

地电化学在隐伏铜镍矿勘查中的应用及异常形成机理探讨

刘映东^{1,2,3} 张必敏^{2,3} 罗先熔¹

(1. 桂林理工大学地球科学学院, 广西桂林 541004; 2. 中国地质科学院地球物理地球化学勘查研究所, 河北廊坊 065000;
3. 国土资源部地球化学探测技术重点实验室, 河北廊坊 065000)

[摘要] 本文从元素迁移角度探讨地电化学异常形成机理。在野外工作的基础上, 结合前人成果, 通过在金川二矿区采集的地电化学数据结果, 以及该地区的相关资料进行综合研究分析, 有如下推测: (1) 该类地区地电采集的成矿元素的迁移受多个营力多阶段作用, 主要由电化学迁移、地气迁移与水动力迁移所主导; (2) 电化学迁移的模式会对最终地电数据曲线的形态有所影响, 影响的根本因素主要在于矿体形成的电场回路的形态; (3) 地电提取的物质是矿体析出并迁移至地表周围所赋存的元素, 这些元素在地表呈活动态离子、络合物或超微细颗粒被粘土矿物所吸附。

[关键词] 地电化学 金川铜镍硫化物矿 元素迁移 元素赋存

[中图分类号] P632 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 0495-5331(2017)04-10

DOI: 10.13712/j.cnki.dzykt.2017.04.009

Liu Ying-dong Zhang Bi-min Luo Xian-rong. Mechanism of geoelectrochemistry anomalies and application to prospecting of buried Cu-Ni deposits [J]. Geology and Exploration 2017 53(4): 0694-0703.

1 前言

地电化学方法最早由前苏联学者 Yu. S. Ryss 提出并应用于找矿勘查 (Ю. С. Рысс, 1986), 20 世纪 80 年代我国学者崔霖沛等将该方法引入到国内, 随后费锡铨 (1984) 提出了电提取离子法的理论和野外工作技术方法, 之后高云龙等 (1990) 对该技术开展了进一步研究和试验。该方法在接下来的研究过程中进行了多次改进, 从早期的大功率、长时间激发、液态提取装置 (费锡铨, 1992), 发展到现在使用的低电压、小电流、偶极提取独立装置, 改进后采样装置更加轻便化, 提高了采样效率, 而且可对阴阳离子同时提取测试 (康明等, 2003; 孙彬彬等, 2011, 2015)。国内目前普遍使用的提取装置主要由两家单位独立研制而成: 桂林理工大学和中国地质科学院地球物理地球化学勘查研究所。两套装置在结构上有一定差别, 前者研制的装置正负电极水平放置, 后者则垂直放置, 不过捕获原理相同, 都是通过对正

负电极供电, 使电极之间产生电位差, 从而使电极之间及周边土壤中的阴阳离子向两极移动并被泡塑所吸附。

地电化学方法是一种以找寻隐伏矿为主要目的的深穿透地球化学方法, 关于其是如何捕获来自于深部的异常信息从而反映深部矿体或矿化的作用原理一直是勘查地球化学界较为关注的一个问题。在技术刚出现时, 前苏联学者认为施加的大功率人工电场与深部矿体共同构成电解池系统, 该系统可以将深部矿体中的金属离子直接驱动到地表人工装置中, 该观点受当时多数学者认可。后来, 随着元素迁移机理研究的开展和深入, 学术界普遍认为, 经过漫长的地质历史时期深部矿体中的成矿元素可通过各种途径迁移至地表, 地电化学方法可采用小电流供电的方式捕获已迁移至地表的物质, 从而达到指示深部矿化体的目的 (李金铭等, 1992; 熊长林等, 2003; 康明等, 2008; 孙彬彬等, 2015); 同时也有学者在上述论点基础上提出, 小功率电场提取周围元素

[收稿日期] 2017-03-06; [修改日期] 2017-04-13; [责任编辑] 衣骏杰。

[基金项目] 国家重点研发计划项目 (编号: 2016YFC0600603-3)、中国地质调查局项目 (编号: 12120113101500) 和广西隐伏金属矿产勘查重点实验室开放基金项目 (编号: 11-031-20) 联合资助。

[第一作者] 刘映东 (1991 年-), 男, 在读硕士研究生, 专业方向: 勘查地球化学。E-mail: 410645769@qq.com。

[通讯作者] 罗先熔 (1953 年-), 男, 教授, 博士生导师, 现主要从事地球化学专业的教学与研究。E-mail: lxr811@glut.edu.cn

离子同时还能够间接影响深部离子的迁移,从而达到获取深部异常信息的目的(罗先熔等 2013)。

地电化学方法在国内开展了大量的应用试验(王葆华等 2009;曹中煌等 2010;文美兰等 2010;刘秀娟等 2012;满荣浩等 2015;刘攀峰等 2016;谢邦廷等 2016),总体来说,比较有效的矿种包括金矿、铜矿、镍矿、铅锌矿等。在这几类矿床中重点要提一下铜镍硫化物矿床,该类型矿床在我国分布广泛,主要产于华北板块西南边缘、北部、东北部的显生宙造山带及西南地区大火成岩省范围内(张照伟等 2016),是我国镍矿也是铜矿的重要矿床类型。铜镍硫化物矿床是典型的岩浆型矿床,因其矿体由易氧化的硫化物组成,在元素迁移过程中具有其特殊性,同时很多矿床又以隐伏矿形式产出,因此对该矿种开展地电化学理论与方法研究具有重要意义。地电化学已经在部分隐伏铜镍矿区取得了一些成功的应用案例(罗先熔等 2004;汤磊等 2009;黄学强等 2013;文美兰等 2013)。本文选择了一处典型隐伏铜镍硫化物型矿床(甘肃金川铜镍矿二矿区)

开展地电化学方法试验,同时就地电化学异常的形成机理作了进一步探讨,以更好地促进该技术的发展,以及更深入地了解元素从深部矿体运移至地表并被地电化学装置所捕获的整个过程。

2 区域地质背景和矿床特征

甘肃金川铜镍硫化物矿床位于阿拉善断块西南缘的龙首山隆起,属于华北板块的西南边缘(图 1)。该地区景观类型属于干旱-半干旱荒漠区,地表普遍被风成沙土和岩屑所覆盖。区内地层为寒武系至志留系的海相地层,含矿地层为下远古界白家咀组,其上部为前长城纪龙首山群及塔马子沟组,地层走向 NW,倾向 SW。出露岩石主要岩性为蛇纹石化白云质大理岩、黑云母片麻岩及条纹混合岩等变质岩,出露火成岩从超基性到酸性均有分布,但以超基性岩为主,也是矿区内主要的含矿岩石,岩体受风化剥蚀严重。区内构造走向为 NW 向,沿构造走向有 F₁ 等深大断裂,亦存在部分其他方向的小型断裂,经后期构造挤压,局部岩体与围岩为断层接触。

