不同成熟度香菇鲜味物质的比较分析

刘 芹[1]，崔 筱[1]，孔维丽[*1]，师子文[2]，吴 杰[2]，宋志波[1]，胡素娟[1]，张玉亭[1]
（1. 河南省农业科学院 植物营养与资源环境研究所，河南 郑州 450002；2. 河南农业大学 生命科学学院，河南 郑州 450002）

摘要：为了确定新鲜香菇子实体的最佳采收期，对不同成熟度香菇子实体中的鲜味物质（氨基酸和5’-核苷酸）进行了检测，并采用主成分分析和层次聚类分析的方法对数据进行了统计分析。结果表明，成熟度对新鲜香菇子实体中的氨基酸和5’-核苷酸有显著影响，不同成熟度香菇样本间存在显著差异。主成分分析（PCA）结合氨基酸和5’-核苷酸数据能够对不同成熟度的香菇样本进行清晰的区分，聚类分析（欧氏距离为4.0）得到的结果与主成分分析结果一致。新鲜香菇子实体氨基酸和5’-核苷酸质量分数、等效鲜味浓度（EUC）、感官评价和综合评价得分在菇蕾（T1）时期达到峰值，常规采摘期即六成熟（T4）和八成熟（T5）时期居中。在本实验条件下，综合考虑，保证香菇的外观形态、经济效益、EUC、感官评价和综合评价得分均在较高水平的最佳采收时间为T4时期。本研究可为高品质香菇及其他类似农产品最佳采收期的确定提供参考。

关键词：香菇；成熟度；鲜味；主成分分析；综合评价
中图分类号：S646.12　**文章编号：**1673-1689(2023)04-0094-09　**DOI：**10.3969/j.issn. 1673-1689.2023.04.011

Comparative Analysis of Taste Component in Shiitake Mushroom (*Lentinula edodes*) Harvested at Different Stages of Maturity

LIU Qin[1]，*CUI Xiao*[1]，*KONG Weili*[*1]，*SHI Ziwen*[2]，*WU Jie*[2]，*SONG Zhibo*[1]，*HU Sujuan*[1]，*ZHAGN Yuting*[1]
(1. Institute of Plant Nutrition, Agricultural Resources and Environmental Science, Henan Academy of Agricultural Sciences, Zhengzhou 450002, China; 2. College of Life Sciences, Henan Agricultural University, Zhengzhou 450002, China)

Abstract: In order to determine the optimal picking time of fresh Shiitake mushroom, the taste components (free amino acid and 5’-nucleotide) in fresh fruiting bodies of Shiitake mushrooms harvested at different growth stages were studied, and the data were statistically analyzed by principal component analysis and cluster analysis. Results indicated that the levels of free amino acids and 5’-nucleotides in Shiitake mushroom harvested at different stages of maturity varied, and significant differences existed among all samples based on maturity. Principal component analysis (PCA) combined with amino acid and 5’-nucleotide data could clearly discriminate samples from different maturity, with results obtained from hierarchical cluster analysis (the euclidean distance of 4.0) being

收稿日期：2021-12-25
基金项目：河南省重点研发与推广专项（科技攻关）（212102110133）；河南省重大公益专项（201300110700）；河南省农业生态环境重点实验室开放课题（Zhs202103）。
作者简介：刘 芹（1986—），女，副研究员，主要从事食用菌育种研究。E-mail：liuqin_bio@hotmail.com
***通信作者：**孔维丽（1976—），女，研究员，主要从事食用菌育种研究。E-mail：kongweili2005@126.com

in agreement with those of PCA. The contents of amino acids and 5'-nucleotides in fresh Shiitake mushroom fruiting bodies, the equivalent umami concentration (EUC), the sensory evaluation and the comprehensive evaluation scores reached the peak at the bud stage (T1). And the conventional picking periods, i.e., six degree of maturity (T4) and eight degree of maturity (T5), were at the middle stage. The optimal picking time to ensure the appearance, economic efficiency, EUC value, sensory quality and comprehensive evaluation score of Shiitake mushrooms remained at a relatively high level and under our experimental conditions, was determined to be T4. The results could serve as a theoretical foundation for determining the optimal harvest period for Shiitake mushrooms and other similar agricultural products with high quality.

Keywords: Shiitake mushroom, maturity, umami taste, principal component analysis, comprehensive evaluation

香菇是我国产量最大的食用菌品种，2019 年全国产量 1 115.94 万吨，占食用菌总产量的 28.37%[1-2]。香菇因其独特的香气、鲜美的味道、丰富的营养（如维生素、蛋白质、矿物质、氨基酸等）而受到消费者的青睐[3]。此外，香菇还具有显著的药用价值，如刺激干扰素的产生，预防动脉粥样硬化，降低血压，以及具有抗病毒和抗癌活性[4]。

鲜味是食用菌主要特征之一，对消费者有着重要的影响，一直是科研人员关注的重点[3]。食用菌中的鲜味来自与谷氨酸钠（MSG）相似的氨基酸，特别是天冬氨酸（Asp）和谷氨酸（Glu）。这种独特的味道还来自呈味 5'-核苷酸，如 5'-鸟苷酸（5'-GMP）、5'-肌苷酸（5'-IMP）和 5'-黄苷酸（5'-XMP）等[5-6]。食用菌中所含有的可溶性糖和多元醇会产生甜味，有机酸会产生酸味和涩味，但不会产生典型的蘑菇味道[7]。此外，食用菌的鲜味还受食用菌的种类、成熟度、等级、部位和加工等多种因素影响[5,8]。

