

天麻鸡汤的加工工艺优化及品质分析

姜浩, 区少碧, 陈美荷, 黎依琳, 李湘銮, 仇全雷, 赵文红, 白卫东

Optimization of Processing Techniques and Quality Analysis of *Gastrodia elata* Chicken Soup

JIANG Hao, OU Shaobi, CHEN Meihe, LI Yilin, LI Xiangluan, QIU Quanlei, ZHAO Wenhong, and BAI Weidong

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2024060449>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于主成分分析和HS-SPME-GC-MS技术综合评价不同品种芒果品质特性

Comprehensive Evaluation of Quality Characteristics of Different Mango Varieties Based on Principal Component Analysis and HS-SPME-GC-MS Technology

食品工业科技. 2023, 44(3): 297-306 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2022040221>

基于HS-SPME-GC-MS比较分析不同原料对葱香油风味品质的影响

Comparative Analysis of Effects of Different Raw Materials on Flavour Quality of Scallion Oil Based on HS-SPME-GC-MS

食品工业科技. 2025, 46(2): 250-257 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2024020116>

天麻多糖酶解工艺优化、结构表征及其抗氧化活性分析

Optimization of Enzymatic Hydrolysis Process, Structural Characterization and Antioxidant Activity Analysis of *Gastrodia elata* Polysaccharide

食品工业科技. 2025, 46(4): 205-214 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2024030247>

乳酸菌发酵天麻口服液工艺优化

Optimization of Fermentation Processing of *Gastrodia elata* Oral Liquid with Lactic Acid Bacteria

食品工业科技. 2023, 44(15): 193-202 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2022090033>

乌红天麻干燥工艺研究

Drying Process of Wuhong *Gastrodia*

食品工业科技. 2021, 42(5): 166-169,176 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2020040119>

基于HS-SPME-GC-MS分析不同茶树品种晒红茶的香气成分

Analysis of the Aroma Composition of Sun-dried Black Tea Samples Processed by Different Varieties Based on HS-SPME-GC-MS

食品工业科技. 2023, 44(7): 260-268 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2022040295>



关注微信公众号，获得更多资讯信息

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. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2024060449

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. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2024060449

· 工艺技术 ·

天麻鸡汤的加工工艺优化及品质分析

姜 浩^{1,2,3}, 区少碧¹, 陈美荷¹, 黎依琳¹, 李湘銮¹, 仇全雷⁴, 赵文红^{1,2,3,*}, 白卫东^{1,2,3,*}

(1.仲恺农业工程学院轻工食品学院广东省岭南特色食品科学与技术重点实验室, 广东广州 510225;
2.现代农业工程创新研究院, 广东广州 510225;
3.农村农业部岭南特色食品绿色加工与智能制造重点实验室, 广东广州 510225;
4.西藏波密高原藏天麻产业开发有限公司, 西藏林芝 860000)

摘要:为探究不同加工工艺对天麻鸡汤品质的影响, 本研究通过单因素实验和正交试验, 运用理化指标分析、游离氨基酸分析及顶空固相萃取-气相色谱-质谱 (Headspace Solid-Phase Microextraction-Gas Chromatography-Mass Spectrometry, HS-SPME-GC-MS) 技术, 结合差异显著性分析和偏最小二乘判别分析 (OPLS-DA), 对天麻的加工工艺进行了优化, 并全面分析了普通鸡汤与天麻鸡汤在营养成分和风味方面的差异。结果表明, 天麻鸡汤的最佳加工工艺为天麻添加量 0.9%, 鸡翅根和水 (肉:水=1:2) 添加量 97.6%, 灰枣添加量 0.9%, 食用盐添加量 0.4%, 炖煮时间 60 min, 该条件下汤体呈浅黄色, 感官评分为 85.57±2.82 分。与普通鸡汤相比, 天麻鸡汤的总抗氧化能力 (0.5719 ± 0.0028 mmol/L)、还原糖 (0.2387 ± 0.0407 mg/mL)、蛋白质 (6.5369 ± 0.3234 mg/mL) 和白度 (55.14 ± 0.86) 得到显著提升 ($P<0.05$) ; 其呈味氨基酸含量 (30.47 ± 3.54 mg/100 mL) 也显著高于普通鸡汤 ($P<0.05$), 特别是天冬氨酸和谷氨酸为天麻鸡汤提供鲜味。GC-MS 结果显示, 相较于普通鸡汤, 天麻鸡汤中挥发性风味物质成分更为丰富, 新增 6 种 OAV>1 的天麻特征挥发性物质, 表明天麻的添加能有效提升丰富鸡汤的风味和营养。因此, 本研究优化天麻鸡汤的生产工艺, 探究不同加工工艺对天麻鸡汤品质和风味的影响规律, 为天麻预制菜产品的开发提供了理论依据。

关键词:天麻鸡汤, 加工工艺, 品质分析, 游离氨基酸, HS-SPME-GC-MS

中图分类号:TS972.16

文献标识码: B

文章编号:1002-0306(2025)10-0237-13

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2024060449

本文网刊:



Optimization of Processing Techniques and Quality Analysis of *Gastrodia elata* Chicken Soup

JIANG Hao^{1,2,3}, OU Shaobi¹, CHEN Meihe¹, LI Yilin¹, LI Xiangluan¹, QIU Quanlei⁴,
ZHAO Wenhong^{1,2,3}, BAI Weidong^{1,2,3,*}

(1.Guangdong Provincial Key Laboratory of Lingnan Specialty Food Science and Technology Academy of Contemporary,
College of Light Industry and Food Engineering, Zhongkai University of Agriculture and Engineering,
Guangzhou 510225, China;

2.Institute of Modern Agricultural Engineering Innovation, Guangzhou 510225, China;

3.Agricultural Engineering Innovations Key Laboratory of Green Processing and Intelligent Manufacturing of Lingnan
Specialty Food, Ministry of Rural Agriculture, Guangzhou 510225, China;

4.Tibet Bomi Plateau Tibetan Gastrodia Industry Development Co., Ltd., Nyingchi 860000, China)

Abstract: To explore the effect of different processing technologies on the quality of *Gastrodia elata* chicken soup (GECS),

收稿日期: 2024-07-02

基金项目: 藏天麻产地加工及产品深度开发技术研究与应用 (2023B03J1307); 广东省驻镇帮镇扶村农村科技特派员项目 (KTP20240971, KTP20210194);
广东特色家禽冰鲜屠宰品质保证及其精深加工关键技术研究 (2024ZDJS005); 西藏自治区藏药材产业集群 (农办计财 [2025]2 号)。

作者简介: 姜浩 (1989-), 男, 博士, 讲师, 研究方向: 天然产物的研究与开发, E-mail: jianghao423@yeah.net。

* 通信作者: 白卫东 (1967-), 男, 博士, 教授, 研究方向: 食品生物化学, E-mail: whitebai2001@163.com。

this study employed single-factor and orthogonal optimization experiments, utilizing physicochemical indicators, free amino acid analysis, and headspace solid-phase microextraction-gas chromatography-mass spectrometry (HS-SPME-GC-MS). Additionally, significance analysis and partial least squares discriminant analysis (OPLS-DA) were utilized. The processing technology for GECS was optimized while analyzing the nutritional and flavor differences between common chicken soup and GECS. The optimized conditions were as follows: 0.9% *Gastrodia elata*, 97.6% chicken wings and water (meat to water ratio of 1:2), 0.4% salt, 0.9% *Ziziphus jujuba* Mill. After 60 min of simmering, GECS exhibited a light-yellow color with a sensory score of 85.57 ± 2.82 . Compared to common chicken soup, the GECS showed a significant improvement in the total antioxidant capacity (0.5719 ± 0.0028 mmol/L), reducing sugar (0.2387 ± 0.0407 mg/mL), protein content (6.5369 ± 0.3234 mg/mL), and whiteness (55.14 ± 0.86) ($P < 0.05$). Additionally, the levels of free amino acids, particularly aspartic acid and glutamic acid, were significantly higher than those found in common chicken soup ($P < 0.05$). Besides, the taste amino acid content (30.47 ± 3.54 mg/100 mL) was significantly higher than common chicken soup ($P < 0.05$), particularly aspartate and glutamic acid, which contributed to the umami taste of GECS. GC-MS results indicated that GECS contained more abundant volatile flavor components than common chicken soup. Six new volatile compounds with OAV>1 were uniquely identified in GECS. Results showed that chicken soup flavor and nutritional content were effectively improved after adding *Gastrodia elata* in GECS. This study optimized the production technology of GECS, while providing theoretical support for developing the semi-cooked food of *Gastrodia elata*.

