徐流芳, 李翔, 刘达玉, 等. 不同骨类的骨汤炖煮工艺优化及挥发性风味分析 [J]. 食品工业科技, 2026, 47(1): 236−249. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2024110258

XU Liufang, LI Xiang, LIU Dayu, et al. Optimization of Simmering Process of Bone Broth from Different Bone Types and Analysis of Volatile Flavors[J]. Science and Technology of Food Industry, 2026, 47(1): 236−249. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2024110258

· 工艺技术 ·

不同骨类的骨汤炖煮工艺优化及挥发性风味分析

徐流芳[1], 李　翔[1,+], 刘达玉[1,*], 郑自立[1], 马　艺[1], 戴　雅[1], 白　婷[1], 陈金凤[2], 孙鸿强[3,*]

（1.成都大学食品与生物工程学院, 肉类加工四川省重点实验室, 四川成都 610106;
2.四川省成都红灯笼食品有限公司, 四川成都 611732;
3.四川国投农牧业发展有限公司, 四川阿坝州 624599）

摘　要: 为了优化火锅汤料的骨汤炖煮工艺，以牛棒骨、猪棒骨和鸡棒骨为原料，对骨类比、料液比、炖煮时间和炖煮温度进行单因素分析。以骨汤的总氮溶出率（total nitrogen dissolution rate，TNDR）和感官评分为评价指标。利用 Box-Behnken 响应面对骨汤炖煮工艺进行优化，电子鼻和顶空固相微萃取-气相色谱质谱法（headspace solid-phase microextraction/gas chromatography-mass spectrometer，HS-SPME-GC-MS）检测，相对气味活度值 (relative odor activity value，ROAV) 结合定量描述分析法（quantitative descriptive analysis，QDA）进行风味分析，联合正交偏最小二乘判别分析（orthogonal partial least squares-discriminant analysis，OPLS-DA）对不同原料的骨汤特征挥发性化合物 (volatile organic compounds，VOCs) 与电子鼻数据进行相关性分析。结果表明：当常压下，骨类比（牛骨:猪骨:鸡骨）为 3:5:2、料液比 1:4、炖煮时间 5 h、炖煮温度 96 ℃ 时，此条件下骨汤的 TNDR 最高为 64.88%，感官评分最高为 86.45 分，骨汤颜色乳白、香味浓郁、口感醇厚。经电子鼻和 HS-SPME-GC-MS 分析，四种样品共检测出 49 种 VOCs。混合骨汤中产出更多的苯类和胺类风味物质，同时增加了 W1S、W1W、W2S 和 W2W 的响应值，风味更加显著。具体分析 ROAV≥1 的关键 VOCs 有 25 种，四种样品共有 3 个关键 VOCs 为辛醛、壬醛、甲基庚烯酮。通过对骨汤风味贡献大的物质 ROAV≥1 且 VIP≥1 的 12 种特征 VOCs 与电子鼻信号相关联，发现它们之间有较强的相关性。本研究可为火锅汤料中骨汤的工业化风味优化及现代烹饪技术的创新应用提供依据。

关键词: 骨汤, 炖煮, 总氮溶出率, 电子鼻, HS-SPME-GC-MS

中图分类号: TS251.94　　**文献标识码:** B　　**文章编号:** 1002−0306(2026)01−0236−14

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2024110258　　本文网刊:

Optimization of Simmering Process of Bone Broth from Different Bone Types and Analysis of Volatile Flavors

XU Liufang[1], LI Xiang[1,+], LIU Dayu[1,*], ZHENG Zili[1], MA Yi[1], DAI Ya[1], BAI Ting[1], CHEN Jinfeng[2], SUN Hongqiang[3,*]

（1.College of Food and Biological Engineering, Chengdu University, Meat Processing Key Laboratory of Sichuan Province, Chengdu 610106, China;
2.Sichuan Chengdu Hongdenglong Food Co., Ltd., Chengdu 611732, China;
3.Sichuan Guotou Agriculture and Animal Husbandry Development Co., Ltd., Aba Tibetan Autonomous Prefecture 624599, China）

收稿日期: 2024−11−20　　+并列第一作者

基金项目: 四川省科技成果转移转化示范项目（2024ZHCG0087）; 四川省科技厅衔接乡村振兴科技专项项目（2024ZHXC0003）; 四川省农业创新团队建设项目（SCCXTD-2024-14）; 四川海聚计划高端人才引进项目 (2025HJRC0041)。

作者简介: 徐流芳（1999−）, 女, 硕士研究生, 研究方向: 食品加工与安全, E-mail: 2632676980@qq.com。
李翔（1974−）, 女, 博士, 教授, 研究方向: 食品贮藏与加工, E-mail: 173212408@qq.com。

*** 通信作者:** 刘达玉（1964−）, 男, 硕士, 教授, 研究方向: 农产品贮藏与加工, E-mail: liudayu@cdu.edu.cn。
孙鸿强（1989−）, 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向: 畜牧养殖业, E-mail: 2424845775@qq.com。

Abstract: In order to optimize the simmering process of bone broth for hotpot soup, a single-factor experiments of bone ratio, material-liquid ratio, simmering time and simmering temperature was conducted using cow, pig and chicken bones as raw materials. The total nitrogen dissolution rate (TNDR) and sensory score of the bone broth were used as evaluation indexes. The Box-Behnken response surface methodology was employed to optimize the bone broth stewing process. Flavor analysis was conducted using an electronic nose and headspace solid-phase microextraction/gas chromatography-mass spectrometry (HS-SPME-GC-MS) detection, with relative odor activity value (ROAV) combined with quantitative descriptive analysis (QDA) for flavor analysis, and orthogonal partial least squares-discriminant analysis (OPLS-DA) to correlate characteristic volatile organic compounds (VOCs) in bone broth from different raw materials with electronic nose data. The results showed that when the bone ratio (cow bone:pig bone:chicken bone) was 3:5:2, the material-liquid ratio was 1:4, the simmering time was 5 h, and the simmering temperature was 96 ℃ at atmospheric pressure, the TNDR of the bone broth under these conditions was the highest of 64.88%, and the organoleptic score was the highest of 86.45 points, and the bone broth was milky in color, with a strong fragrance and a mellow texture. Analyzed by electronic nose and HS-SPME-GC-MS, a total of 49 VOCs were detected in the four samples. The mixed bone broth yielded more benzene and amine flavor substances, and also increased the response values of W1S, W1W, W2S, and W2W, with a more significant flavor. There were 25 key VOCs specifically analyzed for ROAV≥1. A total of three key VOCs for the four samples were octanal, nonanal, and 6-methyl-5-hepten-2-one. A strong correlation was found between the electronic nose signals and the 12 characteristic VOCs that had high flavor contributions (ROAV≥1 and VIP≥1). This study can provide a basis for the industrial flavor optimization of bone broth in hotpot soup and the innovative application of modern cooking technology.

Key words: bone soup; braising; TNDR; electronic nose; HS-SPME-GC-MS

四川作为畜禽养殖大省，其中生猪产量 435 万吨（占肉类产量 75%），牛产量 23 万吨（占肉类产量 4%），家禽产量 83 万吨（占肉类产量 14.6%）[1]。畜禽的骨骼重量约占上述总产量的 20 %[2]，产生大量畜骨类副产物[3]。畜骨主要由钙和蛋白质组成的多孔网状以及管内的骨髓共同构成，富含骨胶原、氨基酸、维生素等人体所必需的营养成分[4−5]，对促进骨骼健康、改善皮肤状况、增强免疫系统功能等方面具有积极作用[6]。我国对畜骨的有效利用率仅有 15%[7]，为促进畜骨高值化利用，利用畜骨进行精加工研发，可极大降低原料成本，提高畜骨附加值。

在健康饮食、文化自信、国际化及创新菜品驱动下，火锅作为中餐第一品牌，2023 年中国火锅收入五千亿元，而川渝火锅占了全国火锅 66% 的份额[8]。火锅作为以汤为底的美食，其独特的风味和营养价值深受消费者喜爱，汤底的风味决定了火锅出餐的风味品质[9]。骨汤是火锅汤底风味的关键[10]。它通过熬煮使骨头中的营养物质（如氨基酸）分解并溶出，这些易于被人体消化吸收的成分[11]，共同构成了骨汤独特的风味与营养。在炖煮过程中，畜骨中的氨基酸等呈鲜物质会释放到汤底中[12]，使汤底更加醇香浓厚，还会增加留香时间，赋予火锅更加浓郁的香味和醇厚的口感[13]。目前关于火锅骨汤的研究鲜见报道，市场上有少量单一骨汤类产品[14]，对于混合骨汤的研究开发很少。

为提升火锅骨汤料的炖煮工艺，本实验以牛骨、猪骨、鸡骨为原料，采用单因素和 Box-Behnken 试验，选用总氮溶出率（total nitrogen dissolution rate, TNDR）和感官评分进行评价，对影响骨汤品质的料液比、炖煮温度和炖煮时间进行优化。结合电子鼻和 HS-SPME-GC-MS 进行检测分析，采用 QDA 对不同骨汤进行香气特征评价，采用 OPLS-DA 分析特征香气。旨在开发一款具有特色风味的火锅汤料的骨汤汤底产品并推动骨类副产物利用。

1　材料与方法

1.1　材料与仪器

牛棒骨、猪棒骨、鸡棒骨（需剔除棒骨表面肉）由四川国投农牧业发展有限公司阿坝州若尔盖县达扎寺镇养殖场提供；生姜、大葱　购自农贸市场；乙醇、浓硫酸、硫酸钾、氢氧化钠、亚甲基蓝、硼酸、硫酸铜、甲基红（均为分析纯）　天津市科密欧化学试剂有限公司。

BST-130 锯骨机　冰仕特江苏有限公司；KND-04A 全自动凯氏定氮仪　闽测仪器设备（厦门）有限公司；HH-2 数显恒温水浴锅　南北仪器有限公司；101-1S 鼓风干燥箱　金河源科技有限公司；PEN3 电子鼻　德国 Airsense 公司；1290 超高效液相色谱仪、8890-7000D GC-MS、DB-5MS 色谱柱（30 m×0.25 mm×0.25 μm）、萃取头 120 μm DVB/CWR/PDMS　美国安捷伦科技有限公司。

1.2　实验方法

1.2.1　骨汤的加工流程　根据不同的骨类比例称取畜骨重量，称取好的畜骨用锯骨机进行碎骨处理，碎骨尺寸约 2~5 cm，将破碎的骨头漂洗 2 h，去除血水，再添加 1% 生姜片和 1% 大葱段，预煮 10 min，去除浮沫。再进行炖煮熬制，将炖煮好的火锅汤料的骨汤冷却至 45~55 ℃ 后进行过滤，去除固体杂质，密封装袋。

1.2.2　混合骨原料比例对炖煮骨汤品质的影响实验　根据单一骨原料炖煮对骨汤品质的影响，将实验所用的牛骨、猪骨、鸡骨按照不同混合比例炖煮，共分成 6 组，分别为组 1（1∶0∶0）、组 2（0∶1∶0）、组 3（5∶3∶2）、组 4（4∶4∶2）、组 5（3∶5∶2）、组 6（2∶6∶2）。

