

农业

改良剂对土壤重金属(Cd、Pb)的固定以及对烤烟生长影响

招启柏¹, 朱卫星¹, 胡钟胜^{1,2}, 王宏武¹, 刘艳杰¹, 王广志¹, 曹志洪²

1 江苏中烟工业公司, 南京市中山北路406号210011;

2 中国科学院南京土壤研究所, 南京210005

摘要: 为了从源头减少烟草重金属对人类健康的潜在危害, 通过盆栽试验, 研究不同改良剂(凹凸棒土、活性炭、有机肥)对植烟土壤重金属(Cd、Pb)的原位固定以及其对烤烟重金属(Cd、Pb)吸收量和生长的影响。分析数据表明: 与对照相比, 改良剂使得土壤中二乙三胺五乙酸(DTPA)提取态Cd与Pb含量有着不同程度的减少, 同时, 改良剂抑制了烤烟对Cd和Pb的吸收, 降低了叶片中Cd、Pb的含量; 同时, 烤烟由根向叶中转移Cd的能力大于Pb; 土壤中DTPA提取态Cd与Pb的含量与烟叶中Cd、Pb的含量呈正相关, 表明烟叶中Cd、Pb含量的降低是由于土壤中重金属的有效性下降所致; 改良剂处理的土壤上烟叶叶绿素仪测定(SPAD)值与对照相比呈上升趋势, 植株根系、高度、叶面积以及叶干重的增加, 表现为改良剂降低了重金属对烤烟的毒害, 促进了烤烟的生长。此外, 随着改良剂剂量的增加, 表现出的正面效益越明显。简而言之, 3种改良剂增加了烟叶产量并且提高了健康质量。

关键词: 烟草; 重金属; 土壤; 改良剂

doi: 10.3969/j.issn.1004-5708.2009.04.006

中图分类号: S572.061

文献标识码: A

文章编号: 1004-5708(2009)04-0026-07

Cadmium and Lead immobilization by applying amendments in polluted soils and their effects on tobacco (*Nicotiana tabacum*) growth

ZHAO Qi-bai¹, ZHU Wei-xing¹, HU Zhong-sheng^{1,2}, WANG Hong-wu¹,
LIU Yan-jie¹, WANG Guang-zhi¹, CAO Zhi-hong²

1 China Tobacco Jiangsu Industrial Corporation, Nanjing 210011, China;

2 Institute of Soil Science, CAS, Nanjing 210008, China

Abstract: In order to reduce heavy metals in tobaccos, a pot experiment was conducted to investigate the effects of soil amendments (Attapulgit, Activated carbon, Organic fertilizer) on Cadmium (Cd) and Lead (Pb) immobilization and growth of tobacco. Results showed that DTPA-extractable Cd and Pb in soils were reduced to different degrees by these three soil amendments compared to control treatment. Amendments in the soils reduced uptake and hence Cd and Pb concentrations in roots and leaves. Higher transportation index of Cd in leaves compared to Pb indicated that it was of importance to reduce Cd uptake. DTPA-extractable Cd and Pb in soils were positively correlated to metal concentrations in tobacco leaves suggesting that DTPA-extractable Cd and Pb in soils may be a feasible method to estimate Cd and Pb availability to tobacco plants and the reduction in leaf Cd and Pb concentration was due to a reduction in metal availability to tobacco. An upward trend of leaf SPAD value was observed when plants were grown in soils with all soil amendments compared with control. The addition of amendments resulted an increase in root length, shoot length, leaf area, and leaf dry weight, indicating important role of soil amendments in protection against Cd and Pb toxicity. Furthermore, higher doses of amendments used resulted in better effects. In general, soil amendments were effective in improving tobacco yield and quality.

Key words: tobacco; heavy metal; soil; amendment

作者简介: 招启柏, 高级农艺师, 长期从事烟叶管理与研究工作。E-mail: zhaqibai@163.com

基金项目: 中国科学院知识创新重点方向性项目(KSCX2-YW-N-038)、国家重点基础研究发展规划(973)项目2002CB410805和江苏中烟工业公司科技项目专项资助

收稿日期: 2008-04-01

吸烟行为是室内空气中颗粒物污染的主要来源之一,对烟民和被动吸烟者都会具有潜在的呼吸性疾病危险^[1]。包括颗粒物、CO和尼古丁在内的有害物质已经被广为研究。仅有很少研究将吸烟相关的疾病与烟草燃烧时释放的重金属相联系^[2-3]。为了数亿不愿戒烟的消费者和国家利益,减害是烟草行业平稳发展的唯一出路和目标,这一任务落在烟草相关科技人员肩上^[4]。

