DOI: 10.19812/j.cnki.jfsq11-5956/ts.20260402003
引用格式: 王泽杨, 刘贵巧. 不同干制方式香菇特征成分差异分析[J]. 食品安全质量检测学报, 2026, 17(16): 70–80.
Wang Zeyang, Liu Guiqiao. Analysis of the differences in characteristic components of *Lentinula edodes* based on different drying methods [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2026, 17(16): 70–80. (in Chinese with English abstract).

不同干制方式香菇特征成分差异分析

王泽杨, 刘贵巧*

(河北工程大学生命科学与食品工程学院, 邯郸 056038)

摘 要: 目的 探讨不同干制方式下香菇特征成分差异, 挖掘独特成分指标。**方法** 以河南省南阳市西峡县的香菇主栽品种 939 为研究对象, 采用超高效液相色谱-三重四极杆/线性离子阱质谱法, 测定麦角甾醇等活性物质、琥珀酸等有机酸和天冬氨酸等游离氨基酸含量差异, 并结合多元数据统计分析, 分析不同干制方式香菇特征成分差异。**结果** 与其他干制方式相比, 真空冷冻和微波真空冷冻干燥处理后香菇中的麦角甾醇等活性成分总含量达到较高水平; 微波真空冷冻干燥处理后香菇中的琥珀酸等有机酸总含量达到最高; 游离氨基酸的总含量在真空冷冻干燥中达到最高。采用正交偏最小二乘判别分析(orthogonal partial least squares discriminant analysis, OPLS-DA)对 5 种干制方式下代谢物组成进行分析, 基于 OPLS-DA, 模型 $P<0.05$、变量重要性投影(variable importance in projection, VIP)>1, 且倍数变化(fold change, FC)>2 或 FC<0.5 为筛选条件, 共筛选出 7 种差异化合物, 包括琥珀酸、谷氨酸、天冬氨酸、柠檬酸、苹果酸、精氨酸和脯氨酸, 可清晰地区分不同干制方式的香菇。**结论** 本研究采用靶向代谢组学技术, 比较不同干制方式下香菇特征成分的含量差异, 为香菇加工中干燥工艺的优化与高值化利用提供数据支撑。

关键词: 香菇; 超高效液相色谱-三重四极杆/线性离子阱质谱法; 靶向代谢组学; 品质评价; 干制方式
中图分类号: TS255.36 **文献识别码:** A **文章编号:** 2095–0381(2026)16–0070–11

Analysis of the differences in characteristic components of *Lentinula edodes* based on different drying methods

WANG Ze-Yang, LIU Gui-Qiao*

(*College of Life Science and Food Engineering*, *Hebei University of Engineering*, *Handan* 056038, *China*)

ABSTRACT: Objective To investigate the differences in characteristic components of *Lentinula edodes* based on different drying methods, and identify unique compositional markers. **Methods** This study took the main cultivated strain 939 of *Lentinula edodes* from Xixia County, Nanyang City, Henan Province as the research object. Ultra performance liquid chromatography-triple quadrupole/linear ion trap mass spectrometry was employed to determine the content differences of bioactive substances (*e.g.*, ergosterol), organic acids (*e.g.*, succinic acid) and free amino acids (*e.g.*, aspartic acid). Combined with multivariate statistical data analysis, the variations in characteristic components of *Lentinula edodes* subjected to different drying methods were systematically investigated. **Results** Compared with other

收稿日期: 2026-04-02
第一作者: 王泽杨(1999—), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为食品加工与安全研究。E-mail: 2213829179@qq.com
***通信作者:** 刘贵巧(1969—), 女, 博士, 教授, 主要研究方向为农产品质量安全研究。E-mail: 844429512@qq.com

drying methods, the total content of bioactive components such as ergosterol in *Lentinula edodes* was higher after vacuum freeze-drying and microwave vacuum freeze-drying; the total content of organic acids such as succinic acid reached the highest level after microwave vacuum freeze-drying; and the total content of free amino acids was the highest after vacuum freeze-drying. Orthogonal partial least squares discriminant analysis (OPLS-DA) was applied to analyze the metabolite profiles under the 5 kinds of drying methods. Based on OPLS-DA, the criteria of $P<0.05$, variable importance in projection (VIP)>1, and fold change (FC)>2 or FC<0.5, a total of 7 differential compounds were identified, namely succinic acid, glutamic acid, aspartic acid, citric acid, malic acid, arginine and proline, which could clearly discriminate *Lentinula edodes* subjected to different drying treatments. **Conclusion** In this study, targeted metabolomics is employed to compare the content differences of characteristic components in *Lentinula edodes* under various drying methods, thereby providing data support for the optimization of drying processes and the high-value utilization of *Lentinula edodes* in processing.

KEY WORDS: *Lentinula edodes*; ultra performance liquid chromatography-triple quadrupole/linear ion trap mass spectrometry; targeted metabolomics; quality evaluation; drying methods

0　引　言

香菇(*Lentinula edodes*)作为一种药食同源性真菌, 同时也是我国第一大食用菌种类, 其产量、消费量和出口量均居世界首位, 凭借其独有的风味和丰富的营养价值, 在食品行业中备受消费者青睐[1]。我国香菇产品主要包括鲜香菇、干香菇、初加工产品及精深加工产品 4 大类别, 其中干香菇在我国香菇加工整体结构中占比 45%~55%[2]。凭借其便于长期储藏、远距离运输以及风味浓缩等优势, 干香菇在国内外市场中均获得广泛应用, 在香菇出口贸易中表现尤为突出[3]。

中国香菇加工产业规模持续扩张[4], 种植区域广泛, 年产量已逾 1300 万吨[4]。各主产区的香菇品种特性各异[5], 其中香菇 939 作为河南西峡的核心品种, 近年来被广泛推广种植。鲜香菇由于含水量高、呼吸作用强, 采后易发生开伞、褐变和品质劣变的问题, 在储运与销售过程中损耗较为严重[6]。香菇在采摘后仍能通过呼吸作用, 消耗体内的营养物质, 从而使得菌盖的颜色加深变为深褐色、菌盖开伞严重、水分丧失、出现褶皱, 甚至木质化, 降低香菇的商品价值[7]。香菇干制作为有效的保鲜手段被广泛应用于食用菌加工领域, 可以显著延长香菇的保存时间, 同时有助于浓缩和增强香菇独特的口感和风味[8]。此外, 干燥处理还可以抑制有害微生物的滋生, 达到常温长期储存的条件, 从而降低冷链储藏与物流成本。香菇富含香菇多糖、麦角甾醇等多种生物活性成分, 但这些成分多具有热敏性, 干燥过程可能导致其损失严重[9–10]。因此, 在干制生产过程中追求高效的同时, 也要兼顾营养成分的有效保留。对于香菇中营养成分的准确评估, 需借助特定的分析方法来进行定性以及定量的测定[11]。

现有研究主要关注干燥方式对香菇外观、香气和复水率[12]等品质指标的影响, 大部分集中在常规营养成分差异分析, 而对香菇中特征性成分包括麦角甾醇、麦角硫因、香菇嘌呤和过氧化麦角甾醇等活性成分以及琥珀酸等有机酸和天冬氨酸等游离氨基酸含量的变化研究相对较少。因此, 本研究拟采用靶标代谢组学技术, 分析不同干制方式对香菇中特征性成分的影响, 重点评估不同干制技术对其活性成分、有机酸、游离氨基酸等成分含量变化的影响, 为香菇加工提供更加高效、环保的技术方案, 为香菇加工中干燥工艺的优化与高值化利用提供理论依据。

1　材料与方法

1.1　试验材料

香菇 939(中国河南省西峡)。每组干燥方式的样本均重复 4 次。

麦角硫因标准品(纯度≥99.9%)、麦角甾醇、过氧化麦角甾醇(纯度≥98%)(上海源叶生物科技有限公司); 香菇嘌呤(纯度≥99.4%)(天津阿尔塔科技有限公司); 甲醇、乙腈、甲酸、乙酸、异丙醇(色谱级)(美国赛默飞世尔科技公司)。

