

# 不同培养基的平菇多酚及氨基酸含量分析

杨洋<sup>1</sup>, 马珊<sup>2</sup>, 邱继尧<sup>3</sup>, 贾培松<sup>4</sup>, 努尔孜亚·亚力买买提<sup>4</sup>, 李斌斌<sup>5</sup>, 张磊<sup>3\*</sup>

(1. 新疆农业大学食品科学与药学学院, 新疆乌鲁木齐 830052) (2. 新疆科技项目服务中心, 新疆乌鲁木齐 830052) (3. 新疆农业大学林学与园艺学院, 新疆乌鲁木齐 830052) (4. 新疆农业科学院植物保护研究所, 新疆乌鲁木齐 830052) (5. 新疆农垦科学院农产品加工研究所, 新疆石河子 832000)

**摘要:** 该研究将不同粉碎处理的葡萄籽和朝鲜蓟叶添加在培养基中, 主要研究了工业副产物对平菇营养物质及活性成分的影响。以总酚含量、总黄酮含量、DPPH、ABTS 自由基清除能力及 Fe<sup>3+</sup>还原能力为检测指标对其抗氧化活性进行评估; 此外, 利用相关性分析、主成分分析和偏最小二乘判别等分析手段对平菇氨基酸组成进行探究。结果表明, 培养基中添加葡萄籽粉和朝鲜蓟叶粉, 其总酚、总黄酮含量及抗氧化活性均高于 CK 组, 尤其以氨基酸组成及含量显著增加, 且氨基酸高贡献组分相对较多, 前两个主成分可解释的累计方差达 94.4%, 其中对 A1 样品高贡献率的氨基酸有 Ala、Tyr、Lys、Ser、Thr、Asp、Arg、Glu、Phe 和 His; 对 A2 高贡献率氨基酸包括 Ile、Val、Gly、Pro 和 Leu, 而 CK 组不存在高贡献率的氨基酸组分。因此, 葡萄籽和朝鲜蓟叶可代替传统棉籽壳培养基培育平菇, 有助于平菇营养物质的富集及活性成分的提高。这些结果为工业副产物的综合利用提供理论依据, 具有一定的实际应用价值和意义。

**关键词:** 平菇; 抗氧化; 氨基酸; 主成分分析 (PCA); 偏最小二乘判别分析 (PLS-DA)

文章编号: 1673-9078(2022)01-271-281

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2022.1.0440

## Analysis of the Contents of Polyphenol and Amino Acid of *Pleurotus ostreatus* in Different Media

YANG Yang<sup>1</sup>, MA Shan<sup>2</sup>, QIU Jiyao<sup>3</sup>, JIA Peisong<sup>4</sup>, NU Erziya·maimaiti<sup>4</sup>, LI Binbin<sup>5</sup>, ZHANG Lei<sup>3\*</sup>

(1.College of Food Science and Pharmacy, Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830052, China)

(2.Xinjiang Science and Technology Project Service Center, Urumqi 830052, China)

(3.College of Forestry and Horticulture, Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830052, China)

(4.Institute of Plant Protection, Xinjiang Academy of Agricultural Sciences, Urumqi 830052, China) (5.Institute of Agricultural Products Processing, Xinjiang Academy of Agricultural Reclamation Sciences, Shihezi 832000, China)

**Abstract:** In this study, the grape seeds and artichoke leaves subjected to different crushing treatments were added to the culture medium, and the effects of industrial by-products on the nutrients and active components of *Pleurotus ostreatus* were mainly investigated. Using total phenolic content, total flavonoid content, DPPH and ABTS free radical scavenging capacities and Fe<sup>3+</sup> reducing capacity as the analysis indicators, the antioxidant activity was evaluated. In addition, analysis methods such as correlation analysis, principal component analysis and partial least squares discriminant analysis were used to explore the amino acid composition of *Pleurotus ostreatus*. The results showed that adding grape seed powder and artichoke leaf powder to the culture medium led to higher contents of total phenolics and total flavonoids and higher antioxidant activity compared with those of the CK group, especially the component number and content of amino acids increased significantly. There were relatively more high amino acid contributors, and the first two principal components accounted for 94.4% of the

引文格式:

杨洋,马珊,邱继尧,等.不同培养基平菇多酚及氨基酸含量的分析[J].现代食品科技,2022,38(1):271-281

YANG Yang, MA Shan, QIU Jiyao, et al. Analysis of the contents of polyphenol and amino acid of *Pleurotus ostreatus* in different media [J]. Modern Food Science and Technology, 2022, 38(1): 271-281

收稿日期: 2021-04-22

基金项目: 新疆自治区区域协同创新项目 (2018E02040)

作者简介: 杨洋 (1994-), 女, 硕士研究生, 研究方向: 果蔬贮藏及物流工程, E-mail: 1315048067@qq.com

通讯作者: 张磊 (1983-), 男, 副研究员, 研究方向: 农产品加工及副产物综合利用, E-mail: zlei\_xj@sina.com

cumulative variance, with Ala, Tyr, Lys, Ser, Thr, Asp, Ary, Glu, Phe and His being the high contributors to A1 sample, Ile, Val, Gly, Pro and Leu being the high contributors to A2 sample, and no amino acid as the high contributor in the CK group. Therefore, grape seeds and artichoke leaves can be used to replace the traditional cottonseed hull culture medium to cultivate *Pleurotus ostreatus*, which is conducive to the enrichment of nutrients and the improvement of active components of *Pleurotus ostreatus*. These results provide a theoretical basis for the comprehensive utilization of industrial by-products, and have certain practical application value and significance.

**Key words:** *Pleurotus ostreatus*; antioxidation; amino acids; principal component analysis; partial least squares -discriminant analysis

葡萄籽作为酿酒副产物, 不仅保留了大量抗氧化酚类化合物<sup>[1]</sup>, 同时富含维生素、矿物质、脂类、蛋白质、氨基酸等营养成分。朝鲜蓟 (*Cynara scolymus* L.), 属菊科菜蓟属多年生草本植物, 又名洋蓟<sup>[2]</sup>, 除了可食用的花蕾部分, 不可食用的副产物部分包括外部苞片及茎叶, 占整棵植株鲜重的 80%~85%<sup>[3]</sup>, 富含多酚和膳食纤维<sup>[4]</sup>。超微粉碎技术是一种通过对原料进行碾磨、冲击、剪切等作用, 将物料粉碎至 10~25  $\mu\text{m}$  以下的过程<sup>[5]</sup>, 处理后的物料流动性、溶解性增加, 更容易被消化吸收<sup>[6]</sup>, 并更有效的释放原料的抗氧化等活性成分。

平菇 (*Pleurotus ostreatus*) 是担子菌纲伞菌目侧耳科侧耳属食用菌<sup>[7]</sup>, 在世界各地广泛种植和消费, 是继香菇 (*Lentinus edodes*)、双孢菇 (*Agaricus bisporus*) 后, 产量跃居中国第三位的食用菌<sup>[8]</sup>。平菇含有丰富的活性成分及营养物质, 其子实体富含膳食纤维、矿物质、蛋白质和较低的脂肪含量, 使其成为低热量饮食中的绝佳选择<sup>[9]</sup>。有研究表明改变培养基的组成对增加平菇产量有重要作用<sup>[7]</sup>, 并且在使用富含木质素、纤维素, 同时具有一定抑菌作用的活性物质替代传统以棉籽壳为主的培养基, 可明显降低食用菌栽培及菌棒生产过程中的杂菌污染率<sup>[10]</sup>。

