

## 溶液 Ca、K 浓度和 pH 对烟草 Cd 毒性的影响

雷丽萍<sup>1</sup>, 陈世宝<sup>2\*</sup>, 孙 聪<sup>2</sup>, 徐照丽<sup>1</sup>, 汪安云<sup>1</sup>, 柴家荣<sup>1</sup>

(1. 云南省烟草农业科学研究院, 云南 玉溪 653100; 2. 农业部植物营养与施肥重点实验室, 中国农业科学院农业资源与农业区划研究所, 北京 100081)

**摘要:** 通过水培实验, 利用逻辑斯蒂克分布模型研究了溶液中不同 Ca、K 浓度及 pH 条件下镉 (Cd) 对烟草的急性毒性。结果表明, 随着溶液 pH 的升高, Cd 对烟草根伸长的 10% 抑制浓度 (EC<sub>10</sub>) 及半抑制浓度 (EC<sub>50</sub>) 逐渐增加, 也即 Cd 的毒性逐渐降低, 溶液的 pH 与烟草 Cd 毒性 EC<sub>10</sub>、EC<sub>50</sub> 间呈显著的正相关关系, 当溶液 pH 从 4.52 增加到 8.10 时, 烟草根伸长的 EC<sub>50</sub> 增加了 6.73 倍。烟草 Cd 毒性 EC<sub>10</sub>、EC<sub>50</sub> 测定结果表明, 当溶液 Ca 离子浓度 < 128.0 mg/L 时, 添加 Ca 离子浓度可以显著降低烟草 Cd 的毒性; 与 Ca 不同, 当溶液中 K 离子浓度 < 64.0 mg/L 时, K 离子浓度的增加并没有显著降低 Cd 的毒性, 当溶液中 K 离子浓度 > 64.0 mg/L, 溶液 K 离子浓度增加可以显著降低烟草 Cd 的毒性。在烟草 Cd 污染胁迫条件下, 提高介质 pH 和增加介质中 Ca、K 离子的浓度是有效降低 Cd 毒性的措施之一。

**关键词:** 烟草, 镉, 钙, 钾, pH

中图分类号: S572.01

文章编号: 1007-5119 (2012) 04-0079-06

DOI: 10.3969/j.issn.1007-5119.2012.04.017

## Influence of Ca, K Concentration and pH Value in Solution on Cd Toxicity to Tobacco in Solution Culture

LEI Liping<sup>1</sup>, CHEN Shibao<sup>2\*</sup>, SUN Cong<sup>2</sup>, XU Zhaoli<sup>1</sup>, WANG Anyun<sup>1</sup>, CHAI Jiarong<sup>1</sup>

(1. Yunnan Academy of Tobacco Sciences, Yuxi, Yunnan 653100, China; 2. Ministry of Agriculture Key Laboratory of Crop Nutrition and Fertilization, Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, CAAS, Beijing 100081, China)

**Abstract:** The acute toxicity of cadmium (Cd) to tobacco cultivar (*Nicotiana tabacum* L.) as affected by calcium (Ca), potassium (K) concentrations and pH values was assessed by using Log-logistic distribution model in solution culture. The results showed that the 10% and half inhibitory concentration (EC<sub>10</sub>, EC<sub>50</sub>) of Cd toxicity increased with the increment of pH values in solution as determined by tobacco root elongation, which indicated that the toxicity of Cd to tobacco decreased with the increasing pH values in solution, a significantly positive correlation was observed between the ECs (s=10, 50) and pH values in solution. The half inhibitory concentration (EC<sub>50</sub>) of Cd toxicity to tobacco increased 6.73 times greater when the pH value increased from 4.52 to 8.10 in solution. The addition of Ca ion in solution could markedly decrease the Cd-toxicity to tobacco cultivar as assessed by EC<sub>10</sub> and EC<sub>50</sub> with an optimum maximum concentration of 128.0 mg/L. In terms of K ion, low concentration of K ion addition (<64.0 mg/L) could marginally decrease the toxicity of Cd to tobacco cultivar in solution as assessed by EC<sub>10</sub>, however, it could significantly decrease the Cd-toxicity to tobacco cultivar with greater concentration addition more than 64.0 mg/L in solution. Increasing pH and Ca, K concentration in culture matrix could significantly decrease toxicity of Cd to tobacco cultivars in Cd-polluted matrix.

