

刘玉玲, 彭 鸥, 铁柏清, 等. *Delftia* sp. B9对镉胁迫下水稻种子萌发及幼苗镉积累的影响[J]. 农业环境科学学报, 2019, 38(8): 1855–1863.

LIU Yu-ling, PENG Ou, TIE Bai-qing, et al. Effects of *Delftia* sp. B9 on rice seed germination and cadmium accumulation in rice seedlings under Cd stress [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2019, 38(8): 1855–1863.

Delftia sp. B9对镉胁迫下水稻种子萌发及幼苗镉积累的影响

刘玉玲^{1,2,3}, 彭 鸥^{1,2,3}, 铁柏清^{1,2,3*}, 刘亦婷¹, 罗海艳^{1,2,3}, 李丹阳^{1,2,3}, 刘寿涛^{1,2,3}

(1.湖南农业大学资源环境学院,长沙 410128;2.湖南省灌溉水源水质污染净化工程技术研究中心,长沙 410128;3.重金属污染耕地安全高效利用湖南省工程研究中心,长沙 410128)

摘要:为探讨耐镉细菌*Delftia* sp. B9对镉(Cd)胁迫下水稻种子萌发及幼苗吸收积累Cd的影响,以两种水稻(华润2号、深两优5814)为材料,研究水稻在3种Cd胁迫浓度(0、0.01、0.1 mg·L⁻¹)下添加*Delftia* sp. B9菌液对水稻幼苗生长和积累Cd的影响。结果表明:Cd胁迫浓度为0.1 mg·L⁻¹时,*Delftia* sp. B9产吲哚乙酸(IAA)能力与对照相比显著减少2.87 mg·L⁻¹,产铁载体相对含量下降17.34%。Cd胁迫浓度为0.1 mg·L⁻¹时,添加*Delftia* sp. B9菌液对水稻种子萌发和耐性系数有显著的促进作用。Cd胁迫下添加*Delftia* sp. B9菌液的处理(T3)与对照(T1)相比能显著增加两种水稻幼苗的根长、株高、叶绿素a和叶绿素b含量。添加*Delftia* sp. B9显著降低两种水稻幼苗根、茎、叶中Cd含量,使华润2号根、茎、叶中Cd含量分别降低63.81%、67.59%、70.84%,使深两优5814根、茎、叶中Cd含量分别降低75.95%、74.84%、80.81%。研究表明,耐镉细菌*Delftia* sp. B9可促进Cd胁迫下水稻种子萌发,增加水稻幼苗叶绿素含量和株高,并降低根、茎、叶中Cd含量。

关键词:*Delftia* sp. B9; Cd 胁迫; 铁载体; 叶绿素

中图分类号:X171.5 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2019)08-1855-09 doi:10.11654/jaes.2019-0261

Effects of *Delftia* sp. B9 on rice seed germination and cadmium accumulation in rice seedlings under Cd stress

LIU Yu-ling^{1,2,3}, PENG Ou^{1,2,3}, TIE Bai-qing^{1,2,3*}, LIU Yi-ting¹, LUO Hai-yan^{1,2,3}, LI Dan-yang^{1,2,3}, LIU Shou-tao^{1,2,3}

(1. College of Resources and Environment, Hunan Agricultural University, Changsha 410128, China; 2. Engineering Research Center for Water Pollution Purification of Irrigation Source in Hunan Province, Changsha 410128, China; 3. Hunan Engineering Research Center for Safe and High-Efficient Utilization of Heavy Metal Pollution Farmland, Changsha 410128, China)

Abstract: To explore the effects of *Delftia* sp. B9 strain on seed germination and Cd accumulation in rice seedlings, three different levels of Cd stress (0, 0.01, and 0.1 mg·L⁻¹) were applied to two rice varieties (Huarun No. 2 and Shenliangyou No. 5814) following inoculation of *Delftia* sp. B9 strain. The results showed that *Delftia* sp. B9 produced 2.87 mg·L⁻¹ less indoleacetic acid under 0.1 mg·L⁻¹ Cd stress, whereas the siderophore production decreased by 17.34%, accordingly. The addition of *Delftia* sp. B9 had a significant role in promoting rice seed germination and tolerance coefficient under 0.1 mg·L⁻¹ Cd stress. Exposure to *Delftia* sp. B9 stress (T3) significantly increased the root length, height, and chlorophyll a and chlorophyll b content of the two rice varieties compared to that of the control (T1). After the addition of *Delftia* sp. B9, the Cd concentrations in the roots, stems, and leaves of Huarun No. 2 were decreased by 63.81%, 67.59%, and 70.84%, respectively, and correspondingly decreased by 75.95%, 74.84%, and 80.81% in Shenliangyou No. 5814. The results showed that the Cd-tolerant bacteria *Delftia* sp. B9 promoted germination of rice seed and increase chlorophyll content and plant height of rice seedlings under Cd stress, while reducing Cd content in the roots, stems, and leaves of rice seedlings.

Keywords:*Delftia* sp. B9; cadmium stress; siderophores; chlorophyll

收稿日期:2019-03-11 录用日期:2019-06-19

作者简介:刘玉玲(1992—),女,山东泰安人,硕士研究生,研究方向为农田重金属污染治理与修复。E-mail:2227283058@qq.com

*通信作者:铁柏清 E-mail:tiebq@qq.com

基金项目:国家重点研发计划项目(2017YFD0801505)

Project supported: The National Key R&D Program of China(2017YFD0801505)

土壤重金属污染是当今最为突出的环境问题之一,其中,镉(Cd)已成为我国受污染土壤中最主要的重金属类污染物^[1]。20世纪60年代,日本富山县神通川流域出现“痛痛病”,就是由Cd引起的公害事件,引起人们对重金属污染问题的高度重视^[2]。Cd对人类和其他动植物均有毒害作用。研究发现,Cd容易被植物尤其是一些农作物吸收并富集,Cd胁迫下的植物会表现出一系列不良症状,如生长抑制、植株矮小、萎黄病等,这都可能导致植物生物量大幅降低^[3-5]。彭鹏等^[6]研究发现水培条件下,当Cd²⁺浓度为0.2~1 mg·L⁻¹时,水稻各农艺性状与不加Cd的对照组相比均显著降低,且Cd²⁺浓度越高,水稻产量越低。Cd会通过食物链在动物体肝、肾等器官中累积,影响生理代谢,从而对动物体各大系统产生不同程度的损害^[7-9]。

