

深穿透地球化学迁移模型

王学求

WANG Xueqiu

中国地质科学院地球物理地球化学勘查研究所, 中国地质科学院应用地球化学开放实验室, 河北 廊坊 065000

Key Laboratory of Applied Geochemistry, Institute of Geophysical and Geochemical Exploration, Chinese Academy of Geological Sciences, Langfang 065000, Hebei, China

摘要: 深穿透地球化学是针对寻找隐伏矿的需求而发展起来的一门新的地球化学分支学科, 其理论基础由连续的几个要素构成: 元素向地表的迁移机理→迁移到地表以后的赋存介质和赋存形式→形成异常模式的特征。本文针对元素从深部隐伏矿体向地表的迁移机理, 总结了传统的具有代表性的3种迁移模型, 包括离子扩散迁移模型、地下水溶解迁移模型和电化学迁移模型, 并根据最新的研究成果, 提出了地气流迁移模型和多营力迁移模型。这些模型的系统总结和提出对深穿透地球化学理论基础的建立和研究隐伏矿体元素的三维分散模式具有重要理论意义。

关键词: 深穿透地球化学; 电化学迁移模型; 地气流迁移模型; 多营力迁移模型

中图分类号: P595 **文献标识码:** A **文章编号:** 1671-2552(2005)10~11-0892-05

Wang X Q. Conceptual model of deep-penetrating geochemical migration. *Geological Bulletin of China*, 2005, 24(10-11): 892-896

Abstract: Deep-penetrating geochemistry is a new branch of geochemistry initiated for looking for concealed ore deposits. Its theoretical framework consists of several consecutive elements: mechanism of migration of elements from deeply buried deposits to the surface→modes of occurrence of elements in overburden at surface→geochemical anomaly patterns. With respect to the mechanism of migration of elements from deeply buried deposits to the surface, three traditional migration models are summarized: they are the models of ionic diffusion, groundwater dissolution and dispersion and electrochemically-induced dispersion. Based on the latest research results, the new conceptual models of earthgas streaming and multi-agent dispersion are proposed. The systematic summary and proposition of these models have great significance for the establishment of the theoretical basis of geochemistry and study of 3D element dispersion model of concealed deposits.

Key words: deep-penetrating geochemistry; electrochemically-induced dispersion; the earthgas streaming; multi-agent mechanism

出露区经历了人类肉眼上千年的找矿历史和一个多世纪的系统地质勘查, 现要找到新的矿产地的可能性越来越小, 寻找新的大型矿床的最大机遇是在隐伏区。因此, 国际找矿界都在致力于研究能探测更大深度的获取直接信息的地球化学找矿方法。在国外, 前苏联20世纪70年代发展了电地球化学方法(CHIM)^[1], 瑞典80年代发展了地气法(GEOGAS)^[2], 美国和加拿大90年代研制了酶提取法(ENZYME LEACH)^[3], 澳大利亚90年代研制了活动态金属离子法(MMI)^[4]; 中国80年代末

和90年代初研制了金属元素活动态提取方法(MOMEO)^[5]和动态地球气纳微金属测量法(NAMEG)^[6,7]。这些方法经过这些年实战的考验, 已经开始走向成熟, 并在矿产勘查中开始发挥作用, 成功的实例不断增多, 探测深度可达几百米。在此背景下, “深穿透地球化学”(deep-penetrating geochemistry)的概念开始被提出^[8,9]。深穿透地球化学通过研究成矿元素或伴生元素从隐伏矿向地表的迁移机理和分散模式, 含矿信息在地表的存在形式和富集规律, 发展含矿信息采集、提取与分

收稿日期: 2004-12-22; 修订日期: 2005-08-10

基金项目: 国家科技攻关计划项目《西部荒漠戈壁区大型铜金铀矿勘查评价技术及综合示范》(编号: 2003BA612A03)资助。

作者简介: 王学求(1963-), 男, 博士, 教授级高级工程师, 从事勘查地球化学研究。E-mail: xqwang@heinfo.net

© 1994-2010 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. <http://www.cnki.net>