**Keywords:** tobacco; cadmium; calcium; potassium; pH

在土壤重金属污染中, 镉 (Cd) 是影响我国烟草安全性的主要污染元素之一<sup>[1-3]</sup>。烟草属于易累积 Cd 的经济作物之一, Cd 污染胁迫不仅影响烟草的生理过程, 同时也会降低烟叶的品质<sup>[3-4]</sup>。虽然在近 10 多年来国内外对烟草重金属的相关研究取得了

不少进展<sup>[1,5-7]</sup>, 但主要还是集中在对植烟区土壤和烟叶中的重金属 (包括 Cd) 含量的监测、烟草土壤中重金属的富集研究等, 少量研究涉及不同重金属污染对烟叶质量的影响、生理反应及其减控措施等<sup>[8-12]</sup>, 而针对烟草 Cd 胁迫毒性与环境因子之间的

基金项目: 云南省烟草公司项目 (A03、09YN006、2010YN16); 国家自然科学基金 (21077131)

作者简介: 雷丽萍, 女, 副研究员, 长期从事低危害烟草研究。E-mail: lplei@yntsti.com。\*通信作者, E-mail: sbchen@mail.caas.net.cn

收稿日期: 2012-03-16

量化关系研究较少。

烟草主要通过根系对 Cd 进行吸收、累积,因此,不同土壤性质对土壤中 Cd 的迁移、转化特性有显著影响,如土壤 pH、有机质含量、阳离子交换量及粘粒含量等<sup>[1]</sup>。除了上述土壤性质外,土壤溶液阳离子组成与含量与烟草对 Cd 吸收的影响还未见报道。本研究通过水培实验,利用 ISO 毒性测试方法,研究溶液中 Ca、K 离子浓度变化及溶液 pH 对烟草 Cd 毒性的影响,以期对烟草 Cd 减控措施提供科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验设计

溶液性质变化实验共设钙(Ca)、钾(K)和 pH 3 个组,实验以 8.0 mg/L 的 Ca (以 Ca(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub> 进行配制)作为背景溶液。8.0 mg/L 的 Ca<sup>2+</sup>是土壤孔隙水中 Ca<sup>2+</sup>的最低浓度,也通常作为植物毒性测试的一种背景溶液<sup>[13]</sup>。溶液 Ca、K 离子浓度的变化范围参照自然土壤孔隙水的离子浓度范围进行设置<sup>[13]</sup>。本试验中,设置 Ca<sup>2+</sup>离子浓度分别为 0、8.0、16.0、32.0、64.0、128.0、256.0、400.0 mg/L;设置 K<sup>+</sup>离子(以 KNO<sub>3</sub> 进行配制)浓度分别为 0、4.0、8.0、16.0、32.0、64.0、128.0、256.0 mg/L;溶液 pH 分别为 4.52、5.04、5.57、6.02、6.55、7.09、7.47 和 8.10。

### 1.2 溶液配制

用钙与钾的硝酸盐分别配制 Ca<sup>2+</sup>、K<sup>+</sup>母液,通过添加不同量的母液配制成不同 Ca<sup>2+</sup>、K<sup>+</sup>浓度的供试溶液。除 pH 组外,钙与钾溶液分别以 2.0 mmol/L 的 2-吗啉乙磺酸缓冲液(MES)调节溶液 pH 为 6.0,每组钙与钾离子浓度及不同 pH 溶液中,通过添加 Cd(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>·4H<sub>2</sub>O,分别配制 7 个浓度的 Cd 溶液(0、1.12、2.24、4.48、8.96、17.92、35.84 mg/L),每处理设 3 次重复。

