

不同生长阶段的竹笋挥发性物质的变化

银育婷¹, 王丹¹, 邓思宇¹, 周晓佳², 晏玲英², 肖婉逸³, 彭信辉⁴, 卢星军^{2*}

¹湖南医药学院药学院, 湖南 怀化

²湖南医药学院医学检验学院, 湖南 怀化

³湖南医药学院临床学院, 湖南 怀化

⁴湖南医药学院康复医学与健康学院, 湖南 怀化

收稿日期: 2025年12月20日; 录用日期: 2026年1月18日; 发布日期: 2026年1月27日

摘要

本研究聚焦于竹笋发育过程中挥发物成分的动态变化, 利用气相色谱 - 离子迁移谱(GC-IMS)技术, 对竹笋的出笋初期(IFS)、出笋中期(MBS)及出笋末期(LBS)三个关键发育阶段的挥发物进行精准剖析。通过该技术, 共鉴定出64种挥发性化合物, 涵盖醛类、醇类、酯类、酮类、醚类、吡嗪以及呋喃等多个类别。研究数据显示, 不同发育阶段竹笋的挥发物种类与相对含量均呈现显著差异。IFS以醛类化合物为主导同时2-辛酮, 丙酮, 嘧啶等物质的含量也较高; MBS中1-辛烯-3-醇、1-己醇、1-丙醇、乙醇、E-2-辛烯醛、乙酸乙酯等物质的含量较高; 至LBS中醛类, 酮类, 醇类的含量都较高此外还含有大量2-戊基呋喃、2-乙基呋喃、丁酸乙酯、乙酸甲酯、2,6-二甲基-3-乙基吡嗪、吡嗪、二甲基硫醚等物质。

关键词

竹笋, 色差仪, GC-IMS, 挥发性物质

Changes in Volatile Substances of Bamboo Shoots at Different Growth Stages

Yuting Yin¹, Dan Wang¹, Siyu Deng¹, Xiaojia Zhou², Lingying Yan², Wanyi Xiao³,
Xinhuai Peng⁴, Xingjun Lu^{2*}

¹School of Pharmacy, Hunan University of Medicine, Huaihua Hunan

²School of Medical Laboratory Science, Hunan University of Medicine, Huaihua Hunan

³Clinical College of Hunan University of Medicine, Huaihua Hunan

⁴School of Rehabilitation Medicine and Health, Hunan University of Medicine, Huaihua Hunan

Received: December 20, 2025; accepted: January 18, 2026; published: January 27, 2026

*通讯作者。

Abstract

This study focuses on the dynamic changes of volatile components during the development of bamboo shoots. By using gas chromatography-ion mobility spectrometry (GC-IMS) technology, the volatile components of bamboo shoots in the three key development stages of early emergence (IBS), middle emergence (MBS), and late emergence (LBS) are precisely analyzed. Through this technology, a total of 64 volatile compounds were identified, covering multiple categories such as aldehydes, alcohols, esters, ketones, ethers, pyrazines and furans. Research data shows that the types and relative contents of volatile substances in bamboo shoots at different developmental stages vary significantly. IBS is dominated by aldehyde compounds, while the content of substances such as 2-octanone, acetone, and thiophene is also relatively high. The contents of substances such as 1-octene-3-alcohol, 1-hexanol, 1-propanol, ethanol, E-2-octenal and ethyl acetate in MBS are relatively high. The content of aldehydes, ketones and alcohols in LBS is relatively high. In addition, it also contains a large amount of 2-pentylfuran, 2-ethylfuran, ethyl butyrate, methyl acetate, 2,6-di-methyl-3-ethylpyrazine, pyrazine, dimethyl sulfide and other substances.