1.2.3　感官评分标准　参考余亚琴等[15] 的方法，并

表 1 骨汤感官评分标准

Table 1 Braised bone soup sensory scoring criteria

指标	权重	评分标准				
		0~4	5~8	9~12	13~16	17~20
香味	20	腥味重, 无香味	腥味较强, 香味淡	腥味一般, 有香味	腥味弱, 香味一般	无腥味, 香味浓郁
味道	20	口感如同清水, 鲜味被完全掩盖	风味存在明显缺陷, 刚好达到及格线, 需要改进	风味良好, 达到可接受的标准, 无明显重大缺陷, 但缺乏亮点	风味优秀, 协调性好, 有明显满足感	味达到完美平衡, 层次复杂, 令人印象深刻, 回味悠长
口感	20	无鲜味, 口感差	鲜味不明显, 口感淡	鲜味淡, 口感一般	鲜味明显, 口感明显	鲜味浓郁, 口感好
色泽	20	颜色发暗, 不透明	浅灰色, 不透明	浅黄色, 透明度差	灰白色, 半透明	乳白色, 透明清亮
总体满意度	20	无法接受	可接受差	可接受一般	可接受较高	可接受高

作修改。由感官评分小组的 10 名 18~28 岁(5 个女生, 5 个男生)食品专业学生对火锅汤料的骨汤进行感官评分, 依照火锅汤料感官评分标准表进行评价, 见表 1。

1.2.4 总氮的测定及 TNDR 的计算 按照 GB 5009.5-2016《食品安全国家标准 食品中蛋白质的测定》的测定方法[16], 选用全自动凯氏定氮仪分别测定火锅汤料的骨汤和不同比例骨块原料中的总氮含量。TNDR 的计算公式如下:

$$TDNR(\%)=\frac{骨汤中总氮含量(mg/mL)\times骨汤体积(mL)}{原料骨总氮含量(mg/g)\times原料骨质量(g)}\times 100 \quad 式(1)$$

1.2.5 单因素实验 根据 6 组混合骨原料比例炖煮对骨汤品质的影响, 在预实验的基础上, 确定混合骨比例, 选取料液比、炖煮温度和炖煮时间进行单因素实验。在混合骨比例、猪棒骨、鸡棒骨、牛棒骨的重量和生姜、大葱基础配方不变的情况下, 分别研究 A 料液比(1∶1、1∶2、1∶3、1∶4、1∶5)、B 炖煮温度(80、85、90、95、100 ℃)和 C 炖煮时间(2、3、4、5、6 h)对火锅汤料的骨汤品质的影响, 以料液比 1∶4、炖煮温度 95 ℃、炖煮时间 4 h 为固定工艺参数。所有处理组均用总氮溶出率和感官评分为判定标准, 筛选出各因素较适宜的水平。

1.2.6 Box-Behnken 优化火锅汤料的骨汤炖煮工艺试验 使用 Design-Expert 13 中的 Box-Behnken 对火锅汤料的骨汤炖煮工艺进行 3 因素 3 水平响应面设计(表 2), 以 TDNR 和感官评分为响应值。

表 2 Box-Behnken 因素和水平

Table 2 Box-Behnken factors and levels

编码	A料液比	B炖煮温度(℃)	C炖煮时间(h)
−1	1∶3	90	4
0	1∶4	95	5
1	1∶5	100	6

1.2.7 电子鼻的测定 所测骨汤为响应面优化并验证后的最佳条件下炖煮的四种不同骨汤, 分别为猪骨:牛骨:鸡骨为 5∶3∶2 比例的混合骨汤(HH)、鸡骨汤(JG)、牛骨汤(NG)、猪骨汤(ZG)。电子鼻测定参考王琳琳等[17] 的方法稍作修改, 测定取 2 mL 的骨汤样品置于 20 mL 的样品瓶中密封, 放在 60 ℃ 水浴锅内预热 15 min 后进行测定。数据采集时间 120 s, 时间延迟 3 min, 选取 60~70 s 时数据。表 3 为电子鼻化学传感器及其主要响应的物质。

表 3 电子鼻化学传感器及其主要响应的物质

Table 3 Electronic nose chemical sensors and their main response substances

阵列序号	传感器	性能描述	标准物质(检测限(mg/kg))
1	W1C	芳香族成分	甲苯(10)
2	W5S	对氮氧化物灵敏度大	NO_2(1)
3	W3C	对胺类、芳香成分灵敏	苯(10)
4	W6S	对氢化物有选择性	H_2(0.1)
5	W5C	烷烃芳香成分	丙烷(1)
6	W1S	对甲基类灵敏	CH_4(100)
7	W1W	对硫化物灵敏	H_2S(1)
8	W2S	对醇类、醛酮类灵敏	CO (100)
9	W2W	对芳香成分、有机硫化物灵敏	H_2S(1)
10	W3S	对高浓度烷烃灵敏	CH_3 (10)

1.2.8 GC-MS 分析条件 样品前处理: 精确称取 3 g 样品放进容量为 15 mL 的顶空瓶, 将瓶盖盖在顶空瓶密封。60 ℃ 水浴平衡 5 min, 顶空萃取 55 min, 上机 250 ℃ 解析 5 min。

色谱条件: GC 载气 He, GC 流速 0.8 mL/min, GC 分流模式不分流, GC 升温程序: 40 ℃ 保持 3 min; 5 ℃/min 升温至 90 ℃; 10 ℃/min 升温至 230 ℃, 保持 7 min, 汽化室温度 250 ℃。

质谱条件: MS 电离电子能量 70 eV, 灯丝发射电流 200 μA, 电子轰击(EI)离子源温度 200 ℃, 接口温度 250 ℃, 检测器电压 1000 V, 扫描质子范围 35~350 amu。

定性定量方法: 样品中未知化合物经 GC/MS 软件鉴定, 并与 NIST20 质谱库匹配, 只报道相似度大于 85% 的物质。峰面积归一化法确定样品中各香气成分的相对含量[17], 计算公式如下:

$$X=\frac{m}{n}\times 100 \quad 式(2)$$

式中: X 为相对含量, %; m 为单组分物质的峰面积; n 为总峰面积。

1.2.9 关键香气物质确定 参考李翔等[18] 方法进行

修改，采用 ROAV 分析关键风味物质，以评价各骨类组分对骨汤整体风味贡献程度。用检测出的化合物相对含量与对应化合物的香气阈值的比值表示。骨汤样品风味贡献最大物质的 ROAV 为 100，其他物质 ROAV 值按照公式(3)计算：

$$ROAV(\%) = \frac{C_i}{C_{max}} \times \frac{T_{max}}{T_i} \times 100 \qquad 式（3）$$

式中：C_i 为各风味物质的相对含量，%；C_{max} 为风味贡献最大物质的相对含量，%；T_{max} 为风味贡献最大物质的香气阈值，mg/kg；T_i 为各风味物质的香气阈值，mg/kg。ROAV 值越大说明对样品风味的贡献越大。

1.3　数据处理

数据来源均为 3 次平行实验并计算平均值。采用 Excel 数据整理，SPSS 26.0 进行显著性分析、Design-Expert 13 进行响应面试验设计、Origin 2021 软件作柱状图、韦恩图和雷达图、SIMCA 14.1 软件用于 OPLS-DA 的分析处理。

2　结果与分析

2.1　混合骨原料比例对炖煮骨汤品质的影响

TNDR 指在特定条件下，固体样品中的总氮以可溶性形式释放出来的比率。在骨汤的制作过程中，TNDR 可以反映出骨汤中溶解的蛋白质和氨基酸含量，这些成分是骨汤营养价值的重要组成部分。由图 1 可知，组 2 为全猪骨时，骨汤的 TNDR 最高，感官评分也相对较高，是较好的骨汤组别，但缺少火锅汤料的骨汤独特的牛骨香气。组 1 为全牛骨时，由于牛棒骨相比较于猪棒骨和鸡棒骨，其腥味较大，用其炖煮的骨汤不易被接受，感官表现差[19]，同时，可能是牛棒骨的质地坚硬，呈味物质需要长时间或特殊工艺炖煮才能转移到骨汤中，限制了牛骨中的蛋白质的溶出，因此组 1 的 TNDR 较其他骨类而言较低，使其感官风味偏低[20]。也可能是由于牛棒骨中含有酸类化合物，例如异丁酸和己酸，会使人感到异味[21]。经过实验对 TNDR 和感官评分进行分析，结果得出，组 5 牛骨∶猪骨∶鸡骨为 3∶5∶2 时，感官评分最高，TNDR 较高，且以此骨块比例炖煮出的骨汤特色牛骨风味明显，符合火锅汤料的骨汤标准。因此选取猪骨∶牛骨∶鸡骨为 5∶3∶2 进行后续实验。

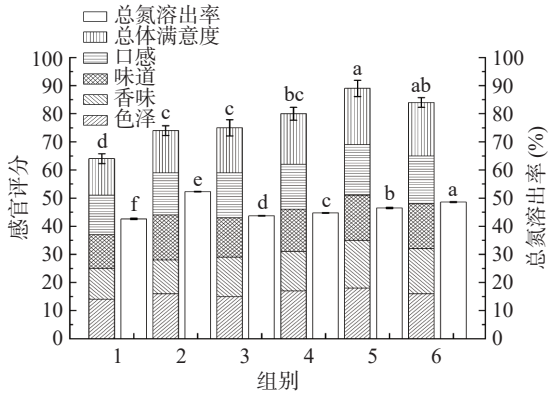


图 1　原料骨比例对火锅汤料的骨汤品质的影响

Fig.1　Effect of raw bone ratio on the quality of bone broth in hot pot soup

注：各指标中不同字母表示差异显著（P<0.05），图 2~图 4、图 7 同。

2.2　单因素实验结果

2.2.1　料液比对骨汤品质的影响　由图 2，料液比在 1∶1 到 1∶4 之间时，TNDR 呈上升趋势。同时，感官评分随着液体比例的提高先上升后下降，在料液比 1∶4 时，感官评分达到最高，且与其他组之间具有显著性差异（P<0.05）。可能是由于随着液体比例的增加骨汤颜色乳白色增强、灰白色降低、适口度增强、腥味降低且具有火锅汤料的骨汤独特的牛棒骨香味，但料液比达到一定比例后，含氮物质溶出已达到平衡，骨汤的香味口感被稀释，感官评分随之下降。因不同骨类含有的脂肪量不同[22]，牛棒骨中的脂肪含量约为 12%~20%[23]，猪棒骨中的脂肪含量约为 15%~22%[24]，鸡棒骨中的脂肪含量约为 13.44%[25]，所以骨汤感官评分的升高也可能是因为不同畜骨中营养物质的浸提作用，料液比直接影响原料中营养物质及风味成分的浸提效率，过高或过低的料液比都可能导致脂肪酸浓度不平衡，在高温炖煮过程中，不适当的料液比可能会导致脂肪酸发生热降解，产生不良风味物质。当料液比适中时会促进营养物质的释放包括多种脂肪酸发生裂解和降解，从而生成酯类、炔烃和烷烃，这些物质被鉴定为有助于形成骨汤良好的风味[26]。综上，选取料液比 1∶4 进行后续实验。

