

土壤性质对烟草中镉富集的影响及预测模型研究^①

王 卫¹, 梁振飞¹, 李菊梅¹, 石 屹², 刘继芳^{3*}, 马义兵¹

(1 中国农业科学院农业资源与农业区划研究所/国家土壤肥力与肥料效益监测站网, 北京 100081; 2 农业部烟草生物学与加工重点实验室, 中国农业科学院烟草研究所, 山东青岛 266101; 3 中国农业科学院农业信息研究所, 北京 100081)

摘 要: 利用 15 个不同性质的土壤进行盆栽试验, 研究了土壤性质对烟草中镉(Cd)富集的影响及预测模型。结果表明, 影响烟草中 Cd 的主要土壤因素依次为土壤 Cd 浓度、pH、有机质含量。酸性土壤中烟草对土壤 Cd 具有较强的富集作用。外源 Cd 比土壤中原生 Cd 更容易被烟草吸收。土壤基本性质与烟草 Cd 浓度的数量关系为: $\text{Log}[\text{烟草 Cd}] = 3.04 + 1.212\text{Log}[\text{土壤 Cd}] - 0.270\text{pH} - 0.264\text{Log}[\text{OC}]$, 利用此方程能够很好地预测烟草中 Cd 浓度。通过降低土壤中 Cd 的浓度或有效性, 提高土壤 pH 等措施可有效降低烟叶中 Cd 的浓度。

关键词: 土壤性质; 烟草; 镉; 富集规律

中图分类号: X131.3; S572

镉(Cd)是一种植物非必需元素^[1], 对人和动植物具有严重危害作用^[2-3]。烟草是 Cd 的高富集植物。Cd 不但影响烟草的生理过程, 也会影响烟草品质^[4-5]。因此烟草中 Cd 积累问题得到越来越多的重视。大量研究表明烟草吸收累积 Cd 受到多种土壤因素的影响, 主要包括土壤中 Cd 的浓度、pH、有机质、阳离子交换量、阳离子组成、磷肥施用量等^[6-9]。Golias 等^[10]研究认为土壤 pH 降低是导致烟叶中重金属有效性增加的最重要因素。张大庚等^[11]研究结果显示添加有机物料有利于降低污染土壤中可交换态 Cd 浓度; 雷丽萍等^[12]研究发现在烟草 Cd 污染胁迫条件下, 提高介质中 Ca^{2+} 、 K^{+} 浓度可有效降低 Cd 毒性; 刘芳等^[13]对磷(P)、Cd 交互作用的研究表明磷的添加可减轻 Cd 对烟草的危害。总的来看, 目前的研究主要集中在一种或两种土壤条件下烟草 Cd 浓度与某些土壤性质间的定性关系, 而针对多种土壤与烟草 Cd 浓度间量化关系的研究较少。本研究通过盆栽试验, 研究 15 种不同性质土壤对烟草中 Cd 的富集规律, 建立烟草 Cd 浓度与土壤性质间的关系模型, 以期为我国烟草生产中重金属风险评估与预测提供依据。

1 材料与方法

1.1 供试材料

供试土壤是根据我国土壤分布规律, 采自全国

范围内 15 个位点的典型土壤。所有土样风干后过 2 mm 尼龙筛, 备用。各土壤的基本性质见表 1。

供试烟草品种为 NC89。

1.2 试验设计

试验采用二因素完全随机设计的盆栽试验, 在中国农业科学院作物科学所温室进行。试验因素包括不同性质的土壤及不同浓度的外源 Cd。土壤为 15 种土壤样品; Cd 添加浓度设置 0、1.0、2.0 mg/kg 3 个水平, 每个处理 4 次重复, 总计 180 个处理。

