

不同富硒土壤对烤烟生长及硒吸收转运的影响

姜超强¹, 沈 嘉¹, 徐经年¹, 邵伏文², 李 田³, 祖朝龙^{1*}

(1 安徽省农业科学院烟草研究所, 合肥 230031; 2 中国烟草总公司安徽省公司, 合肥 230022; 3 安徽省烟草公司池州市公司, 安徽池州 247000)

摘 要:以烤烟品种‘云烟 87’为材料, 采用盆栽试验研究安徽池州烟区不同全硒含量土壤(0.30、0.45、1.00、1.75 mg·kg⁻¹)对烤烟生长发育以及硒吸收和转运的影响。结果显示: (1) 土壤硒含量≤1.00 mg·kg⁻¹时能够促进烤烟生长, 而土壤硒含量≥1.75 mg·kg⁻¹则抑制烤烟的生长。 (2) 土壤硒含量的增加能够显著提高烤烟根系、茎秆、叶片的硒含量, 烟株各部位的硒含量呈现根系>叶片>茎秆的特点, 且根系硒含量是叶片的 2~3 倍, 叶片硒含量则是茎秆的 3~4 倍。 (3) 土壤硒含量由 0.30 mg·kg⁻¹增加至 1.75 mg·kg⁻¹时, 烟株对硒的吸收系数由 1.08 显著降低至 0.36, 次级转运系数则由 2.84 显著升高至 4.03, 即土壤硒含量增加降低了根系吸收硒的效率, 但却增加了硒在叶中的转运和相对累积量。 (4) 烤烟整株硒的富集量在土壤硒含量为 1.00 mg·kg⁻¹时达到最大, 每株达到 72 μg。研究表明, 在安徽池州烟区的富硒土壤(0.45~1.00 mg·kg⁻¹)上能够生产出富硒(0.15~0.23 mg·kg⁻¹)烟叶, 不需要额外添加外源硒, 既可以减少生产成本, 也能够避免造成水土污染。

关键词: 硒; 富硒土壤; 烤烟; 吸收; 转运

中图分类号: Q945.12

文献标志码: A

Effects of Se-enriched Soils on the Plant Growth, Selenium Uptake and Transport in Flue-cured Tobacco

JIANG Chaoqiang¹, SHEN Jia¹, XU Jingnian¹, SHAO fuwen², LI Tian³, ZU Chaolong^{1*}

(1 Tobacco Research Institute, Anhui Academy of Agricultural Sciences, Hefei 230031, China; 2 Anhui Provincial Tobacco Company, Hefei 230022, China; 3 Chizhou Tobacco Company of Anhui Province, Chizhou, Anhui 247000, China)

Abstract: The plant growth, selenium (Se) uptake and transportation in plant organs of flue-cured tobacco ‘Yunyan 87’ exposed to soil with different Se concentration (0.30, 0.45, 1.00, 1.75 mg·kg⁻¹) were studied by a pot experiment in tobacco growing areas of Chizhou, Anhui province. Results showed that: (1) The appropriate amount of Se in soils (≤1.00 mg·kg⁻¹) stimulated plant growth but high concentration Se (≥1.75 mg·kg⁻¹) inhibited plant growth. The Se concentration in the roots, shoots, and leaves of the tobacco plants significantly increased with the increase of Se in soils. (2) The pattern of total Se concentration in the tobacco plant tissues followed the order: root>leaf>shoot. The Se concentration in root was 2~3 times of the corresponding leaf, and leaf was 3~4 times of the stem. (3) When the Se concentration of soil increased from 0.30 to 1.75 mg·kg⁻¹, the root absorption index (RAI) of Se significantly reduced from 1.08 to 0.36, but the secondary transport index (STI) of Se significantly increased from 2.84 to 4.03. These suggested that the Se absorption efficiency of root was decreased, while the transport and accumulation of Se in leaf were increased with increasing Se concentration in soil. (4) The plants accumulated the maximum Se (72 μg) when the amount of Se in soils was 1.00 mg·kg⁻¹. Therefore, we could produce Se-enriched tobacco leaf under soil Se concentration within the range of 0.45 to 1.00 mg·kg⁻¹ without spraying Se fertilizer to

收稿日期: 2014-05-07; 修改稿收到日期: 2014-09-25

基金项目: 安徽省烟草公司科技项目(20120551002); 安徽省农业科学院院长青年基金项目(12B0919)

作者简介: 姜超强(1980—), 男, 博士, 助理研究员, 主要从事作物营养与土壤养分管理研究。E-mail: chaoqiang@163.com

* 通信作者: 祖朝龙, 学士, 研究员, 主要从事植物栽培研究。E-mail: lc2468@sina.com

reduce the cost and avoid soil and water pollution caused by exogenous Se.

