



熊明月, 郭嘉航, 张福琼, 等. 不同氮肥对鬼针草修复土壤镉污染的效果研究[J]. 江西农业大学学报, 2022, 44(6): 1592–1600.

XIONG M Y, GUO J H, ZHANG F Q, et al. Effects of different nitrogen fertilizers on remediation of soil cadmium pollution by *Bidens pilosa*[J]. Acta agriculturae universitatis Jiangxiensis, 2022, 44(6): 1592–1600.

不同氮肥对鬼针草修复土壤镉污染的效果研究

熊明月^{1,2,3}, 郭嘉航^{1,2,3}, 张福琼^{1,2,3}, 韩 飞^{1,2,3},
刘剑虹^{1,2,3}, 杨 云^{1,2,3,4}, 钟 浩¹, 黄晶心^{1,2,3*}

(1. 云南师范大学 能源与环境科学学院, 云南 昆明 650500; 2. 云南师范大学 高原特色中药材种植土壤质量演变退化与修复云南省野外科学观测研究站, 云南 昆明 650500; 3. 云南师范大学 云南省农村能源工程重点实验室, 云南 昆明 650500; 4. 文山州农业科学院, 云南 文山 663099)

摘要:【目的】为探究不同氮肥对超富集植物鬼针草修复土壤镉(Cd)污染的效果。【方法】通过用总Cd含量为60 mg/kg的土壤进行盆栽试验, 设置空白和添加尿素、氯化铵、硝酸钙、硝酸铵钙5组处理, 分析植物生长指标及重金属Cd的含量等。【结果】施加尿素、氯化铵、硝酸铵钙均能显著增加土壤中Cd向鬼针草转移($P < 0.05$)。尿素、氯化铵、硝酸铵钙施用后鬼针草Cd的转移系数分别增加了7.82%、11.78%、18.82%, 鬼针草对土壤Cd污染的净化率分别提高了14.39%、24.27%、141.55%, 显著提高了鬼针草对Cd的吸收效果; 其中施用硝酸铵钙使鬼针草吸收Cd的效果最好。【结论】在施加氮素量相同的情况下, 施用硝酸铵钙对鬼针草修复土壤Cd污染的效果最佳。研究为氮肥在重金属污染土壤植物修复中的应用提供了参考, 也为植物修复矿区土壤、抛荒地、工业污染区等提供了技术支持。

关键词: 氮肥类型; 鬼针草; 镉污染; 土壤修复

中图分类号: X173; X53 文献标志码: A 文章编号: 1000-2286(2022)06-1592-09

Effects of Different Nitrogen Fertilizers on Remediation of Soil Cadmium Pollution by *Bidens pilosa*

XIONG Mingyue^{1,2,3}, GUO Jiahang^{1,2,3}, ZHANG Fuqiong^{1,2,3}, HAN Fei^{1,2,3},
LIU Jianhong^{1,2,3}, YANG Yun^{1,2,3,4}, ZHONG Hao¹, HUANG Jingxin^{1,2,3*}

(1. College of Energy and Environmental Sciences, Yunnan Normal University, Kunming 650500, China; 2. Yunnan Provincial Observation and Research Station of Soil Degradation and Restoration for Cultivating Plateau Traditional Chinese Medicinal Plants, Yunnan Normal University, Kunming 650500, China; 3. Yunnan Provincial Renewable Energy Engineering Key Laboratory, Yunnan Normal University, Kunming 650500, China; 4. Wenshan Academy of Agricultural Sciences, Wenshan, Yunnan 663099, China)

收稿日期: 2022-02-23 修回日期: 2022-08-02

基金项目: 国家自然科学基金项目(31800443)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(31800443)

作者简介: 熊明月, orcid.org/0000-0001-5918-2652, 447233394@qq.com; *通信作者: 黄晶心, 副教授, 博士, 主要从事土壤重金属污染修复与生态效应研究, orcid.org/0000-0001-5641-2731, huangjingxin17@163.com。

Abstract: [Objective] This study aims to explore the effects of different nitrogen (N) fertilizers on the restoration of soil cadmium (Cd) pollution by hyperaccumulator plant *Bidens pilosa*. [Method] A green house experiment was conducted with 60 mg/kg total Cd content soil. Five treatments, including CK treatment (added with no N fertilizer), urea, ammonium chloride, calcium nitrate and calcium ammonium nitrate added treatments were set, respectively. Plant growth and the content of heavy metal Cd were analyzed. [Result] Urea, ammonium chloride and calcium ammonium nitrate added treatments significantly increased the transfer of Cd from soil to *B. pilosa* ($P < 0.05$). Urea, ammonium chloride and calcium ammonium nitrate added treatments increased the Cd transfer coefficients of *B. pilosa* by 7.82%, 11.78% and 18.82% respectively; they increased Cd purification rate of *B. pilosa* by 14.39%, 24.27% and 141.55%, respectively. Among all treatments, calcium ammonium nitrate added treatments had the best effect on *B. pilosa* absorption of soil Cd. [Conclusion] With the same N added rate, the addition of calcium ammonium nitrate had the best effect on increasing *B. pilosa* restoration Cd contaminated soil. This study provided a reference for adding nitrogen fertilizers in phytoremediation of Cd contaminated soil, and it also provided technical support for phytoremediation of soil in mining areas, abandoned land and industrial polluted areas.