取风干后各土壤样品 1.0 kg 于植物生长盆中, 添加相应浓度的外源镉($\text{Cd}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$) 混匀后用去离子水保持田间最大持水量的 70%, 平衡老化 3 个月后进行烟苗移栽种植。种植前每盆施加纯 N 0.200 g, 并按照 N:P:K = 1:1:2 的比例施加磷、钾肥。试验过程保持土壤含水量为田间最大持水量的 60% ~ 70%, 42 天后收获烟草地上部分。

1.3 样品处理

1.3.1 土壤样品 烟草收获后, 将盆内土壤风干混匀, 采用 5 点法取 10 g 土样, 过 0.15 mm 尼龙筛。称取 0.500 0 g 土样于消解管中, 加入 9 ml 浓硝酸(优级纯)和 3 ml 氢氟酸(优级纯)进行微波消解, 消解液进行赶酸, 过滤, 定容。消解液中 Cd 浓度用电感耦合等离子质谱仪(ICP-MS, Agilent 7500a, Agilent Technologies Co. Ltd., USA) 进行测定。

基金项目: 国家烟草专卖局特色优质烟叶开发重大科技专项低危害烟叶开发项目(TS-06-20110037)资助。

* 通讯作者(liujifang@caas.cn)

作者简介: 王卫(1988—), 男, 河北宽城人, 硕士研究生, 主要从事土壤污染修复研究。E-mail: wangwei@caas.net.cn

表 1 土壤样品的基本理化性质
Table 1 Selected properties of tested soil samples

土壤	土壤类型	PH (1 : 5)	阳离子交换量 (cmol/kg)	电导率 (μS/cm)	总碳 (g/kg)	有机碳 (g/kg)	碳酸钙 (g/kg)	<2 μm 黏粒含量 (g/kg)
海口	砖红壤	4.93	8.75	111	15.1	15.1	-	661
祁阳	红壤	5.31	7.47	74.1	8.70	8.70	-	461
海伦	黑土	6.56	33.6	153	30.3	30.3	-	404
杭州	水稻土	6.8	12.8	203	24.6	24.6	-	389
重庆	紫色土	7.12	22.3	71.0	9.88	9.88	-	273
广州	水稻土	7.27	8.30	137	14.9	14.7	1.50	253
灵山	棕壤	7.48	22.7	92.5	48.0	42.8	42.7	199
呼伦贝尔	黑钙土	7.66	22.7	888	26.9	26.6	2.70	371
公主岭	黑土	7.82	28.8	147	21.9	21.7	2.70	446
石家庄	褐土	8.19	11.7	302	14.6	10.0	38.4	214
杨凌	垆土	8.83	8.46	83.2	16.9	6.18	89.2	275
廊坊	潮土	8.84	6.36	5.70	8.94	6.03	24.2	101
郑州	潮土	8.86	8.50	109	15.9	15.7	1.50	163
张掖	灌漠土	8.86	8.08	152	19.5	10.2	77.5	196
德州	潮土	8.90	8.33	112	14.3	6.92	61.7	176

注：土壤 pH 和电导率(EC)在土水比为 1 : 5 条件下测定；阳离子交换量(CEC)使用非缓冲的硫脲银方法测定；总碳(TC)含量采用高温燃烧法测定，无机碳含量使用 Pressure- Calcimeter 法测定，有机碳含量(OC)通过总碳与无机碳含量之差获得；土壤质地通过沉降法测定。

1.3.2 植物样品 将收获后的完整烟株样品清洗、杀青、烘干、称重。样品全部粉碎后，称取 0.500 0 g 于消解管中，加入 6 ml 浓硝酸(优级纯)和 2 ml 双氧水(优级纯)进行微波消解。消解后的样品测定同上。

1.4 统计分析

植物富集系数(CF)定义为植物体内污染物浓度与相应的土壤中污染物浓度的比值。其表达式为：

$$CF = W_{\text{plant}} / W_{\text{soil}} \tag{1}$$

其中， W_{plant} 代表植物中污染物浓度， W_{soil} 代表相应的土壤污染物浓度。由于本试验为外源添加 Cd 污染试验，因此本文运用两种富集系数的计算方法进行表示：

$$CF_{\text{total}} = W_{\text{pt}} / W_{\text{st}} \tag{2}$$

$$CF_{\text{added}} = (W_{\text{pt}} - W_{\text{pCK}}) / (W_{\text{st}} - W_{\text{sCK}}) \tag{3}$$

