

基于电子鼻与气相色谱-离子迁移谱的不同熬制温度下黑虎掌菌汤挥发性风味物质变化分析

古锬钰^{1,2}, 郑静怡¹, 许程剑^{1*}, 杨潇², 朱中燕¹, 闫妮娜¹, 肖静², 周宇¹, 朱楠¹, 易宇文¹

(1. 四川旅游学院食品学院, 四川成都 610100) (2. 西华大学食品与生物工程学院, 四川成都 610100)

摘要: 为探究熬制温度对黑虎掌菌汤风味的影响, 该研究采用电子鼻和气相色谱-离子迁移谱 (Gas Chromatography-Ion Mobility Spectrometry, GC-IMS) 结合相对气味活度值 (Relative Odor Activity Value, ROAV) 与多元统计法对不同温度熬制的黑虎掌菌汤的风味进行分析。结果表明: 黑虎掌菌汤中共鉴定出 35 种有效的挥发性化合物, 包括醛类 11 种、酮类 6 种、酯类 4 种、醇类 5 种、醚类 1 种, 杂环类 4 种和烯烃类 4 种, 其中醛类、酮类和醇类是黑虎掌菌汤的主要风味物质, 结合相对气味活度值发现: 熬制温度为 90 °C 时更有利于释放黑虎掌菌汤中的蘑菇香味; 利用正交偏最小二乘判别分析 (Orthogonal Partial Least Squares Discriminant Analysis, OPLS-DA) 建立稳定性与预测性较好的模型, 经变量重要投影因子 (Variable Importance in Projection, VIP) 筛选出 5 种关键差异风味物质 (VIP ≥ 1): 1-辛烯-3-酮-D、壬醛-D、1-辛烯-3-醇-D、壬醛-M、正丁醛-M、顺-4-庚烯醛。该研究为黑虎掌菌汤产品的风味优化提供实践参考与理论依据。

关键词: 黑虎掌菌; 电子鼻; 气相色谱-离子迁移谱; 相对气味活度值; 多元统计分析

文章编号: 1673-9078(2025)12-244-254

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2025.12.1349

Electronic Nose and GC-IMS Analysis of the Flavor Changes in *Sarcodon imbricatus* Soup Cooked at Different Temperatures

GU Siyu^{1,2}, ZHENG Jingyi¹, XU Chengjian^{1*}, YANG Xiao², ZHU Zhongyan¹, YAN Nina¹,
XIAO Jing², ZHOU Yu¹, ZHU Nan¹, YI Yuwen¹

(1.College of Food Science and Technology, Sichuan Tourism University, Chengdu 610100, China)

(2.College of Food and Biological Engineering, Xihua University, Chengdu 610100, China)

Abstract: The impact of cooking temperatures on the flavor of *Sarcodon imbricatus* soup was investigated using an electronic nose and gas chromatography-ion mobility spectrometry (GC-IMS), complemented by relative odor activity values (ROAVs) and multivariate statistical analyses. In total, 35 effective volatile compounds were identified in *S. imbricatus* soup, comprising 11 aldehydes, 6 ketones, 4 esters, 5 alcohols, 1 ether, 4 heterocyclic compounds, and 4 olefins, among which aldehydes, ketones, and alcohols were identified as the main flavor compounds. ROAVs were used to determine the conductivity of releasing mushroom

引文格式:

古锬钰,郑静怡,许程剑,等.基于电子鼻与气相色谱-离子迁移谱的不同熬制温度下黑虎掌菌汤挥发性风味物质变化分析[J].现代食品科技,2025,41(12):244-254.

GU Siyu, ZHENG Jingyi, XU Chengjian, et al. Electronic nose and GC-IMS analysis of the flavor changes in *Sarcodon imbricatus* soup cooked at different temperatures [J]. Modern Food Science and Technology, 2025, 41(12): 244-254.

收稿日期: 2024-09-10; 修回日期: 2024-10-23; 接受日期: 2024-10-29

基金项目: 四川科技厅区域创新合作项目 (24QYCX0265); 四川旅游学院 2023 年度高水平科研项目培育专项 (2023PY02); 四川省高等学校工程研究中心 (GCZX22-17); 特色园艺生物资源开发与利用四川省高等学校重点实验室 (2023TSYY-08); 国家大学生创新创业项目 (202511552231)

作者简介: 古锬钰 (2002-), 女, 硕士, 研究方向: 食品营养与安全, E-mail: siyu6222@163.com

通讯作者: 许程剑 (1978-), 男, 博士, 教授, 研究方向: 烹饪科学与食品工程, E-mail: helloxj2000@gmail.com

flavors in *S. imbricatus* soup at a cooking temperature of 90 °C. An orthogonal partial least squares discriminant analysis (OPLS-DA) model with good stability and predictability was established. After variable importance in projection (VIP) screening, five key differential flavor substances were identified: 1-octen-3-one-*D*, 1-nonanal-*D*, 1-octen-3-ol-*D*, 1-nonanal-*M*, butanal-*M* and (Z)-4-heptenal. These results provide practical reference data and a theoretical basis for the flavor optimization of *S. imbricatus* soup products.

Key words: *Sarcodon imbricatus*; electronic nose; gas chromatography-ion mobility spectrometry (GC-IMS); relative odor activity value (ROAV); multivariate statistical analysis

黑虎掌菌学名翘鳞肉齿菌 (*Sarcodon imbricatus* (L.) P. Karst.), 又名虎帽、獐头菌、虎掌菌等, 隶属于齿菌科、肉齿菌属, 是一种珍稀名贵野生食用菌。目前, 国内外对黑虎掌菌的研究主要集中于活性成分与营养成分的研究。多项研究表明, 黑虎掌菌中多糖具有多种生物活性, 具有抗疲劳^[1]、抗肿瘤^[2,3]、抗氧化^[4]、抗癌症^[5]等功效。此外, 黑虎掌菌在中医学中被认为具有疏风散寒、降低胆固醇、降血压等作用^[6], 是一种药用真菌。近年对食用菌挥发性风味物质的研究主要集中于对其风味成分的分离与鉴定, 张丹^[7]在松茸菌汤中鉴定出 64 种不同的挥发性化合物。李琴^[8]在双孢菇中检测出 50 中挥发性风味物质。王婷婷等^[9]在黑虎掌中鉴定出 37 种挥发性风味物质。

菌汤的风味是影响其食用品质的关键因素之一。风味化合物的产生与蘑菇的品种、加工方式、熬制时间、温度等因素密切相关。例如, 1-辛烯-3-醇被认为是蘑菇香气的主要贡献者, 在加热过程中它的含量会发生变化, 影响最终的风味感知^[10]。通过研究不同加工条件下挥发性风味化合物的变化, 可以优化加工工艺, 最大化菌汤的风味表现, 提升产品的食用品质。熬制温度是影响菌汤风味的关键参数。过高的温度熬制可能导致挥发性化合物的过度释放或分解, 从而降低风味的浓度和复杂性^[7,11]。另外, 适当的熬制温度能够平衡风味化合物的生成和释放, 使菌汤的风味更加浓郁且令人愉悦^[7,11]。因此, 基于挥发性风味化合物的动态变化, 研究熬制温度对于菌汤的食用品质的影响至关重要。目前, 关于黑虎掌菌加工制品的挥发性风味分析, 以及加工过程的挥发性风味变化还鲜见报道。

气相色谱-离子迁移谱 (Gas Chromatography-Ion Mobility Spectrometry, GC-IMS) 是近几年新兴的无损检测技术, 相较于气相色谱-质谱联用仪 (Gas Chromatograph-Mass Spectrometer, GC-MS), GC-IMS 具有检测快、灵敏等优点^[12,13], 并且无需样品前处理。本研究以黑虎掌菌汤为研究对象, 结合电子鼻与 GC-IMS 探讨熬制温度对黑虎掌菌汤挥发性风味物质的影响, 通过正交偏最小二乘判别分析 (Orthogonal Partial Least Squares Discriminant Analysis, OPLS-DA) 模型构建、关键差异香气成分筛选、热图聚类分析等方法表

征不同熬制温度下的黑虎掌菌汤的风味特征, 结合相对气味活度值 (Relative Odor Activity Value, ROAV) 探讨熬制温度对黑虎掌菌汤挥发性风味的影响, 以期 为开发黑虎掌菌产品提供实践参考与理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

黑虎掌菌新鲜子实体, 市售。

DK-98-II 电热恒温水浴锅, 天津市泰斯特仪器有限公司; cNose 电子鼻, 上海保圣实业发展公司; 气相色谱-离子迁移谱, 德国 G.A.S. 公司。

1.2 实验方法

1.2.1 黑虎掌菌汤熬制

以前期预试验为基础, 将新鲜黑虎掌菌切成大小均匀的粒状, 当温度达到预定值后, 将黑虎掌菌与水按照料液比 1:61 (*m/V*, g/mL) 在不同温度 (60、70、80、90、100 °C) 条件下水浴熬制 113 min, 分别编号为 F、G、H、I、J。

