

富锌硒花生芽的营养成分及其抗氧化活性

吴雪婷, 廖宁, 刘昆仑*

(河南工业大学粮油食品学院, 河南郑州 450001)

摘要: 锌和硒是人体日常生活不可缺少但普遍严重缺失的微量元素, 为了给锌和硒的缺失人群补充锌和硒, 可以利用花生发芽吸收营养物质生长的特性研究锌、硒膳食补充剂。该研究以花生作为膳食补充剂的载体, 在浸种时添加硫酸锌 (0、10、20、30、40、50 mg·L⁻¹) 和亚硒酸钠 (0、100、200、300、400、500 mg·L⁻¹) 溶液, 通过发芽富集锌硒元素。结果显示, 外源锌的质量浓度在 40 mg·L⁻¹, 外源硒的质量浓度在 420 mg·L⁻¹ 时, 花生芽富集的锌、硒含量最高, 较普通花生芽分别提高了 2.0 倍和 23.76 倍。除此以外, 锌、硒的富集增加花生芽中多酚的含量, 其中花生芽中儿茶素、水杨酸、槲皮素和芦丁等含量都显著提升 ($P<0.05$), 而有毒物质棉酚的含量受到显著抑制 ($P<0.05$)。同时, 花生芽中多酚含量和硒含量的显著增加 ($P<0.05$) 也增强了花生芽的抗氧化能力。综上所述, 富锌、硒花生芽可以作为新型锌硒膳食补充剂有助于缺锌硒人群的日常补充, 同时也能为人体提供更多的生物活性物质。

关键词: 花生芽; 锌、硒富集; 多酚; 抗氧化能力

文章编号: 1673-9078(2026)02-28-39 DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2026.2.1608

Nutrient Composition and Antioxidant Activity of Zinc- and Selenium-enriched Peanut Sprouts

WU Xueting, LIAO Ning, LIU Kunlun*

(College of Grain, Oil and Food, Henan University of Technology, Zhengzhou 450001, China)

Abstract: Despite being indispensable, zinc and selenium are often severely deficient trace elements in humans. To achieve optimal zinc and selenium supplementation for deficient populations, dietary supplements of these elements can be investigated by harnessing the nutrient-absorbing properties of germinating peanuts. In the present study, peanut was used as a carrier of dietary supplements, with zinc sulfate (0, 10, 20, 30, 40, 50 mg·L⁻¹) and sodium selenite (0, 100, 200, 300, 400, 500 mg·L⁻¹) solutions added during seed soaking to attain zinc and selenium enrichment through germination. The results showed that the enrichment of zinc and selenium in peanut sprouts was highest at exogenous zinc and selenium concentrations of 40 and 420 mg·L⁻¹, respectively, with contents being higher than 2.0 and 23.76 times than those in the control peanut sprouts, respectively. Zinc and selenium enrichment also increased the polyphenol content of peanut sprouts. The contents of catechin, salicylic acid, quercetin, and rutin were significantly increased ($P<0.05$), while that of toxic gossypol was significantly decreased ($P<0.05$). The significant increases in polyphenol and selenium contents ($P<0.05$) also enhanced the antioxidant capacity of peanut sprouts. The findings of this study suggest zinc- and selenium-enriched peanut sprouts as a novel zinc-selenium dietary supplement for daily supplementation in zinc-

引文格式:

吴雪婷,廖宁,刘昆仑.富锌硒花生芽的营养成分及其抗氧化活性[J].现代食品科技,2026,42(2):28-39.

WU Xueting, LIAO Ning, LIU Kunlun. Nutrient composition and antioxidant activity of zinc- and selenium-enriched peanut sprouts [J]. Modern Food Science and Technology, 2026, 42(2): 28-39.

收稿日期: 2024-10-29 ; 修回日期: 2024-12-23 ; 接受日期: 2025-01-07
基金项目: 国家自然科学基金项目 (32172259) ; 河南省重点研发计划项目 (231111111800) ; 河南省科技副青年拔尖人才计划项目 (2021) ; 河南工业大学创新基金计划项目 (2021ZKCJ03)
作者简介: 吴雪婷 (1998-), 女, 硕士研究生, 研究方向: 食品工程, E-mail: 18342631696@139.com
通讯作者: 刘昆仑 (1982-), 男, 博士, 教授, 研究方向: 食品组分与营养, E-mail: knlnliu@126.com

and selenium-deficient populations, providing additional bioactive substances for the human body.

Key words: peanut sprouts; zinc and selenium enrichment; polyphenols; antioxidant capacity

花生芽菜, 是花生种子发芽后短期培养而得到的一种芽类蔬菜。花生本身富含多种维生素、矿物质以及各种活性物质^[1], 如白藜芦醇、对香豆酸、单宁等, 发芽后, 花生内的大分子营养物质被有效分解成小分子, 更容易被人体吸收^[2]。而花生中具有抗炎、抗肿瘤、预防骨质疏松的白藜芦醇的含量^[3]也因花生种子的萌发生长而含量增加。

微量元素是植物体内不可缺少一部分, 能促进蛋白质和叶绿素合成、调控植物体内新陈代谢, 从而影响植物的生长。其中, 微量元素锌对植物的生长影响明显。锌以二价阳离子形式被植物通过扩散作用吸收^[4], 在植物体内参与蛋白质的合成、影响酶的活性, 并促进植物的生长发育。研究表明, 低浓度的锌可以提高芽菜的发芽率, 并且促进芽菜生长发育^[2,5]。李世玉等^[6]研究发现低浓度的锌可以促进亚麻芽菜的生长, 同时也可以提高芽菜中的蛋白质、总脂肪和维生素C的含量。Yang等^[7]也发现硫酸锌作为外源锌可以有效促进西蓝花芽菜的生长, 并且也显著提高芽菜中的硫苷含量, 从而促进萝卜硫素的形成。

与锌相似, 硒也对植物的生长发育具有显著影响。硒通过主动运输进入植物体内, 转化为5种不同形态的有机硒。硒可以通过影响叶片的生物活性从而调控叶绿素的合成, 同时硒也是谷胱甘肽酶的重要成分^[8]。此外, 大量研究表明低浓度的硒也可以促进芽菜的生长, 但高浓度的硒会抑制芽菜的生长^[9]。Shen等^[10]发现除 $10\text{ }\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 的浓度外, 其他高浓度的亚硒酸钠处理的大豆芽苗菜的生物量显著下降。Huang等^[11]在不同浓度硒溶液中浸泡大豆, 发现豆芽中总硒含量随硒浓度增加而不断增加, 而且有机硒含量也在增加。

适当剂量的锌硒共同富集可同时对植物进行锌和硒的强化。高雅惠等^[12]对谷子叶面喷施不同浓度的锌肥和硒肥发现低锌低硒肥共同施加提高谷子叶片的锌和硒含量, 而且低锌低硒同时施加对产量提高效果最好。Huang等^[13]的研究有相同的结论, 他们发现草莓果实中锌和硒含量随着锌肥和硒肥施加含量增加而增加。而且锌肥和硒肥共同施加增加了草莓的抗化血酸含量。植物通过锌硒共同富集可以增加体内的锌、硒含量, 同时也可以调节体内的代谢活动, 以此增加植物体内的活性物质含量。Nawaz等^[14]发现锌、硒联合富集可使玉米幼苗的叶绿素含量显著增加, 而且玉米幼苗的抗氧化酶活性也显著提高。Zhao等^[15]研究发现

硒和锌的协同生物强化作用可以促进蝉花虫草(一种食用菌)甘露醇和腺苷的产生, 同时蝉花虫草的腺苷和虫草素释放量也增加。已有一些研究对植物中锌和硒之间的相互作用进行了研究, 但得出了有争议的结论^[16]。同时现在关于锌硒共同富集对植物整体影响的研究较少。本研究的目的是明确锌和硒相互作用对花生芽营养物质的影响。研究结果将为富含锌、硒的芽菜的开发提供参考。

1 材料与方式

1.1 主要材料与试剂

花生: 远缘杂交6号, 郑州鹏讯种业有限公司, 保存于 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 冰箱备用。

