

## 镉浓度对烤烟幼苗镉含量及生长和生理指标的影响

贺 远<sup>1,2</sup>, 王树声<sup>1</sup>, 刘海伟<sup>1</sup>, 鹿 莹<sup>1,2</sup>, 常 帅<sup>1,2</sup>, 石 屹<sup>1\*</sup>

(1. 农业部烟草生物学与加工重点实验室, 中国农业科学院烟草研究所, 青岛 266101;

2. 中国农业科学院研究生院, 北京 100081)

**摘 要:** 为了探索重金属镉对烟草的危害机理, 采用水培试验, 调查了不同镉浓度处理在烟草幼苗各部位不同提取态的镉含量以及烟草幼苗干物质积累量、根系活力、叶绿素含量、硝酸还原酶活力和丙二醛含量等生理指标的变化。结果表明, 烟草根系镉 (Cd) 以去离子水提取态为主, 其次为醋酸提取态, 叶片中 Cd 主要以醋酸结合态存在。随着镉浓度的提高, Cd 存在由活性弱的化学形态向活性强的形态转化的趋势, 干物质质量的积累先升高后降低; 不同 Cd 浓度处理时, 烟草幼苗 Cd 含量表现为: 茎>根>叶, 随着 Cd 处理浓度的提高, 烟草幼苗中的 Cd 更多的富集在烟苗的根部和茎部。根系活力和叶绿素含量逐渐降低; 硝酸还原酶活性呈先升高后降低, 丙二醛含量则反之。因此, 与对照相比, 低浓度 Cd 处理在一定程度上刺激烟草幼苗的某些生理活性, 使其呈现更高的生物活性, 但高浓度 Cd 处理则极显著抑制烟草幼苗的生长, 使其各项生理活动降低, 最终影响其正常的生长。

**关键词:** 烤烟; 镉; 提取; 干物质质量; 叶绿素; 生理特性

中图分类号: S572.043

文章编号: 1007-5119(2014)02-0037-06

DOI: 10.13496/j.issn.1007-5119.2014.02.007

## Effect of Cd Concentration on Cd Content and Growth and Physiological Indices of Tobacco Seedlings

HE Yuan<sup>1,2</sup>, WANG Shusheng<sup>1</sup>, LIU Haiwei<sup>1</sup>, LU Ying<sup>1,2</sup>, CHANG Shuai<sup>1,2</sup>, SHI Yi<sup>1\*</sup>

(1. Key Laboratory of Tobacco Biology and Processing, Ministry of Agriculture, Tobacco Research Institute, CAAS, Qingdao 266101, China; 2. Graduate School of CAAS, Beijing 100049, China)

**Abstract:** In order to explore the damage mechanism of cadmium (Cd) on tobacco, effects of cadmium with different concentrations on the growth and the physiological and biochemical activities of tobacco were studied by solution culture. The results showed that the growth of tobacco plant was restrained under the cadmium stress. Acetic acid -extractable Cd was the main chemical form of Cd in root system. In leaves, Cd mainly existed in the forms of binding to Acetic Acid and deionized water. With the increase of Cd concentration, Cd tended to transform from low activity to high activity. The Cd content in different parts of tobacco seedlings under different Cd treatment was: stem > root > leaf. The chlorophyll content, nitrate reductase activity, root activity and MDA content changed under different cadmium treatment to tobacco seedlings. With the increase of cadmium concentration, the dry matter accumulation increased firstly and then decreased, chlorophyll content and root activity showed a gradual decreasing trend, nitrate reductase activity increased firstly and then decreased, and MDA content decreased first and then increased. This study suggest that low concentrations of Cd can stimulate tobacco biological activity, but high concentrations of Cd can significantly inhibit the growth of tobacco seedlings, reduce the physiological activity, and ultimately affect their normal growth.

