

陈 诚,李中宝,邓楠鑫,等. 植物对镉污染土壤的修复作用[J]. 江苏农业科学,2020,48(1):254-258.

doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2020.01.047

植物对镉污染土壤的修复作用

陈 诚,李中宝,邓楠鑫,李升锦

(长江大学化学与环境工程学院,湖北荆州 434000)

摘要:通过对黑麦草、玉米草、苏丹草、狼尾草、紫花苜蓿、白三叶草 6 种植物在不同浓度镉离子溶液中发芽率的测定,以及 6 种草生长状况的观察,选择发芽率较高、生长良好的黑麦草、玉米草、苏丹草、狼尾草作为修复重金属镉离子污染土壤的植物。通过比较 4 种植物在不同浓度镉离子污染土壤中的生长状况及去除率发现,当土壤中的镉离子含量为 25 mg/kg 时,黑麦草对镉离子的去除率最高,达到 79%,但是随着土壤中镉离子浓度的升高,去除率逐渐下降,最后不到 20%。玉米草对镉离子的去除率先升后降;苏丹草对镉离子的去除率大致稳定在 60% 左右;当土壤中镉离子含量为 75~100 mg/kg 时,狼尾草对镉离子的去除率较高,并且一直稳定在 75% 左右。因此,目前认为狼尾草、苏丹草对镉离子有很好的耐受能力,可以用于镉离子污染土壤的修复。

关键词:土壤;镉污染;植物修复;狼尾草;苏丹草;去除率;发芽率;生长状况

中图分类号: X53 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2020)01-0254-05

随着社会和经济的快速发展,我国境内大部分土壤受到了不同程度的重金属污染。重金属污染

收稿日期:2018-10-24

基金项目:国家重大科技专项(编号:2016ZX05040)。

作者简介:陈 诚(1994—),男,湖北荆州人,硕士研究生,主要研究方向为环境工程。E-mail:chencheng123465@163.com。

通信作者:梅 平,博士,教授,主要研究方向为油气田应用化学。E-mail:meipinghb@126.com。

是指由重金属及其相应的化合物所造成的环境污染,主要由广泛使用矿产资源、电子垃圾、污水污泥以及化肥、除草剂、杀虫剂和工业污水排放、废气与一些金属制品等人为因素所致^[1-2],重金属污染的危害程度取决于重金属在环境、食品和生物体中存在的浓度和化学形态,主要出现在水、大气固体废物中^[3]。

土壤中的重金属进入植物体内的方式是通过根系吸收,重金属会在一定程度上改变与植物光合作用

[27] Gao Y H, Schumann M, Chen H, et al. Impacts of grazing intensity on soil carbon and nitrogen in an alpine meadow on the eastern Tibetan Plateau[J]. Journal of Food Agriculture & Environment, 2009, 7(2): 749-754.

[28] Frank A B, Tanaka D L, Hofmann L, et al. Soil carbon and nitrogen of northern great plains grasslands as influenced by long-term grazing[J]. Journal of Range Management, 1995, 48(5): 470-474.

[29] 王 蓓, 孙 庚, 罗 鹏, 等. 模拟升温 and 放牧对高寒草甸土壤有机碳氮组分和微生物生物量的影响[J]. 生态学报, 2011, 31(6): 1506-1514.

[30] 韩永伟, 韩建国, 王 堃, 等. 利用年限对农牧交错带退耕还草地土壤化学性质的影响[J]. 草业科学, 2005, 13(3): 50-53.

[31] 安 慧, 徐 坤. 放牧干扰对荒漠草原土壤性状的影响[J]. 草业学报, 2013, 22(4): 35-42.

[32] 罗 琰, 苏德荣, 纪宝明, 等. 辉河湿地不同草甸植被群落特征及其与土壤因子的关系[J]. 草业学报, 2018, 27(3): 33-43.

[33] Baskin Y. Ecosystem function of biodiversity[J]. Bioscience, 1994, 44(10): 657-660.

[34] Yimer F, Ledin S, Abdelkadir A. Soil property variations in relation to topographic aspect and vegetation community in the south -

eastern highlands of Ethiopia[J]. Forest Ecology & Management, 2006, 232(1/2/3): 90-99.

[35] 江 源, 章异平, 杨艳刚, 等. 放牧对五台山高山、亚高山草甸植被-土壤系统耦合的影响[J]. 生态学报, 2010, 30(4): 837-846.

