

胡鑫, 罗真华, 谢会雅, 等. 土壤性质对烟叶中铅、镉含量的影响及预测模型研究[J]. 农业环境科学学报, 2016, 35(3): 449–454.

HU Xin, LUO Zhen-hua, XIE Hui-ya, et al. Soil property effects on and prediction models of lead and cadmium concentrations in tobacco leaves[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2016, 35(3): 449–454.

土壤性质对烟叶中铅、镉含量的影响及预测模型研究

胡鑫¹, 罗真华², 谢会雅², 周毅², 晏哲¹, 彭亮¹, 曾清如^{1*}

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

摘要:在湖南某植烟区采集代表性的土壤和烟叶样品 112 个,测定了土壤理化性质和样品的铅、镉含量,并通过相关性和回归分析来研究烟叶铅、镉含量与土壤因子关系。结果表明:研究区土壤 Pb、Cd 全量平均值为 40.91、0.37 mg·kg⁻¹, Pb、Cd 有效态平均值分别为 10.71、0.23 mg·kg⁻¹, 烟叶 Pb、Cd 含量分别为 3.86、7.55 mg·kg⁻¹; 烟叶 Pb、Cd 的富集系数分别为 0.094 和 19.84, 对比富集系数可知,植烟区烟叶镉的健康风险要大于铅。相关性分析表明:烟叶中 Pb 与土壤 Pb 全量、Pb 有效态含量呈正相关,与 pH 值呈负相关;烟叶 Cd 与土壤 Cd 全量、Cd 有效态含量、有机质含量和氯离子量呈正相关,与 pH 值负相关。通过数据逐步回归得到的方程为 $\lg Y_{\text{tobacco-Pb}} = 0.806 \lg X_{\text{soil Pb}} - 0.314 \text{pH} - 0.020$ ($R^2 = 0.499$)、 $\lg Y_{\text{tobacco-Cd}} = 0.877 X_{\text{soil Cd}} - 0.302 \text{pH} + 0.465 \lg X_{\text{OM}} + 1.632$ ($R^2 = 0.561$), 回归方程对烟叶中 Pb、Cd 的预测达到极显著水平。

关键词:烟叶; 铅; 镉; 土壤性质; 预测

中图分类号: X503.23 文献标志码: A 文章编号: 1672-2043(2016)03-0449-06 doi:10.11654/jaes.2016.03.006

Soil property effects on and prediction models of lead and cadmium concentrations in tobacco leaves

HU Xin¹, LUO Zhen-hua², XIE Hui-ya², ZHOU Yi², YAN Zhe¹, PENG Liang¹, ZENG Qing-ru^{1*}

(1.College of Resources and Environmental Science, Hunan Agricultural University, Changsha 410128, China; 2.Zhuzhou Branch of Hunan Tobacco Company Zhuzhou, Zhuzhou 412000, China)

Abstract: Plant heavy metal content is greatly affected by soil properties. In this paper, 112 flue-cured tobacco leaf and corresponding soil samples were collected from typical tobacco growing areas in Hunan Province to analyze soil properties and plant lead and cadmium content. Correlation between Pb and Cd content in tobacco leaves and soil properties were studied. Results showed that the average values of soil total Pb and Cd were 40.91 mg·kg⁻¹ and 0.37 mg·kg⁻¹ and those of soil available Pb and Cd 10.71 mg·kg⁻¹ and 0.23 mg·kg⁻¹, respectively. The average content of Pb and Cd in flue-cured tobacco leaves was respectively 3.86 mg·kg⁻¹ and 7.55 mg·kg⁻¹, with enrichment factor of 0.094 and 19.84. This indicated that cadmium had higher health risks than lead. Lead in tobacco was positively correlated with soil total and available Pb, but negatively correlated with soil pH. The content of Cd in tobacco was positively correlated with soil total and available Cd, organic matter, and chloride content, but negatively with soil pH. The optimal prediction models for Pb and Cd content in tobacco were $\lg Y_{\text{tobacco-Pb}} = 0.806 \lg X_{\text{soil Pb}} - 0.314 \text{pH} - 0.02$ ($R^2 = 0.499$), and $\lg Y_{\text{tobacco-Cd}} = 0.877 X_{\text{soil Cd}} - 0.302 \text{pH} + 0.465 \lg X_{\text{OM}} + 1.632$ ($R^2 = 0.561$), with good prediction.

