

管婷婷, 寇宇, 张一婷, 等. 不同豆角品种生长期及发芽处理对其皂苷含量的影响 [J]. 食品工业科技, 2023, 44(20): 70–76. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2022120108

GUAN Tingting, KOU Yu, ZHANG Yiting, et al. Effects of Growth Period and Germination Treatment on Saponin Content of Different Bean Varieties[J]. Science and Technology of Food Industry, 2023, 44(20): 70–76. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2022120108

· 研究与探讨 ·

不同豆角品种生长期及发芽处理对其皂苷含量的影响

管婷婷¹, 寇宇¹, 张一婷², 刘大军³, 宋永¹, 孙庆申^{1,*}

(1.黑龙江大学生命科学学院, 农业微生物技术教育部工程研究中心, 黑龙江省寒地生态修复与资源利用重点实验室, 黑龙江省普通高校微生物重点实验室, 黑龙江哈尔滨 150080;
2.河北环境工程学院, 河北省农业生态安全重点实验室, 河北秦皇岛 066102;
3.黑龙江大学现代农业与生态环境学院, 黑龙江哈尔滨 150080)

摘要: 为明确东北油豆角皂苷的含量、存在部位及其影响因素, 以提高油豆角系列产品的加工利用价值, 本研究对开花后 10~40 d 内的金冠、绿冠、盛冠等 7 种东北油豆角采用超声辅助法分别提取豆角种子及荚皮中的皂苷, 并利用 0.4%~1.2% 的氯化钠溶液进行盐胁迫发芽处理, 分析其对金冠和满堂彩豆角种子皂苷含量的影响, 最后采用超高效液相色谱-四极杆-飞行时间质谱技术 (UHPLC-Q-TOF-MS) 对金冠豆角种子中的皂苷种类进行鉴定。结果表明, 豆角皂苷主要存在部位为豆角种子, 且皂苷含量随生长时间的增加呈现先上升后下降的趋势, 皂苷含量出现高峰的时期因豆角品种而异, 与其他 6 个品种豆角相比, 满堂彩中皂苷含量最高, 在 35 d 时, 整个豆角皂苷含量为 (23.62±0.14) mg/g。皂苷含量变化与豆粒萌芽时间、豆角品种密切相关, 盐胁迫处理可以使满堂彩种子皂苷含量由 (7.08±0.15) mg/g 提高到 (10.15±0.55) mg/g。UHPLC-Q-TOF-MS 分析表明金冠豆角粗皂苷中存在柴胡皂苷 F、赤豆皂苷 II、黄芪皂苷 IV 等 7 种皂苷。本研究为东北油豆角皂苷的深入开发提供数据支持。

关键词: 豆角皂苷, 不同生长期, 发芽处理, 组分分析

中图分类号: TS235.2

文献标识码: A

文章编号: 1002-0306(2023)20-0070-07

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2022120108



本文网刊:

Effects of Growth Period and Germination Treatment on Saponin Content of Different Bean Varieties

GUAN Tingting¹, KOU Yu¹, ZHANG Yiting², LIU Dajun³, SONG Yong¹, SUN Qingshen^{1,*}

(1.School of Life Sciences, Heilongjiang University, Engineering Research Center of Agricultural Microbiology Technology, Ministry of Education, Heilongjiang Provincial Key Laboratory of Ecological Restoration and Resource Utilization for Cold Region, Key Laboratory of Microbiology, College of Heilongjiang Province, Harbin 150080, China;
2.Hebei University of Environmental Engineering, Hebei Key Laboratory of Agroecological Safety, Qinhuangdao 066102, China;
3.College of Advanced Agricultural, Ecological and Environmental Sciences, Heilongjiang University, Harbin 150080, China)

Abstract: In order to improve the processing and utilization value of the Northeast snap beans products by clarifying the saponin content, sites and influencing factors, this study extracted saponins from the seeds and pods of seven kinds of

收稿日期: 2022-12-14

基金项目: 黑龙江省自然科学基金 (LH2021C075)。

作者简介: 管婷婷 (1999-), 女, 硕士研究生, 研究方向: 食品加工与安全, E-mail: 1227411606@qq.com。

* 通信作者: 孙庆申 (1977-), 男, 博士, 教授, 研究方向: 食品与药品活性物质的挖掘与研发, E-mail: sunqingshen@hlju.edu.cn。

Northeast snap beans, including Golden Crown, Green Crown, and Sheng Crown within 10~40 d after blooming using ultrasonic-assisted methods. 0.4%~1.2% sodium chloride solution was used to conduct germination treatment under salt stress on the saponin content of Golden Crown and Mantangcai seed. Finally, ultra-high performance liquid chromatography-quadrupole time-of-flight mass spectrometry (UHPLC-Q-TOF-MS) was used to identify the saponin species in the seeds of Golden Crown. The results showed that saponin existed mainly in the seeds, and the saponin content increased firstly but then decreased with the increase of growth time. The peak period of saponin content varied with the bean varieties. Compared with the other six varieties of snap beans, the saponin content in the full hall was the highest, with the highest saponin content of Mantangcai whole pods of 23.62 ± 0.14 mg/g at 35 d. The change of saponin content was closely related to the sprouting time of bean seeds and bean varieties. Salt stress treatment could significantly increase the saponin content of Mantangcai seeds from (7.08 ± 0.15) mg/g to (10.15 ± 0.55) mg/g. The UHPLC-Q-TOF-MS analysis showed that there were seven saponins in the crude saponins of the Golden Crown bean, including saikosaponin F, adzuki saponin II and astragaloside IV. This study provides data support for the in-depth development of soybean saponins in Northeast China.