七水合硫酸锌、亚硒酸钠、次氯酸钠、浓硫酸、无水乙醇均为分析级, 天津市天力化学试剂有限公司; 锌标准溶液、硒标准溶液均为色谱级, 北京索莱宝科技有限公司。

1.2 主要仪器与设备

HH-3 电热恒温水浴锅, 上海森信实验仪器有限公司; BGZ-240 电热鼓风干燥箱, 上海博讯医疗器械有限公司; H1750R 台式高速冷冻离心机, 湖南湘仪仪器有限公司; SPX-250B-Z 生化培养箱, 上海博讯医疗器械有限公司; SB25-12DTD-720W 超声清洗机, 新芝生物科技有限公司。

1.3 试验方法

1.3.1 富集锌硒的方法

采用Zou等^[17]和刘欣^[18]报道的方法, 并加以改进。选取新鲜完整、饱满的花生种子 120 g , 先用质量分数为8%的次氯酸钠浸泡 15 min 进行消毒, 然后水流进行清洗。加入 100 mL 的特定质量浓度硫酸锌(0 、 10 、 20 、 30 、 40 、 $50\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$)或/和 100 mL 亚硒酸钠(0 、 100 、 200 、 300 、 400 、 $500\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$)溶液浸没花生种子, 所有交互处理的质量浓度和标签见表1^[19]。恒温($25\text{ }^{\circ}\text{C}$)浸泡 6 h 后取出, 均匀铺于发芽盘中, 盘中加入适量蒸馏水, 置于恒温培养箱中($25\text{ }^{\circ}\text{C}$) 3 d , 每隔 12 h 进行补水。发芽结束后移植至水培箱, 每隔 24 h 更换蒸馏水, 连续培养 7 d 。花生芽去除红衣后干燥, 用高速粉碎机粉碎, 过 40 目筛, 放置于 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 冰箱保存。

表 1 花生芽交互处理的溶液质量浓度 (mg·L⁻¹)

Table 1 Solution concentration of peanut bud interactive treatment (mg·L ⁻¹)						
外源硒 质量浓度	外源锌质量浓度					
	0	10	20	30	40	50
0	CK	Zn-10	Zn-20	Zn-30	Zn-40	Zn-50
100	Se-100	Zn-10+Se-100	Zn-20+Se-100	Zn-30+Se-100	Zn-40+Se-100	Zn-50+Se-100
200	Se-200	Zn-10+Se-200	Zn-20+Se-200	Zn-30+Se-200	Zn-40+Se-200	Zn-50+Se-200
300	Se-300	Zn-10+Se-300	Zn-20+Se-300	Zn-30+Se-300	Zn-40+Se-300	Zn-50+Se-300
400	Se-400	Zn-10+Se-400	Zn-20+Se-400	Zn-30+Se-400	Zn-40+Se-400	Zn-50+Se-400
500	Se-500	Zn-10+Se-500	Zn-20+Se-500	Zn-30+Se-500	Zn-40+Se-500	Zn-50+Se-500

注：表中显示了花生芽外源锌硒质量浓度以及各处理对应的标签。共 36 个处理，其中（1）6 个单独外源硒质量浓度梯度（0、100、200、300、400、500 mg·L⁻¹）。（2）6 个单独外源锌质量浓度梯度（0、10、20、30、40、50 mg·L⁻¹）。（3）25 个交互处理。该表中的数据由与外源硒与外源锌相互作用的质量浓度相对应的处理的标签组成，其中 CK 代表空白溶液，Zn 代表硫酸锌，Se 代表亚硒酸钠。

1.3.2 响应面实验设计

根据锌、硒双因素实验结果，采用 Design-Expert 12 中 Central Composite Design 方法设计响应面试验，寻找花生芽中锌硒含量最高的外源锌和硒质量浓度。

根据锌、硒双因素实验结果，选择外源锌质量浓度和外源硒质量浓度为自变量，以花生芽内锌硒含量为响应变量，设计二因素三水平响应面实验，建立响应面模型，预测不同外源锌、硒质量浓度下花生芽中锌、硒含量，并确定最佳外源锌、硒质量浓度。

表 2 响应面因素与水平

Table 2 Response surface factors and levels				
因素		水平		
		-1	0	1
A	外源锌质量浓度/(mg·L ⁻¹)	30	40	50
B	外源硒质量浓度/(mg·L ⁻¹)	300	400	500

1.3.3 生理指标及营养成分的测定

1.3.3.1 发芽率

计数到达发芽标准的花生芽数量，与发芽的花生芽总数进行差值计算，得到发芽率（以胚根达到或超过豆种长度 5 mm 为发芽标准）。

1.3.3.2 芽长

随机抽取 10 根新鲜花生芽，用数显游标卡尺测量花生芽的下胚轴宽、下胚轴长和胚根长，重复 3 次取平均值。

1.3.4 矿物质元素的测定

准确称取 0.5 g（精确至 0.001 g）花生芽粉于聚四氟乙烯（PTFE）微波消解管中。向消解管中加入硝酸 1 mL，将消解管置于微波消解仪中控温 190 ℃，控压 38 kPa，消解 50 min。冷却后，用去离子水稀释定质量至 10.00 g，然后用 ICP-MS 测定矿物质含量。ICP-

MS 仪器检测条件为射频功率 1 550 W，冷却气 14 L·min⁻¹，辅助气 0.820 3 L·min⁻¹，雾化气 1.041 6 L·min⁻¹，雾化室温度 2.5 ℃，蠕动泵速率 40 r·min⁻¹，驻留时间 0.1 s，采集次数 3 次。

1.3.5 营养物质测定

1.3.5.1 蛋白含量的测定

根据 GB 5009.5-2016 的凯氏定氮方法测定。准确称取花生芽粉 0.50 g（精确至 0.001 g）至消化管中，再加入 0.4 g 硫酸铜、0.6 g 硫酸钾以及 20 mL 硫酸。当消化炉温度达到 420 ℃后消化 1 h。取出冷却后于自动凯氏定氮仪上进行含量测定。

1.3.5.2 脂肪含量的测定

根据 GB 5009.6-2016 的索氏抽提方法测定。准确称取花生芽粉 2.50 g（精确至 0.001 g）于滤纸包中。将滤纸包放入索氏抽提器的抽屉桶内，连接接收瓶，由冷凝管上端加入石油醚至瓶内容积三分之二处，50 ℃水浴加热 10 h。提取结束后回收石油醚，接收瓶内溶剂干燥后称量。

1.3.5.3 水溶性多糖的测定

采用赵小红等^[20]报道的方法，并加以改进。准确称取 2.0 g（精确至 0.001 g）脱脂花生芽粉，根据 1:40 料液比加入蒸馏水，超声波 150 W 超声 20 min，80 ℃水浴加热并搅拌 4 h。提取完毕后，以 8 000 r·min⁻¹ 的转速离心 10 min，在上清液中加入体积分数为 5% 三氯乙酸至上清液澄清，再以 8 000 r·min⁻¹ 的转速离心 20 min，取上清液，放置于 4 ℃冰箱备用。按标准曲线制备方法测定样品吸光度值。

准确称取葡萄糖标准品 25 mg（精确至 0.001 g），定容于 250 mL 容量瓶中。分别吸取 0.4、0.6、0.8、1.0、1.2、1.4 mL 稀释后的葡萄糖溶液，用蒸馏水补充至 2 mL。加入 1.0 mL 体积分数为 6% 的苯酚和 7.0 mL

浓硫酸,混合均匀后室温静置 30 min。于 490 nm 波长处测定吸光值绘制标准曲线。

1.3.6 酚类物质和抗氧化能力的测定

1.3.6.1 总酚含量和总黄酮含量的测定

花生芽中酚类物质的提取工艺和类黄酮化合物的提取工艺参考付诗鸣等^[1]的方法。准确称量 1.0 g (精确 0.000 1 g) 花生芽粉,以料液比 1:30 使用体积分数为 30% 乙醇溶解花生芽粉。超声波 60 °C 处理 80 min 后减压抽滤,以 8 000 r·min⁻¹ 的转速离心 10 min,取上清液,于 4 °C 冰箱保存待使用。

总酚含量的测定采用福林-苯酚法:准确吸取 0.5 mL 待测样品溶液于试管中,先加入 5 mL 蒸馏水进行稀释,再加入 0.5 mL 福林酚试剂,混匀静置 2 min。再加入 1.5 mL 质量分数为 20% 的碳酸钠溶液,加水定容至 10 mL,静置 1 h,于 765 nm 波长处测定吸光度。

