

中国三稀矿产生物找矿技术方法及其应用综述

于扬¹⁾, 王登红¹⁾, 高娟琴^{1,2)}, 刘丽君^{1,3)}, 王伟³⁾, 张塞^{1,2)}

1) 自然资源部成矿作用与资源评价重点实验室, 中国地质科学院矿产资源研究所, 北京 100037;

2) 中国地质大学(北京), 地球科学与资源学院, 北京 100083;

3) 四川省地质矿产勘查开发局地质矿产科学研究所, 成都 610000

内容提要:生物地球化学作为全球热点学科之一, 为找矿工作者探索地壳发生的地质地球化学过程提供了新的理论与方法, 开展“三稀矿产”生物找矿方法研究并将其应用到找矿实践工作中, 将对资源、环境领域的研究和应用产生重要影响。三稀矿产的生物找矿方法包括地植物学(植被观察)、生物地球化学找矿(植物分析测试)、动物找矿以及微生物找矿四个方面。本文通过归纳、总结前人研究成果, 梳理了当前国内三稀矿产生物找矿研究的特点、概念和内涵, 归纳了三稀矿产资源生物找矿常用方法, 包括采样、测试和综合分析技术方法, 总结了生物找矿方法在稀有金属矿区、稀散金属矿区的应用与研究进展, 并结合项目团队最新成果, 提出了对中国三稀矿产生物找矿方法及其应用的几点新认识, 进一步阐述了三稀矿产生物找矿的理论与实际应用意义。通过川西地区锂铍稀有金属生物找矿方法应用于辅助隐伏矿床勘查, 已取得一些成功案例。随着研究的深入, 生物找矿方法必将对我国三稀矿产地球化学勘查理论和技术发展产生重大影响。

关键词:三稀矿产; 生物找矿; 生物地球化学; 技术; 应用

“十三五”以来, 伴随着中国经济的高速发展, 国家对能源矿产的需求越来越强烈, 矿产资源的调查评价与找矿勘探面临着新的形势(Chen Yuchuan et al., 1989; Wang Denghong et al., 2016)。对矿产资源的绿色勘查, 尤其是“大型矿产资源基地”(非一般的矿产地)的调查评价更需要理论与技术方法方面的创新驱动(Wang Denghong et al., 2016)。因此, 进一步探索、创新行之有效的找矿方法并推广应用, 对常规物化探工作无法开展地区的找矿突破具有重要的现实意义。

为了发现那些日渐难找的矿, 慎重地选用两种或三种不同的方法, 能取得比单独采用一种方法更优越的效果, 因此科学工作者们重新关注生物找矿法(Gu Lianxing et al., 1990)。在上世纪 90 年代之前, 前苏联的研究处于世界领先水平(Brooks, 1986), 前苏联通过大规模生物地球化学采样, 在

1978~1982 年四年间发现 4 个被疏松层覆盖的工业矿床, 这类矿床以常规化探手段通常难以被发现(Ren Tianxiang, 1993)。20 世纪 60 年代以后, 中国(内蒙古、陕西、广东、云南、湖北、甘肃等地)、美国、英国、奥地利、加拿大、瑞典、印度、新西兰、日本等国家都开展了生物找矿研究工作并不断取得新的突破(Wu Jing, 2003; Cen Kuang et al., 2003), 有学者最新研究发现印度南部安得拉邦 Brahmanapalli 石棉矿区鸡蛋中出现明显的镁富集(Reddy, 2019), 认为这是有效的生物找矿标志; 加纳 Pelangio Mamfo 金矿项目生物地球化学研究结果显示矿区植物金元素浓度差异足以有效区分背景区和异常区(Arhin et al., 2018); 对马来西亚和菲律宾典型洞穴鸟粪的研究表明, 鸟粪中 Sn、Pb、Rb、Cr 等金属元素富集现象与其栖息区域的地质资源关系密切(Wurster et al., 2019); 在瑞典南部一个富稀土及锆的矿床进

注: 本文为中国地质调查局二级项目“松潘—甘孜成锂带锂铍多金属大型资源基地综合调查评价”(项目编码 DD20190173)和“川西甲基卡大型锂矿资源基地综合调查评价”(项目编码 DD20160055)资助成果。

收稿日期: 2019-04-25; 改回日期: 2019-05-29; 网络发表日期: 2019-05-30; 责任编辑: 黄敏。

作者简介: 于扬, 女, 1982 年生。博士, 副研究员, 主要从事矿山环境研究工作。通讯地址: 北京市西城区百万庄大街 26 号中国地质科学院, Email: yuyang_cags@sina.com。通讯作者: 王登红, 男, 1967 年生。研究员, 博士生导师, 现主要从事矿产资源研究工作。Email: wangdenghong@sina.com。

引用本文: 于扬, 王登红, 高娟琴, 刘丽君, 王伟, 张塞. 2019. 中国三稀矿产生物找矿技术方法及其应用综述. 地质学报, 93(6): 1533~1542, doi: 10.19762/j.cnki.dizhixuebao.2019149.

YU Yang, WANG Denghong, GAO Juanqin, LIU Lijun, WANG Wei, ZHANG Sai. 2019. A review of “three-type rare resources” biological methods for mineral exploration and its application in China. Acta Geologica Sinica, 93(6): 1533~1542.

行植物地球化学工作发现,个别蕨类植物的叶子对稀土元素有异常高效的富集(Bluemel et al., 2015)。实践表明,生物找矿法在寻找金、银、铂、铅、锌、铜、铀和稀土矿床(Hu Xishun et al., 1992; Shen Yuanchao et al., 1999; Ma Yueliang et al., 2000; Leslie et al., 2013)等方面都取得了较好的研究成果。由于篇幅限制,本文只讨论国内“三稀”矿种生物找矿勘查方面的一些进展。

“三稀”是指稀有、稀土和稀散元素共 34 个元素的简称(Wang Denghong et al., 2013)。总体看来,生物找矿法在稀有、稀散矿产领域应用较好,如超累积指示植物指导寻找“镉、钼、钡、铊、硒、锗、镭”七种矿产均取得了非常好的效果。在稀土生物找矿方面,未有明确的研究成果发表。2016~2018年,笔者所在的项目组在川西高海拔特殊地貌区运用生物找矿的实例证明,该方法在寻找铍矿方面也具有较好的应用潜力。本文综述了国内有关三稀矿产生物找矿相关研究的进展,并在此基础上提出了几点新认识。

1 当前三稀矿产生物找矿研究的特点

1.1 研究内容多层次

三稀矿产资源的生物找矿方法,是依赖于生物所处的生存环境如土壤、岩石、水及大气中存在某种“三稀”元素地球化学异常而受其影响,通过取样分析来发现生物体所含化学成分的正常而实现的。这种异常包括两种情况,一是生物体内“三稀”元素化学成分变化,二是生物个体或群体的生态特征因富集某些“三稀”元素而发生变异,从而出现特殊外观或种属。三稀矿产资源生物找矿勘查除了研究“三稀”元素及各种化合物在特定指示生物体内的含量,还研究“三稀”元素及其化合物在生物圈、水圈、大气圈、岩石土壤圈各介质之间的迁移和转化。