Key words: *Gastrodia elata* chicken soup; processing technology; quality analysis; free amino acids; HS-SPME-GC-MS

天麻(*Gastrodia elata*)是兰科植物中一种常见且广泛应用于药食同源领域的干制块茎,特别是在中医药文化中具有重要地位^[1]。根据《神农本草经》记载,天麻被称为“赤箭”,具备调理脾胃健康、促进长寿延年的功效^[2]。药理学研究显示,天麻具有神经系统保护作用,包括促进安眠、抗癫痫和增强学习记忆能力;同时还能通过促进血液流动、降低血压和疏通血管等机制来保护心血管系统,对高血压、动脉硬化等心血管疾病具有预防和治疗效果^[3]。然而,由于天麻中存在“马尿臭”不良气味,限制了消费者对其接受度。为克服这一问题,将天麻加工成药膳是一个有效的途径。通过与其他原辅料的合理配伍和功效互补,天麻药膳不仅能够减少不良气味,还能增加营养价值,在人体吸收和健康维护方面更有益处,并展示了广阔的市场前景;然而,目前关于天麻药膳的文献报道较少。

鸡肉,作为一种备受喜爱的食材,因其丰富的蛋白质含量和相对较低的胆固醇水平而成为当下人们追求营养均衡和低热量饮食理想选择^[4]。事实上,蛋白质是维持正常生理功能、促进机体生长发育不可或缺的重要组成部分^[5]。因此,在众多肉类食品中,鸡肉凭借这些优势脱颖而出。在众多的鸡肉加工方法中,炖汤是一种最受欢迎的烹饪方式,火候掌握和炖煮时间对汤品品质具有重要影响^[6]。长时间炖煮可以充分释放鸡肉中的营养成分,使鸡汤口感浓郁、营养价值丰富^[7-8]。炖煮鸡汤还富含人体生长发育必需的蛋白质、氨基酸等营养物质,并在提高人体免疫力和降血压等方面起到积极作用^[9]。将天麻与鸡汤结合炖煮,则可以更好地发挥它们之间相互作用以增强天麻药理效果,并进一步提升天麻药用价值和滋补的功效。

因此,本文采用天麻、鸡肉、灰枣和食用盐等材料制备天麻鸡汤(*Gastrodia elata* Chicken Soup,

GECS)。以感官评价和总抗氧化能力为指标,进行单因素实验和正交试验,进一步优化天麻鸡汤的最佳配料比例;同时,测定总抗氧化能力、还原糖、可溶性蛋白质、白度以及游离氨基酸,并结合顶空固相萃取-气相色谱-质谱(Headspace Solid-Phase Micro-extraction-Gas Chromatography-Mass Spectrometry, HS-SPME-GC-MS)技术,对比分析天麻鸡汤与普通鸡汤在营养成分和风味方面的差异。本研究旨在提升天麻鸡汤的口感和营养价值,为天麻预制菜的开发提供理论支持。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

干制藏天麻 西藏波密高原藏天麻产业开发有限公司;鸡翅根、灰枣、食盐、生姜 均为市售;无水葡萄糖、磺基水杨酸 上海源叶生物科技有限公司;没食子酸、无水碳酸钠、福林酚 上海麦克林生化科技股份有限公司;3,5-二硝基水杨酸溶液 飞净生物科技有限公司;二辛可宁酸(Bicinchoninic Acid, BCA)蛋白定量试剂盒 上海雅酶生物医药科技有限公司;总抗氧化能力(Total Antioxidant Capacity, T-AOC)测试盒 南京建成生物技术有限公司。

Synergy H1 多功能酶标仪 美国伯腾仪器有限公司;TDL-80-2C 低速台式离心机 上海安亭科学仪器厂;SQP 分析天平 赛多利斯科学仪器(北京)有限公司;CR-400 色彩色差计 柯尼卡美能达办公系统(中国)有限公司;电、汽两用快速蒸柜 山东省博兴县赋康厨房设备厂;LA8080 高速氨基酸分析仪

本科学仪器(北京)有限公司;890/5977B 型气相色谱-质谱联用仪 美国 Agilent 科技有限公司;DB-WAX 毛细管柱($30.0\text{ m} \times 250\text{ }\mu\text{m} \times 0.25\text{ }\mu\text{m}$) 海元析仪器有限公司;57328-U $50/30\text{ }\mu\text{m}$ DVB/CAR/PDMS 萃取头、57330-USPME 手动进样手柄 美国 Supe-

lco 公司。

1.2 实验方法

1.2.1 天麻鸡汤的制备 将去核的灰枣切成约 0.3 cm 粗细均匀的片状; 生姜削去表皮, 切成约 0.5 cm 厚度的片状。鸡翅根洗净后切块, 每 100 g 鸡翅根加入 5 g 姜片, 焯水处理后除去血水并冲洗干净。将经过处理的鸡翅根放入炖盅内, 加入天麻、灰枣、姜片和水, 并置于蒸柜内进行炖煮。炖煮完成后, 添加适量食用盐调味即可。

1.2.2 天麻鸡汤工艺优化单因素实验设计 为了探究天麻添加量、肉水比、灰枣添加量、食用盐添加量以及炖煮时间对天麻鸡汤感官评分及总抗氧化能力的影响, 进行单因素实验。

1.2.2.1 天麻添加量的确定 固定鸡翅根和水占总重量为 97.6%, 且肉水比为 1:3, 灰枣添加量为 0.9%, 食用盐添加量为 0.4%, 炖煮时间为 60 min, 考察天麻添加量(0.3%、0.6%、0.9%、1.2%、1.5%)对天麻鸡汤的感官评分及总抗氧化能力的影响, 并确定天麻添加量。

1.2.2.2 肉水比的确定 固定天麻添加量为 0.9%, 鸡翅根和水占总重量为 97.6%, 灰枣添加量为 0.9%, 食用盐添加量为 0.4%, 炖煮时间为 60 min, 考察肉水比(1:2、1:3、1:4、1:5、1:6)对天麻鸡汤的感官评分及总抗氧化能力的影响, 并确定肉水比。

1.2.2.3 灰枣添加量的确定 固定天麻添加量为 0.9%, 鸡翅根和水占总重量为 97.6%, 且肉水比为 1:3, 食用盐添加量为 0.4%, 炖煮时间为 60 min, 考察灰枣添加量(0.3%、0.6%、0.9%、1.2%、1.5%)对天麻鸡汤的感官评分及总抗氧化能力的影响, 并确定灰枣添加量。

1.2.2.4 食用盐添加量的确定 固定天麻添加量为 0.9%, 鸡翅根和水占总重量为 97.6%, 且肉水比为 1:3, 灰枣添加量为 0.9%, 炖煮时间为 60 min, 考察食用盐添加量(0.2%、0.4%、0.6%、0.8% 和 1.0%)对天麻鸡汤的感官评分及总抗氧化能力的影响, 并确定食用盐添加量。

1.2.2.5 炖煮时间的确定 固定天麻添加量为 0.9%, 鸡翅根和水占总重量为 97.6%, 且肉水比为 1:3, 灰枣添加量为 0.9%, 食用盐添加量为 0.4%, 考察炖煮时间(30、45、60、75、90 min)对天麻鸡汤的感官评分及总抗氧化能力的影响, 并确定炖煮时间。

表 1 正交试验设计因素水平表

Table 1 Horizontal table of orthogonal experimental design factors

水平	A炖煮时间(min)	B天麻添加量(%)	C肉水比	D食用盐添加量(%)
1	45	0.9	1:2	0.2
2	60	1.2	1:3	0.4
3	75	1.5	1:4	0.6

1.2.3 正交试验 根据单因素实验的结果, 选择炖煮时间(A)、天麻添加量(B)、肉水比(C)、盐添加量(D)作为自变量, 并进行四因素三水平的正交试验(表 1)。

1.2.4 感官评定 为确保评价的准确性和可靠性, 选取 15 名具备良好感官能力和丰富经验的食品专业学生组成感官小组, 并制定天麻鸡汤的感官评价标准(表 2)。在评价前, 每位参评成员必须使用矿泉水进行漱口以消除口腔残留物对结果的影响。同时, 为保证评价的独立性和公正性, 明确规定每位成员独立完成样品的评价。通过上述措施, 可以确保天麻鸡汤的感官评价结果准确可靠, 并为优化其品质提供有力依据。

表 2 感官评价标准

Table 2 Criteria of sensory evaluation

项目	分值(分)	评分标准	得分(分)
色泽	25	金黄色	21~25
		黄色	16~20
		浅黄色或乳白色	11~15
		灰白色	0~10
形态	25	肉块形态完整, 汤汁澄清	21~25
		肉块形态尚佳, 汤汁有少许杂质	16~20
		肉块不完整, 汤汁杂质较多	11~15
滋味	25	肉块松散, 汤汁浑浊	0~10
		口感细腻, 无苦涩味	21~25
		口感一般, 轻微苦涩味	16~20
香气	25	口感清淡	11~15
		苦涩味重, 咸味重	0~10
		香味浓郁, 气味协调, 无异味	21~25
香气	25	肉香味和天麻味淡, 无异味	16~20
		肉香味和天麻味不协调, 稍有异味	11~15
		无香味, 有明显异味	0~10

1.2.5 总抗氧化能力测定 将 5 mL 样品置于 4 °C 条件下, 以 5000 r/min 的速度离心 10 min, 收集上清液备用。根据 T-AOC 试剂盒的操作步骤, 严格测定样品的总抗氧化能力(T-AOC), 以 y 轴为标准浓度, x 轴为吸光度, 得出回归方程 $y=-1.1214x+1.1262$, 决定系数 $R^2=0.9957$, 根据回归方程计算样品的总抗氧化能力。

1.2.6 还原糖含量测定 参考续建国等^[10]的方法, 采用 3,5-二硝基水杨酸法测定鸡汤中还原糖含量。取样品 5 mL, 在 4 °C 下以 5000 r/min 离心 10 min, 收集 0.5 mL 上清液并加入 15 mL 试管内。随后, 加入 2.5 mL 蒸馏水和 0.75 mL 3,5-二硝基水杨酸溶液, 充分混匀。将试管置于沸水浴中加热 5 min 后, 使用流水冷却至室温, 并用蒸馏水定容至 10 mL。在酶标板中加入 200 μL 溶液, 使用酶标仪于 540 nm 波长下测定样品吸光度。以 y 轴为还原糖含量, x 轴为吸光度, 绘制回归方程为 $y=3.4112x+0.0531$, 决定系数 $R^2=0.9971$, 计算样品的还原糖含量。

