

DOI:10.16788/j.hddz.32-1865/P.2020.01.001

引用格式:王天刚,Adrian Fabris,姚仲友,等. 勘查植物地球化学在我国不同地球化学景观区的应用现状及展望[J]. 华东地质,2020,41(1):1-7.

勘查植物地球化学在我国不同地球化学景观区的应用现状及展望

王天刚^{1,2}, Adrian Fabris³, 姚仲友^{1,2}, Hou Baohong³, 赵宇浩^{1,2},
赵晓丹^{1,2}, 朱意萍^{1,2}

(1.中国地质调查局南京地质调查中心,南京 210016;2.中国地质调查局拉丁美洲-大洋洲地质
合作研究中心,南京 210016;3.澳大利亚南澳大利亚州地质调查局,阿德莱德 5000)

摘要: 勘查植物地球化学是通过分析植物器官来获取成矿元素信息的地球化学方法。我国学者在干旱荒漠区、森林沼泽区、半干旱和湿润半湿润中低山景观区开展了系统的勘查植物地球化学试验,厘定了一批适用于勘查植物地球化学调查的植物,为该方法的推广及应用奠定了良好基础。今后应进一步加强对勘查植物地球化学异常产生的机理、勘查植物地球化学数据库及指南建立、勘查植物地球化学异常遥感应用等方面的研究,更好地利用勘查植物地球化学方法服务矿产勘查工作。

关键词: 勘查植物地球化学;地球化学景观区;应用现状;中国

中图分类号: P593; P632.4

文献标识码: A

文章编号: 2096-1871(2020)01-001-07

勘查植物地球化学是指通过对植物,尤其是对维管类植物器官进行分析并获取成矿元素信息的地球化学方法^[1-2]。从地球化学的角度,植物能通过根系吸收来自土壤、沉积物、岩石、地下水和气态化合物中的元素,意味着植物器官成分可以集成代表地表以下数平方米的土壤、岩石和地下水的地球化学特征,从而为寻找被土壤覆盖的隐伏矿体提供成矿信息^[1]。目前,勘查植物地球化学已在俄罗斯、加拿大、澳大利亚、美国及瑞典等国家获得了广泛应用^[1,3-7]。

20世纪50年代初,谢学锦等在长江中下游地区开展了勘查植物地球化学研究,发现了铜矿指示植物海州香薷,并指出该类植物可以富集Cu元素^[8]。20世纪90年代初,任天祥等系统考察了苏联和加拿大勘查植物地球化学工作方法、采样技术、基础理论及其在地质找矿中的应用情况^[9-10],促

进了我国勘查植物地球化学的研究和发展。自此,我国勘查植物地球化学研究进入了系统研究阶段,主要集中在勘查植物地球化学原理及应用等方面^[11-13]。本文在回顾勘查植物地球化学理论研究的基础上,系统总结了我国不同景观区勘查植物地球化学方法的应用现状,在此基础上对勘查植物地球化学的今后研究方向进行展望。

1 勘查植物地球化学异常形成机制

早期,Kovalevsky^[14]提出了“地球化学障”理论,认为植物内部存在“防御机制”,即不同植物种类的器官对根部吸收基底元素具有不同程度的抵抗,这被认为是勘查植物地球化学异常形成的基本理论,为勘查植物地球化学研究奠定了基础,也为利用勘查植物地球化学寻找矿床带来了局限性(如寻找与有障元素相关的铀矿等)。随着对植物研究

* 收稿日期:2019-12-05 修订日期:2020-01-16 责任编辑:谭桂丽

基金项目: 中国地质调查局“玻利维亚—古巴镍钴锂油气资源调查(编号:DD20201155)”和国家自然科学基金“西秦岭地区西成盆地铅锌矿床成矿流体特征研究(编号:41202068)”项目联合资助。

