

吴莹莹,鲍大鹏,李燕,等.蟹味菇和白玉菇的蛋白质及氨基酸营养评价与分析[J].上海农业学报,2021,37(1):13-21.

## 蟹味菇和白玉菇的蛋白质及氨基酸营养评价与分析

吴莹莹<sup>1,2</sup>,鲍大鹏<sup>1,2</sup>,李燕<sup>1</sup>,李金鑫<sup>3</sup>,王莹<sup>1</sup>,周陈力<sup>1</sup>,曹娜<sup>3</sup>,高利慧<sup>1,2</sup>,陈洪雨<sup>1\*</sup>

(<sup>1</sup>上海市农业科学院食用菌研究所,国家食用菌工程技术研究中心,农业农村部南方食用菌资源利用重点实验室,上海 201403;<sup>2</sup>上海海洋大学食品学院,上海 201306;<sup>3</sup>上海丰科生物科技股份有限公司,上海 201401)

**摘要:**为分析2种工厂化栽培斑玉蕈(蟹味菇和白玉菇)蛋白的氨基酸组成及营养均衡性,测定了6个不同企业生产的12个斑玉蕈样品的氨基酸含量,并运用主成分分析法(PCA)抽取了各样品的必需氨基酸综合特征,采用多种参数对氨基酸营养均衡性进行了系统评价。结果表明:12个样品均含有18种常见氨基酸,其中8种必需氨基酸(IAA)含量为436.18—533.00 mg/g pro,含量最高的是Met;各氨基酸评分均值为123.16(Leu)—394.87(Met + Cys),满足多种国际权威氨基酸平衡模式谱的要求。Met + Cys、His、Trp和Thr的氨基酸比值系数相对较贴近模式谱要求。对IAA的化学评分分析发现,斑玉蕈蛋白的氨基酸营养供给略逊于全鸡蛋蛋白。通过PCA可抽取4个主成分,共解释了90.016%的样品氨基酸组成差异。蟹味菇的总氨基酸含量及其在PC2的得分均高于白玉菇。基于氨基酸营养均衡性分析,推荐将蟹味菇和白玉菇与含硫氨基酸较少的豆类等蔬菜搭配食用,以满足人体对膳食氨基酸的平衡摄取。

**关键词:**斑玉蕈;蟹味菇;白玉菇;蛋白质;主成分分析;必需氨基酸

**中图分类号:**TS207.3 **文献标志码:**A **文章编号:**1000-3924(2021)01-013-09

## Evaluation and analysis of protein and amino acid nutrition of buna-shimeji and bunapi-shimeji

WU Yingying<sup>1,2</sup>, BAO Dapeng<sup>1,2</sup>, LI Yan<sup>1</sup>, LI Jinxin<sup>3</sup>, WANG Ying<sup>1</sup>,  
ZHOU Chenli<sup>1</sup>, CAO Na<sup>3</sup>, GAO Lihui<sup>2</sup>, CHEN Hongyu<sup>1\*</sup>

(<sup>1</sup> Institute of Edible Fungi, Shanghai Academy of Agricultural Sciences; National Engineering Research Center of Edible Fungi; Key Laboratory of Applied Mycological Resources and Utilization(South), Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Shanghai 201403, China; <sup>2</sup> College of Food Sciences & Technology, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China; <sup>3</sup> Shanghai Fine Bio-Tech Inc., Shanghai 201401, China)

**Abstract:** In order to analyze the amino acid composition and nutritional balance of two kinds of industrial cultivated *Hypsizygus marmoreus* (buna-shimeji and bunapi-shimeji) proteins, the amino acid contents of 12 samples from 6 different enterprises were determined, and the comprehensive characteristics of indispensable amino acids (IAAs) in each sample were extracted by principal component analysis (PCA), and the nutritional balance of amino acids was systematically evaluated by various parameters. The results showed that all 12 samples contained 18 kinds of common amino acids, among which 8 kinds of IAAs were 436.18—533.00 mg/g pro, and Met was the most abundant IAA. The average AAS of each amino acid was 123.16(Leu)—394.87(Met + Cys), which met the requirements of many international authoritative amino acid balance model spectrum. The amino acid ratio coefficients of Met + Cys, His, Trp and Thr were relatively close to the requirements of the model spectrum. According to the chemical score analysis of IAA, the amino acid nutrition supply of *H. marmoreus* protein was slightly lower than that of egg protein. Four principal components (PC) were extracted by PCA, which accounted for 90.016% of the sample amino acid composition difference. The total amino acid content and its

收稿日期:2020-04-01

基金项目:上海市农业科技创新行动计划(17391900400);上海市现代农业产业技术体系项目[沪农科产字(2020)第9号];上海市科委国际科技合作基金项目(18390741000)

作者简介:吴莹莹(1983—),女,博士,副研究员,研究方向为大型真菌的品质代谢与合成生物学。E-mail:wuyingying@sibs.ac.cn

\*通信作者,E-mail:chenhongyu20128@163.com

PC2 score of buna-shimeji were higher than those of bunapi-shimeiji. Based on the analysis of amino acid nutrition balance, it is recommended to eat buna-shimeji and bunapi-shimeiji together with beans and other vegetables with less sulfur-containing amino acids to meet the balanced intake of dietary amino acids.

