



覆盖区地球化学勘查进展*

鲁美^{1,4}, 叶荣^{1**}, 张必敏^{2,3}, 王永康¹

(1 中国地质大学 地球科学与资源学院, 北京 100083; 2 中国地质科学院地球物理地球化学勘查研究所 国土资源部地球化学探测技术重点实验室, 河北 廊坊 065000; 3 联合国教科文组织全球尺度地球化学国际研究中心, 河北 廊坊 065000; 4 中国科学院矿物学与成矿学重点实验室 中国科学院广州地球化学研究所, 广东 广州 510640)

社会发展在很大程度上依赖于矿产资源的供应, 如一部智能手机中就包含了60多种金属(Arndt et al., 2017)。随着人们生活水平的不断提高, 尤其是发展中国家的快速发展, 人们对矿产资源的人均需求将持续上升。据估计, 为了满足社会发展, 每几年就需要发现一个超大型矿床。具有经济效益的矿床的发现逐渐依赖于覆盖层下深部含矿信息在地表的表达。因此, 无论国内或国际都将矿产勘查的视野瞄准于覆盖区。

1997年国际合作项目 Deep-penetrating Geochemistry Phase II 拉开了覆盖区找矿技术与方法——深穿透地球化学矿产勘查研究和应用的大幕, 国内外多家科研单位选取典型矿床展开地球化学勘查实践与项目交流。谢学锦等(2003)和Cameron等(2004)综述了该项目的研究成果, 这次国际合作发展了选择性提取技术、地电技术和有机、无机气体测量技术, 并且提出地震泵、大气压泵、冬天呼气、CO₂发生器等驱动活动态金属向上迁移的理论, 奠定了深穿透地球化学勘查的基础。深穿透地球化学与穿透性地球化学勘查技术都是通过获取覆盖层不同介质中微弱的地球化学信息来指示隐伏矿床, 目前探测深度只能达到1400 m, 因此, 将其称为穿透性地球化学勘查技术更为妥帖。在常规的地球物理和地球化学找矿方法无法适用于覆盖区找矿的情况下, 穿透性地球化学技术凭借其“穿透覆盖层, 提取弱信息”的优越性得到了广泛的研究。经过了20多年的发展, 形成了细粒级土壤全量测量和活动态测量、地气测量、地电测量和植物测量等覆盖区地球化学勘

查技术。

(1) 土壤活动态及细粒级土壤全量测量技术

土壤简单易得, 蕴含指示或者探途元素, 被广泛应用于地球化学勘查中。传统的土壤全量测量已经无法满足覆盖区勘查地球化学微弱异常的识别, 因此发展了偏提取技术, 用于提取土壤中特定的相态。勘查地球化学家经过不断的探索, 发现元素在地表疏松沉积物中具有2种不同的存在形式: 一种为稳定形式, 存在于硅酸盐、硫化物和晶质氧化物中; 另一种为活动态形式, 包括吸附态和离子可交换态等。Mann等(2015)提出的活动态金属离子法(Mobile Metal Ions, 简称MMI)即是提取呈活动态的金属离子, MMI方法现已取得10多项专利, 100多个成功案例, 年产值在4000万澳元左右, 是目前最成功的地球化学勘查偏提取技术, 被应用于覆盖区填图。王学求团队研制了金属活动态测量技术(Leaching of Mobile Forms of Metals in Overburden, MEMEO), 用于提取土壤中金属的活动态形式。并且他们认为与成矿有关的超微细金属、金属离子或者化合物迁移到地表之后, 在原有介质元素含量的基础上叠加活动态元素含量, 提取活动态金属能够探测隐伏矿床(Wang et al., 2016)。金属的活动态形式通常包括水溶解相态、与有机物结合相态、黏土吸附相态和与铁锰氧化物结合相态等。野外模拟实验表明, 在冲积物覆盖区金容易被高岭石、埃洛石、针铁矿和赤铁矿等吸附, 土壤中的矿物组成会影响土壤中金的浓度(Cao et al., 2010)。过去国内金属离子活动态提取采用2步顺序提取方法, 即第一步使用弱提取剂, 第二