Keywords: nitrogen fertilizer type; *Bidens pilosa*; Cd pollution; soil restoration

【研究意义】土壤镉(Cd)污染在我国广泛存在,尤其以湖南、云南省部分地区最为严重。Cd是一种对动物、植物有较强毒性的重金属元素,不仅会影响作物的生长发育,还通过食物链进入人体。Cd进入人体后难以排出,会对肝肾造成损伤,还影响生殖功能、导致骨骼软化等^[1]。目前土壤Cd污染的修复方法中植物修复因操作简单、生态环保等特点,是近年来土壤Cd污染修复方法研究的重点^[2]。三叶鬼针草为菊科植物,具有生物量大、适应性强、对氮肥敏感等特点,是Cd污染土壤修复性价比较高的植物^[4]。笔者推测施用氮肥可增加超富集植物鬼针草对土壤Cd的修复,且不同氮肥的效果存在差异。本研究结果将为植物修复高浓度重金属污染土壤提供指导。【前人研究进展】有研究表明施氮能有效调控植物对Cd的吸收和积累^[7],如施加氮肥可以通过增加植物生物量,增加东南景天对Cd的吸收^[8]。研究表明植物对不同氮肥的吸收、转化存在差异,不同氮肥在土壤中的赋存形式、肥效时长也存在差异^[9-10]。例如:延长肥料铵滞留时间的氮素调控措施可以提高碱性水稻产量^[11]。也有研究表明不同氮肥对增加超富集植物修复土壤重金属污染的效果不同,例如:研究表明不同的氮肥对龙葵修复土壤重金属污染的效果不同,施用铵态氮的效果优于硝态氮与硝态-铵态氮组合^[12]。由此笔者推测不同氮肥可能对鬼针草修复土壤Cd污染的效果不同,然而目前尚无该方面的研究报道。【本研究切入点】氮肥是农业生产中常用的肥料,施加氮肥能提高作物的光合作用、生物量、产量,理论上可提高植物吸收Cd^[6]。相关研究表明施用氮肥有助于超富集植物修复土壤Cd污染^[5]。鬼针草喜生长于温暖湿润气候区,对氮肥较为敏感,施加少量氮肥会促进其生物量的增加,由此笔者认为施用氮肥可增加鬼针草对土壤Cd污染的修复。但目前关于施用氮肥对鬼针草修复Cd土壤污染的报道较少,也没有相关研究指出哪种类型的氮肥促进鬼针草修复土壤Cd污染的效果最好。【拟解决的关键问题】为探究不同氮肥处理对超富集植物鬼针草生长及对Cd污染土壤的修复效果,本研究选用市面上常见的4种氮肥作为供试肥料,利用盆栽试验比较不同氮肥对鬼针草修复Cd污染的效果。

1 材料与方法

1.1 供试材料

试验土壤采集于云南昆明呈贡区,土壤类型为红壤。采集栽培土壤作为本研究的供试土壤,土壤在使用之前仔细去除其中的杂物和动植物残体,自然风干、破碎后过5目筛。经检测,本研究所用栽培土壤Cd含量为2.38 mg/kg,铵态氮(NH_4^+-N)含量为2.72 mg/kg,硝态氮(NO_3^--N)含量为12.4 mg/kg,土壤pH为7.25,土壤电导率为4.82 ms/cm,有效磷含量为26.5 mg/kg。

供试肥料为:尿素(N1)[CO(NH₂)₂],有效N含量46.7%;氯化铵(N2)NH₄Cl,有效N含量26.27%;硝酸钙(N3)[Ca(NO₃)₂·4H₂O],有效N含量17.07%;硝酸铵钙(N4)[5Ca(NO₃)₂·NH₄NO₃·10H₂O],有效N含量23.73%。

供试植物材料为鬼针草,首先培育幼苗,选取形态大小一致的株高约为6~7 cm的幼苗移栽入花盆。供试花盆为高14 cm,内口径为15.5 cm,外口径为20 cm的塑料花盆。

1.2 试验设计

本研究共设置5个处理,包括对照组(对照,不施肥,CK)、尿素(N1)、氯化铵(N2)、硝酸钙(N3)、硝酸铵钙(N4)处理组,每个处理设置5个重复。每个重复装入上述过筛土壤1.6 kg。装入土壤后,将配置好的Cd溶液均匀加入土壤,使土壤中的Cd含量达到60 mg/kg,添加Cd后放置两周后用于栽培试验。将萌发的鬼针草幼苗移入花盆,每盆移栽3株幼苗,幼苗死亡后及时补种。上述处理在鬼针草生长50 d施加,施氮处理均按照100 (mg·N)/kg土壤添加的上述肥料。生长期定期浇水,根据天气对花盆里的湿润程度进行观察,保持土壤含水量相对稳定。

1.3 收获与测定

待鬼针草生长160 d时收获,收获时分别采集植株样品与土壤样品,采集根际土时,以摇动后仍附着在根系的土壤为根际土壤,将根际土壤保存自封袋中,测定土壤铵态氮、硝态氮、土壤根际Cd含量。土壤硝态氮与铵态氮含量根据标准LY/T 1228—2015,用流动分析仪(AA3, Seal Analytical, ltd. Germany)进行测定。土壤中总Cd含量测定:取风干、研磨、过100目筛土壤粉末2.00 g,使用7:2的硝酸、氢氟酸通过微波消解法消解,用AA-7000原子吸收仪(AA-7000, Shimadzu, Japan)测定。植物中Cd含量采用5:2硝酸、过氧化氢进行微波消解,用AA-7000原子吸收仪(AA-7000, Shimadzu, Japan)测定。

收获方法:于收获前2 d浇水,保持盆栽土壤湿润,以保证收获鬼针草根系的完整性。收获前先测量株高、茎基直径,叶绿素含量。叶绿素的测定采用叶绿素仪(SPAD-502、北京海天友诚科技有限公司提供)。将整株鬼针草取出后,测量根长后,将鬼针草分为根、茎、叶、花4部分,放于烘箱先做105℃杀青处理,再将其置于70℃烘干至恒重,称取其干重后,再分别研磨后装入干净的自封袋中备用,试验时取用烘干后鬼针草。

1.4 有关指标的计算方法

富集系数=植物体内重金属含量/土壤中重金属含量 (1)

转运系数=植物地上部重金属含量/植物根部重金属含量 (2)

净化率=植物地富集重金属的量/土壤中重金属的量 (3)

富集量=植物地上部重金属含量*植物的生物量+植物根部重金属含量*植物根的生物量 (4)

1.5 数据分析

使用GraphPad Prism 9.0.0、Excel 2016及SPSS19.0软件对试验数据进行数据分析与绘图。按照标准方法,使用单因素方差分析法(One-way-ANOVA)分析不同氮肥处理土壤性质、鬼针草株的茎基直径、根长、株高、叶绿素含量,鬼针草各部位的生物量与Cd的含量,Cd的含量、富集量指标的差异。

