

DOI: 10.7524/j.issn.0254-6108.2016.09.2016020103

晏哲, 高志强, 罗真华, 等. 不同钾肥对几种烟草吸收累积土壤镉的影响[J]. 环境化学, 2016, 35(9): 1913-1920

YAN Zhe, GAO Zhiqiang, LUO Zhenhua, et al. Effect of potassium fertilizers on the uptake of soil cadmium by flue-cured tobaccos [J]. Environmental Chemistry, 2016, 35(9): 1913-1920

## 不同钾肥对几种烟草吸收累积土壤镉的影响\*

晏哲<sup>1</sup> 高志强<sup>2</sup> 罗真华<sup>2</sup> 胡鑫<sup>1</sup> 彭亮<sup>1</sup> 曾清如<sup>1\*\*</sup>

(1. 湖南农业大学资源环境学院, 长沙, 410128; 2. 湖南省株洲市烟草公司, 株洲, 412000)

**摘 要** 采用盆栽试验,研究了 3 种钾肥对 4 种烟草吸收土壤重金属镉的影响.烟草云烟 87、云烟 97、K326 和湘 3 号生长在株洲茶陵镉污染  $1.0 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  以下的酸性土壤上,通过追肥施入 3 种钾肥(硫酸钾、硅酸钾、磷酸氢二钾),分别测定烟草上、中、下部位烟叶中重金属的含量,探讨 3 种钾肥对污染土壤 pH 的影响及烟草吸收土壤重金属镉的差异性.结果表明,K326 对镉的富集能力最强,云烟 87 最弱;硅酸钾对降低烟草吸收镉的效果最好,降低率可达 20%—40%;且 3 种钾肥对土壤 pH 和镉化学形态的影响均呈显著性水平.

**关键词** 钾肥, 烟草, 镉, 抗性.

## Effect of potassium fertilizers on the uptake of soil cadmium by flue-cured tobaccos

YAN Zhe<sup>1</sup> GAO Zhiqiang<sup>2</sup> LUO Zhenhua<sup>2</sup> HU Xin<sup>1</sup> PENG Liang<sup>1</sup> ZENG Qingru<sup>1\*\*</sup>

(1. College of Resource and Environment, Hunan Agricultural University, Changsha, 410128, China;

2. Hunan Zhuzhou City Tobacco Companies, Zhuzhou, 412000, China)

**Abstract:** Pot experiments were conducted to study the effects of 3 potassium fertilizers ( $\text{K}_2\text{SO}_4$ ,  $\text{K}_2\text{SiO}_4$  and  $\text{K}_2\text{HPO}_4$ ) on the absorption of cadmium by 4 tobacco plants. Tobacco Yun87, Yun97, K326 and Xiang3 were grown in acidic soils in Zhuzhou Chaling with cadmium concentration below  $1.0 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  with. Through 3 fertilizers application, we analysed heavy metal contents in the upper, middle and lower leaves of the tobacco to explore the effects of the fertilizers on the pH of the contaminated soil and absorption of soil cadmium by tobacco. The results showed that the accumulation of K326 was the strongest for cadmium, and Yun87 was the weakest,  $\text{K}_2\text{SiO}_4$  showed best reduction of cadmium absorbed by tobacco, by 20% to 40%. All the three fertilizers had significant effects on soil pH and chemical speciation of cadmium.

**Keywords:** potash fertilizer, tobacco, cadmium, resistance differences.

一直以来,人们对于烟草危害的关注主要集中在烟叶燃烧产生的焦油量.迄今仍少见烟草重金属危害人体健康的报道.而我国烟叶主产区重金属污染越来越严重,其危害日益成为烟草业关注的焦点,究其来源是土壤污染.镉是土壤中主要的污染重金属之一,极易被作物吸收积累,影响作物的产量和品质,同时通过食物链进入人体带来危害<sup>[1-3]</sup>.目前,对于烟草中重金属的研究主要集中在控制重金属在烟叶

2016 年 2 月 1 日收稿(Received: February 1, 2016).

\* 资助项目“株烟草产地重金属污染风险评估定量模型及控制技术的研究与示范”(SHZH(湘 F)2013-006)资助.

**Supported by** the Quantitative Risk Assessment Models of Metal Contamination and Technique Measures of Field Remediation in A Tobacco Producing Area of Zhuzhou(SHZH 2013-006).

\*\* 通讯联系人, Tel: 0731-84673620, E-mail: qrzeng@163.com

**Corresponding author**, Tel: 0731-84673620, E-mail: qrzeng@163.com

中的积累等方面,赵秀兰等研究镉对烟草生长的胁迫发现有低浓度促进高浓度抑制的规律<sup>[4-6]</sup>,胡钟胜等发现改良剂能不同程度地降低烟叶中镉的含量同时提高了烟草的生物量<sup>[7-8]</sup>.水溶性硅肥在对烟草的产量和烟碱含量影响方面已有报道<sup>[9]</sup>,但其对烟草吸收重金属的抑制作用方面研究较少.钾肥对作物吸收重金属镉的差异性研究主要表现在水稻和小麦等作物中<sup>[10-11]</sup>,有关烟草的研究则较少.因此,研究钾肥对烟草吸收累积重金属镉的效用具有较高的理论意义和应用价值.

