DOI: 10.19812/j.cnki.jfsq11-5956/ts.20251226001
引用格式: 刘丽娜, 李顺峰, 崔国梅, 等. 3 种短菌龄香菇的营养成分和质构特性分析[J]. 食品安全质量检测学报, 2026, 17(12): 221–229.
LIU LN, LI SF, CUI GM, *et al*. Analysis of nutritional components and texture characteristics of 3 kinds of short-age *Lentinula edodes* [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2026, 17(12): 221–229. (in Chinese with English abstract).

3 种短菌龄香菇的营养成分和质构特性分析

刘丽娜, 李顺峰, 崔国梅, 高帅平, 田广瑞, 王安建*

(河南省农业科学院农产品加工研究中心, 郑州 450002)

摘 要: 目的 探究 3 种短菌龄香菇的营养特征与质构特性, 并进行综合评价。**方法** 以同配方同批次栽培的 3 种常见短菌龄品种鲜香菇 X2、F6、Q2 为实验材料, 测定其常规营养成分、矿物质元素、氨基酸及质构, 并通过相关性和主成分分析法对其品质进行评价。**结果** 3 个品种的鲜香菇营养成分存在一定差异, 香菇 X2 的粗多糖含量最高, 达到 31.70%; 香菇 Q2 蛋白质含量为 24.07%, 比香菇 F6、X2 分别高 18.54%、16.86%。香菇 Q2 的粗纤维含量是香菇 F6、X2 的 1.62、1.65 倍。3 个香菇品种的钾元素含量最高, 磷元素次之; 香菇 Q2 中钾、磷含量分别达到 20487.80 mg/kg、6764.23 mg/kg, 显著高于其他两个品种(P<0.05); 香菇 Q2、X2 的钙含量分别是 F6 的 1.81 倍、1.49 倍, 3 个品种的锌铜比均在 6 以上。3 个香菇品种总氨基酸含量为 142.11~172.36 mg/g, 谷氨酸含量均为最高, 必需氨基酸/非必需氨基酸均大于 60%, 必需氨基酸/氨基酸总量均大于 40%, 属于高质量蛋白质; 而氨基酸评分结果显示, 蛋氨酸是第一限制氨基酸, 氨基酸比值系数及化学评分显示氨基酸营养平衡性一般。香菇 F6 子实体硬度大且弹性高, 相较于 X2、Q2 质构更适于鲜切加工。相关性和主成分分析表明, 香菇 Q2 的品质综合评价优于香菇 X2、F6。**结论** 3 个香菇品种存在差异性且各有特点, 香菇 Q2 综合品质最佳, 为短菌龄品种香菇的开发利用提供一定参考依据。

关键词: 香菇; 营养; 氨基酸; 质构; 主成分分析

Analysis of nutritional components and texture characteristics of 3 kinds of short-age *Lentinula edodes*

LIU Li-Na, LI Shun-Feng, CUI Guo-Mei, GAO Shuai-Ping, TIAN Guang-Rui, WANG An-Jian*

(*Research Center of Agricultural Products Processing*, *Henan Academy of Agricultural Sciences*, *Zhengzhou* 450002, *China*)

ABSTRACT: Objective To explore the nutritional characteristics and texture characteristics of 3 kinds of short-age *Lentinula edodes*, and conduct a comprehensive evaluation. **Methods** The 3 kinds of short varieties of *Lentinula edodes* cultivated in the same formula and batch, X2, F6 and Q2 were selected as experiments materials. The nutritional components, mineral elements, amino acids and texture were measured respectively. Then the quality

收稿日期: 2025-12-26
基金项目: 河南省科技攻关计划项目(262102110084); 河南省重点研发专项项目(231111112500); 河南省农业科学院自主创新项目(2025ZC86, 2026ZC97); 河南省中央引导地方科技发展资金项目(Z20241471135, 2025ZYYD03)
第一作者: 刘丽娜(1982—), 女, 助理研究员, 主要研究方向为食用菌加工。E-mail: 83231174@qq.com
***通信作者:** 王安建(1969—), 男, 研究员, 主要研究方向为食用菌加工。E-mail: jgs1419@163.com

was evaluated by the correlation and principal component analysis method. **Results** There were some differences in nutritional components of fresh *Lentinula edodes* among the 3 varieties. The crude polysaccharide of X2 was the highest, reaching 31.70%. The protein content of Q2 was 24.07%, which was 18.54% and 16.86% higher than F6 and X2 respectively (P<0.05). The crude fiber of Q2 was 1.62 and 1.65 times that of F6 and X2. The 3 varieties were rich in mineral elements, among which the potassium was the highest, followed by phosphorus. The potassium and phosphorus in Q2 were 20487.80 mg/kg and 6764.23 mg/kg respectively, which were significantly higher than the other 2 varieties (P<0.05). The calcium of Q2 and X2 was 1.81 times and 1.49 times that of F6, and the zinc-copper ratios of 3 varieties were all above 6. The total amino acid content of 3 varieties was 142.11–172.36 mg/g, the glutamic acid content was the highest, the essential amino acid/non-essential amino acid was more than 60%, and the essential amino acid/total amino acid was more than 40%, which belonged to high-quality protein. According to amino acid score, methionine was the first limiting amino acid, the ratio coefficient and chemical score showed that the nutritional balance of amino acid was ordinary level. The fruit body of *Lentinula edodes* F6 had high hardness and elasticity, and its texture was more suitable for fresh-cut processing than X2 and Q2. Correlation and principal component analysis showed that the quality of *Lentinula edodes* Q2 was better than X2 and F6. **Conclusion** There are differences among 3 kinds of *Lentinula edodes* varieties and each has its own characteristics. The comprehensive quality of *Lentinula edodes* Q2 is the best, which provides a certain reference for the development and utilization of short-age *Lentinula edodes* varieties.

