

不同成熟度平菇新鲜子实体中风味物质的比较分析

刘芹¹, 崔筱¹, 宋志波¹, 胡素娟¹, 孔维丽¹, 师子文², 吴杰², 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 郑州 450002; 2. 河南农业大学生命科学学院 郑州 450002)

摘要: 为了确定平菇新鲜子实体的最佳采收期, 对不同成熟度平菇子实体中的风味物质进行了检测, 并采用主成分分析和层次聚类分析方法对数据进行统计分析。结果表明, 成熟度对平菇新鲜子实体中的游离氨基酸、5'-核苷酸和挥发性物质有显著影响, 不同成熟度平菇样本间存在显著差异。主成分分析(PCA)能够对不同成熟度的平菇样本进行清晰的区分, 聚类分析(欧氏距离为 2.5)与主成分分析结果一致。平菇新鲜子实体游离氨基酸(34.31 g·kg⁻¹)、醛类(13.30%)和烃类(0.48%)总量以及综合评价得分(3.78)在 T2 时期最高, 5'-核苷酸总量(1.64 g·kg⁻¹)、等效鲜味浓度值(108.75 g MSG·100 g⁻¹鲜质量)和其他类挥发性物质(4.98%)在 T3 时期达到峰值。在本试验条件下, 综合考虑, 保证平菇的外观形态、经济效益、风味质量和综合评价得分均在较高水平的最佳采收时间为 T3 时期。

关键词: 平菇; 成熟度; 鲜味; 挥发性物质; 主成分分析; 综合评价

中图分类号: S646.1⁴ 文献标志码: A 文章编号: 1673-2871(2022)09-038-010

Comparative analysis of flavor component in fresh fruiting body of *Pleurotus ostreatus* harvested at different stages of maturity

LIU Qin¹, CUI Xiao¹, SONG Zhibo¹, HU Sujuan¹, KONG Weili¹, SHI Ziwen², WU Jie², ZHANG Yuting¹

(1. Institute of Plant Nutrition, Agricultural Resources and Environmental Science, Henan Academy of Agricultural Sciences, Zhengzhou 450002, Henan, China; 2. College of Life Sciences, Henan Agricultural University, Zhengzhou 450002, Henan, China)

Abstract: In order to determine the optimum picking time of fresh *Pleurotus ostreatus*, the flavor components in fresh fruiting bodies of *P. ostreatus* 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 acid, 5'-nucleotide and volatile compound in *P. ostreatus* harvested at different stages of maturity varied, and significant differences were shown among all samples based on maturity. Principal component analysis(PCA) could clearly discriminate samples from different maturity, with results obtained from hierarchical cluster analysis (the euclidean distance is 2.5) being in agreement with those of PCA. The total contents of free amino acids (34.31 g·kg⁻¹), aldehydes(13.30%) and hydrocarbons(0.48%) and the comprehensive evaluation score(3.78) of fresh fruiting body peaked at T2. Total 5'-nucleotide content(1.64 g·kg⁻¹), EUC value(108.75 g MSG·100 g⁻¹ fresh weight) and other volatile substances content(4.98%) reached the peak at stage T3. The optimum picking time to ensure the appearance, economic efficiency, flavor quality and comprehensive evaluation score of *P. ostreatus* remained at a relatively high level was determined to be stage T3 in the present experiments.

Key words: *Pleurotus ostreatus*; Maturity; Umami taste; Volatile compound; Principal component analysis; Comprehensive evaluation

平菇 [*Pleurotus ostreatus* (Jacq.) P. Kumm.], 属于真菌界(Fungi)、担子菌门(Basidiomycota)、蘑菇纲(Agaricomycetes)、蘑菇目(Agaricales)、侧耳科(Pleurotaceae)、侧耳属(*Pleurotus*), 是产量位居我国第三位的食用菌栽培种^[1]。据中国食用菌协会统

计, 2020 年河南省平菇产量高达 117.17 万 t, 占全国总产量的 20.86%^[2]。平菇之所以深受消费者青睐, 是因为除了具有丰富的营养(如维生素、蛋白质、矿物质、氨基酸等)和显著的抗病毒、抗氧化、抗肿瘤效果及免疫调节活性外, 还具有独特的风

收稿日期: 2022-04-06; 修回日期: 2022-06-24

基金项目: 河南省重点研发与推广专项(科技攻关)(212102110133); 河南省重大公益性行业专项(201300110700)

作者简介: 刘芹, 女, 副研究员, 主要从事食用菌生理研究。E-mail: liuqin_bio@hotmail.com

通信作者: 孔维丽, 女, 研究员, 主要从事食用菌育种研究。E-mail: kongweili2005@126.com

味^[3-4]。

风味是食品的主要特征之一,主要由挥发性和非挥发性成分构成,极大地影响着消费者的偏好^[5]。鲜味和香气是食用菌最突出的特征,主要由游离氨基酸、5'-核苷酸、挥发性化合物及其他成分产生^[6]。食用菌中的氨基酸尤其是必需氨基酸种类齐全,含量丰富。根据世界卫生组织(WHO)和联合国粮农组织(FAO)于1973年提出的蛋白质营养价值必需氨基酸模式可知,理想蛋白质中必需氨基酸(Essential amino acid, EAA)/非必需氨基酸(non-essential amino acid, NEAA)值应在60%以上,且EAA/(EAA+NEAA)值应达到40%左右。段静怡等^[7]研究发现,4种常见食用菌(金针菇、斑玉蕈、香菇、双孢蘑菇)的EAA/NEAA和EAA/(EAA+NEAA)值均接近WHO、FAO提出的理想蛋白均衡值。游离氨基酸根据呈味特征可分为鲜味、甜味、苦味和无味氨基酸等类型^[8]。甜味氨基酸包括丝氨酸(Ser)、苏氨酸(Thr)、丙氨酸(Ala)和甘氨酸(Gly);鲜味氨基酸包括谷氨酸(Glu)和天冬氨酸(Asp);苦味氨基酸包括精氨酸(Arg)、组氨酸(His)、异亮氨酸(Ile)、亮氨酸(Leu)、蛋氨酸(Met)、苯丙氨酸(Phe)和缬氨酸(Val);无味氨基酸包括赖氨酸(Lys)和酪氨酸(Tyr)^[8]。食用菌的风味口感与含有的呈味氨基酸的含量和比例密切相关,甜味和鲜味氨基酸是食用菌味道鲜美的原因之一^[7]。食用菌中的鲜味来自类味精(MSG-like)氨基酸,特别是Asp和Glu^[5]。这种独特的鲜味还来自呈味5'-核苷酸,如5'-鸟苷酸(5'-GMP)、5'-腺苷酸(5'-AMP)、5'-胞苷酸(5'-CMP)、5'-肌苷酸(5'-XMP)和5'-黄苷酸(5'-XMP)等^[5,9]。5'-AMP可以在有效抑制苦涩的同时赋予食用菌甜度^[8]。5'-GMP是一种鲜味增强剂,可以产生比味精更强烈的鲜味^[5]。等效鲜味浓度(Equivalent umami concentration, EUC)是指由鲜味氨基酸和呈味5'-核苷酸协同作用产生的鲜味强度转化的等价味精浓度,食用菌的鲜味强度常用EUC来评价^[10]。此外,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^[11]。食用菌的香气取决于含有的挥发性风味物质,如八碳化合物、含硫化合物和一些酸、酮、醛、酯类化合物^[12]。八碳化合物是食用菌的主要挥发性成分,由酶(如脂氧合酶和氢过氧化物酶裂解酶)和不饱和脂肪酸(如亚油酸)等经过一系列代谢过程形成^[10]。八碳化合物中的特征物质包括1-辛烯-3-醇(俗称蘑菇醇)、3-辛