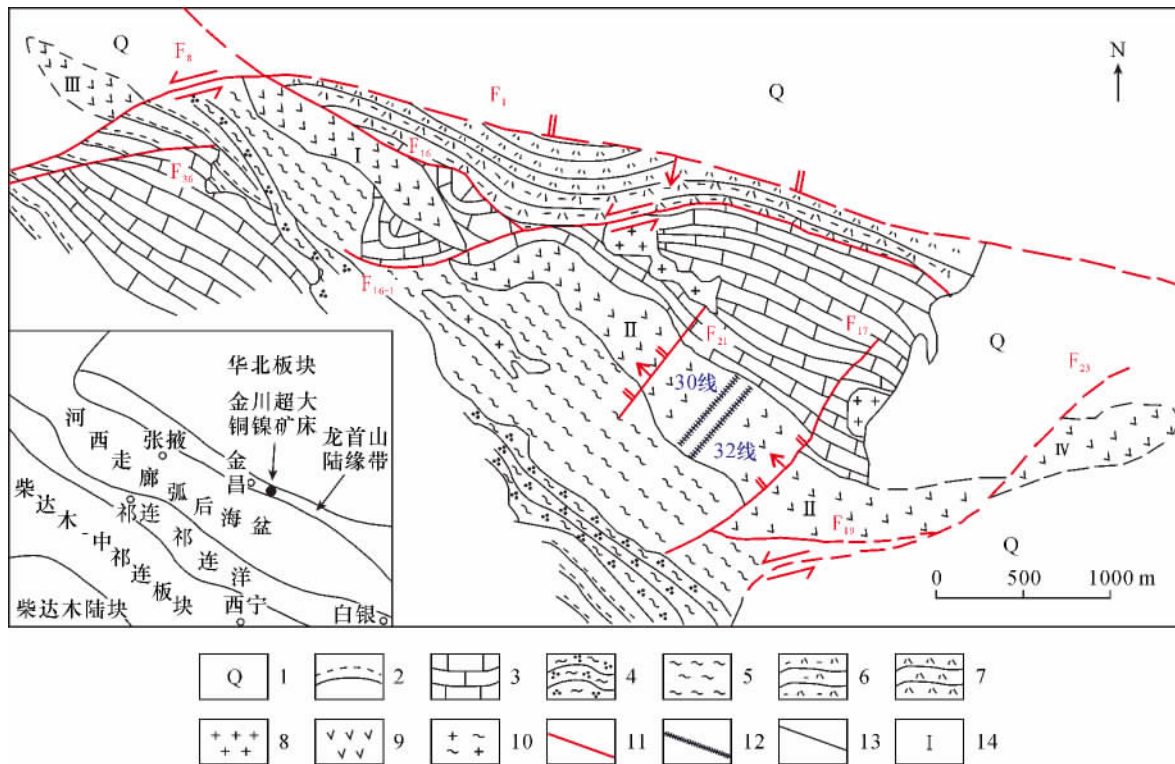


图 1 金川铜镍矿区地质构造简图(汤中立等 1999;文美兰等 2013)

Fig.1 Sketch map showing geological structures of the Jinchuan Cu - Ni deposit(Tang et al. 1999; Wen et al. ,2013)

1 - 第四系; 2 - 条纹混合岩; 3 - 大理岩; 4 - 含硫二运片麻岩; 5 - 均质混合岩; 6 - 黑云斜长片麻岩; 7 - 混合岩; 8 - 晚期花岗岩; 9 - 超基性岩; 10 - 混合花岗岩; 11 - 断层; 12 - 测线; 13 - 岩性界线; 14 - 矿区编号

1 - Quaternary; 2 - striped migmatitic; 3 - marble; 4 - sulphuretted micaceous gneiss; 5 - homogeneous migmatite; 6 - biotite plagioclase gneiss; 7 - migmatite; 8 - late granite; 9 - ultrabasic rock; 10 - granitization granite; 11 - fault; 12 - surveying line; 13 - lithologic boundary; 14 - mining area number

矿区断裂构造相当发育,岩浆活动频繁,总共在三个时期经历有多个期次的强烈构造-岩浆运动,因此该区域形成了超大的铜镍硫化物矿床(师占义等,1980;梁有彬等,1997;解广轰等,1998;汤中立等,1999;曹南石等,2013)。

金川铜镍矿床总共有四个矿区,各矿区地质特征相似。一矿区有200多个铜镍矿体,二矿区300多个,三、四矿区相比较少,各存在37个及42个铜镍矿体(梁有彬等,1997)。本次工作的测试区域位于金川二矿区。

3 野外工作及测试分析

在金川铜镍矿二矿区布置了两条横穿矿体的地电化学采样剖面线(图1),采样点距为20m,线距为100m。其中30号测线取样25个,32号测线取样26个。

本次试验使用桂林理工大学研制的低电压、小电流偶极提取装置,该装置适用于不同景观条件的覆盖区(曹中煌等,2010)。野外工作中将人工电极的两极包裹具较强吸附能力的泡塑作为提取装置,将两极置于测试点位置的B层土壤中(图2),两级之间用导线和9V电池相连接,土壤中加入1L浓度为15%的硝酸搅拌并掩埋,经48h提取后取出。

泡塑样品由有色金属桂林矿产地质测试中心分析,共测试了Ti、Mn、Co、Ni、Cu、Zn、Pb七种元素。泡塑样品在实验室使用灰化法(严洪泽等,2016)进行预处理。测试仪器为美国热电X series电感耦合等离子体质谱仪,该仪器具有检测限低、干扰少、灵敏度高、精密度好、可同时快速分析多种元素的优点。

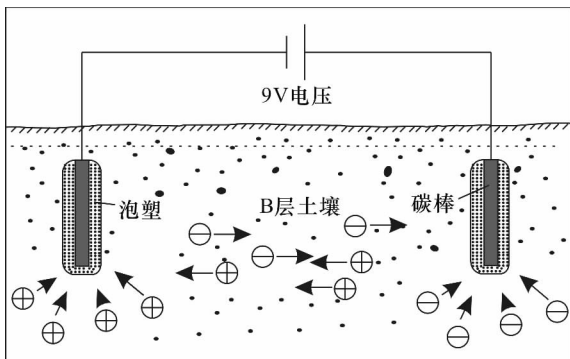


图2 地电化学提取装置简图

Fig. 2 Sketch of the geoelectrochemical extraction device

4 地电化学异常特征

根据分析结果,对30线和32线制作元素折线

图(图3、图4),可以看出,在已知矿体上方,Cu、Ni、Co等元素均出现了地电化学异常,其中32线异常图中不仅Cu在矿体上方有异常,在矿体上方两侧更是出现了强异常,同时从图中还可以看出元素异常以单点异常为主。由于地电测试方法本身的特点和复杂的野外地质情况,在野外工作中采集的样品会存在不稳定性,此外,样品在分析时也难以避免随机误差的产生。所以,为减弱在野外工作或测试阶段所引起的误差对最终结果带来的影响,可进一步对原始数据进行处理。

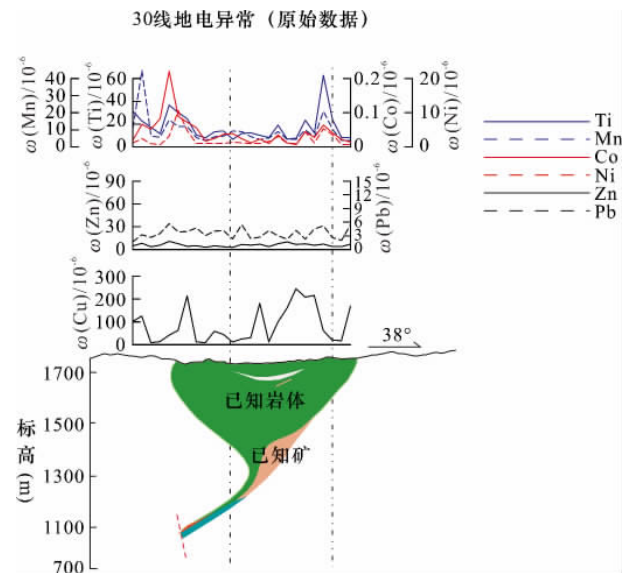


图3 30线地电异常剖面(原始数据)

Fig. 3 Cross-section of geoelectrochemical anomalies along No. 30 line (original data)

