参与成矿。俄罗斯 Noril'sk 地区含矿岩体的体积仅约为 3.5 km^3 ,而其镍金属储量达 $2\,300 \times 10^4$ t,意味着约 $1\,000 \text{ km}^3$ 的玄武质岩浆参与了成矿^[34-35]。因此,形成大型铜镍矿所需的金属物质需要大量的幔源岩浆。由于成矿的岩体往往很小,如金川 Cu-Ni-PGE 硫化物矿床,那么大量的岩浆到哪去了呢?是被剥蚀掉了,还是侵入到其他空间?龙首山镁铁质岩带中茅草泉岩体的锆石 U-Pb 年龄为 $(832.5 \pm 1.5) \text{ Ma}$ ^[36],金川岩体

的锆石 U-Pb 年龄为 $(831.8 \pm 0.6) \text{ Ma}$ ^[37],在误差范围内一致,具有时间上的耦合性;岩石地球化学特征具相似性,都属于 EM I 型富集地幔源区,具有同源岩浆特征;龙首山隆起带中镁铁质岩体群弥补了金川小岩体成(大)矿的岩相缺失、岩浆质量缺失^[36]。

3.4 含矿岩体的就位深度、隆升高度、剥蚀程度

以往关于岩浆型 Cu-Ni-PGE 硫化物矿床的研究,多集中讨论矿床的成因和形成过程,包括成矿环境和年代、物质来源、成矿作用和矿床模式等,而对矿床形成后的变化缺乏系统论述。翟裕生等曾多次提到,应该注意矿床形成后发生的变化,包括矿床、矿体自身所经历的改变和矿床所处环境和空间位置的变化^[38-42]。影响矿床变化与保存因素众多,在诸多因素中,区域隆升与剥蚀起着关键性的作用。很多矿床,尤其是中、深成的内生矿床,如果其形成后所处区域没有经受隆升与剥蚀作用,那么它们很难被发现并开发。一些形成环境较浅的矿床则会因后期的隆升与剥蚀而暴露地表,有时可能遭受部分破坏甚至完全消失。因此,关注成矿岩体的就位深度、隆升高度、剥蚀程度是非常有必要的。

例如,对于金川矿床含矿母岩浆的就位深度,国内学者通过矿物温压计计算表明其成岩温度范围为 $996 \text{ }^\circ\text{C} \sim 1\,884 \text{ }^\circ\text{C}$,成岩压力为 $0.1 \sim 2.0 \text{ GPa}$ ^[43-45];而铬铁矿和橄榄石中多相包裹体的相平衡关系以及热力学计算则表明岩体的成岩温度为 $1\,000 \text{ }^\circ\text{C} \sim 1\,320 \text{ }^\circ\text{C}$,岩浆房深度为 $4 \sim 15 \text{ km}$ ^[46]。关于金川矿床成矿后的剥蚀程度和保存变化过程,系统的热年代学研究能够深入细致地恢复矿床的热-剥露历史,是研究矿床保存变化和评价勘查潜力的有效途径。综合应用磷灰石、锆石(U-Th)/He、磷灰石裂变径迹,以及斜长石和角闪石 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 等中—低热年代学分析和热史正反演模拟方法,刻画金川含矿岩体热历史,定量计算隆升高度和剥蚀深度。已有研究成果表明,金川矿床自寒武纪开始经历冷却过程,最晚在早泥盆世暂时结束冷却并经历短暂增温;在泥盆纪至二叠纪期间经历缓慢冷却(可能持续至中三叠世);并在晚中生代持续经历冷却剥露^[47]。研究金川矿床成矿后的剥蚀程度和保存变化过程,对于岩浆铜镍硫化物矿床保存、成矿潜力评价以及深部找矿等都具有重要的理论和实际意义。