1.2　仪器与设备

TSQ Endura 超高效液相色谱-三重四极杆/线性离子阱质谱仪、ST 16R 高速冷冻离心机(美国赛默飞世尔科技公司); BGZ-70 电热恒温鼓风干燥箱(上海一恒科学仪器有限公司); GHRH-20 热泵干燥机(广东省农业机械研究所干燥设备制造厂); GIPP-4000FD 真空冷冻干燥(上海继谱电子科技有限公司); ZDRC-I-LED 微波真空冷冻干燥机(成都正华公司); ME203E 分析电子天平(精度 0.001 g, 上海梅特勒-托利多仪器有限公司); E0301 QuSEL 平行研磨仪(北京微思行科技有限公司); SCDEALL VX-III涡旋振荡仪(北京踏锦科技有限公司); HKCL-948 80 目筛(海斯迪克公司);

3005 微孔滤膜(浙江泰林生物); 186002352 ACQUITY UPLC BEH C_{18}色谱柱(2.1 mm×100 mm, 1.7 μm)(美国沃特世公司); 930990-902 ZORBAX Eclipse XDB-C_{18}色谱柱(2.1 mm ×150 mm, 3.5 μm)(美国安捷伦科技公司); Milli-Q 水纯化系统(上海化科试验器材有限公司)。

1.3 试验方法

1.3.1 香菇水分的测定

按 GB/T 5009.3—2016《食品中水分的测定》规定的方法测定新鲜未干燥和干燥后香菇中水分含量, 将鲜香菇、干香菇样品质量换算成干重后计算测定指标的含量, 所有指标含量均以干重计。

1.3.2 香菇不同干制方式

(1)晒干

将鲜香菇单层平铺于白瓷盘中, 进行自然阳光下晾晒, 设置 4 个平行样本。环境温度 28~39 ℃, 相对湿度约 75%, 持续约 6 d, 记为 SD。

(2)热风干燥

将修整后的香菇样品置于烘箱中干燥, 设置 4 个平行样本, 温度条件设置为 55 ℃, 风速为 1 m/s, 记为 HAD。

(3)热泵干燥

将 HPD 组香菇在热泵干燥机中干燥, 设置 4 个平行样本, 条件为 55 ℃、风速 1 m/s, 记为 HPD。

(4)真空冷冻干燥

将香菇预冻(–20 ℃) 8 h 后, 在冷冻干燥机中进行两阶段干燥: 阶段 1: –25 ℃、100 Pa 真空条件下保持 8 h; 阶段 2: 20 ℃、50 Pa 真空条件下保持 16 h, 设置 4 个平行样本, 直至干燥完成, 记为 VFD。

(5)微波真空冷冻干燥

将微波真空冷冻干燥的新鲜香菇也同样经–20 ℃预冻 8 h, 冷阱温度设定为–35 ℃。取约 500 g 样品平铺于干燥箱中, 在微波功率密度为 0.4 W/g, 每 30 min 称重一次, 设置 4 个平行样本, 直至干燥完成(含水率低于 13%), 记为 MVFD。

所有干制的香菇样品去柄, 在暗光条件下切成均匀的薄片, 使用平行研磨仪将香菇研磨成粉过 80 目筛, 将过筛的香菇粉装进密封袋中置于−20 ℃保存, 鲜香菇洗净晾干表面水分后, 研磨后装进密封袋中置于−20 ℃保存。

1.3.3 香菇中 4 种活性成分的提取及定量检测

参考孙振英[13]的方法略作修改。活性成分定量检测设置 4 个平行样本。

化合物分析采用超高效液相色谱-串联质谱技术。参考孙振英[13]的方法略作修改, 液相色谱条件如下:

色谱柱: ACQUITY UPLC BEH C_{18} 色谱柱(2.1 mm ×100 mm, 1.7 μm); 柱温: 35 ℃; 流速: 0.3 mL/min; 流动相: A: 0.2%甲酸水溶液, B: 0.2%甲酸甲醇溶液, 流动相洗脱程序如表 1 所示; 样品进样量: 5 μL。

表 1 流动相梯度洗脱程序

Table 1 Mobile phase gradient elution program

时间/min	流速/(mL/min)	A 相/%	B 相/%
0	0.3	20	80
0.2	0.3	20	80
1.0	0.3	10	90
4.0	0.3	0	100
8.5	0.3	0	100
8.6	0.3	20	80
11.0	0.3	20	80

超高效液相色谱-三重四极杆/线性离子阱质谱仪条件: 离子源类型: 电喷雾离子源; 扫描方式: 多反应监测(multi-reaction monitoring, MRM); 喷雾电压: 正离子模式 3600 V; 质谱离子源温度: 325 ℃; 鞘气: 30 Arb; 辅助气: 10 Arb;

香菇嘌呤、麦角硫因、麦角甾醇、过氧化麦角甾醇的离子对及对应的碰撞能量、射入电压等详细的离子特征质谱条件见表 2, 麦角硫因、香菇嘌呤、麦角甾醇和过氧化麦角甾醇的质谱检测均采用正离子模式。

表 2 4 种活性成分保留时间、MRM 离子对及质谱检测参数

Table 2 Retention times, MRM ion pairs and mass spectrometry parameters for 4 kinds of active ingredients

化合物名称	保留时间/min	射频电压/V	子离子(*m*/*z*)	碰撞能量/V
麦角硫因	0.81	145	230.15→127.11*	16
			230.15→186.11	10
香菇嘌呤	0.83	81	254.15→136.11*	18
			254.15→178.04	35
麦角甾醇	7.40	128	379.18→145.13*	18
			379.18→212.99	17
过氧化麦角甾醇	6.64	78	451.36→433.28*	23
			451.36→423.33	25

注: *代表定量离子对。

1.3.4 香菇中游离氨基酸的提取及定量检测

样品前处理方法: 准确称取 500 mg 香菇粉于 50 mL 离心管中, 加入 20 mL 的 0.1%甲酸水溶液, 涡旋 5 min。将混合溶液于 10000 r/min 条件下离心 10 min, 取上清液过 0.22 μm 滤膜于进样小瓶中, 分别将提取液稀释 20 倍、400 倍, 保存于 4 ℃冰箱, 根据需求选择合适的稀释浓度进行进样。仪器方法: 超高效液相色谱-三重四极杆/线性离子阱质谱仪的仪器参数设置参考刘平香[14]所建方法。游离氨基酸定量检测设置 4 个平行样本。

1.3.5 香菇中有机酸的提取及定量检测

样品前处理方法参考 Tang 等[15]的方法, 并稍做修改: 准确称取 0.5 g 香菇粉于 30 mL 离心管中, 加入 5 mL 含 0.1%甲酸的 70%甲醇水溶液, 涡旋 3 min, 将混合溶液于

12000 r/min 条件下离 10 min, 取上清液于离心管中放置于–20 ℃冰箱冷藏 30 min, 接着将溶液于 12000 r/min 条件下离 10 min, 取上清液过 0.22 μm 滤膜于进样小瓶中, 保存于–20 ℃冰箱。

化合物分析采用超高效液相色谱-串联质谱技术。有机酸定量检测设置 4 个平行样本。参考 Tang 等[15]的方法稍作修改, 液相色谱条件如下: 色谱柱: ZORBAX Eclipse XDB-C_{18} (2.1 mm×150 mm, 3.5 μm), 柱温: 40 ℃, 流速: 0.4 mL/min, 流动相: A 为 0.1%甲酸水溶液、B 为 0.1%甲酸-甲醇溶液进样量: 5.0 μL。流动相梯度洗脱程序所包含的时间、流速等见表 3。

表 3　流动相梯度洗脱程序

Table 3　Mobile phase gradient elution program

时间/min	流速/(mL/min)	A/%	B/%
0	0.4	98	2
4.0	0.4	98	2
5.0	0.4	95	5
5.5	0.4	0	100
7.5	0.4	0	100
7.6	0.4	98	2
12.0	0.4	98	2

1.4　数据处理

柱状图和小提琴图使用 Graphpad Prism 10.1.2 进行绘制, 主成分分析(principal component analysis, PCA)和正交偏最小二乘-判别分析(orthogonal projection to latent structures-discriminant analysis, OPLS-DA)多元数据统计分析由 SIMCA-P 14.1 软件完成, 在使用迈维代谢云工具完成聚类热图的绘制, 单因素方差分析及相关性分析图采用 IBM SPSS Statistics 23 完成, 显著性分析方法为使用单因素方差分析, 事后比较方法使用最小显著差异(least significant difference, LSD)。

