

组分差异分析结合智能感官对本草栽培 银耳风味特征的分析

Analysis of flavor characteristics of herbal cultivated *Tremella fuciformis*
based on component difference analysis and intelligent sensory

陈万超^{1,2,3} 吴迪^{1,2,3} 肖敏生⁴

CHEN Wanchao^{1,2,3} WU Di^{1,2,3} XIAO Minsheng⁴

姚淑先⁵ 杨焱^{1,2,3} 刘艳芳^{1,2,3}

YAO Shuxian⁵ YANG Yan^{1,2,3} LIU Yanfang^{1,2,3}

(1. 上海市农业科学院食用菌研究所, 上海 201403; 2. 农业农村部南方食用菌资源利用重点实验室, 上海 201403; 3. 国家食用菌工程技术研究中心, 上海 201403; 4. 上海开森生物科技有限公司, 上海 201824; 5. 福建山湖本草银耳有限公司, 福建 宁德 352262)

(1. Institute of Edible Fungi, Shanghai Academy of Agricultural Sciences, Shanghai 201403, China; 2. Key Laboratory of Edible Fungi Resources and Utilization [South], Ministry of Agriculture, Shanghai 201403, China; 3. National Engineering Research Center of Edible Fungi, Shanghai 201403, China; 4. Shanghai Kaisen Biotechnology Co., Ltd., Shanghai 201824, China; 5. Fujian Shanhu Bencao Yiner Co., Ltd., Ningde, Fujian 352262, China)

摘要:目的:明确本草栽培银耳的风味特征。方法:以本草基质栽培的白色银耳(本草银耳)为研究对象,常规栽培基质黄色银耳和白色银耳为对照,采用高效液相色谱法和顶空固相微萃取—气相色谱—质谱联用技术(HS-SPME-GC-MS)分析其风味组成差异,并结合智能感官技术对本草银耳风味特征进行解析。结果:本草银耳从鲜、甜味氨基酸和呈味核苷酸含量,滋味活度值和等鲜浓度值,电子舌等多维度评价显示,其鲜味强度均低于黄色银耳和白色银耳。HS-SPME-GC-MS分析结果显示,本草银耳鉴定得到82种挥发性物质,高于白色银耳(71种)和黄色银耳(49种),以酯类为主,占比16.9%~22.4%,呈现浓郁的花草芳香,同时鉴定得到26种银耳特征香气成分,9种白色银耳特有成分和4种本草银耳特有成分;香气物质含量方面,本草银耳亦占据优势。结论:本草银耳鲜味淡香气浓,可开发调制饮品,而黄色银耳更适合作为

菜肴。

关键词:银耳;本草银耳;风味;电子舌;电子鼻

Abstract: Objective: Clarify the flavor characteristics of *Tremella fuciformis* cultivated on herbaceous substrate. Methods: In the study *T. fuciformis* cultivated on herbaceous substrate was used as the research object, while samples of yellow *tremella* and white *tremella* cultivated on conventional substrate were used as controls. The differences in flavor composition between them were analyzed using high-performance liquid chromatography and Headspace Solid Phase Microextraction Gas Chromatography Mass Spectrometry (HS-SPME-GC-MS). And combined with intelligent sensory technology, its flavor characteristics were analyzed. Results: According to multi-dimensional evaluations such as fresh and sweet amino acid and flavor nucleotides content, taste activity value and equal freshness concentration value, and electronic tongue, the freshness intensity of this herb's *tremella* was lower than that of yellow *tremella* and white *tremella*. The results of HS-SPME-GC-MS analysis showed that 82 volatile compounds were identified in this herb *Tremella*, which were higher than those in white *Tremella* (71 species) and yellow *Tremella* (49 species). The main compounds were esters, accounting for 16.9%~22.4%, presenting a strong floral aroma. At the same time, 26 characteristic aroma components of

基金项目:上海市现代农业产业技术体系项目(编号:沪农科产字[2024]第9号);现代农业产业技术体系(编号:CARs-20)

作者简介:陈万超,男,上海市农业科学院副研究员,博士。

通信作者:杨焱(1970—),女,上海市农业科学院研究员,博士。

E-mail: yangyan@saas.sh.cn

收稿日期:2023-06-01 **改回日期:**2024-02-21

Tremella, 9 unique components of white Tremella, and 4 unique components of this herb Tremella were identified; In terms of aroma substance content, this herb Tremella also holds an advantage. **Conclusion:** The traditional Chinese medicinal fungus has a light taste and a strong aroma, making it suitable for developing and preparing beverages, while yellow white fungus is more suitable as a dish.

Keywords: *Tremella fuciformis*; herbal cultivated *Tremella*; flavor; electric tongue; electric nose

