朱焕婷, 邹金浩, 杨怀谷, 等. 基于智能感官技术结合 OPLS-DA 解析传统药膳鸡汤特征风味及其来源 [J]. 食品工业科技, 2026, 47(17): 377−385. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025080084
ZHU Huanting, ZOU Jinhao, YANG Huaigu, et al. Characterization and Source Identification of Characteristic Flavor Compounds in Chinese Herbal Chicken Soup Using Intelligent Sensory Technology Combined with OPLS-DA[J]. Science and Technology of Food Industry, 2026, 47(17): 377−385. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025080084

· 分析检测 ·

基于智能感官技术结合 OPLS-DA 解析传统药膳鸡汤特征风味及其来源

朱焕婷[1,2], 邹金浩[2], 杨怀谷[2], 唐道邦[2], 刘学铭[1,2,*], 王旭苹[2,*]
（1.广东海洋大学食品科技学院, 广东省水产品加工与安全重点实验室, 广东省海洋生物制品工程实验室, 广东省海洋食品工程技术研究中心, 广东省水产预制食品加工与品质控制工程技术研究中心, 广东湛江 524088;
2.广东省农业科学院蚕业与农产品加工研究所, 农业部功能食品重点实验室, 广东省农产品加工重点实验室, 广东广州 510610）

摘　要: 不同药材对传统药膳鸡汤特征风味形成具有重要作用。本研究以添加黄芪、党参、枸杞和红枣炖制的鸡汤为对照（CK），分别建立了黄芪缺失（-HQ）、党参缺失（-DS）、枸杞缺失（-GQ）和红枣缺失（-HZ）等 4 种鸡汤模型，通过智能感官技术、气相色谱-质谱（Gas Chromatography-Mass Spectrometer，GC-MS）、游离氨基酸分析、呈味核苷酸分析，结合正交偏最小二乘判别分析（Orthogonal Partial Least Squares-Discriminant Analysis，OPLS-DA）比较分析其特征风味与来源。结果表明：电子鼻与电子舌技术可有效检测与区分 5 组鸡汤的气味与滋味差异。药材的缺失主要导致鸡汤在硫化氢类化合物传感器（W1W）的响应值以及鲜味传感器（NMS）响应值降低。进一步分析得出，药材缺失导致挥发性风味物质总含量降低，通过 OPLS-DA 和 VIP 值得出 2,3-丁二酮、正己醇、右旋萜二烯、己醛、2-甲基丁醛、植物醇等 10 种挥发性风味物质是影响鸡汤整体风味的主要差异物质。相比于其它药材缺失组，这 10 种物质和电子鼻传感器均与-HQ 组距离较远，说明黄芪对鸡汤整体风味的影响最大。此外，药材缺失还导致鸡汤关键鲜味物质（谷氨酸和 5'-肌苷酸）含量降低。综上，药材缺失均会影响鸡汤特征风味，其中以黄芪对鸡汤的特征风味贡献最大。

关键词: 药膳鸡汤, 智能感官技术, GC-MS, 特征风味物质, 正交偏最小二乘判别分析
中图分类号: TS251.1　　**文献标识码:** A　　**文章编号:** 1002−0306(2026)17−0377−09
DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2025080084
本文网刊:

Characterization and Source Identification of Characteristic Flavor Compounds in Chinese Herbal Chicken Soup Using Intelligent Sensory Technology Combined with OPLS-DA

ZHU Huanting[1,2], ZOU Jinhao[2], YANG Huaigu[2], TANG Daobang[2], LIU Xueming[1,2,*], WANG Xuping[2,*]
（1.College of Food Science and Technology, Guangdong Ocean University, Guangdong Provincial Key Laboratory of Aquatic Product Processing and Safety, Guangdong Province Engineering Laboratory for Marine Biological Products, Guangdong Provincial Engineering Technology Research Center of Seafood, Guangdong Provincial Engineering Technology Research Center of Prefabricated Seafood Processing and Quality Control, Zhanjiang 524088, China;

收稿日期: 2025−08−11
基金项目: 广东省重点领域研发计划项目（2023B0202080003）; 广东省科技成果入县达镇促进城乡区域协调发展专项项目（2025B0202010011）; 广东省“百千万工程”农村科技特派员项目（KTP20240714）; 广东省现代农业产业共性关键技术研发创新团队建设项目-加工与保鲜共性关键技术（2024CXTD16）。

作者简介: 朱焕婷（2000−）, 女, 硕士研究生, 研究方向: 食品加工与安全, E-mail: 13927528969@163.com。
*** 通信作者:** 刘学铭（1967−）, 男, 博士, 研究员, 研究方向: 药食两用资源开发利用研究, E-mail: liuxueming@gdaas.cn。
王旭苹（1988−）, 女, 博士, 副研究员, 研究方向: 肉类科学, Email: Wangxuping@gdaas.cn。

2.Sericultural & Agri-Food Research Institute, Guangdong Academy of Agricultural Sciences, Key Laboratory of Functional Foods, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Guangdong Key Laboratory of Agricultural Products Processing, Guangzhou 510610, China）

Abstract: Different medicinal herbs play an important role in shaping the characteristic flavor of traditional herbal chicken soup. In this study, chicken soup prepared with *Radix Astragali* (HQ), *Radix Codonopsis* (DS), *Fructus Lycii* (GQ), and *Fructus Jujubae* (HZ) was used as the control (CK). Four model soups were established by individually omitting one of these herbs: -HQ, -DS, -GQ, and -HZ. The characteristic flavors and their sources were compared using intelligent sensory techniques, gas chromatography–mass spectrometry (GC–MS), free amino acid analysis, flavor nucleotide analysis, and orthogonal partial least squares-discriminant analysis (OPLS-DA). The results showed that the electronic nose and electronic tongue could effectively detect and distinguish differences in odor and taste among the five groups. The omission of herbs mainly led to a decrease in the response values of the hydrogen sulfide-sensitive sensor (W1W) and the umami sensor (NMS). Further analysis revealed that the omission of herbs led to a reduction in the total content of volatile flavor compounds. OPLS-DA and variable importance in projection (VIP) analysis identified ten volatile flavor compounds as the main contributors to the overall flavor profile, including 2,3-butanedione, 1-hexanol, dipentene, hexanal, 2-methylbutanal, and phytol. Compared to the other omission groups, the -HQ group showed the greatest distance from both these key compounds and the electronic nose sensor signals, indicating that *Radix Astragali* has the most significant impact on the overall flavor of the chicken soup. Additionally, the levels of key umami compounds (Glu and 5'-IMP) were reduced in the herb-omitted groups. In conclusion, the absence of any herb affects the characteristic flavor of the soup, with *Radix Astragali* contributing the most notably to its distinctive flavor profile.