其中， CF_{total} 表示烟草对土壤中全部 Cd 吸收的富集系数； CF_{added} 表示烟草对土壤中外源添加 Cd 吸收的富集系数。 W_{pCK} 和 W_{sCK} 分别表示未添加 Cd 处理的烟草和土壤 Cd 浓度； W_{pt} 和 W_{st} 分别表示 1 mg/kg 和 2 mg/kg Cd 处理的烟草和土壤 Cd 浓度。

试验数据采用 SAS 9.2 及 Excel 2003 进行处理，运用 LSD 法进行差异显著性检验。

2 结果

2.1 不同土壤性质对烟草中镉富集的影响

如表 2 所示，分别计算土壤全 Cd 及外源 Cd 在

烟草中的富集系数。结果表明，对于 CF_{total} ，各土壤类型 1 mg/kg 和 2 mg/kg Cd 处理的 CF_{total} 与对照处理相比均有了不同程度提高，而 1 mg/kg 和 2 mg/kg Cd 处理之间 CF_{total} 则不存在显著差异。在海口和祁阳两个土壤类型中，各处理的 CF_{total} 均显著高于其他土壤，这是由于两个土壤 pH (4.93、5.31)较低的原因。同时各处理的 CF_{total} 最小值均出现在张掖土壤中，这主要是由于该土壤 pH (8.86)及 CaCO_3 含量 (7.8%)均较高。

在 CF_{added} 中各土壤类型的富集系数变化规律与 CF_{total} 较为相似，但 CF_{added} 中每种土壤类型的富集系数较 CF_{total} 均有不同程度的增加。这表明与土壤全 Cd 相比，土壤外源 Cd 能更有效地表征 Cd 在植物和土壤之间的转移关系。

2.2 烟草富集镉的主要影响因素

对烟草中 Cd 浓度与土壤 Cd 浓度进行相关分析，结果如图 1 所示。结果表明，在 $\text{pH} < 5.5$ 的条件下，烟草中 Cd 浓度与土壤 Cd 浓度具有较强的相关性，表明在低 pH 条件下土壤中 Cd 较容易被烟草吸收累积；在 $\text{pH} > 5.5$ 的条件下，烟草 Cd 浓度与土壤 Cd 浓度具有一定相关性，将二者对数化后可显著提高其相关性， R^2 由 0.613 提高至 0.863。因此本文考虑将烟草和土壤 Cd 浓度分别对数化后再进行多元回归分析。

表 2 基于土壤全 Cd 及土壤外源 Cd 的烟草 Cd 浓度富集系数
Table 2 Concentration factors of total Cd and added Cd in soil

