

# 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

雷丽萍<sup>1</sup>, 陈世宝<sup>2\*</sup>, 夏振远<sup>1</sup>, 柴家荣<sup>1</sup>, 王 萌<sup>2</sup>

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

**摘要:** 低危害烟叶的开发研究一直是国内外烟草研究的热点。大量研究表明, 土壤镉 (Cd) 污染是影响我国烟草品质安全性的主要因素之一。烟草属于易累积 Cd 的作物之一, 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。笔者针对目前国内外对 Cd 在土壤-烟草系统中的迁移、转化规律及其影响因素进行了综述, 并对降低烟草 Cd 吸收的主要措施及相关研究进行了展望。

**关键词:** 镉胁迫; 污染土壤; 烟草; 修复

中图分类号: S572.061

文章编号: 1007-5119 (2011) 04-0087-07

DOI: 10.3969/j.issn.1007-5119.2011.04.020

## Tolerance and Accumulation of Cadmium by Tobacco Plants and the Influence Factors in Polluted Soils: a Review

LEI Liping<sup>1</sup>, CHEN Shibao<sup>2\*</sup>, XIA Zhenyuan<sup>1</sup>, CHAI Jiarong<sup>1</sup>, WANG Meng<sup>2</sup>

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

**Abstract:** Cultivation of low-hazard-tobacco (*Nicotiana tabacum* L.) has been focus of research on tobacco sciences. Recently, numerous studies indicated that cadmium accumulation by tobacco in polluted soils was becoming one of the main factors that affecting the tobacco quality. Cadmium was readily accumulated by crops such as tobacco in soils, and the cadmium stress in soils could not only affect the physiological process, but also reduced tobacco's quality. The mechanisms governing the transport, accumulation, and compartmentalization of cadmium by tobacco are reviewed in this paper and some integrated approaches to reduce the uptake of cadmium by tobacco are introduced for further study.

**Keywords:** cadmium stress; polluted soil; tobacco; remediation

镉 (Cd) 是植物生长的非必需元素, 但容易被吸收累积, 并且通过食物链对人体产生危害<sup>[1]</sup>。大量研究结果表明, 土壤镉污染是影响烟草品质的主要因素之一, 而烟草属于易累积镉的作物之一。土壤中镉污染胁迫不仅影响烟草体内叶绿素的合成, 同时也会对烟草的生理过程, 如对光合作用和蒸腾作用造成很大影响<sup>[2]</sup>。另一方面, 镉对烟草大量营养元素和微量元素的吸收也有影响, 从而影响烟草的品质, 如影响烟叶中相关蛋白质的合成和烟碱的含量等, 使烟叶中的酸碱失去平衡等<sup>[3]</sup>; 此外, 在抽吸过程中, 镉可通过主流烟气进入人体, 对人体健康造成潜在的危害。土壤中镉的含量差异很大,

自然土壤中镉的浓度一般都低于 1 mg/kg<sup>[1,4]</sup>。污染土壤中镉的来源主要包括工业“三废”的排放、施肥及农业污水灌溉等<sup>[1]</sup>。

### 1 镉在土壤-烟草系统中的迁移、转化

和其他植物一样, 烟草对非必需重金属元素具有较强的吸收和转化能力, 包括 Cd、Pb、As、Hg 等<sup>[5]</sup>。土壤中低浓度的 Cd 对烟草生长具有刺激作用, 而高浓度时则产生毒害作用<sup>[1]</sup>, 有研究证实, 镉污染对烟草种子的出苗和生长影响显著<sup>[6]</sup>, 不同镉浓度和不同烟草品种对镉胁迫反应有明显差异。当烟草吸收过量的 Cd 后, 植株的生理代谢机制会

基金项目: 云南省烟草公司项目 (08A03、09YN006、10YN16); 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@caas.ac.cn

收稿日期: 2010-12-15

修回日期: 2011-05-06

受到显著影响,如对植株的抗氧化酶系统的破坏,导致萎黄病、坏疽等病变的发生<sup>[7]</sup>。而在污染土壤中,烟草则通过产生不同的耐性机制来适应土壤中Cd的胁迫反应<sup>[8]</sup>。

