

印度梨形孢对高丹草生长及Cd吸收与积累的影响

先露露, 董智, 李红丽, 窦晓慧, 刘超, 刘冰倩, 贾丰源

引用本文:

先露露, 董智, 李红丽, 窦晓慧, 刘超, 刘冰倩, 贾丰源. 印度梨形孢对高丹草生长及Cd吸收与积累的影响[J]. 农业环境科学学报, 2022, 41(8): 1689–1697.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11654/jaes.2021-1420>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

3种土壤下巨菌草对镉胁迫的生理响应

王丽萍, 张健, 胡红玲, 蒋晓梅, 张如意, 何书惠, 宋君祥, 张学才

农业环境科学学报. 2015(12): 2252–2260 <https://doi.org/10.11654/jaes.2015.12.002>

根际促生菌 *Enterobacter* sp. EG16 对小白菜生长及硒吸收的影响

刘东昀, 袁永强, 仇荣亮, 王诗忠, 黄雄飞, 黄海燕

农业环境科学学报. 2021, 40(7): 1420–1431 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-1213>

土壤镉胁迫对龙葵 (*Solanum nigrum* L.) 幼苗生长及生理特性的影响

刘柿良, 杨容子, 马明东, 蒋潘, 赵燕

农业环境科学学报. 2015(2): 240–247 <https://doi.org/10.11654/jaes.2015.02.006>

外源NO对铝胁迫下西瓜幼苗生长及生理特性的影响

肖家昶, 郑开敏, 马俊英, 郑阳霞

农业环境科学学报. 2021, 40(8): 1650–1658 <https://doi.org/10.11654/jaes.2021-0145>

镉/铬胁迫对谷子幼苗生长和NADPH氧化酶及抗氧化酶体系的影响

田保华, 张彦洁, 张丽萍, 马晓丽, 金竹萍, 刘志强, 刘旦梅, 裴雁曦

农业环境科学学报. 2016(2): 240–246 <https://doi.org/10.11654/jaes.2016.02.005>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

先露露, 董智, 李红丽, 等. 印度梨形孢对高丹草生长及Cd吸收与积累的影响[J]. 农业环境科学学报, 2022, 41(8): 1689–1697.

XIAN L L, DONG Z, LI H L, et al. Effects of *Piriformospora indica* on the growth, Cd uptake and accumulation in *Sorghum Hybrid Sudangrass*[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2022, 41(8): 1689–1697.



开放科学 OSID

印度梨形孢对高丹草生长及Cd吸收与积累的影响

先露露, 董智, 李红丽*, 窦晓慧, 刘超, 刘冰倩, 贾丰源

(山东农业大学林学院/泰山森林生态系统定位研究站, 山东 泰安 271018)

摘要:为探究植物和微生物联合修复对镉(Cd)的作用效应,以一年生草本植物高丹草(*Sorghum Hybrid Sudangrass*)为试验材料,通过水培试验,研究印度梨形孢(*Piriformospora indica*)在不同浓度Cd胁迫(0、5、10、30、50、100 mg·L⁻¹)下高丹草生长和生理特性,以及重金属Cd在高丹草植物体内转运、富集和分布特征。结果表明:在5 mg·L⁻¹低Cd浓度下,高丹草株高、叶片数、生物量均有一定程度的增加;随着浓度的增加,高丹草株高、叶片数减少,生物量降低,黄叶数增加,生长受到抑制,接菌后能够促进高丹草生物量的积累,缓解叶片发黄现象,改善生长状况。接菌提高了高丹草在Cd胁迫下的抗性生理指标。随着浓度的增加,高丹草未接菌组的可溶性糖、可溶性蛋白、丙二醛、超氧化物歧化酶、过氧化氢酶活性总体上逐渐升高,过氧化物酶活性逐渐降低。接菌提高了可溶性蛋白、可溶性糖含量以及酶活性,降低了丙二醛含量。不同Cd浓度条件下,高丹草体内Cd含量呈根>叶>茎的分布,且含量随着浓度增加而增加,接菌后高丹草地下部Cd含量增加,地上部Cd含量降低,接菌减少了Cd从地下部向地上部的转移,减轻了Cd对高丹草地上部的毒害。研究表明印度梨形孢能有效降低Cd对高丹草生长的抑制作用和毒性损伤。

关键词:印度梨形孢;高丹草;Cd胁迫;抗性生理;转移系数

中图分类号:X173 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2022)08-1689-09 doi:10.11654/jaes.2021-1420

Effects of *Piriformospora indica* on the growth, Cd uptake and accumulation in *Sorghum Hybrid Sudangrass*

XIAN Lulu, DONG Zhi, LI Hongli*, DOU Xiaohui, LIU Chao, LIU Bingqian, JIA Fengyuan

(Forestry College of Shandong Agricultural University/Taishan Forest Ecosystem Positioning Research Station, Tai'an 271018, China)

Abstract: To explore the effect of plant and microbial joint restoration on cadmium (Cd) content, the annual herb *Sorghum Hybrid Sudangrass* was used as the experimental material. The effects of *Piriformospora indica* at different Cd concentrations (0, 5, 10, 30, 50, 100 mg·L⁻¹) on the growth and physiological characteristics of *Sorghum Hybrid Sudangrass* were investigated along with the transport, enrichment, and distribution characteristics of Cd in *Sorghum Hybrid Sudangrass*. The results showed that at low Cd concentration of 5 mg·L⁻¹, the plant height, number of leaves, and biomass increased to a certain extent. With further increase in concentration, the plant height, number of leaves, and biomass of the plant decreased; number of yellow leaves increased; and the growth was inhibited. After inoculation with *Piriformospora indica*, accumulation of biomass of *Sorghum Hybrid Sudangrass* increased, the yellowing of leaves alleviated, and the growth condition improved. Moreover, bacteria inoculation improved the physiological indices of the resistance of *Sorghum Hybrid Sudangrass* against Cd stress. With concentration increasing, the activities of soluble sugar, soluble protein, malondialdehyde, superoxide dismutase, and catalase in the non-inoculated group of *Sorghum Hybrid Sudangrass* gradually increased, whereas the peroxidase activity

收稿日期:2021-12-07 录用日期:2022-03-09

作者简介:先露露(1996—),女,四川泸州人,硕士研究生,研究方向为水土保持与生态修复。E-mail:xianlulu3148@163.com

*通信作者:李红丽 E-mail:lhl@sdau.edu.cn

基金项目:山东省农业科技资金(林业科技创新)课题(2019LY005-03);内蒙古自治区科技重大专项项目(2019ZD003-3-1);国家自然科学基金面上项目(51879155,31870708)

Project supported: Agricultural Science and Technology Fund of Shandong Province (Forestry Science and Technology Innovation) (2019LY005-03); Inner Mongolia Autonomous Region Major Science and Technology Project (2019ZD003-3-1); Surface Project of the National Natural Science Foundation of China (51879155, 31870708)

gradually decreased. Inoculation increased the contents of soluble protein, soluble sugar, and malondialdehyde, and reduced enzymatic activity. Under different Cd concentrations, the Cd content in *Sorghum Hybrid Sudangrass* showed the following distribution: root>leaf>stem. With concentration increasing, the Cd content increased; inoculation reduced the transfer of Cd from underground part to the above-ground part, and alleviated the toxicity of Cd in the upper part of the plant. This study shows that *Piriformospora indica* can effectively reduce the toxic damage and inhibitory effect of Cd on the growth of *Sorghum Hybrid Sudangrass*.

