

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 in different tobacco species[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2016, 35(11):2067-2076.

不同烟草材料镉积累差异评价

刘登璐¹, 李廷轩^{1*}, 余海英¹, 张路¹, 王勇²

(1.四川农业大学资源学院, 成都 611130; 2.四川省烟草公司凉山州公司, 四川 西昌 615000)

摘要:为进一步研究烟草镉积累遗传特性和培育烟草镉低积累品种提供材料,以 93 份烟草材料为研究对象,采用水培试验,以耐性指数和镉含量为指标对不同烟草材料镉积累进行评价,获取镉低积累种质资源,并分析其镉积累特征。结果表明:(1)两个镉浓度处理下,供试烟草材料地上部均受到不同程度的抑制,且材料间表现出显著差异,并以耐性指数为聚类分析指标,将材料分为高耐性、中耐性和低耐性 3 类,中高耐性材料生物量及耐性指数显著高于低耐性材料。(2)两个镉浓度处理下,中高耐性烟草材料镉积累能力存在较大差异;以镉含量为聚类分析指标,将中高耐性材料分为低积累、中积累和高积累 3 类;在 $2\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 镉处理下获得低积累材料 12 份,在 $10\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 镉处理下获得 10 份。(3)低积累、中积累和高积累材料地上部生物量和镉积累量均随着镉处理浓度的增加而下降,而其镉含量则表现出相反的变化趋势;烟草镉低积累材料地上部生物量与中高积累材料相比差异不显著,但其镉含量和镉积累量显著低于中高积累材料。该研究中,通过镉积累差异评价获得镉低积累种质资源 7 份,分别为“云烟 85”、“中烟 90”、“翠碧一号”、“CF986”、“RG11”、“91-5⁹⁸”和“9601¹⁶⁸”,这 7 份材料在两个镉处理下均表现出低积累特性,可为培育镉低积累烟草品种提供优良的遗传材料。

关键词:烟草;镉;耐性;积累;差异评价

中图分类号:S572 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2016)11-2067-10 doi:10.11654/jaes.2016-0646

Evaluation of differential cadmium accumulation ability in different tobacco species

LIU Deng-lu¹, LI Ting-xuan^{1*}, YU Hai-ying¹, ZHANG Lu¹, WANG Yong²

(1.College of Resource Sciences, Sichuan Agricultural University, Chengdu 611130, China; 2.Liangshan Branch of Sichuan Tobacco Company, Xichang 615000, China)

Abstract: A hydroponic experiment was conducted to obtain tobacco germplasm resources with lower Cd accumulation characteristics from 93 tobacco species by evaluating Cd tolerance index and accumulation, so as to provide species and information for the further researches on the genetic characteristics and cultivation of tobaccos with lower Cd accumulation characteristics, of which Cd accumulation characteristics were also analyzed. For the different treatments of Cd, the shoots of all tobaccos were inhibited and showed significantly difference among species. According to the cluster analysis, all species were classified as three types of high tolerance, middle tolerance and low tolerance. The biomass and the tolerance index of the high tolerance and middle tolerance species were significantly higher than those of the low tolerance species. There was observed a significant difference in Cd accumulation of middle tolerance and high tolerance species. According to the cluster analysis of Cd content, the medium tolerance and high tolerance species were classified as three types, which were low accumulation, middle accumulation and high accumulation species. 12 and 10 kinds of low accumulation species were obtained at the treatment of $2\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ and $10\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ Cd. The biomass and Cd accumulation of the low accumulation, middle accumulation and high accumulation species decreased with the increasing Cd concentrations, while Cd content in shoots of tobaccos increased with the increasing Cd concentrations.

收稿日期:2016-05-10

基金项目:四川省科技支撑计划项目(2014NZ0008);四川省教育厅项目(14ZB0017)

作者简介:刘登璐(1990—),女,硕士,主要从事土壤污染防治与安全生产研究。E-mail:liudengly@163.com

* 通信作者:李廷轩 E-mail:litinx@263.net

There was not noticed a significant difference in shoot biomass between the low accumulation species and other species, but Cd content and Cd accumulation of the low accumulation species were significant lower than other species. In this study, 7 kinds of tobacco species with lower Cd accumulation characteristics (Yuyan85, “Zhongyan90”, “Cuibiyihao”, “CF986”, “91-5^{8#}” and “9601^{16#}”) were obtained. And these provide excellent genetic materials for the cultivation of tobaccos with lower Cd accumulation characteristics.

Keywords: tobacco; cadmium; tolerance; accumulation; differential evaluation

烟草是世界范围内广泛种植的重要经济作物,其品质的提高和无公害生产一直是烟草行业关注的重点及热点^[1]。植烟土壤重金属污染是烟草安全生产的主要限制因子,烟草植株吸收过多的重金属,其生长发育受到抑制,产量和品质明显降低,且增大烟草烟雾中重金属浓度,引发多种人类疾病,对吸烟人群健康造成威胁^[2-3]。据报道,镉是我国烟叶中的主要重金属元素之一,其含量远高于铅、汞和砷等,且叶片平均镉含量达 $2.53 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,最高可接近 $5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ^[4]。烟草对镉的敏感程度和吸收积累在基因型和品种之间存在明显的差异,且受遗传因素的严格控制^[5-9]。因此,从烟草自身出发,筛选和培育烟草镉低积累种质资源是保障烟叶安全生产的根本途径,也被国内外普遍认为是现实可行的途径。目前,已有不少学者通过筛选所得的镉低积累水稻^[10]、小麦^[11]等粮食作物以及白菜^[12]、花生^[13]和番茄^[14]等经济作物来降低其可食部分的镉含量,进而实现安全生产。Zhang 等^[15]基于 146 份水稻亲本材料镉耐性评价,以镉含量为聚类指标进行筛选,获得 4 份水稻镉安全材料。陈瑛等^[16]通过比较 60 份小白菜地上部镉含量,获得 12 份镉低积累小白菜,其在轻度镉污染土壤上种植安全系数较高。然而,目前对于烟草的筛选主要集中在抗病害^[17]和养分高效基因型烟草种质资源的筛选^[18],而对烟草镉低积累材料的筛选还鲜见报道。因此,本研究以来源较为广泛的 93 份烟草材料为研究对象,通过水培试验,对不同烟草材料进行镉耐性和镉积累差异评价,获取烟草镉低积累种质资源,并分析其镉积累特征,以期为进一步研究烟草镉积累遗传特性和培育烟草镉低积累品种提供材料。

1 材料与方法

1.1 供试材料

由凉山州烟草公司提供的 93 份烟草材料,其中烤烟 70 份(T1~T70)和非烤烟 23 份(T71~T93),主要包括西南烟区的主栽品种及部分国外引进品种,来源较为广泛且材料间存在较大的遗传差异。供试材料编号及名称见表 1。

