

# 毕节岩溶区坡耕地烟草镉安全评价研究

谢运球<sup>1</sup>, 罗志鹏<sup>2</sup>, 孟天友<sup>3</sup>, 姚建陆<sup>3</sup>, 张敏<sup>4</sup>, 梁鸿<sup>2</sup>

(1.中国地质科学院岩溶地质研究所 中国地质科学院岩溶生态系统与石漠化治理重点开放实验室, 广西 桂林 541004 2.广西师范大学环境与资源学院, 广西 桂林 541004 ;3.毕节地区水土保持办公室, 贵州 毕节 551700 ;4.中国地质调查局水文地质环境地质调查中心, 河北 保定 071051)

**摘要:**以贵州省毕节地区岩溶环境烟水配套工程为例,通过实地调查和采样,对烟草地土壤-烟草系统镉进行评价。结果表明,烟草地土壤镉含量 0.12~0.67 mg·kg<sup>-1</sup>,平均 0.40 mg·kg<sup>-1</sup>,已遭轻度-中度污染。水溶态、离子交换态、碳酸盐结合态、腐植酸态、铁锰氧化物结合态、强有机结合态和残渣态镉分别为 0.024、0.100、0.033、0.067、0.096、0.019 mg·kg<sup>-1</sup>和 0.016 mg·kg<sup>-1</sup>,其中离子交换态、铁锰结合态和腐植酸态占 66%。全镉与水溶态、离子交换态和铁锰结合态,水溶态与离子交换态和碳酸盐结合态,离子交换态与铁锰氧化物结合态显著正相关,揭示了镉形态间的转化关系及其对烟草的潜在影响。烟株上部烟叶镉含量 1.04~1.59 mg·kg<sup>-1</sup>,茎、根中镉残留量为 0.2~1.4 mg·kg<sup>-1</sup>,可能与源自 K326 的主推和示范品种对镉的提取效率高有关。因此,建议采用吸收镉低的烟草品种和合理的差异性水肥管理措施,固定土壤中活性态镉,降低土壤镉向烟株的转移,以保障烟叶品质,同时妥善处理这些农业废弃物以保护环境。

**关键词:** 坡耕地; 烟草; 镉; 岩溶环境

中图分类号: X820.4 文献标志码: A 文章编号: 1672-2043(2011)05-0886-07

## Evaluation on Cadmium Safety of Tobacco Planted in Slope Farmland of Karst Area in Bijie Prefecture of Guizhou, China

XIE Yun-qiu<sup>1</sup>, LUO Zhi-peng<sup>2</sup>, MENG Tian-you<sup>3</sup>, YAO Jian-lu<sup>3</sup>, ZHANG Min<sup>4</sup>, LIANG Hong<sup>2</sup>

(1.Institute of Karst Geology & Key Laboratory for Karst Ecosystem and Rocky Desertification Rehabilitation, CAGS, Guilin 541004, China; 2.College of Resources and Environment, Guangxi Normal University, Guilin 541004, China; 3.Bijie Prefecture Soil and Water Conservation, Bijie 551700, China; 4.Center for Hydrogeology and Environmental Geology, CGS, Baoding 071051, China)

**Abstract:** Karst environment is rich in interior cadmium which may influence the cadmium level in tobacco species. The cadmium from soil-tobacco system in karst area of Bijie prefecture of Guizhou Province was evaluated by sampling and analyzing with a case of water-tobacco project. The results showed that the content of soil cadmium from tobacco farmlands averaged 0.4 mg·kg<sup>-1</sup>, ranging from 0.12 to 0.67 mg·kg<sup>-1</sup>, so the soil had been mildly to moderately polluted by cadmium. The water-soluble, the ion-exchangeable, the carbonate-bound, the humic acid-bound, the Fe-Mn oxide-bound, the organic matter-strongly bound and the residual of cadmium were 0.024, 0.100, 0.033, 0.067, 0.096, 0.019 mg·kg<sup>-1</sup> and 0.016 mg·kg<sup>-1</sup> respectively, the sum of the ion-exchangeable, the Fe-Mn oxide-bound and the humic acid-bound being up to 66% of total cadmium. Evidently present were positive correlations among the water-soluble, the ion-exchangeable, the Fe-Mn oxide-bound and the total cadmium, among the water-soluble, the ion-exchangeable and the carbonate-bound, between the ion-exchangeable and the Fe-Mn oxide-bound, which pointed out the transformation of cadmium speciations and potential effects on tobacco under cultivated conditions. Top leaves were of 1.04~1.59 mg·kg<sup>-1</sup> cadmium and 0.2~1.4 mg·kg<sup>-1</sup> of cadmium remained in stalks and roots of tobacco, which might be related to high extraction efficiency of cadmium by those tobacco species originating from K326, which had been promoting and demonstrating in this area. To fix available form of soil cadmium and decrease the transformation of soil cadmium into tobacco organs, some suggestions are to use the tobacco species of lower cadmium absorption, differential management of fertilizers and water applied to tobacco lands so as to harvest good quality of tobacco leaves. Meanwhile, abandoned tobacco stalks and roots need to be disposed properly to protect the environment from cadmium pollution.

