

DOI: 10.5846/stxb202004180925

刘俏, 林勇, 胡小飞, 吴安琪, 叶学敏, 陈伏生. 氮磷肥对茶树锌硒等中微量元素吸收与分配的影响. 生态学报, 2021, 41(2): 637-644.

Liu Q, Lin Y, Hu X F, Wu A Q, Ye X M, Chen F S. Influences of nitrogen and phosphorus fertilizers on the absorption and accumulation of zinc, selenium, and other trace elements in tea plants. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(2): 637-644.

氮磷肥对茶树锌硒等中微量元素吸收与分配的影响

刘 俏^{1,2}, 林 勇¹, 胡小飞³, 吴安琪¹, 叶学敏¹, 陈伏生^{1,2,*}

1 江西农业大学林学院江西省森林培育重点实验室, 南昌 330045

2 江西农业大学鄱阳湖流域森林生态系统保护与修复国家林业和草原局重点实验室, 南昌 330045

3 南昌大学管理学院, 南昌 330031

摘要: 锌(Zn)和硒(Se)及其他中微量元素(铝 Al, 钙 Ca, 铁 Fe, 铜 Cu, 锰 Mn)是茶叶品质的重要指标,但茶树吸收 Zn、Se 能力及氮(N)磷(P)肥影响中微量元素吸收与分配的过程尚不清楚。以红壤丘陵区福鼎大白茶树为研究对象,开展 Zn+Se、Zn+Se+N、Zn+Se+P、Zn+Se+N+P 和对照共 5 种处理 3 次重复随机化区组试验,处理第 3 年春季分茶叶、成熟叶、吸收根、运输根和储藏根采集植物样品,测定其元素含量。结果表明,茶树地上和地下器官 Zn 和 Se 及其他中微量元素对 N、P、Zn、Se 添加的响应具分异性。与对照相比,茶树地上和地下器官 Zn 和 Se 含量均显著增加,与 Zn+Se 相比,施 N 和/或 P 肥仅显著提高茶叶和成熟叶 Se 含量($P<0.05$);与对照相比,施肥处理均显著提高吸收根和运输根 Al、Fe 含量以及储藏根 Cu 含量;运输根 Mn 含量表现为 Zn+Se+N、Zn+Se+P、Zn+Se+N+P 显著高于对照,储藏根 Mn 含量为 Zn+Se+N+P 显著高于其他处理;茶树各器官 Ca 含量对施肥处理无显著响应。此外,茶叶和成熟叶的 Zn 含量与吸收根显著正相关,而 Se 含量则与储藏根显著正相关。茶树具有吸收和积累 Zn 和 Se 的能力,而施 N、P 肥有助于提高茶叶 Se 含量,研究结果为红壤丘陵区培育高品质锌硒茶及营建生态高值茶园提供了依据。

关键词: 茶树; 锌; 硒; 氮磷肥; 中微量元素

Influences of nitrogen and phosphorus fertilizers on the absorption and accumulation of zinc, selenium, and other trace elements in tea plants

LIU Qiao^{1,2}, LIN Yong¹, HU Xiaofei³, WU Anqi¹, YE Xuemin¹, CHEN Fusheng^{1,2,*}

1 Jiangxi Provincial Key Laboratory of Silviculture, College of Forestry, Jiangxi Agricultural University, Nanchang 330045, China

2 Key Laboratory of Forest Ecosystem Protection and Restoration in Poyang Lake Watershed, Jiangxi Agricultural University, Nanchang 330045, China

3 School of Management, Nanchang University, Nanchang 330031, China

Abstract: Zinc (Zn), selenium (Se), and other trace elements, such as aluminum (Al), calcium (Ca), iron (Fe), copper (Cu), and manganese (Mn), are important indexes of tea quality. In *Camellia sinensis* the uptake mechanism of Zn and Se and the internal cycles of trace elements in response to nitrogen (N) and phosphorus (P) fertilizers are unclear. The tea plant “Fudingdabai”, located in the red-soil hilly region of China, was selected for a randomized block experiment with three replications of five treatments: Zn+Se, Zn+Se+N, Zn+Se+P, Zn+Se+N+P, and a control (CK). After three years of fertilization, trace element concentrations were measured in the tea and mature leaves and the absorptive, transportive, and storative roots. The concentrations of Zn, Se, and other trace elements in the above- and below-ground organs exhibited divergent responses to the treatments. In all of the organs, Zn and Se were significantly elevated in the fertilized plots. In the tea and mature leaves, Se concentrations significantly increased in the Zn+Se treated plots with N and/or P. Al and Fe (in the absorptive and transportive roots) and Cu (in the storative roots) were significantly elevated in the fertilized plots. Mn

基金项目: 国家自然科学基金项目(31560152, 31770749, 31870427)

收稿日期: 2020-04-18; 网络出版日期: 2020-11-27

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: chenfush@hotmail.com

was more prevalent in the transportive roots of the Zn+Se+N, Zn+Se+P, and Zn+Se+N+P treated plots. In the storative roots, Mn increased only in the Zn+Se+N+P treatment. Ca did not differ. There was a positive correlation between Zn in the tea and mature leaves and Zn in the absorptive roots, while Se in the tea and mature leaves was positively correlated with Se in the storative roots. These results suggest that tea plants can absorb and accumulate Zn and Se, and N and P fertilizers increase Se levels in tea leaves. This study provides a basis for cultivating high-quality tea with abundant Zn and Se and for establishing tea gardens in the red-soil hilly region of China.

