吕虹霞, 王永瑞. 多技术结合 PCA-BP 神经网络研究黄羽鸡炖煮过程中鸡汤挥发性风味物质变化 [J]. 食品工业科技, 2026, 47(18): 306−315. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025070092

LÜ Hongxia, WANG Yongrui. Changes of Volatile Flavor Compounds in Chicken Soup during Stewing Process of Yellow-feathered Chicken Using Multiple Technologies Combined with PCA-BP Neural Network[J]. Science and Technology of Food Industry, 2026, 47(18): 306−315. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025070092

· 现代分析与智能检测 ·

多技术结合 PCA-BP 神经网络研究黄羽鸡炖煮过程中鸡汤挥发性风味物质变化

吕虹霞[1], 王永瑞[2,*]

（1.西安外事学院医学院, 陕西西安 710077;
2.宁夏大学动物科技学院, 宁夏银川 750021）

摘　要: 为研究黄羽鸡炖煮过程中鸡汤挥发性风味物质的变化，采用顶空固相微萃取（headspace solid-phase microextraction，HS-SPME）结合气相色谱-质谱联用（gas-chromatographic mass-spectrometric，GC-MS）、电子鼻、电子舌结合 PCA-BP 神经网络对不同炖煮时间（0.5、1.0、1.5、2.0 和 2.5 h）鸡汤样品进行研究。结果表明，随着炖煮时间增加，鸡汤颜色变浓。通过 GC-MS 共鉴定出 35 种挥发性化合物，主要为醛类和醇类化合物。挥发性风味物质的总含量随炖煮时间先增加后降低，其中在炖煮 2.0 h 时达到了最高。GC-MS 结合 OAVs 值法鉴定出关键挥发性物质 13 种，分别为 1-己醇、1-辛烯-3-醇、(E,E)-2,4-癸二烯醛、(E,E)-2,4-壬二烯醛、(Z)-2-庚烯醛、(E)-2-壬烯醛、(E)-2-辛烯醛、(E)-2-十一烯醛、2-戊基呋喃、庚醛、己醛、壬醛和辛醛。基于 VIP 值筛选出 19 种特征挥发性化合物，可用来区分 5 种鸡汤样品。不同炖煮时间鸡汤样品的电子鼻和电子舌数据存在显著差异，并能通过 PCA 及聚类分析有效区分。电子舌数据 PCA-BP 神经网络模型可准确预测鸡汤样品炖煮时间，真实值与预测值线性关系良好（R^2=0.9998）。感官评价表明，炖煮 2.0 h 的鸡汤在风味、色泽、外观和总体可接受性方面得分很高。综上，鸡汤的最佳炖煮时间为 2.0 h，研究结果可作为原始鸡汤的风味依据，为后续高质量的中药鸡汤研究作为铺垫。

关键词: 鸡汤, 炖煮过程, 气相色谱-质谱, 电子舌, 电子鼻, PCA-BP 神经网络, 挥发性化合物, 感官分析

中图分类号: TS251.1　　**文献标识码:** A　　**文章编号:** 1002−0306(2026)18−0306−10　　本文网刊:

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2025070092

Changes of Volatile Flavor Compounds in Chicken Soup during Stewing Process of Yellow-feathered Chicken Using Multiple Technologies Combined with PCA-BP Neural Network

LÜ Hongxia[1], WANG Yongrui[2,*]

（1.Medical College, Xi'an International University, Xi'an 710077, China;
2.College of Animal Science and Technology, Ningxia University, Yinchuan 750021, China）

Abstract: To investigate the changes in volatile flavor compounds in chicken soup during the stewing process of yellow-feathered chicken, headspace solid phase microextraction (HS-SPME)-gas chromatography-mass spectrometry (GC-MS), electronic nose, and electronic tongue combined with PCA-BP neural network were used to study chicken soup samples at different cooking times (0.5, 1.0, 1.5, 2.0 and 2.5 h). The results showed that as the stewing time increased, the color of the chicken soup became darker. A total of 35 volatile compounds were identified through GC-MS, primarily consisting of aldehydes and alcohols. The total content of volatile flavor compounds increased first and then decreased, and reached a

收稿日期: 2025−07−08

作者简介: 吕虹霞（1984−）, 女, 硕士, 副教授, 研究方向: 有机合成、中药材有效成分提取分离鉴定, E-mail: lvhongxia-001@163.com。

*** 通信作者:** 王永瑞（1991−）, 男, 博士, 研究方向: 农产品加工, E-mail: 422972005@qq.com。

peak after stewing for 2.0 h. GC-MS combined with OAVs value method identified 13 key volatile compounds, including 1-hexanol, 1-octene-3-ol, (E,E)-2,4-decadiena,l (E,E)-2,4-nonadienal, (Z)-2-heptenal, (E)-2-nonenal, (E)-2-octenal, (E)-2-decenal, 2-pentylfuran, heptanal, hexanal, nonanal and octanal. Based on VIP values, 19 characteristic volatile compounds were screened, which could be used to distinguish 5 chicken soup samples. Significant differences in the electronic nose and electronic tongue of chicken soup samples with different stewing times, and these samples could be effectively distinguished by PCA and cluster analysis. The electronic tongue PCA-BP neural network model could accurately predict the stewing time of chicken soup samples and the linear relationship between the true value and the predicted value was good (R^2=0.9998). The chicken soup stewed for 2.0 h showed significantly high scores for flavor, color, appearance, and overall acceptability. In conclusion, the optimal stewing time for chicken soup was 2.0 h. The results can be used as the basis for the flavor of the original chicken soup and pave the way for subsequent high-quality Chinese herbal chicken soup research.

Key words: chicken soup; stewing process; GC-MS; E-tongue; E-nose; PCA-BP neural network; volatile flavor compounds; sensory analysis

在中国, 鸡肉被认为是一种营养丰富且美味的肉类产品。与其他肉类相比, 鸡肉具有低脂肪、低胆固醇、低热量和高蛋白质的优势[1−3]。全球对鸡肉需求的增长速度超过了猪肉和牛肉, 其中中国消耗了全球约 12% 的鸡肉产量[4]。鸡肉的烹饪方式有很多种, 如煎、炸、烤、煮、蒸等, 其中炖煮成鸡汤在中国是较为常见的一种烹饪方式[5]。鸡汤富含多肽、氨基酸等多种营养成分, 具有缓解感冒症状、消除疲劳、促进机体代谢、增强免疫力等作用, 特别适合儿童、老年人、体弱者以及手术后的患者饮用[6−8]。在炖煮过程中, 来自鸡肉中的部分蛋白质、碳水化合物、维生素、矿物质、多肽和氨基酸等水溶性成分会溶解到鸡汤中, 随着炖煮时间的延长, 汤中的这些成分含量会逐渐增加[9−10]。鸡汤中还含有大量源自肉类的风味化合物。这些化合物在炖煮过程中逐渐积累, 传统上认为这种积累是炖汤独特风味的重要来源[11]。黄羽鸡饲养周期较长, 超过 90 d, 主要加工成煮鸡肉或鸡汤。基于鲜美肉质和特殊香气, 这种鸡肉制成的鸡汤深受中国消费者的喜爱[12]。

风味是影响消费者对鸡汤接受度和偏好的重要因素。鸡汤的风味是由烹饪过程中碳水化合物、蛋白质和脂质的热反应产生的, 主要包括美拉德反应、脂质氧化以及反应产物之间的相互作用[1,13−14]。醛、酯、醇、酸、内酯、烃、醚、杂环化合物和硫化合物是最常见的风味物质。许多研究比较了鸡汤(包括鸡肉)成分中的挥发性化合物, 到目前为止在鸡肉和汤中发现了数百种挥发性化合物[11,15]。Jia 等[16] 研究了云南武定鸡与狄高肉鸡杂交 F1 代鸡在炖煮过程中的挥发性风味物质变化, 在炖煮 1、1.5、2、2.5 和 3 h 的 5 个鸡汤样品共检测出 86 种挥发性风味化合物, 包括 20 种醛类、18 种醇类、2 种呋喃、16 种烯烃、4 种酯类、8 种酮类、4 种芳香烃以及 14 种其他化合物。Qi 等[17] 采用了 GC-MS 结合 OAV 研究了不同炖煮次数黄羽鸡鸡汤挥发性风味化合物, 发现戊醛、己醛、庚醛、辛醛、(E)-2-辛烯醛、壬醛、(Z)-4-癸烯醛、癸醛、(E,E)-2,4-癸二烯醛、1-戊醇和 1-辛烯-3-醇是黄羽鸡鸡汤中的主要挥发性化合物。并且 Qi 等[17] 还发现随着炖煮时间的延长, 鸡汤中醛类显著减少, 醇类则显著增加, 2 h 炖煮后产生的强烈香气主要归因于 1-戊醇和 1-辛烯-3-醇。Guan 等[18] 采用 GC-MS 研究中国大沽鸡汤发现鸡汤中挥发性化合物主要是己醛、辛醛、庚醛、(E,E)-2,4-癸二烯醛、壬醛和 1-辛烯-3-醇。Liao 等[19] 研究确定(E,E)-2,4-癸二烯为鸡汤中最重要的气味成分, 其权重重要性排序(Variable Importance in Projection, VIP)和气味活性值(Odor Activity Value, OAV)最高。醛、烯、酮、杂环化合物和硫化合物在鸡肉煮制过程中对鸡肉风味有重要影响[20]。然而目前的研究主要是对鸡汤风味物质含量以及贡献度的研究, 对于鸡汤品质控制的预测模型研究较少。

