

## Comparative Study about Selenium Accumulation of Chinese Yam with Root and Foliar Selenium Application

Song Jiaping<sup>1,2</sup> Zhang Zezhou<sup>2</sup> Cao Sheng<sup>3</sup> Chen Qingqing<sup>2,4</sup>  
Lu Yapu<sup>2</sup> Yin Xuebing<sup>1,2</sup> Yan Huabing<sup>3</sup> Wang Zhangmin<sup>2\*</sup>

1. School of Earth and Space Sciences, University of Science and Technology of China, Hefei;
2. Suzhou Setek Co., LTD, Jiangsu Bio-Engineering Research Center for Selenium, Suzhou;
3. Cash Crops Research Institute, Guangxi Academy of Agricultural Sciences, Nanning;
4. Yichun University, Yichun

**Abstract:** To explore the economical and efficient selenium biofortification technology for Chinese yam, a selenium biofortification field experiment of “Gui-Huai 7” and “Ziyu Huai Shan” was carried out in Ganxu Town, Wuming County, Nanning. At the early stage, expansion stage and maturity stage of tuber formation, different amounts of selenium was applied by root and foliar fertilization to two varieties of Chinese yam to study the effects of variety, fertilization method, time and amount on selenium accumulation of Chinese yam. The results showed that the biofortification effect of lower root selenium fertilization in early stage of tuber formation was the best in the experiment. The selenium content in Chinese yam was up to  $193.4 \pm 21.3$   $\mu\text{g}/\text{kg}$ , which was 4.5 times that of the control group. The biofortification effect of higher foliar selenium fertilization in early stage of tuber formation was the best. The

selenium content of Chinese yam was up to  $285.4 \pm 39.9$   $\mu\text{g}/\text{kg}$ , which was 6.6 times higher than the control group. Different variety of Chinese yam had different selenium accumulation effects under the same treatment. The optimal fertilization time was the early stage of tuber formation in both foliar and root fertilization. It is feasible to realize selenium biofortification by foliar fertilization and root fertilization, however, the biofortification effect of foliar fertilization is better than root fertilization.

**Key words:** Chinese yam; Selenium fertilizer; Root fertilization; Foliar fertilization; Selenium biofortification

Received: 2020-09-01; Accepted: 2020-09-10; Published: 2020-09-17

# 土壤和叶面施硒对淮山硒累积的对比研究

宋佳平<sup>1,2</sup> 张泽洲<sup>2</sup> 曹升<sup>3</sup> 陈清清<sup>2,4</sup> 鲁亚普<sup>2</sup> 尹雪斌<sup>1,2</sup>  
严华兵<sup>3</sup> 王张民<sup>2\*</sup>

1. 中国科学技术大学地球和空间科学学院, 合肥;
2. 苏州硒谷科技有限公司江苏省硒生物工程技术研究中心, 苏州;
3. 广西壮族自治区农业科学院经济作物研究所, 南宁;
4. 宜春学院, 宜春

邮箱: sa1700@mail.ustc.edu.cn

**摘要:** 为探究经济高效的淮山硒生物营养强化技术, 采用大田试验方法, 在南宁市武鸣县甘圩镇针对“桂淮7号”和“紫玉淮山”两个品种进行硒生物营养强

化试验。分别在淮山块茎初期、膨大期和成熟期,通过根施和叶施不同量硒肥,研究淮山品种、施肥方式、施肥时期以及施肥量对淮山硒含量的影响。结果表明,块茎初期根施低硒效果最好,淮山硒含量可达  $193.4 \pm 21.3 \mu\text{g}/\text{kg}$ ,为对照组硒含量的4.5倍;块茎初期叶施高硒效果最好,淮山硒含量可达  $285.4 \pm 39.9 \mu\text{g}/\text{kg}$ ,为对照组硒含量的6.6倍。不同品种淮山在相同施肥处理下硒营养强化效果有差异;无论是根施或叶施,最优硒生物营养强化时期均为淮山块茎初期;根施和叶施都能实现淮山硒生物营养强化,但是叶面施肥强化效果优于根施。

**关键词:** 淮山; 硒肥; 根部施肥; 叶面施肥; 硒生物营养强化

收稿日期: 2020-09-01; 录用日期: 2020-09-10; 发表日期: 2020-09-17

Copyright © 2020 by author (s) and SciScan Publishing Limited

This article is licensed under a [Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/).