Keywords: *Piriformospora indica*; *Sorghum Hybrid Sudangrass*; Cd stress; resistance physiology; transfer coefficient

据2014年生态环境部发表的土壤污染状况调查公报^[1],全国土壤环境状况不容乐观,耕地、林地、草地和未利用土地土壤点位超标率分别达到19.4%、10.0%、10.4%和11.4%,其中无机污染物中镉(Cd)超标率最高,达到7.0%。重金属Cd具有隐蔽性强、生物毒性高、毒性持久、不可逆活性强等特点。Cd不仅会对植物造成毒害作用,且极易通过食物链和富集作用进入人体,危害人体健康^[2-4]。

相关研究表明,低浓度Cd对植物的生长有一定的促进作用,但高浓度Cd会对植物产生毒害^[5],使得植物表现出生长缓慢、植株矮小、叶片发黄卷曲、植物根系生长受阻等现象^[6],且在生理方面表现出光合作用受阻、抗氧化系统被破坏、保护酶活性受抑制等危害^[7]。印度梨形孢(*Piriformospora indica*)是于印度西北部塔尔沙漠中发现的一种植物根系内生真菌,具有促进植物地上部和根系的生长^[8-9]、增强养分吸收^[10-11]、提高宿主抗病性^[12]、增强植物对生物和非生物胁迫的抗性和耐受性等优点^[13-14]。印度梨形孢在形态与功能上均与传统的丛枝菌根真菌极为相似,不同之处在于,印度梨形孢可以在人工培养基上进行离体培养,而丛枝菌根真菌只能寄生于活体植物的根部^[15]。目前已有大量研究表明印度梨形孢通过强化植物对重金属的转运、富集及根系稳定化过程来降低土壤重金属污染程度^[14,16],并通过促进营养物质的吸收利用^[17]、提高植物体内的抗氧化水平^[18]、调控抗逆性相关基因的表达^[19-22]、根系排泄调控和改善根系微生物生态环境^[23]等方式提升寄主植物对重金属的抗逆性^[24]。

高丹草(*Sorghum Hybrid Sudangrass*)具有生长速度快、根系发达、地上生物量大的特点^[25-26],高丹草不仅具有耐贫瘠、耐盐碱等优良抗性,还被用于Cd污染土壤的修复研究^[27],是在环境修复和资源开发利用方面具有广阔应用前景的生态修复植物^[28-29]。但对高丹草和菌根共生效应的研究还较少^[30],印度梨形孢对高丹草的作用机制尚不可知。

基于此,本研究拟通过水培实验,探究印度梨形孢

在不同Cd浓度(0、5、10、30、50、100 mg·L⁻¹)下对高丹草幼苗生长和吸收积累重金属的影响,分析印度梨形孢对重金属Cd胁迫下高丹草生长和生理特性以及重金属Cd在高丹草植物体内转运、富集和分布特征的影响,以期对印度梨形孢广泛应用于植物抗逆性的研究提供参考。

1 材料和方法

1.1 试验材料

供试草种高丹草为高粱与苏丹草杂交的一年生草本植物。供试菌种印度梨形孢(*Piriformospora indica*,简称P)由山东省林业科学研究院提供,后于山东农业大学林学院实验室进一步培育使用。

1.2 试验设计

试验在山东农业大学林学实验站的温室大棚内进行。挑选颗粒饱满的高丹草种子,用3%的次氯酸钠浸泡20 min后,用去离子水冲洗3遍,再用70%乙醇消毒20 min,去离子水冲洗3遍之后均匀播种到铺满蛭石的种植槽内,待种子萌发生长一个月后进行移苗,挑选生长健壮和长势一致的幼苗放入水中,缓慢冲洗掉蛭石,用定植棉固定移栽到含有1/2霍格兰营养液的水中,以5株幼苗为一个样,重复3个样,设置两组处理,每组设置6个Cd浓度。水培生长一周后,待植株完全适应了水培环境,在接菌处理组(记作P+)的水培基质中加入印度梨形孢悬浮液,每升水含3 g印度梨形孢菌丝^[31],对照组(记作P-)不做处理,2~3 d更换一次水和补加菌液。待印度梨形孢在植株体内定殖25 d后,将根部有印度梨形孢定殖与未定殖的植株苗转移到清水中,以营养液补充营养。而后加入重金属标样,使两组培养液中Cd浓度分别为0、5、10、30、50、100 mg·L⁻¹,以未加重金属的植株作为空白对照。

1.3 指标测定

待印度梨形孢在高丹草体内定殖25 d后,使用台盼蓝染色法观察印度梨形孢在高丹草体内的定殖情况^[32]。Cd胁迫7 d后,用直尺测量株高,记录叶片数和黄叶数,采集新鲜叶片测定生理指标。生理指标的

测定均以鲜质量计,可溶性蛋白(Soluble protein, SP)含量采用考马斯亮蓝 G-250 染色法测定;可溶性糖(Soluble sugar, SS)含量采用蒽酮法测定^[33];丙二醛(Malondialdehyde, MDA)含量采用硫代巴比妥酸法测定;过氧化物酶(Peroxidase, POD)含量采用愈创木酚法测定;过氧化氢酶(Catalase, CAT)含量采用分光光度计法测定;超氧化物歧化酶(Superoxide dismutase, SOD)含量采用NBT光还原法测定^[34]。同步采集根茎叶样本在105℃杀青,75℃烘干后记录生物量,最后将各组织样品粉碎过筛后用电感耦合等离子体发射光谱仪(ICP)测定植物不同部位Cd含量^[35],ICP分析条件参数设置为分谱线波长214.3 nm、射频功率1 150 W、雾化器流速1.00 L·min⁻¹、辅助器流速1.50 L·min⁻¹、等离子体流速15.0 L·min⁻¹。分别计算转移系数和富集系数^[36],计算公式如下:

转移系数(transport factor, TF)=地上部Cd含量/根部Cd含量

富集系数(biological concentration factor, BCF)=植物Cd含量/营养液Cd含量

1.4 数据处理

所有数据均为3个重复的平均值±标准差,采用Excel 2010和SPSS 22.0软件进行数据统计分析,采用Origin 9.1软件绘图。

2 结果与分析

2.1 印度梨形孢在高丹草根系的定殖

印度梨形孢与高丹草共培养25 d后,印度梨形孢与高丹草成功定殖,且印度梨形孢的厚垣孢子主要集中在高丹草侧根两侧和主根根端部分,通过图1可以看出,印度梨形孢在高丹草根部大量定殖,数量多且分布密集,二者成功建立共生关系。