醇、3-辛酮、1-辛烯-3-酮等。其中1-辛烯-3-醇属于八碳醇,具有典型蘑菇味,因而又称蘑菇醇,广泛存在于食用菌中^[8]。醛类物质是食用菌中含量比较丰富的一种挥发性化合物,气味阈值低,并且与其他化合物协同作用较强。醛类通常来自脂肪氧化和氨基酸的史崔克降解,具有青草、杏仁、水果或坚果的气味^[8]。酮类物质可贡献花香和果香,且香味持久,主要通过脂质氧化加热生成,其中,具有八碳主链结构的3-辛酮具有典型的蘑菇味^[13]。

研究表明,食用菌的品种类型、栽培方法、部位(菌盖或菌柄)以及成熟阶段对风味成分的产生具有重要影响^[9,14]。目前,对平菇的研究主要集中在栽培技术和生物活性成分方面^[4],而对新鲜子实体在生长发育过程中的风味变化则鲜有报道^[4,15]。笔者主要研究了平菇发育过程中新鲜子实体风味物质(氨基酸、5'-核苷酸和挥发性物质)的变化,其结果可为确定优质新鲜平菇的最佳采收期提供理论依据。

1 材料与方法

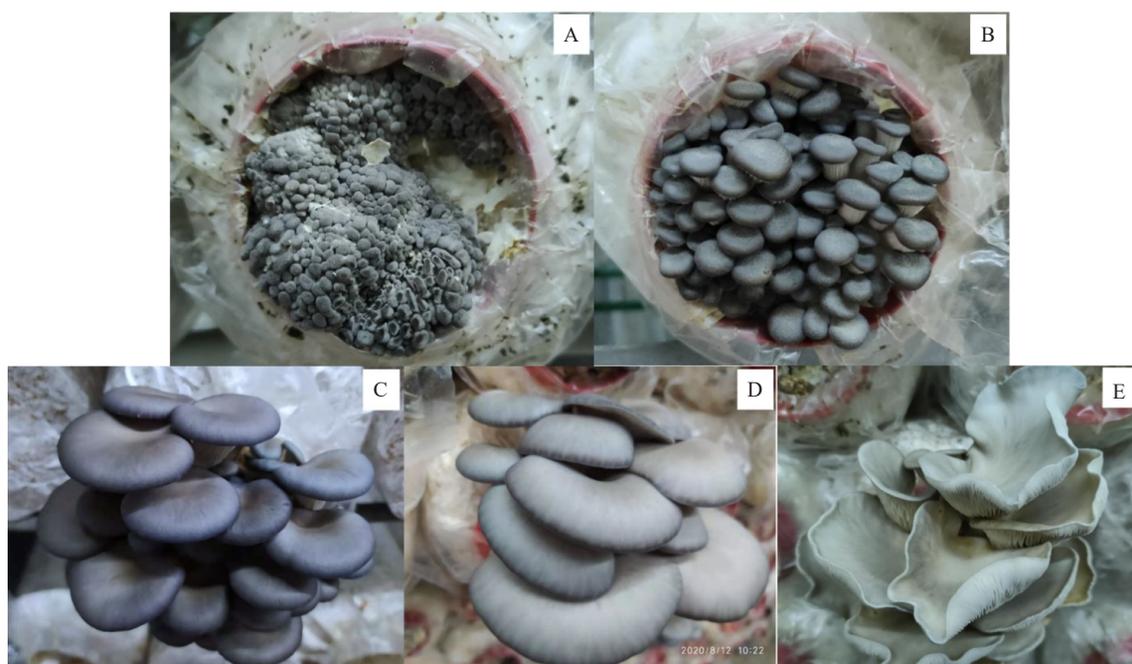
1.1 材料与仪器

氨基酸和5'-核苷酸标准品购自Sigma公司,色谱级甲醇购自美国Dikma公司,其他试剂均购自国药集团化学试剂有限公司。所用到的仪器有高速冷冻离心机(德国Eppendorf公司),AL204型电子天平[Mettler-Toledo仪器(上海)有限公司],KQ-数控超声波清洗器(昆山市超声仪器有限公司),P393九阳破壁机(九阳股份有限公司),L8900氨基酸自动分析(日本Hitachi公司),UltiMate 3000高效液相色谱仪(美国Thermo公司),7890A气质联用仪(美国Agilent公司)。

1.2 试验方法

1.2.1 子实体栽培、样品采集及预处理 平菇菌株黑平17-1,河南省农业科学院植物营养与资源环境研究所选育[(2018)第2018002号,河南省种子管理站认定品种]。栽培试验于2021年2月在河南省农业科学院原阳二基地进行,栽培方法参照Kong等^[16]报道的平菇发酵料栽培技术。根据平菇子实体生长周期,于2021年4月采摘5个典型生长阶段的平菇子实体(图1)。选取大小一致、无机械损伤、无病虫害的子实体样品,采收后用保鲜袋分装,再放入加有冰块的泡沫纸箱,运回实验室后置于-80℃冰箱保存备用。

1.2.2 氨基酸和核苷酸测定 参照Liu等^[10]报道的



注:A.T1,菇蕾期;B.T2,幼菇期;C.T3,五成熟;D.T4,七成熟;E.T5,十成熟。平菇子实体分为3个成熟阶段:T1~T2,子实体生长初期;T3~T4,子实体生长中期;T5,子实体生长成熟期(菌盖边缘上卷)。

图1 不同成熟度的平菇新鲜子实体

游离氨基酸和5'-核苷酸检测方法。

1.2.3 挥发性物质分析 采用顶空固相微萃取气质联用仪对平菇新鲜子实体的挥发性成分进行测定。向10 g平菇新鲜子实体中加入50 mL去离子水,用破壁机打成匀浆。准确称取1.0 g子实体匀浆放入装有5 mL蒸馏水和10 μ L 100 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 1,2-二氯苯的微萃取顶空瓶(Sigma-Aldrich, St Louis, MO, USA)中,55 $^{\circ}\text{C}$ 孵化15 min。应用固相微萃取头45 $^{\circ}\text{C}$ 萃取40 min,富集挥发性化合物,在GC-MS进样口250 $^{\circ}\text{C}$ 解吸附5 min。GC-MS分析在装备有DB-5 ms毛细管柱(30 $\text{m}\times$ 0.25 $\text{m}\times$ 0.25 μm ;J&W Scientific Inc, USA)的Agilent 6890气相色谱/5975 C质谱联用仪上进行。分析条件如下—(1)色谱条件:进样口采用不分流模式;进样口温度250 $^{\circ}\text{C}$,载气(He)流量1 $\text{mL}\cdot\text{min}^{-1}$,柱温初始温度40 $^{\circ}\text{C}$,保持2 min后以1.5 $^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$ 的上升速度调节至130 $^{\circ}\text{C}$,再以4 $^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$ 的上升速度调节至220 $^{\circ}\text{C}$,保持5 min。(2)质谱条件:质量扫描范围为35~300 amu,离子源温度230 $^{\circ}\text{C}$,四极杆温度150 $^{\circ}\text{C}$,传输线温度250 $^{\circ}\text{C}$ 。挥发性物质含量按面积归一化法进行定量分析,各分离组分相对含量/%=(分离组分的峰面积/总峰面积) \times 100。