第一作者简介: 王天刚,1983年生,男,高级工程师,主要从事区域成矿规律、矿床成因及勘查技术方法研究。

的不断深入,一些学者提出了“功能型植物营养物”的概念^[15],即在植物生命周期占据重要地位的元素。目前,在自然界中仅发现 16 种植物生长必需的元素,其余 55 种元素(痕量或含量更低的元素)多数被植物吸收必要营养元素的同时被动吸收了,但是这些元素对于植物生长也十分必要,也可能在植物中富集,进一步印证了“地球化学障”理论。

然而,随着勘查植物地球化学的进一步应用,一些对植物有害的元素也可反映一定的异常信息,例如,前人研究认为寻找铀矿的大部分植物是“有障”的^[2],但是在北萨斯克彻温省,生长在 Athabasca 砂岩上的黑云杉 U 含量超过正常背景值的 1 000 倍,而其他树种(拉不拉多茶树、杜鹃和其他北方树种)也具有较高的 U 含量^[16],这一发现进一步扩展了勘查植物地球化学的应用领域。

随着相关研究的深入,研究者们逐渐认识到植物对生长环境中金属元素吸收和积累的过程十分复杂,受植物的生物地球化学特性、土壤中金属元素含量、有效态含量、土壤酸碱度、有机质含量及各元素之间的相互关系等影响,植物吸收元素的含量也各不相同^[17]。因此,通过研究不同景观区勘查植物地球化学的应用进展,从而系统确定有效的勘查植物地球化学采样对象是十分必要的。

2 不同类型景观区有效植物研究

2.1 干旱荒漠区

干旱荒漠区在我国西部地区广泛分布。由于干旱荒漠区的植物根系通常较发达,部分植物的根系深达地下 60 m,可吸收的金属体积十分庞大,因此,该类景观区较适宜开展勘查植物地球化学调查与研究。目前,我国一些学者已在西部甘肃、青海、新疆和内蒙古等地区开展了大量试验性研究工作^[18-22]。

在甘肃北山地区,针对金、铜矿床开展勘查植物地球化学找矿试验。采用网格和剖面采样方法,采样密度为 2~40 个/km²,采集的植物样品主要为该地区常见的红沙,同时随机采集木本猪毛菜、梭梭、白梭梭、霸王、膜果麻黄、小白果刺、细枝盐爪爪、合头草和松叶猪毛菜等伴生植物作为对比,采集的植物器官为植物新生叶和细枝。研究表明,该区所有植物对金矿均具有较好的指示作用,且在金异常区还伴生 Ag、As、Sb、Mo 异常。所有植

物对铜矿也具有较好的指示作用,同时伴生 Pb、Zn、Sn、Ba、Ag 异常^[18-19]。

在新疆准噶尔地区,针对岩浆岩型铜镍矿床开展了试验性研究工作。采用剖面 and 随机布点相结合,采样密度为 2~100 个/km²。主要采集区内广泛分布的白茎绢蒿,同时采集小蓬、冷蒿等 14 种伴生植物进行对比,采集的植物器官为新生叶和细枝。研究结果显示,该区植物的 Cu、Ni、Ag 异常与矿化对应性较好,Pb、As、Bi、Co、Au 等元素在矿体内也显示较好的异常特征,而 Zn、Cr、Mn、Mo 等元素未表现出明显的异常特征^[22]。

在内蒙古阿拉善地区,针对铜矿进行了试验性研究。采用网格采样方法,采样密度为 4~25 个/km²。采集的植物主要为区内广泛分布的绵刺和珍珠,同时采集琵琶柴、松叶猪毛菜、霸王、束伞亚菊、无芒隐子草、木本猪毛菜、蒙古扁桃、沙冬青、白刺和沙鞭等 10 种植物进行对比,采集的植物器官为植物根、老枝、新生叶和细枝。研究表明,植物的老枝和根部 Cu、Ni、Co、Cr 等元素含量高于新生叶及细枝,绵刺和琵琶柴为较好的采样对象,能够反映明显的 Cu、Pb、Zn 异常^[20]。

