

响应面法优化微酸性电生功能水萌发苦荞芽工艺及其富硒规律研究

赵一迪, 刘媛, 张凯, 尹晨, 朱伟冉, 王健, 李云龙, 周海涛, 牟建楼

Optimization of Germination of Tartary Buckwheat with Slightly Acidic Electrolyzed Water by Response Surface Methodology and Its Selenium-enriched Rules

ZHAO Yidi, LIU Yuan, ZHANG Kai, YIN Chen, ZHU Weiran, WANG Jian, LI Yunlong, ZHOU Haitao, and MOU Jianlou

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2023080010>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

富含 γ -氨基丁酸的黑苦荞发芽的条件优化及成分分析

Optimization of Germination Conditions for γ -Aminobutyric Acid Accumulation and Component Analysis of Black Tartary Buckwheat

食品工业科技. 2021, 42(24): 144-150 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2021030277>

微酸性电解水杀菌工艺优化及对云南鲜米线贮藏品质影响

Optimization of the Sterilization Process of Slightly Acidic Electrolyzed Water and Its Effect on the Storage Quality of Yunnan Fresh Rice Noodles

食品工业科技. 2021, 42(1): 204-210 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2020030389>

响应面法优化西兰花芽苗富集异硫氰酸酯发芽工艺

Optimization of Germination Process of Isothiocyanate Enrichment in Broccoli Sprouts by Response Surface Methodology

食品工业科技. 2022, 43(7): 239-247 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2021080304>

青稞籽粒富硒发芽条件优化及其抗氧化能力分析

Optimization of Selenium Enriched Germination Conditions and Its Antioxidant Abilities in Highland Barley Seeds

食品工业科技. 2019, 40(14): 188-195, 202 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2019.14.031>

低醇度萌发苦荞酒工艺优化及相关指标变化研究

Study on Optimization of Process and Related Index Changes of Low Alcohol Germination Buckwheat Wine

食品工业科技. 2019, 40(15): 120-128 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2019.15.020>

微波协同L-苯丙氨酸处理对苦荞萌发中黄酮的影响

Effects of Microwave-assisted L-phenylalanine Treatment on the Flavonoids of Tartary Buckwheat during Germination

食品工业科技. 2022, 43(5): 191-198 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2021060227>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

赵一迪, 刘媛, 张凯, 等. 响应面法优化微酸性电生功能水萌发苦荞芽工艺及其富硒规律研究 [J]. 食品工业科技, 2024, 45(17): 155-162. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2023080010

ZHAO Yidi, LIU Yuan, ZHANG Kai, et al. Optimization of Germination of Tartary Buckwheat with Slightly Acidic Electrolyzed Water by Response Surface Methodology and Its Selenium-enriched Rules[J]. Science and Technology of Food Industry, 2024, 45(17): 155-162. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2023080010

· 工艺技术 ·

响应面法优化微酸性电生功能水萌发苦荞芽 工艺及其富硒规律研究

赵一迪¹, 刘媛¹, 张凯¹, 尹晨¹, 朱伟冉¹, 王健^{1,*}, 李云龙^{2,*}, 周海涛³, 牟建楼⁴

(1.河北北方学院河北省农产品食品质量安全分析检测重点实验室, 河北张家口 075000;

2.山西农业大学山西功能食品研究院, 山西太原 030031;

3.河北农业大学食品科技学院, 河北保定 071000;

4.张家口市农业科学院, 河北张家口 075000)

摘要:为探究不同 pH、有效氯浓度 (Available Chlorine Contents, ACC) 的微酸性电生功能水 (Slightly Acidic Electrolyzed Water, SAEW) 萌发条件对发芽苦荞的影响规律, 以发芽率为考察指标, 通过单因素和响应面试验优化微酸性电生功能水萌发苦荞芽工艺; 为获得总硒含量高且品质优良的富硒苦荞芽, 以总硒含量和发芽率为考察指标, 在微酸性电生功能水萌发基础上, 研究了不同亚硒酸钠浓度对苦荞发芽的影响。结果表明, 最佳工艺参数为: 浸泡时间为 2.3 h, pH 为 6.5, 萌发温度为 21 °C, 萌发时间为 108 h, 在该条件下发芽率为 84.96%, 与响应面预测值 (85.36%) 接近, 相比蒸馏水组提高了 14.3%, 比自来水组提高了 11.71%。优选的 Na₂SeO₃ 溶液浓度为 60 mg/L, 苦荞芽的总硒含量为 15.5 mg/L 且发芽率为 85.63%, 高于响应面优化预测值且高于苦荞发芽实际值。本研究为微酸性电生功能水和富硒处理萌发苦荞芽产品的开发提供了理论基础和科学依据。

关键词:微酸性电生功能水, 苦荞, 发芽, 响应面法, 工艺优化, 富硒

中图分类号: TS210.1

文献标识码: B

文章编号: 1002-0306(2024)17-0155-08

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2023080010



本文网刊:

Optimization of Germination of Tartary Buckwheat with Slightly Acidic Electrolyzed Water by Response Surface Methodology and Its Selenium-enriched Rules

ZHAO Yidi¹, LIU Yuan¹, ZHANG Kai¹, YIN Chen¹, ZHU Weiran¹, WANG Jian^{1,*}, LI Yunlong^{2,*},
ZHOU Haitao³, MOU Jianlou⁴

(1. Hebei Key Laboratory of Quality and Safety Analysis of Agricultural Products and Food, Hebei North University,
Zhangjiakou 075000, China;

2. Shanxi Functional Food Research Institute, Shanxi Agricultural University, Taiyuan 030031, China;

3. College of Food Science and Technology, Agricultural University of Hebei, Baoding 071000, China;

4. Zhangjiakou Academy of Agricultural Sciences, Zhangjiakou 075000, China)

Abstract: To explore the influence of slightly acidic electrolyzed water (SAEW) with different pH and available chlorine contents (ACC) on the germination of tartary buckwheat (*Fagopyrum tataricum*), the germination rate was taken as the

收稿日期: 2023-08-10

基金项目: 山西省重点研发计划项目 (201903D211006); 张家口市重点研发计划项目 (1911016-C); 国家现代农业 (燕麦荞麦) 产业技术体系建设专项 (CARS07-E2-04)。

作者简介: 赵一迪 (2000-), 女, 硕士研究生, 研究方向: 食品加工与安全, E-mail: 958581857@qq.com。

* 通信作者: 王健 (1980-), 男, 博士, 教授, 研究方向: 农产品加工与贮藏工程, E-mail: xuanyuanjian0228@126.com。