Key words: selenium(Se); Se-enriched soil; flue-cured tobacco; absorption; transport

硒是人和动物必需的微量元素之一,对增强抗氧化、提高免疫力和预防癌症等有重要作用^[1-2]。适量的硒能够促进植物生长,降低植物脂质过氧化反应,缓解某些逆境条件对植物产生的危害^[2-4]。研究表明,烟草叶片可以富集硒,尤其是叶片中的可溶性蛋白质对硒有较高的富集性,可溶性蛋白质的含硒量达 $77.8 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,高纯度的含硒组分 I 蛋白具有很高的价值^[5]。因此,通过在富硒土壤上种植烤烟,并能够有效提高烟叶的硒含量,将能显著提高烟叶可溶性蛋白质含量,从而提升烟叶利用价值。目前富硒植物产品主要依靠土壤或叶面添加外源硒来获得^[6-7],土壤施硒或叶面喷硒既提高了生产成本,又存在潜在的环境风险,很难获得硒含量稳定的产品^[8]。利用富硒土壤资源提高作物硒含量,是一条理想的途径。世界土壤自然含硒量在 $0.01 \sim 2.0 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,一般土壤中硒含量约 $0.4 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ^[2],中国土壤硒元素背景平均值为 $0.215 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ^[9]。经安徽省国土资源局调查,池州市部分地区土壤具有富硒特色。其中,贵池区境内土壤总硒量变幅为 $0.21 \sim 4.19 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,平均为 $0.72 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ^[10],远高于全国平均水平($0.215 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)^[9]。同时,池州市是中国重要的烟叶生产基地,其植烟土壤总硒量平均值 $0.66 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ (变幅为 $0.27 \sim 1.99 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,本课题组数据未发表),具备生产优质富硒烟叶的自然资源条件。

目前已有大量关于硒对植物影响方面的研究,普遍认为硒对植物的生长有双重作用,适量的硒能够提高作物产量,硒浓度过高则有抑制作用^[3,11-12]。林匡飞等^[13]的研究表明,土壤添加低浓度 Se($<8 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)对水稻根系和地上部生物量有促进作用;而高浓度 Se($>16 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)则明显抑制水稻根系和地上部生物量,并且对抗氧化酶系统产生胁迫效应。魏丹等^[14]的研究也认为叶面喷施硒肥对

水稻有不同程度的增产效应。而周鑫斌等^[15-16]研究表明,叶面喷施硒肥对水稻的产量并无显著影响。可见,Se 对植物生长发育和产量的影响因植物种类不同而具有较大差异,并且与土壤理化性状和培养条件密切相关。虽然外源硒对植物生长和产量影响已有大量研究^[8,13,15-16],但关于富硒土壤中硒对植物影响的研究较少。本研究根据谭见安^[17]划分的土壤中总硒含量的界限值,以及池州市植烟土壤总硒量的情况,选择池州市烟区 4 种不同含硒土壤,研究不同含硒土壤对烤烟含硒量的影响,探讨硒从土壤向烟株迁移转运的规律,为合理生产开发富硒烟叶和农业生产中硒的合理利用提供理论依据。

1 材料和方法

1.1 试验地点及土壤性状

试验在安徽省池州市烟草公司育苗基地试验大棚内进行,供试土壤为池州市含硒量不同的 4 种土壤($\text{Se}_{0.30}$ 、 $\text{Se}_{0.45}$ 、 $\text{Se}_{1.00}$ 、 $\text{Se}_{1.75}$),土壤取自池州市主要植烟区域,供试土壤基本理化性质见表 1。

1.2 供试品种

烤烟品种‘云烟 87’种子由池州市烟草公司提供。

1.3 试验设计及方法

盆栽试验共设 4 个处理,即主产烟区 3 种富硒土壤($\text{Se}_{0.45}$ 、 $\text{Se}_{1.00}$ 、 $\text{Se}_{1.75}$)和非富硒土壤(对照, $\text{Se}_{0.30}$)处理。将风干、压碎和过筛后的土壤每盆按 15 kg 称重装土,每盆栽烟 1 株,每处理 3 次重复,每重复 6 株烟,按随机区组排列。根据池州市优质烤烟生产技术方案进行施肥,肥料配比为($\text{N} : \text{P}_2\text{O}_5 : \text{K}_2\text{O} = 1 : 1.5 : 3$),即每盆施用烟草专用肥($\text{N} : \text{P}_2\text{O}_5 : \text{K}_2\text{O} = 9 : 13.5 : 22.5$) 45.45 g 、硝酸钾 13.64 g 、硫酸钾 4.55 g ,将肥料和土壤充分混匀后装盆。在适宜移栽时间选择长势一致的烟苗,移栽到花盆的中心,栽培深度一致。另外,烟株按照池州市优质烤烟

