

烟草对土壤铅的吸收、转运及分配特征

颜奕华¹, 郑子成^{1*}, 李廷轩¹, 张锡洲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:采用室外盆栽试验方法,开展烟草不同生育期铅吸收转运及分配特征的研究。结果表明:土壤铅处理对烟草生长有较明显的抑制作用,且生育前期比生育后期更明显;烟草根系对铅的阻滞作用较强,以限制铅由根系向地上部运输。烟草各生育期根、茎和叶中铅含量均随土壤铅浓度的增加而升高,其中根部的上升幅度最大,随着生育期的推进,烟草各器官铅含量从团棵期至现蕾期呈现先降低后升高的趋势,根部铅含量从现蕾期至成熟期呈现下降趋势。土壤添加外源铅后,烟草生育期内茎和叶的铅转运系数分别介于0.35~1.00和0.25~0.91之间,茎和叶的转运系数随着铅浓度的增加和生育期的推进呈下降趋势。烟草各器官中铅含量介于13.8~180.74 mg·kg⁻¹之间,各器官铅含量的分布规律为根>茎>叶,各器官铅积累量总体为叶>根>茎,但成熟期在T2和T3处理下表现为根>叶>茎。在土壤铅浓度较低时,烟草体内铅较易向地上部分转运,旺长期至现蕾期阶段是烟草体内铅向地上部分转运的关键时期。

关键词:铅;吸收;转运;分配;烟草

中图分类号:X503.23 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2013)11-2151-08 doi:10.11654/jaes.2013.11.008

Uptake, Transfer and Distribution of Lead in Tobacco

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

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

Abstract: Elevated lead (Pb) in tobacco profoundly impacts the quality of cigarettes. Uptake and transfer of Pb by tobacco are dependent on its growth. A pot experiment was performed to examine Pb uptake, transfer and distribution in tobacco grown in soils spiked with different Pb levels during the whole growth period. Lead additions obviously inhibited tobacco growth, especially at early stages. Tobacco roots had strong retention of Pb, which restricted transportation of Pb from roots to shoots. Concentrations of Pb in different organs ranged from 13.89 mg·kg⁻¹ to 180.74 mg·kg⁻¹, with an order of roots>stems>leaves, increasing with Pb additions during growth periods. As the growth progressed, concentrations of Pb in tobacco roots, stems and leaves showed a rising-and-falling trend from the rosette stage to squaring stage. The root Pb decreased from the squaring stage to mature stage. Transfer coefficients of Pb from roots to leaves and stems ranged from 0.35 to 1.00, and 0.25 to 0.91, respectively, both decreasing with growth stages and Pb additions. Lead accumulation was generally in order: leaves>roots>stems, whereas roots>leaves>stems at mature stage in T2 and T3 treatments. Peak and squaring stages were the critical periods for Pb transfer from tobacco roots to shoots.

Keywords: lead; uptake; transfer; distribution; tobacco

我国土壤环境日益恶化,其中受重金属污染的耕地面积近 2000 万 hm²,且污染范围呈扩大趋势^[1]。目

前土壤主要重金属污染物为 Pb、Cd、Hg 等,已成为农产品质量安全的严重隐患^[2]。重金属铅并非生物体所必需的元素,铅不仅可抑制植物正常生长,而且能通过土壤-作物-农产品途径迁移,对人体健康造成威胁^[3]。作为重要经济作物的烟草,不仅对土壤重金属具有较强的适应能力,还可将土壤中重金属富集到体内^[4-5]。随着环境中铅污染问题的加剧,增加了烟草安全的潜在风险。有研究表明,与国外香烟相比,中国香

收稿日期:2013-03-12

基金项目:国家自然科学基金资助项目(40901138);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.cn

烟铅含量较高^[6]。因此,开展烟草对铅的吸收、转运及分配特征的研究具有重要的现实意义,以期寻求降低烟叶铅含量的适宜途径。多数研究表明,植物根中铅含量远高于地上部,这主要是由于铅在植物体内主要以磷酸盐、沉淀物等难溶态存在,不易向地上部转运^[7]。当土壤铅含量升高时,植物根、茎、叶铅含量也随之升高^[8-9]。但外源铅浓度过高时,根系对铅的截留作用达到饱和,易使根部的铅向地上部分转运与分配^[10]。由于植物不同生育时期生长中心的转移,作物对重金属的吸收与分配常因器官部位和生育期的不同而异^[11-12]。黄成江等^[13]研究表明,烟草现蕾期各器官中根部的铅含量与积累量最高,而张晓海^[14]研究则表明,烟草成熟期体内铅主要积累于叶部。张仕祥等^[15]研究表明,烟叶中铅含量从团棵期到初花期逐渐降低,初花期至盛花期则明显增加。目前关于作物对土壤铅的吸收积累过程以及铅对植物的环境效应,大部分研究仅局限于作物特殊的生长时期与收获器官,涉及植物全生育期各器官中铅的动态分配特点的研究较少,尤其对烟草的研究甚少。鉴于此,为保证烟叶的安全生产,本文通过室外盆栽试验,从土壤的合理利用与科学管理角度,开展西南典型植烟区烟草对土壤中铅的吸收、转运和分配特征研究,探索各生育期烟草体内铅的动态变化,以期对烟叶安全生产和植烟土壤可持续利用提供依据。

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区 0~20 cm 土层,土壤基本性质如下:pH 值 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 280.11 mg·kg⁻¹,土壤铅含量 42.86 mg·kg⁻¹。供试烟草品种为当地主栽的红花大金元。