**Key words:** *Hypsizigus marmoreus*; Buna-shimeji; Bunapi-shimeiji; Protein; Principal component analysis; Indispensable amino acids

蟹味菇和白玉菇的学名都是斑玉蕈(*Hypsizigus marmoreus*),为该食用真菌商业化栽培后的不同品系。斑玉蕈又名玉蕈、真姬菇,是我国市场发展较快的新型食用真菌之一,2018年产量达30万t,在我国工厂化栽培食用真菌生产总量中排名第三。斑玉蕈的野生资源分布于欧洲、北美各国和日本,以及中国的吉林、云南等地<sup>[1-2]</sup>,我国企业目前生产使用的菌种主要为从日本引入的菌种或在其基础上进一步杂交选育而成的菌种。斑玉蕈的褐色品系以蟹味菇为商品名,白色品系则命名为白玉菇和海鲜菇<sup>[1,3]</sup>。斑玉蕈因外形美观、质地脆嫩爽滑、具有独特的海鲜味且价格实惠而受到消费者喜爱。近年研究发现,斑玉蕈中所含的小分子化合物、多糖和短肽等成分具有溶血活性<sup>[4-5]</sup>、抗氧化活性<sup>[6]</sup>、抑制白血病<sup>[7-8]</sup>和淋巴瘤细胞活性<sup>[9]</sup>、降脂活性<sup>[10]</sup>及抗炎、抗氧化功能<sup>[11]</sup>。因此,斑玉蕈是一种经济价值很高的食药兼用菌。

目前,关于斑玉蕈氨基酸和蛋白质营养特征的系统剖析相关研究较少。李淑荣等<sup>[12]</sup>对海鲜菇的盖、柄、根、幼菇及残菇的水解氨基酸和游离氨基酸的组成分别进行了分析,发现样品中氨基酸含量丰富,水提法得到的游离氨基酸含量是酸提法的6倍<sup>[13]</sup>;王中华等<sup>[14]</sup>研究表明,真姬菇中总游离氨基酸和必需氨基酸的含量明显高于杏鲍菇和金针菇。但上述研究未对蛋白质营养价值展开全面系统的评价,且未见不同颜色斑玉蕈品系产品蛋白质品质的比较分析。主成分分析(Principle component analysis, PCA)是一种数据降维手段,可将多个参数正交变换为综合的主评价指标(主成分),在营养学中可用于评估氨基酸的综合品质<sup>[15-16]</sup>,曾被用于禽蛋<sup>[17]</sup>和乳品<sup>[18]</sup>等动物蛋白质,以及食用真菌竹荪<sup>[19]</sup>的氨基酸分析。食物中必需氨基酸(Indispensable amino acid, IAA)的分布与人体需求的契合度是蛋白质品质评价的重要内容,其评估方法是依据氨基酸平衡模式谱,通过氨基酸评分等参数来分析IAA的供需平衡<sup>[20-21]</sup>。国际食品营养学权威机构——世界卫生组织/联合国粮农组织/联合国大学(World Health Organization/Food and Agricultural Organization/United Nation University, WHO/FAO/UNU)和美国科学院医学研究所(Institute of Medicine, IOM)基于生物利用率、人群适应性和食物矩阵等临床营养数据的不断完善,近年来对氨基酸平衡模式谱和蛋白质评价方法进行了大量更新<sup>[20,22-23]</sup>。目前,在国内用新模式谱进行食用菌氨基酸的系统性参数评估报道较少<sup>[23]</sup>。

本研究选取6个企业的上海市售工厂化栽培的12个斑玉蕈样品,采用PCA提取IAA的主成分参数,比较样品的IAA综合特征;并基于国际新版模式谱,对其蛋白质营养价值进行氨基酸评分、IOM模式评分、化学评分、氨基酸比值系数和必需氨基酸指数等多个参数的系统性评价,旨在为消费者的日常膳食搭配提供科学指导,并为进一步打开斑玉蕈的消费市场和提高企业产能,进而促进斑玉蕈工厂化产业发展提供理论依据。

## 1 材料与amp;方法

### 1.1 试验材料与amp;仪器

斑玉蕈样品统一收集自上海市江桥批发市场,12个样品分别产自上海及江苏的6家工厂化栽培企业(为避免涉及商业利益,此处匿去企业名)。其中褐色品系的蟹味菇样品编号为A1—A6,白色品系的白玉菇样品编号为B1—B6。

硫酸、盐酸、硼酸、柠檬酸、氢氧化锂、氢氧化钠、硫酸铜、硫酸钾、柠檬酸钠和氯化钠均为分析纯,为上海国药集团化学试剂有限公司产品;茚三酮为日本日立集团产品。

DHG-9246A型电热恒温鼓风干燥箱(上海精宏实验设备有限公司);Scientz-48型样品研磨机(宁波新芝生物科技股份有限公司);FB224型自动内校电子分析天平(上海舜宇恒平科学仪器有限公司);Kjeltec 8400型全自动凯氏定氮仪(丹麦FOSS公司);835-50型氨基酸自动分析仪(日本日立集团)。

## 1.2 试验方法

### 1.2.1 取样及样品预处理

采集鲜样后,从每个样品中选择无变质、无损伤、成熟度相近的5朵成簇生长的成熟子实体,由内至外随机分离可食部位约500 g,剪碎,称取50 g。将样品置于研磨管中,在液氮中浸渍后,用研磨机粉碎60 s,并充分混合。

### 1.2.2 水分的测定

参照国家标准 GB 5009.3—2016<sup>[24]</sup>的直接干燥法,用电子天平称取5—10 g 经过预处理的12个斑玉蕈样品(精确至0.000 1 g),在105 °C干燥箱中干燥至恒重,计算水分含量。

### 1.2.3 粗蛋白的测定

参照国家标准 GB 5009.5—2016<sup>[25]</sup>的自动凯氏定氮法,用电子天平随机称取2—5 g 经过预处理的12个斑玉蕈样品(精确至0.001 g),在消化炉中完成消化后,使用 Kjeltec 8400 型全自动凯氏定氮仪测定氮含量,并换算为蛋白质含量。

### 1.2.4 氨基酸的测定

参照国家标准 GB/T 18246—2000 的碱水解法<sup>[26]</sup>、GB/T 15399—94 的过氧化酸氧化法<sup>[27]</sup>和 GB 5009.124—2016的酸水解法<sup>[28]</sup>,使用835-50型氨基酸自动分析仪,分别测定12个斑玉蕈样品的 Trp、Cys 和其他16种常见氨基酸(Ala、Arg、Asp、Glu、Gly、His、Ile、Leu、Lys、Met、Phe、Pro、Ser、Thr、Tyr 和 Val)的含量。

