

两采收成熟度赤松茸粉的品质特性与功能活性比较

岳书可¹, 林细标², 余稳稳³, 刘宏生^{1*}, 谈欣乐^{1*}

(1. 华南理工大学食品科学与工程学院, 广东广州 510640) (2. 始兴县罗坝镇桃源村旅游有限公司, 广东韶关 512526) (3. 暨南大学生命科学技术学院, 广东广州 510632)

摘要: 赤松茸富含蛋白质、多酚及多糖, 是开发功能性食品的潜在原料, 但采收成熟度对其品质及功能活性的影响尚不明确。为筛选优质配料, 本研究比较了未开伞赤松茸粉(CSR, close-cap *Stropharia rugosoannulata*)和开伞赤松茸粉(OSR, open-cap *Stropharia rugosoannulata*)的营养成分、粉体性质、氨基酸组成及滋味活度值、生物活性物质含量、抗氧化能力及 α -淀粉酶抑制活性, 并采用LC-MS进行成分鉴定。结果表明: CSR的蛋白质(27.06%)、总氨基酸(20.63 g/100 g)及总游离氨基酸(34.28 mg g⁻¹)均显著高于OSR(20.54%、15.45 g/100 g、16.35 mg g⁻¹); CSR的 L^* 值更高(88.36), 持水力更优为5.47 g g⁻¹。风味上, CSR中谷氨酸TAV值(15.80)远高于OSR(8.57), 鲜味更突出。活性物质上, CSR的总多酚(9.35 g/100 g)和粗多糖(10.12 g/100 g)含量更高。CSR的DPPH及ABTS⁺自由基清除率(87.78%、86.76%)及 α -淀粉酶抑制率(64.10%)均显著优于OSR(77.75%、76.73%、34.90%); LC-MS鉴定显示CSR含有6-姜酚、表儿茶素等更丰富的多酚物质。综上, CSR的营养成分、滋味物质、抗氧化活性及酶抑制活性优于OSR, 是开发功能性食品的优质原料。本研究为赤松茸的科学采收及高值化应用提供了理论基础。

关键词: 赤松茸; 采收成熟度; 营养成分; α -淀粉酶活性

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2027.7.0758

Quality Characteristics and Bioactive Properties of *Stropharia rugosoannulata* at Two Harvest Maturity Stages

YUE Shuke¹, LIN Xibiao², YU Wenwen³, LIU Hongsheng^{1*}, TAN Xinle^{1*}

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

(2.Taoyuan Village Tourism Co., Ltd., Luoba Town, Shixing County, Shaoguan, 512526, China)

(3.College of Life Science and Technology, Jinan University, Guangzhou, 510632, China)

Abstract: *Stropharia rugosoannulata* is rich in protein, polyphenols, and polysaccharides, making it a promising raw material for the development of functional foods; however, the effects of different harvest maturity stages on their quality and functional activity remain unclear. To identify high-quality ingredients, this study compared the nutritional composition, powder properties, amino acid profile, flavor activity values, content of bioactive compounds, antioxidant capacity, and α -amylase inhibitory activity of close-cap *S.rugosoannulata* powder (CSR) and open-cap *S.rugosoannulata* powder (OSR), and identified the components using LC-MS. The results showed that the protein content (27.06%), total amino acids (20.63 g/100 g), and total free amino acids (34.28 mg g⁻¹) in CSR were all significantly higher than those in OSR (20.54%, 15.45 g/100 g, and 16.35 mg g⁻¹); CSR also exhibited a higher L^* of 88.36 and a superior water-holding capacity of 5.47 g g⁻¹. In terms of flavor, the TAV value of glutamic acid in CSR (15.80) was significantly higher than that of OSR (8.57), indicating a more pronounced umami taste. Regarding bioactive compounds, CSR had higher levels of total polyphenols (9.35 g/100 g) and crude polysaccharides (10.12 g/100 g), and its DPPH and ABTS⁺ radical scavenging rates (87.78%, 86.76%) and α -amylase inhibition rate (64.10%) were all significantly superior to those of OSR (77.75%, 76.73%, 34.90%); LC-MS analysis revealed that CSR contains a richer variety of polyphenols, including 6-gingerol and epicatechin. In summary, the nutritional composition, flavor compounds, antioxidant activity, and enzyme-inhibitory activity of CSR were superior to OSR, making it a high-quality raw material for the development of functional foods. This study provides a theoretical basis for the scientific harvesting and high-value utilization of *S.rugosoannulata*.

收稿日期: 2026-05-18; 修回日期: 2026-09-01; 接受日期: 2026-09-01

基金项目: 广东省农村科技特派员项目

作者简介: 岳书可(2001-), 男, 硕士研究生, 研究方向: 功能碳水化合物, E-mail: 3378519310@qq.com;

通讯作者: 刘宏生(1977-), 男, 博士, 教授, 研究方向: 功能碳水化合物, E-mail: hongshengliu@scut.edu.cn; 共同通讯作者: 谈欣乐(1991-), 男, 博士, 副教授, 研究方向: 食品营养与健康, E-mail: yoorqwqi@gmail.com

Key words: *Stropharia rugosoannulata*; harvest maturity; nutritional component; α -Amylase activity

糖尿病及其并发症已成为 21 世纪全球主要的公共卫生挑战之一^[1], 通过膳食干预平稳餐后血糖、延缓淀粉消化, 是防控 II 型糖尿病的重要策略^[2]。餐后血糖应答主要取决于主食中淀粉的消化速率, 因此, 降低主食的血糖生成指数 (Glycemic index, GI) 已成为功能性食品研发的重要方向。面条作为全球消费量较大的传统主食, 其高 GI 特性 (GI 值约为 80~90) 与健康消费需求之间的矛盾尤为突出^[3]。白面条的高 GI 特性主要源于小麦粉中淀粉在加工中充分糊化, 消化酶可及性高, 导致餐后血糖快速升高。因此, 对面条进行改良, 使其兼具优良口感与缓升糖特性, 具有重要的现实意义。

为开发低 GI 面条产品, 现有研究采用原料替换、杂粮复配、活性物质引入、工艺改良等多种策略^[4], 然而上述路径均存在一定局限, 难以实现面条口感、风味及缓消化间的平衡, 如: 杂粮过多会稀释面筋蛋白导致口感粗糙^[5]; 膳食纤维虽能延缓消化, 但过量添加易破坏面筋网络连续性^[6]; 多酚类物质则因其苦涩味及相容性问题限制其添加量^[7]。因此, 寻找兼具降糖活性与优良风味的天然配料是实现该目标的重要途径^[8]。食用菌风味独特、营养全面且富含生物活性物质, 在这一方向上展现出独特潜力。

赤松茸 (*Stropharia rugosoannulata*) 作为联合国粮农组织推荐的食用菌, 拥有独特的菇香, 蛋白质含量高且氨基酸组成均衡, 还富含多糖、多酚等多种活性成分^[9]。有研究证实其提取物对 α -淀粉酶展现出良好的抑制活性, 在延缓淀粉消化方面具有应用潜力^[8,10]。然而从未开伞到开伞阶段, 菇体在形态、营养积累及次生代谢产物合成上均发生显著变化, 影响其作为原料的加工特性及产品品质^[11]。孟德梅等^[12]的研究结果表明未开伞的香菇在蛋白质、DPPH 清除率上均优于开伞香菇, 建议在未开伞时期对香菇进行商业采收。王赵改等^[13]的结果表明, 随着成熟度增加, 双孢菇的蛋白质、Vc、总酚含量呈现先增加后降低的趋势。同时, 尽管已有研究将香菇等食用菌应用于低 GI 面条的开发^[14], 但赤松茸粉作为低 GI 面条配料的系统品质评价尚未见报道。

综上, 本研究明确赤松茸的综合品质需涵盖加工适宜性、风味品质及功能活性三个维度。鉴于此, 本研究以未开伞、开伞两采收成熟度的赤松茸为对象, 系统比较其基本成分、粉体性质、氨基酸组成与滋味活度值、活性物质含量、抗氧化能力及 α -淀粉酶抑制活性, 并结合 LC-MS 进行成分鉴定。本研究旨在揭示开伞及未开伞两成熟度赤松茸的品质差异及内在联系, 筛选兼具食用品质与 α -淀粉酶抑制的原料, 为赤松茸科学采收及低 GI 功能性主食产品开发奠定物质基础。

1 材料与方法

1.1 原料材料与试剂

赤松茸采自韶关市始兴县赤松茸栽种基地, 经 60 °C 干燥至恒重、粉碎过 100 目筛, 制得开伞与未开伞阶段赤松茸粉末。 α -淀粉酶 (来源猪胰腺, 货号 A3176-1MU, 纯度 $\geq$ 98%)、麦芽糖标准品 (纯度 $\geq$ 99%, 100 g), 均购自美国 Sigma 公司。4-羟基苯甲酰肼 (PAHBAH)、甲醇、氨水, 购于上海 Macklin 试剂有限公司。如未特别说明, 其他试剂均为分析纯。