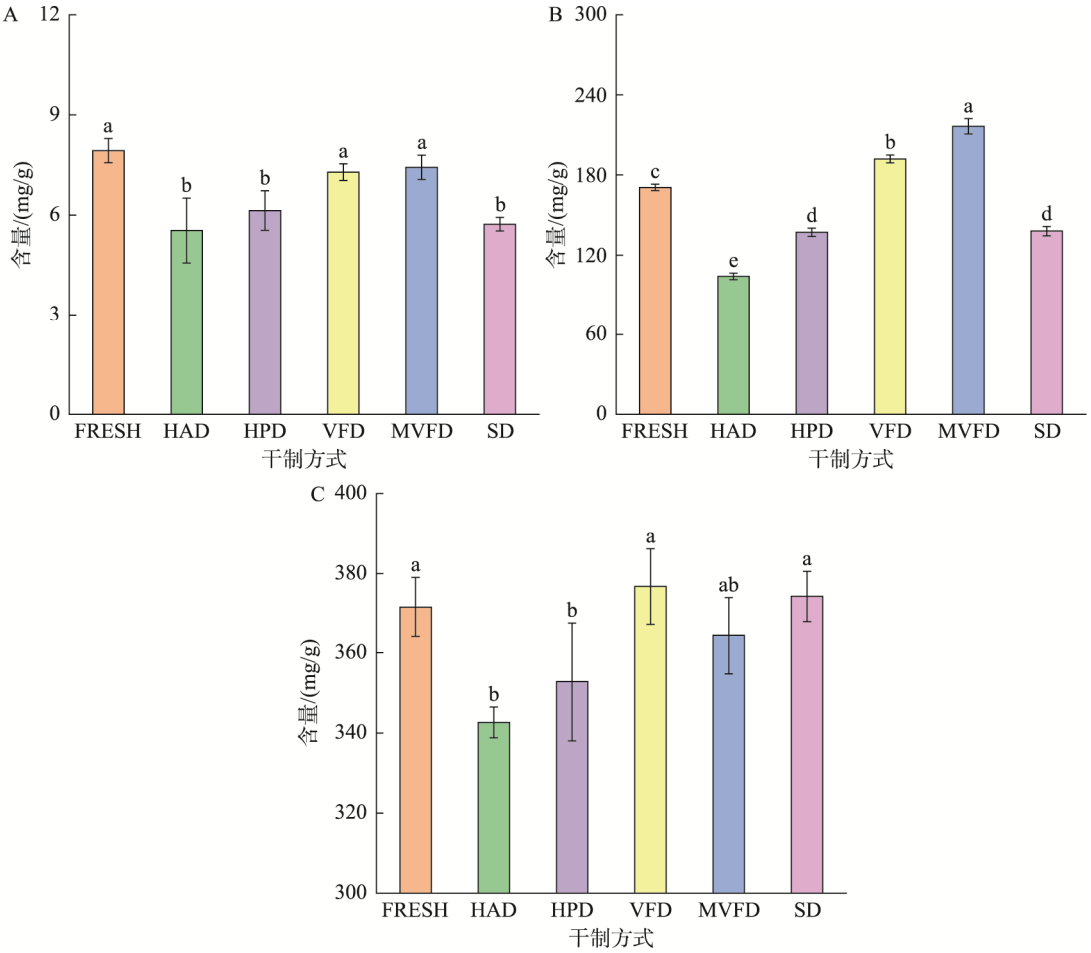
2　结果与分析

2.1　香菇品质成分定量结果分析

基于靶标代谢组学对香菇中 29 种特征品质成分进行定性及定量分析, 结果如图 1 所示。麦角甾醇等活性成分具有抗氧化及免疫调节等功效[16]。本研究比较新鲜香菇与不同干燥方式处理后含量的变化, 与其他干制方式相比, 真空冷冻和微波真空冷冻干燥处理后香菇中的麦角甾醇等活性成分总含量达到较高水平。新鲜香菇中麦角甾醇含量为 4.26 mg/g±0.34 mg/g, MVFD 和 VFD 无显著差异, 而 HAD 和 SD 显著降低(P<0.05), 表明低温干燥有利于其保留[17]。鄂恒超等[18]建立了食用菌中过氧化麦角甾醇的测定方法, 强调在加工过程中的稳定性是评价产品质量的重要指标。麦角硫因是一种天然含硫氨基酸衍生物[19], 在新鲜组中含量为 1.81 mg/g±0.04 mg/g, HAD 和 SD 则显著降低(P<0.05), 这与食用菌作为麦角硫因重要天然来源及加工方式影响保留率的认识一致[20]。香菇嘌呤作为香菇特有的降血脂成分[13], 在 MVFD 和 VFD 中保留最好。如图 1A 所示, 新鲜香菇中 4 种活性成分总量明显高于各干燥组, 经干燥后均出现不同程度下降, VFD、MVFD 和 SD 保留水平较高。这一现象可能与活性成分的热敏性有关: 热风和热泵干燥过程中长时间的热处理易导致发生热降解而 VFD 和 MVFD 的低温和真空环境有效抑制了氧化和酶促降解, 从而更好地保留活性成分[21]。

有机酸中, 部分含量在干燥后高于新鲜状态, 微波真空冷冻干燥处理后香菇中的琥珀酸等有机酸总含量达到最高。琥珀酸在 MVFD 含量高达 186.92 mg/g±4.39 mg/g 与其他处理组相比差异显著。柠檬酸在 VFD (23.72 mg/g±0.98 mg/g) 和 MVFD (19.13 mg/g±1.30 mg/g)中含量均显著高于新鲜组(16.83 mg/g±1.01 mg/g), 这与 Xu 等[22]的研究结果高度吻合, 干燥温度对风味成分保留具有显著影响。乙酸在所有干制组中含量均显著升高, 这种现象可能源于两个机制: (1)干燥过程中细胞结构破坏导致有机酸释放[23]; (2)干燥初期的温度激活三羧酸循环, 促进有机酸生物合成[24]。卢晓烁等[25]在香菇真空冷冻干燥研究中发现, 有机酸含量在解析干燥阶段增加。苹果酸和富马酸在 VFD 和 MVFD 与新鲜组无显著差异, 表明低温干燥对有机酸类物质的保留具有明显优势。如图 1B 所示, MVFD 香菇有机酸含量最高, HAD 和 HPD 显著降低, 有机酸含量的降低可能源于高温条件下的热降解[26]。SD 含量接近 HPD, 表明晒干对有机酸破坏较小, 但需注意光照和氧气可能引起的氧化影响[27]。

游离氨基酸是构成香菇鲜味和甜味的重要呈味物质, 游离氨基酸的总含量在真空冷冻干燥中达到最高。鲜味氨基酸的结果表明, VFD 谷氨酸含量高达 120.87 mg/g±6.30 mg/g, 显著高于新鲜组。Yang 等[22]的研究证实, 干燥过程中谷氨酸等含量增加, 新的呈味物质在干燥过程中生成; Du 等[28]进一步指出酶解处理有利于鲜味氨基酸的释放。脯氨酸则在 HAD 中含量最高(9.91 mg/g±0.26 mg/g), 显著高于新鲜组(9.45 mg/g±0.26 mg/g), 而在 MVFD 中最低(5.42 mg/g ±0.11 mg/g), 说明脯氨酸对干燥方式极为敏感。从氨基酸总量来看, MVFD 和 VFD 能够最大程度地保留香菇中的游离氨基酸, 尤其是鲜味氨基酸, 这与吕佳宁等[29]证实冷冻干燥法优于热风干燥且感官评价得分更高的结论一致。如图 1C 所示, SD 略高于鲜样, 游离氨基酸具有较强的热稳定性, 不易在干燥过程中发生严重降解[23]; 干燥过程中蛋白质可能发生部分酶解, 释放出更多游离氨基酸, 从而在一定程度上补偿了热降解造成的损失[12]。VFD 游离氨基酸总量与鲜样相当, 这与 VFD 能够保持物料原有结构和化学成分的特性相符[22]。



