

植物地球化学找矿的进展与展望

卢新新, 刘志川

桂林理工大学地球科学学院, 广西 桂林

收稿日期: 2026年7月13日; 录用日期: 2026年8月11日; 发布日期: 2026年8月19日

摘要

随着全球矿产勘查重心向厚层覆盖区隐伏矿床转移, 传统化探方法在运积物覆盖区面临信号衰减与多解性的严峻挑战。植物地球化学作为一种兼具深穿透能力与绿色非侵入性优势的勘查方法, 近年来受到广泛关注, 但其应用仍以经验类比为主, 缺乏系统的机理认知与定量化判别标准。本文从“矿体-覆盖层-根际-植物器官”全链条视角出发, 系统梳理了金属元素垂向迁移的四条并行路径——地下水溶解迁移、毛细管蒸发输运、地气纳米微粒携带及深根系直接吸收, 解析了植物在金属过量胁迫下的跨膜转运蛋白调控与避性/耐性策略分异机制。在此基础上, 引入科瓦列夫斯基生物屏障分类与胡西顺衬度极限系数(CM), 构建了有效指示植物与优势采样器官的定量化筛选框架。进而, 本文按“元素-植物”配对关系的思路, 系统梳理了金(Au)、稀土元素(REE)、铜多金属(Cu-Pb-Zn)、稀有金属(Li-U)以及铬镍钴等关键成矿元素的优势指示植物类群、富集强度与富集机制, 其中重点涵盖了芒萁Si-细胞壁固定、桉树纳米金颗粒转运、乌毛蕨纳米独居石生物矿化等近年来标志性的机理发现。最后, 本文指出了元素迁移路径多解性、源混淆及局地基体效应等现存挑战, 并对原位微区分析技术与机器学习融合前景进行了展望, 以期为覆盖区隐伏矿床的绿色深部探测提供理论参考与方法支撑。

关键词

植物地球化学, 隐伏矿床, 衬度系数, 指示植物, 超富集植物

Progress and Prospect of Plant Geochemical Prospecting

Xinxin Lu, Zhichuan Liu

College of Earth Sciences, Guilin University of Technology, Guilin Guangxi

Received: July 13, 2026; accepted: August 11, 2026; published: August 19, 2026

Abstract

As global mineral exploration increasingly targets concealed deposits beneath thick transported

cover, conventional geochemical methods face fundamental limitations in signal attenuation and source ambiguity. Phytogeochemistry—the use of plant tissue chemistry to detect buried mineralization—offers a deep-penetrating, non-invasive alternative, yet its application remains predominantly empirical, lacking a systematic mechanistic framework and quantitative discrimination criteria. This review synthesizes advances in phytogeochemical exploration from a holistic “orebody - cover - rhizosphere - plant organ” perspective. We delineate four coupled vertical transport pathways—groundwater advection and electrochemical gradient migration, capillary evaporation-driven ascent, gaseous nanoparticle transport via geogas, and direct deep-root uptake—and elucidate the molecular responses of plants to metal excess, including transmembrane transporter regulation and the exclusion-tolerance strategy continuum. Building on Kovalevsky’s biogenic barrier classification and Hu Xishun’s contrast-limit coefficient (CM), we present a quantitative framework for selecting effective indicator species and optimal sampling organs. We further organize the evidence by element-plant pairings, systematically reviewing the dominant indicator plant taxa, enrichment intensities, and underlying mechanisms for Au, REE, Cu-Pb-Zn, Li-U, and Cr-Ni-Tl, with emphasis on landmark mechanistic discoveries including Si-enhanced cell-wall sequestration in *Dicranopteris*, Au nanoparticle translocation in *Eucalyptus*, and nanoscale monazite phytomineralization in *Blechnopsis orientalis*. We identify persistent challenges including source apportionment ambiguity, exogenic noise, and local matrix effects, and highlight emerging opportunities in in situ microanalytical techniques and machine learning integration. This review provides a mechanistic foundation and practical roadmap for advancing phytogeochemistry as a quantitative green-exploration tool for concealed mineral resources.

Keywords

Phytogeochemistry, Concealed Deposit, Contrast-Limit Coefficient, Indicator Plant, Hyperaccumulator

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

在全球“向地球深部进军”的战略驱动下，矿产资源勘查正经历深刻的结构性变革。地表易识别的露头矿与浅埋矿床经过近一个世纪的系统勘查已大量被发现与开发，矿产勘查的战略重心已全面转向厚层运积物、第四系覆盖物、外来松散沉积物等覆盖区之下的隐伏与半隐伏矿床[1] [2]。据国际矿业统计，近二十年来全球新发现的重大矿床中超过 70%位于厚覆盖区，传统勘查技术面临前所未有的挑战。

在此条件下，传统的勘探方法面临三个主要的困境：(1) 巨厚的覆盖层会导致深部成矿信号被极大地弱化；(2) 外源物质的混入可能产生与深部矿化无关的异常信号；(3) 在寒温带针叶林、亚热带稠密植被覆盖区以及高寒生态脆弱景观区，传统高密度、侵入式的槽探与浅钻工程不仅成本高昂，而且会造成环境污染等破坏[3] [4]。在此背景下，“深穿透地球化学”概念应运而生，其核心在于捕获隐伏矿体发出的极微弱直接信息。在众多深穿透方法中，植物地球化学因其勘探范围广，效率高，成本低等优点，得到广泛运用[5] [6]。

1926 年，生物地球化学家 Vladimir Vernadsky 在其著作《生物圈》中首次提出“生物地球化学”概念，系统论述了生物活动引起的地壳元素迁移、转化与富集规律。1938 年，学者 C.M.特卡利奇首次建议将植物化学分析应用于矿产勘探，并发现西伯利亚地区某些植物中的高铁含量指示了大型铁矿床的存在。

几乎同期, 北欧研究者 Brundin (1936) 和 Warren (1945) 也开展了植物指示找矿的探索性工作, 均得到了不错的成果[7]。此后, 全球范围内陆续确认了一批具有经典指示意义的植物物种: 在非洲, Brummer 和 Woodward (1999) 系统记述了赞比亚“铜花”(*Becium centraliafricanum*) 的找矿历史与植物学特征[8]; 在中国, 戴兴根(1981)较早开展了橐木(*Loropetalum chinense*)找铀矿的试验研究[9]。这些早期探索为植物地球化学找矿方法奠定了重要的实践基础。

近年来, 于扬等(2019)系统综述了中国三稀矿产生物找矿的技术方法及应用进展[10], 龚庆杰等(2021)全面回顾了 2011~2020 年中国应用地球化学各分支领域的研究进展[11], 表明植物地球化学作为应用地球化学的重要分支, 正处于方法体系加速完善的关键时期。

尽管植物地球化学找矿已有近 90 年的实践历史, 并在多个地区取得了成功, 但是依旧存在一些不足。本文系统整合近四十年来国内外在植物地球化学找矿领域的关键研究成果, 构建从深部矿体到地表植物的完整机理框架, 建立有效指示植物的定量化筛选体系, 为植物地球化学勘探技术提供了理论支撑和方法参考。