**Keywords:** tobacco; cadmium, extract, dry matter weight, chlorophyll, physiological index

随着城镇化的的发展和农业现代化的推进, 农用化肥和农药种类及用量的增加, 土壤重金属污染日趋严重。因镉 (Cd) 易被植物吸收, 并导致不同

的形态、生理、生化和结构的变化, 故而其危害尤为突出<sup>[1]</sup>。Cd 对植物的影响包括光合作用和生长的抑制, 减少叶绿素和水分含量, 干扰营养物质的吸

基金项目: 国家烟草专卖局特色优质烟叶开发重大科技专项“低危害烟叶开发”(Ts-06-20110037); 国家烟草专卖局创新平台经费专项(201304); 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项(22060302)

作者简介: 贺 远, 博士研究生, 研究方向为植物生理与作物营养。E-mail: heyuan818@163.com。\*通信作者, E-mail: qdshiyi0@163.com。

收稿日期: 2014-02-16

修回日期: 2014-04-10

收,甚至导致植物死亡<sup>[2-5]</sup>。大量研究表明,Cd可破坏光合色素的合成,引起光合速率降低,抑制RuBP羧化酶活性,影响碳固定、PSII活力,并可诱导细胞膜脂过氧化作用<sup>[6-8]</sup>。

烟草是我国重要的经济作物之一<sup>[9]</sup>,是一种对环境极其敏感的作物,同时也是一种Cd的超富集植物<sup>[10]</sup>。Cd在烟草中具有毒性大,污染普遍,易在烟叶中累积,且易挥发,在烟气中的迁移比例高等特点。控制烟草制品中Cd的含量在减轻烟草重金属对人体危害方面意义重大。烟草制品中的Cd主要来源于烟叶生产过程,土壤是其主要途径之一<sup>[12]</sup>。控制Cd从土壤向烟草转移的过程是控制烟叶中Cd含量的有效方法。有关Cd对农作物的毒害机理,Cd怎样通过对植物的生理生化过程的影响造成农作物受害,以及如何降低农田土壤中的Cd污染,不少学者就Cd对烤烟的大田生长期做了一些研究<sup>[13-15]</sup>,但关于Cd对烤烟幼苗生长生理的影响研究较少,同时针对Cd在烟草中的赋存提取态的研究也鲜有报道。针对上述问题,本研究以栽培面积较广泛的烟草品种K326为试验材料,采用水培试验探讨不同Cd浓度处理下烤烟幼苗生长及生理生化变化,揭示重金属Cd毒害烟草幼苗的作用机制,以期在生产中获得优质、低危害的烟苗。

## 1 材料与方法

### 1.1 供试材料

烟草品种K326由中国烟草种质资源库提供,水培营养液采用1/4浓度的Hoagland完全营养液。Cd溶液以分析纯醋酸镉 $[(CH_3COO)_2Cd \cdot 3H_2O]$ ,分析纯 $[CaCl_2]$ 配制,设置不添加Cd(CK)、添加Cd 10和500  $\mu mol/L$  3个处理,3次重复,完全随机排列。

### 1.2 烟草幼苗培养

烟草种子经浸泡、灭菌、消毒后于28  $^{\circ}C$ 黑暗条件下催芽,发芽后移入石英砂培养基中培养至6叶1心期,选取大小一致的烟苗,用去离子水冲洗干净后移至营养液中培养7 d后放入不同镉浓度营养液中培养。烟苗培养所用容器为体积12 L的塑

料盆,每盆定植3株。烟苗培养在玻璃温室中进行,白天用通气泵进行通气14 h(6:00—18:00),期间每2 h停止通气1 h。培养期间每4 d更换1次营养液,营养液用0.1 mol/L NaOH或0.1 mol/L HCl调节溶液pH至6.0左右。

### 1.3 测试项目与方法

干物质质量的测定,取样后105  $^{\circ}C$ 杀青,75  $^{\circ}C$ 烘干至恒重。Cd含量的测定采用微波消解,ICP-MS法测定<sup>[16]</sup>。细胞内各化学提取态的分离,采用化学试剂逐步提取法,具体操作参照Perronnet的方法<sup>[17]</sup>。硝酸还原酶(Nitrate Reductase, NR)活性采用磺胺比色法测定;根系活力采用TTC法测定;叶绿素(Chlorophyll)含量采用乙醇丙酮提取法测定;丙二醛(MDA)含量采用硫代巴比妥酸法<sup>[18]</sup>测定。

