杨承龙, 格桑曲珍, 程浩, 等. 亚硒酸钠浸种对青稞芽苗生长发育及其抗氧化活性的影响 [J]. 食品工业科技, 2026, 47(3): 116−123. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025010258
YANG Chenglong, GESANG Quzhen, CHENG Hao, et al. Effects of Sodium Selenite Soaking Seed on the Growth and Development of Highland Barley Sprout and Its Antioxidant Activity[J]. Science and Technology of Food Industry, 2026, 47(3): 116−123. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025010258

· 研究与探讨 ·

亚硒酸钠浸种对青稞芽苗生长发育及其抗氧化活性的影响

杨承龙[1,2,3], 格桑曲珍[1,+], 程　浩[2], 扎西顿珠[1], 刘玉红[1], 杨亚辉[1,*], 任茂智[2,3,*]
（1.西藏自治区农牧科学院蔬菜研究所, 西藏拉萨 850000;
2.中国农业科学院都市农业研究所/国家成都农业科技中心, 四川成都 610213;
3.郑州大学农学院, 河南郑州 450001）

摘　要: 为探究亚硒酸钠浸种对青稞芽苗生长发育及其抗氧化活性的影响，本研究以藏青 2000 青稞籽粒为材料，使用不同浓度的亚硒酸钠溶液进行浸种处理。通过对发芽率、发芽势、株高、鲜重、总硒及有机硒含量、总酚和总黄酮含量及抗氧化活性等指标的测定展开研究，结果显示：使用 5 mg/L 亚硒酸钠浸种时，青稞籽粒的发芽率和发芽势达到最高，青稞芽苗的株高和鲜重达到最大值；5~80 mg/L 亚硒酸钠处理可显著提高总硒及有机硒含量；总酚和总黄酮含量分别在 40 和 10 mg/L 亚硒酸钠处理时最高，相比对照组提高了 8.53% 和 16.41%；10 mg/L 时铁离子还原能力和 ABTS$^+$自由基清除能力最高，此时 DPPH 自由基清除能力也较高，分别比对照组提高了 11.85%、12.85% 和 11.90%；青稞芽苗的抗氧化活性与总酚和总黄酮含量呈正相关。综合而言，10 mg/L 为最优浸种浓度，该浓度可协同促进青稞芽苗生长发育和抗氧化活性，从而改善青稞芽苗品质。研究结果为西藏地区青稞芽苗富硒生产提供了理论依据与技术参考。

关键词: 青稞芽苗, 亚硒酸钠, 生长发育, 硒含量, 抗氧化
中图分类号: S512.3　　**文献标识码:** A　　**文章编号:** 1002−0306(2026)03−0116−08
DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2025010258　　本文网刊:

Effects of Sodium Selenite Soaking Seed on the Growth and Development of Highland Barley Sprout and Its Antioxidant Activity

YANG Chenglong[1,2,3], GESANG Quzhen[1,+], CHENG Hao[2], ZHAXI Dunzhu[1], LIU Yuhong[1], YANG Yahui[1,*], REN Maozhi[2,3,*]
（1.Institute of Vegetable Research, Xizang Academy of Agriculture and Animal Husbandry Sciences, Lasa 850000, China;
2.Institute of Urban Agriculture, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Chengdu National Agricultural Science and Technology Center, Chengdu 610213, China;
3.School of Agricultural Science, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China）

Abstract: To investigate the effects of sodium selenite on the growth, development, and antioxidant activity of highland barley sprouts, highland barley variety Zangqing 2000 was used as the experimental material. Highland barley seeds were soaked in various concentrations of sodium selenite solutions. The study examined the effects of these sodium selenite

收稿日期: 2025−01−23　　+并列第一作者
基金项目: 2024 年度西藏居民膳食营养健康改善与优化农产品保供科技支撑项目课题子课题芽苗菜资源开发（XZCZ-SS-2024-3-006）; 国家成都农业科技中心地方财政专项（NASC2024KY22）; 中国农业科学院科技创新工程项目（34-IUA-02）。
作者简介: 杨承龙（2000−）, 男, 硕士研究生, 研究方向: 富硒植物培养及应用, E-mail: ycl_guizhou@163.com。
格桑曲珍（1995−）, 女, 本科, 研究实习员, 研究方向: 蔬菜栽培, E-mail: Gsqzism@163.com。
*** 通信作者:** 杨亚辉（1982−）, 男, 硕士, 副研究员, 研究方向: 蔬菜设施栽培和无土栽培研究, E-mail: yyh02yyh@163.com。
任茂智（1974−）, 男, 博士, 研究员, 研究方向: 功能植物研究, E-mail: renmaozhi01@caas.cn。

treatments on germination rate, germination potential, plant height, fresh weight, total selenium and organic selenium contents, as well as total phenolic and flavonoid contents and antioxidant activity in highland barley sprouts. When treated with 5 mg/L sodium selenite, highland barley sprouts achieved the highest germination rate and germination potential, while sprout plant height and fresh weight reached maximum values. Treatments with 5~80 mg/L sodium selenite significantly increased total selenium and organic selenium contents. Total phenolic and flavonoid contents peaked at 40 mg/L and 10 mg/L sodium selenite treatments, respectively, increasing by 8.53% and 16.41% compared to the control group. The ferric reducing antioxidant power and $ABTS^{+}$ free radical scavenging ability reached their highest levels at 10 mg/L, with concurrently high DPPH free radical scavenging ability, increasing by 11.85%, 12.85% and 11.90% compared to the control group, respectively. The antioxidant activity of highland barley sprouts showed a positive correlation with total phenolic and flavonoid contents. In summary, a treatment concentration of 10 mg/L sodium selenite was identified as optimal, significantly enhancing the quality of highland barley sprouts by synergistically promoting both sprout growth and antioxidant activity. The findings provide theoretical and technical references for selenium-enriched production of highland barley sprouts in the Tibetan region.