Key words: snap bean saponins; different growth periods; germination treatment; component analysis

油豆角是我国东北地区(黑龙江、吉林为主)特有的一种优质菜豆品种^[1],富含蛋白质、胡萝卜素,营养价值高,口感好,具有促进胃肠蠕动、健脾补肾等功效。此外,油豆角中还含有皂苷类物质,主要为三萜类皂苷^[2]。三萜皂苷主要通过乙酸/甲羟戊酸途径合成,一般可划分为 3 个阶段:合成异戊烯基焦磷酸(IPP)和二甲基烯丙基焦磷酸(DMAPP);由异戊烯基转移酶和萜类环化酶催化 IPP 和 DMAPP 形成 2,3-氧化鲨烯;2,3-氧化鲨烯依次经过环化、羟基化、糖基化修饰后最终形成三萜类皂苷^[3-5]。

油豆角中皂苷主要由三萜皂苷元与糖组成,常见的糖有葡萄糖、半乳糖、鼠李糖等^[6]。目前,采用超声波辅助法^[7]、正丁醇萃取^[2]等方法来提取油豆角中皂苷,具有效率高、操作简便、避免溶剂损失等特点。研究表明,品种、生长周期、生长部位等客观条件会使油豆角等植物中皂苷含量发生改变^[1]。这些皂苷具有多种重要的生物活性和广泛的药理作用,如降血脂、降血糖、抗癌、抗炎、抗过敏、抗氧化、治疗白血病、抗病毒、防治心脑血管疾病等^[6,8]。在生产生活中常被用于制作清洁剂、发泡剂和乳化剂等^[9]。因此,对油豆角中皂苷类物质的开发具有重要的价值。

本文以东北油豆角为原料,分析不同时期豆荚及种子的皂苷含量,明确豆角皂苷含量与生长期的关系及存在的部位;对发芽联合盐胁迫后豆角种子皂苷含量的变化进行测定,探究豆角种子通过发芽联合盐胁迫处理后皂苷含量变化。利用 UHPLC-Q-TOF-MS 得到的精确相对分子质量,对照文献数据库,对豆角中的皂苷类成分进行鉴别,为开发油豆角深加工产品种类提供数据支持。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

豆角(金冠、绿冠、盛冠、紫冠、青冠、满堂彩、哈 15 号)均摘自黑龙江大学呼兰校区园艺基地;人参皂苷 Rg1 标准品 上海创赛科技有限公司;氯化

钠、冰醋酸、香草醛、高氯酸 均为分析纯,天津科密欧试剂有限公司;AM-P996 型 Parafilm 封口膜 无锡德凡仪器有限公司。

A560 型双光束紫外可见分光光度计 翱艺仪器上海有限公司;DZKW-D-2 型恒温水浴锅 天津天泰仪器有限公司;SB-5200DT 型超声波清洗机 信仪仪器有限公司;FW100 型高速万能粉碎机 天津泰斯特有限公司;Agilent1290-G6470 型三重四极杆液质联用仪 上海安捷伦科技有限公司。

1.2 实验方法

1.2.1 样品采集 在 2022 年 6~8 月于黑龙江大学呼兰校区采摘金冠、绿冠、盛冠等 7 个品种东北油豆角,在开花 10~40 d 内每间隔五天采样,每个品种各取样 100 g,平行取样三份,在采摘过的植株上挂签,实现对同株豆角在不同生长期进行采摘跟踪。

1.2.2 豆角总皂苷的提取、含量测定

1.2.2.1 原料制备 开花后 10、15 d 的豆角,因种子较小,难以分开,所以这两个时期测定的是整个豆角中皂苷的含量;对开花后 20 d 及以后的豆角,取不同生长期新鲜豆角的豆荚和种子剥离,置于 60 ℃ 烘箱内烘干至恒重,用高速万能粉碎机将其分别粉碎,过 80 目筛备用。

1.2.2.2 豆角总皂苷的提取 参照刘宁等^[7]的方法,采用超声辅助提取法提取豆角总皂苷。准确称取 1 g 豆角粉末于烧杯中,加入 15 mL 70% 乙醇溶液,用封口膜密封后放入超声波清洗机中进行超声辅助提取,提取时间为 25、30、35、40、45 min,温度为 45 ℃,功率 240 W,频率 40 kHz,得到皂苷粗提液,过滤至澄清备用。

1.2.2.3 标准曲线绘制 参照张慧颖等^[10]的方法,利用人参皂苷 Rg1 绘制标准曲线,取不同量的人参皂苷标准溶液(400 mg/L)于 60 ℃ 水浴干燥。加入 0.2 mL 5% 香草醛冰醋酸溶液,转动蒸发皿,使残渣溶解,再加入 0.8 mL 高氯酸,混匀后移入 10 mL 比