本试验采用施肥这一农业生产中不可或缺的农艺措施,在确保不影响烟草产量的同时,通过施肥措施降低土壤中重金属镉的活性,减少烟草对重金属镉的吸收,达到对烟草生产土壤镉污染治理的效果<sup>[12-14]</sup>.

## 1 材料与方法 (Materials and methods)

### 1.1 供试材料

试剂:盐酸、硝酸、高氯酸(均为 GR,国药集团化学试剂有限公司).

肥料:硫酸钾、磷酸氢二钾(均为 AR,河南金誉化工有限公司)、硅酸钾(AR,深州中科有限公司),其中硫酸钾为试验当地常用钾肥.依据国家标准 GB/T23349—2009,测定以上 3 种肥料中的 Cd、As、Pb 和 Hg 含量都远低于相应的限量标准值,对烟草 Cd 含量没有影响.

供试植物:供试烟草(*Nicotianatabacum*)品种分别为:云烟 87、云烟 97、K326 和湘 3 号,来自湖南株洲市茶陵县烤烟区.

供试土壤:土壤为黄壤土,采自湖南株洲市茶陵县红色农场烟田土壤(26.97°N, 113.75°E).土壤中重金属本底值见表 1,重金属 Cu、Zn、Pb、As、Hg 的浓度都低于国家一级标准,只有 Cd 的浓度为 0.587 属三级标准,是典型的单一镉轻度污染区酸性土壤.

表 1 供试土壤基本理化性质

Table 1 Basic physical and chemical properties of the tested soil

地名 Site	As/ (mg·kg <sup>-1</sup> )	Hg/ (mg·kg <sup>-1</sup> )	Pb/ (mg·kg <sup>-1</sup> )	Cd/ (mg·kg <sup>-1</sup> )	Zn/ (mg·kg <sup>-1</sup> )	pH	有机质 Organic matter/ (g·kg <sup>-1</sup> )	总 N Total N/ (g·kg <sup>-1</sup> )	总 P Total P/ (mg·kg <sup>-1</sup> )	总 K Total K/ (g·kg <sup>-1</sup> )
茶陵县 Chaling	5.13	0.13	34.63	0.587	46.28	4.77	31.19	2.12	505.2	14.62

注:标准为土壤环境质量标准(GB15618—1995). Note: Standard is Soil Environmental Quality Standards(GB15618—1995).

### 1.2 盆栽实验

2013 年 6 月于湖南农业大学耘园试验基地,采用直径 31 cm、高 28 cm 的塑料有孔盆 36 个,每盆装土 15 kg,以烟草专用肥为基肥,种植云烟 87、云烟 97、K326 和湘 3 号 4 个烟草品种,每盆 1 株.追肥期以追施硫酸钾(试验当地常用钾肥)为对照,设置 3 个处理,3 个平行.第一次追肥量为:硫酸钾 150 kg·ha<sup>-1</sup>、硅酸钾 135 kg·ha<sup>-1</sup>、磷酸氢二钾 150 kg·ha<sup>-1</sup>;第二次追肥量为第一次追肥量的 1.5 倍.种植 60 d(成熟期)收获,对烟叶分段采样,取 1 到 5 叶为下部叶,6 到 10 叶为中部叶,11 到 15 叶为上部叶,分别测定重金属镉在烟草各部位叶片以及根茎中的含量.

### 1.3 室内实验

在实验室内分别分析 3 种钾肥对土壤 pH 值和重金属镉的不同化学形态的影响.其中 3 种钾肥以含 K 元素量的肥料浓度为准.

### 1.4 测定方法

重金属含量的测定:土壤重金属和植物样品中总铅、总镉、总铜、总锌的消解分别采用 GB/T 17141—1997 的盐酸-硝酸-氢氟酸-高氯酸全消解的方法和 NY/T 1100—2006 的硝酸-高氯酸混合酸的消解方法.土壤总砷、总汞的消解采用 GB/T 22105.2—2008 的方法.重金属 Pb、Cd、Zn、Cu 采用电感耦合等离子发射光谱仪(美国 PE, Optima-8300)测定, Hg、As 采用原子荧光分光光度计(北京吉天, AFS-920)测定.

土壤 pH 值的测定:称取过 20 目筛的盆栽土 5 g 于 100 mL 三角瓶中,加入超纯水 25 mL,封口恒温振荡 1 h,用 pH 计测定.

土壤镉形态测定:采用 BCR 三步提取法,采用电感耦合等离子发射光谱仪(美国 PE, Optima-8300)测定<sup>[15]</sup>.

### 1.5 数据分析

采用 Excel 进行数据的分析和处理,采用 DPS 进行平均数的显著性检验( $P < 0.05$ ).