* 本文得到国家重点研发项目(编号:2016YFC0600602-2)和国土资源部公益性行业科研专项课题(编号:201511034-2)的资助

第一作者简介 鲁美, 女, 1990年生, 博士, 地球化学专业。Email: lumei@cugb.edu.cn

** 通讯作者 叶荣, 女, 1956年生, 博士, 教授, 主要从事勘查地球化学研究。Email: yerong@cugb.edu.cn

步使用强提取剂。Mann(2010)对比了土壤强提取和弱提取在不同矿床的应用效果,认为强提取具有抗背景干扰的优势。Noble等(2009)对比研究8种常用的土壤偏提取剂和4种不常见的提取剂,结果说明各种提取剂在反映异常的准确度和精确度上并没有明显的差异,因此,出于经济考虑,去离子水、弱酸等提取剂能够满足地球化学勘查标准。虽然金属活动态提取等偏提取方法相对其他方法更加全面可靠,但是在分相的合理性、相态的提取流程和分析方法方面仍有许多工作要做(白金峰等,2011)。目前,国外土壤偏提取技术的发展着重于研制不同的提取剂,但配方严格保密。国内基于金属活动态理论与方法,对活动态提取与测定方法不断进行改进,开展了针对不同金属元素专用提取剂的研究。

不同粒度的土壤通常反映不同的地球化学异常模式。中国细粒级土壤全量测量技术采集地表以下5~30 cm处,粒径<75 μm 的土壤样品,样品中元素浓度普遍大于相对的粗粒级土壤(Zhang et al., 2015),这是因为细粒级土壤蕴含丰富的呈活动态的成矿信息,而且元素背景值趋于一致,全量分析能够用于识别地球化学异常。国外细粒级土壤测量采用<2 μm 富含黏土的土壤,土壤细粒部分相对粗粒部分地球化学背景不均一性降低,微量元素相对含量升高(Van Geffen et al., 2012)。

(2) 地气测量技术

基于地球内部地气流上升现象,地球化学家提出地气流能够携带成矿及伴生元素迁移到地表形成异常的假设,表生介质中纳米金属微粒的发现为这一假设提供了直接的证据(Tong et al., 1998)。地气测量研究不仅能够为穿透性地球化学机理提供证据,而且具有发展成为独立的勘查地球化学技术的潜力。王学求团队在国内外地气累积提取技术的基础上研制了地气动态提取技术(王学求等,1995)。在黄土覆盖层厚度大于20 m的河南申家窑金矿床应用地气动态提取技术,金及伴生元素的异常模式与深部矿体产状具有明显的平行关系,表明地气测量在矿区尺度上能够揭示深部矿化(Lu et al., 2019)。

(3) 地电测量技术

地电化学测量技术借助外电场作用选择性提取近地表介质中电活动态物质,通过研究电提取元素组合、分布及异常特征进行地球化学勘查。目前普遍采用便携式、独立供电、低压、“偶极子”式的地电化学提取装置,接收端摒弃了液态载体物质,采用泡

塑等固体载体,可称之为“独立供电偶极子地电化学技术”,该方法是在野外现场进行单点独立供电,在每个提取点一定范围内覆盖层中电活动态物质高度富集到载体物质中,提取含矿信息。当前使用的地电测量技术,元素异常很大程度上是由于土壤中存在的具有电活动性的纳微米级细粒黏土矿物颗粒所引起,地电化学提取过程中对这些黏土矿物具有选择性吸附。

(4) 植物测量技术

利用生物进行矿产勘查取得成功的案例屡有报道。自谢学锦先生发现铜矿的指示矿物——海州香薷以来,中国开始了植物地球化学勘查技术研究,但进展缓慢。植物的根系能够穿透覆盖层,从深部的矿化体中吸收大量的金属元素,在植物体内富集,也能从地表的疏松沉积物中将活动态的金属吸收至植物体内。某些植物对特定金属或者矿物显著富集,且植物树干、叶子和树皮等对金属元素富集能力不同,利用这一特性植物地球化学勘查技术不断发展(Van Geffen et al., 2012)。

王学求等(2011)在覆盖层土壤和地气中发现纳米金属微粒,这些微粒形态相似且内部具有格子构造,结合室内的迁移柱实验,为穿透性地球化学机理提供了直接的微观证据,并构建了地气流携带纳米金属颗粒迁移的地球化学模型(图1),即来自于深部矿体的纳米级金属微粒具有巨大的表面能,可与气体分子(如 CO_2)表面相结合,以地气流为载体,穿透厚覆盖层迁移至地表;也可以“类气相”形式迁移,它们到达地表后一部分仍滞留在气体里,另一部分被土壤地球化学障捕获。纳米颗粒可能是表生介质中地球化学异常的表现形式之一,与深部矿体具有直接联系。因此,通过采集表生环境中的纳米颗粒,观测纳米颗粒的形态和成分,某种程度上可以有效识别深部矿体。研究人员在不同矿种的已知矿(金、铅、锌、铜、铁以及多金属矿)上方覆盖层采集并观测到纳米微粒,纳米微粒的形貌和大小在不同矿种矿床具有相似性,主要的差异表现在纳米微粒的组成上面(Wang et al., 2016)。

