

刘纯友, 丘静, 王书军, 等. 不同原料对螺蛳汤风味形成的影响 [J]. 食品工业科技, 2025, 46(15): 103-114. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2024080166

LIU Chunyou, QIU Jing, WANG Shujun, et al. Effects of Different Ingredients on the Flavor Formation of Luosi Soup[J]. Science and Technology of Food Industry, 2025, 46(15): 103-114. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2024080166

· 研究与探讨 ·

不同原料对螺蛳汤风味形成的影响

刘纯友¹, 丘静¹, 王书军^{1,2}, 殷朝敏³, 林华^{1,4,*}, 任仙娥¹, 唐湘毅¹, 黄永春^{1,*}

(1.广西科技大学生物与化学工程学院, 广西柳州螺蛳粉工程技术研究中心, 广西柳州 545006;

2.天津科技大学食品营养与安全国家重点实验室, 天津 300457;

3.湖北省农业科学院农产品加工与核农技术研究所, 湖北武汉 430072;

4.柳州市质量检验检测研究中心, 广西柳州 545000)

摘要:为探究螺蛳肉、猪骨、鸡架和香辛料等不同原料对螺蛳汤风味形成的影响, 采用光谱技术、气相色谱、高效液相色谱和气相色谱-质谱联用技术对螺蛳汤的理化特性和风味成分进行测定。结果表明, 不同原料对螺蛳汤中水溶性蛋白含量、颗粒平均粒径和聚集度指数有显著影响, 但不同原料对螺蛳汤的 Zeta 电位无显著影响。气相色谱结果显示, 猪骨和鸡架是螺蛳汤中油酸、亚油酸、棕榈酸和棕榈油酸的主要来源。GC-MS 结果表明, 螺蛳汤中共鉴定出 35 种挥发性风味化合物, 包括醛类 10 种、醇类 4 种、烯烃 11 种、烷烃 1 种、酮类 2 种、酯类 2 种、醚类 2 种、酚类 3 种。香气活度值显示, 茴香脑、草蒿脑、桉叶油醇和壬醛是螺蛳汤中关键挥发性化合物, 其中茴香脑和桉叶油醇源自香辛料, 而壬醛来自螺蛳肉、猪骨和鸡架, 这些挥发性化合物赋予螺蛳汤甜味、樟脑香、油脂味、柑橘香。氨基酸分析结果显示, 谷氨酸、天冬氨酸、甘氨酸和丙氨酸等游离氨基酸是螺蛳汤中重要的呈味氨基酸; 5'-GMP、5'-AMP 和 5'-IMP 等核苷酸是螺蛳汤中主要的鲜味核苷酸, 这些呈味氨基酸和核苷酸共同赋予螺蛳汤鲜甜的滋味特性, 而这些滋味物质主要来自螺蛳肉、猪骨和鸡架。综上, 动物基肉类原料和植物基香辛料共同构成螺蛳汤的特征香气和滋味。

关键词:螺蛳汤, 原料, 挥发性风味化合物, 滋味化合物, 气相色谱-质谱联用

中图分类号: TS201.2

文献标识码: A

文章编号: 1002-0306(2025)15-0103-12

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2024080166

本文网刊:



Effects of Different Ingredients on the Flavor Formation of Luosi Soup

LIU Chunyou¹, QIU Jing¹, WANG Shujun^{1,2}, YIN Chaomin³, LIN Hua^{1,4,*}, REN Xian'e¹, TANG Xiangyi¹, HUANG Yongchun^{1,*}

(1.Schools of Biological and Chemical Engineering, Guangxi University of Science and Technology, Engineering Technology Research Center of Liuzhou Luosifen of Guangxi, Liuzhou 545006, China;

2.State Key Laboratory of Food Nutrition and Safety, Tianjin University of Science & Technology, Tianjin 300457, China;

3.Institute of Agro-products Processing and Nuclear-Agricultural Technology, Hubei Academy of Agricultural Science, Wuhan 430072, China;

4.Liuzhou Quality Inspection and Testing Research Center, Liuzhou 545000, China)

Abstract: In order to investigate the effects of different ingredients such as Luosi meat, pork bones, chicken skeleton and spices on the flavor formation of Luosi soup, the physio-chemical characteristics and flavor components of Luosi soup were determined using spectroscopic techniques, gas chromatography (GC), high performance liquid chromatography (HPLC)

收稿日期: 2024-08-14

基金项目: 广西自然科学基金面上项目 (2025GXNSFAA069520); 广西重点研发计划项目 (桂科 AB22035061); 广西壮族自治区 2023 年学位与研究生教育改革课题 (JGY2023280); 广西高等学校千名中青年骨干教师培育计划项目 (桂教师 [2020]58 号); 广西科技大学博士基金项目 (校科博 16Z05)。

作者简介: 刘纯友 (1981-), 男, 博士, 副教授, 研究方向: 农畜产品加工及贮藏工程, E-mail: chunyoucn@126.com。

* **通信作者:** 林华 (1982-), 男, 本科, 副主任药师, 研究方向: 食品药品质量安全、检验检测技术及标准化, E-mail: lzzjhl@126.com。

黄永春 (1974-), 男, 博士, 教授, 研究方向: 生物资源加工及过程强化, E-mail: huangyc@yeah.net。

and gas chromatography-mass spectrometry (GC-MS). The results showed that the different ingredients had a significant effect on the water-soluble protein content, average particle size and polydispersity index of Luosi soup, but the different ingredients had no significant effect on the Zeta potential of Luosi soup. The results of GC showed that pig bone and chicken skeleton were the main sources of oleic, linoleic, palmitic acid and palmitoleic acids in Luosi soup. The results of GC-MS indicated that a total of 35 volatile flavor compounds, including 10 aldehydes, 4 alcohols, 11 olefins, 1 alkane, 2 ketones, 2 esters, 2 ethers and 3 phenols, were identified in Luosi soup. The aroma activity values indicated that anethole, estragole, eucalyptol and nonanal were the key volatile compounds in Luosi soup, among which the anethole and eucalyptol were derived from spices, while nonanal was originated from Luosi meat, pork bones and chicken skeleton, and these volatile compounds conferred sweet, anise, fatty and citrusy flavor to the Luosi soup. The results of amino acid analysis showed that free amino acids, including glutamic acid, aspartic acid, glycine and alanine, were the important flavor amino acids in Luosi soup, and 5'-GMP, 5'-AMP and 5'-IMP, were the main umami nucleotides, these flavor amino acids and nucleotides together conferred sweet and umami taste characteristics to Luosi soup, and these flavor compounds mainly originated from Luosi meat, pork bones and chicken skeleton. In conclusion, animal-based meat ingredients and plant-based spices together constituted the characteristic aroma and taste of Luosi soup.

Key words: Luosi soup; ingredients; volatile flavor compounds; taste compounds; gas chromatography-mass spectrometry

肉汤是一种以肉类为原料辅以佐料后加入适量的水经文火慢炖而成的汤品。肉汤的原料中含有丰富的蛋白质、脂质和氨基酸等多种营养物质,而热加工期间原料中的营养物质逐渐迁移到汤体中,迁移过程往往会伴随蛋白质的水解变性、脂质氧化降解和美拉德反应等一系列化学反应的发生,进而形成肉汤中各类风味物质^[1]。根据广西柳州市地方标准《柳州螺蛳粉用螺蛳汤料包生产规范》(DB 4502/T 0026-2022)和团体标准《地理标志证明商标 柳州螺蛳粉》(T/LZLSF 003-2022)中关于螺蛳汤的规定,螺蛳汤是以螺蛳或螺蛳肉、畜骨或禽骨、香辛料或调味料为原料,经加水长时间熬制而成的一种风味独特的汤料。螺蛳汤不仅营养丰富,而且风味独特,是柳州螺蛳粉中最重要的“灵魂”配料,深受国内外消费者的普遍青睐。

原料在热加工过程中溶出的营养物质,对肉汤的风味形成具有非常重要的作用,如肉类中蛋白质降解和脂质氧化可为肉汤的风味形成提供大量的风味前体物质。Hou等^[2]研究发现猪骨汤中游离氨基酸、5'-鸟苷单磷酸、5'-肌苷单磷酸和5'-腺苷单磷酸的变化与其滋味和口感密切相关,猪骨汤中的主要挥发性风味物质为己醛、壬醛、庚醛、(Z)-2-庚烯醛和(E)-2-癸烯醛。Qi等^[3]研究表明,随着超声热处理时间的延长,鸡汤中的蛋白质含量增加,脂质氧化加剧,产生大量的油酸、亚油酸以及花生四烯酸,而不饱和脂肪酸的氧化降解产生的己醛、庚醛、辛醛、壬醛等化合物为鸡汤提供了脂香和清香。除动物基肉类原料外,植物基香辛料也是肉汤原料的重要组成部分,香辛料不仅具有杀菌、抑菌的作用,还对肉汤的风味形成具有重要贡献。Qin等^[4]研究了八角反复使用对猪肉汤挥发性风味的影响,研究发现肉汤中共检出了37种挥发性风味物质,茴香烯、桉叶油醇、芳樟醇和 α -松油醇等主要来源于八角,同时也是肉汤中主要的挥发性风味化合物。因此,动物基肉类原料与植物基香辛料两者均对肉汤风味的形成具有重要

影响。

螺蛳汤是广西壮族自治区柳州螺蛳粉的关键配料,赋予柳州螺蛳粉不同于全国其他特色米粉的独特风味。螺蛳汤的原料主要包括螺蛳肉、畜禽骨和香辛料,但截至目前关于不同原料对螺蛳汤风味形成的影响机制尚不明确。因此,本研究以螺蛳汤为研究对象,采用光谱技术、气相色谱、液相色谱和气相色谱-质谱联用等技术探讨螺蛳汤的理化特性、游离氨基酸、核苷酸、脂肪酸、挥发性风味物质的组成及其变化,探究螺蛳肉、猪骨、鸡架和香辛料等原料对螺蛳汤风味形成的影响机制,以期为螺蛳汤料的风味形成及其调控提供科学依据,并为广西柳州螺蛳粉产业的高质量发展提供有力技术支撑。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