表 1 供试土壤基本理化性质

Table 1 Basic physical and chemical properties of tested soils

土壤类型 Soil type	pH	有机质 Organic matter /($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	碱解氮 Available N /($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	速效磷 Available P /($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	速效钾 Available K /($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	全硒 Total Se /($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)
$\text{Se}_{0.30}$ (CK)	4.76	29.15	170.91	57.23	78.57	0.30
$\text{Se}_{0.45}$	4.85	19.37	120.41	51.08	42.57	0.45
$\text{Se}_{1.00}$	5.01	24.25	123.75	33.79	66.86	1.00
$\text{Se}_{1.75}$	4.83	34.74	163.89	28.90	46.62	1.75

生产技术方案要求进行病虫害防治、抹杈打顶等管理,并适时进行烟叶采收、烘烤等。

1.4 测定项目及方法

1.4.1 土壤理化性状 按常规方法测定土壤 pH、有机质、碱解氮、速效磷、速效钾等理化性状^[18]。

1.4.2 土壤硒含量 土壤硒含量测定参照《土壤中全硒的测定》(NY/T 1104-2006)的方法并做适当调整:准确称取 0.200 0 g 土壤样品于 100 mL 的三角瓶,加入 10 mL 混合酸(HNO₃:HClO₄=4:1),盖上小漏斗,静置过夜。次日置于自动控温消化炉上硝化至无色并冒白烟,取下稍冷后加入 5 mL HCl(1:1),继续加热至无色并冒白烟,取下稍冷却后再加 5 mL HCl(1:1),冷却至室温后,用去离子水转入 25 mL 容量瓶中,定容至刻度并摇匀,采用 AFS-230E 型原子荧光光谱仪(北京光海)测定硒含量。

1.4.3 烟株及烤后烟叶硒含量 烟叶全部成熟采收后,将根、茎分开并洗净,与烤后的烟叶于 65℃ 烘干至恒重,粉碎,过 60 目筛备用。烟株根、茎、叶的硒含量测定参照周鑫斌等^[15]等方法并做适当调整:准确称取 0.500 0 g 的干样于干净的微波消解仪内罐中,加入浓硝酸 10 mL、过氧化氢 2 mL,按微波消解仪操作规程进行样品分解,待消解完成冷却至室温后取出内罐,用洗瓶将溶液移入 50 mL 烧杯中,加高氯酸 0.5 mL,在电热板上溶样至高氯酸冒烟取下,冷却后用水定容至 50 mL,摇匀,分取 10 mL,采用 X-SERIES II 型电感耦合等离子体质谱仪(美国 Thermo 公司)测定 Se 含量。

1.4.4 硒的吸收系数和转移系数 吸收系数(RAI)为作物根中某物质的含量与土壤中该物质的含量之比;初级转移系数(PTI)是指作物茎中某物质含量与根系中该物质含量之比;次级转移系数(STI)是指作物叶中某物质的含量与茎中该物质的含量之比,反映作物由茎部向叶运转该物质的能力^[19-20]。依据上述土壤和植株中硒含量测定结果计算烟草硒的 RAI、PTI、STI。

1.5 数据统计分析

数据用 Excel、SPSS 19.0 等软件分析,用 Duncan 新复极差法对不同处理进行显著性检验。

2 结果与分析

2.1 富硒土壤对烤烟生物量的影响

由图 1 可见,烤烟干物质质量在不同含硒量土壤中差异较大,并随着土壤硒含量的升高呈先增加后降低趋势,且根系、茎秆、叶片以及整株的干重均以

Se_{0.45} 处理时最大,分别为 71.9、89.7、146.0 和 307.5 g·plant⁻¹。与对照(Se_{0.30})相比,Se_{0.45} 和 Se_{1.00} 处理不同程度增加了烟株的根系、茎秆、叶片的干重,烟株的总干重(整株)分别显著增加了 11% 和 6%(P<0.05);然而,当土壤全硒含量达到 1.75 mg·kg⁻¹(Se_{1.75})时,烤烟根系、茎秆、叶片的干重和总干重则显著低于对照,降幅分别是对照的 11%、27%、25% 和 22%。可见,适宜硒含量土壤能显著促进烟株生长,但硒含量过高反而有抑制作用。

