

# 纳米硒对紫色马铃薯生长及其矿质元素含量和品质特性的影响

胡万行<sup>1,2</sup>, 石 玉<sup>1</sup>, 程玉琦<sup>1</sup>, 赵博思<sup>1,2</sup>, 周云云<sup>1</sup>, 张 毅<sup>1\*</sup>

(1 山西农业大学 园艺学院/山西省设施蔬菜提质增效协同创新中心, 山西太谷 030801; 2 西北农林科技大学 园艺学院, 陕西杨陵 712100)

**摘 要:**以紫色马铃薯品种‘黑美人’为试材,采用水培法,分别用不同浓度(0、0.38、0.19 和 0.095 mmol/L)纳米硒溶液对紫色马铃薯进行叶面喷施处理,研究纳米硒对紫色马铃薯生长、矿质元素含量及品质特性的影响。结果表明:(1)与对照相比,各硒处理马铃薯的生物量与单株结薯数均显著增加,其中喷施 0.095 mmol/L 硒处理的生物量最高且增幅达 1.5 倍,喷施 0.19 mmol/L 硒处理的单株结薯数显著增加 2.2 倍。(2)纳米硒能够显著提高紫色马铃薯叶片、根系、块茎硒含量,各器官硒含量大小呈现:根系>叶片>块茎的特点,且喷施 0.095 mmol/L 硒处理块茎总硒含量达 0.106 mg/kg,较对照显著提高 0.65 倍,达到了马铃薯块茎的富硒标准;同时纳米硒可在不同程度上调控 K、Ca、Mg、Mn、Zn 在马铃薯各器官中的分配。(3)随施硒浓度的增加,紫色马铃薯块茎中淀粉、可溶性蛋白及游离氨基酸含量呈先增加后降低的变化趋势,均在喷施 0.19 mmol/L 硒处理下达到最大值,且较对照分别显著增加 56.33%、26.91% 和 27.89%;块茎中花青素、可溶性糖含量呈下降趋势,均在喷施 0.095 mmol/L 硒处理下达到最大值,且较对照分别显著提高 24.73%、25.33%;而块茎中硝态氮含量呈上升趋势,在喷施 0.095 mmol/L 硒处理下最低并较对照显著降低 34.82%。研究表明,叶面喷施 0.095~0.19 mmol/L 纳米硒溶液能够显著促进紫色马铃薯生长和单株结薯数,提高硒元素含量,调控矿质元素含量在器官中分配,有效改善其块茎品质特性。

**关键词:**纳米硒;紫色马铃薯;生长;硒元素;品质特性

中图分类号:Q945.79; S532

文献标志码:A

## Effects of Nano-selenium on the Growth and Its Mineral Element Contents and Quality Characteristics of Purple Potatoes

HU Wanxing<sup>1,2</sup>, SHI Yu<sup>1</sup>, CHENG Yuqi<sup>1</sup>, ZHAO Bosi<sup>1,2</sup>, ZHOU Yunyun<sup>1</sup>, ZHANG Yi<sup>1\*</sup>

(1 College of Horticulture/Collaborative Innovation Center of Quality and Profit Improvement for the Protected Vegetables of Shanxi Province, Shanxi Agricultural University, Taigu, Shanxi 030801, China; 2 College of Horticulture, Northwest & University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

**Abstract:** In order to evaluate the effects of nano-selenium on growth, mineral element contents and quality characteristics of purple potatoes, in this study we treated the purple potato cultivar ‘black beauty’ under hydroponic cultivation with foliar-spraying of different concentrations of nano-selenium (0, 0.38, 0.19 and 0.095 mmol/L). The results showed that: (1) biomass and tuber number per plant of all selenium treatments increased significantly compared with the control group, among which the highest increase of plant biomass under the treatment of spraying with 0.095 mmol/L selenium reached 1.5 times, and the tuber

收稿日期:2019-09-28;修改稿收到日期:2020-02-02

基金项目:山西省高等学校大学生创新创业训练计划项目重点项目(2017084);山西省高等学校教学改革创新项目(J2016029);山西省重点研发计划重点项目子课题(201703D211001-04-03)

作者简介:胡万行(1994-),男,在读硕士研究生,主要从事蔬菜栽培生理生态研究。E-mail: hwx3665@163.com

\* 通信作者:张 毅,男,副教授,博士,主要从事设施蔬菜栽培生理研究。E-mail: harmony1228@163.com

number per plant treated with spraying with 0.19 mmol/L selenium significantly increased by 2.2 times. (2) Nano-selenium could significantly improve the selenium content of leaves, roots and tubers of purple potatoes. The pattern of total Se concentration in different tissues of the plant followed the order of root > leaf > tuber, and the total selenium content in tubers reached 0.106 mg/kg under the treatment of spraying with 0.095 mmol/L selenium, which was significantly increased by 0.65 times compared with the control group, that is to meet se-riched standard of potato tubers. Meanwhile, the distribution of K, Ca, Mg, Mn and Zn in potato tissues can be controlled by nano-selenium to different levels. (3) With the increase of selenium concentration in foliar-spraying, the contents of starch, soluble protein and free amino acid in purple potato tubers were appeared the trend of unimodal trend, which reached the maximum value under 0.19 mmol/L selenium treatment, and increased significantly by 56.33%, 26.91% and 27.89% respectively compared with the control. Meanwhile, the contents of anthocyanin and soluble sugar in tubers showed a decreasing trend, which reached the maximum value under the treatment of spraying with 0.095 mmol/L selenium, and increased significantly by 24.73% and 25.33% respectively compared with the control; while the nitrate nitrogen content was on the rise, and decreased significantly by 34.82% compared with the control, which reached the minimum value under 0.095 mmol/L selenium treatment. Therefore, nano-selenium foliar-spraying concentration at 0.095 – 0.19 mmol/L could significantly promote the growth and increase selenium content and quality characteristics of purple potato.