Keywords: tobacco leaf; lead; cadmium; soil properties; prediction

随着我国经济高速发展,重金属的污染不仅十分普遍,污染面积和程度也愈发加大,严重威胁农业生产安全和人类健康^[1]。烟草是我国重要的经济作物,烟

株中 Pb、Cd 浓度过高时不仅会影响其生长发育,烟叶产品中的 Pb、Cd 也会随烟气吸入人体肺部,对人体健康造成潜在危害^[2-3]。因此研究重金属对烟草的影响有重要意义。

重金属向植物体内迁移转化主要受土壤重金属总量及其化学形态、土壤理化性质、基因品种等^[4-6]影响。一方面,随着土壤中重金属总量升高,其交换态、碳酸盐结合态、铁锰氧化态等非残渣态的比例增加,增加了重金属生物有效性^[7-8];另一方面,土壤理化性

收稿日期: 2015-04-03

基金项目: 湖南省株洲市烟草公司资助项目“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]

作者简介: 胡鑫(1989—),男,湖南衡阳人,硕士研究生,研究方向为土壤重金属污染控制。E-mail: xin5217@qq.com

* 通信作者: 曾清如 E-mail: qzeng@163.com

质也影响植物对重金属的吸收,如 pH 值^[4]、有机质^[5]、CEC^[6]、粘粒^[6]等。其中土壤 pH 值对植物-土壤系统中重金属迁移尤为关键,例如胡萝卜-土壤^[9]、莴苣-土壤^[10]、菠菜-土壤^[11]的盆栽实验中,pH 是影响 Cd 吸收最重要的土壤因素,其次为土壤有机质,其他因子相关性则不显著。而在大田环境中,小麦根系 Cd 含量与 pH 和粘粒含量呈显著性负相关 ($R_{\text{pH}}=-0.549$, $R_{\text{clay}}=-0.642$, $n=47$),与 OM 和 CEC 相关性不明显^[12]。因此,土壤性质对重金属向植物迁移有重要影响,但目前关于烟叶 Pb、Cd 含量与土壤环境因子相关性的研究比较少。

目前,对于烟叶的重金属研究主要为:重金属在烟叶中的分布、重金属对烟叶品质的影响,且以盆栽为主,而通过在野外较大范围采集样品,系统分析土壤理化性质对烟叶重金属含量影响的报道较少。本文通过大田采样测定土壤 Pb、Cd 含量、土壤理化性质指标,分析其与烟叶 Pb、Cd 相关性,探讨影响烟叶 Pb、Cd 含量的主要因素。

重金属在植物体内累积的预测模型是当前研究的热点,一般分为经验模型和机理模型^[13]。机理模型主要应用于重金属在水体环境中的毒性评价,本研究中基于土壤理化性质的经验模型要优于机理模型。本文通过分析烟叶 Pb、Cd 含量及其与土壤环境因子相关性,建立基于土壤主控因子与烟叶 Pb、Cd 含量的量化关系,以期为区域降低烟叶 Pb、Cd 含量,烟叶安全生产提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 样品的采集

2013 年 6 月初烟叶收获期,在湖南东部某县级植烟区进行了土壤和烟叶样品的采集,如图 1。根据当地地形和土壤类型,采用五点法采样,在实地选择具有代表性的植烟土壤,采样深度为 20 cm,共采集了具有代表性的 112 个点的样品。从田间采回的土壤登记编号后进行预处理,经过风干、磨细、过筛、混匀、贮存于塑料自封袋密封待用。

植烟区土壤主要为红壤和红壤性水稻土,烟叶品种主要为云烟 87。烟叶样品的采集和土壤样品相互对应,采集烟草植株的中部叶,用去离子水洗净,编号后置于 100~150 °C 烘箱中杀青 5~10 min,然后 70~80 °C 下烘干至恒重,样品粉碎并过筛后备用。