注: A. 4 种活性物质的总量; B. 5 种有机酸物质的含量; C. 20 种游离氨基酸的总量。FRESH 表示新鲜香菇样本, 下同。不同小写字母表示具有显著差异, $P<0.05$, 图 6~7、10 同。

图 1 鲜样状态及不同干制方式下香菇中品质成分含量差异

Fig.1 Differences in the content of quality components in *Lentinula edodes* under fresh state and different drying methods

2.2 多元数据统计分析

2.2.1 非监督模式识别

本研究运用 PCA 和层次聚类分析(hierarchical cluster analysis, HCA)两种非监督模式识别方法, 解析不同干燥方式对香菇中活性成分的影响, 并筛选可用于区分干制方式的潜在标志性化合物。图 2A 展示了样本的 PCA 得分图, 第一主成分(PC1)与第二主成分(PC2)的贡献率分别为 42.4%和 26.8%, 二者累计贡献率为 69.2%, 表明前两个主成分能够反映原始数据中的主要变异趋势, 但仍存在部分信息分布于其他成分中。从得分图中可观察到, 不同干燥方式处理的香菇样本本沿 PC2 轴明显分离, 分布于轴两侧, 说明加工方式的差异是导致品质成分组成不同的主要因素。

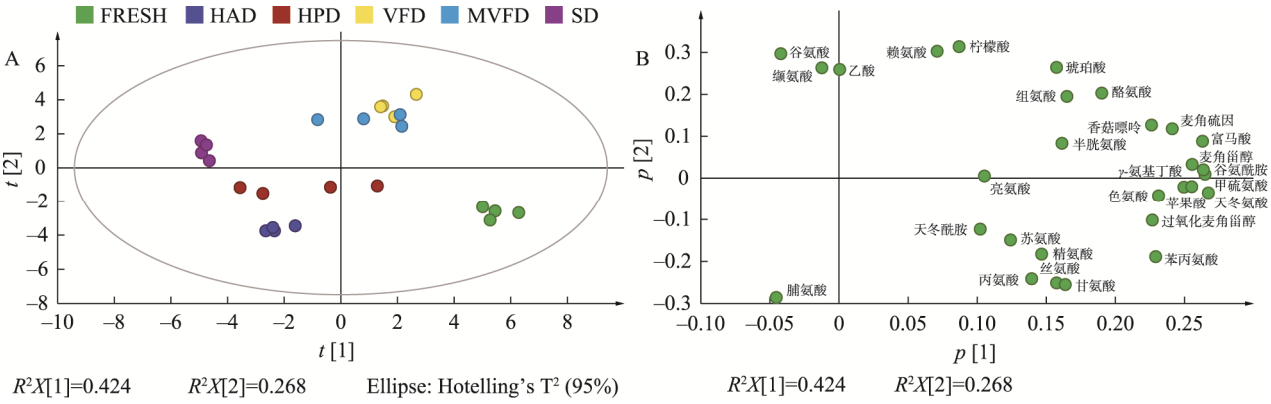
新鲜香菇(FRESH)样本主要分布在第四象限, 与其他干制方式明显区分。MVFD、VFD、HAD、SD 及 HPD 分别位于第一、第二和第三象限, 而 MVFD 和 VFD 位于第一象限, VFD 与 MVFD 样本可与鲜样明显区分。HAD 与新鲜样本沿某一主成分方向存在偏移, 表明干燥处理改变了香菇的活性成分组成。VFD 的分布范围较广, 与新鲜样本及热风干燥样本均有明显区分, 样本点均位于 Hotelling's T2 (95%)置信椭圆内。

基于以上结果, 不同干制处理是影响香菇品质成分含量的重要因素。图 2B 所示的载荷图揭示了各化合物对主成分的贡献, 可以看出富马酸、谷氨酰胺及苹果酸等成分在 PC1 方向贡献较大, 说明这些化合物对不同干制的区分贡献显著。而谷氨酸、缬氨酸及丙氨酸等在 PC2 方向上具有较高载荷, 表明这些化合物可能对区分不同干燥处理方式具有重要作用。这表明不同化合物对于干制方式的响应程度各不相同, 部分化合物对 HAD 敏感, 而另一些化合物则在 VFD 条件下得到更好保留[21]。

本研究基于香菇在不同干制处理下 29 种品质成分的含量数据绘制了聚类热图, 如图 3 所示, 新鲜样品和不同干制方式分别聚为两类, 表明干制方式是导致品质成分显著区别的主要因素。不同干燥组聚成不同的小类: HAD、HPD 与 SD 首先聚为一类, 表明这两种干燥方式对品质成

分的影响较为相似；而 FD 与 MFD 则聚为另一类，表明两组对成分的影响具有相似性。VFD 与 MVFD 则与其他干制组明显分离，说明两组处理对品质成分含量的影响接近于鲜香菇，这一结果与上述 PCA 的结果一致。

基于以上结果分析，聚类热图所反应的结果与 PCA 结果一致，证明不同的干制处理是影响香菇品质成分含量的重要因素。VFD 对香菇活性成分的影响与 HAD 存在明显区别，这与其低温真空的处理特性密切相关[30]。载荷图揭示的化合物分布规律可为筛选对不同干制方式响应的标志性化合物提供参考[23]。



注：A. 得分图；B. 载荷图。

图 2　不同干制方式下香菇样本的 PCA

Fig.2　PCA of *Lentinula edodes* samples under different drying methods

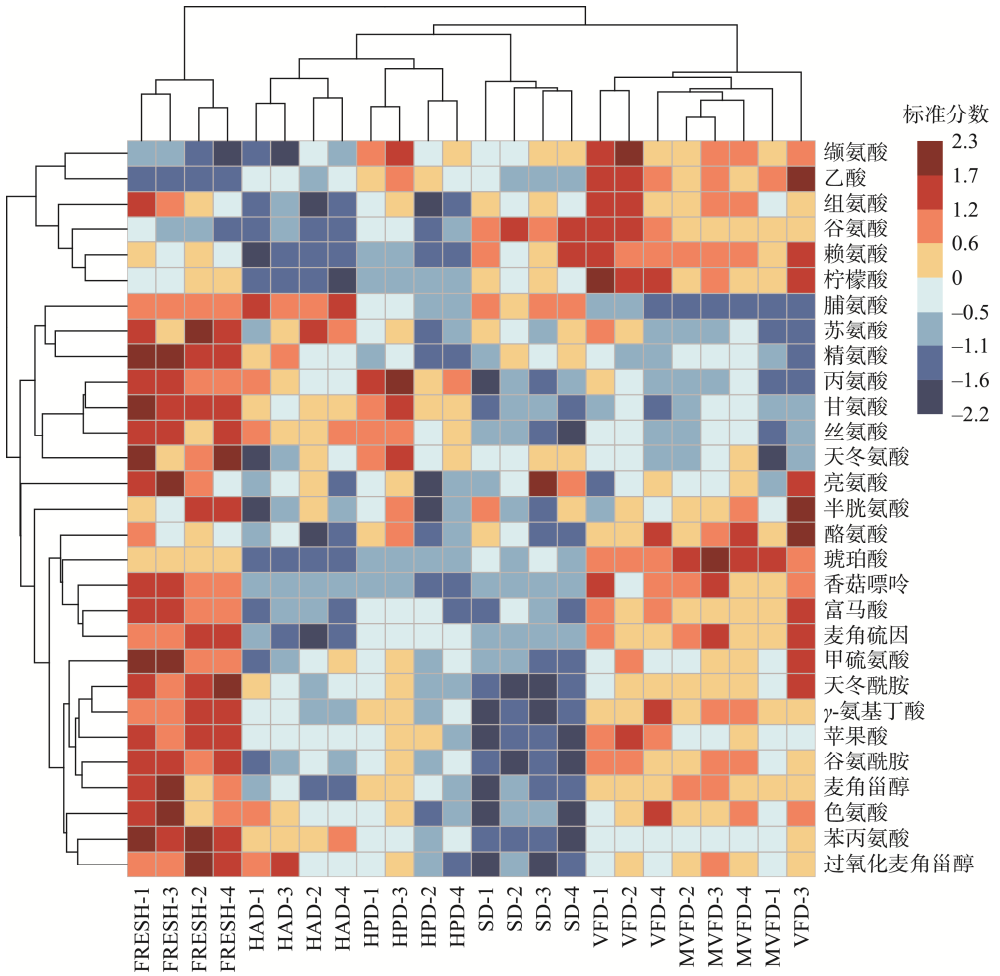


图 3　不同干制方式下香菇中 29 种品质成分含量的聚类热图

Fig.3　Cluster heatmap of the content of 29 kinds of quality components in *Lentinula edodes* under different drying methods