### 1.1 烟草对污染土壤中镉胁迫的响应

相对于其他植物而言,烟草对Cd具有更强的吸收累积特性,这与烟草对污染土壤中Cd胁迫产生的耐性有关。Davis<sup>[9]</sup>的实验结果表明,当土壤Cd含量为69 mg/kg时,烟草植株中Cd的含量是菠菜、莴笋的3倍;Phu-Lich等<sup>[10]</sup>利用水培实验研究了不同烟草(cv.Samsun NN及cv.Samsun)对Cd的吸收,结果表明,当溶液中镉(CdCl<sub>2</sub>)浓度为1.50 mg/L,烟叶中Cd含量为226 mg/kg时,植株生长正常;只有当镉添加浓度为560 mg/L时才观察到烟叶有少量的坏疽症状;有类似结果表明,当溶液中Cd浓度达到4 000 mg/kg时,烟草的生长才明显受到抑制<sup>[11]</sup>。Clarke等<sup>[12]</sup>通过烟草对系列浓度的Cd吸收实验表明,当烟叶中Cd浓度达到383 mg/kg时,烟草的生长才开始表现出抑制症状。

Cd胁迫对烟草生长的抑制作用表现为光合作用受到抑制,导致烟叶发黄,叶片圆形有锈状斑点、植株生长缓慢,叶绿素a/b的含量明显降低等<sup>[2,13-14]</sup>。高家合等<sup>[15]</sup>通过水培试验发现,当溶液镉浓度大于16 mg/L时,烤烟叶片中叶绿素a/b、叶绿素a+b及类胡萝卜素含量明显降低;袁祖丽等<sup>[16]</sup>利用电感耦合等离子体、透射电镜、扫描电镜等技术研究了镉污染对烟草叶绿素a/b值含量、叶片细胞超微结构等影响发现,随着镉浓度的增高,烟草叶绿素含量及叶绿素a/b值显著降低,叶绿体中组成基粒的类囊体层数减少,叶绿体膜系统崩溃,内外膜均解体;而马新明等<sup>[17]</sup>研究发现,随着Cd浓度的增加,烟叶净光合速率和气孔导度逐渐降低、植株光系统活性、最大光能转换率及光化学猝灭系数等逐渐降低;另外有研究表明<sup>[18-19]</sup>,在Cd污染胁迫条件下,烟草植株对烟草斑纹病毒的抗病性也明显降低。

综上所述,高浓度Cd对烟草生长有不同程度的抑制作用,而在低浓度条件下,Cd会对烟草的生长产生低剂量刺激效应<sup>[20-21]</sup>。Wanger等利用水培实验发现<sup>[20-21]</sup>,在Cd浓度为0.25 mg/kg时,与对照

相比,烟草茎叶干重增加10%~40%;高家合等<sup>[15]</sup>通过水培试验发现,低浓度镉(<8 mg/L)对烤烟叶片中叶绿素a、叶绿素b、叶绿素a+b和类胡萝卜素含量有促进作用。另有对烟草与动物细胞Cd污染毒性的剂量-效应关系研究结果表明,在相同Cd污染条件下,烟草对Cd污染的影响浓度值(EC<sub>x</sub>)是动物毒性影响浓度值近10倍<sup>[22]</sup>,这表明,相对于动物而言,烟草对Cd污染有某种特别的耐性机制<sup>[23-24]</sup>,这种耐性机制可能与烟草将吸收的Cd隔离于细胞壁中、排出表皮细胞或通过腺毛分泌作用来减少其毒害有关,且这种耐性机制与不同烟草品种及污染的介质及浓度有很大关系。

### 1.2 烟草吸收和转化镉的途径

烟草主要通过根细胞吸收和转化土壤中的Cd。烟草根部既是土壤中Cd进入植株的第一道屏障,也是Cd贮藏的主要场所。烟草根部对Cd的吸收、累积量与茎叶中Cd的含量有明显的正相关性,不同烟草品种对土壤中Cd的富集系数及向茎叶迁移转化的能力(根/茎比)有很大差异<sup>[11]</sup>。烟草首先通过根细胞壁吸附土壤溶液中的Cd离子,被吸附的可溶性Cd穿过根细胞膜进入中柱细胞,然后进入木质部进行长距离运输<sup>[25]</sup>。进入木质部的Cd可以通过自由离子态、无机络合态(CdCl<sub>x</sub>)及低分子有机酸络合态(如柠檬酸络合态等)进行运输,而在烟草对Cd向地上部分进行长距离运输过程中,蒸腾作用对木质部Cd的运输有显著影响<sup>[26]</sup>。最近研究发现,植物螯合肽(PCs)及富含巯基的有机络合剂可以明显促进植株木质部Cd向地上部分的运输<sup>[27-28]</sup>。Cd经过木质部运输进入植株中茎后,通过韧皮部进行再分配作用到叶片,但这种再分配机制(根/茎比)与烟草基因型差异及Cd的浓度有很大关系。

