发芽提高花生中主要脂溶性营养物质的含量

李淑莹，刘国琴

（华南理工大学食品科学与工程学院，广东广州 510640）

摘要：以粤油 13 号花生为原料进行 25 ℃避光发芽 7 d 实验，探究白藜芦醇（苷）、生育酚、植物甾醇和多酚等主要脂溶性营养物质的变化规律，结合脂肪含量及脂肪酸组成评价油脂营养的变化。结果表明，发芽能显著提高花生中白藜芦醇（苷）、生育酚、植物甾醇及多酚的总量（p<0.05），分别为未发芽花生的 4.71、3.25、2.27、2.74 倍，强化了花生的营养价值。其中，白藜芦醇、白藜芦醇苷、α-生育酚、δ-生育酚、β-谷甾醇及豆甾醇最高能达到未发芽花生的 5.94、2.96、5.98、8.64、1.96、2.80 倍。虽然花生发芽过程中脂肪含量显著下降 21.39%，但含油量仍符合油料要求，且脂肪酸组成变化不大，能保持花生油脂的质量。同时，本文对发芽过程中花生的黄曲霉毒素 B_1 含量进行监测，结果均未检出（方法检出限为 1 μg/kg），符合安全标准，为花生芽的食用开发提供理论支持。

关键词：花生芽；发芽；白藜芦醇（苷）；脂溶性营养物质；脂肪酸组成；黄曲霉毒素 B_1

文章篇号：1673-9078(2018)04-30-38 DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2018.04.006

Increase of Lipid-soluble Nutritional Components Content in Peanuts by Germination

LI Shu-ying, LIU Guo-qin

(College of Food Science and Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

Abstract: Germination of Yueyou No. 13 peanuts at 25 ℃ in dark for 7 days was conducted to explore the changs of the main lipid-soluble bioactive components such as resveratrol, tocopherol, phytosterol and phenolics. The nutritional changes of oil fraction were also evaluated by determination of fat content and fatty acids composition . The result showed that germination significantly increased the total amount of resveratrol, tocopherol, phytosterol, and polyphenol in peanuts (p < 0.05), which were 4.71, 3.25, 2.27, and 2.74 times, respectively, higher than those of unmalted peanuts, respectively, enriching the nutrition of peanuts. Compared to ungerminated peanuts, resveratrol, piceid, α-tocopherol, δ-tocopherol, β-sitosterol and stigmasterol contents in germinated peanuts significantly increased up to 5.94, 2.96, 5.98, 8.64, 1.96 and 2.80 fold, respectively. Although the fat contents of peanut decreased significantly by 21.39% during the germination process, the oil content was still in line with the requirements of oil crops, and the fatty acid composition did not change much, and the peanut oil quality was maintained. At the same time, the content of aflatoxin B_1 in the peanut sprouts during germination was monitored and the results were not detected (method detection limit (MDLs) 1 μg/kg), which met the safety standards and provided theoretical support for the development of peanut sprouts.

Key words: peanut sprout; germination; resveratrol; lipid-soluble nutritional component; fatty acid composition; aflatoxin B_1

花生，是我国最大的油料作物。报告显示[1]，2016 年我国的花生总产量是 1690 万吨，位居全球第一。花生含油量约 50~60%，富含 80%不饱和脂肪酸，有着优质的油亚比（O/L）[2]，目前 50%以上的花生用于油脂加工。与其他谷物相较，花生含有大量生育酚、植物甾醇、角鲨烯、白藜芦醇和维生素 B 等脂溶性营养物质[3]，有很好的抗氧化酸败作用，能延长花生及花生制品的货架期。诸多临床试验研究表明这些脂溶性伴随物能有效软化血管、降低血脂、改善脂质代谢，对心血管疾病的防治起着不容忽视的功能[4]。因此，提高这些脂溶性营养物质的比例能强化花生及其制品的价值。目前，有研究通过基因工程调控[5]、γ-射线诱导[6]方式有效提高花生中生育酚的含量，但存在程序繁杂、成本昂贵和品种差异性等不少问题，至今仍受争议而未能普及应用。

近年来，谷物发芽逐渐成为国内外的研究热点之一。发芽能打破种子休眠期，激活其内部酶及代谢系统，降解大分子贮藏物质，减少抗营养因子，提高功能因子，是提高种子营养价值的有效手段[7]。已有研究表明，发芽能显著提高菜籽中植物甾醇含量[8]，芝

收稿日期：2017-09-15

基金项目：国家自然科学基金资助项目（31471677、31771895）

作者简介：李淑莹（1992-），女，硕士研究生，研究方向：油脂营养与安全

通讯作者：刘国琴（1962-），女，博士，教授，研究方向：油脂营养与安全

麻[9]以及糙米[10]中的生育酚含量。目前，研究发芽对花生脂溶性营养物质的影响以白藜芦醇为主。白藜芦醇具有出色的抗氧化功能，备受全球关注，而花生是唯一含有白藜芦醇的油料作物。邱义源[11]首次发现台湾三个品种的花生在经过 25 ℃避光发芽 9 d 后白藜芦醇含量显著增加为原来的 5 倍以上。于淼[12]研究发现超声波预处理能使花生芽在第 3 d 达到白藜芦醇含量的最高值，约为本底值的 10 倍，并初步探讨了其富集机理。目前，鲜见国内外报道花生发芽过程中其他脂溶性营养物质的变化。

因此，本研究以粤油 13 号花生种子为原料进行 25 ℃避光发芽 7 d 实验，（1）研究花生发芽过程中白藜芦醇（苷）含量的动态变化规律；（2）探究花生发芽过程中生育酚、植物甾醇、多酚等主要脂溶性营养物质的变化规律，结合脂肪含量及脂肪酸组成评价花生发芽过程中的油脂营养变化；（3）监测发芽过程中花生的黄曲霉毒素 B_1 含量，探讨花生芽的食品安全性。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