在处理前,首先将各元素的分析结果进行因子分析,根据因子分析结果(表1)将所分析元素分成三组:Ti、Mn、Co、Ni一组;Pb、Zn一组;Cu单独一组。Ti、Mn、Co、Ni主要来源于地幔物质,代表超基性岩和基性岩的岩浆活动,与Cu一样是铜镍硫化物矿床的主要物质来源;Pb、Zn则和岩浆的热液作用相关;Cu与其他各个元素的相关均较差的原因可能是Cu的来源多样,和岩浆活动以及热液活动都有一定的关系。

为弱化单元素异常,强化有较好套合关系区段的异常强度,用衬度累加法(吕明芬等,2010;张有军等,2015)将各组数据进行处理。首先将数据标准化,计算位于各测试点的各个元素的衬度;再把同组内不同元素的衬度累加。为方便对比,最后每组数据根据元素个数取平均值,得到 $\Sigma k1$ (Ti、Mn、Co、

表 1 二矿区地电提取数据因子分析结果
Table 1 Factor analysis results of geoelectrochemical data of mining area No. II in the Jinchuang deposit

元素	成份	
	1	2
Ti	0.777*	0.213
Mn	0.830*	0.374
Co	0.856*	-0.053
Ni	0.896*	-0.037
Cu	-0.177	0.427
Zn	0.215	0.713*
Pb	0.290	0.766*

注: * 在各维度与潜在因子相关性较好的元素。

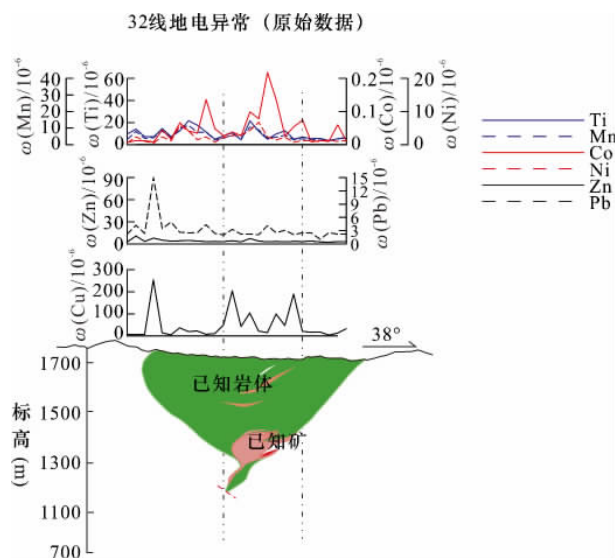


图 4 32 线地电异常剖面(原始数据)

Fig. 4 Cross-section of geoelectrochemical anomalies along No. 32 line(original data)

Ni)、 $\Sigma k2$ (Zn、Pb)、 $\Sigma k3$ (Cu) 三组数据。还是以测区的 30 线和 32 线为例,结合各组元素的地球化学性质对异常进行研究分析。

4.1 测线的地电化学异常特征

由 30 线地电异常曲线(图 5)可以看出, $\Sigma k1$ 在矿体上方都有一定的异常显示,异常强度一般,异常宽度与矿体宽度相对比比较吻合,异常整体上呈左低右高。 $\Sigma k3$ 的异常曲线较清晰,异常宽度与矿体非常吻合,在矿体上方是左窄右宽的双峰异常,同时也一定程度呈现左低右高的形态。 $\Sigma k2$ 基本无异常显示。

由 32 线地电异常曲线(图 6)可以看出, $\Sigma k1$ 在矿体上方异常强度一般,异常宽度和矿体宽度非常一致。 $\Sigma k3$ 异常曲线在矿体上方特别是其两侧有很

明显的异常,异常强度高,异常范围与矿体宽度十分吻合,还呈现非常典型的双峰形状。 $\Sigma k2$ 曲线基本无异常显示。

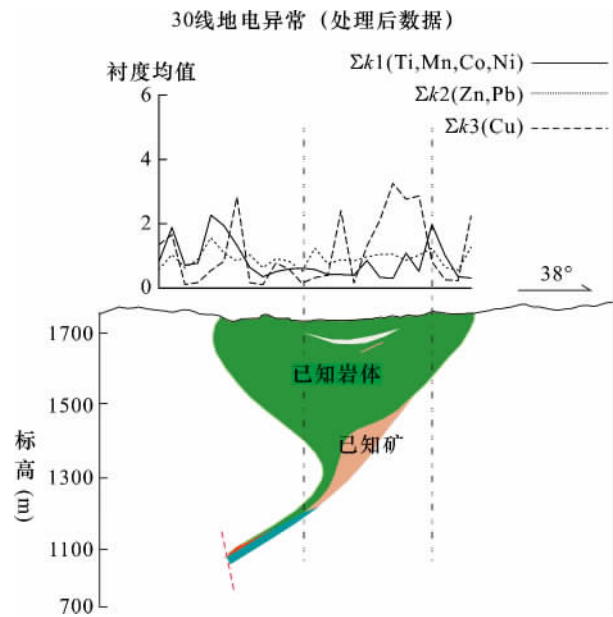


图 5 30 线地电异常剖面(处理后数据)

Fig. 5 Cross-section of geoelectrochemical anomalies along No. 30 line(processed data)

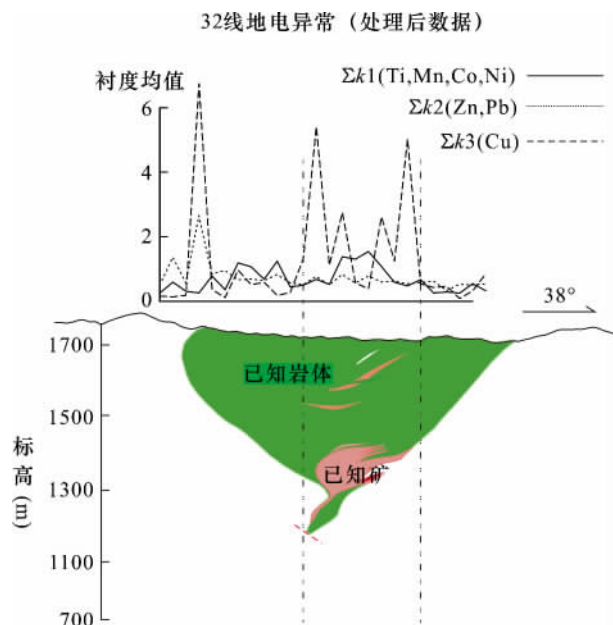


图 6 32 线地电异常剖面(处理后数据)

Fig. 6 Cross-section of geoelectrochemical anomalies along No. 32 line(processed data)

4.2 异常结果分析

总体来说,30 线与 32 线的异常情况基本一致。

Cu 异常均非常好; Ti、Mn、Co、Ni 异常虽然稍差,但也能反映下方的矿体信息; Pb、Zn 在两条测线位置几乎无异常显示。Ni、Co 和 Cu 是铜镍矿床的主要成矿元素,所以可作为找矿的主要依据。Pb、Zn 则代表期后热液作用,因其亲硫性较低,一般不呈硫化物产出,在铜镍硫化物矿床里与成矿没有直接的相关性,所以地电提取的 Pb、Zn 离子含量在剖面上均匀分布,没有明显的异常显示。

5 隐伏铜镍矿地电异常形成机理讨论和迁移模型建立

元素从深部向地表迁移的作用大致可分为五种类型:(1)与地下气体上升有关的迁移作用;(2)与地下水上升有关的迁移作用;(3)与电化学有关的迁移作用;(4)元素自身扩散、渗透而发生的迁移作用;(5)与生物作用相关的迁移作用(王学求 2005)。