1.2 主要仪器设备

L-8900 全自动氨基酸分析仪, 日本日立科学仪器有限公司; 1290 Infinity III-6546 超高效液相色谱-四级杆飞行时间质谱联用仪, 安捷伦仪器 (中国) 有限公司; UV1800PC 紫外分光光度计, 上海菁华科技仪器有限公司; WSC-C 色差仪, 上海仪电物光仪器有限公司; Hei-PLATE Mix 'n' Heat Core 恒温磁力搅拌水浴锅, 德国 Heidolph 公司; DL-5-B 离心机, 上海安亭科技有限公司; BP-211D 分析天平, 德国 Sartorius 仪器。

1.3 实验方法

1.3.1 赤松茸粉末样品制备

首先要筛选未开伞阶段及开伞阶段的赤松茸子实体, 筛选标准为: 观察子实体菌盖是否展开、菌膜是否破裂。将筛选后的新鲜子实体用清水浸泡后洗刷干净, 置于烘箱中于 60 °C 干燥至恒重。干品赤松茸粉碎后, 过 100 目筛, 即为未开伞赤松茸粉末 (CSR) 及开伞赤松茸粉末 (OSR), 使用密封袋密封后置于 4 °C 冰箱中冷藏储存备用。

1.3.2 赤松茸粉基本营养成分的测定

取开伞及未开伞赤松茸粉末（已过 100 目筛）测定其基本营养成分，使用的方法见下：

水分含量测定：按照国标 GB/T 5009.3-2016 记录的直接干燥法测定各样品的水分含量^[15]。

蛋白质含量测定：参照国标 GB 5009.5-2025 中的凯氏定氮法进行测定^[16]。

脂肪含量测定：按照国标 GB/T 5009.6-2025 记录的酸解法测定各样品的粗脂肪含量^[17]。

灰分含量测定：参照 GB 5009.4-2016 中的直接灼烧法进行测定^[18]。

1.3.3 外观颜色测定

使用色差仪测定开伞及未开伞成熟度的赤松茸粉样品的色度值。在测试前，将色差仪开机预热，30 min 后将初始值调为零，随后使用仪器附带的白板进行校正（白板 L^* 值为 99.12， a^* 值为 1.06， b^* 值为 1.32），样品压平后上样检测 L^* 、 a^* 和 b^* 值。

1.3.4 粉体性质测定

振实密度及持水力的测定参考骆勇^[19]的方法并适当修改。

振实密度：称取 5.0 g 的赤松茸粉末缓缓加入到刻度为 25 mL 的量筒中，轻敲外壁 100 次后，读取并记录量筒中粉体的体积，计算粉体质量与体积的比，即为容积密度（ g mL^{-1} ）。

持水力：在离心管中加入称取好的 0.5 g 赤松茸粉，用移液枪加入 15 mL 去离子水，常温静置 24 h，离心 20 min，转速设定为 $4\,000\text{ r min}^{-1}$ 。缓慢倒出管中上清液，吸干管内壁剩余的水分，室温静置 3 min 后称量沉淀及离心管重量，持水力（ g g^{-1} ）的计算参照公式（1）：

$$W_1 = \frac{M_2 - M_1 - M_0}{M_0} \quad (1)$$

式中：

W_1 ——样品持水力， g g^{-1} ；

M_0 ——称取的赤松茸粉质量，g；

M_1 ——对应的 50 mL 空离心管的质量，g；

M_2 ——离心并静置后剩余粉末及离心管的总重，g。

持油力：在 50 mL 离心管中加入 10 mL 玉米油，随后加入 1 g 赤松茸粉末，混合均匀，常温放置 2 h。以 $4\,800\text{ r min}^{-1}$ 的转速离心 15 min 后弃去上层油，称量离心管及沉淀总重，持油力（ g g^{-1} ）的计算参照公式（2）：

$$W_2 = \frac{M_2 - M_1 - M_0}{M_0} \quad (2)$$

式中：

W_2 ——样品持油力， g g^{-1} ；

M_0 ——称取的赤松茸粉质量，g；

M_1 ——对应的 50 mL 空离心管的质量，g；

M_2 ——离心并静置后剩余粉末及离心管的总重，g。

1.3.5 氨基酸成分、含量测定及非挥发风味分析

总氨基酸（水解氨基酸）：在 GB/T 5009.124-2016 描述的方法的基础上稍加修改^[20]。使用盐酸水解法提取样品中的总氨基酸并在全自动氨基酸分析仪中进行检测。

游离氨基酸：在 Lee 等^[21]的方法上稍加修改，在 50 mL 离心管中加入 50 mL 稀盐酸（ 0.1 mol L^{-1} ），接着加入称取好的 0.5 g 赤松茸粉， $37\text{ }^\circ\text{C}$ 溶解 45 min。水解后冷冻离心 15 min，转速设为 $10\,000\text{ r min}^{-1}$ 。取上清液过 $0.22\text{ }\mu\text{m}$ 滤膜后加入棕色进样瓶中，在全自动氨基酸分析仪中进行检测。

参照 Hufnagel 等^[22]的研究结果，将氨基酸根据其滋味特征划分为鲜、甜、苦味氨基酸及芳香族氨基酸。其中鲜味氨基酸包括天门冬氨酸（Asp）、谷氨酸（Glu），甜味氨基酸包括丙氨酸（Ala）、甘氨酸（Gly）、丝氨酸（Ser）、苏氨酸（Thr）、脯氨酸（Pro）、组氨酸（His），苦味氨基酸包括赖氨酸（Lys）、蛋氨酸（Met）、缬氨酸（Val）、精氨酸（Arg）、亮氨酸（Leu）、异亮氨酸（Ile），芳香族氨基酸^[23]包括胱氨酸（Cys）、酪氨酸（Tyr）、苯丙氨酸（Phe）。统计样品内所含有的各类呈味氨基酸的种类及相对含量，绘制出对应的呈味特征图。同时，为了衡量各呈味氨基酸对于样品整体风味的贡献度，使用 Warmke 等^[24]的方法根据各氨基酸的味觉阈值计算对应的滋味活度

值 (TAV, Taste activity value), 参照公式 (3) 计算:

$$TAV_i = \frac{C_i}{T_i} \quad (3)$$

式中:

TAV_i ——对应氨基酸 i 的滋味活度值;

C_i ——呈味氨基酸 i 的浓度, mg g^{-1} ;

T_i ——呈味氨基酸 i 的活度阈值, mg g^{-1} 。

1.3.6 生物活性物质测定

总多酚: 在 Belwal 等^[25]的方法基础上适当修改。使用甲醇溶液 (80%, V/V) 提取酚类物质, 采用福林酚法测定酚含量。测定时以甲醇溶液作为空白对照, 绘制吸光度随没食子酸标品溶液浓度变化的标准曲线 ($y=0.0037x+0.0066$, $R^2=0.9984$), 总多酚含量对应标准曲线进行计算。

总黄酮: 参考张建芳^[26]的方法稍加修改, 使用乙醇溶液 (40%, V/V) 提取样品中的黄酮, 提取液加入亚硝酸钠及硝酸铝溶液显色。测定时选取芦丁作为对照标准品配置不同浓度的标准溶液在 510 nm 处测定其吸光值, 绘制标准吸收曲线 ($y=2.7157x+0.0116$, $R^2=0.9994$), 并计算得到样品总黄酮含量。

粗多糖: 参照 SN/T 4260-2015 中的苯酚-硫酸法进行测量^[27]。

生物碱的提取和测定: 参照何晋浙等^[28]的提取方法并稍加修改, 称取 10 g 红松茸粉样品, 加入 100 mL 乙醇, 置于快速溶剂萃取仪中加热到 140 °C 萃取 30 min, 趁热过滤, 滤液烘干后加入 20 mL 盐酸 (2%, V/V) 重新溶解。随后用浓氨水调 pH 值至 11, 使用三氯甲烷 (20 mL) 多次萃取, 集中有机相干燥后, 定容至 10 mL。将 0.010 0 g 苦参碱溶于 25 mL 三氯甲烷中配成 0.4 mg mL^{-1} 的标品溶液。分别吸取 0、1、2、4、8 mL 该溶液加入 CHCl_3 定容至 10 mL。将上述液体转移到分液漏斗中, 加入 5 mL 醋酸钠缓冲液 (pH 值为 4.5) 及 2 mL 溴甲酚绿染料, 充分混合后静置 5 min。吸取三氯甲烷层使用紫外分光光度计测量 230 nm 处测定不同浓度标品的吸光值, 绘制标准曲线 (方程 $Y=0.0011X+0.0117$, $R^2=0.9969$)。以同法操作的氯仿为空白, 待测样品也按照上述方法进行测定并对照标准曲线计算相应含量。

