

巨大芽孢杆菌 LY02 对黑麦草修复重金属污染土壤的影响

赵树民¹, 李晓东², 虞方伯³, 鲍雅莉³, 沈颖³,

张媚¹, 林马水¹, 王冰璇¹, 林海萍¹

(1. 浙江农林大学生物农药高效制备技术国家地方联合工程实验室, 杭州 311300;

2. 浙江省丽水市林业局开发区分局, 浙江 丽水 323000; 3. 浙江省土壤污染生物修复重点实验室, 杭州 311300)

摘要: 采用盆栽试验方法, 研究了接种巨大芽孢杆菌 LY02 对黑麦草修复 Cd、Cu 污染土壤以及二者复合污染土壤效果的影响。结果表明: 在 Cd、Cu 污染土壤及复合污染土壤中接种巨大芽孢杆菌 LY02, 可显著提高黑麦草地上部生物量, 增幅达 65.0%~108.3%; 促进了黑麦草在 3 种污染土壤中对重金属的吸收, 其中对 Cd 污染土壤中黑麦草吸收 Cd 的影响最为显著, 地上部 Cd 吸收量较对照组增加了 45.8% ($P < 0.05$); 3 种污染土壤中黑麦草根际土壤有效磷含量显著升高, 较对照组分别增加了 18.2%, 26.7%, 16.2%; 黑麦草根际土壤中有有效态 Fe 含量显著提高, Cu 单一污染土壤中增幅最大, 达到 152.5%; 3 种污染土壤中有有效态重金属含量升高, 在 Cu 污染土壤中, 有效态 Cu 增幅达到 49.7% ($P < 0.05$)。综上所述, 巨大芽孢杆菌 LY02 通过增加污染土壤中生物可利用态 P 和 Fe, 促进黑麦草生长; 通过提高有效态 Cd 和 Cu 的含量, 增加黑麦草对其吸收, 从而提高了黑麦草对 Cu、Cd 污染土壤的修复效率。

关键词: 巨大芽孢杆菌; 黑麦草; 植物修复; Cd; Cu

中图分类号: X53 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-2242(2017)05-0340-05

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2017.05.053

Effect of *Bacillus Megaterum* LY02 on Phytoremediation of Heavy Metal from Contaminated Soil by *Lolium Perenne* L.

ZHAO Shumin¹, LI Xiaodong², YU Fangbo³, BAO Yali³, SHEN Ying³,

ZHANG Mei¹, LIN Mashui¹, WANG Bingxuan¹, LIN Haiping¹

(1. National Joint Engineering Laboratory of Biopesticide Preparation, School of Forestry and Biotechnology, Zhejiang Agricultural and Forestry University, Hangzhou 311300; 2. Lishui Forestry Bureau of Zhejiang, Lishui, Zhejiang 323000; 3. Key Laboratory of Soil Contamination Bioremediation of Zhejiang Province, Hangzhou 311300)

Abstract: Pot experiments were carried out to evaluate the influence of *Bacillus megaterum* LY02 inoculation on phytoremediation of Cd, Cu and Cd-Cu contaminated soil by *Lolium perenne* L. The results showed that inoculation *B. megaterum* LY02 in Cd, Cu and Cd-Cu contaminated soil significantly increased the aboveground biomass of *Lolium perenne* L. by 65%~108.3%. The strain promoted phytoextraction of heavy metal by *Lolium perenne* L. in different kinds of contaminated soil, and Cd extraction was increased significantly by 45.8% compared with the control. Compared with the control, *B. megaterum* significantly enhanced the available phosphorus in three kinds of contaminated soil by 18.2%, 26.7% and 16.2%, respectively. The available Fe was increased after inoculation, especially in Cu-contaminated soil, the increase was up to 152.5%. Furthermore, the content of available Cd and Cu in the rhizosphere were also enhanced in the three kinds of contaminated soil, the available Cu was increased by 49.7% in the Cu-contaminated soil. Above all, inoculation *B. megaterum* LY02 in *Lolium perenne* L. can improve the content of available P and Fe in the contaminated soil, and enhance the content of available Cd and Cu, which are beneficial for the improvement of remediation efficiency of *Lolium perenne* L.