2. 金属元素从隐伏矿体至地表的垂向迁移路径

植物凭借其发育极深的主根系(部分树种可穿透数十米覆盖层), 作为地下三维化学信息的天然探测器; 通过长期、稳定的蒸腾抽提作用, 将深部地下水、基岩风化带中的微量成矿元素长途转运至地上器官(枝、叶、皮等), 从而在地表群落尺度上形成直接或间接的“成矿指纹”(见图 1)[6][12]。这种方法不仅具有非侵入式、低成本、全天候采样和生态环境友好等核心优势, 更因其生物学特异性, 能够有效规避土壤测量中由外来物理颗粒造成的“块金效应”, 为深部隐伏矿的精确靶区圈定提供了不可替代的绿色技术手段[2][13]。从更宏观的视角看, 植物采矿领域的综述性研究也为理解植物-金属相互作用机制和元素迁移富集规律提供了有益借鉴[14]。

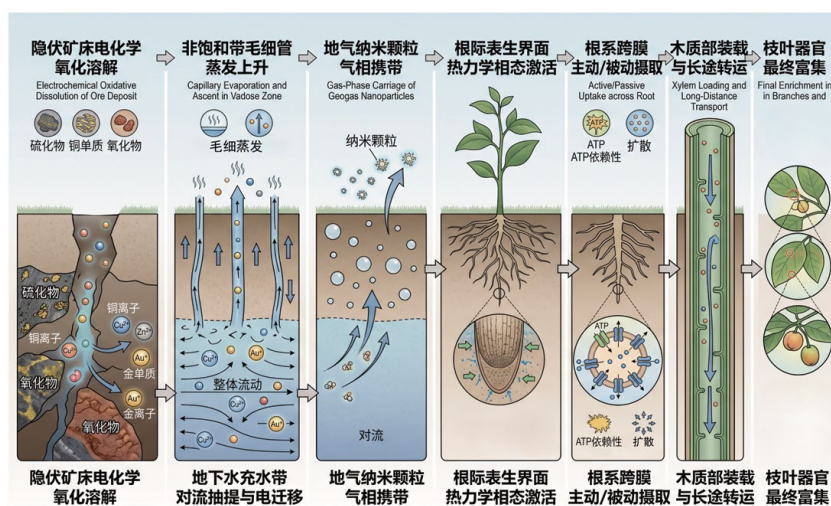


Figure 1. Schematic diagram of the complete migration pathway of metal elements from concealed orebody to plant roots

图 1. 植物根系吸收金属元素的完整迁移路径示意图

深部矿化信号能够被地表植物捕获的前提, 是隐伏矿体周围的金属元素克服上覆巨厚盖层的物理与化学屏障, 垂向迁移至根际可吸收界面。经过数十年的机理研究与野外验证, 目前学界确认这一过程主要受控于四种并行且相互耦合的深穿透动力场路径。

2.1. 地下水对流迁移与电化学梯度驱动

这是金属元素垂向迁移的基础路径。隐伏金属矿体(尤其是硫化物矿床)在地下深处的氧化带中, 因水-氧-微生物的协同作用, 发生剧烈的电化学溶解反应, 释放出高浓度的可溶性游离态或络合态金属离子(如 Cu^{2+} 、 Zn^{2+} 、 Pb^{2+} 等) [15]。在承压地下水流动和地形梯度驱动下, 这些可溶性组分沿断裂带、次级节理和微裂隙系统性的横向或纵向长途输送 [16]。

除此之外, 电化学作用导致的带电粒子迁移也是高效的迁移机制(见图 2)。电化学作用是由于矿体与围岩自发反应形成其长期存在显著的氧化还原电位差, 导致金属离子沿浓度梯度扩散 [16]。同时 H^+ 的迁移会导致地表土壤 pH 值的改变, 形成所谓的电化学电池机制 [16]。在这种机制的驱动下, 金属阳离子发生定向迁移, 从深部源源不断地向近地表转运扩散 [1] [16]。为浅表植物根系提供了持续且丰富的物质来源。Leslie 等(2013)在加拿大 Talbot VMS 矿床的研究进一步证实, 即便在厚层运积覆盖条件下, 植物器官中的金属异常仍能有效指示深部矿化的空间位置 [17]。

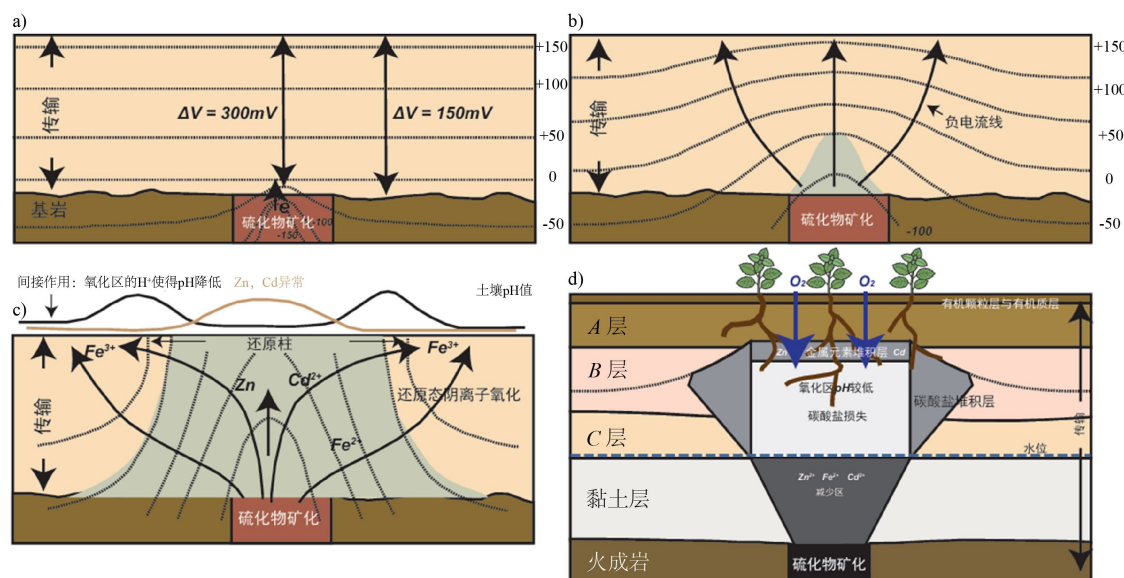


Figure 2. The evolution stage of the “reduction column” in the saturated overburden sequence and the associated metal migration process diagram (modified [16])

图 2. 饱和覆盖层序列中“还原柱”的演化阶段及伴生的金属迁移过程图(据[16])

2.2. 毛细管蒸发驱动的逆重力元素运移

在干旱、半干旱以及季节性分明的地区, 毛细管作用被证实是驱动成矿元素逆重力垂向运移的关键机制。旱季强烈的近地表蒸发导致非饱和带出现持续的水分亏缺与基质势梯度。根据非饱和带水动力学原理, 地下深处的水分裹挟着溶解的金属离子, 沿土壤孔隙或微细裂隙以毛细管上升流的形式向上移动 [16]。

当土壤水在近地表经历蒸发-蒸腾散失后, 金属离子并非随之逃逸, 而是在三个界面发生富集滞留:

- (1) 在黏土矿物层间通过离子交换吸附;
 - (2) 在铁锰氧化物/氢氧化物表面通过专性吸附和共沉淀;
 - (3) 直接溶解于根际孔隙水中, 被植物的蒸腾流持续吸收。
- 这种由持续蒸发力驱动, 使得即使在年降雨量不足 200 mm 的极端干旱区, 深根系植物仍能通过其庞大的毛细根网络持续摄取来自隐伏矿体的地球化学信号 [18] [19]。