### 1.2.5 统计与分析

每个样品在相同前处理及仪器参数条件下进行3次平行测定,取均值,采用 SPSS 22.0 软件对18种氨基酸进行主成分分析。主成分分析时,先将数据集标准化,然后通过因子分析进行降维处理,抽取主成分(PC)及向量特征贡献值。采用 Sigma Plot 11.0 软件绘制结果图。

### 1.2.6 蛋白质营养价值评估

氨基酸评分(Amino acid score, AAS)依据 WHO/FAO/UNU 联合发布的模式谱<sup>[29]</sup>计算;蛋白质消化率校正氨基酸得分(Protein digestibility corrected amino acid score, PDCAAS)依据 WHO/FAO/UNU 推荐的方法<sup>[20]</sup>计算;氨基酸比值系数(Ratio coefficient, RC)及比值系数分(Score of RC, SRC)采用朱圣陶等<sup>[30]</sup>提出的方法计算;IOM 模式评分(IOMS)参照 IOM 的指南<sup>[31]</sup>计算;化学评分(Chemical score, CS)采用 Seligson 等<sup>[32]</sup>的方法,以全鸡蛋蛋白质为参比蛋白<sup>[33]</sup>计算;必需氨基酸指数(Essential amino acid index, EAAI)依据 Oser<sup>[34]</sup>提出的方法计算。

## 2 结果与分析

### 2.1 粗蛋白含量测定结果

经检测,12个斑玉蕈样品中粗蛋白在干质量(DW)中的含量为181.50—243.79 mg/g DW(表1),平均粗蛋白含量为215.47 mg/g DW。其中蟹味菇样品的平均粗蛋白含量为224.17 mg/g DW,高于白玉菇样品的均值206.17 mg/g DW。各样品中粗蛋白含量存在差异,含量最高的蟹味菇 A2 样品比含量最低的白玉菇 B1 样品高62.29 mg/g DW。

### 2.2 氨基酸组成及含量测定结果

经检测,12个斑玉蕈样品中均含有18种常见氨基酸(表1),其中含量最高的为谷氨酸;包括8种 IAA,含量最高的 IAA 为甲硫氨酸(Met)。所有样品的平均总氨基酸(Total amino acids, TAA)含量为132.35 mg/g DW,蟹味菇样品的平均 TAA 含量(139.84 mg/g DW)略高于白玉菇的平均 TAA 含量(123.38 mg/g DW)。各斑玉蕈样品中,IAA/TAA 含量比为36.74%—45.95%,均值41.69%,高于 FAO/WHO/UNU 提出理想蛋白模式(IAA/TAA  $\geq$  40%),表明斑玉蕈蛋白质可提供丰富的 IAA。

### 2.3 18种常见氨基酸的主成分分析

对12个斑玉蕈样品的18种常见氨基酸含量标准化后的数据集进行主成分分析(PCA),按起始特征值大于1的原则抽取主成分(表2)。PCA 综合性地区分了各个样品,抽取出的4个主成分共解释了90.016%的样品差异。

表 1 斑玉蕈的氨基酸组成

Table 1 Amino acid composition of *Hypsizigus marmoreus*

													mg·g <sup>-1</sup> DW	
氨基酸		A1	A2	A3	A4	A5	A6	B1	B2	B3	B4	B5	B6	平均
IAA	苏氨酸(Thr)	7.43	7.68	7.11	7.33	7.38	7.83	6.57	6.59	6.35	7.02	7.39	6.37	7.09
	赖氨酸(Lys)	10.40	8.77	7.43	11.73	11.50	7.27	9.41	8.05	6.71	8.46	10.11	9.31	9.10
	亮氨酸(Leu)	10.40	9.25	9.14	11.20	11.25	8.82	9.71	8.03	7.60	9.62	10.91	9.61	9.63
	异亮氨酸(Ile)	5.52	4.95	4.83	7.07	7.25	4.49	5.00	4.09	3.87	6.35	6.93	5.78	5.51
	甲硫氨酸(Met)	8.39	9.33	9.33	10.67	12.00	8.31	8.82	9.20	10.10	10.58	11.25	7.45	9.62
	苯丙氨酸(Phe)	6.48	4.70	5.26	6.93	7.13	5.26	6.08	5.53	5.16	6.44	7.05	5.78	5.98
	缬氨酸(Val)	6.05	7.56	7.48	7.07	7.25	7.36	5.49	6.52	6.38	6.63	6.93	6.08	6.73
NAA	色氨酸(Trp)	1.49	2.15	0.99	1.73	2.25	0.96	1.47	0.89	1.56	1.54	1.93	1.58	1.55
	天冬氨酸(Asp)	12.52	10.10	9.27	11.07	10.63	9.42	11.08	8.50	8.69	10.58	10.91	8.63	10.12
	丝氨酸(Ser)	7.75	7.44	7.24	7.47	7.13	7.10	6.96	6.36	5.69	6.54	7.27	6.27	6.93
	谷氨酸(Glu)	21.76	25.70	22.75	20.00	20.00	26.37	16.86	16.63	19.93	17.31	17.05	21.47	20.49
	甘氨酸(Gly)	6.37	7.42	7.08	6.93	6.88	7.13	5.78	6.26	5.94	6.73	6.70	5.29	6.54
	丙氨酸(Ala)	9.02	11.97	10.41	10.40	11.25	11.76	8.04	9.07	9.97	9.62	9.66	8.33	9.96
	半胱氨酸(Cys)	1.80	1.24	1.88	2.13	2.50	2.24	1.57	1.06	1.18	2.12	2.05	2.65	1.87
	酪氨酸(Tyr)	4.78	2.92	3.20	4.13	4.50	3.42	4.41	4.09	3.32	3.85	4.20	4.80	3.97
	组氨酸(His)	4.88	4.03	3.45	3.87	4.00	3.75	4.22	3.59	3.16	3.37	3.75	3.92	3.83
	精氨酸(Arg)	9.77	11.87	9.65	9.33	9.88	9.55	8.43	8.94	8.37	8.08	8.86	9.22	9.33
	脯氨酸(Pro)	3.71	6.21	5.98	3.47	2.50	5.86	3.82	5.38	4.97	2.31	3.07	2.06	4.11
	IAA	56.16	54.39	51.57	63.73	66.00	50.31	52.55	48.90	47.73	56.63	62.50	51.97	50.96
	TAA	138.53	143.30	132.49	142.53	145.25	136.91	123.73	118.77	118.97	127.12	136.02	124.62	132.35
IAA/TAA	40.53%	37.96%	38.92%	44.71%	45.44%	36.74%	42.47%	41.18%	40.12%	44.55%	45.95%	41.70%	41.69%	
IAA/NAA	68.17%	61.19%	63.71%	80.88%	83.28%	58.09%	73.83%	70.01%	67.01%	80.35%	85.01%	71.54%	71.92%	
蛋白质	200.64	243.79	225.00	208.01	237.00	230.60	181.50	225.00	194.88	193.12	214.73	231.01	215.47	