近年来,微生物修复技术因其环境友好性和投入低等优点受到广泛关注。微生物作为土壤中的重要组成部分,具有比表面积大、带电荷、代谢活动旺盛、种类繁多、数量大等特点,有的土壤微生物不仅参与土壤中污染物的降解或转化过程,还可作为环境载体吸附重金属污染物^[10]。本文使用的细菌(*Delftia* sp. B9)是从Cd污染土壤中筛选分离的一株耐镉细菌^[11],该菌株已被证明能使土壤中的Cd从弱酸可溶态向可还原态和残渣态转化。已有大量研究报道该菌属细菌能够降解或转化有机和无机污染物^[12-14]。Prakash等^[15]报道了*D. tsuruhatensis* AR-7可以通过胞内积累或细胞膜吸附将Se⁴⁺转化为Se⁰,Caravaglia等^[16]和Uballe等^[17]报道了Cr(VI)抗性菌*D. acidovorans* AR和*Delftia* sp. JD2对Cr(VI)的生物转化,可将Cr(VI)还原成毒性较低的Cr(III)。此外,有相关研究^[18-19]表明,*Delftia*菌属菌株能够产生植物促生物质,有效抑制病原菌活性,提升作物质量和产量。然而,重金属Cd胁迫下*Delftia*菌属菌株对水稻生长及积累Cd的研究较少,*Delftia* sp. B9在促进水稻生长及减少累积Cd中具有很大的发展潜力和应用价值。

本文使用耐镉细菌*Delftia* sp. B9,研究不同Cd浓度对菌体产铁载体和产吲哚乙酸(IAA)能力的影响,并将菌体添加于Cd胁迫下水稻种子发芽及幼苗试验,研究其对水稻种子萌发及幼苗积累Cd的影响,为耐镉菌株的应用提供理论参考。

1 材料与方法

1.1 试验材料

液体培养基:牛肉膏3 g、蛋白胨10 g、氯化钠5

g、蒸馏水1 L,pH 7.2~7.4,121 °C高压灭菌锅灭菌30 min。

菌株及菌悬液制备:测试菌株为*Delftia* sp. B9(基因登录号为MF679148,菌种保藏号为CGMCC No.16073,简称B9)。将*Delftia* sp. B9接种于液体培养基中30 °C、120 r·min⁻¹培养24 h,用无菌水洗涤两次后制成OD₆₀₀=1.6(7.6×10⁸ cfu·mL⁻¹)的菌悬液(菌悬液1,菌液浓度设置参考王秋菊等^[20]),然后用无菌水将菌悬液1稀释10倍(菌悬液2,7.6×10⁷ cfu·mL⁻¹)、100倍(菌悬液3,7.6×10⁶ cfu·mL⁻¹)、1000倍(菌悬液4,7.6×10⁵ cfu·mL⁻¹)的稀释液,备用。

水稻品种:华润2号(常规稻,全生育期119 d);深两优5814(籼型两系杂交水稻,全生育期137 d)。

1.2 Cd 胁迫对 *Delftia* sp. B9 产铁载体和产 IAA 能力的测定

用MKB液体培养基^[21]培养菌株,采用CAS检验法^[21]测定菌株合成铁载体的能力。菌株产铁载体的能力用铁载体活性单位(Siderophore unit,SU)表示,铁载体活性单位的计算公式:

$$SU = [(Ar - As)/Ar] \times 100\%$$

式中:Ar表示未接种菌液下的OD₆₃₀值,As表示接种菌液下的OD₆₃₀值。SU数值大小与菌株产铁载体能力呈正相关。

菌株分泌IAA的能力采用Salkowski比色法^[22]测定。

试验各处理如下:(1)B9;(2)B9+Cd1(0.01 mg·L⁻¹ Cd);(3)B9+Cd2(0.1 mg·L⁻¹ Cd)。Cd浓度设置根据《农田灌溉水质标准》(GB 5084—2005),灌溉水中Cd允许的最大排放浓度为0.01 mg·L⁻¹,以此作为Cd胁迫处理的低浓度,同时设置0.1 mg·L⁻¹作为Cd胁迫处理的高浓度。

1.3 种子萌发试验

1.3.1 不同浓度 *Delftia* sp. B9 菌液对水稻种子萌发的影响试验

采用光照培养箱培养方法。选取大小一致、籽粒饱满的水稻种子用2%的H₂O₂消毒6 min,再用去离子水反复冲洗3~5遍,将种子放入去离子水中浸种24 h后,均匀播于铺有2层滤纸的培养皿(直径为12 cm)中,每皿铺放30粒。分别加入1.1中制备的不同浓度的菌悬液20 mL,以添加无菌水的处理作为对照。各处理如下:(1)CK:无菌水;(2)B1:菌悬液1;(3)B2:菌悬液2;(4)B3:菌悬液3;(5)B4:菌悬液4。盖上培养皿盖,置于培养箱内以光照16 h、黑暗8 h进

行培养,条件控制温度为30℃。于培养7 d后统计发芽数,以幼芽达到种子长度一半,幼根与种子等长作为发芽标准,1次支根数以根长与种子等长为标准^[23]。培养期间喷洒菌液使滤纸保持湿润。

1.3.2 *Delftia* sp. B9菌液对Cd胁迫下水稻种子萌发及幼苗耐Cd性试验

种子萌发的方法按照1.3.1中进行,分别加入20 mL不同处理溶液浸润的种子,盖上培养皿盖,置于培养箱内以光照16 h、黑暗8 h进行培养,条件控制温度为30℃。培养期间每日记录种子发芽数,并在培养7 d后统计发芽数、幼根及幼芽长度,根系、幼芽长度用1/10 cm尺子人工测量。培养期间喷洒菌液使滤纸保持湿润(菌液浓度根据1.3.1结果选择7.6×10⁶ cfu·mL⁻¹)。各处理具体操作见表1。水稻种子的发芽率、发芽指数、活力指数、耐性系数和胁迫指数的计算公式为:

$$\text{发芽率}(\text{Germination rate, GR}) = (\text{发芽种子数}/\text{供试种子数}) \times 100\%$$

$$\text{发芽指数}(\text{Germination index, GI}) = \sum (t \text{ d时的发芽数}/\text{发芽日数})$$

$$\text{活力指数}(\text{Vigor index, VI}) = \text{幼苗总根长} \times \text{GI}^{[24]}$$

$$\text{耐性系数}(\text{Tolerance index, TI}) = \text{各处理中根系的长度}/\text{对照的根系长度}$$

$$\text{胁迫指数}(\text{Stress index, SI}) = 1 - \text{处理值}/\text{对照值}^{[25]}$$

1.4 *Delftia* sp. B9菌液对Cd胁迫下水稻幼苗积累Cd的影响试验

1.4.1 对水稻幼苗长势的影响

幼苗培养使用营养液:1 L木村B营养液中添加1 mL Arnon A-Z微量元素营养液^[26-27]。

种子萌发的方法按照1.3.1中进行,种子萌发时每日适当补充蒸馏水。待水稻幼苗长到两叶一心时移栽到烧杯中,移栽后加入培养液进行培养,初始移栽时用1/3营养液,15 d后用1/2营养液。营养液中

表1 Cd胁迫下水稻种子发芽试验

Table 1 Experiment on germination of rice seeds under Cd stress

编号 Number	处理 Treatments	具体操作 Operation
T1	CK	无菌水
T2	B3	<i>Delftia</i> sp. B9菌液
T3	Cd1	0.01 mg·L ⁻¹ Cd
T4	Cd1+B3	0.01 mg·L ⁻¹ Cd+ <i>Delftia</i> sp. B9菌液
T5	Cd2	0.1 mg·L ⁻¹ Cd
T6	Cd2+B3	0.1 mg·L ⁻¹ Cd+ <i>Delftia</i> sp. B9菌液

