

不同氮肥形态对李氏禾铬富集能力的影响

陈诗奇, 刘杰, 蒋旭升, 韩庆坤, 王路洋

引用本文:

陈诗奇, 刘杰, 蒋旭升, 韩庆坤, 王路洋. 不同氮肥形态对李氏禾铬富集能力的影响[J]. [农业环境科学学报](#), 2024, 43(6): 1250-1259.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11654/jaes.2023-0813>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

[不同品种硫肥对苋菜镉累积的影响](#)

邹茸, 王秀斌, 迟克宇, 霍文敏, 王丽, 范洪黎

[农业环境科学学报](#). 2018, 37(10): 2135-2141 <https://doi.org/10.11654/jaes.2018-0164>

[磷灰石、石灰对Cd胁迫下黑麦草根形态及Cd吸收影响研究](#)

杜志敏, 向凌云, 杜凯敏, 杨文玲, 王继雯, 雷高, 郭雪白, 郭亮, 周静, 巩涛, 陈国参, 甄静

[农业环境科学学报](#). 2021, 40(1): 92-101 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0376>

[玉米根系、根鞘性状与镉吸收的品种差异研究](#)

于子昊, 李胜宝, 赵晓玲, 李明锐, 李博, 何永美, 陈建军, 湛方栋

[农业环境科学学报](#). 2021, 40(4): 747-755 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0733>

[光合细菌和生物炭对污染土壤中铬的稳定化效果及小白菜生长的影响](#)

任晓斌, 白红娟, 卫燕红, 马瑞, 贾万利, 杨官娥

[农业环境科学学报](#). 2021, 40(10): 2141-2149 <https://doi.org/10.11654/jaes.2021-0162>

[外源硒对萘胁迫下车前草生长及土壤修复能力的影响](#)

朱灿, 刘慧刚, 顾彦, 席颖, 任东, 黄应平

[农业环境科学学报](#). 2019, 38(11): 2511-2519 <https://doi.org/10.11654/jaes.2019-0431>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

陈诗奇, 刘杰, 蒋旭升, 等. 不同氮肥形态对李氏禾铬富集能力的影响[J]. 农业环境科学学报, 2024, 43(6): 1250-1259.

CHEN S Q, LIU J, JIANG X S, et al. Effects of nitrogen fertilizer forms on growth and chromium accumulation of *Leersia hexandra* Swartz [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2024, 43(6): 1250-1259.



开放科学 OSID

不同氮肥形态对李氏禾铬富集能力的影响

陈诗奇, 刘杰*, 蒋旭升, 韩庆坤, 王路洋

(桂林理工大学环境污染控制理论与技术广西重点实验室, 广西 桂林 541004)

摘要: 为了优化李氏禾(*Leersia hexandra* Swartz)铬修复时的施氮效率, 通过盆栽试验, 研究了5种氮肥形态(硝酸钙、尿素、氯化铵、硝酸铵、硫酸铵)对李氏禾铬修复性能、生长指标和根系指标的影响。结果表明: 与对照(不施氮肥)相比, 施加的5种形态氮肥均促进了李氏禾生长, 提高了根系活力, 改变了根系形态特征, 有利于提高李氏禾铬含量、铬累积量、富集系数和土壤铬去除率。施加硫酸铵的李氏禾生物量和根平均直径最大, 分别为对照的5.54倍和1.51倍, 其根系活力比对照增加108%; 施加硝酸铵的李氏禾总根表面积和总根体积最大, 分别为对照的2.17倍和1.99倍($P < 0.05$)。相关性分析结果表明, 李氏禾的生物量、根平均直径、总根表面积、总根体积和根系活力均与土壤铬修复效率有关。其中, 施加硫酸铵处理的富集系数和土壤铬去除率最高, 分别为对照的1.45倍和5.56倍。研究表明, 施加硫酸铵比其他氮肥形态更有利于提高李氏禾铬污染土壤修复效率。

关键词: 氮肥形态; 铬污染; 李氏禾; 根系特征; 修复效率

中图分类号: S451; X53; X173

文献标志码: A

文章编号: 1672-2043(2024)06-1250-10

doi:10.11654/jaes.2023-0813

Effects of nitrogen fertilizer forms on growth and chromium accumulation of *Leersia hexandra* Swartz

CHEN Shiqi, LIU Jie*, JIANG Xusheng, HAN Qingkun, WANG Luyang

(Guangxi Key Laboratory of Environmental Pollution Control Theory and Technology, Guilin University of Technology, Guilin 541004, China)

Abstract: In order to optimize the nitrogen application efficiency of *Leersia hexandra* Swartz in soil chromium (Cr) remediation, the effects of five nitrogen fertilizer forms (calcium nitrate, urea, ammonium chloride, ammonium nitrate and ammonium sulfate) on Cr remediation efficiency, growth index, and root index of *L. hexandra* were assessed in pot experiments. The results showed that, compared with the control, the five nitrogen fertilizer forms promoted the growth and the root activity of *L. hexandra* and changed its root morphological characteristics; these changes improved Cr content, rate of Cr accumulation, bioconcentration factor (BCF), and the soil Cr removal rate of itself. The biomass and average root diameter of *L. hexandra* were greatest under ammonium sulfate treatment, with values 5.54 times and 1.51 times of the control, respectively, and the root activity increased by 108% compared with the control. The total root surface area and total root volume were greatest under ammonium nitrate, with values that were 2.17 times and 1.99 times of the control, respectively ($P < 0.05$). The results of correlation analysis showed that the biomass, average root diameter, total root surface area, total root volume, and root activity of *L. hexandra* were related to the efficiency of soil Cr remediation. Among these factors, the BCF and soil Cr removal rate were highest under ammonium sulfate treatment, with values that were 1.45 times and 5.56 times of the control, respectively. Therefore, the application of ammonium sulfate is more conducive to improve the remediation efficiency of Cr-contaminated soil than other forms of nitrogen fertilizer.

Keywords: nitrogen fertilizer forms; Cr pollution; *Leersia hexandra* Swartz; root characteristics; remediation efficiency

收稿日期: 2023-10-09 录用日期: 2023-11-27

作者简介: 陈诗奇(1998—), 女, 福建漳州人, 硕士研究生, 主要从事污染土壤植物修复研究。E-mail: chenshiqi0807@163.com

*通信作者: 刘杰 E-mail: liujie@glut.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金项目(32271700); 广西自然科学基金重点项目(2020GXNSFDA297018)

Project supported: National Natural Science Foundation of China (32271700); Key Program of the Natural Science Foundation of Guangxi, China (2020GXNSFDA297018)

铬作为被广泛使用的工业原料,在工业生产过程中会被排放到环境中,对环境造成污染^[1],同时其可以通过食物链在人体中累积,对身体健康产生有害影响^[2],所以土壤铬污染一直是人们关注的热点环境问题之一^[3]。植物修复作为土壤修复的一种有效且低成本技术,植物生物量和土壤中重金属的生物利用度是影响植物修复效率的关键因素^[4]。李氏禾(*Leersia hexandra* Swartz)是中国境内首次发现的铬超富集植物^[5],为多年生植物,能多次刈割,具有生物量大、生长迅速等特点,是修复土壤铬污染的一种理想植物。

