

超声波处理对花生萌发及芽苗中黄酮质量比的影响

许先猛^{1,2}, 龙圣世¹, 朱晴云¹, 王俊钢^{1,2}

(1. 亳州学院生物与食品工程系, 安徽 亳州 236800;
2. 亳州市天然产物分离纯化工程技术研究中心, 安徽 亳州 236800)

[摘要] 为促进花生芽苗中黄酮的富集, 以‘鲁花1号’花生种子为原料, 采用超声波处理方法, 研究超声功率、超声温度和超声时间对花生芽苗黄酮的富集作用。结果表明, 当超声功率小于200 W时, 超声波处理对于花生种子发芽和花生芽苗富集黄酮作用不显著 ($P>0.05$); 当超声功率为300 W处理花生种子, 花生种子发芽和花生芽苗富集黄酮作用显著增加 ($P<0.05$), 但继续增大超声功率, 花生芽苗中黄酮质量比又逐渐降低。花生种子经质量分数为0.5% KMnO_4 消毒后, 在超声功率为300 W、超声温度为30 °C的条件下处理15 min, 然后在30 °C条件下用蒸馏水浸种6 h, 最后在温度为27 °C、相对湿度为 $(85 \pm 5)\%$ 的发芽箱中避光培养7 d, 花生芽中的黄酮质量比为5.883 mg/g, 显著高于对照组的黄酮质量比 ($P<0.05$)。可见, 采用适宜温度、短时间、低功率的超声波处理花生种子, 可以促进花生种子发芽和花生芽苗黄酮的富集。

[关键词] 黄酮; ‘鲁花1号’; 花生芽苗; 超声波; 富集作用

[中图分类号] S 517

Effects of Ultrasonic Treatment on the Flavonoids Content of Peanut Seeds During Germination

XU Xianmeng^{1,2}, LONG Shengshi¹, ZHU Qingyun¹, WANG Jungang^{1,2}

(1. Department of Biotechnology and Food Engineering, Bozhou University, Bozhou 236800, China;

2. Bozhou Natural Product Separation and Purification Engineering Technology Research Center, Bozhou 236800, China)

Abstract: To promote the enrichment of flavonoids in peanut sprouts, the seeds of ‘Luhua 1’ peanut were used as raw materials and treated with ultrasonic waves. The effects of ultrasonic power, ultrasonic temperature, and ultrasonic time on the enrichment of flavonoids in peanut sprouts were studied. The results showed that when the ultrasonic power was less than 200 W, there was no significant effect on peanut seed germination and peanut seedling flavonoid enrichment ($P>0.05$); when peanut seeds were treated with an ultrasound power of 300 W, the germination of peanut seeds and the enrichment of flavonoids in peanut sprouts increased significantly ($P<0.05$), but the flavonoid content in peanut sprouts gradually decreased with the further increase of ultrasound power. After being sterilized in 0.5% KMnO_4 solution, the peanut seeds were treated with 300 W power ultrasonic for 15 min at 30 °C, and then soaked in water for 6 h. The treated peanut seeds were cultured in the dark for 7 days at 27 °C and $(85 \pm 5)\%$ relative humidity, the flavonoid content in peanut sprouts was 5.883 mg/g higher significantly than that of the control group ($P<0.05$). Thus, suitable temperature, short

[收稿日期] 2023-01-28

[基金项目] 安徽省高校自然科学研究重点项目 (KJ2021A1147); 亳州学院自然科学重点项目 (BYZ2021B02); 高校优秀青年人才支持项目 (gxyqZD2022086)

[作者简介] 许先猛 (1984—), 男, 副教授, 博士, 从事农产品加工与贮藏方向研究, E-mail: xuxianmeng@sina.com

time and low power ultrasonic treatment could promote peanut seed germination and the enrichment of flavonoids in peanut sprouts.