Key Words: *Camellia sinensis*; zinc; selenium; nitrogen and phosphorus fertilizers; trace elements

锌(Zn)和硒(Se)是人体必不可少的元素^[1-2],具有保护心脏、提高免疫力、抗肿瘤和衰老等作用^[3-5]。调查研究表明,我国大部分人口对Zn和Se这两种元素摄取不足^[6-7]。为缓解人体Zn和Se缺乏的症状,可种植从自然土壤中吸收富集Zn和Se的作物,通过直接食用(如大米和茶籽油)或浸泡饮用(如茶叶)等方式供人体吸收利用,从而有效补充^[3,6]。与此同时,Zn和Se在植物体的含量虽然不高,但参与植物许多重要的生理代谢过程,在植物生长发育过程中也有着不可或缺的作用^[8-9]。Zn和Se如何被作物吸收、利用一直受到关注,但其在作物体内吸收与分配过程还有待研究。

氮(N)、磷(P)是作物生长所需要的矿质营养元素^[10],对作物生理功能和生长发育具有重要影响。N添加可促进根系活力、增加叶绿素含量;P添加有利于多发新根,提高作物抗寒、抗旱能力^[11]。同时,N、P易与Zn、Se等中微量元素发生耦合作用^[12],进而影响作物对矿质营养的吸收。研究表明,N和/或P添加将增加或减少作物Zn、Se、铝(Al)、钙(Ca)、铁(Fe)、铜(Cu)和锰(Mn)等元素的含量^[12-14];而Zn、Se等中微量元素的有效性增加会对作物N、P利用起催化或抑制作用。矿质元素此消彼长的关系不仅影响作物品质和产量,且与作物主要生化成分密切相关。植物体不同器官对矿质元素的吸收利用具有选择性^[15],故各器官对N、P与中微量元素调控的吸收积累存在差异,但有关N、P与Zn、Se等中微量元素耦合在植物体不同器官的元素分配机制尚不明确^[16]。因此,探讨N、P对中微量元素吸收积累的调控,可揭示常规施肥对中微量元素迁移和富集的潜在影响,为食品安全和农业生产提供参考。

茶树(*Camellia sinensis*)是亚热带重要的经济作物,喜生于光热条件好、空气湿度大的酸性丘陵地带;江西独特的地质地貌,使其成为我国重要的茶树种植区。微量元素对饮茶者健康有益,是茶叶自然品质的重要指标^[17],而茶树又具有吸收和富集Zn、Se等中微量元素的潜能。基于此,本研究以福鼎大白茶树为对象,通过往土壤中添加Zn、Se并进行N、P调控,探讨不同施肥处理对茶树不同器官Zn、Se、Al、Ca、Fe、Cu和Mn含量的影响,拟重点回答以下问题:(1)外源Zn+Se添加是否提高茶树体,特别是茶叶Zn和Se含量;(2)N、P肥是否影响茶树对Zn、Se的吸收及其分配,从而改变茶叶Zn和Se含量;(3)Zn、Se、N和/或P肥添加如何交互作用于茶树其他中微量元素的吸收和分配。研究结果为栽培含Zn富Se茶提供一定的参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于江西省南昌县黄马乡(28°20' N, 116°01' E),平均海拔约30 m。该区为亚热带季风气候区,气候温和、降雨充沛,年均气温17.5℃左右,年降雨量1700 mm左右,年平均相对湿度为78.5%。研究样地处于典型的红壤丘陵区,保水保肥效果较好。茶树种植土壤有机质为19.90 g/kg、全氮为1.50 g/kg、全磷为0.87 g/kg、矿质氮为8.43 mg/kg、有效磷为15.80 mg/kg、pH为4.05^[12],适合茶树生长。

1.2 试验设计

本实验以种植于红壤丘陵区30 a生福鼎大白茶树为研究对象,平均株高1.2 m,平均主干基径3—5 cm。按5种处理3次重复完全随机化区组进行试验设计。每个区组选取5个大小为3 m×4 m样方且间距不小于3 m,每个样方种植30株(3行×10株)福鼎大白茶树,样方内设2空白条带之间夹着1样地条带,随机布设

5 种施肥处理,每个处理之间有间隔。5 种处理每块样方施肥种类及 1 月的剂量分别为:Zn+Se (2.53 g ZnSO₄·7H₂O +21.9 mg Na₂SeO₃);Zn+Se+N(2.53 g ZnSO₄·7H₂O +21.9 mg Na₂SeO₃+14.29 g NH₄NO₃);Zn+Se+P(2.53 g ZnSO₄·7H₂O +21.9 mg Na₂SeO₃+9.68 g NaH₂PO₄);Zn+Se+N+P (2.53 g ZnSO₄·7H₂O +21.9 mg Na₂SeO₃+14.29 g NH₄NO₃+9.68 g NaH₂PO₄) 和对照 (CK,仅灌水)。5 种施肥处理每次均按照对应的化学试剂 (均为分析纯)和施肥量溶解于 12 L 水中,均匀的灌溉 12 m² 土壤(距离根茎 30 cm 的地方)。土壤中 Zn、Se、N 和 P 每次添加量分别相当于 33.3 mg/m²、0.833 mg/m²、0.417 g/m²和 0.208 g/m²。2011 年 3 月开始进行施肥 (选择连续 3 天以上天晴)处理,且每月进行一次施肥,共 24 次,期间样地内进行合理的经营管理措施。

