

土壤-烟草系统中铅的迁移特征及形态分布

颜奕华¹, 郑子成^{1*}, 李廷轩¹, 张锡洲¹, 王永东¹, 王 勇²

(1.四川农业大学资源环境学院, 成都 611130; 2.四川省烟草公司凉山州公司, 四川 西昌 615000)

摘要:通过盆栽试验,以两烟草品种(云烟 85 和红花大金元)为对象,研究了重金属铅(Pb)在土壤-烟草系统中的迁移特征以及土壤与烟草各器官 Pb 化学形态分布特征。结果表明:与非根际土壤相比,根际土壤铁锰氧化物结合态 Pb 明显降低(降幅 3.86%~22.33%),碳酸盐结合态、有机态和残渣态呈上升趋势。随着土壤 Pb 处理浓度的升高,两品种烟草生物量均显著降低,各器官 Pb 含量均显著上升,云烟 85 各器官 Pb 含量大小顺序为根>叶>茎,红花大金元为根>茎>叶。CK 处理下两个品种烟草各器官 Pb 形态主要以氯化钠、醋酸和盐酸提取态为主(66.49%~72.40%),随着 Pb 处理浓度的升高,根部与叶部乙醇提取态 Pb 显著增加,这加剧了 Pb 的迁移性,红花大金元茎部 Pb 向盐酸提取态转化从而抑制 Pb 由茎部向叶部的转运。

关键词:铅;根际;烟草;迁移;形态分布

中图分类号:X131.3 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2014)01-0081-07 doi:10.11654/jaes.2013.01.010

Translocation and Fractions of Lead in Soil-Tobacco System

YAN Yi-hua¹, ZHENG Zi-cheng^{1*}, LI Ting-xuan¹, ZHANG Xi-zhou¹, WANG Yong-dong¹, WANG Yong²

(1.College of Resource and Environmental Science, Sichuan Agricultural University, Chengdu 611130, China; 2.Liangshan Branch, Sichuan Tobacco Corporation, Xichang 615000, China)

Abstract: The fractions and contents of lead (Pb) in soil-plant system would influence its mobility and plant toxicity. In a pot experiment, two varieties of tobacco (Yunyan 85 and Honghuadajinyuan) were used to study the distribution of different Pb chemical fractions in soil and tobacco organs. Compared with the non-rhizospheric soil, the percentages of iron and manganese-oxides-bound Pb decreased by 3.86% to 22.33%, whereas these of carbonate-bound, organic-bound and residual Pb all increased. Applying Pb significantly decreased biomass of the two tobacco varieties, while increased Pb concentrations in tobacco organs significantly. The Pb concentrations in tobacco organs were in order of root>leaf>stem for Yunyan 85, and root>stem>leaf for Honghuadajinyuan. In control treatment, Pb mainly existed as NaCl-extractable, HAc-extractable and HCl-extractable Pb, with sum of 66.49%~72.40%, but Pb addition significantly increased concentrations of ethanol-extractable Pb, which enhanced Pb mobility. Increased HCl-extractable Pb in the stem of Honghuadajinyuan might reduce Pb transference to the leaves.

Keywords: lead; rhizosphere; tobacco; translocation; fractions distribution

铅污染因分布广泛、污染途径多、不易治理及危害性大,具有潜在的环境风险^[1-2]。土壤铅污染不仅影响植物的正常生长、降低农产品产量与品质,且由于铅易被作物吸收积累于农产品中,进而直接危害人体健康^[3-4]。农产品中铅主要来源于土壤-作物系统,其迁移过程受土壤铅浓度、土壤环境特性、植物种类等

多方面影响^[3-5]。铅进入土壤,与土壤组分发生物理、化学作用后以不同赋存形态存在^[6]。铅的形态分布不仅可表征铅的转化过程,也可反映其潜在移动性及生物有效性^[7]。植物可改变根际土壤 pH、Eh、有机质、微生物群落和养分有效性等状况,进而影响土壤铅的化学特性及根系对铅的吸收^[8-10]。植物根系分泌的部分物质能使土壤少量难溶性 Pb 转化为可溶性^[11]。同时,植物根系分泌物可通过螯合、沉淀和竞争吸附等途径降低铅有效性和移动性^[12],影响铅在土壤-植物系统中的迁移性。铅被植物吸收并以不同形态存储于各部位,其化学形态能反映其毒性及迁移的难易程度^[13]。铅敏感植物体内重金属多以无机态及水溶态存在^[14],而铅

收稿日期:2013-06-13

基金项目:四川省烟草公司凉山州公司项目;四川省学术和技术带头人培养资金资助项目(2012);四川省科技厅应用基础研究项目(2010JY0083)

作者简介:颜奕华(1988—)福建永安人,硕士研究生,主要从事土壤生态方面的研究。E-mail: yihuayan@aliyun.com

*通信作者:郑子成 E-mail: zichengzheng@aliyun.com

耐性植物中的重金属多储存于果胶及蛋白质结合态中。然而结合土壤与植物化学形态分析铅在土壤-植物系统中的迁移转化的动态过程方面的研究较少,尤其对烟草的研究甚少。作为重要经济作物的烟草,不仅对土壤铅具有较强的适应能力,还可将土壤中的铅富集到体内,且易向叶部转运^[15-16]。此外,部分国产香烟的铅、镉、砷等重金属含量较国外香烟高^[17]。因此,本文通过盆栽试验,开展铅在土壤-烟草系统中的迁移特征研究,旨在揭示重金属铅在土壤-烟草系统迁移过程中形态转化特征,为降低土壤铅的有效性及烟叶铅含量提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