Keywords: flavonoids; ‘Luhua 1’; peanut sprouts and seedlings; ultrasound; enrichment effect

0 引言

中国花生总产量占世界总产量的 36.4%^[1]。花生籽粒中富含脂肪、蛋白质等营养元素和黄酮类等生物活性成分^[2]。花生中黄酮类化合物主要有原花青素、木犀草素、槲皮素等^[3],黄酮类化合物具有抑菌、消炎等生物活性^[4-5]。超声波、电磁场和辐照等技术常被用于诱导植物生长和代谢,能够诱导激活并提高植物体内苯丙氨酸氨裂解酶(phenylalanine ammonialyase, PAL)和查尔酮异构酶(chalcone isomerase, CHI)活性,从而促进植物体内黄酮类化合物的合成与富集^[6-9]。目前,花生种子萌发方面的研究主要集中在花生芽苗中白藜芦醇的富集,花生芽苗中黄酮的富集研究较少^[10]。胡伟凤等^[11]研究发现,水稻种子在超声频率为 20~100 kHz 条件下处理 2 min,其田间出苗率得到显著提高。张冬晨等^[12]将荞麦种子在超声频率为 40 kHz、超声功率为 480 W、超声温度为 24 ℃ 条件下处理 20 min,其发芽率高达 94%,较对照组提高 30%。适宜超声波处理的机械效应会产生能量,同时会破坏种皮,形成许多小孔和裂痕,种子细胞壁和细胞膜结构受到破坏,使种子吸水率增加并提高种子内源酶活性,提高种子的发芽率和生长参数^[9]。但是超声波处理时间过长或功率过大则会破坏种子内部蛋白质结构,降低种子生理活性,对种子发芽产生副作用^[13]。本文考察了超声波诱导过程中超声功率、超声时间、超声温度对花生萌发和花生芽苗中黄酮类化合物合成的影响,为促进超声波在花生种子萌发和花生芽苗黄酮富集等方面的应用提供理论基础。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

花生种子‘鲁花 1 号’产自安徽蚌埠,采收当年产花生,自然阴干。

芦丁标准品(纯度>98%)购于中国药品生物制品检定所;高锰酸钾(KMnO₄)、福林酚试剂、碳酸钠、无水乙醇、无水亚硝酸钠均购自国药集团化学试剂有限公司。

1.2 实验仪器

HH-2 型数显恒温水浴锅,国华电器有限公司;TG16-WS 型离心机,北京澎昆博远科贸发展有限责任公司;BSA124S 型电子天平,德国赛多利斯;T600 型紫外可见分光光度计,北京普析通用仪器有限责任公司;RWBZ-08S 型真空干燥箱,南京苏恩瑞实验仪器有限公司;YRG-150 型光照种子发芽箱,上海合恒仪器有限公司;UV-9000S 型紫外分光光度计,上海元析仪器有限公司;JK-400CDB 型超声波清洗器,合肥金尼克机械制造有限公司;MFHL10 型磁场恒温恒湿培养箱,英都斯特(无锡)感应科技有限公司;DS-1 型高速组织捣碎机,上海隆拓仪器设备有限公司。

1.3 实验方法

1.3.1 花生种子预处理

挑选大小接近、成熟饱满、无霉变、无虫蛀的花生种子,去离子水冲洗去除花生表面浮尘,置于杀菌后的 500 mL 烧杯中。倒入质量分数为 0.5% 高锰酸钾溶液 200 mL 没过花生种子,浸泡消毒 40 min 后用去离子水冲洗 3 次至溶液呈澄清状态。

1.3.2 花生萌发富集黄酮工艺优化

1.3.2.1 单因素实验

1) 超声功率对花生萌发富集黄酮的影响。取 100 颗预处理后的花生种子,分别采用超声功率为 160,200,240,280,320 W 处理 15 min,超声温度为 30 ℃。然后在 30 ℃ 条件下用蒸馏水浸种 6 h,浸种后过滤,备用。然后将浸种后种子放入花生发芽盘(发芽盘底盘装入去离子水,每隔 2 d 换水一

次), 在温度为 27 ℃、相对湿度为 (85 ± 5)% 条件下避光培养 7 d, 每天进行观察, 待花生发芽后将花生芽朝下播种在花生发芽盘中, 测定培养 1,3,5,7 d 的花生芽中的黄酮质量比, 以不进行超声处理的花生种子作对照。

2) 超声时间对花生萌发富集黄酮的影响。取 100 颗预处理后的花生种子, 采用超声功率为 280 W, 分别处理 5,10,15,20,25 min, 超声温度为 30 ℃。然后在 30 ℃条件下用蒸馏水浸种 6 h, 浸种后过滤, 备用。然后, 将浸种后种子放入花生发芽盘 (发芽盘底盘装入去离子水, 每隔 2 d 换水一次), 在温度为 27 ℃、相对湿度为 (85 ± 5)% 条件下避光培养 7 d, 每天进行观察, 待花生发芽后将花生芽朝下播种在花生发芽盘中, 测定培养 1,3,5,7 d 的花生芽中的黄酮质量比, 以不进行超声处理的花生种子作对照。