4 勘查意义

21 世纪以来,小岩体成(大)矿的勘查成果十分显著,主要有青海夏日哈木超大型镍矿、新疆图拉尔

根大型镍矿、甘肃黑山中型镍矿,西藏冈底斯超大型铜钼铅锌斑岩成矿带,安徽沙坪沟巨型钼矿、内蒙古曹四夭超大型钼矿、黑龙江岔路口超大型钼矿,江西大湖塘超大型钨矿、朱溪巨型钨矿,湖南芙蓉超大型锡矿,福建紫金山超大型金铜矿,云南北衙超大型金矿等。这些小岩体成(大)矿都是这个时期发现并勘查成功的,由此可见小岩体成(大)矿将是今后岩浆(热液)成矿作用的一个主要勘查方向。

在一个有利成矿的区域内,各种地质、物探、化探、遥感信息纷呈的现象是必然的,需要抓住关键信息要素。例如,金川Ⅱ矿区①号隐伏富矿体在地表不仅反映有磁异常,而且磁异常曲线顶部有一个叠加的峰值[图 4(a)],这个峰值恰恰就是隐伏于约 400 m 之下的海绵状富矿体顶部的反映,因为矿体中含大量磁黄铁矿,使得岩体磁异常又叠加了矿体磁异常。如何能够快捷、经济地从众多岩体中筛选出含矿岩体,建立成矿岩体含矿性评价指标体系十分重要。

依据成矿条件、成矿过程、控矿因素、有效找矿方法等,本文总结出岩体含矿性评价的筛选方法。

①野外地质定性:围岩地层富硫;岩相多样化,多期侵入;矿物粒度变化较大;富含斜方辉石、角闪石;岩石发生蚀变;②地球化学定量:橄榄石 Fo 牌号为 70~90;橄榄石中 Ni 含量小于 $4\,000\times10^{-6}$;全岩的镁铁比值介于 2.0~6.5;全岩的球粒陨石标准化稀土元素配分模式呈右倾型;全岩微量元素中 Cu/Zr 值大于 1;③化探与物探定位:区域上 Cu、Ni、Co、Cr 综合化探异常;高磁、高重、高极化、低电阻的物探组合异常;物探技术探测矿体埋藏深度。镁铁—超镁铁质岩体含矿性评价方法从野外地质角度定性认识岩浆演化信息;从室内测试角度定量揭示岩石矿物信息;从物探、化探角度确定隐伏矿体信息;层层筛选,改进与完善传统找矿勘查方法,解决评价岩体成矿潜力的问题(图 7)。

5 结 语

小岩体成(大)矿理论揭示了岩浆(热液)成矿系统的本质,岩浆在很多矿床成矿过程中发挥了重要作用(提供热动力、矿物质或流体)。然而,岩浆(热液)体系是一个十分复杂的系统,小岩体成(大)矿理