供试土壤采自四川省西昌市烟田土壤,土壤类型为红壤。土壤基本性质如下:pH 5.76,有机质 17.71 g·kg⁻¹,全氮 1.41 g·kg⁻¹,碱解氮 215.92 mg·kg⁻¹,速效磷 16.00 mg·kg⁻¹,速效钾 238.11 mg·kg⁻¹,土壤铅含量 42.86 mg·kg⁻¹。供试植物为烟草,品种为西昌当地主栽的云烟 85(Y85)和红花大金元(HD),由四川省烟草公司凉山州公司提供。试验的氮、磷、钾肥分别为硝酸铵(含 N 35%)、磷酸二氢钾(含 P₂O₅ 58%)和硫酸钾(含 K₂O 54%)。

1.2 试验设计与处理

试验设置添加铅浓度为 0(CK)、125(T1)、250 mg·kg⁻¹(T2)和 500 mg·kg⁻¹(T3)的 4 个铅水平,并分别种植云烟 85 和红花大金元,共 8 个处理,每处理 6 次重复,共 48 盆。肥料施用量为 N 90 mg·kg⁻¹、P₂O₅ 90 mg·kg⁻¹、K₂O 270 mg·kg⁻¹。

试验于 2012 年在凉山州烟草公司烟叶生产技术推广应用中心试验基地进行。将土壤风干后混匀,装入 10 L 塑料桶,每桶装土 15 kg。移栽前 2 周将分析纯 Pb(CH₃COO)₂·3H₂O、全部的磷肥、70%的氮肥和 70%的钾肥作为基肥以水溶液的形式混入土壤,剩余氮、钾肥在移栽后 30 d 追施。采用根袋盆栽试验,根袋用 400 目尼龙纱网自制(直径 25 cm,高 35 cm),将根袋放入塑料盆中,根袋预先装土埋在盆中,上口与土表平齐,下口封底。土壤盆栽按行株距 100 cm×50 cm 随机排列。烟草包衣种子经漂盘育苗后,选择长势一致的烟苗移栽至根袋内,每盆种 1 株。移栽后管理均按大田常规进行。

1.3 样品采集与制备

在烟草移栽 60 d 后采样。土壤分为根际(根袋

内)与非根际土(根袋外)采集。经自然风干、磨碎,过 2 mm 筛,取一部分过 100 目筛备用。植株样品用自来水冲洗干净,再用蒸馏水润洗,然后用吸水纸擦干。其中每处理 3 株分为根、茎、叶储存于-70℃冰箱。另外 3 株分为根、茎、叶,在 105℃下杀青 30 min,再将温度降至 75℃烘干至恒重,磨碎密封保存。

1.4 重金属铅含量测定

土壤 Pb 全量测定采用 HNO₃:HClO₄:HF(4:2:1,V:V:V)法消解,植物中铅含量测定采用 HNO₃:HClO₄(4:1,V:V)法消解^[18]。土壤铅形态分析采用 Tessier 连续浸提法^[19],植物体内铅的化学形态分析参照 Wu 等方法^[20]。所有土壤、烟草的铅含量均用火焰原子吸收分光光度计(TAS-990,北京普析通用仪器有限责任公司)测定。铅含量测定以国家标准样品(GSB 04-1742—2004)进行质量控制。

1.5 数据分析

铅的迁移过程分为 3 个阶段:土-根,根-茎,茎-叶。分别计算 3 个阶段的移动指数(mobility index, MI):MI_{土-根}=根的浓度/土的浓度、MI_{根-茎}=茎的浓度/根的浓度、MI_{茎-叶}=叶的浓度/茎的浓度。

所有数据采用 Microsoft Excel(2007)软件整理数据,利用 DPS(v11.0)软件进行数据的方差分析及多重比较(LSD法)。

2 结果与分析

2.1 不同处理土壤中 Pb 的形态分布

由表 1 可知,铅处理后根际与非根际土壤各铅形态含量显著增加,随着铅处理浓度的升高,各铅形态含量呈上升趋势。与 CK 相比,铅处理后非根际土壤中铁锰氧化物结合态(Fe/Mn)比例大幅增加,交换态(Exch)和碳酸盐结合态(Carb)比例有增加趋势,残渣态(Resid)比例逐渐降低,有机态(Om)变化规律不明显。铅处理后,与非根际土相比,根际土中铁锰氧化物结合态比例大幅降低,碳酸盐结合态、有机态和残渣态呈上升趋势,说明烟草根际环境变化使土壤铅向活性较高的碳酸盐结合态转化的同时,部分铅向活性较低的有机态和残渣态转化。在 CK 和 T3 处理下,两品种烟草根际土中交换态铅含量与比例呈下降趋势,云烟 85 在 T3 处理时达显著差异;在 T2 和 T3 处理下,根际土中交换态铅显著增加,交换态铅比例呈上升趋势,说明根际土交换态铅的转化因铅污染水平的不同而异。

2.2 不同铅处理对烟草生物量的影响

由表 2 可知,土壤添加铅后,与 CK 相比,两烟草

表 1 非根际(NR)与根际(R)土壤中铅的形态转化
Table 1 Fractions of Pb in non-rhizospheric(NR) and rhizospheric(R) soils