1.2 试验设计与处理

盆栽实验设置 4 个铅水平(Pb):0 mg·kg⁻¹(CK)、125 mg·kg⁻¹(T1)、250 mg·kg⁻¹(T2)和 500 mg·kg⁻¹(T3),分别在烟草团棵期(移栽后 30 d)、旺长期(移栽后 60 d)、现蕾期(移栽后 90 d)和成熟期(移栽后 120 d)4 个时期采样,每处理 3 个重复,共 48 盆。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。土壤采集后经自然风干、混匀,过 1 cm 筛后装入 10 L 的塑料盆,每盆装土 15 kg。肥料按每千克土施入 N 90 mg、P₂O₅ 90 mg、K₂O 180 mg,分别以 NH₄NO₃、KH₂PO₄、K₂SO₄ 的方式施入。其中,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。将分析纯 Pb(CH₃COO)₂·3H₂O 配制成一定浓度的溶液,取一定量溶液加入供试土壤作为外源铅来源,同时一并施入基肥混匀,陈化两周后移栽。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,每盆定苗 1 株,移栽后管理均按大田常规进行。

在烟草团棵期、旺长期、现蕾期和成熟期采样,将烟草根、茎、叶分开,先用自来水冲洗干净,再用蒸馏水润洗,然后用吸水纸擦干,各部位分开装入纸袋。鲜样在 105 ℃下杀青 30 min,再将温度降至 75 ℃烘干至恒重,测定植物样品干重。最后磨碎密封保存,供植株铅含量分析测定用。

1.3 测定方法

植物样铅含量采用 HNO₃+HClO₄ 法消解^[16],土样铅含量采用 HNO₃+HClO₄+HF 法消解^[16],用原子吸收分光光度计(TAS-990,北京)测定。

1.4 数据处理

地上部与根部重金属含量的比值为烟草的转运系数,用以表示烟草对重金属从根部向地上部的有效转运程度。

叶转运系数=叶铅含量/根铅含量

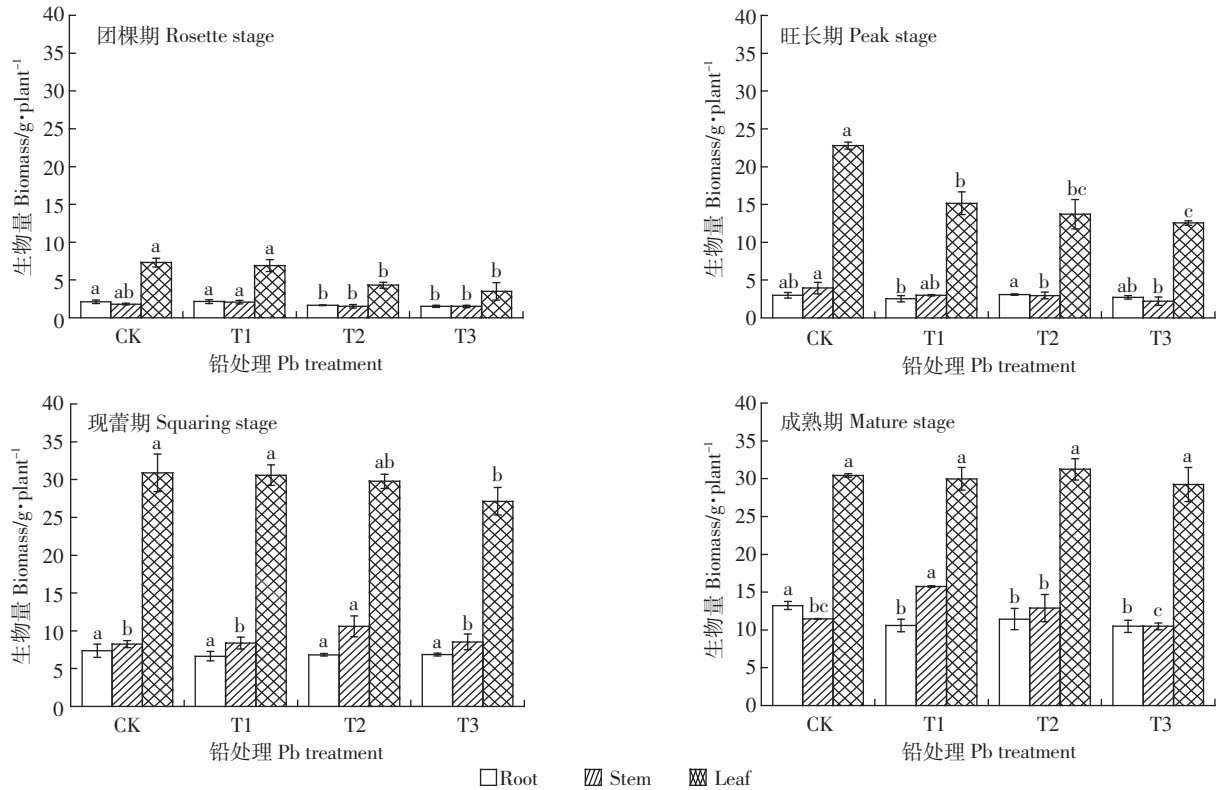
茎转运系数=茎铅含量/根铅含量

所测数据采用 Microsoft Excel(2003)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(Duncan 法),利用 Origin8.0 软件绘制图表。