**Key words:** nano-selenium; purple potato; growth; selenium elements; quality characteristics

马铃薯(*Solanum tuberosum* L.)是粮菜兼用型第四大主粮作物,栽培面积仅次于小麦、水稻和玉米<sup>[1-2]</sup>,具有耐寒、耐旱、生长周期短、营养丰富等优点,深受消费者喜爱。中国作为马铃薯第一生产大国,2015年农业部又提出了马铃薯主粮化战略<sup>[3]</sup>,进一步推动了马铃薯产业的快速发展。但随着马铃薯土壤栽培面积逐年扩大,连作现象日益突出,随之带来的土传病害加剧、种性退化严重及种薯繁殖率低等问题制约着马铃薯生长和营养品质的提高。有研究表明,马铃薯水培技术的应用可扩大单株繁殖率,而且可有效避免连作障碍,关键可以保证植株庞大的根系和较强的根系活力,同时水培设备简易,成本较低又便于管理<sup>[4]</sup>。因此,在不挤占三大主粮耕地的前提下,利用非耕地在设施内采用水培技术对紫色马铃薯叶面进行富硒处理对于缓解耕地紧缺、种性退化、硒营养问题及提高种薯繁殖率和马铃薯品质具有重要实践意义。

硒作为继碘、锌之后人体所必需的第三大微量营养元素,具有抗氧化、抗癌、防治心血管疾病、延缓衰老等生物学功能<sup>[5-6]</sup>。同时,硒也是植物的有益元素之一<sup>[7]</sup>,在促进植株生长发育和提升营养品质等方面发挥着重要作用。但由于土壤-植物系统的硒匮乏,导致中国72%的地区属于缺硒或低硒地区<sup>[8-9]</sup>,据调查,中国居民平均日硒摄入量为26~32 μg,远低于中国营养学会和国际硒学会推荐的日摄入量50 μg和60 μg<sup>[6]</sup>。而农作物对硒的吸收和富集以及硒从植株向食物链的营养迁移特性已得到广

泛验证和应用,在辣椒<sup>[10]</sup>、小扁豆<sup>[11]</sup>、水稻<sup>[12]</sup>、胡麻<sup>[13]</sup>、马铃薯<sup>[1]</sup>等作物中均有报道。有研究表明,外源硒处理可以促进马铃薯生长,改善其品质。殷金岩等<sup>[8]</sup>发现土壤适宜施硒可增加马铃薯产量、有机硒转化率、粗蛋白、还原糖和维生素C(Vc)含量等。邢海峰等<sup>[14]</sup>研究证明,叶面喷硒和土壤施硒可使马铃薯块茎硒含量分别达到0.104 mg/kg和0.093 mg/kg,即达到或接近富硒水平。紫色马铃薯因其富含花青素、多酚类等多种高抗氧化活性物质而成为一种营养价值极高的新型保健食品<sup>[15]</sup>,目前国内外关于在水培条件下叶面喷施纳米硒对紫色马铃薯生长及品质特性调控效应的研究鲜有报道,而且发展富硒紫色马铃薯可产生巨大的经济效益,具有广阔的市场前景。

纳米硒是一种以蛋白质为核心、硒元素为膜的新型硒源,其性状为红色硒元素单质纳米小颗粒,粒径在20~60 nm,水溶解度较大,且表面富含活性基团,具有很强的催化活性,容易被植物体吸收和转运,故与传统无机硒和有机硒相比,纳米硒在低毒高活性、吸收转运效率高等方面表现出独特的生物学效应<sup>[12,16-17]</sup>。为此,本试验采用水培技术,以紫色马铃薯品种‘黑美人’为材料,以纳米硒为硒源,对紫色马铃薯叶面进行不同水平的富硒处理,探究外源硒对紫色马铃薯生长、矿质元素含量及品质特性等相关指标的影响,以期进一步阐明纳米硒对紫色马铃薯的影响效应,为基于水培技术进行马铃薯富硒栽培及推动马铃薯产业提质增效提供适当理论依据和

技术支持。

## 1 材料和方法

### 1.1 试验材料

供试品种为‘黑美人’紫色马铃薯。纳米硒由中国农业大学潘灿平教授馈赠的 19 mmol/L 纳米硒原液配制而成。

### 1.2 试验设计

本试验于 2018 年 4 月 11 日在山西农业大学园艺站连栋温室内进行。前期先后经暖种、浸种、催芽、炼芽等处理,然后播种培育壮苗,待幼苗 4~5 片幼叶展开时,定植于预先配置好的装有 1/2 剂量日本园试配方营养液(pH6.0±0.2)的塑料水培槽内,其标准营养液配方组成如下:Ca(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub>·4H<sub>2</sub>O 945 mg/L、KNO<sub>3</sub> 809 mg/L、NH<sub>4</sub>H<sub>2</sub>PO<sub>4</sub> 153 mg/L、MgSO<sub>4</sub>·7H<sub>2</sub>O 493 mg/L、FeEDTA 30 mg/L、H<sub>3</sub>BO<sub>3</sub> 2.86 mg/L、MnSO<sub>4</sub>·4H<sub>2</sub>O 2.13 mg/L、ZnSO<sub>4</sub>·7H<sub>2</sub>O 0.22 mg/L、CuSO<sub>4</sub>·5H<sub>2</sub>O 0.08 mg/L、(NH<sub>4</sub>)<sub>6</sub>Mo<sub>7</sub>O<sub>24</sub>·4H<sub>2</sub>O 0.02 mg/L。每 3 d 调 1 次 pH,每 6 d 换 1 次营养液。当幼苗从团棵到主茎封顶叶(第 12~16 叶)展开,即进入发棵期,将植株随机分成 4 组并进行叶面喷施蒸馏水、稀释 50 倍纳米硒溶液(即硒浓度为 0.38 mmol/L)、稀释 100 倍纳米硒溶液(即硒浓度为 0.19 mmol/L)和稀释 200 倍纳米硒溶液(即硒浓度为 0.095 mmol/L)处理,每个处理 3 次重复,每个重复 10 株。待 80% 左右的植株现蕾时进行第 2 次喷施,喷施处理和方法与发棵期相同。两次叶面富硒处理均选择在没有风、晴天上午 6:00~8:00 进行,喷施以叶面产生水膜且不滴落为止,先后两次各处理喷施液体用量分别控制为 0.5 L、1.0 L。