Keywords

Bamboo Shoots, Colorimeter, GC-IMS, Volatile Substances

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

竹笋作为一种具有丰富营养价值和独特风味的食材，在我国饮食文化中占据着重要地位[1]。其风味在不同发育阶段呈现出显著差异，这种差异不仅影响着消费者的口感体验，还与竹笋的品质鉴定、加工利用以及市场价值密切相关。

挥发物质是竹笋风味的关键组成部分，其种类和含量在竹笋生长过程中发生动态变化[2]。为了深入探究这些变化我们将竹笋的发育阶段分为了三个时期分别是出笋初期 IBS，出笋中期 MBS，出笋末期 LBS [3]并利用 GC-IMS 对这三个时期的挥发物进行了测定。GC-IMS 在挥发物质的定性与定量分析中发挥核心作用[4]，它能够分离和检测竹笋中复杂的挥发物成分，确定各类挥发物质在不同发育阶段的含量变化趋势，从而揭示竹笋风味形成与发展的内在化学机制。本研究旨在利用 GC-IMS 技术全面分析不同发育阶段竹笋的挥发物成分，揭示其在竹笋生长过程中的变化规律，这不仅有助于深入理解竹笋风味形成的内在机制，还能为竹笋的品质评价、采摘时间的优化以及相关食品加工产业的发展提供科学依据和理论支撑，具有重要的理论与实践意义。

2. 材料与方法

2.1. 材料与试剂

为进行不同发育阶段的楠竹笋其挥发性有机物的比较，依循竹笋的生物学固有属性、生长进程以及笋箨外在表征，将竹笋发育历程划分为三个关键阶段：IBS、MBS 和 LBS，各阶段竹笋生长的详细情形呈现如图 1 所示。

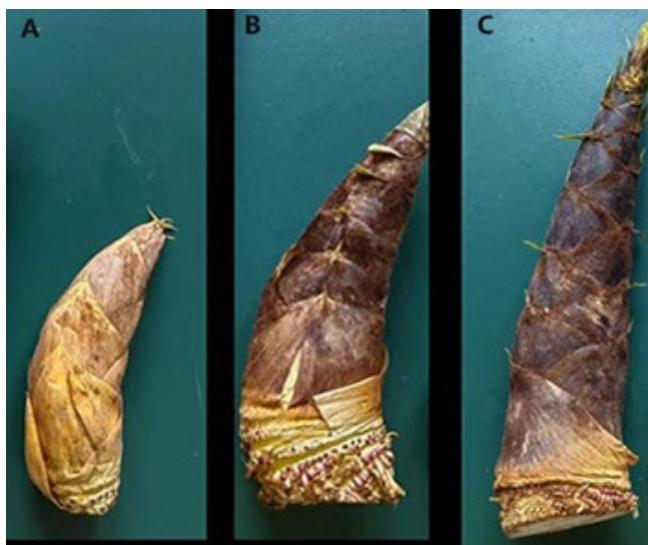


Figure 1. Bamboo shoots at different growth stages. (A) IBS, (B) MBS, (C) LBS

图 1. 不同生长阶段的竹笋。(A) IBS, (B) MBS, (C) LBS

供试竹笋品种为楠竹，采收地点为怀化市，采收日期分别为：出笋初期(IBS)2023年3月2日、中期(MBS)2023年3月7日、末期(LBS)2023年3月12日。各阶段划分标准如下：出笋初期(IBS)：笋高5~8 cm，笋重60~120 g，出土天数1~3 d；中期(MBS)：笋高25~35 cm，笋重250~350 g，出土天数4~6 d；末期(LBS)：笋高45~55 cm，笋重450~650 g，出土天数7~10 d。

针对上述三个不同发育阶段，各设立处理组，每组选取10株生理特性相近、生长态势茁壮的竹笋，并且设置3次重复操作。选取新鲜的竹笋样本，仔细剔除外皮、根部等不适宜食用的部位后，取2 g竹笋样品，-20℃冷冻保存。