Cd以CdCl₂·2.5H₂O的形式加入,菌悬液经无菌水洗涤后加入并保持一定浓度(菌悬液浓度根据1.3.1结果选择7.6×10⁶ cfu·mL⁻¹)。培养液每5 d更换一次,调节pH至5.5~6.0。培养条件如表2所示,每个处理3个重复。分别在水稻移栽后的第1、3、5、10、15、20、30 d对水稻幼苗苗长和根长进行测量。

表2 幼苗生长试验处理

Table 2 Experiment on growth of rice seedlings

编号 Number	处理 Treatments	具体操作 Operation
E1	CK	营养液
E2	Cd	0.1 mg·L ⁻¹ Cd溶液+营养液
E3	Cd+B3	0.1 mg·L ⁻¹ Cd溶液+菌悬液3+营养液

1.4.2 对水稻幼苗叶绿素含量的影响

培养条件如表2所示,分别在水稻移栽后的第1、3、5、10、15、20、30 d采集水稻幼苗,叶绿素含量测定参照王备芳等^[28]的方法进行,叶绿素a(Chlorophyll-a, Chl a)、叶绿素b(Chlorophyll-b, Chl b)计算公式:

$$\text{Chl a} = (12.7D_{663} - 2.69D_{645}) \times V/m$$

$$\text{Chl b} = (22.9D_{645} - 4.68D_{663}) \times V/m$$

式中:V表示提取液的体积,10⁻³ L;W表示叶片的质量,g。

1.5 *Delftia* sp. B9对Cd胁迫下水稻转运和吸收Cd的影响试验

培养条件如表2所示,在水稻移栽后的第30 d收集水稻样品,用自来水洗净水稻植株,将植株根、茎、叶进行手工分离,并置于105±2℃烘箱内杀青1 h,然后在65±2℃下烘干至恒质量。水稻样品采用混合酸(HClO₄:HNO₃=1:4)湿法进行消解,消解时每个样品3个重复,每一台消解仪上有3个空白样品和3个质控样品。Cd浓度在0.1 mg·L⁻¹以上的样品用ICP-OES(美国PE8300)进行测定,Cd浓度在0.1 mg·L⁻¹及以下的样品采用原子吸收分光光度计-石墨炉法(GTA120,美国Varian)测定。消解液不能及时测定时应放入冰柜冷藏保存。

1.6 数据处理

试验数据采用Office 2013、SPSS 22.0软件进行分析与作图,差异显著性采用ANOVA单因素方差分析。

2 结果与分析

2.1 Cd胁迫对*Delftia* sp. B9产铁载体IAA能力的影响

由表3可知,*Delftia* sp. B9具有产铁载体和产IAA的能力,其中,铁载体活性单位(SU)为64.68%,

OD₆₃₀的As/Ar为0.35,As/Ar代表细菌产铁载体的相对含量,该值越低SU值越高,表明产生的铁载体的含量越高。一般产铁载体能力较高的细菌As/Ar值低于0.5^[29],因此,Delftia sp. B9是一株高产铁载体的细菌。Delftia sp. B9中产生的IAA质量浓度为56.08 mg·L⁻¹。当培养基中Cd浓度为0.01 mg·L⁻¹时,均能提高B9产铁载体和产IAA的能力,但未出现显著性差异。当培养基中Cd浓度为0.1 mg·L⁻¹时,B9产铁载体和产IAA的能力显著下降,As/Ar值为0.53,为中等产铁载体能力。

2.2 Delftia sp. B9菌液对Cd胁迫下水稻种子发芽的影响

2.2.1 不同浓度Delftia sp. B9菌液对水稻种子发芽率的影响

不同浓度菌液对不同品种水稻种子发芽率的影响见图1,添加B1和B2的两个处理对两个水稻品种的萌发有明显的抑制作用。与CK组相比,添加B1和B2使华润2号种子发芽率分别降低40.10%、16.87%;深两优5814种子发芽率分别降低40.44%、20.22%。添加B3和B4的处理对两个品种水稻种子的发芽率与CK相比无显著差异。后续实验中考虑到Cd浓度的胁迫作用,选用菌液B3(7.6×10^6 cfu·mL⁻¹)作为添加量。

表3 Cd胁迫对Delftia sp. B9产铁载体和产IAA能力的影响
Table 3 Effects of siderophore and IAA production by Delftia sp. B9 under Cd stress

处理 Treatments	IAA/mg·L ⁻¹	SU/%	产铁载体能力 Capacity of product siderophores(As/Ar)
B9	56.08a	64.68a	++++
B9+Cd1	56.25a	65.65a	++++
B9+Cd2	53.21b	47.34b	+++

注:As/Ar从1.0~0之间以0.2为间隔,每减小0.2增加一个+。同一列数据中不同字母表示差异显著($P<0.05$)。表4和表5同。

Notes: As/Ar is from 1.0 to 0 at 0.2 intervals, and a+ is added for every 0.2. The different lowercase letters in a column indicate significant differences among treatments at $P<0.05$. The same as table 4 and table 5.

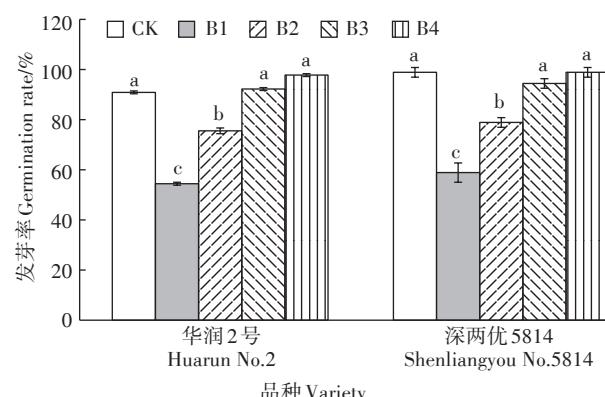
表4 不同浓度Cd胁迫下添加Delftia sp. B9对水稻种子萌发的影响
Table 4 The effects of Delftia sp. B9 on seed germination under Cd stress

编号 Number	华润2号 Huarun No.2			深两优5814 Shenliangyou No.5814		
	种子发芽率 Germination rate/%	发芽指数 Germination index	活力指数 Vigor index	种子发芽率 Germination rate/%	发芽指数 Germination index	活力指数 Vigor index
T1	91.11±1.92ab	28.48±0.39c	2 366.86±166.46f	98.89±1.92a	37.98±0.46ab	3 249.55±515.10c
T2	92.22±1.92a	29.15±1.42c	2 641.64±93.92d	97.78±1.92a	34.35±0.08c	2 201.10±173.33f
T3	94.44±1.92a	32.63±0.81ab	3 002.94±124.43b	98.89±0.00a	38.73±0.67a	3 538.41±517.49a
T4	88.89±1.92bc	28.97±0.55c	2 405.78±93.34e	97.78±1.92a	37.89±1.13ab	2 404.32±224.70d
T5	87.78±1.92c	31.00±1.03b	2 751.33±164.10c	96.67±3.33a	38.44±0.28a	2 399.69±77.81e
T6	93.33±0.00a	33.07±0.54a	3 053.89±34.69a	97.78±1.92a	36.50±0.32b	3 263.58±332.72b