在青海省柴达木盆地东北部地区,针对铅锌矿进行了试验性研究。采用网格采样方法,采样密度为 1 个/km²,采集的植物主要为区内广泛分布的黑柴、木本猪毛菜、优若藜、膜果麻黄、中亚紫苑木和琵琶柴等,采集的植物器官为新生叶和细枝。研究表明,植物的 Pb、Zn 异常与矿体具有较好的对应关系^[21]。

2.2 森林沼泽区

我国森林沼泽区主要分布在东北地区,多数处于北部中低山-丘陵地带,地表植被十分发育,第四系覆盖广且厚,土壤中的有机质含量较高,传统的土壤地球化学测量方法在该地区的应用效果不佳。运用勘查植物地球化学调查方法在加拿大等国家森林沼泽区已发现了较好的找矿信息^[7,23]。

在东北大兴安岭地区,选择大兴安岭北部金矿、铅锌矿、铜矿矿区进行了试验性研究。采用网格采样方法,采样密度为 400~10 000 个/km²,采集的植物主要为白桦、蒙古栎、落叶松、红松、胡枝子、羊胡子草等,采集的植物器官主要为茎、叶、根和树皮。研究表明,植物的 Cu、Au、Ag、Mo、Co、Pb、Zn 等异常与矿体具有较好的对应

关系^[24-25]。

2.3 半干旱中低山景观区

半干旱中低山景观区在我国广泛分布,尤其在秦岭一带,因气候相对湿润,地表植被十分发育,第四系覆盖层较厚,基岩露头较少,传统的土壤地球化学测量方法存在一定局限。此外,秦巴山区植被十分发育,通过对该地区多个金矿区开展勘查植物地球化学调查,采集了槲栎、马桑、牛奶子、粉背黄栌、绣球绣线菊、华山松、板栗(雄株)、美丽胡枝子等植物的树枝和树叶进行分析,发现槲栎和马桑的树枝、牛奶子的树枝和树叶、粉背黄栌的树枝、绣球绣线菊的树枝和树叶、华山松的树枝、板栗(雄株)的树枝和树叶、美丽胡枝子的树枝不仅具有较好的 Au 异常,还具有较好的 Ag、Sb、As、Hg、Zn 异常,是较好的勘查植物地球化学采样对象^[26-27]。

2.4 湿润半湿润中低山景观区

我国南方湿润半湿润中低山景观区,红土较发育,气候温热,雨量丰沛,植被十分发育,第四系覆盖层较厚,露头欠佳,具备利用勘查植物地球化学找矿的条件,目前开展的研究工作主要在鄂南巫山、云贵高原、南岭和武夷山等地区。

在鄂南巫山,针对红土型金矿开展了勘查植物地球化学寻找金矿试验性研究,采集了区域分布较广的杉树、松树、槐树、蕨、大茅草等植物的新生枝叶进行分析。按十字剖面法采样,点距为 40~500 m,发现该地区的植物可较好地反映浅部矿体 Au 异常信息^[28]。

在云贵高原,针对卡林型金矿、砂岩型铜矿开展了勘查植物地球化学试验性研究,采集了区域分布较广的八宝树、千果榄仁、白花羊蹄甲、重阳木、光叶合欢、团花树、飞机草、苔藓、凤尾蕨、芒萁等植物的枝叶进行分析。以剖面法和网格法采样,区域性调查采用网格法,采样密度为 0.25 个/km²,剖面法主要针对矿体,采样间隔为 10~100 m。研究结果表明,该区不同类型的植物可以反映不同的异常信息,例如苔藓类,细叶牛毛藓可反映较好的 Au 异常信息,珠藓和长蒴藓可反映较好的 Cu 异常信息,凤尾蕨、芒萁不仅可反映较好的 Cu 异常信息,还可反映伴生的 Ag、Mo、Pb、W、As 等异常信息。八宝树、千果榄仁、白花羊蹄甲、重阳木、光叶合欢、团花