于第 2 次叶面硒处理后第 12 周,即进入收获期

时,每个处理随机选取 5 株,测定生物量,并分别记录各植株地下部单株结薯数,然后各处理随机取部分块茎鲜样储存于-80℃冰箱内备用,同时各处理随机取部分块茎鲜样烘干后磨碎过 100 目筛装入纸袋备用。取上述干样,每个处理 5 次重复,测定马铃薯各器官中矿质元素含量;同时,取上述块茎冻样,每个处理 5 次重复,测定营养品质。

### 1.3 测定指标与方法

**1.3.1 生物量及单株结薯数** 利用天平、烘箱等测定马铃薯植株的地上部、根系干鲜重,并计算其根冠比(根系鲜重/地上部鲜重),同时记录各植株地下部单株结薯数。

**1.3.2 矿质元素含量** 在通风橱内进行湿法消解制样,采用 iCAP-Q 电感耦合等离子体质谱仪(美国 Thermo 公司),测定叶、根及块茎中硒含量;利用 AA-6200 原子吸收分光光度计(日本 Shimadzu 公司),测定相应器官中 K、Ca、Mg、Mn、Zn、Cu 含量。

**1.3.3 营养品质** 花青素含量采用香草醛盐酸比色法<sup>[18]</sup>测定;可溶性糖及淀粉含量采用蒽酮比色法测定<sup>[17]</sup>;可溶性蛋白含量用考马斯亮蓝 G-250 染色法<sup>[19]</sup>测定;利用茚三酮比色法<sup>[20]</sup>测定游离氨基酸含量;硝酸盐含量则采用水杨酸浓硫酸比色法测定<sup>[21]</sup>。

### 1.4 数据处理与分析

试验数据采用 SPSS 20.0 进行方差分析,利用 SigmaPlot 12.5 进行作图。

## 2 结果与分析

### 2.1 纳米硒对紫色马铃薯生物量的影响

纳米硒处理可显著提高马铃薯植株生长量(表 1、图 1)。其中,喷施 0.095~0.38 mmol/L 硒处理紫色马铃薯地上部鲜重、根系干重和单株结薯数分别比

表 1 不同浓度纳米硒处理下紫色马铃薯生物量和单株结薯数

Table 1 The biomass and tuber number per plant of purple potatoes under different concentrations of nano-selenium

硒浓度 Selenium concentration (mmol/L)	地上部鲜重 Shoot fresh quality/g	根系鲜重 Root fresh quality/g	地上部干重 Shoot dry quality/g	根系干重 Root dry quality/g	根冠比 Root-shoot ratio	单株结薯数 Tuber number per plant
0	209.92±9.32c	15.38±1.40d	23.12±2.45c	3.55±0.36c	0.07±0.008b	3.33±0.58c
0.38	290.83±13.79b	23.67±1.89c	33.16±2.47b	4.87±0.40b	0.08±0.003b	6.00±1.00b
0.19	412.16±17.50a	33.79±1.56b	48.30±3.00a	7.38±0.80a	0.08±0.003b	10.67±1.15a
0.095	312.46±14.98b	38.35±2.04a	49.35±2.31a	5.29±0.39b	0.12±0.012a	7.00±1.00b

注:数据为平均值±标准差,同列不同小写字母表示处理间在 5%水平上差异显著(Duncan 检验);下同

Note: Data are shown as means ± SD, means followed by the different normal letters between treatments are significantly different at 0.05 level; the same as below



图1 不同浓度纳米硒处理下紫色马铃薯单株结薯状况

Fig.1 The tuber number per plant of purple potatoes under different concentrations of nano-selenium

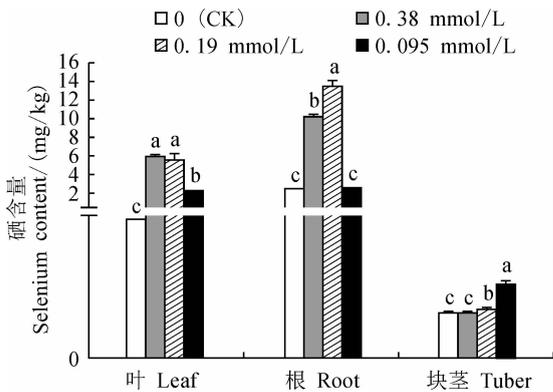


图2 不同浓度纳米硒处理下紫色马铃薯各器官硒含量

Fig.2 The selenium content of purple potato organs under different concentrations of nano-selenium