氮作为植物生长的必需营养元素,施加氮肥能提高植物的叶绿素含量,促进植物生物量积累^[6-7]。而且植物生长发育受植物激素调控^[8],施加氮肥可能会影响植物体内的植物激素含量,从而对植物生长产生影响^[9-10]。在植物修复技术中,植物生物量的大小对植物重金属累积量有直接影响^[11]。近年来,有研究表明,不同氮肥形态对超富集植物东南景天的生物量影响不同,进而影响其对重金属的累积量^[12-13]。同时,不同形态氮肥会在土壤中发生不同反应,对土壤pH值的影响不同。土壤中重金属迁移转化受土壤pH值影响,而土壤重金属迁移转化可能改变土壤重金属赋存形态占比,从而影响植物吸收效率^[14-15]。此外,有研究发现,合理地施加氮肥能显著提高植物根系活力^[16-18],且不同氮肥形态会对植物根系形态产生不同影响,如铵态氮能促进植物的根直径增加^[19],而硝态氮能促进植物侧根发育,从而增加植物根长^[20]。植物根系是植物吸收重金属的重要器官^[21],有研究发现植物重金属含量与植物的总根长、根表面积、根体积呈正相关^[22],所以根系形态的变化可能会影响植物对重金属的吸收,从而影响重金属在植物组织中的累积^[23-24]。而植物根系活性会受重金属抑制,植物根系活性的降低会影响根系发育^[25]。所以在铬污染土壤中研究施加不同形态氮肥对李氏禾根系形态与根系活力的影响,对李氏禾铬吸收机理具有重要意义。

本试验在张学洪等^[26]的研究基础上,在铬污染土壤中,以超富集植物李氏禾作为研究对象,增加酰胺态氮及氯化铵,对施氮条件进行优化,施加 $0.02 \text{ mol} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的不同形态的氮肥。通过对李氏禾的生物量、根系形态特征、铬含量和土壤铬含量等进行分析,探究施加不同形态氮肥对李氏禾富集能力的影响,以期阐明氮肥对强化李氏禾铬修复机制,为铬污染土壤场地应用提供理论参考。

1 材料与方法

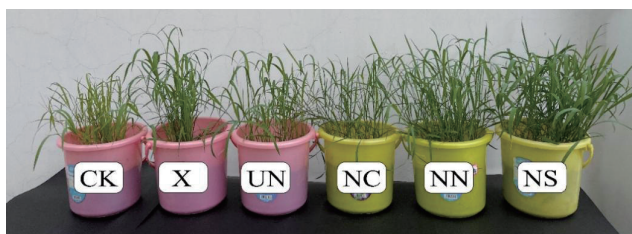
1.1 试验材料

李氏禾幼苗采自于广西壮族自治区桂林市荔浦市某矿区,对采回来的李氏禾幼苗进行挑选修剪后,于温室下用20%的Hoagland营养液于2.5 L塑料桶中进行预培养7 d,使其长出根。

供试土壤选用桂林市雁山区桂林理工大学校园土,土壤在阴凉处自然风干后,挑去其中的杂质、树根和落叶等,将所取土样研磨,充分混匀后过10目筛。土壤基本理化性质:pH 4.97,有机质 $50.1 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,铵态氮 $16.0 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,速效磷 $49.1 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,速效钾 $144 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,总铬含量 $66.4 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。以溶液形式添加 $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ 配制铬污染土,平衡3周后测定土壤总铬含量为 $315.1 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

1.2 盆栽试验

称取2 kg供试土壤装入规格为2.5 L(高21 cm,直径19 cm)的塑料桶中,选取生长一致的李氏禾移入盆内,每盆20株。试验共设6个处理,每个处理3次重复。6个处理分别为:硝酸钙(X)、尿素(UN)、氯化铵(NC)、硝酸铵(NN)、硫酸铵(NS)5种氮肥处理组和对照处理组(CK,不施加氮肥)。施加氮肥量为 $0.02 \text{ mol} \cdot \text{kg}^{-1}$,处理60 d后收获植物,盆栽收样时不同处理的李氏禾如图1所示。



CK:不施加氮肥;X:硝酸钙;UN:尿素;NC:氯化铵;NN:硝酸铵;
NS:硫酸铵(拍摄者:陈诗奇 时间:2023-08-05
地点:桂林理工大学雁山校区)

CK: no nitrogen fertilizer; X: calcium nitrate; UN: urea; NC: ammonium chloride; NN: ammonium nitrate; NS: ammonium sulfate

图1 李氏禾盆栽试验

Figure 1 Pot experiment of *L. hexandra*

1.3 植物及土壤样品的采集、处理及测定方法

1.3.1 李氏禾生长指标及铬含量的测定

李氏禾种植60 d收获,在收样前测量株高和叶绿素含量。用直尺从盆栽李氏禾根部测量至李氏禾最高处作为株高;采用95%乙醇提取-分光光度法^[27]测定叶绿素含量。收获后的李氏禾用自来水洗净后,再用去离子水润洗3次,将清洗后的李氏禾分成根部和

地上部待用。将洗净的李氏禾擦干放进信封置于烘箱中105℃杀青30 min后,75℃烘干至恒质量。将根、茎、叶分开用电子天平测其干质量。

称取烘干磨碎的李氏禾样品0.2 g,用HNO₃-H₂O₂消解,消解后的李氏禾采用电感耦合等离子体发射光谱仪(PerkinElmer Optima 7000 DV)测定铬含量^[28],并采用国家一级标准物质(GBW07603,灌木枝叶)进行质量控制,加标回收率为90.0%~102.5%。

1.3.2 李氏禾根系活力的测定

采用2,3,5-氯化三苯基四氮唑(TTC)法测定根系活力^[27]。称取新鲜的李氏禾根系0.2 g完全浸没于1% TTC溶液和等量0.1 mol·L⁻¹磷酸缓冲液混合液中,37℃避光孵育1~3 h后加入2 mL硫酸(1 mol·L⁻¹)以终止反应。将根系取出,擦干水分后与3~5 mL乙酸乙酯一起放在研钵内研碎,以提取出三苯基甲脒(TTF)。把红色浸提液过滤到10 mL容量瓶,用乙酸乙酯定容,在波长485 nm下测定吸光度。通过TTF标准曲线计算样品的TTF含量,即为李氏禾根系活力(TTF mg·g⁻¹·h⁻¹)。

TTC根系活力=C/(t×m×1 000)

式中:C为根据标准曲线查得的样品提取液TTF含量,μg;t为反应时间,h;m为样品质量,g。

1.3.3 李氏禾的根系形态测定

李氏禾收获后,将洗净的根部剪下,用直尺测量根部长度,然后将根放进有去离子水的塑封袋中。将李氏禾根系平铺在根系扫描系统(万深LA-S植物根系分析系统)的树脂平板上进行扫描,用镊子将重叠的部分分开。测定的根系形态包括根平均直径、总根表面积、总根长和总根体积。