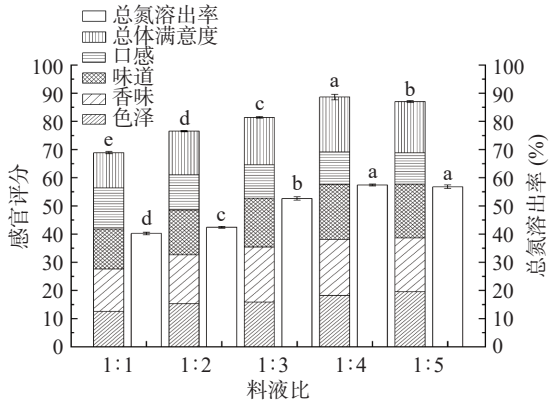


图 2　料液比对火锅汤料的骨汤品质的影响

Fig.2　Effect of solid-liquid ratio on the quality of bone broth in hot pot soup

2.2.2　炖煮温度对骨汤品质的影响　由图 3 可知，随着炖煮温度的升高，骨汤的 TNDR 也增加，炖煮温度为 95 ℃ 时感官评分最高。可能是由于不同畜骨中胶原蛋白含量不同[27]。加热温度增加，胶原蛋白的结构会被改变，溶解程度和变性程度增加，使骨汤中总氮含量上升[28]。经过骨汤中蛋白质和脂肪长时间炖煮后的分解与乳化作用，使骨汤颜色呈现乳白色[29]，感官评分也随之增加。但炖煮温度的持续升高，可能会使赋予骨汤“鲜味”的游离氨基酸等风味物质被过

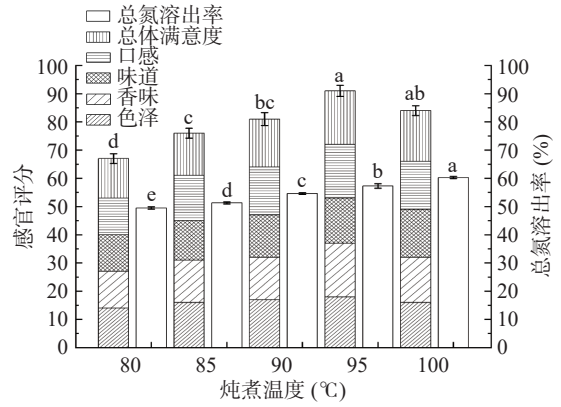


图 3 炖煮温度对火锅汤料得到骨汤品质的影响

Fig.3 Effect of braising temperature on the quality of bone broth in hot pot soup

度分解或挥发[30], 甚至产生不良风味, 从而导致骨汤的感官评分下降。综上, 选取炖煮温度 95 ℃ 进行后续实验。

2.2.3 炖煮时间对骨汤品质的影响 由图 4 可知, 随着炖煮时间增加, 骨汤的 TNDR 也逐渐增大, 炖煮时间 2、3 和 4 h 间的 TNDR 数据具有统计学差异(P<0.05)。同时, 骨汤的 TNDR 在炖煮 4 h 后趋于稳定。可能是由于随着炖煮时间的延长, 畜骨中蛋白质热变性和溶解的速率增加, 使水溶性降解产物溶于骨汤中, 促使骨汤中 TNDR 增加[31]。在 5 组数据中, 骨汤的感官评分在 4 h 时达到最高。这可能是由于能量的持续输入, 分解了热聚集体分子之间的相互作用, 导致蛋白质分离, 蛋白质解离成小分子的肽[32]。小分子的肽有利于骨汤味觉表达, 增加其感官评分[33]。当炖煮 5 h 后, 感官评分开始下降, 可能是炖煮时间过长加速脂肪氧化, 产生不良风味, 使蛋白质发生变性, 其结构发生变化[34], 呈味物质受到破坏, 骨汤会变得过于油腻, 维生素损失, 影响口感, 使感官评分降低。但是炖煮 5 h 后 TNDR 比炖煮 4 h 有所增加, 综上, 选取炖煮时间 5 h 进行后续实验。

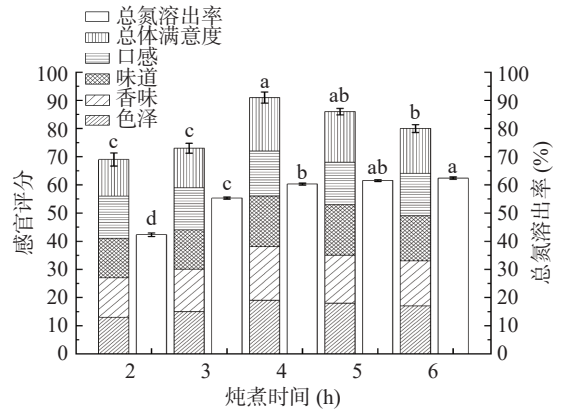


图 4 炖煮时间对火锅汤料的骨汤品质的影响

Fig.4 Effect of braising time on the quality of bone broth obtained from hot pot soup

2.3 Box-Behnken 试验结果与分析

2.3.1 响应面优化试验结果 根据单因素的实验结果, 使用 Design-Expert 8.0.6 中的 Box-Behnken 进行试验设计。以 TNDR(Y_1)和感官评分(Y_2)为响应值, 料液比(A)、炖煮温度(B)和炖煮时间(C)为自变量, 进行 3 因素 3 水平试验。试验设计与结果见表 4。

表 4 Box-Behnken 响应面试验结果

Table 4 Box-Behnken response surface test results

试验号	A	B	C	TNDR(%)	感官评分
1	0	1	1	53.14	85.12
2	0	0	0	66.53	85.78
3	1	0	1	62.54	76.72
4	0	0	0	67.21	82.96
5	1	1	0	58.36	69.68
6	0	0	0	65.75	86.29
7	−1	−1	0	41.45	72.25
8	0	0	0	64.35	85.43
9	0	1	−1	56.73	73.16
10	1	−1	0	41.62	72.22
11	0	−1	1	48.07	72.59
12	−1	1	0	55.57	75.25
13	−1	0	−1	55.52	75.56
14	−1	0	1	57.14	71.71
15	0	0	0	66.82	84.56
16	1	0	−1	59.17	64.48
17	0	−1	−1	31.81	71.36

2.3.2 TNDR 和感官评分的回归模型建立及方差分析 利用 Design-Expert 13 软件, 对以料液比、炖煮温度和炖煮时间 3 因素进行的实验数据进行多元回归拟合, 得到回归方程:

TNDR: Y_1=66.13+1.50A+7.61B+2.21C+0.6550AB+0.4375AC−4.96BC−2.86A^2−14.02B^2−4.68C^2。

感官评分: Y_2=85.00−1.46A+1.85B+2.70C−1.38AB+4.02AC+2.68BC−8.05A^2−4.61B^2−4.84C^2。

方差分析见表 5, TNDR 回归模型 P<0.0001, 表明该模型高度显著。失拟项 P=0.1480>0.05, 说明模型失拟项不显著, 模型的决定系数 R^2=0.9896、R^2_{Adj}=0.9762, 模型与实际数据拟合程度良好。根据 F 值和 P 值可知, A 呈显著影响(P<0.05); C 和 A^2 呈极显著影响(P<0.01); B、BC、B^2 和 C^2 呈高度显著影响(P<0.001)。由 F 值可知, 各因素影响骨汤 TNDR 的次序为: B>C>A, 即炖煮温度>炖煮时间>料液比。

感官评分回归模型 P<0.001, 表明该模型高度显著。失拟项 P=0.0710>0.05, 说明模型失拟项不显著, 模型的决定系数 R^2=0.9548、R^2_{Adj}=0.8967, 模型与实际数据拟合程度良好。根据 F 值和 P 值可知, B、C 和 BC 呈显著影响(P<0.05); AC、B^2 和 C^2 呈极显著影响(P<0.01); A^2 呈高度显著影响(P<0.001)。由 F 值可知, 各因素影响骨汤感官评分的次序为: C>B>A, 即炖煮时间>炖煮温度>料液比。

2.3.3 各因素交互作用分析 由图 5(a、b、c)可知, B 和 C 对 TNDR 的影响曲线图坡度增加, 说明 B 和 C 对骨汤中 TNDR 的交互作用极显著, 对骨汤中 TNDR 影响较大。而 A 和 C 的曲面图坡度较为平

表 5　TNDR 和感官评价的回归分析结果

Table 5　Results of regression analysis of total nitrogen dissolution rate and sensory score regression

方差来源	TNDR						感官评分					
	平方和	自由度	均方	*F*值	*P*值	显著性	平方和	自由度	均方	*F*值	*P*值	显著性
模型	1636.53	9	181.84	73.92	< 0.0001	***	713.36	9	79.26	16.43	0.0006	***
A	18.03	1	18.03	7.33	0.0303	*	17.02	1	17.02	3.53	0.1024	
B	462.84	1	462.84	188.16	< 0.0001	***	27.34	1	27.34	5.67	0.0488	*
C	38.98	1	38.98	15.85	0.0053	**	58.21	1	58.21	12.07	0.0104	*
AB	1.72	1	1.72	0.6977	0.4312		7.67	1	7.67	1.59	0.2476	
AC	0.7656	1	0.7656	0.3113	0.5943		64.72	1	64.72	13.42	0.0080	**
BC	98.51	1	98.51	40.05	0.0004	***	28.78	1	28.78	5.97	0.0446	*
A^2	34.52	1	34.52	14.04	0.0072	**	272.65	1	272.65	56.52	0.0001	***
B^2	827.45	1	827.45	336.39	< 0.0001	***	89.37	1	89.37	18.53	0.0035	**
C^2	92.06	1	92.06	37.43	0.0005	***	98.61	1	98.61	20.44	0.0027	**
残差项	17.22	7	2.46				33.77	7	4.82			
失拟项	12.10	3	4.03	3.15	0.1480	不显著	26.95	3	8.98	5.28	0.0710	不显著
纯误差	5.12	4	1.28				6.81	4	1.70			
总和	1659.18	16					747.13	16				