**Keywords:** slope cropland; tobacco; cadmium; karst environment

收稿日期: 2010-11-25

基金项目: 国家自然科学基金(40872214) 科技支撑计划课题(2008BAD98B07) 岩溶所基本科研业务费(2009007)

作者简介: 谢运球(1964—),男,博士,研究员,研究方向为农业地质、岩溶环境与资源、水土保持、生态农业等。E-mail: yqxie@karst.ac.cn

无论是将烟叶简单加工后直接吸食还是深加工成卷烟后吸食,其质量和安全性均关系人类的健康。最近,有报道称在中国受欢迎的78种香烟品牌中,13种品牌重金属含量偏高,其中镉含量为 $3.21 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$  ( $2.00\sim 5.40 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ ),是加拿大香烟的2~3倍 ( $1.00\sim 1.25 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ ),也比10 a前报道的中国17种品牌香烟镉含量 $1.666 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$  ( $0.690\sim 3.966 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ )高出近1倍<sup>[1]</sup>,但也有进口烟镉含量 ( $1.09\sim 1.32 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ )高于国产烟 ( $0.72\sim 1.23 \mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ )的报道<sup>[2]</sup>,显示出中国卷烟质量良莠不齐。因此,研究烟草中镉含量及其来源对于控制烟草镉水平、降低烟民的镉摄取风险具有非常重要的意义。烟草是富镉、耐镉物种,其镉的最主要来源是土壤,它直接影响烟叶镉水平,成为烟叶重金属控制的主要研究热点和我国烟草行业“十一五”规划十个重大专项之一——烟叶无公害生产的重要内容。不过,人们普遍关注的是外源镉对烟草的污染。在我国西南广泛分布着镉背景值高的岩溶环境,那么种植在岩溶区的烟草是否会受到内源镉的影响?在1988年成为岩溶地区经济社会发展的全国第一个“开发扶贫,生态建设”综合改革试验区的贵州省毕节地区,正在实施烟水配套工程,大力扶持、发展烤烟产业,打造当地经济社会发展的支柱产业。为此,本文选择毕节地区烟水配套工程中土壤-烟草系统为研究对象,评价当地镉的构成及其影响,以期为该地区烤烟产业的无公害化发展提供参考依据。

## 1 材料与方 法

在贵州省毕节地区,选择烟水配套工程区一片植烟坡耕地作为研究场地。该片烟草地建立了统一的育苗大棚、烤房、提水泵站及灌溉系统,采用垄沟种植,每公顷施烤烟专用肥300 kg、硫酸钾300 kg、普钙过磷酸钙300 kg。

### 1.1 采样与制备

土壤样品取自坡上、坡中和坡下3个坡位的植烟坡耕地上,用梅花形布点法取土。每块烟草地设一个中心采样点,分表层(0~20 cm)、中层(20~40 cm)和深层(>40 cm)进行3层取样,其中表层取5个点(含中心点)混合成一个样品。土样经自然风干后,剔除植物残茬和砾石等杂物,按要求磨细,过200目筛后备用。

烟草样品取相应土壤采样点上烟草的根、茎、叶,其中烟叶多为采收后剩余的顶叶。样品在室内置于60~70℃干燥箱中烘干,粉碎后保存于密封塑料

袋中。

### 1.2 镉的测定

#### 1.2.1 土壤全镉

称取0.5 g土样于聚四氟乙烯坩埚中,用水润湿,加入10 mL HF、3滴浓 $\text{H}_2\text{SO}_4$ 、2 mL  $\text{HNO}_3$ 和3 mL HCl,在电热板上加热至白烟冒尽,再加入1:1 HCl 2.5 mL,使盐类溶解,取下冷却;用少量水冲洗坩埚壁,溶液冷却后转移至25 mL比色管中,用水稀释至刻度,摇匀。将过滤后的滤液在等离子体光谱仪上测定(型号IRIS Intrepid XSP)。

#### 1.2.2 土壤镉形态

按照生态地球化学评价样品分析技术要求(试行)(DD2005-03)进行,采用等离子体光谱仪测定。

#### 1.2.3 烟草镉

称取1.0 g样品于瓷坩埚中,在250℃灰化1 h后,将温度升至500℃,再灰化1 h,取出冷却,加入5 mL 1:1 HCl提取,将提取液转移至25 mL比色管中,用水稀释至刻度,摇匀。将过滤后的滤液在等离子体光谱仪上测定。

### 1.3 镉评价方法

#### 1.3.1 土壤镉“污染”评价

采用公式 $P=X/S$

式中 $P$ 为镉“污染”指数, $X$ 为土壤镉的实测值, $S$ 为镉的评价标准,取值于“无公害”烟叶产地环境质量标准(NY/T 852—2004)中土壤环境质量要求。

#### 1.3.2 烟株镉评价

目前,国内外有关烟叶镉含量限量没有统一标准,因此参照《有机产品》(GB/T 19630.1—2005)中有机茶叶的标准和已有的研究成果<sup>[3]</sup>。烟株茎、根镉含量对比有机肥料中镉限量进行评价。