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>



硒是人体必需微量元素,具有抗氧化作用,参与人体免疫过程调节,还有研究显示硒能降低癌症风险,保护肝脏功能 [1] [2]。缺硒有可能导致人体患克山病及大骨节病 [3] [4]。最新研究显示,中国只有 17% 的人群膳食硒摄入量达到 WHO/FAO 推荐的适宜摄入标准 (55 ~ 400  $\mu\text{g}/\text{天}/\text{成人}$ ),而有 39 ~ 61% 的人群膳食硒摄入量 (26 ~ 34  $\mu\text{g}/\text{天}/\text{成人}$ ) 低于其推荐摄入标准,潜在影响到中国国民的营养健康 [5] [6]。为了提高人群硒摄入水平,需要探究经济合理及安全高效的强化技术来实现作物硒营养强化。

外源硒强化的方式主要有根际施肥和叶面施肥两大类 [7] [8],前人已经在水稻、小麦 [9]、蔬菜 [10]、谷子 [11] 等作物上进行了相关研究,并

发现两种施肥方式均能显著提高各种作物可食部分的硒含量。但是，在作物不同生育期施加硒肥，其可食部分硒吸收效率也不尽相同。外源硒添加能实现作物的硒强化，但是不同施肥处理对其强化效果存在一定影响。

淮山含有大量蛋白质、糖类和维生素，是一种营养价值极高的农作物 [12]。目前关于淮山硒外源强化的研究较少 [13] [14] [15]，有限的研究表明，淮山施加硒肥后，其产量及硒含量都显著提高。因此，本研究选用两个淮山品种，探讨不同施肥方式、施肥时期和施肥量对淮山硒含量的影响，确定有效的淮山硒强化方法，为富硒淮山标准化生产提供参考。

## 1 材料与方 法

### 1.1 试验区概况

田间试验地点选在南宁市武鸣县甘圩镇，该地属亚热带季风性气候区，北部为喀斯特地貌石山，南部以高丘陵山地为主。试验地土壤硒含量背景值为  $1042.1 \pm 77.8 \mu\text{g}/\text{kg}$ 。

### 1.2 试验设计

供试淮山品种为“桂淮7号”（由桂平市金田村家春合作社提供，简称GH）和“紫玉淮山”（由玉林市兴业县大水庄园提供，简称ZY），试验于2019年4月30日在南宁市武鸣县甘圩镇试验田开展。在块茎初期（8月20日）、块茎膨大期（9月30日）、块茎成熟期（11月30日）分别对两个品种采用根际施硒肥和叶面喷施硒肥两种方式。根际施硒肥（苏州硒谷科技有限公司提供的基准硒肥，产品代码SETEK-BF-002，硒含量为  $1000 \text{ mg}/\text{kg}$ ），共设3个处理组，分别为CK（不施加硒肥）、低硒组（ $100 \text{ kg}/\text{hm}^2$ ，即  $100 \text{ g Se}/\text{hm}^2$ ）和高硒组（ $250 \text{ kg}/\text{hm}^2$ ，即  $250 \text{ g Se}/\text{hm}^2$ ）。叶面喷施液态硒肥（广西农业科学院提供，硒含量为  $2000 \text{ mg}/\text{kg}$ ）同样设3个处理组，分别为CK（不施加硒肥）、低硒组（ $10 \text{ kg}/\text{hm}^2$ ，即  $20 \text{ g Se}/\text{hm}^2$ ）和高硒组（ $25 \text{ kg}/\text{hm}^2$ ，即  $50 \text{ g Se}/\text{hm}^2$ ），具体处理方法见表1。小区面积  $60 \text{ m}^2$ ，随机排列，

3次重复。各小区田埂用塑料薄膜进行包裹隔离，田间栽培管理按大田常规操作进行。

表 1 大田试验处理方式

Table 1 Treatment methods of field experiments

施硒时期	处理组	桂淮7号 (GH)		紫玉淮山 (ZY)	
		根施 (g Se/hm <sup>2</sup> )	叶施 (g Se/hm <sup>2</sup> )	根施 (g Se/hm <sup>2</sup> )	叶施 (g Se/hm <sup>2</sup> )
块茎初期	CK	0	0	0	0
	低硒	100	20	100	20
	高硒	250	50	250	50
块茎膨大期	CK	0	0	0	0
	低硒	100	20	100	20
	高硒	250	50	250	50
块茎成熟期	CK	0	0	0	0
	低硒	100	20	100	20
	高硒	250	50	250	50