近年来对香菇所含有鲜味成分的研究很多，但主要集中于香菇干子实体[7,9]，对香菇生长发育过程中新鲜子实体鲜味变化的研究尚缺乏。随着交通和储运设施的发展，鲜食香菇所占的比重也越来越大。因此，作者主要目的是研究香菇发育过程中新鲜子实体鲜味物质（氨基酸和 5'-核苷酸）的变化，研究结果可为确定优质新鲜香菇的最佳采收期提供参考。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

选取河南省农业科学院植物营养与农业资源与环境科学研究所选育的香菇品种——豫香 1 号（（2018）第 2018001 号，河南省种子管理站认定品种）为研究对象。栽培地点为河南省新乡市原阳县河南现代农业开发示范基地，采用常规配方（质量分数 79%木屑，20%麸皮，1%石膏）。

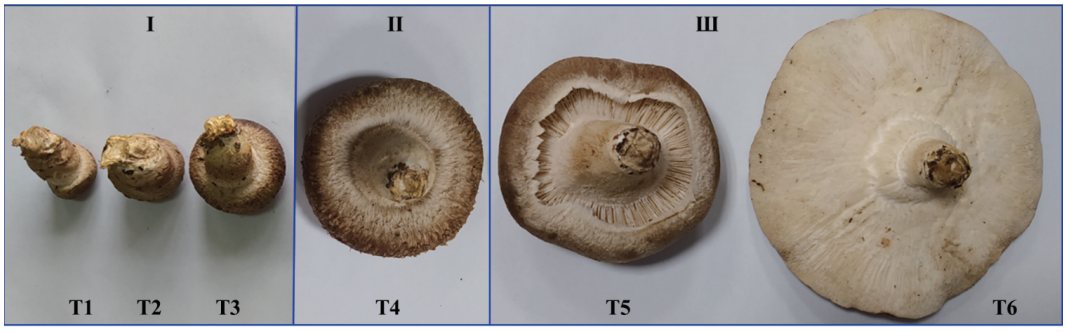
氨基酸（天冬氨酸、谷氨酸、苏氨酸、丝氨酸、脯氨酸、甘氨酸、精氨酸、丙氨酸、缬氨酸、蛋氨酸、异亮氨酸、亮氨酸、酪氨酸、甘氨酸、苯丙氨酸、组氨酸、色氨酸）和 5'-核苷酸（5'-胞苷酸、5'-尿苷酸、5'-鸟苷酸、5'-肌苷酸、5'-黄苷酸）标准品：购自 Sigma 公司；色谱级甲醇：购自美国 Dikma 公司；其他试剂：购自国药集团化学试剂有限公司。

高速冷冻离心机：德国 Eppendorf 公司产品；KQ-数控超声波清洗器：昆山市超声仪器有限公司产品；P393 九阳破壁机：九阳股份有限公司产品；L8900 氨基酸自动分析仪：日本 Hitachi 公司产品；Waters 600 高效液相色谱仪：沃特斯中国有限公司产品。

1.2 实验方法

1.2.1 香菇子实体栽培、样品采集及预处理 该样本于 2020 年进行，栽培方法参照春栽香菇栽培技术[10]。在子实体发育的 6 个时间点采摘大小一致、无机械损伤、无病虫害的香菇（见图 1），采收后的子实体样品用保鲜袋分装，再放入加有冰块的泡沫纸箱中，运回实验室后置于-80 ℃冰箱保存备用。

1.2.2 氨基酸测定 称取香菇样品 1.0 g，剪碎后研磨成浆，加入 10 mL 的 100 mmol/L 盐酸中，在 25 ℃超声提取 30 min。5 000 *g* 离心 10 min 后，取 5.0 mL 上清液与 5 mL 磺基水杨酸（质量分数 5.0%）混合，25 ℃黑暗静置 30 min。5 000 *g* 离心 10 min，收集上清液并采用微孔过滤膜（0.22 μm）过滤。滤液采用 L8900 氨基酸自动分析仪进行测定和分析。采样前



香菇子实体分为 6 个成熟度:T1,圆柱形,菇蕾;T2,大头钉形,幼菇;T3,内膜完整(紧密),幼菇;T4,内膜完整(拉伸),六成熟;T5,内膜破裂,八成熟;T6,菌褶完全暴露,十成熟。I:香菇子实体生长初期;II:香菇子实体生长成熟期;Ⅲ:香菇子实体生长成熟期(菌盖开伞)。

图 1　不同成熟度的香菇新鲜子实体

Fig. 1　Fruiting bodies of fresh Shiitake mushrooms harvested at different developmental stages

对氨基酸混合标准品进行分析,通过对比样品的氨基酸峰谱和标准氨基酸谱,对样品中的氨基酸进行鉴定和定量。结果用每千克鲜重所含氨基酸的克数(g/kg)表示。每份样品重复检测 3 次,测定结果取平均值[3]。

1.2.3　核苷酸测定　称取香菇样品 10.0 g,剪碎后研磨成浆,加入 50 mL 蒸馏水,沸水浴 10 min。4 000 *g* 离心 10 min。在样品残渣中加 50 mL 蒸馏水,重复上述操作,将两次上清液混合并用蒸馏水定容至 100 mL。上清液采用微孔滤膜(0.45 μm)过滤,滤液采用装备有 LiChrospher RP-18 色谱柱 (250 mm×4.6 mm,5 μm)的高效液相色谱仪进行分析。色谱条件:进样量 10 μL,柱温 30 ℃,流动相 0.05 mol/L 磷酸二氢钾溶液,紫外检测波长为 260 nm。采样前对 5'-核苷酸混合标准品进行分析,通过对比样品的 5'-核苷酸峰谱和标准 5'-核苷酸谱,对样品中的 5'-核苷酸进行鉴定和定量。每份样品重复检测 3 次,测定结果取平均值。