李云龙 (1979-), 男, 硕士, 研究员, 研究方向: 荞麦精深加工技术, E-mail: liyunlong125@126.com。

index, and the germination process of tartary buckwheat sprouts with SAEW was optimized by single factor and response surface experiments. Moreover, to obtain good quality selenium-enriched tartary buckwheat sprouts, the effects of different Na_2SeO_3 concentrations on tartary buckwheat were studied on the basis of SAEW germination, with the total selenium content and germination rate as indexes. The optimum technological parameters were determined as follows: soaking time 2.3 h, pH6.5, germination temperature 21 °C and germination time 108 h. Under these conditions, the germination rate was 84.96%, which was close to the predicted value of the response surface group (85.36%), being 14.3% and 11.71% higher than those of distilled water and tap water groups, respectively. The optimal concentration of Na_2SeO_3 was 60 mg/L, under which the total selenium content of tartary buckwheat sprouts was 15.5 mg/L, and the germination rate was 85.63%, which were both higher than the predicted and actual values of response surface group. This study provided a theoretical and scientific basis for the development of SAEW and selenium-enriched treatment of tartary buckwheat sprouts.

Key words: slightly acidic electrolyzed water; tartary buckwheat; germination; response surface method; process optimization; selenium-enriched

苦荞的学名是鞑靼荞麦, 别名荞叶七、野兰荞等, 属于双子叶蓼科植物^[1], 起源于我国西南部^[2]。苦荞中的蛋白质、矿物质、淀粉和膳食纤维含量普遍高于大米、甜荞等农作物, 含有丰富的生物类黄酮, 硒元素含量较高, 且具有降血压降血脂、防治高血压冠心病、抗癌、抗肿瘤等功效^[3-10], 是一种优良的有价值、有潜力的功能性食品开发原料。苦荞种子在萌发过程中, 其理化性质发生较大改变。大量研究表明, 萌发不仅可以提高苦荞内对人体有益的活性成分含量如黄酮、芦丁等, 而且可以消除其中有毒、有害或抗营养物质的含量^[11-14]。苦荞中硒元素含量较高, 具有很强的免疫调节、抗氧化以及抗肿瘤活性, 在一定程度上可以预防肿瘤、肝病、老年性心脑血管疾病^[15-18]。我国是一个缺硒大国, 约有 72% 的地区, 2/3 的人口, 近 10 亿人都存在着贫硒现象。而人体主要的硒来源就是从食物中摄取。因此, 对苦荞进行富硒萌发处理, 有利于提高苦荞产品品质, 开发出附加值较高的功能性产品, 具有重要的现实意义和经济价值^[19]。

电生功能水(Electrolyzed Water, EW)又称电解水或离子水, 是将水在一种特殊装置中经电场处理后, 使水的 pH、氧化还原电位(Oxidation-Reduction Potential, ORP)、有效氯浓度(Available Chlorine Contents, ACC)等指标发生改变而产生的具有特殊功能的酸性离子水和碱性离子水的总称。近些年来, 微酸性电解水(Slightly Acidic Electrolyzed Water, SAEW)被应用到农药、医学等领域, 在食品行业也有涉及^[20-25], 具有瞬时、广谱、高效、安全、无残留、成本低等特点^[26]。Liu 等^[27]研究表明, SAEW 可显著促进绿豆种子的萌发和绿豆芽的生长, 使得种子保持较高的活力, 并提高种子的过氧化氢酶活性; 周艳鑫^[28]研究表明, SAEW 可促进萝卜苗的生长; Liu 等^[29]研究表明, SAEW 可促进糙米芽的生长, 且降低糙米上的微生物负荷, 并有效增加 GABA 的积累。此外, 部分学者系统研究了 SAEW 用于绿豆、糙米和大豆等谷物发芽的研究报道, 但尚无有关其对苦荞发芽影响的系统性研究, 且未见将 SAEW 与富

硒相结合应用于苦荞发芽的研究报道。目前, 国内仅有本研究团队前期开展了不同 pH 和有效氯浓度的电生功能水对苦荞萌发的影响规律研究, 但未筛选出发芽苦荞的最适工艺条件。

基于以上现状, 本研究以苦荞粒为原料, 在单因素实验基础上, 以蒸馏水组和自来水组为对照组, 通过响应面法优化筛选最适的 SAEW 萌发工艺; 然后分析比较不同浓度 Na_2SeO_3 处理对 SAEW 萌发苦荞芽总硒含量和生长特性的影响规律。本研究是将电生功能水新型萌发机制与富硒处理在苦荞发芽研究上的一次集成创新, 对提高苦荞芽产品的生长特性、总硒含量具有理论和实践意义。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

苦荞 购于康保品冠食品集团有限公司; 氯化钠、碘化钾 西陇科学股份有限公司; 硫代硫酸钠 天津市杭汇化工科技有限公司; 亚硒酸钠 湖南丰润生物科技有限公司; 浓硫酸 广州市同源化工科技有限公司。

LE225D 精密电子天平、XYS-C-12 电生功能灭菌水生成器 宝鸡新宇光机电有限责任公司; SX721 pH/ORP 氧化还原电位计 上海三信仪表厂; LHS-150/250HC-II 恒温恒湿箱 上海一恒科学仪器有限公司。

1.2 实验方法

1.2.1 SAEW 的制备 SAEW 采用 XYSC-12 电生功能灭菌水生成器制成; 通过电流的变化, 可以反映出 SAEW 中 pH 和有效氯浓度(ACC)的变化, 采用碘量法测定有效氯浓度。

1.2.2 SAEW 萌发苦荞方法 选取颗粒大而饱满, 色泽均匀, 发育充实, 无病害, 无霉变的优质苦荞种子, 用蒸馏水洗净。用微酸性电生功能水 SAEW 浸泡一定时间。每个直径 15 cm 的培养皿中放入浸泡好的苦荞籽粒各 100 粒。将种子置于浸湿的纱布中, 采用下层用 4 层纱布垫底, 上层用 2 层纱布覆盖的方式对种子进行处理。将处理好的苦荞籽粒分别置于一定温度和湿度的恒温恒湿培养箱中进行萌发

处理,重复 3 次实验。

1.2.3 SAEW 萌发苦荞芽单因素实验

1.2.3.1 浸泡时间对电生功能水萌发苦荞芽的影响
苦荞种子样品分成 5 组, 每组 100 粒, 固定其他单因素条件为: pH 为 6.5、ACC 为 25 mg·L⁻¹, 考察浸泡时间为 1、2、3、4、5 h, 于温度 25 ℃、湿度为 80% 恒温恒湿培养箱中萌发, 萌发时间为 120 h。注意随时观察并保持纱布湿润但不能有过多的水分, 通过发芽率, 选择最佳浸泡时间。