银耳, 又称白木耳、雪耳等, 属于担子菌门、银耳纲、银耳目、银耳科、银耳属, 是一种常见的食药两用真菌。

中国银耳栽培分布主要是福建、四川等地, 其中福建古田银耳历史悠久, 产量占全球 90% 以上^[1]。福建古田代料栽培银耳普遍为黄色银耳(Tr01)和白色银耳(Tr21)^[1], 栽培基质主要采用棉籽壳、麦麸等。除此之外, 亦存在以传统植物本草为基质的栽培技术, 目前研究主要集中在栽培设施设备的开发, 关于本草基质对银耳子实体的品质影响的研究鲜有报道。本草基质栽培银耳所选用的栽培品种为白色银耳, 旨在弥补银耳的营养缺陷, 如粗多糖含量较低, 对人体的滋补效果不明显等^[2]。对于饮食习惯, 大众消费的主要以黄色银耳为主, 其肉质脆爽, 常作为拌菜的食材, 而对于白色银耳的食用习惯并未建立, 其内在原因值得进一步挖掘。研究拟以常规栽培基质的黄色银耳和白色银耳为参考, 传统植物本草为基质的白色银耳为研究对象, 通过高效液相色谱技术和顶空固相微萃取—气相色谱—质谱联用技术(headspace solid phase microextraction-gas chromatography-mass spectrometry, HS-SPME-GC-MS)对 3 种银耳中主要的滋味成分(游离氨基酸和核苷酸)进行测定, 基于这些组分的差异分析结合智能感官(如电子舌和电子鼻)探究 3 种银耳的风味特征, 以期为银耳作为食材用于烹饪提供理论支撑, 同时为本草栽培银耳的高值利用提供新思路。

1 材料与amp;方法

1.1 材料与amp;仪器

黄色银耳、白色银耳和本草基质栽培白色银耳(本草银耳): 其鲜品银耳子实体均于 2022 年 11 月产自福建古田, 上海开森生物科技有限公司;

粉碎机: QE-400 型, 浙江屹立工贸有限公司;

水分测定仪: MA100 型, 德国 Sartorius 公司;

离心机: Allegra 25R Centrifuge 型, 美国 Beckman 公司;

超纯水设备: ELGA 型, 美国 ULTRA 公司;

液相色谱: Waters E2695 Alliance 型, 美国 Waters 公司;

高效液相色谱仪: Waters 600 型, 美国 Waters 公司;
二极管阵列检测器: 2996 型, 美国 Waters 公司;
味觉分析系统: SA-402B 型, 日本 INSENT 公司;
气质联用仪: 7890A-5975C 型, 安捷伦科技(上海)有限公司;

电子鼻: PEN2 型, 德国 Airsense 公司。

1.2 试验方法

1.2.1 游离氨基酸测定 参考 Boogers 等^[3]的方法, 准确称取银耳样品 500 mg 于 50 mL 离心管, 加入 20 mL 超纯水, 沸水浴加热提取 10 min(每 5 min 混匀一次), 趁热抽滤, 冷至室温后定容至 50 mL, 过 0.22 μm 混合纤维素微孔滤膜, 备用。样品衍生化: 分别准确吸取 20 μL 样品溶液于衍生管(6 mm \times 50 mm), 加入 140 μL 硼酸盐缓冲液, 涡旋混匀后加入 40 μL 衍生剂。室温放置 1 min, 55 $^{\circ}\text{C}$ 下加热 10 min, 取出待测。液相测定条件与陈荣荣等^[4]的方法相同。

1.2.2 游离 5'-核苷酸测定 参考陈万超等^[5]的检测方法, 准确称取银耳样品 1 000 mg, 加入 25 mL 蒸馏水, 煮沸并保持 1 min, 冷却至室温, 16 000 $\times g$ 离心 15 min, 取出上清液, 过 0.22 μm 微孔滤膜, 待测。色谱条件: Ultimate AQ-C₁₈ 色谱柱(250 mm \times 4.6 mm, 5 μm); 流动相: KH₂PO₄ 缓冲盐(pH 4.68); 流速 1.0 mL/min; 柱温 30 $^{\circ}\text{C}$; 进样量 10 μL ; 紫外检测波长 249 nm。

1.2.3 挥发性香气成分 HS-SPME-GC-MS 测定 参考李文等^[6]的分析和数据处理方法, 略有修改, 采用顶空固相微萃取—气相色谱—质谱联用技术(HS-SPME-GC-MS)进行测定, 准确称取 0.5 g, 置于 20 mL 顶空瓶中, 加入 5 mL 水和 10 μL 二氯苯(内标物, 100 $\mu\text{g}/\text{mL}$) 迅速混匀待测。顶空瓶置于 55 $^{\circ}\text{C}$ 条件平衡 30 min, 将 75 μm DVB/CAR/PDMS 萃取头经 30 $^{\circ}\text{C}$ 老化 20 min 后插入顶空瓶中, 平衡吸附 30 min, 后立即将纤维萃取头抽出并转移到 GC-MS 进样口中, 推出萃取头中的纤维头, 在 250 $^{\circ}\text{C}$ 下解吸 10 min。

1.2.4 电子舌分析 采用 SA-402B 味觉分析系统对离心后的酶解液进行测定。该装置具有 8 个传感器, 分别为 CA0(酸味)、C00(苦味)、CT0(咸味)、AAE(鲜味)、AE1(涩味)、甜味(GL1)和 2 个参比传感器。在样品测试前, 提前将传感器活化并进行自检, 待各传感器数值稳定在允许范围内, 即 CA0 和 AAE 为 -80~80 V, CT0 90~130 V, C00 和 AE1 80~160 V, 方可进行测定。参数设置: 测定 5 次, 正负极清洗 90 s, 标准清洗液 2 和 3 均清洗 120 s, 参比液(30 mmol/L 氯化钾+0.3 mmol/L 酒石酸)测定 30 s, 静止 1 s, 样品测定 30 s, 标准清洗液 4 和 5 分别清洗 3 s, 参比液(30 mmol/L 氯化钾+0.3 mmol/L 酒石酸)测定 30 s。