1.3.4 李氏禾的植物激素测定

采用固相萃取(SPE)和高效液相色谱串联质谱(LC-MS/MS)对6种植物激素[顺式玉米素核苷-O-糖苷(cZROG)、异戊烯腺嘌呤-7-葡糖苷(iP7G)、2-甲硫基顺式玉米素核苷(2MeScZR)、N6-异戊烯腺嘌呤(IP)、异戊烯腺嘌呤-9-葡糖苷(iP9G)和反式-玉米素-9-B-葡萄糖苷(tZOG)]进行分析和测定^[29]。将称质量后的样品研磨后放入10 mL离心管中,加入5 mL提取液(甲醇:水:甲酸=15:4:1,含0.5%二丁基羟基甲苯)漩涡混合1 min、超声振荡30 min,于-40℃下静置60 min。固相萃取:(1)活化,用3 mL水和3 mL甲醇洗涤萃取柱。(2)吸附,将上清液注入柱中,流速应小于1 mL·min⁻¹。(3)淋洗,用3 mL水和10%的甲醇清洗色谱柱。(4)洗脱,1 mL甲醇。洗脱液用蒸发浓

缩器干燥,然后加入200 μL 80% 甲醇复溶,再次旋转离心(12 000 r·min⁻¹,10 min)。最后用LC-MS/MS分析上清液。

标准品购自源叶生物科技有限公司。准确取标准溶液(2.5 μg·mL⁻¹)0.20 mL,用80%的甲醇定容至1 mL配制成浓度为500 ng·mL⁻¹的标准溶液,再用80%的甲醇稀释成标准系列溶液。根据不同浓度及相应浓度下标品的峰面积绘制出标准曲线。

仪器:液相色谱 Waters Acquity UPLC,质谱 AB SCIEX 5500 Qtrap-MS。

色谱柱:Acquity UPLC HSS T3(1.8 μm,2.1 mm×100 mm)。

1.3.5 土壤理化性质测定

土壤pH值采用水土比2.5:1(V/m)提取,pH计测定^[30];有机质用重铬酸钾加热法测定^[31];铵态氮用氯化钾浸提,流动注射分析仪(荷兰SKALAR SAN++)测定^[30];速效磷用碳酸氢钠-分光光度法测定^[32];速效钾用乙酸铵浸提法测定^[32]。

1.3.6 土壤铬含量和铬形态的测定

土壤总铬含量测定采用HNO₃-H₂O₂消解法,土壤铬质量控制用国家一级标准物质(GBW07404,土壤),加标回收率为89.8%~101.0%。施肥种植后的土壤铬赋存形态采用BCR四步连续提取法^[33]测定。消解和提取后的铬含量用电感耦合等离子体发射光谱仪(PerkinElmer Optima 7000 DV)测定。

1.4 数据处理与统计分析方法

富集系数(BCF)=李氏禾地上部铬含量(mg·kg⁻¹)/土壤总铬含量(mg·kg⁻¹)^[34]

修复效率(土壤铬去除率)=(修复前土壤总铬含量-修复后土壤总铬含量)/修复前土壤总铬含量×100%^[34]

使用Microsoft Excel 2019和SPSS 26对数据进行处理和统计学分析。植物生长指标及修复效率采用单因素方差分析(ANOVA),通过最小显著差数法(LSD)进行显著性检验(P<0.05)。植物激素含量采用t检验(Student's t-test)分析显著差异性。使用Origin 2021绘制柱状图,使用R4.1.3中R包“Heatmap”进行相关性分析并绘制热图。

2 结果与分析

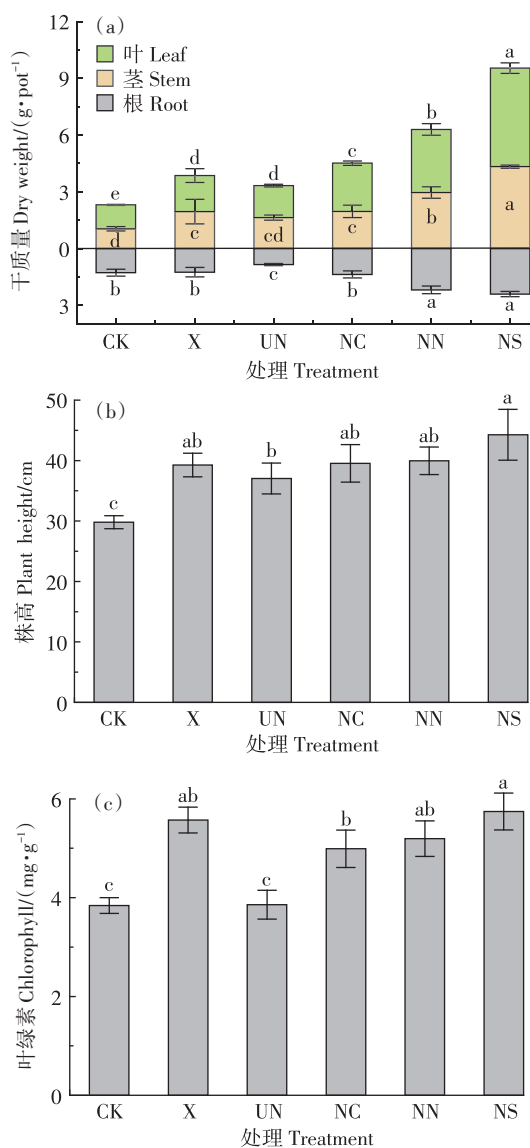
2.1 施加不同形态氮肥对李氏禾生长的影响

如图2(a)所示,施加不同形态氮肥对李氏禾各部位生物量均有显著性提高,其中施加硫酸铵的李氏

禾生物量最大,相比于对照,地上部生物量增加了1.98倍、根部干质量增加了88.3% ($P < 0.05$)。如图2(b)所示,施加不同形态氮肥后李氏禾株高均有显著增长。图2(c)为施加不同形态氮肥对李氏禾叶绿素含量的影响,除了施加尿素外,施加其他形态氮肥的李氏禾的叶绿素含量比对照增加35%~50%,说明施加氮肥有利于提高叶绿素含量,促进李氏禾生长。

2.2 施加不同形态氮肥对李氏禾根系特征的影响

施加不同形态氮肥对李氏禾的根系特征影响不同。由图3(a)可以看出,施加氮肥对李氏禾根系伸



不同字母表示不同处理间存在显著差异 ($P < 0.05$, $n=3$)。下同。
Different letters represent significant differences between averages of different treatment groups ($P < 0.05$, $n=3$). The same below.

图2 施加不同形态氮肥对李氏禾生长的影响

Figure 2 Effects of different nitrogen fertilizer forms on growth of *L. hexandra*

长均有促进作用,根长增长的大小顺序为尿素>硝酸铵>硫酸铵>硝酸钙>氯化铵>对照。如图3(b)所示,施加硝酸钙和硝酸铵的总根长有显著增加,分别比对照增加22.0%和59.4%,根据根系扫描图显示,应该是侧根发育比较多,从而使总根长有显著增加。如图3(c)和图3(d)所示,施加不同形态氮肥后,硝酸铵处理李氏禾总根表面积和总根体积增长最显著,总根表面积为对照的2.15倍,总根体积比对照增长99.5%。如图3(e)所示,施加不同形态氮肥有利于李氏禾根平均直径增大,其中施加硫酸铵比对照增长50%。如图3(f)所示,与对照相比,除了施加氯化铵外,施加其他形态氮肥的李氏禾根系活力均有提高,其中施加硫酸铵的李氏禾根系活力最高,比对照增加1.08倍。