Key words: medicinal chicken soup; intelligent sensory technology; GC-MS; characteristic flavor compounds; orthogonal partial least squares-discriminant analysis

传统药膳鸡汤是体现我国“药食同源”思想的经典中式汤品之一，其高营养价值以及独特风味满足了当代人对饮食“既美味又养生”的需求。传统药膳鸡汤的独特风味是其受到我国民众青睐的重要原因之一，其风味形成是由添加的多种药材共同作用的结果。在炖制过程中，风味物质的产生涉及热降解、核糖核苷酸降解、硫胺素的热分解及相互作用等一系列反应，这些反应在炖煮过程中相互交织，共同塑造了鸡汤醇厚独特的风味[1]。

挥发性风味物质、游离氨基酸以及核苷酸是决定鸡汤风味的重要物质基础[1]。以往的研究通过气相色谱-质谱（Gas Chromatography-Mass Spectrometer, GC-MS）、高效液相色谱等现代分析技术结合人工感官评价证实了添加的不同辅料以及不同添加量均会对鸡汤的挥发性风味物质、游离氨基酸以及核苷酸等含量产生影响，从而影响鸡汤整体风味[2−4]。而由于传统药膳鸡汤采用多药材协同炖制，不同药材对整体风味的影响往往还存在复杂的协同或屏蔽作用，因此有必要采用更为准确和客观的检测方法对整体风味进行解析。近年来，电子鼻、电子舌等智能感官技术迅速发展，这类技术借助传感器模拟人体器官对食物的感官过程，具有灵敏度高、重复性好等优势[5]，有望有效区分鸡汤复杂体系下的整体风味差异[6−7]。

因此，本文以添加黄芪、党参、枸杞和红枣炖煮的传统药膳鸡汤为对照，分别设计了 4 种药材缺失模型，通过智能感官技术探讨不同药材缺失对传统药膳鸡汤特征风味的影响，并结合正交偏最小二乘判别分析（Orthogonal Partial Least Squares-Discriminant Analysis, OPLS-DA）进一步分析鸡汤特征风味物质的变化，旨在明确多药材协同炖制中不同药材对传统药膳鸡汤特征风味的影响，为鸡汤产品的风味调控提供理论指导。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

清远鸡（120 日龄） 广州西亚兴安超市；黄芪、党参、枸杞、红枣 天河好德堂大药房；食盐 广东省盐业集团广州有限公司；2,4,6-三甲基吡啶 色谱纯、氢氧化钾 分析纯，上海阿拉丁生化科技股份有限公司；5'-核苷酸（纯度 98%）、5-磺基水杨酸（纯度 99%） 上海源叶生物技术科技有限公司。

7980N 气相色谱-质谱联用仪、LC1260 高效液相色谱仪 美国安捷伦公司；L-8900 全自动氨基酸分析仪 日本株式会社日立制作所；PEN3 型电子鼻 德国 Airsense 公司；Astree Astree II V5 电子舌 法国 Alpha M.O.S 公司。

1.2 实验方法

1.2.1 鸡汤的制备 参考姜浩等[8] 的方法并稍作修改：新鲜整鸡洗净切块，焯水处理后按照鸡肉∶水=1∶2（w/w）比例将鸡肉放入炖盅中，加入 10 g 黄芪、10 g 党参、7.5 g 枸杞和 24.36 g 红枣，然后置于蒸柜中炖煮 2 h。炖煮结束后加入原质量（鸡肉和水总质量）0.20%（w/w）的食盐，搅拌均匀，用汤勺去除表面油脂，双层纱布过滤鸡块及可见杂质，将滤液于−80 ℃保存备用。以上述传统药膳鸡汤配方为对照组（CK），分别设计了 4 种药材缺失模型为试验组，分别

为黄芪缺失组(-HQ：鸡肉、党参、枸杞、红枣)、党参缺失组(-DS：鸡肉、黄芪、枸杞、红枣)、枸杞缺失组(-GQ：鸡肉、黄芪、党参、红枣)、红枣缺失组(-HZ：鸡肉、黄芪、党参、枸杞)。

1.2.2　电子鼻检测方法　将 5 mL 样品置于 50 mL 顶空瓶，并用三层保鲜膜密封，于 50 ℃ 孵化 10 min 后进行测定。参数设定：进样时间为 5 s，传感器清洗时间 180 s，气流流速 400 mL/min，数据采集时间为 180 s。PEN3 型电子鼻的 10 个传感器性能描述见表 1。

表 1　电子鼻性能描述

Table 1　Performance of electronic nose

传感器名称	性能描述
W1C	对苯类，芳香成分灵敏
W5S	对氮氧化合物灵敏
W3C	对氨类芳香成分灵敏
W6S	主要对氢化物灵敏
W5C	对短链烷烃芳香成分灵敏
W1S	对甲基类灵敏
W1W	对硫化物灵敏
W2S	对醇类、醛酮类灵敏
W2W	对有机硫化物灵敏
W3S	对长链烷烃灵敏

1.2.3　电子舌检测方法　样品稀释 6 倍并使用滤膜过滤油脂，取 80 mL 滤液用于电子舌测定。每个样品做 4 次平行，去掉第 1 次循环取后 3 次结果，检测时传感器响应稳定，具有较好的重现性，数据被认为有效。参数设定：Astree Astree II V5 型电子舌，数据采集时间为 120 s，采集周期为 1.0 s，采集延迟 0 s，搅拌速度 1 r/s。传感器对应滋味参考见表 2。

表 2　电子舌性能描述

Table 2　Performance of electronic tongue

传感器阵列	AHS	PKS	CTS	NMS	CPS	ANS	SCS
对应滋味	酸	复合	咸	鲜	复合	甜	苦

味觉活性值(Taste Activity Value, TAV)按式(1)计算：

$$TAV = \frac{\text{滋味物质质量浓度}}{\text{滋味物质阈值}} \qquad \text{式（1）}$$

1.2.4　挥发性风味物质的测定　参考姜浩等[8]的方法并稍作修改：取 7.0 mL 样品于顶空瓶中，加入 2.0 g 氯化钠，7.50 mol/mL 2,4,6-三甲基吡啶稀释 100 万倍后取 1 mL 作为内标用于定量。

固相微萃取(Solid Phase Micro Extraction, SPME)：样品瓶于 50 ℃ 恒温下平衡 15 min，萃取头(50/30 μm)于温度 60 ℃ 下萃取 40 min，后将萃取头插入 GC-MS 进样口，于 250 ℃ 解析 5 min。

GC 条件：色谱柱：J&W HP-5MS UI 毛细管色谱柱(30 m×0.25 mm×0.25 μm)；升温程序：40 ℃ 保持 3 min，接着以 3 ℃/min 的速度上升到 70 ℃，保持 3 min，然后以 6 ℃/min 的速度上升到 140 ℃，最后以 8 ℃/min 上升至 230 ℃ 并保持 2 min。以氦气为载气，流速为 0.8 mL/min。

MS 条件：质谱条件：接口温度 250 ℃；离子源温度 230 ℃，EI 离子源，电子能量 70 eV，扫描范围为 30~400 m/z。

定量分析：以 2,4,6-三甲基吡啶为内标，根据公式(2)计算各挥发性风味物质含量：

$$M_1 = \frac{S_1}{S_2} \times \frac{m}{M} \times 1000 \qquad \text{式（2）}$$

式中：M_1 为挥发性风味物质绝对含量，μg/kg；S_1 为挥发性风味物质的峰面积；S_2 为内标物的峰面积；m 为内标物的质量，μg；M 为样品质量，g；1000 为单位换算系数。

