

解磷菌联合绿色活化剂对黑麦草累积土壤中镉的影响^①

彭鑫¹, 朱逸纯¹, 杨远¹, 王密², 赵儒乐¹, 黄红丽¹

(1. 湖南农业大学 环境与生态学院, 湖南 长沙 410128; 2. 中铝环保生态技术(湖南)有限公司, 湖南 长沙 410021)

摘要: 以橙子废渣提取物和谷氨酸二乙酸四钠(GLDA)为原材料制备了绿色活化剂, 研究了解磷菌联合绿色活化剂对黑麦草富集、转运及累积土壤中镉的影响。结果表明, 解磷菌对黑麦草在镉污染环境下的生长有显著促进作用, 单独使用绿色活化剂时黑麦草干重下降了27.37%, 抑制了黑麦草的生长; 将二者联用时, 黑麦草干重是空白组的1.29倍, 解磷菌的加入缓解了绿色活化剂对黑麦草生长的负面作用。解磷菌联合绿色活化剂使土壤中有效态镉含量提升而土壤总镉浓度减少, 且地上部分和地下部分的富集系数分别提升了35.37%和10.23%, 黑麦草对镉的转运系数提升了22.58%。此外, 镉在黑麦草地上部分和地下部分的累积总量分别提升了87.90%和32.69%, 且各处理方式下, 镉在地上部分累积总量均大于地下部分, 说明解磷菌联合绿色活化剂的使用促进了黑麦草对土壤中镉的提取。

关键词: 重金属污染土壤; 土壤生物修复; 镉; 植物提取; 解磷菌; 活化剂; 黑麦草

中图分类号: X53

文献标识码: A

doi:10.3969/j.issn.0253-6099.2024.01.021

文章编号: 0253-6099(2024)01-0095-05

Effect of Phosphate-Solubilizing Bacteria Combined with Green Activator on Accumulation/Translocation of Cadmium in Soil by Ryegrass

PENG Xin¹, ZHU Yichun¹, YANG Yuan¹, WANG Mi², ZHAO Rule¹, HUANG Hongli¹

(1. College of Environment and Ecology, Hunan Agricultural University, Changsha 410128, Hunan, China; 2. Chinalco Environmental Protection and Ecological Technology (Hunan) Co Ltd, Changsha 410021, Hunan, China)

Abstract: With orange residue extract and tetrasodium glutamate diacetate (GLDA) as raw materials, a green activator was prepared. Then, the effects of phosphate-solubilizing bacteria (PSB) combined with green activator on the enrichment, translocation and accumulation of cadmium from soil by ryegrass were studied. The results show that PSB can significantly promote the growth of ryegrass in cadmium-contaminated soil. However, the growth of ryegrass is inhibited by only using green activator, with the dry weight of ryegrass at the end of experiment decreased by 27.37%; while a combination of PSB and green activator can make the final dry weight of ryegrass become 1.29 times that in the blank group, indicating that the addition of PSB can alleviate the negative effect of green activator on the growth of ryegrass. A combination of both can increase the content of phytoavailable cadmium in soil, while decrease the total cadmium concentration in soil. It is shown that the enrichment coefficient of Cd in stem and root parts of ryegrass increases by 35.37% and 10.23%, respectively, and the translocation factor of cadmium by ryegrass increases by 22.58%. In addition, the total accumulation of cadmium in the stem and root parts of ryegrass is up by 87.90% and 32.69%, respectively. It is found that the total accumulation of cadmium in the stem is all greater than that in the root whether by using PSB and green activator separately, or by a combination of both, indicating that PSB combined with green activator can promote the phytoextraction efficiency of cadmium from soil by ryegrass.