### 1.4 数据处理

数据采用SPSS 13.0按单因素3重复完全随机设计进行统计分析。

## 2 结果

### 2.1 烟草幼苗各部位Cd含量

表1是Cd处理后烟草幼苗各部位Cd含量。可以看出,随着Cd浓度的增加,烟草幼苗中的Cd含量极显著地增加,但与CK相比,10  $\mu mol/L$  Cd浓度处理,其茎部和叶片的Cd含量增加不显著。在不添加Cd处理和10  $\mu mol/L$  Cd处理时,烟草幼苗各部位Cd含量为茎>根>叶。随着Cd浓度的提高,Cd主要集中在根部和茎部,在500  $\mu mol/L$  Cd处理时,烟草幼苗各部位Cd含量茎>根>>叶。

表1 Cd处理后烟草幼苗各部位Cd含量 mg/kg  
Table 1 Cd content of various parts of tobacco seedling with Cd treatment

Cd 浓度 /( $\mu mol \cdot L^{-1}$ )	根	茎	叶	整株
0	9.51a	12.91a	9.00a	31.42a
10	11.78b	13.78a	9.57a	35.13b
500	122.96c	132.29b	26.54b	281.79c

注:同一列内小写字母不同表示在0.05水平下差异显著,下同。

2.2 烟草幼苗各部位 Cd 的化学形态分布

从表 2 可以看出，烟草根系和叶片中 Cd 在不添加 Cd 处理和 10 μmol/L Cd 浓度处理时以醋酸提取态和氯化钠提取态为主；500 μmol/L Cd 处理时以去离子水提取态和醋酸提取态为主。其根系在 500

μmol/L Cd 处理时，去离子水提取态的 Cd 含量最高，而叶片中则以去离子水结合态含量最高。提高 Cd 处理浓度，Cd 存在由活性弱的化学形态向活性强的形态转化的趋势。

表 2 烟草幼苗中各种提取剂提取的 Cd 含量（鲜基） mg/kg

Table 2 The content of various extract Cd in tobacco seedlings

部位	Cd 浓度/(μmol·L <sup>-1</sup> )	乙醇提取	水提取	氯化钠提取	醋酸提取	盐酸提取	残留	回收率/%
叶	0	0.00a	0.15a	2.68a	3.92a	1.56a	0.36b	0.96
	10	0.17c	0.18a	2.72a	4.69b	1.31a	0.14a	0.96
	500	0.06b	6.86b	3.36b	11.84c	1.52a	0.38b	0.90
根	0	0.00a	0.09a	2.67a	4.33a	0.99a	0.27ab	0.88
	10	0.08b	0.66b	2.78a	5.02a	1.30b	0.21a	0.85
	500	0.33c	68.09c	9.23b	33.65b	2.63c	0.34b	0.93

注：回收率为各提取 Cd 之和/全量实测值。

叶片中的 Cd 含量在不添加 Cd 处理时主要以氯化钠提取态、醋酸提取态和盐酸提取态存在，添加 10 μmol/L Cd 浓度处理后，盐酸提取态含量降低，乙醇提取态和去离子水提取态的比例上升；添加 500 μmol/L Cd 处理后去离子水提取态和醋酸提取态所占的比例极显著的提高。根部在不添加 Cd 处理时 Cd 主要以醋酸提取态和氯化钠提取态存在，所占比例分别为 51.8%和 32.0% 添加 10 μmol/L Cd 浓度处理后去离子水提取态和乙醇提取态呈极显著提高 ( $P<0.01$ )，添加 500 μmol/L Cd 处理后，去离子水提取态极显著的提高，所占比例达到了 59.6%，醋酸提取态比例降低到了 29.4%。

2.3 烟草幼苗干物质积累

烟草幼苗总的干物质质量均表现为先略微升高后急剧降低，各处理干物质质量均表现为：叶>根>茎。茎部干物质重则在低浓度时与对照持平，高浓度时降低，叶片的干物质重表现为持续降低。Cd 浓度为 10 μmol/L 时根部的干物质重与对照之间差异不显著（图 1），Cd 浓度达到 500 μmol/L 时其干物质重量极显著低于对照处理，各处理间幼苗茎部的干物质重差异不显著，Cd 浓度为 10 μmol/L 时叶片的干物质重与对照差异不显著，500 μmol/L Cd 浓度处理下烟草幼苗的叶片干物质重极显著低于对照。