KEY WORDS: *Lentinus edodes*; nutrition; amino acid; texture; principal component analysis

0 引 言

香菇(*Lentinus edodes*)隶属于担子菌亚门口蘑科香菇属, 其滋味鲜美, 营养丰富, 且具有很强的保健功效, 是一种健康食品, 深受人们的喜爱[1]。香菇是我国栽培规模最大、产量最多的食用菌品种。香菇菌龄指从接种菌棒到出菇所需的时间, 一般分为短菌龄(<80 d)、中菌龄(80~110 d)、长菌龄(>110 d)[2]。香菇菌龄是其栽培中最为重要的农艺性状, 决定了在最合适季节出菇而进行制棒、接种时间[3], 直接影响着香菇产量和质量, 在生产中具有重要应用价值。随着香菇菌棒集约化生产转型升级, 为了缩短栽培周期, 对短菌龄品种的需求尤为迫切。短菌龄品种的培养周期短、能耗成本低、库房周转率高, 有利于提高香菇的生产效益, 因此, 短菌龄香菇已成为工厂化栽培的发展方向。目前, 对香菇菌龄的研究主要集中在不同菌龄品种的栽培过程外界环境影响[4], 与香菇农艺性状的关联分析[5], 遗传多样性分析的分子标记技术[6]、菌龄基因位点的控制[3]等方面, 而关于短菌龄品种鲜香菇的营养分析与品质评价则鲜有报道。

主成分分析(principal component analysis, PCA)是通过数据降维技术用较少的变量反映大量指标的多元统计方法[7]。目前此方法已广泛用于食用菌综合品质评价和筛选特征性指标, 如 SUN 等[8]对 13 种野生食用菌的总游离氨基酸进行 PCA 综合评价, 发现特征性游离氨基酸含量与特征风味形成有直接关系; 范婷婷等[9]采用 PCA 对人工栽培和野生羊肚菌游离氨基酸组成及含量进行分析评价, 可为羊肚菌营养价值及滋味比对提供参考。上述研究主要关注不同的生物学类别及来源, 但培养料组成、生长环境条件及栽培技术等因素也会影响食用菌品质, 对同菌龄不同品种鲜香菇的比较鲜见报道。因此, 本研究针对目前河南产区广泛栽培的 3 个生产型短菌龄香菇品种开展营养、质构分析与品质评价, 从而为短菌龄品种香菇的加工利用提供数据支持和科学依据。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

本研究用短菌龄香菇菌种 F6 来自河南金海生物科技有限公司, Q2 来自山东七河生物科技股份有限公司, X2 来自汝州市朕迪农业科技有限公司, 栽培试验在河南省农业科学院河南现代农业研究开发基地进行。3 个品种采用相同的栽培料和栽培管理方法。栽培料配方为木屑 78%、麸皮 20%、石膏 1%、石灰 1%, 含水量 50%。栽培管理按照 DB41/T 2048—2020《春栽香菇代料栽培技术规程》进行。待香菇子实体长至八成熟采收, 预冷后用保鲜袋分装, 用泡沫箱运回实验室冷藏备用。

硫酸、硼酸、氢氧化钠、苯酚、盐酸、柠檬酸钠(分析纯, 国药集团化学试剂有限公司); 氨基酸混合标准品(纯度 1 nmol/μL)、茚三酮(色谱纯)(美国 Sigma 公司)。

1.2 仪器与设备

TMS-Pro 质构仪(美国 FTC 公司); Prodigy 电感耦合等离子体发射光谱仪(美国利曼-徕伯斯公司); 835-50 型氨基

酸自动分析仪(日本日立公司); Kylin S12 原子荧光光谱仪(北京吉天仪器有限公司); DISCOVER-I艾柯超纯水机(台湾艾柯成都康宁实验专用纯水设备厂); FA2004C 分析天平(精度 0.001 g, 上海越平科学仪器有限公司); UV-1150 分光光度计(日本岛津公司); K1100 凯氏定氮仪(济南海能仪器股份有限公司); XM 120-HR 快速水分测定仪(Precisa Gravimetrics AG 公司); H2050R 台式高速冷冻离心机(湖南湘仪实验室仪器开发有限公司)。

1.3 实验方法

1.3.1 营养成分测定

总灰分含量测定参照 GB 5009.4—2016《食品安全国家标准 食品中灰分的测定》; 蛋白质含量测定参照 GB 5009.5—2016《食品安全国家标准 食品中蛋白质的测定》凯氏定氮法; 脂肪含量测定参照 GB 5009.6—2016《食品安全国家标准 食品中脂肪的测定》索氏抽提法; 粗纤维含量测定参照 GB/T 5009.10—2003《植物类食品中粗纤维的测定》; 粗多糖含量测定参照 NY/T 1676—2023《食用菌中粗多糖的测定》分光光度法; 磷含量测定参照 GB 5009.87—2016《食品安全国家标准 食品中磷的测定》; 钙含量测定参照 GB 5009.92—2016《食品安全国家标准 食品中钙的测定》; 硒含量测定参照 GB 5009.93—2017《食品安全国家标准 食品中硒的测定》; 铜、锌、铁、锰、钾、钠、镁含量参照 GB 5009.268—2016《食品安全国家标准 食品中多元素的测定》; 氨基酸含量测定采用 GB 5009.124—2016《食品安全国家标准 食品中氨基酸的测定》。

1.3.2 营养价值评价

参照陈万超等[10]的方法计算氨基酸评分(amino acid score, AAS)和化学评分(chemical score, CS), 参照李艳艳等[11]的方法计算氨基酸比值系数(ratio coefficient, RC)。

1.3.3 质构测定

采用质构仪对鲜香菇样品的质构进行全质构(texture profile analysis, TPA)测定。测试条件: 采用 P50 探头, 测前速率 1.0 mm/s, 测试速率 1.0 mm/s, 测后速率 1 mm/s; 压缩率 30%, 触发类型设置为: Auto, 起点感应力: 2.5 N, 数据采集速率: 200 pps。每组品种样品测定 10 组数据, 取平均值, 记录硬度 1、黏附性、内聚性、硬度 2、弹性、胶黏性、咀嚼性。

1.3.4 主成分分析

采用 SPSS Statistics 24.0 软件对香菇相关指标进行 PCA, 得到原始数据的特征值、方差贡献率、累计贡献率、因子载荷矩阵和成分得分系数矩阵等, 抽取特征值大于 1 的因子作为主成分。根据主成分信息进行对香菇进行综合评价, 以每个主成分对应特征值的方差相对贡献率 β_i (i=1, 2, 3, …, k)为权数, 与各主成分得分 F_i 相乘, 加和得到综合评价函数[12]为 $F=F_1\beta_1+F_2\beta_2+\ldots+F_k\beta_k$。