品种 Variety	处理 Treatment	土壤 soil	铅含量 Pb concentration/mg·kg ⁻¹					各铅形态分配比率 Percentages of each Pb fraction/%				
			Exch	Carb	Fe/Mn	Om	Resid	Exch	Carb	Fe/Mn	Om	Resid
Y85	CK	NR	17.82d ^a	6.13d ^a	11.53d ^a	2.62d ^a	13.23c ^a	34.72	11.94	22.46	5.10	25.77
		R	15.46d ^a	5.25d ^a	6.79d ^{a*}	0.23d ^{a*}	21.13d ^{a*}	31.64	10.74	13.90	0.47	43.25
	T1	NR	34.92c ^a	14.10c ^a	70.35c ^a	7.03c ^a	34.27b ^a	21.73	8.78	43.79	4.38	21.33
		R	51.16c ^{a*}	20.08c ^{b*}	33.08c ^{a*}	10.73c ^{a*}	31.63a ^c	34.88	13.69	22.55	7.32	21.56
	T2	NR	54.94b ^a	30.87b ^a	129.99b ^a	17.00b ^a	39.43b ^a	20.18	11.34	47.75	6.24	14.48
		R	65.87b ^{b*}	46.56b ^{a*}	108.80b ^{a*}	21.19b ^a	32.40b ^{b*}	23.97	16.94	39.59	7.71	11.79
	T3	NR	134.91a ^a	54.58a ^a	191.45a ^a	29.83a ^a	45.57a _a	29.56	11.96	41.95	6.54	9.99
		R	113.75a ^{a*}	68.92a ^{b*}	144.25a ^{a*}	33.85a ^a	49.67a ^{b*}	27.71	16.79	35.15	8.25	12.10
HD	CK	NR	18.08d ^a	4.30d ^a	12.88d ^a	2.54d ^a	15.20d ^a	34.11	8.11	24.30	4.79	28.68
		R	15.22d ^a	4.86d ^a	9.81d ^a	0.50d ^{a*}	17.6d ^a	31.71	10.13	20.44	1.04	36.67
	T1	NR	34.88c ^a	18.49c ^a	62.79c ^a	8.94c ^a	29.23c ^a	22.60	11.98	40.69	5.79	18.94
		R	51.71c ^{a*}	35.60c ^{a*}	29.08c ^{a*}	13.29c ^{a*}	34.20c ^{a*}	31.55	21.72	17.74	8.11	20.87
	T2	NR	67.76b ^a	31.57b ^a	117.16b ^a	12.15b ^b	43.07b ^a	24.94	11.62	43.12	4.47	15.85
		R	84.13b ^{a*}	51.40b ^{a*}	60.09b ^{b*}	17.81b ^{b*}	60.33b ^{a*}	30.73	18.78	21.95	6.51	22.04
	T3	NR	137.20a ^a	53.62a ^a	178.64a ^a	25.98a ^b	61.50a ^a	30.03	11.73	39.09	5.69	13.46
		R	117.17a ^a	75.56a ^{a*}	123.97a ^{a*}	30.58a ^a	96.53a ^{a*}	26.40	17.03	27.93	6.89	21.75

注:HD 为红花大金元,Y85 为云烟 85;不同小写字母表示同一品种不同铅处理间 $p<0.05$ 水平上显著;上标不同小写字母表示同一处理不同品种间 $p<0.05$ 水平上显著;* 表示根际与非根际土间 $p<0.05$ 水平上显著。下同。
Note: HD is Honghuadajinyuan, Y85 is Yunyan 85; Different letters indicate significant differences between the Pb treatment at $p<0.05$ level; Different superscript letters indicate significant difference between tobacco cultivars at $p<0.05$ levels; the * indicate significant difference between non-rhizospheric and rhizospheric soils at $p<0.05$ level. The same as below.

表 2 铅对烟草生物量的影响
Table 2 Effects of Pb on tobacco biomass

品种 Variety	部位 Tissue	生物量 Biomass/g·plant ⁻¹			
		CK	T1	T2	T3
Y85	根 Root	11.30a ^a	3.34b ^a	2.83b ^a	1.90c ^b
	茎 Stem	8.76a ^a	3.52b ^a	3.72b ^a	2.23b ^a
	叶 Leaf	28.37a ^a	17.37b ^a	14.90b ^c	12.07c ^a
HD	根 Root	11.55a ^a	2.49b ^b	3.10b ^a	2.72b ^a
	茎 Stem	3.98a ^b	3.01b ^a	2.76b ^a	2.21b ^a
	叶 Leaf	23.45a ^a	15.16b ^a	13.72b ^a	12.55b ^a

品种根、茎和叶的生物量均显著降低。随着土壤铅处理浓度的增加,两烟草品种生物量均呈下降趋势。云烟 85 在 T3 处理时与 T2 相比,根和叶生物量显著降低。T3 处理下云烟 85 根、茎、叶生物量分别比对照下降 83.2%、74.5%和 57.4%,红花大金元根、茎、叶生物量分别比对照下降 76.5%、44.5%和 46.5%,说明铅胁迫对烟草生长具有一定的抑制作用,且对根系的抑制作用更明显。

2.3 烟草不同器官中的铅含量及化学形态

2.3.1 烟草不同器官中的铅含量

植物根系通过代谢作用吸收铅后可将铅贮藏在

根部或运输到地上部,在植物体内不同器官中积累。由表 3 可知,随着土壤铅浓度的升高,两烟草品种根、茎、叶中铅含量均显著升高。CK 处理中云烟 85 不同器官铅含量高低顺序为叶>茎>根;随着铅处理浓度的升高,云烟 85 不同器官铅含量高低顺序为根>叶>茎,红花大金元不同器官铅含量高低顺序为根>茎>叶。云烟 85 根部和叶部铅含量均高于红花大金元,说明云烟 85 对铅的吸收与转运能力高于红花大金元。