2.2 富硒土壤对烤烟各器官硒含量的影响

由表 2 可见,富硒土壤(0.45~1.75 mg·kg⁻¹ Se)中烤烟植株各器官硒含量均显著高于对照(Se_{0.30}),Se_{0.45}、Se_{1.00} 和 Se_{1.75} 处理烤烟根系硒含量分别为对照的 1.5、1.7、1.9 倍,茎秆硒含量分别为对照的 1.4、1.6 和 1.6 倍,而叶片硒含量分别为对照的 1.6、2.1 和 2.3 倍,均表现出随土壤硒含量的提高而增加的趋势。在各富硒土壤处理条件下,烤烟植株硒含量均呈现根系>叶片>茎秆的特点,如根系硒含量在对照处理下分别是茎秆和叶片的 9.5

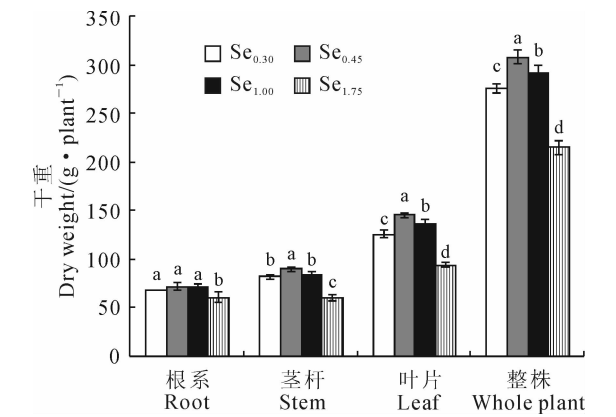


图 1 富硒土壤烤烟生物量的差异分析
小写字母不同表示处理间差异达到 0.05 显著水平。下图同
Fig.1 Biomass of flue-cured tobacco in Se-enriched soil
Different letters indicated significant differences among treatments at 0.05 level. The same as below

表 2 富硒土壤上烤烟各器官的含硒量
Table 2 Se concentration of flue-cured tobacco in Se-enriched soil/(mg·kg⁻¹)

处理 Treatment	Se _{0.30}	Se _{0.45}	Se _{1.00}	Se _{1.75}
根系 Root	0.322 d	0.470 c	0.559 b	0.624 a
茎秆 Stem	0.034 c	0.046 b	0.053 a	0.056 a
叶片 Leaf	0.097 c	0.154 b	0.203 a	0.225 a

注:同一行数据小写字母不同表示差异达到 0.05 显著水平。
Note: Different letters in the same column indicated significant differences at 0.05 level among treatments.

和 3.3 倍,而在 $Se_{0.45}$ 、 $Se_{1.00}$ 和 $Se_{1.75}$ 处理时分别是 10.2 和 3.1 倍、10.5 和 2.8 倍、11.1 和 2.8 倍;随着土壤硒含量的增加,烤烟根系与茎秆之间的硒含量差异增大,而根系与叶片之间的硒含量差异则呈降低的趋势。可见,烤烟各器官硒含量随着土壤硒含量的提高而增加,同时随着根、叶、茎的顺序递减。

2.3 富硒土壤对烤烟各器官硒富集量及分布影响

烤烟不同部位硒的富集量以该部位的干物质量与其硒含量相乘的值表示。图 2 显示,富硒土壤中烤烟根系、茎秆和叶片等部位硒的富集量均显著高于对照,整株烟叶对硒的积累量亦显著高于对照; $Se_{0.45}$ 、 $Se_{1.00}$ 和 $Se_{1.75}$ 处理烤烟整株的硒积累量分别为对照的 1.6、1.9、1.7 倍,其中 $Se_{1.00}$ 处理整株的硒积累量最大($72.0 \mu g \cdot plant^{-1}$),显著高于其他处理。

同时,在各处理条件下,烤烟的硒富集量均呈现根系>叶片>茎秆的特点。由于不同硒含量土壤中烤烟生长发育有较大差异,从而导致了单株富硒量存在较大差异。在土壤全硒含量为 $0.30 \sim 1.75 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 范围内,烤烟各部位硒的富集量随土壤硒浓度的升高呈先增加后降低的趋势,并均在 $1.00 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 含量土壤($Se_{1.00}$)中达到最大值;但当土