Key words: highland barley sprout; sodium selenite; growth and development; selenium content; antioxidant

青稞芽苗是指青稞种子萌发后生长的幼茎叶，加工后可应用于食品领域。目前在营养健康领域中已呈现出显著的影响力，逐渐成为了绿色营养健康研究的关注焦点之一。其丰富的维生素、矿物质和蛋白质[1] 等元素，被认为是生命活动所需的必备营养物，对于维系人类和动物的健康起着至关重要的作用。近几年来，大量的研究者已开始从不同的角度对青稞芽苗的食品应用进行深入研究。例如，白婷等[2] 对青稞芽苗粉的营养价值进行了深度解析，揭示了其含有黄酮、叶酸、维生素 C 等活性物质，这些物质具有天然的抗氧化特性，能有效抵抗氧化压力，并在保持机体健康方面发挥核心作用[3−5]。母志平[6] 则以青稞芽苗为基础原料，成功研制出一款新型杂粮高纤代餐粉，为青稞芽苗在食品领域的应用开发提供了新思路。随着此类研究的不断深入和相关产品的持续开发，青稞芽苗产品市场呈现出蓬勃发展的趋势，深入探究影响青稞芽苗生长及其品质的因素具有一定的重要性与紧迫性。

硒作为人体不可或缺的微量元素[7]，对人类健康有着重要的意义。大量研究显示，长期处于硒缺乏的状态，可能会诱发克山病、大骨节病等严重疾病[8]。依据 Dinh 等[9] 的调查结果，中国大部分地区属于缺硒地区，其中西藏地区的缺硒情况尤为严重。一项土壤硒含量调查报告显示，西藏日喀则地区土壤有效硒含量为 14.66~32.25 μg/kg，硒含量处于中低水平[10]。硒缺乏造成西藏昌都、山南、拉萨、林芝、那曲、日喀则和阿里等地区约 200 万人口患大骨节病[11]。另一项调查报告则表明，通过补充外源硒，有助于降低当地人群大骨节病的患病率[12]。硒的存在形式主要为无机硒和有机硒，无机硒大多为硒酸盐和亚硒酸盐[13]，它们能够被植物或微生物吸收，并进一步转化成有机硒，例如硒代半胱氨酸、硒代蛋氨酸等形式[14]。毒理学相关研究证实，有机硒具有的毒性相较于无机硒明显更低[15]。已有诸多研究表明，适量摄入硒有助于维持机体的正常功能，国内外众多研究表明硒在抗氧化[16]、抗癌[17]、心脑血管保护[18] 等诸多方面有着重要价值。此外，通过硒处理可显著提高植物中的总硒含量[19]、地上部株高、鲜重[20] 及抗氧化活性[21−22] 等，如适量浓度的亚硒酸钠溶液浸种可加速甜菜种子发芽，提高种子活力水平，促进幼苗生长，增加光合色素含量，降低丙二醛含量，增强抗氧化酶活性[23]；使用亚硒酸钠溶液浸种提高了鹰嘴豆芽苗的异黄酮含量和抗氧化能力[24]；对于萝卜芽苗，亚硒酸钠浸种有效促进萝卜种子萌发和芽苗生长，萝卜芽苗抗氧化能力得到显著提高[25]。采用亚硒酸钠浸种处理是否能够促进青稞芽苗生长发育，是否能够提高青稞芽苗的抗氧化活性，最佳处理浓度又为多少，均仍有待研究。

青稞作为西藏地区的特色作物，开展富硒青稞芽苗研究，不仅有助于增加当地特色农副产品的种类和附加值，而且有利于提高当地人群硒营养水品。在富硒青稞研究中，研究人员主要是探究硒对青稞植株或籽粒营养成分及抗氧化活性等的影响，硒对青稞芽苗生长发育及抗氧化活性的影响研究稀少。基于上述背景，本研究选用水培生产芽苗菜模式，采用 0~80 mg/L 亚硒酸钠浸种，探究促进青稞芽苗生长发育并提高其抗氧化活性的最适硒浓度范围，同时挖掘亚硒酸钠浸种处理提高青稞芽苗抗氧化能力的生理响应模式，为西藏地区富硒青稞芽苗工厂化培养技术体系建立提供参考，为改善当地硒营养水平提供助力。

1　材料与方法

1.1　材料与仪器

本实验采用的青稞籽粒品种为藏青 2000　由西藏自治区农牧科学院提供；亚硒酸钠(97%)　上海山浦化工有限公司；其余有机试剂　分析纯。

LT-BIX 恒温恒湿培养箱　上海立德泰勃科学仪器有限公司；Alpha 2-4 LSCbasic 冷冻干燥机　北京德采实仪器设备有限公司；WM-16TD 多通道超声波破碎仪　上海微弥科技有限公司；SPARK 多功能酶标仪　瑞士 TECAN 公司。

1.2　实验方法

1.2.1　实验地概况　2024 年 6~10 月，于西藏自治区

农牧科学院蔬菜研究所温室大棚内进行实验。大棚设钢制育苗架和自动喷雾系统，控制湿度。地点海拔 3650 m，利于研究青稞对硒处理的高原响应。

1.2.2 实验设计 藏青 2000 青稞籽粒经自来水冲洗去杂后，用不同浓度（0、5、10、20、40、80 mg/L）的亚硒酸钠溶液浸泡 12 h 进行富硒处理，蒸馏水作对照。浸泡后籽粒清水冲洗 3 遍，置 28 ℃ 恒温箱催芽 12 h，再均匀摆放于湿润吸水纸上的育苗盘内，于实验大棚黑暗培养 7 d，期间日平均气温 23~27 ℃，湿度为 80%~90%，每日自动喷雾补水 2 次，每次 1 min。培养结束后，收获芽苗，清洗 3 遍，晾干后液氮冷冻并真空干燥，粉碎后−80 ℃ 密封保存，以备分析。

1.2.3 测定指标及方法

1.2.3.1 生理指标 催芽结束后，以籽粒露白作为判断标准，统计青稞籽粒的发芽情况，按照式（1）计算发芽率。完成催芽的青稞在大棚内继续培养 2 d，于第 3 d 按式（2）统计青稞籽粒的发芽势。收获当日，使用直尺测量 10 株青稞芽苗根部以上的长度，计算平均值作为株高，该测量过程重复 3 次以确保数据准确性。随机选取 10 株芽苗作为一组样本，置于电子天平上称重，取平均值作为鲜重，同样重复 3 次。

$$发芽率(\%)=\frac{发芽籽粒数}{实验籽粒总数}\times 100 \quad 式（1）$$

$$发芽势(\%)=\frac{播种后3\ d内发芽的籽粒数}{实验籽粒总数}\times 100 \quad 式（2）$$

1.2.3.2 总硒及有机硒含量测定 总硒含量依据 GB 5009.93-2017 第一法展开检测，有机硒参照 GB 1903.21-2016 附录 A 的相关要求进行检测，有机硒含量等于总硒含量减去无机硒含量[26]。

1.2.3.3 样品提取 称取 100 mg 冻干青稞芽苗粉末，加入 1 mL 80% 甲醇。混合均匀，25 kHz 超声波破碎 30 min，4 ℃ 条件下 10956×g 高速离心 5 min 取上清液存放在−20 ℃ 冰箱待测，若上清浑浊可多次离心。

1.2.3.4 铁离子还原能力（FRAP）测定 参照李明玥[27] 提出的方法，用超纯水配制 0.4、0.55、0.7、0.85、1 mmol/L 的硫酸亚铁标准溶液制作标准曲线。分别吸取 50 μL 样品提取液（空白对照为 80% 甲醇），加入 1.5 mL FRAP 工作液，室温反应 4 min 后，吸取 200 μL 于 96 孔板中，在 593 nm 下测定吸光度。通过标准曲线 y=2.8554x−0.3025（R^2=0.9998）计算出样品的 FRAP 值，以 μmol Fe（Ⅱ）/g DW 表示。