2.3.2 烟草不同器官中铅的化学形态

烟草体内铅化学形态含量因处理浓度、烟草品

表 3 不同铅处理下烟草各器官铅含量
Table 3 Concentrations of Pb in different tobacco organs under different treatments

品种 Variety	部位 Tissue	铅含量 Pb concentration/mg·kg ⁻¹			
		CK	T1	T2	T3
Y85	根 Root	25.24c ^a	64.31b ^a	112.41a ^a	112.6a ^a
	茎 Stem	30.69c ^a	39.44b ^c	46.65b ^b	61.57a ^a
	叶 Leaf	38.41c ^a	54.1b ^a	66.74b ^a	93.23a ^a
HD	根 Root	22.85d ^a	47.51c ^b	84.39b ^b	105.5a ^a
	茎 Stem	17.71c ^b	38.06b ^a	64.24a ^a	61.74a ^a
	叶 Leaf	13.89c ^b	29.07b ^b	32.84b ^b	38.42a ^b

种、器官部位的不同而异。由表4可以看出,随着铅处理浓度的升高,两个品种烟草根部各铅形态含量显著增加,但红花大金元在T3处理时较T2处理时残渣态铅含量显著降低。CK中烟草根部铅形态主要以氯化钠和醋酸提取态为主,分别占总量的38.5%和19.6%(两品种平均值);随着铅浓度的升高,乙醇提取态铅的比例逐渐增加,T3处理时达40.4%(两品种平均值),而氯化钠和醋酸提取态逐渐降低。随着铅处理浓度的升高,云烟85盐酸提取态和残渣态比例逐渐降低,红花大金元盐酸提取态和残渣态呈上升趋势,但T3处理时大幅降低。

烟草茎部铅形态含量与分布的品种间差异较大。由表5可以看出,云烟85茎部铅主要分布于氯化钠、醋酸和盐酸提取态,红花大金元茎部铅主要分布于氯化钠、醋酸和乙醇提取态。随着铅处理浓度的增加,云烟85茎部去离子水、氯化钠和醋酸提取态铅含量显著增加,乙醇提取态、盐酸提取态和残渣态呈下降趋势,但未达到显著水平。与CK相比,红花大金元茎部

各形态铅含量有增加趋势,随着铅处理浓度的增加,红花大金元乙醇提取态铅含量先显著下降后显著上升,而去离子水提取态和残渣态铅含量先上升后显著下降。随着铅处理浓度的增加,云烟85茎部去离子水和醋酸提取态铅比例有上升趋势,红花大金元茎部盐酸提取态比例大幅增加。

由表6可以看出,随着铅处理浓度的升高,云烟85叶部乙醇提取态和氯化钠提取态铅含量显著升高,其他形态差异不显著。红花大金元叶部乙醇提取态和盐酸提取态含量显著升高。云烟85叶部各提取态铅的含量百分率的大小依次为氯化钠提取态>盐酸提取态>醋酸提取态>乙醇提取态>残渣态>去离子水提取态;红花大金元叶部各提取态铅的含量百分率的大小依次为氯化钠提取态>盐酸提取态>醋酸提取态>去离子水提取态>残渣态>乙醇提取态。

2.4 铅在土壤-植物系统中的移动指数

移动指数因土壤铅处理浓度、作物品种及迁移阶段不同而异(表7)。随着土壤铅浓度的升高,两品种烟草

表4 烟草根中Pb化学形态的含量与分布

Table 4 Concentrations and distribution of Pb fractions in tobacco roots

品种 Variety	处理 Treatment	铅含量 Pb concentration/mg·kg ⁻¹						各铅形态分配比率 Percentages of each Pb fraction/%					
		F _I	F _{II}	F _{III}	F _{IV}	F _V	F _{VI}	F _I	F _{II}	F _{III}	F _{IV}	F _V	F _{VI}
Y85	CK	1.10d ^a	1.29c ^a	3.49c ^a	1.56c ^a	1.56b ^a	0.94ab ^a	11.07	12.98	35.09	15.67	15.73	9.46
	T1	4.42c ^a	1.82bc ^a	4.18b ^a	1.89bc ^a	2.14ab ^a	0.96ab ^b	28.69	11.82	27.14	12.25	13.89	6.21
	T2	8.38b ^a	1.92b ^a	4.33b ^a	2.08b ^a	2.47a ^a	0.90b ^b	41.73	9.56	21.58	10.36	12.30	4.47
	T3	12.38a ^a	3.32a ^a	5.19a ^a	2.58a ^a	2.69a ^a	1.40a ^a	44.91	12.05	18.83	9.36	9.77	5.07
HD	CK	1.23d ^a	0.75b ^b	3.10a ^a	1.78b ^a	0.27c ^b	0.43c ^b	16.24	9.97	41.00	23.52	3.62	5.65
	T1	2.72c ^b	1.90a ^a	3.94a ^a	1.79b ^a	1.25b ^b	1.61ab ^a	20.58	14.39	29.82	13.54	9.49	12.17
	T2	4.36b ^b	1.12b ^b	4.30a ^a	2.33ab ^a	1.63b ^b	2.19a ^a	27.38	7.03	27.00	14.64	10.23	13.72
	T3	7.36a ^b	2.32a ^b	4.32a ^a	2.77a ^a	2.64a ^a	1.21b ^a	35.68	11.24	20.95	13.45	12.80	5.88

注:F_I、F_{II}、F_{III}、F_{IV}、F_V和F_{VI}分别表示80%乙醇提取态、去离子水提取态、1 mol·L⁻¹氯化钠提取态、2%醋酸提取态、0.6 mol·L⁻¹盐酸提取态和残渣态。下同。

Note: F_I, F_{II}, F_{III}, F_{IV}, F_V and F_{VI} represent the fractions extracted by 80% ethanol, deionized water, 1 mol·L⁻¹ NaCl, 2% acetic acid, 0.6 mol·L⁻¹ HCl and residual, respectively. The same as below.