### 1.3 毒性测试

根伸长抑制试验参照 ISO 标准(11269—1)<sup>[14]</sup>。烟草品种为云烟 87。将上述烟草种子在 10% (v/v)

H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 中表面消毒 10 min 后,冲洗干净,放于底部铺有纱布的培养皿上,滤纸用蒸馏水浸湿,然后置于温度为 (20±2) °C 无光照的培养箱中直到种子露白。生长箱的光照时间保持在 14 h,光强度约为 280 μmol/(m<sup>2</sup>·s),相对湿度保持在 80%,昼夜温度保持在 20~25 °C。培养 24 h 后,挑选出大小一致、幼根长度约为 2 mm 的种子进行根伸长抑制水培试验。水培装置采用顶部罩有玻璃纤维网的 PVC 培养筒(直径 7.0 cm,高 12 cm),每个处理为 10 粒种子,暴露于装有不同供试溶液组的培养筒,然后置于培养箱中进行培养。PVC 培养筒在培养箱中随机放置,每 2 d 更换溶液并变换烧杯的位置,培养 7 d 后测定种子的根长。相对于对照的根的伸长百分比(RE)依据公式计算:

$$RE = \frac{Ret}{Rec} * 100\%$$

式中,Ret 为处理溶液中根的伸长(cm),Rec 为对照溶液中根的伸长(cm)。

### 1.4 测定分析

在进行毒性测试前,经过消化以(石墨)原子吸收光谱法(F-AAS; Varian 220Z)(AAS)对每组溶液中 Cd、Ca 及 K 的实际含量进行测定。预备实验结果表明,植物生长 2 d 对溶液中 Cd、Ca 及 K 离子浓度影响可以忽略,因此,溶液每 2 d 更换 1 次。用梅特勒 pH 计(Delta320, Mettler)对溶液的实际 pH 进行测定,以获得培养溶液最终 pH。

### 1.5 统计分析

剂量-效应曲线拟合:溶液中 Cd 植物毒性的剂量-效应关系曲线采用逻辑斯蒂克分布模型(Log-logistic distribution)进行拟合<sup>[15]</sup>。

Log-logistic 曲线:

$$y = \frac{y_0}{1 + e^{(b(x-M))}}$$

式中,x 为溶液中 Cd 浓度值(mg/L);M 为 EC<sub>x</sub> 的自然对数值,b 为参数。当低剂量毒物刺激效应发生时,采用低剂量毒物刺激效应(hormesis)曲线拟合<sup>[15]</sup>,通过 Table curve 2D-V5.01 软件来完

成。当溶液中低浓度 Cd 对烟草产生刺激效应时，采用低剂量刺激效应拟合方程（Hormesis dose-response data fitting）进行毒性效应的拟合，方程如下：

$$Y = \frac{a + bX}{1 + \left\{ \frac{k}{100 - k} + \left( \frac{100}{100 - k} \right) \frac{bc}{a} \right\} \exp[ d \ln X / c]}$$

式中，Y 是烟草相对根长（%），X 是溶液 Cd 的浓度（mg/L），a、b、c、d 是方程参数。当 k 为 10、50 时，参数 c 定义为 EC10 及 EC50。所有实验数据均采用 Excel 2007 和 SPSS13.0 分析软件进行处理，LSD 法检测差异显著性（ $p < 0.05$ ）。

## 2 结 果

### 2.1 溶液 pH 对烟草 Cd 毒性的影响

溶液 pH 对烟草 Cd 毒性的影响浓度 EC10、EC50 值及其 95%置信区间见表 1。可以看出，随着 pH 的升高，Cd 对烟草毒性的影响浓度值 EC10、EC50 值逐渐增加，且 EC50 值变化趋势较 EC10 更为明显，这一结果表明，随着溶液 pH 的逐渐升高，Cd 对烟草胁迫毒性逐渐降低。就 EC10 变化而言，最低 pH（4.52）处理 Cd 的 10%毒害浓度值仅为最高 pH（8.10）处理毒害浓度的 28.4%，其中在较低 pH（ $< 5.57$ ）条件下，EC10 之间差异并不显著，而随着 pH 逐渐升高，Cd 对烟草毒害 EC10 显著增加；相对 EC10 而言，溶液 pH 变化对 Cd 的 50%毒害浓度值影响更为显著，最低 pH（4.52）处理 Cd 的 50%毒害浓度值仅为最高 pH（8.10）处理毒害浓度的