## 2 结果与讨论(Results and discussion)

### 2.1 重金属镉在不同品种烟草中各部位的分布情况

由图 1 可以明显地看出,重金属镉主要集中在烟草的地上叶片部分,且 4 个品种烟草的不同部位对镉的积累情况均呈现出相同的趋势:下部叶>中部叶>上部叶>茎>根.相关研究结果表明,镉在烟草植株内的分布特征是在新陈代谢旺盛的器官积累量较大,而在繁殖器官中积累量较小<sup>[16-17]</sup>.

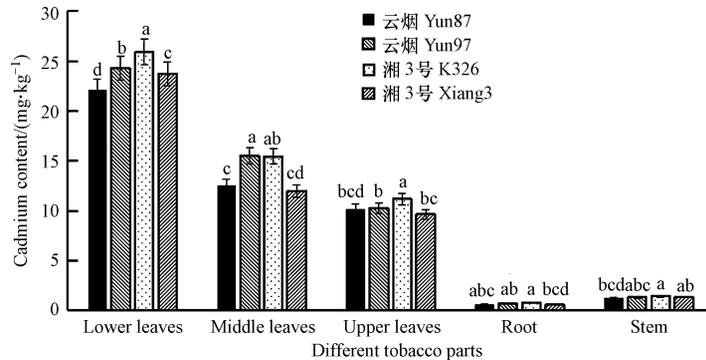


图 1 不同品种烟草中各个部位镉含量 ( $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ )

Fig.1 The concentration of Cd in different parts of the tobacco ( $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ )

富集系数是作物某一部位中某一个元素的浓度与土壤中该元素浓度之比,表征了重金属由土壤向植物体内迁移的难易程度.富集系数越高,该元素在土壤-作物体内越易迁移,反之则越难迁移.表 2 为 4 种烟草对镉的富集系数,从表 2 可以看出,烟叶地上部位的富集系数明显高于根茎,特别是下部叶的富集系数,表现出对镉的较高的富集能力.烟草 K326 和云烟 97 各部位对镉的富集能力均大于云烟 87 和湘 3 号,特别是 4 种烟草的下部叶和中部叶间存在显著性差异.刘义新等<sup>[18]</sup>研究镉胁迫对 2 个常用烤烟品种(K326 和云烟 87)吸收镉的差异性影响,发现镉主要存在于根部,占总吸收量的 80%以上,且 K326 中烟叶的镉含量明显高于云烟 87,与本文研究结果相似.

表 2 烟草中各个部位的富集系数

Table 2 The enrichment factor of Tobacco in various parts

部位 Parts	云烟 87 Yun87	云烟 97 Yun97	K326	湘 3 号 Xiang3
下部叶 Lower leaves	37.70d	41.40b	44.11a	40.48c
中部叶 Middle leaves	21.40c	26.42a	26.34ab	20.44cd
上部叶 Upper leaves	17.29bcd	17.48b	19.05a	16.42bc
根 Root	1.04abc	1.23ab	1.35a	0.97bcd
茎 Stem	2.20bcd	2.28abc	2.47a	2.32ab

注:表中数据为 3 个重复的平均值,且同一行中不同字母表示差异显著( $P < 0.05$ );Note:Data is the average of 3 replicates in the table, and the different letters in the same line indicate significant difference at  $P < 0.05$  level.

### 2.2 3 种钾肥对不同品种烟叶中镉含量的影响

由图 2 可知,3 种钾肥对 4 个烟草品种烟叶中镉含量影响显著,施用硅酸钾的烟叶镉含量最低,施

用硫酸钾的对照组中烟叶镉含量最高.不同部位的烟叶镉含量也有显著性差异,差异最大的是中部叶.施用硅酸钾,烟草云烟 87、云烟 97、K326 和湘 3 号中部叶镉含量比对照分别降低了 22.9%、39.1%、38.9%和 18.3%;施用磷酸氢二钾的中部叶镉含量比对照分别降低了 19.2%、30.9%、32.9%和 10.9%.相比而言硅酸钾更能明显降低烟草中部叶镉的含量,且对镉富集能力强的 K326 和云烟 97 的降镉效果好于云烟 87 和湘 3 号,其原因可能与烟草品种有关.3 种钾肥中硫酸钾属生理酸性肥料,其生产原料之一是氯化钾,并含有硫酸根和游离酸,长期施用于土壤中会降低土壤 pH<sup>[19]</sup>,且硫酸根和氯离子易与重金属镉结合成络合离子<sup>[20-21]</sup>,在旱地有氧环境下易被作物吸收,因此硫酸钾对烟草富集重金属镉的影响最大.而磷酸氢二钾和硅酸钾都是碱性肥料,施用于土壤中提高了土壤 pH,降低了重金属镉的生物有效性,因而烟叶中的镉含量低于硫酸钾处理.