2 结果与分析

2.1 不同氮肥对土壤理化性质及根际土壤Cd含量的影响

由表1,N1和N2处理导致土壤pH值降低。施氮处理使土壤电导率增加,其中N3和N4处理显著增加土壤电导率($P<0.05$)。施氮处理均使土壤NO₃⁻-N含量增加,其中N3处理作用最强($P<0.05$)。N3处理中土壤中铵态氮含量存在显著差异,其中N3处理使土壤NH₄⁺-N显著降低($P<0.05$)。不同施氮处理下鬼针草根际的Cd含量均升高。

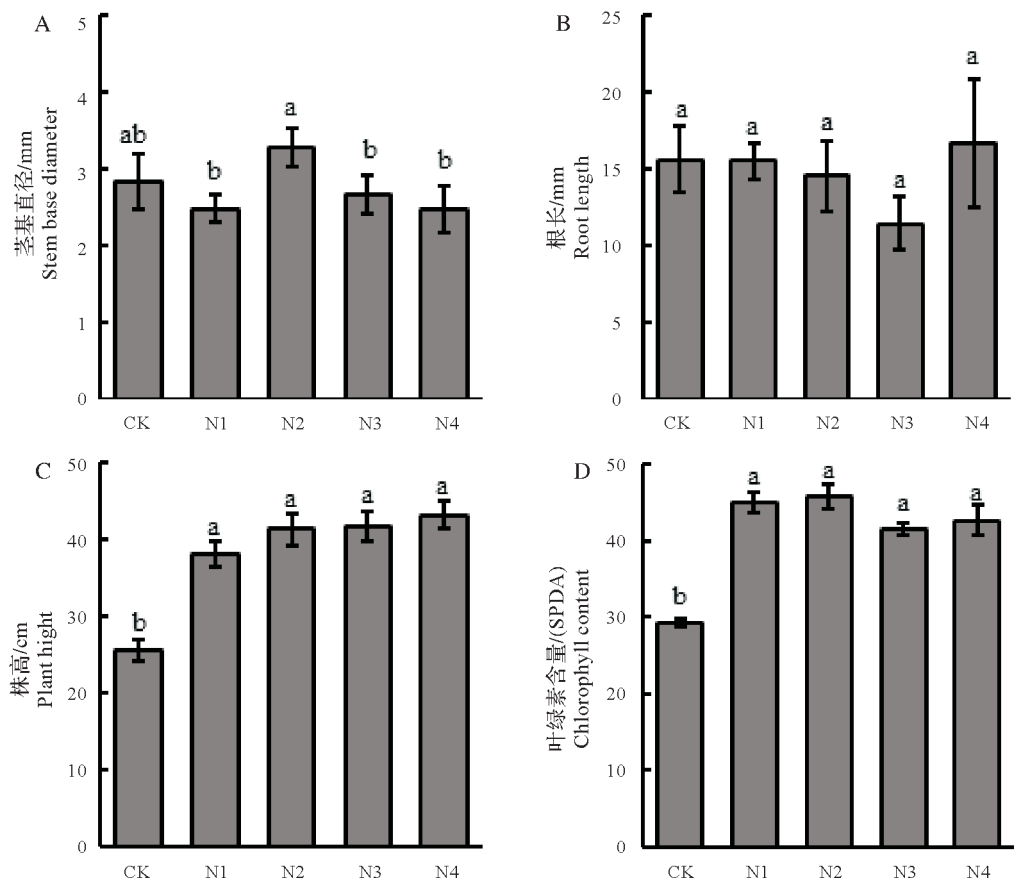
2.2 不同氮肥处理对鬼针草生长的影响

由图1,与对照组相比,施氮N2处理组与其他处理组相比鬼针草的茎基直径存在显著差异($P<0.05$),N2处理组的茎基直径最粗,与对照组相比,增加了15.80%。与对照组相比,施氮处理组的鬼针草株高与叶绿素含量均显著高于对照组($P<0.05$);其中,施尿素、氯化铵、硝酸钙、硝酸铵钙氮处理的株高分别增高了48.45%、61.22%、62.51%、68.37%;说明施加氮肥能促进鬼针草叶片叶绿素的合成与株高的生长。

表 1 不同氮肥对土壤铵态氮、硝态氮和鬼针草根际土壤 Cd 含量的影响
Tab.1 Effects of different nitrogens on the contents of ammonium nitrogen, nitrate nitrogen and Cd in the rhizosphere soil of *Bidens pilosa*

处理 Treatment	pH	EC/(ms·cm ⁻¹)	NO ₃ ⁻ -N 含量/(mg·kg ⁻¹) NO ₃ ⁻ -N content	NH ₄ ⁺ -N 含量/(mg·kg ⁻¹) NH ₄ ⁺ -N content	根际土壤 Cd/(mg·kg ⁻¹) Cd content in the rhizosphere soil
CK	6.86±0.12 ^a	0.41±0.14 ^b	0.17±0.01 ^b	3.93±0.85 ^a	54.177±8.15 ^c
N1	6.85±0.24 ^a	0.45±0.08 ^b	0.23±0.04 ^b	4.74±0.20 ^a	69.840±14.48 ^b
N2	6.32±0.03 ^b	0.47±1.02 ^b	0.18±0.01 ^b	4.23±0.61 ^a	79.571±16.28 ^a
N3	6.15±0.04 ^b	0.51±0.03 ^a	0.36±0.17 ^a	3.09±0.41 ^b	67.326±13.38 ^b
N4	6.84±0.04 ^a	0.51±1.03 ^a	0.21±0.13 ^b	4.55±0.50 ^a	67.604±15.02 ^b

数值为平均值±标准误差(n=5)。同列数据后不同字母表示差异达到0.05水平显著性(P<0.05)。
Average value±standard error(n=5).The different letters in the same column indicate a significant difference(P<0.05).