1.2.2 电子鼻分析

电子鼻取样: 量取 2.0 mL 不同温度熬制的黑虎掌菌汤分别放入 10 mL 顶空瓶中, 于 50 °C 水浴锅中平衡气体 15 min 取出^[8], 吸取顶空气体进行检测, 每个样品设置 5 个平行, 选取传感器响应值稳定的三次数据进行分析。

分析条件: 采用顶空采样, 传感器清洗时间: 120 s, 样品准备时间 10 s, 检测时间 120 s, 载气流量 300 mL/s。

电子鼻各个传感器的响应特性如表 1 所示。

表 1 电子鼻传感器响应特征

Table 1 Response characteristics of electronic nose sensors

序号	传感器名称	响应特征
1	S1	短链烷烃
2	S2	含碳物质等
3	S3	氢气
4	S4	硫化物
5	S5	含氮类物质
6	S6	醛酮类

1.2.3 GC-IMS分析

自动进样：量取 5 mL 黑虎掌菌汤样品，装入 20 mL 顶空进样瓶中加盖密封，放进孵化炉中，在 80 ℃ 下孵化 15 min，进样体积为 0.5 mL。

GC 条件：色谱柱：FS-SE-54-CB-1 色谱柱（15 m×0.53 mm）；载气：N₂（纯度≥99.999%）；载气流量程序：初始流量 2.0 mL/min，保持 2 min，在 10 min 内流量增大到 20.0 mL/min，然后在 10~20 min 内流量增大到 100 mL/min，最后在 20~30 min 内流量增大到 150 mL/min；分析时间：30 min。

IMS 条件：漂移气体：纯度 99.99% 以上的 N₂；漂移气流量：150 mL/min；漂移管长度：98 mm；漂移管温度：45 ℃；管内线性电压：500 V/cm；放射源：β 射线（氚，³H）；离子化模式：正离子。

1.2.4 相对气味活度值

采用 ROAV（Relative Odor Activity Value, ROAV）参数评价挥发性风味物质对黑虎掌菌汤气味的贡献程度^[14]，该参数设定对黑虎掌菌汤气味贡献最大组分的 ROAV_{stan}=100，其余组分 ROAV 计算如式（1）：

$$ROAV_A \approx \frac{C\%_A}{C\%_{Astan}} \times \frac{T_{stan}}{T_A} \times 100 \tag{1}$$

式中：

C%_A——各挥发性气味化合物的相对含量，%；

T_A——各挥发性气味化合物的气味阈值，mg/kg；

C%_{Astan}——对各样品总体气味贡献最大的组分的相对含量，%；

T_{stan}——对各样品总体气味贡献最大的组分的气味阈值，mg/kg。

1.2.5 数据处理

实验结果以“平均值±SEM”表示，数据归一化处理用 SPSS 27.0，雷达图、主成分图、相对含量图使用 Origin 2022 绘制，通过在线网站 <https://www.chiplot.online> 绘制聚类热图，OPLS-DA 图与 VIP 图使用 Simca 14.1 绘制。

2 结果与分析

2.1 电子鼻结果分析

电子鼻是一种模拟人类嗅觉系统的设备，可通过检测食品挥发性化合物的特征来分析其风味。图 1a 显示，不同熬制温度下的黑虎掌菌汤在电子鼻响应值雷达图变化趋势一致，但响应强度存在差异，这说明熬制温度会对黑虎掌菌汤风味产生影响。在 S2、S3 与 S6 传感器上，五种样品的响应值明显高于其他传感器，

黑虎掌菌汤中含碳化合物、氢气与醛酮类物质含量比较丰富。黑虎掌菌汤的电子鼻响应值随熬制温度的增大逐渐增大。不同温度熬制的黑虎掌菌汤样品在传感器上的响应值由大到小依次是：I、H、G、J、F，这表明黑虎掌菌汤的风味随熬制温度的增大先增浓后减淡，在熬制温度为 90 ℃ 时黑虎掌菌汤的风味可能最丰富。

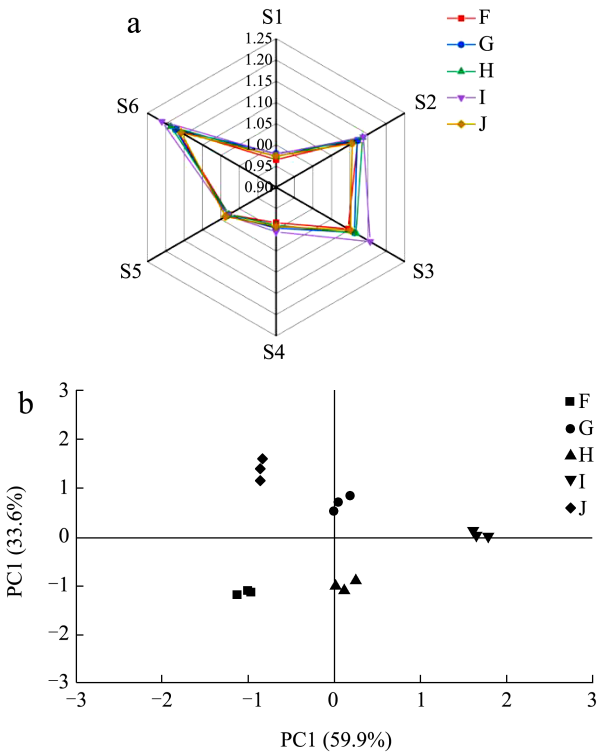


图 1 不同熬制温度下的黑虎掌菌汤电子鼻雷达图和 PCA 图
Fig.1 Electronic nose radar and PCA of *S. imbricatus* soup at different cooking temperatures

注：a 为电子鼻雷达图；b 为 PCA 图。

对黑虎掌菌汤的电子鼻响应值进行主成分分析。图 1b 显示，黑虎掌菌汤主成分分析中提取出了两个表示数据变异性的主要维度，即第一主成分（PC1）和第二主成分（PC2），其中 PC1 代表了样本之间差异的最大部分，PC2 表示了差异第二大的一部分。成分贡献率则表示该主成分在数据中所解释的方差比例。不同熬制温度的黑虎掌菌汤电子鼻主成分分析的第一主成分贡献率为 59.9%，第二主成分贡献率为 33.6%，二者累计贡献率为 93.5%，涵盖了大部分信息，表明该主成分分析能够有效捕捉电子鼻数据的主要变化特征，五种黑虎掌菌汤能被有效的区分开，说明熬制温度对黑虎掌菌汤的挥发性风味物质产生了显著的影响。其中，I 样品靠近 X 轴，远离 Y 轴，说明 PC1 能表征 I 样品的信息；G 与 H 样品靠近 Y 轴，远离 X 轴，说明 PC2 能表征 G 与 H 样品的信息。

2.2 GC-IMS分析

2.2.1 图谱分析

对不同温度熬制的黑虎掌菌汤挥发性风味成分的GC-IMS地形图谱进行分析,如图2可知,图2a中X轴代表离子迁移时间,Y轴代表气相色谱保留时间,Z轴表示峰强度^[15],每一个峰代表一种物质。图2b为GC-IMS传感器俯视图谱,图中横坐标表示离子迁移时间,纵坐标表示保留时间,红色点表示反应离子峰。

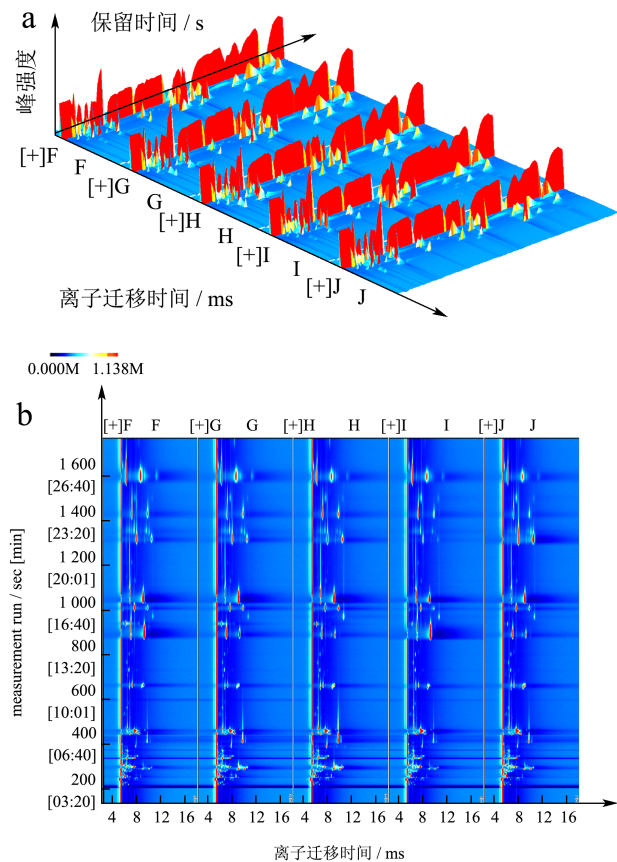


图2 不同熬制温度的黑虎掌菌汤挥发性风味物质色谱图

Fig.2 Chromatograms of volatile flavor compounds in *S. imbricatus* soup at different cooking temperatures