1.2.4 综合评价 采用SPSS 22.0软件对不同成熟度新鲜平菇子实体中游离氨基酸、5'-核苷酸和挥发性物质进行主成分分析(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平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 $\beta_i(i=1, 2, 3, \dots, k)$ 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: $F=\beta_1F_1+\beta_2F_2+\dots+\beta_kF_k^{[17]}$ 。

1.3 数据分析

所有试验均设置3次重复。采用Excel 2016、IBM SPSS 22.0和R语言软件对实验数据进行整理和分析,采用Duncan法进行显著性分析。

2 结果与分析

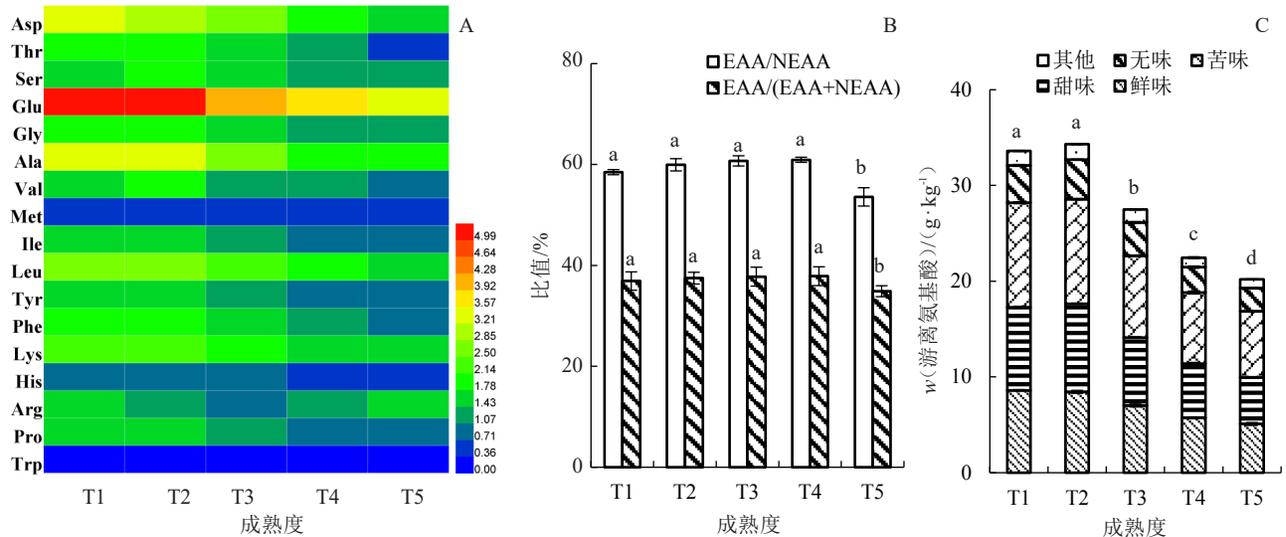
2.1 不同成熟度平菇中游离氨基酸含量

5个不同成熟度的平菇新鲜子实体中氨基酸含量如图2所示。结果显示,共检测出17种游离氨基酸,其中Glu、Asp、Ala、Leu和Lys为主要成分,其含量(w ,后同)超过1.50 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ (图2A)。其中,T2时期采收的新鲜子实体中氨基酸含量最高(34.31 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$),T1(33.61 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)时期次之,T3(27.50 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)和T4(22.46 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)不同成熟期居中,T5(20.20 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)时期采收的子实体中游离氨基酸含量最低。不同成熟度的平菇新鲜子实体EAA/NEAA分别为58.49%、59.94%、60.72%、60.94%和

53.58% ; EAA/(EAA + NEAA) 分别为 36.90%、37.48%、37.78%、37.86%和 34.89%,均接近甚至超过 WHO、FAO 提出的理想蛋白均衡值(图 2-B)。

如图 2-C 所示,5 个不同成熟度的平菇新鲜子实体中鲜味氨基酸总含量为 5.09~7.02 g·kg⁻¹。甜味氨基酸总含量(4.87~9.20 g·kg⁻¹)与鲜味氨基酸

总含量类似,但均低于苦味氨基酸总含量(6.91~10.93 g·kg⁻¹)。虽然在平菇新鲜子实体中检测到较高含量的苦味氨基酸,但在实际食用过程中我们却没有感受到苦味,这可能因为苦味被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。



注:Asp,天冬氨酸;Thr,苏氨酸;Ser,丝氨酸;Glu,谷氨酸;Gly,甘氨酸;Ala,丙氨酸;Val,缬氨酸;Met,蛋氨酸;Ile,异亮氨酸;Leu,亮氨酸;Tyr,酪氨酸;Phe,苯丙氨酸;Lys,赖氨酸;His,组氨酸;Arg,精氨酸;Pro,脯氨酸;Trp,色氨酸。鲜味氨基酸(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)。EAA,必需氨基酸;NEAA,非必需氨基酸。颜色由蓝到红表示各种氨基酸含量由低到高。色卡对应数值表示各种氨基酸的含量,单位为 g·kg⁻¹。不同小写字母表示在 0.05 水平差异显著。下同。

图 2 不同成熟度平菇新鲜子实体中游离氨基酸的含量(A)、占比(B)和分类(C)

采用 PCA 对检测得到的氨基酸数据进行分析以评估成熟度对平菇子实体样品分组的影响。图 3-A 和图 3-B 分别为主成分 1(PC1)和主成分 2(PC2)在二维 PC 空间的得分图和载荷图,PC1 和 PC2 解释总方差的 83.5%和 7.0%,累计解释 90.5%,足以解释数据集的总方差。从图 3-A 可以

看出,不同成熟度平菇子实体样本间区分良好,且数据点均位于 95%置信区间内。T1 样本位于第二象限;T2 样本除一个样本位于第二象限外,其余均位于第三象限;T3 样本主要位于第三象限;T4 样本位于第四象限;T5 样本位于第一象限。图 3-B 为不同成熟度平菇样本的载荷图,通过分析可以解释在