[36] 王长庭, 龙瑞军, 刘 伟, 等. 高寒草甸不同群落类型土壤碳分布与物种多样性、生物量关系[J]. 资源科学, 2010, 32(10): 2022-2029.

[37] 李 平, 李凤汀, 范 川, 等. 川中丘陵区柏木低效林改造模式物种多样性对土壤有机碳的影响[J]. 生态学报, 2015, 35(8): 2667-2675.

[38] 刘 楠, 张英俊. 放牧对典型草原土壤有机碳及全氮的影响[J]. 草业科学, 2010, 27(4): 11-14.

[39] 赵自超, 夏振尧, 熊诗源, 等. 扰动边坡植被恢复过程中的土壤性质演变[J]. 水土保持通报, 2013, 33(5): 82-86.

[40] Liu G, Zha X, Zhou W, et al. Soil nutrient restriction factors in serious eroded and degraded pinus massoniana woodland[J]. Bulletin of Soil & Water Conservation, 2016, 36(5): 34-39.

[41] 尚占环, 姚爱兴, 龙瑞军, 等. 山地荒漠草原植物群落多样性与环境因子动态关系研究[J]. 干旱区资源与环境, 2005, 19(2): 163-168.

有关酶的活性,改变细胞膜通透性,并促进 ATP(三磷酸腺苷)的降解,从而损伤遗传物质 DNA(脱氧核糖核酸)等,进而影响植物的生长、繁殖和代谢^[4]。

植物修复是利用植物来降解或吸附土壤或水中的污染物,植物修复技术就是一项利用绿色植物及其根系与土壤中的微生物体系来降解环境中一些不易自然降解而造成永久性污染的物质^[5]。随着关于重金属植物修复技术研究的逐渐深入、根系分泌物与重金属络合理论的提出,以及“绿色化学”引起全球范围内的重视,植物修复技术的涵义和应用越来越被重视^[6]。并且该技术无二次污染,绿色环保,作用持久^[7]。在重金属污染土壤的植物修复中,根系分泌物中的有机酸、柠檬酸等物质能有效降解土壤中的重金属,能促进重金属离子的活化从而更易被植物或其他生物体吸收、富集^[8]。

本研究以镉为重金属污染源,探究黑麦草、玉米草、苏丹草、狼尾草 4 种不同植物对其污染土壤的修复作用。

1 材料与方法

1.1 发芽率的测定

本研究中的 6 种植物种子,分别为黑麦草、玉米草、苏丹草、狼尾草、紫花苜蓿、白三叶草种子,均购自华南农业大学。试验地点为长江大学东校区,试验时间为 2017 年 6 月。取 90 个直径为 120 mm 且经过乙醇洗涤、高温消毒的培养皿,在每个培养皿中放入 2 片直径为 120 mm 的定性滤纸,取浸泡 8 h 后的各 10 粒种子置于培养皿中;配制不同浓度的含镉离子的溶液,浓度分别设置为 10、25、50、75、100 mg/L,将配制好的镉离子溶液分批多次滴加在滤纸上,保持滤纸湿润,每隔 1 d 滴加 1 次 5 mL 镉离子溶液,并记录种子的发芽情况。待种子萌发后,将所有培养皿移入人工气候箱内,设置湿度为 70%,温度为 30 ℃,光照度为 80 lx。

1.2 植物生长试验

土壤取自长江大学校园附近无重金属污染的农田,土壤类型为褐土,取回后将土壤置于阴凉处风干、磨碎待用,试验地点为长江大学东校区,试验时间为 2017 年 7—9 月。

污染土壤的配制:以分析纯 CdCl_2 作为 Cd 污染试剂,在每个盆中加入 500 g 土壤,按照 0、25、50、75、100 mg/kg 的土壤含量标准,求出每个盆栽所需的镉离子含量,然后将所需的镉离子含量配制成相

应溶液加入,搅拌均匀后放置 2 d,风干。

分别在培养箱中对黑麦草、玉米草、苏丹草、狼尾草、紫花苜蓿、白三叶草 6 种草的种子进行催芽,然后在每个盆中移植 10 粒已经发芽的种子,保持土壤含水率为 60%~70%,以 45 d 为生长周期。

1.3 植物及土壤中镉离子的测定

1.3.1 仪器及试剂 WYS2400 型原子吸收分光光度计(杭州华创科学器材有限公司)、浓硝酸(分析纯)、高氯酸(分析纯)、氢氟酸(分析纯)、柠檬酸(分析纯)、甘氨酸(分析纯)、麦芽糖(分析纯)(国药集团化学试剂有限公司)。