粤油 13 号新鲜花生种子：购于广东省农业科学院；白藜芦醇、白藜芦醇苷、角鲨烯、菜油甾醇、*β*-谷甾醇标准品、BSTFA+TMCS（99:1）硅烷化试剂（GC 级）、三氟乙酸（LC 级）：上海阿拉丁生物试剂有限公司；*α*-生育酚、*γ*-生育酚、*δ*-生育酚、豆甾醇标准品、10%（*m/m*）三氯化硼-甲醇溶液：美国 Sigma 公司；黄曲霉毒素 B_1 标准品：上海羽朵生物科技有限公司；无水乙醇、正己烷、石油醚等均为 AR 级：天津科密欧化学试剂有限公司；氢氧化钾、无水碳酸钠、没食子酸等均为 AR 级：国药集团化学试剂有限公司；正己烷、甲醇、乙腈均为 LC 级：RCI 公司。

1.2 仪器与设备

TW-008 自动豆芽机（永康市天旺电器五金厂）；DELTA 1-24/LSC 真空冷冻干燥机（德国 CHRIST 公司）；LC-20 型高效液相色谱仪，配置 SPD-20A 紫外检测器（日本岛津公司）；P680 高效液相色谱，配置 PDA-100 二极管阵列检测器和 RF-2000 荧光检测器（DIONEX 有限公司）；GC6890N 气相色谱仪，配置氢火焰离子化检测器（安捷伦科技有限公司）；RE-2000 旋转蒸发仪（上海亚荣生化仪器厂）；GENESYS 10S 紫外分光光光度计（美国 Thermo Fisher 公司）；GC 6890N-MS 5975 气相色谱质谱联用仪（安捷伦科技有限公司）。

1.3 实验方法

1.3.1 花生发芽试验



图 1 粤油 13 号花生发芽 7 d 的生理形态变化

Fig.1 Physiological morphological changes of Yueyou No. 13 peanuts during 7-day germination

挑选外观饱满、大小一致、无霉变的新鲜花生种子，用蒸馏水清洗去除表面杂质，于 1%（*V/V*）次氯酸钠溶液浸泡 10 min 进行消毒，用蒸馏水反复冲洗至 pH 值为中性，沥干后加入 3 倍于花生质量的蒸馏水，25 ℃避光浸泡 6 h，于 25 ℃、95%湿度下避光发芽，每隔 1 h 喷淋蒸馏水，时间持续 2 min，每隔 24 h 更换发芽机水箱的蒸馏水。整个发芽周期为 7 d，每隔 1 d 取样，真空冷冻干燥，高速粉碎后过 40 目筛，真空包装后置于 25 ℃干燥箱保存用于后续试验。图 1 为粤油 13 号花生发芽 7 d 的生理形态变化图。

1.3.2 白藜芦醇（苷）含量的测定

参照 R S Chen 等[13]方法，加以改进。准确称取 0.5 g 冻干粉（精确至 0.0001 g），加入 5 mL 80%（*V/V*）LC 级甲醇溶液，15000 r/min 均质 1 min，取 2 mL 80%（*V/V*）LC 级甲醇溶液清洗均质头，合并清洗液后在 70 ℃下振荡水浴（140 r/min）30 min，冷却后过滤，定容至 10 mL，过 0.45 μm 有机微孔滤膜，待 HPLC 进样分析。

标准品制备：准确称取 5 mg 白藜芦醇、白藜芦醇苷标准品，用 80%（*V/V*）LC 级甲醇溶液混合溶解并定容至 500 mL，得到 10 μg/mL 混合标准储备液，逐级稀释成 0.005、0.01、0.1、2、10 μg/mL 的混合标准使用液。

高效液相色谱测定条件：反相 C_{18} 柱（WATERS Nova-Pak C_{18}，4 μm，150 mm×3.9 mm）；乙腈-水（*V/V*，20:80）；0.5 mL/min 等度洗脱；紫外检测器，波长为 306 nm；柱温 30 ℃；进样量 10 μL。白藜芦醇、白藜芦醇苷线性回归方程分别为：y=84214x-968.43，R^2=0.9995；y=106032x-253.93，R^2=0.9999，线性范围均为 0.005~10 μg/mL。

1.3.3 生育酚含量的测定

准确称取 2 g 冻干粉（精确至 0.0001 g），加入 10 mL 正己烷，旋涡后超声（40 kHz，150 W）30 min，

8000 r/min 离心 15 min，提取过程重复三次，合并上清液在 40 ℃下旋蒸，用 2 mL LC 级正己烷复溶，过 0.45 μm 有机微孔滤膜，待 HPLC 进样分析。

标准品制备：准确称取 5 mg *α*-、*γ*-及 *δ*-生育酚标准品，用 LC 级正己烷混合溶解并定容至 50 mL，得到 100 μg/mL 混合标准储备液，逐级稀释成 1、5、20、60、100 μg/mL 的混合标准使用液。

参照何伟[14]方法进行高效液相色谱法测定，得到 *α*-、*γ*-及 *δ*-生育酚线性回归方程分别为：y=0.0483x-0.031，R^2=0.9988；y=0.0485x-0.020，R^2=0.9982；y=0.0511x-0.009，R^2=0.9988，线性范围均为 1~100 μg/mL。

1.3.4 植物甾醇及角鲨烯含量的测定

提取过程同 1.3.3，旋蒸后得原油。准确称取油样 0.3 g（精确至 0.0001 g），加入 2 mol/L KOH-乙醇溶液 3 mL，85 ℃水浴 1 h，取出冷却后加入 2 mL 水和 5 mL 正己烷，旋涡 1 min，5000 r/min 离心 5 min，取上清液，下层用 5 mL 正己烷重复提取 2 次，用 2 mL 水洗至中性，合并上清液，氮气吹干。加入 BSTFA+TMCS（99:1）硅烷化试剂 600 μL 及 LC 级正己烷 600 μL，70 ℃水浴衍生 30 min。取出冷却后，过 0.22 μm 有机微孔滤膜，待 GC 进样分析。

标准品制备：称取一定量角鲨烯、菜油甾醇、豆甾醇、*β*-谷甾醇标准品，用 LC 级正己烷溶解，使其质量浓度分别为角鲨烯 0.1、0.2、0.3、0.4、0.5 mg/mL，菜油甾醇 0.2、0.4、0.6、0.8、1.0 mg/mL，豆甾醇 0.05、0.1、0.15、0.2、0.25 mg/mL，*β*-谷甾醇 0.5、1.0、1.5、2.0、2.5 mg/mL。

