2020，39(2): 304-312

农业 环境科 学学报 ***Journal of Agro-Environment Science***

2020年2月

李 艺，王炳森，黄媛媛，等.肠杆菌对蓼科植物镉砷污染土壤修复机理研究J].农业环境科学学报,2020,39(2)： 304-312.

LI Yi, WANG Bing-sen, HUANG Yuan-yuan, et al. Mechanism study on the phytoremediation of cadmium - and arsenic-contaminated soil by Polygonaceae plants with *Enterobacter* sp.[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2020, 39( 2): 304-312.

肠杆菌对蓼科植物镉砷污染土壤修复机理研究

李 艺 1，2，王炳森 2，黄媛媛 2，姚亚威 2，林嘉敏 2，刘可慧 1，3，于方明 1，2\*

(1. 广西师范大学珍稀濒危动植物生态与环境保护教育部重点实验室，广西 桂林 541004；2.广西师范大学环境与资源学院，广 西 桂林 541004；3.广西师范大学生命科学学院，广西 桂林 541004)

摘 要：通过盆栽试验研究了接种不同浓度肠杆菌对镉-砷复合污染土壤上蓼科植物水蓼(*Polygonum hydropiper* L.)和酸模叶蓼 (*Polygonum lapathifolium* L.)生长、镉砷富集及抗氧化酶系统和非酶系统的影响。结果发现:接种肠杆菌显著提高水蓼和酸模叶 蓼株高、株质量及叶片中叶绿素和类胡萝卜素的含量。当接种浓度为3.4xlO7CFU・gT土时，水蓼和酸模叶蓼根际土壤pH降低了 0.35个和0.28个单位，根茎叶中的镉和砷含量分别为对照的1.64〜2.74倍和1.21〜2.51倍。接种肠杆菌还可以提高叶片中SOD、 POD和CAT的活性以及GSH和PCs的含量，降低O-・和MDA的含量，缓解重金属的毒害。结果表明，接种肠杆菌能通过提高植株 抗氧化酶活性来减轻镉砷富集对水蓼和酸模叶蓼的胁迫，从而提高水蓼和酸模叶蓼对镉-砷复合污染土壤的修复效率。 关键词：水蓼；酸模叶蓼；肠杆菌；镉；砷

中图分类号：X53 文献标志码：A 文章编号:1672-2043(2020)02-0304-09 doi:10.11654/jaes.2019-1006

Mechanism study on the phytoremediation of cadmium - and arsenic-contaminated soil by Polygonaceae plants with *Enterobacter* sp.

LI Yi1,2, WANG Bing-sen2, HUANG Yuan-yuan2, YAO Ya-wei2, LIN Jia-min2, LIU Ke-hui1,3, YU Fang-ming1,2\*

(1.Key Laboratory of Ecology of Rare and Endangered Species and Environmental Protection, Ministry of Education, Guilin 541004, China; 2.College of Environment and Resource, Guangxi Normal University, Guilin 541004, China; 3.College of Life Science, Guangxi Normal Uni­versity, Guilin 541004, China)

Abstract：We conducted this study to investigate the effects of different *Enterobacter* sp. FM-1 inoculation levels on the growth, phytoreme­diation of cadmium and arsenic, antioxidant enzymatic system, and non-enzymatic system by Polygonaceae plants( *Polygonum hydropiper* L. and *Polygonum lapathifolium* L.) in cadmium-arsenic co-contaminated soil. The results indicated inoculation with *Enterobacter* sp. FM-1 promoted the growth of both plants. Furthermore, there were increased contents of chlorophyll and carotenoids in the leaves of *Polyg­onum hydropiper* L. and *Polygonum lapathifolium* L. Inoculation with *Enterobacter* sp. FM-1(3.4 x 107 CFU • g-lsoil) decreased rhizospher- ic soil pH. For both *Polygonum hydropiper* L. and *Polygonum lapathifolium* L., compared to that of the uninoculated control, the soil pH val­ue decreased by 0.35 and 0.28, respectively. The content of cadmium and arsenic in the roots, stems, and leaves of the two plants increased 1.64~2.74 times and 1.21~2.51 times, respectively. Additionally, inoculation with *Enterobacter* sp. could not only increase the content of SOD, POD, and CAT in the leaves of *Polygonum hydropiper* L. and *Polygonum lapathifolium* L., but also increased the content of GSH and PCs. Moreover, the content of O-■ and MDA were effectively decreased. Our findings indicated that inoculation with *Enterobacter* sp. FM-1

**收稿日期**：2019-09-12 **录用日期**：2019-12-04

**作者简介:**李 艺(1986—)，女，辽宁盖州人，博士，讲师，主要从事环境污染生物修复研究。E-mail：[liyi412@mailbox.gxnu.edu.cn](mailto:liyi412@mailbox.gxnu.edu.cn)

\***通信作者** ：于方明 E-mail：[fmyu1215@163.com](mailto:fmyu1215@163.com)

**基金项目：**国家自然科学基金项目(41967019,41907096,41661077)；国家重点研发计划项目(2017YFD0801500)；广西创新驱动发展专项项目(桂 科AA17204047-3)；广西自然科学基金项目(2018JJA150018)

Project supported： The National Natural Science Foundation of China(41967019, 41907096, 41661077)； The National Key R&D Program of China (2017YFD0801500)； The Major Program for Science and Technology Development of Guangxi(GuiKe-AA17204047-3)； The Natural Science Foundation of Guangx(i 2018JJA150018)

helped plants alleviate heavy metal poisoning by increasing the activity of antioxidant enzymes. Hence, *Enterobacter* sp. FM-l is potential­ly useful for cadmium and arsenic phytoremediation in cadmium-arsenic co-contaminated soil by *Polygonum h/ydropiper* L. and *Polygo­num lapathifolium* L..