1.2 试验设计与处理

试验设 $2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ (Cd2)和 $10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ (Cd10)两个镉处理,以不添加镉作为对照,镉以 $\text{CdCl}_2 \cdot 2.5\text{H}_2\text{O}$ (分析纯)施入营养液,每处理重复 3 次,完全随机排列。水培采用 Hoagland 完全营养液^[19]。

烟草种子经浸泡、灭菌、消毒后于 28°C 黑暗条件下催芽,发芽后移入珍珠岩培养基中培养至 6 叶 1 心期,将长势一致的烟苗用去离子水洗净根部附着的珍珠岩后,转移到高密度聚乙烯塑料水槽槽(长×宽×高: $60 \text{ cm} \times 40 \text{ cm} \times 13.5 \text{ cm}$)中,每槽 24 穴,每穴 1 株,用海绵固定烟苗,进行营养液培养,预培养一周后开始添加镉处理,每 5 d 更换一次营养液,用 $0.1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 的 HCl 或 NaOH 调节营养液 pH 至 6.0 左右并补充去离子水,用通气泵进行间歇性通气(通气 2 h 停止 1 h)。试验于 2015 年 5 月在有防雨设施的网室中进行。

1.3 样品采集与制备

于烟草团棵期(处理后 30 d)采样,分为地上部和地下部。将地下部样品置于 $20 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 的 EDTA- Na_2 中浸泡 15 min,然后与地上部样品一并用自来水洗净,再用去离子水润洗,最后用吸水纸擦干。样品置于 105°C 杀青 30 min, 75°C 烘干至恒重,将样品粉碎过筛,用于镉含量的测定。

1.4 测定项目与方法

植株镉含量测定:样品经 $\text{HNO}_3\text{-HClO}_4$ (V/V, 5:1)消化,火焰原子吸收分光光度计测定(Analyst 800, Perkin Elmer, USA)^[15]。

1.5 数据处理与分析

耐性指数=镉处理下生物量/对照生物量^[20]

镉积累量=生物量×镉含量

采用 DPS(11.0)进行统计分析,选择 LSD 法进行多重比较,离差平方和方法进行系统聚类;图表制作采用 Excel(2013)和 Origin(9.0)。

2 结果与分析

2.1 烟草材料镉耐性差异评价

2.1.1 不同烟草材料镉耐性差异

由表 2 可知,两个镉处理下 93 份烟草材料生物

表 1 供试烟草材料编号及名称
Table 1 Codes and names of tobacco species used in the experiment

编号 Code	材料名称 Material name	材料类型 Material type	编号 Code	材料名称 Material name	材料类型 Material type	编号 Code	材料名称 Material name	材料类型 Material type
T01	云烟 85(原种)	烤烟	T32	KRK26	烤烟	T63	ZT99	烤烟
T02	云烟 85	烤烟	T33	MSK326	烤烟	T64	K358	烤烟
T03	云烟 87	烤烟	T34	NC55	烤烟	T65	CV87	烤烟
T04	云烟 97	烤烟	T35	NC71	烤烟	T66	RG8	烤烟
T05	云烟 99	烤烟	T36	NC102	烤烟	T67	RG11	烤烟
T06	云烟 100	烤烟	T37	NCTG55	烤烟	T68	G28	烤烟
T07	云烟 201	烤烟	T38	NC82	烤烟	T69	Coker319	烤烟
T08	云烟 317	烤烟	T39	川烟 1 号	烤烟	T70	CF965	烤烟
T09	MS 云烟 87	烤烟	T40	遵烟 6 号	烤烟	T71	云香斯玛 1 号	香料烟
T10	贵烟 1 号	烤烟	T41	南江三号	烤烟	T72	云香斯玛 3 号	香料烟
T11	贵烟 2 号	烤烟	T42	韭菜坪 2 号	烤烟	T73	达白 1 号	白肋烟
T12	贵烟 5 号	烤烟	T43	秦烟 96	烤烟	T74	达白 2 号	白肋烟
T13	贵烟 4 号	烤烟	T44	毕纳 1 号	烤烟	T75	什烟 1 号	晒烟
T14	中烟 90	烤烟	T45	黔西 1 号	烤烟	T76	MSCA	雪茄烟
T15	中烟 100	烤烟	T46	长脖黄	烤烟	T77	CP/2012	雪茄烟
T16	中烟 101	烤烟	T47	农大 202	烤烟	T78	MNC	雪茄烟
T17	中烟 103	烤烟	T48	净叶黄	烤烟	T79	MF2S	雪茄烟
T18	豫烟 5 号	烤烟	T49	黄杆烟	烤烟	T80	中 99	未知
T19	豫烟 6 号	烤烟	T50	小黄金 0088	烤烟	T81	万良	未知
T20	豫烟 10 号	烤烟	T51	赞比亚烟草	烤烟	T82	西昌大附耳	未知
T21	豫烟 11 号	烤烟	T52	MSLS-6(神八)	烤烟	T83	巴西 8#	未知
T22	红花大金元	烤烟	T53	LS-2	烤烟	T84	MS 云烟 85	未知
T23	嘎吉红大	烤烟	T54	Ricks Broad	烤烟	T85	催芽 MS 云烟 85	未知
T24	长叶红大	烤烟	T55	Delhil 34	烤烟	T86	91-5 ^{BH}	未知
T25	皱叶红花大金元	烤烟	T56	6603	烤烟	T87	91-5 ^{1H}	未知
T26	翠碧一号	烤烟	T57	Coker176	烤烟	T88	930032(1)#	未知
T27	翠碧一号白花(神八)	烤烟	T58	MScoker176	烤烟	T89	930032 ^{7H}	未知
T28	CK 翠碧一号(神八)	烤烟	T59	Del Gold	烤烟	T90	9601 ^{16H}	未知
T29	K326	烤烟	T60	Islan Gold	烤烟	T91	J2	未知
T30	K326(白花)神八	烤烟	T61	Va116	烤烟	T92	GL939	未知
T31	K346	烤烟	T62	CF986	烤烟	T93	91-5	未知

量及耐性指数均存在较大差异。在 2 mg·L⁻¹ 处理下, 各烟草材料地上部生物量最小值和最大值分别为 0.27 g·株⁻¹ 和 1.65 g·株⁻¹, 差异达 6.11 倍, 其平均值为 0.93 g·株⁻¹ (CV=31.84%); 相应的耐性指数为 0.22~1.38, 最大值为最小值的 6.27 倍, 平均值为 0.59 (CV=38.48%)。在 10 mg·L⁻¹ 处理下, 各烟草材料地上部生物量平均值为 0.63 g·株⁻¹ (CV=33.70%), 其耐性指数平均值为 0.40 (CV=37.10%), 地上部生物量最小值和最大值分别为 0.23 g·株⁻¹ 和 1.25 g·株⁻¹, 差异达到 5.43 倍; 相应耐性指数为 0.16~0.86, 最大值为最小值的 5.38 倍。这说明在镉胁迫条件下, 各烟草材料地