气相色谱条件[15]：Agilent HP-5MS 柱（30 m×0.25 mm×0.25 μm）；升温程序：160 ℃保持 1 min，15 ℃/min 升温至 280 ℃，保持 5 min，5 ℃/min 升温至 300 ℃，保持 10 min；进样口温度 300 ℃；FID 检测器温度 330 ℃；进样量 1 μL；载气 99.99%高纯氮；载气流速 1 mL/min；分流比 10:1；进样口压力 16.44 psi；氢气 30 mL/min；空气 400 mL/min；尾吹氮气 25 mL/min。角鲨烯、豆甾醇、菜油甾醇、*β*-谷甾醇线性回归方程分别为：Y=316.69X-4.9059，R^2=0.9996，线性范围为 0.1~0.5 mg/mL；Y=577.02X-5.3934，R^2=0.9996，线性范围为 0.05~0.25 mg/mL；Y=321.84X-8.9821，R^2=0.9996，线性范围为 0.2~1.0 μg/mL；Y=314.94X-20.728，R^2=0.9995，线性范围为 0.5~2.5 mg/mL。

1.3.5 多酚含量的测定

称 0.2 g 冻干粉（精确至 0.0001 g）于 10 mL 离心管中，加入 8 mL 80%（*V*/*V*）甲醇溶液，旋涡 1 min，于 70 ℃水浴振荡（140 r/min）30 min，10000 r/min 离心 15 min，取上清液过 0.22 μm 有机微孔滤膜。

标准品制备：准确称取 20 mg 没食子酸，用 80%（*V*/*V*）甲醇溶液混合溶解并定容至 100 mL，得到 200 μg/mL 混合标准储备液，逐级稀释成 20、60、100、140、180 μg/mL 的混合标准使用液。

采用 Folin-Ciocalteau 法测定。分别吸取 0.5 mL 提取液及标准液于 10 mL 离心管，加入 0.5 mL 福林酚，摇匀反应 3 min，加入 2 mL 7.5%（*m*/*V*）碳酸钠溶液和 6.5 mL 蒸馏水，摇匀反应 1 min，置于黑暗处 1 h，在 765 nm 下用紫外分光光度计测定吸光值，同时做空白试验。线性回归方程为：Y=0.0054X-0.00008，R^2=0.9996，线性范围为 20~180 μg/mL。

1.3.6 油脂性质的测定

1.3.6.1 脂肪含量

按照 GB 5009.6-2016《食品中粗脂肪的测定》中索式抽提法测定。

1.3.6.2 脂肪酸组成

称取 20~30 mg 油样于 50 mL 圆底烧瓶中，加入 4 mL 2%（*m*/*V*）氢氧化钠-甲醇溶液，上接冷凝管，置于 70 ℃水浴回流进行甲酯化 5 min，冷却。加入 3 mL 三氯化硼-甲醇溶液，70 ℃水浴回流 5 min，冷却。加入 3 mL 正己烷，70 ℃水浴回流 5 min，冷却。加入饱和氯化钠溶液直至液面水平到达瓶口，静置 3 min。吸取上层正己烷于离心管中，加入无水硫酸钠除去样品水分。过 0.22 μm 有机微孔滤膜，待 GC 进样分析。

气相色谱质谱条件：Agilent DB-23 柱（30 m×0.25 mm×0.25 μm），升温程序：110 ℃保持 1 min，5 ℃/min 升温至 220 ℃，保持 5 min，检测器、进样口温度 220 ℃。进样量 0.2 μL，分流比 50:1。载气：高纯度氦气；载气流速：1 mL/min。离子源温度 230 ℃，MS 四级杆温度 150 ℃，EM 电压 1576.5 V，分子离子碎片扫描范围 *m*/*z* 35~550。经 NIST 谱库检索匹配，取匹配度不低于 80%的成分确定脂肪酸组成并以峰面积归一化法定量。

1.3.7 黄曲霉毒素 B_1 含量的测定

按照 NY/T 1286-2007《花生中黄曲霉毒素 B_1 的测定 高效液相色谱法》测定，得到线性回归方程为：Y=36477X+36294，R^2=0.9998，线性范围为 0.5~100 ng/mL，方法检出限为 1 μg/kg。

1.3.8 数据分析

本文所有指标测定均进行三次重复实验，采用 Excel 2010 软件统计分析数据，运用 Origin 9.0 软件作图，结果用平均值±标准偏差形式表示。样品之间的差异采用 SPSS 19.0 软件进行单因素方差分析

（ANOVA），显著性分析通过 Tukey 的多范围检验，显著性水平被认为是 $p \leqq 0.05$。白藜芦醇（苷）、生育酚及多酚结果均以干重表示。

2 结果与分析

2.1 白藜芦醇（苷）含量变化

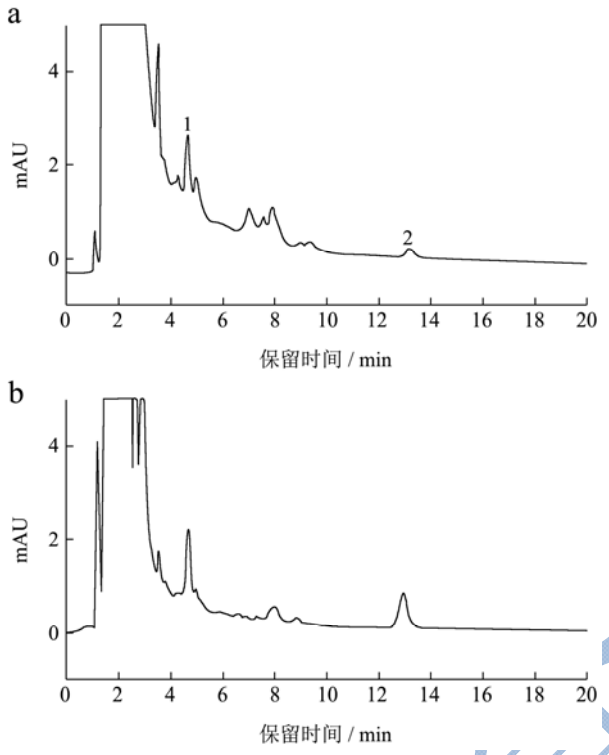


图 2 花生（a）及发芽 4 d 的花生芽（b）中白藜芦醇（苷）液相色谱对比图

Fig.2 HPLC chromatograms of RES and PD in original peanut (a) and peanut sprout after germination for 4 d (b)

