

余浩, 王幽静, 宋睿, 等. 不同品种烟草对Cd的富集及根际有机酸的分泌特征[J]. 农业环境科学学报, 2018, 37(9): 1827–1832.

YU Hao, WANG You-jing, SONG Rui, et al. Bioaccumulation of Cd in different varieties of tobacco and their rhizosphere organic acid secretion characteristics[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2018, 37(9): 1827–1832.

不同品种烟草对Cd的富集及根际有机酸的分泌特征

余浩¹, 王幽静², 宋睿³, 潘彦硕², 王长青⁴, 刘炳杉⁴, 李本银⁵, 李烜桢^{1*}

(1. 河南农业大学林学院, 郑州 450002; 2. 河南农业大学生命科学学院, 郑州 450002; 3. 华南农业大学材料与能源学院, 广州 510642; 4. 河南农业大学现代实验技术管理中心, 郑州 450002; 5. 河南农业科学院植物营养与资源环境研究所, 郑州 450002)

摘要:为探索用烟草修复Cd污染土壤的可行性, 采用盆栽试验, 以7种常见的烟草品种(云烟87、中烟100、粤烟96、长脖黄、K326、8326和NC628)为供试植物, 研究了烟草对Cd的富集能力及根际有机酸的分泌特征。结果表明: Cd胁迫下, “长脖黄”根、茎、叶生物量均最高; “云烟87”叶Cd含量最高, 为 $64.67 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, “长脖黄”茎Cd含量最高, 为 $27.1 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, “8326”根Cd含量最高, 为 $23.75 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$; 从Cd贮存部位看, 不同烟草品种均为叶>茎>根; 从去除率看, “长脖黄”对Cd的去除率最高, 达3.48%。通过高效液相色谱法分析根际土壤有机酸含量发现, Cd胁迫下7种烟草主要分泌草酸。因此, 烟草有望被用于土壤重金属污染的实际修复, 其中“长脖黄”最具优势。

关键词: 土壤污染; Cd积累; 烟草; 有机酸

中图分类号: X53 文献标志码: A 文章编号: 1672-2043(2018)09-1827-06 doi:10.11654/jaes.2018-0178

Bioaccumulation of Cd in different varieties of tobacco and their rhizosphere organic acid secretion characteristics

YU Hao¹, WANG You-jing², SONG Rui³, PAN Yan-shuo², WANG Chang-qing⁴, LIU Bing-shan⁴, LI Ben-yin⁵, LI Xuan-zhen^{1*}

(1. College of Forestry, Henan Agricultural University, Zhengzhou 450002, China; 2. College of Life Sciences, Henan Agricultural University, Zhengzhou 450002, China; 3. College of Materials and Energy, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China; 4. Modern Experimental Technology Center, Henan Agricultural University, Zhengzhou 450002, China; 5. Institute of Plant Nutrient and Environmental Resources, Henan Academy of Agricultural Sciences, Zhengzhou, 450002, China)

Abstract: In order to determine the feasibility of remediation of Cd-contaminated soil by tobacco, pot experiments were conducted in this study. Seven common tobacco varieties (Yunyan 87, Zhongyan 100, Yueyan 96, Changbohuang, K326, 8326, and NC628) were employed, and the ability of tobacco to bioaccumulate Cd and the secretion characteristics of organic acids in the rhizosphere were analyzed. The results showed that the biomasses of "Changbohuang" root, stem, and leaf were the highest under Cd stress. The Cd concentrations in "Yunyan 87" leaves, "Changbohuang" stems, and "8326" roots were the highest, reaching $64.67 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, $27.1 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, and $23.75 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, respectively. Regarding the Cd concentration in different organs, it was highest in leaves, followed by stems and roots. The highest removal rate of Cd, i.e., 3.48%, was observed in "Changbohuang". The organic acids in rhizosphere soils were analyzed using HPLC, and the results showed that oxalic acid was secreted by all the tobacco varieties. This study indicated that tobacco is potential for using in the remediation of heavy-metal-polluted soil, with "Changbohuang" the most promising variety for such.