植物吸收的重金属只占土壤重金属全量的很少部分,并且从根到地上部的迁移量也很有限^[5]。但土壤是烟草中重金属最主要来源。仅有少量应用于改良重金属污染土壤的新技术,而且不够理想,譬如土壤淋洗改良方法产生对土壤生物活动的不利影响,破坏土壤结构和肥力,而且工程费用也很昂贵^[6]。从生态学、毒理学和健康角度来说,研究污染土壤中生物可用性(有效性)重金属含量尤为重要,因为这些组份容易被生物放大^[7]。为了减少烟草重金属含量,在土壤中添加改良剂降低重金属有效性,从而减少吸收的措施将是行之有效的改良重金属污染土壤方法。近几年,在其他作物生产中通过向土壤耕层添加化学物质(粘土矿物、有机肥和活性炭等)而调整土壤参数使重金属有效性降低或无效化的方法开展了大量研究。由于这种重

金属污染的治理方法经济可行而且不破坏土壤结构的优势而可被广泛应用^[8]。除减少重金属溶解性之外,改良剂还可以有效地减少重金属生物有效性和对健康的负面作用^[9]。本研究在土壤中各自添加凹凸棒土、活性炭和有机肥3种改良剂的试验,以观测其对降低土壤中重金属有效性、减少烤烟对重金属吸收的效果以及对烤烟生长的影响,为从源头减少供卷烟的烟叶中重金属对人类健康的潜在危害提供技术方法和理论依据。

1 材料与方法

1.1 土壤与改良剂

植烟土壤(0~10 cm)采自河南省。风干后的土壤样品通过2 mm筛以备盆栽试验。根据中国土壤学会推荐的标准方法测定土壤基本性质^[9]。土壤是粘壤土,其中粘粒:37.2%、粉粒:33.9%、沙粒:28.9%、阳离子交换量(CEC)为15.9 cmol(+)kg⁻¹。称取200 mg土壤在高压微波系统中用12.5 mL王水(HNO₃/HCl/HClO₄,3:1:1)消化,稀释样品至25 mL,利用Varian SpectrAA 400原子吸收分光仪测定重金属含量。土壤的基本理化性质见表1。

表1 供试土壤基本性质

总 N (g·kg ⁻¹)	有机质 (g·kg ⁻¹)	pH*	有效 P (mg·kg ⁻¹)	速效 K (mg·kg ⁻¹)	总 Cd (mg·kg ⁻¹)	总 Pb (mg·kg ⁻¹)	总 As (mg·kg ⁻¹)	总 Hg (mg·kg ⁻¹)
1.43	15.64	6.46	16.56	81.15	0.24	63.32	25.10	0.33

注:* 土水比 1:2.5。

表2 改良剂的基本性质

改良剂	测定项目	测定项目
凹凸棒土	SiO ₂ 含量 :60.5%	Fe ₂ O ₃ 含量 :5.3%
	Al ₂ O ₃ 含量 :9.8%	CaO 含量 :2.0%
	MgO 含量 :10.4%	pH :9.43*
活性炭	有机质含量 :83.2%	比表面积 (m ² ·g ⁻¹) :1076
	总氮 :4.48%	水分含量 :5.24%
	碘吸附比 (mg·g ⁻¹) :956	pH :8.21
有机肥	有机质含量 :12.53%	K ₂ O 含量 :1.82%
	总氮 :6.31%	总有机酸含量 :3.12%
	P ₂ O ₅ 含量 :2.46%	pH :5.62