2.3 施加硫酸铵和尿素对李氏禾叶片植物激素的影响

选取施加不同形态氮肥后生物量相差最大的硫酸铵和尿素处理,来测定李氏禾叶片中的植物激素。图4为测定的6种植物激素的结果,其中硫酸铵的cZROG和iP7G高于尿素,且cZROG存在显著差异,硫酸铵的IP、iP9G、tZOG均显著低于尿素,而两种氮肥的2MeScZR无显著差异。综上推测,cZROG和iP7G可能是调控李氏禾生长的关键植物激素,导致施加硫酸铵与尿素之间的李氏禾生物量差异显著。

2.4 施加不同形态氮肥对土壤铬含量和形态及土壤pH的影响

施加不同形态氮肥种植李氏禾60 d后的土壤铬含量如图5(a)所示,与对照相比,施加氮肥种植李氏禾后的土壤铬含量均有所降低。图5(b)为种植后土壤铬赋存形态占比变化,与对照相比,土壤铬弱酸提取态、可还原态和可氧化态占比有所下降,土壤铬残渣态占比较高。如图5(c)所示,与对照相比,施加硝酸钙、氯化铵、硝酸铵、硫酸铵的土壤pH值均有所下降,只有施加尿素的土壤pH值显著上升,与对照相比增长10.0%。

2.5 施加不同形态氮肥对李氏禾铬修复效率的影响

李氏禾铬含量如图6(a)所示,与对照相比,施加硝酸钙、尿素、硝酸铵、硫酸铵的李氏禾叶铬含量和根铬含量均有显著增加,地上部铬含量分别比对照组增加10.3%、23.4%、18.7%、36.8%,说明施加氮肥有利于提高李氏禾对铬的吸收。图6(b)为李氏禾铬累积量,施加不同形态氮肥有利于提高李氏禾铬累积量,其中,施加硫酸铵的李氏禾铬累积量最高,地上部和根铬累积量分别达到 $941.4 \mu\text{g} \cdot \text{pot}^{-1}$ 和 $1\ 239.3 \mu\text{g} \cdot \text{pot}^{-1}$ 。施加不同形态氮肥对李氏禾BCF均存在显著

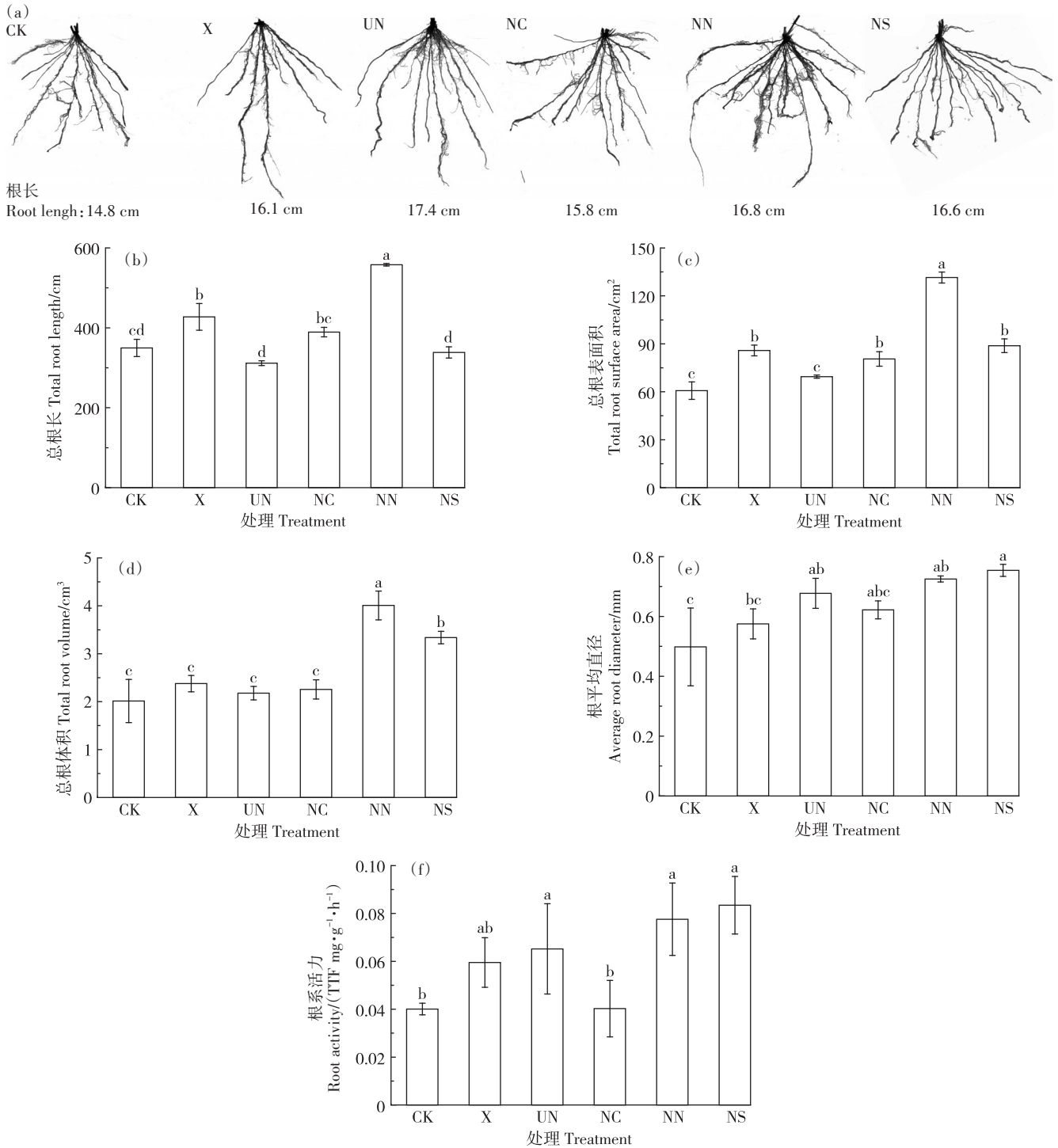


图3 施加不同形态氮肥对李氏禾根系指标的影响

Figure 3 Effects of different nitrogen forms on root index of *L. hexandra*

性影响,如图6(c)所示,与对照相比,氯化铵的BCF降低10.2%,硝酸钙、尿素、硝酸铵、硫酸铵分别增加了16.6%、27.2%、22.2%、46.2%。土壤中铬的去除率如图6(d)所示,施加氮肥的李氏禾的土壤铬去除率均有显著性提高,为对照组的3.23~5.56倍。