1.2.3.5 $ABTS^+$自由基清除能力测定 精密称取 Trolox 标准品，以 80% 乙醇溶液溶解后，采用超纯水梯度稀释至 50、100、200、400、600 及 800 μmol/L 浓度梯度，用于绘制标准曲线。分别吸取 50 μL 样品提取液（空白组为 80% 甲醇），与 1.95 mL ABTS 工作液充分混匀后，室温避光反应 6 min。取 200 μL 反应液转移至 96 孔板，于 734 nm 测定吸光度值，通过标准曲线 y=2427x−39.579（R^2=0.9997）计算出样品的 ABTS 值，以 μmol Trolox/g DW 表示。

1.2.3.6 DPPH 自由基清除能力测定 DPPH 自由基清除能力参考马浩媛等[28] 的方法进行测定。以 50、100、200、400、600 及 800 μmol/L Trolox 溶液绘制标准曲线。分别吸取 50 μL 样品提取液（空白组为 80% 甲醇），与 1.95 mL DPPH 工作液充分混匀后，室温避光反应 2 h，取 200 μL 反应液转移至 96 孔板，于在 515 nm 波长处测定吸光度值，通过标准曲线 y=3107.2x+36.43（R^2=0.9910）计算出样品的 DPPH 值，以 μmol Trolox/g DW 表示。

1.2.3.7 总黄酮含量测定 总黄酮含量运用三氯化铝比色法[29] 测定。用 80% 甲醇配制 0.0125、0.0250、0.0500、0.1000、0.1500、0.2000 μg/mL 的芦丁标准溶液制作标准曲线。吸取 50 μL 提取液（空白对照为 80% 甲醇），先后加入 450 μL 80% 甲醇、200 μL 三氯化铝溶液、300 μL 乙酸钾溶液，混合均匀后室温反应 30 min，吸取 200 μL 于 96 孔板中，在 420 nm 下测定吸光度。通过标准曲线 y=1.2822x−0.0005（R^2=0.9996）计算出样品的总黄酮含量，以 mg/100 g 表示。

1.2.3.8 总酚含量测定 总酚含量通过福林酚显色法[30] 测定。用超纯水配制 0.02、0.04、0.06、0.08、0.1 mg/mL 的没食子酸标准溶液制作标准曲线。分别吸取 20 μL 提取液（空白对照为 80% 甲醇），先后加入 80 μL 80% 甲醇、500 μL 福林酚试剂，室温反应 5 min 后，加入 400 μL 7.5% 碳酸钠溶液，于黑暗环境反应 2 h，吸取 200 μL 于 96 孔板中，在 720 nm 下测定吸光度。通过标准曲线 y=0.4653x+0.0173（R^2=0.9996）计算出样品的总酚含量，以 mg/100 g 表示。

1.3 数据处理

本研究运用 Excel 2021 进行数据处理，借助 SPSS 软件（IBM SPSS Statistics 27.0）实施数据的方差分析、相关性分析和回归分析，其中单因素方差分析在 95% 置信水平下对均值之间的显著性差异予以检验，相关性分析采用 Pearson 相关性分析方法，回归分析采用线性回归分析方法，利用 Origin 2021 进行图形绘制。

2 结果与分析

2.1 不同亚硒酸钠浓度对青稞籽粒发芽率和发芽势的影响

由表 1 可知，通过亚硒酸钠浸种的方式进行硒处理，随着亚硒酸钠处理浓度的增加，青稞籽粒发芽率呈现先促进后抑制的趋势。在亚硒酸钠处理浓度为 5 mg/L 时，青稞籽粒发芽率显著高于对照组（P<

表 1　不同亚硒酸钠浓度对青稞籽粒萌发及青稞芽苗生长的影响

Table 1　Effects of different concentrations of sodium selenite on seed germination and sprout growth of highland barley

亚硒酸钠浓度(mg/L)	发芽率(%)	发芽势(%)	株高(cm)	鲜重(mg/株)
0	75.333±1.155^{bc}	64.667±1.155^{d}	12.033±0.115^{d}	86.533±1.002^{d}
5	86.667±3.055^{a}	79.333±1.155^{a}	13.333±0.208^{a}	108.267±1.749^{a}
10	78.667±3.055^{b}	74.000±2.000^{b}	13.100±0.100^{b}	101.877±0.849^{b}
20	76.000±2.000^{bc}	68.667±2.309^{c}	12.633±0.058^{c}	98.923±1.199^{c}
40	75.333±3.055^{bc}	68.667±1.155^{c}	12.533±0.153^{c}	98.490±1.524^{c}
80	73.333±3.055^{c}	63.333±3.055^{d}	12.533±0.058^{c}	97.047±0.914^{c}

注：数据为平均值±标准误(n=3)；同列不同小写字母表示差异显著(P<0.05)，表2同。

0.05)，达到最大值；在亚硒酸钠处理浓度为 10~80 mg/L 时，青稞籽粒发芽率与对照组相比无显著差异(P>0.05)。随着硒处理浓度的逐步增加，青稞籽粒发芽势呈现出先上升后下降的趋势，在 5~40 mg/L 亚硒酸钠浓度浸种处理下，青稞籽粒发芽势相较于对照组分别提高了 22.67%、14.43%、6.18%、6.18%。当亚硒酸钠浓度为 5 mg/L 时，青稞籽粒发芽势达到最大值。此后，发芽势逐渐递减，但在 5~40 mg/L 的浓度范围内，发芽势仍显著高于对照组(P<0.05)，而当亚硒酸钠浓度升高至 80 mg/L 时，发芽势与对照组无明显差异。

本研究发现，运用亚硒酸钠浸种方式对青稞籽粒实施硒处理时，适当的亚硒酸钠浓度能够有效提高青稞籽粒的发芽率与发芽势，5 mg/L 时效果最好。这一结果与高雪等[31] 的研究相契合，即低浓度的硒(1~5 mg/L Se^{4+})可强化青稞的发芽势，促进籽粒萌发。Nagdalian 等[32] 也证实了低浓度的硒添加量有助于青稞籽粒发芽率和发芽势的提高，采用 1~20 mg/L 的纳米硒溶液处理青稞籽粒，在 5 mg/L 的发芽率和发芽势较高，高于 5 mg/L 后纳米硒对青稞籽粒开始起毒害作用。刘爱杰等[33] 的研究也呈现出了相似的结果，盐胁迫下的甜菜籽经过 5 mg/L 亚硒酸钠浸种后可有效提升其发芽势、发芽率、发芽及活力指数。