2.2.2 Delftia sp. B9菌液对Cd胁迫下水稻种子发芽的影响

如表4所示,Cd处理浓度为0.01 mg·L⁻¹时(T3),华润2号的种子发芽指数和活力指数与对照T1相比都有显著提高,种子发芽率与T1相比虽有提高,但未达到显著差异;深两优5814的种子发芽率、发芽指数与T1相比无显著差异,活力指数显著增加。当Cd处理浓度为0.01 mg·L⁻¹并且添加Delftia sp. B9菌液时(T4),华润2号的种子发芽率、发芽指数、活力指数与T3相比均显著降低;深两优5814的活力指数与T3相比显著降低。

Cd处理浓度为0.1 mg·L⁻¹时(T5),华润2号的种子发芽率与T1相比显著降低,发芽指数、活力指数与T1相比显著提高;深两优5814的种子发芽率、发芽指数与T1相比无显著差异,活力指数显著降低。当Cd处理浓度为0.1 mg·L⁻¹并且添加Delftia sp. B9菌液时(T6),华润2号的种子发芽率、发芽指数、活力指数与T5相比均显著增加;深两优5814的活力指数与T5相



不同小写字母表示不同处理间差异显著($P<0.05$)。下同
The different lowercase letters represent the significant difference within each treatment using one-way ANOVA ($P<0.05$). The same below

图1 不同浓度Delftia sp. B9菌液对水稻种子发芽率的影响
Figure 1 Effects of different concentrations of Delftia sp. B9 on germination rate of rice seeds

比显著增加。T6处理下华润2号的种子发芽指数和活力指数与T1相比显著提高。

由表5可以看出,当Cd处理浓度为0.01、0.1 mg·L⁻¹时,华润2号T3处理的耐性系数显著高于T1,T6处理的耐性系数与T1相比未出现显著差异,但显著高于T5处理,T2、T3处理的胁迫指数比T1分别减小0.02、0.05,T4、T5、T6处理的胁迫指数与T1相比分别显著增加0.02、0.14、0.02;深两优5814的T3、T6耐性系数均显著高于T1,T2、T5、T6处理的胁迫指数均高于T1。Cd胁迫浓度高时(0.1 mg·L⁻¹),对水稻种子发芽的胁迫指数:华润2号>深两优5814。添加菌液对水稻种子发芽的胁迫指数:华润2号>深两优5814。

2.3 *Delftia* sp. B9菌液对Cd胁迫下水稻幼苗积累Cd的影响

2.3.1 *Delftia* sp. B9菌液对Cd胁迫下水稻幼苗长势的影响

由表6可知,在水稻移栽培养后的第5 d,华润2

号和深两优5814的3个处理水稻根长出现差异,E2与E1相比未出现显著差异,E3与E2、E1相比根长均显著增加,且这种差异一直到培养的第30 d。华润2号在培养15 d时,E3与E1、E2相比株高显著增加;第30 d时E3处理比E1、E2处理株高分别增加3.86、5.76 cm;在培养第20 d时,E2处理与E1相比株高显著降低,第30 d时E2处理比E1处理株高减少1.90 cm。深两优5814在培养15 d时,3个处理的株高之间出现显著差异,大小为E3>E1>E2;第30 d时E3处理比E1、E2处理株高分别增加2.16、4.34 cm,E2处理比E1处理株高减少2.18 cm。

2.3.2 *Delftia* sp. B9菌液对Cd胁迫下水稻幼苗叶绿素含量的影响

由表7可知,水稻华润2号幼苗在移栽后第5 d,E2处理与E1、E3相比Chl a含量显著减少;培养到第20 d时,E3处理与E1、E2相比显著增加;到培养的第30 d,E3处理与E1、E2相比Chl a分别增加了0.81、

表5 不同浓度Cd胁迫下添加*Delftia* sp. B9对水稻幼苗耐Cd性的影响

Table 5 The effects of *Delftia* sp. B9 on Cd-tolerance of rice seedlings under Cd stress

编号 Number	华润2号 Huarun No.2			深两优5814 Shenliangyou No.5814		
	耐性系数 Tolerance index	胁迫指数 Stress index		耐性系数 Tolerance index	胁迫指数 Stress index	
T1	1.00±0.07b	0±0.02c		1.00±0.16c	0±0.02d	
T2	1.09±0.08a	-0.02±0.02d		1.05±0.06b	0.06±0.02a	
T3	1.11±0.06a	-0.05±0.02e		1.07±0.17a	0±0d	
T4	1.00±0.03b	0.02±0.02b		1.00±0.09c	0.01±0.02cd	
T5	0.88±0.05c	0.14±0.02a		0.73±0.12d	0.03±0.02b	
T6	1.07±0.03ab	0.02±0.02b		1.05±0.03b	0.02±0.03bc	

表6 不同处理下水稻幼苗长势(cm)

Table 6 The effects of *Delftia* sp. B9 on Cd-tolerance of growth tendency of rice seedling(cm)

指标 Index	时间 Time/d	华润2号 Huarun No.2			深两优5814 Shenliangyou No.5814		
		E1	E2	E3	E1	E2	E3
根长 Root length	1	4.53±0.55b	4.77±0.78a	4.63±0.83ab	4.83±0.35a	4.97±0.27a	4.93±0.36a
	5	4.80±0.6b	4.97±0.72b	5.23±0.50a	5.09±0.27b	5.07±0.51b	5.23±0.21a
	10	5.30±0.90b	5.20±0.31b	5.73±0.06a	5.41±0.39b	5.47±0.42b	5.73±0.35a
	15	5.77±0.38b	5.80±0.56b	6.07±0.25a	5.85±0.42b	5.80±0.37b	6.07±0.19a
	20	5.83±0.55b	5.87±0.55b	6.43±0.26a	6.17±0.57b	6.13±0.62b	6.54±0.61a
株高 Height	30	5.93±0.25b	5.97±0.50b	6.72±0.60a	6.32±0.51b	6.27±0.42b	6.90±0.39a
	1	10.37±0.67a	10.43±0.80a	10.17±0.55a	10.47±0.61a	10.56±0.49a	10.65±0.72a
	5	14.97±0.80a	14.83±0.32a	15.13±0.68a	15.06±0.87b	15.02±1.02b	15.98±0.91a
	10	17.00±0.17ab	16.30±1.15b	17.77±0.38a	19.00±1.34a	18.21±1.26a	19.23±1.80a
	15	20.50±0.80b	20.47±1.12b	22.30±0.52a	23.76±1.35b	21.04±1.25c	26.40±0.97a
	20	25.17±0.87b	23.23±0.60c	28.50±1.30a	27.74±1.58b	26.39±1.73b	30.27±1.84a
	30	28.57±0.85b	26.67±0.49c	32.43±0.80a	33.45±1.79b	31.27±1.86c	35.61±2.04a

注:同一行数据中不同字母表示E1、E2、E3处理间差异显著($P<0.05$)。表7同。

Notes: The different lowercase letters in a rows indicate significant differences among different treatments at $P<0.05$. The same as table 7.

