

曹丹, 杨明忠, 刘艳丽, 等. 3个茶树品种吸收和转运硒的差异研究[J]. 福建农业学报, 2025, 40 (3): 291–297.

CAO D, YANG M Z, LIU Y L, et al. Differentiate Selenium Uptakes and Translocations of Three Tea Varieties[J]. Fujian Journal of Agricultural Sciences, 2025, 40 (3): 291–297.



3个茶树品种吸收和转运硒的差异研究

曹丹^{1,2}, 杨明忠³, 刘艳丽¹, 马林龙¹, 梁金波⁴, 金孝芳^{1*}

(1. 湖北省农业科学院果树茶叶研究所, 湖北 武汉 430064; 2. 湖南农业大学茶学教育部重点实验室/国家植物功能成分利用工程技术研究中心/植物功能成分利用省部共建协同创新中心, 湖南 长沙 410128; 3. 宣恩县农业农村局, 湖北 宣恩 445500; 4. 恩施土家族苗族自治州农业科学院, 湖北 恩施 445000)

摘要:【目的】探明不同茶树品种对硒的响应差异。【方法】采用沙培方式研究不同品种在0、0.05 mmol·L⁻¹亚硒酸盐处理下, 茶树各部位硒含量、硒转运系数、根系磷酸转运蛋白基因以及叶片主要内含成分含量变化。【结果】不加硒时, 根和茎中的硒含量在品种间无显著差异, ‘鄂茶11’的叶部硒含量较其他两个品种高。0.05 mmol·L⁻¹亚硒酸盐处理下, 3个品种根、茎和叶中的硒含量均显著增加, 同时, ‘鄂茶一号’和‘鄂茶12’根部硒含量显著高于‘鄂茶11’, ‘鄂茶12’茎和叶中的硒含量均显著高于其他两个品种, 进一步分析发现地上部对硒的转运能力是影响叶片硒含量的重要因素。基因表达分析发现在3个品种根部的*CsPht1;2a*表达量差异趋势与硒累积量一致。添加硒可以显著提高‘鄂茶12’的游离氨基酸(34.01%)、茶多酚(18.19%)、咖啡碱(9.82%)和黄酮类化合物(29.95%)的含量($P<0.05$), 显著提高‘鄂茶一号’和‘鄂茶11’的咖啡碱含量, 增幅分别为24.58%、6.58%($P<0.05$)。

结论茶树品种间叶片硒含量的差异主要归因于其地上部对硒的转运能力, *CsPht1;2a*基因可能在茶树硒吸收和转运过程中发挥了重要作用。外源添加硒影响茶叶品质, 但存在品种间差异。

关键词:茶树品种; 沙培; 硒含量; 磷酸转运蛋白; 主要内含成分

中图分类号: S571.1

文献标志码: A

文章编号: 1008-0384 (2025) 03-0291-07

Differentiate Selenium Uptakes and Translocations of Three Tea Varieties

CAO Dan^{1,2}, YANG Mingzhong³, LIU Yanli¹, MA Linlong¹, LIANG Jinbo⁴, JIN Xiaofang^{1*}

(1. *Fruit and Tea Research Institute, Hubei Academy of Agricultural Sciences, Wuhan, Hubei 430064, China*; 2. *Key Laboratory of Tea Science of Ministry of Education/National Research Center of Engineering and Technology for Utilization of Botanical Functional Ingredients/Co-Innovation Center of Education Ministry for Utilization of Botanical Functional Ingredients, Hunan Agricultural University, Changsha, Hunan 410128, China*; 3. *Xuanen County Bureau of Agriculture and Rural Affairs, Xuanen, Hubei 445500, China*; 4. *Enshi Tujia and Miao Autonomous Prefecture Academy of Agricultural Sciences, Enshi, Hubei 445000, China*)

Abstract:【Objective】Responses to selenium (Se) uptake and translocation of different tea cultivars were studied.

【Method】Sand culture on Echa 1, Echa 11, and Echa 12 tea plants was conducted to determine the content and transport coefficient of Se, the phosphate transporter protein genes in the roots, and the major chemical components in the leaves under 0 or a stress of 0.05 mmol·L⁻¹ Se. 【Result】Without Se addition in the soil, Se content in the roots and stems did not significantly differ among the 3 varieties, but that in the leaves of Echa 11 higher than the others. However, with the 0.05 mmol·L⁻¹ Se addition, it increased significantly in different parts of the plants of all varieties. Echa 1 and 12 had significantly more Se than Echa 11 in the roots, while Echa 12 significantly more than the other two in the stems and leaves. The Se translocation in the aboveground plant parts significantly affected the Se content in the leaves. And the expressions of *CsPht1;2a* in the roots of the 3 varieties paralleled the Se accumulation. The increased exogenous Se also significantly rose the