注：a.白藜芦醇苷；b.白藜芦醇。

白藜芦醇总量（Total resveratrol content，简称 TRc）即白藜芦醇（Resveratrol，简称 RES）和白藜芦醇苷（Piceid，简称 PD）含量之和。

由图 2、3 可知，花生中的 TRc 随着发芽时间延长而升高，未发芽花生的 TRc 为 0.63±0.02 μg/g，发芽 7 d 后显著提高到 2.97±0.06 μg/g（$p<0.05$），是原料花生的 4.71 倍。

其中，RES 含量呈现先上升后平缓再上升的趋势，从 0.36±0.02 μg/g 显著提高到 2.14±0.04 μg/g，是未发芽花生的 5.94 倍，与前人研究一致[11,12,16]。研究发现，发芽过程 RES 增长的原因可能是发芽激活了底物作用酶-苯丙氨酸裂解酶的活性，也可能是增加了白藜芦醇合成酶的基因表达量。

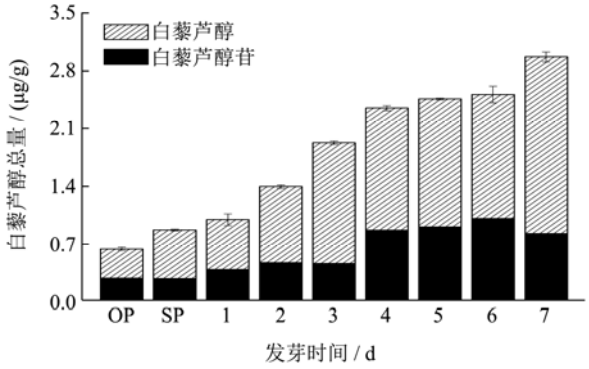


图 3 花生发芽过程中白藜芦醇（苷）含量的变化

Fig.3 Changes in the contents of RES and PD in peanut during the germination

注：OP：未发芽花生；SP：浸泡后花生，下同。

这两种酶均是 RES 在植物体内生物合成的重要作用酶。于淼[12]研究显示，发芽过程中苯丙氨酸裂解酶活性先升高后下降再升高，同时白藜芦醇合成酶基因表达量也呈现波动式变化，这可用于解释本实验 RES 的趋势变化。PD 含量呈现先上升后下降的趋势，从 0.28±0.02 μg/g 显著提高到 0.83±0.03 μg/g，是未发芽花生的 2.96 倍。PD 是 RES 在 3-O-葡萄糖基转移酶的作用下糖苷化而成，同时 PD 会在糖苷酶的作用下释放出 RES，因此花生发芽过程中 RES 和 PD 含量的动态变化可能是 3-O-葡萄糖基转移酶和糖苷酶两者综合作用的表现，与发芽过程中两酶的活性相关。目前，红葡萄酒的 RES 含量最高，据文献报道红葡萄酒的 RES 均量为 1.9 mg/L[17]。由本研究结果可推算，约 65 g 发芽 7 d 的花生芽即可与 100 mL 红葡萄酒中 RES 含量相当。

2.2 生育酚含量变化

生育酚总量为 α-、δ-、γ-生育酚之和。由图 4、5 可知，未发芽花生的生育酚含量排序为：γ->α->δ-，符合前人研究结果[18]，总量为 119.34±5.21 μg/g。发芽使 α-、δ-生育酚呈现相同趋势，前 3 d 增加缓慢，第 4 d 起呈现迅速增长趋势，第 7 d 达到最高值，分别提高为原料的 5.98、8.64 倍。

不同的是，γ-生育酚在发芽过程中呈现先略微升高后持续下降的趋势，7 d 后含量比未发芽花生下降了 53.16%。这与菜籽发芽[10]、芝麻发芽[9]的研究相符，可能与 α-生育酚和 γ-生育酚的异构化现象有关，发芽提高了 γ-甲基转移酶的活性，促使 γ-生育酚进一步转化为 α-生育酚，从而降低了 γ-生育酚的含量[19]。总体，发芽显著提高了花生的生育酚总量（$p<0.05$）。

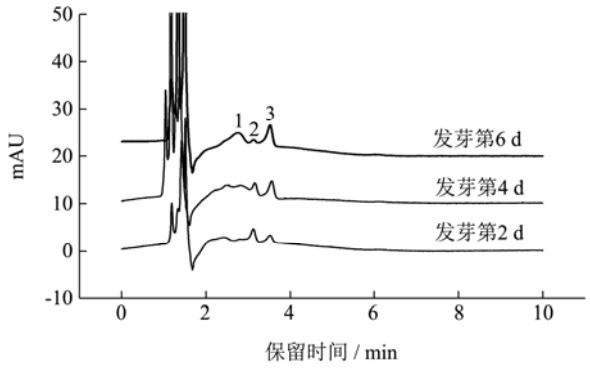


图 4 花生发芽 2、4、6 d 的生育酚含量液相色谱对比图

Fig.4 HPLC chromatograms of tocopherols content in peanut sprout duirng germination for 2 d, 4 d and 6 d

