



王欢欢, 鹿美航, 鹿俊华, 董元杰. 农用无机纤维对镉胁迫下黑麦草生长的影响及其机理[J]. 中国农业大学学报, 2023, 28(12): 54-64.
WANG Huanhuan, LU Meihang, LU Junhua, DONG Yuanjie. Effect of agricultural inorganic fibers on the growth of ryegrass under cadmium stress and its mechanism[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2023, 28(12): 54-64.
DOI: 10.11841/j.issn.1007-4333.2023.12.05

农用无机纤维对镉胁迫下黑麦草生长的影响及其机理

王欢欢¹ 鹿美航² 鹿俊华² 董元杰^{1*}

(1. 山东农业大学 资源与环境学院/土肥资源高效利用国家工程研究中心, 山东 泰安 271018;
2. 淄博华源科技创新发展有限公司, 山东 沂源 256100)

摘要 研究农用无机纤维(IF)对镉(Cd)胁迫下黑麦草生长的影响及其机理。采用盆栽试验,研究了IF和污染土壤体积比分别为1:19(IF1)、1:9(IF2)和3:17(IF3)的IF对Cd污染土壤($\omega(\text{Cd})=50\text{ mg/kg}$)上黑麦草生长、生理生化特性、土壤理化性质和Cd质量分数的影响。结果表明: Cd胁迫显著抑制了黑麦草的生长, IF1处理能有效促进黑麦草的生长,降低黑麦草根系与叶片丙二醛(MDA)含量和超氧阴离子($\text{O}_2^{\cdot-}$)产生速率,提高可溶性蛋白质质量分数和抗氧化酶活性,增加土壤中有效硅的质量分数,增加黑麦草根和叶的Cd质量分数和地上部Cd积累量。IF2和IF3处理对Cd胁迫下黑麦草的促进作用不明显,但也能改善黑麦草根和叶的上述生理生化指标,且与IF1处理差异不显著; IF2和IF3处理能显著增加土壤中有效硅质量分数,降低土壤有效Cd质量分数,降低黑麦草叶片与根系中Cd质量分数与Cd积累量。本研究可为开辟外源物质提高植物耐Cd性,强化植物修复Cd污染土壤的绿色新途径提供依据。

关键词 农用无机纤维; 土壤Cd污染; 黑麦草; 植物修复

中图分类号 X53 **文章编号** 1007-4333(2023)12-0054-11 **文献标志码** A

Effect of agricultural inorganic fibers on the growth of ryegrass under cadmium stress and its mechanism

WANG Huanhuan¹, LU Meihang², LU Junhua², DONG Yuanjie^{1*}

(1. College of Resources and Environment/National Engineering Research Center for Efficient Utilization of Soil and Fertilizer Resources, Shandong Agricultural University, Tai'an 271018, China;
2. Zibo Huayuan science and Technology Innovation Development Co., Ltd, Yiyuan 256100, China)

Abstract The study was to analyze the effect and mechanism of agricultural inorganic fibers (IF) on ryegrass growth under cadmium (Cd) stress. The effects of IF with volume ratios of 1:19 (IF1), 1:9 (IF2) and 3:17 (IF3) on the growth, physiological and biochemical characteristics, soil physicochemical properties and Cd mass fraction of ryegrass on Cd contaminated soil ($\omega(\text{Cd})=50\text{ mg/kg}$) were studied by pot experiments. The results showed that: Cd stress significantly inhibited the growth of ryegrass, and the treatment of IF1 could effectively promote the growth of ryegrass, reduce the content of malondialdehyde (MDA) and the production rate of superoxide anion ($\text{O}_2^{\cdot-}$) in roots and leaves of ryegrass, improve the mass fraction of soluble protein and antioxidant enzyme activity, increase the mass fraction of available silicon in soil, and increase the Cd mass fraction of ryegrass roots and leaves and the accumulation of Cd in the aboveground part. The growth promotion effect of the treatment of IF2 and IF3 on ryegrass under Cd stress was not obvious, but it can also improve the above physiological and biochemical indexes of ryegrass roots and leaves, and the

收稿日期: 2023-02-22

基金项目: 山东省重点研发计划项目(2021CXGC00704); 淄博华源科技创新发展有限公司农用纤维应用项目(381192)

第一作者: 王欢欢(ORCID:0000-0001-5245-6622), 硕士研究生, E-mail: 455150645@qq.com

通讯作者: 董元杰(ORCID:0000-0002-6827-5612), 教授, 主要从事植物营养与肥料、土壤生态与环境质量方面的研究, E-mail: yuanjiedong@163.com

difference with the treatment of IF1 was not significant; The treatment of IF2 and IF3 could significantly increase the available silicon mass fraction in soil, reduce the soil effective Cd mass fraction, and reduce the Cd mass fraction and Cd accumulation in leaves and roots of ryegrass. This study can provide a basis for opening up a new green way for exogenous substances to improve plant Cd tolerance and strengthen phytoremediation of Cd contaminated soil.

Keywords agricultural inorganic fiber; soil Cd pollution; ryegrass; phytoremediation

随着工农业的快速发展,我国环境污染问题层出不穷,其中土壤镉(Cd)污染问题愈发得到人们的关注。Cd作为一种植物非必需的重金属元素,广泛存在于土壤环境中,对土壤和水体产生严重污染^[1]。Cd容易被植物吸收积累,不仅影响植物本身的生长发育,还会随食物链传递影响人类健康^[2]。在现有Cd污染土壤修复方法中,植物修复技术因其过程简单、成本低和环境友好等多种特点得到广泛应用。超富集植物对污染程度低的土壤具有较高的应用价值^[3-5],但超富集植物易受地域、生长周期偏长和生物量偏小的影响,限制了植物修复在生产上的应用,难以满足Cd污染土壤修复的需求^[6]。因而,运用对Cd有一定耐性和积累能力的常规植物来修复Cd污染土壤的研究越来越得到人们的重视。近期研究表明,找到既能缓解常规植物Cd胁迫,又能修复Cd污染土壤的外源物质来缓解Cd对植物生长的胁迫效应,以实现Cd污染土壤边修复边利用的目的,是强化常规植物修复Cd污染土壤的有效途径^[2]。有研究发现,1年生黑麦草(*Lolium* spp.)地上部的Cd积累量分别为超富集植物龙葵和印度芥菜的3.4和4.1倍^[7]。本研究前期研究发现,黑麦草具有生长快、产量高、适应性强和对Cd富集能力强等特点,可作为常规植物来修复Cd污染土壤。因此,筛选出合适的外源物质来提高黑麦草修复Cd污染土壤的效率,缓解Cd污染土壤对黑麦草生长的胁迫作用,对环境健康、食品安全以及提高土地利用率都具有重要意义。

农用无机纤维材料(IF)由纯无机材料高温熔融甩丝而成,具有耐火、保温、节能和环保的特点,在工业、建筑业和日常生活中得到了广泛应用。IF主要成分为SiO₂、CaO和MgO,目前有关Ca和Si缓解植物Cd胁迫的研究较多。钙是参与各种植物生理过程所必需的中量营养元素,由于Ca和Cd之间的化学相似性,Ca可作为外源物质调节Cd诱导的植物生理代谢变化,通过缓解生长抑制,调节重金属的转运和积累,改善光合并减轻重金属胁迫诱导的氧化损伤,从而缓解植物Cd胁迫^[8]。有研究表明,添