1.2 研究手段多类型

近些年来,随着航空航天科技的发展,将遥感技术应用于植物探矿取得了很好的效果。环境遥感法极大地推动了地植物学的发展。我国也有研究证明某些植物叶片由于异常的元素含量导致其中的叶绿素、水含量、温度、细胞结构发生变化,植物反射光谱较正常情况出现异常,例如蓝移 5nm 等(Rock, 1988),从而可从遥感图像圈定矿化异常(Ma Yueliang et al., 1999)。

1.3 分析测试多样化

原子吸收光谱仪、电感耦合等离子体发射光谱

议、电感耦合等离子体质谱仪等一些有效的分析测试手段及尖端计算机统计技术的发展明显地提高了分析测试工作的精密度和可靠性。对植物样品的前处理技术如 $\text{HNO}_3\text{-HClO}_4\text{-HF}$ 常压消解、 $\text{HNO}_3\text{-H}_2\text{O}_2\text{-HF}$ 高压密闭消解、 $\text{HNO}_3\text{-H}_2\text{O}_2$ 微波消解、干法灰化后残渣用 $\text{HNO}_3\text{-HF-HClO}_4$ 溶解等方法日趋成熟,并在实践中取得了很好的应用效果(Sun Dezhong et al., 2012)。

2 三稀矿产生物找矿的概念和内涵

生物找矿理论主要是地质学、地球化学和生物学三个学科融合的产物。1964年, D. P. 马利尤加(Malyuga)发表了《生物地球化学勘探法》一书之后,苏联建立了植物地球化学探矿方法并加以应用。1972年, R. R. 布鲁克斯(Brooks R R)在其《矿产勘查中的地植物学和生物地球化学》一书中首次介绍了地动物学方法,至此国际上对生物找矿的研究掀起了一股热潮。A. L. 科瓦列夫斯基(Kovalevsky)于1979年所著的《矿床的生物地球化学勘探法》更为量化地阐述了植物探矿方法,但这三部专著均未进一步探讨动物探矿方法及其有效性。针对三稀矿种的生物找矿是以生物体特殊的生长和行为特征以及生物体内三稀元素含量异常为标志进行找矿,包括地植物学、生物地球化学找矿、动物找矿以及微生物找矿。

地植物学(植被观察)找矿是指根据观察矿化区植物个体或群落的生态特征来确定地植物异常,中国古代就有“山上有葱,下有银;山上有薤,下有金;山上有姜,下有铜、锡;山有宝石,木旁枝皆下垂”的说法,这说明早在1200多年前古人就已经意识到了植物分布和矿产分布存在一定的对应关系(Wei Yongfu, 1994)。如植物的株、叶发红为爱景山镉矿床明显存在的异常,这种植物形态异常可作为该类型矿床的找矿标志(Shang Xiaochun et al., 1990)。

生物地球化学(植物化学分析)找矿是指根据植物体内矿质元素含量确定生物地球化学异常,进一步圈定矿化异常。如镉矿床上部水蓼、蔷薇等10多种植物中 Sr、Ba 显示出明显的异常(Shang Xiaochun et al., 1990);用铊的植物地球化学测量是寻找铊矿床是最有效的方法(Hu Xishun et al., 2005);芒箕、蜈蚣草、南烛、椰榆、黄花草、醉鱼草、石松均为寻找铊矿的有效指示植物(Li Dexian et al., 2003; Zou Zhenxi et al., 2000);豆科紫云属(*Astragalus*)、十字花科芸苔属(*Brassica*)和藜科滨

藜属 (*Atriplex*) 是 Se 的超累积植物找矿 (Tang Shirong et al., 1997); 在粉红色的紫云英引导下曾发现硒矿 (Zhao Wu et al., 2014), 于渔塘坝硒矿区首次发现的一种新的硒富集植物——遏蓝菜 (*Thlaspiarvensis* L.) 亦可指导发现硒矿 (Shao Shuxun et al., 2007); 灵芝草喜欢生长在锗富集的区域 (Mei Xiaohong, 2005)。

动物找矿或地动物学 (用动物探矿) (Brooks, 1986) 是指通过研究动物的生态特征和行为异常, 或测定特定动物组织及排泄物中矿质元素含量, 或利用动物作为野外探矿的助手发现未知矿床。但是由于大多数动物本身具有很强的游动性, 活动很难局限在一个地区, 其有效性与植物学方法相比效果略差。但是利用动物探矿仍有很多成功的例子, 例如利用接受过训练的探矿犬嗅测含硫化物漂砾效果很好, 在相同地区探矿犬发现了 1330 块含硫化物漂砾, 而勘探人员仅发现 270 块 (Brooks, 1986)。笔者于 2016~2018 年连续三年在川西高海拔游牧区, 利用牦牛粪便中锂元素含量异常来发现隐伏矿体, 也取得了较好的效果。

微生物找矿 (He Xin, 2013) 技术是通过观察某

区域内微生物数量变化来确定矿化的存在。某些微生物的数量被证明与金矿、石油及天然气的存在有密切关系。很多学者证明了土壤中微生物蜡样芽孢杆菌 (*Bacillus cereus*) 的芽孢与下伏基岩金矿化存在明显的相关性, 对广西金牙金矿床和四川阿西金矿床进行研究发现两个矿区均存在 *Bacillus cereus* 孢子异常区, 已知矿体上方的孢子数量比外背景区高出几百倍至几千倍 (Xie Shucheng et al., 1997)。川西北地区的一些典型金矿床的地质—土壤剖面分析结果显示, 金矿体顶底板出现 *Bacillus cereus* 计数的异常值 (Xie Shucheng et al., 1997)。在三稀矿产生物找矿领域, 微生物种类对铈的生物矿化有特定影响 (Liu Mingxue, 2014), 紫苜蓿能够分泌溶钼素, 溶解土壤中的钼, 然后被根部吸收并运输到茎、叶、花和种子里, 将 14 公顷的紫苜蓿燃烧可以提取 3kg 钼 (Sun Jibao, 2011)。

3 国内三稀矿产资源生物找矿研究进展

笔者查阅了国内相关领域的研究现状, 将国内三稀矿产资源生物找矿研究成果总结如表 1 所示。

表 1 国内三稀矿产资源生物找矿研究现状一览表

Table 1 A list of domestic research status of biological method for “Three-type Rare Resources” exploration