1.2.5 电子鼻分析 采用直接顶空吸气法,称取 1.0 g 样品置于 20 mL 顶空瓶内,用带有 PTFE 密封垫的盖子密封,静止 10 min 待测。以洁净干燥空气为载气,设置电子鼻采样时间为 160 s,气体流量为 0.3 L/min,等待时间为 10 s,清洗时间 60 s。每个样品重复 6 次,取稳定后的 3 次数据,进行下一步数据分析。

表 1 电子鼻传感器阵列名称及其性能描述

Table 1 Names and performance description of electronic nose sensor arrays

序号	传感器名称	化合物灵敏性能描述
1	W1C	芳香族、苯类
2	W5S	氮氧化合物
3	W3C	氨基类和芳香族类化合物
4	W6S	氢化物
5	W5C	短链烷烃和芳香族
6	W1S	甲基类
7	W1W	硫化物
8	W2S	醇类、醛酮类
9	W2W	有机硫化物和芳香族类
10	W3S	长链烷烃

1.2.6 等鲜浓度值计算 等鲜浓度值(equivalent umami concentration, EUC)是指 100 g 干样品中,呈鲜物质的总量,常用谷氨酸钠(monosodium glutamate, MSG)的含量表示^[7]。其计算公式为:

$$Y = \sum a_i b_i + 1.218(\sum a_i b_i)(\sum a_j b_j), \quad (1)$$

式中:

Y——味精当量即 EUC 值, g MSG/100 g;

a_i ——呈鲜氨基酸的含量,如天冬氨酸(Asp)和谷氨酸(Glu), g/100 g;

a_j ——呈鲜核苷酸的含量,如鸟苷酸(5'-GMP)、肌苷酸(5'-IMP)、黄苷酸(5'-XMP)和腺苷酸(5'-AMP), g/100 g;

b_i ——呈鲜氨基酸相对 MSG 的鲜味程度(Glu 为 1, Asp 为 0.077);

b_j ——呈味核苷酸相对 5'-IMP 的值(5'-IMP 为 1, 5'-GMP 为 2.3, 5'-XMP 为 0.61, 5'-AMP 为 0.18);

1.218——协同作用常数。

1.3 数据处理

利用 Matlab 2020b, 生科云(https://www.bioincloud.tech/)信息分析云平台 and TBtools 等工具进行可视化绘图。利用 Excel 2019 和 IBM SPSS Statistic 25 进行数据分析和处理,数据均以平均数±标准偏差表示,采用 Tukey HSD 检验进行显著性分析(显著水平 $P <$

0.05)。

2 结果与讨论

2.1 银耳样品滋味组分分析

食用菌以鲜香美味著称,其中鲜味的重要载体包括 Asp、Glu 等游离氨基酸,以及 5'-GMP、5'-IMP、5'-XMP 和 5'-AMP 等游离 5'-核苷酸。如表 2 所示,从氨基酸组成看,3 种银耳样品氨基酸种类存在一定差异,其中半胱氨酸(Cys)、缬氨酸(Val)和亮氨酸(Leu)均未检出,甲硫氨酸(Met)仅在黄色银耳中有检出,赖氨酸(Lys)和异亮氨酸(Ile)则分别在白色银耳和黄色银耳中未检出。在含量层面,白银耳的游离氨基酸总量相对最高(8.33 mg/g),其次为普通银耳(7.69 mg/g),本草银耳的最低(7.37 mg/g);3 种银耳中均以精氨酸(Arg, 1.51~2.52 mg/g)和 Glu(1.03~2.12 mg/g)含量较高,前者具有良好的清除自由基延缓衰老的功效^[8],后者可以提高鲜美的口感。对于呈味氨基酸,鲜味氨基酸和甜味氨基酸主要以 Glu 和甘氨酸(Gly, 0.42~0.43 mg/g)为主,前者以普通银耳的最高,比本草银耳和白色银耳分别高出 42.3%和 105.8%,由此可见黄色银耳样品鲜味较为浓郁,白色银耳品种本身鲜味较淡;后者在 3 种样品中差异不显著($P < 0.5$),即甘甜味差异不大。

5'-核苷酸是典型的呈鲜物质,近年来“I+G”(即“肌苷酸+鸟苷酸”)被广泛应用在调味品中,以增加食品的鲜味。由表 2 可知,3 种样品中 6 种游离核苷酸可检出 5 种,5'-XMP 除外。游离 5'-核苷酸总量以黄色银耳含量最高(1.09 mg/g),其次为草本银耳(0.67 mg/g),白色银耳的最低(0.36 mg/g)。就单一核苷酸而言,5'-CMP 含量相对丰富(0.10~0.45 mg/g);呈味核苷酸则以 5'-GMP 含量较高(0.06~0.29 mg/g),有研究^[9]显示其有很强的助鲜作用,在与呈味氨基酸等的协同作用下可以使鲜度提高几十倍甚至几百倍之高。除 5'-IMP 外,黄色银耳中 5'-核苷酸含量普遍高于其他两种银耳样品,尤其对于呈味核苷酸总量(0.40 mg/g)比本草银耳(0.18 mg/g)和白色银耳(0.18 mg/g)高出 122.2%,该结果亦可以看出黄色银耳样品较其他两种样品的鲜味更为浓郁。

2.2 银耳样品的滋味物质的呈味作用和鲜味强度评价

滋味活度值(taste active value, TAV)可以用于表征单一化合物对整体滋味的贡献, $TAV < 1$ 表示该物质对样品滋味没有贡献, $TAV > 1$ 则表示有贡献,且贡献度与数值正相关。如表 3 所示,仅 Glu、Arg 和 His,以及白色银耳品种样品才有的 Ile 的 TAV 高于 1,且分别为 3.43~7.07, 3.02~5.04, 3.00~3.90 和 1.44~2.86,说明 Glu 对于鲜味有较大的贡献,而 Arg 虽然对苦味有贡献,但是其可以与 Glu 和食盐协同作用产生令人愉快的风味^[10],另