总黄酮化合物含量采用紫外分光光度计测定。准确吸取 1 mL 待测样品溶液于试管中,加入质量分数 5% 的亚硝酸钠溶液 0.3 mL 后静置 6 min,再加入质量分数 10% 的硝酸铝溶液 0.3 mL 后静置 6 min,再加入质量分数 4% 的氢氧化钠溶液 4 mL 后摇匀。最后用体积分数 60% 的乙醇溶液定容至 10 mL,静置 15 min 后于 510 nm 波长处测定吸光度。

1.3.6.2 多酚种类的测定

取适量样品至离心管中,加入 0.5 mL 体积分数为 80% 甲醇水溶液 (含质量分数为 0.2% 维生素 C),涡旋混匀,室温超声提取 30 min,以 12 000 r·min⁻¹ 离心 10 min,取上清液,重复提取两次,将两次上清液合并混匀,根据实际情况稀释数倍后进行超高效液相色谱和高分辨质谱仪检测。

色谱柱: Waters HSS T3 (50×2.1 mm, 1.8 μm); 流动相: A 相为超纯水溶液 (含 0.1% 甲酸), B 相为乙腈溶液 (含 0.1% 甲酸); 流速 0.3 mL·min⁻¹; 柱温 40 °C; 进样量 2 μL; 洗脱梯度: 0 min A 相/B 相 (90:10, V/V), 2 min A 相/B 相 (90:10, V/V), 6 min A 相/B 相 (40:60, V/V), 9 min A 相/B 相 (40:60, V/V), 9.1 min A 相/B 相 (90:10, V/V), 12 min A 相/B 相 (90:10, V/V)。整个分析过程样品置于 4 °C 自动进样器中。为避免仪器检测信号波动造成影响,采用随机顺序进行样本的连续分析。

采用美国 Thermo 公司的 Q Exactive 高分辨质谱检测系统进行采集。配备有电喷雾离子源 (Electrospray Ionization, ESI), 鞘气 40 arb, 辅助气 10 arb, 离子喷雾电压 -2 800 V, 温度 350 °C, 离子传输管温度 320 °C。

1.3.6.3 ABTS⁺清除能力测定

称取一定量的 ABTS 试剂,配成 7 mmol·L⁻¹ 的

ABTS 溶液,与 2.45 mmol·L⁻¹ 的过硫酸钾溶剂 1:1 混合,避光静置 12 h。使用无水乙醇将避光处理的 ABTS 溶液稀释,使其在 734 nm 波长的吸光度为 0.700±0.02,即为测定液。吸取 8 mL ABTS 测定液,加入 100 μL 多酚提取液,振荡 30 s 后静置 10 min。在 734 nm 波长测定吸光值 (A_1), ABTS+100 μL 无水乙醇在 734 nm 波长测定吸光值 (A_0)。ABTS⁺ 自由基清除率公式如下:

$$C_1 = \frac{A_0 - A_1}{A_0} \times 100\% \quad (1)$$

式中:

C_1 ——ABTS⁺ 自由基清除率, %;

A_0 ——ABTS 与无水乙醇的吸光值;

A_1 ——ABTS 与待测样品的吸光值。

1.3.6.4 DPPH·清除能力测定

采用付诗鸣等^[1]报道的方法,并加以改进。将 4 mL 0.2 mol·L⁻¹ DPPH 溶液与 4 mL 无水乙醇溶液振荡混匀,在波长 517 nm 处测其吸光值 (B_0)。将 4 mL 样品溶解于 8 mL DPPH 溶液中,避光放置 30 min,在波长 517 nm 处测其吸光值 (B_1)。将 4 mL 样品与 8 mL 体积分数为 70% 乙醇混匀,在波长 517 nm 处测其吸光值 (B_2)。DPPH 自由基清除率公式如下:

$$C_2 = \frac{B_0 - (B_1 - B_2)}{B_0} \times 100\% \quad (2)$$

式中:

C_2 ——DPPH 自由基清除率, %;

B_0 ——DPPH 乙醇溶液的吸光值;

B_1 ——DPPH 乙醇溶液与待测样品的吸光值;

B_2 ——无水乙醇与待测样品的吸光值。

1.4 数据分析

每个试验均重复 3 次,试验结果采用平均数 ± 标准差的方式表示,采用统计分析软件 SPSS 25.0 进行单因素方差分析 (One-way ANOVA),结果判定标准为: $P < 0.05$ 表示差异显著, $P < 0.01$ 表示差异极显著。采用软件 Origin 2024 绘制图形。

2 结果与讨论

2.1 花生芽单因素富集锌硒的含量变化

由图 1a 可知,对于花生芽中锌含量而言,空白实验中锌含量为 20.56 mg·kg⁻¹; 其中, 30 mg·L⁻¹ 硫酸锌浸种的花生芽中锌含量最多,且与其他质量浓度浸种的花生芽中的锌含量相比,具有显著差异 ($P < 0.05$),可达到为 25.76 mg·kg⁻¹,约是空白对照的 1.25 倍;李世玉等^[6]的研究具有相同的现象,这是因为外源锌大

部分通过扩散形式进入花生芽内^[21]。

由图 1b 可知, 对于花生芽中硒含量而言, 空白实验中硒含量为 $0.945 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$; 其中, $400 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $500 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 亚硒酸钠浸种的花生芽中硒含量与其他质量浓度浸种的花生芽中的硒含量有极显著差异 ($P<0.01$)。但是 $400 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 亚硒酸钠浸种的花生芽中硒含量最多, 为 $23.61 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 约是空白对照的 25 倍。这与李敏^[22]的结论一致, 而有研究发现高浓度亚硒酸钠处理对花生幼苗的生长产生的抑制作用与亚硒酸钠诱导的过氧化逆境有密切关系^[23]。

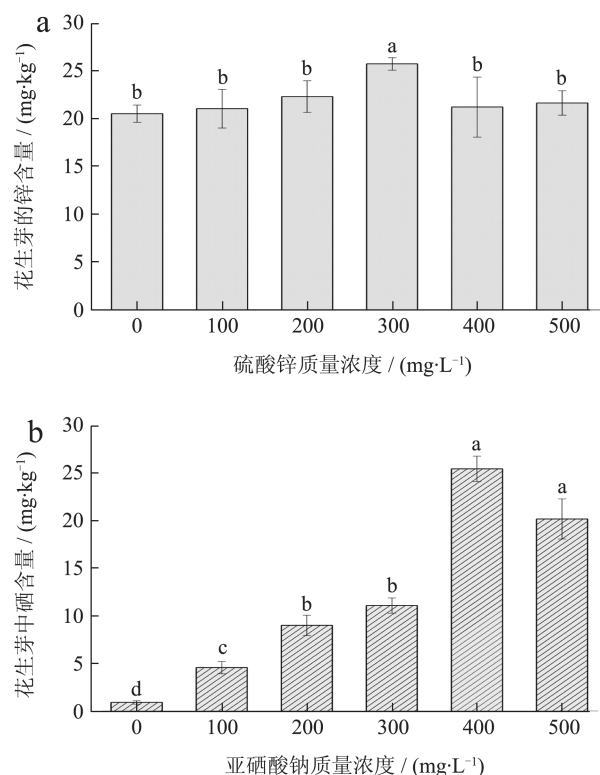


图 1 单富锌花生芽中的锌含量和单富硒花生芽中的硒含量

Fig.1 Zinc content in single zinc-rich peanut sprouts and selenium content in single selenium-rich peanut sprouts

注: 图中上标同一列不同字母表示差异显著 ($P<0.05$)。

图 6、7、9、10 同。

2.2 花生芽双因素富集锌硒的含量变化

2.2.1 锌、硒富集对花生芽中锌含量影响

由图 2a 可知, 外源硒含量在 $100\sim 400 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 范围内增加时, 外源锌含量与花生芽中的锌含量之间有明显的线性关系。在每种外源硒条件下, 花生芽中的锌含量随外源锌质量浓度的增加而先增加后减小。当外源硒质量浓度在 $400 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时, 外源锌质量浓度在 $40 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时, 花生芽中的锌含量最高, 达到 $41.56 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 是普通花生芽的 2.0 倍, 是富锌花生芽