### 1.3 样品采集及检测

2020年1月10日采集成熟淮山样品，每个试验小区内采集3个淮山成熟块茎样品，同时，采集根施硒肥处理组小区内的根际土壤样品，密封保鲜带回实验室。将所有淮山可食部份用清水反复冲洗，再用去离子水冲洗后，低温烘干研磨，过200目筛待测。土壤样品风干后研磨，过200目筛待测。淮山样品参照《食品安全国家标准食品中硒的测定 GB 5009.93-2017》[16]氢化物原子荧光光谱法进行总硒检测分析，根系土壤样品参照《土壤中全硒的测定 NY/T1104-2006》[17]氢化物原子荧光光谱法进行总硒检测分析。

### 1.4 数据处理

数据结果利用 Excel 软件进行平均值和标准差统计。利用 SPSS 25.0 软件进行 ANOVA (Duncan's 法) 显著性差异检验，使用 origin 2019 进行图形绘制。

## 2 结果

### 2.1 根施硒肥对淮山硒含量的影响

根施硒肥处理组的淮山可食部分硒含量如表2所示。在块茎初期施肥，低硒组和高硒组成熟淮山硒含量都显著提高 ( $p < 0.05$ )，硒含量分别为  $193.4 \pm 21.3 \mu\text{g/kg}$  和  $192.3 \pm 34.2 \mu\text{g/kg}$ ，为CK组淮山硒含量 ( $43.0 \pm 30.3 \mu\text{g/kg}$ ) 的4.5倍。在块茎膨大期和块茎成熟期根施硒肥，淮山硒含量均无显著提高 ( $p > 0.05$ )。在相同施肥量处理下，根施低硒时，膨大期和成熟期施肥淮山硒含量分别为  $76.9 \pm 50.0 \mu\text{g/kg}$  和  $71.2 \pm 48.5 \mu\text{g/kg}$ ，块茎初期施肥组淮山硒含量显著高于块茎膨大期和成熟期施肥组淮山硒含量 ( $p < 0.05$ )，为膨大期和成熟期施肥淮山硒含量的2.5倍和2.7倍。根施高硒时，膨大期和成熟期施肥淮山硒含量分别为  $93.9 \pm 40.3 \mu\text{g/kg}$  和  $39.2 \pm 14.2 \mu\text{g/kg}$ ，块茎初期施肥组淮山硒含量显著高于块茎膨大期和成熟期施肥组淮山硒含量 ( $p < 0.05$ )，为膨大期和成熟期施肥淮山硒含量的2.0倍和4.9倍。

表2 不同处理条件下根施硒肥淮山硒含量 ( $\mu\text{g/kg}$ )

Table 2 Selenium content of Chinese yam under different root fertilization treatment ( $\mu\text{g/kg}$ )

施硒时期	处理组		
	CK组	低硒组	高硒组
块茎初期	$43.0 \pm 30.3 \text{ Ab}$	$193.4 \pm 21.3 \text{ Aa}$	$192.3 \pm 34.2 \text{ Aa}$
块茎膨大期	$43.0 \pm 30.3 \text{ Aa}$	$76.9 \pm 50.0 \text{ Ba}$	$93.9 \pm 40.3 \text{ Ba}$
块茎成熟期	$43.0 \pm 30.3 \text{ Ba}$	$71.2 \pm 48.5 \text{ Aa}$	$39.2 \pm 14.2 \text{ Ba}$

注：小写字母 abc 表示同一施肥期不同施肥量处理下淮山硒含量存在显著性差异， $p < 0.05$ ；大写字母 ABC 表示相同施肥量不同施肥期处理下淮山硒含量存在显著性差异， $p < 0.05$ 。

### 2.2 叶面施硒肥对淮山硒含量的影响

叶面施硒肥处理后淮山可食部分硒含量如表3所示。在块茎初期施

肥, 低硒组和高硒组成熟淮山硒含量都显著提高 ( $p < 0.05$ ), 硒含量分别为  $152.5 \pm 30.8 \mu\text{g/kg}$  和  $285.4 \pm 39.9 \mu\text{g/kg}$ , 为 CK 组淮山硒含量 ( $43.0 \pm 30.3 \mu\text{g/kg}$ ) 的 3.6 倍和 6.6 倍。在块茎膨大期叶面施硒肥, 低硒组淮山硒含量无显著提高, 高硒组淮山硒含量显著提高 ( $p < 0.05$ ), 达到  $91.1 \pm 12.1 \mu\text{g/kg}$ , 为对照组淮山硒含量的 2.12 倍。在块茎成熟期根施硒肥, 淮山硒含量均无显著提高 ( $p > 0.05$ )。在相同施肥量处理下, 根施低硒时, 膨大期和成熟期施肥淮山硒含量分别为  $68.9 \pm 37.5 \mu\text{g/kg}$  和  $52.4 \pm 24.0 \mu\text{g/kg}$ , 块茎初期施肥组淮山硒含量显著高于块茎膨大期和成熟期施肥组淮山硒含量 ( $p < 0.05$ ), 为膨大期和成熟期施肥淮山硒含量的 2.2 倍和 2.9 倍。在根施高硒时, 膨大期和成熟期施肥淮山硒含量分别为  $91.1 \pm 12.1 \mu\text{g/kg}$  和  $41.4 \pm 24.1 \mu\text{g/kg}$ , 块茎初期施肥组淮山硒含量显著高于块茎膨大期和成熟期施肥组淮山硒含量 ( $p < 0.05$ ), 为膨大期和成熟期施肥淮山硒含量的 3.1 倍和 6.9 倍。