注: a 为三维色谱图; b 为二维色谱图。

不同熬制温度的黑虎掌菌汤风味物质成分的峰信号分布相似,但峰信号强度存在差异,说明黑虎掌菌汤风味物质成分在风味成分组成上差别不大,但含量存在差异,具有各自不同的特征信息,熬制温度会影响黑虎掌菌汤的挥发性风味物质。

2.2.2 风味化合物分析

为了进一步分析熬制温度对黑虎掌菌汤挥发性风味成分的影响,对GC-IMS分离检测出的物质进行分析,采用归一法对样品中鉴定出的化合物进行半定量分析,计算各样品中的挥发性风味化合物的相对含

量^[16,17]。表2显示,不同熬制温度下的黑虎掌菌汤中有35种有效的挥发性风味化合物成分,主要包括醛类11种、酮类6种、酯类4种、醇类5种、醚类1种,杂环类4种、烯烃类4种,以及一些化合物的二聚体,挥发性风味物质的生成与二聚体形成密切相关,当反应物的质子亲和力超过水中的高浓度物质时,质子转移到亲和力更高的物质上,从而催化二聚体的生成^[18]。

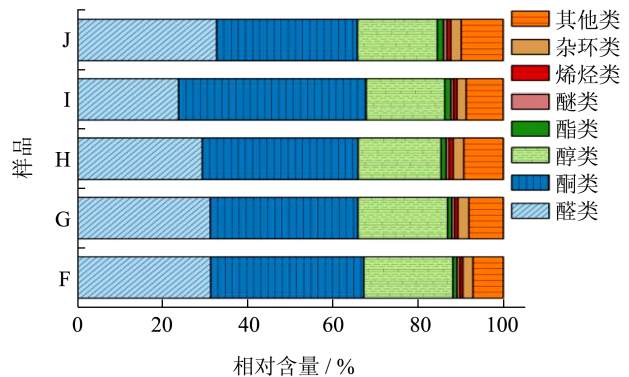


图3 不同熬制温度的黑虎掌菌汤挥发性风味物质相对含量变化图

Fig.3 Variation of volatile flavor substance relative content in *S. imbricatus* soup at different cooking temperatures

由图3可知,不同熬制温度下,黑虎掌菌汤风味化合物相对含量发生变化。醛类相对含量为23.94%至32.84%,主要包含反-辛烯醛、正壬醛与正辛醛。酮类化合物相对含量为32.32%至43.21%,主要包括1-辛烯-3-酮与3-辛酮。醇类化合物相对含量为19.14%至21.77%,包括1-辛烯-3-醇。酯类相对含量为0.94%至1.45%,主要包括甲酸乙酯与顺-3-己烯基丁酯。醚类化合物相对含量为0.63%至0.81%,包括烯丙基甲基硫醚。杂环类化合物相对含量为2.15%至2.57%。烯烃类相对含量为0.70%至0.96%。综上所述,醛类、醇类与酮类是黑虎掌菌汤中主要的挥发性成分,这与王婷婷等^[19]的研究结果相似。

醛类化合物因其具有较低的气味阈值与强大的气味特性,在食物的风味形成过程中起着重要作用。大多数醛类化合物被证实是由脂质氧化生成^[20]。同时,Wang等^[21]表示在美拉德反应中一些活性比较高的中间体不稳定,容易导致氨基酸的脱氨和脱羧反应从而生成醛类化合物。由表2可知,醛类化合物相对含量随熬制温度的增大先减小后增大,60~90℃阶段醛类化合物相对含量减小可能是因为熬制温度升高,黑虎掌菌汤中的氧被损耗抑制了脂质氧化,在90~100℃阶段黑虎掌菌汤中美拉德反应因高温环境而反应加剧,从而促进了醛类的生成。

表 2 不同熬制温度的黑虎掌菌汤GC-IMS定量分析

Table 2 GC-IMS quantitative analysis of *S. imbricatus* soup with different cooking temperatures