注:TAA为总氨基酸;IAA为必需氨基酸;NAA为非必需氨基酸。

表 2 斑玉蕈氨基酸的 PCA 解释方差

Table 2 PCA explained variance of *Hypsizigus marmoreus* amino acids

主成分	统计	变异/%	累加/%
1	6.881	38.230	38.230
2	5.616	31.199	69.429
3	2.412	13.397	82.826
4	1.294	7.190	90.016

依据载荷表,以载荷绝对值大于 0.75(正向或负向载荷超过 75%)来确定各主成分(PC)的决定性因子,结果表明:PC1 由 Lys、Leu、Ile、Phe 和 Asp 5 种氨基酸决定,PC2 由 Thr、Val、Gly、Ala 和 Arg 5 种氨基酸决定,PC3 由 Met 和 His 2 种氨基酸决定,PC4 由 Cys 单个氨基酸决定(表 3)。

表 3 斑玉蕈氨基酸的 PCA 载荷

Table 3 PCA loading of *Hypsizigus marmoreus* amino acids

氨基酸	PC1	PC2	PC3	PC4
Thr	0.338	0.868	0.118	-0.008
Lys	0.940	0.023	0.085	-0.052
Leu	0.972	0.160	0.006	0.056
Ile	0.928	0.073	-0.296	0.151
Met	0.459	0.198	-0.775	-0.339
Phe	0.913	-0.228	-0.229	-0.074
Val	-0.058	0.880	-0.386	0.164
Trp	0.619	0.221	-0.210	-0.075
Asp	0.770	0.135	0.318	-0.401
Ser	0.561	0.620	0.417	-0.179
Glu	-0.276	0.727	0.376	0.440
Gly	0.084	0.922	-0.213	-0.164
Ala	-0.095	0.919	-0.267	0.106
Cys	0.595	0.001	-0.100	0.760
Tyr	0.667	-0.611	0.288	0.145
His	0.545	0.065	0.811	-0.109
Arg	0.021	0.792	0.367	0.061
Pro	-0.741	0.534	0.194	-0.270

进一步由元件评分系数矩阵计算发现,样品存在 PC 得分差异,其中蟹味菇样品在 PC2 的平均得分高于白玉菇。A5 和 A4 在 PC1 的得分较高,A1 和 B1(来自 1 号企业)在 PC3 的得分较高,A6 和 B6(来自 6 号企业)在 PC4 的得分较高。

表 4 斑玉蕈氨基酸的 PCA 得分  
Table 4 PCA scores of *Hypsizigus marmoreus* amino acids

样品	PC1	PC2	PC3	PC4
A1	2.37	-0.23	3.31	-0.76
A2	-1.48	4.60	0.93	-0.65
A3	-2.37	1.79	-0.28	0.32
A4	3.00	0.96	-0.65	-0.16
A5	3.87	1.23	-1.51	0.51
A6	-2.33	2.74	0.68	1.43
B1	0.39	-3.01	1.51	-1.20
B2	-3.00	-1.87	-0.12	-1.04
B3	-3.96	-1.78	-1.59	-0.57
B4	0.68	-1.19	-1.95	-0.01
B5	2.76	-0.04	-1.36	-0.62
B6	0.07	-3.21	1.02	2.75

## 2.4 蛋白质营养价值评价

### 2.4.1 蛋白质中的必需氨基酸分布

参照 WHO 和 IOM 列出的 IAA 当量<sup>[29,31]</sup>,以氨基酸总量记为蛋白质含量,计算得到斑玉蕈蛋白质中的总 IAA 含量为 436.18—533.00 mg/g pro(表 5),存在企业间差异性,但均超过参考氨基酸平衡模式谱中所需求的总 IAA 含量,是 IAA 充足的优质蛋白源。IAA 中,含量最高的是含硫氨基酸当量(甲硫氨酸 + 半胱氨酸)。除苏氨酸和含硫氨基酸外,斑玉蕈蛋白中其他 IAA 水平低于鸡蛋蛋白。

表 5 斑玉蕈蛋白质的必需氨基酸分布  
Table 5 IAA distribution of *Hypsizigus marmoreus* proteins

必需氨基酸													mg · g <sup>-1</sup> pro			
	A1	A2	A3	A4	A5	A6	B1	B2	B3	B4	B5	B6	平均	WHO 2007 版模式谱 <sup>[29]</sup>	IOM 2005 版模式谱 <sup>[31]</sup>	全鸡蛋蛋白 <sup>[33]</sup>
His	35.3	28.1	26.1	27.13	27.54	27.39	34.1	30.2	26.6	26.48	27.57	31.47	28.98	15	18	-
Thr	53.6	53.6	53.7	51.45	50.77	57.18	53.1	55.5	53.4	55.22	54.30	51.14	53.58	23	27	47
Lys	75.1	61.2	56.1	82.32	79.17	53.13	76.1	67.8	56.4	66.57	74.35	74.74	68.57	45	51	70
Leu	75.1	64.6	69.0	78.58	77.45	64.43	78.5	67.6	63.9	75.64	80.20	77.10	72.67	59	55	86
Ile	39.9	34.6	36.5	49.58	49.91	32.76	40.4	34.5	32.6	49.92	50.96	46.42	41.49	30	25	54
Met+Cys	73.6	73.7	84.6	89.80	99.83	77.06	84.0	86.5	94.8	99.85	97.74	81.03	86.87	22	25	57
Phe+Tyr	81.2	53.2	63.8	77.64	80.03	63.40	84.8	81.0	71.3	80.94	82.71	84.97	75.42	38	47	93
Val	43.7	52.7	56.4	49.58	49.91	53.79	44.4	54.9	53.6	52.19	50.96	48.78	50.91	39	32	66
Trp	10.7	15.0	7.5	12.16	15.49	7.04	11.9	7.5	13.1	12.10	14.20	12.67	11.61	6	7	17
总含量	488.1	436.7	453.5	518.24	530.12	436.18	507.1	485.4	465.7	518.91	533.00	508.30	490.11	277	283	490

