

金针菇原生质体杂交菌株游离氨基酸多样性

Amino acid characteristics and nutritional evaluation of *Flammulina filiformis* protoplast hybrid strains

陆 欢^{1,2,3,4} 刘建雨^{1,2,3,4} 尚晓冬^{1,2,3,4}

LU Huan^{1,2,3,4} LIU Jianyu^{1,2,3,4} SHANG Xiaodong^{1,2,3,4}

杨 慧^{1,2,3,4} 吴燕莎^{1,2,3,4} 王瑞娟^{1,2,3,4}

YANG Hui^{1,2,3,4} WU Yansha^{1,2,3,4} WANG Ruijuan^{1,2,3,4}

(1. 上海市农业科学院食用菌研究所, 上海 201403; 2. 农业部应用真菌资源与利用重点开放实验室, 上海 201403;
3. 国家食用菌工程技术研究中心, 上海 201403; 4. 上海市农业遗传育种重点实验室, 上海 201403)

(1. Institute of Edible Fungi, Shanghai Academy of Agricultural Sciences, Shanghai 201403, China; 2. Key Laboratory of Applied Fungi Resources and Utilization [South], Ministry of Agriculture, P. R. China, Shanghai 201403, China; 3. National Engineering Research Center of Edible Fungi, Shanghai 201403, China; 4. Shanghai Key Laboratory of Agriculture Genetics and Breeding, Shanghai 201403, China)

摘要:目的: 了解不同杂交金针菇品种间的品质差异, 选育高品质金针菇新品种。方法: 以黄色金针菇 Fv1923 两个不同原生质体单核为亲本之一, 分别与 6 个(2 个黄色、4 个白色)金针菇原生质体进行单亲杂交, 共获得 12 个黄色杂交菌株。利用主成分分析和聚类分析等方法对 12 个杂交菌株的游离氨基酸进行了综合评价, 同时评价了不同原生质体杂交菌株呈味多样性。结果: 12 个杂交菌株中必需氨基酸、非必需氨基酸和总氨基酸平均含量分别为 7.71, 22.83, 30.54 mg/g; 甲硫氨酸是菌株 F1、F11、F15、F16、F21、F29、F39、F41 和 F42 的第一限制性氨基酸。12 个杂交菌株中所含的氨基酸组分之间相关性较强, 4 个主成分累计方差贡献率为 87.15%, 较好地反映出杂交菌株中氨基酸的综合信息, 综合得分排列前二的品种均为上研 1820 和 Fv1923 的杂交菌株。聚类分析将 12 个杂交菌株分为 6 类, 与主成分分析结果较为一致, 较好地反映出不同杂交菌株中游离氨基酸的品种差异性。结论: 以不同原生质体单核体作为亲本选育的杂交后代在游离氨基酸组分和含量上存在显著差异。

关键词: 金针菇; 原生质体; 杂交; 氨基酸组成; 营养评价

Abstract: Objective: This study aimed to investigate the quality

differences among different hybrid enoki mushrooms (*Flammulina filiformis*) strains and breed new strains with high quality. **Methods:** Two different protoplast monocytes of yellow enoki mushrooms Fv1923 were used as one of the parents to cross with 6 enoki mushrooms protoplasts (2 yellow and 4 white strains), and a total of 12 yellow hybrid strains were obtained. Principal component analysis and cluster analysis were used to evaluate the free amino acids of 12 hybrid strains, and the flavor diversity of different protoplast hybrid strains was also evaluated. **Results:** The average contents of essential amino acids, non-essential amino acids and total amino acids were 7.71, 22.83 and 30.54 mg/g, respectively. Methionine was the first limiting amino acid of strains F1, F11, F15, F16, F21, F29, F39, F41 and F42. The amino acid components in 12 hybrid strains had a strong correlation, and the cumulative variance contribution rate of the four principal components was 87.15%, which better reflected the comprehensive information of amino acids in hybrid strains. The top two strains in comprehensive scores were hybrid strains of Shangyan 1820 and Fv1923. Cluster analysis showed that 12 strains were divided into 6 groups, which was consistent with the results of principal component analysis and reflected the variety differences of free amino acids in different strains. **Conclusion:** There were significant differences in the composition and content of free amino acids in hybrid strains with different protoplast monocytes as parents.

Keywords: enoki mushrooms; protoplast; hybridization; amino acid composition; nutritional evaluation

基金项目: 上海市科委“科技创新行动计划”农业科技领域项目 (编号: 21N11900300)

作者简介: 陆欢, 女, 上海市农业科学院助理研究员, 硕士。

通信作者: 王瑞娟(1980—), 女, 上海市农业科学院副研究员, 硕士。E-mail: wangruijuan@saas.sh.cn

收稿日期: 2023-03-21 **改回日期:** 2023-07-08

金针菇(*Flammulina filiformis*)又称构菌、朴菇,属蘑菇纲、蘑菇目、膨瑚菌科、冬菇属^[1-2],是中国最早实现工厂化生产的食用菌品种,也是目前中国工厂化日年和年产量最多的食用菌品种之一,2021 年中国金针菇年产量已达到 214.57 万 t^[3]。金针菇形态优美,口感鲜脆,营养丰富,富含蛋白质、氨基酸、维生素、矿物质、膳食纤维和不饱和脂肪酸等营养物质^[4-7];此外,金针菇还富含生物活性成分,包括多糖、黄酮、萜类、酚类和真菌免疫调节蛋白等化合物^[8-11]。金针菇既可以鲜品食用,也可加工成即时食品食用,深受广大消费者的喜爱。

食用菌具有高蛋白的特点,可作为优质的替代蛋白,以保证蛋白的可持续供应和绿色低碳生产。金针菇含有丰富的氨基酸,是优良蛋白的新型植物蛋白源之一,还能与动物蛋白结合达到互补作用,以满足人们多元化食品需求。有研究^[12]表明,食用菌中所含的可溶性糖、有机酸、核苷酸和游离氨基酸等呈味物质能影响其风味,而游离氨基酸也是作为衡量食用菌品质的一个重要指标,其含量与食用菌的滋味和风味等品质相关。游离氨基酸(Free amino acids, FAAs)作为一种非蛋白氨基酸,其约占氨基酸总量的 25%~35%,是食物味觉活性成分的主要组成部分之一,游离氨基酸含有多样的独特滋味,一般分为甜味、鲜味、苦味和芳香族氨基酸,且食用菌中游离氨基酸含量的变化能影响食用菌的品质^[13-14],因此,分析测定食用菌中游离氨基酸对评价食用菌的营养品质具有重要意义。

中国针对金针菇的研究主要集中于栽培技术和品种选育等方面,对构建金针菇营养评价体系的研究报道较少。顾可飞等^[15]分析了不同生育期金针菇基础营养成分的差异性,发现金针菇在发酵期的益智成分(赖氨酸、精氨酸、亮氨酸、组氨酸)含量均较高,鲜味氨基酸及粗蛋白含量也较高。陆欢等^[16]对 9 个不同品种的金针菇进行了营养成分分析与评价,发现 9 个品种的金针菇均营养丰富,粗蛋白含量较高,氨基酸种类齐全,其中谷氨酸、蛋氨酸、天冬氨酸和亮氨酸含量占总氨基酸含量的 53.25%,黄色品种与白色品种氨基酸含量存在明显差异。刘宗奇等^[17]分析了白色和黄色金针菇子实体的营养成分,发现白色金针菇中的氨基酸总量和必需氨基酸含量均高于黄色品种,可能与不同品种的金针菇蛋白质合成和氨基酸代谢通路存在差异有关。金针菇的营养品质和游离氨基酸不仅受培养条件和生长环境等因素影响,且不同品种均存在一定差异,但目前对这些差异的研究极少有报道。