表 3 不同处理条件下叶施硒肥淮山硒含量 ( $\mu\text{g/kg}$ )

Table 3 Selenium content of Chinese yam under different foliar fertilization treatment ( $\mu\text{g/kg}$ )

施硒时期	处理组		
	CK 组	低硒组	高硒组
块茎初期	$43.0 \pm 30.3$ Ac	$152.5 \pm 30.8$ Ab	$285.4 \pm 39.9$ Aa
块茎膨大期	$43.0 \pm 30.3$ Ab	$68.9 \pm 37.5$ Bab	$91.1 \pm 12.1$ Bb
块茎成熟期	$43.0 \pm 30.3$ Aa	$52.4 \pm 24.0$ Ba	$41.4 \pm 24.1$ Ba

注: 小写字母 abc 表示同一施肥期不同施肥量处理下淮山硒含量存在显著性差异,  $p < 0.05$ ; 大写字母 ABC 表示相同施肥量不同施肥期处理下淮山硒含量存在显著性差异,  $p < 0.05$ 。

### 2.3 各处理条件下不同淮山品种硒含量比较

分析不同施肥方式及不同施肥时期高硒组淮山硒含量, 比较各处理条件下不同品种淮山硒含量, 结果如表 4 所示。根施硒肥时, 块茎初期施肥 GH 及 ZY 淮山硒含量无显著差异 ( $p > 0.05$ ), 分别为  $204.2 \pm 49.0 \mu\text{g/kg}$  和  $180.3 \pm 9.7 \mu\text{g/kg}$ 。

块茎膨大期施肥 ZY 淮山硒含量为  $128.7 \pm 10.5 \mu\text{g/kg}$ ，显著高于 GH 淮山硒含量  $59.0 \pm 17.6 \mu\text{g/kg}$  ( $p < 0.05$ )。块茎成熟期施肥 GH 淮山硒含量  $26.5 \pm 1.6 \mu\text{g/kg}$ ，显著低于 ZY 淮山硒含量  $51.8 \pm 4.6 \mu\text{g/kg}$  ( $p < 0.05$ )。叶面喷施硒肥时，块茎初期施肥 GH 淮山硒含量为  $318.9 \pm 14.8 \mu\text{g/kg}$ ，与 ZY 淮山硒含量 ( $251.8 \pm 19.2 \mu\text{g/kg}$ ) 相比，显著提高了 26.7% ( $p < 0.05$ )。块茎膨大期施肥 GH 及 ZY 淮山硒含量无显著差异 ( $p > 0.05$ )，分别为  $85.2 \pm 11.5 \mu\text{g/kg}$  和  $96.9 \pm 11.6 \mu\text{g/kg}$ 。块茎成熟期施肥 GH 及 ZY 淮山硒含量也无显著差异 ( $p > 0.05$ )，分别为  $23.9 \pm 8.6 \mu\text{g/kg}$  和  $58.9 \pm 21.5 \mu\text{g/kg}$ 。

表 4 高硒组不同处理下不同品种淮山硒含量 ( $\mu\text{g/kg}$ )

Table 4 The selenium content of different varieties of Chinese yam under different treatments with higher selenium application ( $\mu\text{g/kg}$ )

施硒时期	根施硒肥淮山硒含量		叶施硒肥淮山硒含量	
	GH	ZY	GH	ZY
块茎初期	$204.2 \pm 49.0 \text{ a}$	$180.3 \pm 9.7 \text{ a}$	$318.9 \pm 14.8 \text{ a}$	$251.8 \pm 19.2 \text{ b}$
块茎膨大期	$59.0 \pm 17.6 \text{ b}$	$128.7 \pm 10.5 \text{ a}$	$85.2 \pm 11.5 \text{ a}$	$96.9 \pm 11.6 \text{ a}$
块茎成熟期	$26.5 \pm 1.6 \text{ b}$	$51.8 \pm 4.6 \text{ a}$	$23.9 \pm 8.6 \text{ a}$	$58.9 \pm 21.5 \text{ a}$

