

白参菌复合小麦粉馒头及其淀粉消化性研究

何泽东, 沈秋莲, 冯 慧, 王灵艳, 赵玲新, 任达兵*, 孙丽平*

(昆明理工大学食品科学与工程学院, 昆明 650500)

摘要: 目的 探究白参菌(*Schizophyllum commune*)的理化性质, 同时探究白参菌馒头的物理特性和淀粉消化性。**方法** 测定白参菌的基本营养成分、滋味成分和水提取物抗氧化性。在营养价值、风味物质和水样抗氧化分析的基础上, 研制白参菌复合小麦粉馒头, 测定白参菌馒头的物理特性及消化性能。**结果** 白参菌中的粗蛋白、总可溶性糖、粗脂肪、粗灰分和蛋白质氨基酸的干基质量分数分别为 14.75%、14.06%、0.80%、3.46% 和 9.24%; 含有丰富的钾、钙和锌等必需矿物质元素。白参菌中琥珀酸含量为 359.01 $\mu\text{g/g}$, 游离氨基酸总量为 29.67 mg/g , 核苷酸总量为 11.14 mg/g , 是形成白参菌鲜味的主要物质。白参菌水提取物中总酚含量为 11.04 mg GAE/g 干重, 总糖含量为 14.06%, 以总酚计其在 3 种抗氧化体系中均表现出显著高于维生素 C 的抗氧化能力。随着白参菌粉添加量的增加, 白参菌馒头的硬度和咀嚼性增强, 葡萄糖释放量逐渐降低。掺入白参菌粉质量分数为 3% 和 5% 的馒头制品具有较好的感官特性。**结论** 白参菌是一种高蛋白低脂肪的健康食品, 掺入白参菌粉会改变馒头的质构特性, 可以显著抑制淀粉消化或控制葡萄糖向消化液中的释放。本研究为白参菌主粮化健康产品的研制提供了理论基础。

关键词: 白参菌; 营养评价; 滋味物质; 抗氧化活性; 质构特性; 淀粉消化

Study on the *Schizophyllum commune* composite wheat flour steamed bread and its starch digestibility

HE Ze-Dong, SHEN Qiu-Lian, FENG Hui, WANG Ling-Yan, ZHAO Ling-Xin,
REN Da-Bing*, SUN Li-Ping*

(Faculty of Food Science and Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, China)

ABSTRACT: Objective To explore the physical and chemical properties of *Schizophyllum commune*, and explore the physical properties and starch digestibility of the compound steamed bread. **Methods** The basic nutritional components, flavor components and antioxidant activity of water extract of *Schizophyllum commune* were determined. Based on its nutritional value, taste substances analysis and antioxidant analysis of water samples, the *Schizophyllum commune* composite wheat flour steamed bread was developed, and the physical and *in vitro* digestion characteristics of starch from the composite steamed bread were further studied. **Results** The dry basis content of

基金项目: 云南省重点研发课题项目(202202AG050009-02)、国家自然科学基金项目(31860421)

Fund: Supported by the Yunnan Major Scientific and Technological Projects (202202AG050009-02), and the National Natural Science Foundation of China (31860421)

*通信作者: 任达兵, 博士, 副教授, 主要研究方向为食品分析与检测。E-mail: rendabing425@kust.edu.cn

孙丽平, 博士, 教授, 主要研究方向为食品营养与安全控制。E-mail: lpsun@kmust.edu.cn

*Corresponding author: REN Da-Bing, Ph.D, Associate Professor, Faculty of Food Science and Engineering, Kunming University of Science and Technology, No.727, Jingming South Road, Chenggong District, Kunming 650500, China. E-mail: rendabing425@kust.edu.cn

SUN Li-Ping, Ph.D, Professor, Faculty of Food Science and Engineering, Kunming University of Science and Technology, No.727, Jingming South Road, Chenggong District, Kunming 650500, China. E-mail: lpsun@kmust.edu.cn

crude protein, total soluble sugar, crude fat, crude ash and protein amino acids in the *Schizophyllum commune* were 14.75%, 14.06%, 0.80%, 3.46% and 9.24%, respectively. The *Schizophyllum commune* was rich in essential mineral elements such as K, Ca and Zn. The content of succinic acid was 359.01 $\mu\text{g/g}$, the total content of free amino acids was 29.67 mg/g, and the total content of nucleotide was 11.14 mg/g. These components played an important role in the formation of *Schizophyllum commune* umami taste. The total phenolic content of water extract was 11.04 mg GAE/g dry weight, and the total sugar content was 14.06%. The water extract showed significant antioxidant activity *in vitro*, and the antioxidant capacity of the 3 kinds of antioxidant systems was significantly higher than that of vitamin C. The hardness and chewiness of steamed bread increased with the increase of *Schizophyllum commune* powder, and the glucose release decreased with the increase of powder. Steamed bread products with 3% and 5% of *Schizophyllum commune* powder had better sensory characteristics. **Conclusion** *Schizophyllum commune* is a healthy food with high protein and low fat. The addition of *Schizophyllum commune* powder will change the texture characteristics of steamed bread, it can significantly inhibit starch digestion or control the release of glucose into digestive fluid. This study provides a theoretical basis for the development of the main grain products of *Schizophyllum commune*.

KEY WORDS: *Schizophyllum commune*; nutritional evaluation; taste components; antioxidant activity; texture characteristics; starch digestion

0 引言

食用菌富含人体必需的营养成分和生物功能活性物质,加之其独特的鲜香风味备受消费者喜爱^[1]。同时,全面开发食用菌食品特别是食用菌在主粮食品中的应用,是践行“大食物观”、多途径开发食物资源、从微生物摄取能量和蛋白的主要途径。白参菌(*Schizophyllum commune*),又名裂褶菌,子实体呈菊花状,颜色灰偏白,质地柔嫩,滋味鲜美,且具有特殊浓郁的香气。其营养价值高,含有丰富的氨基酸、膳食纤维和人体必需的微量元素,也是一种优质的蛋白质来源。研究表明,白参菌含有多种活性成分如白参菌多糖、白参菌素和甾醇等,具有抑制肿瘤生长、增强机体免疫以及抗菌消炎等多种生理活性^[2]。

小麦粉馒头是我国居民最主要的主食品类,其含有大量糊化的淀粉颗粒,食用后在人体胃肠道消化快,产生的葡萄糖为人体供能^[3]。随着经济发展,我国市场食物供给充足,居民饮食种类更多质量更好。但是,随之而来的肥胖、高血压、高血脂、高血糖等代谢性慢性患病率飞速增加。馒头类食物中淀粉的消化与人体健康密切相关,极易消化释糖的馒头会造成人体血糖应答水平升高^[4]。我国目前总人口约有 14.1 亿,其中约 1.1 亿人被诊断患有糖尿病,中国已成为诊断患有糖尿病人数最多的国家^[5]。迄今为止,糖尿病是无法通过药物治愈的,控制饮食是控制糖尿病发生和发展的最有效措^[6]。在此情况下,针对喜食馒头的、又有罹患高血糖等慢性疾病风险的国民,开发低消化性能的馒头具有极重要的现实意义。众多学者也在致力于开发具有低消化性的主食,例如 ZHU 等^[7]研究表明添