化合物	英文名称	分子式	保留 指数	相对含量/%				
				F	G	H	I	J
反-2-辛烯醛- <i>D</i>	(<i>E</i>)-2-octenal- <i>D</i>	C ₈ H ₁₄ O	1 432.3	2.26 ± 0.24 ^b	2.61 ± 0.07 ^a	2.27 ± 0.25 ^b	1.46 ± 0.09 ^c	1.41 ± 0.07 ^c
反-2-辛烯醛- <i>M</i>	(<i>E</i>)-2-octenal- <i>M</i>	C ₈ H ₁₄ O	1 432.6	5.00 ± 0.53 ^{ab}	5.53 ± 0.02 ^a	5.47 ± 0.48 ^a	4.44 ± 0.14 ^b	4.46 ± 0.39 ^b
正己醛- <i>D</i>	1-Hexanal- <i>D</i>	C ₆ H ₁₂ O	1 081.5	1.89 ± 0.81 ^a	1.18 ± 0.04 ^{ab}	1.18 ± 0.08 ^{ab}	0.90 ± 0.19 ^b	1.15 ± 0.34 ^{ab}
正己醛- <i>M</i>	1-Hexanal- <i>M</i>	C ₆ H ₁₂ O	1 082.3	1.15 ± 0.04 ^{cd}	1.28 ± 0.04 ^a	1.18 ± 0.02 ^c	1.15 ± 0.00 ^d	1.23 ± 0.01 ^b
壬醛- <i>D</i>	1-Nonanal- <i>D</i>	C ₉ H ₁₈ O	1 395.8	2.87 ± 1.79 ^{ab}	2.39 ± 1.6 ^{ab}	1.55 ± 0.80 ^{ab}	0.68 ± 0.48 ^b	5.03 ± 3.10 ^a
壬醛- <i>M</i>	1-Nonanal- <i>M</i>	C ₉ H ₁₈ O	1 396.1	5.13 ± 0.74 ^a	5.00 ± 1.04 ^a	4.53 ± 0.90 ^{ab}	3.01 ± 0.94 ^b	6.51 ± 1.38 ^a
正辛醛- <i>M</i>	1-Octanal- <i>D</i>	C ₈ H ₁₆ O	1 292.3	1.78 ± 0.78 ^a	1.50 ± 0.37 ^{ab}	1.37 ± 0.45 ^{ab}	0.67 ± 0.20 ^b	1.21 ± 0.29 ^{ab}
正辛醛- <i>D</i>	1-Octanal- <i>M</i>	C ₈ H ₁₆ O	1 292.3	2.49 ± 0.24 ^a	2.50 ± 0.20 ^a	2.46 ± 0.30 ^a	1.81 ± 0.22 ^b	2.43 ± 0.15 ^a
2-己烯醛	2-Hexenal	C ₆ H ₁₀ O	1 216.8	0.17 ± 0.04 ^c	0.17 ± 0.01 ^{bc}	0.21 ± 0.02 ^{ab}	0.21 ± 0.00 ^{ab}	0.22 ± 0.02 ^a
2-甲基丁醛- <i>D</i>	2-Methylbutanal- <i>D</i>	C ₅ H ₁₀ O	917.8	1.48 ± 0.04 ^{ab}	1.48 ± 0.37 ^{ab}	1.07 ± 0.39 ^b	1.94 ± 0.05 ^a	1.19 ± 0.41 ^b
2-甲基丙烯醛	2-Methyl-2-propenal	C ₄ H ₆ O	885.6	0.07 ± 0.01 ^c	0.08 ± 0.00 ^b	0.09 ± 0.01 ^b	0.12 ± 0.00 ^a	0.14 ± 0.02 ^a
2-甲基丁醛- <i>M</i>	2-Methylbutanal- <i>M</i>	C ₅ H ₁₀ O	909.9	0.18 ± 0.00 ^a	0.16 ± 0.05 ^{ab}	0.10 ± 0.04 ^b	0.14 ± 0.00 ^{ab}	0.11 ± 0.04 ^{ab}
正丁醛- <i>D</i>	Butanal- <i>D</i>	C ₄ H ₈ O	837.8	0.15 ± 0.01 ^a	0.12 ± 0.02 ^b	0.09 ± 0.01 ^{bc}	0.11 ± 0.00 ^b	0.08 ± 0.02 ^c
正丁醛- <i>M</i>	Butanal- <i>M</i>	C ₄ H ₈ O	848.1	1.50 ± 0.13 ^d	2.08 ± 0.10 ^c	2.84 ± 0.27 ^b	3.09 ± 0.07 ^{ab}	3.42 ± 0.27 ^a
庚醛	Heptaldehyde	C ₇ H ₁₄ O	1 183.8	1.56 ± 0.02 ^a	1.43 ± 0.07 ^{bc}	1.30 ± 0.19 ^{cd}	1.12 ± 0.44 ^d	1.46 ± 0.03 ^b
正戊醛- <i>D</i>	n-Pentanal- <i>D</i>	C ₅ H ₁₀ O	986.2	1.21 ± 0.45 ^b	1.11 ± 0.06 ^c	1.51 ± 0.05 ^{ab}	1.56 ± 0.03 ^a	1.17 ± 0.41 ^{bc}
正戊醛- <i>M</i>	n-Pentanal- <i>M</i>	C ₅ H ₁₀ O	983.5	0.98 ± 0.00 ^b	1.11 ± 0.02 ^a	1.12 ± 0.05 ^a	1.02 ± 0.02 ^{ab}	1.13 ± 0.04 ^a
顺-4-庚烯醛	(<i>Z</i>)-4-heptenal	C ₇ H ₁₂ O	1 270.9	1.55 ± 0.33 ^a	1.63 ± 0.06 ^a	1.10 ± 0.27 ^b	0.51 ± 0.04 ^c	0.49 ± 0.04 ^c
醛类（11 种）				31.42 ± 3.89 ^a	31.35 ± 3.42 ^a	29.46 ± 2.98 ^{ab}	23.94 ± 1.95 ^b	32.84 ± 3.83 ^a
1-辛烯-3-酮- <i>D</i>	1-Octen-3-one- <i>D</i>	C ₈ H ₁₄ O	1 311.3	14.80 ± 1.88 ^a	16.49 ± 0.03 ^a	15.77 ± 2.67 ^a	11.07 ± 2.05 ^b	16.09 ± 1.10 ^a
1-辛烯-3-酮- <i>M</i>	1-Octen-3-one- <i>M</i>	C ₈ H ₁₄ O	1 313.6	4.66 ± 0.44 ^{ab}	4.98 ± 0.04 ^{ab}	5.05 ± 0.54 ^a	4.25 ± 0.21 ^b	5.08 ± 0.37 ^a
2-丁酮- <i>D</i>	2-Butanone- <i>D</i>	C ₄ H ₈ O	902.4	0.08 ± 0.01 ^c	0.14 ± 0.07 ^{bc}	0.14 ± 0.09 ^{bc}	0.52 ± 0.05 ^a	0.22 ± 0.10 ^b
2-丁酮- <i>M</i>	2-Butanone- <i>M</i>	C ₄ H ₈ O	900.5	0.10 ± 0.01 ^b	0.12 ± 0.05 ^b	0.09 ± 0.05 ^b	0.21 ± 0.01 ^a	0.12 ± 0.04 ^b
2-庚酮- <i>D</i>	2-Heptanone- <i>D</i>	C ₇ H ₁₄ O	1 179.9	0.34 ± 0.07 ^e	0.48 ± 0.05 ^d	0.72 ± 0.08 ^c	1.09 ± 0.09 ^b	1.26 ± 0.04 ^a
2-庚酮- <i>M</i>	2-Heptanone- <i>M</i>	C ₇ H ₁₄ O	1 178.8	0.80 ± 0.08 ^c	1.05 ± 0.05 ^{bc}	1.34 ± 0.13 ^{ab}	1.56 ± 0.24 ^a	1.65 ± 0.28 ^a
2-己酮	2-Hexanone	C ₆ H ₁₂ O	1 098.9	0.89 ± 0.15 ^c	1.10 ± 0.02 ^b	1.20 ± 0.11 ^{ab}	1.28 ± 0.03 ^a	1.29 ± 0.10 ^a
2-戊酮	2-Pentanone	C ₅ H ₁₀ O	933.1	0.81 ± 0.08 ^a	0.80 ± 0.08 ^{ab}	0.76 ± 0.13 ^{ab}	0.61 ± 0.04 ^b	0.89 ± 0.13 ^a
3-辛酮- <i>D</i>	3-Octanone- <i>D</i>	C ₈ H ₁₆ O	1 259.4	7.41 ± 5.28 ^b	3.84 ± 2.28 ^b	6.23 ± 7.55 ^b	16.58 ± 2.11 ^a	1.88 ± 0.31 ^b
3-辛酮- <i>M</i>	3-Octanone- <i>M</i>	C ₈ H ₁₆ O	1 259.1	5.25 ± 0.94 ^{ab}	4.81 ± 1.32 ^{ab}	4.54 ± 1.39 ^{ab}	6.04 ± 0.06 ^a	3.83 ± 0.16 ^b
酮类（6 种）				35.13 ± 4.31 ^b	33.81 ± 3.58 ^b	35.85 ± 5.28 ^b	43.21 ± 1.40 ^a	32.32 ± 1.87 ^b
正丁醇	1-Butanol	C ₄ H ₁₀ O	1 140.5	0.15 ± 0.01 ^c	0.19 ± 0.00 ^b	0.24 ± 0.02 ^a	0.24 ± 0.01 ^a	0.25 ± 0.01 ^a
异戊醇	1-Butanol, 3-methyl	C ₅ H ₁₂ O	1 206.2	0.42 ± 0.02 ^a	0.40 ± 0.01 ^{ab}	0.38 ± 0.03 ^b	0.43 ± 0.01 ^a	0.42 ± 0.02 ^a
1-辛烯-3-醇- <i>D</i>	1-Octen-3-ol- <i>D</i>	C ₈ H ₁₆ O	1 486.6	8.18 ± 0.90 ^a	7.73 ± 0.07 ^a	6.24 ± 0.59 ^b	5.79 ± 0.15 ^b	5.40 ± 0.38 ^b
1-辛烯-3-醇- <i>M</i>	1-Octen-3-ol- <i>M</i>	C ₈ H ₁₆ O	1 486.9	10.70 ± 0.09 ^{bc}	11.22 ± 0.07 ^a	11.21 ± 0.04 ^a	10.42 ± 0.19 ^c	11.16 ± 0.02 ^b
2-己醇	2-Hexanol	C ₆ H ₁₄ O	1 300.2	0.93 ± 0.12 ^c	1.00 ± 0.03 ^{bc}	1.11 ± 0.04 ^{ab}	1.27 ± 0.13 ^a	1.21 ± 0.10 ^a
3-辛醇- <i>D</i>	3-Octanol- <i>D</i>	C ₈ H ₁₈ O	1 406.7	0.49 ± 0.05 ^a	0.43 ± 0.03 ^b	0.26 ± 0.02 ^c	0.26 ± 0.01 ^c	0.28 ± 0.03 ^c
3-辛醇- <i>M</i>	3-Octanol- <i>M</i>	C ₈ H ₁₈ O	1 407.6	0.79 ± 0.14 ^a	0.80 ± 0.03 ^a	0.67 ± 0.06 ^a	0.73 ± 0.01 ^a	0.67 ± 0.06 ^a
醇类（5 种）				21.66 ± 2.18 ^a	21.77 ± 0.12 ^a	20.11 ± 1.52 ^a	19.14 ± 0.4 ^a	19.38 ± 1.24 ^a