注：小写字母 abc 表示同一施肥期不同品种淮山硒含量存在显著性差异， $p < 0.05$ 。

## 2.4 块茎初期不同施肥方式对淮山硒含量的影响

分析块茎初期施肥不同施肥量不同品种淮山硒含量，比较各处理条件下根施和叶施淮山硒含量，结果如表 5 所示。对 GH 品种，在低硒组内，根际施肥和叶面施肥后淮山硒含量无显著差异 ( $p > 0.05$ )，分别为  $178.1 \pm 13.8 \mu\text{g/kg}$  及  $127.9 \pm 12.9 \mu\text{g/kg}$ 。经高硒施肥处理，根际施肥 GH 淮山含量达到  $204.2 \pm 49.0 \mu\text{g/kg}$ ，显著低于叶面施肥 GH 淮山硒含量  $318.9 \pm 14.9 \mu\text{g/kg}$  ( $p < 0.05$ )。和 GH 淮山类似，ZY 淮山硒含量在不同处理下也存在相同的规律。即低硒处理下根施和叶施硒肥淮山硒含量无显著差异 ( $p > 0.05$ )，硒含量分别为  $208.6 \pm 15.6 \mu\text{g/kg}$  和  $177.1 \pm 19.8 \mu\text{g/kg}$ 。高硒处理时，叶面施肥淮山硒含量达到  $251.8 \pm 19.2 \mu\text{g/kg}$ ，与根际施肥淮山 ( $180.3 \pm 9.7 \mu\text{g/kg}$ ) 相比，显著提高了 39.6% ( $p < 0.05$ )。

表5 块茎初期根施及叶施处理后淮山硒含量 ( $\mu\text{g}/\text{kg}$ )Table 5 Selenium content of Chinese yam under root and foliar fertilization in early stage of tuber formation ( $\mu\text{g}/\text{kg}$ )

处理组	GH 淮山硒含量		ZY 淮山硒含量	
	根施	叶施	根施	叶施
CK	23.0 ± 6.2 A	23.0 ± 6.2 A	63.0 ± 32.5 A	63.0 ± 32.5 A
低硒组	178.1 ± 13.8 A	127.9 ± 12.9 A	208.6 ± 15.6 A	177.1 ± 19.8 A
高硒组	204.2 ± 49.0 B	318.9 ± 14.9 A	180.3 ± 9.7 B	251.8 ± 19.2 A

注：字母 ABC 表示相同施肥量不同施肥方式处理下淮山硒含量存在显著性差异， $p < 0.05$ 。

### 3 讨论

#### 3.1 根施硒肥强化技术探究

本试验研究表明，根施硒肥能有效提高淮山可食用部分硒含量。与潘晓红等和陈雪等报道的根际施硒肥能提高作物硒含量 [18] [19] 结果类似。邢海峰等 [20] 发现土施硒  $68 \text{ g}/\text{hm}^2$  作种肥，可以使马铃薯全株硒含量提高 2.5 倍，收获期块茎硒含量达到  $93 \mu\text{g}/\text{kg}$ ，实现马铃薯硒强化。由于根肥大部分添加硒源为亚硒酸钠，通过作物根部撒肥，土壤中的总硒及能被植物根系吸收的有效态硒增多，作物硒积累量增多，因此能实现淮山硒生物营养强化。在对比不同时期硒强化效果时发现，在块茎初期施肥强化效果最好。习敏研究表明 [21]，马铃薯块茎生长期（出苗后 32 ~ 63 d）是马铃薯吸收锰元素最多，吸收强度最大的时期，块茎形成期（出苗后 12 ~ 31 d）是马铃薯吸收锌元素最多且吸收强度最大的时期。硒作为一种矿物质，和锰锌元素类似，淮山对其吸收强度在块茎未成熟期达到最大，结合本试验结果，说明在对淮山生产过程中，应在块茎初期给土壤施加硒肥，以得到最好的硒强化效果。

此外，本研究还表明，根施硒肥淮山施肥量对淮山硒含量无影响。荞麦两年硒强化试验表明，根际施肥量和荞麦硒含量呈显著正相关，相关系数高达 0.827 和 0.845 [22]。而在本研究中，根施硒肥低硒和高硒处理，淮山硒含量