3) 超声温度对花生萌发富集黄酮的影响。取 100 颗预处理后的花生种子, 采用超声功率为 280 W 处理 15 min, 设置超声温度分别为 28,30,32,34,36 ℃。然后在 30 ℃条件下用蒸馏水浸种 6 h, 浸种后过滤, 备用。然后, 将浸种后种子放入花生发芽盘 (发芽盘底盘装入去离子水, 每隔 2 d 换水一次), 在温度为 27 ℃, 相对湿度为 (85 ± 5)% 条件下避光培养 7 d, 每天进行观察, 待花生发芽后将花生芽朝下播种在花生发芽盘中, 测定培养 1,3,5,7 d 的花生芽中的黄酮质量比, 以不进行超声处理的花生种子作对照。

1.3.2.2 响应面实验

选取超声功率、超声温度、超声时间 3 个因素开展响应面实验, 优化超声波处理促进花生萌发及黄酮富集条件, 响应面分析因素水平见表 1。

1.3.3 花生芽中黄酮质量比的测定

花生芽经真空冷冻干燥后, 研磨粉碎, 精确称取 0.02 g 花生芽粉末于离心管中, 加入 1 mL 体积分数为 80% 的乙醇溶液, 在 60 ℃、200 W 条件下超声波水浴浸提 30 min, 于高速冷冻离心机中 6 000 r/min 离心 10 min, 取上清液。

黄酮质量比测定参照吕东灿等^[5]的方法并作调整。取 500 μL 的上清液于 10 mL 容量瓶中, 加入质量分数为 5% 的 NaNO₂ 溶液 1.0 mL, 反应 6 min, 再加质量分数为 10% 的 Al(NO₃)₃ 溶液 1.0 mL, 反应 6 min。然后加质量分数为 4% 的 NaOH 溶液 8.0 mL, 用体积分数为 80% 的乙醇定容, 反应 15 min 后进行测定。以芦丁为标准品, 标准曲线线性回归方程为 $y = 9.5314x + 0.0054$ ($R^2 = 0.9982$), 计算黄酮的质量比^[14], 计算公式为: 黄酮质量比/(mg/g) = ($C \times V_1 \times n$)/ W , 其中: C 为查标准曲线值 (g/L); n 为测定时稀释倍数; V_1 为样液总体积 (mL); W 为样品质量 (g)。

2 实验结果与分析

2.1 花生萌发中黄酮富集的单因素实验

2.1.1 超声功率对黄酮质量比的影响

不同超声功率对花生芽黄酮质量比的影响结果如图 1 所示。由图 1 可以看出, 在花生发芽的 1~7 d, 实验组和对照组的黄酮质量比总体呈逐步增加的趋势, 花生发芽 5 d 之后, 超声功率为 280 W 的实验组黄酮质量比最大, 为 (5.753 ± 0.095) mg/g, 是对照组的 1.62 倍, 显著高于其他实验组 ($P < 0.05$), 对花生芽黄酮质量比有促进作用。在超声波处理花生种子过程中, 随着超声波功率的增加, 超声波的空化效应也会更加剧烈^[15-16], 超声波对花生种皮细胞壁破坏和细胞壁间隙清理作用也会更显著, 但超声功率过大则会造成花生种子细胞损伤, 导致发芽率降低。

表 1 响应面分析因素水平表
Tab.1 Response surface analysis factor level

| 水平 | 因素 | | |
|----|---------------|-----------------|---------------|
| | 超声功率 (A)/W | 超声时间 (B)/min | 超声温度 (C)/℃ |
| -1 | 240 | 10 | 28 |
| 0 | 280 | 15 | 30 |
| 1 | 320 | 20 | 32 |

2.1.2 超声时间对黄酮质量比的影响

采用不同超声波处理时间诱导花生发芽,测定花生发芽 1,3,5,7 d 的花生芽黄酮质量比,结果见图 2。由图 2 可以看出,在花生发芽的 1~7 d,实验组和对照组的黄酮质量比总体呈逐步增加的趋势,花生发芽 3 d 之后,超声时间为 15 min 的超声波发芽组中的黄酮质量比最大,为 (5.698 ± 0.088) mg/g,对花生芽黄酮质量比有显著促进作用,黄酮质量比显著高于其他实验组 ($P < 0.05$)。在超声波处理花生种子过程中,随着超声处理时间的延长,超声波对花生种皮细胞壁破坏和细胞壁间隙清理作用也会更显著,但超声波处理时间过程,长时间的机械效应和能量效应也会导致花生种子细胞损伤。