表 1 不同 pH 条件下 Cd 对烟草毒性的影响

溶液 pH	EC10/ (mg·L <sup>-1</sup> )	95% 置信区间	EC50/ (mg·L <sup>-1</sup> )	95% 置信区间
4.52	4.156d	3.652 ~ 4.729	9.110g	8.643 ~ 9.602
5.04	4.298d	3.926 ~ 4.706	10.211f	9.821 ~ 10.616
5.57	4.395d	4.139 ~ 4.666	10.957e	10.675 ~ 11.245
6.02	6.391c	5.841 ~ 6.993	16.879d	16.266 ~ 17.515
6.55	8.004bc	6.074 ~ 10.545	18.682d	16.534 ~ 21.109
7.09	10.579b	9.821 ~ 11.394	25.104c	24.321 ~ 25.913
7.47	12.799a	12.303 ~ 13.316	30.539b	30.067 ~ 31.017
8.10	14.638a	12.438 ~ 17.226	61.286a	53.928 ~ 69.647

注：同列内字母不同表示 5%显著差异。

14.9%，除了 pH 6.02 和 pH 6.55 二个处理间 EC50 没有显著性差异外，EC50 值随着溶液 pH 的升高 EC50 值显著增加（ $p < 0.05$ ）。

相关分析结果表明，溶液的 pH 与烟草 Cd 毒性影响浓度间呈显著正相关关系，方程为  $EC10 = 3.2072pH - 12.032$ ， $R^2 = 0.9325^{**}$ ； $EC50 = 12.16pH - 53.7$ ， $R^2 = 0.7563^*$ 。

### 2.2 溶液 Ca 离子浓度对烟草 Cd 毒性的影响

通过利用逻辑斯蒂克分布模型并结合低剂量刺激效应拟合方程对 8 个不同 Ca<sup>2+</sup>浓度下 Cd 毒性进行了测定。培养溶液中不同 Ca<sup>2+</sup>浓度变化对烟草 Cd 毒害的剂量-效应关系见图 1。从图 1A 可以看出，在相对低 Ca<sup>2+</sup>浓度（ $< 64.0$  mg/L）处理下，Cd 的毒害影响浓度（纵坐标）相同时，随着溶液 Ca<sup>2+</sup>浓度的增加，溶液中 Cd 的浓度也逐渐增加，换言之，

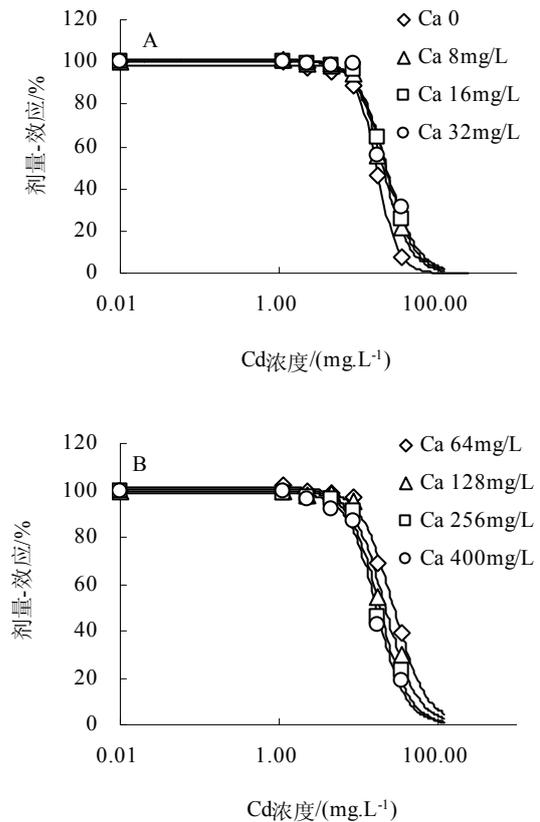


图 1 不同 Ca 离子浓度条件下 Cd 对烟草毒性的剂量-效应关系（实线为模型预测值）

Fig. 1 The dose-response curves of Cd to tobacco with different Ca<sup>2+</sup> in solution