平菇的升生长周期短, 可有效分解、利用其它有机物, 并实现产业化生产, 有关平菇培养基的研究,

主要从培养基组成比例的优化对其产量的影响来实现的。关于葡萄籽和朝鲜蓟副产物的综合利用研究较为广泛, 但将这两种副产物以不同比例添加到培养基中, 并比较其生物活性强弱的研究较少。因此为满足消费者对健康饮食的需求及对食品加工副产物的综合开发利用, 本文通过不同粉碎处理的葡萄籽和朝鲜蓟叶, 替代部分棉籽壳为培养基, 添加到菌棒中, 培养富含酚类物质的高营养食用菌, 实现培养基中固体废弃物到可食用物质的生物转化, 探究不同培养基对平菇多酚、抗氧化活性及氨基酸含量的影响, 以期在提高工业副产物利用率的同时, 进一步提高平菇的营养成分及功能品质。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料与试剂

#### 1.1.1 培养基组成

食用菌的培育在新疆农业科学院植保所食用菌实验室完成。培养基配料方式按平菇菌种生产配方进行配制、装袋, 棉籽壳提前预湿 12 h 以上, 121  $^{\circ}\text{C}$  高压蒸汽灭菌 120 min, 固体菌种接种后, 统一放于 25  $^{\circ}\text{C}$  培养箱培养, 菌袋菌丝长满后继续在 25  $^{\circ}\text{C}$  培养 7~10 d, 采收后选取完整、无损伤、未发生褐变的平菇样品, 于 -80  $^{\circ}\text{C}$  下冻存储用。具体分组及培养基组成见表 1。

表 1 平菇培养基组成

Table 1 Culture medium composition of *Pleurotus ostreatus*

组号	培养基添加量/g									
	棉籽壳	GSOP	SPGS	ALOP	UPAL	麸皮	蔗糖	石膏粉	石灰	碳酸钙
CK	200	-	-	-	-	10	2	2	2	0.6
A1	100	100	-	-	-	10	2	2	2	0.6
A2	100	-	100	-	-	10	2	2	2	0.6
B1	100	-	-	100	-	10	2	2	2	0.6
B2	100	-	-	-	100	10	2	2	2	0.6

注: GSOP 为葡萄籽普通粉; SPGS 为葡萄籽超微粉; ALOP 为朝鲜蓟叶普通粉; UPAL 为朝鲜蓟叶超微粉; “-”表示未添加; CK 为棉籽壳对照组, A1 为 GSOP 组, A2 为 SPGS 组, B1 为 ALOP 组, B2 为 UPAL 组。

#### 1.1.2 试验试剂

没食子酸 (纯度>98%)、芦丁 (纯度>98%)、6-羟基-2,5,7,8-四甲基苯并二氢吡喃-2-羧酸 (Trolox, 纯

度>99%)、1,1-二苯基-2-苦基肼 (DPPH, 纯度>98%)、2,4,6-三吡啶基三嗪 (TPTZ, 纯度>98%)、2,2'-联氨-双(3-乙基苯并噻唑啉-6-磺酸)二胺盐 (ABTS, 纯

度>98%)均购于上海源叶生物科技有限公司; Folin-Ciocalteu 试剂购于北京索莱宝科技有限公司; 氨基酸混合标准品(不含色氨酸)购于北京爱邦科技发展有限公司; 其他试剂均为国产分析纯。

### 1.1.3 仪器与设备

KQ-500DE 超声波清洗机, 江苏昆山市超声仪器有限公司; SH200F+WD03 石墨消解仪、K9860 全自动凯氏定氮仪, 济南海能仪器股份有限公司; N-1300S-W 旋转蒸发仪, 上海贤德实验仪器有限公司; LA8080 全自动氨基酸分析仪, 日立(中国)有限公司; FD-1C-50 冷冻干燥机, 北京博医康实验仪器有限公司; UV-1800 紫外可见分光光度计, 日本岛津公司; 85-2A 双向恒温磁力搅拌器, 金坛市医疗仪器厂。

## 1.2 试验方法

### 1.2.1 普通粉、超微粉及平菇样品的制备

(1) 葡萄籽普通粉(grape seed ordinary powder, GSOP)制备: 酿酒后的葡萄籽经自然晾晒、干燥后粉碎至 20 目得到 GSOP;

(2) 葡萄籽超微粉(superfine powder of grape seed, SPGS)制备: 将 GSOP 进行超微粉碎, 得到 SPGS;

(3) 朝鲜蓟叶普通粉(artichoke leaf ordinary powder, ALOP)制备: 朝鲜蓟叶经自然晾干, 粉碎至 20 目得到 ALOP;

(4) 朝鲜蓟叶超微粉(ultrafine powder of artichoke leaf, UPAL)制备: 将 ALOP 进行超微粉碎, 得到 UPAL。

平菇样品的制备: 将低温保存的平菇样品进行真空冷冻干燥, 粉碎后过 20 目筛, 得到干燥均匀的平菇粉末, 低温保存备用。

### 1.2.2 基础理化指标检测

灰分的测定在 550 °C 马弗炉中高温灼烧 4 h<sup>[11]</sup>、蛋白质含量采用凯氏定氮法测定<sup>[12]</sup>、使用 30~60 °C 沸程石油醚为溶剂采用索氏抽提法进行脂肪含量测定<sup>[13]</sup>、碳水化合物、总能量按照公式(1)、(2)计算:

$$\text{碳水化合物质量(g)} = 100 - [\text{蛋白质质量(g)} + \text{脂肪质量(g)} + \text{灰分质量(g)}] \quad (1)$$

$$\text{总能量(kJ)} = 17 \times [\text{粗蛋白质量(g)} + \text{碳水化合物质量(g)}] + 37 \times \text{脂肪质量(g)} \quad (2)$$

由于蘑菇中非蛋白质氮化化合物的比例较高, 在其细胞壁中含有大量不易消化的几丁质(甲壳素)<sup>[14]</sup>。基于 70% 的可消化蛋白质的存在, 蛋白质含量计算转换因子为 4.38 (0.7×6.25), 用于将蘑菇样品中的%N 转换为%粗蛋白<sup>[15]</sup>。

### 1.2.3 平菇多酚的提取

平菇多酚的提取参照文献方法<sup>[16]</sup>进行。称取平菇粉末加入无水甲醇(1:20, g/mL), 于 25 °C 下磁力搅拌提取 1.5 h, 25 °C 超声提取 30 min, 离心取上清液, 平菇残渣按上述方法进行二次提取, 合并上清液, 真空旋蒸至干, 无水甲醇定容到 5 mL, -40 °C 冷藏备用。

### 1.2.4 总酚、总黄酮含量的测定

总酚含量的测定采用 Folin-酚法<sup>[17,18]</sup>: 平菇甲醇提取液 0.1 mL, 依次加入 6.0 mL 的蒸馏水, 0.5 mL 福林-酚试剂、1.5 mL 碳酸钠溶液(200 g/L)混合, 蒸馏水定容至 10 mL, 摇匀, 避光反应 2 h, 于 765 nm 处测定吸光值。以没食子酸溶液作为标准溶液, 不加标准液的溶液作为对照, 以没食子酸的质量浓度为横坐标, 吸光值为纵坐标绘制标准曲线。

总黄酮含量测定参照文献<sup>[19-21]</sup>并稍作修改: 平菇甲醇提取液 0.5 mL 和 1.5 mL 5% 的亚硝酸钠混合, 摇匀静置 6 min, 加入 0.3 mL 10% 的硝酸铝, 摇匀静置 6 min 后, 加入 1 mL 4% 的氢氧化钠, 95% 乙醇定容至 5 mL, 摇匀静置 15 min, 于 510 nm 处测定吸光值。以芦丁溶液作为标准溶液, 不加标准液的溶液作为对照, 绘制标准曲线。

