

炒制加工对白术籽蛋白氨基酸营养价值及挥发性成分的影响

聂 广^{1,2}, 张睿胤¹, 陈淼芬³,

唐 其^{1,2}, 陆 英^{1,2}, 李海涛¹, 黎 毅⁴, 郑亚杰^{1,2*}

¹湖南农业大学园艺学院; ²国家植物功能成分利用工程技术研究中心; ³湖南农业大学动物医学院, 长沙 410128; ⁴湖南岁物者农业科技有限公司, 平江 410400

摘 要: 通过对白术籽蛋白质氨基酸营养价值和挥发性成分及其炒制前后的变化研究, 为白术药材资源综合利用提供理论支持。利用全自动氨基酸分析仪、紫外-可见分光光度计、气相色谱质谱联用仪 (gas chromatography-mass spectrometry, GC-MS) 分别对炒制前后白术籽的可溶性蛋白、氨基酸、挥发性成分进行测定, 通过 NIST 谱库检索对目标化合物进行解析。白术籽中氨基酸种类齐全, 生品和炒制品均含有 17 种氨基酸, 总量分别为 5.29% 和 5.90%; 甜味和鲜味氨基酸总量与苦味氨基酸总量的比值为 1.98 和 1.95。蛋白质营养价值高, 其中必需氨基酸含量与氨基酸总量的比值、必需氨基酸含量与非必需氨基酸含量比值都与理想蛋白标准相接近, 必需氨基酸比值系数分别为 80.41 和 77.76, 必需氨基酸指数均接近于 1。挥发性香气成分丰富, 40 个挥发性成分包括共有成分 12 个, 生品和炒制品的特有成分各为 15 个和 37 个; 以萜类化合物为主, 以 *D*-柠檬烯为代表的单萜类化合物占比较大。炒制可增加白术籽中药效氨基酸、必需氨基酸以及具有呈味能力的鲜味氨基酸含量, 进而提高蛋白质营养价值, 促使挥发性成分的种类和数量更加丰富。作为白术药材非药用部位, 白术籽生品和炒制品均具有较高的食用价值, 炒制加工可进一步改善口感和提升风味; 本文研究可为白术非药用部位的资源化利用及高附加值产品创造提供理论依据。

关键词: 白术籽; 氨基酸组成; 蛋白质营养价值; 挥发性成分; 非药用部位;

中国分类号: Q946.8 文献标识码: A

Effect of frying process on nutritional value of protein amino acids and volatile substances in *Atractylodes macrocephala* seeds

NIE Guang^{1,2}, ZHANG Rui-yin¹, CHEN Miao-fen³,

TANG Qi^{1,2}, LU Ying^{1,2}, LI Hai-tao¹, LI Yi⁴, ZHENG Ya-jie^{1,2*}

¹College of Horticulture, Hunan Agricultural University; ²National Research Center of Engineering Technology for Utilization of Functional Ingredients from Botanicals, Hunan Agricultural University; ³College of Veterinary

Medicine, Hunan Agricultural University, Changsha 410128, China;⁴Hunan Suiwuzhe Agricultural Science and Technology Development Co., Ltd., Pingjiang 410400, China

Abstract: To provide theoretical support for comprehensive resource utilization of *Atractylodes macrocephala*, this study analyzed and evaluated the nutritional value of protein amino acids and flavor components of *A. macrocephala* seeds before and after frying. The soluble protein, amino acids, and volatile components were determined through an automatic amino acid analyzer, ultraviolet-visible spectrophotometer, and gas chromatography-mass spectrometry (GC-MS); the target volatile compounds were postulated by searching NIST spectral library. The amino acid content in *A. macrocephala* seeds was diverse, with 17 amino acids present in both raw and fried seeds, accounting for 5.29% and 5.90% of the total content of amino acid, respectively; the ratios of sweet and fresh amino acids to bitter amino acids were 1.98 and 1.95 in raw and fried samples, respectively. The nutritional value of soluble protein was high, with the ratios of essential amino acids to total amino acids and essential amino acids to non-essential amino acids being close to the ideal protein standard, with coefficient values of 80.41 and 77.76, respectively, and essential amino acid index values approaching 1. The volatile aroma components were abundant, with 40 volatile components including 12 common components in both raw and fried seeds, with 15 unique components in raw sample and 37 unique components in fried sample; terpenoids were the main components, with *D*-limonene as the representative monoterpene accounting for a large proportion. Frying process could increase the content of medicinal amino acids, essential amino acids, and flavoring amino acids in *A. macrocephala* seeds, thereby improving protein nutritional value and promoting the richness and diversity of volatile components. As a non-medicinal part of *A. macrocephala*, both raw and fried seeds have high edible value, and frying process can further improve taste and enhance flavor. Thus, this study can provide theoretical basis for the resource utilization of non-medicinal parts of *A. macrocephala* and the development of high-value products.