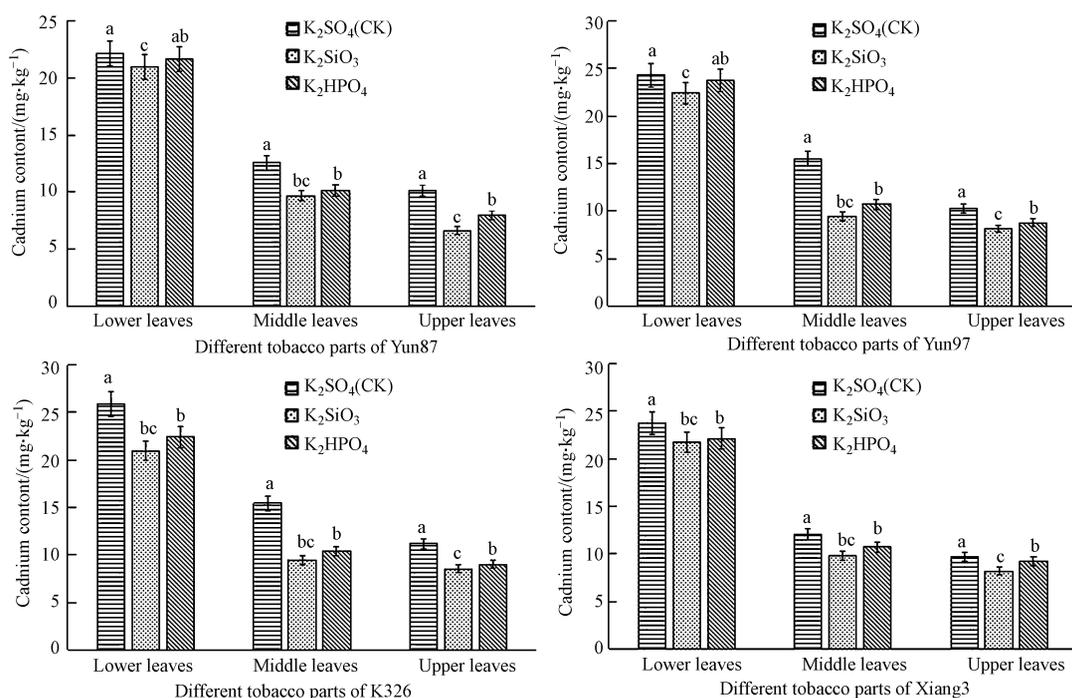


图 2 3 种不同钾肥对不同烟草品种吸收镉的影响 ( $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ )

Fig.2 Effect of 3 potash fertilizer on Cd content in different Tobacco plants ( $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ )

### 2.3 3 种钾肥对土壤 pH 值和镉化学形态的影响

由图 3 可以看出,随着肥料用量的升高,3 种不同的钾肥对土壤的 pH 值的影响有显著的差异.在  $2.5 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$  的用量下,硅酸钾和磷酸氢二钾就明显提高了土壤的 pH 值,高于对照.

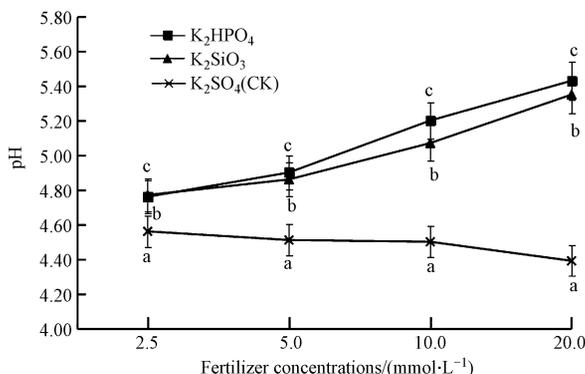


图 3 钾肥浓度对土壤 pH 值的影响

Fig.3 Effects of potash fertilizer concentrations on soil pH

随着用量的提高,施用磷酸氢二钾和硅酸钾的土壤 pH 值大幅上升,施用硫酸钾的对照土壤 pH 值

逐渐降低.到了  $20 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$  的用量后,和对照相比,土壤 pH 值最高值与最低值之间相差 1.0.朱奇宏等<sup>[22]</sup>和林大松等<sup>[23]</sup>研究表明,土壤 pH 值升高是导致土壤中镉形态变化及有效性降低的重要原因,随着 pH 值的升高,土壤对镉的吸附量增加.与施用不同钾肥后的烟叶镉含量进行对比可以发现,烟叶镉含量与土壤 pH 值间呈显著负相关.

由图 4 可以看出,随着施用钾肥浓度的升高,不同的钾肥对土壤重金属镉的水溶态含量的影响差异性显著.在  $2.5 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$  的浓度下,土壤镉水溶态含量最高的为硫酸钾,其次为磷酸氢二钾,最低的为硅酸钾.随着钾肥浓度的升高,施用硅酸钾的土壤镉水溶态含量略微降低,施用磷酸氢二钾的土壤镉水溶态含量上升缓慢,而施用硫酸钾的则迅速上升.当浓度为  $20 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$  时,施用 3 种不同钾肥的土壤镉水溶态含量差别很大,其中施用硫酸钾与施用硅酸钾的镉水溶态含量间相差可达 15 倍.