2.2 印度梨形孢对高丹草生长的影响

不同Cd浓度下高丹草的生长状况存在差异,低浓度(5 mg·L⁻¹)处理下与CK相一致,100 mg·L⁻¹浓度下生长最差(图2),而在同一Cd浓度处理下,接种印度梨形孢的高丹草生长状况优于不接种处理的(图3)。

由表1可知,随着Cd浓度的增加,高丹草不接菌组与接菌组叶片数和生物量无显著差异($P>0.05$),但整体生物量接菌组高于不接菌组,0、5、10、30、50、100 mg·L⁻¹的Cd浓度处理分别比对照组高17.85%、19.51%、0%、29.7%、10.61%、9.65%。随着Cd浓度的增加,高丹草接菌与不接菌组株高、叶片数、干质量降低,黄叶数增加。在0~30 mg·L⁻¹ Cd浓度下,两组黄

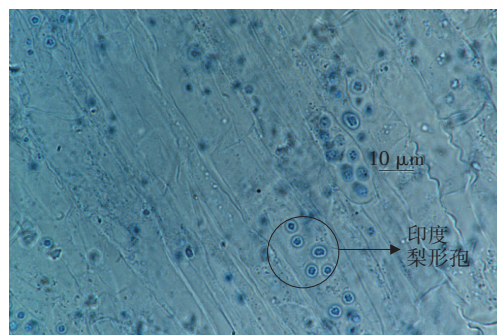


图1 高丹草根系侵染状况(100×)

Figure 1 Root infection status of *S. Hybrid Sudangrass* (100×)

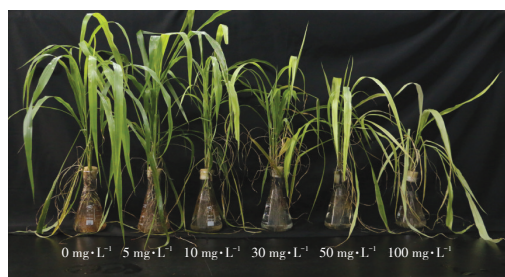


图2 不同Cd浓度下高丹草的生长状况

Figure 2 The growth of *S. Hybrid Sudangrass* under different Cd concentrations

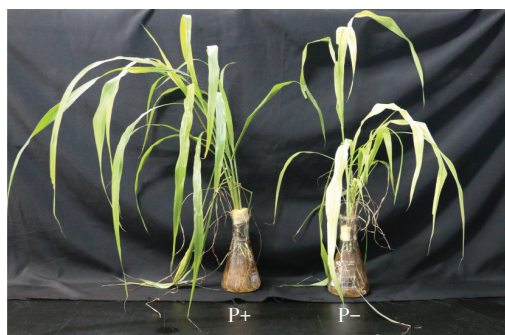


图3 同一Cd浓度下高丹草不同处理的生长状况

Figure 3 Growth conditions of *S. Hybrid Sudangrass* under different treatments at the same Cd concentration

叶数差异不明显($P>0.05$),在高浓度50 mg·L⁻¹和100 mg·L⁻¹下,接菌组分别比对照组分别降低49.8%和42.2%,接菌显著降低了高丹草的黄叶数。

2.3 印度梨形孢对Cd胁迫下高丹草地上部抗性生理指标的影响

2.3.1 印度梨形孢对Cd胁迫下高丹草渗透调节物质的影响

由图4可知,随着Cd浓度的增加,高丹草接菌组与对照组可溶性蛋白含量先增加后降低,且在不同Cd

表1 Cd胁迫与印度梨形孢接种对高丹草生长的影响

Table 1 Effects of Cd stress and *Piriformospora indica* on the growth of *S. Hybrid Sudangrass*

Cd浓度 Cd concentration/(mg·L ⁻¹)	处理 Treatment	叶片数 Number of leaves	株高/cm Height/cm	黄叶数 Number of yellow leaves	干质量/(g·株 ⁻¹) Dry weight(g·plant ⁻¹)
0	P-	5.00±0.00a	65.53±6.90a	0	1.61±0.02b
	P+	5.67±0.94a	78.33±7.12a	0	1.90±0.01a
5	P-	5.33±0.47a	64.37±8.69a	0.67±0.47a	1.56±0.03b
	P+	5.67±0.47a	81.63±4.40a	0	1.85±0.06a
10	P-	5.67±0.47a	60.20±5.88a	1.00±0.81a	1.55±0.01a
	P+	5.00±0.81a	68.37±7.17a	0.33±0.47a	1.55±0.01a
30	P-	4.67±0.47a	57.70±10.46a	1.67±0.47a	1.44±0.02a
	P+	5.67±0.47a	67.40±9.17a	0.67±0.47a	1.86±0.03a
50	P-	4.67±0.47a	54.40±7.91a	3.33±0.47a	1.43±0.02a
	P+	5.00±0.00a	64.00±5.35a	1.67±0.47b	1.58±0.02a
100	P-	4.67±0.47a	47.27±3.51b	4.67±0.47a	1.38±0.02a
	P+	5.33±0.47a	63.87±3.52a	2.67±0.47b	1.52±0.03a

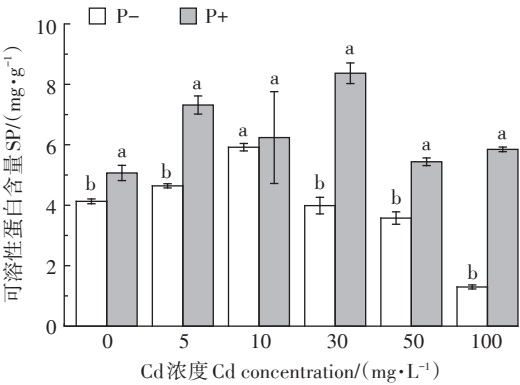
注:不同字母代表同一Cd浓度下不同处理之间的显著差异性, $P<0.05$ 。下同。
Note: Different letters represent the significant difference among different treatments at the same Cd concentration, $P<0.05$. The same below.