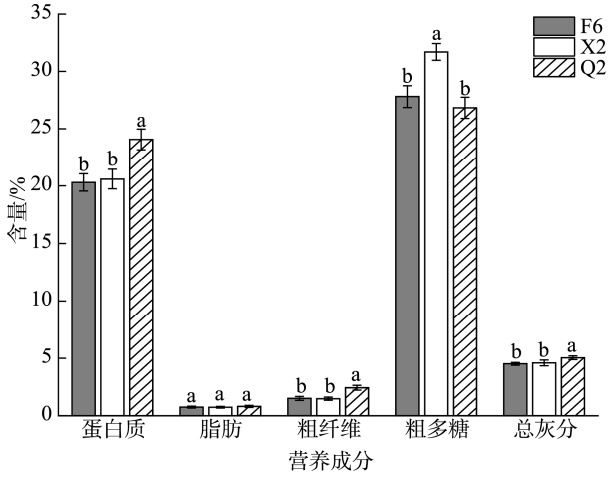
1.4 数据处理

每个实验重复 3 次, 采用 Microsoft Excel 2016 和 Origin 2021 软件进行数据统计分析和作图, 采用 SPSS Statistics 24.0 软件相关性分析、显著性检验及 PCA。

2 结果与分析

2.1 营养成分分析

从图 1 可直观看出, 香菇 F6、X2、Q2 3 个品种的各营养成分含量存在一定差异, 但整体变化趋势一致, 由大到小依次是粗多糖>蛋白质>总灰分>粗纤维>脂肪。香菇多糖是香菇中最重要的活性成分, 具有增强免疫、抗癌、抗氧化的生物特性[13]。3 个香菇品种的粗多糖含量为 26.83%~31.70%, 蛋白质含量为 20.30%~24.07%。香菇 X2 粗多糖含量最高, 达到 31.70%, 比香菇 F6、Q2 显著增加了 13.96%、18.17% (P<0.05), 是一种高多糖香菇品种; 香菇 Q2 的蛋白质含量为 24.07%, 比香菇 F6 显著增加了 18.54%、比香菇 X2 显著增加了 16.86% (P<0.05)。灰分是物质中无机成分总量的一项显示指标[14], 香菇灰分中含有大量矿质元素及钾盐, 可作为酸性食物中毒的预防食品[15]。香菇 Q2 的总灰分和粗纤维含量均显著高于其他两个品种 (P<0.05), 而香菇 F6、X2 除粗多糖含量外其他指标含量相当, 无显著性差异(P>0.05)。差异最大的指标是粗纤维含量, 香菇 Q2 粗纤维含量是 F6、X2 的 1.62、1.65 倍。



注: 各营养成分含量以干基计, 同指标不同小写字母表示差异显著(P<0.05)。

图 1　不同香菇品种营养成分含量

Fig.1　Content of nutrients in different *Lentinula edodes* varieties

2.2 矿物质元素分析

常量矿物质元素如钾、钙、钠、镁等, 对维持机体渗透压及酸碱平衡有重要作用, 微量元素如铁、铜、锌等对人体同样至关重要[16]。由表 1 可知, 3 个香菇品种的矿物质元素含量丰富, 钾钠比均在 100 以上, 均具有高钾低钠特

征。钾是所有元素中含量最高的, 磷元素含量仅次于钾元素, 香菇 Q2 中钾、磷含量分别达到 20487.80 mg/kg、6764.23 mg/kg, 显著高于其他两个品种(P<0.05)。香菇 Q2、X2 的钙含量较高, 分别是 F6 的 1.81、1.49 倍; 而香菇 F6、X2 除钙含量外其他矿物质元素含量均无显著性差异(P>0.05)。3 个品种的锌铜比均在 6 以上, 具有较好的营养健康比例[17]。此外, 3 个品种间镁、钠、锌、铁、锰、硒含量无显著差异(P>0.05)。综合图 1 和表 1 可知, 3 个短菌龄的香菇品种均具有很高的营养价值。

表 1 不同香菇品种矿物质元素含量(mg/kg)
Table 1 Content of mineral elements in different *Lentinula edodes* varieties (mg/kg)

矿物质元素	F6	X2	Q2
磷	6315.79±94.74^{b}	6555.56±84.32^{b}	6764.23±79.86^{a}
钙	36.84±5.79^{b}	54.81±7.42^{a}	66.67±8.54^{a}
硒	0.08±0.01^{a}	0.09±0.01^{a}	0.10±0.01^{a}
铜	4.21±0.52^{b}	5.01±0.63^{b}	7.19±0.68^{a}
锌	38.20±4.72^{a}	38.67±3.76^{a}	45.37±6.58^{a}
铁	24.44±5.09^{a}	21.33±4.82^{a}	20.49±3.86^{a}
锰	10.53±2.63^{a}	10.81±2.27^{a}	13.25±3.02^{a}
钾	18796.99±90.00^{b}	18222.22±96.00^{b}	20487.80±75.00^{a}
钠	177.44±30.96^{a}	161.48±28.13^{a}	139.84±37.65^{a}
镁	1022.56±87.53^{a}	1007.41±91.86^{a}	1138.21±97.35^{a}

注: 同行不同小写字母表示差异显著(P<0.05)。

2.3 氨基酸组成及营养评价

由表 2 可知, 3 个香菇品种中 TAA 含量在 142.11~172.36 mg/g 之间, 均含有 16 种氨基酸, 氨基酸总量由高到低分别为香菇 Q2、X2、F6。香菇 Q2 中除异亮氨酸外, 其余氨基酸含量均高于 F6 和 X2, 因此其氨基酸总量也最高; 香菇 F6 和 X2 在各氨基酸含量上具有很大相似性。所有氨基酸中谷氨酸含量均为最高, 占比达到 14.81%、15.46%、16.98%, 谷氨酸具有多种重要的生理功能, 对传递神经冲动, 维护脑及神经功能发挥着重要作用; 此外, 谷氨酸和天冬氨酸是鲜味氨基酸中的特征性氨基酸, 其占比在 3 个香菇品种中均在 20%以上, 这在一定程度反映出香菇有浓郁的鲜味, 可用于开发鲜味剂。3 个香菇品种 Q2、X2、F6 的 EAA 含量依次分别为 72.36、61.48、60.15 mg/g, 含量丰富, 其中含量最高的均为缬氨酸, 最低的均为蛋氨酸, 符合食用菌具有低蛋氨酸的特征[18]。EAA 和 NEAA 含量对比发现 Q2>X2>F6, 3 个香菇品种的 EAA/NEAA 为 72.36%~74.77%, EAA/TAA 为 41.98%~42.78%, 均超过了联合国粮食及农业组织/世界卫生组织(Food and Agriculture Organization of the United States/World Health Organization, FAO/WHO)所推荐的理想蛋白质指标[19](EAA/NEAA>60%, EAA/TAA>40%), 均属于高质量蛋白质。