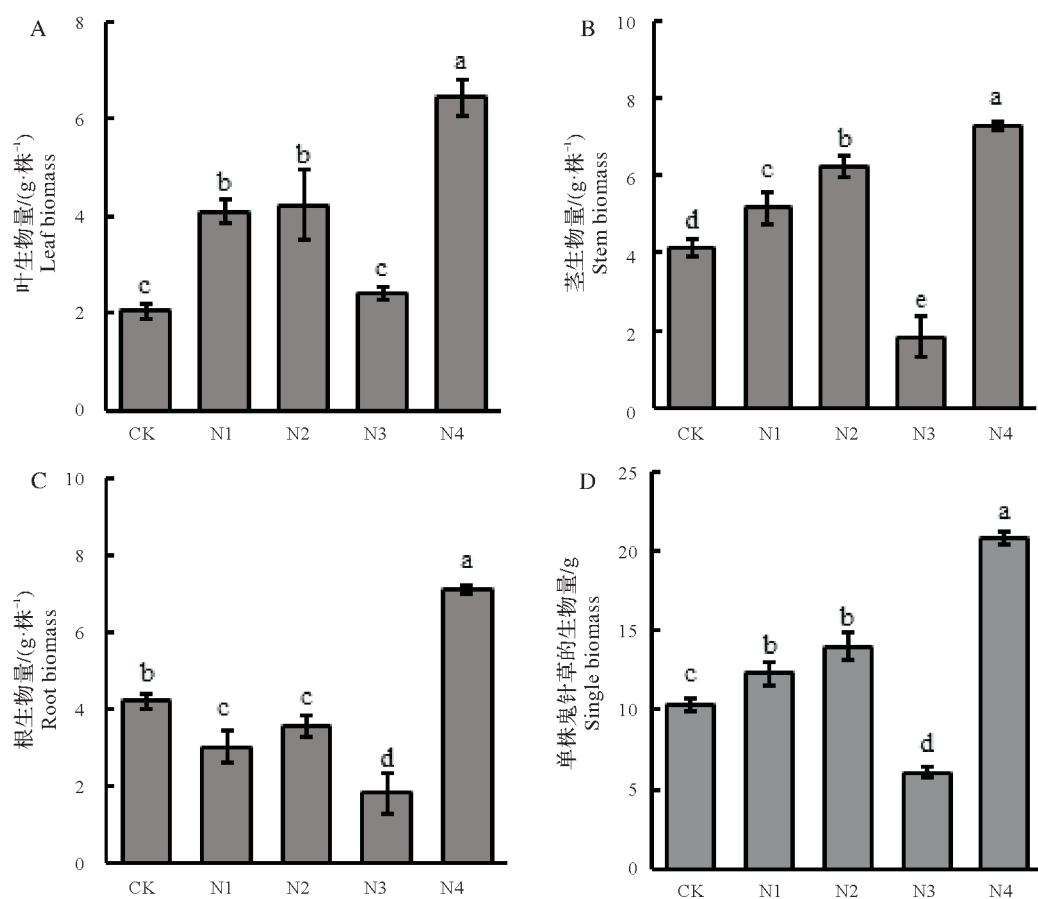
数值为平均值±标准误差(n=5)。*表示0.05水平显著性,下同。
Average value±standard error(n=5), the different letters above each bar indicate a significant difference(P<0.05)by t-test.

图 1 不同氮肥处理鬼针草茎基直径、根长、株高、叶绿素含量

Fig.1 Stem base diameter, root length, plant height and chlorophyll content of *Bidens pilosa* under different nitrogen fertilizer treatments

2.3 不同氮肥处理对鬼针草生物量的影响

由图 2,不同处理组鬼针草的叶片、茎秆、根、单株生物量均存在显著差异(P<0.05),N1、N2、N4处理组的叶重、茎重均增加,N3处理组减少;在重金属 Cd 的作用下,N3 处理茎秆、根及总生物量显著下降,分别为 55.74%、56.49%、41.57%;N4 处理组其各部位及总的生物量显著提高(P<0.05),分别为对照组的 3.15 倍、1.77 倍、1.69 倍、2.01 倍。N4 处理组中叶片的生物量增加最显著(P<0.05)。这说明硝酸铵钙对鬼针草各部位的生物量具有显著促进作用,硝酸钙对鬼针草的生物量增加具有抑制效果。



数值为平均值 ± 标准误差 (n=5) 不同字母表示差异达到 0.05 显著水平。

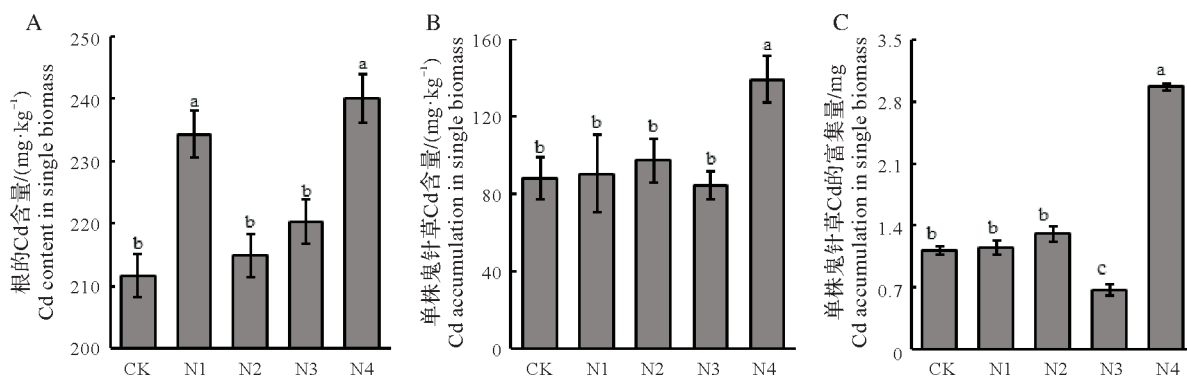
Average value ± standard error (n=5), the different letters above each bar indicate a significant difference ($P<0.05$) by t-test.