Keywords：*Polygonum hydropiper* L.; *Polygonum lapathifolium* L.; *Enterobacter* sp. FM-l; cadmium; arsenic

2014年《全国土壤污染状况调查公报》显示，全 国土壤环境状况不容乐观。其中，镉污染点位超标率 为 7.0%，砷污染点位超标率为2.7%，在无机污染物中 位列第一和第三［1］。因此，对于土壤镉-砷污染的修 复至关重要。植物-微生物联合修复是近年来土壤 修复的研究热点。有研究表明，一些根际微生物对植 物的生长具有显著的促进作用［2］，被称作“根际促生 菌”。另外，部分耐重金属的微生物还能显著提高植 物对重金属的富集能力［3-4］。Nie等［5」的研究表明，植 物促生菌*Enterobacter cloacae* CAL2通过分泌氨基环 丙 烷羧 酸 脱氢 酶(1 -aminocyclopropane - 1 -carboxylic acid, ACC)，有效促进了欧洲油菜*(Brassica napus* L.) 对砷的富集。赵根成等［6］的研究也表明，接种放线菌 PSQ、sh2和细菌TS37、C13显著提高了蜈蚣草*(Pteris vittata* L.)对砷的富集。

研究表明，在植物受到外界胁迫时如重金属胁 迫，植物体内的抗氧化酶及非酶抗氧化剂可以清除植 物体内过多的活性氧物质，以减轻逆境胁迫对植物的 损伤，是植物抵抗逆境胁迫的重要防御机制［7］。根际 微生物可通过提高植物对非生物逆境胁迫的忍耐能 力从而促进植物在逆境胁迫下的生长。汤叶涛等［8］ 研究发现，高浓度镉胁迫导致滇苦菜(*Picris divarica- ta*)体内H2O2和丙二醛(MDA)含量以及阴离子超氧自 由基产生速率显著提高。李燕等［9］研究表明，重金属 锰对短毛蓼( *Polygonum pub escens* Blume )的胁迫引起 了植物体内H2O2和MDA的累积，同时超氧化物歧化 酶(SOD)活性随着外界重金属浓度的升高而升高。 张 子 杨 等［10］ 的 研 究 表 明 ，接 种 *Streptomyces pactum* Actl对包心芥菜*(Brassica juncea)*的抗氧化酶系统有 积极作用,可以有效降低MDA的含量,提高植物对镉 的富集能力。Pandey等［11］的研究表明镉耐受菌 *Ochrobactrum* sp. 和砷耐受菌 *Bacillus* sp. 的接种可以 有效提高水稻(*Oryza sativa* L.)根部的SOD含量，并且 可以通过分泌ACC促进水稻的生长，提高其对镉和 砷的富集能力。

水 蓼( *Polygonum hydropiper* L.) ［12］ 和 酸 模 叶 蓼 *(Polygonum lapathifolium* L.)［l3」作为两种常见的蓼科 植物，具有较好的锰富集和耐受能力。肠杆菌FM-1 *(Enterobacter* sp. FM-1)为新发现的对镉具有一定耐 性且对植物有一定促进作用的微生物［14］，但水蓼和酸 模叶蓼对于镉和砷的富集性能，以及肠杆菌对其的促 生特性尚未有研究报道。因此，本研究通过灌根的方 式，研究了肠杆菌对水蓼和酸模叶蓼生长、镉和砷富 集以及植物抗氧化酶系统和非酶系统的影响，旨在为 镉-砷复合污染土壤的植物-微生物联合修复提供理 论依据和技术支持。

1 材料与方法

1.1 **实验材料**

镉耐受菌 肠杆菌FM-1，GenBank登录号： MF664375；中国典型培养物保藏中心保藏号: 2017825［14］。水蓼和酸模叶蓼采自广西桂林漓江沿岸。

镉-砷复合污染土壤采自广西桂林阳朔思的村。 土壤采集时先去除地表杂物，然后采用蛇形5点法采 集0~20 cm的土壤，混合均匀后，置于塑料袋中运回 实验室。土壤经自然风干后，一部分过4 mm筛，另一 部分过0.149 mm的尼龙筛备用。土壤的理化性质采 用鲁如坤的《土壤农业化学分析法》［15］进行测定，结果 见表1。

1.2 **实验方法**

1. 植物栽培

将过4 mm孔径筛的土壤装入直径为25 cm的黑

表 1 土壤理化性质

Table 1 Physical and chemical character of soil

|  |  |
| --- | --- |
| 项目 Items | 参数 Value |
| 总镉 Total C("mg・kgT | 44.87±2.76 |
| 水提态镉 Water soluble Cd/mg^kg-1 | 1.01±0.03 |
| 总砷 Total As/mgHg-1 | 24.58±4.84 |
| 有效态砷 Bioavailable As/mg<kg-1 | 1.36±0.02 |
| pH( 1: 1 *m/V* H?0) | 6.74±0.01 |
| 电导率 Electrical conductivity/dS •m-1 | 34.35±0.67 |
| 氧化还原电位 Oxidation-reduction potential/mV | 365.32±2.57 |
| 总氮Total nitrogen/g •kg-1 | 0.61±0.04 |
| 总磷 Total phosphorous/g • kg-1 | 1.68±0.25 |
| 有机质 Organic matter/mg • g-1 | 2.37±0.21 |

色塑料盆，每盆2.5 kg；并加入基肥，基肥标准:N 100 mg • kg-（以干土计，下同），以NH4NO3形式加入；P和 K分别为80 mg・kg-1和100 mg・kg-1,以KH2PO4形式加 入，每 30 d 施加追肥一次。水蓼和酸模叶蓼采用扦插 的方式进行栽培，选取长势良好且粗细一致的茎，用 自来水冲洗 2~3 次，洗掉泥土，用剪刀剪成长度约为 5 cm的茎段，保留一个完整的节间和一个腋芽。将剪 短的植物茎段插入装好土壤的盆中，保留腋芽于土壤 上面。每盆扦插4株，定期浇水，保持在田间最大持 水量的 60%。

1. 微生物接种

在植物长出新芽且培养15 d后，以灌根的方式分 别接种OD600值为0.25、0.5和1.0的菌悬液（其对应的 浓度分别为 5.5x108、1.0x109、2.8x109 CFU・mL-1）30 mL于未灭菌的土壤中，每7 d接种一次（在前期的试 验中以7 d为间隔向土壤中接种菌悬液1次）,保证土 壤中的肠杆菌浓度维持在6.6x106、1.2x107、3.4x107 CFU・gT土左右。以不加肠杆菌为对照。

1. 植物收获及重金属含量分析

待植物培养60 d后,取出植物样品，首先用自来 水冲净，再浸入20 mmol・L-1的EDTA-Na2溶液中交换 20 min,以除去附着的重金属，最后用去离子水洗净， 用吸水纸将水分吸干，用天平称量生物量。采集同一 位置的叶片置于-20*弋*冰箱用于抗氧化酶和非酶物 质的测定，其他部分分为植物根、茎和叶，并分开装入 信封，在105 T烘箱中杀青30 min,且在70 T下烘干 48 h至恒质量。烘干的植物样品用不锈钢粉碎机磨 碎，用于分析重金属含量。同时测定根际土壤的pH 值［16］、有效态砷含量［17］以及水提态镉含量［18］。