注：1.δ-生育酚；2.γ-生育酚；3.α-生育酚。

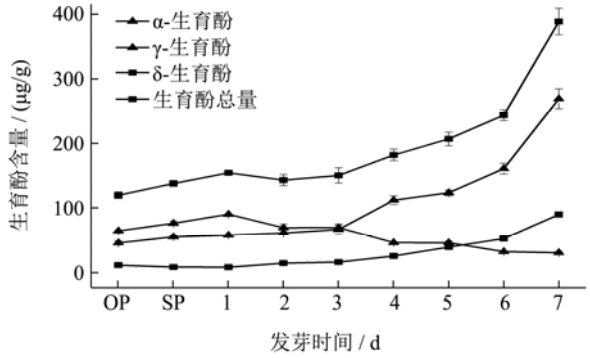


图 5 花生发芽过程中生育酚含量的变化

Fig.5 Changes in the content of tocopherols in peanut during the germination

2.3 植物甾醇及角鲨烯含量变化

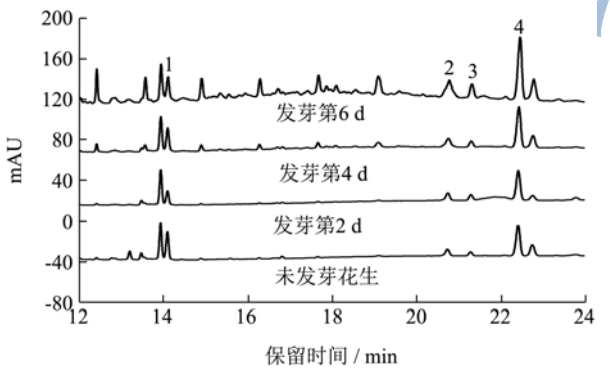


图 6 花生原料及发芽 2、4、6 d 的植物甾醇及角鲨烯气相色谱对比图

Fig.6 GC chromatograms of phytosterol and squalene in peanut and peanut sprout during germination of 2d, 4d and 6d

注：1.角鲨烯；2.菜油甾醇；3.豆甾醇；4.β-谷甾醇。

植物甾醇总量为β-谷甾醇、菜油甾醇、豆甾醇含量之和。由图 6、7 可知，未发芽花生中植物甾醇含量排序为：

β-谷甾醇>菜油甾醇>豆甾醇，总量为 1478.58±106.04 μg/g oil。β-谷甾醇与豆甾醇含量的趋势变化相似，前 3 d 并无显著差异（p>0.05），第 4 d 起呈现先升高后下降的趋势，在第 6 d 达到最高值，分别为原料的 1.96、2.80 倍。随着发芽时间的延长，菜油甾醇含量呈现波动性增长。总体，植物甾醇总量呈现波动式的双峰值趋势变化，在第 6 d 达到最高值，是原料的 2.27 倍。角鲨烯在发芽过程中呈现先下降后上升并保持平稳的趋势，发芽前后并无显著性变化。曾有学者对发芽 20 d 菜籽油脂中的甾醇含量进行测定，发现发芽前后植物甾醇总量提高了 4.2~5.2 倍[8]。目前，鲜见对花生发芽过程中植物甾醇及角鲨烯含量进行研究。

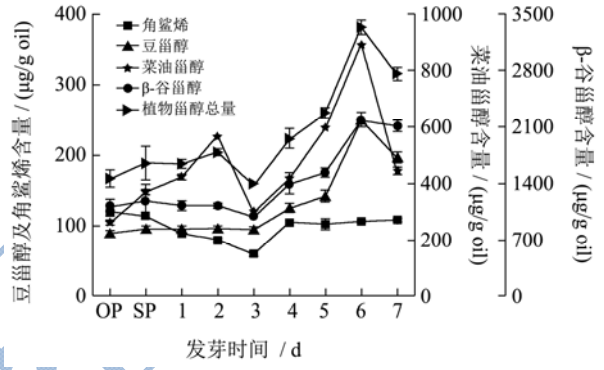


图 7 花生发芽过程中植物甾醇及角鲨烯的含量变化

Fig.7 Changes in the contents of phytosterols and squalene in peanut during the germination

2.4 多酚含量变化

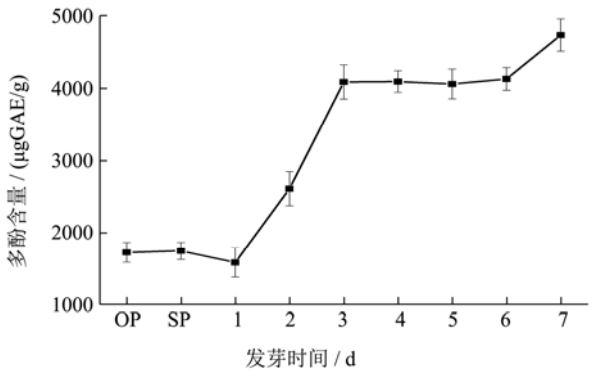


图 8 花生发芽过程中多酚含量的变化

Fig.8 Changes in the content of total phenolic in peanut during the germination

由图 8 可知，未发芽花生中多酚含量为 1726.30±136.61 μg GAE/g，随着发芽时间延长，多酚含量总体呈现显著增加趋势（p<0.05）。第 1 d 开始，多酚含量急剧增加，第 3 d 已达到未发芽花生的 2.37 倍。第 3~6 d 花生芽的多酚含量无显著差异，第 6d 起多酚含量继续增加，并在第 7 d 达到最高值，为原料的 2.74 倍。不少研究表明，发芽有助于提高豆类多酚

[20,21]、谷物多酚[22,23]以及燕麦多酚[24,25]。Kang 等[26]研究发现发芽能提高不同品种花生的多酚含量。Wang 等[27]研究结果显示花生发芽能有效提高咖啡酸、β-香豆酸、阿魏酸含量。目前认为种子发芽显著提高植物多酚含量的原因是，酚酸会与木质素交联构成细胞壁，因此种子生长发芽过程中需要更多的酚酸支撑细胞壁的形成[28]。

