

曾 鹏, 曹 霞, 郭朝晖, 等. Cd 污染土壤景观修复植物筛选研究[J]. 农业环境科学学报, 2016, 35(4): 691–698.

ZENG Peng, CAO Xia, GUO Zhao-hui, et al. Potential of ornamental plants for remediating soil polluted with cadmium[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2016, 35(4): 691–698.

Cd 污染土壤景观修复植物筛选研究

曾 鹏, 曹 霞, 郭朝晖*, 肖细元, 刘亚男, 梁 芳

(中南大学冶金与环境学院环境工程研究所, 长沙 410083)

摘 要:在温室条件下,研究了香樟、圆柏、侧柏、夹竹桃、珊瑚树、四季桂、红花檵木、金边黄杨、金叶女贞和海桐子 10 种常见景观植物对污染土壤中 Cd 的耐受能力和富集特征。试验设置的三个处理分别为不添加外源 Cd 的 CK 处理(土壤中 Cd 本底值为 $3.6 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)和添加外源 Cd 的 T_1 、 T_2 处理(土壤中 Cd 含量分别为 9.6 、 $24.6 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)。结果表明,在 T_1 和 T_2 处理下,圆柏、侧柏和四季桂的根、茎、叶和整株生物量与 CK 处理无显著差异($P>0.05$)。当土壤中 Cd 含量范围为 $3.6\sim 24.6 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时,侧柏、珊瑚树、四季桂和金边黄杨光合作用正常; T_1 和 T_2 处理下香樟、侧柏、珊瑚树、四季桂、红花檵木、金边黄杨和金叶女贞叶片中丙二醛含量与 CK 处理无显著差异($P>0.05$)。珊瑚树对土壤中 Cd 有一定的富集能力,而香樟对 Cd 具有较强的转运能力。供试植物 Cd 富集系数的聚类分析表明,圆柏、夹竹桃和珊瑚树可用于 Cd 污染土壤修复与景观美化,红花檵木、金边黄杨、香樟、四季桂、侧柏和金叶女贞可用于 Cd 重污染土壤中 Cd 的稳定。

关键词: Cd; 污染土壤; 景观植物; 植物修复

中图分类号: X53 文献标志码: A 文章编号: 1672-2043(2016)04-0691-08 doi:10.11654/jaes.2016.04.012

Potential of ornamental plants for remediating soil polluted with cadmium

ZENG Peng, CAO Xia, GUO Zhao-hui*, XIAO Xi-yuan, LIU Ya-nan, LIANG Fang

(Institute of Environmental Engineering, School of Metallurgy and Environment, Central South University, Changsha 410083, China)

Abstract: Under greenhouse condition, the tolerance and accumulation characteristics for ornamental plants of 10 species grown on Cd contaminated soil, including *Cinnamomum camphora*, *Sabina chinensis*, *Platycladus orientalis*, *Nerium indicum*, *Viburnum odoratissimum*, *Osmanthus fragrans*, *Loropetalum chinense*, *Euonymus japonicus*, *Ligustrum vicaryi* and *Gardenia Ellis*, were studied. Three levels of Cd in polluted soil were designed, which is the background level of $3.6 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ (CK), the content of $9.6 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ (T_1) and $24.6 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ (T_2) with addition of external cadmium, respectively. The results showed that the biomass of roots, stems, leaves and total plant among *Sabina chinensis*, *Platycladus orientalis* and *Osmanthus fragrans* was slightly significant difference ($P>0.05$) compared with CK treatment under T_1 and T_2 treatment. When the content of Cd in soils were from 3.6 to $24.6 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, *Platycladus orientalis*, *Viburnum odoratissimum*, *Osmanthus fragrans* and *Euonymus japonicus* could photosynthesize regularly, and the content of malondialdehyde in leaves of *Cinnamomum camphora*, *Platycladus orientalis*, *Viburnum odoratissimum*, *Osmanthus fragrans*, *Loropetalum chinense*, *Euonymus japonicus* and *Ligustrum vicaryi* were slightly changed. The accumulation capacity of Cd in *Viburnum odoratissimum* and the transferring coefficient of Cd to aboveground of *Cinnamomum camphora* was relatively higher compared with the other tested plants. According to the hierarchical cluster analysis based on Cd bioaccumulation factors of tested plants, *Sabina chinensis*, *Nerium indicum* and *Viburnum odoratissimum* can serve for phytoremediation and ameliorate the landscape of Cd contaminated soil. *Loropetalum chinense*, *Euonymus japonicus*, *Cinnamomum camphora*, *Osmanthus fragrans*, *Platycladus orientalis* and *Ligustrum vicaryi* is helpful for stabilization of Cd in contaminated soil.

Keywords: Cd; polluted soil; ornamental plant; phytoremediation

随着现代社会经济的快速发展,矿山开采^[1]、金属

冶炼^[2]、化工生产^[3]和农药、化肥^[4]等生产活动加剧了工矿区土壤重金属污染,Cd 等重金属能够通过食物链对生产者和消费者产生毒害作用^[5],解决土壤中 Cd 等重金属污染问题迫在眉睫。植物修复具有环境友好、成本低、美化环境、不易引起二次污染等优点,

收稿日期: 2015-11-15

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(41271330)

作者简介: 曾 鹏(1992—),男,硕士研究生,主要从事重金属污染土壤修复研究。E-mail: 547032220@qq.com

* 通信作者: 郭朝晖 E-mail: zhguo@csu.edu.cn

因而倍受关注^[6]。很多超富集植物^[7-9]和耐性草本植物^[10-12]被用于植物修复研究和应用中,一些生物量大、耐受性强、具有较好景观特征的先锋植物也正逐渐步入植物修复目标植物行列。景观植物种类丰富,可在美化环境的同时修复重金属污染土壤^[13]。有研究表明,海桐(*Pittosporum tobira*)可作为Cd污染土壤修复的备选植物^[14],樟树(*Cinnamomum camphora*)对Cd有较强的富集能力^[15],珊瑚树(*Viburnum odoratissimum*)和地中海荚蒾(*Viburnum tinus*)对土壤中Cd具有一定的富集能力^[16]。然而,景观植物对污染土壤中Cd等重金属的耐受能力和富集特征还缺乏系统的研究报道。本文通过温室盆栽试验,研究香樟、圆柏、侧柏、夹竹桃、珊瑚树、四季桂、红花檵木、金边黄杨、金叶女贞和海栀子等10种常见景观植物对污染土壤中Cd的耐受能力和富集特征,为选用适宜的Cd污染土壤生态修复用景观植物提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 供试土壤和植物