表5 烟草茎中Pb化学形态的含量与分布

Table 5 Concentrations and distribution of Pb fractions in tobacco stems

品种 Variety	处理 Treatment	铅含量 Pb concentration/mg·kg ⁻¹						各铅形态分配比率 Percentages of each Pb fraction/%					
		F _I	F _{II}	F _{III}	F _{IV}	F _V	F _{VI}	F _I	F _{II}	F _{III}	F _{IV}	F _V	F _{VI}
Y85	CK	0.82a ^a	0.35c ^a	1.62b ^a	1.18b ^a	1.19a ^a	0.63a ^a	14.23	5.99	28.05	20.39	20.51	10.83
	T1	0.56a ^a	0.59bc ^a	1.93ab ^a	1.52b ^a	1.28a ^a	0.85a ^a	8.33	8.82	28.71	22.56	18.99	12.59
	T2	0.57a ^a	0.66ab ^a	1.95ab ^a	1.72b ^a	1.37a ^a	0.39a ^a	8.60	9.85	29.25	25.85	20.55	5.90
	T3	0.65a ^b	0.84a ^a	2.35a ^a	2.40a ^a	1.52a ^a	0.67a ^a	7.67	10.01	27.89	28.52	18.00	7.91
HD	CK	0.71b ^a	0.29b ^a	1.13b ^a	1.41a ^a	0.17c ^b	0.25b	17.96	7.25	28.58	35.58	4.30	6.32
	T1	0.37c ^a	0.69a ^a	1.46ab ^a	1.43a ^a	0.56b ^b	0.40ab ^b	7.49	14.03	29.77	29.16	11.38	8.17
	T2	0.61b ^a	0.73a ^a	1.56ab ^a	1.42a ^a	0.64b ^b	0.62a ^a	10.88	13.09	27.91	25.52	11.42	11.18
	T3	1.03a ^a	0.41b ^b	1.94a ^a	2.03a ^a	1.70a ^a	0.31b ^a	13.91	5.56	26.16	27.32	22.92	4.13

表 6 烟草叶中 Pb 化学形态的含量与分布
Table 6 Concentrations and distribution of Pb fractions in tobacco leaves

品种 Variety	处理 Treatment	铅含量 Pb concentration/mg·kg ⁻¹						各铅形态分配比率 Percentages of each Pb fraction/%					
		F _I	F _{II}	F _{III}	F _{IV}	F _V	F _{VI}	F _I	F _{II}	F _{III}	F _{IV}	F _V	F _{VI}
Y85	CK	0.34b ^a	0.55a ^b	1.38b ^a	1.16a ^a	1.21a ^a	0.54a ^a	6.56	10.62	26.58	22.46	23.36	10.42
	T1	0.36b ^a	0.56a ^a	1.85ab ^a	1.16a ^a	1.24a ^a	0.55a ^a	6.30	9.80	32.38	20.25	21.70	9.57
	T2	1.16a ^a	0.56a ^b	1.94ab ^a	1.30a ^a	1.25a ^a	0.67a ^a	16.89	8.13	28.17	18.83	18.20	9.78
	T3	1.24a ^a	0.68a ^a	1.99a ^a	1.27a ^a	1.36a ^a	0.60a ^a	17.41	9.47	27.86	17.78	19.04	8.45
HD	CK	0.16b ^a	0.79ab ^a	1.36a ^a	1.10a ^a	0.67c ^b	0.39b ^a	3.58	17.67	30.50	24.61	14.99	8.65
	T1	0.19b ^a	0.63b ^a	1.58a ^a	1.02a ^a	0.92bc ^a	0.82a ^a	3.69	12.16	30.60	19.79	17.92	15.85
	T2	0.29ab ^b	0.86a ^a	1.58a ^a	0.98a ^a	1.36ab ^a	0.44ab ^a	5.31	15.52	28.68	17.75	24.70	8.03
	T3	0.42a ^b	0.80ab ^a	1.72a ^a	1.23a ^a	1.65a ^a	0.61ab ^a	6.58	12.39	26.75	19.18	25.66	9.44

表 7 铅在土壤-烟草系统中的移动指数
Table 7 Mobility index(MI) of Pb in soil-tobacco system

处理 Treatment	Y85			HD		
	MI _{土-根}	MI _{根-茎}	MI _{茎-叶}	MI _{土-根}	MI _{根-茎}	MI _{茎-叶}
CK	0.60	1.28	1.57	0.54	0.79	0.78
T1	0.51	0.63	1.40	0.38	0.81	0.76
T2	0.45	0.42	1.46	0.34	0.76	0.51
T3	0.23	0.55	1.52	0.21	0.59	0.62

MI_{土-根}逐渐减小,MI_{茎-叶}呈先降低后升高的趋势。土壤添加铅后云烟 85MI_{根-茎}剧降,可能是因为植株受到铅胁迫诱导限制了铅向地上部的迁移。云烟 85MI_{根-茎}随铅浓度的升高表现为先降低后升高,红花大金元 MI_{根-茎}则表现为先升高后降低的趋势。云烟 85 的 MI_{土-根}和 MI_{茎-叶}都高于红花大金元,尤其 MI_{茎-叶}更明显,这是云烟 85 烟叶铅含量较高的主要原因。