析、成果解释技术,以达到寻找隐伏矿的目的。深穿透地球化学的理论基础由连续的几个要素构成:元素向地表的迁移机理→迁移到地表以后的赋存介质和赋存形式→形成异常模式的特征。后2个要素是第1个要素导致的结果,是可以观测到的。而元素从深部向地表的迁移机理是无法观测到的,也一直是勘查地球化学研究的焦点和争论最大的问题。一般认为元素可以通过下列途径被运移至地表:①风化过程中元素的物理和化学释放;②地下水循环将元素溶解带到地表;③离子扩散作用;④氧化还原电位;⑤蒸发作用;⑥植物的根系吸收;⑦气体扩散;⑧被气体搬运。这几种迁移途径在不太厚的覆盖区都会存在。但前6种机制,最多只能迁移几十米的距离,是不可能将深部几百米的矿体元素迁移至地表的。对于第7种迁移机理,只有像Hg等易挥发的元素才能迁移很远的距离。但大量的事实表明,在几百米深的矿体上方发现金属元素异常,说明人们对元素的迁移机理还不完全了解。本文试图对几种具有普遍代表性的迁移模型进行比较,并根据最新观测结果提出了地气流迁移模型和多营力迁移模型。

1 离子扩散迁移模型

矿体或矿体风化后会在矿体及其周围存在高浓度成矿元素及其伴生元素离子。由于近矿离子浓度高,远矿离子浓度低,所以会产生离子浓度差。离子扩散迁移主要是由于离子浓度差的原因,离子由高浓度向低浓度扩散。这种扩散表现为从矿体到地表连续的晕圈结构,即在靠近矿体部位最高,远离矿体浓度逐渐降低(图1)。图1中示意“点”越密集代表离子浓度越高。这种迁移模型,在地表采样时,发现的是矿体顶部的异常。

2 地下水溶解迁移模型

地下水溶解迁移是指矿体中的化学元素被地下水所溶解,随着地下水的运移而被带到地表。地下水迁移表现为垂向运移和侧向运移,也就是通常所说的上移水成异常和侧移水成异常。图2是水成异常模式。上移水成异常是水溶液中的元素可以通过毛细管上升和植物根系吸收向上运动,输送到地表以后由于水分的蒸发而沉淀。侧移水成异常是元素被地下水溶解,随着地下水运移到渗出带,在某种沉淀障上析出,形成侧移的水成异常。在地表采样,会出现2处异常,一个是垂直运移异常,另一个是侧移异常。这种水成异常在低水位的干旱地区,近地表水成异常受到制约。因为潜水面太深,甚至在矿体以下,无法将元素携带到地表。

3 电化学迁移模型

大多数硫化物矿床由于氧化还原作用,硫化物氧化不停地释放电子,产生电位差,而形成一个自身电池。前苏联学者Ryss等^[1]认为地球上存在规模不同的电地球化学场。这种场是引致元素一部分(百分之几至百分之零点几)活动化的原因,因此将元素的活动化迁移归结于电化学迁移。