Keywords: soil pollution; Cd accumulation; tobacco; organic acids

收稿日期: 2018-02-01 录用日期: 2018-05-17

作者简介: 余浩(1992—), 男, 河南信阳人, 硕士研究生, 从事土壤污染修复研究。E-mail: yh00512@163.com

*通信作者: 李烜桢 E-mail: xzli2015@sina.com

基金项目: 国家自然科学基金项目(41401350); 河南省科技攻关项目(152102310021); 河南省高等学校重点科研项目(17A610001); 国家重点研发计划项目(2018YFD0800304)

Project supported: The National Natural Science Foundation of China (41401350); The Key Science and Technology Program of Henan Province, China (152102310021); Key Research Project of the Henan Higher Education Institutions of China (17A610001); National Key R&D Program of China (2018YFD0800304)

随着社会不断发展,土壤污染问题越来越严重,其中土壤重金属污染问题尤其突出。据统计,我国受重金属污染的耕地占总耕地面积的五分之一,其中Cd污染最为严重^[1]。土壤受Cd污染后,会通过生物富集作用进入人体,危害人体健康。目前土壤重金属污染修复方法主要有物理、化学和生物方法等,但物理和化学方法修复成本高,并且会在一定程度上破坏土壤结构,容易造成二次污染,因此不适用于农田污染治理^[2-3]。植物修复技术因具有成本低、环境友好等优势而被广泛应用于农田土壤重金属污染的修复^[4]。

目前发现的Cd超积累植物,如有翅星蕨(*Microsorium pteropus*)、遏蓝菜(*Thlaspi caerulescens*)等,多因生长缓慢、生物量低、栽培困难等较难应用于实际^[5-6]。烟草是世界上较广泛种植的一种作物,其生物量大,并且对重金属有较强的吸收和积累能力,因此烟草可能被用于土壤重金属污染的修复^[7]。张艳玲等^[8]研究了497份烤烟样品的重金属含量发现,烟草中Cd含量远高于其他重金属,叶片平均Cd含量为 $2.95 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,最高可达 $19.35 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。烟草对Cd的吸收积累能力品种间差异明显,刘登璐等^[9]对93个烟草品种的Cd耐受性进行评价,发现了“达白一号”、“长脖黄”等多个对Cd具有高积累特性的品种。目前关于烟草富集重金属的研究不多,且大都集中在筛选Cd的低积累品种用于烟草栽培,而很少有人从环境角度考虑将烟草用于土壤重金属污染的修复。

本研究以来源广泛的7个烟草品种为供试材料,采用盆栽实验方法,研究了Cd胁迫下不同品种烟草的生长状况,探索了Cd在烟草不同器官的分布规律,初步筛选了对Cd富集能力强的品种,还研究了Cd胁迫下烟草根际有机酸的分泌特征,以期Cd污染土壤的现实修复提供依据。

1 材料与方法

1.1 实验材料

烟草品种为中烟100、粤烟96、NC628、K326、长脖黄、云烟87和8326,均由河南农业大学科教园区提供。供试土壤采自河南农业大学校园,土壤类型为褐土,采样深度为0~20 cm,将土壤风干后,去除动植物残渣、碎石,过2 mm筛,备用。

土壤pH采用水浸提,微机型酸度计(杭州齐威仪器有限公司)测定(水:土=2.5:1);有机质采用重铬酸钾容量法检测;速效磷采用 NaHCO_3 溶液浸提,钼锑抗

比色法检测;速效钾采用醋酸铵浸提,火焰光度计(上海傲谱)检测;碱解氮采用碱解扩散法检测;全Cd采用微波消解(美国CEM),原子吸收分光光度计检测(日本日立公司Z-2000)。所用试剂均为优级纯,供试土壤基本性质见表1。