螺蛳、筒骨、鸡架、香辛料等原料均购于广西柳州市桂中农贸市场;2-甲基-3-庚酮(纯度99%)美国Sigma-Aldrich公司;C7~C30系列正构烷烃、37种脂肪酸甲酯(C4~C24)标准品 色谱级,美国Supelco公司;己醛、壬醛、对茴香醛、1-辛烯-3-醇、桉叶油醇、丁香酚、4-烯丙基苯甲醚、 α -蒎烯、D-柠檬烯 色谱级,美国Sigma-Aldrich公司;庚醛、癸醛、苯甲醛、柠檬醛、(E,E)-2,4-癸二烯醛、2-戊基呋喃、茴香脑、小茴香酮、反式-石竹烯 色谱级,上海麦克林生化科技股份有限公司;5'-腺苷单磷酸(5'-AMP)、5'-胞苷单磷酸(5'-CMP)、5'-鸟苷单磷酸(5'-GMP)、5'-肌苷单磷酸(5'-IMP)、次黄嘌呤核苷酸(Hx)标准品 纯度98%,北京索莱宝科技有限公司;乙腈 色谱级,美国Fisher公司;四丁基硫酸氢铵分析纯,天津光复试剂有限公司。

TRACE1310-TSQ900 GC-MS联用仪 美国赛默飞世尔科技(中国)有限公司;Agilent1260高效液相色谱仪、HP-5MS毛细管色谱柱(30 m \times 0.25 mm \times 0.25 μ m) 美国安捷伦科技有限公司;AMINO

A300 型全自动氨基酸分析仪 德国曼默博尔公司; Zetasizer Nano-ZS90 纳米粒度及 Zeta 电位分析仪 英国 Malven 仪器有限公司; UV-2600 紫外-可见分光光度计 岛津仪器(苏州)有限公司; 固相微萃取装置、50/30 μm DVB/CAR/PDMS 萃取头 美国 Supelco 公司; DG40Z-GD410 九阳电炖锅 九阳股份有限公司; BCD-632WPUCX 冰箱 长虹美菱股份有限公司。

1.2 实验方法

1.2.1 螺蛳汤的制备 根据广西壮族自治区柳州市螺蛳粉协会发布的团体标准《地理标志证明商标 柳州螺蛳粉》(T/LZLSF 003-2022)和《柳州螺蛳粉(配)汤料包生产规范》(T/LZLSF001-2019)中关于螺蛳汤料的规定制备汤料,具体方法如下:先将各组原料置于电炖锅中,各组原料如表 1 所示,再将各组采用电炖锅的营养汤炖煮模式炖煮 5 h,炖煮结束后,冷却至室温,用纱布过滤制得样液,经真空包装分别制得螺蛳肉组、猪骨组、鸡架组、香辛料组和螺蛳汤组,然后置于 4 $^{\circ}\text{C}$ 冰箱储藏备用。

1.2.2 理化特性的测定

1.2.2.1 水溶性蛋白测定 参考 Gornall 等^[5]方法:先将 1 mL 样液与 4 mL 双缩脲试剂混匀,再在室温条件下静置 5 min,于波长 540 nm 测定样品的吸光度值。以牛血清白蛋白为标准蛋白,测定样液中水溶性蛋白含量。

1.2.2.2 Zeta 电位与粒径测定 参考 Duan 等^[6]的方法:取 1 mL 样液于聚苯乙烯样品池中,采用纳米粒度及 Zeta 电位分析仪分别测定样液的平均粒径和 Zeta 电位。检测条件为:温度 25 $^{\circ}\text{C}$,平衡时间 2 min,折光率 1.33,粘度 1.00 cP。

1.2.3 脂肪酸测定

1.2.3.1 脂质的提取 参考 Bligh 等^[7]的方法,并做相应修改:吸取 100 mL 样液分别加入 100 mL 氯仿和 200 mL 甲醇,均质 2 min,再加入 100 mL 氯仿,均质 30 s,最后加入 100 mL 蒸馏水摇匀,静置分液,取下层清液过滤,过滤时加入适量的无水硫酸钠,将滤液置于旋转蒸发仪中回收溶剂,即可得到脂质。

1.2.3.2 脂肪酸甲酯的制备 参考 Li 等^[8]的方法,稍作修改。准确称取 20.00 mg 脂质加入 1 mL 内标(C19:0)和 1 mL 5 mol/L 氢氧化钠-甲醇溶液摇匀,

在温度 60 $^{\circ}\text{C}$ 条件下水浴 30 min 至油珠完全溶解,冷却至室温(25 $^{\circ}\text{C}$)后,加入 1 mL 14% 三氟化硼-甲醇溶液后,在温度 60 $^{\circ}\text{C}$ 水浴 30 min,待冷却至室温(25 $^{\circ}\text{C}$)后加入 2.0 mL 正己烷混匀,再加入 1 mL 饱和 NaCl 溶液,并剧烈振荡,待溶液分层后取上层清液,过 0.45 μm 微孔滤膜备用。

1.2.3.3 脂肪酸甲酯的检测 参考 Jin 等^[9]的方法,并做适当修改:色谱柱为 DB-23(60 m \times 250 μm \times 0.25 μm),以氮气为载气,流速 1.0 mL/min,分流比 20:1,进样量 1 μL ;进样口温度 250 $^{\circ}\text{C}$,检测器温度 280 $^{\circ}\text{C}$ 。程序升温条件如下:初始温度 50 $^{\circ}\text{C}$,保持 1 min,然后以 25 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 的速度上升到 175 $^{\circ}\text{C}$,再以 5 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 的速度上升到 200 $^{\circ}\text{C}$,最后以 1.0 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 的速度上升到 230 $^{\circ}\text{C}$,保持 7 min。

1.2.3.4 定性定量分析 选取 37 种脂肪酸甲酯(C4~C24)混标为标准品,以保留时间对样液中的脂肪酸进行定性,以浓度 0.1 mg/mL 的 C19:0 作为内标,采用内标法对样液中的脂肪酸进行定量分析,结果表示为 mg/100 g。

1.2.4 挥发性风味物质测定

1.2.4.1 样品萃取 参考 Fu 等^[10]方法,并做相应修改:先取 5 mL 样液于顶空瓶中,再加入 1 μL 内标(2-甲基-3-庚酮),压盖密封,再将样液置于温度 55 $^{\circ}\text{C}$ 下平衡 10 min,平衡结束后将 50/30 μm DVB/CAR/PDMS 萃取头插入顶空瓶,萃取 30 min,萃取完毕将萃取头置于 GC-MS 进样口,在温度 250 $^{\circ}\text{C}$ 下解析 4 min。

1.2.4.2 GC-MS 测定 参照 Jia 等^[11]方法,稍作修改:HP-5MS 毛细管柱(30 m \times 0.25 mm \times 0.25 μm),氮气为载气(纯度 \geq 99.99%),流速 1.0 mL/min,采用不分流模式进样。程序升温条件如下:初始温度 40 $^{\circ}\text{C}$,保持 4 min;再以 3 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 的速率升温到 80 $^{\circ}\text{C}$,不保持;再以 5 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 的速率由温度 80 $^{\circ}\text{C}$ 升温至 180 $^{\circ}\text{C}$,不保持;最后以 8 $^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 的速率由 180 $^{\circ}\text{C}$ 升温至 320 $^{\circ}\text{C}$,保持 3 min。MS 检测条件:离子源为 EI 源,电离电压 70 eV,离子源温度 300 $^{\circ}\text{C}$,传输线温度 280 $^{\circ}\text{C}$,扫描模式为 Scan,质荷比范围为 30~550 m/z。

1.2.4.3 定性分析 参考 Huang 等^[12]的方法,通过 NIST 谱库比对,选择正反匹配度均大于 700(最大

表 1 实验设计与分组

Table 1 Experimental design and grouping

分组	用量(g)					
	螺蛳肉	猪骨	鸡架	香辛料	水	食盐
螺蛳肉组	250.00	-	-	-	500.00	2.50
猪骨组	-	977.00	-	-	1954.00	9.77
鸡架组	-	-	410.00	-	820.00	4.10
香辛料组	-	-	-	20.00	1000.00	5.00
螺蛳汤组	250.00	977.00	410.00	20.00	3314.00	16.57

值 1000)的化合物,结合标准品定性,初步确定挥发性风味物质的成分。同时,根据在相同实验条件下获得的 C7~C30 系列正构烷烃的保留时间计算各化合物的保留指数(Retention index, RI),计算公式如式(1)所示:

$$RI = 100 \times \left(n + \frac{T_i - T_n}{T_{n+1} - T_n} \right) \quad \text{式 (1)}$$

式中: n 和 $n+1$ 分别是化合物前后烷烃中的碳数, T_n 和 T_{n+1} 是对应的保留时间, T_i 是待测化合物的保留时间($T_n < T_i < T_{n+1}$)。

1.2.4.4 定量分析 参考李素等^[13]的方法:以 2-甲基-3-庚酮为内标,根据内标浓度和峰面积对各待测挥发性风味化合物进行定量分析,定量结果按式(2)计算:

$$C = \frac{A_x \times C_0 \times V_0 \times 1000}{A_0 \times m} \quad \text{式 (2)}$$

式中: C 为测定挥发性化合物含量($\mu\text{g}/\text{kg}$); C_0 为内标化合物质量浓度($\mu\text{g}/\mu\text{L}$); V_0 为内标化合物进样体积(μL); A_x 为测定挥发性化合物的峰面积; A_0 为添加的内标化合物峰面积; m 为样品质量(g)。

1.2.4.5 香气活性值计算 参照 Wang 等^[14]的方法,计算样液中挥发性化合物的香气活性值(Odor activity value, OAV),计算公式如式(3):

$$OAV = \frac{C}{T} \quad \text{式 (3)}$$

式中: C 为待测挥发性风味化合物含量($\mu\text{g}/\text{kg}$); T 为该风味化合物在水中的嗅觉阈值($\mu\text{g}/\text{kg}$)。

1.2.5 游离氨基酸测定 参考 Meng 等^[15]方法,并做适当修改:取 2 mL 的样液与 4 mL 5'-磺基水杨酸(3%)混合均匀,在转速 12000 r/min 离心 15 min,得到上清液;吸取 1 mL 上清液加入 2 mL 正己烷,漩涡振荡 30 s,静置 15 min,取下层溶液过 0.45 μm 微孔滤膜后上机检测。采用 A-300 全自动氨基酸分析仪对样液中游离氨基酸进行检测,以外标法计算样液中游离氨基酸的含量。

1.2.6 核苷酸测定

1.2.6.1 核苷酸的提取 参考 Meng 等^[15]的方法,稍加修改:取 5 mL 样液加入 10 mL 10% 高氯酸溶液,均质 2 min,均质结束后离心,离心温度 4 $^{\circ}\text{C}$,离心转速 12000 r/min,离心时间 10 min,离心结束后取上清液,用 10 mol/L KOH 调节 pH 至 2.75。用上述条