2.2　不同亚硒酸钠浓度对青稞芽苗株高和鲜重的影响

由图 1 和表 1 可知，5~80 mg/L 亚硒酸钠溶液浸种处理的青稞芽苗的株高和鲜重均显著高于对照组(P<0.05)，相较于对照组株高分别提高了 10.80%、8.86%、4.99%、4.16%、4.16%，鲜重分别提高了 25.12%、17.73%、14.32%、13.82%、12.15%。当亚硒酸钠浸种浓度为 5 mg/L 时，青稞芽苗的株高最大值为 13.333 cm，鲜重最大值为 108.267 mg/株。



图 1　不同亚硒酸钠浓度对青稞芽苗株高和鲜重的影响

Fig.1　Effects of different concentrations of sodium selenite on the height and fresh weight of highland barley sprouts

亚硒酸钠对青稞植株的生长同样具有重要作用，适宜浓度的亚硒酸钠有助于植株的生长。该研究发现 5~80 mg/L 的亚硒酸钠可有效促进青稞芽苗的生长，其中 5 mg/L 的效果最好。这与杨邦伟等[34] 的研究结论相似，采用土壤配施、叶面喷施以及水培配施的方式研究不同浓度亚硒酸钠对青稞苗生长发育的影响，采用土壤配施和水培配施时，1 mg/kg 的纳米硒或亚硒酸钠对青稞苗株高和鲜重的影响最好，采用叶面喷施时，5 mg/kg 的纳米硒或亚硒酸钠效果最高。叶面喷施和本研究采用的浸种配施对硒溶液的耐受性大于土壤配施和水培配施，这可能是青稞籽粒、苗叶以及根部对硒的吸收效果存在差异的原因。

2.3　不同亚硒酸钠浓度对青稞芽苗总硒和有机硒含量的影响

不同浓度亚硒酸钠浸种处理后，青稞芽苗中总硒和有机硒含量的变化如图 2 所示，青稞芽苗中总硒和有机硒含量均随亚硒酸钠处理浓度增加而逐渐升高，有机硒含量和总硒含量接近。5~80 mg/L 处理组有机硒含量(0.021、0.056、0.125、0.221、0.341 mg/kg FW)显著高于对照组的 0.002 mg/kg FW(P<0.05)，较对照组分别提高了 9.50 倍、27.00 倍、61.50 倍、109.50 倍、169.50 倍。

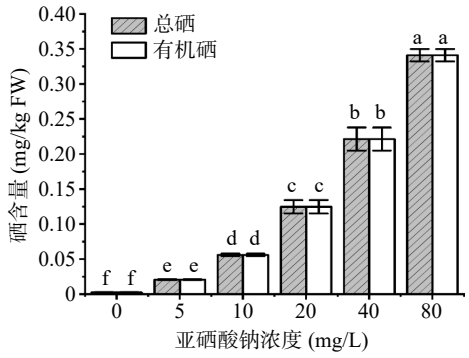


图 2　不同亚硒酸钠浓度对青稞芽苗总硒和有机硒含量的影响

Fig.2　Effects of different concentrations of sodium selenite on total selenium and organic selenium content of highland barley sprouts

注：不同小写字母表示差异显著(P<0.05)。

植物可以吸收环境中的无机硒转化为有机硒。Liu 等[35] 的研究表明，糙米可以从周边环境摄取无机硒，并在发芽进程里将摄取的无机硒转化为 SeCys、

SeMet 等有机硒形式。秦玉燕等[36−37] 对茶树分别进行土壤施硒和叶面喷硒处理后，大部分无机硒转化为有机硒，但仍有一部分以无机硒形式存在。Cheng 等[19] 研究发现，使用 80 mg/L 的亚硒酸钠溶液浸泡绿豆种子，生长 5 d 后获得的绿豆芽硒转化率为 93.77%。Han 等[38] 研究结果表明，使用 200 μmol/L 的亚硒酸钠浸种，花生种子发芽过程中，无机硒通过生物转化高效转化为有机硒，花生芽中的总硒、有机硒含量在发芽第 6 d 达到 6618.59 和 6144.07 μg/kg，转化率为 92.83%。在本研究中，青稞籽粒在吸收硒溶液之后，在发芽过程中将无机硒转化为有机硒，使得青稞芽苗中几乎只存在有机硒，且有机硒含量随亚硒酸钠处理浓度升高而升高，含量最高可达 0.341 mg/kg FW，硒转化率约为 100%，富硒能力高于绿豆芽、花生芽等。相较于叶面喷施和土壤施硒处理，本研究采用的硒浸种处理方式能更好地吸收无机硒，在种子萌发初期就参与到植物的生理代谢过程中，有利于更早地启动无机硒的转化机制，从而在转化效率上表现出明显优势。关于青稞芽苗菜有机硒的具体组成形态、含量还待进一步研究。

2.4 不同亚硒酸钠浓度对青稞芽苗抗氧化活性及酚类物质含量的影响

由表 2 可知，10~40 mg/L 亚硒酸钠处理组铁离子还原能力（FRAP）显著高于对照组（P<0.05），随着硒处理浓度的增加，富硒组的 FRAP 值呈现先升高后降低的趋势，并在 10~40 mg/L 这个范围内基本保持不变（22.885~23.542 μmol Fe(Ⅱ)/g），10 mg/L 时青稞芽苗的 FRAP 相比对照组提高了 11.85%，超过 40 mg/L 后铁离子还原能力下降到与对照同一水平。硒处理后青稞芽苗的 $ABTS^+$ 自由基清除能力均显著高于对照组（P<0.05），分别在对照组的基础上提升了 4.96%、12.85%、9.15%、9.15%、3.83%。DPPH 自由基清除能力则在 5~40 mg/L 亚硒酸钠处理时显著提高（P<0.05），相比对照组分别提高了 8.95%、11.90%、24.83%、14.05%。随着硒处理浓度的增加，富硒组的 $ABTS^+$ 和 DPPH 自由基清除能力呈现先升高后降低的趋势，分别在 10 和 20 mg/L 时达到最大值，为 13.717 和 13.978 μmol Trolox/g。

另一方面，添加亚硒酸钠浸种显著提高了青稞芽苗中的总黄酮含量（P<0.05），与对照组相比，各亚硒酸钠浸种处理组分别提升了 6.00%、16.41%、14.95%、13.83%、10.13%。总黄酮含量呈现先升高后降低的变化趋势，亚硒酸钠浓度为 5 mg/L 时青稞芽苗中总黄酮含量显著高于对照组（P<0.05），当亚硒酸钠溶液浓度达到 10 mg/L 时，青稞芽苗的总黄酮含量达到最高值，即 373.611 mg/100 g，并在亚硒酸钠溶液浓度为 10~40 mg/L 范围内总黄酮含量无明显变化（373.611~365.316 mg/100 g），超过 40 mg/L 后总黄酮含量开始下降。10、40、80 mg/L 亚硒酸钠处理，可显著提高青稞芽苗中的总酚含量（P<0.05），其中 40 mg/L 亚硒酸钠处理时总酚含量最高，为 438.331 mg/100 g，相比于对照组提高了 8.53%，而 5、20 mg/L 亚硒酸钠处理组相对于对照组差异不显著（P>0.05）。