3 讨论

3.1 根际土壤铅形态分布与转化

土壤重金属的生物有效性及其环境风险主要取决于其化学形态而非总量^[21]。由工业、农业等途径进入土壤的重金属与土壤组分发生复杂的物理、化学作用,形成不同形态的重金属化合物^[22]。随着时间增加及环境条件的变化,土壤重金属的化学形态也可发生连续变化^[23]。本研究加入外源铅后土壤铅形态以铁锰氧化物结合态和交换态为主。有研究表明 6 种冬青科苦丁茶树土壤中铅主要以残渣态和有机态存在,两者占土壤中总铅量的 90%以上^[21]。而本研究有机态铅的比例较低,主要是供试土壤有机质含量较低所致。

根际土壤铅形态转化是其在土壤-植物系统中迁移的关键过程。根系分泌物和根际微生物作用通常导致根际理化性质、有机质含量等差异,进而改变土壤

重金属的形态及其生物有效性。根际环境是土壤与植物相互作用的结果,不同土壤类型及植物种类的根际环境有着很大差异。林琦等^[11]研究表明红壤植麦和植稻后土壤交换态铅表现为根际>非根际,说明植物根际对土壤铅有一定活化作用。杜兵兵等^[21]研究表明,从非根际土壤到根际土壤,苦丁茶中生物有效性较大的碳酸盐态铅、生物有效性居中的铁锰氧化态铅和有机态铅有下降趋势,而难于被植物吸收的残渣态铅含量呈上升趋势,表明苦丁茶树的根际环境对铅有效性具有一定的抑制作用。本研究表明根际土壤铁锰氧化物结合态大量向生物有效性更高的碳酸盐结合态和可交换态转化,有机态与残渣态也呈增加的趋势。这可能是因为根际土壤有机酸含有的羧基、羟基和氨基能与重金属络合形成可溶态的有机金属络合物,从而增加土壤重金属的溶出,促进铅向植物迁移;而土壤腐殖质与重金属结合,可以促进水不溶性的有机结合态重金属的形成,抑制铅向植物迁移^[24]。根系分泌的草酸等可与铅形成难溶的化合物,使残渣态有所增加。本研究结果表明,根际土交换态铅的转化因铅污染水平的不同而异,其机理需进一步研究。

3.2 铅在土壤-烟草系统中的迁移

本试验条件下两品种烟草 MI_{土-根}均小于 1,且随着铅处理浓度的升高 MI_{土-根}逐渐降低,说明土壤中的铅不易向烟草中迁移。各处理中 MI_{土-根}红花大金元均小于云烟 85,说明红花大金元对土壤铅的吸收能力较弱,土壤中铅更难向红花大金元中迁移。

重金属进入根细胞后,可贮藏在根部或运输到地上部。云烟 85 和红花大金元在 CK 条件下 MI_{根-茎}分别为 1.28 和 0.79,说明烟草未受铅生长胁迫时,铅易向烟草地上部分转运。当烟草受到铅胁迫加剧时,云烟 85MI_{根-茎}急剧降低,红花大金元 MI_{根-茎}也呈下降趋

势,这主要是由于当重金属进入根细胞质后,与细胞质中的有机酸、氨基酸、多肽和无机盐结合,通过液泡膜上的运输体或通道蛋白运入液泡中或因为有根部凯氏带的存在抑制烟草体内铅向地上部的迁移^[25-26]。云烟85在T3处理时 $MI_{根-茎}$ 较T2有所上升,同时T3处理与T2处理相比,烟草根部乙醇提取态与去离子水提取态铅含量显著增加,比例明显增大。这是由于在T3处理下铅浓度过高烟草根系的截留能力达到饱和,或是由于铅毒性加剧导致细胞壁、原生质膜的透性增加,对烟草根的截留作用与选择透过性产生破坏,使根部的铅离子更容易向地上部分运输^[27]。云烟85的 $MI_{土-根}$ 和 $MI_{茎-叶}$ 均大于红花大金元,说明云烟85对铅的吸收与转运能力高于红花大金元。两个品种烟草茎部铅含量差异较小而红花大金元叶部铅含量明显低于云烟85,这主要是由于随着铅浓度升高红花大金元茎中铅向活性较低的盐酸提取态转化,降低了茎部铅的毒性与移动性。

3.3 Pb的化学形态与植物吸收、转运Pb的关系

利用不同的化学提取剂可以有针对性地提取植物体内不同形态的金属化合物,其中:80%乙醇主要提取无机盐、氨基酸盐等可溶性盐;去离子水主要提取与水溶性物质结合的部分,如水溶性有机酸盐等;氯化钠可提取与蛋白质结合或吸着态的重金属及果胶盐等;醋酸提取难溶于水的重金属磷酸盐;盐酸提取草酸盐等。铅在植物体内的迁移性及对植物的毒性与其在植物器官组织中的化学形态密切相关。乙醇提取态及去离子水提取态铅移动性强、对植物细胞的毒性最大,氯化钠提取态铅次之,醋酸提取态、盐酸提取态及残渣态铅较稳定且对植物毒害最小^[28]。研究表明,植物体内铅主要以结合态形式为主,可溶性与潜在可溶性Pb的含量较低^[29],铅污染后植物体内铅活性和移动性有所增加^[30]。本研究表明土壤铅浓度较低时,烟草体内铅形态主要以氯化钠和醋酸提取态为主,这可能是烟草通过果胶盐、蛋白质、磷酸盐等结合形成无毒化合物限制铅在烟草体内的迁移,降低铅对烟草的毒性^[13-14];随着铅浓度的增大,烟草体内各器官乙醇提取态显著增加,两烟草品种根中乙醇提取态分配率分别为44.9%和35.7%,而毒性与迁移性较低的氯化钠和醋酸提取态比例逐渐下降,与耐性植物截然相反,这可能是烟草对铅毒害作用敏感的直接原因。随着铅处理浓度的增加,云烟85根和叶中乙醇提取态含量和比例均高于红花大金元,这可能是云烟85生物量下降更明显、体内铅易向叶部转运的原因。