收稿日期: 2024-05-29 修回日期: 2024-09-23

作者简介: 曹丹(1988—), 女, 博士, 主要从事茶树资源与育种研究, E-mail: skyiswide@163.com

*通信作者: 金孝芳(1982—), 男, 博士, 副研究员, 主要从事茶树资源与育种研究, E-mail: xfjin@126.com

基金项目: 国家重点研发计划项目(2021YFD1601103); 湖北省重点研发计划项目(2023BBB043); 湖北省自然科学基金(联合基金)项目(2023AFD065); 湖北省种业高质量发展专项(HBZY2023A001-11); 湖北省农业科技创新中心项目(2021-620-000-001-024)

contents of free amino acids by 34.01%, tea polyphenols by 18.19%, caffeine by 9.82%, and flavonoids by 29.95% in Echa 12 ($P < 0.05$), and caffeine in Echa 1 by 24.58% and Echa 11 by 6.58% ($P < 0.05$). 【Conclusion】 The significant differences in Se content in the tea plants of 3 different varieties were attributed primarily to the varied aboveground Se translocation. *CsPht1;2a* was likely to play a significant role in the Se uptake and translocation as well. The effect of soil Se on the leaf quality of the tea plants grown on the ground, however, varied by the species of the cultivar.

Key words: tea variety; sand culture; Se content; phosphate transporter protein; main chemical

0 引言

【研究意义】硒 (Selenium, Se) 是人体不可或缺的微量元素, 其丰缺与人和动物的健康密切相关。据调查显示, 全球 40 多个国家和地区处于缺硒或低硒地带, 而我国约 72% 的地区也面临缺硒问题, 因此, 补充硒元素显得尤为迫切^[1]。作为世界上广受欢迎的饮品之一, 茶叶中含有易于人体吸收的有机硒, 其占比超过总硒含量的 80%^[2], 因此, 通过饮茶增加人体对硒的摄入量是一种科学有效的方法。研究茶树硒吸收和转运的机制, 对低硒地区的富硒茶生产具有重要的指导意义。【前人研究进展】同一作物的不同品种间存在硒吸收和转运差异。Pu 等^[3]认为小麦种间的籽粒硒含量差异与籽粒颜色相关, 相较于白色品种, 有色小麦品种具有较高的硒吸收效率和花青素含量。而在水稻中的研究表明, 不同品种的富硒能力差异并非直接与籽粒颜色相关, 而是与植株地上部分对硒的转运能力有关^[4], 同时磷酸转运蛋白 *OsPht1;2* 参与了根系对硒的吸收和转运过程^[5]。目前, 已有针对不同茶树品种叶片硒含量差异的相关研究。吴双桃等^[6]通过对凤凰单丛古茶树茶叶中的硒含量进行测定发现, 宋种东方红和宋种蜜兰香叶片的硒含量高于其他 8 种古茶树, 认为茶树对硒的吸收累积与叶片发育过程存在一定关联。秦玉燕等^[7]在研究不同茶树品种硒、汞、砷富集特性时发现, ‘福鼎大毫’ ‘湘波绿’ 和 ‘碧香早’ 对硒的富集能力较强, 推测这种差异可能源于其遗传特性。郭丽娜等^[8]的研究显示, 在高聚硒品种 (系) 叶片中, 磷酸转运蛋白基因 *CsPht1;3* 在亚硒酸钠处理下显著上调表达, 推测该基因参与了茶树对硒的吸收和分配。此外, 多项研究发现, 适量

的硒可以促进茶树生长, 提高茶叶中的硒含量, 并改善茶叶品质^[9-12]。【本研究切入点】目前, 已有关于不同茶树品种叶片硒含量差异的报道, 但其差异机制仍不明确, 硒对各品种内含成分的具体影响也有待进一步研究。此外, 尽管已有研究表明磷酸转运蛋白 *Pht1* (phosphate transporter 1) 参与了植物对硒的吸收与转运, 然而在茶树中具体是哪些 *Pht1* 基因发挥了关键作用, 目前尚不清楚。【拟解决的关键问题】通过比较外源硒在不同茶树品种硒吸收和转运、相关基因表达及叶片主要内含成分等方面的差异, 探究不同品种间硒吸收和转运的差异机制, 以期为湖北省及其周边省份选择富硒茶树品种提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 材料

供试品种为‘鄂茶一号’ ‘鄂茶 11’ 和 ‘鄂茶 12’, 由湖北省茶树种质资源圃提供。3 个供试品种的生物学特征见表 1。

1.2 试验设计

培养方式为沙培, 培养基质为直径小于 1 mm 的洁净河沙。河沙经烘干冷却后, 装入 17.4 cm × 24.2 cm × 6.7 cm 的蓝色周转箱, 每箱装填 2.8 kg。培养液为 1/3 Hogland 营养液^[13], 每箱浇灌 500 mL。前期研究表明, 在 0.05 mmol·L⁻¹ 硒浓度下处理 4 d 时, 茶树生长良好并处于硒吸收和转运的动态平衡状态^[13], 因此本研究选择硒浓度为 0.05 mmol·L⁻¹, 并设置不添加硒为对照组 (CK), 处理时间为 4 d, 硒源为亚硒酸钠 (国药集团化学试剂有限公司, 含量 ≥ 97.0%)。分别选取长势一致的一年生扦插苗定植于周转箱中, 每箱 6 株, 每个处理设 3 个生物学