无显著差异,这可能是由于不同作物对硒的吸收和富集能力有很大差异 [23],适量外源硒添加可以提高作物硒含量,但是超出其硒富集能力,外源硒不能被吸收利用,甚至会对作物产生毒害作用。因此,在富硒淮山标准化生产中,考虑到施肥成本,可以施加较低用量的硒肥,以达到高的硒利用率。

### 3.2 叶施硒肥强化技术研究

本试验研究表明,和根施硒肥类似,叶面施肥也能显著提高两品种淮山可食部位硒含量。叶面施肥作为主要农业施肥方式之一,被广泛应用于硒生物营养强化相关研究 [24] [25] [26] 及富硒农产品开发 [27] [28]。杨舒添等 [29] 研究发现  $60 \text{ g/hm}^2$  的叶面喷硒处理能分别提高 4 个品种玉米籽粒硒含量 118、139、163 和  $87 \mu\text{g/kg}$ 。陈文红等 [30] 探究了不同施肥时期叶面施加硒肥对紫色马铃薯块茎硒含量的影响,结果表明不同时期喷施硒肥马铃薯硒强化效果各不相同,在花期喷施硒肥效果最好,说明作物施肥效果受施肥时期影响。本研究也发现在淮山块茎初期施肥的硒生物营养强化效果最佳,与杨舒添和陈文红等研究结果类似,这主要和叶面施肥特点及淮山植株生长特点相关联。叶面施肥是利用叶片角质层的渗透性、角质层裂缝和气孔的吸收功能 [31],将吸收进来的简单的无机态硒,经过各种生物化学的变化,合成为复杂的有机硒,再输送到包括块茎在内的淮山植株各器官。块茎初期是淮山块茎开始生长的时期,此时,作物地上部分茎叶已经生长完全,喷施的硒肥,能被叶面高效吸收转化并运输到块茎。在块茎初期施肥,叶面喷施硒越多,淮山硒含量越高,这也和 Jiang 等的实验结果类似,即在一定范围内,叶面施肥量和淮山硒积累量呈正比 [22]。

因此在富硒淮山生产时,如果采用叶面喷施硒肥的强化方式,可以选择在块茎初期施肥,施加硒越多,淮山硒含量越高。

### 3.3 不同品种淮山硒含量的差异

研究表明,不同品种的淮山在相同土壤背景值及相同硒强化条件下,硒积累量存在差异。根施硒肥时,ZY 淮山硒强化效果优于 GH 淮山,叶施硒肥时,

GH 淮山硒强化效果优于 ZY 淮山。Zhang 等人对 151 个水稻品种的研究表明, 相同种植环境下, 不同品种糙米硒含量在 29 ~ 103  $\mu\text{g}/\text{kg}$  波动, 根到茎的总硒转运量是影响糙米硒含量的重要因素 [32]。富硒水稻能通过直接从茎向籽粒的转运过程和从剑叶至籽粒的转运过程运输较多的硒到籽粒, 这可能是引起水稻籽粒硒含量差异的直接原因 [33], 而作物品种间硒转运量的差异主要和基因型有关 [34]。在本研究中, GH 淮山和 ZY 淮山基因型不同, 对硒的转运量不同。同时, 在不同施肥方式下, 硒运输到淮山可食块茎的方式也不同, 导致了两种淮山在相同施肥处理下存在一定差异。

因此, 在富硒淮山生产过程中, 可根据施肥方式推广不同的淮山种植品种。根施硒肥时, 适宜推广 ZY 淮山, 叶施硒肥时, 则可以选择推广硒含量更高的 GH 淮山。

### 3.4 不同施肥方式对淮山硒含量的影响

对比块茎初期两个淮山品种通过根施和叶施硒肥后的淮山硒含量, 结果显示, 施加低硒时, 根施和叶施方式之间没有显著差异, 施加高硒时, 叶施硒强化效果优于根施处理组。叶面施硒量为根施硒量的 1/5, 叶面肥料中硒的利用效率远高于根际施肥。与本研究结果类似, 曹升等进行木薯外源硒强化技术研究发现, 三种外源硒强化方式的外源硒利用率大小顺序为叶面喷施 > 根施 > 叶面喷施 + 根施 [35]。这主要是由于根际施肥, 硒进入土壤后, 容易被土壤有机质固定, 从有效态硒转变为不能被植物根系吸收的硒形态。叶面施肥能避免养分在土壤中固定或转化, 直接供给作物吸收, 提高了硒的利用率。因此, 淮山硒外源强化的最高效的方式是叶面施肥。