2.3. 地气纳米微粒的气相迁移

在超深隐伏矿床(埋深达数百米)的上覆系统中, 金属元素的非液态运移已被证实具有重要贡献。地壳深部产生的酸性气体(如 CO_2 、 CH_4 、 H_2S 、 SO_2)和惰性气体(He 、 Rn)沿深大断裂和微裂隙网络向上逸出, 形成微弱但持续存在的上升地气流[5] [20]。

地气流在穿过成矿带时, 其超微气泡(直径通常为纳米至微米级)表面具有极强的吸附活性, 能够有效捕获并携带成矿金属的纳米级微粒(1~100 nm)或挥发性金属络合物(如甲基化金属) [20]。当地气流穿透至根际土壤层时, 由于温度、压力和氧化还原条件的急剧变化, 这些纳米级金属组分发生相态转变——从气溶胶态解吸为离子态或纳米颗粒态, 进而被植物根系捕获甚至直接跨膜进入植物组织[20] [21]。多地隐伏锂矿区和金矿区的联合剥蚀-植物测试表明, 地气金属异常与植物器官金属异常在空间边界上表现出统计显著的一致性($R^2 > 0.7$), 证实了地气携带-根际二次激活-植物吸收这一链式过程的有效性[21] [22]。

2.4. 深根系直接吸收与生物扰动的叠加改造

(1) 深层根系直接吸收金属元素, 部分旱区超深根系植物(如荒漠红沙 *Reaumuria soongorica*、澳洲尤加利树 *Eucalyptus* spp.、澳洲鬣刺属 *Spinifex* spp.)进化出了极具穿透能力的垂直主根系统(Sinker Root System), 其下扎深度可达覆盖层厚度的数倍(30~60 m 乃至更深), 能够直接触及隐伏矿床上部的次生氧化带或矿化地下水含水层[19] [23]。在此情形下, 大树完整的维管束系统(从根尖到叶尖)等同于一条无衰减的“垂直化学通道”, 实现了对深部矿化信息的“直接拔取”与地上投放。Lintern 等(2013)在 *Nature Communications* 报道的西澳大利亚桉树叶中自然金颗粒的发现, 正是这一机制的最经典例证——金以纳米颗粒形态被桉树根系吸收后, 经木质部转运至叶片细胞间隙中沉淀[21]。

(2) 局地生物运动的叠加改造, 自然界中穴居动物的活动构成了不可忽视的二次成晕机制。深挖穴居的白蚁(如 *Tumulitermes tumuli*)、蚂蚁和蚯蚓等, 在筑巢与觅食过程中将深部的富矿土壤和风化碎屑机械搬运至地表, 形成高度富集金属元素的生物成因构造体(如蚁塚、蚯蚓粪丘)。Stewart 和 Anand (2014)在 Garden Well 金矿床的研究表明, 白蚁巢穴堆积体中的 Au 含量可达到周围背景土壤的 5~20 倍, 构成显著的“生物二次散落晕” [24]。这种由生物工程活动介导的叠加改造, 使得表层浅根系植物也能轻易接触并吸收来自深部的金属成分, 从而在景观尺度上放大和均化了植物地球化学异常信号[16] [24]。

3. 植物对金属胁迫的细胞-分子响应机制

成矿元素被运移至植物根际后, 由于其含量常远超地表常规背景值(可达数十至数百倍), 将触发植物体复杂而精密的细胞生物学和分子平衡响应。这一响应直接决定了地表叶片异常信号和衬度系数[7] [25]。

3.1. 跨膜转运蛋白家族及其调控

植物根系细胞膜上存在着一个金属转运蛋白系统, 它们对金属离子进入植物体内用着这选择性控制作用。在面对高浓度重金属胁迫时, 这些蛋白的表达水平会受到转录调控——根据金属种类和浓度被选择性地上调或下调(见图 3) [26]。

ZIP 家族(ZRT/IRT-like Proteins)与 NRAMP 家族(Natural Resistance-Associated Macrophage Proteins)主要负责非特异性二价过渡金属(如 Zn^{2+} 、 Cd^{2+} 、 Fe^{2+} 等)的主动跨膜吸收。当土壤中这些金属元素过量时, 多数植物通过下调 ZIP/NRAMP 的表达来启动“生理屏障”, 限制毒性金属的大量进入植物体内。然而, 在超富集植物种(Hyperaccumulators)这种情况却恰恰相反, 它们在收到这些金属胁迫时去维持甚至上调这些转运蛋白的表达, 使得其体内储存的金属含量远远高于这些普通植物[26]。

HMA 家族(Heavy Metal ATPases)在金属的木质部吸收和向地上组织长途运输中起核心控制作用。其

中, HMA2 和 HMA4 负责将植物根系共质体内的 Zn/Cd 通过跨膜运输至木质部导管; HMA5 则专门转运 Cu; HMA3 将过量金属转运至细胞液泡中进行区隔化解毒[27] [28]。超富集植物之所以能产生高浓度的地上找矿异常, 其核心机制正是 HMA 基因导致的高水平组成型表达——它们能够主动突破根部的天然生理屏障, 将金属离子不间断地运输至地上组织, 形成比背景区高出数十甚至数百倍的地球化学异常[27] [28]。

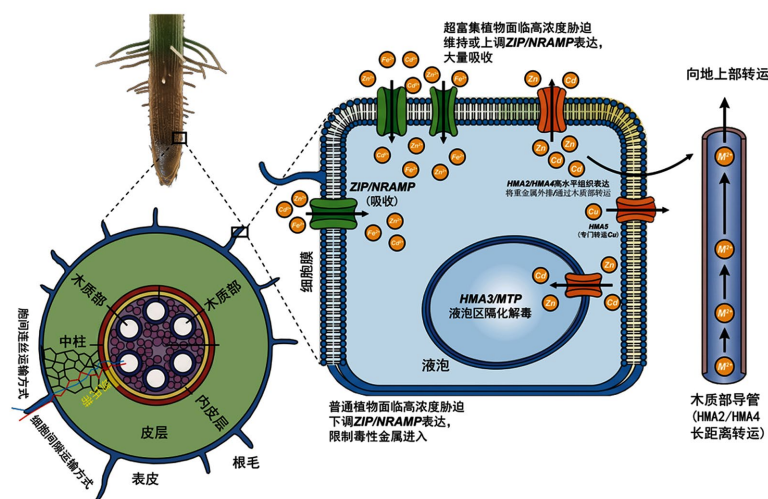


Figure 3. Heavy metal ion transport mechanisms in plant root cells
图 3. 植物根系细胞重金属离子转运机制图

3.2. 避性与耐性策略的分异

宋慈安等通过多景观区金属矿床的对比研究, 提出了一个对找矿实践具有直接指导意义的理论框架: 生物地球化学异常的形成, 本质上是植物在“避性屏障”与“耐性机制”两种对立生存策略之间竞争与妥协的演化产物[25] [29]。