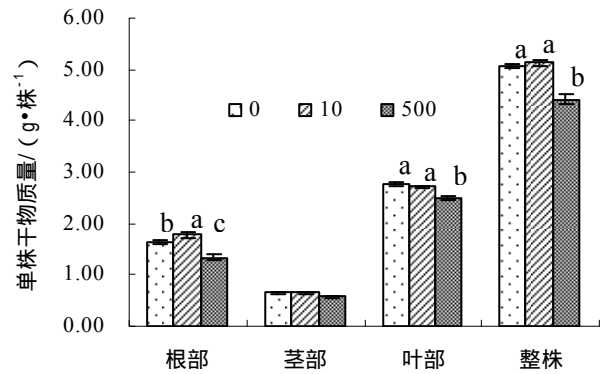


图 1 镉对烟草幼苗干物质重量的影响

Fig. 1 Influence of Cd on dry matter weight of tobacco seedling

整株干物质重，镉 500 μmol/L 与对照与 10 μmol/L Cd 处理差异均达到极显著水平，但对照与 10 μmol/L Cd 浓度处理间差异不显著。

2.4 烟草幼苗叶绿素及类胡萝卜素含量

从图 2 可以看出，叶绿素 a、叶绿素 b 和总叶绿素含量随着 Cd 浓度的增加显著降低，其中叶绿素 a 降幅最大，达到了 37.65%，而叶绿素 b 和总叶绿素含量的降低幅度分别达到了 34%和 36.78%。类胡萝卜素含量处理间无显著差异。

2.5 烟草幼苗其他生理指标

与对照相比，添加 10 μmol/L Cd 时，根系活

力并没有受到显著影响(图3A),添加500  $\mu\text{mol/L}$  Cd时,根系活力显著降低,降幅达44.89%,此说明添加大量的Cd会引起根系活力显著下降,但少量Cd(10  $\mu\text{mol/L}$ )并不会影响根系活力。

从图3B可以看出,与对照相比,添加10  $\mu\text{mol/L}$  Cd使硝酸还原酶活性显著增加,但过高的Cd会造成硝酸还原酶活性显著下降。

图3C显示了镉对烟草幼苗叶片丙二醛含量的影响,可以看出10  $\mu\text{mol/L}$  Cd浓度处理下烟草幼苗丙二醛含量与对照相比降低了8.52%,但是两者差异未达显著水平。当Cd浓度提高到500  $\mu\text{mol/L}$ 时,烟草幼苗丙二醛含量比对照高出35%,但差异未达

到5%显著水准。

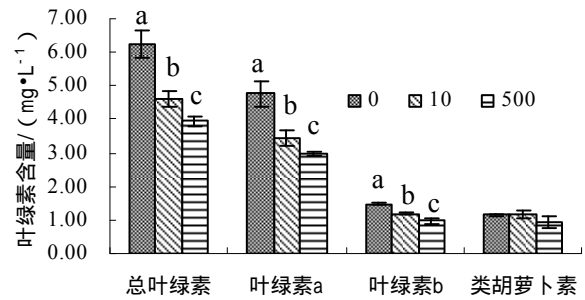


图2 烟草幼苗叶绿素类胡萝卜素含量

Fig. 2 Influence of Cd concentration on chlorophyll and carotenoid content in tobacco leaves

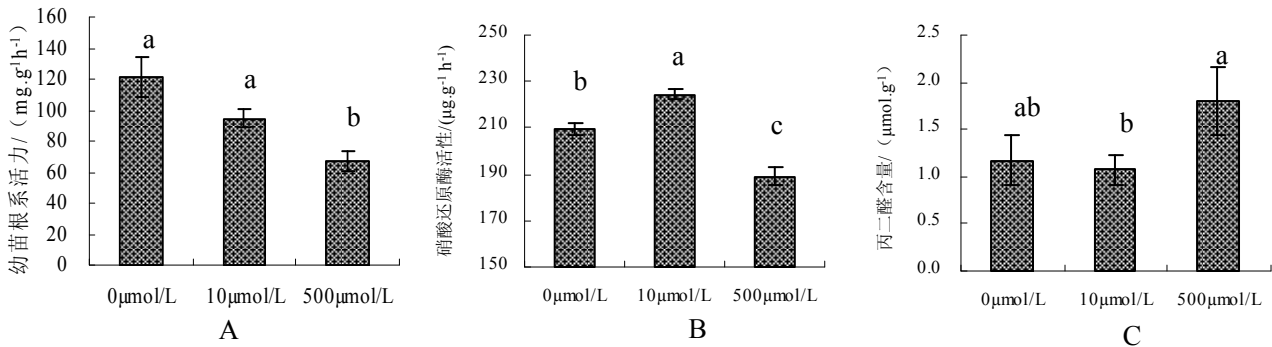


图3 烟草幼苗根系活力(A),硝酸还原酶活性(B)和丙二醛含量(C)