表 2 不同香菇品种氨基酸组成(mg/g)
Table 2 Amino acid composition in different *Lentinula edodes* varieties (mg/g)

氨基酸	F6	X2	Q2
天冬氨酸	12.78±1.01	13.33±0.98	15.45±0.89
苏氨酸	7.52±0.72	7.41±0.69	8.94±0.63
丝氨酸	7.52±0.65	7.41±0.58	8.13±0.56
谷氨酸	21.05±2.32	22.22±2.25	29.27±1.92
甘氨酸	7.52±0.58	7.41±0.54	8.94±0.69
丙氨酸	10.53±0.59	10.37±0.61	11.38±0.76
缬氨酸	12.78±0.69	14.81±0.62	17.89±0.72
蛋氨酸	3.01±0.52	2.96±0.47	4.07±0.45
异亮氨酸	7.52±0.71	7.41±0.66	7.32±0.59
亮氨酸	11.28±0.74	11.11±0.69	13.01±0.76
酪氨酸	3.76±0.48	2.96±0.52	4.88±0.58
苯丙氨酸	7.52±0.68	7.41±0.63	8.94±0.64
赖氨酸	10.53±1.32	10.37±1.22	12.20±1.01
组氨酸	4.51±0.61	4.44±0.65	4.88±0.58
精氨酸	8.27±0.43	8.15±0.38	9.76±0.55
脯氨酸	6.02±0.36	5.93±0.33	7.32±0.46
TAA	142.11±12.41	143.70±11.82	172.36±11.79
EAA	60.15±5.38	61.48±4.98	72.36±4.80
NEAA	81.95±7.03	82.22±6.84	100.00±6.99
EAA/NEAA/%	73.39	74.77	72.36
EAA/TAA/%	42.33	42.78	41.98

注: TAA 为总氨基酸(total amino acid); EAA 为必需氨基酸(essential amino acid); NEAA 为非必需氨基酸(non-essential amino acid)。

AAS、RC 及 CS 是目前氨基酸营养评价的常用指标[20]。AAS 是按 WHO 联合 FAO 与联合国大学(United Nations University, UNU)推荐 EAA 量蛋白模式谱计算, CS 采用 FAO 推荐的改良鸡蛋蛋白模式谱计算[21]; 二者数值越高, 表明营养价值高, 小于 100 的为限制性氨基酸[10]。RC 是基于氨基酸平衡理论的评估值, 越接近 1 蛋白质营养价值越高[22]。3 个香菇品种的 AAS、RC 及 CS 结果见表 3, 3 个香菇品种存在蛋氨酸和亮氨酸的 AAS 均小于 100, 说明 3 个香菇品种不属于完全蛋白, 其第一限制氨基酸均为蛋氨酸; 苯丙氨酸+酪氨酸的 AAS 为 134.44~179.17, 缬氨酸的 AAS 为 161.45~190.54, 总体上, 3 个香菇品种不足和过剩氨基酸种类相同, 但数量程度不同。RC 方面, 香菇 F6 和 X2 中异亮氨酸、香菇 Q2 中赖氨酸的 RC 值最接近 1, 对氨基酸的平衡性贡献最好; 3 个香菇品种中缬氨酸、蛋氨酸分别正负向偏离平衡最远, 蛋氨酸的 RC 值最低, 缬氨酸的的 RC 最高, 这与 AAS 分析结果一致。CS 方面, 香菇 F6 和 X2 中仅有缬氨酸高于 100, 其余氨基酸的 CS 均低于标准鸡蛋蛋白模式; 香菇 Q2 中除缬氨酸、苯丙氨酸+酪氨酸外, 其他

表 3　氨基酸营养评价
Table 3　Amino acid nutrition evaluation

氨基酸	AAS			RC			CS		
	F6	X2	Q2	F6	X2	Q2	F6	X2	Q2
缬氨酸	161.45	184.49	190.54	1.30	1.49	1.46	125.93	143.90	148.62
蛋氨酸	67.34	65.41	76.77	0.54	0.53	0.59	42.33	41.12	48.25
异亮氨酸	123.46	119.92	101.33	0.99	0.97	0.78	92.60	89.94	76.00
苏氨酸	161.04	156.42	161.54	1.29	1.27	1.24	92.60	89.94	92.89
亮氨酸	94.17	91.46	91.60	0.76	0.74	0.70	79.37	77.09	77.20
苯丙氨酸+酪氨酸	146.20	134.44	179.17	1.18	1.09	1.37	92.60	85.14	113.47
赖氨酸	115.23	111.92	112.59	0.93	0.91	0.86	94.28	91.57	92.12

氨基酸的 CS 也比标准鸡蛋蛋白模式低; 这说明 3 个香菇品种在氨基酸平衡性方面逊于鸡蛋蛋白, 需要搭配食用其他食物以达到均衡营养。

2.4　质构分析

硬度与弹性常作为衡量果蔬品质优良的标准[23]。不同香菇品种质构分析见图 2, 各品种间质构存在一定差异, 在硬度 1、黏附性、硬度 2、弹性、胶黏性、咀嚼性方面, 从高到低顺序是香菇 F6>X2>Q2。香菇 F6 的硬度 1、黏附性、硬度 2、弹性、胶黏性、咀嚼性依次为 73.390 N、0.332 N • mm、69.029 N、5.155 mm、39.475 N、207.027 mJ, 分别是香菇 Q2 的 1.512、1.942、1.526、1.313、1.444、1.854 倍。这表明香菇 F6 子实体硬度大且弹性高, 相较于 X2、Q2 质构更适于鲜切加工。