定性分析：将质谱数据与 NIST 11 标准谱库相匹配，仅保留匹配度大于 75% 的成分，对其成分进行定性分析，并与相同检测条件下的 C7~C40 正构烷烃的保留指数(Retention Index, RI)对比，RI 计算公式如式(3)所示：

$$RI = 100 \times \frac{t_x - t_n}{t_{n+1} - t_n} + 100_n \qquad \text{式（3）}$$

式中：n 为碳数；t_x、t_n、t_{n+1} 分别为化合物 x、碳数为 n 和 n+1 的正构烷烃的保留时间($t_n<t_x<t_{n+1}$)。

气味活度值(Odor Activity Value, OAV)计算：通过 OAV 的大小来确定特征风味物质，计算公式如式(4)所示：

$$OAV_x = \frac{C_X}{OT_x \times 1000} \qquad \text{式（4）}$$

式中：C_x 为挥发性物质的含量，μg/kg；OT_x 为该挥发性物质的气味阈值，mg/kg；1000 为单位换算系数

1.2.5　游离氨基酸的测定　参考刘彩玲等[9]的方法对鸡汤进行前处理，后使用全自动氨基酸分析仪测定。

1.2.6　呈味核苷酸的测定　称取 1 mL 样品，加入 4 mL 0.5 mol/L 高氯酸中，涡旋 1 min，随后在 4 ℃ 条件下 10000 r/min 离心 15 min。保留上清液，后用 1 mol/L 氢氧化钾溶液调节 pH 至 6.8，经 0.22 μm 滤膜过滤后，使用高效液相色谱法测定，具体参数参考刘登勇等[10]的方法设置。

1.3　数据处理

实验数据采用 Microsoft Office Excel 2010 软件进行计算分析；运用 Graphpad Prism 10.1.2 进行显著性分析；利用 Origin 2024 作图；采用 SIMCA 14.1 进行 PCA、OPSL-DA。实验结果取 3 次实验的平均值。

2　结果与分析

2.1　智能感官技术结果分析

2.1.1　电子鼻分析　电子鼻技术凭借其灵敏度高

等优势，可以有效检测并区分鸡汤中的复杂香气组分[11]。如图 1a 所示，5 组鸡汤在 W1W（硫化氢类化合物）、W1S（甲基类）、W2S（醇类、醛酮类）和 W2W（有机硫化物）4 个传感器上的响应值较高，其中 CK 组的响应值均最高，表明其含有更丰富的挥发性风味物质。药材缺失导致鸡汤在 W1W 传感器上响应值降低，尤其以-HZ 组、-HQ 组的影响最为突出。硫化氢类化合物主要来源于半胱氨酸的降解，能与呋喃酮等物质反应生成肉香味物质[12]，其在肉类风味形成中具有重要作用，说明药材缺失会导致鸡汤肉香味降低。通过主成分分析（Principal Component Analysis，PCA）进一步区分药材缺失对鸡汤风味带来的影响，结果如图 1b 所示。主成分 1（PC1）和主成分 2（PC2）的方差贡献率分别是 75.8% 和 16.0%，5 组鸡汤分布区分明显，表明 5 组鸡汤挥发性风味成分存在差异。具体来看，CK 组位于左下方区间，与其他 4 组鸡汤样品呈现明显分离，说明药材的缺失改变了鸡汤的风味特征。其中以-HZ 组、-HQ 组与 CK 组距离最远，表明红枣、黄芪的缺失可能导致鸡汤的整体风味发生明显变化，后续可针对其挥发性风味物质的组成及含量变化进行深入解析。

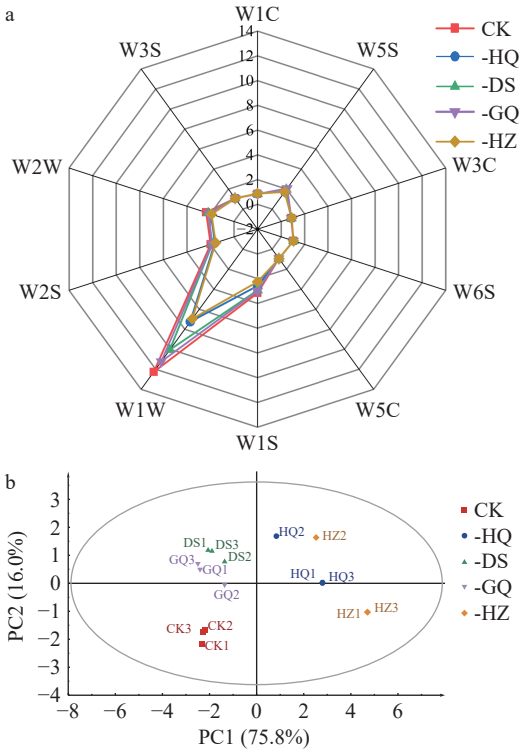


图 1 电子鼻传感器响应值

Fig.1 Electronic nose sensor response values

注：a.电子鼻数据雷达图；b. PCA 图。

2.1.2 电子舌分析 电子舌技术可实现样品滋味特征的快速检测与客观区分[13]。由图 2a 可以看出，5 组鸡汤在 7 个传感器上的响应值差异明显，表明 5 组鸡汤的滋味特征不同。CK 组在 NMS（鲜味）传感器上的响应值远高于其他 4 组鸡汤，这可能是因为药材的添加促进了鸡汤中鲜味物质的溶出，使 CK

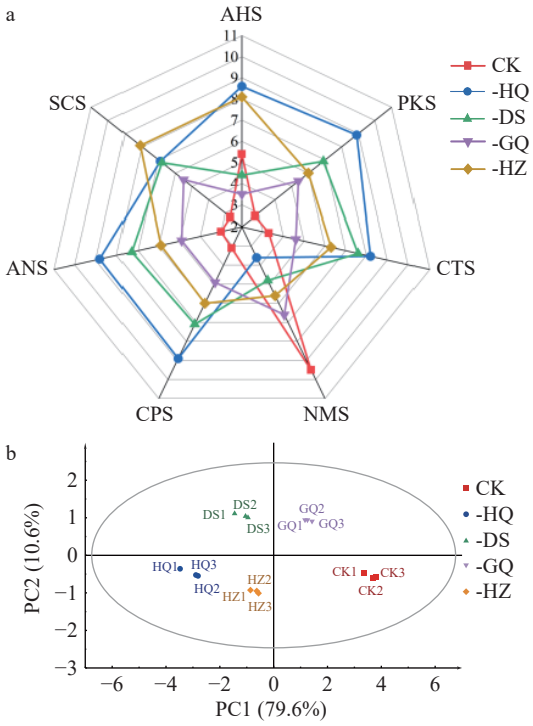


图 2 电子舌传感器响应值

Fig.2 Electronic tongue sensor response values

注：a.电子舌数据雷达图；b. PCA 图。

组呈现较高的鲜味强度[14]。其中，黄芪缺失对鸡汤中的鲜味影响最大，枸杞缺失对鸡汤中鲜味影响最小。值得注意的是，-HQ 组在 NMS 传感器上的响应值最低，但其在 AHS（酸味）、CTS（咸味）、ANS（甜味）和 SCS（苦味）传感器上都具有较高的响应值，相反，CK 组在 NMS 上响应值最高，但其在 AHS、CTS、ANS 和 SCS 传感器上响应值低，这是由于鲜味的突出可能在一定程度上抑制了其他味道的表达[15−16]。通过 PCA 深入解析不同组别鸡汤的滋味差异，结果如图 2b 所示。PC1 和 PC2 的累计方差贡献率达 90.2%，表明所构建的 PCA 模型能有效反映样本整体信息。5 组鸡汤样品在 PCA 空间分布上无重叠现象，表明不同组别鸡汤具有明显的滋味特征差异。其中，CK 组位于右下方区间，与各药材缺失组均呈现明显分离，其中与-HQ 组距离最远，说明黄芪的缺失对鸡汤滋味特征影响最大，而与-GQ 组的空间距离最近，表明其滋味特征相近。