类别	内容	文献来源
稀有	爱景山铈矿床存在明显的 Sr、Ba 生物地球化学异常, 且植物的株、叶发红, 可作为该类型矿床的找矿标志	Shang Xiaochun et al., 1990
	紫苜蓿能够分泌溶钼素, 溶解土壤中的 Ta, 然后被根部吸收并运输到茎、叶、花和种子里, 燃烧 14 公顷的紫苜蓿可以提取 3kg 的 Ta	Sun Jibao, 2011
	微生物种类对 Sr 的生物矿化有特定影响	Liu Mingxue, 2014
稀散	芒箕、南烛、榔榆、蜈蚣草、石松、醉鱼草、黄花草为找寻 Tl 矿的有效指示植物	Zou Zhenxi et al., 2000
	矿区富 Tl、Hg、As 的动物和地植物是找矿的最佳标志	Zhang Zhong et al., 2000
	芒箕、蜈蚣草、南烛、榔榆、黄花草、醉鱼草、石松为寻找 Tl 矿的有效指示植物	Li Dexian et al., 2003
	铊矿区生物和人体中 Tl 含量明显高, 是判别 Tl 超常富集的标志	Zhang Baogui et al., 2004
	用 Tl 的植物地球化学测量寻找铊矿床是最有效的方法	Hu Xishun et al., 2005
	灵芝草喜欢生长在 Ge 富集的区域	Mei Xiaohong, 2005
	豆科紫云属 (<i>Astragalus</i>)、十字花科芸苔属 (<i>Brassica</i>) 和藜科滨藜属 (<i>Atriplex</i>) 可作为 Se 的超累积植物用于找矿	Tang Shirong et al., 1997
	渔塘坝硒矿区发现了一种新的 Se 富集植物——遏蓝菜 (<i>Thlaspiarvensis</i> L.)	Shao Shuxun et al., 2007
在粉红色紫云英引导下发现了 Se 矿	Zhao Wu et al., 2014	
壶瓶碎米荠是超富集 Se、Cd 的植物	Long Shengqiao et al., 2015	

根据国内已发表的文献资料, 能产生生物地球化学异常的共有 7 种稀有稀散元素: 铈 (Shang Xiaochun et al., 1990; Liu Mingxue, 2014)、钽 (Sun Jibao, 2011)、钷 (Shang Xiaochun et al., 1990)、铊 (Zou Zhenxi et al., 2000; Li Dexian et al., 2003; Zhang Baogui et al., 2004; Hu Xishun et al., 2005)、硒 (Tang Shirong et al., 1997; Shao

Shuxun et al., 2007; Zhao Wu et al., 2014)、锗 (Mei Xiaohong, 2005)、镉 (Long Shengqiao et al., 2015), 其超累积指示植物指导找矿均取得了非常好的效果。此外, 微生物通过其代谢产物影响或改变稀土风化介质、直接与稀土元素络合或吸附和吸收稀土元素, 从而对风化壳中稀土元素的迁移和分异过程产生重要影响, 细菌、真菌和藻类微生物还有可

能加快次生矿物的沉淀速率,微生物地球化学对稀土表生循环的矿物学和地球化学行为的影响不容忽视(Ma Yingjun et al., 2004),微生物在稀土尾矿及稀土废弃资源二次回收中应用前景较好(Li Siyu et al., 2017),如风化壳中的微生物对稀土元素的迁移富集也起到了重要的作用(Chen Binghui et al., 2001),但运用微生物地球化学方法找到稀土矿床的案例未见发表。在生物地球化学领域,稀土的生物效应研究成果丰富,比如江西赣南某离子吸附型稀土矿床植物体内的稀土元素含量较高,其中铁芒萁叶中稀土总量可达 3358×10^{-6} (Wang Yuqi et al., 1997),福建省长汀县某离子吸附型稀土矿芒萁叶中稀土总量可达 2199×10^{-6} (Li Xiaofei et al., 2013),河台金矿矿山芒萁叶稀土总量 1952×10^{-6} (Miao Li et al., 2018),比其它植物叶高 2~3 个数量级,植物体各部位的稀土含量分布一般为根>叶>茎,有学者指出天然植物铁芒萁其中含有稀土结合蛋白、多糖和DNA,茶中也含有稀土结合多糖(Qin Junfa et al., 2002),稀土与这些生物大分子的结合紧密,但是迄今

为止并没有研究成果将某类植物作为稀土矿找矿标志,但稀土对于促进植物生长、增产、优质、抗病作用显著(Qin Junfa et al., 2002),稀土对于动物机体功能调节、对人类大脑记忆、思维和推理等功能性损害等领域的生物效应研究也取得了较多研究成果(Zhu Weifang et al., 1996)。总的来说,国内生物找矿技术仍在研究阶段,还未成为探矿的主流技术,未能在生产上广泛应用(Song Cian et al., 2009)。

4 国内三稀矿产资源生物找矿技术方法

4.1 生物地球化学异常特征

生物地球化学找矿是很早就被提出的一种矿产勘查方法,但由于野外地质工作人员往往缺乏系统、精准的生物学知识,使得这一方法的研究及应用热度始终不高(Jiang Jingye, 2006)。实际上,近年来在三稀矿产资源生物找矿研究过程中,发现了一些超累积植物,将特定的三稀元素在这些植物样品中的含量用于找矿效果明显(表2)。

表2 已发表的超累积植物找矿勘查成功范例

Table 2 Some successful examples of super-accumulated plant for prospecting surveys

三稀矿床名称	植物种属	含量($\times 10^{-6}$)					数据来源
		Sr	Ba	Se	Cd	Tl	
爱景山锶矿	水蓼	>10000	3500				Shang Xiaochun et al., 1990
	蔷薇	10000	30000				
	野豌豆	≥ 10000	30000				
	山萸	8000	1000				
	双穗雀稗	10000	1000				
	紫草	10000	1000				
	白苏	>10000	500				
	龙葵	8500	3000				
贵州滥木厂铊矿、云南南华砷铊矿床	蜈蚣草					91	Li Dexian et al., 2003
	石松					41	
芒箕					41		
湖北渔塘坝硒矿区	多年生遏蓝菜根			119.67			Shao Shuxun et al., 2007
	多年生遏蓝菜茎			274.45			
	多年生遏蓝菜叶			129			
	一年生遏蓝菜根			1167			
	一年生遏蓝菜茎			627			
	一年生遏蓝菜叶			942.5			
	壶瓶碎米茅地上部分				211.35~1088.5		Long Shengqiao et al., 2015
壶瓶碎米茅地下部分				172.4~505.83			

4.2 三稀矿产生物找矿样品采集、处理和分析测试方法

三稀矿产植物找矿的样品采集时间一般以春、秋季植物生长旺盛的季节为好,通常采集嫩枝、根系、叶子或树皮。样品的重量要保证灰化或干燥粉

碎后能满足化学分析之用(Jiang Jingye, 2006)。取样点的分布可视野外情况布设网格、剖面或代表性点采样。一般的处理步骤包括干燥—研细/粉碎—称重—灰化/湿法硝化—称重—分析测试。样品在干燥的气候条件下可自然风干,否则需要烘干,一般

60~70℃烘干潮湿样品。灰化通常选择450℃,过程要保证彻底,不留碳质,但也要根据“三稀”元素的特点选择是否应用灰化这种方法,防止微量元素的损失。实践表明,HNO₃-H₂O₂微波消解方法处理植物样品效果较好(Sun Dezhong et al., 2012)。随着分析测试技术的发展,电感耦合等离子体质谱法测试生物样品是目前较常用的方法(DZ/T 0253.1-2014)。

