

铅胁迫下产铁载体细菌对芒草幼苗的促生特性研究

赵锐名^{1,2,3}, 成小英^{1,2,3*}

(1. 江南大学环境与土木工程学院, 江苏无锡 214122; 2. 江苏省厌氧生物技术重点实验室, 江苏无锡 214122; 3. 江苏省水处理技术与材料协同创新中心, 江苏苏州 215000)

摘要 [目的] 探讨产铁细菌对芒草铅吸收特性的影响。[方法] 从土壤中分离产铁载体细菌, 并进行土壤 pH 影响芒草铅富集试验和产铁载体细菌影响芒草促生特性试验。[结果] pH 值越接近 7, 植株生物量、株高生长势越强, 叶片、根系对铅的吸收能力越弱; 铅胁迫下添加产铁载体细菌均提高了芒草植株的叶、根重量及其总干重、根冠比、株高, 使根系含铅量下降, 叶片含铅量在 400、600 mg/kg 胁迫下也显著下降。[结论] 产铁载体细菌可提高铅胁迫下芒草抗逆性, 降低富集量, 应用价值高。

关键词 芒草; 产铁细菌; 铅胁迫; 促生性

中图分类号 Q945.78 文献标识码 A

文章编号 0517-6611(2019)16-0093-05

doi: 10.3969/j.issn.0517-6611.2019.16.027

开放科学(资源服务)标识码(OSID):

**Growth Promoting Properties of Siderophore-producing Bacteria on the Seedlings of *Miscanthus sinensis* under Lead Stress**ZHAO Rui-ming^{1,2,3}, CHENG Xiao-ying^{1,2,3} (1. School of Environment and Civil Engineering, Jiangnan University, Wuxi, Jiangsu 214122; 2. Jiangsu Key Laboratory of Anaerobic Biotechnology, Wuxi, Jiangsu 214122; 3. Jiangsu Province Water Treatment Technology and Materials Collaborative Innovation Center, Suzhou, Jiangsu 215000)

Abstract [Objective] To study the effects of siderophore-producing bacteria on lead absorption characteristics of *Miscanthus sinensis*. [Method] Siderophore-producing bacteria were separated from the soil, then the effects of soil pH on lead bioaccumulation characters and the effects of siderophore-producing bacteria on growth promoting properties of *Miscanthus sinensis* were studied. [Result] The growth potential of biomass and height became stronger and the lead absorptive capacity of leaf and root became weaker when pH was close to 7. The addition of siderophore-producing bacteria under lead stress increased the leaf, root weight and total dry weight of *Miscanthus sinensis* plants. The root-shoot ratio and plant height decreased the lead content in roots, and the lead content in leaves decreased significantly under the stress of 400 and 600 mg/kg. [Conclusion] Siderophore-producing bacteria could improve stress resistance of *Miscanthus sinensis* under lead stress, meanwhile, it could also reduce lead concentration of enrichment which had higher application value.

Key words *Miscanthus sinensis*; Siderophore-producing bacteria; Lead stress; Growth promoting activity

环境污染问题已成为当今社会普遍关注的生态问题之一, 日益受到人们关注^[1-3]。而随着工业化、城镇化的迅猛发展, 重金属废弃物源源不断进入人们赖以生存的环境, 严重污染了土壤、水质和大气, 导致环境恶化, 土壤重金属污染加剧^[4]。铅是毒性极高的神经毒物, 是常见重金属污染物之一, 而频繁的采矿、冶炼等活动也使大量铅进入陆地表层生态系统, 既对环境造成了污染, 又给生态安全造成了威胁^[5]。研究表明, 铅对植物生长发育、生理代谢、产量、品质等均会造成显著负面影响, 铅易通过食物链进行富集, 对人体神经、消化、免疫和生殖系统甚至可造成严重影响^[6-8], 使人类的生命健康受到威胁。因此, 重金属污染及其修复一直是国内外研究者重点关注的研究方向之一。

土壤修复技术是针对土壤重金属污染而涌现的现代手段, 可分为物理修复、化学修复和生物修复 3 种。生物修复是近年发展起来的一种新兴技术, 潜力巨大, 其较传统修复技术处理费用低、环境干扰小、不产生二次污染, 具有经济性、有效性和非破坏性等特点, 应用前景广阔^[9]。微生物可通过自身代谢活动及其代谢产物溶解重金属, 提高其生物有效性, 促进植物对重金属的吸收, 同时还可通过分泌植物激素使植物生长旺盛、生物量增加、土壤重金属污染修复效率