2.2 挥发性风味物质结果分析

2.2.1 鸡汤挥发性风味物质组成 通过 GC-MS 分析鸡汤挥发性风味物质组成，结果如图 3 所示。从 5 组鸡汤中共检测到 55 种挥发性风味物质，包括烷烃类（24 种）、醛类（15 种）、醇类（6 种）、酮类（5 种）、烯烃类（3 种）、芳香烃类（1 种）和杂环类（1 种）。药材缺失导致鸡汤的挥发性风味物质组成发生了变化，如-HQ 组中未检出右旋萜二烯（附表 1，详见本刊官网 http://www.spgykj.com/文章的网络版），-HZ 组中未检出（E）-2-辛烯醛。有研究表明，添加药材（当归、黄芪）鸡汤中的 α-蒎烯、水芹烯、β-月桂烯、对伞花

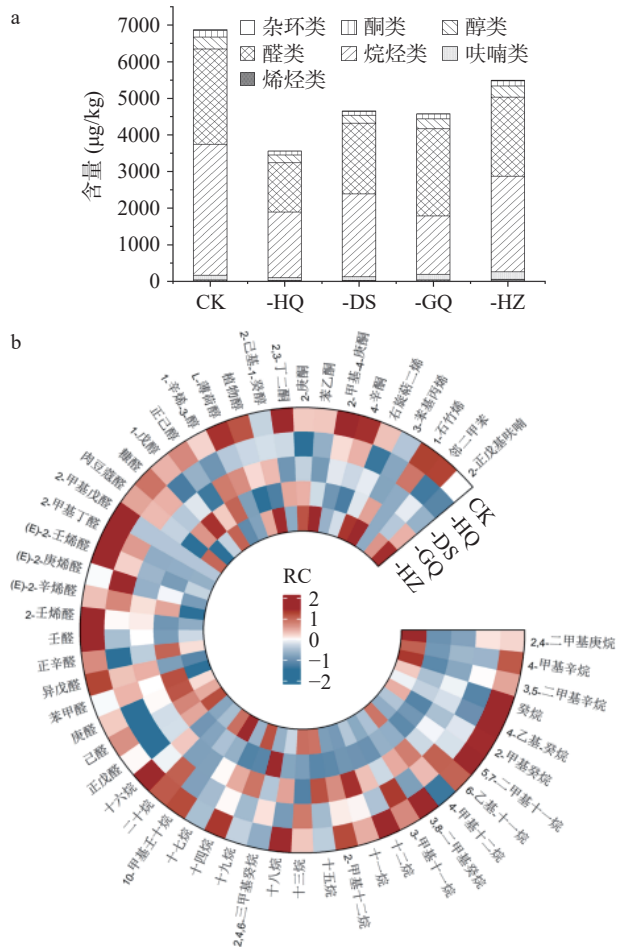


图 3　鸡汤中挥发性风味成分

Fig.3　Volatile flavor compounds in chicken broth

注：a. 挥发性风味物质类别含量；b. 挥发性风味物质相对含量。

烃、右旋柠檬烯等萜烯烃类物质含量明显高于空白鸡汤，说明了鸡汤中萜烯类物质的主要来源为药材[4]。因此，可推测药膳鸡汤中右旋萜二烯的主要来源为黄芪。

药材缺失还导致鸡汤的挥发性风味物质含量发生了变化。如图 3a 所示，CK 组的挥发性风味物质总含量最高，为 6871.73 μg/kg，其次是-HZ 组（5495.63 μg/kg），而-HQ 组的挥发性风味物质总含量最低（附表 1，详见本刊官网 http://www.spgykj.com/ 文章的网络版）。除气味阈值较高的烷烃类物质外[17]，鸡汤中醛类化合物的总含量最高，为 1349.14~2599.97 μg/kg，与以往对鸡汤风味研究的结果相似[18−19]。图 3b 的颜色表示鸡汤中挥发性风味物质的相对含量（Relative Content，RC），颜色越趋于红色表示值越高，反之越趋于蓝色则表示值越低。结果显示，CK 组糠醛、2-甲基丁醛、(E)-2-壬烯醛、2-壬烯醛、壬醛、异戊醛的相对含量明显高于所有药材缺失组，且 2-甲基戊醛仅在 CK 组中检出，说明药材缺失会导致鸡汤中醛类物质含量下降。药材缺失还导致鸡汤中醇类物质含量发生了变化，其中 CK 组中植物醇、L-薄荷醇的相对含量明显高于各药材缺失组，而 1-辛烯-3-醇以-GQ 组、-DS 组最高。此外，药材缺失还导致鸡汤中烷烃类、烯类、芳香烃类和杂环类等挥发性风味物质含量发生了不同的变化，说明不同药材对鸡汤风味的影响不同。