色管中, 60 ℃ 水浴加热 15 min, 取出。静置冷却 40 min, 使用冰醋酸定容, 摇匀后。以 1 cm 比色皿于 545 nm 波长处测定其吸光度。以皂苷质量为横坐标, 吸光度为纵坐标, 绘制人参皂苷 Rg1 标准曲线方程如下: $Y=2.3223X-0.0075 (R^2=0.9965)$ 。

1.2.2.4 样品中皂苷含量测定 准确吸取 1 mL 皂苷粗提液于蒸发皿中, 按照标准曲线的制备过程, 在 545 nm 波长处测定其吸光度, 总皂苷含量计算公式如下:

$$\text{总皂苷含量(mg/g)} = \frac{C \times V_m}{m \times V_0}$$

式中: C 为由提取液吸光度值代入标准曲线回归方程得出的总皂苷质量(mg); m 为豆角粉末质量(g); V_m 为样液定容后体积(mL); V_0 为测定所用样液体积(mL)。

1.2.3 添加氯化钠对豆角种子发芽过程中皂苷含量的影响 参照赵露等^[11]的方法, 对金冠、满堂彩种子进行发芽处理。取一定量豆角种子, 清洗后用蒸馏水浸泡过夜, 将纱布平铺于培养皿的底部, 每皿摆放 100 粒精选种, 加入适量蒸馏水或不同浓度的氯化钠(0.4%、0.8%、1.2%), 在 28 ℃ 恒温培养箱中培养至漏出白芽, 并选取发芽 1~4 d 的种子, 测定皂苷含量, 每个样本做三个平行。

1.2.4 UHPLC-Q-TOF-MS 分析金冠豆角粒中皂苷的种类

1.2.4.1 待测液制备 参照侯亚楠等^[12]的方法, 准确称取 1 g 豆角粉末置于 100 mL 烧杯中, 加入 15 mL 70% 甲醇, 45 ℃、功率 240 W、40 kHz 超声提取 35 min, 提取液用 0.22 μm 膜过滤后供检测分析。

1.2.4.2 色谱与质谱条件 测定仪器为三重四极杆液质联用仪, 该系统配备 Agilent ZORBAX RRHD Eclipse Plus C_{18} 柱(2.1 mm×50 mm, 1.8 μm), 流动相为 0.1% 甲酸/水(A)和乙腈(B)。简化洗脱条件为 10% 乙腈至 100% 乙腈 5 min 线性梯度洗脱。柱温 25 ℃, 流速 0.4 mL/min, 进样量 1 μL。电喷雾质谱(electrospray ionization-mass spectrometric, ESI-MS)分析, 采用电离电压 3500 V, 源温度 350 ℃ 电喷雾电离; 氮气 35 psi, 气体流速 10 L/min, 负离子模式下对 m/z 44 到 m/z 1004 进行全扫描(MS^2 scan)在选择离子监测(selected ion monitoring, SIM)检测方式下, 检测提取物的分子离子。在碎片离子扫描方式下, 检测提取物的碎片离子。

1.3 数据处理

使用 Origin 8.0 软件对试验所得结果进行统计学分析, $P<0.05$ 表示差异显著, 所有数据均以平均值±标准差表示。

2 结果与分析

2.1 不同生长期及品种豆角皂苷含量测定

由于开花后 10~15 d 表现为豆粒不饱满, 豆荚太

小, 因此在这两个生长期没有进行荚皮及种子分别提取, 只对整个豆角进行皂苷含量测定, 不同豆角在开花后 10、15 d 时皂苷含量的动态变化见表 1。其中, 绿冠、盛冠、紫冠、满堂彩随生长周期的增加皂苷含量逐渐升高, 金冠、青冠、哈 15 号皂苷含量下降。

表 1 不同豆角在开花后 10、15 d 时皂苷含量的动态变化
Table 1 Changes of saponin contents in different beans at 10, 15 d post blooming

豆角品种	生长时间(d)	
	10	15
金冠	3.39±0.15	2.24±0.24
绿冠	6.72±0.20	7.08±0.19
盛冠	3.66±0.27	4.37±0.17
青冠	5.96±0.26	2.28±0.25
紫冠	5.76±0.21	6.02±0.19
哈15号	4.47±0.31	4.42±0.05
满堂彩	2.24±0.15	2.60±0.06

图 1 是豆角开花后 20~40 d 豆荚和豆角粒中皂苷含量的动态变化, 金冠、绿冠豆角种子皂苷含量都在 20 d 便达到最高值, 但金冠和绿冠种子荚皮中皂苷含量分别在 30 d 和 20 d 时达到峰值, 且豆粒中的皂苷含量显著高于荚皮(图 1A, 图 1B)。盛冠和青冠种子和荚皮皂苷含量在 25 d 时显著高于其它生长期, 但盛冠和青冠种子荚皮中皂苷含量分别在 25 d 和 35 d 时达到峰值(图 1C, 图 1D)。紫冠、哈 15 号种子皂苷含量在 30 d 时含量显著高于其它生长期, 但紫冠和哈 15 号种子荚皮中皂苷含量分别在 25 d 和 20 d 时达到峰值(图 1E, 图 1F), 满堂彩种子和豆荚中皂苷含量均在第 35 d 达到最高值(图 1G)。