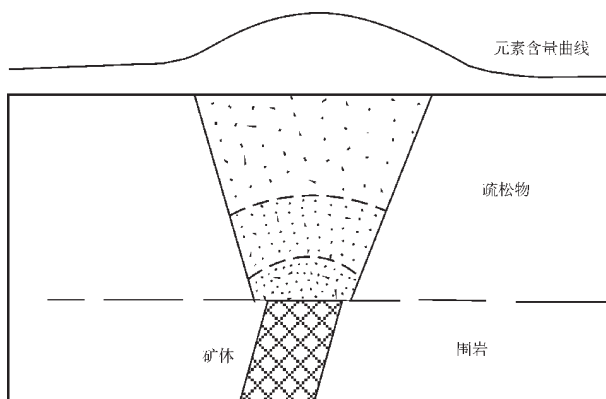


图1 离子扩散模型

Fig.1 Conceptual model of ionic diffusion

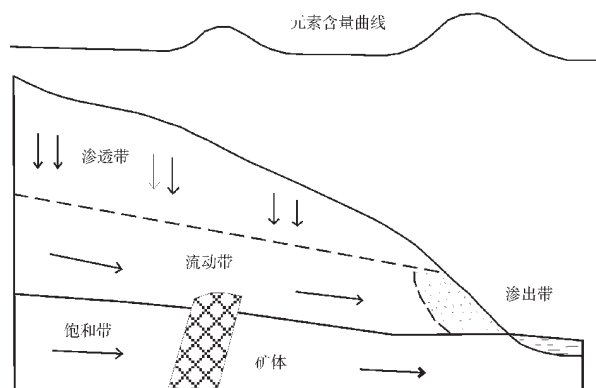


图2 水成异常模型

Fig.2 Geochemical model of water dispersion

Govett等^[10]认为,隐伏的硫化物金属矿体与地下水接触时,由于其各部位不同,不可避免地存在地质环境条件的差异(特别是氧化还原条件不同)。这使矿体相当于一个电子导体置于具有垂向氧化还原电位梯度的电解液中。矿体的底部和顶部存在较大的氧化还原电位差异。这种电位差的存在使得矿体底部的金属物质最容易被氧化,从而放出电子形成金属离子。释放的电子以矿体为导体从底部部位沿矿体向顶部流动。同时,矿体外部围岩的裂隙水和土壤饱和水中溶解的金属离子围绕矿体向上迁移,构成外部位移电流。这种电化学过程源源不断地持续进行,致使矿体上部疏松沉积层内的金属离子浓度增高,在矿体周围形成“离子晕”。

支持电化学迁移理论的证据是,矿体上方异常往往是沿矿体两侧呈对称分布的“双峰式”异常,即通常所说的“兔耳朵”异常。图3是典型的电化学迁移在地表形成“兔耳朵”异常的模型。但实际工作中,很难发现这种“兔耳朵”异常模式。Clark等^[11]对为什么异常不总是“兔耳朵”状异常的解释是,由于矿体的深度不同,氧化还原强度也不同,产生的地表异常形状也就不一样(图4)。在矿体比较浅的情况下,氧化作用强烈,异常形态与电场强度一致,都是“兔耳朵”状;中等深度的

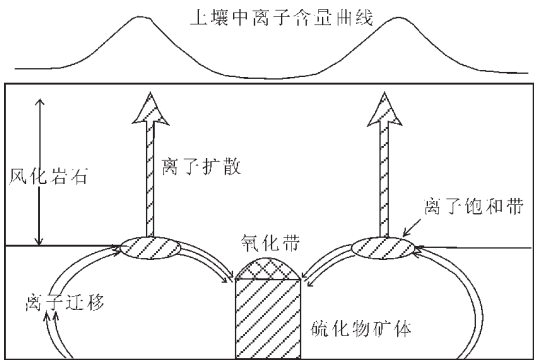


图3 电化迁移模型^[10]

Fig.3 Conceptual model of the electrochemically-induced dispersion

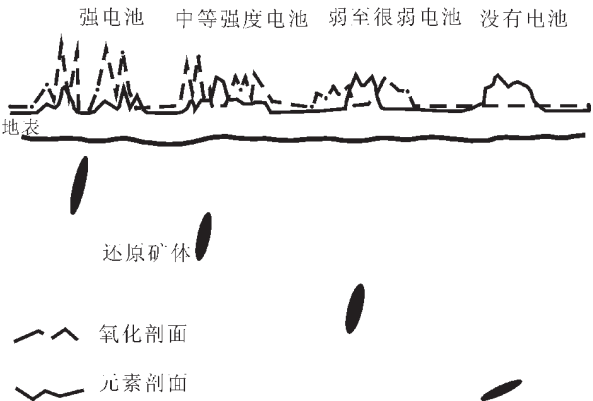


图4 异常形状与氧化还原电池强度的关系^[11]