金针菇是典型的四极性异宗配合系统,在金针菇双核体细胞中存在两个细胞核,目前可通过原生质体单核化技术获得 2 个细胞核,再通过单杂杂交技术得到不同细胞核的杂交子代。因此,为分析和评价不同金针菇品

种间的品质差异,研究通过种质资源评价筛选获得品质优良的亲本 Fv1923,并获得 Fv1923 菌株的 2 个细胞核,通过与其他 6 个菌株的原生质体单核杂交获得 12 个金针菇原生质体杂交菌株。以 12 个原生质体杂交菌株为研究材料,分析其游离氨基酸的含量和组分,通过主成分分析(Principal component analysis, PCA)和聚类分析对其进行综合评价,以期为提高金针菇氨基酸含量、选育高品质金针菇新品种和产品开发提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

黄色金针菇品种(亲本材料 Fv923、金 2301 和上研 1820)和白色金针菇品种(亲本材料金 2611、金 2318、金 2641 和上研 1 号):农业农村部国家食用菌种质资源库(上海);

甲醇、乙腈、甲酸:色谱纯,德国 CNW Technologies GmbH 公司;

氨基酸标准品:美国 Sigma 公司。

1.2 仪器与设备

分析天平:MS-TS 型,梅特勒—托利多仪器(上海)有限公司;

真空冷冻干燥机:FD5-3T 型,美国西盟国际公司;

数显鼓风干燥箱:GZX-9240MBE 型,上海博迅实业有限公司医疗设备厂;

研磨仪:JXFSTPRP-24 型,上海净信科技有限公司;

离心机:Heraeus Fresco17 型,美国 Thermo Fisher Scientific 公司;

超声仪:YM-080S 型,深圳市方奥微电子有限公司;

质谱仪:6460 Triple Quadrupole Mass Spectrometer 型,美国 Agilent 公司;

超高效液相仪:1290 Infinity II series UHPLC System 型,美国 Agilent 公司。

1.3 试验方法

1.3.1 样品制备 试验材料为 7 个亲本菌株的原生质体经单杂杂交后获得的 12 个黄色金针菇菌株,菌株具体信息见表 1。均于 2021 年 8 月于山东雪榕生物科技有限公司进行工厂化条件下出菇,培养和栽培条件相同。12 个杂交菌株均于 2021 年 9 月中旬进行采收,采收后的子实体保存在-80℃超低温冰箱中备用。

1.3.2 取样及样品预处理 选择成熟度相近、无腐败变质的新鲜金针菇子实体(含菌盖和菌柄)10 g。将所取样品放置于冻干机中冷冻 24 h,研磨仪粉碎,充分混合过 40 目筛后,称取 5 g 备用。

1.3.3 氨基酸含量测定

(1) 样品制备:称取适量样本(20~25 mg)于 EP 管中,加入钢珠,向样本中加入 1 000 μ L 乙腈—甲醇—水混

表 1 金针菇菌株信息

Table 1 Source of strain of *F. filiformis*

编号	亲本信息	编号	亲本信息
F1	金 2611(3)×Fv1923(29)	F15	金 2611(3)×Fv1923(27)
F7	上研 1 号(21)×Fv1923(29)	F21	上研 1 号(21)×Fv1923(27)
F11	金 2318(1)×Fv1923(29)	F45	金 2318(1)×Fv1923(27)
F16	金 2641(20)×Fv1923(29)	F17	金 2641(20)×Fv1923(27)
F29	金 2301(7)×Fv1923(29)	F39	金 2301(7)×Fv1923(27)
F41	上研 1820(9)×Fv1923(29)	F42	上研 1820(9)×Fv1923(27)

合液($V_{\text{乙醇}}:V_{\text{甲醇}}:V_{\text{水}}=2:2:1$;含同位素标记内标混合物),涡旋 30 s 混匀。35 Hz 研磨处理 4 min,冰水浴条件下超声 5 min,重复研磨超声 3 次,−40 ℃静置 1 h 后在 4 ℃,12 000 r/min 条件下离心 15 min。取上清液稀释 25 倍后涡旋 30 s 混匀后移至 LC 进样瓶中备用,使用 UHPLC-MS/MS 测定金针菇子实体中的氨基酸含量。

(2) UHPLC-MS/MS 检测:液相色谱 A 相为 1% 甲酸水溶液,B 相为 1% 甲酸乙腈。流动相条件为柱温箱温度为 35 ℃,样品盘设为 4 ℃,进样体积为 1 μL 。质谱条件为 ESI 离子源,数据采集为 MRM 模式。质谱参数:毛细管电压+4 000/−3 500 V,喷嘴电压+500/−500 V,干燥气体温度 300 ℃,干燥气体流量 5 L/min,鞘气温度 250 ℃,鞘气体积流量 11 L/min,雾化器压力 310 kPa。

1.3.4 氨基酸营养特征评价 依据 WHO/FAO/UNU^[18]联合发布的模型计算氨基酸评分(Amino acid score,AAS)和计算蛋白质消化率校正氨基酸得分(Protein digestibility corrected amino acid score,PDCAAS);根据 Seligson 等^[19]的方法计算化学评分(Chemical score,CS);根据朱圣陶等^[20]的方法计算氨基酸比值系数分(Score of RC, SRC);参照 Oser^[21]的方法计算必需氨基酸指数(Essential amino acid index, EAAI);参照 IOM 指南^[22]进行 IOM 模式评分和蛋白完全性分析。

1.4 数据分析

采用 Agilent Mass Hunter Work Station Software (B.08.00, Agilent Technologies)进行质谱数据采集及目标化合物定量分析,采用 SPSS 22.0 软件进行单因素方差分析、Pearson 相关性分析和聚类分析,使用 Origin 21 软件进行绘图。

2 结果与分析

2.1 不同金针菇杂交菌株氨基酸组成分析

由表 2 可知,12 个金针菇杂交菌株中均检测到 15 种常见氨基酸,与陆欢等^[16]报道的 7 个不同品种金针菇营养成分结果有一致性。12 个金针菇杂交菌株的氨基酸总量在 22.70~40.58 mg/g,其中菌株 F41 的总氨基酸含量

最高,菌株 F29 的总氨基酸含量最低。杂交菌株的 IAA 和 NIAA 的平均含量为 7.71,22.83 mg/g,菌株 F41 的 IAA 和 NIAA 的含量也是最高,分别为 10.57,30.01 mg/g;菌株 F29 的 IAA 和 NIAA 的含量也是最低,分别为 5.98,16.72 mg/g。菌株 F29 和 F41 的一个原生质体单核相同,另一单核均为黄色菌株,说明黄色金针菇的游离氨基酸含量存在显著差异。杂交菌株中游离氨基酸平均含量从高到低为:谷氨酸>组氨酸>丙氨酸>缬氨酸>酪氨酸>苏氨酸>丝氨酸=甘氨酸>苯丙氨酸>赖氨酸>脯氨酸>精氨酸>天冬氨酸>色氨酸>甲硫氨酸。其中含量较高的氨基酸为谷氨酸和组氨酸,谷氨酸分别占氨基酸总量的 22.73%,31.86%,25.59%,23.49%,24.80%,27.01%,35.84%,33.18%,33.00%,31.23%,29.13%,25.68%。谷氨酸约为组氨酸、丙氨酸、缬氨酸、天冬氨酸、色氨酸和甲硫氨酸含量的 2.5,4.1,4.2,9.4,11.2,145.5 倍。综上所述,不同金针菇杂交菌株的氨基酸含量存在较大的差异,体现了显著的品种多样性。此外,12 个金针菇杂交菌株的 IAA/TAA 值为 23.14%~29.45%,IAA/NIAA 值为 30.11%~41.74%,均低于 FAO/WHO/UNU 提出的理想蛋白质模式值标准(IAA/TAA 值应达到 40%,IAA/NIAA 值应达到 60%),说明 12 个金针菇杂交菌株所含的蛋白质后续可用作补充蛋白质的来源。