$2.29 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$, E2 处理与 E1 相比 Chl a 显著减少 $1.48 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 。深两优 5814 幼苗在移栽后第 5 d, Chl a 含量在 3 个处理间出现显著差异, 到培养的第 30 d, Chl a 含量为 E3>E1>E2, E3 处理与 E1、E2 相比 Chl a 分别增加了 1.55 、 $2.98 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$, E2 处理与 E1 相比 Chl a 显著减少 $1.43 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 。

华润 2 号幼苗在移栽后第 5 d, E3 处理与 E1 相比 Chl b 含量显著增加, 到培养的第 30 d, E3 处理与 E1、E2 相比 Chl b 分别增加了 1.06 、 $1.51 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$, E1 处理与 E2 之间 Chl b 有所差异, 但未达到显著水平。深两优 5814 幼苗在移栽后第 5 d, E3 处理与 E1、E2 相比 Chl b 含量显著增加, 到培养的第 30 d, E3 处理与 E1、E2 相比 Chl b 分别增加了 0.73 、 $0.99 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$, E2 处理与 E1 相比 Chl b 显著减少 $0.26 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 。

2.4 *Delftia* sp. B9 对 Cd 胁迫下水稻转运和吸收 Cd 的影响

由图 2 可知, 两种水稻在移栽培养 30 d 后各部位 Cd 含量相差较大, 且同一部位 3 个处理间 Cd 含量也相差很大。对照组(E1)根、茎、叶中也含有 Cd, 其可能来源于营养液配制所使用的药品, 其中含有微量的 Cd。在 Cd 胁迫下(E2)华润 2 号根、茎、叶中 Cd 含量分别达到 129.26 、 47.43 、 $16.87 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 添加 *Delftia* sp. B9 菌液的处理(E3)中 Cd 含量分别达到 46.78 、 15.37 、 $4.92 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 与 E2 相比分别减少了 82.48 、 32.06 、 $11.95 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 减少率分别达到 63.81% 、 67.59% 、 70.84% 。深两优 5814 在 T2 处理下根、茎、叶中 Cd 含量分别达到 89.35 、 30.29 、 $9.64 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, E3 中 Cd 含量与 E2 相比分别减少了 67.86 、 22.67 、 $7.79 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

kg^{-1} , 减少率分别达到 75.95% 、 74.84% 、 80.81% 。同时, 深两优 5814 各部位 Cd 含量均低于华润 2 号。

3 讨论

种子萌发是植物实现天然更新的关键环节^[30], 是植物个体发育早期的生活史特征, 影响结实率和成活率等后期生活史特征^[31]。水稻是我国主要粮食作物之一, 水稻萌发时期生长状况直接影响作物以后的生长和产量。Liu 等^[32]提出选育水稻品种时, 不应只关注水稻的 Cd 吸收积累特性, 还要关注水稻幼苗时期的生长情况。种子发芽率、发芽指数是衡量农作物种子发芽能力的重要指标, 反映了种子发芽速度与整齐度的潜势, 发芽指数能够反映种子在整个发芽期的综合活力。活力指数是反映种子品质的重要参数, 既能反映种子发芽率、发芽速度, 又能反映生长活力。这些指标能够从不同角度反映出水稻苗期耐镉性的强弱^[33-35]。低 Cd 浓度($0.01 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$)增加了华润 2 号和深

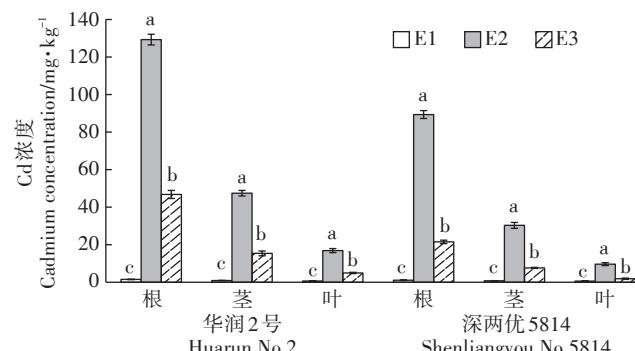


图 2 不同处理水稻幼苗各部位 Cd 含量

Figure 2 Cadmium concentration in various parts of rice seedling of different treatments

表 7 不同处理下水稻叶绿素含量 ($\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$)

Table 7 The differences of chlorophyll contents among different treatments ($\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$)

指标 Indexes	时间 Time/d	华润 2 号 Huarun No.2			深两优 5814 Shenliangyou No.5814		
		E1	E2	E3	E1	E2	E3
Chl a	1	3.05 ± 0.35 a	2.90 ± 0.26 a	2.97 ± 0.30 a	3.23 ± 0.07 a	3.17 ± 0.02 a	3.15 ± 0.03 a
	5	3.82 ± 0.11 a	3.10 ± 0.46 b	4.24 ± 0.07 a	4.08 ± 0.07 b	3.91 ± 0.06 c	4.22 ± 0.07 a
	10	5.70 ± 0.41 ab	5.54 ± 0.32 b	6.29 ± 0.09 a	5.84 ± 0.12 b	5.73 ± 0.12 b	6.06 ± 0.06 a
	15	6.38 ± 0.76 a	4.67 ± 0.53 b	7.75 ± 1.35 a	6.94 ± 0.11 b	6.53 ± 0.12 c	8.09 ± 0.20 a
	20	7.45 ± 0.44 b	7.26 ± 0.22 b	8.76 ± 0.30 a	7.65 ± 0.29 b	6.99 ± 0.07 c	8.83 ± 0.14 a
	30	8.92 ± 0.26 a	7.44 ± 0.36 b	9.73 ± 0.60 a	9.11 ± 0.17 b	7.68 ± 0.11 c	10.66 ± 0.40 a
Chl b	1	0.95 ± 0.14 a	0.98 ± 0.05 a	1.06 ± 0.08 a	1.18 ± 0.03 a	1.19 ± 0.03 a	1.18 ± 0.02 a
	5	0.80 ± 0.29 b	1.07 ± 0.26 ab	1.37 ± 0.23 a	1.27 ± 0.07 b	1.32 ± 0.04 b	1.53 ± 0.09 a
	10	1.33 ± 0.23 b	1.27 ± 0.17 b	1.73 ± 0.18 a	1.55 ± 0.07 b	1.73 ± 0.06 a	1.82 ± 0.11 a
	15	1.84 ± 0.32 a	2.11 ± 0.24 a	2.28 ± 0.24 a	1.93 ± 0.09 b	1.88 ± 0.05 b	2.25 ± 0.10 a
	20	1.77 ± 0.43 ab	1.35 ± 0.20 b	2.35 ± 0.27 a	2.16 ± 0.09 b	2.05 ± 0.07 b	2.64 ± 0.06 a
	30	1.82 ± 0.42 b	1.37 ± 0.10 b	2.88 ± 0.57 a	2.45 ± 0.16 b	2.19 ± 0.09 c	3.18 ± 0.11 a