2 结果与分析

2.1 铅对烟草生长的影响

由图 1 可知,不同铅处理条件下烟草的生长基本正常。与对照相比,铅处理后团棵期烟草根、茎、叶生物量呈下降趋势,且在 T2 和 T3 处理间达显著差异。除 T1 处理的茎部,铅处理后旺长期烟草茎和叶的生物量均显著降低,铅处理对烟草根部的影响较小。在烟草现蕾期和成熟期,随着铅处理浓度的增加烟草茎部铅含量呈先增高后降低的趋势。在现蕾期 T3 处理的烟草叶部生物量显著降低,铅处理对根部生物量无显著影响。烟草成熟期铅处理后烟草根部生物量显著降低,对叶部生物量无显著影响。可见,土壤铅浓度在 0~500 mg·kg⁻¹ 范围内,铅对烟草生长的毒害作用主要出现在团棵期与旺长期,而对烟草生育后期的生长影响较小。



不同小写字母表示各生育时期不同铅处理间差异显著 ($P < 0.05$)。下同

Different letters show significant difference among Pb treatments in each part at each growth stage ($P < 0.05$). The same below

图 1 铅对不同生育期烟草生物量的影响

Figure 1 Effect of Pb on tobacco biomass at different growth stages

2.2 不同生育期烟草体内铅含量的动态变化

由图 2 可知,在各生育期烟草叶、茎和根的铅含量随着土壤铅浓度的增加而逐渐增加,根系中铅含量的增加均达显著水平。这主要是因为土壤铅浓度的增加促进了烟草根系对铅的吸收,增加了铅对烟草的胁迫,进而抑制了铅在烟草体内向地上部分转运的过程。烟草从团棵期开始对土壤铅具有较强的吸收能力,其中在铅浓度为 $500 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时达到最高值。随着生育期的推进,烟草根系中铅含量呈先降低后升高的趋势,因为在团棵期至旺长期间,烟草生物量的积累速率大于烟草对铅的积累速率,使烟草体内的铅含量有所降低。而在旺长期至现蕾期间,烟草生物量的积累速率小于烟草对铅的积累速率,使烟草体内铅含量有所增加。可见,烟草在旺长期至现蕾期间是吸收铅的一个敏感阶段。在现蕾期至成熟期烟草根系铅含量受土壤铅浓度的影响而表现出不同特征,铅浓度在 $0 \sim 250 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 范围内根系铅含量有不同程度的降低,而在铅浓度为 $500 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时增幅达 33.11%。

铅进入烟草根细胞后,可贮藏于根部或向地上部

转运。与对照相比,土壤添加铅后不同程度地增加烟草茎部和叶部铅含量,这与根部铅含量的变化趋势一致(图 2)。在烟草团棵期、现蕾期和成熟期,随着铅浓度的增加,烟草茎部铅含量逐渐升高,且均达到显著差异。但烟草旺长期在铅处理为 $500 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时,烟草茎部铅含量有所降低。烟草茎部和叶部铅含量在团棵期至现蕾期间呈先降低后升高的趋势,这与根部铅含量的结果一致,在现蕾期至成熟期间的变化趋势却不明显。

2.3 各生育期烟草对铅的转运

由图 3 可知,土壤中添加外源铅后,烟草生育期内叶和茎的铅转运系数分别介于 $0.25 \sim 0.91$ 和 $0.35 \sim 1.00$ 之间;铅在烟草各器官中的分布呈现出根 > 茎 > 叶(图 1)。这一结果说明烟草根部铅不易向地上部分转运。烟草团棵期,添加铅后降低了烟草茎和叶的转运系数,烟草茎与叶的转运系数随铅处理浓度的增加呈线性降低。可见,增加土壤铅浓度虽促进烟草对铅的吸收,但是烟草根系向地上部转运铅的能力却随铅浓度的增加而降低。烟草旺长期,随着土壤铅浓度的增加,