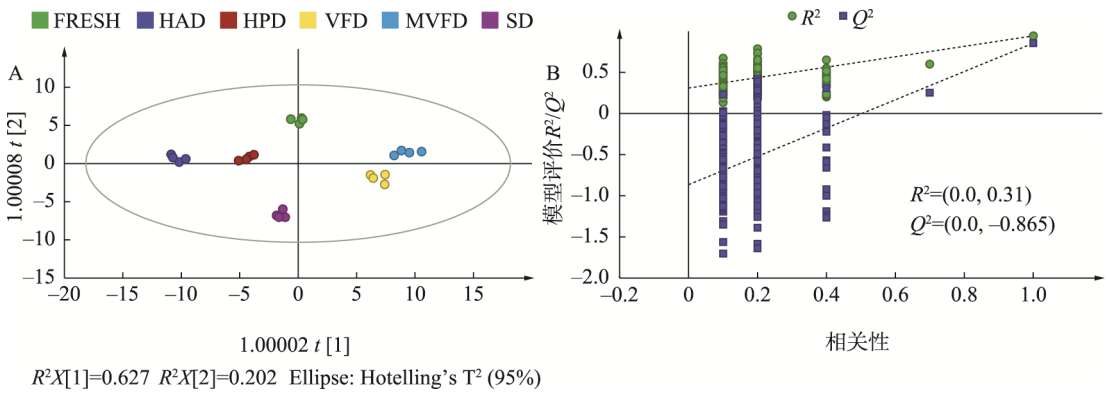
2.2.2 差异化合物的分析

为深入解析香菇在不同干制方式下品质成分的差异性，本研究采用OPLS-DA对5种干制方式下代谢物组成进行分析。如图 4A 所示，OPLS-DA 散点图中 6 类样本明显分离，表明其品质成分构成存在显著差异。为验证模型的可靠性，进行了 200 次置换检验(图 4B)。结果显示，置换生成的 R^2 与 Q^2 回归线与纵轴的交点均小于 0，且 Q^2 截距为负，表明模型未出现过拟合。基于 OPLS-DA 模型 P<0.05、变量重要性投影(variable importance projection, VIP)>1，且倍数变化(fold change, FC)>2 或 FC<0.5 为筛选条件，共筛选出 7 种差异化合物，如图 5 所示，其中包括琥珀酸、谷氨酸、天冬氨酸、柠檬酸、苹果酸、精氨酸和脯氨酸 4 种游离氨基酸和 3 种有机酸。

为直观展示这些化合物在不同干制方式下的分布差异，绘制箱线图，结果如图 6 和图 7 所示。在有机酸化合物中，如图 6A 所示，琥珀酸在 MVFD 中的含量显著高于其它干制方式，含量为(186.92±4.39) mg/g；柠檬酸在 VFD 中的含量显著高于其他干制方式(P<0.05)，含量为(23.72±0.98) mg/g(图 6B)；苹果酸在 VFD 中的含量为(9.99±0.68) mg/g(图 6C)，与新鲜组无显著差异(P>0.05)。而 HAD 含量为(7.72±0.23) mg/g，HPD 含量为(7.93±0.60) mg/g，MVFD 含量为(7.82±0.32) mg/g，3 组含量无显著性差异，和新鲜组对比含量显著降低(P<0.05)。如图 7 所示，在游离氨基酸化合物中，天冬氨酸含量在鲜样中含量最高，为(79.53±2.95) mg/g，和其他干制组相比具有显著性差异(P<0.05)(图 7A)，谷氨酸在 SD 含量最高，为(122.62±5.35) mg/g，在 VFD 组含量为(120.87±6.30) mg/g，两组含量无显著性差异，含量均高于鲜样和其他干制组(图 7B)。精氨酸含量在鲜样中含量最高，为(22.61±0.78) mg/g，和其他干制组相比具有显著性差异(P<0.05)(图 7C)，HPD 组含量最低，为(17.99±0.78) mg/g，HAD 组和 SD 组含量分别为(20.04±0.78) mg/g 和(19.53±0.91) mg/g，无显著性差异(P>0.05)。如图 7 D 所示，脯氨酸在 HAD 组中含量最高，为(9.91±0.26) mg/g，和其他干制组相比具有显著性差异。以上结果与聚类热图的发现一致，进一步从代谢物层面证实了不同干制方式对香菇品质成分构成的显著影响。

为了明确不同干制方式对香菇品质成分的影响，本研究依据聚类热图分析结果将样本划分为 3 类：鲜香菇组(F)、热干燥组(HD)包含 SD、HAD 与 HPD 处理及低温干燥组(FD)包含 VFD 与 MVFD 处理。采用 OPLS-DA 对上述 3 类样本一并进行比较，并进行 200 次置换检验。结果如图 8 所示，各组样本在 OPLS-DA 散点图中均呈现明显分离，表明不同干燥组的品质成分含量差异显著。置换检验结果表明，所有模型的 R^2 与 Q^2 截距均符合标准，未出现过拟合现象，证明模型具备良好的解释与预测能力。

基于 OPLS-DA 模型，以 P<0.05、VIP>1，且 FC<2 或 FC>0.5 为阈值，在 3 组比较中共同筛选出 5 种共有差异化合物(图 9)，其中包括：琥珀酸、柠檬酸、天冬氨酸、谷氨酸和精氨酸。为明确干燥方式对这些化合物含量的影响，进一步绘制了其含量分布箱线图(图 10)。分析表明，干燥处理可显著提高上述琥珀酸和谷氨酸的含量。其中，天冬氨酸和精氨酸在低温干燥组中含量最高，而琥珀酸、谷氨酸和柠檬酸则在热干燥组中富集程度最高。这些化合物可作为区分鲜香菇、热干燥香菇和低温干燥香菇的特征代谢物，从化学层面揭示了干制方式对香菇品质成分构成的特异性影响。



注：A. OPLS-DA 分析图；B. 置换检验图。图 8 同。

图 4 不同干制方式香菇中 29 种品质成分含量的差异分析

Fig.4 Difference analysis of the content of 29 kinds of quality components in *Lentinula edodes* under different drying methods

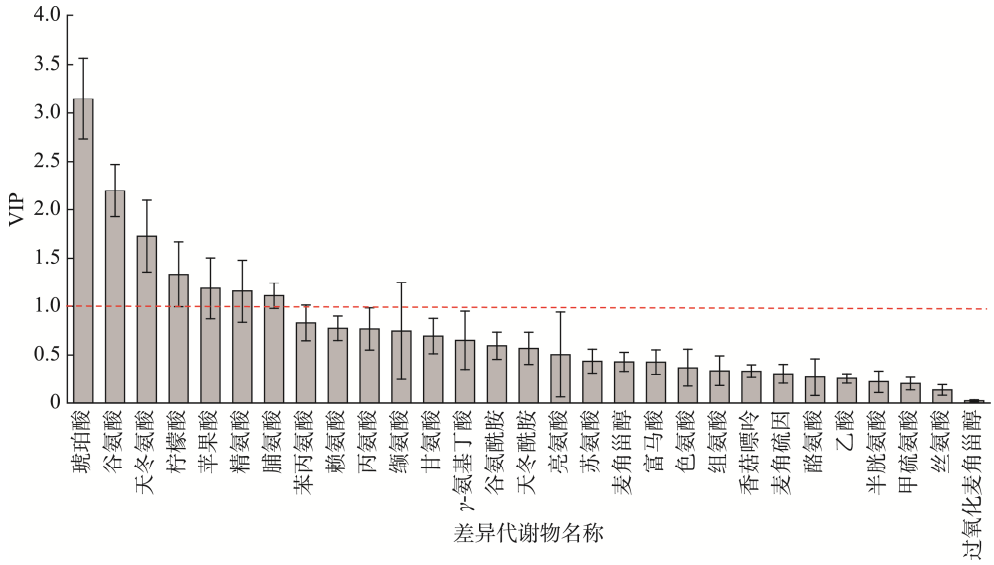
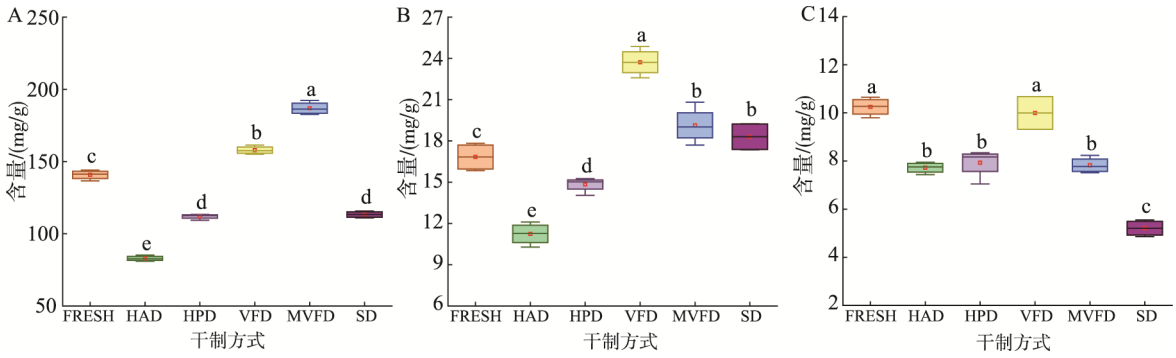


