

# 闽产食用菌的氨基酸组成特征及其营养评价

颜孙安<sup>1,2,3</sup>, 林香信<sup>1,2,3</sup>, 李巍<sup>1,2,3</sup>, 林虬<sup>1,2,3</sup>, 姚清华<sup>1,2,3\*</sup>

[1. 农业农村部农产品质量安全风险评估实验室(福州), 福州 350003; 2. 福建省农业科学院农业质量标准与检测技术研究所, 福州 350003; 3. 福建省农产品质量安全重点实验室, 福州 350003]

**摘要:** **目的** 探究闽产食用菌的氨基酸组成特征及其营养价值。**方法** 采用氨基酸自动分析仪分析食用菌氨基酸含量, 利用鸡蛋蛋白模式和联合国粮食及农业组织(Food and Agriculture Organization, FAO)/世界卫生组织(World Health Organization, WHO)推荐的理想蛋白模式系统评价各食用菌的氨基酸营养价值。**结果** 食用菌至少包含18种氨基酸, 包括8种成人必需氨基酸、2种儿童必需氨基酸。成人必需氨基酸、非必需氨基酸、酸味类氨基酸、甜味类氨基酸、苦味类氨基酸、儿童必需氨基酸、药用氨基酸、支链氨基酸、增香与着色氨基酸、伯胺基氨基酸含量等特殊功效氨基酸含量分别为3.19%~10.90%、4.51%~16.24%、1.73%~7.77%、2.09%~7.39%、3.03%~9.73%、0.55%~2.30%、4.84%~17.16%、1.30%~4.86%、2.90%~12.06%、3.94%~14.89%, 品种间含量差异明显。必需氨基酸与氨基酸总量的百分比、必需氨基酸与非必需氨基酸含量的百分比、氨基酸比值系数分、必需氨基酸指数和营养指数依次为40.86%~48.72%、69.10%~95.00%、46.19~88.18、58.37~83.43、7.12~24.53, 品种间营养价值差异明显。蛋氨酸+胱氨酸均相对过剩, 缬氨酸、异亮氨酸、亮氨酸、赖氨酸表现严重不足, 而苯丙氨酸+酪氨酸、苏氨酸、色氨酸各品种表现不一。通过聚类分析, 样品可分为3大类: 高、中、低品质蛋白组。**结论** 18种食用菌氨基酸组成及营养价值存在一定的差异, 具有不同的开发应用前景。

**关键词:** 食用菌; 氨基酸; 营养评价; 聚类分析

## Amino acid composition characteristics and nutritional evaluation of edible fungi produced in Fujian

YAN Sun-An<sup>1,2,3</sup>, LIN Xiang-Xin<sup>1,2,3</sup>, LI Wei<sup>1,2,3</sup>, LIN Qiu<sup>1,2,3</sup>, YAO Qing-Hua<sup>1,2,3\*</sup>

[1. Laboratory of Quality and Safety Risk Assessment for Agro-products, Ministry of Agriculture (Fuzhou), Fuzhou 350003, China; 2. Institute of Agricultural Quality Standards and Testing Technology Research, Fujian Academy of Agricultural Sciences, Fuzhou 350003, China; 3. Fujian Key Laboratory of Quality and Safety of Agricultural Products, Fuzhou 350003, China]

**ABSTRACT: Objective** To explore the amino acid composition characteristics and nutritional evaluation of edible fungi produced in Fujian. **Methods** The amino acid content of edible fungi was analyzed by automatic amino acid

**基金项目:** 福建省“5511”协同创新工程项目(XTCXGC2021020)、福建省科技经济融合服务平台(FJKX2020-5)、福建省公益类科研院所专项(2020R1022006)、福建省农业科学院创新团队项目(CXTD2021011-1)

**Fund:** Supported by the Fujian Province "5511" Collaborative Innovation Project in Fujian Province (XTCXGC2021020), the Fujian Province Science and Technology and Economy Integration Service Platform (FJKX2020-5), the Special Project of Public Welfare Research Institute of Fujian Province (2020R1022006), and the Innovation Team Project of Fujian Academy of Agricultural Sciences (CXTD2021011-1)

\*通信作者: 姚清华, 副研究员, 主要研究方向为农产品质量安全与风险评估。E-mail: yaoyaoshuimu@163.com

\*Corresponding author: YAO Qing-Hua, Associate Professor, Institute of Quality Standards and Testing Technology, Fujian Academy of Agricultural Sciences, Fuzhou 350003, China. E-mail: yaoyaoshuimu@163.com

analyzer. The egg protein model and the ideal protein model recommended by the Food and Agriculture Organization (FAO)/World Health Organization (WHO) were used to evaluate the amino acid nutritional value of edible fungi.

**Results** Edible fungi contain at least 18 kinds of amino acids, including 8 kinds of essential amino acids for adults and 2 kinds of essential amino acids for children. The content of special effect amino acids such as adult essential amino acid, non-essential amino acids, sour amino acids, sweet amino acids, bitter amino acids, children essential amino acids, medicinal amino acids, branched chain amino acids, flavoring and coloring amino acids, primary amine amino acids, and that like were 3.19%–10.90%, 4.51%–16.24%, 1.73%–7.77%, 2.09%–7.39%, 3.03%–9.73%, 0.55%–2.30%, 4.84%–17.16%, 1.30%–4.86%, 2.90%–12.06% and 3.94%–14.89%, respectively. The differences of amino acids content among different edible fungi were significant. The percentage of essential amino acids to total amino acids, the percentage of essential amino acids to non-essential amino acids, the score of amino acid ratio coefficient, the essential amino acid index and the nutritional index were 40.86%–48.72%, 69.10%–95.00%, 46.19–88.18, 58.37–83.43 and 7.12–24.53, respectively. The difference in nutritional value among varieties were significant. Methionine+cystine were relatively surplus, valerian acid, isoleucine, leucine and lysine showed serious deficiencies, while phenylalanine+tyrosine, threonine and tryptophan each variety showed different performances. Through clustering analysis, the samples could be divided into three categories: High, medium and low quality protein groups. **Conclusion** There are some differences in amino acid composition and nutritional value of 18 kinds of edible fungi, which have different development and application prospects.

**KEY WORDS:** edible fungi; amino acid; nutritional evaluation; cluster analysis

## 0 引言

食用菌是可供人类食用或药用的蕈菌,多数属担子菌亚门,少数属于囊菌亚门。目前,我国人工栽培的食用菌已达 100 多种,形成商业化栽培约 60 种,规模化栽培 30 多种,主要集中在伞菌目(Agaricales)、多孔菌目(Polyporales)、木耳目(Auriculariales)、银耳目(Tremellales)、鬼笔目(Phallales)等<sup>[1-2]</sup>。食用菌味道鲜美、质地脆嫩、低脂低热量,富含蛋白质、氨基酸、多糖、麦角甾醇和矿物质,具有抗炎、抗氧化、抗糖尿病和增强免疫力等生理功能,深受消费者喜爱<sup>[3-6]</sup>。研究不同食用菌的营养品质差异,对指导食用菌产业优质生产具有重要意义。国内外部分学者研究了不同食用菌的蛋白质营养价值。例如 SUN 等<sup>[7]</sup>研究表明,常见市售食用菌蛋白质含量充足,品质优于许多果蔬和谷物,是优质的蛋白来源。陈洪雨等<sup>[8]</sup>研究发现亚东黑耳蛋白质中的必需氨基酸含量丰富、比例合理,符合国际推行的氨基酸平衡模式谱,属于完全蛋白质。吴莹莹等<sup>[9]</sup>研究表明,不同市售金针菇蛋白质的含量存在明显差异,营养价值略有差异,与卵清蛋白接近。熊丙全等<sup>[10]</sup>研究表明,不同来源、不同品系的羊肚菌蛋白质营养价值差别较大,分为高质蛋白品系和营养较差品系。现代营养学研究表明,食物蛋白质的营养价值主要取决于蛋白质的含量和质量。食物蛋白质质量的高低主要取决于必需氨基酸的种类、含量及组成比例。食用菌是优质的蛋白源,种类繁多,蛋白的含量和质量差异较大,易受品种、产地环境、培养基质等因素影响。因此,对当地食用菌的蛋白质