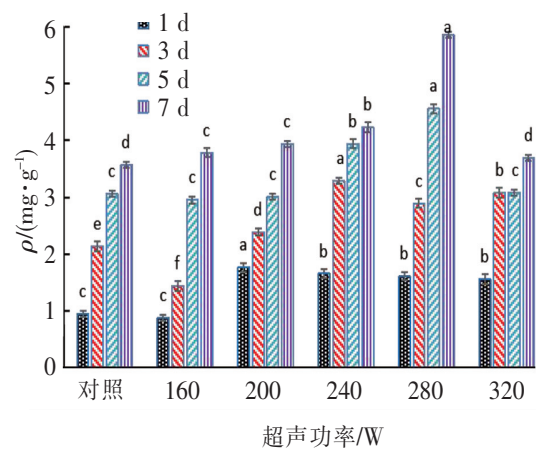


图 1 超声功率对黄酮质量比的影响

Fig.1 Effect of ultrasonic power on total flavonoids content in peanut sprouts

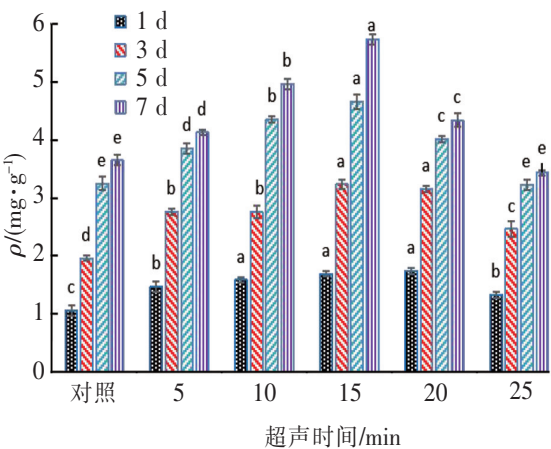


图 2 超声时间对黄酮质量比的影响

Fig.2 Effect of ultrasonic treatment time on total flavonoids content in peanut sprouts

2.1.3 超声温度对黄酮质量比的影响

采用不同超声波处理温度诱导花生发芽,测定花生发芽 1,3,5,7 d 的花生芽黄酮质量比,结果见图 3。由图 3 可以看出,在花生发芽的 1~7 d,实验组和对照组的黄酮质量比总体呈逐渐增加的趋势,花生发芽 3 d 之后,超声温度为 30 ℃ 的超声波发芽组中的黄酮质量比最大,为 (5.716 ± 0.058) mg/g,对花生芽黄酮质量比有显著促进作用,黄酮质量比显著高于对照组及 28,34,36 ℃ 实验组 ($P < 0.05$)。花生发芽的最适温度为 30 ℃ 左右,在超声波处理花生种子过程中,当超声处理温度升高至 30 ℃ 左右时,花生种子体内酶活性较高,生理生化反应能够得到促进^[10]。继续升高温度,花生种子体内酶活性和生理生化反应则会受到抑制。

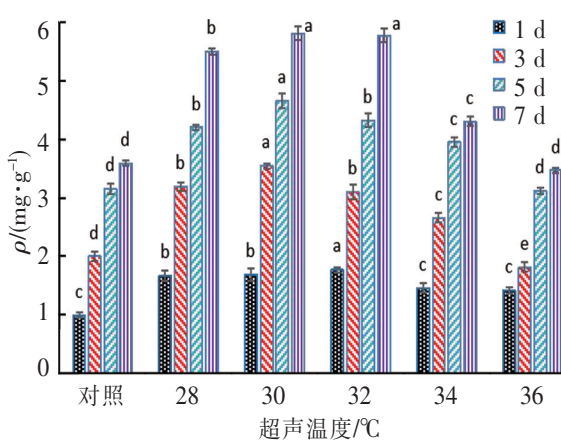


图 3 超声温度对黄酮质量比的影响

Fig.3 Effect of ultrasonic treatment temperature on total flavonoids content in peanut sprouts