1.2 分析方法

土壤样品利用盐酸-硝酸-高氯酸法消解后,过

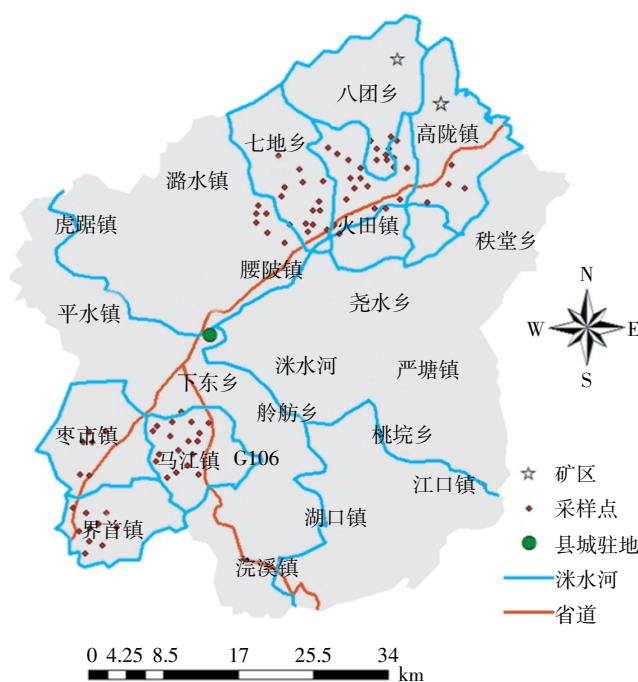


图 1 采样点位置示意图

Figure 1 Distribution of sampling points

滤,利用 ICP-OES (PerkinElmer-Optima 8300) 测定土壤中 Pb,用石墨炉原子吸收光谱法测定 Cd。土壤 Pb、Cd 有效态:对于南方酸性土壤,可以采用环境保护行业标准土壤环境监测技术规范 (HJ/T 166—2004) 提出的 0.1 mol·L⁻¹ 的 HCl 作为浸提,该方法提取的有效态重金属含量与作物重金属有较好的相关性^[14]。烟叶样品用盐酸-硝酸法进行消解后过滤,滤液中 Pb、Cd 测定方法同土壤样品。

土壤理化性质测定:采用 pH 计(水土比为 1:2.5)测定土壤 pH;土壤有机质含量采用重铬酸钾-硫酸氧化-外加热法测定;阳离子交换量(CEC)用乙酸铵离心交换法测定;土壤中氯离子利用离子色谱仪测定。

质量控制:土壤样品消解全量用国家土壤标准物质 GBW07429(GSS-15)进行质量控制,所测样品均设置空白样、平行样,分析时采用国标液控制工作曲线,测量分析的相对标准偏差控制在 10% 以内。实验所用试剂均为优级纯,实验用水为超纯水。

1.3 统计分析

采用 SPSS 20.0 软件进行数据的 Pearson 相关性分析和多元线性回归分析。

2 结果与分析

2.1 植烟区土壤理化性质统计分析

研究区土壤理化性质描述性统计如表 1。研究区

土壤 pH 平均值为 5.23, 其中 pH 值小于 6.5 的比例有 94.6%, 空间变异不大, 整体呈酸性, 对烟草生长不利。研究区有机质含量比较高, 在空间上变异较小, 属于烟草适宜生长范围。阳离子交换量反映了土壤胶体的负电荷量, 研究区 CEC 含量比较高, 保肥能力较强, 变异系数属于中等。水溶性氯平均值水平比较高, 变异系数大, 可能与不同地区施含氯肥料多少有关。

表 1 植烟区土壤理化性质
Table 1 Physical and chemical properties of soils in tobacco grown areas

指标	pH	有机质/ $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	CEC/ $\text{cmol}\cdot\text{kg}^{-1}$	水溶性氯含量/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$
最小值	4.47	14.05	7.24	3.26
最大值	7.78	51.15	42.12	68.26
均值	5.23	30.84	25.18	27.57
标准差	0.68	7.93	8.11	13.91
变异系数	0.13	0.257	0.322	0.475

2.2 植烟区土壤铅、镉含量

Pb、Cd 全量和有效态含量的描述统计如表 2, 研究区土壤 Pb、Cd 全量平均值分别为 40.91 、 $0.37 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。土壤 Cd 全量平均值高于国家二级标准, 超标率为 55.36%。分别有 82.14% 和 98.21% 的样品 Pb、Cd 含量高于湖南土壤重金属背景值, 说明植烟区土壤 Pb、Cd 已有一定的累积。土壤有效态 Cd 平均含量比较高, 超过了湖南土壤重金属背景值。总的来说 Pb、Cd 有效态含量变异系数大于全量的变异系数。