Key words: *Atractylodes macrocephala* seeds; amino acid composition; protein nutritional value; volatile ingredient; non-medicinal part

大健康产业快速发展引发市场对中药资源需求的日益增长, 中药材非药用部位的资源化利用引起广泛关注。中药非药用部位分布广泛, 通常含有与药用部位相似的化学成分, 甚至某些成分高于传统药用部位^[1]。中药非药用部位的资源化利用在促进药材资源综合利用、扩大药用部位以及发展新药物上有重大的意义^[2], 为中药产业的可持续发展提供了新的利用思路。

白术为菊科苍术属多年生草本植物白术 *Atractylodes Macrocephala* Koidz. 的干燥根茎^[3], 为传统大宗补益类中药材, 已被列入国家卫生部发布的《关于进一步规范保健食品原料管理

的通知》名单，多用于保健食品开发和使用。白术野生资源缺乏，在湖南、浙江等产区主要用种子育苗进行引种栽培，但白术籽因易失活被废弃^[4,5]；目前白术籽研究主要集中在种子的产量和品质的提高^[6,7]，有关白术籽的综合利用研究较少。

白术籽作为白术的非药用部位，因含蛋白质、氨基酸、可溶性多糖等营养物质，在当地药农会选取颗粒饱满的种子作为“瓜子”类食品食用。由于个体小且具绒毛，直接食用口感欠佳，通常进行炒制加工以改善口感和增加香味，至今尚未见白术籽的食用以及品质评价等的研究报道。本文将对炒制前后白术籽的蛋白氨基酸组成及其营养价值和挥发性物质进行比较研究，从营养价值和风味两个维度为白术籽的加工及其综合利用提供科学依据。

1 材料与amp;方法

1.1 仪器与试剂

UV-1900PC 紫外可见分光光度计（翱艺仪器有限公司）；L-8900 全自动氨基酸分析仪（日本日立有限公司）；GCMS-QP2010 型气相色谱-质谱联用仪（日本岛津公司），配有GC/MS solution 色谱工作站和 NIST.14、NIST.17 质谱数据库；固相微萃取装置（上海安谱实验科技有限公司），含固相微萃取手动进样手柄、萃取纤维头（65 μm -PDMS/DVB、50/30 μm -DVB/Carboxen-PDMS）、顶空样品瓶；PL203 电子分析天平（梅特勒-托利多仪器（上海）有限公司）；Milli-Q Advantage A10 超纯水制备系统（美国 MILLIPORE 公司）。

干燥牛血清蛋白（美国 Sigma-Aldrich 公司，批号：WXBC9348V）；考马斯亮蓝 G250（上海麦克林生化科技股份有限公司，批号：C6232）；其余试剂均为分析纯。

1.2 材料

白术籽生品及炒制品由湖南岁物者农业科技发展有限公司提供，经湖南农业大学唐其副教授鉴定为菊科苍术属多年生草本植物白术（*Atractylodes macrocephala* Koidz.）的干燥种子及其炒制品。

1.3 方法

1.3.1 可溶性蛋白含量测定

1.3.1.1 供试品溶液制备

取适量白术籽生品和炒制品，用球磨仪粉碎后放置阴凉干燥处保存，备用。

称取上述生品和炒制品白术籽粉末各约 1.0 g，精密称定，加入水 50 mL，超声提取 30 min，过滤，取滤液作为供试品溶液。

1.3.1.2 标准曲线绘制

精密称取适量牛血清蛋白加水配制成浓度为 0.13 mg/mL 的对照品储备溶液。称取 50 mg

考马斯亮蓝溶于 25 mL 95% 乙醇中，再加入 50 mL 磷酸，加水定容至 500 mL，得考马斯亮蓝溶液。

吸取上述对照品储备液 0.1、0.2、0.4、0.6、0.8、1.0、1.2 和 1.4 mL 置 10 mL 试管中，分别加水补足至 2.0 mL，继续加入考马斯亮蓝溶液 5.0 mL，摇匀后放置 10 min，配制成系列浓度工作溶液；随行空白，得到空白对照溶液。在吸收波长 595 nm 下测定吸光度，以吸光度对牛血清蛋白质量绘制标准曲线，得到线性方程和相关系数^[8]。

1.3.1.3 样品测定

精密吸取上述“1.3.1.1”各供试品溶液 2.0 mL，依照“1.3.1.2”方法配制成待测溶液并测定吸光度。将吸光度值代入标准曲线方程计算样品中可溶性蛋白的含量。

1.3.2 氨基酸组成及含量测定

1.3.2.1 供试品溶液制备

称取上述生品和炒制品白术籽粉末，参照国标^[9]及文献的方法^[10]完成供试品溶液的制备。

1.3.2.2 氨基酸的测定方法

取上述氨基酸供试品溶液，参照孙娟娟^[10]的方法进行氨基酸含量测定。

1.3.2.3 营养价值评价

利用 FAO/WHO 的必需氨基酸模式，计算样品中的必需氨基酸比值（ratio of essential amino acid, RAA）、氨基酸比值系数（ratio coefficient, RC）、比值系数分（core of ratio coefficient, SRC）和必需氨基酸指数值（essential amino acid index, EAAI）^[11]。