浓度下,接菌组与对照组可溶性蛋白含量存在极显著差异($P<0.01$)。接菌提高了高丹草可溶性蛋白含量,在0、5、10 mg·L⁻¹下,含量分别提高了22.74%、57.59%、5.37%,在中高浓度30、50、100 mg·L⁻¹下提高显著,分别增加了110%、52%、351%,说明在高浓度下印度梨形孢通过调节渗透调节物质来改善细胞膜受损的效果显著。

接菌组和未接菌组可溶性糖含量随着Cd浓度的增加呈波动上升趋势(图5),且两组可溶性糖含量存在显著差异(100 mg·L⁻¹除外)。在0、5、10、30、50

mg·L⁻¹的Cd浓度下,接菌组比对照组分别提高了33%、14.7%、6.9%、15.7%、29.2%,但在100 mg·L⁻¹Cd浓度下无显著差异($P>0.05$)。

随着Cd浓度的增加,高丹草叶片丙二醛含量呈上升趋势(图6),在0、5、10、30、50 mg·L⁻¹Cd浓度下含量增加不显著($P>0.05$),在100 mg·L⁻¹Cd胁迫下,丙二醛含量明显上升,且接菌组植株含量低于未接菌组,在0、5、10、30 mg·L⁻¹接菌组比未接菌组分别减少19.2%、15.8%、14%、21.7%。在50 mg·L⁻¹接菌组比未接菌组增加14.2%,在100 mg·L⁻¹又减少49.4%。说明高丹草在高浓度Cd胁迫下,植株细胞膜透性受到严重伤害,接种印度梨形孢后缓解了Cd对植物的伤害,增强了细胞膜透性。



不同字母代表同一Cd浓度下不同处理之间的显著差异性, $P<0.05$ 。下同。

Different letters represent the significant difference between different treatments at the same concentration of Cd, $P<0.05$. The same below

图4 Cd胁迫和接种印度梨形孢对可溶性蛋白含量的影响
Figure 4 Effects of Cd stress and *Piriformospora indica* inoculation on soluble protein content

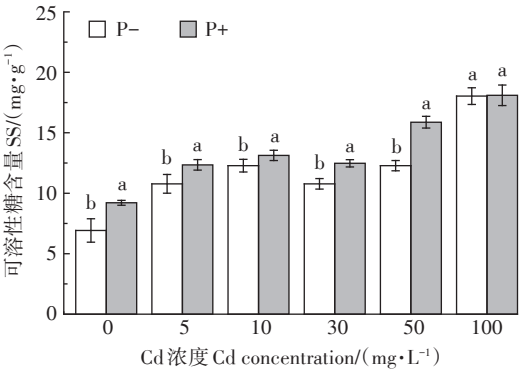


图5 Cd胁迫和接种印度梨形孢对可溶性糖含量的影响
Figure 5 Effects of Cd stress and *Piriformospora indica* inoculation on soluble sugar content

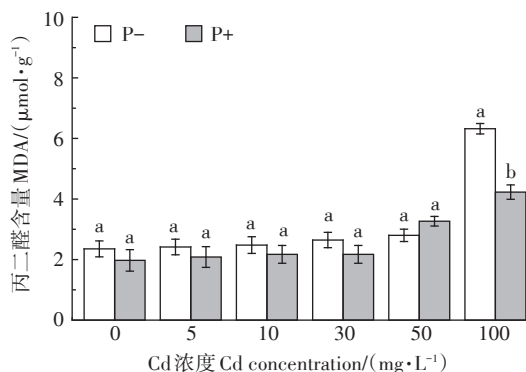


图6 Cd胁迫和接种印度梨形孢对丙二醛含量的影响

Figure 6 Effects of Cd stress and *Piriformospora indica* inoculation on malondialdehyde content

2.3.2 印度梨形孢对Cd胁迫下高丹草酶活性的影响

随着Cd浓度的增加,两组处理过氧化物酶活性呈递减趋势(图7)。在无Cd胁迫处理($0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$)下,接菌与不接菌组过氧化物酶活性无显著差异($P > 0.05$),随着Cd浓度的增加,两组之间存在极显著差异($P < 0.01$),在5、10、30、50、100 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 浓度下,接菌后高丹草叶片过氧化物酶活性分别提高了1.51、0.24、1.21、0.42、1.6倍。

不同Cd浓度处理下,高丹草接菌组与不接菌组超氧化物歧化酶活性呈先增加后降低趋势(图8)。在不接菌处理下,5、10、30、50、100 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ Cd胁迫下高丹草超氧化物歧化酶活性比不加Cd处理($0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$)分别增加了15.25、54.5、105、328.25、560倍。接菌后高丹草根部Cd含量增加,在5 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和30 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 浓度下,接菌组与不接菌组根部Cd积累量差异明显

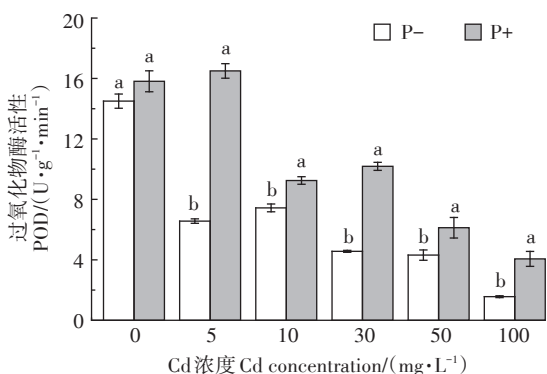


图7 Cd胁迫和接种印度梨形孢对过氧化物酶活性的影响

Figure 7 Effects of Cd stress and *Piriformospora indica* inoculation on peroxidase activity

随着Cd浓度的增加,高丹草叶片过氧化氢酶活性先增加后降低(图9)。在不同Cd浓度下,接菌组与不接菌组含量差异显著(10、30 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 除外)。0、5、10、30、50、100 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ Cd处理接菌组比不接菌组分别增加52.17%、30.3%、1.38%、17.7%、21.2%、47.05%。在Cd浓度为30 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时含量达到最高,之后随着浓度的增加过氧化氢酶活性降低,在100 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时达到最低值。

2.4 印度梨形孢对高丹草体内Cd的转运、富集和分布特征的影响

由表2可知,高丹草各组织对Cd的积累和分配存在显著差异($P < 0.05$)。高丹草体内Cd含量总体呈现根>叶>茎的分布。在不接菌情况下,高丹草根、茎、叶中Cd含量随着浓度增加而增加,5、10、30、50、100 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 处理下高丹草根部Cd含量比不加Cd分别增加15.25、54.5、105、328.25、560倍。接菌后高丹草根部Cd含量增加,在5 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 和30 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 浓度下,接菌组与不接菌组根部Cd积累量差异明显

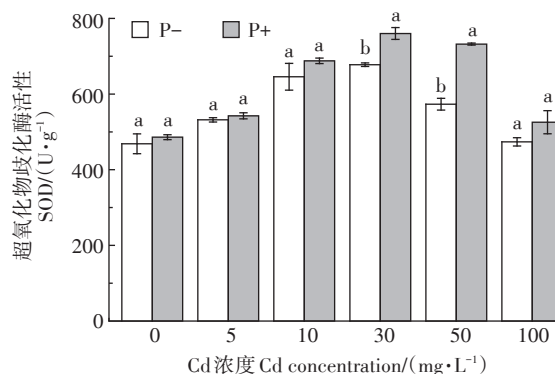


图8 Cd胁迫和接种印度梨形孢对超氧化物歧化酶活性的影响

Figure 8 Effects of Cd stress and *Piriformospora indica* inoculation on superoxide dismutase activity