1.3.7 抗氧化能力测定

抗氧化能力的测定参照何晋浙等^[28]的提取方法并稍加修改。

DPPH 自由基清除率: 称取定量 DPPH, 与无水乙醇混合, 浓度为 0.2 mmol L^{-1} , 以此作为 DPPH 工作液。将 2 mL 该液体与等量赤松茸粉溶液 (10 mg mL^{-1}) 混合, 在暗室中静置 30 min。反应结束后离心 15 min, 转速为 6 000 r min^{-1} 。测定上清液的吸光度 (517 nm), 空白对照为无水乙醇, 阳性对照为同浓度的 Vc 溶液, 样品浓度以此为 0、2、4、6、8、10 mg mL^{-1} 。清除率根据以下公式 (4) 计算:

$$Q_1 = 1 - \frac{A_x - A_{x0}}{A_0} \times 100 \quad (4)$$

式中:

Q_1 ——样品的 DPPH 自由基清除率, %;

A_0 ——蒸馏水的吸光度;

A_x ——样品液加 DPPH 工作液的吸光度;

A_{x0} ——样品液加无水乙醇的吸光度。

ABTS⁺自由基清除率: 第一步要配置 ABTS⁺工作液: 将配置好的 ABTS⁺溶液 (7 mmol L^{-1}) 与过硫酸钾溶液 (2.45 mmol L^{-1}) 混合均匀后在室温条件下于暗室反应 16 h 制得 ABTS⁺工作液。使用时, 加入 pH 值为 6.8 的 PBS 溶液控制工作液在 734 nm 处的吸光度, 样品浓度梯度同上。测定时取 1.2 mL 工作液于 2.0 mL 离心管中, 加入 200 μL 样品溶液于离心管中充分混合, 反应 10 min, 测量混合物在 734 nm 处的吸光度。空白对照为蒸馏水, 阳性对照为同浓度的 Vc, 清除能力根据以下公式 (5) 计算:

$$Q_2 = 1 - \frac{A_x - A_{x0}}{A_0} \times 100 \quad (5)$$

式中:

Q_2 ——样品的 ABTS⁺自由基清除率, %;

A_0 ——蒸馏水的吸光度;
 A_x ——样品液加 ABTS⁺溶液的吸光度;
 A_{x0} ——样品液加同体积蒸馏水的吸光度。

1.3.8 α -淀粉酶活力测定

体外模拟消化实验：本实验需要配置的试剂溶液如表 1 所示。

表 1 体外模拟消化实验试剂配制

Table 1 Reagent preparation for in vitro simulated digestion assay

试剂名称	浓度/组成	溶剂/配制方法
NaAc 缓冲液	0.2 mol L ⁻¹ , pH 值 6.0	去离子水
α -淀粉酶溶液	1 mg mL ⁻¹	NaAc 缓冲液
PAHBAH 试剂	0.5 g 4-羟基苯甲酰肼+10 mL HCl (0.5 mol L ⁻¹) +90 mL NaOH (0.5 mol L ⁻¹)	——
麦芽糖标品溶液	0、0.125、0.25、0.5、1 mmol L ⁻¹	梯度稀释于去离子水

称取 200 mg 待测样品加入 50 mL 离心管中,添加 10 mL 蒸馏水后在 100 ℃、300 r·min⁻¹ 的条件下水浴 20 min。冷却至室温后,加入 7 mL NaAc 缓冲液,混合均匀,吸取 100 μ L 离心管中液体加入 2 mL 离心管中(内含 0.9 mL 0.3 mol L⁻¹ 的碳酸钠溶液),并以此定义为消化反应的起点。接着加入配制好的酶液 1 mL 并开始计时消化(过程中温度设定为 37 ℃,转速 300 r·min⁻¹),在 5、10、15、20、30、40、60、90 和 120 min 时间点分别取 100 μ L 消化液加入装有 Na₂CO₃ 溶液的微量离心管中。反应完成后将全部的 2 mL 离心管以 10 000 g 离心力离心 10 min,上清液稀释 2 倍,取 0.1 mL 按照 1:10 的比例加入 4-羟基苯甲酰肼溶液,混合后沸水浴处理 5 min 后,用流动水冷却 1 min,测定其在 410 nm 处的吸光值。测定梯度浓度麦芽糖标品溶液的吸光度并绘制标准曲线,以此确定样品各时间点对应的糖浓度并计算得到消化率。

测定 α -淀粉酶活力的具体流程为:在消化反应进行至第 20 min 时,收集 50 μ L 反应液,加入到 4 mL 充分糊化后的 CS 溶液(浓度为 10 mg mL⁻¹)内,混合均匀后置于恒温搅拌水浴锅中继续反应 20 min,反应条件为温度 37 ℃、搅拌速率 300 r·min⁻¹。在上述反应期间,从 0 开始每隔 4 min 为一个时间点,共 6 个时间点,各时间点收集 100 μ L 反应混合液,迅速转移至 2 mL 离心管中(已加入 0.9 mL 碳酸钠溶液),以 4 000 g 的离心力离心 10 min。随后,从离心所得上清液中吸取 100 μ L,加入 PAHBAH 显色试剂,经过加热显色并冷却处理后测定样品中的糖含量,进而构建还原糖释放量随反应时间变化的关系曲线。基于酶反应动力学理论,还原糖(即酶催化反应生成物)的生成速率与 α -淀粉酶的活性水平及其浓度呈现正比例关系,因此该曲线的斜率即为 α -淀粉酶活力的度量值,酶活力单位为 mmol min⁻¹ mL⁻¹,定义为每毫升体系中淀粉酶每分钟生成的还原糖量。

1.3.9 植物化学成分定性分析

采用安捷伦 1290Infinity I1-6546 高分辨 Q-TOF 液质联用仪对赤松茸粉含有的化学成分进行定性分析。称取 5 g 松茸粉,按照 1:25 的料液比加入 125 mL 80%乙醇溶液在 50 ℃下提取 2 h。随后过滤提取液,滤液置于冷冻离心机中以 10 000 r·min⁻¹ 转速离心 15 min,吸取上清液,过 0.45 μ m 滤膜后待测。分离条件如下:选用 C18 反相色谱柱(柱长 250 mm、内径 4.6 mm、填料粒径 5 μ m),温度控制在 40 ℃,相输送速率为 0.4 mL min⁻¹,每次进样 10 μ L。质谱条件:离子源为电喷雾离子化源(ESI);毛细管电压:负离子,3.5 kV;干燥气温度:350 ℃;干燥气流速:8 L min⁻¹;鞘气温度:320 ℃;鞘气流速:18 L min⁻¹;鞘气电压:1 500 V;紫外采集波长为 254 nm。流动相组成及梯度洗脱程序参照表 2。

表 2 流动相组成及梯度洗脱程序

Table 2 Mobile phase composition and gradient elution program

时间/min	A 相(去离子水,含 0.1%甲酸)/%	B 相(甲醇,含 0.1%甲酸)/%
0~4	95	5
4~7	40	60
7~10	30	70
10~11	0	100
11~15	95	5

1.3.10 统计分析

本研究对全部样品均开展至少三次平行实验,所得实验数据以均值加减标准差(SD)的形式呈现。在 IBM SPSS 25.0 中对实验数据进行分析,其中两组数据的对比分析采用独立样本 t 检验,三组及以上的数据对比采用单因素方差分析(ANOVA)结合邓肯检验,并以 *P* 值是否低于 0.05 作为判定差异是否具有显著性的标准。实验结果的可视化绘图使用 Origin 2024 完成。

2 结果与讨论

2.1 赤松茸粉的基本营养成分

两不同采收成熟度赤松茸的营养成分,包括总碳水、蛋白质、灰分、水分及粗脂肪的含量见表 3。未开伞阶段赤松茸的主要成分为蛋白质(27.06%)、碳水化合物(47.57%),此外还含有少量的水分(6.86%)、灰分(9.97%)及脂肪(1.35%)。其中除脂肪外,未开伞赤松茸其他营养成分的含量与开伞赤松茸样品均存在显著差异(*P*<0.05)。CSR 的蛋白质与灰分含量显著高于 OSR,而总碳水则呈现出相反的规律,这一结果与菌菇类子实体的生理发育过程密切相关:未开伞阶段子实体处于营养生长旺盛期,细胞内蛋白质合成代谢活跃,大量氨基酸被用于酶蛋白和结构蛋白的构建,同时矿物质元素(如磷、钾、镁等)作为酶辅因子被大量吸收和积累,因此 CSR 表现出较高的蛋白质和灰分含量。随着菌膜破裂、菌盖展开,子实体进入生殖生长阶段,其生理重心由营养积累转向孢子形成与释放。在此过程中,部分蛋白质被水解作为能量和氮源供孢子发育利用,部分矿物质元素随孢子喷射而流失;同时,为满足后期生理代谢的能量需求,子实体通过光合或异养途径合成并积累更多碳水化合物(如糖醇、海藻糖等)作为渗透调节物质和能量储备^[29]。Barros 等^[30]将松乳菇及红菇的子实体根据成熟度的不同划分为不同的阶段,研究发现,随着子实体成熟度的增加,蛋白质含量、矿物元素含量、单不饱和脂肪酸及多不饱和脂肪酸的含量逐渐升高,当子实体充分成熟喷射出孢子后,上述营养成分显著下降,而碳水化合物及饱和脂肪酸的含量则逐渐升高。孔子浩等^[31]的研究亦指出,紫灵芝未成熟阶段的蛋白质含量及黄酮含量显著高于成熟阶段,进一步印证了子实体在未成熟期在营养物质积累方面的优势。