1.2.4　等效鲜味浓度(EUC)　等效鲜味浓度(EUC)表示与鲜味氨基酸和鲜味 5'-核苷酸协同产生的鲜味强度相当的味精(monosodium glutamate,MSG)数量[3],计算公式如下:

$$Y=\sum a_i b_i+1\ 218\left(\sum a_i b_i\right)\left(\sum a_j b_j\right) \quad (1)$$

式中:Y 为混合物的 EUC 值;a_i 鲜味氨基酸(Asp 或 Glu)的质量分数,%;a_j 表示鲜味 5'-核苷酸(5'-AMP、5'-GMP、5'-IMP 或 5'-XMP)的质量分数,%;b_i 表示与味精相比,各鲜味氨基酸的相对鲜味浓度(Asp,0.077;Glu,1),b_j 表示与 5'-IMP 相比,各鲜味 5'-核苷酸相对鲜味浓度(5'-IMP,1.0;5'-GMP,2.3;5'-XMP,0.61;5'-AMP,0.18);1 218 是基于所使用质量分数的协同常数。

1.2.5　感觉评价　感官评价小组由 6 男 6 女组成,年龄在 24~30 岁,以香菇的鲜味强度作为评价指标。在感官评价之前用不同质量浓度(0.08、0.12、0.17、0.24、0.34、0.49、0.70、1.00 g/L)的谷氨酸钠溶液对评价员进行鲜味强度的培训。所有成员的感官测试在特定的实验室中进行,香菇进行切片处理(厚约 0.2 mm),评价人员品尝香菇片并记录所尝到的鲜味强度和味觉感官属性。评分采用 10 分制,味觉强度很弱:2~<4,弱:4~<6,中等:6~<8,强:8~<10,非常强。当感官人员评价完一个样品后,用纯净水漱口再品评下一个样品[11]。

1.2.6　综合评价　采用 SPSS 22.0 分析软件,对不同成熟度新鲜香菇子实体中氨基酸和 5'-核苷酸数据进行主成分分析 (principal component analysis,PCA),提取特征值大于 1.00 的因子作为主成分,得到原始数据相关矩阵的特征值、方差贡献率、累计方差贡献率、成分矩阵、成分得分系数矩阵等,根据所得信息对不同发育期香菇子实体进行综合评价,以每个主成分所对应特征值的方差贡献率 β_i (i=1,2,3,…,k)为权数,由各主成分得分 F_i 与对应的权重相乘得综合评价模型[12]:

$$F=\beta_1 F_1+\beta_2 F_2+\cdots+\beta_k F_k \quad (3)$$

1.3　数据分析

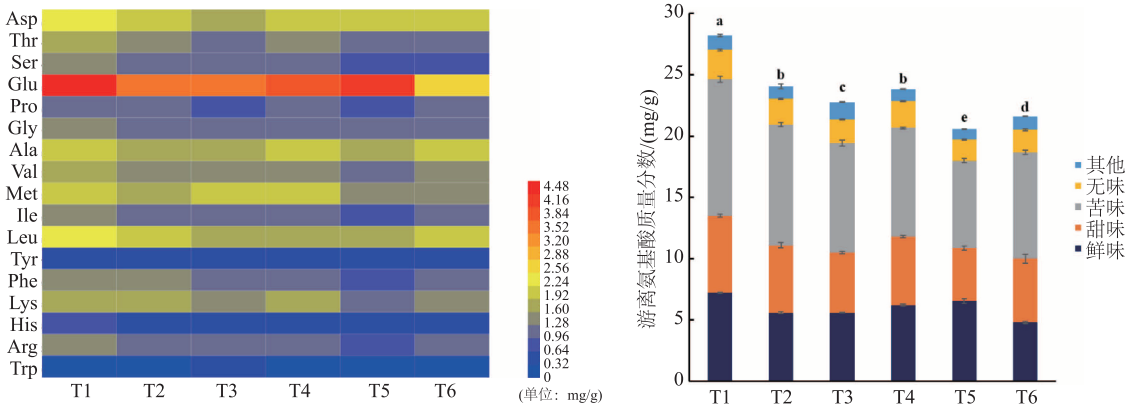
采用 Excel 2016、IBM SPSS 22.0 和 R 语言对实验数据进行整理和分析,采用 Duncan's post-hoc tests 进行显著性分析,P<0.05 为差异显著,P<0.01 为差异极显著。

2 结果与分析

2.1 不同成熟度香菇中游离氨基酸质量分数

游离氨基酸是构成香菇鲜味的重要成分，在加工过程中可与糖等物质发生反应，形成甜香、焦糖香等特殊的香味[13]。6 个不同成熟度的香菇新鲜子实体中氨基酸质量分数如图 2(a)所示，结果显示共检测出 17 种游离氨基酸，其中 Glu、Asp、Ala 和 Leu 为主要成分，其质量分数超过 1.60 mg/g。这一结果与前期研究结果类似[3]，色氨酸质量分数最低或没有检测到。游离氨基酸总质量分数为 20.57~28.22 mg/g，结果与文献[7]的研究结果接近，其测定的申香 16 菌盖氨基酸质量分数水平为 22.0~27.7 g/kg。其中 T1 时期采收的新鲜子实体中氨基酸质量分数最高（28.22 g/kg），T2（24.05 g/kg）时期次之，T4（23.83 g/kg）和 T3（22.77 g/kg）不同成熟期居中，T6（21.60 g/kg）和 T5（20.57 g/kg）时期采收的子实体中游离氨基酸质量分数最低。不同成熟度的香菇新鲜子实体必需氨基酸（essential amino acid，EAA）与非必需氨基酸（non-essential amino acid，NEAA）比值（EAA/NEAA）分别为 79.52%、85.71%、85.57%、76.91%、65.60%和 81.51%；必需氨基酸在氨基酸总量中的占比分别为 44.29%、46.15%、46.11%、43.47%、39.61%和44.91%，基本都超过理想蛋白质标准[14]。