加外源Ca可缓解Cd对魔芋的氧化损伤,增加生物量^[9],增强多年生黑麦草光合能力,降低活性氧(ROS)的积累并增强抗氧化防御系统,降低Cd的可移动性从而缓解其胁迫现象^[10]。外源硅能提高黄瓜苗期光合作用,缓解Cd污染土壤中植物的Cd胁迫现象^[11],并能促进Cd污染土壤中固相Cd向无效态转化,降低自由态Cd浓度,从而缓解水稻幼苗的Cd胁迫现象^[12]。还有研究表明通过硅钙肥的使用,减少了Pb和Cd从水稻根部向地上部的转移,增加了水稻各部位Si浓度,从而减少了水稻地上部的重金属浓度^[13]。镁是植物所需的中量营养元素,但被用作修复Cd污染土壤和缓解植物Cd胁迫的相关应用甚少。有研究提出添加外源Mg能使Cd污染条件下的水稻多器官中Cd含量升高^[14],但关于Mg对土壤Cd污染的作用及对植物转运Cd的能力说法不一,需进一步研究。IF具有多孔隙和高吸附性的特点,有可能吸附栽培介质中的Cd,降低介质中有效Cd质量分数。另外IF进入土壤后可提高土壤pH,可能对固定土壤中有效Cd质量分数发挥一定作用。目前,有关IF作为外源物质缓解黑麦草Cd胁迫效应及其机理的研究还较少,在土壤重金属修复方面的相关应用研究也处于起步阶段,相关理论和应用基础研究亟需加强。

本试验通过研究添加外源IF对Cd胁迫下黑麦草的生长指标、生理生化指标、Cd吸收和Cd积累的影响,及其对土壤理化性质、有效性钙镁硅质量分数和有效Cd质量分数的影响,旨在摸清IF缓解黑麦草Cd胁迫的效应及其机理,明确其对黑麦草修复Cd污染土壤的影响,为开辟外源物质提高植物Cd耐性,强化植物修复Cd污染土壤的绿色新途径提供依据。

1 材料与方法

1.1 试验设计

盆栽试验于2021年11月在山东农业大学资源与环境学院土肥资源高效利用国家工程研究中心进

行。供试黑麦草品种为‘四倍体黑麦草’。选取大小均匀且无病虫害的黑麦草种子,经 0.1% 的 NaClO 消毒处理后待播种。试验用土取自无污染的试验田。供试土壤基本性质:铵态氮 6.00 mg/kg、硝态氮 13.01 mg/kg、速效磷 28.93 mg/kg、速效钾 76.39 mg/kg, pH 6.88, 电导率为 54 μ S/cm, 总镉质量分数 0.16 mg/kg。供试 IF(淄博华源科技创新发展有限公司提供)为过筛 2 mm 的纤维颗粒, pH 8.78, 电导率 205 μ S/cm, 交换性钙(1/2 Ca²⁺)为 85.76 cmol/kg, 交换性镁(1/2 Mg²⁺)为 4.29 cmol/kg, 有效硅质量分数为 12.17 mg/kg。IF 主要成分中 SiO₂ 含量为 64.11%, CaO 含量为 28.58%, MgO 含量为 5.98%, 淋溶条件下测得 IF 含有丰富的 Ca、Mg 和 Si 元素。与土壤体积比为 1:19、1:9 和

3:17 时的 IF 对 Cd(50 mg/L Cd 溶液)的吸附率分别为 32.14%、38.94% 和 52.75%, 对 100 μ mol/L Cd 溶液的吸附率分别为 64.21%、80.85% 和 90.71%。本试验人工污染土壤制备:将 CdCl₂·2.5H₂O(M=228.4)溶于蒸馏水配制成 3.81 g/L 的溶液,取 20 mL 喷洒到 750 g 风干土壤(本试验每盆装 750 g 土壤)中混合均匀,制成 Cd 元素质量分数为 50 mg/kg 的供试 Cd 污染土壤,平衡 1 周后播种。基肥为复合肥:15% N, 15% P₂O₅, 15% K₂O。试验用塑料盆,每盆肥料的用量为 225 mg。

试验处理见表 1。本试验共设 5 个处理,每个处理设 3 次重复。每盆播种 2 g, 最后留苗 80 株。试验设计时 IF 一次性施入土中,处理 30 d 后收获测定植物和土壤各项指标。

表 1 试验设计

Table 1 Experimental designs

| 处理 Treatment | 内容 Content |
|-----------------|---|
| CK | 无污染土壤 |
| Cd | 污染土壤中 $\omega(\text{Cd})=50$ mg/kg |
| IF1 | $V(\text{IF}):V(\text{污染土壤})=1:19$, 污染土壤中 $\omega(\text{Cd})=50$ mg/kg |
| IF2 | $V(\text{IF}):V(\text{污染土壤})=1:9$, 污染土壤中 $\omega(\text{Cd})=50$ mg/kg |
| IF3 | $V(\text{IF}):V(\text{污染土壤})=3:17$, 污染土壤中 $\omega(\text{Cd})=50$ mg/kg |

1.2 测定指标与方法

植株收获后用去离子水冲洗干净,并用吸水纸吸干,直接测定鲜重(FW)和株高。新鲜材料于 105 $^{\circ}$ C 杀青 30 min,然后在 70 $^{\circ}$ C 下烘干至恒重,测定植株干重(DW)。采用 SPAD 仪测定叶绿素。采用羟胺氧化反应法测定 O₂⁻ 产生速率^[15],采用硫代巴比妥酸法测定 MDA 含量,采用考马斯亮蓝 G250 法测定可溶性蛋白质含量。采用氮蓝四唑(NBT)法测定超氧化物歧化酶(SOD)活性,采用愈创木酚法测定过氧化物酶(POD)活性,采用紫外吸收法测定过氧化氢酶(CAT)和抗坏血酸过氧化物酶(APX)活性^[16]。采用硝酸-高氯酸消煮-原子吸收分光光度法测定植株 Ca、Mg 和 Cd 元素^[17],采用王水-HClO₄ 消煮法测定土壤全镉,采用 DTPA 浸提-原子吸收分光光度法测定土壤有效态镉。土壤($m(\text{土}):m(\text{水})=2.5:1$)pH 使用 PHS-3C 型 pH 计测定,土壤($m(\text{土}):m(\text{水})=5:1$)电导率使用

DDS-11A 型电导率仪测得。采用乙酸铵浸提法测定土壤交换性 Ca 和 Mg,采用柠檬酸浸提-钼蓝比色法测定土壤有效 Si。

1.3 数据处理与分析方法

试验数据采用 Excel 2019 和 Origin 2021 进行处理与绘图,采用 SPSS 21.0 软件进行统计分析,采用 Duncan 法进行差异显著性检验($P<0.05$)。