Fig. 3 Root activity(A), NR activity (B) and MDA(C) content of tobacco seedling

### 3 讨论

Cd在烟株地上和地下部的分配模式在不同作物中存在较大差异。Wagner等<sup>[19]</sup>通过水培试验发现,普通烟草主要将Cd储存在叶片和根部。袁祖丽<sup>[20]</sup>通过盆栽试验发现,当土壤中Cd的添加量为3~6 mg/kg时,根中Cd的含量要略高于叶片中Cd的含量,随着Cd污染程度的继续增加,叶片中的Cd含量才高于根。Clark<sup>[21]</sup>通过盆栽试验研究了16个烟草品种在不同污染条件下Cd的分配情况,发现在未添加外源Cd的情况下,叶、茎和根中Cd的含量分别为0.7、0.3和0.21 mg/kg,当向土壤添加0.25 mg/kg Cd后,Cd含量分别增至86.9、14.5和21.2 mg/kg。本研究结果表明:在不添加Cd处理和10  $\mu\text{mol/L}$  Cd处理时,烟草幼苗各部位Cd含量表现为:茎>根>叶,在500  $\mu\text{mol/L}$  Cd处理时,

烟草幼苗各部位Cd含量表现为:茎>根>>叶,这表明随着Cd浓度的提高,Cd主要被富集在根部和茎部。

Cd在各作物不同部位提取态存在较大差异,圆锥南芥叶片中以水提取态Cd为主,根系中乙醇提取态Cd的含量最高;当Cd提高到10 mg/L时,叶片和根系中Cd均以NaCl提取态含量最高,说明随着Cd浓度的增加,Cd与蛋白质、果胶酸等形态结合是圆锥南芥减轻Cd毒害的主要机制<sup>[22]</sup>。田阳阳等<sup>[23]</sup>在对烟草中Cd赋存形态的研究表明,烟草根系中Cd以乙醇提取态为主,叶片中Cd主要以氯化钠结合态和去离子水结合态存在。提高Cd处理浓度,Cd存在由活性强的化学形态向活性弱的形态转化的趋势。本研究的结果表明,随着Cd浓度的提高,Cd存在由活性弱的化学形态向活性强的形态转

化的趋势，这与前人的研究存在较大差异。而李彦娥等<sup>[24]</sup>的研究表明根部醋酸提取态分配比例最高，叶片中氯化钠提取态分配比例最高，这与本文的研究存在差异。

Cd 并非烟草生长所需的必需元素，但却易于被烟草吸收并且 Cd 胁迫明显抑制烤烟的生长，且随浓度增加其抑制程度加重。有研究表明，镉胁迫对烟草生长发育造成严重的伤害，如显著降低叶片叶绿素含量，增加 MDA 含量等，同时降低叶片氨基酸含量等<sup>[25-26]</sup>，还有研究表明<sup>[27]</sup>，Cd 胁迫对作物生长发育造成严重的伤害，能够显著的降低作物的生物量，这与本试验的研究结果一致。随着 Cd 浓度的升高，烟草幼苗的干物质重量明显下降，但是本研究发现低浓度的 Cd 处理能增加烟草幼苗根部的干物质质量，表明低浓度的 Cd 处理刺激了烟草幼苗根系的生长。