游离氨基酸根据其呈味特征可分为 4 个类别：甜味（Ala、Thr、Ser 和 Gly）、鲜味（Glu 和 Asp，MSG-like）、苦味（Arg、His、Val、Phe、Met、Ile 和 Leu）和无味（Lys 和 Tyr）氨基酸[15]。食材的风味口感与其含有的呈味氨基酸的含量和比例密切相关，甜味和 MSG-like 的氨基酸是食用菌味道鲜美的原因之一[16]。如图 2(b)所示，6 个不同成熟度的香菇新鲜子实体中 MSG-like 氨基酸总质量分数为 4.80~7.20 mg/g，高于申香 16 中 MSG-like 氨基酸总质量分数（1.56~4.65 mg/g）[7]。根据 Yang 等的描述，MSG-like 组分含量可分为 3 个级别：低（<5 mg/g）、中（5~20 mg/g）和高（> 20 g/kg）[17]。因此，本研究中不同成熟度的香菇新鲜子实体中 MSG-like 组分质量分数级别为低和中。MSG-like 氨基酸总质量分数随成熟度的增加呈下降-上升-下降的趋势，T1（7.20 mg/g）和 T5（6.53 mg/g）时期质量分数最高，该结果与李晓贝在对发育过程中的杏鲍菇子实体中 MSG-like 氨基酸总质量分数的变化趋势相似[18]。甜味氨基酸总质量分数（4.33~6.30 mg/g）与 MSG-like 氨基酸总质量分数类似，但均低于苦味氨基酸总质量分数（7.13~11.14 mg/g）。虽然在不同成熟度的香菇新鲜子实体中均检测到较高质量分数的苦味氨基酸，但在实际食用过程中却没有感受到苦味，这可能因为苦味被香菇子实体中所含有的甜味成分（可溶性糖和游离氨基酸）所掩盖[6]。



(a) 游离氨基酸质量分数　　(b) 分类

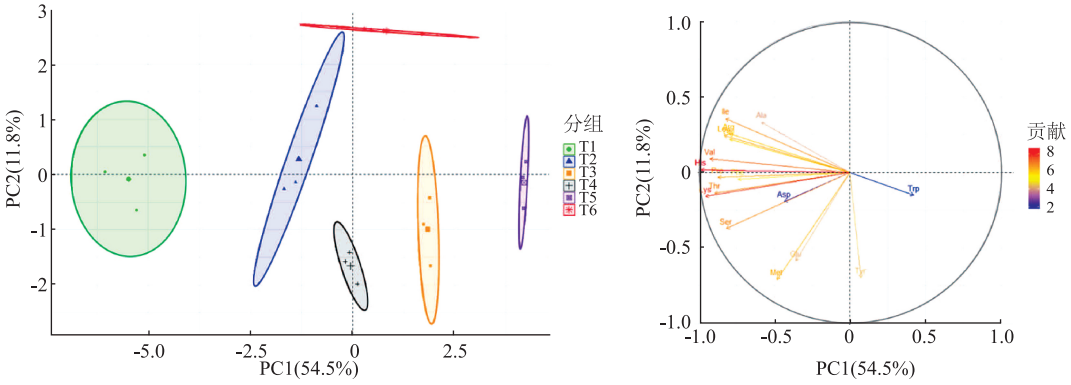
MSG-like 氨基酸（Glu + Asp），甜味氨基酸（Ser + Thr + Ala + Gly），苦味氨基酸（Arg + His + Ile + Leu + Met + Phe + Val），无味氨基酸（Lys + Tyr），其他氨基酸（Pro + Trp）。柱上不同字母表示差异显著（$P < 0.05$）。

图 2　不同成熟度香菇新鲜子实体中游离氨基酸质量分数和分类

Fig. 2　Contents and types of free amino acid in fresh fruiting bodies of Shiitake mushrooms harvested at different stages of maturity

2.2 不同成熟度香菇中游离氨基酸的主成分分析

PCA 是一种用于解释样本之间的差异,并从主要影响样本空间分布的变量中提取信息的统计方法[19]。该分析可以在保留原始数据的大部分信息的同时降低数据矩阵的维数,并解释对象之间的关系和变量之间的关联结构[20]。因此,对检测得到的氨基酸数据进行 PCA 以评估成熟度对香菇子实体样本分组的影响。图 3 为主成分 1 (PC1) 和主成分 2 (PC2)在二维 PC 空间的得分图(见图 3(a))和载荷图 (见图 3 (b)),这两个成分累计解释总方差的 66.3%,其中 PC1 占54.5%,PC2 占 11.8%[19]。从图 3 (a)可以看出,不同成熟度香菇子实体样本展现了良好的区分度,且数据点均位于 95%置信区间内。T1 和 T2 样本位于 PC1 的左侧;T3 样本位于第四象限;T4 样本位于 PC2 的负方向上;T5 样本位于 PC1 的正方向上;T6 样本位于第一象限。图 3(b)为不同成熟度香菇样本的载荷图,通过分析可以解释在得分图中,哪些氨基酸对样本的分布和分组具有较大的贡献[16]。T1 和T2 样本中的 His、Lys、Val、Pro、Thr 等氨基酸含量均较高,对其分布具有较大的贡献;T4 样本中 Glu、Met、Tyr 含量较高,对其分布具有较大的影响;Trp 对 T3 和 T5 样本的区分具有较大的贡献;Ala、Ile 对区分 T6 与其他样本起较大的作用,说明正是这些氨基酸含量不同造成不同成熟度香菇新鲜子实体样本之间的差异。