供试土壤取自湖南省衡阳市某典型矿冶区周边的表层(0~20 cm)土壤,土壤的基本理化性质见表1。

选取城市绿化常用的香樟、圆柏、侧柏、夹竹桃、珊瑚树、四季桂、红花檵木、金边黄杨、金叶女贞和海栀子等10种景观植物为供试植物。其中,香樟、圆柏、侧柏为常绿乔木,夹竹桃、珊瑚树、四季桂、红花檵木、金边黄杨为常绿小乔木或灌木,金叶女贞和海栀子为

常绿灌木。供试幼苗从长沙市某苗木基地选购,基本情况见表2。

1.2 实验设计

土壤经自然风干、磨细后过5 mm筛,装入塑料盆(上口直径18 cm,下口直径13 cm,高17 cm)中,每盆装入3.5 kg风干土。根据我国《土壤环境质量标准》(GB 15618—1995)和《展览会用地土壤环境质量评价标准(暂行)》(HJ 350—2007),以Cd(NO₃)₂·4H₂O作为外源镉向土壤中分别添加0、6、21 mg·kg⁻¹形成Cd污染土壤的三个处理:CK处理(土壤中Cd本底值为3.6 mg·kg⁻¹)、T₁处理(土壤中Cd含量为9.6 mg·kg⁻¹)和T₂处理(土壤中Cd含量为24.6 mg·kg⁻¹),每个处理重复4次。在室内平衡2周后统一移栽大小基本一致的幼苗,每盆4株,于2014年6月至2015年1月在温室内进行培养。培养期间,根据土壤水分蒸发情况,不定期浇灌去离子水,以保持土壤田间持水量为70%。光照10 h·d⁻¹,温室内昼夜温度为30℃/20℃。培栽203 d后收获上述植物,不同处理下取植物相同部位叶片用于叶绿素和丙二醛(MDA)含量分析,剩余植株按根、茎、叶分开,依次用自来水、去离子水清洗后,在105℃下杀青30 min,然后60℃烘干至恒重。称量干重、粉碎后备用。

1.3 测试与分析

土壤基本理化性质的测定参照鲁如坤^[17]的方法,植物叶片叶绿素^[18]和MDA^[19]含量采用分光光度计测定。土壤样品采用HNO₃-HCl-H₂O₂(MDS-8G型多通量

表1 供试土壤的基本理化性质

Table 1 Basic physiochemical properties of tested soil

pH	有机质 Organic matter/ g·kg ⁻¹	速效氮 Available N/ mg·kg ⁻¹	速效磷 Available P/ mg·kg ⁻¹	速效钾 Available K/ mg·kg ⁻¹	重金属 Heavy metal/mg·kg ⁻¹		
					As	Cd	Pb
7.76	5.05	5.60	9.80	15.20	34.40	3.60	96.20

表2 供试幼苗的基本情况

Table 2 General characteristics of tested plant seedlings

植物 Plants	拉丁文名 Latin name	类型 Types	Cd 含量 Cd content/mg·kg ⁻¹
香樟	<i>Cinnamomum camphora</i>	常绿乔木	0.72
圆柏	<i>Sabina chinensis</i>	常绿乔木	0.39
侧柏	<i>Platycladus orientalis</i>	常绿乔木	0.19
夹竹桃	<i>Nerium indicum</i>	常绿小乔木或灌木	1.66
珊瑚树	<i>Viburnum odoratissimum</i>	常绿小乔木或灌木	1.37
四季桂	<i>Osmanthus fragrans</i>	常绿小乔木或灌木	1.12
红花檵木	<i>Loropetalum chinense</i>	常绿小乔木或灌木	0.88
金边黄杨	<i>Euonymus japonicus</i>	常绿小乔木或灌木	0.52
金叶女贞	<i>Ligustrum vicaryi</i>	常绿灌木	0.48
海栀子	<i>Gardenia Ellis</i>	常绿灌木	0.41

密闭微波消解仪)消解;植物样品采用 $\text{HNO}_3\text{-HClO}_4$ 法消解(体积比为 3:1)^[20]。所有消解液中 Cd 含量采用原子吸收分光光度计(TAS-990,北京普析通用)测定。植株中 Cd 的富集系数(BC)^[21]和转运系数(TF)^[22]按照下列公式计算:

$\text{BC} = \text{植物地上部 Cd 含量} / \text{土壤中 Cd 含量}$

$\text{TF} = \text{植物地上部 Cd 含量} / \text{根部 Cd 含量}$

所有试验数据采用 Microsoft Excel 2007 进行处理。采用 SPSS 18.0 统计软件进行显著性检验,利

用单因素方差分析(One-way ANOVA)比较各处理间的差异,显著性水平为 $P < 0.05$ 。

2 结果与讨论

2.1 供试景观植物的生物量

从表 3 可看出,经过 203 d 的培养,Cd 胁迫对景观植物生物量影响明显。 T_1 处理下,土壤中 Cd 对香樟、金叶女贞和海梔子的生长有明显促进作用,尤其对香樟根和茎、珊瑚树叶片和金叶女贞茎的生长发育

表 3 不同 Cd 处理下景观植物的生物量
Table 3 Biomass of ornament plants in different Cd treatments