实验仪器与设备

FlavourSpec®风味分析仪：采用气相色谱 - 离子迁移谱联用(GC-IMS)技术，用于测量固态或液态样品中的挥发性顶空成分。

2.2. 试验方法

GC-IMS 分析：本研究采用内标法计算挥发性有机物的相对含量，已知内标物(2-辛醇)的浓度为100 ppm，加入体积为20 μ l，在GC-IMS检测中先确定内标物的特征峰面积，再确定目标挥发性有机物的特征峰面积。通过公式“目标物相对含量 = (目标物峰面积/内标物峰面积) \times 内标物浓度”计算相对含量[5]。

取2 g样品，置于20 mL顶空瓶中，加入100 ppm 2-辛醇内标20 μ l，60℃孵育20分钟后进样。当样品进入气相色谱柱后，将分析时间设置为40 min、色谱柱类型为wax，30 m，ID：0.53 mm，膜厚1 μ m(美国 RESTEK 公司)将柱温设为60℃、载气/漂移气为N₂、IMS温度设为45℃，以确保不同挥发性有机物能够有效地分离[6]。在气相色谱分离的过程中，挥发性有机物会根据其化学性质和沸点的不同，在色谱柱上进行分离。再将分离后的挥发性有机物送进离子迁移谱进行检测，离子迁移谱通过测量挥发性有机物在电场中的迁移速度，来确定其化学结构和浓度[7]。“-M”：代表质子化分子离子，即1个有机物分子(M)结合1个质子(H⁺)形成的离子。“-D”：代表质子化二聚体离子，即2个有机物分子(M)结合1个质子(H⁺)形成的二聚体离子[7]。

2.3. 数据分析

首先要收集气相色谱 - 离子迁移谱(GC-IMS)的分析结果后，整理数据，确保每一行对应一个样本，每一列对应一种挥发性有机物的含量信息，剔除异常值与缺失值。

用 CNSKnowal 分析结果，确定竹笋中挥发性有机物的种类和含量，并通过与标准化合物的比对，来确定挥发性有机物的化学结构。

再充分利用 VOCal 软件完成分析谱图及数据的定性定量解析。依托软件内置的权威 NIST 数据库与 IMS 数据库，为物质定性分析提供坚实支撑；借助 Reporter 插件，能够直接比对不同样品间的谱图差异，涵盖三维谱图、二维俯视图以及差异谱图，实现多维度、精细化的差异甄别。Gallery Plot 插件的启用，则聚焦于指纹图谱对比，以直观且量化的方式呈现不同样品挥发性有机物的差异特性。Dynamic PCA 插件通过动态主成分分析手段，达成对样品的聚类划分，为未知样品的种类快速判定提供高效解决方案。此外，“最近邻”指纹分析功能依据所选评估区域内化合物的强度，对样本展开快速比对，借助欧几里得距离算法精密计算各样本两两之间的距离关系。

3. 结果与分析

3.1. 不同生长阶段的竹笋的颜色变化

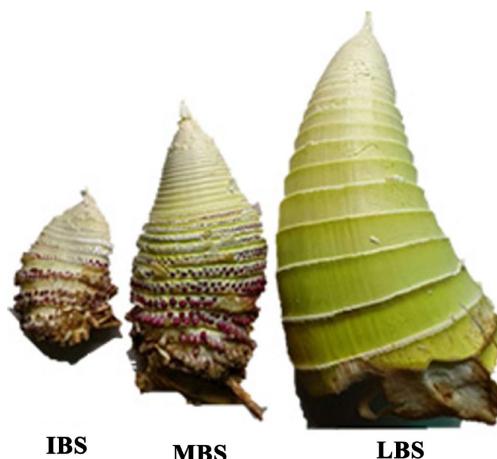


Figure 2. The apparent changes of bamboo shoots at different growth stages

图 2. 不同生长阶段的竹笋的表观变化

如图 2 所示，竹笋在 IBS 期整体呈黄白色，到 LBS 期时，竹笋的绿色调更加明显，整体呈黄绿色。色差仪也验证了这一点(见表 1)，IBS 期到 LBS 期总色差显著增加，明度值显著增加，黄度值显著增加，色调值无明显变化[8]。

Table 1. Color difference values of bamboo shoots at different growth stages
表 1. 不同生长阶段的竹笋的色差值