2.5 油脂性质变化

2.5.1 脂肪含量的变化

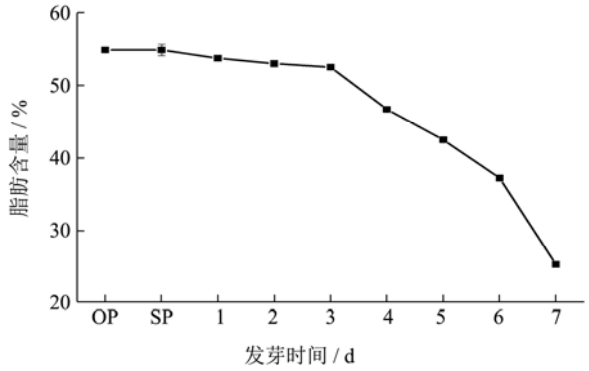


图 9 花生发芽过程中脂肪含量的变化

Fig.9 Changes in the fat content in peanut during the germination

由图 9 可知，未发芽花生中脂肪含量为 55.49±0.75%。发芽前 3 d 脂肪含量变化不显著（p>0.05）。从第 4 d 开始，花生芽中脂肪含量急剧下降，第 7 d 花生芽与未发芽花生相比下降了 21.39%。脂肪作为油料种子的主要贮藏物质，在脂肪酶和脂氧合酶的作用下代谢降解为种子发芽提供能量。种子发芽过程中脂肪代谢与脂肪酶和脂氧合酶的活性高低密切相关。杨选等[29]研究花生发芽 72 h 过程中发现脂肪酶活力在 48 h 达到最高值后降低，脂氧合酶在 36 h 时达到最高值后降低。由此可见，发芽 1~3 d 的脂肪含量变化不显著与脂肪酶和脂氧合酶活力降低有关。油脂工业定义含油率高于 10%的植物性原料为油料，花生发芽 7 d 过程中脂肪含量均高于 20%，可见花生芽仍符合油料的要求。

2.5.2 脂肪酸组成的变化

由表 1 可知，未发芽花生的脂肪酸组成主要有 7 种，分别是棕榈酸 $C_{16:0}$、硬脂酸 $C_{18:0}$、花生酸 $C_{20:0}$、山嵛酸 $C_{22:0}$、木焦油酸 $C_{24:0}$、油酸 $C_{18:1}$、亚油酸 $C_{18:2}$，含量分别为 14.00±0.02%、1.72±0.02%、0.56±0.01%、1.21±0.04%、0.46±0.01%、40.62±0.04%、41.83±0.06%。其中含量最高的是油酸及亚油酸，两者之和使花生的不饱和脂肪酸含量高达 82.45±0.12%。结果显示，花生在发芽过程中保留 7 种花生的特征性脂肪酸，且无新脂肪酸生成。随着发芽的进行，饱和脂肪酸中的棕榈酸及硬脂酸含量显著下降（p<0.05），分别下降了 0.89%和 0.23%。木焦油酸含量显著上升。花生酸及山嵛酸含量无明显规律变化。结果与杨选等[29]研究基本相同，这是因为发芽过程中甘油三酯在脂肪酶的作用下降解为游离脂肪酸及甘油，而游离脂肪酸可能会进一步合成磷脂、氨基酸等分子，或者进入三羧酸循环提供能量[30]。发芽过程中，不饱和脂肪酸中的油酸及亚油酸呈现相反的趋势，油酸显著提高了 2.24%，而亚油酸显著降低了 1.66%。根据油脂代谢机理，油酸需通过油体膜上 1,2-去饱和酶的作用才能转化为亚油酸并被脂酶水解释放。这一趋势变化可能是因为甘油三酯的降解速度快于油酸的转化速度，因此油酸呈现上升趋势，而亚油酸呈现下降趋势，这与花生种子发育过程中脂肪酸积累规律的研究结果相符[31,32]。花生的品质在很大程度上取决于油酸、亚油酸含量及两者之比，发芽过程中油亚比呈现幅度不大的升高，说明发芽并未改变花生的优质脂肪酸组成，仍能保证花生油脂的质量。

表 1 花生发芽过程中脂肪酸组成及含量的变化（%）

Table 1 Changes in the fatty acid composition in peanut during the germination (%)

脂肪酸组成	发芽时间/d				
	OP	SP	1	2	3
$C_{16:0}$	14.00±0.02^{a}	13.89±0.03^{b}	13.62±0.02^{d}	13.64±0.04^{cd}	13.66±0.01^{c}
$C_{18:0}$	1.72±0.02^{a}	1.71±0.03^{a}	1.55±0.04^{b}	1.55±0.03^{b}	1.53±0.03^{c}
$C_{20:0}$	0.56±0.01^{d}	0.70±0.02^{bc}	0.57±0.01^{d}	0.68±0.02^{c}	0.67±0.02^{c}
$C_{22:0}$	1.21±0.04^{e}	1.40±0.06^{d}	1.12±0.02^{f}	1.54±0.04^{b}	1.40±0.03^{d}
$C_{24:0}$	0.46±0.01^{f}	0.48±0.01^{e}	0.54±0.04^{d}	0.65±0.02^{c}	0.68±0.03^{c}
$C_{18:1}$	40.62±0.04^{g}	41.84±0.08^{f}	42.22±0.03^{e}	42.52±0.06^{d}	42.60±0.04^{cd}
$C_{18:2}$	41.83±0.06^{a}	41.78±0.07^{a}	41.56±0.04^{b}	41.42±0.06^{c}	41.37±0.08^{c}
SFA	17.95±0.05^{ab}	18.18±0.03^{a}	17.40±0.04^{b}	18.06±0.01^{ab}	17.93±0.05^{ab}

转下页

接上页

UFA	82.45±0.12^{h}	83.62±0.09^{d}	83.78±0.15^{c}	83.94±0.08^{b}	83.97±0.22^{a}
UFA/SFA	4.59±0.04^{e}	4.60±0.06^{e}	4.82±0.03^{a}	4.65±0.06^{d}	4.68±0.06^{cd}
O/L	0.97±0.01^{d}	1.00±0.02^{c}	1.02±0.01^{bc}	1.03±0.02^{b}	1.03±0.02^{b}

脂肪酸组成	发芽时间/d			
	4	5	6	7
$C_{16:0}$	13.34±0.01^{e}	13.31±0.02^{e}	13.29±0.01^{f}	13.11±0.03^{g}
$C_{18:0}$	1.53±0.02^{c}	1.52±0.01^{cd}	1.51±0.04^{cd}	1.49±0.02^{d}
$C_{20:0}$	0.59±0.01^{d}	0.59±0.03^{d}	0.74±0.03^{b}	0.87±0.01^{a}
$C_{22:0}$	1.47±0.02^{c}	1.21±0.01^{e}	1.60±0.05^{b}	1.95±0.02^{a}
$C_{24:0}$	0.76±0.02^{b}	0.77±0.03^{b}	0.78±0.01^{b}	0.86±0.02^{a}
$C_{18:1}$	42.58±0.09^{cd}	42.63±0.08^{c}	42.75±0.06^{b}	42.86±0.04^{a}
$C_{18:2}$	40.50±0.11^{d}	40.27±0.03^{e}	40.08±0.09^{f}	40.17±0.06^{f}
SFA	17.69±0.05^{b}	17.40±0.02^{b}	17.92±0.02^{ab}	18.28±0.02^{a}
UFA	83.08±0.14^{e}	82.90±0.08^{f}	82.83±0.19^{g}	83.03±0.16^{e}
UFA/SFA	4.70±0.02^{c}	4.77±0.02^{b}	4.62±0.04^{de}	4.54±0.04^{f}
O/L	1.05±0.02^{ab}	1.06±0.01^{a}	1.07±0.02^{a}	1.07±0.01^{a}