2.6 李氏禾生理机制和土壤参数与李氏禾铬修复效率的相关性

采用Pearson相关分析评估各参数对李氏禾铬修复效率的影响,结果如图7所示。土壤铬弱酸提取态、可还原态、可氧化态和土壤总铬含量均与土壤铬

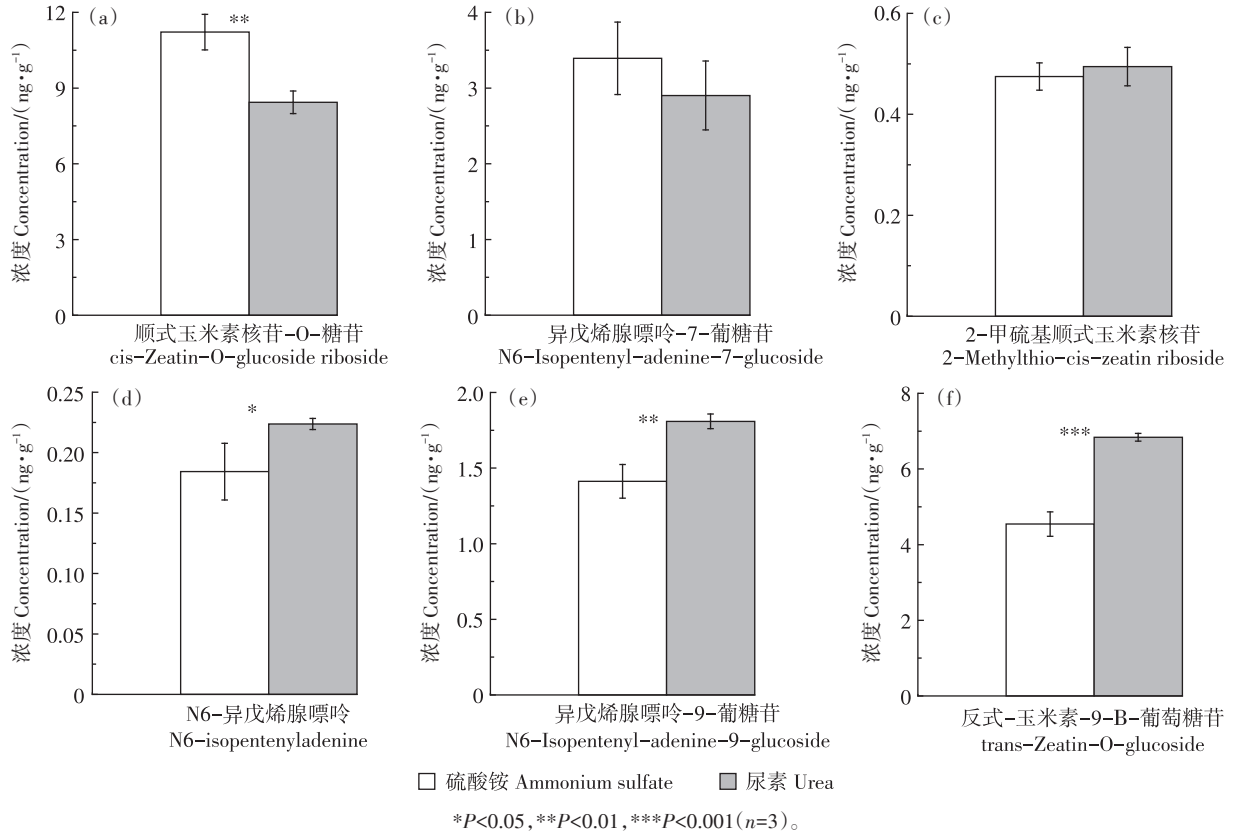


图4 施加硫酸铵和尿素对李氏禾叶片植物激素的影响

Figure 4 Effects of ammonium sulfate and urea on plant hormones in leaves of *L. hexandra*

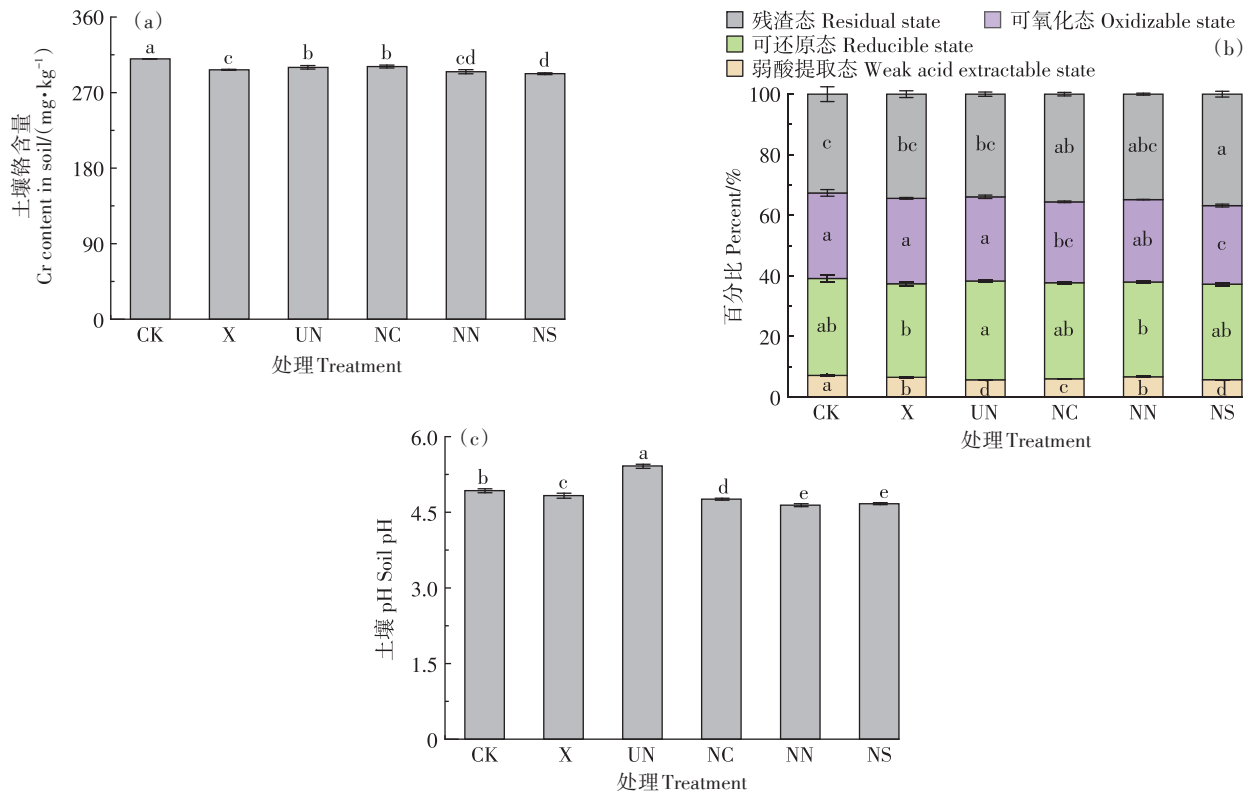


图5 施加不同形态氮肥对土壤铬含量和形态及pH的影响

Figure 5 Effects of different nitrogen fertilizer forms on Cr content and forms and pH in soil