2.2 不同金针菇杂交菌株的氨基酸营养评价

2.2.1 必需氨基酸组成比较分析 必需氨基酸组成分析 12 个金针菇杂交菌株的蛋白中检测到有 7 种人体必需氨基酸(表 3),必需氨基酸总量为 9.31~15.26 mg/g,平均值为 13.19 mg/g。由表 3 可知,12 个金针菇杂交菌株中必需氨基酸的组成均低于 FAO/WHO/UNU 模式、鸡蛋模式和 IOM 模式,且每个菌株所含的每种必需氨基酸也均低于模式值,说明杂交菌株中氨基酸组成虽然较丰富,但氨基酸含量值较低,即杂交菌株所含的蛋白质未达到优异蛋白的标准。

2.2.2 必需氨基酸评分 由图 1 可知,12 个金针菇杂交菌株中 AAS 得分较高的是苯丙氨酸+酪氨酸和苏氨酸。杂交菌株中除菌株 F45 外,其余 11 个杂交菌株的苯丙氨酸+酪氨酸和组氨酸的 AAS 值均大于 100;以及菌株 F15、F21、F41 和 F42 的缬氨酸 AAS 值也均大于 100,其余 8 个菌株 AAS 值均小于 100。甲硫氨酸是菌株 F1、F11、F15、F16、F21、F29、F39、F41 和 F42 的第一限制性氨基酸,色氨酸是其余 3 个菌株的第一限制性氨基酸。说明 12 个金针菇杂交菌株中所含的部分必需氨基酸达到了模式谱的要求(100%),可考虑将其作为优质蛋白的来源。

2.2.3 必需氨基酸化学评分 由图 2 可知,12 个金针菇杂交菌株中氨基酸化学评分(CS)得分均低于全鸡蛋蛋白

表 2 12 个金针菇杂交菌株的氨基酸组成[†]

Table 2 Amino acid composition of 12 different *F. filiformis* hybrid strains

氨基酸	含量/(mg·g ⁻¹)						
	F1	F7	F11	F15	F16	F17	F21
苏氨酸*	1.81±0.23 ^b	1.73±1.11 ^c	1.72±2.54 ^c	1.77±0.17 ^c	1.43±0.36 ^d	1.47±2.14 ^d	1.82±0.44 ^b
赖氨酸*	1.48±1.05 ^d	1.64±2.47 ^c	3.22±1.19 ^a	1.07±0.31 ^f	1.58±0.74 ^c	1.16±0.55 ^e	1.24±0.03 ^e
甲硫氨酸*	0.06±0.07 ^b	0.07±0.01 ^b	0.07±0.12 ^b	0.03±0.02 ^c	0.04±0.01 ^c	0.07±0.13 ^b	0.05±0.22 ^c
苯丙氨酸*	1.61±0.74 ^b	1.63±0.57 ^b	1.58±0.12 ^c	1.52±1.13 ^c	1.53±0.84 ^c	1.49±0.37 ^d	1.63±0.92 ^b
缬氨酸*	1.81±0.28 ^e	1.96±0.33 ^d	2.19±1.02 ^c	2.33±0.83 ^b	1.70±2.11 ^f	1.83±1.04 ^e	2.35±1.73 ^b
色氨酸*	0.64±0.39 ^d	0.59±0.22 ^e	0.77±0.17 ^c	0.79±0.35 ^c	0.47±0.08 ^f	0.68±0.17 ^d	0.69±0.02 ^d
天冬氨酸	0.51±0.11 ^h	1.27±0.74 ^c	1.44±0.91 ^b	0.56±0.07 ^g	0.93±0.36 ^e	0.96±0.73 ^c	0.79±0.11 ^f
丝氨酸	1.35±1.33 ^f	1.41±0.76 ^e	1.69±0.82 ^d	1.64±0.39 ^d	1.18±0.46 ^h	1.45±1.03 ^e	1.83±1.23 ^c
谷氨酸	6.62±1.85 ^g	10.49±2.32 ^b	8.30±0.87 ^e	11.17±1.65 ^a	6.79±0.89 ^g	8.36±0.47 ^c	10.14±1.18 ^b
甘氨酸	1.73±3.21 ^c	2.13±0.33 ^a	1.40±0.56 ^e	1.83±0.37 ^b	1.57±0.08 ^d	1.56±0.15 ^d	1.62±0.31 ^d
丙氨酸	4.01±0.52 ^a	2.59±0.42 ^d	1.85±0.52 ^e	1.64±0.09 ^f	2.83±1.11 ^c	1.28±0.78 ^b	1.38±0.67 ^g
酪氨酸	1.89±1.87 ^e	1.75±0.75 ^f	2.32±0.16 ^c	1.62±0.53 ^g	2.19±0.04 ^d	1.52±0.17 ^h	1.81±0.71 ^e
组氨酸	3.05±0.03 ^e	3.48±1.23 ^c	2.97±0.73 ^e	2.78±1.11 ^g	4.58±0.52 ^b	2.90±0.73 ^f	3.27±0.58 ^d
精氨酸	0.79±0.24 ^f	0.70±0.08 ^g	1.62±0.63 ^b	0.93±0.15 ^e	0.71±0.09 ^g	0.87±0.12 ^e	0.92±0.63 ^e
脯氨酸	1.77±0.61 ^b	1.49±0.15 ^c	1.29±0.28 ^e	1.49±0.41 ^c	1.38±0.08 ^d	1.17±0.36 ^f	1.02±0.03 ^g
TAA	29.13	32.93	32.43	31.17	28.91	26.77	30.56
IAA	7.41	7.62	9.55	7.51	6.75	6.70	7.78
NIAA	21.72	25.31	22.88	23.66	22.16	20.07	22.78
IAA/TAA/%	25.44	23.14	29.45	24.09	23.35	25.03	25.46
IAA/NIAA/%	34.12	30.11	41.74	31.74	30.46	33.38	34.15