1.3 样品采集与测定

于 2013 年 3 月 (当月不施肥)进行取样。在每个样方内随机选取 3 株具有代表性的茶树,采用挖掘法把茶树全株取出,尽量避免损害根系,保存茶树的完整性。地下器官根据根系根序分级理论将收集到的根系分为吸收根 (即顶端的 1—3 级)、运输根 (4—5 级)、储藏根 (5 级以上,且直径<8 mm)^[18];地上器官根据年龄分为茶叶 (一芽两叶)和成熟叶。将植物样品先用清水洗净,再用去离子水冲洗,将同一样方内的 3 株植物样品进行混合,晾干,置于烘箱中 105℃ 杀青 30 min 后,65℃ 烘至恒重,粉碎,过 0.25 mm 筛,测定各元素含量。样品 Al 含量测定参照肖乐勤^[19]改良后石墨炉原子吸收光谱法;Ca、Fe、Mn、Cu、Zn 含量采用 HNO₃-HClO₄ 消煮 ICP-AES 测定^[20];Se 含量采用原子荧光测定^[21]。

1.4 数据处理

采用 Excel 2017 和 SPSS 17.0 软件对数据进行处理和统计分析。采用双因素 (施肥处理和不同功能根或不同年龄叶)和最小显著性差异 (LSD)法进行 5 种施肥处理、3 种不同功能根系和 2 种不同年龄叶片的方差分析及多重比较 ($\alpha=0.05$)。茶树体不同器官 Zn、Se 含量采用 Pearson 法进行相关性分析。利用 SigmaPlot 10.0 软件作图。

2 结果与分析

2.1 茶树体 Zn、Se 元素对外源 N、P、Zn、Se 添加的响应

双因素方差分析结果表明,施肥处理显著影响茶树地下和地上器官 Zn 和 Se 含量 ($P<0.05$);地下不同功能根之间 Zn 含量差异显著,而 Se 含量差异不显著,但地上不同年龄叶片 Zn 和 Se 含量均差异显著;施肥处理与地下或地上器官对 Zn 和 Se 含量的交互作用均不显著 (表 1)。外源养分添加后,茶树吸收根、运输根、茶叶、成熟叶的 Zn 含量显著高于 CK;施肥处理中,地下不同功能根系 Se 含量均表现为 Zn+Se+N+P 处理下最高,Zn+Se+P 处理次之,Zn+Se+N 处理最低,而地上茶叶和成熟叶 Se 含量均表现为 Zn+Se+N、Zn+Se+P、Zn+Se+N+P 处理显著高于 CK、Zn+Se 处理 (图 1)。此外,Zn 含量总体表现为吸收根>运输根>储藏根,茶叶高于成熟叶;Se 含量为成熟叶高于茶叶 (图 1)。

表 1 N、P、Zn、Se 添加和地下、地上器官及交互作用对茶树 Zn、Se 及其他中微量元素影响的方差分析

Table 1 ANOVA of effects of nitrogen, phosphorus, zinc and selenium additions, belowground or aboveground organs and their interactions on zinc, selenium and other trace elements in *C. sinensis*

影响因素 Factor	自由度 <i>df</i>	Zn	Se	Al	Ca	Fe	Cu	Mn
施肥处理 Fertilization	4	8.01 ***	5.42 ***	14.42 ***	0.89 ns	13.85 ***	2.76 **	8.31 **
地下器官 Belowground organ	2	154.18 ***	0.15 ns	219.15 ***	29.53 ***	232.58 ***	35.04 ***	0.28 ns
交互作用 Interaction	8	1.51 ns	0.25 ns	5.38 ***	1.92 ns	4.80 **	0.61 ns	1.76 ns
施肥处理 Fertilization	4	16.45 ***	16.01 ***	0.65 ns	0.58 ns	0.85 ns	1.20 ns	0.33 ns
地上器官 Aboveground organ	1	79.69 ***	13.45 **	1172.23 ***	236.40 ***	4.65 *	76.24 ***	284.02 ***
交互作用 Interaction	4	0.54 ns	1.18 ns	0.74 ns	0.56 ns	0.15 ns	0.46 ns	0.34 ns

* $P<0.05$, ** $P<0.01$, *** $P<0.001$, ns $P>0.05$.