表1 供试土壤的基本性质

Table 1 Basic properties of the experimental soil

pH值	Cd/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	有机质/ $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$	碱解氮/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	速效磷/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	速效钾/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$
7.5	0.023	12.56	37.58	16.76	67.59

1.2 实验处理

实验于河南农业大学气候室进行,向土壤(过2 mm筛)中添加 CdCl_2 粉末(无结晶水),采用“二分法”混土,将652 mg CdCl_2 粉末混于40 kg土中(理想条件下混合后Cd含量接近 $10 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$);先将163 mg CdCl_2 粉末和200 g土小范围均匀混合,再加入163 mg CdCl_2 和200 g土继续均匀混合,连续添加将652 mg CdCl_2 混于1 kg土中;再按照上述方法将含有Cd的1 kg土与39 kg土混合。平衡一周后,5点取样法取样,测定Cd含量为 $9.4 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,分装。每个烟草品种均设5个重复,以不种烟草作为对照。基肥(烟草专用肥不含Cd)与土壤均匀混合后装入塑料盆钵中,选择生长状况均匀一致的烟苗(四叶一心)移栽,每盆1.0 kg土定植一株。每天光照10 h,温度28℃;夜晚14 h,温度18℃;湿度为70%。

1.3 样品采集与测定

烟株移栽30 d后采集样品,先用抖土法^[10]去掉非根际土,然后用毛刷将附着在根系周围的土壤轻轻刷下来作为根际土,保存至-20℃冰箱备用。随后将去土后的烟株用蒸馏水润洗,再用去离子水反复冲洗干净,用不锈钢剪刀将根、茎、叶分开,于105℃下杀青30 min,65℃烘干至恒质量并称量,经微波消解^[11]后,赶酸,转移并定容至25 mL,用乙炔-火焰原子吸收光谱法测定烟草中Cd含量。

有机酸测定:测定根际土壤中原草酸、苹果酸、柠檬酸、甲酸和乙酸的含量,有机酸均为色谱纯。称取根际土壤样品5 g于25 mL离心管中,加10 mL 0.1%的 H_3PO_4 水溶液,振荡3 min后,在 $5000 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 转速下,离心5 min。过水相0.45 μm 滤膜,用高效液相色谱仪(美国Agilent公司)检测。色谱条件:流动相为 $0.01 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 磷酸缓冲液(pH=2.7);进样量为20 μL ;流速 $0.5 \text{ mL} \cdot \text{min}^{-1}$;柱温30℃;检测波长210 nm^[10]。

根富集系数=烟草根Cd含量/土壤Cd含量

茎富集系数=烟草茎Cd含量/土壤Cd含量

叶富集系数=烟草叶Cd含量/土壤Cd含量

去除率=(根Cd含量×根生物量+茎Cd含量×茎生物量+叶Cd含量×叶生物量)/(土壤Cd含量×土壤质量)×100%

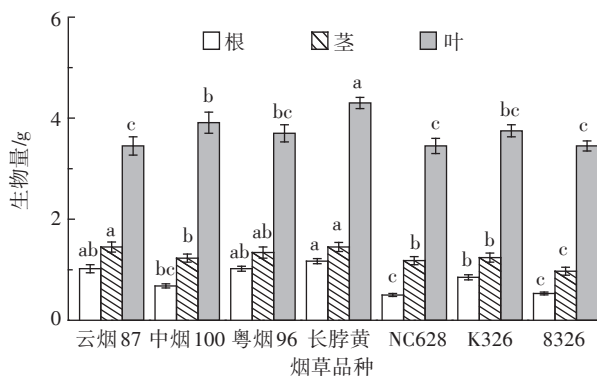
1.4 数据分析

试验结果用Excel 2016处理,SPSS17.0显著性分析,Origin 9.0作图。

2 结果与分析

2.1 不同品种烟草生物量的差异

本研究通过盆栽实验比较了Cd胁迫下不同品种烟草生物量(干质量)的差异(图1),在土壤Cd含量为 $9.4 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 条件下,不同品种烟草生物量呈现叶>茎>根的趋势。“长脖黄”根、茎和叶的生物量均最大,分别为1.17、1.45 g和4.3 g,“长脖黄”叶的生物量与其他品种间差异达显著水平($P<0.05$)。