### 1.2.5 平菇抗氧化活性的测定

#### 1.2.5.1 DPPH 自由基清除能力测定

参照文献方法<sup>[22]</sup>, 将 0.1 mL 平菇甲醇提取液加入到 3.9 mL 2.5×10<sup>-2</sup> mg/mL DPPH 甲醇溶液中(现配现用), 室温避光处反应 30 min, 于 517 nm 处测定吸光度。DPPH 自由基的百分清除率按公式(3)计算:

$$\text{DPPH 自由基清除率/\%} = \frac{A_0 - A}{A_0} \times 100\% \quad (3)$$

式中:

A<sub>0</sub>——未加待测液反应后的吸光度;

A——加入待测液反应后测得的吸光度。

#### 1.2.5.2 ABTS 自由基清除能力测定

参照文献方法<sup>[23]</sup>, 取 5 mL 7 mmol/L ABTS 溶液和 88 μL 140 mmol/L 过硫酸钾溶液, 均匀混合, 室温避光放置 12~16 h 后使用。将配置好的 ABTS 工作液用无水乙醇稀释至其在 734 nm 波长下测得吸光度为 0.700±0.020。平菇甲醇提取物 50 μL 加入到 4.0 mL 稀释后的 ABTS 溶液中, 室温避光处反应 10 min, 于 734 nm 处测定吸光值。ABTS 自由基的百分清除率按公式(4)计算:

$$\text{ABTS 自由基清除率/\%} = \frac{A_0 - A}{A_0} \times 100\% \quad (4)$$

式中:

A<sub>0</sub>——未加待测样品反应后的吸光度;

A—加入待测样品反应后测得的吸光度。

### 1.2.5.3 Fe<sup>3+</sup>还原能力测定

参照文献方法<sup>[24]</sup>, 20 mmol/L FeCl<sub>3</sub>·6H<sub>2</sub>O 溶液: 10 mmol/L TPTZ 溶液: 0.3 mol/L 的醋酸钠缓冲液 (pH 为 3.6) 按 1:1:10 的体积比配置成 FRAP 混合液, 置于 37 °C 水浴中备用。在每支试管中加入 0.1 mL 的甲醇提取液, 0.3 mL 蒸馏水, 3 mL 的 FRAP 工作液, 混匀, 37 °C 水浴下反应 10 min, 在 593 nm 波长下测吸光度。Fe<sup>3+</sup>还原能力以  $\Delta A=A-A_0$  表示, 其中 A<sub>0</sub> 为未加待测液反应后的吸光度, A 为加入待测样品反应后测得的吸光度。

### 1.2.6 平菇氨基酸含量测定

#### 1.2.6.1 氨基酸前处理

平菇氨基酸含量测定参照国标<sup>[25]</sup>方法略作修改: 准确称取平菇粉末 0.20 g 于水解管中, 用 10 mL 6 mol/L 盐酸溶液混合均匀, 继续向水解管内加入苯酚 3~4 滴, 将水解管放入冷冻剂中, 冷冻 3 min~5 min, 接到真空泵的抽气管上, 抽真空 (接近 0 Pa), 然后充入氮气, 重复抽真空-充入氮气 3 次后, 在充氮气状态下封口或拧紧螺丝盖。将已封口的水解管放在 110 °C±1 °C 的电热鼓风恒温箱内, 水解 22 h 后, 取出, 冷却至室温。打开水解管, 将水解液过滤至 25 mL 容量瓶内, 用少量水多次冲洗水解管, 水洗液移入同一 25 mL 容量瓶内, 最后用水定容至刻度, 振荡混匀。准确吸取 1.0 mL, 在 45 °C 水浴环境下氮吹至干燥后, 残留物用 1 mL 蒸馏水溶解, 再减压干燥, 最后氮吹至干。用 1.0 mL pH 2.2 柠檬酸钠缓冲溶液加入到干燥后试管内溶解, 振荡混匀后, 吸取溶液通过 0.22 μm 滤膜后, 转移至仪器进样瓶, 为样品测定液, 供仪器测定用。

#### 1.2.6.2 测定条件

采用氨基酸自动分析仪进行氨基酸的分析测定, 自动分析条件为: 分离柱为阳离子交换树脂, 检测波长为 570 nm、440 nm, 缓冲液流速为 0.40 mL/min, 茚三酮溶液流速 0.35 mL/min, 进样量为 20 μL。采用系统自带软件进行数据分析, 对每个样品图谱进行积分后选定校正文件进行计算。每个样品进行 3 次平行测定, 结果取平均值。

### 1.3 数据统计分析

每组试验设置 3 次平行; 试验结果以平均值±标准偏差表示; 数据统计及处理采用 Excel 软件; 使用 Origin Pro 2018c 作图软件绘图及主成分分析; 显著性差异分析及相关性分析使用 IBM SPSS Statistics 26; 显著性水平  $p<0.05$ 。

## 2 结果与讨论

### 2.1 平菇生长情况和基础营养成分分析

培养基是人工配制的、适合不同微生物生长繁殖或积累代谢产物的营养基质<sup>[9]</sup>。如表 2 所示, 不同培养基培育的平菇大小各有差异, 其中普通粉组 (A1、B1 组) 平菇长势和菌盖大小对比 CK 组和超微粉组 (A2 及 B2) 较优。这可能是食用菌菌丝的长势除与谷物自身所含营养成分与含量不同有关外, 还与谷物颗粒间隙、谷物持水性强弱等因素有关<sup>[26]</sup>。罗莹等<sup>[27]</sup>研究金针菇在荞麦、燕麦、大米、玉米碴、黄豆、黑豆、花生 7 种不同谷物培养基上的生长情况, 结果表明, 同一品种金针菇菌丝在谷物培养基上的生长速率与长势并不一致, 且金针菇在黑米培养基上长势最好, 菌丝均匀、浓密。

为探究葡萄籽和朝鲜蓟叶的添加对平菇营养成分的影响, 采用中国食品安全国家标准法对各组平菇基础理化指标进行检测。不同培养基组成培育的平菇基本营养成分检测结果如表 3 所示。试验结果表明, 培养基组成不同对平菇营养成分存在一定差异。在培养基中添加葡萄籽和朝鲜蓟叶粉不会使脂肪、碳水化合物和总能量上升; 但与 CK 组比较, A1、A2 和 B1 组的灰分及蛋白质含量显著提高 ( $p<0.05$ ), 这可能是因为在生长发育过程中, 食用菌可分解吸收培养基中的有机物, 在体内合成蛋白质等营养物质<sup>[28]</sup>; 并且普通粉颗粒间隙大, 超微粉持水能力强, 培养基中添加葡萄籽粉和朝鲜蓟叶粉, 丰富了培养基中的营养成分, 同时提高了平菇的营养成分。

### 2.2 平菇总酚、总黄酮含量分析

平菇总酚、总黄酮含量测定分别采用福林-酚法和硝酸铝-亚硝酸钠比色法, 结果如图 1 所示。与 CK 组相比, 培养基中添加葡萄籽粉和朝鲜蓟叶粉培育的平菇, 总酚、总黄酮含量均有一定程度的提高, 其中普通粉组 (A1、B1 组) 总酚、总黄酮含量最高, 且显著高于超微粉组 (A2、B2 组) ( $p<0.05$ ), 这可能是由于培养基中添加的葡萄籽粉和朝鲜蓟叶粉含有丰富的多酚类物质, 平菇生长的同时不断吸收培养基中的活性成分, 从而增加自身的总酚、总黄酮含量。此外, 与传统棉籽壳基料相比, 葡萄籽和朝鲜蓟叶作为培养基基质中没有锦葵科植物, 无需考虑棉酚的问题<sup>[29]</sup>; 杨久芳<sup>[16]</sup>等的研究还表明, 平菇中总酚、总黄酮的含量随培养基中葡萄籽添加量的增大而增大, 由图 1 可以看出, 朝鲜蓟叶的添加同样利于平菇中总酚、总黄酮的富集和积累。