1.2.3.2 pH 对萌发苦荞芽的影响 方法参考文献 [30] 稍作改变, 苦荞种子样品分成 5 组, 每组 100 粒, 固定其他单因素条件为: 考察 pH 为 5.7、5.9、6.1、6.3、6.5, ACC 为 25 mg·L⁻¹, 浸泡时间为 2 h, 于温度 25 ℃、湿度为 80% 恒温箱中萌发, 萌发时间为 120 h。注意随时观察并保持纱布湿润但不能有过多的水分, 通过发芽率, 选择最佳 pH。

1.2.3.3 ACC 对萌发苦荞芽的影响 苦荞种子样品分成 5 组, 每组 100 粒, 固定其他单因素条件为: pH 为 6.5、考察 ACC 为 10、15、20、25 和 30 mg·L⁻¹, 浸泡时间为 2 h, 温度 25 ℃、湿度为 80% 恒温箱中萌发, 萌发时间为 120 h。注意随时观察并保持纱布湿润但不能有过多的水分, 通过发芽率, 选择最佳 ACC。

1.2.3.4 萌发温度对萌发苦荞芽的影响 将苦荞种子样品分成 5 组, 每组 100 粒, 固定其他单因素条件为: pH 为 6.5、ACC 为 25 mg·L⁻¹, 浸泡时间为 2 h, 考察温度为 15、20、25、30、35 ℃, 于湿度为 80% 恒温箱中萌发, 萌发时间为 120 h。注意随时观察并保持纱布湿润但不能有过多的水分, 通过发芽率, 选择最佳萌发温度。

1.2.3.5 萌发时间对萌发苦荞芽的影响 将苦荞种子样品分成 5 组, 每组 100 粒, 固定其他单因素条件为: pH 为 6.5、ACC 为 25 mg·L⁻¹, 浸泡时间为 2 h, 萌发温度为 20 ℃, 考察萌发时间 24、48、72、96、120 h, 于湿度为 80% 恒温箱中萌发。注意随时观察并保持纱布湿润但不能有过多的水分, 通过发芽率, 选择最佳萌发时间。

1.2.4 发芽率的测定 每组苦荞麦种子样品为 100 粒, 每次萌发完成后统计发芽种子数量, 按式(1)计算发芽率。

$$\text{发芽率}(\%) = \frac{\text{发芽籽粒数}}{100} \times 100$$

式 (1)

1.2.5 Box-Beheken 优化试验 在单因素实验的基础上, 以浸泡时间、pH、萌发温度和萌发时间为研究因素, 根据 Box-Behnken 试验设计原理设计四因素三水平试验, 以苦荞发芽率为衡量指标, 从而得到最优的 SAEW 萌发苦荞工艺, 其响应面试验设计见表 1。以筛选的最优工艺条件进行验证实验。以蒸馏水组与自来水组为对照。

表 1 Box-Beheken 试验因素与水平
Table 1 Factors and levels of Box-Beheken test

水平	A 浸泡时间(h)	B pH	C 萌发温度(℃)	D 萌发时间(h)
-1	1.5	6.4	18	84
0	2	6.5	20	96
1	2.5	6.6	22	108

1.2.6 富硒处理与 SAEW 联合作用对苦荞发芽的影响研究 将荞麦籽粒分为 6 组, 每组 100 粒, 用 pH 及 ACC 已确定的 SAEW 浸泡, 放入铺有滤纸的培养皿中, 用 SAEW 调配不同浓度的 Na₂SeO₃ 溶液, 分别加入浓度为 0、20、60、100、140、180 mg/L Na₂SeO₃ 溶液, 用浸二断六法(浸水培养 2 h 后断水通风 6 h)浸麦, 将富硒处理的苦荞芽放入恒温培养箱中萌发培养 108 h。萌发过程中, 每 6 h 补加 Na₂SeO₃ 溶液, 样品放入-20 ℃ 冰箱备用。用相同的工艺方法, 以蒸馏水组与自来水组作为对照实验。

将制备好的苦荞芽粉碎, 按照国家标准《食品安全国家标准 食品中硒的测定》(GB 5009.93-2017)中第一法 氢化物原子荧光光谱法进行总硒含量的测定。

1.3 数据处理

所有实验设置 3 组平行实验, 结果以“平均值±标准差”的形式表示, 采用 SPSS 24.0 检验进行显著性统计分析, P<0.05 表示差异显著, 分别采用 Design-Expert 13.0、SPSS 24.0 和 Origin 2021 软件完成响应面试验设计、数据统计分析和作图处理。

2 结果与分析

2.1 单因素实验结果

2.1.1 浸泡时间对 SAEW 萌发苦荞芽的影响 浸泡时间对 SAEW 萌发苦荞发芽率的影响结果见图 1。

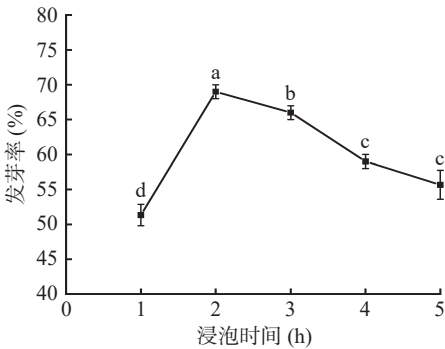


图 1 浸泡时间对 SAEW 萌发苦荞发芽率的影响
Fig.1 Effect of soaking time with SAEW treatment on germination rate of tartary buckwheat
注: 图中不同小写字母表示差异显著 P<0.05, 图 2~图 5、图 7、图 8 同。

由图 1 可知, 随着浸泡时间的增加, 苦荞发芽率呈先上升后下降的趋势。当浸泡时间为 2 h 时, 发芽率最高, 在萌发 120 h 时的发芽率为 69%。浸泡时间是谷物萌发的关键因素, 浸泡时间过短, 会导致种子无法吸取足够的水分, 影响其生长代谢; 浸泡时间

过长,会导致种子中的部分内源酶活性降低,使种子无法合成部分营养物质,从而影响种子发芽质量^[31]。综上,选取苦荞种子浸泡时间 2 h 为宜。

2.1.2 pH 对 SAEW 萌发苦荞芽的影响 研究表明,酸处理可以腐蚀种皮的结构^[32-34]和减小其厚度,使种皮变薄,从而减小种皮的机械限制,提高发芽率^[35]。不同 pH 的 SAEW 对苦荞发芽率影响结果如图 2 所示。