上部均受到不同程度的抑制, 且对镉的耐性表现出明显的差异。在 10 mg·L⁻¹ 镉处理下各烟草材料受镉的抑制作用较 2 mg·L⁻¹ 处理更强。

2.1.2 不同烟草材料镉耐性评价

以地上部耐性指数为聚类分析指标, 采用离差平方和法进行聚类分析, 对烟草材料进行耐性分类。由图 1 可知, 当欧氏距离为 13.98 (2 mg·L⁻¹) 和 10.87 (10 mg·L⁻¹) 时, 可将 93 份烟草材料按镉耐性高低分为 3 类, 即高耐性、中耐性和低耐性材料(表3)。

由表 3 可知, 各类型烟草材料地上部生物量、耐性指数和镉积累量均随着镉处理浓度的增加而显著

表 2 不同烟草材料地上部生物量及相应的耐性指数差异

Table 2 Difference of biomass and relative tolerance index in shoot of different tobacco species(Cd2:n=93;Cd10:n=92)						
镉处理 Cd treatment	参数 Parameter	变幅 Range	均值 Mean value	标准差 SD	变异系数 CV/%	F 检验 F-test
Cd2	生物量 Biomass/g·株 ⁻¹ DW	0.27~1.65	0.93	0.30	31.84	**
	耐性指数 Cd-tolerance indices	0.22~1.38	0.59	0.23	38.48	**
Cd10	生物量 Biomass/g·株 ⁻¹ DW	0.23~1.25	0.63	0.21	33.70	**
	耐性指数 Cd-tolerance indices	0.16~0.86	0.40	0.15	37.10	**

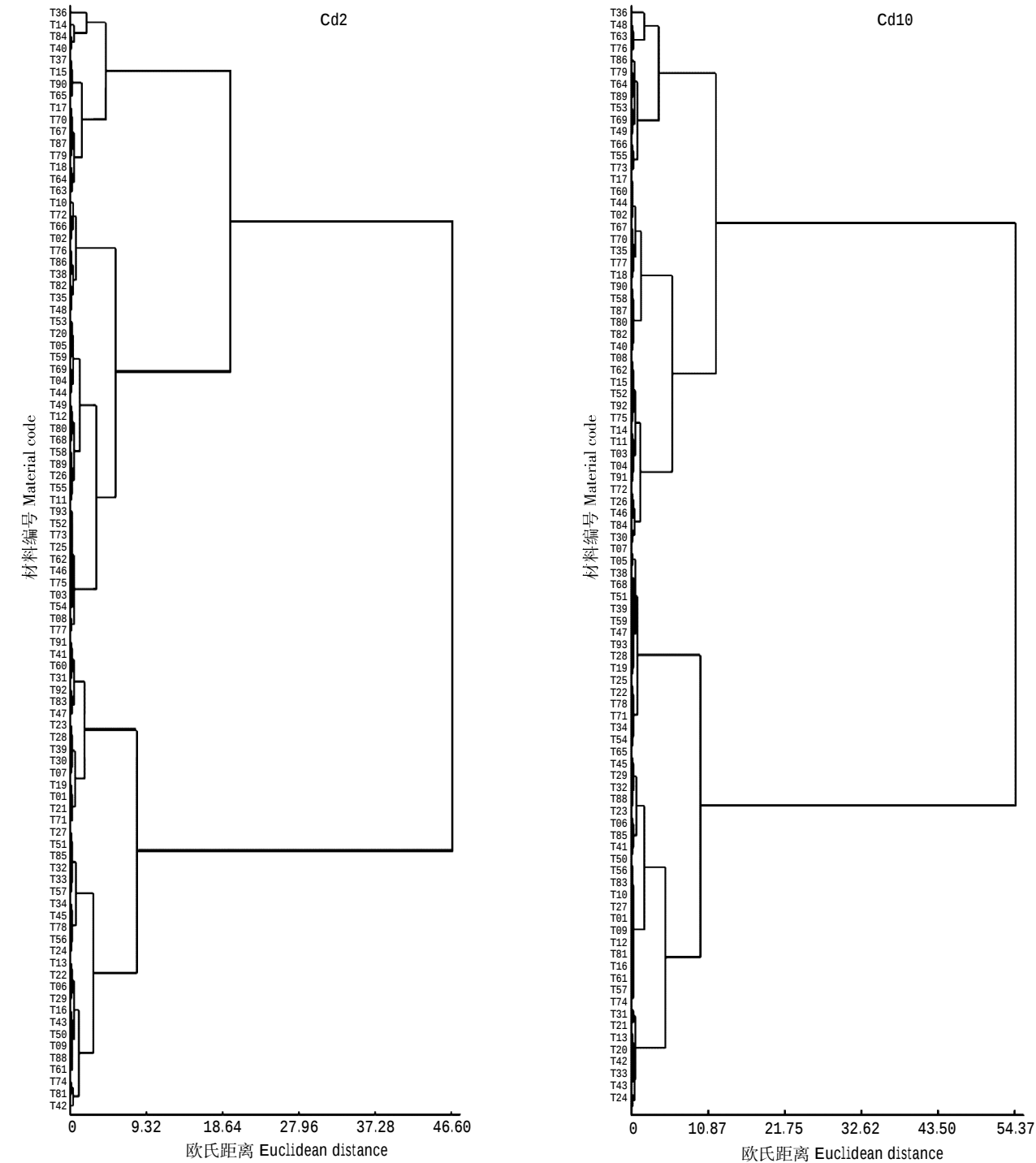


图 1 不同烟草材料地上部镉耐性聚类分析

Figure 1 Cluster analysis of cadmium tolerance in shoot of different tobacco species

表 3 不同耐性烟草材料的镉耐性及镉积累能力差异
Table 3 Differences in Cd tolerance and accumulation ability of tobacco species with different tolerance