植物 Plant	处理 Treatment	生物量 Biomass/g			
		根 Root	茎 Stem	叶 Leaf	整株 Total
香樟	CK	0.58±0.01b	0.43±0.16b	0.29±0.28ab	1.30±0.42b
	T_1	0.84±0.13a	0.73±0.09a	0.62±0.05a	2.19±0.27a
	T_2	0.36±0.12c	0.33±0.04b	0.23±0.04b	0.91±0.17b
圆柏	CK	7.41±2.81a	8.43±3.56a	21.76±2.53a	37.59±6.59a
	T_1	7.10±1.67a	6.73±1.74a	24.47±5.72a	38.30±8.89a
	T_2	5.73±0.40a	6.59±1.13a	19.39±2.53a	31.70±4.06a
侧柏	CK	1.28±0.71a	1.99±1.23a	4.20±0.49a	7.47±2.13a
	T_1	1.93±0.39a	2.28±0.22a	4.81±0.15a	9.02±0.71a
	T_2	1.23±0.34a	1.56±0.10a	3.96±0.72a	6.75±0.81a
夹竹桃	CK	5.46±2.14a	5.23±0.27a	4.27±0.64a	14.95±2.80a
	T_1	3.11±1.64ab	4.92±0.43a	4.04±2.16a	12.06±3.47ab
	T_2	0.89±0.38b	4.70±0.17a	2.63±1.14a	8.22±1.35b
珊瑚树	CK	1.90±0.11a	0.90±0.30a	0.86±0.01b	3.66±0.27a
	T_1	1.24±0.63a	0.74±0.13a	0.96±0.06a	2.94±0.55a
	T_2	1.45±0.22a	0.80±0.17a	0.68±0.005c	2.92±0.31a
四季桂	CK	0.23±0.03a	0.74±0.20a	1.10±0.15a	2.08±0.37a
	T_1	0.42±0.20a	0.78±0.30a	1.40±0.46a	2.60±0.84a
	T_2	0.35±0.09a	0.59±0.26a	0.86±0.34a	1.80±0.52a
红花檵木	CK	0.69±0.03a	1.09±0.26a	0.61±0.17a	2.39±0.30a
	T_1	0.58±0.14a	0.89±0.05a	0.65±0.05a	2.12±0.15ab
	T_2	0.35±0.01b	0.87±0.11a	0.56±0.27a	1.79±0.14b
金边黄杨	CK	0.77±0.16a	0.92±0.39a	1.19±0.41ab	2.88±0.91a
	T_1	0.78±0.09a	0.82±0.12a	1.47±0.18a	3.08±0.15a
	T_2	0.66±0.09a	0.63±0.03a	0.72±0.10b	2.02±0.22a
金叶女贞	CK	0.39±0.11a	0.56±0.01b	0.24±0.06a	0.98±0.05b
	T_1	0.37±0.09a	1.01±0.20a	0.29±0.13a	1.67±0.34a
	T_2	0.17±0.03b	0.25±0.05c	0.21±0.02a	0.62±0.05b
海梔子	CK	0.27±0.02	1.09±0.13	0.28±0.09	1.64±0.02
	T_1	0.85±0.12	1.21±0.31	0.86±0.23	2.86±0.41
	T_2	—	—	—	—

注:数据为平均值±标准差,同一植物同一列中不同字母表示处理间差异显著($P < 0.05$)。 T_2 处理下海梔子只有小部分成活,未进行统计分析。下同。

Notes: Data are presented in means±SD. Different letters under the same plant within a column mean statistical significant differences at $P < 0.05$ level. Only a small portion of *Gardenia Ellis* was survived in T_2 treatment, and thus no statistical analysis was performed. The same below.

促进作用明显,与CK处理相比分别提高44.8%和69.8%、11.6%、80.3%; T_2 处理下,香樟、夹竹桃、红花檵木、珊瑚树和金叶女贞的生长明显受到抑制,尤其对香樟、夹竹桃和红花檵木根部、珊瑚树叶片和金叶女贞茎的生长抑制作用明显,而且海栀子几乎没有存活。当土壤中Cd含量范围为 $3.6\sim 24.6\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时,圆柏、侧柏和四季桂的根、茎、叶和整株生物量差异不明显。因此,从植物生物量考虑,夹竹桃、红花檵木和海栀子对土壤中Cd含量比较敏感;当土壤Cd含量达到 $9.6\sim 24.6\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时,香樟、圆柏、侧柏、珊瑚树、四季桂、金边黄杨和金叶女贞可作为适宜Cd污染土壤的修复植物。

2.2 Cd污染土壤上景观植物的生理特征

2.2.1 光合色素含量

光合色素含量高低是判定植物光合作用强弱和衡量叶片衰老程度的重要生理指标^[23]。从表4可看出, T_1 和 T_2 处理下,香樟、侧柏、珊瑚树、四季桂、红花檵木和金边黄杨的叶绿素a、叶绿素b以及类胡萝卜素含量与CK处理相比均无显著差异($P>0.05$),而夹竹桃叶绿素a、叶绿素b和类胡萝卜素的含量显著高于CK处理($P<0.05$),表明土壤中Cd可促进夹竹桃光合色素的合成。 T_1 处理下,圆柏的叶绿素a、叶绿素b和类胡萝卜素含量高于CK处理,尤其是类胡萝卜素含量较CK处理明显提高37.5%;而 T_2 处理下,其

表4 不同Cd处理下景观植物叶片光合色素含量

Table 4 Content of photosynthetic pigments in ornament plants in different Cd treatments