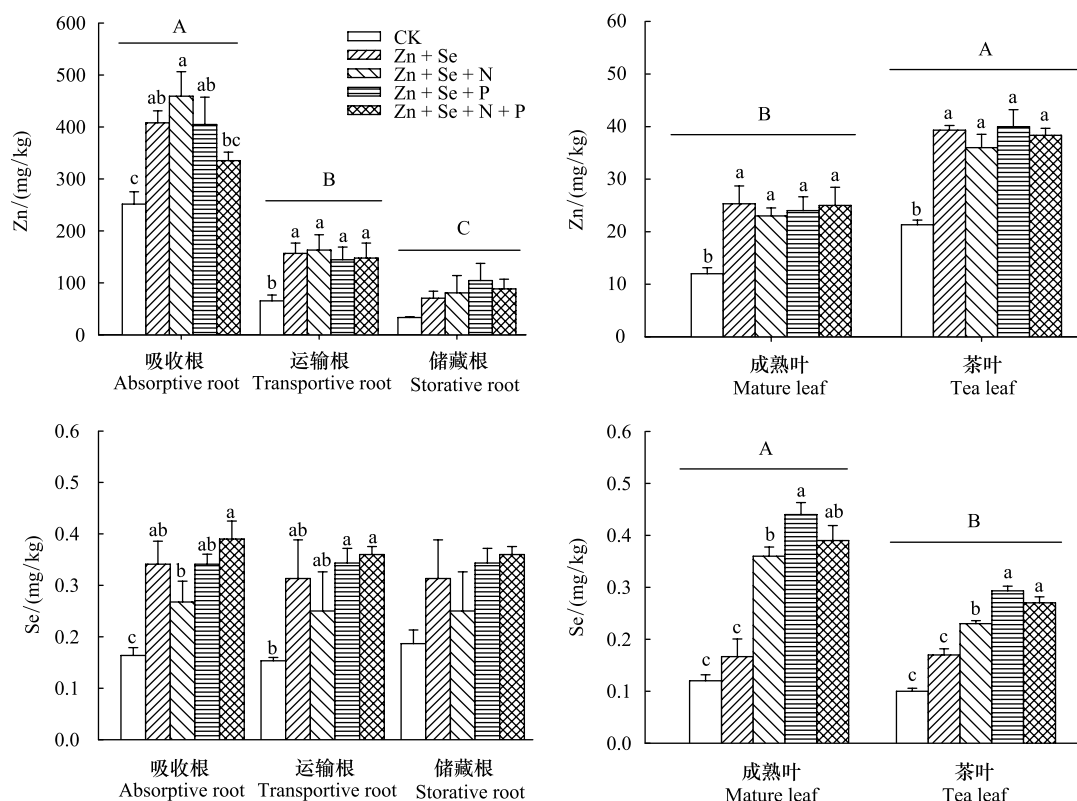


图 1 茶树地下和地上器官中 Zn、Se 含量对外源 N、P、Zn、Se 添加的响应

Fig.1 The responses of Zn and Se in belowground and aboveground organs of tea plant to the additions of N, P, Zn and Se

不同小写字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$) 不同大写字母表示器官间差异显著 ($P < 0.05$)

2.2 茶树体 Al、Ca 元素对外源 N、P、Zn、Se 添加的响应

双因素方差分析结果表明,施肥处理、地下器官及其交互作用对 Al 含量均影响显著,而地上器官 Al 含量仅表现为不同年龄叶片之间差异显著,施肥处理及交互作用的影响均不显著;茶树 Ca 含量仅表现为地下不同功能根系之间和地上不同年龄叶片之间差异显著,施肥处理及交互作用的影响均不显著(表 1)。外源养分添加后,茶树吸收根和运输根 Al 含量显著高于 CK(图 2),其中 Zn+Se、Zn+Se+N、Zn+Se+P、Zn+Se+N+P 处理吸收根的增幅为 55.00%、56.00%、63.17%、60.50%;运输根的增幅分别为 52.22%、56.11%、51.29%、59.84%。Al 含量总体表现为吸收根>运输根>储藏根,成熟叶高于茶叶;Ca 含量为成熟叶高于茶叶(图 2)。

2.3 茶树体 Fe、Cu、Mn 元素对外源 N、P、Zn、Se 添加的响应

双因素方差分析结果表明,施肥处理对地下器官 Fe、Cu、Mn 含量影响显著,而对地上器官 Fe、Cu、Mn 含量影响均不显著;地下不同功能根系之间仅 Fe、Cu 含量差异显著,而地上不同年龄叶片之间 Fe、Cu、Mn 含量均差异显著;施肥处理和地下器官的交互作用仅表现为对 Fe 的影响(表 1)。与 CK 相比,施肥处理显著提高吸收根和运输根 Fe 含量,Zn+Se、Zn+Se+N 处理显著提高储藏根 Fe 含量;以及施肥处理显著提高储藏根 Cu 含量;运输根 Mn 含量为 Zn+Se+N、Zn+Se+P、Zn+Se+N+P 处理显著高于 CK 和 Zn+Se 处理,储藏根 Mn 含量为 Zn+Se+N+P 处理显著高于其他处理(图 3)。此外,Fe 含量总体为吸收根高于运输根和储藏根,成熟叶高于茶叶;Cu 含量为吸收根高于运输根和储藏根,茶叶高于成熟叶;Mn 含量为成熟叶显著高于茶叶(图 3)。

2.4 茶树不同器官中 Zn、Se 含量的相关性分析

相关性分析表明,茶叶和成熟叶 Zn 含量均与吸收根呈显著正相关,成熟叶 Zn 含量仅与运输根呈显著正相关;而茶叶和成熟叶 Se 含量仅与储藏根呈显著正相关(表 2)。可见,Zn、Se 元素在茶树中的迁移途径有别。