## 2 结果与分析

### 2.1 烟草地土壤镉

#### 2.1.1 镉全量

烟草地土壤镉全量为 $0.12\sim 0.67 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,平均 $0.40 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,与贵州其他岩溶地区烟草地镉含量相符<sup>[4]</sup>。其中,坡上土壤、坡下表层与中层土壤和坡中表层土壤镉含量高于 $0.30 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ (图1),超过了“无公害”烟叶产地土壤环境质量标准。

土壤镉在剖面上具有随深度递减的趋势,地形上呈现出坡上>坡下>坡中的规律。这可能是烟草生长对养分、水分的吸收利用过程中,根系主要分布在土壤的中、深层,吸收的镉多于表层土,造成中、深层土

壤残留的镉减少;同时,养分与水分在坡面上具有显著的差异,烟草生长差异明显,导致生物量相对较低的坡上烟草地转移的镉少,土壤滞留的镉多。相关分析表明,土壤镉与水分饱和度在0.05水平(双侧)显著负相关(相关系数-0.735),表明伴随烟草对水分的吸收,土壤镉也随之迁移,根系分布层的土壤镉降低。据研究<sup>[5]</sup>,烟草地土壤水肥效应随着地形变缓而变好,即坡下>坡中>坡上,同时养分与镉之间的相互作用特别是拮抗作用可能增强,从而造成坡中土壤镉最低。

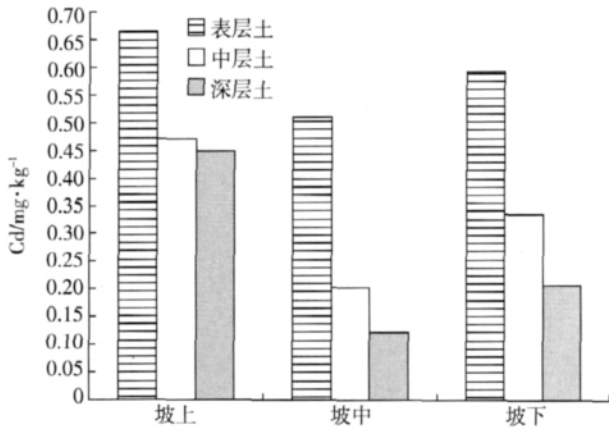


图1 烟草地土壤镉总量  
Figure 1 Total soil Cd in tobacco land

2.1.2 镉形态

烟草地土壤水溶态镉含量平均为 0.024 mg·kg<sup>-1</sup> (0.090~0.046 mg·kg<sup>-1</sup>),占土壤全镉的 6.06%(2.99%~8.57%);离子交换态镉 0.100 mg·kg<sup>-1</sup> (0.011~0.250 mg·kg<sup>-1</sup>),占 25.28%(9.00%~42.37%),碳酸盐结合态镉 0.033 mg·kg<sup>-1</sup> (0.004~0.076 mg·kg<sup>-1</sup>),占 8.36%(1.90%~17.14%);腐植酸态镉 0.067 mg·kg<sup>-1</sup>(0.028~0.134 mg·kg<sup>-1</sup>),占 16.98%(5.49%~31.67%);铁锰氧化物结合态镉 0.096 mg·kg<sup>-1</sup> (0.014~0.167 mg·kg<sup>-1</sup>),

占 24.13%(11.67%~35.24%);强有机结合态镉 0.019 mg·kg<sup>-1</sup> (0.002~0.670 mg·kg<sup>-1</sup>),占 4.85%(0.43%~21.50%);残渣态镉 0.016 mg·kg<sup>-1</sup>(0.007~0.031 mg·kg<sup>-1</sup>),占4.10%(2.94%~16.67%)。可见,烟草地土壤镉以离子交换态、铁锰氧化物结合态和腐植酸态为主(>66%),其顺序为离子交换态>铁锰氧化物结合态>腐植酸态>碳酸盐结合态>水溶态>强有机结合态>残渣态(图2)。

烟草地土壤水溶态、离子交换态、铁锰氧化物结合态和强有机结合态镉随土层深度递减(图2),且表层土碳酸盐态和残渣态镉也高于中层土和深层土,而腐植酸态镉几乎不随土壤深度发生变化。

2.1.3 镉形态间的关系

烟草地土壤镉全量与各形态镉为正相关,与水溶态(n=18 P=0.05 r=0.698)、离子交换态(n=18 P=0.01 r=0.904)和铁锰氧化物结合态镉(n=18 P=0.01, r=0.892)达到了显著水平。这说明土壤镉全量越高,烟株可吸收的有效镉(水溶态+离子交换态)越多。因此,土壤镉含量高低是选择烟草地应考虑的因素之一。