1.2.7 多酚测定 参照续建国等^[10] 福林酚法测定鸡汤中多酚含量。没食子酸母液: 精密称取没食子酸 17 mg, 加入少量蒸馏水使其溶解, 再倒入 100 mL 容量瓶中定容。10% 碳酸氢钠溶液: 精确称取 10.00 g 碳酸氢钠粉末定溶于 100 mL 容量瓶中, 取样品 5 mL 在 4 ℃ 下 5000 r/min 条件下离心 10 min, 然后再取上清液。离心后的样品取 11 mL 加入至 25 mL 容量瓶内, 加入 1.5 mL 福林酚试剂, 混匀。在 5 min 内加入 6 mL 10% 碳酸氢钠溶液, 加蒸馏水定容。使用移液枪吸取 200 μL 反应后的样品溶液, 并在 765 nm 处测定吸光度。以 y 轴为多酚含量, x 轴为吸光度, 根据标准曲线的回归方程 $y=0.0444x+0.0573$, 决定系数 $R^2=0.9993$, 计算样品的多酚含量。

1.2.8 水溶性蛋白含量测定 严格按照 BCA 蛋白定量试剂盒的操作步骤进行测定。显色工作液需要将试剂 A 和试剂 B 按照 50:1 的体积等比例充分混匀。取样品 5 mL 在 4 ℃ 下以 5000 r/min 离心 10 min, 收集上清液并稀释十倍。取 20 μL 稀释液置于酶标板中, 加入 200 μL 工作液, 在 37 ℃ 下反应 30 min。反应结束后, 将酶标板冷却至室温, 使用酶标仪在 595 nm 波长下测定样品吸光度。以 y 轴为水溶性蛋白含量, x 轴为吸光度, 得到标准曲线的回归方程 $y=1.0142x+0.2229$, 决定系数 $R^2=0.9951$, 计算样品的水溶性蛋白质含量。

1.2.9 白度测定 取 30 mL 样品, 用干净的双层纱布进行过滤, 其滤液在 4 ℃, 5000 r/min 条件下离心 10 min, 取上清液 5 mL 用于后续白度测定。为了确保一致的照射条件, 在进行白度测定前需要对样品进行统一处理, 并使用色彩色差计进行测量。测定后可以得到样品的 L^* 、 a^* 、 b^* 值, 从而进行对比分析并确

定天麻鸡汤的色泽特点, 根据式(1)计算样品的白度。

$$W = 100 - \sqrt{(100 - L^*)^2 + b^{*2} + a^{*2}} \quad \text{式 (1)}$$

式中: W 表示样品的白度; L^* 值表示透明度 ($L^*=0$ 为黑色, $L^*=100$ 为白色), 其值越大, 表示鸡汤的颜色越白; a^* 值和 b^* 值分别表示红色和黄色程度。

1.2.10 游离氨基酸含量测定 参照赵培静等^[11] 测定游离氨基酸的方法, 并稍作修改。使用 8% 磺基水杨酸, 按 1:3 的比例与天麻鸡汤样液混合, 在 4000 r/min 离心 10 min 除去蛋白质, 取上清液并用 0.22 μm 水膜过滤, 取适量样液后使用高速全自动氨基酸分析仪测定, 测定程序如表 3 所示。

根据式(2)计算样品的滋味活性值:

$$TAV = \frac{C_1}{C_2} \quad \text{式 (2)}$$

式中: TAV 为样品中呈味化合物的滋味活性值; C_1 为呈味化合物的含量, mg/100 g; C_2 为呈味化合物的滋味阈值, mg/100 g。

1.2.11 挥发性风味物质的测定 参照赵培静等^[11] 测定挥发性风味物质的方法, 并稍作修改。

顶空固相微萃取 (HS-SPME) 条件: 取 (7.0±0.1) mL 样品于顶空瓶中, 加入 2.0 g NaCl 和 10 μL 7.50 mol/mL 2,4,6-三甲基吡啶, 50 ℃ 下平衡 20 min。采用 57328-U 50/30 μm DVB/CAR/PDMS 萃取头萃取, 在 60 ℃ 下萃取 50 min。随后将萃取头插入 GC-MS 进样口, 于 250 ℃ 解析 5 min。

GC 条件: 采用毛细管 DB-WAX 柱 (30 m×0.25 mm×0.25 μm)。以氦气为载气, 流速为 0.8 mL/min, 40 ℃ 保持 3 min, 接着以 3 ℃/min 的速度上

表 3 高速氨基酸自动分析仪检测程序

Table 3 High-speed amino acid analyzer detection program

时间(min)	B1 (%)	B2 (%)	B3 (%)	B4 (%)	B5 (%)	B6 (%)	流速(mL/min)	温度(℃)	R1 (%)	R2 (%)	R3 (%)	流速(mL/min)
0.0	100	0	0	0	0	0			50	50	0	
2.5	100	0	0	0	0	0			0	0	0	
2.6	0	100	0	0	0	0			0	0	0	
4.3	0	100	0	0	0	0			0	0	0	
4.4	0	0	100	0	0	0			0	0	0	
12.8	0	0	100	0	0	0			0	0	0	
12.9	0	0	0	100	0	0			0	0	0	
27.0	0	0	0	100	0	0			0	0	0	
27.1	0	0	0	0	0	100	0.40	57	0	0	0	0.35
32.0	0	0	0	0	0	0			50	50	0	
32.1	0	0	0	0	0	0			0	0	100	
33.0	0	0	0	0	0	100			0	0	0	
33.1	0	0	0	0	0	0			0	0	0	
34.0	0	0	0	0	0	0			0	0	0	
34.1	100	0	0	0	0	0			0	0	0	
37.0	0	0	0	0	0	0			0	0	100	
37.1	0	0	0	0	0	0			50	50	0	
53.0	100	0	0	0	0	0			0	0	0	

注: B1 为 12% 乙醇-2% 水合柠檬酸缓冲水溶液; B2 为 2%—水合柠檬酸-1.5% 乙醇缓冲水溶液; B3 为 2%—水合柠檬酸-0.3% 乙醇缓冲水溶液; B4 为 2%—水合柠檬酸-0.5% 苯酚缓冲水溶液; B5 和 R3 为 5% 乙醇; B6 为 8% 乙醇-0.7% 氢氧化钠缓冲水溶液; R1 为 苯三酮溶液 (2% 苯三酮; 98% 1-甲氧基-2-丙醇); R2 为 25% 1-甲氧基-2-丙醇、20% 乙酸锂二水合物和 10% 乙酸缓冲水溶液。

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。

质谱(MS)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。

定性和半定量分析: 挥发性风味物质经 NIST 2008 质谱库进行检索, 筛选匹配度大于 80% 的风味物质。通过样品挥发性物质的峰面积与内标的峰面积计算各个风味物质的相对含量。

气味活性值是指鸡汤中活性化合物浓度与挥发性物质阈值的比值, 根据式(3)计算样品的气味活性值:

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

式中: OAV 为样品中风味化合物的气味活性值; C 为风味化合物的浓度, mg/kg; T 为风味化合物的阈值浓度, mg/kg。

1.3 数据处理

采用 Microsoft Office Excel 365 软件对实验数据进行处理; 运用 IBM SPSS Statistics 23 统计软件进行单因素方差分析, 并通过 Duncan 法和 T 检验法进行显著性分析; 利用 Origin 2021 绘图; 采用 SIMCA 进行正交偏最小二乘法判别分析(Orthogonal Partial least Squares-Discriminant Analysis, OPLS-DA)。每次实验结果取三次实验的平均值。

2 结果与分析

2.1 单因素实验结果

2.1.1 天麻添加量对天麻鸡汤品质的影响 适量添加天麻可提升其药理作用, 增添汤品的香气、滋味及营养价值^[12]。结果显示, 随着天麻添加量的增加, 天麻鸡汤的感官评分和总抗氧化能力分别呈现先增后减、逐渐上升的趋势, 并且其色泽、滋味和香气也表现出先增后减的变化(图 1A 和图 1B)。在 0.3%~0.9% 的添加量范围内, 口感一般, 并且肉香和天麻味道较淡, 因此感官评分相对较低。但天麻添加量为 0.9% 的总抗氧化能力显著高于 0.3% 添加量($P < 0.05$), 为(0.5721±0.0237) mmol/L, 这归因于天麻中的抗氧化成分, 如酚类化合物和多糖等, 可能与鸡汤中的其他抗氧化物质产生协同作用, 从而增强整体的抗氧化能力^[13]。当天麻添加量达 1.2% 时, 其感官评分显著高于其他组别($P < 0.05$), 为(76.33±2.50)分, 并且抗氧化能力保持高水平; 此时, 天麻鸡汤呈现出金黄色、无苦涩味、风味协调。这主要因为适量添加天麻所带来的独特气味, 能够提升鸡汤的香气, 并且其中富含的氨基酸有助于增加鸡汤鲜美的滋味。天麻中有一种特殊气味, 略似马尿^[14]。然而, 当天麻添加量达到 1.5% 时, 天麻的“马尿”不良气味开始显现, 影响整体风味。这表明天麻的添加量并非越多越好, 过量的天麻会破坏鸡汤原本的风味。因此, 选择