鉴于此, 本研究旨在通过 GC-MS 鉴定鸡汤炖煮过程中的挥发性化合物, 基于 OAV 和偏最小二乘判别分析(Partial Least Squares Discriminant Analysis, PLS-DA)确定鸡汤中的关键挥发性化合物和关键标志化合物。然后采用电子鼻、电子舌对不同鸡汤样品进行区分并建立鸡汤电子舌 PCA-BP 神经网络预测模型, 旨在对炖煮过程中鸡汤样品的品质控制提供一定的理论基础。

1　材料与方法

1.1　材料与仪器

鸡肉　150 日龄, 雌性, 当天现宰, 宁夏晓鸣农牧股份有限公司; 邻二氯苯(99.78%, g/g)、辛醛(99.0%)、1-己醇(98.0%)、己醛(95.0%)、(E)-2-辛烯醛(97.0%)、(E)-2-壬烯醛(95.0%)、壬醛(99.0%)、(E)-2-十一烯醛(96%)、庚醛(97%)、正构烷烃(C_7~C_{40})标准品　美国 Sigma-Aldrich 公司; 1-辛烯-3-醇(98.0%)、(E,E)-2,4-癸二烯醛(94.0%)、(E,E)-2,4-壬二烯醛(95.8%)、2-戊基呋喃(98.0%)　梯希爱(上海)化成工业发展有限公司; 甲醇(色谱纯)　赛默飞世尔科技有限公司。

Qp2010ultra 气相色谱-质谱仪　日本 Shimadzu 公司; PEN 3.5 电子鼻　德国 Airsence 公司; cTongue 型电子舌　保圣科技有限公司; ST22J1 型不锈钢汤锅　苏泊尔股份有限责任公司; C21-SC011 型九阳

触控式电磁炉　九阳股份有限公司; WNB22 型精密数显恒温水浴槽　上海树立仪器仪表有限公司; LT202E 型电子天平　常熟市天量仪器有限责任公司。

1.2　实验方法

1.2.1　样品的制备　取 20 块新鲜带皮鸡胸肉(黄羽鸡, 重量为 290~320 g)洗净平均分为 5 组。称取 4 块鸡胸肉, 加入 2.5 倍于鸡胸肉的纯净水于 4 L 不锈钢锅中, 将电磁炉设置为 300 W, 待水煮沸时加入鸡肉。分别炖 0.5、1.0、1.5、2.0 和 2.5 h。使用分液漏斗分离出汤面油层后, 对鸡汤样品进行检测。

1.2.2　挥发性成分的 HS-SPME 萃取以及 GC-MS 分析

1.2.2.1　HS-SPME 提取挥发性成分　准确称取(2.00±0.01)g 鸡汤样品于 15 mL 顶空瓶, 使用 10 μL 微型注射器加入 4 μL 浓度为 6.42 μg/mL 的邻二氯苯/甲醇溶液, 旋盖并用聚四氟乙烯隔膜密封, 涡旋混匀。于 55 ℃ 的恒温水浴中平衡 20 min 后使用 50/30 μm DVB/CAR/PDMS 纤维萃取头吸附挥发性化合物, 吸附时间为 30 min。结束后立即将萃取头转移到 GC 进样口, 250 ℃ 解吸 7 min。每个样品平行测定 3 次。

1.2.2.2　GC-MS 条件　GC: DB-WAX 色谱柱(30 m×0.25 mm×0.25 μm); 程序升温: 柱温 40 ℃ 保持 3 min, 5 ℃/min 升至 90 ℃, 8 ℃/min 升至 230 ℃ 保持 10 min。载气为 He, 流速为 1.8 mL/min。进样口温度 250 ℃; 不分流模式, 进样量 1 μL。

MS: 电子电离源, 温度 230 ℃, 能量 70 eV; 四极杆温度 150 ℃; 全扫描, 质量扫描范围 m/z 20~350。

1.2.2.3　定性与定量分析　挥发性化合物定性方式为 NIST 质谱库(MS)、保留指数(RI)以及标准品(S)。定量计算公式如下:

$$M_x = \frac{4\times1000\times A_x}{2\times A_i\times1000}\times C_i \qquad 式(1)$$

式中: M_x 为目标挥发性化合物的含量(μg/kg); A_x 为目标挥发性化合物峰面积; A_i 为邻二氯苯的峰面积; C_i 为邻二氯苯质量浓度(μg/kg)。

1.2.2.4　OAVs 分析　浓度以及感觉阈值共同决定了挥发性物质对于样品总体气味的贡献大小, 因而本实验采用气味活度值(odor activity values, OAVs)法[21]对鸡汤样品中挥发性物质的香气贡献进行分析。OAVs 按式(2)计算:

$$OAV_x = M_x/T_i \qquad 式(2)$$

式中: M_x 和 T_i 分别为各挥发性物质的含量(μg/kg)和感觉阈值(μg/kg)。

OAVs 贡献率为鸡汤样品中某一关键挥发性物质的 OAVs 与该样品中所有关键挥发性物质总 OAVs 的百分比。

1.2.3　电子鼻检测　准确称取(2.00±0.01)g 鸡汤样品置于电子鼻进样瓶内, 旋盖并用聚四氟乙烯隔膜密封。50 ℃ 恒温水浴中放置 30 min, 取出至室温静置平衡 30 min。电子鼻参数与王永瑞等[22]一致, 每个样品平行测定 3 次。

1.2.4　电子舌分析　根据 Zhu 等[23]的方法对样品进行预处理, 并作修改。称取 10 g 样品加入 100.0 mL 超纯水进行均质化; 然后将溶液在 4.0 ℃ 下以 3000 r/min 离心 15 min。使用 12.5 cm滤纸过滤稀释的样品上机进行检测分析。电子舌由 6 个传感器(铂 S1、金 S2、钯 S3、钨 S4、钛 S5、银 S6)组成, 每个传感器取三个特征数值, 总共有 18 个特定值, 即 P_1~P_18。传感器的信号放大倍数为 100 倍, 检测时间为 120 s。

1.2.5　感官评价　感官评价由宁夏大学 18 名研究生(9 名女性和 9 名男性, 年龄 22~25 岁)进行。在评估之前, 所有学生都接受了专业培训。选择四个感官特征来评估鸡汤的质量, 包括外观、色泽、风味和总体可接受性[24]。感官评估小组对鸡汤的感官属性进行 0 到 10 的评分, 评价标准见表 1。

表 1　鸡汤样品感官评价标准

Table 1　Sensory evaluation criteria of chicken soup samples

指标	0~3分	4~6分	7~9分	10分
外观	清水样/浑浊、浮沫残留	浑浊	略微浑浊	均匀不浑浊
色泽	无色/灰暗	汤色发灰不透亮	奶白浓稠	鲜亮、金黄
风味	无味/异味(腥味、腐败味、酸臭味等)	略带腥味、脂肪味缺乏肉香	浓郁肉香、脂肪味厚重	浓郁鲜香、肉香、
总体可接受性	外观、色泽、风味整体较差	外观、色泽、风味整体一般	外观、色泽、风味整体良好	外观、色泽、风味整体极佳

1.3　数据处理

每个样品重复测定三次, 数据的平均值和标准差采用 Excel 软件进行; 采用 SPSS 19.0 软件进行单因素方差分析, 并结合 Duncan 法进行多重比较检验组间差异性, 设定 $P<0.05$ 为显著性差异。PLS-DA 分析由 SIMCA 14.1 软件完成; 聚类热图、相关性分析热图、OAVs 贡献率图和 PCA 分析采用在线网站 http://www.bioinformatics.com.cn/绘制。其他雷达图、OAVs 值热图、柱状图由 Origin 18C 软件绘制。