对照(CK)显著提高0.39~0.96倍、0.37~1.08倍和0.8~2.2倍,并均在0.19 mmol/L硒处理时达到最大值,且0.19 mmol/L硒处理均与0.38、0.095 mmol/L硒处理差异显著( $P < 0.05$ ),而后两者均无显著差异;各处理根系鲜重、地上部干重和根冠比均随纳米硒处理浓度降低表现出逐渐增加趋势,它们分别比对照增加0.54~1.5倍、0.43~1.13倍和0.11~0.68倍,且0.095 mmol/L硒处理与0、0.38 mmol/L硒处理差异均达到显著水平。以上结果表明叶面喷施纳米硒可有效提高紫色马铃薯生物量,尤其在喷硒0.19和0.095 mmol/L处理下效果较为显著。

## 2.2 纳米硒对紫色马铃薯各器官中硒含量的影响

纳米硒可显著提高紫色马铃薯叶、根、块茎中硒

含量(图2)。与对照相比,0.38~0.095 mmol/L硒处理紫色马铃薯叶片硒含量分别显著提高7.5、7.0和2.2倍;其相应根系与块茎硒含量增幅分别达3.2、4.6、0.08倍和0.02、0.12、0.65倍,且0.38、0.19 mmol/L硒处理根系和与0.19、0.095 mmol/L硒处理块茎的硒含量均有显著性提高。可见,纳米硒可有效促进紫色马铃薯对硒元素的吸收以及在各器官内的分配,且在0.19 mmol/L处理下各器官硒含量都得到显著提高。

## 2.3 纳米硒对紫色马铃薯各器官微量元素含量的影响

纳米硒在不同程度上可调控K、Ca、Mg、Mn、Zn、Cu在紫色马铃薯各器官中的分配(表2)。首先,紫色马铃薯叶片中K含量仅在0.38 mmol/L硒处理下比对照显著提高19.96%;叶片Ca、Mg、Mn、Zn含量在0.095~0.38 mmol/L硒处理下均比对照显著提高,增幅分别为33.76%~44.87%、7.26%~33.33%、19.74%~59.28%、14.15%~27.76%,且0.38、0.095 mmol/L硒处理Ca、Mg含量显著高于0.19 mmol/L硒处理,0.19 mmol/L硒处理Mn、Zn含量显著高于0.38、0.095 mmol/L硒处理;叶片Cu含量在0.38 mmol/L硒处理下比对照稍高,在0.19、0.095 mmol/L硒处理下比对照分别显著降低54.28%和36.28%。其次,紫色马铃薯根系K、Ca、Mg、Mn含量在0.38 mmol/L硒处理下分别比对照显著提高56.20%、58.63%、97.01%、40.16%,而此时Zn、Cu含量则分别显著降低

26.90%、6.17%；根系中K、Mg含量在0.19 mmol/L 硒处理下分别比对照显著提高23.63%、27.84%，而此时Ca、Zn含量则分别显著降低了36.65%、27.15%；根系Cu含量在0.095 mmol/L 硒处理下比对照显著增加35.35%，而此时其K、Mn含量则分别比对照显著降低40.06%、22.03%。此外，紫色马铃薯块茎Zn含量在0.38 mmol/L 硒处理下比对照显著提高了42.95%，而其Ca、Mg含量则分别显著降低26.02%、25.09%；块茎中Mn、Zn、Cu含量在0.19 mmol/L 硒处理下分别比对照显著提高19.45%、23.88%、22.44%，而其K、Mg含量则分别显著降低17.20%、32.10%；块茎Zn含量在0.095 mmol/L 硒处理下比对照显著增加17.47%，而其Ca、Mg、Mn含量则分别显著减少41.69%、35.79%、37.84%。以上结果说明，纳米硒对紫色马铃薯不同器官内微量元素含量的调控效应有所差异，且在叶片与根系中以提高K、Ca、Mg含量为主，而在块茎中以增加Mn、Zn含量为主。

## 2.4 纳米硒对紫色马铃薯块茎营养品质的影响

纳米硒对紫色马铃薯块茎的花青素、可溶性糖、淀粉、可溶性蛋白、游离氨基酸及硝态氮含量的影响不同(表3)。其中，紫色马铃薯块茎的花青素含量和可溶性糖含量均随喷硒浓度降低而逐渐增加，两者在0.095 mmol/L 硒处理下较对照分别显著提高24.73%和25.33%，而在0.19、0.38 mmol/L 硒处理下较对照分别显著下降10.28%~26.19%和9.54%~18.09%。块茎淀粉、可溶性蛋白和游离氨基酸含量均随硒浓度的降低呈先增加后降低的变化趋势，并均在0.19 mmol/L 硒处理下达到最大值，分别比对照显著增加56.33%、26.91%和27.89%；在0.38 mmol/L 硒处理下，游离氨基酸含量仍比对照显著增加22.25%，淀粉含量与对照相近，可溶性蛋白含量却比对照显著降低14.44%；在0.095 mmol/L 硒处理下，淀粉含量仍比对照显著增加20.34%，可溶性蛋白和游离氨基酸含量比对照稍高。此外，紫色马铃薯块茎的硝态氮含量随硒浓度的降低而呈逐渐

表2 不同浓度纳米硒处理下紫色马铃薯各器官微量元素含量

Table 2 The trace element contents of purple potato organs under different concentrations of nano-selenium