注：0.01<*P*<0.05，显著“*”；0.001<*P*<0.01，极显著“**”；*P*<0.001，高度显著“***”。

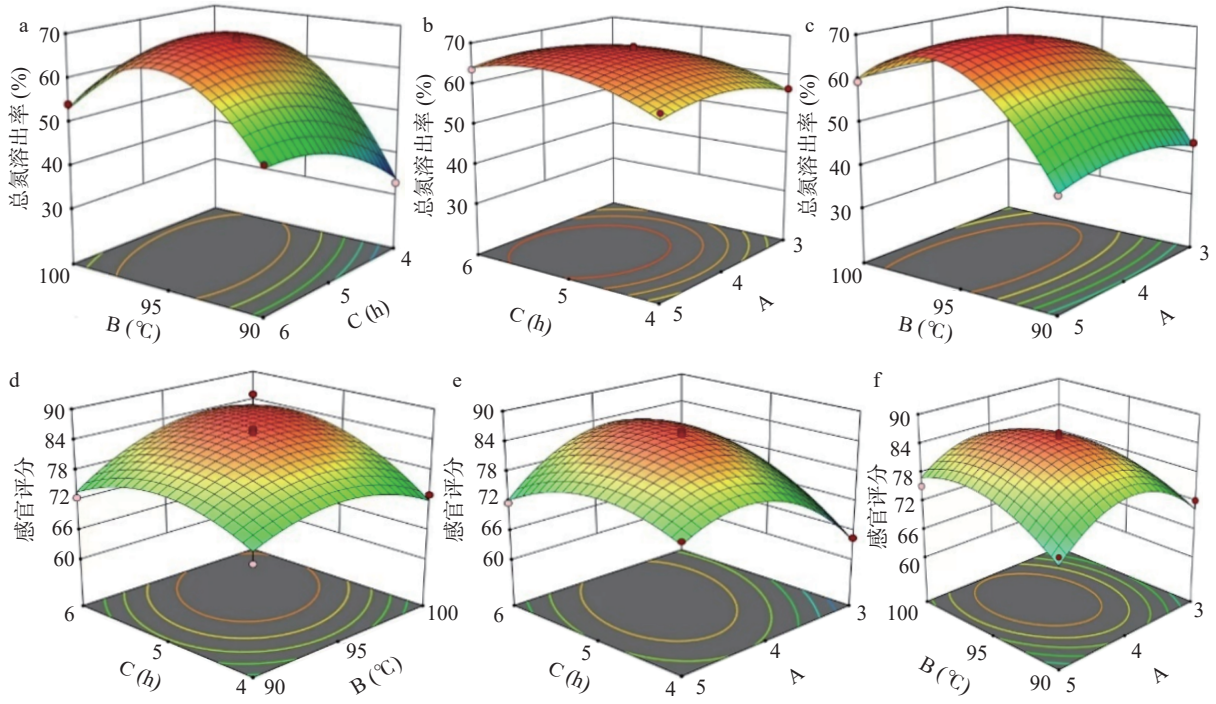


图 5　各因素交互作用对 TNDR(a、b、c)和感官评价(d、e、f)影响的响应曲面

Fig.5　Response surface of interaction of various factors on total nitrogen dissolution rate (a, b, c) and sensory score (d, e, f)

缓，说明这两因素对 TNDR 的交互作用影响不显著，对骨汤中 TNDR 的影响较小。与表 5 结果相同。

由图 5(d、e、f)可知，A 和 C、B 和 C 对感官评分的影响曲线图坡度大，说明 A 和 C、B 和 C 对骨汤的感官评分的交互作用非常显著，对骨汤的感官评分影响很大。而 A 和 B 的曲面图坡度小，表示这两因素对感官评分的交互作用影响不明显，对感官评分的影响较小。与表 5 结果相同。

2.3.4　火锅汤料的骨汤最佳炖煮条件确定及验证

通过 Design-Expert 13 软件分析，得出火锅汤料的骨汤的最佳炖煮工艺为：料液比 1∶4.017，炖煮温度 96.213 ℃，炖煮时间 5.263 h。在此条件下火锅汤料的骨汤中的 TNDR 为 67.122%，感官评分为 85.712。结合实际工艺设置的可行性，按照最佳炖煮工艺为料液比 1∶4，炖煮温度 96 ℃，炖煮时间 5 h。以此工艺条件开展 3 次实验对其验证，其 TNDR 为 64.88%，感官评分为 86.45，预测值与实验值具有很高的相关度，表明模型拟合度较好，基于该响应面模型的分析优化有效可行。

2.4　不同骨汤电子鼻分析

通过电子鼻传感器气味强度值作风味雷达图 6(a)，可知不同原料炖煮的骨汤的响应值差异较大、风味差异明显。NG 在 W1C 和 W3C 的响应值均大于其他骨类所炖煮的骨汤，但在 W1S、W1W、W2S 和 W2W 的响应值均小于其他骨类所炖煮的骨汤。而 HH 相较于 JG 和 ZG 在 W1C 和 W3C 的响应值

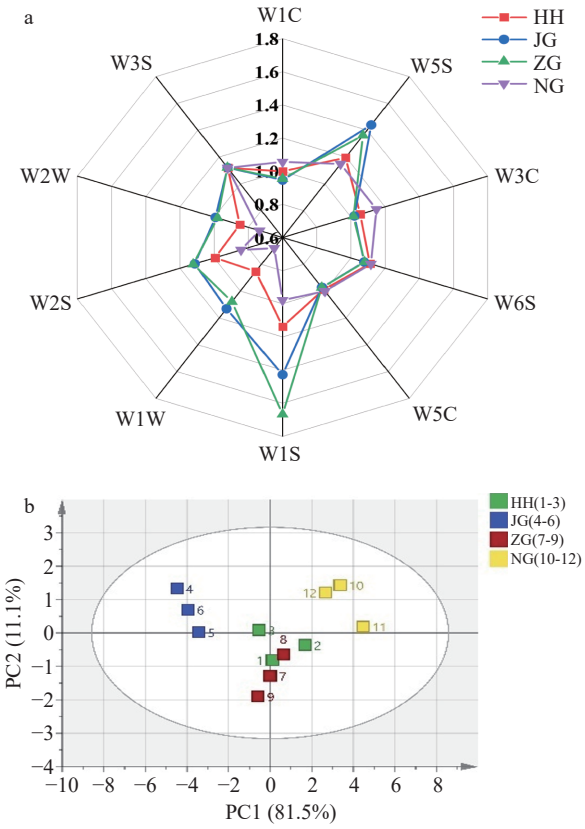


图 6　不同骨汤电子鼻雷达图及 PCA 分析

Fig.6　Electronic nose radar and PCA analysis of different bone soup

更大，HH 可产出更多的苯类和胺类风味物质，同时与 NG 相比，增加了 W1S、W1W、W2S 和 W2W 的响应值，使其拥有更多的挥发性物质、风味更加突出。

样品的香气整体信息可以用主成分分析[35]，把电子鼻的传感器响应值进行处理进而得到四种骨汤样品的差异性。为探究四种不同原材料骨汤的整体香气差异，本研究采用主成分分析(PCA)对电子鼻传感器响应值进行了降维处理。PCA 结果(图 6b)显示，第一主成分(PC1)与第二主成分(PC2)的累积贡献率远大于 70%，表明该二维散点图能够较好地反映原始数据的有效信息。在图中，代表四种骨汤的样本点组均实现了完全分离，且组内平行样聚集紧密，这清晰地表明：电子鼻能够有效捕获不同骨汤的挥发性指纹信息，四种骨汤的气味特征存在显著差异，足以被可靠地区分。HH 比 NG、JG、ZG 沿 PC1 轴的分散情况较大，推测可能不同原材料中，风味物质(如脂肪含量、脂肪酸组成)的差异最大，这可能是 PC1 分离的原因。在 PC2 所代表的风味维度上，样品间存在次要但关键的差异。PC2 可能捕获了除 PC1 主要因素之外的其他风味信息，比如某些特定的氨基酸或硫化物，还有化学差异，也是造成风味差异的最主要因素。而沿 PC2 轴的分离则揭示了次要差异，如美拉德反应产物的不同。该结果为不同原材料骨汤具有独特的风味轮廓提供了直观的证据。

2.5　不同骨汤 GC-MS 检测结果分析

2.5.1　不同骨汤的风味成分分析　利用 HS-SPME-GC-MS 联用对 4 种不同骨汤样品的 VOCs 成分和相对含量进行分析，得到总离子流色谱图见图 7(a)，相对含量结果见表 6，4 个不同骨汤样品共检测出

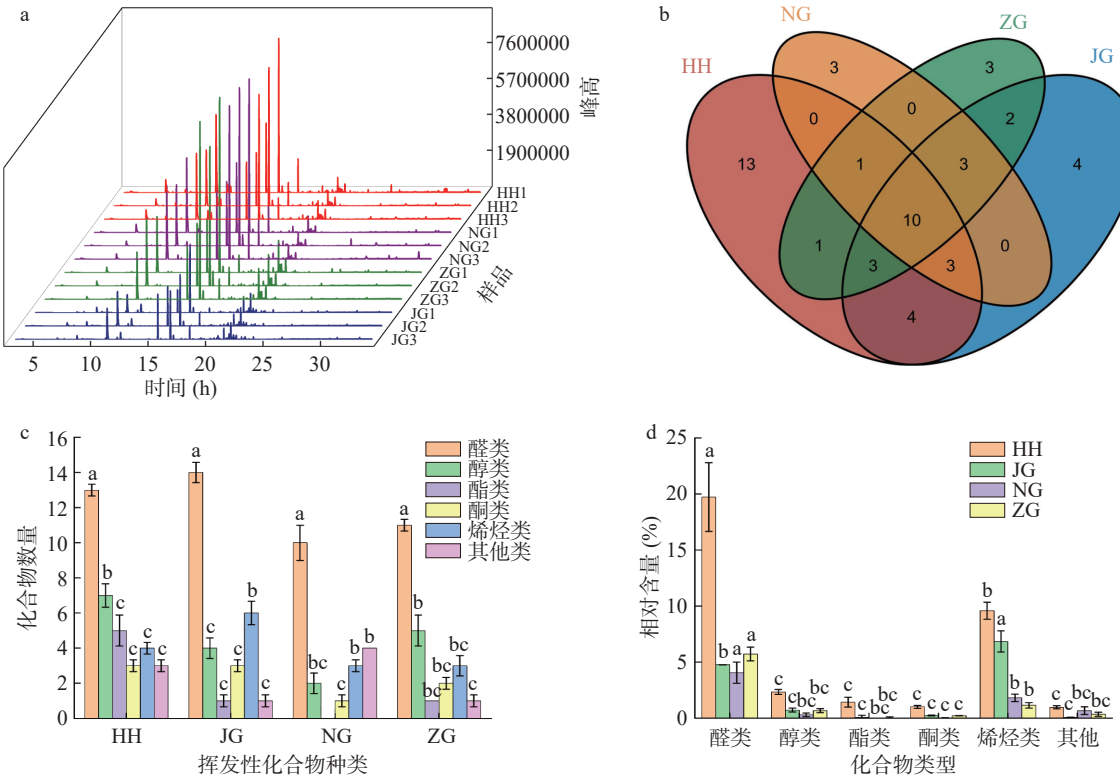


图 7　不同骨汤挥发性风味成分总离子流色谱图(a)、韦恩图(b)及 VOCs 种类柱状图(c)和相对含量(d)

Fig.7　Total ion flow chromatogram of volatile flavor components in different bone soups (a), Venn diagram (b) and column diagram of VOCs species (c) and relative content (d)