2.2 响应面优化实验

2.2.1 响应面实验结果

选取超声功率、超声时间、超声温度 3 个因素进行 3 因素 3 水平的响应面分析,结果见表 2。

表 2 响应面试验设计及结果
Tab.2 Design and results of response surface experiments

| 序号 | 因素 | | | 黄酮质量比/ (mg · g ⁻¹) |
|----|----|----|----|-----------------------------------|
| | A | B | C | |
| 1 | -1 | -1 | 0 | 4.895 |
| 2 | 1 | -1 | 0 | 4.796 |
| 3 | -1 | 1 | 0 | 4.968 |
| 4 | 1 | 1 | 0 | 4.758 |
| 5 | -1 | 0 | -1 | 4.854 |
| 6 | 1 | 0 | -1 | 4.698 |
| 7 | -1 | 0 | 1 | 4.838 |
| 8 | 1 | 0 | 1 | 4.723 |
| 9 | 0 | -1 | -1 | 5.478 |
| 10 | 0 | 1 | -1 | 5.589 |
| 11 | 0 | -1 | 1 | 5.638 |
| 12 | 0 | 1 | 1 | 5.432 |
| 13 | 0 | 0 | 0 | 5.798 |
| 14 | 0 | 0 | 0 | 5.856 |
| 15 | 0 | 0 | 0 | 5.944 |
| 16 | 0 | 0 | 0 | 5.885 |
| 17 | 0 | 0 | 0 | 5.923 |

2.2.2 响应面实验回归模型及方差分析

响应面预测模型的方程为： $R_1 = 588.12 - 7.25A - 0.75B + 0.15C - 2.78AB + 1.02AC - 7.92BC - 89.15A^2 - 13.55B^2 - 21.15C^2$ 。方差分析结果显示， $F = 193.10$ ， $P < 0.0001$ ，响应面模型度显著（见表3）。结果显示，影响花生芽黄酮质量比的因素依次为 A、B、C，即超声功率 > 超声时间 > 超声温度，交互项依次为 $BC > AB > AC$ 。响应面模型多元相关系数 $R^2 = 0.996$ ，因此拟合度为 99.60%，大于 80%；失拟 P 为 0.8707（ $P > 0.05$ ），不显著，说明超声波处理对花生萌发及芽苗中黄酮预测模型可信度较高，响应面模型拟合度较高，应用价值高。

表 3 响应面实验结果方差分析
Tab.3 Variance analysis of response surface experiments

| 方差来源 | 平方和 | 自由度 | 均方 | <i>F</i> | <i>P</i> | 显著性 |
|-----------------------|-----------|-----|-----------|---------------------------|-----------|-----|
| 模型 | 38 632.22 | 9 | 4 292.47 | 193.10 | < 0.000 1 | * * |
| A | 420.50 | 1 | 420.50 | 18.92 | 0.003 4 | * * |
| B | 4.50 | 1 | 4.50 | 0.20 | 0.666 4 | |
| C | 0.18 | 1 | 0.18 | 0.008 098 | 0.930 8 | |
| AB | 30.80 | 1 | 30.80 | 1.39 | 0.277 6 | |
| AC | 4.20 | 1 | 4.20 | 0.19 | 0.676 8 | |
| BC | 251.22 | 1 | 251.22 | 11.30 | 0.012 1 | * |
| A ² | 33 462.22 | 1 | 33 462.22 | 1 505.34 | < 0.000 1 | * * |
| B ² | 772.78 | 1 | 772.78 | 34.76 | 0.000 6 | * * |
| C ² | 1 883.02 | 1 | 1 883.02 | 84.71 | < 0.000 1 | * * |
| 残差 | 155.60 | 7 | 22.23 | | | |
| 失拟项 | 22.98 | 3 | 7.66 | 0.23 | 0.870 7 | |
| 纯误差 | 132.63 | 4 | 33.16 | | | |
| 总残差 | 38 787.82 | 16 | | Adj <i>R</i> ² | 0.990 8 | |
| <i>R</i> ² | 0.996 | | | CV | 0.008 9 | |

2.2.3 响应面结果

通过响应面优化的方法得到各个因子交互作用的响应面图（见图 4）。经分析可知，在实验设定的各因素范围内，超声波处理对花生萌发及芽苗中黄酮影响最大的交互作用是超声时间与超声温度的交互作用。由表 3 和图 4c 可知，超声时间与超声温度对花生芽黄酮质量比的交互作用显著（ $P < 0.05$ ）。当超声时间一定时，花生芽黄酮质量比随着超声温度的增加先增加后降低。