两优5814两个水稻品种的种子发芽率、发芽指数和活力指数,同时华润2号胁迫指数表现为促进作用;高浓度Cd胁迫($0.1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$)可以降低两种水稻的发芽率耐性系数,胁迫指数显著增大(表4、表5)。出现这种低促高抑现象的原因可能是低浓度Cd提高胚的生理活性,从而促进种子萌发,高浓度Cd使得种子中淀粉酶和蛋白酶活性受到抑制,种子萌发和幼苗生长中物质和能量供应不足,抑制种子的正常萌发和幼苗生长^[36-37]。另外,已有研究表明,Cd胁迫下植物细胞中DNA和RNA活性降低,核酸含量下降,有丝分裂过程受阻,从而影响种子发芽过程^[38]。高浓度Cd胁迫对两个水稻品种的耐性系数和胁迫指数大小均表现为华润2号>深两优5814,这也表明Cd胁迫对不同品种水稻种子萌发的影响有差异,不同水稻品种的Cd耐性差异很大^[39]。目前认为植物的耐Cd途径主要有限制Cd吸收、螯合沉淀和区域化作用^[40]。邬飞波等^[41]研究表明植物对重金属的耐性和积累在种间和基因型之间存在差异,在重金属胁迫下植物螯合态合成是植物对胁迫的一种适应性反应,耐性基因型合成较多的植物螯合态,植物螯合态可与重金属螯合,进一步转运至液泡贮存,从而达到解毒效果。深两优5814在 $0.1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ Cd胁迫下种子发芽率和发芽指数均高于华润2号,同时幼苗培养中Chl a、Chl b以及株高、根长等都高于华润2号(表6、表7),可能是因为深两优5814是低积累Cd品种,幼苗培养后各部位Cd含量均远小于华润2号(图2)。

本实验中Cd胁迫下添加*Delftia* sp. B9菌液能提高水稻幼苗的叶绿素含量,增加植株株高,并能显著减少水稻植株各部位Cd含量,可能是由于菌株对Cd²⁺的吸附,*Delftia* sp. B9对Cd²⁺具有较高的耐性和吸附能力^[11],从而减少了Cd²⁺对水稻幼苗的胁迫,同时减少水稻幼苗对Cd²⁺的吸收和积累;另外,*Delftia* sp.能产生与植物促生菌(PGP)相关的代谢产物,如铁载体及IAA等促生物质,这些促生物质能促进植物生长,同时减少植物对Cd²⁺的吸收,减缓Cd对植物的胁迫。陆仲烟等^[42]研究发现,Cd胁迫浓度在 $10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时接种伯克氏菌能显著提高水稻种子的活力指数、耐性系数和根系鲜质量。王立等^[43]发现接种丛枝菌根真菌显著减轻Cd胁迫对水稻生长的抑制程度,水稻株高比对照组增加10%~13%。植物促生菌对植物生长发育有积极的影响,不仅为植物提供营养物质,固氮、溶磷、溶铁,并产生植物激素,还能提高植物抗逆性,抵抗致病生物体的感染^[18,44]。庞海东等^[45]、杨丽

等^[46]的研究表明,促生菌产生的IAA和铁载体可以促进植物生长、提高植物对重金属的耐受性。铁载体不仅具有运输铁离子的作用,还可以与多种重金属离子进行络合,形成稳定的络合物,降低环境中重金属离子的浓度。Piotrowska-Niczyporuk等^[47]研究发现IAA能够通过抑制重金属吸附来恢复植物的生长,缓解重金属对植物的毒害。经试验测定,*Delftia* sp. B9菌液能产生 $56.08 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ IAA,是一株高产铁载体的细菌(表3),高浓度Cd胁迫会显著降低*Delftia* sp. B9产铁载体和产IAA的能力。添加不同浓度的*Delftia* sp. B9菌液对水稻种子萌发影响不同(图1),高浓度菌液会抑制水稻种子萌发,这可能是由于菌液浓度过高产生某些有害的中间代谢产物,抑制了种子萌发。稀释后低浓度的菌液对种子萌发无抑制作用,也没有显著的促进作用,但能显著增加水稻株高和叶绿素含量。Morel等^[44]研究表明,接种*Delftia* sp.JD2虽然不能增加苜蓿的苗产量,但能促进其根系的发育,同时能够增加4%~5%的作物产量。低浓度Cd胁迫下添加菌液没有增加种子的发芽率,这可能是因为菌液对Cd进行吸附使Cd浓度降低,减少了低浓度Cd对水稻种子萌发的促进作用;高浓度Cd胁迫下添加菌液比不添加的处理水稻种子的发芽率显著提高,可能是菌液对Cd进行吸附使Cd浓度降低,缓解了对种子的毒害,也可能是菌液产生铁载体降低了水稻种子对Cd的吸收。

4 结论

(1) Cd胁迫浓度为 $0.1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,添加*Delftia* sp. B9菌液可以提高水稻华润2号、深两优5814种子发芽率、活力指数和耐性系数,耐性系数分别显著增加0.19、0.32。

(2) Cd胁迫浓度为 $0.1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,添加*Delftia* sp. B9菌液的处理能使两种水稻幼苗的Chl a含量分别增加 2.29 、 $2.98 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$, Chl b含量分别增加 1.51 、 $0.99 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$,植株株高分别增加 5.76 、 4.34 cm 。

(3) Cd胁迫浓度为 $0.1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,添加*Delftia* sp. B9菌液的处理使华润2号根、茎、叶中Cd含量分别降低63.81%、67.59%、70.84%,深两优5814根、茎、叶中Cd含量分别降低75.95%、74.84%、80.81%。

参考文献:

- [1] 杨 扬,王晓燕,王 江,等.物种多样性对植物生长与土壤镉污染修复的影响[J].环境科学学报,2016,36(6):2103-2113.