2　结果与分析

2.1　样品外观

将鸡胸肉分别炖煮 0.5、1.0、1.5、2.0 和 2.5 h 后得到鸡汤样品如图 1 所示。由图 1 可知随着炖煮时间的延长, 鸡汤颜色加深, 浓稠度升高。在鸡肉炖煮的过程中, 鸡肉中的营养物质如蛋白质、碳水化合物、维生素、矿物质、多肽和氨基酸等水溶性成分会溶解到鸡汤中[9−10]。随着加热时间的延长, 汤中的这些成分含量会逐渐增加, 导致了鸡汤的颜色加深、浓

稠度升高。

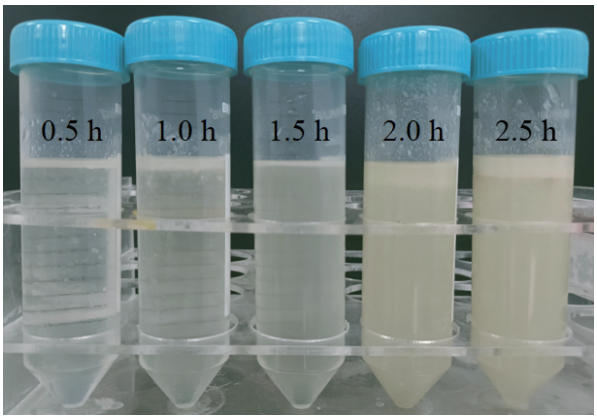


图 1　不同炖煮时间鸡汤样品

Fig.1　Chicken soup samples with different stewing times

2.2　鸡汤样品 HS-SPME-GC-MS 分析

2.2.1　鸡汤样品挥发性化合物种类和含量分析　采用 HS-SPME 结合 GC-MS 对鸡汤样品中的挥发性化合物进行萃取分析，5 份样品中共鉴定出 35 种挥发性化合物，包括 15 种醛类、8 种醇类、8 种酸类、2 种酮类、1 种酯类和 1 种杂环类化合物，这些物质的含量变化如图 2 所示。这一结果与 Jia 等[16] 和 Qi 等[17] 的研究结果差异明显，这主要归因于鸡汤炖煮工艺、检测仪器、萃取头型号、升温程序的差异。共有 14 种挥发性化合物在 5 个炖煮样品中均被检测出，分别为 1-庚醇、1-辛醇、1-辛烯-3-醇、己醛、壬醛、(E,E)-2,4-癸二烯醛、(E,E)-2,4-庚二烯醛、(E,E)-2,4-壬二烯醛、(Z)-2-庚烯醛、(E)-2-壬烯醛、(E)-2-辛烯醛、2,4-二甲基苯甲醛、2,3-辛二酮和壬酸。有研究表明己醛、1-辛烯-3-醇、壬醛、(E,E)-2,4-癸二烯醛和(E)-2-壬烯醛在煮熟的鸡肉或肉汤中具有强烈的气味效力[12,25]。这些物质主要来源于脂

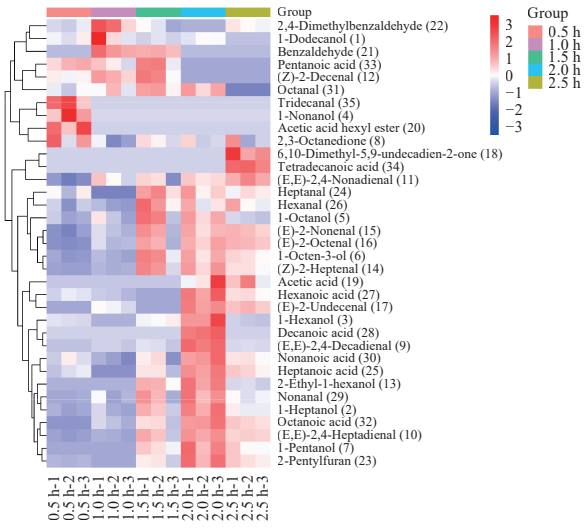


图 2　不同炖煮时间鸡汤样品挥发性风味物质聚类热图

Fig.2　Cluster heatmap of volatile flavor compounds in chicken soup samples with different stewing times

注：图中括号数字为挥发性化合物编号。

质氧化，表明鸡汤在炖煮过程中的风味物质的形成主要来自肌内脂肪中各不饱和脂肪酸的氧化裂解。在炖煮 0.5、1.0、1.5、2.0 和 2.5 h 样品中，分别鉴定出 26、22、26、27 和 26 种化合物，各类别化合物种类如图 3(a)所示。醛类、醇类和酸类化合物是所有样品中种类最多的 3 类化合物，各类化合物数目随着炖煮时间的增加变化不大(图 3(b))。鸡汤中鉴定出的醇、醛类物质主要为 C_6~C_{10} 类化合物。醇类物质除 1-辛烯-3-醇和 2-乙基-1-己醇外均为直链 1 号位醇。醛类物质为 2 种直链醛、5 种直链烯醛、3 种直链二烯醛和 2 种芳香醛。有研究表明，己醛、辛醛、壬醛、庚醛、(E)-2-辛烯醛和(E)-2-己烯醛等醛类为鸡汤的关键风味物质[26-27]。酸类物质均为直链饱和脂肪酸，是肉中长链脂肪酸氧化代谢的产物。2,3-辛二酮和 2-戊基呋喃是肉中较常见的挥发性风味物质，在鲜鸡肉[24]、鲜羊肉[28]、鲜牛肉[29]、烤羊肉[28,30]、烤鸡肉[31]、炸鸡肉[24] 样品中均有存在。在所有样本中，挥发性化合物的总含量范围在 67.49~270.45 μg/kg。随着炖煮时间的增加，挥发性化合物的总量先增加后降低，其中在炖煮 2.0 h 时达到了最高。Qi 等[17] 研究表明炖煮 3 h 鸡汤样品挥发性化合物总含量较炖煮 2 h 鸡汤样品明显降低，这可能是因为在鸡汤炖煮 2 h 后部分低沸点、不稳定的挥发性香气成分挥发或者分解导致总香气强度减弱。醛类和醇类化合物是鸡汤样品中含量较高的两类化合物，其总含量与所有挥发性化合物总含量的变化一致，而酯类物质只在炖煮 0.5 h 样品中检测出。酸类化合物和杂

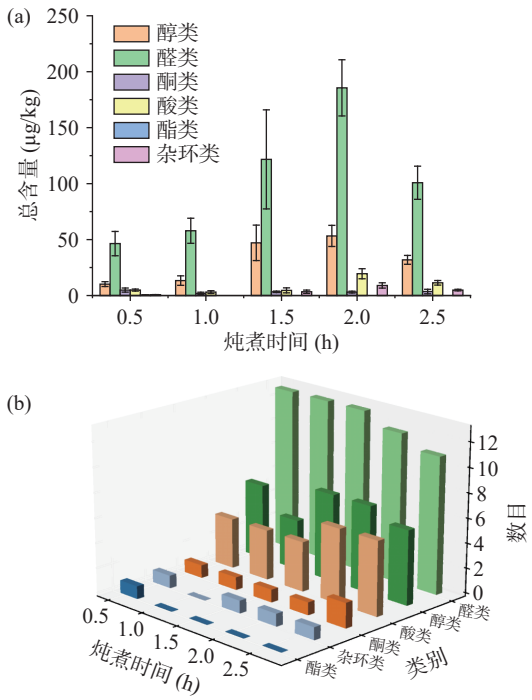


图 3　不同炖煮时间鸡汤挥发性物质各类别总含量分析(a)、各类别种类图(b)

Fig.3　Analysis of the total content of volatile substances in different categories of chicken soup with different stewing times (a), types of categories (b)

环类化合物总含量在炖煮 2.0 h 时最高，而酮类在炖煮 0.5 h 的鸡汤样品中含量最高。在这些化合物中，己醛在不同炖煮时间样品中含量普遍较高，含量范围在 22.04~59.99 μg/kg，且在 1.5 h 达到最高。1-辛烯-3-醇（6.90~35.88 μg/kg）和（E,E）-2,4-癸二烯醛（4.94~83.02 μg/kg）也是鸡汤样品中含量较高的化合物，它们分别在 1.5 h 和 2.0 h 样品中达到最高。此外，(Z)-2-庚烯醛的含量在个别样品中也超过了 10 μg/kg，范围在 1.63~19.51 μg/kg 之间，炖煮 2.0 h 后最高。其他的化合物的含量在所有样品中均小于 10 μg/kg，这表明相对于炖煮鸡肉的挥发性物质，鸡汤中的风味物质含量较低[17]。鸡汤中风味物质主要来源于鸡肉中风味前体物质溶解、反应，并且随着炖煮的进行，部分挥发性风味化合物随水分的蒸发被带出。