Key words: heavy metal contaminated soil; soil bioremediation; cadmium; plant extraction; phosphorus-solubilizing bacteria; activator; ryegrass

植物提取技术被广泛应用于修复土壤镉污染, 但修复效果受植物生物量、重金属生物有效性这两大因

① 收稿日期: 2023-08-06

基金项目: 国家自然科学基金青年基金(42107308); 湖南省高新技术产业科技创新引领计划(2020NK2001)

作者简介: 彭鑫(1997—), 女, 湖南邵阳人, 硕士研究生, 主要研究方向为重金属污染土壤修复。E-mail: px15773954421@163.com

通信作者: 黄红丽(1980—), 女, 江西南昌人, 副教授, 主要研究方向为重金属污染土壤修复。E-mail: huanghongli@hunau.edu.cn

素限制^[1-3]。有研究报道,可通过添加低分子有机酸类活化剂和解磷菌的方式强化植物提取重金属的效率^[4-6]。水果废渣中含有丰富的低分子有机酸,在活化重金属方面具有一定价值,是一种纯天然的绿色活化剂^[7-8]。解磷菌具有解磷、增加植物抗逆性等功能,有利于增加植物生物量^[9]。此外,水果废渣中富含的糖类、纤维素等物质能为微生物提供碳源,促进其生命代谢活动^[10]。因此,将以水果废渣为主要原料的绿色活化剂与解磷菌结合,作为植物提取增强剂,是一种有前景的强化措施。本文选取橙子废渣提取物和谷氨酸二乙酸四钠(GLDA)为原料,制备绿色活化剂,并将绿色活化剂与解磷菌联合使用,通过黑麦草盆栽实验探讨不同添加物对黑麦草提取镉的效果,以期为强化植物提取重金属技术提供新思路。

1 材料与方法

1.1 实验原料

1.1.1 供试土壤

供试土壤取自湖南省浏阳市焦溪镇镉污染农田土壤表面以下深度0~20 cm。土壤于晾晒室平铺自然风干,去除大块石子及植物残渣,过2 mm筛。供试土壤理化性质的测定方法参考《土壤农化分析》^[11],供试土壤基本理化性质见表1。

表1 土壤基本理化性质

项目	数值	项目	数值
pH值	5.36±0.23	速效磷(mg/kg)	35.29±1.42
电导率(ms/cm)	185.33±7.51	速效钾(mg/kg)	80.07±1.57
总氮(mg/kg)	827.07±35.87	总有机质(%)	3.38±0.85
总磷(mg/kg)	610.49±23.01	镉含量(mg/kg)	1.62±0.06
碱解氮(mg/kg)	267.26±53.66	有效态镉含量(mg/kg)	0.16±0.01

1.1.2 绿色活化剂的制备

选取橙子废渣提取物为绿色活化剂的主要原料。橙子废渣收集于湖南长沙本地水果市场(主要为废弃的湖南冰糖橙、湘南脐橙),超纯水洗净后,以橙子废渣和超纯水质量比1:5混合,置于搅拌机中打碎,转速6 000 r/min下离心10 min,去除底物,取上清液即为橙子废渣提取物,其pH值为3.8~4.2。将GLDA(Nouryon,中国)稀释至体积浓度1.6%,与橙子废渣提取物按体积比1:1进行配比,制备成复合绿色活化剂。

1.1.3 解磷菌的复活和培养

供试菌株为大肠埃希氏菌,购自中国工业微生物菌种保藏管理中心(CICC),编号CICC10527。

牛肉膏蛋白胨培养基配方:蛋白胨5.0 g,牛肉膏

3.0 g,NaCl 5.0 g,超纯水1 000 mL,pH值7.0~7.2。

按照菌种说明书要求复活菌株,将复活后的菌株划线接种于新鲜的牛肉膏蛋白胨斜面培养基上,于30℃恒温培养箱静置培养24 h后于4℃保存。刮取斜面培养基上的解磷菌并用无菌水制备成 1×10^8 CFU/mL的种子液,按体积比2%接种至液体牛肉膏蛋白胨培养基内,转速150 r/min、温度30℃下培养24 h,即为盆栽实验接种菌液解磷菌。

1.2 实验仪器

主要仪器包括万分之一电子天秤(FA2004,上海舜宇恒平科学仪器有限公司)、台式pH计(PHS-3E,上海仪电科学仪器股份有限公司)、叶绿素仪(TY-4N,郑州腾宇仪器仪表有限公司)、消解炉(KDNX-20,上海雷磁有限公司)、电感耦合等离子体质谱仪(NexION 350,美国PerkinElmer)、气浴恒温振荡器(SHZ-82,上海华邻实业有限公司)等。