续表2

化合物	英文名称	分子式	保留 指数	相对含量/%				
				F	G	H	I	J
顺-3-己烯基丁酯	(Z)-3-hexen-1-ol butanoate	C ₁₀ H ₁₈ O ₂	1 457.3	0.32 ± 0.05 ^d	0.45 ± 0.01 ^c	0.60 ± 0.06 ^b	0.79 ± 0.03 ^a	0.79 ± 0.07 ^a
乙酸乙酯	Acetic acid ethyl ester	C ₄ H ₈ O ₂	891.5	0.09 ± 0.02 ^a	0.09 ± 0.01 ^a	0.09 ± 0.02 ^a	0.06 ± 0.01 ^a	0.10 ± 0.02 ^a
甲酸乙酯	Ethyl formate	C ₃ H ₆ O ₂	832	0.30 ± 0.01 ^a	0.21 ± 0.02 ^c	0.23 ± 0.03 ^{bc}	0.31 ± 0.02 ^a	0.24 ± 0.10 ^b
异戊酸甲酯	Isovaleric acid,methyl ester	C ₆ H ₁₂ O ₂	1 016.1	0.23 ± 0.01 ^b	0.25 ± 0.03 ^b	0.28 ± 0.04 ^{ab}	0.26 ± 0.02 ^b	0.32 ± 0.03 ^a
酯类（4种）				0.94 ± 0.02 ^c	1.00 ± 0.04 ^c	1.20 ± 0.16 ^b	1.43 ± 0.04 ^a	1.45 ± 0.13 ^a
烯丙基甲基硫醚	3-(Methylthio)-1-propene	C ₄ H ₈ S	935.6	0.69 ± 0.06 ^b	0.70 ± 0.04 ^{ab}	0.69 ± 0.08 ^b	0.63 ± 0.00 ^b	0.81 ± 0.08 ^a
醚类（1种）				0.69 ± 0.06 ^b	0.70 ± 0.04 ^{ab}	0.69 ± 0.08 ^b	0.63 ± 0.00 ^b	0.81 ± 0.08 ^a
α-蒎烯	alpha-Pinene	C ₁₀ H ₁₆	999	0.27 ± 0.04 ^{cd}	0.31 ± 0.00 ^{ab}	0.35 ± 0.03 ^a	0.30 ± 0.01 ^{bc}	0.25 ± 0.01 ^d
罗勒烯	beta-Ocimene	C ₁₀ H ₁₆	1 228.5	0.27 ± 0.01 ^b	0.19 ± 0.00 ^c	0.27 ± 0.02 ^b	0.30 ± 0.01 ^{ab}	0.32 ± 0.02 ^a
1-辛烯	1-Octene	C ₈ H ₁₆	834.9	0.10 ± 0.04 ^b	0.17 ± 0.09 ^{ab}	0.24 ± 0.06 ^{ab}	0.12 ± 0.03 ^{ab}	0.26 ± 0.12 ^a
茨烯	Camphen	C ₁₀ H ₁₆	1 043.7	0.07 ± 0.01 ^b	0.08 ± 0.00 ^a	0.09 ± 0.01 ^a	0.09 ± 0.00 ^a	0.09 ± 0.01 ^a
烯烃类（4种）				0.70 ± 0.11 ^c	0.75 ± 0.09 ^{bc}	0.96 ± 0.07 ^a	0.81 ± 0.04 ^{abc}	0.92 ± 0.10 ^{ab}
2-甲基吡嗪	2-Methylpyrazine	C ₅ H ₆ N ₂	1 270.3	0.26 ± 0.06 ^a	0.27 ± 0.01 ^a	0.18 ± 0.03 ^b	0.12 ± 0.01 ^c	0.11 ± 0.01 ^c
四氢吡咯	Pyrrolidine	C ₄ H ₉ N	1 013.6	0.39 ± 0.05 ^{bc}	0.46 ± 0.00 ^{ab}	0.46 ± 0.04 ^{abc}	0.37 ± 0.01 ^c	0.51 ± 0.06 ^a
四氢呋喃-D	THF-D	C ₄ H ₈ O	781.2	0.14 ± 0.02 ^b	0.15 ± 0.01 ^b	0.15 ± 0.02 ^b	0.10 ± 0.01 ^c	0.18 ± 0.01 ^a
四氢呋喃-M	THF-M	C ₄ H ₈ O	781.2	0.40 ± 0.04 ^b	0.42 ± 0.01 ^b	0.44 ± 0.04 ^b	0.35 ± 0.01 ^c	0.49 ± 0.03 ^a
噻吩	Thiophene	C ₄ H ₄ S	1 044.3	1.17 ± 0.01 ^c	1.27 ± 0.04 ^a	1.25 ± 0.01 ^{ab}	1.21 ± 0.04 ^{bc}	1.17 ± 0.02 ^c
杂环类（4种）				2.37 ± 0.27 ^a	2.57 ± 0.03 ^a	2.48 ± 0.23 ^a	2.15 ± 0.06 ^a	2.47 ± 0.27 ^a
未定性化合物				7.10 ± 0.42 ^d	8.05 ± 0.26 ^c	9.25 ± 0.73 ^{ab}	8.70 ± 0.16 ^{bc}	9.81 ± 0.42 ^a

注：M表示单体，D表示二聚体。不同字母之间代表显著性差异，*P* < 0.05。

酮类属于羰基化合物，可以在美拉德反应中发挥作用，所以高温条件下更容易发生脂类和醛类化合物的氧化反应生成酮类^[22]。酮类化合物随熬制温度的增大先增大后减小，在 90~100 ℃阶段酮类化合物相对含量减小，可能是因为酮类化合物在高温熬制条件下挥发损失所致。

醇类化合物阈值较低，在食用菌风味中发挥重要作用。醇类化合物相对含量随熬制温度的升高未发生显著变化。其中 1-辛烯-3-醇与 3-辛醇是典型的 C₈ 化合物，在不同的熬制温度下，黑虎掌菌汤中的 C₈ 化合物引导了一些重要挥发性化合物的变化，这可能会受到多不饱和脂肪酸的影响，Guo 等^[23]通过松茸在热处理过程中的水分动力学证实细胞结构被破坏会导致 C₈ 化合物的损失。

酯类化合物给黑虎掌菌汤带来水果味与脂肪味^[24]，酯类随熬制温度的增大相对含量逐渐增大，说明熬制温度对酯类化合物的生成具有促进作用。

烃类化合物可以通过美拉德反应形成杂环类化合物来影响风味^[25]，因此烃类化合物是黑虎掌菌汤风味

形成的潜在物质。杂环化合物中的 2-甲基吡嗪可以为黑虎掌菌汤提供榛子味，呋喃类主要由脂质氧化和碳水化合物热降解产生^[26]。

2.2.3 风味化合物指纹图谱分析

在指纹图中，每行代表一个样本的总体信号峰值，每列代表相同物质在不同样本中的含量。每个斑点表示物质在不同时间点的浓度，颜色深浅反映了挥发性物质的含量，红色越深，含量越高。由图 4 可知，熬制温度对黑虎掌菌汤挥发性风味化合物产生了影响。

(a) 框中的化合物随熬制温度的变化未发生显著变化，主要包括 1-辛烯-3-醇-M、2-己酮、1-辛烯-3-酮-M、正己醛-M、正辛醛-M 等。(b) 框中的化合物随熬制温度的升高含量减少，主要有反-2-辛烯醛-D、1-辛烯-3-醇-D、3-辛醇-M、顺-4-庚烯醛、正己醛-D 等。(c) 框中的化合物随熬制温度的升高含量先增加后减少，主要有 2-丁酮-M、2-丁酮-D、3-辛酮-D 等。(d) 框中的化合物随熬制温度的升高含量增加，主要包括四氢吡咯、正丁醇、2-庚酮-D、2-甲基丙烯醛等。

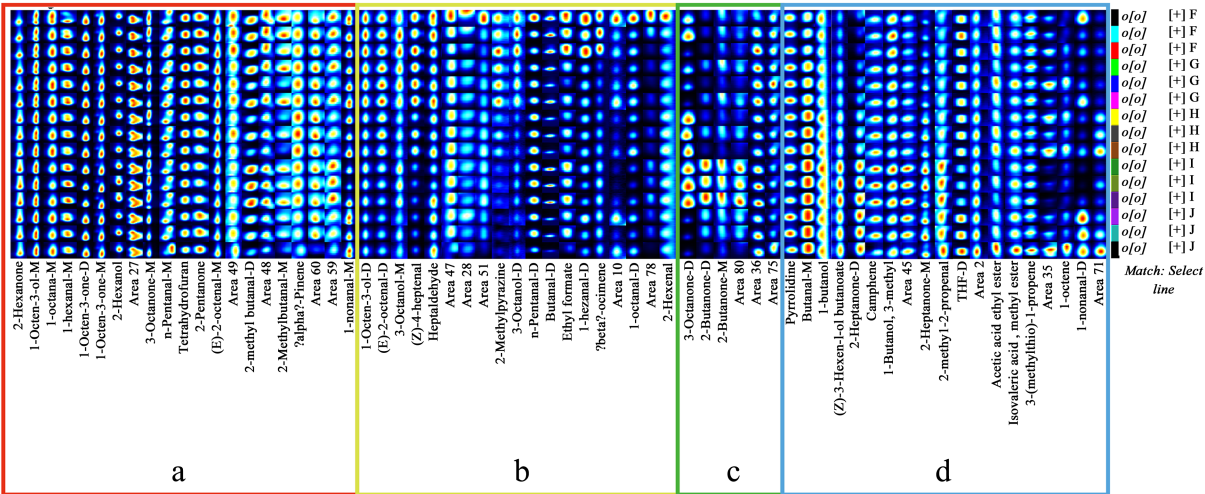


图 4 不同熬制温度的黑虎掌菌汤挥发性风味物质的 GC-IMS 检出成分指纹图谱

Fig.4 GC-IMS fingerprint of volatile flavor substances detected in *S. imbricatus* soup at different cooking temperatures

2.3 热图聚类分析

为进一步分析不同熬制温度下黑虎掌菌汤挥发性风味化合物的差异，对黑虎掌菌汤中鉴定出的挥发性化合物相对含量作为变量进行热图聚类分析，由此可直观地观察到黑虎掌菌汤中挥发性风味物质的变化规律。红色代表正相关，蓝色代表负相关。由图 5 可知，不同温度熬制的黑虎掌菌汤在聚类热图中具有明显的区别，5 种不同温度熬制的黑虎掌菌汤可以被显著的聚到不同的类别，在熬制温度为 80 ℃与 90 ℃时黑虎掌菌汤中的挥发性物质含量发生了显著变化。

2.4 挥发性风味化合物相对气味活度值

设定对黑虎掌菌汤风味贡献最大的正辛醛-D 的 ROAV 值为 100，计算其他风味物质的 ROAV 值。由表 3 可知，在不同温度熬制下的黑虎掌菌汤中一共有 17 种挥发性风味化合物 ROAV ≥ 0.1，还包括一些化合物的二聚体，这 17 种化合物对黑虎掌菌汤风味具有贡献作用，其中顺-4-庚烯醛、正己醛-D、正己醛-M、壬醛-D、壬醛-M、正辛醛-M、正辛醛-D、2-甲基丁醛-D、2-甲基丁醛-M、正丁醛-M、庚醛、正戊醛-D、正戊醛-M、1-辛烯-3-醇-D、1-辛烯-3-醇-M、1-辛烯-3-酮-D、1-辛烯-3-酮-M、异戊酸甲酯、噻吩的 ROAV > 1，说明这些化合物是黑虎掌菌汤中的关键挥发性风味物质。正丁醛-D、3-辛醇-M、2-庚酮-M、2-己酮、2-戊酮、3-辛酮-M 的 0.1 ≤ ROAV ≤ 1，对黑虎掌菌汤的风味有修饰作用。其中 1-辛烯-3-醇（蘑菇味）3-辛酮（香草味）、正辛醛（柑橘味、脂肪味）、3-辛醇（蘑菇味）、1-辛烯-3-酮（蘑菇味）是蘑菇独特风味的主要来源^[22]。综合比较 ROAV > 1 的化合物，发现熬