本研究结果中, 豆角总皂苷含量在不同部位不同生长期差别较大, 种子中皂苷含量高于荚皮含量, 皂苷含量都随豆角生长先增加后降低, 以 20~35 d 采收质量较好。李启照等^[13]研究发现女贞不同药用部位不同生长期薯蓣皂苷元含量有所不同。徐伟等^[14]研究发现随着生长时间的延长, 美国皂荚壳皂苷的含量逐渐增加, 在开花后 25 d 皂苷含量达到最高后逐渐减少。均与本研究趋势相近, 其皂苷所存在位置对皂苷含量影响较大, 随生长时间的延长出现先升高后下降的趋势。因此可以确定豆角皂苷主要存在部位为豆角种子中, 且在不同生长期含量差别较大。因为随着豆角生长周期的延长, 经过甲酸戊醛代谢途径等一系列反应最终形成三萜皂苷类化合物, 使皂苷含量升高, 达到峰值后, 由于温度升高, 豆角内部水分大量流失, 皂苷等活性物质损失, 导致其含量下降。

2.2 发芽处理对豆角种子皂苷含量的影响

本文选取在海南种植的全堂彩豆角及东北特色品种的金冠豆角做发芽处理, 由于前期测定结果得到满堂彩及金冠两个品种豆角中总皂苷含量较高于其他品种, 而满堂彩豆角属于海南品种, 金冠豆角是东

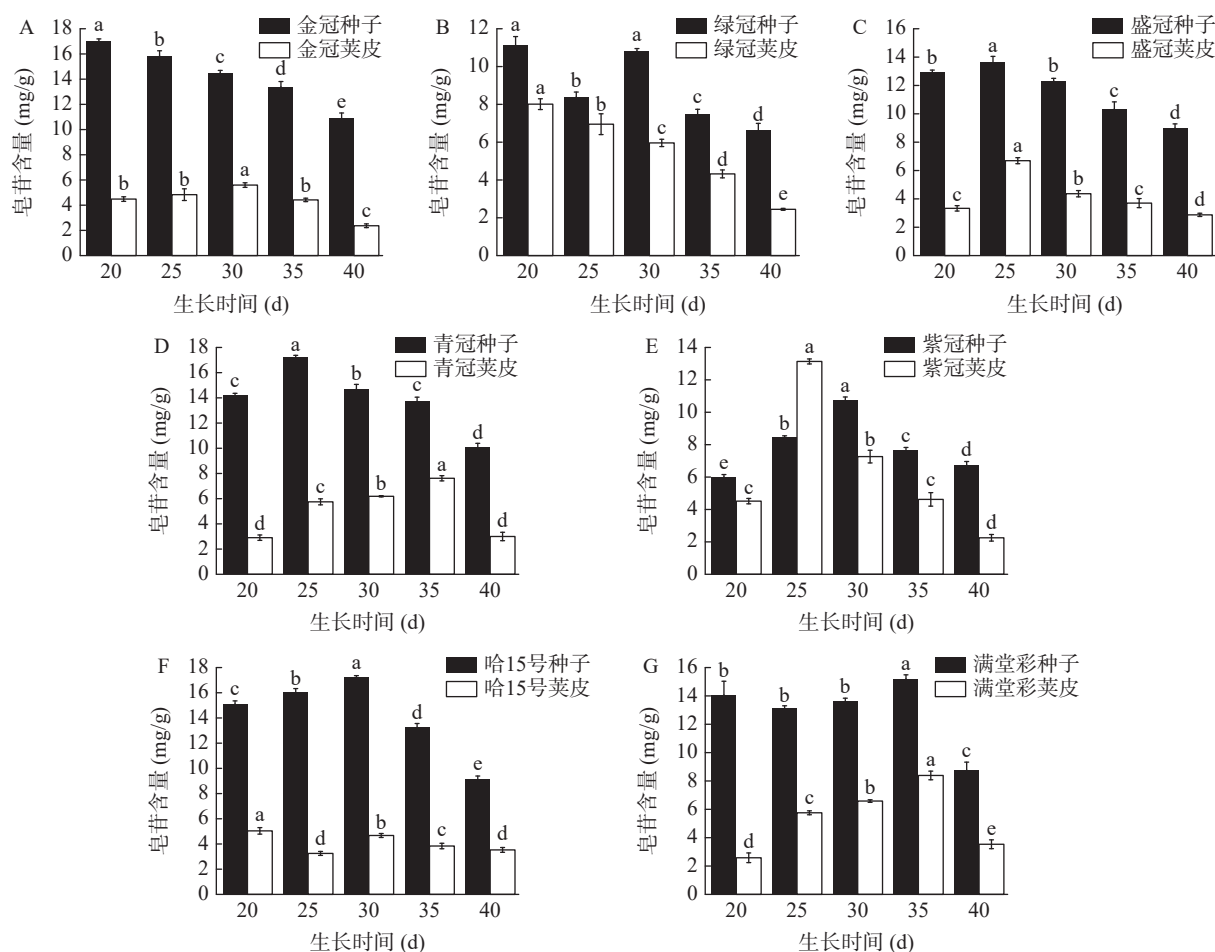


图 1 7 个品种豆角不同生长期种子及荚皮皂苷含量

Fig.1 Contents of saponin in seeds and pods of seven varieties of *Phaseolus vulgaris* in different growth periods