图 5　不同干制方式下香菇差异代谢物的 VIP 柱状图

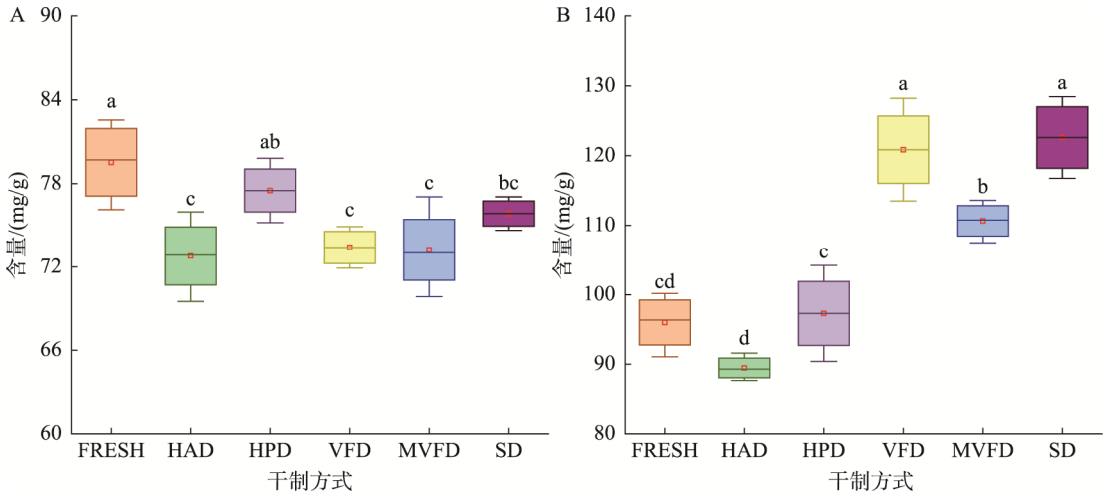
Fig.5　VIP score bar chart of differential metabolites in *Lentinula edodes* under different drying methods



注: A. 琥珀酸; B. 柠檬酸; C. 苹果酸。

图 6　不同干制方式下香菇 3 种差异化合物的含量

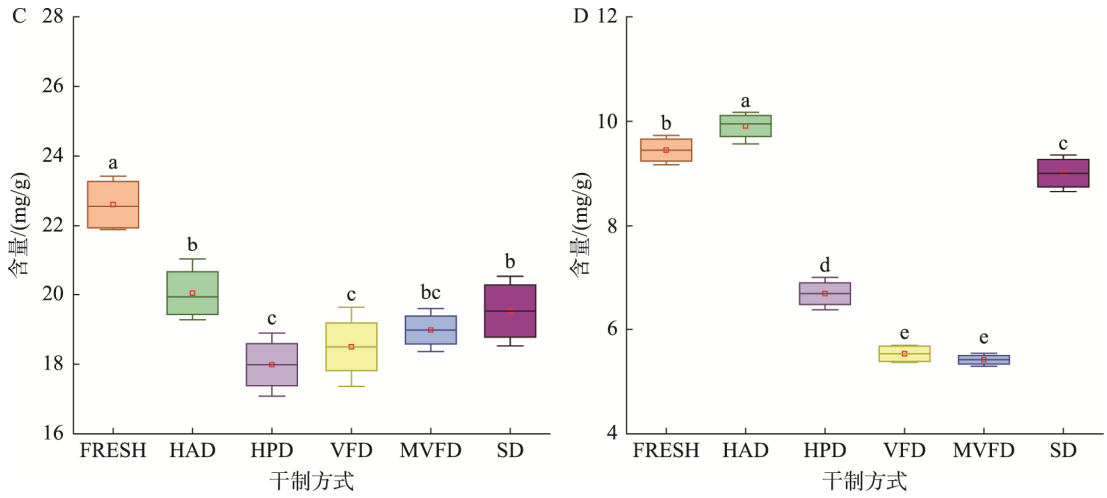
Fig.6　Content of 3 kinds of differential compounds in *Lentinula edodes* with different drying methods



注: A. 天冬酰胺; B. 谷氨酸; C. 精氨酸; D. 脯氨酸。

图 7　不同干制方式下香菇 4 种差异化合物的含量

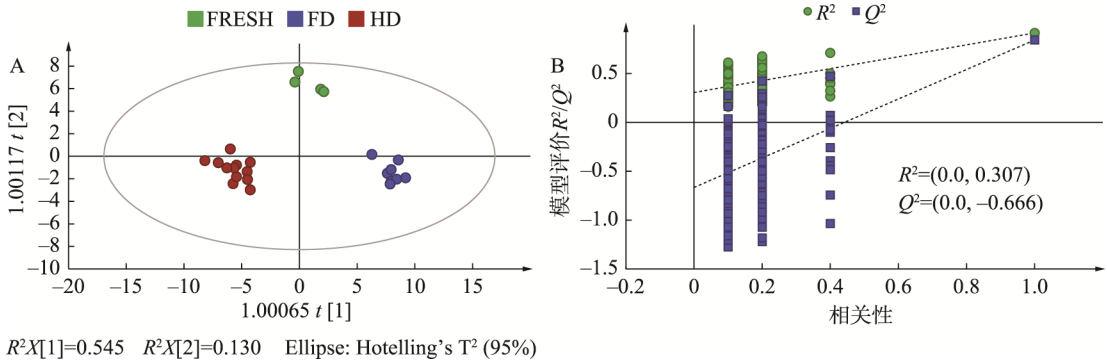
Fig.7　Content of 4 kinds of differential compounds in *Lentinula edodes* with different drying methods



注: A. 天冬酰胺; B. 谷氨酸; C. 精氨酸; D. 脯氨酸。

图 7(续) 不同干制方式下香菇 4 种差异化合物的含量

Fig.7 Content of 4 kinds of differential compounds in *Lentinula edodes* with different drying methods



R^2X[1]=0.545 R^2X[2]=0.130 Ellipse: Hotelling's T^2 (95%)

图 8 3 种干制条件下香菇 29 种品质成分含量 OPLS-DA 分析图

Fig.8 OPLS-DA analysis diagrams of 29 kinds of quality components of *Lentinula edodes* under 3 kinds of drying conditions