注:“-”表示该项数据空缺。

### 2.4.2 蛋白质的氨基酸评分和消化率校正氨基酸得分

AAS 是基于受试蛋白质中 IAA 分布与模式谱推荐值的接近程度分析蛋白质营养价值的方法。参照 WHO/FAO/UNU 模式谱,采用 AAS 模型对斑玉蕈蛋白中的 IAA 进行评分(表 6)。结果表明,12 个样品中 IAA 的 AAS 均达到了模式谱要求(100),说明斑玉蕈蛋白所含 IAA 充足。各样品中 AAS 得分最高的 IAA 均为 Met + Cys,12 个样品的 Met + Cys 平均含量为模式谱推荐值的 3.95 倍,表明斑玉蕈蛋白具有提供丰富含硫氨基酸的优势。AAS 模型同时反映出各个 IAA 的 AAS 存在样品间差异性,其中 5 个样品(A1、B1、A4、A5、B5)得分最低的 IAA 为缬氨酸,其他 7 种样品 AAS 得分最低的 IAA 为亮氨酸(A6 样品为亮氨酸和异亮氨酸)。

依据 AAS 结果,以蛋白质中相对不足的 IAA 当量乘以消化率系数(食用菌的消化率系数为 73%)<sup>[36]</sup>计算消化率校正氨基酸得分(PDCAAS),得到 12 个样品的 PDCAAS 在 79.03—95.40,平均值为 86.92(表 6),高于此前报道的糙皮侧耳、沙漠松露、金针菇和杏鲍菇等食用菌<sup>[23,37,40]</sup>。

表6 斑玉蕈蛋白质的氨基酸评分  
Table 6 Amino acid scores of *Hypsizigus marmoreus* proteins

必需氨基酸	A1	A2	A3	A4	A5	A6	B1	B2	B3	B4	B5	B6	平均
His	234.99	187.36	173.70	180.85	183.59	182.57	227.15	201.24	177.27	176.50	183.79	209.79	193.23
Thr	233.22	233.15	233.44	223.70	220.76	248.60	230.83	241.32	232.16	240.08	236.10	222.33	232.97
Lys	166.88	136.01	124.55	182.93	175.94	118.08	169.04	150.60	125.27	147.92	165.23	166.09	152.38
Leu	127.28	109.40	116.92	133.18	131.28	109.20	132.96	114.62	108.26	128.21	135.93	130.68	123.16
Ile	132.82	115.22	121.52	165.26	166.38	109.20	134.71	114.89	108.52	166.41	169.87	154.72	138.29
Met+Cys	334.38	335.14	384.47	408.20	453.76	350.28	381.79	393.00	430.96	453.86	444.29	368.33	394.87
Phe+Tyr	213.75	139.97	167.97	204.32	210.62	166.84	223.12	213.24	187.60	212.99	217.65	223.59	198.47
Val	112.00	135.19	144.69	127.13	127.98	137.92	113.78	140.75	137.55	133.83	130.67	125.07	130.55
Trp	178.80	250.06	124.53	202.68	258.18	117.34	198.10	124.70	218.98	201.71	236.70	211.10	193.57
PDCAAS	81.76	79.86	85.35	92.80	93.43	79.72	83.06	83.67	79.03	93.59	95.39	95.40	86.92

#### 2.4.3 氨基酸比值系数和比值系数分

基于2.4.2中得到的AAS,采用氨基酸比值系数(RC)对IAA的相对平衡性进行分析(表7)。结果发现,斑玉蕈蛋白质中各IAA的RC平均值为0.63—2.02。其中,Phe+Tyr、His、Trp和Thr的RC平均值接近于1,相对较贴近模式谱要求;而Met+Cys和Leu的RC平均值则分别为正向和负向偏离平衡谱最远。进一步计算氨基酸比值系数分(SRC),通过RC离散程度来评估蛋白质中IAA与模式谱贴合的整体情况,得到斑玉蕈蛋白质的SRC为47.52—63.68,12个样品的均值为55.74,整体略高于灰褐牛肝菌(50.05)<sup>[41]</sup>,低于香菇(66.29)、秀珍菇(76.48—89.13)、平菇(78.78)<sup>[42]</sup>和金针菇(77.80)<sup>[37]</sup>。

表7 斑玉蕈蛋白质的氨基酸比值系数  
Table 7 Amino acid ratio coefficients of *Hypsizigus marmoreus* proteins

必需氨基酸	A1	A2	A3	A4	A5	A6	B1	B2	B3	B4	B5	B6	平均
His	1.22	1.03	0.98	0.89	0.86	1.07	1.13	1.07	0.92	0.85	0.86	1.04	0.99
Thr	1.21	1.28	1.32	1.10	1.03	1.45	1.15	1.28	1.21	1.16	1.11	1.10	1.20
Lys	0.87	0.75	0.70	0.90	0.82	0.69	0.84	0.80	0.65	0.72	0.77	0.83	0.78
Leu	0.66	0.60	0.66	0.66	0.61	0.64	0.66	0.61	0.56	0.62	0.64	0.65	0.63
Ile	0.69	0.63	0.69	0.81	0.78	0.64	0.67	0.61	0.57	0.80	0.80	0.77	0.70
Met+Cys	1.74	1.84	2.17	2.01	2.12	2.05	1.90	2.09	2.25	2.19	2.08	1.83	2.02
Phe+Tyr	1.11	0.77	0.95	1.01	0.98	0.98	1.11	1.13	0.98	1.03	1.02	1.11	1.01
Val	0.58	0.74	0.82	0.63	0.60	0.81	0.57	0.75	0.72	0.65	0.61	0.62	0.67
Trp	0.93	1.37	0.70	1.00	1.20	0.69	0.98	0.66	1.14	0.98	1.11	1.05	0.98
SRC	63.68	58.19	51.22	59.00	53.81	52.55	59.79	52.47	47.52	51.74	55.44	63.49	55.74