氨基酸	含量/(mg·g ⁻¹)					平均值
	F29	F39	F41	F42	F45	
苏氨酸*	1.53±1.36 ^d	2.29±0.08 ^a	2.28±1.32 ^a	2.24±1.77 ^a	1.26±0.57 ^e	1.78
赖氨酸*	0.66±1.01 ^h	1.09±0.25 ^f	2.16±2.42 ^b	0.93±0.08 ^g	1.40±0.24 ^d	1.47
甲硫氨酸*	0.04±0.02 ^c	0.10±0.05 ^a	0.10±0.02 ^a	0.07±0.03 ^b	0.06±0.01 ^b	0.06
苯丙氨酸*	1.31±0.38 ^e	1.63±1.35 ^b	2.03±0.05 ^a	1.49±0.31 ^d	1.07±0.42 ^f	1.54
缬氨酸*	1.67±0.55 ^f	1.83±0.31 ^e	2.83±1.45 ^a	2.82±1.17 ^a	1.66±0.98 ^f	2.08
色氨酸*	0.77±0.14 ^c	1.20±0.88 ^a	1.17±0.26 ^a	1.00±0.03 ^b	0.59±0.07 ^e	0.78
天冬氨酸	0.44±0.36 ⁱ	1.07±0.28 ^d	0.96±0.14 ^e	0.61±0.06 ^g	1.57±1.03 ^a	0.93
丝氨酸	1.22±0.68 ^g	1.97±0.39 ^b	2.08±1.41 ^a	2.00±1.21 ^b	1.14±0.22 ^h	1.58
谷氨酸	5.63±0.31 ^h	8.91±0.97 ^d	10.96±1.01 ^a	9.36±0.56 ^c	7.97±0.33 ^f	8.73
甘氨酸	0.92±0.41 ^h	1.16±0.57 ^g	1.61±0.11 ^d	2.19±0.35 ^a	1.23±0.42 ^f	1.58
丙氨酸	1.87±0.44 ^e	1.28±0.34 ^h	1.76±0.25 ^e	3.85±0.07 ^b	1.41±0.15 ^g	2.15
酪氨酸	2.10±0.08 ^d	2.70±1.14 ^b	2.95±0.28 ^a	2.17±0.34 ^d	1.22±0.51 ⁱ	2.02
组氨酸	2.72±0.12 ^g	3.38±0.44 ^c	5.75±1.04 ^a	4.54±0.92 ^b	2.05±0.13 ^h	3.46
精氨酸	0.81±0.18 ^f	1.32±0.32 ^c	2.78±1.06 ^a	1.21±0.52 ^d	0.64±0.04 ^h	1.11
脯氨酸	1.01±0.48 ^g	0.66±0.15 ⁱ	1.16±0.62 ^f	1.97±0.11 ^a	0.88±0.17 ^h	1.27
TAA	22.70	30.59	40.58	36.45	24.15	30.54
IAA	5.98	8.14	10.57	8.55	6.04	7.71
NIAA	16.72	22.45	30.01	27.90	18.11	22.83
IAA/TAA/%	26.34	26.61	26.05	23.46	25.01	25.25
IAA/NIAA/%	35.77	36.26	35.22	30.65	33.35	33.77

† * 为必需氨基酸;TAA 为总氨基酸;IAA 为必需氨基酸总量;NIAA 为非必需氨基酸总量;小写字母表示不同菌株的含量差异显著($P<0.05$)。

表 3 12 个金针菇杂交菌株必需氨基酸组成比较分析

Table 3 Composition analysis of essential amino acids of 12 different <i>F. filiformis</i> hybrid strains mg/g								
菌株	苏氨酸	缬氨酸	甲硫氨酸+半胱氨酸	赖氨酸	苯丙氨酸+酪氨酸	色氨酸	组氨酸	总含量
F1	1.81	1.81	0.06	1.48	3.50	0.64	3.05	12.35
F7	1.73	1.96	0.07	1.64	3.38	0.59	3.48	12.85
F11	1.72	2.19	0.07	3.22	3.90	0.77	2.97	14.84
F15	1.77	2.33	0.03	1.07	3.14	0.79	2.78	11.91
F16	1.43	1.70	0.04	1.58	3.72	0.47	4.58	13.52
F17	1.47	1.83	0.07	1.16	3.01	0.68	2.90	11.12
F21	1.82	2.35	0.05	1.24	3.44	0.69	3.27	12.86
F29	1.53	1.67	0.04	0.66	3.41	0.77	2.72	10.80
F39	2.29	1.83	0.10	1.09	4.33	1.20	3.38	14.22
F41	2.28	2.83	0.10	2.16	4.98	1.17	5.75	19.27
F42	2.24	2.82	0.07	0.93	3.66	1.00	4.54	15.26
F45	1.26	1.66	0.06	1.40	2.29	0.59	2.05	9.31
FAO/WHO/UNU 模式	23	39	22	45	38	6	15	188
鸡蛋模式	40	50	35	51	60	10	—	246
IOM 模式	27	32	25	55	47	7	18	211

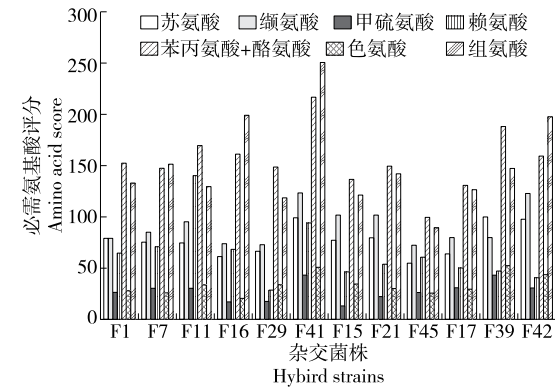


图 1 12 个金针菇杂交菌株的必需氨基酸评分(AAS)
Figure 1 Essential amino acids AAS score of 12 different *F. filiformis* hybrid strains

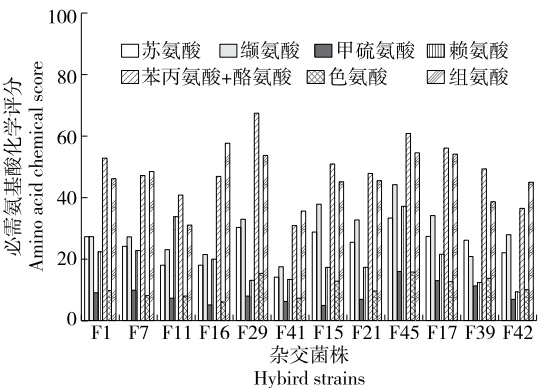


图 2 12 个金针菇杂交菌株的必需氨基酸化学评分(CS)
Figure 2 Essential amino acids CS score of 12 different *F. filiformis* hybrid strains

质模式(100),说明杂交菌株的蛋白质营养价值低于鸡蛋蛋白。其中菌株 F1、F11、F15、F17、F29、F39 和 F45 的苯丙氨酸+酪氨酸的 CS 值最高,其余 6 个杂交菌株的组氨酸 CS 值最高。在 CS 评价模式下,甲硫氨酸是 F1、F11、F15、F16、F21、F29、F39、F41 和 F42 的第一限制性氨基酸,色氨酸是其余 3 个菌株的第一限制性氨基酸,与 AAS 评价模式结果一致。杂交菌株的 CS 评价结果与香菇、杏鲍菇、猴头菇、白玉菇、金耳、绣球菌等常见的食用菌评价结果较一致^[23]。

2.2.4 必需氨基酸 IOM 模式评分 由图 3 可知,12 个金针菇杂交菌株中只有组氨酸的 IOM 模式评分均大于 100,以及菌株 F11、F15、F29、F39、F41 和 F42 中色氨酸的 IOM 模式评分也大于 100,菌株 F29 的赖氨酸的 IOM

模式评分大于 100。此外,所有菌株的其他必需氨基酸的 IOM 模式评分均小于 100。在 IMO 模式评分下,甲硫氨酸是菌株 F1、F7、F11、F15、F16、F21 和 F45 的第一限制性氨基酸,赖氨酸是其余 5 个菌株的第一限制性氨基酸。说明 12 个杂交菌株所含的部分必需氨基酸符合完全蛋白质的标准,可作为传统完全蛋白源之外新的来源,并与其他氨基酸含量丰富的食品进行搭配,从而满足人类对氨基酸的补充需求。

2.2.5 蛋白质评价 由表 4 可知,菌株 F1、F7、F17、F21、F41 和 F45 的 SRC 值高于鸡蛋(81.22),菌株 F42 与鸡蛋的 SRC 值相差不大,其余菌株的 SRC 值均低于鸡蛋。其中菌株 F1、F7、F21 和 F45 的亲本之一为白色金针菇,菌株 F41 和 F42 的亲本之一为黄色菌株上研 1820,说明杂