硫化物矿体因自身的化学性质,容易与周围环境发生氧化还原作用。而隐伏硫化物矿体因其埋藏深度不同或地下水切割等各种原因,其各部位的氧化还原电位差是不同的。这导致了矿体氧化还原作用过程产生的电子在矿体内部迁移,让矿体自身成为一个原电池。在矿体成为原电池过程中,矿体底部电位较顶部电位低,使矿体底部成为原电池阴极,顶部成为阳极,底部的物质更容易发生氧化作用,失去的电子向顶部移动,被顶部周围的氧原子获得,获得了电子的氧成为负价的氧离子,与从阴极迁移而来构成外部电流的金属离子在矿体顶部结合生成金属氧化物(Govett *et al.*, 1984)。

在这个过程中,金属阳离子的迁移是向上并环绕着矿体进行的,部分元素离子在迁移过程会在矿体上方的疏松层累积而形成离子晕,此学说的直接证据是对已知矿体使用化探方法测试出的异常结果呈双峰式(图7)。金川二矿区矿床类型为铜镍硫化物矿床,本次试验 32 线 Σk_3 的异常曲线较好地反映了电化学迁移“双峰”异常的特征。对于矿体上方的异常曲线是否显示双峰形状的现象,主要是由矿体受氧化程度高低导致的自身电场强度的强弱决定(王学求 2005)。此外,异常曲线形态还应受到矿体形态、埋藏深度、覆盖物性质等因素的影响。30 线的 Σk_1 和 Σk_3 在矿体上方曲线都有左低右高的形态。一般情况下,矿体都是端部氧化程度较深部高,其自身的电位差方向是纵向的,但假如矿体自身倾斜,或环境引起的非对称的氧化还原作用,将导致矿体内部的电位差以及而后产生的自然电场发生倾

斜,让元素迁移过程中分布密度产生改变从而致使地表异常形态发生变化(图8)。结合 30 线的异常曲线情况,其下方矿体呈长板状且有一定角度的倾斜,使得异常曲线在总体上呈现左低右高的特点。

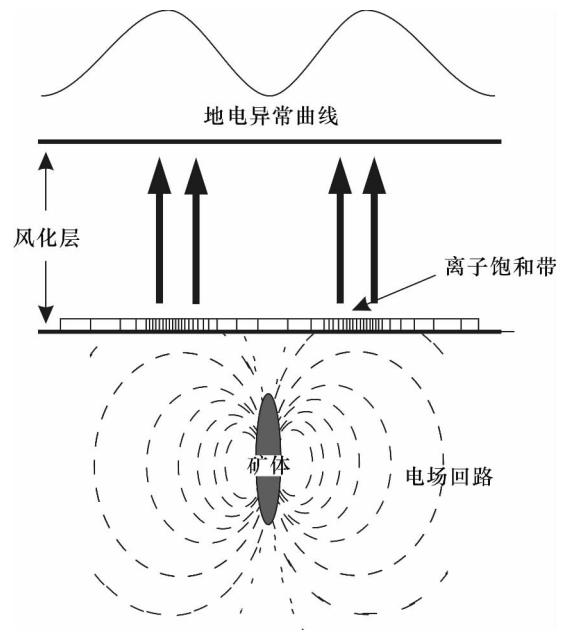


图7 电化学迁移模式图(Govett *et al.*, 1984)

Fig. 7 Model of electrochemical migration for a vertical ore body(Govett *et al.*, 1984)

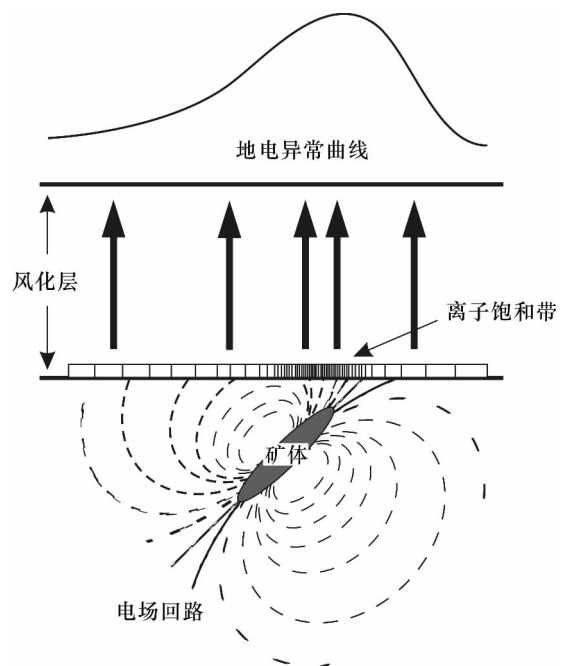


图8 倾斜矿体的电化学迁移模式图

Fig. 8 Model of electrochemical migration for an inclined ore body

元素的向上迁移往往并非只有一种迁移方式,而是由多个迁移应力共同作用导致的(王学求,2005)。金川铜镍矿床的形成是岩浆多次侵入后形成(杨合群,1991)。在此过程中,矿体与围岩受构造挤压作用而向地表抬升(曾南石等,2013),使二矿区已知的超基性-基性岩体均呈下部窄上部宽的倒三角形,并形成大量NE-SW方向的断裂构造,大量存在的构造裂隙给后期含矿热液向周围围岩的渗透提供了条件,此外,这些断裂构造也为地气和地下水携带含矿物质向上运移提供了通道。

对于在迁移过程中元素的存在状态,以前普遍认为主要是以离子或络合物形式向上迁移(康明等,2008)。通过实验发现铜镍矿的电化学溶解出的物质主要是 Cu^{2+} 、 Ni^{2+} 、 Co^{2+} 及 S^{2-} 等极化力较强的离子,这些极化力较强的金属阳离子会在迁移过程中容易和由矿体溶解出的、或者周围已赋存的离子 SO_4^{2-} 、 HCO_3^- 、 F^- 、 Cl^- 、 CN^- 和 CNS^- 等阴离子,或是带负电的粘土微粒结合形成络合物(康明等,2008;张向文等,2009;张向文等,2010)。近几年,国内学者已经在矿体上方采集的化探样品中,观测到和深部矿体有关的纳米级的金属颗粒(曹建劲,2009;Cao *et al.*, 2009, 2010; Cao, 2011; 王学求等, 2011; 曹建劲, 2012; 王学求等, 2012),并由此推断这些纳米级金属微粒来自于深部矿体,受地气搬运(童纯菡等,1999;叶荣等,2013;王晓佳等,2016)。地表发现纳米微粒的矿床也包括铜镍硫化物矿床(图9)。此后,孙彬彬等(2015)用扫描电镜观测地电提取装置中的泡塑样品,发现在泡塑中包含一些纳米级粘土矿物颗粒(图10),认为地电异常可能主要由这些纳米级粘土矿物颗粒中所吸附的、与深部矿体有关的信息导致,而粘土矿物本身带负电荷,能有效吸附带正电荷的纳米金属微粒。因此,我们认为纳米级金属微粒同样是成矿元素由矿体向上迁移的元素存在形式。

根据以上分析,提出了铜镍硫化物矿床成矿元素迁移模型(图11),即铜镍硫化物矿床在成矿作用过程中或成矿后期,含矿热液会沿构造裂隙向周边运移,部分含矿热液在此过程中,迁移距离较远,可达上百米,甚至上千米。矿体由自身电位差形成原电池后,矿体阴极部位源源不断产出金属阳离子,金属离子在矿体外部通过介质围绕矿体移动至矿体顶部,结合离子氧生成金属氧化物,还有部分金属离子在矿体上方疏松层累积,从而形成离子饱和带,离子饱和带的金属离子可通过扩散作用、植物根系吸