1.3.3 基于 GC-MS 技术的白术籽中挥发性成分定性分析

1.3.3.1 供试品制备

称取上述生品和炒制品白术籽粉末约 0.5 g，精密称定，装入顶空样品瓶，再加入 20% 氯化钠溶液 3 mL 和搅拌子，摇匀备用；随行空白样品。

1.3.3.2 GC-MS 测定条件

HP-88（100 m × 0.25 mm，0.20 μm，安捷伦科技有限公司）；进样口温度 240 °C；程序升温为初始柱温 60 °C，保持 5 min，3 °C/min 升至 140 °C，保持 5 min，5 °C/min 升至 210 °C，保持 5 min，5 °C/min 升至 240 °C，保持 10 min；载气为氦气，纯度 ≥ 99.99%；柱流量 1.37 mL/min，分流比 5:1。

接口温度 220 °C；离子源为电子轰击离子源；离子源温度 200 °C，电子碰撞能量 70 eV；溶剂延迟 9.5 min；检测器电压 0.9 kV；质荷比扫描范围 50~600 m/z ^[12]。

1.3.3.3 数据采集

将装有待测样品的顶空样品瓶（或空白样品瓶）固定在磁力加热搅拌器上，设定加热温度为 70 °C，在此温度条件下搅拌预热 40 min；将萃取纤维头暴露在样品正上方，进行吸附萃取 40 min；按照“1.3.3.2”项下条件完成数据采集。

在样品检测前需对各空白样品进行采集以排除外源杂质或污染物的干扰，包括仪器空白和方法空白。

1.3.3.4 数据处理

将采集的 GC-MS 谱图积分后对目标色谱峰进行 NIST.14 和 NIST.17 谱库检索，人工对目标色谱峰的质谱图与数据库中标准谱图进行比对和定性分析，得到各目标色谱峰的可能归属；通过面积归一化法计算白术籽生品和炒制品中各目标化合物的相对百分比。

2 结果与分析

2.1 蛋白质及其氨基酸组成分析

无论白术籽生品还是炒制品都含有种类丰富的氨基酸（见图 1A），其中谷氨酸（Glu）、天冬氨酸（Asp）和亮氨酸（Leu）含量较高，它们在样品中的占比均超过 0.5%；半胱氨酸（Cys）和蛋氨酸（Met）含量较低。炒制后大部分氨基酸的含量均显著增加，Cys、Met 和异亮氨酸（Ile）表现为升高趋势但不具有显著性，仅赖氨酸（Lys）在炒制后含量下降显著。如图 1B 所示，炒制后白术籽中可溶性蛋白（soluble protein, SP）显著下降，由原来的 1.49% 下降至 0.59%，大约 60%的蛋白质在加热处理后发生了降解；白术籽经过炒制后氨基酸总量（total amino acid, TAA）显著升高，由 5.29%升高至 5.90%，可能是由于翻炒过程中白术籽受热鼓起引起表面绒毛脱落而引起。

白术籽生品和炒制品所含天冬氨酸、谷氨酸、甘氨酸、蛋氨酸、异亮氨酸、亮氨酸、苯丙氨酸、赖氨酸、精氨酸等药效氨基酸^[10]（medicinal amino acid, MAA）均被检测到，它们的含量总和占氨基酸总量的 65%以上；在炒制品中的含量（3.88%）较生品（3.50%）中的含量略有增加；苏氨酸、缬氨酸、蛋氨酸、异亮氨酸、亮氨酸、苯丙氨酸、赖氨酸等七种必需氨基酸（essential amino acid, EAA）总和经炒制后可提高至 2.03%，表明炒制可在一定程度上提高白术籽的保健价值。以 Glu 和 Asp 为代表的鲜味氨基酸^[10]（flavor amino acid, FAA）在炒制品中占氨基酸总量接近 40%，显著高于生品中的相应占比，表明炒制可以使白术籽具有更好的呈味能力；生品和炒制品中 FAA 和甜味氨基酸^[10]（sweet amino acid, SAA）的总量与苦味氨基酸^[10]（bitter amino acid, BAA）总量的比值分别为 1.98 和 1.95，两者没有显著差异，说明白术籽在炒制前后由于氨基酸变化引起的口感变化不明显。整体而言，炒制加工过的白术籽无论具有保健功能的 MAA 和 EAA，还是呈味能力的 FAA 含量都有提高，