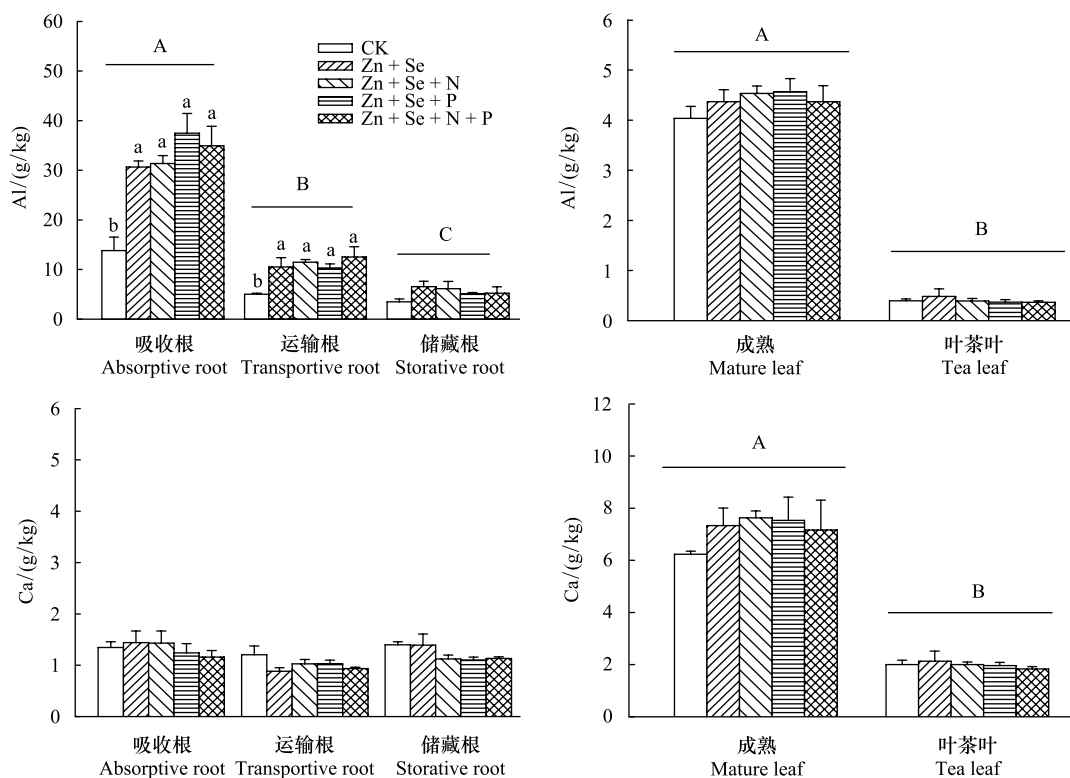


图2 茶树地下和地上器官中 Al、Ca 含量对外源 N、P、Zn、Se 添加的响应

Fig.2 The responses of Al and Ca in belowground and aboveground organs of tea plant to the additions of N, P, Zn and Se

表2 茶树不同器官中 Zn、Se 含量的相关性分析

Table 2 Correlation analysis of Zn and Se concentrations in different organs of *C. sinensis*

器官 Organ	Zn			Se		
	吸收根 Absorptive root	运输根 Transportive root	储藏根 Storative root	吸收根 Absorptive root	运输根 Transportive root	储藏根 Storative root
茶叶 Tea leaf	0.59 *	0.37 ns	0.34 ns	0.49 ns	0.15 ns	0.59 **
成熟叶 Mature leaf	0.59 *	0.86 **	0.39 ns	0.37 ns	0.22 ns	0.51 *

* $P < 0.05$, ** $P < 0.01$, ns $P > 0.05$.

3 讨论

茶树是一种富含多种中微量元素的作物,其生长发育往往会受到外界环境和土壤状况等多种因素的影响^[12,22]。外源养分添加至土壤,会打破其原本的元素分配状况,进而改变茶树各器官对元素的吸收和分配,最终影响茶树生长及茶叶自然品质^[12]。本研究表明,Zn+Se 处理显著提高了茶树器官 Zn、Se 含量,较好地回答了科学问题一,即茶树具有较强吸收和积累 Zn 和 Se 的能力。可能原因包括:茶树可通过根系从土壤中吸收 Zn 来活化体内一些酶促反应,增强光合作用,促进叶片对 CO₂ 的同化^[23];吸收 Se 可增强根系养分吸收和转化速度,进而提高茶树体内过氧化物酶活性,增加其抗逆性^[3]。显然,茶树可通过吸收和累积 Zn、Se 来维持和促进其正常生长。正如 Yang 等^[12]研究发现,富 Zn 和富 Se 土壤可以释放更多的 Zn、Se 离子,这些离子通过根系被茶树吸收、积累,进而增加其器官中 Zn、Se 含量,提高茶叶的自然品质。同时 Dai 等^[8]在研究大白菜时也发现,土壤中添加 Zn、Se 可以提高根叶抗氧化酶、叶绿素和脂质过氧化物的含量,进而提高作物的耐受性和生理状态,促进器官对 Zn、Se 的吸收。段晓琴和赵永亮^[24]发现在土壤中施用 Zn 和 Se 后,油菜茎叶中的 Zn 和 Se 浓度较对照显著升高。多数研究也表明,植物组织 Zn 和 Se 含量与土壤 Zn、Se 含量呈正相关^[25-26]。以