已有的研究结果表明，适当硒处理可以有效提高植物的抗氧化活性[39−40] 以及总黄酮和总酚等[41] 等抗氧化物质含量。李晓红等[42] 发现，用亚硒酸钠溶液进行水培能够有效地提高萝卜芽苗菜的抗氧化活性，5 mg/L 浓度下萝卜芽苗菜的 ABTS、FRAP 和 DPPH 值达到最大。黄雪梅等[43] 和武文玥等[44] 的研究发现适宜的硒处理能够增加总酚和黄酮的含量，其中 0.25 mg/L 的硒处理显著增加生菜的总酚含量，并且该含量随着硒浓度的增加而增加。叶面喷施亚硒酸钠提高了甜荞的黄酮含量，在 1 mg/L 时黄酮含量最高。Banerjee 等[45] 研究结果与之相似，100 μg/g 的硒有效提高了菜豆中类黄酮和酚类物质的含量。在本研究中，经亚硒酸钠浸种处理后，青稞芽苗中的总酚和总黄酮含量增加，在 40 mg/L 时青稞芽苗中的总酚含量最高，10 mg/L 时青稞芽苗中的总黄酮含量最高，富硒青稞芽苗的抗氧化活性显著强于对照组。

赵梦媛等[46] 的研究发现，芦丁降解酶（RDEs）与黄酮类物质相关，过热蒸汽处理一定程度上降低了 RDEs 酶活，抑制芦丁水解，从而提高黄酮类物质含量。此外，有机硒既可以作为一种直接抗氧化剂，也可以提高抗氧化酶酶活[47]。抗氧化酶（如超氧化物歧化酶 SOD、过氧化氢酶 CAT、过氧化物酶 POD 等）是生物体内抗氧化系统的关键组分，通过催化反应清除自由基从而增强抗氧化系统。研究表明，用亚硒酸钠溶液浸种花生种子，有效提高了花生芽苗的 SOD 和 POD 酶活[48]；用亚硒酸钠溶液叶面喷施处理油麦

表 2 不同亚硒酸钠浓度对青稞芽苗总酚、总黄酮含量和抗氧化活性的影响

Table 2 Effects of different concentrations of sodium selenite on the contents of total phenol, total flavone and antioxidant activity of highland barley sprouts

亚硒酸钠浓度（mg/L）	FRAP（μmol Fe(Ⅱ)/g）	ABTS（μmol Trolox/g）	DPPH（μmol Trolox/g）	总黄酮含量（mg/100 g）	总酚含量（mg/100 g）
0	20.850±0.692^{b}	12.155±0.255^{d}	11.198±0.312^{c}	320.935±9.937^{d}	403.885±1.913^{c}
5	21.248±0.642^{b}	12.758±0.238^{c}	12.200±0.224^{b}	340.175±6.799^{c}	398.734±3.110^{c}
10	23.265±0.256^{a}	13.717±0.170^{a}	12.531±0.411^{b}	373.611±8.211^{a}	420.549±1.830^{b}
20	22.885±0.616^{a}	13.267±0.083^{b}	13.978±0.147^{a}	368.908±6.051^{a}	405.592±2.051^{c}
40	23.542±0.195^{a}	13.267±0.221^{b}	12.771±0.537^{b}	365.316±7.732^{ab}	438.331±7.628^{a}
80	21.629±0.749^{b}	12.620±0.159^{c}	11.187±0.628^{c}	353.430±0.770^{b}	427.687±5.867^{b}

菜植株，显著提高了其 SOD、POD、CAT 酶活性[49]。本研究中，亚硒酸钠浸种处理青稞籽粒后，青稞芽苗的芦丁降解酶和抗氧化酶酶活有待后续研究，这可能与青稞芽苗抗氧化活性变化相关。下一步，可通过代谢组学、转录组学等手段，深入分析富硒青稞芽苗的富硒机理与代谢情况。此外，研究发现油菜芽苗中硒、维生素 E 和硫代葡萄糖苷的含量与种子中的含量高度相关[50]。芽苗的种子仍具有开发利用价值，本研究萌发后的青稞种子硒含量、生物活性等还在进一步研究中。

2.5　化学成分与抗氧化活性的 Pearson 相关性分析

从表 3 Pearson 相关性分析结果能够看出，青稞芽苗中总硒和有机硒与 FRAP、ABTS、DPPH 值的相关性系数均较低，无相关性，与总酚含量极显著正相关（P<0.01）；总黄酮含量与铁离子还原能力、$ABTS^+$自由基清除能力、DPPH 自由基清除能力极显著正相关（P<0.01）；总酚含量与铁离子还原能力显著正相关（P<0.05），与 $ABTS^+$和 DPPH 自由基清除能力几乎不相关，与总黄酮含量显著正相关（P<0.05）。此结果表明，亚硒酸钠浸种处理可能主要是通过提高青稞芽苗中的总黄酮和总酚含量，间接增强其抗氧化能力。在 Pearson 相关性分析结果基础上进行线性回归分析，得出回归方程（FRAP=0.372+0.046×总黄酮含量+0.013×总酚含量，R^2=0.768；ABTS=3.766+0.026×总黄酮含量，R^2=0.840；DPPH=−0.538+0.036×总黄酮含量，R^2=0.350），可以通过总黄酮和总酚含量预测抗氧化活性。相关研究表明，总黄酮及总酚含量和抗氧化活性之间存在关联[30,51]，硒通过提高酚类和类黄酮含量从而改善植物的抗氧化防御系统[52]。硒处理提高油菜粉抗氧化活性的同时，黄酮和多酚含量也相应增加，富硒油菜粉的抗氧化活性与黄酮和多酚含量正相关[53]。本文结果与上述研究结果相似，表明总黄酮和总酚含量的增加有利于提高青稞芽苗的抗氧化能力。

表 3　化学成分与抗氧化活性的 Pearson 相关性分析
Table 3　Pearson correlation analysis of chemical constituents and antioxidant activity

指标	FRAP	ABTS	DPPH	总硒	有机硒	总黄酮	总酚
FRAP	1						
ABTS	0.779**	1					
DPPH	0.516*	0.677**	1				
总硒	0.254	0.061	−0.099	1			
有机硒	0.254	0.061	−0.099	1.000**	1		
总黄酮	0.815**	0.873**	0.651**	0.362	0.362	1	
总酚	0.493*	0.36	−0.031	0.722**	0.722**	0.479*	1