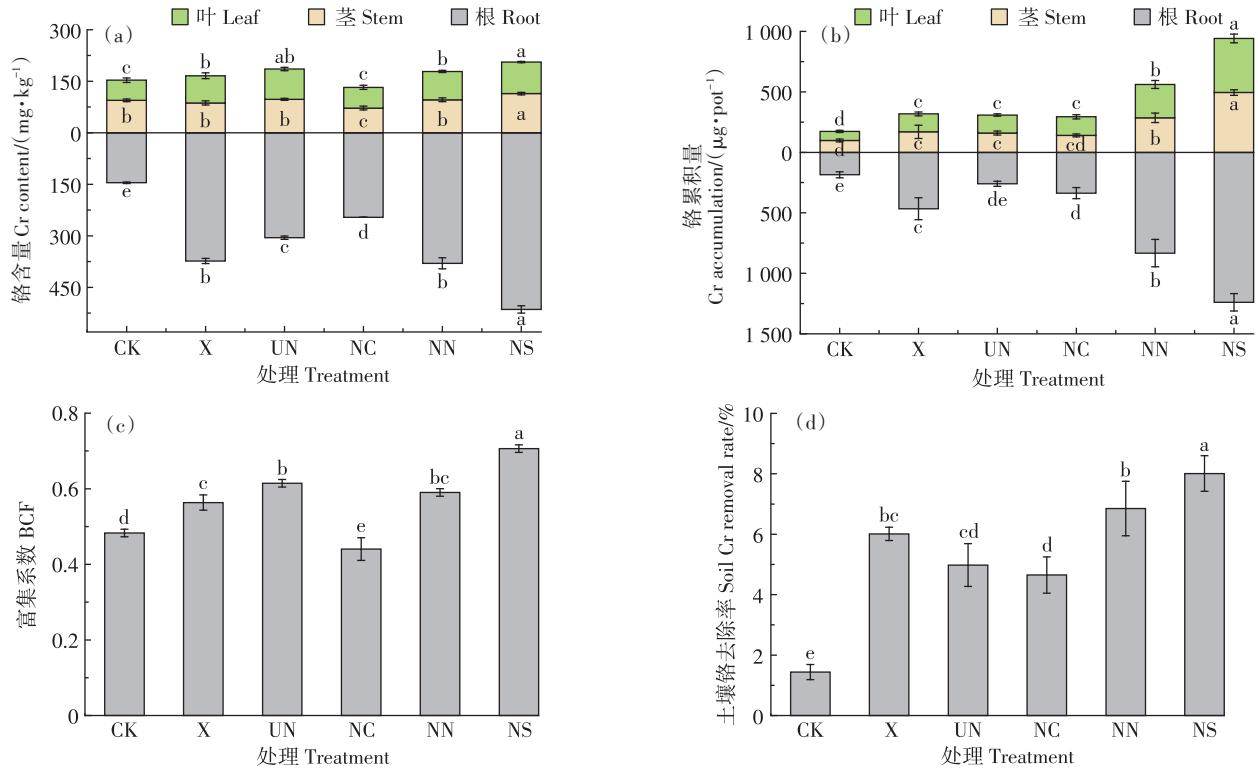


图6 施加不同形态氮肥对李氏禾铬修复效率的影响

Figure 6 Effects of different nitrogen fertilizer forms on Cr remediation of *L. hexandra*

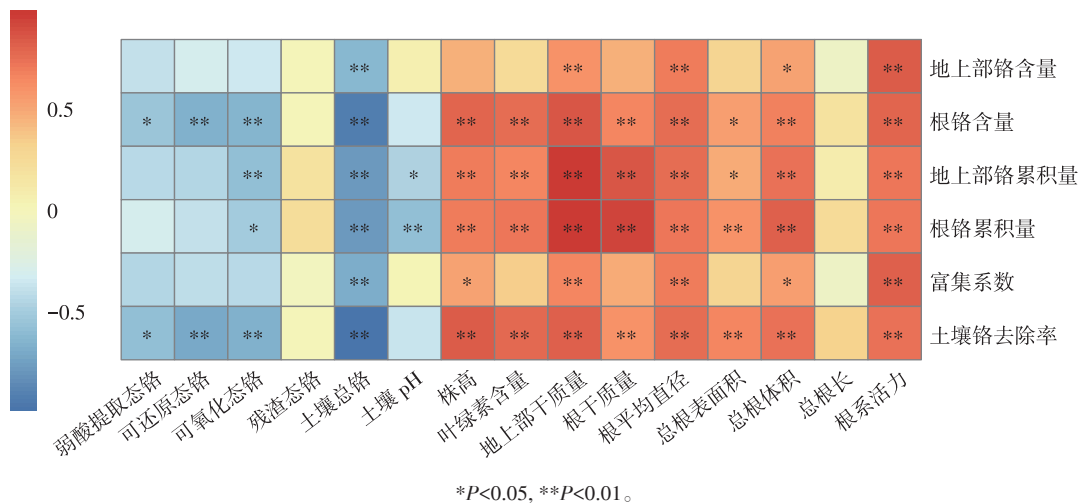


图7 李氏禾铬修复效率与植物参数和土壤参数的相关性

Figure 7 Correlation of Cr remediation efficiency of *L. hexandra* with plant parameters and soil parameters

去除率存在显著负相关。李氏禾株高、叶绿素含量、地上部干质量、根干质量、根平均直径、总根表面积、总根体积、根系活力均与根铬含量、地上部铬累积量、根铬累积量、土壤铬去除率存在显著正相关,其中,地上部干质量、根平均直径、根系活力还与李氏禾铬含量、铬累积量、富集系数、土壤铬去除率存在极显著相关性。残渣态铬和李氏禾总根长与李氏禾铬修复效

率均无显著相关性。

3 讨论

3.1 施加不同形态氮肥对李氏禾地上部生长和根系发育的影响

植物叶片光合作用是植物体内能量传递和物质累积的关键环节之一,而氮直接参与了光合色素的合

成^[35]。本试验发现施加不同形态氮肥对李氏禾叶绿素含量影响存在差异(图2),其中,施加铵态氮和硝态氮的李氏禾叶绿素含量和生物量均高于酰胺氮,这可能是硝态氮和铵态氮可以被李氏禾直接吸收利用,而酰胺氮需要转化为无机氮才能被李氏禾利用^[36],导致李氏禾对氮肥吸收效率不同,影响了李氏禾叶绿素合成,对李氏禾生物量产生差异影响。植物内源激素对植物的生长发育也有调控作用,李氏禾叶片植物激素含量结果表明(图4),施加硫酸铵的李氏禾叶片cZ-ROG和iP7G高于施加尿素,这可能是由于调控李氏禾生长的关键植物激素是cZROG和iP7G,所以施加硫酸铵的李氏禾生物量显著高于尿素。此外,本课题组研究还发现合理的刈割频率、刈割高度和刈割时间也能提高李氏禾修复效率^[29],刈割后的李氏禾再生有较大的氮需求。合理的施用硫酸铵可能加快李氏禾再生,两者结合会进一步提高李氏禾对铬污染的修复效率。

本试验发现施加不同形态氮肥对李氏禾根系形态发育和根系活力影响不同(图3),施加硝酸铵的总根长、根表面积和根体积最大,分别为557.89 cm、131.47 cm²和4.01 cm³;施加硫酸铵的根直径和根系活力最大,分别为0.75 mm和0.08 TTF mg·g⁻¹·h⁻¹。这与前人研究发现的硝态氮有利于植物根的伸长,铵态氮有利于根的加粗^[37],铵态氮和硝态氮的联用会促进植物侧根发育和根伸长^[38]的结果相似。