随着溶液  $\text{Ca}^{2+}$  浓度的增加, Cd 对烟草毒害浓度逐渐降低, 烟草 Cd 的 50% 毒害浓度  $\text{EC}_{50}$  与溶液  $\text{Ca}^{2+}$  浓度之间呈正相关关系 (图 2), 相关关系方程为:  $\text{EC}_{50} = 0.1775[\text{Ca}^{2+}] + 18.03$ ,  $R^2 = 0.8521$ ; 而随着溶液  $\text{Ca}^{2+}$  浓度的逐渐增加, 在相对高  $\text{Ca}^{2+}$  浓度 ( $>128.0 \text{ mg/L}$ ) 处理下 (图 1B), 随着溶液  $\text{Ca}^{2+}$  浓度的增加, Cd 对烟草毒害浓度  $\text{EC}_{50}$  逐渐降低, 此表明, 溶液中  $\text{Ca}^{2+}$  浓度的持续增加并不能降低溶液中 Cd 对烟草的致害浓度值。

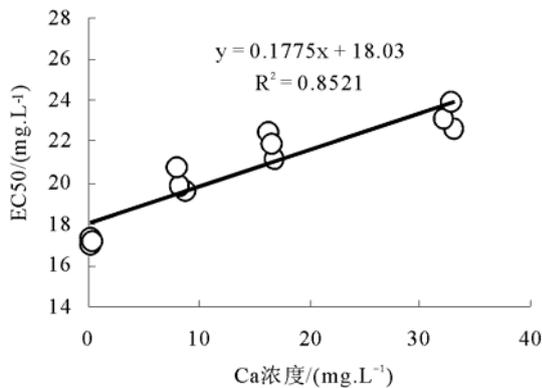


图 2 溶液中  $\text{Ca}^{2+}$  离子浓度与 Cd 对烟草毒性  $\text{EC}_{50}$  间的关系

Fig. 2 Relationship between the Cd toxicity ( $\text{EC}_{50}$ ) to tobacco and  $\text{Ca}^{2+}$  concentration in solution

### 2.3 溶液 K 离子浓度对烟草 Cd 毒性的影响

溶液不同  $\text{K}^+$  浓度变化对 Cd 烟草毒性影响浓度见图 3。就 Cd 对烟草毒性影响浓度  $\text{EC}_{10}$  而言, 在相对低浓度 ( $<64.0 \text{ mg/L}$ ) 条件下,  $\text{K}^+$  浓度的增加并没有显著降低 Cd 的致害浓度  $\text{EC}_{10}$ , 而随着  $\text{K}^+$  浓度逐渐增加,  $\text{EC}_{10}$  值显著增加 ( $p < 0.05$ ), 不同浓度  $\text{K}^+$  处理的 Cd 的  $\text{EC}_{10}$  变化为  $8.54 \sim 20.23 \text{ mg/L}$ 。相对  $\text{EC}_{10}$  而言, 溶液中的  $\text{K}^+$  浓度变化对烟草 Cd 毒性的  $\text{EC}_{50}$  影响更为明显, 从图 3 可以明显看出, 随着溶液中的  $\text{K}^+$  浓度的增加,  $\text{EC}_{50}$  值逐渐增加, 也即表明 Cd 的毒害显著降低, 不同处理 Cd 的  $\text{EC}_{50}$  浓度变化为  $17.29 \sim 39.03 \text{ mg/L}$ , 其中对照处理  $\text{EC}_{50}$  值为最高  $\text{K}^+$  处理  $\text{EC}_{50}$  值的 44.3%。 $\text{K}^+$  浓度与 Cd 毒害的  $\text{EC}_{50}$  值之间呈显著的正相关关系 ( $\text{EC}_{50} = 0.0767[\text{K}^+] + 21.276$ ,  $R^2 = 0.8709$ )。