但是其口感受影响不大。

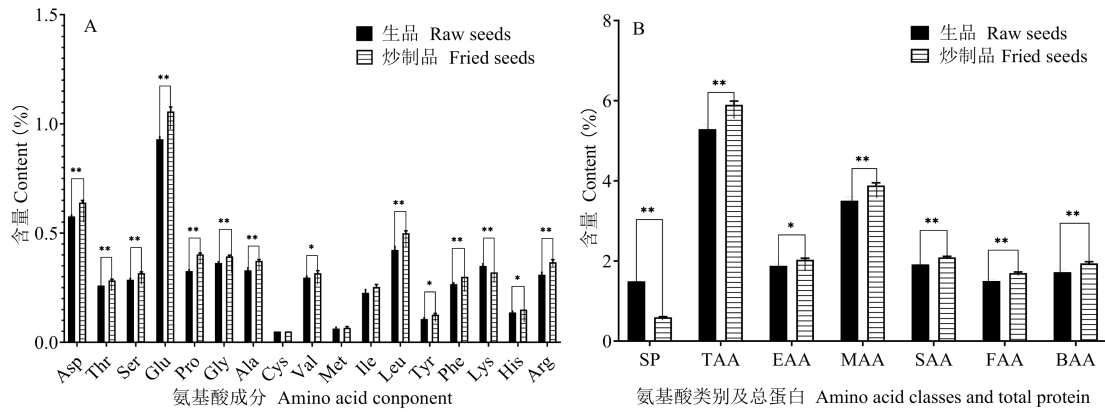


图 1 白术籽生品和炒制品中氨基酸 (A)、蛋白质及功能氨基酸 (B) 的含量

Fig.1 Content of amino acid(A), proteins and functional amino acids (B) in raw and fried *Atractylodes macrocephala* seeds

注：与生品比较，* $P \leq 0.05$ ，** $P \leq 0.01$ 。Note: Compared with raw seeds, * $P \leq 0.05$, ** $P \leq 0.01$.

2.2 蛋白质营养价值评价

2.2.1 与 FAO/WHO 标准比较

食物蛋白营养价值的优劣主要取决于所含必需氨基酸的种类、数量和组成比例，其组成比例越接近人体需要氨基酸的比例，其质量就越高，但不同植物蛋白质中各类蛋白质的氨基酸组成比例不尽相同。白术籽生品和炒制品中必需氨基酸与总氨基酸含量比值 (essential amino acid/total amino acid, EAA/TAA) 分别为 35.52% 和 34.41%，必需氨基酸含量与非必需氨基酸含量比值 (essential amino acid/nonessential amino acid, EAA/NAA) 分别为 55.03% 和 52.45%，略低于或接近理想蛋白标准 (FAO/WHO 标准 EAA/TAA=40%，EAA/NAA=60%)，表明白术籽蛋白质营养价值较高。

2.2.2 必需氨基酸比值系数

根据 FAO/WHO 所提出的氨基酸比值系数法，通过计算样品中 RAA、RC、SRC (见表 1) 可以帮助进一步分析白术籽炒制前后氨基酸的营养价值，SRC 值越接近 100，植物蛋白质营养价值越高。虽然炒制品白术籽样品的 SRC 值 (77.76) 较生品白术籽样品的 SRC 值 (80.41) 低，但仍处于一个较高的水平。

表 1 白术籽中各种必需氨基酸的 RAA、RC 及 SRC 比较

Table 1 Comparison on RAA, RC and SRC of essential amino acid composition of *A. macrocephala* seeds

必需氨基酸	生品	炒制品
Essential amino acid	Raw seeds	Fried seeds

	RAA	RC	RAA	RC
异亮氨酸 Ile	1.07	1	1.08	1.04
亮氨酸 Leu	1.14	1.06	1.2	1.15
赖氨酸 Lys	1.19	1.11	0.98	0.94
蛋氨酸+半胱氨酸 Met+Cys	0.61	0.57	0.55	0.53
苯丙氨酸+酪氨酸 Phe+Tyr	1.17	1.09	1.19	1.15
苏氨酸 Thr	1.22	1.14	1.2	1.15
缬氨酸 Val	1.12	1.04	1.08	1.04
SRC	80.41		77.76	

2.2.3 必需氨基酸指数

EAAI 是判定食物蛋白是否为优质蛋白的重要标准, EAAI 值越接近于 1, 食物蛋白与标准蛋白的必需氨基酸组成越接近, 营养价值就越高。白术籽生品和炒制品的必需氨基酸指数分别为 1.30 和 1.01, 与生品相比, 炒制后的白术籽的必需氨基酸指数更接近于 1, 表明炒制白术籽中蛋白质质优且更适合于食用。

2.2.4 与 FAO/WHO 氨基酸模式谱比较

白术籽炒制前后的各种 EAA 占 TAA 的比值是比较接近的, 除 Lys 在加热后下降超过 1 (见表 2)。将各种 EAA/TAA 与 FAO/WHO 推荐氨基酸模式谱相比较, 除 Met+Cys 的比值低于模式谱的标准 (3.5) 外, 其他各种必需氨基酸占氨基酸总量的比值均接近且略高于模式谱标准。结果表明无论是否加热处理, 白术籽的第一限制氨基酸均为 Met+Cys。