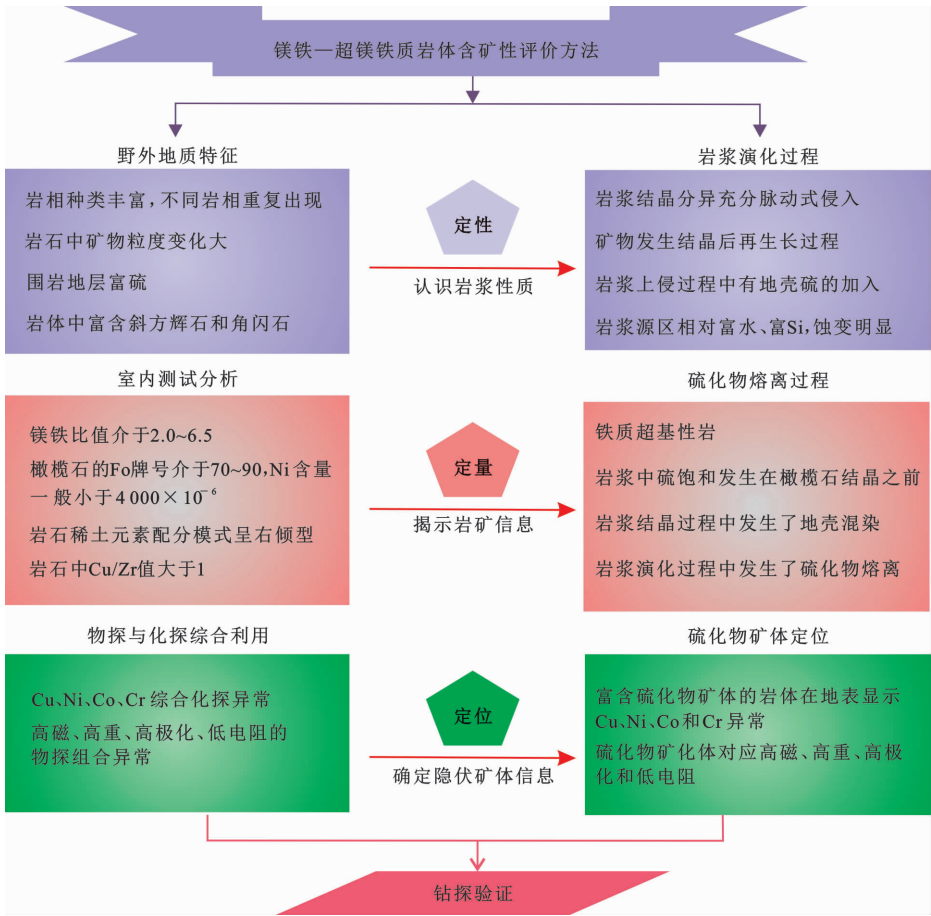


图 7 镁铁—超镁铁质岩体含矿性评价方法

Fig. 7 Evaluation Method of Ore-bearing Mafic-ultramafic Intrusions

论的发展方向应是研究成矿的热力学原理、控矿因素等。因此,小岩体成(大)矿还需要在理论上不断探索完善,并在实践中不断提高找矿效果。

在小岩体成(大)矿理论的找矿勘查应用中,应充分考虑对已有典型矿床研究成果的推广,特别是成矿岩体地质、地球化学评价指标体系以及物探、化探勘查模型等。小岩体一般与围岩物性有异、边界明显,而镁铁—超镁铁质小岩体有关的矿体与岩体相似,往往有着更为明显的重、磁、电等方面的特性,地球物理勘探技术是找寻隐伏岩体、矿体的有效途径之一。但是由于地质条件和地理景观的复杂性,不同地球物理勘探方法在应用于不同地区、不同矿床时,其效果存在很大差异。为此,围绕小岩体找矿,开展新的物探找矿示范研究很有必要。对于遥感技术和化探技术应用,情况类同。

近年来我国找矿成果显示,小岩体成(大)矿理论已被多个大型、超大型以及巨型矿床的发现所证实,有着巨大的找矿指导意义。虽然小岩体成(大)矿理论体系已经初步建立,但该理论体系还要经过实践的进一步检验,并不断丰富和发展。特别是在找矿实践中,一方面需要加强推广应用,特别是第一线勘查部门,另一方面还要根据实际情况,不断跟踪和总结应用效果,以期不断提高找矿成效。已有找矿突破实例表明,在小岩体中寻找大矿床取得了很大成效。为此,从找矿战略角度出发,在我国加强对小岩体成(大)矿理论的推广应用,具有重大实际意义。

参考文献:

References:

[1] 毛景文.超大型钨多金属矿床成矿特殊性:以湖南柿竹园矿床为例[J].地质科学,1997,32(3):351-363.
MAO Jing-wen. Etallogenic Speciality of Super Giant Polymetallic Tungsten Deposit: Taking the Shizhuyuan Deposit as an Example[J]. Scientia Geologica Sinica, 1997, 32(3): 351-363.