表 2 本草银耳、白色银耳和黄色银耳中游离氨基酸和 5'-核苷酸含量测定结果[†]

Table 2 Analysis results of free amino acids and 5'-nucleotides in the *T. fuciformis* samples (n=3)

		mg/g			
化合物种类	化合物名称	本草银耳	白色银耳	黄色银耳	
游离氨基酸	天冬氨酸 Asp [#]	0.51±0.02 ^c	0.76±0.14 ^a	0.67±0.12 ^b	
	丝氨酸 Ser [*]	0.06±0.01 ^b	0.02±0.00 ^c	0.09±0.01 ^a	
	谷氨酸 Glu [#]	1.03±0.16 ^c	1.49±0.25 ^b	2.12±0.32 ^a	
	甘氨酸 Gly [*]	0.42±0.03 ^b	0.45±0.02 ^a	0.43±0.02 ^b	
	组氨酸 His	0.72±0.07 ^a	0.60±0.03 ^b	0.78±0.14 ^a	
	精氨酸 Arg	2.52±0.06 ^a	2.24±0.26 ^b	1.51±0.11 ^c	
	苏氨酸 Thr [*]	0.03±0.00 ^b	0.04±0.00 ^b	0.25±0.16 ^a	
	丙氨酸 Ala [*]	0.14±0.05 ^b	0.01±0.00 ^c	0.40±0.11 ^a	
	脯氨酸 Pro [*]	0.03±0.00 ^b	0.06±0.00 ^b	0.68±0.14 ^a	
	半胱氨酸 Cys	ND	ND	ND	
	酪氨酸 Tyr	0.36±0.02 ^a	0.03±0.00 ^c	0.28±0.06 ^b	
	缬氨酸 Val	ND	ND	ND	
	甲硫氨酸 Met	ND	ND	0.29±0.03	
	赖氨酸 Lys	0.10±0.01 ^a	ND	0.08±0.01 ^b	
	异亮氨酸 Ile	1.30±0.36 ^b	2.57±0.54 ^a	ND	
	亮氨酸 Leu	ND	ND	ND	
	苯丙氨酸 Phe	0.15±0.03 ^a	0.06±0.01 ^b	0.11±0.08 ^{ab}	
	氨基酸总量	7.37±0.60 ^c	8.33±0.75 ^a	7.69±0.32 ^b	
	游离 5'-核苷酸	胞苷酸 5'-CMP	0.42±0.02 ^a	0.10±0.00 ^b	0.45±0.02 ^a
		尿苷酸 5'-UMP	0.07±0.00 ^b	0.08±0.00 ^b	0.24±0.02 ^a
鸟苷酸 5'-GMP [#]		0.06±0.00 ^c	0.11±0.01 ^b	0.29±0.01 ^a	
肌苷酸 5'-IMP [#]		0.07±0.00 ^a	0.02±0.00 ^b	0.02±0.00 ^b	
黄苷酸 5'-XMP [#]		ND	ND	ND	
腺苷酸 5'-AMP [#]		0.05±0.00 ^b	0.05±0.00 ^b	0.09±0.00 ^a	
核苷酸总量		0.67±0.05 ^b	0.36±0.10 ^c	1.09±0.07 ^a	

[†] # 为鲜味氨基酸或核苷酸；* 为甜味氨基酸；ND 为未检出；同一行上标字母不同表示差异显著(P<0.05)。

外 His 和 Ile 也对苦味有贡献。虽然丝氨酸(Ser)、丙氨酸(Ala)和 Gly 的 TAV<1,但它们与 IMP 协同作用可以增强鲜味^[11]。从鲜、甜味 TAV 总和可以看出,黄色银耳鲜味更为突出。

5'-核苷酸与鲜味氨基酸的协同作用是提高食用菌鲜味的主要因素,可以通过 EUC 从另一个角度来评价样品的鲜味强度。有研究^[12]将 EUC 评价鲜味程度分为 4 个水平:>1 000,100~1 000,10~100,<10 g MSG/100 g。本草银耳、白银耳和普通银耳的 EUC 值对比见图 1,可以直观看出普通银耳鲜味强度高于其他两种样品(P<0.01),且处于第 3 个水平,另两个样品则处于最低水平。综上所述,研究通过鲜味物质含量、TAV 以及 EUC 等多个维度分析发现,黄色银耳鲜味突出,更适合作为烹饪的佐料,这也符合了人们日常的饮食习惯;而白银耳鲜味强

度较低,特别是本草银耳,在调制饮品时,口感更易于消费者接受。

2.3 银耳样品电子舌分析

如图 2(a)所示,不同银耳样品差异不明显,仅在酸味有轮廓的波动。采用主成分分析(principle component analysis,PCA)对不同银耳样品的滋味进行进一步挖掘分析,结果如图 2(b)所示,主成分 1(principle component 1, PC1)贡献率占比 47.4%,主成分 2(principle component 2, PC2)贡献率占比 25.3%,前两个主成分累积贡献率占比 72.7%,可以看出不同样品间存在明显差异。虽然雷达图谱整体差异不大,但是通过 PCA 可挖掘到细微差异,以及不同味道对样品整体呈味贡献程度是存在差异的。黄色银耳鲜、甜味突出,更适合作为菜肴的佐料,这与成分分析和 EUC 评价结果相吻合;本草银耳具有一定