Fig.4 Relation between anomaly profile variation and strength of the redox cell

矿体,氧化作用一般或较弱,电场强度相对较弱,电场强度是“兔耳朵”状的,而异常是顶部的;深度大的矿体,几乎不被氧化,电场强度很弱,地表测不到电场强度变化,却可以发现弱的顶部异常。

4 地气流迁移模型

Kristiansson等^[9]指出,通过矿体的微气泡流能将矿体中微量组分带到地表。他们提出隐伏铀矿上方观测到的Rn原子流(streaming of radon atoms)是通过其他气体持续不断地向上运动而形成的。这种作为微气泡的运载气体流(Stream of carrier gas)能够携带Rn原子加速向上运动,运动速度比扩散要快得多。这种运载气体或者起源于地球内部,或者作为大气与地下气体交换的一部分。这种运载气体被称为地气“geogas”。随后于1984年Malmqvist等^[12]对3个不同地区30个钻孔中的26个钻孔观测了地气的流量和成分。

程志中等在河北省张全庄金矿上方的气体采样也证明了地气流的存在,并且发现气体成分是多来源的(个人交流,

2004,待发表)。张全庄金矿被厚20 m的厚层黄土覆盖,是一个典型的隐伏矿。在60~70 cm深度采集2~3L气体样品,用高纯铝箔袋密封包装。样品送中国科学院兰州地质研究所气体地球化学开放实验室分析气体成分和同位素。用MAT-271GC质谱仪分析气体成分,MAT-251分析C、O同位素, VG5400稀有气体静态质谱计分析He同位素。气体的成分和比例见表1。

从表1中可以看出,地球气中一些微量气体成分比大气高得多,如He、CH₄比大气高出2个数量级,而CO₂比大气高出

表1 地气流与大气气体成分比较

Table 1 Comparison between the composition of earthgas and that of the atmosphere

成分	地 气 流 平均值	变化范围	大 气
N ₂	77.94%	77.78%~78.22%	78.08%
O ₂	20.69%	20.58%~20.90%	20.95%
CO ₂	0.44%	0.075%~0.75%	0.033%
Ar	0.932%	0.93%~0.94%	0.934%
CH ₄	2.0×10 ⁻⁴	1×10 ⁻⁴ ~6.5×10 ⁻⁴	2×10 ⁻⁶
He	4.4×10 ⁻⁴	3×10 ⁻⁴ ~5×10 ⁻⁴	5×10 ⁻⁶

1个数量级。显然与大气中这3种气体有较大差别。一些常量组分O₂、N₂与大气相差不大。

稀有气体³He/⁴He的比值能可靠地指示其物质的来源,因为幔源、大气、壳源的He各自具有特征的³He/⁴He比值,幔源为(1.1~1.4)×10⁻⁵,大气为1.4×10⁻⁶,壳源为2×10⁻⁸。张全庄金矿地气中³He/⁴He的比值为(1.41~1.78)×10⁻⁶,平均值为1.60×10⁻⁶,高于大气中³He/⁴He的比值,说明所测量的气体中有幔源的成分加入。

CO₂的成因可以分为两大类型,即生物成因和非生物成因,通常以δ¹³C<-10‰作为生物成因的判断标准。张全庄金矿上方气体中δ¹³C的均值为-16.3‰(-14.1‰~-18.4‰),因此可以认为其CO₂主要来源于土壤中生物成因。

根据气体成分、³He/⁴He、δ¹³C同位素的比值,可以认为所测得的地球气是一种多成因的气体,其中N₂、O₂和Ar主要以大气渗入为主,CO₂主要以土壤中生物来源为主,部分He和CH₄来源于深部。

