

周 振,张 彪,杨海涛,等. 曼陀罗对土壤镉污染的响应及镉累积特征[J]. 江苏农业科学,2019,47(8):269–272.  
doi:10.15889/j.issn.1002–1302.2019.08.062

# 曼陀罗对土壤镉污染的响应及镉累积特征

周 振<sup>1</sup>,张 彪<sup>1</sup>,杨海涛<sup>1</sup>,师振亚<sup>1</sup>,包环宇<sup>1</sup>,苗利娟<sup>2</sup>,杨素勤<sup>1</sup>

(1. 河南农业大学资源与环境学院,河南郑州 450002; 2. 河南省农业科学院经济作物研究所,河南郑州 450002)

**摘要:**为了探究镉污染土壤上曼陀罗生长及镉吸收和累积特征,设置对照和污染土壤组,采用盆栽方式对曼陀罗的生长状况、镉含量、生物累积量等指标进行分析。结果表明,相比于对照组,污染土壤组曼陀罗的株高和根长受到一定的抑制,但根部和茎部生物量并无明显减少,其生长未出现受害症状。移栽污染土壤 60 d 内,曼陀罗叶绿素 a 和叶绿素 b 并无显著降低,类胡萝卜素也出现相同规律。本研究中曼陀罗根、茎和叶镉含量最高可达 38、43、47 mg/kg,曼陀罗的根部富集系数最高达 2.69,地上部转移系数最高达 1.40,曼陀罗地上部的镉累积量占总量的 70% 以上。因此,曼陀罗虽未满足镉超富集植物的标准,但可以作为修复植物用于镉污染土壤的治理。

**关键词:**植物修复;镉;曼陀罗;富集系数;叶绿素含量

**中图分类号:** X53;X173 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002–1302(2019)08–0269–04

近年来,土壤重金属污染问题引起人们广泛的关注。据《全国土壤污染状况调查公报》显示,我国土壤点位超标率为 16.1%,污染类型以无机污染为主,其中,镉(Cd)的点位超标率达 7.0%<sup>[1]</sup>。目前,对重金属污染土壤治理方法的研究已得到各界重视<sup>[2–3]</sup>。就耕地而言,重金属污染土壤的生物修复成为具有巨大发展前途的治理技术之一。植物修复技术是一种利用植物从环境中吸收重金属、放射性核素等有害物质,并转化为环境友好的代谢产物的治理方式<sup>[4]</sup>。随研究深入,科研工作者已发现多种重金属超富集植物,如李氏禾<sup>[5]</sup>、龙葵<sup>[6]</sup>和蜈蚣草<sup>[7]</sup>等。但是,这些植物因受地域和气候等因素限制,暂时无法广泛种植,难以大面积修复重金属污染土壤。因此,寻找符合当地生态条件、生物量足够大、重金属累积量可观的植物成为土壤修复成功的关键因素之一。

曼陀罗(*Datura stramonium* L.)别称醉心花,生长迅速、生物量大、适应性强,有一定的经济效益,可作为锰、铬、铜和砷污染土壤的修复植物<sup>[8–9]</sup>。但是,目前还未见曼陀罗用于镉污染土壤修复的报道。有研究表明,曼陀罗叶片镉含量

为其他野生植物镉含量的数十倍<sup>[10]</sup>。董林林等研究表明,曼陀罗有较强的镉富集能力,其地上部镉含量最高可达 115 mg/kg<sup>[11]</sup>。但是关于曼陀罗对镉富集累积的研究还主要集中在某一时期,难以找出最佳的时间点,进行收割或者调控,用于土壤修复。因此,本试验侧重研究土壤镉污染对曼陀罗的生长和镉吸收的影响,重点探讨不同时间曼陀罗的生物量累积和富集特性,以期为曼陀罗修复重金属镉污染土壤提供参考和依据。

## 1 材料与与方法

### 1.1 供试植物及土壤

供试野生曼陀罗种子采自豫西某铅锌冶炼厂周边。供试清洁土壤和镉污染土壤分别采自豫西某铅锌冶炼厂西南 25 km 和西北 1 km 处,分别用 CK 和 TR 表示,均采集 0~20 cm 表层土壤,风干、碾碎、过 4 mm 尼龙筛。土壤基本理化性质见表 1。