件再次离心,得到的上清液定容到 50 mL,取 1 mL 样液过 0.45 μm 微孔滤膜后上机检测。

1.2.6.2 核苷酸的测定 参考 Chen 等^[16]的方法,稍加修改:色谱柱 ZORBAX SB-Aq(5 μm , 4.6 \times 250 mm),流动相为乙腈:四丁基硫酸氢铵(0.6 mg/mL, pH2.75)为 5:95(V/V),流速 1.0 mL/min,检测波长 254 nm,柱温 30 $^{\circ}\text{C}$,进样量 10 μL ,等度洗脱 10 min。

1.2.6.3 定性与定量分析 以样品和 5'-AMP、5'-IMP、5'-GMP、5'-CMP、Hx 标准品在相同条件下测定的保留时间进行定性分析,以外标法计算样液中核苷酸的含量。

1.3 数据处理

所有实验独立重复 3 次,实验结果以平均值 \pm 标准差表示。采用 Microsoft Excel 2021 软件对实验数据进行平均值和标准差的计算,利用 SPSS Statistics 21.0 对实验数据进行显著性分析,显著水平设为 $P < 0.05$;利用 Origin 2021b 软件对实验数据进行绘图。

2 结果与分析

2.1 原料对螺蛳汤理化特性的影响

由表 2 可知,原料对螺蛳汤组的理化特性有显著影响($P < 0.05$)。螺蛳汤组的水溶性蛋白含量(10.20 mg/mL)显著高于螺蛳肉组(6.62 mg/mL)和香辛料组(5.16 mg/mL),但显著低于鸡架组(14.02 mg/mL)($P < 0.05$),与猪骨组(9.65 mg/mL)无显著差异($P > 0.05$),这是因为螺蛳汤中水溶性蛋白由动物基和植物基原料长时间炖煮共同溶出,其中动物基原料中鸡架、猪骨和螺蛳肉溶出的水溶性蛋白较多,而植物基原料中香辛料溶出较少。汤的平均粒径分布从 61.36 nm 到 676.20 nm,聚集度指数(PDI)在 0.20~0.70 之间,螺蛳汤组的平均粒径和聚集度指数(PDI)分别为 97.62 nm 和 0.43,平均粒径显著低于猪骨组、鸡架组和香辛料组,但显著高于螺蛳肉组($P < 0.05$)。单一原料试验组中螺蛳肉组的粒径(61.36 nm)最小,猪骨组、鸡架组和香辛料组的粒径分别为 123.56、127.66 和 676.20 nm,而混合原料螺蛳汤组的粒径为 97.62 nm,这证明螺蛳肉的添加在一定程度上减小了螺蛳汤的粒径,而粒径越小,分子之间的相互作用越强,进而使得溶液的分散性越好,汤液体系的稳定性越高。不同组别之间的 Zeta 电位均为负值,且五组之间的 Zeta 电位值无显著差异($P > 0.05$)。

表 2 原料对螺蛳汤理化特性的影响

Table 2 Effect of raw materials on the physicochemical properties of Luosi soup

理化指标	螺蛳肉组	猪骨组	鸡架组	香辛料组	螺蛳汤组
水溶性蛋白(mg/mL)	6.62 \pm 0.05 ^c	9.65 \pm 0.33 ^b	14.02 \pm 0.98 ^a	5.16 \pm 0.09 ^d	10.20 \pm 0.21 ^b
平均粒径(nm)	61.36 \pm 0.52 ^d	123.56 \pm 4.00 ^b	127.66 \pm 3.59 ^b	676.20 \pm 39.10 ^a	97.62 \pm 0.95 ^c
聚集度指数(PDI)	0.20 \pm 0.00 ^d	0.70 \pm 0.05 ^a	0.44 \pm 0.00 ^c	0.61 \pm 0.04 ^b	0.43 \pm 0.00 ^c
Zeta电位(mV)	-12.64 \pm 0.68 ^a	-15.00 \pm 0.85 ^a	-14.40 \pm 1.47 ^a	-12.97 \pm 0.98 ^a	-12.90 \pm 2.07 ^a

注:同行不同小写字母表示差异显著($P < 0.05$),表3、表4、表6、表7同。

2.2 原料对螺蛳汤中脂肪酸组成的影响

肉类中的脂肪酸组成不仅对人体健康非常重要, 而且对肉汤的风味形成具有重要意义^[17]。由表 3 可知, 螺蛳汤组中单不饱和脂肪酸(MUFA)含量最高, 其次是饱和脂肪酸(SFA), 而多不饱和脂肪酸(PUFA)含量相对较低。肉类中不饱和脂肪酸包括单不饱和脂肪酸和多不饱和脂肪酸, 氧化产生氢过氧化物, 进一步氧化产生醛类、酮类和醇类化合物等风味物质, 这对肉汤的风味产生重要影响^[18]。具体而言, 油酸(C18:1, cis)、亚油酸(C18:2, cis)、棕榈油酸(C16:1)、棕榈酸(C16:0)和硬脂酸(C18:0)是螺蛳汤组中含量最高的五种脂肪酸, 其中以油酸含量最高。与猪骨组相比, 螺蛳汤组的硬脂酸和棕榈酸含量均显著降低($P<0.05$), 这可能是由于炖煮过程中螺蛳汤组的脂肪酸从原料中到汤中的迁移速率小于汤中脂肪酸的氧化降解速率^[8]; 与鸡架组、螺蛳肉组和香辛料组相比, 螺蛳汤组的棕榈酸和硬脂酸含量显著增加($P<0.05$), 这主要是由于高温炖煮促进了猪骨和鸡架中棕榈酸和硬脂酸溶出所致。因此, 猪骨和鸡架是螺蛳汤中棕榈酸和硬脂酸的主要来源。

油酸是动植物油脂中重要的单不饱和脂肪酸之

一, 其含量的高低对食品的风味形成至关重要。与四个单一原料组相比, 螺蛳汤组的油酸含量显著增加($P<0.05$), 占总脂肪酸含量的 46.85%。多不饱和脂肪酸中亚油酸(C18:2, cis)的含量最高, 其中螺蛳汤组的亚油酸含量(285.86 mg/100 g)显著高于猪骨组、鸡架组和香辛料组($P<0.05$), 且亚油酸主要来源于猪骨和鸡架等动物基原料。亚油酸在体内相关酶的作用下可进一步合成亚麻酸(C18:3)、花生四烯酸(C20:4)、二十碳五烯酸(C20:5)和二十二碳六烯酸(C22:6)^[19]。螺蛳汤组中 α -亚麻酸(C18:3, ALA)的含量(15.36 mg/100 g)显著高于其他四个单一原料组, 而花生四烯酸(C20:4)的含量显著低于猪骨组, 但高于鸡架组和螺蛳肉组($P<0.05$), 这说明鸡架和猪骨是螺蛳汤中亚麻酸和花生四烯酸重要来源, 其中猪骨为主要来源。研究表明, 香辛料中的黄酮类化合物具有较强抗氧化活性, 能够取代自由基作用于不饱和脂肪酸, 达到抑制不饱和脂肪酸氧化降解的效果^[20]。

多不饱和脂肪酸与饱和脂肪酸(PUFA/SFA)比值是评价脂肪酸营养价值的重要指标, 通常当 PUFA/SFA 比值 >0.45 时, 饮食具有较高的营养价值。由表 3 可知, 螺蛳汤组的 PUFA/SFA 比值为 0.67, 符

表 3 原料对螺蛳汤脂肪酸的影响

Table 3 Effect of raw materials on fatty acids of Luosi soup

脂肪酸	含量(mg/100 g)				
	螺蛳肉组	猪骨组	鸡架组	香辛料组	螺蛳汤组
SFA					
C8:0	N.D.	0.94±0.02 ^a	0.03±0.00 ^b	N.D.	N.D.
C10:0	N.D.	1.28±0.14 ^a	0.05±0.00 ^c	N.D.	0.67±0.05 ^b
C12:0	N.D.	1.33±0.18 ^a	0.08±0.02 ^c	N.D.	1.15±0.06 ^b
C14:0	N.D.	24.2±1.21 ^a	2.76±0.07 ^c	N.D.	18.19±0.42 ^b
C15:0	N.D.	2.16±1.16 ^a	0.40±0.03 ^c	N.D.	0.78±0.01 ^b
C16:0	0.05±0.00 ^e	492.52±5.27 ^a	100.02±1.83 ^c	0.21±0.00 ^d	443.28±5.54 ^b
C17:0	N.D.	7.71±0.29 ^a	0.52±0.03 ^c	N.D.	3.78±0.05 ^b
C18:0	N.D.	59.40±2.23 ^a	2.82±0.25 ^c	N.D.	21.41±0.22 ^b
C20:0	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	1.45±0.09
C24:0	0.01±0.00 ^b	N.D.	0.36±0.03 ^a	N.D.	N.D.
MUFA					
C14:1	N.D.	N.D.	0.72±0.07 ^b	N.D.	0.92±0.08 ^a
C16:1	0.01±0.00 ^d	40.12±1.37 ^b	24.58±0.16 ^c	0.01±0.00 ^d	54.29±1.25 ^a
C17:1	N.D.	6.68±0.49 ^a	0.35±0.01 ^c	N.D.	2.84±0.02 ^b
C18:1, cis	0.04±0.00 ^e	357.03±8.65 ^b	193.08±3.54 ^c	0.35±0.00 ^d	772.14±9.17 ^a
C20:1, n9	N.D.	82.17±7.38 ^a	1.53±0.08 ^c	N.D.	14.59±0.47 ^b
PUFA					
C18:2, cis	0.03±0.00 ^e	258.48±14.66 ^b	124.5±0.98 ^c	0.16±0.00 ^d	285.86±5.56 ^a
C18:3 (GLA)	0.04±0.00 ^e	14.09±3.35 ^a	1.41±0.11 ^b	0.01±0.00 ^c	11.38±1.82 ^a
C18:3 (ALA)	0.01±0.00 ^e	10.08±0.38 ^b	10.33±1.11 ^b	0.01±0.00 ^e	15.36±0.44 ^a
C20:2	N.D.	20.10±1.40 ^a	1.02±0.05 ^c	N.D.	10.14±0.04 ^b
C20:3	N.D.	11.86±0.27 ^a	1.19±0.10 ^b	N.D.	1.90±0.05 ^b
C20:4	0.02±0.00 ^d	12.53±0.20 ^a	2.93±0.14 ^c	N.D.	4.57±0.14 ^b
SFA	0.08±0.00 ^d	588.53±2.39 ^a	107.57±2.27 ^c	0.24±0.00 ^d	490.25±5.73 ^b
MUFA	0.07±0.00 ^e	486.02±4.41 ^b	220.27±3.50 ^c	0.38±0.00 ^d	839.93±10.73 ^a
PUFA	0.12±0.00 ^e	323.20±22.48 ^a	141.42±2.45 ^b	0.19±0.00 ^e	329.22±7.09 ^a
PUFA/SFA	1.45±0.01 ^a	0.54±0.03 ^d	1.31±0.00 ^b	0.78±0.00 ^c	0.67±0.00 ^{cd}