壤全硒含量达到 $1.75 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时,烤烟根系、茎秆和叶片硒的积累量分别比 $1.00 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 处理降低 6%、24% 和 23%。总之,烤烟对土壤硒积累量以根系最高,其次是叶片,茎秆最少;在各处理中则以 $Se_{1.00}$ 最高, $Se_{1.75}$ 和 $Se_{0.45}$ 居中,对照最低。

2.4 富硒土壤对烤烟硒吸收和转运效率的影响

由表 3 可见,烤烟根系对不同含硒量土壤硒的吸收系数为 $0.36 \sim 1.08$ 。其中,对照处理根系硒的吸收系数最高(1.08),显著高于其他处理,并且随着土壤中硒含量的增加而显著降低。与吸收系数表现相似,烤烟对硒的初级转运系数也随着土壤中硒含量的增加而显著降低。然而,烤烟对硒的次级转运系数与吸收系数和初级转运系数不同,以对照处理的次级转运系数最低(2.84);与对照相比, $Se_{0.45}$ 、 $Se_{1.00}$ 和 $Se_{1.75}$ 处理烤烟硒的次级转运系数分别提高了 19%、36% 和 42%,并呈现随着土壤中硒含量的增加而显著增加的趋势。

3 讨论

已有的研究表明硒对植物的生长有双重作用,适量的硒能够增强植物的抗氧化能力,促进植物的生长,而硒浓度过高则对植物产生毒害作用^[3,11-12]。本研究发现, $Se_{0.45}$ 和 $Se_{1.00}$ 处理烟株的总干重分别比对照($Se_{0.30}$)显著增加了 11% 和 6%,而 $Se_{1.75}$ 处理植株总干重则比对照显著降低 22%,该研究结果与外源硒对烟草^[7,21]、马铃薯^[22]、小白菜^[23] 等生长作用的结论一致。然而,由于各处理土壤基本理化性状有一定差异,不同硒含量土壤对烤烟生长发育的影响可能与土壤肥力有一定关系,尤其是各处理土壤有机质、速效磷和速效钾差异较大。王强盛等^[24] 发现在一定范围内增施钾肥可以提高产量;王伟妮等^[25] 研究认为氮、磷、钾肥的施用均可以显著提高水稻产量。虽然 $Se_{0.30}$ 处理土壤的有机质、速效磷和速效钾均较高,但其烟株干重却显著低于 $Se_{0.45}$ 和 $Se_{1.00}$ 处理。本研究证明土壤硒含量对烤烟生长发育有较大的影响,适量的硒能够增加烟叶产量。不同植物耐硒能力存在着差异,硒从对植物有益到产生毒害作用的浓度范围非常狭窄,因此,对一定的生物体,硒缺乏、必需和毒害剂量间的差异非常小^[26-27]。本研究发现,土壤全硒含量不超过 $1.00 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时能够促进烟株根系、茎秆、叶片的生长,增加烟株的干物质量;而土壤全硒含量达到 $1.75 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时,烤烟生长则受到抑制,烟株干物质含量低于对照。可见,土壤中硒对烤烟生长起促进和

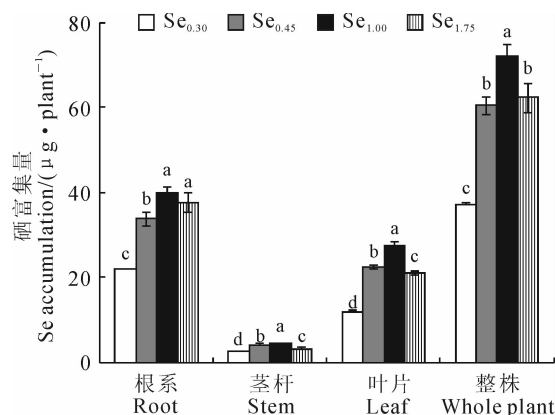


图 2 富硒土壤烤烟各器官硒富集量

Fig. 2 Se accumulation of flue-cured tobacco in Se-enriched soil

表 3 烤烟对富硒土壤硒的吸收和转运系数

Table 3 Se absorption and transportation coefficient of flue-cured tobacco in Se-enriched soil

处理 Treatment	吸收系数 Root absorption index	初级转运系数 Primary transportation index	次级转运系数 Secondary transportation index
$Se_{0.30}$	1.08 a	0.106 a	2.84 b
$Se_{0.45}$	1.03 b	0.097 b	3.37 ab
$Se_{1.00}$	0.56 c	0.094 c	3.86 a
$Se_{1.75}$	0.36 d	0.090 d	4.03 a

抑制作用的含量范围亦非常狭窄,但烤烟在高含硒量土壤中生长受到抑制的原因有待进一步探讨。因此,在选择富硒土壤种植烤烟或其他作物时应慎重考虑所种植作物的土壤有益和毒害硒含量范围,以实现富硒产品的高产、稳产、优质、高效。