注:* 土水比 1:2.5

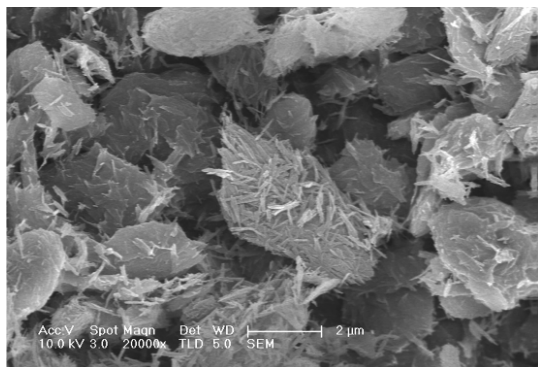


图1 凹凸棒土电镜图片

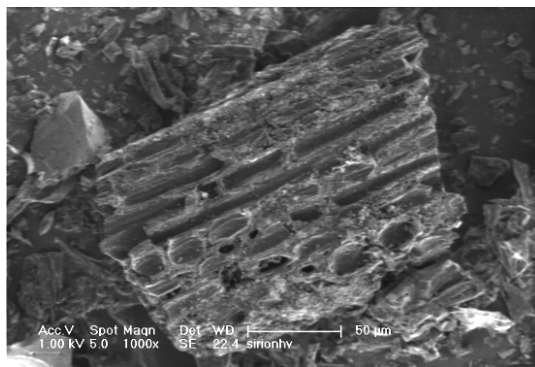


图2 活性炭电镜图片

根据中国土壤学会推荐的标准方法^[10]测定获得的3种土壤改良剂的基本性质见表2。凹凸棒土采自中国江苏省,颜色为灰色。样品在使用之前通过2 mm筛。化学组成通过Magix PW 2403 XRF Spectrometer测定获得。阳离子交换容量(CEC)为29.7 meq/100 g,表面积(SSA)^[11]为50.67 m²·g⁻¹。凹凸棒土和活性炭的微结构通过电子显微镜观察(Philips XL30S-FEG)^[12]结果见图1和图2。

1.2 试验设计

供试烤烟品种为K326。为试验效果考虑,供试土

壤中还要加入Cd(NO₃)₂和Pb(NO₃)₂稀释溶液使土壤中Cd和Pb总量分别为1 mg·kg⁻¹和100 mg·kg⁻¹。每盆装有10 kg土壤。土壤充分混合以确保重金属均匀分布。老化1周后,加入改良剂,每个处理重复3次(表3)。字母“CK”、“A”、“B”、“C”和“D”分别表示改良剂的不同剂量,而数字“1”、“2”和“3”分别为凹凸棒土、活性炭和有机肥。盆栽试验采取3种改良剂处理、5种剂量、3次重复的随机区组试验,在扬州大学温室中进行试验。

表3 土壤改良剂实验处理

处理	剂量/(g·kg ⁻¹)	处理	剂量/(g·kg ⁻¹)	处理	剂量/(mL·kg ⁻¹)
凹凸棒土		活性炭		有机肥	
CK	0	CK	0	CK	0
A1	1.5	A2	1.5	A3	1.5
B1	2.25	B2	2.25	B3	2.25
C1	3	C2	3	C3	3
D1	3.75	D2	3.75	D3	3.75

注:每盆添加基肥为:10 g N [NH₄NO₃] + 6 g P₂O₅ [KH₂PO₄] + 8 g K₂O [K₂SO₄]

每个盆栽1棵烤烟。60 d后观察叶片特征。采样时测定从底部向上数的第12片叶SPAD值^[13],并且确定同一片叶表面积;测定60 d的烟草植株根系和植株高度,用去离子水洗净后放入75℃烘箱中直到恒重,记录不同处理的叶干重;称200 mg烟草干物质在高压微波系统用5 mL HNO₃(G.R)和1 mL H₂O₂(G.R)消化,样品稀释至25 mL,利用Varian SpectrAA 400原子吸附分光仪(AAS)测定植株中Cd和Pb的含量。土壤中重金属(Cd、Pb)的含量采用DTPA提取^[14]。

1.3 数据分析

数据用SPSS软件进行统计检验,方差分析采用One-Way ANOVA方法在不同水平下LSD多重比较各处理平均值与对照之间的差异显著性, $P < 0.05$ 。土壤中

DTPA提取态重金属(Cd、Pb)含量与烟叶中重金属(Cd、Pb)含量的相关性通过计算获得,并得到线性方程。

2 结果与分析

2.1 改良剂对DTPA提取态重金属(Cd、Pb)含量的影响

试验结果表明:不同的改良剂对土壤中DTPA提取态Cd和Pb含量都有着不同程度的降低效果,说明供试的3种改良剂均对土壤中的重金属(Cd、Pb)有一定的固定作用,从3种改良剂的效果来看(图3),对于土壤中重金属Cd和Pb的固定,低剂量时表现为:凹凸棒 < 有机肥 < 活性炭,当剂量超过2.25 (g/mL)·kg⁻¹时,对于土壤中重金属Cd和Pb的固定,表现为:凹凸