加奇亚籽可以显著降低馒头的血糖生成指数;丁长河等^[8]使用鹰嘴豆粉替代部分小麦粉并加入菊粉和低聚木糖研制的馒头,属于低消化性食品且比普通馒头具有更高的营养价值。关于将食用菌粉掺入馒头的同类研究更侧重于对馒头加工工艺、配方和感官特性的探究和优化,如杜冉等^[9]研究了食用菌馒头粉的配方;张鹏辉等^[10]研究了添加金针菇粉对馒头品质的影响,而对馒头中淀粉消化释放葡萄糖方面的研究较少。目前,以白参菌为原料,在主粮化产品开发方面的探究较少,本研究在探究白参菌的理化性质和生物活性的基础上,测评了白参菌的掺入对馒头感官、质构和淀粉消化释糖的影响,旨在为白参菌主粮化产品的研制提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

市售新鲜白参菌,洗净切分后冷冻干燥,粉碎过 60 目的网筛,备用。

香雪美味富强粉(中粮集团有限公司);高活性干酵母(安琪酵母股份有限公司);人工胃液(货号: R4110)、人工小肠液(货号: R30384)、1,1-二苯基-2-苦基胍(1,1-diphenyl-2-picrylhydrazyl, DPPH)、2,4,6-三吡啶基三嗪[2,4,6-tris(2-pyridyl)-s-triazine, TPTZ]、抗坏血酸(vitamin C, VC)(纯度 $\geq 99\%$)(上海源叶生物科技有限公司); α -淀粉酶(酶活 3700 U/g,自芽孢杆菌提取)、糖化酶(酶活 100000 U/g,自黑曲霉提取)(北京索莱宝科技有限公司);葡萄糖氧化酶法测定试剂盒(E1010,北京普利莱基因技术有限公司);氨基酸标准品 H 型(和光纯药工业株式会社);甲酸(色谱纯,美国 FLUKA

公司); 乙腈(色谱纯, 德国 Merck 公司); 甲酸铵(色谱纯)、福林酚(生物纯)、没食子酸(纯度 $\geq 99\%$)(上海麦克林生化科技有限公司); 2,2'-联氮-双-3-乙基苯并噻唑啉-6-磺酸[2,2'-azino-bis(3-ethylbenzothiazoline-6-sulfonic acid), ABTS](纯度 $\geq 98\%$, 美国 Sigma 公司); 三氯化铁(分析纯, 天津市优谱化学试剂有限公司); 过硫酸钾、无水乙醇(分析纯, 天津致远公司)。

1.2 仪器与设备

LGJ-12 真空冷冻干燥机(北京松源华兴科技发展有限公司); BioTek Epoch2 酶标仪(美国伯腾仪器有限公司); TGL-20B 高速台式离心机(上海安亭科学仪器厂); L-8900 氨基酸自动分析仪(日本日立公司); TA-XT PLUS 质构仪(英国 Stable Micro Systems 公司); LCMS-8040 三重四极杆串联质谱仪(日本岛津公司); Mars 6 Xpress 微波消解仪(美国 CEM 公司); NovAA400p 原子吸收光谱仪(德国耶拿公司); T9 型双光速紫外可见分光光度计(北京普析通用仪器有限责任公司); AL204 型电子天平(精度 0.0001 g, 上海梅特勒-托利多仪器有限公司)。

1.3 实验方法

1.3.1 白参菌基本营养成分测定

水分测定: 参考 GB 5009.3—2016《食品中水分的测定》第一法直接干燥法, 结果以鲜重计量; 粗蛋白测定: 参考 GB 5009.5—2016《食品中蛋白质的测定》第一法微量凯氏定氮法; 粗脂肪含量测定: 参考 GB 5009.6—2016《食品中脂肪的测定》第一法索氏抽提法; 矿物质含量测定: 参考 GB 5009 系列, 采用微波消解-火焰原子吸收光谱法测定。

1.3.2 蛋白氨基酸测定及营养评价

准确称取 100 mg 样品于硬质玻璃水解管中, 加入 6 mL 6 mol/L HCl, 混匀, 拧口密封, 于 110°C 下水解 22 h。水解结束后用 10 mol/L NaOH 和 1 mol/L NaOH 调节水解液至 pH 2.2, 定容至 50 mL, 离心, 取上清液过 0.22 μm 滤膜, 滤液进行氨基酸组成分析。参照郑秀艳等^[11]的方法, 分别统计白参菌中的氨基酸总量(total amino acid, TAA)、必需氨基酸(essential amino acid, EAA)、非必需氨基酸(non-essential amino acid, NEAA)、鲜味氨基酸(flavor amino acid, FAA)、甜味氨基酸(sweet amino acid, SWAA)、苦味氨基酸(bitter amino acid, BIAA)和芳香族氨基酸(aromatic amino acid, AAA)的含量, 并根据世界卫生组织/联合国粮农组织(World Health Organization/Food and Agriculture Organization of the United Nations, WHO/FAO)修订的理想蛋白质人体必需氨基酸模式普(1973 版本)^[12]来评价白参菌蛋白质的营养价值。

1.3.3 白参菌滋味成分测定

(1) 有机酸含量的测定

取样品 0.2 g 于 10 mL 连盖离心管中, 加入 4 mL 蒸馏水, 涡旋 30 s, 超声 3 min, 95°C 水浴 5 min, 冷却后 10000 r/min

离心 15 min, 取上清液过 0.22 μm 的水膜后上机^[13]。

(2) 亲水性滋味成分含量的测定

取样品 0.5 g 于 50 mL 离心管中, 加入 10 mL 蒸馏水, 涡旋 30 s, 超声 3 min, 95°C 水浴 5 min, 冷却后 10000 r/min 离心 15 min, 取上清液过 0.22 μm 的水膜后上机^[14]。

1.3.4 白参菌水提取物的制备和测定

(1) 水提取物的制备

准确称取 1 g 样品于 50 mL 离心管中, 首先加入 30 mL 蒸馏水, 涡旋 30 s, 采用超声波辅助提取 5 min, 5000 r/min 离心 20 min, 收集上清液, 沉淀物再次加入 15 mL 蒸馏水, 重复上述的提取步骤, 合并两次离心后的上清液并定容至 50 mL, 得到水提取物溶液, 备用。

(2) 水提取物中总酚和总糖的测定

使用 Folin-Ciocalteu 比色法测定水提取物溶液中多酚的含量, 结果表达为 mg 没食子酸当量/g 干样(mg GAE/g DW)。使用苯酚-硫酸法测定水提取物溶液中多糖的含量。