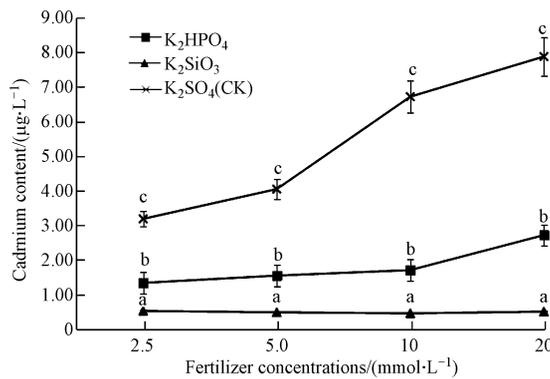


图 4 钾肥浓度对土壤镉的水溶态影响

Fig.4 Effects of potash fertilizer concentrations on water-soluble Cd

表 3 是 3 种不同浓度钾肥进入土壤后,对土壤镉化学形态的分析数据.由表 3 可以看出,在  $2.5 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$  的浓度下,只有施用硫酸钾的土壤镉可交换态及碳酸盐结合态含量超过 50%,其他两种钾肥均低于 50%,铁锰氧化物结合态含量的差异性不明显,相比其他钾肥,硫酸钾的有机物及硫化物结合态的比重高,残渣态比重低,其他两种钾肥的这两种形态间差异性不大.

表 3 施用浓度钾肥对土壤镉化学形态含量的影响

Table 3 Effects of potash fertilizer concentrations on chemical forms of Cd in soil

肥料类型 Stypes of fertilizer	添加浓度 Addition concentration/ ( $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ )	可交换态及碳酸盐 结合态占比 Percentage of exchangeable and carbonate fractions/%	铁锰氧化物 结合态占比 Percentage of Fe-Mn oxide fractions/%	有机物及硫化物 结合态占比 Percentage of organic matter and sulfide fractions/%	残渣态占比 Percentage of residual fractions/%
硫酸钾 (CK) K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	2.5	51.5d	29.2a	9.7bcd	9.6ab
	5.0	52.1c	28.4ab	9.5bc	10.0a
	10.0	53.3b	27.9bc	10.1ab	8.7c
	20.0	55.9a	25.7d	10.5a	7.9cd
硅酸钾 Si <sub>2</sub> SO <sub>3</sub>	2.5	48.6a	29.4cd	8.2bcd	13.8a
	5.0	48.1ab	29.5bc	9.1a	13.3abcd
	10.0	47.5abc	30.5ab	8.6abc	13.4abc
磷酸氢二钾 K <sub>2</sub> HPO <sub>4</sub>	2.5	48.9d	30.1a	8.4ab	12.6a
	5.0	49.5c	29.8ab	8.2abc	12.5ab
	10.0	50.7b	29.3abc	8.2abcd	11.8bc
	20.0	53.3a	27.8d	8.6a	10.3d

注:表中数据为 3 个重复的平均值,且同一列中不同字母表示差异显著 ( $P < 0.05$ ). Note: Data is the average of 3 replicates in the table, and the different letters in the same column indicate significant difference at  $P < 0.05$  level.

随着施用钾肥浓度的升高,施用硅酸钾的土壤镉可交换态及碳酸盐结合态含量比重降低,铁锰氧化

物结合态含量比重上升,有机物及硫化物结合态含量比重和残渣态含量比重变化不明显;施用磷酸氢二钾和硫酸钾的土壤镉可交换态及碳酸盐结合态含量比重上升,铁锰氧化物结合态含量比重下降,有机物及硫化物结合态含量比重和残渣态含量比重略有变化.在  $20 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$  浓度下,施用硅酸钾的土壤镉可交换态及碳酸盐结合态含量比重明显低于其他 2 种钾肥,铁锰氧化物结合态含量比重则高于其他 2 种钾肥.总体来说,3 种钾肥对土壤镉化学形态的影响主要体现在对可交换态及碳酸盐结合态含量的变化方面.

研究表明<sup>[24-25]</sup>,土壤重金属对植物的危害程度取决于其赋存形态,用分级法提取的不同形态的土壤重金属对植物的有效性顺序为:水溶态>可交换态及碳酸盐结合态>铁锰氧化物结合态>有机物及硫化物结合态>残渣态.水溶态和可交换态及碳酸盐结合态稳定性差,容易被植物吸收利用,是其有效或较为有效的形态,它们的含量与植物吸收量呈正相关.铁锰氧化物结合态、有机物及硫化物结合态、残渣态稳定性强,不易释放到环境中,也较难为植物吸收<sup>[26-27]</sup>.施用硅酸钾的土壤与施用其他钾肥的土壤相比,主要体现在镉的水溶态含量极低,交换态及碳酸盐结合态比重低,与施用其他不同钾肥后的烟叶镉含量做对比可以发现,烟叶的镉含量与土壤镉的水溶态含量、交换态及碳酸盐结合态的含量呈正相关的关系.