#### 2.4.4 IOM模式评分

根据美国科学院医学研究所提出的IOM氨基酸平衡模式谱<sup>[31]</sup>,计算得到12个斑玉蕈样品中各IAA得分均超过100(表8),符合IOM模式谱的标准,说明斑玉蕈作为一种完全蛋白来源,可提供充足比例的、满足人类需求的必需氨基酸。

表8 斑玉蕈蛋白质的IOM模式评分  
Table 8 IOM model scores of *Hypsizigus marmoreus* proteins

必需氨基酸	A1	A2	A3	A4	A5	A6	B1	B2	B3	B4	B5	B6	平均
His	195.83	156.14	144.75	150.71	152.99	152.14	189.29	167.70	147.73	147.08	153.16	174.83	161.03
Thr	198.67	198.61	198.86	190.56	188.05	211.77	196.63	205.57	197.76	204.52	201.12	189.40	198.46
Lys	147.25	120.01	109.89	161.41	155.24	104.19	149.16	132.88	110.53	130.52	145.79	146.55	134.45
Leu	136.54	117.36	125.42	142.87	140.82	117.14	142.63	122.96	116.13	137.53	145.82	140.18	132.12
Ile	159.39	138.27	145.83	198.32	199.66	131.04	161.65	137.86	130.23	199.70	203.84	185.67	165.95
Met+Cys	294.25	294.92	338.34	359.21	399.31	308.25	335.97	345.84	379.25	399.39	390.98	324.13	347.49
Phe+Tyr	172.82	113.17	135.81	165.20	170.29	134.89	180.40	172.40	151.68	172.21	175.97	180.78	160.47
Val	136.49	164.76	176.34	154.93	155.98	168.09	138.67	171.54	167.64	163.11	159.25	152.43	159.10
Trp	153.26	214.34	106.74	173.73	221.29	100.57	169.80	106.88	187.70	172.90	202.89	180.95	165.92

#### 2.4.5 化学评分和必需氨基酸指数

以全鸡蛋蛋白质<sup>[33]</sup>作为参照,对斑玉蕈蛋白质进行了化学评分(CS)。测得各样品IAA的平均CS在68.32—152.42(表9),其中Met+Cys和Thr的CS超过100,赖氨酸的CS接近100,表明斑玉蕈蛋白质中

上述几种 IAA 的含量超过或接近鸡蛋;其他几种 IAA 的 CS 均低于 100,表明斑玉蕈蛋白质中这些 IAA 的供应量和平衡性均不如鸡蛋蛋白质。

必需氨基酸指数(EAAI)与 100 的接近程度可反映样品蛋白质与高价参比蛋白质(鸡蛋蛋白质)的相对营养价值。在化学评分的基础上计算 EAAI,得到所测斑玉蕈样品的 EAAI 在 77.53—100.76,平均值为 90.46(表 9)。其中 6 个蟹味菇样品的平均 EAAI 为 88.10,6 个白玉菇样品的平均 EAAI 为 92.18。斑玉蕈的 EAAI 与笔者之前通过同样方法计算得到的金针菇 EAAI(90.62—96.08)近似;与杏鲍菇的 EAAI(113.89—142.89)相比,更接近参考值 100。上述结果表明:斑玉蕈蛋白质的 IAA 平衡性虽然不如鸡蛋蛋白质,但因其含有优势氨基酸(如 Met + Cys 和 Thr)而取得了较理想的 EAAI 值,可作为优良的蛋白质来源。

表 9 斑玉蕈蛋白质的化学评分  
Table 9 Chemical scores of *Hypsizigus marmoreus* proteins

必需氨基酸	A1	A2	A3	A4	A5	A6	B1	B2	B3	B4	B5	B6	平均
Thr	114.04	114.04	114.26	109.47	108.03	121.66	112.98	118.09	113.62	117.49	115.54	108.80	114.00
Lys	107.29	87.43	80.14	117.60	113.11	75.91	108.71	96.86	80.57	95.09	106.22	106.77	97.97
Leu	87.33	75.12	80.23	91.37	90.06	74.92	91.28	78.60	74.30	87.96	93.26	89.65	84.51
Ile	73.89	64.07	67.59	91.81	92.43	60.67	74.81	63.89	60.37	92.45	94.37	85.96	76.86
Met+Cys	129.12	129.30	148.42	157.55	175.14	135.20	147.37	151.75	166.32	175.17	171.48	142.16	152.42
Phe+Tyr	87.31	57.20	68.60	83.49	86.06	68.17	91.18	87.10	76.67	87.03	88.93	91.36	81.09
Val	66.21	79.85	85.45	75.12	75.63	81.50	67.27	83.18	81.21	79.08	77.21	73.90	77.14
Trp	62.94	88.24	44.12	71.53	91.12	41.41	70.00	44.12	77.06	71.19	83.54	74.51	68.32
EAAI	88.34	84.09	81.29	96.68	100.69	77.53	92.39	85.24	86.98	96.94	100.76	94.58	90.46