提高^[10-11]。微生物产铁载体对铁元素亲和力强, 可螯合 Fe³⁺、Pb²⁺、Al³⁺ 等金属离子, 形成大分子而留在细胞外, 以提高修复植物对重金属的耐受能力^[12-14]。

芒草 (*Miscanthus sinensis*) 隶属于禾本科黍亚科高粱族甘蔗亚族芒属, 是一类多年生高大草本植物, 因其具有生物产量高、水肥消耗低、环境适应性强等优势而备受关注^[15]。芒草在我国分布广泛, 有的种植区也常常受到铅污染。然而, 目前关于铅对芒草生长发育的影响以及产铁载体细菌对提高芒草吸收土壤铅的能力都鲜见报道。为此, 笔者拟筛选芒草根际土壤中产铁能力较强的细菌, 对其影响芒草吸收铅的特性进行研究, 以期对铅污染土壤的生物修复提供参考。

1 材料与方法**1.1 材料**

1.1.1 供试土样采集。2017 年 5 月采集坡向和地势平缓一致的地段周围生长正常、无病虫害的芒草植株, 按照“S”形取样法进行采集。采集时, 先在植株周围 5 cm 处画一个规整的圆形, 用铁锹慢慢挖出芒草植株, 将整个植株连同根际土壤一起用聚乙烯塑料袋包裹严实, 置于冰盒中, 迅速带回实验室, 并进行根际土壤取样工作。土壤取样在超净工作台上进行, 避免污染, 将取好的土样进行封装, 备用。

1.1.2 培养基。采用牛肉膏蛋白胨培养基 (g/L) 进行菌株的分离、纯化和保种, 该培养基中含蛋白胨 10 g/L、牛肉膏 5 g/L、NaCl 10 g/L, pH 7.0~7.2, 在 115 °C 下灭菌 20 min。固体平板在液体 LB 的基础上再添加 2% 的琼脂。

1.2 方法 分离并筛选产铁载体细菌。芒草根际土壤细菌

基金项目 水体污染控制与治理科技重大专项 (2017ZX07203-005-07)。**作者简介** 赵锐名 (1992—), 男, 辽宁阜新, 硕士研究生, 研究方向: 水环境治理。* 通信作者, 副教授, 博士, 从事河道污水处理研究。**收稿日期** 2019-03-06

的分离采用稀释平板涂布法^[16]。称取鲜土样 10 g,溶于 100 mL 已灭菌的去离子水中,在 28 ℃、145 r/min 下培养 30 min,之后进行稀释。吸取上清液 50 μL,均匀涂抹在 CAS 平板上,置于培养箱中 28 ℃ 培养 48 h,反复镜检以获得纯培养根际细菌样本。所获得的细菌用 -20 ℃ 下的牛肉膏斜面和 -80 ℃ 下的 30% 甘油中。产铁细菌的筛选采用 CAS 检测法,以菌斑周围产生黄色晕圈作为产铁载体阳性细菌筛选的主要参考指标^[17],记录黄色晕圈产生时间、颜色、大小、形态特征等,分析细菌分泌铁载体的能力,以定性筛选出产铁载体能力强的菌株。

1.3 芒草盆栽试验

1.3.1 土壤 pH 影响芒草铅富集试验。首先通过预备试验测试产铁载体细菌对 Pb²⁺ 的耐受能力。土壤 pH 对土壤中金属元素的生物可利用性影响较大,因此设计以下试验来进行探讨:设置盆栽芒草蛭石基质中的 Pb²⁺ 浓度为 600 mg/kg, pH 梯度分别为 5.0、5.5、6.0、6.5 和 7.0,测试不同 pH 下芒草对铅的富集特性。每处理 10 盆,3 次重复,共计 30 盆。

1.3.2 产铁载体细菌对芒草的促生特性试验。设置盆栽芒草蛭石基质中 Pb²⁺ 的浓度分别为 0、200、400、600、800、1 000 mg/kg。先对芒草种子进行表面消毒,并将其浸泡在 95% 的酒精中 30 s,在灭菌的 0.1% HgCl₂ 溶液中浸泡 5 min,以无菌水清洗 5~6 次。将种子播在 1×10⁵ Pa 下灭菌 30 min 的蛭石基质中,并喷施植物营养液,进行培养。待植株长出土表 2~3 cm 时,在根周围接种产铁载体菌悬液(10⁸ 个细