表2 不同培养基培育的平菇图

Table 2 *Pleurotus ostreatus* samples cultured by different medium composition

组号	子实体总高/mm	菌盖宽/mm	菌柄宽/mm	备注
CK				82.36×43.70×18.75
A1				134.30×66.09×17.28
A2				95.72×47.44×19.34
B1				126.18×55.07×12.52
B2				83.75×59.85×13.97

表3 不同培养基培育平菇基础营养成分及总能量

Table 3 Basic nutrients and total energy of *Pleurotus ostreatus* cultured in different media

组号	营养成分/(g/100 g dw)				总能量 (kJ/100 g dw)
	灰分	脂肪	蛋白质	碳水化合物	
CK	4.90±0.01 <sup>c</sup>	1.75±0.17 <sup>a</sup>	14.72±0.01 <sup>d</sup>	78.63±0.17 <sup>a</sup>	1651.70±3.32 <sup>a</sup>
A1	5.34±0.09 <sup>a</sup>	1.63±0.21 <sup>a</sup>	17.29±0.10 <sup>b</sup>	75.75±0.27 <sup>d</sup>	1641.84±2.88 <sup>b</sup>
A2	5.39±0.04 <sup>a</sup>	1.24±0.19 <sup>ab</sup>	17.57±0.11 <sup>a</sup>	75.80±0.26 <sup>d</sup>	1633.28±4.37 <sup>b</sup>
B1	5.21±0.01 <sup>b</sup>	1.44±0.17 <sup>b</sup>	16.52±0.14 <sup>c</sup>	76.83±0.06 <sup>b</sup>	1640.11±3.40 <sup>b</sup>
B2	4.80±0.03 <sup>c</sup>	1.76±0.18 <sup>a</sup>	14.24±0.02 <sup>c</sup>	79.20±0.16 <sup>c</sup>	1653.62±3.93 <sup>a</sup>

注: 每组结果以平均值±标准方差 (mean±SD) 表示; 同列标注不同字母表示差异显著,  $p < 0.05$ 。

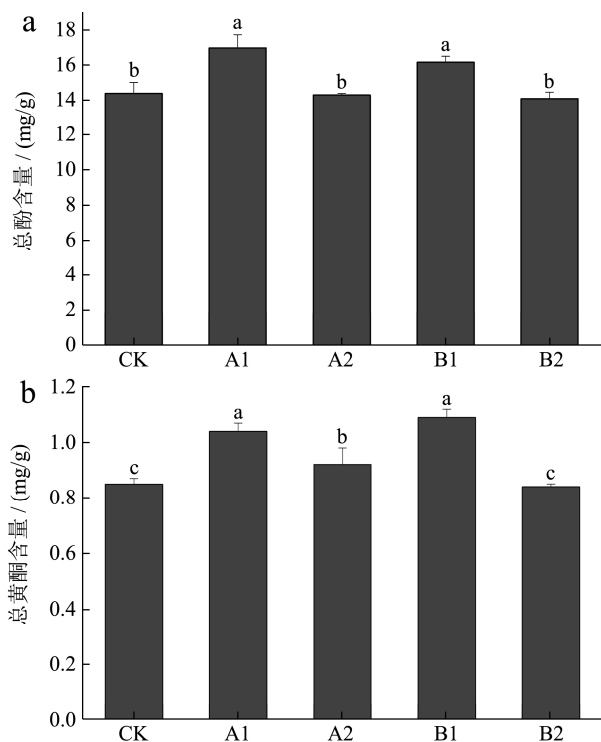


图1 不同培养基对平菇总酚、总黄酮含量的影响

Fig.1 Effects of different media on the contents of total phenols and flavonoids in *Pleurotus ostreatus*

注：图中不同字母表示差异显著， $p < 0.05$ 。图2同。

### 2.3 平菇抗氧化活性分析

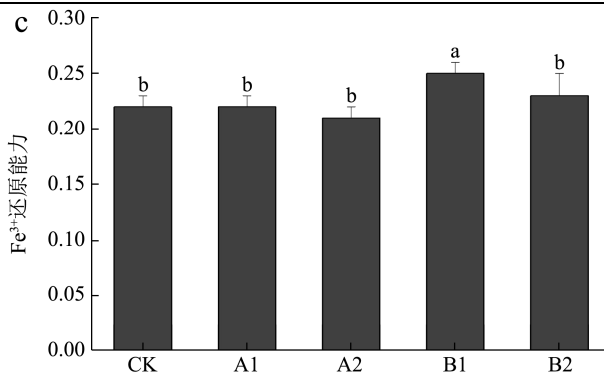
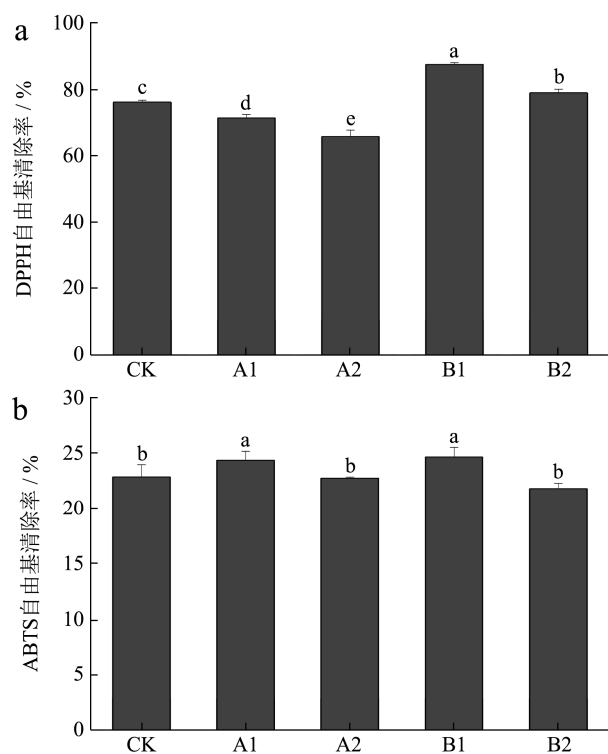


图2 不同培养基对平菇抗氧化活性的影响

Fig.2 Effects of different media on antioxidant activity of *Pleurotus ostreatus*

有研究表明，在一定范围内，平菇提取物浓度越高，自由基清除效率越好。本试验通过检测平菇多酚提取液的 DPPH、ABTS 自由基清除能力和  $Fe^{3+}$  还原能力，探究不同平菇的抗氧化活性强弱，结果如图 2 所示。由图可知，吸取同一浓度、同一体积多酚提取液检测平菇抗氧化活性时，B1 组的 3 个抗氧化活性均强于其他各组，可能是平菇在生长期累积的酚类物质使其 DPPH、ABTS 自由基清除能力和  $Fe^{3+}$  还原能力得到提高。

### 2.4 平菇氨基酸成分与含量分析

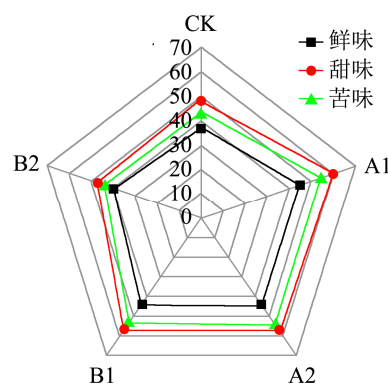


图3 平菇呈味氨基酸雷达图

Fig.3 Random forest map of amino acids in *Pleurotus ostreatus*

游离氨基酸是一类可以被机体吸收、合成蛋白质，并维持机体新陈代谢及免疫反应的化合物<sup>[30]</sup>，也是重要的风味活性成分，从表 4 可以看出，各组平菇中游离氨基酸含量略有差异，其中含量最高的为 A1 组，与 A2、B1 组游离氨基酸含量无显著差异 ( $p > 0.05$ )，但显著高于 CK 和 B2 组 ( $p < 0.05$ )，CK 和 B2 组无显著差异 ( $p > 0.05$ )；构成蛋白质的 20 种氨基酸中，人体必需氨基酸含有 8 种，平菇中含有 7 种，分别为苏