2.2.2　鸡汤特征风味物质分析　鸡汤中具有众多的挥发性风味物质，但仅有一小部分起主导作用[20]，通常通过其 OAV 的大小来评估它们对鸡汤整体风味的贡献。如表 3 所示，5 种鸡汤中 OAV>1 的挥发性风味物质共有 23 种。尽管在鸡汤中检测出的烷烃类物质含量较高，但烷烃通常具有较高的气味阈值，其对鸡汤的整体风味贡献较小[17]。相比之下，醛类物质的气味阈值较低，是鸡汤特征风味的重要贡献物质[17]。醛类物质中，己醛、正辛醛、壬醛和(E)-2-壬烯醛等的 OAV 较高，说明它们对鸡汤的特征风味具有重要贡献。药材缺失导致这些醛类物质的 OAV 发生了不同的变化。其中，-HQ 组中己醛（108.68）、正辛醛（92.65）的 OAV 明显低于其它组，与电子鼻的结果一致，共同说明黄芪对鸡汤风味影响较大。鸡汤中醛类物质的主要来源为多不饱和脂肪酸氧化[17]。以往的研究表明，黄芪等根茎类药材由于生长在土壤中，容易富集金属离子[21−22]，而金属离子可以促进脂质氧化产生醛类物质[23]，这可能是导致-HQ 组的己醛和正辛醛的 OAV 较低的原因之一。然而，-GQ 组中的己醛与正辛醛的 OAV 与 CK 组接近，说明枸杞缺失对鸡汤特征风味的影响较小。醇类通常也具有较低的气味阈值[24]。1-辛烯-3-醇是由亚油酸和其他多不饱和脂肪酸氧化而成[25]，呈现“蘑菇、青草香、脂香”的香味[26]。结果表明，缺失不同药材还影响了 1-辛烯-3-醇的 OAV。其中，以-GQ 组的 OAV（94.44）最高，这可能是因为枸杞中富含酚类等抗氧化成分[27]可以抑制 1-辛烯-3-醇的生成，当枸杞缺失时，鸡汤中 1-辛烯-3-醇含量增多。此外，CK 组中 L-薄荷醇、植物醇的 OAV 最高，不同药材缺失会导致这两种醇类的 OAV 出现不同程度的下降，说明 L-薄荷醇、植物醇等可能来源于鸡汤中所添加的药材。另外，不同鸡汤中 2,3-丁二酮与 2-正戊基呋喃的 OAV 也较高。2,3-丁二酮具有黄油、奶油香气，有助于提升鸡汤中的整体香味[6]。以往的研究表明，传统红烧肉中 2,3-丁二酮的主要来源为氨基酸与还原糖的美拉德反应[26]。本研究中所有药材缺失组鸡汤的 2,3-丁二酮的 OAV 均低于 CK 组，这说明药材的缺失，导致了体系中还原糖的减少，从而影响了 2,3-丁二酮的形成。2-正戊基呋喃是多不饱和脂肪酸氧化的典型产物[28]，具有脂香味和肉香味[26]。结果表明，不同药材缺失对 2-正戊基呋喃 OAV 的影响不同，其中以-HQ 组（23.92）的 OAV 最低，再次验证了黄芪中的金属离子对鸡汤体系中脂质氧化的促进作用。

2.2.3　OPLS-DA　为了进一步区分药材缺失对鸡汤整体风味的影响，对鸡汤的特征风味物质（OAV>1）和电子鼻 10 个感应器得到的响应值进行 OPLS-DA，结果如图 4 所示。模型中自变量拟合指数（R^2_X）

表 3 鸡汤特征风味成分的 OAV

Table 3 OAV of characteristic flavor components of chicken soup

化合物	气味阈值（mg/kg）[29]	气味描述	OAV				
			CK	-HQ	-DS	-GQ	-HZ
正戊醛	0.01	脂香、杏仁[9]	14.52	11.27	13.95	15.54	17.03
己醛	0.005	青草香、脂香[4]	300.66	108.68	225.06	308.15	285.26
庚醛	0.001	肉香、果香[1]	47.38	24.01	44.24	58.27	46.07
苯甲醛	0.05	杏仁、果香[4]	1.09	1.29	1.11	1.62	0.44
异戊醛	0.001	奶油、果香[4]	57.97	45.51	47.05	29.69	25.50
正辛醛	0.0007	花香[30]	124.08	92.65	108.65	128.80	116.31
壬醛	0.0011	脂香、青草香[1]	254.98	187.14	203.14	176.17	194.63
2-壬烯醛	0.0005	脂香、青草香[1]	80.36	55.79	56.51	40.01	44.14
(E)-2-辛烯醛	0.003	青草香、脂香[20]	10.72	12.80	9.71	11.64	ND
(E)-2-庚烯醛	0.003	脂香、青草香[20]	3.41	4.47	3.01	3.39	2.86
(E)-2-壬烯醛	0.0003	脂香、黄瓜[20]	198.26	117.53	68.69	52.38	85.28
2-甲基丁醛	0.01	麦芽香、巧克力香[4]	5.43	4.38	2.90	2.92	2.94
2-甲基戊醛	0.05	果香、青草香[20]	1.74	ND	ND	ND	ND
肉豆蔻醛	0.01	脂香、花香[4]	2.09	2.01	1.60	0.89	2.38
糠醛	0.03	面包香、焦糖香[4]	4.00	3.65	3.02	3.79	2.19
正己醇	0.05	松香、花香[4]	2.67	1.35	0.67	2.24	2.97
1-辛烯-3-醇	0.001	蘑菇、脂香[26]	86.80	75.61	92.70	94.44	74.47
L-薄荷醇	0.1	薄荷[4]	4.62	3.15	4.05	2.80	2.82
植物醇	0.64	花香、脂香[4]	2.37	1.21	1.59	0.23	1.82
2,3-丁二酮	0.001	奶油、黄油[6]	66.88	41.31	31.01	52.56	34.69
2-庚酮	0.3	肥皂、奶酪香[4]	0.88	0.35	0.70	0.93	1.14
右旋萜二烯	0.01	柑橘、松木[4]	0.69	ND	0.50	0.49	1.10
2-正戊基呋喃	0.1	脂香、肉香[26]	43.36	23.92	32.58	50.58	66.97