树、飞机草等植物可较好地反映 Cu 异常信息^[29-31]。

在南岭地区,针对石英脉型钨锡矿床、热液型铅锌矿床开展了勘查植物地球化学试验。采集了南岭地区较常见且易采集的凤尾蕨、芒萁等蕨类植物的叶子,通过剖面法针对矿体进行采样,采样间隔为 10~100 m。研究结果显示,芒萁可较好地反映 Pb、Zn、Ag、Cd 异常信息,凤尾蕨可较好地反映 W、Sn、Hg、As 异常信息^[32-33]。

在武夷山地区,针对斑岩型钼矿开展了勘查植物地球化学试验。采集该区较常见的竹叶、柚叶、毛蕨、夹竹桃、杉木、马尾松、茶叶的茎和叶,通过网格采样法,采样网格为 10 m×10 m。研究结果显示,毛蕨、夹竹桃可以较好地反映 Mo、Cu、Zn、Pb 异常信息^[34]。

3 我国勘查植物地球化学应用现状

目前,我国植被区划可分为寒温带针叶林区、温带针阔叶混交林区、暖温带落叶阔叶林区、亚热带常绿阔叶林区、热带季雨林与雨林区、温带荒漠区和青藏高原高寒植被区^[35]。研究发现,在寒温带针叶林区、温带针阔叶混交林区、暖温带落叶阔叶林区、亚热带常绿阔叶林区和温带荒漠区开展系统的勘查植物地球化学采样工作,通过采集植物相同器官,发现了大量能反映异常信息的植物(表 1)。

在干旱荒漠区,对应温带荒漠植被区,植物以灌木为主,梭梭属、猪毛菜属、盐爪爪属、怪柳属、蒺藜科、绢蒿属等植物为该区域最常见的植物。研究发现,这些植物中的红沙、梭梭、白梭梭、霸王、膜果麻黄、小白果刺、细枝盐爪爪、合头草、松叶猪毛菜、白茎绢蒿、小蓬、冷蒿、绵刺、琵琶柴、黑柴、中亚紫菀木、琵琶柴、优若藜、膜果麻黄等均可反映矿体的异常信息,这与干旱地区植物根系普遍发达具有直接关系。因此,在干旱荒漠区利用勘查植物地球化学找矿具有较好的应用前景。

在森林沼泽区,对应寒温带针叶林区和温带针阔叶混交林区,植物以木本落叶松、白桦、樟子松为主,白桦、胡枝子等植物是较好的采样对象。研究结果表明^[17, 36],加拿大和瑞典的黑云杉、香脂冷杉、薄叶桉木及苔藓等均是较好的勘查植物地球化学采样对象。

表 1 中国主要植物生物地球化学特征

Table 1 Biogeochemical characteristics of major plants in China

景观区	植被分区	地区	器官	有效植物	异常信息
干旱荒漠区	温带荒漠区	北山地区 ^[18-19]	新生枝、叶	红沙、木本猪毛菜、梭梭、白梭梭、霸王、膜果麻黄、小白果刺、细枝盐爪爪、合头草、松叶猪毛菜	Au、Ag、As、Sb、Mo、Cu、Pb、Zn、Sn、Ba
		准噶尔地区 ^[22]	1~2 年生叶及细枝	白茎绢蒿、小蓬、冷蒿	Cu、Ni、Ag、Zn、Pb、As、Bi、Co、Au
		阿拉善盆地 ^[20]	1~2 年生叶及细枝	绵刺、琵琶柴	Cu
		柴达木盆地 ^[21]	新生枝、叶	黑柴、中亚紫菀木、琵琶柴、优若藜、膜果麻黄	Pb、Zn
森林沼泽区	寒温带针叶林区、温带针阔叶混交林区	大兴安岭地区 ^[24-25]	根、茎、叶	白桦、胡枝子	Cu、Ag、Mo、Co、Pb、Zn
半干旱中低山景观区	暖温带落叶阔叶林区	秦巴山区 ^[26]	枝、叶、果实、皮	榲桲、牛奶子、粉背黄栌、华山松、板栗、美丽胡枝子、散枝栒子	Au、Ag、As
湿润半湿润中低山景观区	亚热带常绿阔叶林区	巫山地区 ^[28]	新生枝、叶	杉、松、蕨	Au
		云贵高原 ^[29-31]	根、新生枝、叶	凤尾蕨、小叶藤黄、芒萁、长叶实蕨	Cu、Ag、W、As、Pb
		南岭地区 ^[32-33]	叶	芒萁、凤尾蕨	Pb、Zn、Ag、Cd、W、Sn、Hg、As
		武夷山地区 ^[34]	茎、叶	毛蕨、夹竹桃	Mo、Cu、Zn、Pb