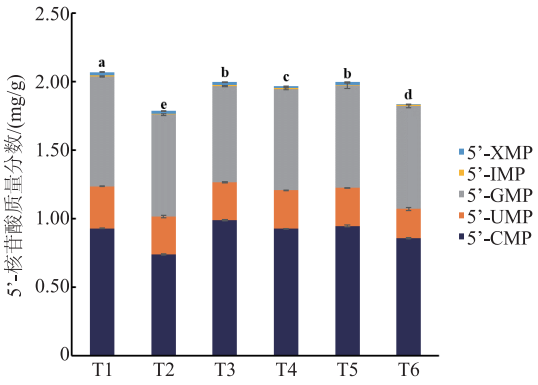
(a) 得分图　　(b) 载荷图

图 3　基于氨基酸数据的不同成熟度香菇子实体样本主成分分析

Fig. 3　PCA of free amino acid data in fresh fruiting bodies of Shiitake mushrooms harvested at different stages of maturity

2.3 不同成熟度香菇中 5'-核苷酸质量分数

5'-核苷酸通过与 MSG-like 氨基酸的协同作用,对食用菌鲜味特性的贡献远大于 MSG-like 氨基酸[21]。在 6 个成熟阶段香菇新鲜子实体中检测到 5 种 5'-核苷酸,分别为 5'-CMP、5'-UMP、5'-GMP、5'-IMP、5'-XMP(见图 4)。与文献[13]的结果相比,多了 5'-CMP 和 5'-XMP,这可能是由于香菇品种差异造成的。在本研究中,香菇新鲜子实体中 5 种 5'-核苷酸质量分数均随成熟度不同而不同。其中,5'-CMP(0.74~0.99 mg/g)和 5'-GMP(0.67~0.80 mg/g)质量分数在香菇子实体整个生长阶段基本一致,且均高于其他 5'-核苷酸。5'-GMP 是一种鲜味增强剂,赋予食用菌肉味,可以产生比味精更强烈的鲜味[8]。5'-IMP(0.005 0~0.009 0 mg/g)和5'-XMP (0.005 0~0.023 mg/g)在香菇各成熟阶段均极低;因



柱上不同字母表示差异显著(P<0.05)。

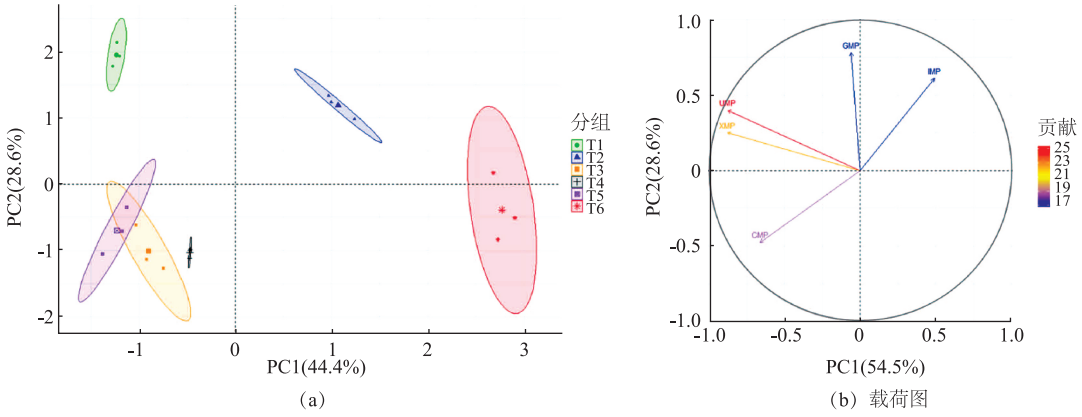
图 4　不同成熟度香菇新鲜子实体中 5'-核苷酸质量分数

Fig. 4　Contents of 5'-nucleotide in fresh fruiting bodies of Shiitake mushrooms harvested at different stages of maturity

此，它们对鲜味的贡献远远小于 5’-GMP。在这些 5’-核苷酸中，5’-AMP、5’-GMP、5’-IMP、5’-XMP 被认为是鲜味 5’-核苷酸[22]。6 个成熟阶段香菇新鲜子实体中鲜味氨基酸总质量分数分别为 0.83、0.77、0.73、0.76、0.77、0.76 mg/g，约占各阶段 5’-核苷酸总质量分数(1.79~2.09 mg/g)的 50%。鲜味 5’-核苷酸总质量分数在 T1 时期达到峰值，其后基本保持在较稳定的水平。依据质量分数不同，鲜味 5’-核苷酸可分为 3 个级别：低(<1 mg/g)，中(1~5 mg/g)和高(>5 mg/g)[8]。因此，本研究中香菇新鲜子实体中的鲜味 5’-核苷酸含量级别为低。