Keywords: *Bacillus megaterum*; *Lolium perenne* L.; phytoremediation; Cd; Cu

重金属 Cd 和 Cu 被美国环保署(EPA)列入土壤中的几种首要污染物^[1],我国近几年的全国土壤污染状况调查公报^[2]也显示,这 2 种重金属对农田土壤的危害较为广泛和严重。重金属污染土壤的修复工作已迫在眉睫。

植物-微生物联合修复技术综合了植物与微生物修复技术优势,被越来越多的研究者所重视。某些微生物具有显著提高植物修复重金属污染土壤效果的作用^[3-4],其主要作用可以归纳为以下 3 个方面:一是促进植物生长^[5-6];二是改变土壤重金属的生物有效性;三是影响植物对重金属的吸收与分配^[3,7]。已有许多通过接种特定微生物促进受体植物生长,提高植物修复效率的报道。研究表明,接种微生物能够提高印度芥菜对 Cd 的吸收^[4]、*Solanum nigrum* 对 Cd 的富集^[8]和 *Lolium perenne* L. 对铜的累积^[9]。因此,将具有特定功能的微生物与植物联合用于重金属污染土壤的修复是一个有效和值得深入探究的方法。

多年生黑麦草(*Lolium perenne* L.)对 Cd、Cu 和 Pb 等多种重金属均有一定的耐受性^[10],且黑麦草地上部生物量较大、可多次刈割、环境适应性强,具有作为重金属修复材料的前景。巨大芽孢杆菌(*Bacillus megaterum*)是一类有益的功能性细菌,能够改善土壤微环境,具有环境友好、对粮食作物安全、对人畜无害等优点。我国在 20 世纪五六十年代即开始对巨大芽孢杆菌进行研究,并将其作为解磷菌用于微生物肥料的生产。随着研究的深入,巨大芽孢杆菌在微生物菌肥生产、生物防治、水质净化等方面的作用也被人们开发利用出来^[11-12]。

通过植物与微生物的互作关系提高植物修复效率已成为国内外研究热点,但针对黑麦草与巨大芽孢杆菌相互作用的研究还较少。本文以黑麦草为植物材料,以本实验室前期筛选获得的一株巨大芽孢杆菌 LY02 为微生物材料,通过盆栽试验测定 LY02 对黑麦草生长、吸收和富集重金属、土壤有效态磷以及土壤有效态重金属含量的影响,初步明确 LY02 在黑麦草修复 Cd 和 Cu 污染土壤中的作用。

1 材料与方法

1.1 供试材料

供试植物为多年生黑麦草(*Lolium perenne* L.),种子购于临安市种子站。供试土壤采自浙江农林大学平山试验基地未受重金属污染的农田土壤表层(0—15 cm),土壤 pH 6.3,有机质 34.2 g/kg,有效磷 42.4 mg/kg,CEC 12.52 cmol/kg。风干后过 2 mm 筛备用。通过添加 $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ 和 $\text{Cd}(\text{NO}_3)_2$ 制备重金属污染土壤,分别是含 Cd 10 mg/kg 土壤,记为 Cd 污染土壤;含 Cu 500 mg/kg 土壤,记为 Cu

污染土壤;含 Cd 10 mg/kg 与 Cu 500 mg/kg 土壤,记为复合污染土壤。以上土壤平衡 2 个月,自然风干后过 2 mm 筛备用。

1.2 供试菌株及菌悬液的制备

以本实验室保藏的具有 Cd、Cu 抗性的巨大芽孢杆菌 LY02 为供试菌株,该菌株具备分泌 3-吲哚乙酸和解磷能力,在含有 L-色氨酸(100 mg/L)的 LB 培养液中培养 2 d 后,产 IAA 26.5 mg/L;在 NBRIP 培养液中培养 7 d 后无机磷溶出量达到 96.3 mg/L。同时,菌株 LY02 的铁载体活性单位达到 86.1%。从-80℃冰箱中取出菌株活化后,取 50 μL 菌液接种于 100 mL 的 LB 液体培养基中,28℃、150 r/min 培养 48 h,6 000 r/min 离心 10 min,弃上清液,再用无菌水冲洗菌体 5 遍,添加适量无菌水调节菌体浓度为 10^8 cfu/mL,即得到 LY02 菌悬液。