2.3 烟叶中铅、镉含量及其富集系数

从表 3 可知研究区烟叶中 Pb 含量的变化范围为 $0.61\sim 7.81 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 平均值 $3.86 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$; Cd 含量的变化范围为 $1.06\sim 20.15 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 平均值 $7.55 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。Cd、Pb 的变异系数属于中等。

张艳玲等^[15]对我国烟叶主产区烟叶样品分析得出, 烤烟中 Pb、Cd 的平均值分别为 2.89 、 $2.95 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。对比发现, 研究区烟叶 Pb 含量是其 1.33 倍, Cd 含量是其 2.55 倍。杨永健等^[16]建立的烟叶重金属残

表 3 烟叶中 Pb、Cd 含量及其富集系数
Table 3 Heavy metal content and enrichment factors of Pb and Cd in tobacco leaves

元素	最小值/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	最大值/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	均值/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	标准差/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	变异系数	富集系数
Pb	0.61	7.81	3.86	1.88	0.487	0.094
Cd	1.06	20.15	7.55	4.62	0.612	19.84

留量计算公式对 Pb、Cd 限定值分别为 15.00 、 $0.21 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 研究区烟叶 Cd 超过限定值比较多, Pb 基本未超标。

烟叶的富集系数是指烟叶中重金属与土壤中重金属全量浓度之比, 用来表示烟叶对土壤中重金属的吸收累积能力。Cd 的富集系数平均值为 19.84, 而 Pb 的富集系数为 0.094, 说明烟叶是 Cd 的高累积植物, 有较高的健康风险。本地区 Cd 富集系数比较大, 可能与土壤酸性程度较高有关。

2.4 土壤环境对烟叶重金属含量的影响

表 4 为烟叶重金属含量与土壤重金属全量和有效态含量的关系。相关性分析表明, 烟叶 Pb、Cd 含量与土壤 Pb、Cd 全量呈显著正相关, 相关系数为 $R_{\text{Pb}}=0.572(P<0.01)$, $R_{\text{Cd}}=0.522(P<0.01)$ 。烟叶 Pb、Cd 含量与土壤 Pb、Cd 有效态含量显著正相关, 相关系数为 $R_{\text{Pb}}=0.795(P<0.01)$, $R_{\text{Cd}}=0.776(P<0.01)$ 。对比可知, 烟叶中 Pb、Cd 含量与土壤中该元素有效态含量相关性更优。Penka 等^[17]研究发现有效态 Pb、Cd 比全量更能影响烟叶中 Pb、Cd 的积累。

表 5 为植烟区土壤理化性质和烟叶重金属的相关性, 从表中可以看出, 烟叶 Pb、Cd 与 pH 呈负相关,

表 4 烟叶重金属含量与土壤重金属全量和有效态含量关系
Table 4 Correlation between heavy metals in tobacco and in soils

土壤中重金属	烟叶中重金属	
	Pb	Cd
重金属全量	0.572**	0.522**
重金属有效态含量	0.795**	0.776**

注:** 表示在 0.01 水平上显著。

表 2 土壤铅、镉全量和有效态含量统计
Table 2 Descriptive statistics of total and bioavailable concentrations of Pb and Cd in soils

项目	最小值/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	最大值/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	均值/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	标准差/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	变异系数/%	土壤背景值/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	超背景值率/%	国家二级标准/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	超国家二级标准率/%
全 Pb	11.84	108.02	40.91	14.65	35.82	27.00	82.14	250.00	0
全 Cd	0.08	0.82	0.37	0.18	48.63	0.098	98.21	0.30	55.36
有效态 Pb	2.69	31.43	10.71	5.07	47.37				
有效态 Cd	0.02	0.64	0.23	0.16	69.75				

表 5 植烟区土壤理化性质和烟叶重金属的相关性

Table 5 Correlation between heavy metal in tobacco leaves and soil properties

项目	N	pH 值	OM	CEC	氯离子量
烟叶铅	112	-0.366**	0.113	-0.131	0.096
烟叶镉	112	-0.431**	0.367**	-0.266*	0.211*