避性策略(Exclusion Strategy)是指植物通过自身的一些机制来阻止过量金属元素进入植物体内。(1) 根际分泌有机酸(柠檬酸、苹果酸等), 在胞外改变根际微区 pH 或直接络合金属离子, 促使其在根表沉淀; (2) 内皮层凯氏带形成物理屏障, 阻断金属向质外体旁路运输; (3) 限制金属从根系向地上部分的木质部转运。避性较强的植物在矿化区上方的金属吸收量相对于背景区不增反降, 导致地表叶片产生假信号——在找矿中属于无信息或误导信息的植物[7] [29]。

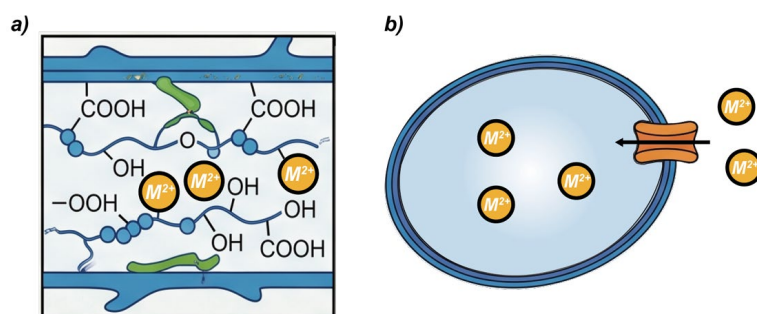


Figure 4. Tolerance mechanisms. (a) Cell wall immobilization and detoxification;
(b) vacuolar compartmentalization and detoxification
图 4. 耐性机制图。(a) 细胞壁固定解毒机制; (b) 液泡区隔化解毒机制

耐性策略(Tolerance Strategy)是指找矿指示植物大多采取耐性-超富集的演化路径。它们不阻止金属进入体内,而是通过强大的胞内解毒网络确保在高金属负荷下依然正常生长。主要耐性机制包括(见图4): (1) 细胞壁固定——通过纤维素、半纤维素和果胶中的羧基(-COOH)和羟基(-OH)官能团,将大量金属离子吸附固定于细胞壁基质中,减少其对细胞质内敏感酶系统的干扰;(2) 液泡区隔化——借助液泡膜定位的转运蛋白(MTP 家族、HMA3),将游离金属离子强制运输至代谢极不活跃的中央液泡中,实现物理隔离[26] [29]。

这一避性-耐性的演化,为理解“为什么同一矿化区上方的不同植物种属会产生截然不同的异常响应”提供了一种生物学解释[29] [30]。Dang 和 Li (2022)在植物采矿综述中进一步指出,对植物-金属相互作用分子机制的深入理解,是提升植物地球化学找矿方法量化预测能力的关键基础[31]。

同时这两种策略也会带来局限性例如采取强烈避性策略的植物,其根际分泌物和内皮层凯氏带对过量金属具有极佳的生理排斥性。即使下伏极其高产的隐伏矿体,其地上器官(如叶片)中的金属含量仍可能被锁死在常规背景水平甚至低于背景值。若在面积性测量中盲目选择避性植物作为采样介质,将会导致显著的“假信号异常”,造成严重漏矿。而超富集植物并非具备无限的吸收能力。根据生物屏障理论,多数找矿指示植物在本质上属于“高极限屏障型”而非完全的“无极限型”。当深部矿化信号引起的近地表重金属丰度超过该植物的生理承受极限时,其细胞壁固定与液泡区隔化系统将发生不可逆的饱和或中毒损伤。此时,植物体表现为地上器官含量不再随基底浓度上升而增加(进入平台期),甚至出现植株矮化、失绿死亡。这极大地限制了利用植物绝对含量进行深部矿体品位精确定量预测的可能性。并且绝大多数超富集植物生存在特定的超基性岩或重金属污染区,在其他大部分区域并不存在,使得在大多数区域无法建立连续的区域化探网络。

4. 指示信号的量化判别与有效物种优选

4.1. 植物地球化学技术流程图

在野外复杂的生态系统中,不同植物种属乃至同一植物的不同器官对同一矿化异常的响应可能截然相反。如何科学地筛选出能够高保真反映深部矿体信息的有效指示植物与优势器官,是决定整个植物地球化学测量核心问题,以下是植物地球化学的技术流程图(见图5)。



Figure 5. Plant geochemical technology flow chart

图5. 植物地球化学技术流程图

4.2. 生物屏障分类与采样器官的生理约束

生物地球化学家 A.L. Kovalevsky 通过系统分析数万件植物器官样品后, 基于“植物对特定金属元素是否存在生理吸收极限”提出了生物屏障分类系统。这一分类直接划定了有效的采样器官范围, 避免了盲目的全株采集(见表 1) [7] [32]。

Table 1. Classification of plant biological barriers and its guidance for sampling strategies
表 1. 植物生物屏障分类及其对采样策略的指导

屏障类型	金属吸收特征	找矿适用性
无极限型	植物体内金属含量与基底供给量呈完美线性正相关, 无吸收饱和现象	最理想
无极限型	仅在基底浓度极高时才出现吸收饱和, 线性范围宽广	优良
中极限型	生理保护作用明显, 体内最高含量被锁定在固定阈值内	仅提供定性参考
低极限型	全面限制元素的纵向输送, 地上器官含量始终维持在背景水平	易产生误导

4.3. 衬度系数(CM): 指示有效性的定量标尺

为将 Kovalevsky 的定性理论转化为可操作的工程判据, 胡西顺(1995)提出了衬度极限系数(Contrast-limit Coefficient, CM)作为植物地球化学勘查中的核心定量化判别参数[33]:

$$CM = \frac{C_0}{C_b}$$

式中, C_0 为植物器官中某元素含量的平均值, C_b 为背景区内植物器官中某元素含量的平均值。

CM 值的物理解释及其对应的找矿有效性分级如下(见表 2):

Table 2. Classification criteria for indicatorplant effectiveness based on thecontrast-limit coefficient (CM) (after [34])
表 2. 基于衬度极限系数(CM)的指示植物有效性分级标准(据[34])

CM 值范围	有效性等级	指示能力描述
$CM \geq 10$	A 级(高效指示)	矿致异常与背景差异极为显著, 基本不受生理屏障和季节波动干扰
$5 \leq CM < 10$	B 级(有效指示)	异常清晰但衬度中等, 需结合共生元素组合或多器官互验
$2 \leq CM < 5$	C 级(弱指示)	异常可识别但接近检测限, 受环境噪声影响大
$CM < 2$	D 级(无效)	矿化区与背景区无实质性差异, 或植物对该元素存在强烈生理排斥

CM 指标的最大优势在于其跨种属、跨器官的可比性——它消除了不同植物种属间因基体效应和生理特性差异造成的绝对含量不可比困难, 使得在全区优势植被群落中系统筛选最优指示植物与最优采样器官成为可能[33] [34]。在实际勘查流程中, CM 被用作初期试验性测量的核心评价参数, 直接指导后续面积性调查的采样方案设计。

4.4. 定量筛选过程中的不确定性与质量控制

4.4.1. 核心不确定性因素分析

尽管利用生物屏障分类与衬度极限系数(CM)构建了植物地球化学的定量筛选框架, 但在野外实际勘查工程的实施过程中, 由于生态-地质系统的复杂性, 以及野外采样的主观性。可能选择的背景区距离矿区过近或者过远, 从而导致计算出的背景值无法真实反映非矿化状态下的生理基准, 从而引发异常的信号的产生。