指标	IBS	MBS	LBS
ΔL	-25.385 ± 3.075	-9.947 ± 3.347	-5.793 ± 0.053
Δa	2.855 ± 0.175	2.363 ± 0.457	3.60 ± 0.007

续表

Δb	21.845 ± 0.765	32.47 ± 1.49	40.673 ± 0.053
ΔC	21.9275 ± 0.7725	32.50 ± 1.47	40.763 ± 0.053
ΔH	2.1275 ± 0.0825	1.93 ± 0.17	2.453 ± 0.007
ΔE	33.6425 ± 2.0275	34.15 ± 0.52	41.24 ± 0.06

3.2. 不同生长阶段的竹笋 GC-IMS 图谱分析

图 3 为 Reporter 插件制作的二维俯视图, 背景为蓝色, 横坐标 10 处红色竖线为 RIP 峰(反应离子峰, 经归一化处理), RIP 峰两侧的每一个点代表一种挥发性有机物。根据峰(色点)的有无或者颜色深浅能够直观表现不同样品之间的组分及浓度差异, 白色表示浓度较低, 红色表示浓度较高, 颜色越深表示浓度越大[9]。由图 3 可以直观看出, 不同生长阶段的竹笋挥发性物质的差异, 从 IBS 期到 LBS 期的竹笋样品中大部分风味物质浓度增加, 个别物质浓度有所下降。

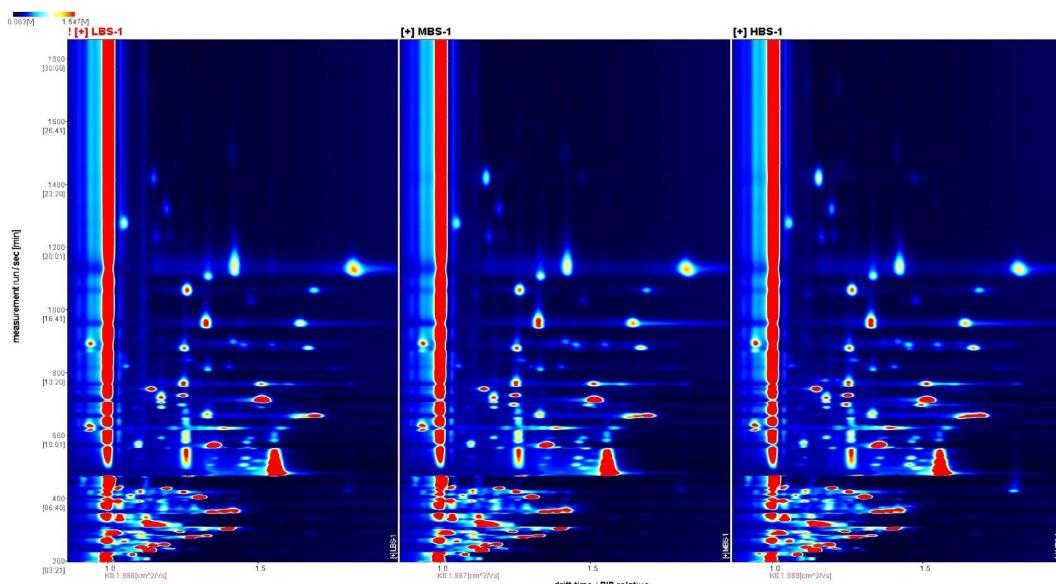


Figure 3. GC-IMS spectrum of the sample (top view)

图 3. 样品的 GC-IMS 谱图(俯视图)

3.3. 不同生长阶段的竹笋挥发性有机物的定性分析

通过 GC-IMS 技术对竹笋的挥发性物质进行了定性分析, 在竹笋中初步鉴别出 64 中挥发性化合物(如图 4 所示), 其中醇类 18 种, 醛类 28 种, 酮类 10 种, 酯类 3 种, 醚类 1 种, 吡嗪 2 种, 呋喃 2 种。由图 4 热力图可知, 竹笋的挥发性化合物中, 己醛-D 含量占比最多, 且随着生长时期延长, 己醛-D 的含量整体呈上升趋势。醛类物质是竹笋中挥发性气味的重要组成部分, 大部分醛类气味的阈值较低, 对竹笋的特殊香味有显著贡献[10]。