制温度为 90 ℃时黑虎掌菌汤的蘑菇风味最浓郁，此时菌汤的杏仁香、麦芽香与青草香味也最浓郁，但相较于熬制温度为 60 ℃时水果香味较弱，熬制温度为 100 ℃时黑虎掌菌汤的油脂风味最浓郁。综上所述，熬制温度为 90 ℃时更有利于释放黑虎掌菌汤中的蘑菇香味。

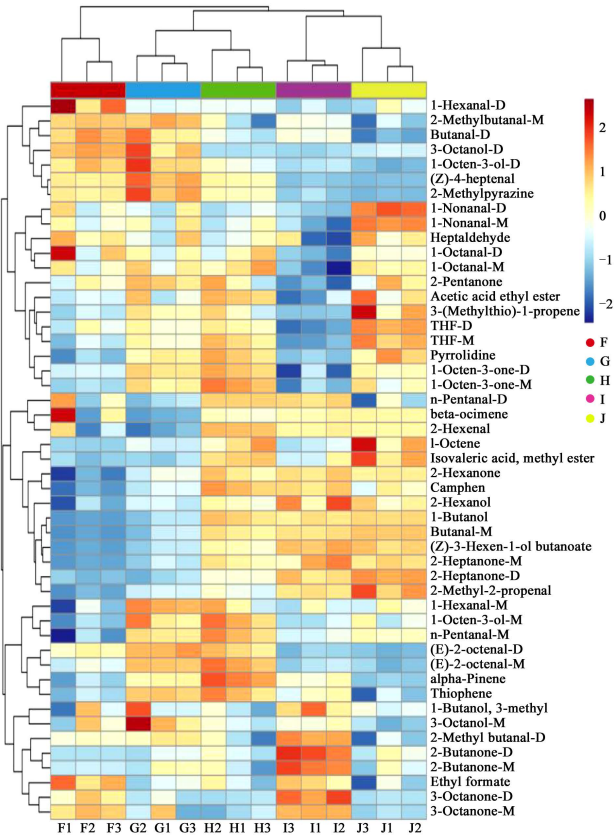


图 5 不同熬制温度的黑虎掌菌汤热图聚类分析图

Fig.5 Heat map clustering analysis of *S. imbricatus* soup at different cooking temperatures

表 3 不同熬制温度的黑虎掌菌汤风味物质的气味描述与ROAV值

Table 3 Odor description and ROAV value of flavor substances in *S. imbricatus* soup at different cooking temperatures

化合物	阈值 /(mg/kg)	气味描述	ROAV				
			F	G	H	I	J
顺-4-庚烯醛	0.003 4	青草香味	12.86	13.43	9.18	5.83	4.14
正己醛- <i>D</i>	0.007 5	新鲜的苹果味	7.09	4.42	4.47	4.66	4.40
正己醛- <i>M</i>	0.007 5	新鲜的苹果味	4.32	4.79	4.46	5.90	4.73
壬醛- <i>D</i>	0.015	油脂味	5.39	4.46	2.94	1.75	9.67
壬醛- <i>M</i>	0.015	油脂味	9.61	9.33	8.59	7.75	12.50
正辛醛- <i>M</i>	0.000 7	柑橘味	71.35	59.87	55.86	36.76	49.99
正辛醛- <i>D</i>	0.000 7	柑橘味	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
2-甲基丁醛- <i>D</i>	0.003	杏仁香、麦芽香	13.84	13.80	10.15	25.05	11.41
2-甲基丁醛- <i>M</i>	0.003	杏仁香、麦芽香	1.64	1.47	0.97	1.74	1.09
正丁醛- <i>D</i>	0.005 26	青草香味	0.78	0.61	0.51	0.80	0.43
正丁醛- <i>M</i>	0.005 26	青草香味	8.00	11.07	15.37	22.73	18.74
庚醛	0.01	脂肪味	4.39	4.00	3.71	4.33	4.21
正戊醛- <i>D</i>	0.008	杏仁香、麦芽香	4.26	3.88	5.36	7.55	4.21
正戊醛- <i>M</i>	0.008	杏仁香、麦芽香	3.45	3.88	4.00	4.94	4.07
正丁醇	10	水果香	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01
异戊醇	0.3	烧焦的麦芽味	0.04	0.04	0.04	0.06	0.04
1-辛烯-3-醇- <i>D</i>	0.007	蘑菇味	32.87	30.92	25.38	31.96	22.23
1-辛烯-3-醇- <i>M</i>	0.007	蘑菇味	42.98	44.90	45.56	57.57	45.92
2-己醇	6.7	—	<0.01	<0.01	<0.01	0.01	0.01
3-辛醇- <i>D</i>	0.1	蘑菇味	0.14	0.12	0.07	0.10	0.08
3-辛醇- <i>M</i>	0.1	蘑菇味	0.22	0.22	0.19	0.28	0.19
1-辛烯-3-酮- <i>D</i>	0.03	蘑菇味	13.87	15.39	14.96	14.28	15.45
1-辛烯-3-酮- <i>M</i>	0.03	蘑菇味	4.37	4.65	4.79	5.47	4.88
2-丁酮- <i>D</i>	3	宜人的水果香	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01
2-丁酮- <i>M</i>	3	宜人的水果香	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01
2-庚酮- <i>D</i>	0.2	蓝纹奶酪、坚果味	0.05	0.07	0.10	0.21	0.18
2-庚酮- <i>M</i>	0.2	蓝纹奶酪、坚果味	0.11	0.15	0.19	0.30	0.24
2-己酮	0.09	刺激的酒精香	0.28	0.34	0.38	0.55	0.41
2-戊酮	0.09	刺激的酒精香	0.25	0.25	0.24	0.26	0.28
3-辛酮- <i>D</i>	1	香草味	0.21	0.11	0.18	0.64	0.05
3-辛酮- <i>M</i>	1	香草味	0.15	0.13	0.13	0.23	0.11
α -蒎烯	1.013 8	松木香	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
乙酸乙酯	0.1	白兰地香	0.02	0.02	0.03	0.02	0.03
甲酸乙酯	6.6	刺鼻	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01
异戊酸甲酯	0.000 4	水果香	16.12	17.71	20.22	25.36	23.18
2-甲基吡嗪	0.25	榛子味	0.03	0.03	0.02	0.02	0.01
噻吩	0.008	—	4.12	4.44	4.46	5.84	4.22

注：阈值均来源于《化合物嗅觉阈值汇编原书》。

2.5 多元统计分析

将不同温度熬制的黑虎掌菌汤中鉴定出的ROAV≥1的挥发性风味物质的相对含量作为变量进行多元统计分析。

2.5.1 主成分分析

如图6所示，不同熬制温度的黑虎掌菌汤主成分分析的第一主成分贡献率为45.9%，第二主成分贡献率为33.7%，二者累计贡献率为79.6%，并且可以将不同熬制温度的黑虎掌菌汤进行有效区分。其中J与H样品距离较近且都位于第一象限，二者风味可能相似。每个化合物与5种黑虎掌菌汤样品之间距离代表香气化合物和黑虎掌菌汤之间的相关程度。如果位置越接近，它们之间的相关性越高。异戊酸甲酯、正戊醛-M、噻吩、1-辛烯-3-醇-M、1-辛烯-3-酮-M、正己醛-M、壬醛-D、壬醛-M、1-辛烯-3-酮-D距离J与H样品较近，呈现出较强的相关性，是J与H样品风味的主要贡献物质。庚醛、正己醛-D、顺-4-庚烯醛、正辛醛-M、1-辛烯-3-醇-D、正辛醛-D与2-甲基丁醛-M距离G与F样品较近，具有较强的相关性，是G与F样品风味的主要贡献物质。

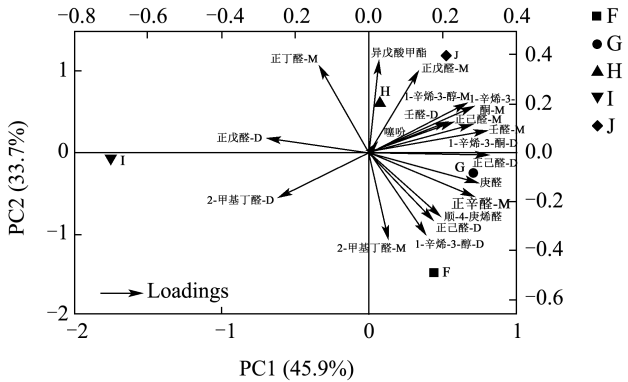


图6 不同熬制温度的黑虎掌菌汤挥发性风味物质主成分分析图
Fig.6 Principal component analysis of volatile flavor substances of *S. imbricatus* soup at different cooking temperatures