的 1.6 倍。

2.2.2 锌、硒富集对花生芽中硒含量影响

由图 2b 可知, 外源锌含量在 $10\sim 50 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 范围内增加时, 外源硒含量与花生芽中的硒含量之间有明显的线性关系。在每种外源锌条件下, 花生芽中的硒含量随外源硒质量浓度的增加而先增加后减小。在外源硒质量浓度在 $400 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时, 外源锌质量浓度在 $40 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时, 花生芽中硒的含量为 $21.45 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 是普通花生芽中硒含量的 22.57 倍, 是富硒花生芽的 0.93 倍。

锌硒之间具有一定的协同作用。Nawaz 等^[14]研究表明通过锌和硒联合施加玉米种子, 玉米幼苗的锌和硒的积累显著增加。同样, 高慧雅等^[12]研究发现稻谷叶面喷施低锌低硒对籽粒锌、硒含量和产量有明显协同作用。可能得原因是硒离子与膜结构相互作用以改变锌离子的通透性^[24], 从而提高营养物质的可用性。

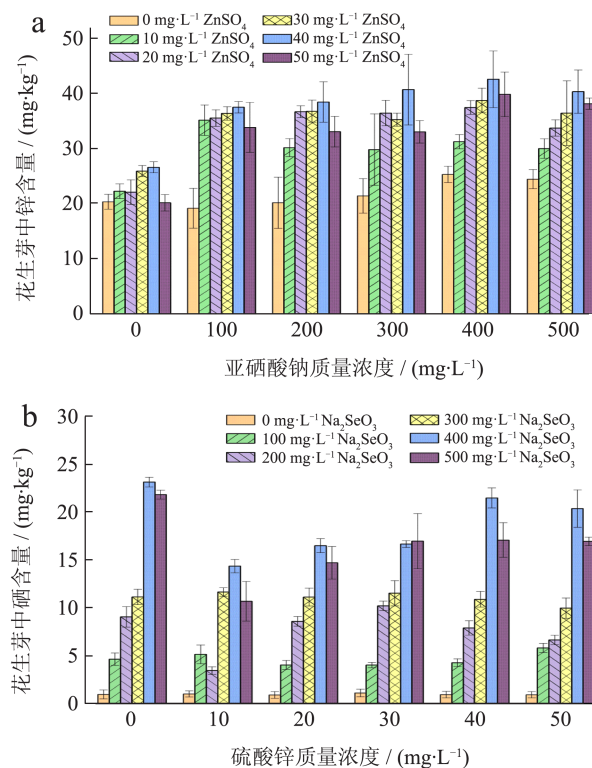


图 2 富锌、硒花生芽中锌含量和硒含量

Fig.2 Zinc content and selenium content in zinc-rich and selenium-rich peanut sprouts

2.2.3 花生芽锌硒含量响应面结果分析和验证实验

利用 Design-Expert 软件拟合表 3 的数据, 可以得到花生芽中锌含量回归方程为 $Y_1=41.1-0.27\times A+0.72\times B+0.73\times AB-3.44\times A^2-1.51\times B^2$ 。花生芽中硒含量回归方程为 $Y_2=21.56+0.65\times A+0.38\times B-0.11\times AB-3.36\times A^2-1.04\times B^2$ 。

表 3 响应面设计及结果

Table 3 Design and results of response surface test

序号	A 外源锌质量浓度/(mg·L ⁻¹)	B 外源硒质量浓度/(mg·L ⁻¹)	Y ₁ 花生芽中锌含量/(mg·kg ⁻¹)	Y ₂ 花生芽中硒含量/(mg·kg ⁻¹)
1	-1	-1	36.44	15.82
2	1	-1	34.01	17.40
3	-1	1	36.61	16.94
4	1	1	37.12	18.05
5	-1	0	37.71	17.84
6	1	0	38.02	19.06
7	0	-1	39.28	20.51
8	0	1	40.31	21.03
9	0	0	40.56	22.11
10	0	0	41.37	21.40
11	0	0	40.34	21.17
12	0	0	40.85	22.34
13	0	0	41.97	20.33

表 4 回归模型方差分析

Table 4 Analysis of variance of regression model

变异源	Y ₁ 花生芽中锌含量						Y ₂ 花生芽中硒含量					
	平方和	自由度	均方	F 值	P 值	显著性	平方和	自由度	均方	F 值	P 值	显著性
模型	64.09	5	12.82	34.23	<0.000 1	**	51.88	5	10.38	24.63	0.000 3	**
A 外源锌质量浓度	0.43	1	0.43	1.13	0.322 1		2.53	1	2.53	6.01	0.044	*
B 外源硒质量浓度	3.11	1	3.11	8.3	0.023 6	*	0.88	1	0.88	2.09	0.191 6	
AB	2.16	1	2.16	5.76	0.047 5	*	0.052	1	0.052	0.12	0.736 2	
A ²	32.7	1	32.7	87.32	<0.000 1	**	31.1	1	31.1	73.82	<0.000 1	**
B ²	6.29	1	6.29	16.81	0.004 6	**	2.97	1	2.97	7.05	0.032 7	*
残差	2.62	7	0.37				2.95	7	0.42			
失拟项	0.9	3	0.3	0.69	0.602 7		0.38	3	0.13	0.2	0.891 7	
纯误差	1.73	4	0.43				2.57	4	0.64			
总和	66.71	12					54.83	12				
R ² =0.960 7				R _{Adj} ² =0.932 6			R ² =0.946 2				R _{Adj} ² =0.907 8	

注：* 差异显著（0.01<P≤0.05）；** 差异极显著（P≤0.01）。

由表 4 可知，花生芽中锌含量和花生芽中硒含量两个回归模型均 $P<0.01$ ，失拟度 $P>0.05$ ，表明回归模型拟合程度高。两个模型的 R^2 分别 0.960 7 和 0.946 2，说明花生芽中锌、硒含量分别有 96.07% 和 94.62% 来源于所选变量。说明两个模型拟合度较好。综上所述，表明这两个回归模型有效。

在锌含量模型中，一次项 B 和交互项 AB ($P<0.05$) 显著，二次项 A²、B² ($P<0.01$) 极显著。通过 F 值可知，影响花生芽中锌含量的主次顺序为外源硒质量浓度>外源锌质量浓度；在硒含量模型中，一次项 A 和二次项 B² ($P<0.05$) 显著，二次项 A² ($P<0.01$) 极显著。通过 F 值可知，影响花生芽中硒含量的主次顺

序为外源锌质量浓度>外源硒质量浓度。

2.2.4 响应面分析

采用 Design-Expert 软件对试验结果进行多元回归分析，得到外源锌质量浓度（A）、外源硒质量浓度（B）对花生芽中锌含量（图 3）和硒含量（图 4）影响的响应曲面。外源锌、硒质量浓度的交互作用对花生芽中锌硒含量的影响的显著性通过响应面图的陡峭程度反映，响应面图越陡峭则表明两个因素的交互作用越显著^[21]。影响花生芽中锌含量的主次顺序为外源硒质量浓度>外源锌质量浓度；影响花生芽中硒含量的主次顺序为外源锌质量浓度>外源硒质量浓度，与方差结果一致。

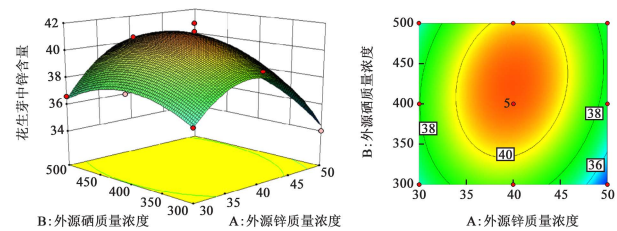


图 3 两因素交互作用对花生芽中锌含量影响的响应面图

Fig.3 Response surface diagram of interaction of two factors on zinc content in peanut bud