1.3 实验方法

盆栽实验设置4种处理方案:空白组(CK),单独添加绿色活化剂(OG),单独添加解磷菌(EC),联合添加解磷菌和活化剂(ECOG);每种处理方案进行5个平行实验,共20个盆栽。将OG按浓度80 mL/kg添加到600 g风干土中混合均匀并置于花盆中。添加蒸馏水使土壤含水率保持在田间持水量的60%~65%,称重记录。将多年生黑麦草种子(长景园林,中国)在1%次氯酸钠溶液中浸泡15 min后置于超纯水中浸泡24 h,每盆均匀撒入大小相同的30粒种子,并用表层土薄薄掩盖。每隔一天,称重盆栽并补充水分。种子发芽后10天,接种一次菌液。每个盆栽对称地设置5个接种点,每个点接种3 mL菌液,接种深度3 cm,接种后一天内停止浇水。黑麦草生长25天后,收集地上部分和地下部分,用于检测各项指标。同时采集土壤样品并检测土壤中镉含量和有效态镉含量。

1.4 样品的测定

用叶绿素仪测定新鲜黑麦草样品叶片中的相对叶绿素含量(SPAD)。用剪刀截取黑麦草地上部分,直尺测量,记为植株高度。将黑麦草地下部分附着的土壤抖落,用超纯水清洗。将黑麦草样品称重即得鲜重,放入烘箱110℃杀青10 min,然后于70℃烘干至恒重,称重即得干重。

采用HCl-HNO₃-HF-HClO₄酸消解法消解黑麦草样品,采用王水(HNO₃:HCl=1:3)消解法消解土壤样品;消解液用超纯水定容,经0.45 μm滤膜过滤,采用电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS)测定镉含量,即为黑麦草中镉和土壤总镉浓度。采用氯化钙浸提法测定土壤中有效态镉浓度。

1.5 数据处理与分析

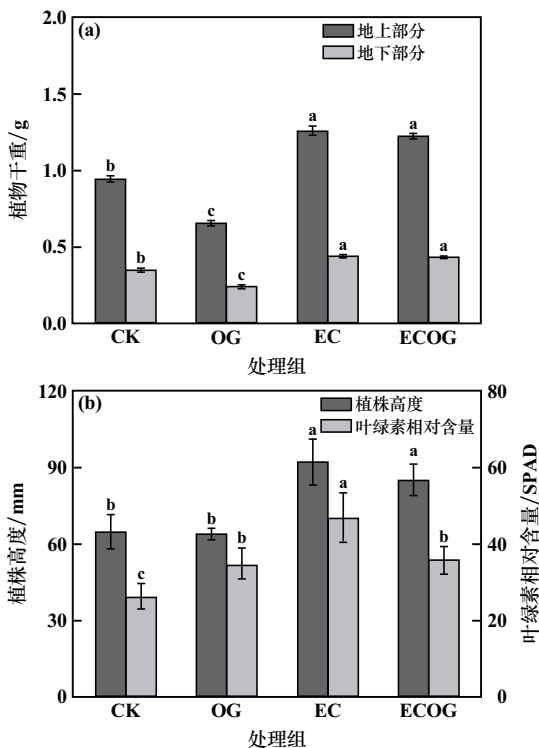
采用 Excel 2020、GraphPad Prism 9.0 对原始数据进行处理、绘图,并使用 SPSS 25.0 软件、采用 LSD 法在 $P<0.05$ 水平上进行显著性差异分析。试验数据均使用平均值±标准差表示。主要指标计算公式如下^[12-14]：

$$\begin{aligned} \text{生物富集系数} &= \text{植物中 Cd 含量} / \text{土壤中 Cd 含量} \\ \text{转运系数} &= \text{地上部分 Cd 含量} / \text{地下部分 Cd 含量} \\ \text{重金属累积量} &= \text{植物内重金属含量} \times \text{生物量} \end{aligned}$$