水溶态镉与离子交换态(n=18 P=0.01 r=0.825)、碳酸盐结合态镉(n=18 P=0.05 r=0.734),离子交换态镉与铁锰氧化物结合态镉(n=18 P=0.05 r=0.690),腐植酸态镉与残渣态镉(n=18 P=0.05 r=0.701)都表现出较好的正相关性。这可能反映了在现有耕作条件下各形态镉之间的转化关系。即当水溶态镉因烟草根系吸收而消耗时,离子交换态和碳酸盐结合态镉首先转入土壤溶液中补充水溶态镉,同时铁锰氧化物结合态镉转化成离子交换态镉。

2.1.4 烟草地土壤镉与环境条件和养分关系

相关分析表明,烟草地土壤 pH 与水溶态和离子交换态镉负相关性不明显,与全量和其他形态镉不显

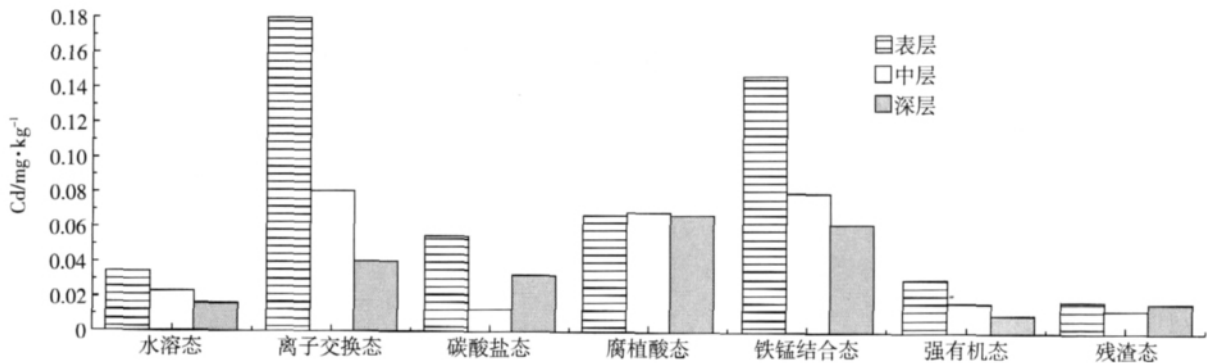


图2 烟草地不同层次土壤中镉形态分布  
Figure 2 Soil Cd forms of tobacco lands

著正相关。这显示,由于烟草地土壤 pH 的降低,非有效态镉向有效态镉转化,一方面引起土壤中有效镉含量升高,另一方面导致土壤全镉含量减少。因此,为了阻止镉形态的这种转化,需要对烟草地土壤 pH 进行调控,以降低烟草利用镉的风险。土壤水分饱和度与各形态镉均为负相关,其中与全量( $n=18$ ,  $P=0.05$ ,  $r=-0.713$ )、腐植酸态( $n=18$ ,  $P=0.01$ ,  $r=-0.877$ )和残渣态镉( $n=18$ ,  $P=0.01$ ,  $r=-0.837$ )达到了显著水平。因此,控制对烟草地的浇水量,保持土壤适度干旱,可以阻止镉向土壤溶液迁移并被烟株吸收。

有机质对全量( $n=18$ ,  $P=0.01$ ,  $r=0.841$ )和腐植酸态镉( $n=18$ ,  $P=0.01$ ,  $r=0.879$ )的相关性高于铁锰氧化物结合态( $n=18$ ,  $P=0.05$ ,  $r=0.676$ )与残渣态( $n=18$ ,  $P=0.05$ ,  $r=0.763$ )。腐植酸构成对镉形态的影响程度有差异,其中富里酸、胡敏酸和胡敏素都有助于全量( $n=18$ ,  $P=0.01$ ,  $r=0.874$ ;  $n=18$ ,  $P=0.05$ ,  $r=0.760$ ;  $n=18$ ,  $P=0.01$ ,  $r=0.840$ )和腐植酸态镉( $n=18$ ,  $P=0.05$ ,  $r=0.729$ ;  $n=18$ ,  $P=0.01$ ,  $r=0.922$ ;  $n=18$ ,  $P=0.01$ ,  $r=0.872$ )富集,但富里酸对离子交换态镉( $n=18$ ,  $P=0.01$ ,  $r=0.831$ )、胡敏酸对残渣态镉( $n=18$ ,  $P=0.05$ ,  $r=0.733$ )、胡敏素对铁锰氧化物结合态( $n=18$ ,  $P=0.05$ ,  $r=0.692$ )与残渣态镉( $n=18$ ,  $P=0.05$ ,  $r=0.773$ )都表现出显著的正相关性。可见,有机质及其构成对不同形态的镉影响不同,通过控制有机质中富里酸含量,可减少烟草对镉的吸收。