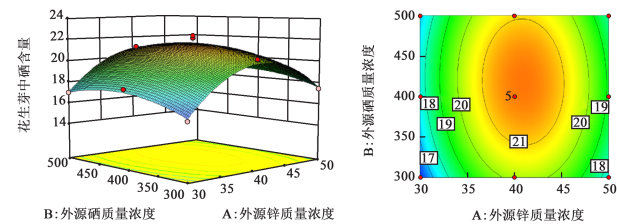


图 4 两因素交互作用对花生芽中硒含量影响的响应面图

Fig.4 Response surface diagram of the interaction of two factors on selenium content in peanut bud

2.2.5 最佳条件试验验证

根据响应面试验设计及结果分析，得到花生芽中锌、硒含量最高理论条件为外源锌质量浓度 40.44 mg·L⁻¹，外源硒质量浓度 421.81 mg·L⁻¹。此条件下，得到的花生芽中的锌含量为 41.13 mg·kg⁻¹，花生芽中的硒含量 21.62 mg·kg⁻¹。基于现实，将外源锌、硒质量浓度改为 40 mg·L⁻¹ 和 420 mg·L⁻¹。进行重复试验，最终得到花生芽中锌、硒含量为 41.56 mg·kg⁻¹ 和 22.46 mg·kg⁻¹，较普通花生芽分别提高了 2.0 倍和 23.76 倍，实测值接近理论值，说明该模型优化花生芽中锌、硒含量可行。

2.2.6 花生芽生长状态

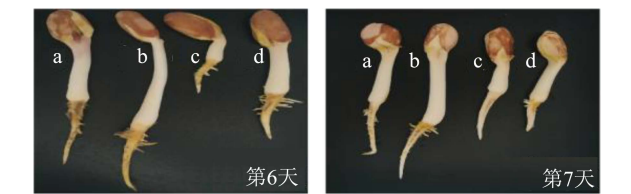


图 5 不同处理的花生芽黑暗培养 7 d 的生长变化

Fig.5 Growth changes of peanut sprouts with different treatments after 7 d of dark culture

注：(a) 表示空白对照的花生芽；(b) 表示富锌花生芽；(c) 表示富硒花生芽；(d) 表示富锌、硒花生芽。

表 5 不同处理的花生芽生长状态

Table 5 Growth state of peanut sprouts with different treatments

处理	发芽率/%	茎宽/mm	茎长/mm	根长/mm
空白	51.09 ± 11.19 ^a	5.96 ± 0.55 ^b	59.84 ± 11.12 ^a	79.77 ± 25.93 ^a
Zn-30	56.53 ± 7.74 ^a	6.36 ± 0.36 ^{ab}	62.08 ± 10.84 ^a	70.28 ± 29.01 ^a
Se-400	12.22 ± 1.11 ^b	6.60 ± 0.49 ^a	20.68 ± 5.87 ^c	20.85 ± 9.44 ^b
Zn-40+ Se-420	27.70 ± 4.67 ^b	6.44 ± 0.29 ^{ab}	43.33 ± 11.34 ^b	56.35 ± 21.98 ^a

注：表中上标同一列不同字母表示差异显著 ($P < 0.05$)。下表同。

花生芽菜的生长受到与锌可以促进植物体内的叶绿素和生长素含量^[25,26]有关。图 5 展现了花生种子发芽后的状态变化，可以直观看出来外源锌、硒的添加对花生芽生长的影响。有图可知，富锌花生芽的生长受到促进，生长趋势最旺盛，茎长和根长最大，富硒花生芽的生长受到抑制，茎长和根长明显小于空白对照花生芽。富锌、硒花生芽的生长介于富锌花生芽和富硒花生芽之间。高慧雅等^[12]研究有相似结论。

由表 5 可知，花生仁在黑暗环境中培育 3 d 后发芽，花生仁超过 5 mm 的发芽率富锌和空白对照花生芽显著高于富硒和富锌硒花生芽。四种不同处理的花生芽的茎宽仅富硒花生芽与空白对照组之间有显著差异 ($P < 0.05$)。花生芽的茎长和根长趋势相似，富硒花生芽茎和根最短，且与其他处理的花生芽之间有显著差异 ($P < 0.05$)。高浓度的硒在植物体中积累可能会阻碍植物发育^[27]。

2.3 营养品质变化

2.3.1 蛋白质、脂肪和水溶性多糖的变化

锌是蛋白质代谢和稳定性的重要来源^[28]。而在植物对硒的吸收、调控和转运过程中有各种酶的参与^[16]。由表 6 可知，四组花生芽样品中，蛋白质含量最高的是富锌、硒花生芽，且与其他三组相比，均具有显著差异 ($P < 0.05$)。油脂含量由高到低依次是富锌、硒处理组 > 富硒处理组 > 富锌处理组 > 空白对照

组。富锌、硒处理的花生芽中的油脂含量与其他三组相比具有显著差异 ($P < 0.05$)。Shahsavari 等^[29]认为锌可以显著提高了油菜的产油量和含油量。Seppanen 等^[30]发现低浓度硒可以通过提高植物抗氧化特性和降低脂质过氧化来增加对氧化胁迫的抵抗能力。水溶性多糖含量最低的是富锌处理的花生芽, 其次是富锌硒处理的花生芽。这两种处理的花生芽都与空白对照组之间产生显著性差异 ($P < 0.05$)。Huang 等^[13]发现叶面喷施硒对提高草莓果实可溶性糖含量的效果优于锌硒配施。

表 6 不同处理的花生芽蛋白质、脂肪和水溶性多糖含量
Table 6 Protein, oil and water-soluble polysaccharide content of peanut sprouts with different treatments

处理	蛋白质/%	油脂/%	水溶性多糖/(mg·mL ⁻¹)
空白	23.22 ± 0.63 ^b	52.61 ± 1.58 ^b	0.43 ± 0.04 ^a
Zn-30	23.06 ± 0.70 ^b	53.65 ± 0.56 ^b	0.40 ± 0.03 ^c
Se-400	23.08 ± 0.75 ^b	54.15 ± 3.15 ^{ab}	0.43 ± 0.01 ^a
Zn-40+Se-420	24.65 ± 0.04 ^a	57.51 ± 1.95 ^a	0.42 ± 0.04 ^b

2.3.2 矿物质含量的变化

矿物质元素在整个植物生长周期中有不可替代的作用^[16]。由表 7 可知, 四种处理的花生芽样品中, 富集锌、硒的花生芽中矿物质元素均较其他处理增加。对于花生芽中的大量元素镁和钙, 外源锌、硒的施加能增加花生芽中大量元素镁和钙的含量, 与空白对照相比, 富集锌硒的花生芽中镁和钙的含量分别增加了 3.2% 和 6.2%, 但镁和钙在四种处理的花生芽样品之间无显著差异 ($P > 0.05$)。

花生芽中微量元素铁、铬、钴、锰和铜因外源锌硒的施加而有变化。富锌硒花生芽中的铁含量增加, 但与其他三种处理相比无显著差异 ($P > 0.05$)。在四种处理花生芽样品的铬、钴、锰和铜之间有显著差异 ($P < 0.05$)。四种处理的花生芽中锰元素之间含量差异较小, 富锌硒处理和空白对照之间有显著差异 ($P < 0.05$)。外源锌硒的施加增加了花生芽中铜的含量, 四种处理的花生芽中铜含量按大小顺序为富锌硒花生芽 > 富硒花生芽 ≈ 富锌花生芽 > 空白对照, 且四种处理的花生芽中铜含量之间有显著差异 ($P < 0.05$)。对于花生芽中的铬元素, 富锌硒和富锌处理含量最高, 且与空白对照之间有显著差异 ($P < 0.05$), 分别增加了 5.1% 和 4.8%。与铜元素相同, 外源锌硒的施加增加了花生芽中钴的含量, 且钴含量按大小顺序为

富锌硒花生芽 > 富锌花生芽 > 富硒花生芽 > 空白对照。同样, 四种处理的花生芽中钴含量之间有显著差异 ($P < 0.05$)。栗国栋^[21]发现单施锌和硒肥都可以增加番茄中的铁和锰的含量。