镉处理 Cd treatment	类别 Type	材料数量 Number of material	生物量 Biomass/g·株 ⁻¹	耐性指数 Cd-tolerance indices	镉含量 Cd content/mg·kg ⁻¹	镉积累量 Cd accumulation/μg·株 ⁻¹
Cd2	高耐性 High-tolerance	16	1.15±0.07aA	0.96±0.03aA	114.50±5.19abB	129.89±9.42aA
	中耐性 Middle-tolerance	37	0.98±0.05bA	0.66±0.05bA	109.70±3.07bB	106.33±6.17abA
	低耐性 Low-tolerance	40	0.79±0.04cA	0.79±0.04cA	118.41±2.44aB	96.84±5.62bA
Cd10	高耐性 High-tolerance	14	0.78±0.05aB	0.63±0.08aB	137.93±5.90aA	107.37±8.28aB
	中耐性 Middle-tolerance	31	0.68±0.04abB	0.48±0.01bB	135.45±4.49aA	85.54±5.15bcB
	低耐性 Low-tolerance	47	0.55±0.03cB	0.27±0.01cB	138.53±3.02aA	80.46±5.64cB

注:数据为平均值±标准误;数值后不同小写字母表示同一镉处理下不同材料间差异显著(P<0.05),不同大写字母表示同一类型材料在不同镉处理间差异显著(P<0.05)。下同。
Note: Data were mean ± SE. Different small letters after numerical value indicate significant differences(P<0.05) in different type species. Different capital letters indicate significant differences among different Cd treatments(P<0.05). The same below.

下降,其镉含量呈相反的变化趋势。两个镉处理下,各类型烟草材料地上部生物量及耐性指数存在显著差异,表现为高耐性和中耐性材料显著高于低耐性材料,其地上部镉含量差异在两个镉处理下有所不同。在 2 mg·L⁻¹ 处理下,低耐性材料镉含量显著高于高耐性和中耐性材料;而在 10 mg·L⁻¹ 处理下,3 类材料镉含量差异不显著。3 类材料地上部镉积累量变化与生物量表现出相同的趋势,即高耐性和中耐性材料显著高于低耐性材料,说明高耐性和中耐性烟草材料不一定具有低积累特性。目标材料的获取应以镉含量为聚类指标进行进一步评价,保证其耐性较高且镉含量和积累量均较低。

2.2 烟草材料镉积累差异评价

2.2.1 不同烟草材料镉积累差异

由表 4 可知,在 2 mg·L⁻¹ 镉处理下,烟草材料地上部镉含量和镉积累量变幅分别为 75.86~160.82 mg·kg⁻¹ 和 38.90~214.22 μg·株⁻¹, 差异达 2.12 倍和 5.51 倍,其变异系数分别为 17.34%和 34.18%;在 10 mg·L⁻¹ 镉处理下,烟草材料地上部镉含量和镉积累量平均值分别为 136.22 mg·kg⁻¹ 和 94.76 μg·株⁻¹, 其最大值为最小值的 2.08 倍和 5.10 倍, 变异系数分别为 17.55%和 32.90%。说明在两个镉处理下各烟草材料间镉积累能力存在明显差异。

2.2.2 不同烟草材料镉积累评价

以地上部镉含量为聚类分析指标,用离差平方和法进行聚类分析,对两个镉处理下中高耐性烟草材料进行镉积累能力分类。由图 2 可知,当欧氏距离为 7.02(2 mg·L⁻¹)和 8.09(10 mg·L⁻¹)时,可将烟草材料按镉积累能力高低分为 3 类,即低积累、中积累和高积累材料(表 5)。

由表 5 可知,在 2 mg·L⁻¹ 镉处理下,获得低积累材料 12 份,中积累材料 16 份,高积累材料 25 份。在 10 mg·L⁻¹ 镉处理下,获得低积累、中积累和高积累材料各 10、20、15 份。其中编号为 T02、T14、T26、T62、T67、T86 和 T90 的 7 份烟草材料在两个镉处理下均为低积累的材料,与本试验其余低积累材料相比,具有更好的稳定性。

2.3 烟草镉低积累材料镉积累特征

2.3.1 烟草镉低积累材料生物量及耐性指数

从图 3 可以看出,各类型烟草材料地上部生物量和耐性指数均随着镉处理浓度的增加呈现显著下降趋势,且耐性指数均小于 1,说明 3 类烟草材料生长均受到一定程度的抑制,且随着镉浓度增加抑制作用增强。在两个镉处理下,烟草镉低积累材料地上部生物量和耐性指数与其余两类材料相比差异不显著,说明在 3 类材料生长情况具有相似性,同时验证了进行

表 4 不同烟草材料地上部镉积累能力差异
Table 4 Difference of biomass and relative tolerance index in shoot of different tobacco species(Cd2:n=53;Cd10:n=45)

镉处理 Cd treatment	参数 Parameter	变幅 Range	均值 Mean value	标准差 SD	变异系数 CV/%	F 检验 F-test
Cd2	镉含量 Cd-content/mg·kg ⁻¹	75.86~160.82	111.15	19.27	17.34	**
	镉积累量 Cd-accumulation/μg·株 ⁻¹	38.90~214.22	113.44	38.78	34.18	**
Cd10	镉含量 Cd-content/mg·kg ⁻¹	90.76~188.55	136.22	23.90	17.55	**
	镉积累量 Cd-accumulation/μg·株 ⁻¹	34.46~175.90	94.76	31.18	32.90	**