1.2.4叶绿素、类胡萝卜素、0-・、民。2和丙二醛（MDA） 含量的分析

水蓼和酸模叶蓼叶片中叶绿素、类胡萝卜素、 H2O2和O--的分析参考Li等119」的方法*,*MDA的分析采 用Quan等120」的方法。

1. 抗氧化酶活性的测定

准确称取0.20 g去叶脉剪碎的叶片于预冷研钵 中，加1 mL预冷的0.1 mol・L-1磷酸缓冲液在冰浴上研 磨成匀浆，加缓冲液至体积为8mL。在4T条件下 10 000r・min-1离心15 min,上清液即为粗提液，用于 超氧化物歧化酶（SOD）、过氧化氢酶（CAT）和过氧化 物酶（POD）的测定。其中SOD、CAT和POD的分析参 考Parida等［21」和Wu等122啲方法。

1. 巯基、谷胱甘肽和植物螯合肽含量分析

巯基（-SH）、谷胱甘肽（GSH）和植物螯合肽 （PCs）含量的分析采用El-Zohri等123」的方法。

1.3 **数据处理**

实验数据均以 3次重复的平均数±标准误差表 示。方差分析采用SPSS 19.0软件完成，绘图采用Ex- cel 2010软件完成。

2 结果与分析

2.1**接种肠杆菌对根际土壤**pH**、砷的有效态以及镉 的水提态含量的影响**

接种肠杆菌（A1.2X107 CFU・g-1 土）显著降低了水 蓼和酸模叶蓼根际土壤pH,提高了砷的有效态以及 镉的水提态含量。当接种浓度为3.4X107 CFU・g-1 土 时，水蓼和酸模叶蓼根际土壤pH较对照下降了 0.35 个和0.28个单位（图1A）；水蓼根际土壤镉的水提态 和砷的有效态含量分别为1.45 mg・kg-1和1.64 mg • kg-1,较对照分别增加了 30%和21%；酸模叶蓼根际土 壤镉的水提态和砷的有效态含量分别为1.35 mg・kg-1 和1.59 mg •kg-1,较对照分别增加了 29%和17%（图 1B）。

2.2 **接种肠杆菌对植物生物量和重金属富集量的影响**

接种肠杆菌对蓼科植物的株高、株质量有不同程 度的影响。当接种浓度小于3.4X107 CFU• g-1 土时,水 蓼的株高、株质量与对照间无显著差异（*P*>0.05）。酸 模叶蓼的株高随接种浓度的增加而显著提高（*P*< 0.05）；当接种浓度为6.6x106 CFU ・g-1 土时，酸模叶蓼 的株质量与对照无差异（*P*>0.05）。当浓度为3.4X107 CFU・g-1 土时，水蓼和酸模叶蓼的株高和株质量显著 增加（*P*<0.05）,此时，水蓼的株高和株质量分别为对 照的1.54倍和1.45倍。酸模叶蓼的株高和株质量分 别为对照的2.27倍和1.33倍（图2）。

另外，随着肠杆菌接种浓度的增加，水蓼和酸模 叶蓼根茎叶中镉、砷含量呈增加的趋势。当接种浓度 为3.4X107 CFU・g-1 土时，除酸模叶蓼根中镉含量外，水 蓼和酸模叶蓼根茎叶中的镉、砷含量显著高于对照（*P*< 0.05）。此时，水蓼根中的镉和砷含量最高，分别达到 了 81.2 mg・kg-1DW和33.9 mg・kg-1DW，分别为对照的 1.64倍和1.68倍（图3A）。水蓼茎中的镉和砷含量分 别为对照的1.68倍和1.74倍；酸模叶蓼茎中的镉和砷 含量分别为对照的2.51倍和1.21倍（图3B）。水蓼叶 中的镉和砷含量分别为对照的2.74倍和1.92倍；酸模 叶蓼叶中的镉和砷含量分别为对照的2.12倍和1.86 倍（图 3C）。

7.2

6.8

6.4

6.0

5.6

水蓼

酸模叶蓼

0 6 2 8 4

2 1 1 0 0

八)1(亠 八)jRM. pu put?八)=亠 FIIFAFOS宀 sy  
tt细舉瞬崇'K)启舉頼轉"V

a

辿

1-■

c c

a

小击

c

1 c

a

b-

C-壬

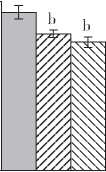
对照

6.6x106CFU・gT 土

1.2X107 CFBg-1 土

水蓼-砷 水蓼-镉 酸模叶蓼-砷 酸模叶蓼-镉

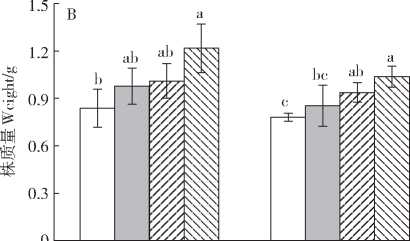
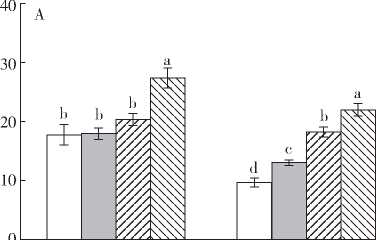
&3.4X107 CFBg-1 土



数据表示平均值土标准偏差(*n*=3),不同小写字母代表各处理组间差异显著(*P*<0.05)o下同

Data is shown as mean±SE(*n*=3). The different lowercase letters indicate significant differences among treatments(*P*<0.05). The same below  
图1接种肠杆菌对水蓼和酸模叶蓼根际土壤pH、砷的有效态以及镉的水提态含量的影响

Figure 1 Effect of *Enterobacter* sp. addition on the pH and bioavailable concentration of arsenic and water-soluble concentration of  
cadmiun in rhizosphere soil of *Polygonum hydropiper* L. and *Polygonum lapathifolium* L.



酸模叶蓼

目7?q^)H咆卷

水蓼 酸模叶蓼

□对照 口6.6乂106(茁口第-1 土 田 1.2X107 CFU・gT土 & 3.4X107 CFU・gT土

图 2 接种肠杆菌对植物株高和株质量的影响

igure 2 Effect of *Enterobacter* sp. addition on the height and weight of plant

1. **接种肠杆菌对植物叶绿素和类胡萝卜素含量的 影响**

从表2中可以看出，接种肠杆菌（A1.2X107 CFU- g-1 土）显著提高了水蓼和酸模叶蓼叶片中的叶绿素 a、叶绿素b、类胡萝卜素含量以及水蓼叶片中的总叶 绿素含量（*P*<0.05）。其中，接种浓度为3.4X107 CFU- g-1 土时，水蓼和酸模叶蓼叶片中叶绿素a、叶绿素b、 总叶绿素、类胡萝卜素含量分别为对照的1.46、2.14、 1.61、3.32倍和2.73、2.98、2.04、1.47倍。另外，接种浓 度为3.4X107 CFU・gT土时显著降低了水蓼和酸模叶 蓼叶片中叶绿素a/叶绿素b的值（*P*<0.05），与对照相 比分别降低了31.5%和40.5%。