表 1 土壤基本理化性质

处理	pH 值	有机质含量 (g/kg)	碱解氮含量 (mg/kg)	速效磷含量 (mg/kg)	速效钾含量 (mg/kg)	全镉含量 (mg/kg)	有效镉含量 (mg/kg)
CK	8.16	14.20	90.67	30.31	173.22	0.18	0.04
TR	8.30	13.05	85.92	29.10	165.85	14.11	2.25

### 1.2 试验设计

试验于 2015 年 5—8 月在河南农业大学科教园区进行。

收稿日期:2018–12–11

基金项目:河南省科技攻关计划(编号:162102110127);河南农业大学科技创新基金(编号:KJCX2016A15)。

作者简介:周 振(1994—),男,河南商丘人,硕士研究生,从事重金属污染土壤修复研究工作。E-mail:zhou\_zhen6177@126.com。

通信作者:张 彪,博士,讲师,从事重金属土壤污染修复研究, E-mail:zhangbiao6136@163.com;杨素勤,教授,从事重金属土壤污染控制与修复, E-mail:yang\_suqin@126.com。

选择饱满均一的种子,用 5% NaClO 溶液消毒 30 min,再用 10% NaOH 浸泡 90 min 破除休眠<sup>[12]</sup>,经去离子水冲洗、25℃遮光催芽后,移至基质育苗盘中,置于河南农业大学培养室。待幼苗长出 7~8 片真叶(约 40 d)后,选择健壮、长势一致的幼苗移栽到花盆中,每盆 1 株,盆内装土 10 kg。每天浇水,使土壤含水量保持在田间持水量的 80% 左右。试验期间,每 10 d 调整花盆位置。试验共 2 个处理(CK 和 TR),每个处理设置 12 盆,共 24 盆。采集样品时,先用自来水冲洗去除泥土,再用去离子水冲洗后,85℃杀青 30 min,于 70℃烘干备用。

### 1.3 测定指标及方法

1.3.1 生长指标测定 分别于移栽后 20、40、60、80 d 时采集植株样品,测量株高和根长,分根、茎和叶 3 个部分,称干质量。叶绿素和类胡萝卜素采用 95% 乙醇浸提 - 比色法<sup>[13]</sup>测定。

1.3.2 镉的测定 土壤总镉采用  $\text{HF} - \text{HClO}_4 - \text{HNO}_3$  法消解,原子吸收分光光度法测定;土壤有效镉采用二乙基三胺五乙酸(DTPA)浸提剂提取,原子吸收分光光度法测定;植株镉采用  $\text{HNO}_3 - \text{HClO}_4$  (体积比为 3 : 1) 消化,原子吸收分光光度法<sup>[14]</sup>测定。

### 1.4 数据分析

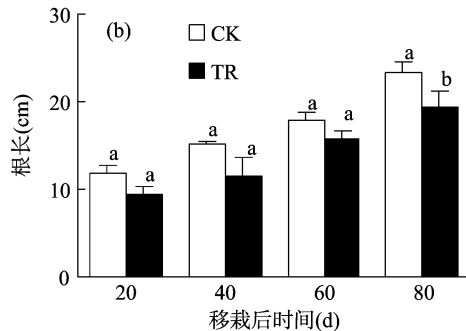
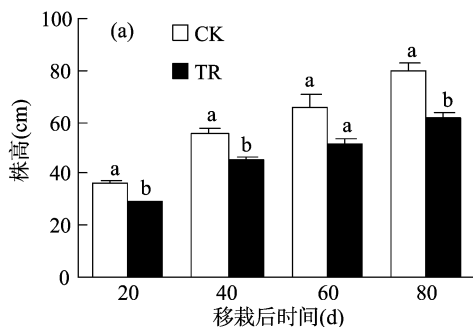
富集系数 = 根部镉含量/土壤中镉含量;转移系数 = 地上

部镉含量/根部镉含量;镉累积量 = 器官镉含量 × 器官质量。采用 SPSS 20.0 进行数据统计分析;采用 Excel 2007 软件绘图。

## 2 结果与分析

### 2.1 镉对曼陀罗生长状况的影响

2.1.1 株高和根长 随移栽时间的增加,污染土壤组 and 对照(清洁土壤)组曼陀罗的株高和根长均有所增加,其中污染土壤组株高和根长最高可达 61.9 cm 和 19.3 cm,相比对照减少 22.6% 和 17.2% (图 1)。曼陀罗移栽至污染土壤后,其株高明显低于对照组。就根长而言,移栽 60 d 之后,污染土壤组较对照组才开始受到抑制。