2.3.3 总酚含量和总黄酮含量的变化

酚类化合物在植物中具有相当大的生理和形态重要性^[31]。由图 6 和 7 可知, 微量元素锌和硒的富集能够提高花生芽中活性物质的含量。与普通花生芽相比, 富锌硒花生芽中的总酚含量和总黄酮含量显著提高 ($P < 0.05$)。这与已有的研究结果相一致, 例如 García-López 等^[32]发现氧化锌纳米颗粒促进所需酚类化合物在胚根中的积累。Pawel 等^[33]确定硒元素促进羽衣甘蓝芽苗菜中的多酚生成。可能的原因是外源锌和硒促进了花生芽体内的苯丙氨酸含量, 增强了苯丙氨酸解氨酶 (PAL) 的活性, 从而促进了花生芽中总酚和总黄酮的合成和积累^[34]。

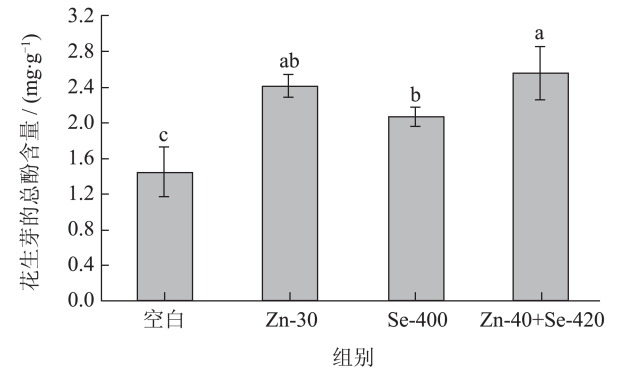


图 6 不同处理的花生芽总酚含量
Fig.6 Total phenol content of peanut sprouts with different treatments

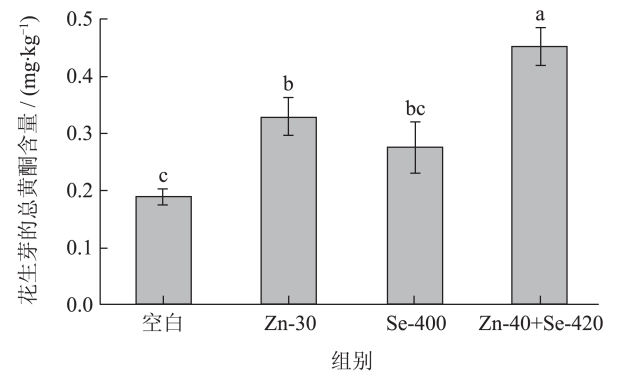


图 7 不同处理的花生芽总黄酮含量
Fig.7 Total flavonoid content of peanut sprouts with different treatments

表 7 不同处理的花生芽矿物质含量
Table 7 Minerals content of peanut sprouts with different treatments

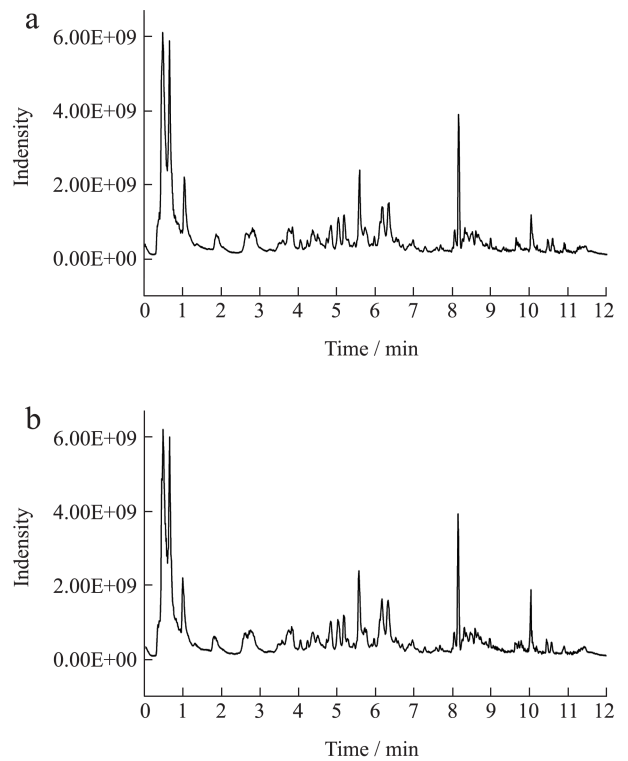
组别	铬/($\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)	钴/($\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)	锰/($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	铜/($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	铁/($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	镁/($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	钙/($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)
空白	789.15 $\pm$ 3.80 ^b	3.36 $\pm$ 0.10 ^d	15.77 $\pm$ 0.46 ^b	6.86 $\pm$ 0.02 ^c	20.02 $\pm$ 0.98 ^a	1 944.51 $\pm$ 2.72 ^a	616.38 $\pm$ 16.90 ^a
Zn-30	826.76 $\pm$ 0.84 ^a	8.54 $\pm$ 0.06 ^b	16.39 $\pm$ 0.33 ^{ab}	7.24 $\pm$ 0.04 ^b	20.88 $\pm$ 0.88 ^a	1 939.00 $\pm$ 54.45 ^a	602.90 $\pm$ 1.15 ^a
Se-400	762.87 $\pm$ 11.07 ^c	6.16 $\pm$ 0.04 ^c	16.41 $\pm$ 0.54 ^{ab}	7.25 $\pm$ 0.02 ^b	20.77 $\pm$ 0.57 ^a	1 990.19 $\pm$ 67.76 ^a	646.25 $\pm$ 24.15 ^a
Zn-40+Se-420	829.61 $\pm$ 3.79 ^a	10.33 $\pm$ 0.40 ^a	17.19 $\pm$ 0.26 ^a	7.40 $\pm$ 0.01 ^a	21.23 $\pm$ 0.08 ^a	2 059.03 $\pm$ 18.64 ^a	654.59 $\pm$ 32.30 ^a

2.3.4 多酚种类的变化

图 8 表示不同处理花生芽样品的总离子流色谱图。由表 8 可知，富锌、硒的花生芽中的大部分多酚含量都有明显增加。花生芽中含量最高的酚是对香豆酸，为 1 271.33~1 300.33 ng/100 mg 在四组样品中，富锌、硒花生芽中的对香豆酸含量最高，其次是富锌花生芽和空白对照组，而富硒花生芽中最低，且富锌、硒花生芽的对香豆酸含量与其余三组样品的对香豆酸间有极显著差异 ($P<0.01$)；在四组样品中，富锌、硒花生芽中的儿茶素含量最高，约是普通花生芽的儿茶素含量的 2.0 倍。其次是富硒花生芽中的儿茶素，约是普通花生芽的儿茶素含量的 1.9 倍，因此锌、硒元素的共同富集使花生芽的儿茶素较普通花生芽含量显著提高 ($P<0.05$)；儿茶素和表儿茶素是空间异构体，表儿茶素和儿茶素在富锌、硒花生芽和富硒花生芽中含量最高，为 50.08 ng/100 mg 和 47.30 ng/100 mg，与空白对照组 (25.85 ng/100 mg) 和富锌花生芽 (21.19 ng/100 mg) 中含量有显著差异 ($P<0.05$)。原儿茶酸是儿茶素的酯化产物，在四组样品中，原儿茶酸含量从高到低依次是富锌、硒花生芽>富锌花生芽>空白对照组>富硒花生芽。富锌硒花生芽的原儿茶酸含量为 2.71 ng/100 mg，与其他三组样品的原儿茶酸含量之间有显著差异 ($P<0.05$)。在四组样品中，原儿茶醛含量从高到低依次是富锌、硒花生芽>富硒花生芽>富锌花生芽>空白对照组。这表明，锌硒富集促进花生芽中的原儿茶醛生成。在四组样品中，富锌、硒花生芽的原儿茶醛含量最高，为 77.88 ng/100 mg，与其余三组样品的原儿茶醛之间有显著差异 ($P<0.05$)。富锌、硒花生芽中的水杨酸含量为 112.33 ng/100 mg，而其余三组的水杨酸含量在 52.42~59.62 ng/100 mg，富锌、硒花生芽中的水杨酸含量约为其他组花生芽中水杨酸含量的 2.14 倍。锌硒共同富集极显著提高 ($P<0.01$) 花生芽的水杨酸含量；富硒花生芽的槲皮素含量较其余三组有显著下降 ($P<0.05$)，而四组样品中，富锌、硒花生芽的槲皮素含量最高，比普通花生芽和富锌花生芽的槲皮素含量提升约 1.24 倍和