2 结果与讨论

2.1 解磷菌和绿色活化剂对黑麦草生长的影响

在植物提取技术中,植物的生物量是影响提取效率的重要指标,植株的高度、质量、叶绿素相对含量能直观反映植物的生长情况。图 1 为不同处理方案下黑麦草地上部分和地下部分干重以及植株高度、叶绿素含量变化情况。由图 1 可知,黑麦草地上部分干重降序排列为:EC 组>ECOG 组>CK 组>OG 组,对应的黑麦草地上部分干重分别为 1.27 g、1.23 g、0.95 g 和 0.69 g,OG 组较 CK 组黑麦草干重下降了 27.37%,ECOG 组黑麦草干重是 CK 组的 1.29 倍;黑麦草地下部分的干重变化趋势与地上部分一致;黑麦草植株高度和相对叶绿素含量的变化趋势与干重和鲜重类似,EC 组植株平均高度 92.3 mm,叶绿素相对含量 47.06 SPAD,显著高于



(a) 植物干重; (b) 植株高度及叶绿素相对含量

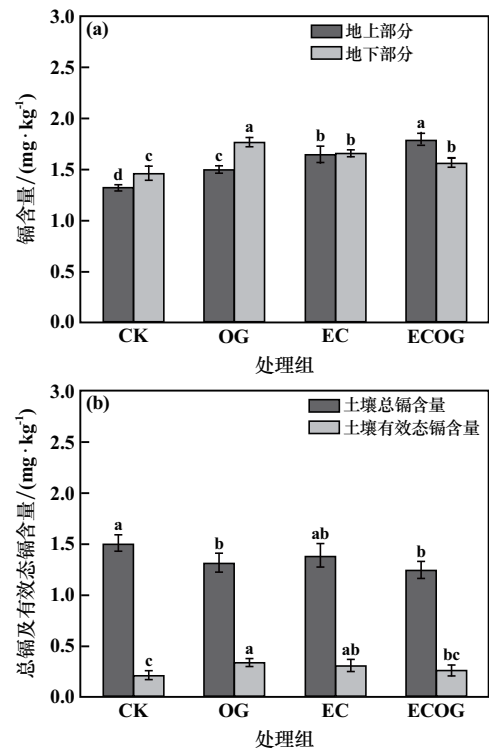
图 1 黑麦草地上和地下部分植物干重、植株高度与叶绿素相对含量变化

其他 3 组,分别是 CK 组的 1.42 倍和 1.78 倍,其次是 ECOG 组,植株平均高度 85.13 mm,叶绿素相对含量 36.14 SPAD,分别是 CK 组的 1.31 倍和 1.37 倍。

解磷菌作为一种植物根际促生菌,可以通过固氮溶磷、分泌植物激素等作用提高植物的抗病能力,促进植物生长,间接提升植物修复重金属的效率^[15]。本研究中,接种了解磷菌的 EC 和 ECOG 组植物生物量明显强于其他处理组,说明解磷菌具有良好的植物促生特性,原因是解磷菌具有良好的溶磷效果,能够将土壤中的难溶性磷溶解为可供植物吸收利用的可溶性磷,促进土壤养分循环。然而,单独添加绿色活化剂的 OG 处理组中,黑麦草生物量最低,且伴随着植物叶片枯萎、坏死等现象,这可能是因为 OG 具有良好的活化效果,土壤中大量的镉被活化,植物根际环境中的镉含量过高,使植物中毒,导致植物生长情况不佳。解磷菌的加入缓解了这一毒害效果,强化了黑麦草在镉胁迫环境下的生长能力,这与文献[16]的研究结果一致。