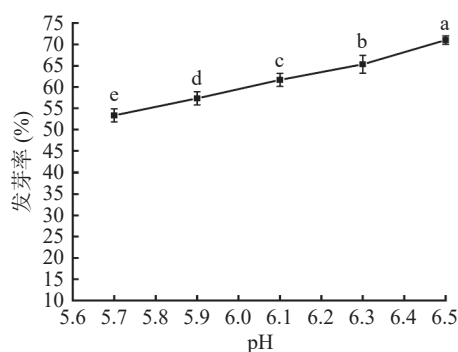


图 2 pH 对 SAEW 萌发苦荞发芽率的影响

Fig.2 Effect of pH with SAEW treatment on germination rate of tartary buckwheat

由图 2 可知,随着 pH 的增加,苦荞发芽率呈逐渐上升的趋势。当 pH 为 6.5 时,发芽率最高,在萌发 120 h 时的发芽率为 71%。可能是由于种子经过不同 pH 的 SAEW 浸种以后,由于种子的吸水作用,种子内部会含有极少量的 SAEW,这些 SAEW 对种子产生影响。当在种子萌动时期,残存的 SAEW 会对胚产生促进萌发的影响,而 SAEW 对种子萌发具有促进的作用^[35]。因此,选取萌发苦荞的 SAEW 的 pH 为 6.5。

2.1.3 ACC 对 SAEW 萌发苦荞芽的影响 由图 3 可知,ACC 对萌发 120 h 苦荞芽发芽率的影响无显著规律,但 ACC 在 10~25 mg·L⁻¹ 时发芽率整体呈上升趋势,当 ACC 高于 25 mg·L⁻¹ 时,发芽率呈下降趋势。因此,不把 ACC 作为响应面设计中的影响因素。选取发芽率较高时的 ACC 为 25 mg·L⁻¹ 进行后续试验。

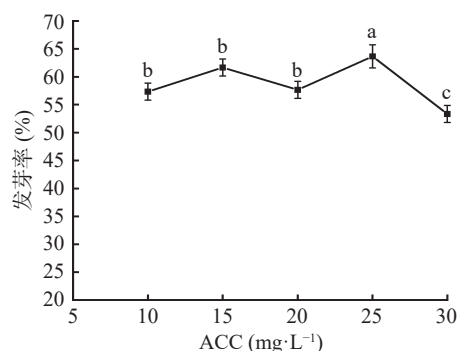


图 3 ACC 对 SAEW 萌发苦荞发芽率的影响

Fig.3 Effect of ACC with SAEW treatment on germination rate of tartary buckwheat

2.1.4 萌发温度对 SAEW 萌发苦荞芽的影响 在适宜的萌发温度条件下,适当提高萌发温度对种子萌发具有促进作用。但高温会使苦荞种子中的酶活性降低,失去催化活力,进而抑制种子的发芽^[36]。适宜的萌发温度也是种子萌发必不可少的条件之一,结果见图 4。

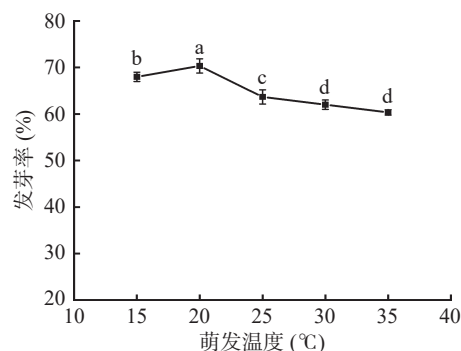


图 4 萌发温度对 SAEW 萌发苦荞发芽率的影响

Fig.4 Effect of germination temperature with SAEW treatment on germination rate of tartary buckwheat

由图 4 可知,随着萌发温度的增加,苦荞种子的发芽率呈先上升后下降的趋势。当萌发温度为 20 °C 时,发芽率为 70%。因此,选取苦荞种子萌发温度 20 °C 为宜。

2.1.5 萌发时间对 SAEW 萌发苦荞芽的影响 由图 5 可知,随着萌发时间的延长,发芽率不断升高,但是根据 SPSS 分析可知,萌发 120 h 的发芽率比萌发 96 h 发芽率仅提高了 1%,差异不显著($P>0.05$)。因此考虑现实情况及生产效率,选取 96 h 为苦荞种子萌发的适宜时间。

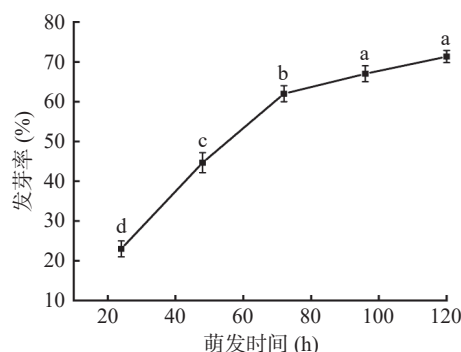


图 5 萌发时间对 SAEW 萌发苦荞发芽率的影响

Fig.5 Effect of germination time with SAEW treatment on germination rate of tartary buckwheat

2.2 响应面法优化 SAEW 萌发苦荞芽工艺试验结果

2.2.1 SAEW 萌发苦荞芽工艺响应面试验设计及结果 根据单因素实验结果,设计了 4 因素 3 水平共 29 个试验点的响应面试验优化 SAEW 萌发苦荞芽工艺条件,响应面试验设计及结果见表 2。

2.2.2 模型与方差分析结果 采用 Design-Expert 13.0 软件对试验数据进行方差分析,结果如表 3 所示。

表 2 响应面试验设计及结果

Table 2 Design and results of response surface experiments					
试验号	A浸泡时间(h)	B pH	C萌发温度(℃)	D萌发时间(h)	发芽率(%)
1	2.5	6.6	20	96	68
2	2	6.5	22	84	62
3	2	6.5	20	96	81
4	2	6.5	18	84	60
5	2	6.5	20	96	81
6	2.5	6.5	20	84	66
7	2	6.5	20	96	85
8	2	6.4	20	84	73
9	1.5	6.6	20	96	56
10	1.5	6.5	20	108	74
11	2	6.4	18	96	64
12	1.5	6.4	20	96	84
13	2	6.6	20	84	63
14	2	6.5	18	108	59
15	2	6.6	22	96	59
16	2	6.6	20	108	68
17	2.5	6.5	18	96	58
18	1.5	6.5	18	96	54
19	1.5	6.5	22	96	66
20	2	6.6	18	96	51
21	2	6.5	20	96	82
22	2	6.5	20	96	79
23	2.5	6.5	20	108	81
24	2	6.4	22	96	81
25	1.5	6.5	20	84	69
26	2	6.4	20	108	84
27	2.5	6.4	20	96	69
28	2	6.5	22	108	82
29	2.5	6.5	22	96	72