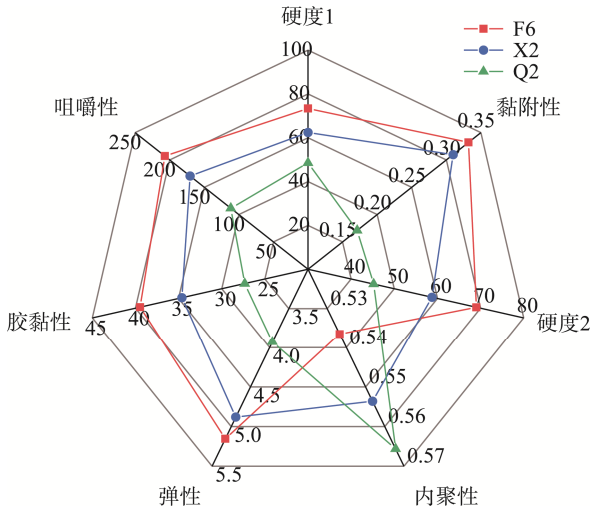


图 2　不同香菇品种质构分析
Fig.2　Texture analysis of different *Lentinula edodes* varieties

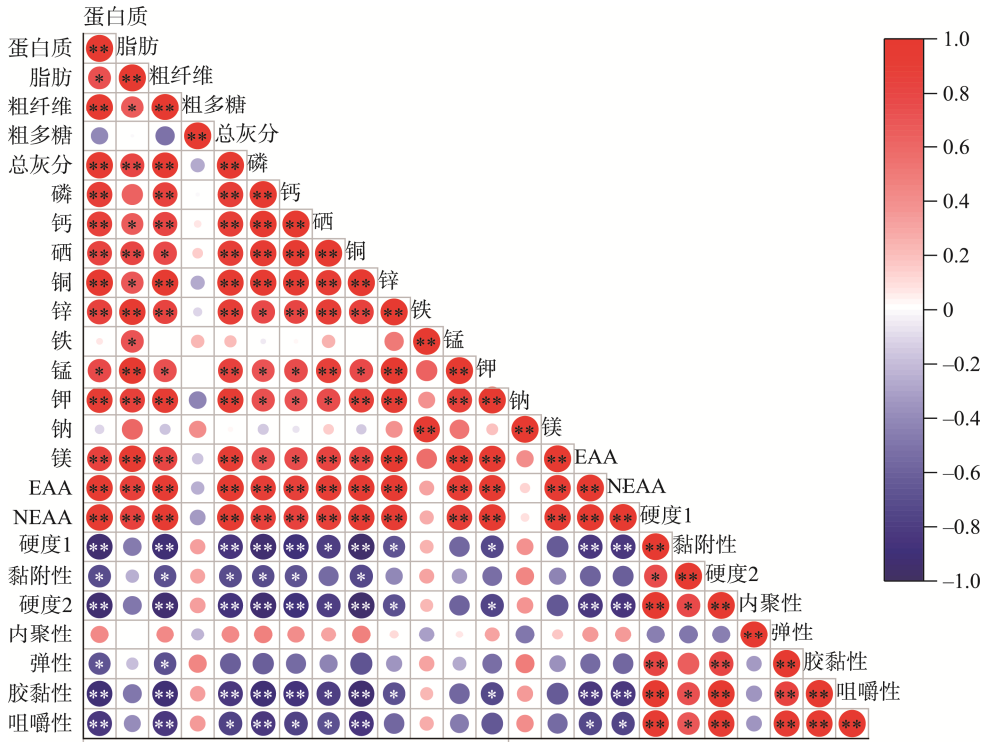
2.5　指标相关性分析

各指标相关性分析结果见图 3, 其中蓝色表示负相关, 红色表示正相关, 颜色深浅表示相关程度; 相关系数绝对值 0.8~1.0 为极显著相关, 0.6~0.8 为显著相关。如图 3 所示, 各个指标之间存在正相关也存在负相关, 且绝大部分呈现显著正相关。除粗多糖外, 其他营养成分与大部分矿物质元素、氨基酸呈正相关, 其中蛋白质、粗纤维与大部分矿物质元素、氨基酸存在极显著正相关(P<0.01); 大部分矿质元素(除铁和钠外)与总灰分呈极显著正相关(P<0.01)。除内聚性外, 其他质构指标与营养成分、矿物质元素、氨基酸呈负相关, 其中硬度 1、黏附性、硬度 2、弹性、胶黏性、咀嚼性均与蛋白质和粗纤维存在显著或者极显著负相关性(P<0.05 或 P<0.01)。质构指标(除内聚性外)间呈显著正相关(P<0.05)。这些表明, 指标间存在较强的联系, 因此可以采用 PCA 进行综合评价。

2.6　品质综合评价

对香菇样品的营养成分、矿物质元素、氨基酸组成和质构共 24 个指标进行 PCA。由表 4 可知, 前 3 个主成分对应特征值分别为 16.424、4.525、1.424, 均大于 1, 累计贡献率为 93.223%, 说明 3 个主成分基本包含了所有变量的初始信息, 可以解释 93.223%的变异信息。第一个主成分方差贡献率为 68.434%, 从表 4 中载荷可以看出蛋白质、脂肪、粗纤维、总灰分、磷、钙、硒、铜、锌、锰、钾、镁、EAA、NEAA 对其有较大的正向影响, 其中蛋白质、粗纤维、总灰分、磷、钙、硒、铜、钾、EAA、NEAA 载荷均大于 0.9, 为高度正相关; 硬度 1、黏附性、硬度 2、弹性、胶黏性、咀嚼性对其有较大的负向影响。第二个主成分方差贡献率为 18.854%, 与脂肪、铁、钠有较大的正相关。第 3 个主成分方差贡献率为 5.935%, 粗多糖载荷较高(0.872), 相关性强。由此可知, 前 3 个主成分反映了香菇品质指标的绝大部分信息。因此, 利用前 3 个主成分进行香菇品质指标的综合评价是可行的[9]。

利用 PCA 得到 3 个新的综合指标 F_1、F_2、F_3 替代初始的 24 个指标对香菇综合品质进行分析, 得到前 3 个主成分因子的方程表达式如下: F_1=0.060X_1+0.047X_2+0.059X_3–0.017X_4+…–0.041X_{22}–0.056X_{23}–0.052X_{24}; F_2=–0.015X_1+0.141X_2–0.025X_3+0.086X_4+…+0114X_{22}+0.073X_{23}+0.090X_{24}; F_3=–0.085X_1–0.041X_2–0.149X_3+0.612X_4+…+0.094X_{22}–0.038X_{23}– 0.011X_{24}。