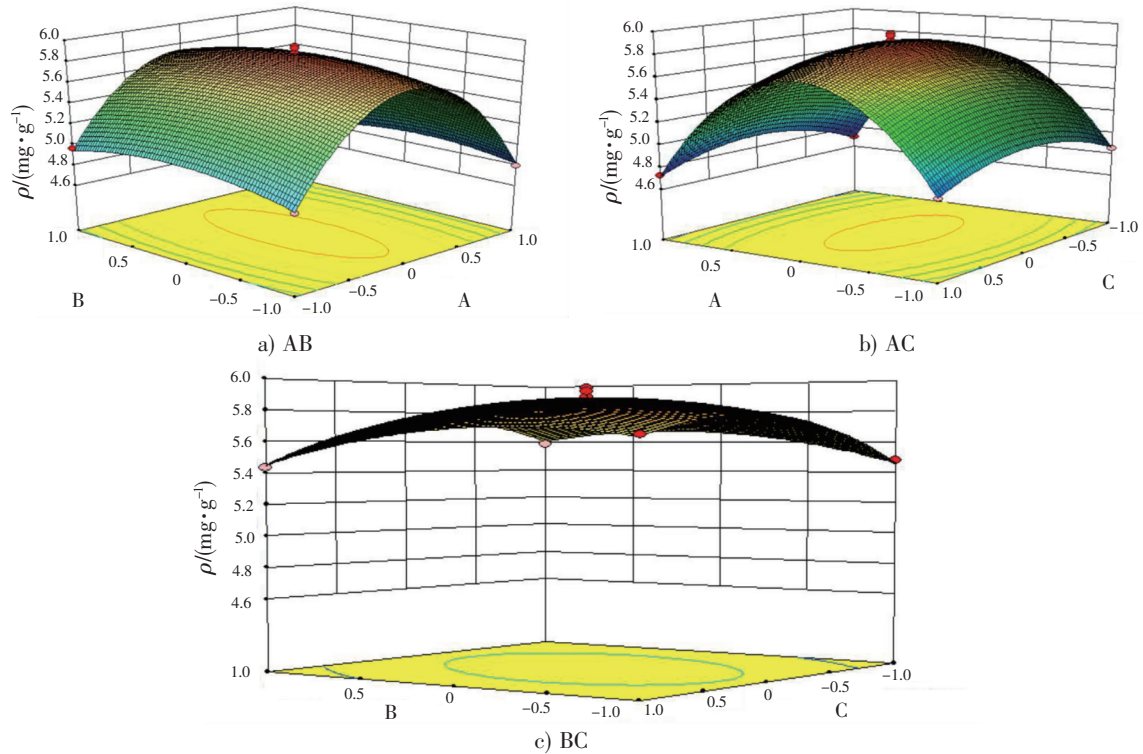


图 4 因子交互作用对总黄酮质量比的响应面图
Fig.4 Response surface for the effects of cross interactions among factors on total flavonoids content in peanut sprouts

2.2.4 验证实验

超声波处理对花生芽富集黄酮各因素最优值结果为：种子消毒后，在超声功率为 295.16 W 条件下处理 14.62 min，超声温度为 30.06 ℃；然后在 30 ℃ 条件下用蒸馏水浸种 6 h。在温度为 27 ℃、相对湿度为 $(85 \pm 5)\%$ 发芽箱中避光培养 7 d，培养 7 d 花生芽中黄酮质量比预测值为 5.726 44 mg/g。对工艺条件进行校正，种子消毒后，在超声功率为 300 W 条件下处理 15 min，超声温度为 30 ℃，然后在 30 ℃ 条件下用蒸馏水浸种 6 h。在温度为 27 ℃、湿度为 $(85 \pm 5)\%$ 发芽箱中避光培养 7 d，培养 7 d 萌发的花生芽中测定的黄酮质量比为 5.883 mg/g。预测值与实际测定值结果相近，优化得到的超声波处理花生芽富集黄酮工艺参数较可靠。

3 讨论

黄酮类化合物是植物种子发芽过程中的一类次级代谢产物，植物种子在受到外界环境刺激下，次级代谢产物的含量会明显增加^[17]。一些非生物技术和生物技术可以诱导促进种子萌发，常用的促进种子萌发的非生物技术包括超声波、紫外线、微波、磁场、脉冲电场、臭氧、冷等离子体、等离子体活化水等^[18-21]，生物诱导技术包括真菌诱导和细菌诱导等。超声波作为一种非热加工技术常应用于食品检测和加工、食品分析检测、食品乳化和细胞破壁等。近些年，超声波技术也用于诱导和调节种子的发芽率和生长参数。Amin 等^[13]研究表明，42 kHz 超声波处理滨藜、小茴香、水瓜柳种子，处理