器官 Organ	硒浓度 Selenium concentration (mmol/L)	微量元素含量 Trace element content					
		K/%	Ca/%	Mg/%	Mn/(mg/kg)	Zn/(mg/kg)	Cu/(mg/kg)
叶 Leaf	0	2.500±0.049b	2.396±0.105c	0.771±0.028c	121.258±3.907c	45.103±1.260c	7.677±1.088a
	0.38	2.999±0.100a	3.393±0.035a	0.993±0.004a	145.190±11.547b	53.925±2.127b	8.195±0.834a
	0.19	2.636±0.119b	3.205±0.022b	0.827±0.004b	193.142±8.190a	57.622±0.962a	3.510±0.391c
	0.095	2.670±0.122b	3.471±0.062a	1.028±0.041a	155.092±5.746b	51.487±1.210b	4.892±0.315b
根系 Root	0	1.443±0.053c	3.075±0.038b	0.334±0.026c	802.438±25.471b	345.362±3.667a	60.328±0.797b
	0.38	2.254±0.139a	4.878±0.039a	0.658±0.041a	1124.712±13.348a	252.457±7.200b	56.607±0.757c
	0.19	1.784±0.200b	1.948±0.083c	0.427±0.006b	793.117±62.105b	251.603±6.772b	62.340±3.166b
	0.095	0.865±0.045d	3.017±0.040b	0.369±0.0009c	625.638±49.375c	339.672±10.174a	81.652±1.975a
块茎 Tuber	0	2.198±0.037a	0.319±0.015a	0.271±0.015a	295.540±6.208b	20.595±2.248c	7.847±0.508bc
	0.38	2.205±0.127a	0.236±0.010b	0.203±0.012b	308.176±4.554b	29.440±0.050a	8.598±0.422b
	0.19	1.820±0.072b	0.314±0.032a	0.184±0.007bc	353.025±9.199a	25.513±1.293b	9.608±0.695a
	0.095	2.041±0.111a	0.186±0.018c	0.174±0.005c	183.695±6.635c	24.193±1.080b	7.417±0.205c

表3 不同浓度纳米硒处理下紫色马铃薯块茎营养品质

Table 3 The nutritional quality of purple potato tubers under different concentrations of nano-selenium

硒浓度 Selenium concentration (mmol/L)	花青素含量 Anthocyanin content (nmol/g)	可溶性糖含量 Soluble sugar content/%	淀粉含量 Starch content/%	可溶性蛋白 Soluble protein content (mg/g)	游离氨基酸 Free amino acid content (mg/g)	硝态氮含量 Nitrate nitrogen content (μg/g)
0	339.093±28.753b	0.304±0.005b	4.529±0.053c	7.675±0.262b	2.607±0.063b	1.031±0.020a
0.38	250.295±8.683d	0.249±0.013d	4.568±0.098c	6.567±0.291c	3.187±0.124a	0.983±0.015a
0.19	304.230±6.252c	0.275±0.011c	7.080±0.288a	9.740±0.347a	3.334±0.067a	0.903±0.048b
0.095	422.956±15.602a	0.381±0.009a	5.450±0.163b	8.090±0.274b	2.655±0.053b	0.672±0.048c

下降趋势,其在 0.38 mmol/L 硒处理下与对照相近,在 0.19 和 0.095 mmol/L 硒处理下分别比对照显著降低 12.42% 和 34.82%。可见,适宜浓度的纳米硒可显著提高紫色马铃薯块茎的花青素、可溶性糖、淀粉、可溶性蛋白、游离氨基酸含量,显著降低其硝态氮含量,有效改善块茎的营养品质,并以 0.095~0.19 mmol/L 浓度水平较佳。

### 3 讨 论

生物量是衡量植株生长状况的重要生理指标。本试验表明,纳米硒能够显著提高紫色马铃薯植株生物量,尤其是在喷施 0.19、0.095 mmol/L 硒处理下效果最为显著,其最高增幅分别达 1.2 倍、1.5 倍,这可能与外源硒处理提高植株光合作用有一定关系<sup>[22]</sup>,因为在本试验条件下纳米硒处理增加了叶片 Mg 含量,而 Mg 作为叶绿素的重要组分,在光合作用中起重要作用。同时,本试验结果还显示,纳米硒显著提高了紫色马铃薯单株块茎数,且随着硒浓度的增加,其单株结薯数呈先上升后下降趋势,但仍显著高于对照,其中在喷施 0.19 mmol/L 处理下较对照显著提高 2.2 倍并达到最大值,这与 Lei 等<sup>[23]</sup>在紫薯上和穆婷婷等<sup>[24]</sup>在谷子上的研究结论类似,而与铁梅等对黑豆和黄豆的研究中当亚硒酸钠用量超过 100 mg/kg 时则出现减产现象有所差异<sup>[6]</sup>,这可能与选用硒源有关,本试验选用低毒、高活性且利用率较高的纳米硒分析纯作为硒源,故表现出显著的增薯效应。

硒元素具有多种生物学功能,是人体生命活动必需的微量元素,而富硒农产品已成为一种安全有效的补硒途径。在本研究条件下,适宜浓度的纳米硒可有效促进硒元素在紫色马铃薯叶、根中的积累并向块茎内部的转运,且各器官硒含量呈现根系>叶片>块茎的特点,同时叶、根硒含量随硒浓度的增加而呈先上升后降低的趋势,这与姜超强等<sup>[25]</sup>对烤烟的研究结论相似,而与殷金岩等<sup>[8]</sup>对马铃薯“早大白”的研究结果有所不同,这可能是由于不同品种马铃薯对硒的富集及转运能力存在差异所致。同时,在喷施 0.095 mmol/L 硒处理下紫色马铃薯块茎总硒含量达 0.106 mg/kg,即达到富硒马铃薯块茎硒素浓度标准<sup>[14]</sup>。此外,本试验结果还表明,喷施 0.38 mmol/L 硒处理显著增加了紫色马铃薯叶、根中 K、Ca、Mg 含量,而喷施 0.19 mmol/L 硒处理显著提高了块茎中 Mn、Zn 含量,表明 Se 与 K、Ca、Mg、Mn、Zn 之间存在协同作用,这与韩丹等在烤烟