(3) 水提取物对 DPPH·清除能力的测定

取稀释为不同浓度梯度的水提取物溶液 0.4 mL 于 5 mL 连盖离心管中, 加入 2 mL 0.1 mmol/L DPPH·甲醇溶液, 混匀, 室温条件下避光反应 0.5 h, 在波长 517 nm 下测定吸光值, 记为 $A_{\text{样品}}$ 。同时, 取相同体积的蒸馏水代替样品作为空白对照测定吸光值, 记为 $A_{\text{对照}}$ 。VC 作为阳性对照。用半抑制浓度(half maximal inhibitory concentration, IC_{50})表示提取物清除自由基的活性, IC_{50} 表示清除 50% 的自由基时样品的反应体系质量浓度($\mu\text{g}/\text{mL}$)。按照公式(1)计算 DPPH 自由基清除率。

$$\text{清除率}/\% = (1 - A_{\text{样品}}/A_{\text{对照}}) \times 100\% \quad (1)$$

(4) 水提取物对 ABTS⁺清除能力测定

将 5 mL 的 ABTS (7 mmol/L) 和 88 μL (140 mmol/L) 的过硫酸钾混合制成 ABTS⁺储备液, 室温下避光反应 12 h。测定前, 使用无水乙醇稀释该储备液, 稀释后的储备液在波长 734 nm 下的吸光值为 0.70 \pm 0.02(乙醇调零)。准确吸取 0.5 mL 稀释成不同浓度梯度的样品溶液与 4 mL ABTS⁺储备液混合, 于 30°C 水浴反应 6 min 后, 在波长 734 nm 下测定吸光值 $A_{\text{样品}}$ 。相同条件下测定 0.5 mL 水 + 4 mL ABTS⁺工作液的吸光值为 $A_{\text{对照}}$ 。以 VC 作为阳性对照。 IC_{50} 表示清除率为 50% 时样品反应体系质量浓度($\mu\text{g}/\text{mL}$)。按照公式(1)计算 ABTS⁺清除率。

(5) 水提取物 Fe^{3+} 还原能力的测定

采用 Fe^{3+} 还原能力(ferric ion reducing antioxidant power, FRAP)法测定水提取物的还原能力。取稀释为不同浓度梯度的样品溶液 150 μL 于 10 mL 离心管中, 加入 4.5 mL 用 TPTZ 试剂与氯化铁现配的 FRAP 工作液后摇匀, 于 37°C 水浴反应 10 min 后在波长 593 nm 下测定吸光值, 相同条件下以蒸馏水作为空白, VC 作为阳性对照。用半数有效浓度(concentration for 50% of maximal effect, EC_{50})来表示还原

能力达到 0.5 mmol/L 硫酸亚铁溶液在 593 nm 的吸光值时的样品反应体系质量浓度($\mu\text{g}/\text{mL}$)。

1.3.5 白参菌复合小麦粉馒头的制作

小麦粉与白参菌粉的总量为 100 g, 白参菌粉的添加量依次为总量的 1%、3%、5%、7%, 干酵母占总质量的 1%, 用温水化开后缓慢倒入混合粉中, 同时用筷子将混合粉搅成絮状, 揉成光滑面团, 常温发酵 1 h 后揉面排气, 整形后在相同条件下继续发酵 20 min, 冷水上锅蒸 30 min 得到白参菌馒头。

1.3.6 馒头的感官评价

感官评价小组由 10 位受过感官训练的同学组成, 根据色泽、表面光滑度、弹性、组织结构、香气、适口性、综合评价 6 个项目对白参菌馒头做出感官评价, 评价标准参考表 1。

表 1 白参菌馒头感官评价评分标准
Table 1 Sensory evaluation and scoring standard of *Schizophyllum commune* steamed bread

| 项目 | 满分 | 评分标准 |
|-------|------|---|
| 色泽 | 10 分 | 白参菌馒头呈灰褐色, 颜色分布均匀, 有光泽 9~10 分; 颜色分布不均匀, 稍有光泽 6~8 分; 颜色灰暗, 无光泽 2~5 分。 |
| 表面光滑度 | 10 分 | 表面光滑, 形状完整 8~10 分; 表面光滑度一般, 稍有褶皱 6~8 分; 表面粗糙, 有塌陷、气泡、裂痕 1~5 分。 |
| 弹性 | 15 分 | 按压后复原性好, 有弹性 13~15 分; 复原性较好, 有一定弹性 10~12 分; 复原性差, 弹性差 1~9 分。 |
| 组织结构 | 15 分 | 气孔细密且均匀, 呈海绵状 13~15 分; 气孔过于细密, 分布不均匀 10~12 分; 有大气孔, 结构粗糙 1~9 分。 |
| 香气 | 10 分 | 馒头在鼻子范围 2~3 cm 处, 能闻到白参菌的香气, 且味道适中 9~10 分; 香气味道较淡 6~8 分; 没有香气且有异味(发酵味、酸味)1~5 分。 |
| 适口性 | 20 分 | 有韧性, 有咬劲, 咀嚼时爽口不粘牙 16~20 分; 韧性和咬劲一般, 较爽口, 略微粘牙 10~15 分; 韧性和咬劲均较差, 不爽口、发粘 1~9 分。 |
| 综合评价 | 20 分 | 馒头总体感觉好: 16~20 分; 馒头总体感觉较好: 10~15 分; 馒头总体感觉差: 1~9 分。 |

1.3.7 馒头质构特性的测定

参照吕佳丽等^[15]的方法并稍作修改, 蒸好的馒头

冷却 30 min 后, 将其横向切割成 2 cm 厚的馒头片, 用 TA-XTplus 质构仪, 在 TPA 模式下用 P/36R 探头进行测定。测试参数为: 测前速度 2.0 mm/s, 测中速度 1.0 mm/s, 测后速度 2.0 mm/s, 压缩比 50%, 触发力 5.0 g, 保持时间 5.0 s。

1.3.8 馒头淀粉消化性的测定

基于实验室前期研究建立的微生态全仿生体外消化模型对馒头消化性进行测定^[16]。取馒头 0.5 g 于 50 mL 离心管中, 加入 5 mL 去离子水充分溶胀后用研磨机将馒头磨成糊状, 加入适量玻璃珠和 5 mL 人工胃液, 在 37°C、100 r/min 水浴振荡 1 h, 得到胃仿生消化物。将离心管中的胃仿生消化物用饱和 NaHCO_3 调节 pH 至 6.8 后加入 7 mL 人工小肠液, 以及加入新鲜配制的 α -淀粉酶溶液 18 mL (370 U/mL) 和 40 μL 糖化酶溶液(10000 U/mL), 混匀, 在 37°C、100 r/min 水浴振荡, 取 0、20、40、60、90、120、150、180 min 的小肠仿生消化液 0.5 mL 进行葡萄糖含量的测定。技术参数: 向 0.5 mL 小肠消化液中加入 6 mL 无水乙醇进行灭酶, 5000 r/min 离心 5 min 后取上清液进行葡萄糖含量的测定。根据文献^[17]与公式(2)计算食物在仿生消化过程中释放至消化液中的葡萄糖质量(mg)。

$$\text{葡萄糖释放质量(mg)} = \text{测定的葡萄糖含量(mg/mL)} \times \text{消化液体积(mL)} \quad (2)$$

1.4 数据处理

所有实验至少 3 次测定后取平均值。数据统计处理采用 SPSS Statistics 22 软件, 差异显著水平为 $P < 0.05$, 图形绘制采用 Origin 2022 软件。