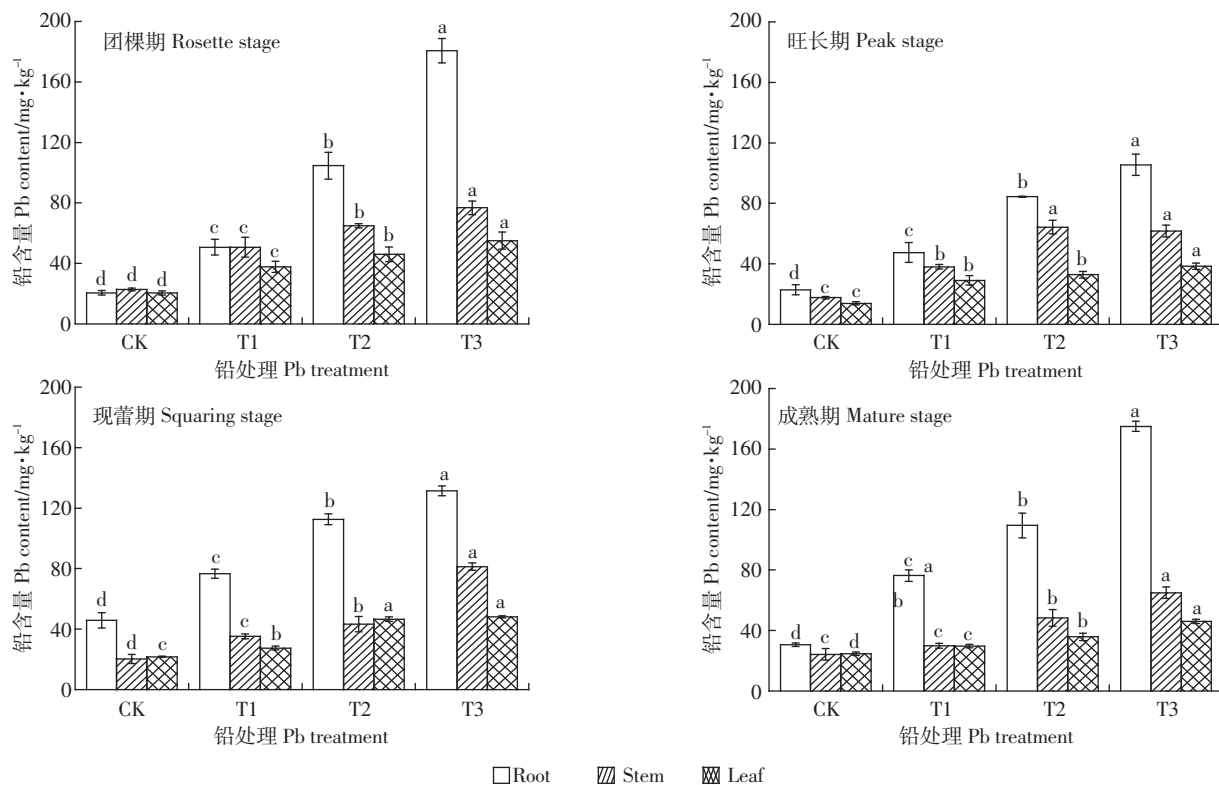


图 2 不同生育期烟草体内各器官的铅含量

Figure 2 Lead contents in different parts of tobacco at different growth stages

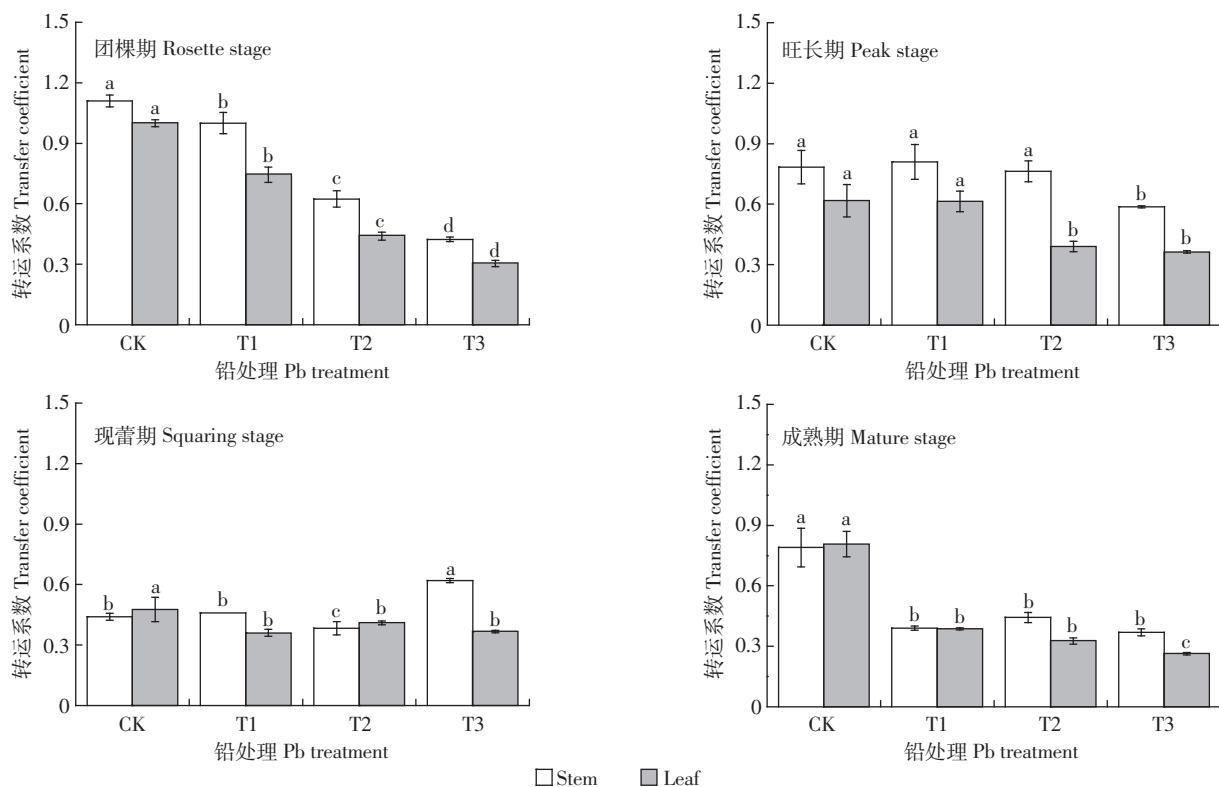


图 3 铅对不同生育期烟草茎和叶铅的转运系数的影响

Figure 3 Transfer coefficients of Pb from tobacco roots to stems and leaves at different growth stages

叶与茎的转运系数均呈下降趋势。烟草现蕾期,叶和茎转运系数随土壤铅浓度的变化趋势不明显。与对照相比,土壤铅浓度的增加使烟草成熟期茎与叶的转运系数大幅降低,其中烟草叶部的迁移系数均随土壤铅浓度的增加呈下降趋势。可见,烟草对体内铅的转运能力因生育期的不同而异,其机理有待进一步研究。

2.4 各生育期烟草对铅的累积与分配

由图 4 可知,烟草根部铅积累量随着土壤铅浓度的增加而逐渐升高。烟草茎部也有相同的趋势,但烟草旺长期 T3 与 T2 相比积累量显著降低,与烟草茎部铅含量的变化趋势一致。随着土壤铅浓度的增加,烟草叶部铅积累量逐渐升高,但烟草团棵期 T2 和 T3 与 T1 相比显著降低。这主要是因为随着土壤铅浓度的增加使烟草生长受到不同程度的抑制,生物量较低。随着生育期的推进,烟草各器官对铅的积累量逐渐增加。