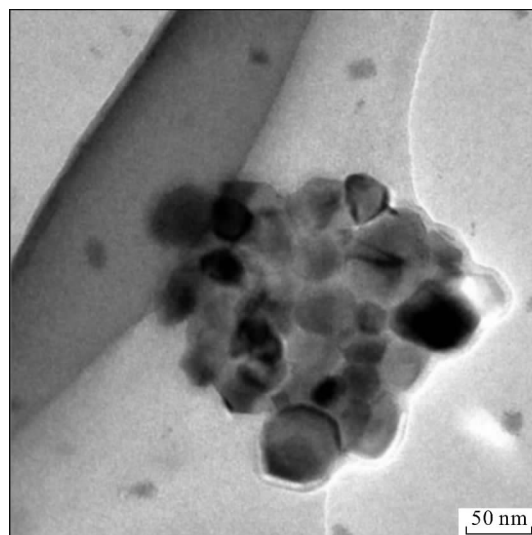


图9 透射电镜下的隐伏铜镍矿上方被地气装置捕获的纳米金属颗粒(张必敏等,2014)

Fig. 9 Nano metal particles observed at transmission electron microscope captured by geogas-captured apparatus above concealed Cu-Ni ores (Zhang *et al.*, 2014)

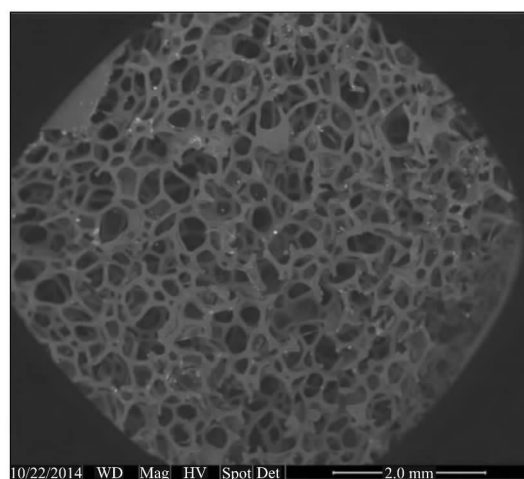


图10 扫描电镜下的泡塑样品及其吸附的纳米粘土颗粒(孙彬彬等,2015)

Fig. 10 Nanoscale clay particles absorbed on foam plastic sample observed on scanning electron microscope (Sun *et al.*, 2015)

收等进一步向上运动,同时因为地下水的循环,矿体在地下水中被溶解的金属离子可随着地下水的蒸发、毛细等地下水的排泄作用上升迁移至地表。除上述之外,矿体中风化解离出的物质与气体分子结合,以地气流为载体,通过大量存在的构造裂隙或岩石孔隙直接迁移至地表。到达地表后这些来自深部的金属离子、纳米级金属微粒等可被土壤地球化学障所捕获(王学求,2005),也有一部分如纳米颗粒

可滞留在气体里,小电流供电地电化学测量装置捕获的正是迁移至地表的金属离子、金属络合物及纳米级金属微粒。

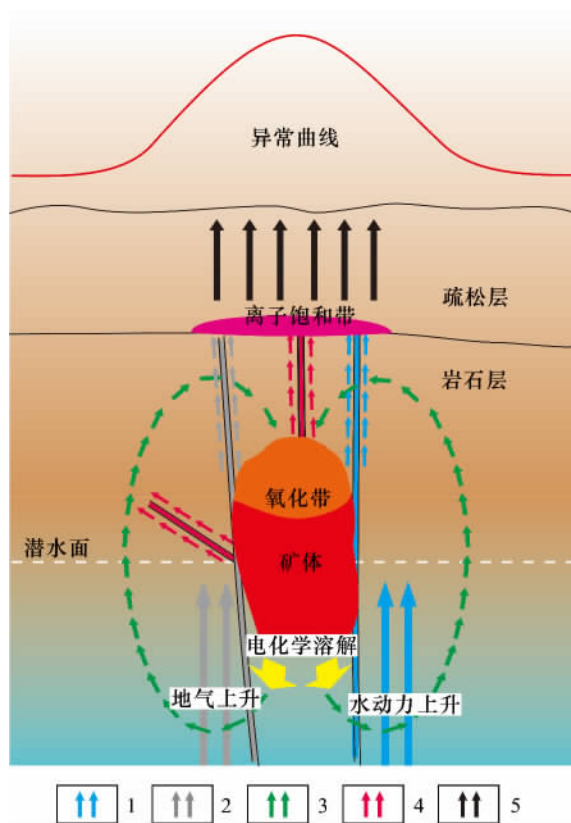


图 11 铜镍硫化物矿床成矿元素迁移模型

Fig. 11 Model of ore-forming element migration of Cu-Ni sulfide deposits

1 - 蒸发、毛细作用; 2 - 地气上升作用; 3 - 电化学迁移; 4 - 渗透迁移; 5 - 元素在疏松层迁移至地表

1 - evaporation and capillarity; 2 - geogas rising; 3 - electrochemical migration; 4 - osmotic migration; 5 - element migrating to surface through loose strata

7 结论

随着寻找隐伏矿床研究及化探技术应用的深入,地电化学找矿方法也逐渐获得了更多关注。本研究针对隐伏铜镍矿开展了地电化学方法试验,数据较好地反映了隐伏铜镍矿体位置,为利用该方法寻找类似矿床提供了很好的示范。此外,试验发现,除矿体上方外,两条剖面的西南位置均有一定异常显示,该结论为矿区进一步开展物探和钻探工作提供了找矿靶区。

目前,对于隐伏矿地球化学勘查遇到的最大的瓶颈就是对异常形成机理的了解不足,尽管开展了大量研究,建立了很多元素迁移模型,但这些模型更

多的是一些推测性模型,缺少实证性证据。因此,要真正攻克这个难题需要走的路还很长。本文以铜镍硫化物矿床为例,进一步梳理了该类型矿床成矿元素从深部迁移至地表的方式,认为成矿分多期次,成矿元素的迁移也分多期次,成矿阶段或成矿后期含矿热液通过构造裂隙向围岩迁移渗透。成矿后,金属离子、金属络合物、金属纳米微粒通过电化学迁移、地下水搬运、地气携带、蒸发作用等多营力复合作用由矿体接力迁移至地表。小电流供电地电化学测量装置捕获的正是迁移至地表的金属离子、金属络合物及纳米级金属微粒。

[References]

- Cao Jian-jing. 2009. A technique for detecting concealed deposits by combining geogas particle characteristics with element concentrations [J]. *Metal Mine*, 39(2): 1-4 (in Chinese with English abstract)
- Cao Jian-jing. 2012. Characteristics, formation and migration of the particles carried by ascending gas flow from the concealed metal deposits [J]. *Geoscience Frontiers*, 19(3): 113-119 (in Chinese with English abstract)
- Cao Jian-jin. 2011. Migration mechanisms of gold nanoparticles explored in geogas of the Hetai ore district, southern China [J]. *Geochemical Journal*, 45(3): e9-e13
- Cao Jian-jin, Hu Rui-zhong, Liang Zhi-rong, Peng Zhuo-lun. 2009. TEM observation of geogas-carried particles from the Changkeng concealed gold deposit, Guangdong Province, South China [J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 101(3): 247-253
- Cao Jian-jin, Hu Xian-yong, Jiang Zhong-tao, Li Hong-wei, Zou Xian-zhong. 2010. Experimental simulation of adsorption of geogas-carried gold nanoparticles in alluvial cover of the middle-lower reaches of the Yangtze River [J]. *Geofluids*, 10(3): 438-446
- Cao Jian-jin, Liu Chang, Xiong Zhi-hua, Qin Ting-rong. 2010. Particles carried by ascending gas flow at the Tongchanghe copper mine, Guizhou Province, China [J]. *Science China Earth Sciences (Science in China Series D)*, 53(11): 1647-1654
- Cao Zhong-huang, Luo Xian-rong, Wang Pei-pei. 2010. Geoelectrochemical exploration method for prospecting nickel-cobalt deposits in South Jinchuan [J]. *Journal of Guilin University of Technology*, 30(1): 47-51 (in Chinese with English abstract)
- Cao Zhong-huang, Luo Xian-rong, Wang Pei-pei, Wang Fa-ming. 2010. Comparative study of copper-nickel deposit exploration by the geoelectrochemical extraction method in different overburden areas [J]. *Geology and Exploration*, 46(3): 476-482 (in Chinese with English abstract)
- Fei Xi-quan. 1984. The result of experiment with method of partial metal extraction in several mining areas [J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 8(3): 162-166 (in Chinese with English abstract)
- Fei Xi-quan. 1992. *Electric ion extraction* [M]. Beijing: Geological Publishing House: 1-122 (in Chinese)
- Gao Yun-long. 1990. Study on uranium and other metal geoelectrochemical extraction [J]. *China Nuclear Science and Technology Report*,