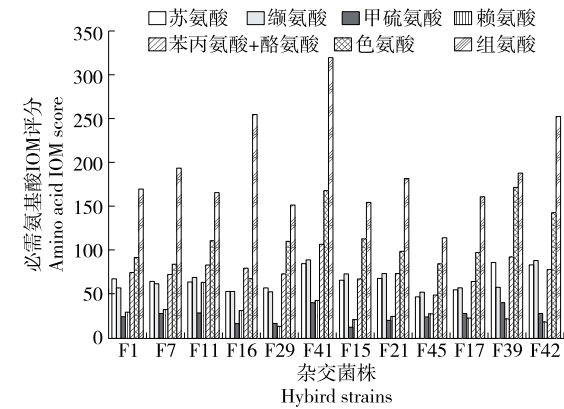


图 3 12 个金针菇杂交菌株的必需氨基酸 IOM 评分
Figure 3 Essential amino acids IOM score of 12 different *F. filiformis* hybrid strains

表 4 12 个金针菇杂交菌株必需氨基酸平衡评价及蛋白质校正氨基酸计分
Table 4 SRC, EAAI and PDCAAS of essential amino acids in proteins of 12 different *F. filiformis* hybrid strains

菌株	SRC	EAAI	PDCAAS	菌株	SRC	EAAI	PDCAAS
F1	92.47	67.78	4.80	F21	88.76	68.17	4.99
F7	88.57	68.16	4.99	F29	77.17	66.49	4.19
F11	64.34	69.58	5.76	F39	74.58	69.15	5.52
F15	76.77	67.43	4.62	F41	91.71	72.22	7.48
F16	73.13	68.66	5.25	F42	79.51	69.86	5.93
F17	89.06	66.77	4.32	F45	83.23	65.09	3.62

甲硫氨酸、色氨酸、精氨酸)和芳香族氨基酸(苯丙氨酸、酪氨酸、半胱氨酸)。由表 5 可知,12 个金针菇杂交菌株的鲜味氨基酸含量为 6.73~14.08 mg/g,平均含量为 11.12 mg/g,占氨基酸总含量的 36.41%,占呈味氨基酸的 36.42%;菌株 F41 的鲜味氨基酸含量最高,占其总氨基酸含量的 34.70%;菌株 F29 的鲜味氨基酸含量最低,占其总氨基酸含量的 29.65%。甜味氨基酸含量为 7.97~16.79 mg/g,平均含量为 11.81 mg/g,占氨基酸总含量的 38.67%;菌株 F42 的甜味氨基酸含量最高,占其总氨基酸含量的 46.06%,占呈味氨基酸的 38.70%;菌株 F45 的甜味氨基酸含量最低,占其总氨基酸含量的 33%。苦味氨基酸含量为 2.92~6.88 mg/g,平均含量为 4.03 mg/g,占氨基酸总含量的 13.20%,占呈味氨基酸的 13.21%;菌株 F41 的苦味氨基酸含量最高,占其总氨基酸含量的 16.95%;菌株 F29 的苦味氨基酸含量最低,占其总氨基酸含量的 12.86%。芳香族氨基酸含量在 2.29~4.98 mg/g,平均含量为 3.56 mg/g,占氨基酸总含量的 11.66%,占呈味氨基酸的 11.67%;菌株 F41 的芳香族氨基酸含量最高,占其总氨基酸含量的 12.27%;菌株 F45 的芳香族氨基酸含量最低,占其总氨基酸含量的 9.48%。12 个金针菇杂交

交菌株蛋白质营养价值较高的菌株可能受白色亲本遗传影响较大。但 12 个杂交菌株的 EAAI 值远低于 100,说明杂交菌株的蛋白质平衡性相对较差。12 个杂交菌株的 PDCAAS(消化率以 73% 计算)为 3.62~7.48,说明其在人体对必需氨基酸消化过程中营养吸收的能力较强。综上,杂交菌株的蛋白质含量较丰富,可用于蛋白产品的开发。

2.3 不同金针菇杂交菌株呈味氨基酸分析

金针菇具有果味或花香味等清新甜美的风味^[24],可能与金针菇所含的呈味游离氨基酸有关。结构上具有不同的侧链基团的氨基酸在口味感官上也有所不同,按味觉强度将氨基酸分为鲜味氨基酸(赖氨酸、谷氨酸、天冬氨酸)、甜味氨基酸(甘氨酸、丙氨酸、丝氨酸、苏氨酸、脯氨酸、组氨酸)、苦味氨基酸(缬氨酸、亮氨酸、异亮氨酸、

菌株中,菌株 F41 的鲜味氨基酸、苦味氨基酸和芳香族氨基酸含量最高,菌株 F42 的甜味氨基酸最高,可能与亲本之一的上研 1820 本身具有的独特清香风味特征有关^[25]。

由表 5 还可知,12 个金针菇杂交菌株中,F1、F16 和 F29 的味觉氨基酸含量从高到低为:甜味氨基酸>鲜味氨基酸>芳香族氨基酸>苦味氨基酸;F11、F15、F21、F45、F17 和 F39 的味觉氨基酸含量从高到低为:鲜味氨基酸>甜味氨基酸>苦味氨基酸>芳香族氨基酸;F41 和 F42 的味觉氨基酸含量从高到低为:甜味氨基酸>鲜味氨基酸>苦味氨基酸>芳香族氨基酸;只有 F7 的味觉氨基酸含量从高到低是甜味氨基酸>鲜味氨基酸>芳香族氨基酸>苦味氨基酸。杂交菌株中鲜味氨基酸和甜味氨基酸质量分数均为最高,说明杂交菌株整体口感较好,金针菇独特的气味可能与这两种高含量的味觉氨基酸有密切联系。

2.4 不同金针菇杂交菌株氨基酸的 PCA 分析

由图 4 可知,12 个杂交菌株分别集中于 4 个象限。其中,仅 F42 位于第一象限,说明 F42 包含的游离氨基酸组分和含量与其他 11 个杂交菌株差异较大;F1、F7、F15 和 F16 位于第二象限,F7 和 F15 距离非常接近,说明包

表 5 12 个金针菇杂交菌株的呈味氨基酸含量[†]

Table 5 Gustatory amino acids content of 12 different *F. filiformis* hybrid strains

菌株	鲜味氨基酸/ (mg · g ⁻¹)	甜味氨基酸/ (mg · g ⁻¹)	苦味氨基酸/ (mg · g ⁻¹)	芳香族氨基酸/ (mg · g ⁻¹)	鲜味氨基酸/ 呈味氨基酸/%	甜味氨基酸/ 呈味氨基酸/%	苦味氨基酸/ 呈味氨基酸/%	芳香族氨基酸/ 呈味氨基酸/%
F1	8.61±0.17 ^h	13.72±3.22 ^c	3.30±1.25 ^e	3.50±0.79 ^e	29.56	47.10	11.37	12.02
F7	13.40±3.21 ^b	12.83±2.38 ^d	3.32±0.74 ^e	3.38±1.68 ^e	40.69	38.96	10.08	10.26
F11	12.96±2.65 ^c	10.90±0.97 ^e	4.65±0.34 ^c	3.90±0.74 ^c	39.96	33.76	14.34	12.03
F15	12.80±1.18 ^c	11.15±3.46 ^e	4.08±0.15 ^d	3.14±0.63 ^f	41.07	35.77	13.09	10.08
F16	9.30±0.87 ^g	12.97±2.48 ^d	2.92±0.23 ^f	3.72±0.39 ^c	32.17	44.86	10.10	12.87
F17	10.48±0.56 ^f	9.83±0.76 ^g	3.45±0.07 ^e	3.01±0.44 ^f	39.15	36.72	12.89	11.24
F21	12.17±1.13 ^d	10.94±1.04 ^e	4.01±0.26 ^d	3.44±0.53 ^c	39.82	35.80	13.12	11.26
F29	6.73±0.89 ⁱ	9.27±0.88 ^h	3.29±0.11 ^e	3.41±0.27 ^c	29.65	40.84	14.49	15.02
F39	11.07±0.92 ^e	10.74±2.17 ^f	4.45±0.76 ^c	4.33±0.18 ^b	36.19	35.11	14.55	14.12
F41	14.08±2.61 ^a	14.64±0.89 ^b	6.88±0.24 ^a	4.98±0.55 ^a	34.70	36.08	16.95	12.27
F42	10.90±1.93 ^e	16.79±4.22 ^a	5.10±0.23 ^b	3.66±0.21 ^d	29.90	46.06	13.99	10.04
F45	10.94±0.98 ^e	7.97±0.74 ⁱ	2.95±0.11 ^f	2.29±0.05 ^g	45.30	33.00	12.21	9.48
平均值	11.12	11.81	4.03	3.56	36.42	38.70	13.21	11.67