2.4　不同成熟度香菇中 5’-核苷酸的主成分分析

由图 5(a)可知，不同成熟度香菇子实体的 5’-核苷酸数据点分别集中于图的不同区域，区分效果较好，且均位于 95%置信区间内。主成分 PC1 和PC2 分别占总方差的 44.4%和 28.6%，这两个主成分的累积贡献率为 73.0%，说明它们足以解释数据集的总方差[19]。T1 样本位于第二象限，T2 样本位于第一象限，T3、T4、T5 样本位于第三象限，其距离较近，说明其含有的核苷酸成分组成和含量相近；T6 样本除一个数据点位于第一象限外，主要位于第四象限。由图 5(b)可知，T1 样本中 5’-GMP、5’-UMP、5’-XMP 含量较高，对区分 T1 样本与其他样本贡献较大。5’-CMP 与 PC1 和 PC2 均负相关，其对 T3、T4、T5 样本的区分具有很大的贡献。5’-IMP 在 PC1 和 PC2 正方向上的得分较高，其对 T2 样本的分布有很大的贡献。综上可知，游离氨基酸和 5’-核苷酸均可用于不同成熟度香菇子实体的区分，且两者的结果比较一致。



柱上不同字母表示差异显著(P<0.05)。

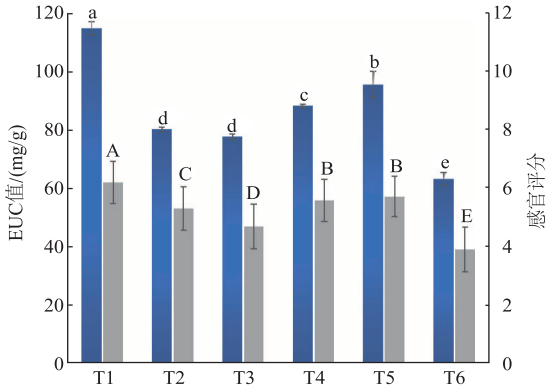
图 5　不同成熟度香菇新鲜子实体中 5’-核苷酸主成分分析

Fig. 5　PCA of 5’-nucleotide in fresh fruiting bodies of Shiitake mushrooms harvested at different stages of maturity

2.5　鲜味强度分析

等效鲜味浓度(EUC)是用来评价氨基酸与 5’-核苷酸协同增强食用菌鲜味的常用指标[21]。较大的 EUC 值表示较强的鲜味[6]。Mau 将 EUC 值分为 4 个级别[8]。因此本研究中不同成熟度香菇新鲜子实体 EUC 值可归为Ⅱ级。该结果明显高于其他香菇菌种，包括 271、台农 1 号和申香 16[7]。如图 6 所示，EUC 值呈先降低后升高再降低的趋势，在所有生长阶段中，T1 时期香菇子实体 EUC 值最高。在实际生产中，香菇常于 T4 和 T5 时期采摘，这两个时期 EUC 值仅次于 T1 时期，分别为 87.68、94.97 mg/g(以鲜质量计)。T6 时期，香菇子实体菌盖完全暴露，子实体过度成熟，EUC 值降低，该结果与文献[7]报道的结果一致。

感官评价可以直观反映消费者对香菇鲜味和味道强度等感觉属性的喜好程度[23]，不同成熟度香菇新鲜子实体鲜味属性的感官评分结果如图 6 所示。T1 时期香菇子实体感官评分最高，为 6.17。T4(5.56)和 T5(5.69)时期香菇子实体感官评分次之，T6 时期最低，为 2.89。EUC 值和感官评价结果都表明 T1 时期采收的香菇新鲜子实体鲜味性最强。



柱上不同字母表示差异显著(P<0.05)。

图 6　不同成熟度香菇新鲜子实体的 EUC 值和感官评分

Fig. 6　EUC value and sensory score of fresh fruiting bodies of Shiitake mushrooms harvested at different stages of maturity

2.6　综合评价

由表 1 可知,前 5 个主成分对应特征值均大于 1,累计方差贡献率为 88.721%,故可选取前 5 个主成分。5 个相互独立的综合性变量,可反映不同成熟度香菇新鲜子实体游离氨基酸和 5'-核苷酸的大部分信息。

表 1　主成分的特征值和贡献率

Table 1　Eigenvalue of the principal components and their contribution and cumulative contribution

主成分	全部特征值	方差贡献率/%	累计方差贡献率/%
1	10.278	46.720	46.720
2	3.933	17.878	64.598
3	2.317	10.530	75.128
4	1.773	8.059	83.187
5	1.218	5.534	88.721

如表 2 所示,数值反映原始变量对因子影响的大小,正负表示影响的方向[12]。变量 Thr、Ser、Pro、Gly、Val、Leu、Ile、Phe、Lys、His、Arg、GMP 在 PC1 上有较高载荷系数,说明其与 PC1 相关性较强;PC2 中 Glu、5'-UMP、5'-XMP 载荷系数较高,贡献大;