由图 5 可以看出,铅在烟草根部的分配率随土壤铅浓度的增高呈现上升趋势,烟草叶部分配率随土壤铅浓度的增加呈现下降趋势,茎部分配率的变化趋势不明显。随着生育期的推进,烟草根与茎分配率呈现先降低后升高的趋势,而叶部则相反,表明烟草旺长期至现蕾阶段是烟草体内铅向叶部分配的主要时期。CK 及 T1、T2 处理下,烟草各生育期不同器官铅分配率均表现为叶>根>茎,而团棵期与成熟期在 T3 处理下却表现为根>叶>茎,表明随着铅浓度的增加,铅在植物体内向上转运分配的作用逐渐降低。烟草旺长期与现蕾期, T4 处理下各器官铅分配率表现为叶>根>茎,表明旺长期至现蕾阶段是烟草体内铅向地上部分转运分配的敏感阶段。在烟草成熟期叶、茎和根的分配率分别介于 34.82%~52.34%、17.64%~21.70% 和 28.23%~47.54% 之间。

3 讨论

3.1 铅对烟草生长的影响

铅对植物生长代谢的影响因植物种类、品种、器官组织部位的不同而异。土壤环境是植物吸收铅的主要来源,其中根系最先受到影响,进而影响植株的生长。铅对烟草的毒害作用,不仅直接影响烟草的生长,还可破坏其叶绿体结构,降低叶绿素含量,使烟草叶片发黄、植株矮小、产量下降等^[7,17]。

有研究表明,当烟草 NC-89 在 pH 为 7.5 的土壤中培养 90 d 后,在铅浓度为 0~1000 mg·kg⁻¹ 土壤中能增加烟草生物量,铅污染土壤中毒性临界点为

1500 mg·kg⁻¹^[8]。本试验中红花大金元培养 90 d 后,烟草茎部生物量在 T2 处理时显著升高,烟草叶部生物量在 T3 处理时显著降低,可能是因为不同烟草品种对重金属的耐性不同,或是由于本试验为酸性土壤铅有效性较高。马新民等^[17]研究表明,当铅浓度为 0~450 mg·kg⁻¹ 时对烟叶产量影响较小,而在 600~1000 mg·kg⁻¹ 浓度时显著降低烟草产量。本试验表明,在烟草旺长期当铅浓度为 125 mg·kg⁻¹ 时就能显著降低叶部生物量,而在成熟期铅处理对叶部生物量影响较小。这可能是因为烟草生育前期(团棵期和旺长期)对铅胁迫的耐性较弱,导致烟草矿质营养的缺乏,易于引起烟草代谢功能紊乱,进而影响生物量的累积^[8]。烟草现蕾期至成熟期,由于在生长过程中生物量的大量积累,对烟草体内铅浓度具有一定的“稀释”效应,故烟草受铅的胁迫作用有所缓解。此外,烟草易受环境中铅的诱导,植物通过自身限制铅的跨膜运输、植物细胞壁对铅的沉淀作用及液泡对铅的区隔化等途径,缓解铅对烟草生长的影响^[9,19]。烟草成熟期,烟草叶部生物量受铅胁迫的影响较小且根部生物量显著降低,这是因为在成熟期烟草体内铅主要分配于根部,进而抑制了根部的生长。可见,烟草对重金属的吸收能力与适应能力因土壤理化性质、污染程度、植物品种和生长阶段等因素影响而异^[20]。

3.2 烟草对铅的吸收与转运

植物对土壤中铅的吸收主要从根表进入根内部,再由根向地上部分转运。植物对土壤铅的吸收随土壤铅浓度的增加而增加,并在植物根、茎、叶中累积。铅在植物体内的运输能力有限,根系对铅向地上部分转运起到限制作用,这使植物体内的铅主要富集在根部,只有很小一部分向地上部转运^[21]。本试验结果表明,铅在烟草不同器官的分布表现为根>茎>叶。这主要是因为铅进入烟草根系后主要以难溶态存在,根系不同组织器官作为一种屏障限制了铅在非原生质体和共生质体之间的运输,阻碍了铅向地上部转运的过程^[22]。

不同生育期烟草对铅的转运能力有所差异。本试验结果表明,在团棵期烟草茎与叶转运系数随土壤铅浓度的升高而降低,在烟草旺长期与成熟期烟叶铅的转运系数也表现出相似结果。这可能是在铅浓度较低时,铅对烟草正常生长发育的影响较小,烟草对铅毒的应答机制未被诱导^[8]。有研究表明,随着铅处理浓度的增加,植物体内移动性较差的铅形态比例增加,导致了植物因体内铅浓度的升高而表现出转运能力的降低^[10,23]。烟草从移栽至团棵期对铅表现出较强的吸