表 3 两采收成熟度赤松茸的营养成分

Table 3 Contents of nutritional components of *S. rugosoannulata* at two harvest maturity stages

Contents (g/100 g)	CSR	OSR
碳水化合物	54.76 ±0.20 ^b	57.58 ±0.34 ^a
蛋白质	27.06 ±0.07 ^a	20.54 ±0.11 ^b
水分	6.86 ±0.10 ^b	12.49 ±0.12 ^a
灰分	9.97 ±0.22 ^a	7.98 ±0.37 ^b
脂质	1.35 ±0.02 ^a	1.38 ±0.05 ^a

注:表中每行中使用不同字母标示的数据之间存在显著差异(*P*<0.05)。下表同。

2.2 赤松茸粉的外观颜色差异

本研究所制备的赤松茸干制品及粉末如图 1 所示,测定的粉末色度值见图 2。CSR 子实体干制品的菌盖内收呈聚拢状,菌盖下侧的菌褶呈现出与整体一致的乳黄色,菌盖与菌柄间连接的菌膜完整且清晰可见,菌柄形态饱满盈实,对应其 *L*^{*}值(88.36)显著较高(*P*<0.05),色泽明亮,*a*^{*}值(3.05)和 *b*^{*}值(19.86)较低,呈现典型的乳黄色调;相比之下,OSR 子实体菌盖明显展开,菌膜不可见,菌盖下侧菌褶结构疏松、呈现出深褐色,菌柄相较于 CSR 子实体更为干瘪、颜色也更深,其 *L*^{*}值(60.26)显著低于 CSR, *a*^{*}值(3.49)和 *b*^{*}值(21.95)则更高,表明开伞后颜色更深、更偏向红黄色调^[32]。上述色度结果表明,CSR 样品呈现出更浅、更亮的乳黄色特征,而 OSR 样品则呈现出更暗更深的棕褐色,这与肉眼观察到的样品实物的颜色规律一致,王伟等^[33]在栽培不同菌种草菇的过程中也发现随着子实体的成熟菌菇颜色会加深同时呈现出最高的黄色值(*b*^{*})。这种随生长阶段转色的规律可能与光照有关,谢振飞等^[34]对赤松茸酪氨酸酶(TYR)基因家族进行了全基因组鉴定,发现 8 个 SrTYRs 基因的上游启动子区域广泛存在光响应元件和激素响应元件;其中 SrTYR2、SrTYR5、SrTYR6、SrTYR7 在子实体菌盖打开成熟后大量表达,且在外菌皮中的相对表达量显著高于菌盖、菌褶和菌柄,与色素积累部位一致。



图 1 两采收成熟度赤松茸的外观实物图

Fig.1 Photographs of *S. rugosoannulata* at two harvest maturity stages

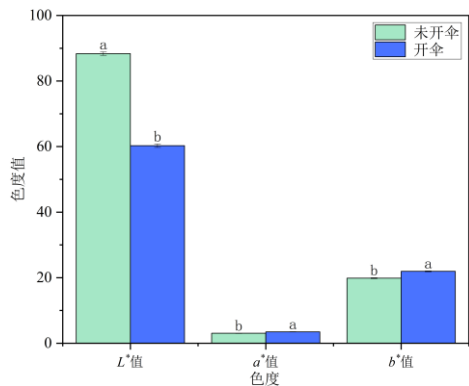


图 2 两采收成熟度赤松茸粉的色度值

Fig.2 Colorimetric values of *S. rugosoannulata* at two harvest maturity stages

注：图中使用不同字母标示的数据之间存在显著差异 ($P<0.05$)。下图同。

2.3 赤松茸粉的粉体性质分析

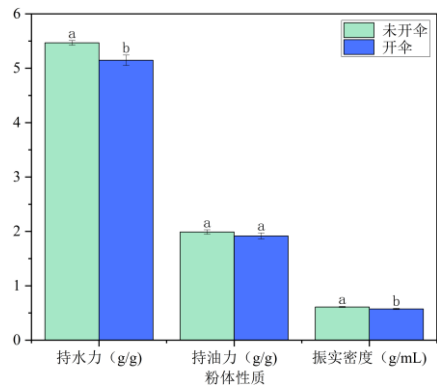


图 3 两采收成熟度赤松茸粉的粉体性质

Fig.3 Powder properties of *S. rugosoannulata* at two harvest maturity stages

粉体性质是评价食品类原料在生产加工过程中的功能性与适应性的重要指标,能够直观展示食品原料在后续产品开发中的分散性、复水性及在与其他食品组分混合时的均匀性。本研究测定了未开伞阶段及开伞阶段赤松茸粉的持水力、持油力及振实密度,结果见图 3。持水力反映了粉末状样品与水分子结合的能力,对于开发需要水合形成面筋网络的面条类产品而言尤为重要,样品的持水力通常与亲水基团的含量有关。CSR 样品的持水力为 5.47 g g^{-1} ,显著高于 OSR 的 5.11 g g^{-1} ,这一差异可能是由于 CSR 相较于 OSR 含有更多的蛋白质,蛋白质分子中含有大量亲水基团,可通过氢键与水分子结合进而增大样品的持水力。此外这种差异可能与粉体本身的水分含量

及致密程度有关。持水力的差异说明了 CSR 相较于 OSR 具有更致密的粉体结构及更强的水合能力, 预示了其在面条体系中的加工潜力。CSR 与 OSR 在持油力上未表现出显著差异, 分别为 1.99 g g^{-1} 及 1.92 g g^{-1} 。研究表明, 食用菌中具有疏松多孔结构的膳食纤维是影响其持油能力的主要因素^[35], CSR 与 OSR 的膳食纤维含量接近, 这可能是二者持油力无显著差异的原因。振实密度反映了粉体颗粒的堆积紧密程度, 较高的振实密度通常意味着粉体颗粒排列更为致密, 空间间隙较小。CSR 的振实密度显著高于 OSR 的振实密度, 这与持水力结果的趋势一致, 说明未开伞赤松茸粉拥有更致密的粉体结构。Hetayezu 等^[36]的研究也指出, 经超微粉碎后得到的更加致密的菇粉其持水力更高, 且在热水提取过程中表现出更高的活性物质得率。

2.4 赤松茸的水解氨基酸组成及含量分析

氨基酸作为构成蛋白质的基本单元, 其含量及分布情况是评价食用菌营养价值与风味品质的重要指标, 通常水解氨基酸(总氨基酸)用于评价样品的营养价值, 而游离氨基酸则是非挥发风味物质的重要成分。本研究测定了 CSR 与 OSR 样品的水解氨基酸含量及组成, 结果见表 4。从整体来看, CSR 与 OSR 均检测出 18 种氨基酸, 其中包括人体所需的全部 9 种必需氨基酸, 但氨基酸总量及组成上随采收成熟度的不同呈现出显著的差异。

两阶段样品的总氨基酸含量存在极显著的差异, CSR 高达 20.63%, 而 OSR 仅为 15.45%, 这一规律与蛋白质含量的差异高度契合, 进一步佐证了未开伞阶段在营养物质积累尤其是蛋白质积累上的优势。相似地, Liang 等^[37]对离褶伞的研究发现在子实体发育过程中氨基酸浓度呈现显著的增长趋势, 在成熟阶段达到峰值, 在成熟阶段后期, 菌菇开盖喷射孢子后营养物质随之减少。