注: ND表示未检出。

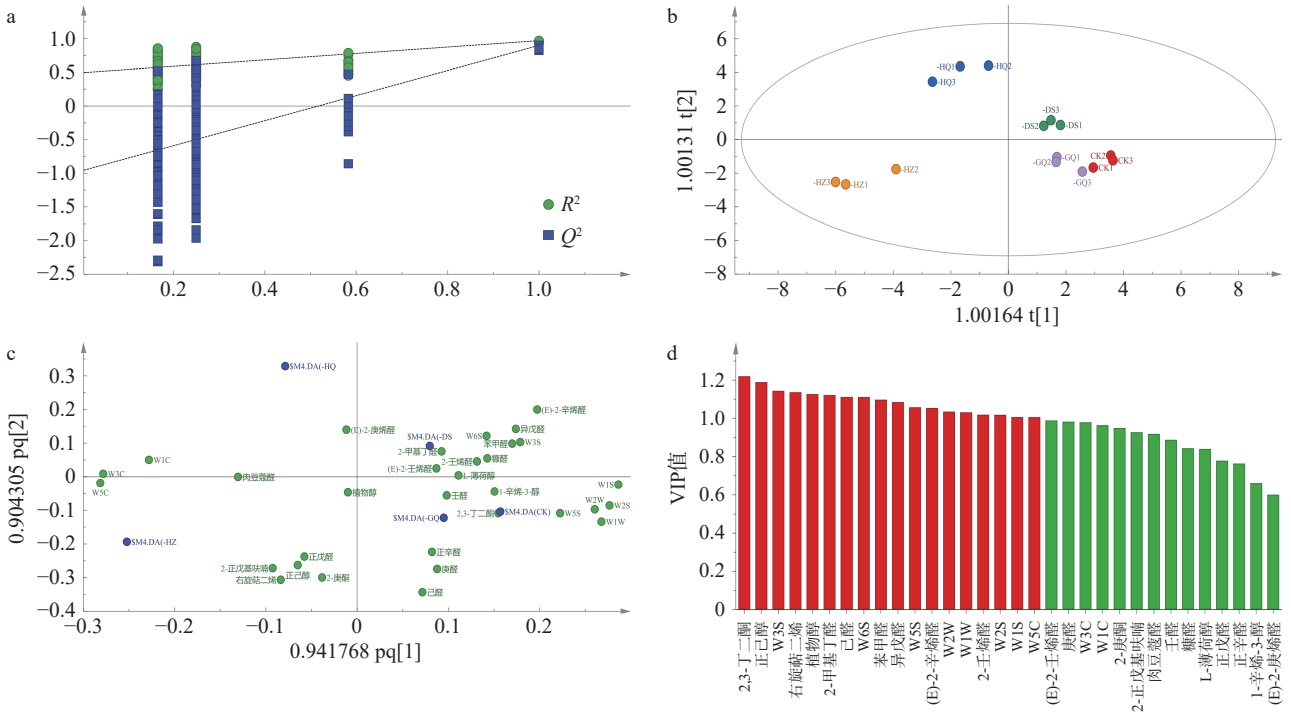


图 4 关键挥发性风味物质 OPLS-DA

Fig.4 OPLS-DA of key volatile flavor compounds

注: a. OPLS-DA 模型验证图; b. OPLS-DA 模型得分图; c. OPLS-DA 模型载荷图; d. VIP 值。

为 0.878, 因变量拟合指数(R^2_Y)为 0.939, 模型预测指数(Q^2)为 0.789, R^2 和 Q^2 均大于 0.5, 表明模型拟合结果良好。由图 4a 可以看出, 经过 200 次置换检验, Q^2 回归线与纵轴的相交点小于 0, 说明模型不存在过拟合, 模型验证有效, 说明该结果可用于区分缺失不同药材鸡汤的风味特征。从图 4b 可以看出, -

GQ 组、-DS 组与 CK 组相离较近，说明三组鸡汤风味差异较小，而-HZ 组和-HQ 组远离 CK 组，即这两组鸡汤与 CK 组的风味差异大，说明这两种药材对鸡汤特征风味的影响较大。结合图 4c，2,3-丁二酮、1-辛烯-3-醇、壬醛聚集在 CK 组附近，而与-HQ 与-HZ 组距离较远，说明黄芪和红枣缺失主要导致这 3 种物质减少。己醛与-HQ 组的距离较远，而与-GQ 组和 CK 的距离较近，说明黄芪缺失还导致了己醛的减少。通过变量投影重要性（Variable Importance in Projection，VIP）进一步分析样品特征风味差异，根据 VIP≥1 筛选了 10 种挥发性风味物质，分别为 2,3-丁二酮、正己醇、右旋萜二烯、己醛、2-甲基丁醛、植物醇、苯甲醛、异戊醛、（E）-2-辛烯醛和 2-壬烯醛，说明这些挥发性风味物质是影响鸡汤整体风味的主要差异物质。而电子鼻的 W3S、W6S、W5S、W2W、W1W、W2S、W1S、W5C 的 VIP 值≥1，说明这些传感器可以反映鸡汤整体风味的差异。相比于其它药材缺失组，这些特征差异性风味物质与电子鼻传感器均与-HQ 组距离较远，说明黄芪对鸡汤风味的影响最大。

2.3　非挥发性风味物质结果分析

2.3.1　游离氨基酸及其味觉活性值结果分析　游离氨基酸是鸡汤中重要的呈味物质。5 组鸡汤中共检出 18 种氨基酸。按味觉特征进行分类，可将这些氨基酸分为鲜味氨基酸（谷氨酸、天冬氨酸）、甜味氨基酸（苏氨酸、丝氨酸、甘氨酸、脯氨酸、丙氨酸）、无味氨基酸（半胱氨酸、羟脯氨酸）和苦味氨基酸（甲硫氨酸、精氨酸、赖氨酸、异亮氨酸、亮氨酸、苯丙氨酸、组氨酸、酪氨酸、缬氨酸）[31]。由图 5a 可以看出，CK 组的 Glu、Ser 和 Gly 等鲜甜味氨基酸含量最高，其次为-DS 组，而-GQ 组最低。说明药材的缺失影响了鸡汤中鲜甜味氨基酸的含量。鸡肉是鸡汤中氨基酸的主要来源，而药材中的多糖、有机酸以及微量元素可能影响鸡肉中蛋白质的分解，进而影响了鸡汤中氨基酸的含量。张雅敬[4] 在研究中也证实药材的添加会影响鸡汤中鲜甜味氨基酸的含量。另外，CK 组随着游离氨基酸总含量的增加相应地导致了苦味氨基酸（如 Arg）的增加。尽管 Arg 通常被归类为苦味氨基酸，但其亦有轻微的甜味[32]。同时，苦味氨基酸的存在有助于增强鸡汤风味的层次感，并适当提升其鲜味强度[33]。

TAV 是评估风味物质对样品整体味道贡献的重要指标。TAV>1 表示对味觉特征有重要影响，而 TAV<1 表示对样品味觉的影响为修饰作用。如图 5b 所示，5 组鸡汤中氨基酸的 TAV 均小于 1，这与姜浩等[8]、刘彩玲等[9] 的结果一致，这可能与鸡品种、鸡汤的熬煮方式以及鸡汤肉水比等有关[6]。尽管如此，各药膳鸡汤中谷氨酸的 TAV 最高，说明鸡汤主要以鲜味为主。此外，不同药材缺失均导致谷氨酸的 TAV 出现不同程度的下降，说明药材缺失主要影响鸡汤的鲜味，这与电子舌的结果一致。以往的研究表明，鸡汤的滋味还可能来源于核苷酸、呈味肽、无机盐等多种滋味物质，不同药材对鸡汤滋味的影响还有待进一步研究。

2.3.2　呈味核苷酸分析　研究表明，5'-核苷酸是一类重要的鲜味的活性化合物[34]，典型的呈味核苷酸包括 5'-腺苷酸（5'-Adenosine monophosphate，5'-AMP）、5'-鸟苷酸（5'-Guanosine monophosphate，5'-GMP）、5'-肌苷酸（5'-Inosine monophosphate，5'-IMP）、5'-胞苷酸（5'-Cytidine monophosphate，5'-CMP）和 5'-尿苷酸（5'-Uridine monophosphate，5'-UMP）[35]。其中，5'-IMP 和 5'-GMP 是风味核苷酸，不仅直接影响鸡汤的鲜味，而且与谷氨酸钠具有协同作用[36]，而 5'-IMP 对鸡汤鲜味起主导作用[37]。图 6 显示，CK 组的 5'-IMP 含量显著高于其他 4 个实验组，其中以缺失黄芪对鸡汤 5'-IMP 含量影响最大。黄芪中含有的多