棒 < 活性炭 < 有机肥；相同的改良剂，不同的剂量对土壤中 DTPA 提取态 Cd 和 Pb 含量影响效果也不一样，随着使用剂量的增加，土壤中 DTPA 提取态 Cd、Pb 的浓度(图 3)显著降低，凹凸棒土在实验施用最大剂量时与对照处理相比 DTPA 提取态 Cd 浓度减少了 40%，DTPA 提取态 Pb 浓度减少了 53%。

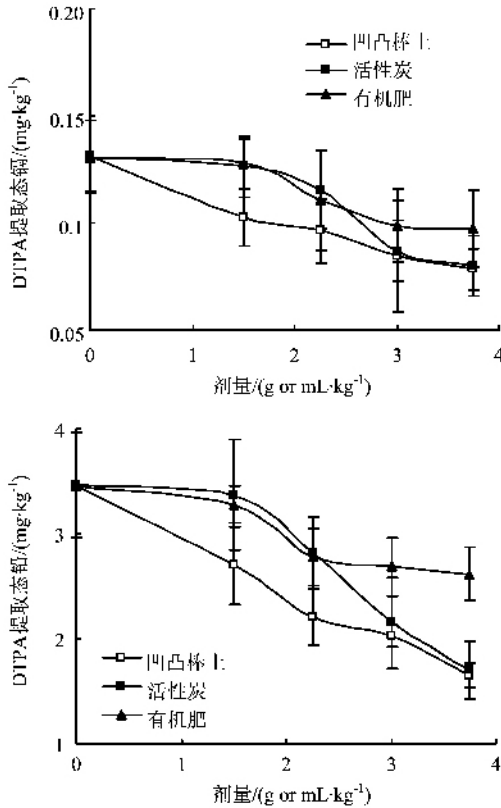


图 3 改良剂对土壤 DTPA 提取态 Cd 和 Pb 的影响

2.2 改良剂处理对烤烟体内 Cd 和 Pb 含量的影响

试验结果(图 4, 图 5)表明:改良剂能有效地减少烤烟对土壤中 Cd 的吸收。3 种改良剂在使用最高剂量的情况下,与对照相比,有机肥减少烤烟根与叶中 Cd 的含量最多,达 26%,凹凸棒土次之,为 21%,活性炭最少,为 12%。

改良剂能有效地减少烤烟对土壤中 Pb 的吸收。3 种改良剂在使用最高剂量的情况下,与对照处理相比,活性炭将烤烟叶片中 Pb 含量 $12.17 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 降低到 $10.20 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,将根中 Pb 含量 $25.26 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 减少到 $13.11 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$;与对照处理相比,凹凸棒土和有机肥对烤烟体内重金属 Pb 含量也有着相同的降低效应,凹凸棒土和有机肥将烤烟叶片中重金属 Pb 浓度分别降低到 $10.77 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $11.41 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,将根中 Pb 含量分别降低到 $16.73 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $18.71 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,而且,全