综上所述,气体的来源可能有以下4种:与大气交换有关的气体、当地土壤产生的气体、矿床氧化产生的气体和地幔排气(Mantle degassing)^[13]。

Cameron等^[14]认为地气流的形成有3种机制:①气压泵(barometric pump),矿体及周围介质中充满了气体,高气压与低气压的旋回过程形成气压泵,高气压将空气压入,而低气压使空气将岩石或矿床中的气体带出;②冬季呼气作用(winter exhalation),在冬季,暖的空气在山顶上从岩石裂隙内释出,代以冷空气和蒸气从山脚下方深部上升,形成冬季呼气作用;③地震泵(seismic pumping),一种更强的推动营力

是地震泵,这是在地震多发地区发生的现象。地震多发地区,可借地震喷射(seismic squirting)作用在隐伏矿床上方的断层或裂隙带中形成气流。Cameron等^[14]认为在智利Gaby Sur和Spence巨型隐伏铜矿床地表的深穿透异常主要都是由地震泵推动而形成的。由于温差变化极大,加强地球气搬运与接力的最主要的营力是地震泵,继续上升时则大气压泵起重要作用,在地形起伏较大的地区冬季呼气亦起重要作用。

笔者将地气流迁移用图5的模型来表述。上升的气体流通过矿体时把成矿元素和伴生元素的活动态部分(离子、胶体、超微细亚微米和纳米级颗粒)带到地表,在地表遇到地球化学障(各种次生可溶性盐类、粘土、氧化物、有机物、胶体物质等)时,其中所携带的金属元素将被卸载,在地表形成地球化学异常。地表表现的异常是对应于矿体的顶部异常。

5 多营力迁移模型

以上阐述的都是单一营力所形成的异常模型,实际上隐伏矿体上方异常的形成,往往是多种营力共同参与的结果。各种迁移方式在异常的形成中起到的作用,要具体根据矿体的产出深度、地表景观及气候条件而定^[15,16]。谢学锦^[9]提出了

