



农业资源与环境学报

CSCD 核心期刊
中文核心期刊
中国科技核心期刊

JOURNAL OF AGRICULTURAL RESOURCES AND ENVIRONMENT

欢迎投稿 <http://www.aed.org.cn>

镍的植物采矿农艺管理强化措施及其实践

王亚洲, 胡尊河, 蔡煊, 邓腾灏博, 曹越, 汤叶涛, 仇荣亮

引用本文:

王亚洲, 胡尊河, 蔡煊, 邓腾灏博, 曹越, 汤叶涛, 仇荣亮. 镍的植物采矿农艺管理强化措施及其实践[J]. 农业资源与环境学报, 2024, 41(2): 452–463.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13254/j.jare.2023.0305>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

我国土壤镉污染特征研究进展及其富集植物的应用前景初探

殷志遥, 和君强, 刘代欢, 邓林, 常海伟, 秦华, 桂娟

农业资源与环境学报. 2018, 35(3): 199–207 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2017.0293>

锡矿山土壤重金属生态健康风险评价及重金属在优势植物的分布

白婧, 张文, 张思思, 向国红, 徐会娟, 郑玉, 张新, 段仁燕

农业资源与环境学报. 2021, 38(3): 411–421 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2020.0783>

高酸度芦苇活性炭的制备及其吸附性能

傅成锴, 郭千里, 梁成博, 郭子彰, 张成禄

农业资源与环境学报. 2017, 34(2): 175–181 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2016.0275>

硒在动植物及微生物体中的转化规律研究进展

朱燕云, 吴文良, 赵桂慎, 郭岩彬

农业资源与环境学报. 2018, 35(3): 189–198 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2017.0237>

土壤重金属污染修复植物处置技术进展

王敏捷, 盛光遥, 王锐

农业资源与环境学报. 2021, 38(2): 151–159 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2020.0756>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

王亚洲, 胡尊河, 蔡煊, 等. 镍的植物采矿农艺管理强化措施及其实践[J]. 农业资源与环境学报, 2024, 41(2): 452–463.

WANG Y Z, HU Z H, CAI X, et al. Enhancement of agro-management strategies and implementation protocols for nickel phytomining[J].

Journal of Agricultural Resources and Environment, 2024, 41(2): 452–463.



开放科学 OSID

镍的植物采矿农艺管理强化措施及其实践

王亚洲¹, 胡尊河², 蔡煊¹, 邓腾灏博^{3*}, 曹越¹, 汤叶涛¹, 仇荣亮^{1,2,4,5*}

(1. 中山大学环境科学与工程学院, 广州 510006; 2. 华南农业大学资源环境学院, 广州 510642; 3. 广东省农业科学院农业质量标准与监测技术研究所, 广州 510640; 4. 岭南现代农业科学与技术广东省实验室茂名分中心, 广东 茂名 525099; 5. 广东省农业农村污染治理与环境安全重点实验室, 广州 510642)

摘要: 全球广泛分布着大量富含镍等重金属但缺乏氮和磷等营养元素的超基性岩风化土壤, 如何有效利用这类高风险、低生产力的土地是现阶段的一大难题。在此背景下, 有研究者提出了利用超富集植物富集土壤中的镍, 随后将其收获并冶炼提纯的植物采矿技术。该技术既可以有效利用镍污染土壤产出经济价值, 也可以缓解镍供应风险, 并已经在北美、欧洲和东南亚等地区相继开展。受到超富集植物长势偏慢、生物量不足等限制, 建立针对性的农艺管理措施是提高植物采矿效率和经济价值的有效方法。本文重点综述了土壤改良措施(调节土壤 pH 值、施加活化剂等)以及耕作管理措施(施肥、除草、种植模式等)对超富集植物生长及富集镍含量的影响, 并总结了我国植物采矿农艺管理研究的主要进展, 以期为后续的植物采矿研究提供借鉴和参考。

关键词: 植物采矿; 镍; 超富集植物; 农艺管理; 植物修复

中图分类号: TD864

文献标志码: A

文章编号: 2095-6819(2024)02-0452-12

doi: 10.13254/j.jare.2023.0305

Enhancement of agro-management strategies and implementation protocols for nickel phytomining

WANG Yazhou¹, HU Zunhe², CAI Xuan¹, DENG Tenghaobo^{3*}, CAO Yue¹, TANG Yetao¹, QIU Rongliang^{1,2,4,5*}

(1. School of Environmental Science and Engineering, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510006, China; 2. College of Natural Resources and Environment, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China; 3. Institute of Quality Standard and Monitoring Technology for Agro-products of Guangdong Academy of Agricultural Sciences, Guangzhou 510640, China; 4. Maoming Branch, Guangdong Laboratory for Lingnan Modern Agriculture, Maoming 525099, China; 5. Guangdong Provincial Key Laboratory of Agricultural & Rural Pollution Abatement and Environmental Safety, Guangzhou 510642, China)

Abstract: Vast expanses of ultramafic soils across the globe that are rich in heavy metals, such as nickel, but lacking essential nutrients, such as nitrogen and phosphorus, present a significant challenge for effective land utilization. The scientific community has proposed phytomining technology for economically exploiting and extracting nickel by hyperaccumulator plants grown in such soils for both soil remediation and nickel supply risk alleviation. This technology has been implemented in North America, Europe, and Southeast Asia. Targeted agronomic management measures are necessary to improve the efficiency of phytomining for nickel and enhance the economic viability of phytomining due to the limited growth rate and biomass of hyperaccumulators. In this context, we review the effects of soil amendment measures (e.g., regulation of soil pH, application of soil amendments) and cultivation management measures (e.g., fertilization, weed control, planting pattern) on the growth and nickel accumulation of hyperaccumulator plants. Moreover, we summarize the main advances in nickel phytomining agronomic management research in China, aiming to provide guidance and references for future research into agromining.

Keywords: phytomining; nickel; hyperaccumulator; agronomic management; phytoremediation

收稿日期: 2023-05-12 录用日期: 2023-07-03

作者简介: 王亚洲(1999—), 男, 河南鹤壁人, 硕士研究生, 主要从事土壤重金属污染植物修复技术和植物采矿研究。

E-mail: wangyzh227@mail2.sysu.edu.cn

*通信作者: 邓腾灏博 E-mail: dengtenghb@gdaas.cn; 仇荣亮 E-mail: eesqrl@mail.sysu.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金项目(41920104003, 41701369); 国家重点研发计划项目(2022YFE0116300); 广东省科技计划项目(2022A0505090002)

Project supported: The National Natural Science Foundation of China(41920104003, 41701369); The National Key R&D Program of China(2022YFE01-16300); Guangdong Science and Technology Program(2022A0505090002)

超基性岩出露区域分布广泛,其面积可达到地球表面积的3%^[1]。这些岩石风化后形成的土壤中含有大量镍、钴和铬等重金属元素,使得土壤镍的背景值($200\sim 2\,000\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)^[2]远高于其他土壤($<40\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)^[3-4],特别是蛇纹岩土壤中镍污染问题尤为突出。此外,矿冶、电镀等行业排放的“三废”使大量的镍等重金属在周围的土壤中沉积,导致土壤中含量超标,进而威胁世界各国的粮食安全和人类健康。而我国土壤镍污染问题同样不容忽视。根据《全国土壤污染状况调查公报》,无机污染物超标点位数占全部超标点位的82.8%,其中镍污染土壤的点位超标率达4.8%^[5]。因此,镍污染土壤亟需得到有效管控。

另一方面,镍作为一种重要的战略金属,在现代工业中应用广泛。在中国,不锈钢制造、航空航天工业、铸造工业等领域都需要大量的镍作为原材料。此外,电池、催化剂、化学品、冶金等领域也都需要大量的金属镍^[6]。而我国大部分镍资源具有品位低、难选、含杂质多、开采难度较大等缺点,且对镍的需求量持续增长,这给我国镍资源供应带来了巨大的压力和挑战。自2005年开始,我国的镍自给率就一直非常低,长期在20%以下,需要大量进口来满足市场需求^[7]。因此,开展镍污染土壤修复和资源回收对我国实现镍的自给自足具有非常重要的现实意义。植物采矿是利用超富集植物富集土壤中的金属镍,然后通过收获生物质、干燥和焚烧以产生高品位的“生物矿石”或高价值含镍化学产品^[8]。