4.3 指示矿化的特征性植物

国外对于指示矿化的特征性植物区系有过系统的研究,包括喜钙(石灰岩)植物区系、盐生植物区系、硒植物区系、蛇纹石植物区系、锌植物区系、其他特征性植物区系。湖北渔塘坝硒矿区发现的硒富集植物——遏蓝菜(*Thlaspiarvense* L.)即为遏蓝菜属(*Thlaspi*),属锌植物区系,其10个种也含有相当数量的锌。硒的指示植物包括黄芪属(*Astragalus*),鸡冠花(*Stanleya*)、紫菀属(*Aster*)和落芒草属(*Oryzopsis*)等属的一些种,并见于特征性的密叶滨藜(*Atriplexconfertifolia*)群丛(Brooks, 1986)。国内学者指出壶瓶碎米荠是超富集硒的植物(Long Shengqiao et al., 2015)。毋庸置疑,几乎对各类土壤都有可能找出其特征性的植物区系,对于指示矿化特征的植物,需要在地质调查实践工作中发现并证实是否可用于辅助指导找矿勘查工作。

笔者所在的团队连续三年在川西甲基卡大型锂矿资源基地综合调查评价工作中,开展了运用植物找矿方法辅助锂铍矿种找矿勘查的实践,取得了较好的验证效果。川西甲基卡已开采的矿山周边广泛分布康定小叶冬青,其茎叶、根系、根系土壤中锂元素高于未开采矿脉及背景地区。甲基卡矿区植物茎叶中锂的含量最高值出现在已开采的134号伟晶岩脉,最低值出现在海子边坡。植物根中锂的含量介于 $1.27 \times 10^{-6} \sim 7.16 \times 10^{-6}$ 之间,最高值出现在已开采的308号伟晶岩脉。在土壤-植物系统中,水溶态和交换态金属微量元素的数量很低,根系吸收金属微量元素主要来源是固相物质的释放,这与锂元素具有较强活动性的特性是一致的。实地调研结果也表明,腐殖层中锂的含量较深层土壤为富,这与植物富集锂的作用相关(Aral et al., 2011)。相比而言,在同一地区,植物根系中Li的含量高于茎叶,而植物根、茎叶中Li含量只及根系土壤Li含量的十分之一甚至是几十分之一。通常牧草中锂的含量为 $0.05 \times 10^{-6} \sim 0.15 \times 10^{-6}$ (Liu Yingjun et al., 1984),谷物和蔬菜锂的含量为 $0.5 \times 10^{-6} \sim 3.4 \times$

10^{-6} ,不同植物中锂的含量浮动于 $0.2 \times 10^{-6} \sim 30 \times 10^{-6}$ 之间(Aral et al., 2011)。

4.4 动物协助找矿

利用动物作为野外辅助找矿手段看似荒唐滑稽,但中国古代利用鸭子找金矿,国外利用狗和白蚁等不同动物协助探矿的实例古已有之。生物地球化学省是所谓地带性的,或是地带内的。地带性省往往因该区的地带性土壤而缺乏钙、钴和碘一类元素;地带内省通常因矿体和与之有关的分散晕的存在而受到地区性元素富集的影响。家畜的养分与健康受到来自各类土壤的牧草成分的影响,其中既包括某些元素的严重缺乏或过量而致毒,也包括金属元素相对比例的变异。不一定来自当地的补充饲料,往往使生物地球化学省的影响变得模糊不清。家畜对地动物学探矿较为合适,因为家畜往往局限于一个小区域,其营养来源也受局限(Brooks, 1986)。

笔者对川西高海拔地区的动物样品进行过尝试性的研究,动物样品采集地点含甲基卡已开采矿脉(134脉、308脉)、未开采资源富集区(X03脉、烧炭沟)、远离矿脉的背景区(高原海子周边),已获取的34件牦牛骨骼及牛粪中Li元素测试结果显示(图1),动物样品中的Li含量或可指示稀有金属矿床,甲基卡矿区动物骨骼锂的含量介于 $0.96 \times 10^{-6} \sim 13.47 \times 10^{-6}$ 之间,最高值出现在已开采的308号伟晶岩脉,尾矿库内采集的牛骨锂含量为 9.59×10^{-6} ,牛粪中锂的含量介于 $4.58 \times 10^{-6} \sim 34 \times 10^{-6}$ 之间。此前国内外有关动物骨骼中锂的含量分析的研究结果较少,据报道红骨山羊骨骼中锂的含量为 $0.425 \pm 0.011 \times 10^{-6}$ (Gu Fengyi, 2009)。动物体通过空气、水和食物摄取锂,甲基卡矿区动物饮水中锂与地质环境有关,通过空气摄入的锂相对较少。有研究表明,锂在动物组织中数量很少,奶制品中锂的含量为 0.5×10^{-6} ,肉类中锂的含量为 0.012×10^{-6} (Aral et al., 2011)。对比可知,甲基卡矿区动物骨骼中锂的含量明显高于其它动物体内锂含量一个数量级。

5 三稀矿产生物找矿应用问题探讨

(1)国内近年稀有稀土勘查工作大多集中在已知矿带、矿田、矿区范围内或在已知矿床的深部和旁侧。应注意在这些矿区开展环境调查评价工作的同时,寻找不同三稀矿种的有效指示植物,进而在新一轮的找矿工作中运用这种特征植物尝试发现其它未知矿床。

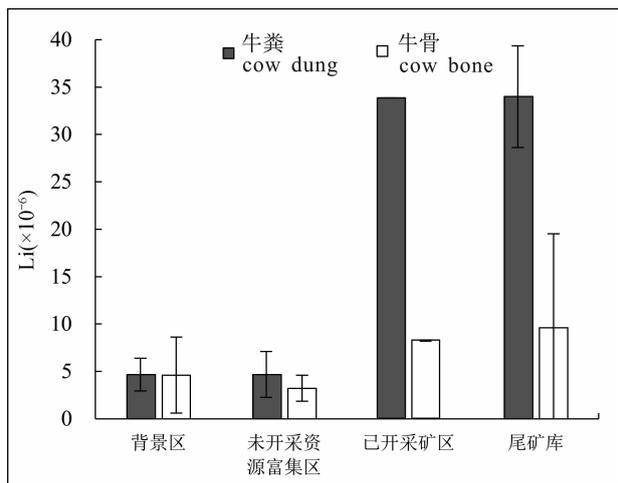


图1 甲基卡矿区牛粪及牛骨中Li含量

Fig. 1 Mass concentration of Li in cowdung and bones in Jiajikamine

(2)生物找矿勘查适用矿种的问题。生物找矿勘查方法虽不具普适性,但其在三稀矿产资源找矿勘查工作中特别是稀有金属矿种找矿工作中应有其适用范围。其中,锂是近年来工作重点,但锂属非常活跃的元素,应在不同地表景观不同环境条件下,有针对性地开展系统研究。如前所述,国内的三稀矿产资源生物勘查是在多层次上进行的,但研究内容在稀散金属方面居多。除铯矿以外,目前国内尚未见到在稀有金属矿区进行生物地球化学研究的工作。笔者尝试调查过甲基卡稀有金属矿区内含矿地带及不含矿地带土壤及动植物样品稀有金属含量分布规律,从而反推动植物稀有金属含量是否可以反映采样地带含矿性,旨在提出面向甲基卡地区稀有金属矿的生物找矿方法。