1.3 盆栽试验设计

盆栽试验时间为 2016 年 11 月 10 日—2017 年 1 月 10 日。将风干过筛后的污染土壤装盆,每盆装入 500 g 污染土。将黑麦草种子用 75%酒精表面消毒 3 min 后用无菌蒸馏水冲洗 5 遍,晾干。盆栽试验共分 3 组,各组的土壤分别设接菌和不接菌处理。Cd₁₀Cu₀:Cd 污染土壤;Cd₀Cu₅₀₀:Cu 污染土壤;Cd₁₀Cu₅₀₀:复合污染土壤,每个处理 3 次重复。将种子均匀撒在盆中,每盆 30 颗,7 d 后间苗,每盆留下长势一致的幼苗 15 棵。间苗后每 15 d 取 LY02 菌悬液 10 mL 至加菌组,同时取等量的去离子水加入对照组。将黑麦草放置于光照培养箱,生长 60 d 后采样。

1.4 样品采集和处理

将黑麦草从盆中小心取出,抖落根系周围土壤,收集紧密粘连在黑麦草根系上的土壤。黑麦草植株取出后将根和地上部分分开,根系洗净后用 10 mmol/L 的 EDTA 溶液浸泡 30 min,再用去离子水冲洗。将黑麦草放在烘箱中 75℃烘干至恒重并测定其干重。

1.5 土壤和植物样品的分析方法

土壤有效磷的测定采用碳酸氢钠-钼锑抗比色法^[13]测定;

土壤中有效态重金属含量采用 DTPA(二乙基三胺五乙酸)浸提法测定;

土壤中全量重金属含量分析参照 Pérez-de-Mora 等^[14]的方法测定。

黑麦草植株内重金属含量的测定:烘干的植物样品用微型植物粉碎机磨碎,过 100 目筛(分为地上部和地下部),地上部和地下部样品分别称取 0.100 0 g 和 0.050 0 g 于聚四氟乙烯消解罐中,加入 7 mL HNO_3 和 2 mL H_2O_2 ,浸泡 1 h,置于微波消解仪内进行消解,消解完毕,定容至 25 mL。同时做空白试

验,待测。以上所有待测样品用电感耦合等离子发射光谱仪(ICP-OES, PerkinElmer 7000 DV)测定铁、镉和铜的含量。

1.6 数据处理

采用 Excel 2013 和 SPSS 19.0 软件进行数据统计分析,不同处理间的差异显著性分析采用单因素方差分析中的 Duncan 多重比较方法检验($p < 0.05$)。

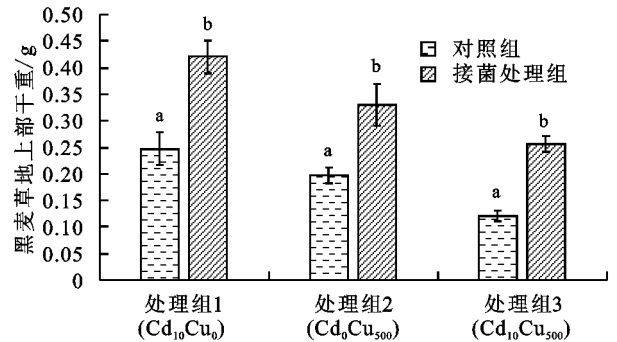
2 结果与分析

2.1 菌株 LY02 对黑麦草生长的影响

图 1 为不同重金属污染土壤中接种 LY02 后黑麦草地上部的干重。无论接菌与否,复合污染土壤中黑麦草的长势均要劣于单一污染土壤中的黑麦草,生物量显著低于单一污染土壤中的黑麦草,这表明 Cd、Cu 对黑麦草胁迫产生了协同效果。与对照组相比,接种菌株 LY02 使 Cd、Cu 污染土壤及其复合污染土壤中黑麦草地上部的生物量均显著增加,增幅分别为 40.5%,39.4%,50.0%,表明巨大芽孢杆菌 LY02 能够促进重金属污染土壤中黑麦草的生长,尤其是当黑麦草受到 Cd、Cu 双重胁迫时,这种促生效果尤其明显,尽管如此,此时黑麦草的生物量仍显著低于单一污染土壤中的黑麦草。因此,巨大芽孢杆菌—黑麦草的组合更适合用于 Cd 或者 Cu 单一污染土壤的修复。