本研究结果表明富硒土壤种植烤烟能够显著大幅提高烟株各部位硒的含量,并且其含量与土壤的硒含量密切相关。杜前进等^[28]研究证明富硒土壤中水稻根、茎、叶和籽粒中硒的含量均显著高于低硒土壤中相应部位的硒含量。同样,Xu等^[7]和许自成等^[21]也发现外源添加硒能够显著提高烤烟硒的含量。然而,由于本研究各处理土壤理化性状有一定差异,植物对Se的吸收和转运会受到营养元素,如硫和氮的影响^[29],因此,烤烟Se的积累与土壤矿质营养的关系有待进一步研究。本研究表明,烤烟能充分吸收土壤中的硒,在富硒土壤种植烤烟能够提高烤烟含硒量。杨兰芳等^[30]研究表明,低硒土壤施硒后土壤硒含量与烟叶含硒量也呈极显著正相关(相关系数为0.995),说明烤烟能吸收利用土壤中的硒。因此,生产上直接利用富硒土壤中的硒,不必添加外源硒肥,同样能达到调节和提高作物Se含量的目的,以满足人和动物对Se营养的需求。

由于植物不同部位对硒的吸收、转运能力不同,导致体内硒含量各异。本研究中烤烟在同一含硒量土壤的条件下,不同部位的硒含量存在较大差异,基本表现为根系>叶片>茎秆的特点,并且随着土壤硒含量的增加,烤烟根系与茎秆之间的硒含量差异增大(从10.2倍增加到11.1倍),而根系与叶片的差异则减少(从3.1倍降低为2.8倍)。烤烟各器官含硒量的分配规律与杨兰芳等^[30]在烤烟、杜前进等^[28]在水稻、郝玉波等^[31]在玉米中的研究结果一致。有研究认为,硒从植物根系到植株的运转及分配取决于植物吸收硒的形态。Arvy等^[28]证实了豆科植物根系吸收的硒酸盐被大量运转到叶片累积,而吸收量较小的亚硒酸盐和有机态硒只有少量被运转并累积于叶片。此外,本研究发现高浓度硒土壤中烟株根系与叶片硒含量差异较小与根系吸收系数的显著降低和次级转运系数的显著增加有密切关系。根系吸收系数(RAI)反映了土壤中该物质的生物有效性^[19-20],RAI值越大,说明土壤中Se越易被烤烟吸收利用,Se的生物有效性越大。本研究中,随着土壤硒含量的增加,烟株根系硒的吸收系数显

著降低(由对照的1.08降低到Se_{1.75}处理的0.36),说明即使土壤硒含量较低时,烤烟根系也能从土壤中富集硒;而高浓度下,Se的生物有效性显著降低可能与烤烟对硒的吸收饱和有关。次级转移系数(STI)反映作物由茎部向叶运转该物质的能力^[19-20]。本研究中烤烟Se的STI值在2.84~4.03之间,说明烤烟茎秆中Se很容易运输到叶片中,可能是因为通过根系进入茎秆的Se形态易于在体内运转,因为植物吸收的亚硒酸盐大部分留在根部,而大量的硒酸盐能运转到叶片并积累^[32]。烤烟STI值呈现随着土壤中硒含量的增加而显著增加的趋势。因此,烤烟在土壤高硒浓度下根系吸收系数的降低和次级转运系数的提高,说明了随着土壤硒含量的增加根系吸收硒的相对量有所减少,而叶片则仍然表现出对硒的富集趋势。

烤烟各部位硒的富集能力和硒的有效利用程度与烟叶的品质和经济效益密切相关。本研究发现,烟株各部位硒的积累量与土壤硒含量并不一致,且烤烟对硒的积累量存在较大差异。土壤全硒含量在0.30~1.00 mg·kg⁻¹时,烟株各部位以及整株硒的富集量均呈现显著增加的趋势,并以Se_{1.00}处理(1.00 mg·kg⁻¹)整株硒的富集量最高(72 μg·plant⁻¹),为对照的1.9倍;而当土壤全硒量为1.75 mg·kg⁻¹时(Se_{1.75}),其烟株硒的积累量却低于Se_{1.00}处理,主要原因是Se_{1.75}条件下烤烟各器官干物质含量均低于Se_{1.00}处理的烟株。可见,烤烟对土壤硒的积累量高低并不与土壤硒含量一致,植株要获得较高的硒富集量,一方面要求植株能够吸收较多的硒以增加体内硒的浓度,另一方面要求植株保持较好的生长以保证较高的生物量。