2.5.2 正交偏最小二乘判别分析

正交偏最小二乘判别分析模型是一种将数据可视化的方法，通过将X矩阵分解为与Y矩阵相关和不相关的两类信息，从而筛选出差异变量^[27]。 R^2X 和 R^2Y 表示模型的X和Y矩阵的解释率， Q^2 表示模型预测能力， R^2 和 Q^2 越接近1说明模型的拟合度和预测能力越好^[28]。两样本之间距离越近，样本之间的差异越小^[29]

如图7a所示，五种不同熬制温度制备的黑虎掌菌汤可以被有效区分开，其中H样品与J样品位于同一

象限，二者风味可能比较相似，这与前面的主成分分析结果一致。OPLS-DA模型的X和Y矩阵的解释率分别为0.888和0.569， $Q^2=0.385>0$ ，说明类别区分有效。如图7b所示，模型的 $R^2=0.179$ 与 $Q^2=-0.540$ 均小于1，且模型 Q^2 回归线与Y轴交于负轴，表示模型可靠且无过拟合现象，具有良好的可靠性与预测性。

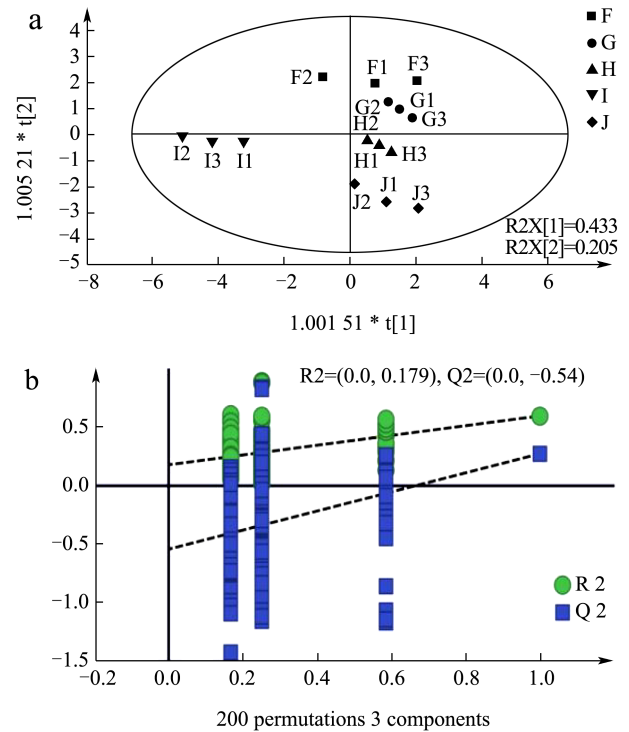


图7 不同熬制温度的黑虎掌菌汤挥发性风味物质
Fig.7 Least squares discriminant analysis of volatile flavor substances in *S. imbricatus* soup at different cooking temperatures

注：a 为 OPLS-DA 分析图；b 为置换检验图。

2.6 关键差异风味物质分析

变量投影重要性因子（Variable Importance in Projection, VIP）常用于 OPLS-DA 模型关键变量的分析，可以反应风味物质对模型分类的贡献程度，VIP 值越大，说明贡献率越大。通过 VIP 值在 OPLS-DA 模型中计算不同熬制温度下的黑虎掌菌汤的关键差异风味物质，结果如图8所示。VIP 值大于1的挥发性化合物共有5种，分别为1-辛烯-3-酮-D、壬醛-D、1-辛烯-3-醇-D、壬醛-M、正丁醛-M、顺-4-庚烯醛，各风味物质VIP值得分如表4，因此这5种挥发性风味化合物是不同熬制温度的黑虎掌菌汤关键差异性物质。

壬醛、1-辛烯-3-酮-D与1-辛烯-3-醇-D属于C₉与C₈化合物，1-辛烯-3-醇主要由n-3、n-6多不饱和

脂肪酸氧化降解产生^[30], 1-辛烯-3-酮可能是由 1-辛烯-3-醇氧化产生^[31], 二者都具有蘑菇香味。亚麻酸分解产生的具有油脂香味的壬醛^[32], 顺-4-庚烯醛属于饱和醛, 可能是由 n-3 多不饱和脂肪酸氧化生成^[33], 具有青草香味。正丁醛具有青草香味。由表 4 可知, 1-辛烯-3-酮-*D* 在筛选出的五种化合物中 VIP 值最大, 说明它是造成不同熬制温度的黑虎掌菌汤风味差异贡献最大的物质, 1-辛烯-3-酮-*D* 的相对含量在 70 °C 时最大, 但与 100 °C 条件下的相对含量无显著差异, ROAV 值在 100 °C 时最大为 15.45, 说明熬制温度 100 °C 时更有利于黑虎掌菌汤中的 1-辛烯-3-酮-*D* 的生成与释放。筛选出的第三重要差异物质 1-辛烯-3-醇-*D* 的相对含量比 1-辛烯-3-酮-*D* 低, 这可能是因为 1-辛烯-3-醇-*D* 在高温熬制环境中氧化生成了 1-辛烯-3-酮-*D*, 但因其阈值较低, 使其 ROAV 值大于 1-辛烯-3-酮-*D*, 说明在黑虎掌菌汤样品的风味中 1-辛烯-3-醇-*D* 的风味贡献程度大于 1-辛烯-3-酮-*D*, 综合 1-辛烯-3-醇-*D* 与 1-辛烯-3-酮-*D* 在不同熬制温度下的相对含量与 ROAV 值比较, 发现 70 °C 是一个相对平衡的温度, 此时二者的 ROAV 值与相对含量都较大, 对样品风味贡献更显著。由表 4 可知, 壬醛-*D* 是造成不同熬制温度的黑虎掌菌汤风味差异贡献的第二重要的物质, 因壬醛-*D* 是壬醛-*M* 的二聚体, 因此将二者结合为一种物质进行分析, 由表 2 可知, 在熬制温度为 100 °C 壬醛相对含量最大, 且 ROAV 值也最大, 说明 100 °C 更有利于壬醛的生成与释放, 熬制温度为 100 °C 时更能突出黑虎掌菌汤中的油脂香味。正丁醛-*M* 的 ROAV 值在 90 °C 最大, 此时正丁醛-*M* 在样品中对风味的贡献更显著, 正丁醛-*M* 的相对含量在熬制温度为 100 °C 时最大, 与熬制温度为 90 °C 时无显著差异, 因此 90 °C 条件下正丁醛-*M* 对黑虎掌菌汤中的对风味贡献最显著。顺-4-庚烯醛的相对含量与 ROAV 值随熬制温度的升高先增大后减小, 在熬制温度为 70 °C 时最大, 此时有利于顺-4-庚烯醛的生成与释放。正丁醛-*M* 与顺-4-庚烯醛都具有青草香味, 综合二者分析发现, 熬制温度为 90 °C 时它们对黑虎掌菌汤的风味贡献最大, 但在 80 °C 时它们的相对含量和最大, 这可能是因为 90 °C 条件下对黑虎掌菌汤风味贡献最大的组分正辛醛-*D* 的相对含量较低而使得 90 °C 条下的正丁醛-*M* 与顺-4-庚烯醛比 80 °C 条下的气味贡献更突出。

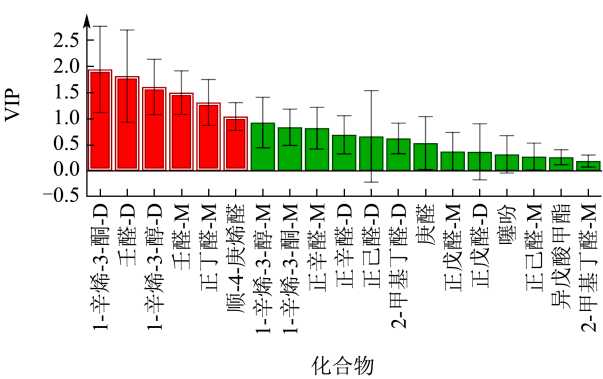


图 8 不同熬制温度的黑虎掌菌汤各挥发性风味物质 VIP 图

Fig.8 VIP figure of volatile flavor substances in *S. imbricatus* soup at different cooking temperatures

表 4 黑虎掌菌汤各挥发性化合物的VIP得分表

Table 4 VIP score table of volatile compounds in *S. imbricatus* soup

序号	化合物	VIP 值
1	1-辛烯-3-酮- <i>D</i>	1.940 45
2	壬醛- <i>D</i>	1.813 19
3	1-辛烯-3-醇- <i>D</i>	1.604 73
4	壬醛- <i>M</i>	1.495 52
5	正丁醛- <i>M</i>	1.307 98
6	顺-4-庚烯醛	1.038 68