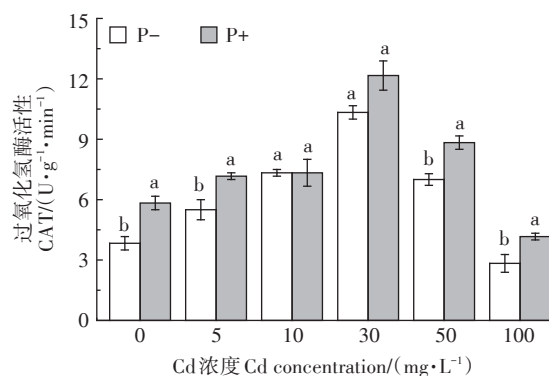


图9 Cd胁迫和接种印度梨形孢对过氧化氢酶活性的影响

Figure 9 Effects of Cd stress and *Piriformospora indica* inoculation on catalase activity

表2 Cd胁迫和接种印度梨形孢对高丹草体内Cd的转运、富集和分布特征的影响

Table 2 Effects of Cd stress and *Piriformospora indica* inoculation on the transport, enrichment and distribution characteristics of Cd in *S. Hybrid Sudangrass*

Cd浓度 Cd concentration/(mg·L ⁻¹)	处理 Treatment	Cd 积累量/(mg·kg ⁻¹)				
		根 Root	茎 Stem	叶 Leaf	富集系数 BCF	转移系数 TF
0	P-	0.04±0.01a	0.07±0.00a	0.06±0.00a	0	3.25±0.90a
	P+	0.40±0.50a	0.05±0.00b	0.05±0.00b	0	0.60±0.43b
5	P-	0.65±0.09b	0.10±0.00a	0.21±0.01a	0.19±0.02b	0.49±0.09a
	P+	1.08±0.07a	0.13±0.02a	0.08±0.01b	0.26±0.01a	0.19±0.04b
10	P-	2.22±0.07a	0.28±0.01a	0.57±0.01a	0.31±0.01a	0.38±0.00a
	P+	2.25±0.09a	0.18±0.00b	0.33±0.01b	0.28±0.01b	0.23±0.02b
30	P-	4.26±0.10b	0.21±0.01a	0.95±0.01a	0.18±0.00b	0.27±0.00a
	P+	7.46±0.09a	0.19±0.01a	0.53±0.00b	0.27±0.00a	0.10±0.00b
50	P-	13.17±0.15a	0.45±0.05a	0.67±0.49a	0.29±0.01a	0.09±0.04a
	P+	13.16±0.10a	0.26±0.09b	0.73±0.01a	0.28±0.00a	0.07±0.00a
100	P-	22.44±0.18a	1.07±0.05a	3.82±0.02a	0.27±0.00a	0.22±0.00a
	P+	22.55±0.09a	0.90±0.01b	2.72±0.03b	0.26±0.00b	0.16±0.00b

($P<0.05$), 接菌后分别增加了 66.1% 和 75.11%, 高 Cd 浓度 (50、100 mg·L⁻¹) 下二者无明显差异 ($P>0.05$)。在 5 mg·L⁻¹ 和 30 mg·L⁻¹ Cd 浓度下接菌组和不接菌组茎部 Cd 含量差异不显著, 在 10、50、100 mg·L⁻¹ Cd 浓度下, 接菌组茎部 Cd 含量显著低于不接菌组, 分别减少了 35.7%、42.2%、15.8%。在 5、10、30、100 mg·L⁻¹ Cd 浓度下, 接菌显著减少了叶片 Cd 的积累, 和不接菌相比, 分别减少了 16.7%、61.9%、42.1%、40.6%, 在 50 mg·L⁻¹ Cd 时增加 7.9%, 可能是误差引起。不同浓度和不同处理下高丹草富集系数呈波动变化, 在 5 mg·L⁻¹ Cd 浓度下, 接菌组比不接菌增加了 33.6%, 10 mg·L⁻¹ Cd 浓度下降低 10%, 30 mg·L⁻¹ Cd 浓度下增加 50%, 50~100 mg·L⁻¹ Cd 浓度下降低 1%~4%。不同处理和不同 Cd 浓度下高丹草的转移系数存在差异, 且在不同 Cd 浓度下, 接菌组转移系数显著 ($P<0.05$) 低于对照组 (50 mg·L⁻¹ Cd 除外), 0、5、10、30、50、100 mg·L⁻¹ 处理下分别降低了 81.5%、61.2%、39.5%、63%、22.2%、27.3%, 说明随着 Cd 浓度的增加, 高丹草由根部向地上部转移 Cd 的能力减弱, 接菌后印度梨形孢将大部分 Cd 聚集到植物根部, 限制其向地上部转移, 从而减少 Cd 在地上部的积累, 减轻重金属 Cd 对植物地上部的毒害。

3 讨论

Cd 影响植物的生长发育, 对植物的生长表现出低促高抑的效果, 不同物种和品种表现出不同的效

果。当 Cd 浓度超出植物所能承受的最大范围时, 植物则表现出植株矮小、生长缓慢、生物量下降甚至死亡^[37]。本研究结果表明, 在低 Cd 浓度下, 高丹草能够正常生长, 叶片数和株高均有一定程度的增加, 这与前人的研究结果相似^[38-39]。随着 Cd 浓度的增加, 高丹草的生长状况变差, 叶片发黄, 积累的生物量减少, 说明高浓度 Cd 胁迫对高丹草产生明显的毒害作用, 这与前人的研究结果一致^[40]。接菌后高丹草黄叶数减少, 生物量提高, 叶片数增加, 说明接种印度梨形孢后其生长状况得到明显改善, 接菌缓解了 Cd 对高丹草生长的抑制作用。

印度梨形孢提高了 Cd 胁迫下高丹草的抗性生理指标。植物在遭受 Cd 胁迫时, 积累的 Cd 离子在植物体内活动, 导致植物体内产生大量活性氧, 破坏了体内活性氧平衡, 导致细胞氧化受损, 从而抑制植物的生长, 植物体内的保护酶 (过氧化氢酶、超氧化物歧化酶、过氧化物酶等) 通过改变自身活性来清除多余的活性氧, 从而维护植株正常生长^[7]。NANDA 等^[41]对铜胁迫下决明子的研究表明, 印度梨形孢通过增强超氧化物歧化酶、抗坏血酸过氧化物酶、谷胱甘肽过氧化物酶和谷胱甘肽还原酶的酶活性显著改善了抗氧化防御系统。此外, 除了增强保护参数外, 它还降低了过氧化氢含量、脂质过氧化和 DNA 损伤等破坏性参数。本研究结果表明, 随着 Cd 浓度增加, 高丹草体内超氧化物歧化酶、过氧化氢酶活性先增加后降低, 而过氧化物酶活性随着 Cd 浓度的增加而降低, 说明高