2.4**接种肠杆菌对植物**O-・、H2O2、MAD**含量及抗氧化 酶活性的影响**

从表3中可以看出，接种肠杆菌（A1.2X107 CFU- g-1 土）显著降低了水蓼和酸模叶蓼叶片中02-・、民。2 和MAD的含量（*P*<0.05）。当接种浓度为3.4X107 CFU・gT土时，水蓼和酸模叶蓼叶片中O--、H2O2、MAD 的含量分别比对照降低了 16.9%、74.9%、28.8% 和 19.5%、59.3%、19.6%。从表3中可以看出，接种浓度 A1.2X107 CFU・gT土时显著提高了水蓼叶片中SOD、 POD、CAT的活性（*P*<0.05），分别为对照的1.65、 12.81,2.19倍；当接种浓度为3.4X107 CFU-g-1 土时显 著提高了酸模叶蓼叶片中POD和CAT的活性，此时 分别为对照的2.09倍和3.36倍。但接种肠杆菌对酸 模叶蓼叶片中的SOD活性未产生显著影响（*P*>0.05）。 2.5**接种肠杆菌对植物**-SH、PCs**和**GSH**含量的影响**

当接种肠杆菌浓度A1.2X107 CFU-g-1 土时，水蓼 和酸模叶蓼叶片中-SH、PCs和GSH的含量显著增加 （*P*<0.05）。当接种浓度为3.4X107 CFU-g-1 土时，水蓼 和酸模叶蓼叶片中-SH、PCs、GSH的含量分别比对照 增加了 92%、97%、104%（图 4A）和 111%、124%、96%

o >is)nEhu9)u〈)Q SI5八)E、PF 八)H

80

3

A. 根 Roots

a

h

bb

ax

aT

T

hb-L

a

水蓼-砷 水蓼-镉

酸模叶 酸模叶 蓼-砷 蓼-镉

HQ A曾

/uonFhUOTUO") SI5八)E aaboh  
啊细嘤金M

c --

14H

aves

水蓼-砷 水蓼-镉

酸模叶 酸模叶 蓼-砷 蓼-镉

□ 1.2X107 CFU-g-1 土 & 3.4x107 CFBg-1 土

图 3 接种肠杆菌对水蓼和酸模叶蓼根茎叶中砷、 镉含量的影响

Figure 3 Arsenic and cadmium content in roots，stems and leaves of *Polygonum hydropiper* L. and *Polygonum lapathifolium* L.

under different bacterial-inoculated level

^WW-N\N\N\N\N\N\N\^^

a

abT

50505 76431 Ma A曾 'uonBhUOTUOQ SI5八)E、P

w细嘤金M

图 4B）。

2.6 **相关性分析**

从表4可以看出，根际土壤pH、土壤镉水提态含 量和砷有效态含量与接菌量呈极显著相关关系（*P*< 0.001）,而植物种类仅对根际土壤pH和镉水提态含 量的变化产生显著影响（*P*<0.05）。接菌量与植物的 交互作用对根际土壤pH和砷有效态含量以及镉水提 态含量均没有显著影响（*P*>0.05）。

3 讨论

本研究发现，当肠杆菌FM-1接种浓度为3.4X107 CFU・g-1 土时，水蓼和酸模叶蓼的株高和株质量显著 增加（*P*<0.05）（图2）,这表明肠杆菌有利于植物的生 长，是一种良好的植物促生菌。有研究表明，植物根 际促生菌可直接或间接地促进宿主植物的生长［20］，其 促生机制主要包括：分泌植物生长素，如吲哚乙酸 （indole-3-acetic acid ,IAA）、氨基环丙烷羧酸（1-ami- nocyclopropane-1-carboxylic acid, ACC ）脱氢酶、铁载 体（Siderophore ）等促生物质［22J;分泌有机酸和释放矿 质中难溶的营养元素促进植物生长［21］；通过固氮作用 促进植物生长；提高植物的抗逆性等［23J。另外，接种 肠杆菌FM-1显著提高了水蓼和酸模叶蓼的叶绿素 及类胡萝卜素含量（表2），叶绿素含量的增加有利于 植物的光合作用，从而促进植物生长。这与Guo等［24J 通过在镉污染土壤中接种植物促生菌*Bradyhizobi- um* sp. YL-6,从而通过菌株分泌铁载体和吲哚乙酸, 有效促进黑麦*（Lolium multiflorum Lam*.）和大豆*（Gly- cine max* 的研究结论相似。在我们的前期研

究中发现肠杆菌FM-1可以通过分泌吲哚乙酸、铁载 体及其具有良好的溶磷性，来促进积雪草对土壤中镉 的富集佝。

本研究结果表明，接种肠杆菌FM-1降低了水蓼 和酸模叶蓼根际土壤的pH（图1）,促进了水蓼和酸模 叶蓼根茎叶对镉和砷的富集（图3），这可能与土壤中 能被植物直接利用的镉、砷浓度有关。大量的研究结 果表明，土壤pH的降低有利于土壤水提态镉的增加, 从而增加植物可利用镉含量，增加植物对镉的吸收。 Rajkumar等126」发现植物促生菌*Pseudomonas* sp. PsM6 和 *Pseudomonas jessenii* PjM15 通过分泌铁载体来提高 土壤中重金属的生物可利用性,从而提高蓖麻*（Rici- nus commun is* ）对重金属的富集。Prapagdee等127J发现 植 物 促 生 菌 *Micrococcus* sp. MU1 和 *Klebsiella* sp. BAM1 通过分泌大量的吲哚乙酸来增加重金属的生 物可利用性，从而提高向日葵*（Helianthus annuus）*对 镉的富集。

土壤pH的降低一般不利于砷的溶解,但本实验 中肠杆菌的添加降低了水蓼和酸模叶蓼根际土壤的 pH（图1）,而植物的砷含量却增加，这可能与微生物 对土壤砷的作用有关。耐砷菌株*Pseudomonas* 2-23T 的添加明显提高了砷沉积物中砷的释放能力*叫*抗 砷菌株E、G可以增强蜈蚣草对砷的吸收能力叫另

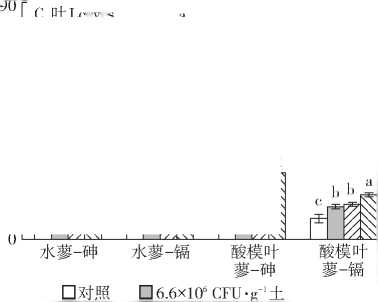
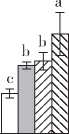
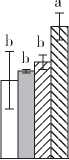


表2接种肠杆菌对植物叶片中叶绿素a、叶绿素b、总叶绿素、叶绿素a/叶绿素b和类胡萝卜素含量的影响

Table 2 Effects of *Enterobacter* sp. addition on the content of chlorophyll a， chlorophyll b， total chlorophyll， chlorophyll a/chlorophyll b  
and carotenoids in the leaves of *Polygonum hydropiper* L. and *Polygonum lapathifolium* L.