上的研究结果不完全相同,其研究表明,低浓度硒显著增加了烤烟各部位中 K、Ca、Mg、Mn 及 Zn 含量,而在高浓度硒处理下则表现出抑制效应<sup>[19]</sup>。这可能是因为植株体内,K、Ca 能够维持植物细胞完整性并抵抗逆境损害,而 Mg、Mn、Zn 作为植物体内多种酶的重要活化剂,对于促进植物体内各种代谢活动具有积极作用,随施硒浓度的增加,会同时产生氧化、毒害等逆境胁迫,损伤植物细胞膜的完整性并降低其选择透过性<sup>[26,27]</sup>。因此,硒元素与其他矿质元素间的互作效应可能与载体作物及喷施浓度相关,尚有待进一步深入研究。

花青素属于生物类黄酮物质,是紫色马铃薯特征性营养成分,具有抗氧化、清除自由基和抗癌变等多方面功效<sup>[15,28-30]</sup>。本试验表明,喷施 0.095 mmol/L 硒可有效促进紫色马铃薯块茎花青素合成,其含量较对照显著提高 24.73%,而在高硒处理下则表现出抑制效应,这与他人研究结果相似。如刘丹丹研究结果显示,低硒浓度可以促进紫色生菜中花青素积累,这可能是由于硒促进了花青素生物合成关键基因(F3H 和 UFGT)的表达<sup>[31]</sup>。也有人在紫甘薯研究中发现,施硒对花青素含量影响不显著<sup>[28]</sup>,这可能与硒源类型及硒浓度设置密切相关。其次,可溶性糖、淀粉、可溶性蛋白、游离氨基酸等营养物质含量是评价马铃薯营养价值的常用指标。在本试验条件下,块茎的可溶性糖与淀粉含量呈负相关变化,喷施 0.095 mmol/L 硒处理块茎的可溶性糖含量较对照显著提高 25.33%,而喷施 0.38 和 0.19 mmol/L 硒处理块茎的可溶性糖含量有所降低,但却提高了块茎中淀粉含量,且在喷施 0.19 mmol/L 处理下较对照显著提高 56.33%。这可能是由于可溶性糖是淀粉合成的主要底物,其含量多少与合成的淀粉含量密切相关,而外源硒有助于块茎内可溶性糖的转化,进一步促进块茎中淀粉的积累。同时,各处理紫色马铃薯块茎中可溶性蛋白含量随硒浓度增加呈现先上升后降低的趋势,且最佳施用硒浓度为 0.19 mmol/L,与对照相比增幅达 26.91%,这与王佑成等<sup>[17]</sup>在绿豆芽上发现的变化规律基本一致。本试验还发现,块茎中游离氨基酸含量变化趋势在喷施 0.19 和 0.095 mmol/L 硒处理下与可溶性蛋白含量相一致,而在喷施 0.38 mmol/L 硒处理下与可溶性蛋白含量变化趋势则相反,这可能是因为低浓度硒处理有利于含硒氨基酸参与蛋白质代谢,从而促进了游离氨基酸与蛋白质之间的转化,而在较高浓度硒处理下可能会诱导膜

质过氧化,进而导致蛋白质结构、功能失常和降解,阻碍蛋白质的合成,故蛋白质水平呈下降趋势,而游离氨基酸含量有所上升<sup>[20]</sup>。此外,硝态氮作为蔬菜主要氮素来源,是影响作物丰产优质的积极因素,但作物积累过多通过食物链进入人体后会在细菌作用下被还原成亚硝酸盐,而亚硝酸盐进一步分解会产生NO,从而给人体健康造成伤害<sup>[32-33]</sup>。本试验结果表明,纳米硒可有效降低紫色马铃薯块茎硝态氮含量,且在喷施0.095 mmol/L硒处理下效果最佳,较对照显著降低34.82%,这与Lei等在莴苣上的研究结果相似,外源硒通过调节氮素代谢酶的转运和增强其活性进而降低植株体内硝态氮的积累<sup>[34]</sup>。而在喷施0.38 mmol/L硒处理下块茎硝态氮含量无明显变化,这可能与硒浓度设置相关,故关于纳米硒降低马铃薯块茎硝态氮含量的有效浓度有待进一步确定。

综上所述,叶面喷施纳米硒可以显著提高紫色

马铃薯植株生物量、硒含量及营养品质。首先,各浓度硒处理紫色马铃薯生物量均比对照显著提高;其次,块茎总硒含量在喷施0.095 mmol/L处理下达到马铃薯块茎富硒标准,且纳米硒在不同程度上调控了K、Ca、Mg、Mn、Zn等其他矿质元素在马铃薯各器官中的分配;此外,0.19 mmol/L纳米硒处理块茎的淀粉、可溶性蛋白、游离氨基酸含量与0.095 mmol/L纳米硒处理的块茎花青素、可溶性糖含量均较对照显著提高,而两浓度处理块茎硝态氮含量均显著降低,有效提升了马铃薯块茎营养品质及经济价值。因此,生产富硒紫色马铃薯以0.095~0.19 mmol/L纳米硒浓度喷施最佳。本研究结果可为纳米硒在马铃薯富硒栽培中的应用推广提供适当理论参考,而从矿质营养学角度解释纳米硒与马铃薯植株体内其他矿质元素间互作效应及改善马铃薯品质特性的最适喷施浓度仍需进一步研究。