氨基酸组成特征进行分析,建立本地特色的食品成分含量数据库至关重要。鉴于此,本研究分析了闽产 18 种食用菌的氨基酸组成,综合评价氨基酸营养价值,研究了食用菌中各类别氨基酸的相关性、氨基酸组成与分类地位间的关系,为食用菌资源的综合开发利用提供科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料与试剂

供试材料为闽产食用菌,共 18 个品种(表 1),由福建各地食用菌企业提供,随机采摘成熟子实体鲜品 1 kg,纯净水洗净后,置于 50 °C 烘箱内烘 24 h,而后升温至 70 °C 烘 5 h,粉碎,过 40 目筛,备用。

氨基酸标准品(2.5 μmol/mL, 美国 Sigma 公司);色氨酸标准品(纯度≥99%, 上海嘉辰化工有限公司);柠檬酸、柠檬酸钠、氯化钠、氢氧化钠、无水乙醇、盐酸、硫酸和硼酸(优级纯)、其他试剂(分析纯)(上海国药集团化学试剂有限公司)。

### 1.2 仪器与设备

Kjeltec 2300 型全自动凯氏定氮仪(瑞典 Foss Tecator 公司);L-8800 型氨基酸自动分析仪(日本 HITACHI 公司);DHG-9140A 型电热恒温鼓风干燥箱(上海精宏实验设备有限公司)。

### 1.3 试验方法

#### 1.3.1 蛋白质测定

蛋白质测定参考 GB 5009.5—2016《食品安全国家标准 食品中蛋白质的测定》。

表 1 样品来源  
Table 1 Source of samples

编号	品种	目	来源	编号	品种	目	来源
F1	秀珍菇	伞菌目	罗源县	F10	草菇	伞菌目	龙海市
F2	香菇	伞菌目	连城县	F11	毛木耳	木耳目	龙海市
F3	牛肝菌	伞菌目	古田县	F12	黑木耳	木耳目	连城县
F4	黄金菇	伞菌目	古田县	F13	银耳	银耳目	古田县
F5	茶树菇	伞菌目	屏南县	F14	绣球菌	多孔菌目	闽侯县
F6	姬松茸	伞菌目	顺昌县	F15	蟹味菇	伞菌目	顺昌县
F7	鸡腿菇	伞菌目	古田县	F16	杏鲍菇	伞菌目	云霄县
F8	双孢蘑菇	伞菌目	龙海市	F17	竹荪	鬼笔目	顺昌县
F9	金针菇	伞菌目	云霄县	F18	蒙古口蘑	伞菌目	南靖县

### 1.3.2 氨基酸测定

色氨酸:称取 0.2~0.5 g 试样,置于聚四氟乙烯衬管中,加入 1.5 mL 4 mol/L 氢氧化钾,置液氮中冷冻后放入水解管,抽真空封管,在(110±1) °C 恒温干燥箱中,水解 20 h 后,加入 6.0 mol/L 盐酸中和,用 pH=2.2 柠檬酸钠缓冲液稀释定容,4000 r/min 离心 10 min,取上清液待测。

其他氨基酸:参考 GB 5009.124—2016《食品安全国家标准 食品中氨基酸的测定》。

### 1.4 氨基酸营养评价

通过统计学方法比较 18 种食用菌的氨基酸组成特征,计算必需氨基酸(essential amino acids, EAA)、非必需氨基酸(non-essential amino acids, NEAA)、儿童必需氨基酸(child essential amino acids, CE)、酸味类氨基酸(sour amino acids, SOAA)、甜味类氨基酸(sweet amino acids, SWAA)、苦味类氨基酸(bitter amino acids, BIAA)、药用氨基酸(medicinal amino acids, MAA)、支链氨基酸(branched chain amino acids, BCAA)、芳香族氨基酸(aromatic amino acids, AAA)、增香与着色氨基酸(flavoring and coloring amino acids, FCAA)、伯胺基氨基酸(primary amine amino acids, PAAA)的含量和比例,根据联合国粮食及农业组织(Food and Agriculture Organization, FAO)/世界卫生组织(World Health Organization, WHO)建议的氨基酸营养评分标准模式<sup>[11-12]</sup>评价各食用菌蛋白质的营养。氨基酸比值(amino acid ratio, RC)、氨基酸比值系数(amino acid ratio coefficient, RCAA)和氨基酸比值系数分(amino acid ratio coefficient score, SRC)、必需氨基酸指数(essential amino acid index, EAAI)、营养指数(nutrient index, NI)等参数的计算参考文献方法<sup>[13-15]</sup>。

### 1.5 数据处理与分析

每个指标进行 3 次平行试验,结果以  $\bar{x}$  表示。利用 Excel 2007 和 SPSS 19.0 软件对数据进行分析处理。

## 2 结果与分析

### 2.1 氨基酸种类及含量

食用菌富含蛋白质和氨基酸,是一般蔬菜和水果的几

倍到几十倍<sup>[16]</sup>。18 种食用菌品种的蛋白质、氨基酸含量、EAA 总量和 NEAA 总量详见表 2。18 种食用菌的蛋白质含量为 9.52~33.54%,其中含量最高的为 F5,最低的为 F13,相差 3.5 倍,表明不同食用菌品种的蛋白质含量存在明显差异。氨基酸分析结果表明,18 种食用菌均含有 8 种 EAA 和 10 种 NEAA[其中天冬酰胺(asparagine, Asn)和谷氨酰胺(glutamine, Gln)在酸水解时会降解为天门冬氨酸(aspartate, Asp)和谷氨酸(glutamate, Glu)], EAA 总量为 3.19%~10.90%, NEAA 总量为 4.51%~16.24%,其中含量最高的均为 F5,最低的均为 F13;除 F11 外,均以 Glu 含量为最高,除 F9、F13 外,均以 Cys 含量为最低。由此可见,食用菌的氨基酸种类齐全,品种间含量差异明显。

### 2.2 氨基酸组成特征

#### 2.2.1 呈味氨基酸含量及组成

食用菌的滋味主要是从非挥发性滋味物质中体现出来的,主要包括氨基酸、核苷酸和碳水化合物等,而烹饪或加工可使食用菌的蛋白质降解为短肽和氨基酸,从而获得风味独特、味道鲜美的食用产品<sup>[17-18]</sup>。按照呈味特征划分,氨基酸中含有 2 种酸味类氨基酸、5 种甜味类氨基酸和 8 种苦味类氨基酸<sup>[19]</sup>。由表 3 可知,18 种食用菌品种的 SOAA 含量为 1.73%~7.77%,占氨基酸总量的 21.12%~31.22%,其中含量最高的为 F10,最低的为 F11;SWAA 含量为 2.09%~7.39%,占氨基酸总量的 23.64%~29.91%,其中含量最高的为 F5,最低的为 F13;BIAA 含量为 3.03%~9.73%,占氨基酸总量的 34.15%~41.94%,其中含量最高的为 F5,最低的为 F13;SOAA 和 SWAA 二者含量占比为 49.05%~56.86%,是 BIAA 的 1.2~1.7 倍,其中最高的为 F8,最低的为 F17。可见,食用菌的呈味氨基酸含量丰富,是其良好口感的重要因素,但品种间含量差异较大,风味差别明显。