受 Cd 危害的植物，其叶绿体的合成受到影响，叶绿体提取量下降，对植物的光合作用将产生不利影响<sup>[28]</sup>。本研究的结果更加详细的探讨了叶绿素 a、b、总叶绿素和类胡萝卜素含量随着 Cd 浓度的变化而发生的变化，Cd 对叶绿素 a、b 和总叶绿素的影响均达到显著水平且叶绿素 a/b 的值呈现降低的趋势，这与马新明的研究一致<sup>[29]</sup>，只有在较高的 Cd 浓度处理下，类胡萝卜素的含量才显著下降，这点与前人的研究不尽相同。在本试验中，随 Cd 浓度的升高，烟草幼苗的长势越来越差，叶片出现黄化现象并且随着处理时间的延长，烟草幼苗出现萎焉现象并伴有根尖黑点，这与郭江波<sup>[30]</sup>的研究相近。有研究指出随着 Cd 浓度的提高，植物的根系活力逐渐降低<sup>[31]</sup>，本研究的结果与之相一致。硝酸还原酶是植物氮代谢过程中的关键酶，主要存在于叶绿体和前质体中，其活性的高低直接影响植物的氮同化速率。研究表明，在低浓度镉处理下，烟草幼苗的硝酸还原酶活性略微的升高而后随着镉浓度的提高呈现降低趋势，这与张秋银等<sup>[32]</sup>的研究一致。膜脂过氧化产物丙二醛(MDA)的含量是反映细胞膜过氧化作用强弱的一个指标。作物受 Cd 胁迫后，体内 MDA 含量显著增加，质膜透性增大，作

物生长受到显著的抑制<sup>[33]</sup>，本研究的结果证实了这一点，但在本研究中，在 10  $\mu\text{mol/L}$  Cd 处理时烟草幼苗的 MDA 含量出现了微量的减少，而后在 500  $\mu\text{mol/L}$  Cd 处理时则急剧降低，其原因有待进一步的研究。

## 4 结 论

本研究表明，在不添加 Cd 处理时，Cd 主要集中在烟草的茎部，随着 Cd 浓度的增加，叶片中 Cd 的积累量增加，但是 Cd 主要还是积累在根部和茎部。烟草根系中 Cd 以去离子水提取态为主，其次为醋酸提取态，叶片中 Cd 主要以醋酸结合态存在，提高 Cd 处理浓度，活性强 Cd 化学形态所占比例升高。Cd 抑制了烟草幼苗的生长，降低了烟草幼苗各项生理活性，使其碳氮代谢受到严重影响。低浓度的 Cd 处理在一定程度上能使烟草幼苗根部干物质重增加，叶片硝酸还原酶活性增强。综合本研究结果，我们认为要降低烟草中的 Cd 含量，必须在苗期严格控制重金属对幼苗的污染，在烤烟生产中栽种优质、低危害的烟苗。

## 参考文献

- [1] 秦天才, 吴玉树, 王焕校, 等. 镉、铅及其相互作用对小白菜根系生理生态效应的研究[J]. 生态学报. 1998, 18(3): 320-325.
- [2] López-Climent M F, Arbona V, Pérez-Clement R M. Effects of cadmium on gas exchange and phytohormone contents in citrus[J]. Biol. Plant. 2011, 55: 187-190.
- [3] Maksymiec W. Effects of jasmonate and some other signalling factors on bean and onion growth during the initial phase of cadmium action[J]. Biol. Plant, 2011, 55: 112-118.
- [4] Wójcik M, Tukiendorf A. Glutathione in adaptation of *Arabidopsis thaliana* to cadmium stress[J]. Biol. Plant., 2011, 55: 125-132.
- [5] Zacchini M, Iori V, Mugnozza S G, et al. Cadmium accumulation and tolerance in *Populus nigra* and *Salix alba*[J]. Biol. Plant. 2011, 55: 383-386.
- [6] Padmaja K, Parsad D D K, Parsad A R K. Inhibition of chlorophyll synthesis in *Phaseolus vulgaris* L. seedling by cadmium acetate[J]. Photosynthetica, 1990, 24: 399-404.
- [7] Sigfridsson K G V, Bernát G, Mamedov F, et al. Molecular interference of  $\text{Cd}^{2+}$  with Photosystem II[J]. Biochim. biophys. Acta, 2004, 1659: 19-31.