4 结论

(1)在土壤-烟草系统中,铅由茎部向叶部的转运是影响烟叶铅含量的关键过程。红花大金元通过使茎部Pb向盐酸提取态转化而抑制Pb由茎部向叶部的转运。选取铅吸收与转运能力较低的烟草品种(红花大金元)是降低烟叶铅含量的可行途径。

(2)铅在土壤-烟草系统中的迁移特征为:根际环境使铁锰氧化物结合态铅向碳酸盐和可交换态转化,增加根际土壤铅的有效性 with 迁移性;烟草体内化合物与铅结合抑制铅向烟叶的运输,而过高的铅浓度使铅向乙醇提取态转化,增加了铅的迁移性。

参考文献:

- [1] 方凤满,林跃胜,王海东,等.城市地表灰尘中重金属的来源、暴露特征及其环境效应[J].生态学报,2011,31(23):7301-7310.
FANG Feng-man, LIN Yue-sheng, WANG Hai-dong, et al. Source, exposure characteristics and its environmental effect of heavy metals in urban surface dust[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, 31(23):7301-7310.
- [2] Karlien C, Sofie P, Dorien D, et al. Lead phytotoxicity in soils and nutrient solutions is related to lead induced phosphorus deficiency[J]. *Environmental Pollution*, 2012, 164:242-247.
- [3] 孙贤斌,李玉成,王宁.铅在小麦和玉米中活性形态和分布的比较研究[J].农业环境科学学报,2005,24(4):666-669.
SUN Xian-bin, LI Yu-cheng, WANG Ning. Comparisons on active chemical form and distribution of lead in wheat and corn[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2005, 24(4):666-669.
- [4] 陈天金,魏益民,潘家荣.食品中铅对人体危害的风险评估[J].中国食物与营养,2007(2):15-18.
CHEN Tian-jin, WEI Yi-ming, PAN Jia-rong. Risk assessment of lead in food on human healthy[J]. *Food and Nutrition in China*, 2007(2):15-18.
- [5] 潘攀,杨俊诚,邓仕槐,等.土壤-植物体系中农药和重金属污染研究现状及展望[J].农业环境科学学报,2011,30(12):2389-2398.
PAN Pan, YANG Jun-cheng, DENG Shi-huai, et al. Proceedings and prospects of pesticides and heavy metals contamination in soil-plant system[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2011, 30(12):2389-2398.
- [6] 杨潇瀛,张力文,张凤君,等.土壤重金属污染潜在风险评价[J].世界地质,2011,30(1):103-109.
YANG Xiao-ying, ZHANG Li-wen, ZHANG Feng-jun, et al. Potential risk assessment of heavy metal pollution in soil[J]. *Global Geology*, 2011, 30(1):103-109.
- [7] 曹会聪,王金达,张学林. Cd、Pb投加浓度对其在黑土中化学形态分布及油菜生长和吸收Cd、Pb的影响[J].生态学报,2007,26(7):1043-1048.
CAO Hui-cong, WANG Jin-da, ZHANG Xue-lin. Effects of added concentrations of Cd and Pb on the distribution of Cd and Pb form in black soil of northeast China and on the Cd and Pb uptake by cole[J]. *Chinese*