注: 种子和荚皮分别进行显著性比较, 字母不同表示不同生长期存在显著差异($P<0.05$)。

本地区特色油豆角品种, 前期课题组已对金冠豆角种子中 α -淀粉酶抑制剂进行研究, 为进一步探究地域差异对豆角皂苷含量的影响, 因此选择满堂彩和金冠豆角进行发芽处理。

由图 2 可知, 对于不同氯化钠浓度处理和空白组来说, 在金冠种子发芽后 1~4 d, 其皂苷含量相比于发芽前 (12.04 ± 0.62) mg/g 均显著下降 ($P<0.05$)。Huang 等^[15] 研究发现发芽处理 3 d 后, 黑皮大豆中

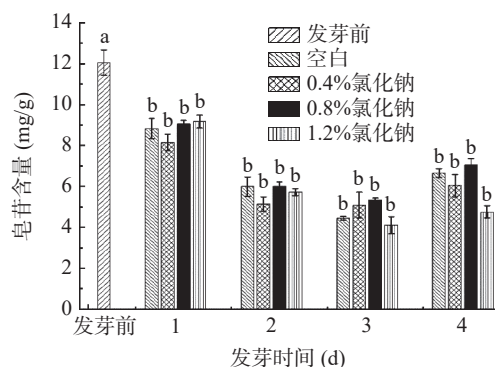


图 2 氯化钠溶液发芽处理对金冠种子皂苷含量的影响

Fig.2 Effects of sprouting treatment with sodium chloride solution on the content of saponins in Golden Crown seeds

注: 均与发芽前进行比较, 字母不同表示显著差异 ($P<0.05$), 图 4 同。

总皂苷含量较发芽前略有降低, 与本实验结果相似。本实验四组氯化钠浓度处理下均在发芽后 1 d 皂苷含量最高, 2~3 d 含量降低, 第 4 d 含量升高, 可以得出皂苷含量与萌芽时间密切相关。可能是由于氯化钠浓度的改变可以在一定程度上影响植物皂苷的合成途径, 抑制了皂苷合成所需的物质代谢和关键酶活性(图 3)^[16-17]。

高春霞等^[18] 也发现发芽 4 d 后大豆中皂苷含量从 2.8% 增加到 8.9%, 与本实验结果相似。如表 2 所示, 本实验四种浓度处理后, 皂苷含量均在发芽第 2 d 下降, 3 d 含量升高, 4 d 含量下降, 且均在 3 d 时皂苷含量最高。通过发芽处理可以显著提高满堂彩种子皂苷含量, 且皂苷含量与萌芽时间和豆角品种密切相关。Alam 等^[19] 和 Sarkar 等^[20-20] 采用氯化钠等前处理方法对种子进行诱导, 发现其活性物质含量增加, 而本实验随氯化钠浓度升高, 呈先上升后下降的趋势, 可能是随着氯化钠浓度改变, 通过调节皂苷合成酶来适应浓度改变, 说明适度的盐胁迫有利于种子生长以及豆角总皂苷的积累^[21-22]。

2.3 UHPLC-Q-TOF-MS 对金冠种子粗皂苷的化学成分分析

由于课题组前期对金冠豆角种子中 α -淀粉酶抑

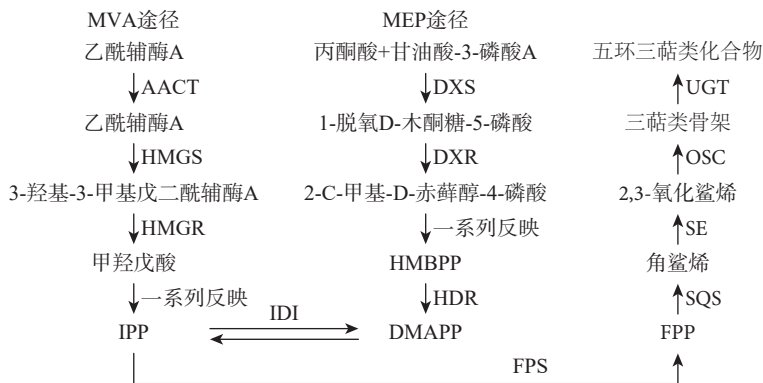


图 3 三萜皂苷类化合物合成途径

Fig.3 Synthetic pathway of triterpenoid saponins

注: AACT: 乙酰乙酰辅酶 A 硫解酶; HMGS: 3-羟基-3-甲基戊二酰辅酶 A 合成酶; HMGR: 3-羟基-3-甲基戊二酰辅酶 A 还原酶; IPP: 异戊烯基焦磷酸; IDI: IPP 异构酶; DMAPP: 二甲基烯丙基焦磷酸; DXS: DXP 合成酶; DXR: DXP 还原异构酶; HMBPP: (E)-4-羟基-3-甲基-2-丁烯基-焦磷酸; HDR: HMBPP 还原酶; FPS: FPP 合成酶; FPP: 法尼基焦磷酸; SQS: 角鲨烯合成酶; SE: 鲨烯氧化酶; OSC: 2,3-氧化鲨烯环化酶; UGT: 糖基转移酶。

表 2 氯化钠发芽处理对满堂彩种子皂苷含量的影响(mg/g)