2 结果与分析

2.1 白参菌基本营养成分分析

白参菌的基本成分的含量如表 2 所示。有关文献报道, 新鲜食用菌的含水率高达 70%~95%^[18]。由表 2 可知, 白参菌的水分含量为 69.69%(以湿重计), 其水分含量明显低于其他的人工栽培食用菌。水分含量越低, 制备得到的干物质越多, 其经济效益更高。白参菌中的粗蛋白和水溶性总糖的含量分别为 14.75%和 14.06%(以干重计), 灰分含量为 3.46%。粗脂肪的含量低, 仅有 0.80%。白参菌中矿物质元素的含量如表 3 所示。在测定的白参菌中人体必需矿质元素中 K 含量最高, 为 13560.00 mg/kg 干重, Mn 含量最低, 为 2.85 mg/kg 干重。整体上, 白参菌呈现三高二低的健康食品特性, 即高蛋白、高真菌多糖、高钾; 低脂肪、低钠。

表 2 白参菌基本营养成分含量
Table 2 Proximate composition content of *Schizophyllum commune*

| | 水分/%(以湿重计) | 水提取物总酚/(mg GAE/g 干重) | 粗蛋白/%(以干重计) | 水溶性总糖/%(以干重计) | 粗脂肪/%(以干重计) | 粗灰分/%(以干重计) |
|-----|------------|----------------------|-------------|---------------|-------------|-------------|
| 白参菌 | 69.69±0.17 | 11.04±0.18 | 14.75±0.85 | 14.06±0.13 | 0.80±0.06 | 3.46±0.03 |

表 3 白参菌中人体所需矿物质含量(mg/kg 干重)
Table 3 Mineral content required by human body in *Schizophyllum commune* (mg/kg dry weight)

| 矿物质 | 含量 | 矿物质 | 含量 |
|-----|----------------|-----|--------------|
| K | 13560.00±32.50 | Zn | 107.00±11.38 |
| Na | 77.80±2.34 | Fe | 39.10±2.53 |
| Ca | 194.00±6.98 | Mn | 2.85±0.01 |
| Mg | 39.10±4.67 | Cu | 3.20±0.01 |

2.2 白参菌蛋白氨基酸组成分析

白参菌中蛋白氨基酸组成及含量分析如表 4 所示。白参菌中检出的蛋白氨基酸总量为 9.24 g/100 g 干重, 各蛋白氨基酸含量从高到低为 Glu、Asp、Arg、Ile、Lys、Ala、Val、Ser、Gly、Thr、Leu、His、Phe、Tyr、Cys、Met。天冬氨酸和谷氨酸作为最主要的鲜味氨基酸, 有助于食用菌鲜美味道的形成, 这也可能是白参菌鲜味突出的原因^[19]。白参菌中检出的必需氨基酸(Met、Val、Lys、Ile、Phe、Leu、Thr)的含量为 3.18 g/100 g, 非必需氨基酸(Asp、Glu、Ser、Gly、Ala、Cys、Tyr、His、Arg)的含量为 5.96 g/100 g。WHO/FAO 提出的理想氨基酸模式标准指出食物蛋白质中的 EAA/TAA 为 40%左右, EAA/NEAA 在 60%时, 其被人体消化吸收时的营养价值更高。白参菌的 EAA/TAA 为 34.42%, EAA/NEAA 为 53.36%, 具有较高的营养吸收价值, 可作为开发食用菌健康增益产品的原料选择。

表 4 白参菌蛋白氨基酸组成及含量(g/100 g 干重)
Table 4 Amino acid composition and content of *Schizophyllum commune* (g/100 g dry weight)

| 氨基酸 | 含量 | 氨基酸 | 含量 |
|-----------|-----------|----------|-----------|
| 天冬氨酸(Asp) | 0.92±0.02 | 酪氨酸(Tyr) | 0.26±0.01 |
| 谷氨酸(Glu) | 1.97±0.05 | 组氨酸(His) | 0.35±0.03 |
| 丝氨酸(Ser) | 0.46±0.01 | 精氨酸(Arg) | 0.81±0.01 |
| 甘氨酸(Gly) | 0.46±0.01 | TAA | 9.24±0.37 |
| 丙氨酸(Ala) | 0.62±0.02 | EAA | 3.18±0.16 |
| 甲硫氨酸(Met) | 0.08±0.01 | NEAA | 5.96±0.19 |
| 缬氨酸(Val) | 0.56±0.04 | FAA | 2.89±0.07 |
| 赖氨酸(Lys) | 0.67±0.02 | SWAA | 2.00±0.06 |
| 异亮氨酸(Ile) | 0.67±0.04 | BIAA | 3.21±0.22 |
| 苯丙氨酸(Phe) | 0.33±0.02 | AAA | 0.70±0.05 |
| 亮氨酸(Leu) | 0.42±0.03 | EAA/TAA | 34.42% |
| 苏氨酸(Thr) | 0.45±0.02 | EAA/NEAA | 53.36% |
| 半胱氨酸(Cys) | 0.11±0.03 | FAA/TAA | 31.28% |

2.3 有机酸含量分析

白参菌中有机酸测定结果如表 5 所示。一共检测到 9 种有机酸, 含量范围在 1.36~359.01 μg/g 之间, 其中, 琥珀酸含量最高, 为 359.01 μg/g, 其次是奎宁酸和柠檬酸, 分

别是 243.89 μg/g 和 243.36 μg/g。有研究表明琥珀酸对食用菌的风味起着重要作用^[20], FUJITA 等^[21]研究口蘑中的有机酸, 发现琥珀酸和草酸约占总有机酸量的 63.8%。陈万超等^[22]研究不同品种香菇中子实体中有机酸的含量, 发现有机酸主要以琥珀酸和苹果酸为主。

表 5 白参菌中有机酸的线性方程和含量
Table 5 Linear equations and content of organic acid in *Schizophyllum commune*

| 名称 | 线性方程 | r^2 | 含量/(μg/g 干重) |
|--------|--------------------|--------|--------------|
| 奎宁酸 | $Y=32237X-5552.1$ | 0.9988 | 243.89±3.88 |
| L-抗坏血酸 | $Y=249.26X+290164$ | 0.9982 | 191.54±86.43 |
| 丁二酸酐 | $Y=6214.2X+2502.5$ | 0.9996 | 38.88±2.75 |
| 琥珀酸 | $Y=37647X-7409.3$ | 0.9990 | 359.01±2.99 |
| 柠檬酸 | $Y=220556X-21639$ | 0.9979 | 243.36±2.80 |
| 富马酸 | $Y=1456777X+19103$ | 0.9986 | 1.77±0.08 |
| 马来酸 | $Y=1485752X+21639$ | 0.9994 | 1.36±0.08 |
| 乌头酸 | $Y=812632X-57857$ | 0.9993 | 10.04±0.94 |
| 莽草酸 | $Y=169807X-7428.1$ | 0.9993 | 11.89±0.71 |