氨酸 (Thr)、缬氨酸 (Val)、甲硫氨酸 (Met)、异亮氨酸 (Ile)、亮氨酸 (Leu)、苯丙氨酸 (Phe) 和赖氨酸 (Lys), 必需氨基酸中含量最高的是 A2 组, 与 A1、B1 组无显著差异 ( $p>0.05$ )。食品中的蛋白质按照人体的需要及比例关系, 含量相对不足的氨基酸称为限制性氨基酸, 由于这些氨基酸的不足, 一定程度会限制对其他氨基酸的利用程度。平菇中含有甲硫氨酸 (Met) 和赖氨酸 (Lys) 两种限制性氨基酸, 含量最高的为 A1 组, 显著高于 CK 组 ( $p<0.05$ )。将氨基酸根据不同呈味特征分为鲜味、甜味、苦味和无味这 4 类呈味氨基酸<sup>[31]</sup>, 平菇呈味氨基酸雷达图如图 3 所示, 构成平菇风味最主要的呈味氨基酸是鲜味、甜味和苦味氨基酸, 图中 A1 各呈味氨基酸含量均达到最高, 和 A2、B1 组无明显差异 ( $p>0.05$ ), 但显著高于 CK 和 B2 组 ( $p<0.05$ ), 且含量丰富、贡献最大的是甜味氨基酸, 其次是苦味和鲜味氨基酸, 但由于呈苦味的氨基酸会被甜味和鲜味物质所掩盖<sup>[32]</sup>, 最终使平菇呈现独特滋味。对比 5 组平菇, 平菇中甜味氨基酸含较

高, 鲜味氨基酸含量也相对较高, 这一点从图 3 可直观反映。组氨酸 (His) 作为婴儿不能自行合成, 需要从饮食中摄入的必需氨基酸, A1 组 His 含量显著高于其他 4 组 ( $p<0.05$ )。结果表明, 无论在培养基中添加 GSOP 还是 SPGS 均可有效提升平菇中的氨基酸含量, 将 ALOP 添加在培养基中, 平菇氨基酸含量显著高于添加 UPAL 的 B2 组, 但 B2 与 CK 组比较, 无显著差异 ( $p>0.05$ ), 说明葡萄籽和朝鲜蓟叶的普通粉和超微粉均可以代替传统棉籽壳为主的培养基。

变异系数越大, 说明不同培养基组成对平菇氨基酸含量影响越大<sup>[33]</sup>。通过变异系数的大小可知不同培养基组成对氨基酸含量的影响, 按变异系数大小排序为: Met>Phe>Ala>Ile>Tyr>Arg>Gly>Val>Leu>His>Lys>Pro>Ser>Asp>Thr>Glu。17 种氨基酸中, Glu 含量在 23.09~27.37 mg/g dw 之间, 变异系数最小, 为 7.27%, 说明 5 种培养基组成对平菇中 Glu 含量影响最小; Met 的含量在 1.80~2.45 mg/g dw 之间, 变异系数最大, 说明培养基组成对平菇中 Met 含量影响最大。

表 4 平菇氨基酸成分与含量分析 (mg/g dw)

Table 4 Analysis of amino acid composition and content of *Pleurotus ostreatus*

氨基酸种类	RT/min	呈味特征	CK	A1	A2	B1	B2	变异系数/%
天冬氨酸(Asp)	4.887	鲜	14.46±0.25 <sup>b</sup>	17.60±0.19 <sup>a</sup>	17.49±0.29 <sup>a</sup>	17.51±0.34 <sup>a</sup>	15.28±0.09 <sup>b</sup>	9.05
苏氨酸(Thr)*	5.560	甜	7.77±0.03 <sup>c</sup>	9.14±0.09 <sup>a</sup>	9.01±0.13 <sup>ab</sup>	8.85±0.17 <sup>b</sup>	7.45±0.14 <sup>c</sup>	8.86
丝氨酸(Ser)	6.147	甜	7.47±0.09 <sup>c</sup>	8.81±0.20 <sup>a</sup>	8.76±0.08 <sup>ab</sup>	8.54±0.13 <sup>b</sup>	7.21±0.12 <sup>c</sup>	9.15
谷氨酸(Glu)	6.780	鲜	23.09±0.35 <sup>c</sup>	27.37±0.73 <sup>a</sup>	27.27±0.31 <sup>a</sup>	26.85±0.41 <sup>a</sup>	24.92±0.18 <sup>b</sup>	7.27
甘氨酸(Gly)	9.920	甜	8.65±0.18 <sup>b</sup>	10.76±0.45 <sup>a</sup>	10.78±0.16 <sup>a</sup>	10.76±0.20 <sup>a</sup>	8.85±0.04 <sup>b</sup>	11.28
丙氨酸(Ala)	10.840	甜	14.15±0.22 <sup>b</sup>	18.10±1.58 <sup>a</sup>	16.86±0.19 <sup>a</sup>	17.71±0.36 <sup>a</sup>	13.72±0.22 <sup>b</sup>	12.84
胱氨酸(Cys)	11.427	无味	-	-	-	0.48±0.01 <sup>a</sup>	-	
缬氨酸(Val)*	12.193	苦	8.28±0.16 <sup>b</sup>	10.13±0.30 <sup>a</sup>	10.19±0.18 <sup>a</sup>	10.16±0.19 <sup>a</sup>	8.35±0.10 <sup>b</sup>	10.74
甲硫氨酸(Met)* <sup>#</sup>	13.407	苦	1.90±0.35 <sup>bc</sup>	2.45±0.34 <sup>a</sup>	2.41±0.03 <sup>a</sup>	2.32±0.08 <sup>ab</sup>	1.80±0.02 <sup>c</sup>	15.94
异亮氨酸(Ile)*	15.813	苦	5.32±0.12 <sup>d</sup>	6.71±0.06 <sup>b</sup>	7.14±0.09 <sup>a</sup>	6.84±0.12 <sup>b</sup>	5.58±0.14 <sup>c</sup>	12.66
亮氨酸(Leu)*	16.953	苦	12.34±0.22 <sup>b</sup>	15.33±0.08 <sup>a</sup>	15.37±0.27 <sup>a</sup>	15.11±0.30 <sup>a</sup>	12.61±0.15 <sup>b</sup>	10.70
酪氨酸(Tyr)	18.020	苦	5.78±0.16 <sup>c</sup>	7.33±0.15 <sup>a</sup>	6.84±0.28 <sup>b</sup>	6.98±0.26 <sup>ab</sup>	5.45±0.12 <sup>c</sup>	12.14
苯丙氨酸(Phe)*	18.913	苦	6.16±0.12 <sup>c</sup>	8.53±0.02 <sup>a</sup>	8.34±0.16 <sup>a</sup>	8.27±0.17 <sup>a</sup>	7.03±0.11 <sup>b</sup>	13.31
赖氨酸(Lys)* <sup>#</sup>	21.387	无味	10.10±0.17 <sup>b</sup>	12.30±0.10 <sup>a</sup>	12.19±0.21 <sup>a</sup>	12.29±0.25 <sup>a</sup>	10.30±0.10 <sup>b</sup>	9.80
组氨酸(His)	23.607	苦	3.48±0.09 <sup>c</sup>	4.36±0.03 <sup>a</sup>	4.20±0.08 <sup>b</sup>	4.12±0.08 <sup>b</sup>	3.47±0.05 <sup>c</sup>	10.58
精氨酸(Arg)	27.647	甜	10.64±0.05 <sup>d</sup>	13.38±0.23 <sup>a</sup>	11.97±0.13 <sup>b</sup>	11.62±0.17 <sup>c</sup>	9.83±0.15 <sup>e</sup>	11.52
脯氨酸(Pro)	7.470	无味	7.13±0.09 <sup>b</sup>	8.56±0.16 <sup>a</sup>	8.65±0.15 <sup>a</sup>	8.54±0.19 <sup>a</sup>	7.27±0.02 <sup>b</sup>	9.62
游离氨基酸			146.70±2.45 <sup>b</sup>	180.86±4.34 <sup>a</sup>	177.47±2.73 <sup>a</sup>	176.95±3.38 <sup>a</sup>	149.12±1.56 <sup>b</sup>	
必需氨基酸			51.87±0.97 <sup>b</sup>	64.59±0.96 <sup>a</sup>	64.65±1.07 <sup>a</sup>	63.84±1.27 <sup>a</sup>	53.12±0.75 <sup>b</sup>	
限制性氨基酸			11.99±0.44 <sup>b</sup>	14.74±0.43 <sup>a</sup>	14.60±0.24 <sup>a</sup>	14.62±0.33 <sup>a</sup>	12.18±0.12 <sup>b</sup>	