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

图 3 品质指标相关性分析结果

Fig.3 Correlation analysis results of quality index

表 4 主成分的载荷矩阵和贡献率

Table 4 Loading matrix of principal components and their contribution rates

品质指标	主成分载荷		
	PC1	PC2	PC3
蛋白质	0.987	–0.066	–0.121
脂肪	0.768	0.637	–0.059
粗纤维	0.963	–0.114	–0.212
粗多糖	–0.274	0.388	0.872
总灰分	0.984	0.074	–0.031
磷	0.935	–0.110	0.328
钙	0.917	–0.022	0.393
硒	0.904	0.202	0.375
铜	0.991	–0.092	0.056
锌	0.890	0.437	–0.026
铁	0.122	0.955	–0.139
锰	0.828	0.560	0.022
钾	0.915	0.233	–0.315
钠	–0.041	0.990	–0.002
镁	0.880	0.456	–0.125
EAA	0.979	0.185	–0.052
NEAA	0.979	0.148	–0.130
硬度 1	–0.921	0.356	–0.078
黏附性	–0.697	0.439	–0.057
硬度 2	–0.930	0.345	–0.063
内聚性	0.396	–0.434	0.077

表 4(续)

品质指标	主成分载荷		
	PC1	PC2	PC3
弹性	–0.670	0.517	0.134
胶黏性	–0.914	0.330	–0.054
咀嚼性	–0.846	0.405	–0.016
特征值	16.424	4.525	1.424
方差贡献率/%	68.434	18.854	5.935
累计贡献率/%	68.434	87.288	93.223

3 个主成分分别从不同方面反映了不同品种香菇综合品质的总体水平，因此以各主成分对应的方差相对贡献率作为权重，对 3 个主成分得分进行加权求和，建立综合评价函数：F=0.734F_1+0.202F_2+0.064F_3，计算各品种综合得分，总得分高低可反映综合品质高低。由表 5 可知，第 1~3 主成分得分最高的分别是 Q2、F6、X2，说明 3 个品种各有侧重，与主成分各指标载荷相对应。3 个短菌龄香菇品种综合品质从高到低的排序为 Q2>X2>F6。

表 5 主成分得分和综合评价

Table 5 Principal component score and comprehensive evaluation

香菇品种	F_1	F_2	F_3	F	排序
F6	–0.877	0.689	–0.875	–0.560	3
X2	–0.492	0.216	1.327	–0.233	2
Q2	1.102	–0.488	–0.260	0.694	1

3 讨　论

香菇富含多种营养物质, 是一种药食两用真菌。随着香菇生产规模及区域不断扩大, 选育出适合不同生产模式的差异化菌种成为新的育种课题, 其中菌龄是香菇育种者非常关注的性状之一, 但还缺乏对香菇菌龄性状的关键位点和基因的研究。目前香菇集约化、工厂化生产逐渐成为一种趋势, 短菌龄品种香菇的生产应用价值越来越凸显[24], 有必要了解短菌龄品种鲜香菇的营养品质。因此, 本研究针对目前广泛栽培的 3 个短菌龄香菇品种进行同配方同批次栽培的营养、质构分析与品质评价。结果表明, 3 个香菇品种的粗多糖含量为 26.83%~31.70%, 蛋白质含量为 20.30%~24.07%, 与李巧珍等[25]的研究结果一致, 是香菇多糖、蛋白质研究的优质试验材料。但短菌龄整体蛋白质含量低于李艳艳等[11]报道的长菌龄香菇 9608 和中菌龄香菇 1504 子实体中蛋白质含量, 估计跟遗传特性有关。X2 粗多糖含量最高, 比香菇 F6、Q2 显著增加了 13.96%、18.17%, 这可能跟该品种多糖合成关键酶基因表达量更多, 有利于香菇多糖合成积累的缘故。香菇 Q2 蛋白质含量比香菇 F6、X2 分别高 18.54%、16.86%; 香菇 Q2 粗纤维含量是香菇 F6、X2 的 1.62、1.65 倍。这表明香菇不同品种间粗多糖、蛋白质、粗纤维含量存在明显差异。矿物质元素是评价食用菌营养价值的重要指标之一, 香菇中含量最丰富的矿物质元素是钾, 高钾低钠特征明显, 使其在限盐饮食中具有潜在益处; 钙、铁、锌等含量较低的矿物质也是重要的饮食补充元素。孙恬等[26]对我国 4 大产区香菇的矿物质元素进行检测, 钾含量可达 21773.3 mg/kg, 钙含量 113.83 mg/kg, 与本研究测定结果存在一定的差异, 可能与其生长条件和栽培品种技术有关。本研究中香菇 Q2 中钾、磷含量分别达到 20487.80 mg/kg、6764.23 mg/kg, 明显高于其他两个品种(P<0.05); 香菇 Q2、X2 的钙含量分别是 F6 的 1.81、1.49 倍, 3 个品种的锌铜比均在 6 以上。

氨基酸及 EAA 的组成与比例是评价蛋白质营养价值的重要指标[27]。3 个香菇品种 TAA 含量为 142.11~172.36 mg/g, 与李治平等[28]报道的河南、浙江、四川等地的香菇 TAA 含量在 143.9~187.1 mg/g 相似。3 个香菇品种的谷氨酸含量最高, EAA/NEAA 为 72.36%~74.77%, EAA/TAA 为 41.98%~42.78%, 均超过了 FAO/WHO 所推荐的理想蛋白质指标, 属于优质蛋白源。采用 AAS、RC 及 CS 进行营养评价, 发现蛋氨酸是第一限制氨基酸, 这与熊碧等[29]对杏鲍菇、双孢蘑菇等的研究结果一致; 而 RC 及 CS 显示氨基酸营养平衡性一般。质构特性是评价食用菌品质特性的重要指标[30], 与营养成分种类及含量有关[31]。本研究中, 香菇 F6 子实体硬度大且弹性高, 相较于 X2、Q2 质构更适于鲜切加工。值得注意的是, 本研究中香菇 Q2 出现了高纤维低硬度的现象, 这可能与本研究中所用原料为鲜香菇, 其含水量高, 纤维类物质吸水膨胀后结构变软, 水分能削弱纤维之间的氢键作用, 且微观结构上纤维均匀分散, 均降低了网络刚性, 从而降低硬度有关。