1.15 倍。芦丁含量变化与槲皮素含量变化相似，芦丁含量变化趋势也是富锌、硒花生芽>富锌花生芽>空白对照组>富硒花生芽。富锌、硒花生芽的芦丁含量最高，为 115.42 ng/100 mg，与其余三组样品的芦丁含量之间有显著差异 ($P<0.05$)。与之相似，Jing 等^[35]研究发现，硒能促进植物中总酚含量，同时绿原酸含量随硒含量增加而增加，而槲皮素、山奈酚、芦丁和类胡萝卜素等类黄酮与硒浓度呈显著负相关，并且硒对槲皮素合成芦丁有抑制作用。

此外，有些酚类含量因外源锌硒的富集而减少。棉酚作为一种毒性物质，锌、硒元素的富集可以抑制棉酚的生成。四组花生芽中棉酚含量从大到小依次是空白对照组<富锌花生芽<富硒花生芽<富锌硒花生芽。富锌、硒花生芽的棉酚含量下降 1.86 倍。总而言之，从四组花生芽的酚类变化可以确定微量元素锌、硒的富集提高花生芽中的活性物质含量，同时对于有害酚类也可以起到抑制作用。



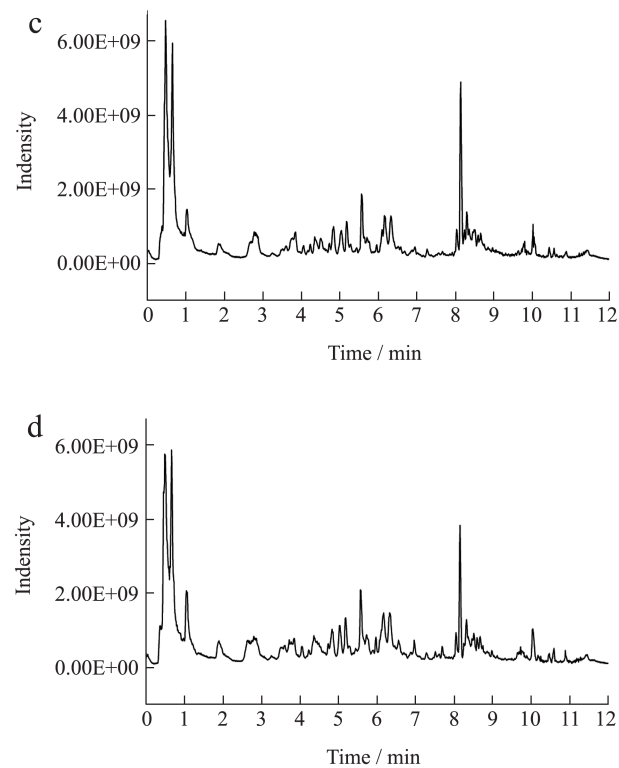


图 8 不同处理的花生芽总离子流色谱图

Fig.8 Total ion flow chromatogram of peanut sprouts with different treatments

注：(a) 空白对照的花生芽；(b) 富锌花生芽；(c) 富硒花生芽；(d) 富锌、硒花生芽。

表 8 不同处理的花生芽多酚含量

Table 8 Polyphenol content of peanut sprouts with different treatments (ng/100 mg)				
多酚	空白	Zn-30	Se-400	Zn-40+Se-420
对香豆酸	1 271.33 ± 2.82 ^b	1 262.65 ± 5.65 ^b	1 146.63 ± 4.08 ^c	1 300.33 ± 2.55 ^a
儿茶素	12.41 ± 2.98 ^b	10.10 ± 1.49 ^b	23.52 ± 4.80 ^a	24.85 ± 4.18 ^a
表儿茶素	25.85 ± 5.27 ^b	21.19 ± 4.60 ^b	47.30 ± 5.65 ^a	50.08 ± 5.14 ^a
原儿茶醛	55.64 ± 5.63 ^c	61.44 ± 3.78 ^{ab}	71.04 ± 5.65 ^{bc}	77.88 ± 4.40 ^a
丁香醛	2.54 ± 0.57 ^a	3.18 ± 0.85 ^a	2.92 ± 0.40 ^a	3.79 ± 0.16 ^a
原儿茶酸	1.97 ± 0.11 ^b	2.24 ± 0.11 ^b	0.93 ± 0.15 ^c	2.71 ± 0.23 ^a
芦丁	94.43 ± 2.81 ^b	100.15 ± 2.81 ^b	59.42 ± 1.55 ^c	115.42 ± 1.55 ^a
水杨酸	52.42 ± 2.27 ^b	59.62 ± 2.32 ^b	59.18 ± 2.83 ^b	112.33 ± 5.05 ^a
槲皮素	4.07 ± 0.56 ^{ab}	4.38 ± 0.80 ^a	2.53 ± 0.60 ^b	5.04 ± 0.49 ^a
棉酚	70.72 ± 3.11 ^a	58.14 ± 2.68 ^b	41.98 ± 1.61 ^c	37.98 ± 1.85 ^c

2.4 抗氧化性

2.4.1 ABTS⁺清除能力测定

已有研究证明，多酚含量和硒含量与 ABTS⁺ 清除能力呈正相关^[36]。因此富锌、硒花生芽的抗氧化能力较空白对照有显著增强。由图 9 可知，锌硒富集促进花生芽中多酚的 ABTS⁺ 清除能力。花生芽中多酚含量的与 ABTS⁺ 清除能力变化趋势相似，ABTS⁺ 清除能力从高到低依次是富锌、硒花生芽>富锌花生芽>富硒花生芽>空白对照花生芽。且富锌硒花生芽的 ABTS⁺ 清除能力与空白对照之间有显著差异 ($P<0.05$)。

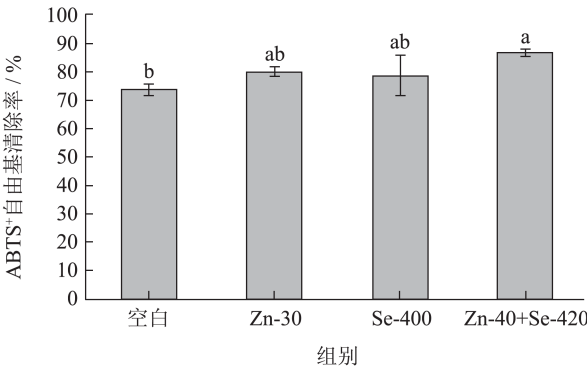


图 9 不同处理的花生芽 ABTS⁺ 清除能力

Fig.9 ABTS⁺ removal ability of peanut sprouts with different treatments

2.4.2 DPPH·清除能力测定

由图 10 可知，DPPH· 清除能力由高到低依次是富硒花生芽>富锌、硒花生芽>空白对照>富锌花生芽。同时富硒和富锌、硒处理花生芽的 DPPH 自由基清除能力显著高于 ($P<0.05$) 空白对照组。研究表明乙醇提取的多酚中，硒含量越高，DPPH 自由基清除率越高，二者之间有一定的相关性^[37]。

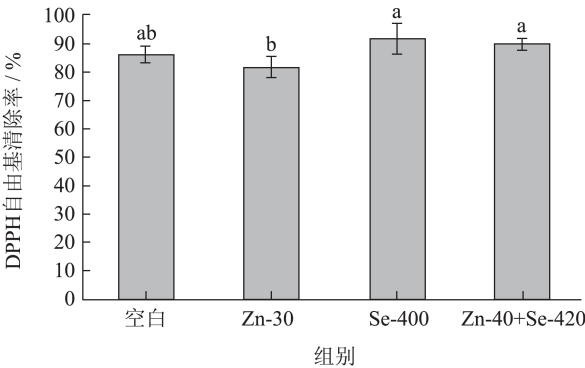


图 10 不同处理的花生芽 DPPH· 清除能力

Fig.10 DPPH· eliminating ability of peanut sprouts with different treatments

3 结论

本研究揭示了外源硒和外源锌对花生种子萌发和芽生长的影响,以及富集锌硒对营养物质含量的影响。结果显示,外源锌质量浓度在 $40 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 、外源硒质量浓度在 $420 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,花生芽富集的锌硒含量最高,较普通花生芽分别提高了 2.0 倍和 23.76 倍。锌硒的富集促进花生芽体内活性物质的生成,总酚含量和类黄酮化合物含量有显著提升。富锌、硒花生芽中的儿茶素含量最高,约是普通花生芽的儿茶素含量的 2.0 倍。同时,锌、硒的富集提高花生芽中的水杨酸含量至 $112.33 \text{ ng}/100 \text{ mg}$ 。由于花生芽中多酚含量和硒含量的增加,富锌、硒花生芽的抗氧化能力也因而显著增强。本研究探索了锌和硒对花生芽菜营养价值的影响,为获得富锌、硒花生芽提供了一种可行的方法。然而,锌硒拮抗和调节花生芽的多酚合成的机制仍需进一步研究。