注:** 表示在 0.01 水平上显著;* 表示在 0.05 水平上显著。

有机质与烟叶镉呈正相关,其余因子影响均较小。

2.5 烟叶重金属含量预测模型

通过逐步线性回归得到土壤指标和烟叶 Pb、Cd 含量的经验模型(表 6)。结果表明,各回归方程相关系数达到显著水平,土壤 pH、有机质、土壤全量 Cd 对烟叶 Cd 影响最大;土壤 pH、全量 Pb 对烟叶 Pb 影响比较大。土壤重金属总量和 pH 是影响烟叶 Pb、Cd 的主要因素,各回归方程相关系数达到显著水平。由表 4 看出土壤重金属有效态含量与烟叶重金属相关性优于全量,但土壤重金属有效态受土壤理化性质影响较大,且测定方法也不同,因此应用土壤重金属全量预测烟叶重金属效果更好。

根据回归方程预测的烟叶 Pb、Cd 含量与实测值(均经过对数化处理)散点图如图 2,可以看出烟叶 Pb、Cd 预测值与实际值拟合程度较好,其中烟叶 Cd 预测略好于烟叶 Pb。

3 讨论

重金属进入烟草的途径可归纳为两类:大气中重金属由叶表面进入,土壤中重金属由烟草根部进入。土壤是烟草重金属的主要来源,烟草产地不同 Pb、Cd 含量差异也比较明显。高旭等^[18]对云南曲靖烟区烟叶调查得知,Pb 含量为 4.99 mg·kg⁻¹,Cd 含量为 3.32 mg·kg⁻¹;玉溪烟区烟叶样品调查得知^[19],烟叶中 Pb 平均含量为 2.80 mg·kg⁻¹,Cd 平均含量为 1.53 mg·kg⁻¹。山东五莲地区烟叶中 Pb、Cd 平均含量分别为 0.76、0.46 mg·kg⁻¹^[20]。我国烟叶 Pb、Cd 含量南方比北方高。本研究中烟叶 Pb 平均含量为 3.86 mg·kg⁻¹、Cd 平均含量为 7.85 mg·kg⁻¹,对比其他地区 Cd 含量偏高。

土壤-植物系统中,土壤理化性质是影响重金属

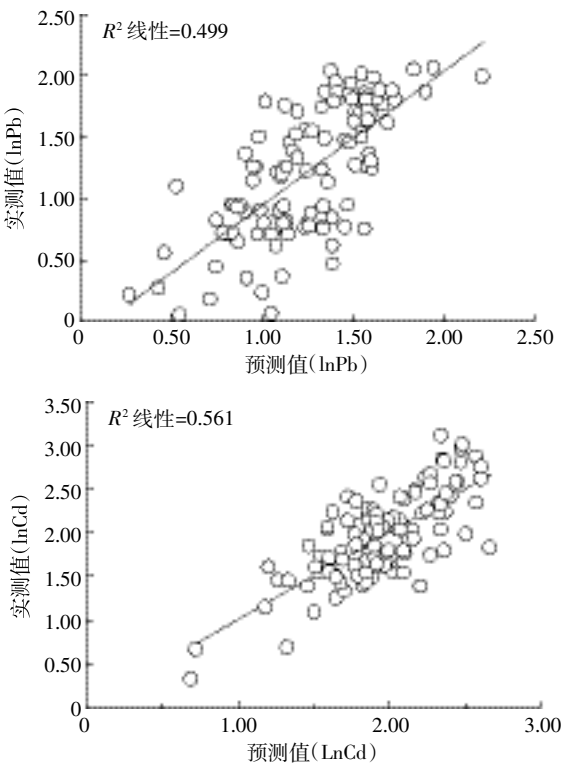


图 2 烟叶 Pb 和 Cd 含量的实测值与预测值的对数值散点图
Figure 2 Logarithm of predicted versus measured Cd and Pb