注: “-”表示未检测到; RT 为保留时间; \*为必需氨基酸; #为限制性氨基酸; 每组结果以平均值±标准方差 (mean±SD) 表示; 同行不同字母表示差异显著,  $p<0.05$ 。



表 5 不同培养基平菇中必须氨基酸与 WHO/FAO 模式谱比较表

Table 5 Comparison of essential amino acids in *Pleurotus ostreatus* on different media and WHO/FAO model spectrum

氨基酸质量分数/%	WHO/FAO 模式	CK	A1	A2	B1	B2
Thr	4	5.30	5.05	5.08	5.00	5.03
Val	5	5.65	5.60	5.74	5.74	5.59
Ile	4	3.62	3.71	4.02	3.87	3.77
Leu	7	8.41	8.48	8.66	8.54	8.48
Lys	5.5	6.88	6.80	6.87	6.95	6.91
Met+Cys	3.5	1.29	1.35	1.36	1.64	1.20
Phe+Tyr	6	8.13	8.77	8.55	8.62	8.43

表 6 17 种氨基酸相关性分析

Table 6 Correlation analysis of 17 amino acids

	Asp	Thr	Ser	Glu	Gly	Ala	Cys	Val	Met	Ile	Leu	Tyr	Phe	Lys	His	Arg	Pro
Asp	1																
Thr	0.936*	1															
Ser	0.943*	0.999**	1														
Glu	0.983**	0.876	0.888*	1													
Gly	0.991**	0.969**	0.974**	0.952*	1												
Ala	0.944*	0.972**	0.965**	0.879*	0.964**	1											
Cys	0.391	0.292	0.281	0.286	0.404	0.439	1										
Val	0.984**	0.975**	0.980**	0.939*	0.999**	0.966**	0.408	1									
Met	0.942*	0.999**	1.000**	0.889*	0.972**	0.966**	0.265	0.977**	1								
Ile	0.973**	0.933*	0.946*	0.948*	0.981**	0.898*	0.359	0.981**	0.941*	1							
Leu	0.989**	0.974**	0.980**	0.956*	0.998**	0.959**	0.348	0.997**	0.979**	0.982**	1						
Tyr	0.924*	0.986**	0.979**	0.859	0.953*	0.993**	0.346	0.957*	0.981**	0.887*	0.954*	1					
Phe	0.992**	0.899*	0.908*	0.997**	0.967**	0.913*	0.328	0.955*	0.910*	0.950*	0.968**	0.891*	1				
Lys	0.991**	0.969**	0.972**	0.950*	0.999**	0.974**	0.422	0.998**	0.970**	0.972**	0.996**	0.960**	0.967**	1			
His	0.963**	0.987**	0.987**	0.927*	0.976**	0.974**	0.258	0.975**	0.990**	0.935*	0.983**	0.982**	0.946*	0.978**	1		
Arg	0.802	0.921*	0.909*	0.755	0.830	0.904*	0.055	0.833	0.920*	0.746	0.847	0.943*	0.786	0.839	0.930*	1	
Pro	0.989**	0.969**	0.976**	0.954*	0.999**	0.954*	0.375	0.998**	0.973**	0.988**	0.999**	0.945*	0.965**	0.996**	0.974**	0.826	1

注: \*表示差异显著 ( $p<0.05$ ); \*\*表示差异极显著 ( $p<0.01$ )。

## 2.5 平菇中必须氨基酸与 WHO/FAO 模式谱

### 比较分析

在蛋白质的质量评价中,必需氨基酸的组成及含量是评价蛋白质是否优质的非常重要的指标,以样品中必需氨基酸比例接近世界卫生组织/联合国粮农组织(WHO/FAO)氨基酸模式谱的程度,来评价样品营养价值的高低,其比例越接近则营养价值越高<sup>[34]</sup>,被广泛用于各类果蔬、肉类等营养评价分析。各组平菇必需氨基酸的质量分数与 WHO/FAO 模式谱对比结果如表 5 所示。平菇中 Thr、Val、Leu、Lys 和 Phe+Tyr 均高于模式谱中氨基酸质量分数,其中 Leu 的质量分数最高,但不同培养基组成导致平菇氨基酸的质量分

数略有差异。

## 2.6 平菇中 17 种氨基酸相关性分析

对 5 组平菇的 17 种氨基酸进行相关性分析,结果如表 6 所示,各种氨基酸指标之间相关性均为正相关,且多数相关系数大于 0.5,说明各氨基酸之间具有较强的相关性,且数值越接近 1,正相关程度越大。Met 和 Ser 相关系数达到 1,是所有正相关系数中最高的;Cys 与其他氨基酸均无显著相关性,Arg 与其他各氨基酸无极显著相关;Glu 仅与 Phe 和 Asp 达到极显著水平 ( $p<0.01$ ),其他各氨基酸之间均存在不同程度的相关性。由于 5 组平菇 17 种氨基酸含量差异各不相同,同时各种氨基酸之间存在着不同程度的相关性,因此通过某一种氨基酸指标来评定某一组平菇的优劣是不