胞)10 mL,表面铺已灭菌、干燥的石英砂,防止杂菌污染。在光(25 ℃ 17 h)、暗(17 ℃ 7 h)交替的光照培养室中生长 60 d,收获整株植株,进行相关指标测定。每处理 10 盆,3 次重复,共计 30 盆。以不接种菌株为对照。

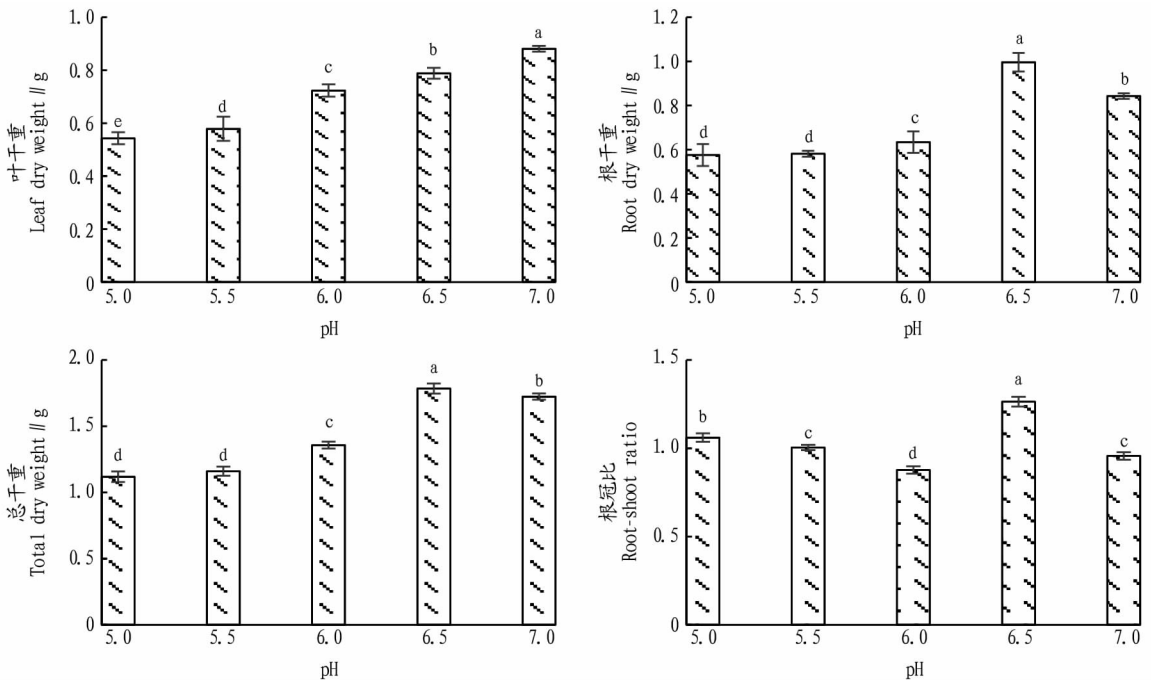
1.3.3 测试方法。将收获的新鲜植株分别用自来水、去离子水各冲洗 3 次,先用米尺测量株高,然后将植株根和地上部分分离,在 105 ℃ 下杀青 30 min,然后转至 80 ℃ 烘干至恒重,称重,并计算根冠比(地下部与地上部的比值)。粉碎,取 0.2 g 样品加入酸液(HNO₃:H₂SO₄ = 4:1),用 MARS240 微波消解系统消解,冷却,过滤,滤液保存于塑料瓶中。样品中的铅含量(mg/kg 干重)用 AA-6300 原子吸收分光光度计测定。

1.4 数据分析 所有数据均用 Microsoft Excel 录入作图。用 SPSS 22.0 对数据进行统计分析。

2 结果与分析

2.1 土壤 pH 对芒草幼苗生长的影响

2.1.1 对生物量的影响。由图 1 可见,随着 pH 的升高,叶片干重呈现显著的上升趋势,pH 7.0 下叶片的干重最大。就根系干重和总生物量(总干重)而言,以 pH 5.0 和 pH 5.5 处理表现相同的趋势,该 2 个指标均处于最低水平且二者差异不显著,而 pH 6.5 的处理根系干重和总生物量最高(P<0.05),pH 7.0 的处理次之。不同 pH 处理下芒草幼苗的根冠比排序为 pH 6.5>pH 5.0>pH 5.5>pH 7.0>pH 6.0。说明芒草幼苗在 pH 6.5 的微酸环境下表现出较好的生长势,生物量高,根冠比大;而 pH 越低,生物量越小,对生长发育影响越大。