### 1.3 镉在植株体内的亚细胞分布

目前,国内外针对Cd在烟株中不同部位含量分布已有大量的研究,与其他重金属不同之处在于,Cd在烟草不同部位的分布规律一般为叶>茎>根<sup>[29]</sup>。吴玉萍等通过盆栽实验发现,烟株吸收的

Cd 有>80%左右分布在烟叶中,其次是茎和根<sup>[3]</sup>;这与烟草对 Cd 具有富集的特点是相吻合的。进入到烟株细胞中的 Cd 将以不同形态存在于烟株不同部位的不同组分细胞中,如细胞壁、细胞质、细胞液、叶绿体及线粒体等<sup>[24]</sup>。

Cd 对烟草的毒性不仅表现在生理生化的抑制作用,还表现在对不同亚细胞结构的伤害。当烟草吸收过量的 Cd 时, Cd 会导致植株细胞膜被破坏,使细胞膜选择透性机能受损、透性增大,并破坏细胞内酶的代谢作用<sup>[24]</sup>。镉对烟草植株细胞亚结构的影响主要表现在对细胞膜结构的破坏,如类囊体、叶绿体的膜、线粒体的脊、核膜等。Cd 在植株体内亚细胞的分布与不同烟草基因型差异、植株组织及 Cd 污染浓度等有很大关系<sup>[30]</sup>。Vögeli-Lange 等<sup>[11]</sup>利用水培实验研究了 Cd 对烟草毒性,结果显示,当 Cd 浓度为 20 mM 时,植株细胞的液泡中含有较多的可溶性 Cd,而在相同 Cd 污染水平的土培实验中,植株的细胞壁吸附了较多的 Cd;此外,Wagner 等<sup>[20]</sup>通过水培实验发现,当添加 Cd 的浓度到 7.6 mM 时,植株液泡和细胞壁中有难溶性 Cd 沉淀出现,且随着 Cd 浓度的增加细胞组分中难溶性 Cd 的比例也呈增加趋势。由此可见,细胞壁和液泡对植株根系吸收、转化 Cd 具有十分重要的意义,但目前针对 Cd 在不同烟草植株亚细胞中分布的研究主要限于水培条件下的结果较多,在田间条件的相关报道还很少。

## 2 烟草对镉吸收、转化的主要影响因素

### 2.1 土壤性质对烟草镉吸收的影响

烟草主要通过根系对 Cd 进行吸收和积累,而土壤性质如土壤 pH、有机质含量、阳离子交换量及粘粒含量等对土壤中 Cd 的迁移和转化有显著影响。King<sup>[31]</sup>对 9 种不同性质土壤中烟草吸收 Cd 进行了实验,结果发现烟草中 Cd 含量与土壤 pH 及有机质含量有很大关系,低 pH 和低有机质含量处理土壤中,烟叶中 Cd 含量(96 mg/kg)是高 pH 和高有机质土壤处理的 8 倍(12 mg/kg)。由此可见,土壤性质与烟草对 Cd 的吸收有直接的关系。

2.1.1 土壤 pH 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。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>[31-32]</sup>。进入土壤中的 Cd,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>[33]</sup>对土壤中 Cd 的结合形态研究发现,当 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于土壤中,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。

2.1.2 阳离子交换量的影响 在烟草对 Cd 吸收的影响因子中,除了土壤 pH 外,土壤的阳离子交换量是重要影响因子之一。土壤中胶体的种类及其交换性能对烟草 Cd 吸收有十分重要的影响。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>[34-35]</sup>,如 Adamu 等<sup>[36]</sup>所进行的 13 种土壤中烟草对 Cd 的吸收实验结果表明,烟叶 Cd 含量与土壤阳离子交换量呈显著负相关关系,而与土壤 DTPA-提取态的 Cd 及全 Cd 含量相关关系并不明显。Matsi 等<sup>[35]</sup>研究了 5 个烟草品种对土壤 Cd 的吸收结果表明,烟叶中 Cd 的含量与土壤中阳离子交换量及 DTPA-提取态 Cd 含量有显著正相关关系。