客观的, 接下来通过主成分分析进行不同培养基平菇的综合评价。

### 2.7 平菇各项指标主成分分析及 PLS-DA 分析

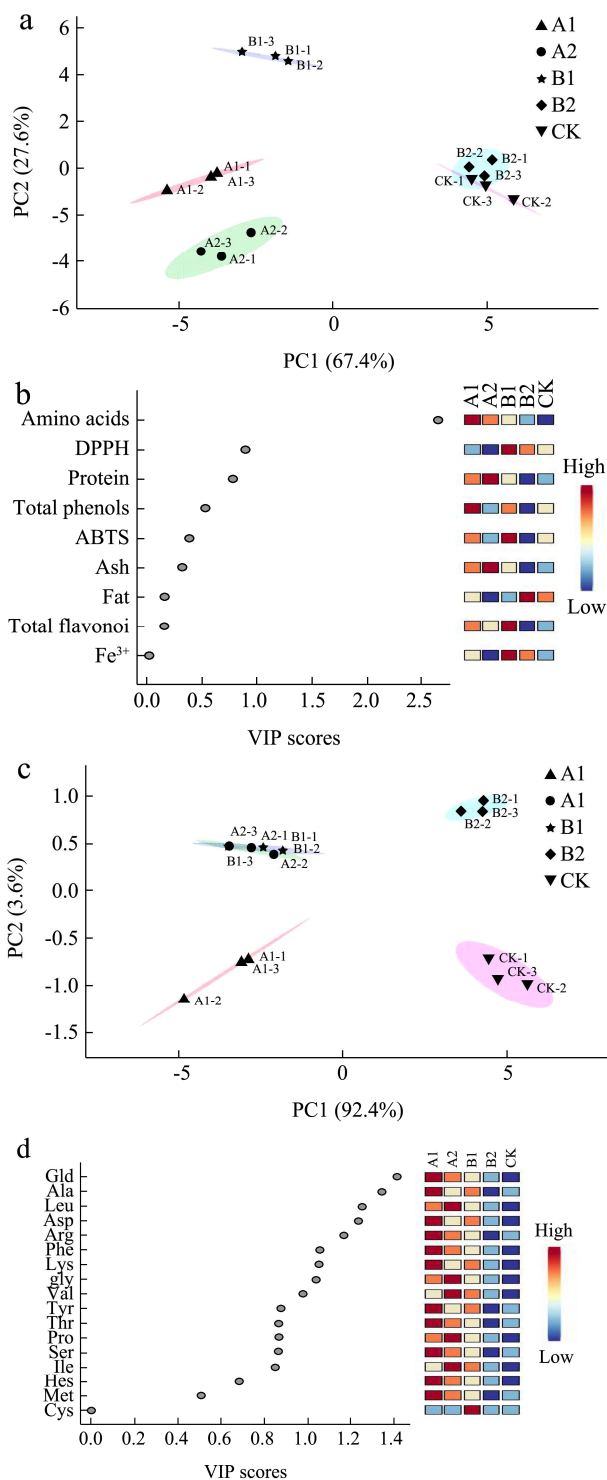


图4 平菇主成分分析及 PLS-DA 分析

Fig.4 Principal component analysis and PLS-DA analysis of *Pleurotus ostreatus*

注: a、b 分别为平菇各项指标主成分分析及 PLS-DA 分析; c、d 分别为氨基酸主成分分析及 PLS-DA 分析。

采用 Origin Pro 2018c 对平菇 9 项检测指标(灰分、脂肪、蛋白质、总酚、总黄酮、DPPH、ABTS 自由基清除能力、Fe<sup>3+</sup>还原能力和氨基酸)进行主成分分析(PCA)(图 4a), 并在此基础上对所有指标进行偏最小二乘判别分析(PLS-DA), 它具有内置高维和高相关样品建模能力, 用以筛选高贡献率组分与各平菇样品进行关联分析, 结果如图 4b。由图 4a 可知, 当提取到第二个主成分时, 累计方差可达 82.68%, 因此选择前两个主成分来描述不同培养基平菇与各项指标的整体分布情况, CK 和 B2 分离度较小, 说明这两组平菇品质相似, A1、A2 和 B1 组平菇样品的各成分均有差异; 图 4b 的得分由大到小排序为氨基酸到 Fe<sup>3+</sup>还原能力, 颜色越靠近红色代表项目对该组平菇的贡献值越大, 反之贡献值则越小, 其中氨基酸含量及组成是区分平菇最主要的指标, 且对 A1 的贡献率最大, 同时总酚对 A1 的贡献率也是最大的; 以此类推, A2 中贡献率较高的是氨基酸和蛋白质; 对 B1 贡献率大的指标包括 DPPH、ABTS、总黄酮和 Fe<sup>3+</sup>, 这可能与酚类物质在平菇生长期间的积累有关, ABTS 自由基清除能力随之增加, 并与 Fe<sup>3+</sup>具有较高的相关系数<sup>[6]</sup>。

为进一步综合探究不同培养基平菇氨基酸成分的差异, 以 5 组平菇样品为分析对象, 对 17 种氨基酸进行 PCA 分析, 并结合 PLS-DA 分析对各氨基酸对平菇样品的贡献率。从图 4c 可以看出, 前两个主成分可解释的累计方差达 94.4%, 足以描述平菇中氨基酸的总体水平, 而 CK 和 B2 聚为一类, 对主成分贡献较低; 从图 4d 可知, A1 和 A2 样品中高贡献的组分相对较多, 而 CK 和 B2 样品中不存在高贡献率的氨基酸组分。其中对 A1 样品高贡献率的氨基酸有 Ala、Tyr、Lys、Ser、Thr、Asp、Arg、Glu、Phe 和 His; 对 A2 高贡献率氨基酸包括 Ile、Val、Gly、Pro 和 Leu。

### 3 结论

本文将葡萄籽和朝鲜蓟叶通过不同粉碎处理后添加在培养基中, 以传统棉籽壳为对照组, 得到 5 组平菇样品, 通过 Pearson 相关性分析、PCA 及 PLS-DA 分析, 探讨不同培养基组成与平菇营养物质、活性成分及氨基酸的关联度, 结果表明, 不同培养基组成导致平菇的各项指标具有一定的差异, 其中 CK 和 B2 的成分与含量最为接近, A1、A2 和 B1 组无论是含量还是组分均比 CK 组显著提高, 说明葡萄籽和朝鲜蓟叶均可替代传统棉籽壳添加在培养基中进行平菇的生产, 从而提高工业副产物利用率。