注: SFA、MUFA、PUFA 分别表示饱和脂肪酸、单不饱和脂肪酸、多不饱和脂肪酸; N.D. 表示未检出。

合人体膳食营养推荐标准,可为机体提供必需脂肪酸。综上,不同原料对螺蛳汤的脂肪酸组成有显著影响,猪骨和鸡架是螺蛳汤中油酸、亚油酸、亚麻酸和花生四烯酸的主要来源,且螺蛳汤的 PUFA/SFA 比值符合 WHO 推荐标准,可作为人体必需脂肪酸的重要来源。

2.3 原料对螺蛳汤挥发性风味物质的影响

由表 4 可知,五个组别检出醛类 17 种、醇类 16 种、酮类 7 种、酚类 7 种、酯类 9 种、醚类 3 种、烯炔 13 种、烷烃 5 种和呔喃化合物 1 种,共 9 大类 78 种挥发性风味物质。由图 1 可知,五组共有的挥发性风味物质为 2 种,分别是壬醛和反式肉桂醛;仅在

表 4 五个组别的挥发性风味物质 GC-MS 分析
Table 4 GC-MS analysis of volatile flavor compounds for five groups

分类	化合物	CAS号	分子式	RI计算值	含量(μg/kg)					鉴定方式
					螺蛳肉组	猪骨组	鸡架组	香辛料组	螺蛳汤组	
醛类					109.82±13.96 ^c	11.01±4.18 ^c	307.68±91.87 ^b	811.50±164.15 ^a	37.93±11.41 ^d	
	己醛	66-25-1	C ₅ H ₁₂ O	N.D.	5.05±1.85 ^b	N.D.	48.04±28.6 ^a	N.D.	N.D.	MS, Std
	苯甲醛	100-52-7	C ₇ H ₆ O	1024	22.87±3.18 ^a	N.D.	N.D.	20.17±4.31 ^a	6.72±1.8 ^b	MS, RI, Std
	(Z)-2-庚醛	57266-86-1	C ₇ H ₁₂ O	1021	N.D.	N.D.	16.4±0.00	N.D.	N.D.	MS, RI
	(E)-2-辛醛	2548-87-0	C ₈ H ₁₄ O	1066	N.D.	N.D.	32.40±9.92	N.D.	N.D.	MS, RI
	壬醛	124-19-6	C ₉ H ₁₈ O	1088	22.96±1.66 ^b	5.29±3.45 ^c	40.84±11.62 ^a	19.92±7.3 ^b	1.47±0.43 ^d	MS, RI, Std
	苯丙醛	104-53-0	C ₉ H ₁₀ O	1129	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	0.99±0.26	MS, RI
	(Z)-2-癸烯醛	2497-25-8	C ₁₀ H ₂₀ O	1218	N.D.	N.D.	30.67±5.82	N.D.	N.D.	MS, RI
	癸醛	112-31-2	C ₁₀ H ₁₈ O	1179	48.63±2.59 ^a	2.79±0.38	N.D.	N.D.	0.50±0.12 ^b	MS, RI, Std
	柠檬醛	5392-40-5	C ₈ H ₈ O ₂	1213	N.D.	N.D.	N.D.	86.66±5.43 ^a	3.91±1.18 ^b	MS, RI, Std
	(E)-2-癸醛	3913-81-3	C ₁₀ H ₁₈ O	1218	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	0.80±0.12	MS, RI
	4-甲氧基苯甲醛	123-11-5	C ₈ H ₈ O ₂	1227	N.D.	N.D.	N.D.	628.46±102.78 ^a	8.89±2.74 ^b	MS, RI, Std
	反式肉桂醛	57194-69-1	C ₉ H ₈ O	1200	10.31±4.68 ^c	2.93±0.35 ^d	30.94±12.4 ^b	56.29±4.43 ^a	14.31±4.56 ^c	MS, RI
	2,4-癸二烯醛	2363-88-4	C ₁₀ H ₁₆ O	1239	N.D.	N.D.	56.87±16.01	N.D.	N.D.	MS, RI
	(E, E)-2,4-癸二烯醛	25152-84-5	C ₁₀ H ₁₆ O	1254	N.D.	N.D.	31.88±3.83	N.D.	N.D.	MS, RI, Std
	2-十一醛	2463-77-6	C ₁₁ H ₁₈ O	1283	N.D.	N.D.	19.64±3.67	N.D.	N.D.	MS, RI
	α-甲基肉桂醛	101-39-3	C ₁₀ H ₁₀ O	1291	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	0.63±0.05	MS, RI
	十六醛	629-80-1	C ₁₅ H ₃₂ O	1790	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	0.34±0.04	MS, RI
醇类					15.80±5.41 ^c	2.33±0.48 ^d	221.24±44.01 ^b	643.43±95.98 ^a	4.12±0.87 ^d	
	戊醇	71-41-0	C ₅ H ₁₂ O	N.D.	N.D.	N.D.	10.23±1.92	N.D.	N.D.	MS
	己醇	111-27-3	C ₆ H ₁₄ O	N.D.	N.D.	N.D.	168.68±34.42	N.D.	N.D.	MS
	1-辛烯-3-醇	3391-86-4	C ₈ H ₁₆ O	983	N.D.	2.33±0.48 ^b	42.33±7.67 ^a	N.D.	N.D.	MS, RI, Std
	桉叶油醇	470-82-6	C ₁₀ H ₁₈ O	1027	N.D.	N.D.	N.D.	264.64±41.09 ^a	1.67±0.29 ^b	MS, RI, Std
	芳樟醇	78-70-6	C ₁₀ H ₁₈ O	1096	N.D.	N.D.	N.D.	64.31±12.26 ^a	0.70±0.16 ^b	MS, RI
	α-松油醇	10482-56-1	C ₁₀ H ₁₈ O	1168	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	1.38±0.41	MS, RI
	(-)-4-萜品醇	20126-76-5	C ₁₀ H ₁₈ O	1159	N.D.	N.D.	N.D.	116.7±19.27	N.D.	MS, RI
	(+)-α-松油醇	7785-53-7	C ₁₀ H ₁₈ O	1168	2.42±0.29 ^b	N.D.	N.D.	98.99±16.77 ^a	N.D.	MS, RI
	3-苯基丙醇	122-97-4	C ₉ H ₁₂ O	1175	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	0.37±0.01	MS, RI
	肉桂醇	104-54-1	C ₉ H ₁₀ O	1224	N.D.	N.D.	N.D.	17.02±0.71	N.D.	MS, RI
	2,7-二甲基-2,6-辛二醇	22410-74-8	C ₁₀ H ₁₈ O	1283	7.38±1.48	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	MS, RI
	榄香醇	639-99-6	C ₁₅ H ₂₆ O	1552	N.D.	N.D.	N.D.	17.14±1.94	N.D.	MS, RI
	反式-橙花叔醇	40716-66-3	C ₁₅ H ₂₆ O	1561	N.D.	N.D.	N.D.	22.12±2.67	N.D.	MS, RI
	α-毕橙茄醇	481-34-5	C ₁₅ H ₂₆ O	1643	N.D.	N.D.	N.D.	28.21±0.59	N.D.	MS, RI
	α-木榄醇	19435-97-3	C ₁₅ H ₂₆ O	1646	N.D.	N.D.	N.D.	14.3±0.68	N.D.	MS, RI
	胆固醇	57-88-5	C ₂₇ H ₄₆ O	3126	6±3.64	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	MS, RI
烯炔					44.54±4.39 ^b	24.33±13.05 ^b	N.D.	633.25±43.48 ^a	7.34±2.98 ^c	
	D-柠檬烯	5989-27-5	C ₁₀ H ₁₆	1025	44.54±4.39 ^b	N.D.	N.D.	490.30±34.24 ^a	2.80±1.57 ^c	MS, RI, Std
	β-蒎烯	127-91-3	C ₁₀ H ₁₆	984	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	0.25±0.08	MS, RI
	邻伞花烃	527-84-4	C ₁₀ H ₁₄	1020	N.D.	3.65±1.23	N.D.	N.D.	N.D.	MS, RI
	α-蒎烯	3856-25-5	C ₁₅ H ₂₄	1364	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	0.5±0.23	MS, RI, Std
	可巴烯	3856-25-5	C ₁₅ H ₂₄	1364	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	0.5±0.23	MS, RI
	γ-萜品烯	99-85-4	C ₁₀ H ₁₆	1056	N.D.	20.68±11.82 ^b	N.D.	42.17±2.08 ^a	N.D.	MS, RI
	β-石竹烯	87-44-5	C ₁₅ H ₂₄	1418	N.D.	N.D.	N.D.	68.01±5.35 ^a	1.09±0.38 ^b	MS, RI, Std
	可巴烯	3856-25-5	C ₁₅ H ₂₄	1364	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	0.5±0.23	MS, RI
	律草烯	6753-98-6	C ₁₅ H ₂₄	1454	N.D.	N.D.	N.D.	15.33±0.83 ^a	0.25±0.07 ^b	MS, RI