[2] 王登红,陈郑辉,黄国成,等.华南“南钨北扩”、“东钨西扩”及其找矿方向探讨[J].大地构造与成矿学,2012,36(3):322-329.
WANG Deng-hong, CHEN Zheng-hui, HUANG Guo-cheng, et al. Northwards and Westwards Prospecting for Tungsten and Its Significance in South China[J]. Geotectonica et Metallogenia, 2012, 36(3): 322-329.

[3] 姚书振,周宗桂,吕新彪,等.秦岭成矿带成矿特征和找矿方向[J].西北地质,2006,39(2):156-178.
YAO Shu-zhen, ZHOU Zong-gui, LYU Xin-biao, et al.

Mineralization Characteristics and Prospecting Potential in the Qinling Metallogenic Belt[J]. Northwestern Geology, 2006, 39(2): 156-178.

[4] 谢桂青,毛景文,李瑞玲,等.鄂东南地区大型矽卡岩型铁矿床金云母⁴⁰Ar-³⁹Ar同位素年龄及其构造背景初探[J].岩石学报,2008,24(8):1917-1927.
XIE Gui-qing, MAO Jing-wen, LI Rui-ling, et al. ⁴⁰Ar-³⁹Ar Phlogopite Dating of Large Skarn Fe Deposits and Tectonic Framework in Southeastern Hubei Province, Middle-Lower Reaches of the Yangtze River, Eastern China [J]. Acta Petrologica Sinica, 2008, 24(8): 1917-1927.

[5] 汤中立.中国的小岩体岩浆矿床[J].中国工程科学,2002,4(6):9-12.
TANG Zhong-li. Magmatic Ore Deposits in Small Rockbody in China [J]. Engineering Sciences, 2002, 4(6): 9-12.

[6] 汤中立,李小虎.两类岩浆的小岩体成(大)矿[J].矿床地质,2006,25(增1):35-38.
TANG Zhong-li, LI Xiao-hu. Small Intrusions Forming Large Deposits in Two Types of Magma [J]. Mineral Deposits, 2006, 25(S1): 35-38.

[7] 汤中立,钱壮志,姜常义,等.岩浆硫化物矿床勘查研究的趋势与小岩体成(大)矿系统[J].地球科学与环境学报,2011,33(1):1-9.
TANG Zhong-li, QIAN Zhuang-zhi, JIANG Chang-yi, et al. Trends of Research in Exploration of Magmatic Sulfide Deposits and Small Intrusions Metallogenic System [J]. Journal of Earth Sciences and Environment, 2011, 33(1): 1-9.

[8] 汤中立,徐刚,王亚磊,等.岩浆成矿新探索:小岩体成矿与地质找矿突破[J].西北地质,2012,45(4):1-16.
TANG Zhong-li, XU Gang, WANG Ya-lei, et al. The New Exploration of Magmatic Mineralization: Small Intrusion Mineralization and Geological Prospecting Breakthrough [J]. Northwestern Geology, 2012, 45(4): 1-16.

[9] 汤中立,焦建刚,闫海卿,等.小岩体成(大)矿理论体系[J].中国工程科学,2015,17(2):4-18.
TANG Zhong-li, JIAO Jian-gang, YAN Hai-qing, et al. Theoretical System for (Large) Deposit Formed by Smaller Intrusion [J]. Engineering Sciences, 2015, 17(2): 4-18.