2.2.2 OAVs 分析　根据 Guadagni 气味活度值理论，食品中香气浓度高而阈值低的成分很可能是食品的特征香气，因此结合化合物浓度以及阈值研究鸡汤炖煮过程中的关键挥发性化合物[32]。结合《化合物香味阈值汇编（原书第二版）》[33]、《食用调香术》[32]以及文献 [34] 中的香气阈值计算出鸡汤样品中各挥发性化合物的 OAVs。通过筛选最终得到 13 种化合物的 OAVs>1，分别为 1-己醇、1-辛烯-3-醇、(E,E)-2,4-癸二烯醛、(E,E)-2,4-壬二烯醛、(Z)-2-庚烯醛、(E)-2-壬烯醛、(E)-2-辛烯醛、(E)-2-十一烯醛、2-戊基呋喃、庚醛、己醛、壬醛和辛醛，这与 Qi 等[17] 研究结果相近。这 13 种化合物为鸡汤的关键风味物质，其 OAVs 在 5 种鸡汤样品中的变化如表 2 所示。由于(E,E)-2,4-癸二烯醛的香气阈值较低，因此其在所有鸡汤样品中的 OAVs 均最高。脂质氧化是肉类风味物质产生的重要原因，辛醛、壬醛和(E)-2-十一烯醛主要由油酸氧化生成。己醛、1-己醇、(E)-2-壬烯醛、(E,E)-2,4-癸二烯醛和 2-戊基呋喃主要由亚油酸氧化产生[34−35]。亚油酸的 9-氢过氧化物和 13-氢过氧化物的降解分别导致(E,E)-2,4-癸二烯醛和己醛生成[36]。(E,E)-2,4-癸二烯醛的反式醇化反应生成(E)-2-辛烯醛[37]。庚醛在肉中的形成主要由亚油酸降解主导、氨基酸与美拉德反应协同[38]。具有蘑菇香气的 1-辛烯-3-醇主要由花生四烯酸氧化生成[39]。(E,E)-2,4-壬二烯醛来源于 α-亚麻酸，是 ω-3 油脂氧化程度的标志物[40]。(Z)-2-庚烯醛的前体物质为 ω-6 多不饱和脂肪酸，如亚油酸或花生四烯酸。其中亚油酸经热氧化生成 13-氢过氧化物，进一步裂解产生庚醛，庚醛再脱水或异构化形成(Z)-2-庚烯醛。花生四烯酸氧化生成 12-氢过氧化物，裂解后可直接产生(Z)-2-庚烯醛，同时生成其他烯醛（如(E)-2-辛烯醛）。此外，庚醛经 Strecker 降解或与含硫化合物结合，可能异构化为(Z)-2-庚烯醛。这 13 种关键挥发性化合物对鸡汤的整体风味起重要的贡献作用。而其余 OAV<1 的化合物为鸡汤样品的整体香气起到重要修饰作用[41]。

为进一步了解这 13 种化合物对于鸡汤风味的贡献，计算出了各物质 OAVs 贡献率，结果如表 2 所示。在 5 种鸡汤样品中(E,E)-2,4-癸二烯醛的 OAVs 贡献率均在 85% 以上，并且在炖煮 2.0 h 时(E,E)-2,4-癸二烯醛的 OAVs 贡献率达到了 97.78%，表明(E,E)-2,4-癸二烯醛是鸡汤风味最主要的贡献者，这与 Liao 等[19] 的研究结果一致。有研究表明(E,E)-2,4-癸二烯醛有助于提高鸡汤的浓郁度[19]。相较于其他关键挥发性醛类化合物，(E,E)-2,4-癸二烯醛碳链较长。随着醛类链长的增加，鸡汤中的肉基质对醛类物质的吸附能力也随之增强[42]。其余 12 种关键挥发性化合物的 OAVs 贡献率则全部小于 5%。

表 2　鸡汤关键挥发性物质 OAVs 及 OAVs 贡献率

Table 2　OAVs and contribution rate of key volatile substance of chicken soup

关键挥发性化合物	阈值（μg/kg）	0.5 h		1.0 h		1.5 h		2.0 h		2.5 h	
		OAVs	贡献率(%)	OAVs	贡献率(%)	OAVs	贡献率(%)	OAVs	贡献率(%)	OAVs	贡献率(%)
1-己醇	5.6	0.22±0.03^{b}	0.11±0.02^{a}	0.35±0.06^{b}	0.09±0.07^{ab}	–	–	1.04±0.31^{a}	0.03±0.01^{b}	0.14±0.04^{b}	0.03±0.01^{b}
1-辛烯-3-醇	1.5	4.60±1.28^{b}	2.26±0.71^{bc}	23.92±8.84^{a}	4.71±0.84^{a}	6.95±1.73^{b}	2.00±0.29^{c}	22.07±4.1^{a}	0.70±0.08^{d}	17.43±2.03^{a}	3.24±0.31^{b}
(E,E)-2,4-癸二烯醛	0.027	183.12±9.50^{b}	89.43±2.42^{bc}	470.91±232.61^{b}	86.64±2.37^{c}	320.58±85.49^{b}	91.09±1.41^{b}	3074.86±233.61^{a}	97.78±0.21^{a}	482.65±41.66^{b}	89.60±1.02^{bc}
(E,E)-2,4-壬二烯醛	1	1.66±0.28^{c}	0.81±0.16^{bc}	3.29±1.37^{b}	0.63±0.06^{c}	3.68±0.79^{ab}	1.07±0.16^{a}	4.14±0.25^{ab}	0.13±0.01^{d}	5.15±0.43^{a}	0.96±0.04^{ab}
(Z)-2-庚烯醛	10	0.16±0.02^{b}	0.08±0.01^{cd}	1.82±0.89^{a}	0.34±0.01^{a}	0.37±0.05^{b}	0.11±0.03^{c}	1.95±0.45^{a}	0.06±0.01^{d}	1.28±0.15^{a}	0.24±0.02^{b}
(E)-2-壬烯醛	0.19	3.16±0.99^{c}	1.54±0.46^{c}	13.37±6.39^{ab}	2.49±0.06^{ab}	7.07±1.56^{bc}	2.05±0.34^{bc}	14.35±2.00^{a}	0.45±0.03^{d}	14.08±1.26^{a}	2.62±0.17^{a}
(E)-2-辛烯醛	3	0.42±0.05^{c}	0.20±0.03^{c}	1.73±0.84^{ab}	0.32±0.01^{ab}	0.98±0.21^{bc}	0.29±0.08^{b}	2.09±0.27^{a}	0.07±0.00^{d}	2.02±0.13^{a}	0.38±0.02^{a}
(E)-2-十一烯醛	5	–	–	–	–	0.44±0.11^{c}	0.13±0.01^{b}	1.29±0.14^{a}	0.04±0.00^{c}	0.89±0.09^{b}	0.17±0.00^{a}
2-戊基呋喃	5.8	0.12±0.02^{c}	0.06±0.01^{c}	0.59±0.25^{b}	0.11±0.01^{b}	–	–	1.55±0.41^{a}	0.05±0.01^{c}	0.84±0.12^{b}	0.16±0.02^{a}
庚醛	2.8	0.61±0.22^{b}	0.30±0.10^{a}	1.17±0.29^{a}	0.25±0.09^{ab}	–	–	0.99±0.27^{ab}	0.03±0.01^{c}	0.79±0.11^{ab}	0.15±0.02^{bc}
己醛	5	5.31±1.77^{ba}	2.59±0.88^{a}	12.00±3.50^{a}	2.48±0.82^{ab}	4.41±0.97^{c}	1.29±0.29^{bc}	9.23±2.20^{ab}	0.29±0.05^{d}	9.19±2.60^{ab}	1.71±0.48^{ab}
壬醛	1.1	2.70±0.04^{c}	1.32±0.04^{a}	4.99±2.02^{ab}	0.97±0.14^{b}	3.25±0.89^{bc}	0.96±0.31^{b}	6.53±0.92^{a}	0.21±0.01^{c}	4.15±0.30^{bc}	0.77±0.10^{b}
辛醛	0.59	2.65±0.60^{b}	1.29±0.29^{a}	4.76±1.23^{a}	0.99±0.34^{a}	3.47±1.08^{ab}	1.00±0.21^{a}	4.94±0.91^{a}	0.16±0.02^{b}	–	–

注：同行字母不同表示差异显著（P<0.05）；“–”表示无。

2.2.3　PLS-DA 分析　采用 SIMCA 14.0 软件对 GC-MS 数据进行 PLS-DA，以寻找鸡汤样品特征挥发性成分。由图 4(a)可知，炖煮 0.5 h 鸡汤位于第 1 象限，炖煮 1.5 h 和 2.0 h 鸡汤样品位于第 2 象限，炖煮 1.0 h 鸡汤样品位于第 4 象限，炖煮 2.5 h 鸡汤样品位于第 3 象限。5 个鸡汤样品差异显著，可以明显区分。挥发性化合物对已构建的分析模型的贡献大小可由 PLS 载荷图反映。挥发性化合物离中心圆点和