## 4 结论

(1) 根施方式施加硒肥可以显著提高淮山硒含量, 淮山块茎初期施肥硒营养强化效果最好, 此时施加低硒 ( $100 \text{ g Se}/\text{hm}^2$ ), 即可获得较好的强化效果。

(2) 叶施方式施加硒肥也可以显著提高淮山硒含量, 淮山块茎初期施肥硒营养强化效果最好, 施硒量越高, 淮山硒含量越高。可选择在淮山块茎初期施

加高硒 (250 g Se/hm<sup>2</sup>)，以获得较好强化效果。

(3) 由于淮山品种基因型差异，GH 和 ZY 淮山在相同施肥处理下硒营养强化效果有差异。根施硒肥时，ZY 淮山硒强化效果优于 GH 淮山，叶施硒肥时，GH 淮山硒强化效果优于 ZY 淮山，可以根据施肥方式选择合适的淮山品种。

(4) 叶施硒肥比根施硒肥效率更高，且操作简单，适用于富硒淮山生产，但两种施肥方式均可生产出富硒淮山。

## 基金项目

广西创新驱动发展专项资金项目 (项目编号: 桂科 AA17202027)。

## 参考文献

- [1] Brown K M, Arthur J R. Selenium, Selenoproteins and Human Health: a Review [J]. *Public Health Nutr*, 2001, 4 (2B): 593–599.  
<https://doi.org/10.1079/PHN2001143>
- [2] Huang Y, Wang Q X, Gao J, et al. Daily Dietary Selenium Intake in a High Selenium Area of Enshi, China [J]. *Nutrients*, 2013, 5 (3): 700–710.  
<https://doi.org/10.3390/nu5030700>
- [3] Zhou H, Wang T, Li Q, et al. Prevention of Keshan Disease by Selenium Supplementation: a Systematic Review and Meta-analysis [J]. *Biol Trace Elem Res*, 2018, 186 (1): 98–105.  
<https://doi.org/10.1007/s12011-018-1302-5>
- [4] Long Z D, Yuan L X, Hou Y Z, et al. Spatial Variations in Soil Selenium and Residential Dietary Selenium Intake in a Selenium-rich County, Shitai, Anhui, China [J]. *Journal of Trace Elements in Medicine and Biology*, 2018, 50: 111–116. <https://doi.org/10.1016/j.jtemb.2018.06.019>
- [5] Ullah H, Liu G, Yousaf B, et al. A Comprehensive Review on Environmental Transformation of Selenium: Recent Advances and Research Perspectives [J]. *Environ Geochem Health*, 2019, 41 (2): 1003–1035.

<https://doi.org/10.1007/s10653-018-0195-8>

- [6] 张泽洲. 典型农作物中硒形态分析及其硒—镉相互作用研究 [D]. 中国地质大学, 2019.
- [7] Yin H, Qi Z, Li M, et al. Selenium Forms and Methods of Application Differentially Modulate Plant Growth, Photosynthesis, Stress Tolerance, Selenium Content and Speciation in *Oryza Sativa* L [J]. *Ecotoxicol Environ Saf*, 2019, 169: 911–917. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2018.11.080>
- [8] 李秀启, 尹国红, 郝浩浩, 等. 植物对硒的吸收利用及主要农作物硒生物强化研究进展 [J]. *甘肃农业科技*, 2019 (4): 65–71.
- [9] 孙发宇, 杨亮, 李磊, 等. 小麦硒强化研究进展 [J]. *生物技术进展*, 2017, 7 (5): 433–438.
- [10] 冯时钦, 粟晓万, 黄勇, 等. 几种蔬菜不同水平硒肥试验 [J]. *广西农学报*, 2017, 32 (2): 14–17. <https://doi.org/10.7748/ns.32.10.14.s15>
- [11] 张巽, 王宏富. 不同生育时期喷施硒肥对谷子籽粒含硒量的影响 [J]. *安徽农学通报 (下半月刊)*, 2009, 15 (14): 85–86.
- [12] 杨学梅. 山药营养保健成分及其应用前景 [J]. *当代生态农业*, 2012, (Z2): 131–134.
- [13] 臧传江, 许念芳, 刘延详, 等. 叶面喷施硒肥对山药产量和含硒量的影响 [J]. *种子科技*, 2019, 37 (1): 89–90.
- [14] 叶峻. 共沉淀富集氢化物发生——原子荧光光谱法同时测定山药中砷和硒 [J]. *分析科学学报*, 2012, 28 (5): 731–733. <https://doi.org/10.1093/bioinformatics/btr714>
- [15] 邢丹英, 金明珠, 江泽, 等. 几种作物施用硒矿粉的效果比较 [J]. *长江大学学报 (自科版)*, 2006 (2): 105–107.
- [16] 食品安全国家标准. 食品中硒的测定 [S]. GB 5009. 93–2017.
- [17] 土壤中全硒的测定 [S]. NY/T 1104–2006.
- [18] 潘晓红, 郑甲成, 史文卫, 等. 不同硒肥施入量对黑花生的产量和硒含量的影响 [J]. *甘肃农业大学学报*, 2011, 46 (5): 56–58.