表 1 3 个茶树品种的生物学特征
Table 1 Botanical characteristics of 3 tea varieties

品种 Varieties	选育方法 Breeding methods	亲本 Parents	基本特征 Characteristics	适制性 Processing suitability
鄂茶一号 Echa 1	杂交育种	福鼎大白茶 (♀) × 梅占 (♂)	无性系、灌木型、中叶类、中生种	绿茶、红茶
鄂茶 11 Echa 11	杂交育种	龙井 43	无性系、灌木型、中叶类、早生种	绿茶
鄂茶 12 Echa 12	杂交育种	福鼎大白茶	无性系、小乔木型、小叶类、中生种	绿茶

重复, 每个重复为1箱, 共18箱。茶苗定植4 d后, 按照幼根、嫩茎(1芽2叶下约5 cm的茎段)和1芽2叶分开取样, 样品经自来水及去离子水各清洗3次, 用滤纸吸干表面水分后, 用于总硒含量测定。另取适量叶片, 置于预热到110 °C的烘箱中烘至恒重^[14], 用于内含成分的检测。取适量根系液氮速冻, 并保存于-80 °C超低温冰箱, 用于RNA提取和实时荧光定量(qRT-PCR)分析。

1.3 样品的制备与检测

1.3.1 总硒含量测定

分别称取适量样品, 采用HClO₄-HNO₃(体积比1:4)消解, 温度控制在180 °C以内, 消解完全后加入6 mol·L⁻¹的HCl溶液将六价硒还原为四价, 冷却后定容过滤, 采用氯化物发生原子荧光光谱法(HG-AFS-8220)测定总硒含量^[15]。茎-根迁移系数=茎硒含量(mg·kg⁻¹)/根硒含量(mg·kg⁻¹), 叶-茎迁移

系数=叶硒含量(mg·kg⁻¹)/茎硒含量(mg·kg⁻¹)^[16]。

1.3.2 内含成分测定

游离氨基酸总量测定参照GB/T 8314—2013《茶游离氨基酸总量的测定》, 茶多酚含量测定参照GB/T 8313—2018《茶叶中茶多酚和儿茶素类含量的检测方法》, 咖啡碱含量测定参照GB/T 8313—2013《茶咖啡碱测定》, 黄酮类化合物总量测定采用三氯化铝比色法^[14]。

1.3.3 qRT-PCR分析

使用全能型植物RNA提取试剂盒OmniPlant RNA Kit(DNase I)(康为世纪生物科技有限公司)提取根系总RNA, 利用Reverse Transcription Kit试剂盒(Simgen, 杭州新景生物)进行cDNA合成。以GAPDH为内参基因, 反应在ABI7500荧光定量PCR仪上进行^[13], 相关引物见表2。采用2^{-ΔΔCT}法进行相对表达量计算, 每个基因3次生物学重复。

表2 qRT-PCR引物
Table 2 Primers for qRT-PCR

基因名称 Gene name	上游引物(5'-3') Forward primer (5'-3')	下游引物(5'-3') Reverse primer (5'-3')
<i>CsPht1;2a</i>	TGGATTCCCGATGCCAGAC	CTGAATGGTGAAGGCCCTA
<i>CsPht1;2b</i>	TGGCTTGGTGACAAGCTAGG	TAGTCACCGCCAATGCCAAA
<i>CsPht1;3a</i>	CTTCAGCATTGACGCCAG	GGGAAGTGCTCCAACCATCA
<i>CsPht1;3b</i>	GGCCGCATCTATTACACCGA	CGCATAAGGTGCCACAAGG
<i>CsPht1;4a</i>	GGATCGTGGTGTGCTCGGA	AATGAGGGCAGTGTATCGGC
<i>CsPht1;4b</i>	TCGAAATCCAGGACGAGCAG	ACAAGAACCATGTGGTCGCA
<i>CsPht1;6a</i>	CTGCCGTTTCTCGATGCAG	GTCCTTGGCGTCTTCAT
<i>CsPht1;6b</i>	GGCTAGGATTGGCATCGGT	AAACACCGCAGCAATGAAGG
<i>CsPht1;8</i>	CCGTCATCGGTCAGCTAGTC	ACTCACCAATACACAGGCCG
<i>GAPDH</i>	TTGGCATCGTTGAGGGTCT	CAGTGGAACACGGAAAGC

1.4 数据分析

采用Microsoft office 2010和SPSS 19.0 Duncan新复极差法对试验数据进行统计分析, 利用Person相关系数法进行各指标间的相关性分析, 利用Origin2019b软件绘制热图。

2 结果与分析

2.1 不同品种对硒的吸收和转运

2.1.1 不同品种各组织硒含量比较

从表3可以看出, 在不加硒的情况下, 3个品种对照组的根和茎总硒含量分别为0.058~0.172 mg·kg⁻¹、0.033~0.072 mg·kg⁻¹, 且品种间无显著差异; ‘鄂茶11’叶片总硒含量显著高于其他2个品种