在半干旱中低山景观区,对应暖温带落叶阔叶林区,以菊科、禾本科、豆科和蔷薇科植物为主,较常见的森林植被为松科、柏科、壳斗科、杨柳科、桦木科、榆科等木本植物。该区属于松科、壳斗科的华山松、榲桲、板栗及属于蔷薇属及豆科的牛奶子、美丽胡枝子等植物,均是较好的勘查植物地球化学采样对象。

在湿润半湿润中低山景观区,对应亚热带常绿阔叶林区,以壳斗科、樟科、山茶科及蕨类植物为主。研究^[28-34]表明,区内凤尾蕨、芒萁、长叶实蕨、毛蕨等蕨类植物均可较好地反映矿化异常信息,为较好的勘查植物地球化学采样对象。

总体而言,我国干旱荒漠区、森林沼泽区、半干旱中低山和湿润半湿润中低山景观区的主要植物均具备反映区域矿化信息的生物地球化学特性,是勘查植物地球化学理想的采样对象,为勘查植物地球化学在我国的广泛应用奠定了基础。

4 展望

4.1 加强勘查植物地球化学异常机理研究

通常认为,勘查植物地球化学异常与土壤地球

化学异常有关。我国一些学者通过对高寒荒漠区、森林沼泽区和亚热带地区进行勘查植物地球化学应用研究,发现勘查植物地球化学可较好地反映矿体及相关地球化学异常信息。宋慈安等^[37]通过对高寒荒漠区甘肃北山金矿床浅井基岩(矿)、覆盖层和植物进行系统采样,发现在干旱区荒漠覆盖条件下,金矿床地下水和土壤水携带的可溶性成分和成矿-伴生元素,在外界潜在蒸发力、含水量及其变化梯度和植物吸收蒸腾等驱动力作用下,主要以垂向运移为主,K、Na、Ca、Cl 等元素淀积在覆盖层上部,Au、Ag、Cu、Pb、Zn、As、Sb、Mo 等成矿-伴生元素沉淀在覆盖层下部。因此,根系较深的植物更能吸收覆盖层下部富集成矿元素及其伴生元素,从而形成较好的植物地球化学异常。姜涛等^[38]对森林沼泽区黑龙江多宝山成矿区的岩石、土壤和植物进行了系统采样,发现植物中的 Cu 主要来自土壤 A 层,而土壤 A 层的 Cu 含量与深部土壤和岩石关系密切。孙艳铃等^[34]对亚热带地区福建平和县钟腾铜钼矿区、泮池铜钼矿区及附近异常区的基岩、土壤和植物进行系统分析,发现该区土壤与岩石中各元素分布基本一致,不同植物对不同元素的吸收程度差别较大,部分植物呈现较好的 Zn、Mo、Cu、Pb、As、

Co、Bi 异常,与土壤地球化学异常具有较好的相关性。宋慈安等^[32]对亚热带地区广西佛子冲铅锌矿开展了剖面土壤和勘查植物地球化学找矿对比试验,发现植物对元素的吸收具有选择性,Pb、Zn、Ag、Cd 等元素同时具有较好的勘查植物地球化学异常和土壤地球化学异常,土壤地球化学异常是形成植物异常的必要物质基础。但是,在一些情况下,勘查植物地球化学反映的元素异常信息与土壤地球化学异常信息不一致。例如,在新南威尔士东北部进行的植被和水系沉积物调查,发现 Au 的生物地球化学异常与水系沉积物异常并不对应^[39],因此,还需要进一步对比研究两种方法的应用性,以便更好地利用不同的地球化学调查方法组合进行有效的矿产勘查。