(3)样品采集的针对性问题。在生物找矿试验阶段,所采集的生物样品除考虑其生物种属以外,应注意选择研究区内广泛分布的物种,以便于对比分析、计算其生物富集系数等参数。本项目于2016~2018年在川西甲基卡锂矿区内尝试性开展生物地球化学工作,旨在探索锂矿区生物地球化学方法的实际应用效果。甲基卡矿区植被覆盖较好,部分矿脉及岩体是浅部埋藏或者是裸露于地表,大部分区域为植被覆盖区,在甲基卡矿区开展生物找矿工作是较为适宜的。

(4)遥感技术在三稀矿种生物找矿中的拓展应用问题。在植物物种相对较单一的研究区,植物的光学遥感异常可作为地植物学及生物地球化学采样的先行,在这一方面国外如英国和美国均有较成功

的找矿案例,但这些案例集中在亲铜成矿元素如铜、金等矿种,在“三稀”矿产资源生物找矿方面的应用未见报道。

(5)研究方法技术的实用性问题。找矿勘查工作最后都要落实到空间位置,即矿产资源的空间属性,生物找矿勘查方法也应如此。本次工作以甲基卡矿田周围各环境介质为主要调查对象,开展了多手段(野外实地取样+RS+GIS)环境地质调查取样工作,总结了一套快速、有效而精确的查明环境地质问题的技术方法;通过动、植物找矿方法的尝试,初步得出了一些有用的结论。牛粪Li含量富集特征为尾矿库>已开采矿脉>未开采资源富集区>背景区(图1),尾矿库及134脉牛粪Li含量达到甲基卡背景区(矿区内未见矿脉的区域)牛粪Li含量的7倍以上,可见不同地点的牛粪样品Li含量差异较大,且牛粪样品中Li含量与矿脉展布关系极为密切,矿脉周边牛粪Li含量远高于未见矿地区。此外动物骨骼及牛粪中的Be、Nb、Ta等稀有金属元素同样表现出含矿脉区域元素含量远高于不含矿区域的特征,空间差异显著,动物骨骼及牛粪中稀有金属元素含量与甲基卡稀有金属矿脉关系密切。甲基卡矿区植物各部位Li含量测试结果显示(图2),尾矿库及矿脉周边植物根中Li的富集程度最高,植物根Li含量变化规律是:尾矿库>已开采矿区>未开采资源富集区>背景区,已开采矿脉中采得的植物根Li含量明显大于不含矿脉背景区所采根Li含量,可以作为一种辅助性找矿方法。出拉海子东坡,茎叶→根→牛粪→淤泥→根系土壤中的Li含量分别为 $0.955 \times 10^{-6} \rightarrow 3.093 \times 10^{-6} \rightarrow 5.290 \times 10^{-6} \rightarrow 33.444 \times 10^{-6} \rightarrow 98.159 \times 10^{-6}$,依次升高,根系土壤Li含量相当于茎叶的100倍。土壤中其它稀有金属(如Be、Nb、Ta)在茎叶、根、根系土壤中的富集程度变化情况也与Li相似,但Be、Nb、Ta在根系土壤中的含量明显低于Li一个数量级。显然,在甲基卡稀有金属矿田,Li、Be、Nb、Ta等稀有金属元素在不同环境介质中的富集规律有可能实现生物找矿的技术创新。

6 结论

(1)生物找矿法是一种快捷而又环保的找矿方法,符合当前绿色勘查找矿的新要求。在青藏高原尤其是环境保护要求高的三稀矿产成矿远景区可以比较有效地指示成矿元素的种类,能较为直观地反映相关元素的富集特征。结合其它勘查手段,可以

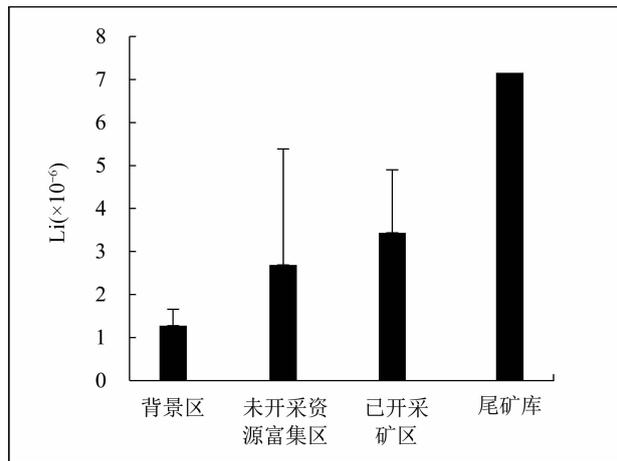


图 2 甲基卡矿区植物根 Li 含量

Fig. 2 Li mass concentration in plant roots of Jiajika mining area

快速圈定靶区,指导发现未知三稀矿床,应是今后需要密切关注的一个新的工作方向。

(2)在三稀矿产生物找矿勘查应用过程中,应将遥感、地理信息系统、计算机技术与地质勘查工作有机结合,优化方法技术,通过 GIS 空间信息技术将生物找矿勘查成果与传统地质调查成果有效结合,应用于找矿部署。

(3)国内生物找矿主要集中在植物找矿领域,对超累积植物仍处在以筛选和机理研究为主的阶段(Wang Jingguo, 2017)。在实际应用工作中还需特别关注不同矿种与三稀元素生物化学循环有关的基本过程、各圈层之间的物质交换、反应机制,注意排除人类活动及污染物排放对指示矿化的特征性动植物的影响,避免得到“假信息”。随着生物找矿技术的发展和更深入、系统地研究,期望生物找矿技术能有助于探矿工作者更好地开展找矿勘查工作,以实现资源和环境的可持续发展。

致谢:工作过程中得到部矿产勘查技术指导中心王瑞江等领导及中国地质科学院陈毓川、邹天人、杨岳清等老专家及四川地调院郝雪峰等同事的支持和帮助,成文过程中得到《地质学报》编辑部老师及审稿专家的指导,不胜感激,一并致谢!

References

Aral H, Vecchio S A. 2011. Lithium: environmental pollution and health effects. *Encyclopedia of Environmental Health*, 499 ~ 508.

Arhin E, Torkornoo S, Zango M S, Kazapoe R W. Gold in Plant: A Biogeochemical Approach in Detecting Gold Anomalies Undercover—A Case Study at Pelangio Gold Project at Mamfo Area of Brong Ahafo, Ghana [J]. *Ghana Mining Journal*,

2018, 18(1): 39~48.