($P<0.05$)。同时, 3个品种不同部位总硒含量均呈根>叶>茎的趋势。

加硒处理后, 与对照相比, 3个品种的总硒含量根部增加53.437倍(‘鄂茶11’)~164.466倍(‘鄂茶一号’), ‘鄂茶12’总硒含量最高, ‘鄂茶一号’次之, 二者与‘鄂茶11’存在显著性差异($P<0.05$)。茎部增加17.264倍(‘鄂茶11’)~59.814倍(‘鄂茶12’), ‘鄂茶12’总硒含量最高, 与其他品种存在显著性差异($P<0.05$)。叶部增加2.317倍(‘鄂茶11’)~6.763倍(‘鄂茶12’), ‘鄂茶12’总硒含量最高, ‘鄂茶11’次之, ‘鄂茶一号’含量最低, 3个品种间存在显著差异。此外, 3个品种各部位均为根>茎>叶。以上说明, 经过外源硒处理后, 不同品种

表 3 沙培方式下 3 个茶树品种各部位总硒含量
Table 3 Total Se in tissues of tea plants of 3 varieties in sand cultivation

品种 Varieties	处理 Treatments	硒含量 Se content/ (mg·kg ⁻¹)		
		根 Roots	茎 Stems	叶 Leaves
鄂茶 1 号 Echa 1	CK	0.058±0.009 c	0.033±0.007 c	0.034±0.007 e
	Se	9.539±0.504 a	1.662±0.386 b	0.163±0.035 c
鄂茶 11 Echa 11	CK	0.151±0.024 c	0.072±0.019 c	0.101±0.007 d
	Se	8.069±0.406 b	1.243±0.162 b	0.234±0.037 b
鄂茶 12 Echa 12	CK	0.172±0.015 c	0.043±0.001 c	0.059±0.003 e
	Se	9.851±0.530 a	2.572±0.705 a	0.399±0.017 a

同列数据后不同小写字母表示差异达显著水平 ($P<0.05$)，下同。

Data with different lowercase letters on same column indicate significant difference at $P<0.05$. Same for below.

各部位总硒含量提高的同时，品种间及同一品种不同部位也出现了差异。

2.1.2 不同品种对硒的转运差异

茶树各部位总硒含量的变化与其硒元素的转运能力有关。因此，在初步了解不同品种对硒的累积基础上，通过转运系数进一步说明硒元素由地下到地上的转运能力是否存在品种差异。由图 1 可知，不加硒时，3 个品种的根-茎转运系数为 0.252 (‘鄂茶 12’) ~ 0.569 (‘鄂茶 1 号’)，‘鄂茶 1 号’的转运系数明显高于其他 2 个品种 ($P<0.05$)。茎-叶转运系数为 1.026 (‘鄂茶 1 号’) ~ 1.462 (‘鄂茶 11’)，‘鄂茶 11’的转运系数高于其他两个品种。由表 3 可知，不加硒时 3 个品种根部硒含量无显著性差异，说明‘鄂茶 11’叶中硒含量比其他两个品种高的主要原因是其具有高效的茎到叶的转运体系。

加硒条件下，3 个品种的根-茎转运系数为 0.155 (‘鄂茶 11’) ~ 0.260 (‘鄂茶 12’)，‘鄂茶 12’的转运系数显著高于其他两个品种 ($P<0.05$)。茎-叶转运系数为 0.099 (‘鄂茶 1 号’) ~ 0.192 (‘鄂茶 11’)，3 个品种无差异性显著。由表 3 可知，加硒后‘鄂茶 1 号’和‘鄂茶 12’根中硒含量无显著性差异，

说明‘鄂茶 12’叶中硒含量高于‘鄂茶 1 号’的主要原因是其根到茎中的转运能力较强。

2.1.3 茶树叶片硒含量与转运系数的相关性分析

为探究茶树叶片硒含量与其他部位硒含量和转运系数的相关性，对硒处理后茶树根、茎、叶总硒含量和根-茎、茎-叶转运系数进行相关性分析。结果如表 4 所示，无论是否添加硒，叶片的硒含量均与根、茎和茎-叶的转运系数呈正相关的关系，其中与不加硒时茎的硒含量和加硒后根-茎的转运系数的相关性达显著性水平 ($P<0.05$)。

2.2 硒处理下不同品种根部 *CsPht1* 基因的表达

为解析不同茶树品种对硒吸收累积的差异机制，进一步分析了磷酸转运蛋白基因在不同品种根部中的表达特性。如图 2 所示，不加硒 (CK) 时，基因 *CsPht1;2a* 在 3 个品种中的表达量无明显差异，基因 *CsPht1;3a* 表达趋势为‘鄂茶 12’>‘鄂茶 11’>‘鄂茶 1 号’；基因 *CsPht1;3b* 和 *CsPht1;8* 在‘鄂茶 1 号’中的表达量最高。硒处理下，基因 *CsPht1;2a* 在‘鄂茶 12’中的表达量最高，‘鄂茶 1 号’次之，‘鄂茶 11’最低，基因 *CsPht1;2b* 在‘鄂茶 11’中的表达量最高，基因 *CsPht1;3a* 在‘鄂茶 1 号’中的表达量最