植物采矿技术具有修复土壤生态环境和获得高品位“生物矿石”的双重优势^[8]。1983年,Chaney等^[9]基于超富集植物首次提出利用植物去吸收土壤中的重金属,然后通过收获植物达到恢复土壤健康的目的,即“植物修复”。20世纪90年代,一些研究人员利用超富集植物在镍污染土壤上开展采镍试验,可以将富集植物叶片中的镍含量提高到2.5%(质量分数)^[10],但是植物采镍存在采集量不稳定、技术难度大和经济效益不明显等问题,未能在当时广泛推广。随着相关研究的深入,植物采矿的理论及技术逐渐完善,并被广泛应用于野外实践^[11]。例如,Hipfinger等^[12]在欧洲中部温带气候区的奥地利蛇纹岩土壤上种植超富集植物*Odontarrhena chalcidica*,可以每年提取 $94.3\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 的金属镍并获得 $5.93\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$ 的燃料生物质。Bani等^[13]在阿尔巴尼亚的蛇纹岩土壤上开展植物采镍的研究发现,通过利用野外生长的*O. chalcidica*开展植物采矿可以提炼获得 $105\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ 的金属镍(生物

质产量为 $9\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$,镍平均含量为 $11.5\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$),种植一年生的镍超富集植物每年每公顷可获得1 055美元的净收益,显著高于当地种植小麦产生的收益。Li等^[14]通过田间试验发现,在蛇纹岩土壤上种植*O. muralis*和*O. corsicum*可以获得每年每公顷1 749美元的净利润。在印度尼西亚,肥沃的“正常”土壤上种植优质水稻作物每年每公顷的收益约为850美元,而van der Ent等^[15]通过植物采矿的大田试验表明在当地贫瘠的蛇纹岩土壤上种植超富集植物*Phyllanthaceae balgooyi*后每年每公顷可以获得1 000美元的收益。由此可见,镍植物采矿已经成为一种具有一定经济价值的农业种植技术。因此, van der Ent等^[8]在2015年提出了“农艺采矿(Agromining)”这个新概念,即在低产高镍土壤上以超富集植物为“农作物”,运用相关农艺管理措施提高镍提取量,然后通过精炼获得镍等高价值金属的农业种植过程。

经过20多年的发展,植物采矿技术逐渐成熟,美国、欧洲、东南亚等地区已开展了镍植物采矿的相关研究(图1)。但是,超富集植物采镍量低仍是限制植物采镍技术推广的关键瓶颈之一。因此,需要寻找更高镍积累的种质资源,探索和健全植物采镍农艺管理技术体系,降低采镍成本,恢复土壤健康。

1 镍超富集植物的种类与分布

1976年,Jaffre等^[16]首次在文章标题中使用“hyperaccumulator”一词,描述了对镍有异常吸收的植物*Pycnantha acuminata*。之后,“hyperaccumulator”(我国翻译为超富集植物、超累积植物或超积累植物)被相关研究人员广泛使用。Brooks等^[17]首次将地上部干物质镍含量大于 $1\,000\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 的植物定义为镍超富集植物。截至2020年,全球已经发现超富集植物750余种,其中大部分是镍超富集植物(约500多种),它们主要分布在地中海沿岸、拉丁美洲和东南亚等热带及亚热带地区的蛇纹岩出露区域,其中古巴分布有130种、新喀里多尼亚有65种、土耳其有59种^[18-19]。表1列出了部分镍超富集植物及其分布。植物中镍的超富集能力可能是植物为了适应蛇纹岩土壤高镍环境进化出的特殊适应机制。野外生长的超富集植物地上部镍含量一般为 $1\,000\sim 45\,600\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ^[44]。迄今为止生物体内最高的镍含量记录出现在新喀里多尼亚生长的镍超富集植物*P. acuminata*树皮分泌的乳胶中,其镍含量高达25.74%^[45]。此外,在植物采镍实践中,镍超富集植物种类也相当丰富。

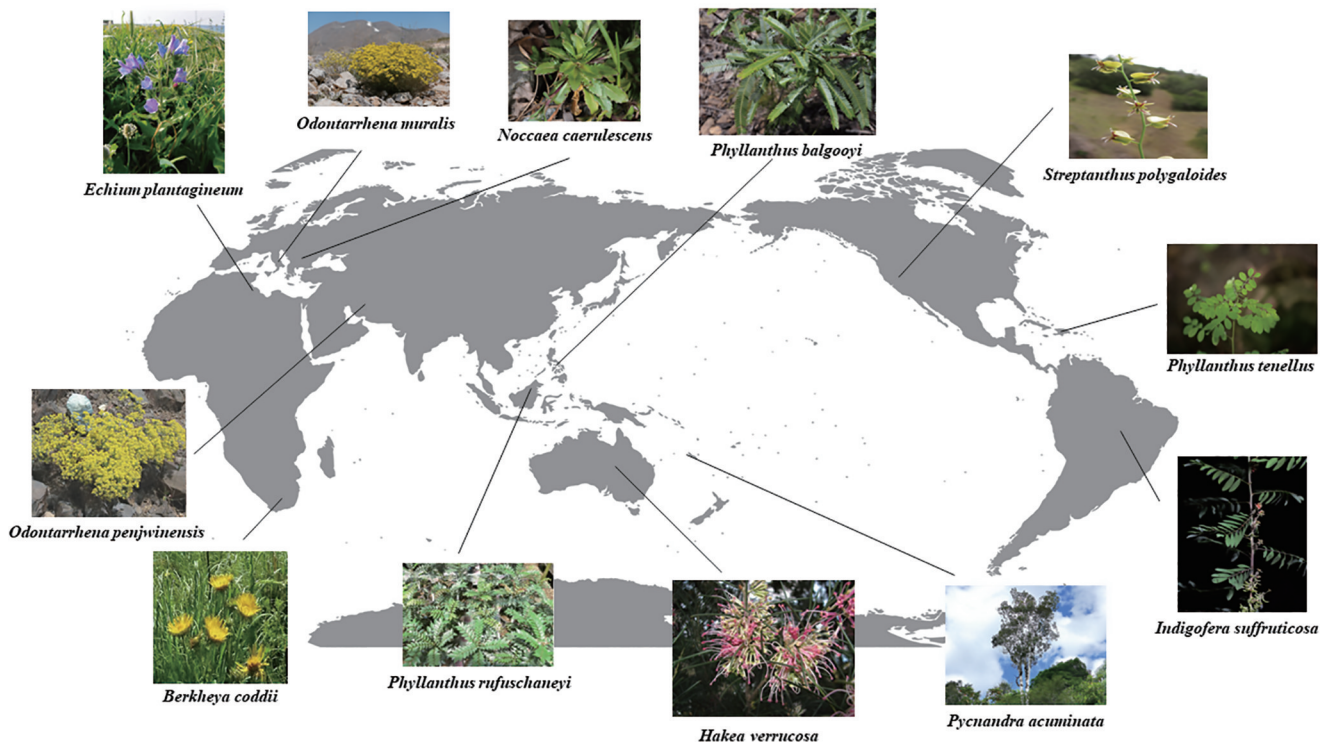


图1 植物采矿研究的地区分布示意和相应的镍超富集植物

Figure 1 Regional distribution of phytomining research and corresponding hyperaccumulator plant species for Ni accumulation

目前,用于植物采矿研究的镍超富集植物主要有 *O. chalcidica* (阿尔巴尼亚)、*O. muralis* (希腊)、*Berkheya coddii* (南非) 以及 *Phyllanthus rufuschaneyi* (马来西亚)。*O. chalcidica* 和 *O. muralis* 是 *Odontarrhena* 属中的亚灌木植物,前者主要分布在阿尔巴尼亚和土耳其等国家,目前已经应用到阿尔巴尼亚、西班牙等国家的植物采矿实践中,被认为是中欧温带的蛇纹岩土壤上最具农业采矿潜力的植物之一^[12];而后者主要分布在希腊、伊朗等地区的蛇纹岩土壤上,因其具有较高的产量($10 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$)以及可以在地上组织中浓缩 $>1\%$ 镍的能力,也被认为是具有较强应用潜力的镍超富集植物之一^[13, 46-47]。现今,奥地利、希腊等国家已对其进行商业化植物采矿的潜力评估^[47]。此外,在植物采矿研究领域中,*B. coddii* 和 *P. rufuschaneyi* 也是常用的镍超富集植物。*B. coddii* 是生长在南非蛇纹岩土壤上的一种菊科多年生草本植物,因其具有快速生长的能力和较高生物产量($22 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$)而受到关注。Robinson等^[48]和Anderson等^[49]将其应用于新西兰的蛇纹岩土壤上并进行了植物采矿试验。而 *P. rufuschaneyi* (叶下珠属)是一种位于马来西亚沙巴地区的木本植物,Bouman等^[50]发现其可以在组织中富集大量的镍($>10\,000 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$),且灰化后获得的“生物矿

石”含有高达12.7%(质量分数)的镍,被认为是植物采矿最有前途的热带超富集植物之一^[51]。此外,自然界存在大量形态各异的镍超富集植物(图2),它们可能也具有植物采矿潜力,对这些植物进行研究和应用,对于促进植物采矿技术的发展和推广具有重要意义。