#### 2.2.2 特殊功效氨基酸

氨基酸是维系人体生命活动的重要物质,具有各种生理功能<sup>[19]</sup>。各食用菌品种所含特殊功效氨基酸:儿童必须氨基酸、药用氨基酸、支链氨基酸、芳香族氨基酸、增

香与着色氨基酸、伯氨基氨基酸等含量详见表 4。

除 8 种人体必需氨基酸外, Arg 和 His 是儿童生长过程中所必需的<sup>[19]</sup>。18 种食用菌的 CE 含量为 0.55%~2.30%, 占氨基酸总量的 6.69%~10.42%, 其中含量最高的为 F12, 最低的为 F15。MAA 包括 Asp 等 9 种, 在一般植物中含量少, 有些人体不能合成, 是维持机体氮平衡所必需的<sup>[19]</sup>。18 个食用菌品种的 MAA 含量为 4.84%~17.16%, 占氨基酸总量的 59.58%~67.48%, 其中含量最高的为 F5, 最低的为 F17。BCAA 分别占成人、儿童及婴儿每日 EAA 需要量的 40%、41%及 45%, 是糖类、脂肪缺乏或代谢障碍时重要的能源物质, 具有调节组织蛋白质合成与分解、调节芳香族氨基酸进入血脑屏障和防治肝肾功能衰竭等作用<sup>[19]</sup>。正常人体及其他哺乳动物的支/芳值为 3.0~3.5, 而当肝受伤时则降为 1.0~1.5<sup>[17]</sup>。

18 种食用菌的 BCAA 含量为 1.30%~4.86%, 最高的为 F5, 最低的为 F17; 占 EAA 的 36.36%~44.59%, 最高的为 F5, 最低的为 F16; 与 AAA 的比值 131.13%~211.48%, 最高的为 F14, 最低的为 F9。FCAA 的氨基与还原糖的羰基之间的美拉德反应生成具有愉快香味的褐色物质, 促进食品的增香与着色<sup>[19]</sup>。18 个食用菌品种的 FCAA 含量为 2.90%~12.06%, 占氨基酸总量的 35.41%~48.51%, 其中含量最高的为 F5, 最低的为 F15。PAAA 中的伯胺基替代了仲胺与亚硝酸盐产生范斯莱克反应, 分解出的氮气和有机酸有效地抑制二甲氨基亚硝胺的生成<sup>[19]</sup>。18 个食用菌品种的 PAAA 含量为 3.94%~14.89%, 占氨基酸总量的 48.11%~58.06%, 其中含量最高的为 F5, 最低的为 F15。综合可见, 各食用菌品种特殊功效氨基酸含量差异较大, 部分品种的含量丰富, 适合功能性食品的开发。

表 2 不同食用菌的氨基酸含量(%)  
Table 2 Amino acid content of different edible fungi (%)

氨基酸	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7	F8	F9	F10	F11	F12	F13	F14	F15	F16	F17	F18
异亮氨酸 (isoleucine, Ile <sup>*</sup> )	1.04	0.80	0.71	0.63	1.30	1.11	0.53	1.00	0.70	1.10	0.39	0.33	0.35	0.61	0.75	0.96	0.65	0.73
亮氨酸 (leucine, Leu <sup>*</sup> )	1.70	1.36	1.26	1.07	1.98	1.88	0.89	1.65	1.16	1.79	0.61	0.71	0.52	1.08	1.33	1.46	1.08	1.16
赖氨酸 (lysine, Lys <sup>*</sup> )	1.53	1.20	0.74	0.83	1.78	1.58	0.70	1.36	1.04	1.54	0.26	0.50	0.45	0.86	1.27	1.47	0.82	1.23
胱氨酸 (cysteine, Cys <sup>#</sup> )	0.17	0.20	0.07	0.11	0.21	0.23	0.07	0.16	0.34	0.17	0.08	0.07	0.12	0.13	0.14	0.21	0.07	0.22
蛋氨酸(methionine, Met <sup>*</sup> )	1.07	1.06	1.35	1.06	1.06	1.42	0.83	1.32	1.15	1.16	0.67	0.90	0.58	0.89	1.12	1.24	1.14	1.05
酪氨酸 (tyrosine, Tyr <sup>#</sup> )	0.80	0.57	0.54	0.42	0.89	1.13	0.70	0.67	0.77	0.92	0.31	0.36	0.26	0.38	0.53	0.67	0.50	0.53
苯丙氨酸 (phenylalanine, Phe <sup>*</sup> )	1.09	0.86	0.78	0.67	1.26	1.16	0.57	1.09	0.93	1.19	0.48	0.45	0.35	0.62	0.84	0.98	1.03	0.86
苏氨酸(threonine, Thr <sup>*</sup> )	1.22	0.97	0.90	0.76	1.54	1.23	0.64	1.20	0.86	1.31	0.53	0.62	0.41	0.69	1.05	1.01	0.79	0.85
色氨酸 (tryptophane, Trp <sup>*</sup> )	0.28	0.26	0.52	0.26	0.40	0.28	0.24	0.35	0.42	0.42	0.11	0.26	0.10	0.22	0.48	0.30	0.16	0.28
缬氨酸 (valine, Val <sup>*</sup> )	1.35	1.00	0.96	0.87	1.58	1.38	0.66	1.24	0.92	1.37	0.55	0.52	0.43	0.89	0.91	1.10	0.91	0.88
组氨酸 (histidine, His <sup>#</sup> )	0.57	0.43	0.39	0.31	0.59	0.54	0.25	0.54	0.33	0.51	0.13	0.29	0.18	0.28	0.47	0.41	0.35	0.39
精氨酸 (arginine, Arg <sup>#</sup> )	1.61	1.16	1.00	0.76	1.56	1.53	0.67	1.22	0.84	1.21	0.42	0.56	0.52	0.63	1.26	1.89	0.81	0.95
天门冬氨酸(aspartate, Asp <sup>#</sup> )	2.40	1.85	1.62	1.46	2.78	2.32	1.22	2.34	1.33	2.56	0.88	1.02	0.76	1.41	1.86	2.00	1.37	1.86
丝氨酸 (serine, Ser <sup>#</sup> )	1.29	1.01	0.88	0.79	1.44	1.20	0.61	1.17	0.78	1.31	0.39	0.60	0.43	0.71	1.09	0.92	0.83	0.91
谷氨酸(glutamate, Glu <sup>#</sup> )	5.01	3.87	2.17	2.83	4.36	4.31	2.28	5.33	3.22	5.21	0.85	1.24	0.99	1.97	3.27	4.17	2.00	3.61
脯氨酸(proline, Pro <sup>#</sup> )	0.88	0.65	0.70	0.59	1.03	1.32	0.48	1.13	0.57	0.88	0.60	0.43	0.35	0.54	0.42	0.94	0.63	0.80
丙氨酸(alanine, Ala <sup>#</sup> )	1.56	1.17	1.03	1.00	1.89	2.08	0.78	1.66	1.35	1.68	0.53	0.76	0.49	0.89	1.44	1.33	0.97	1.39
甘氨酸 (glycine, Gly <sup>#</sup> )	1.21	0.93	1.00	0.80	1.49	1.28	0.57	1.14	0.79	1.18	0.40	0.44	0.41	0.64	0.99	1.02	0.65	0.75
必需氨基酸总量	9.28	7.51	7.22	6.15	10.90	10.04	5.06	9.21	7.18	9.88	3.60	4.29	3.19	5.86	7.75	8.52	6.58	7.04
非必需氨基酸总量	15.50	11.84	9.40	9.07	16.24	15.94	7.63	15.36	10.32	15.63	4.59	5.77	4.51	7.58	11.47	13.56	8.18	11.41
氨基酸总量 (total amino acid, TAA)	24.78	19.35	16.62	15.22	27.14	25.98	12.69	24.57	17.50	25.51	8.19	10.06	7.70	13.44	19.22	22.08	14.76	18.45
粗蛋白 (crude protein, CP)	31.12	24.64	24.89	21.74	33.54	32.67	17.29	31.43	23.88	31.88	9.63	12.24	9.52	15.64	24.33	27.68	22.85	27.29