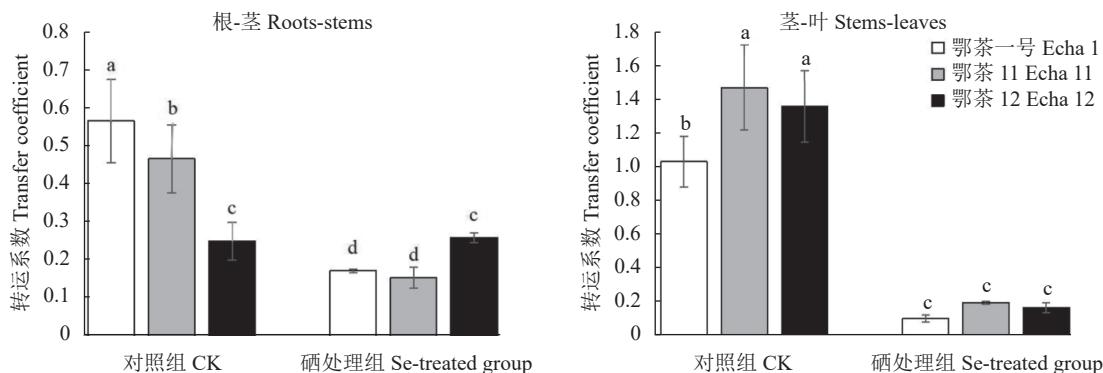


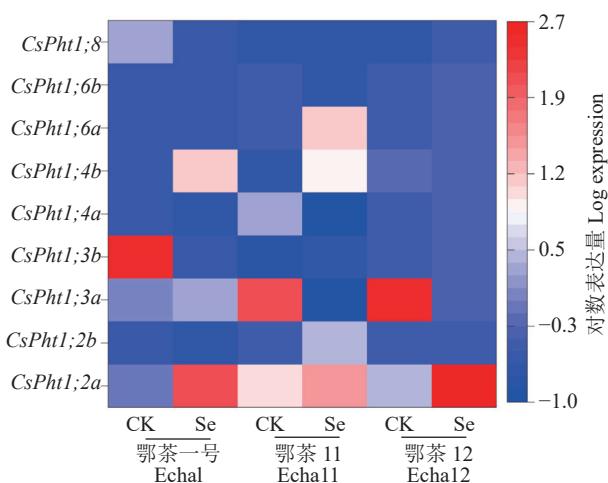
图 1 硒处理对 3 个品种硒转运系数的影响

Fig. 1 Effects of treatment on Se transfer coefficient in tea plants of 3 varieties

表4 叶片硒含量与茶树各部位硒含量及其转运系数的相关性分析

Table 4 Correlation between Se content in leaves and Se content and transport coefficients in various tissues of tea plants

处理 Treatments	项目 Items	根 Roots	茎 Stems	叶 Leaves	根-茎转运系数	茎-叶转运系数
					Transfer coefficient from roots to stems	Transfer coefficient from stems to leaves
CK	根 Roots	1	0.576	0.677	-0.825	0.973
	茎 Stems		1	0.992*	-0.013	0.749
	叶 Leaves			1	-0.141	0.828
	根-茎转运系数 Transfer coefficient from roots to stems				1	-0.672
	茎-叶转运系数 Transfer coefficient from stems to leaves					1
	根 Roots	1	0.842	0.381	0.751	-0.611
Se	茎 Stems		1	0.819	0.988	-0.088
	叶 Leaves			1	0.897*	0.500
	根-茎转运系数 Transfer coefficient from roots to stems				1	0.065
	茎-叶转运系数 Transfer coefficient from stems to leaves					1

图2 硒处理对3个品种根部*CsPht1*基因表达的影响Fig. 2 Effects of Se treatment on *CsPht1* expression in roots of tea plants of 3 varieties

高, 基因 *CsPht1;4b* 在3个品种中的表达趋势为‘鄂茶一号’>‘鄂茶11’>‘鄂茶12’, 基因 *CsPht1;6a* 在‘鄂茶11’中的表达量高于另两个品种。此外, 与对照组相比, 加硒处理诱导3个品种中的 *CsPht1;2a*、‘鄂茶11’中的 *CsPht1;2b*、‘鄂茶一号’和‘鄂茶11’中的 *CsPht1;4b* 以及‘鄂茶11’中的 *CsPht1;6a* 上调表达, 同时‘鄂茶11’和‘鄂茶12’中的 *CsPht1;3a*、‘鄂茶一号’中的 *CsPht1;3b* 和 *CsPht1;8* 以及‘鄂茶11’中的 *CsPht1;4a* 下调表达。

2.3 不同品种主要内含成分对外源硒的响应

硒对不同品种游离氨基酸、茶多酚、咖啡碱和黄酮类化合物含量的影响如图3所示。与对照组

(CK)相比, 添加硒显著提高了‘鄂茶12’的游离氨基酸、茶多酚、咖啡碱和黄酮类化合物的含量($P<0.05$), 增幅分别是34.01%、18.19%、9.82%、29.95%。同时, 添加硒显著提高了‘鄂茶一号’和‘鄂茶11’的咖啡碱含量($P<0.05$), 增幅分别是24.58%、6.58%, 但对这两个品种的游离氨基酸、茶多酚和黄酮类化合物含量影响不显著。