- [19] 陈雪, 沈方科, 梁欢婷, 等. 外源施硒措施对水稻产量品质及植株硒分布的影响 [J]. 南方农业学报, 2017, 48 (1): 46-50.  
<https://doi.org/10.15358/0340-1650-2017-5-48>
- [20] 邢海峰, 高炳德, 樊明寿, 等. 马铃薯硒素吸收分配规律及硒肥效应研究 [J]. 华北农学报, 2012, 27 (6): 213-218.
- [21] 习敏. 马铃薯不同品种锰锌吸收、积累、分配规律及施肥响应 [D]. 内蒙古农业大学, 2011.
- [22] Jiang Y, Zeng Z H, Zhang K, et al. Effects of Selenium Fertilizer on Grain Yield, Se Uptake and Distribution in Common Buckwheat (*Fagopyrum esculentum* Moench) [J]. Plant, Soil and Environment, 2016, 61 (8): 371-377. <https://doi.org/10.17221/284/2015-PSE>
- [23] 程兆东, 王喜东. 硒的自然分布及植物对硒的吸收转运转化机制研究进展 [J]. 江西农业, 2017 (13): 71-73.
- [24] 刘春菊, 刘夫国, 陈伟, 等. 叶面喷施硒肥对鲜食玉米硒富集的影响 [J]. 江苏农业学报, 2012, 28 (4): 713-716.
- [25] 高家合, 李梅云, 晋艳. 叶面喷施硒肥对烤烟的影响 [J]. 中国农业科技导报, 2007 (2): 61-65.  
<https://doi.org/10.5771/1611-5821-2007-5-6-65>
- [26] 张艳玲, 潘根兴, 胡秋辉, 等. 叶面喷施硒肥对低硒土壤中大豆不同蛋白组成及其硒分布的影响 [J]. 南京农业大学学报, 2003 (1): 37-40.
- [27] 郭天宇, 徐宁彤, 曲琪环. 叶面喷施不同硒肥对水稻含硒量及产量的影响 [J]. 江苏农业科学, 2017, 45 (7): 59-61.  
<https://doi.org/10.1093/itnow/bwx106>
- [28] 陈火云, 王加冕, 汪欢, 等. 硒叶面肥对油菜农艺性状、产量和籽粒硒含量影响的初步研究 [J]. 长江大学学报 (自科版), 2018, 15 (2): 5-8.
- [29] 杨舒添, 杜天庆, 翟红梅, 等. 叶面喷硒对糯玉米生理特性及子粒硒含

- 量的影响 [J]. 玉米科学, 2020, 28 (1): 117-123.
- [30] 陈文红, 王晓琴, 万年鑫, 等. 不同时期喷施硒肥对紫色马铃薯块茎硒: 花青素含量的影响 [J]. 安徽农业科学, 2015, 43 (21): 92-94.  
<https://doi.org/10.2985/026.021.0113>
- [31] 李晓梅, 张海贵. 叶面施肥的原理及在果树生产中的应用 [J]. 山西果树, 2009 (4): 18-19.
- [32] Zhang L H, Shi W M, Wang X C, et al. Genotypic Differences in Selenium Accumulation in Rice Seedlings at Early Growth Stage and Analysis of Dominant Factors Influencing Selenium Content in Rice Seeds [J]. Journal of Plant Nutrition, 2006, 29 (9): 1601-1618.  
<https://doi.org/10.1080/01904160600851437>
- [33] 周鑫斌, 赖凡, 张城铭, 等. 不同形态硒向水稻籽粒转运途径及品种差异 [J]. 土壤学报, 2017, 54 (5): 1251-1258.  
<https://doi.org/10.1111/1365-2664.12844>
- [34] 裴英. 小麦硒含量控制基因的 QTL 定位及遗传分析 [D]. 四川农业大学, 2016.
- [35] 曹升, 陈会鲜, 严华兵, 等. 食用木薯天然富硒品种筛选及外源硒强化技术研究 [J]. 西南农业学报, 2019, 32 (10): 2285-2291.