注:图中不同小写字母表示不同处理在 0.05 水平差异显著

Note: Different lowercase letters in the figure stand for significant differences between different treatments at 0.05 level

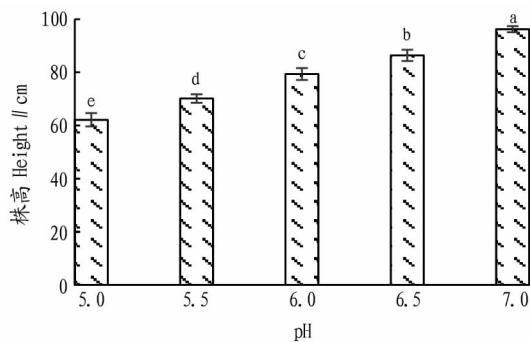
图 1 pH 对芒草幼苗生物量的影响

Fig.1 Effects of pH on biomass of *Miscanthus sinensis* seedlings

2.1.2 对株高的影响。图 2 表明,随着基质 pH 的降低,芒草幼苗的株高呈显著下降的趋势(P<0.05),与叶片干重变化趋

势一致。pH 7.0 的处理株高最高(96.25 cm),而 pH 5.0 的处理株高最低(62.14 cm)。表明基质 pH 对芒草幼苗高度影响

显著, pH 越低, 基质酸度越大, 对株高的增加越不利。



注:图中不同小写字母表示不同处理在 0.05 水平差异显著

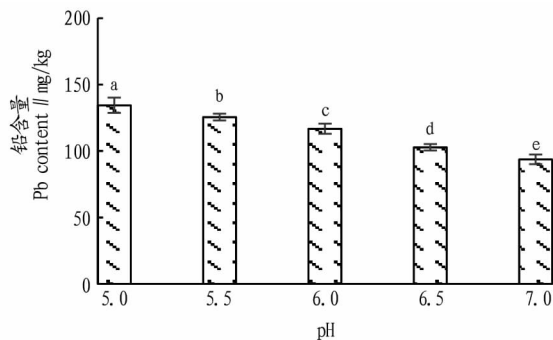
Note: Different lowercase letters in the figure stand for significant differences between different treatments at 0.05 level

图 2 pH 对芒草幼苗株高的影响

Fig.2 Effects of pH on height of *Miscanthus sinensis* seedlings

2.2 土壤 pH 对芒草幼苗铅吸收积累的影响

2.2.1 对叶片铅积累的影响。图 3 表明, pH 越低, 芒草叶片中铅含量越高, 不同处理间呈显著差异 ($P < 0.05$)。表明 pH 对芒草叶片积累铅的能力有显著影响, 酸性环境下更易导致铅的吸收和积累。



注:图中不同小写字母表示不同处理在 0.05 水平差异显著

Note: Different lowercase letters in the figure stand for significant differences between different treatments at 0.05 level

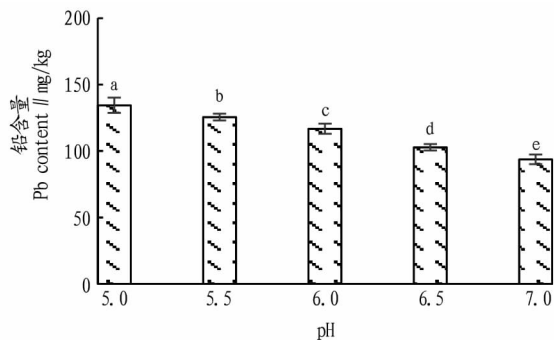
图 3 pH 对芒草幼苗叶片铅含量的影响

Fig.3 Effects of pH on leaf Pb content of *Miscanthus sinensis* seedlings

2.2.2 对根系铅积累的影响。由图 4 可见, 随着 pH 的降低, 根系铅含量表现为与叶片一致的变化趋势, 且不同处理间差异显著 ($P < 0.05$)。说明芒草根系对铅的吸收和积累也受 pH 值的影响, 酸性环境可使根系富集更多的铅。