综上所述,本研究表明:适宜硒含量土壤能促进烤烟生长,而过高硒含量土壤则抑制烤烟的生长;富硒土壤种植烤烟能够显著提高烟株根系、茎秆和叶片的硒含量;同一含硒量土壤条件下,烤烟各部位硒含量由高到低依次为根系、叶片、茎秆;随着土壤硒含量增加,根系对硒的吸收效率显著降低,而叶片对硒的转运则呈现提高的趋势,叶片能保持较高的积累硒的能力。虽然本研究组正在深入开展富硒土壤对作物生长和硒积累影响的多个试验点的大田验证研究工作,但本研究结果仍可为确定对作物有益的土壤硒含量范围值以及富硒产品的高产、稳产、优质、高效生产与开发提供了理论基础和科学依据。

参考文献:

- [1] RAYMA M P. Selenium in cancer prevention: a review of the evidence and mechanism of action[J]. *Proceedings of the Nutrition Society*, 2005, **64**(4): 527—542.
- [2] ZHU Y G, PILON-SMITS E A H, ZHAO F J, *et al.* Selenium in higher plants: understanding mechanisms for biofortification and phytoremediation[J]. *Trends Plant Science*, 2009, **14**(8): 436—442.
- [3] HASANUZZAMAN M, HOSSAIN M A, FUJITA M. Selenium in higher plants: physiological role, antioxidant metabolism and abiotic stress tolerance[J]. *Journal of Plant Sciences*, 2010, **5**: 354—375.
- [4] ZHANG Y Y(张艳嫣), CHEN D(陈丹), TAN Y L(谭艳玲), *et al.* Alleviating effects of exogenous Selenium on *Dendrobium candidum* seedling under low temperature stress and the change of its antioxidative physiology characteristics[J]. *Acta Bot. Boreal.-Occident. Sin.* (西北植物学报), 2013, **33**(4): 747—754(in Chinese).
- [5] GAO X Y(高学云), ZHANG J S(张劲松), HUANG ZH(黄镇), *et al.* Effect of leaf-spray with Na_2SeO_3 on the Se bioavailability of tobacco leaf and its soluble protein[J]. *Acta Tabacaria Sinica* (中国烟草学报), 1997, **3**(4): 49—52(in Chinese).
- [6] HU Q H, CHEN L C, XU J, *et al.* Determination of selenium concentration in rice and the effect of foliar application of Se-enriched fertilizer or sodium selenite on the selenium content of rice[J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2002, **82**(8): 869—872.
- [7] XU Z C, SHAO H F, ZHAO S, BI Q W. Effects of selenium spraying on tobacco physiological properties[J]. *Journal of Food Agriculture and Environment*, 2011, **9**(3—4): 118—123.
- [8] ZHANG L H, HU B, LI W, *et al.* OsPT2, a phosphate transporter, is involved in the active uptake of selenite in rice[J]. *New Phytologist*, 2014, **201**: 183—191.
- [9] WEI F SH(魏复盛), YANG G ZH(杨国治), JIANG D ZH(蒋德珍), *et al.* The basic statistics and its characteristics of the soil element background values in China[J]. *Environmental Monitoring in China* (中国环境监测), 1991, **7**(1): 1—6(in Chinese).
- [10] 赵学杏. 池州市水稻富硒栽培技术与推广[D]. 北京: 中国农业科学院, 2010.
- [11] YAO X, CHU J, WANG G. Effects of selenium on wheat seedlings under drought stress[J]. *Biological Trace Element Research*, 2009, **130**(3): 283—290.
- [12] RAMOS S J, FAQUIN V, GUILHERME L R G, *et al.* Selenium biofortification and antioxidant activity in lettuce plants fed with selenate and selenite[J]. *Plant Soil and Environment*, 2010, **56**: 584—588.
- [13] LIN K F(林匡飞), XU X Q(徐小清), JIN X(金霞), *et al.* Eco-toxicological effects of selenium and its critical value on *Oryza sativa* [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2005, **16**(4): 678—682(in Chinese).
- [14] WEI D(魏丹), YANG Q(杨谦), CHI F Q(迟凤琴), *et al.* Effect of foliage dressing Se fertilizer on the rice in the field[J]. *Soils and Fertilizers* (土壤肥料), 2005, **38**(1): 39—41(in Chinese).
- [15] ZHOU X B(周鑫斌), SHI W M(施卫明), YANG L ZH(杨林章). Genotypical differences and characteristics of Se uptake and accumulation in rice[J]. *Soils* (土壤), 2007, **39**(5): 731—736(in Chinese).