3 讨论

本研究比较分析了3个湖北省主栽茶树品种对硒吸收和转运的差异性, 以及施硒对不同品种叶片主要品质成分的影响。‘鄂茶一号’和‘鄂茶12’具有相同的亲本(‘福鼎大白茶’), 但二者在相同条件下的富硒能力存在差异, 这为通过杂交育种的方式选育出富硒茶树品种提供了可能, 该发现与Zhao等^[17]的研究结果一致。张联合等^[18]通过水培试验研究发现, 不同供硒水平下, 富硒和非富硒水稻品种苗期根部硒含量无显著差异, 低硒水平下, 富硒品种的茎叶与根中的总硒含量比高于非富硒品种, 推测硒吸收转运差异是两类水稻品种硒含量差异的主要原因。周鑫斌等^[19]利用溶液培养试验发现, 在相同蒸腾速率的条件下, 富硒水稻秀水48地上部硒含量明显高于非富硒水稻丙9652, 说明两个品种向地上部转运硒的能力存在显著性差异, 富硒品种更易将根中的硒向地上部转运, 推测富硒品种地上部硒含量高的关键原因是高效的转运体系, 而高效的转运体系可能是因为根部木质部具有较强的硒装载能力。

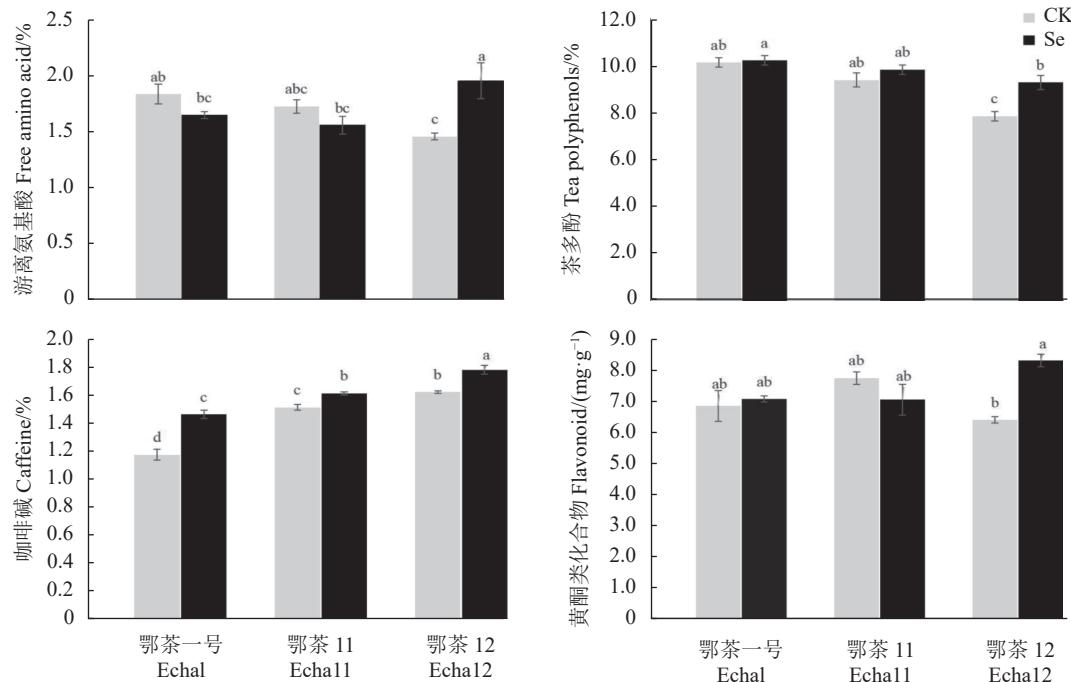


图 3 硒处理对 3 个茶品种主要内含成分的影响

Fig. 3 Effects of Se treatment on main chemical components in tea plants of 3 varieties

史志伟等^[20]在研究两个水稻品种向籽粒中转移硒的差异性中发现,同一供硒水平下,高累积品种根-茎、叶-籽粒的硒迁移系数显著高于低累积品种,而茎-叶的迁移系数则相反。本研究得出类似的结论,相关性分析发现叶片硒含量虽与各部位硒含量及其转运系数相关,但无论是否加硒,叶片硒含量的差异均取决于地上部的硒转运能力。本研究还发现3个茶树品种茎-叶的转运系数无显著差异,这与史志伟等^[20]的不一致,这可能跟硒处理条件或者物种间的差异有关。另外,3个品种根-茎与茎-叶的转运系数在加硒处理后均表现为降低的趋势,这可能是因为根部吸收的亚硒酸盐先转化为有机硒再向地上部运输,在无外源硒或低硒条件下,根系吸收的硒总量较低,能很快地将吸收的亚硒酸盐转化为有机硒并向上运输;当外源硒浓度较高时,根系中无机硒转化为有机硒需要一定时间,故而向地上部转运相对较慢,从而导致转运系数下降^[18]。在本研究中,不加硒时,不同品种各部位硒含量均是根>叶>茎,加硒后则为根>茎>叶,这说明添加外源硒会影响茶树对硒的分配,该结果与周鑫斌等^[21]的研究结果相似。