### 3 讨论

本研究测得 12 个市售斑玉蕈样品的粗蛋白平均含量为 215.47 mg/g DW,说明斑玉蕈是一种丰富的膳食蛋白来源。所测样品的蛋白质中总 IAA 平均含量为 129.30 mg/g DW,占总氨基酸的 40.20%,与已报道的人工栽培食用菌金针菇(42.15%—45.62%)、杏鲍菇(46.4%—49.5%)<sup>[43]</sup>、野生食用菌亚东黑耳(38.29%)<sup>[23]</sup>和灰褐牛肝菌(38%)<sup>[41]</sup>相当,高于小米和花生等粮食或经济作物<sup>[44,45]</sup>,是能够提供充足 IAA 的蛋白质。多种参数模型分析结果表明,斑玉蕈蛋白质中含量最丰富的 IAA 是含硫氨基酸(Met + Cys)。Met 作为最主要的甲基供体,是大多数真核生物蛋白质合成的起始氨基酸;半胱氨酸则通过形成二硫键,在维持蛋白质结构和蛋白质折叠途径中发挥关键作用;缺乏含硫氨基酸会导致机体代谢紊乱,肝脏组织和心肌受损<sup>[46]</sup>。日常膳食中,含硫氨基酸在豆类、蔬菜和水果等植物蛋白中含量相对较低<sup>[33,46]</sup>,将斑玉蕈与上述食物共同食用,可很好地提升人体摄入膳食蛋白的 IAA 平衡性。

斑玉蕈的白色品系是褐色品系的白色突变种,白玉菇、海鲜菇由于外观洁白如玉受到消费者喜爱,在我国的销量远高于蟹味菇。食用菌颜色的变异来源于次级代谢产物的生物合成途径发生改变,生物体的代谢网络也会受到影响,从而引起外观、营养和生理等方面的变化。常见食用菌中还有一些野生型的白色变异品种被用于大量生产,如双孢蘑菇是棕色蘑菇的白色变种。杨红澎等<sup>[47]</sup>发现,双孢蘑菇子实体中总氨基酸含量高于棕色蘑菇。斑玉蕈的白色品系与褐色品系相比,具有栽培周期长、抗病性差和产量低等特点,二者的氨基酸特征比较未见报道。本研究发现,蟹味菇的平均总氨基酸含量高于白玉菇。进一步运用 PCA 方法比较各斑玉蕈样品的 IAA 特征,从 6 个样品中提取出 2 个 PC,发现蟹味菇在 PC2(由缬氨酸和苏氨酸组成)的得分高于白玉菇,说明不同颜色品系的斑玉蕈在氨基酸含量和分布特征方面均存在一定差异。

综上所述,本研究采用 PCA 方法分析了蟹味菇和白玉菇两个不同颜色品系的市售斑玉蕈的氨基酸分布特征,并结合 WHO/FAO/UNU 和 IOM 的新版模式谱进行了蛋白营养评价,发现斑玉蕈蛋白质含量较高,氨基酸配比较为均衡,满足多种国际权威氨基酸平衡模式谱的要求,是一种能够为人体提供充足 IAA 的优良蛋白质来源。蟹味菇和白玉菇的氨基酸营养均衡性相当,二者的氨基酸分布差异可通过 PCA 结果显示。与其他已报道的食用菌类似,斑玉蕈蛋白质中含硫氨基酸含量丰富,亮氨酸相对缺乏,可作为辅助食材与乳制品、豆类和蔬果等其他食物进行搭配,以促进人体对氨基酸的平衡摄取。本研究建立的蛋白质品质评价体系可用于其他食用菌的营养分析,研究结果进一步证明“一荤一素一菇”具有理论基础,可为消费者日常膳食搭配提供科学指导。