2.1.3 伴随的金属离子 土壤中的金属阳离子,如 Ca、Co、Cu、Ni 及 Pb 等,由于和 Cd 具有类似的理化性质,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 Cd 的有效性<sup>[1,9]</sup>。土壤中共存阳离子不仅影响烟草对 Cd 的吸收,而且也影响烟草体内 Cd 的转运和再分配。这种影响与烟草的基因型差异、吸收部位及金属离子浓度大小有直接关系<sup>[37-38]</sup>。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>[1,39]</sup>。Oliver 等<sup>[41]</sup>通过向 Cd 污染土壤中施入不同浓度的 Zn, 使小麦子粒中的 Cd 含量降低 50%以上, 而 Green 等<sup>[41]</sup>的研究也得到类似的结论。除了 Zn 外, 土壤中其他金属元素, 如 Fe、Ca 的存在也会由于 Fe-Cd, Ca-Cd 的拮抗作用而降低烟草对 Cd 的吸收和转运<sup>[42]</sup>。

## 2.2 农艺措施对烟草镉吸收的影响

农艺措施对烟草 Cd 的吸收起很大作用, 如施用污泥、石灰、肥料及灌溉等。污泥由于含 Cd, 施用污泥往往使烟草中 Cd 的含量明显增加<sup>[20,43]</sup>, 因此在烟区土壤中进行污泥农用时, 需对污泥中重金属的含量、pH 及污泥中的金属离子的形态随时间的变化等因素进行综合考虑。与污泥类似, 由于磷肥中往往含有不同程度 (0.2~340 mg/kg) 的 Cd, 因此, 长期施用磷肥也会给烟区土壤带来 Cd 污染的风险<sup>[1]</sup>。近来, 一些欧盟成员国已经将磷肥中 Cd 污染列为污染土壤中 Cd 主要来源之一而加以控制<sup>[44]</sup>。与施用污泥等不同, 在酸性土壤中施入石灰不仅可以提高土壤的 pH, 而且还可以降低烟草对 Cd 的吸收<sup>[1,45]</sup>, 因此能显著降低烟草中 Cd 的含量, 尤其是在强酸性土壤中效果更明显。

灌溉对烟草 Cd 含量的影响主要与水中不同离子含量有关。污水中除了本身含有的 Cd 会增加烟草对 Cd 的吸收外, 污水中含有的阴离子组成也会影响烟草中 Cd 的含量。有研究表明, 当灌溉水含有较多的  $\text{Cl}^-$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$  等阴离子时, 土壤中的 Cd 往往易形成植物易吸收的  $\text{CdCl}_x^{n+}$ 、 $\text{Cd}(\text{SO}_4)_x^{n+}$  络合物, 从而促进烟草对 Cd 的吸收转化<sup>[1,44]</sup>, 且烟草 Cd 含量与土壤 Cl 含量的自然对数  $\ln(\text{Cl})$  呈正相关关系<sup>[46]</sup>。Cai 等<sup>[47]</sup>通过调查发现, 在我国南方某烟区土壤中, 由于长期使用 Cd 含量超标的污水进行灌溉, 使烟区土壤中的 Cd 平均含量达到 17.4 mg/kg, 目前我国有超过 11 000  $\text{hm}^2$  的土壤由于灌溉水中 Cd 含量超标而受到污染。

## 2.3 其他因素

其他影响烟草 Cd 吸收的因素还包括植烟区的气候条件 (如温度、湿度)、烟草类型及大气沉降等。Moreno 等<sup>[48]</sup>通过对烟草 Cd 吸收的田间裂区实验表明, 对裂区进行薄膜覆盖处理后, 由于小区内温度和湿度的增加, 显著增加了烟草对 Cd 的吸收和转化。烟草除了根系对土壤中的 Cd 具有吸收富集外, 也可通过叶片对大气颗粒中沉降的 Cd 进行吸收转化。Hovmand 等<sup>[49]</sup>对丹麦不同烟区烟草 Cd 吸收来源研究发现, 烟叶中大约有 20%~60% 的 Cd 来源于大气颗粒物沉降。Cakmak 等<sup>[50]</sup>利用  $^{109}\text{Cd}$  示踪技术研究了烟草对 Cd 的吸收转化过程后发现, 烟草可通过叶片吸收 Cd, 然后向茎和根进行转移, 但转移系数在不同烟草品种间有很大差异。