注：双尾检验(n=3)；*和**分别表示显著相关（P<0.05）和极显著相关（P<0.01）。

3　结论

亚硒酸钠浸种可显著提升青稞籽粒的发芽率与发芽势，促进青稞芽苗的生长，表现为株高和鲜重的增加；亚硒酸钠浸种后，青稞籽粒的发芽过程将无机硒转化为有机硒，有效提高了青稞芽苗中的有机硒含量、总酚和总黄酮含量，进而增强青稞芽苗的抗氧化活性。其中，对青稞芽苗生长指标影响最为显著的亚硒酸钠浓度为 5 mg/L，而对其抗氧化活性指标影响最为突出的亚硒酸钠浓度则为 10 mg/L。综上所述，以 10 mg/L 的亚硒酸溶液浸泡青稞籽粒，既可以促进青稞芽苗生长，提高青稞芽苗的硒含量，也可以显著提高其抗氧化活性。富硒青稞芽苗抗氧化活性的显著增强，意味着其在食品、保健品等领域具有潜在的开发价值。结合本研究结果，未来可进一步开发功能性食品，如富硒青稞芽苗面食或饮品等，以及进一步研究硒在青稞芽苗体内的代谢途径。

© The Author(s) 2026. This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/).

参考文献

[1] 应泉盛，古斌权，张华峰，等. 6 个大麦品种麦苗产量与营养成分比较[J]. 浙江农业科学，2017，58(2)：233−234. [YING Quansheng, GU Binquan, ZHANG Huafeng, et al. Comparison of wheat seedling yield and nutrient composition of 6 barley varieties [J]. Journal of Zhejiang Agricultural Sciences, 2017, 58(2): 233−234.]

[2] 白婷，靳玉龙，朱明霞，等. 青稞苗粉营养品质分析[J]. 食品工业，2020，41(2)：318−321. [BAI Ting, JIN Yulong, ZHU Mingxia, et al. Nutritional quality evaluation of highland barley grass powder[J]. The Food Industry, 2020, 41(2): 318−321.]

[3] 石子林，杨旭，周建波，等. 芫蔚子总黄酮提取工艺优化及抗氧化活性研究[J]. 饲料工业，2025，46(11)：101−106. [SHI Zilin, YANG Xu, ZHOU Jianbo, et al. Study on extraction process and antioxidant activity of total flavonoids from *Fructus leonuri*[J]. Feed Industry, 2025, 46(11): 101−106.]

[4] 金莉莉，于炎巧，朱晓玉，等. 甜菜碱及叶酸的降血脂和抗氧化作用[J]. 辽宁大学学报(自然科学版)，2019，46(2)：142−150. [JIN Lili, YU Yanqiao, ZHU Xiaoyu, et al. Effect of betaine and folic acid on reducing blood lipid and anti-oxidation of hyperlipidemia model mice[J]. Journal of Liaoning University (Natural Sciences Edition), 2019, 46(2): 142−150.]

[5] 张传玉，张执金，黄荣峰，等. 水稻品种中 VC 含量及抗氧化性的比较分析[J]. 中国农业科技导报，2011，13(6)：6−11. [ZHANG Chuanyu, ZHANG Zhijin, HUANG Rongfeng, et al. Comparative analysis of vitamin C contents and anti-oxidization in rice varieties[J]. Journal of Agricultural Science and Technology, 2011, 13(6): 6−11.]

[6] 母志平. 一种新型杂粮高纤代餐粉的研制[D]. 成都：成都大学，2024. [MU Zhiping. Development on a novel multigrain high-fiber meal replacement powder[D]. Chengdu: Chengdu University, 2024.]

[7] 刘慧，张静林，刘杰超，等. 施硒对樱桃番茄贮藏品质及 3 种活性氧代谢酶的影响[J]. 食品工业科技，2019，40(24)：256−261. [LIU Hui, ZHANG Jinglin, LIU Jiechao, et al. Effects of selenium on cherry tomato storage qualities and involved three active oxygen metabolism related enzymes[J]. Science and Technology of Food Industry, 2019, 40(24): 256−261.]