3.2 施加不同形态氮肥对李氏禾铬富集能力的影响

植物主要通过根部吸收重金属^[39],所以根系形态的变化会影响植物吸收重金属的能力^[40-41]。本试验中施加不同形态氮肥下李氏禾根系形态有所改变,从而影响了李氏禾对铬的吸收,其中,施加硫酸铵的李氏禾铬含量最高,地上部和根部分别为205.9 mg·kg⁻¹和514.3 mg·kg⁻¹。值得注意的是,通过相关性分析发现(图7):与李氏禾总根表面积和总根体积相比,根平均直径与李氏禾铬含量相关性更强,这可能是由于植物根平均直径相较于总根表面积对土壤孔隙度的影响更大^[42],根平均直径越大所产生的孔隙越大,从而更有利于土壤铬的迁移转化,提高李氏禾对铬的吸收。此外,植物对土壤中重金属的吸收与土壤中重金属的生物有效性有关^[43],提高重金属活性可以促进超富集植物对重金属的吸收,提高植物累积量,这是植物修复发展的一个新方向。重金属的弱酸提取态和可还原态易被植物吸收,可氧化态和残渣态较稳定,但可氧化态在酸性条件下可以被还原^[8],且还原后更有利于植物吸收。本试验中,与对照相比,施加不同

形态氮肥种植李氏禾后的土壤铬弱酸提取态、可还原态和可氧化态含量显著下降(图5),这可能是施肥后土壤中铬活性提高,李氏禾对铬吸收有所增加。综上,植物重金属含量和土壤重金属含量会影响植物富集能力,施加不同形态氮肥提高李氏禾铬含量和土壤铬去除率后,有利于提高李氏禾的富集系数,其中施加硫酸铵的李氏禾富集系数最高,为对照的1.45倍。富集系数的提高意味着相同质量的李氏禾可以富集更多土壤中的铬,使李氏禾土壤铬修复效率得到提高。

4 结论

(1)施加不同形态氮肥有利于促进李氏禾生长,提高叶绿素含量、生物量和根系活力,并改变其根系形态指标。

(2)施加不同形态氮肥对土壤铬赋存形态、李氏禾根系形态和根系活力的改变有利于提高李氏禾铬吸收量和土壤中铬去除率。其中,施加硫酸铵的李氏禾修复效果最显著,其富集系数较对照组提高47.9%,土壤铬去除率为对照的5.56倍。

参考文献:

- [1] RAJAPAKSHA A U, ALAM M S, CHEN N, et al. Removal of hexavalent chromium in aqueous solutions using biochar: chemical and spectroscopic investigations[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 625: 1567-1573.
- [2] MURTHY M K, KHANDAYATARAY P, PADHIARY S, et al. A review on chromium health hazards and molecular mechanism of chromium bioremediation[J]. *Reviews on Environmental Health*, 2023, 38(3): 461-478.
- [3] SHI J J, MCGILL W B, CHEN N, et al. Formation and immobilization of Cr(VI) species in long-term tannery waste contaminated soils[J]. *Environmental Science & Technology*, 2020, 54(12): 7226-7235.
- [4] ASHRAF S, ALI Q, ZAHIR Z A, et al. Phytoremediation: environmentally sustainable way for reclamation of heavy metal polluted soils[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2019, 174: 714-727.
- [5] 张学洪, 罗亚平, 黄海涛, 等. 一种新发现的湿生铬超积累植物: 李氏禾(*Leersia hexandra* Swartz)[J]. *生态学报*, 2006, 26(3): 950-953.
- [6] ZHANG X H, LUO Y P, HUANG H T, et al. *Leersia hexandra* Swartz: a newly discovered hygrophyte with chromium hyper-accumulator properties[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26(3): 950-953.
- [7] 刘娟, 李莲芳, 王文俊, 等. 基质施肥和截根对长蕊甜菜苗木生物量和光合色素的影响[J]. *厦门大学学报(自然科学版)*, 2023, 62(5): 873-880.
- [8] LIU X, LI L F, WANG W J, et al. Effects of substrate fertilization and root cutting on biomass and photosynthetic pigments of *Yunnanopilia longistaminea* seedlings[J]. *Journal of Xiamen University (Natural Science)*, 2023, 62(5): 873-880.
- [9] 吴小林, 张东北, 楚秀丽, 等. 赤皮青冈容器苗不同基质配比和缓释