从水解氨基酸组成的角度分析, CSR 所含 9 种必需氨基酸的含量均高于 OSR, 其中苏氨酸、缬氨酸、亮氨酸、苯丙氨酸、赖氨酸的差异均达到显著水平。同时 CSR 必需氨基酸总量为 6.65 g/100 g , 必需氨基酸在总氨基酸的占比为 32.23%, 接近 FAO/WHO 组织推荐的理想蛋白质营养模式中必需氨基酸占比 40% 的标准, 这表明 CSR 的蛋白质及氨基酸组成相较于 OSR 具有更高的营养价值。在非必需氨基酸中, 谷氨酸在两个阶段均呈现出所有氨基酸中的最高含量, CSR 的谷氨酸含量高达 3.48%, 显著高于 OSR 的 2.33%。谷氨酸是食用菌鲜味最主要的来源, 其含量优势预示着 CSR 在风味品质上的潜力, 而天门冬氨酸作为另一种重要的鲜味氨基酸, 同样在 CSR 中含量更高。值得注意的是, 酪氨酸是唯一在 OSR 中含量显著高于 CSR 的氨基酸, 这与前文 2.2 中提到的子实体发育过程中色素类物质的合成有关。酪氨酸作为黑色素合成的前体物质, 其代谢通路是菌菇成熟转色过程中的关键路径, 其含量的升高与 OSR 颜色加深的现象相呼应^[38]。

表 4 两采收成熟度赤松茸的水解氨基酸含量

Table 4 Contents of total amino acids in *S. rugosoannulata* at two harvest maturity stages

含量/(g/100 g)	CSR	OSR
蛋氨酸	0.08 ± 0.02^a	0.05 ± 0.01^a
天门冬氨酸	1.98 ± 0.11^a	1.40 ± 0.06^b
苏氨酸	1.10 ± 0.04^a	0.78 ± 0.03^b
丝氨酸	1.16 ± 0.05^a	0.81 ± 0.04^b
谷氨酸	3.45 ± 0.09^a	2.33 ± 0.11^b
甘氨酸	1.05 ± 0.02^a	0.77 ± 0.04^b
丙氨酸	1.45 ± 0.05^a	1.07 ± 0.05^b
半胱氨酸	0.10 ± 0.02^a	0.07 ± 0.01^a
缬氨酸	1.03 ± 0.02^a	0.75 ± 0.05^b
异亮氨酸	1.09 ± 0.05^a	0.94 ± 0.03^a
亮氨酸	1.57 ± 0.10^a	1.24 ± 0.06^b
酪氨酸	0.89 ± 0.09^b	1.00 ± 0.05^a
苯丙氨酸	1.03 ± 0.08^a	0.82 ± 0.04^b
赖氨酸	1.28 ± 0.10^a	0.85 ± 0.04^b
色氨酸	0.44 ± 0.02^a	0.39 ± 0.03^a
组氨酸	0.65 ± 0.17^a	0.58 ± 0.03^a

精氨酸	1.31±0.11 ^a	0.88±0.11 ^b
脯氨酸	0.94±0.02 ^a	0.73±0.02 ^b
总氨基酸	20.63±0.69 ^a	15.45±1.12 ^b

2.5 赤松茸粉的游离氨基酸组成及滋味活度值 (TAV) 分析

游离氨基酸作为食用菌中重要的非挥发性风味物质,是菌菇类独特香味的关键来源。本研究测定了 CSR 及 OSR 的游离氨基酸含量及组成,并依据其各氨基酸的呈味特征将其划分为:鲜味氨基酸、甜味氨基酸、芳香味氨基酸及苦味氨基酸四种呈味氨基酸。同时通过计算各游离氨基酸的含量与对应味觉阈值的比,引入滋味活度值 (TAV, taste activity value) 来定量比较各氨基酸在样品综合风味上的贡献度,一般来说, TAV>1 则可认为该氨基酸对样品整体风味影响较大,根据 TAV 值的大小可有效判定样品中的主要呈味氨基酸^[24],结果如表 5 所示。

两样品的总游离氨基酸含量分别为 34.28 mg g⁻¹ 及 16.35 mg g⁻¹, CSR 样品是 OSR 样品的两倍以上,这与上文水解氨基酸趋势一致,进一步说明了未开伞阶段赤松茸在营养及风味物质积累的优势。于慧萍等^[39]探究不同干燥方式对赤松茸干制品营养成分影响时,测得的总游离氨基酸含量为 33.57 mg g⁻¹。CSR 及 OSR 均检测出 18 种游离氨基酸,其中含量较高的有苏氨酸、谷氨酸、丙氨酸。甜味氨基酸含量在呈味氨基酸中占主导地位,分别为 5.12 mg g⁻¹ (OSR) 及 15.07 mg g⁻¹ (CSR), CSR 的甜味氨基酸占比为 43.95%,显著高于 OSR 的 31.33%,这是由于 CSR 含有丰富的苏氨酸 (6.37 mg g⁻¹) 及丙氨酸 (4.24 mg g⁻¹)。CSR 的鲜味氨基酸含量为 5.91 mg g⁻¹,显著高于 OSR 的 3.04 mg g⁻¹。此外,OSR 的芳香味氨基酸 (19.76%) 及苦味氨基酸占比 (27.28%) 显著高于 CSR (14.69%、22.54%),这可能与子实体在成熟过程中的代谢途径有关^[40],导致成熟后期的赤松茸产生了更多此类氨基酸带来不良风味。表 5 展示了 CSR 及 OSR 中呈味氨基酸的 TAV 值,OSR 中有 8 种主要呈味氨基酸 (TAV>1),CSR 中有 12 种主要呈味氨基酸,其中风味贡献度较大的三种氨基酸均为:谷氨酸 (鲜味)、丙氨酸 (甜味)、组氨酸 (甜味)。谷氨酸作为食用菌鲜味最主要的贡献者,其 TAV 值在未开伞阶段高达 15.80,是开伞阶段 (8.57) 的近两倍,这与水解氨基酸结果的规律一致。范婷婷等^[41]对羊肚菌的研究也发现,谷氨酸对食用菌鲜味的影响最大,野生羊肚菌的谷氨酸 TAV 值在 13.75 至 17.79 之间,与本研究结果高度吻合。丙氨酸属甜味氨基酸,其 TAV 值在未开伞阶段达 7.07,显著高于开伞阶段的 3.54,进一步强化了未开伞样品的味觉层次。

表 5 两采收成熟度赤松茸的游离氨基酸含量及 TAV 值

Table 5 Contents of free amino acids and TAV of *S. rugosoannulata* at two harvest maturity stages

氨基酸种类	味觉阈值 ^[24]	游离氨基酸含量/(mg g ⁻¹)		滋味活度值 (TAV)	
		OSR	CSR	OSR	CSR
谷氨酸	0.30	2.57±0.04 ^b	4.74±0.05 ^a	8.57±0.01 ^b	15.80±0.15 ^a
天冬氨酸	1.00	0.47±0.01 ^b	1.17±0.01 ^a	0.47±0.01 ^b	1.17±0.01 ^a
甘氨酸	1.30	0.27±0.07 ^b	0.88±0.023 ^a	0.21±0.01 ^b	0.68±0.02 ^a
丙氨酸	0.60	2.13±0.03 ^b	4.24±0.01 ^a	3.54±0.04 ^b	7.07±0.01 ^a
脯氨酸	3.00	0.37±0.02 ^b	0.866±0.03 ^a	0.12±0.01 ^b	0.29±0.01 ^a
丝氨酸*	1.50	0.60±0.02 ^b	1.54±0.02 ^a	0.40±0.00 ^b	1.03±0.02 ^a
苏氨酸	2.60	1.06±0.04 ^b	6.37±0.01 ^a	0.41±0.01 ^b	2.45±0.01 ^a
组氨酸	0.20	0.70±0.02 ^b	1.17±0.01 ^a	3.5±0.08 ^b	5.82±0.03 ^a
半胱氨酸	NF	0.06±0.02 ^a	0.073±0.01 ^a	—	—
酪氨酸	0.91	1.26±0.03 ^b	1.99±0.01 ^a	1.38±0.03 ^b	2.19±0.01 ^a
赖氨酸*	0.50	0.78±0.03 ^b	1.88±0.01 ^a	1.57±0.03 ^b	3.75±0.01 ^a
苯丙氨酸*	0.90	1.92±0.03 ^b	2.98±0.01 ^a	2.13±0.20 ^b	3.31±0.02 ^a
精氨酸	0.50	0.69±0.02 ^a	0.54±0.01 ^b	1.38±0.04 ^a	1.08±0.03 ^b
缬氨酸*	0.40	1.05±0.05 ^b	2.20±0.00 ^a	2.63±0.12 ^b	5.49±0.01 ^a
蛋氨酸*	3.00	0.17±0.02 ^b	0.27±0.00 ^a	0.06±0.00 ^b	0.089±0.00 ^a
亮氨酸*	1.90	1.01±0.05 ^b	1.622±0.01 ^a	0.53±0.03 ^b	0.85±0.01 ^a
异亮氨酸*	0.90	0.77±0.09 ^a	1.23±0.01 ^b	0.85±0.10 ^a	1.36±0.01 ^b