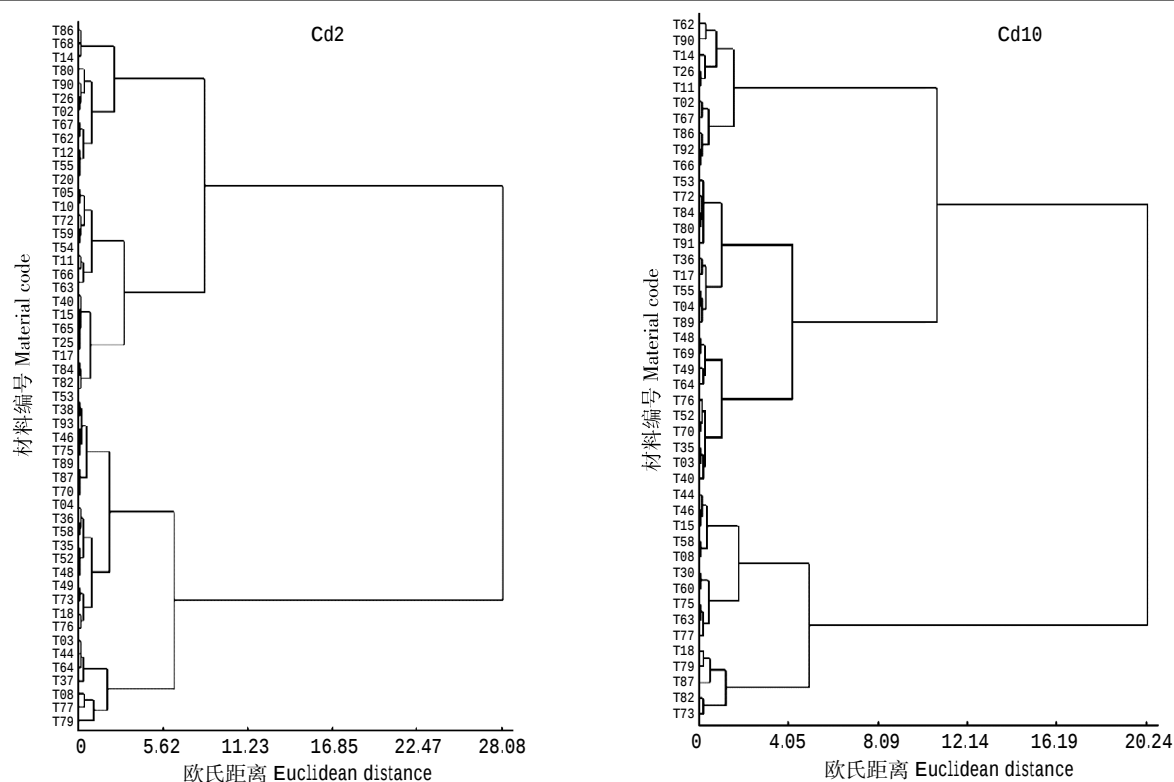


图 2 不同烟草材料地上部镉积累能力聚类分析
Figure 2 Cluster analysis of Cd accumulation capacity in the upper part of different tobacco species

表 5 中高耐性烟草材料镉积累差异分类
Table 5 Differential classification of Cd accumulation in middle and high tolerance tobacco species

镉处理 Cd treatment	类别 Type	材料编号 Code of parent material
Cd2	低积累 Low-accumulation	T86 T68 T14 T80 T90 T26 T02 T67 T62 T12 T55 T69
	中积累 Middle-accumulation	T20 T05 T10 T72 T59 T54 T11 T66 T63 T40 T15 T65 T25 T17 T84 T82
	高积累 High-accumulation	T53 T38 T93 T46 T75 T89 T87 T70 T04 T36 T58 T35 T52 T48 T49 T73 T18 T76 T03 T44 T64 T37 T08 T77 T79
Cd10	低积累 Low-accumulation	T62 T90 T14 T26 T11 T02 T67 T86 T92 T66
	中积累 Middle-accumulation	T53 T72 T84 T80 T91 T36 T17 T55 T04 T89 T48 T69 T49 T64 T76 T52 T70 T35 T03 T40
	高积累 High-accumulation	T44 T46 T15 T58 T08 T30 T60 T75 T63 T77 T18 T79 T87 T82 T73

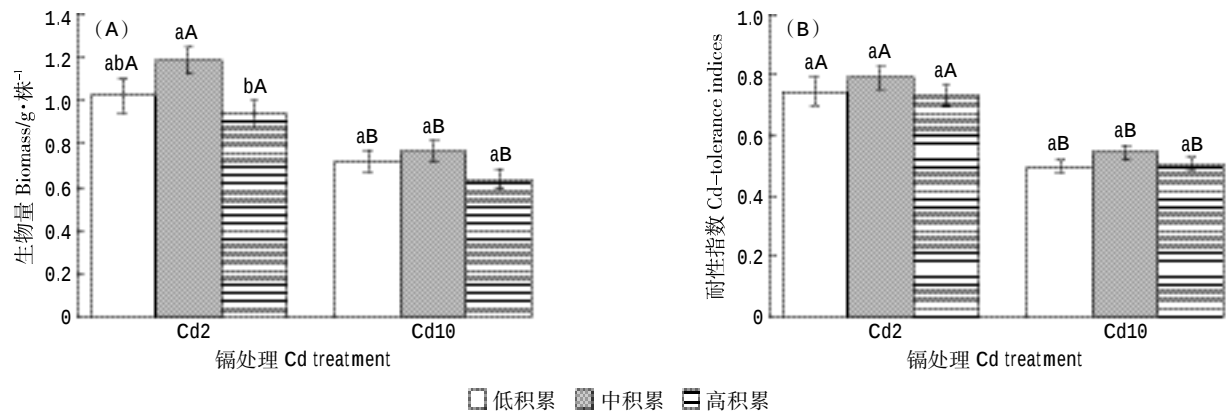
镉积累评价材料镉耐性具有相对一致性。

2.3.2 烟草镉低积累材料镉含量及积累量

由表 6 可知,各类型烟草材料地上部镉含量均随着镉处理浓度的增加而显著增加,而镉积累量则表现出相反的变化规律,即随着镉浓度的增加而明显降低。这是由于各类型烟草材料镉含量随镉浓度增加而增加的幅度(22.03%~27.20%)小于其生物量随镉浓度增加而降低的幅度(41.67%~55.26%)。此外,烟草镉低积累材料镉含量及镉积累量均显著低于其余两类材料。这说明烟草镉低积累材料地上部对镉积累能力较弱,有助于烟叶的安全生产。

3 讨论

植物对镉的吸收和积累受多种因素的影响。土壤中镉浓度及有效性^[21]、土壤 pH^[22]、施肥^[23-24]和其他金属离子与镉的拮抗作用^[25]等环境因素均在不同程度上影响着植物对镉的吸收积累,但植物对镉的吸收积累及敏感程度受遗传因素严格控制,并在基因型和品种之间存在明显差异^[26]。Martin 等^[6]设计了烟草外显子数组,并将两种土壤种植条件下的 45 份烟草根部和叶部进行外显子阵列分析,弄清了烟草镉积累的基因组成,表明镉高积累和镉低积累烟草品种叶片对镉的



不同小写字母表示同一镉处理下不同材料间差异显著($P<0.05$),不同大写字母表示同一类型材料在不同镉处理间差异显著($P<0.05$)
Data was mean $\pm$ SE. Different small letters indicate significant differences ($P<0.05$) in different type materials. Different capital letters indicate significant differences among different Cd treatments ($P<0.05$)

图 3 不同烟草材料地上部生物量(A)及耐性指数(B)差异
Figure 3 Difference of biomass(A) and tolerance index(B) in different tobacco species

表 6 不同烟草材料地上部镉含量及积累量差异
Table 6 Differences in Cd content and accumulation in shoot of different tobacco species

镉处理 Cd treatment	类别 Type	材料数量 Number of material	镉含量 Cd content/mg·kg ⁻¹	镉积累量 Cd accumulation/μg·plant ⁻¹
Cd2	低积累 Low-accumulation	12	85.78±1.76cB	88.26±7.02cA
	中积累 Middle-accumulation	16	103.82±1.47bB	118.36±8.06abA
	高积累 High-accumulation	25	128.02±2.12aB	122.38±8.77aA
Cd10	低积累 Low-accumulation	10	104.68±2.23cA	75.22±5.30bAB
	中积累 Middle-accumulation	20	132.03±1.75bA	97.70±7.45abB
	高积累 High-accumulation	15	162.84±3.56aA	103.88±8.14aB