[10] 汤中立,李文渊.金川铜镍硫化物(含铂)矿床成矿模式及地质对比[M].北京:地质出版社,1995.
TANG Zhong-li, LI Wen-yuan. The Metallogenic Model and Geological Characteristics of the Jinchuan

- Pt-bearing Ni-Cu Sulfide Deposit[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1995.
- [11] 翟裕生, 邓 军, 宋鸿林, 等. 同生断层对层控超大型矿床的控制[J]. 中国科学: D 辑, 地球科学, 1998, 28(3): 214-218.
- ZHAI Yu-sheng, DENG Jun, SONG Hong-lin, et al. Control of Stratabound Giant Deposits by Syngenetic Fault[J]. Science in China: Series D, Earth Sciences, 1998, 28(3): 214-218.
- [12] 翟裕生. 论成矿系统[J]. 地学前缘, 1999, 6(1): 14-28.
- ZHAI Yu-sheng. On the Metallogenic System[J]. Earth Science Frontiers, 1999, 6(1): 14-28.
- [13] NALDRETT A, KINNAIRD J, WILSON A, et al. Genesis of the PGE-enriched Merensky Reef and Chromitite Seams of the Bushveld Complex[M]// LI C S, RIPLEY E M. Reviews in Economic Geology: Magmatic Ni-Cu and PGE Deposits: Geology, Geochemistry, and Genesis. New York: Society of Economic Geologists, 2011.
- [14] 张怀东, 王波华, 郝越进, 等. 安徽沙坪沟斑岩型钼矿床地质特征及综合找矿信息[J]. 矿床地质, 2012, 31(1): 41-51.
- ZHANG Huai-dong, WANG Bo-hua, HAO Yue-jin, et al. Geological Characteristics and Comprehensive Ore-prospecting Information of Shapinggou Porphyry-type Molybdenum Deposit in Anhui Province[J]. Mineral Deposits, 2012, 31(1): 41-51.
- [15] ARNDT N T, LESHER C M, CZAMANSKE G K. Mantle-derived Magmas and Magmatic Ni-Cu (PGE) Deposits[M]// HEDENQUIST J W, THOMPSON J F H, GOLDFARB R J, et al. Economic Geology: One Hundredth Anniversary Volume. New York: Society of Economic Geologists, 2005: AV100. 02.
- [16] LI C S, RIPLEY E M. Sulfur Contents at Sulfide-liquid or Anhydrite Saturation in Silicate Melts: Empirical Equations and Example Applications[J]. Economic Geology, 2009, 104(3): 405-412.
- [17] JUGO P J, LUTH R W, RICHARDS J P. An Experimental Study of the Sulfur Content in Basaltic Melts Saturated with Immiscible Sulfide or Sulfate Liquids at 1 300 °C and 1.0 GPa[J]. Journal of Petrology, 2005, 46(4): 783-798.
- [18] JUGO P J. Sulfur Content at Sulfide Saturation in Oxidized Magmas[J]. Geology, 2009, 37(5): 415-418.
- [19] SHIMA H, NALDRETT A J. Solubility of Sulfur in an Ultramafic Melt and the Relevance of the System Fe-S-O[J]. Economic Geology, 1975, 70(5): 960-967.
- [20] WENDLANDT R F. Sulfide Saturation of Basalt and Andesite Melts at High Pressures and Temperatures[J]. American Mineralogist, 1982, 67(9/10): 877-885.
- [21] MAVROGENES J A, O'NEILL H S C. The Relative Effects of Pressure, Temperature and Oxygen Fugacity on the Solubility of Sulfide in Mafic Magmas[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1999, 63(7/8): 1173-1180.
- [22] HOLZHEID A, GROVE T L. Sulfur Saturation Limits in Silicate Melts and Their Implications for Core Formation Scenarios for Terrestrial Planets [J]. American Mineralogist, 2002, 87(2/3): 227-237.
- [23] CARROLL M R, RUTHERFORD M J. The Stability of Igneous Anhydrite: Experimental Results and Implications for Sulfur Behavior in the 1982 El Chichon Trachyandesite and Other Evolved Magmas[J]. Journal of Petrology, 1987, 28(5): 781-801.
- [24] TOMKINS A G, REBRYNA K C, WEINBERG R F, et al. Magmatic Sulfide Formation by Reduction of Oxidized Arc Basalt[J]. Journal of Petrology, 2012, 53(8): 1537-1567.
- [25] MAO Y J, QIN K Z, BARNES S J, et al. A Revised Oxygen Barometry in Sulfide-saturated Magmas and Application to the Permian Magmatic Ni-Cu Deposits in the Southern Central Asian Orogenic Belt[J]. Mineralium Deposita, 2018, 53(6): 731-755.
- [26] WEI W, ZHOU B, POLAP D, et al. A Regional Adaptive Variational PDE Model for Computed Tomography Image Reconstruction[J]. Pattern Recognition, 2019, 92: 64-81.
- [27] CAO Y H, WANG C Y, WEI B, et al. Magma Oxygen Fugacity of Mafic-ultramafic Intrusions in Convergent Margin Settings: Insights for the Role of Magma Oxidation States on Magmatic Ni-Cu Sulfide Mineralization[J]. American Mineralogist, 2020, 105(12): 1841-1856.
- [28] XUE S C, DENG J, WANG Q F, et al. The Redox Conditions and C Isotopes of Magmatic Ni-Cu Sulfide Deposits in Convergent Tectonic Settings: The Role of Reduction Process in Ore Genesis[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 2021, 306(1): 210-225.
- [29] JIA L H, CHEN Y, SU B, et al. Oxygen-fugacity Evolution of Magmatic Ni-Cu Sulfide Deposits in East Kunlun: Insights from Cr-spinel Composition [J]. American Mineralogist, 2022, 107(10): 1968-1981.
- [30] RIPLEY E M, LI C S. Sulfide Saturation in Mafic Magmas: Is External Sulfur Required for Magmatic Ni-Cu-(PGE) Ore Genesis? [J]. Economic Geology, 2013, 108(1): 45-58.