相同时间不同小写字母表示处理间在 0.05 水平上差异显著。图 3 至图 5 同

图 1 镉对曼陀罗株高与根长的影响

2.1.2 生长指数 叶质量比和茎质量比分别是指叶和茎质量占植株总质量的比值,能够反映植株生物量的分配情况<sup>[15]</sup>。植株地上部生物量越大,其提取的重金属越多。由图 2-a 可知,随时间增加,污染土壤组叶质量比呈现先减小

后增加的趋势,在移栽 60 d 后,污染土壤组与对照组无明显差异。由图 2-b 可知,移栽 20 ~ 60 d 时污染土壤组曼陀罗的茎质量比高于对照组,随后趋于稳定。

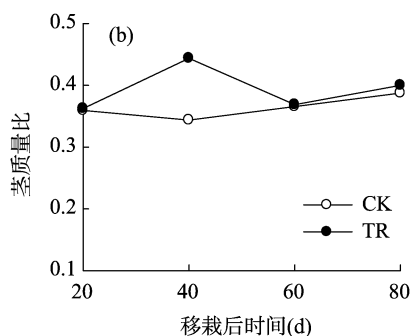
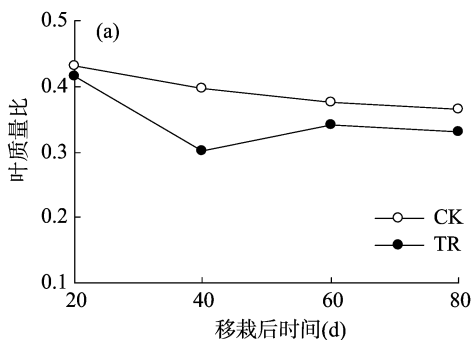


图 2 曼陀罗的生长状况

2.1.3 各器官干质量 随移栽时间的增加,污染土壤组与对照组的曼陀罗根、茎和叶干质量均增大(图 3),但三者又有所不同。与对照相比,各采样时间点污染土壤组的根部干质量无明显减少(图 3-a)。就地上部而言,整个生长期,污染土壤组曼陀罗茎部干质量与对照无明显差异(图 3-b);当移栽 40 d 以后,污染土壤组曼陀罗叶片干质量较对照显著减少(图 3-c)。

### 2.2 叶绿素和类胡萝卜素

由图 4 可知,当移栽 60 d 内,与对照组相比,污染土壤组的曼陀罗叶绿素 a、b 和类胡萝卜素含量无明显降低。只有当移栽时间增至 80 d 时,污染土壤组曼陀罗叶绿素 a、b 和类胡萝卜素较对照组显著降低,分别为 1.10、0.38、0.21 mg/g。

### 2.3 镉含量及富集、转移系数

由图 5 可知,随移栽时间增加,污染土壤组的曼陀罗根、茎、叶中镉含量均呈现减少的趋势。根、茎和叶镉含量分别达到 26.09 ~ 37.96、26.67 ~ 42.93、24.54 ~ 47.02 mg/kg。在移栽后 20 d 时,曼陀罗根、茎和叶的镉含量最大,并且随时间增加,曼陀罗根部、叶片镉含量趋于稳定。相比于移栽 20 d 时,曼陀罗根部、茎部和叶片中镉含量最大降幅分别为 31.3%、37.9%、47.8%。

富集系数反映植物吸收重金属能力<sup>[16]</sup>,转移系数反映植物将重金属从地下部转移到地上部能力<sup>[17]</sup>。由表 2 可知,曼陀罗的根部富集系数均大于 1,当移栽后 20 d 时,曼陀罗根部富集系数显著高于其他时间。随移栽时间增加,曼陀罗叶片