注：带“*”为必需氨基酸，NF 代表该呈味氨基酸对应阈值在文献中未查到。

2.6 赤松茸粉的生物活性

2.6.1 生物活性物质含量

为探讨赤松茸生物活性与生长阶段的关系，本研究测定了 CSR 及 OSR 中的生物活性物质含量，包括：总多酚、粗多糖、总黄酮、生物碱的含量，结果如图 4 所示。由图可知，两采收成熟度的赤松茸所含的生物活性物质含量存在显著差异，赤松茸粉中含量较高的生物活性物质为多糖及多酚。经测定，CSR 的总多酚含量高达 9.35 g/100 g，显著高于 OSR 的 8.34 g/100 g。黄珊^[42]在微波法的基础上提取赤松茸中的多酚类物质，优化了提取流程的料液比、试剂种类及浓度，最终得率为 10.64%。总黄酮方面，CSR 含量为 1.31 g/100 g，显著高于 OSR 的 1.13 g/100 g ($P<0.05$)。生物碱方面，CSR 为 0.37 g/100 g 显著高于 OSR (0.31 g/100 g)。CSR 及 OSR 的多糖含量分别为 10.12 g/100 g 和 8.83 g/100 g。黎欣欣^[43]通过单因素及正交实验设计，基于三相法优化了赤松茸多糖的提取率，最高为 10.85%。已有研究证实赤松茸多糖含有抗氧化、抗肿瘤、抑菌消炎等众多生理活性，杜敏华等^[44]提取出赤松茸粗多糖并使用化学荧光法测定其抗氧化能力，结果指出赤松茸多糖能够有效清除羟自由基及超氧阴离子自由基，且清除效果呈现浓度依赖性关系。此外，有研究指出赤松茸多糖能够显著抑制脂肪酶、淀粉酶活性，在防控肥胖及Ⅱ型糖尿病等慢性疾病上具有重大潜力。Ma 等^[10]提取了赤松茸多糖，并在体外测定了其对于胰脂肪酶和胰酶（内含 α -淀粉酶）活性的影响，发现该多糖能有效抑制这两种酶的活性

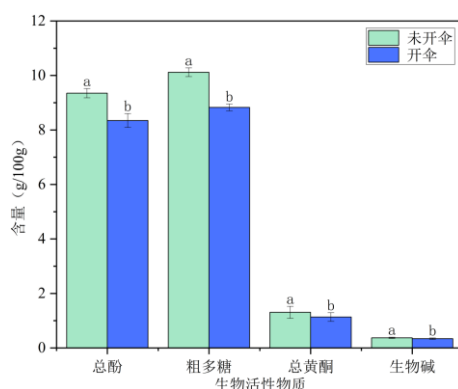


图 4 两采收成熟度赤松茸的生物活性物质含量

Fig.4 Contents of bioactive compounds of *S. rugosoannulata* at two harvest maturity stages

2.6.2 抗氧化能力

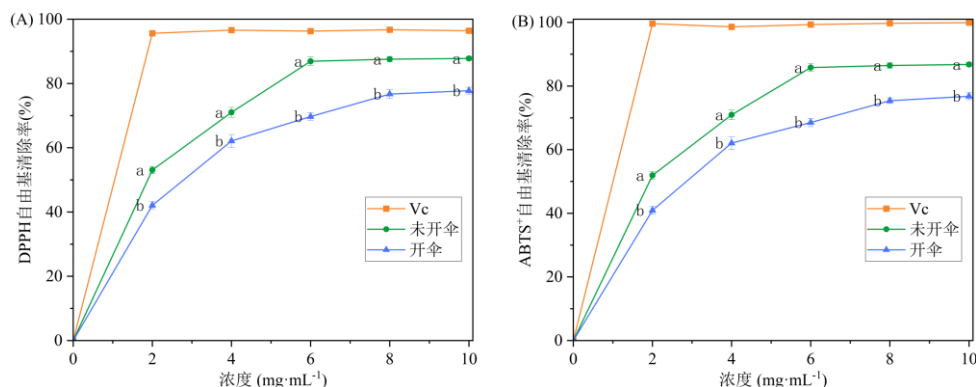


图 5 两采收成熟度赤松茸的 DPPH 及 ABTS⁺自由基清除力

Fig.5 DPPH & ABTS⁺ radical scavenging activity of *S. rugosoannulata* at two harvest maturity stages

DPPH 自由基及 ABTS⁺自由基清除测定法试剂易得、流程简单，是常用于实验室测定样品抗氧化能力的重要方法。一般来说，样品对 DPPH 及 ABTS⁺自由基的清除率取决于其提供氢的能力。CSR 及 OSR 清除 DPPH 自由基（图 5A）及 ABTS⁺自由基（图 5B）的能力如图 5 所示。由图可知，所有样品的抗氧化活性在一定的测试浓度范围内呈现浓度依赖性，阳性对照 Vc 的 DPPH 清除率随浓度有所波动，但始终保持在 95.6%以上。在测试浓度

(2~10 mg mL⁻¹) 内, CSR 的 DPPH 清除率均高于 OSR 且存在显著差异, 这可能是因为 CSR 含有更多的多酚、多糖等具有抗氧化活性的物质。样品浓度在 2~6 mg mL⁻¹ 时, 样品的 DPPH 自由基清除率随浓度的增加而快速上升; 当样品浓度达到 8 mg mL⁻¹ 时, 清除率的增长进入平台期, 随浓度增加抗氧化能力不再出现较大变化; 两样品的 DPPH 清除率在样品浓度为 10 mg mL⁻¹ 时达到峰值, 分别为 87.78% 和 77.75%。CSR 和 OSR 对 ABTS⁺ 自由基的清除曲线呈现出相似的规律, 在 6 mg mL⁻¹ 的前清除率与浓度呈正相关, 6~10 mg mL⁻¹ 的浓度范围内进入平台期, 清除率在浓度 10 mg mL⁻¹ 达到峰值, 分别为 86.76% 及 76.73%。上述结果说明, CSR 及 OSR 具有较好的自由基清除能力及抗氧化活性。

2.6.3 α -淀粉酶的体外抑制活性

α -淀粉酶作为催化淀粉分子内部 α -1,4-糖苷键水解的关键酶, 其活性高低直接决定着淀粉在肠道内的消化速率, 因此通过测定样品对该酶的抑制能力可以较好地评估其在延缓碳水化合物消化、调控餐后血糖方面的潜在功效^[45], 本研究在体外酶促反应体系的基础上测定了 CSR 及 OSR 对 α -淀粉酶活力的影响 (图 6A), 并通过线性回归拟合得到相应的还原糖释放曲线方程 (图 6B)。

从测定结果来看, 空白对照组的酶活力值为 0.113 5 mmol min⁻¹ mL⁻¹, 对应的反应曲线方程为 $y=0.113\ 5x+0.024\ 8$, 其代表了在不存在任何抑制剂的体外模拟体系中 α -淀粉酶的催化淀粉消化的能力; 在加入 OSR 后酶活值显著下降至 0.073 5 mmol min⁻¹ mL⁻¹, 对应的曲线方程为 $y=0.073\ 5x+0.226\ 9$, 抑制率约为 34.9%; 而 CSR 展现出最为突出的抑制效果, 酶活值进一步降低至 0.040 5 mmol min⁻¹ mL⁻¹, 其曲线方程为 $y=0.040\ 5x+0.293$, 抑制率高达 64.10%, 低于阳性对照阿卡波糖的酶活抑制率 74.98%。CSR 显著更低的酶活值表明其拥有更强的降糖潜力, 这一结果与本章前述小节关于生物活性物质含量的数据一致。已有研究证实赤松茸提取物对 α -淀粉酶具有良好的抑制活性, 当复合食用菌提取物浓度为 2 mg mL⁻¹ 时其对 α -淀粉酶的抑制率可达 50.01%^[46]。需要指出的是, 体外酶活性抑制实验反映的是样品提取物在特定反应体系中对酶的直接抑制作用, 其结果可作为预测样品体内降糖潜力的参考指标之一, 但食物基质效应、消化动态过程及个体差异等因素均可能影响其在体内的实际功效。Zhai 等^[47]通过体外液态培养赤松茸菌丝, 并从中提取了胞外多糖, 将此多糖饲喂给造模后的糖尿病大鼠, 发现该多糖既能降低大鼠的血糖应答水平, 同时还能显著降低大鼠的总胆固醇含量及转氨酶活性等生理生化指标。