[†] 同列字母不同表示差异显著($P<0.05$)。

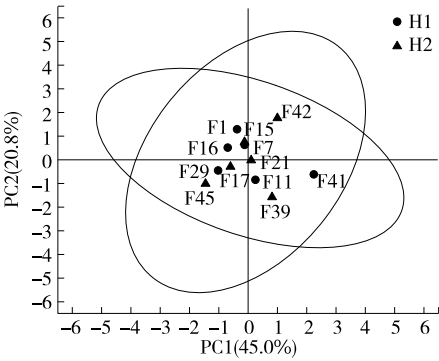


图 4 12 个金针菇杂交菌株的 PCA 得分图

Figure 4 PCA scoreplot for 12 different *F. filiformis* hybrid strains

含的游离氨基酸组分和含量相似程度较高;F17、F29 和 F45 位于第三象限,F45 远离其他杂交菌株,说明 F45 包含的游离氨基酸组分和含量与其他 2 个杂交菌株差异较大;F11、F21、F39 和 F41 位于第四象限,F41 远离其他杂交菌株,说明 F41 包含的游离氨基酸组分和含量与其他 3 个杂交菌株差异较大。此外,F21 位于横轴上,说明 F21 主要受 PC1 影响。以原生质体单核体 Fv1923(29)为亲本的 6 个杂交菌株除 F29 位于第三象限外,其余主要集中于第二和第四象限;以另一原生质体单核体 Fv1923(27)为亲本的 6 个杂交菌株除 F42 位于第一象限和 F15 位于第二象限外,其余主要集中于第三和第四象限,说明以不同原生质体单核体作为亲本选育的杂交后代在游离氨基酸组分和含量上存在较大差异。这可能是由于白色金针菇种质资源在遗传物质上差异较小,而黄色金针菇

在遗传物质上差异较大,导致以白色菌株为亲本的杂交后代所含氨基酸差异不显著,以黄色菌株为亲本的杂交后代差异较显著。

2.5 不同金针菇杂交菌株氨基酸的综合评价

从 12 个杂交菌株中共提取了 4 个主成分,4 个主成分的累积方差贡献率达到了 87.15%(见表 6),基本可以解释自变量所有的变异信息,因此利用前 4 个主成分对 12 个金针菇杂交菌株进行综合评价。以 15 个游离氨基酸为初始自变量,将 15 个氨基酸指标标准化后的数据进行主成分分析,再根据 4 个主成分因子的权重值和每个因子的特征值,得到 4 个主成分因子的判别函数:

$$F_1 = 0.350X_1 + 0.118X_2 + 0.265X_3 + 0.324X_4 + 0.315X_5 + 0.313X_6 - 0.027X_7 + 0.352X_8 + 0.233X_9 + 0.126X_{10} + 0.025X_{11} + 0.304X_{12} + 0.297X_{13} + 0.336X_{14} + 0.049X_{15}, \tag{1}$$

$$F_2 = 0.047X_1 - 0.193X_2 - 0.236X_3 + 0.038X_4 + 0.173X_5 - 0.161X_6 - 0.323X_7 - 0.029X_8 + 0.036X_9 + 0.450X_{10} + 0.465X_{11} - 0.126X_{12} + 0.131X_{13} - 0.163X_{14} + 0.529X_{15}, \tag{2}$$

$$F_3 = -0.201X_1 + 0.554X_2 + 0.073X_3 + 0.071X_4 + 0.086X_5 - 0.296X_6 + 0.557X_7 - 0.070X_8 + 0.282X_9 + 0.302X_{10} - 0.030X_{11} - 0.197X_{12} - 0.003X_{13} + 0.058X_{14} + 0.132X_{15}, \tag{3}$$

$$F_4 = -0.063X_1 + 0.357X_2 + 0.115X_3 + 0.122X_4 - 0.227X_5 - 0.104X_6 + 0.035X_7 - 0.232X_8 - 0.549X_9 - 0.194X_{10} + 0.385X_{11} + 0.371X_{12} + 0.251X_{13} + 0.136X_{14} + 0.126X_{15}, \tag{4}$$

式中:

F_i ——主成分($i=1,2,3,4$);

$X_1 \sim X_{15}$ ——分别为苏氨酸、赖氨酸、甲硫氨酸、苯丙氨酸、缬氨酸、色氨酸、天冬氨酸、丝氨酸、谷氨酸、甘氨酸、丙氨酸、酪氨酸、组氨酸、精氨酸和脯氨酸标准化后的变量。

以 4 个主成分对应的方差相对贡献率为权重,将各品种主成分得分和相应的权重进行线性加权求和建立综合评价函数 $F=0.450F_1+0.208F_2+0.116F_3+0.098F_4$, 计算各不同金针菇杂交菌株的综合评价得分,综合得分越高,说明该杂交菌株的氨基酸营养品质越好。12 个杂交菌株的综合得分见表 7,综合得分排名依次为 F41、F42、F11、F7、F39、F1、F21、F15、F16、F17、F29 和 F45,其中排名前二的品种均为上研 1820 和 Fv1923 的杂交菌株,表明这 2 个杂交菌株的氨基酸综合品质相对较好,可能是由于 2 个亲本菌株的品质相对较好。此外,综合得分排名前 5 个菌株中的 F41、F11、F7 均来源于原生质体单核体 Fv1923(29),可能单核体 Fv1923(29)包含调控氨基酸合成代谢的主要遗传物质。

2.6 不同金针菇杂交菌株的氨基酸聚类分析

以氨基酸为变量对 12 个金针菇杂交菌株进行聚类分析,结果见图 5。结果表明,12 个杂交菌株可分成 6 类。其中,F41 和 F42 单独聚为一类,这 2 个菌株均为上研 1820 和 Fv1923 的杂交菌株,其氨基酸总含量、甜味氨基酸、苦味氨基酸和芳香族氨基酸均高于平均值,口感最佳;F1 和 F16 聚为一类,并与 F29 聚为一大类,3 个菌株的氨基酸总含量均低于平均值,但 F1 和 F16 的甜味氨基酸高于平均值,品质较差;F7、F15 和 F21 聚为一类,鲜味氨基酸均高于平均值,芳香族氨基酸与平均值接近,且 F7 和 F15 的氨基酸总含量高于平均值,F21 的氨基酸总含量与平均值接近,品质较好;F11、F17、F39 和 F45 聚为一类,F11 的氨基酸总含量高于平均值,F39 的氨基酸总含量与平均值接近,F17 和 F45 的氨基酸总含量低于平均值,除 F11 的鲜味氨基酸和甜味氨基酸高于平均值外,其

表 6 12 个不同金针菇杂交菌株氨基酸总方差分析结果
Table 6 Eigenvalues of first four principal components and their contribution to total variance of 12 different *F. filiformis* hybrid strains

PC	相关系数矩阵 总特征值	方差贡献 率/%	累计方差 贡献率/%
1	6.75	45.01	45.01
2	3.11	20.76	65.77
3	1.73	11.55	77.32
4	1.47	9.82	87.15