2 植物采矿实践的农艺强化措施

植物采矿虽然具有成本低、环境友好等优点,但是其在应用推广方面仍面临一些问题,其中,吸收量不稳定、生物量受环境影响大等尤为突出。因此,为了提高植物采矿技术的效率并克服以上缺点,进行农艺措施强化具有非常重要的意义。目前采取的植物采矿优化措施主要包括土壤改良和耕作管理^[52]等,即针对不同植物物种,通过调整土壤pH值、控制水肥管理、利用微生物修复、改变种植密度和选择最佳收获期等方法,提高植物对重金属的富集能力,加快植物生长进程,进而提高植物抗逆性。这些措施有助于进一步挖掘植物采矿技术的潜力,实现其在环保、资源回收等方面的应用与推广。

2.1 土壤改良

土壤改良对提高土壤中镍的植物有效性具有积

表 1 部分镍超富集植物的种类及其分布

Table 1 Species and distribution of selected hyperaccumulator plants for Ni accumulation

物种 Species	植物类型 Plant type	分布国家(地区) Distribution country(region)	文献 Reference
<i>Actephila alambakeri</i>	灌木	马来西亚	[20]
<i>Actephila excelsa</i>	灌木	东南亚	[2]
<i>Alyssoides utriculata</i> (L.)Medik	灌木	法国、意大利、希腊、阿尔巴尼亚等	[21]
<i>Bornmuellera dieckii</i> Degen	亚灌木	科索沃	[22]
<i>Berkheya coddii</i>	多年生植物	南非、津巴布韦	[23]
<i>Breynia cernua</i>	灌木或乔木	菲律宾	[24]
<i>Breynia coronata</i>	灌木或乔木	马来西亚	[2]
<i>Dichapetalum gelonioides</i> subsp. <i>tuberculatum</i>	乔木	菲律宾	[25]
<i>D. gelonioides</i> (Roxb.) Engl. subsp. <i>andamanicum</i>	灌木或乔木	印度	[26]
<i>Euphorbia helenae</i>	灌木或乔木	古巴	[27]
<i>Justicia lanstykii</i>	亚灌木	巴西	[28]
<i>Lippia lupulina</i>	灌木	巴西	[28]
<i>Leptoplax emarginata</i>	亚灌木	日本	[29]
<i>Leucocroton linearifolius</i>	灌木	古巴	[27]
<i>Manihot sparsifolia</i>	亚灌木或灌木	巴西	[28]
<i>Noccaea goesingensis</i>	多年生植物	阿尔巴尼亚、奥地利、保加利亚、匈牙利和北美	[30]
<i>N. tymphaea</i>	多年生植物	阿尔巴尼亚、希腊	[31]
<i>N. caerulescens</i>	两年生植物	奥地利、比利时、捷克斯洛伐克和法国等	[32]
<i>Odontarrhena sibirica</i>	亚灌木	阿尔巴尼亚、伊朗、黎巴嫩、叙利亚、罗马尼亚和土耳其等	[33]
<i>O. muralis</i>	亚灌木	希腊、保加利亚、塞尔维亚、美国、加拿大等	[34]
<i>O. chalcidica</i>	亚灌木	阿尔巴尼亚、保加利亚、希腊、土耳其等	[35]
<i>O. corsica</i>	亚灌木	土耳其、美国	[36]
<i>O. bertolonii</i>	草本	意大利	[37]
<i>Pearsonia metallifera</i>	多年生植物	津巴布韦	[38]
<i>Pycnanandra acuminata</i>	灌木	新喀里多尼亚	[16]
<i>Psychotria gabriellae</i>	灌木	新喀里多尼亚	[17]
<i>P. xaragurensis</i>	灌木或乔木	新喀里多尼亚	[17]
<i>Phyllanthus nummularioides</i>	灌木	多米尼加共和国	[17]
<i>Phyllanthus rufuschaneyi</i>	木本植物	马来西亚	[39]
<i>Phyllanthus</i> cf. <i>Securinegoides</i>	灌木	纳鲁马德	[17]
<i>Phyllanthus balgooyi</i>	灌木	菲律宾	[40]
<i>Rinorea bengalensis</i>	灌木或小乔木	东南亚	[41]
<i>Streptanthus polygaloides</i>	草本	美国	[42]
<i>Senecio conrathii</i> N.E.Br.	草本	南非	[17]
<i>Viola calaminaria</i>	草本	比利时	[43]
<i>Xylosma luzonensis</i>	灌木或乔木	东南亚	[17]
<i>Walsura pinnata</i>	灌木	中国、东南亚	[20]

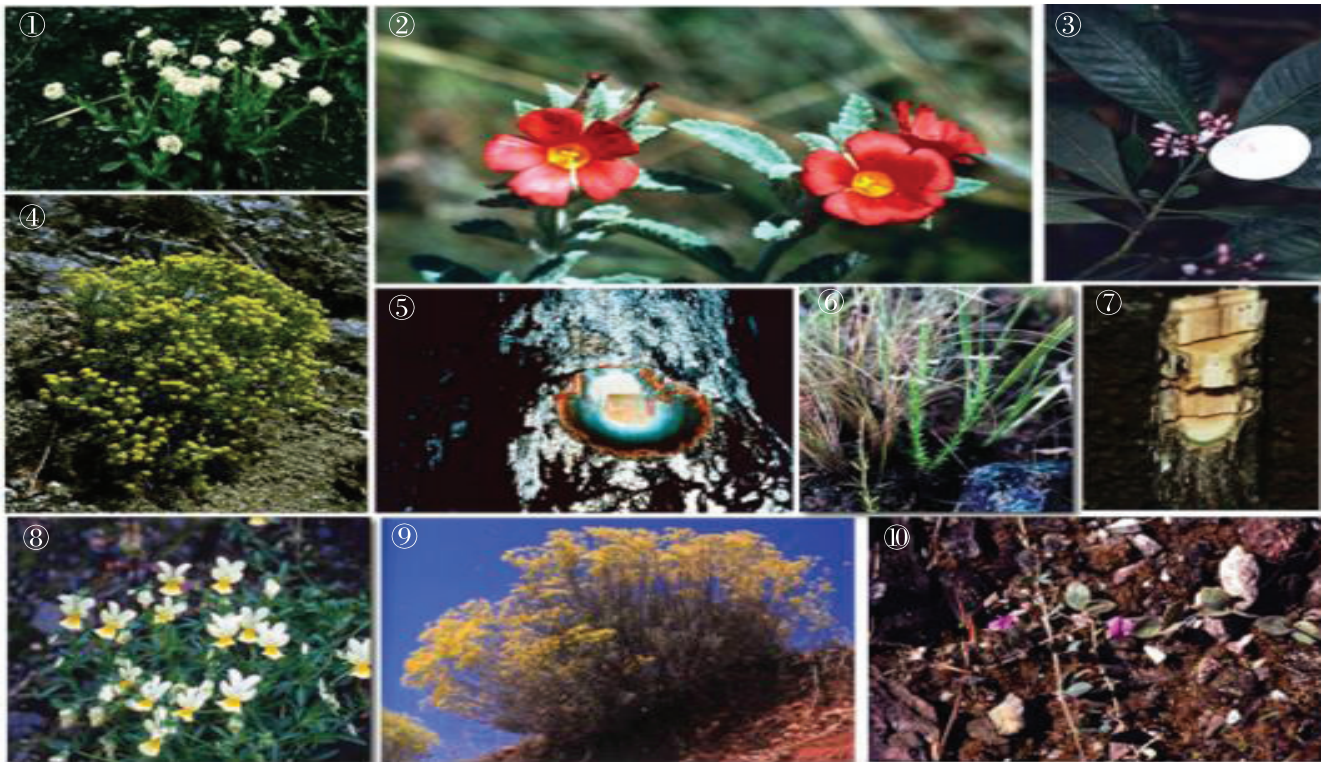
极作用。调节土壤pH值、添加化学活化剂、接种微生物等措施可以提高土壤中镍的植物有效性,同时强化超富集植物对镍的富集能力,但应根据植物种类、土壤环境等因素进行适当的调整。

2.1.1 土壤pH调节

土壤pH值是影响超富集植物的生长和镍的富集

的重要因素之一。然而,在不同地区、不同培养方式和不同土壤类型上,土壤pH值对镍的富集和超富集植物的生长也有很大差异。

土壤pH值直接决定了土壤中重金属镍的有效性,从而影响植物对镍的吸收。Robinson等^[10]研究了MgCO₃、CaCO₃和硫对超富集植物*B. coddii*富集的影响。



① *Nocca caerulea*; ② Non-identified; ③ *Psychotria douarrei*; ④ *Odontarrhena bertolonii*; ⑤ *Pycnanandra acuminata*; ⑥ *Aeollanthus bifurcatus*; ⑦ *Phyllanthus balgooyi*; ⑧ *Viola calaminaria*; ⑨ *Odontarrhena Corsica*; ⑩ *Vigna dolomitica*.