2.3 添加产铁载体细菌菌剂对芒草幼苗生长的影响

2.3.1 对生物量的影响。由图 5 可看出, 随着 Pb^{2+} 浓度的增加, 对照和添加菌剂处理的叶、根干重和总生物量均呈逐渐降低的趋势, 但在同一浓度梯度下, 添加菌剂处理的这 3 个指标均显著高于对照。就根冠比而言, 添加菌剂的处理表现为先升高后降低的趋势, 对照的根冠比随 Pb^{2+} 的浓度变化则不明显。可见, 土壤中 Pb^{2+} 的浓度对芒草幼苗生物量积累影响显著, 浓度越高, 影响越大; 而添加产铁载体细菌菌剂则可在一定程度上提高其生物量, 以应对铅的不利影响。



注:图中不同小写字母表示不同处理在 0.05 水平差异显著

Note: Different lowercase letters in the figure stand for significant differences between different treatments at 0.05 level

图 4 pH 对芒草幼苗根系铅含量的影响

Fig.4 Effects of pH on root Pb content of *Miscanthus sinensis* seedlings

2.3.2 对株高的影响。由图 6 可见, 随着 Pb^{2+} 浓度的提高, 芒草幼苗添加菌剂处理和对照的株高均呈现降低趋势, 在每一浓度梯度下, 添加菌剂处理的株高均显著低于对照。表明 Pb^{2+} 浓度越高, 越不利于芒草幼苗的向上生长, 但产铁载体细菌菌剂可起到在铅胁迫下增强芒草生长的效果。

2.4 添加产铁载体细菌菌剂对芒草幼苗铅吸收积累的影响

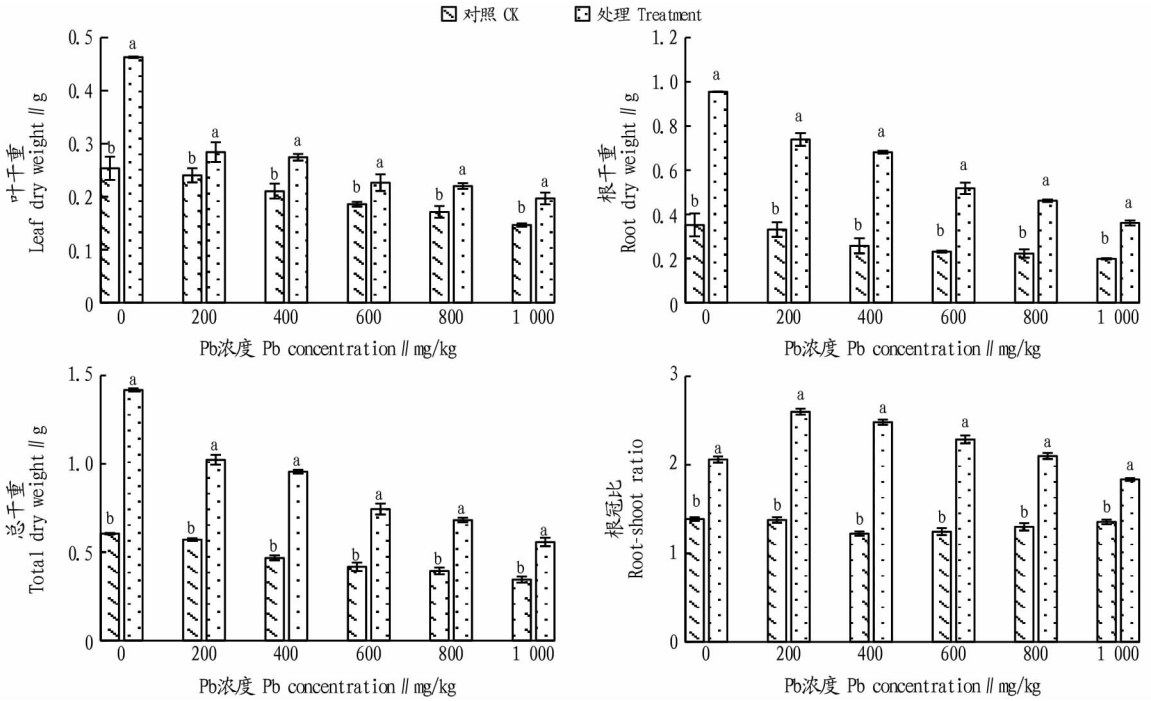
2.4.1 对叶片铅积累的影响。图 7 为不同浓度 Pb^{2+} 胁迫下添加产铁载体细菌菌剂后芒草幼苗叶片铅含量的差异。处理和对照的叶片铅含量均随着 Pb^{2+} 浓度的提高呈先上升后下降的趋势, 200 mg/kg 的 Pb^{2+} 浓度下菌剂处理的芒草叶片铅含量最高, 而 400 mg/kg 的 Pb^{2+} 浓度下对照叶片的铅含量则最高。同一 Pb^{2+} 浓度下不同处理相比, Pb^{2+} 浓度为 200、800、1 000 mg/kg 的处理具有显著高的叶片铅含量, 而其他浓度下则相反。可见, 基质中 Pb^{2+} 浓度、是否添加产铁载体细菌菌剂均对芒草叶片铅含量有重要影响; 添加菌剂可降低一定 Pb^{2+} 浓度下芒草叶片中铅的含量。