3.4. 不同生长阶段的竹笋挥发性物质的 Gallery Plot 指纹谱图

将不同生长阶段的竹笋, 即 IBS 期、MBS 期、LBS 期三个时期的竹笋分别进行 GC-IMS 测定, 其样品挥发性物质的指纹谱图见图 5。

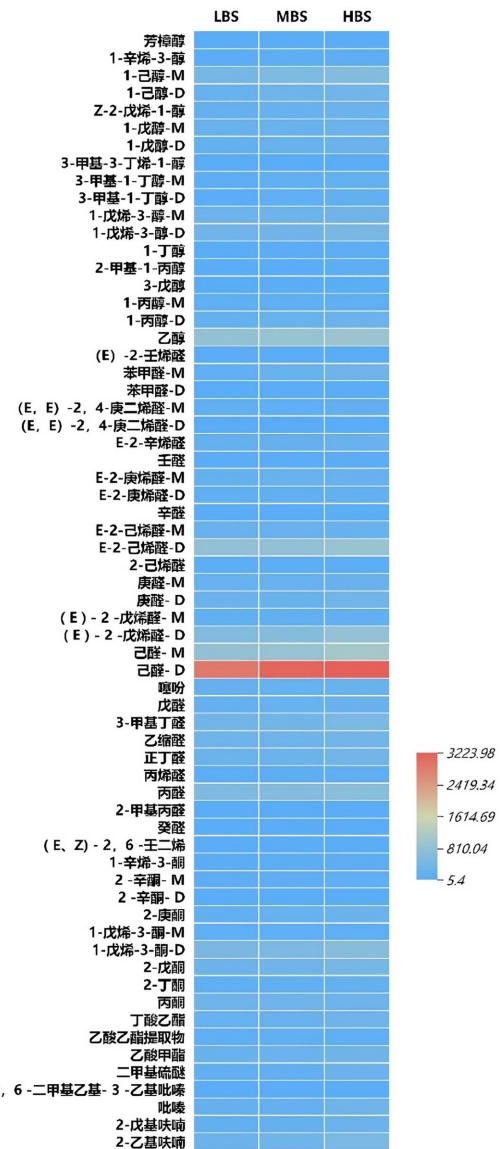


Figure 4. GC-IMS heat maps of volatile substances in bamboo shoots at different growth stages

图 4. 不同生长阶段的竹笋挥发性物质 GC-IMS 热力图

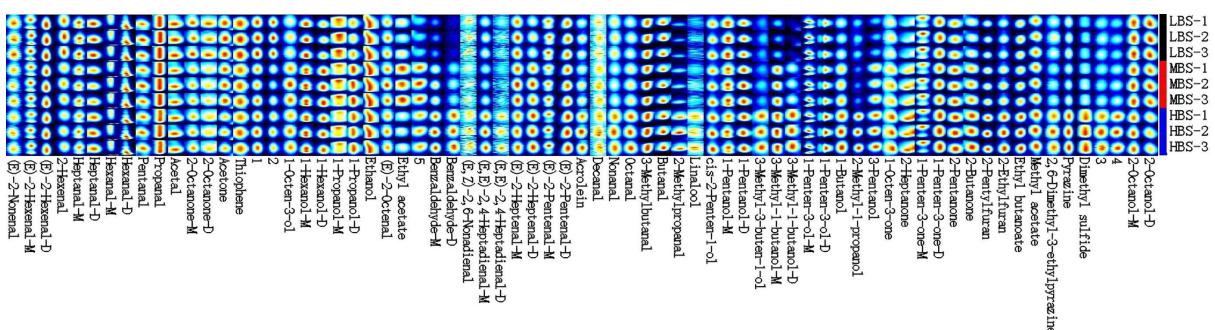


Figure 5. Fingerprint spectra of volatile substances in bamboo shoots at different growth stages
图 5. 不同生长阶段竹笋挥发性物质指纹图谱