## 3 降低烟草对镉吸收转化的主要措施

### 3.1 通过土壤修复降低 Cd 的有效性

对污染土壤进行修复是降低烟草对 Cd 吸收最有效的措施之一。土壤修复措施可分为二大类型: 原位修复和异位去除类。原位修复主要是通过物理化学方法降低土壤 Cd 的有效性, 从而降低烟草对 Cd 的吸收转化。近年来, 通过向污染土壤中添加不同修复剂来降低污染土壤 Cd 有效性已经成为重金属污染土壤修复研究的热点。常用的修复剂类物质包括: 粘土矿物类、工业副产品类如磷矿粉、羟基磷灰石、针铁矿、赤泥、磷酸、磷肥及石灰等等<sup>[51]</sup>。异位去除主要是利用各种措施降低土壤 Cd 的含量, 从而达到修复的目的, 其中植物修复是目前研究较多的方法之一, 具体包括植物提取技术、植物固定及植物挥发等<sup>[52]</sup>。

### 3.2 通过分子和生物化学途径降低 Cd 吸收

根据近年来对不同植物根系 Cd 吸收、转运的生理机制研究结果<sup>[50]</sup>, 从分子和生物化学角度控制烟草对 Cd 的吸收转化有望取得突破性进展。但遗憾的是, 目前该领域研究还主要集中在其他植物类型上, 而在烟草对 Cd 的研究还鲜见报道, 这类研究主要集中在以下几个方面。

#### 3.2.1 控制植物根系分泌物研究

植物根系通过分泌大量的低分子有机酸, 从而改变植物根际土壤的

理化性质,如根际 pH、电导值、氧化电位及微生物群落结构,从而影响 Cd 的有效性。有研究结果表明<sup>[53]</sup>,在植物根际土壤中,有机络合态 Cd 是土壤溶液中有效态 Cd 的主要组成部分<sup>[54]</sup>;因此,通过基因工程的方法,如向不同烟草嫁接相应的基因,改变植物根系分泌物的多少和组成,从而影响根际土壤中 Cd 的有效性,进而达到降低植物根系对 Cd 的吸收运转的目的。

**3.2.2 植物螯合肽 (Phytochelatin, PCs) 研究** 最近,有研究发现富含巯基 (-SH) 的植物络合素在植物 Cd 解毒中有重要作用,主要原因可能与络合素中的巯基 (-SH) 能与  $Cd^{2+}$  形成稳定的络(螯)合物有关,但这一解释目前在对 Cd 解毒机理的结论上还存在一定分歧<sup>[55]</sup>。有研究表明,植物在受到重金属胁迫时,会在体内诱导产生植物络合素,在植物组织内通过巯基与重金属形成稳定的络合物,从而减轻 Cd 对植物的毒害<sup>[55]</sup>。Tiryakioglu 等<sup>[56]</sup>通过水培试验,研究了不同 Cd 处理大麦的生理机理变化。结果显示,随着 Cd 浓度的增加,大麦体内的植物络合素的含量也明显增加,并证实上述化合物的生成对降低 Cd 吸收有明显作用,但作用机理尚不明确。Nishikawa 等<sup>[57]</sup>对 2 种耐 Cd 型植物(*C. acidophila* 及 *C. acidophila* DVB238)在不同 Cd 胁迫条件下研究发现,植株体内 PCs 含量与忍耐性间有显著关系。目前,对于富含巯基的植物络合素在植物 Cd 抗性中的作用仍需要进一步的研究。此外,植物对 Cd 的抗性可能也不是单一机制起作用,而是多种机制同时或相继起作用,植物对 Cd 离子的吸收似乎涉及到一个由吸收、运输、络合和螯积等过程组成的受控网络。

**3.2.3 Cd 离子转运载体的研究** 和其他植物所需的营养元素一样,植物根系需要通过具有高亲和力的载体将土壤溶液中的有效态的 Cd 通过细胞质膜进行转运<sup>[58-59]</sup>,因此,研究植物根细胞对 Cd 的吸收转运载体的主要作用机制,有望探明不同植物对 Cd 吸收转运的差异,从而对 Cd 的吸收转运进行控制。目前,虽然有研究证明土壤中有些酶被证明可以有效转运溶液中的  $Cd^{2+}$ ,但和其他金属离子一

样,目前还没有发现针对溶液中  $Cd^{2+}$  转运的专一载体<sup>[60]</sup>,对 Cd 离子专一转运载体的进一步研究有望对降低烟草 Cd 吸收起到关键作用。