表 7 12 个不同金针菇杂交菌株的成分得分和综合得分
Table 7 Principal component scores and comprehensive scores of 12 different *F. filiformis* hybrid strains

菌株	F_1	F_2	F_3	F_4	F	排名
F1	-1.000 9	2.233 0	-0.527 7	1.556 9	0.105 0	6
F7	-0.299 0	1.100 3	1.852 6	-0.386 0	0.269 9	4
F11	0.732 3	-1.470 4	2.037 0	1.247 1	0.382 1	3
F15	-0.354 1	1.328 0	-0.146 4	-2.132 6	-0.110 0	8
F16	-1.781 4	0.909 9	0.218 6	1.838 3	-0.407 2	9
F17	-1.524 4	-0.585 6	0.185 3	-0.654 4	-0.850 6	10
F21	0.171 2	-0.089 0	-0.061 2	-1.536 0	-0.099 3	7
F29	-2.680 2	-0.757 1	-2.570 5	0.701 3	-1.591 6	11
F39	2.106 2	-2.825 0	-1.669 2	-0.213 4	0.147 8	5
F41	5.848 9	-1.093 1	0.280 2	0.564 0	2.493 4	1
F42	2.585 9	3.117 3	-0.676 3	-0.376 0	1.696 0	2
F45	-3.804 5	-1.868 2	1.077 5	-0.654 4	-0.850 6	12

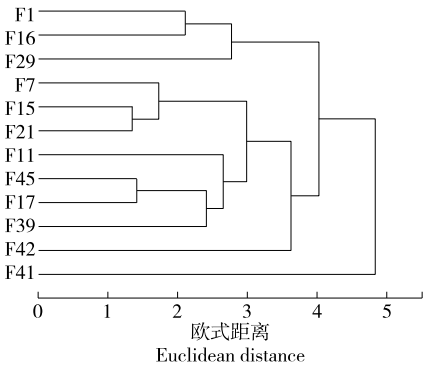


图 5 12 个不同金针菇杂交菌株的聚类分析图
Figure 5 Dendrogram from cluster analysis of 12 different *F. filiformis* hybrid strains

余 3 个菌株均低于平均值,F11 和 F39 的苦味氨基酸和芳香族氨基酸高于平均值,其余 2 个菌株均低于平均值,说明菌株 F11 的品质较好,F17、F39 和 F45 的品质较差。图 5 反映出了不同金针菇杂交菌株之间的差异性,且与前述 PCA 部分结果一致,可为金针菇的氨基酸营养价值评价和新品种选育提供参考。

3 结论

研究分别以 Fv1923 的 2 个不同原生质体单核体作为亲本,与其余 6 个菌株的原生质体单核杂交获得的 12 个不同金针菇原生质体杂交菌株为材料,分析了 12 个菌株的氨基酸含量、组分、呈味和蛋白质特征。结果表明,12 个杂交菌株均含有 15 种游离氨基酸,氨基酸总量为 22.70~40.58 mg/g,平均含量为 30.54 mg/g,且不同菌株的氨基酸总量、必需氨基酸及呈味氨基酸等含量存

在较大的差异。甲硫氨酸是菌株 F1、F11、F15、F16、F21、F29、F39、F41 和 F42 的第一限制性氨基酸。12 个杂交菌株中呈味氨基酸含量从高到低依次为甜味氨基酸、鲜味氨基酸、苦味氨基酸和芳香族氨基酸,其中甜味氨基酸含量约占呈味氨基酸含量的 38.70%,说明不同杂交菌株的氨基酸含量和呈味氨基酸构成存在显著的差异性。主成分分析和聚类分析结果表明,4 个主成分因子的累积方差贡献率达到了 87.15%,12 个杂交菌株可分为 6 类,其中菌株 F41 和 F42 所含的游离氨基酸品质较好。综上所述说明,以不同原生质体单核体作为亲本选育的杂交后代在游离氨基酸组分和含量上存在显著差异。研究虽然对不同原生质体杂交菌株的氨基酸进行了综合评价,明确了杂交菌株的氨基酸含量存在差异,但受代表性菌株的数量限制,未能探究出亲本对杂交菌株氨基酸含量高低的影响,在今后研究中还需扩大亲本选择范围,并结合组学方法,阐明亲本选择对后代菌株中氨基酸含量的影响。

参考文献

- [1] 戴玉成, 杨祝良. 中国五种重要食用菌学名新注[J]. 菌物学报, 2018, 37(12): 1 527-1 577.
DAI Y C, YANG Z L. Notes on the nomenclature of five important edible fungi in China[J]. Mycosystema, 2018, 37(12): 1 527-1 577.
- [2] 戴玉成, 杨祝良, 崔宝凯, 等. 中国森林大型真菌重要类群多样性和系统学研究[J]. 菌物学报, 2021, 40(4): 770-805.
DAI Y C, YANG Z L, CUI B K, et al. Diversity and systematics of the important macro fungi in Chinese forests[J]. Mycosystema, 2021, 40(4): 770-805.
- [3] 中国食用菌协会. 中国食用菌协会关于印发 2021 年度全国食用菌产量、产值统计调查结果的函: 中食菌协函[2022]30 号 [EB/OL]. (2022-12-30) [2023-02-12]. <http://bigdata.cefa.org.cn/output.html>.
China Edible Fungi Association. Letter of China edible fungi association on the issuance of national edible fungi production, output value in 2021: China Edible Fungi Association Letter[2022] No.30[EB/OL]. (2022-12-30) [2023-02-12]. <http://bigdata.cefa.org.cn/output.html>.
- [4] JAN V, JAN Š, MAREK K, et al. Detrimental and essential elements in fruiting bodies of wild-growing fungi *Coprinus comatus*, *Flammulina velutipes*, and *Armillaria ostoyae* [J]. Journal of Environmental Science and Health, PartB: Pesticides, Food Contaminants, and Agricultural Wastes, 2022, 57(4): 243-251.
- [5] ANDREAS K H, NILS O E, JANINA O, et al. Biotechnological production and sensory evaluation of ω 1-unsaturated aldehydes[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2021, 69(1): 345-353.
- [6] YANG X, DAI J, ZHONG Y, et al. Characterization of insoluble dietary fiber from three food sources and their potential hypoglycemic and hypolipidemic effects[J]. Food & Function, 2021, 12(14): 6 576-6 587.
- [7] DIPAK K B, ARUN K D, R ITUPARNA B, et al. Application of enoki mushroom (*Flammulina velutipes*) stem wastes as functional ingredients in goat meat nuggets[J]. Foods, 2020, 9(4): 432.
- [8] WANG Y X, ZHANG H. Advances in the extraction, purification, structural-property relationships and bioactive molecular mechanism of *Flammulina velutipes* polysaccharides: A review[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2021, 167: 528-538.
- [9] ZHANG T T, YE J F, XUE C H, et al. Structural characteristics and bioactive properties of a novel polysaccharide from *Flammulina velutipes*[J]. Carbohydrate Polymers, 2018, 197: 147-156.
- [10] LI H P, YANG W J, QU S X, et al. Variation of volatile terpenes in the edible fungi mycelia *Flammulina velutipes* and communications in fungus-mite interactions [J]. Food Research International, 2018, 103: 150-155.
- [11] TUNG C H, LIN C C, WANG H J, et al. Application of thermal stability difference to remove flammutoxin in fungal immunomodulatory protein, FIP-fve, extract from *Flammulina velutipes*[J]. Journal of Food and Drug Analysis, 2018, 26(3): 1 005-1 014.
- [12] 段静怡, 李自燕, 李建, 等. 基于游离氨基酸的组分及特征比较四种食用菌与四种果蔬的营养与风味特征[J]. 菌物学报, 2020, 39(6): 1 077-1 089.
DUAN J Y, LI Z Y, LI J, et al. Comparison of nutritional and flavor characteristics between four edible fungi and four fruits and vegetables based on components and characteristics of free amino acids[J]. Mycosystema, 2020, 39(6): 1 077-1 089.
- [13] 李学贤, 张雪, 童灵, 等. 游离氨基酸改善作物风味品质综述 [J]. 中国农业大学学报, 2022, 27(4): 73-81.
LI X X, ZHANG X, TONG L, et al. Summary of free amino acids to improve crop flavor quality [J]. Journal of China Agricultural University, 2022, 27(4): 73-81.
- [14] 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.
FAN T T, ZHAO X Y, LI X B, et al. Principal component analysis for comprehensive evaluation of free amino acids in cultivated and wild *Morchella*[J]. Food Science, 2022, 43(6): 295-302.
- [15] 顾可飞, 王红梅, 周昌艳. 不同生育期金针菇营养成分比较[J]. 农产品质量与安全, 2019(3): 81-83.
GUK F, WANG H M, ZHOU C Y. Comparison of nutritional components of *Flammulina velutipes* in different growth stages[J]. Quality and Safety of Agro-Products, 2019(3): 81-83.
- [16] 陆欢, 王瑞娟, 刘建雨, 等. 不同品种金针菇的营养成分分析与评价[J]. 食品与机械, 2021, 37(6): 69-75.
LU H, WANG R J, LIU J Y, et al. Analysis and evaluation of nutrient components of different strains of *Flammulina filiformis* [J]. Food & Machinery, 2021, 37(6): 69-75.