土壤	CF_{total}			CF_{added}	
	0 mg/kg	1 mg/kg	2 mg/kg	1 mg/kg	2 mg/kg
海口	9.11 ± 0.73	109 ± 10.08	68.8 ± 4.76	142 ± 10.09	77.8 ± 4.77
祁阳	31.3 ± 2.96	78.8 ± 5.16	62.7 ± 3.90	89.9 ± 5.55	66.1 ± 3.92
海伦	7.76 ± 1.13	10.7 ± 1.38	10.2 ± 0.79	10.9 ± 1.36	10.3 ± 0.75
杭州	4.34 ± 0.48	7.33 ± 0.41	8.85 ± 0.80	8.31 ± 0.33	9.58 ± 0.83
重庆	9.71 ± 1.89	17.2 ± 1.82	15.3 ± 1.04	18.6 ± 1.69	15.8 ± 1.00
广州	6.73 ± 0.11	15.4 ± 1.09	6.64 ± 0.99	7.83 ± 1.53	6.63 ± 1.18
灵山	7.98 ± 1.11	10.9 ± 1.22	7.24 ± 0.52	11.5 ± 1.07	7.19 ± 0.56
呼伦贝尔	4.13 ± 0.60	11.1 ± 0.79	12.0 ± 0.77	12.4 ± 0.79	12.6 ± 0.75
公主岭	7.18 ± 0.55	6.08 ± 0.44	7.27 ± 0.77	5.89 ± 0.33	7.27 ± 0.77
石家庄	2.83 ± 0.33	4.85 ± 0.46	6.50 ± 0.98	5.28 ± 0.56	6.89 ± 0.97
杨凌	4.03 ± 0.30	6.17 ± 0.93	4.7 ± 0.56	6.53 ± 0.91	4.76 ± 0.56
廊坊	2.62 ± 0.13	5.22 ± 0.98	5.41 ± 0.51	5.84 ± 1.41	5.66 ± 0.51
郑州	4.51 ± 0.14	6.68 ± 0.58	6.47 ± 0.43	6.91 ± 0.55	6.58 ± 0.42
张掖	1.73 ± 0.12	3.72 ± 0.61	2.70 ± 0.19	4.19 ± 0.63	2.81 ± 0.25
德州	2.85 ± 0.48	7.77 ± 0.11	6.13 ± 0.98	9.69 ± 0.12	6.59 ± 1.07

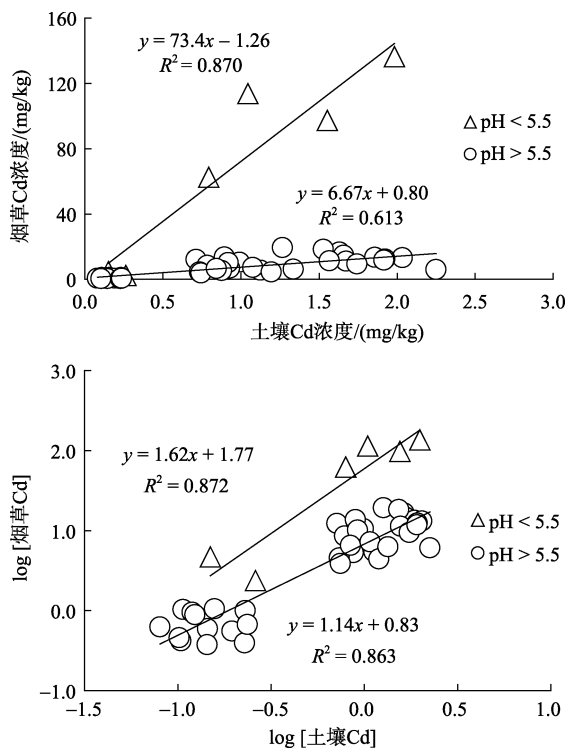


图 1 烟草 Cd 浓度与土壤 Cd 浓度间的关系
Fig. 1 Relationship between tobacco Cd and soil Cd

利用烟草中 Cd 浓度与土壤性质间的关系进行简单和多元的回归分析,建立预测方程,并利用规划求解对方程进行优化,当方程预测烟草中 Cd 浓度与实测烟草 Cd 浓度之间残差平方和最小时所得到的方程即为最优方程。预测方程如表 3 所示。

预测方程表明,烟草中 Cd 浓度与土壤中 Cd 浓度呈显著的正相关关系,土壤 Cd 浓度与土壤 pH 二者可共同控制方程 90.3% 的变异,当再引入土壤有机质含量(OC)后可进一步提高方程预测能力。而引入如阳离子交换量(CEC)、黏粒含量等则不能提高方程预测能力。