2.4 亲水性滋味成分含量分析

白参菌中亲水性滋味成分分析含量如表 6 所示。一共检测到 35 种亲水性物质, 主要包括核苷酸、游离氨基酸、核苷和生物碱等物质。核苷酸和游离氨基酸对食品风味的形成具有重要作用^[23-25]。游离氨基酸的总量为 29.67 mg/g, 其中含量最高的是谷氨酸, 为 4.12 mg/g。谷氨酸作为鲜味氨基酸之一, 对食用菌的鲜味具有一定的贡献作用。核苷酸总量为 11.14 mg/g, 其中含量最高的是尿嘧啶核苷酸, 为 3.86 mg/g, 含量最少的是黄嘌呤核苷酸, 为 0.27 mg/g。律诗等^[26]对 9 种食用菌的核苷酸含量进行测定, 研究结果表明这 9 种食用菌核苷酸含量范围在 4.36~79.85 mg/g 之间。

2.5 白参菌水提取物抗氧化评价

对白参菌水提取物的总酚和总糖含量进行测定, 发现白参菌中总酚含量为(11.04±0.18) mg GAE/g 干重, 水溶性总糖含量为 14.06%。

并且, 白参菌水提物的体外抗氧化活性均与白参提取物中的多酚及多糖浓度呈显著正相关, 即显著量效关系。根据其量效关系, 分别计算了以多酚和多糖为计量基础的 50%清除率/抑制率(IC₅₀/EC₅₀)的浓度, 如表 7 所示。可以发现, 以多酚为计量基础, 其清除 ABTS⁺和 DPPH·的 IC₅₀ 值分别为 0.218 μg/mL 和 1.219 μg/mL, 同时也表现出较强的还原能力, 其 EC₅₀ 值为 0.372 μg/mL。以多糖为计量基础, 其清除 ABTS⁺和 DPPH·的 IC₅₀ 值分别为 5.445 μg/mL 和 30.944 μg/mL, EC₅₀ 值为 9.480 μg/mL。以多酚或多糖为计量基础, 白参菌水提取物都表现出了较强的体外抗氧化活性, 尤其是以多酚为计量基础, 发现其抗氧化活性优于一些同

表 6 白参菌亲水性滋味成分含量(mg/g 干重)
Table 6 Content of hydrophilic taste components of *Schizophyllum commune* (mg/g dry weight)

| 名称 | 含量 | 名称 | 含量 | 名称 | 含量 |
|---------|-----------|--------|-----------|----------------|------------|
| 腺嘌呤 | 1.01±0.13 | 胞嘧啶核苷酸 | 1.69±0.03 | 蛋氨酸 | 0.45±0.06 |
| 胞嘧啶 | 0.04±0.01 | 天冬酰胺 | 0.94±0.07 | γ -氨基丁酸 | 1.27±0.05 |
| 次黄嘌呤 | 0.05±0.00 | 谷氨酰胺 | 2.31±0.03 | 高丝氨酸 | 0.23±0.00 |
| 胞嘧啶核苷 | 1.22±0.18 | 组氨酸 | 0.45±0.01 | 异亮氨酸 | 3.26±0.43 |
| 腺嘌呤核苷 | 2.39±0.10 | 苏氨酸 | 0.17±0.01 | 缬氨酸 | 2.32±0.16 |
| 尿嘧啶核苷 | 1.26±0.16 | 丙氨酸 | 2.25±0.06 | 精氨酸 | 0.72±0.02 |
| 黄嘌呤核苷 | 0.33±0.03 | 苯丙氨酸 | 0.03±0.00 | 色氨酸 | 0.04±0.00 |
| 次黄嘌呤核苷 | 0.39±0.01 | 赖氨酸 | 3.97±0.07 | 酪氨酸 | 0.03±0.00 |
| 黄嘌呤核苷酸 | 0.27±0.01 | 亮氨酸 | 2.78±0.23 | 天冬氨酸 | 1.74±0.12 |
| 次黄嘌呤核苷酸 | 0.88±0.02 | 丝氨酸 | 1.52±0.03 | 总生物碱 | 1.10±0.14 |
| 鸟嘌呤核苷酸 | 2.17±0.03 | 脯氨酸 | 0.14±0.01 | 总核苷 | 5.58±0.50 |
| 腺嘌呤核苷酸 | 2.27±0.03 | 谷氨酸 | 4.12±0.26 | 总游离氨基酸 | 29.67±1.72 |
| 尿嘧啶核苷酸 | 3.86±0.19 | 甘氨酸 | 0.93±0.05 | 总核苷酸 | 11.14±0.32 |

类型研究, 例如孙丽平等^[27]研究的 6 种牛肝菌多酚提取物对 DPPH·清除能力比 VC 低。而白参菌水提物在 DPPH·清除能力和 FRAP 还原能力两种抗氧化体系中的多酚抗氧化活性与 VC 无显著性差异, 且在 ABTS⁺·抗氧化体系中的抗氧化活性显著高于 VC。可能是由于白参菌中的水溶性多酚组分较多, 抗氧化活性较好^[28]。由此, 可以推测, 白参菌中的水提多酚和水提多糖均具有一定的抗氧化活性, 是开发白参菌健康增益食品的重要物质基础。

表 7 白参菌水提物在不同体系中的抗氧化活性($\mu\text{g}/\text{mL}$)
Table 7 Antioxidant activity of water extracts from *Schizophyllum commune* in different systems ($\mu\text{g}/\text{mL}$)

| 样品/阳性对照 | ABTS ⁺ ·清除能力 (IC ₅₀) | DPPH·清除能力 (IC ₅₀) | FRAP 还原能力 (EC ₅₀) |
|---------|---|-------------------------------|-------------------------------|
| 水提多酚 | 0.218±0.004 ^c | 1.219±0.030 ^b | 0.372±0.013 ^b |
| 水提多糖 | 5.445±0.060 ^a | 30.944±0.506 ^a | 9.480±0.326 ^a |
| VC | 1.942±0.019 ^b | 1.776±0.003 ^b | 0.799±0.002 ^b |

注: 同列数据后的不同小写字母表示具有显著差异($P<0.05$), 下同。

表 8 白参菌复合量对馒头感官品质的影响
Table 8 Effects of *Schizophyllum commune* on sensory quality of steamed bread