生物有效性的重要因素,其中土壤 pH 是影响重金属向植物迁移的关键因素。全区土壤 pH 均值为 5.23,大部分偏酸性。研究区域为湖南省重酸雨沉降地区,常年的酸雨使土壤酸化严重,有强烈的淋溶作用,导致重金属氧化物、氢氧化物的溶解度提高或者土壤胶体对重金属可溶态离子的吸附量降低,相应地重金属在土壤中的溶解度增大,浓度和活性提高^[21]。有研究发现,pH 主要影响土壤 Pb、Cd 吸附量,在 pH 为 4.0~7.7 的范围内,pH 值每上升一个单位,Pb、Cd 吸附量增加 3 倍,使 Pb、Cd 向植物根际的迁移能力下降^[22]。潘文杰等^[9]研究表明,南北烤烟中 Pb、Cd 含量与 pH 值呈负相关,与本研究结果一致。有机质(OM)是次要影响因素,一般有机质含量越高,植物体内重金属含量累积越低^[9-11]。这与本研究结果有一定差异,可能是因为有机质的主要成分为腐殖质,虽然其中的胡敏酸、胡敏素与重金属形成的络合物不易溶解,但富里

表 6 烟叶 Pb、Cd 含量预测方程

Table 6 Prediction models of Pb and Cd in tobacco leaves

指标	回归方程	R	R ²	P
烟叶铅	$\lg Y_{\text{tobac-Pb}} = 0.806 \lg X_{\text{soil Pb}} - 0.314 \text{pH} - 0.020$	0.693	0.499	<0.001
烟叶镉	$\lg Y_{\text{tobac-Cd}} = 0.877 X_{\text{soil Cd}} - 0.302 \text{pH} + 0.465 \lg X_{\text{OM}} + 1.632$	0.749	0.561	<0.001

注:Y_{tobac-Cd} 和 Y_{tobac-Pb} 分别为烟叶镉含量和烟叶铅含量;OM 表示土壤有机质。

酸与重金属的络合物比较易溶,重金属络合物可通过矿物表面的溶解作用增加土壤溶液中重金属离子浓度来增加其生物有效性,随着易溶的重金属络合物的增加,土壤中 Pb、Cd 向植物中迁移也更容易^[23]。土壤 CEC 反映土壤胶体负电荷量,其值越高表明土壤能提供更多的吸附位点来固定重金属离子^[24]。本文结果显示烟叶中 Cd 与土壤 CEC 呈负相关($P<0.05$)。有研究显示^[25],酸性土壤中 Cd 在硅酸盐层面和铁铝氧化物上的吸附均是由 CEC 控制的,且 Cd 吸附量随 CEC 的增大而增大。虽然普遍认为烟草是忌氯作物,但氯也是烟草生长发育必需的营养元素。本研究表明土壤中水溶性氯离子量与烟叶中 Cd 含量有一定正相关性。关于水溶性氯与烟叶重金属关系的研究比较少,对其他植物研究比较多,Norvell 等^[26]野外调查结果表明,硬质小麦中 Cd 的积累与土壤中水溶性氯离子含量呈显著正相关关系,与本研究结果相似。因此,适宜的氯含量是保证烟草品质的条件。

以往的植物-土壤系统研究大多是在盆栽的情况下进行的,作物生长的环境条件比较一致,因此模型系数较好。前人研究^[27]基于盆栽模型的相关系数几乎达到了 0.90 以上,本研究的模型相关系数虽然已经具有显著拟合水平,但还是有一定差异。实际的烟草-大田是一个复杂的系统,土壤重金属含量、理化性质、气候条件、海拔高度、土壤类型、耕作方式等^[28]都存在空间差异。本研究只考虑了理化性质中影响较为显著的因子,因此模型相关系数还有提升空间。

烟草是一种容易富集镉的植物,烟草对镉的富集系数通常在 5~10 之间,成熟烟草植株中 Cd 的分布规律一般是叶或茎>根>种子^[29]。本文中烟叶重金属含量比较高,主要是因为土壤重金属背景值比较高,其次为土壤 pH 较低,必然影响土壤中重金属的有效性。因此,在实际应用中,适量施加一定量石灰或改良剂提高土壤 pH 值可以降低烟叶铅、镉含量。同时,在本研究所处县级区域可以利用本文建立的预测模型为烟叶安全生产提供参考。

4 结论

研究区土壤 Cd 全量平均值高于国家二级标准,超标率为 55.36%,Pb 基本无超标。烟叶 Cd 的富集系数达到 19.84,而 Pb 富集系数很小。

相关性和逐步回归分析表明,影响烟叶中 Pb、Cd 含量的主要土壤因子为 Pb、Cd、有机质含量和 pH 值。pH 与烟叶 Pb、Cd 呈负相关,CEC 与烟叶 Cd 含量呈