表 6　不同骨汤的挥发性化合物

Table 6　Different volatile compounds of bone broth

序列	种类	VOCs	CAS	相对含量(%)			
				HH	JG	NG	ZG
1	醛类	癸醛	112-31-2	0.36±0.03	0.38±0.03	0.43±0.07	0.29±0.10
2		(2E)-2-辛烯醛	2548-87-0	0.54±0.08	0.24±0.01	0.17±0.00	0.15±0.00
3		月桂醛	112-54-9	−	−	0.13±0.00	−
4		香茅醛	2385-77-5	0.02±0.00	−	−	−
5		(2E, 4E)-癸-2,4-二醛	25152-84-5	0.5±0.06	0.15±0.08	−	−
6		间苯二甲醛	626-19-7	0.07±0.00	0.03±0.00	0.03±0.00	−
7		苯甲醛	100-52-7	0.56±0.05	0.16±0.08	0.15±0.08	0.62±0.00
8		(2E)-2-癸烯醛	3913-81-3	1.48±0.10	0.54±0.04	−	0.24±0.00
9		橙花醛	106-26-3	4.84±1.38	0.34±0.08	0.28±0.06	0.5±0.25
10		己醛	66-25-1	0.77±0.13	0.34±0.04	0.29±0.02	0.48±0.05
11		辛醛	124-13-0	0.47±0.08	0.30±0.02	0.28±0.10	0.28±0.07
12		壬醛	124-19-6	2.92±0.11	1.60±0.10	2.13±0.66	2.60±0.50
13		(E)-壬-2-烯醛	18829-56-6	0.70±0.09	0.27±0.04	0.17±0.00	0.22±0.06
14		十五醛	2765-11-9	−	0.07±0.04	−	0.12±0.00
15		2,4-癸二烯醛	2363-88-4	−	0.23±0.00	−	−
16		庚醛	111-71-7	−	0.12±0.00	−	0.23±0.00
17		柠檬醛	5392-40-5	6.56±1.47	−	−	−
1	醇类	己醇	111-27-3	0.25±0.05	−	−	−
2		1-(4-甲基苯基)乙醇	536-50-5	0.13±0.00	0.09±0.01	−	−
3		辛醇	111-87-5	0.42±0.06	0.11±0.00	−	0.15±0.00
4		α-萜品醇	98-55-5	0.40±0.02	−	−	−
5		芳樟醇	78-70-6	−	0.41±0.00	0.20±0.12	0.27±0.14
6		十一醇	112-42-5	−	0.12±0.00	0.11±0.00	0.07±0.04
7		松油醇	10482-56-1	−	−	−	0.08±0.00
8		香叶醇	106-24-1	0.78±0.00	−	−	0.11±0.00
9		桉树醇	470-82-6	0.26±0.06	−	−	−
10		庚醇	111-70-6	0.10±0.05	−	−	−
1	酯类	丁酸丁酯	109-21-7	0.17±0.14	−	−	−
2		甲酸芳樟酯	115-99-1	0.42±0.00	−	−	−
3		乙酸香茅酯	150-84-5	0.36±0.00	0.07±0.00	−	−
4		己酸甲硫醇酯	2432-77-1	−	−	−	0.02±0.00
5		乙酸芳樟酯	115-95-7	0.35±0.00	−	−	−
6		丙酸戊酯	624-54-4	0.13±0.00	−	−	−
1	酮类	甲基庚烯酮	110-93-0	0.48±0.02	0.08±0.00	0.04±0.00	0.18±0.02
2		甲基乙烯基酮	78-94-4	−	−-	−	0.04±0.00
3		2-十一酮	112-12-9	0.29±0.08	0.10±0.00	−	−
4		3-羟基-2-丁酮	513-86-0	0.24±0.18	0.07±0.00	−	−
1	烯烃类	桧烯	3387-41-5	1.48±0.18	−	−	−
2		α-松油烯	99-86-5	0.08±0.04	0.09±0.00	0.01±0.00	−
3		(+)-柠檬烯	5989-27-5	1.97±0.20	3.43±0.40	1.55±0.20	0.65±0.06
4		β-芬兰烯	555-10-2	6.06±0.40	2.58±0.23	−	0.34±0.17
5		间伞花烃	535-77-3	−	0.08±0.00	−	−
6		邻伞花烃	527-84-4	−	0.08±0.00	−	−
7		月桂烯	123-35-3	−	0.58±0.30	0.26±0.14	0.16±0.00
1	其他类	壬酸	112-05-0	0.59±0.05	−	0.44±0.33	0.35±0.18
2		十四烷	629-59-4	−	−	0.01±0.00	−
3		(+)-冰片	507-70-0	0.30±0.15	−	−	−
4		2-乙酰基噻唑	24295-03-2	0.09±0.00	0.07±0.04	0.03±0.01	−
5		2,5-二甲基吡嗪	123-32-0	−	−	0.19±0.00	−

注: −表示未检出。

49 种 VOCs, 包括醛类 17 种, 醇类 10 种, 酯类 6 种, 酮类 4 种, 烯烃类 7 种, 以及其他风味物质 5 种。

根据图 7(b)韦恩图可以看到不同骨汤 VOCs 的交集情况, 四个骨汤样品中共有物质有 10 个, 包括癸醛、(2E)-2-辛烯醛、苯甲醛、橙花醛、己醛、辛醛、壬醛、(E)-壬-2-烯醛、(+)-柠檬烯、甲基庚烯酮。HH 样品检测出 35 个 VOCs, JG 样品检测出 29 个 VOCs, ZG 样品检测出 23 个 VOCs, NG 样品检测出 20 个 VOCs。根据数量排列 HH>JG>ZG>NG, 表明 HH 中 VOCs 较多。HH 中醛类化合物相对于 NG 和 ZG 分别增加了 3 种、2 种, 醇类化合物相对 JG、NG 和 ZG 增加了 3 种、5 种、2 种, 酯类化合物相对 JG、NG 和 ZG 增加了 4 种、5 种、4 种, 酮类化合物相对于 NG 和 ZG 增加了 2 种、1 种, 烯烃类化合物相对于 NG 和 ZG 都增加了 1 种(图 7c)。HH、JG、NG 和 ZG 四种样品的 VOCs 相对含量的差异也十分显著, 醛类是相对含量最高的化合物类型, 相对含量分别为 19.73%、4.52%、3.72% 和 4.83%; 醇类相对含量分别为 1.74%、0.3%、0.24% 和 0.46%; 酯类相对含量分别为 1.19%、0.73%、0.02% 和 0.22%; 酮类相对含量分别为 1.01%、0.14%、0.01% 和 0.2%; 烯烃类相对含量分别为 9.58%、6.72%、1.83% 和 1.04%; 其他类相对含量分别为 0.97%、0.07%、0.47% 和 0.35%(图 7d)。

骨类中的物质经过炖煮溶于汤中, 形成呈味分子, 这些分子随后与味蕾上的受体结合, 从而被感知为特定风味[36]。在熬制骨汤中, 蛋白质会发生热变性分解为小分子多肽, 小分子多肽再次水解生成游离氨基酸[37]。骨汤中 VOCs 主要是由美拉德反应、糖、氨基酸及脂肪的热氧化反应等产生[38], 由于脂肪的水解和氧化程度不断加深, 产生大量醛类、醇类和酮类化合物。骨汤的主要风味化合物是醛类[39], 醛类具有脂肪类香气[40], 是肉类香气重要成分。四个样品共检测出醛类 17 种, 其中 HH 醛类有 13 种, 相对于 NG 和 ZG 种类增加, 可能是猪骨、牛骨和鸡骨含有不同的营养成分和风味前体物质, 在炖煮的过程中, 成分相互作用, 生成更多醛类物质。比 JG 少一种可能是由于猪骨与牛骨的蛋白质和脂肪含量高于鸡骨, 影响醛类物质的生成。不饱和脂肪酸在高温下容易发生氧化反应, 不同骨头中脂肪酸的种类和含量不同, 可能导致氧化产物差异。由表 6 可知, HH 中醛类成分相对含量比单一骨汤中的醛类物质相对含量高。醛类物质具有较低的阈值, 意味着在很低浓度时也能被人类的嗅觉感知到, 赋予 HH 独特的香气。壬醛(油脂香)在 HH、JG、NG、ZG 中相对含量分别达 2.92%、1.60%、2.13%、2.60%; 柠檬醛(柠檬香)仅在 HH 中检出, 相对含量为 6.56%; 己醛(青草香)在 HH 中相对含量最高(0.77%), 是 ZG(0.48%)的 1.6 倍。数据表明, 猪骨、牛骨与鸡骨混合的 HH 可能因脂肪氧化程度更高, 产生更多醛类物质, 赋予其更浓郁的脂肪香气。

醇类物质丰富, 主要来源于脂肪的氧化降解, 赋予骨汤较浓郁的香味, 醇类物质在后续热加工中极易被氧化成醛类或酮类物质[41]。四个样品共检测 10 种醇类物质, 其中 HH 中辛醇(0.42%)、香叶醇(0.78%)相对含量显著高于其他样品(表 6), 可能通过氧化生成醛类(如辛醛)增强香气层次。香叶醇还具有一定的抗氧化应激、抗炎症反应等生物活性, 这些特性使得香叶醇在骨汤中不仅能够提升风味和口感, 还可以对人体健康产生积极影响。

酯类是一类重要的感官活性化合物, 是由脂肪酸的降解和裂解产生的[42], 酯类物质本身不是主要营养成分, 但它们可以作为其他营养物质的载体或辅助成分存在。酯类物质在口腔中能够与唾液等液体发生相互作用, 形成细腻的口感体验。适量的酯类物质可以使骨汤口感更加丰富、醇厚。然而, 过量的酯类物质可能会带来油腻感或过于浓郁的口感, 影响整体风味。但酯类作为风味协调剂也是必不可少的。四个样品共检测出 6 种酯类, HH 检测到 5 种酯类(总含量 1.43%), 如丁酸丁酯(0.17%), 可能缓解醛类的刺激性气味, 提升口感圆润度。

酮类物质主要由脂肪分解和醇类氧化生成, 酮类物质的交互作用在骨汤形成独特风味的过程中发挥了巨大的作用, 有助于骨汤的风味和芳香特性[43]。甲基庚烯酮(柑橘香)为共有物质, HH 中相对含量(0.48%)为 ZG(0.18%)的 2.7 倍, 可能通过美拉德反应强化果香调性。

烃类物质来源于香辛料挥发物质, 是香辛料中脂肪酸烷氧化自由基断裂的产物。四个样品检测到有 7 种烯烃类物质。HH 中 β-芬兰烯(松香, 6.06%)、(+)-柠檬烯(柑橘香, 1.97%)、桧烯(松香, 1.48%)相对含量突出, 推测来源于香辛料的挥发物, 贡献清新香气。其他一些 VOCs 也对骨汤起到增香、增味的作用, 具有清香风味, 对整体风味有一定的贡献。