积累主要依赖于遗传因素和基因变异。本试验中,供试烟草材料来源于我国西南烟区的主栽品种及部分国外引进品种,来源较为广泛且材料间存在较大的遗传差异,为烟草镉积累评价提供了必要条件。此外,大量研究也表明,不同烟草种类和同一种类不同烟草品种对镉的敏感程度及吸收积累存在明显差异。雷丽萍等^[27]通过对我国南方烟区 16 个烟草主栽品种进行水培试验研究发现,各烟草品种对镉毒性的敏感性分布频次具有明显差异,在 50 mg·L⁻¹ 镉处理下,烟草 K326 和 K346 对镉的毒害最不敏感,表现出较强的耐性。本研究表明,在 2、10 mg·L⁻¹ 镉处理条件下,93 份烟草材料地上部镉耐性指数均存在极显著差异,变异系数高达 37.10%和 38.48%,其中 K326(T29)和 K346(T31)烟草材料对镉的敏感程度较大,属低耐性烟草材料。这与上述结果有所不同,主要是由于本试验供试材料样本数量较多,且试验所设置的浓度有所不同导致的。王浩浩等^[9]对全国 10 个烤烟主栽品种进行研究,在镉处理为 3 mg·kg⁻¹ 时,不同烟草品种烟叶干物质积累量、镉含量及镉积累量存在较大差异,其

中烟叶镉含量和镉积累量的最大值为最小值的 1.09 倍和 1.29 倍。在本试验中,中高耐性烟草材料地上部镉含量和镉积累量也存在显著差异。在 2 mg·L⁻¹ 镉处理下其最大值分别为最小值的 2.12 倍和 5.51 倍,在 10 mg·L⁻¹ 镉处理下分别为 2.08 倍和 5.10 倍,与上述研究结果具有相似性。但本研究供试材料间差异更大,主要是因为样本数量较大。

镉低积累作物的筛选和培育是镉污染土壤持续安全生产的一条经济、有效途径^[28]。为对作物做出合理的评价和筛选,评价时期和评价指标的选择尤为重要,应选择作物吸收镉的关键时期或是对镉吸收速率较大的时期进行评价,以便较好地体现材料间镉吸收积累的差异。张锡洲等^[29]在供试水稻材料处理后 30 d,即水稻吸收镉的关键时期,进行 145 份水稻亲本材料镉耐性及镉积累的评价,获得 15 份镉低积累种质资源。然而,烟草对镉吸收则表现出前期高后期低的双峰吸收型,烟草以团棵期和旺长期烟叶镉含量较高,是烟草镉吸收积累的敏感时期^[30]。贺远等^[31]通过盆栽试验对烟草镉积累规律进行研究也表明,烟草各

器官镉积累速率变化规律为:快速积累-快速降低-缓慢积累,其中团棵期(移栽至移栽后 30 d)为镉快速积累时期。本研究中评价时期为烟草团棵期(处理后 30 d),该时期各烟草材料地上部镉耐性指数和镉含量变异系数大,较好反映了材料间对镉的耐性和吸收差异。再者,评价指标的选择依据目标材料的特性而定。唐忠厚等^[32]通过长期定位试验对 31 份甘薯材料差异分析,指出钾敏感性和钾利用效率可作为钾高效利用型甘薯的筛选指标。同理,镉低积累种质资源对镉应具有较强的耐性,以保证植株的正常生长和经济产物的获得。同时,其对镉吸收应具有较强的阻抑能力,表现为镉含量和积累量均较低^[29]。Wang 等^[33]和 Chen 等^[34]也指出,镉安全卷心菜和镉低积累大麦的筛选应满足镉耐性较好和可食部分镉含量低两个标准。故本研究中以烟草地上部镉耐性指数和镉含量为评价指标,进行材料的系统聚类分析。评价所得镉低积累烟草材料对镉具有较好的耐性,其地上部生物量与中高积累材料相比差异不显著,且镉低积累材料地上部镉含量和镉积累量均显著低于中高积累材料。

不同烟草品种对镉的耐性及镉的积累能力与镉处理浓度具有相关关系,即同一烟草材料在不同的镉浓度下可能会表现出相似或相反的镉耐性和镉积累能力^[35]。王浩浩等^[9]研究指出,在 $0.6 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 镉处理下,翠碧 1 号、豫烟 3 号和龙江 851 叶片镉含量高于云烟 87 和 K326,且对土壤镉响应敏感性相对较强;而在 $3 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 镉处理下,翠碧 1 号、豫烟 3 号和龙江 851 叶片镉含量低于云烟 87 和 K326,对土壤镉响应敏感性较弱。Iannone 等^[36]研究也发现,在 $100 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 镉处理下,野生型烟草材料(SR1)植株镉含量显著高于缺过氧化氢酶烟草材料(CAT1AS),而在 $500 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 镉处理下则表现出相反趋势。本研究结果表明,在 $2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 镉处理下,Delhil 34(T55)、中 99(T80)和 Coker319(T69)为低积累烟草材料,而在 $10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 镉处理下,则为中积累材料,与上述研究结果具有相似性。本试验设置 2 、 $10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 两个镉处理,在保证供试烟草材料正常生长,且较好体现材料间的镉耐性和镉积累差异的基础上,对供试材料进行评价,获得较为稳定低积累材料。结果表明,在 2 、 $10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 镉处理下,分别获得 12 份和 10 份低积累材料,其中存在 7 份烟草材料在两个镉处理下均表现为低积累材料,分别为云烟 85(T02)、中烟 90(T14)、翠碧一号(T26)、CF986(T62)、RG11(T67)、91-5^{8#}(T86)和 9601^{16#}(T90)烟草材料,且与本试验其余低积累材料相比,具有更

好的稳定性。

4 结论

在两个镉处理下,不同烟草材料地上部生物量均受到不同程度的抑制,且地上部耐性指数、镉含量和镉积累量在团棵期均达显著差异。以镉耐性指数和镉含量为指标进行聚类评价,可获得在两个镉处理下均表现出较高的耐性和低积累特性的材料 7 份,分别为“云烟 85”、“中烟 90”、“翠碧一号”、“CF986”、“RG11”、“91-5^{8#}”和“9601^{16#}”。镉低积累材料地上部生物量和镉耐性与中高积累材料相比差异不显著,而镉含量和积累量均显著低于中高积累材料,表明评价所得的 7 份材料既可作为烟草镉低积累遗传特性的研究材料,也可作为培育镉低积累烟草品种的优良遗传资源。

参考文献:

- [1] 郑新章,高琳,周雅宁.近 5 年国内外烟草科技论文统计分析与研究热点[J].中国烟草学报,2008,14(3):59-64.
ZHENG Xin-zhang, GAO Lin, ZHOU Ya-ning. Analysis of tobacco scientific articles published at home and abroad during 2002—2006 and hot research topics[J]. Acta Tabacaria Sinica, 2008, 14(3):59-64.
- [2] 吴坤,吴中红,邵付菊,等.镉胁迫对烟草叶激素水平、光合特性、荧光特性的影响[J].生态学报,2011,31(16):4517-4524.
WU Kun, WU Zhong-hong, TAI Fu-ju, et al. Effects of Cd on the contents of phytohormones, photosynthetic, performance and fluorescent characteristics in tobacco leaves[J]. Acta Ecologica Sinica, 2011, 31(16):4517-4524.
- [3] 贺远,王树声,刘海伟,等.镉浓度对烤烟幼苗镉含量及生长和生理指标的影响[J].中国烟草科学,2014(2):37-42.
HE Yuan, WANG Shu-sheng, LIU Hai-wei, et al. Effect of Cd concentration on Cd content and growth and physiological indices of tobacco seedlings[J]. Chinese Tobacco Science, 2014(2):37-42.
- [4] 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):49-57.
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 and Technology, 2006(11):49-57.
- [5] Vasiliadou S and Dordas C. Increased concentration of soil cadmium affects on plant growth, dry matter accumulation, Cd, and Zn uptake of different tobacco cultivars (*Nicotiana tabacum* L.)[J]. International Journal of Phytoremediation, 2009, 11(2):115-130.
- [6] Martin F, Bovet L, Cordier A, et al. Design of a tobacco exon array with application to investigate the differential cadmium accumulation property in two tobacco varieties[J]. BMC Genomics, 2012, 13(1):163-169.
- [7] Lugon-Moulin N, Martin F, Krauss M R, et al. Cadmium concentration in tobacco (*Nicotiana tabacum* L.) from different countries and its relationship with other elements[J]. Chemosphere, 2006, 63(7):1074-

- 1086.
- [8] Doroszewska T, Berbeć A. Variation for cadmium uptake among *Nicotiana* species[J]. *Genetic Resources and Crop Evolution*, 2004, 51: 323-333.
- [9] 王浩浩, 刘伟海, 王 勇, 等. 烤烟品种对镉吸收累积敏感性差异研究[J]. *中国烟草科学*, 2013(6): 64-68.
WANG Hao-hao, LIU Wei-hai, WANG Yong, et al. Sensibility variation of Cd uptake and accumulation among flue-cured tobacco varieties [J]. *Chinese Tobacco Science*, 2013(6): 64-68.
- [10] Liu J, Min Q, Cai G, et al. Uptake and translocation of Cd in different rice cultivars and the relation with Cd accumulation in rice grain [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2007, 143(1/2): 443-447.
- [11] 杨玉敏, 张庆玉, 张 冀, 等. 小麦基因型间籽粒镉积累及低积累资源筛选[J]. *中国农学通报*, 2010, 26(17): 342-346.
YANG Yu-min, ZHANG Qing-yu, ZHANG Ji, et al. Genotypic differences of Cd accumulation in *Triticum aestivum* and screening of low-accumulation material[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2010, 26(17): 342-346.
- [12] 刘维涛, 周启星, 孙约兵, 等. 大白菜(*Brassica pekinensis* L.)对镉富集基因型差异的研究[J]. *应用基础与工程科学学报*, 2010, 18(2): 226-235.
LIU Wei-tao, ZHOU Qi-xing, SUI Yue-bing, et al. Genotypic variation of Cd accumulation in Chinese cabbage (*Brassica pekinensis* L.) [J]. *Journal of Basic Science and Engineering*, 2010, 18(2): 226-235.
- [13] McLaughlin M J, Bell M J, Wright G C, et al. Uptake and partitioning of cadmium by cultivars of peanut (*Arachis hypogaea* L.) [J]. *Plant and Soil*, 2000, 222(1/2): 51-58.
- [14] 朱 芳, 方 炜, 杨中艺. 番茄吸收和积累 Cd 能力的品种间差异[J]. *生态学报*, 2006, 26(12): 4071-4081.
ZHU Fang, FANG wei, YANG Zhong-yi. Variations of Cd absorption and accumulation of 36 *Lycopersicon esculentum* cultivars [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26(12): 4071-4081.
- [15] Zhang H, Zhang X, Li T, et al. Variation of cadmium uptake, translocation among rice lines and detecting for potential cadmium-safe cultivars [J]. *Environmental Earth Sciences*, 2014, 71(1): 277-286.
- [16] 陈 瑛, 李廷强, 杨肖娥, 等. 不同品种小白菜对镉的吸收积累差异 [J]. *应用生态学报*, 2009, 20(3): 736-740.
CHEN Ying, LI Ting-qiang, YANG Xiao-e, et al. Differences in cadmium absorption and accumulation of *Brassica* varieties on cadmium polluted soil [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2009, 20(3): 736-740.
- [17] 孙学永, 周应兵, 杨华应, 等. 烟草种质抗青枯病鉴定及其抗性分类[J]. *中国烟草学报*, 2011, 17(3): 61-66.
SUN Xue-yong, ZHOU Ying-bing, YANG Hua-ying, et al. Identification and classification of tobacco germplasm resistant to bacterial wilt [J]. *Chinese Tobacco Science*, 2011, 17(3): 61-67.
- [18] 黄元炯, 张生杰, 马永建, 等. 不同烤烟品种(基因型)氮效率及耐低氮能力的差异[J]. *烟草科技*, 2013(4): 71-77.
HUANG Yuan-jiong, ZHANG Sheng-jie, MA Yong-jian, et al. Differential analysis of nitrogen utilization and tolerance to low nitrogen level between flue-cured tobacco cultivars (genotypes) [J]. *Tobacco Science and Technology*, 2013(4): 71-77.
- [19] 李合生. 现代植物生理学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2005.
LI He-sheng. *Modern plant physiology* [M]. Beijing: Higher Education Press, 2005.
- [20] Ahmad I, Akhtar M J, Zahir Z A, et al. Organic amendments: Effects on cereals growth and cadmium remediation [J]. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 2015, 12(9): 2919-2928.
- [21] Zaprianova P, Dospatliev L, Angelova V, et al. Correlation between soil characteristics and lead and cadmium content in the aboveground biomass of Virginia tobacco [J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2010, 163(1/2/3/4): 253-261.
- [22] Tsadilas C D. Soil pH influence on cadmium uptake by tobacco in high cadmium exposure [J]. *Journal of Plant Nutrition*, 2000, 23(8): 1167-1178.
- [23] 刘昭兵, 纪雄辉, 彭 华, 等. 磷肥对土壤中镉的植物有效性影响及其机理[J]. *应用生态学报*, 2012, 23(6): 1585-1590.
LIU Zhao-bing, JI Xiong-hui, PENG Hua, et al. Effects of phosphorous fertilizers on phytoavailability of cadmium in its contaminated soil and related mechanisms [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2012, 23(6): 1585-1590.
- [24] Mar S S, Okazaki M, Motobayashi T. The influence of phosphate fertilizer application levels and cultivars on cadmium uptake by *Komatsuna* (*Brassica rapa* L. var. *perviridis*) [J]. *Soil Science & Plant Nutrition*, 2012, 58(4): 492-502.
- [25] Choi Y E, Harada E, Wada M, et al. Detoxification of cadmium in tobacco plants: Formation and active excretion of crystals containing cadmium and calcium through trichomes [J]. *Planta*, 2001, 213(1): 45-50.
- [26] Vasiliadou S, Dordas C. Increased concentration of soil cadmium affects on plant growth, dry matter accumulation, Cd, and Zn uptake of differ tobacco cultivars (*Nicotiana tabacum* L.) [J]. *International Journal of Phytoremediation*, 2009, 11(2): 115-130.
- [27] 雷丽萍, 刘 彬, 陈世宝, 等. 不同烟草对 Cd 吸收的敏感性分布及烟草中 Cd 的结合形态[J]. *农业环境科学学报*, 2015, 34(10): 1858-1864.
LEI Li-ping, LIU Bing, CHEN Shi-bao, et al. Cd-phytotoxicity species sensitivity distributions and root Cd forms of different tobacco cultivars [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2015, 34(10): 1858-1864.
- [28] 张 路, 张锡洲, 李廷轩, 等. 水稻镉安全亲本材料对镉的吸收分配特性[J]. *中国农业科学*, 2015, 48(1): 174-184.
ZHANG Lu, ZHANG Xi-zhou, LI Ting-xuan, et al. Cd Uptake and distribution characteristics of Cd pollution-safe rice materials [J]. *Agricultural Sciences in China*, 2015, 48(1): 174-184.
- [29] 张锡洲, 张洪江, 李廷轩, 等. 水稻镉耐性差异及镉低积累种质资源的筛选[J]. *中国生态农业学报*, 2013, 21(11): 1434-1440.
ZHANG Xi-zhou, ZHANG Hong-jiang, LI Ting-xuan, et al. Differences in Cd-tolerance of rice and screening for Cd low-accumulation rice germplasm resources [J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2013, 21(11): 1434-1440.
- [30] 张仕祥, 张艳玲, 魏春阳, 等. 烤烟和白肋烟吸收积累铅、镉的生育期动态[J]. *烟草科技*, 2008(5): 49-53.