### 参考文献

- [1] 王瑞艳.葡萄多酚抗ACE活性及抗氧化性的研究[D].北京: 中国农业大学,2012  
WANG Ruiyan. Study on the anti-ACE activity and antioxidant properties of grape polyphenols [D]. Beijing: China Agricultural University, 2012
- [2] 王振帅,陈善敏,信思悦,等.朝鲜蓟花苞汁总酚、总黄酮、抗氧化性比较及体外模拟胃肠消化特性[J].食品科学,2019, 40(19):136-142  
WANG Zhenshuai, CHEN Shanmin, XIN Siyue, et al. Comparison of total phenols, total flavonoids, antioxidant properties of artichoke flower bud juice and in vitro simulated gastrointestinal digestion characteristics [J]. Food Science, 2019, 40(19): 136-142
- [3] Pandino G, Lombardo S, Mauromicale G. Globe artichoke leaves and floral stems as a source of bioactive compounds [J]. Industrial Crops and Products, 2013, 44: 44-49
- [4] Wang M, Li J, Rangarajan M, et al. Antioxidative phenolic compounds from sage (*Salvia officinalis*) [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 1998, 46(12): 4869-4873
- [5] Yang Y, Ji G, Xiao W, et al. Changes to the physicochemical characteristics of wheat straw by mechanical ultrafine grinding [J]. Cellulose, 2014, 21(5): 3257-3268
- [6] Zhao X, Ao Q, Yang L, et al. Application of superfine pulverization technology in biomaterial industry [J]. Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers, 2009, 40(3): 337-343
- [7] 袁娅,许佳妮,张剑飞,等.不同培养基对平菇营养成分、多酚含量及其抗氧化活性的影响[J].食品科学,2014,35(13):137-142  
YUAN Ya, XU Jiani, ZHANG Jianfei, et al. Effects of different media on the nutritional components, polyphenol content and antioxidant activity of *Pleurotus ostreatus* [J]. Food Science, 2014, 35(13): 137-142
- [8] Liu Q, Kong W, Hu S, et al. Effects of *Oudemansiella radicata* polysaccharide on postharvest quality of oyster mushroom (*Pleurotus ostreatus*) and its antifungal activity against *Penicillium digitatum* [J]. Postharvest Biology and Technology, 2020, 166: 111207
- [9] Basso V, Schiavenin C, Mendonca S, et al. Chemical features and antioxidant profile by *Schizophyllum commune* produced on different agroindustrial wastes and byproducts of biodiesel production [J]. Food Chemistry, 2020, 329: 127089
- [10] 姚强,宫志远,司洪宇,等.香菇抗杂菌菌棒栽培基质配方筛选研究[J].中国食用菌,2020,39(10):56-58  
YAO Qiang, GONG Zhiyuan, SI Hongyu, et al. Study on the screening of the cultivation substrate formula of *Lentinus edodes* against miscellaneous fungi [J]. Edible Mushrooms in China, 2020, 39(10): 56-58
- [11] GB 5009.4-2016 食品安全国家标准 食品中灰分的测定[S]  
GB 5009.4-2016 National Food Safety Standard Determination of Ash in Food [S]
- [12] GB 5009.5-2016 食品安全国家标准 食品中蛋白质的测定[S]  
GB 5009.5-2016 National Food Safety Standard Determination of Protein in Food [S]
- [13] GB 5009.6-2016 食品安全国家标准 食品中脂肪的测定[S]  
GB 5009.6-2016 National Food Safety Standard Determination of Fat in Food [S]
- [14] Wang X, Zhan J, Wu L, et al. A mini-review of chemical composition and nutritional value of edible wild-grown mushroom from China [J]. Food Chemistry, 2014, 151: 279-285
- [15] Rasalanavho M, Moodley R, Jonnalagadda S B. Elemental bioaccumulation and nutritional value of five species of wild growing mushrooms from South Africa [J]. Food Chemistry, 2020, 319: 126596
- [16] 杨久芳,迟全勃,李霄雪,等.不同品种葡萄籽培养基对平菇酚类物质及抗氧化性的影响[J].现代食品科技,2016,32(5): 104-111  
YANG Jiufang, CHI Quanbo, LI Xiaoxue, et al. Effects of different grape seed culture media on phenolic substances and antioxidant properties of oyster mushrooms [J]. Modern Food Science and Technology, 2016, 32(5): 104-111
- [17] Georgé S, BRAT P, ALTER P, et al. Rapid determination of polyphenols and vitamin C in plant-derived products [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2005, 53(5): 1370-1373
- [18] 杨久芳,迟全勃,李景明.不同品种葡萄籽培养基对平菇酚类物质及抗氧化性的影响[J].现代食品科技,2016,5(32): 104-111  
YANG Jiufang, CHI Quanbo, LI Jingming. Effects of different grape seed culture media on phenolic compounds and antioxidant properties of oyster mushrooms [J]. Modern Food Science and Technology, 2016, 5(32): 104-111
- [19] 张昌伟,彭胜,张琳杰,等.三种杜仲原料栽培平菇效果的比较[J].食品工业科技,2014,35(1):52-55  
ZHANG Changwei, PENG Sheng, ZHANG Linjie, et al. Comparison of the effects of three kinds of *Eucommia ulmoides* on cultivation of *Pleurotus ostreatus* [J]. Food

- Industry Science and Technology, 2014, 35(1): 52-55
- [20] Sudha G, Vadivukkarasi S, Shree R B I, et al. Antioxidant activity of various extracts from an edible mushroom *Pleurotus eous* [J]. Food Science and Biotechnology, 2012, 21(3): 661-668
- [21] 张强,辛秀兰,杨富民,等.红树莓果醋酿造过程中抗氧化性能的变化[J].食品科学,2016,37(3):6-11  
ZHANG Qiang, XIN Xiulan, YANG Fumin, et al. Changes in antioxidant properties during the brewing of red raspberry vinegar [J]. Food Science, 2016, 37(3): 6-11
- [22] Brand W W, Cuvelier M E, Berset C. Use of a free radical method to evaluate antioxidant activity [J]. LWT - Food Science and Technology, 1995, 28(1): 25-30
- [23] Sudha G, Vadivukkarasi S, Shree R B I, et al. Antioxidant activity of various extracts from an edible mushroom *Pleurotus eous* [J]. Food Science and Biotechnology, 2012, 21(3): 661-668
- [24] Pulido R, Bravo L, Saura C F. Antioxidant activity of dietary polyphenols as determined by a modified ferric reducing/antioxidant power assay [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2000, 48(8): 3396-3402
- [25] GB 5009.124-2016 食品安全国家标准 食品中氨基酸的测定[S]  
GB 5009.124-2016 National Food Safety Standard Determination of Amino Acids in Food [S]
- [26] 温鲁.几种食用菌与不同谷物培养基的亲合性[J].食品科学, 2006,27(10):132-134  
WEN Lu. The compatibility of several edible fungi with different grain culture media [J]. Food Science, 2006, 27(10): 132-134
- [27] 罗莹,张志军,周永斌,等.食用菌菌丝在不同谷物培养基上的生长研究[J].北方园艺,2020,13:124-128  
LUO Ying ZHANG Zhijun, ZHOU Yongbin, et al. Study on the growth of edible fungus mycelium on different grain culture media [J]. Northern Horticulture, 2020, 13: 124-128
- [28] 刘小霞,安学明,负建民,等.改变培养基碳源复壮草菇退化菌种[J].菌物学报,2020,39(7):1312-1321  
LIU Xiaoxia, AN Xueming, YIN Jianmin, et al. Changing the carbon source of the culture medium to rejuvenate the degraded strains of *Volvariella volvacea* [J]. Acta Mycologica Sinica, 2020, 39(7): 1312-1321
- [29] 罗杨,陈岗,范俊安,等.桑枝、桔梗非药用部位培养基对银耳产量及营养安全性的影响[J].食品研究与开发,2021,42(6): 12-16  
LUO Yang, CHEN Gang, FAN Junan, et al. The influence of non-medicinal parts of mulberry branch and *Platycodon grandiflorum* on the yield and nutritional safety of white fungus [J]. Food Research and Development, 2021, 42(6): 12-16
- [30] Wu G. Amino acids: metabolism, functions, and nutrition [J]. Amino Acids, 2009, 37(1): 1-17
- [31] 魏光强,李子怡,黄艾祥,等.基于游离氨基酸、挥发性组分和感官评价的两种酸化技术加工乳饼的滋味特征差异分析[J/OL].食品科学,DOI:10.7506/spkx1002-6630-20201105-045  
WEI Guangqiang, LI Ziyi, HUANG Aixiang, et al. Analysis of the difference in taste characteristics of milk cakes processed by two acidification technologies based on free amino acids, volatile components and sensory evaluation [J/OL]. Food Science, DOI : 10.7506/spkx1002-6630-20201105-045
- [32] Chen D, Zhang M. Non-volatile taste active compounds in the meat of Chinese mitten crab (*Eriocheir sinensis*) [J]. Food Chemistry, 2007, 104(3): 1200-1205
- [33] 王丽艳,荆瑞勇,郭永霞,等.基于氨基酸含量的市售 14 种食用蘑菇的综合评价[J].食品科学,2021,42(16):203-208  
WANG Liyan, JING Ruiyong, GUO Yongxia, et al. Comprehensive evaluation of 14 edible mushrooms on the market based on amino acid content [J]. Food Science, 2021, 42(16): 203-208
- [34] 郭文瑞,韩云飞,杨扬,等.植物乳杆菌对发酵香肠蛋白质分解及游离氨基酸的影响[J].中国食品学报,2021,21(4):209-215  
GUO Wenrui, HAN Yunfei, YANG Yang, et al. The effect of *Lactobacillus plantarum* on the protein decomposition and free amino acids of fermented sausage [J]. Chinese Journal of Food Science, 2021, 21(4): 209-215