## 参考文献:

- [1] 殷金岩, 耿增超, 孟令军, 等. 不同硒肥对马铃薯产量、硒含量及品质的影响[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2012, **40**(9): 122-127.  
YIN J Y, GENG Z C, MENG L J, *et al.* Effects of different selenium fertilizers on the yield, selenium contents and qualities of potatoes[J]. *Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition)*, 2012, **40**(9): 122-127.
- [2] 李勇, 吕文河, 吕典秋, 等. 施氮水平对不同淀粉型马铃薯块茎产量和淀粉品质的影响[J]. 中国农业大学学报, 2019, **24**(3): 27-38.  
LI Y, LÜ W H, LÜ D Q, *et al.* Effects of nitrogen fertilizer application rate on the tuber yield and starch quality of potato varieties with different starch contents[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2019, **24**(3): 27-38.
- [3] 关佳晨, 蔡海龙. 我国马铃薯生产格局变化特征及原因分析[J]. 中国农业资源与区划, 2019, **40**(3): 92-100.  
GUAN J C, CAI H L. Analysis on the changes and reasons of potato production pattern in China[J]. *Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning*, 2019, **40**(3): 92-100.
- [4] 张晓勇, 唐道彬, 王季春, 等. 水培营养液离子浓度对脱毒马铃薯生长发育和光合性能的影响[J]. 西南农业学报, 2017, **30**(2): 345-353.  
ZHANG X Y, TANG D B, WANG J C, *et al.* Effects of different ionic concentration on plant growth and photosynthetic characteristics in virus-free potato by hydroponic system[J]. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences*, 2017, **30**(2): 345-353.
- [5] DEVI P, JAIN R, THAKUR A, *et al.* A systematic review and meta-analysis of voltammetric and optical techniques for inorganic selenium determination in water[J]. *Trends in Analytical Chemistry*, 2017, 69-85.
- [6] 铁梅, 韩杰, 李宝瑞, 等. 土壤施硒对黑豆和黄豆硒质量分数及产量的影响[J]. 西北农业学报, 2014, **23**(10): 90-96.  
TIE M, HAN J, LI B R, *et al.* Effects of selenium fertilization on the yield and selenium mass fraction of black soya beans and soya[J]. *Acta Agriculturae Boreali-Occidentalis Sinica*, 2014, **23**(10): 90-96.
- [7] HAGHIGHI M, SHEIBANIRAD A, PESSARAKLI M. Effects of selenium as a beneficial element on growth and photosynthetic attributes of greenhouse cucumber[J]. *Journal of Plant Nutrition*, 2016, **39**(10): 1493-1498.
- [8] 殷金岩, 耿增超, 李致颖, 等. 硒肥对马铃薯硒素吸收、转化及产量、品质的影响[J]. 生态学报, 2015, **35**(3): 823-829.  
YIN J Y, GENG Z C, LI Z Y, *et al.* Effects of three fertilizers on uptake, transformation, yield and quality of potatoes[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, **35**(3): 823-829.
- [9] ZHANG H Q, ZHAO Z Q, ZHANG X, *et al.* Effects of foliar application of selenate and selenite at different growth stages on Selenium accumulation and speciation in potato (*Solanum tuberosum* L.). [J]. *Food chemistry*, 2019, 286: 550-556.
- [10] 李磊, 尹显慧, 龙友华, 等. 叶面喷施硒对辣椒果实品质及微量元素的影响[J]. 北方园艺, 2019, (16): 1-6.  
LI L, YIN X H, LONG Y H, *et al.* Effects of foliar spraying of selenium fertilizer on fruit quality and trace elements in pepper[J]. *Northern Horticulture*, 2019, (16): 1-6.
- [11] EKANAYAKE L J, THAVARAJAH D, VIAL E, *et al.* Selenium fertilization on lentil (*Lens culinaris* Medikus) grain yield, seed selenium concentration, and antioxidant activity[J]. *Field Crops Research*, 2015, 177: 9-14.
- [12] 王雅琦, 朱丽娜, 李奎, 等. 小麦和水稻对纳米硒的吸收和转运[J]. 环境科学, 2019, **40**(10): 4654-4660.  
WANG Y Q, ZHU L N, LI K, *et al.* Absorption and transportation of selenium nanoparticles in wheat and rice[J]. *Environmental Science*, 2019, **40**(10): 4654-4660.