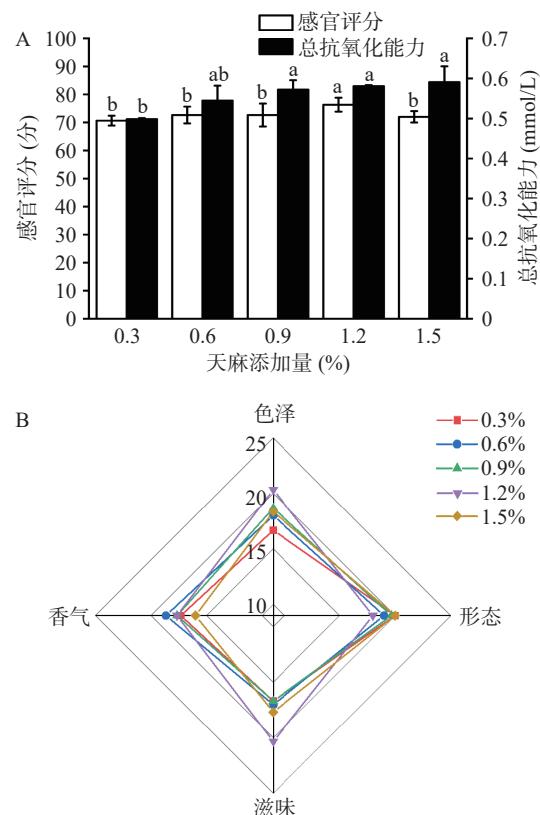


图 1 天麻添加量对天麻鸡汤品质的影响

Fig.1 Effects of the addition of *Gastrodia elata* on the quality of GECS

注: 不同小写字母表示差异显著($P < 0.05$), 图 2~图 5 同。

0.9%、1.2%、1.5% 的天麻添加量进行深入研究。

2.1.2 肉水比对天麻鸡汤品质的影响 合理控制肉水比, 可以确保天麻鸡汤滋味醇厚、风味鲜美等。随着肉水比的增大, 天麻鸡汤的感官评分逐渐下降, 其色泽呈现先增后减, 滋味和香气则表现逐渐下降的趋势, 而形态的变化相较平缓(图 2A 和图 2B)。肉水比在 1:2~1:4 范围内, 天麻鸡汤滋味较为醇厚, 呈现金黄色, 其感官评分变化不大, 无明显差异($P > 0.05$)。在肉水比为 1:2 时, 感官评分达到最大值(80.00±2.62)分, 其色泽、滋味和香气表现较佳。这主要归因于汤中的鸡肉含量较多, 其中溶解的蛋白质和脂肪含量较高, 使汤的色泽呈现金黄色, 同时加热促进鸡肉中的氨基酸和脂肪等风味物质释放, 提升天麻鸡汤的整体风味。随着肉水比的变化, 肉香味减弱和口感变淡, 肉水比 1:5 和 1:6 的感官评分显著低于 1:2~1:4 的感官评分($P < 0.05$)。此外, 肉水比对天麻鸡汤的总抗氧化能力也具有显著影响, 呈现先降后升的趋势。该研究结果与周淑仪^[15]的相似, 其发现随着水分的增加, 鸡汤中的抗氧化活性呈现双峰下降的变化趋势。这种变化可能与高浓度的蛋白质、多肽和氨基酸等抗氧化物质的直接参与有关, 影响整体抗氧化能力^[6]。综合考虑后选择肉水比 1:2、1:3、1:4 进行后续的实验。

2.1.3 灰枣添加量对天麻鸡汤品质的影响 在炖煮

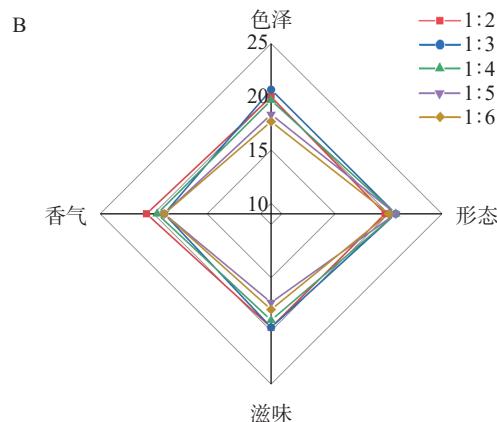
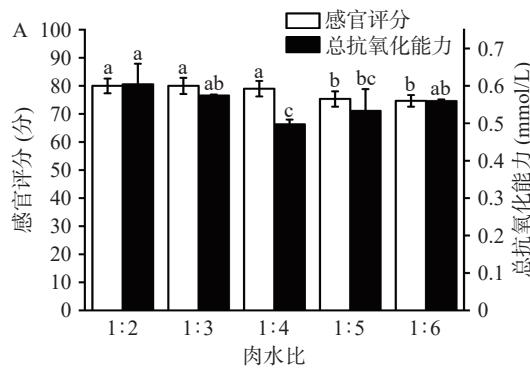


图2 肉水比对天麻鸡汤品质的影响

Fig.2 Effects of the meat-to-water ratio on the quality of GECS

天麻鸡汤时加入适量灰枣,可以提升鸡汤的风味。随着灰枣添加量的增加,天麻鸡汤的感官评分呈现钟形曲线,其感官属性大致呈现先增后减的变化趋势(图3A、图3B)。当灰枣添加量增加到0.9%时,天麻鸡汤的感官评分最显著($P<0.05$),其色泽呈现黄色,滋味醇厚并且风味协调、无异味,这是因为灰枣的甜味和汤本身的咸味、鲜味达到最佳平衡,并且其释放的香味使得天麻鸡汤的风味更具有吸引力。但过量的灰枣添加量会掩盖天麻和鸡肉自身的风味,导致味道失衡,影响整体口感,因此感官评分下降。抗氧化能力随着灰枣添加量的增加而逐渐上升,且灰枣添加量为1.5%时,抗氧化能力达到最大值(0.6871 ± 0.0321)mmol/L,显著高于其他组($P<0.05$),这可能是因为灰枣多糖溶于鸡汤,鸡汤表现出较强的抗氧化效果^[16]。综合考虑,选择灰枣添加量0.9%作为较佳添加量。

2.1.4 食用盐添加量对天麻鸡汤品质的影响 适量添加食用盐可以提升天麻鸡汤的鲜美口感。随着食用盐添加量增加,天麻鸡汤的感官评分呈钟形曲线,滋味呈现双峰增长的变化趋势,而对形态影响较小(图4A、图4B)。当食用盐添加量为0.4%时,天麻鸡汤咸淡适中,感官评分最高为(81.00 ± 3.18)分,但其风味表现较为一般。而食用盐添加量超过0.6%时,汤汁咸味过重并出现轻微苦涩味,使得整体滋味失衡,导致天麻鸡汤的感官评分下降。这表明适量的食用盐添加量(0.4%)可以显著增强肉汤的风味。

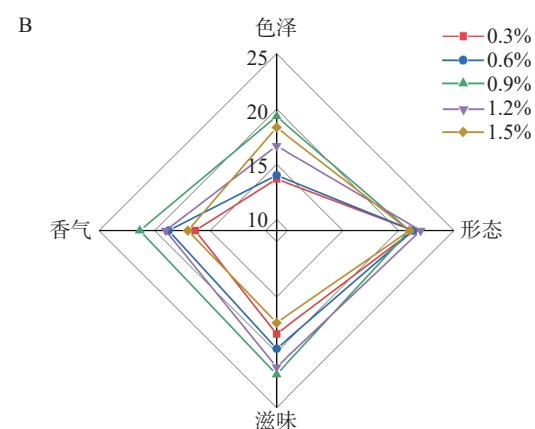
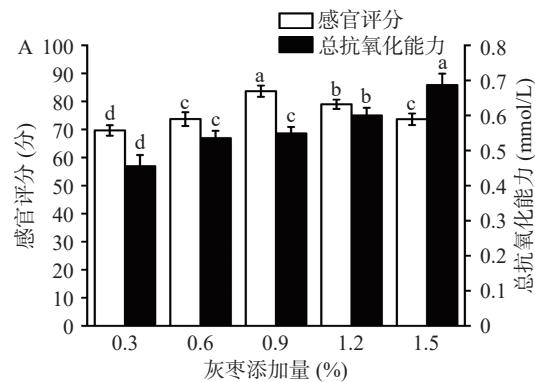


图3 灰枣添加量对天麻鸡汤品质的影响

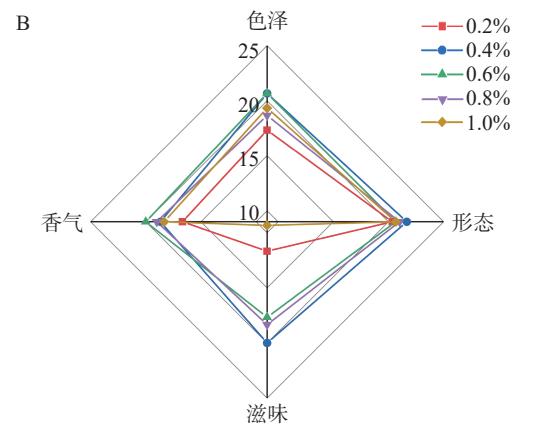
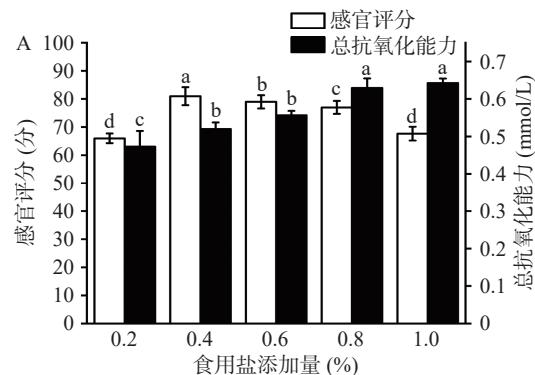
Fig.3 Effects of the addition of *Ziziphus jujuba* Mill. on the quality of GECS