潘凤山等^[15]从东南景天根部筛选到一株巨大芽孢杆菌 SaN1,通过砂培试验证明接种此菌后,油菜地上部干重增加了 25.3%,表明了通过接种外源菌而提高植物生物量的可行性。王璐等^[16]将 Cu 抗性植物促生内生细菌 K3-9 接种到苏丹草根后也发现其能促进苏丹草的生长,进而增加了苏丹草对土壤中

Cu 的吸收量,达到了提高修复效果的作用。研究表明,能够产生 IAA、溶解无机磷、产生铁载体的细菌能够显著促进植物的生长和提高植物对重金属的富集。本文中所用的巨大芽孢杆菌 LY02 为溶磷和产铁载体菌,故推测其改善了黑麦草周围的营养情况,促进了黑麦草的生长,并提高了其生物量。



注:同组中不同小写字母者表示在 0.05 水平下差异显著。下同。

图 1 不同处理间黑麦草的地上部干重

2.2 巨大芽孢杆菌 LY02 对黑麦草吸收重金属的影响

由表 1 可知,3 种污染土壤中接种巨大芽孢杆菌 LY02 均能够明显提高黑麦草地上部和地下部对重金属的累积,其中,黑麦草地下部重金属含量与不接菌的对照相比,差异均达显著水平。在 Cd 污染土壤中黑麦草地下部的 Cd 含量提高 59.6%,在 Cu 污染土壤中,黑麦草地下部 Cu 含量提高 26.6%,而在复合污染土壤中,黑麦草地下部 Cd、Cu 含量分别提高 15.7%和 34.4%。对地上部分来说,接菌使 Cd 污染土壤中黑麦草地上部的 Cd 含量提高了 45.8%,且两者之间差异显著,但对 Cu 污染土壤与复合污染土壤中黑麦草地上部分的 Cu、Cd 含量的影响不显著。

表 1 接菌对在 3 种污染土壤上生长的黑麦草吸收重金属的影响

处理		Cd 含量/(mg · kg ⁻¹)		Cu 含量/(mg · kg ⁻¹)	
		地上部	地下部	地上部	地下部
Cd ₁₀ Cu ₀	不接菌	31.2 ± 0.8a	260.9 ± 7.3a	—	—
	接菌	45.5 ± 7.3b	416.5 ± 5.8b	—	—
Cd ₀ Cu ₅₀₀	不接菌	—	—	34.0 ± 3.4a	504.7 ± 6.4a
	接菌	—	—	43.5 ± 1.7a	639.1 ± 13.1b
Cd ₁₀ Cu ₅₀₀	不接菌	14.1 ± 1.2a	217.8 ± 2.5a	17.3 ± 0.8a	243.4 ± 8.4a
	接菌	16.9 ± 1.0a	252.1 ± 9.1b	22.2 ± 0.8a	327.2 ± 9.9b

注:表中数据为 3 次重复的平均值 ± 标准差;同一处理同列中不同小写字母者表示在 0.05 水平下差异显著。下同。

2.3 菌株对黑麦草根际土壤中有效磷含量的影响

由图 2 可知,在 3 种污染土壤中,接菌处理后黑麦草的根际土壤中有效磷含量显著提高,提高幅度以 Cu 污染土壤最大,达 26.7%。说明巨大芽孢杆菌在 Cu 污染土壤中能更好地提高有效磷的水平。尽管土壤中存在大量的磷元素,但大部分是以难溶性磷的形式存在,植物难以吸收利用。此外,重金属的胁迫更加剧了植物氮、磷、钾等营养元素的匮乏或有效性降低^[17]。土壤中的某些微生物能够通过生命活动或者