- [13] 冯学金, 郭秀娟, 杨建春, 等. 喷施硒肥对胡麻子粒硒含量、产量及品质的影响[J]. 作物杂志, 2019, (3): 155-157.  
FENG X J, GUO X J, YANG J C, *et al.* Effects of spraying selenium fertilizer on selenium content, yield and quality of flax seed[J]. *Crops*, 2019, (3): 155-157.
- [14] 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.  
XING H F, GAO B D, FAN M S, *et al.* Studies on the effects of selenium absorption, distribution and selenium reaction of potato [J]. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 2012, 27(6): 213-218.
- [15] 姚 兰, 雷 灿, 艾训儒. 富硒紫色马铃薯多酚类组成及主要微量元素分析[J]. 食品研究与开发, 2016, 37(9): 1-5.  
YAO L, LEI C, AI X R. Phenolic composition and beneficial trace minerals of selenium enriched purple potatoes[J]. *Food Research and Development*, 2016, 37(9): 1-5.
- [16] BENKO I, NAGY G, TANCZOS B, *et al.* Subacute toxicity of nano-selenium compared to other selenium species in mice [J]. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 2012, 31(12): 2 812-2 820.
- [17] 王佑成, 赵天瑶, 裴淑敏, 等. 纳米硒喷施对绿豆芽生长特性、营养品质、酚类含量和抗氧化性的影响[J]. 中国农业大学学报, 2019, 24(5): 39-46.  
WANG Y C, ZHAO T Y, CHANG S M, *et al.* Effect of nano-selenium spraying on the growth characteristics, nutritional quality, phenolics content and antioxidant activity of mung bean sprouts[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2019, 24(5): 39-46.
- [18] 蒋 静, 王伟华. 原花青素含量测定方法考察及应用[J]. 食品工业, 2019, 40(4): 168-172.  
JIANG J, WANG W H. Procyanidins content determination method and application[J]. *Food Industry*, 2019, 40(4): 168-172.
- [19] 韩 丹, 熊双莲, 许自成, 等. 硒对烤烟生长、化学指标及矿质营养元素含量的影响[J]. 核农学报, 2017, 31(10): 2 072-2 079.  
HAN D, XIONG S L, XU Z C, *et al.* Effects of selenium on growth, chemical index and mineral nutrition contents of flue-cured tobacco [J]. *Acta Agriculturae Nucleatae Sinica*, 2017, 31(10): 2 072-2 079.
- [20] 施 怡, 胡兴锁, 潘亚璐, 等. 富硒双孢蘑菇硒形态分布及其营养品质和抗氧化特性[J]. 食品科学, 2017, 38(9): 99-105.  
SHI Y, HU X S, PAN Y L, *et al.* Selenium speciation distribution, nutritional quality and antioxidant activity of Se-enriched *Agaricus bisporus*[J]. *Food Science*, 2017, 38(9): 99-105.
- [21] 赵 倩, 石晓勇, 陈月红, 等. 水杨酸浓硫酸比色法测定浒苔中硝酸盐含量[J]. 海洋学报, 2017, 39(2): 112-119.  
ZHAO Q, SHI X Y, CHEN Y H, *et al.* Salicylic acid-concentrated sulfuric acid colorimetry method for determination of nitrate content in *Ulva prolifera* [J]. *Acta Oceanologica Sinica*, 2017, 39(2): 112-119.
- [22] 钟松臻, 张宝军, 张 木, 等. 硒对水稻光合作用及抗氧化作用的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2017, (4): 134-139.  
ZHONG S Z, ZHANG B J, ZHANG M, *et al.* Effects of selenium on photosynthesis and antioxidation of rice[J], *Soils and Fertilizers Sciences in China*, 2017, (4): 134-139.
- [23] LEI C, MA Q, TANG Q Y, *et al.* Sodium selenite regulates phenolics accumulation and tuber development of purple potatoes[J]. *Scientia Horticulturae*, 2014, 165: 142-147.
- [24] 穆婷婷, 杜慧玲, 张福耀, 等. 外源硒对谷子生理特性、硒含量及其产量和品质的影响[J]. 中国农业科学, 2017, 50(1): 51-63.  
MU T T, DU H L, ZHANG F Y, *et al.* Effects of exogenous selenium on the physiological activity, grain selenium content, yield and quality of foxtail millet[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2017, 50(1): 51-63.
- [25] 姜超强, 沈 嘉, 徐经年, 等. 不同富硒土壤对烤烟生长及硒吸收转运的影响[J]. 西北植物学报, 2014, 34(11): 2 303-2 308.  
JIANG C Q, SHEN J, XU J N, *et al.* Effects of Se-enriched soils on the plant growth, selenium uptake and transport in flue-cured tobacco [J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2014, 34(11): 2 303-2 308.
- [26] VERBRUGGEN N, HERMANS C. Physiological and molecular responses to magnesium nutritional imbalance in plants [J]. *Plant and Soil*, 2013, 368(1/2): 87-99.
- [27] HAN D, XIONG S L, TU S X, *et al.* Interactive effects of selenium and arsenic on growth, antioxidant system, arsenic and selenium species of *Nicotiana tabacum* L. [J]. *Environmental and Experimental Botany*, 2015, 117(2): 12-19.
- [28] 郭文慧, 刘 庆, 史衍玺. 施硒对紫甘薯硒素累积及产量和品质的影响研究[J]. 中国粮油学报, 2016, 31(9): 31-37.  
GUO W H, LIU Q, SHI Y X. Effects of applying selenium on the accumulation of selenium, yield and quality of purple sweet potato[J]. *Journal of the Chinese Cereals and Oils Association*, 2016, 31(9): 31-37.
- [29] GU K D, WANG C K, *et al.* How do anthocyanins paint our horticultural products? [J]. *Scientia Horticulturae*, 2019, 249: 257-262.
- [30] STEED L E, TRUONG V D. Anthocyanin Content, Antioxidant activity, and selected physical properties of flowable Purple-fleshed sweet potato purees [J]. *Journal of Food Science*, 2008, 73(5): 215-221.
- [31] 刘丹丹. 南京:外源硒对紫色生菜生理特性及花青素合成调控的研究[D]. 南京:南京农业大学, 2016.
- [32] 鲁 焯. N-亚硝基化合物对人体的危害及防治措施研究[J]. 食品研究与开发, 2014, 35(2): 128-130.  
LU X. Study on the harm of N-nitroso compounds to human health and prevention measures[J]. *Food Research and Development*, 2014, 35(2): 128-130.
- [33] 南运有, 吕婷婷, 曹敏轩, 等. 马铃薯硝态氮转运蛋白基因的克隆及表达分析[J]. 西北植物学报, 2019, 39(4): 588-594.  
NAN Y Y, LÜ T T, CAO M X, *et al.* Cloning and expression analysis of potato nitrate transporter gene[J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2019, 39(4): 588-594.
- [34] LEI B, BIAN Z H, YANG Q C, *et al.* The positive function of selenium supplementation on reducing nitrate accumulation in hydroponic lettuce (*Lactuca sativa* L.) [J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2018, 17(4): 837-846.