不同字母表示处理间差异显著($P<0.05$, $n=3$)。下同

The different letters indicated significant difference among different treatments ($P<0.05$, $n=3$). The same below

图1 不同品种烟草生物量

Figure 1 Tobacco biomass of different varieties

2.2 不同品种烟草根、茎和叶Cd含量

通过检测烟草根、茎和叶中的Cd含量发现(图2),“云烟87”叶Cd含量最高,达 $64.67 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,其次为“8326”和“长脖黄”;“长脖黄”茎Cd含量最高,达 $27.1 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,其次为“中烟100”和“云烟87”;“8326”根Cd含量最高,达 $23.75 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,其次为“粤烟96”和“NC628”。不同器官的Cd含量均呈叶>茎>根的趋势,例如“长脖黄”根、茎、叶Cd含量分别为14.3、27.1、 $63.02 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。烟草叶片中Cd含量远高于根和茎,这种现象说明烟草生长期间对Cd有较强的转移能力。

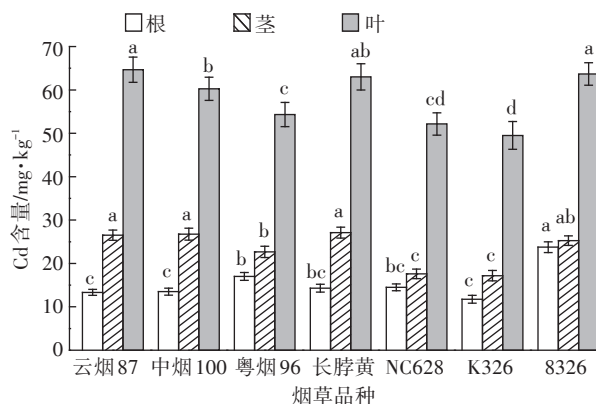


图2 不同品种烟草根、茎和叶Cd含量

Figure 2 Cd concentration in roots, stems and leaves of different varieties of tobacco

2.3 不同品种烟草对Cd的富集系数

图3显示“云烟87”叶对Cd的富集系数最高达6.88,其次为“8326”(6.77)和“长脖黄”(6.7);“长脖黄”茎对Cd的富集系数最高达2.88,其次为“中烟100”(2.84)和“云烟87”(2.82);“8326”根富集系数最高达2.53,其次是“粤烟96”(1.81)和“NC628”(1.54)。烟草不同器官富集系数均呈现叶>茎>根。Baker^[12]认为,超累积植物富集系数远大于1,而排斥型作物富集系数通常小于1。以此标准判断,在 $9.4 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 条件下,烟草不同器官对Cd的富集系数均大于1,其中烟草品种“云烟87”叶对Cd的富集系数达到6.88,说明烟草对Cd有比较强的富集能力,有望用于实际土壤Cd污染修复中。