- (S4): 531–541 (in Chinese)
- Govett G J S, Dunlop A C, Atherden P R. 1984. Electrogeochemical techniques in deeply weathered terrain in Australia [J]. *Journal of Geochemical Exploration*, (21): 311–331
- Huang Xue-qiang, Luo Xian-rong, Liu Wei, Wang Guang-hong, Huang Wei-ge, Dong Yan-qiu. 2013. Features of geo-electrochemical anomaly and copper-nickel prospecting prognosis in Hallow basin [J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 37(2): 199–205 (in Chinese with English abstract)
- Kang Ming, Guo Lei. 2008. The formation of Halos Chim [J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry* 27(2): 195–199 (in Chinese with English abstract)
- Kang Ming, Luo Xian-rong. 2003. Improvement and applied results of geo-electrical chemistry methods [J]. *Geology and Exploration*, 39(5): 63–66 (in Chinese with English abstract)
- Kang Ming, Ma Meng-hao. 2008. The role of the artificial electric field in the formation of geoelectrochemical ionic Halos [J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 32(5): 534–536, 548 (in Chinese with English abstract)
- Li Jin-ming, Lu Jun. 1992. A fundamental theoretical study of the geoelectrochemical extraction method [J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, (4): 275–285 (in Chinese with English abstract)
- Liang You-bin, Zhu Wen-feng, Song Guo-ren, Song Shu-xia. 1997. Geological and geochemical characteristics of the Jinchuan platinum group element deposit of the copper-nickel type, Gansu [J]. *Mineral Resources and Geology*, (1): 2–14 (in Chinese with English abstract)
- Liu Pan-feng, Wen Mei-lan, Zhang Jia-li. 2016. The application of geo-electrochemical integrated technology to the prospecting in the Xiyi Pb-Zn deposit, Yunnan Province [J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 40(4): 655–660 (in Chinese with English abstract)
- Lu Ming-fen, Luo Xian-rong, Wang Bao-hua, Wang Guang-hong, Ban Qiu-yin. 2010. Integrated treatment of original data in geo-electrochemical extraction – A case from ore district II of Jinchuan sulfide copper-nickel deposit [J]. *Journal of Guilin University of Technology*, 30(2): 217–222 (in Chinese with English abstract)
- Liu Xiu-juan, Luo Xian-rong, Zhen Xiao-ming, Li Yan-wei, Huang Xue-qiang, Li Zhao-yi, Hua Er. 2012. Prospecting for concealed lead-zinc-silver and polymetallic deposits: A case study of the Tolgoi ore deposit in Abag Banner of Inner Mongolia [J]. *Geological Bulletin of China*, 31(1): 143–150 (in Chinese with English abstract)
- Luo Xian-rong, Wen Mei-lan, Ouyang Fei. 2013. Research of halo formation mechanism and prospect for geo-electrochemical method [J]. *Journal of Guilin University of Technology*, 33(S2): 1–4 (in Chinese with English abstract)
- Luo Xian-rong, Zhou Tao-fa. 2004. Feature and forming mechanism of geo-electrochemical anomaly of the Hongqiling copper-nickel deposit and its prediction, Jilin Province [J]. *Journal of Jilin University (Earth Science Edition)*, 34(2): 304–308 (in Chinese with English abstract)
- Man Rong-hao, Luo Xian-rong, Yi Chao. 2015. Application of the geo-electrochemical method on prospecting for concealed uranium deposits in the Dongsheng area of the Ordos basin [J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 34(5): 1007–1013 (in Chinese with English abstract)
- Shi Zhan-yi. 1980. Mineralogy and petrology of Jinchuan ultrabasic rock body with copper-nickel deposits [J]. *Northwest Geoscience*, 1(1): 78–91 (in Chinese with English abstract)
- Sun Bin-bin, Liu Zhan-yuan, Zhou Guo-hua. 2015. Research status and development trends for geoelectrochemical methods [J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 39(1): 16–21 (in Chinese with English abstract)
- Sun Bin-bin, Liu Zhan-yuan, Zhou Guo-hua. 2011. The development of the solid carrier elements extractor [J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 35(3): 375–378 (in Chinese with English abstract)
- Sun Bin-bin, Zhang Xue-jun, Liu Zhan-yuan, Zhou Guo-hua, Zhang Bi-min, Chen Ya-dong. 2015. A preliminary study of the formation mechanism of the geoelectric chemistry anomaly [J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 39(6): 1183–1187 (in Chinese with English abstract)
- Tang Lei, Luo Xian-rong, Chen Xi-quan. 2009. Prospecting and prediction model for Lashuixia copper-nickel deposit in Qinghai [J]. *Journal of Guilin University of Technology*, 29(1): 25–30 (in Chinese with English abstract)
- Tang Zhong-li, Bai Yun-lai. 1999. Geotectonic framework and metallogenic system in the Southwest Margin of North China Palecontinent [J]. *Earth Science Frontiers (China University of Geosciences, Beijing)*, 6(2): 78–90 (in Chinese with English abstract)
- Tong Chun-han, Li Ju-chu. 1999. Geogas prospecting and its mechanism in the search for deep-seated or concealed gold deposits [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 42(1): 135–142 (in Chinese with English abstract)
- Wang Bao-hua, Bai Zhi-shan, Wen Mei-lan, Ou-yang Fei. 2009. Features and Halo-forming mechanism of geo-electrochemical anomaly and exploration forecast in Yindonggou Cu-Zn deposit, Baiyin, Gansu Province [J]. *Mineral Resources and Geology*, 23(4): 352–356 (in Chinese with English abstract)
- Wang Xiao-jia, Lu Mei, Wang Zhen-kai, Ye Rong. 2016. Characteristics of geogas anomalies measured in the Shengjiayao gold deposit of Shan County, Henan Province [J]. *Geology and Exploration*, 52(4): 0667–0677 (in Chinese with English abstract)
- Wang Xue-qiu. 2005. Conceptual model of deep-penetrating geochemical migration [J]. *Geological Bulletin of China*, 24(z1): 892–896 (in Chinese with English abstract)
- Wang Xue-qiu, Liu Zhan-yuan, Bai Jin-feng, Sun Bin-bin. 2005. Deep-penetration geochemistry comparison studies of two concealed deposits [J]. *Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration*, 27(3): 250–255, 183 (in Chinese with English abstract)
- Wang Xue-qiu, Ye Rong. 2011. Findings of nanoscale metal particles: Evidence for deep-penetrating geochemistry [J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 32(1): 7–12 (in Chinese with English abstract)
- Wang Xue-qiu, Zhang Bi-min, Liu Xue-min. 2012. Nanogeochemistry: Deep-penetrating geochemical exploration through cover [J]. *Geo-*