部的改良剂处理烤烟体内重金属 Pb 含量与对照处理相比均呈显著差异。

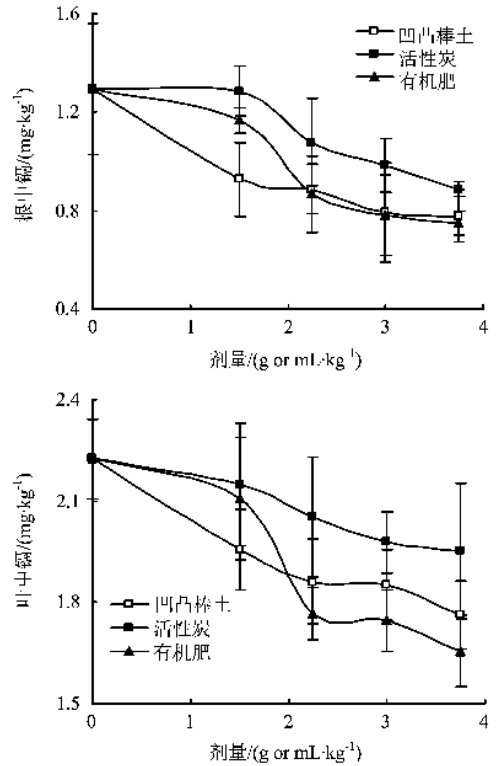


图 4 改良剂对烤烟体内 Cd 的影响

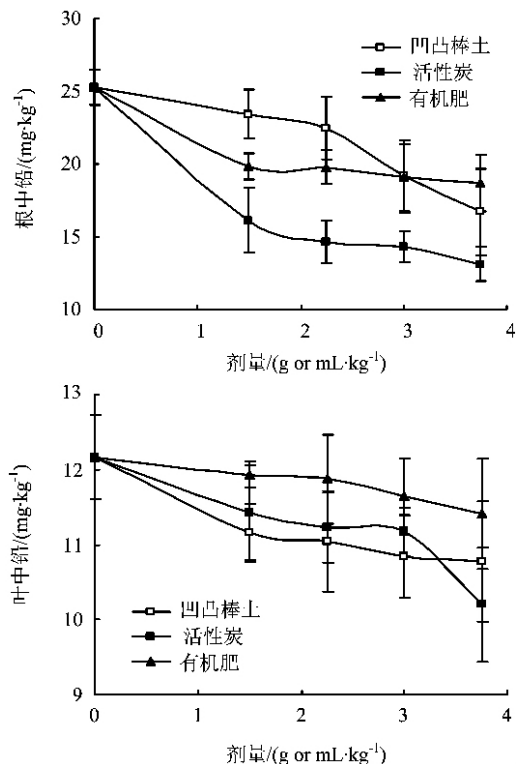


图 5 改良剂对烤烟体内 Pb 的影响

2.3 土壤中 DTPA 提取态 Cd、Pb 含量与烟叶中 Cd、Pb 含量的相关性

表 4 和图 6 显示, 烤烟对土壤中 Cd 的吸收与 DTPA 提取态 Cd 含量呈正比。3 种改良剂处理, 烟叶中 Cd 含量与土壤中 DTPA 提取态 Cd 含量呈极显著正相关(凹凸棒土、活性炭和有机肥对应的 $R^2 = 0.55$ 、 0.47 和 0.68 ; P 都小于 0.01); 烟叶中 Pb 也与土壤中 DTPA 提取态 Pb 含量呈极显著正相关(凹凸棒土、活性炭和有机肥对应的 $R^2 = 0.57$ 、 0.55 和 0.42 , P 都小于 0.01)。这结果与 Keller 等^[5]研究得到的植物叶中 Cd 含量与土壤中可提取的 Cd 含量正相关的结论是一致的。试验证明 3 种改良剂通过减少土壤中 DTPA 提取态 Cd 和 Pb 的含量(降低重金属在土壤中的有效性), 达到降低烤烟对土壤中 Cd 和 Pb 吸收的效果。

2.4 改良剂对烟叶 SPAD 值的影响

研究结果(图 7)表明, 改良剂均能有效地促使烟叶 SPAD 值的增加。不同的改良剂对烟叶 SPAD 值的影响效果不同, 在使用最高剂量情况下, 凹凸棒土作用最为显著, 烟叶 SPAD 为 45.3, 其次是活性炭, 烟叶 SPAD 值为 42.8, 有机肥最差, 烟叶 SPAD 值为 42.0。