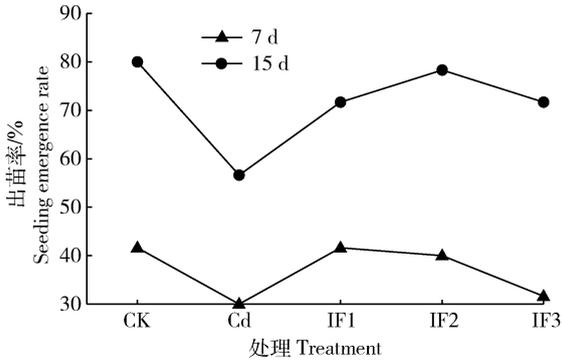
2 结果与分析

2.1 外源 IF 对 Cd 胁迫下黑麦草出苗和生长的影响

2.1.1 对 Cd 胁迫下黑麦草出苗率的影响

外源 IF 对 Cd 胁迫下黑麦草出苗率的影响见图 1。与 CK 相比,Cd 胁迫显著降低黑麦草在第 7 天及第 15 天的出苗率,分别降低 28.01% 和 29.16%;与 Cd 处理相比,添加 IF 能显著提高 7 和 15 d 时 Cd 胁迫下黑麦草的出苗率,IF1 处理可使 Cd 胁迫下黑麦草出苗率分别提高 20.00% 和 11.66%。

IF2 和 IF3 处理也可提高 Cd 胁迫下黑麦草出苗率, IF2 处理在 15 d 时的出苗率优于 IF1, 但 7 d 时仍以 IF1 处理效果最佳。7 d 时处理 IF2 和 IF3、15 d 时



CK、Cd、IF1、IF2 及 IF3 具体含义见表 1。下同。

The specific meanings of CK, Cd, IF1, IF2 and IF3 are shown in Table 1. The same below.

图 1 外源 IF 对 Cd 胁迫下黑麦草出苗率的影响

Fig. 1 Effect of exogenous IF on ryegrass emergence rate under Cd stress

处理 IF3 中黑麦草出苗率会出现降低趋势。可能是因为 IF 可改善土壤理化性质, 具有良好的保水性能, 能加快 Cd 胁迫下黑麦草出苗的速度, 提高出苗率, 但 IF 添加量过高可能会增大土壤 pH 从而抑制黑麦草出苗, 因此 IF1 处理添加量对出苗最佳。

2.1.2 对 Cd 胁迫下黑麦草生长指标的影响

IF 对 Cd 胁迫下黑麦草生长的影响见表 2。与 CK 相比, Cd 胁迫会显著降低黑麦草株高、鲜重、干重和 SPAD 值, 分别降低 23.63%、41.34%、25.93% 和 20.70%, 说明 Cd 胁迫能显著抑制黑麦草的生长, 降低其生物量。添加低浓度 IF 可缓解黑麦草的 Cd 胁迫, 且以 IF1 处理效果最优, 与 Cd 处理相比, 可使黑麦草株高、鲜重、干重和 SPAD 增加 1.35%、33.56%、10.00% 和 3.08%。IF2 和 IF3 处理也可增加 Cd 胁迫下黑麦草的生物量, 但差异不显著。因此添加适量 IF 能有效促进黑麦草的生长, 提高叶片 SPAD 值, 缓解黑麦草 Cd 胁迫, 以 IF1 处理效果最优。

表 2 外源 IF 对 Cd 胁迫下黑麦草生长的影响

Table 2 Effects of exogenous IF on the growth of ryegrass under Cd stress

| 处理 Treatment | 株高/cm Shoot height | 鲜重/(g/15 株) Fresh weight | 干重/(g/15 株) Dry weight | SPAD 值 SPAD value |
|-----------------|-----------------------|-----------------------------|---------------------------|----------------------|
| CK | 29.20±1.20 a | 2.54±0.39 a | 0.27±0.01 a | 24.97±0.62 a |
| Cd | 22.30±1.30 b | 1.49±0.04 c | 0.20±0.02 b | 19.80±0.74 b |
| IF1 | 22.60±0.85 b | 1.99±0.16 b | 0.22±0.03 b | 20.41±1.19 c |
| IF2 | 21.77±3.91 b | 1.65±0.03 bc | 0.20±0.04 b | 20.84±0.89 bc |
| IF3 | 22.53±1.62 b | 1.49±0.14 c | 0.20±0.01 b | 22.32±1.35 c |

注: CK、Cd、IF1、IF2 及 IF3 具体含义见表 1。不同字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$)。下同。

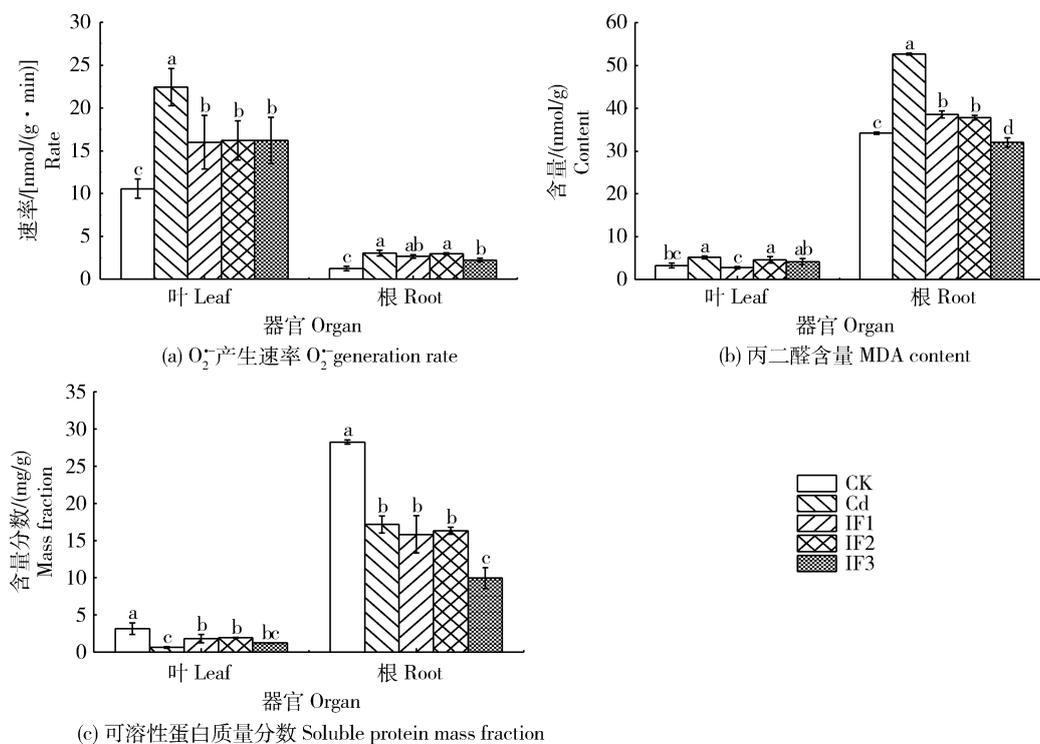
Note: The specific meanings of CK, Cd, IF1, IF2 and IF3 are shown in Table 1. Different letters in a column indicate significant differences among treatments at the 0.05 level. The same below.