图4 食盐添加量对天麻鸡汤品质的影响

Fig.4 Effects of the addition of salt on the quality of GECS
($P<0.05$),但过高(高于0.6%)的添加量则会破坏其滋味。此外,天麻鸡汤的总抗氧化能力随着食用盐添

加量的增加而呈上升趋势(图 5A)。当食用盐添加量为 0.8% 和 1% 时, 天麻鸡汤的总抗氧化能力分别为 0.6293 ± 0.0256 、 0.6426 ± 0.0121 mmol/L, 其总抗氧化能力显著高于 0.2%、0.4% 和 0.6% 添加量($P < 0.05$)。这可能是由于食用盐促进肉汤中活性物质的渗出, 从而提高鸡汤的总抗氧化能力^[17]。因此, 选用 0.2%、0.4%、0.6% 作为适宜食用盐添加量继续后续实验。

2.1.5 炖煮时间对天麻鸡汤品质的影响 炖煮时间对于鸡肉滋味、天麻药效及汤品整体风味至关重要^[18]。天麻鸡汤的感官评分和总抗氧化能力呈钟形曲线, 并且其色泽和香气逐渐提升(图 5A 和图 5B)。当炖煮时间达到 60 min 时, 其感官评分显著高于 30 min 和 45 min 实验组($P < 0.05$), 达到(77.00 ± 3.10)分。同时, 炖煮 60 min 天麻鸡汤的色泽较佳, 并保持适中的浓稠度, 融合天麻与鸡汤鲜美的滋味, 香气适中而不失层次感。这 60 min 的炖煮使得鸡汤在各感官属性上达到平衡, 既能充分释放食材的风味, 又避免了过长炖煮导致的负面影响。然而, 长时间(75 min 和 90 min)炖煮使鸡肉松散, 汤汁浑浊, 降低评分, 但感官评分与 60 min 实验组无显著差异($P > 0.05$), 这表明长时间的炖煮导致汤中的部分味道过于浓烈, 但对整体的口感不造成明显影响。此外, 当炖煮时间为 45 min 时, 总抗氧化能力达到峰值为(0.5888 ± 0.0143) mmol/L。随着炖煮时间的增加总抗氧化能力逐渐下降, 但 60、75、90 min 实验组与 45 min 实验组相比无显著差异($P > 0.05$), 这可能

是因为长时间高温炖煮导致天麻中的天麻素、巴利森苷等活性物质发生降解或转化, 并且脂肪氧化产生的自由基会破坏天麻中的抗氧化成分^[19]。因而选用炖煮时间 45、60、75 min 进行后续试验。

2.2 正交试验结果

在单因素实验的基础上, 筛选出炖煮时间(A)、天麻添加量(B)、肉水比(C)与食用盐添加量(D)为正交试验因素, 通过四因素三水平的正交试验探究不同加工条件对天麻鸡汤品质的影响, 进一步优化天麻鸡汤的加工条件。

由正交试验结果分析表(表 4)中极差 R 值可知, 影响天麻鸡汤感官评分的四个因素主次关系依次为肉水比(C)>食用盐添加量(D)>天麻添加量(B)>炖煮时间(A)。因此, 肉水比和食用盐添加量是影响天麻鸡汤感官评分的主要因素。根据正交试验结果得出试验 3 在感官评分上表现最优, 但通过极差分析得到天麻鸡汤感官评分最优组合是 A₂B₁C₁D₂, 这一组合的感官评分为(85.57 ± 2.82)分; 另一方面, 研究还发现影响天麻鸡汤总抗氧化能力的四个因素主次关系依次为食用盐添加量(D)>天麻添加量(B)>炖煮时间(A)>肉水比(C)。因此, 食用盐添加量与天麻添加量是影响天麻鸡汤总抗氧化能力的主要因素。根据正交试验结果得出试验 6 在总抗氧化能力方面表现最优, 但通过极差分析获得的最优组合为 A₃B₃C₁D₃, 达到(0.5719 ± 0.0028) mmol/L。

表 4 正交试验结果分析表

Table 4 Analysis table of orthogonal test results

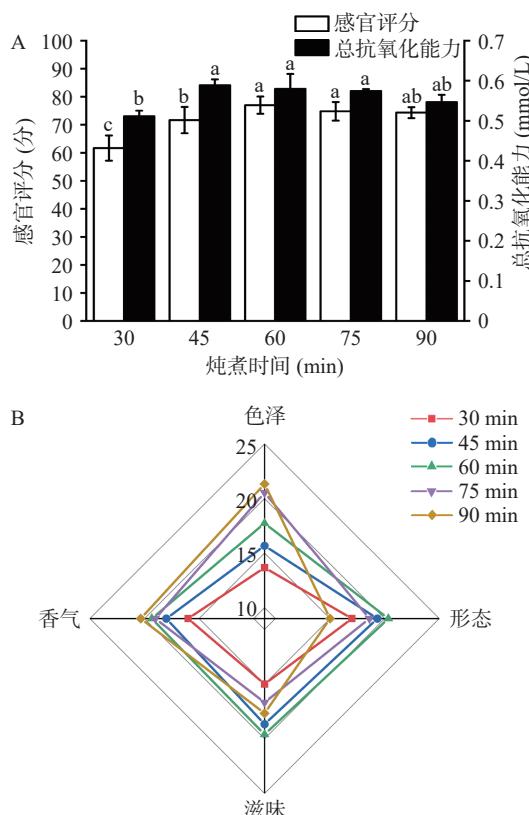


图 5 炖煮时间对天麻鸡汤品质的影响

Fig.5 Effects of stewing time on the quality of GECS

注: k_1 、 k_2 、 k_3 为各水平对应的感官评分之和的平均值; R 为 k_1 、 k_2 、 k_3 之间的极差; k_1^* 、 k_2^* 、 k_3^* 为各水平对应的总抗氧化能力之和的平均值; R^* 为 k_1^* 、 k_2^* 、 k_3^* 之间的极差。

在食品开发中, 感官评分直接反映消费者对产品的接受度和喜好度, 是影响产品市场表现的重要因素。天麻鸡汤的感官评分是对其色泽、香气、滋味、形态等方面综合评价, 在优化产品的过程中, 感官

评分通常被作为最优先考虑的指标。因此,选取感官评分最优组合 A₂B₁C₁D₂, 即以天麻添加量 0.9%、肉水比 1:2、灰枣添加量 0.9%、食用盐添加量 0.4%、炖煮时间 60 min 制得天麻鸡汤, 进行后续的对比试验。

2.3 天麻鸡汤品质分析

2.3.1 理化指标分析 天麻作为一种具有生物活性的草药, 其富含的还原糖、蛋白质、多糖、多酚等具有改善睡眠、抗氧化、抗炎等多种生物活性作用^[20], 在改善人体健康方面扮演着重要角色^[21]。为进一步探究普通鸡汤和天麻鸡汤在营养价值以及消费者接受度方面的区别, 对两者的总抗氧化能力、还原糖、可溶性蛋白质及白度等指标进行测定。

结果表明, 天麻鸡汤各项理化指标均显著高于普通鸡汤(表 5), 具有较佳的食用价值。具体而言, 天麻鸡汤的总抗氧化能力显著高于普通鸡汤($P<0.05$), 并且提升了 11.44%。这主要归功于天麻中活性成分的贡献, 特别是天麻多糖和多酚。另外, 天麻鸡汤中还原糖含量具有明显优势, 达到(0.2387±0.0407) mg/mL。有研究发现天麻多糖中含有 97.97% 葡萄糖和 0.43% 半乳糖等具有还原性的糖类, 这些还原糖通过提供电子参与氧化还原反应^[22-23], 从而发挥抗氧化作用^[24]。同时, 天麻中的多酚通过其抗氧化活性, 有效清除自由基, 增强了鸡汤的整体抗氧化能力。此外, 天麻鸡汤的蛋白质含量显著高于普通鸡汤($P<0.05$), 为(6.5369±0.3234) mg/mL。有研究表明, 高温炖煮后部分蛋白质会被水解为肽链和游离氨基酸, 这些物质具有抗氧化活性, 并且增加天麻鸡汤的风味^[25]。因此, 天麻本身所含还原糖和蛋白质与其抗氧化能力呈正相关关系, 在营养和保健方面也表现出显著优越性, 并且天麻可丰富鸡汤的口感。

表 5 普通鸡汤与天麻鸡汤理化指标分析表
Table 5 Analysis table of physical and chemical indexes of common chicken soup and GECS

项目	普通鸡汤	天麻鸡汤
总抗氧化能力(mmol/L)	0.5056±0.0304 ^b	0.5719±0.0028 ^a
还原糖含量(mg/mL)	0.1611±0.0139 ^b	0.2387±0.0407 ^a
多酚含量(mg/mL)	9.1334±1.4936 ^b	10.0818±1.9740 ^a
可溶性蛋白质含量(mg/mL)	5.9096±0.1198 ^b	6.5369±0.3234 ^a
白度	57.66±0.62 ^a	55.14±0.86 ^b

注: 同一行不同字母表明均值差异性显著($P<0.05$), 表6~表7同。

鸡汤的色泽对人的吸引力至关重要。白度是衡量物质中白色成分占比的指标, 用于评估物质的白色程度^[15]。自然而明亮的色泽能够刺激视觉感官, 引发条件反射, 从而增强食欲^[26]。通过对比可以发现, 添加天麻使得鸡汤呈现更加金黄的颜色。色泽的改善不仅增加了鸡汤的视觉吸引力, 也在一定程度上增强了消费者的食欲。因此, 天麻不仅提高了鸡汤的营养