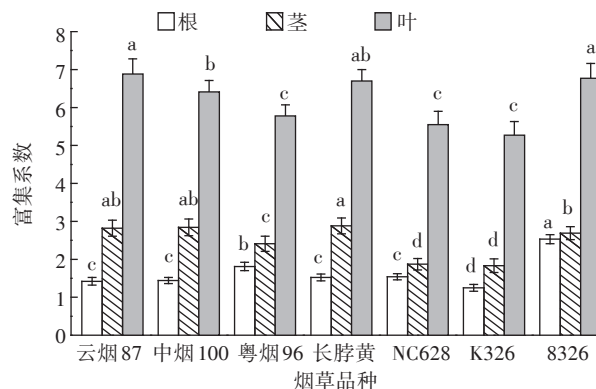


图3 不同品种烟草对Cd的富集系数

Figure 3 Enrichment coefficient of different varieties of tobacco to Cd

2.4 不同品种烟草对Cd的去除率

修复植物对土壤中重金属的去除率是评价植物修复能力的最终指标。本研究发现“长脖黄”对Cd的去除率最高为3.48%，“NC628”对Cd的去除率最低为

2.21%,两者相差36.5%,差异达显著水平($P<0.05$) (图4)。杨勇等^[6]通过盆栽实验比较超富集植物印度芥菜、遏蓝菜和高生物量植物烟草对土壤中Cd的去除率,发现在1.0 kg土中生长60 d后,烟草对Cd的去除率远高于遏蓝菜和印度芥菜。

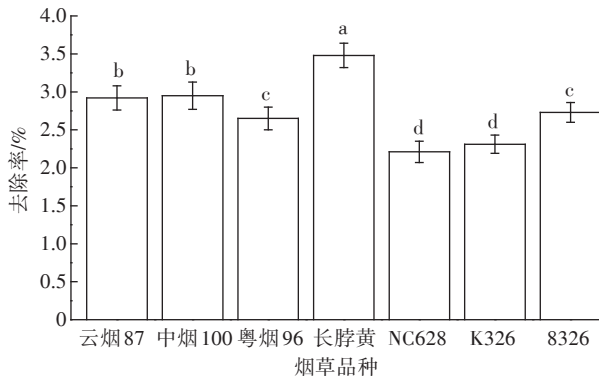


图4 不同品种烟草对Cd的去除率

Figure 4 Cd removal rate of different varieties of tobacco

2.5 Cd胁迫下不同品种烟草根系分泌的有机酸

本文研究了不同品种烟草根际土壤5种有机酸含量,发现不同品种烟草根际土壤中均检测到了草酸;除粤烟96外,其他烟草品种根际土壤均检测到了乙酸,“中烟100”和“粤烟96”根际土壤中检测出少量苹果酸;“粤烟96”和“8326”根际土壤中检测出少量甲酸;在对照土壤中检测出少量的草酸、苹果酸和乙酸(表2)。不同品种烟草根际土壤中检测出草酸的含量均远高于其他酸,其中“长脖黄”分泌的草酸含量最高达 $16.23 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,“NC628”最低为 $10.2 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,差异达到显著水平($P<0.05$);“NC628”乙酸含量最高为 $0.31 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,“云烟87”乙酸含量最低为 $0.2 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,差异达到显著水平($P<0.05$)(表2)。

3 讨论

有学者^[13]研究了多种高生物量植物对重金属的

富集能力,发现用于植物修复技术的植物种类不一定局限于超富集植物,寻找与开发大生物量、富集重金属能力强的修复植物是首要任务。从图1看出烟草品种“长脖黄”生物量比其他品种大,且生长过程中未出现明显毒害现象。本研究为室内控制实验,烟草的生长期为30 d,因此生物量比大田生长的小。在大田生长条件下,“长脖黄”属于高产品种,据报道其仅烟叶产量(干质量)可达 $3000 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,因此具备了进行土壤重金属污染修复的先决条件^[14-15]。

本试验研究表明(图2)不同品种烟草对Cd均有较强的富集能力,并且叶片为烟草储存Cd的主要场所,这与其他研究结果类似,例如袁祖丽^[16]通过盆栽试验发现,当土壤中Cd的添加量达到 $10 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 左右时,烟草叶片Cd含量高于根;贺元等^[17]通过盆栽实验发现Cd含量在 $4.8 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 下烟草叶片中的Cd含量($110 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)显著高于茎($25 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)和根($12 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)。其他植物类似,如朱艳霞^[18]发现,Cd胁迫下东南景天不同部位Cd含量为叶($180 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)>茎($100 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)>根($80 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)。有研究表明植物叶片的叶肉细胞在植物对Cd的解毒过程中起主要作用,这是因为Cd主要区隔在液泡和细胞壁等代谢不活跃的部位。在叶肉细胞中有大型液泡,液泡中富含蛋白质、有机酸和巯基化合物等都能与重金属结合降低重金属毒性;细胞壁中如木质素和各类蛋白等也能与重金属结合,因此烟草叶片的Cd含量高于根和茎^[19-21]。