2.2 外源 IF 对黑麦草生理生化指标的影响

2.2.1 对 Cd 胁迫下黑麦草可溶性蛋白含量、 O_2^- 产生速率和 MDA 含量的影响

IF 对 Cd 胁迫下黑麦草可溶性蛋白含量、 O_2^- 产生速率和 MDA 含量的影响见图 2。Cd 胁迫会使黑麦草叶片及根系的可溶性蛋白显著降低 (图 2(c))。与 CK 相比, 叶片及根系的可溶性蛋白含量分别降低了 80.01% 和 39.26%, 黑麦草叶片和根系中 MDA 含量分别增加了 56.53% 和 54.11%, O_2^- 产生速率分别增加 112.00% 和 138.58% (图 2(a) 和 2(b)), 说明 Cd 胁迫引起了黑麦草的过氧化

作用。与 Cd 处理相比, IF1 处理能使 Cd 胁迫下黑麦草叶片及根系 O_2^- 的产生速率降低 28.72% 和 12.22%, 使黑麦草叶片及根系中的 MDA 含量降低 45.78% 和 26.79%, 使黑麦草叶片中可溶性蛋白含量增加 187.30%, 说明添加 IF 可以缓解 Cd 胁迫导致的黑麦草生理功能受抑, 增加黑麦草可溶性蛋白含量。IF2 和 IF3 处理也可有效降低黑麦草根叶 MDA 含量和 O_2^- 产生速率, 提高可溶性蛋白含量, 且 IF3 处理对降低黑麦草根系的 MDA 含量和 O_2^- 产生速率优于 IF1, 说明添加 IF 可以降低黑麦草因逆境所受的氧化损伤, 缓解其 Cd 胁迫效应。



不同小写字母表示差异显著 ($P < 0.05$)。下同。

Different lowercase letters mean significant difference ($P < 0.05$). The same below.

图2 外源IF对Cd胁迫下黑麦草可溶性蛋白含量、 O_2^- 产生速率和MDA含量的影响

Fig. 2 Effects of exogenous IF on soluble protein content, O_2^- production rate and MDA content of ryegrass under Cd stress

2.2.2 对Cd胁迫下黑麦草抗氧化酶活性的影响

与CK相比, Cd胁迫会显著降低黑麦草叶片及根系中POD和CAT抗氧化酶活性,降低根系SOD和APX抗氧化酶活性,且对根系酶活性降低程度更显著。与Cd处理相比,添加不同体积比IF均能提高Cd胁迫下黑麦草叶片及根系中SOD活性。IF1处理下黑麦草叶片和根系SOD活性分别提高8.12%和22.55%,在根系中SOD活性以IF2处理提高效果最明显,达28.08%(图3(a))。IF2处理提高黑麦草叶片及根系POD效果最明显,分别使黑麦草叶片和根系中POD活性提高了29.43%和103.23%;IF1处理使黑麦草叶片及根系中POD活性分别提高13.73%和93.70%,2种添加量IF均可有效提高黑麦草POD活性,且差异显著(图3(b))。IF1处理能使黑麦草叶片及根系中CAT活性提高25.36%和93.12%,而IF2能使黑麦草根系中CAT活性提高202.56%(图3(c))。IF1处理可使黑麦草根系APX活性提高24.14%,而处理IF2和IF3对黑麦草根系APX活性提高效

果更明显,分别提高92.67%和77.35%,且差异显著(图3(d))。添加适宜浓度的IF能够提高叶片及根系中各种抗氧化酶活性,且对黑麦草根系各抗氧化酶活性提高效果更显著,这说明IF能缓解Cd胁迫下黑麦草所受氧化损伤,从而缓解Cd胁迫,增强黑麦草的耐Cd性。

2.3 外源IF对Cd污染土壤中Ca、Mg和Si含量的影响

与CK相比,单一Cd处理对土壤中 $1/2 Ca^{2+}$ 、 $1/2 Mg^{2+}$ 和有效Si含量几乎无影响(表3)。与Cd处理相比,不同添加量的IF均能显著增加土壤中有效Si的质量分数,且IF1处理的增加效果最明显,达47.13%;IF2和IF3处理分别使土壤有效Si质量分数增加8.43%和22.74%。IF3处理能增加土壤 $1/2 Ca^{2+}$ 含量,但差异不显著。说明IF中含有的Ca和Si元素,可增加土壤中有效Si质量分数,增加IF3处理土壤中的 $1/2 Ca^{2+}$ 含量,这可能进一步影响黑麦草体内Ca和Si元素的质量分数,提高黑麦草耐Cd性。

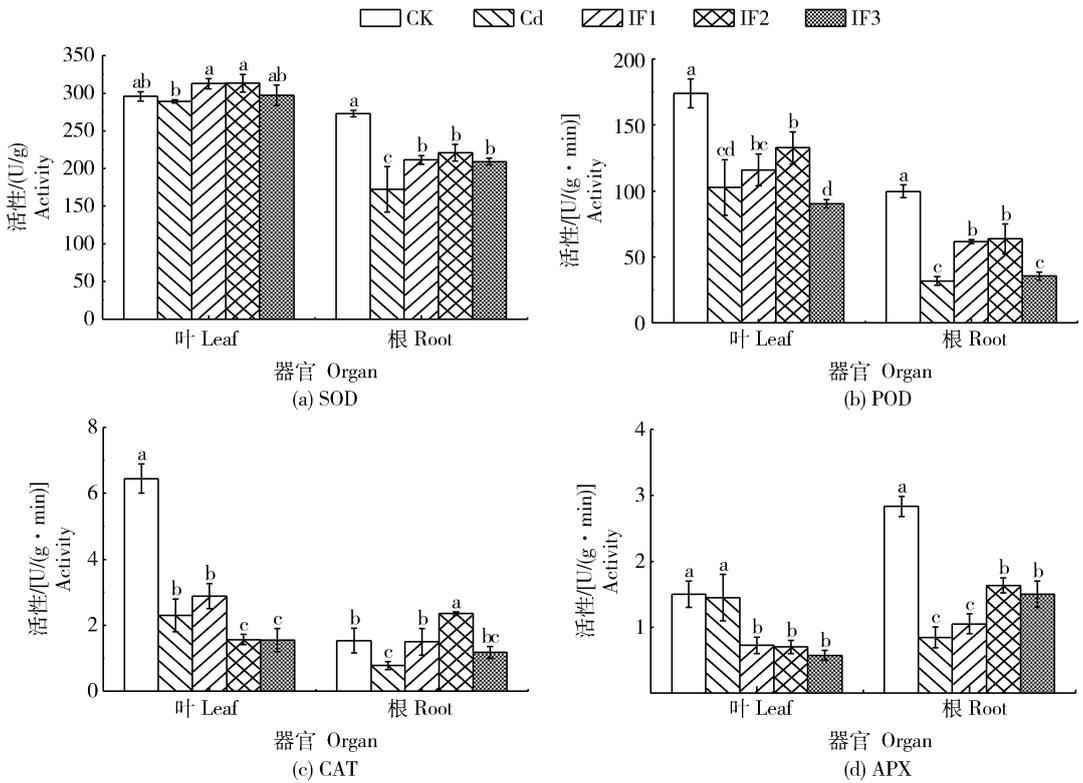


图 3 外源 IF 对 Cd 胁迫下黑麦草抗氧化酶活性的影响

Fig. 3 Effect of exogenous IF on antioxidant enzyme activity of ryegrass under cadmium stress

表 3 外源 IF 对 Cd 污染土壤中 Ca、Mg 和 Si 质量分数的影响

Table 3 Effects of exogenous IF on calcium, magnesium and silicon mass fraction in cadmium-contaminated soil

| 处理 Treatment | 土壤交换性钙含量/ (cmol/kg) 1/2 Ca ²⁺ content | 土壤交换性镁含量/ (cmol/kg) 1/2 Mg ²⁺ content | 土壤有效硅质量分数/ (mg/kg) Soil available silicon mass fraction |
|-----------------|--|--|---|
| CK | 15.30±0.27 b | 4.22±0.10 ab | 306.25±15.96 d |
| Cd | 15.47±0.10 b | 4.21±0.19 ab | 328.33±13.58 cd |
| IF1 | 15.32±1.12 b | 3.86±0.14 b | 483.06±28.31 a |
| IF2 | 14.11±0.51 b | 3.54±0.18 c | 356.00±17.65 c |
| IF3 | 20.34±1.53 a | 3.94±0.03 c | 403.00±2.75 b |