2.5.2 ROAV 分析不同骨汤关键 VOCs 试验检测出的挥发性物质种类较多, 并非每种物质对骨汤的关键风味都起到突出贡献作用, 香气对风味的贡献大小取决于其含量高低及阈值大小[44]。采用 ROAV 分析关键性香气。ROAV 值越大的物质对样品总体风味的贡献也越大。ROAV≥1 的物质是所分析样品的关键风味化合物, 0.1≤ROAV<1 的物质对样品的总体风味具有重要的修饰作用。

如表 7, ROAV≥1 的关键 VOCs 有 25 种, 四个骨汤样品共有 3 个关键香气成分是辛醛、壬醛、甲基庚烯酮, 呈现出花果香、脂肪香气。HH 骨汤 ROAV≥1 的物质有 20 种, 其中醛类 8 种, 醇类 3 种, 酯类 2 种, 酮类 3 种, 烯烃类 2 种和其他物质 2 种。JG 和 NG 样品中 ROAV≥1 的物质有 10 种, ZG 样品 ROAV≥1 的物质有 7 种。其中, 对 HH 风味影响最大的是柠檬醛 ROAV 为 100, 它是一种天

表 7　四种不同骨汤风味物质 ROAV

Table 7　ROAV of four different flavor substances of bone broth

编号	种类	VOCs	阈值（μg/kg）	ROAV				气味描述
				HH	JG	NG	ZG	
1	醛类	癸醛	2.95	10.2	0.13	6.78	0.52	柑橘香气
2		(2E)-2-辛烯醛	3	0.32	0.08	2.67	0.26	脂肪气息
3		香茅醛	0.03	1.2	–	–	–	柠檬果香
4		(2E, 4E)-癸-2,4-二醛	0.25	3.84	2.18	–	–	鸡香和鸡油味
5		苯甲醛	0.75	1.44	0.25	9.33	4.31	杏仁坚果香
6		(2E)-2-癸烯醛	0.25	11.04	2.18	–	5.03	花香
7		己醛	4.5	0.32	0.08	3.11	0.56	青草气味
8		辛醛	0.3	2.8	1.02	43.33	4.87	茉莉花香
9		壬醛	1	45	1.6	100	13.6	脂肪香
10		十五醛	1	–	0.07	–	0.63	–
11		庚醛	3	–	0.03	–	0.4	果香
12		柠檬醛	0.12	100	–	–	–	柠檬果香
1	醇类	己醇	0.0056	85.71	–	–	–	油脂味
2		辛醇	0.1258	5.72	0.8	–	6.22	柑橘果香
3		α-萜品醇	1.2	0.6	–	–	–	丁香花香
4		十一醇	0.7	–	0.15	0.008	0.53	柑橘、凤梨果香
5		香叶醇	40	0.04	–	–	0.01	玫瑰花香
6		庚醇	0.0054	44.44	–	–	–	酒香
1	酯类	丁酸丁酯	0.4	0.9	–	–	–	苹果香味
2		乙酸香茅酯	1	5	0.07	–	–	杏子果香
3		乙酸芳樟酯	1	5	–	–	–	薰衣草香
1	酮类	甲基庚烯酮	0.068	12.35	1	29.41	14	柑橘香气
2		2-十一酮	0.0055	87.27	18.55	–	–	油脂香气
3		3-羟基-2-丁酮	0.014	34.29	4.86	–	–	脂肪香气
1	烯烃类	桧烯	0.98	2.82	–	–	–	花香
2		α-松油烯	0.08	1.5	1.28	5.75	–	柑橘果香气
3		(+)-柠檬烯	34	–	100	–	100	柠檬果香气
4		间伞花烃	0.8	–	0.09	–	–	–
1	其他类	壬酸	9	0.09	–	2.33	0.2	脂肪香
2		十四烷	1	–	–	0.47	–	–
3		(+)-冰片	0.18	3.33	–	–	–	松树香
4		2-乙酰基噻唑	0.003	40	22.67	–	–	坚果果仁香气
5		2,5-二甲基吡嗪	1.75	–	–	5.14	–	巧克力、奶油脂肪香

注: –表示未检出; 阈值来源: 化合物嗅觉阈值汇编原书第2版; 气味描述来源PubChem(https: //pubchem.ncbi.nlm.nih.gov)。

然香料, 带有浓郁的柠檬香气。癸醛、香茅醛、(2E, 4E)-癸-2,4-二醛、苯甲醛、(2E)-2-癸烯醛、辛醛、壬醛均 ROAV≥1, 呈现果香、花香、脂肪、焦糖杏仁香。HH 中柠檬醛大量产生可能是因为骨头中的脂肪逐渐释放出来并发生氧化反应, 生成包括醛类在内的多种挥发性化合物。柠檬醛作为一种特定的醛类物质, 可能在这一过程中由某些特定的脂肪或脂肪酸通过氧化途径产生。美拉德反应是氨基酸与还原糖之间发生的非酶促褐变反应, 也会产生包括醛类在内的多种风味化合物, 在炖煮过程中骨头中的蛋白质会分解氨基酸, 这些氨基酸与骨头中的微量糖分发生美拉德反应, 进一步增加了柠檬醛类物质含量。JG 和 ZG 中(+)-柠檬烯的 ROAV 最大, 可能是因为鸡骨和猪骨中天然含有一定量的脂肪和挥发性化合物, 这些成分在炖煮过程中可能会释放出包括(+)-柠檬烯在内的多种香气物质。也有研究表明, 不同压力炖煮的骨汤挥发性风味化合物的含量也不相同[45]。NG 中壬醛的 ROAV 最大, 可能是因为牛骨在炖煮过程中脂肪会释放发生氧化反应, 生成包括壬醛在内的多种挥发性化合物。壬醛作为油酸的氧化产物, 也是卤制类牛肉的代表性风味物质之一。牛骨中的蛋白质与糖分发生美拉德反应, 这一过程会生成包括壬醛在内的多种挥发性风味化合物。壬醛本身具有油脂和柑橘般的气味, 它能与其他风味物质产生协同效应, 从而显著提升骨汤风味的复杂性与浓郁度。

2.5.3　不同骨汤香气特征评价分析　实验主要通过 GC-MS 得到不同骨汤的 VOCs, 根据表 7 中 ROAV≥1 的主要香气物质的香气特征描述, 主要表现为花香、果香、脂肪香、坚果香、酒香、松木香、青草气, 对不同骨汤的香气特征进行定量描述性分析(quantitative descriptive analysis, QDA), 结果见图 8, 雷达图的差异一定程度上反映了不同骨料炖煮后的

风味差异。HH 结合了三种不同骨类的营养物质，当这些骨头混合炖煮时，各种脂肪香气相互作用，可能产生更丰富的香气，因此各种香气强度都有增加。此外，混合骨汤中的脂肪含量相对较高，这也是其香气浓郁的重要原因。HH 在炖煮过程中物质分解并发生化学反应产生庚醇、2-乙酰基噻唑、(+)-冰片等溶于汤中，从而赋予了骨汤新的香气。香气雷达图表明 HH 中特征香气挥发性化合物较多，对火锅的骨汤风味贡献显著。

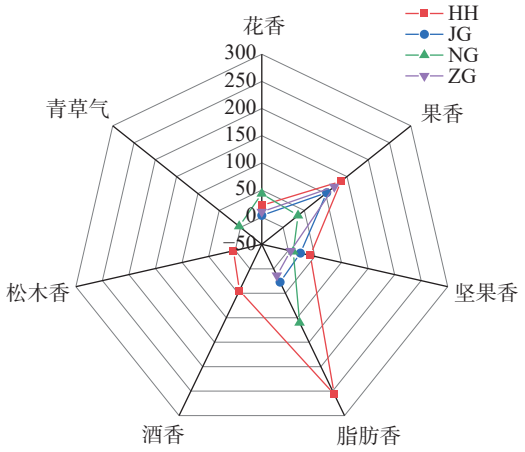


图 8　不同骨汤香气特征评价

Fig.8　Evaluation of aroma characteristics of different bone soups

2.5.4　OPLS-DA 分析不同骨汤特征 VOCs　OPLS-DA 可以提取 VOCs 中的有效信息并体现不同样品香气组成间的差异情况，在香气特征中广泛应用，适用于解释数量较多的情况，为进一步分析不同骨汤样品的 VOCs 的香气成分影响，采用 OPLS-DA 对骨汤样品 VOCs 进行分析[45]。如图 9(a)所示，HH 分布在一、四象限，JG、ZG 和 NG 分布在二、三象限，区别较明显，HH 的横坐标可以看出组间差距，纵坐标可以看出组内的差距，表明其具有独特的风味轮廓，结合 ROAV 数据发现，HH 的风味物质均显著多于其他组别。这些香气物质的独特性与更优的感官接受度高度相关，表明 HH 的挥发性香气物质构成，可能共同贡献了其更佳的风味品质。根据图 9(c)，模型累积解释率 R^2_X 为 0.728，整体预测能力 Q^2 为 0.229，表明该模型具有较好的解释能力。为进一步检验模型，置换检验 200 次中 R^2 和 Q^2 的截距分别为 0.13 和−0.476，如图 9(c)所示，Q^2 截距<0，并且模型 Q^2 回归线与横坐标交叉，且交于 y 轴负半轴，说明该模型不存在过拟合。进一步对 NG 和 HH 差异性挥发性物质进行变量投影重要性(variable importance in projection，VIP)分析。VIP 作为衡量 OPLS-DA 模型变量的权重程度，能够代表各处理之间分类判别的影响度和解释力[45]。VIP 值越大对模型分类的贡献就越大，从图 9(b)VIP≥1 的 VOCs 中筛选得到 19 种特征 VOCs，分别是(E)-壬-2-烯醛、2-乙酰基噻唑、(+)-柠檬烯、癸醛、辛醛、壬醛、芳樟

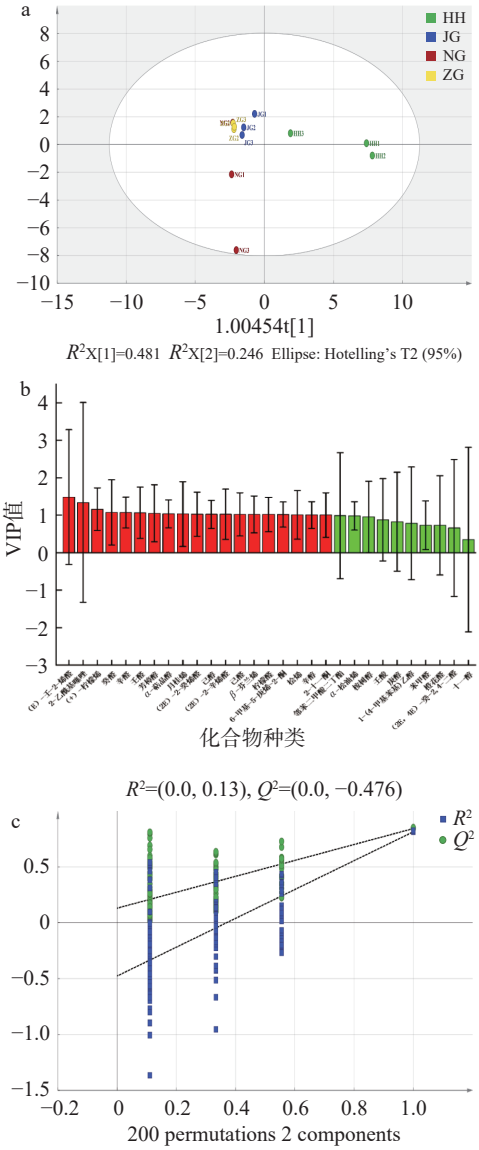


图 9　不同骨汤样品挥发性化合物含量的 OPLS-DA 得分图(a)、VIP 值(b)及置换保留图(c)