植物 Plant	处理 Treatment	光合色素含量 Content of photosynthetic pigments/ $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$ FW			叶绿素 a/b Chlorophyll a/b
		叶绿素 a Chlorophyll a	叶绿素 b Chlorophyll b	类胡萝卜素 Carotenoid	
香樟	CK	$2.22\pm 0.30\text{ab}$	$1.14\pm 0.37\text{b}$	$0.42\pm 0.03\text{a}$	$2.05\pm 0.35\text{a}$
	T_1	$2.18\pm 0.22\text{b}$	$1.01\pm 0.27\text{b}$	$0.41\pm 0.03\text{a}$	$2.22\pm 0.31\text{a}$
	T_2	$2.55\pm 0.32\text{a}$	$1.58\pm 0.24\text{a}$	$0.42\pm 0.04\text{a}$	$1.61\pm 0.34\text{b}$
圆柏	CK	$1.00\pm 0.13\text{a}$	$0.36\pm 0.06\text{a}$	$0.16\pm 0.02\text{b}$	$2.77\pm 0.16\text{b}$
	T_1	$1.16\pm 0.21\text{a}$	$0.41\pm 0.11\text{a}$	$0.22\pm 0.04\text{a}$	$2.86\pm 0.19\text{b}$
	T_2	$0.57\pm 0.04\text{b}$	$0.18\pm 0.02\text{b}$	$0.11\pm 0.01\text{b}$	$3.25\pm 0.22\text{a}$
侧柏	CK	$0.89\pm 0.13\text{a}$	$0.35\pm 0.07\text{a}$	$0.14\pm 0.01\text{a}$	$2.55\pm 0.12\text{a}$
	T_1	$0.94\pm 0.13\text{a}$	$0.38\pm 0.09\text{a}$	$0.16\pm 0.04\text{a}$	$2.52\pm 0.48\text{a}$
	T_2	$0.64\pm 0.30\text{a}$	$0.24\pm 0.14\text{a}$	$0.11\pm 0.05\text{a}$	$2.81\pm 0.33\text{a}$
夹竹桃	CK	$0.52\pm 0.15\text{b}$	$0.20\pm 0.07\text{b}$	$0.12\pm 0.02\text{b}$	$2.65\pm 0.13\text{a}$
	T_1	$0.91\pm 0.27\text{a}$	$0.37\pm 0.13\text{a}$	$0.19\pm 0.06\text{a}$	$2.47\pm 0.18\text{a}$
	T_2	$1.05\pm 0.18\text{a}$	$0.40\pm 0.01\text{a}$	$0.21\pm 0.04\text{a}$	$2.64\pm 0.07\text{a}$
珊瑚树	CK	$1.77\pm 0.38\text{a}$	$0.82\pm 0.23\text{a}$	$0.34\pm 0.05\text{a}$	$2.20\pm 0.17\text{a}$
	T_1	$1.42\pm 0.28\text{a}$	$0.60\pm 0.13\text{a}$	$0.27\pm 0.06\text{a}$	$2.38\pm 0.09\text{a}$
	T_2	$1.41\pm 0.78\text{a}$	$0.65\pm 0.41\text{a}$	$0.26\pm 0.14\text{a}$	$2.38\pm 0.41\text{a}$
四季桂	CK	$1.49\pm 0.23\text{a}$	$0.57\pm 0.11\text{a}$	$0.29\pm 0.04\text{a}$	$2.61\pm 0.11\text{ab}$
	T_1	$1.61\pm 0.16\text{a}$	$0.61\pm 0.07\text{a}$	$0.31\pm 0.03\text{a}$	$2.65\pm 0.05\text{a}$
	T_2	$1.39\pm 0.15\text{a}$	$0.56\pm 0.07\text{a}$	$0.28\pm 0.03\text{a}$	$2.51\pm 0.06\text{b}$
红花檵木	CK	$1.93\pm 0.31\text{ab}$	$0.83\pm 0.14\text{b}$	$0.39\pm 0.05\text{ab}$	$2.33\pm 0.03\text{a}$
	T_1	$1.70\pm 0.26\text{b}$	$0.76\pm 0.14\text{b}$	$0.36\pm 0.05\text{b}$	$2.25\pm 0.09\text{a}$
	T_2	$2.23\pm 0.10\text{a}$	$1.08\pm 0.10\text{a}$	$0.44\pm 0.03\text{a}$	$2.07\pm 0.10\text{b}$
金边黄杨	CK	$1.66\pm 0.32\text{a}$	$0.65\pm 0.17\text{a}$	$0.33\pm 0.06\text{a}$	$2.58\pm 0.16\text{a}$
	T_1	$1.51\pm 0.31\text{a}$	$0.57\pm 0.13\text{a}$	$0.31\pm 0.06\text{a}$	$2.64\pm 0.07\text{a}$
	T_2	$1.61\pm 0.26\text{a}$	$0.62\pm 0.11\text{a}$	$0.33\pm 0.06\text{a}$	$2.62\pm 0.06\text{a}$
金叶女贞	CK	$1.48\pm 0.08\text{a}$	$0.49\pm 0.06\text{a}$	$0.28\pm 0.02\text{a}$	$3.02\pm 0.23\text{a}$
	T_1	$1.41\pm 0.14\text{a}$	$0.46\pm 0.09\text{a}$	$0.27\pm 0.03\text{a}$	$3.13\pm 0.37\text{a}$
	T_2	$1.11\pm 0.11\text{b}$	$0.32\pm 0.06\text{b}$	$0.22\pm 0.01\text{b}$	$3.54\pm 0.43\text{a}$
海栀子	CK	0.82 ± 0.08	0.31 ± 0.03	0.23 ± 0.02	2.69 ± 0.02
	T_1	1.55 ± 0.33	0.67 ± 0.24	0.35 ± 0.06	2.42 ± 0.32
	T_2	—	—	—	—

光合色素含量与 CK 处理相比均有显著下降,尤其是叶绿素 a 和叶绿素 b 含量较 CK 处理分别下降 75.4% 和 50.0%。其原因可能是低 Cd 含量处理下,刺激了叶绿素含量增加,弥补光合作用中主要电子传递的成分,但 Cd 含量继续增加会破坏叶绿体的结构和功能,使叶绿素含量逐渐下降^[24]。金叶女贞在 T_2 处理下,其叶绿素 a、叶绿素 b 和类胡萝卜素的含量较 CK 处理分别下降 25.0%、34.7% 和 21.4%。在 $3.6\sim 24.6\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ Cd 污染土壤上,侧柏、珊瑚树、四季桂和金边黄杨光合作用正常,进一步表明其整株生物量在各处理下无明显差异(表 3),对土壤中 Cd 具有较强的耐受能力。叶绿素 a/b 值可反映植物对光能的利用效率^[25]。 T_1 和 T_2 处理下,侧柏、夹竹桃、珊瑚树、四季桂、金边黄杨和金叶女贞的叶绿素 a/b 值与 CK 处理无显著差异($P>0.05$)。 T_2 处理下,圆柏叶绿素 a/b 的值显著高于 CK 处理,而红花檵木叶绿素 a/b 值显著低于 CK 处理。 T_1 处理下香樟叶绿素 a/b 值高于 CK 处理,而 T_2 处理下其比值显著低于 CK 处理,原因可能是适当含量 Cd 可提高植物对光能的利用效率,从而提高光合作用的效果^[26]。研究结果表明,土壤中 Cd 会对香樟、圆柏、红花檵木和金叶女贞叶片中光合色素含量产生影响,而对侧柏、夹竹桃、珊瑚树、四季桂和金边黄杨影响不明显,故对 Cd 污染土壤有较强的耐受能力。