相关性分析发现香菇 24 个指标之间具有较强相关性, 进一步 PCA 表明, 前 3 个主成分的累计方差贡献率为 93.223%, 较好地反映了不同品种香菇品质的综合信息, 并建立综合评价函数 F=0.734F_1+0.202F_2+0.064F_3, 综合评价结果显示, 从高到低的排序为 Q2>X2>F6。为保证研究的可靠性, 本研究将 3 个品种进行同配方同批次栽培, 排除生长条件及栽培技术等因素影响, 能较准确地反映不同种质间的差异性, 为后续香菇的加工利用提供理论依据。

4 结　论

本研究针对目前河南产区广泛栽培的 3 个生产型短菌龄香菇品种开展营养成分和质构特性分析。3 个品种的鲜香菇均含有丰富的营养成分, 例如粗多糖、蛋白质、10 种主要矿物质元素、16 种氨基酸等。香菇 X2 的粗多糖含量最高, 达到 31.70%; 香菇 Q2 蛋白质含量为 24.07%, 比香菇 F6、X2 分别高 18.54%、16.86%; 香菇 Q2 的粗纤维含量是香菇 F6、X2 的 1.62、1.65 倍; 香菇 F6 子实体硬度大且弹性高, 质构更适合鲜切, 3 个香菇品种可为不同加工用途提供候选原料。矿物质元素评价方面, 3 个香菇品种的钾元素含量最高, 磷元素次之, 锌铜比均在 6 以上; 香菇 Q2 中钾、磷含量分别高达 20487.80 mg/kg、6764.23 mg/kg, 香菇 Q2、X2 的钙含量分别是 F6 的 1.81、1.49 倍。氨基酸分析结果表明, 3 个香菇品种 TAA 含量为 142.11~172.36 mg/g, 最高含量为谷氨酸, 符合 FAO/WHO 所推荐的理想蛋白质指标, 属于高质量蛋白质; 通过比较氨基酸评分, 第一限制氨基酸是蛋氨酸, 且氨基酸营养平衡性一般。通过相关性和 PCA 构建的综合评价函数表明, 香菇 Q2 综合品质最佳。本研究不仅为工厂生产选择适宜品种提供了科学依据, 同时也为产业加工产品提供数据支撑。但本研究仅考察了 3 个生产型短菌龄香菇品种, 后续可通过拓展采样区域, 纳入更多香菇品种, 增加样本量, 进一步更新调整模型, 以形成更加全面准确的评价。

参考文献

[1] 王梓杭, 范秀芝, 姚芬, 等. 不同纹理香菇内在品质分析及评价[J]. 食品安全质量检测学报, 2023, 14(1): 130–137.
WANG ZH, FAN XZ, YAO F, *et al*. Analysis and evaluation of the internal quality of *Lentinula edodes* with different cap cracks [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2023, 14(1): 130–137.

[2] 董浩然, 陆欢, 姜宁, 等. GC-IMS 分析不同菌龄香菇挥发性有机物的差异[J]. 菌物学报, 2023, 42(6): 1330–1344.
DONG HR, LU H, JIANG N, *et al*. GC-IMS analyses of volatile organic

compounds in *Lentinula edodes* at different ages [J]. Mycosystema, 2023, 42(6): 1330–1344.

[3] 沈秀芬. 香菇菌龄性状 BSA 定位及 InDel 标记开发研究[D]. 长春: 吉林农业大学, 2021.
SHEN XF. Study on mapping of *Lentinula edodes* vegetative growth rate traits by BSA and development of Indel markers [D]. Changchun: Jilin Agricultural University, 2021.

[4] 曲扬, 章炉军, 于海龙, 等. 不同栽培方式和菌株对香菇 CO_2 释放量的影响[J]. 食用菌学报, 2020, 27(3): 37–44.
QU Y, ZHANG LJ, YU HL, *et al*. CO_2 release from *Lentinula edodes* strains under different cultivation modes [J]. Acta Edulis Fungi, 2020, 27(3): 37–44.

[5] 翟丹丹, 尚怀国, 章炉军, 等. 出菇温度对不同菌龄香菇群体主要农艺性状的影响[J]. 上海农业学报, 2024, 40(1): 1–6.
ZHAI DD, SHANG HG, ZHANG LJ, *et al*. Effects of fruiting temperature on main agronomic traits of *Lentinula edodes* populations of different ages [J]. Acta Agriculturae Shanghai, 2024, 40(1): 1–6.

[6] 肖扬. 几种新型分子标记技术在中国香菇种质资源遗传多样性研究中的应用[D]. 武汉: 华中农业大学, 2009.
XIAO Y. Application of new molecular markers to evaluate the genetic diversity in germplasm of *Lentinula edodes* in China [D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2009.

[7] PANG T, ZHANG H, WEN L, *et al*. Quantitative analysis of a weak correlation between complicated data on the basis of principal component analysis [J]. Journal of Analytical Methods in Chemistry, 2021: 8874827. DOI: 10.1155/2021/8874827

[8] SUN L, LIU Q, BAO 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.

[9] 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 TT, ZHAO XY, LI XB, *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.

[10] 陈万超, 李文, 陈辉, 等. 青海高原栽培羊肚菌营养和氨基酸特征分析及综合评价[J]. 食用菌学报, 2024, 31(2): 64–75.
CHEN WC, LI W, CHEN H, *et al*. Analysis and comprehensive evaluation of nutritional and amino acid characteristics of *Morchella* cultivated in Qinghai Plateau [J]. Acta Edulis Fungi, 2024, 31(2): 64–75.

[11] 李艳艳, 徐鸿雁, 孟清, 等. 不同品种香菇子实体的主成分分析和综合品质评价[J]. 青海大学学报, 2025, 43(1): 62–70.
LI YY, XU HY, MENG Q, *et al*. Principal component analysis and comprehensive quality evaluation of fruiting bodies of different *Lentinula edodes* varieties [J]. Journal of Qinghai University, 2025, 43(1): 62–70.

[12] 刘伟, 张群, 李志坚, 等. 不同品种黄花菜游离氨基酸组成的主成分分析及聚类分析[J]. 食品科学, 2019, 40(10): 243–250.
LIU W, ZHANG Q, LI ZJ, *et al*. Principal component analysis and cluster analysis for evaluating free amino acids of different cultivars of daylily buds [J]. Food Science, 2019, 40(10): 243–250.