简单和多元回归分析结果表明,通过土壤 Cd 浓度、pH 以及有机质含量可以较好地预测烟草 Cd 浓度。

2.3 不同来源的土壤镉的有效性比较

土壤中 Cd 具有不同来源,其中包括土壤本身含有的土壤背景 Cd ($Cd_{control}$),外源添加的土壤外源 Cd (Cd_{added})以及二者共同组成的土壤全 Cd (Cd_{total})。土壤中不同来源 Cd 的有效性受土壤性质的影响存在差异,因此烟草对不同来源的土壤 Cd 吸收也存在差别。

表 3 烟草 Cd 浓度与土壤性质间的预测方程
Table 3 Prediction equations between tobacco Cd and soil properties

编号	预测方程	Adj. R^2	P	n
1	$\text{Log [烟草 Cd]} = 0.96 + 1.216\text{Log [土壤 Cd]}$	0.687	< 0.001	45
2	$\text{Log [烟草 Cd]} = 2.86 + 1.214\text{Log [土壤 Cd]} - 0.252\text{pH}$	0.903	< 0.001	45
3	$\text{Log [烟草 Cd]} = 3.04 + 1.212\text{Log [土壤 Cd]} - 0.270\text{pH} - 0.264\text{Log [OC]}$	0.911	< 0.001	45

注: Adj. R^2 表示调整后 R^2 , 下同。

表 4 为利用不同来源土壤 Cd 建立烟草 Cd 浓度与土壤性质间的多元回归预测方程。结果表明,所有方程均达到了极显著水平($P < 0.001$)。不同来源的烟草 Cd 浓度与土壤性质间具有相似的规律和趋势:烟草 Cd 浓度与土壤 Cd 浓度均呈现显著的正相关关系,

而与土壤 pH、有机质含量间均呈现显著的负相关关系。烟草 Cd 浓度与土壤外源 Cd (Cd_{added})的预测方程优于与土壤全镉(Cd_{total})以及土壤背景镉($Cd_{control}$)的预测方程,这表明土壤外源镉(Cd_{added})具有更高的有效性和植物可利用性,更利于烟草吸收。

表 4 不同来源土壤 Cd 的预测方程
Table 4 Prediction equations of different soil Cd resources

编号	预测方程	Adj. R^2	P	n
4	$\text{Log [烟草 Cd]} = 1.69 + 0.120\text{Log [土壤 } Cd_{\text{control}}] - 0.219\text{pH} - 0.198\text{Log [OC]}$	0.767	< 0.001	15
5	$\text{Log [烟草 Cd]} = 3.49 + 0.647\text{Log [土壤 } Cd_{\text{added}}] - 0.311\text{pH} - 0.360\text{Log [OC]}$	0.864	< 0.001	30
6	$\text{Log [烟草 Cd]} = 3.39 + 0.763\text{Log [土壤 } Cd_{\text{total}}] - 0.306\text{pH} - 0.372\text{Log [OC]}$	0.846	< 0.001	30

2.4 预测方程验证

对本文各种分析方式所得的预测方程进行比较发现,方程 3 利用土壤全 Cd 结合土壤背景 Cd 共 45 个观测值进行多元回归分析所得预测方程 ($\text{Adj.}R^2 = 0.911$)具有良好的预测能力。

通过预测方程 3 计算得到的预测烟草 Cd 浓度与实际测量的烟草 Cd 浓度间比较(图 2)发现烟草 Cd 浓度的预测值与真实值间的一致性较好,预测烟草 Cd 浓度与实测烟草 Cd 浓度间的 $R^2 = 0.917$, 95% 的预测值均在 2 倍的预测区间内,本模型具有良好的预测性。通过土壤基本性质可较好地预测烟草 Cd 浓度。