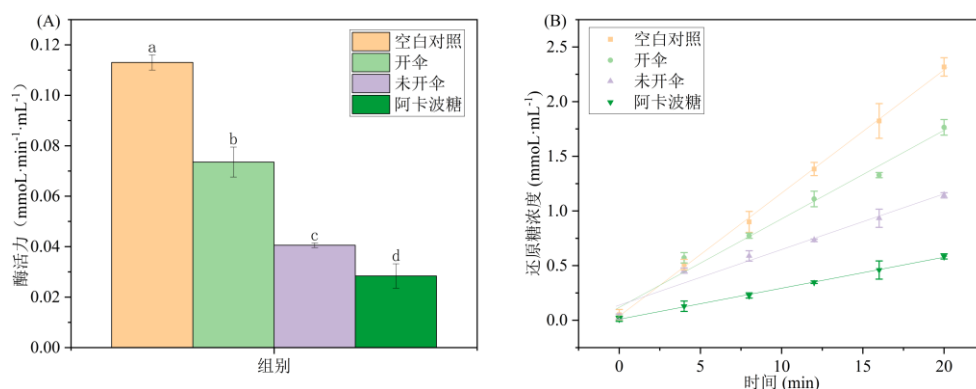


图 6 两采收成熟度赤松茸的 α -淀粉酶活力 (A) 及还原糖释放曲线 (B)

Fig.6 α -amylase enzyme activity (A) and reducing sugar release curves (B) of *S. rugosoannulata* at two harvest maturity stages

2.7 赤松茸粉的化学组成成分定性鉴定

本研究采用 LC-MS 对 CSR 及 OSR 的植物化学成分进行了定性鉴定, 经合并平行样中重复峰后, 两样品中共检测出超过 80 种化合物, 其中多酚类物质是赤松茸粉中最为主要的植物化学成分, 部分代表化合物见表 4。CSR 及 OSR 共有的酚类化合物包括表没食子儿茶素没食子酸酯和儿茶素, CSR 含有的酚类物质种类更加多样。开伞阶特有的酚类物质包括恩贝林、9(R)-HODE、 α -卡姆洛酸、8-去甲基四环霉素 C 及 Cartorimine。CSR 检出的独有的酚类及其衍生物包括 6-姜酚、(-)-表儿茶素、4-氨基儿茶酚、苔色酸甲酯及高香草酸等, 这些化合物含有丰富的酚羟基, 赋予了样品较强的氢供给能力, 这也印证了 CSR 在自由基清除能力上的优势。同时, 丰富的羟基也与 OSR 的淀粉酶抑制活力紧密相关。研究指出, 多酚作为 α -淀粉酶抑制剂, 其与淀粉酶的作用依赖其含有的 -OH 基团与 α -淀粉酶中氨基酸侧链上的活性位点的结合^[48]。此外, 含有丰富羟基的 CSR 还可以通过与淀粉通过疏水相

互作用及氢键增强淀粉链的有序排列，形成 V 型复合物，进而降低消化酶对淀粉的可及性^[49]。除酚类物质外，样品中还检测出有机酸类、糖类及其衍生物、氨基酸及多肽类、核苷酸类等多种植物化学成分。CSR 特有的 9,10-二羟基十六烷酸、多孔菌甾酮 A、GSSG（氧化型谷胱甘肽）以及 OSR 特有的 11,12,13-三羟基-9-十八烯酸、UDP-N-乙酰-D-甘露糖胺、GABA（ γ -氨基丁酸）等均为具有潜在生物活性的功能成分。Papoutsis 等^[50]系统综述了水果、蔬菜及食用菌中具有 α -淀粉酶和 α -葡萄糖苷酶抑制活性的提取物，明确指出黄酮类、有机酸类、萜类及生物碱等化合物是主要的活性贡献者，且提取物的酶抑制活性与原料的采收期、成熟度密切相关。Wang 等^[9]的研究聚焦于赤松茸的营养与生理活性，证实其富含多酚、黄酮及三萜类化合物，这些成分在抗氧化、抗炎及抗肿瘤方面具有明确功效。需要指出的是，本研究鉴定出的化合物种类丰富多样，多酚类物质虽被认为是重要的活性组分，但其他成分如有机酸、核苷酸糖类及生物碱等是否参与降糖作用的发挥仍有待进一步研究。

表 6 LC-MS 鉴定出 CSR 及 OSR 中的部分成分

Table 6 Compounds identified by LC-MS in CSR and OSR				
来源	洗脱时间	化学式	m/z	化合物名称
CSR & OSR	11.11	C ₂₂ H ₁₈ O ₁₁	457.08	没食子儿茶素没食子酸酯
CSR & OSR	11.174	C ₁₅ H ₁₄ O ₆	289.0749	儿茶素
CSR	1.704	C ₁₇ H ₂₆ O ₄	293.1759	6-姜酚
CSR	11.275	C ₁₅ H ₁₄ O ₆	289.0719	(-)-表没食子儿茶素
CSR	11.436	C ₆ H ₇ NO ₂	124.0404	4-氨基儿茶酚
CSR	11.918	C ₉ H ₁₀ O ₄	181.0507	香草酸
OSR	1.778	C ₁₇ H ₂₆ O ₄	293.1763	恩贝林
OSR	2.261	C ₁₈ H ₃₀ O ₃	293.2123	α -亚麻酸
OSR	11.116	C ₂₂ H ₁₈ O ₁₁	457.0775	8-去甲四环素霉素 C

3 结论

本文系统比较了未开伞（CSR）与开伞（OSR）两个采收成熟度赤松茸粉的品质特性与功能活性。结果表明，CSR 的蛋白质含量（27.06%）、灰分含量（9.97%）及总氨基酸含量（20.63 g/100 g）均显著高于 OSR（20.54%、7.98%、15.45 g/100 g），碳水化合物含量则较低；CSR 的 L^* 值（88.36）显著高于 OSR（60.26），色泽更浅更亮，粉体持水力（5.47 g g⁻¹）和振实密度更优，预示其更好的加工适应性。游离氨基酸分析显示，CSR 总游离氨基酸含量（34.28 mg g⁻¹）为 OSR（16.35 mg g⁻¹）的两倍以上，滋味活度值（TAV）评价表明谷氨酸（TAV=15.80）和丙氨酸（TAV=7.07）是 CSR 味觉的主要贡献者，赋予其浓郁的鲜甜风味。生物活性物质测定中，CSR 的总多酚（9.35 g/100g）、粗多糖（10.12 g/100g）及总黄酮含量均显著高于 OSR；抗氧化实验表明，CSR 对 DPPH 和 ABTS⁺ 自由基的清除率（10 mg mL⁻¹ 时分别为 87.78%和 86.76%）均显著优于 OSR； α -淀粉酶抑制活性测试显示，CSR 的抑制率高达 64.10%，远高于 OSR（34.90%）。LC-MS 定性分析进一步确认 CSR 含有更丰富的多酚类化合物（如 6-姜酚、表儿茶素等），为其强抗氧化及降糖活性提供了物质基础。综上所述，未开伞赤松茸粉在营养品质、风味特征、抗氧化能力及 α -淀粉酶抑制活性方面均显著优于开伞赤松茸粉，是开发低 GI 功能性主食的优质原料。值得指出的是，子实体发育是一个连续的生物学过程，本研究仅选取了两个极端成熟度进行对比，虽明确了未开伞阶段的原料优势，但未能揭示品质与功能活性随成熟度推进的连续动态变化规律。未来研究可进一步增设半开伞等中间过渡阶段的样品，构建多梯度成熟度样品体系，以系统解析赤松茸品质特性与功能活性的动态变化规律，为精准确定最优采收期提供更充分的科学依据。本研究为赤松茸的科学采收及高附加值产品开发提供了理论依据。

参考文献

[1] ZHOU Y-C, LIU J-M, ZHAO Z-P, et al. The national and provincial prevalence and non-fatal burdens of diabetes in China from 2005 to 2023 with projections of prevalence to 2050 [J]. Military Medical Research, 2025, 12(1): 28.

[2] OJO O, OJO O O, ONILUDE Y, et al. Current Advances and Future Prospects in the Use of a Low-Carbohydrate Diet in Managing People with Type 2 Diabetes: A Systematic Review of Randomised Controlled Trials [J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2025, 22(9): 112-116.