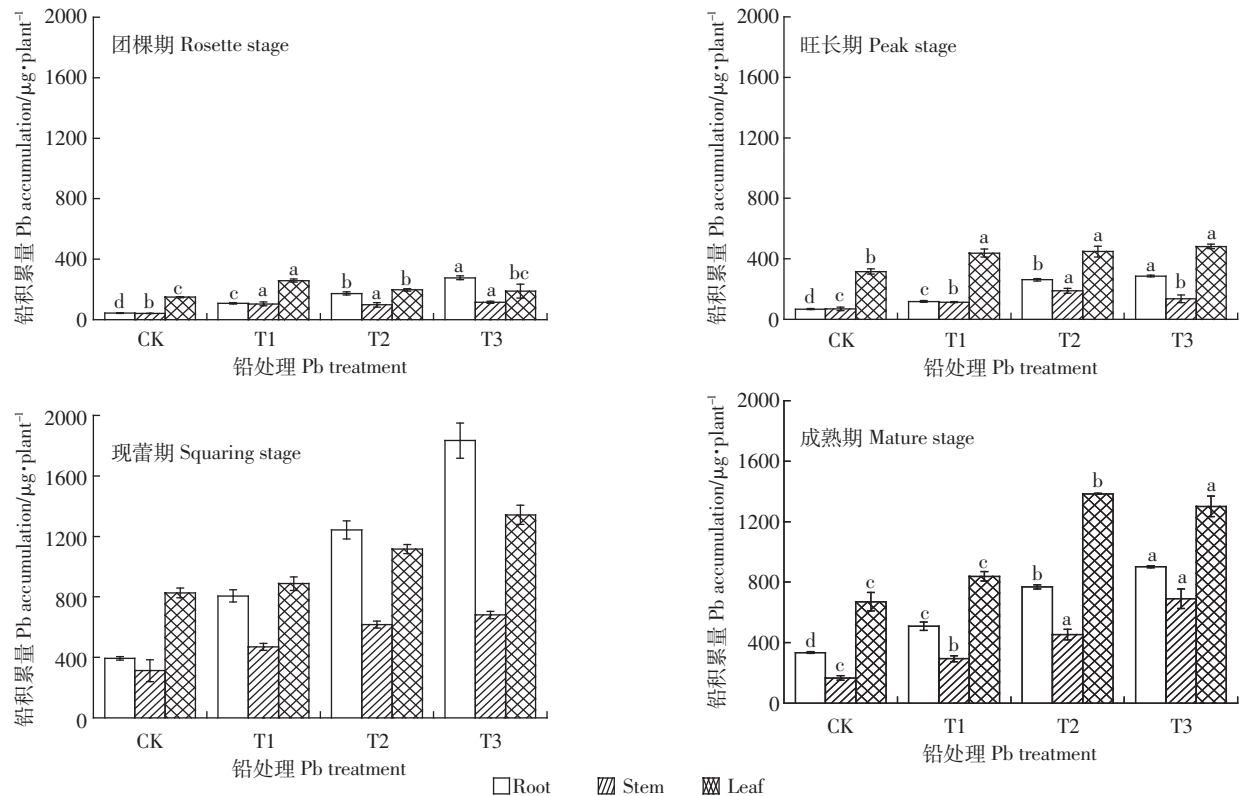


图 4 不同生育期烟草体内各器官铅的积累量

Figure 4 Lead accumulation in different parts of tobacco at different growth stages

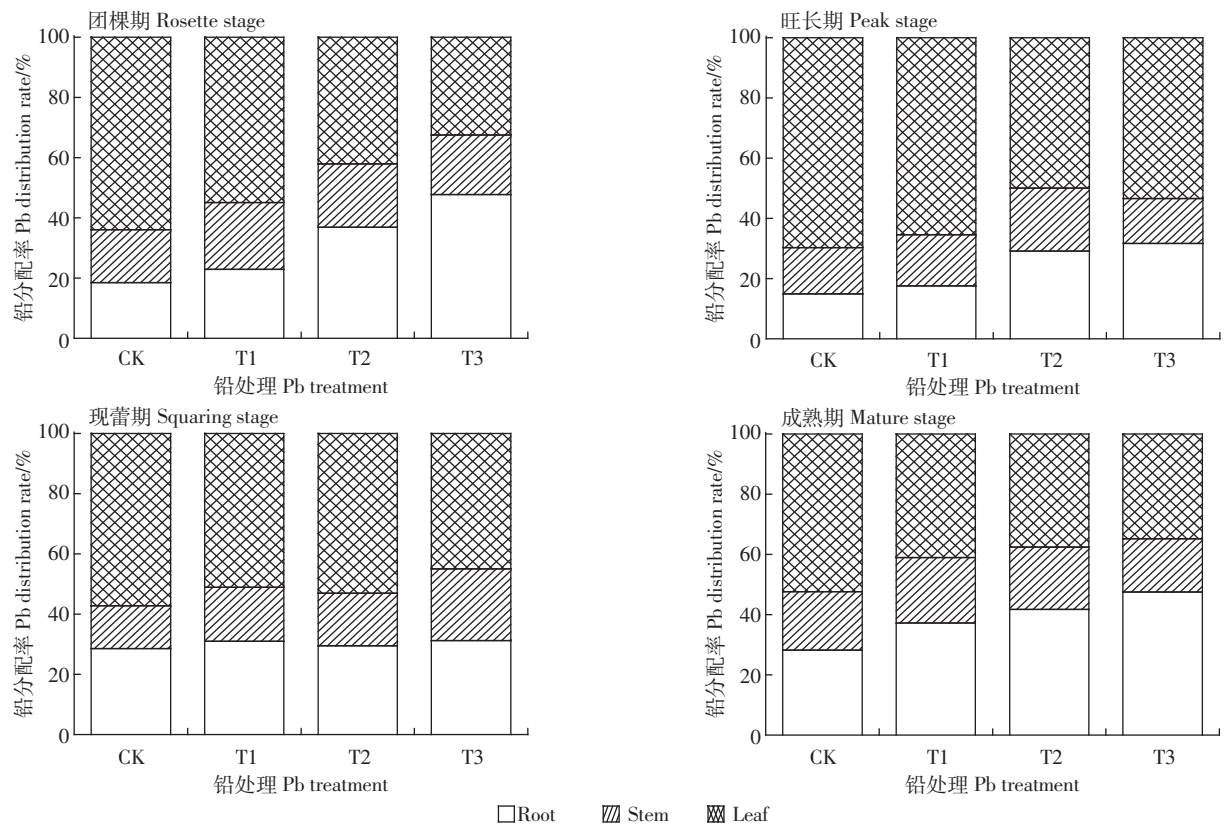


图 5 不同生育期烟草体内各器官铅的分配率

Figure 5 Lead distribution in different parts of tobacco at different growth stages