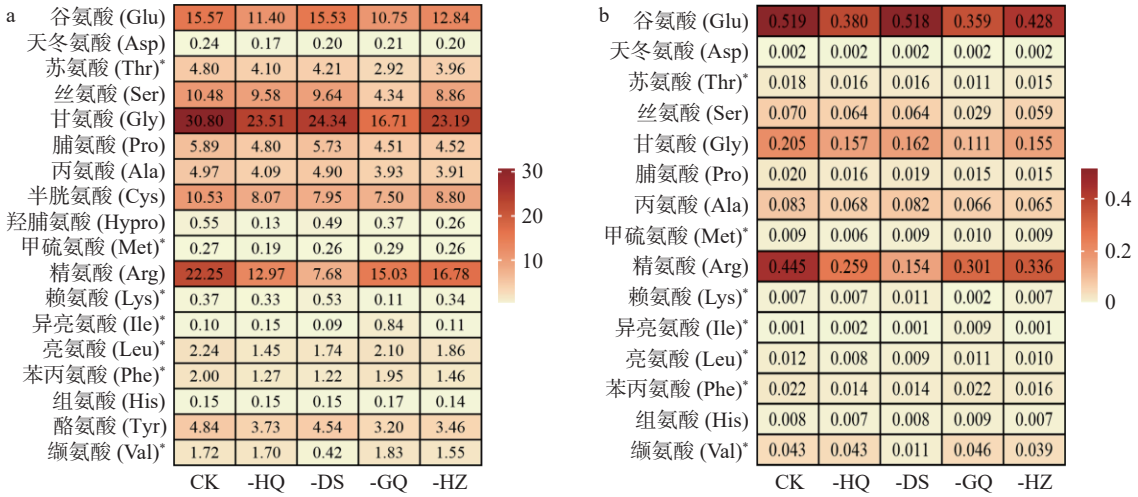


图 5　鸡汤样品氨基酸组成

Fig.5　Amino acid composition of chicken soup samples

注：*. 必需氨基酸；a. 鸡汤样品游离氨基酸含量（mg/100 g）；b. 味觉活性值。

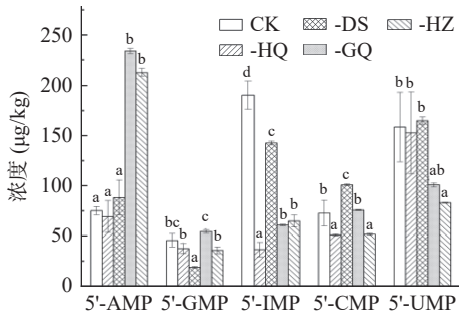


图 6 呈味核苷酸含量

Fig.6 Taste-active nucleotides

注：相同呈味核苷酸不同组别小写字母不同表示差异显著（P<0.05）。

种微量元素[38]，推测这些微量元素促进了鸡汤中 5'-IMP 的溶出和转化。另外，-GQ 组和-HZ 组的 5'-AMP 含量最高。5'-AMP 的鲜味阈值较高，单独存在时其对鸡汤滋味贡献很小，但当其与 5'-IMP 共同存在时会发生鲜味协同效应，从而增强鸡汤中的鲜味强度[39]。综上所述，4 种药材的添加都能有效提升鸡汤的滋味，使鸡汤具有特殊的滋味特征，其中黄芪对鸡汤中 5'-IMP 含量影响最大。

3 结论

本研究通过智能感官技术、GC-MS、高效液相色谱结合 OPLS-DA 比较分析了缺失不同药材对药膳鸡汤整体风味的影响。发现电子鼻与电子舌技术可有效检测与区分 5 组鸡汤的风味差异，药材的缺失导致鸡汤整体风味和滋味发生了明显变化。通过 GC-MS 发现药材缺失会影响鸡汤挥发性风味物质组成和含量，且不同药材对特征风味物质的影响不同。通过 OPLS-DA 和 VIP 进一步分析得出，2,3-丁二酮、正己醇、右旋萜二烯、己醛、2-甲基丁醛、植物醇、苯甲醛、异戊醛、(E)-2-辛烯醛和 2-壬烯醛是影响鸡汤整体风味的主要差异物质。且相比于其它药材缺失组，这些特征差异性风味物质与电子鼻传感器均与-HQ 组距离较远，说明黄芪对鸡汤整体风味的影响最大。此外，药材缺失还会影响鸡汤中关键鲜味物质（Glu 和 5'-IMP）含量，其中-HQ 组的 5'-IMP 最低。综上，药材缺失均会影响鸡汤特征风味，其中以黄芪对鸡汤特征风味的贡献最大。本研究明确了复杂体系下不同药材对鸡汤风味特征的影响，为传统药膳鸡汤的风味调控提供了理论依据。

© 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] GUAN Haining, ZHANG Wenxiu, TIAN Yanli, et al. Analysis of the flavor profile of chicken white soup with varying fat addition using GC-MS, GC-IMS and E-nose combined with E-tongue [J]. Food Chemistry: X, 2025, 26: 102335.

[2] 来静, 冯翠萍, 王莹, 等. 食用菌添加对鸡汤品质和风味的影响 [J]. 食品科学, 2022, 43(12): 274−282. [LAI Jing, FENG Cuiping, WANG Ying, et al. Effect of the addition of edible mushrooms on the quality and flavor of chicken soup[J]. Food Science, 2022, 43(12): 274−282.]

[3] 刘威, 林蔼媛, 黄桂颖, 等. 党参和桂圆对鸡汤品质的影响 [J]. 中国调味品, 2025, 50(6): 83−89,110. [LIU Wei, LIN Aiyuan, HUANG Guiying, et al. Effect of *Codonopsis* and Longan on quality of chicken soup[J]. China Condiment, 2025, 50(6): 83−89,110.]

[4] 张雅敬. 天然配料对鸡汤风味和鸡精货架期的影响研究 [D]. 上海: 上海应用技术大学, 2018. [ZHANG Yajing. Effects of natural ingredients on the flavor of the chicken broth and shelf life of the chicken seasoning[D]. Shanghai: Shanghai Institute of Technology, 2018.]

[5] ALIYA, LIU Shi, ZHANG Danni, et al. Research on the evaluation of Baijiu flavor quality based on intelligent sensory technology combined with machine learning[J]. Chemosensors, 2024, 12(7): 125.

[6] YUAN Can, XU Chengjian, CHEN Lilan, et al. Effect of different cooking methods on the aroma and taste of chicken broth[J]. Molecules, 2024, 29(7): 1532.

[7] DUAN Wen, LIANG Li, HUANG Yan, et al. Effect of ginger on chemical composition, physical and sensory characteristics of chicken soup[J]. Foods, 2021, 10(7): 1456.

[8] 姜浩, 区少碧, 陈美荷, 等. 天麻鸡汤的加工工艺优化及品质分析 [J]. 食品工业科技, 2025, 46(10): 237−249. [JIANG Hao, OU Shaobi, CHEN Meihe, et al. Optimization of processing techniques and quality analysis of *Gastrodia elata* chicken soup[J]. Science and Technology of Food Industry, 2025, 46(10): 237−249.]

[9] 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. Effects 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.]

[10] 刘登勇, 赵志南, 吴金城, 等. 不同地域特色熏鸡非盐呈味物质比较分析 [J]. 食品科学, 2020, 41(2): 238−243. [LIU Dengyong, ZHAO Zhinan, WU Jincheng, et al. Comparative analysis of non-salt taste compounds in featured smoked chickens from different regions[J]. Food Science, 2020, 41(2): 238−243.]

[11] COLE M, COVINGTON J A, GARDNER J W. Combined electronic nose and tongue for a flavour sensing system[J]. Sensors and Actuators B: Chemical, 2011, 156(2): 832−839.

[12] 蔡文韬, 夏延斌. 肉类香精风味形成机理及其研究进展[J]. 中国酿造, 2010, 29(1): 9−12. [CAI Wentao, XIA Yanbin. Mechanism of meat flavor formation and its research progress[J]. China Brewing, 2010, 29(1): 9−12.]