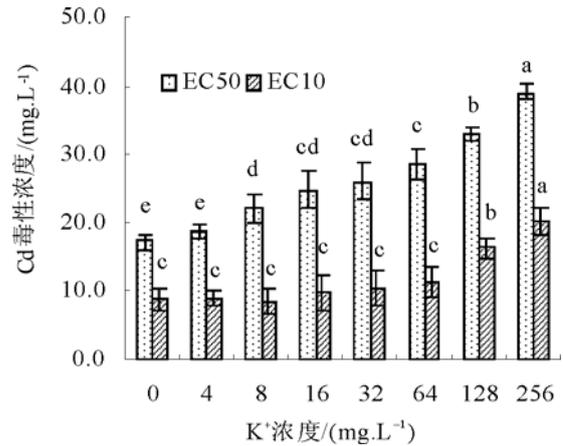


图 3 不同 K 离子浓度条件下 Cd 对烟草毒性的影响  
Fig. 3 The toxicity thresholds of Cd to tobacco as affected by different  $\text{K}^+$  concentration in solution

## 3 讨论

### 3.1 溶液 pH 对 Cd 毒性的影响

在影响烟草对 Cd 吸收的土壤性质中, pH 是其中重要的影响因子之一。有大量研究表明, 土壤 pH 变化是影响烟草对污染土壤中 Cd 吸收最重要的影响因子之一<sup>[1,16-17]</sup>。进入土壤中的  $\text{Cd}^{2+}$ , 以不同结合形态存在于土壤固-液体系中, 随着土壤 pH 的升高, 土壤胶体带负电荷逐渐增加, 导致土壤胶体对 Cd 离子的吸附明显增加, 从而降低 Cd 的迁移转化性。

Zachara 等<sup>[18]</sup>对土壤中 Cd 的结合形态研究发现, 当  $\text{pH} > 8.0$  时, 土壤中的 Cd 几乎都以氧化铁、铝和硅酸盐等植物无效态存在, 而当土壤 pH 为中、酸性时, Cd 则以较多的有机结合形态及可交换态等有效态存在于土壤中。pH 变化导致土壤中 Cd 结合形态的变化是影响烟草对 Cd 吸收、转化的最根本原因。本试验结果显示, 对于 10% 的致害浓度 ( $\text{EC}_{10}$ ) 而言, 在溶液  $\text{pH} < 5.57$  的酸性条件下, 随着 pH 的升高, Cd 的毒性虽然有所降低, 但并不显著, 而随着 pH 的逐渐升高达到碱性 ( $\text{pH} > 7.09$ ) 条件下, Cd 的毒性显著降低, 而这一结果对于半抑制浓度 ( $\text{EC}_{50}$ ) 的影响更为显著, 这可能与 Cd 在溶液中随着 pH 升高, 其吸附形态的变化有关。

### 3.2 溶液中 Ca、K 离子的影响

在烟草对 Cd 吸收的影响因子中,除了土壤 pH 外,土壤溶液中阳离子的种类和含量也是其中重要影响因子之一。土壤中的金属阳离子,如 Ca、K、Co、Cu、Ni 及 Pb 等,由于和 Cd 具有类似的物理、化学性质,在一定程度上影响土壤胶体对 Cd 的吸附-解吸作用,从而影响土壤中 Cd 的植物有效性<sup>[19-20]</sup>。土壤中胶体的种类及其交换性能对 Cd 离子的吸附作用大小对烟草 Cd 吸收有十分重要影响。有研究表明,烟草对土壤中 Cd 的吸收与土壤的阳离子交换量(CEC)呈明显负相关关系<sup>[19]</sup>,如 Adamu 等<sup>[21]</sup>在 13 种土壤中烟草对 Cd 吸收实验结果表明,烟叶中 Cd 的含量与土壤阳离子交换量呈显著负相关关系;另有资料报道,土壤中的 Zn 通过对土壤胶体吸附位的竞争从而影响烟草对 Cd 的吸收、转化。在烟草根系对 Cd 吸收转运的过程中,Zn 的存在会影响植物根细胞质膜对 Cd 向韧皮部的转运,而当 Zn 进入植株体内后,Zn 由于和植物蛋白产生竞争络合作用从而影响植物体内 Cd 的再分配过程,也即产生拮抗效应<sup>[22-23]</sup>。除了 Zn 外,土壤中其他金属元素,如 Fe、Ca、K 等阳离子的存在也会由于 Fe-Cd、Ca-Cd 的拮抗作用而降低烟草对 Cd 的吸收、转运<sup>[1]</sup>。