续表 4

分类	化合物	CAS号	分子式	RI计算值	含量(μg/kg)				螺蛳汤组	鉴定方式	
					螺蛳肉组	猪骨组	鸡架组	香辛料组			
烷烃	姜烯	495-60-3	C ₁₅ H ₂₄	1491	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	1.42±0.53	MS, RI	
	γ-荳麻烯	30021-74-0	C ₁₅ H ₂₄	1498	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	0.16±0.01	MS, RI	
	β-红没药烯	495-61-4	C ₁₅ H ₂₄	1505	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	0.32±0.11	MS, RI	
	α-姜黄烯	644-30-4	C ₁₅ H ₂₂	1481	N.D.	N.D.	N.D.	17.44±0.98 ^a	0.55±0.01 ^b	MS, RI	
						21.47±1.89 ^b	5.11±4.61 ^c	61.92±6.09 ^a	N.D.	0.53±0.05 ^d	
	3,5-二甲基辛烷	15869-93-9	C ₁₀ H ₂₂	1056	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	0.53±0.05	MS, RI	
	十二烷	112-40-3	C ₁₂ H ₂₅	1194	N.D.	5.11±4.61 ^b	13.65±3.18 ^a	N.D.	N.D.	MS, RI	
	十四烷	629-59-4	C ₁₄ H ₃₀	1284	N.D.	N.D.	34.66±0.56	N.D.	N.D.	MS, RI	
	茶螺烷	36431-72-8	C ₁₃ H ₂₂ O	1313	21.47±1.89	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	MS, RI	
	十六烷	544-76-3	C ₁₅ H ₃₄	1591	N.D.	N.D.	13.61±2.35	N.D.	N.D.	MS, RI	
酮类					3.77±1.05 ^c	N.D.	8.96±2.92 ^b	188.66±29.07 ^a	1.11±0.28 ^d		
	甲基庚烯酮	110-93-0	C ₈ H ₁₄ O	990	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	0.57±0.10	MS, RI	
	3-辛酮	106-68-3	C ₈ H ₁₅ O	991	N.D.	N.D.	8.96±2.92	N.D.	N.D.	MS, RI	
	蒎酮	1195-79-5	C ₁₀ H ₁₅ O	1084	N.D.	N.D.	N.D.	74.92±18.14	N.D.	MS, RI	
	2-十一酮	112-12-9	C ₁₁ H ₂₂ O	1246	1.39±0.16	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	MS, RI	
	香叶基丙酮	3796-70-1	C ₁₀ H ₁₂ O ₂	1335	2.38±0.89	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	MS, RI	
	大茴香基丙酮	122-84-9	C ₁₃ H ₂₂ O	1384	N.D.	N.D.	N.D.	40.09±7.04	N.D.	MS, RI	
	茴香武	78259-41-3	C ₁₄ H ₁₈ O	1661	N.D.	N.D.	N.D.	73.65±3.89 ^a	0.54±0.18 ^b		
						11.72±4.81 ^c	23.41±16.60 ^b	9.18±0.82 ^c	348.79±44.55 ^a	1.92±0.69 ^d	
	酯类	肉桂酸丙酯	7778-83-8	C ₁₂ H ₁₄ O ₂	1292	N.D.	N.D.	N.D.	42.23±3.45	N.D.	
2-甲基丙酸-1-苯乙酯		7775-39-5	C ₁₂ H ₁₅ O ₂	1313	N.D.	2.45±1.73	N.D.	N.D.	N.D.	MS, RI	
α-乙酸松油酯		80-26-2	C ₁₂ H ₂₀ O ₂	1341	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	0.39±0.16	MS, RI	
茴香酸甲酯		121-98-2	C ₉ H ₁₀ O ₃	1261	N.D.	N.D.	N.D.	45.45±4.83	N.D.	MS, RI	
邻甲氨基苯甲酸甲酯		85-91-6	C ₉ H ₁₁ NO ₂	1277	N.D.	20.96±14.87	N.D.	N.D.	N.D.	MS, RI	
乙酸肉桂酯		103-54-8	C ₁₁ H ₁₂ O ₂	1394	N.D.	N.D.	N.D.	36.75±2.53	N.D.	MS, RI	
乙酸丁香酯		93-28-7	C ₁₂ H ₁₄ O ₃	1494	N.D.	N.D.	N.D.	151.62±20.36 ^a	1.53±0.53 ^b	MS, RI	
水杨酸-2-乙基己基酯		118-60-5	C ₁₅ H ₂₂ O ₃	1775	4.22±0.74 ^c	N.D.	9.18±0.82 ^b	26.79±5.96 ^a	N.D.	MS, RI	
邻苯二甲酸二丁酯		84-74-2	C ₁₅ H ₂₂ O ₄	1893	7.5±4.07 ^b	N.D.	N.D.	45.95±7.42 ^a	N.D.	MS, RI	
						3.7±0.72 ^a	18.49±12.02 ^d	46.93±6.46 ^c	574.63±59.68 ^a	104.23±12.75 ^b	
醚类	草蒿脑	140-67-0	C ₁₀ H ₁₂ O	1174	3.7±0.72	N.D.	N.D.	N.D.	9.82±3.1	MS, RI, Std	
	顺式茴香脑	25679-28-1	C ₁₀ H ₁₂ O	1214	N.D.	N.D.	N.D.	52.50±5.31	N.D.	MS, RI	
	茴香脑	104-46-1	C ₁₀ H ₁₂ O	1235	N.D.	18.49±12.02 ^d	46.93±6.46 ^c	522.13±54.37 ^a	94.41±9.65 ^b	MS, RI, Std	
酚类					4.03±0.28 ^c	N.D.	N.D.	159.05±6.52 ^a	52.55±16.34 ^b		
	对烯丙基苯酚	501-92-8	C ₉ H ₁₀ O	1203	N.D.	N.D.	N.D.	26.98±4.59	N.D.	MS, RI	
	m-丁香酚	501-19-9	C ₁₀ H ₁₂ O ₂	1282	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	51.81±16.01	MS, RI	
	甲基丁香酚	93-15-2	C ₁₁ H ₁₄ O ₂	1364	N.D.	N.D.	N.D.	13.27±0.47	N.D.	MS, RI	
	反式-异丁香酚	5932-68-3	C ₁₀ H ₁₂ O ₂	1336	N.D.	N.D.	N.D.	79.91±13.21 ^a	0.39±0.09 ^b	MS, RI	
	异丁香酚	97-54-1	C ₁₀ H ₁₂ O ₂	1335	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	0.35±0.04	MS, RI	
	顺式-甲基异丁香油酚	6380-24-1	C ₁₁ H ₁₄ O ₂	1431	N.D.	N.D.	N.D.	38.89±2.57	N.D.	MS, RI	
	2,4-二叔丁基酚	96-76-4	C ₁₄ H ₂₂ O	1506	4.03±0.28	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	MS, RI	
						N.D.	N.D.	21.97±1.78	N.D.	N.D.	
	2-戊基呋喃	3777-69-3	C ₉ H ₁₄ O	987	N.D.	N.D.	21.97±1.78	N.D.	N.D.	MS, RI, Std	

注: 结果以平均值±标准差(M±SD)表示, N.D.表示未检测到, RI表示保留指数鉴定法; MS-表示质谱鉴定法, Std表示标准品鉴定法。

猪骨组、鸡架组、螺蛳肉组、香辛料组和螺蛳汤组检出的挥发性风味物质分别有 3、12、6、15 和 18 种。

2.3.1 挥发性风味物质 GC-MS 结果分析 螺蛳汤中共鉴定出 35 种挥发性风味化合物, 包括醛类 10 种、醇类 4 种、烯炔 11 种、烷烃 1 种、酮类 2 种、酯类 2 种、醚类 2 种、酚类 3 种。由于醛类化合物具有高挥发性且阈值较低, 故醛类化合物被认为是重要的芳香化合物, 并对肉品风味有重要的影响, 赋予制品肉香、脂肪香和青草香^[21-22]。醛类化合物

不仅由不饱和脂肪酸氧化降解形成, 还可以通过美拉德反应诱导的氨基酸降解、Strecker 降解、脂质与美拉德反应之间的相互作用产生^[23]。由表 4 可知, 螺蛳汤组的醛类物质有 10 种, 主要包括苯甲醛、壬醛、癸醛和反式肉桂醛, 总含量达 37.93 μg/kg, 其含量显著高于猪骨组($P<0.05$), 低于香辛料组、鸡架组和螺蛳肉组。四个单一原料组中仅螺蛳肉组和香辛料组发现有苯甲醛, 故螺蛳肉和香辛料是螺蛳汤中苯甲醛的主要来源。苯甲醛是苯丙氨酸通过 Strecker 降解生

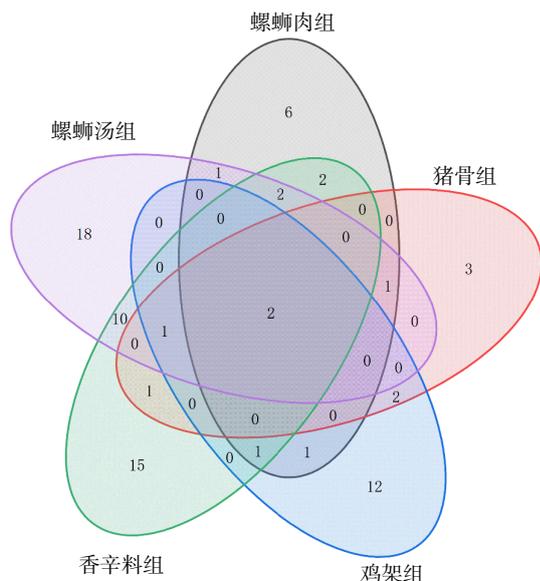


图1 五个组别的挥发性风味物质韦恩图

Fig.1 Venn diagram of volatile flavor compounds in five groups

成^[24], 赋予螺蛳汤苦杏仁香气。与螺蛳肉组相比, 螺蛳汤组的苯甲醛含量显著降低($P<0.05$), 可能是香辛料中的香叶对苯甲醛的形成有一定的抑制作用^[25]。四个原料组中均检出有壬醛, 但螺蛳汤中的壬醛含量($1.47 \mu\text{g}/\text{kg}$)显著低于四个原料组($P<0.05$)。壬醛是由油酸氧化而产生^[26], 赋予螺蛳汤柑橘、青草和香茅香气。四种原料组中仅在螺蛳肉和猪骨组中检出癸醛, 而鸡架和香辛料组未检出, 且螺蛳肉中癸醛含量是猪骨组的 17.4 倍, 这说明螺蛳肉是螺蛳汤中癸醛的主要来源, 癸醛是由花生四烯酸氧化产生^[26], 赋予螺蛳汤柑橘味和清香味。螺蛳汤中反式肉桂醛含量($14.31 \mu\text{g}/\text{kg}$)与螺蛳肉组($10.31 \mu\text{g}/\text{kg}$)无显著差异, 其含量显著高于猪骨组($2.93 \mu\text{g}/\text{kg}$), 但显著低于香辛料组($56.29 \mu\text{g}/\text{kg}$)和鸡架组($30.94 \mu\text{g}/\text{kg}$) ($P<0.05$), 赋予螺蛳汤特殊的肉桂香气。螺蛳汤中还检出柠檬醛和 4-甲氧基苯甲醛, 但两者仅在单一原料香辛料组中检出, 故两者均源自香辛料。己醛、(Z)-2-癸烯醛、2,4-癸二烯醛、(E,E)-2,4-癸二烯醛均为鸡架组中的醛类物质, 其中己醛、2,4-癸二烯醛、(E,E)-2,4-癸二烯醛被认为是肉汤中典型的醛类物质^[26], 但螺蛳汤组中未检出, 这可能是由于香辛料中的抗氧化物质抑制了螺蛳汤中不饱和脂肪酸的氧化。Li 等^[8]探讨了香辛料对牛肉汤中脂肪酸氧化稳定性的影响, 研究发现香辛料中槲皮素与表儿茶素可抑制牛肉汤中不饱和脂肪酸氧化。不饱和烯醛类如(E)-2-辛烯醛、(E)-2-癸烯醛、(E,E)-2,4-癸二烯醛为亚油酸的氧化降解产物^[3,27], 原料对螺蛳汤脂肪酸组成的影响进一步得到证实(表 3)。