2.2.2 MDA 含量

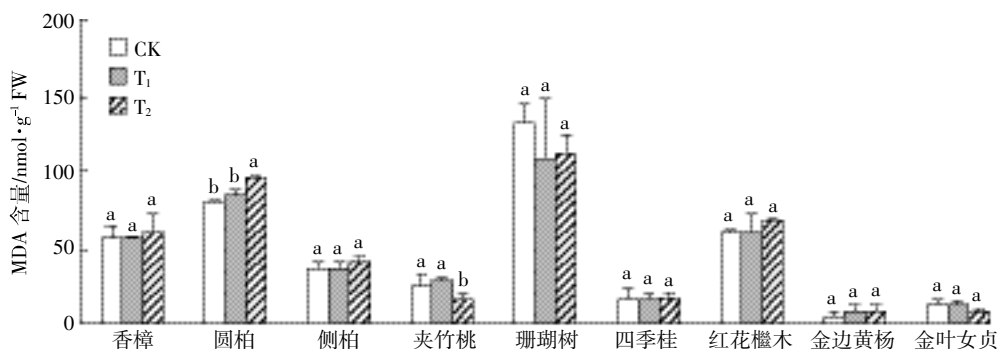
叶片中 MDA 是植物在逆境条件下膜质氧化的主要产物之一,其含量体现了膜质过氧化、植物衰老或植物的伤害程度^[27]。从图 1 可看出, T_1 和 T_2 处理下,香樟、侧柏、珊瑚树、四季桂、红花檵木、金边黄杨和金叶女贞 MDA 含量与 CK 处理无显著差异($P>0.05$),表明上述植物对土壤中 Cd 具有较好的耐受能力。 T_2 处理下,圆柏叶片中 MDA 含量显著高于 CK 处理,是

CK 处理的 1.17 倍,表明土壤中 Cd 含量为 $24.6\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时会对圆柏产生明显的毒害作用;夹竹桃叶片中 MDA 含量较 CK 处理明显降低了 62.2%,表明土壤中 Cd 含量为 $24.6\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时夹竹桃仍具有较好的耐受能力。有研究表明,植物体内的保护酶系统对过氧化物有一定的清除作用,从而保护重金属胁迫下植物的膜系统^[28]。这可能是香樟、侧柏、夹竹桃、珊瑚树、四季桂、红花檵木、金边黄杨和金叶女贞对 Cd 有一定耐受能力的原因。

2.3 景观植物体内 Cd 的富集特征

从表 5 可看出,除海栀子外,其他供试景观植物根、茎、叶中 Cd 含量随着土壤 Cd 含量的增加呈增加趋势。 T_1 处理下,四季桂茎、圆柏和金边黄杨根部,侧柏茎和叶,珊瑚树根、茎、叶中 Cd 含量显著高于 CK 处理($P<0.05$)。 T_2 处理下,香樟茎和叶,圆柏的根部,夹竹桃、红花檵木、金边黄杨和金叶女贞根和茎,侧柏、珊瑚树和四季桂根、茎、叶中 Cd 含量显著高于 CK 处理($P<0.05$),其中香樟茎和叶片中 Cd 含量分别为 CK 处理的 4.77 倍和 4.54 倍,表明随着土壤中 Cd 含量的增加,香樟体内 Cd 含量逐渐向茎和叶转移;圆柏、侧柏、夹竹桃、珊瑚树、四季桂、红花檵木、金边黄杨和金叶女贞根部 Cd 含量分别为 CK 处理的 8.43、7.53、4.54、6.46、2.89、1.46、3.77、2.34 倍;侧柏、夹竹桃、珊瑚树、四季桂、红花檵木、金边黄杨和金叶女贞茎部 Cd 含量较 CK 处理分别提高 138.3%、94.7%、278.8%、158.1%、44.8%、37.5% 和 226.4%;侧柏、珊瑚树和四季桂叶片 Cd 含量较 CK 处理分别提高 136.5%、266.0% 和 30.4%。

富集系数和转运系数可反映植物对重金属的富集能力^[25,29]。从表 5 可进一步看出,所有供试景观植物的富集系数随着土壤 Cd 浓度的升高而降低,表明其



同一植物不同字母标记表示不同处理间差异显著($P<0.05$)

Different letters under the same plant indicate significant differences ($P<0.05$) between different treatments

图 1 不同 Cd 处理下各景观植物叶片 MDA 含量

Figure 1 Malondialdehyde content in leaves of ornamental plants under different Cd treatments

对土壤中 Cd 的吸收能力有限。CK 处理下,香樟、珊瑚树、红花檵木、金边黄杨和金叶女贞的富集系数均在 1 左右,而在 T₁ 和 T₂ 处理下,仅珊瑚树的富集系数大于 1,表明其对 Cd 具有一定的富集能力。供试植物对 Cd 富集能力的高低顺序为珊瑚树>红花檵木≈金边黄杨≈金叶女贞>香樟≈侧柏>四季桂≈圆柏>海栀子>夹竹桃。除香樟、海栀子和珊瑚树外,其余供试景观植物的转运系数均小于 1,表明其对 Cd 的运输能力较弱。香樟在土壤中 Cd 含量逐渐增加的情况下表现出较强的转运能力。珊瑚树在 CK、T₁ 和 T₂ 处理下,转运系数均大于 1,但转运系数随着土壤中 Cd 含量的增加呈现降低趋势。尽管海栀子在 T₂ 处理下不

能存活,但 CK 和 T₁ 处理下,其体内 Cd 转运系数均大于 1,可能在低浓度 Cd 作用下海栀子迫使根部的 Cd 向地上部分转移来改善 Cd 对其根部的毒害作用。