表 3 银耳样品滋味物质的阈值和滋味活度值[†]

Table 3 Threshold values and TAVs of taste components in the *T. fuciformis* samples

指标	阈值 ^[13] / (mg · g ⁻¹)	滋味活度值(TAV)		
		本草银耳	白色银耳	黄色银耳
天冬氨酸 Asp [#]	1.0	0.51	0.76	0.67
丝氨酸 Ser [*]	1.5	0.04	0.01	0.06
谷氨酸 Glu [#]	0.3	3.43	4.97	7.07
甘氨酸 Gly [*]	1.3	0.32	0.35	0.33
组氨酸 His	0.2	3.60	3.00	3.90
精氨酸 Arg	0.5	5.04	4.48	3.02
苏氨酸 Thr [*]	2.6	0.01	0.02	0.10
丙氨酸 Ala [*]	0.6	0.23	0.02	0.67
脯氨酸 Pro [*]	3.0	0.01	0.02	0.23
半胱氨酸 Cys	—	—	—	—
酪氨酸 Tyr	—	—	—	—
缬氨酸 Val	0.4	—	—	—
甲硫氨酸 Met	0.3	—	—	0.97
赖氨酸 Lys	0.5	0.20	—	0.16
异亮氨酸 Ile	0.9	1.44	2.86	—
亮氨酸 Leu	1.9	—	—	—
苯丙氨酸 Phe	0.9	0.17	0.07	0.12
鸟苷酸 5'-GMP [#]	0.125	0.48	0.88	2.32
肌苷酸 5'-IMP [#]	0.25	0.28	0.08	0.08
腺苷酸 5'-AMP [#]	0.50	0.10	0.10	0.18
甜味物质 TAV 总和	—	0.62	0.41	1.38
鲜味物质 TAV 总和	—	4.80	6.79	10.32

[†] # 为鲜味氨基酸或核苷酸; * 为甜味氨基酸; “—”为阈值没有文献报道或 TAV 无法计算。

苦味和苦味回味,可能与本身苦味氨基酸以及本草基质存在的一些苦味物质迁移到子实体中有关。

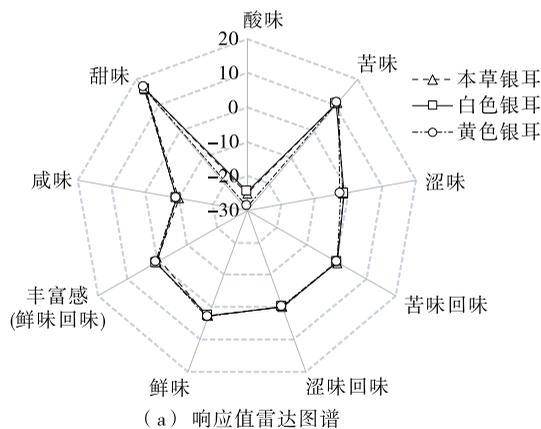


图 2 本草银耳、白色银耳和黄色银耳电子舌滋味分析及其 PCA 结果

Figure 2 Results of electronic tongue taste analysis and PCA Biplot of the *T. fuciformis* samples

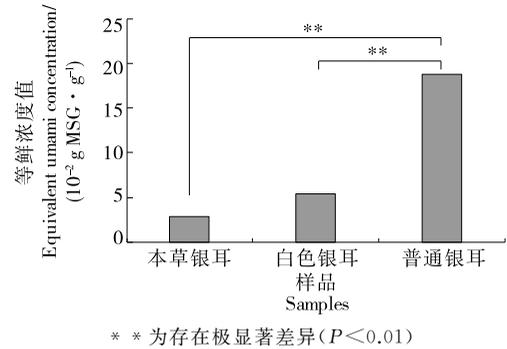


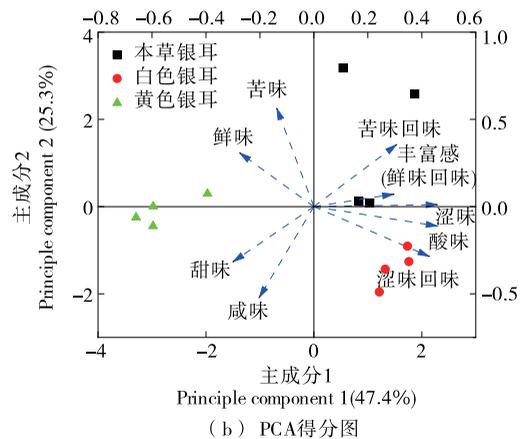
图 1 本草银耳、白色银耳和黄色银耳等鲜浓度值计算结果

Figure 1 EUC values of the *T. fuciformis* samples

2.4 银耳样品 SPME-GC-MS 挥发性成分分析

4 种银耳样品经 SPME 萃取后,结合 GC-MS 分析,挥发性成分 GC-MS 总离子流图见图 3。如图 4(a)所示,黄色银耳、白色银耳和本草银耳分别鉴定得到 49, 71, 82 种化合物,可见白色银耳香气物质丰富度要高于普通银耳,且经过本草基质改良后,香气丰富度进一步提升;其中主要以酯类和醛类为主,本草银耳中酯类检出 17 种,占比约 21%,其次是烷烃类化合物(12 种,占比 15.32%),通常情况下,大多烷烃类化合物香气较弱或无味,但烃类化合物可能作为杂环类化合物的重要中间体对风味形成具有基底作用,且在一些情况下,它们可以作为辅助呈香物质,使得香气更为柔和。如图 4(b)所示,本草银耳烷烃类化合物相对含量占比较高(14.23%),相对于白色银耳(醛类占比较高,13.82%)香气更加柔和,而黄色银耳则香气较为平淡,没有较为突出的香气种类。