4.2 建立勘查植物地球化学数据库及指南

研究表明,不同景观区和植被区均具备勘查植物地球化学应用的潜力。因此,应尽快建立系统的勘查植物地球化学数据库,根据我国已有植被的分布情况,厘定区域内主要植被在勘查植物地球化学方面的应用前景,明确能够反映地球化学异常信息的主要植物器官及其相应的异常元素。在此基础上,编制系统的勘查植物地球化学指南,为不同地区开展勘查植物地球化学调查提供参考。

4.3 开展勘查植物地球化学异常遥感应用研究

研究发现,金属矿物对植物的生长发育产生影响,引起植物矮化、褪绿等病变,造成植物叶片反射光谱发生“蓝移”^[40],因此,光谱曲线向短波方向的“蓝移”可作为矿点的指示。在寒温带针叶林区、温带针阔叶混交林区和暖温带落叶阔叶林区,森林植被茂密,给勘查植物地球化学调查工作带来了巨大挑战。利用遥感技术圈定地球化学异常可提高地球化学调查工作的效率^[41-43]。利用遥感技术提取生物地球化学异常信息,可为植被覆盖区快速找矿提供线索。

5 结论

(1)勘查植物地球化学作为一种重要的地球化学调查手段,在我国不同地球化学景观区的应用前景较好,在反映隐伏矿体异常信息方面具有独特优势。目前,我国已厘定了一批适用于勘查植物地球化学调查的植物,为勘查植物地球化学的进一步推广及应用奠定了基础。

(2)勘查植物地球化学的应用前景较好,未来应进一步加强对勘查植物地球化学异常产生机理、勘查植物地球化学数据库及指南建立、勘查植物地球化学异常遥感应用等方面的研究,更好地利用勘查植物地球化学方法服务矿产勘查工作。

致谢:感谢史蒂夫·希尔博士在勘查植物地球化学研究方面对作者团队的指导与帮助。

参考文献

- [1] DUNN C E. Biogeochemistry in mineral exploration[M]. Amsterdam: Elsevier, 2011: 1-460.
- [2] KOVALEVSKY A L. Biogeochemical exploration for mineral deposits[M]. Utrecht: VNU Science Press, 1987: 1-225.
- [3] REID N, HILL S M, LEWIS D M. Spinifex biogeochemical expressions of buried gold mineralisation: the great mineral exploration penetrator of transported regolith[J]. Applied Geochemistry, 2008, 23(1): 76-84.
- [4] COHEN D R, HOFFMAN E L, NICHOL I. Biogeochemistry: A geochemical method for gold exploration in the Canadian Shield[J]. Journal of Geochemical Exploration, 1987, 29(1/3): 49-73.
- [5] BROOKS R R. Biogeochemical parameters and their significance for mineral exploration[J]. Journal of Applied Ecology, 1973, 10(3): 825-836.
- [6] BRUNDIN N H, EK J I, SELINUS O C. Biogeochemical studies of plants from stream banks in northern Sweden[J]. Journal of Geochemical Exploration, 1987, 27(1/2): 157-188.
- [7] DUNN C E. Biogeochemistry as an aid to exploration for gold, platinum and palladium in the northern forests of Saskatchewan, Canada[J]. Journal of Geochemical Exploration, 1986, 25(1/2): 21-40.
- [8] 谢学锦, 徐邦梁. 铜矿指示植物海州香薷[J]. 地质学报, 1954(4): 360-368.
- [9] 任天祥, 李立, 张华, 等. 俄罗斯的勘查生物地球化学[J]. 国外地质勘探技术, 1993(2): 24-31.
- [10] 任天祥, 高平, 莫根生, 等. 赴加拿大进行区域地球化学、环境地球化学考察见闻[J]. 国外地质勘探技术, 1993(6): 16-23.
- [11] 宋慈安, 雷良奇. 我国勘查植物地球化学的研究现状及发展方向[J]. 桂林理工大学学报, 2009, 29(1): 1-11.
- [12] 刘亚轩, 李晓静, 白金峰, 等. 植物样品中无机元素分