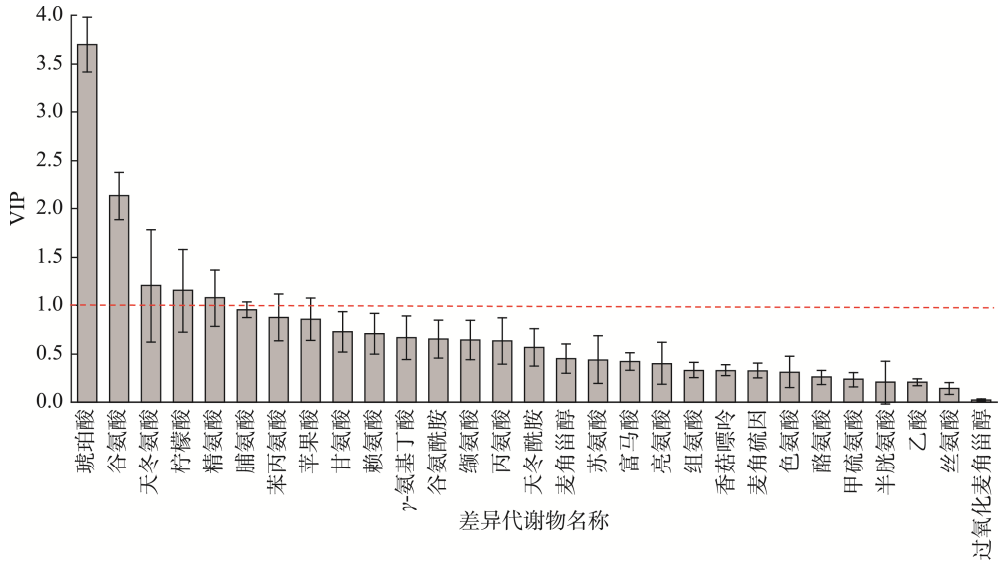
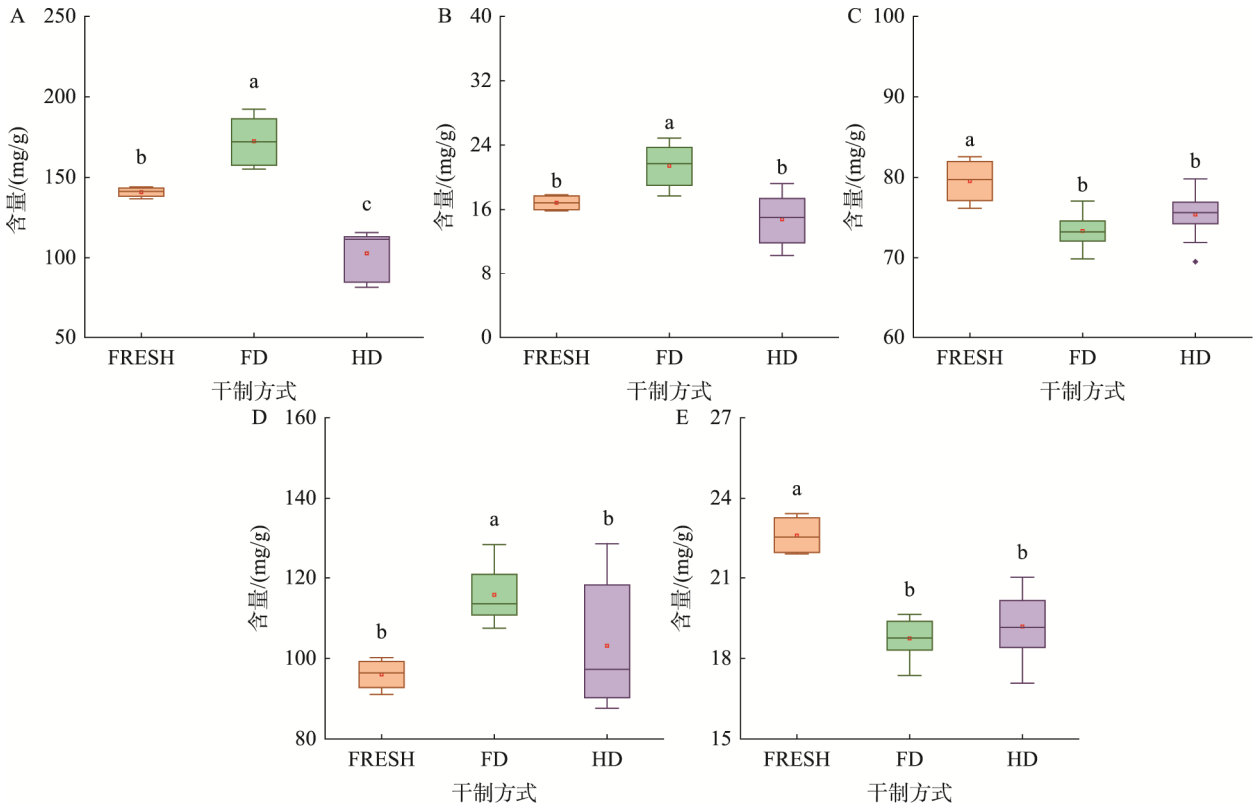


图 9 3 种干制条件下香菇差异代谢物的 VIP 值柱状图

Fig.9 VIP score bar chart of differential metabolites in *Lentinula edodes* under 3 kinds of drying conditions



注: A. 琥珀酸; B. 柠檬酸; C. 天冬氨酸; D. 谷氨酸; E. 精氨酸。

图 10　3 种干制条件下香菇的 5 种差异性化合物的含量比较

Fig.10　Comparison of the content of 5 kinds of differential compounds in *Lentinula edodes* under 3 kinds of drying conditions

3　结　论

本研究对香菇 939 品种的鲜样及不同干制样品中 29 种品质成分进行了定量分析，结果表明，不同干制方式是影响香菇品质成分的重要因素，MVFD 是综合表现最优的干燥方式。在 4 种活性成分保留方面，MVFD 与 VFD 保留率较高；在有机酸保留方面，MVFD 对琥珀酸的保留显著优于其他处理组(P<0.05)；在氨基酸保留方面，SD 仅次于 VFD。考虑到 MVFD 较 VFD 效率更高、成本更低，MVFD 是实际生产中较优的选择。VFD 在氨基酸保留方面具有显著优势。HAD 和晒干 SD 对活性成分和氨基酸的破坏较大，大多数指标在统计上均位于靠后的显著性水平。

通过多元数据统计分析，共鉴定出 7 种香菇不同干制方式的差异化合物，包括 4 种游离氨基酸和 3 种有机酸。在不同干制方式中，3 种有机酸在 VFD 和 MVFD 中含量均较高；而 4 种游离氨基酸在鲜样、SD 和 HAD 组的含量较其他干制方式而言比较高。同时，干燥温度也是影响香菇品质成分含量的关键因素，在鲜香菇、高温干燥与低温干燥组中共鉴定出 5 种共有差异化合物。高温干燥组中天冬氨酸和精氨酸含量更高，而琥珀酸、柠檬酸和谷氨酸在低温干燥组中更易保留，而谷氨酸在鲜香菇中含量最低。综上，不同干制方式在香菇特征成分含量上存在明显差异，可为地方品种优化与特色产品开发提供科学依据。未来可进一步研究不同干制方式香菇特征香型的形成机制。

参考文献

[1] Turło J, Gutkowska B, Herold F, et al. Optimizing vitamin B_1 biosynthesis by mycelial cultures of *Lentinula edodes* (Berk.) Pegl [J]. Enzyme and Microbial Technology, 2008, 43(4–5): 369–374.

[2] 曹斌, 高博. 我国香菇产业发展现状、趋势和对策研究[J]. 食药用菌, 2025, 33(4): 242–251.
Cao Bin, Gao Bo. Research on the current development, prospect and development countermeasures for the Xianggu (*Lentinula edodes*) industry in China [J]. Edible and Medicinal Mushrooms, 2025, 33(4): 242–251.

[3] Li Changtian, Xu Shuai. Edible mushroom industry in China: current state and perspectives [J]. Applied Microbiology and Biotechnology, 2022, 106(11): 3949–3955.

[4] 谭琦, 宋春艳. 中国香菇产业的现状、问题及发展建议[J]. 食药用菌, 2026, 34(1): 1–6.
Tan Qi, Song Chunyan. Current status, challenges, and development recommendations for China's Xianggu (*Lentinula* edodes) industry [J]. Edible and Medicinal Mushrooms, 2026, 34(1): 1–6.

[5] 曹斌, 张月吟, 高博. 全球香菇产业发展历史、现状及趋势[J]. 食用菌学报, 2024, 31(3): 1–20.
Cao Bin, Zhang Yueyin, Gao Bo. Development history, current situation and trends of global *Lentinula edodes* industry [J]. Acta Edulis Fungi, 2024, 31(3): 1–20.