2.4.2 对根系铅积累的影响。由图 8 可看出, 随着 Pb^{2+} 浓度的增加, 添加菌剂和对照的芒草幼苗根部铅含量均呈上升趋势, 同一 Pb^{2+} 浓度下 2 个处理比较, 添加菌剂处理的根系铅含量均显著低于对照。以上结果表明, 在 Pb^{2+} 胁迫下, 添加产铁载体细菌菌剂可减少芒草幼苗根系对铅的积累。

3 结果与讨论

铁载体是一种生长在铁含量较低的环境中、由微生物合成的、对 Fe^{3+} 具有高专一性的低分子量铁螯合剂^[18]。产铁载体细菌对遭受重金属污染的植物维持正常生理活动有重要作用, 缓解离子毒害, 降低胁迫程度^[19-20]。产铁载体细菌产生的铁载体能与一些重金属离子相结合, 形成螯合物, 进而增加植物根系对重金属的吸收, 提高修复土壤的效率。

土壤 pH 的变化与重金属积累量关系密切, 其主要影响重金属在土壤中的存在形态以及土壤颗粒的表面性质。研究表明, 铅主要在酸性条件下实现在沉积物中的释放, 随着 pH 的升高, 铅释放率逐渐降低^[21]。翟娜等^[22]研究发现, 芥菜地上、地下部分铅含量受土壤中铅释放量影响显著, 含铅

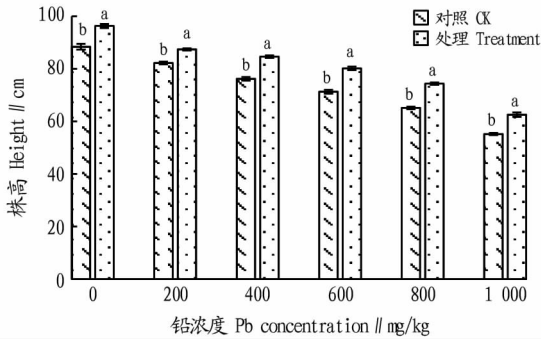


注:图中不同小写字母表示不同处理在 0.05 水平差异显著

Note: Different lowercase letters in the figure stand for significant differences between different treatments at 0.05 level

图 5 添加菌剂对芒草幼苗生物量的影响

Fig.5 Effects of agent on biomass of *Miscanthus sinensis* seedlings

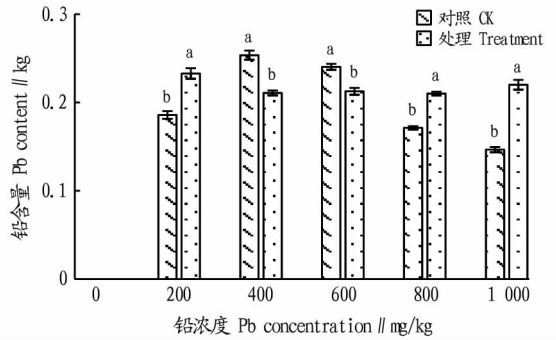


注:图中不同小写字母表示不同处理在 0.05 水平差异显著

Note: Different lowercase letters in the figure stand for significant differences between different treatments at 0.05 level

图 6 添加菌剂对芒草幼苗株高的影响

Fig.6 Effects of agent on height of *Miscanthus sinensis* seedlings



注:图中不同小写字母表示不同处理在 0.05 水平差异显著

Note: Different lowercase letters in the figure stand for significant differences between different treatments at 0.05 level