烟草地土壤有效磷与全量( $n=18$ ,  $P=0.01$ ,  $r=0.798$ )、水溶态( $n=18$ ,  $P=0.01$ ,  $r=0.859$ )、离子交换态( $n=18$ ,  $P=0.01$ ,  $r=0.904$ )和铁锰氧化物结合态镉( $n=18$ ,  $P=0.05$ ,  $r=0.727$ )显著正相关,这意味着有效磷以吸附态和水溶性磷为主,可能与有效镉产生协同作用并形成产量效应。因此,磷肥的用量应该得到控制。碱解氮与全量( $n=18$ ,  $P=0.05$ ,  $r=0.757$ )、腐植酸态( $n=18$ ,  $P=0.01$ ,  $r=0.892$ )和残渣态镉( $n=18$ ,  $P=0.05$ ,  $r=0.687$ )都有好的正相关性。结合前述腐殖质构成与镉形态的关系分析,碱解氮主要来源于有机氮,无机氮可能大部分被烟株所利用,说明氮肥用量相对合理。

CEC 主要影响烟草地土壤腐植酸态( $n=18$ ,  $P=0.01$ ,  $r=0.924$ )和残渣态镉( $n=18$ ,  $P=0.05$ ,  $r=0.783$ )。对

CEC 贡献较大的有交换性钙( $n=18$ ,  $P=0.01$ ,  $r=0.989$ )、镁( $n=18$ ,  $P=0.01$ ,  $r=0.904$ )而交换性钙、镁与胡敏酸( $n=18$ ,  $P=0.01$ ,  $r=0.840$ ;  $n=18$ ,  $P=0.01$ ,  $r=0.862$ )和胡敏素( $n=18$ ,  $P=0.01$ ,  $r=0.843$ ;  $n=18$ ,  $P=0.01$ ,  $r=0.834$ )具有明显的相关性,推测岩溶区烟草地土壤中钙、镁与胡敏酸、胡敏素结合,进而与镉络合形成腐植酸态和残渣态镉。

## 2.2 烟株各部位镉含量及其分布

烟株上部叶的镉含量在  $1.04\sim 1.59\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  之间,与加拿大烟草镉含量相当,对镉的富集系数为  $2.09\sim 6.91$ ,低于已报道的贵州烟叶中的镉含量  $3.02\sim 4.93\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  和富集系数  $10.63^{[6-7]}$ 。这可能与本次研究采样多为采收后剩下的上部叶有关。根据镉在烟叶中的分布规律,即下部叶>中部叶>上部叶<sup>[8-9]</sup>,推断作为烤烟原料采收的中部烟叶所含的镉会更高。

烟株茎、根中残留镉含量分别为  $0.27\sim 1.41\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  和  $0.21\sim 0.39\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,其富集系数分别是  $0.49\sim 4.09$  与  $0.38\sim 1.70$ ,大致遵循坡下>坡中>坡上的规律。可见,烟株茎中的镉含量高于根,从生物量来说,茎残留的镉也多于根。

总之,镉在烟株中的分布为叶( $1.26\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ )>茎( $0.74\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ )>根( $0.32\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ),与已有研究结果一致<sup>[8-9]</sup>。

## 3 讨论

烟株镉含量的多少既取决于植烟环境(镉的来源),又取决于烟草品种(对镉的吸收能力),还受种植管理的控制(影响镉的迁移与转化)。

### 3.1 烟草地土壤镉评价

土壤镉是烟株镉的主要来源。除了坡中中层、深层土壤以外,烟草地土壤 Cd 的污染指数均大于 1,达 2.7(表 1)。其中,坡上表层、中层和坡下表层土壤属中度 Cd 污染,坡上深层、坡中表层、坡下中层与深层土壤属轻度 Cd 污染。可见研究区烟草地土壤已遭轻度-中度镉污染,达不到无公害烟叶产地土壤环境质量,需要改良土壤。

虽然施肥、浇水和大气等因素可能带入外源镉即

表 1 烟草地土壤 Cd 污染指数

Table 1 Cd pollution index of tobacco land soil

项目	坡上			坡中			坡下		
	表层	中层	深层	表层	中层	深层	表层	中层	深层
污染指数	2.70	2.00	1.70	1.90	0.70	0.83	2.10	1.23	1.07
污染等级	中度	中度	轻度	轻度	安全	安全	中度	轻度	轻度

镉污染,但岩溶环境土壤中的镉主要是内源成因的,并非污染所致,与成土母岩、土壤结构与环境要素等密切相关。虽然本地区烟草地土壤全镉仅  $0.4 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,但有效态镉(水溶态+离子交换态)占 31%,加上碳酸盐态和腐植酸态镉,这个比例达 56%。这可能是本区烟草地烟叶镉含量偏高的一个重要原因。研究表明<sup>[10]</sup>,硅酸盐矿物中氧化锰含量的高低对镉的吸附起了非常重要的作用。烟草地土壤有效态锰、铁平均含量为  $782.6, 54.2 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,远高于有效锌( $6.38 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )、铜( $1.40 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )等其他微量元素,较好地解释了铁锰结合态镉作为主要镉形态的成因。因此,利用富含锰、铁氧化物的矿物作为土壤改良剂可减少镉在土壤中的移动,如在含镉  $0.24 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  土壤中添加含铁的凹凸棒石等可减少土壤 DTPA 可提取态镉 40%<sup>[11]</sup>,从而达到降低烟叶镉含量的目的,如 1%沸石、5%羟基磷灰石可使含镉  $0.4, 0.7 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  土壤上的烟叶镉降幅达 33.3%、53.3%<sup>[12]</sup>。