2.4 外源 IF 对 Cd 污染土壤理化性质的影响

与 CK 相比, Cd 处理对土壤 pH 和电导率无明显影响(表 4)。与 Cd 处理相比, 不同添加量 IF 均能明显增加土壤 pH 和电导率, 且随 IF 添加量的增加有升高趋势。与 Cd 处理相比, IF1、IF2 和 IF3 分别使土壤 pH 增加 9.80%、7.26% 和 12.16%, 电导

率分别增加 7.30%、31.11% 和 26.09%。可能是 IF 中富含 CaO 和 MgO 等碱性氧化物提高了土壤 pH, 同时 IF 材料部分溶解增加了土壤中离子浓度, 从而使电导率升高。pH 增加将有利于 Cd 的固定, Si 的阴离子也能增加 Cd 的固定, 这可能进一步降低土壤中有效 Cd 的质量分数。

表4 外源 IF 对 Cd 污染土壤理化性质的影响

Table 4 Effects of exogenous IF on physicochemical properties of cadmium-contaminated soil

| 处理 Treatment | pH | 电导率/($\mu\text{S}/\text{cm}$) Electrical conductivity |
|-----------------|--------------|--|
| CK | 5.82±0.06 c | 120.30±18.38 b |
| Cd | 5.92±0.03 c | 124.70±8.61 ab |
| IF1 | 6.50±0.11 ab | 133.80±28.06 ab |
| IF2 | 6.35±0.15 b | 163.50±8.36 a |
| IF3 | 6.64±0.13 a | 157.23±30.10 ab |

表5 外源 IF 对黑麦草体内 Ca 和 Mg 质量分数的影响

Table 5 Effects of exogenous IF on Ca, Mg mass fraction in ryegrass mg/kg

| 处理 Treatment | 钙质量分数 Ca mass fraction | | 镁质量分数 Mg mass fraction | |
|-----------------|---------------------------|-------------------|---------------------------|-------------------|
| | 叶 Leaf | 根 Root | 叶 Leaf | 根 Root |
| CK | 5 784.52±0.83 a | 4 426.52±14.27 bc | 1 074.81±36.72 c | 1 122.50±3.77 a |
| Cd | 5 206.95±2.30 c | 4 850.94±3.28 ab | 1 214.88±63.43 ab | 1 156.57±5.09 ab |
| IF1 | 5 628.26±25.12 ab | 5 164.12±70.74 a | 1 234.75±8.95 a | 1 189.70±16.98 ab |
| IF2 | 5 251.09±18.63 c | 4 273.14±3.69 bc | 1 164.51±10.51 b | 1 141.58±9.48 ab |
| IF3 | 5 372.05±10.44 bc | 3 800.50±14.56 c | 1 222.84±17.27 ab | 997.66±0.23 b |

2.6 外源 IF 对植株及土壤 Cd 质量分数和 Cd 积累量的影响

Cd 胁迫会显著提高黑麦草叶片及根系 Cd 的质量分数,且根系中 Cd 的质量分数远高于叶片(表 6)。与 Cd 处理相比,添加 IF 能降低土壤有效 Cd 质量分数,IF2 和 IF3 均能降低黑麦草根叶 Cd 质量分数和地上部 Cd 积累量,并增加 Cd 从黑麦草根系向叶片的运输,提高了转运系数(TF);且随 IF 添加量的增加,对降低黑麦草叶片及根系 Cd 质量分数效果更明显。与 Cd 处理相比,IF2 使黑麦草叶片和根系 Cd 质量分数分别降低 3.45%和 20.15%,IF3 使黑麦草叶片和根系 Cd 质量分数分别降低 19.94%和 34.67%,IF2 和 IF3 分别使黑麦草地上部 Cd 积累量降低 18.22%和 22.22%。而 IF1 处理能显著提高富集系数(BCF),增加黑麦草地上部 Cd 的积累量,促进 Cd 从土壤向植物体内的迁移;同时增加了黑麦草叶片及根系 Cd 质量分数,促进其对 Cd 的吸收,分别使黑麦草叶片和根系 Cd 质量分数

2.5 外源 IF 对黑麦草体内 Ca 和 Mg 质量分数的影响

与 CK 相比,Cd 胁迫会降低黑麦草叶片 Ca 和根系 Mg 的质量分数,而根系 Ca 和叶片 Mg 质量分数略有增加(表 5)。IF1 处理能使 Cd 胁迫下黑麦草叶片及根系中 Ca 和 Mg 质量分数增加,可能是因为 IF 促进了 Cd 胁迫下黑麦草的生长,从而增加了植物对 Ca 和 Mg 等有益元素的吸收。与 Cd 处理相比 IF1 处理可使 Cd 胁迫下黑麦草叶片和根系 Ca 质量分数提高 8.09%和 6.46%,而 IF2 和 IF3 处理对提高黑麦草叶片及根系 Ca 和 Mg 质量分数影响不明显。可能是高添加量 IF 对黑麦草生长有抑制作用,从而影响其对离子的吸收。

增加 6.89%和 2.61%,地上部 Cd 积累量增加 10.22%。说明 IF1 处理可促进黑麦草生长,增加生物量并促进 Cd 吸收,增强耐 Cd 性;而 IF2 和 IF3 也能降低土壤有效 Cd 质量分数,且能减少 Cd 被黑麦草吸收,从而缓解黑麦草的 Cd 胁迫。

3 讨论

3.1 外源 IF 对 Cd 胁迫下黑麦草生长的影响

本试验条件下,Cd 胁迫会显著抑制黑麦草的生长,使黑麦草的干鲜重、株高和 SPAD 都受到影响,表明 Cd 胁迫严重抑制了黑麦草的生长发育和光合色素形成。IF1 处理能有效促进 Cd 胁迫下黑麦草的生长,缓解 Cd 胁迫效应,IF2 和 IF3 对 Cd 胁迫下黑麦草生长的缓解效应不及 IF1。

有研究表明适度的外源 Si 能有效改善逆境情况下植物生长状况,改善 Cd 胁迫下草莓的生长和生理特性^[18]。本试验材料 IF 中富含的 Si 元素可为植物吸收利用,且本试验中 IF1 处理能有效缓解 Cd