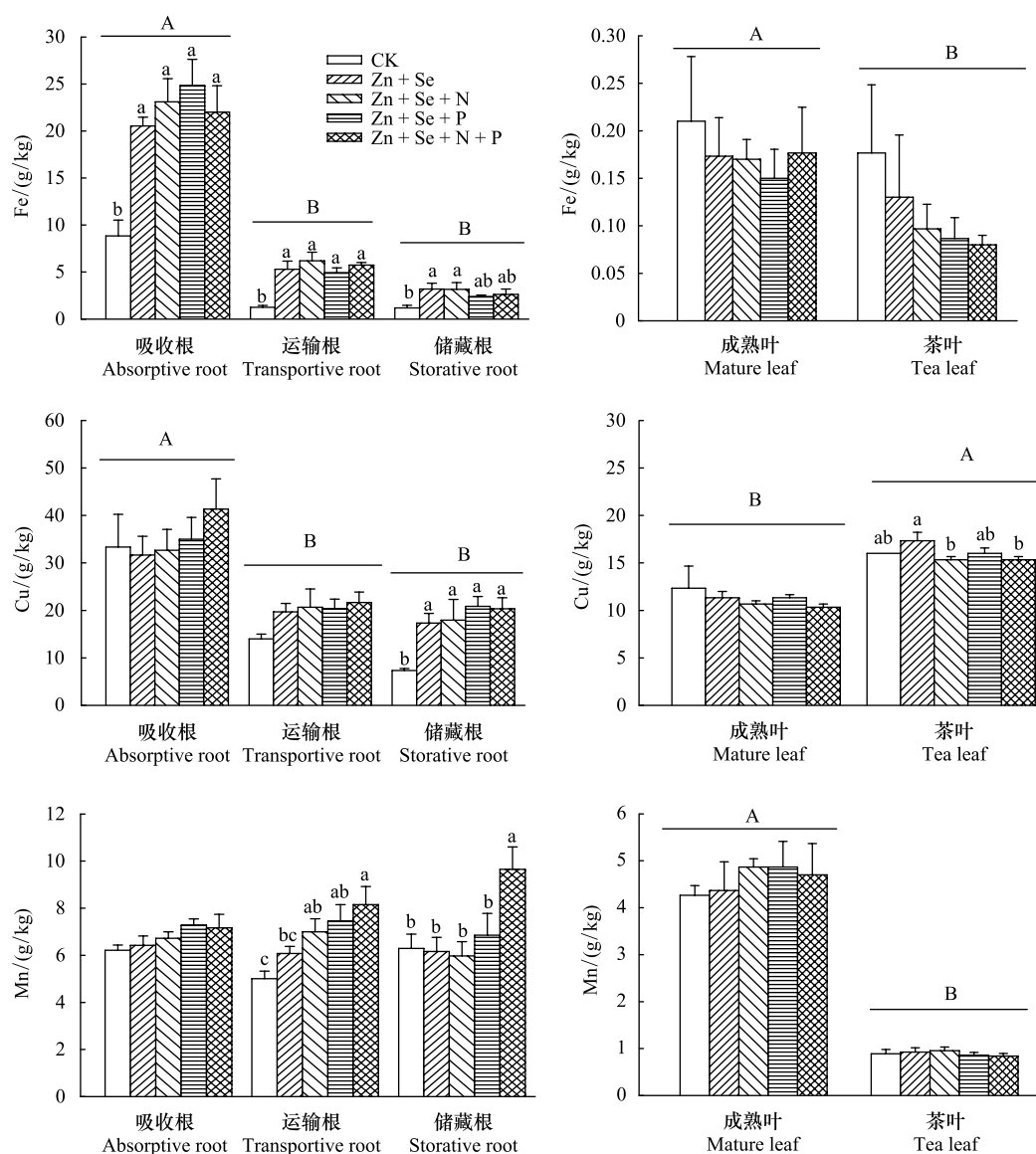


图3 茶树地下和地上器官中 Fe、Cu、Mn 含量对外源 N、P、Zn、Se 添加的响应

Fig.3 The responses of Fe, Cu, Mn in belowground and aboveground organs of tea plant to the additions of N, P, Zn and Se

上研究结果都证实,向土壤中添加 Zn、Se 不失为提高茶树器官,特别是茶叶 Zn、Se 含量的有效措施之一,这为培育高品质锌硒茶提供了数据支持。

N 和 P 均是生态系统中重要的营养元素和限制性养分,故土壤中添加 N、P 往往可促进作物的生长^[11];同时 N、P 也易与 Zn、Se 等中微量元素发生耦合互动,进而改变作物的吸收与分配^[12]。本研究发现,N 和/或 P 肥调控 Zn 和 Se 肥后仅会显著增加茶树地上器官的 Se 含量,回答了科学问题二,即 N、P 显著增加了茶叶 Se 的累积。刘世亮等^[27]研究发现 N、P、K 和 Zn、Se 处理显著增加紫花苜蓿 Se 含量和有机 Se 转化率。龙世方等^[28]也发现 N、P、K 和 Se 配施可达到水稻富硒、高产的目标。而造成本研究 N、P 显著增加茶叶 Se 的累积可能原因包括:N 肥施入促进茶树生长发育,增加茶叶对 Se 的吸收和积累^[29];而 P 肥则通过对土壤 Se 进行内源调控,改善茶树根际微生物群落结构,为有机肥的分解提供更适宜的土壤环境,而土壤有机质增加可通过微生物的矿化分解释放出 Se^[30]。为此,N 和/或 P 肥与 Zn 和 Se 肥配施可以增加茶叶中的酶活性,增加其抗氧化活性^[12],从而提高 Se 的利用率及茶叶中 Se 含量^[31]。同时,本研究发现,Zn 含量并未因 N 和 P 添加与否

而显著变化。推断估计与施用 P 肥有关,P 肥引起作物根系形态改变,导致与植物根系共生的菌根数量减少,在一定程度上抑制 N 的作用,进而限制了茶树对 Zn 的吸收能力^[12,13,3-2]。此外,有研究发现施 P 可降低根系分泌活化土壤 Zn 的低分子有机酸,从而减少植物对 Zn 的吸收^[33]。可见,N、P 添加是促进茶叶富 Se 的有效措施之一,但对 Zn 的吸收积累未见显著效应。