### 3.2 烟株镉评价

本次研究所采烟株的叶、茎、根镉含量与吴玉萍等添加  $0.6 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ CdCl}_2$  的红壤-K326 盆栽试验结果非常近似<sup>[13]</sup>,烟株中、下部叶片中镉可能接近  $4 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,与文献记载的贵州烟叶镉含量相当<sup>[6-7]</sup>。烟草属于镉高度富集、生物量大的经济作物,为了降低烟叶镉含量,需要考虑选择镉吸收低的烟草品种。据访问,贵州毕节地区烤烟主推品种为南江 3 号、云烟 97,示范品种有毕纳 1 号。南江 3 号是红花大金元的自然变异株,毕纳 1 号是云烟 85 的自然变异株,云烟 97 是云烟 85 与 87 的杂交体,但云烟 85、云烟 87 都是源自 K326 的杂交品种。在高镉( $15 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )胁迫的水培情况下,向 K326 叶部转移的镉是云烟 87 的 2 倍,生物量减少的比例是云烟 87 的一半<sup>[14]</sup>。华中烟区的植烟实践也证实, K326 烟叶镉达  $6 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,而云烟 87 约  $1.5 \sim 2.0 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ <sup>[15]</sup>。在镉全量为  $2.87 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、有效态  $3.0 \sim 4.2 \mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$  土壤中(与岩溶区土壤类似), K326 地上部镉含量为  $4.37 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,对土壤镉的提取效率达到 1%,高出超积累镉的遏蓝菜和高生物量的印度芥菜 2 倍<sup>[16]</sup>。当土壤镉浓度为  $10 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  时,云烟 87、贵烟 11 号、Xanthi、RG17、CF965 和 NC82 叶镉含量  $> 100 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,具备超积累植物的主要特征<sup>[17]</sup>。可见, K326、云烟 87、贵烟 11 号、Xanthi、RG17、CF965 和 NC82 作为香烟原料植物在岩溶环境种植都需要斟酌。云烟 85 的耐镉性和吸收镉的量居中,毕纳 1 号的耐镉能力还没有证实,但因其叶生物量高达  $3 \sim 375$

$\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ,有利于镉的吸收量增加。

此外,大面积种植烤烟固然带来巨大的经济效益,但采收后产生大量的烟秆、根系等农业废弃物。按烟叶与茎秆 1:1 估算,毕节地区年产  $7.0 \times 10^6 \sim 9.3 \times 10^6 \text{ kg}$  烟叶,至少带来  $7 \times 10^6 \text{ kg}$  的烟秆和根,由于一般都被随意堆放或直接遗弃在烟草地上,其中残留的  $0.2 \sim 1.4 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  镉,可能被分解重新释放到土壤中。据研究<sup>[18]</sup>,以 1%和 5%比例将菜豆秸秆(含镉  $3.28 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )和玉米秸秆(含镉  $4.11 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )还田后显著增加了土壤中醋酸铵提取态镉,并随还田秸秆量增加而增加。其原因可能是秸秆快速分解释放出大量有机酸和溶解有机碳所致。在非岩溶区产的烟秆与鸡粪堆化处理的堆肥中,其镉含量为  $1 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ <sup>[19]</sup>,可推知将岩溶区烟草地产的烟秆资源化制成的有机肥,其镉含量更高。实际上,我国用有机废弃物生产出的商用有机肥,镉含量高是普遍现象,且超标率高于其他重金属<sup>[20]</sup>。可见,如何利用岩溶区产的大量烟草废弃物仍然是一个尚待解决的问题,希望引起关注。

### 3.3 管理对镉的影响

由于耕作的缘故,土壤结构趋于均一化,从表层到深层都为壤土,土壤质地对镉影响的差异性减小,表现为中、深层土壤间镉含量比较接近。

统一水肥管理,对于保障烟叶品质的一致性看似“合理”,其实不然。由于坡位的不同,土壤保持水、肥的能力有差异,统一水肥的结果是坡中、坡下烟草地水肥较充足甚至过剩,而坡上烟草地水肥不足,导致坡上烟草地镉迁移、转化比坡中、坡下少,这一点倒是减少烟叶镉积累有利。另外,大量使用生理酸性的硫酸钾肥,烟草地土壤的 pH 一般都低于 6.5(野外原位测量都低于 5.5)。pH 值的降低可引起碳酸盐态和铁锰结合态镉的溶解和释放,同时会增加吸附态镉的释放<sup>[21]</sup>,不利于镉在蒙脱石、海泡石等粘土矿物上的吸附<sup>[10]</sup>,促进了土壤中离子交换态镉等的活化。每公顷土地年施硫酸 2 136 kg,土壤 pH 从 7.4 降到 6.7,烟草镉增加 1.3 倍<sup>[22]</sup>,而 pH 增加 0.8,土壤和烟叶中 DTPA 可提取镉分别减少 40%、35%<sup>[23]</sup>。