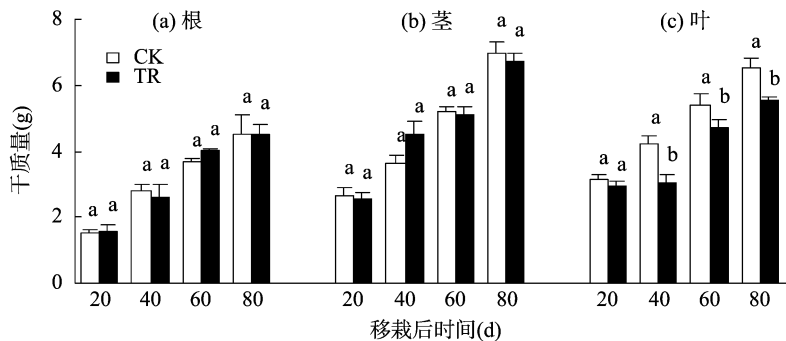


图3 曼陀罗各器官干质量

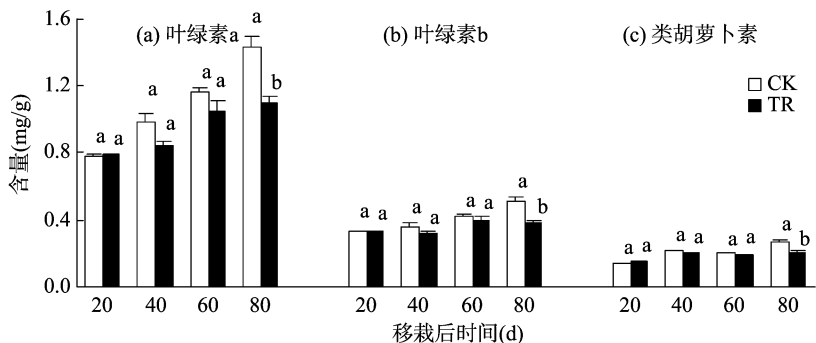


图4 曼陀罗叶绿素和类胡萝卜素含量

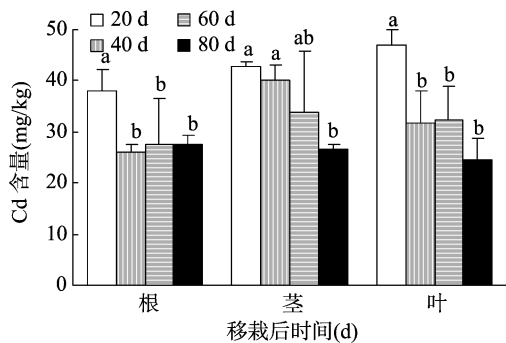


图5 污染土壤曼陀罗各器官镉含量

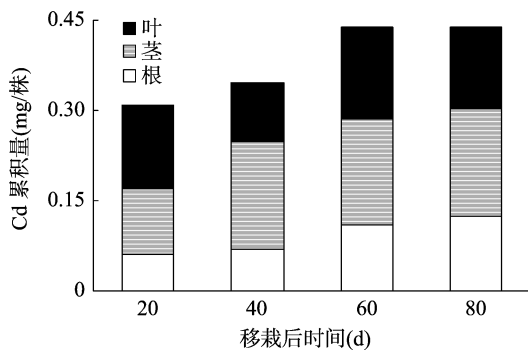


图6 污染土壤曼陀罗各器官镉累积量

表2 污染土壤曼陀罗镉富集系数和转移系数

移栽后时间 (d)	根富集系数	转移系数		
		茎	叶	地上部分
20	2.69a	1.14b	1.24a	1.20a
40	1.85b	1.54a	1.21a	1.40a
60	1.95b	1.23b	1.26a	1.24a
80	1.95b	0.98b	0.90a	0.94b

注:同列数据后不同小写字母表示在 0.05 水平上差异显著。

转移系数变化不大,茎部转移系数先升高后降低,在移栽时间为 40 d 时,达到最大值 1.54,显著高于其他时间。随移栽时间增加,地上部转移系数先升高后降低,最小值为 0.94。

2.4 各器官对镉的累积量

曼陀罗对镉的累积量反映其从土壤中吸取的镉总量。由图 6 可知,随时间增加,污染土壤组曼陀罗根部的镉累积量逐渐增加。曼陀罗根、茎和叶的镉累积量在移栽后最大可达 0.12、0.18、0.15 mg/株。在整个生长周期内,曼陀罗的地上部镉累积量所占百分比均在 70% 以上。