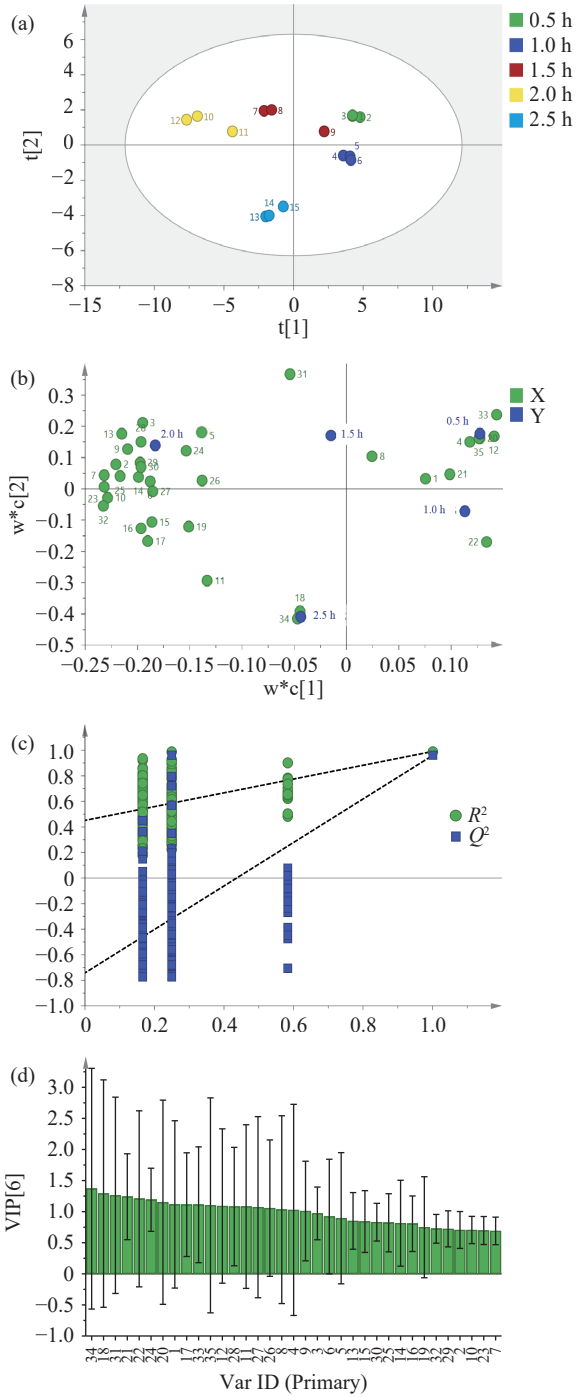


图 4　鸡汤样品挥发性化合物 PLS 二维得分图(a)、二维载荷图(b)、PLS-DA 模型的置换检验(c)和 VIP 排序(d)

Fig.4　PLS score plot (a), loading plot (b), permutation test of PLS-DA model (c), and VIPs (d) of volatile compounds in chicken soup samples

注：图(b)、图(d)中数字为挥发性化合物编号。

主要化合物团越远，说明其对已构建的模型贡献越大[43]。从图 4(b)可以看出，在鸡汤样品中戊酸(33)、1-壬醇(4)、十三醛(35)、乙酸己酯(20)、(Z)-2-癸烯醛(12)等化合物在载荷图中的位置与炖煮 0.5 h 鸡汤样品在得分图中的位置相近，表明这些化合物为炖煮 0.5 h 鸡汤的主要挥发性物质。1-十二醇(1)、苯甲醛(21)、2,4-二甲基苯甲醛(22)等挥发性物质为炖煮 1.0 h 鸡汤样品主要挥发性物质。6,10-二甲基-5,9-十一烯-2-酮(18)、十四碳酸(34)为炖煮 2.5 h 鸡汤样品的主要挥发性物质。2,3-辛二酮(8)、辛醛(31)为炖煮 1.5 h 鸡汤样品的主要挥发性物质。1-己醇(3)、1-辛醇(5)、庚醛(24)、己醛(26)、癸酸(28)、2-乙基-1-己醇(13)、(E,E)-2,4-癸二烯醛(9)、1-庚醇(2)、壬醛(29)、壬酸(30)、(Z)-2-庚烯醛(14)、1-辛烯-3-醇(6)、己醛(27)、庚酸(25)等为炖煮 2.0 h 鸡汤样品的主要挥发性物质。

采用有监督的 PLS-DA 进行分析时易产生过拟合现象，因此通过 200 次响应的置换检验验证 PLS-DA 模型是否存在过拟合现象[22]。如图 4(c)所示，置换检验得到 R^2 为 0.451，Q^2 为−0.742，Q^2 与 Y 轴的截距为负，表明该模型不存在过拟合现象，模型的预测能力好，能够胜任后续特征挥发性物质的筛选。VIP 展示每个变量对样品分类的贡献大小，其中 VIP 值大于 1 的变量通常被认为是模型的重要标志化合物。VIP 值越大的变量在判别过程中贡献越大，在样品之间的差异也越显著[44]。从图 4(d)可以看出，有 19 个香气组分 VIP 值大于 1.0，可作为区分 5 个鸡汤样品的重要挥发性化合物。分别为十四碳酸(34)、6,10-二甲基-5,9-十一烯-2-酮(18)、辛醛(31)、苯甲醛(21)、2,4-二甲基苯甲醛(22)、庚醛(24)、乙酸己酯(20)、1-十二醇(1)、(E)-2-十一烯醛(17)、戊酸(33)、十三醛(35)、(Z)-2-癸烯醛(12)、癸酸(28)、(E,E)-2,4-壬二烯醛(11)、己醛(27)、己醛(26)、2,3-辛二酮(8)、1-壬醇(4)和(E,E)-2,4-癸二烯醛(9)。以上挥发性物质能作为 5 个鸡汤样品的关键变量，可用于区分不同炖煮时间鸡汤样品。

2.3　电子鼻分析

电子鼻是通过其内部的金属传感器对挥发性化合物的响应来辨别气味的电子系统，在 PEN3.5 型电子鼻中共含有 10 个金属传感器，分别为：W1C(响应特征：芳香类物质)、W5S(响应特征：氮氧化合物)、W3C(响应特征：氨，芳香类化合物)、W6S(响应特征：氢气)、W5C(响应特征：烷烃类，芳香类化合物)、W1S(响应特征：甲烷，与 W2S 传感器类似)、W1W(响应特征：萜烯类)、W2S(响应特征：醇类，部分芳香化合物)、W2W(响应特征：芳香类化合物，有机硫化物)、W3S(响应特征：烷烃类)[45]。采用 PEN3.5 电子鼻对不同炖煮时间鸡汤样品进行检测分析，各传感器对样品的响应值结果如图 5(a)所示。金属传感器 W1C、W3C、W6S 和 W5C 对鸡汤样品的响应曲线始终在 1 附近，表明氨、烷烃类以及部分

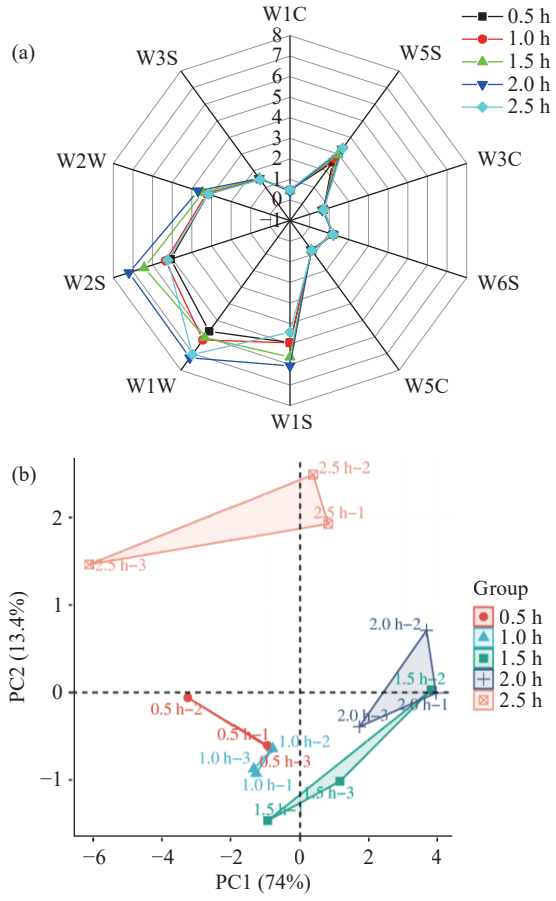


图 5　电子鼻响应雷达图(a)和二维载荷图(b)

Fig.5　Radar plots of the responses of the sensor (a) and PLS score plot (b) of E-nose