- [8] Krantev A, Yordanova R, Janda T, Szalai G. Treatment with salicylic acid decreases the effect of cadmium on photosynthesis in maize plants[J]. *J. Plant Physiol.* 2008, 165: 920-931.
- [9] 黄英华, 黄英梅, 李宝香. 中国烟草行业的市场定位及其发展方向的初步探讨[J]. *中国烟草学报*, 2008, 14(16): 57-61.
- [10] Andrea K, Lenka G, Sylva Z, et al. Cytological changes and alterations in polyamine contents induced by cadmium in tobacco BY-2 cells[J]. *Plant Physiology and Biochemistry*, 2004, 42(2): 149-156.
- [11] 张福锁. 环境胁迫与植物根际营养[M]. 北京: 中国农业出版社, 1998: 211.
- [12] 刘海伟, 石屹, 梁洪波. 烟草和卷烟中重金属迁移分配的研究进展[J]. *中国农业科技导报*, 2013, 15(2): 153-158.
- [13] 赵秀兰, 刘晓. 不同品种烟草生长和镉及营养元素吸收对镉胁迫响应的差异[J]. *水土保持学报*. 2009, 23(1): 117-121, 131.
- [14] 王文兴, 童莉, 海热提. 土壤污染物来源及前沿问题[J]. *生态环境*, 2005, 14(1): 1-5.
- [15] 赵中秋, 朱永官, 蔡运龙. 镉在土壤-植物系统中的迁移转化及其影响因素[J]. *生态环境*, 2005, 14(2): 282-286.
- [16] 侯冬岩, 回瑞华, 李铁纯, 等. 电感耦合等离子体质谱法(ICP-MS)同时测定正山小种红茶中 18 种微量元素[J]. *中国无机分析化学*, 2012, 2(2): 52-56.
- [17] Perronnet K, Schwartz C, Gerard E, et al. Distribution of cadmium and zinc in the hyperaccumulator *Thlaspi caerulescens* grown on multicontaminated soil[J]. *Plant and Soil*, 2003, 249: 19-25.
- [18] 陈建勋, 王晓峰. 植物生理学实验指导[M]. 广州: 华南理工大学出版社, 2002.
- [19] Wagner G J, Yeargan R. Variation in cadmium accumulation potential and tissue distribution of cadmium in tobacco[J]. *Plant Physiology*, 1986, 82: 274-279.
- [20] 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, 2005.
- [21] Clarke B, Brennan E. Differential cadmium accumulation and phytotoxicity in sixteen tobacco cultivars [J]. *Air & Waste Management Association*. 1989, 39: 1319-1322.
- [22] 于方明, 汤叶涛, 周小勇, 等. 镉在圆锥南芥 (*Arabis paniculata* Franch.) 中的亚细胞分布及其化学形态[J]. *中山大学学报: 自然科学版*, 2007, 46(6): 88-92.
- [23] 田阳阳, 陈江华, 张艳玲, 等. 不同 Cd 积累基因型烟草中 Cd 的亚细胞分布及化学形态[J]. *烟草科技*, 2012(2): 6-70.
- [24] 李彦娥, 赵秀兰. 镉胁迫下不同品种烟草镉化学形态分布研究[J]. *中国农学通报*, 2013, 29(16): 69-73.
- [25] 汪洪, 周卫, 林葆. 钙对镉胁迫下玉米生长及生理特性的影响[J]. *植物营养与肥料学报*. 2001, 7(1): 78-87.
- [26] 周静, 汪天, 崔健, 等. 红壤水分条件对柑橘叶片氨基酸及多胺含量的影响[J]. *中国农业生态学报*. 2009, 17(1): 85-89.
- [27] 李新博, 谢建治, 李博文, 等. 印度芥菜-苜蓿间作对镉胁迫的生态响应[J]. *应用生态学报*. 2009, 20(7): 1711-1715.
- [28] 袁祖丽, 马新明, 韩锦峰, 等. 镉污染对烟草叶片超微结构及部分元素含量的影响[J]. *生态学报*, 2005, 25(11): 2919-2927.
- [29] 马新明, 李春明, 袁祖丽. 镉和铅污染对烤烟根区土壤微生物及烟叶品质的影响[J]. *应用生态学报*, 2005, 16(11): 182-186.
- [30] 郭江波, 唐炳, 王建英, 等. 镉胁迫对烟草生理特性的影响[J]. *浙江农业学报*. 2013, 25(6): 1279-1283.
- [31] 张呈祥, 陈为峰. 德国鸢尾对 UC 胁迫的生理生态响应及积累特性[J]. *生态学报*. 2013, 33(7): 2165-2172.
- [32] 张银秋, 台培东, 李培军, 等. 青鲜素与谷胱甘肽对万寿菊镉积累的影响[J]. *生态学杂志*, 2010, 29(5): 887-891.
- [33] Xu Zhiqiang, Zhou Qixing, Liu Weitao. Joint effects of cadmium and lead on seedlings of four Chinese cabbage cultivars in northeastern China [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2009, 21(11): 1598-1606.