3 讨论

目前已发现的许多超富集植物生长缓慢且适应能力差,这成为植物修复技术走向应用的障碍因素之一。曼陀罗作为一种野生植物,具有生长快、抗逆性强、分布广且生长周期短等特点<sup>[18]</sup>,这些都有助于污染土壤的修复。本试验中,即使在重度污染土壤中,曼陀罗亦未发现明显的受害症状,表明曼陀罗对污染土壤的适应性强。虽然曼陀罗株高和根长受到一定抑制(图 1),但就生物量而言,污染土壤组曼陀罗根部和茎部的干质量与对照组差异并不明显(图 3),且地上部生物量(茎和叶的生物量之和)占总生物量比例也无明显差异,表明利用曼陀罗修复重度污染土壤具有一定的可行性。在移至污染土壤 40 d 时,茎质量比明显高于对照,进一步的生长调节和镉吸收调控若能针对这一时刻进行,则会提升修复效果。曼陀罗增加分配至茎部生物量的原因和机制目前尚不清楚,可能和污染条件下曼陀罗叶片的物质合成(叶绿素、类胡萝卜素等)及运输有关。为此,本研究分析了叶绿素、类胡萝卜素以初步判断曼陀罗叶片的生理状况。

随时间增加,污染土壤组与对照组的曼陀罗叶绿素 a、b 和类胡萝卜素均逐渐增多,表明这些物质在生物体内的合成并未受到阻止。叶绿素影响植物光合作用的强度及物质合成速率<sup>[19]</sup>,一定程度反映了植物的适应能力;而类胡萝卜素影响植物细胞内活性氧的清除,与光合作用关系密切<sup>[20]</sup>。在移栽后的 60 d 内,污染土壤组与对照组曼陀罗的叶绿素 a、b 和类胡萝卜素无明显差异,由此分析,镉对曼陀罗生长并未产生显著影响。只有当胁迫时间增至 80 d 后,污染土壤组曼陀罗叶绿素 a、b 和类胡萝卜素含量才开始低于对照,这也侧面验证了曼陀罗对镉具有较强的耐受能力。

本试验中,曼陀罗地上部镉含量达到 24.54 ~ 47.02 mg/kg,且在前 3 次采样时间点,地上部转移系数均大于 1(表 2),这表明曼陀罗具备相当的镉富集能力。就镉含量而言,曼陀罗相比于超富集植物有一定差距,但由于其具有较大的生物量,曼陀罗镉累积量与镉超富集植物东南景天相差不大。姚桂华等研究表明,镉浓度为 13.15 mg/kg 的酸性土壤中,东南景天单株镉累积量为 0.53 mg<sup>[21]</sup>。魏树和等研究表明,当土壤中镉浓度为 10 mg/kg 时,镉超富集植物龙葵幼苗根、茎和叶镉含量分别达到 29、62、76 mg/kg;高积累镉植物水蒿、蒲公英和刺儿菜地上部镉含量分别达到 21、33、16 mg/kg。相比于龙葵,曼陀罗根部镉含量与之相差不大,但茎部和叶片的镉含量较低,并未达到镉超富集植物的标准<sup>[22~23]</sup>。李念等采用大田栽培模式,发现曼陀罗单株镉提取量远小于本试验结果<sup>[24]</sup>。这可能是由于本试验采用的土壤镉浓度较大,以及栽培管理模式不同造成的。但是,鉴于曼陀罗具有较高的镉含量、较强的根部富集及地上部转移等优点,初步认为曼陀罗具有镉高累积的特性。

本研究设置了移栽后 20、40、60、80 d 4 个采样时间,以全面了解曼陀罗对镉的吸收、转移和累积特征。曼陀罗的镉累积量在整个生长周期中并不是持续增加,表现出独特的镉累积特性,这一特性主要受地上部镉浓度、生物量累积、转移系数等影响。累积量在移栽后 60 d 后达到最大,此时地上部镉累积量占植株累积量的 70% 以上,当胁迫时间继续增加至 80 d 后,累积量不再增加。

#### 4 结论

在选取的重度污染土壤上,曼陀罗对镉具有较强的富集性,镉含量最高可达 47 mg/kg。从修复角度而言,地上部具有较高的镉累积能力,其累积量占植株累积量的比例超过 70%。镉累积量随时间有所增加,达到峰值(本试验为移栽 60 d)后趋于稳定,曼陀罗植物提取修复应选择最佳的时间点收割地上部,尤其是茎部。