丹草主要通过调节超氧化物歧化酶、过氧化氢酶活性来抵抗Cd胁迫的伤害,在高浓度下,高丹草体内的抗氧化酶的调节能力降低导致酶活性降低。接菌后过氧化氢酶、超氧化物歧化酶、过氧化物酶活性均有所提高,说明接种印度梨形孢能够通过提高抗氧化酶活性来抵御不良环境。丙二醛、可溶性蛋白和可溶性糖含量的变化能反映植物在逆境环境下生物膜的受损程度,丙二醛含量越高说明生物膜受损越严重^[42]。在本研究中,高丹草丙二醛和可溶性糖含量随着Cd浓度的增加而增加,可溶性蛋白先增加后降低,接菌降低了高丹草叶片中丙二醛含量,提高了可溶性糖和可溶性蛋白含量,说明随着Cd浓度的上升,植物生物膜受损严重,接菌通过降低丙二醛含量,提高渗透调节物质来减轻Cd对植物生物膜的损伤,这与前人有关印度梨形孢接种和Cd胁迫下植物生理响应的研究结果一致^[18,21]。

YAGHOUBIAN等^[43]研究发现,印度梨形孢在0~100 mg·L⁻¹的Cd溶液中具有较高的去除效率,且浓度的增加会抑制印度梨形孢对Cd的积累。印度梨形孢细胞壁能够吸附重金属,通过将重金属固定在植物根系的表皮层和皮层,降低了对根系皮层细胞的损害,减少了重金属进入中柱细胞,从而减少了植物通过维管束将重金属向地上部的运输。SALEH等^[16]对向日葵的研究表明,在Cd胁迫下接种印度梨形孢通过向根部积累更多的Cd以减少重金属向植物地上部的移动。也有对决明子的研究表明,印度梨形孢通过抑制铜从根部向地上部转移,减轻了铜对决明子的毒害作用^[41]。本研究中,Cd在高丹草不同部位的积累呈根>叶>茎的分布,在不同Cd浓度下,高丹草接种印度梨形孢后和未接菌相比地下部Cd含量增加,地上部Cd含量降低,转移系数也降低,这说明印度梨形孢通过将大部分Cd离子固定在植物的根部,从而减少了向高丹草地上部的转移,减轻了Cd对高丹草的毒害,提高了高丹草的耐性。

综上,在Cd胁迫下添加印度梨形孢菌剂通过促进高丹草根对Cd的吸收和累积,抑制重金属Cd向地上部的转移,减轻膜过氧化损伤,调节渗透调节物质和提高抗氧化酶活性来减轻Cd对高丹草生长的抑制作用和毒性损伤。印度梨形孢具有环保、高效且容易在体外繁殖等优点,具有巨大的应用前景。在重金属污染地区的生态恢复中可考虑采用印度梨形孢和植物共生的互作体系,但生长条件与环境因子均会对印度梨形孢与植物互作产生影响。印度梨形孢与宿

主植物的互作机制,印度梨形孢提高宿主植物抗逆性相关基因的表达,以及高质量菌剂和生物菌肥的生产等均有待进一步的研究。

4 结论

(1)低浓度(5 mg·L⁻¹)Cd对高丹草的生长具有促进作用。随着浓度的增加,高丹草株高、叶片数减小,生物量降低,黄叶数增加,生长受到抑制,接种印度梨形孢后能够促进高丹草生物量的积累,缓解叶片发黄现象,改善生长状况。

(2)接种印度梨形孢提高了Cd胁迫下高丹草的抗性生理指标。随着Cd浓度的增加,高丹草未接菌组的可溶性糖、可溶性蛋白、丙二醛、超氧化物歧化酶、过氧化氢酶活性总体上逐渐升高,过氧化物酶活性逐渐降低。接种印度梨形孢提高了可溶性蛋白、可溶性糖含量以及酶活性,降低了丙二醛含量。印度梨形孢通过调节渗透调节物质和提高抗氧化酶活性来抵御Cd胁迫对高丹草的伤害。

(3)不同Cd浓度条件下,高丹草体内Cd含量分布呈根>叶>茎,且含量随着Cd浓度增加而增加,接种印度梨形孢后高丹草地下部Cd含量增加,地上部Cd含量降低,接种印度梨形孢减少了Cd从地下部向地上部的转移,减轻了Cd对高丹草地上部的毒害。

参考文献:

- [1] 全国土壤污染状况调查公报[J]. 中国环保产业, 2014(5): 10-11. National soil pollution survey bulletin[J]. *China Environmental Protection Industry*, 2014(5): 10-11.
- [2] 方琳娜, 方正, 钟豫, 等. 土壤重金属镉污染状况及其防治措施: 以湖南省为例[J]. 现代农业科技, 2016(7): 212-213. FANG L N, FANG Z, ZHONG Y, et al. Status and countermeasures of Cd-pollution in soil: Taking Hunan Province for example[J]. *Modern Agricultural Science and Technology*, 2016(7): 212-213.
- [3] 孙大鹏. Cd污染土壤的植物修复研究进展[J]. 环境保护与循环经济, 2014, 34(3): 53-55. SUN D P. Research progress on phytoremediation of Cd-contaminated soil[J]. *Environmental Protection and Circular Economy*, 2014, 34(3): 53-55.
- [4] SEREGIN I V, IVANOV V B. Physiological aspects of cadmium and lead toxic effects on higher plants[J]. *Russian Journal of Plant Physiology*, 2001, 48(4): 523-544.
- [5] 高芳, 林英杰, 张佳蕾, 等. 镉胁迫对花生生理特性、产量和品质的影响[J]. 作物学报, 2011, 37(12): 2269-2276. GAO F, LIN Y J, ZHANG J L, et al. Effects of cadmium stresses on physiological characteristics, pod yield, and seed quality of peanut[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2011, 37(12): 2269-2276.
- [6] 杨红霞, 陈俊良, 刘巍. 镉对植物的毒害及植物解毒机制研究进展