表 3 模型的方差分析结果

Table 3 Analysis of variance results of the model						
来源	平方和	自由度	均方	F值	P值	显著性
模型	2932.52	14	209.47	51.95	<0.0001	**
A-浸泡时间	10.08	1	10.08	2.50	0.1361	
B-pH	675.00	1	675.00	167.40	<0.0001	**
C-萌发温度	481.33	1	481.33	119.37	<0.0001	**
D-萌发时间	252.08	1	252.08	62.52	<0.0001	**
AB	182.25	1	182.25	45.20	<0.0001	**
AC	1.00	1	1.00	0.248	0.6262	
AD	25.00	1	25.00	6.20	0.026	*
BC	20.25	1	20.25	5.02	0.0418	*
BD	9.00	1	9.00	2.23	0.1574	
CD	110.25	1	110.25	27.34	0.0001	**
A ²	257.45	1	257.45	63.85	<0.0001	**
B ²	227.71	1	227.71	56.47	<0.0001	**
C ²	1001.39	1	1001.39	248.35	<0.0001	**
D ²	70.64	1	70.64	17.52	0.0009	**
残差	56.45	14	4.03			
失拟项	37.25	10	3.73	0.776	0.6621	不显著
误差项	19.20	4	4.80			
总和	2988.97	28				

注: $R^2=0.9811$, $R^2_{Adj}=0.9622$; *表示有显著性差异($P<0.05$); **表示有极显著性差异($P<0.01$)。

得到的各因素与响应值间的回归模型方程为: 发芽率=81.60+0.92A-7.5B+6.33C+4.58D+6.75AB+0.50AC+2.50AD-2.25BC-1.50BD+5.25CD-6.30A²-5.93B²-12.43C²-3.30D²。模型的 P 值小于 0.0001,

说明建立的回归模型有极显著性差异; 此模型的失拟项 P 值=0.6621>0.05, 代表失拟项的差异不显著, 说明此方程的拟合度好, 试验误差较小, 回归方程可以较好地描述各因素与发芽率之间的关系。所建立回归模型的决定系数 $R^2=0.9811$, $R^2_{Adj}=0.9622$, 说明该实验实测值与预测值拟合较好, 可以利用此模型对 SAEW 萌发苦荞芽最优工艺进行分析和预测。各因素对响应值的影响可通过方差分析中的 F 值评价, F 值越大, 说明对响应值的影响越显著, 因此, 其影响顺序为: pH>萌发温度>萌发时间>浸泡时间。

2.2.3 响应面分析 采用 Design-Expert 13.0 软件对试验结果进行多元回归分析, 得到浸泡时间(A)、pH(B)、萌发温度(C)和萌发时间(D)对苦荞芽发芽率影响的响应曲面, 如图 6 所示。图 6 所示的响应面图的陡峭程度可以反映出两个因素的交互作用对响应值影响的显著性, 响应面图越陡峭则表明两个因素的交互作用越显著^[37]。由图 6 可知, 四因素对响应值影响大小顺序为: pH>萌发温度>萌发时间>浸泡时间, 与方差分析结果一致, 其中图 6(a)的曲面坡度陡峭程度高于其他各组, 等高线也相对密集, 表明浸泡时间(A)与 pH(B)的交互作用对发芽率的影响高于其他组合对发芽率的影响。除此之外, 浸泡时间(A)与萌发时间(D)、pH(B)与萌发温度(C)的交互作用对发芽率的影响具有显著性, 萌发温度(C)与萌发时间(D)的交互作用对发芽率的影响具有极显著性。

2.2.4 验证实验 由软件 Design-Expert 13.0 结果显示最优条件为浸泡时间为 2.34 h, pH 为 6.49, 萌发温度为 21.07 ℃, 萌发时间为 107.44 h, 该条件下发芽率为 85.36%。结合实际操作方便, 后续验证实验确定最佳提取工艺为: 浸泡时间为 2.3 h, pH 为 6.5, 萌发温度为 21 ℃, 萌发时间为 108 h, 在最佳实验条件下开展三次平行实验, 得到苦荞芽发芽率为 84.96%, 实验结果与上述预测值接近, 说明该模型准确性良好。以筛选的最优工艺条件, 进行蒸馏水组和自来水组的对照实验, 蒸馏水组发芽率为 70.66%, 自来水组发芽率为 73.25%。两组对照实验的发芽率显著低于微酸性电生功能水实验的。

2.3 富硒处理与 SAEW 联合作用对苦荞发芽的影响结果

亚硒酸钠是一种常见的无机硒盐, 浓度较低时, 对种子发芽具有一定的促进作用^[38], 反之浓度过高时, 会对种子产生一定的毒副作用, 抑制种子的生长及富硒作用。Na₂SeO₃ 浸麦浓度对种子生长及硒含量都存在显著的影响($P<0.05$)。如图 7 所示, Na₂SeO₃ 溶液浓度对发芽率的影响呈现先升高再降低的趋势, 当浓度为 60 mg/L 时, 发芽率达到最大值, 为 85.63%。该发芽率高于单独使用 SAEW 响应面优化后的发芽率预测值 85.36%, 且高于单独使用 SAEW 响应面优化后的发芽率实际值 84.96%, 表明富硒处理可进一