时间为 5 和 7 min, 这 3 种植物种子的发芽率均显著提高。Zhang 等^[22]研究发现, 40 kHz 超声波能显著提高糙米种子发芽率, 促进种子代谢。Zeng 等^[23]采用混合超声工作频率 20 ~ 40 kHz 处理甘蔗, 处理时间 1 ~ 5 min, 甘蔗芽的长度、直径和发芽率得到了提高。适宜超声波处理的机械效应会产生能量, 同时会破坏种皮, 形成许多小孔和裂痕, 种子细胞壁和细胞膜结构受到破坏, 种子吸水率增加, 提高种子内酶的活性, 促进种子呼吸作用, 提高氧气利用率, 从而提高种子的发芽率和生长参数^[24]。超声波热效应也会加速种子萌发过程中的生理生化反应速率, 从而种子的发芽率和生长参数得到提高, 种子中黄酮类化合物等次级代谢产物的积累增加。同时, 超声诱导提高了发芽花生苯丙烷类合成途径中基因的表达, 这意味着发芽花生苯丙烷代谢途径中的下游产物也将可能被超声诱导所改变, 这也进一步验证了本研究实验中发现的超声诱导能显著提高发芽花生的黄酮质量比的结果。但是, 超声波处理时间过短则达不到预期效果, 对种子发芽作用效果不明显, 若超声波处理时间过长或功率过大, 则会破坏种子内部蛋白质结构, 降低种子生理活性, 反而对种子发芽起到副作用^[25]。

4 结论

本研究主要采用超声波处理方法, 比较超声功率、超声温度和超声时间对花生芽苗富集黄酮作用。研究结果表明: 小于 200 W 的超声波对花生种子发芽和花生芽苗黄酮富集作用不显著 ($P > 0.05$), 而 300 W 的超声波对花生种子发芽和花生芽苗黄酮富集作用显著增强 ($P < 0.05$)。但继续增大超声功率, 过大的超声功率会使花生种子细胞结构遭到不可逆的损害, 影响花生种子正常发芽与生长代谢, 花生芽苗中黄酮质量比也逐渐降低。合适的超声时间与超声温度同样能够促进花生种子发芽和花生芽苗黄酮富集, 但过长时间超声处理和过高温度处理对于花生种子来说都是不利的, 当超声功率为 300 W 处理 15 min、超声温度为 30 °C 时, 培养 7 d 萌发的花生芽中的黄酮质量比为 5.883 mg/g, 黄酮质量比显著高于对照组的 ($P < 0.05$)。因此, 适宜温度、短时间、低功率的超声波可以促进花生种子发芽和花生芽苗黄酮富集。

[参考文献]

- [1] 苗欣, 吴一平. 中国花生全要素生产率分析[J]. 河南农业大学学报, 2020, 54(3): 526-533.
- [2] MUHAMMAD B, ZOU X B, MUHAMMAD A, et al. Rapid determination of the chemical compositions of peanut seed (*Arachis hypogaea*) using portable near-infrared spectroscopy[J]. Vibrational Spectroscopy, 2020, 110: 103138.
- [3] 蒋新龙, 蒋益花, 何星谷, 等. 双水相法制备花生衣高纯度黄酮及其抗氧化的研究[J]. 中国粮油学报, 2021, 36(3): 135-139.
- [4] 胡迎芬, 丁皓玥, 魏玉西, 等. 花生粕黄酮类物质的提取及抗氧化活性研究[J]. 中国粮油学报, 2017, 42(9): 141-144.
- [5] 吕东灿, 侯婧霞, 姜广策, 等. 球磨辅助提取花生壳黄酮工艺优化及其抗氧化活性研究[J]. 食品工业科技, 2022, 43(8): 212-218.
- [6] IOAN O, SINGUREANU V, MOLDOVAN G, et al. High frequency pulsatile electromagnetic fields and ultrasound pulsatile fields impact on germination dynamic at *Ocimum basilicum* L. and *O. basilicum* var. *purpurascens* benth, observed with open source software[J]. Notulae Botanicae Horti Agrobotanici Cluj-Napoca, 2016, 44(1): 41-47.
- [7] ZHOU X L, FANG X, ZHOU Y M, et al. Effect of magnetic field stimulation on flavonoid synthesis in tartary buckwheat (*Fagopyrum tataricum* Gaertn.) sprouts [J]. Food Science, 2012, 33(21): 20-23.
- [8] ALADJADJIYAN A. Effect of microwave irradiation on seeds of lentils (*Lens culinaris*, Med.) [J]. Rom J Biophys, 2010, 20(3): 213-221.
- [9] ASFARAM A, GOUDARZI A, SADEGHI H, et al. Ultrasound combined with manganese oxide nanoparticles loaded on activated carbon for extraction and pre-concentration of thymol and carvacrol in methanolic extracts of *Thymus daenensis*, *Salvia officinalis*, *Stachys pilifera*, *Satureja khuzistanica* [J]. The Analyst, 2019, 144(6): 1923-1934.
- [10] 于森. 花生发芽过程中白藜芦醇富集技术与机理研究[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2016.
- [11] 胡伟凤. 超声波处理对水稻种子活力及水稻幼苗抗冷性的影响[D]. 长沙: 湖南农业大学, 2018.