图2 形态各异的镍超富集植物(图片由 Alan JM Baker 提供)

Figure 2 Morphologically diverse hyperaccumulator plants for Ni accumulation (Image provided by Alan JM Baker)

响,发现添加 MgCO_3 和 CaCO_3 使土壤 pH 分别从 6.9 提高到 8.7 和 7.5,同时极大地降低了植物体内的镍含量,而施加硫使土壤 pH 从 6.9 降低到 5.5,显著增加了植物中的镍含量。然而,pH 的升高并非一定会降低超富集植物对镍的吸收量。Li 等^[14]在温室和田间两种条件下,利用 HNO_3 和 CaCO_3 调节土壤的 pH 值,探究了土壤 pH 值对超富集植物 (*O. muralis* 和 *O. corsicum*) 萃取镍的影响,发现随着土壤 pH 值从 5 升高至 6.5,两种植物中的镍含量也随之增加。仇荣亮等^[53]探究元江土壤的 pH 值与植物 *A. murale* 和 *A. corsicum* 地上部镍含量的关系,也有类似的发现:土壤 pH 在 5.0~6.0 时,植物的镍提取量会不断提高;而当 pH 超过 6.0 时,植物中的镍含量会下降。这可能因为两种植物喜欢中性的土壤环境,较低的 pH 会抑制根系对镍的吸收转运能力;当 pH 过高时,土壤中的铁氧化物会吸附镍,降低镍的生物有效性。Nkrumah 等^[54]研究发现,对于超富集植物 *P. rufuschaneyi* 和 *Rinorea cf. bengalensis*,土壤 pH 值(5.2~6.4)对植株中的镍含量没有显著影响,这一现象可能源于植物本身。

调节 pH 值不仅可以强化植物对镍的富集能力,

而且对植物生长也有一定的促进作用。Nkrumah 等^[54]发现降低 pH 值使 *P. rufuschaneyi* 的生物量降低了 60%。Rosenkranz 等^[35]发现施加 $0.46 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的硫降低了土壤 pH 的同时增加了 *O. chalcidica* 的生物量,且不会显著降低植物中镍的含量。表 2 列举了国内外土壤 pH 影响镍超富集植物富集镍的相关研究。综上所述,镍超富集植物更趋向在近中性的土壤环境生长,但不同土壤类型条件下不同种类超富集植物对镍的富集能力存在较大差异^[46]。

2.1.2 土壤镍的化学活化

在镍污染的土壤中,总镍含量可以高达 $8000 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,但其中植物可利用的镍含量非常低 ($60 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$),这限制了植物采矿的效率。而通过施加化学试剂提高土壤中有效镍含量是提高植物采镍效率的重要方式,常见的镍的土壤活化剂主要包括无机螯合剂和有机酸等。

(1) 螯合剂对植物采镍效率的影响

一般使用的螯合剂是人工合成的、与镍具有强力络合作用的化学药剂,主要包括 EDTA、DTPA、NTA、TA 和 CDTA 等(表 3)。方晓航等^[62]针对土壤中镍的

植物有效性较低的问题进行了化学活化的相关探究,发现EDTA具有较强的镍活化能力。Munn等^[59]发现在不同程度的重金属污染的土壤上,EDTA对植物的镍富集有不同的效果。总体上,0.3 g·kg⁻¹ EDTA的处理促进了镍在超富集植物 *Helianthus annuus* 组织中的富集,这与Jean等^[63]的研究有相似的规律,其研究结果表明施加1 mmol·kg⁻¹的EDTA可以显著提高超富集植物 *Datura innoxia* 的根和叶中的镍含量。Cay等^[60]也发现添加EDTA和TA(单宁酸)可以显著提高镍在普通植物 *Althaea rosea* Cavan中的积累。但是,Chen等^[57]则发现添加螯合剂(HEDTA和EDTA)增加了植物组织中的镍含量,但降低了总镍的提取量,原因可能是镍产生的金属毒性抑制了 *H. annuus* 生长。此外,Robinson等^[10]研究发现,施加EDTA、DPTA和NTA虽然可以增加土壤中醋酸铵提取态的镍含量,

但是施加EDTA等并未提高超富集植物 *B. coddii* 中的镍含量,原因可能是EDTA对植物根部、土壤生物和土壤酶活性等会产生毒性效应^[64],推测螯合剂也可能具有低促高抑的特性。

(2)有机酸对植物采镍效率的影响

小分子有机酸主要通过螯合、配位作用以及降低土壤pH使土壤中镍的形态发生变化,进而提高镍的植物有效性^[62]。小分子有机酸主要包括柠檬酸、苹果酸和草酸等。方晓航等^[62]研究发现,当小分子有机酸(柠檬酸、苹果酸和草酸)的含量较低时(1 mmol·L⁻¹),其对土壤镍的活化效果均较差,对云南元江以及墨江的蛇纹岩土壤镍的活化率分别小于0.7%和0.5%;当有机酸含量增加到50 mmol·L⁻¹时,活化效果得到了加强(9.1%、12.9%)。对酢浆草提取液、猪粪提取液和味精厂废水的镍、钴活化能力研究发现,酢浆草提

表2 土壤pH值影响超富集植物镍富集规律的相关研究
Table 2 Effects of soil pH on Ni accumulation in hyperaccumulator plants

地区 Region	土壤类型 Soil type	植物 Plant	培养条件 Culture condition	土壤镍含量 Content of soil Ni/ (mg·kg ⁻¹)	最佳pH值 Optimal pH value	地上部镍含量 Shoot Ni content/ (mg·kg ⁻¹)	培养时间 Culture time/d	文献 Reference
北美	镍精炼厂污染的土壤(W、Q)	<i>O. muralis</i> ; <i>O. corsicum</i>	温室	W:2 550 Q:1 700	Wm:5.46 Wc:5.7 Qm:6.32 Qc:6.1	Wm:11 300 Wc:7 000 Qm:4 630 Qc:4 000	120	[14]
北美	镍炼油厂污染的土壤(W、Q)、蛇纹岩土壤(B)	<i>O. muralis</i> ; <i>O. corsicum</i>	温室	Q:2 147 W:3 207 B:4 707	Qm:7.30 Qc:7.3 Wm:7.6 Wc:6.5 Bm:5.84 Bc:5.80	Qm:6 430 Qc:— Wm:6 980 Wc:9 060 Bm:12 260 Bc:10 950	68	[55]
中国广东	蛇纹岩发育土壤	<i>O. muralis</i> ; <i>O. corsicum</i>	温室	YJ:1 779.3	m:6 c:6	m:5 000 c:4 000	28	[53]
澳大利亚	蛇纹岩土壤	<i>Pimelea leptospermoides</i>	野外	3 665	6.35	1 535	—	[56]

注:Q:采石场泥土;W:韦兰德土壤;B:布罗克曼土壤;YJ:元江土壤;m:*O. muralis*;c:*O. corsicum*。
Note:Q:Quarry muck;W:Welland loam;B:Brockman soil;YJ:Yuanjiang soil;m:*O. muralis*;c:*O. corsicum*。

表3 化学螯合剂影响超富集植物镍富集规律的相关研究
Table 3 Exploration of the effect of chemical chelating agents on the enrichment of Ni in hyperaccumulator plants

地区 Region	超富集植物 Hyperaccumulator plant	螯合剂 Chelating agents	培养条件 Culture condition	最佳用量 Optimal dosage/(g·kg ⁻¹)	文献 Reference
新西兰	<i>Berkheya coddii</i>	NTA DTPA EDTA	盆栽	0.5 1 4	[10]
美国	<i>Helianthus annuus</i>	HEDTA EDTA	盆栽	1 1	[57]
美国	<i>Helianthus annuus</i>	EDTA	盆栽	0.3	[58]
美国	<i>Helianthus annuus</i> ; <i>Thlaspi caerulescens</i>	EDTA	盆栽	0.1	[59]
土耳其	<i>Althaea rosea</i> Cavan	EDTA TA	盆栽	1.5 1.5	[60]
俄罗斯	<i>Trifolium repens</i> L.	K ₂ HEDP	盆栽	0.566	[61]

取液对镍、钴具有较强的活化能力(活化率分别为4.8%和18.7%)^[65]。Nascimento等^[66]发现外源添加柠檬酸(20 mmol·kg⁻¹)可以显著增加超富集植物 *N. caerulescens* 和非富集植物 *Thlaspi arvense* 叶片中的镍含量。然而,Turgut等^[58]发现,柠檬酸对 *H. annuus* 存在“低促高抑”效应,当柠檬酸为1.0 g·kg⁻¹时,植物组织中的镍含量得到了提高,而当柠檬酸为3.0 g·kg⁻¹时植物组织中的镍含量显著降低。因此,根据镍超富集植物和生境的差异,控制有机酸的剂量是开展农艺管理优化的重要措施。