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 处理  Treatments | 叶绿素a  Chlorophyll a/ mg-g-1 FW | 叶绿素b Chlorophyll b/ mg-g-1 FW | 总叶绿素  Total chlorophyll/ mg-g-1 FW | 叶绿素a/叶绿素b  Chlorophyll a/  Chlorophyll b | 类胡萝卜素  Carotenoid/  mg-g-1 FW |
|  |  | 水蓼 *Polygonum* | *hydropiper* L. |  |  |
| 对照 Control | 2.13±0.11c | 0.59±0.04c | 2.72±0.15b | 3.63±0.08a | 0.19±0.01d |
| 6.6X106 CFU-g-1 土 | 2.29±0.18c | 0.69±0.11c | 2.98±0.28b | 3.34±0.30a | 0.39±0.02c |
| 1.2X107 CFU-g-1 土 | 2.88±0.02b | 1.03±0.02b | 3.91±0.03a | 2.81±0.04b | 0.50±0.02b |
| 3.4X107 CFU-g-1 土 | 3.12±0.05a | 1.26±0.09a | 4.38±0.14a | 2.49±0.14c | 0.63±0.01a |

酸模叶蓼 *Polygonum lapathifolium* L.

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 对照 Control | 1.18±0.15c | 0.48±0.06c | 2.29±0.21c | 3.82±0.18a | 0.36±0.01b |
| 6.6X106 CFU-g-1 土 | 2.38±0.17b | 0.67±0.09b | 3.04±0.11b | 3.62±0.69a | 0.38±0.02b |
| 1.2X107 CFU-g-1 土 | 2.28±0.21b | 0.70±0.08b | 2.98±0.13b | 3.31±0.73a | 0.51±0.03a |
| 3.4X107 CFU-g-1 土 | 3.23±0.05a | 1.43±0.13a | 4.67±0.17a | 2.27±0.17b | 0.53±0.01a |

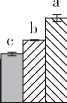
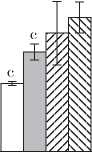
注：同列不同小写字母表示处理间差异显著(*P*<0.05,*n*=3)。下同。

Note：Different lowercase letters in the same column indicate significant difference among treatments(*P*<0.05，*n*=3). The same below.

表3接种肠杆菌对水蓼和酸模叶蓼叶片中MDA、O-・、H2O2含量及抗氧化酶活性的影响

Table 3 Effects of *Enterobacter* sp. addition on the content of MDA, O- \* , H2O2 and antioxidant enzyme activity in the leaves of  
*Polygonum hydropiper* L. and *Polygonum lapathifolium* L.

POD/U- mg-1 - min-1 CAT/U- mg-1 - min-1



**()(**

**20**

A. 水蓼 *Polygonum hydropiper* L.

00

0 5 0 5 0 5

3 2 2 1 1 B • WUIUIAUWUOU\*<rn

B. 酸模叶蓼 *Polygonum lapathifolium* L.

d

1

-SH PCs

-SH PCs GSH

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 对照 Control | 8.9±0.3a | 92.4±7.7a | 5.2±0.2a | 1 082.1±85.92c | 52.0±4.0c | 285.3±7.0c |
| 6.6X106 CFU-g-1 土 | 8.7±0.2a | 48.1±2.7b | 3.8±0.1b | 1 395.4±171.8b | 45.3±1.2c | 426.7±10.5b |
| 1.2X107 CFU-g-1 十 | 7.5±0.4b | 48.0±5.0b | 3.9±0.2b | 1 762.4±82.5a | 332.7±12.7b | 489.3±6.4b |
| 3.4X107 CFU-g-1 土 | 7.4±0.4b | 23.2±2.3c | 3.7±0.1b | 1 786.5±36.2a | 666.3±13.6a | 627.0±8.5a |

处理 Treatments O- - /nmol -g-1 - min-1 H2O2/^mol - g-1 FW MDA/nmol - g-1 FW SOD/U - mg-1

水蓼 *Polygonum hydropiper* L.

酸模叶蓼 *Polygonum lapathifolium* L.

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 对照 Control | 8.2±0.3a | 186.6±7.5a | 5.1±0.1a | 1 856.1±12.3a | 10.3±1.2b | 133.3±12.7c |
| 6.6X106 CFU-g-1 土 | 6.8±0.5b | 103.7±18.1b | 4.3±0.1bc | 1 805.3±20.2a | 13.3±5.8b | 278.7±16.3b |
| 1.2X107 CFU-g-1 十 | 6.8±0.9b | 78.9±2.2b | 4.6±0.1b | 1 853.5±28.2a | 16.0±2.0ab | 400.1±143.0ab |
| 3.4X107 CFU-g-1 土 | 6.6±0.2b | 76.0±12.1b | 4.1±0.2c | 1 826.7±47.1a | 21.7±2.5a | 448.0±46.5a |

对照 6.6X106 CFU-gT土 1.2X107 CFU-gT土 3.4X107 CFU-g-1 土

图4接种肠杆菌对水蓼和酸模叶蓼叶片中-SH、PCs、GSH含量的影响

Figure 4 Effect of *Enterobacter* sp. addition on the content of —SH, PCs and GSH in the leaves of *Polygonum hydropiper* L.  
and *Polygonum lapathifolium* L.