注: \*必需氨基酸; #非必需氨基酸。

表 3 不同食用菌的呈味氨基酸含量(%)  
Table 3 Content of flavor amino acids in different edible fungi (%)

种类	SOAA	SWAA	BIAA	SO/T	SW/T	BI/T
F1	7.41	6.16	8.71	29.90	24.86	35.15
F2	5.72	4.73	6.93	29.56	24.44	35.81
F3	3.79	4.51	6.97	22.80	27.14	41.94
F4	4.29	3.94	5.63	28.19	25.89	36.99
F5	7.14	7.39	9.73	26.31	27.23	35.85
F6	6.63	7.11	9.30	25.52	27.37	35.80
F7	3.50	3.08	4.64	27.58	24.27	36.56
F8	7.67	6.30	8.41	31.22	25.64	34.23
F9	4.55	4.35	6.45	26.00	24.86	36.86
F10	7.77	6.36	8.75	30.46	24.93	34.30
F11	1.73	2.45	3.36	21.12	29.91	41.03
F12	2.26	2.85	4.02	22.47	28.33	39.96
F13	1.75	2.09	3.03	22.73	27.14	39.35
F14	3.38	3.47	5.22	25.15	25.82	38.84
F15	5.13	4.99	7.16	26.69	25.96	37.25
F16	6.17	5.22	8.34	27.94	23.64	37.77
F17	3.37	3.87	6.13	22.83	26.22	41.53
F18	5.47	4.70	6.30	29.65	25.47	34.15

注: SWAA 甜味氨基酸总量; BIAA 苦味类氨基酸总量; SOAA 酸味类氨基酸总量; SO/T: SOAA/TAA; SW/T: SWAA/TAA; BI/T: BIAA/TAA。

### 2.3 氨基酸营养价值评价

食品蛋白质的 EAA 种类、含量及其组成比例直接影响其营养价值<sup>[20]</sup>。各食用菌品种每克氮中氨基酸的毫克数(氨基酸含量 $\times 62.5$ /蛋白质的百分含量)详见表 5。18 种食用菌的必需氨基酸总量(the total of essential amino acid, TEAA)为 1784~2590 mg·g<sup>-1</sup>N, 其中, F15、F14、F16、F17

的含量较高, 优于 FAO/WHO 标准模式、低于鸡蛋蛋白模式, 而 F13、F4、F18、F3 的含量较低; 必需氨基酸与氨基酸总量的百分比、必需氨基酸与非必需氨基酸含量的百分比分别为 40.86%~48.72%、69.10%~95.00%, 均高于 FAO/WHO 标准模式、低于鸡蛋蛋白模式, 其中占比最高的为 F15, 最低的为 F8。由上可知, 不同食用菌品种的必需氨基酸种类齐全, 总量占比合理, 属于优质蛋白, 但品种间各必需氨基酸含量差异明显, 应进一步对其组成特征进行综合分析评价。

化学分析法是以单位重量蛋白质中所含的各种必需氨基酸含量与参考蛋白模式进行比较, 是评定食物蛋白质营养价值的常用方法。不同参考蛋白模式评价结果差距较大, SRC 以 FAO/WHO 作为理想蛋白参考模式, EAAI、NI 以全蛋蛋白作为理想蛋白参考模式<sup>[15]</sup>。各食用菌品种的化学评分结果详见表 6。

SRC 是根据氨基酸过剩和缺乏同样限制蛋白质营养价值而提出的评价方法<sup>[14]</sup>。RC>1 时, 表示氨基酸过剩; 而 RC<1 时, 表示氨基酸缺乏。SRC 越接近 100, 蛋白质营养价值越高; SRC 越小, 营养价值越低。由表 6 可知, 18 个食用菌品种的 SRC 为 46.19~88.18, 其中, F1、F5 和 F10 评分均大于 80, F3、F9、F11、F15 和 F16 评分均低于 60; Met+Cys 均相对过剩, Val、Ile、Leu、Lys 表现严重不足, 为限制性氨基酸, Phe+Tyr、Thr、Trp 各品种表现不一。可见, 各食用菌品种的 Met+Cys 均相对过剩, 但品种间蛋白质营养价值差异明显, 其中, F1、F5 和 F10 属于优质蛋白质。

表 4 不同食用菌的特殊功效氨基酸含量(%)  
Table 4 Content of special functional amino acids in different edible fungi (%)

种类	CE	MAA	BCAA	AAA	FCAA	PAAA	CE/T	BC/A	M/T	BC/E	FC/T	PA/T
F1	2.18	16.42	4.09	2.17	11.94	14.20	8.80	188.48	66.26	44.07	48.18	57.30
F2	1.59	12.86	3.16	1.69	9.22	10.83	8.22	186.98	66.46	42.08	47.65	55.97
F3	1.39	10.46	2.93	1.84	6.59	8.26	8.36	159.24	62.94	40.58	39.65	49.70
F4	1.07	9.90	2.57	1.35	6.78	8.27	7.03	190.37	65.05	41.79	44.55	54.34
F5	2.15	17.16	4.86	2.55	12.06	14.89	7.92	190.59	63.23	44.59	44.44	54.86
F6	2.07	16.61	4.37	2.57	11.45	14.42	7.97	170.04	63.93	43.53	44.07	55.50
F7	0.92	8.43	2.08	1.51	5.52	6.70	7.25	137.75	66.43	41.11	43.50	52.80
F8	1.76	16.12	3.89	2.11	11.50	14.18	7.16	184.36	65.61	42.24	46.81	57.71
F9	1.17	11.23	2.78	2.12	7.85	9.14	6.69	131.13	64.17	38.72	44.86	52.23
F10	1.72	16.76	4.26	2.53	11.80	14.26	6.74	168.38	65.70	43.12	46.26	55.90
F11	1.73	12.47	2.99	1.85	8.65	10.51	9.00	161.62	64.88	38.58	45.01	54.68
F12	2.30	14.90	3.52	1.95	10.71	12.82	10.42	180.51	67.48	41.31	48.51	58.06
F13	1.34	12.00	2.77	1.67	8.44	10.59	7.26	165.87	65.04	39.35	45.75	57.40
F14	0.91	8.48	2.58	1.22	5.84	6.94	6.77	211.48	63.10	44.03	43.45	51.64
F15	0.55	4.88	1.55	0.90	2.90	3.94	6.72	172.22	59.58	43.06	35.41	48.11
F16	0.85	6.18	1.56	1.07	3.89	4.95	8.45	145.79	61.43	36.36	38.67	49.20
F17	0.70	4.84	1.30	0.71	3.21	3.97	9.09	183.10	62.86	40.75	41.69	51.56
F18	1.16	9.40	2.64	1.69	6.04	7.25	7.86	156.21	63.69	40.12	40.92	49.12

注: CE 儿童必需氨基酸: His 和 Arg; MAA 药用氨基酸: Asp、Glu、Gly、Met、Leu、Phe、Tyr、Lys 和 Arg; BCAA 支链氨基酸: Ile、Leu 和 Val; AAA 芳香族氨基酸: Phe、Tyr 和 Trp; FCAA 增香与着色氨基酸: Glu、Cys、Val、Leu、Lys、His 和 Arg; PAAA 伯氨基氨基酸: Asp、Glu、Pro、Gly、Ala、Lys 和 Arg; BC/A: BCAA/AAA; BC/E: BCAA/EAA; M/T: MAA/TAA; FC/T: FCAA/TAA; PA/T: PAAA/TAA。