根据景观植物对土壤中 Cd 富集系数进行聚类分析(图 2),结合植株中 Cd 含量可将供试景观植物分为富集型、规避型和根部囤积型 3 种类型^[30]:珊瑚树的 Cd 富集系数大于 1,属于 Cd 富集型植物,与谭立敏等^[31]在矿区调查的珊瑚树属于富集型植物结果一致;圆柏、夹竹桃和海栀子的 Cd 富集系数在 0.17~0.66 之间,可作为 Cd 规避型植物^[32];侧柏、四季桂、红花檵木、金边黄杨和金叶女贞吸收的 Cd 大部分囤积于根部,其转运系数为 0.1~0.66,只有少量转移到地

表 5 不同 Cd 处理下 Cd 在景观植物体内的含量和分布

Table 5 Content and distribution of Cd in ornamental plants under different Cd treatments

植物 Plant	处理 Treatment	Cd 含量 Cd content/mg·kg ⁻¹			富集系数 BC	转运系数 TF
		根 Root	茎 Stem	叶 Leaf		
香樟	CK	4.28±0.30a	2.62±0.66b	2.37±0.39a	0.95±0.06a	0.60±0.05b
	T ₁	5.15±2.54a	4.77±1.56b	2.89±0.41a	0.45±0.16b	0.81±0.18b
	T ₂	6.42±0.40a	12.50±7.28a	10.71±4.01b	0.39±0.08b	1.83±0.50a
圆柏	CK	3.12±0.10c	2.40±0.06a	1.69±0.38a	0.60±0.05a	0.61±0.07a
	T ₁	10.14±4.15b	4.33±0.75a	2.24±0.66a	0.41±0.12b	0.29±0.09a
	T ₂	29.38±4.30a	7.72±1.96a	2.79±0.36a	0.26±0.02c	0.16±0.07a
侧柏	CK	5.18±2.30b	1.67±0.21c	1.67±0.30c	0.66±0.14a	0.37±0.15a
	T ₁	14.70±7.32b	3.01±0.33b	2.60±0.72b	0.56±0.20a	0.21±0.10ab
	T ₂	44.21±15.65a	3.98±0.47a	3.95±0.45a	0.45±0.09a	0.10±0.03b
夹竹桃	CK	2.23±0.24b	1.88±0.67b	1.22±0.36a	0.50±0.12a	0.71±0.24a
	T ₁	2.86±0.80b	2.20±0.11b	1.51±0.73a	0.22±0.05b	0.64±0.17a
	T ₂	12.35±1.21a	3.66±1.30a	1.77±0.36a	0.17±0.02b	0.20±0.01b
珊瑚树	CK	3.43±0.16c	6.76±1.30c	7.01±1.53c	1.40±0.23a	2.00±0.40a
	T ₁	11.27±2.15b	12.33±1.31b	15.47±6.26b	1.34±0.25ab	1.27±0.24b
	T ₂	25.60±5.05a	25.61±0.34a	25.66±1.49a	1.03±0.12b	1.03±0.21b
四季桂	CK	4.05±0.615b	2.27±0.77c	2.83±0.34b	0.77±0.12a	0.66±0.22a
	T ₁	6.69±1.14b	4.06±0.41b	2.97±0.22b	0.41±0.03b	0.51±0.10ab
	T ₂	15.76±6.06a	5.86±1.16a	3.69±0.52a	0.28±0.07c	0.31±0.09b
红花檵木	CK	8.37±1.59b	2.03±0.21b	2.15±0.26a	1.04±0.25a	0.25±0.05a
	T ₁	17.29±2.35ab	2.31±0.30b	2.04±0.24a	0.59±0.10b	0.13±0.02ab
	T ₂	20.59±11.25a	2.94±0.14a	3.93±2.63a	0.27±0.07c	0.18±0.10b
金边黄杨	CK	6.90±0.62c	2.45±0.19b	2.59±0.07ab	1.05±0.10a	0.37±0.04a
	T ₁	14.88±4.04b	2.47±0.26b	2.56±0.31b	0.60±0.14b	0.18±0.03b
	T ₂	32.91±6.96a	3.37±0.86a	3.07±0.43a	0.35±0.07c	0.11±0.03c
金叶女贞	CK	5.71±1.35b	1.89±0.29b	7.16±3.81ab	1.11±0.07a	0.50±0.11a
	T ₁	6.23±1.42b	2.28±0.29b	4.54±1.46a	0.37±0.04b	0.46±0.14a
	T ₂	19.09±6.70a	6.17±4.01a	9.67±1.68a	0.45±0.13b	0.44±0.17a
海栀子	CK	2.05±0.82	2.01±0.31	4.23±0.87	0.66±0.11	1.30±0.33
	T ₁	1.65±0.39	2.32±0.31	1.96±0.42	0.21±0.03	1.34±0.22
	T ₂	—	—	—	—	—

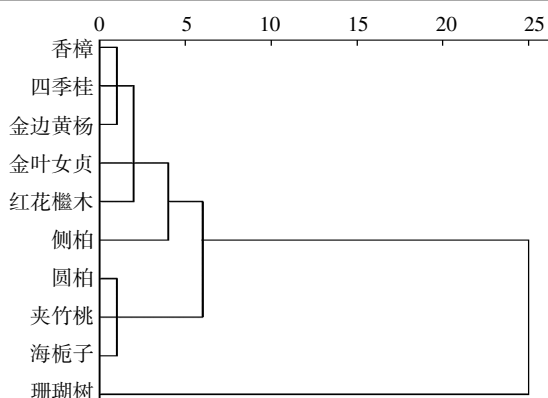


图2 基于景观植物 Cd 富集系数层级聚类分析结果

Figure 2 Hierarchical cluster analysis based on Cd bioaccumulation coefficients of ornamental plants

上部分,尽管香樟转运系数大于 0.6,但 CK 和 T₁ 处理下根部 Cd 含量明显高于茎部和叶片部,故均可作为 Cd 根部囤积型植物,与苏焕珍等^[3]报道魁蒿和柳叶菜对 Cd 的转运系数在 0.34~1.35 之间、归属于根部囤积型植物的报道结果一致。因此,珊瑚树可用于修复 Cd 污染程度较轻的土壤,圆柏和夹竹桃可用于中轻度 Cd 污染土壤的景观美化,红花檵木、金边黄杨、香樟、四季桂、侧柏和金叶女贞可用于 Cd 污染严重土壤中 Cd 的稳定,海栀子可作为土壤中 Cd 污染程度的指示植物。