图2 不同施氮处理下鬼针草各部位的生物量与单株鬼针草总生物量

Fig.2 Biomass and Cd contents in different parts of *Bidens pilosa* with different treatments

2.4 不同氮肥对鬼针草根Cd的含量与整株Cd含量与吸收量的影响

由图3,施用不同氮肥鬼针草中N1与N4处理组Cd的含量存在显著差异($P<0.05$),N4处理组下鬼针草根部和整株的Cd含量最高($P<0.05$)。施氮处理下根部的Cd含量均高于对照组。施用不同氮肥鬼针草对Cd的富集量存在显著差异($P<0.05$),N4处理组鬼针草对Cd的富集量最高,其对Cd的富集量为对照的2.66倍;N3处理组Cd的富集量显著低于CK($P<0.05$)。施加硝酸铵钙对鬼针草富集Cd具有促进作用。



数值为平均值 ± 标准误差 (n=5)。不同字母表示差异达到 0.05 显著水平。

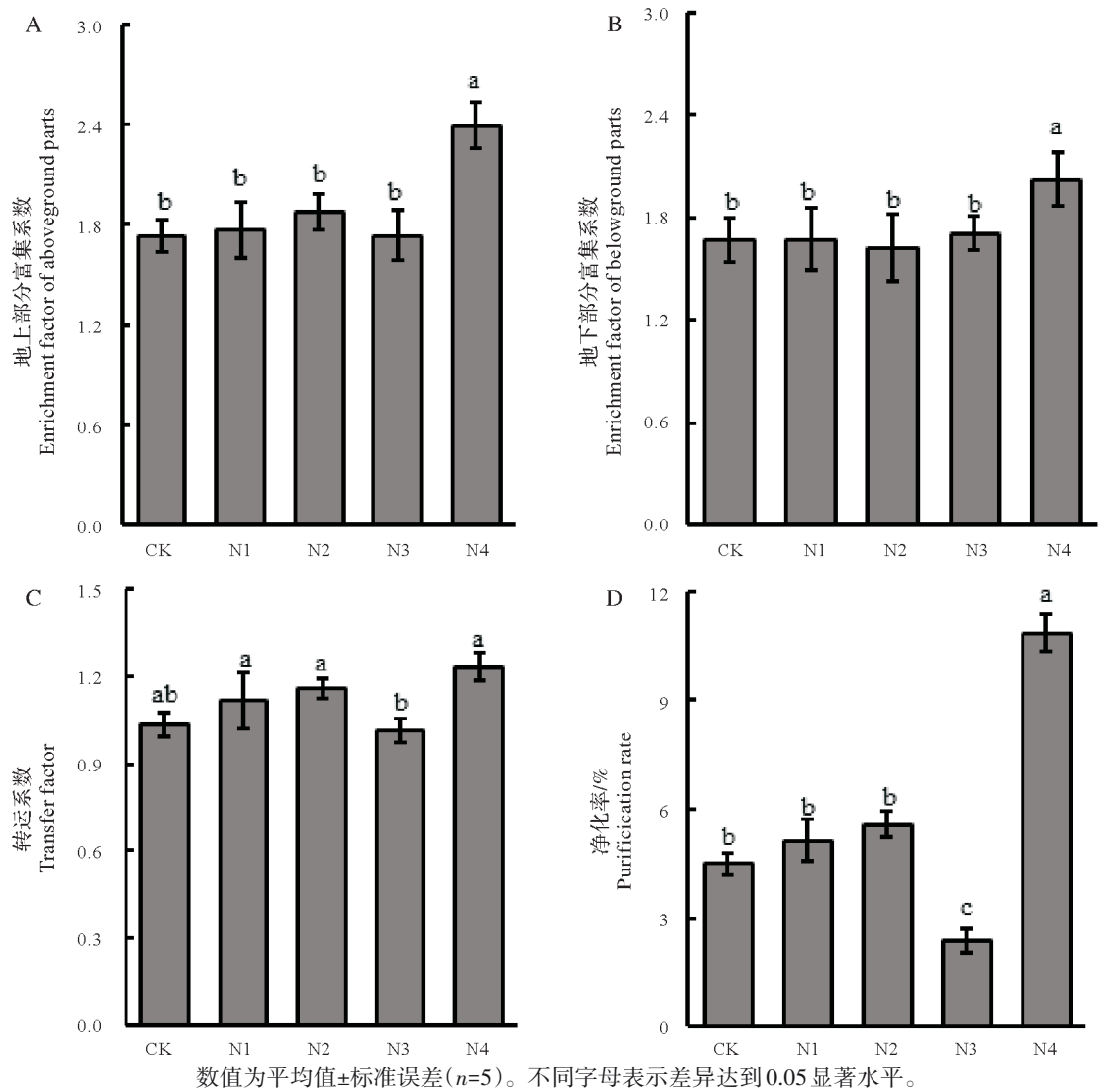
Average value ± standard error (n=5). The different letters above each bar indicate a significant difference ($P<0.05$) by t-test.

图3 不同氮肥处理下鬼针草Cd的总含量与Cd的富集量

Fig.3 Total content of Cd and enrichment of Cd in *Bidens pilosa* under different treatments

2.5 不同氮肥对鬼针草富集系数、转运系数与净化率的影响

由图 4,鬼针草地上部分与地下部分的富集系数 N4 处理组显著增大($P<0.05$);施加氮肥对转运系数的变化无显著影响($P<0.05$);N3 处理组的净化率降低,N4 处理组净化率显著提高($P<0.05$)。鬼针草施加硝酸铵钙可以促进 Cd 污染土壤的修复,促使更多的 Cd 从土壤中分离。



Average value±standard error (n=5).The different letters above each bar indicate a significant difference ($P<0.05$) by t-test.