价值, 还通过改善外观进一步增强了消费者对其的接受度。

2.3.2 游离氨基酸分析 天麻作为一种传统中药材, 含有丰富的氨基酸。游离氨基酸作为蛋白质的基本组成单位, 在生物体内具有多种重要功能, 包括参与细胞构建、组织修复、调节人体氮平衡、增强免疫力和健体补虚等。因此, 测定鸡汤中的游离氨基酸含量, 可以有效反映其营养价值^[27]。

研究结果表明, 天麻鸡汤中游离氨基酸种类及含量较高(表 6)。特别是呈味氨基酸, 如天冬氨酸((1.23±0.15) mg/100 mL)和谷氨酸((7.62±0.80) mg/100 mL), 其总含量显著高于普通鸡汤($P<0.05$), 增加天麻鸡汤的鲜味。此外, 尽管甜味、苦味和芳香族氨基酸的总含量差异不具有统计学意义($P>0.05$), 但其均高于普通鸡汤。在呈味氨基酸中, 天麻鸡汤的呈味氨基酸含量((30.47±3.54) mg/100 mL)显著($P<0.05$)高于普通鸡汤((28.55±1.97) mg/100 mL), 并且天麻鸡汤中的 F/T(37.27%)比值高于普通鸡汤的 F/T(29.3%)比值。因此, 天麻的添加提高了鸡汤的呈味氨基酸。

必需氨基酸含量是评价蛋白质营养价值的重要指标, 它们维持机体的氮平衡, 影响人类身体健康。从表 6 可得, 天麻鸡汤的必需氨基酸含量为(8.7±1.28) mg/100 mL, 高于普通鸡汤的必需氨基酸含量为(7.79±0.35) mg/100 mL, 但是两者无显著差异($P>0.05$)。此外, 天麻鸡汤中 E/T(22.21%)和 E/N(28.55%)比值均高于普通鸡汤的 E/T(21.43%)和 E/N(27.29%)。因此, 天麻鸡汤中的营养价值高于普通鸡汤。天麻鸡汤中特有的组氨酸也值得注意。组氨酸是一种重要的氨基酸, 参与神经系统调节, 并对机体保护起到积极作用^[28]。这一发现进一步证实了天麻鸡汤的营养价值和健康益处。因此, 天麻鸡汤中游离氨基酸不仅提升了鸡汤的整体风味, 使其口感更加浓郁, 同时也满足了健康饮食的需求。

2.3.3 挥发性风味物质分析 通过 HS-SPME-GC-MS 测定普通鸡汤和天麻鸡汤中挥发性风味种类和含量, 深入探究天麻的添加对鸡汤风味的影响。从表 7 可得, 天麻鸡汤中共测定 43 种挥发性风味物质, 其中醇类 15 种、醛类 11 种、烯类 3 种、酚类 3 种、酮类 3 种、烷烃类 1 种、酯类 1 种及其他类 6 种。相比之下, 对照组的普通鸡汤中共检测出 31 种挥发性风味物质, 其中醇类 11 种、醛类 8 种、烯类 1 种、酚类 2 种、酮类 2 种、烷烃类 1 种、酯类 1 种及其他类 5 种。研究发现, 天麻的添加不仅丰富了鸡汤的挥发性风味物质的种类, 还增加特定挥发性风味物质(如醇类和醛类)含量, 这可能是天麻中特有的芳香成分溶于鸡汤, 赋予鸡汤独特的天麻风味^[29]。

醇类物化合物主要通过脂质氧化反应及 strecker 降解反应产生^[30], 赋予鸡汤特有的风味, 包括青草味、花果味、蘑菇味和金属味等。庚醇、 β -松

表 6 普通鸡汤与天麻鸡汤游离氨基酸成分分析表
Table 6 Analysis table of free amino acids in common chicken soup and GECS

呈味特征	氨基酸种类		阈值 (mg/100 mL)	含量(mg/100 mL)		TAV值	
	英文缩写	中文名称		普通鸡汤	天麻鸡汤	普通鸡汤	天麻鸡汤
鲜味	Lys	赖氨酸	50	0.15±0.01 ^a	0.17±0.01 ^a	0.00±0.00 ^a	0.00±0.00 ^a
	Asp	天冬氨酸	100	0.41±0.04 ^b	1.23±0.15 ^a	0.00±0.00 ^b	0.01±0.00 ^a
	Glu	谷氨酸	30	4.39±0.70 ^b	7.62±0.80 ^a	0.15±0.02 ^b	0.25±0.03 ^a
	小计	—	—	4.95±0.75 ^b	9.02±0.96 ^a	0.15±0.02 ^b	0.27±0.03 ^a
甜味	Thr	酪氨酸	260	4.09±0.07 ^a	4.52±1.23 ^a	0.02±0.00 ^a	0.02±0.00 ^a
	Ala	丙氨酸	60	3.84±0.61 ^a	3.40±0.39 ^a	0.06±0.01 ^a	0.06±0.01 ^a
	Gly	甘氨酸	130	1.71±0.05 ^a	1.66±0.20 ^a	0.01±0.00 ^a	0.01±0.00 ^a
	Ser	丝氨酸	150	3.02±0.56 ^a	3.17±0.43 ^a	0.02±0.00 ^a	0.02±0.00 ^a
苦味	小计	—	—	12.66±1.29 ^a	12.75±2.25 ^a	0.11±0.01 ^a	0.11±0.02 ^a
	Tyr	酪氨酸	—	1.07±0.12 ^a	1.28±0.07 ^a	—	—
	Ile	异亮氨酸	90	0.48±0.06 ^a	0.60±0.06 ^a	0.01±0.00 ^a	0.01±0.00 ^a
	Leu	亮氨酸	190	0.86±0.10 ^a	0.89±0.09 ^a	0.00±0.00 ^a	0.00±0.00 ^a
无味	Phe	苯丙氨酸	90	0.94±0.11 ^a	1.08±0.06 ^a	0.01±0.00 ^a	0.01±0.00 ^a
	Val	缬氨酸	40	0.93±0.11 ^a	1.10±0.10 ^a	0.02±0.00 ^a	0.03±0.00 ^a
	Arg	精氨酸	50	1.35±0.19 ^a	1.61±0.14 ^a	0.03±0.00 ^a	0.03±0.00 ^a
	His	组氨酸	—	0.58±0.06	—	—	—
总计	小计	—	—	6.70±0.81 ^a	8.42±0.65 ^a	0.07±0.01 ^a	0.08±0.01 ^a
	Met	蛋氨酸	30	0.35±0.04 ^a	0.34±0.04 ^a	0.01±0.00 ^a	0.01±0.00 ^a
	Cys	半胱氨酸	—	0.25±0.01 ^a	0.18±0.05 ^a	—	—
	Pro	脯氨酸	300	12.51±1.98 ^a	9.74±1.51 ^a	0.04±0.01 ^a	0.03±0.01 ^a
无味	小计	—	—	14.05±2.14 ^a	11.34±1.66 ^a	0.06±0.01 ^a	0.06±0.01 ^a
	总计 TFAA(mg/100 mL)	—	—	36.34±3.29 ^a	39.17±4.44 ^a	0.40±0.06 ^a	0.52±0.06 ^a
	必需氨基酸 EAA(mg/100 mL)	—	—	7.79±0.35 ^a	8.70±1.28 ^a	—	—
	非必需氨基酸 NEAA(mg/100 mL)	—	—	10.65±0.07 ^a	14.60±1.36 ^a	—	—
呈味	呈味氨基酸 DAA(mg/100 mL)	—	—	28.55±1.97 ^b	30.47±3.54 ^a	—	—
	必需氨基酸/总氨基酸 E/T	—	—	21.43%	22.21%	—	—
	必需氨基酸/非必需氨基酸 E/N	—	—	27.29%	28.55%	—	—
	呈味氨基酸/总氨基酸 F/T	—	—	29.30%	37.27%	—	—

注: “—”为未查到阈值或未计算TAV值。EAA: 必需氨基酸(Thr+Val+Met+Ile+Leu+Phe+Lys); DAA: 呈味氨基酸(Asp+Glu+Gly+Ala+Tyr+Phe)。

表 7 普通鸡汤与天麻鸡汤挥发性风味物质成分分析表
Table 7 Analysis table of volatile flavor substances in common chicken soup and GECS