(下转第 41 页)

- YUE X, BAO Y H. Study of the interaction between polyphenols from red pinecone and whey protein based on fluorescence and UV spectroscopy[J]. Modern Food Science and Technology, 2019, 35(7): 114-120.
- [14] DUFOUR C, DANGLES O. Flavonoid-serum albumin complexation: Determination of binding constants and binding sites by fluorescence spectroscopy[J]. BBA-General Subjects, 2005, 1721(1/2/3): 164-173.
- [15] CAO Y, XIONG Y L, CAO Y, et al. Interfacial properties of whey protein foams as influenced by preheating and phenolic binding at neutral pH[J]. Food Hydrocolloids, 2018, 82(9): 379-387.
- [16] MOON B, MANGINO M E. The effect of preheating on solubility and emulsion stability of whey protein concentrates [J]. Milchwissenschaft-milk Science International, 2004, 59 (3): 165-169.
- [17] UMESHA K, JALDAPPAGARI S, KALANUR S, et al. Probing the binding of fluoxetine hydrochloride to human serum albumin by multispectroscopic techniques[J]. Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy, 2010, 75(1): 314-319.
- [18] LAKOWICZ J R, WEBER G. Quenching of fluorescence by oxygen: A probe for structural fluctuations in macromolecules[J]. Biochemistry, 1973, 12(21): 4161-4170.
- [19] TU B, WANG Y, MI R, et al. Evaluation of the interaction between naringenin and human serum albumin: Insights from fluorescence spectroscopy, electrochemical measurement and molecular docking [J]. Spectrochim Acta A Mol Biomol Spectrosc, 2015, 149 (5): 536-543.
- [20] LIAO Z, YU X, YAO Q, et al. Interaction between pirenexine and bovine serum albumin in aqueous solution[J]. Spectrochim Acta A Mol Biomol Spectrosc, 2014, 129(15): 314-319.
- [21] LI M, HAGERMAN A E. Role of the Flavan-3-ol and galloyl moieties in the interaction of (—)-epigallocatechin gallate with serum albumin[J]. Journal of Agricultural & Food Chemistry, 2014, 62(17): 3768-3775.
- [22] ROSS P D, SUBRAMANIAN S. Thermodynamics of macromolecular association reactions: Analysis of forces contributing to stabilization[J]. Biophysical Journal, 1980, 32(1): 79-81.
- [23] LI X, HAO Y. Probing the binding of (+)-catechin to bovine serum albumin by isothermal titration calorimetry and spectroscopic techniques[J]. Journal of Molecular Structure, 2015, 1091: 109-117.
- [24] BOURASSA P, KANAKIS C D, TARANTILIS P, et al. Resveratrol, genistein, and curcumin bind bovine serum albumin [J]. Journal of Physical Chemistry B, 2010, 114(9): 3348-3354.
- [25] JIA Z, ZHENG M, TAO F, et al. Effect of covalent modification by (—)-epigallocatechin-3-gallate on physicochemical and functional properties of whey protein isolate [J]. LWT-Food Science and Technology, 2016, 66: 305-310.
- [26] LANGE D C, KOTHARI R, PATEL R C, et al. Retinol and retinoic acid bind to a surface cleft in bovine β -lactoglobulin: A method of binding site determination using fluorescence resonance energy transfer[J]. Biophysical Chemistry, 1998, 74(1): 45-51.
- [27] SASTRY M C S, RAO M S N. Binding of chlorogenic acid by the isolated polyphenol-free 11 S protein of sunflower (*Helianthus annuus*) seed[J]. Journal of Agricultural & Food Chemistry, 1990, 38(12): 2103-2110.
- [28] THOMAS H, ARNE G, BERND S, et al. Protein binding and astringent taste of a polymeric procyanidin, 1, 2, 3, 4, 6-penta-O-galloyl- β -D-glucopyranose, castalagin, and grandinin[J]. Journal of Agricultural & Food Chemistry, 2006, 54(25): 5093-5099.
- (上接第 33 页)
- [17] 刘宗奇, 武晨剑, 袁学文, 等. 白色和黄色金针菇子实体营养成分与挥发性物质比较[J]. 食用菌学报, 2021, 28(3): 102-111.
- LIU Z Q, WU C J, YUAN X W, et al. Comparison of nutrients and volatile compounds between fruiting bodies of white and yellow *Flammulina filiformis* [J]. Acta Edulis Fungi, 2021, 28 (3): 102-111.
- [18] WHO/FAO/UNU. Protein and amino acid requirements in human nutrition: Report of a joint WHO/FAO/UNU expert consultation [M]. Geneva: WHO Press, 2007: 276.
- [19] SELIGSON F H, MACKEY L N. Variable predictions of protein quality by chemical score due to amino acid analysis and reference pattern[J]. Journal of Nutrition, 1984, 114: 682-691.
- [20] 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 S T, WU K. Nutritional evaluation of protein-ratio coefficient of amino acid[J]. Acta Nutrimenta Sinica, 1988, 10(2): 187-190.
- [21] OSER B. Method for integrating essential amino acid content in the nutritional evaluation of protein[J]. Journal of the American Dietetic Association, 1951, 27(5): 396-402.
- [22] IOM. Dietary reference intakes: Energy, carbohydrate, fiber, fat, fatty acid, cholesterol, protein and amino acids[M]. Washington DC: The National Academies Press, 2005: 589-768.
- [23] 李泰, 卢士军, 孙君茂, 等. 26 种常见市售食用菌营养成分分析及评价[J]. 中国食用菌, 2021, 40(12): 66-72.
- LI T, LU S J, SUN J M, et al. Analysis and evaluation on nutritional components of 26 common edible fungi in market[J]. Edible Fungi of China, 2021, 40(12): 66-72.
- [24] WANG R J, ZHANG Y Y, LU H, et al. Comparative aroma profile analysis and development of a sensory aroma lexicon of seven different varieties of *Flammulina velutipes* [J]. Frontiers in Nutrition, 2022, 9: 827825.
- [25] LU H, SONG W, SHANG X D, et al. Expression of terpene synthase-related genes in parents and offspring of *Flammulina filiformis*. based on differences in volatile aroma components[J]. Food Chemistry: Molecular Sciences, 2023, 6: 100156.