图 4 不同施氮处理下鬼针草地上及地下部分的富集系数、转运系数及净化率
Fig.4 Enrichment coefficient, transport coefficient and purification rate of the aboveground and underground parts under different treatments of *Bidens pilosa*

3 讨 论

本研究显示施用不同氮肥使 Cd 污染土壤鬼针草的叶绿素含量显著增加(图 1D),这与其他研究结果类似。例如,施用氮肥有利于大豆的生长,使其叶绿素含量、产量等明显增加^[13],不同形态氮肥均能提高超积累植物东南景天叶绿素含量^[14]。这主要由于氮素是植物叶绿素合成所需元素,施用氮肥可促进植物叶绿素的合成^[15-17]。本研究显示施用尿素、氯化铵、硝酸铵钙对鬼针草的生长均具有促进作用。这与其他研究结果类似,施加尿素、氯化铵、硝酸铵钙对苋菜、高羊茅、百合等植物生长具有促进作用^[18-20]。施用氮肥可提高植物的叶绿素含量^[21],促进植物的合成代谢^[22],从而使植物的光合作用更强^[23]和生长速率更快^[24],使鬼针草各部分及单株生物量更高(图 2)。这是由于尿素可在土壤中快速转化为铵态氮,和氯化铵、硝酸铵钙一样可提供能被植物快速吸收利用的铵态氮。土壤中铵态氮含量的增加可提高植物的

逆境性,例如铵态氮可以增强水稻在干旱环境下的抗性^[25],也有研究显示施用铵氮可提高春小麦对重金属Cd的抗性^[26]。本研究结果显示施用硝酸铵钙对鬼针草生长的促进作用更强(图1B、C、图2),这与其他研究结果类似^[27,28]。适量的硝、铵配比能提高甘草的生物量和品质^[29],不同的硝态氮与铵态氮的配比影响坦桑尼亚豚草的生长^[30]。这是由于同时施用的硝态氮、铵态氮使植物对氮营养的获取效率更高。本研究显示Cd污染土壤中施加硝酸钙不利于鬼针草生长(图2),其原因可能是施加硝酸钙使土壤酸化,使土壤铵态氮含量下降(表1),减少鬼针草根对Cd的吸收(图3A)。土壤有效态重金属受土壤pH影响很大,一般随土壤酸度增加而增加^[31]。如酸性土壤会使土壤生物可利用态Cd含量增加,促进鬼针草Cd积累^[32]。土壤中生物有效态重金属含量增加,将导致重金属污染物对植物的胁迫增加,且铵态氮含量较少降低了鬼针草对Cd的耐受性,由此可能导致施用硝酸钙使鬼针草的株高、根长、各部位生物量的降低(图1、2)。

本研究结果显示施用不同氮肥对鬼针草Cd含量的影响不同,这与其他研究结果类似。例如:施用不同氮肥玉米Cd含量不同^[33]。这是由于鬼针草对不同肥料的利用效率不同^[34,35]。不同形态的氮肥施用后,在植物根际的铵态氮、硝态氮的浓度存在差异(表1),土壤中离子间存在竞争吸附,这可能影响鬼针草对Cd的吸收,从而影响其在植物体内的含量。本研究结果显示,施用硝酸铵钙使鬼针草的Cd含量增加,这可能由于施用硝酸铵钙促进了鬼针草根部的生物量(图2C),发达的根系促使鬼针草对土壤中的养分与Cd吸收。施用尿素、氯化铵、硝酸铵钙均显著增加了单株鬼针草对Cd的富集(图3C),这是由于施用以上氮肥极大地促进了鬼针草的生物量,其生物量分别是对照1.2倍、1.3倍、1.9倍,Cd含量是对照的1.03倍、1.1倍、1.5倍,总体表现为施用氮肥促进了鬼针草对土壤Cd的富集。

本研究结果显示施用硝酸铵钙使鬼针草的地上部分富集系数、净化率显著增加(图4),这意味着单位重量的鬼针草富集更多的土壤Cd,这将使鬼针草对土壤Cd污染的修复效率增加。本研究结果还显示施用硝酸铵钙使鬼针草修复Cd污染的转移系数增加,这意味着施氮使更多的Cd集中在鬼针草的地上部分(图4A),这将使利用鬼针草修复土壤Cd污染更加方便。由此施用硝酸铵钙可增加鬼针草修复土壤Cd的效率和便捷性。当今全球土壤Cd污染问题普遍存在,严重威胁着土壤资源的可持续利用和粮食的安全种植^[34]。因此本研究指出的通过施用硝酸铵钙从而促进鬼针草对土壤Cd的吸收,并且将更多的Cd转移到地上部分,这对利用鬼针草修复Cd污染,甚至是利用其他超富集植物修复土壤重金属污染均具有一定的指导意义。

4 结 论

本研究通过温室试验表明,施用不同氮肥显著提高鬼针草株高、叶绿素含量,不同氮肥类型效果不同,硝酸铵钙的促进作用最强;施用适当的氮肥有利于鬼针草生长和地上部Cd的积累,而这种促进作用与施用的氮形态有关。其中,硝酸铵钙处理对鬼针草株高、叶绿素含量、生物量的增加效果最明显,对土壤中Cd的富集量也最大。施用硝酸铵钙明显促进了鬼针草对土壤的净化效率。综上所述,Cd污染土壤中施用不同氮肥对鬼针草净化土壤Cd污染的效果不同,其中硝酸铵钙的效果最好。本研究为氮肥在重金属污染土壤植物修复领域的应用提供了参考,也为植物修复矿区土壤、抛荒地、工业污染区等重金属污染区域的应用提供了技术支持。

致谢:云南省大学生创新创业训练(202110681008,S202110681027,S202110681058X,S202110681036X)和云南师范大学研究生科研创新基金(YJSJJ21-B91)同时对本研究给予了资助,谨致谢意!

参考文献 References:

- [1] HONGPING C, XINPING Y, PENG W, et al. Dietary cadmium intake from rice and vegetables and potential health risk: a case study in Xiangtan, southern China[J]. Science of the total environment, 2018, 639: 271-277.
- [2] 孙丽娟, 秦秦, 宋科, 等. 镉污染农田土壤修复技术及安全利用方法研究进展[J]. 生态环境学报, 2018, 27(7): 1377-1386. SUN L J, QIN Q, SONG K, et al. The remediation and safety utilization techniques for Cd contaminated farmland soil: a review[J]. Journal of ecological environment, 2018, 27(7): 1377-1386.
- [3] 高宇, 程潜, 张梦君, 等. 镉污染土壤修复技术研究[J]. 生物技术通报, 2017, 33(10): 103-11. GAO Y, CHENG Q, ZHANG M J, et al. The remediation technology and remediation practice of heavy metals-contaminated soil[J]. Journal of agro-environment science, 2018, 27(7): 1377-1386.