Fig.9　OPLS-DA score chart (a), VIP value (b) and displacement retention chart (c) of volatile compounds in different bone broth samples

醇、α-萜品醇、月桂烯、(2E)-2-癸烯醛、己醇、(2E)-2-辛烯醛、己醛、β-芬兰烯、柠檬醛、6-甲基-5-庚烯-2-酮、桧烯、辛醇、2-十一酮。不同原料骨在长时间的炖煮过程中，不同的骨头中的蛋白质会分解成不同的氨基酸。这些氨基酸与糖分发生美拉德反应，会生成各种挥发性物质。根据筛选出的 19 种 VIP≥1 的关键风味化合物，深入分析其构效关系：萜烯类是赋予 HH 特征风味的标志性组分，而醛类则是由不同骨类在热反应中协同生成，奠定了火锅汤料的基底风味。这些关键差异性物质，尤其是醛类在 NG 与 HH 炖煮体系中的动态演变，是造成二者最终风味显著分化的决定性因素。

2.6　电子鼻与关键 VOCs 的相关性分析

通过 GC-MS 和电子鼻分析发现 HH 与单一 JG、NG、ZG 存在显著差异，筛选出 ROAV≥1 且 VIP≥1 的 12 种关键 VOCs 与电子鼻信号相关联。

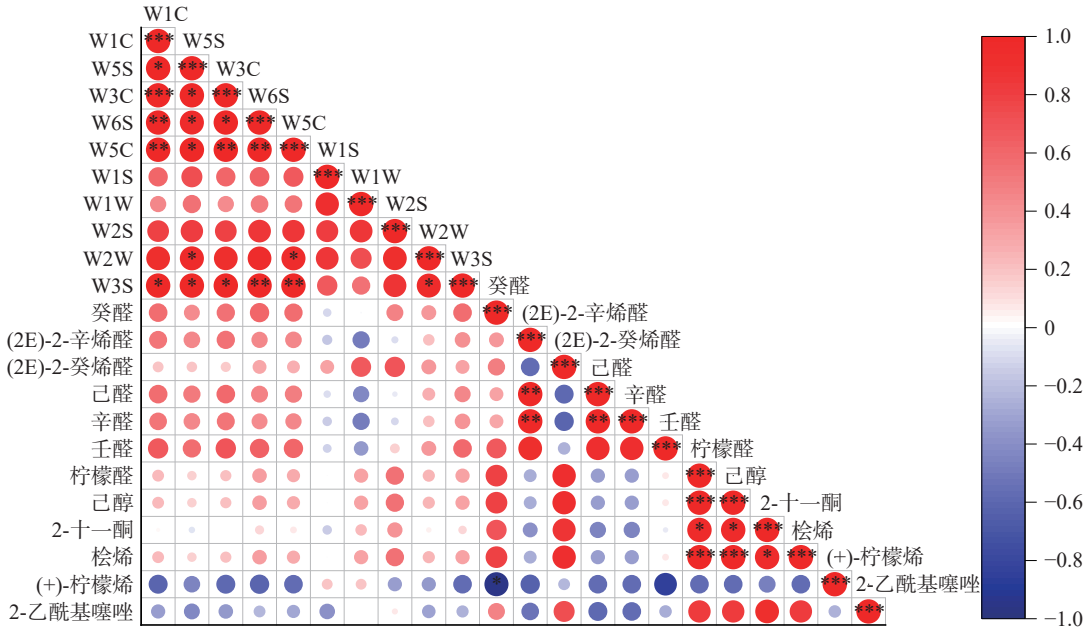


图 10　主要挥发性化合物与电子鼻的相关性

Fig.10　Correlation between main volatile compounds and electronic nose

注：*P≤0.05、**P≤0.01、***P≤0.001。

热图显示了电子鼻传感器与 GC-MS 的检测值相关情况，如图 10 所示。

关键 VOCs 与传感器的正向关联包括，醛类物质：癸醛、己醛、辛醛、壬醛与传感器 W1C（芳香烃敏感）、W5S（氮氧化物敏感）、W3C（氨类敏感）呈正相关，表明这些醛类对脂肪香气的贡献可通过电子鼻快速识别。（2E）-2-癸烯醛、柠檬醛与 W2S（醇类、醛酮类敏感）正相关，表示其柑橘香和果香的协同效应。己醇与 W2S 呈正相关，可能反映其在脂肪氧化中的中间作用。

负相关性中，（+）-柠檬烯与 2-乙酰基噻唑：与 W1W（硫化物敏感）、W3S（烷烃敏感）负相关，推测因炖煮过程中醛类挥发掩盖了萜烯类香气，导致传感器对背景干扰敏感度降低。

核心风味物质筛选综合相关系数前 3 位的化合物为壬醛、辛醛、己醛，其与 10 个传感器均存在较强的相关性。其中壬醛对 W5C（烷烃、极性化合物）的影响最大，印证其作为关键油脂香成分的地位。此外，尽管柠檬醛在综合排名中未在前 3 位，但其与 W2S 传感器表现出极强的特异性相关，与其高挥发性的物理特征高度一致，说明电子鼻能有效捕捉此类关键香气化合物的信号。

电子鼻信号可有效表征骨汤关键风味物质的变化，混合骨汤（HH）中醛类与萜烯类的动态平衡是区别于单一骨汤的核心特征，进一步验证骨头类型对风味组成的决定性作用。

3　结论

本实验通过比较不同原料骨，筛选确定骨类比例作为火锅汤料的最优骨类比，并采用单因素及响应面优化骨汤炖煮工艺。骨块比例为牛棒骨∶猪棒骨∶鸡棒骨为 3∶5∶2、料液比 1∶4、炖煮时间 5 h、炖煮温度 96 ℃，在常压下炖煮。在此工艺下，火锅汤料的骨汤中 TNDR 为 64.88%，感官评分为 86.45 分，按照此工艺条件炖煮出的骨汤风味最佳。和单一的鸡骨、猪骨、牛骨炖煮的骨汤相比，按照骨类比炖煮后风味化合物种类增加，相对含量显著提高。HS-SPME-GC-MS 共检测出 49 种 VOCs，对 4 个样品的挥发性化合物相对含量与种类进行分析，发现 HH 挥发性化合物质较多，ROAV≥1 的化合物有 20 种，主要是柠檬醛、2-十一酮、己醇等物质。JG 的主要挥发性化合物为（+）-柠檬烯、2-乙酰基噻唑、2-十一酮等物质。NG 的主要挥发性化合物为壬醛、辛醛、甲基庚烯酮等物质。ZG 的主要挥发性化合物为（+）-柠檬烯、甲基庚烯酮、壬醛等物质。4 个样品共有 3 个关键 VOCs 是辛醛、壬醛、甲基庚烯酮。通过 ROAV 值分析发现，HH 样品中含有的关键挥发性风味化合物种类更多，且其相对含量与 ROAV 值均较高，表明其对整体风味的贡献更为显著。这一结果表明，按照特定骨类比例炖煮的 HH，在关键风味物质的组成上展现出更优的复杂性与强度。总体来说，HH 相对于单一骨类炖煮的骨汤在各方面均有所改善，因此对改善火锅汤料的骨汤风味起到了积极作用，可为火锅汤料的骨汤的工业化生产提供一定的参考依据。

© 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] ZHAO Yonggan, ZHANG Min, LAW C L, et al. New tech-