植物体内的元素分布在微观与宏观尺度上均表现出极强的非均质性。即便在同一物种、同一器官内, 元素的富集程度也深度受控于树龄、树高、采样方位、器官发育成熟度等因素制约。

季节性气候波动(降雨、气温)会剧烈改变植物的蒸腾速率与根系提抽动力, 导致体内金属含量呈动态演变。在春季萌芽生长期, 蒸腾拉力的剧增和跨膜转运蛋白的选择性上调, 会加速部分金属元素向叶片的转运; 而在秋冬休眠期, 由于水分浓缩效应或落叶前的营养重吸收机制, 金属元素在细茎和老树皮中会表现出富集。这种随时间和气温起伏的生理波动, 使得在不同月份采集的样品缺乏直接可比性。

4.4.2. 建议与解决方法

背景区必须遵循地理、构造及植物区系相似性原则, 确保采样介质的物种及生境与目标区高度一致[3][35]。在数据处理上, 建议采用不依赖正态分布假设的累积频率法或下四分位数法来确定更稳健的背景基准, 并保证背景样件数在 10 件以上以增强统计可靠性[22][33]。

严格执行“同种、同器官、同龄、同方位”的采样准则[21][22]。对于乔木, 建议优先采集多年生树皮或成熟木质枝条, 其累积的信号较新叶更具长时序代表性。此外, 应采用复合采样法, 即在每个采样点 5~10 m² 范围内采集多株长势相当的植株组合成一个样品, 以降低个体差异带来的随机误差[3][34]。

采样应尽可能在较短的窗口期(如 1~2 周内)集中完成, 以规避时间演化导致的含量漂移[22]。若必须跨季节作业, 应对标准剖面进行重复采样以建立季节性校正模型[36][37]。对于铀、金等特定元素, 应避免开极端雨季, 选择生理累积峰值期(如盛长期前或干季末期)进行采集[9][38]。

5. 不同植物对关键成矿元素的富集与指示效果

5.1. 金(Au)的指示植物与富集特征

金是植物地球化学找矿中研究最为深入、成功案例最多的目标元素之一。胡西顺(2002)指出 Au 属于第 I 类指示元素——自然界中存在大量对 Au 呈无极限型或高极限型吸收的植物类群[7][33]。在风化带中, Au 主要以溶解态有机络合物或纳米级零价金颗粒(1~100 nm)形式存在, 纳米金颗粒可经由根表皮细胞间隙以完整颗粒形态进入根共质体, 随后在木质部蒸腾流中随水转运至地上器官[21]。

槲栎(*Quercus aliena*)和牛奶子(*Elaeagnus umbellata*)是中国最早被系统验证的金指示植物。胡西顺等(1993)在秦岭金洞子金矿区的试验表明, 槲栎多年生细枝中的 Au 衬度系数(CM)可达背景值的 10~30 倍, 异常空间展布与隐伏含金石英脉高度吻合, 清晰度显著优于同区土壤测量[34][39]。红沙(*Reaumuria soongorica*)随后被确认为中国西北金-铜矿床的有效指示灌木, 宋慈安等(2001)在甘肃北山的试验显示其新生枝叶 Au、Cu 异常与隐伏矿体的空间对应率超过 80% [19]。

在澳大利亚, Reid 和 Hill (2010)在 Tanami 金矿省发现 *Triodia pungens* 和 *T. basedowii* 叶片中的 Au、As 异常成功圈定了厚层风成砂(>30 m)下隐伏金矿带的形态边界, 连续 5 年旱季采样异常重现性良好[23]; 后续工作进一步证实其对基岩型金矿化的垂向探测能力[39][40]。2013 年, Lintern 等在 *Nature Communications* 报道了桉树(*Eucalyptus marginata*)叶片中的突破性发现: 粒径 2~20 nm 的自然金颗粒位于叶片海绵组织细胞间隙中, 首次以直接成像证据证实金纳米颗粒可经植物维管系统完整转运至地上器官[21]。Lintern 和 Anand (2017)在 Boddington 金矿床进一步揭示了金在树木-砾石-土壤系统中的分散模式[41]。

5.2. 稀土元素(REE)的超富集植物与指示作用

稀土元素超富集植物的发现可追溯至 20 世纪 30 年代, Robinson 等(1958)最早报道了山核桃属(*Carya* spp.)叶片中 REE 的异常富集[42]。

芒萁属(*Dicranopteris*)是目前已知富集 REE 强度最高的植物类群。Shan 等(2003)首次报道了中国南

方离子吸附型稀土矿区芒萁叶片中 LREE 含量高达 3000~7000 $\mu\text{g/g}$, 且地上部 REE 总量与根系土中有效态 REE 浓度呈显著正相关[43]。Liu 等(2021)通过同步辐射 $\mu\text{-XRF}$ 实现了芒萁叶片中 La 和 Ce 的亚细胞级空间定位, 发现二者共同富集于叶缘坏死病变组织的细胞壁和细胞间隙中; 更为重要的是, Si 与 REE、Al 在细胞壁果胶层中共定位, 通过 Si 修饰果胶多糖结构增强细胞壁对 REE 的吸附容量和机械耐受性[44]。

美洲商陆(*Phytolacca americana*)代表了另一种 REE 富集策略。Yuan 等(2017)的水培实验表明, *P. americana* 地上部表现出轻微的重稀土(HREE)富集偏向, 与芒萁的 LREE 优先形成互补[45]。Liu 等(2020)进一步发现 *P. americana* 不仅富集 REE (地上部总量可达 500~900 $\mu\text{g/g}$), 还共超富集 Mn 和 Al, 三种元素具有协同效应[46]。

乌毛蕨(*Blechnopsis orientalis*)是近年最具突破性的 REE 超富集植物。Purwadi 等(2024)在印度尼西亚 Bangka 岛确认其叶片 REE 总量可达 3000 $\mu\text{g/g}$, 同时超富集 As 达 2100 $\mu\text{g/g}$ ——首次发现 REE-As 双超富集表型, 且生长快、生物量大[47]。He 等(2025)进一步在乌毛蕨叶片细胞外组织中发现了纳米级独居石晶体——首次在活体植物中发现 REE 以矿物晶体形式存在, 揭示了植物介导的生物矿化作为 REE 固定与解毒的新途径[48]。

5.3. 铜多金属(Cu-Pb-Zn)的指示植物

铜是勘查植物地球化学历史上最早被系统研究的矿种之一。20 世纪 50 年代, 谢学锦和徐邦梁在长江中下游发现海州香薷(*Elsholtzia haichowensis*)对 Cu 具有强烈富集能力, 叶片 Cu 含量可达数千 $\mu\text{g/g}$ [18]。几乎同期, Webb (1951)报道埋深约 100 m 盲矿体上方橡树(*Quercus* spp.)枝中 Zn 含量比背景值增高约 60%, 为乔木指示深埋 Pb-Zn 矿化提供了最早的定量证据[7]。

1999 年, Brummer 和 Woodward 系统记述了赞比亚“铜花”(*Becium centraliafricanum*)的找矿历史: 该物种仅生长在土壤 Cu > 500 $\mu\text{g/g}$ 的区域, 其分布边界与下伏铜矿化边界高度一致[8]。这一案例揭示了植物指示作用的核心逻辑——当土壤金属含量超过多数植物的耐受阈值时, 仅具备特定耐性机制的物种能够存活, 其空间分布本身即构成地植物学找矿标志。