3 结论

(1)在供试土壤中 Cd 含量范围为 3.6~24.6 mg·kg⁻¹ 时,香樟、圆柏、侧柏、夹竹桃、珊瑚树、四季桂、红花檵木、金边黄杨和金叶女贞等景观植物能够正常生长。侧柏、夹竹桃、珊瑚树、四季桂和金边黄杨叶片中光合色素含量,香樟、侧柏、珊瑚树、四季桂、红花檵木、金边黄杨和金叶女贞叶片中丙二醛含量受到土壤中 Cd 含量影响不明显。

(2)珊瑚树属于 Cd 富集型植物,适于修复 Cd 轻度污染土壤;圆柏和夹竹桃属于 Cd 规避型植物,可用于修复中轻度 Cd 污染土壤;红花檵木、金边黄杨、香樟、四季桂、侧柏和金叶女贞属于 Cd 根囤积型植物,可用于 Cd 重度污染土壤中 Cd 的稳定。

参考文献:

- [1] 高彦鑫,冯金国,唐 磊,等.密云水库上游金属矿区土壤中重金属形态分布及风险评价[J]. 环境科学, 2012, 33(5):1707-1717.
GAO Yan-xin, FENG Jin-guo, TANG Lei, et al. Fraction distribution and risk assessment of heavy metals in iron and gold mine soil of Miyun

- reservoir upstream[J]. *Chinese Journal of Environmental Science*, 2012, 33(5):1707-1717.
- [2] Ha H, Olson J R, Bian L, et al. Analysis of heavy metal sources in soil using kriging interpolation on principal components[J]. *Environmental Science & Technology*, 2014, 48(9):4999-5007.
- [3] 齐雁冰,楚万林,蒲 洁,等.陕北某化工企业周围污灌区土壤-作物系统重金属积累特征及评价[J]. 环境科学, 2015, 36(4):1453-1460.
QI Yan-bing, CHU Wan-lin, PU Jie, et al. Accumulation characteristics and evaluation of heavy metals in soil-crop system affected by wastewater irrigation around a chemical factory in Shenmu county[J]. *Environmental Science*, 2015, 36(4):1453-1460.
- [4] Banat K M, To'Mah F M H M. Chemical fractionation and heavy metal distribution in agricultural soils, North of Jordan Valley[J]. *Soil and Sediment Contamination*, 2007, 16(1):89-107.
- [5] Veltman K, Huijbregts M A J, Hendriks A J. Cadmium bioaccumulation factors for terrestrial species: Application of the mechanistic bioaccumulation model OMEGA to explain field data[J]. *Science of the Total Environment*, 2008, 406(3):413-418.
- [6] Chen Y H, Shen Z G, Li X D. The use of vetiver grass (*Vetiveria zizanioides*) in the phytoremediation of soils contaminated with heavy metals[J]. *Applied Geochemistry*, 2004, 19(10):1553-1565.
- [7] Fayiga A O, Ma L Q, Cao X, et al. Effects of heavy metals on growth and arsenic accumulation in the arsenic hyperaccumulator *Pteris vittata* L.[J]. *Environmental Pollution*, 2004, 132(2):289-296.
- [8] Wójcik M, Skórzyńska-Polit E, Tukiendorf A. Organic acids accumulation and antioxidant enzyme activities in *Thlaspi caerulescens* under Zn and Cd stress[J]. *Plant Growth Regulation*, 2006, 48(2):145-155.
- [9] 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, 30(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 Ecologica Sinica*, 2010, 30(2):324-332.
- [10] 孙约兵,周启星,王 林,等.三叶鬼针草幼苗对镉污染的耐性及其吸收积累特征研究[J]. 环境科学, 2009, 30(10):3028-3035.
SUN Yue-bing, ZHOU Qi-xing, WANG Lin, et al. Characteristics of cadmium tolerance and bioaccumulation of *Bidens pilosa* L. seedlings [J]. *Environmental Science*, 2009, 30(10):3028-3035.
- [11] 仇 硕,张 敏,孙延东,等.植物重金属镉(Cd²⁺)吸收、运输、积累及耐性机理研究进展[J]. 西北植物学报, 2006, 26(12):2615-2622.
QIU Shuo, ZHANG Min, SUN Yan-dong, et al. Research advances in the mechanisms of Cd²⁺ uptake, transport, accumulation and tolerance in plants[J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2006, 26(12):2615-2622.
- [12] 胡鹏杰,周小勇,仇荣亮,等. Zn 超富集植物长柔毛委陵菜对 Cd 的耐性与富集特征[J]. 农业环境科学学报, 2007, 26(6):2221-2224.
HU Peng-jie, ZHOU Xiao-yong, QIU Rong-liang, et al. Cadmium tolerance and accumulation features of Zn-hyperaccumulator *Potentilla giffithii* var. *velutina*[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2007, 26(6):2221-2224.
- [13] Liu J N, Zhou Q X, Sun T, et al. Identification and chemical enhance-