2.2 解磷菌和绿色活化剂对黑麦草提取镉的影响

考察镉在黑麦草地上部分和地下部分的分布情况有助于进一步研究黑麦草对镉的提取、转运效果。图 2 为不同处理方案下黑麦草中镉含量、土壤总镉及有效态镉含量的变化情况。



(a) 镉含量; (b) 土壤总镉及有效态镉含量

图 2 黑麦草地上和地下部分镉、土壤总镉及有效态镉含量变化

由图 2(a)可见,黑麦草地上部分的镉含量降序排

列为:ECOG组>EC组>OG组>CK组,ECOG组地上部分镉含量1.79 mg/kg,高出CK组35.60%,其次是EC组和OG组,地上部分镉含量分别高出CK组25.08%和13.64%;黑麦草地下部分镉含量变化趋势与地上部分不同,最高的为OG组(镉含量1.77 mg/kg),ECOG、EC和OG组分别为CK组的1.08、1.14和1.21倍。此外,CK、OG组黑麦草地下部分镉含量均高于地上部分,说明这两组的根部对镉的富集能力较强,而ECOG组根部镉含量低于地上部分。由图2(b)可见,土壤总镉含量降序排列为:CK组>EC组>OG组>ECOG组,CK组总镉含量分别是后三组的1.08、1.14和1.20倍。此外,相较于CK组,各组有效态镉含量均有不同程度提升,其中OG组提升幅度最大,ECOG组涨幅略小于其他两组,说明OG、EC和ECOG均对镉有显著的活化作用,且ECOG组镉转化效果更强,大量有效态镉被黑麦草吸收,出现有效态镉含量低于其他两组而植物内镉含量更高的现象。

研究表明,在植物修复技术的强化措施中,有机酸类活化剂可通过降低pH值来增强重金属的迁移性,解磷菌分泌的吡啶乙酸、铁载体等物质在促进植物生长方面起着重要作用^[17-18]。本研究中,一方面解磷菌代谢的低分子量有机酸等物质可通过螯合、酸溶作用活化镉,增加重金属溶解性,这与文献[19]研究结果一致;另一方面,OG原材料中含有大量低分子量有机酸,会增加土壤中正电荷离子的含量,这些离子能比重金属先一步附着于土壤颗粒表面,从而降低土壤对重金属的吸附,同时,低分子量有机酸通过与重金属络合,置换出已经与土壤颗粒结合的重金属,重金属活性得到进一步提升,且GLDA作为可生物降解螯合剂,增强了OG的活化作用^[20-21]。此外,OG处理时根部镉含量最高,这可能是因为大量的镉被活化,富集于黑麦草根部分,且受生物量影响,镉转运至地上部分的速率较慢。而ECOG组中的地上部分镉含量最高,且低于地下部分镉含量,这可能是因为该处理方案下黑麦草拥有较大生物量,能够为镉向植物体内迁移提供良好条件。

2.3 黑麦草的富集系数与转运系数

富集系数是评估植物提取重金属能力的一个重要指标,常用于考察植物对重金属的累积能力,其值越大,植物对重金属的提取能力越强^[22]。转运系数用于表征植物通过根系将地下部分重金属迁移至植物地上部分的能力,转运系数值与植物的转运能力成正比。图3为黑麦草富集系数和转运系数的变化情况。由图3可见,黑麦草地上部分生物富集系数降序排列为:

ECOG组>EC组>OG组>CK组,前三个处理组分别高出CK组35.37%、24.39%和13.41%;OG组地下部分的生物富集系数最高,达到1.1,高出CK组25.00%,ECOG组、EC组比CK组分别高10.23%和17.05%。转运能力最大的是ECOG组,达到1.14,比CK组提升了22.58%,其次是EC组,达到了0.99,最低的为OG组,只有0.85。4个处理组中,只有ECOG组的转运系数大于1,反映出黑麦草对镉具有较强的提取能力,能通过根系将土壤中的镉向植物体内运输。