进入 21 世纪, 宋慈安等(2001)在甘肃北山发现红沙对 Cu 具有高衬度指示能力, Cu 异常伴随 Pb、Zn、Sn、Ba、Ag 等多元素组合[19]。Batista 等(2007)在葡萄牙 Neves Corvo 矿区——伊比利亚黄铁矿带最大的 VMS 型 Cu-Zn 矿床——证实 *Cistus ladanifer* 和 *Erica australis* 叶片中的 Cu、Pb、Zn、As 异常与隐伏矿体空间对应[38]。

5.4. 三类景观异常响应模式的系统对比

铀(U)的植物地球化学勘查起步最早。戴兴根(1981)率先开展了檵木(*Loropetalum chinense*)找铀矿的试验研究[9]。加拿大地盾区黑云杉(*Picea mariana*)细枝中的 U 异常可反映厚达 150 m 砂岩层以下的基底铀矿化, U 含量可达正常背景值的 1000 倍以上[2]。

锂(Li)的植物地球化学指示研究以川西甲基卡锂矿区最为系统和深入。刘婷(2020)发现区内优势灌木——北方雪层杜鹃(*Rhododendron nivale*)的细茎与细叶中 Li 含量在矿体正上方出现系统性正异常, 衬度系数 CM > 10, 同时伴生 Nb、Ta 异常[22]。这一高衬度暗示杜鹃对碱金属 Li⁺不具有典型的生理排斥反应——这在碱金属中是非同寻常的。该案例还揭示了一个重要的季节性效应: 冬季休眠期样品的 Li、Nb、Ta 异常衬度反而高于夏季生长期, 推测与冻土层季节性消融驱动的水文循环变化及冬季冻析浓缩有关[22]。工程钻探查证表明, 杜鹃群落的 Li-Nb-Ta 复合异常成功指示了埋深约 100 m 的隐伏锂辉石伟晶岩体[22]。

5.5. 其他关键元素的指示植物

铊(Tl)是典型的稀散元素。陈代演等(2000)在黔西南滥木厂铊矿床发现矿区优势植物对 Tl 具有选择性富集, 其生物地球化学行为与 K 相似, 在木质部和韧皮部中具极高的迁移性, 叶片 Tl 异常能够灵敏反映深部铊矿化信息[49]。

铬(Cr)和镍(Ni)的植物指示研究各有侧重。Reid 和 Hill (2013)发现澳大利亚 *Triodia* 属对 Cr 的富集与基岩中超镁铁质岩分布高度对应, Cr 异常与 Ni、Co 异常形成特征性元素组合指纹[50]。Reeves 等(2018)的全球数据库收录了超过 500 种 Ni 超富集植物(叶片 Ni > 1000 $\mu\text{g/g}$), 主要分布于蛇纹岩风化土壤区[51]。

6. 现存挑战和不确定性

勘查植物地球化学找矿虽然在覆盖区展现出了常规方法无可比拟的穿透优势, 但从目前以经验类比为主的“辅助性探途工具”蝶变为具备确定性的“量化找矿方法”, 仍然面临需要困难[2] [18]。

元素迁移路径的多解性与局地噪声的去噪难题这是当前制约该方法确定性提升的最根本障碍。浅表植物器官测出的高异常含量, 其最终物理-化学输入源往往具有极大的多解性与不可区分性(见图 6)。

深源信号: 深根系直接吸纳的、经由木质部主动转运的“主成分”异常——这是找矿真正依赖的信息。

后生信号: 由断裂地气携带的活动态气溶胶在根际土壤中被二次活化、经被动扩散进入根表的“再生异常”——仍具有找矿意义, 但空间定位精度较差。

外源噪声: 大气干/湿沉降(工业浮尘、沙尘暴、海盐气溶胶)直接附着于植物叶片蜡质层或通过气孔被动渗入的“环境噪声”——完全不反映深部矿化信息, 是主要的假异常来源[16] [18]。

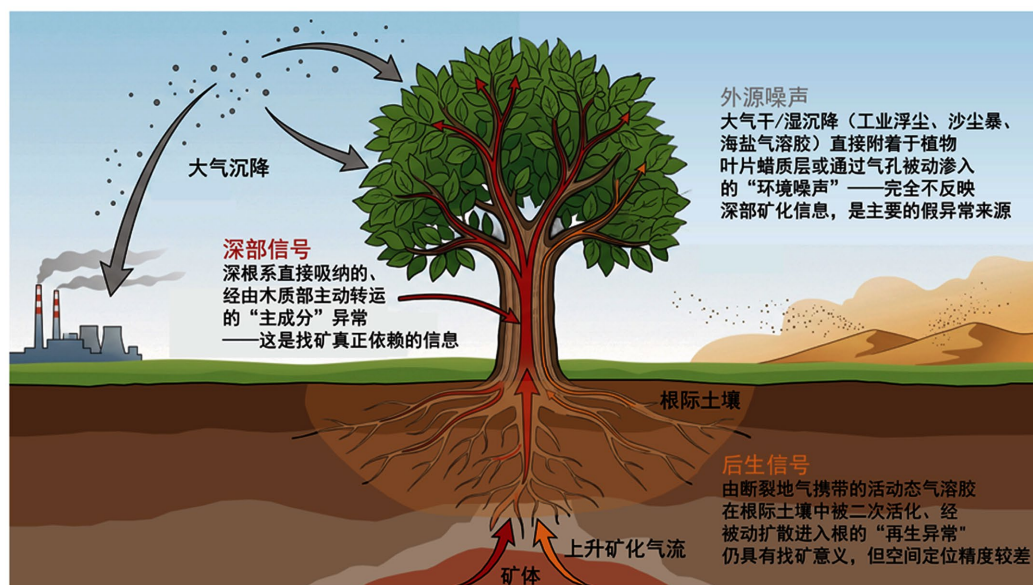


Figure 6. Schematic diagram of signal sources in phytogeochemical mineral exploration

图 6. 植物地球化学矿床勘查信号来源示意图

目前的全株强酸消解-溶液分析流程(ICP-MS/AAS), 无法区分同一元素在上述三种来源中的分配比例。尤其是对于 Pb、Cd、As 等既具深源性又广泛存在于大气沉降中的元素, 这一多解性导致的“源混淆”问题尤为严重[18] [52]。Singh 等(2022)综述了 X 射线荧光光谱(XRF)技术在植物科学中的应用前景,

指出便携式 XRF 和同步辐射 μ XRF 等原位微区分析技术兼具快速、无损和多元素同时分析的优势, 有望部分解决传统整体消解分析面临的源混淆问题, 为野外现场快速筛查和实验室精细溯源提供了新的技术路径[53]。

此外, 局地土壤基体效应——如高 Ca^{2+} 背景对过渡金属二价阳离子的主动生理排斥(离子竞争性抑制)——以及物种依赖性、季节性温度波动等因素的复杂交织, 常常导致基于单元素含量的异常下限在野外产生大范围的假异常, 使地球化学图的解译确定性大打折扣[2]。