芳香族化合物在鸡汤样品中的含量较低且变化较小。传感器 W5S、W2W、W2S、W1W 以及 W1S 对鸡汤样品的响应明显，其中 W5S 的响应值与炖煮时间呈正相关，这表明氮氧类化合物随着炖煮时间增加含量上升。W2W、W1W、W2S 和 W1S 传感器的响应值在炖煮 2.0 h 时最大，表明鸡肉炖煮 2.0 h 时鸡汤中的芳香类化合物、有机硫化物、萜烯类、醇类和部分芳香化合物含量较高。

PCA 是一种多元统计分析方法，它利用多元线性变换选择几个显著变量，通常用于分析观测变量之间的关系，已在肉制品风味鉴定方面广泛应用[46]。电子鼻数据 PCA 结果如图 5(b)所示，鸡汤样品在 PC1 和 PC2 维度上有较好区分，PC1 和 PC2 的贡献度分别为 74.0% 和 13.4%。PC1+PC2 为 87.4%，说明前 2 个 PC 已将鸡汤样品中绝大多数挥发性化合物信息涵盖。结合雷达图和 PCA 得分图看，炖煮 2.5 h 的鸡汤样品与其他 4 个样品差异显著。雷达图中炖煮 2.5 h 鸡汤样品的 10 个传感器的轮廓与其他 4 个样品差异明显，因而在 PCA 得分图中炖煮 2.5 h 的鸡汤样品位于第一象限、第二象限的边缘处，独立于其他 4 个鸡汤样品。炖煮 0.5 h 和炖煮 1.0 h 的鸡汤样品完全坐落于第三象限，平行样之间相互略有交集。炖煮 1.5 h 鸡汤样品横跨第三象限、第四象限和第一象限。炖煮 2.0 h 位于第四和第一象限，与炖煮 1.5 h 鸡汤样品互相略有交集。5 个鸡汤样品在 PCA 得分图中呈现逆时针的过渡，表明鸡汤样品中的挥发性化合物随着炖煮时间的增加呈现规律性的变化。

2.4　电子舌分析

电子舌是一种被广泛采用、客观且高效的工具，

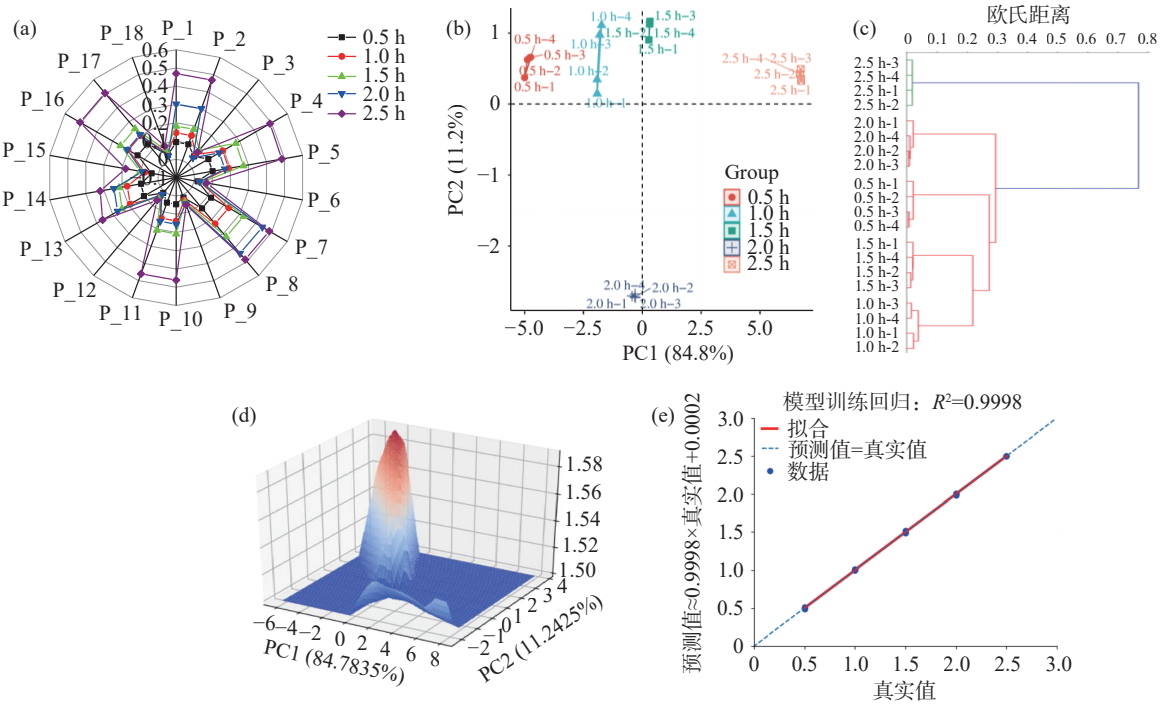


图 6　电子舌响应雷达图(a)、二维载荷图(b)、聚类分析(c)、PCA-BP 神经网络模型(d)和模型验证(e)

Fig.6　Radar plots of the responses of the sensor (a), PLS score plot (b), cluster analysis (c), PCA-BP neural network model (d), and model validation (e) of E-tongue

用于评估食物的味道特征[47−48]。不同炖煮时间的鸡汤样本的电子舌检测结果如图 6(a)所示。可以看出，5 个不同时间鸡汤的电子舌传感器特征数据存在差异。其中特征值 P_1、P_2、P_7、P_8、P_13 和 P_14 随着炖煮时间增加明显上升。18 个特征值在炖煮 2.5 h 达到最大值。这说明炖煮 2.5 h 后，鸡汤内滋味物质丰富。为了进一步了解 5 种不同炖煮时间的鸡汤样品在味道特征上的差异，使用 PCA 和聚类分析对它们的味道成分进行了定性比较分析(图 6(b)和图 6(c))。由图 6(b)可知，PC1 方差贡献率为 84.80%，PC2 方差贡献率 11.20%，累计方差贡献率 96.00%；5 个鸡汤样品按味道大致可分为 3 类，即炖煮 0.5、1.0 和 1.5 h为一类，炖煮 2.0 h 为一类，炖煮 2.5 h 为一类。图 6(c)显示了以树状图形式呈现的合并数据，其中水平轴表示组之间的欧几里德距离，垂直轴表示鸡汤滋味相似性。人工神经网络是模仿人脑神经细胞的结构和功能的系统，是一种大规模并行的非线性动力系统，能够实现输入与输出之间的高度非线性映射，在信号和模式识别中的应用非常广泛[49−51]。采用主成分分析(PCA)降维：将 18 个电子舌特征值压缩成了两个主成分(图 6(d))。横轴：主成分 1，占 84.7835% 的信息量。纵轴：主成分 2，占 11.1425% 的信息量。总共解释了 95.9% 的数据变异性，已经覆盖了大部分有效信息。垂直轴是 BP 神经网络的输出值(炖煮时间)，呈现一个明显的单峰分布，说明模型在主成分空间中有一个清晰的最优响应区域。采用主成分分析结合 BP 人工神经网络技术建立鸡汤样品鉴别模型。在最优条件下模型定标集的相关系数为 0.996，验证集的相关系数为 0.9998。对预测模型进行验证，R^2=0.9998 表明模型训练的决定系数非常高，接近 1，说明预测值和真实值拟合度极高(图 6(e))。模型拟合的线性方程为：预测值=0.9998×真实值+0.0002。

2.5　感官评价

感官评价用于表征样品的各种视觉、味觉、嗅觉的特征。如表 3 所示，炖煮 2.0 h 的鸡汤在风味、色泽、外观和总体可接受性方面得分最高，这表明此时会产生很多气味化合物，更具吸引力。并且 GC-MS 数据得出挥发性风味物质的总含量在炖煮 2.0 h 时达到了最高。鉴于此，鸡汤的最佳炖煮时间为 2.0 h。

表 3　不同炖煮时间鸡汤样品的感官评价

Table 3　Sensory evaluation of chicken soup samples with different stewing times

指标	0.5 h	1.0 h	1.5 h	2.0 h	2.5 h
外观	5.38±0.14^{e}	6.27±0.12^{d}	6.55±0.11^{c}	8.77±0.13^{a}	8.22±0.14^{b}
色泽	5.37±0.12^{d}	6.27±0.17^{c}	6.53±0.05^{c}	8.49±0.26^{a}	7.52±0.14^{b}
风味	4.16±0.84^{c}	4.73±0.08^{bc}	5.26±0.20^{b}	7.44±0.25^{a}	7.21±0.15^{a}
总体可接受性	5.35±0.08^{e}	5.77±0.04^{d}	6.17±0.07^{c}	8.22±0.13^{a}	7.60±0.07^{b}