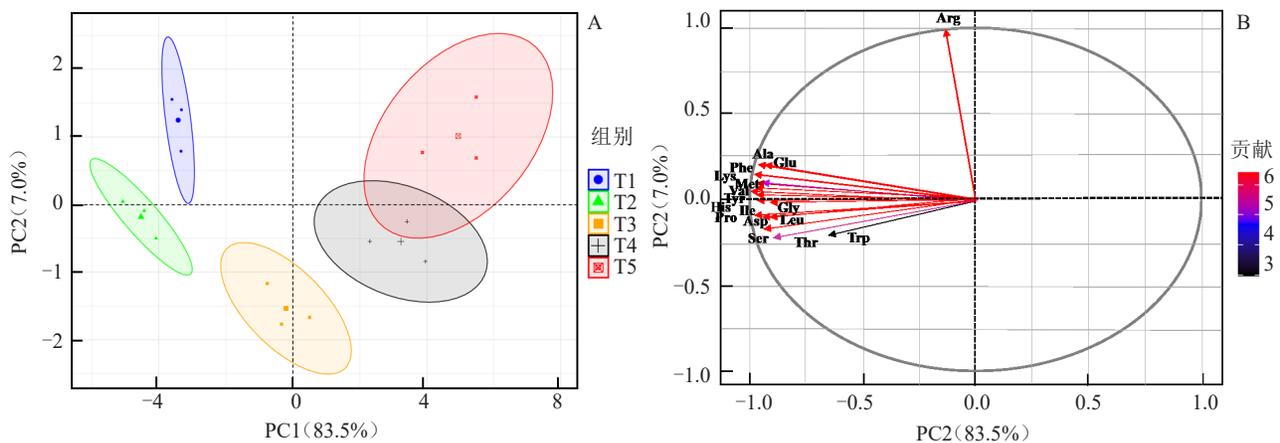
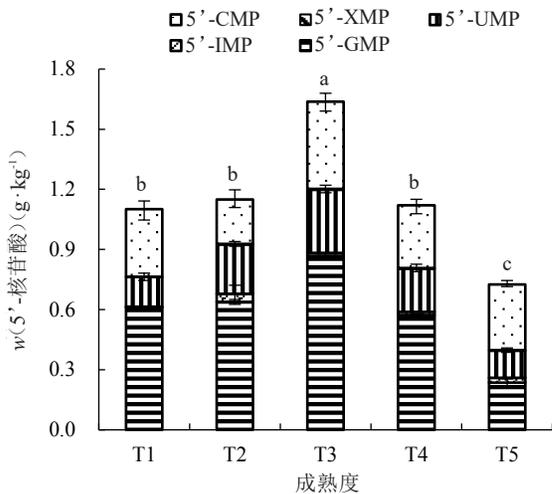


图 3 基于氨基酸数据的不同成熟度平菇新鲜子实体样本主成分分析图(A 为得分图,B 为载荷图)

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。T1和T2样本中的绝大部分氨基酸含量均最高,故分布在PC1的负方向,T1和T5样本中的Arg含量较高,故分布在PC2的正方向,说明正是这些氨基酸含量不同造成不同成熟度平菇新鲜子实体样本之间的差异。

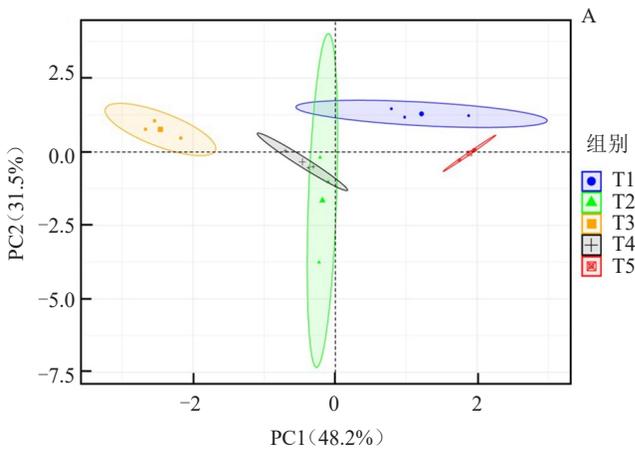
2.2 不同成熟度平菇中5'-核苷酸含量

平菇新鲜子实体中检测到5'-CMP、5'-UMP、5'-GMP、5'-IMP、5'-XMP 5种呈味核苷酸,其含量随平菇生长成熟度不同而不同(图4)。5'-GMP含



注:5'-GMP,5'-鸟苷酸;5'-AMP,5'-腺苷酸;5'-CMP,5'-胞苷酸;5'-XMP,5'-肌苷酸;5'-UMP,5'-黄苷酸。

图4 不同成熟度平菇新鲜子实体中5'-核苷酸含量



量为0.24~0.87 g·kg⁻¹。5'-CMP含量为0.22~0.44 g·kg⁻¹,5'-UMP含量为0.13~0.32 g·kg⁻¹。5'-IMP(0.0027~0.0400 g·kg⁻¹)和5'-XMP(0.0017~0.0041 g·kg⁻¹)含量在各成熟阶段均极低,因此,它们对鲜味的贡献远远小于其他核苷酸。平菇中鲜味核苷酸(5'-GMP、5'-IMP和5'-XMP)总含量为0.26~0.89 g·kg⁻¹,基本占核苷酸总量(0.73~1.64 g·kg⁻¹)的一半。

以5'-核苷酸数据作为输入变量进行PCA,以区分不同成熟度的平菇样品。图5-A~B所示的主成分分析图解释了总累积方差贡献的79.7%,PC1和PC2分别占总方差的48.2%和31.5%,平菇样本在PCA的得分图中形成5个明显分组。T1样本位于第一象限,T2样本位于第三象限,T3样本位于第二象限,T4样本除一个样本位于第二象限外,其余均位于第三象限,T5样本分布于PC1的正方向上。T1、T2、T4样本有部分重叠,说明它们含有的核苷酸成分组成和含量相近。根据载荷图显示,5'-GMP、5'-UMP和5'-XMP在PC1的负方向上得分较高,对T3和T4的区分具有较大贡献。5'-CMP对T1样本的分布贡献较大,5'-IMP对T2样本的分布具有较大的作用。

2.3 不同成熟度平菇的EUC值

由图6可知,不同成熟度新鲜平菇子实体中的

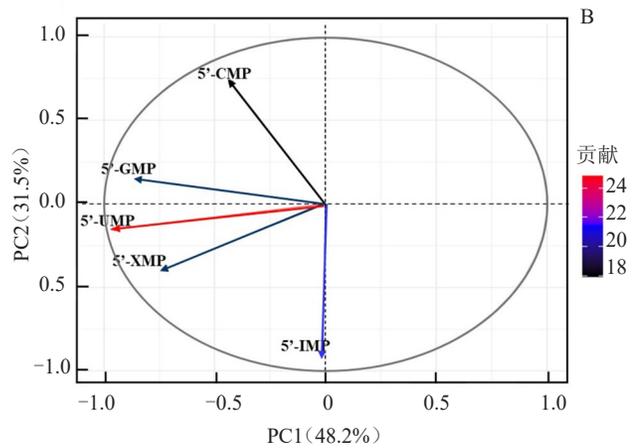


图5 基于5'-核苷酸数据的不同成熟度平菇新鲜子实体样本主成分分析图(A为得分图,B为载荷图)

EUC值为24.39~108.75 g MSG·100 g⁻¹(以鲜质量计),呈先升高后降低的趋势,T3时期子实体EUC值最高(108.75 g MSG·100 g⁻¹)。此后,随着平菇子实体的生长,EUC值逐渐下降,尤其是T5时期,子实体过度成熟,EUC值最低。