7. 结论

植物地球化学作为深穿透地球化学方法体系的重要分支, 是推进覆盖区深部隐伏矿床绿色定位难题的核心方法之一。本文综合国内外的研究进展与勘查实践, 得出以下核心结论。

(1) “深部矿体 - 覆盖层 - 根际 - 植物”全链条异常成因机制已获得多学科交叉理论确证。隐伏矿体的植物地球化学异常并非表生杂乱信号的简单叠加, 而是贯穿“矿体电化学溶解 - 非饱和带水、气、电、生物四场耦合输送 - 根际界面热力学激活 - 跨膜转运蛋白调控 - 植物络合素/金属硫蛋白络合解毒与液泡区隔化”的完整生物 - 表生地球化学级联过程。这一连续的成因链条, 构成了植物能够在近地表以高衬度($\text{CM} > 10$)长时序保留深部矿体物质信号的科学根基。

(2) 定量化筛选判别体系(生物屏障分类 + 衬度系数)显著提升了覆盖区深穿透探测的确定性和工程可操作性。该体系已被证实是剔除植物生理避性干扰、在复杂群落中科学筛选有效指示植物与最优采样器官的核心方法论依据。从“元素 - 植物”配对角度系统集成国内外案例表明: Au 的最优指示植物包括桉树(纳米颗粒转运)、榲桲和 *Spinifex* ($\text{CM} 10\sim 50$); REE 超富集以芒萁(Si-细胞壁固定, LREE 优先)和乌毛蕨(纳米独居石生物矿化, REE-As 双富集)为突出代表; Cu-Pb-Zn 指示植物涵盖海州香薷、赞比亚铜花及干旱区红沙; 稀有金属方面, 雪层杜鹃对 Li-Nb-Ta 的指示($\text{CM} > 10$, 探测深度约 100 m)以及黑云杉对 U 的指示(探测深度达 150 m)均展现出显著的穿透效能。

(3) 本文聚焦于以植物为采样介质的勘查地球化学方法, 不涵盖微生物地球化学勘查和动物地球化学勘查。各元素的探测深度极限数据来源于文献报道的典型成功案例, 不代表该方法的理论上限, 实际应用中需结合具体地质 - 水文 - 生态条件进行个案评估。

综上所述, 勘查植物地球化学找矿正从经验类比迈向机理驱动的定量化阶段。在跨尺度地质学大数据与机器学习算法的交叉作用下, 构建覆盖不同矿种 - 植物组合的衬度系数数据库、发展基于原位微区分析的元素溯源技术、建立融合水文 - 生物地球化学模型的定量预测体系, 将是推动该方法从辅助性探途工具升级为确定性找矿手段的关键方向。

参考文献

- [1] 陈杨. 植物地球化学测量在隐伏金属矿床勘查中的应用及效果[D]: [硕士学位论文]. 桂林: 桂林理工大学, 2014.
- [2] 王天刚, Fabris A, 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.
- [3] 赵红松. 植物地球化学与原生晕方法在矾山地区的找矿应用[D]: [硕士学位论文]. 北京: 中国地质大学, 2016.
- [4] 刘草, 陈远荣, 鲁富兰, 等. 基于深地勘探的化探新方法发展现状分析[J]. 矿产与地质, 2016, 30(3): 446-450.
- [5] 唐金荣. 非传统化探方法研究的新进展[J]. 地质通报, 2009, 28(2): 231-243.
- [6] 伍静. 植物地球化学应用于找矿的探讨[J]. 矿产与地质, 2003, 17(1): 59-61.
- [7] 胡西顺. 植物地球化学测量找矿应用综述[J]. 矿床地质, 2002, 21(S1): 1148-1151.
- [8] Brummer, J.J. and Woodward, G.D. (1999) A History of the ‘Zambian Copper Flower’, *Becium centraliafricanum* (B. homblei). *Journal of Geochemical Exploration*, **65**, 133-140. [https://doi.org/10.1016/S0375-6742\(98\)00068-5](https://doi.org/10.1016/S0375-6742(98)00068-5)

- [9] 戴兴根. 生物地球化学法——櫟木找铀矿的试验研究[J]. 物探与化探, 1981(1): 17-25.
- [10] 于扬, 王登红, 于泓, 等. 中国三稀矿产生物找矿技术方法及其应用综述[J]. 地质学报, 2019, 93(6): 1533-1542.
- [11] 龚庆杰, 夏学齐, 刘宁强, 等. 2011-2020 中国应用地球化学研究进展与展望[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2020, 39(5): 927-944.
- [12] 何谷先. 动植物在金矿找矿中的应用[J]. 黄金地质, 1995, 1(4): 64-67.
- [13] 孙盛楠. 大兴安岭林区植物找矿的方法研究[J]. 生物技术世界, 2016, 13(5): 317-317.
- [14] Sheoran, V., Sheoran, A.S. and Poonia, P. (2013) Phytomining of Gold: A Review. *Journal of Geochemical Exploration*, **128**, 42-50. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2013.01.008>
- [15] Wakelin, S., Anand, R.R., Macfarlane, C., Reith, F., Noble, R. and Rogers, S. (2012) Assessing Microbiological Surface Expression over an Overburden-Covered VMS Deposit. *Journal of Geochemical Exploration*, **112**, 262-271. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2011.09.005>
- [16] Anand, R.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. *Ore Geology Reviews*, **73**, 394-416. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2015.06.018>
- [17] Leslie, K., van Geffen, P.W.G., MacFarlane, B., Oates, C.J., Kyser, T.K. and Fowle, D.A. (2013) Biogeochemical Indicators of Buried Mineralization under Cover, Talbot VMS Cu-Zn Prospect, Manitoba. *Applied Geochemistry*, **37**, 190-202. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2013.07.013>
- [18] 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]. 桂林工学院学报, 2009, 29(1): 1-11.
- [19] 宋慈安, 雷良奇, 杨启军, 等. 甘肃北山金、铜矿床红沙的植物地球化学特征及其找矿意义[J]. 地质与勘探, 2001, 37(3): 45-49.
- [20] 宋慈安, 杨仲平, 雷良奇. 热带雨林和干旱戈壁不同景观铜矿的生物地球化学找矿[J]. 矿物学报, 2011, 31(S1): 834-836.
- [21] Lintern, M., Anand, R., Ryan, C. and Paterson, D. (2013) Natural Gold Particles in Eucalyptus Leaves and Their Relevance to Exploration for Buried Gold Deposits. *Nature Communications*, **4**, Article No. 2274. <https://doi.org/10.1038/ncomms3614>
- [22] 刘婷. 甲基卡稀有金属矿区隐伏矿体植物地球化学找矿试验研究[D]: [硕士学位论文]. 成都: 成都理工大学, 2020.
- [23] Reid, N. and Hill, S.M. (2010) Biogeochemical Sampling for Mineral Exploration in Arid Terrains: Tanami Gold Province, Australia. *Journal of Geochemical Exploration*, **104**, 105-117. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2010.01.004>
- [24] Stewart, A.D. and Anand, R.R. (2014) Anomalies in Insect Nest Structures at the Garden Well Gold Deposit: Investigation of Mound-Forming Termites, Subterranean Termites and Ants. *Journal of Geochemical Exploration*, **140**, 77-86. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2014.02.011>
- [25] 宋慈安, 雷良奇, 杨仲平, 等. 屏障效应对生物地球化学异常形成的影响及找矿有效指示植物的选择[J]. 桂林理工大学学报, 2012, 32(1): 1-8.
- [26] Pollard, A.J. (2022) Inadvertent Uptake of Trace Elements and Its Role in the Physiology and Evolution of Hyperaccumulators. *Plant and Soil*, **483**, 711-719. <https://doi.org/10.1007/s11104-022-05856-w>
- [27] 唐世荣, 黄昌勇, 朱祖祥. 超积累植物与找矿[J]. 物探与化探, 1997, 21(4): 263-268.
- [28] Ma, Y., Oliveira, R.S., Freitas, H. and Zhang, C. (2016) Biochemical and Molecular Mechanisms of Plant-Microbe-Metal Interactions: Relevance for Phytoremediation. *Frontiers in Plant Science*, **7**, Article ID: 918. <https://doi.org/10.3389/fpls.2016.00918>
- [29] Krzeslowska, M. (2011) The Cell Wall in Plant Cell Response to Trace Metals: Polysaccharide Remodeling and Its Role in Defense Strategy. *Acta Physiologiae Plantarum*, **33**, 35-51. <https://doi.org/10.1007/s11738-010-0581-z>
- [30] 宋慈安, 宋玮, 雷良奇, 等. 干旱荒漠区勘查植物地球化学研究现状及关键科学问题[J]. 桂林理工大学学报, 2014(4): 595-605.
- [31] Dang, P. and Li, C. (2022) A Mini-Review of Phytomining. *International Journal of Environmental Science and Technology*, **19**, 12825-12838. <https://doi.org/10.1007/s13762-021-03807-z>
- [32] Ковалевский А. Л. 生物地球化学法找矿的深度[M]. 邱郁文, 译. 北京: 地质出版社, 1985.
- [33] 胡西顺. 关于植物地球化学测量中有效指示植物判定标准的讨论[J]. 国外地质勘探技术, 1995(4): 14-22.
- [34] 胡西顺, 刘金成, 汪振洋, 等. 植物地球化学测量及其在金洞子金矿区的应用效果[J]. 地质与勘探, 1993, 29(1): 41-46.