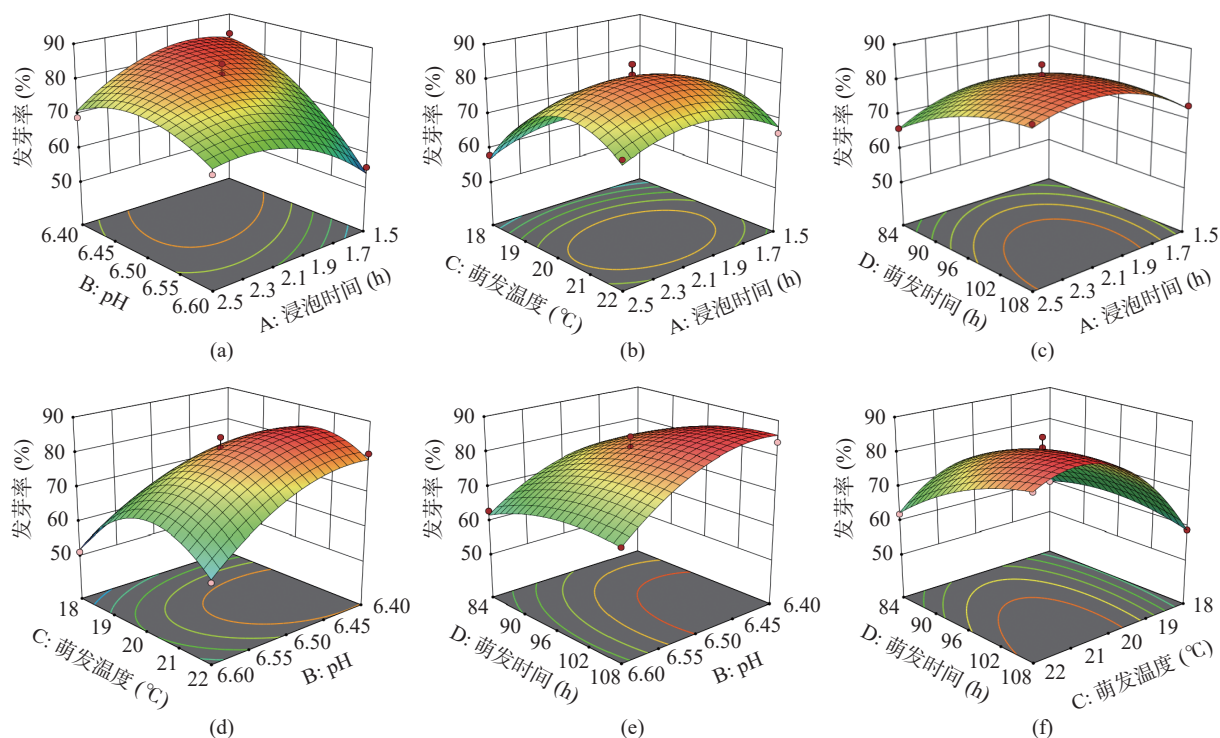


图6 各因素交互对苦荞发芽率影响的响应面图

Fig.6 Response surface diagram of interaction of various factors on germination rate of tartary buckwheat

注: (a) 浸泡时间-pH 组, (b) 浸泡时间-萌发温度组, (c) 浸泡时间-萌发时间组, (d) pH-萌发温度组, (e) pH-萌发时间组, (f) 萌发温度-萌发时间组。

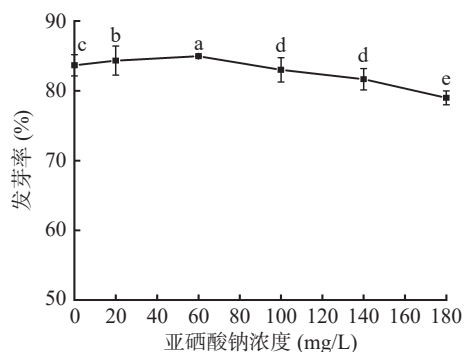


图7 不同亚硒酸钠浓度对苦荞发芽率的影响

Fig.7 Effect of different concentrations of sodium selenite on germination rate of tartary buckwheat

步协同增强 SAEW 的胁迫作用, 促进苦荞发芽率的提高。这与边淑惠等^[39]的研究结论一致, 认为适量施用硒, 可以通过提高作物酶活性, 从而提高对逆境的抗性、增加产量。

由图7可知, 当 Na_2SeO_3 溶液浓度高于 60 mg/L 时, 荞麦芽的生长受到了抑制, 发芽率缓慢降低, 说明高硒浓度对种子产生了毒副作用^[39]。如图8所示, 随着 Na_2SeO_3 溶液浓度的升高, 苦荞芽中的总硒含量逐渐升高, 但当浓度高于 60 mg/L 后, 总硒含量的增幅明显变缓, 发芽率逐渐下降, 结合发芽率影响结果, 选取 60 mg/L 为亚硒酸钠最佳浸麦浓度。

SAEW 可以促进种子萌发和生长, 也具有抑菌、杀菌等作用。硒是生物、植物所需的必要元素, 具有防癌、抗肿瘤、保护心脏, 促进植株生长发育等突出作用^[40]。本研究以苦荞粒为原料, 在单因素实验基础

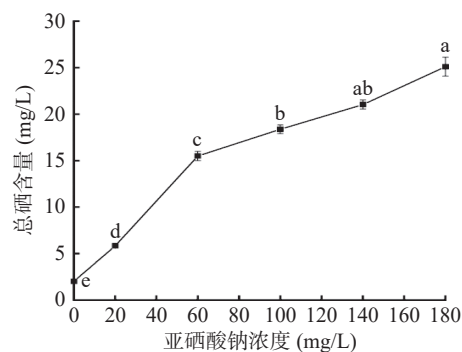


图8 不同亚硒酸钠浓度对苦荞芽总硒含量的影响

Fig.8 Effect of different concentrations of sodium selenite on total selenium content of tartary buckwheat sprouts

上, 以蒸馏水组和自来水组为对照组, 通过响应面法优化 SAEW 工艺; 在筛选获得的电生功能水萌发苦荞芽工艺条件下, 分析比较添加不同浓度 Na_2SeO_3 对苦荞芽总硒含量、生长特性的影响规律。目前国内学者已有对苦荞发芽优化工艺的研究, 童晓萌等^[41]选择自来水浸种, 采取单因素结合响应面法优化苦荞萌发工艺, 结果表明, 苦荞籽粒的最佳萌发条件为: 浸种温度 20 ℃、浸种时间 8 h、萌发温度 26 ℃、萌发时间 98 h, 此条件下发芽率为 34%。与本研究相比, 在优化工艺相似且浸种时间较短的情况下, 本研究发芽率为 84.96%, 远高于上述研究得到的 34%; 严宏康^[42]研究表明当 Na_2SeO_3 溶液浓度为 60 mg/L, 浸麦温度为 18 ℃, 浸麦时间为 20 h 时, 大麦芽的总硒含量约为 9.5 mg/kg, 低于本研究中 Na_2SeO_3 溶液浓度为 60 mg/L 时的苦荞芽总硒含量

15.5 mg/L, 表明在 SAEW 萌发工艺基础上结合富硒处理, 有助于提高苦荞芽的总硒含量。

3 结论

本文以苦荞为原料, 在单因素实验基础上, 对 SAEW 萌发苦荞芽工艺进行了响应面优化, 得到最佳优化工艺为浸泡时间 2.3 h, pH6.5, 萌发温度 21 ℃, 萌发时间 108 h, 该条件下发芽率为 84.96%, 相比蒸馏水组提高了 14.3%, 比自来水组提高了 11.71%, 说明该工艺可有效提高其发芽率, 并且工艺简单、生产成本低、绿色安全无污染。当 Na_2SeO_3 溶液浓度为 60 mg/L 时, 总硒含量为 15.5 mg/L 且发芽率为 85.63%, 以上两项指标均远高于 SAEW 单独处理对照组。本研究为 SAEW 联合富硒处理提高苦荞芽产品的生长特性和硒元素水平提供了理论依据, 并为上述技术在苦荞芽萌发中的应用提供了新思路。