注：SFA 表示饱和脂肪酸；UFA 表示不饱和脂肪酸；不同小写字母表示同行数据之间差异显著（p<0.05）。

2.6 黄曲霉毒素 B_1 含量变化

花生是目前最容易受黄曲霉菌污染的作物，其次生代谢产物黄曲霉毒素具有极强致畸致癌性，黄曲霉毒素的测定是保证花生及其制品质量的重要指标之一。发芽的条件适合黄曲霉菌的生长繁殖及产毒[33]，因此花生发芽过程中黄曲霉菌的安全隐患不容忽视。本文测定了其中毒性最强的黄曲霉毒素 B_1，结果显示花生发芽 7 d 过程中含量均未检出（方法检出限为 1 μg/kg），远低于我国对花生及其制品的现行有效限量标准（≤20 μg/kg），且符合严格的欧盟标准（≤2 μg/kg）。Lin 等[34]对发芽 4 d 的花生芽样品中黄曲霉毒素进行测定，结果显示 24 个样品中黄曲霉毒素 B_1 的最高检出量为 0.19 μg/kg，低于 1 μg/kg，与本文研究结果一致。有报道糙米发芽 2 d 过程中的黄曲霉毒素 B_1 含量明显从 5.83 μg/kg 升高达 60 μg/kg[35]，超过了我国对大米中黄曲霉毒素 B_1 的最高允许量（10 μg/kg）。但是，王维坚[36]在发芽浸泡前采用强氯精对糙米表面进行消毒，有效避免了黄曲霉毒素 B_1 含量的升高，与本实验采用次氯酸钠溶液效果相同。可见，只要在发芽前采取适当的消毒方法、保证原料安全及发芽卫生，花生芽是安全可食用的，能用于食品的加工利用。

3 结论

结果显示花生 7 d 避光发芽过程中，不仅可以显著提高花生中白藜芦醇（苷）含量，还有效提高生育酚、植物甾醇、多酚等重要脂溶性营养物质的含量。发芽过程，虽然花生的脂肪含量显著下降了 21.39%，但仍满足油料的条件。花生发芽不改变花生的优质脂肪酸组成，且发芽过程中的黄曲霉毒素 B_1 含量均未检出（方法检出限为 1 μg/kg），在安全限量范围内。综上，发芽不仅能基本保持花生的质量，保留其作为油料的主要用途，更显著强化了花生的脂溶性营养物质，提高了花生的营养保健价值。因此，花生芽具有用于制备功能食品的广阔发展空间。

参考文献

[1] United States Department of Agriculture. Oilseeds: World Markets and Trade [R]. United States, 2016

[2] Carrín M E, Carelli A A. Peanut oil: compositional data [J]. European Journal of Lipid Science & Technology, 2010, 112(7): 697-707

[3] Shamim Akhtar, Nauman Khalid, Iftikhar Ahmed, et al. Physicochemical characteristics, functional properties, and nutritional benefits of peanut oil: a review [J]. Critical Reviews in Food Science & Nutrition, 2014, 54(12): 1562-1575

[4] Moreau R A, Whitaker B D, Hicks K B. Phytosterols, phytostanols, and their conjugates in foods: structural diversity, quantitative analysis, and health-promoting uses [J]. Progress in Lipid Research, 2002, 41(6): 457

[5] Tsegaye Y, Shintani D K, Dellapenna D. Overexpression of the enzyme p-hydroxyphenolpyruvate dioxygenase in

Arabidopsis, and its relation to tocopherol biosynthesis [J]. Plant Physiology & Biochemistry, 2002, 40(11): 913-920

[6] Hunter S C, Cahoon E B. Enhancing vitamin E in oilseeds: unraveling tocopherol and tocotrienol biosynthesis [J]. Lipids, 2007, 42(2): 97

[7] Sangronis E, Rodríguez M, Cava R, et al. Protein quality of germinated phaseolus vulgaris [J]. European Food Research & Technology, 2006, 222(1-2): 144-148

[8] Zhang H, Thava Vasanthan A, Wettasinghe M. Enrichment of tocopherols and phytosterols in canola oil during seed germinationm [J]. J Agric. Food Chem., 2007, 55(2): 355-359

[9] Hahm T S, Park S J, Lo Y M. Effects of germination on chemical composition and functional properties of sesame (*Sesamum indicum*, L.) seeds [J]. Bioresource Technology, 2009, 100(4): 1643-1647

[10] 吴凤凤.发芽对糙米主要营养成分、生理功效和加工特性的影响[D].无锡:江南大学,2013
WU Feng-feng. Effect of germination on nutritional components, physiological functions and processing characteristics of brown rice [D]. Wuxi: Jiangnan University, 2013

[11] Wang K H, Lai Y H, Chang J C, et al. Germination of peanut kernels to enhance resveratrol biosynthesis and prepare sprouts as a functional vegetable [J]. Journal of Agricultural & Food Chemistry, 2005, 53(2): 242

[12] 于淼.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
YU Miao. Research on resveratrol accumulation and regulation mechanism in the process of peanut germination [D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2016

[13] Chen R S, Wu P L, Chiou RYY. Peanut roots as a source of resveratrol [J]. J Agric. Food Chem., 2002, 50(6): 1665-1667

[14] 何伟.反相液相色谱法测定植物油中 VE 含量的方法研究[D].长沙:湖南农业大学,2011
HE Wei. Study on determination vitamin E in vegetable oil by reversed-phase liquid chromatography [D]. Changsha: Hunan Agricultural University, 2011