- ment of two ornamental plants for phytoremediation[J]. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 2008, 80(3):260-265.
- [14] 曹 霞, 郭朝晖, 肖细元, 等. 海桐(*Pittosporum tobira*)对污染土壤中镉的耐受和吸收特征[J]. 农业环境科学学报, 2015, 34(4):627-632.
- CAO Xia, GUO Zhao-hui, XIAO Xi-yuan, et al. Cadmium tolerance and uptake characteristics in *Pittosporum tobira* in contaminated soil[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2015, 34(4):627-632.
- [15] 方 晰, 田大伦, 陈骏超, 等. 重金属元素在樟树人工林中的累积与迁移[J]. 安全与环境学报, 2006, 6(1):64-68.
- FANG Xi, TIAN Da-lun, CHEN Jun-chao, et al. Accumulation and transportation of heavy metal elements in *Cinnamomum camphora* plantation[J]. *Journal of Safety and Environment*, 2006, 6(1):64-68.
- [16] 杜 晓, 申晓辉. 镉胁迫对珊瑚树和地中海荚蒾生理生化指标的影响[J]. 生态学杂志, 2010, 29(5):899-904.
- DU Xiao, SHEN Xiao-hui. Effects of cadmium stress on physiological and biochemical indices of *Viburnum odoratissimum* and *V. tinus* seedlings[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2010, 29(5):899-904.
- [17] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 1999:150-194.
- LU Ru-kun. Soil and agricultural chemistry analysis[M]. Beijing: China Agriculture S&T Press, 1999:150-194.
- [18] Mobin M, Khan N A. Photosynthetic activity, pigment composition and antioxidative response of two mustard(*Brassicajuncea*) cultivars differing in photosynthetic capacity subjected to cadmium stress[J]. *Journal of Plant Physiology*, 2007, 164(5):601-610.
- [19] 张志良, 胡伟菁. 植物生理学实验指导[M]. 北京: 高等教育出版社, 2004:274-277.
- ZHANG Zhi-liang, HU Wei-jing. Laboratory guide of plant physiology [M]. Beijing: Higher Education Press, 2004:274-277.
- [20] Sun Y B, Zhou Q X, Diao C Y. Effects of cadmium and arsenic on growth and metal accumulation of Cd-hyperaccumulator *Solanum nigrum* L.[J]. *Bioresource Technology*, 2008, 99(5):1103-1110.
- [21] Tanhan P, Kruatrachue M, Pokethitiyook P, et al. Uptake and accumulation of cadmium, lead and zinc by Siam weed [*Chromolaena odorata* (L.). King & Robinson][J]. *Chemosphere*, 2007, 68(2):323-329.
- [22] Baker A J M, Reeves R D, Hajar A S M. Heavy metal accumulation and tolerance in British populations of the metallophyte *Thlaspi caerulescens* J. & C. Presl (Brassicaceae)[J]. *New Phytologist*, 1994, 127(1):61-68.
- [23] 杜天庆, 杨锦忠, 郝建平, 等. Cd、Pb、Cr 三元胁迫对小麦幼苗生理生化特性的影响[J]. 生态学报, 2009, 29(8):4475-4482.
- DU Tian-qing, YANG Jin-zhong, HAO Jian-ping, et al. Influences of multiple stress by Cd, Pb and Cr on physiological-biochemical characters of wheat seedlings[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2009, 29(8):4475-4482.
- [24] 柯世省, 张崇邦, 王 江. 不同光强下镉胁迫对紫茉莉光合作用和抗氧化系统的影响[J]. 环境科学学报, 2009, 29(6):1302-1310.
- KE Shi-sheng, ZHANG Chong-bang, WANG Jiang. Effects of cadmium stress on photosynthesis and antioxidant systems in *Mirabilis jalapa* under different light intensities[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2009, 29(6):1302-1310.
- [25] 燕傲蕾, 吴亭亭, 王友保, 等. 三种观赏植物对重金属镉的耐性与积累特性[J]. 生态学报, 2010, 30(9):2491-2498.
- YAN Ao-lei, WU Ting-ting, WANG You-bao, et al. The characteristics of cadmium tolerance and accumulation in three kinds of ornamental plants[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, 30(9):2491-2498.
- [26] 刘周莉, 何兴元, 陈 玮. 镉胁迫对金银花生理生态特征的影响[J]. 应用生态学报, 2009, 20(1):40-44.
- LIU Zhou-li, HE Xing-yuan, CHEN Wei. Effects of cadmium stress on the growth and physiological characteristics of *Lonicera japonica* [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2009, 20(1):40-44.
- [27] Xu P, Zou J, Meng Q M, et al. Effects of Cd²⁺ on seedling growth of garlic (*Allium sativum* L.) and selected physiological and biochemical characters[J]. *Bioresource Technology*, 2008, 99(14):6372-6378.
- [28] 焦铁男, 朱 宏. 黑藻(*Hydrilla verticillata*)对重金属 Cd²⁺的积累及生理响应[J]. 中国农学通报, 2014, 30(5):249-253.
- JIAO Yi-nan, ZHU Hong. Physiological responses of *Hydrilla verticillata* to cadmium and cadmium bioaccumulation[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2014, 30(5):249-253.
- [29] 肖细元, 杨 森, 郭朝晖, 等. 改良剂对污染土壤上蔬菜生长及吸收重金属的影响[J]. 环境科学与技术, 2012, 35(8):41-46.
- XIAO Xi-yuan, YANG Miao, GUO Zhao-hui, et al. Effect of amendments on vegetable growth and uptake of heavy metals from contaminated soils[J]. *Environmental Science & Technology*, 2012, 35(8):41-46.
- [30] 雷 梅, 岳庆玲, 陈同斌, 等. 湖南柿竹园矿区土壤重金属含量及植物吸收特征[J]. 生态学报, 2005, 25(5):1146-1151.
- LEI Mei, YUE Qing-ling, CHEN Tong-bin, et al. Heavy metal concentrations in soils and plants around Shizhuyuan mining area of Hunan Province[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25(5):1146-1151.
- [31] 谭立敏, 李科林, 李 顺. 株洲霞湾港域乡土植物及其根际土壤重金属蓄积特性[J]. 水土保持学报, 2013, 27(4):161-165.
- TANG Li-min, LI Ke-lin, LI Shun. Accumulation characteristics of heavy metals in native plants and rhizospheresoil at harbor area in Zhuzhou[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2013, 27(4):161-165.
- [32] 周耀瑜, 杨胜香, 袁志忠, 等. 湘西铅锌矿区重金属污染评价及优势植物重金属累积特征[J]. 地球与环境, 2012, 40(3):361-366.
- ZHOU Yao-yu, YANG Sheng-xiang, YUAN Zhi-zhong, et al. Assessment of heavy metal pollution in mine soil and bioaccumulation characteristics of dominant plants in a lead-zinc mineland, west Hunan[J]. *Earth and Environment*, 2012, 40(3):361-366.
- [33] 苏焕珍, 刘文胜, 郑 丽, 等. 兰坪铅锌矿区不同污染梯度下优势植物的重金属累积特征[J]. 环境工程学报, 2014, 8(11):5027-5034.
- SU Huan-zhen, LIU Wen-sheng, ZHENG Li, et al. Accumulation characteristics of heavy metals in dominant plant species growing on Lanping lead/zinc mining wasteland with different pollution gradients [J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2014, 8(11):5027-5034.