- Journal of Ecology*, 2007, 26(7):1043-1048.
- [8] 黄化刚, 李廷轩, 杨肖娥, 等. 植物对铅胁迫的耐性及其解毒机制研究进展[J]. 应用生态学报, 2009, 20(3):696-704.
HUANG Hua-gang, LI Ting-xuan, YANG Xiao-e, et al. Research advances in plant lead tolerance and detoxification mechanism[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2009, 20(3):696-704.
- [9] Ian D, Yesilonis B R, James R V, et al. Lead forms in urban turfgrass and forest soils as related to organic matter content and pH[J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2008, 146:1-17.
- [10] 石汝杰, 陆引罡, 丁美丽. 植物根际土壤中铅形态与土壤酶活性的关系[J]. 山地农业生物学报, 2005, 24(3):225-229.
SHI Ru-jie, LU Yin-gang, DING Mei-li. The relationship between heavy metal forms and soil enzymatic activities in rhizosphere of different plants[J]. *Journal of Mountain Agriculture and Biology*, 2005, 24(3):225-229.
- [11] 林琦, 陈怀满, 郑春荣, 等. 根际环境中铅的形态转化[J]. 应用生态学报, 2002, 13(9):1145-1149.
LIN Qi, CHEN Huai-man, ZHENG Chun-rong, et al. Conformation transformation of lead in rhizosphere[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2002, 13(9):1145-1149.
- [12] 李雪莲. 东南景天镉超积累生态型根系分泌物的研究[D]. 杭州:浙江大学, 2011.
LI Xue-lian. Studies on root exudates of the Cd hyperaccumulating ecotype of *Sedum alfredii* Hance [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2011.
- [13] 徐劼, 于明革, 陈英旭, 等. 铅在茶树体内的分布及化学形态特征[J]. 应用生态学报, 2011, 22(4):891-896.
XU Jie, YU Ming-ge, CHEN Ying-xu, et al. Characteristic of distribution and chemical forms of Pb in tea plant varieties[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2011, 22(4):891-896.
- [14] 丁平, 庄萍, 李志安, 等. 镉在土壤-蔬菜-昆虫食物链的传递特征[J]. 应用生态学报, 2012, 23(11):3116-3122.
DING Ping, ZHUANG Ping, LI Zhi-an, et al. Transfer characteristics of cadmium in soil-vegetable-insect food chain[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2012, 23(11):3116-3122.
- [15] Mate B, Csordas A, Horvath M J, et al. Pb(Po)-210 concentration of tobacco samples grown in the vicinity of a remedied uranium mine[J]. *Radioprotection*, 2011, 46(6):161-165.
- [16] Del P L, Abet M, Sorrentino C, et al. Uptake and distribution of lead in tobacco(*Nicotiana tobacco* L.)[J]. *Journal of Applied Botany and Food Quality*, 2008, 82:21-25.
- [17] 沈晓明, 赵薇, John F R. 美国、日本和国产香烟中铅含量的比较[J]. 广东微量元素科学, 1998, 5(6):54-56.
SHEN Xiao-ming, ZHAO Wei, John F R. Comparison of lead concentration in American, Japanese and Chinese cigarettes[J]. *Guangdong Trace Elements Science*, 1998, 5(6):54-56.
- [18] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京:中国农业出版社, 2005.
BAO Shi-dan. Chemical analysis on soil[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2005.
- [19] Tessier A, Campbell P G C, Bisson M. Sequential extraction procedure for the speciation of particulate trace metals[J]. *Analytical Chemistry*, 1979, 51(7):844-850.
- [20] Wu F B, Dong J, Qian Q R, et al. Subcellular distribution and chemical form of Cd and Cd-Zn interaction in different barley genotypes[J]. *Chemosphere*, 2005, 60:1437-1446.
- [21] 杜兵兵, 罗盛旭, 贾振亚, 等. 苦丁茶树土壤铅的形态分布及生物有效性研究[J]. 环境科学与技术, 2011, 34(7):31-34.
DU Bing-bing, LUO Sheng-xu, JIA Zhen-ya, et al. Speciation distribution and bioavailability of Pb in Kudingcha-growing soil[J]. *Environmental Science & Technology*, 2011, 34(7):31-34.
- [22] Christophe W, Christelle H, et al. Effects of a phosphorus amendment and the pH of water used for watering on the mobility and phytoavailability of Cd, Pb and Zn in highly contaminated kitchen garden soils[J]. *Ecological Engineering*, 2011, 37(7):1081-1093.
- [23] 刘霞, 刘树庆, 唐兆宏. 河北主要土壤中Cd、Pb形态与油菜有效性的关系[J]. 生态学报, 2002, 22(10):1688-1694.
LIU Xia, LIU Shu-qing, TANG Zhao-hong. The relationship between Cd and Pb forms and their availability to rape in major soils of Hebei Province[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2002, 22(10):1688-1694.
- [24] 郭艳杰, 李博文, 谢建治, 等. 潮褐土施用有机酸对油菜吸收Cd、Zn、Pb的影响[J]. 农业环境科学学报, 2008, 27(2):472-476.
GUO Yan-jie, LI Bo-wen, XIE Jian-zhi, et al. Effect of organic acids on Cd, Zn, Pb absorption of rape in meadow cinnamon soil[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2008, 27(2):472-476.
- [25] 张玉秀, 张媛雅, 孙涛, 等. 植物重金属转运蛋白P1B-ATPase结构和功能研究进展[J]. 生物工程学报, 2010, 26(6):715-725.
ZHANG Yu-xiu, ZHANG Yuan-ya, SUN Tao, et al. Structure and function of heavy metal transporter P1B-ATPase in plant: A review[J]. *Chinese Journal of Biotechnology*, 2010, 26(6):715-725.
- [26] 金枫, 王翠, 林海建, 等. 植物重金属转运蛋白研究进展[J]. 应用生态学报, 2011, 21(7):1875-1882.
JIN Feng, WANG Cui, LIN Hai-jian, et al. Heavy metal-transport proteins in plants: A review[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2011, 21(7):1875-1882.
- [27] Sharma P, Dubey R S. Lead toxicity in plants[J]. *Brazilian Journal of Plant Physiology*, 2005, 17:35-52.
- [28] He J Y, Zhu C, Ren Y F, et al. Uptake subcellular distribution and chemical forms of cadmium in wild-type and mutant rice[J]. *Pedosphere*, 2008, 18:371-377.
- [29] 黄凯丰, 江解增. 复合胁迫下茭白体内镉、铅的亚细胞分布和植物络合素的合成[J]. 植物科学学报, 2011, 29(4):502-506.
HUANG Kai-feng, JIANG Jie-zeng. Sub-cellular fraction of heavy metals and production of phytochelators in *Zizania latifolia* exposed to Cd and Pb[J]. *Plant Science Journal*, 2011, 29(4):502-506.
- [30] 殷宪强, 王昌钊, 易磊, 等. 小青菜酶活性与铅形态关系的研究[J]. 干旱地区农业研究, 2010, 28(5):133-137.
YIN Xian-qiang, WANG Chang-zhao, YI Lei, et al. Study on relationship between Pb chemical forms and enzyme activity in *Brassica chinensis*[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2010, 28(5):133-137.