2.4 不同成熟度平菇中挥发性物质的种类和含量

采用HS-SPME-GC-MS对不同成熟度的平菇

新鲜子实体样品所含有的挥发性化合物进行分析,共检测出42种挥发性成分,其中醛类成分20个,酮类成分5个,醇类成分4个,烃类成分7个,其他类成分6个(图7,表1)。从相对含量看,不同成熟度的平菇新鲜子实体挥发性物质含量具有明显的差别。T2和T5时期采收的平菇新鲜子实体醛类物质含量最高,分别为13.30%和12.78%;T1和T3

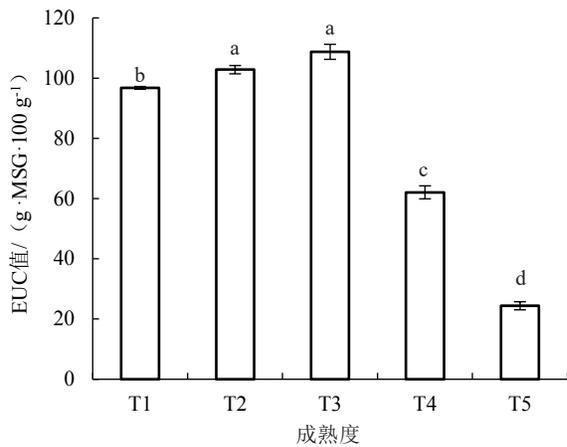


图6 不同成熟度平菇新鲜子实体的 EUC 值

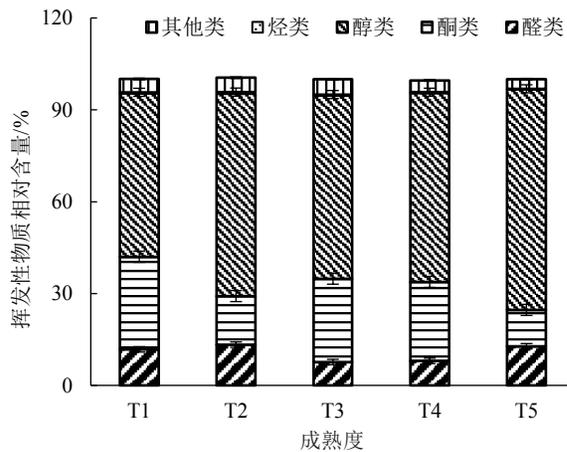


图7 不同成熟度平菇新鲜子实体挥发性成分含量

时期酮类物质相对含量最高,分别为 30.24%和 27.24%;T2 和 T5 时期醇类物质相对含量最高,分别为 66.15%和 72.00%;烃类物质含量最高的为 T2 时期,为 0.48%;T3 时期采收的子实体其他类物质相对含量最高,为 4.98%。

由表 1 可知,5 个成熟度的平菇新鲜子实体中均含有的醛类物质辛醛、(E)-2-辛醛、3-甲基-丁醛、正己醛、(Z)-2-庚醛和苯甲醛,其中苯甲醛(2.04%~8.09%)、正己醛(1.43%~3.23%)含量最高。这些醛类能够产生独特的香味,如苯甲醛具有杏仁香味,苯乙醛具有蜂蜜香味,正己醛具有青草香味,可赋予平菇丰富的香味。平菇新鲜子实体中相对含量最高的酮类化合物为 3-辛酮(10.85%~29.61%),具有典型蘑菇味。此外,不同成熟度的平菇新鲜子实体中均含有酮类化合物,还含有 1-庚烯-3-酮(0.16%~1.15%)和具有水果香味的 2-十一烷酮(0.10%~0.21%)。平菇新鲜子实体中醇类物质相对含量最高,为 53.35%~72.00%。其中,一个八碳醇即 1-辛烯-3-醇(蘑菇味)相对含量随平菇生长发生了显著的变化,T2 和 T5 时期采摘的子实体含量最高,分别为 47.59%和 40.48%。另一个八碳醇即 3-辛醇(蘑菇味)相对含量在不同成熟度的平菇子实体中也具有明显差异(18.55%~40.03%)。平菇新鲜子实体中相对含量较高的烃类是苯乙烯(甜香味),其相对含

表 1 不同成熟度平菇新鲜子实体挥发性成分 GC-MS 分析结果

类别	名称	分子式	成熟度					%
			T1	T2	T3	T4	T5	
醛类	辛醛	C ₈ H ₁₆ O	0.58±0.01 b	0.53±0.03 b	0.85±0.11 a	0.47±0.09 c	0.34±0.02 d	
	(E)-2-辛醛	C ₈ H ₁₆ O	0.60±0.05 d	2.10±0.12 b	0.52±0.09 d	0.80±0.12 c	2.80±0.26 a	
	3-甲基-丁醛	C ₅ H ₁₀ O	0.41±0.05 a	0.01±0.00 d	0.35±0.02 b	0.35±0.01 b	0.28±0.03 c	
	2-甲基-丁醛	C ₅ H ₁₀ O		0.10±0.00 b	0.24±0.05 a			
	戊醛	C ₅ H ₁₀ O	0.14±0.02 a		0.01±0.00 b			
	3-甲基-1-丁醛	C ₅ H ₁₀ O	0.25±0.05 a	0.02±0.00 c	0.08±0.03 b			
	正己醛	C ₆ H ₁₂ O	2.03±0.13 b	1.43±0.05 c	2.15±0.35 b	1.48±0.12 c	3.23±0.56 a	
	1-己醛	C ₆ H ₁₂ O	1.01±0.12 a		0.47±0.09 b			
	庚醛	C ₇ H ₁₄ O	0.08±0.01 b		0.16±0.05 a			
	(Z)-2-庚醛	C ₇ H ₁₄ O	0.44±0.21 d	0.56±0.15 c	0.55±0.17 c	0.76±0.21 b	1.40±0.34 a	
	苯甲醛	C ₇ H ₆ O	5.94±0.13 b	8.09±0.56 a	2.04±0.13 d	3.46±0.15 c	4.13±0.25 c	
	苯乙醛	C ₈ H ₈ O	0.29±0.02 a	0.17±0.01 b	0.12±0.01 b		0.14±0.01 b	
	2,4-癸二烯醛	C ₁₀ H ₁₆ O		0.13±0.01 b	0.01±0.00 c	0.11±0.01 b	0.31±0.03 a	
	(E,E)-2,4-壬二烯醛	C ₉ H ₁₄ O				0.08±0.01		
	2,4-壬二烯醛	C ₁₀ H ₁₆ O		0.10±0.02				
	壬醛	C ₉ H ₁₈ O		0.06±0.00 a	0.07±0.00 a	0.07±0.00 a		
	4-甲基-3-环己烯-1-吡咯甲醛	C ₈ H ₁₂ O				0.10±0.01 b	0.16±0.05 a	
	α-甲基苯乙醛	C ₉ H ₁₀ O				0.16±0.03		
	(E,E)-2,4-壬二烯醛	C ₉ H ₁₄ O				0.08±0.02		