- 析的样品前处理方法和测定技术[J]. 岩矿测试, 2013, 32(5): 681-693.
- [13] 马跃良, 徐瑞松, 吕惠萍, 等. 金矿生物地球化学效应及遥感信息提取[J]. 遥感技术与应用, 1998, 13(1): 8-17.
- [14] KOVALEVSKY A L. The reliability of biogeochemical beryllium prospecting using different species and organs of plants (in Russian)[J]. Geokhimiya, 1974, 22(10): 1575-1580.
- [15] SUBBARAO, G V, ITO O, BERRY W L, et al. Sodium—A functional plant nutrient[J]. Critical Reviews in Plant Sciences, 2003, 22(5): 391-416.
- [16] DUNN C. Uranium biogeochemistry of the NEA/IAEA Athabasca test area. Uranium Exploration in Athabasca Basin, Saskatchewan[M]. Canada: Geological Survey of Canada, 1983: 82-11.
- [17] DUNN C, HALL G, SCAGEL R. Applied biogeochemical prospecting in forested terrain[R]. 1993.
- [18] 宋慈安, 雷良奇, 杨仲平. 北山荒漠景观区金、铜矿床植物地球化学找矿试验[J]. 物探与化探, 2012, 36(3): 332-338.
- [19] 潘小菲, 岑况, 吴悦斌, 等. 公婆泉地区植物地球化学异常特征及其指矿意义[J]. 物探与化探, 2003, 27(5): 371-374.
- [20] 孔令韶, 高平, 任天祥, 等. 内蒙阿拉善脑木洪铜矿区的植物地球化学特征[J]. 植物学报, 1992, 34(10): 781-789.
- [21] 孔令韶, 孙世洲, 罗金铃, 等. 青海锡铁山矿区铅、锌的植物地球化学特征及其与矿的关系[J]. 植物生态学报, 1988, 12(1): 40-50.
- [22] 宋玮, 雷良奇, 宋慈安, 等. 新疆喀拉通克铜镍矿区植物地球化学特征及找矿有效植物和元素的选择[J]. 桂林理工大学学报, 2016, 36(2): 195-206.
- [23] DUNN C E, BANVILLE R M, ADCOCK S W. Reconnaissance biogeochemical survey, eastern Nova Scotia[M]. Nova Scotia Department of Mines, 1989.
- [24] 权恒, 张宏, 张炯飞, 等. 大兴安岭森林覆盖区植物化探找矿方法研究[J]. 贵金属地质, 1998, 7(4): 241-249.
- [25] 贾大成, 姜涛, 陈圣波, 等. 大兴安岭多宝山铜成矿区植物地球化学特征及找矿意义[J]. 吉林大学学报: 地球科学版, 2013, 43(1): 76-86.
- [26] 王平, 王波, 刘金成, 等. 植物地球化学测量法在秦巴地区寻找金矿中的应用[J]. 西安地质学院学报, 1995, 17(2): 32-38.
- [27] 胡西顺, 刘金成, 汪振洋, 等. 陕西小秦岭地区金矿植物地球化学勘查初步研究[J]. 黄金科技动态, 1992(8): 31-32.
- [28] 谭秋明, 刘施民, 杨志甫. 鄂南植物地球化学找金试验[J]. 资源环境与工程, 1999, 13(2): 25-30.
- [29] 黄文琥, 张朝晖. 贵州烂泥沟金矿 5 种苔藓植物的生物地球化学研究及生物探矿潜力分析[J]. 黄金, 2006, 27(12): 12-15.
- [30] 丁矢勇. 植物地球化学测量在云南热带雨林区的初步尝试及效果[J]. 云南地质, 1989, 8(1): 89-92.
- [31] 宋慈安, 杨仲平, 雷良奇, 等. 西双版纳南坡铜矿区植物地球化学特征及找矿有效指示植物[J]. 桂林理工大学学报, 2010, 30(1): 1-14.
- [32] 宋慈安, 宋玮, 王柘, 等. 广西佛子冲铅锌矿植物和土壤地球化学找矿的对比试验研究[J]. 矿产勘查, 2015(4): 98-106.
- [33] 韦雪姬, 宋慈安, 丁汝福. 广西富贺钟钨锡多金属矿区植物地球化学异常特征及其找矿有效性[J]. 中国地质, 2011, 38(3): 750-761.
- [34] 孙艳铃, 谢淑云, 王学平, 等. 福建平和铜钼矿区植物地球化学特征研究[J]. 地质学刊, 2015, 39(2): 277-285.
- [35] 中国科学院中国植被图编辑委员会. 中华人民共和国植被图(1:100 万)[M]. 北京: 地质出版社, 2007.
- [36] LAX K, SELINUS O. Geochemical mapping at the Geological Survey of Sweden[J]. Geochemistry Exploration Environment Analysis, 2005, 5(4): 337-346.
- [37] 宋慈安, 宋玮, 丁汝福, 等. 甘肃北山地区 460 金矿床植物地球化学异常形成的地学机制[J]. 地球科学与环境学报, 2016, 38(6): 766-777.
- [38] 姜涛, 贾大成, 陈圣波, 等. 植物地球化学找矿中有效指示元素和有效指示植物的选择方法——以黑龙江多宝山铜成矿区为例[J]. 地质与勘探, 2013, 49(2): 346-351.
- [39] COHEN D R, SILVA-SANTISTEBAN C M, RUTHERFORD N F, et al. Comparison of vegetation and stream sediment geochemical patterns in northeastern New South Wales[J]. Journal of Geochemical Exploration, 1999, 66(3): 469-489.
- [40] ROCK B, HOSHIZAKI T, MILLER J. Comparison of in situ and airborne spectral measurements of the blue shift associated with forest decline[J]. Remote Sensing of Environment, 1988, 24(1): 109-127.
- [41] 《中国矿床发现史》编委会. 中国矿床发现史[M]. 北京: 地质出版社, 1996.
- [42] 马跃良. 遥感生物地球化学找金矿方法研究进展[J]. 地球科学进展, 2002, 17(4): 521-527.
- [43] 赵小星, 钱建平, 张渊, 等. 河南祁雨沟金矿及外围高植被区遥感找矿预测[J]. 大地构造与成矿学, 2012, 36(4): 172-181.