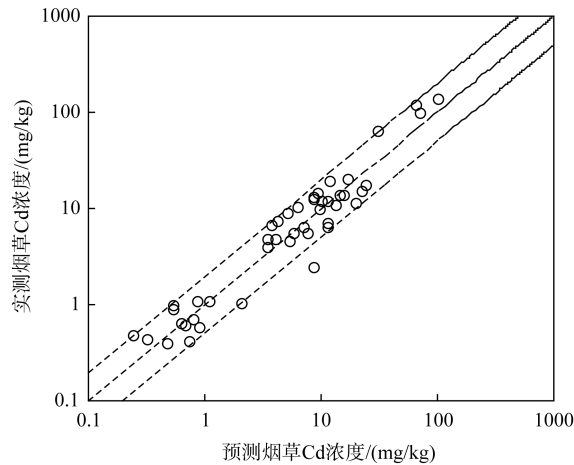


图 2 方程 3 预测烟草 Cd 浓度与实际测量烟草 Cd 浓度间的关系(实线代表 1 : 1 的直线,虚线代表 2 倍的预测区间)
Fig. 2 Relationship between measured and predicted tobacco Cd (the solid line represents a 1 : 1 linear, the dashed lines represents 2 times between predicted and measured values)

3 讨论

土壤中 Cd 浓度及有效性是影响烟草吸收土壤 Cd 最直接的因素。Zaprianova 等^[7]研究发现烟叶 Cd 浓度与土壤 Cd 浓度及有效态浓度呈极显著的正相关关系。吴玉萍等^[14]研究 Cd 在烤烟中的累积分配时发

现随着 Cd 浓度增加,烟株各部位 Cd 多呈增加趋势。但同时 Castillo 等^[15]研究发现,植物 Cd 浓度与土壤 Cd 浓度没有明显的相关性。本文的研究结果显示,当 $\text{pH} < 5.5$ 时烟草 Cd 浓度与土壤 Cd 浓度存在显著的线性相关关系;当 $\text{pH} > 5.5$ 时,烟草 Cd 浓度与土壤 Cd 浓度对数化后存在显著的线性相关关系。去除土壤背景 Cd 的干扰后烟草外源 Cd CF_{added} 显著高于全 Cd CF_{total} ,烟草 Cd 浓度与不同来源的预测方程中土壤外源 Cd 的预测方程($\text{Adj.}R^2 = 0.864$)与土壤全 Cd ($\text{Adj.}R^2 = 0.846$)以及土壤背景 Cd ($\text{Adj.}R^2 = 0.767$)相比具有更好的预测能力,这表明在土壤体系中外源 Cd 具有更高的活性和生物可利用性,较易被植物吸收。

土壤 pH 是影响烟草吸收土壤 Cd 最重要的因素。随着 pH 升高,土壤胶体对土壤中 Cd^{2+} 吸附也不断增加从而降低了土壤中 Cd^{2+} 的可利用性^[12]。Zachara 等^[16]研究发现土壤 pH 对土壤中 Cd 的形态也存在显著影响,碱性条件下($\text{pH} > 8$),土壤体系中 Cd 多以氧化铁(铝)结合态和硅铝酸盐结合态等植物无效态形式存在,中性或酸性条件下,土壤体系中 Cd 较多以可交换态等有效态存在。Tsadilas 等^[17]研究发现通过施加氢氧化钙提高土壤 pH 可有效降低土壤 DTPA 提取态 Cd 和烟草 Cd 浓度。本文研究结果表明,在海口($\text{pH} 4.93$)和祁阳($\text{pH} 5.31$)两种土壤上,烟草对土壤中 Cd 的富集均显著高于其他土壤类型;在张掖($\text{pH} 8.86$)土壤条件下,烟草对 Cd 的富集显著地低于其他土壤类型。在土壤性质与烟草 Cd 浓度的逐步回归预测方程中,加入土壤 pH 因子后使方程 $\text{Adj.}R^2$ 由 0.687 提高到 0.903。因此,土壤 pH 是影响烟草吸收土壤 Cd 最重要的因素之一。