表 6 外源 IF 对 Cd 质量分数、Cd 积累量、有效 Cd、转运系数与富集系数的影响
Table 6 Effects of exogenous IF on cadmium mass fraction, cadmium accumulation, available cadmium, transshipment coefficient, and enrichment coefficient

| 参数 Parameter | 处理 Treatment | | | |
|---|---------------|----------------|---------------|----------------|
| | Cd | IF1 | IF2 | IF3 |
| 植株叶片 Cd 质量分数/(mg/kg) Plant leaf Cd mass fraction | 53.55±0.28 b | 57.24±0.04 a | 51.70±1.17 c | 42.87±0.41 d |
| 植株根系 Cd 质量分数/(mg/kg) Plant root Cd mass fraction | 248.12±3.72 a | 254.59±37.10 a | 198.13±0.63 b | 162.10±12.60 b |
| 植株地上部 Cd 积累量/($\mu\text{g}/15$ 株) Cd accumulation of plant leaves | 11.25±0.59 a | 12.40±1.66 a | 9.20±0.11 b | 8.75±0.17 b |
| 土壤 Cd 质量分数/(mg/kg) Soil Cd mass fraction | 49.60±0.23 a | 47.04±0.51 b | 48.07±1.06 b | 47.58±0.78 b |
| 土壤有效 Cd 质量分数/(mg/kg) Soil available Cd mass fraction | 9.23±0.87 a | 8.74±0.67 ab | 8.89±0.33 ab | 7.71±0.50 b |
| 转运系数 Translation factor | 0.22±0.00 a | 0.23±0.03 ab | 0.26±0.01 b | 0.27±0.02 b |
| 富集系数 Bioconcentration factor | 1.08±0.01 b | 1.22±0.01 a | 1.08±0.05 b | 0.90±0.01 c |

胁迫对黑麦草生长的抑制,增加 Cd 胁迫下黑麦草鲜干重、株高和 SPAD 值,与前人研究结果一致^[18]。而高添加量 IF 可能因其可增大土壤 pH,对 Cd 胁迫下黑麦草的促生效果不显著。因此适量添加 IF 能为黑麦草生长提供营养元素,保持土壤水分,吸附或固定土壤中 Cd,从而能促进 Cd 胁迫下黑麦草的生长,缓解 Cd 胁迫。

3.2 外源 IF 对 Cd 胁迫下黑麦草生理生化指标的影响

逆境胁迫下,植物体内活性氧产生与清除的平衡状态会遭到破坏,使 ROS 水平升高,加剧膜脂过氧化,引起细胞膜损伤与破坏,产生氧化胁迫。 $\text{O}_2^{\cdot-}$ 具有强氧化性,会造成生物膜机构和功能受损,引起核酸和蛋白质变性等,加快植株老化^[19]。抗氧化酶 SOD、POD、CAT 和 APX 是清除 ROS 的重要酶类。MDA 是衡量逆境胁迫下植物膜脂过氧化的重要指标。可溶性蛋白是植物细胞质内渗透调节物质,长期单一的胁迫会损伤植物的生理机制,使可溶性蛋白含量降低。本研究发现 Cd 处理会显著增加 MDA 含量和 $\text{O}_2^{\cdot-}$ 产生速率,降低可溶性蛋白含

量,同时降低黑麦草叶片及根系中各抗氧化酶活性,说明 Cd 胁迫对黑麦草造成了氧化损伤;可溶性蛋白降低可能是 Cd 胁迫导致黑麦草生理功能受抑,影响了相关酶和蛋白的合成。已有研究证明, Si 能促进植株体内相关抗氧化酶活性的增强,提高植株 Cd 耐性^[20]。孟红梅等^[21]研究发现外源 Na_2SiO_3 能增强 Cd 胁迫下板蓝根幼苗的 SOD 和 POD 活性,刘朋等^[22]发现外源 Na_2SiO_3 能增强 Cd 胁迫下高粱叶片中 POD 和 CAT 活性。由此可见,添加外源 Si 可有效提高抗氧化酶活性,清除 Cd 胁迫造成的活性氧积累,缓解质膜的氧化损伤,恢复相关酶和蛋白的合成,这与本研究结果一致。本研究中添加 3 种不同添加量的 IF 均能显著提高黑麦草叶片中可溶性蛋白含量,降低 MDA 含量和 $\text{O}_2^{\cdot-}$ 产生速率,提高叶片及根系各项抗氧化酶活性,以 IF1 处理缓解效果最明显,但与 IF2 和 IF3 的缓解效果基本无显著性差异。这可能是不同添加量的 IF 增加了土壤中的 Si 元素质量分数,使其有利于缓解 Cd 胁迫下黑麦草的氧化损伤,提高了黑麦草清除氧自由基的能力,从而保护细胞免受伤害,缓解了 Cd 胁迫现象。

3.3 外源 IF 对土壤 Ca、Mg 和 Si 元素质量分数以及植株 Ca 和 Mg 质量分数的影响

本研究结果发现,与 Cd 处理相比,外源添加 3 种不同添加量的 IF 均能提高土壤中有效 Si 质量分数,且 IF3 处理能增加土壤中 $1/2\text{Ca}^{2+}$ 含量。IF1 处理能增加黑麦草叶片及根系的 Ca 和 Mg 质量分数,但 IF2 和 3 对 Cd 胁迫下黑麦草根叶的 Ca 和 Mg 质量分数增加效果不明显,这可能是因为 IF1 处理促进了 Cd 胁迫下黑麦草的生长,增加了其对有益元素 Ca 和 Mg 的吸收。有研究表明 Ca 离子在土壤吸附过程中与 Cd 存在竞争关系,能提高 Cd 的迁移率和转化率^[23],因此 IF3 可能通过增加土壤中有效 Ca 质量分数,降低黑麦草对 Cd 的吸收,从而提高黑麦草 Cd 耐性。贾倩等^[13]研究发现,Ca 与硅肥相互作用可显著降低水稻地上部 Cd 质量分数,且随施用量增加其降低效果越显著,说明添加外源 Si 可缓解植株 Cd 胁迫,提高其 Cd 耐性。结合本试验结果,说明 IF 增加了土壤中 Si 的质量分数,而 Si 的添加能减少植株对 Cd 的吸收,本试验 IF2 和 IF3 处理均能降低 Cd 胁迫下黑麦草对 Cd 的吸收,调控 Cd 胁迫下黑麦草的生理特性从而缓解 Cd 胁迫。

3.4 IF 对植株和土壤 Cd 质量分数及 Cd 积累量的影响

有研究报道,土壤 pH 升高会增加土壤胶体表面吸附的负电荷,从而有利于重金属的吸附^[24]。Yang 等^[25]添加硅基材料,增加了土壤的 pH 和土壤阳离子交换量(CEC),而使有效态 Cd 降低;Ning 等^[26]报道,钢渣基硅肥的添加能使土壤 pH 和有效 Si 质量分数增加,并可显著降低水稻土中可交换态 Cd 和稻籽粒中 Cd 的积累。这可能是因为 Si 的添加增大了土壤 pH,固定了土壤中的 Cd,从而降低土壤有效 Cd。史新慧等^[27]发现 Si 缓解水稻幼苗 Cd 毒害原因之一就是水稻体内的硅结合蛋白诱导 Si 在细胞中沉积,进而阻塞细胞壁孔隙度,影响 Cd 的质外体运输,抑制 Cd 向地上部的运输,从而减轻 Cd 毒害。进一步说明了 Si 可抑制 Cd 在植物体内的吸收和运输,从而缓解植株的 Cd 胁迫。由此可见,外源 Si 可有效降低土壤有效 Cd,缓解植物的 Cd 胁迫现象。本研究发现,与 Cd 处理相比,不同添加量 IF 均可显著降低土壤有效 Cd 质量分数,高添加量 IF 能降低黑麦草根叶 Cd 质量分数和地上部 Cd 积累量,而 IF1 处理能增加黑麦草根叶 Cd 质量分数和地上部 Cd 积累量。本研究中不同添加量 IF