钾是烟草的品质元素,施用钾肥是烟草种植中重要的农艺措施<sup>[28]</sup>.目前烟草生长上施用的钾肥主要是硫酸钾.我国南方的烟田多数为酸性土壤,土壤 pH 值低,长期施用会加剧土壤酸化,从而增加重金属有效态含量,加重了烟草对重金属镉的吸收积累.而磷酸氢二钾施入土壤后,虽然使土壤的 pH 值上升,但是其镉的水溶态、交换态及碳酸盐结合态都较高.张艳玲等研究发现,大量施用磷肥对控制作物中镉的含量造成不利影响<sup>[29-31]</sup>,因此在烟草追肥期不建议大量施用磷肥.

试验中硅酸钾的施用对烟叶降镉效果最佳,因硅本身可以降低土壤和植物中镉的活性,抑制植物对镉的吸收.杨超光等<sup>[32]</sup>和王永锐<sup>[33]</sup>认为由于可溶性硅酸盐在水溶液中水解形成硅酸,呈凝胶状态,吸附有毒重金属离子,所以硅可以抑制镉的毒害作用.且硅进入土壤后,能够提高土壤的 pH 值,促进重金属离子的沉淀及硅酸盐复合物的形成,降低土壤中活性重金属离子的浓度及其流动性<sup>[34-35]</sup>,最终能降低烟草对重金属镉的吸收.陈喆等<sup>[36]</sup>发现以硅肥为基肥配合喷施叶面硅肥对稻米的降镉效果最佳,分别降低了谷壳、糙米和精米的镉含量的 62.59%、58.33% 和 65.83%.本研究施用水溶性硅钾肥能对烟叶起到很好的降镉效果,说明施用硅肥能作为一种很有潜力的植物镉污染控制技术.

### 3 结论 (Conclusion)

(1) 镉在烟草不同部位的含量差异性显著,下部叶对镉吸收能力最强,建议烟叶生产时去除重金属含量偏高的脚叶,降低吸烟对人体造成的危害.

(2) 不同烟草品种对镉的吸收有明显差异,建议在轻度污染的土壤上选择种植低累积重金属的品种.

(3) 在镉污染的酸性烟田土中施用硅酸钾,可以提高土壤 pH 值,改变土壤镉的化学形态,显著降低酸性土壤中烟叶镉含量的 20%—40%.建议在烟草种植生产中,采用硅酸钾替代硫酸钾施用,以便更好控制烟草中的重金属镉污染,提高烟草品质.

#### 参考文献 (References)

- [1] 苏贤坤, 庄文贤, 李继新, 等. 重金属对烤烟的影响及其治理技术与策略[J]. 中国烟草科学, 2008, 29(4): 57-61.  
SU X K, ZHUANG W X, LI J X, et al. Impact of heavy metals on tobacco and its control[J]. Chinese Tobacco Science, 2008, 29(4): 57-61 (in Chinese).
- [2] SWAMI K, JUDD C D, ORSINI J. Trace metals analysis of legal and counterfeit cigarette tobacco samples using inductively coupled plasma mass spectrometry and cold vapor atomic absorption spectrometry[J]. Spectroscopy Letters, 2009(8): 142-159.
- [3] 杨欣, 陈江华, 张艳玲. 烟草对镉的吸收及控制措施研究综述[J]. 中国烟草科学, 2010, 31(2): 70-75.  
YANG X, CHEN J H, ZHANG Y L. A review on cadmium uptake of tobacco and its control[J]. Chinese Tobacco Science, 2010, 31(2): 70-75 (in Chinese).
- [4] YUE L. Cadmium in tobacco[J]. Biomedical and Environment Science, 1992: 53-56.
- [5] 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.