1.3.2 样品前处理 (1)待植物生长 45 d 后,将植物与土壤分离,然后轻轻敲去根系周围的土壤,用自来水充分冲洗,除去上面的泥土,再用蒸馏水清洗 1 遍,然后置于烘箱中于 104 ℃ 恒温烘烤 8 h 至完全干燥,将干燥的植物样品分别剪成根、茎、叶,然后分别称质量以计算生物量。

(2)称取 0.5 g 土壤样品,加入 10 mL 盐酸(50%),充分混匀消解($T=180\text{ }^{\circ}\text{C}$),待溶液挥发近干时,加入 10 mL 浓硝酸,过一段时间后,溶液挥发近干;再加入 10 mL 氢氟酸,过一段时间以后,氢氟酸挥发近干;再加入 10 mL 高氯酸,消解过程中要盖盖子,适当摇晃消解罐使之充分消解。待土样基本被消解后,用 5% 稀硝酸清洗消解罐内壁,并将所有溶液转移至 25 mL 比色管中,用蒸馏水定容,置于 4 ℃ 冰箱内待测^[9]。

(3)植物根、茎、叶的处理方法同土壤样品。

1.3.3 标准曲线的测定 (1)镉标准贮备液的制备。准确称取 0.100 0 g 镉粉,溶解于 10 mL 硝酸中,然后于 1 L 容量瓶中定容,得到 100 mg/mL 镉的贮备液。

(2)镉标准溶液的配制。分别取镉贮备液 0.2、0.5、1、2、4 mL 于 100 mL 容量瓶中定容,获得标准系列质量浓度分别为 0.2、0.5、1、2、4 mg/L 的镉离子溶液。

(3)绘制标准曲线。用原子吸收分光光度计在波长 228.8 nm 处依次加入 1 mL 质量浓度为 0.2、0.5、1、2、4 mg/L 的镉离子溶液,测定其吸光度,然后以吸光度对浓度作图,即得到其标准曲线,详见图 1。

2 结果与分析

2.1 发芽率结果

经过 2 周的培养,分别计算不同植物发芽种子

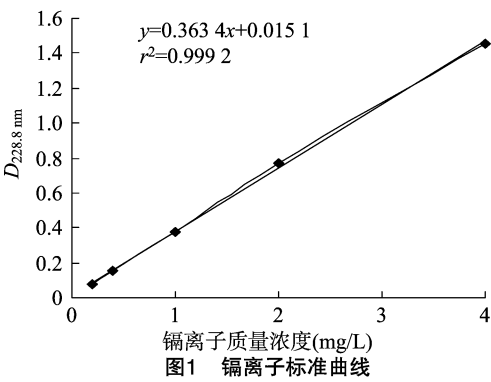


图1 镉离子标准曲线

的数量,并计算平均发芽率。由表 1 可以看出,狼尾草在全系镉离子质量浓度下的发芽率均可达到 80% 及以上;玉米草的发芽率随着镉离子质量浓度的升高先降后升,但是也能稳定在 70% 左右;苏丹草的发芽率随着镉离子质量浓度的升高而逐渐降低,当镉离子质量浓度达到 100 mg/kg 时,其发芽率仍能达到 60% 以上;黑麦草的发芽率随着镉离子质量浓度的升高而逐渐降低,直至最后降至 50%;而紫花苜蓿、白三叶草的发芽率一直较低,在高质量浓度时甚至不发芽。

表 1 不同植物种子的发芽率

溶液中的镉质量浓度 (mg/L)	发芽率(%)					
	狼尾草	紫花苜蓿	苏丹草	玉米草	白三叶草	黑麦草
0	90	50	90	90	40	80
25	90	40	80	70	30	70
50	80	10	70	70	20	60
75	90	0	70	80	0	50
100	100	0	70	80	0	50

2.2 植物的生长状况

在出苗之后,将各盆植物搬到室外,发现白三叶草、紫花苜蓿均有少量的根枯黄、变干的迹象,尤其是紫花苜蓿较为严重。紫花苜蓿和白三叶草在不同镉离子浓度条件下与其他植物相比最明显的就是生长缓慢、植株矮小,且植株数量随着镉离子浓度的升高而逐渐减少,因为 Cd 可对植物光合作用及根系与土壤产生的一系列氧化还原反应的酶产生抑制作用,从而降低了生物量和抑制了根的伸长,导致植物出现植株矮小等状况^[10]。故本研究选用黑麦草、玉米草、苏丹草、狼尾草 4 种草作为分析对象。