表5 不同食用菌的必需氨基酸含量与鸡蛋蛋白、FAO/WHO标准模式的比较(mg·g<sup>-1</sup>N)  
Table 5 Composition of essential amino acid in different edible fungi and comparing with egg's protein and FAO/WHO standard model (mg·g<sup>-1</sup>N)

种类	Ile	Leu	Lys	Met+Cys	Phe+Tyr	Thr	Trp	Val	TEAA	E/T/%	E/N/%
F1	209	341	307	249	380	245	56	271	2059	41.36	70.54
F2	203	345	304	320	363	246	66	254	2100	42.79	74.80
F3	178	316	186	357	331	226	131	241	1966	47.11	89.08
F4	181	308	239	336	313	218	75	250	1920	43.89	78.22
F5	242	369	332	237	401	287	75	294	2236	44.22	79.26
F6	212	360	302	316	438	235	54	264	2181	43.88	78.19
F7	192	322	253	325	459	231	87	239	2107	45.94	84.99
F8	199	328	270	294	350	239	70	247	1997	40.86	69.10
F9	183	304	272	390	445	225	110	241	2170	47.37	90.01
F10	216	351	302	261	414	257	82	269	2151	43.00	75.45
F11	193	342	326	324	352	270	123	234	2163	43.81	77.96
F12	217	330	332	327	373	228	68	248	2122	42.57	74.13
F13	167	266	282	291	318	195	64	202	1784	42.22	73.08
F14	244	432	344	408	400	276	88	356	2546	47.40	90.10
F15	253	396	169	487	513	344	71	357	2590	48.72	95.00
F16	169	363	255	495	414	317	133	266	2410	46.92	88.39
F17	230	341	295	460	400	269	66	282	2344	46.36	86.44
F18	178	295	224	331	418	216	44	249	1956	48.44	93.96
鸡蛋蛋白	331	534	441	386	565	292	106	411	3066	49.80	99.22
FAO/WHO	250	440	340	220	380	250	60	310	2250	36.35	57.11

注: E/T 必需氨基酸与氨基酸总量的百分比; TEAA/TAA; E/N 必需氨基酸与非必需氨基酸含量的百分比: TEAA/(TAA-TEAA)。

表6 不同食用菌的必需氨基酸营养价值评分  
Table 6 Nutritional scores of essential amino acids in different edible fungi

种类	RC、RCAA	FAO/WHO								鸡蛋蛋白		
		Ile	Leu	Lys	Met+Cys	Phe+Tyr	Thr	Trp	Val	SRC	EAAI	NI
F1	RC	0.84	0.78	0.90	1.13	1.00	0.98	0.94	0.87	88.18	65.95	20.52
	RCAA	0.90	0.83*	0.97	1.22	1.07	1.05	1.01	0.94			
F2	RC	0.81	0.78	0.90	1.45	0.95	0.98	1.10	0.82	77.45	68.24	16.81
	RCAA	0.83	0.80*	0.92	1.49	0.98	1.01	1.13	0.84			
F3	RC	0.71	0.72	0.55	1.62	0.87	0.90	2.18	0.78	46.19	67.03	16.68
	RCAA	0.68*	0.69	0.52	1.56	0.84	0.87	2.09	0.75			
F4	RC	0.72	0.70	0.70	1.53	0.82	0.87	1.25	0.81	67.46	63.51	13.81
	RCAA	0.78	0.76*	0.76	1.65	0.89	0.94	1.35	0.87			
F5	RC	0.97	0.84	0.98	1.08	1.05	1.15	1.24	0.95	87.77	73.14	24.53
	RCAA	0.94	0.81*	0.95	1.04	1.02	1.11	1.20	0.92			
F6	RC	0.85	0.82	0.89	1.43	1.15	0.94	0.89	0.85	78.36	68.61	22.41
	RCAA	0.87	0.84*	0.91	1.47	1.18	0.96	0.91	0.87			
F7	RC	0.77	0.73	0.74	1.48	1.21	0.93	1.45	0.77	68.17	69.03	11.94
	RCAA	0.76	0.72*	0.74	1.47	1.20	0.92	1.43	0.76			
F8	RC	0.80	0.75	0.80	1.34	0.92	0.95	1.16	0.80	77.66	65.03	20.44
	RCAA	0.85	0.79*	0.85	1.43	0.98	1.02	1.24	0.85			
F9	RC	0.73	0.69	0.80	1.77	1.17	0.90	1.83	0.78	56.91	72.02	17.20
	RCAA	0.68	0.64*	0.74	1.63	1.08	0.83	1.69	0.72			
F10	RC	0.86	0.80	0.89	1.19	1.09	1.03	1.37	0.87	80.54	71.02	22.64
	RCAA	0.85	0.79*	0.88	1.17	1.08	1.02	1.36	0.86			
F11	RC	0.77	0.78	0.96	1.47	0.93	1.08	2.06	0.75	58.83	73.79	17.95
	RCAA	0.70	0.71	0.87	1.34	0.84	0.98	1.87	0.69*			
F12	RC	0.87	0.75	0.98	1.49	0.98	0.91	1.13	0.80	76.34	68.99	19.10
	RCAA	0.88	0.76*	0.99	1.51	0.99	0.92	1.14	0.81			
F13	RC	0.67	0.60	0.83	1.32	0.84	0.78	1.07	0.65	71.37	58.37	15.93
	RCAA	0.79	0.71*	0.98	1.56	0.99	0.92	1.27	0.77			
F14	RC	0.98	0.98	1.01	1.85	1.05	1.10	1.47	1.15	74.28	83.43	13.05
	RCAA	0.81*	0.82	0.84	1.55	0.88	0.92	1.22	0.96			
F15	RC	1.01	0.90	0.50	2.21	1.35	1.38	1.19	1.15	59.30	80.19	7.72
	RCAA	0.84	0.74	0.41*	1.83	1.11	1.14	0.98	0.95			
F16	RC	0.67	0.82	0.75	2.25	1.09	1.27	2.21	0.86	48.36	79.83	9.77
	RCAA	0.54*	0.66	0.61	1.81	0.88	1.02	1.78	0.69			
F17	RC	0.92	0.78	0.87	2.09	1.05	1.08	1.09	0.91	62.19	74.84	7.12
	RCAA	0.84	0.71*	0.79	1.90	0.96	0.98	1.00	0.83			
F18	RC	0.71	0.67	0.66	1.50	1.10	0.86	0.73	0.80	67.08	60.42	13.81
	RCAA	0.81	0.76	0.75*	1.71	1.25	0.98	0.83	0.91			

注: \*第一限制性氨基酸。

EAAI 所体现的不仅是单个必需氨基酸, 而是综合考虑所有必需氨基酸与参考蛋白模式间全面比较的评价方法<sup>[13]</sup>。NI 是在 EAAI 的基础上考虑了蛋白质的含量, 反映了每克食物中蛋白质氨基酸的营养价值<sup>[21]</sup>。由表 6 可知, 18 个食用菌品种的 NI 为 7.12~24.53, 其中, F5、F10、F6、F1 和 F8 的 NI 均高于 20, F15、F16 和 F17 的 NI 均低于 10。综上所述, 每克食用菌的蛋白质营养价值差异也明显, F5、F10、F6、F1 和 F8 是食用菌类中优质的蛋白源。

### 2.4 相关性分析及聚类分析

由表 7 可知, TAA、EAA、SOAA、SWAA、BIAA、CE、MAA、BCAA、AAA、FCAA 和 PAAA 之间均存在极显著的正相关性, 而与 E/T、E/N、SRC 和 EAAI 相关性均不明显。由此可见, 综合评价食用菌蛋白质营养价值, 需要考虑各类氨基酸总量及各种化学分析评分等多个指标。