Table 2 Effect of sodium chloride germination treatment on saponin content of Mantangcai seeds (mg/g)

发芽时间(d)	处理浓度				
	发芽前	空白组	0.4%氯化钠	0.8%氯化钠	1.2%氯化钠
1	7.08±0.15	6.83±0.20 ^a	8.45±0.39 ^{a+}	7.80±0.79 ^{a+}	7.26±0.19 ^a
2		6.06±0.33 ^{a+}	5.88±0.52 ^{a+}	6.90±0.43 ^a	7.24±0.77 ^a
3		8.08±0.22 ^{a+}	8.88±0.34 ^{a+}	10.15±0.54 ^{a+}	8.40±0.26 ^{a+}
4		7.03±0.15 ^a	6.51±0.38 ^a	7.54±0.26 ^a	6.36±0.38 ^a

注: 与发芽前进行比较, a代表差异不显著, a+代表高于发芽前, a-代表含量低于发芽前(P<0.05)。

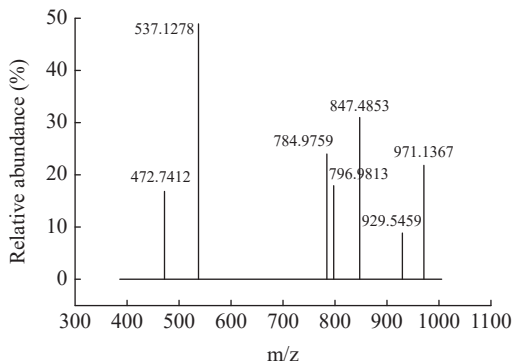


图 4 金冠种子粗皂苷在 UHPLC-Q-TOF-MS 质谱图

Fig.4 Mass spectrum of crude saponin from golden crown seeds in UHPLC-Q-TOF-MS

制剂进行研究,为进一步挖掘金冠豆角种子的价值,因此对金冠种子粗皂苷进行液质联用分析。

如图 4 为金冠粗皂苷在 UHPLC-Q-TOF-MS 得到的质荷比与相对丰度的相关性图。经过液质联用对金冠种子粗皂苷进行鉴定,通过查出文献建立谱库共分析出柴胡皂苷 F、赤豆皂苷 II、黄芪皂苷 IV 等 7 种皂苷,如表 3 所示。

其中,柴胡皂苷 F 具有抗病毒作用^[26],赤豆皂苷 II 具有利尿消肿,解毒排脓等功效;黄芪皂苷 IV 是中医临床上常用的中药材,在食品、保健品、化妆品等行业具有广泛的应用前景^[27]。竹节参皂苷 V 甲酯在抗炎,抗心肌缺血,保护肝损害和延缓衰老等方面具有重要的作用^[28]。大豆皂苷元 D 具有多种生物学活性,包括抗肿瘤,抗癌,预防肥胖和免疫调节等^[29-30]。远志皂苷元具有降低神经细胞炎症反应的作用^[31],可为缓解抗肿瘤药物的毒副作用寻找新的突破口。

表 3 金冠种子粗皂苷成分分析

Table 3 Composition analysis of crude saponins in golden crown seeds

序号	皂苷名称	计算质荷比	实际质荷比	分子式	相对丰度(%)	化合物类别	参考文献
P1	柴胡皂苷F	929.5468	929.5459	C ₄₈ H ₈₀ O ₁₇	9	三萜皂苷	[23]
P2	大豆皂苷元D	472.7430	472.7412	C ₃₁ H ₅₂ O ₃	17	皂苷类	[24]
P3	赤豆皂苷II	796.9810	796.9813	C ₄₂ H ₆₈ O ₁₄	18	皂苷类	[12]
P4	黄芪皂苷IV	784.9700	784.9759	C ₄₁ H ₆₈ O ₁₄	24	皂苷类	[23]
P5	竹节参皂苷V甲酯	971.1320	971.1367	C ₄₉ H ₇₈ O ₁₉	22	皂苷类	[23]
P6	二乙酰乙酰皂苷A/D/B2	865.4838	866.4953	C ₄₆ H ₇₂ O ₁₅	69	三萜皂苷	[25]
P7	远志皂苷元	537.1280	537.1278	C ₃₀ H ₄₅ ClO ₆	49	皂苷类	[23]

3 结论

豆角种子及荚皮中均含有皂苷类成分,且豆角种子中皂苷含量高于荚皮含量,随着生长周期的增加豆角中总皂苷含量呈现先升高后下降的趋势,且通过发芽处理可以显著改变皂苷含量($P<0.05$),且含量变化与萌芽时间、豆角品种密切相关。发芽时协同盐胁迫处理可以显著提高豆角种子中皂苷含量。通过液质联用方法共鉴定出 7 种皂苷类物质,在食品、保健品、医疗等领域具有广泛应用前景。目前本实验仅做了提取含量分析及活性成分鉴定,缺少应用、结构鉴定及功能评价,需要在未来进行进一步研究。