表4二元方差分析（*F*-值和*P*-值）考察植物种类、接菌量及其交互作用对指标的影响

Table 4 *F*-values and *P*-value of a Two-way ANOVA of measured parameters of *Polygonum hydropiper* L. and *Polygonum lapathifolium* L.，reated with different inoculation level

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 变量  Variables | 接菌量 Inoculation levels | | 植物种类Types of plant | | 植物种类X接菌量 Types of plants X Inoculation levels | |
| *df* | *F*-值 | *df* | *F*-值 | *df* | *F*-值 |
| pH | 3 | 24.28\*\*\* | 1 | 7.95\* | 3 | 0.88 ns |
| 砷有效态 Bioavailable As | 3 | 21.21\*\*\* | 1 | 0.99 ns | 3 | 0.33 ns |
| 镉水提态 Water soluble Cd | 3 | 23.52\*\*\* | 1 | 5.22\* | 3 | 0.11 ns |
| 株高 Height | 3 | 107.04\*\*\* | 1 | 119.99\*\*\* | 3 | 6.80\*\* |
| 株质量Weight | 3 | 9.52\*\* | 1 | 6.33\* | 3 | 0.41 ns |
| 根砷摄取量 As in roots | 3 | 13.01\*\*\* | 1 | 25.89\*\*\* | 3 | 1.16 ns |
| 茎砷摄取量 As in stems | 3 | 15.08\*\*\* | 1 | 34.67\*\*\* | 3 | 4.19ns |
| 叶砷摄取量 As in leaves | 3 | 13.28\*\*\* | 1 | 8.53\* | 3 | 0.20 ns |
| 根镉摄取量 Cd in roots | 3 | 8.32\*\* | 1 | 44.84\*\*\* | 3 | 0.99 ns |
| 茎镉摄取量 Cd in stems | 3 | 16.36\*\*\* | 1 | 23.72\*\*\* | 3 | 0.52 ns |
| 叶镉摄取量 Cd in leaves | 3 | 47.45\*\*\* | 1 | 361.79\*\*\* | 3 | 23.08\*\*\* |
| 叶绿素 a Chlorophyll a | 3 | 85.11\*\*\* | 1 | 11.01\*\* | 3 | 9.78\*\* |
| 叶绿素 b Chlorophyll b | 3 | 108.17\*\*\* | 1 | 4.43 ns | 3 | 9.31\*\* |
| 类胡萝卜素 Carotenoids | 3 | 1 223.21\*\*\* | 1 | 11.84\*\* | 3 | 323.56\*\*\* |
| SOD | 3 | 27.11\*\*\* | 1 | 107.20\*\*\* | 3 | 28.56\*\*\* |
| POD | 3 | 2 613.12\*\*\* | 1 | 7 857.39\*\*\* | 3 | 2 453.07\*\*\* |
| CAT | 3 | 27.41\*\*\* | 1 | 28.27\*\*\* | 3 | 0.49 ns |
| MDA | 3 | 29.09\*\*\* | 1 | 39.33\*\*\* | 3 | 63.09\*\*\* |
| -SH | 3 | 97.53\*\*\* | 1 | 115.09\*\*\* | 3 | 4.04\* |
| PCs | 3 | 37.85\*\*\* | 1 | 12.68\*\* | 3 | 0.99 ns |
| GSH | 3 | 68.74\*\*\* | 1 | 204.88\*\*\* | 3 | 3.96\* |
| H2O2 | 3 | 81.73\*\*\* | 1 | 176.37\*\*\* | 3 | 8.85\*\* |
| （）• | 3 | 14.85\*\*\* | 1 | 34.53\*\*\* | 3 | 2.15 ns |

注:\*表示*P*<0.05 , \*\*表示*P*<0.01, \*\*\*表示*P*<0.001, ns表示不显著。SOD为超氧化物酶,POD为过氧化物酶,CAT为催化酶,MDA为丙二 醛，-SH为巯基*,*PCs为植物螯合肽*,*GSH为谷胱甘肽。

Note ： \* *P*<0.05；\*\* *P*<0.01；\*\*\* *P*<0.001; ns ： not significant; SOD: Superoxide dismutase; POD:Peroxidase; CAT: Catalase; MDA: Malondialdehyde; -SH: Acid-soluble thiol； PCs: Phytochelatins; GSH: Reduced glutathione.

外，这还可能与土壤砷的价态有关。通常在pH<7时, 随着土壤pH的升高，As（皿）的吸附量逐渐增加，As （V ）的吸附量逐渐降低*叫* 对于添加肠杆菌所引起 的蓼科植物砷吸收量的增加，究竟是肠杆菌促进了土 壤砷的溶解还是改变了砷的价态，还有待进一步研 究。由此可见，在镉-砷复合污染土壤中接种肠杆菌 FM-1,不仅有效地促进了水蓼和酸模叶蓼的生长，而 且提高了水蓼和酸模叶蓼对镉和砷的富集，是一种良 好的植物促生菌。

当植物受到重金属胁迫时，会超量产生超氧自由 基（0-・）等活性氧物质（Reactive oxygen species,ROS）。 超量活性氧物质的存在会造成植物体内DNA、蛋白 质被破坏以及膜脂过氧化等伤害症状［30J。此时， SOD.POD和CAT等抗氧化酶在去除环境应激活性氧 方面发挥着重要作用［31J。SOD可以有效清除植物体 内多余的活性氧，是植物抗氧化酶系统中首先起作用 的酶［32J。在SOD作用下，0-・发生歧化反应产生大量 的过氧化氢，而这些过氧化氢可以在植物体内 CAT 和POD的作用下被清除。植物叶片内的CAT可以有 效清除植物体内多余的过氧化氢。本研究结果表明， 接种肠杆菌 FM-1 能够更好地激活水蓼叶片中的 SOD. POD和CAT的酶活性（表3）,加速催化水蓼叶 片中0-・向H2O2的转变。对于酸模叶蓼，尽管肠杆菌 FM-1的接种也提高了酸模叶蓼叶片中POD和CAT 的含量，但是相对水蓼而言，提高的幅度不大。因此， 在应对镉-砷复合污染的胁迫时，水蓼的应激机制更 为有效，所以在同等条件下，水蓼的根茎叶中可以富 集更多的镉。这与沈亚琴等［33J对接种丛枝菌根可以 有效激活玉米的抗氧化酶系统、帮助其缓解膜脂过氧 化程度、减轻锑对玉米胁迫的研究结果相似。

抗氧化酶系统并非植物体清除氧化胁迫的唯一 途径，植物还可以通过非酶物质(GSH、PCs)系统消除 活性氧物质的胁迫。其中GSH是植物体内的抗氧化 剂，当植物受到氧化胁迫时，植物叶绿体及其他细胞 区室内会产生较高浓度的GSH参与活性氧物质的清 除[34]; PCs可以通过螯合作用清除活性氧，是植物缓解 重金属毒害的重要物质[35-37]。当水蓼和酸模叶蓼根 茎叶中镉、砷含量显著增加时，其叶片中的MDA含量 显著降低，这表明两种植物的叶片并未受到膜脂过氧 化的伤害，无氧化应激反应[38]。这与秦余丽等[39]对丛 枝菌根(*Arbuscular Mycorrhiza*)-黑麦草(*Lolium multi- florum* L.)联合修复可以有效降低番茄*(Lycopersicon esculintum* Mill.)叶片中的MDA含量的结果相似。这 表明接种肠杆菌虽然促进了叶片中镉、砷含量的累 积，但植物通过抗氧化酶和非酶系统消除了活性氧物 质对植物的伤害，从而提高了水蓼和酸模叶蓼的叶绿 素含量，有利于植物的生长。