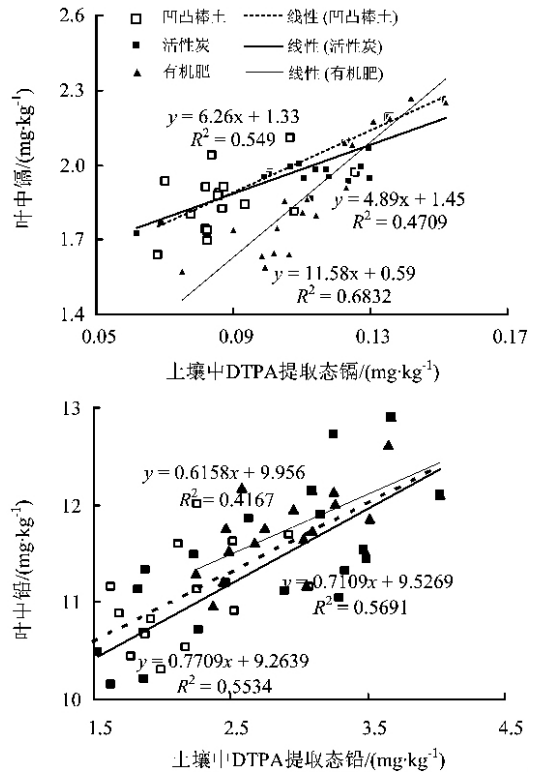


图 6 土壤 DTPA 提取态 Pb 和 Cd 与烟叶中 Pb 和 Cd 相关性

表 4 土壤 DTPA 提取态 Pb 和 Cd 与烟叶中 Pb 和 Cd 相关性

改良剂	n	回归方程	R ²	回归方程	R ²
		Cd	Cd	Pb	Pb
凹凸棒土	20	Y = 6.26x + 1.33	0.55	Y = 0.71x + 9.53	0.57
活性炭	20	Y = 4.89x + 1.45	0.47	Y = 0.77x + 9.26	0.55
有机肥	20	Y = 11.6x + 0.59	0.68	Y = 0.62x + 9.96	0.42

没有施用改良剂的对照, 烟叶 SPAD 值为 40.7, 表现为最小。而且, 同一改良剂不同的剂量其作用效果也不相同, 随着剂量的增加, 作用的效果越明显。

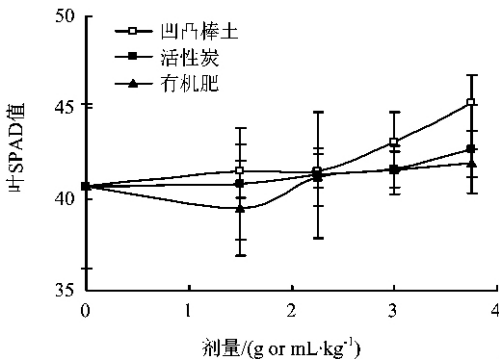


图 7 改良剂对烟叶 SPAD 值的影响

2.5 改良剂对烤烟生长发育的影响

试验表明, 如表 5 所示改良剂导致根伸长, 随之是株高、叶面积和叶干重的增加, 可见改良剂起到降低重金属对烤烟生长的毒害作用, 促进了烤烟的生长。与对照处理相比, 添加最大剂量的改良剂, 凹凸棒土处理将叶干重提高了 1.8 倍, 活性炭的提高了 1.5 倍和有机肥的 1.4 倍; 凹凸棒土和活性炭处理将根长提高了 1.4 倍, 有机肥提高了 1.5 倍; 但是除了添加最高剂量的改良剂处理外, 株高与对照处理相比均未达到显著水平。3 种改良剂对作为烤烟生长指数的叶面积的影响呈现相同的趋势。施用改良剂促进了烤烟的生长, 说明土壤中重金属生物有效性的降低导致重金属对烤烟毒害的减小。相同的改良剂, 不同的剂量对烤烟生长的影响效果也不一样, 随着使用改良剂剂量的增加, 改良剂对增加烤烟根长、株高、叶面积和叶干重的效果更加明显。

值得注意的是,凹凸棒土在提高烟叶干重方面效果最佳。即使施用最低剂量的凹凸棒处理,叶干重约为 50 g,显著高于其他对应的处理。有机肥对叶干重的提高效果优于活性炭,这可能由于有机肥含有植物易于吸收的养分,而且有机肥更易矿化的有机质有利