注：同行字母不同表示差异显著(P<0.05)。

2.6　相关性分析

在炖煮过程中，鸡肉中的营养物质逐渐渗透至汤中，发生各类化学反应形成挥发性风味物质。这些物质的含量与炖煮时间存在着一定的关系。将鸡汤中关键挥发性物质的含量与电子鼻数据、电子舌数据、感官评价数据进行相关性分析，结果如图 7 所示。1-己醇与电子鼻 W2S 和 W2W 传感器呈显著正相关(P<0.05)，与电子鼻 W1C、W3C 和 W5C 传感器呈显著负相关(P<0.05)。辛醛与电子鼻 W1S 和 W3S 传感器呈显著正相关(P<0.05)。壬醛与电子鼻 W3C 和 W5C 传感器呈显著负相关(P<0.05)，与电子鼻 W2S 和 W2W 传感器呈显著正相关(P<0.05)。(E,E)-2,4-癸二烯醛与电子鼻 W2W 传感器呈显著正相关(P<0.05)。(E,E)-2,4-壬二烯醛与电子舌的 P_1、P_2、P_7、P_8、P_9、P_13 和 P_14 特征值呈显著正相关(P<0.05)。(E)-2-壬烯醛与电子鼻 W5S 传感器、电子舌的 P_7、P_8、P_9、P_13 和 P_14 特征值呈显著正相关(P<0.05)。(E)-2-辛烯醛与电子鼻 W5S 传感器、电子舌的 P_7、P_8、P_9、P_13 和 P_14 特征值、感官评价的外观、色泽、风味和总体可接受性呈显著正相关(P<0.05)。(E)-2-十一烯醛与电子鼻 W1W 传感器、感官评价的外观、色泽、风味和总体可接受性显著正相关(P<0.05)。2-戊基呋喃与感官评价的外观、色泽、风味和总体可接受性显著正相关(P<0.05)。

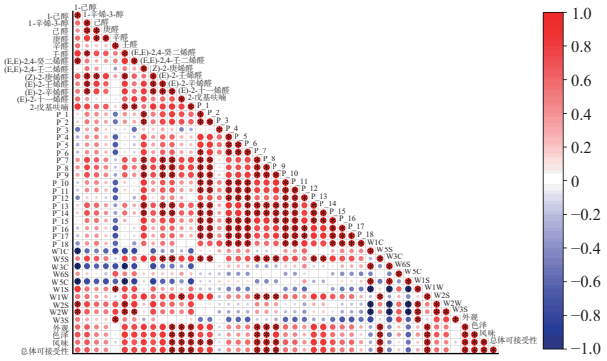


图 7　鸡汤中关键挥发性物质含量与电子鼻、电子舌及感官评价数据的相关性分析

Fig.7　Correlation analysis between the content of key volatile compounds in chicken soup and the data of E-nose, E-tongue, and sensory evaluation

注：*代表显著相关(P<0.05)。

3　结论

本文研究了黄羽鸡炖煮过程中鸡汤挥发性风味物质的变化。鸡汤颜色随着炖煮时间增加逐渐变浓。在所有鸡汤样品中共鉴定出 35 种挥发性化合物，醛类、醇类和酸类化合物种类最多。鸡汤中的关键挥发性化合物主要来源于脂质氧化，(E,E)-2,4-癸二烯醛在其中起到极其重要的作用。不同炖煮时间的鸡汤样品可通过电子鼻和电子舌进行有效区分。电子舌 PCA-BP 神经网络模型可准确预测鸡汤样

品炖煮时间，模型拟合的线性方程为：预测值=0.9998×真实值+0.0002。综合感官评价和 GC-MS 数据得出鸡汤的最佳炖煮时间为 2.0 h。论文研究结果可初步作为原始鸡汤风味物质的依据，下一步就中药对鸡汤的风味影响以及鸡汤滋味物质变化进行研究，有助于生产高质量的药食同源的鸡汤产品。

© The Author(s) 2026. This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/).

参考文献

[1] ZHANG M, CHEN X, HAYAK K, et al. Characterization of odor-active compounds of chicken broth and improved flavor by thermal modulation in electrical stewpots[J]. Food Research International, 2017, 109: 72−81.

[2] CAO C W, XIAO Z C, TONG H Q, et al. Effect of ultrasound-assisted enzyme treatment on the quality of chicken breast meat[J]. Food and Bioproducts Processing, 2021, 125: 193−203.

[3] WANG X M, ZHANG J, WU L H, et al. A mini-review of chemical composition and nutritional value of edible wild-grown mushroom from China[J]. Food Chemistry, 2014, 151: 279−285.

[4] QI J, XU Y, XIE X F, et al. Gelatin enhances the flavor of chicken broth: A perspective on the ability of emulsions to bind volatile compounds[J]. Food Chemistry, 2020, 333: 127463.

[5] 杜超, 戚军, 蔡莹暄, 等. 反复炖煮鸡汤中挥发性物质的指纹图谱分析[J]. 食品工业科技, 2020, 41(21): 246−252. [DU Chao, QI Jun, CAI Yingxuan, et al. Fingerprint analysis of volatile compounds in stewed chicken broth[J]. Science and Technology of Food Industry, 2020, 41(21): 246−252.]

[6] GUAN H N, YANG C, TIAN Y L, et al. Changes in stability and volatile flavor compounds of self-emulsifying chicken soup formed during the stewing process[J]. LWT, 2023, 175: 114520.

[7] DEVI S, ZHANG M, JU R H, et al. Water loss and partitioning of the oil fraction of mushroom chips using ultrasound-assisted vacuum frying[J]. Food Bioscience, 2020, 38: 100753.

[8] 刘彩玲, 李雪, 刘光宪, 等. 4 种江西不同地方鸡品种对鸡汤滋味及挥发性风味的影响[J]. 食品工业科技, 2025, 46(14): 71−83. [LIU Cailing, LI Xue, LIU Guangxian, et al. The influence of four different chicken breeds from different regions of Jiangxi on the taste and volatile flavor of chicken soup[J]. Science and Technology of Food Industry, 2025, 46(14): 71−83.]

[9] MENG Q, ZHOU J W, GAO D, et al. Desorption of nutrients and flavor compounds formation during the cooking of bone soup[J]. Food Control, 2022, 132: 108408.

[10] ZHANG L L, HAO Z L, ZHAO C, et al. Taste compounds, affecting factors, and methods used to evaluate chicken soup: A review[J]. Food Science & Nutrition, 2021, 9(10): 5833−5853.

[11] DU C, QI J, YANG C, et al. Enrichment of taste and aroma perceptions in chicken meat stewed in braised soup used repeatedly[J]. Journal of Food Science, 2022, 87(6): 2563−2577.

[12] QI J, WANG H H, ZHOU G H, et al. Evaluation of the taste-active and volatile compounds in stewed meat from the Chinese yellow-feather chicken breed[J]. International Journal of Food Properties, 2017, 20(3): 2579−2595.

[13] QI J, JIA C K, ZHANG W W, et al. Ultrasonic-assisted stewing enhances the aroma intensity of chicken broth: A perspective of the aroma-binding behavior of fat[J]. Food Chemistry, 2023, 398: 133913.

[14] XU C H, YIN Z Z. Unraveling the flavor profiles of chicken meat: Classes, biosynthesis, influencing factors in flavor development, and sensory evaluation[J]. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety, 2024, 23(4): e13391.

[15] LIANG L, DUAN W N, ZHANG J C. Characterization and molecular docking study of taste peptides from chicken soup by sensory analysis combined with nano-LC-Q-TOF-MS/MS[J]. Food Chemistry, 2022, 383: 132455.

[16] JIA R, YANG Y C, LIAO G Z, et al. Effect of stewing time on the small molecular metabolites, free fatty acids, and volatile flavor compounds in chicken broth[J]. Food Science of Animal Resources, 2024, 44(3): 651−661.

[17] QI J, LIU D Y, ZHOU G H, et al. Characteristic flavor of traditional soup made by stewing Chinese yellow-feather chickens[J]. Journal of Food Science, 2017, 82(9): 2031−2040.

[18] GUAN H N, XU X J, FENG C M, et al. Effects of stewing modes on physicochemical quality and formation of flavour compounds of Chinese Dagu chicken soup[J]. Polish Journal of Food and Nutrition Sciences, 2024, 74(1): 26−40.

[19] LIAO M J, PENG S Y, GUO H B, et al. The effect of enzymatic hydrolysis on the flavor improvement of chicken broth by characterizing key taste and odor-active compounds[J]. Food Bioscience, 2024, 62: 105054.

[20] FLORES M. Understanding the implications of current health trends on the aroma of wet and dry cured meat products[J]. Meat Science, 2018, 144: 53−61.