[6] 刘娅妮, 孙鹏伟, 高虹, 等. 模拟电商物流环境下纳米保鲜袋对香菇贮

运品质的影响[J]. 食品安全质量检测学报, 2024, 15(3): 36–45.
Liu Yani, Sun Pengwei, Gao Hong, et al. Effects of nano fresh-keeping bags on storage and transportation quality of *Lentinula edodes* under simulated E-commerce logistics environment [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2024, 15(3): 36–45.

[7] Zhang Ning, Chen Haixia, Zhang Yu, et al. Comparative studies on chemical parameters and antioxidant properties of stipes and caps of shiitake mushroom as affected by different drying methods [J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2013, 93(12): 3107–3113.

[8] Tian Yuting, Zhao Yingting, Huang Jijun, et al. Effects of different drying methods on the product quality and volatile compounds of whole shiitake mushrooms [J]. Food Chemistry, 2016, 197(Pt A): 714–722.

[9] Yao Fen, Gao Hong, Yin Chaomin, et al. Effect of different cooking methods on the bioactive components, color, texture, microstructure, and volatiles of shiitake mushrooms [J]. Foods, 2023, 12(13): 2573.

[10] 曹燕妮, 华蓉, 游金坤, 等. 超高效液相色谱-三重四级杆串联质谱法(UHPLC-MS/MS)测定松茸中麦角甾醇含量[J]. 中国食用菌, 2023, 42(6): 69–73.
Cao Yanni, Hua Rong, You Jinkun, et al. Determination of ergosterol in *Tricholoma matsutake* by UHPLC-MS/MS [J]. Edible Fungi of China, 2023, 42(6): 69–73.

[11] Chen Li, Zhang Liping, Ye Xujun, et al. Ergothioneine and its congeners: anti-ageing mechanisms and pharmacophore biosynthesis [J]. Protein & Cell, 2024, 15(3): 191–206.

[12] Li Yao, Han Jingyi, Yarley O P N, et al. Effects of combined drying techniques and cellulase hydrolysis on the nutritional value and sensory properties of shiitake mushrooms (*Lentinus edodes*) [J]. Food Chemistry, 2024, 450: 139387.

[13] 孙振英. 基于代谢组学的不同产地干香菇特征成分差异研究[D]. 邯郸: 河北工程大学, 2025: 16.
Sun Zhenying. Study on the difference of characteristic components of dried *Lentinus edodes* from different habitats based on metabonomics [D]. Handan: Hebei University of Engineering, 2025: 16.

[14] 刘平香. 基于代谢组学的大蒜生长贮藏过程中特征成分变化研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2020: 1.
Liu Pingxiang. Distinct changes of characteristic compounds in garlic during growth and storage based on metabolomics [D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2020: 1.

[15] Tang Yajun, Wang Pengjie, Chen Jingyuan, et al. The accumulation pattern of sugars and organic acids in diverse fruit pulps coordinates sweet-sour taste of passion fruit [J]. LWT, 2025, 225: 117948.

[16] 刘鹏, 刘雪莲, 李金耀. 麦角甾醇过氧化物的生物活性及制备进展[J]. 中国新药杂志, 2023, 32(20): 2058–2065.
Liu Peng, Liu Xuelian, Li Jinyao. Progress in study on biological activities and preparation of ergosterol peroxide [J]. Chinese Journal of New Drugs, 2023, 32(20): 2058–2065.

[17] 刘秀继, 张国龙, 陈智仙, 等. 麦角甾醇原料筛选及制备工艺[J]. 中国酿造, 2026, 45(4): 229–234.
Liu Xiuji, Zhang Guolong, Chen Zhixian, et al. Raw materials screening and preparation process of ergosterol [J]. China Brewing, 2026, 45(4): 229–234.

[18] 鄂恒超, 彭书婷, 赵志勇, 等. 食用菌及其制品中过氧化麦角甾醇含量测定方法建立及应用[J]. 食用菌学报, 2024, 31(6): 112–118.
E Hengchao, Peng Shuting, Zhao Zhiyong, et al. Ultra-high-performance liquid chromatography-tandem mass spectrometry for detection of ergosterol peroxide in edible fungi and their processed products [J]. Acta Edulis Fungi, 2024, 31(6): 112–118.

[19] 刘向前, 邱晓锋, 刘忠. 麦角硫因的功能、制备及应用研究进展[J]. 中国食品药品监管, 2024(6): 116–128.
Liu Xiangqian, Qiu Xiaofeng, Liu Zhong. Research progress on the functions, preparation and application of ergothioneine [J]. China Food & Drug Administration Magazine, 2024(6): 116–128.

[20] 许晟, 刘琦, 姜文侠, 等. 高效液相色谱分析真菌液态发酵产物中的麦角硫因[J]. 食品工业科技, 2018, 39(18): 238–243.
Xu Sheng, Liu Qi, Jiang Wenxia, et al. Determination of ergothioneine content in liquid fermentation broth of fungi by HPLC [J]. Science and Technology of Food Industry, 2018, 39(18): 238–243.

[21] 张海伟, 鲁加惠, 张雨露, 等. 干燥方式对香菇品质特性及微观结构的影响[J]. 食品科学, 2020, 41(11): 150–156.
Zhang Haiwei, Lu Jiahui, Zhang Yulu, et al. Effects of drying methods on the quality characteristics and microstructure of shiitake mushrooms (*Lentinus* edodes) [J]. Food Science, 2020, 41(11): 150–156.

[22] Xu Yiming, Liu Wenchao, Li Linlin, et al. Dynamic changes of non-volatile compounds and evaluation on umami during infrared assisted spouted bed drying of shiitake mushrooms [J]. Food Control, 2022, 142: 109245.

[23] Wen Xinmeng, Li Wen, Li Wu, et al. Quality characteristics and non-volatile taste formation mechanism of *Lentinula edodes* during hot air drying [J]. Food Chemistry, 2022, 393: 133378.

[24] De Oliveira H O, Siqueira J A, Medeiros D B, et al. Harnessing the dynamics of plant organic acids metabolism following abiotic stresses [J]. Plant Physiology and Biochemistry, 2025, 220: 109465.

[25] 卢晓烁, 张毅航, 方东路, 等. 香菇真空冷冻干燥过程中滋味物质动态变化及鲜味评价[J]. 食品科学, 2021, 42(20): 91–97.
Lu Xiaoshuo, Zhang Yihang, Fang Donglu, et al. Dynamic change of taste compounds and umami evaluation of *Lentinula edodes* during vacuum freeze-drying process [J]. Food Science, 2021, 42(20): 91–97.

[26] 刘芹, 胡素娟, 牛森园, 等. 不同干燥方式对香菇品质、质构和微观结构的影响[J]. 北方园艺, 2023(11): 98–106.
Liu Qin, Hu Sujuan, Niu Senyuan, et al. Effects of different drying methods on the quality, texture and microstructure of shiitake mushroom [J]. Northern Horticulture, 2023(11): 98–106.

[27] Subramaniam S, Jiao Shunshan, Zhang Zhentao, et al. Impact of post-harvest processing or thermal dehydration on physiochemical, nutritional and sensory quality of shiitake mushrooms [J]. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety, 2021, 20(3): 2560–2595.

[28] Du Jiaxin, Xi Jiapei, Chen Xiao, et al. Effects of different extraction methods on the release of non-volatile flavor components in shiitake mushroom (*Lentinus edodes*) [J]. Journal of Food Composition and Analysis, 2024, 128: 106001.

[29] 吕佳宁, 李影, 韩立杰, 等. 不同干燥方法对生食香菇品质的影响[J]. 食品科学技术学报, 2014, 32(2): 46–50.
Lyu Jianing, Li Ying, Han Lijie, et al. Effects of different drying methods on quality of uncooked *Lentinus edodes* [J]. Journal of Food Science and Technology, 2014, 32(2): 46–50.

[30] Zhang Jin, Yagoub A E G A, Sun Yanhui, et al. Role of thermal and non-thermal drying techniques on drying kinetics and the physicochemical properties of shiitake mushroom [J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2022, 102(1): 214–222.

(责任编辑: 曹岱琳 蔡世佳)