如图 5 所示, 不同生长阶段的竹笋中的挥发性物质有所差异, 这也造成不同生长时期, 竹笋的风味也会有所不同。在 IBS 时期, 竹笋的挥发性化合物主要以醛类、简单酮类、杂环类化合物为主, MBS 时期, 则以醇类、不饱和醛类、酯类为主, 到了 LBS 时期, 醛类、醇类酮类、呋喃类酯类及含氮/硫化合物交织(见表 2)。醛类物质是“绿色”、“青草”以及“果香”等香气的重要贡献者[11][12], 其相对含量在所有品种中均随竹笋发育程度的增加整体呈上升趋势。醇类作为不饱和脂肪酸的氧化过程的副产物[13], 具有蘑菇味、清香、果香、酯香[11]。

Table 2. Identification of volatile compounds in bamboo shoots at different growth Stages based on GC-IMS
表 2. 基于 GC-IMS 不同生长期竹笋的挥发性化合物识别

时期	特征风味化合物	潜在风味贡献
IBS	E-2-壬烯醛、E-2-己烯醛、2-己烯醛、庚醛、己醛、戊醛、丙醛、乙缩醛、2-辛酮、丙酮、噻吩	青鲜草本香、清新果香、微弱焦香
MBS	1-辛烯-3-醇、1-己醇、1-丙醇、乙醇、E-2-辛烯醛、乙酸乙酯	蘑菇鲜香、温润醇香、明亮果香酯香
LBS	苯甲醛、(E, Z)-2,6-壬二烯醛、(E, E)-2,4-庚二烯醛、E-2-庚烯醛、E-2-戊烯醛、丙烯醛、癸醛、壬醛、辛醛、3-甲基丁醛、丁醛、2-甲基丙醛、芳樟醇、Z-2-戊烯-1-醇、1-戊醇、3-甲基-3-丁烯-1-醇、3-甲基-1-丁醇、1-戊烯-3-醇、1-丁醇、2-甲基-1-丙醇、3-戊醇、1-辛烯-3-酮、2-庚酮、1-戊烯-3-酮、2-戊酮、2-丁酮、2-戊基呋喃、2-乙基呋喃、丁酸乙酯、乙酸甲酯、2,6-二甲基-3-乙基吡嗪、吡嗪、二甲基硫醚	杏仁香、青鲜花香、醇厚脂香、优雅花香、坚果焦香、清甜果香、微弱烘烤香与硫香

4. 讨论

本实验采用 GC-IMS 对不同生长阶段的竹笋进行挥发性物质的组分及其含量进行测定, 通过测量固态或液态样品中的挥发性顶空成分。共鉴定出 64 种挥发性物质分为乙醇、醛、酮、酯、醚、吡嗪、呋喃七类挥发性物质。

挥发性物质在竹笋的不同生长过程中受到多种因素的影响, 如竹笋的光合作用、糖代谢以及一些生化途径(如脂肪酸的代谢、类萜的合成等)。与此同时竹笋中挥发性物质也影响着这些反应。挥发性物质的合成依赖于竹笋生长过程中的光合作用和糖代谢等提供碳骨架、能量等[14]。从而影响挥发性物质的产量和种类。不饱和脂肪酸通过氧化作用生成醛类和醇类等挥发性物质(如乙醇、戊醇等)这些醇类物质可以使竹笋散发青叶和青苹果的气息[10]。类萜物质是竹笋挥发性物质的重要组成部分[7]。

不同的挥发物在不同阶段的含量各不相同使得竹笋的各个阶段的口感、风味各不相同, 不同挥发性物质的组合和相互作用为竹笋带来丰富的风味层次, 使竹笋的口感更加立体和富有变化。