续表 1

%

类别	名称	分子式	成熟度					
			T1	T2	T3	T4	T5	
酮类	反-4-十一烯醛	C ₁₁ H ₂₀ O				0.10±0.02		
	共计		11.77±0.56 b	13.30±0.98 a	7.62±1.01 c	8.00±0.93 c	12.78±0.85 a	
	3-辛酮	C ₈ H ₁₆ O	29.61±2.11 a	14.58±1.01 b	26.69±0.98 a	24.85±2.23 a	10.85±0.87 c	
	1-庚烯-3-酮	C ₇ H ₁₂ O	0.42±0.06 c	1.15±0.21 a	0.29±0.05 d	0.16±0.03 e	0.87±0.15 b	
	苯乙酮	C ₈ H ₈ O			0.07±0.00 b	0.21±0.02 a		
	2-十一烷酮	C ₁₁ H ₂₂ O	0.21±0.05 a	0.14±0.01 b	0.18±0.01 a	0.10±0.02 c	0.14±0.01 b	
	6-甲基-3-庚酮	C ₈ H ₁₆ O				0.47±0.11		
醇类	共计		30.24±2.01 a	15.87±1.37 c	27.24±1.99 a	25.80±1.24 b	11.86±0.93 d	
醇类	1-辛烯-3-醇	C ₈ H ₁₆ O	12.93±0.21 d	47.59±2.11 a	17.16±0.56 c	13.33±1.01 d	40.48±2.10 b	
	3-辛醇	C ₈ H ₁₈ O	40.03±1.39 b	18.55±2.01 d	41.85±3.11 b	48.30±3.25 a	31.52±1.99 c	
	乙醇	C ₂ H ₆ O	0.41±0.02 b	0.01±0.00 c	0.82±0.10 a			
	3-异丙基-4-甲基-1-戊炔-3-醇	C ₉ H ₁₆ O				0.06±0.01		
	共计		53.37±1.25 d	66.15±2.03 b	59.83±1.87 c	61.69±1.55 c	72.00±1.85 a	
烃类	2-辛烯	C ₈ H ₁₆		0.07±0.00 a	0.01±0.00 b			
	十四烷	C ₁₄ H ₃₀		0.09±0.02 a	0.07±0.01 b			
	十五烷	C ₁₅ H ₃₂		0.07±0.01				
	十六烷	C ₁₆ H ₃₄		0.06±0.00				
	环丙烷,戊烷基-	C ₈ H ₁₆			0.07±0.01			
	戊烷基-环氧乙烷	C ₇ H ₁₄ O	0.07±0.01					
	苯乙烯	C ₈ H ₈	0.28±0.03 a	0.21±0.02 b	0.17±0.01 c	0.26±0.03 a	0.22±0.02 b	
	共计		0.34±0.02 b	0.48±0.05 a	0.31±0.02 b	0.26±0.03 c	0.22±0.02 c	
	其他类	乙酸	C ₂ H ₄ O ₂					0.08±0.01
		苯二酚单乙醚	C ₇ H ₁₂ O					0.08±0.03
烯丙基戊醚		C ₈ H ₁₆ O		0.32±0.01				
2-戊基-咪喃		C ₉ H ₁₄ O	3.69±0.59 a	2.38±0.26 c	2.91±0.11 b	2.39±0.13 c		
薄荷醇咪喃		C ₁₀ H ₁₄ O		1.62±0.29 b	1.49±0.21 b	1.47±0.15 b	2.65±0.33 a	
乙二醇单丁醚		C ₉ H ₁₈ O	0.67±0.11 a	0.36±0.02 c	0.58±0.09 b		0.34±0.10 c	
共计			4.36±0.62 a	4.68±0.09 a	4.98±0.55 a	3.86±0.25 b	3.15±0.12 c	

注：同行内不同小写字母表示在 0.05 水平差异显著。

量为 0.17%~0.28%。此外,平菇新鲜子实体中还检测出一些其他化合物,如烯丙基戊醚、乙二醇单丁醚等醚类物质,可能对平菇新鲜子实体的整体风味

有一定影响。

对挥发性物质的数据矩阵进行 PCA,观察不同成熟度平菇新鲜子实体样本可能的分布。图 8 所

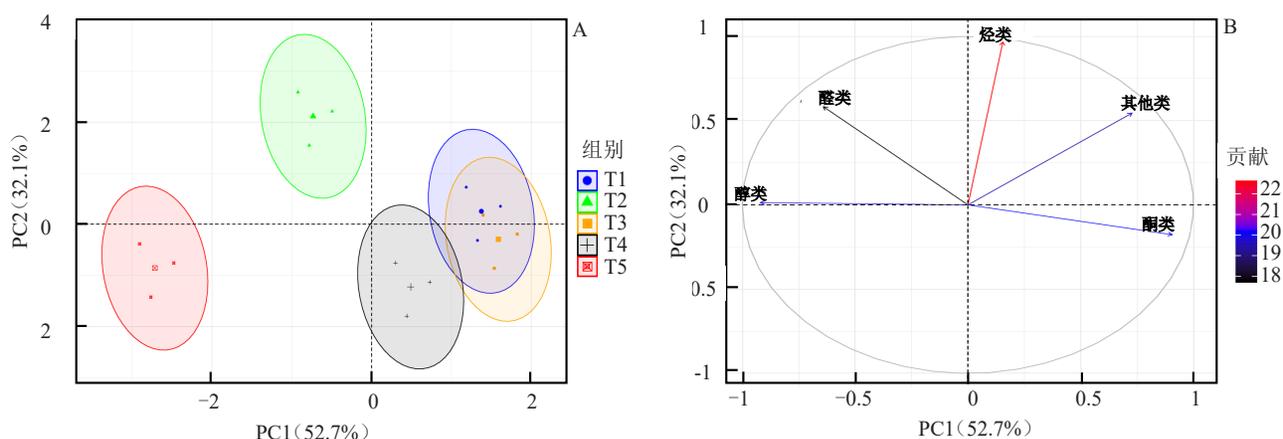


图 8 使用挥发物矩阵作为输入变量的平菇新鲜子实体样本的主成分分析(A:得分图,B:加载图)

示的 PCA 图解释了总累积方差贡献的 84.8%,PC1 和 PC2 分别占总方差的 52.7%和 32.1%,不同成熟度子实体样品具有形成 5 个群体的趋势。如图 8-A 所示,T1 样本除一个样本位于第四象限外,其余均位于第一象限;T2 样本位于第二象限;T3 样本大部分位于第四象限;T4 样本位于第四象限;T5 样本位于第三象限。其中 T1 和 T3 样本部分重叠。图 5-B 显示了子实体样品与挥发性化合物的关系,可以看出酮类和其他类物质在 PC1 正方向上得分较高,对区分 T1、T3 和 T4 样本贡献较大。醛类和烃类与 PC2 呈高度正相关,对 T2 样本的分布具有较大作用。T5 样本中醇类物质相对含量最高,PC1 和 PC2 的得分均为负值。

2.5 综合评价

将游离氨基酸、5'-核苷酸和挥发性物质数据输入 SPSS 软件,进行主成分分析。由表 2 可知,前 3 个主成分对应特征值均大于 1,累计方差贡献率为 97.641%,故可选取前 3 个主成分。3 个相互独立的综合性变量,可反映不同成熟度平菇新鲜子实体游离氨基酸、5'-核苷酸和挥发性成分的大部分信息。