[15] 汤富彬,沈丹玉,刘毅华,等.油茶籽油和橄榄油中主要化学成分分析[J].中国粮油学报,2013,28(7):108-113
TANG Fu-bin, SHEN Dan-yu, LIU Yi-hua, et al. Analysis of main chemical components in camellia oil and olive oil [J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2013, 28 (7): 108-113

[16] Liu C D, Wen Y Y, Chiou J M, et al. Comparative characterization of peanuts grown by aquatic floating cultivation and field cultivation for seed and resveratrol production [J]. Journal of Agricultural & Food Chemistry, 2003, 51(6): 1582-1585

[17] Stervbo U, Vang O, Bonnesen C. A review of the content of the putative chemopreventive phytoalexin resveratrol in red wine [J]. Food Chemistry, 2007, 101(2): 449-457

[18] CamposMondragón M G, Barca A M C de la, DuránPrado A, et al. Nutritional composition of new peanut (*Arachis hypogaea* L.) cultivars [J]. Grasas Y Aceites, 2009, 60(2): 161 -167

[19] Shintani D, Dellapenna D. Elevating the vitamin e content of plants through metabolic engineering [J]. Science, 1998, 282(5396): 2098-2100

[20] Pająk P, Socha R, Gałkowska D, et al. Phenolic profile and antioxidant activity in selected seeds and sprouts [J]. Food Chemistry, 2014, 143(1): 300-306

[21] Gharachorloo M, Tarzi B G, Baharinia M. The effect of germination on phenolic compounds and antioxidant activity of pulses [J]. Journal of the American Oil Chemists Society, 2013, 90(3): 407-411

[22] Pradeep P M, Sreerama Y N. Impact of processing on the phenolic profiles of small millets: evaluation of their antioxidant and enzyme inhibitory properties associated with hyperglycemia [J]. Food Chemistry, 2015, 169: 455-463

[23] Ti H, Zhang R, Zhang M, et al. Dynamic changes in the free and bound phenolic compounds and antioxidant activity of brown rice at different germination stages [J]. Food Chemistry, 2014, 161(6): 337

[24] 赵霞,张文斌,杨瑞金,等.浸泡发芽处理对燕麦多酚组成及其抗氧化活性的影响[J].食品工业科技,2016, 37(15):101-106
ZHAO Xia, ZHANG Wen-bin, YANG Rui-jin, et al. Polyphenol composition and antioxidant activity of oat as affected by soaking and germination [J]. Science and Technology of Food Industry, 2016, 37(15): 101-106

[25] 付晓燕,胡崇琳,田斌强,等.燕麦发芽过程中酚类物质的变化[J].食品科学,2011,32(5):137-142
FU Xiao-yan, HU Chong-lin, TIAN Bin-qiang, et al. Changes in phenols during oat germination [J]. Food Science, 2011, 32(5): 137-142

[26] Kang H I, J Y Kim, S J Kwon, et al. Antioxidative Effects of Peanut Sprout Extracts [J]. Journal of the Korean Society of Food Science & Nutrition, 2010, 39(7): 941-946

[27] Wang G, Lei Z, Zhong Q, et al. Enrichment of caffeic acid in peanut sprouts and evaluation of its in vitro effectiveness

against oxidative stress-induced erythrocyte hemolysis [J]. Food Chemistry, 2016, 217: 332-341

[28] Zhou Z, Robards K, Helliwell S, et al. The distribution of phenolic acids in rice [J]. Food Chemistry, 2004, 87(3): 401-406

[29] 杨选,杨震,陶阳,等.花生籽粒发芽过程中脂肪代谢的变化[J].食品科学,2017,38(1):142-148
YANG Xuan, YANG Zhen, TAO Yang, et al. Change in lipid metabolism during peanut seed germination [J]. Food Science, 2017, 38(1): 142-148

[30] 曹品豹.燕麦油脂及在燕麦发芽过程中的变化和微胶囊化制备工艺[D].武汉:华中农业大学,2009
CAO Pin-bao. Lipids of oat, their changes during germination and preparation technics of microencapsulation [D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2009

[31] 李兰,彭振英,陈高,等.花生种子发育过程中脂肪酸积累规律的研究[J].华北农学报,2012,27(1):173-177
LI Lan, PENG Zhen-ying, CHEN Gao, et al. Accumulation pattern of fatty acids during the seed development of peanut [J]. Acta Agriculturae Boreali-Sinica, 2012, 27(1): 173-177

[32] 迟晓元,郝翠翠,潘丽娟,等.不同花生品种脂肪酸组成及其积累规律的研究[J].花生学报,2016,45(3):32-36
CHI Xiao-yuan, HAO Cui-cui, PAN Li-juan, et al. Fatty acid accumulation pattern in different types of peanut [J]. Journal of Peanut Science, 2016, 45(3): 32-36

[33] 路子显,伍松陵,孙长坡.黄曲霉素合成相关基因表达与环境因素的关系[J].生物技术通报,2010,11:56-61
LU Zi-xian, WU Song-ling, SUN Chang-po. The relationship of aflatoxin biosynthetic gene expression and environmental factors [J]. Biotechnology Bulletin, 2011, 11: 56-61

[34] Lin B S, Lien T F, Chao M R, et al. Toxicological and nutraceutical assessments of peanut sprouts as daily supplements to feed Sprague-Dawley rats for 18 weeks [J]. Journal of the Science of Food & Agriculture, 2008, 88(12): 2201-2207

[35] 袁列江,丁婉,张顺,等.糙米、发芽糙米中黄曲霉毒素含量的初步调查分析[J].粮油加工:电子版,2015,8:40-43
YUAN Lie-jiang, DING Wan, ZHANG Shun, et al. Preliminary investigation and analysis of aflatoxin content in brown rice and germinated brown rice [J]. Grain Engineering, 2015, 8: 40-43

[36] 王维坚.糙米发芽工艺的基础研究[D].吉林:吉林大学,2004
WANG Wei-jian. Sprouting process of germinated brown rice [D]. Jilin: Jilin University, 2004

现代食品科技