分类	编号	CAS号	中文名称	英文名称	含量(mg/kg)		OAV	
					普通鸡汤	天麻鸡汤	阈值*(mg/kg)	普通鸡汤
醇类	1	111-70-6	庚醇	1-Hydroxy	—	0.33±0.03	0.0054	—
	2	78-26-2	2-甲基-2-丙基-1,3-丙二醇	2-Methyl-2-propyl-1,3-propanediol	—	0.17±0.06	—	—
	3	109-59-1	2-异丙氧基乙醇	Ethanol,2-(1-methylethoxy)-	—	0.13±0.03	—	—
	4	138-87-4	β-松油醇	beta-Terpineol	—	0.23±0.06	6.0000	—
	5	106-24-1	香叶醇	Geraniol	13.51±0.54 ^a	14.83±0.76 ^a	0.0066	1351.00
	6	470-82-6	桉叶油醇	Cineole	4.56±0.52 ^a	4.59±0.85 ^a	0.0010	4560.00
	7	111-87-5	1-辛醇	1-Octanol	0.46±0.19 ^a	0.55±0.04 ^a	0.1258	3.54
	8	1117-61-9	D-香茅醇	6-Octen-1-ol,3,7-dimethyl-,(3R)-	1.69±0.21 ^a	1.41±0.21 ^a	0.0400	41.75
	9	626-93-7	2-己醇	2-Hexanol	0.25±0.18 ^a	0.15±0.07 ^a	0.0820	3.13
	10	71-41-0	1-戊醇	1-Pentanol	0.24±0.12 ^a	0.31±0.04 ^a	0.1500	1.60
	11	543-49-7	2-庚醇	2-Heptanol	0.53±0.05 ^a	0.63±0.10 ^a	0.0650	7.75
	12	3391-86-4	1-辛烯-3-醇	1-Octen-3-ol	1.32±0.31 ^a	1.55±0.15 ^a	0.0015	880.00
	13	78-70-6	芳樟醇	Linalool	3.31±0.69 ^a	3.08±0.28 ^a	0.0060	551.00
	14	562-74-3	4-萜烯醇	Terpinen-4-ol	0.64±0.06 ^b	0.76±0.03 ^a	1.2000	0.53
	15	98-55-5	α-松油醇	alpha-Terpineol	3.48±0.41 ^a	4.10±0.80 ^a	1.2000	2.90
	总醇				30.00±3.26 ^a	32.82±3.50 ^a	—	—

续表 7

分类	编号	CAS号	中文名称	英文名称	含量(mg/kg)		阈值*(mg/kg)	OAV	
					普通鸡汤	天麻鸡汤		普通鸡汤	天麻鸡汤
醛类	16	66-25-1	己醛	Hexanal	2.98±0.20 ^a	2.23±0.62 ^a	0.0500	59.60	44.60
	17	505-57-7	2-己烯醛	2-Hexenal	0.51±0.14 ^a	0.48±0.09 ^a	0.0300	17.00	16.00
	18	2548-87-0	反-2-辛烯醛	((E))-2-Octenal	0.57±0.18 ^a	0.90±0.23 ^a	0.0030	190.00	300.00
	19	100-52-7	苯甲醛	Benzaldehyde	0.6±0.08 ^b	0.93±0.07 ^a	0.7500	0.80	1.24
	20	122-78-1	苯乙醛	Phenylacetaldehyde	0.33±0.02 ^b	0.63±0.20 ^a	0.0060	33.00	63.00
	21	106-26-3	(Z)-3,7-二甲基-2,6-辛二烯醛	((Zz))-3,7-dimethylocta-2,6-dienal	10.24±1.69 ^a	10.47±1.58 ^a	0.0530	204.80	209.40
	22	141-27-5	(E)-3,7-二甲基-2,6-辛二烯醛	((E))-3,7-dimethyl-2,6-Octadienal	12.97±1.78 ^a	13.94±1.37 ^a	—	—	—
	23	2363-88-4	2,4-癸二烯醛	2,4-Decadienal	0.83±0.21 ^a	0.97±0.06 ^a	0.0003	2766.00	3233.00
	24	124-19-6	壬醛	1-Nonanal	—	0.0075±0.00	0.0011	—	6.82
	25	5392-40-5	柠檬醛	Citral	—	0.0086±0.00	0.0400	—	0.22
烯类	26	5779-95-3	3,5-二甲基苯甲醛	3,5-Dimethylbenzaldehyde	—	1.89±0.45	—	—	—
			总醛		29.02±4.29 ^a	32.46±2.34 ^a	—	—	—
	27	79-92-5	莰烯	Camphene	—	0.69±0.31	0.1800	—	3.83
	28	555-10-2	3-亚甲基-6-(1-甲基乙基)环己烯	3-methylene-6-(1-methylethyl)-Cyclohexene	—	0.92±0.52	0.0360	—	23.00
	29	138-86-3	双戊烯	Dipentene	0.28±0.09 ^a	0.48±0.09 ^a	0.2000	1.40	2.40
酚类			总烯		0.28±0.09 ^a	2.08±0.91 ^a	—	—	—
	30	128-37-0	2,6-二叔丁基对甲酚	2,6-Di-tert-butyl-4-methylphenol	15.67±0.28 ^a	5.67±1.30 ^b	1.0000	15.67	5.67
	31	96-76-4	2,4-二叔丁基苯酚	2,4-Di-tert-butylphenol	4.20±0.45 ^a	0.55±0.04 ^b	0.5000	8.40	1.10
	32	106-44-5	4-甲基苯酚	p-Cresol	—	0.46±0.18	0.0100	—	46.00
酮类			总酚		19.87±0.73 ^a	6.69±1.52 ^a	—	—	—
	33	111-13-7	仲辛酮	2-Octanone	—	0.30±0.12	0.0500	—	6.00
	34	110-93-0	甲基庚烯酮	6-Methyl-5-hepten-2-one	3.18±0.24 ^a	3.09±1.12 ^a	0.0680	45.00	44.00
	35	78-59-1	异佛尔酮	isophorone Isophorone	1.13±0.26 ^a	1.47±0.17 ^a	—	—	—
烷烃类			总酮		4.31±0.50 ^a	4.86±1.41 ^a	—	—	—
	36	74-98-6	丙烷	Propane	0.05±0.01 ^a	0.06±0.00 ^a	—	—	—
			总烃		0.05±0.01 ^a	0.06±0.00 ^a	—	—	—
酯类	37	105-87-3	乙酸香叶酯	Geranyl acetate	0.52±0.01 ^a	1.29±0.48 ^a	0.1500	3.47	8.60
			总酯		0.52±0.01 ^a	1.29±0.48 ^a	—	—	—
其他类	38	3777-69-3	2-正戊基呋喃	2-Pentylfuran	—	0.14±0.09	0.0050	—	14.00
	39	4229-91-8	2-正丙基呋喃	2-Propylfuran	0.36±0.10 ^b	0.57±0.06 ^a	0.5000	0.72	1.14
	40	108-47-4	2,4-二甲基吡啶	2,4-dimethylpyridine	3.3±0.37 ^a	3.59±0.57 ^a	—	—	—
	41	24295-03-2	2-乙酰基噻唑	2-Acetylthiazole	0.66±0.09 ^b	1.28±0.15 ^a	0.0030	220.00	426.00
	42	91-20-3	萘	Naphthalene	0.07±0.03 ^b	0.32±0.04 ^a	0.0060	7.00	32.00
	43	527-53-7	1,2,3,5-四甲基苯	Benzene,1,2,3,5-tetramethyl-	1.11±0.01 ^b	1.30±0.13 ^a	—	—	—
			总含量		5.51±0.59	7.19±1.03	—	—	—

注: GC-MS数据库识别鸡汤中挥发性化合物(结果表示为“平均值±标准差”);“—”表示未检出该物质、未查到阈值或未计算OAV值;*相对气味强度阈值数据主要来源于《化合物嗅觉阈值汇编》(原书第二版), ISBN: 978-7-03-058320-8。

油醇、2-异丙氧基乙醇和2-甲基-2-丙基-1,3-丙二醇仅在天麻鸡汤检测到,而普通鸡汤中未发现这四种物质,因此推测他们可能来源于天麻^[31-32]。其中,庚醇具有新鲜且轻淡的油脂气息,并带有酒香和辛辣味^[33],其OAV值为33(OAV>1),对天麻鸡汤挥发性风味物质的形成具有重要作用。1-辛烯-3-醇具有蘑菇香气,是亚油酸经催化转变形成的产物^[34],其在两组鸡汤中的OAV较高,是鸡汤中重要的挥发性风味物质;同时,天麻的添加增加了1-辛烯-3-醇的含量,但两组之间并不存在显著差异($P>0.05$)。D-香茅醇主要来源于枣类,被认为是枣类的风味特征之一,具有玫瑰花般迷人馥郁的香气。此外,4-萜烯醇具有胡

椒香、较淡的泥土香和陈腐的木材气息,天麻鸡汤中4-萜烯醇的含量((0.76±0.03) mg/kg)显著高于普通鸡汤((0.64±0.06) mg/kg)($P<0.05$)。同时,研究发现天麻中含有4-萜烯醇^[14],因此天麻的添加可以有效提高鸡汤中4-萜烯醇含量,促进鸡汤风味的提高。

醛类物质是一类阈值比较低的挥发性风味物质^[35]。天麻鸡汤中检测出壬醛和柠檬醛,可能源于天麻中的挥发性风味物质,分别具有蜜蜡花香气息和浓厚的柠檬香气^[36],并且壬醛的OAV值为6.82(OAV>1),是天麻鸡汤中关键风味物质,因此可赋予鸡汤特殊香气。苯乙醛主要存在于鸡肉中,并且在天麻中也含有较高浓度的苯乙醛,其表现出风信子香气^[14]。天

麻鸡汤中苯乙醛((0.63 ± 0.2) mg/kg)含量显著高于对照组((0.33 ± 0.02) mg/kg)($P<0.05$)。因此,苯乙醛增加可能是由于天麻中苯乙醛析出所致。己醛在天麻鸡汤中略有降低,但与普通鸡汤相比并无显著差异。己醛主要通过亚油酸氧化产生,是鸡汤中主要醛类风味物质,具有浓厚的水果和青草香气^[37]。此外,2,4-癸二烯醛是构成肉类特征香气的重要组成部分之一,呈强烈的鸡香和鸡油味^[38]。然而,天麻的添加并没有显著提高其含量。