收能力,而从团棵期至旺长期,烟草根、茎、叶中铅含量都有不同程度的降低,在旺长期至现蕾期则表现出增加趋势,说明烤烟对土壤铅的吸收主要在移栽至团棵期阶段以及旺长期至现蕾期阶段,与张仕祥等^[15]对烤烟和白肋烟烟叶的研究结果相似。烟草对铅的吸收主要伴随着营养吸收的过程,所以烟草对铅的吸收主要在烟草快速生长的生育阶段。陈金等^[24]对大豆吸收积累硒的生育期动态进行研究,得出大豆中硒积累与干物质积累的动态变化直接影响硒在大豆体内含量的动态变化。由于不同生育期烟草干物质积累速率和烟草对铅的吸收速率有所差异,同时铅对烟草生长的影响因生育时期的不同有较大差异,导致烟草体内铅含量在生育其内的动态变化。

3.3 烟草对铅的积累与分配

铅在烟草体内不同器官的积累与分配受铅含量与生物量的影响。本试验铅浓度在 $0\sim 500\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 范围内对烟草生长的抑制作用较小,故烟草体内不同器官对铅的吸收量变化趋势与铅含量变化趋势大体一致。由于铅在植物体内迁移能力有限,不同器官铅含量表现为根>茎>叶;因不同器官生物量的差异,不同器官铅积累量总体呈现为叶>根>茎。但是当铅处理为 $500\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时,在团棵期与成熟期铅在烟草体内积累量表现为根>叶>茎,这主要是因为随着铅浓度的增加铅由根部向上转运能力逐渐降低。而当铅处理为 $500\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时,在旺长期与现蕾期铅积累量仍表现为叶>根>茎,说明烟草旺长期至现蕾阶段不仅对土壤铅具有较强的吸收能力,而且也是烟草根部铅向地上部分转运分配的敏感阶段。许多研究证明,植物体内重金属含量与积累量均随重金属浓度的增加而显著升高^[25-26],本试验也得到同样的结果。尽管铅浓度的增加能提高植物铅含量与积累量,但是当铅含量较高时铅对植物生长的抑制作用愈为明显,因此植物对铅的积累量反而随土壤铅浓度的增加而显著下降。这说明当土壤铅浓度较低时,土壤中铅因较易被植物吸收与向地上部转运,仍具有较大的环境风险。本试验过程中,随着生育期的推进,烟草根部铅的分配率呈先下降后上升的趋势,而烟草叶部则相反,说明虽然烟草根对根系吸收的铅有截留作用,但不同生育期截留能力有所差异,导致这一现象的机理需深入研究。

4 结论

(1)土壤铅对烟草生长的抑制作用主要在团棵期与旺长期。土壤铅浓度达到 $125\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 就对烟草生

长产生抑制作用,但随着生育期的推进,烟草表现出对铅较强的适应能力。当铅浓度增加到 $500\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时,铅对烟草各生育期内的生长均表现为抑制作用。

(2)烟草在团棵期对土壤铅表现出较强的吸收能力,在 $500\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时根部铅含量达到 $180.74\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。随着旺长期生物量的快速积累,烟草体内铅浓度有所降低。可见,旺长期至现蕾期是烟草对铅吸收和转运的敏感阶段。

(3)土壤铅被烟草根系吸收后可被转运与贮存到各部位,其中主要分配于烟草根部和叶部。烟叶铅的转运系数较低($0.25\sim 1.00$),但植株积累的铅在成熟期有 $34.82\%\sim 52.34\%$ 分配于叶片。烟草各器官铅含量呈现为根>茎>叶,各器官铅积累量总体呈现为叶>根>茎。

参考文献:

- [1] 郭 勇,童艳君.我国农业土壤重金属污染现状及防治对策[J].现代农业科技,2012,18:220-221.
GUO Yong, TONG Yan-jun. Status quo and countermeasures of heavy metal pollution in Chinese agriculture soils[J]. *Modern Agricultural Science and Technology*, 2012, 18:220-221.
- [2] 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.
- [3] 寇士伟,吴锦标,谢 素,等.红薯对 Pb、Cd 的吸收累积特征及根际土壤对 Pb、Cd 形态分析研究[J].农业环境科学学报,2011,30(4):677-683.
KOU Shi-wei, WU Jin-biao, XIE Su, et al. Absorption and accumulation of Pb and Cd in sweet potato and species distribution of Pb and Cd in rhizosphere soil[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2011, 30(4):677-683.
- [4] 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.
- [5] Del P L, Abet M, Sorrentino C, et al. Uptake and distribution of lead in tobacco (*Nicotiana glauca* L.)[J]. *Journal of Applied Botany and Food Quality*, 2008, 82:21-25.
- [6] 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.
- [7] 罗春玲,沈振国.植物对重金属的吸收与分布[J].植物学通报,2003,20(1):129-132.
LUO Chun-ling, SHEN Zhen-guo. The mechanisms of heavy metal uptake and accumulation in plants[J]. *Chinese Bulletin of Botany*, 2003, 20