负相关,有机质与烟叶 Cd 呈正相关。

研究区土壤 pH 普遍偏低,而烟叶累积 Cd 含量高,因此采取适当措施提高土壤 pH 值是烟叶安全生产的重要保障。烟叶重金属预测方程已达到显著水平,在采样区域内,可以为利用土壤性质指标来预测烟叶重金属污染风险提供一定的科学依据。

参考文献:

- [1] Dong J, Yang Q W, Sun L N, et al. Assessing the concentration and potential dietary risk of heavy metals in vegetables at a Pb/Zn mine site, China[J]. *Environmental Earth Sciences*, 2011, 64(5): 1317-1321.
- [2] 曾德武,李帆,赵建武,等.烟草重金属研究现状及农业减害对策[J]. *中国烟草科学*, 2014, 35(1): 127-132.
ZENG De-wu, LI Fan, ZHAO Jian-wu, et al. Advance in tobacco heavy metal pollution and its controlling measures[J]. *Chinese Tobacco Science*, 2014, 35(1): 127-132.
- [3] 张川东,何腾兵,林昌虎,等.几种重金属对烟草的影响研究进展[J]. *贵州农业科学*, 2009, 36(6): 78-80.
ZHANG Chuan-dong, HE Teng-bing, LIN Chang-hu, et al. Research progress in effects of some heavy metals on tobacco[J]. *Guizhou Agricultural Sciences*, 2009, 36(6): 78-80.
- [4] Adamu C A, Mulchi C L, Bell P F. Relationships between soil pH, clay, organic matter and CEC and heavy metal concentrations in soils and tobacco[J]. *Tobacco Science*, 1989, 33: 96-100.
- [5] Khan M A, Mulchi C, McKee C G. Influence of pH and soils on the bioaccumulation of trace elements in Maryland tobacco[J]. *Tobacco Science*, 1992, 36: 53-56.
- [6] 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*, 2008, 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]. *Soils*, 2008, 39(3): 369-374.
- [7] Teutsch N, Erel Y, Halicz L, et al. Distribution of natural and anthropogenic lead in Mediterranean soils[J]. *Geochemical & Cosmochimica Acta*, 2001, 65(17): 2853-2864.
- [8] 张鑫,周涛发,袁峰,等.铜陵矿区土壤中镉存在形态及生物有效性[J]. *生态环境*, 2004, 13(4): 572-574.
ZHANG Xin, ZHOU Tao-fa, YUAN Feng, et al. Speciation and bioavailability of cadmium in Tongling mining soils[J]. *Ecology and Environment*, 2004, 13(4): 572-574.
- [9] Ding C F, Zhang T, Wang X, et al. Prediction model for cadmium transfer from soil to carrot (*Daucus carota* L.) and its application to derive soil thresholds for food safety[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2013, 61(43): 10273-10282.
- [10] Brown S L, Chaney R L, Angle J S, et al. The phytoavailability of cadmium to lettuce in long-term biosolids-amended soils[J]. *Journal of Environmental Quality*, 1998, 27(5): 1071-1078.
- [11] Liang Z, Ding Q, Wei D, et al. Major controlling factors and predictions for cadmium transfer from the soil into spinach plants[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2013, 93(4): 180-185.