### 3.3 共生菌根

土壤中的真菌及共生菌根对 Cd 的生物有效性有较大的影响,如有些真菌的残体可以作为土壤中 Cd 的有效吸附剂,从而降低土壤 Cd 的有效性<sup>[61-62]</sup>。此外,土壤中大量的共生菌根对植物根吸收和转运 Cd 有十分重要的作用。有研究资料表明,在 Cd 污染土壤中,接种共生菌根可以降低植物对 Cd 的吸收,其主要机制可能是共生菌根对土壤溶液中的 Cd 起到截获和贮存的作用,在提高植物对 Cd 污染胁迫的同时,也降低了根对 Cd 的吸收转运作用<sup>[63]</sup>,但在降低烟草对 Cd 吸收的相关研究还未见报道。

## 4 研究展望

目前,不同烟草对土壤中 Cd 吸收转运的生理机制已经有大量的研究,结果表明,烟草对 Cd 的吸收转化受多种因素控制,包括土壤中 Cd 的浓度、烟草品种、土壤性质、气候条件及栽培管理措施等。目前,虽然国内外在如何降低烟草对 Cd 吸收、转化方面已经开展了大量的工作,但还存在一些薄弱之处,其中包括:

(1) 生物技术和基因工程技术在降低烟草对 Cd 吸收中的应用研究有待加强。如采用生物技术和基因工程技术对烟草品种进行改良,以提高烟草对 Cd 的抗性、减少烟草对土壤 Cd 的吸收及影响机制。

(2) 进一步研究不同烟草在 Cd 污染条件下植物螯合肽 (PC) 的产生及其对 Cd 吸收、转运机制,这对降低烟草 Cd 吸收将具有十分重要的意义,如对植株体内 Cd 转运酶 (如谷胱甘肽 GSH) 基因的拷贝与表达控制研究等。

(3) 对影响烟草 Cd 吸收的主控因子及其相关关系进行定量研究。如不同土壤性质、共存金属离子间的相互作用、不同烟草的根际效应及不同农艺措施对烟草 Cd 吸收的影响,基于土壤中 Cd 吸收累积的可预测模型的建立与预测等。