- [4] 王林,周启星,孙约兵.氮肥和钾肥强化龙葵修复镉污染土壤[J].中国环境科学,2008(10):915-920.
WANG L,ZHOU Q X,SUN B Y,Intensification of *Solanum nigrum* L.remedying cadmium contaminated soils by nitrogen and potassium fertilizers[J].China environmental science,2008(10):915-920.
- [5] 张云霞,周浪,肖乃川,等.鬼针草(*Bidens pilosa* L.)对镉污染农田的修复潜力[J].生态学报,2020,40(16):5805-5813.
ZHANG Y X,ZHOU L,XIAO N C,et al.Remediation potential of *B. pilosa* L. in cadmium-contaminated farmland[J].Acta ecologica Sinica,2020,40(16):5805-5813.
- [6] 颜昌宙,郭建华.氮肥管理对植物镉吸收的影响[J].生态环境学报,2020,29(7):1466-1474.
YAN C Z,GUO J H,Remediation potential of *B. pilosa* L.in cadmium-contaminated farmland[J].Acta ecologica Sinica,2020,29(7):1466-1474.
- [7] M B A J,D R R,M H A S.Heavy metal accumulation and tolerance in british populations of the metallophyte *Thlaspi caerulescens* J. & C. presl(brassicaceae)[J].The new phytologist,1994,127(1):61-68.
- [8] 窦春英.施肥对东南景天吸收积累锌和镉的影响[D].杭州:浙江林学院,2009.
DOU C Y.Effect of fertilizer application on soil heavy metal phytoremediation by *Sedum alfredii* hance[D].Hangzhou:Chinese Master's Theses full-text database,2009.
- [9] 田中伟.小麦产量和氮素吸收利用特性的改良特征及生理基础[D].南京:南京农业大学,2012.
TIAN Z W.Genetic improvement of grain yield and characteristics of nitrogen uptake and utilization in winter wheat and its physiological basis[D].Nanjing:Chinese doctoral dissertations full-text database,2012.
- [10] 张海涛,王倩,刘金,等.不同施肥处理对黄淮地区大白菜产量及养分利用率的影响[J].河南农业大学学报,2012,46(4):392-396.
ZHANG H T,WANG Q,LIU J,et al.Effect of different fertilization treatments on the yield of Huang-Huai region cabbage and nutrient use efficiency[J].Journal of Henan agricultural university,2012,46(4):392-396.
- [11] 池巧东.中国水稻土氮素转化特征及其对氮肥利用率的影响机理[D].南京:南京师范大学,2021.
CHI Q D.Nitrogen transformation characteristics of paddy soil in China and its impact mechanism on nitrogen utilization efficiency[D].Nanjing:Nanjing Normal University,2021.
- [12] 杨容才,刘柿良,宋会兴,等.不同氮形态对龙葵镉积累、抗氧化系统和氮同化的影响[J].生态环境学报,2016,25(4):715-723.
YANG R Z,LIU S L,SONG H X,et al.Impacts of different nitrogen forms on cadmium accumulation,antioxidant system and nitrogen assimilation in *Hyperaccumulator solanum Nigrum* L[J].Ecology and environmental sciences,2016,25(4):715-723.
- [13] 郝青南,杨芳,汪媛媛,等.氮肥与复硝酸钠复配对南方大豆光合特性和产量及品质的影响[J].中国油料作物学报,2022,44(3):610-620.
HAO Q N,YANG F,WANG Y Y,et al.Effects of nitrogen fertilizer and sodium nitratol on photosynthetic characteristics and yield quality in southern soybean[J].Chinese journal of oil crop sciences,2022,44(3):610-620.
- [14] 李继光,李廷强,朱恩,等.不同氮形态对东南景天镉积累的影响[J].浙江大学学报(农业与生命科学版),2008(3):327-333.
LI J G,LI T Q,ZHU E,et al.Effects of different nitrogen forms on cadmium accumulation of *Sedum alfredii* Hance[J].Journal of Zhejiang university(agriculture and life sciences),2008(3):327-333.
- [15] 王健,梁运江,许广波,等.水肥耦合效应对保护地辣椒叶片叶绿素含量的影响[J].延边大学农学学报,2006(4):287-292+297.
WANG J,LIANG Y J,XU G B,et al.Couping effects of water and fertilizers on chlorophyll contents of *Capsicum* leaves in protective ground[J].Journal of agricultural science Yanbian university,2006(4):287-292+297.
- [16] 李静,李志军,张富仓,等.水氮供应对温室黄瓜叶绿素含量及光合速率的影响[J].干旱地区农业研究,2016,34(5):198-204.
LI J,LI Z J,ZHANG F C,et al.Effects of water and nitrogen supply on chlorophyll content and photosynthetic rate of greenhouse cucumber[J].Agricultural research in the arid areas,2016,34(5):198-204.
- [17] 刘玉梅.不同施氮水平对嫁接和自根黄瓜生长和生理的影响[J].安徽农业科学,2009,37(26):12481-12484.
LIU Y M.Effects of different nitrogen application levels on the growth and physiology of grafted and self-rooted cucumber[J].Journal of Anhui agricultural sciences,2009,37(26):12481-12484.
- [18] 王丽,邹茸,王秀斌,等.不同氮肥品种对不同类型土壤苋菜镉累积的影响[J].中国土壤与肥料,2020(3):29-35.
WANG L,QU R,WANG X B,et al.Effects of different nitrogen fertilizers on cadmium accumulation of *Amaranthus mangostanus* L.in different soil types[J].Soil and fertilizer sciences in China,2020(3):29-35.
- [19] 张申,刘丽萍,苗庆选,等.不同氮肥品种对高羊茅生长及养分吸收的影响[J].草原与草坪,2019,39(6):66-71.
ZHANG S,LIU L P,MIAO Q X,et al.Effects of different nitrogen fertilizers on the growth and nutrient absorption characteristics of *Festuca arundinacea*[J].Grassland and turf,2019,39(6):66-71.
- [20] 魏贵玉,方泽涛,李伏生.不同氮肥种类和亏缺灌溉对切花百合品质的影响[J].植物营养与肥料学报,2017,23(1):244-253.