[8] LIU Huan, YU Fangfang, SHAO Wanzhen, et al. Associations

between selenium content in hair and kashin-beck disease/Keshan disease in children in northwestern China: A prospective cohort study[J]. Biological Trace Element Research, 2018, 184(1): 16−23.
[9] DINH Q T, CUI Zewei, HUANG Jie, et al. Selenium distribution in the Chinese environment and its relationship with human health: A review[J]. Environment International, 2018, 112: 294−309.
[10] 李爽, 时学双, 次旦卓嘎, 等. 西藏日喀则地区青稞籽粒与栽培土壤中锌和硒含量特征[J]. 土壤通报, 2023, 54(3): 645−653. [LI Shuang, SHI Xueshuang, CIDANZHUOGA, et al. Characteristics of zinc and selenium contents in highland barley and their cultivated soils from Shigatze, Tibet[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2023, 54(3): 645−653.]
[11] 刘熙会, 张小平, 李倩倩, 等. 青藏高原地区大骨节病的流行特征及致病因素探究[J]. 环境化学, 2022, 41(4): 1137−1147. [LIU Xihui, ZHANG Xiaoping, LI Qianqian, et al. Epidemiological trend and pathogenic factors of KBD in Qinghai-Tibet Plateau region[J]. Environmental Chemistry, 2022, 41(4): 1137−1147.]
[12] 王婧, 李海蓉, 杨林生. 青藏高原大骨节病流行区环境、食物及人群硒水平研究[J]. 地理科学进展, 2020, 39(10): 1677−1686. [WANG Jing, LI Hairong, YANG Linsheng. Selenium levels in the environment, food, and human hair in Kashin-Beck disease endemic areas of the Qinghai-Tibet Plateau[J]. Progress in Geography, 2020, 39(10): 1677−1686.]
[13] SINDIREVA A, GOLUBKINA N, BEZUGLOVA H, et al. Effects of high doses of selenate, selenite and nano-selenium on biometrical characteristics, yield and biofortification levels of *Vicia faba* L. cultivars[J]. Plants, 2023, 12(15): 2847.
[14] 沈乐丞, 温志刚, 廖涵, 等. 叶面喷施不同硒肥对水稻硒含量及硒形态和稻米组分的影响[J]. 中国农业科技导报(中英文), 2025, 27(3): 206−215. [SHEN Lecheng, WEN Zhigang, LIAO Han, et al. Effects of foliar spraying of different selenium fertilizers on selenium content, selenium speciation and components in rice[J]. Journal of Agricultural Science and Technology, 2025, 27(3): 206−215.]
[15] 王雪儿, 王玲, 杨欣宇, 等. 不同化学形态硒的毒理学研究[J]. 湖北民族大学学报(自然科学版), 2022, 40(2): 150−156. [WANG Xueer, WANG Ling, YANG Xinyu, et al. Toxicological studies on different chemical forms of selenium[J]. Journal of Hubei Minzu University (Natural Science Edition), 2022, 40(2): 150−156.]
[16] BJØRKLUND G, SHANAIDA M, LYSIUK R, et al. Selenium: An antioxidant with a critical role in anti-aging[J]. Molecules, 2022, 27(19): 6613.
[17] ZAREI S, HOSSEINIARA S M. Selenium as a mineral with anti-cancer properties[J]. Novelty in Clinical Medicine, 2022, 1(1): 4−25.
[18] ZHANG Yihong, LIU Wanling, WANG Xiaoyu, et al. Nanozyme-enabled treatment of cardio- and cerebrovascular diseases[J]. Small, 2023, 19(13): 2204809.
[19] CHENG Hua, LI Lei, DONG Jingzhou, et al. Transcriptome and physiological determination reveal the effects of selenite on the growth and selenium metabolism in mung bean sprouts[J]. Food Research International, 2023, 169: 112880.
[20] 严翻翻, 张永清, 张萌, 等. 亚硒酸钠对盐碱胁迫下藜麦生长及抗性的影响[J]. 广西师范大学学报(自然科学版), 2025, 43(1): 58−64. [YAN Fanfan, ZHANG Yongqing, ZHANG Meng, et al. Effects of sodium selenite on growth and resistance of quinoa under salinity stress[J]. Journal of Guangxi Normal University (Natural Science Edition), 2025, 43(1): 58−64.]
[21] CHEN Jiahui, CHEN Hui, WANG Haixia, et al. Selenium treatment promotes anthocyanin accumulation in radish sprouts (*Raphanus sativus* L.) by its regulation of photosynthesis and sucrose transport[J]. Food Research International, 2023, 165: 112551.
[22] 冯明菊, 熊华, 王晓雅, 等. 富硒糙米蛋白理化特性及抗氧化活性的研究[J]. 食品工业科技, 2020, 41(15): 34−42. [FENG Mingju, XIONG Hua, WANG Xiaoya, et al. Physicochemical properties and antioxidant activity of protein in selenium-enriched brown rice[J]. Science and Technology of Food Industry, 2020, 41(15): 34−42.]
[23] LIU Aijie, WANG Huazhong, WANG Maoqian. Na_2SeO_3 seed priming improves seed germination, seedling growth and rhizosphere microbial community structure of sugar beet (*Beta vulgaris* L.) under salt stress[J]. Plant Stress, 2025, 16: 100795.
[24] GUARDADO-FÉLIX D, SERNA-SALDIVAR S O, CUEVAS-RODRÍGUEZ E O, et al. Effect of sodium selenite on isoflavonoid contents and antioxidant capacity of chickpea (*Cicer arietinum* L.) sprouts[J]. Food Chemistry, 2017, 226: 69−74.
[25] 孙小川, 丁竟, 王纪忠, 等. 外源硒对萝卜芽苗菜生长特性及营养品质的影响[J]. 黑龙江农业科学, 2023(8): 66−71. [SUN Xiaochuan, DING Jing, WANG Jizhong, et al. Effects of exogenous selenium on growth characteristics and nutritional quality of radish sprouts[J]. Heilongjiang Agricultural Sciences, 2023(8): 66−71.]
[26] 吴焕焕, 任志红, 肖文敏, 等. 叶面喷施纳米硒对夏茶硒含量及品质的影响[J]. 山东农业科学, 2024, 56(8): 123−128. [WU Huanhuan, REN Zhihong, XIAO Wenmin, et al. Effects of foliar application of nano-selenium on selenium content and quality of summer tea[J]. Shandong Agricultural Sciences, 2024, 56(8): 123−128.]
[27] 李明玥. 硒处理对西兰花芽苗抗氧化活性及代谢物组成的影响[D]. 成都: 成都大学, 2023. [LI Mingyue. Effect of selenium treatment on the antioxidant activity and metabolism of broccoli sprouts[D]. Chengdu: Chengdu University, 2023.]
[28] 马浩媛, 王瑞, 武敏, 等. 燕麦麸酶解物制备工艺优化及体内外抗氧化活性研究[J]. 食品工业科技, 2025, 46(21): 319−328. [MA Haoyuan, WANG Rui, WU Min, et al. Optimization of the preparation process of oat bran hydrolysate and its *in vitro* and *in vivo* antioxidant activity[J]. Science and Technology of Food Industry, 2025, 46(21): 319−328.]
[29] 甘文梅, 张炜, 王志娟, 等. 超高压处理对青稞苗汁品质的影响[J]. 现代化工, 2021, 41(9): 185−191. [GAN Wenmei, ZHANG Wei, WANG Zhijuan, et al. Effect of ultra-high pressure treatment on quality of highland barley seedling juice[J]. Modern Chemical Industry, 2021, 41(9): 185−191.]
[30] 孟想, 朱雪洋, 张莉方, 等. 萌发处理对黑青稞活性成分组成及抗氧化能力的影响[J]. 食品与发酵工业, 2022, 48(4): 158−164. [MENG Xiang, ZHU Xueyang, ZHANG Lifang, et al. Effect of germination on the composition of active ingredients and antioxidant capacity in black highland barley[J]. Food and Fermentation Industries, 2022, 48(4): 158−164.]
[31] 高雪, 李安庆, 冉黄丹妮, 等. 硒对六个青稞品种种子萌发及吸收转运的影响[J]. 核农学报, 2024, 38(7): 1385−1397. [GAO Xue, LI Anqing, RAN Huangdanni, et al. Effects of selenium on germination and selenium uptake and transportation in six varieties of highland barley[J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 2024, 38(7): 1385−1397.]
[32] NAGDALIAN A A, BLINOV A V, SIDDIQUI S A, et al. Effect of selenium nanoparticles on biological and morphofunction-