聚类分析(cluster analysis, CA)能在多维空间或模式空间发现隐藏的结构, 利用确定的标准计算出所有样品之间的相关性, 根据相关程度将其简化合并, 从而可以直观地进行相似品种及组分信息的综合比较<sup>[22]</sup>。对 18 种食用菌的 CP、TAA、E/T、E/N、SRC、EAAI 和 NI 进行系统聚类分析, 数据采用转换方式、Ward 分类法和离差平方和法, 结果见图 1。从最大组内连接距离中值 5 处划分, 可分为 3 类。第 1 类为 F1、F5、F6、F8、F10 和 F2、F4、F11、F12、F13, 具有蛋白质、各类氨基酸总量和氨基酸营养价值评分高的特征, 前组各指标高于后组; 第 2 类为 F3、F7、F9、F18, 具有蛋白质、各类氨基酸总量和氨基酸营养价值评分居中的特征; 第 3 类为 F14、F15、F16、F17, 具有蛋白质、各类氨基酸总量和氨基酸营养价值评分较低的特征。可见, 该聚类结果很好地反映了各食用菌品种间氨基酸组成特征及其营养价值的差异性。

表 7 不同食用菌中氨基酸种类间的相关性分析  
Table 7 Correlation analysis of amino acid species in different edible fungi

	TAA	EAA	SOAA	SWAA	BIAA	CE	MAA	BCAA	AAA	FCAA	PAAA	E/T	E/N	SRC	EAAI
TAA	1	0.992	0.976	0.988	0.987	0.932	0.998	0.984	0.946	0.992	0.995	-0.739	-0.740	0.711	-0.405
EAA		1	0.947	0.988	0.995	0.921	0.984	0.991	0.960	0.972	0.975	-0.659	-0.660	0.671	-0.386
SOAA			1	0.943	0.938	0.893	0.984	0.940	0.887	0.990	0.988	-0.837	-0.835	0.754	-0.434
SWAA				1	0.981	0.910	0.977	0.986	0.943	0.964	0.975	-0.683	-0.684	0.678	-0.367
BIAA					1	0.947	0.982	0.984	0.952	0.970	0.972	-0.664	-0.664	0.651	-0.401
CE						1	0.938	0.907	0.847	0.938	0.937	-0.738	-0.740	0.649	-0.372
MAA							1	0.975	0.936	0.997	0.997	-0.767	-0.767	0.722	-0.423
BCAA								1	0.939	0.964	0.969	-0.648	-0.649	0.735	-0.342
AAA									1	0.915	0.918	-0.533	-0.536	0.556	-0.392
FCAA										1	0.998	-0.795	-0.795	0.747	-0.412
PAAA											1	-0.795	-0.795	0.739	-0.414
E/T												1	0.999	-0.660	0.481
E/N													1	-0.656	0.475
SRC														1	-0.263
EAAI															1

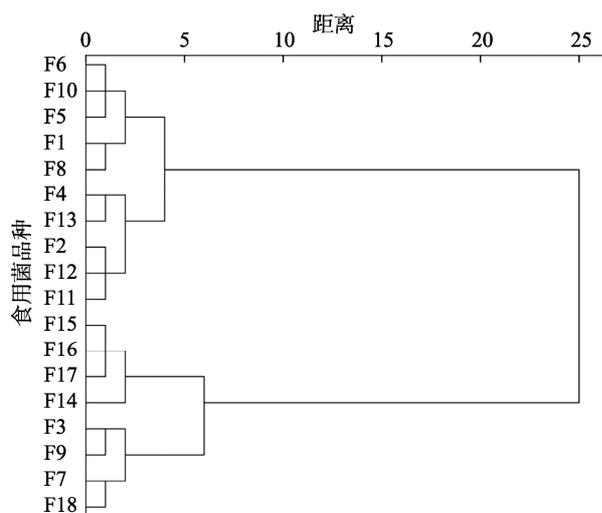


图 1 不同食用菌氨基酸营养聚类分析图

Fig.1 Dendrogram of hierarchical cluster analysis of amino acid nutrition of different edible fungi

### 3 结论与讨论

蛋白氨基酸含量及其组成特征是影响食用菌品质的重要指标<sup>[23]</sup>。与甘蓝<sup>[24]</sup>等 6 种常见蔬菜相比, 食用菌的氨基酸种类齐全, 含有 18 种氨基酸。食用菌的 CP、TAA、EAA 含量品种间差异明显, 均低于梭鱼<sup>[25]</sup>等水产品, 高于狗肝菜<sup>[26]</sup>等 5 种野生蔬菜, 其中, 除木耳目和银耳目外其他菌目的 CP、TAA、EAA 均高于荞麦<sup>[27]</sup>、大麦<sup>[28]</sup>、小麦<sup>[29]</sup>、水稻<sup>[29]</sup>等谷物; 金针菇、蟹味菇、蒙古口蘑和黑木耳的支链氨基酸占 EAA 的比例小于 40%, 其他食用菌的占比与人体组织细胞相符, 其中茶树菇能够满足婴儿的需求。可见, 伞菌目食用菌可作为每日获取所需蛋白质的来源。

氨基酸在防止食品色、香、味和外观变质等方面具有重要作用。食用菌的呈味氨基酸含量丰富, 品种间差异明显, 鲜甜味类氨基酸占 TAA 的比例依次为: 12 个伞菌目品种>大黄花<sup>[30]</sup>>多孔菌目、木耳目>牛肝菌、银耳目、鬼笔目>盘

菌目<sup>[31]</sup>;说明了伞菌目食用菌的味道鲜美,其他目的风味差别不明显;增香与着色氨基酸、伯胺基氨基酸含量品种间差异较大,增香与着色氨基酸占 TAA 的比例依次为:12 个伞菌目品种>多孔菌目>银耳目、鬼笔目>牛肝菌>木耳目,均低于大黄鱼<sup>[30]</sup>等水产品,伯胺基氨基酸占 TAA 的比例依次为:12 个伞菌目品种>多孔菌目>银耳目>牛肝菌、鬼笔目、木耳目>大黄鱼<sup>[30]</sup>等水产品。可见,食用菌适用于食品抑菌剂的开发,伞菌目食用菌也可用于食品调味剂的开发。

氨基酸在人体的正常生理活动中也发挥着重要的作用。食用菌的药用氨基酸含量丰富,占 TAA 的比例依次为:12 个伞菌目品种>鬼笔目>多孔菌目、牛肝菌、银耳目>木耳目、盘菌目<sup>[31]</sup>>枇杷<sup>[32]</sup>,杏鲍菇、香菇、鸡腿菇和秀珍菇的占比高达 66%以上,高于冬虫夏草<sup>[33]</sup>、枸杞<sup>[34]</sup>、石斛<sup>[35]</sup>、人参<sup>[36]</sup>等中药材。研究还发现 Glu、Asp、Leu、Arg、Lys 5 种特殊功效的氨基酸占 TAA 的 36.80%~49.77%,其中,杏鲍菇、香菇和秀珍菇的占比高于 49%。Glu 具有健脑益智、保肝护肝的作用<sup>[19]</sup>;Asp 具有增强肝功、消除疲劳、解除氨中毒、保护心肌的作用<sup>[19]</sup>;Leu 具有调节蛋白合成与分解、防治肝、肾功能衰竭、刺激胰岛素分泌等功能<sup>[19]</sup>;Arg 具有增强免疫力、改善心脑血管、改善性欲、提高抗氧化能力等生理功能<sup>[19]</sup>;Lys 具有增强食欲、促进脂肪代谢、治疗贫血、支气管炎和乙型肝炎等功效<sup>[19]</sup>。可见,杏鲍菇、香菇、鸡腿菇和秀珍菇在医疗保健食品方面具有广阔的开发前景。