表 2 必需氨基酸与 FAO/WHO 推荐氨基酸模式谱比较

Table 2 Comparison of essential amino acid composition and FAO/WHO recommended pattern

必需氨基酸	FAO/WHO 标准模式	生品	炒制品
Essential amino acid	FAO/WHO standardized model	Raw seeds	Fried seeds
异亮氨酸 Ile	4	4.29	4.33
亮氨酸 Leu	7	7.98	8.4
赖氨酸 Lys	5.5	6.55	5.38
蛋氨酸+半胱氨酸 Met+Cys	3.5	2.15	1.93
苯丙氨酸+酪氨酸 Phe+Tyr	6	7.04	7.14
苏氨酸 Thr	4	4.89	4.78

上述结果表明白术籽中氨基酸种类丰富,所含蛋白质营养价值较高;炒制会使超过一半的蛋白质发生降解和氨基酸含量显著增加,相应的功能氨基酸含量也得到提高,但因氨基酸带来的口感变化不大。

2.3 挥发性成分分析

2.3.1 结构推测

按照“1.3.3.2”项下方法对生品和炒制品白术籽样品进行分析(见图2)。由图可知,炒制品主要色谱峰强度较生品相应色谱峰强度增加,特别是25~40 min内的色谱峰强度增加较显著,此外生品白术籽中还产生多个新的色谱峰。将检测的数据进行整理,再运用峰面积归一化法计算各色谱峰占总峰面积的百分比(见表3),在白术籽生品和炒制品中共检出挥发性成分40个,包括生品15个和炒制品检出的37个,它们共同含有的挥发性成分12个。

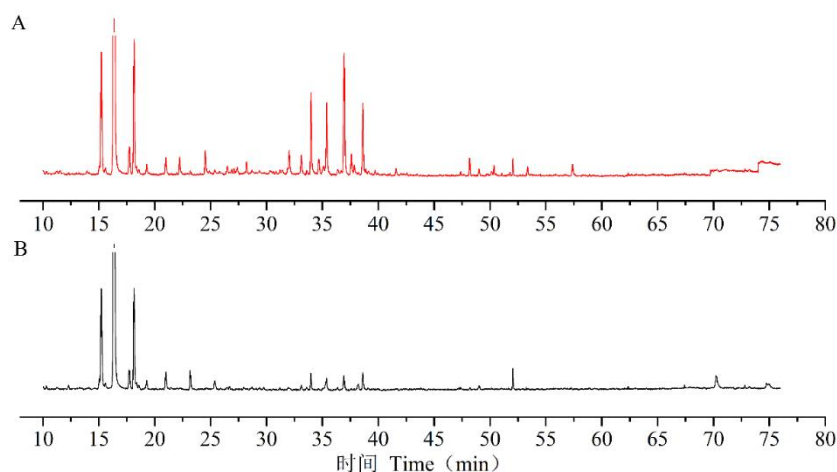


图2 生品和炒制品白术籽的GC-MS总离子流图

Fig. 2 GC-MS total ion chromatograms of raw and fired *A. macrocephala* seeds

注: A: 炒制品; B: 生品。Note: A: Fried seeds; B: Raw seeds.

通过NIST谱库检索,发现生品中挥发性成分中的主要类别是萜类成分,其峰面积占总峰面积的96.87%,包括单萜类成分5个(88.85%)和倍半萜类成分8个(8.02%,见表3);还有脂肪醇类(1.54%)、芳香烃类(1.59%)。炒制品中萜类成分(89.16%)仍是挥发性成分的主要类别,包括单萜类成分5个(66.39%)和倍半萜类成分10种(22.77%);还有吡咯类(0.49%)、吡嗪类(3.31%)、哌啶类(0.71%)、醇类(芳香醇类1.65%、脂肪醇类0.25%)、芳香烃类(0.73%)、芳香酮类(1.13%)、芳香醚类(0.33%)、芳香醛类(2.24%)。炒制前后白术籽中挥发性成分无论数量还是种类上都有着较大的变化,炒制后挥发性成分种

类更为丰富,但均以萜类化合物居多,特别是以 *D*-柠檬烯为代表的单萜类化合物占比较大。经过炒制处理白术籽所含挥发性化合物更加丰富,单萜类成分(β -月桂烯、*D*-柠檬烯、 β -水芹烯和 γ -松油烯)的相对含量有所降低,而倍半萜类成分(甲基-4-(6-甲基庚-5-烯-2-基)环己-1,3-二烯、 β -姜黄烯、(+)- γ -cadinene、 α -姜黄烯)的相对含量有所上升,提示萜类化合物对加热处理较为敏感,炒制使白术籽中萜类成分的结构发生重排或者结合态分解释放出游离态而导致含量发生改变^[13]。相较于生品,炒制品挥发性成分增加了吡嗪类成分、糠醛和糠醇等,可能是白术籽在炒制过程中由于 Maillard 反应所致^[14]。