烟草根系主要通过 H<sup>+</sup>-ATP 酶的作用对溶液中的 K<sup>+</sup>进行主动运输或通过低亲和力的 K<sup>+</sup>内流通道和非选择性的阳离子通道进行被动运输。提高溶液中 K<sup>+</sup>浓度对降低烟草 Cd 毒性的机制可能与以下原因有关,一是提高 K<sup>+</sup>浓度可以促进烟草的生长,增强烟草对 Cd 胁迫的耐性,二是由于 K<sup>+</sup>在溶液中通过与 Cd<sup>2+</sup>竞争阳离子吸附点位及 Cd<sup>2+</sup>进入植物细胞阳离子运输通道等。本研究结果表明,虽然在低浓度(<64.0 mg/L)条件下,添加 K<sup>+</sup>在一定程度上增加了烟草 Cd 胁迫的抗性,但就 10%毒性影响浓度(EC10)而言,与对照相比并不显著( $p>0.05$ ),随着溶液中 K<sup>+</sup>浓度的增加,显著降低了溶液中 Cd 对烟草的毒性,因此,在烟草 Cd 胁迫条件下,增加介质中 K 的浓度,可以显著降低 Cd 对烟草的毒性。

## 4 结 论

(1) 水培试验结果表明,随着溶液 pH 的升高,Cd 对烟草的毒性浓度值 EC10、EC50 逐渐增加,也即表明 Cd 的毒性逐渐降低,溶液的 pH 与烟草 Cd 毒性影响浓度值间呈显著正相关关系。

(2) 在溶液 Ca<sup>2+</sup>浓度 < 64.0 mg/L 处理下,随着溶液 Ca<sup>2+</sup>浓度的增加,Cd 对烟草毒害浓度逐渐降低,烟草 Cd 的 50%毒害浓度 EC50 与溶液 Ca<sup>2+</sup>浓度之间呈正相关关系;而随着溶液 Ca<sup>2+</sup>浓度的逐渐增加,当 Ca<sup>2+</sup>浓度 > 128.0 mg/L 时,溶液中 Ca<sup>2+</sup>浓度的增加并不能降低 Cd 对烟草的毒性;与 Ca<sup>2+</sup>相比,在相对低浓度(< 64.0 mg/L)条件下,K<sup>+</sup>浓度的增加并没有显著降低 Cd 的毒性,而随着 K<sup>+</sup>浓度逐渐增加,EC10 及 EC50 值显著增加,溶液中高 K<sup>+</sup>浓度(>64.0 mg/L)可以显著降低烟草 Cd 的毒性。