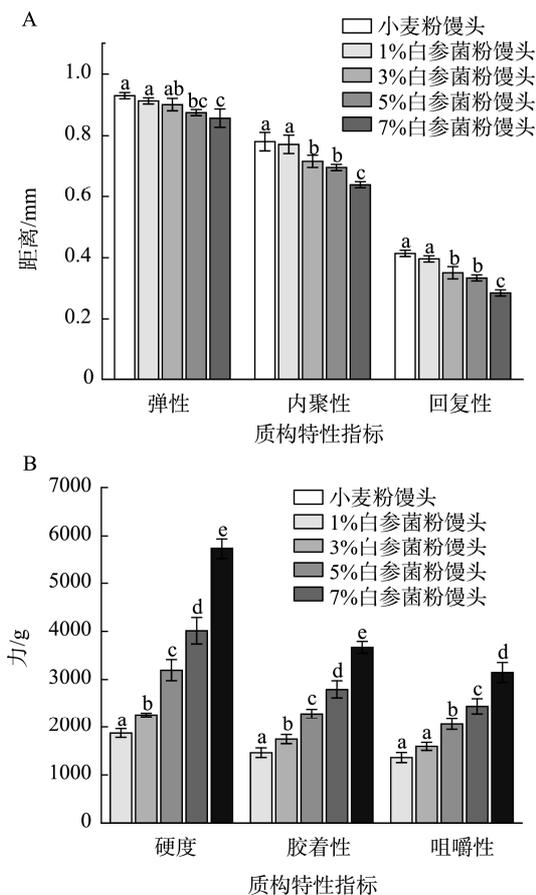
| 添加量% | 色泽 (10 分) | 表面光滑度 (10 分) | 弹性 (15 分) | 组织结构 (15 分) | 香气 (10 分) | 适口性 (20 分) | 综合评价 (20 分) | 总分 (100 分) |
|------|-----------------------|----------------------|-----------------------|-----------------------|----------------------|-----------------------|------------------------|------------------------|
| 0 | 7.9±0.7 ^{ab} | 8.5±0.9 ^a | 11.0±1.1 ^a | 11.6±1.1 ^a | 6.2±0.9 ^b | 15.0±1.9 ^a | 15.0±0.7 ^{ab} | 75.2±2.7 ^{ab} |
| 1 | 8.2±1.2 ^{ab} | 9.1±1.0 ^a | 11.0±1.9 ^a | 12.5±2.0 ^a | 6.5±0.8 ^b | 15.4±1.7 ^a | 16.9±1.4 ^a | 79.6±5.5 ^a |
| 3 | 8.7±0.8 ^b | 9.1±0.5 ^a | 11.9±2.4 ^a | 12.8±1.9 ^a | 7.1±0.8 ^b | 15.9±2.1 ^a | 16.6±1.1 ^a | 82.1±6.1 ^a |
| 5 | 7.5±1.4 ^a | 7.2±0.7 ^b | 12.6±2.8 ^a | 12.1±2.0 ^a | 8.3±1.3 ^a | 16.1±2.9 ^a | 16.4±2.6 ^a | 80.2±11.3 ^a |
| 7 | 5.9±1.3 ^c | 5.8±1.0 ^c | 11.3±2.4 ^a | 10.9±2.0 ^a | 8.1±1.2 ^a | 14.4±3.1 ^a | 14.3±2.6 ^b | 70.7±9.1 ^b |

2.6 白参菌馒头感官评价

表 8 为白参菌复合量对馒头感官品质的影响。结果表明不同添加量白参菌馒头的感官评价存在显著性差异 ($P<0.05$)。感官评价考量了色泽、表面光滑度、弹性、组织结构、香气、适口性以及综合评价等 7 个指标。结果显示, 随着白参菌粉添加量的提高, 各项指标的得分整体呈现一个先上升后下降的趋势, 推测可能是因为随着白参菌粉添加量的提高, 使馒头中的核苷酸和游离氨基酸含量随之增多, 赋予了馒头更强烈的鲜味和独特的滋味^[29]。过量加入蘑菇粉可能会破坏面粉原有的面筋结构, 在面团制作时会使面团面筋含量降低, 从而影响淀粉形成完整的面筋结构, 造成馒头整体品质的下降。从感官评价的总体得分来看, 添加量为 3% 和 5% 的白参菌馒头分数最高且两组之间没有显著性差异, 分别为 82.1 分和 80.2 分, 而添加量为 7% 的白参菌馒头分数最低, 为 70.7 分, 比空白组的分数更低。因此, 白参菌粉添加量 3% 和 5% 的白参菌馒头更容易被消费者所接受。

2.7 白参菌馒头质构性质分析

图 1 为不同添加量白参菌馒头质构仪分析的结果。综合考量了硬度、弹性、内聚性、胶着性、咀嚼性和回复性 6 个指标。从图 1 的结果来看,随着白参菌粉添加量的增加,馒头的硬度、胶着性和咀嚼性呈现上升的趋势,而弹性、内聚性和回复性呈现下降的趋势。硬度和咀嚼性是考量馒头品质的重要指标,白参菌粉添加量的提高会影响这两个指标,分析原因可能是白参菌粉的加入会影响面筋蛋白结构的完整性,面筋基质被稀释以及纤维含量的增加,使馒头的硬度和咀嚼性都随着精制面粉被逐渐替代而增加。这一研究结果与郭文滔等^[30]一致,随着葛根粉添加量的提高,馒头的硬度和咀嚼性也不断提高,其原因可能是葛根粉的加入阻碍了面筋蛋白结构的形成,导致面筋蛋白的含量减少。此外,加入蘑菇粉会提高馒头中有机酸的含量,有研究表明,有机酸可以促进面包面团中酵母菌的活性,有助于提高其产气能力,然而,它对谷蛋白网络有减弱的作用,会导致气体保留能力的下降,因此过量加入蘑菇粉会对馒头的质构产生负面影响^[31]。



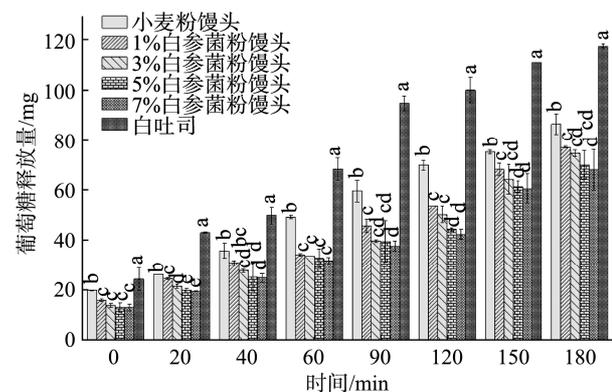
注:不同小写字母代表在同一测定指标下不同样品之间具有显著性差异($P < 0.05$)。

图 1 白参菌添加量对馒头质构的影响

Fig.1 Effects of addition of *Schizophyllum commune* on texture of steamed bread

2.8 淀粉消化性研究

图 2 为不同添加量的白参菌馒头以及空白对照组体外淀粉消化性结果。由图 2 可知,随着消化的进行,消化液中的葡萄糖含量整体呈现一个上升的趋势。在相同消化时间内,消化液中葡萄糖含量越高,表明更多的淀粉被消化水解成了葡萄糖,从而更容易被人体消化吸收^[32]。如图 2 所示,在每一消化时间阶段里,白吐司的葡萄糖释放量都显著高于其他馒头组,而添加白参菌粉组的馒头基本上显著地比空白对照组具有更低的葡萄糖释放量($P < 0.05$),且添加量越高,消化液中的葡萄糖释放量越少。添加量 7% 的白参菌粉馒头的葡萄糖释放量最低,平均只有白吐司的 48.61% 左右,其次为 5% 的白参菌粉馒头,葡萄糖释放量为白吐司的 49.80% 左右,添加量为 5% 和 7% 的白参菌粉馒头的葡萄糖释放量之间没有显著性差异。可以看出添加白参菌粉会对馒头中的淀粉消化起到显著的抑制效果,且随着添加量的增加这种抑制效果呈现一定的增强趋势。该结果与 WANG 等^[33]的研究结果相似,其研究发现添加香菇茎粉,可使体外消化后释放的还原糖显著降低。董晓琳等^[34]研究发现添加甘薯叶粉会对面包中的淀粉消化起抑制作用,且这种抑制作用会随着添加量的增加而增强,其原因可能是甘薯叶中含有膳食纤维和多酚会抑制淀粉消化。TANG 等^[35]研究指出蛋白质与淀粉结合在一起,也会影响淀粉酶与淀粉的反应。白参菌中含有蛋白质、多酚和膳食纤维等。其多酚物质会降低淀粉的水解,减缓葡萄糖的生成;将白参菌加入馒头中,会提高膳食纤维含量,可能在一定程度上抑制了淀粉消化^[36]。膳食纤维难以被人体消化,且在糊化后具有一定的胶凝特性,从而使基底形成一定的网络结构,阻碍酶与淀粉的反应,进而抑制葡萄糖的释放。因此,添加了白参菌粉的馒头比普通馒头以及白吐司的消化性更低,释放葡萄糖量更少。