从图 2 中 4 种草在不同镉离子含量土壤中的生长状况看出,随着镉离子含量上升,玉米草的根质量先下降,但随后基本不变,而茎、叶质量出现小范围的波动,目前认为,玉米草对镉离子的耐受能力是不错的。对于狼尾草而言,叶质量整体呈抛物线形先升后降,而根、茎质量整体呈上升趋势,说明其对镉离子的修复主要靠叶、茎来固定及吸收。至于黑麦草,Lou 等研究发现,黑麦草在 Cd 存在下的根系活动异常旺盛,除了根部被镉离子抑制生长外,其他部位的生长波动不大,可以认为黑麦草主要靠根系来修复污染土壤^[11]。至于苏丹草,在一定镉离子含量范围内,其生物量明显随着镉离子含量的上升而不断增大,可以认为它对镉离子的耐受能力是极好的。

2.3 植物各部位的镉离子含量

经过 45 d 室外培养后,将培养盆中的所有植物收割,并分别将每种植物的根系、茎、叶剪碎,放入烘箱中烘干,称质量,然后将每种植物的根、茎和叶分别放入三角瓶中进行消解。消解后溶液中的镉离子含量用原子吸收分光光度计进行测定。

从表 2 可以看出,随着土壤中镉离子含量的增加,玉米草根系中的镉离子含量也越来越大,即随着土壤中镉离子含量的增加,玉米草根系对镉离子的修复能力也随之增强,而茎、叶中的镉离子含量较少,可能是因为玉米草主要靠根系来固定和吸收镉子。Schütze 等研究发现,链霉菌可通过生物吸附、氧化还原作用以及增加酶活性来增强植物的抗重金属特性^[12]。可以认为,由于根际土壤中微生物数量的增加有效地促进了植物对重金属的修复,只有当镉离子在根系中的积累达到一定量时才会向茎和叶片中转移。当镉离子含量逐渐升高时,去除率先升后降。

从表 3 可以看出,狼尾草叶片中的镉离子含量最高,可能是狼尾草根系对重金属几乎没有固定作用,主要靠叶片积累重金属,可能是植物叶片内产生了抗氧化酶或者一些抗性物质能够有效清除重金属胁迫产生的有活性的和有毒性的超氧自由基,于是产生了相对于根茎更好的耐金属效应^[13]。狼尾草对镉离子的去除率稳定在 70% 左右,并且不随含量的增大而减小,可以认为狼尾草对镉的耐受能