如表 4 所示,筛选得到了 26 种银耳特征香气成分(即表 3 前 26 个化合物),它们不随品种和基质改变而消失,包括 6 种酯类、5 种醛类、4 种芳香类化合物、2 种醇



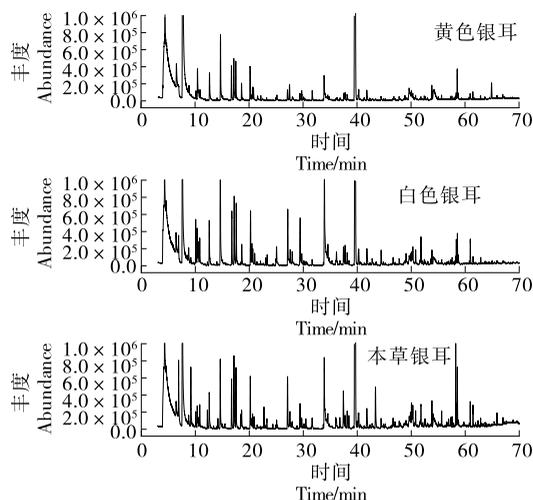


图 3 3 种银耳样品 GC-MS 总离子流图

Figure 3 TIC of GC-MS of the *T. fuciformis* samples

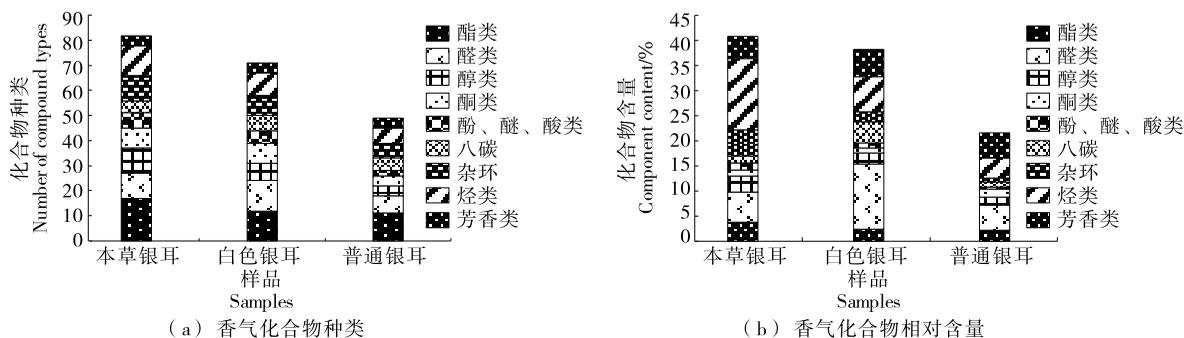


图 4 3 种银耳样品香气化合物种类及其相对含量

Figure 4 Types of aromatic compounds, and relative content of the *T. fuciformis* samples from GC-MS

表 4 银耳特征指纹香气成分[†]

Table 4 Characteristic fingerprint of the *T. fuciformis* samples and its aroma components

编号	保留时间/ min	化合物	含量/($\mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)			呈味特征
			黄色银耳	白色银耳	本草银耳	
1	4.3	己烷	2.26	3.38	9.73	无
2	4.6	甲基环戊烷	0.99	1.65	0.89	无
3	6.9	2-甲基咪喃	0.29	0.69	1.56	巧克力味
4	8.8	苯	0.39	0.44	0.28	芳香味
5	12.6	甲苯	1.33	1.41	0.99	芳香味
6	14.6	己醛	2.48	4.67	1.60	青草味
7	16.8	乙基苯	1.31	1.53	1.22	芳香味
8	17.2	1,3-二甲基苯	1.88	2.02	1.91	芳香味
9	20.6	己酸甲酯	0.45	0.36	0.36	热带水果味
10	23.3	2-戊基咪喃	0.07	0.28	1.56	果香
11	24.9	3-辛酮	0.12	0.15	0.09	蘑菇味
12	25.1	正戊醇	0.20	0.47	0.21	甜香脂味
13	33.7	辛酸甲酯	0.06	0.07	0.09	甜橙、植物本草味
14	33.9	正壬醛	1.05	4.38	1.91	玫瑰橙皮味
15	37.4	乙酸	0.36	0.67	1.16	酸味

类、2 种杂环化合物、2 种烷烃化合物、2 种八碳化合物、1 种酮类、1 种酸类和 1 种酚类化合物。白色银耳特有化合物有 27~35 号化合物,包括 6 种酮类、2 种醇类和 1 种醛类化合物,它们主要以花香、甜香为主。本草银耳特有化合物有 36~39 号化合物,包括酯类、酸类、醇类和杂环类化合物各 1 种,分别呈现花香、草本和烟草香等。

2.5 银耳样品电子鼻分析

研究所使用的电子鼻包含 10 个传感器,其名称和性能描述如表 4 所示,对银耳样品各传感器响应值绘图见图 5(a),其中 W1W、W5S、W1S 和 W2W 等传感器响应存在差异。基于 PCA 整体差异分析,PC1 和 PC2 的贡献率占比分别为 77.7% 和 10.1%,累积贡献率达 87.8%,大于 85%^[14],可见两个主成分包含了 3 种银耳样品的大部分特征信息(87.8%),可以描述不同银耳样品之间香气物质特征的差异;如图 5(b)所示,白色银耳系列相对聚集,与