对 Cd 污染土壤及 Cd 胁迫黑麦草表现出不同的剂量效应:低添加量 IF($V(\text{IF}) : V(\text{土壤}) = 1 : 19$)主要通过增加 Cd 胁迫下黑麦草的生物量,增强其抗氧化酶活性,降低 MDA 含量和 O_2^- 产生速率,改善其生理特性,促进 Cd 胁迫下黑麦草的生长,强化其对 Cd 的吸收,因而与单独 Cd 处理相比能增加黑麦草的 Cd 积累量,从而降低土壤 Cd 污染;而高添加量 IF($V(\text{IF}) : V(\text{土壤}) = 1 : 9$ 和 $3 : 17$)对 Cd 的吸附和固定作用主要体现在 IF 具有多孔隙和高吸附性的特点,并且含有碱性物质能提高土壤 pH,能增加土壤中有效 Si 的质量分数,因而可吸附或固定土壤中的 Cd,减少土壤中有效 Cd 的质量分数,降低黑麦草对 Cd 的吸收和积累,虽然对黑麦草的促生效果不及 IF1 处理,但与单独 Cd 处理相比生物量仍有所增加。因此,IF 对 Cd 污染土壤的影响,可从修复 Cd 污染土壤和缓解 Cd 污染土壤上植物 Cd 胁迫这 2 个方向进行深入研究,这对缓解我国 Cd 污染现状、缓解人多地少的矛盾以及降低重金属 Cd 对人类健康的危害具有较大的应用价值。用于修复 Cd 污染土壤的黑麦草收获后可作为燃料使用或单独焚烧,将灰分用化学方法进一步提取处理以去除灰分中的重金属,防止黑麦草吸收的 Cd 在植物残体分解后重新进入土壤中,造成 2 次污染。

4 结 论

1) 本试验条件下,Cd 胁迫会显著抑制黑麦草的生长。Cd 胁迫条件下,与 Cd 处理相比,添加 IF 能明显改善黑麦草的各项生理生化指标,从而提高黑麦草耐 Cd 性,促进 Cd 胁迫下黑麦草的生长,其中以 IF1 处理最优。IF2 和 IF3 处理也能改善上述生化指标,但与 IF1 差异不显著。

2) 添加 IF 能提高 Cd 处理下土壤 pH 和电导率,增加土壤中有效 Si 的质量分数,IF1 处理可促进 Cd 胁迫下黑麦草的生长,强化其对 Cd 的吸收,提高黑麦草的耐 Cd 性;高添加量 IF($V(\text{IF}) : V(\text{土壤}) = 1 : 9$ 和 $3 : 17$)可有效吸附或固定土壤中 Cd,从而减少其被黑麦草的吸收与积累,缓解黑麦草 Cd 胁迫。

参考文献 References

- [1] 邵将,陈璐,刘大林,陈鸣晖,吴亚,黄玉婷. 硅对镉胁迫下不同狼尾草属牧草生理代谢的影响[J]. 草地学报, 2018, 26(5): 1223-1228

- Shao J, Chen Y, Liu D L, Chen M H, Wu Y, Huang Y T. Effects of silicon on the physiological metabolism of different *Pennisetum* species under cadmium stress[J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2018, 26(5): 1223-1228 (in Chinese)
- [2] 张倩, 陈为峰, 董元杰. 外源硝酸钠与 EDTA 强化黑麦草耐镉性及镉积累[J]. *植物营养与肥料学报*, 2019, 25(9): 1560-1568
- Zhang Q, Chen W F, Dong Y J. Adding sodium nitroprusside and EDTA to strengthen cadmium tolerance and cadmium accumulation of ryegrass[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2019, 25(9): 1560-1568 (in Chinese)
- [3] 苗欣宇, 周启星. 污染土壤植物修复效率影响因素研究进展[J]. *生态学杂志*, 2015, 34(3): 870-877
- Miao X Y, Zhou Q X. Some research progresses in influencing factors for the efficiency of contaminated soil phytoremediation [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2015, 34(3): 870-877 (in Chinese)
- [4] 卢陈彬, 刘祖文, 张军, 杨秀英, 胡方洁. 化学诱导剂强化植物提取修复重金属污染土壤研究进展[J]. *应用化工*, 2018, 47(7): 1531-1535
- Lu C B, Liu Z W, Zhang J, Yang X Y, Hu F J. Review of chemical inducers enhanced phytoextraction and recovery of heavy metals contaminated soils[J]. *Applied Chemical Industry*, 2018, 47(7): 1531-1535 (in Chinese)
- [5] Liu H, Zhao H X, Wu L H, Liu A N, Zhao F J, Xu W Z. Heavy metal ATPase 3 (HMA3) confers cadmium hypertolerance on the cadmium/zinc hyperaccumulator *Sedum plumbizincicola* [J]. *The New Phytologist*, 2017, 215(2): 687-698
- [6] 林立金, 石军, 刘春阳, 马倩倩, 何静, 钟程操, 黄佳琪, 温莹, 廖明安. 稻田冬季杂草稻槎菜的镉积累特性研究[J]. *华北农学报*, 2016, 31(2): 146-152
- Lin L J, Shi J, Liu C Y, Ma Q Q, He J, Zhong C C, Huang J J, Wen K, Liao M A. Cadmium accumulation characteristics of winter weed *Lapsana apogonoides* in paddy field [J]. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 2016, 31(2): 146-152 (in Chinese)
- [7] 李希铭. 草本植物对镉的耐性和富集特征研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2016
- Li X M. Tolerance and accumulation characteristics of cadmium in herbaceous plants[D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2016 (in Chinese)
- [8] 叶文玲, 吴凡, 方清, 马友华, 曾秋勇. 外源钙对镉胁迫下植物生长及耐镉机制研究[J]. *安徽农业大学学报*, 2020, 47(2): 237-242
- Ye W L, Wu F, Fang Q, Ma Y H, Zeng Q Y. Study on plant growth and cadmium tolerance mechanism of exogenous calcium under cadmium stress[J]. *Journal of Anhui Agricultural University*, 2020, 47(2): 237-242 (in Chinese)
- [9] 王启宇, 吕怡颖, 方宇, 柯艳果, 魏环宇, 刘佳妮, 赵建荣, 赵永腾, 余磊, 黄飞燕. 外源钙离子对镉胁迫下珠芽魔芋幼苗生长及生理特性的影响[J]. *分子植物育种*, 2021: 1-16
- Wang Q Y, Lü Y Y, Fang Y, Ke Y G, Wei H Y, Liu J N, Zhao J R, Zhao Y T, Yu L, Huang F Y. Effects of exogenous calcium ions on the growth and physiological characteristics of konjac konjac seedlings under cadmium stress[J]. *Molecular plant breeding*, 2021: 1-16 (in Chinese)
- [10] 张超. 多年生黑麦草对镉胁迫的生理生化响应及外源钙处理的调控作用[D]. 雅安: 四川农业大学, 2018
- Zhang C. The physiological and biochemical response of perennial ryegrass to cadmium stress and the regulation effect of exogenous calcium treatment [D]. Yaan: Sichuan Agricultural University, 2018 (in Chinese)
- [11] 李二豹, 樊文华, 刘奋武, 王改玲, 于敏敏. 硅对镉胁迫下黄瓜苗期生长及光合作用的影响[J]. *北方园艺*, 2021(8): 8-16
- Li E B, Fan W H, Liu F W, Wang G L, Yu M M. Effects of silicon on growth and photosynthesis of cucumber seedling under cadmium stress [J]. *Northern Horticulture*, 2021(8): 8-16 (in Chinese)
- [12] 郭磊. 外源硅影响镉化学形态及其生物有效性的土壤化学机制[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2018
- Guo L. The soil chemistry mechanisms of influences on cadmium chemical speciation and bioavailability with exogenous silicon [D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2018 (in Chinese)
- [13] 贾倩, 胡敏, 张洋洋, 孟远夺, 李小坤, 丛日环, 任涛. 硅钙肥对水稻吸收铅、镉的影响研究[J]. *环境科学与技术*, 2017, 40(6): 24-30
- Jia Q, Hu M, Zhang Y Y, Meng Y D, Li X K, Cong R H, Ren T. Effect of silicon-calcium fertilizer on Pb and Cd absorption by rice in heavy metal polluted farmland [J]. *Environmental Science & Technology*, 2017, 40(6): 24-30 (in Chinese)
- [14] 杜文琪. 外源镁对镉在稻田系统中生物有效性及转运累积的影响[D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2018
- Du W Q. Effects of exogenous magnesium on bioavailability, transportation and accumulation of cadmium in rice-soil systems [D]. Changsha: Central South University of Forestry & Technology, 2018 (in Chinese)
- [15] Patterson B D, MacRae E A, Ferguson I B. Estimation of hydrogen peroxide in plant extracts using titanium (IV) [J]. *Analytical Biochemistry*, 1984, 139(2): 487-492
- [16] 李合生. 植物生理生化实验原理和技术[M]. 北京: 高等教育出版社, 2000
- Li H S. *Principles and Techniques of Plant Physiological Biochemical Experiment*[M]. Beijing: Higher Education Press, 2000 (in Chinese)
- [17] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000
- Lu R K. *Methods of Soil Agrochemical Analysis*[M]. Beijing: China Agriculture Sciencetech Press, 2000 (in Chinese)
- [18] 王耀晶, 付田震, 苏瑛, 刘鸣达. 镉胁迫下硅对草莓生长及生理特性的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2012, 31(12): 2335-2339
- Wang Y J, Fu T X, Su Y, Liu M D. Effects of silicon on growth and physiological characteristics of strawberry (*Fragaria ananassa* Duch) under cadmium stress[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2012, 31(12): 2335-2339 (in Chinese)
- [19] 吴雪霞, 朱月林, 朱为民, 陈建林, 刘正鲁. 外源一氧化氮对 NaCl 胁迫下番茄幼苗生理影响[J]. *中国农业科学*, 2006, 39(3): 575-581
- Wu X X, Zhu Y L, Zhu W M, Chen J L, Liu Z L. Physiological effects of exogenous nitric oxide in tomato seedlings under NaCl stress [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2006, 39(3): 575-581 (in Chinese)
- [20] 孙梦梦, 徐劼, 张玲玲, 施德剑, 赵玺童. 硅对镉胁迫下植物生长影响的研究进展[J]. *广州化工*, 2019, 47(13): 41-43
- Sun M M, Xu J, Zhang L L, Shi D J, Zhao X T. Research progress on effects of silicon on plant growth under cadmium stress[J]. *Guangzhou Chemical Industry*, 2019, 47(13): 41-43 (in Chinese)
- [21] 孟红梅, 汤燕. 硅对镉胁迫下板蓝根种子萌发及生理特性的影响[J]. 种