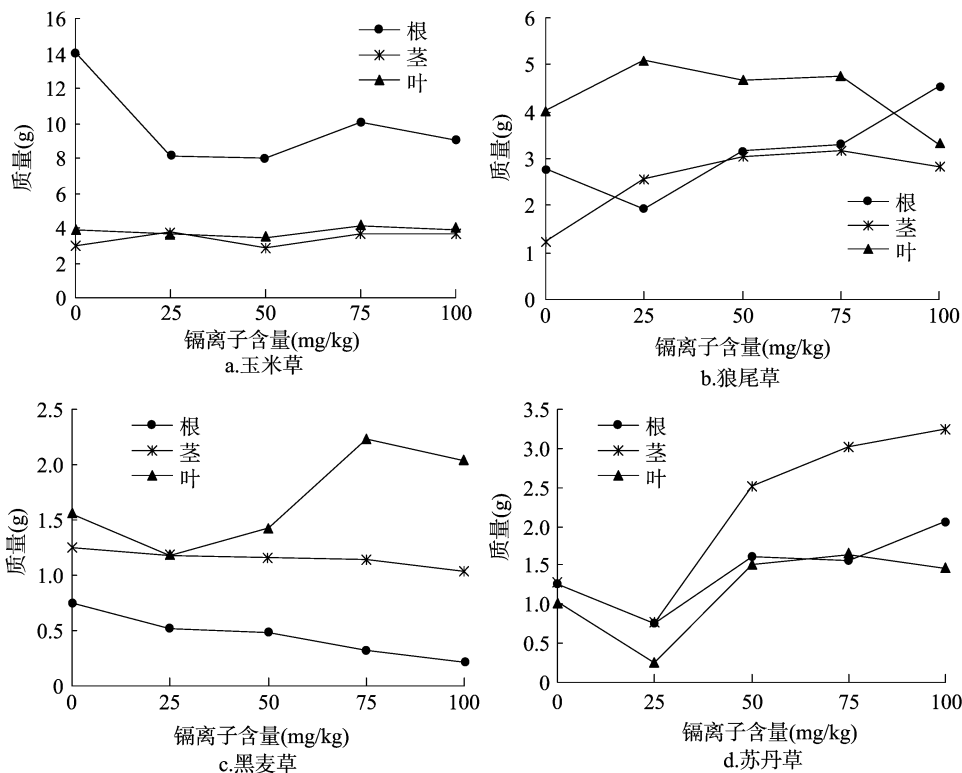


图2 4 种草在不同镉离子含量污染土壤中各部分的生物量

表 2 玉米草植物各部位的镉离子含量

土壤中的镉含量 (mg/kg)	镉离子含量 (mg/kg)			对镉的去除率 (%)
	根	茎	叶	
0	0.260	0.35	0.275	
25	10.625	1.75	1.130	54
50	33.750	1.35	2.500	75
75	45.000	2.25	3.130	67
100	57.250	1.00	2.700	61

表 3 狼尾草各部位的镉离子含量

土壤中的镉含量 (mg/kg)	镉离子含量 (mg/kg)			对镉的去除率 (%)
	根	茎	叶	
0	0.25	0.10	0	
25	0.36	1.75	15.28	70
50	0.68	3.28	28.80	64
75	0.96	3.25	57.50	82
100	1.25	4.15	68.92	74

力是不错的。

由表 4 可以看出,黑麦草对镉离子的积累与狼尾草相似,靠叶片积累镉离子,并且随着镉离子含量的增加,黑麦草叶片对镉离子的吸收量呈现先增大后减小的趋势,而根、茎则无明显变化并且吸附量小到可忽略不计,这可能也是因为黑麦草的叶片比较发达,而根、茎则相对较弱小,又或者与狼尾草一样,叶片内产生了抗氧化酶或者其他一些抗性物

质,所以黑麦草在镉离子污染土壤中主要是由其叶片吸收和固定镉离子。而从对镉离子的去除率来看,随着含量的上升,对镉离子的去除率下降得很明显,最后不到 20%,表明耐受性较差。

表 4 黑麦草各部位镉离子含量

土壤中的镉含量 (mg/kg)	镉离子含量 (mg/kg)			对镉的去除率 (%)
	根	茎	叶	
0	0.250	0.175	0.20	
25	0.200	0.150	19.50	79
50	0.225	0.150	22.50	58
75	0.175	0.175	20.00	27
100	0.250	0.175	17.50	18

由表 5 可以看出,苏丹草主要靠茎固定重金属,叶几乎没有固定效果,这可能与苏丹草的茎比较发达有关,又或者由于茎向叶传输重金属的路径不如黑麦草、苏丹草通顺,但是总体上对镉离子的去除率稳定在 60% 以上。因此可以认为,苏丹草对镉离子的耐受能力是不会随着土壤中镉离子含量的增加而降低的,其耐受能力也不错。

为了更加直观地对比不同植物在不同镉离子含量土壤中对镉离子的去除效率,对不同植物在不同含量下对镉离子的去除率作图。由图 3 可以直观地看出,当土壤中镉离子含量为 25 mg/kg 时,黑麦草对镉离子的去除率最高,玉米草对镉离子的去除

表 5 苏丹草各部位镉离子含量

土壤中的镉含量 (mg/kg)	镉离子含量(mg/kg)			对镉的去除率 (%)
	根	茎	叶	
0	0.325	0.575	0.600	
25	3.250	12.500	0.225	64
50	4.000	41.250	0.400	91
75	4.250	45.000	0.175	66
100	1.400	47.500	0.275	66

率最低,可以认为此时玉米草处于被镉离子抑制的阶段,从而导致这一结果;当土壤中镉离子含量为 50 mg/kg 时,苏丹草对镉离子的去除率最高,并且一直稳定在 60% 以上,而黑麦草此时对镉离子的去除率最低;当土壤中镉离子含量为 75 ~ 100 mg/kg 时,狼尾草对镉离子的去除率较高,而黑麦草对镉离子的去除率较低,并且随着土壤中镉离子含量的升高,黑麦草对镉离子的去除率逐渐降低,狼尾草对镉离子的去除率先降后升再降,但总体比较稳定,在 75% 左右。