Status and outlook of the biogeochemical exploration in various geochemical landscape zones in China

WANG Tian-gang^{1,2}, Adrian Fabris³, YAO Zhong-you^{1,2}, Hou Baohong³, ZHAO Yu-hao^{1,2},
ZHAO Xiao-dan^{1,2}, ZHU Yi-ping^{1,2}

(1. *Nanjing Center, China Geological Survey, Nanjing 210016, China*;

2. *Cooperative Research Center for Geosciences of Latin America and Oceania, China Geological Survey, Nanjing 210016, China*; 3. *Geological Survey of South Australia, Adelaide 5000, Australia*)

Abstract: Biogeochemistry in mineral exploration refers to the geochemical method of obtaining information of metallogenic elements through the analysis of plant organs. Reconnaissance research conducted in various geochemical landscape zones including the arid desert, forest swamp areas, semi-arid low mountain landscape zone, humid and semi-humid low mountain landscape areas suggest that set a batch of plants are suitable for biogeochemical mineral exploration, which laid a good foundation for the application of this method. In the future, studies on the mechanism of biogeochemical anomalies, the establishment of biogeochemical databases and guidelines and the application of remote sensing of biogeochemical anomalies should be further strengthened in order to better utilize biogeochemical methods to serve mineral exploration.

Key words: biogeochemical exploration; geochemical landscape zone; application status; China