注:不同小写字母代表在同一消化阶段不同样品的葡萄糖释放量之间具有显著性差异($P < 0.05$)。

图 2 白参菌添加量对馒头淀粉消化性的影响

Fig.2 Effects of addition of *Schizophyllum commune* on starch digestibility of steamed bread

3 结 论

本研究表明白参菌是一种高蛋白低脂肪的健康食品。菌体中对滋味有贡献的物质, 如鲜味氨基酸、琥珀酸、游离氨基酸、核苷酸等含量较高, 可能对于白参菌的风味形成起着重要作用。菌体水提取物中的多酚和多糖物质在体外抗氧化评价体系中均表现出很高的抗氧化性能, 进一步表明白参菌可被开发为对人体健康增益的食品。白参菌添加到馒头中, 添加量为 3%~5% 可被消费者认可和接受。白参菌的添加降低了馒头中淀粉的消化性, 且添加量越大, 消化液中检出的葡萄糖释放量越低, 表明白参菌可用于面粉制品, 不仅能增加面粉制品的营养价值, 还能降低面粉中淀粉的消化性。未来还需要进一步探究白参菌降低淀粉消化性的机制, 以发掘白参菌更高的开发价值。

参考文献

- [1] 饶克诚, 黄文, 王益, 等. 食用菌品质评价因素及保鲜技术研究进展[J/OL]. 食品工业科技: 1-16. [2023-03-22]. DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2022110107
- RAO KC, HUANG W, WANG Y, *et al.* Research advances on quality evaluation factors and preservation technology of edible mushrooms [J/OL]. *Sci Technol Food Ind*: 1-16. [2023-03-22]. DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2022110107
- [2] 贺凤, 黄龙花, 刘远超, 等. 裂褶菌多糖的研究进展[J]. 食用菌学报, 2016, 23(2): 88-93.
- HE F, HUANG LH, LIU YC, *et al.* Progress in *Schizophyllum* research [J]. *Acta Edulis Fungi*, 2016, 23(2): 88-93.
- [3] EDWARDS CH, GRUNDY MML, GRASSBY T, *et al.* Manipulation of starch bioaccessibility in wheat endosperm to regulate starch digestion, postprandial glycemia, insulinemia, and gut hormone responses: A randomized controlled trial in healthy ileostomy participants [J]. *Am J Clin Nutr*, 2015, 102(4): 791-880.
- [4] SHAO SB, LI EP, YU SY, *et al.* Subtle differences in starch fine molecular structure are associated with large differences in texture and digestibility of Chinese steamed bread [J]. *Food Hydrocolloid*, 2023, 134: 108090.
- [5] International Diabetes Federation. IDF Diabetes Atlas, 10th edition [EB/OL]. [2021-12-06]. <https://www.diabetesatlas.org/en/resources/> [2023-06-19].
- [6] 魏芷茜, 欧雨嘉, 汤俊杰, 等. 淀粉消化的影响因素及其速率调控的研究进展[J]. 福建农林大学学报(自然科学版), 2022, 51(3): 289-297.
- WEI ZX, OU YJ, TANG JJ, *et al.* Research progress on the influencing factors of starch digestion and regulation of digestion rate [J]. *J Fujian Agric Forest Univ (Nut Sci Ed)*, 2022, 51(3): 289-297.
- [7] ZHU F, CHAN C. Effect of chia seed on glycemic response, texture, and sensory properties of Chinese steamed bread [J]. *LWT*, 2018, 98: 77-84.
- [8] 丁长河, 张金叶, 高雅君. 低 GI 馒头的工艺优化及营养评价[J]. 食品科技, 2022, 47(3): 175-181.
- DING CH, ZHANG JY, GAO YJ. Process optimization and nutritional evaluation of low GI steamed bread [J]. *Sci Technol Food*, 2022, 47(3): 175-181.
- [9] 杜冉, 贾春晓, 王世雄, 等. 食用菌馒头粉的配方设计及其品质改良[J]. 食品工业科技, 2019, 40(24): 144-151.
- DU R, JIA CX, WANG SX, *et al.* The design of the formula for edible mushroom steamed bread flour and its quality improvement [J]. *Sci Technol Food Ind*, 2019, 40(24): 144-151.
- [10] 张鹏辉, 聂远洋, 李波. 添加金针菇粉和山药粉对馒头品质的影响[J]. 中国食用菌, 2021, 40(5): 79-86.
- ZHANG PH, NIE YY, LI B. Effect of adding *Flammulina velutipes* powder and yam powder on the quality of steamed bread [J]. *Edible Fungi China*, 2021, 40(5): 79-86.
- [11] 郑秀艳, 黄磊, 王培, 等. 红托竹荪菌托和冬荪菌托的营养价值评价及抗氧化能力分析[J]. 食品安全质量检测学报, 2022, 13(13): 4374-4382.
- ZHENG XY, HUANG L, WANG P, *et al.* Evaluation of nutritional values and antioxidant capacities of *Dictyophora rubrovalvata* volva and *Phallus impudicus* L. volva [J]. *J Food Saf Qual*, 2022, 13(13): 4374-4382.
- [12] FAO/WHO. Energy and protein requirements [R]. FAO Nutrition Meeting Report Series, 1973.
- [13] 施丽娟, 陈宁, 王丹, 等. 超高效液相色谱-三重四极杆串联质谱法定量分析云南大叶种茶酚类成分[J]. 食品科学, 2022, 43(8): 271-280.
- SHI LJ, CHEN N, WANG D, *et al.* Quantitative and comparative studies on phenolic constituents in different types of Yunnan large leaf tea based on validated ultra-high performance liquid chromatography-triple quadrupole-tandem mass spectrometry [J]. *Food Sci*, 2022, 43(8): 271-280.
- [14] WANG D, SHI LJ, FAN XN, *et al.* Development and validation of an efficient HILIC-QQQ-MS/MS method for quantitative and comparative profiling of 45 hydrophilic compounds in four types of tea (*Camellia sentences*) [J]. *Food Chem*, 2022, 371: 131201.
- [15] 吕佳丽, 庄永亮, 孙丽平. 不同添加量啤酒糟对面包品质的影响[J]. 食品与发酵工业, 2022, 48(22): 201-205.
- LV JL, ZHUANG YL, SUN LP. Effect of added amounts of brewer's spent grain on the quality of bread [J]. *Food Ferment Ind*, 2022, 48(22): 201-205.
- [16] ZHANG TT, TIAN Z, SUN LP, *et al.* Effect of different cadmium levels in *Boletus griseus* on bioaccessibility, bioavailability, and intestinal flora by establishing a complete bionic digestion system *in vitro* [J]. *J Food Sci*, 2022, 87(8): 3677-3689.
- [17] ZHANG Q, YU JT, LI K, *et al.* The rheological performance and structure of wheat/acorn composite dough and the quality and *in vitro* digestibility of its noodles [J]. *Foods*, 2021, 10(11): 2727.
- [18] 张越翔, 刘静, 吴小恬, 等. 食用菌干燥技术研究进展[J]. 中国果菜, 2022, 42(1): 24-33.
- ZHANG YX, LIU J, WU XT, *et al.* Research progress on drying technology of edible fungus [J]. *China Fruit Veg*, 2022, 42(1): 24-33.
- [19] SHEN QL, SUN LP, HE ZD, *et al.* Isolation, taste characterization and molecular docking study of novel umami peptides from *Lactarius volemus* (Fr.) [J]. *Food chem*, 2022, 401: 134137.
- [20] MAGDZIAK Z, SIWULSKI M, MLECZEK M. Characteristics of organic acid profiles in 16 species of wild growing edible mushrooms [J]. *J Environ Sci Health B-Pestic Contam Aric Wastses*, 2017, 52(10): 1-6.
- [21] FUJITA T, KOMEMUSHI S, YAMAGATA K. Contents of amino acids, organic acids and 5'-nucleotides in *Tricholoma giganteum* [J]. *J Sci Food Agric*, 1991, 55(1): 137-139.
- [22] 陈万超, 李文, 吴迪, 等. 11 个主栽品种香菇可溶性糖和有机酸测定及