(3) 在烟草 Cd 污染胁迫条件下,提高介质 pH 和增加介质中 Ca<sup>2+</sup>、K<sup>+</sup>的浓度可以有效降低 Cd 的毒性。

### 参考文献

- [1] 雷丽萍,陈世宝,夏振远,等. 烟草对污染土壤中镉胁迫的响应机制及影响因素研究进展[J]. 中国烟草科学, 2011, 32(4): 87-93.
- [2] 刘义新,陶涌,孟丽华,等. 烤烟品种 K326 和云烟 87 对镉胁迫的生理响应及抗性差异[J]. 中国烟草科学, 2008, 29(4): 1-5.
- [3] 马新明,李春明,田志强,等. 镉污染对烤烟光合特性、产量及其品质的影响[J]. 生态学报, 2006, 26(12): 4039-4043.
- [4] 高家合,王树会. 镉胁迫对烤烟生长及生理特性的影响[J]. 农业环境科学学报, 2006, 25(5): 1167-1170.
- [5] 张艳玲,周汉平. 烟草重金属研究概述[J]. 烟草科技, 2004(12): 20-27.
- [6] 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: 45-50.
- [7] Verma S, Yadav S, Singh I. Trace metal concentration in different Indian tobacco products and related health implications [J]. Food and Chemical Toxicology, 2010, 48: 2291-2297.

- [8] 吴玉萍, 杨虹琦, 徐照丽, 等. 重金属镉在烤烟中的累积分配[J]. 中国烟草科学, 2008, 29(5): 37-39.
- [9] 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.
- [10] 刘双营, 李彦娥, 赵秀兰. 不同品种烟草镉吸收的动力学研究[J]. 中国农学通报, 2010, 26(5): 257-261.
- [11] Toma G, Zden P, Jir S, et al. Toxicity and DNA damage in tobacco and potato plants growing on soil polluted with heavy metals [J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2006, 65: 420-426.
- [12] Isaure M P, Sarret G, Harada E, et al. Calcium promotes cadmium elimination as vaterite grains by tobacco trichomes[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 2010, 74: 5817-5834.
- [13] Oorts K, Ghesquiere U, Swinnen K, et al. Soil properties affecting the toxicity of  $\text{CuCl}_2$  and  $\text{NiCl}_2$  for soil microbial processes in freshly spiked soils[J]. Environ Toxicol Chem, 2006, 25(3): 836-844.
- [14] International Organization for Standardization. Soil quality determination of the effects of pollutants on soil flora, Part 1: method for the measurement of inhibition of root growth, ISO 11269-1[S]. Geneva, Switzerland, 1993.
- [15] Schabenberger K, James J. Kells G, et al Response of annual weed species to glufosinate and glyphosate [J]. Weed Technology, 1999, 13(3): 542-547.
- [16] Tsadilas C D. Soil pH influence on cadmium uptake by tobacco in high cadmium exposure [J]. J. Plant Nutr, 2000, 23, 1167-1178.
- [17] Maier N A, McLaughlin M J, Heap M, et al. Effect of nitrogen source and calcitic lime on soil pH and potato yield, leaf chemical composition, and tuber cadmium concentrations [J]. J. Plant Nutr., 2002, 25: 523-544.
- [18] Zachara J M, Smith S C, Resch C T, et al. Cadmium sorption to soil separates containing layer of silicates and iron and aluminium oxides [J]. Soil Sci. Soc. Am. J., 1992, 56: 1074-1084.
- [19] Ghnaya T, Slama I, Messedi D. Effects of  $\text{Cd}^{2+}$  on  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$  and N uptake in two halophytes *Sesuvium portulacastrum* and *Mesembryanthemum crystallinum*: consequences on growth [J]. Chemosphere, 2007, 67: 72-79.
- [20] Larsson E H, Asp H, Bormann J F. Influence of prior  $\text{Cd}^{2+}$  exposure on the uptake of  $\text{Cd}^{2+}$  and other elements in the phytochelatin-deficient mutant, *cad1-3*, of *Arabidopsis thaliana* [J]. J. Exp. Bot., 2002, 53: 447-453.
- [21] Adamu C A, Mulchi C, Bell P F. Relationships between pH, clay, organic matter and CEC and heavy metal concentrations in soils and tobacco [J]. Tob. Sci., 1989, 33: 96-100.
- [22] Hart J J, Welch R M, Norvell W A, et al. Transport interactions between cadmium and zinc in roots of bread and durum wheat seedlings [J]. Physiol. Plant., 2002, 116: 73-78.
- [23] Green C E, Chaney R L, Bouwkamp J. Interactions between cadmium uptake and phytotoxic levels of zinc in hard red spring wheat [J]. J. Plant Nutr., 2003, 26: 417-430.