nologies and products for livestock and poultry bone processing: Research progress and application prospects: A review[J]. Trends in Food Science & Technology, 2024, 144: 104343.
[2] SHEN Xu, ZHANG Min, BHANDARI B, et al. Novel technologies in utilization of byproducts of animal food processing: A review[J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2019, 59(21): 3420−3430.
[3] FIVE K K, FÅLUN I, ROLAND G J, et al. Enzymatic hydrolysis of chicken viscera and bones: Rest raw material characterization and evaluation of industrially relevant process parameters on product yields[J]. Process Biochemistry, 2024, 146: 68−80.
[4] 阮孝慈, 张贵芳, 邓宇. 牛骨成分的综合表征分析[J]. 中国科技论文, 2017, 12(6): 712−715. [RUAN Xiaoci, ZHANG Guifang, DENG Yu. The comprehensive characterization of bovine bone tissue[J]. China Sciencepaper, 2017, 12(6): 712−715.]
[5] MA Chenwei, TIAN Xiaojing, LI Yangshuai, et al. Using high-temperature cooking for different times for bone soup: Physicochemical properties, protein oxidation and nutritional value[J]. Journal of Food Composition and Analysis, 2023, 122: 105467.
[6] 褚新月, 王实玉, 夏飞飞, 等. 复合酶解对猪骨风味高汤品质的影响[J]. 食品工业, 2023, 44(6): 9−12. [CHU Xinyue, WANG Shiyu, XIA Feifei, et al. The effect of complex enzymatic hydrolysis on the quality of pork bone flavored broth[J]. The Food Industry, 2023, 44(6): 9−12.]
[7] 于连富, 毕蕾. 标准化骨汤料与中国餐饮新食代[J]. 中国调味品, 2018, 43(7): 193−194,200. [YU Lianfu, BI Lei. Standardized bone soup stock and new food generation of Chinese catering industry[J]. China Condiment, 2018, 43(7): 193−194,200.]
[8] 陈碧红. 川渝火锅产业链拓展新赛道[N]. 四川日报, 2024-11-28(001). [CHEN B H. Sichuan and Chongqing hot pot industry chain expands to new tracks[N]. Sichuan Daily, 2024-11-28(001).]
[9] 赵芩, 张立彦, 曾清清. 不同熬煮方法对鸡骨汤风味物质的影响[J]. 食品工业科技, 2015, 36(7): 314−319. [ZHAO Qin, ZHANG Liyan, ZENG Qingqing. Effect of different boiling methods on flavor components of chicken skeleton soup[J]. Science and Technology of Food Industry, 2015, 36(7): 314−319.]
[10] 谢善慈, 徐晓斌. 鸡骨的加工利用研究进展[J]. 食品科技, 2024, 49(6): 153−157. [XIE Shanci, XU Xiaobin. Research progress on processing and utilization of chicken bone[J]. Food Science and Technology, 2024, 49(6): 153−157.]
[11] 韦舟平. 骨类高汤的生产工艺以及在食品行业中的应用研究[J]. 食品安全导刊, 2023(1): 146−148. [WEI Zhouping. Research on the production technology of bone soup and its application in various cuisines[J]. China Food Safety Magazine, 2023(1): 146−148.]
[12] 郑自立. 基于供给侧的红烧牛肉面臊子开发与应用[D]. 成都: 成都大学, 2019: 43-44. [ZHENG Z L. Development and application of burnt beef for noodle based on supply side[D]. Chengdu: Chengdu University, 2019: 43-44.]
[13] 何莲, 易宇文, 徐向波, 等. 基于电子鼻和气质联用技术分析德庄火锅底料在煮制过程中挥发性物质变化[J]. 食品工业科技, 2024, 45(24): 252−262. [HE Lian, YI Yuwen, XU Xiangbo, et al. Analysis of volatile substances in Dezhuang hotpot base during cooking based on electronic nose and GC-MS technology[J]. Science and Technology of Food Industry, 2024, 45(24): 252−262.]
[14] WANG Huiqin, GAO Guanzhen, KE Lijing, et al. Isolation of colloidal particles from porcine bone soup and their interaction with murine peritoneal macrophage[J]. Journal of Functional Foods, 2019, 54: 403−411.
[15] 余亚琴, 谭春明, 聂诗, 等. 不同卤制条件对酱卤草鱼肉感官品质、理化特性和风味的影响[J]. 食品工业科技, 2025, 46(6): 261−272. [YU Yaqin, TAN Chunming, NIE Shi, et al. Effects of different marinade conditions on sensory quality, physicochemical properties and flavor of sauced grass carp (*Ctenopharyngodon idellus*) meat[J]. Science and Technology of Food Industry, 2025, 46(6): 261−272.]
[16] 中华人民共和国国家卫生和计划生育委员会, 国家食品药品监督管理总局. GB 5009.5-2025 食品安全国家标准 食品中蛋白质的测定[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016, 12. [National Health and Family Planning Commission of PRC, China Food and Drug Administration. GB 5009.5-2025 National standard for food safety-Determination of protein in food[S].Beijing: China Standards Press, 2016, 12.]
[17] 王琳琳, 张佰清, 王萍, 等. HS-SPME-GC-MS 结合 ROAV 分析藜麦茶及藜麦芽茶的香气成分[J]. 食品研究与开发, 2025, 46(3): 167−173. [WANG Linlin, ZHANG Baiqing, WANG Ping, et al. Analysis of the aroma components of quinoa tea and quinoa sprouts tea by using combination of HS-SPME-GC-MS and ROAV[J]. Food Research and Development, 2025, 46(3): 167−173.]
[18] 李翔, 张文韬, 伍一有, 等. 青花椒香菇酱夹心香肠的制备及品质研究[J]. 美食研究, 2023, 40(4): 64−71. [LI Xiang, ZHANG Wentao, WU Yiyou, et al. Study on reparation and quality of stuffed sausage with green *Zanthoxylum* and mushroom sauce[J]. Journal of Researches on Dietetic Science and Culture, 2023, 40(4): 64−71.]
[19] 穆红, 罗瑞明, 李亚蕾. 响应面法优化超声辅助双酶酶解牛骨蛋白工艺[J]. 食品研究与开发, 2023, 44(7): 135−142. [MU Hong, LUO Ruiming, LI Yalei. Optimization of ultrasonic-assisted enzymatic hydrolysis of bovine bone proteins by response surface methodology[J]. Food Research and Development, 2023, 44(7): 135−142.]
[20] 万勇斌. 牛骨高汤制备的研究[D]. 武汉: 武汉轻工大学, 2019. [WAN Yongbin. Study on preparation of beef bone soup [D]. Wuhan: Wuhan Polytechnic University, 2019.]
[21] 董闯, 续辉, 祝亚辉, 等. 基于 HS-SPME-GC-MS 和 OAV 分析西藏不同地区牦牛乳拉拉关键呈香物质[J]. 食品工业科技, 2025, 46(10): 281−290. [DONG Chuang, XU Hui, ZHU Yahui, et al. Analysis of key aroma presenting substances in yak milk Lala from different regions of Tibet based on HS-SPME-GC-MS and OAV[J]. Science and Technology of Food Industry, 2025, 46(10): 281−290.]
[22] 张鉴, 熊伟, 夏虎, 等. 粉碎程度对畜禽骨蛋白消化率及骨粉的氨氮含量影响[J]. 食品研究与开发, 2017, 38(23): 95−99. [ZHANG Yin, XIONG Wei, XIA Hu, et al. Effect of grinding degree on the digestibility of bone protein and ammonia nitrogen content of bone powder[J]. Food Research and Development, 2017, 38(23): 95−99.]
[23] CHIANG J H, EYRES G T, SILCOCK P J, et al. Changes in the physicochemical properties and flavour compounds of beef bone hydrolysates after Maillard reaction[J]. Food Research International, 2019, 123: 642−649.
[24] QI Liwei, ZHANG Hongru, GUO Yujie, et al. Preparation, characterization and antioxidant activity analysis of three Maillard glycosylated bone collagen hydrolysates from chicken, porcine and bovine[J]. Food Science and Human Wellness, 2024, 13(4): 2002−2013.

［25］ LASEKAN A, ABU BAKAR F, HASHIM D. Potential of chicken by-products as sources of useful biological resources[J]. Waste Management, 2013, 33(3): 552−565.
［26］ MENG Qian, ZHOU Jianwei, GAO De, et al. Desorption of nutrients and flavor compounds formation during the cooking of bone soup[J]. Food Control, 2022, 132: 108408.
［27］ 周娇娇, 郭玉杰, 齐立伟, 等. 脯氨酰内肽酶水解不同来源畜禽骨胶原蛋白的特性分析[J]. 食品科学, 2024, 45(9): 66−74. ［ZHOU Jiaojiao, GUO Yujie, QI Liwei, et al. Characterization of prolyl endopeptidase-hydrolyzed bone collagen from different species of livestock and poultry[J]. Food Science, 2024, 45(9): 66−74.］
［28］ EXPOSITO J Y, VALCOURT U, CLUZEL C, et al. The fibrillar collagen family[J]. International Journal of Molecular Sciences, 2010, 11(2): 407−426.
［29］ 郭营营, 韩焱, 张彦聪, 等. 基于 HS-SPME-GC-MS 和 PCA 分析陈酿条件对蓝莓酒品质的影响[J]. 食品与发酵工业, 2021, 47(20): 271−277. ［GUO Yingying, HAN Yan, ZHANG Yancong, et al. Effects of aging conditions on the quality of blueberry wine analyzed by HS-SPME-GC-MS and PCA[J]. Food and Fermentation Industries, 2021, 47(20): 271−277.］
［30］ ALAJAJI S A, EL-ADAWY T A. Nutritional composition of chickpea (*Cicer arietinum* L.) as affected by microwave cooking and other traditional cooking methods[J]. Journal of Food Composition and Analysis, 2006, 19(8): 806−812.
［31］ 曾清清, 张立彦. 鸡骨高汤熬煮条件响应面优化[J]. 食品工业, 2014, 35(1): 37−41. ［ZENG Qingqing, ZHANG Liyan. Optimization of boiling conditions of chicken bone stock by response surface methodology[J]. The Food Industry, 2014, 35(1): 37−41.］
［32］ SHEN Dongyu, LI Mengke, SONG Huanlu, et al. Characterization of aroma in response surface optimized no-salt bovine bone protein extract by switchable GC/GC×GC-olfactometry-mass spectrometry, electronic nose, and sensory evaluation[J]. LWT, 2021, 147: 111559.
［33］ ZHANG Miao, ZHAO Di, ZHU Shuran, et al. Overheating induced structural changes of type I collagen and impaired the protein digestibility[J]. Food Research International, 2020, 134: 109225.
［34］ 关海宁, 冯春梅, 田艳丽, 等. 肉源汤体关键组分相互作用机制及对风味的调控研究进展[J]. 肉类研究, 2022, 36(3): 52−58. ［GUAN Haining, FENG Chunmei, TIAN Yanli, et al. Recent advances in the interaction mechanisms between key nutrient components and their regulatory effects on the flavor of meat broth[J]. Meat Research, 2022, 36(3): 52−58.］
［35］ JIN Guangyuan, ZHU Zhengshan, WU Zhaolong, et al. Characterization of volatile components of microwave dried *Perilla* leaves using GC-MS and E-nose[J]. Food Bioscience, 2023, 56: 103083.
［36］ ZHENG Zhiliang, ZHANG Min, FAN Hanzhi, et al. Effect of microwave combined with ultrasonic pretreatment on flavor and antioxidant activity of hydrolysates based on enzymatic hydrolysis of bovine bone[J]. Food Bioscience, 2021, 44: 101399.
［37］ GALLEGO M, MORA L, HAYES M, et al. Effect of cooking and *in vitro* digestion on the antioxidant activity of dry-cured ham by-products[J]. Food Research International, 2017, 97: 296−306.
［38］ DAO Dongta, HIEN L T M, THINH N P, et al. Recovery of amino acids and peptides from pig bone soup using thermal pretreatment and enzymatic hydrolysis[J]. Journal of Food Processing and Preservation, 2022, 46(7): e16700.
［39］ LIANG Li, ZHOU Chenchen, ZHANG Jingcheng, et al. Characteristics of umami peptides identified from porcine bone soup and molecular docking to the taste receptor T1R1/T1R3[J]. Food Chemistry, 2022, 387: 132870.
［40］ FU Jianing, LI Shaobo, ZHANG Dequan, et al. Physicochemical properties of colloidal nanoparticles (CNPs) in lamb soup with different stewing times[J]. Journal of Food Composition and Analysis, 2024, 134: 106548.
［41］ WANG Le, ZHAO Bing, CHENG Xiaoyu, et al. Exploration on the stability changes and flavor profiles of duck soup during cooking[J]. LWT, 2024, 211: 116905.
［42］ GUAN Haining, FENG Chunmei, TIAN Yanli, et al. Effect of fat addition on the characteristics and interfacial behavior of chicken white soup emulsion from chicken skeleton[J]. Food Chemistry, 2024, 21: 101163.
［43］ HE Wei, HAN Menglin, BU Ying, et al. Flavor mechanism of micro-nanoparticles and correlation analysis between flavor substances in thermoultrasonic treated fishbone soup[J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2023, 93: 106299.
［44］ 赵玲, 王琳, 曹荣, 等. 基于固相微萃取-气相色谱-质谱和电子舌分析不同处理秋刀鱼烤后的风味特征[J]. 食品科学, 2024, 45(11): 186−191. ［ZHAO Ling, WANG Lin, CAO Rong, et al. Analysis of flavor characteristics of roasted *Cololabis saira* with different pretreatments by solid-phase microextraction coupled with gas chromatography-mass spectrometry and electronic tongue[J]. Food Science, 2024, 45(11): 186−191.］
［45］ 白庆祥. 蒸汽爆破制备猪骨汤工艺研究[D]. 无锡: 江南大学, 2023. ［BAI Qingxiang. Study on preparation of pig bone soup by steam explosion[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2023.］