表 2　主成分的特征向量与载荷矩阵

Table 2　Principal component eigenvectors and loading matrix

指标	1		2		3		4		5	
	载荷系数	特征向量	载荷系数	特征向量	载荷系数	特征向量	载荷系数	特征向量	载荷系数	特征向量
Asp	0.445	0.043	0.429	0.109	−0.629	−0.271	−0.251	−0.142	0.132	0.109
Thr	0.879	0.085	0.071	0.018	0.031	0.013	0.266	0.150	−0.029	−0.024
Ser	0.816	0.079	0.326	0.083	0.282	0.122	0.027	0.015	−0.150	−0.123
Glu	0.375	0.037	0.835	0.212	−0.212	−0.092	−0.266	−0.150	−0.020	−0.016
Pro	0.872	0.085	−0.029	−0.007	0.115	0.050	0.045	0.025	−0.008	−0.007
Gly	0.783	0.076	−0.170	−0.043	−0.124	−0.053	0.169	0.096	0.367	0.302
Ala	0.559	0.054	−0.372	−0.094	−0.492	−0.213	0.404	0.228	0.264	0.217
Val	0.927	0.090	−0.086	−0.022	0.019	0.008	0.072	0.041	0.082	0.068
Met	0.440	0.043	0.482	0.123	0.356	0.154	0.617	0.348	0.088	0.072
Ile	0.836	0.081	−0.300	−0.076	0.005	0.002	−0.161	−0.091	0.080	0.066
Leu	0.851	0.083	−0.186	−0.047	0.158	0.068	−0.213	−0.120	0.002	0.002
Tyr	−0.107	−0.010	0.467	0.119	−0.115	−0.050	0.691	0.390	−0.216	−0.178
Phe	0.755	0.073	−0.040	−0.010	0.430	0.185	−0.054	−0.031	−0.375	−0.308
Lys	0.946	0.092	0.125	0.032	−0.010	−0.004	0.193	0.109	0.012	0.010
His	0.986	0.096	−0.007	−0.002	−0.046	−0.020	0.071	0.040	0.002	0.001
Arg	0.799	0.078	−0.180	−0.046	0.137	0.059	−0.145	−0.082	0.230	0.189
Trp	−0.436	−0.042	0.137	0.035	0.727	0.314	−0.014	−0.008	0.474	0.389
5'-CMP	−0.285	−0.028	0.606	0.154	0.010	0.004	−0.053	−0.030	0.678	0.557
5'-UMP	0.407	0.040	0.864	0.220	0.078	0.034	−0.096	−0.054	−0.139	−0.114
5'-GMP	0.735	0.071	−0.004	−0.001	−0.485	−0.209	−0.398	−0.224	−0.027	−0.022
5'-IMP	0.508	0.049	−0.591	−0.150	0.536	0.231	−0.249	−0.141	0.057	0.046
5'-XMP	0.131	0.013	0.813	0.207	0.310	0.134	−0.373	−0.210	−0.045	−0.037

PC3 为 Asp、Trp 载荷系数较高;PC4 为 Tyr、Met;CMP 主要代表了 PC5,其载荷分数为 0.678。

经过主成分分析提取 5 个主成分,以每个主成分对应的方差相对贡献率作为权重建立综合评价模型 $F=0.527F_1+0.202F_2+0.119F_3+0.091F_4+0.062F_5$,计算各成熟度香菇新鲜子实体的综合得分,分数高低可反映各样本综合品质的高低。如表 3 所示,不同成熟度香菇子实体的品质差别显著,初始生长阶段的香菇子实体(T1 时期)品质最优,T2 时期次之,成熟且未开伞的香菇子实体风味品质较优(T4),菌盖完全开伞后(T5 和 T6),香菇子实体风味品质较差。但 T1 和 T2 时期采收的香菇子实体较小,不具备市场经济效益。综合考虑,T4 时期采收香菇新鲜子实体经济价值、EUC 值及综合品质均较高且外形美观(菌盖未开伞),因此香菇最佳采收期为 T4 时期。

表 3 不同成熟度香菇新鲜子实体的成分得分和综合评价

Table 3 Principal component scores and comprehensive assessment of fresh fruiting bodies of Shiitake mushrooms harvested at different stages of maturity

	F_1	F_2	F_3	F_4	F_5	F	排名
T1	5.87	1.16	−0.35	−1.00	0.64	3.24	1
T2	1.55	−1.16	0.93	0.13	−1.86	0.59	2
T3	−2.09	1.08	2.75	0.31	0.96	−0.47	4
T4	−0.29	1.32	−1.46	2.36	−0.05	0.15	3
T5	−4.15	1.45	−1.33	−1.70	−0.40	−2.23	6
T6	−0.90	−3.85	−0.55	−0.10	0.71	−1.28	5

2.7 层次聚类分析

采用层次聚类分析方法分析由游离氨基酸和 5'-核苷酸数据组成的融合数据集,并采用 Ward 链接法和欧式距离计算不同成熟度香菇新鲜子实体样本之间的间隔距离,得到的树状图(见图 7)显示了不同成熟度香菇子实体样本之间的关系和分布模式[19]。18 个样本聚为四大类群:A 组由 3 个不同成熟度的样本组成(T2、T3、T4),B、C、D 组分别由 T6、T5、T1 样本组成,成熟度相近的样本在树状图中紧密聚类,但彼此之间有充分的区别。这些分组与综合评价结果保持一致,子实体样本的区分与其成熟度密切相关。

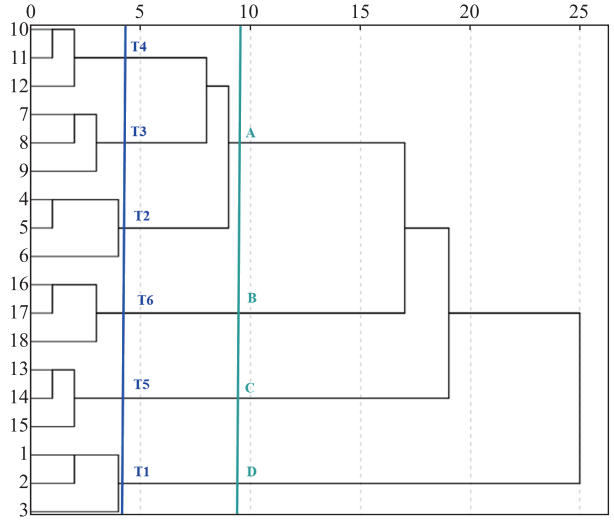


图 7 基于香菇游离氨基酸和 5'-核苷酸数据的聚类分析结果

Fig. 7 Cluster analysis based on the data of free amino acids and 5'-nucleotides of Shiitake mushroom