Brooks R R. 1986. Mineral exploration: Biological systems and organic matter. *Applied Geochemistry*, 1(5): 627~627.

Brooks R R, Gu Lianxing (translator), Chen Xiaoya (translator). 1990. *Biological exploration method*. Beijing: Metallurgical Industry Press, 115 ~ 294 (in Chinese without English abstract).

Bluemel B, Dunn C, Hart C, Leijd M. 2015. Biogeochemical expressions of buried REE mineralization at Norra Kärr, southern Sweden. *Symposium on critical and strategic materials*. British Columbia Geological Survey Paper, 3: 231.

Cen Kuang, Ye Rong, Shen Yili, Wu Yuebin. 2003. The effect of 1: 50000 geochemical vegetation survey in the Beishan gobi desert region. *Geology and Exploration*, 39(06): 86 ~ 89 (in Chinese with English abstract).

Chen Binghui, Liu Huhu, Qi Fuhai. 2001. Microorganisms in granite weathering crust and their leaching effects on rare earth elements. *Geological Review*, 47 (1): 88 ~ 94 (in Chinese without English abstract).

Chen Yuchuan, Li Wenxiang, Zhu Yusheng. 1989. Giant, large and world-class deposit geology—the general trend of prospecting. *Progress in Earth Science*, (6): 37 ~ 41 (in Chinese without English abstract).

Gu Fengying. 2009. Study on bone metabolism and VDR gene of red bone goats and non-red bone goats. *Yunnan Agricultural University* (in Chinese with English abstract).

He Xin. 2013. Overview of the principles and applications of biological prospecting. *Biology Teaching*, 38 (11): 11~12 (in Chinese without English abstract).

Hu Xishun, Liu Jincheng, Wang Zhenyang, Wang Bo. 1992. A preliminary study on the geochemical exploration of gold deposits in the Xiaoqingling area of Shaanxi Province. *Gold Technology News*, (8): 32 ~ 33 (in Chinese without English abstract).

Hu Xishun, Meng Guanglu. 2005. Method of plant geochemical measurement and its prospecting result. *Mineral Resources and Geology*, 19(6): 610~616 (in Chinese with English abstract).

Leslie K, Geffen P, Farlane B M, Oates C J, Kyser T K, Fowle D A. 2013. Biogeochemical indicators of buried mineralization under cover, Talbot VMS Cu - Zn prospect, Manitoba. *Applied Geochemistry*, (37): 190~202.

Li Dexian, Gao Zhenmin, Zhu Yongxuan, Rao Wenbo. 2003. Thallium-bearing minerals and vegetation prospecting for thallium. *Geology and Exploration*, 39(5): 44~48 (in Chinese with English abstract).

Li Siyu, Fu Huizhen, Dong Wei. 2017. Research progress on the interaction of microorganisms and rare earth. *Journal of Jiangxi University of Science and Technology*, 38 (3): 56 ~ 62 (in Chinese with English abstract).

Li Xiao Fei, Chen Zhibiao, Chen Zhiqiang. 2013. Concentrations of soil rare earth elements and their accumulation characteristics in plants in recovered mining wastelands in Fujian Province, South China. *Chinese Journal of Ecology*, 32(8): 2126 ~ 2132 (in Chinese with English abstract).

Liu Mingxue. 2011. Studies on microorganism-strontium, uranium interactions and mechanisms. *University of Electronic Science and Technology* (in Chinese with English abstract).

Liu Yingjun, Cao Liming, Li Zhaolin. 1984. *Element Geochemistry*. Beijing: Science Press, 125 ~ 136 (in Chinese without English abstract).

Long Shengqiao, Shao Shuxun. 2015. Geochemical characteristics of super-concentrated cadmium in the bottled rice bran of Yutangba. *Journal of Mineralogy*, (s1): 817~817 (in Chinese without English abstract).

Ma Yingjun, Huo Runke, Xu Zhifang, Zhang Hui, Liu Congqiang. 2004. REE behavior and influence factors during chemical weathering. *Advances in Earth Science*, 19(1): 87 ~ 94 (in Chinese with English abstract).