- 肥施用量的生长效应[J]. 林业科学研究, 2014, 27(6): 794-800.
- WU X L, ZHANG D B, CHU X L, et al. Effect of substrate ratio and slow-release fertilizer dose on the growth of containerized *Cyclobalanopsis gilva* seedlings[J]. *Forest Research*, 2014, 27(6): 794-800.
- [8] SHAH S, CAI L, LI X, et al. Influence of cultivation practices on the metabolism of cytokinin and its correlation in rice production[J]. *Food and Energy Security*, 2023, 12(5).
- [9] CRIADO M, CAPUTO C, ROBERTS I, et al. Cytokinin-induced changes of nitrogen remobilization and chloroplast ultrastructure in wheat (*Triticum aestivum*)[J]. *Journal of Plant Physiology*, 2009, 166: 1775-1785.
- [10] DING C, YOU J, CHEN L, et al. Nitrogen fertilizer increases spikelet number per panicle by enhancing cytokinin synthesis in rice[J]. *Plant Cell Reports*, 2014, 33(2): 363-371.
- [11] SABIR M, USMAN S, SAIFULLAH, et al. Nitrogen forms modify growth response and accumulation of potentially toxic elements by wheat genotypes in nickel-contaminated soil[J]. *Clean-Soil Air Water*, 2022, 50(11).
- [12] ZHU E, LIU D, LI J G, et al. Effect of nitrogen fertilizer on growth and cadmium accumulation in *Sedum alfredii* Hance[J]. *Journal of Plant Nutrition*, 2010, 34(1): 115-126.
- [13] LIN Z, DOU C, LI Y, et al. Nitrogen fertilizer enhances zinc and cadmium uptake by hyperaccumulator *Sedum alfredii* Hance[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2020, 20(1): 320-329.
- [14] YANG Y, XIONG J, TAO L, et al. Regulatory mechanisms of nitrogen (N) on cadmium (Cd) uptake and accumulation in plants: a review[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 708: 135186.
- [15] STERCKEMAN T, THOMINE S. Mechanisms of cadmium accumulation in plants[J]. *Critical Reviews in Plant Sciences*, 2020, 39(4): 322-359.
- [16] 赵全志, 高尔明, 黄丕生, 等. 水稻穗颈节与基部节间伤流的比较及其氮素调控研究[J]. 作物学报, 2001, 27(1): 103-109. ZHAO Q Z, GAO E M, HUANG P S, et al. The comparison and nitrogen nutrition regulations of bleeding in neck-panicle node and basal internode of rice[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2001, 27(1): 103-109.
- [17] DAI L Y, ZHU H D, YIN K D, et al. Seed priming mitigates the effects of saline-alkali stress in soybean seedlings[J]. *Chilean Journal of Agricultural Research*, 2017, 77(2): 118-125.
- [18] ZHU Q, KONG L, XIE F, et al. Effects of biochar on seedling root growth of soybeans[J]. *Chilean Journal of Agricultural Research*, 2018, 78(4): 549-558.
- [19] 录亚丹, 郭丽琢, 李春春, 等. 干旱胁迫和氮素形态对豌豆根系生长的影响[J]. 中国农学通报, 2018, 34(3): 19-25. LU Y D, GUO L Z, LI C C, et al. Effect of drought stress and nitrogen forms on root morphology of pea[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2018, 34(3): 19-25.
- [20] SCHORTEMEYER M, FEIL B, STAMP P. Root morphology and nitrogen uptake of maize simultaneously supplied with ammonium and nitrate in a split-root system[J]. *Annals of Botany*, 1993, 72(2): 107-115.
- [21] LU Z, ZHANG Z, SU Y, et al. Cultivar variation in morphological response of peanut roots to cadmium stress and its relation to cadmium accumulation[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2013, 91: 147-155.
- [22] YU R, XIA S, LIU C, et al. Variations in root morphology among 18 herbaceous species and their relationship with cadmium accumulation[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2017, 24(5): 4731-4740.
- [23] LUX A, SOTTNIKOVA A, OPATRINA J, et al. Differences in structure of adventitious roots in *Salix* clones with contrasting characteristics of cadmium accumulation and sensitivity[J]. *Physiologia Plantarum*, 2004, 120(4): 537-545.
- [24] VACULIK M, KONLECHNER C, LANGER I, et al. Root anatomy and element distribution vary between two *Salix caprea* isolates with different Cd accumulation capacities[J]. *Environmental Pollution*, 2012, 163: 117-126.
- [25] FAN X, WEN X, HUANG F, et al. Effects of silicon on morphology, ultrastructure and exudates of rice root under heavy metal stress[J]. *Acta Physiologiae Plantarum*, 2016, 38(8): 197.
- [26] 张学洪, 蔡湘文, 李恺, 等. 氮肥形态对李氏禾富集铬的影响及其生化分析[J]. 桂林理工大学学报, 2011, 31(3): 399-403. ZHANG X H, CAI X W, LI K, et al. Effect of nitrogen forms on Cr uptake by the *Leersia hexandra* Swartz and biochemical analysis[J]. *Journal of Guilin University of Technology*, 2011, 31(3): 399-403.
- [27] 高俊凤. 植物生理学实验指导[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006. GAO J F. Experimental guidance for plant physiology[M]. Beijing: Higher Education Press, 2006.
- [28] 丁志凡, 刘杰, 代德敏, 等. 留茬高度对李氏禾累积铬能力的影响及生理机制[J]. 应用与环境生物学报, 2023, 29(1): 96-101. DING Z F, LIU J, DAI D M, et al. Effects of stubble heights on chromium accumulation in *Leersia hexandra* Swartz and its physiological mechanism[J]. *Chinese Journal of Applied and Environmental Biology*, 2023, 29(1): 96-101.
- [29] MA S R, JIANG X S, LIU J, et al. Mowing improves chromium phytoremediation in *Leersia hexandra* Swartz[J]. *Sustainability*, 2023, 15(7): 6244.
- [30] 代德敏, 蒋旭升, 刘杰, 等. 3种有机改良剂对铅锌矿尾砂适生性改善的研究[J]. 生态环境学报, 2023, 32(4): 784-793. DAI D M, JIANG X S, LIU J, et al. Study on suitability of Pb/Zn mine tailings using three different organic amendments[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2023, 32(4): 784-793.
- [31] 吴慧, 吴程龙, 张仕颖, 等. 施用有机-无机改良剂对锡尾矿化学属性的影响[J]. 生态环境学报, 2021, 30(11): 2244-2250. WU H, WU C L, ZHANG S Y, et al. Effects of applying organic inorganic modifiers on the chemical properties of tin tailings[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2021, 30(11): 2244-2250.
- [32] 谭川疆, 潘忠图, 罗有发, 等. 不同改良剂对黔西北锌冶炼区农用地土壤重金属修复效果研究[J]. 地球与环境, 2022, 50(4): 575-585. TAN C J, PAN Z T, LUO Y F, et al. Remediation effect of different amendments on heavy metals in agricultural soil in zinc smelting area of northwest Guizhou[J]. *Earth and Environment*, 2022, 50(4): 575-585.

- [33] TOKALIOGLU S, KARTAL S, ELCI L. Determination of heavy metals and their speciation in lake sediments by flame atomic absorption spectrometry after a four-stage sequential extraction procedure[J]. *Analytica Chimica Acta*, 2000, 413(1/2):33-40.
- [34] 张云霞, 宋波, 宾娟, 等. 超富集植物藜香蓟(*Ageratum conyzoides* L.)对镉污染农田的修复潜力[J]. 环境科学, 2019, 40(5):2453-2459. ZHANG Y X, SONG B, BIN J, et al. Remediation potential of *Ageratum conyzoides* L. on cadmium contaminated farmland[J]. *Environmental Science*, 2019, 40(5):2453-2459.
- [35] PADILLA F M, PENA-FLEITAS T M, GALLARDO M, et al. Derivation of sufficiency values of a chlorophyll meter to estimate cucumber nitrogen status and yield[J]. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2017, 141:54-64.
- [36] 郭松, 周子军, 刘东瑶, 等. 氮肥形态对不同持绿性玉米品种产量及叶片光合氮素的影响[J]. 玉米科学, 2022, 30(6):131-137. GUO S, ZHOU Z J, LIU D Y, et al. Effects of nitrogen forms on yield and photosynthetic nitrogen in different stay-green maize cultivars[J]. *Journal of Maize Sciences*, 2022, 30(6):131-137.
- [37] 张国斌, 刘赵帆, 魏红霞, 等. 氮肥形态及配比对花椰菜生长和光合特性的影响[J]. 甘肃农业大学学报, 2013, 48(3):35-39. ZHANG G B, LIU Z F, WEI H X, et al. Effects of nitrogen forms and proportion on growth and photosynthesis of broccoli[J]. *Journal of Gansu Agricultural University*, 2013, 48(3):35-39.
- [38] IMRAN M, HU C, HUSSAIN S, et al. Molybdenum-induced effects on photosynthetic efficacy of winter wheat (*Triticum aestivum* L.) under different nitrogen sources are associated with nitrogen assimilation [J]. *Plant Physiology and Biochemistry*, 2019, 141:154-163.
- [39] SUSEELA M R, SINHA S, SINGH S, et al. Accumulation of chromium and scanning electron microscopic studies in *Scirpus lacustris* L. treated with metal and tannery effluent[J]. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 2002, 68(4):540-548.
- [40] TKALEC M, STEFANIC P P, CVJETKO P, et al. The Effects of cadmium-zinc interactions on biochemical responses in tobacco seedlings and adult plants[J]. *PLoS One*, 2014, 9(1):e87582.
- [41] LI T, YANG X, LU L, et al. Effects of zinc and cadmium interactions on root morphology and metal translocation in a hyperaccumulating species under hydroponic conditions[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2009, 169(1/2/3):734-741.
- [42] PIRE R, PEREIRA A. Soil pores size and root and shoot growth of jalapeno pepper (*Capsicum annum* L.)[J]. *Agrociencia*, 2018, 52(5):685-693.
- [43] 陈敏妮, 聂小奇, 张杏锋, 等. 蚯蚓、秸秆和柠檬酸对少花龙葵与翅果菊修复锌铅镉污染土壤的影响[J]. 环境科学, 2023, 44(3):1714-1726. CHEN M N, NIE X Q, ZHANG X F, et al. Effects of earthworm, straw, and citric acid on the remediation of Zn, Pb, and Cd contaminated soil by *Solanum photeinocarpum* and *Pterocypsela indica* [J]. *Environmental Science*, 2023, 44(3):1714-1726.