4 结论

1. 接种肠杆菌可以降低根际土壤的pH ；接种浓 度为3.4X107 CFU-gT土时，水蓼和酸模叶蓼根茎叶中 的镉、砷含量均提高，表明肠杆菌促进了水蓼和酸模 叶蓼对镉和砷的吸收。
2. 接种肠杆菌可以提高水蓼和酸模叶蓼叶片中 叶绿素及类胡萝卜素的含量，同时提高株高和株质 量，表明肠杆菌能够促进水蓼和酸模叶蓼的生长。
3. 接种肠杆菌可以提高水蓼和酸模叶蓼叶片中 SOD、POD、CAT的活性，同时提高植物叶片中GSH及 PCs的含量，降低O--及MDA的含量，有效缓解了重 金属对植物的毒害。

参考文献：

1. 陈能场, 郑煜基, 何晓峰, 等.《全国土壤污染状况调查公报》探析

[J].农业环境科学学报,2017, 36(9): 1689-1692.

CHEN Neng-chang, ZHENG Yu-ji, HE Xiao-feng, et al. Analysis of the bulletin of national soil pollution survey[J]. *Journal of Agro-Envi- ronment Science*, 2017, 36(9)：1689-1692.

1. 王 鹏, 张 迪, 李家东. 植物-微生物协同修复土壤重金属污染研 究进展[J].广东化工,2017, 44(8): 127-128.

WANG Peng, ZHANG Di, LI Jia-dong. Research progress of plant-mi­crobial synergistic remediation for heavy metal contaminated soil[J]. *Guangdong Chemistry*, 2017, 44(8)： 127-128.

1. Laurence B, Marc S A, Michel L. Phytoextraction of heavy metals by two Salicaceae clones in symbiosis with arbuscular mycorrhizal fungi during the second year of a field tria[J]. *Plant and Soil*, 2010, 33( 2)： 55-67.
2. Davide B, Matthias R, Klaus S, et al. Revealing structure and assembly cues for Arabidopsis root-inhabiting bacterial microbiota[J]. *Nature*, 2012, 488(7409)：91-95.
3. Nie L, Shah S, Rashid A, et al. Phytoremediation of arsenate contami­nated soil by transgenic canola and the plant growth-promoting bacteri­um *Enterobacter cloacae* CAL2[J]. *Plant Physiology and Biochemistry*, 2002, 40(4)：355-361.
4. 赵根成, 廖晓勇, 阎秀兰, 等 . 微生物强化蜈蚣草累积土壤砷能力的 研究[J].环境科学,2010, 31(2):431-436.

ZHAO Gen-cheng, LIAO Xiao-yong, YAN Xiu-lan, et al. Enhance of As accumulaiton by *Peteris vittata* L. affected by microorganisms[J]. *Environmental Science*, 2010, 31(2)：431-436.

1. 杨舒贻, 陈晓阳, 惠文凯, 等 . 逆境胁迫下植物抗氧化酶系统响应研 究进展[J].福建农林大学学报(自然科学版)，2016, 45(5): 481- 489.

YANG Shu-yi, CHEN Xiao-yang, HUI Wen-kai, et al. Progress in re­sponses of antioxidant enzyme systems in plant to environmental stress- es[J]. *Journal of Fujian Agriculture and Forestry University*( *Natural Science Edition*), 2016, 45(5)：481-489.

1. 汤叶涛, 关丽捷, 仇荣亮, 等. 镉对超富集植物滇苦菜抗氧化系统的 影响[J].生态学报,2010, 20(2):324-332.

TANG Ye-tao, GUAN Li-jie, QIU Rong-liang, et al. Antioxidative de­fense to cadmium in hyperaccumulator *Picris divaricata*V.[J]. *Acta Eco­logical Sinica*, 2010, 20(2)：324-332.

1. 李 燕，刘可慧，于方明，等.Mn对超富集植物短毛蓼*(Polygonum pubescens* Blume)抗氧化机理的影响[J].农业环境科学学报,2011, 30(12)：2422-2427.

LI Yan, LIU Ke-hui, YU Fang-ming, et al. Effects of manganese on en­zymatic and non-enzymatic antioxidative defenses of the hyperaccumu­lator *Polygonum pubescens* Blume[J]. *Journal of Agro-Environment Sci­ence*, 2011, 30(12)：2422-2427.

1. 张子杨,郭瞻宇,管伟豆,等.硫磺和放线菌强化植物修复土壤镉 污染[J].中国环境科学,2019, 39(5):2106-2114.

ZHANG Zi-yang, GUO Zhan-yu, GUAN Wei-dou, et al. Combina­tion of sulphur and actinomycete to enhance the efficiency of phytore­mediation in cadmium contamination soil[J]. *China Environmental Sci­ence*, 2019, 39(5)：2106-2114.

1. Pandey S, Ghosh P K, Ghosh S, et al. Role of heavy metal resistant *Ochrobactrum* sp. and *Bacillus* spp. strains in bioremediation of a rice cultivar and their PGPR like activities[J]. *Journal of Microbiology*, 2013, 51(1) 11-17.
2. Wang H, Tang S, Liao X, et al. A new manganese-hyperaccumulator： *Polygonum hydropiper* L. [J]. *Ecology & Environment*, 2007, 16：830- 834.
3. Liu K, Yu F, Chen M, et al. A newly found manganese hyperaccumu­lator *Polygonum lapathifolium* Linn. [J]. *International Journal of Phy­toremediation*, 2016, 18(4)：348-353.
4. Li Y, Liu K H, Wang Y, et al. Improvement of cadmium phytoremedia-

tion by *Centella asiatica* L. after soil inoculation with cadmium-resis­tant *Enterobacter* sp. FM-1[JJ. *Chemosphere*, 2018, 202： 280-288.

312

农业环境科学学报

第39卷第2期

[15J鲁如坤.土壤农业化学分析法[MJ.北京:中国农业科技出版社, 1999.

LU Ru-kun. Agrochemical analysis method of soil[MJ. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 1999.

[16J Yu F M, Liu K H, Ye P H, et al. Manganese tolerance and accumula­tion characteristics of a woody accumulator *Camellia oleifera*[JJ. *Envi­ronmental Science and Pollution Research*, 2019, 26:21329-21339.

[17J Faust M B, Christians N E. Copper reduces shoot growth and root de­velopment of creeping bentgrass[JJ. *Crop Science*, 2000, 40(2): 498­502.

[18J杨 锚，王火焰,周健民，等.不同水分条件下几种氮肥对水稻土 中外源镉转化的动态影响[JJ.农业环境科学学报，2006, 25(5): 1202-1207.