- YANG Yang, WANG Xiao-yan, WANG Jiang, et al. Effects of species diversity on plant growth and remediation of Cd contamination in soil [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2016, 36(6):2103–2113.
- [2] 刘莉莉, 林 岚, 殷 霄, 等. 锡毒性研究进展[J]. 中国职业医学, 2012, 39(5):445–447.
- LIU Li-li, LIN Lan, YIN Xiao, et al. Research progress on cadmium toxicity[J]. *China Occupational Medicine*, 2012, 39(5):445–447.
- [3] Dias M C, Monteiro C, Moutinho-Pereira J, et al. Cadmium toxicity affects photosynthesis and plant growth at different levels[J]. *Acta Physiologiae Plantarum*, 2013, 35(4):1281–1289.
- [4] Rizwan M, Ali S, Adrees M, et al. Cadmium stress in rice: Toxic effects, tolerance mechanisms, and management: A critical review[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2016, 23(18):17859–17879.
- [5] 陈 虎, 郭笃发, 郭 峰, 等. 作物吸收富集镉研究进展[J]. 中国农学通报, 2013, 29(3):6–11.
- CHEN Hu, GUO Du-fa, GUO Feng, et al. Research advances on cadmium absorption and accumulation of plant[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2013, 29(3):6–11.
- [6] 彭 鸥, 李丹阳, 刘寿涛, 等. 锡胁迫对水稻生长发育的影响及伤流液与稻米镉含量的相关性研究[J]. 生态与农村环境学报, 2019, 35(1):76–82.
- PENG Ou, LI Dan-yang, LIU Shou-tao, et al. Effects of cadmium stress on rice growth and correlation between bleeding sap and cadmium content in rice[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2019, 35(1):76–82.
- [7] Hartwig A. Cadmium and cancer cadmium: From toxicity to essentiality [M]. Netherlands: Springer, 2013:491–507.
- [8] Milham P J, Payne T E, Lai B, et al. Can synchrotron micro-X-ray fluorescence spectroscopy be used to map the distribution of cadmium in soil particles?[J]. *Soil Research*, 2017, 45(8):624–628.
- [9] Chen C, Xun P C, Nishijo M, et al. Cadmium exposure and risk of lung cancer: A meta-analysis of cohort and case-control studies among general and occupational populations[J]. *Journal of Exposure Science and Environmental Epidemiology*, 2016, 26(5):437–444.
- [10] Kavamura V N, Esposito E. Biotechnological strategies applied to the decontamination of soils polluted with heavy metals[J]. *Biotechnology Advances*, 2010, 28(1):61–69.
- [11] 刘玉玲, 铁柏清, 李园星露, 等. 耐镉细菌的分离及其对土壤中镉的形态影响[J]. 农业环境科学学报, 2018, 37(2):250–258.
- LIU Yu-ling, TIE Bai-qing, LI Yuan-xing-lu, et al. Isolation of a Cd-resistant bacterium and its effect on the speciation of Cd in soil [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2018, 37(2):250–258.
- [12] Gusseme B D, Vanhaecke L, Verstraete W, et al. Degradation of acetaminophen by *Delftia tsuruhatensis* and *Pseudomonas aeruginosa* in a membrane bioreactor[J]. *Water Research*, 2011, 45(4):1829–1837.
- [13] Maisuria V B, Nerurkar A S. Interference of quorum sensing by *Delftia* sp. VM4 depends on the activity of a novel N-Acylhomoserine lactone-acylase[J]. *PLoS One*, 2015, 10(9):e0138034.
- [14] Wu W Y, Huang, H Y, Ling Z M, et al. Genome sequencing reveals mechanisms for heavy metal resistance and polycyclic aromatic hydrocarbon degradation in *Delftia lacustris* strain LZ-C[J]. *Ecotoxicology*, 2016, 25(1):234–247.
- [15] Prakash D, Pandey J, Tiwary B N, et al. Physiological adaptations and tolerance towards higher concentration of selenite (Se^{4+}) in *Enterobacter* sp. AR-4, *Bacillus* sp. AR-6 and *Delftia tsuruhatensis* AR-7[J]. *Extremophiles*, 2010, 14(3):261–272.
- [16] Garavaglia L, Cerdeira S B, Vullo D L. Chromium (VI) biotransformation by β - and γ -proteobacteria from natural polluted environments: A combined biological and chemical treatment for industrial wastes [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2010, 175(1/2/3):104–110.
- [17] Ubalde M C, Braña V, Sueiro F, et al. The versatility of *Delftia* sp. isolates as tools for bioremediation and biofertilization technologies[J]. *Current Microbiology*, 2012, 64(6):597–603.
- [18] Han J G, Sun L, Dong X Z, et al. Characterization of a novel plant growth-promoting bacteria strain *Delftia tsuruhatensis* HR4 both as a diazotroph and a potential biocontrol agent against various plant pathogens[J]. *Systematic Applied Microbiology*, 2005, 28: 66–76.
- [19] Morel M, Cagide C, Minteguiaga M, et al. The pattern of secreted molecules during the co-inoculation of alfalfa plants with *Sinorhizobium meliloti* and *Delftia* sp. JD2: An interaction that improves plant yield [J]. *Mol Plant Microbe Interact*, 2015, 28: 134–142.
- [20] 王秋菊, 焦 峰, 崔战利, 等. 光合细菌浸种对水稻种子萌发的影响[J]. 作物杂志, 2012(3):126–129.
- WANG Qiu-ju, JIAO Feng, CUI Zhan-li, et al. Influence of soaking seeds with PSB solution on germination of rice seed[J]. *Crops*, 2012 (3):126–129.
- [21] 王 平, 董 驶, 李阜棣, 等. 小麦根圈细菌铁载体的检测[J]. 微生物学通报, 1994, 21(6):323–326.
- WANG Ping, DONG Biao, LI Fu-di, et al. Detection and determination of the siderophores produced by wheat rhizobacteria[J]. *Microbiology China*, 1994, 21(6):323–326.
- [22] Glickmann E, Dessaux Y. A critical examination of the specificity of the Salkowski reagent for indolic compounds produced by phytopathogenic bacteria[J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 1995, 61(2):793–796.
- [23] 曾 翔, 张玉烛, 王凯荣, 等. 锡对水稻种子萌发的影响[J]. 应用生态学报, 2007, 18(7):1665–1668.
- ZENG Xiang, ZHANG Yu-zhu, WANG Kai-rong, et al. Effects of cadmium on rice seed germination[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2007, 18(7):1665–1668.
- [24] 何俊瑜, 任艳芳, 周国强, 等. 不同水稻品种种子萌发期耐镉性的研究[J]. 华北农学报, 2010, 25(3):108–112.
- HE Jun-yu, REN Yan-fang, ZHOU Guo-qiang, et al. Study on cadmium tolerance of different varieties of *Oryza sativa* L. during seed germination stage[J]. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 2010, 25(3):108–112.
- [25] Wilkins D A. The measurement of tolerance to edaphic factors by means of root growth[J]. *New Phytol*, 1978, 80(3):623–633.
- [26] Arnon D I, Stour P R. Molybdenum as an essential element for higher plants[J]. *Plant Physiology*, 1939, 14(3):599–602.
- [27] 薛应龙. 植物生理学实验手册[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1985:145–146.
- XUE Ying-long. Handbook of plant physiological experiments[M]. Shanghai: Shanghai Scientific and Technical Publishers, 1985: 145–146.
- [28] 王备芳, 陈玉宇, 张迎信, 等. 水稻早衰突变体es5的鉴定及其突变