表 3 炒制前后白术籽中挥发性成分分析

Table 3 Volatile components in *A. macrocephala* seeds before and after frying process

序号 No.	保留时间 t_R (min)	化合物名称 Compound	分子式 Molecular formula	相对百分含量	
				Relative content (%)	
				生品 Raw seeds	炒制品 Fried seeds
1	15.212	β -月桂烯 β -Myrcene	C ₁₀ H ₁₆	8.42	6.72
2	16.361	<i>D</i> -柠檬烯 <i>D</i> -Limonene	C ₁₀ H ₁₆	68.18	50.32
3	17.709	β -水芹烯 β -Phellandrene	C ₁₀ H ₁₆	2.05	1.43
4	18.140	γ -松油烯 γ -Terpinene	C ₁₀ H ₁₆	9.46	7.53
5	19.278	Menogene	C ₁₀ H ₁₆	—	0.39
6	19.280	异松油烯 Terpinolene	C ₁₀ H ₁₆	0.74	—
7	20.986	<i>P</i> -伞花烃 <i>P</i> -Cymene	C ₁₀ H ₁₄	1.59	0.73
8	22.212	2-甲基吡嗪 2-Methylpyrazine	C ₅ H ₆ N ₂	—	0.83
10	24.522	2,5-二甲基吡嗪	C ₆ H ₈ N ₂	—	1.17

		2,5-Dimethylpyrazine			
13	27.101	2-乙基-5-甲基吡嗪 2-Ethyl-5-methylpyrazine	C ₇ H ₁₀ N ₂	—	0.18
14	27.381	2,3,5-三甲基吡嗪 2,3,5-Trimethylpyrazine	C ₇ H ₁₀ N ₂	—	0.51
15	28.204	3-乙基-2,5-二甲基吡嗪 3-Ethyl-2,5-dimethylpyrazin	C ₈ H ₁₂ N ₂	—	0.62
		e			
9	23.176	1-己醇 1-Hexanol	C ₆ H ₁₄ O	1.54	0.12
12	26.885	蘑菇醇 1-Octen-3-ol	C ₈ H ₁₆ O	—	0.13
11	25.374	7- <i>epi</i> -Silphiperfol-5-ene	C ₁₅ H ₂₄	0.93	—
17	33.106	石竹烯 Caryophyllene	C ₁₅ H ₂₄	0.56	0.96
18	33.594	4a,8-Dimethyl-2-(prop-1-en-2-yl)-1,2,3,4,4a,5,6,7-octahydronaphthalene	C ₁₅ H ₂₄	—	0.23
19	33.968	甲基-4-(6-甲基庚-5-烯-2-基)环己-1,3-二烯 1-Methyl-4-(6-methylhept-5-en-2-yl)cyclohexa-1,3-diene	C ₁₅ H ₂₄	1.17	4.31
		e			
20	34.682	(1 <i>R</i> ,4 <i>R</i> ,5 <i>S</i>)-1,8-Dimethyl-4-(prop-1-en-2-yl)spiro[4.5]dec-7-ene	C ₁₅ H ₂₄	—	0.82
22	35.361	β -姜黄烯 β -Curcumene	C ₁₅ H ₂₄	1.06	4.42
23	36.918	(+)- γ -Cadinene	C ₁₅ H ₂₄	1.15	7.05

25	37.845	(+)- β -himachalene 朱栾倍半萜	C ₁₅ H ₂₄	—	0.29
26	38.206	4a,5-Dimethyl-3-(prop-1-en-2-yl)-1,2,3,4,4a,5,6,7-octahydronaphthalene α -姜黄烯	C ₁₅ H ₂₄	0.56	—
27	38.611	α -Curcumene β -榄香烯	C ₁₅ H ₂₂	1.33	3.73
28	38.889	(-)- <i>cis</i> - β -Elemene 苍术酮	C ₁₅ H ₂₄	—	0.24
38	52.037	Atractylon	C ₁₅ H ₂₀ O	1.26	0.72
16	32.027	糠醛 Furfural	C ₅ H ₄ O ₂	—	1.70
21	35.091	苯甲醛 Benzaldehyde	C ₇ H ₆ O	—	0.54
24	37.589	糠醇 Furfuranol	C ₅ H ₆ O ₂	—	1.12
29	39.715	5-甲基-2-呋喃甲醇 2-Furanmethanol, 5-methyl-	C ₆ H ₈ O ₂	—	0.18
31	47.365	苯甲醇 Benzyl alcohol	C ₇ H ₈ O	—	0.08
33	49.000	苯乙醇 Phenylethyl Alcohol	C ₈ H ₁₀ O	—	0.27
30	41.586	苯乙酮 Acetophenone	C ₈ H ₈ O	—	0.30
34	50.107	2(5H)-呋喃酮 2(5H)-Furanone	C ₄ H ₄ O ₂	—	0.16
36	51.027	2H-Pyran-2-one, tetrahydro-5,6-dimethyl-,	C ₇ H ₁₂ O ₂	—	0.06