2.1.3 微生物强化

微生物对植物生长和土壤镍的活化均具有重要影响。例如,微生物可以通过分泌生长激素^[67]和有机酸或通过固氮、溶磷等营养素转化等^[68]方式促进植物生长,提高植物采镍效率。蔡信德等^[69-70]首次探究了土壤微生物对镍污染土壤的作用,纯化鉴定出了我国首个镍超富集植物促生菌(泡囊假单胞菌),随后通过盆栽试验发现接种根际促生菌(PGPR)泡囊假单胞菌(*Pseudomonas vesicularis*)可以提高镍超富集植物 *O. corsicum* 的生物量,从而获得更高的植物采镍量。同样地,Orlowska等^[71]发现,接种丛枝菌根真菌(AMF)可以增加土壤中有效K和有效P的含量,从而提高了超富集植物(*B. coddii*)根和茎的生物量,使得植物的总镍提取量提高了20倍。Wazny等^[30]发现接种内生真菌(PGPE)也能显著促进超富集植物 *N. goesingensis* 的生长。在超富集植物 *O. serpyllifolium* 中也有相同的发现,其中接种A3R3菌株显著提高了植物的生物量^[72]。微生物一方面可以通过吸附或吸收镍来缓解其毒性,另一方面可以通过分泌促生物质促进超富集植物生长,进而强化其对镍的富集^[72]。

微生物通过活化土壤金属镍或分泌一些代谢物增强超富集植物对镍的耐性,提高镍的提取能力。Visioli等^[73]研究发现,使用组合内生菌[Ncr-1(*Arthrobacter*属)+Ncr-8(*Microbacterium*属)]处理土壤,显著提高了土壤中有效镍含量、超富集植物 *N. caerulescens* 镍富集及转运能力,同时促进了植物生长。Akhtar等^[74]发现在不同程度镍污染的土壤上,接种 *Bacillus* sp.(CIK-516)或 *Stenotrophomonas* sp.(CIK-517Y)(根际促生菌)均可以通过活化土壤中的镍元素来提高富集植物 *Raphanus sativus* 根和地上部组织中的镍含量。此外,Zaidi等^[75]发现接种枯草芽孢杆菌菌株SJ-101可促进镍在 *Brassica juncea* 组织中累积。可见,接种AMF、PGPE^[76]或PGPR^[77-79]可以通过提高生物量或植

物的镍含量来提高植物采矿效率,但是由于地域性、植物品种等不同,功能微生物种类的差异可能导致不同的植物采矿效果,因此需要针对特定超富集植物根际的微生物种群开展深入研究。

2.2 耕作管理

耕作管理对超富集植物的采矿及修复效率具有极为重要的影响。耕作管理主要包含施肥制度、杂草防治、种植模式、种植密度和收获时期等多个方面。科学合理的施肥可以提供植物生长所需的养分,增加超富集植物的产量和富集能力;有效防治杂草可以抑制其与超富集植物竞争水分、养分等生长条件,同时还可以减少外源污染的影响;选用适宜的种植模式和密度,则可以提高种植区域的超富集植物覆盖度和富集能力;而合理的收获时期则可以在保证产量的基础上,将植物体内富集的重金属有效收集利用。因此,耕作管理是提升植物采矿效率的关键之一,但需要根据镍超富集植物种类和生境条件进行合理调整。

2.2.1 施肥制度

一般自然生成的超基性土壤肥力均较低,向土壤中施加适量的肥料会对超富集植物的生长产生积极作用。Bani等^[13]对生长在阿尔巴尼亚的蛇纹岩土壤上的超富集植物进行了长达5年的研究,结果显示施肥(100 kg·hm⁻² P、100 kg·hm⁻² K、65 kg·hm⁻² Ca和50 kg·hm⁻² N)可以显著提高超富集植物 *O. chalcidica* 的生物量,从3.2 t·hm⁻²提高到6.3 t·hm⁻²,并将植物采镍量从1.7 kg·hm⁻²提高到22.0 kg·hm⁻²。Robinson等^[80]在新西兰进行的田间试验中也证实了适度施肥对 *B. coddii* 的干物质生物量有一定促进作用(可以达到22 t·hm⁻²)。Álvarez-López等^[81]发现施加无机肥和有机肥均可提高镍超富集植物 *Odontarrhena serpyllifolium* ssp. *lusitanicum*、*O. serpyllifolium* ssp. *malacitanum*、*O. bertolonii* 和 *N. goesingense* 的生物量,且对植物 *N. goesingense* 的促进作用尤为显著,增量高达162倍。而Saad等^[82]发现氮是蛇纹岩土壤最重要的植物生长限制因子,施加氮肥60 kg·hm⁻²(以N计)即可显著提高植物生物量,与Bani和Álvarez-López的结论相一致。此外,Nkrumah等^[83]研究显示,不同超富集植物对肥料的需求也存在较大差异。例如,向土壤中添加有机质(5%、10%)对植物 *R. cf. Bengalensis* 的生长有明显的促进作用,但对植物 *P. rufuschaneyi* 的生长呈现“低促高抑”的效应。

施肥不仅可以促进镍超富集植物的生长,而且对镍的富集也会产生作用。Li等^[14]发现,施加氮肥可以

显著增加 *N. caerulescens* 的产量,但不会显著影响植物地上部的镍含量。Robinson 等^[80]也发现施用氮肥可以提高 *B. coddii* 叶片中的镍含量。施加适量的有机肥(5%)或无机肥(N: 100 kg·hm⁻² NH₄NO₃; P: 100 kg·hm⁻² KH₂PO₄; K: 125 kg·hm⁻² KH₂PO₄)均可以提高植物采矿效率^[81]。可见,施加各种类型的肥料是提高植物采矿的有效方式。但是,植物品种及其土壤环境的差异造成了不同的施肥需求,因此针对性的施肥方案仍然值得探索。

2.2.2 杂草防治

杂草控制也会影响超富集植物的采矿效率。相较于肥沃的土壤,在蛇纹岩土壤中,杂草对富集植物生长的作用较小,因此不需要高强度的人工除草或使用大量的除草剂。除草剂在杀灭杂草的同时也可能会对富集植物的生长产生不利影响,因此,这就要求在人工除草和使用除草剂之间进行合理选择。Li 等^[14]的研究显示,使用组合的化学除草剂(三氟草胺、氟草酸乙草胺等)配合机械除草可有效控制杂草,促进超富集植物生长。Bani 等^[13]研究发现,使用除草剂控制杂草可使 *O. chalcidica* 生物量增加 70%。然而,人工除草成本较高,化学除草针对性不强,因此,如何平衡成本与收益的关系是今后需要关注和评估的关键。

2.2.3 种植密度和种植模式

目前超富集植物种植方法包括直接播种、种子造粒、扦插和移植。Li 等^[14]对种植方法进行评估后认为,对于草本类超富集植物的种植,将种子直接播撒到土壤表面是最有效的方法。Bouman 等^[50]的研究表明,在东南亚地区,用于植物采矿的超富集植物 *P. rufuschaneyi* (木本植物)最适宜的大面积种植方式是扦插。目前针对其他超富集植物的播种方式的研究还相对较少,需要进一步加强相关研究。

合理的种植密度也是影响植物采矿效率的重要因素。种植密度的设置会直接影响单位面积的生物量和采矿效率。根据 Li 等^[14]的研究,草本植物 *O. muralis* 和 *O. corsicum* 的最佳种植密度是 4 株·m⁻²。Bani 等^[84]对三种种植密度(1、4 株·m⁻² 和 6 株·m⁻²)进行研究发现,这三种种植密度处理的生物量分别为 10、10 t·hm⁻² 和 5 t·hm⁻²,镍的提取量分别为 77、112 kg·hm⁻² 和 41 kg·hm⁻²,最佳种植密度为 4 株·m⁻²,这与 Li 等^[14]的研究结果一致。在马来西亚沙巴的超基性土壤上, Tisserand 等^[85]对 *P. rufuschaneyi* (木本植物)的种植密度(2、4 株·m⁻²)进行了研究,两种处理的金属镍和生

物量分别是 55、115 kg·hm⁻²·a⁻¹ 和 110、230 kg·hm⁻²·a⁻¹。目前,针对其他镍超富集植物的种植密度的研究还较少,探索出一种最大采矿量的种植密度对今后的采矿实践具有重要的指导意义。