- (1):129-132.
- [8] 王学锋, 师东阳, 刘淑萍, 等. 烟草对土壤中环境激素铅的吸收及其相互影响的研究[J]. 农业环境科学学报, 2006, 25(4):890-893.
WANG Xue-feng, SHI Dong-yang, LIU Shu-ping, et al. Absorption of tobacco to environmental hormone Pb in soil and their commutative influences[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2006, 25(4):890-893.
- [9] 刘维涛, 周启星, 孙灼兵, 等. 大白菜对铅积累与转运的品种差异研究[J]. 中国环境科学, 2009, 29(1):63-67.
LIU Wei-tao, ZHOU Qi-xing, SUN Yue-bing, et al. Variety difference of lead accumulation and translocation in Chinese cabbage (*Brassica pekinensis* L.)[J]. *China Environmental Science*, 2009, 29(1):63-67.
- [10] 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.
- [11] 党红凯, 李瑞奇, 张馨文, 等. 超高产冬小麦铜素的吸收、积累和分配[J]. 中国农业科学, 2010, 43(24):5019-5027.
DANG Hong-kai, LI Rui-qi, ZHANG Xin-wen, et al. Study on the absorption, accumulation and distribution of copper in super-high-yielding winter wheat[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2010, 43(24):5019-5027.
- [12] 李 鹏, 葛 滢, 吴龙华, 等. 两种籽粒镉含量不同水稻的镉吸收转运及其生理效应差异初探[J]. 中国水稻科学, 2011, 25(3):291-296.
LI Peng, GE Ying, WU Long-hua, et al. Uptake and translocation of cadmium and its physiological effects in two rice cultivars differed in grain cadmium concentration[J]. *Chin J Rice Sci*, 2011, 25(3):291-296.
- [13] 黄成江, 王树会. 不同类型土壤的烟株对铅的吸收与分配特征[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版), 2008, 34(5):545-548.
HUANG Cheng-jiang, WANG Shu-hui. Distribution and absorption of flue-cured tobacco to Pb in different types of soil[J]. *Journal of Hunan Agricultural University(Natural Sciences)*, 2008, 34(5):545-548.
- [14] 张晓海. 不同施肥水平下烤烟对重金属元素的吸收分配研究[J]. 农业网络信息, 2005(11):144-146.
ZHANG Xiao-hai. Absorption and distribution of heavy metal in tobacco under different fertilizer levels[J]. *Agriculture Network Information*, 2005(11):144-146.
- [15] 张仕祥, 张艳玲, 魏春阳, 等. 烤烟和白肋烟吸收积累铅、镉的生育期动态[J]. 烟草科技, 2008, 25(5):49-53.
ZHANG Shi-xiang, ZHANG Yan-ling, WEI Chun-yang, et al. Lead and cadmium absorption and accumulation in tobacco at different growth stages[J]. *Tobacco Science & Technology*, 2008, 25(5):49-53.
- [16] 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.
- [17] 马新明, 李春明, 袁祖丽, 等. 铅污染对烤烟光合特性、产量及其品质的影响[J]. 植物生态学报, 2006, 30(3):472-478.
MA Xin-ming, LI Chun-ming, YUAN Zu-li, et al. Effect of pollution on photosynthetic characteristics, quality, and yield of tobacco leaves[J]. *Journal of Ecology*, 2006, 30(3):472-478.
- [18] 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.
- [19] 吴 佳, 涂书新. 植物根系分泌物对污染胁迫响应的研究进展[J]. 核农学报, 2010, 24(6):1320-1327.
WU Jia, TU Shu-xin. Research progress on response of plant root exudates to pollution stress[J]. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 2010, 26(6):715-725.
- [20] 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]. *Soils*, 2007, 39(3):369-374.
- [21] Meyers D E R, Auchterlonie G J, Webb R I, et al. Uptake and localisation of lead in the root system of *Brassica juncea*[J]. *Environmental Pollution*, 2008, 153(2):323-332.
- [22] Mohd I, Amy J, Dharendra K. Interactive effects of lead, copper, nickel and zinc on growth, metal uptake and antioxidative metabolism of *Sesbania drummondii*[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2011, 186:1520-1526.
- [23] 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.
- [24] 陈 金, 潘根兴, 李正文, 等. 不同硒水平下两种大豆对土壤中硒吸收积累的生育期动态[J]. 大豆科学, 2003, 22(4):278-282.
CHEN Jin, PAN Gen-xing, LI Zheng-wen, et al. Dynamics of Se uptake and accumulation in growth period by soybean cultivars under different Se-levels of soil[J]. *Soybean Science*, 2003, 22(4):278-282.
- [25] 韩美清, 王路光, 郭平毅, 等. 重金属污染土壤中菠菜对铅吸收和累积规律的研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2009, 15(4):975-980.
HAN Mei-qing, WANG Lu-guang, GUO Ping-yi, et al. Effect of heavy metal pollution on the absorption and accumulation of Pb in spinach[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2009, 15(4):975-980.
- [26] 汤叶涛, 吴好都, 仇荣亮, 等. 滇苦菜(*Picris divaricata* Vant.)对锌的吸收和富集特性[J]. 生态学报, 2009, 29(4):1823-1831.
TANG Ye-Tao, WU Yu-Du, QIU Rong-Liang, et al. Zinc uptake and accumulation in *Picris divaricata* Vant. [J]. *Acta Ecology Ica Sinica*, 2009, 29(4):1823-1831.