- 子, 2011, 30(11): 37-40
- Meng H M, Tang Y. Effect of silicon on *Radix isatidis* seed germination and seedlings growth physiological characteristics under cadmium stress[J]. *Seed*, 2011, 30(11): 37-40 (in Chinese)
- [22] 刘朋, 殷俐娜, 王仕稳, 邓西平. 镉胁迫下硅对高粱生长的影响及其作用机制[J]. 水土保持研究, 2014, 21(6): 329-333
- Liu P, Yin L N, Wang S W, Deng X P. The effect and mechanism of silicon on *Sorghum* seedlings growth under cadmium stress[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2014, 21(6): 329-333 (in Chinese)
- [23] 张雄邦, 潘磊, 张天宇. 重金属镉污染土壤修复技术研究进展[J]. 现代矿业, 2022, 38(5): 209-213, 222
- Zhang X B, Pan L, Zhang T Y. Research progress of soil remediation technology contaminated by heavy metal Cd[J]. *Modern Mining*, 2022, 38(5): 209-213, 222 (in Chinese)
- [24] 李艳利, 王厚鑫, 张玉龙, 刘鸣达. 外源硅对土壤镉吸附特性的影响[J]. 生态环境, 2007, 16(2): 446-448
- Li Y L, Wang H X, Zhang Y L, Liu M D. Influence of silicon on the adsorption characteristics of Cadmium in soils [J]. *Ecology and Environment Sciences*, 2007, 16(2): 446-448 (in Chinese)
- [25] Yang H F, Zhang G, Fu P, Li Z, Ma W K. The evaluation of in-site remediation feasibility of Cd-contaminated soils with the addition of typical silicate wastes[J]. *Environmental Pollution*, 2020, 265 (Pt B): 114865
- [26] Ning D F, Liang Y C, Liu Z D, Xiao J F, Duan A W. Impacts of steel-slag-based silicate fertilizer on soil acidity and silicon availability and metals-immobilization in a paddy soil[J]. *PLoS One*, 2016, 11(12): e0168163
- [27] 史新慧, 王贺, 张福锁. 硅提高水稻抗镉毒害机制的研究[J]. 农业环境科学学报, 2006, 25(5): 1112-1116
- Shi X H, Wang H, Zhang F S. Research on the mechanism of silica improving the resistance of rice seedlings to Cd[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2006, 25(5): 1112-1116 (in Chinese)

责任编辑: 董金波



第一作者简介: 王欢欢, 硕士研究生。本科就读于鲁东大学农学院, 硕士就读于山东农业大学资源与环境学院。曾获鲁东大学二等奖学金、校级优秀毕业生和山东农业大学二等奖学金等奖项。主要从事土壤生态与植物营养方面的研究。参与华源农用纤维应用研究校企合作项目。以第1作者发表论文《无公害桔梗病虫害综合防治技术探析》《碳量子点缓解黑麦草镉胁迫的效应与机制》, 参与专利《北马兜铃组培苗扩繁方法》和论著《中药材无公害栽培生产技术规范》的撰写。



通讯作者简介: 董元杰, 农学博士, 教授, 博/硕士研究生导师。主要从事新型肥料研制与应用方面、土壤生态与环境方面的研究工作。目前主持山东省重点研发计划课题、山东省农业重大应用技术创新课题和华源农用纤维应用研究校企合作课题等3项科研课题。“十三五”期间, 主持完成了973项目课题“作物高产高效的栽培学机制与途径”子课题、国家重点研发计划课题“鲁东冬小麦化肥农药减施技术集成研究与示范”和山东省自然科学基金(面上项目)“外源一氧化氮强化黑麦草修复土壤镉污染的机理及其应用研究”等3项课题。作为第1作者或通讯作者, 在 *Frontiers in plant science* 和《植物营养与肥料学报》等国内外学术刊物上发表论文80余篇, 其中SCI收录30余篇; 获得国家发明专利2项, 获得厅级以上科技奖励4项。