- [3] FU B X. Asian noodles: History, classification, raw materials, and processing [J]. Food Research International, 2008, 41(9): 888-902.
- [4] CUI C, WANG Y, YING J, et al. Low glycemic index noodle and pasta: Cereal type, ingredient, and processing [J]. Food Chemistry, 2024, 431: 137188.
- [5] 孙康娜, 阮珍珍, 李岩. 小麦、酶解青稞低 GI 面条加工工艺研究[J]. 中国食品添加剂, 2025, 36(3): 142-149.
- [6] JANG H L, BAE I Y, LEE H G. In vitro starch digestibility of noodles with various cereal flours and hydrocolloids [J]. LWT-Food Science and Technology, 2015, 63(1): 122-128.
- [7] TANG P, ZHANG S, MENG L, et al. Effects of different content of EGCG or caffeic acid addition on the structure, cooking, antioxidant characteristics and in vitro starch digestibility of extruded buckwheat noodles [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2023, 252: 126426.
- [8] LIU Y-T, SUN J, LUO Z-Y, et al. Chemical composition of five wild edible mushrooms collected from Southwest China and their antihyperglycemic and antioxidant activity [J]. Food and Chemical Toxicology, 2012, 50(5): 1238-1244.
- [9] WANG Q, YANG X, ZHU J. Nutritional and Therapeutic Potential of *Stropharia rugosoannulata* and *Macrolepiota procera*: From Composition to Health-Promoting Effect [J]. Journal of Fungi, 2025, 11(4): 259.
- [10] MA M, ZHAN Y, XIAO X, et al. Pancreatic lipase-inhibiting polysaccharide from *Stropharia rugosoannulata*: Structural characterization and interaction mechanisms [J]. Food Research International, 2025, 206: 116063.
- [11] WANG C, ZHANG X, ZENG Z, et al. Transcriptome Analysis Explored the Differential Genes' Expression During the Development of the *Stropharia rugosoannulata* Fruiting Body [J]. Frontiers in Genetics, 2022, 13: 1638-1644.
- [12] 孟德梅, 奚志媛, 张亚璇, 等. 两种采收期香菇营养品质和抗氧化能力比较[J]. 中国食品学报, 2018, 18(4): 228-234.
- [13] 王赵改, 杨慧, 李靖, 等. 采收期对不同品种双孢蘑菇品质的影响[J]. 河南农业科学, 2012, 41(7): 107-110.
- [14] 程文芳, 罗艺娟, 童爱均, 等. 低 GI 海带香菇面条加工工艺优化及体外消化特性研究[J]. 福建农业科技, 2024, 55(1): 66-74.
- [15] GB 5009.3-2016. 食品中水分的测定[S].
- [16] GB 5009.5-2025. 食品中蛋白质的测定[S].
- [17] GB 5009.6-2025. 食品中脂肪的测定[S].
- [18] GB 5009.4-2016. 食品中灰分的测定[S].
- [19] 骆勇. 食用菌深加工系列产品开发与品质评价[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2024.
- [20] GB 5009.124-2016. 食品中氨基酸的测定[S].
- [21] LEE Y-L, JIAN S-Y, MAU J-L. Composition and non-volatile taste components of *Hypsizygus marmoreus* [J]. LWT-Food Science and Technology, 2009, 42(2): 594-598.
- [22] HUFNAGEL J C, HOFMANN T. Quantitative reconstruction of the nonvolatile sensometabolome of a red wine [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2008, 56(19): 9190-9199.
- [23] 刘新, 刘政芳, 张彦, 等. 基于游离氨基酸和感官鲜度评价的复合鲜味产品的呈味特征分析[J]. 食品工业科技, 2023, 44(7): 287-293.
- [24] WARMKE R, BELITZ H D, GROSCH W. Evaluation of taste compounds of Swiss cheese (Emmentaler) [J]. Zeitschrift für Lebensmittel-Untersuchung und Forschung, 1996, 203(3): 230-235.
- [25] BELWAL T, DHYANI P, BHATT I D, et al. Optimization extraction conditions for improving phenolic content and antioxidant activity in *Berberis asiatica* fruits using response surface methodology (RSM) [J]. Food Chemistry, 2016, 207: 115-124.
- [26] 张建芳. 茶树菇多糖和黄酮对 DSS 诱导结肠炎小鼠的保护作用[D]. 南昌: 南昌大学, 2022.
- [27] SN/T 4260-2015. 出口植物源食品中粗多糖的测定 苯酚-硫酸法[S].
- [28] 何晋浙, 冯婷婷, 孙培龙. 香菇总生物碱提取工艺优化及其抗氧化研究[J]. 食品与发酵工业, 2014, 40(5): 229-234.
- [29] BRAAKSMA A, SCHAAP D J, SCHIPPER C M A. Time of harvest determines the postharvest quality of the common mushroom *Agaricus bisporus* [J]. Postharvest Biology and Technology, 1999, 16(2): 195-198.
- [30] BARROS L, BAPTISTA P, ESTEVINHO L M, et al. Effect of Fruiting Body Maturity Stage on Chemical Composition and Antimicrobial Activity of *Lactarius* sp. Mushrooms [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2007, 55(21): 8766-8771.
- [31] 孔子浩, 王宏雨, 翁梦婷, 等. 不同生长发育阶段紫芝营养成分含量的研究[J]. 食品安全质量检测学报, 2024, 15(9): 296-303.
- [32] 孙向东, 王乐凯, 任红波, 等. 色彩色差计在面粉色泽测定上的应用[J]. 粮油食品科技, 2002, 2: 31-33.
- [33] 王玮, 林俊芳, 聂斐, 等. 不同草菇栽培菌株的比较[J]. 食用菌学报, 2012, 19(2): 59-62.

- [34] 谢振飞,张国庆,张薇薇,等.皱环球盖菇酪氨酸酶基因家族鉴定及表达分析[J].菌物学报,2025,44(10):78-92.
- [35] ZHAO X, ZHANG Y, WANG X, et al. Structure, physicochemical properties, and hypolipidemic activity of soluble dietary fiber obtained from button mushroom (*Agaricus bisporus*) [J]. Food Chemistry : X, 2025, 29: 102657.
- [36] HITAYEZU E, KANG Y-H. Effect of particle size on the physicochemical and morphological properties of *Hypsizygus marmoreus* mushroom powder and its hot-water extracts [J]. Food Science and Preservation, 2021, 28(4): 504-549.
- [37] LIANG L, ZHANG P, LU J, et al. Exploring the Mechanisms of Amino Acid and Bioactive Constituent Formation During Fruiting Body Development in *Lyophyllum decastes* by Metabolomic and Transcriptomic Analyses [J]. Journal of Fungi, 2025, 11(8): 106-112.
- [38] QIU Z, GAO Y, WANG S, et al. Mechanism Underlying Light Intensity-Induced Melanin Synthesis of *Auricularia heimuer* Revealed by Transcriptome Analysis [J]. Cells, 2023, 12(1): 56.
- [39] 于慧萍,胡思,黄文,等.干制方式对大球盖菇滋味物质的影响[J].食品工业科技,2021,42(9):251-256.
- [40] LIU Y, MENG F, TANG P, et al. Widely Targeted Metabolomics Analysis of the Changes to Key Non-volatile Taste Components in *Stropharia rugosoannulata* Under Different Drying Methods [J]. Frontiers in Nutrition, 2022, 9: 884400.
- [41] 范婷婷,赵晓燕,李晓贝,等.人工栽培和野生羊肚菌游离氨基酸主成分分析及综合评价[J].食品科学,2022,43(6):295-302.
- [42] 黄珊.大球盖菇酚类物质的提取及其抗氧化性研究[D].福州:福建农林大学,2010.
- [43] 黎欣欣.基于三相法的大球盖菇多糖提取方法优化及抗氧化和免疫调节活性研究[D].郑州:河南农业大学,2023.
- [44] 杜敏华,王小立,苏海飞,等.大球盖菇多糖超声波提取及抗氧化活性[J].食品研究与开发,2013,34(16):18-22.
- [45] ZHOU X, WANG C, YUE S, et al. Mutual interactions between α -amylase and amyloglucosidase in the digestion of starch with distinct chain-length distributions at a fully gelatinized state [J]. Food & Function, 2022, 13(6): 3453-3464.
- [46] 张博华,张明,范祺,等.三种食用菌多糖及其复合多糖功能性评价研究[J].中国果菜,2021,41(6):74-79.
- [47] ZHAI X, ZHAO A, GENG L, et al. Fermentation characteristics and hypoglycemic activity of an exopolysaccharide produced by submerged culture of *Stropharia rugosoannulata* #2 [J]. Annals of Microbiology, 2013, 63(3): 1013-1020.
- [48] KAWAMURA-KONISHI Y, WATANABE N, SAITO M, et al. Isolation of a New Phlorotannin, a Potent Inhibitor of Carbohydrate-Hydrolyzing Enzymes, from the Brown Alga *Sargassum patens* [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2012, 60(22): 5565-5570.
- [49] HU Z, XU Y, XIONG Y, et al. Mechanisms, Functions, Research Methods and Applications of Starch-Polyphenol Complexes in the Synergistic Regulation of Physiological Parameters [J]. Foods, 2025, 14(18): 3219.
- [50] PAPOUTSIS K, ZHANG J, BOWYER M C, et al. Fruit, vegetables, and mushrooms for the preparation of extracts with α -amylase and α -glucosidase inhibition properties: A review [J]. Food Chemistry, 2021, 338: 128119.