- WEI G Y, FANG Z T, LI F S. Effects of different nitrogen fertilizers and deficit irrigation on quality of lily (*Lilium* spp.) cut-flower[J]. Journal of plant nutrition and fertilizer, 2017, 23(1): 244-253.
- [21] 向芬, 李维, 刘红艳, 等. 氮素水平对不同品种茶树光合及叶绿素荧光特性的影响[J]. 西北植物学报, 2018, 38(6): 1138-1145.
- XIANG F, LI W, LIU Y H, et al. Characteristics of photosynthetic and chlorophyll fluorescence of tea varieties under different nitrogen application levels[J]. Acta botanica boreali-occidentalia Sinica, 2018, 38(6): 1138-1145.
- [22] 范媛媛. 氮肥添加对贝加尔针茅草原群落特征和牧草品质的影响[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2021.
- FAN Y Y. Effects of nitrogen fertilizer addition on the community characteristics and forage quality of stipa baicalensis steppe[D]. Hohhot: Inner Mongolia agricultural University, 2021.
- [23] 刘新亮, 唐星林, 黄文超, 等. 施氮对镉胁迫下龙葵生长和光合特性的影响[J]. 西部林业科学, 2021, 50(6): 24-30.
- LIU X L, TANG X L, HUANG W C, et al. Effects of nitrogen supplement on photosynthetic characteristic and growth rate of poplar plants under cadmium stress[J]. Journal of Sichuan agricultural university, 2021, 50(6): 24-30.
- [24] 李伟, 江智敏, 肖汉乾, 等. 基追氮肥比例对郴州稻茬烤烟生长和产量及质量的影响[J]. 作物研究, 2021, 35(6): 576-580.
- LI W, JIANG Z M, XIAO H Q, et al. Effect of the ratio of base and topdressing nitrogen fertilizer on the growth, yield and quality of flue-cured tobacco in rice-tobacco rotation[J]. Crop research, 2021, 35(6): 576-580.
- [25] 高迎旭, 周毅, 郭世伟, 等. 不同形态氮素营养对水稻抗旱性影响的研究[J]. 干旱区研究, 2006(4): 598-603.
- GAO Y X, ZHOU Y, GUO S W, et al. Effects of different nitrogen supply forms on drought resistance of paddy plants[J]. Arid zone research, 2006(4): 598-603.
- [26] 曹莹, 段萌, 刘玉莲, 等. 镉胁迫下铵态氮对春小麦光合生理特性的影响[J]. 生态环境学报, 2011, 20(2): 359-363.
- CAO Y, DUAN M, LIU Y L, et al. Effects of NH_4^+ -N on photosynthetic characteristics of spring wheat plant under cadmium[J]. Ecology and environmental sciences, 2011, 20(2): 359-363.
- [27] 潘玉梅, 唐赛春, 韦春强, 等. 三叶鬼针草生长特征对土壤氮素水平的响应[J]. 杂草科学, 2012, 30(1): 11-16.
- PAN Y M, TANG S C, WEI C Q, et al. Response of growth characteristics of *Bidens pilosa* L. to soil nitrogen level[J]. Weed science, 2012, 30(1): 11-16.
- [28] 李伟华, 冯莉, 周先叶, 等. 外来入侵杂草的分布及其土壤 $\text{NH}_4^+/\text{NO}_3^-$ 生境特征研究[J]. 华南师范大学学报(自然科学版), 2014, 46(5): 105-111.
- LI W H, FENG L, ZHOU X Y, et al. Study on distribution of alien invasive weeds and their characteristics of soil $\text{NH}_4^+/\text{NO}_3^-$ nitrogen[J]. Journal of south China normal university (natural science edition), 2014, 46(5): 105-111.
- [29] 裴文梅, 张参俊, 王景安. 不同氮形态及配比对甘草生长及品质的影响[J]. 中国农学通报, 2011, 27(28): 184-187.
- PEI Y M, ZHANG S J, WANG J A, et al. Effects of nitrogen form ratios on the lettuce growth and activity of protective enzymes[J]. Journal of Huazhong agricultural, 2011, 27(28): 184-187.
- [30] Sousa L T D, Antonio M F. Nitrogen form regulates cadmium uptake and accumulation in Tanzania; guinea grass used for phytoremediation[J]. Chemosphere, 2019: 236.
- [31] 李江遐, 关强, 黄伏森, 等. 不同改良剂对矿区土壤重金属有效性及土壤酶活性的影响[J]. 水土保持学报, 2014, 28(6): 211-215.
- LI J X, GUAN Q, HUANG F S, et al. Impacts of different amendments of availability of heavy metals and soil enzyme activity in mining area soils[J]. Journal of soil and water conservation, 2014, 28(6): 211-215.
- [32] HUIPING D, SHUHE W, LIDIA S. Effects of different soil pH and nitrogen fertilizers on *Bidens pilosa* L. Cd accumulation[J]. Environmental science and pollution research, 2020, 27(9): 9403-9409.
- [33] 綦峥, 齐越, 杨红, 等. 土壤重金属镉污染现状、危害及治理措施[J]. 食品安全质量检测学报, 2020, 11(7): 2286-2294.
- QI Z, QI Y, YANG H, et al. Status, harm and treatment measures of heavy metal cadmium pollution in soil[J]. Journal of food safety & quality, 2020, 11(7): 2286-2294.
- [34] 张海涛, 王倩, 刘金, 等. 不同施肥处理对黄淮地区大白菜产量及养分利用率的影响[J]. 河南农业大学学报, 2012, 46(4): 392-396.
- ZHANG H T, WANG Q, LIU J, et al. Effect of different fertilization treatments on the yield of Huang-Huai region cabbage and nutrient use efficiency[J]. Journal of Henan agricultural university, 2012, 46(4): 392-396.
- [35] 马忠明, 杜少平, 薛亮. 磷钾配施对旱砂田西瓜产量、品质及养分利用率的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2014, 20(3): 687-695.
- MA Z M, DU S P, XUE L, et al. Effects of combined application of P and K on the yield, quality and nutrient utilization of watermelon in gravel-mulched field[J]. Journal of plant nutrition and fertilizer, 2014, 20(3): 687-695.