表 2 主成分的特征值和贡献率

主成分	全部特征值	方差贡献率/%	累计方差贡献率/%
1	17.432	64.564	64.564
2	5.315	19.687	84.251
3	3.615	13.391	97.641

如表 3 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。变量 Asp、Thr、Ser、Glu、Gly、Ala、Val、Met、Ile、Leu、Tyr、Phe、Lys、His、Pro、Trp、烃类和其他类物质在 PC1 上有较高载荷系数,说明它们与 PC1 相关性较强;PC2 中 Arg、5'-GMP、5'-CMP、醇类、醛类和酮类载荷系数较高,贡献大;PC3 为 5'-IMP、5'-UMP 和 5'-XMP 载荷系数较高。

经过主成分分析提取 3 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 $F=0.661F1 + 0.202F2 + 0.137F3$,计算各成熟度平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 4 所示,不同成熟度平菇子实体的品质差别显著,T2 时期品质最优,T1 时期次之,五六成熟子实体风味品质较优(T3),过熟期(T5)子实体风味品质差。但 T1 时期和 T2 时期采收的子实体较小,不具备市场经济效益。综合考虑,T3 时期采收平菇新鲜子实体经济价值、口感风味及综合品质均较高且外形美观

表 3 主成分的特征向量与载荷矩阵

指标	PC1		PC2		PC3	
	载荷	特征向量	载荷	特征向量	载荷	特征向量
Asp	0.975	0.056	-0.147	-0.028	-0.158	-0.044
Thr	0.973	0.056	-0.198	-0.037	-0.040	-0.011
Ser	0.977	0.056	-0.044	-0.008	0.183	0.051
Glu	0.974	0.056	0.124	0.023	-0.185	-0.051
Gly	0.976	0.056	0.211	0.040	0.034	0.009
Ala	0.962	0.055	0.193	0.036	-0.194	-0.054
Val	0.990	0.057	0.080	0.015	-0.079	-0.022
Met	0.980	0.056	0.170	0.032	0.100	0.028
Ile	0.991	0.057	-0.024	-0.005	-0.122	-0.034
Leu	0.981	0.056	-0.063	-0.012	-0.177	-0.049
Tyr	0.990	0.057	-0.012	-0.002	-0.052	-0.014
Phe	0.982	0.056	0.170	0.032	-0.024	-0.007
Lys	0.999	0.057	-0.021	-0.004	0.020	0.006
His	0.995	0.057	0.068	0.013	0.001	0.000
Arg	0.053	0.003	0.708	0.133	-0.704	-0.195
Pro	0.990	0.057	-0.032	-0.006	-0.009	-0.002
Trp	0.624	0.036	0.513	0.097	0.580	0.161
5'-GMP	0.623	0.036	-0.750	-0.141	0.222	0.062
5'-IMP	0.115	0.007	0.586	0.110	0.801	0.221
5'-UMP	0.327	0.019	-0.642	-0.121	0.681	0.188
5'-XMP	-0.229	-0.013	-0.465	-0.087	0.809	0.224
5'-CMP	-0.273	-0.016	-0.773	-0.145	-0.260	-0.072
醇类	-0.522	-0.030	0.603	0.113	0.557	0.154
醛类	0.255	0.015	0.938	0.176	-0.140	-0.039
烃类	0.913	0.052	0.234	0.044	0.326	0.090
酮类	0.316	0.018	-0.786	-0.148	-0.462	-0.128
其他类	0.809	0.046	-0.519	-0.098	0.242	0.067

表 4 不同成熟度平菇新鲜子实体的成分得分和综合评价

成熟度	F1	F2	F3	F	排名
T1	3.19	0.00	-3.07	1.69	2
T2	4.66	2.12	1.97	3.78	1
T3	0.54	-3.19	0.92	-0.16	3
T4	-3.16	-1.20	0.46	-2.27	4
T5	-5.24	2.27	-0.30	-3.05	5

(菌盖直径 4~5 cm),因此认为平菇新鲜子实体最佳采收期为 T3 时期。

2.6 层次聚类分析

采用层次聚类分析分析由游离氨基酸、5'-核苷酸和挥发性物质数据组成的融合数据集,并采用 Ward 连接和欧式距离计算不同成熟度平菇新鲜子实体样本之间的间隔距离,得到的树状图(图 9)显示了不同成熟度平菇子实体样本之间的关系和分布模式。15 个样本聚为两大类群:A 组由 2 个不同成熟度的样本组成(T1 和 T2),B 组由 T3、T4 和 T5

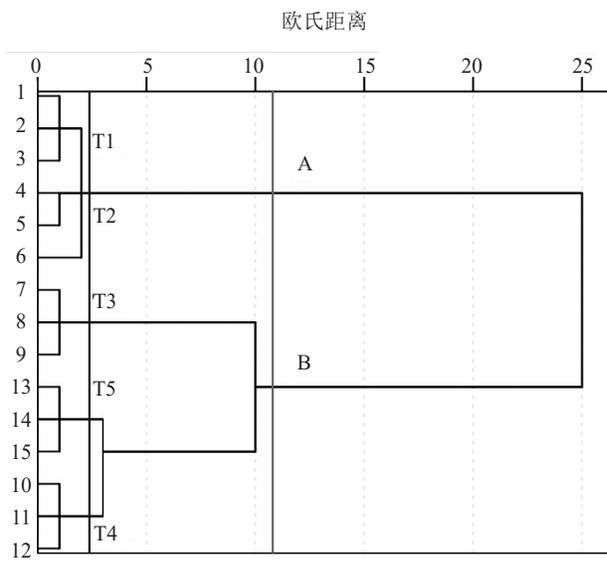


图9 基于平菇游离氨基酸、5'-核苷酸和挥发性物质数据的聚类分析结果

样本组成,成熟度相近的样本在树状图中紧密聚类,但彼此之间有明显的区别。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。

3 讨论

平菇营养丰富、味道鲜美,且具有较高的食药两用价值,深受广大消费者喜爱^[18]。食用菌的特殊风味是广受欢迎的重要因素,主要来自于自身所含的一些游离氨基酸、5'-核苷酸以及挥发性物质^[19]。研究表明,食用菌的成熟度对所含有的游离氨基酸、5'-核苷酸以及 EUC 值具有显著的影响。本研究发现,平菇新鲜子实体中的大多数氨基酸含量在 T1 和 T2 时期最高,T5 时期最低。T3 时期 5'-核苷酸含量显著高于其他成熟阶段,EUC 值具有类似的变化趋势,T3 时期平菇新鲜子实体的 EUC 值最高,为 108.75 g MSG·100 g⁻¹。在传统平菇生产中,平菇常于 T4 时期采摘,产量高效益好^[4]。而近几年,消费者越来越青睐 T3 时期采摘的平菇,形态美观且口感更好,这与本研究中 T3 时期采摘的平菇具有最高的 EUC 值相一致。此外,该结果与发育中的杏鲍菇子实体中 MSG-like 氨基酸总含量的变化趋势相似^[19]。然而,对其他食用菌的研究结果表明,食用菌品种或种类不同时,成熟度对游离氨基酸、5'-核苷酸以及 EUC 值的影响趋势是有显著差异的。Cho 等^[20]对松口蘑的研究表明,它的 Asp、Glu、5'-GMP 含量以及 EUC 值均在生长初期最高,此后随成熟度提升而逐渐降低。而草菇中的 Asp(3.48~5.21 g·kg⁻¹)、Glu(7.72~21.00 g·kg⁻¹)以及 EUC 值(1048~4494 g