- [J]. 江苏农业科学, 2019, 47(2): 1-8. YANG H X, CHEN J L, LIU W. Research progress on cadmium toxicity and detoxification mechanism in plants[J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2019, 47(2): 1-8.
- [7] 姜艺, 黄琳丽. 镉胁迫对植物的影响探究[J]. 南方农业, 2020, 14(30): 138-139. JIANG Y, HUANG L L. Research on the effects of cadmium stress on plants[J]. *South China Agriculture*, 2020, 14(30): 138-139.
- [8] 高娅, 梁玉, 董智, 等. 盐胁迫下印度梨形孢对核桃幼苗生长的影响[J]. 干旱区资源与环境, 2019, 33(8): 194-198. GAO Y, LIANG Y, DONG Z, et al. Effects of *Piriformospora indica* on the growth of walnut seedlings under salt stress[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2019, 33(8): 194-198.
- [9] 周晓莹, 梁玉, 董智, 等. 印度梨形孢对黑松幼苗生长量及其根系形态的动态影响[J]. 山东大学学报(理学版), 2018, 53(7): 7-14. ZHOU X Y, LIANG Y, DONG Z, et al. Effects of *Piriformospora indica* on growth and root morphology of *Pine thunbergii* seedlings[J]. *Journal of Shandong University(Natural Science)*, 2018, 53(7): 7-14.
- [10] JAHANDIDEH M A V A, SEPEHRI M, KHATABI B, et al. Alleviation of zinc deficiency in wheat inoculated with root endophytic fungus *Piriformospora indica* and rhizobacterium *Pseudomonas putida*[J]. *Rhizosphere*, 2021, 17: 100311.
- [11] 田娜, 王斌, 武欢, 等. 印度梨形孢对短期不同浓度钾磷钙处理下香蕉生长及光合特性的影响[J/OL](2021-09-13)[2021-10-24]. 应用与环境生物学报: <https://doi.org/10.19675/j.cnki.1006-687x.2021.03026>. TIAN N, WANG B, WU H, et al. Effects of *Piriformospora indica* on the growth and photosynthetic characteristics of bananas under short-term treatments, phosphorus and calcium[J/OL]. *Chinese Journal of Applied and Environmental Biology*, (2021-09-13)[2021-10-24]. <https://doi.org/10.19675/j.cnki.1006-687x.2021.03026>.
- [12] DANESHKHAH R, CABELLO S, ROZANSKA E, et al. *Piriformospora indica* antagonizes cyst nematode infection and development in *Arabidopsis* roots[J]. *Journal of Experimental Botany*, 2013, 64(12): 3763-3774.
- [13] 徐万茹. 不同水分胁迫下接种印度梨形孢对白榆生理特性的影响[D]. 泰安: 山东农业大学, 2021. XU W R. Effects of *Piriformospora indica* inoculation on physiological characteristics of *Ulmus pumila* under different water stress[D]. Tai'an: Shandong Agricultural University, 2021.
- [14] 主朋月, 韩冰, 王晓阳, 等. 印度梨形孢联合紫花苜蓿修复土壤镉污染研究[J]. 环境科学与技术, 2019, 42(6): 21-27. ZHU P Y, HAN B, WANG X Y, et al. Study on the remediation of cadmium pollution in soil by combination of *Medicago sativa* and *Piriformospora indica*[J]. *Environmental Science & Technology*, 2019, 42(6): 21-27.
- [15] 毛琳琳, 朱志炎, 何勇, 等. 印度梨形孢(*Piriformospora indica*)与植物互作研究综述[J]. 安徽农学通报, 2016, 22(11): 47-50, 99. MAO L L, ZHU Z Y, HE Y, et al. Reserch overview on *Piriformospora indica* and its interaction effect with plants[J]. *Anhui Agricultural Science Bulletin*, 2016, 22(11): 47-50, 99.
- [16] SHAHABIVAND S, PARVANEH A, ALILOO A A. Root endophytic fungus *Piriformospora indica* affected growth, cadmium partitioning and chlorophyll fluorescence of sunflower under cadmium toxicity[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2017, 145: 496-502.
- [17] SEPEHRI M, KHATABI B. Combination of siderophore-producing bacteria and *Piriformospora indica* provides an efficient approach to improve cadmium tolerance in Alfalfa[J]. *Microbial Ecology*, 2020, 81(3): 717-730.
- [18] 惠非琼, 彭兵, 楼兵干, 等. 印度梨形孢通过促进渗透调节物质的合成和诱导抗逆相关基因的表达提高烟草耐盐性[J]. 农业生物技术学报, 2014, 22(2): 168-176. HUI F Q, PENG B, LOU B G, et al. *Piriformospora indica* improves salt tolerance in nicotiana tobacum by promoting the synthesis of osmotic and inducing the expression of stress resistance genes[J]. *Journal of Agricultural Biotechnology*, 2014, 22(2): 168-176.
- [19] SU Z Z, ZENG Y, LI X L, et al. The endophytic fungus *Piriformospora indica*-assisted alleviation of cadmium in tobacco[J]. *Journal of Fungi*, 2021, 7(8): 675.
- [20] SAGONDA T, ADIL M F, SEHAR S, et al. Physio-ultrastructural footprints and iTRAQ-based proteomic approach unravel the role of *Piriformospora indica*-colonization in counteracting cadmium toxicity in rice[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2021, 220(3): 112390.
- [21] JIANG W, PAN R, WU C, et al. *Piriformospora indica* enhances freezing tolerance and post-thaw recovery in arabidopsis by stimulating the expression of CBF genes[J]. *Plant Signaling & Behavior*, 2020, 15(4): 1745472.
- [22] 彭兵. 三种内生真菌对烟草生长、诱导抗病性和抗重金属能力的影响及其机理的初步研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2015. PENG B. Effects of three endophytic fungi on tobacco growth, induced disease resistance and tolerance to heavy metals and their preliminary mechanism[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2015.
- [23] LI D, ZHENG X X, LIN L, et al. Remediation of soils co-contaminated with cadmium and dichlorodiphenyltrichloroethanes by king grass associated with *Piriformospora indica*: Insights into the regulation of root excretion and reshaping of rhizosphere microbial community structure[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2021, 422: 126936.
- [24] 王晓慧, 常伟, 宋福强. 印度梨形孢-植物共生关系的建立及其共生体对重金属胁迫的响应[J]. 中国科学: 生命科学, 2021, 51(4): 427-437. WANG X H, CHANG W, SONG F Q. Roles of *Serendipita indica* in phytoremediation of heavy metal pollution[J]. *Scientia Sinica(Vitae)*, 2021, 51(4): 427-437.
- [25] 李聚才, 施安, 张俊丽, 等. 宁夏六盘山区饲用高粱和高丹草品选及种植方式研究[J]. 中国草地学报, 2020, 42(6): 125-133. LI J C, SHI A, ZHANG J L, et al. Study on selection of varieties and planting modes of forage sorghum and sorghum×Sudan grass in Liupan mountain area of Ningxia[J]. *Chinese Journal of Grassland*, 2020, 42(6): 125-133.
- [26] 刘贵波, 李源, 赵海明, 等. BMR高丹草及饲用小黑麦新品种介绍[J]. 现代农村科技, 2021(9): 124-125. LIU G B, LI Y, ZHAO H M, et al. Introduction of BMR high dan grass and new varieties of forage triticale[J]. *Modern Rural Science and Technology*, 2021(9): 124-125.
- [27] 孟楠, 王萌, 陈莉, 等. 不同草本植物间作对Cd污染土壤的修复效