由于大多数醇类化合物的阈值较高, 故醇类化合物对螺蛳汤的香气贡献相对较小, 但某些醇类化合物(1-辛烯-3-醇、桉叶油醇和芳樟醇)的阈值较低, 故这些醇类化合物对肉类风味形成起重要作用, 醇类主

要由多不饱和脂肪酸的氧化所产生^[28]。螺蛳汤组中检出的醇类物质主要有 4 种, 其中桉叶油醇含量最高($1.67 \mu\text{g}/\text{kg}$), 其次是 α -松油醇($1.38 \mu\text{g}/\text{kg}$), 而芳樟醇含量($0.70 \mu\text{g}/\text{kg}$)较低。由于桉叶油醇和芳樟醇仅在单一香辛料组检出, 故螺蛳汤中的桉叶油醇和芳樟醇均源自香辛料。研究表明, 桉叶油醇和芳樟醇是香叶中的主要成分^[29]。鸡架组和猪骨组还发现有 1-辛烯-3-醇, 其具有蘑菇香气, 是花生四烯酸在脂氧合酶的作用下生成的化合物^[28], 也有研究认为亚油酸经氧化会产生 1-辛烯-3-醇^[3]。螺蛳汤组中未检出 1-辛烯-3-醇, 该化合物仅在猪骨组和鸡架组中检出, 这可能是由于香辛料的加入延缓了花生四烯酸($\text{C}_{20}:4, n_6$)的氧化降解, 其降解速度大于生成速度, 因此 1-辛烯-3-醇含量降低; 另一原因可能是生成的 1-辛烯-3-醇与醛类发生了醛醇缩合反应生成了其他化合物, 故螺蛳汤中未检出 1-辛烯-3-醇。

酮类化合物形成的途径有两种: 一种是油酸与亚油酸自动氧化生成的己醛、庚醛通过脱氢生成酮类; 另一种是游离氨基酸与酮糖裂解产生的 α -二羰基化合物通过 Strecker 降解生成酮类^[28]。一部分酮类化合物呈花香和果香, 且随着碳链的增强, 呈现出更强的花香特征, 而二酮一般具有肉香和奶油香^[28-29]。五个组别中检出酮类物质共有 7 种, 其中螺蛳汤组只检出甲基庚烯酮和茴香酮。研究表明, 香辛料的添加在一定程度上减少酮类化合物的生成, 这可能与香辛料的抗氧化活性密切相关^[22]。

烃类化合物包括烯烃和烷烃两类, 主要来自脂肪酸烷氧自由基的均裂。由于烷烃与大多数烯烃的阈值较高, 故烃类对食品总体风味贡献相对较小, 但某些烯烃(如 D-柠檬烯、 β -石竹烯)对食品的风味有直接贡献作用^[30-31]。与香辛料组相比, 螺蛳汤组中的 D-柠檬烯和 β -石竹烯的含量显著降低($P<0.05$)。酯类化合物主要来源于羧酸和醇类化合物的酯化反应。短链酯类化合物具有果香和甜味, 长链酯类化合物具有脂香^[24,32]。螺蛳汤组的酯类化合物主要有乙酸丁香酯和 α -乙酸松油酯两种, 其中乙酸丁香酯仅在单一原料香辛料组检出, 故螺蛳汤中的酯类化合物来源于香辛料。

此外, 螺蛳汤组中检出少量的酚类、醚类和呋喃类化合物。酚类化合物包括 m-丁香酚、反式异丁香酚和异丁香酚, 其主要来源于香辛料。醚类化合物包括草蒿脑、顺式茴香脑和茴香脑, 其中螺蛳汤组中茴香脑含量($94.41 \mu\text{g}/\text{kg}$)显著高于猪骨组和鸡架组, 但显著低于香辛料组($P<0.05$)。草蒿脑和茴香脑被认为是八角和八角精油中的主要香气物质^[4,33]。鸡架组中检出 2-戊基呋喃, 但它在螺蛳汤组未有检出, 这可能与螺蛳汤熬制过程中添加香辛料对 2-戊基呋喃的抑制作用有关。2-戊基呋喃通过亚油酸的氧化降解产生^[26], 具有肉香味。Sun 等^[34]探讨了八角对鸡汤中挥发性化合物的影响, 研究发现添加八角可以降低鸡汤中 2-戊基呋喃的含量, 故进一步证实添加香辛

料可减少亚油酸的氧化,进而抑制肉汤中 2-戊基呋喃的生成。

2.3.2 香气活度值分析 香气活度值(OAV)是一种评价挥发性香气化合物对样品贡献程度的有效方法,它是香气化合物的浓度与其香气阈值的比值。当挥发性风味化合物的 OAV \geq 1 时,被认为该挥发性化合物是对样品的总体风味特征有重要影响的关键风味化合物,且挥发性化合物的 OAV 值越大,那么该化合物对样品的总体贡献值越大;当化合物的 OAV $<$ 1 时,则该挥发性化合物对样品的总体风味产生影响^[10,35]。由表 5 可知,五个组别中 OAV \geq 1 的挥发性风味化合物有 13 种,包括醛类 6 种、醇类 3 种、烯炔 1 种、醚类 2 种和呋喃 1 种。螺蛳肉组、猪骨组、鸡架组、香辛料组和螺蛳汤组分别有 4、4、7、6 和 4 种。研究发现,螺蛳汤中 OAV \geq 1 的挥发性风味化合物,包括 1 种醛类、1 种醇类和 2 种醚类,分别为壬醛、桉叶油醇、草蒿脑和茴香脑,其中茴香脑的 OAV 值(6.29)最高,它具有茴香的特殊香气,赋予螺蛳汤甜味、木香和甘草味;其次是草蒿脑,其 OVA 值达 1.64,赋予螺蛳汤茴香味、甜味和草本味;最后是桉叶油醇和壬醛,其 OVA 值分别为 1.28 和 1.34,赋予螺蛳汤樟脑香、清凉味、油脂味和青草味。此外,挥发性化合物中 D-柠檬烯、癸醛和 4-甲氧基苯甲醛,三者在一定程度上进一步提升螺蛳汤的总体香气。综上,螺蛳汤中关键挥发性化合物主要包括茴香脑、草蒿脑、桉叶油醇和壬醛,且不同原料对螺蛳汤的总体香气形成有重要作用。

2.4 原料对螺蛳汤中游离氨基酸组成的影响

由表 6 可知,五个组别中共检测出 16 种游离氨基酸,包括 7 种必需氨基酸和 9 种非必需氨基酸,且不同组别中总游离氨基酸含量存在显著差异($P<0.05$)。螺蛳汤组的总游离氨基酸含量(251.40 $\mu\text{g}/\text{mL}$)显著低于鸡架组(369.52 $\mu\text{g}/\text{mL}$)和螺蛳肉组(283.28 $\mu\text{g}/\text{mL}$),但显著高于猪骨组(204.12 $\mu\text{g}/\text{mL}$)

和香辛料组(69.74 $\mu\text{g}/\text{mL}$)($P<0.05$),故原料中鸡架、螺蛳肉和猪骨是螺蛳汤中游离氨基酸的主要来源,而香辛料来源较少。氨基酸具有多种呈味特性,如天冬氨酸和谷氨酸呈鲜味,丙氨酸、甘氨酸、苏氨酸等呈甜味,蛋氨酸、亮氨酸、异亮氨酸等呈苦味,且不同氨基酸之间的互动,为食品提供特有的滋味^[36]。螺蛳汤组的总鲜味氨基酸含量(54.97 $\mu\text{g}/\text{mL}$)显著高于猪骨组(35.68 $\mu\text{g}/\text{mL}$)、螺蛳肉组(42.30 $\mu\text{g}/\text{mL}$)和香辛料组(8.41 $\mu\text{g}/\text{mL}$),但显著低于鸡架组(92.54 $\mu\text{g}/\text{mL}$)($P<0.05$)。总甜味氨基酸与总苦味氨基酸含量高低顺序均为鸡架组 $>$ 螺蛳肉组 $>$ 螺蛳汤组 $>$ 猪骨组 $>$ 香辛料组。游离氨基酸中的谷氨酸、丙氨酸、甘氨酸和天冬氨酸是决定食品中鲜味的主要因子,统称为风味氨基酸,其中谷氨酸和天冬氨酸对肉汤品质的影响较为重要^[37]。螺蛳汤中主要鲜味氨基酸有谷氨酸和天冬氨酸,两者对螺蛳汤的滋味特性有重要影响,赋予螺蛳汤鲜美的味道。鸡架组的谷氨酸在总游离氨基酸中的占比(19.46%)最大,其次是螺蛳汤组(17.94%)。甜味氨基酸中的丙氨酸不仅可以作为增味剂和酸味矫正剂,还可以减少苦味^[37-38]。丙氨酸在总游离氨基酸含量的占比以螺蛳肉组最高(21.43%),其次是猪骨组(16.78%)、螺蛳汤组(15.76%)和鸡架组(11.54%),而香辛料组最低(8.24%)。综上,原料中鸡架、猪骨和螺蛳肉是螺蛳汤中呈味氨基酸的主要来源,且氨基酸中谷氨酸、天冬氨酸、丙氨酸和甘氨酸是赋予螺蛳汤鲜甜滋味特性的重要呈味氨基酸。

2.5 原料对螺蛳汤中核苷酸的影响

由表 7 可知,螺蛳汤组中 5'-GMP 含量最高(213.03 mg/L),其次是 5'-AMP(174.44 mg/L)和 Hx(148.52 mg/L),而 5'-IMP(58.22 mg/L)和 5'-CMP(6.49 mg/L)含量较低。肉类加工过程中核苷酸之间、核苷酸与氨基酸之间会产生协同增效作用,对整体风味的提升具有重要作用^[39]。核苷酸中 5'-GMP 和 5'-IMP 是螺蛳汤组中重要的鲜味核苷酸,且两者

表 5 原料对螺蛳汤挥发性风味物质香气活性值的影响

Table 5 Effect of raw materials on the aroma activity values of volatile flavor compounds in Luosi soup