[21] PU D D, SHAN Y M, DUAN W, et al. Characterization of the key aroma compounds in the fruit of *Litsea pungens* Hemsl. (LPH) by GC-MS/O, OAV, and sensory techniques[J]. Journal of Food Quality, 2021, 1: 6668606.

[22] 王永瑞, 柏霜, 罗瑞明, 等. 基于电子鼻、GC-MS 结合化学计量学方法鉴别烤羊肉掺假[J]. 食品科学, 2022, 43(4): 291−298. [WANG Yongrui, BAI Shuang, LUO Ruiming, et al. Identification of adulteration of roast mutton using electronic nose and gas chromatography-mass spectrometry combined with chemometric methods[J]. Food Science, 2022, 43(4): 291−298.]

[23] ZHU Y, ZHOU X, CHEN Y P et al. Exploring the relationships between perceived umami intensity, umami components and electronic tongue responses in food matrices[J]. Food Chemistry, 2022, 368: 130849.

[24] WANG Y R, ZHANG H Y, CUI J R, et al. Dynamic changes in the water and volatile compounds of chicken breast during the frying process[J]. Food Research International, 2024, 175: 113715.

[25] BI J C, LIN Z Y, LI Y, et al. Effects of different cooking methods on volatile flavor compounds of chicken breast[J]. Journal of Food Biochemistry, 2021, 45(8): e13770.

[26] 刘薇. 瑶柱鸡汤风味组分的解析及其方便汤粉的研制[D]. 扬州: 扬州大学, 2024. [LIU W. Analysis of flavor components in Yaozhu chicken soup and development of convenient soup powder [D]. Yangzhou: Yangzhou University, 2024.]

[27] FENG Y, CAI Y, FU X, et al. Comparison of aroma-active compounds in broiler broth and native chicken broth by aroma extract dilution analysis (AEDA), odor activity value (OAV) and omission experiment[J]. Food Chemistry, 2018, 265: 274−280.

[28] WANG Y R, WANG S L, LUO R M. Evaluation of key aroma compounds and protein secondary structure in the roasted Tan mutton during the traditional charcoal process[J]. Frontiers in nutri-

tion, 2022, 9: 1003126.
[29] WANG Y R, LUO R M, WANG S L. Water distribution and key aroma compounds in the process of beef roasting[J]. Frontiers in Nutrition, 2022, 9: 978622.
[30] WANG Y R, WANG S L, LUO R M. M Study on key aroma compounds in the electric roasting process of Tan mutton[J]. Journal of Food Processing and Preservation, 2022, 46(11): e17095.
[31] WANG Y R, ZHANG H Y, LI K K, et al. Dynamic changes in the water distribution and key aroma compounds of roasted chicken during roasting[J]. Food Research International, 2023, 172: 113146.
[32] 孙宝国. 食用调香术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2015. [SUN Baoguo. Food fragrance mixing technique[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2015.]
[33] 里奥·范海默特. 化合物嗅觉阈值汇编[M]. 北京: 中国科学技术出版社, 2018. [van GEMERT L J. Complations of odour threshold values in air, water and other media[M]. Beijing: China Science and Technology Press, 2018.]
[34] SOHAIL A, AL-DALALI S, WANG J N, et al. Aroma compounds identified in cooked meat: A review[J]. Food Research International, 2022, 157: 111385.
[35] DU W B, ZHAO M Y, ZHEN D W, et al. Key aroma compounds in Chinese fried food of youtiao[J]. Flavour and Fragrance Journal, 2019, 35: 88−98.
[36] Al-DALALI S, LI C, XU B. Insight into the effect of frozen storage on the changes in volatile aldehydes and alcohols of marinated roasted beef meat: Potential mechanisms of their formation [J]. Food Chemistry, 2022, 385: 132629.
[37] ZHANG Q, KE J, LONG P, et al. Formation of furan from linoleic acid thermal oxidation: (E,E)-2,4-decadienal as a critical intermediate product[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2024, 72(8): 4384−4392.
[38] 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, 2019. [LIU Huan. Characterization and formation mechanism of key aroma compounds in Beijing roasted duck[J]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2019.]
[39] TIAN H L, ZHAN P, LI W G, et al. Contribution to the aroma characteristics of mutton process flavor from oxidized suet evaluated by descriptive sensory analysis, gas chromatography, and electronic nose through partial least squares regression[J]. European Journal of Lipid Science and Technology, 2014, 116(11): 1522−1533.
[40] 张丽娜, 瞿婧妍, 尹利昂, 等. 冻藏条件对人乳脂质及挥发性风味物质的影响[J]. 食品科学, 2022, 43(4): 135−143. [ZHANG Lina, QU Jingyan, YIN Li'ang, et al. Effect of frozen storage on lipids and volatile compounds of human milkds[J]. Food Science, 2022, 43(4): 135−143.]
[41] 王永瑞, 王松磊, 陈放, 等. 基于 LF-NMR 和 HS-SMPE-GC-MS 分析烤牛脂水分分布及关键挥发性风味物质[J]. 食品科学, 2023, 44(12): 278−288. [WANG Yongrui, WANG Songlei, CHEN Fang, et al. Effect of roasting time on the moisture distribution and key volatile flavor compounds of beef tallow as analyzed by low field-nuclear magnetic resonance spectroscopy and headspace solid-phase microextraction coupled with gas chromatography-mass spectrometry[J]. Food Science, 2023, 44(12): 278−288.]
[42] QI J, XU Y, ZHANG W W, et al. Short-term frozen storage of raw chicken meat improves its flavor traits upon stewing[J]. LWT - Food Science and Technology, 2021, 142: 111029.
[43] 王永瑞, 柏霜, 罗瑞明, 等. 焙烤对宁夏滩羊羊脂水分分布和关键性香气成分的影响[J]. 食品科学, 2022, 43(6): 287−294. [WANG Yongrui, BAI Shuang, LUO Ruiming, et al. Effect of roasting on moisture migration and key aroma compounds of mutton tallow[J]. Food Science, 2022, 43(6): 287−294.]
[44] JI C, WU B, GAO S, et al. Impact of roasting time on the color, protein, water distribution and key volatile compounds of pork[J]. Journal of Food Composition and Analysis, 2024, 136: 106787.
[45] 马尧, 郝慧慧, 张海红, 等. GC-MS 结合电子鼻分析不同干燥方式对黄花菜粉挥发性物质的影响[J]. 食品科学, 2022, 43(6): 324−330. [MA Yao, HAO Huihui, ZHANG Haihong, et al. Effects of different drying methods on volatile flavor components of daylily powder analyzed by gas chromatography-mass spectrometry combined with electronic nose[J]. Food Science, 2022, 43(6): 324−330.]
[46] 王永瑞, 柏霜, 罗瑞明, 等. 焙烤对宁夏滩羊肉脂肪酸、氨基酸及核苷酸含量的影响[J]. 中国食品学报, 2023, 23(11): 289−302. [WANG Yongrui, BAI Shuang, LUO Ruiming, et al. Effects of roasting on the content of fatty acids, amino acids and nucleotides of Tan mutton from Ningxia[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2023, 23(11): 289−302.]
[47] HE Z G, LIU Y, Al-DALALI S, et al. Evaluating volatile flavor and taste component changes of beer fish using HS-GC-IMS, E-nose, and E-tongue at various processing stages[J]. Current Developments in Nutrition, 2024, 8: 102871.
[48] ZHANG Z Q, ZANG M W, CHEN J, et al. Effect of the mycelium of oyster mushrooms on the physical and flavor properties of a plant-based beef analogue[J]. LWT - Food Science and Technology, 198, 2024: 116029.
[49] 徐文杰, 刘 茹, 洪响声, 等. 基于近红外光谱技术的淡水鱼品种快速鉴别[J]. 农业工程学报, 2014, 30(1): 253−261. [XU Wenxie, LIU Ru, HONG Xiangsheng, et al. Discrimination of freshwater fish varieties based on near-infrared spectra[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2014, 30(1): 253−261.]
[50] 秦刚, 宋海燕, 陆辉山. 应用可见/近红外光谱技术快速鉴别山西陈醋品种[J]. 山西农业大学学报: 自然科学版, 2010, 30(4): 309−311. [QIN Haigang, SONG Haiyan, LU Huishan, et al. Discrimination of mature vinegars using vis/near infrared spectra[J]. Journal of Shanxi Agricultural University: Natural Science Edition, 2010, 30(4): 309−311.]
[51] 吴春胤, 张文昭, 欧阳庆, 等. 基于 BP 神经网络模型的荔枝树叶面积测定方法[J]. 农业工程学报, 2007, 23(7): 166−169. [WU Chunyin, ZHANG Wenzhao, OUYANG Qing, et al. BP neural network model for the measurement of the leaf area of litchis[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2007, 23(7): 166−169.]