于土壤微生物总量的增加,同时也改变了土壤氧化还原电位,从而阻止了植物不易吸收的重金属硫化物的氧化。活性炭吸附的养分释放缓慢,导致其对植物生长的效果相对较差。

表 5 改良剂对烤烟生长状况的影响

改良剂	处理	根长/cm	株高/cm	叶面积/cm ²	叶干重/g
凹凸棒土	CK	46.3 ± 3.6c	47.9 ± 7.8c	401.3 ± 55.9a	35.5 ± 6.4b
	A1	52.3 ± 6.9bc	55.3 ± 9.1bc	461.6 ± 73.8a	50.1 ± 9.61ab
	B1	56.5 ± 4.5ab	58.5 ± 6.6abc	470.1 ± 86.9a	52.6 ± 8.1ab
	C1	59.3 ± 8.8ab	65.3 ± 7.3ab	471.6 ± 78.5a	57.1 ± 11.9a
	D1	65.5 ± 7.0a	69.3 ± 8.3a	532.7 ± 107.4a	65.4 ± 10.3a
活性炭	CK	46.3 ± 3.6c	47.9 ± 7.8b	401.3 ± 55.9b	35.5 ± 6.4b
	A2	54.0 ± 7.1b	54.3 ± 8.1ab	405.1 ± 67.2b	36.8 ± 7.4b
	B2	56.5 ± 4.5b	54.9 ± 8.9ab	406.3 ± 39.8b	40.4 ± 6.5b
	C2	60.5 ± 4.8ab	57.7 ± 2.3ab	456.2 ± 44.7ab	42.5 ± 7.5ab
	D2	63.8 ± 2.8a	60.3 ± 8.71a	512.3 ± 27.1a	50.2 ± 7.9a
有机肥	CK	46.3 ± 3.6c	47.9 ± 7.8b	401.3 ± 55.9c	35.5 ± 6.4b
	A3	56.5 ± 4.5b	56.9 ± 6.2ab	439.5 ± 56.7c	36.2 ± 11.8b
	B3	56.5 ± 7.5b	57.9 ± 9.6ab	523.9 ± 51.8b	44.9 ± 7.9ab
	C3	66.5 ± 3.4a	60.4 ± 4.1a	539.6 ± 57.4b	52.6 ± 8.1a
	D3	68.8 ± 7.4a	68.2 ± 10.5a	580.1 ± 64.4a	53.4 ± 11.4a

注: * 同列不同字母表示 $P < 0.05$ 显著性差异。

3 结论与讨论

(1)不同的改良剂对土壤中 DTPA 提取态 Cd 和 Pb 含量都有着不同程度的降低效果。相同的改良剂,随剂量增加,对土壤中 DTPA 提取态 Cd 和 Pb 含量减少的改良效果更好。效果很可能是由于改良剂与土壤中重金属形成很强的结合态形式。在复杂的反应中,土壤 pH、粘粒含量、有机质含量和 CEC 控制着重金属在土壤和提取剂中分布。在使用 $3.75 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 剂量的凹凸棒土时,对土壤中 Cd 和 Pb 均有较好的固定效果,同时,凹凸棒土其资源丰富,可作为经济高效的土壤重金属(Cd、Pb)改良(修复)剂在生产上推广使用。

(2)为了研究改良剂对于具有更加真实意义的土壤中重金属生物有效性的影响,测定各处理烤烟对重金属吸收的数量是很有必要的。试验结果表明,改良剂能有效的减少烤烟对土壤中 Cd 和 Pb 的吸收。而且对于 3 种改良剂处理的烟叶中 Cd、Pb 含量与土壤中 DTPA 提取态 Cd、Pb 含量呈极显著正相关。这结果与 Keller 等^[5]研究得到的植物叶中 Cd 含量与土壤中可提取的 Cd 含量正相关的结论是一致的。因此通过测定土壤中 DTPA 提取态重金属含量,可以预测土壤重

金属的分布,评价原位改良重金属(Cd、Pb)污染物质的改良、修复效果。可见,3 种改良剂通过减少土壤中 DTPA 提取态 Cd 和 Pb 的含量(即降低其生物有效性)达到降低烤烟对土壤中 Cd 和 Pb 吸收的效果。

(3)重金属在植株的运转系数可以作为预测植物对重金属从地下部分向上转移的能力参数。运转系数通过如下的公式获得:运转系数 = 植株叶中重金属含量 / 根中重金属含量^[15]。通过比较图 4、图 5 中烟草体内 Pb 和 Cd 的含量可见,烤烟对 Cd 的运转系数大于 1,这是重金属积累型植物的典型特征。因此,烤烟对 Cd 的运转系数大于 Pb,说明烤烟中 Cd 对健康的危害可能性更大^[16]。同时不同基因型烤烟对元素吸收规律不同^[17],不同基因型对重金属吸收规律值得进一步研究。

(4)以前的研究表明:单位面积光合速率、叶中叶绿素总量与叶 SPAD 值正相关。因此烟叶中叶绿素总量可以通过 SPAD-502 荧光仪非破坏的测定结果来反映。而且叶 SPAD 值可以作为植物营养元素含量和缺乏症状特别是氮的参考数据^[13]。因此选用烟叶 SPAD 值反映改良剂对烤烟生长健康和活力影响。研究结果表明,改良剂均能有效地促使烟叶 SPAD 值的增加。