(4)此外,对Cd污染土壤的原位修复措施研究中,不同钝化剂对土壤中Cd有效性降低的环境化学机制、无效态Cd化合物的环境稳定性研究等还需进一步深入。

### 参考文献

- [1] McLaughlin M J, Singh B R E. Cadmium in Soils and Plants [M]. Kluwer Academic, Dordrecht. 1999.
- [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] 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.
- [4] Kabata-Pendias A, Pendias H. Trace Elements in Soils and Plants[M], 2nd. ed. CRC, Press, Boca Raton, FL. 1992.
- [5] Reid R J. Mechanisms of micronutrients uptake in plants[J]. Aust. J. Plant Physiol, 2001, 28: 659-666.
- [6] 王树会,王红珍. 重金属镉对烟草种子发芽和出苗的影响[J]. 农业网络信息, 2006, 10: 119-120.
- [7] Sanitadi T L, Gabbriellini R. Response to cadmium in higher plants [J]. Environ. Exp. Bot, 1999, 41:105-131.
- [8] Baker A J M, McGrath S P, Reeves R D, et al. Metal hyperaccumulator plants: a review of the ecology and physiology of a biochemical resource for phyto-remediation[M]//Phytoremediation of Contaminated Soil and Water, Lewis Publishers, Boca Raton, FL., 2000. 85-107.
- [9] Davis R D. Cadmium-a complex environmental problem. Part II. Cadmium in sludges used as fertilizer [J]. Experientia, 1984, 40: 117-126.
- [10] Phu-Lich N, Truhaut R, Claude J R, et al. Cadmium and tobacco[J]. Bull. Ass. Rech. Nicotian. 1990, 50-64.
- [11] VÖgeli L R, Wagner G J. Relationship between cadmium, glutathione and cadmium-binding peptides (phytochelatins) in leaves of intact tobacco seedlings [J]. Plant Sci. 1996, 114: 11-18.
- [12] Clarke B B, Brennan E. Differential cadmium accumulation and phytotoxicity in sixteen tobacco cultivars [J]. J. Air Waste Manag. Assoc, 1989, 39: 1319-1322.
- [13] Guadagnini M. In Vitro Breeding for Metal-Accumulation in Two Tobacco (*Nicotiana tabacum*) Cultivars [M]. Ph. D. Thesis. University of Freiburg, Switzerland, Freiburg, Switzerland, 2000.
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] 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.
- [17] 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.
- [18] Citovsky V, Ghoshroy S, Tsui F, et al. Non-toxic concentrations of cadmium inhibit systemic movement of turnip vein clearing virus by a salicylic acid-independent mechanism[J]. Plant J, 1998(16):13-20.
- [19] Ueki S, Citovsky V. The systemic movement of a tobamovirus is inhibited by a cadmium-ion-induced glycine-rich protein [J]. Nat. Cell Biol, 2002(4): 478-486.
- [20] Wagner G J. Accumulation of cadmium in crop plants and its consequences to human health [J]. Adv. Agron, 1993, 51: 173-212.
- [21] Hirt H, Sommergruber K, Barta A. Effects of cadmium on tobacco: synthesis and regulation of cadmium-binding peptides. Biochem [J]. Physiol. Pflanzen, 1990, 186: 153-163.
- [22] Fojtova M, Fulneckova J, Fajkus J, et al. Recovery of tobacco cells from cadmium stress is accompanied by DNA repair and increased telomerase activity [J]. J. Exp. Bot. 2002, 53: 2151-2158.
- [23] Huang B, Goldsbrough P B. Cadmium tolerance in tobacco cell culture and its relevance to temperature stress [J]. Plant Cell Rep. 1988(7): 119-122.
- [24] Domazlicka E, Opatrny Z. The effect of cadmium on tobacco cell culture and the selection of potentially Cd-resistant cell lines [J]. Biol. Plant. 1989, 31: 19-27.
- [25] White P J. Calcium channels in higher plants [J]. BBA Acta, 2002, 1465: 171-189.
- [26] Senden M H M N, Van Der Meer A J G M, Wolterbeek H T. Effects of cadmium on the longitudinal and lateral xylem movement of citric acid through tomato stem internodes [J]. Acta Bot. Neerl, 2005, 44: 129-138.
- [27] Larsson E H, Asp H, Bornman J F. Influence of prior Cd<sup>2+</sup> exposure on the uptake of Cd<sup>2+</sup> and other elements in the phytochelatin-deficient mutant, cad1-3, of *Arabidopsis thaliana* [J]. J. Exp. Bot. 2002, 53: 447-453.
- [28] Gong J M, Lee D A, Schroeder J I. Long-distance root-to-shoot transport of phytochelatins and cadmium in *Arabidopsis* [J]. Proc. Natl Acad. Sci, 2003, 100, 10118-10123.
- [29] 张晓海. 不同施肥水平下烤烟对重金属元素的吸收分配研究[J]. 农业实验与产业化, 2005(11): 144-146.
- [30] Ramos I, Esteban E, Lucena J J, et al. Cadmium uptake and subcellular distribution in plants of *Lactuca sp.* Cd-Mn interaction [J]. Plant Sci, 2002, 162: 761-767.
- [31] King L D. Effect of selected soil properties on cadmium content of tobacco [J]. J. Environ. Qual, 1988(17): 251-255.
- [32] Tsadilas C D. Soil pH influence on cadmium uptake by tobacco in high cadmium exposure [J]. J. Plant Nutr, 2000, 23: 1167-1178.
- [33] 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.
- [34] Gondola I, Kadar I. Heavy metal content of flue-cured tobacco leaf in different growing regions of Hungary [J]. *Acta Agron. Hung.* 1995, 43: 243-251.