#### 参考文献:

- [1] 环境保护部,国土资源部. 全国土壤污染状况调查公报[R/OL]. (2014-04-17) [2018-11-11]. <http://www.gov.cn/footer/site1/20140417/782bcb88840814ba158d01.pdf>.
- [2] Hua M, Zhang S J, Pan B C, et al. Heavy metal removal from water/wastewater by nanosized metal oxides: a review [J]. Journal of Hazardous Materials, 2012, 211/212: 317-331.
- [3] van der Ent A, Baker A J M, Reeves R D, et al. Hyperaccumulators of metal and metalloid trace elements: facts and fiction [J]. Plant and Soil, 2013, 362(1/2): 319-334.
- [4] Mahar A, Wang P, Ali A, et al. Challenges and opportunities in the phytoremediation of heavy metals contaminated soils: a review [J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2016, 126: 111-121.
- [5] Zhang X H, Liu J, Huang H T, et al. Chromium accumulation by the hyperaccumulator plant *Leersia hexandra* Swartz [J]. Chemosphere, 2007, 67(6): 1138-1143.
- [6] 魏树和,周启星,王新,等. 一种新发现的镉超积累植物龙葵 (*Solanum nigrum* L.) [J]. 科学通报, 2004, 49(24): 2568-2573.
- [7] Ma L Q, Komar K M, Tu C, et al. A fern that hyperaccumulates arsenic [J]. Nature, 2001, 409(6820): 579.
- [8] 中国科学院中国植物志编辑委员会. 中国植物志: 第 67 卷 [M]. 北京: 科学出版社, 1978.
- [9] Varun M, D'Souza R, Pratas J, et al. Metal contamination of soils and plants associated with the glass industry in North Central India: prospects of phytoremediation [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2012, 19(1): 269-281.
- [10] 杨海涛,卢炳坤,苗利娟,等. 野生曼陀罗生态学特性及镉铅携带量的研究 [J]. 西南农业学报, 2016, 29(2): 413-419.
- [11] 董林林,赵先贵,韦良焕. 曼陀罗和苍耳对污染土壤中镉的吸收与富集 [J]. 生物技术, 2009, 19(2): 29-32.
- [12] 史雷,慕小倩. 曼陀罗种子破眠方法研究 [J]. 种子, 2010, 29(9): 40-43.
- [13] 李合生. 植物生理生化实验原理和技术 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2000.
- [14] 鲍士旦. 土壤农化分析 [M]. 3 版. 北京: 中国农业出版社, 2008.
- [15] 林波,刘庆. 四种亚高山针叶林树种的表型可塑性对不同光照度的响应 [J]. 生态学报, 2007, 28(10): 4665-4675.
- [16] 张红振,骆永明,章海波,等. 水稻、小麦籽粒砷、镉、铅富集系数分布特征及规律 [J]. 环境科学, 2010, 31(2): 488-495.
- [17] 李霞,张银龙,魏猷刚,等. 芦蒿对 Cd 积累与转运的基因型差异研究 [J]. 农业环境科学学报, 2013, 32(11): 2132-2139.
- [18] 杨珍平,郝教敏,卜玉山,等. Cd 胁迫对 5 种植物体内 Cd 积累及根际土壤特性的影响 [J]. 水土保持学报, 2011, 25(6): 188-190.
- [19] 宇克莉,孟庆敏,邹金华. 镉对玉米幼苗生长、叶绿素含量及细胞超微结构的影响 [J]. 华北农学报, 2010, 25(3): 118-123.
- [20] 陈良,隆小华,郑晓涛,等. 镉胁迫下 2 种菊芋幼苗的光合作用特征及镉吸收转运差异的研究 [J]. 草业学报, 2011, 20(6): 60-67.
- [21] 姚桂华,徐海舟,朱林刚,等. 不同有机物料对东南景天修复重金属污染土壤效率的影响 [J]. 环境科学, 2015, 36(11): 4268-4276.
- [22] 魏树和,周启星,王新. 超积累植物龙葵及其对镉的富集特征 [J]. 环境科学, 2005, 26(3): 167-171.
- [23] 魏树和,周启星,王新,等. 杂草中具重金属超积累特征植物的筛选 [J]. 自然科学进展, 2003, 13(12): 1259-1263.
- [24] 李念,李荣华,冯静,等. 粉煤灰改良重金属污染农田的修复效果植物甄别 [J]. 农业工程学报, 2015, 31(16): 213-219.