富集系数是衡量植物对重金属积累能力的一种重要参考标准,富集系数越大,说明植物对重金属的吸收能力越强^[22]。从图3发现不同品种烟草均对Cd有较强的吸收能力。从烟草与超富集植物对Cd的去除率比较发现,将高生物量、高富集能力的烟草品种“长脖黄”用于土壤Cd污染修复是可行的。

根系分泌的有机酸可能是影响植物吸收重金属

表2 Cd胁迫下不同品种烟草根系对有机酸的分泌($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)

Table 2 Secretion of organic acids from different tobacco roots under Cd stress($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)

有机酸	云烟87	中烟100	粤烟96	长脖黄	NC628	K326	8326	CK
草酸	15.57a	12.44b	13.05b	16.23a	10.2c	12.36b	14.08ab	0.44d
苹果酸	—	0.17a	0.13a	—	—	—	—	0.05b
柠檬酸	—	—	—	—	—	—	—	—
甲酸	—	—	0.25a	—	—	—	0.16b	—
乙酸	0.20b	0.26ab	—	0.28ab	0.31a	0.21b	0.30a	0.02c

注:同行不同字母表示处理间的差异性($P<0.05, n=3$);“—”表示未测出。

Note: The different letters between the same column represent the difference of treatments($P<0.05, n=3$); “—” means that it is not detected.

的重要因素^[23]。本研究发现,烟草品种“长脖黄”对Cd的去除率最高,同样根际土壤草酸含量也最高,“NC628”去除率最低,根际土壤草酸含量也最低,因此可以推测,在Cd胁迫下烟草根系分泌较多的低分子量有机酸尤其是草酸可能是烟草对Cd具有较高富集能力的原因之一,这可能与有机酸的解离程度有关。草酸的解离常数高,更容易解离和释放H⁺,一方面降低了土壤pH,增加Cd的有效性;另一方面与土壤中的Cd螯合,促进了土壤中重金属的释放和烟草对重金属的吸收^[24-26]。

4 结论

(1)在Cd胁迫下,7种供试烟草品种中“长脖黄”对Cd的去除率最高,因此,该品种有望成为一种新的Cd污染土壤的修复植物。

(2)不同烟草品种均分泌了草酸,其次为乙酸。在Cd胁迫下烟草根系分泌较多的低分子量有机酸尤其是草酸可能是烟草对Cd具有较高富集能力的原因之一。

参考文献:

- [1] 王玉军,刘存,周东美,等.客观地看待我国耕地土壤环境质量的现状:关于《全国土壤污染状况调查公报》中有关问题的讨论和建议[J].农业环境科学学报,2014,33(8):1465-1473.
WANG Yu-jun, LIU Cun, ZHOU Dong-mei, et al. A critical view on the status quo of the farmland soil environmental quality in China: Discussion and suggestion of relevant issues on report on the national general survey of soil contamination[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2014, 33(8): 1465-1473.
- [2] Boominathan R, Doran P M. Organic acid complexation, heavy metal distribution and the effect of ATPase inhibition in hairy roots of hyperaccumulator plant species[J]. *Journal of Biotechnology*, 2003, 101(2): 131-146.
- [3] 代允超,吕家珑,刁展,等.改良剂对不同性质镉污染土壤中有效镉和小白菜镉吸收的影响[J].农业环境科学学报,2015,34(1): 80-86.
DAI Yun-chao, LÜ Jia-long, DIAO Zhan, et al. Effects of soil amendments on Cd bioavailability to and uptake by *Brassia chinensis* in different Cd-contaminated soils[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2015, 34(1): 80-86.
- [4] 樊霆,叶文玲,陈海燕,等.农田土壤重金属污染状况及修复技术研究[J].生态环境学报,2013,22(10):1727-1736.
FAN Ting, YE Wen-ling, CHEN Hai-yan, et al. Review on contamination and remediation technology of heavy metal in agricultural soil[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2013, 22(10): 1727-1736.
- [5] 兰心宇,王军军,阎蕴运,等.水生植物有翅星蕨(*Microsorium pteropus*)对镉的超富集能力及抗性生理研究[J].中国科学:生命科学, 2017, 47(10): 1113-1123.
LAN Xin-yu, WANG Jun-jun, YAN Yun-yun, et al. Hyperaccumulation capacity and resistance in Chinese physiology of *Microsorium pteropus*, an aquatic fern to cadmium[J]. *Scientia Sinica Vitae*, 2017, 47(10): 1113-1123.
- [6] 杨勇,王巍,江荣风,等.超累积植物与高生物量植物提取镉效率的比较[J].生态学报,2009,29(5):2732-2737.
YANG Yong, WANG Wei, JIANG Rong-feng, et al. Comparison of phytoextraction efficiency of Cd with the hyperaccumulator *Thlaspi caerulescens* and three high biomass species[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2009, 29(5): 2732-2737.
- [7] 王发园,王玲,王旭刚,等.钝化剂在烟草植物修复铅镉污染土壤中的作用[J].环境工程学报,2014,8(2):789-794.
WANG Fa-yuan, WANG Ling, WANG Xu-gang, et al. Role of immobilization amendments in phytoremediation of Pb-Cd-contaminated soil using tobacco plants[J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2014, 8(2): 789-794.
- [8] 张艳玲,尹启生,周汉平,等.中国烟叶铅、镉、砷的含量及分布特征[J].烟草科技,2006(11):49-52,57.
ZHANG Yan-ling, YIN Qi-sheng, ZHOU Han-ping, et al. Contents and distribution of Pb, Cd and As in Chinese tobacco leaves[J]. *Tobacco Science & Technology*, 2006(11): 49-52, 57.
- [9] 刘登璐,李廷轩,余海英,等.不同烟草材料镉积累差异评价[J].农业环境科学学报,2016,35(11):2067-2076.
LIU Deng-lu, LI Ting-xuan, YU Hai-ying, et al. Evaluation of differential cadmium accumulation ability indifferent tobacco species[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2016, 35(11): 2067-2076.
- [10] 肖靖秀,郑毅,汤利,等.间作小麦蚕豆不同生长期根际有机酸和酚酸变化[J].土壤学报,2016,53(3):685-693.
XIAO Jing-xiu, ZHENG Yi, TANG Li, et al. Changes in organic and phenolic acids in rhizosphere of interplanted wheat and faba bean with growth stage[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2016, 53(3): 685-693.
- [11] 龙加洪,谭菊,吴银菊,等.土壤重金属含量测定不同消解方法比较研究[J].中国环境监测,2013,29(1):123-126.
LONG Jia-hong, TAN Ju, WU Yin-ju, et al. Comparative study on the detection of heavy metal in soil with different digestion methods[J]. *Environmental Monitoring in China*, 2013, 29(1): 123-126.
- [12] Baker A J M. Accumulators and excluders: Strategies in the response of plants to heavy metals[J]. *Journal of Plant Nutrition*, 1981, 3(1/2/3/4): 643-654.
- [13] 周振民,朱彦云.土壤重金属污染大生物量植物修复技术研究进展[J].灌溉排水学报,2009,28(6):26-29.
ZHOU Zhen-min, ZHU Yan-yun. Progress in the research of soil heavy metal pollution in biomass plant restoration[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2009, 28(6): 26-29.
- [14] 河南省农科院烟草研究所.长脖黄2248[J].中国烟草,1981(1): 38.
Institute of Tobacco Research of Henan Academy of Agricultural Sciences. Changbohuang 2248[J]. *Acta Tabacaria Sinica*, 1981(1): 38.
- [15] 周金仙.不同生态条件下烟草品种产量与品质的变化[J].烟草科技,2005(9):32-35.