续表 4

编号	保留时间/ min	化合物	含量/($\mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)			呈味特征
			黄色银耳	白色银耳	本草银耳	
16	37.7	1-辛烯-3-醇	0.32	0.54	0.32	蘑菇味
17	38.1	糠醛	0.24	0.36	0.47	杏仁香
18	41.8	苯甲醛	0.62	0.72	0.76	苦杏仁味
19	44.4	甲酸辛酯	0.21	0.53	0.32	玫瑰橙味
20	47.8	苯甲酸甲酯	0.16	0.17	0.15	冬青、杏花香
21	53.8	苯乙酸甲酯	0.39	0.27	0.44	蜂蜜、杏仁香
22	55.6	吡喃-2-酮	0.14	0.11	0.32	—
23	58.3	丁二酸二异丁酯	0.19	0.44	0.34	—
24	58.5	苯乙醇	0.89	0.65	1.10	玫瑰花味
25	60.8	苯酚	0.05	0.05	0.05	橡胶味
26	65.9	胡椒醛	0.07	0.06	0.23	向日葵、香草味
27	29.4	2,3-辛二酮	ND	1.57	0.68	蘑菇味
28	30.3	甲基庚辛酮	ND	0.07	0.04	—
29	46.6	甲基壬基酮	ND	0.23	0.25	奶香、花香
30	48.7	苯乙醛	ND	0.05	0.05	风信子香、可可味
31	49.9	糠醇	ND	0.23	0.25	焦糖味
32	50.0	正癸醇	ND	0.29	0.51	甜橙味
33	52.1	4-(5-甲基-2-呋喃基)丁烷-2-酮	ND	0.11	0.13	—
34	56.9	香叶基丙酮	ND	0.06	0.11	玫瑰香、果香
35	61.4	Dehydromevalonic lactone	ND	0.17	0.48	—
36	38.4	噻吩	ND	ND	0.32	蒜香
37	54.4	烟酸甲酯	ND	ND	0.08	温性草药烟草味
38	56.5	己酸	ND	ND	0.11	酸味、干酪味
39	63.9	苯氧基乙醇	ND	ND	0.05	玫瑰香、肉桂香

† 香气描述来源于 TGSC Information System(<http://www.thegoodscentscompany.com/search3.php>);“—”为未检索到相应香气描述;ND为未检出。

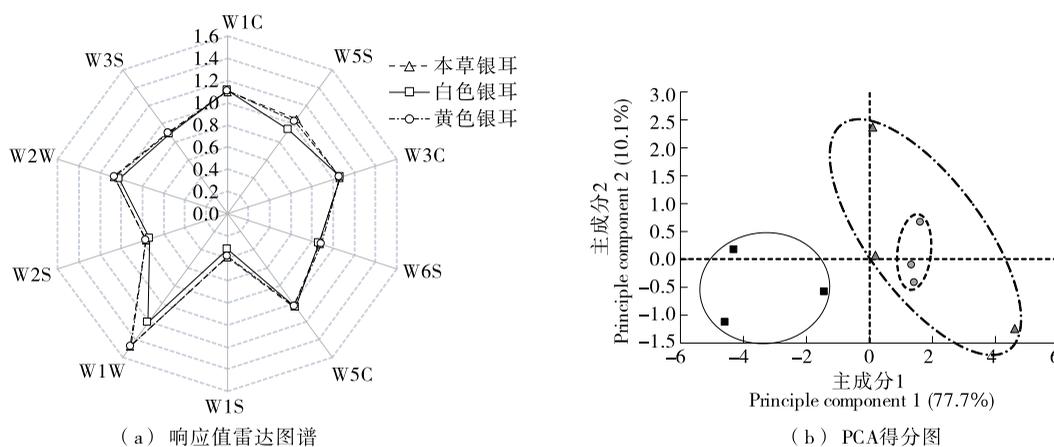


图 5 智能感官电子鼻传感器响应值雷达图谱和 PCA 得分图

Figure 5 Intelligent sensory electronic nose sensor response value radar map and PCA score map

普通银耳区分明显,且主要差异体现在 PC1 上。品种造成的香气差异程度要大于不同基质所产生的影响,从另

一个角度可以表明,电子舌加 PCA 具有用于不同品种样品的初步鉴别的潜力。

3 结论

采用高效液相色谱法和 HS-SPME-GC-MS 技术对不同栽培基质的银耳样品中的主要滋味成分和挥发性成分进行分析,并结合智能感官电子舌和电子鼻技术对样品的风味特征进行了解析。结果表明,游离鲜味氨基酸以普通银耳含量最高,比白色银耳和本草基质栽培的白色银耳分别高出 105.8% 和 42.3%。黄色银耳呈味核苷酸总量比白色银耳和本草基质栽培的白色银耳高出 122.2%,反映出黄色银耳样品鲜味更为浓郁。本草基质栽培的白色银耳和白色银耳鲜味较淡。电子舌滋味值雷达图谱观测到 3 种样品差异不明显,通过 PCA 进一步分析,可以看出样品间存在明显差异,其中普通银耳鲜、甜味突出,本草基质栽培的白色银耳具有一定苦味和苦味回味。挥发性成分鉴定结果显示,本草基质栽培的白色银耳鉴定得到 82 种挥发性物质,高于白色银耳和黄色银耳,以酯类为主,占比 16.9%~22.4%,呈现浓郁的花草芳香。香气物质含量方面本草基质栽培的白色银耳亦占据优势,其中烷烃类化合物相对含量占比比较高,相对于白色银耳香气更加柔和。不同样品电子鼻传感器响应值雷达图谱亦差异不明显,通过 PCA 整体差异分析发现,白银耳系列相对聚集,并且可与普通银耳产生区分。品种造成的香气差异程度要大于不同基质所产生的影响。综上所述,本草基质栽培的白色银耳鲜味淡香气浓,可开发调制饮品,而黄色银耳更适合作为菜肴。