## 参 考 文 献

- [ 1 ] 图力古尔,王呈玉,李玉. 吉林省担子菌补记(五)[J]. 菌物研究,2003,1(1):13-16.
- [ 2 ] 黄晨阳,张金霞. 国家食用菌标准菌株库菌种名录[M]. 1版. 北京:中国农业出版社,2012:102.
- [ 3 ] 邱成书,林敏,宋斌. 食用菌斑玉蕈研究进展[J]. 食用菌学报,2013,20(4):78-82.
- [ 4 ] SAITO K, HAZAMA S, ODA Y, et al. pH-Dependent exhibition of hemolytic activity by an extract of *Hypsizygus marmoreus* fruiting bodies[J]. Bioscience Trends,2018,12(3):325-329.
- [ 5 ] ODA Y, SAITO K, NAKATA M. Structural analyses of a hemolytic compound found in an extract of *Hypsizygus marmoreus* fruiting bodies at a low pH[J]. Bioscience Trends,2019,13(1):86-90.
- [ 6 ] YAN J, ZHU L, QU Y, et al. Analyses of active antioxidant polysaccharides from four edible mushrooms[J]. International Journal of Biology Macromolecules,2019,123:945-956.
- [ 7 ] BAO H H, TARBASA M, CHAE H M, et al. Molecular properties of water-unextractable proteoglycans from *Hypsizygus marmoreus* and their *in vitro* immunomodulatory activities[J]. Molecules,2011,17(1):207-226.
- [ 8 ] TSAI P F, MA C Y, WU J S. A novel glycoprotein from mushroom *Hypsizygus marmoreus* (Peck) Bigelow with growth inhibitory effect against human leukemic U937 cells[J]. Food Chemistry,2013,141(2):1252-1258.
- [ 9 ] LEE J S, OKA K, WATANABE O, et al. Immunomodulatory effect of mushrooms on cytotoxic activity and cytokine production of intestinal lamina propria leukocytes does not necessarily depend on beta-glucan contents[J]. Food Chemistry,2011,126(4):1521-1526.
- [ 10 ] KANEKO T, CHIHARA T, SHIMPO K, et al. Inhibition of azoxymethane-induced colorectal aberrant crypt foci in mice fed a high-fat diet by *Pleurotus eryngii* (Eringi) and *Hypsizygus marmoreus* (Bunashimeji) [J]. Asian Pacific Journal of Cancer Prevention,2015,16(9):3881-3885.
- [ 11 ] LIU M, LI S, WANG X, et al. Characterization, anti-oxidation and anti-inflammation of polysaccharides by *Hypsizygus marmoreus* against LPS-induced toxicity on lung[J]. International Journal of Biology Macromolecules,2018,111:121-128.
- [ 12 ] 王丽,罗红霞,李淑荣,等. 海鲜菇氨基酸组成分析及营养评价[J]. 食品工业科技,2016,37(21):338-346.
- [ 13 ] 李淑荣,王丽,唐选民,等. 海鲜菇中游离氨基酸含量分析[J]. 食品科技,2017,42(12):281-284.
- [ 14 ] 王中华,孔浩,蔡孝华,等. 真姬菇与杏鲍菇、金针菇游离氨基酸含量比较[J]. 食品科技,2014,39(6):85-88.
- [ 15 ] VIDAL R, MA Y, SASTRY S S. Generalized Principal Component Analysis[M]. New York:Springer Press,2016:25-62.
- [ 16 ] DAVID C C, JACOBS D J. Principal component analysis: a method for determining the essential dynamics of proteins[J]. Methods in Molecular Biology,2014,1084:193-226.
- [ 17 ] 李倩倩,刘玥明,李凡,等. 六种市售禽蛋蛋清氨基酸主成分分析与综合评价[J]. 食品与发酵工业,2018,44(1):224-229.
- [ 18 ] 高玓玲,木其尔,刘莉敏,等. 内蒙古4种家畜乳蛋白质和氨基酸检测与比较[J]. 食品科技,2017,42(2):267-272.
- [ 19 ] 刘庆庆,袁再晶,施伽,等. 梵净山区竹荪氨基酸含量及其主成分分析[J]. 铜仁学院学报,2018,20(6):31-35.
- [ 20 ] BOYE J, WIJESINHA-BETTONI R, BURLINGAME B. Protein quality evaluation twenty years after the introduction of the protein digestibility corrected amino acid score method[J]. British Journal of Nutrition,2012,108(Suppl 2):S183-S211.
- [ 21 ] WOLFE R R, RUTHERFURD S M, KIM I Y, et al. Protein quality as determined by the digestible indispensable amino acid score: evaluation of factors underlying the calculation[J]. Nutrition Reviews,2016,74(9):584-599.
- [ 22 ] PHILLIPS S M. Current concepts and unresolved questions in dietary protein requirements and supplements in adults[J]. Frontiers in Nutrition,2017,4:13.
- [ 23 ] 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.
- [ 24 ] 中华人民共和国国家卫生和计划生育委员会. 食品安全国家标准 食品中水分的测定:GB 5009.3—2016[S]. 北京:中国标准出版社,2016.
- [ 25 ] 中华人民共和国国家卫生和计划生育委员会. 食品安全国家标准 食品中蛋白质的测定:GB 5009.5—2016[S]. 北京:中国标准出版社,2016.
- [ 26 ] 中华人民共和国农业部和全国饲料工业标准化技术委员会. 饲料中氨基酸的测定:GB/T 18246—2000[S]. 北京:中国标准出版社,2000.
- [ 27 ] 中华人民共和国农业部. 饲料中含硫氨基酸测定方法 离子交换色谱法:GB/T 15399—94[S]. 北京:中国标准出版社,1994.
- [ 28 ] 中华人民共和国国家卫生和计划生育委员会. 食品安全国家标准食品中氨基酸的测定:GB 5009.124—2016[S]. 北京:中国标准出版社,2016.
- [ 29 ] 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.
- [ 30 ] 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.
- [ 31 ] IOM. Dietary Reference Intakes: Energy, carbohydrate, fiber, fat, fatty acid, cholesterol, protein and amino acids[M]. Washington DC: The National Academies Press,2005.
- [ 32 ] 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.
- [ 33 ] 王光慈. 食品营养学[M]. 2版. 北京:中国农业出版社,2001:12.



- [34] OSER B L. Method for integrating essential amino acid content in the nutritional evaluation of protein [J]. Journal of American Dietetic Association, 1951, 27(5):396-402.
- [35] WHO/FAO/UNU. Energy and Protein Requirements; report of a joint WHO/FAO/UNU expert consultation [M]. Geneva; WHO Technical Report Series 724, 1985.
- [36] DIEZ V A, ALVAREZ A. Compositional and nutritional studies on two wild edible mushrooms from northwest Spain [J]. Food Chemistry, 2001, 75(4):417-422.
- [37] 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.
- [38] DABBOUR I, TAKRURI H. Protein digestibility using corrected amino acid score method (PDCAAS) of four types of mushrooms grown in Jordan [J]. Plant Foods for Human Nutrition, 2002, 57(1):13-24.
- [39] 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.
- [40] 陈洪雨, 鲍大鹏, 康前进, 等. 5种市售工厂化栽培杏鲍菇的氨基酸组成及蛋白质营养分析 [J]. 上海农业学报, 2019, 35(4):9-15.
- [41] 鲍长俊, 常惟丹, 庄永亮, 等. 灰褐牛肝菌 (*Boletus griseus*) 子实体的营养评价及蛋白质组分分析 [J]. 食品科学, 2017, 38(20):83-89.
- [42] 金茜, 令狐金卿, 李华刚. 不同基质培养下秀珍菇中蛋白质营养价值评价 [J]. 食品科技, 2017, 42(3):79-83.
- [43] 李晓贝, 周峰, 杨焱, 等. 栽培基质对杏鲍菇子实体蛋白质营养价值的影响 [J]. 食品科学, 2015, 36(23):262-267.
- [44] 程祥, 熊华, 胡居吾, 等. 富硒花生油和富硒花生蛋白的基本性质研究 [J]. 中国油脂, 2013, 38(7):95-97.
- [45] 杨春, 栗红瑜, 邓晓燕, 等. 小米蛋白质的氨基酸组成及品质评价分析 [J]. 农产品加工, 2008(12):8-10.
- [46] SEITE S, MOURIER A, CAMOUGRAND N, et al. Dietary methionine deficiency affects oxidative status, mitochondrial integrity and mitophagy in the liver of rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) [J]. Scientific Report, 2018, 8(1):10151-10164.
- [47] 杨红澎, 班立桐, 黄亮, 等. 双孢蘑菇和棕色蘑菇氨基酸的对比分析 [J]. 食品研究与开发, 2013, 34(5):84-86.

(责任编辑: 闫其涛)