食品蛋白质的必需氨基酸模式越接近人体蛋白模式,越容易被机体吸收利用,营养价值就越高<sup>[20]</sup>。食用菌的 E/T、E/N 排序依次为:毛木耳>鬼笔目>多孔菌目、牛肝菌、银耳目>黑耳目>12 个伞菌目品种>FAO/WHO 标准模式>盘菌目<sup>[31]</sup>,与于士军等<sup>[37]</sup>对不同食用菌的研究结果基本一致。SRC 的排序依次为:10 个伞菌目品种、多孔菌目>鬼笔目>银耳目>木耳目>牛肝菌,NI 的排序依次为:12 个伞菌目品种>鬼笔目>多孔菌目>木耳目>银耳目,其中,秀珍菇、茶树菇和草菇的 SRC 值大于 80、NI 值大于 20,优于大鲮<sup>[38]</sup>、花鳊<sup>[39]</sup>等水产品,说明这 3 种食用菌的必需氨基酸组成均衡性好,接近人体蛋白的组成,为良好的食物蛋白源。各食用菌的 Met+Cys 相对过剩,Val、Ile、Leu、Lys 相对不足,根据蛋白质互补法,与红地球<sup>[20]</sup>、猪肉<sup>[38]</sup>等搭配食用,有助于提高蛋白的利用率和营养价值。

食用菌氨基酸总量、必需氨基酸、各呈味氨基酸、各特殊功效氨基酸存在极显著相关性,但与各营养价值评分相关性不明显,因此,评价食用菌的营养需要对蛋白质含量、氨基酸总量、E/T、E/N、氨基酸比值系数分、必需氨基酸指数和营养指数等指标进行综合评价。通过这些指标的聚类分析,18 种食用菌分成 3 类:高、中、低品质蛋白组,本研究为各类食用菌合理开发利用提供了科学依据。

## 参考文献

[1] 汤昕明,冯云利,郭相,等.我国食用菌栽培现状分析及发展展望

[J].北方园艺,2019,43(8):148-153.

TANG XM, FENG YL, GUO X, et al. Current situation and development trend of edible medicinal fungi in China [J]. North Hortic, 2019, 43(8): 148-153.

[2] 赵春艳,陈旭,董娇,等.2015 年~2018 年我国食用菌产量和品种概况分析[J].中国食用菌,2021,40(2):101-105.

ZHAO CY, CHEN X, DONG J, et al. Analysis on Chinese edible fungi yield and varieties distribution from 2015 to 2018 [J]. Chin Edible Fungi, 2021, 40(2): 101-105.

[3] HELENO SA, FERREIRA RC, ANTONIO AL. Nutritional value, bioactive compounds and antioxidant properties of three edible mushrooms from Poland [J]. Food Biosci, 2015, 11: 48-55.

[4] JULIE H, WANG Q, GOULD T, et al. Impact of *Agaricus bisporus* mushroom consumption on gut health markers in healthy adults [J]. Nutri, 2018, 10: 1401-1416.

[5] MA G, YANG W, ZHAO L, et al. A critical review on the health promoting effects of mushrooms nutraceuticals [J]. Food Sci Hum Welln, 2018, 7: 125-133.

[6] 马腾茂.常见食用菌药理作用研究进展[J].中国果菜,2019,39(2):39-43.

MA TM. Research progress on pharmacological effects of common edible fungi [J]. Chin Fruit Veget, 2019, 39(2): 39-43.

[7] SUN L, LIU Q, BAN C, et al. Comparison of free total amino acid compositions and their functional classifications in 13 wild edible mushrooms [J]. Molecules, 2017, 22(3): 350-359.

[8] 陈洪雨,鲍大鹏,杨瑞恒,等.亚东黑耳的氨基酸特征分析及蛋白质品质评价[J].核农学报,2019,33(1):81-87.

CHEN HY, BAO DP, YANG RH, et al. Amino acid profile and protein quality of *Exidia* sp.[J]. J Nucl Agri Sci, 2019, 33(1): 81-87.

[9] 吴莹莹,鲍大鹏,王瑞娟,等.6 种市售工厂化栽培金针菇的氨基酸组成及蛋白质营养评价[J].食品科学,2018,39(10):263-268.

WU YY, BAO DP, WANG RJ, et al. Amino acid composition and nutritional evaluation of proteins in six samples of cultivated *Flammulina velutipes* [J]. Food Sci, 2018, 39(10): 263-268.

[10] 熊丙全,兰秀华,彭卫红,等.不同羊肚菌氨基酸比较分析及营养评价[J].食品与发酵工业,2020,46(2):114-119.

XIONG BQ, LAN XH, PENG WH, et al. Comparative analysis and nutritional evaluation of different amino acids in *Morchella*. spp [J]. Food Ferment Ind, 2020, 46(2): 114-119.

[11] BANO Z, RAIATHNAM S. Tropical mushrooms: Biological nature and cultivation methods [M]. Hong Kong: The Chinese University Press, 1982.

[12] Food and Agriculture Organization. Amino acid content of foods and biological data on proteins [C]// FAO Nutritional Studies, No.24. Food Policy and Food Science Service, Nutrition Division, FAO. Rome: FAO, 1970.

[13] 朱圣陶,吴坤.蛋白质营养价值评价-氨基酸比值系数法[J].营养学报,1988,10(2):187-190.

ZHU ST, WU K. Nutritional evaluation of protein-ratio coefficient of amino acid [J]. Acta Nutr Sin, 1988, 10(2): 187-190.

[14] OSER BL. Protein and Amino Acid Nutrition [M]. New York: Academic Press, 1959.

[15] 颜孙安,林香信,钱爱萍,等.化学分析法的理想参考蛋白模式及其化学生物价研究[J].中国农学通报,2010,26(23):101-107.

YAN SA, LIN XX, QIAN AIP, et al. The study on the ideal reference protein model of chemical analysis and biological value [J]. Chin Agric Sci Bull, 2010, 26(23): 101-107.

[16] 陈巧玲,李忠海,陈素琼.5 种地产食用菌氨基酸组成比较及营养评价[J].食品与机械,2014,30(6):43-46,81.

CHEN QL, LI ZH, CHEN SQ. Analysis of amino acid composition and nutritional evaluation in five local edible fungus [J]. Food Mach, 2014, 30(6): 43-46, 81.