Zn、Se、N 和/或 P 肥添加除直接影响茶树各器官 Zn、Se 的含量外,其耦合作用还改变茶树体相关中微量元素在各器官的分配。本研究发现,在 Zn、Se、N 和/或 P 肥添加下,各元素在茶树各器官的响应是不同的,地下器官的响应比地上器官强,可能主要源于根系可吸收积累较多中微量元素(Al、Fe、Zn 和 Cu 等)^[16],且一些元素与根的结合方式往往较地上枝和叶更多。本研究中,茶树吸收根和运输根 Fe 含量显著增加,可能是因为根系易分泌柠檬酸的小分子有机酸,增强根部对 Fe 的吸收和利用,且 Fe 的活性较低,向上运输能力较弱^[34],所以大部分 Fe 累积在吸收根和运输根中。而根系 Al 含量显著增加,可能主要缘于土壤 Al 易与 P 在根系表面发生吸附-沉淀反应,且 N 添加增加了根系活性^[35],导致 Al 向上运输的量减少,在吸收根和运输根富集。同时,茶树体内各元素在一定程度上存在竞争抑制的效应,例如:Al 含量过多会抑制茶树对 Cu 的吸收,本研究中 Al 多积累于吸收根与运输根,这在一定程度上会抑制 Cu 的累积,但 Cu 与根细胞的结合性较强,故导致施肥后储藏根 Cu 含量显著增加。此外,土壤 Mn 有效性因外源养分添加驱动根系向土壤分泌大量有机酸而增加^[36],根系从土壤中吸收 Mn^{2+} 及其他形态的 Mn 来满足生长,但多集中于年老器官,如运输根和储藏根,而在幼嫩器官分配较少。Ca 为难以移动的元素,易形成不溶性 Ca 盐沉淀而固定,不易受其他元素耦合的影响^[37]。可见,与未添加相比,外源养分添加下中微量元素在各器官的耦合效应各异,但地上器官,特别茶叶中未添加的中微量元素含量维持基本不变,这可较好地保障茶叶的食用安全性。

4 结论

土壤外源 Zn、Se 供应可提高茶树组织中 Zn 和 Se 含量,且施 N 和/或 P 肥有助于提高 Se 利用率,增加茶叶 Se 含量;其 Zn 和 Se 含量与国家标准规定相一致(国家标准规定,Se 含量为 0.25—4.00 mg/kg(NY/T600-2002),Zn 含量为 35.00 ± 2.00 mg/kg(GSB-30)),处于食品安全及人体健康的范围之内。Al、Ca、Cu、Fe 和 Mn 的响应规律不一致,但主要集中在地下器官,地上器官并未有显著增加或降低,可规避 Al、Ca、Cu、Fe 和 Mn 等 5 种金属元素通过饮茶造成的毒害风险。研究结果为红壤丘陵区栽培高品质锌硒茶提供了新的证据,或许是人体补充 Zn 和 Se 有效便捷的途径之一。

致谢:江西省蚕桑茶叶研究所提供研究基地,陈希和李敬等完成野外试验及采样工作,特此致谢。

参考文献(References):

- [1] Silva C S, Moutinho C, Vinha A F, Matos C. Trace minerals in human health: iron, zinc, copper, manganese and fluorine. *International Journal of Science and Research Methodology*, 2019, 13(3): 57-80.
- [2] Yin K, Yang Z J, Gong Y Z, Wang D X, Lin H J. The antagonistic effect of Se on the Pb-weakening formation of neutrophil extracellular traps in chicken neutrophils. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2019, 173: 225-234.
- [3] Xu J, Yang F M, Chen L C, Hu Y, Hu Q H. Effect of selenium on increasing the antioxidant activity of tea leaves harvested during the early spring tea producing season. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2003, 51(4): 1081-1084.
- [4] Rahman M M, Hossain K F B, Banik S, Sikder M T, Akter M, Bondad S E C, Rahaman M S, Hosokawa T, Saito T, Kurasaki M. Selenium and zinc protections against metal-(loids)-induced toxicity and disease manifestations: A review. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2019, 168: 146-163.
- [5] Hu X F, Wu A Q, Wang F C, Chen F S. The effects of simulated acid rain on internal nutrient cycling and the ratios of Mg, Al, Ca, N, and P in tea plants of a subtropical plantation. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2019, 191(2): 99.
- [6] Finley J W, Ip C, Lisk D J, Davis C D, Hintze K J, Whanger P D. Cancer-protective properties of high-selenium broccoli. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2001, 49(5): 2679-2683.
- [7] Fang Y, Wang L, Xin Z H, Zhao L Y, An X X, Hu Q H. Effect of foliar application of zinc, selenium, and iron fertilizers on nutrients concentration and yield of rice grain in China. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2008, 56(6): 2079-2084.
- [8] Dai H P, Wei S H, Skuza L, Jia G L. Selenium spiked in soil promoted zinc accumulation of Chinese cabbage and improved its antioxidant system