3 结 语

香菇营养丰富、味道鲜美,且具有较高的食药用价值,深受广大消费者喜爱[9]。对香菇子实体发育过程中 6 个典型成熟阶段采摘的新鲜子实体含有的游离氨基酸和 5'-核苷酸进行检测,并采用主成分分析和聚类分析方法对数据进行了统计分析,共检出 17 种游离氨基酸和 5 种 5'-核苷酸。不同成熟度的香菇新鲜子实体中游离氨基酸和 5'-核苷酸含量具有明显差异,总质量分数分别为 20.57~28.22 mg/g 和 1.79~2.09 mg/g。EUC 值随成熟期增加呈先降低后升高再降低的趋势,T1 时期采收的香菇子实体EUC 值和感官评分均最高(114.02 mg/g 和 6.17),T4(87.68 mg/g 和 5.56)和 T5(94.97 mg/g 和 5.69)时期次之。PCA 结合游离氨基酸和 5'-核苷酸数据可以有效区分不同成熟度的香菇子实体样本,结合融合数据矩阵的层次聚类分析获得了类似的结果。综合评价结果表明,T1 时期采收的香菇子实体综合品质最优,T2 时期次之,T4 时期居中。综合

考虑经济价值、外观形态、EUC 值和综合品质，香菇 最佳采收期为T4 时期。

参考文献：

[1] 李玉，李泰辉，杨祝良，等. 中国大型菌物资源图鉴[M]. 郑州：中原农民出版社，2015：64-66.

[2] 中国食用菌协会.2019 年度全国食用菌统计调查结果分析[EB/OL]. (2020-12-22)[2021-12-15]. https://www.cefa.org.cn/web/index.html.

[3] LIU Q，CUI X，SONG Z B，et al. Coating shiitake mushrooms (*Lentinus edodes*) with a polysaccharide from *Oudemansiella radicata* improves product quality and flavor during postharvest storage[J]. **Food Chemistry**，2021，352：129357.

[4] YE J J，LI J R，HAN X X，et al. Effects of active modified atmosphere packaging on postharvest quality of shiitake mushrooms (*Lentinula edodes*) stored at cold storage[J]. **Journal of Integrative Agriculture**，2012，11：474-482.

[5] SUN L，ZHANG Z，XIN G，et al. Advances in umami taste and aroma of edible mushrooms[J]. **Trends in Food Science & Technology**，2020，96：176-187.

[6] ZHANG Y，VENKITASAMY C，PAN Z，et al. Recent developments on umami ingredients of edible mushrooms[J]. **Trends in Food Science & Technology**，2013，33：78-92.

[7] CHEN W，LI W，YANG Y，et al. Analysis and evaluation of tasty components in the pileus and stipe of *Lentinula edodes* at different growth stages[J]. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**，2015，63：795-801.

[8] MAU J L. The umami taste of edible and medicinal mushrooms[J]. **International Journal of Medicinal Mushrooms**，2005，7：119-125.

[9] 陈万超，李文，吴迪，等.11 个主栽品种香菇可溶性糖和有机酸测定及滋味品质评价[J].食品工业科技，2022,43(7):273-279.

[10] 李玉，康源春. 中国食用菌生产[M]. 郑州：中原农民出版社，2020.

[11] 律诗，代晹鑫，刘野，等. 食用菌鲜味强度评价及鲜味氨基酸和核苷酸提取工艺优化[J]. 食品科学技术学报，2022,40(1):100-108.

[12] 王馨雨，王蓉蓉，王婷，等.不同品种百合内外鳞片游离氨基酸组成的主成分分析及聚类分析[J].食品科学，2020，41：211-220.

[13] LUO D，WW J，MA Z，et al. Production of high sensory quality shiitake mushroom (*Lentinus edodes*) by pulsed air-impingement jet drying(AID) technique[J]. **Food Chemistry**，2021，341：128290.

[14] 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，2020，39：1077-1089.

[15] LIU Q，HU S，SONG Z，et al. Relationship between flavor and energy status in shiitake mushroom(*Lentinula edodes*) harvested at different developmental stages[J]. **Journal of Food Science**，2021，86：4288-4302.

[16] HOU H，LIU C，LU X，et al. Characterization of flavor frame in shiitake mushrooms (*Lentinula edodes*) detected by HS-GC-IMS coupled with electronic tongue and sensory analysis：influence of drying techniques[J]. **LWT–Food Science and Technology**，2021，146：111402.

[17] YANG J H，LIN H C，MAU J L. Non-volatile taste components of several commercial mushrooms[J]. **Food Chemistry**，2001，72：465-471.

[18] 李晓贝. 杏鲍菇品种、栽培工艺及干制方式对其风味物质产生的影响研究[D]. 上海：上海应用技术学院，2014.

[19] DONG W，HU R，LONG Y，et al. Comparative evaluation of the volatile profiles and taste properties of roasted coffee beans as affected by drying method and detected by electronic nose，electronic tongue，and HS-SPME-GC-MS[J]. **Food Chemistry**，2019，272：723-731.

[20] 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，2019，40：243-250.

[21] WANG L Q，HU Q H，PEI F，et al. Influence of different storage conditions on physical and sensory properties of freeze-dried *Agaricus bisporus* slices[J]. **LWT–Food Science and Technology**，2018，97，164-171.

[22] ZHANG Z Y，ZHANG X Y，GUANG X，et al. Umami taste and its association with energy status in harvested *Pleurotus geesteranus* stored at different temperatures[J]. **Food Chemistry**，2019，279：179-186.

[23] LIU Q，KONG W L，HU S J，et al. Effects of Oudemansiella radicata polysaccharide on postharvest quality of oyster mushroom (*Pleurotus ostreatus*) and its antifungal activity against Penicillium digitatum[J]. **Postharvest Biology and Technology**，2021，166：111207.

(责任编辑：许艳超)