[13] PARK GS, SHIN J, HONG S, *et al*. Anticarcinogenic potential of the mushroom polysaccharide lentinan on gastric and colon cancer cells: Antiproliferative, antitumorigenic, Mu-2-related death-inducing gene, MUDENG ramifications [J]. Journal of Industrial and Engineering Chemistry, 2024, 135: 122–130.

[14] 史杰, 李冠龙, 曹雨佳, 等. 玉米浆水解液对金针菇生长和子实体品质的影响[J]. 食品研究与开发, 2025, 46(8): 109–116.
SHI J, LI GL, CAO YJ, *et al*. Effect of corn steep liquor hydrolysates on growth and fruiting body quality of *Flammulina velutipes* [J]. Food Research and Development, 2025, 46(8): 109–116.

[15] 王琦, 张立娟, 王玥玮, 等. 香菇柄营养成分分析及高值化利用研究[J]. 食品研究与开发, 2019, 40(15): 199–203.
WANG Q, ZHANG LJ, WANG YW, *et al*. Nutrient composition analysis and high value utilization of *Lentinus edodes* stalk [J]. Food Research and Development, 2019, 40(15): 199–203.

[16] SARIKURKCU C, SOLAK MH, TARKOWSKI P, *et al*. Minerals, phenolics, and biological activity of wild edible mushroom, *Morchella steppicola* Zerova [J]. Natural Product Research, 2022, 36(23): 6101–6105.

[17] 郭洁, 周晓华, 王炯, 等. 硒营养强化对香菇营养品质影响研究[J]. 食品安全质量检测学报, 2022, 13(23): 7781–7787.
GUO J, ZHOU XH, WANG J, *et al*. Effects of selenium nutrition enhancement on the nutritional quality of *Lentinus edodes* [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2022, 13(23): 7781–7787.

[18] 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 & Machinery, 2014, 30(6): 43–46, 81.

[19] 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): 1077–1089.
DUAN JY, LI ZY, 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): 1077–1089.

[20] 陈艳芳, 鲍大鹏, 陈洪雨, 等. 蛋白质品质评价方法及其在食用菌中的应用进展[J]. 食用菌学报, 2020, 27(3): 92–104.
CHEN YF, BAO DP, CHEN HY, *et al*. Advances in protein quality assessment methods and their applications on edible fungi [J]. Acta Edulis Fungi, 2020, 27(3): 92–104.

[21] 孙国荣, 金琦琦, 周静, 等. 巴氏蘑菇蛋白质与氨基酸特征分析及营养评价[J]. 上海农业学报, 2025, 41(1): 37–42.

SUN GR, JIN QQ, ZHOU J, *et al*. Analysis of protein and amino acid characteristics and nutritional evaluation of *Agaricus blazei* Murrill [J]. Acta Agriculturae Shanghai, 2025, 41(1): 37–42.

[22] 侯娣, 黄卫华, 陈洪雨, 等. 球状香菇菌株的氨基酸特征分析及蛋白质品质评价[J]. 菌物学报, 2021, 40(9): 2412–2422.
HOU D, HUAGN WH, CHEN HY, *et al*. Amino acid profile and protein quality of *Lentinula edodes* with ball-shaped fruiting bodies [J]. Mycosystema, 2021, 40(9): 2412–2422.

[23] 赵哲坤, 吴林凤, 罗晓恒, 等. 用于鲜切加工的香菇营养品质和质构特性研究[J]. 食药用菌, 2022, 30(3): 221–225.
ZHAO ZK, WU LF, LUO XH, *et al*. Study on nutritional quality and texture characteristics of *Lentinula edodes* used for fresh cutting processing [J]. Edible and Medicinal Mushrooms, 2022, 30(3): 221–225.

[24] 孙波, 赵会长, 周洪英, 等. 香菇工厂化生产研究进展[J]. 北方园艺, 2024(18): 122–128.
SUN B, ZHAO HZ, ZHOU HY, *et al*. Research progress on factory cultivation of *Lentinula edodes* [J]. Northern Horticulture, 2024(18): 122–128.

[25] 李巧珍, 姜宁, 李正鹏, 等. 香菇营养品质评价体系的构建[J]. 核农学报, 2021, 35(4): 881–890.
LI QZ, JIANG N, LI ZP, *et al*. Establishment of the nutritional quality evaluation system for *Lentinula edodes* [J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 2021, 35(4): 881–890.

[26] 孙恬, 姚松君, 刘凤松, 等. 我国四大产区香菇的营养成分比较[J]. 现代食品科技, 2021, 37(12): 97–103, 293.
SUN T, YAO SJ, LIU FS, *et al*. A comparative study on nutritional compositions of *Lentinula edodes* in four main producing regions in China [J]. Modern Food Science and Technology, 2021, 37(12): 97–103, 293.

[27] YU Q, GUO M, ZHANG B, *et al*. Analysis of nutritional composition in 23 kinds of edible fungi [J]. Journal of Food Quality, 2020, 2020: 8821315.

[28] 李治平, 刘娟汝, 陈艳, 等. 不同产地香菇氨基酸组成及营养价值评价[J]. 保鲜与加工, 2020, 20(3): 167–172.
LI ZP, LIU JR, CHEN Y, *et al*. Amino acid composition and nutritional value evaluation of *Lentinus edodes* from different habitats [J]. Storage and Process, 2020, 20(3): 167–172.

[29] 熊碧, 许文远, 杨清清, 等. 13 种常见食用菌的氨基酸组成特征及营养评价[J]. 农产品质量与安全, 2023(3): 15–21.
XIONG B, XU WY, YANG QQ, *et al*. Amino acid composition characteristics and nutritional evaluation of 13 common edible mushrooms [J]. Quality and Safety of Agro-products, 2023(3): 15–21.

[30] ADAY MS. Application of electrolyzed water for improving postharvest quality of mushroom [J]. LWT-Food Science and Technology, 2016, 68: 44–51.

[31] TANAKA F, HAYAKAWA F, TATSUKI M. Flavor and texture characteristics of ‘Fuji’ and related apple (*Malus domestica* L.) cultivars, focusing on the rich watercore [J]. Molecules, 2020, 25(5): 1114.

(责任编辑: 安香玉　曹岱琳)