<i>trans</i> -					
		2,3-二氢-3,5-二羟基-6-甲基			
		-4(H)-吡喃-4-酮			
40	57.378	4H-Pyran-4-one,	C ₆ H ₈ O ₄	—	0.61
		2,3-dihydro-3,5-dihydroxy-6			
		-methyl-			
32	48.170	4(H)-Pyridine, <i>N</i> -acetyl-	C ₇ H ₉ NO	—	0.71
		2-乙酰基吡咯			
35	50.351	2-Acetylpyrrole	C ₆ H ₇ NO	—	0.33
		吡咯-2-甲醛			
37	51.789	Pyrrole-2-carboxaldehyde	C ₅ H ₅ NO	—	0.16
		3,4-二甲氧基苯乙烯			
39	53.356	3,4-Dimethoxystyrene	C ₁₀ H ₁₂ O ₂	—	0.33

2.3.2 挥发性成分的风味特征解析

对生品和炒制品白术籽中已检出的挥发性成分的结构进行归类,其中种数最多的是倍半萜类化合物(12种)和单萜类化合物(6种),它们多具有特殊香气,如含量较高的 *D*-柠檬烯和 β -月桂烯等具有柑橘香和桔皮香^[15]; β -水芹烯呈现薄荷、松脂香气^[16]。其次是醇类和吡嗪类物质,如苯甲醇具有熟樱桃香、烤面包香、玫瑰花香、甜香等风味;1-己醇有香蕉味、花香、青草香、香草味;蘑菇醇有土壤香气、油脂香、花香、蘑菇香;吡嗪类物质均具有坚果味、可可味和泥土味^[17]。醛类和酮类成分中糠醛具有甜香味、烤面包味、焦糖味、杏仁味;苯甲醛具有坚果香和杏仁味;苯乙酮具有杏仁香、花香、甜香、山楂味、肉香、葡萄汁香^[18]。另外,根据挥发性有机化合物感官风味特征查询网站([http://www.the good scents company.com](http://www.the-good-scents-company.com))检索,2(5H)-呋喃酮具有黄油味,*P*-伞花烃具有柑橘香、辛辣味,2-乙酰基吡咯具有霉味、坚果味、茶香,吡咯-2-甲醛具有霉味和咖啡味,3,4-二甲氧基苯乙烯具有花香。

挥发性成分的数量和种类变化会产生不同的气味,使物质具有特殊的风味;炒制后白术籽挥发性成分数量和类别的增加是炒制白术籽闻起来更芳香和气味层次更丰富的根本原因。

3 讨论与结论

上述研究表明生品白术籽和炒制品白术籽氨基酸种类齐全，其总氨基酸含量低于枸杞、核桃、燕麦、荞麦、小麦、大麦^[19]，与水稻、山药^[20]比较接近；而相比较于榛子、角瓜子、葵花子、松子等坚果类食物来说，白术籽的氨基酸总量较高，表明白术籽作为零食开发有其一定的可行性。它们的 EAA/TAA 值与 EAA/NAA 值都与理想蛋白标准相接近，SRC 均处于较高的水平，EAAI 均接近于 1，表明白术籽氨基酸组成是较为均衡和合理，与人体中蛋白质的组成比较接近，属于优质蛋白，营养价值高，可用于相关产品的开发。若要对白术籽的营养价值进行综合全面的价值评价，白术籽中油脂、维生素和矿物质等营养成分分析还有待研究。

基于固相顶空微萃取及气质联用技术，从生品白术籽和炒制白术籽中共检出单萜类、倍半萜类、吡嗪类、醇类、酮类、芳香烃类、芳香醛类、哌啶类、吡咯类以及芳香醚类等多种挥发性成分，以单萜类和倍半萜类为主，它们可使白术籽呈柑橘香、桔皮香、柠檬味以及松香。白术籽中单萜类成分含量降低而倍半萜类成分含量有所增加，且新产生了糠醇、糠醛以及吡嗪类等成分，这些挥发性成分数量和种类的增加使白术籽具有甜香味、焦糖味、杏仁味以及坚果香味，共同构建了炒制白术籽的特征风味。与此同时，有研究证实，倍半萜类化合物是白术中含量最丰富的生物活性成分之一，具有显著的抗肿瘤、抗菌抗炎^[4]等作用，被认为未来具有良好的开发和利用的潜力。

综上，通过对白术籽生品和炒制品所含可溶性蛋白质、氨基酸以及挥发性成分的检测和分析，本研究认为白术籽中氨基酸种类齐全，蛋白质营养价值高，具有较高的食用、保健应用前景，且炒制加工可以提升白术籽的风味和改善食用口感，有利于促进白术植物资源的综合利用和创造高附加值产品。