3 结论

该研究采用电子鼻和 GC-IMS 技术, 分析了不同熬制温度对黑虎掌菌汤风味的影响。电子鼻主成分分析 (PCA) 显示, 样品在 5 种熬制温度下可有效区分。通过 GC-IMS 在黑虎掌菌汤中检测到 35 种挥发性挥发性化合物, 包括醛类 11 种、酮类 6 种、酯类 4 种、醇类 5 种、醚类 1 种, 杂环类 4 种和烯炔类 4 种, 其中醛类 (23.94%~32.84%)、酮类 (32.32%~43.21%)、醇类 (19.14%~21.77%) 为主要挥发性物质。结合 ROAV 分析发现, 熬制温度为 90 °C 时更有利于释放黑虎掌菌汤中的蘑菇香味。基于正交偏最小二乘判别分析 (OPLS-DA) 的变量重要性投影因子 (VIP ≥ 1) 筛选出 5 种关键差异化合物, 包括 1-辛烯-3-酮-*D*、壬醛-*D*、1-辛烯-3-醇-*D*、壬醛-*M*、正丁醛-*M*、顺-4-庚烯醛, 其中 1-辛烯-3-酮-*D* 与 1-辛烯-3-醇-*D* 具有蘑菇味, 壬醛-*D* 与壬醛-*M* 具有油脂味, 正丁醛-*M* 与顺-4-庚烯醛具有青草香味。该研究为黑虎掌菌汤产品的工业化生产提供了理论依据。

参考文献

- [1] WANG X, QU Y D, ZHANG Y F, et al. Antifatigue potential activity of *Sarcodon imbricatus* in acute excise-treated and chronic fatigue syndrome in mice via regulation of Nrf2-mediated oxidative stress [J]. *Oxidative Medicine and Cellular Longevity*, 2018, 2018: 9140896.
- [2] JIN Y H, KWON E B, CHOI J G, et al. Sarcodonol A-D from fruiting bodies of *Sarcodon imbricatus* inhibits HCoV-OC43 induced apoptosis in MRC-5 cells [J]. *Bioorganic Chemistry*, 2023, 140: 106824-106824.
- [3] TAN X P, CHEN W, JIAO C W, et al. Anti-tumor and immunomodulatory activity of the aqueous extract of *Sarcodon imbricatus* in vitro and in vivo [J]. *Food & Function*, 2019, 11(1): 1110-1121.
- [4] WANG X, WANG Z Q, WU H H, et al. *Sarcodon imbricatus* polysaccharides protect against cyclophosphamide-induced immunosuppression via regulating Nrf2-mediated oxidative stress [J]. *International Journal of Biological Macromolecules*, 2018, 120(PA): 736-744.
- [5] SUDHAN D, DEBANJAN S. Mushrooms are potential foods against cancer: identified by molecular docking and molecular dynamics simulation [J]. *Natural Product Research*, 2021, 36(10): 1-6.
- [6] 黄世群,秦琳,仲伶俐,等.野生黑虎掌菌与羊肚菌营养成分测定及分析比较[J].山西农业科学,2019,47(12):2098-2102.
- [7] 张丹.松茸菌汤的风味物质研究及其冻干汤包的研制[D].成都:西华大学,2023.
- [8] 李琴.双孢蘑菇汤特征风味物质的鉴定及熬制过程风味物质释放规律研究[D].无锡:江南大学,2011.
- [9] 王婷婷,严明,邓雅元,等.云南黑虎掌菌挥发性成分分析[J].中国食用菌,2020,39(6):17-20.
- [10] XIE L M, GUO S L, RAO H T, et al. Characterization of volatile flavor compounds and aroma active components in button mushroom (*Agaricus bisporus*) across various cooking methods [J]. *Foods*, 2024, 13(5): 685.
- [11] 步营,李月,杨琬琳,等.鳕鱼骨汤的熬制及风味物质释放规律[J].现代食品科技,2020,36(3):226-233.
- [12] 庞钊靖,万国超,刘振平,等.气相色谱-离子迁移谱结合化学计量学分析对新会陈皮的鉴别[J].食品科学,2024,45(13):275-281.
- [13] 张浩,顾思远,邓静,等.基于固相微萃取-气相色谱-质谱联用和气相色谱-离子迁移谱分析不同等级郫县豆瓣煸炒后风味特征差异[J].食品科学,2024,45(7):172-181.
- [14] WANG Y, HE Y H, LIU Y, et al. Analyzing volatile compounds of young and mature *Docynia delavayi* fruit by HS-SPME-GC-MS and ROAV [J]. *Foods*, 2022, 12(1): 59.
- [15] RAFAEL M G, JUAN M, ANDREA B, et al. Using an electronic nose and volatilome analysis to differentiate sparkling wines obtained under different conditions of temperature, ageing time and yeast formats [J]. *Food Chemistry*, 2021, 334: 127574.
- [16] SUN X, LIU X L, YANG W, et al. Establishment of intermittent ultrasound-complex enzyme deodorization technology for tilapia based on GC-IMS and HS-SPME-GC/MS analysis [J]. *Food Bioscience*, 2024, 61: 104806.
- [17] LI W L, ZI L, XU N M, et al. Identification of characteristic flavor compounds of *Boletus edulis* from different regions based on by E-nose, HS-GC-IMS and HS-SPME-GC-MS [J]. *Food Chemistry: X*, 2024, 23: 101601.
- [18] YANG F, LIU Y, WANG B, et al. Screening of the volatile compounds in fresh and thermally treated watermelon juice via headspace-gas chromatography-ion mobility spectrometry and comprehensive two-dimensional gas chromatography-olfactory-mass spectrometry analysis [J]. *LWT*, 2021, 137: 110478.
- [19] 王婷婷,邓雅元,杨璐敏,等.热加工方式对黑虎掌菌挥发性风味物质的影响[J].中国调味品,2021,46(7):76-79.
- [20] BRUNTON N P, CRONIN D A, MONAHAN F J, et al. A comparison of solid-phase microextraction (SPME) fibres for measurement of hexanal and pentanal in cooked turkey [J]. *Food Chemistry*, 2000, 68(3): 339-345.
- [21] WANG K, YANG R W, SUN N, et al. The formation pattern of off-flavor compounds induced by water migration during the storage of sea cucumber peptide powders (SCPPs) [J]. *Food Chemistry*, 2019, 274: 100-109.
- [22] YANG N, ZHANG S S, ZHOU P, et al. Analysis of volatile flavor substances in the enzymatic hydrolysate of *Lanmaoa asiatica* mushroom and its Maillard reaction products based on E-Nose and GC-IMS [J]. *Foods*, 2022, 11(24): 4056.
- [23] GUO Y, CHEN D, DONG Y F, et al. Characteristic volatiles fingerprints and changes of volatile compounds in fresh and dried *Tricholoma matsutake* Singer by HS-GC-IMS and HS-SPME-GC-MS [J]. *Journal of Chromatography B*, 2018, 1099: 46-55.
- [24] WANG K, YANG C C, DAI Z Y, et al. The flavor profiles of highland barley fermented with different mushroom mycelium [J]. *Foods*, 2022, 11(24): 3949.
- [25] 徐婕,潘春飞,苗幼珺,等.响应面法优化鲢鱼鱼骨粉脱腥工艺研究[J].渔业研究,2024,46(5):490-500.
- [26] 郝雅茹.油炸食品中呋喃类物质形成动力学及其减控措施的研究[D].石家庄:河北科技大学,2021.
- [27] WANG X R, ROGERS K M, LI Y, et al. Untargeted and targeted discrimination of honey collected by *Apis cerana* and *Apis mellifera* based on volatiles using HS-GC-IMS and HS-SPME-GC-MS [J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2019, 67(43): 12144-12152.
- [28] DOU X J, ZHANG L X, YANG R N, et al. Adulteration detection of essence in sesame oil based on headspace gas chromatography-ion mobility spectrometry [J]. *Food Chemistry*, 2022, 370: 131373.
- [29] SHAO Y Y, LIU X Q, ZHANG Z Y, et al. Comparison and discrimination of the terpenoids in 48 species of huajiao according to variety and geographical origin by E-nose coupled with HS-SPME-GC-MS [J]. *Food Research International*, 2023, 167: 112629.
- [30] LIU H, HUI T, FANG F, et al. The formation of key aroma compounds in roasted mutton during the traditional charcoal process [J]. *Meat Science*, 2022, 184: 108689.
- [31] LIU H, WANG Z Y, ZHANG D Q, et al. Characterization of key aroma compounds in Beijing roasted duck by gas chromatography-olfactometry-mass spectrometry, odor-activity values, and aroma-recombination experiments [J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2019, 67(20): 5847-5856.
- [32] NIETO G, BAÑÓN S, GARRIDO M D. Effect of supplementing ewes' diet with thyme (*Thymus zygis* ssp. *gracilis*) leaves on the lipid oxidation of cooked lamb meat [J]. *Food Chemistry*, 2010, 125(4): 1147-1152.
- [33] 刘欢.北京烤鸭关键挥发性风味物质鉴别及其形成机制研究[D].北京:中国农业科学院,2020.