- [31] NALDRETT A J, CABRI L J. Ultramafic and Related Mafic Rocks; Their Classification and Genesis with Special Reference to the Concentration of Nickel Sulfides and Platinum-group Elements[J]. *Economic Geology*, 1976, 71(7): 1131-1158.
- [32] NALDRETT A J, DUKE J M. Platinum Metals in Magmatic Sulfide Ores[J]. *Science*, 1980, 208: 1417-1424.
- [33] PEACH C L, MATHEZ E A, KEAYS R R, et al. Sulfide Melt-silicate Melt Distribution Coefficients for Noble Metals and Other Chalcophile Elements as Deduced from MORB: Implications for Partial Melting[J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1990, 54(12): 3379-3389.
- [34] NALDRETT A J. Magmatic Sulfide Deposits; Geology, Geochemistry and Exploration[M]. Berlin: Springer, 2004.
- [35] 宋谢炎, 陈列锰. “小岩体成(大)矿”的核心: 岩浆通道系统成矿原理、特征及找矿标志[J]. *西北地质*, 2012, 45(4): 117-127.
- SONG Xie-yan, CHEN Lie-meng. The Core Issue of the Large-scale Mineralization in Small Intrusion; Mineralization in Magmatic Plumbing System Principles, Key Features and Exploration Marks[J]. *North-western Geology*, 2012, 45(4): 117-127.
- [36] 焦建刚, 汤中立, 闫海卿, 等. 金川铜镍硫化物矿床的岩浆质量平衡与成矿过程[J]. *矿床地质*, 2012, 31(6): 1135-1148.
- JIAO Jian-gang, TANG Zhong-li, YAN Hai-qing, et al. Magmatic Mass Balance and Metallogenic Process of Jinchuan Cu-Ni Sulfide Deposit[J]. *Mineral Deposits*, 2012, 31(6): 1135-1148.
- [37] ZHANG C L, LI Z X, LI X H, et al. A Permian Large Igneous Province in Tarim and Central Asian Orogenic Belt, NW China: Results of a ca. 275 Ma Mantle Plume? [J]. *Geological Society of America Bulletin*, 2010, 122(11/12): 2020-2040.
- [38] 翟裕生, 林新多, 周宗桂, 等. 花岗岩体构造-化学特征与钨、锡成矿作用[J]. *地球科学*, 1985, 10(4): 11-20.
- ZHAI Yu-sheng, LIN Xin-duo, ZHOU Zong-gui, et al. Granite Tectono-chemistry and W-Sn Metallogenesis [J]. *Earth Science*, 1985, 10(4): 11-20.
- [39] 程小久, 翟裕生. 超大型金属矿床研究现状和某些进展[J]. *地质科技情报*, 1993, 12(4): 75-80.
- CHENG Xiao-jiu, ZHAI Yu-sheng. Some Advances in the Research of Superlarge Metal Deposits[J]. *Geological Science and Technology Information*, 1993, 12(4): 75-80.