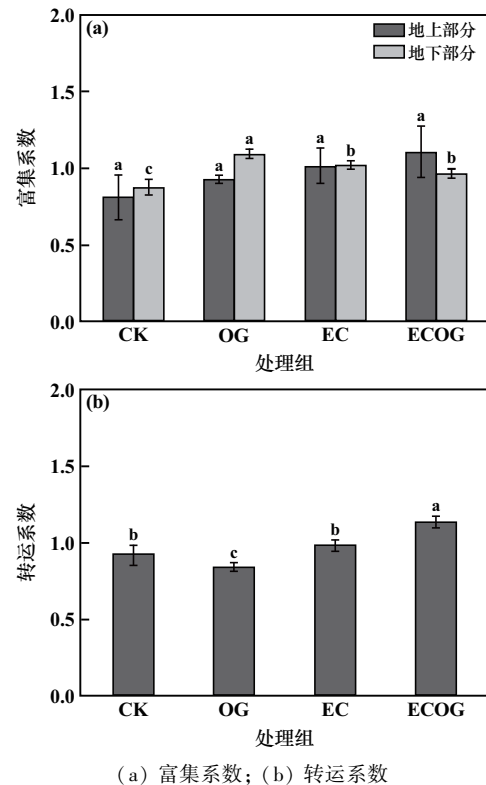


图3 不同处理方案富集系数及转运系数的变化

本研究中,绿色活化剂和解磷菌均能提高黑麦草对镉的富集能力,这可能是因为绿色活化剂施入土壤中时,一方面,活化剂会降低土壤pH值,活化重金属,增强重金属的流动性,增加植物对重金属离子和络合物的吸收;另一方面,活化剂激活了细胞质膜上的ATP酶,使负责重金属转运的离子通道发生变化,从而促进根系吸收^[23]。OG组的地下部分富集量大于地上部分,且转运系数最低,这可能是由于生长在高浓度镉环境下,为减少重金属对地上部分的毒害,黑麦草通过自身抑制作用减少镉向地上部分迁移,从而缓解危害^[24]。此外,与单独使用OG或解磷菌相比,二者联合使用显著促进了镉从根部向地上部分转运,可能是由于解磷菌和绿色活化剂发挥协同作用,除对镉有活化作用外,还对黑麦草有促生效应,使黑麦草生物量变

大,提高其在重金属胁迫环境下的抗逆性,缓解了OG对黑麦草生长的负面作用。另外,OG在活化重金属的同时,还可解磷菌提供生命活动所需要的能量,促进了解磷菌活化重金属和黑麦草生长,而黑麦草拥有的发达根系又能为解磷菌提供良好的生长空间。

2.4 黑麦草中镉的累积总量

采用植物生物量及相应器官、部位中所含重金属的浓度来计算植物对重金属的累积总量,以评估超累积植物提取重金属的能力。黑麦草地上、地下部分累积的镉总量如图4所示。地上部分,对镉累积量最高的为ECOG组,高出CK组87.90%,OG组的镉累积量最低,低于CK组20.97%;地下部分,镉累积量降序排列为:EC组>ECOG组>CK组>OG组,EC组和ECOG组分别高出CK组42.31%和32.69%。结果表明,各处理方案下地上部分的累积量均大于地下部分,这是由于黑麦草的地上部分生物量较大,可以在其体内储存更多的镉,这与黑麦草干重的变化趋势一致。随着OG和解磷菌的加入,地上部分累积镉含量呈上升趋势,表明添加物有利于镉从土壤向黑麦草地上部分迁移,为后续收割植物、实现永久去除土壤内镉提供了良好的技术依据。

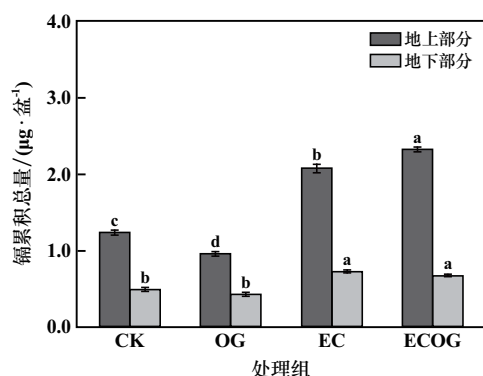


图4 镉累积总量的变化

3 结 论

1) 单独施加OG抑制了黑麦草的生物量、植株高度和叶绿素相对含量,而加入具有促生效果的解磷菌能够缓解OG对黑麦草的负面作用。

2) 单独施加解磷菌或OG增加了黑麦草地上、地下部分镉及土壤中有效态镉的含量,并减少了土壤总镉浓度。

3) 单独施加解磷菌及OG联合解磷菌使用显著增加了黑麦草对镉的转运系数,且二者联用效果显著强于单独施加,更有利于黑麦草提取累积土壤中的镉,强化其修复土壤镉的效率。

参考文献:

- [1] LIU L, LI W, SONG W, et al. Remediation techniques for heavy metal-contaminated soils: Principles and applicability[J]. Science of the Total Environment, 2018,633:206-219.
- [2] 刘 炯. 土壤改良介质对矿区先锋植物富集重金属能力的影响[J]. 矿冶工程, 2018,38(5):122-125.
- [3] LI G, WANG Z, LV Y, et al. Effect of culturing ryegrass (Lolium perenne L.) on Cd and pyrene removal and bacteria variations in co-contaminated soil[J]. Environmental Technology & Innovation, 2021, 24:101963.
- [4] QIAO D, LU H, ZHANG X. Change in phytoextraction of Cd by rapeseed (Brassica napus L.) with application rate of organic acids and the impact of Cd migration from bulk soil to the rhizosphere[J]. Environmental Pollution, 2020,267:115452.
- [5] LI F L, QIU Y, XU X, et al. EDTA-enhanced phytoremediation of heavy metals from sludge soil by Italian ryegrass (Lolium perenne L.) [J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2020,191:110185.
- [6] 方治国,谢俊婷,杨 青,等. 低分子有机酸强化植物修复重金属污染土壤的作用与机制[J]. 环境科学, 2022,43(10):4669-4678.
- [7] LUO J, LIANG J, SONG Y, et al. Compounded chelating agent derived from fruit residue extracts effectively enhances Cd phytoextraction by sedum alfredii [J]. Soil Ecology Letters, 2021,3(3):253-265.
- [8] NING Y, LIU N, SONG Y, et al. Enhancement of phytoextraction of Pb by compounded activation agent derived from fruit residue[J]. International Journal of Phytoremediation, 2019,21(14):1449-1456.
- [9] QIN S, ZHANG H, HE Y, et al. Improving radish phosphorus utilization efficiency and inhibiting Cd and Pb uptake by using heavy metal-immobilizing and phosphate-solubilizing bacteria [J]. Science of the Total Environment, 2023,868:161685.
- [10] De Andrade Silva C A, Da Silva P G P, Da Silva G F A, et al. Bio-transformation of fruit residues via solid state bioprocess using Lichtheimia ramosa [J]. SN Applied Sciences, 2020(2):861.
- [11] 鲍士旦,秦怀英,劳家桢. 土壤农化分析[M]. 北京:中国农业出版社, 1988.
- [12] ZHAO R, HUANG L, PENG X, et al. Effect of different amounts of fruit peel-based activator combined with phosphate-solubilizing bacteria on enhancing phytoextraction of Cd from farmland soil by ryegrass [J]. Environmental Pollution, 2022,316:120602.
- [13] ZHANG Y, LUO X J, MO L, et al. Bioaccumulation and translocation of polyhalogenated compounds in rice (Oryza sativa L.) planted in paddy soil collected from an electronic waste recycling site, South China [J]. Chemosphere, 2015,137:25-32.
- [14] Brady K U, Kruckeberg A R, Jr H. Evolutionary ecology of plant adaptation to serpentine soils [J]. Annual Review of Ecology Evolution & Systematics, 2005,36(1):243-266.
- [15] HE H, YE Z, YANG D, et al. Characterization of endophytic rhizobium sp. JN6 from polygonum pubescens and its potential in promoting growth and Cd, Pb, Zn uptake by brassica napus [J]. Chemosphere, 2013,90(6):1960-1965.

(下转第104页)