YANG Miao, WANG Huo-yan, ZHOU Jian-min, et al. Effects of ap­pling nitrogen fertilizers on transformation of external cadmium in the paddy soil with different soil moisture[JJ. *Journal of Agro - Environ­ment Science*, 2006, 25( 5): 1202-1207.

[19J Li H S, Sun Q, Zhao S J. Principles and techniques of plant physiolog­ical biochemical experiment[MJ. Beijing: Higher Education Press, 2000: 130-248.

[20J Quan R, Shang M, Zhang H, et al. Improved chilling tolerance by transformation with *betA* gene for the enhancement of glycinebetaine synthesis in maize[JJ. *Plant Science*, 2004, 166( 1): 141-149.

[21J Parida A K, Das A B, Mohanty P. Defense potentials to NaCl in a mangrove, *Bruguiera parviflora*: Differential changes of isoforms of some antioxidative enzymes[JJ. *Journal of Plant Physiology*, 2004, 161 (5):531-542.

[22J Wu S, Hu C, Tan Q, et al. Effects of molybdenum on water utilization, antioxidative defense system and osmotic-adjustment ability in winter wheat( *Triticum aestivum*) under drought stress[JJ. *Plant Physiology & Biochemistry*, 2014, 83: 365-374.

[23J El-Zohri M H, Cabala R, Frank H. Quantification ofphytochelatins in plants by reversed-phase HPLC-ESI-MS-MS[JJ. *Analytical & Bioan- alytical Chemistry*, 2005, 382(8): 1871-1876.

[24J Guo J, Chi J. Effect of Cd-tolerant plant growth-promoting rhizobium on plant growth and Cd uptake by *Lolium multiflorum* Lam. and *Gly­cine max*(L. ) Merr. in Cd-contaminated soil[JJ. *Plant & Soil*, 2014, 375(1/2):205-214.

[25J周 行，祝贤彬，刘紫薇，等.耐砷菌*Pseudomonas* 2-23T的分离鉴 定及其对高砷沉积物中砷释放的影响[JJ.安全与环境工程,2019, 26( 5): 40-45.

ZHOU Xing, ZHU Xian-bin, LIU Zi-wei, et al. Isolation and identifi­cation of arsenic-resistant bacteria *Pseudomonas* 2-23T and its effect on the release of arsenic in high-arsenic sediment[JJ. *Safety and Envi­ronmental Engineering*, 2019, 26( 5): 40-45.

[26J Rajkumar M, Ae N, Prasad M N V, et al. Potential of siderophore-pro­ducing bacteria for improving heavy metal phytoextraction[JJ. *Trends in Biotechnology*, 2010, 28(3): 142-149.

[27J Prapagdee B, Chanprasert M, Mongkolsuk S. Bioaugmentation with cadmium-resistant plant growth-promoting rhizobacteria to assist cadmium phytoextraction by *Helianthus annuus*[JJ. *Chemosphere*, 2013, 92(6): 659-666.

[28J曾 东,许振成.抗砷菌对蜈蚣草生长及其砷吸收能力的影响[JJ. 环境污染与防治,2010,32(5):43-46.

ZENG Dong, XU Zhen-cheng. Effect of arsenite - reistent bacteria on growth and arsenite adsorption capacity of *Pteris vittata* L.[JJ. *Environ­mental Polution and Control*, 2010, 32(5): 43-46.

[29J肖艳平，尹 睿,沈生元，等.丛枝菌根真菌在植物修复砷污染土 壤中的作用[JJ. 土壤,2010, 42(2): 171-177.

XIAO Yan-ping, YIN Ru, SHEM Sheng-yuan, et al. Roles of Arbus- cular mycorrhizal in plant remediation of arsenic-contaminated soil [JJ. *Soils*, 2010, 42(2) 171-177.

[30J Ferreira P A A, Tiecher T, Tiecher T L, et al. Effects of *Rhizophagus clarus* and P availability in the tolerance and physiological response of *Mucuna cinereum* to copper[JJ. *Plant Physiology and Biochemistry*, 2018, 122：46-56.

[31J Lloveras J, Chocarro C, Torres L. Influence of phosphorus and potassi­um on alfalfa yield, taproot C and N pools, and transcript levels of key genes after defoliation[JJ. *Crop Science*, 2009, 49( 3)：974-982.

[32J马旭俊,朱大海.植物超氧化物歧化酶(SOD)的研究进展[JJ.遗 传, 2003, 25(2) 225-231.

MA Xu-jun, ZHU Da-hai. Functional roles of the plant superoxide dismutase[JJ. *Heredita*(*s Beijing*), 2003, 25( 2)：225-231.

[33J沈亚琴，魏 源，陈志鹏，等.锑胁迫下丛枝菌根真菌对玉米生长 与锑吸收及抗氧化酶的影响[JJ.环境科学研究,2017, 30(5):712- 719.

SHEN Ya-qin, WEI Yuan, CHEN Zhi-peng, et al. Effects of arbuscu- lar mycorrhizal fungi on growth, antimony uptake and antioxidant en­zymes of maize underantimony stress[JJ. *Research of Environmental Sciences*, 2017, 30(5)：712-719.

[34J Mittler R. Oxidative stress, antioxidants and stress tolerance[JJ. *Trends in Plant Science*, 2002, 7(9)：405-410.

[35J Cao Z Z, Qin M L, Lin X Y, et al. Sulfur supply reduces cadmium up­take and translocation in rice grains( *Oryza sativa* L.) by enhancing iron plaque formation, cadmium chelation and vacuolar sequestration [JJ. *Environmental Pollution*, 2018, 238：76-84.

[36J Maleva M, Borisova G, Chukina N, et al. Urea increased nickel and copper accumulation in the leaves of *Egeria densa*(Planch.) Casp. and *Ceratophyllum demersum* L. during short-term exposure[JJ. *Eco­toxicology & Environmental Safety*, 2018, 148：152.

[37J Szabados L, Savourc A. Proline: A multifunctional amino acid[JJ. *Trends in Plant Science*, 2010, 15(2)：89-97.

[38J Moore K, Nd R L. Measurement of lipid peroxidation[JJ. *Free Radical Research Communications*, 1998, 28( 6)：659-671.

[39J秦余丽，江 玲,徐卫红，等.黑麦草与丛枝菌根对大田番茄抗性 及Cd吸收的影响[JJ.农业环境科学学报,2017, 36(6) ： 1053-1061. QIN Yu-li, JIANG ling, XU Wei-hong, et al. Effect of ryegrass and Arbuscular mycorrhiza on tomato resistance and Cd absorption in the field[JJ. *Journal of Agro-Environment Science*, 2017, 36(6)：1053- 1061.