化合物	阈值($\mu\text{g}/\text{kg}$)	气味描述	OAV				
			螺蛳肉组	猪骨组	鸡架组	香辛料组	螺蛳汤组
己醛	4.5 ^[10]	清香、青草味、果香 ^[10]	1.12 \pm 0.41	0.00 \pm 0.00	10.68 \pm 6.36	0.00 \pm 0.00	0.00 \pm 0.00
壬醛	1.1 ^[10]	油脂味、青草味 ^[10]	20.87 \pm 1.51	4.81 \pm 3.14	37.13 \pm 10.56	18.11 \pm 6.64	1.34 \pm 0.39
(Z)-2-癸烯醛	0.3 ^[21]	脂香、柑橘香 ^[21]	0.00 \pm 0.00	0.00 \pm 0.00	102.23 \pm 19.40	0.00 \pm 0.00	0.00 \pm 0.00
癸醛	2.0 ^[10]	蜡香、柑橘味、清香 ^[10]	24.32 \pm 1.30	1.40 \pm 0.19	0.00 \pm 0.00	0.00 \pm 0.00	0.25 \pm 0.06
(E,E)-2,4-癸二烯醛	0.07 ^[10]	脂肪香、鸡肉香 ^[10]	0.00 \pm 0.00	0.00 \pm 0.00	455.43 \pm 54.71	0.00 \pm 0.00	0.00 \pm 0.00
4-甲氧基苯甲醛	47.0 ^[21]	茴香、脂香 ^[21]	0.00 \pm 0.00	0.00 \pm 0.00	0.00 \pm 0.00	13.37 \pm 2.19	0.19 \pm 0.06
桉叶油醇	1.3 ^[21]	樟脑香、清凉味 ^[21]	0.00 \pm 0.00	0.00 \pm 0.00	0.00 \pm 0.00	203.57 \pm 31.61	1.28 \pm 0.22
芳樟醇	6.0 ^[21]	花香、薰衣草香、柠檬香 ^[21]	0.00 \pm 0.00	0.00 \pm 0.00	0.00 \pm 0.00	10.72 \pm 2.04	0.12 \pm 0.03
1-辛烯-3-醇	1.0 ^[21]	蘑菇味、脂香 ^[21]	0.00 \pm 0.00	2.33 \pm 0.48	42.33 \pm 7.67	0.00 \pm 0.00	0.00 \pm 0.00
D-柠檬烯	10.0 ^[21]	柠檬香、薄荷香 ^[21]	4.45 \pm 0.44	0.00 \pm 0.00	0.00 \pm 0.00	49.03 \pm 3.42	0.28 \pm 0.16
草蒿脑	6.0 ^[21]	茴香香气 ^[21]	0.62 \pm 0.12	0.00 \pm 0.00	0.00 \pm 0.00	0.00 \pm 0.00	1.64 \pm 0.52
茴香脑	15.0 ^[21]	茴香、甜味、甘草香味 ^[21]	0.00 \pm 0.00	1.23 \pm 0.80	3.13 \pm 0.43	34.81 \pm 3.62	6.29 \pm 0.64
2-戊基呋喃	6.0 ^[21]	泥土味、黄油味 ^[21]	0.00 \pm 0.00	0.00 \pm 0.00	3.66 \pm 0.30	0.00 \pm 0.00	0.00 \pm 0.00

表6 原料对螺蛳汤中游离氨基酸的影响
Table 6 Effect of raw materials on free amino acids in Luosi soup

氨基酸	含量(μg/mL)				
	螺蛳肉组	猪骨组	鸡架组	香辛料组	螺蛳汤组
鲜味氨基酸					
天冬氨酸(Asp)	14.10±0.23 ^b	4.43±0.11 ^d	20.61±0.02 ^a	3.88±0.03 ^e	9.85±0.03 ^c
谷氨酸(Glu)	28.20±0.12 ^d	31.25±0.36 ^c	71.92±0.29 ^a	4.54±0.01 ^e	45.11±0.21 ^b
甜味氨基酸					
苏氨酸(Thr)*	6.82±0.01 ^c	6.51±0.07 ^d	14.00±0.06 ^a	1.86±0.03 ^e	8.06±0.06 ^b
丝氨酸(Ser)	24.76±0.11 ^b	6.58±0.07 ^e	33.82±0.11 ^a	8.49±0.04 ^d	17.64±0.07 ^c
甘氨酸(Gly)	8.94±0.01 ^d	28.77±0.28 ^b	31.58±0.07 ^a	1.33±0.06 ^e	22.43±0.11 ^c
丙氨酸(Ala)	60.72±0.19 ^a	34.26±0.32 ^d	42.66±0.15 ^b	5.75±0.04 ^e	39.62±0.21 ^c
脯氨酸(Pro)	7.64±0.02 ^c	10.88±0.29 ^b	12.46±0.59 ^a	11.91±0.19 ^{ab}	12.35±0.73 ^a
苦味氨基酸					
缬氨酸(Val)*	11.42±0.03 ^a	10.30±0.29 ^b	8.00±0.36 ^d	2.82±0.10 ^e	9.29±0.44 ^c
蛋氨酸(Met)*	5.17±0.03 ^a	2.31±0.04 ^d	4.73±0.13 ^b	N.D.	3.49±0.36 ^c
异亮氨酸(Ile)*	9.10±0.11 ^a	6.22±0.06 ^c	6.30±0.06 ^b	1.50±0.04 ^e	6.09±0.02 ^d
亮氨酸(Leu)*	24.29±0.28 ^a	11.17±0.13 ^d	13.21±0.09 ^b	1.80±0.04 ^e	12.67±0.03 ^c
酪氨酸(Tyr)	11.82±0.02 ^a	5.42±0.07 ^d	9.01±0.06 ^b	2.42±0.63 ^e	7.23±0.14 ^c
苯丙氨酸(Phe)*	10.78±0.20 ^a	5.92±0.08 ^d	8.05±0.04 ^b	N.D.	6.71±0.03 ^c
组氨酸(His)	21.75±0.04 ^c	22.91±0.27 ^b	57.74±0.57 ^a	7.82±0.16 ^d	23.53±0.33 ^b
赖氨酸(Lys)*	26.70±0.08 ^a	10.57±0.57 ^d	20.16±0.09 ^b	1.70±0.06 ^e	13.75±0.36 ^c
精氨酸(Arg)	11.06±0.04 ^d	6.62±0.09 ^e	15.27±0.13 ^a	13.94±0.13 ^b	13.56±0.06 ^c
Σ鲜味氨基酸	42.30±0.09 ^c	35.68±0.41 ^d	92.54±0.27 ^a	8.41±0.02 ^e	54.97±0.21 ^b
Σ甜味氨基酸	108.89±0.09 ^b	86.99±0.88 ^d	134.50±0.94 ^a	29.33±0.05 ^e	100.11±1.12 ^c
Σ苦味氨基酸	132.09±0.53 ^b	81.45±1.40 ^d	142.47±1.16 ^a	32.00±0.75 ^e	96.32±0.21 ^c
Σ游离氨基酸	283.28±0.09 ^b	204.12±2.66 ^d	369.52±2.34 ^a	69.74±0.71 ^e	251.40±1.18 ^c

注: *表示必需氨基酸, N.D.表示未检出。

表7 原料对螺蛳汤中核苷酸的影响
Table 7 Effect of raw materials on nucleotides of Luosi soup

核苷酸	含量(mg/L)				
	螺蛳肉组	猪骨组	鸡架组	香辛料组	螺蛳汤组
5'-CMP	8.83±0.16 ^a	8.36±0.43 ^b	0.93±0.09 ^c	N.D.	6.49±0.16 ^b
Hx	30.78±0.31 ^d	190.44±1.43 ^b	242.58±0.3 ^a	N.D.	148.52±0.27 ^c
5'-GMP	740.38±4.98 ^a	68.04±0.36 ^d	101.88±4.68 ^c	9.12±0.04 ^e	213.03±8.67 ^b
5'-IMP	N.D.	40.94±0.67 ^c	147.45±4.43 ^b	N.D.	58.22±0.43 ^b
5'-AMP	346.13±4.78 ^a	67.92±1.32 ^d	89.82±0.92 ^c	N.D.	174.44±3.64 ^b

注: 5'-CMP表示5'-胞苷单磷酸, Hx表示次黄嘌呤核苷酸, 5'-GMP表示5'-鸟苷单磷酸, 5'-IMP表示5'-肌苷单磷酸, 5'-AMP表示5'-腺苷单磷酸。

与适量的鲜味氨基酸(如谷氨酸)结合可呈现出更强烈的鲜味。螺蛳汤组中5'-GMP(213.03 mg/L)和5'-AMP含量(174.44 mg/L)显著低于螺蛳肉组(740.38 mg/L和346.13 mg/L)($P<0.05$), 鸡架组中的5'-IMP含量(147.45 mg/L)显著高于螺蛳汤(58.22 mg/L)($P<0.05$), 这证明螺蛳肉和鸡架组是螺蛳汤中5'-GMP、5'-AMP和5'-IMP的主要来源。5'-IMP是肉类原料中的三磷酸腺苷(ATP)在ATP酶、脱氨酶和肌激酶的作用下脱氢, 反应生成5'-IMP^[40]。5'-AMP和5'-IMP具有协同作用, 使螺蛳汤产生鲜味。螺蛳汤中Hx含量(148.52 mg/L)显著高于螺蛳肉组(30.78 mg/L), 但显著低于鸡架组(242.58 mg/L)和猪骨组(190.44 mg/L)($P<0.05$), 这说明原料中鸡架和猪骨是螺蛳汤中Hx的主要来源,

且高温炖煮加快了两者中Hx的释放。综上, 原料中螺蛳肉、鸡架和猪骨是螺蛳汤中5'-GMP、5'-IMP和5'-AMP等鲜味核苷酸的主要来源, 而香辛料对核苷酸的贡献则较小, 这为螺蛳汤味道鲜美的滋味特性进一步提供部分科学依据。

3 结论

本文采用光谱技术、气相色谱、液相色谱和气相色谱-质谱联用技术探讨了不同原料对螺蛳汤风味形成的影响。结果显示, 不同原料对螺蛳汤中水溶性蛋白含量、颗粒平均粒径和颗粒聚集度指数有显著影响, 但原料对螺蛳汤的Zeta电位无显著影响。猪骨和鸡架是螺蛳汤中棕榈酸、油酸、亚油酸和花生四烯酸等主要脂肪酸的重要来源。GC-MS结果表明, 螺蛳汤中共鉴定出35种挥发性风味化合物, 包括醛类