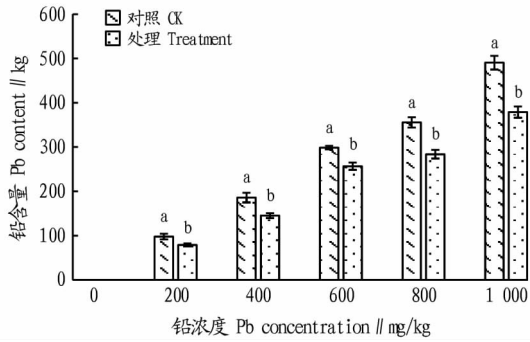
图 7 添加菌剂对芒草幼苗叶片铅含量的影响

Fig.7 Effects of agent on leaf Pb content of *Miscanthus sinensis* seedlings

量为地下部分最高,认为铅在芥菜植株内的转移过程中,地下部分积累了较多的铅;彭克俭等^[23]研究表明,在 pH 为 3~7 的范围内,龙须眼子菜对铅的吸附随 pH 升高而减少。该研究发现,随着 pH 的升高,芒草幼苗叶片和根系铅积累量也逐渐降低,与前人的研究结果一致。积累量降低的原因可能是由于铅在较高 pH 的溶液中溶解度降低以致产生沉淀现象而使其不易被吸附所致。从不同 pH 下芒草幼苗的生长势差异可见,pH 越低,生长势越弱;pH 越接近中性,生长势越强;总体上表现为 pH 6.5~7.0 时生长最好。这进一步验证了 pH 影响植物根系对铅的吸收的论断,pH 越高,植物对铅的吸附能力越弱,生长表现越好。

盆栽试验表明,添加产铁载体细菌菌剂的芒草幼苗在不

同浓度铅胁迫下的叶干重、根干重、总干重、根冠比、株高等指标均较对照显著增加,表明该菌剂对芒草幼苗促生作用明显,但不同浓度间的促生效果也有差异。就植株上、下部对铅的吸收而言,添加产铁载体细菌菌剂的处理均可使根部铅积累量降低,吸收减少,其原因可能是产生的铁载体螯合了基质中的 Pb^{2+} ,进而抑制了芒草植株根部对铅的吸收,使根部铅含量降低,与前人在其他重金属胁迫研究中的结果一致^[24-26]。该研究通过试验筛选确定的产铁载体细菌具有改善芒草幼苗根际缺铁症状的作用,产生的螯合铁可用来摄取铁元素,进而提高对重金属铅的抗性,促进植株生物量的积累和株高的增加。该研究还发现,400、600 mg/kg 铅浓度处



注:图中不同小写字母表示不同处理在 0.05 水平差异显著

Note: Different lowercase letters in the figure stand for significant differences between different treatments at 0.05 level

图 8 添加菌剂对芒草幼苗根系铅含量的影响

Fig.8 Effects of agent on root Pb content of *Miscanthus sinensis* seedlings

理下添加产铁载体细菌菌剂可使叶片铅含量降低,而其他浓度下叶片铅含量却较高,表明铅浓度过高或过低都影响产铁载体细菌发挥螯合作用,尤其是浓度过高时可能导致细菌死亡而使螯合作用丧失。

参考文献

[1] WONG M H. Ecological restoration of mine degraded soils, with emphasis on metal contaminated soils [J]. *Chemosphere*, 2003, 50(6): 775-780.

[2] ISLAM M S, AHMED M K, RAKNUZZAMAN M, et al. Heavy metal pollution in surface water and sediment: A preliminary assessment of an urban river in a developing country [J]. *Ecological indicators*, 2015, 48: 282-291.

[3] ZHANG C, SHAN B Q, TANG W Z, et al. Heavy metal concentrations and speciation in riverine sediments and the risks posed in three urban belts in the Haihe basin [J]. *Ecotoxicology and environmental safety*, 2017, 139: 263-271.

[4] 倪彦博, 吴恒梅, 孙权, 等. 紫叶李对镉·铅胁迫的生理响应 [J]. *安徽农业科学*, 2016, 44(33): 61-62, 120.

[5] 廖琴, 王胜利, 南忠仁, 等. 干旱区绿洲土壤中 Cd、Pb、Zn、Ni 复合污染对芹菜的影响及其富集迁移规律 [J]. *干旱区资源与环境*, 2011, 25(7): 173-177.

[6] TODD A C, WETMUR J G, MOLINE J M, et al. Unraveling the chronic toxicity of lead: An essential priority for environmental health [J]. *Environmental health perspectives*, 1996, 104(S1): 141-146.