- [12] 张冬晨, 刘海杰, 刘瑞, 等. 超声波处理对荞麦种子营养物质累积以及抗氧化活性的影响[J]. 食品工业科技, 2015, 36(7): 69-78.
- [13] AMIN S, MEISAM N, HAMID R A, et al. Effect of ultrasonic waves on seed germination of *Atriplex lentiformis*, *Cuminum cyminum*, and *Zygophyllum eurypterum*[J]. Journal of Applied Research on Medicinal and Aromatic Plants, 2015, 2(3): 102-104.
- [14] JI H, WEN T, ZHOU X, et al. Combined effects of blue and ultraviolet lights on the accumulation of flavonoids in tartary buckwheat sprouts[J]. Polish Journal of Food & Nutrition Sciences, 2016, 66(2): 93-98.
- [15] BROTHIE A, GRIESER F, ASHOKKUMAR M, et al. Effect of power and frequency on bubble-size distributions in acoustic cavitation[J]. Physical Review Letters, 2009, 102(8): 084302.
- [16] MEROUANI S, HAMDAOUI O, REZGUI Y, et al. Effects of ultrasound frequency and acoustic amplitude on the size of sonochemically active bubbles-theoretical study[J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2013, 20(3): 815-819.
- [17] LUKASZ H, JAROSŁAW. The functional genomic studies of resveratrol in respect to its anti-cancer effects[J]. Biotechnology Advances, 2018, 36(6): 1699-1708.
- [18] YU M, LIU H Z, SHI A M, et al. Preparation of resveratrol-enriched and poor allergic protein peanut sprout from ultrasound treated peanut seeds[J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2016, 28: 334-340.
- [19] YU M, ZHOU Y T, WANG X H, et al. Effect of ultrasonic pre-treatment on Ara h 1 in peanut sprouts[J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2021, 75: 105607.
- [20] SALES J M, RESURRECCION A. Maximizing phenolics, antioxidants and sensory acceptance of UV and ultrasound-treated peanuts [J]. LWT-Food Science and Technology, 2010, 43(7): 1058-1066.
- [21] 张茜, 郑雅莹, 李妍, 等. 高压静电场预处理对花生芽活性物质及抗氧化能力的影响[J]. 食品科学, 2019, 40(17): 190-195.
- [22] ZHANG G C, XU J X, WANG Y Q, et al. Combined transcriptome and metabolome analyses reveal the mechanisms of ultrasonic improvement of brown rice germination[J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2022, 91: 106239.
- [23] ZENG Z, LIU X L, DENG Q Q, et al. Transcriptome analysis revealed mechanisms involved in improved germination and growth of sugarcane by ultrasonic treatment[J]. Industrial Crops & Products, 2023, 192: 116104.
- [24] ASFARAM A, GOUDARZI A, SADEGHI H, et al. Ultrasound combined with manganese oxide nanoparticles loaded on activated carbon for extraction and pre-concentration of thymol and carvacrol in methanolic extracts of *Thymus daenensis*, *Salvia officinalis*, *Stachys pilifera*, *Satureja khuzistanica*[J]. The Analyst, 2019, 144(6): 1923-1934.
- [25] MA M, WANG P, YANG R Q, et al. Effects of UV-B radiation on the isoflavone accumulation and physiological-biochemical changes of soybean during germination physiological-biochemical change of germinated soybean induced by UV-B[J]. Food Chemistry, 2018, 250: 259-267.

(责任编辑 马建华 英文审校 刘静雯)