镍超富集植物-普通植物的间套作是提高植物镍提取效率的重要方法之一。Saad 等^[77]研究发现,超富集植物 *O. muralis* 和野豌豆(*Vicia sativa*, 固氮植物)间作可以使 *O. muralis* 的生物量提高 417%。但 Rosenkranz 等^[35]的研究则显示超富集植物 *O. chalcidica* 或 *N. goesingensis* 和草本植物 *Lotus corniculatus* 间作虽然可以一定程度上增加超富集植物中的镍含量,但减少了植物的生物量,降低了植物采矿的效率。总体而言,目前针对镍超富集植物的间套作种植模式的研究还不充分,需要深入研究来充分发挥其价值。

2.2.4 收获时期

植物的收获期也是需要重点考虑的因素之一。*O. muralis* 和 *O. corsicum* 均为多年生草本植物。Bani 等^[13]研究 *O. chalcidica* 在不同生长时期植物体内镍含量的变化发现,在开花中期植物体内镍含量达到最大值,植物器官中的镍含量依次为叶>花>茎>果>根。Pardo 等^[86]对 *O. muralis* 不同生长阶段体内镍含量的研究结果与其相似,即在开花中期采收,可以获得最高的镍产量。但是, Tisserand 等^[85]发现开花期并不会影响木本植物 *P. rufuschaneyi* 的镍提取量,不同的植物可能存在不同的响应机制。因此,未来仍需针对特定植物,通过长期监测获得不同采收时期产生的镍产量数据,进一步指导植物采矿实践。

3 结论和展望

农艺管理措施对克服超富集植物采矿量低的局限非常重要。土壤改良可以在一定程度上提高土壤中有有效镍的含量,进而提高超富集植物对镍的吸收能力;同时,科学的耕作管理措施可以通过增加镍超富集植物的生物量,强化其从土壤中提取镍的能力,提高植物采矿商业化应用潜力。但是,目前尚存在农艺管理技术体系不健全、应用效果不理想等问题,仍需更多基础研究的支持。

未来,首先需要进一步深入研究不同超富集植物对镍的吸收和富集的分子机制,及其生长适应性和耐受性,筛选出适应性强、采矿量高的品种。其次,在土壤改良方面,应继续探索适合不同生境的改良剂和微生物,加强土壤环境监测和评估。此外,也需要探索更多的经济、环境友好的施肥技术,以及筛选能充分

利用农业有机废弃物等资源改善土壤质量的措施。在耕作管理方面,需要对种植密度、育种技术、杂草控制、收获时期等因素进行优化和组合,健全农艺管理措施体系,以降低成本、提高植物采镍效率。最后,应加强国际合作,分享经验和技術,促进植物采矿技术在实践中得到更好的应用和推广。

参考文献:

- [1] GUILLOT S, HATTORI K. Serpentinites: essential roles in geodynamics, arc volcanism, sustainable development, and the origin of life[J]. *Elements*, 2013, 9(2):95-98.
- [2] REEVES R D, VAN DER ENT A, BAKER A J M. Global distribution and ecology of hyperaccumulator plants[M]//VAN DER ENT A, ECHEVARRIA G, BAKER A J M, et al. Agromining: farming for metals: extracting unconventional resources using plants. Cham: Springer International Publishing, 2018:75-92.
- [3] ECHEVARRIA G. Genesis and behaviour of ultramafic soils and consequences for nickel biogeochemistry[M]//VAN DER ENT A, BAKER A J M, ECHEVARRIA G, et al. Agromining: farming for metals: extracting unconventional resources using plants. Cham: Springer International Publishing, 2021:215-238.
- [4] KIERCZAK J, PIETRANIK A, PĘDZIWIATR A. Ultramafic geoecosystems as a natural source of Ni, Cr, and Co to the environment: a review [J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 755:142620.
- [5] 环境保护部, 国土资源部. 全国土壤污染状况调查公报[EB/OL]. (2014-04-17)[2020-04-19]. http://www.gov.cn/foot/2014-04/17/content_2661768.htm. Ministry of Environmental Protection of the People's Republic of China, Ministry of Land and Resources of the People's Republic of China. Bulletin of the national survey on soil pollution status[EB/OL]. (2014-04-17)[2020-04-19]. http://www.gov.cn/foot/2014-04/17/content_2661768.htm.
- [6] 耿珂睿, 孙升升, 黄哲, 等. 镍污染土壤植物采矿技术关键过程及其研究进展[J]. 生物工程学报, 2020, 36(3):436-449. GENG K R, SUN S S, HUANG Z, et al. Key processes and progress in phytomining of nickel contaminated soils: a review[J]. *Chinese Journal of Biotechnology*, 2020, 36(3):436-449.
- [7] 徐爱东, 陈瑞瑞, 李烁, 等. 镍钴行业发展形势分析及建议[J]. 中国有色冶金, 2021, 50(6):9-15. XU A D, CHEN R R, LI S, et al. Analysis and suggestion on the development of nickel-cobalt industry [J]. *China Nonferrous Metallurgy*, 2021, 50(6):9-15.
- [8] VAN DER ENT A, BAKER A J M, REEVES R D, et al. Agromining: farming for metals in the future?[J]. *Environmental Science & Technology*, 2015, 49(8):4773-4780.
- [9] CHANEY R, ANGLE J S, BAKER A, et al. Method for phytomining of nickel, cobalt and other metals from soil[J]. *United States Patent*, 2004, 5:1-4.
- [10] ROBINSON B H, BROOKS R R, CLOTHIER B E. Soil amendments affecting nickel and cobalt uptake by *Berkheya coddii*: potential use for phytomining and phytoremediation[J]. *Annals of Botany*, 1999, 84(6):689-694.
- [11] CERDEIRA-PÉREZ A, MONTERROSO C, RODRIGUEZ-GARRIDO B, et al. Implementing nickel phytomining in a serpentine quarry in NW Spain[J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 2019, 197:1-13.
- [12] HIPFINGER C, LAUX M, PUSCHENREITER M. Comparison of four nickel hyperaccumulator species in the temperate climate zone of central Europe[J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 2022, 234:106933.
- [13] BANI A, ECHEVARRIA G, SULCE S, et al. Improving the agronomy of *Alyssum murale* for extensive phytomining: a five-year field study [J]. *International Journal of Phytoremediation*, 2015, 17(2):117-127.
- [14] LI Y M, CHANEY R, BREWER E, et al. Development of a technology for commercial phytoextraction of nickel: economic and technical considerations[J]. *Plant and Soil*, 2003, 249(1):107-115.
- [15] VAN DER ENT A, BAKER A J M, VAN BALGOOY M M J, et al. Ultramafic nickel laterites in Indonesia (Sulawesi, Halmahera): mining, nickel hyperaccumulators and opportunities for phytomining[J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 2013, 128:72-79.
- [16] JAFFRE T, BROOKS R R, LEE J, et al. *Sebertia acuminata*: a hyperaccumulator of nickel from New Caledonia[J]. *Science*, 1976, 193(4253):579-580.
- [17] BROOKS R R, LEE J, REEVES R D, et al. Detection of nickeliferous rocks by analysis of herbarium specimens of indicator plants[J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 1977, 7:49-57.
- [18] MESJASZ-PRZYBYŁOWICZ J, PRZYBYŁOWICZ W J. Ecophysiology of nickel hyperaccumulating plants from South Africa from ultramafic soil and mycorrhiza to plants and insects[J]. *Metallomics: Integrated Biometal Science*, 2020, 12(7):1018-1035.
- [19] REEVES R D, BAKER A J M, JAFFRÉ T, et al. A global database for plants that hyperaccumulate metal and metalloid trace elements[J]. *New Phytologist*, 2018, 218(2):407-411.
- [20] VAN DER ENT A, ERSKINE P, SUMAIL S. Ecology of nickel hyperaccumulator plants from ultramafic soils in Sabah (Malaysia)[J]. *Chemoecology*, 2015, 25(5):243-259.
- [21] ROCCOTIELLO E, SERRANO H C, MARIOTTI M G, et al. Nickel phytoremediation potential of the Mediterranean *Alyssoides utriculata* (L.) Medik[J]. *Chemosphere*, 2015, 119:1372-1378.
- [22] PACARIZI M, KRASNIQI E, ZOGAJ M, et al. Hyperaccumulation of heavy metals by endemic plants (*Bornmuellera diecki*, *Stachys scardica*) in the Sharri mountains-Kosovo[J]. *Fresenius Environmental Bulletin*, 2021, 30(10):11524-11529.
- [23] TURNAU K, MESJASZ-PRZYBYŁOWICZ J. Arbuscular mycorrhiza of *Berkheya coddii* and other Ni-hyperaccumulating members of *Asteraceae* from ultramafic soils in South Africa[J]. *Mycorrhiza*, 2003, 13(4):185-190.
- [24] GOTERA K M C, CLAVERIA R J R, DORONILA A I, et al. Localization of nickel in the hyperaccumulator plant *Breynia cernua* (Poir.) Mull. Arg. discovered in the nickeliferous laterites of Zambales, the Philippines[J]. *International Journal of Phytoremediation*, 2020, 22(2):127-133.
- [25] NKRUMAH P N, ECHEVARRIA G, ERSKINE P D, et al. Contrast-