- science Frontiers ,19(3) : 101 - 112 (in Chinese with English abstract)
- Wang Xue-qiu ,Zhang Bi-min ,Yao Wen-sheng ,Sun Bin-bin. 2012. New evidences for transport mechanism and case histories of geochemical exploration through covers [J]. Earth Science - Journal of China University of Geosciences ,37(6) : 1126 - 1132 (in Chinese with English abstract)
- Wen Mei-lan ,Luo Xian-rong. 2013. A study of the ore - prospecting work based on multiple geosciences information in the Jinchuan Cu - Ni deposit [J]. Geology in China ,40(2) : 594 - 601(in Chinese with English abstract)
- Wen Mei-lan ,Luo Xian-rong ,Xiong Jian ,Zeng Nan-shi ,Hou Bao-hong , John Keeling. 2010. Electro - geochemical method in the search of concealed gold deposits in South Australia [J]. Geology and Exploration ,46(1) : 153 - 159(in Chinese with English abstract)
- Xie Bang-ting ,Sun Bin-bin ,He Lin ,Liu Zhan-yuan ,Ye Rong ,Liu Yin-fei ,Wang Teng-yun. 2016. Geoelectrochemical exploration at a scale 1:50000 in the periphery of the Chaobuleng polymetallic deposit [J]. Geology and Exploration ,52(5) : 885 - 892(in Chinese with English abstract)
- Xie Guang-hong ,Wang Yun-liang ,Fan Cai-yun ,Zhang Cheng-jiang ,Zhen Rong. 1998. The diagenetic and metallogenic mechanism of the ultramafic intrusion and super - large sulfide deposit in Jinchuan [J]. Science of China , (S2) : 32 - 37 (in Chinese)
- Xiong Chang-lin ,Li Hui-ling. 2003. On the mechanism of the geoelectric and chemical extraction method [J]. Geology of Fujian ,22(4) : 187 - 194(in Chinese with English abstract)
- Yan Hong-ze ,Sun Bin-bin ,Xu Jin-li ,Zhou Guo-hua ,He Ling ,Liu Yin-fei ,Wang Teng-yun. 2016. Comparison of ashing and microwave digestion in analyzing geoelectrochemical polyurethane foam samples [J]. Rock and Mineral Analysis ,35(3) : 276 - 283(in Chinese with English abstract)
- Yang He-qun. 1991. On the genesis of Jinchuan copper - nickel sulfide deposit [J]. Bulletin of the Chinese Academy of Geological Sciences , (1) : 117 - 135(in Chinese with English abstract)
- Ye Rong ,Zhang Bi-min ,Wang Yong. 2013. Distribution and migration of gold in gobi - overlay of arid desert terrain: Take the Jinwozi 210 gold belt in Xinjiang as an example [J]. Geoscience , (6) : 1265 - 1274 (in Chinese with English abstract)
- Yu. s. Ryss. 1986. Geoelectrochemical exploration method [M]. Beijing: Geological Publishing House: 1 - 244 (in Chinese)
- Zeng Nan-shi ,Wang Jing-cao ,Luo Xian-rong ,Zhang Jian-hui. 2013. Structural sequence and its relationship with Cu - Ni sulfide ore deposit in the Jinchuan area ,Gansu ,China [J]. Earth Science Frontiers ,20(6) : 210 - 218 (in Chinese with English abstract)
- Zhang Bi-min ,Wang Xue-qiu ,Ye Rong ,Yao Wen-sheng. 2014. Collection and observation of nanoparticles and the significance for geochemical exploration [J]. Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration , (6) : 708 - 714(in Chinese with English abstract)
- Zhang Xiang-wen ,Wen Mei-lan ,Xiong Jian. 2010. Characteristics of magnetic anomaly and estimation for ore reserves of Sousuoquan iron deposit in Hongqiliang [J]. Gansu Geology , 19(4) : 65 - 69 (in Chinese with English abstract)
- Zhang Xiang-wen ,Wen Mei-lan ,Xiong Jian. 2009. Research of search for concealed Cu - Ni deposit by geoelectro - chemistry [J]. Geotechnical Engineering World ,12(10) : 87 - 90 (in Chinese)
- Zhang You-jun ,Luo Xian-rong ,Duan Huan-chun ,Han Cai-yun ,Yuan Hong-qing ,Song Yan-wei ,Li Zhi-fang ,Gao Yang. 2015. Application of geo - electrochemical prospecting method for concealed gold deposit in Liushaogou district of West Qinling Orogen [J]. Journal of Guilin University of Technology ,35(3) : 473 - 481(in Chinese with English abstract)
- Zhang Zhao-wei ,Li Kan ,Zhang Jiang-wei ,Qian Bing ,Wang Ya-lei. 2016. Formation characteristics and prospecting direction of magmatic Ni - Cu sulfide deposits in China [J]. Geology Survey of China ,3(3) : 7 - 15(in Chinese with English abstract)

[附中文参考文献]

- 曹建劲. 2009. 地气微粒特征和元素含量结合探测隐伏矿床技术 [J]. 金属矿山 ,V39(2) : 1 - 4
- 曹建劲. 2012. 隐伏金属矿床上升气流微粒特征、形成及迁移 [J]. 地学前缘 ,19(3) : 113 - 119
- 曹中煌 ,罗先熔 ,王培培. 2010. 地电化学提取法在金川南延寻找隐伏镍钴矿床的应用 [J]. 桂林理工大学学报 ,30(1) : 47 - 51
- 曹中煌 ,罗先熔 ,王培培 ,王发明. 2010. 不同覆盖区地电化学提取法寻找铜镍矿对比研究 [J]. 地质与勘探 ,46(3) : 476 - 482
- 费锡铨. 1984. 电提取离子法在几个矿区的试验结果 [J]. 物探与化探 ,8(3) : 162 - 166
- 费锡铨. 1992. 电离子提取法 [M]. 北京:地质出版社: 1 - 122
- 高云龙. 1990. 地电化学提取铀及其它金属的研究 [J]. 中国核科技报告 (S4) : 531 - 541
- 黄学强 ,罗先熔 ,刘 巍 ,王光洪 ,黄蔚阁 ,董艳秋. 2013. 凹陷盆地铜镍多金属矿床地电化学异常特征及找矿预测 [J]. 物探与化探 ,37(2) : 199 - 205
- 康 明 ,过 磊. 2008. 地电提取异常的形成 [J]. 矿物岩石地球化学通报 ,27(2) : 195 - 199
- 康 明 ,罗先熔. 2003. 地电化学方法的改进及应用效果 [J]. 地质与勘探 ,39(5) : 63 - 66
- 康 明 ,马孟浩. 2008. 地电化学离子晕的形成过程中外加电场的作用 [J]. 物探与化探 ,32(5) : 534 - 536 ,548
- 李金铭 ,卢 军. 1992. 电提取法基础理论研究 [J]. 物探与化探 , (4) : 275 - 285
- 梁有彬 ,朱文凤 ,宋国仁 ,宋恕夏. 1997. 金川铜镍型铂族元素矿床地质地球化学特征 [J]. 矿产与地质 , (1) : 2 - 14
- 刘攀峰 ,文美兰 ,张佳莉. 2016. 地电化学集成技术在云南西邑铅锌矿区的找矿应用 [J]. 物探与化探 ,40(4) : 655 - 660
- 吕明芬 ,罗先熔 ,王葆华 ,王光洪 ,班秋银. 2010. 地电提取原始数据的综合处理方法—以金川硫化铜镍矿 II 矿区为例 [J]. 桂林理工大学学报 ,30(2) : 217 - 222
- 刘秀娟 ,罗先熔 ,郑小明 ,李彦伟 ,黄学强 ,李兆宜 ,华 二. 2012. 利用地电化学法寻找隐伏铅、锌、银多金属矿—以内蒙古阿巴嘎旗陶勒盖矿区为例 [J]. 地质通报 ,31(1) : 143 - 150
- 罗先熔 ,文美兰 ,欧阳菲. 2013. 地球电化学法成晕机制及找矿研究 [J]. 桂林理工大学学报 ,33 (S2) : 1 - 4