生长代谢产物将这些难溶性磷转化为植物可以吸收利用的有效态磷,从而增加土壤中磷营养的供应,促进植物生长。土壤微生物一般通过酸化、螯合、离子交换和释放有机酸等途径来溶解土壤中的难溶性磷。经测定,接菌处理后黑麦草根际土壤的 pH 下降 0.72。土壤中有效磷含量增加与土壤 pH 下降存在一定关系。但也有研究指出^[3,18],若菌株的分泌物与磷酸盐中的阳离子产生络合或螯合作用,也能促进磷酸盐溶解,从而提高土壤中有效磷含量。巨大芽孢杆

菌 LY02 对于改善土壤磷营养,提高黑麦草的生物量有着重要作用。

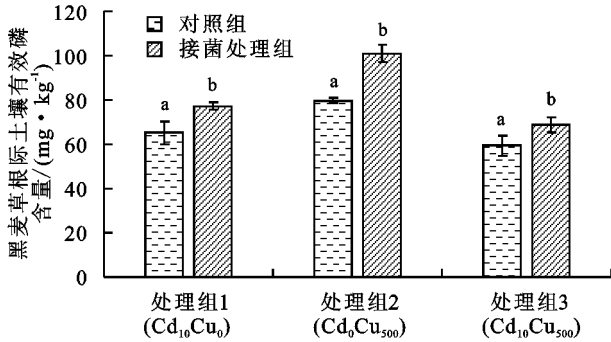


图2 不同重金属处理土壤上黑麦草根际土壤中有有效磷含量

2.4 菌株对土壤中Fe含量的影响

由表2可知,接菌处理后黑麦草根际土壤中Fe总量和有效态的含量均有所提高。其中,在Cu污染土壤中,接菌处理后的土壤中DTPA态Fe和总Fe含量增幅最大,分别达到了152.5%和10.8%,复合污染土壤中,有效态和总铁量均低于单一污染土壤。铁元素是植物生长必需的微量元素之一,产铁载体细菌不仅能在缺铁环境中合成对铁离子具有极高亲和力的铁载体以螯合铁离子以形成螯合物,从而增加对植物铁营养的供应,而且铁载体还能与Al、Cu、Cd和Zn等重金属形成稳定复合物^[19],从而增加或降低其重金属生物有效性^[20],进而影响植物修复效率。张璐等^[21]将产铁载体菌株 *Pseudomonas* sp. T07 接入到甜高粱后发现,接菌促进了甜高粱对土壤中P和Fe的吸收,增加了甜高粱的生物量,而且其地上部Cd的吸收量也提高了55%。因此,产铁载体微生物在植物修复中具有重要意义。本研究中所用的巨大

芽孢杆菌 LY02 为高产铁载体细菌,其产铁载体活性单位达到了86.1%(前期试验所测,数据未发表),推测有效态Fe含量的增加与该菌产铁载体有关。

表2 黑麦草根际土壤中DTPA态Fe与总Fe含量

			单位:mg/kg	
处理		DTPA态Fe	总Fe	
Cd ₁₀ Cu ₀	不接菌	56.3±3.3a	13030.8±370.3a	
	接菌	72.6±9.0b	13990.6±440.0a	
Cd ₀ Cu ₅₀₀	不接菌	15.8±2.9a	12507.4±246.7a	
	接菌	39.9±6.2b	13854.0±281.4b	
Cd ₁₀ Cu ₅₀₀	不接菌	12.7±1.4a	11159.3±1058.0a	
	接菌	27.1±1.8b	12219.5±86.6b	