- [2] Fisher H. Cobalt market report 2021 [R]. London: Commodity Research Unit, 2022.
- [3] 马文军,程晋阳. 低品位红土镍矿资源开发趋势:“资源+能源+材料”一体化模式[J]. 中国有色冶金, 2019,48(3):75-78.
- [4] 张振芳,陈秀法,李仰春,等. “双碳”目标下镍资源的综合利用发展趋势[J]. 矿产综合利用, 2022(2):31-39.
- [5] Vahed A, Mackey P J, Warner A E M. A review of nickel pyrometallurgy over the past 50 years with special reference to the former Inco Ltd and Falconbridge Ltd [C]//The 5th International Symposium on Nickel and Cobalt. Springer International Publishing, 2021:41-62.
- [6] Crundwell F, Moats M, Ramachandran V, et al. Extractive metallurgy of nickel, cobalt and platinum group metals [M]. Elsevier, 2011.
- [7] 饶明军. 红土镍矿选择性还原/硫化制备粗镍铁的基础与新工艺研究 [D]. 长沙:中南大学, 2014.
- [8] RAO M J, CHEN J, ZHANG T, et al. Atmospheric acid leaching of powdery Ni-Co-Fe alloy derived from reductive roasting of limonitic laterite ore and recovery of battery grade iron phosphate [J]. Hydro-metallurgy, 2023,218:106058.
- [9] JIANG M, SUN T, LIU Z, et al. Mechanism of sodium sulfate in promoting selective reduction of nickel laterite ore during reduction roasting process [J]. International Journal of Mineral Processing, 2013, 123:32-38.
- [10] LI G H, RAO M J, JIANG T, et al. Innovative process for preparing ferronickel materials from laterite ore by reduction roasting-magnetic separation [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2011,21(12): 3137-3142.
- [11] ZHOU X J, TAN F, CHEN Y L, et al. Thermodynamic analysis of Na-S-Fe-H₂O system for Bayer process [J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2022,32(6):2046-2060.
- [12] LI X, FEI N, JIE T, et al. Removal of S²⁻ ion from sodium aluminate solutions with sodium ferrite [J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2016,26(5):1419-1424.
- [13] Taylor P, Shoesmith D W. The nature of green alkaline iron sulfide solutions and the preparation of sodium iron (III) sulfide, NaFeS₂ [J]. Canadian Journal of Chemistry, 1978,56(22):2797-2802.
- [14] RAO M J, LI G H, ZHANG X, et al. Reductive roasting of nickel laterite ore with sodium sulfate for Fe-Ni production. Part I: Reduction/sulfidation characteristics [J]. Separation Science and Technology, 2016,51(8):1408-1420.
- [15] German R M, Suri P, Park S J. Liquid phase sintering [J]. Journal of Materials Science, 2009,44:1-39.
- [16] 毛瑞,张建良,刘征建,等. 红土镍矿软熔性能及还原过程研究 [J]. 矿冶工程, 2013,33(6):57-61.

引用本文:肖仁栋,陈靖,胡美世,等. NaFeS₂ 强化褐铁矿型红土镍矿固态还原富集镍钴的研究 [J]. 矿冶工程, 2024,44(1):100-104.

(上接第99页)

- [16] Hadi S, Fauzi A, Widiyati I, et al. The role of phosphate solubilizing bacteria from Rhizosphere of upland rice in the growth and yield of upland rice on ultisol soil [C]//IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. IOP Publishing, 2021,653(1): 012110.
- [17] WANG K, LIU Y, SONG Z, et al. Chelator complexes enhanced *Amaranthus hypochondriacus* L. phytoremediation efficiency in Cd-contaminated soils [J]. Chemosphere, 2019,237:124480.
- [18] Jeong S, Moon H S, Shin D, et al. Survival of introduced phosphate-solubilizing bacteria (PSB) and their impact on microbial community structure during the phytoextraction of Cd-contaminated soil [J]. Journal of Hazardous Materials, 2013,263:441-449.
- [19] CHEN L, LUO S, LI X, et al. Interaction of Cd-hyperaccumulator *Solanum nigrum* L. and functional endophyte *Pseudomonas* sp. Lk9 on soil heavy metals uptake [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2014,68:300-308.
- [20] DING Y, SONG Z, FENG R, et al. Interaction of organic acids and pH on multi-heavy metal extraction from alkaline and acid mine soils [J]. International Journal of Environmental Science and Technology, 2014,11:33-42.
- [21] ZENG F, ALI S, ZHANG H, et al. The influence of pH and organic matter content in paddy soil on heavy metal availability and their uptake by rice plants [J]. Environmental Pollution, 2011,159(1):84-91.
- [22] 韦春媛,严青. 金盏菊和龙葵对土壤中镉的耐受性和富集特征研究 [J]. 矿冶工程, 2022,42(3):108-111.
- [23] 李晓宝,董焕焕,任丽霞,等. 螯合剂修复重金属污染土壤联合技术研究进展 [J]. 环境科学研究, 2019,32(12):1993-2000.
- [24] 张之浩,李威. 活性炭联合植物修复对水中铬的去除效果 [J]. 矿冶工程, 2021,41(4):113-116.

引用本文:彭鑫,朱逸纯,杨远,等. 解磷菌联合绿色活化剂对黑麦草累积土壤中镉的影响 [J]. 矿冶工程, 2024,44(1):95-99.