- [35] Ma, S., Cao, J. and Liang, H. (2024) A Study of Au-Bearing-Nanoparticle-Enriched Plants from the Concealed Gold Deposits and Their Prospecting Significance. *Ore Geology Reviews*, **165**, Article 105910. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2024.105910>
- [36] Lintern, M.J. (2007) Vegetation Controls on the Formation of Gold Anomalies in Calcrete and Other Materials at the Barns Gold Prospect, Eyre Peninsula, South Australia. *Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis*, **7**, 249-266. <https://doi.org/10.1144/1467-7873/07-139>
- [37] 胡西顺. 植物地球化学测量方法的试验效果[J]. 物探与化探, 2005, 29(4): 341-345.
- [38] Batista, M.J., Abreu, M.M. and Pinto, M.S. (2007) Biogeochemistry in Neves Corvo Mining Region, Iberian Pyrite Belt, Portugal. *Journal of Geochemical Exploration*, **92**, 159-176. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2006.08.004>
- [39] 胡西顺. 陕西勉略北部森林区金矿的植物地球化学勘查[J]. 黄金科学技术, 2002, 10(2): 23-28.
- [40] Hodgkinson, I.P., Dunn, C.E., Waldron, H.M., Scarlett, R. and Vose, C.P. (2015) Biogeochemical Exploration Using *Triodia Pungens* in the Tanami Desert, Australia. *Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis*, **15**, 179-192. <https://doi.org/10.1144/geochem2014-277>
- [41] Lintern, M.J. and Anand, R.R. (2017) Dispersion of Gold and Other Metals by Trees, Gravels and Soils near Boddington Gold Deposit, Western Australia. *Journal of Geochemical Exploration*, **181**, 10-21. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2017.06.016>
- [42] Robinson, W.O., Bastron, H. and Murata, K.J. (1958) Biogeochemistry of the Rare-Earth Elements with Particular Reference to Hickory Trees. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, **14**, 55-67. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(58\)90093-0](https://doi.org/10.1016/0016-7037(58)90093-0)
- [43] Shan, X.Q., Wang, H.O., Zhang, S.Z., *et al.* (2003) Accumulation and Uptake of Light Rare Earth Elements in a Hyperaccumulator *Dicranopteris Dichotoma*. *Plant Science*, **165**, 1343-1353.
- [44] Liu, W.S., van der Ent, A., Erskine, P.D., *et al.* (2020) Spatially Resolved Localization of Lanthanum and Cerium in the Rare Earth Element Hyperaccumulator fern *Dicranopteris linearis*. *Environmental Science & Technology*, **54**, 2287-2294.
- [45] Yuan, M., Guo, M.N., Liu, W.S., *et al.* (2017) The Accumulation and Fractionation of Rare Earth Elements in Hydroponically Grown *Phytolacca americana* L. *Plant and Soil*, **421**, 67-82.
- [46] Liu, W.S., Chen, Y.Y., Huot, H., Liu, C., Guo, M., Qiu, R., *et al.* (2020) Phytoextraction of Rare Earth Elements from Ion-Adsorption Mine Tailings by *Phytolacca americana*: Effects of Organic Material and Biochar Amendment. *Journal of Cleaner Production*, **275**, Article 122959. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122959>
- [47] Purwadi, I., Erskine, P.D., Hutahaean, B.P., Wijaya, T.R., Nurtjahya, E. and van der Ent, A. (2024) Rare Earth Elements (REEs) in Soils and Plants of Bangka Island (Indonesia) Focussing on (Hyper)Accumulation. *Plant and Soil*, **507**, 417-431. <https://doi.org/10.1007/s11104-024-06735-2>
- [48] He, L.Q., Xian, H., Yang, Y.P., Cao, J., Yang, H., Xie, J., *et al.* (2025) Discovery and Implications of a Nanoscale Rare Earth Mineral in a Hyperaccumulator Plant. *Environmental Science & Technology*, **59**, 25973-25981. <https://doi.org/10.1021/acs.est.5c09617>
- [49] 陈代演, 邹振西. 地质植物法在黔西南滥木厂铈(汞)矿床的初步应用[J]. 贵州工业大学学报(自然科学版), 2000, 29(5): 32-37.
- [50] Reid, N. and Hill, S.M. (2013) Spinifex Biogeochemistry across Arid Australia: Mineral Exploration Potential and Chromium Accumulation. *Applied Geochemistry*, **29**, 92-101. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2012.10.034>
- [51] Reeves, R.D., Baker, A.J.M., Jaffré, T., Erskine, P.D., Echevarria, G. and van der Ent, A. (2018) A Global Database for Plants That Hyperaccumulate Metal and Metalloid Trace Elements. *New Phytologist*, **218**, 407-411. <https://doi.org/10.1111/nph.14907>
- [52] Ghorbani, Z., Sexton, A., Van Loon, L.L. and Banerjee, N.R. (2022) Biogeochemical Prospecting for Gold at the Yellowknife City Gold Project, Northwest Territories, Canada: Part 1—Species Optimization. *Applied Geochemistry*, **145**, Article 105423. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2022.105423>
- [53] Singh, V.K., Sharma, N. and Singh, V.K. (2022) Application of X-Ray Fluorescence Spectrometry in Plant Science: Solutions, Threats, and Opportunities. *X-Ray Spectrometry*, **51**, 304-327. <https://doi.org/10.1002/xrs.3260>