Ma Yueliang. 2000. Biogeochemical characteristics of the Hetai gold

- deposit, Guangdong Province and their significance in remote-sensing exploration. *Acta Mineralogica Sinica*, 20(1): 80~86 (in Chinese with English abstract).
- Ma Yueliang, Xu Ruisong. 1999. Application of remote sensing and biogeochemistry to prospecting and their practical results. *Geology and Prospecting*, 35(5): 39~43 (in Chinese with English abstract).
- Mei Xiaohong. 2005. Plant miners with expertise. *Friends of Students; Primary School Edition b*, (Z1): 83~83 (in Chinese without English abstract).
- Miao Li, Xu Ruisong, Ma Yueliang, Zhu Zhaoyu, Wang Jie, Cai Rui, Chen Yu. 2008. Characteristics of distribution, accumulation and transportation of rare earth elements in soil-plant system of the Hetai goldfield. *Ecology and Environment*, 32(8): 2126~2132 (in Chinese with English abstract).
- Ministry of Land and Resources of the People's Republic of China. 2014. Analytic methods for biologic samples in eco-geochemistry assessment—Part 1: Determination of the content of 19 elements including lithium, boron, vanadium, etc.—Inductively coupled plasma mass spectrometry. Beijing: China Standard Press, 1~25.
- Qin Junfa, Chen Xiangyou, Li Zengqi. 2002. Biological effects of rare earth elements. *Guangdong Trace Element Science*, 9(3): 1~16 (in Chinese with English abstract).
- Reddy L C S. 2019. Trace elements interaction in eggs from Brahmanapalli asbestos mining area, Andhrapradesh, south India. *International Journal of Research*, 6(2): 850~859.
- Ren Tianxiang, Li Li, Zhang Hua, Kong Lingqi. 1993. Russia's exploration of biogeochemistry—a visit to Russia. *Foreign Geological Exploration Technology*, (2): 24~31 (in Chinese without English abstract).
- Rock B N, Hoshizaki T, Miller J R. 1988. Comparison of in situ and airborne spectral measurements of the blue shift associated with forest decline. *Remote Sensing Environ.*, (24): 109~127.
- Shang Xiaochun. 1990. Biogeochemical anomalies of the Aijingshan strontium deposit. *Journal of Geology*, (3): 25~26 (in Chinese without English abstract).
- Shao Shuxun, Zheng Baoshan, Su Hongcan, Luo Chong, Li Xiaoyan. 2007. A new species of selenium hyperaccumulator identified in YuTang base deposit area. *Acta Mineralogica Sinica*, 27(z1): 567~570 (in Chinese with English abstract).
- Shen Yuanchao, Yang Jinzhong, Li Shen zhi. 1999. Application of biogeochemistry in gold deposit exploration as exemplified by Anqimetallogenic fault in western Junggar. *Geological Science and Technology Information*, 18(3): 55~59 (in Chinese with English abstract).
- Song Cian, Lei Liangqi. 2009. Research and orientation of exploration vegetation geochemistry in China. *Journal of Guilin University of Technology*, 29(1): 1~11 (in Chinese with English abstract).
- Sun Dezhong, An Ziyi, Xu Chunxue, Wang Suming, Wang Yaping. 2012. Comparison of different digestion procedures for elemental determination in plant samples by inductively coupled plasma-mass spectrometry. *Rock and Mineral Analysis*, 31(6): 961~966 (in Chinese with English abstract).
- Sun Jibao. 2011. Plant prospecting shows effect. *Invention and Innovation*, (6): 5~5 (in Chinese without English abstract).
- Tang Shirong, Huang Changyong, Zhu Zuxiang. 1997. Super cumulative plants in relation to ore prospecting. *Geophysical & Geochemical Exploration*, 21(4): 263~268 (in Chinese with English abstract).
- Wang Denghong. 2016. A discussion on some problems concerning deep exploration of mineral resources in South China. *Geology in China*, 43(5): 1585~1598 (in Chinese with English abstract).
- Wang Denghong, Wang Ruijiang, Fu Xiaofang, Sun Yan, Wang Chenghui, Hao Xuefeng, Liu Lijun, Pan Meng, Hou Jianglong, Dai Jingjing, Tian Shihong, Yu Yang. 2016. A discussion on the major problems related to geological investigation and assessment for energy metal resources base: a case study of the Jiajikalarge lithium mineral resource base. *Acta Geoscientia Sinica*, 37(4): 471~480 (in Chinese with English abstract).
- Wang Denghong, Wang Ruijiang, Li Jiankang, Zhao Zhi, Yu Yang, Dai Jingjing, Chen Zhenhui, Li Dexian, Gu Wenjun, Deng Maochun, Fu Xiaofang, Sun Yan, Zhen Guodong. 2013. The progress in the strategic research and survey of rare earth, rare metal and rare-scattered elements mineral resources. *Geology In China*, 40(2): 361~370 (in Chinese with English abstract).
- Wang Hongmei, Yang Fengqing, Zhou Xiugao, Zhang Jun, Yao Shuzhen. 2002. Evaluation of prospecting potential of soil microbes in typical gold mining areas; The combined effects of mineralization and non-mineralization factors. *Chinese Science*, 32(11): 928~933 (in Chinese without English abstract).
- Wang Jingguo. 2017. Biogeochemistry: material circulation and soil process. Beijing: China Agricultural University Press (in Chinese without English abstract). Wang Yuqi, Sun Jingxin, Chen Hongmin, Guo Fanqing. 1997. Study on Contents and distribution characteristics of rare earths in natural plants by NAA. *Journal of the Chinese Rare Earth Society*, 15(2): 64~68 (in Chinese with English abstract).
- Wei Yongfu. 1994. Chinese gold deposits. Beijing: Seismological Press, 3~5 (in Chinese without English abstract).
- Wu Jing. 2003. Discussion on the application of plant geochemistry in ore exploration. *Mineral Resources and Geology*, 17(94): 59~61 (in Chinese with English abstract).
- Wurster C M, Munksgaard N, Zwart C, Bird M. 2015. The biogeochemistry of insectivorous cave guano: a case study from insular Southeast Asia. *Biogeochemistry*, 124(1-3): 163~175.
- Xie Shucheng, Yin Hongfu, Wang Hongmei, Zhou Xiugao. 1997. A potential microbial method of mineral exploration: Study on bacillus cereus as an indicator of gold mineralization. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 2(4): 383~386 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Baogui, Zhang Zhong, Hu Jing, Tian Yifu. 2004. Thallium Geochemistry and Its Ultra-Normal Enrichment. *Guizhou geology*, 21(4): 240~244 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Zhong, Chen Guoli, Zhang Baogui, Chen Yecai, Zhang Xingmao. 2000. The markets for the prospecting of ores and the indices for the identifying of contamination are the high contents of Tl, Hg, As in plants and animals in the Lanmuchang Tl mining district. *Geology and Prospecting*, 36(5): 27~30 (in Chinese with English abstract).
- Zhao Wu, Wang Weidong. 2014. A distinctive prospecting indicator plant. *Biology teaching*, 39(3): 3~5 (in Chinese without English abstract).
- Zhu Weifang, Zhang Hui, Shao Pingping, Feng Jia, Xu Suqin, Wu Dongsen, Yang Wenjiao. 1996. Research on IQ of children in rare earth areas—I. study on biological effects of rare earth areas in South Anhui Province. *Science Bulletin*, 41(10): 914~916 (in Chinese without English abstract).
- Zou Zhenxi, Chen Daiyan, Ren Dayin. 2000. A preliminary application of plant ash method in some thallium ore deposits (prospects) of Southwestern Guizhou. *Journal of Guizhou University of Technology (Natural Science Edition)*, 29(6): 15~24 (in Chinese with English abstract).

参 考 文 献

- 布鲁克斯, R. R. 1990. 生物探矿法. 顾连兴, 陈晓亚译. 北京: 冶金工业出版社, 115~294.
- 岑况, 叶荣, 沈镛立, 吴悦斌. 2003. 北山戈壁荒漠地区 1:5 万植物地球化学测量效果. *地质与勘探*, 39(06): 86~89.
- 陈炳辉, 刘琥琥, 毋福海. 2001. 花岗岩风化壳中的微生物及其对稀土元素的浸出作用. *地质论评*, 47(1): 88~94.
- 陈毓川, 李文祥, 朱裕生. 1989. 巨型、大型和世界级矿床地质—找