10 种、醇类 4 种、烯烃 11 种、烷烃 1 种、酮类 2 种、酯类 2 种、醚类 2 种、酚类 3 种。根据香气活度值,螺蛳汤中的主要特征香气化合物为茴香脑、壬醛、桉叶油醇和草蒿脑。氨基酸分析结果显示,螺蛳汤的氨基酸组成全面,其中谷氨酸、天冬氨酸、甘氨酸和丙氨酸是螺蛳汤中重要的呈味氨基酸;核苷酸中 5'-GMP、5'-AMP 和 5'-IMP 是螺蛳汤主要的鲜味核苷酸。呈味氨基酸和呈味核苷酸共同构成螺蛳汤的特征滋味。螺蛳肉、鸡架和猪骨是螺蛳汤中呈味氨基酸和呈味核苷酸的主要来源。本研究结果可为后续进一步深入研究螺蛳汤加工过程中风味物质调控提供参考与借鉴。

© The Author(s) 2025. 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] 关海宁,徐筱君,孙薇婷,等.肉汤中特征风味体系的形成机理及分析方法研究进展[J].*肉类研究*,2021,35(1):66-73. [GUAN Haining, XU Xiaojun, SUN Weiting, et al. Recent progress in the formation mechanism and analytical methods for characteristic flavor compounds in broth[J]. *Meat Research*, 2021, 35(1): 66-73.]
- [2] HOU M, LIU D, XU X, et al. Effect of postmortem aging time on flavor profile of stewed pork rib broth[J]. *International Journal of Food Properties*, 2018, 21(1): 1449-1462.
- [3] 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.
- [4] QIN Y X, CAI D D, ZHANG D N, et al. Characteristics of volatile flavor components in stewed meat and meat broths prepared with repeatedly used broths containing star anise[J]. *Journal of Food Measurement and Characterization*, 2019, 14(1): 557-572.
- [5] GORNALL A G, BARDAWILL C J, DAVID M M. Determination of serum proteins by means of the biuret reaction[J]. *Journal of Biological Chemistry*, 1949, 177(2): 751-766.
- [6] DUAN W, LIANG L, HUANG Y, et al. Effect of ginger on chemical composition, physical and sensory characteristics of chicken soup[J]. *Foods*, 2021, 10(7): 1456.
- [7] BLIGH E G, DYER W J. A rapid method of total lipid extraction and purification[J]. *Canadian Journal of Biochemistry and Physiology*, 1959, 37: 911-917.
- [8] LI Y, FAN D, ZHAO Y, et al. Effects of quercetin and cinnamaldehyde on the nutrient release from beef into soup during stewing process[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2020, 131: 109712.
- [9] JIN C L, GAO C Q, WANG Q, et al. Effects of pioglitazone hydrochloride and vitamin e on meat quality, antioxidant status and fatty acid profiles in finishing pigs[J]. *Meat Science*, 2018, 145: 340-346.
- [10] FU H X, FENG Q H, QIU D, et al. Improving the flavor of tilapia fish head soup by adding lipid oxidation products and cysteine[J]. *Food Chemistry*, 2023, 429: 136976.
- [11] JIA X, DENG Q, YANG Y, et al. Unraveling of the aroma-active compounds in virgin camellia oil (*Camellia oleifera* Abel) using gas chromatography-mass spectrometry-olfactometry, aroma recombination, and omission studies[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2021, 69(32): 9043-9055.
- [12] HUANG X H, ZHANG Y Y, ZHU M, et al. The effects of different extraction methods on the aroma fingerprint, recombination and visualization of clam soup[J]. *Food Function*, 2021, 12(4): 1626-1638.
- [13] 李素,周慧敏,赵冰,等.卤汤牛肉贮藏过程中挥发性风味物质分析[J].*食品科学*,2020,41(8):203-209. [LI Su, ZHOU Huimin, ZHAO Bing, et al. Analysis of volatile flavor compounds in Stewed beef with broth during storage[J]. *Food Science*, 2020, 41(8): 203-209.]
- [14] WANG F, GUO D, WEN P, et al. Insight into the aroma and taste enrichment pattern in Chinese traditional braised soup based on HS-SPME-GC-MS and HS-GC-IMS[J]. *Food Bioscience*, 2024, 60: 104345.
- [15] MENG Q, ZHOU J, GAO D, et al. Desorption of nutrients and flavor compounds formation during the cooking of bone soup[J]. *Food Control*, 2022, 132: 108408.
- [16] CHEN Y, LUO L, FENG P, et al. Effective and repeatable chromatographic separation of 5 nucleotides in infant formula milk powder by ion-pair high-performance liquid chromatography-ultraviolet[J]. *Journal of Dairy Science*, 2022, 105(4): 2840-2848.
- [17] AASLYNG M D, MEINERT L. Meat flavour in pork and beef-from animal to meal[J]. *Meat Science*, 2017, 132: 112-117.
- [18] JIA Rong, YIN Xiaoyan, YANG Yucai, et al. Effect of different salt additions on the taste and flavor-related compounds in chicken soup[J]. *Frontier in Nutrition*, 2024, 11: 1368789.
- [19] WILLIAMS P. Nutritional composition of red meat[J]. *Nutrition & Dietetics*, 2007, 64(4): S113-S119.
- [20] PRABSANGOB N, BENJAKUL S. Effect of tea catechin derivatives on stability of soybean oil/tea seed oil blend and oxidative stability of fried fish crackers during storage[J]. *Food Science and Biotechnology*, 2018, 28(3): 679-689.
- [21] ZHONG Qiang, XING Zheng, TENG Fei, et al. Evaluation of the aroma and taste contributions of star anise (*I. verum* hook. f.) in braised duck leg via flavor omics combined with multivariate statistics[J]. *Food Research International*, 2024, 184: 114209.
- [22] DUAN M C, XU L G, GU T T, et al. Investigation into the characteristic volatile flavor of old duck[J]. *Food Chemistry: X*, 2023, 20: 100899.
- [23] SHAKOOR A, ZHANG C, XIE J, et al. Maillard reaction chemistry in formation of critical intermediates and flavour compounds and their antioxidant properties[J]. *Food Chemistry*, 2022, 393: 133416.
- [24] HUANG Q, DONG K, WANG Q, et al. Changes in volatile flavor of yak meat during oxidation based on multi-omics[J]. *Food Chemistry*, 2022, 371: 131103.
- [25] 秦艳秀,蔡丹丹,樊玉霞,等.香叶循环煮制对肉汤挥发性风味的影响研究[J].*食品工业科技*,2019,40(20):271-277,284. [QIN Yanxiu, CAI Dandan, FAN Yuxia, et al. Effect of repeated cooking with bay leaf on volatile flavor components of meat broth[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2019, 40(20): 271-277,284.]
- [26] SOHAIL A, AL-DALALI S, WANG J, et al. Aroma compounds identified in cooked meat: A review[J]. *Food Research International*, 2022, 157: 111385.
- [27] FENG Y, CAI Y, FU X, et al. Comparison of aroma-active compounds in broiler broth and native chicken broth by aroma ex-

- tract dilution analysis (AEDA), odor activity value (OAV) and omission experiment[J]. *Food Chemistry*, 2018, 265: 274–280.
- [28] LU K, LIU L, ZI J, et al. New insights from flavoromics on different heating methods of traditional fermented shrimp paste: The volatile components and metabolic pathways[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2022, 168: 113880.
- [29] CAPUTO L, NAZZARO F, SOUZA L F, et al. *Laurus nobilis*: Composition of essential oil and its biological activities[J]. *Molecules*, 2017, 22(6): 930.
- [30] WANG Y, SONG H, ZHANG Y, et al. Determination of aroma compounds in pork broth produced by different processing methods[J]. *Flavour and Fragrance Journal*, 2016, 31(4): 319–328.
- [31] OLIVARES A, NAVARRO J L, FLORES M. Effect of fat content on aroma generation during processing of dry fermented sausages[J]. *Meat Science*, 2011, 87(3): 264–273.
- [32] ROSARIO R, RAMOÑ C. Volatile profiles of dry-cured meat products from three different Iberian×Duroc genotypes[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2007, 55: 1923–1931.
- [33] 刘源, 周光宏, 王锡昌, 等. 顶空固相萃取气质联用检测八角挥发性风味成分[J]. *中国调味品*, 2007(1): 67–69. [LIU Yuan, ZHOU Guanghong, WANG Xichang, et al. Determination of volatile flavor components in *Illicium verum* Hook. f. by head space phase microextraction on coupled to gas chromatography-mass spectrometry[J]. *China Condiment*, 2007(1): 67–69.]
- [34] SUN L, CHEN J, LI M, 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.
- [35] QIN J, DU C, YAO X, et al. Enrichment of taste and aroma compounds in braised soup during repeated stewing of chicken meat[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2022, 168: 113926.
- [36] 杨平, 王瑶, 宋焕禄, 等. 不同熬制条件下猪肉汤中滋味成分的变化[J]. *中国食品学报*, 2018, 18(12): 247–260. [YANG P, WANG Y, SONG H L, et al. Analysis of non-volatile flavor components in pork broth with different cooking conditions[J]. *Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology*, 2018, 18(12): 247–260.]
- [37] 王曜, 陈舜胜. 野生与养殖克氏原螯虾游离氨基酸的组成及比较研究[J]. *食品科学*, 2014, 35(11): 269–273. [WANG Y, CHEN S S. Comparative composition of free amino acids in wild and cultured *Procambarus clarkii*[J]. *Food Science*, 2014, 35(11): 269–273.]
- [38] 赵冰, 张玉玉, 王守伟, 等. 不同区域水对宁夏手抓羊肉滋味特性的影响[J]. *食品科学*, 2022, 43(8): 52–58. [ZHAO B, ZHANG Y Y, WANG S W, et al. Effect of cooking water on taste characteristics of Ningxia hand-grasped mutton[J]. *Food Science*, 2022, 43(8): 52–58.]
- [39] 陈丽花, 张健, 陈培琼, 等. 反相高效液相色谱法测定中国对虾肉中呈味核苷酸[J]. *食品科学*, 2009, 30(10): 52–58. [CHEN L H, ZHANG J, CHEN P Q, et al. Determination of five flavor nucleotides in *Penaeus chinensis* meat by RP-HPLC[J]. *Food Science*, 2009, 30(10): 52–58.]
- [40] ZHAO B, SUN B G, WANG S W, et al. Effect of different cooking water on flavor characteristics of mutton soup[J]. *Food Science & Nutrition*, 2021, 9: 6047–6059.