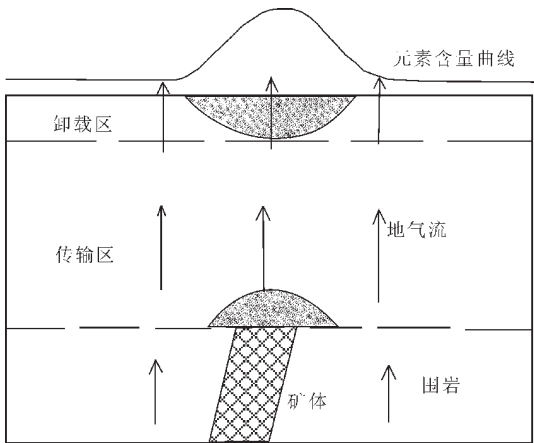


图5 地气流迁移异常模型

Fig.5 Conceptual model of earthgas streaming

多营力接力模型来解释不同迁移营力所起的作用。

图6是在长江中下游铜陵地区一个隐伏银矿上方土壤中的剖面系统采样发现的Ag和Hg异常模式。试验剖面布置在

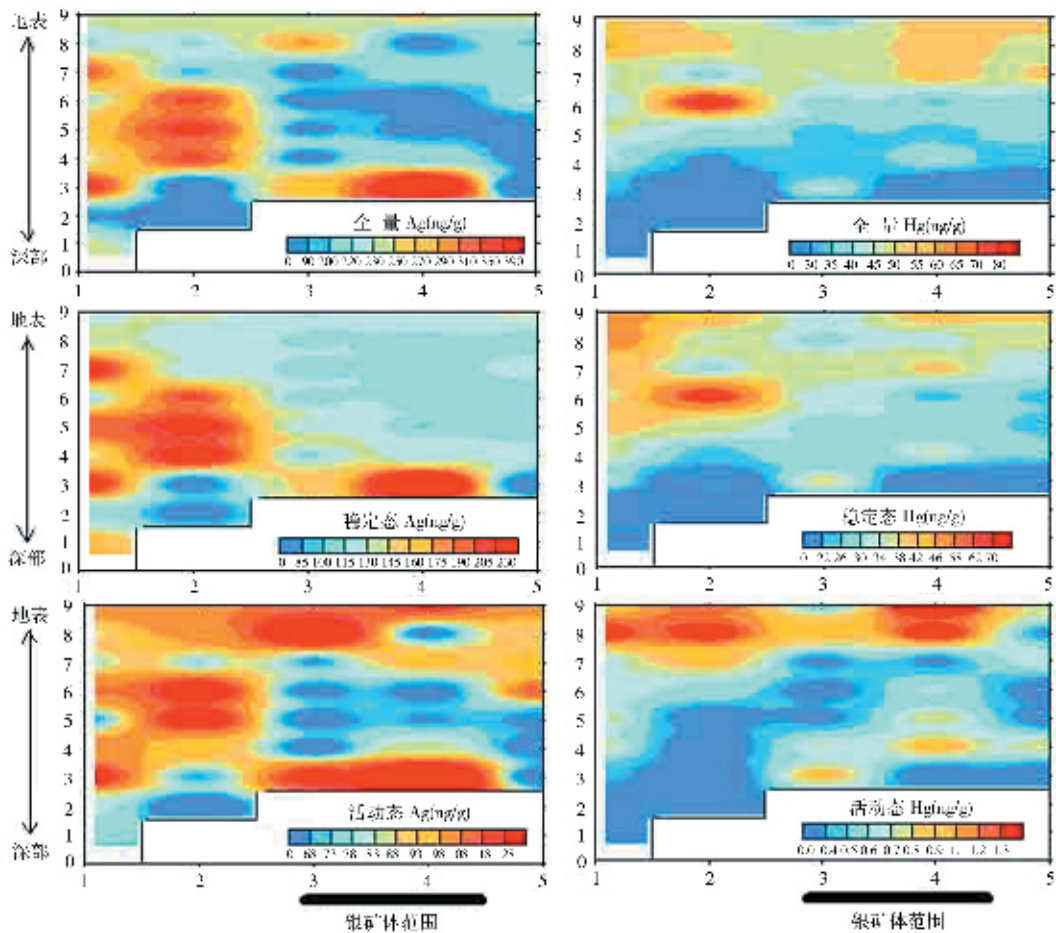


图6 铜陵地区隐伏矿上方垂直剖面Ag和Hg异常模式比较

矿体上方的冲积物覆盖层上,在一个露天采矿场的边部切出的1个土壤剖面上布置5个采样点,每个点间隔20 m,从地表40 cm以下开始采样,每隔1 m采集1个土壤样品。土壤样品在室内晾干,过20目筛,然后粉碎至200目。样品分成2份进行分析,1份作元素活动态的提取分析,1份作全量分析。活动态提取是从弱到强分别提取水提取态、吸附与可交换态、有机质结合金属、铁锰氧化物包裹、硫化物5部分,余下残渣作为稳定态部分^[1]。

从Hg的异常分布来看,Hg的各种形态在顶部含量普遍高于底部含量。Hg是一种迁移能力很强的元素,常以气态形式进行迁移。当Hg迁移到地表后,由于地表地球化学障的存在,气态迁移的Hg在地表富集下来。Ag的分布与Hg明显不同,稳定态的Ag高含量出现在靠近矿体的土壤剖面底部,而活动态Ag异常具有明显的分层现象,底部和顶部异常非常强,而中部出现了明显的低值带。这说明Ag的迁移具有双重性,一方面它具有与其他金属一样的风化残积于原地和浓度扩散的模式,另一方面它可以具有像气体一样的快速远距离迁移的能力。这是多营力共同作用的结果。