- [40] 翟裕生. 金属成矿学研究的若干进展[J]. *地质与勘探*, 1997, 33(1): 13-18.
- ZHAI Yu-sheng. Progresses on Metallization Research[J]. *Geology and Prospecting*, 1997, 33(1): 13-18.
- [41] 翟裕生, 彭润民, 邓 军, 等. 成矿系统分析与新类型矿床预测[J]. *地质前缘*, 2000, 7(1): 123-132.
- ZHAI Yu-sheng, PENG Run-min, DENG Jun, et al. Metallogenic System Analysis and New-type Ore Deposits Forecast[J]. *Earth Science Frontiers*, 2000, 7(1): 123-132.
- [42] 翟裕生, 邓 军, 王建平, 等. 深部找矿研究问题[J]. *矿床地质*, 2004, 23(2): 142-149.
- ZHAI Yu-sheng, DENG Jun, WANG Jian-ping, et al. Researches on Deep Ore Prospecting[J]. *Mineral Deposits*, 2004, 23(2): 142-149.
- [43] 苟国朝, 任端进, JOHAN Z, 等. 金川超镁铁杂岩体中硅酸盐和氧化物的矿物化学特征[J]. *甘肃地质*, 1990(11): 43-70.
- GOU Guo-chao, REN Duan-jin, JOHAN Z, et al. Mineral Chemical Characteristics of Silicate and Oxide in Ultramafic Complex of Jinchuan[J]. *Gansu Geology*, 1990(11): 43-70.
- [44] 吴志勇, 郭原生, 孙淑荣. 金川铜镍硫化矿床成矿温度压力计算及成矿机制探讨[J]. *矿物岩石*, 1992, 12(1): 89-95.
- WU Zhi-yong, GUO Yuan-sheng, SUN Shu-rong. Temperature-pressure Calculation of the Jinchuan Copper and Nickel Sulfide Deposit and Discussion for Mineralogical Mechanism [J]. *Mineralogy and Petrology*, 1992, 12(1): 89-95.
- [45] 徐庆生, 宋学信, 张景凯, 等. 金川超镁铁质岩体矿物化学特征及矿物地质温度计、压力计研究[J]. *甘肃地质学报*, 1994, 3(1): 59-70.
- XU Qing-sheng, SONG Xue-xin, ZHANG Jing-kai, et al. Chemical Characteristics of Minerals in Jinchuan Ultramafic Rocks and Forming *P-T* Conditions of Rocks Obtained by Mineral Thermobarometers[J]. *Acta Geologica Gansu*, 1994, 3(1): 59-70.
- [46] YANG X Z, ISHIHARA S, ZHAO D H, et al. Genesis of the Jinchuan PGE Deposit, China: Evidence from Fluid Inclusions, Mineralogy and Geochemistry of Precious Elements[J]. *Mineralogy and Petrology*, 2006, 86(1): 109-128.
- [47] TAO N, DUAN J, DANISIK M, et al. Paleozoic Tectonothermal Evolution of the Jinchuan Ni-Cu Sulfide Deposit, NW China: New Constraints from $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ and (U-Th)/He Thermochronology [J]. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2023, 250: 105622.