从土壤养分与镉形态正相关性分析,养分的施用与累积有助于各形态镉在土壤中富集。其中,有机质的积累,从单质肥料上可能表现为氮肥的积累,更有助于腐植酸态镉和残渣态镉的富存。试验表明,增施有机肥,土壤中 DTPA 可提取态镉不断降低,烟株叶、根中镉含量也逐渐减少<sup>[11]</sup>。而磷肥的使用,促进了有效态镉和铁锰结合态镉在土壤中的增加,并伴随

产量效应转移到烟株中。因此,适当的pH调控和水肥管理是决定烟草地土壤镉形态“激活”与迁移的关键所在。

#### 4 结论

所研究的毕节地区烟水配套工程区岩溶环境土壤被高背景值的内源镉轻度至中度污染,不符合无公害烟叶产地土壤环境质量要求;受土壤中离子交换态、铁锰氧化物结合态和腐植酸态镉(>66%)和统一水肥管理的影响,上部烟叶含镉 $1.04\sim 1.59\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,茎、根中残留镉 $0.2\sim 1.4\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,应高度关注这些废弃物的处理,预防镉对土壤的污染。因此,在岩溶区实施烟水配套工程,首先应重视基于土壤镉等的选址工作,选择土壤含镉符合相关规定的耕地;其次,应开展烟草吸收镉的实验研究,筛选吸镉低的品种进行推广;同时,兼顾合理的水肥管理措施,如肥料类型选择以及根据坡地类型实行差异性的水肥用量等,固定土壤中活性态镉,降低土壤镉向烟株的转移,生产低镉的烟叶,为卷烟产业提供安全的原材料。

#### 参考文献:

- [1] 朱志国, 谷梅, 王桂贤. 十七种香烟中九种金属元素的含量分析[J]. 广东微量元素科学, 1999, 6(11): 50-54.  
ZHU Zhi-guo, GU Mei, WANG Gui-xian. Analysis on the content of nine kinds of metal elements in 17 kinds of cigarettes[J]. *Guangdong Trace Elements Science*, 1999, 6(11): 50-54.
- [2] 萧蕴英, 尉晓怀, 刘学英, 等. 香烟中烟草的汞和镉[J]. 甘肃环境研究与监测, 2002, 15(2): 100, 145.  
XIAO Wen-ying, WEI Xiao-huai, LIU Xue-ying, et al. Tobacco cadmium and mercury of cigarettes[J]. *Gansu Environmental Study and Monitoring*, 2002, 15(2): 100, 145.
- [3] 杨永建, 刘芳, 李永忠, 等. 烟叶重金属及砷限量标准制订研究初探[J]. 云南农业大学学报, 2007, 22(4): 525-530, 536.  
YANG Yong-jian, LIU Fang, LI Yong-zhong, et al. The preliminary study on the establish of heavy metals and arsenic in residue standard of flue-cured tobacco leaves[J]. *Journal of Yunnan Agricultural University*, 2007, 22(4): 525-530, 536.
- [4] 秦松, 王正银, 刘明竞. 喀斯特边远农区正安县植烟土壤重金属含量及其特征[J]. 水土保持学报, 2007, 21(1): 72-75, 98.  
QIN Song, WANG Zheng-yin, LIU Ming-jing. Contents and its characters of heavy metals with tobacco-growing soils in Zhengan County of remote Karst agricultural area[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2007, 21(1): 72-75, 98.
- [5] 谢运球, 梁鸿, 姚建陆, 等. 岩溶区坡耕地烟水配套工程肥水差异性管理研究: 以钾素为例[J]. 中国烟草科学, 2011, 32(2): 76-80.  
XIE Yun-qiu, LIANG Hong, YAO Jian-lu, et al. Water-tobacco project in karst region: Evaluation on potassium[J]. *Chinese Tobacco Science*, 2011, 32(2): 76-80.
- [6] 胡国松, 赵元宽, 曹志洪, 等. 我国主要产烟省烤烟元素组成和化学品质评价[J]. 中国烟草学报, 1997, 3(3): 36-44.  
HU Guo-song, ZHAO Yuan-kuan, CAO Zhi-hong, et al. The evaluation of the chemical elements and some organic components in flue-cured leaf tobacco from the main tobacco production provinces of China[J]. *Acta Tabacaria Sinica*, 1997, 3(3): 36-44.
- [7] 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, 2009(1): 49-52, 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 & Technology*, 2009(1): 49-52, 57.
- [8] 潘文杰, 姜超英, 唐远驹, 等. 烤烟铅镉含量及其与环境的关系[J]. 土壤, 2007, 39(3): 369-374.  
PAN Wen-jie, JIANG Chao-ying, TANG Yuan-ju, et al. Pb and Cd in flue-cured tobacco and their relations to environment[J]. *Soil*, 2007, 39(3): 369-374.
- [9] 吴玉萍, 夏振远, 邓建华, 等. 铅、镉、汞、砷4种元素在烟株中的含量分布[J]. 西南农业学报, 2009, 22(2): 368-371.  
WU Yu-ping, XIA Zhen-yuan, DENG Jian-hua, et al. Distribution of Hg, As, Pb and Cd in flue-cured tobacco in vigorous growing period[J]. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences*, 2009, 22(2): 368-371.
- [10] 朱霞萍, 白德奎, 李锡坤, 等. 镉在蒙脱石等粘土矿物上的吸附行为研究[J]. 岩石矿物学杂志, 2009, 28(6): 643-648.  
ZHU Xia-ping, BAI De-kui, LI Xi-kun, et al. The adsorption behaviors of montmorillonite and some other clay minerals for cadmium[J]. *Acta Petrologica Et Mineralogica*, 2009, 28(6): 643-648.
- [11] 招启柏, 朱卫星, 胡钟胜, 等. 改良剂对土壤重金属(Cd、Pb)的固定以及对烤烟生长影响[J]. 中国烟草学报, 2009, 15(4): 26-32.  
ZHAO Qi-bai, ZHU Wei-xing, HU Zhong-sheng, et al. Cadmium and lead immobilization by applying amendments in polluted soils and their effects on tobacco (*Nicotiana tabacum*) growth[J]. *Acta Tabacaria Sinica*, 2009, 15(4): 26-32.
- [12] Catherine Keller, Monica Marchetti, Luca Rossi, et al. Reduction of cadmium availability to tobacco (*Nicotiana tabacum*) plants using soil amendments in low cadmium-contaminated agricultural soils: A pot experiment[J]. *Plant and Soil*, 2005(276): 69-84.
- [13] 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.  
WU Yu-ping, YANG Hong-qi, XU Zhao-li, et al. Accumulation and distribution of cadmium in flue-cured tobacco[J]. *Acta Tabacaria Sinica*, 2008, 29(5): 37-39.
- [14] 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 Yi-xin, TAO Yong, MENG Li-hua, et al. Physiological response and resistance of K326 and Yunyan87 to cadmium[J]. *Acta Tabacaria Sinica*, 2008, 29(4): 1-5.
- [15] 李力. 烟草中微量元素和重金属的测定研究[D]. 河南: 郑州大学, 2006, 47-59.  
LI Li. The Study on the testing of microelements and heavy metals in tobacco[D]. Henan: Zhengzhou University, 2006, 47-59.