土壤有机质含量也是影响烟草吸收 Cd 的因素之一。一方面提高土壤有机质含量可以增加土壤对 Cd 的吸附量^[18]; King 等^[19]研究发现低有机质含量处理的土壤中烟草 Cd 浓度是高有机质含量处理的 8 倍。

另一方面在土壤中某些有机酸的加入虽然能提高土壤有机质含量但其通常会降低土壤 pH 从而导致烟草对土壤中 Cd 吸收增加。Evangelou 等^[20]研究表明向土壤中施加腐植酸 2 g/kg 可使烟草中 Cd 浓度由 30 mg/kg 增加至 39 mg/kg。本研究结果显示烟草 Cd 浓度与土壤有机质含量具有显著的负相关关系。此外,土壤中其他一些因素如阳离子交换量、黏粒含量等对烟草吸收 Cd 也有一定影响,Adamu 等^[6]研究发现烟草 Cd 浓度与土壤阳离子交换量具有显著的负相关性。但在本文研究中发现,其他因子对烟草吸收土壤 Cd 的影响并不显著。

4 结论

本研究结果表明烟草 Cd 浓度与土壤 Cd 浓度进行对数化转换后具有显著的正相关性,烟草在酸性土壤上对 Cd 的富集能力强于中性或碱性土壤条件,土壤 pH 是影响烟草吸收土壤 Cd 最重要的因素。土壤外源 Cd 与土壤背景 Cd 相比具有更好的活性和生物有效性。通过土壤镉浓度、pH 以及土壤有机质含量可以较好地预测烟草 Cd 浓度,预测方程为: $\text{Log}[\text{烟草 Cd}] = 3.041 + 1.212\text{Log}[\text{土壤 Cd}] - 0.270\text{pH} - 0.264\text{Log}[\text{OC}]$ 。

在 Cd 污染条件下,降低土壤中 Cd 的浓度或有效性、提高土壤 pH 等措施可有效降低其对烟叶的危害。

参考文献:

- [1] McLaughlin MJ, Singh BRE. Cadmium in Soils and Plants[M]. Dordrecht: Kluwer Academic, 1999
- [2] Järup L, Åkesson A. Current status of cadmium as an environmental health problem[J]. Toxicology and Applied Pharmacology, 2009, 238(3): 201–208
- [3] Marano KM, Naufal ZS, Kathman SJ. Cadmium exposure and tobacco consumption: Biomarkers and risk assessment[J]. Regulatory Toxicology and Pharmacology, 2012, 64: 243–252
- [4] Grispen VMJ, Hakvoort HWJ, Blik T, Verkleij JAC, Schat H. Combined expression of the Arabidopsis metallothionein MT2b and the heavy metal transporting ATPase HMA4 enhances cadmium tolerance and the root to shoot translocation of cadmium and zinc in tobacco[J]. Environmental and Experimental Botany, 2011, 72(1): 71–76
- [5] 吴坤, 吴中红, 郇付菊, 韩莹, 谢宝恩, 袁祖丽. 镉胁迫对烟草叶激素水平、光合特性、荧光特性的影响[J]. 生态学报, 2011, 31(16): 4 517–4 524
- [6] Adamu CA, Mulchi CL, Bell PF. Relationships between pH, clay, organic matter and CEC and heavy metal concentrations in soils and tobacco[J]. Tobacco Science, 1989, 33: 96–100
- [7] Zaprianova P, Dospatliev L, Angelova V, Ivanov K. Correlation between soil characteristics and lead and cadmium content in the above ground biomass of Virginia tobacco[J]. Environmental Monitoring and Assessment 2009, 5: 28–39
- [8] Tsadilas CD. Soil pH influence on cadmium uptake by tobacco in high cadmium exposure[J]. Journal of Plant Nutrition, 2000, 23: 1 167–1 178
- [9] Matsi TH, Tsotsolis N, Barbayiannis N. Heavy metal and trace element levels in soils, irrigation waters and five tobacco types: Results of a 4 years survey study of the main tobacco areas of Greece and north Italy[C]. CORESTA Congress, Agro-Phyto Groups, 2002
- [10] Golias EE, Dimirkou A, Mitsios IK. Heavy metal concentration in tobacco leaves in relation to their available soil fractions[J]. Communications in Soil Science and Plant Analysis, 2009, 40: 106–120
- [11] 张大庚, 依艳丽, 李亮亮, 栗杰. 水分和有机物料对镉污染土壤的改良效应[J]. 土壤, 2008, 40(6): 934–938
- [12] 雷丽萍, 陈世宝, 孙聪, 徐照丽, 汪安云, 柴家荣. 溶液 Ca、K 浓度和 pH 对烟草 Cd 毒性的影响[J]. 中国烟草科学, 2012, 33(4): 79–84
- [13] 刘芳, 介晓磊, 孙巍峰, 化党岭, 刘世亮, 王代长. 磷、镉交互作用对烟草生长及吸收积累磷、镉的影响[J]. 土壤通报, 2007, 38(1): 116–120
- [14] 吴玉萍, 杨虹琦, 徐照丽, 邓建华. 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
- [15] Castilho PD, Chardon WJ. Uptake of soil cadmium by three field crops and its prediction by a pH-dependent Freundlich sorption model[J]. Plant and Soil 1995, 171(2): 263–266
- [16] Zachara JM, Smith SC, Resch CT, Cowan CE. Cadmium sorption to soil separates containing layer of silicates and iron and aluminium oxides[J]. Soil Science Society of America Journal, 1992, 56(4): 1 074–1 084
- [17] Tsadilas CD, Karaivazogloub NA, Tsotsolisb NC, Stamatiadis S, Samaras V. Cadmium uptake by tobacco as affected by liming, N form, and year of cultivation[J]. Environmental Pollution, 2005, 134(2): 239–246
- [18] 林大松, 徐应明, 孙国红, 戴晓华. 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
- [19] King LD. Effect of selected soil properties on cadmium content of tobacco[J]. Journal of Environmental Quality, 1988(17): 251–255
- [20] Evangelou M, Daghan H, Schaeffer A. The influence of humic acids on the phytoextraction of cadmium from soil[J]. Chemosphere, 2004, 57(3): 207–213

Studies on Effects of Soil Properties on Cd Accumulation in Tobacco and Prediction Model

WANG Wei¹, LIANG Zhen-fei¹, LI Ju-mei¹, SHI Yi², LIU Ji-fang^{3*}, MA Yi-bing¹

(1 *National Soil Fertility and Fertilizer Effects Long-term Monitoring Network / Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China*; 2 *Key Laboratory of Tobacco Biology and Processing, Ministry of Agriculture, Tobacco Research Institute, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Qingdao, Shandong 266101, China*; 3 *Institute of Agricultural Information, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China*)

Abstract: The accumulation of cadmium (Cd) in tobacco (*Nicotiana tabacum* L.) as affected and predicted by soil properties was investigated using 15 soils with a wide of properties and pot experiments. Results indicated that the main soil factors affecting the accumulation of Cd in tobacco were in the following order: soil Cd concentration, pH and organic matter content. The accumulation of Cd in tobacco plants in acidic soils was greater than that in alkaline soils. Also, it was found that exogenous water soluble Cd added to soils was more easily absorbed by tobacco compared with Cd in soils. The quantitative relationship between concentration of Cd in tobacco plants and soil properties was $\log [\text{Plant Cd}] = 3.041 + 1.212\text{Log} [\text{Soil Cd}] - 0.270\text{pH} - 0.264\log [\text{Organic carbon}]$, which could be used to predict well the concentration Cd in tobacco plants based on soil Cd, pH and organic carbon content. Meanwhile, the results showed that the concentration of Cd in tobacco plants could be significantly reduced by increasing soil pH and decreasing concentration of soil Cd.

Key words: Soil properties, Tobacco, Cadmium, Accumulation