[7] 秦建桥, 赵华荣, 胡萌, 等. 铅胁迫下不同生态型五节芒 (*Miscanthus floridulus*) 的抗氧化系统的差异研究 [J]. *生态环境学报*, 2011, 20(3): 525-531.

[8] 周建, 江泽平, 魏远. 重金属铅胁迫对刺槐幼苗生长及铅离子转运特性的影响 [J]. *浙江农林大学学报*, 2016, 33(5): 742-748.

[9] WANG Q R, LIU X M, CUI Y S, et al. Concept and advances of applied bioremediation for organic pollutants in soil and water [J]. *Acta ecologica sinica*, 2001, 21(1): 159-163.

[10] MOLINS H, MICHELET L, LANQUAR V, et al. Mutants impaired in vacuolar metal mobilization identify chloroplasts as a target for cadmium hypersensitivity in *Arabidopsis thaliana* [J]. *Plant, cell and environment*, 2013, 36(4): 804-817.

[11] GUIÑAZ Ú L B, ANDRÉS J A, ROVERA M, et al. Evaluation of rhizobacterial isolates from Argentina, Uruguay and Chile for plant growth-promoting characteristics and antagonistic activity towards *Rhizoctonia* sp. and *Macrophomina* sp. *in vitro* [J]. *European journal of soil biology*, 2013, 54: 69-77.

[12] KISS T, FARKAS E. Metal-binding ability of desferrioxamine B [J]. *Journal of inclusion phenomena and molecular recognition in chemistry*, 1998, 32(2/3): 385-403.

[13] 张莹, 张文莉, 陈小贝, 等. 细菌产铁载体的结构、功能及其研究进展 [J]. *中国卫生检验杂志*, 2012, 22(9): 2249-2251.

[14] 王英丽, 林庆祺, 李宇, 等. 产铁载体根际菌在植物修复重金属污染土壤中的应用潜力 [J]. *应用生态学报*, 2013, 24(7): 2081-2088.

[15] BROSSE N, DUFOUR A, MENG X Z, et al. *Miscanthus*: A fast-growing crop for biofuels and chemicals production [J]. *Biofuels bioproducts & biorefining*, 2012, 6(5): 580-598.

[16] 袁红莉, 王贺祥. *农业微生物学及实验教程* [M]. 北京: 中国农业出版社, 2009: 470.

[17] SCHWYN B, NEILANDS J B. Universal chemical assay for the detection and determination of siderophores [J]. *Analytical biochemistry*, 1987, 160(1): 47-56.

[18] HIDER R. Siderophore mediated absorption of iron [J]. *Structure and bonding*, 1984, 58: 25-87.

[19] DIMKPA C O, SVATOŠ A, DABROWSKA P, et al. Involvement of siderophores in the reduction of metal-induced inhibition of auxin synthesis in *Streptomyces* spp. [J]. *Chemosphere*, 2008, 74: 19-25.

[20] SINHA S, MUKHERJEE S K. Cadmium-induced siderophore production by a high Cd-resistant bacterial strain relieved Cd toxicity in plants through root colonization [J]. *Current microbiology*, 2008, 56(1): 55-60.

[21] 王亚平, 王岚, 许春雪, 等. pH 对长江下游沉积物中重金属元素 Cd、Pb 释放行为的影响 [J]. *地质通报*, 2012, 31(4): 594-600.

[22] 翟娜, 曲娟娟, 闫璐, 等. pH 和磷对铅胁迫下芥菜生长和土壤酶活性的影响 [J]. *水土保持学报*, 2013, 27(3): 259-264.

[23] 彭克俭, 高璐, 游武欣, 等. 温度、pH 值及盐度对龙须眼子菜吸附镉、铅的影响 [J]. *生态环境*, 2008, 17(1): 16-22.

[24] TRIPATHI M, MUNOT H P, SHOUCHE Y, et al. Isolation and functional characterization of siderophore-producing lead- and cadmium-resistant *Pseudomonas putida* KNP9 [J]. *Current microbiology*, 2005, 50(5): 233-237.

[25] TANK N, SARAF M. Enhancement of plant growth and decontamination of nickel-spiked soil using PGPR [J]. *Journal of basic microbiology*, 2009, 49(2): 195-204.

[26] 李艳梅, 王琼瑶, 涂卫国, 等. 镍胁迫下产铁载体细菌对花生的促生性 [J]. *微生物学通报*, 2017, 44(8): 1882-1890.