© The Author(s) 2024. 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] 杨芙莲, 赵丽娜. 甜荞麦麸皮蛋白质提取工艺研究[J]. 陕西科技大学学报(自然科学版), 2015, 33(1): 126–130. [YANG F L, ZHAO L N. Study on extraction technology of sweet buckwheat bran protein[J]. Journal of Shaanxi University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2015, 33(1): 126–130.]
- [2] 左光明. 苦荞主要营养成分关键利用技术研究[D]. 贵阳: 贵州大学, 2009. [ZUO G M. Study on key utilization technology of main nutritional functional components of tartary buckwheat [D]. Guiyang: Guizhou University, 2009.]
- [3] HU Y Y, HOU Z X, YI R K, et al. Tartary buckwheat flavonoids ameliorate high fructose-induced insulin resistance and oxidative stress associated with the insulin signaling and Nrf2/HO-1 pathways in mice[J]. Food & Function, 2017, 8(8): 2803–2816.
- [4] LI S Q, ZHANG Q H. Advances in the development of functional foods from buckwheat[J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2001, 41(6): 451–464.
- [5] DAI C, ZHANG X, MENG M, et al. The protective effect of a buckwheat-enriched diet on renal injury in high salt-induced hypertension in rats[J]. Food & Function, 2016, 7(8): 296–301.
- [6] SUN X, TONG L, LIANG T, et al. Effect of oat and tartary buckwheat-based food on cholesterol-lowering and gut microbiota in hypercholesterolemic hamsters[J]. Journal of Oleo Science, 2019, 68(3): 157–162.
- [7] ZHANG C, ZHANG R, LI Y M, et al. Cholesterol-lowering activity of tartary buckwheat protein[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2017, 65(9): 1900–1906.
- [8] 胡园园, 易若琨, 王仲明, 等. 苦荞中 D-手性肌醇的纯化及其抗氧化活性研究[J]. 食品工业科技, 2017, 38(14): 82–86. [HU Y Y, YI R K, WANG Z M, et al. Purification and antioxidant activity of D-chiral inositol from tartary buckwheat[J]. Food Industry Science and Technology, 2017, 38(14): 82–86.]
- [9] LI Y Y, DUAN S Z, JIA H Y, et al. Flavonoids from tartary buck-wheat induce G2/M cell cycle arrest and apoptosis in human hepatoma HepG2 cells[J]. Acta Biochimica et Biophysica Sinica, 2014, 46(6): 460–470.
- [10] 肖兵. 抗性淀粉对糖尿病小鼠血糖和短链脂肪酸的影响及代餐产品开发[D]. 南昌: 南昌大学, 2018. [XIAO B. Effect of resistant starch on blood sugar and short-chain fatty acids in diabetic mice and development of meal replacement products[D]. Nanchang: Nanchang University, 2018.]
- [11] GUO Y X, ZHU Y H, CHEN C X, et al. Effects of aeration treatment on gamma-aminobutyric acid accumulation in germinated tartary buckwheat (*Fagopyrum tataricum*) [J]. Journal of Chemistry, 2016, 51(2016): 1–9.
- [12] ZHOU X, HAO T, ZHOU Y, et al. Relationships between antioxidant compounds and antioxidant activities of tartary buckwheat during germination[J]. Journal of Food Science and Technology, 2015, 52(4): 2458–2463.
- [13] 邓秋秋, 庞文婷, 亢凯杰, 等. 微酸性电解水浸渍对天麻鲜切片贮藏品质影响的动力学研究[J]. 食品工业科技, 2023, 45(10): 1–14. [DENG Q Q, PANG W T, KANG K J, et al. Kinetic study on the effect of slightly acidic electrolytic water immersion on the storage quality of fresh slices of *Gastrodia elata* [J]. Food Industry Science and Technology, 2023, 45(10): 1–14.]
- [14] 朱旭冉, 程铭, 邢维海, 等. 电生功能水对三种蔬菜质构及营养品质的影响[J]. 食品与发酵工业, 2020, 46(15): 201–207. [ZHU X R, CHENG M, XING W H, et al. Effects of electrolyzed functional water on texture and nutritional quality of three vegetables[J]. Food and Fermentation Industry, 2020, 46(15): 201–207.]
- [15] MELANIE W R, MONIKA S, SUSANNE B, et al. Mechanisms of selenium enrichment and measurement in brassicaceous vegetables, and their application to human health[J]. Frontiers in Plant Science, 2017, 8(1): 1365–1377.
- [16] LIN Y, JIANG L Q. Research progress on the immunomodulatory effect of trace element selenium and its effect on immune-related diseases[J]. Food Therapy and Health Care, 2020, 2(2): 86–98.
- [17] PAPADOMICHELAKIS G, ZOIDIS E, PAPPAS A C, et al. Dietary organic selenium addition and accumulation of toxic and essential trace elements in liver and meat of growing rabbits[J]. Meat Science, 2018, 145(9): 383–388.
- [18] LIU M, JING H, ZHANG J, et al. Optimization of mycelia selenium polysaccharide extraction from *Agrocybe cylindracea* SL-02 and assessment of their antioxidant and anti-ageing activities[J]. Plos One, 2016, 11(8): 1–15.
- [19] FORDYCE F M, ZHANG G, GREEN K, et al. Soil, grain and water chemistry in relation to human selenium-responsive diseases in Enshi District, China[J]. Applied Geochemistry, 2000, 15(1): 117–132.
- [20] 徐静, 熊纪敏, 辛鹏举, 等. 微酸性电解水的性能与口腔应用研究进展[J]. 中华医院感染学杂志, 2018, 28(12): 1913–1916. [XU J, XIONG J M, XIN P J, et al. Research progress on properties and oral application of slightly acidic electrolyzed water[J]. Chinese Journal of Hospital Infection, 2018, 28(12): 1913–1916.]
- [21] 石志芳, 席磊, 程璞, 等. 微酸性电解水猪场消毒效果研究[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2020, 48(5): 22–30, 41. [SHI Z F, XI L, CHENG P, et al. Study on disinfection effect of slightly acidic electrolyzed water in pig farms[J]. Journal of Northwest Agriculture and Forestry University (Natural Science Edition), 2020, 48(5): 22–30, 41.]
- [22] 刘媛, 朱旭冉, 王健, 等. 电生功能水清洗对鲜切蔬菜农药残留去除的影响[J]. 食品与发酵工业, 2022, 48(6): 125–133. [LIU Y, ZHU X R, WANG J, et al. Effect of cleaning in electrolyzed functional water on removal of pesticide residues in fresh-cut veg-