深部矿化信息在地表表达受到成矿元素特征、后期风化以及外来运积物堆积等因素的影响。Anand等(2012)提出了2种地球化学异常模式:风化较弱的地区地球化学异常以机械搬运为主,勘查时候可以考虑在不整合面采样;风化较强且后期经历干旱环境导致潜水面下降时,由于植物扰动或者蒸

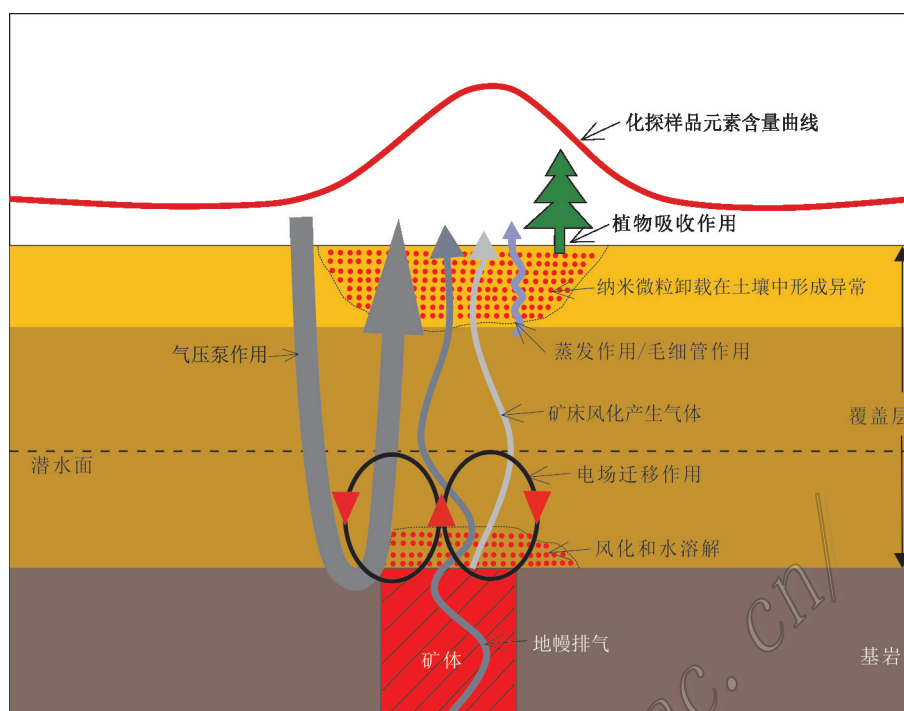


图1 地气流携带纳米金属颗粒迁移并转化到地表土壤中的迁移模型(据王学求等,2011)

Fig. 1 Conceptual model for nanoscale metal particles carried by gas flow and trapped in soils (after Wang et al., 2011)

腾作用,地球化学异常可以迁移到近地表。澳大利亚为期3年的CSIRO/AMIRA计划积累了覆盖区找矿的成果,研究涉及干旱及半干旱地区2~30 m运积物下造山型金矿、火山成因块状硫化物Cu-Zn-Ag和岩浆成因镍矿床。野外实验表明,成矿元素在潜水面上方垂向迁移受生物、地气和毛细作用影响(Anand et al., 2015)。Anand等(2016)改进了前人的地球化学迁移模型,认为潜水面以下地球化学异常迁移受地下水流、电化学、地下水对流和元素扩散作用影响,而在潜水面以上受毛细作用、地气迁移和生物作用控制。

隐伏矿床地球化学勘查效果取决于2个过程:第一个是深部成矿物质向地表覆盖层运移并保存的过程,这是一个自然的、长期的地质作用过程;第二个是对地表蕴含的与隐伏矿床有关的元素的提取过程,这是一个短暂的人工作用过程。目前,穿透性地球化学技术是运积物覆盖区地球化学勘查最有效的手段,形成了土壤活动态提取、细粒级土壤全量测量、地气测量、地电测量和植物测量技术。其中,细粒级土壤全量测量技术由于土壤背景元素含量相对均一且采样介质广泛、取样简单,是目前国内外覆盖

区地球找矿研究的焦点。

纳米微粒的发现为穿透性地球化学技术中元素迁移机理提供了微观实证,地气流携带纳米微粒向上迁移是导致覆盖区地球化学异常最可能的机制。然而目前元素从深部到浅部的迁移以及在表生环境中赋存形式依然缺少足够的直接证据,制约了穿透性地球化学技术的发展,同时也是穿透性地球化学技术未来的发展方向。