植物磷酸转运蛋白 Pht1 亚族成员在植物对亚硒酸盐的吸收和转运过程中发挥着重要作用。超表达或沉默水稻磷酸转运蛋白基因 *OsPT2* (*OsPht1;2*) 能显著提高或降低水稻对亚硒酸盐的吸收^[5,22-23]。此外,在高磷条件下,过表达 *OsPT8* (*OsPht1;8*) 促进烟草对磷和硒的累积^[24]。Yu 等^[25]通过 RNA 测序技

术发现,亚硒酸盐诱导青菜根系 *BraPht1;2* 和 *BraPht1;4* 的表达量上调 4 倍以上。郭丽娜等^[8]研究发现茶树('中茶 108')根系中的 *CsPht1;3* 在 0.6 mg·kg⁻¹ 亚硒酸钠处理的 1、5、7 d 时上调表达,在 3.0 mg·kg⁻¹ 亚硒酸钠处理的 7 d 时下调表达。前期研究发现茶树 *CsPht1* 亚族有 9 个成员^[13],本研究通过利用 qRT-PCR 技术分析发现,与对照组相比,0.05 mmol·L⁻¹ 亚硒酸钠诱导'鄂茶 11'和'鄂茶 12'根系的 *CsPht1;3a* 和'鄂茶 1 号'根系中的 *CsPht1;3b* 下调表达,这与郭丽娜等^[8]的研究结果类似。此外, *CsPht1;2a* 在 3 个品种根部中的表达量与硒累积量的差异一致,推测其在茶树吸收累积硒的过程中起主要作用,但相关机制还需要进一步研究。

此外,Zhao 等^[17]研究发现,施硒对茶叶中的茶多酚、氨基酸等成分的影响存在品种间差异,本研究得出类似结论。

4 结论

(1) 不加硒时,茶树叶片硒的含量为'鄂茶 11'>'鄂茶 12'>'鄂茶 1 号';加硒后则为'鄂茶 12'>'鄂茶 11'>'鄂茶 1 号';造成该差异的重要原因是植物地上部组织对硒的转运能力。

(2) 施硒可以促进茶树生长,改善茶叶品质,但品种间存在差异。

(3) 基因表达分析发现 *CsPht1;2a* 在茶树根系吸收和转运硒的过程中可能起重要作用。

参考文献:

- [1] 程水源. 硒学导论[M]. 北京: 中国农业出版社, 2019: 6.
- [2] 艾春月, 张宝军, 袁萍, 等. 中国天然茶叶硒的含量特征及其质量标准探讨[J]. 食品与营养科学, 2019, 8(2): 155–166.
- AI C Y, ZHANG B J, YUAN P, et al. Characteristics of organic selenium contents in natural tea of China and discussion on the quality standard[J]. *Food and Nutrition Sciences*, 2019, 8(2): 155–166. (in Chinese)
- [3] PU Z E, WEI G H, LIU Z H, et al. Selenium and anthocyanins share the same transcription factors R2R3MYB and bHLH in wheat[J]. *Food Chemistry*, 2021, 356: 129699.
- [4] 陈秋香, 施卫明, 王校常. 有色稻与常规稻富硒能力比较及其机理初探[J]. 土壤, 2010, 42(1): 88–94.
- CHEN Q X, SHI W M, WANG X C. Comparison of selenium accumulation ability between colored and general rice cultivars and its mechanism[J]. *Soils*, 2010, 42(1): 88–94. (in Chinese)
- [5] 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(4): 1183–1191.
- [6] 吴双桃, 朱慧. 凤凰单丛古茶树叶片中硒含量及溶出特征[J]. 食品科学, 2016, 37(4): 127–131.
- WU S T, ZHU H. Se contents and dissolution characteristics in leaves of ancient Fenghuang Dancong tea trees[J]. *Food Science*, 2016, 37(4): 127–131. (in Chinese)
- [7] 秦玉燕, 时鹏涛, 王运儒, 等. 不同茶树品种硒、汞、砷富集特性研究[J]. 西南农业学报, 2017, 30(6): 1396–1401.
- QIN Y Y, SHI P T, WANG Y R, et al. Enrichment characteristics of selenium, mercury and arsenic in different tea varieties[J]. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences*, 2017, 30(6): 1396–1401. (in Chinese)
- [8] 郭丽娜, 郝心愿, 王璐, 等. 茶树 CsPHT1;3 基因特性及其对硒的响应研究[J]. 茶叶科学, 2023, 43(2): 173–182.
- GUO L N, HAO X Y, WANG L, et al. Study on the characteristics of CsPHT1;3 and its response to selenium in tea plants[J]. *Journal of Tea Science*, 2023, 43(2): 173–182. (in Chinese)
- [9] 王丹丹, 黄妍, 周中政, 等. 不同浓度硒酸钠对茶树的生长和生理指标的影响[J]. 广西植物, 2021, 41(2): 183–194.
- WANG D D, HUANG Y, ZHOU Z Z, et al. Effects of selenate at different concentrations on growth and physiological indexes of tea tree[J]. *Guizhou Agricultural Science*, 2021, 41(2): 183–194. (in Chinese)
- [10] 杨海滨, 李中林, 徐泽, 等. 施肥对富硒茶园茶叶硒含量、养分和品质的影响[J]. 中国农业科技导报, 2018, 20(5): 124–131.
- YANG H B, LI Z L, XU Z, et al. Effects of fertilization on selenium content, nutrient and quality of tea in Se-enriched tea garden[J]. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 2018, 20(5): 124–131. (in Chinese)
- [11] 王磊, 黄婷婷, 杨春, 等. 叶面喷硒对台茶 12 号所制红绿茶含硒量及品质的影响[J]. 西南农业学报, 2016, 29(11): 2578–2582.
- WANG L, HUANG T T, YANG C, et al. Effect of selenium content and quality of black tea and green tea made of Taiwan tea 12 by foliar spray of selenium[J]. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences*, 2016, 29(11): 2578–2582. (in Chinese)
- [12] 李晓嫚, 郭丽娜, 郝心愿, 等. 萌芽前叶面喷施硒酸钠提高茶叶含硒量及品质[J]. 植物营养与肥料学报, 2022, 28(10): 1884–1892.
- LI X M, GUO L N, HAO X Y, et al. Foliar sodium selenate spray before budding stage increases selenium content and quality of tea leaves[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2022, 28(10): 1884–1892. (in Chinese)
- [13] 曹丹, 马林龙, 刘艳丽, 等. 茶树对硒吸收累积特性及其硒调控相关基因的表达分析[J]. 茶叶科学, 2020, 40(1): 77–84.
- CAO D, MA L L, LIU Y L, et al. Absorption and accumulation characteristics of selenium in tea plant (*Camellia sinensis*) and expression analysis of genes related to selenium regulation[J]. *Journal of Tea Science*, 2020, 40(1): 77–84. (in Chinese)
- [14] 黄意欢. 茶学实验技术[M]. 北京: 中国农业出版社, 1997: 115.
- HUANG Y H. *Experimental technology of tea science*[M]. Beijing: China Agriculture Press, 1997: 115. (in Chinese)
- [15] 国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 茶叶中硒含量的检测方法: GB/T 21729—2008[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.
- [16] 明佳佳, 胡承孝, 赵小虎, 等. 硒对油菜各部位矿质元素含量及其迁移特征的影响[J]. 浙江农业学报, 2016, 28(9): 1564–1571.
- MING J J, HU C X, ZHAO X H, et al. Content and migration characteristic of mineral element in rape with application of selenium[J]. *Acta Agriculturae Zhejiangensis*, 2016, 28(9): 1564–1571. (in Chinese)
- [17] ZHAO H, HUANG J, LI Y, et al. Natural variation of selenium concentration in diverse tea plant (*Camellia sinensis*) accessions at seedling stage[J]. *Scientia Horticulturae*, 2016, 198: 163–169.
- [18] 张联合, 郁飞燕, 施卫明. 富硒和非富硒水稻品种苗期硒吸收和转运差异[J]. 土壤, 2007, 39(3): 381–386.
- ZHANG L H, YU F Y, SHI W M. Difference of selenium uptake and transport in seedlings between enriched-and non-enriched-selenium rice cultivars[J]. *Soils*, 2007, 39(3): 381–386. (in Chinese)
- [19] 周鑫斌, 于淑惠, 赖凡. 水稻品种间吸收和转运硒特性差异机制研究[J]. 土壤学报, 2014, 51(3): 594–599.
- ZHOU X B, YU S H, LAI F. Mechanisms of differences in selenium absorption and transport between rice plants different in cultivar[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2014, 51(3): 594–599. (in Chinese)
- [20] 史志伟. 两个品种水稻向籽粒中转移硒的差异研究[D]. 郑州: 河南农业大学, 2018: 16–17.
- SHI Z W. Study on the difference of selenium transfer from two varieties of rice to grain[D]. Zhengzhou: Henan Agricultural University, 2018: 16–17 (in Chinese).
- [21] 周鑫斌, 施卫明, 杨林章. 富硒与非富硒水稻品种对硒的吸收分配的差异及机理[J]. 土壤, 2007, 39(5): 731–736.
- ZHOU X B, SHI W M, YANG L Z. Genotypical differences and characteristics of Se uptake and accumulation in rice[J]. *Soils*, 2007, 39(5): 731–736. (in Chinese)
- [22] HOPPER J L, PARKER D R. Plant availability of selenite and selenate as influenced by the competing ions phosphate and sulfate[J]. *Plant and Soil*, 1999, 210(2): 199–207.
- [23] LI H F, MCGRATH S P, ZHAO F J. Selenium uptake, translocation and speciation in wheat supplied with selenate or selenite[J]. *New Phytologist*, 2008, 178(1): 92–102.
- [24] SONG Z P, SHAO H F, HUANG H G, et al. Overexpression of the phosphate transporter gene OsPT8 improves the Pi and selenium contents in *Nicotiana tabacum*[J]. *Environmental and Experimental Botany*, 2017, 137: 158–165.
- [25] YU Y, LIU Z, LUO L Y, et al. Selenium uptake and biotransformation in *Brassica rapa* supplied with selenite and selenate: A hydroponic work with HPLC speciation and RNA-sequencing[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2019, 67(45): 12408–12418.

(责任编辑: 于洪杰)