[13] CHEN Lili, NING Fangjian, ZHAO Li, et al. Quality assessment of royal jelly based on physicochemical properties and flavor profiles using HS-SPME-GC/MS combined with electronic nose and electronic tongue analyses[J]. Food Chemistry, 2023, 403: 134392.

[14] YUE Ziyan, LAI Jing, LI Qiqiong, et al. Enhancement of nutritional, organoleptic, and umami qualities of chicken soup induced by enzymatic pre-treatment of chicken[J]. Food Chemistry: X, 2024, 24: 101914.

[15] CHEN Dewei, ZHANG Min. Non-volatile taste active compounds in the meat of Chinese mitten crab (*Eriocheir sinensis*)[J]. Food Chemistry, 2007, 104(3): 1200−1205.

[16] CHEN Ziqi, GAO Haiyan, WU Weijie, et al. Effects of fermentation with different microbial species on the umami taste of

Shiitake mushroom (*Lentinus edodes*)[J]. LWT, 2021, 141: 110889.
[17] QI Jun, LIU Dengyong, ZHOU Guanghong, 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] 邹金浩, 林耀盛, 杨怀谷, 等. 岭南黄鸡炖鸡汤过程中营养及风味物质的变化[J]. 现代食品科技, 2021, 37(11): 328−337. [ZOU Jinhao, LIN Yaosheng, YANG Huaigu, et al. Changes of nutrients and flavor substances in Lingnan yellow chicken stewed chicken soup[J]. Modern Food Science & Technology, 2021, 37(11): 328−337.]
[19] CHEN Lilan, HUANG Jiale, YUAN Can, et al. Volatile and non-volatile compound analysis of *Ginkgo* chicken soup during cooking using a combi oven[J]. Food Chemistry: X, 2025, 26: 102276.
[20] WANG Hailang, WU Boxiao, ZHANG Jinyan, et al. Bamboo shoots improve the nutritional and sensory quality, and change flavor composition of chicken soup[J]. Food Chemistry: X, 2024, 21: 101140.
[21] ABUGASSA I O, BASHIR A T, DOUBALI K, et al. Characterization of trace elements in medicinal herbs by instrumental neutron activation analysis[J]. Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry, 2008, 278(3): 559−563.
[22] WAN Xiaoming, ZENG Weibin. Composition of three common Chinese herbal medicines and the influence of preparation types on the bioaccessibility of trace elements[J]. Toxics, 2022, 10(12): 719.
[23] ZHOU Zheng, ZHANG Yuying, XIN Ran, et al. Metal ion-mediated pro-oxidative reactions of different lipid molecules: Revealed by nontargeted lipidomic approaches[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2022, 70(33): 10284−10295.
[24] YUE Ziyan, YU Qiuyu, QIN Yuchen, et al. Enhancement of quality induced by ultrasonic-assisted stewing improved the nutritional concentration, emulsifying property, and flavor characteristic of the chicken soup[J]. Food Chemistry: X, 2025, 25: 102184.
[25] SUN Lingxia, CHEN Jinping, LI Miaoyun, et al. Effect of star anise (*Illicium verum*) on the volatile compounds of stewed chicken[J]. Journal of Food Process Engineering, 2014, 37(2): 131−145.
[26] YAO Yishun, HUANG Meigui, WANG Xiaomin, et al. Characteristic volatile compounds contributed to aroma of braised pork and their precursor sources[J]. Food Chemistry, 2024, 459: 140335.
[27] ZHOU Zhengqun, XIAO Jia, FAN Hongxia, et al. Polyphenols from wolfberry and their bioactivities[J]. Food Chemistry, 2017, 214: 644−654.
[28] BENET I, GUÀRDIA M D, IBAÑEZ C, et al. Analysis of SPME or SBSE extracted volatile compounds from cooked cured pork ham differing in intramuscular fat profiles[J]. LWT-Food Science and Technology, 2015, 60(1): 393−399.
[29] 里奥·范海默特. 化合物香味阈值汇编[M]. 北京: 科学出版社, 2018: 98-536. [LI O Van Gemert. Odour thresholds: Compilations of odour threshold values in air, water and other media [M]. Beijing: Science Press, 2018: 98-536.]
[30] WAN Peng, LIU Jie, CHEN Dewei. Analysis of aroma-active compounds in bighead carp head soup and their influence on umami of a model soup[J]. Microchemical Journal, 2021, 168: 106436.
[31] BARIDO F H, KANG S M, LEE S K. The quality and functional improvement of retorted Korean ginseng chicken soup (samgyetang) by enzymolysis pre-treatment with *Cordyceps militaris* mushroom extract[J]. Foods, 2022, 11(3): 422.
[32] LIAO Minjie, PENG Siyi, GUO Haibin, 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.
[33] LIOE H N, APRIYANTONO A, TAKARA K, et al. Umami taste enhancement of MSG/NaCl mixtures by subthreshold L-*α*-aromatic amino acids[J]. Journal of Food Science, 2005, 70(7): s401−s405.
[34] 赵劲灵, 汤龙, 曹瑞, 等. 玉米发酵酱粉风味化合物分析及增鲜应用研究[J]. 食品与发酵工业, 2024, 50(11): 76−84. [ZHAO Jinling, TANG Long, CAO Rui, et al. Analysis of flavor compounds in fermented corn sauce powder andstudy on its freshness enhancement application[J]. Food and Fermentation Industries, 2024, 50(11): 76−84.]
[35] 徐祥, 谷贵章, 尚佳宇, 等. 低盐雪菜中呈味核苷酸关联物的检测及贮藏过程中的变化[J]. 食品科学, 2024, 45(4): 315−322. [XU Xiang, GU Guizhang, SHANG Jiayu, et al. Detection and changes in contents of flavor nucleotide-related compounds in low-salt pickled potherb mustard during storage[J]. Food Science, 2024, 45(4): 315−322.]
[36] ZHANG Lili, DUAN Wen, HUANG Yan, et al. Sensory taste properties of chicken (Hy-Line brown) soup as prepared with five different parts of the chicken[J]. International Journal of Food Properties, 2020, 23(1): 1804−1824.
[37] PHAT C, MOON B, LEE C. Evaluation of umami taste in mushroom extracts by chemical analysis, sensory evaluation, and an electronic tongue system[J]. Food Chemistry, 2016, 192: 1068−1077.
[38] 叶福媛, 毛泉明, 张蕾, 等. 不同品种黄芪中的氨基酸和微量元素含量的比较[J]. 时珍国医国药, 2005, 16(9): 851−852. [YE Fuyuan, MAO Quanming, ZHANG Lei, et al. Comparison on amino acids and trace elements in different kinds of *Astragalus membranaceus*[J]. Journal of Li-Shizhen Traditional Chinese Medicine, 2005, 16(9): 851−852.]
[39] 戴涛. 三种预处理方法对江汉土鸡汤中鲜味物质的影响[J]. 食品工业, 2025, 46(7): 88−93. [DAI Tao. Effects of three pretreatment methods on umami substances in Jianghan native chicken soup[J]. The Food Industry, 2025, 46(7): 88−93.]