- [16] 杨 勇, 王 巍, 江荣风, 等. 超累积植物与高生物量植物提取镉效率的比较[J]. 生态学报, 2009, 29(5) :2732-2737.  
YANG Yong, WANG Wei, JIANG Rong-feng, et al. Comparison of phytoextraction efficiency of Cd with the hyperaccumulator *Thlaspi caerulescens* and three high biomass species[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2009, 29(5) :2732-2737.
- [17] 赵秀兰, 李彦娥. 烟草积累与忍耐镉的品种差异[J]. 西南大学学报, 2007, 29(3) :110-114.  
ZHAO Xiu-lan, LI Yan-e. Variation of cadmium tolerance and accumulation in different tobacco cultivars[J]. *Journal of Southwest University(Natural Science Edition)*, 2007, 29(3) :110-114.
- [18] 贾 乐, 朱俊艳, 苏德纯. 秸秆还田对镉污染农田土壤中镉生物有效性的影响[J]. 农业环境科学学报, 2010, 29(10) :1992-1998.  
JIA Le, ZHU Jun-yan, SU De-chun. Effects of crop straw return on soil cadmium availability in different cadmium contaminated soil[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2010, 29(10) :1992-1998.
- [19] 李 放, 唐莉娜, 蔡海洋, 等. 废弃烤烟茎秆与鸡粪堆肥化利用的研究[J]. 农业环境科学学报, 2009, 28(1) :194-198.  
LI Fang, TANG Li-na, CAI Hai-yang, et al. Utilization of waste tobacco stem and chicken manure by aerobic compost[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2009, 28(1) :194-198.
- [20] 刘荣乐, 李书田, 王秀斌, 等. 我国商品有机肥料和有机废弃物中重金属的含量状况与分析[J]. 农业环境科学学报, 2005, 24(2) :392-397.  
LIU Rong-le, LI Shu-tian, WANG Xiu-bin, et al. Contents of heavy metal in commercial organic fertilizers and organic wastes[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2005, 24(2) :392-397.
- [21] 党 锋. 烤烟对镉、锌复合污染的响应与金属积累特性[D]. 北京: 中国农业大学, 2006 :1-8.  
DANG Feng. The Responses of flue-cured tobacco to Cd-Zn combined pollution and its metal accumulation[D]. Beijing :China Agricultural University, 2006 :1-8.
- [22] Erika Fässler, Brett H Robinson, Werner Stauffer, et al. Phytomanagement of metal-contaminated agricultural land using sunflower, maize and tobacco[J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2010(136) :49-58.
- [23] Tsadilas C D, Karaivazoglou N A, Tsotsolis N C, et al. Cadmium uptake by tobacco as affected by liming, N form, and year of cultivation[J]. *Environmental Pollution*, 2005(134) :239-246.