- ing nickel and zinc hyperaccumulation in subspecies of *Dichapetalum gelonioides* from southeast Asia[J]. *Scientific Reports*, 2018, 8(1): 9659–9674.
- [26] DATTA S, CHAUDHURY K, MUKHERJEE P K. Hyperaccumulators from the serpentines of Andaman, India[J]. *Australian Journal of Botany*, 2015, 63(4): 243–251.
- [27] BERAZAIN R, DE LA FUENTE V, SANCHEZ-MATA D, et al. Nickel localization on tissues of hyperaccumulator species of *Phyllanthus* L. (*Euphorbiaceae*) from ultramafic areas of Cuba[J]. *Biological Trace Element Research*, 2007, 115(1): 67–86.
- [28] DO NASCIMENTO C W A, LIMA L H V, DA SILVA Y, et al. Ultramafic soils and nickel phytomining opportunities: a review[J]. *Revista Brasileira De Ciencia Do Solo*, 2022, 46: 1–17.
- [29] CHARDOT V, MASSOURA S T, ECHEVARRIA G, et al. Phytoextraction potential of the nickel hyperaccumulators *Leptoplax emarginata* and *Bornmuellera tymphaea*[J]. *International Journal of Phytoremediation*, 2005, 7(4): 323–335.
- [30] WAZNY R, ROZPADEK P, JEDRZEJCZYK R J, et al. Phytohormone based biostimulant combined with plant growth promoting endophytic fungus enhances Ni phytoextraction of *Noccaea goesingensis*[J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 789: 147950.
- [31] VAN DER ENT A, SPIERS K M, BRUECKNER D, et al. Spatially-resolved localization and chemical speciation of nickel and zinc in *Noccaea tymphaea* and *Bornmuellera emarginata*[J]. *Metallomics: Integrated Biometal Science*, 2019, 11(12): 2052–2065.
- [32] ALANNE A L, PERANIEMI S, TURHANEN P, et al. A bisphosphonate increasing the shoot biomass of the metal hyperaccumulator *Noccaea caerulea*[J]. *Chemosphere*, 2014, 95: 566–571.
- [33] BETTARINI I, COLZI I, GONNELLI C, et al. Inability to accumulate Ni in a genus of hyperaccumulators: the paradox of *Odontarrhena sibirica* (Brassicaceae)[J]. *Planta*, 2020, 252(6): 99–111.
- [34] DO NASCIMENTO C W A, HESTERBERG D, TAPPERO R, et al. Citric acid-assisted accumulation of Ni and other metals by *Odontarrhena muralis*: implications for phytoextraction and metal foliar distribution assessed by μ -SXRF[J]. *Environmental Pollution*, 2020, 260: 114025.
- [35] ROSENKRANZ T, HIPFINGER C, RIDARD C, et al. A nickel phytomining field trial using *Odontarrhena chalcidica* and *Noccaea goesingensis* on an Austrian serpentine soil[J]. *Journal of Environmental Management*, 2019, 242: 522–528.
- [36] TOGNACCHINI A, ROSENKRANZ T, VAN DER ENT A, et al. Nickel phytomining from industrial wastes: growing nickel hyperaccumulator plants on galvanic sludges[J]. *Journal of Environmental Management*, 2020, 254: 109798.
- [37] GABBRIELLI R, PANDOLFINI T, PUCCI B. Physiological role of root surface phosphatases in adaptation strategies of *Alyssum bertoloni* Desv. to serpentine edaphic conditions[J]. *Phyton(Horn)*, 1995, 35(2): 187–197.
- [38] JAIN P K, SOLOMAN P E, GAUR R K. Higher plant remediation to control pollutants[M]//KUMAR S, HASHMI M Z. Biological approaches to controlling pollutants. Woodhead Publishing, 2022: 321–363.
- [39] VAN DER ENT A, MESJASZ-PRZYBYŁOWICZ J, PRZYBYŁOWICZ W, et al. Contrasting patterns of nickel distribution in the hyperaccumulators *Phyllanthus balgooyi* and *Phyllanthus rufuschaneyi* from Malaysian Borneo[J]. *Metallomics: Integrated Biometal Science*, 2022, 14: 5–20.
- [40] HOFFMANN P, BAKER A, MADULID D, et al. *Phyllanthus Balgooyi* (*euphorbiaceae* S. L.), a new nickel-hyperaccumulating species from Palawan and Sabah[J]. *Blumea – Biodiversity, Evolution and Biogeography of Plants*, 2003, 48: 193–199.
- [41] DANG T T, CHAN L Y, TOMBLING B J, et al. In planta discovery and chemical synthesis of bracelet cystine knot peptides from *Rinorea bengalensis*[J]. *J Nat Prod*, 2021, 84(2): 395–407.
- [42] BOYD R S, SHAW J J, MARTENS S N. Nickel hyperaccumulation defends *Streptanthus polygaloides* (Brassicaceae) against pathogens[J]. *American Journal of Botany*, 1994, 81(3): 294–300.
- [43] KALDORF M, KUHN A J, SCHRODER W H, et al. Selective element deposits in maize colonized by a heavy metal tolerance conferring arbuscular mycorrhizal fungus[J]. *Journal of Plant Physiology*, 1999, 154(5/6): 718–728.
- [44] VAN DER ENT A, OCENAR A, TISSERAND R, et al. Herbarium X-ray fluorescence screening for nickel, cobalt and manganese hyperaccumulator plants in the flora of Sabah (Malaysia, Borneo Island)[J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 2019, 202: 49–58.
- [45] MESJASZ-PRZYBYŁOWICZ J, PRZYBYŁOWICZ W, BARNABAS A, et al. Extreme nickel hyperaccumulation in the vascular tracts of the tree *Phyllanthus balgooyi* from Borneo[J]. *New Phytologist*, 2016, 209(4): 1513–1526.
- [46] NKRUMAH P N, BAKER A J M, CHANEY R L, et al. Current status and challenges in developing nickel phytomining: an agronomic perspective[J]. *Plant and Soil*, 2016, 406(1/2): 55–69.
- [47] KIDD P S, BANI A, BENIZRI E, et al. Developing sustainable agromining systems in agricultural ultramafic soils for nickel recovery[J]. *Frontiers in Environmental Science*, 2018, 6: 1–20.
- [48] ROBINSON B H, LOMBI E, ZHAO F J, et al. Uptake and distribution of nickel and other metals in the hyperaccumulator *Berkheya coddii*[J]. *New Phytologist*, 2003, 158(2): 279–285.
- [49] ANDERSON C W N, BROOKS R R, CHIARUCCI A, et al. Phytomining for nickel, thallium and gold[J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 1999, 67(1): 407–415.
- [50] BOUMAN R, VAN WELZEN P, SUMAIL S, et al. *Phyllanthus rufuschaneyi*: a new nickel hyperaccumulator from Sabah (Borneo Island) with potential for tropical agromining[J]. *Botanical Studies*, 2018, 59(1): 9–21.
- [51] NKRUMAH P N, TISSERAND R, CHANEY R L, et al. The first tropical ‘metal farm’: some perspectives from field and pot experiments[J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 2019, 198: 114–122.
- [52] NKRUMAH P N, CHANEY R L, MOREL J L. Agronomy of ‘metal crops’ used in agromining[M]//VAN DER ENT A, ECHEVARRIA G, BAKER A J M, et al. Agromining: farming for metals: extracting unconventional resources using plants. Cham: Springer International Publishing, 2018: 19–38.