参考文献

- [1] 李香梅,侯志敏,肖宇,等.豆角豆荚和种子中皂苷含量的比较[J].安徽农业科学,2009,37(17):7944-7946. [LI X M, HOU Z M, XIAO Y, et al. Comparison of saponin content in bean pods and seeds[J]. Anhui Agricultural Sciences, 2009, 37(17): 7944-7946.]
- [2] 李健,金龙哲,刘宁,等.豆角总皂苷提取工艺的研究[J].食品与发酵工业,2007(1):127-130. [LI J, JIN L Z, LIU N, et al. Study on extraction technology of total saponins from beans[J]. Food and Fermentation Industry, 2007(1): 127-130.]
- [3] 陈莉,吴耀生.三萜皂苷生物合成途径及相关酶[J].国外医药(植物药分册),2004(4):156-161. [CHEN L, WU Y S. Biosynthesis pathway of triterpenoid saponins and related enzymes[J]. Foreign Medicine (Botanical Medicine), 2004(4): 156-161.]
- [4] 徐圆圆,陈仲,贾黎明,等.植物三萜皂苷生物合成途径及调控机制研究进展[J].中国科学:生命科学,2021,51(5):525-555. [XU Y Y, CHEN Z, JIA L M, et al. Research progress on biosynthesis pathway and regulation mechanism of plant triterpenoid saponins[J]. China Science: Life Sciences, 2021, 51(5): 525-555.]
- [5] GUO S Y, YIN Y, LEI T, et al. A cycloartenol synthase from the steroidal saponin biosynthesis pathway of paris polyphylla[J]. Journal of Asian Natural Products Research, 2021, 23(4): 353-362.
- [6] 唐瑶,陈洋,曹婉鑫,等.三萜皂苷结构及应用的研究进展[J].安徽化工,2015,41(2):13-15,22. [TANG Y, CHEN Y, CAO W X, et al. Research progress on the structure and application of triterpenoid saponin[J]. Anhui Chemical Industry, 2015, 41(2): 13-15,22.]
- [7] 刘宁,李健,金龙哲,等.超声波法提取豆角总皂苷的工艺研究[J].食品科学,2008(10):327-329. [LIU N, LI J, JIN L Z, et al. Study on ultrasonic extraction of total saponins from beans[J]. Food Science, 2008(10): 327-329.]
- [8] 隆逸瑶,刘渝港,夏会平,等.三萜皂苷抗肥胖及其作用机制的研究进展[J].食品工业科技,2022,43(7):445-456. [LONG Y Y, LIU Y G, XIA H P, et al. Research progress of triterpenoid saponins in anti-obesity and its mechanism[J]. Food Industry Science and Technology, 2022, 43(7): 445-456.]
- [9] 任师超,孙秋艳,冯旭东,等.微生物细胞工厂合成五环三萜皂苷类化合物[J].合成生物学,2022,3(1):168-183. [REN S C, SUN Q Y, FENG X D, et al. Synthesis of pentacyclic triterpenoid saponins in microbial cell factory[J]. Synthetic Biology, 2022, 3(1): 168-183.]
- [10] 张慧颖,肖旺钊,郑可利,等.超声波法夏枯草总皂苷提取工艺研究[J].三明学院学报,2017,34(6):50-56. [ZHANG H Y, XIAO W C, ZHENG K L, et al. Ultrasonic assisted extraction of total saponins from *Prunella vulgaris*[J]. Journal of Sanming University, 2017, 34(6): 50-56.]
- [11] 赵露,苗玉华,吴儒琳,等.不同盐胁迫对苦豆子种子萌发及幼苗生长的影响[J].山西农业科学,2021,49(7):844-848. [ZHAO L, MIAO Y H, WU R L, et al. Effects of different salt stress on seed germination and seedling growth of *Sophora alopecuroides* L.[J]. Shanxi Agricultural Sciences, 2021, 49(7): 844-848.]
- [12] 侯亚楠,王思尧,魏朝俊,等.小皂苷提取和液质联用检测方法的优化[J].北京农学院学报,2020,35(3):17-21. [HOU Y N, WANG S Y, WEI Z J, et al. Optimization of extraction and LC-MS detection methods of adzuki bean saponin[J]. Journal of Beijing Agricultural College, 2020, 35(3): 17-21.]
- [13] 李启照.女贞不同部位中总皂苷的含量测定及提取工艺[J].怀化学院学报,2016,35(11):1-5. [LI Q Z. Determination and extraction technology of total saponins in different parts of *Ligustrum lucidum*[J]. Journal of Huaihua University, 2016, 35(11): 1-5.]
- [14] 徐伟,肖志强,李纯懿,等.不同生长时间对美国皂荚壳皂苷的影响比较研究[J].林产化学与工业,2021,41(3):19-25. [XU W, XIAO Z Q, LI C Y, et al. Comparative study on properties of *Gleditsia triacanthos* L. shell saponins at different growth time[J]. Forest Products Chemistry and Industry, 2021, 41(3): 19-25.]
- [15] HUANG G C, CAI W X, XU B J. Improvement in beta-carotene, vitamin B2, gaba, free amino acids and isoflavones in yellow and black soybeans upon germination[J]. LWT-Food Science and Technology, 2017, 75: 488-496.
- [16] 蔡晓锋,胡体旭,叶杰,等.植物盐胁迫抗性的分子机制研究进展[J].华中农业大学学报,2015,34(3):134-141. [CAI X F, HU T X, YE J, et al. Research progress on molecular mechanism of salt stress resistance in plants[J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2015, 34(3): 134-141.]
- [17] 崔悦.盐胁迫对人参转录因子及皂苷合成酶基因表达能力的影响[D].吉林:吉林大学,2021. [CUI Y. Effects of salt stress on gene expression ability of ginseng transcription factor and saponin synthase[D]. Jilin: Jilin University, 2021.]
- [18] 高春霞,王凤忠,袁莉,等.发芽过程中大豆活性物质、抗营养因子及抗氧化活性变化的综述[J].核农学报,2019,33(5):962-968. [GAO C X, WANG F Z, YUAN L, et al. Review on the changes of active substances, anti-nutritional factors and antioxidant activities of soybean during germination[J]. Journal of Nuclear Agriculture, 2019, 33(5): 962-968.]
- [19] AIAM M A, JURAIMI A S, RAFII M Y, et al. Effects of salinity and salinity-induced augmented bioactive compounds in purslane (*Portulaca oleracea* L.) for possible economical use[J]. Food Chemistry, 2015, 169(15): 439-447.
- [20] SARKAR D, CHRISTOPHER A, SHETTY K. Phenolic bioactives from plant-based foods for glycemic control[J]. Frontiers in Endocrinology, 2022, 12: 1921.
- [21] 高晓娟,郎多勇,周丽,等.NaCl胁迫对银柴胡药材活性成分含量及其积累量的影响研究[J].现代农业科技,2015,649(11):94-96. [GAO X J, LANG D Y, ZHOU L, et al. Effects of NaCl stress on the content and accumulation of active components in *Bupleurum chinense* DC[J]. Modern Agricultural Science and Technology, 2015, 49(11): 94-96.]
- [22] 齐琪,马书荣,徐维东,等.盐胁迫对植物生长的影响及耐盐生理机制研究进展[J].分子植物育种,2020,18(8):2741-2746. [QI Q, MA S R, XU W D, et al. Effects of salt stress on plant growth and research progress on physiological mechanism of salt tolerance[J]. Molecular Plant Breeding, 2020, 18(8): 2741-2746.]