[17] 刘培基,崔文甲,王文亮,等.食用菌风味物质及其在美拉德反应中的

- 研究进展[J]. 食品研究与开发, 2020, 41(15): 188–193.
- LIU PJ, CUI WJ, WANG WL, *et al.* Research progress of edible fungi flavor substances and their application in Maillard reaction [J]. Food Res Dev, 2020, 41(15): 188–193.
- [18] ZHANG Y, VENKITASAMY C, PAN Z, *et al.* Recent developments on umami ingredients of edible mushrooms—A review [J]. Tren Food Sci Technol, 2013, 33(2): 78–92.
- [19] 蒋滢. 氨基酸的应用[M]. 北京: 世界图书出版公司, 1996.
- JIANG Y. The Application of Amino Acids [M]. Beijing: World Publishing Corporation, 1996.
- [20] 颜孙安, 姚清华, 林香信, 等. 成熟度对‘红地球’葡萄氨基酸营养价值的影响[J]. 果树学报, 2021, 38(1): 64–72.
- YAN SA, YAO QH, LIN XX, *et al.* Effects of maturity on amino acid nutrition of Red Globe Grape (*Vitis vinifera* L.) [J]. J Fruit Sci, 2021, 38(1): 64–72.
- [21] 罗正明, 刘秀丽, 贾艳青, 等. 四种五台山野生食用菌蛋白质营养价值评价[J]. 食品工业科技, 2015, 36(2): 349–353.
- LUO ZM, LIU XL, JIA YQ, *et al.* Protein nutritional assessments of four kinds of wild edible fungi in mount Wutai [J]. Sci Technol Food Ind, 2015, 36(2): 349–353.
- [22] 张红兵, 贾来喜, 李璐. SPSS 宝典[M]. 北京: 电子工业出版社, 2007.
- ZHANG HB, JIA LX, LI L. SPSS Encyclopedia [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2007.
- [23] 马庆华, 董辰希, 曹晗, 等. 3 种野生大型真菌营养成分分析与评价[J]. 中国食用菌, 2020, 39(7): 35–40.
- MA QH, DONG CX, CAO H, *et al.* Analysis and evaluation of nutritional components of three wild macro fungi [J]. Chin Edible Fungi, 2020, 39(7): 35–40.
- [24] 杨月欣, 王光亚, 潘兴昌. 中国食物成分表(第一册)[M]. 北京: 北京大学医学出版社, 2017.
- YANG YX, WANG GY, PAN XC. Chinese food composition table (Volume 1) [M]. Beijing: Peking University Medical Press, 2017.
- [25] 汪涛, 沈勇, 孙龙生, 等. 梭鲈与加州鲈、鳊鱼的肌肉品质比较[J]. 水产养殖, 2020, 7: 17–23.
- WANG T, SHEN Y, SUN LS, *et al.* Comparison of muscle quality among pikeperch, largemouth bass and mandarin fish [J]. J Aquacult, 2020, 7: 17–23.
- [26] 黄元河, 潘乔丹, 赵秋华, 等. 右江流域 5 种野生蔬菜的氨基酸含量及营养价值评价[J]. 食品工业, 2020, 41(8): 345–348.
- HUANG YH, PAN QD, ZHAO QH, *et al.* Amino acid composition and nutritional evaluation of the 5 kinds of wild vegetables used in the Youjiang river basin [J]. Food Ind, 2020, 41(8): 345–348.
- [27] 张雨薇, 景梦琳, 李小平, 等. 不同种荞麦发芽前后蛋白质及氨基酸变化主成分分析与综合评价[J]. 食品与发酵工业, 2017, 43(7): 214.
- ZHANG YW, JING ML, LI XP, *et al.* Principal component analysis and comprehensive evaluation of protein and amino acid in different varieties of buckwheat and buckwheat sprout [J]. Food Ferment Ind, 2017, 43(7): 214.
- [28] 张端莉, 桂余, 方国珊, 等. 大麦在发芽过程中营养物质的变化及其营养评价[J]. 食品科学, 2014, 35(1): 229.
- ZHANG DL, GUI Y, FANG GS, *et al.* Nutrient change and nutritional evaluation of barley during germination [J]. Food Sci, 2014, 35(1): 229.
- [29] 王婧, 李小平, 刘柳, 等. 燕麦等五种谷物的氨基酸含量综合评价[J]. 麦类作物学报, 2019, 39(4): 438–445.
- 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 Trit Crops, 2019, 39(4): 438–445.
- [30] 张艳霞, 谢成民, 周纷, 等. 两种养殖模式大黄花肌肉营养价值评价及主体风味物质差异性分析[J]. 食品科学, 2020, 41(8): 220–227.
- ZHANG YX, XIE CM, ZHOU F, *et al.* Evaluation of muscle nutritional value and differences in main flavor substances of *Pseudosciaena crocea* in two cultivation modes [J]. Food Sci, 2020, 41(8): 220–227.
- [31] 谢丽源, 兰秀华, 唐杰, 等. 不同羊肚菌品种氨基酸营养价值及等鲜浓
- 度值差异分析[J]. 天然产物研究与开发, 2020, 32: 1023–1029, 979.
- XIE LY, LAN XH, TANG J, *et al.* Nutritional evaluation of different amino acids and difference analysis of equivalent umami concentration in *Morchella* spp. [J]. Nat Prod Res Dev, 2020, 32: 1023–1029, 979.
- [32] 章希娟, 陈秀萍, 许玲, 等. 31 份枇杷种质资源果实的蛋白质营养评价[J]. 福建农业学报, 2016, 31(3): 242–249.
- ZHANG XJ, CHEN XP, XU L, *et al.* Nutritional evaluation on proteins in fruits of 31 loquat genotypes [J]. Fujian J Agric Sci, 2016, 31(3): 242–249.
- [33] 周苏, 刘磊. 冬虫夏草中氨基酸含量分析[J]. 现代食品, 2017, (5): 116–118.
- ZHOU S, LIU L. Analysis of amino acids in *Cordyceps sinensis* [J]. Mod Food, 2017, (5): 116–118.
- [34] 吴有锋, 谭亮, 沈建伟, 等. 柴达木枸杞中 17 种氨基酸的测定与分析[J]. 食品工业科技, 2017, 38(1): 281–286.
- WU YF, TAN L, SHEN JW, *et al.* Determination and analysis of 17 amino acids in Qaidam Chinese wolf berry [J]. Sci Technol Food Ind, 2017, 38(1): 281–286.
- [35] 王晓媛, 王彦兵, 陈玉芹, 等. 6 种石斛属植物氨基酸组成及营养价值评价[J]. 天然产物研究与开发, 2019, 31: 601–607.
- WANG XY, WANG YB, CHEN YQ, *et al.* Amino acid composition and nutritional value evaluation of 6 species of *Dendrobium* [J]. Nat Prod Res Dev, 2019, 31: 601–607.
- [36] 常思佳, 宁雪, 王日明, 等. 日光温室栽培模式下不同种质来源人参单体皂苷及氨基酸对比分析[J]. 人参研究, 2019, (3): 18–24.
- CHANG SJ, NING X, WANG RM, *et al.* Comparative analysis of monomeric saponins and amino acids of ginseng from different germplasm sources in solar greenhouse cultivation mode [J]. Gins Res, 2019, (3): 18–24.
- [37] 于士军, 李向东, 王伟, 等. 不同药用菌氨基酸组成的化学计量学分析[J]. 食品与营养科学, 2020, 9(2): 145–153.
- YU SJ, LI XD, WANG W, *et al.* Chemometrics analysis of amino acids of different edible and medicinal mushrooms [J]. Hans J Food Nutr Sci, 2020, 9(2): 145–153.
- [38] 杨雪海, 黄少文, 郭万正, 等. 源生态类野生中国大鲵肌肉氨基酸组成分析[J]. 湖北农业科学, 2018, 57(S2): 170–173.
- YANG XH, HUANG SW, GUO WZ, *et al.* Analysis of amino acid composition and content in muscle of the ecology of wild *Andrias davidianus* [J]. Hubei Agric Sci, 2018, 57(S2): 170–173.
- [39] 姚清华, 苏德森, 颜孙安, 等. 不同种菲律宾鳗肌肉脂肪酸及氨基酸组成特征比较[J]. 中国食品学报, 2016, 16(4): 244–250.
- YAO QH, SU DS, YAN SA, *et al.* Comparison of composition mode of fatty acid and amino acid in *Anguilla bicolor pacifica* and *Anguilla marmorata* muscle [J]. J Chin Inst Food Sci Technol, 2016, 16(4): 244–250.

(责任编辑: 张晓寒 于梦娇)

## 作者简介



颜孙安, 高级实验师, 主要研究方向为农产品质量安全与风险评估。

E-mail: yansunan1982@163.com



姚清华, 副研究员, 主要研究方向为农产品质量安全与风险评估。

E-mail: yaoyaoshuimu@163.com