- ZHOU Jin-xian. Yield and quality changes of tobacco varieties in different ecological zones[J]. *Tobacco Science & Technology*, 2005 (9): 32-35.
- [16] 袁祖丽. Cd、Pb 污染对烤烟生理特性及生长发育的影响[D]. 郑州:河南农业大学, 2006.
- YUAN Zu-li. Effects of Cd and Pb pollution on physiological character, growth and development of flue-cured tobacco[D]. Zhengzhou: Henan Agricultural University, 2006.
- [17] 贺 远, 刘海伟, 石 屹, 等. 镉在烟草中的积累分配及其对烟草生长的影响[J]. *中国烟草科学*, 2015, 36(2):99-104.
- HE Yuan, LIU Hai-wei, SHI Yi, et al. Effects of cadmium on the growth of tobacco and the characteristics of cadmium accumulation by tobacco[J]. *Chinese Tobacco Science*, 2015, 36(2):99-104.
- [18] 朱艳霞. 东南景天(*Sedum alfredii* Hance)对镉的超积累与有机酸含量变化的关系[D]. 杭州:浙江大学, 2006.
- ZHU Yan-xia. The relation of organic acids and Cd accumulation in *Sedum alfredii* Hance[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2006.
- [19] Rascio N, Navariizzo F. Heavy metal hyperaccumulating plants: How and why do they do it and what makes them so interesting?[J]. *Plant Science An International Journal of Experimental Plant Biology*, 2011, 180(2):169-181.
- [20] Foyer C H, Noctor G. Oxidant and antioxidant signalling in plants: A re-evaluation of the concept of oxidative stress in a physiological context[J]. *Plant Cell and Environment*, 2005, 28:1056-1071.
- [21] 卢玲丽. 超积累植物东南景天(*Sedum alfredii* Hance)对镉的吸收及转运机制研究[D]. 杭州:浙江大学, 2009.
- LU Ling-li. Cadmium uptake and translocation in the hyperaccumulator *Sedum alfredii* Hance[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2009.
- [22] 严明理, 刘丽莉, 王海华, 等. 3 种植物对红壤中镉的富集特性研究[J]. *农业环境科学学报*, 2009, 28(1):72-77.
- YAN Ming-li, LIU Li-li, WANG Hai-hua, et al. Accumulation characteristics of cadmium for three plants in red soil[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2009, 28(1):72-77.
- [23] 赖彩秀, 潘伟斌, 张太平, 等. 苹果酸和草酸对两种植物吸收土壤中 Cd、Zn 的影响[J]. *生态科学*, 2016, 35(4):31-37.
- LAI Cai-xiu, PAN Wei-bin, ZHANG Tai-ping, et al. Effects of malic acid and oxalic acid application on the uptake of Cd and Zn by two plants[J]. *Ecological Science*, 2016, 35(4):31-37.
- [24] 包 姣, 韦惠琴, 赵秀兰, 等. 低分子量有机酸强化烟草修复镉污染土壤的适用性研究[J]. *水土保持学报*, 2012, 26(2):265-270.
- BAO Jiao, WEI Hui-qin, ZHAO Xiu-lan, et al. Feasibility of low molecular weight organic acids in enhancing phytoextraction of cadmium from soils with tobacco (*Nicotiana tabacum* L.)[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2012, 26(2):265-270.
- [25] Qin F, Shan X Q, Wei B. Effects of low-molecular-weight organic acids and residence time on desorption of Cu, Cd, and Pb from soils[J]. *Chemosphere*, 2004, 57(4):253-263.
- [26] Chiang P N, Wang M K, Chiu C Y, et al. Effects of cadmium amendments on low-molecular-weight organic acid exudates in rhizosphere soils of tobacco and sunflower[J]. *Environmental Toxicology*, 2006, 21(5):479-488.