参考文献

- [1] 付诗鸣,汪子郁,张丰泽,等.超声波辅助提取花生芽中酚类物质及不同组分的多酚分布[J].粮食与油脂,2021,34(9):121-125,158.
- [2] ZHAO K, ZHAO C, YANG M, et al. ZnCl_2 treatment improves nutrient quality and Zn accumulation in peanut seeds and sprouts [J]. Scientific Reports, 2020, 10(1): 2364.
- [3] 张爽,李景周,元宝华,等.白藜芦醇防治骨质疏松症的作用机制研究进展[J].中国骨质疏松杂志,2024,30(6):895-899,909.
- [4] 吴冬强.铁、锌配施对紫花苜蓿生长和品质的影响[D].兰州:兰州大学,2017.
- [5] RENATA B, AGNIESZKA B, MAGDALENA S, et al. Enrichment of different plant seeds with zinc and assessment of health risk of zn-fortified sprouts consumption [J]. Agronomy, 2020, 10(7): 937.
- [6] 李世玉,陆旭鹏,戴志刚,等.外源锌对亚麻芽菜营养及有害成分的影响[J].中国麻业科学,2021,43(4):190-197.
- [7] YANG R, GUO L, JIN X, et al. Enhancement of glucosinolate and sulforaphane formation of broccoli sprouts by zinc sulphate via its stress effect [J]. Journal of Functional Foods, 2015, 13: 345-349.
- [8] 钟洪禄.花生的富硒特性及硒形态分析的研究[D].沈阳:辽宁大学,2019.
- [9] DENG B, TIAN S, LI S, et al. A simple, rapid and efficient method for essential element supplementation based on seed germination [J]. Food Chemistry, 2020, 325: 126827.
- [10] SHEN R, XIAN X, WANG Y, et al. Comparative study of the effects of selenium nanoparticles and selenite on selenium content and nutrient quality in soybean sprouts [J]. Folia Horticulturae, 2022, 34(2): 223-234.
- [11] HUANG Y, LEI N, XIONG Y, et al. Influence of selenium biofortification of soybeans on speciation and transformation during seed germination and sprouts quality [J]. Foods, 2022, 11(9): 1200.
- [12] 高慧雅,张爱军,赵丽.叶面喷施锌硒肥对谷子抗氧化酶活性及籽粒锌硒含量的影响[J].植物营养与肥科学报,2020,26(9):1724-1731.
- [13] HUANG S, GAO L, FU G, et al. Interactive effects between zinc and selenium on mineral element accumulation and fruit quality of strawberry [J]. Agronomy, 2023, 13(10): 2453.
- [14] NAWAZ F, ZULFIQAR B, AHMAD K, et al. Pretreatment with selenium and zinc modulates physiological indices and antioxidant machinery to improve drought tolerance in maize (*Zea mays* L.)[J]. South African Journal of Botany, 2021, 138: 209-216.
- [15] ZHAO B, DING H, HU T, et al. Synergistic effects of the Se and Zn supplemental combination on the nutrient improvement of mannitol and adenosine and the multi-element bioaccessibility in *Cordyceps cicadae* [J]. LWT, 2023, 173: 114354.
- [16] GUI J Y, RAO S, HUANG X, et al. Interaction between selenium and essential micronutrient elements in plants: a systematic review [J]. Science of the Total Environment, 2022, 853: 158673.
- [17] ZOU T, XU N, HU G, et al. Biofortification of soybean sprouts with zinc and bioaccessibility of zinc in the sprouts [J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2014, 94(14): 3053-3060.
- [18] 刘欣.富硒花生降胆固醇肽的作用机制及稳定性研究[D].郑州:河南工业大学,2024.
- [19] BAO X, LIN G, DONG X, et al. Synergistic effects of copper and ethylene on resveratrol synthesis in peanuts [J]. Food Science & Nutrition, 2021, 9(3): 1471-1479.
- [20] 赵小红,何慧,贾蕾,等.生物强化硒和锌的豆芽制备、分布及形态研究[J].食品科技,2022,47(1):70-78.
- [21] 栗国栋.铁锌硒配施对番茄生长发育及果实品质的影响[D].太原:山西农业大学,2021.
- [22] 李敏.富硒亚麻芽菜的制备方法研究[J].黑龙江农业科学,2021,6: 67-72.
- [23] 王光.花生芽富硒的机理及有机硒的生物活性研究[D].广州:华南理工大学,2017.
- [24] IQBAL M, HUSSAIN I, LIAQAT H, et al. Exogenously applied selenium reduces oxidative stress and induces heat tolerance in spring wheat [J]. Plant Physiology and Biochemistry, 2015, 94: 95-103.
- [25] PANDEY R. Mineral nutrition of plants [J]. Plant Biology and Biotechnology: Plant Diversity, Organization, Function and Improvement, 2015, 1: 499-538.
- [26] ZHANG J, WANG S, SONG S, et al. Transcriptomic and proteomic analyses reveal new insight into chlorophyll synthesis and chloroplast structure of maize leaves under zinc deficiency stress [J]. Journal of Proteomics, 2019, 199: 123-134.
- [27] KOLBERT Z, MOLNÁR Á, FEIGL G, et al. Plant selenium toxicity: proteome in the crosshairs [J]. Journal of Plant Physiology, 2019, 232: 291-300.
- [28] MARET W. Zinc biochemistry: from a single zinc enzyme to a key element of life [J]. Advances in Nutrition, 2013, 4(1): 82-91.
- [29] SHAHSAVARI N, JAIS HM, SHIRANI RAH. Responses of canola morphological and agronomic characteristics to zeolite and

- zinc fertilization under drought stress [J]. Communications in Soil Science and Plant Analysis, 2014, 45(13): 1813-1822.
- [30] SEPPÄNEN M, TURAKAINEN M, HARYIKAINEN H. Selenium effects on oxidative stress in potato [J]. Plant Science, 2003, 165(2): 311-319.
- [31] BALASUNDRAM N, SUNDRAM K, SAMMAN S. Phenolic compounds in plants and agri-industrial by-products: antioxidant activity, occurrence, and potential uses [J]. Food Chemistry, 2006, 99(1): 191-203.
- [32] GARCÍA-LÓPEZ J, ZAVALA-GARCÍA F, OLIVARES-SÁENZ E, et al. Zinc oxide nanoparticles boosts phenolic compounds and antioxidant activity of *Capsicum annuum* L. during germination [J]. Agronomy, 2018, 8(10): 215.
- [33] PAWEL Z, PAWEL P, ENRIQUE D, et al. Synthesis of novel organic selenium compounds and speciation of their metabolites in biofortified kale sprouts [J]. Microchemical Journal, 2022, 172: 106962.
- [34] 张守花, 许真, 蒋安, 等. 硒素对草莓果实抗氧化活性及相关物质含量的影响[J]. 食品研究与开发, 2020, 41(14): 62-67.
- [35] DONG J, WANG Y, WANG S, et al. Selenium increases chlorogenic acid, chlorophyll and carotenoids of *Lycium chinense* leaves [J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2013, 93(2): 310-315.
- [36] SOTEK Z, BIALECKA B, PILARCZYK B, et al. The content of selenium, polyphenols and antioxidative activity in selected medical plants from Poland and western Ukraine [J]. Acta Poloniae Pharmaceutica-Drug Research, 2018, 75(5): 1107-1116.
- [37] XU J, HU Q. Effect of foliar application of selenium on the antioxidant activity of aqueous and ethanolic extracts of selenium-enriched rice [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2004, 52(6): 1759-1763.