- [53] 仇荣亮, 刘凤杰, 万云兵, 等. 植物 *A. murale* 和 *A. corsicum* 修复镍污染土壤[J]. 中国环境科学, 2008, 28(11): 1026–1031. QIU R L, LIU F J, WAN Y B, et al. Phytoremediation on nickel-contaminated soils by hyperaccumulators *Alyssum corsicum* and *Alyssum murale*[J]. *China Environmental Science*, 2008, 28(11): 1026–1031.
- [54] NKRUMAH P N, ECHEVARRIA G, ERSKINE P D, et al. Effect of nickel concentration and soil pH on metal accumulation and growth in tropical agromining ‘metal crops’ [J]. *Plant and Soil*, 2019, 443 (1/2): 27–39.
- [55] KUKIER U, PETERS C A, CHANEY R L, et al. The effect of pH on metal accumulation in two *Alyssum* species[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2004, 33(6): 2090–2102.
- [56] REEVES R D, LAIDLAW W S, DORONILA A, et al. Erratic hyperaccumulation of nickel, with particular reference to the Queensland serpentine endemic *Pimelea leptospermoides*[J]. *Australian Journal of Botany*, 2015, 63(2): 119–127.
- [57] CHEN H, CUTRIGHT T. EDTA and HEDTA effects on Cd, Cr, and Ni uptake by *Helianthus annuus*[J]. *Chemosphere*, 2001, 45 (1): 21–28.
- [58] TURGUT C, PEPE K M, CUTRIGHT T J. The effect of EDTA and citric acid on phytoremediation of Cd, Cr, and Ni from soil using *Helianthus annuus*[J]. *Environmental Pollution*, 2004, 131(1): 147–154.
- [59] MUNN J, JANUARY M, CUTRIGHT T J. Greenhouse evaluation of EDTA effectiveness at enhancing Cd, Cr, and Ni uptake in *Helianthus annuus* and *Thlaspi caerulescens*[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2008, 8(2): 116–122.
- [60] CAY S, UYANIK A, ENGIN M S, et al. Effect of EDTA and tannic acid on the removal of Cd, Ni, Pb and Cu from artificially contaminated soil by *Althaea rosea* Cavan[J]. *International Journal of Phytoremediation*, 2015, 17(6): 568–574.
- [61] MAKAROVA A, NIKULINA E, AVDEENKOVA T, et al. The improved phytoextraction of heavy metals and the growth of *Trifolium repens* L.; the role of K₂HEDP and plant growth regulators alone and in combination[J]. *Sustainability*, 2021, 13(5): 2432.
- [62] 方晓航, 仇荣亮, 曾晓雯, 等. EDTA、小分子有机酸对蛇纹岩发育土壤 Ni、Co 活性的影响[J]. 中山大学学报(自然科学版), 2005, 44(4): 111–114. FANG X H, QIU R L, ZENG X W, et al. Effect of EDTA and LMWOA on availability of nickel and cobalt in serpentine soils[J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni*, 2005, 44(4): 111–114.
- [63] JEAN L, BORDAS F, GAUTIER-MOUSSARD C, et al. Effect of citric acid and EDTA on chromium and nickel uptake and translocation by *Datura innoxia*[J]. *Environmental Pollution*, 2008, 153 (3): 555–563.
- [64] NEUGSCHWANDTNER R W, TLUSTOS P, KOMAREK M, et al. Chemically enhanced phytoextraction of risk elements from a contaminated agricultural soil using *Zea mays* and *Triticum aestivum*: performance and metal mobilization over a three years period[J]. *International Journal of Phytoremediation*, 2012, 14(8): 754–771.
- [65] 方晓航, 仇荣亮, 赵德骏, 等. 生物源提取液与工业废水对土壤中 Ni、Co 的活化研究[J]. 生态环境, 2005, 14(3): 345–348. FANG X H, QIU R L, ZHAO D J, et al. Effect of biological organic chelators on solubilization of Ni and Co in soils[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2005, 14(3): 345–348.
- [66] NASCIMENTO C, HESTERBERG D, TAPPERO R. Effects of exogenous citric acid on the concentration and spatial distribution of Ni, Zn, Co, Cr, Mn and Fe in leaves of *Noccaea caerulescens* grown on a serpentine soil[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2020, 398: 122992.
- [67] KUKLINSKY-SOBRAL J, ARAUJO W L, MENDES R, et al. Isolation and characterization of soybean-associated bacteria and their potential for plant growth promotion[J]. *Environmental Microbiology*, 2004, 6(12): 1244–1251.
- [68] RAJKUMAR M, AE N, FREITAS H. Endophytic bacteria and their potential to enhance heavy metal phytoextraction[J]. *Chemosphere*, 2009, 77(2): 153–160.
- [69] 蔡信德, 仇荣亮, 汤叶涛, 等. 外源镍在土壤中的存在形态及其与土壤酶活性的关系[J]. 中山大学学报(自然科学版), 2005, 44(5): 93–97. CAI X D, QIU R L, TANG Y T, et al. Fractions of additive nickel and relationship with enzymatic activities in soil[J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni*, 2005, 44(5): 93–97.
- [70] 蔡信德, 仇荣亮, 陈桂珠, 等. 接种泡囊假单胞菌对土壤生物性质及 *A. corsicum* 吸收 Ni 的影响[J]. 生态学报, 2006, 26(5): 1405–1413. CAI X D, QIU R L, CHEN G Z, et al. Effect of soil inoculation with *Pseudomonas vesicularis* on biological properties of three nickel contaminated soils and on Ni accumulation by the hyperaccumulator *Alyssum corsicum*[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26(5): 1405–1413.
- [71] ORLOWSKA E, PRZYBYLOWICZ W, ORLOWSKI D, et al. The effect of mycorrhiza on the growth and elemental composition of Ni-hyperaccumulating plant *Berkheya coddii* Roessler[J]. *Environmental Pollution*, 2011, 159(12): 3730–3738.
- [72] MA Y, RAJKUMAR M, LUO Y, et al. Inoculation of endophytic bacteria on host and non-host plants: effects on plant growth and Ni uptake [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2011, 195: 230–237.
- [73] VISIOLI G, VAMERALI T, MATTAROZZI M, et al. Combined endophytic inoculants enhance nickel phytoextraction from serpentine soil in the hyperaccumulator *Noccaea caerulescens*[J]. *Frontiers in Plant Science*, 2015, 6: 638–650.
- [74] AKHTAR M J, ULLAH S, AHMAD I, et al. Nickel phytoextraction through bacterial inoculation in *Raphanus sativus*[J]. *Chemosphere*, 2018, 190: 234–242.
- [75] ZAIDI S, USMANI S, SINGH B R, et al. Significance of *Bacillus subtilis* strain SJ-101 as a bioinoculant for concurrent plant growth promotion and nickel accumulation in *Brassica juncea*[J]. *Chemosphere*, 2006, 64(6): 991–997.
- [76] WAŻNY R, ROZPADEK P, DOMKA A, et al. The effect of endophytic fungi on growth and nickel accumulation in *Noccaea* hyperaccumulators[J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 768: 144666–144690.
- [77] SAAD R F, KOBALISSI A, GOUX X, et al. Soil microbial and Ni-agronomic responses to *Alyssum murale* interplanted with a legume[J]. *Applied Soil Ecology*, 2018, 132: 60–73.
- [78] LUCISINE P, ECHEVARRIA G, STERCKEMAN T, et al. Effect of

- hyperaccumulating plant cover composition and rhizosphere-associated bacteria on the efficiency of nickel extraction from soil[J]. *Applied Soil Ecology*, 2014, 81:30–36.
- [79] RUE M, VALLANCE J, ECHEVARRIA G, et al. Phytoextraction of nickel and rhizosphere microbial communities under mono- or multi-species hyperaccumulator plant cover in a serpentine soil[J]. *Australian Journal of Botany*, 2015, 63(2):92–102.
- [80] ROBINSON B H, BROOKS R R, HOWES A W, et al. The potential of the high-biomass nickel hyperaccumulator *Berkheya coddii* for phytoremediation and phytomining[J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 1997, 60(2):115–126.
- [81] ÁLVAREZ-LÓPEZ V, PRIETO-FERNÁNDEZ Á, CABELLO-CONEJO M I, et al. Organic amendments for improving biomass production and metal yield of Ni-hyperaccumulating plants[J]. *Science of the Total Environment*, 2016, 548/549:370–379.
- [82] SAAD R F, KOBALISSI A, MACHINET G, et al. Crop rotation associating a legume and the nickel hyperaccumulator *Alyssum murale* improves the structure and biofunctioning of an ultramafic soil[J]. *Ecological Research*, 2017, 33(4):799–810.
- [83] NKRUMAH P N, ECHEVARRIA G, ERSKINE P D, et al. Soil amendments affecting nickel uptake and growth performance of tropical ‘metal crops’ used for agromining[J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 2019, 203:78–86.
- [84] BANI A, ECHEVARRIA G, ZHANG X, et al. The effect of plant density in nickel-phytomining field experiments with *Alyssum murale* in Albania[J]. *Australian Journal of Botany*, 2015, 63(2):72–77.
- [85] TISSERAND R, VAN DER ENT A, NKRUMAH P N, et al. Improving tropical nickel agromining crop systems: the effects of chemical and organic fertilisation on nickel yield[J]. *Plant and Soil*, 2021, 465(1):83–95.
- [86] PARDO T, RODRIGUEZ-GARRIDO B, SAAD R F, et al. Assessing the agromining potential of Mediterranean nickel-hyperaccumulating plant species at field-scale in ultramafic soils under humid-temperate climate[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 630:275–286.