参考文献

- 1 Liu J,Guo S,Duan JA,et al.Analysis and utilization value discussion of multiple chemical composition in different tissues of *Abelmoschus manihot*[J].China J Chin Mater Med(中国中药杂志),2016,41:3782-3791.
- 2 Zhao H,Miao MS.Analysis and reflection on comprehensive utilization of non-medicinal parts of Chinese materia medica[J].China J Tradit Chin Med Pharm(中华中医药杂志),2019,34:3589-3591.
- 3 Chinese Pharmacopoeia Commission.Pharmacopoeia of the People's Republic of China(中华人民共和国药典)[M].Beijing:China Medical Science and Technology Press,2020:107-108.
- 4 Zhang N,Tao Y,Li CY,et al.Research progress in chemical constituents and pharmacological effect of *Actractylodes macrocephala* Koidz[J].J Xinxiang Med Univ(新乡医学院学报),2023,40:579-586.
- 5 Zhang M,Cao GF,Li JL,et al.Effect of soil amendments on quality,morbidity and root soil enzyme activity of

- Atractylodes macrocephala*[J].J Chin Med Mater(中药材),2021,44:793-797.
- 6 Peng FL,Zhao Z,Liu HC,et al.Effect of storage temperature on the quality of *Atractylodes macrocephala* seeds with different moisture contents[J].J Chin Med Mater(中药材),2016,39:2198-2202.
 - 7 Hu CJ,Cheng LM,Shen ZH,et al.Key techniques of seed germination and establishment of root-rot model of *Atractylodes macrocephala*[J].J Zhejiang Agric Sci(浙江农业科学),2023,64:83-86.
 - 8 Wang YG,Yang GR,Ma XQ,et al.Study on interaction between coomassie brilliant blue G-250 and bovine serum albumin by fluorecence spectroscopy and molecular modeling[J] Spectrosc Spect Anal(光谱学与光谱分析),2017,37:2474-2479.
 - 9 GB/T 18246-2019 Determnation of Amino Acids in Feeds(饲料中氨基酸的测定)[S].Beijing:Standards Press of China,2020:3.
 - 10 Sun JJ,A LMS,Zhao JM,et al.Analysis of amino acid composition and six native Alfalfa Cultivars[J].Sci Agric Sin(中国农业科学),2019,52:2359-2367.
 - 11 Paul OO,Taofik SA,Samuel AO,et al.Nutritional profile,protein quality,and biological value of raw and roasted cashew kernels(*Anacardium occidentale*) grown in southwest Nigeria[J].Croatian J Food Sci Technol,2020,12:11-19.
 - 12 Yi ZR,Zhang RY,Wang JL,et al.Determination of volatile components in different parts of *Atractylodes macrocephala* Koidz. by HS-SPME-GC-MS[J].Nat Prod Res Dev(天然产物研究与开发),2022,34:1690-1698.
 - 13 Ma YQ,Zhang C,Deng TJ,et al.Research progress of glycoside bonded aroma compounds in fruits and their processed products[J].Food Ferment Ind(食品与发酵工业),2022,48:290-298.
 - 14 Li RL,Chen K,Xu D,et al.Preparation technology optimization and flavoring application of Maillard reaction flavor[J].Chem Reagents(化学试剂),2021,43:1224-1228.
 - 15 Wang RF,Liu B,Sun J,et al.Volatile aroma analysis of tangerine peel[J].Fine Chem(精细化工),2022,39:321-329,410.
 - 16 Peng C,Chang XX,Chen Z,et al.Analysis on aromatic components and specific aromatic components in different clones of *C. lansium* fruits[J].Non-wood Forest Res(经济林研究),2019,37:50-60.
 - 17 Zhang WG,Zhang Y,Yang XJ,et al.GC-MS analysis of volatile flavor substances in different varieties of roasted hullless barley[J].Food Sci(食品科学),2019,40:192-201.
 - 18 Zhang WG,Lan YL,Dang B.Effects of different processing methods on volatile flavor substances of quinoa[J].J Chin Cereals Oils Assoc(中国粮油学报),2022,37:51-58.

19 Wang J,Li XP,Liu L,et al.Principal component analysis and comprehensive evaluation of amino acids of oat and other four crops[J].J Triticeae Crops(麦类作物学报),2019,39:438-445.

20 Fang YY,Yao YH,Pu YA,et al.Analysis of amino—acids in four seeds of Chang Bai Mountain region[J].J Yanbian Univ:Nat Sci(延边大学学报:自然科学版),1998,2:33-37.

收稿日期: 2023-09-26 接受日期:

基金项目: 湖南省高新技术产业科技创新引领计划项目 (2020SK2033)

*通信作者 E-mail: zhengyj4@126.com