- 矿的总趋势. 地球科学进展, (6): 37~41.
- 顾丰颖. 2009. 红骨山羊与非红骨山羊骨代谢及 VDR 基因的研究. 云南农业大学.
- 何馨. 2013. 生物找矿的原理和应用概述. 生物学教学, 38(11): 11~12.
- 胡西顺, 刘金成, 汪振洋, 王波. 1992. 陕西小秦岭地区金矿植物地球化学勘查初步研究. 黄金科技动态, (8): 32~33.
- 胡西顺, 孟广路. 2005. 植物地球化学测量方法的试验效果. 矿产与地质, 19(6): 610~616.
- 李德先, 高振敏, 朱咏喧, 饶文波. 2003. 铊矿物及铊的植物找矿. 地质与勘探, 39(5): 44~48.
- 李丝雨, 傅惠韵, 董伟. 2017. 稀土与微生物相互作用的研究进展. 江西理工大学学报, 38(3): 56~62.
- 李小飞, 陈志彪, 陈志强. 2013. 南方稀土采矿恢复地土壤稀土元素含量及植物吸收特征. 生态学杂志, 32(8): 2126~2132.
- 刘明学. 2011. 微生物与铈铀相互作用及其机理研究. 电子科技大学.
- 刘英俊, 曹励明, 李兆麟. 1984. 元素地球化学. 北京: 科学出版社, 311~326.
- 龙胜桥, 邵树勋. 2015. 渔塘坝壶瓶碎米茅超富集镉的地球化学特征. 矿物学报, (s1): 817~817.
- 马英军, 霍润科, 徐志方, 张辉, 刘丛强. 2004. 化学风化作用中的稀土元素行为及其影响因素. 地球科学进展, 19(1): 87~94.
- 马跃良. 2000. 广东省河台金矿生物地球化学特征及遥感找矿意义. 矿物学报, 20(1): 80~86.
- 马跃良, 徐瑞松. 1999. 遥感生物地球化学在找矿勘探中的应用及效果. 地质与勘探, 35(5): 39~43.
- 梅小红. 2005. 各有专长的植物矿工. 学生之友, (Z1): 83~83.
- 苗莉, 徐瑞松, 马跃良, 朱照宇, 王洁, 蔡睿, 陈彧. 2008. 河台金矿矿土壤-植物稀土元素含量分布和迁移积聚特征. 生态环境. 17(1): 350~356.
- 秦俊法, 陈祥友, 李增禧. 2002. 稀土的生物学效应. 广东微量元素科学, 9(3): 1~16.
- 任天祥, 李立, 张华, 孔令韶. 1993. 俄罗斯的勘查生物地球化学—赴俄罗斯考察见闻. 国外地质勘探技术, (2): 24~31.
- 尚晓春. 1990. 爱景山锑矿床的生物地球化学异常. 地质学刊, (3): 25~26.
- 邵树勋, 郑宝山, 苏宏灿, 罗充, 李晓燕. 2007. 湖北渔塘坝硒矿区发现超富集硒植物. 矿物学报, 27(z1): 567~570.
- 沈远超, 杨金中, 李慎之. 1999. 生物地球化学方法与金矿找矿—以新疆西准噶尔安齐成矿断裂带为例. 地质科技情报, 18(3): 55~59.
- 宋慈安, 雷良奇. 2009. 我国勘查植物地球化学的研究现状及发展方向. 桂林工学院学报, 29(1): 1~11.
- 孙德忠, 安子怡, 许春雪, 王苏明, 王亚平. 四种前处理方法对电感耦合等离子体质谱测定植物样品中 27 种微量元素的影响. 2012. 岩矿测试, 31(6): 961~966.
- 孙吉宝. 2011. 植物探矿显奇威. 发明与创新, (6): 5~5.
- 唐世荣, 黄昌勇, 朱祖祥. 1997. 超积累植物与找矿. 物探与化探, 21(4): 263~268.
- 王登红. 2016. 对华南矿产资源深部探测若干问题的探讨—以若干超大型矿床深部找矿突破为例. 中国地质, 43(5): 1585~1598.
- 王登红, 王瑞江, 付小方, 孙艳, 王成辉, 郝雪峰, 刘丽君, 潘蒙, 侯江龙, 代晶晶, 田世洪, 于扬. 2016. 对能源金属矿产资源基地调查评价基本问题的探讨—以四川甲基卡大型锂矿基地为例. 地球学报, 37(4): 471~480.
- 王登红, 王瑞江, 李建康, 赵芝, 于扬, 代晶晶, 陈郑辉, 李德先, 屈文俊. 2013. 中国三稀矿产资源战略调查研究进展综述. 中国地质, 40(2): 361~370.
- 王红梅, 杨逢清, 周修高, 张均, 姚书振. 2002. 典型金矿区土壤微生物的找矿潜力评价: 矿化和非矿化因素的综合影响. 中国科学, 32(11): 928~933.
- 王敬国. 2017. 生物地球化学: 物质循环与土壤过程. 北京: 中国农业大学出版社.
- 王玉琦, 孙景信, 陈红民, 郭繁清. 1997. 中子活化法研究稀土矿区植物体中稀土元素的分布特征. 中国稀土学报, 15(2): 64~68.
- 韦永福. 1994. 中国金矿床. 北京: 地震出版社, 3~5.
- 伍静. 2003. 植物地球化学应用于找矿的探讨. 矿产与地质, 17(94): 59~61.
- 谢树成, 殷鸿福, 王红梅, 周修高, 汤显春. 1997. 一种潜在的微生物找矿法—蜡芽孢杆菌指示金矿化的试验研究. 地球科学—中国地质大学学报, 2(4): 383~386.
- 张宝贵, 张忠, 胡静, 田弋夫. 2004. 铊地球化学和铊超常富集. 贵州地质, 21(4): 240~244.
- 张忠, 陈国丽, 张宝贵, 陈业材, 张兴茂. 2000. 富集铊汞砷的生物是滥木厂铊矿床找矿和铊矿区污染的标志. 地质与勘探, 36(5): 27~30.
- 赵武, 王卫东. 2014. 与众不同的找矿指示植物. 生物学教学, 39(3): 3~5.
- 中华人民共和国国土资源部. 2014. DZ/T 0253. 1—2014 生态地球化学评价动植物样品分析方法第 1 部分: 锂、硼、钒等 19 个元素量的测定, 电感耦合等离子体质谱(ICP-MS)法. 北京: 中国标准出版社, 1~25.
- 朱为方, 张辉, 邵萍萍, 冯嘉, 徐素琴, 伍东森, 杨文教. 1996. 稀土区儿童智商调查研究—I 赣南稀土区生物效应研究. 科学通报, 41(10): 914~916.
- 邹振西, 任大银. 2000. 植物灰分法在黔西南某些铊矿床(点)的初步应用. 贵州工业大学学报(自然科学版), 29(6): 15~24.

Areview of “three-type rare resources” biological methods for mineral exploration and its application in China

YU Yang¹⁾, WANG Denghong^{*1)}, GAO Juanqin^{1,2)}, LIU Lijun^{1,3)}, WANG Wei³⁾, ZHANG Sai^{1,2)}

1) *MNR Key Laboratory of Metallogeny and Mineral Assessment, Institute of Mineral Resource, Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing, 100037;*

2) *Department of Earth Science and Resources, China University of Geoscience, Beijing, 100083;*

3) *Geology and Mineral Resources Scientific Institute of Sichuan Exploration Bureau of Geology and Mineral Resources, Chengdu, 610000*

** Corresponding author: wangdenghong@sina.com*

Abstract

As one of the hot subjects in the world, biochemistry can help humans to understand and explore the geological and geochemical processes on the earth with new theories and methods, which have a significant impact on the research and application in the field of resources and environment. “Three-type Rare Resources” biological methods of prospecting for minerals include geobotany (visual examination of the vegetation cover), biogeochemistry (chemical analysis of vegetation), geozoology and microbial prospecting. Based on the summarization of previous academic research achievements combining with this study, the theory of “Three-type Rare Resources” biological methods for mineral exploration and its application significance have been further stated in this paper. Some successful cases show that “Three-type Rare Resources” biological methods of prospecting for minerals could be effectively applied to prospect concealed Li and Be rare metal ore deposits under covers. With the deepening and development of research, “Three-type Rare Resources” biological methods of prospecting for minerals might play a more important role on the development of theory and technology for the Three-type Rare Mineral Resources survey in China.

Key words: three-type rare resources; biological methods of prospecting for minerals; biochemistry; technology; application