- [16] ZHOU X B(周鑫斌), SHI W M(施卫明), YANG L ZH(杨林章). Effect of foliar application of selenite on selenium accumulation and distribution in rice[J]. *Acta Pedologica Sinica* (土壤学报), 2007, **44**(1): 73—78(in Chinese).
- [17] 谭见安. 环境硒与健康[M]. 北京: 人民卫生出版社, 1989: 219—241.
- [18] 张甘霖, 龚子同. 土壤调查实验室分析方法[M]. 北京: 科学出版社, 2012: 55—113.
- [19] CARBONELL-BARRACHINA A A, BURLÓ-CARBONELL F, MATAIX-BENEYTO J. Arsenic uptake, distribution, and accumulation in bean plants: effect of arsenite and salinity on plant growth and yield[J]. *Journal of Plant Nutrition*, 1997, **20**(10): 1419—1430.
- [20] HU ZH SH(胡钟胜), ZHANG G Y(章钢娅), WANG G ZH(王广志), *et al.* Effect of remediators on As uptake by tobacco in contaminated soil[J]. *Soils* (土壤), 2006, **38**(2): 200—205(in Chinese).
- [21] XU Z CH(许自成), SHAO H F(邵惠芳), SUN SH G(孙曙光), *et al.* Effects of selenium added to soil on physiological indexes in flue-cured tobacco[J]. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2011, **31**(23): 7179—7187(in Chinese).
- [22] YIN J Y(殷金岩), GENG Z CH(耿增超), MENG L J(孟令军), *et al.* Effect of different selenium fertilizers on the yield, selenium contents and qualities of potatoes[J]. *Journal of Northwest A&F University* (Nat. Sci. Edi.) (西北农林科技大学学报·自然科学版), 2012, **40**(9): 122—127(in Chinese).
- [23] WU X P(吴雄平), LIANG D L(梁东丽), BAO J D(鲍俊丹), *et al.* Effects of different concentrations of selenate and selenite on growth and physiology of Chinese cabbage[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae* (环境科学学报), 2009, **29**(10): 2163—2171(in Chinese).
- [24] WANG Q SH(王强盛), ZHEN R H(甄若宏), DING Y F(丁艳锋), *et al.* Effects of potassium fertilizer application rates on plant potassium accumulation and grain quality of Japonica rice[J]. *Scientia Agricultura Sinica* (中国农业科学), 2004, **37**(10): 1444—1450(in Chinese).
- [25] WANG W N(王伟妮), LU J W(鲁剑巍), HE Y Q(何予卿), *et al.* Effects of N, P, K fertilizer application on grain yield, quality, nutrient uptake and utilization of rice[J]. *Chin. J. Rice Sci.* (中国水稻科学), 2011, **25**(6): 645—653(in Chinese).
- [26] SAGER M. Selenium in agriculture, food and nutrition[J]. *Pure and Applied Chemistry*, 2006, **78**(1): 111—133.
- [27] VAN HOEYK D. A tale of two toxicities: malformed selenoproteins and oxidative stress both contribute to selenium stress in plants[J]. *Annals of Botany*, 2013, **112**(6): 965—972.
- [28] DU Q J(杜前进), ZHANG Y F(张永发), *et al.* The absorption and distribution mechanisms of selenium from Hainan selenium-rich soil by different rice varieties[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China* (中国土壤与肥料), 2009, (6): 37—40(in Chinese).
- [29] MA Y H(马友华), DING R X(丁瑞兴), ZHANG J ZH(张继榛), *et al.* Interaction of selenium and sulfur in plants[J]. *Plant Physiology Communications* (植物生理学通讯), 2001, **37**(2): 161—166(in Chinese).
- [30] YANG L F(杨兰芳), DING R X(丁瑞兴). Effects of selenium application on selenium content and distribution in flue-cured tobacco grown on Se-low soils[J]. *Journal of Nanjing Agricultural University* (南京农业大学学报), 2000, **23**(1): 47—50(in Chinese).
- [31] HAO Y B(郝玉波), LIU H L(刘华琳), CI X K(慈晓科), *et al.* Effects of applying selenium on selenium allocation, grain yield, and grain quality of two maize cultivars[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2012, **23**(2): 411—418(in Chinese).
- [32] ARVY M P. Selenate and selenite uptake and translocation in bean plants (*Phaseolus vulgaris*) [J]. *Journal of Experimental Botany*, 1993, **44**(6): 1083—1087.