References

- Anand R, Lintern M, Noble R, Aspandiar M, Macfarlane C, Hough R, Stewart A, Wakelin S, Townley B and Reid N. 2015. Geochemical dispersion through transported cover in regolith-dominated terrains—toward an understanding of process[J]. *Economic Geology and the Bulletin of the Society of Economic Geologists*, 18: 97-125.
- Anand R, Aspandiar M F and Noble R R P. 2016. A review of metal transfer mechanisms through transported cover with emphasis on the vadose zone within the Australian regolith[J]. *Ore Geology Reviews*, 73: 394-416.
- Anand R R and 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[J]. *Geochemistry-Exploration Environment Analysis*, 12: 45-66.
- Arndt N T, Fontboté L, Hedenquist J W, Kesler S E, Thompson J F and Wood D G. 2017. Future global mineral resources[J]. *Geochemical Perspectives*, 6(1):1-171.
- Bai J F and Lu Y X. 2011. The experimental application of some deep-penetrating geochemical methods over the spence concealed porphyry copper deposit in Chile[J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 35(5): 610-616(in Chinese with English abstract).
- Cameron E M, Hamilton S M, Leybourne M I, Hall G E M and McClenaghan M B. 2004. Finding deeply buried deposits using geochemistry[J]. *Geochemistry-Exploration Environment Analysis*, 4: 7-32.
- Cao J J, Hu X Y, Jiang Z T, Li H W and Zou X Z. 2010. Simulation of adsorption of gold nanoparticles carried by gas ascending from the Earth's interior in alluvial cover of the middle-lower reaches of the Yangtze River[J]. *Geofluids*, 10: 438-446.
- Lu M, Ye R, Wang Z K and Wang X J. 2019. Geogas prospecting for buried deposits under loess overburden: Taking Shenjiayao gold deposit as an example[J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 197: 122-129.
- Mann A, Reimann C, De Caritat P, Turner N, Birke M and Team G P. 2015. Mobile Metal Ion (R) analysis of European agricultural soils: Bioavailability, weathering, geogenic patterns and anthropogenic anomalies[J]. *Geochemistry-Exploration Environment Analysis*, 15: 99-112.
- Mann A W. 2010. Strong versus weak digestions: ligand-based soil extraction geochemistry[J]. *Geochemistry-Exploration Environment Analysis*, 10: 17-26.
- Noble R R P and Stanley C R. 2009. Traditional and novel geochemical extractions applied to a Cu-Zn soil anomaly: A quantitative comparison of exploration accuracy and precision[J]. *Geochemistry-Exploration Environment Analysis*, 9: 159-172.
- Sun B B. 2017. Formation mechanism of anomaly of the geoelectrochemical method and its standardization applied to mineral exploration (dissertation for doctor degree)[D]. Supervisor: Xue C J. Beijing: China University of Geosciences. 52p(in Chinese with English abstract).
- Tong C H, Li J C, Ge L Q and Yang F G. 1998. Experimental observation of the nano-scale particles in geogas matters and its geological significance[J]. *Science in China Series D-Earth Sciences*, 41: 325-329.
- Van Geffen P W G, Kyser T K, Oates C J and Ihlenfeld C. 2012. Till and vegetation geochemistry at the Talbot VMS Cu-Zn prospect, Manitoba, Canada: Implications for mineral exploration[J]. *Geochemistry-Exploration Environment Analysis*, 12: 67-86.
- Wang X Q, Xie X J and Lu Y X. 1995. Dynamic collection of geogas and its preliminary application in search for concealed deposits[J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 19(3): 161-171(in Chinese with English abstract).
- Wang X Q and Ye R. 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 X Q, Zhang B M, Lin X, Xu S F, Yao W S and Ye R. 2016. Geochemical challenges of diverse regolith-covered terrains for mineral exploration in China[J]. *Ore Geology Reviews*, 73: 417-431.
- Xie X J and Wang X Q. 2003. Recent developments on deep-penetrating geochemistry[J]. *Earth Science Frontiers*, 10(1): 225-238 (in Chinese with English abstract).
- Zhang B M, Wang X Q, Ye R, Zhou J, Liu H L, Liu D S, Han Z X, Lin X and Wang Z K. 2015. Geochemical exploration for concealed deposits at the periphery of the Zijinshan copper-gold mine, south-eastern China[J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 157: 184-193.

附中文参考文献

- 白金峰,卢荫麻. 2011. 若干深穿透地球化学方法在智利 Spence 隐伏斑岩铜矿床上的应用试验[J]. *物探与化探*, 35(5): 610-616.
- 孙彬彬. 2017. 地电化学异常形成机理及找矿技术规范研究(博士学位论文)[D]. 导师:薛春纪. 北京:中国地质大学. 52页.
- 王学求,谢学锦,卢荫麻. 1995. 地气动态提取技术的研制及在寻找隐伏矿上的初步试验[J]. *物探与化探*, 19(3): 161-171.
- 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.
- 谢学锦,王学求. 2003. 深穿透地球化学新进展[J]. *地学前缘*, 10(1): 225-238.