- [12] 南忠仁, 李吉均, 张建国. 干旱区土壤小麦根系界面 Cd 行为的环境影响研究——以甘肃省白银市区耕作灰钙土为例[J]. 土壤与环境, 2001, 10(1):14-16.
- NAN Zhong-ren, LI Ji-jun, ZHANG Jian-ming. Influence of soil properties on the behavior of cadmium in soil-root system in arid zone: Take Baiyin region as example[J]. *Soil and Environmental Sciences*, 2001, 10(1):14-16.
- [13] Wang X D, Li B, Ma Y, et al. Development of a biotic ligand model for acute zinc toxicity to barley root elongation[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2010, 73(6):1272-1278.
- [14] 国家环境保护总局, HJ/T 166—2004 土壤环境监测技术规范[S]. 北京:环境科学出版社, 2004.
- State Environmental Protection Administration, HJ/T 166—2004 Soil environmental monitoring technical specification[S]. Peking:Environmental Science Press, 2004.
- [15] 张艳玲, 周汉平. 烟草重金属研究概述[J]. 烟草科技, 2004, 12:20-25.
- ZHANG Yan-ling, ZHOU Han-ping. Summary on study of heavy metal elements in tobacco[J]. *Tobacco Science & Technology*, 2004, 12:20-25.
- [16] 杨永健, 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:自然科学版, 2007, 22(4):381-384.
- YANG Yong-jian, LIU Fang, LI Yong-zhong, et al. The Preliminary study on the establish of heavy metals and arsenic residue standard of flue-cured tobacco leaves[J]. *Journal of Yun nan Agricultural University: Natural Sciences*, 2007, 22(4):381-384.
- [17] Penka Z J, Lilko D, Violina A L, et al. Correlation between soil characteristics and lead and cadmium content in the aboveground biomass of Virginia tobacco[J]. *Environment Monit Assess*, 2010, 163:253-261.
- [18] 高旭, 孙曙光, 许自成, 等. 曲靖烟区土壤 pH 与烟叶重金属含量的分布特点及关系分析[J]. 江西农业学报, 2011, 23(12):116-120.
- GAO Xu, SUN Shu-guang, XU Zi-cheng, et al. Distributive characteristics and relationship of soil pH value and heavy metal content in tobacco leaves in Qujing tobacco-planting area[J]. *Acta Agriculturae Jiangxi*, 2011, 23(12):116-120.
- [19] 雷丽萍, 夏振远, 方敦煌, 等. 玉溪烟叶几种重金属含量状况研究[J]. 西南农业学报, 2011, 24(4):1612-1614.
- LEI Li-ping, XIA Zhen-yuan, FANG Dun-huang, et al. Studies on heavy metal content of tobacco in Yuxi District[J]. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences*, 2011, 24(4):1612-1614.
- [20] 牛柱峰, 杜永利, 崔丙慧, 等. 五莲植烟土壤及烟叶中重金属、农药残留状况研究[J]. 中国烟草科学, 2006, 27(1):26-28.
- NIU Zhu-feng, DU Yong-li, CUI Bing-hui, et al. Research the content of heavy metals and pesticide residue in soil and tobacco leaves in Wulian planting area[J]. *Chinese Tobacco Science*, 2006, 27(1):26-28.
- [21] Römkens M J M, Helming K, Prasad S N. Soil erosion under different rainfall intensities, surface roughness, and soil water regimes[J]. *Catena*, 2002, 46(2):103-123.
- [22] Jackson A P, Alloway B J. The transfer of cadmium from sewage sludge amended soils into edible components of food crops[J]. *Water, Air and Soil Pollution*, 1991, 57(8):873-881.
- [23] Eriksson J E. A study on factors influencing Cd levels in soils and in grain of oats and winter wheat[J]. *Water, Air and Soil Pollution*, 1990, 53(1/2):69-81.
- [24] 徐仁扣, 赵安珍, 姜军, 等. 酸化对茶园黄棕壤 CEC 和粘土矿物组成的影响[J]. 生态环境学报, 2011, 20(10):1395-1398.
- XU Ren-kou, ZHAO An-zheng, JIANG Jun, et al. Effect of acidification on CEC and mineral compositions of yellow brown soils in tea gardens[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2011, 20(10):1395-1398.
- [25] Appel C, Ma L N. Concentration, pH, and surface charge effects on cadmium and lead sorption in three tropical soils[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2002, 31(2):581-589.
- [26] Norvell W A, Wu J, Hopkins D G, et al. Association of cadmium in durum wheat grain with soil chloride and chelate-extractable soil cadmium[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2000, 64(6):2162-2168.
- [27] Adams M L, Zhao F J, McGrath S P, et al. Predicting cadmium concentrations in wheat and barley grain using soil properties[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2004, 33(2):532-541.
- [28] Reddy C N, Patrick W H J. Effect of redox potential and pH on the uptake of cadmium and lead by rice plants[J]. *Journal of Environmental Quality*, 1977, 6(3):259-262.
- [29] 郎思曼, 王龙宪, 许自成. 烟草对重金属的吸收分布特征及影响因素研究综述[J]. 江西农业学报, 2012, 24(11):93-99.
- LANG Si-man, WANG Long-xian, XU Zi-cheng, et al. Absorption and distribution of heavy metal in tobacco and its influencing factors[J]. *Acta Agriculturae Jiangxi*, 2012, 24(11):93-99.