- ZHAO X L, LIU X. Difference in plant growth, Cd and nutrient uptake, Cd translocation between two Tobacco cultivars under Cd stress[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2009, 23(1): 117-121(in Chinese).
- [ 6 ] 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 Y, LIU H W, SHI Y, et al. Effects of cadmium on the growth of tobacco and the characteristics of cadmium accumulation by tobacco [J]. *Chinese Tobacco Science*, 2015(2):99-104(in Chinese).
- [ 7 ] 胡钟胜, 章钢娅, 王广志, 等. 改良剂对烟草吸收土壤中镉铅影响的研究[J]. *土壤学报*, 2006, 43(2):233-239.  
HU Z S, ZHANG G Y, WANG G Z, et al. Effects of soil amendments on cadmium and lead contents in tobacco[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2006, 43(2):233-239(in Chinese).
- [ 8 ] 曹晨亮, 王卫, 马义兵, 等. 钝化剂-锌肥降低烟草镉含量长期效果研究[J]. *土壤学报*, 2015, 52(3):628-636.  
CAO C L, WANG W, MA Y B, et al. Effects of long-term amendment with passivant and zinc fertilizer on cadmium reduction in tobacco growing in a Cd contaminated field[J]. *Acta Petrologica Sinica*, 2015, 52(3):628-636(in Chinese).
- [ 9 ] 刘光亮, 陈刚, 窦玉青, 等. 水溶性硅肥在烤烟中的应用研究[J]. *中国烟草科学*, 2011, 32(1): 32-34.  
LIU G L, CHEN G, DOU Y Q, et al. Studies on spraying water soluble siliceous fertilizer to flue-cured tobacco[J]. *Chinese Tobacco Science*, 2011, 32(1): 32-34(in Chinese).
- [ 10 ] 甲卡拉铁, 喻华, 冯文强, 等. 不同磷、钾肥对水稻产量和吸收镉的影响研究[J]. *西南农业学报*, 2009, 22(4):990-995.  
JIKA L T, YU H, FENG W Q, et al. Effects of different phosphate and potassium fertilizers on yields and cadmium uptake by paddy rice [J]. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences*, 2009, 22(4):990-995(in Chinese).
- [ 11 ] 赵晶, 冯文强, 秦鱼生, 等. 不同磷、钾肥对小麦产量及吸收镉的影响[J]. *西南农业学报*, 2009, 22(3):690-696.  
ZHAO J, FENG W Q, QIN Y S, et al. Effects of different phosphate, potassium fertilizers on yield and cadmium uptake by wheat [J]. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences*, 2009, 22(3):690-696(in Chinese).
- [ 12 ] 赵志坚, 胡小娟, 彭翠婷, 等. 湖南省化肥投入与粮食产出变化对环境成本的影响分析[J]. *生态环境学报*, 2012, 21(12): 2007-2012.  
ZHAO Z Z, HU X J, PENG C T, et al. The effect of fertilizer usage on grain output and environment cost: An empirical study in Hunan province[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2012, 21(12): 2007-2012(in Chinese).
- [ 13 ] CHERRY K A, SHEPHERD M, WITHERS P J A, et al. Assessing the effectiveness of actions to mitigate nutrient loss from agriculture: A review of methods[J]. *Science of the Total Environment*, 2008, 406(1-2): 1-23.
- [ 14 ] 李亮科, 张卫峰, 王雁峰, 等. 中国农户复合(混)肥施用效果分析[J]. *植物营养与肥料学报*, 2011, 17(3): 623-629.  
LI L K, ZHANG W F, WANG Y F, et al. Effectiveness of compound fertilizer on grain yields in China[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2011, 17(3): 623-629(in Chinese).
- [ 15 ] ZHI Y H, HONG X, YING L C, CHAO C, et al. Assessing of distribution, mobility and bioavailability of exogenous Pb in agricultural soils using isotopic labeling method coupled with BCR approach[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2014, 266:182-188.
- [ 16 ] 杨欣, 陈江华, 张艳玲, 等. 铅、镉在典型植烟土壤中的形态分布及转化趋势研究[J]. *中国烟草学报*, 2010, 16(5):44-49.  
YANG X, CHEN J H, ZHANG Y L, et al. Effects of aging on the fractionation of Lead and Cadmium in tobacco planting soils[J]. *Acta Tabacaria Sinica*, 2010, 16(5):44-49(in Chinese).
- [ 17 ] SONG X H, LU Y G, HE D, et al. Uptake and subcellular distribution of Cd in tobacco[J]. *Agricultural biotechnology*, 2015, 4(2): 12-13.
- [ 18 ] 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.  
LIU Y X, TAO Y, MENG L H, et al. Physiological response and resistance of K326 and Yunyan87 to cadmium[J]. *Chinese Tobacco Science*, 2008, 29(4): 1-5(in Chinese).
- [ 19 ] 李双异, 刘赫, 汪景宽. 长期定位施肥对棕壤重金属含量及其有效性影响[J]. *农业环境科学学报*, 2010, 29(6): 1125-1129.  
LI S Y, LIU H, WANG J K. Effects of long-term located fertilization on heavy metals and their availability in brown earth[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2010, 29(6): 1125-1129(in Chinese).
- [ 20 ] ZHANG S H, LI C H, LI W, et al. Synthesis, crystal structure and electrochemical properties of a cadmium( II ) complex with  $\alpha$ -furoic acid and 1, 10-phenanthroline[J]. *Chinese J Struct Chem*, 2008, 27(10): 1261-1264.
- [ 21 ] SUN W Y, FAN J, TANG W X, et al. Synthesis and crystal structure of a new 2D honeycomb-like cadmium( II ) complex with tripodal ligand[J]. *Chinese Journal of Chemistry*, 2002, 20: 341-345.
- [ 22 ] 朱奇宏, 黄道友, 刘国胜, 等. 改良剂对镉污染酸性水稻土的修复效应与机理研究[J]. *中国生态农业学报*, 2010, 18(4): 847-851.  
ZHU Q H, HUANG D Y, LIU G S, et al. Effects and mechanisms of amendments on remediation of cadmium contaminated acid paddy soils[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2010, 18(4): 847-851(in Chinese).
- [ 23 ] 林大松, 徐应明, 孙国红, 等. 土壤 pH 有机质和含水氧化物对镉、铅竞争吸附的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2007, 26(2): 510-515.  
LIN D S, XU Y M, SUN G H, et al. Effects of pH, organic matter and hydrous oxides on competitive adsorption of Cd<sup>2+</sup> and Pb<sup>2+</sup> by soil [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2007, 26(2): 510-515(in Chinese).