- [35] Matsi T, Tsotsolis N, Barbayiannis N, et al. Heavy metal and trace element levels in soils, irrigation waters and 5 tobacco types [S]. Working programme of the 2002 CORESTA congress, agronomy and phytopathology study groups. New Orleans, USA, 2002, 22-27.
- [36] 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.
- [37] Carvalho M L, Silveira L, Casimiro A. Effects of cadmium on cation concentrations in sycamore cells (*Acer pseudoplatanus* L.): application of EDXRF [J]. *Anal. Bioanal. Chem.* 2002, 373: 827-829.
- [38] Zhang G P, Fukami M, Sekimoto H. Influence of cadmium on mineral concentrations and yield components in wheat genotypes differing in Cd tolerance at seedling stage [J]. *Field Crop Res.* 2002, 77: 93-98.
- [39] 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.
- [40] Oliver D P, Hannam R, Tiller K G, et al. The effects of zinc fertilization on cadmium concentration in wheat grain [J]. *J. Environ. Qual.* 1994, 23: 705-711.
- [41] 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.
- [42] Li L, He Z, Pandey G K, et al. Functional cloning and characterization of a plant efflux carrier for multidrug and heavy metal detoxification [J]. *J. Biol. Chem.* 2002, 277: 5360-5368.
- [43] Keller A, Abbaspour K C, Schulin R. Assessment of uncertainty and risk in modeling regional heavy-metal accumulation in agricultural soils [J]. *J. Environ. Qual.* 2002, 31: 175-187.
- [44] Cupit M, Larsson O, de Meeus C, et al. Assessment and management of risks arising from exposure to cadmium in fertilizers [J]. *Sci. Total Environ.* 2002, 291: 189-206.
- [45] 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.
- [46] Wu J, Norvell W A, Hopkins D G, et al. Spatial variability of grain cadmium and soil characteristics in a durum wheat field [J]. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 2002, 66: 268-275.
- [47] Cai S, Yue L, Shang Q, et al. Cadmium exposure among residents in an area contaminated by irrigation water in China [J]. *Bull. WHO.* 1995, 73: 359-367.
- [48] Moreno D A, Villora G, Hernandez J. Accumulation of Zn, Cd, Cu, and Pb in Chinese cabbage as influenced by climatic conditions under protected cultivation [J]. *J. Agric. Food Chem.* 2002, 50: 1964-1969.
- [49] Hovmand M F, Tjell J C, Mosbaek H. Plant uptake of airborne cadmium [J]. *Environ. Pollut.* 1983, 30: 27-38.
- [50] Cakmak I, Welch R M, Hart J, et al. Uptake and retranslocation of leaf-applied cadmium ( $^{109}\text{Cd}$ ) in diploid, tetraploid and hexaploid wheats [J]. *J. Exp. Bot.* 2000, 51: 221-226.
- [51] Chen S B, Xu M G, Ma Y B. Evaluation of phosphate application on Pb, Cd and Zn bioavailability in metal-contaminated soil [J]. *Environmental Ecotoxicity & Safet.* 2007, 67: 278-285.
- [52] Lasat M M. Phytoextraction of toxic metals: a review of biological mechanisms [J]. *J. Environ. Qual.* 2002, 31: 109-120.
- [53] Hinsinger P, Plassard C, Tang C, et al. Origins of root-mediated pH changes in the rhizosphere and their responses to environmental constraints: a review [J]. *Plant Soil.* 2003, 248: 43-59.
- [54] Nigam R, Srivastava S, Prakash S, et al. Plant availability of cadmium in presence of organic acids: an interactive aspect [J]. *J. Environ. Biol.* 2002, 23: 175-180.
- [55] Toppi L S, Skowronska B P, Vurro E, et al. First and second line mechanisms of cadmium detoxification in the lichen photobiont [J] *Trebouxia impressa* (Chlorophyta), *Environmental Pollution*, 2008, 151: 280-286.
- [56] Tiryakioglu M, Selim E, Faruk O, et al. Antioxidant defense system and cadmium uptake in barley genotypes differing in cadmium tolerance [J]. *Journal of Trace Elements in Medicine and Biology*, 2006, 20: 181-189.
- [57] Nishikawa K, Onodera A, Tominaga N. Phytochelatinos do not correlate with the level of Cd accumulation in *Chlamydomonas* spp [J]. *Chemosphere*, 2006, 63: 1553-1559.
- [58] Mäser P, Thomine S, Schroeder J I. Phylogenetic relationships within cation transporter families of *Arabidopsis* [J]. *Plant Physiol.* 2001, 126: 1646-1667.
- [59] Gupta R K, Dobritsa S V, Stiles C A. Metallothioneins: a new class of plant metal-binding proteins [J]. *J. Protein Chem.* 2002, 21: 529-536.
- [60] Clemens S. Review: molecular mechanisms of plant metal tolerance and homeostasis [J]. *Planta*, 2001, 212: 475-486.
- [61] Jarosz W A, Malarczyk E, Pirszel J, et al. Uptake of cadmium ions in white-rot fungus *Trametes versicolor*: effect of Cd (II) ions on the activity of laccase [J]. *Cell Biol. Int.* 2002, 26: 605-613.
- [62] Simonovicova A, Sevc J, Iro S. *Trichoderma viride* pers. ex gray as biosorbent of heavy metals (Pb, Hg and Cd) [J]. *Ekologia*, 2002, 21: 298-306.
- [63] Turnau K, Mleczko P, Blaudez D, et al. Heavy metal binding properties of *Pinus sylvestris* mycorrhizas from industrial wastes [J]. *Acta Soc. Bot. Pol.* 2002, 71: 253-261.