- and lipid peroxidation. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2019, 180: 179-184.
- [9] 刘新伟, 王巧兰, 段碧辉, 林亚蒙, 赵小虎, 胡承孝, 赵竹青. 亚硒酸盐对油菜幼苗硒吸收、根系形态及生理指标的影响. *应用生态学报*, 2015, 26(7): 2050-2056.
- [10] 王方超, 邹丽群, 唐静, 方向民, 万松泽, 吴南生, 王辉民, 陈伏生. 氮沉降对杉木和枫香土壤氮磷转化及碳矿化的影响. *生态学报*, 2016, 36(11): 3226-3234.
- [11] 陈希, 陈伏生, 叶素琼, 喻苏琴, 方向民, 胡小飞. 丘陵红壤茶园根际氮磷转化对不同强度酸雨胁迫的响应. *应用生态学报*, 2015, 26(1): 1-8.
- [12] Yang T T, Li H Y, Hu X F, Li J, Hu J N, Liu R, Deng Z Y. Effects of fertilizing with N, P, Se, and Zn on regulating the element and functional component contents and antioxidant activity of tea leaves planted in red soil. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2014, 62(17): 3823-3830.
- [13] Hu X F, Chen F S, Wine M L, Fang X M. Increasing acidity of rain in subtropical tea plantation alters aluminum and nutrient distributions at the root-soil interface and in plant tissues. *Plant and Soil*, 2017, 417(1/2): 261-274.
- [14] 华璐, 韦东普, 白玲玉, 姚允寅. 氮锌硒肥配合施用对白茶三叶的固氮作用与氮转移的影响. *生态学报*, 2001, 21(4): 588-592.
- [15] Rawat D, Bhatt S C, Srivastava P C, Pachauri S P. Distribution of zinc in plant parts of wheat varieties with varying zinc sensitivity at different growth stages. *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences*, 2019, 8(6): 404-414.
- [16] Zhao N, Yu G R, He N P, Wang Q F, Guo D L, Zhang X Y, Wang R L, Xu Z W, Jiao C C, Li N N, Jia Y N. Coordinated pattern of multi-element variability in leaves and roots across Chinese forest biomes. *Global Ecology and Biogeography*, 2016, 25(3): 359-367.
- [17] Karak T, Bhagat R M. Trace elements in tea leaves, made tea and tea infusion; a review. *Food Research International*, 2010, 43(9): 2234-2252.
- [18] Bu W S, Chen F S, Wang F C, Fang X M, Mao R, Wang H M. The species-specific responses of nutrient resorption and carbohydrate accumulation in leaves and roots to nitrogen addition in a subtropical mixed plantation. *Canadian Journal of Forest Research*, 2019, 49(7): 826-835.
- [19] 肖乐勤. 石墨炉原子吸收光谱法测定水中的铝. *光谱实验室*, 2006, 23(1): 66-68.
- [20] Özcan M M, Ünver A, Uçar T, Arslan D. Mineral content of some herbs and herbal teas by infusion and decoction. *Food Chemistry*, 2008, 106(3): 1120-1127.
- [21] Chen L C, Yang F M, Xu J, Hu Y, Hu Q H, Zhang Y L, Pan G X. Determination of selenium concentration of rice in China and effect of fertilization of selenite and selenate on selenium content of rice. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2002, 50(18): 5128-5130.
- [22] 曾艳, 伊晓云, 李延升, 马立峰, 阮建云, 唐茜. 氮肥对夏秋季茶树吸收根生物量和养分储量的影响. *生态学报*, 2016, 36(2): 411-419.
- [23] Dai H P, Wei S H. Transformation Process and Mechanism of Selenium and Zinc in Soil-Alfalfa. Beijing: Science Press, 2018.
- [24] 段晓琴, 赵永亮. 锌硒微肥对油菜苗期锌、硒积累及生理效应的影响. *江苏农业科学*, 2009, (4): 106, 147-147.
- [25] Cakmak I, Kalayci M, Kaya Y, Torun A A, Aydin N, Wang Y, Arisoy Z, Erdem H, Yazici A, Gokmen O, Ozturk L, Horst W J. Biofortification and localization of zinc in wheat grain. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2010, 58(16): 9092-9102.
- [26] Li X, Wu Y S, Li B Q, Yang Y H, Yang Y P. Selenium accumulation characteristics and biofortification potentiality in turnip (*Brassica rapa* var. *rapa*) supplied with selenite or selenate. *Frontiers in Plant Science*, 2018, 8: 2207.
- [27] 刘世亮, 刘芳, 田春丽, 刘斌, 介晓磊, 胡华锋. 富啡酸和锌硒配施对紫花苜蓿硒吸收、积累和形态的影响. *中国草地学报*, 2016, 38(1): 61-66.
- [28] 龙世方, 王孟, 吴东梅, 刘波, 黄芬肖, 邢丹英, 朱建强, 周建利, 黄道友. 硒与氮磷钾肥配施对水稻产量和外观品质及其吸收硒的影响. *长江大学学报: 自然科学版*, 2019, 16(1): 66-71, 124-124.
- [29] Ilbas A I, Yilmaz S, Akbulut M, Bogdevich O. Uptake and distribution of selenium, nitrogen and sulfur in three barley cultivars subjected to selenium applications. *Journal of Plant Nutrition*, 2012, 35(3): 442-452.
- [30] 杨旋, 宗良纲, 严佳, 姚欢, 马爱军, 何任红. 改良剂与生物有机肥配施方式对强酸性高硒茶园土壤硒有效性的影响. *土壤*, 2014, 46(6): 1069-1075.
- [31] 姜英, 曾昭海, 杨麒生, 赵杰, 杨亚东, 胡跃高. 植物硒吸收转化机制及生理作用研究进展. *应用生态学报*, 2016, 27(12): 4067-4076.
- [32] Ova E A, Kutman U B, Ozturk L, Cakmak I. High phosphorus supply reduced zinc concentration of wheat in native soil but not in autoclaved soil or nutrient solution. *Plant and Soil*, 2015, 393: 147-162.
- [33] Hoffland E, Wei C Z, Wissuwa M. Organic anion exudation by lowland rice (*Oryza sativa* L.) at zinc and phosphorus deficiency. *Plant and Soil*, 2006, 283: 155-162.
- [34] 石元值, 阮建云, 马立峰, 韩文炎, 王方. 茶树中镉、砷元素的吸收累积特性. *生态与农村环境学报*, 2006, 22(3): 70-75.
- [35] Ruan J Y, Gerendás J, Härdter R, Sattelmacher B. Effect of nitrogen form and root-zone pH on growth and nitrogen uptake of tea (*Camellia sinensis*) plants. *Annals of Botany*, 2007, 99(2): 301-310.
- [36] Dinkelaker B, Römhild V, Marschner H. Citric acid excretion and precipitation of calcium citrate in the rhizosphere of white lupin (*Lupinus albus* L.). *Plant, Cell & Environment*, 1989, 12(3): 285-292.
- [37] Fageria N K, Filho M B, Moreira A, Guimarães C M. Foliar fertilization of crop plants. *Journal of Plant Nutrition*, 2009, 32(6): 1044-1064.