参考文献

- [1] 姚清华, 颜孙安, 陈美珍, 等. 古田银耳主栽品种基本营养分析和评价[J]. 食品安全质量检测学报, 2019, 10(7): 1 896-1 902.
YAO Q H, YAN S A, CHEN M Z, et al. Basic nutrition analysis and evaluation of major cultivars of *Tremella fuciiformis* in Gutian[J]. *Journal of Food Safety & Quality*, 2019, 10(7): 1 896-1 902.
- [2] 姚淑先. 本草银耳栽培技术: ZL201510284636.8[P]. 2016-02-10.
YAO S X. Cultivation techniques of materia medica *Tremella*: ZL201510284636.8[P]. 2016-02-10.
- [3] BOOGERS I, PLUGGE W, STOKKERMANS Y Q, et al. Ultra-performance liquid chromatographic analysis of amino acids in protein hydrolysates using an automated pre-column derivatization method[J]. *Journal of Chromatography A*, 2008, 1 189 (1/2): 406-409.
- [4] 陈荣荣, 李文, 吴迪, 等. 大球盖菇生长发育过程中营养、质构和滋味特征的动态变化[J]. 食用菌学报, 2022, 29(4): 42-54.
CHEN R R, LI W, WU D, et al. Nutrients, texture and taste characteristics of *Stropharia rugosoannulata* during growth and development[J]. *Acta Edulis Fungi*, 2022, 29(4): 42-54.
- [5] 陈万超, 杨焱, 冯杰, 等. 不同产地商业品种香菇的滋味成分分析及评价[J]. 食品工业科技, 2015, 36(8): 152-157.
CHEN W C, YANG Y, FENG J, et al. Analysis and evaluation of taste components in dried *Lentinula edodes* collected from different areas[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2015, 36(8): 152-157.
- [6] 李文, 杨焱, 陈万超, 等. 不同干燥方式对香菇含硫风味化合物的影响[J]. 食用菌学报, 2018, 25(4): 71-79.
LI W, YANG Y, CHEN W C, et al. Effect of drying method on sulfur-containing components in *Lentinula edodes* [J]. *Acta Edulis Fungi*, 2018, 25(4): 71-79.
- [7] 崔伟, 孟祥忍, 高子武, 等. 牛肉低温蒸煮过程中挥发性风味成分及其前体物动态变化[J]. 食品与机械, 2022, 38(4): 20-28, 244.
CUI W, MENG X R, GAO Z W, et al. Dynamic changes of volatile flavor components and their precursors during low temperature cooking of beef[J]. *Food & Machinery*, 2022, 38(4): 20-28, 244.
- [8] 梁明才, 杨林. 精氨酸抗氧化作用机制[J]. 生物信息学, 2020, 18(4): 201-205.
LIANG M C, YANG L. Antioxidant mechanism of arginine [J]. *China Journal of Bioinformatics*, 2020, 18(4): 201-205.
- [9] 邹耀洪. 香菇中 5'-核苷酸的高效液相色谱-质谱分析[J]. 食品科学, 2005, 26(1): 196-198.
ZOU Y H. Analysis of 5'-nucleotide in *Lentinus edodes* with high performance liquid chromatography-mass spectrometry [J]. *Food Science*, 2005, 26(1): 196-198.
- [10] ZHENG J Y, TAO N P, GONG J, et al. Comparison of non-volatile taste-active compounds between the cooked meats of pre- and post-spawning Yangtze *Coilia ectenes* [J]. *Fisheries Science*, 2015, 81: 559-568.
- [11] KAWAI M, OKIYAMA A, UEDA Y. Taste enhancements between various amino acids and IMP[J]. *Chemical Senses*, 2002, 27(8): 739-745.
- [12] 梁明才, 杨林. 精氨酸抗氧化作用机制[J]. 生物信息学, 2020, 18(4): 201-205.
LIANG M C, YANG L. Antioxidant mechanism of arginine [J]. *China Journal of Bioinformatics*, 2020, 18(4): 201-205.
- [13] 刘登勇, 赵志南, 吴金城, 等. 不同地域特色熏鸡非盐呈味物质比较分析[J]. 食品科学, 2020, 41(2): 238-243.
LIU D Y, ZHAO Z N, WU J C, et al. Comparative analysis of non-salt taste compounds in featured smoked chickens from different regions[J]. *Food Science*, 2020, 41(2): 238-243.
- [14] 康佳木, 李倩倩, 刘柳, 等. 西北地区馒头老酵子中氨基酸主成分分析及综合评价[J]. 食品与机械, 2017, 33(4): 44-48, 53.
KANG J M, LI Q Q, LIU L, et al. Principal component analysis and comprehensive evaluation of amino acids in Chinese traditional dough fermentation starter from Northwest of China[J]. *Food & Machinery*, 2017, 33(4): 44-48, 53.