5. 结论

综上, 各个阶段的竹笋中挥发性物质种类多样, 本研究主要利用 GC-IMS 技术阐述了不同生长阶段竹笋中挥发性物质的组分以及含量的变化, 为进一步理解竹笋在不同生长阶段的挥发性物质的动态变化以及风味形成的机制提供了参考和思路, 为竹笋的品质调控以及相关食品工业的发展提供理论依据以及数据支持, 从而推动育竹笋相关研究的发展。

基金项目

2023 年度湖南省大学生创新训练计划(4350); 2024 年度湖南省大学生创新训练计划(5921)。

参考文献

- [1] 杨光琼. 明清时期贵州的竹资源及竹文化[J]. 贵州文史丛刊, 2024(3): 63-73.
- [2] 谢伦岳. 桃果实着色功能验证体系的建立及调控因子 PpWRKY7 的克隆与功能分析[D]: [硕士学位论文]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2023.
- [3] 王波. 铺地竹生长规律及饲用价值的初步研究[D]: [硕士学位论文]. 南京: 南京林业大学, 2007.
- [4] 王霏霏. 循环卤制加工过程中卤汤理化特性和风味变化研究[D]: [硕士学位论文]. 南昌: 南昌大学, 2024.
- [5] 潘年琼, 吴宸印, 杨淇薰, 杨迺嘉, 杜成兴. 楠竹笋及其附属物挥发性成分的 GC-MS 分析与比较研究[J]. 中国果菜, 2024, 44(11): 18-24.
- [6] 孟新涛, 许铭强, 张婷, 古丽米热·祖努纳, 牛逍瞳, 郭金宝, 刘国庆, 马燕. 基于 GC-IMS 技术分析新疆不同品种核桃油挥发性物质的差异[J]. 中国油脂, 2025, 50(3): 102-109.
- [7] 胡玫, 黄艳波, 孔羽, 杨蕾, 周翔宇, 苏涛. 13 种芳香植物挥发性萜类化合物比较研究[J]. 西南林业大学学报(自然科学), 2023, 43(5): 164-170.
- [8] 郭明阳, 贺曰林, 潘凯婷, 鲍方艳, 应叶青. 基于 UPLC-MS/MS 的毛竹笋不同生长阶段差异代谢物分析[J]. 食品科学, 2023, 44(20): 283-291.
- [9] 周晓倩, 李晓贝, 张艳梅, 周昌艳, 任佳丽, 赵晓燕. 基于 GC-IMS 和 GC × GC-To F-MS 技术分析产地对羊肚菌挥发性风味成分的影响[J]. 中国农业科学, 2024, 57(22): 4553-4567.
- [10] 叶欣怡, 杜晓仪, 肖更生, 徐玉娟, 吴继军, 余元善, 李璐. 两株乳杆菌对发酵麻竹笋品质和挥发性风味物质的影响[J]. 广东农业科学, 2024, 51(9): 151-162.
- [11] 乔晨, 赵慧宇, 林佳琦, 刘成, 刘有春, 齐沛沛, 孙晓丽, 王新全. 蓝莓果实不同发育时期挥发性风味物质变化及差异性分析[J]. 现代食品科技, 1-13. <https://doi.org/10.13982/j.mfst.1673-9078.2026.4.0090>, 2025-10-31.
- [12] 李鹏, 王志强, 刘凤之, 冀晓昊, 王孝娣, 王莹莹, 刘培培, 王海波. 6 个草莓品种果实香气组分分类及育种方向分析[J]. 中国果树, 2023(6): 38-45+53+142.
- [13] 侯晓健, 张浩宇, 张光弟, 张昆明, 许昌, 姜仓. 不同成熟度红梅杏品质及挥发性物质研究[J]. 食品与发酵工业, 2022, 48(10): 177-182.
- [14] 刘毅, 邓琳, 李鹏程, 裴佳龙, 唐国建, 赵景威, 王曙光. 竹子快速生长过程中糖分代谢与运输机制研究[J]. 世界竹藤通讯, 2022, 20(4): 104-108.