al parameters of barley seeds (*Hordéum vulgáre* L.)[J]. Scientific Reports, 2023, 13: 6453.
[33] 刘爱杰, 张惠忠, 王茂芊. 亚硒酸钠浸种对盐胁迫下甜菜种子萌发的影响[J]. 中国农学通报, 2023, 39(35): 20−26. [LIU Aijie, ZHANG Huizhong, WANG Maoqian. Effects on seed germination of sugar beet: Sodium selenite immersion under salt stress[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2023, 39(35): 20−26.]
[34] 杨邦伟, 黄琳丽, 张述伟, 等. 富硒大麦苗培育方法的研究[J]. 上海农业学报, 2024, 40(4): 8−14. [YANG Bangwei, HUANG Linli, ZHANG Shuwei, et al. Study on cultivation method of selenium-enriched barley seedlings[J]. Acta Agriculturae Shanghai, 2024, 40(4): 8−14.]
[35] LIU Kunlun, ZHAO Yan, CHEN Fusheng, et al. Purification and identification of Se-containing antioxidative peptides from enzymatic hydrolysates of Se-enriched brown rice protein[J]. Food Chemistry, 2015, 187: 424−430.
[36] 秦玉燕, 王运儒, 时鹏涛, 等. 叶面喷硒对茶树叶片硒及矿质元素含量的影响[J]. 南方农业学报, 2019, 50(3): 622−627. [QIN Yuyan, WANG Yunru, SHI Pengtao, et al. Effects of foliage spraying selenium on the selenium and mineral elements contents in leaves of tea plant[J]. Journal of Southern Agriculture, 2019, 50(3): 622−627.]
[37] 秦玉燕, 王运儒, 时鹏涛, 等. 土壤施硒对茶树叶片硒及矿质元素含量的影响[J]. 土壤通报, 2019, 50(2): 387−394. [QIN Yuyan, WANG Yunru, SHI Pengtao, et al. Effects of selenium application on the concentrations of selenium and mineral elements in the leaves of tea plant[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2019, 50(2): 387−394.]
[38] HAN M Q, LIU K L, RASHID M T, et al. Status and distribution of selenium in selenium-enriched peanut sprouts[J]. Grain & Oil Science and Technology, 2024, 7(4): 262−269.
[39] PAŚKO P, GALANTY A, ZAGRODZKI P, et al. Varied effect of fortification of kale sprouts with novel organic selenium compounds on the synthesis of sulphur and phenolic compounds in relation to cytotoxic, antioxidant and anti-inflammatory activity[J]. Microchemical Journal, 2022, 179: 107509.
[40] 王智伟, 李茜, 张民. 富硒豌豆苗粉理化性质及抗氧化活性分析[J]. 食品科学, 2024, 45(6): 8−14. [WANG Zhiwei, LI Qian, ZHANG Min. Physicochemical properties and antioxidant activity *in vitro* of selenium-enriched pea seedling powder[J]. Food Science, 2024, 45(6): 8−14.]
[41] XIANG Juan, RAO Shen, CHEN Qiangwen, et al. Research progress on the effects of selenium on the growth and quality of tea plants[J]. Plants, 2022, 11(19): 2491.
[42] 李晓红, 句荣辉. 硒对萝卜芽苗菜抗氧化性及相关成分含量的影响[J]. 中国食品添加剂, 2023, 34(12): 98−105. [LI Xiaohong, JU Ronghui. Effects of selenium on antioxidant capacity and related nutrient components content in radish sprouts[J]. China Food Additives, 2023, 34(12): 98−105.]
[43] 黄雪梅, 岳顺念, 王琦瑞. 不同浓度亚硒酸钠对水培生菜富硒品质的影响[J]. 广东农业科学, 2018, 45(1): 29−33. [HUANG Xuemei, YUE Shunnian, WANG Qirui. Effects of nutrient solutions supplemented with sodium selenite on the selenium enriched effect of lettuce in hydroponics[J]. Guangdong Agricultural Sciences, 2018, 45(1): 29−33.]
[44] 武文玥, 马红梅, 武志明, 等. 叶面喷施亚硒酸钠对甜荞籽粒品质的影响[J]. 山西农业科学, 2022, 50(6): 854−860. [WU Wenyue, MA Hongmei, WU Zhiming, et al. Effects of foliar spraying of sodium selenite on grain quality of common buckwheat[J]. Journal of Shanxi Agricultural Sciences, 2022, 50(6): 854−860.]
[45] BANERJEE M, RAJESWARI V D. Green synthesis of selenium nanoparticles using leaf extract of *Moringa oleifera*, their biological applications, and effects on the growth of *Phaseolus vulgaris*-: Agricultural synthetic biotechnology for sustainable nutrition[J]. Biocatalysis and Agricultural Biotechnology, 2024, 55: 102978.
[46] 赵梦媛, 王香玉, 尚盼盼, 等. 过热蒸汽对苦荞粉中黄酮类物质及其抗氧化活性的影响[J]. 食品工业科技, 2025, 46(6): 147−154. [ZHAO Mengyuan, WANG Xiangyu, SHANG Panpan, et al. Effects of superheated steam on flavonoids and antioxidant activity in Tartary buckwheat flour[J]. Science and Technology of Food Industry, 2025, 46(6): 147−154.]
[47] CHEN Xujun, LI Shuyi, CONG Xin, et al. Optimization of *Bacillus cereus* fermentation process for selenium enrichment as organic selenium source[J]. Frontiers in Nutrition, 2020, 7: 543873.
[48] 吴琼, 雷三春, 王真, 等. 不同硒浓度浸种对花生种子萌发与生理生化特性的影响[J]. 贵州农业科学, 2024, 52(12): 10−17. [WU Qiong, LEI Sanchun, WANG Zhen, et al. Effects of different selenium concentrations on the germination and physiochemical properties of peanut seeds[J]. Guizhou Agricultural Sciences, 2024, 52(12): 10−17.]
[49] 陈鸿, 李思彤, 李真琴, 等. 亚硒酸钠对油麦菜品质及保护酶活性的影响[J]. 东南园艺, 2022, 10(3): 161−167. [CHEN Hong, LI Sitong, LI Zhenqin, et al. Effects of sodium selenite on the quality and protective enzyme activities of lettuce[J]. Southeast Horticulture, 2022, 10(3): 161−167.]
[50] XIAO Zelin, PAN Yuying, WANG Chao, et al. Multi-functional development and utilization of rapeseed: Comprehensive analysis of the nutritional value of rapeseed sprouts[J]. Foods, 2022, 11(6): 778.
[51] 申迎宾, 张友维, 黄才欢, 等. 提取溶剂对青稞提取物总酚、黄酮含量及其抗氧化活性的影响[J]. 食品与机械, 2016, 32(11): 133−136. [SHEN Yingbin, ZHANG Youwei, HUANG Caihuan, et al. Effect of different solvents on total phenolic content, total flavonoid content and antioxidant activity of highland barley[J]. Food & Machinery, 2016, 32(11): 133−136.]
[52] AHMAD I, MASHWANI Z U R, YOUSAF T, et al. Antioxidant activity, metabolic profiling, *in-silico* molecular docking and ADMET analysis of nano selenium treated sesame seed bioactive compounds as potential novel drug targets against cardiovascular disease related receptors[J]. Heliyon, 2024, 10(7): e27909.
[53] 杨迪, 闵立风, 张睿, 等. 富硒油菜粉抗氧化特性及其与化学成分相关性[J]. 食品科学, 2024, 45(9): 60−65. [YANG Di, MIN Lifeng, ZHANG Rui, et al. Antioxidant properties and correlation with chemical components in selenium-enriched rape powder[J]. Food Science, 2024, 45(9): 60−65.]