不同的改良剂对烟叶 SPAD 值的影响效果不同；同一改良剂随着剂量的增加，作用的效果越明显。这与重金属与内囊体膜内部的目标物如光合系统 I、铁氧化还原蛋白及内囊体本身通过脂质过氧化反应结合影响叶部光合作用的理论是一致的^[18]。

(5) 3种改良剂对烤烟根长、株高、叶面积和叶干重均有正面影响，不同的改良剂、不同的剂量影响效果和强度不同。说明土壤中重金属生物有效性的降低导致重金属对烟草毒害的减小。根据 Chen 等研究得出，添加改良剂减轻了重金属对植物的毒害和有利于植株的生长^[11]。凹凸棒土、活性炭和有机肥增加了土壤的缓冲性能、改善了控制植物生长的土壤物理性质(土壤耕性、土壤持水率、土壤密度和土壤结持性)^[19]而促进烤烟生长。

参考文献

- [1] Wu D, Landsberger S, Larson S M. Determination of the elemental distribution in cigarette components and smoke by instrumental neutron activation analysis [J]. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 1997, 217(1): 77-82.
- [2] 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.
- [3] 索卫国, 胡清源, 王芳, 等. 卷烟烟气中微量和痕量元素研究综述 [J]. *中国烟草学报* 2007, 13(5): 61-64.
- [4] 朱尊权. 卷烟减害与自主创新 [J]. *中国烟草学报*, 2006, 12(1): 3-7.
- [5] Keller C, Marchetti M, Rossi L, 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.
- [6] Walker D J, Clemente R, Bernal M P. Contrasting effects of manure and compost on soil pH, heavy metal availability and growth of *Chenopodium album* L. in a soil contaminated by pyritic mine waste [J]. *Chemosphere*, 2004, 57: 215-224.
- [7] Walker D J, Clemente R, Roig A, et al. The effects of soil amendments on heavy metal bioavailability in two contaminated Mediterranean soils [J]. *Environmental Pollution*, 2003, 122: 303-312.
- [8] Chen H M, Zheng C R, Tu C, et al. Chemical methods and phytoremediation on soil contaminated with heavy metals [J]. *Chemosphere*, 2000, 41: 229-234.
- [9] Tripathi R D, Vajpayee N, Singh P, et al. Efficacy of various amendments for amelioration of fly-ash toxicity: growth performance and metal composition of *Cassia siamea* Lam [J]. *Chemosphere*, 2004, 54: 1581-1588.
- [10] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法 [M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000.
- [11] Chen H, Wang A Q. Kinetic and isothermal studies of lead ion adsorption onto palygorskite clay [J]. *Journal of Colloid and Interface Science*, 2007, 307: 309-316.
- [12] Philip C A, Girgis B S. Adsorption characteristics of microporous carbons from apricot stones activated by phosphoric acid [J]. *J. Chem. Technol. Biotechnol.*, 1996, 67: 248-254.
- [13] Giunt, F, Motzo R, Deidda M. SPAD readings and associated leaf traits in durum wheat, barley and triticale cultivars. *Euphytica* [J]. 2002, 125: 197-205.
- [14] Lindsay W L, Norvell W A. Development of a DTPA micronutrients soil test [J]. *Agron. Abs.*, 1969: 69, 84.
- [15] Kashem M A, Singh B R. Metal availability in contaminated soils: II. Uptake of Cd, Ni and Zn in rice plants grown under flooded culture with organic matter addition [J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2001, 61(2): 257-266.
- [16] Fayiga A O, Ma L O, Cao X, et al. Effects of heavy metals on growth and arsenic accumulation in the arsenic hyperaccumulator *Pteris vittata* L [J]. *Environmental Pollution*, 2004, 132: 289-296.
- [17] 梁景霞, 梁康迳, 林文雄, 等. 烟草氮素营养的基因型差异初探 [J]. *中国烟草学报* 2007 (6): 36-40.
- [18] Padmaja K, Prasad D K, Prasad A R K. Inhibition of chlorophyll biosynthesis in *Phaseolus vulgaris* L. seedling by cadmium acetate [J]. *Photosynthetica*, 1990, 24: 399-405.
- [19] Stewart B A, Robinson C A, Parker D B. Examples and case studies of beneficial reuse of beef cattle byproducts. In: Dick, W. A. (Ed.), *Land Application of Agricultural, Industrial, and Municipal By-Products* [M]. Madison: Soil Science Society of America Inc., 2000.