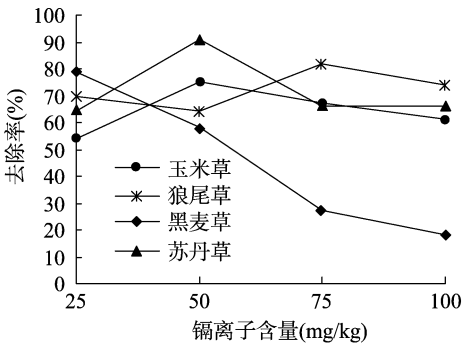


图3 不同镉离子含量下植物去除率

3 结论

笔者根据国内外研究现状,选取能够在当地较好存活的 6 种植物——玉米草、狼尾草、苏丹草、黑麦草与紫花苜蓿、白三叶草进行模拟污染场地修复,在经过 45 d 室外盆栽培养后,测定不同植物的生物量及各个部分的重金属含量,分析其生长和富集规律,得出结论如下:

- (1)以空白为对照,以不同种子的发芽率高低为筛选指标,选取玉米草、狼尾草、苏丹草、黑麦草为镉离子污染土壤修复的主要植物,按富集能力大小排序为狼尾草>玉米草>苏丹草>黑麦草。
- (2)当土壤中镉离子含量为 25 mg/kg 时,黑麦草对镉离子的去除率最高,达到 79%,但随着含量的升高,去除率逐渐下降,最后不到 20%;玉米草对

镉离子的去除率先升后降;苏丹草对镉离子的去除率大致稳定在 60% 左右;当土壤中镉离子含量为 75 ~ 100 mg/kg 时,狼尾草对镉离子的去除率较高,并且一直稳定在 75% 左右。所以,目前认为狼尾草、苏丹草对镉离子有很好的耐受能力,可以用于镉离子污染土壤的修复。

参考文献:

[1] Zhang Z H, Rengel Z, Chang H, et al. Phytoremediation potential of *Juncus subsecundus* in soils contaminated with cadmium and polynuclear aromatic hydrocarbons (PAHs) [J]. *Geoderma*, 2012, 175/176:1-8.

[2] Islam E, Liu D, Li T Q, et al. Effect of Pb toxicity on leaf growth, physiology and ultrastructure in the two ecotypes of *Elsholtzia argyi* [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2008, 154(1/2/3):914-926.

[3] Zhou S Q, Lu W D, Zhou X. Effects of heavy metals on planting watercress in kailyard soil amended by adding compost of sewage sludge[J]. *Process Safety and Environmental Protection*, 2010, 88(4):263-268.

[4] Huang H G, Yu N, Wang L J, et al. The phytoremediation potential of bioenergy crop *Ricinus communis* for DDTs and cadmium co-contaminated soil [J]. *Bioresource Technology*, 2011, 102(23):11034-11038.

[5] 林琦,陈英旭,陈怀满,等.根系分泌物与重金属的化学行为研究[J].*植物营养与肥料学报*, 2003, 9(4):425-431.

[6] Tokunaga S, Hakuta T. Acid washing and stabilization of an artificial arsenic-contaminated soil [J]. *Chemosphere*, 2002, 46(1):31-38.

[7] 唐世荣,黄昌勇,朱祖祥.利用植物修复污染土壤研究进展[J].*环境科学进展*, 1996, 4(6):10-14.

[8] Schnoor J L, Light L A, McCutcheon S C, et al. Phytoremediation of organic and nutrient contaminants [J]. *Environmental Science & Technology*, 1995, 29(7):318A-323A.

[9] 侯芸芸. 蕪草根分泌物在芑-铅复合污染土壤植物修复中的作用[D]. 上海:上海大学, 2016.

[10] Milone M T, Sgherri C, Clijsters H, et al. Antioxidative responses of wheat treated with realistic concentration of cadmium [J]. *Environmental and Experimental Botany*, 2003, 50(3):265-276.

[11] Lou Y, Luo H, Hu T, et al. Toxic effects, uptake, and translocation of Cd and Pb in perennial ryegrass [J]. *Ecotoxicology*, 2013, 22(2):207-214.

[12] Schütze E, Kothe E. Heavy metal-resistant streptomycetes in soil [M]//Bio-geo interactions in metal-contaminated soils. Berlin, Heidelberg:Springer, 2012:163-182.

[13] Bai X Y, Dong Y J, Wang Q H, et al. Effects of lead and nitric oxide on photosynthesis, antioxidative ability, and mineral element content of perennial ryegrass [J]. *Biologia Plantarum*, 2015, 59(1):163-170.