- 罗先熔,周涛发. 2004. 吉林红旗岭铜镍矿床地电化学异常特征、成晕机制及找矿预测[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 34(2): 304-308
- 满荣浩,罗先熔,易超. 2015. 地电化学法在鄂尔多斯盆地东胜地区寻找隐伏铀矿中的应用[J]. 矿物岩石地球化学通报, 34(5): 1007-1013
- 师占义. 1980. 金川铜镍矿床超基性岩体的矿物岩石学[J]. 西北地质科学, 1(1): 78-91
- 孙彬彬,刘占元,周国华. 2015. 地电化学方法技术研究现状及发展趋势[J]. 物探与化探, 39(1): 16-21
- 孙彬彬,刘占元,周国华. 2011. 固体载体型元素提取器研制[J]. 物探与化探, 35(3): 375-378
- 孙彬彬,张学君,刘占元,周国华,张必敏,陈亚东. 2015. 地电化学异常形成机理初探[J]. 物探与化探, 39(6): 1183-1187
- 汤磊,罗先熔,陈希泉. 2009. 青海拉水峡铜镍矿床综合找矿模型及找矿预测[J]. 桂林工学院学报, 29(1): 25-30
- 汤中立,白云来. 1999. 华北古大陆西南边缘构造格架与成矿系统[J]. 地学前缘, 6(2): 78-90
- 董纯茵,李巨初. 1999. 地气测量寻找深部隐伏金矿及其机理研究[J]. 地球物理学报, 42(1): 135-142
- 王葆华,白智山,文美兰,欧阳菲. 2009. 甘肃白银银铜沟铜镍矿床地电化学异常特征、成晕机制及找矿预测[J]. 矿产与地质, 23(4): 352-356
- 王晓佳,鲁美,王振凯,叶荣. 2016. 申家窑金矿床地气测量异常特征[J]. 地质与勘探, 52(4): 667-677
- 王学求. 2005. 深穿透地球化学迁移模型[J]. 地质通报, 24(z1): 892-896
- 王学求,刘占元,白金峰,孙彬彬. 2005. 深穿透地球化学对比研究两例[J]. 物探化探计算技术, 27(3): 250-255, 183
- 王学求,叶荣. 2011. 纳米金属微粒发现—深穿透地球化学的微观证据[J]. 地球学报, 32(1): 7-12
- 王学求,张必敏,刘雪敏. 2012. 纳米地球化学: 穿透覆盖层的地球化学勘查[J]. 地学前缘, 19(3): 101-112
- 王学求,张必敏,姚文生,孙彬彬. 2012. 覆盖区勘查地球化学理论研究进展与案例[J]. 地球科学(中国地质大学学报), 37(6): 1126-1132
- 文美兰,罗先熔. 2013. 金川铜镍矿床多元地学信息找矿研究[J]. 中国地质, 40(2): 594-601
- 文美兰,罗先熔,熊健,曾南石,侯宝宏,John K. 2010. 地电化学法在南澳大利亚寻找隐伏金矿的研究[J]. 地质与勘探, 46(1): 153-159
- 谢邦廷,孙彬彬,贺灵,刘占元,叶荣,刘银飞,王腾云. 2016. 朝不楞多金属矿外围 1:5 万地电化学勘查应用[J]. 地质与勘探, 52(5): 885-892
- 解广轰,汪云亮,范彩云,张成江,郝榕. 1998. 金川超镁铁岩侵入体及超大型硫化物矿床的成岩成矿机制[J]. 中国科学(D辑:地球科学), (S2): 32-37
- 熊长林,李惠玲. 2003. 地电化学提取法机理研究[J]. 福建地质, 22(4): 187-194
- 严洪泽,孙彬彬,徐进力,周国华,贺灵,刘银飞,王腾云. 2016. 灰化法与微波消解法处理地电化学泡塑样品的分析效果对比研究[J]. 岩矿测试, 35(3): 276-283
- 杨合群. 1991. 论金川硫化铜镍矿床成因[J]. 中国地质科学院院报, (1): 117-135
- 叶荣,张必敏,王勇. 2013. 干旱荒漠区隐伏金矿覆盖层中金的分布与迁移: 以新疆金窝子金矿田 210 金矿带为例[J]. 现代地质, (6): 1265-1274
- io·C 雷斯. 1986. 地电化学勘探法[M]. 北京: 地质出版社: 1-244
- 曾南石,汪劲草,罗先熔,张建辉. 2013. 金川地区构造序列及与铜镍硫化物矿床的关系[J]. 地学前缘, 20(6): 210-218.
- 张必敏,王学求,叶荣,姚文生. 2014. 纳米金属微粒的采集观测及其对地球化学勘查的意义[J]. 物探化探计算技术, (6): 708-714
- 张向文,文美兰,熊健. 2010. 地电化学法在红旗岭铜、镍矿预测中的应用[J]. 甘肃地质, 19(4): 65-69
- 张向文,文美兰,熊健. 2009. 地电化学法寻找隐伏铜、镍矿研究[J]. 岩土工程界, 12(10): 87-90
- 张有军,罗先熔,段焕春,韩彩云,苑鸿庆,宋艳伟,李智芳,高杨. 2015. 地球电化学方法在秦岭柳梢沟金矿找矿预测中的应用[J]. 桂林理工大学学报, 35(3): 473-481
- 张照伟,李侃,张江伟,钱兵,王亚磊,尤敏鑫. 2016. 中国岩浆铜镍矿床的形成特点与找矿方向[J]. 中国地质调查, 3(3): 7-15

Mechanism of Geoelectrochemistry Anomalies and Application to Prospecting of Buried Cu - Ni Deposits

LIU Ying-dong^{1,2,3}, ZHANG Bi-min^{2,3}, LUO Xian-rong¹

(1. Earth Science College, Guilin University of Technology, Guilin, Guangxi 541006;

2. Institute of Geophysical and Geochemical Exploration, Langfang, Hebei 065000;

3. Key Laboratory of Geochemical Exploration Technology of Ministry of Land and Resources, Langfang, Hebei 065000)

Abstract: This paper discusses the formation mechanism of geoelectrochemistry from the migration of elements. In combination with field survey and previous work, this paper analyzes the measured data and related data of mining area No. II of the Jinchuan deposit. We obtain the following perceptions: 1) The migration of ore-forming elements collected by geoelectrochemistry was affected by multiple-stage forces from various factors, dominated by electrochemical migration, geo-gas transfer and hydro-dynamic transportation. 2) The electrochemical migration mode can affect the final curve form of the geoelectrochemical data, of which the fundamental factor lies in the morphology of the electric circuit generated by the ore body. 3) The materials extracted by geoelectrochemistry are the elements separated out from the ore, which migrated from depth to the surface, and these elements exhibit as active ions, complex and ultrafine particles, which are adsorbed by clay minerals.

Key words: geoelectrochemistry, Jinchuan Cu - Ni deposit, element migration, element occurrence