- 基因的精细定位[J]. 中国农业科学, 2018, 51(4):613–625.
- WANG Bei-fang, CHEN Yu-yu, ZHANG Ying-xin, et al. Identification and fine mapping of an early senescent leaf mutant *es5* in *Oryza sativa* L.[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2018, 51(4):613–625.
- [29] 杨鸿儒, 袁博, 赵霞, 等. 三种荒漠灌木根际可培养固氮细菌类群及其固氮和产铁载体能力[J]. 微生物学通报, 2016, 43(11):2366–2373.
- YANG Hong-ru, YUAN Bo, ZHAO Xia, et al. Cultivable diazotrophic community in the rhizosphere of three desert shrubs and their nitrogen-fixation and siderophore-producing capabilities[J]. *Microbiology China*, 2016, 43(11):2366–2373.
- [30] 张敏, 朱教君, 同巧玲. 光对种子萌发的影响机理研究进展[J]. 植物生态学报, 2012, 36(8):899–908.
- ZHANG Min, ZHU Jiao-jun, YAN Qiao-ling. Review on influence mechanisms of light in seed germination[J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2012, 36(8):899–908.
- [31] 刘会良, 宋明方, 段士民, 等. 古尔班通古特沙漠及周缘52种植物种子的萌发特性与生态意义[J]. 生态学报, 2011, 31(15):4308–4317.
- LIU Hui-liang, SONG Ming-fang, DUAN Shi-min, et al. A comparative study of seed germination traits of 52 species from Gurbantunggut Desert and its peripheral zone[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, 31(15):4308–4317.
- [32] LIU J, QIAN M, CAI G, et al. Uptake and translocation of Cd in different rice cultivars and the relation with Cd accumulation in rice grain [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2007, 143(1/2):443–447.
- [33] 孙亚莉, 刘红梅, 徐庆国. 镉胁迫对不同水稻品种种子萌发特性的影响[J]. 中国水稻科学, 2017(4):425–431.
- SUN Ya-li, LIU Hong-mei, XU Qing-guo. Effects of cadmium stress on rice seed germination characteristics[J]. *Chinese Journal of Rice Science*, 2017, 31(4):425–431.
- [34] 韩宝贺, 朱宏, 张艺馨. 镉对三种草坪草种子萌发与生长的影响[J]. 中国草地学报, 2014, 36(3):98–103.
- HAN Bao-he, ZHU Hong, ZHANG Yi-xin. Effect of cadmium stress on the seed germination and growth of three turfgrasses[J]. *Chinese Journal of Grassland*, 2014, 36(3):98–103.
- [35] 赵艳艳, 胡晓辉, 邹志荣, 等. 不同浓度5-氨基乙酰丙酸(ALA)浸种对NaCl胁迫下番茄种子发芽率及芽苗生长的影响[J]. 生态学报, 2013, 33(1):62–70.
- ZHAO Yan-yan, HU Xiao-hui, ZOU Zhi-rong, et al. Effects of seed soaking with different concentrations of 5-aminolevulinic acid on the germination of tomato (*Solanum lycopersicum*) seeds under NaCl stress[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, 33(1):62–70.
- [36] 何俊瑜, 任艳芳, 朱成, 等. 镉胁迫对水稻种子萌发、幼苗生长和淀粉酶活性的影响[J]. 中国水稻科学, 2008, 22(4):399–404.
- HE Jun-yu, REN Yan-fang, ZHU Cheng, et al. Effects of cadmium stress on seed germination, seedling growth, and amylase activities in rice[J]. *Chinese Journal of Rice Science*, 2008, 22(4):399–404.
- [37] 徐芬芬, 楚婕妤, 刘誉, 等. 盐胁迫对大豆种子萌发过程中吸水和水解酶活性的影响[J]. 大豆科学, 2017, 36(1):74–77.
- XU Fen-fen, CHU Jie-yu, LIU Yu, et al. Effects of salt stress on water uptake and hydrolytic enzyme activities during soybean seed germination[J]. *Soybean Science*, 2017, 36(1):74–77.
- [38] Eun S O, Young H S, Lee Y. Lead disturbs microtubule organization in the root meristem of *Zea mays*[J]. *Physiol Plantarum*, 2008, 110(3):357–365.
- [39] 柯庆明, 林文雄, 梁康廷, 等. 水稻抗Cd胁迫的生理生化特性研究[J]. 中国农学通报, 2008, 24(4):374–378.
- KE Qing-ming, LIN Wen-xiong, LIANG Kang-ting, et al. Studies on rice genotypes tolerant to Cd contamination and their characters of physio-biochemistry[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2008, 24(4):374–378.
- [40] 张锡洲, 张洪江, 李廷轩, 等. 水稻镉耐性差异及镉低积累种质资源的筛选[J]. 中国生态农业学报, 2013, 21(11):1434–1440.
- ZHANG Xi-zhou, ZHANG Hong-jiang, LI Ting-xuan, et al. Differences in Cd-tolerance of rice and screening for Cd low-accumulation rice germplasm resources[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2013, 21(11):1434–1440.
- [41] 邬飞波, 张国平. 植物螯合肽及其在重金属耐性中的作用[J]. 应用生态学报, 2003, 14(4):632–636.
- WU Fei-bo, ZHANG Guo-ping. Phytochelatin and its function in heavy metal tolerance of higher plants[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2003, 14(4):632–636.
- [42] 陆仲烟, 宋正国, 郭军康, 等. 伯克氏菌对水稻种子萌发及初生幼苗耐镉性的影响[J]. 农业资源与环境学报, 2013, 30(6):87–90.
- LU Zhong-yan, SONG Zheng-guo, GUO Jun-kang, et al. Effects of *Burkholderia* on rice seed germination and Cd-tolerance of rice seedlings[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2013, 30(6):87–90.
- [43] 王立, 安广楠, 马放, 等. AMF对镉污染条件下水稻抗逆性及根际固定性的影响[J]. 农业环境科学学报, 2014, 33(10):1882–1889.
- WANG Li, AN Guang-nan, MA Fang, et al. Effects of arbuscular mycorrhizal fungi on cadmium tolerance and rhizospheric fixation of rice[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2014, 33(10):1882–1889.
- [44] Morel M A, Ubalde M C, Braña V, et al. *Delftia* sp. JD2: A potential Cr(VI)-reducing agent with plant growth-promoting activity[J]. *Archives of Microbiology*, 2011, 193(1):63–68.
- [45] 庞海东, 贺卓, 燕传明, 等. 耐重金属的植物促生芽孢杆菌筛选及其强化香蒲去除Cd的作用[J]. 农业环境科学学报, 2017, 36(11):2314–2321.
- PANG Hai-dong, HE Zhuo, YAN Chuan-ming, et al. Isolation of heavy metal resistant and plant growth promoting *Bacillus* strains and effects on cadmium removal by *Typha angustifolia*[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2017, 36(11):2314–2321.
- [46] 杨丽, 燕传明, 贺卓, 等. 重金属耐性芽孢杆菌的筛选及其对辣椒吸收镉铅的阻控效应[J]. 农业环境科学学报, 2018, 37(6):1086–1093.
- YANG Li, YAN Chuan-ming, HE Zhuo, et al. Effect of heavy metal-tolerant spore-forming bacteria on the cadmium and lead uptake of pepper[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2018, 37(6):1086–1093.
- [47] Piotrowska-Niczyporuk A, Bajguz A, Zambrzycka E, et al. Phytohormones as regulators of heavy metal biosorption and toxicity in green alga *Chlorella vulgaris* (Chlorophyceae)[J]. *Plant Physiology & Biochemistry*, 2012, 52:52–65.