- ZHANG Shi-xiang, ZHANG Yan-ling, WEI Chun-yang, et al. Lead and Cd absorption and accumulation in tobacco at different growth stages[J]. Tobacco Science and Technology, 2008(5):49-53.
- [31] 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(2):99-104.
- HE Yuan, LIU Hai-wei, SHI Qi, et al. Effects of Cd on the growth of tobacco and the characteristics of Cd accumulation by tobacco[J]. Chinese Tobacco Science, 2015(2):99-104.
- [32] 唐忠厚, 张允刚, 魏猛, 等. 耐低钾和钾高效型甘薯品种(系)的筛选及评价指标[J]. 作物学报, 2014(3):542-549.
- TANG Zhong-hou, ZHANG Yun-gang, WEI Meng, et al. Screening and evaluation indicators for low potassium-tolerant and potassium efficient sweet potato(Ipomoea batatas L.) varieties(Lines)[J]. The Crop Journal, 2014(3):542-549.
- [33] Wang X, Shi Y, Chen X, et al. Screening of Cd-safe genotypes of Chinese cabbage in field condition and Cd accumulation in relation to organic acids in two typical genotypes under long-term Cd stress[J]. Environmental Science & Pollution Research, 2015, 22(21):16590-16599.
- [34] Chen F, Dong J, Wang F, et al. Identification of barley genotypes with low grain Cd accumulation and its interaction with four microelements[J]. Chemosphere, 2007, 67(10):2082-2088.
- [35] Erdem H, Kinay A, Ozturk M, et al. Effect of cadmium stress on growth and mineral composition of two tobacco cultivars[J]. Journal of Food Agriculture and Environment, 2012, 10(1):965-969.
- [36] Iannone M F, Groppa M D, Benavides M P. Cadmium induces different biochemical responses in wild type and catalase-deficient tobacco plants[J]. Environmental and Experimental Botany, 2015, 109:201-211.



中国生态系统保育与生态建设

李文华 等编著

我国自然环境复杂,生态系统类型多样,在经济高速发展和社会变化剧烈的背景下,出现了极其复杂的经济、生态、社会复合关系,如何妥善地处理这一关系,从而有效地实现我国的可持续发展,是我们面临的重大课题。

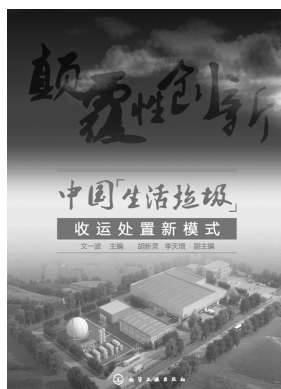
本书基于生态系统保育的相关理论,对我国重要的陆地生态系统的保育与建设、相关生态建设实践的总结和生态产业发展等重要问题进行了全面深入的探讨,这对我国的生态文明建设和生态产业发展都将具有一定的实践指导价值。

※书号:9787122253941

※定价:268.0元

※开本:16

※出版日期:2016年9月



中国生活垃圾收运处置新模式

文一波 主编

本书介绍了与生活垃圾分类和处置相关的几项创新技术及其优化组合,推出了一种适合中国国情的生活垃圾收运处置颠覆性创新模式:“两网融合”的互联网环卫收运体系+生活垃圾混合收集运输+终端干湿分离+干垃圾洁净气化技术产生合成气+湿垃圾干式厌氧技术产生天然气+两种可燃气体直燃发电或提纯利用。

※书号:9787122273437

※定价:98.0

※开本:16

※出版日期:2016年9月

如需更多图书信息,请登录 www.cip.com.cn

服务电话:010-64518888,64518800(销售中心)

网上购书可登录化学工业出版社天猫旗舰店:<http://hxgycbs.tmall.com>

邮购地址:(100011)北京市东城区青年湖南街13号化学工业出版社

如要出版新著,请与编辑联系,联系电话:010-64519525。