- 果[J]. 中国环境科学, 2018, 38(7):2618-2624. MENG N, WANG M, CHEN L, et al. Remediation efficiency of Cd polluted soil by intercropping with herbaceous plants[J]. *China Environmental Science*, 2018, 38(7):2618-2624.
- [28] 金微微, 张会慧, 滕志远, 等. 盐碱互作胁迫对高丹草叶片叶绿素荧光参数的影响[J]. 草业科学, 2017, 34(10):2090-2098. JIN W W, ZHANG H H, TENG Z Y, et al. Effects of salt and alkali interaction stress on chlorophyll fluorescence in leaves of sorghum bicolor $\times$ *S. sudanense*[J]. *Pratacultural Science*, 2017, 34(10):2090-2098.
- [29] 丁俊男, 张会慧, 迟德富. 土壤菲胁迫对高丹草幼苗叶片光合机构功能的影响[J]. 草业科学, 2014, 31(9):1732-1738. DING J N, ZHANG H H, CHI D F. Response of photosynthesis in leaves of *Sorghum bicolor $\times$ *S. sudanense* seedlings to phenanthrene polluted soil[J]. *Pratacultural Science*, 2014, 31(9):1732-1738.*
- [30] 高雁琳. 丛枝菌根真菌对煤矿废弃物上高丹草生长的影响[D]. 临汾:山西师范大学, 2016. GAO Y L. Effects of AMF inoculation on the growth of *Sorghum bicolor $\times$ *Sorghum sudanense* in coal mining wastes[D]. Linfen: Shanxi Normal University, 2016.*
- [31] 刘慧春, 朱开元, 张加强, 等. 印度梨形孢液体发酵产物的制备及其在日本青葱上的应用[J]. 浙江农业科学, 2019, 60(5):779-782, 784. LIU H C, ZHU K Y, ZHANG J Q, et al. Preparation of liquid fermentation product from *Piriformospora indica* and its application on Japanese scallion[J]. *Journal of Zhejiang Agricultural Sciences*, 2019, 60(5):779-782, 784.
- [32] 吴金丹, 陈乾, 刘晓曦, 等. 印度梨形孢对水稻的促生作用及其机理的初探[J]. 中国水稻科学, 2015, 29(2):200-207. WU J D, CHEN Q, LIU X X, et al. Preliminary study on mechanism of growth promotion in rice colonized by *Piriformospora indica*[J]. *Chinese Journal of Rice Science*, 2015, 29(2):200-207.
- [33] 王小松, 万燕, 乐梨庆, 等. 赤霉素对铅胁迫下苦荞种子萌发及幼苗生理特性的影响[J]. 山西农业科学, 2021, 49(11):1269-1273. WANG X S, WAN Y, LE L Q, et al. Effects of gibberellin on seed physiological characteristics of tartary buckwheat under lead stress[J]. *Journal of Shanxi Agricultural Sciences*, 2021, 49(11):1269-1273.
- [34] 文欢欢, 郑新宇, 肖清铁, 等. 镉污染条件下水稻对假单胞菌 TCd-1 微生物修复的生理响应[J]. 生态学报, 2022, 42(5):1924-1933. WEN H H, ZHENG X Y, XIAO Q T, et al. Physiological response of rice (*Oryza stiva* L.) to the microbial remediation by *Pseudomonas* TCd-1 under cadmium contaminated conditions[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2022, 42(5):1924-1933.
- [35] 李东坡, 任思敏, 高叶俊, 等. 微波消解-ICP-MS法同时测定金银花中重金属元素[J]. 广东化工, 2021, 48(18):187-188, 201. LI D P, REN S M, GAO Y J, et al. Simultaneous determination of heavy metal elements in flos lonicerae by microwave digestion-ICP-MS[J]. *Guangdong Chemical Industry*, 2021, 48(18):187-188, 201.
- [36] 何小三, 王微, 肖清铁, 等. 铜绿假单胞菌对镉胁迫水稻苗期生长与镉积累的影响[J]. 中国生态农业学报, 2018, 26(6):884-891. HE X S, WANG W, XIAO Q T, et al. Effects of *Pseudomonas aeruginosa* on the growth and cadmium accumulation in rice (*Oryza stiva* L.) seedling under Cd stress[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2018, 26(6):884-891.
- [37] 陈露. 镉胁迫对不同品种桑树种子萌发及幼苗生长的影响[D]. 贵阳:贵州大学, 2019. CHEN L. Effects of cadmium stress on seed germination and seedling growth of different mulberry varieties[D]. Guiyang: Guizhou University, 2019.
- [38] 王菲, 肖雨, 程小毛, 等. 镉胁迫对吊兰及银边吊兰生长及镉富集特性的影响[J]. 应用生态学报, 2021, 32(5):1835-1844. WANG F, XIAO Y, CHENG X M, et al. Effects of cadmium stress on the growth and cadmium enrichment of *Chlorophytum comosum* var. variegatum[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2021, 32(5):1835-1844.
- [39] 宁楚涵, 李文彬, 徐启凯, 等. 丛枝菌根真菌促进湿地植物对污染水体中镉的吸收[J]. 应用生态学报, 2019, 30(6):2063-2071. NING C H, LI W B, XU Q K, et al. Arbuscular mycorrhizal fungi enhance cadmium uptake of wetland plants in contaminated water[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2019, 30(6):2063-2071.
- [40] 张媛华. Cd胁迫对绿豆幼苗生长、光合作用及微量元素代谢的影响[J]. 东北农业科学, 2016, 41(1):35-37. ZHANG Y H. Effects of Cd on the development, photosynthesis and micronutrients allocation in mung beans seedlings[J]. *Journal of Northeast Agricultural Sciences*, 2016, 41(1):35-37.
- [41] NANDA R, AGRAWAL V. *Piriformospora Indica*, an excellent system for heavy metal sequestration and amelioration of oxidative stress and DNA damage in *Cassia Angustifolia* Vahl under copper stress[J]. *Ecology Environment & Conservation*, 2018, 156(7):409-419.
- [42] 韦献东, 陶志华, 王艺锦, 等. 郁闭度对金花茶和山茶的生理特性影响及主成分分析[J]. 福建农业学报, 2019, 34(8):905-911. WEI X D, TAO Z H, WANG Y J, et al. Effects of canopy density on physiology and biochemistry of *Camellia nitidissima* Chi and *Camellia japonica* L. as evaluated by principal component analysis[J]. *Fujian Journal of Agricultural Sciences*, 2019, 34(8):905-911.
- [43] YAGHOUBIAN Y, SIADAT S A, MORADI TELAVAT M R, et al. Bio-removal of cadmium from aqueous solutions by filamentous fungi: *Trichoderma* spp. and *Piriformospora indica*[J]. *Environmental Science and Pollution Research International*, 2019, 26(8):7863-7872.

(责任编辑:叶飞)