- 滋味品质评价[J]. 食品工业科技, 2022, 43(7): 273–279.
- CHEN WC, LI W, WU D, *et al.* Determination of soluble sugar and organic acid components and evaluation of taste quality of 11 main cultivars of *Lentinula edodes* [J]. *Sci Technol Food Ind*, 2022, 43(7): 273–279.
- [23] REN SY, ZHENG EP, ZHAO TX, *et al.* Evaluation of physicochemical properties, equivalent umami concentration and antioxidant activity of *Coprinus comatus* prepared by different drying methods [J]. *LWT*, 2022, 162: 113479.
- [24] 于慧萍, 胡思, 黄文, 等. 干制方式对大球盖菇风味物质的影响[J]. 食品工业科技, 2021, 42(9): 251–256.
- YU HP, HU S, HUANG W, *et al.* Effects of drying process on the components in *Stropharia rugoso-annulate* [J]. *Sci Technol Food Ind*, 2021, 42(9): 251–256.
- [25] SHEN QL, HE ZD, DING YY, *et al.* Effect of different drying methods on the quality and nonvolatile flavor components of *Qudemansiella raphanipes* [J]. *Foods*, 2023, 12(3): 676–676.
- [26] 律诗, 代囡鑫, 刘野, 等. 食用菌鲜味强度评价及鲜味氨基酸和核苷酸提取工艺优化[J]. 食品科学技术学报, 2022, 40(1): 100–108.
- LV S, DAI XX, LIU Y, *et al.* Evaluation of umami intensity of edible fungi and optimization of umami amino acid and nucleotide extraction [J]. *J Food Sci Technol*, 2022, 40(1): 100–108.
- [27] 孙丽平, 常惟丹, 鲍长俊, 等. 云南产 6 种野生食用牛肝菌的营养成分及抗氧化特性研究[J]. 现代食品科技, 2016, 32(12): 279–286.
- SUN LP, CHANG WD, BAO CJ, *et al.* Nutritive components and antioxidative characteristics of six wild edible boletus mushrooms from Yunnan Province [J]. *Mod Food Sci Technol*, 2016, 32(12): 279–286.
- [28] GUO YJ, DENG GF, XU XR, *et al.* Antioxidant capacities, phenolic compounds and polysaccharide contents of 49 edible macro-fungi [J]. *Food Funct*, 2012, 3(11): 1195.
- [29] LIN LY, HSIEH YJ, LIU HM, *et al.* Flavor components in buckwheat bread [J]. *J Food Process Pres*, 2009, 33(6): 814–826.
- [30] 郭文滔, 郑志, 季一顺, 等. 添加葛根粉对冷冻馒头食用品质的影响[J]. 食品安全质量检测学报, 2023, 14(11): 9–16.
- GUO WT, ZHENG Z, JI YS, *et al.* Effects of addition of *Pueraria lobata* powder on the edible quality of frozen steamed buns [J]. *J Food Saf Qual*, 2023, (14): 9–16.
- [31] SU XQ, WU FF, ZHANG YQ, *et al.* Effect of organic acids on bread quality improvement [J]. *Food Chem*, 2019, 278: 267–275.
- [32] 方圆, 任欣, 彭洁, 等. 青稞及其制品的体内外淀粉消化特性研究[J]. 食品科学技术学报, 2021, 39(1): 144–152.
- FANG Y, REN X, PENG J, *et al.* Study on *in vitro* and *in vivo* starch digestive characteristics of Qingke barley and its products [J]. *J Food Sci Technol*, 2021, 39(1): 144–152.
- [33] WANG LW, ZHAO H, BRENNAN M, *et al.* *In vitro* gastric digestion antioxidant and cellular radical scavenging activities of wheat-shiitake noodles [J]. *Food Chem*, 2020, 330: 127214.
- [34] 董晓琳, 马丽苹, 边雪洁, 等. 甘薯叶粉添加量对面包品质、抗氧化性及淀粉消化性的影响[J/OL]. 食品与发酵工业: 1–12. [2023-03-22]. <https://doi.org/10.13995/j.cnki.11-1802/ts.033380>
- DONG XL, MA LP, BIAN XJ, *et al.* Effect of sweet potato leaf powder addition on bread quality, antioxidant properties, and starch digestibility [J/OL]. *Food Ferment Ind*: 1–12. [2023-03-22]. <https://doi.org/10.13995/j.cnki.11-1802/ts.033380>
- [35] TANG MY, WANG LY, CHENG XX, *et al.* Non-starch constituents influence the *in vitro* digestibility of naked oat (*Avena nuda* L.) starch [J]. *Food Chem*, 2019, 297: 124953.
- [36] 李悦, 李鹏飞, 邱心茹, 等. 麦麸对酥性饼干物理性质和淀粉消化性的影响[J]. 食品安全质量检测学报, 2023, 14(10): 240–245.
- LI Y, LI PF, QIU XR, *et al.* Effects of wheat bran on physical property and starch digestibility of crisp biscuits [J]. *J Food Saf Qual*, 2023, 14(10): 240–245.

(责任编辑: 韩晓红 张晓寒)

作者简介



何泽东, 硕士研究生, 主要研究方向为食用菌营养与产品化研究。

E-mail: kmzdhe@163.com



任达兵, 博士, 副教授, 主要研究方向为食品分析与检测。

E-mail: rendabing425@kust.edu.cn



孙丽平, 博士, 教授, 主要研究方向为食品营养与安全控制。

E-mail: lpsun@kmust.edu.cn