- etables[J]. Food and Fermentation Industry, 2022, 48(6): 125-133.]
- [23] 艾楷棋, 曹凯, 叶章颖, 等. 微酸性电解水对番茄幼苗生长和光合作用的影响[J]. 北方园艺, 2021, 46(3): 1-7. [AI K Q, CAO K, YE Z Y, et al. Effects of slightly acidic electrolyzed water on growth and photosynthesis of tomato seedlings[J]. Northern Gardening, 2021, 46(3): 1-7.]
- [24] LI L L, MU T H, ZHANG M. Contribution of ultrasound and slightly acid electrolytic water combination on inactivating *Rhizopus stolonifer* in sweet potato[J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2021, 29(73): 105528.]
- [25] 张鑫, 杨普云, 杜静, 等. 酸性电解水防治水稻曲霉病效果初探[J]. 中国植保导刊, 2019, 39(9): 69-72. [ZHANG X, YANG P Y, DU J, et al. Preliminary study on the effect of acid electrolyzed water on controlling rice false smut[J]. China Plant Protection Guide, 2019, 39(9): 69-72.]
- [26] ZHANG C L, ZHANG Y Y, ZHAO Z Y, et al. The application of slightly acidic electrolyzed water in pea sprout production to ensure food safety, biological and nutritional quality of the sprout[J]. Food Control, 2019, 29(104): 83-90.]
- [27] LIU R, HAO J, LIU H, et al. Application of electrolyzed functional water on producing mung bean sprouts[J]. Food Control, 2011, 21(22): 1311-1315.]
- [28] 周艳鑫. 电生功能水在芽苗菜生产中的应用研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2011. [ZHOU Y X. Study on the application of electrolyzed functional water in sprout vegetable production[D]. Beijing: China Agricultural University, 2011.]
- [29] LIU R, HE X, SHI J, et al. The effect of electrolyzed water on decontamination, germination and γ -aminobutyric acid accumulation of brown rice[J]. Food Control, 2013, 33(1): 1-5.]
- [30] 王田蕊. 电生功能水处理对苦荞发芽影响研究[D]. 张家口: 河北北方学院, 2022. [WANG T R. Effect of electrogenerated functional water treatment on the germination of tartary buckwheat[D]. Zhangjiakou: Hebei North University, 2022.]
- [31] 何伟俊, 吴俏瑾, 夏雨, 等. 苦荞萌动的浸麦工艺优化[J]. 食品工业, 2020, 41(9): 81-85. [HE W J, WU Q J, XIA Y, et al. Optimization of steeping technology for sprouting buckwheat[J]. Food Industry, 2020, 41(9): 81-85.]
- [32] 文婷婷, 田艺心, 朱岩芳, 等. 蚕豆种皮结构细胞壁成分及其与透水性的关系[J]. 科技通报, 2013, 29(5): 63-67. [WEN T T, TIAN Y T, ZHU Y T, et al. Cell wall composition of *Vicia faba* seed coat structure and its relationship with water permeability[J]. Bulletin of Science and Technology, 2013, 29(5): 63-67.]
- [33] 李英, 沈永宝. 枳椇种子休眠原因及解除方法[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2014, 38(2): 57-62. [LI Y, SHEN Y B. Causes of seed dormancy of *Hovenia dulcis* Thunb. and methods of removing it[J]. Journal of Nanjing Forestry University (Natural Science Edition), 2014, 38(2): 57-62.]
- [34] 杨万霞, 洪香香, 方升佐. 青钱柳种子的种皮构造及其对透水性的影响[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2005, 29(5): 25-28. [YANG W X, FU X X, FANG S X. Seed coat structure of *Cyclocarya paliurus* and its influence on water permeability[J]. Journal of Nanjing Forestry University (Natural Science Edition), 2005, 29(5): 25-28.]
- [35] 宋超, 王跃华, 赵钢, 等. 不同酸处理对苦荞种子萌发和幼苗生长的影响[J]. 种子, 2015, 34(8): 79-82. [SONG C, WANG Y H, ZHAO G, et al. Effects of different acid treatments on seed germination and seedling growth of tartary buckwheat[J]. Seeds, 2015, 34(8): 79-82.]
- [36] 郭丽丽, 李小兰, 孙杰, 等. 基于响应面的苦荞萌发工艺优化及抗氧化活性研究[J]. 食品工业, 2022, 43(11): 6-12. [GUO L L, LI X L, SUN J, et al. Optimization of germination process and antioxidant activity of tartary buckwheat based on response surface methodology[J]. Food Industry, 2022, 43(11): 6-12.]
- [37] 吕小京, 操德群, 徐年军. 响应面试验优化酶解法制备海洋微藻微拟球藻抗氧化肽工艺[J]. 食品科学, 2018, 39(6): 183-188. [LÜ X J, CAO D Q, XU N J. Optimization of enzymatic preparation of antioxidant peptides from protein hydrolysate of the marine microalgae nannochloropsis by response surface methodology[J]. Food Science, 2018, 39(6): 183-188.]
- [38] BERSTEIN D, AZAIZEH H, EDELSTEIN M, et al. Effects of selenium on growth parameters of tomato and basil under fertigation management[J]. Hortscience, 2016, 51(8): 1050-1056.]
- [39] 边淑惠, 邢国芳, 梁昕, 等. 不同形态硒及用量对幼苗期谷子生长与生理的影响[J]. 作物志, 2023, 38(1): 152-157. [BIAN S H, XING G F, LIANG X, et al. Effects of different forms of selenium and its dosage on the growth and physiology of millet in seedling stage[J]. Crops Journal, 2023, 38(1): 152-157.]
- [40] LIU X, YANG Y, DENG X, et al. Effects of sulfur and sulfate on selenium uptake and quality of seeds in rapeseed (*Brassica napus* L.) treated with selenite and selenate[J]. Environmental and Experimental Botany, 2017, 135: 13-20.]
- [41] 童晓萌, 柴春祥, 王永强. 萌发对苦荞籽粒品质的影响及工艺优化[J]. 食品与机械, 2021, 37(4): 176-183. [TONG X M, CHAI C X, WANG Y Q. Effect of germination on grain quality of tartary buckwheat and optimization of technology[J]. Food and Machinery, 2021, 37(4): 176-183.]
- [42] 严宏康. 富硒麦芽的制备工艺及其制麦特性和酿造性能的研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2022. [YAN H K. Study on the preparation technology, malting characteristics and brewing performance of selenium-enriched malt[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2022.]