2.5 菌株对土壤中有效态重金属含量的影响

由表3中可知,接菌增加了根际土壤中有效态重金属的含量,在Cd污染土壤中,有效态Cd增幅达到9.1%,但两者差异未达到显著水平,在Cu污染土壤中,接菌使得有效态Cu的含量提升至240.9 mg/kg,且与对照之间差异显著。在复合污染土壤中,接菌后的有效态Cd、Cu含量较对照均有提升,但增幅要弱于单一污染土壤中的重金属。以上结果表明菌株LY02通过某种方式活化了土壤中部分难以移动的Cd和Cu,土壤微生物对重金属的活化作用一般是通过其代谢产生的有机酸来完成的,如甲酸、乙酸、柠檬酸和乳酸等。此外,微生物还可以通过分泌铁载体、氨基酸、糖类及其他代谢产物溶解、络合重金属,由此改变了土壤环境中重金属的赋存形态及生物有效性^[3]。由于试验中所用的供试菌株LY02为高产铁载体菌株,故推测黑麦草根际土壤中有效态Cd和Cu含量的提高是铁载体作用的效果。

表3 接菌后黑麦草根际土壤中有效态重金属含量变化

单位:mg/kg

处理	DTPA态Cu		DTPA态Cd	
	不接菌	接菌	不接菌	接菌
Cd ₁₀ Cu ₀	—	—	5.5±0.49a	6.0±0.35a
Cd ₀ Cu ₅₀₀	160.9±6.85a	240.9±22.0b	—	—
Cd ₁₀ Cu ₅₀₀	166.1±10.4a	183.1±3.01b	3.65±0.52a	3.93±0.27a

3 结论

(1)接种巨大芽孢杆菌LY02对受重金属Cd、Cu胁迫的黑麦草的生长有显著的促进作用。单一污染及两者的复合污染土壤中的黑麦草生物量较对照组分别增加了40.5%,39.4%,50.0%,且达到差异显著水平。可见 *B. megaterum* LY02 可以有效缓解黑麦草受Cd和Cu的胁迫。

(2)由于 *B. megaterum* LY02 具备溶磷、产铁载体特性,接菌显著增加了黑麦草根际土壤中有效磷和有效铁的含量,改善了黑麦草在重金属胁迫环境中的生长状态,同时,接菌提高了3种污染土壤中有效态重金属的含量,其中,在Cu污染土壤中,接菌使得有

效态Cu的含量提升至240.9 mg/kg,且与对照之间差异显著。接菌促进了黑麦草对重金属的吸收,在单一污染中,黑麦草对Cd、Cu的吸收量分别较对照组增加了45.8%和27.9%,达到差异显著水平。

综上, *B. megaterum* LY02 对黑麦草修复Cd、Cu污染土壤及二者复合污染土壤起到了促进作用。

参考文献:

- [1] 陈佛保,柏珺,林庆祺,等.植物根际促生菌(PGPR)对缓解水稻受土壤锌胁迫的作用[J].农业环境科学学报,2012,31(1):67-74.
- [2] 环境保护部,国土资源部.全国土壤污染状况调查公报[J].中国环保产业,2014(5):10-11.
- [3] 李元,祖艳群.重金属污染生态与生态修复[M].北京:

- 科学出版社,2016.
- [4] 纪宏伟,王小敏,赵英男,等. 巨大/胶冻样类芽孢杆菌对印度芥菜修复 Cd 污染土壤的影响[J]. 水土保持学报, 2015,29(2):215-219.
- [5] 马莹,骆永明,滕应,等. 根际促生菌及其在污染土壤植物修复中的应用[J]. 土壤学报,2013,50(5):1021-1031.
- [6] Rufyikiri G, Declerck S Y. Comparison of U-233 and P-33 uptake and translocation by the arbuscular mycorrhizal fungus *Glomus intraradices* in root organ culture conditions[J]. *Mycorrhiza*,2004,14(3):203-207.
- [7] Ouziad F, Hildebrandt U, Schmelzer E, et al. Differential gene expressions in arbuscular mycorrhizal-colonized tomato grown under heavy metal stress[J]. *Journal of Plant Physiology*,2005,162(6):634-649.
- [8] Liu H, Yuan M, Tan S, et al. Enhancement of arbuscular mycorrhizal fungus (*Glomus versiforme*) on the growth and Cd uptake by Cd-hyperaccumulator *Solanum nigrum*[J]. *Applied Soil Ecology*,2015,89(1):44-49.
- [9] 陈生涛,何琳燕,李娅,等. *Rhizobium* sp. W33 对不同植物吸收铜和根际分泌物的影响[J]. 环境科学学报, 2014,34(8):2077-2084.
- [10] 林云青,章钢娅,许敏,等. 添加凹凸棒土和钠基蒙脱石对铜锌镉污染红壤的改良效应研究[J]. 土壤,2009,41(6):892-896.
- [11] 纪宏伟,王小敏,庞宏伟,等. 枯草芽孢杆菌与巨大芽孢杆菌对土壤有效态 Cd 的影响研究[J]. 水土保持学报, 2015,29(3):325-329.
- [12] Vary P, Biedendieck R, Fuerch T, et al. *Bacillus megaterium* from simple soil bacterium to industrial protein production host[J]. *Applied Microbiology and Biotechnology*,2007,76(5):957-67.
- [13] 卫星,徐鲁荣,张丹,等. 一株耐硝酸盐的巨大芽孢杆菌溶磷特性研究[J]. 环境科学学报,2015,35(7):2052-2058.
- [14] Pérez-De-Mora A, Burgos P, Madejón E, et al. Microbial community structure and function in a soil contaminated by heavy metals: Effects of plant growth and different amendments[J]. *Soil Biology and Biochemistry*,2006,38(2):327-341.
- [15] 潘风山,陈宝,马晓晓,等. 一株镉超积累植物东南景天特异内生细菌的筛选及鉴定[J]. 环境科学学报,2014,34(2):449-456.
- [16] 王璐,何琳燕,盛下放. 耐铜苏丹草根内生细菌的分离筛选及其生物学特性研究[J]. 土壤,2016,48(1):95-101.
- [17] 陈怀满. 土壤中化学物质的行为与环境质量[M]. 北京:科学出版社,2002.
- [18] 赵龙飞,徐亚军,曹冬建,等. 溶磷性大豆根瘤内生菌的筛选、抗性及系统发育和促生[J]. 生态学报,2015,35(13):4425-4435.
- [19] Saha R, Saha N, Donofrio R S, et al. Microbial siderophores: A mini review[J]. *Journal of Basic Microbiology*,2013,53(4):303-17.
- [20] Schalk I J, Hannauer M, Braud A. New roles for bacterial siderophores in metal transport and tolerance[J]. *Environmental Microbiology*,2011,13(11):2844.
- [21] 张璐. 产铁载体细菌强化甜高粱修复土壤重金属污染[J]. 环境科学与技术,2014,37(4):74-79.
- (上接第 339 页)
- [13] 王友保,张杰,黄永杰,等. 土壤污染与生态修复实验指导[M]. 安徽 芜湖:安徽师范大学出版社,2015.
- [14] Zhang J, Yang S Y, Huang Y J, et al. The tolerance and accumulation of *Miscanthus sacchariflorus* (Maxim.) Benth., an energy plant species, to Cadmium [J]. *International Journal of Phytoremediation*,2015,17(6):538-545.
- [15] 胡国涛,于阳,杨兴,等. 速生树种竹柳对镉的吸收、积累与分布特性[J]. 环境科学学报,2016,36(4):1508-1514.
- [16] Mwamba T M, Li L, Gill R A, et al. Differential subcellular distribution and chemical forms of cadmium and copper in *Brassica napus* [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*,2016,134(12):239-249.
- [17] 张家洋. 重金属镉铅短期胁迫对蓬莱蕉生理生化指标的影响[J]. 水土保持学报,2016,30(2):340-345.
- [18] 张晗芝,郭庆军,杨俊兴,等. 镉胁迫下蓖麻对镉及矿质元素的富集特征[J]. 生态环境学报,2015,24(2):323-328.
- [19] Wang J B, Su L Y, Yang J Z, et al. Comparisons of cadmium subcellular distribution and chemical forms between low-Cd and high-Cd accumulation genotypes of watercress (*Nasturtium officinale* L. R. Br.) [J]. *Plant and Soil*,2015,396(1/2):325-337.
- [20] 李伟,韦晶晶,刘爱民,等. 吊兰生长对锌污染土壤微生物数量及土壤酶活性的影响[J]. 水土保持学报,2013,27(2):276-281.