- [23] ZHU H J, CHANG W Q, ZHOU C G, et al. Chemicalome and metabolome profiling of chai-gui decoction using an integrated strategy based on UHPLC-Q-TOF-MS/MS analysis[J]. *Journal of Chromatography B*, 2021, 1185: 122979.
- [24] 梁军, 夏永刚, 郭信东, 等. 超高效液相色谱-高分辨质谱法同时测定类叶牡丹中9种三萜皂苷类成分[J]. *中草药*, 2017, 48(20): 4323-4327. [LIANG J, XIA Y G, GUO X D, et al. Simultaneous determination of nine triterpenoid saponins in ye mudan-like compounds by ultra performance liquid chromatography-high resolution mass spectrometry[J]. *Chinese Herbal Medicine*, 2017, 48(20): 4323-4327.]
- [25] 韩君. 白扁豆总皂苷的含量测定与成分分析[J]. *安徽农业科学*, 2021, 49(8): 195-198. [HAN J. Content determination and analysis of total saponins in white lentil[J]. *Anhui Agricultural Sciences*, 2021, 49(8): 195-198.]
- [26] 李婧, 马小兵, 沈杰, 等. 基于文献挖掘与分子对接技术的抗新型冠状病毒中药活性成分筛选[J]. *中草药*, 2020, 51(4): 845-850. [LI J, MA X B, SHEN J, et al. Screening of active components of anti-novel coronavirus traditional chinese medicine based on literature mining and molecular docking technology[J]. *Chinese Herbal Medicine*, 2020, 51(4): 845-850.]
- [27] 赵灵改, 吕学泽, 刘毅, 等. 黄芪中皂苷类成分的研究进展[J]. *食品安全质量检测学报*, 2021, 12(12): 4937-4946. [ZHAO L G, LÜ X Z, LIU Y, et al. Research progress of saponins in *Astragalus membranaceus*[J]. *Journal of Food Safety and Quality Inspection*, 2021, 12(12): 4937-4946.]
- [28] 申佩瑶, 张也, 李玉钦, 等. 竹节参生物活性与质量控制研究进展[J]. *食品与机械*, 2021, 37(11): 211-220. [SHEN P Y, ZHANG Y, LI Y Q, et al. Research progress of saponins in *Astragalus membranaceus*[J]. *Food and Machinery*, 2021, 37(11): 211-220.]
- [29] 陈禹汐, 于寒松, 王敏, 等. 大豆皂苷的研究进展与应用[J]. *食品工业科技*, 2021, 42(21): 420-427. [CHEN Y X, YU H S, WANG M, et al. Research progress and application of soybean saponin[J]. *Food Industry Science and Technology*, 2021, 42(21): 420-427.]
- [30] MAI E K, RADWAN A M, MOHAMED T M, et al. Cytotoxic effect of soybean saponin against colon cancer[J]. *Biological Science and Medicine*, 2019(7): 007.
- [31] 高丽娜, 周长征, 刘青芝, 等. 远志皂苷类化合物及其药理作用研究进展[J]. *北京联合大学学报*, 2022, 36(3): 58-64. [GAO L N, ZHOU C Z, LIU Q Z, et al. Research progress of polygala tenuifolia saponins and their pharmacological effects[J]. *Journal of Beijing Union University*, 2022, 36(3): 58-64.]