MSG·100 g⁻¹)随成熟度提升呈显著增加的趋势,但 5'-GMP 含量则在第 3 和第 4 阶段最高^[21]。双孢蘑菇的 Asp 含量变化趋势与松口蘑类似,Glu 含量变化则与草菇相同,然而 5'-GMP 含量在第 3 阶段达到峰值,EUC 值变化趋势亦与本研究结果不同^[22]。

挥发性物质是构成食用菌特征风味的主要成分之一,主要包括醛类、酮类、醇类、酯类、含硫化合物等,不同种类的化合物分别赋予食用菌不同的风味^[23]。本研究采用 HS-SPME-GC-MS 对不同成熟度的新鲜平菇子实体样品所含有的挥发性化合物进行分析,在 5 个成熟度的平菇新鲜子实体中共鉴定到 42 种挥发性风味物质,包括醛类 20 种、酮类 5 种、醇类 4 种、烃类 7 种和其他类 6 种。其中醛酮类物质阈值较低,对于风味影响较大;醇类化合物阈值较高,带有花香、果香等令人愉快的风味^[23],这些物质相互作用,构成平菇独特且迷人的风味。食用菌中所含有的挥发性成分也与食用菌品种、栽培措施以及气候环境条件等密切相关。笔者前期在香菇新鲜子实体中鉴定出 47 种挥发性成分^[13]。Li 等^[12]研究发现,采用不同培养基栽培的香菇子实体中的挥发性成分组成和含量也具有显著的差异,与平菇不同的是,香菇子实体含有较多的含硫化合物。Li 等^[24]在野生松茸中鉴定出 66 种挥发性成分,其中 1-辛烯-3-醇和肉桂酸甲酯是主要成分。

近年来,食用菌风味的变化机制也逐渐被关注。Wang 等^[25]对人工栽培的羊肚菌子实体(*Morchella importuna*)进行了蛋白质组学和代谢组学分析,结果表明羊肚菌的味道主要是由极性代谢物引起的,而极性代谢物与其呼吸酶有关。笔者前期研究了香菇新鲜子实体风味和能量状态的关系,结果表明子实体挥发性物质、EUC 值与其能量水平具有显著的相关性^[13]。然而,还需要确切的证据来确定能量状态如何直接或间接地影响香菇的独特风味。

4 结论

不同成熟度的平菇新鲜子实体游离氨基酸、5'-核苷酸和挥发性物质含量差异显著。综合评价结果表明,T2 时期采收的平菇新鲜子实体综合品质最优,T1 时期次之,T3 时期居中。但是,综合考虑经济价值、外观形态、风味质量和综合品质,认为平菇最佳采收期为 T3 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.
- [2] 中国食用菌协会.2020年度全国食用菌统计调查结果分析[J].中国食用菌,2022,41(1):85-91.
- [3] 刘芹,孔维丽,徐柯,等.糙皮侧耳不同生长时期发酵料中微生物和代谢物的变化[J].菌物学报,2021,40(6):1458-1479.
- [4] KOUTROTSIOS G, KALOGEROPOULOS N, STATHOPOULOS P, et al. Bioactive compounds and antioxidant activity exhibit high intraspecific variability in *Pleurotus ostreatus* mushrooms and correlate well with cultivation performance parameters qualities[J]. World Journal of Microbiology & Biotechnology, 2017, 33(5):98.
- [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] CHANG S T, WASSER S P. The cultivation and environmental impact of mushrooms[M]. New York: Oxford University Press, 2017.
- [7] 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.
- [8] LIU Q, BAU T, JIN R X, et al. Comparison of different drying techniques for shiitake mushroom (*Lentinus edodes*): Changes in volatile compounds, taste properties, and texture[J]. LWT-Food Science & Technology, 2022, 164:113651.
- [9] ZHANG Y, VENKITASAMY C, PAN Z, et al. Recent developments on umami ingredients of edible mushrooms[J]. Trends in Food Science & Technology, 2013, 33(2):78-92.
- [10] 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.
- [11] 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 & Food Chemistry, 2015, 63(3):795-801.
- [12] LI W, WANG J B, CHEN W, et al. Analysis of volatile compounds of *Lentinula edodes* grown in different culture substrate formulations [J]. Food Research International, 2019, 125:108517.
- [13] LIU Q, HU S J, SONG Z B, 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(10):4288-4302.
- [14] LI W, CHEN W, YANG Y, et al. Effects of culture substrates on taste component content and taste quality of *Lentinula edodes*[J]. International Journal of Food Science & Technology, 2017, 52(4):981-991.
- [15] SUAREZ C, RATERING S, WEIGEL V, et al. Isolation of bacteria at different points of *Pleurotus ostreatus* cultivation and their influence in mycelial growth[J]. Microbiological Research, 2020, 234:126393.
- [16] KONG W L, SUN B, ZHANG J Y, et al. Metagenomic analysis revealed the succession of microbiota and metabolic function in corncob composting for preparation of cultivation medium for *Pleurotus ostreatus*[J]. Bioresource Technology, 2020, 306:123156.
- [17] 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(12):211-220.
- [18] KUMARI S, NARAIAN R. Enhanced growth and yield of oyster mushroom by growth-promoting bacteria *Glutamicibacter arilaitensis* MRC119[J]. Journal of Basic Microbiology, 2021, 61(1):45-54.
- [19] 李晓贝.杏鲍菇品种、栽培工艺及干燥过程对其风味物质产生的影响研究[D].上海:上海应用技术学院,2021.
- [20] CHO I H, CHOI H K, KIM Y S. Comparison of umami-taste active components in the pileus and stipe of pine-mushrooms (*Tricholoma matsutake* Sing.) of different grades[J]. Food Chemistry, 2010, 118(3):804-807.
- [21] MAU J L, CHYAU C C, LI J Y, et al. Flavor compounds in straw mushrooms *Volvariella volvacea* harvested at different stages of maturity[J]. Journal of Agricultural & Food Chemistry, 1997, 45(12):4726-4729.
- [22] S Y, WU T P, HUANG S J, et al. Nonvolatile taste components of *Agaricus bisporus* harvested at different stages of maturity[J]. Food Chemistry, 2007, 103(4):1457-1464.
- [23] 李佳欢,杨斌,任佳媛,等.热风干燥温度对荷叶离褶伞干燥特性及挥发性风味物质的影响[J].菌物学报,2021,40(12):3304-3319.
- [24] LI Q, ZHANG L, LI W H, et al. Chemical compositions and volatile compounds of *Tricholoma matsutake* from different geographical areas at different stages of maturity[J]. Food Science & Biotechnology, 2016, 25(1):71-77.
- [25] WANG J Q, XIAO J, GENG F, et al. Metabolic and proteomic analysis of morel fruiting body (*Morchella importuna*) [J]. Journal of Food Composition & Analysis, 2018, 76:51-57.