- [24] 谷海红, 李忠伟, 俞强. 钢渣对酸性重金属污染土壤的修复研究进展[J]. 中国农学通报, 2012, 28(20): 243-249.  
GU H H, LI Z W, YU Q. A review of the effects of steel slag on remediation of heavy metal contaminated acidic soil[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2012, 28(20): 243-249(in Chinese).
- [25] 雷鸣, 廖柏寒, 秦普丰. 土壤重金属化学形态的生物可利用性评价[J]. 生态环境, 2007, 16(5): 1551-1556.  
LEI M, LIAO B H, QIN P F. Assessment of bioavailability of heavy metal in contaminated soils with chemical fractionation[J]. Ecology and Environment, 2007, 16(5): 1551-1556(in Chinese).
- [26] 韩春梅, 王林山, 巩宗强, 等. 土壤中重金属形态分析及其环境学意义[J]. 生态学杂志, 2005, 24(12): 1499-1502.  
HAN C M, WANG L S, GONG Z Q, et al. Chemical forms of soil heavy metals and their environmental significance[J]. Chinese Journal of Ecology, 2005, 24(12): 1499-1502(in Chinese).
- [27] 郝汉舟, 靳孟贵, 李瑞敏, 等. 耕地土壤铜, 镉, 锌形态及生物有效性研究[J]. 生态环境学报, 2010, 19(1): 92-96.  
HAO H Z, JIN M G, LI R M, et al. Fractionations and bioavailability of Cu, Cd and Zn in cultivated land[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2010, 19(1): 92-96(in Chinese).
- [28] 解燕, 王文楷, 赵杰, 等. 烟草钾素营养与钾肥研究[J]. 中国农学通报, 2006, 22(8): 302-307.  
XIE Y, WANG W K, ZHAO J, et al. Potassium nutrition and potassium fertilizer for tobacco production[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2006, 22(8): 302-307(in Chinese).
- [29] 张艳玲, 张仕祥, 杨杰. 施肥对植烟土壤重金属输入的影响[J]. 烟草科技, 2010, 11: 51-54.  
ZHANG Y L, ZHANG S X, YANG J. Influence of fertilization on introduction of heavy metals into tobacco growing soils[J]. Tobacco Science & Technology, 2010, 11: 51-54(in Chinese).
- [30] 吕亚敏, 杨京平, 赵杏, 等. 磷肥对茶园土壤中镉有效性及其生物累积的影响[J]. 浙江大学学报: 理学版, 2015(6): 726-731.  
LYU Y M, YANG J P, ZHAO X, et al. Effects of different phosphate fertilizers on the availability and bioaccumulation of cadmium in the tea garden soil[J]. Journal of Zhejiang University, 2015(6): 726-731(in Chinese).
- [31] 陈宝玉, 王洪君, 曹铁华, 等. 不同磷肥浓度下土壤-水稻系统重金属的时空累积特征[J]. 农业环境科学学报, 2010, 29(12): 2274-2280.  
CHEN B Y, WANG H J, CAO T H, et al. Spatio-temporal characteristics of heavy metal accumulation in soil-rice cropping system under different phosphate fertilizer concentrations[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2010, 29(12): 2274-2280(in Chinese).
- [32] 杨超光, 豆虎, 梁永超, 等. 硅对土壤外源镉活性和玉米吸收镉的影响[J]. 中国农业科学, 2005, 38(1): 116-121.  
YANG C G, DOU H, LIANG Y C, et al. Influence of silicon on cadmium availability and cadmium uptake by maize in cadmium-contaminated soil[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2005, 38(1): 116-121(in Chinese).
- [33] 王永锐, 周建华. 硅营养对缓解水稻幼苗 Cd, Cr 毒害的生理研究[J]. 应用环境生物学报, 1997, 1(5): 11-15.  
WANG Y R, ZHOU J H. Physiological studies on poisoning effects of Cd and Cr on rice (*Oryza sativa* L.) seedlings through inhibition of Si nutrition[J]. Chinese Journal of Applied & Environmental Biology, 1997, 1(5): 11-15(in Chinese).
- [34] 梁永超, 丁瑞兴. 硅对大麦根系中离子的微域分布的影响及其与大麦耐盐性的关系[J]. 中国科学: C 辑, 2002, 32(2): 113-121.  
LIANG Y C, DING R X. Effects of silicon on micro-distribution of ions in barley roots and its relation to salt tolerance of barley[J]. Science in China(Series C), 2002, 32(2): 113-121(in Chinese).
- [35] ZSOLDOS F, VASHEGYI A, PECSVARADI A, et al. Influence of silicon on aluminum toxicity in common and durum wheat [J]. Agronomie, 2003, 23(4): 349-354.
- [36] 陈喆, 铁柏清, 雷鸣, 等. 施硅方式对稻米镉阻隔潜力研究[J]. 环境科学, 2014, 35(7): 2763-2770.  
CHEN Z, TIE B Q, LEI M, et al. Phytoexclusion potential studies of Si fertilization modes on rice cadmium[J]. Environmental Science, 2014, 35(7): 2763-2770(in Chinese).