综上所述,深穿透地球化学异常的形成是多营力接力迁移的结果,可以概括为:矿床本身及其围岩中存在成矿元素或伴生元素的活动态形式,包括各种离子、络合物、原子团、胶体、超微细的亚微米至纳米级金属颗粒、铁族元素氧化物吸附和包裹金属、碳酸盐包裹金属和矿物颗粒间的成矿元素独立金属矿物(自然金属、金属互化物、硫化物等)。如果矿体覆盖厚度不大,各种营力包括地下水循环、离子扩散、氧化还原电位梯度、蒸发作用、植物作用、地气流等都可将矿床元素组分迁移至地表。但对于厚层覆盖,在不同的气候与地形条件下,这些营力所起的作用会有很大不同,是多营力接力迁移而完成元素从深部向地表的传输过程的。如果是在潮湿地区,地下水溶解,并在充水的通道中向上迁移,到达接近地表时离子扩散、植物作用、蒸发作用等因素都可参与元素向地表的迁移;在干旱地区,由于地下水潜水面很深,难以将元素溶解携带至地表,在深部地气流的搬运可能起着主导作用,到达接近地表时,蒸发作用、离子扩散等因素都可参与元素向地表的迁移。

参考文献:

[1] Ryss Yu S, Goldberg I S. The partial extraction of metals (CHIM) method in mineral exploration[J]. Method and Technique, ONTI, VITR, Leningrad, 1973, 84:5-19. (In: Bloomstein E. Translation by Earth Science Translation Services of sec-

tion entitled CHIM surface set-up unipolar extraction. USGS Open-File Report, 1990, 90-462)

[2] Kristiansson K, Malmqvist L. Evidence for nondiffusive transport of Rn in the ground and a new physical model for the transport [J]. Geophysics, 1982, 47(10): 1444-1452.

[3] Clark J R. Enzyme-induced leaching of B-horizon soils for mineral exploration in areas of glacial overburden[J]. Trans. Instn. Min. Metall. (Sect. B: Appl. Earth Sci.), 1993, 102: B19-B29.

[4] Mann A W, Birrell R D, Gay L M, et al. Partial extractions and mobile metal ions[A]. In: Camuti K S ed. Extended abstracts of the 17th IGES[C]. 1995.31-34.

[5] Wang Xueqiu. Leaching of mobile forms of metals in overburden: development and applications [J]. J. Geochem. Explor., 1998, 61:39-55.

[6] 王学求, 谢学锦, 卢荫麻. 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, 1995, 19(3): 161-171.

[7] Wang Xueqiu, Cheng Zhizhong, Liu Dawen, et al. Nanoscale metals in earthgas and mobile forms of metals in overburden in wide-spaced regional exploration for giant ore deposits in overburden terrains[J]. J. Geochem. Explor., 1997, 58(1): 63-72.

[8] 王学求. 深穿透勘查地球化学[J]. 物探与化探, 1998, 22(3): 166-169.

[9] 谢学锦, 王学求. 深穿透地球化学新进展[J]. 地学前缘, 2003, 10(1): 225-238.

[10] Govett G J S, Dunlop A C, Atherden P R. Electrogeochemical techniques in deeply weathered terrain in Australia[J]. Journal of Geochemical Exploration, 1984, 21: 311-331.

[11] Clark J R, Yeager J R, Rogers P, et al. Innovative enzyme leach provides cost-effective overburden/bedrock penetration [A]. In: Gubins A G ed. Geophysics and Geochemistry at the Millennium, Proceedings of Exploration 97[C]. 1997. 371-374.

[12] Malmqvist L, Kristiansson K. Experimental evidence for an ascending microflow of geogas in the ground[J]. Earth and Planetary Science Letters, 1984, 70: 407-416.

[13] Gold T, Soter S. The deep earthgas hypothesis [J]. Science America, 1980, 242:130-138.

[14] Cameron E M, Hamilton S M H, Leybourne M I L, et al. Finding deeply-buried deposits using geochemistry[J]. Geochemistry-Exploration, Environment, Analysis, 2004, 4(1):7-32.

[15] 王学求. 地球气纳微金属测量的概念理论与方法[A]. 见: 谢学锦, 邵跃, 王学求主编. 走向21世纪的矿产勘查地球化学[C]. 北京: 地质出版社, 1999.105-124.

[16] 王学求. 巨型矿床与大型矿集区勘查地球化学[J]. 矿床地质, 1999, 19(1):86-94.