在其它挥发性风味物质中,2-正丙基呋喃、2-乙酰基噻唑和萘具有较低的阈值,分别具有鱼肉香、爆玉米花香和花香味。天麻鸡汤中2-正丙基呋喃的含量((0.57±0.06) mg/kg)显著高于普通鸡汤((0.36±0.1) mg/kg)($P<0.05$),并且天麻鸡汤中2-正丙基呋喃的OAV值均大于1,但是2-正丙基呋喃在普通汤中的OAV值小于1。2-正丙基呋喃主要通过脂肪醛的热降解产生,并且苯丙氨酸也可促进2-正丙基呋喃形成^[39]。天麻的添加增加了苯丙氨酸含量,并提升了脂肪醛(如反-2-辛烯醛和2,4-癸二烯醛)的水平。萘的产生一方面源于加热反应,另一方面可能来自天麻原料的引入^[40]。从表7中可以发现天麻鸡汤中萘

的含量((0.32±0.04) mg/kg)显著高于普通鸡汤((0.07±0.03) mg/kg)($P<0.05$)。此外,天麻鸡汤中2-乙酰基噻唑含量((1.28±0.15) mg/kg)也显著高于普通鸡汤((0.66±0.09) mg/kg)($P<0.05$)。

相比于普通鸡汤，天麻鸡汤中还检测出莰烯、3-亚甲基-6-(1-甲基乙基)环己烯、4-甲基苯酚、仲辛酮等挥发性风味物质。其中，莰烯具有刺激性气味^[41]；4-甲基苯酚感官描述为窖泥臭、皮革臭、焦皮臭、动物臭^[42]；而仲辛酮则带有奶酪和蘑菇的香气^[43]，有助于增加天麻鸡汤风味。因此，天麻的添加不仅可以提高鸡汤的风味，同时也更好地保留鸡汤原有的风味。

2.3.4 多元统计分析 基于上述普通鸡汤和天麻鸡

汤的比对结果进行 OPLS-DA 分析(图 6), 图 6A 显示了普通鸡汤和天麻鸡汤的聚类结果。普通鸡汤位于第一、四象限, 天麻鸡汤位于第二、三象限, 分布区域不重叠, 表明天麻的添加对鸡汤品质和风味的影响存在较大相关性。为了解天麻鸡汤和普通鸡汤的差异情况, 采用载荷图进行分析。由图 6B 可得, 添加天麻能够促进营养成分和风味物质的变化, 并且还原糖、蛋白质、谷氨酸、天冬氨酸、庚醇、双戊烯、2-乙酰基噻唑、2-正戊基呋喃和莰烯等物质具有较强的

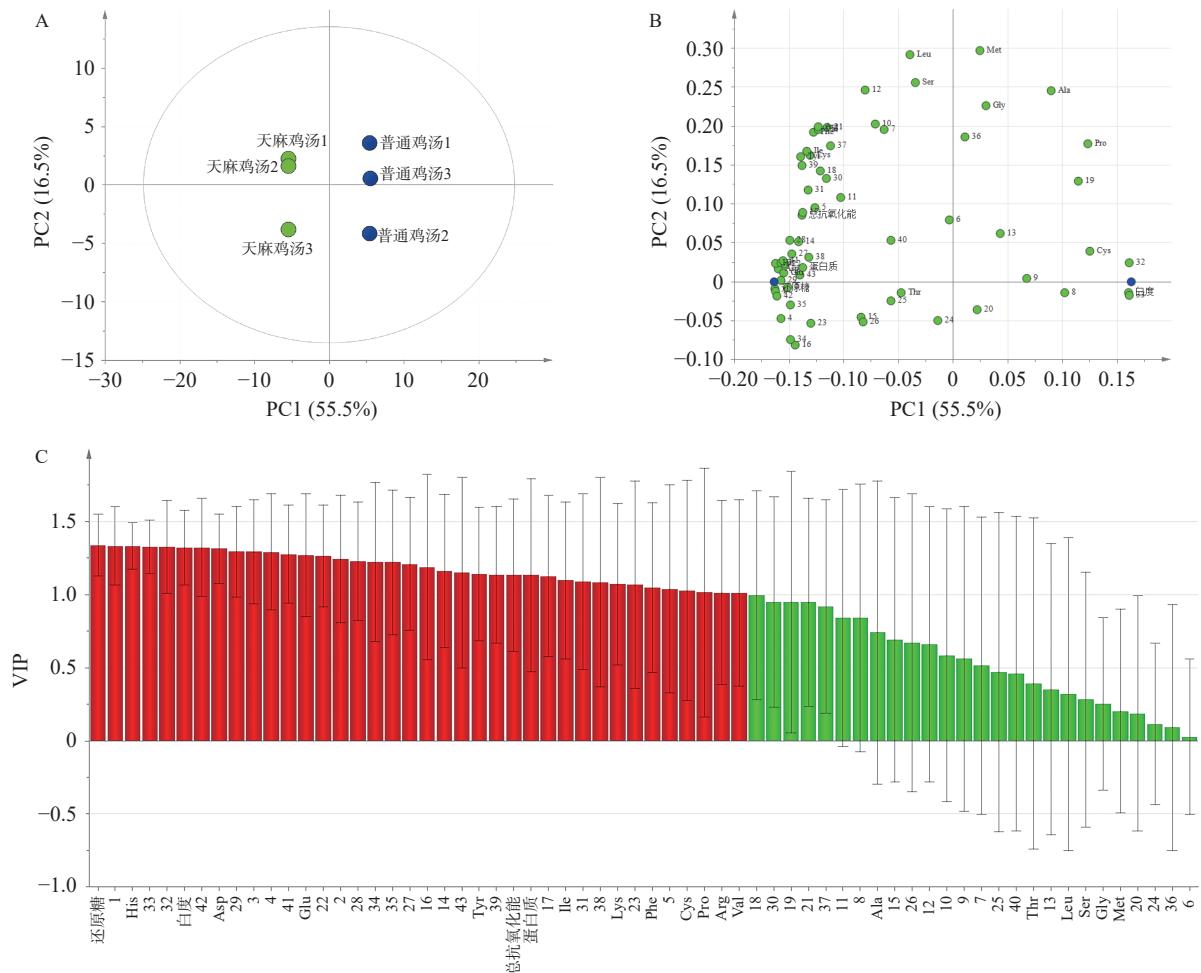


图 6 普通鸡汤和天麻鸡汤品质及挥发性风味物质的 OPLS-DA 得分图(A)、载荷图(B)和 VIP 值(C)分析

Fig.6 OPLS-DA score (A), load (B) and VIP value of quality and volatile flavor compounds of common chicken soup and GECS

注: B、C 图中各物质对应的数字代表与表 7 中编号相对应的挥发性风味物质。

相关性。相比于天麻鸡汤,普通鸡汤与白度、半胱氨酸、仲辛酮和4-甲基苯酚呈现负相关关系。此外,利用VIP值进一步分析普通鸡汤和天麻鸡汤的差异(图6C)。经过筛选,从两种鸡汤中确定了模型区分起到重要作用的38种物质(VIP>1):还原糖、白度、总抗氧化能力、蛋白质、组氨酸、谷氨酸、酪氨酸、赖氨酸、天冬氨酸、4-甲基苯酚、萘、双戊烯、 β -松油醇、2-甲基-2-丙基-1,3-丙二醇、甲基庚烯酮、莰烯和4-萜烯醇等,表明这38种物质可作为有效指标来区分天麻鸡汤和普通鸡汤。综上所述,OPLS-DA分析表明了天麻鸡汤与普通鸡汤在营养成分和风味物质上的显著差异,这些差异物质可作为天麻鸡汤品质鉴别的主要标志物。

3 结论

天麻鸡汤的最佳加工工艺为天麻添加量0.9%,鸡翅膀和水(肉:水=1:2)添加量97.6%,灰枣添加量0.9%,食用盐添加量0.4%,炖煮时间60 min,该条件下鸡汤呈浅黄色,感官评分为(85.57±2.82)分。与普通鸡汤相比,天麻鸡汤中总抗氧化能力、还原糖和可溶性蛋白质等方面均具有显著优势。天麻的添加不仅增加鸡汤的营养成分,还丰富了鸡汤风味,天冬氨酸和谷氨酸等呈味氨基酸含量显著增加,必需氨基酸的含量也明显升高,E/T和E/N均高于普通鸡汤。进而GC-MS分析发现天麻鸡汤新增10种挥发性风味物质,其中壬醛、莰烯、3-亚甲基-6-(1-甲基乙基)环己烯、4-甲基苯酚、仲辛酮、2-正戊基呋喃这6种物质的OAV>1,是天麻鸡汤风味增加的主要原因之一。此外,天麻鸡汤中较高的还原糖和氨基酸含量也是美拉德反应的重要底物,促进2-正丙基呋喃、2-乙酰基噻唑、苯乙醛、己醛、壬醛和2,4-癸二烯醛等呋喃类、噻唑类和醛类化合物的生成,赋予鸡汤独特的风味。因此,天麻的添加不仅能够提升鸡汤的营养价值,还能够丰富鸡汤的风味。本研究的开展,不仅为天麻鸡汤的加工工艺优化提供了科学依据,还为天麻预制菜的创新开发与产业化应用提供了理论支持,推动中式养生饮食文化的传承与发展。

© 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] 段昊,闫文杰.天麻生物活性成分及功效研究进展[J].*食品科学*,2023,44(17):332-340. [DUAN H, YAN W J. Research progress on bioactive components in *Gastrodia elata* Bl. and their biological activity[J]. *Food Science*, 2023, 44(17): 332-340.]
- [2] 王恬,赵岩,张秋梅,等.HPLC指纹图谱分析不同产地天麻中酚类成分差异[J].*中国药学杂志*,2022,57(10):791-798. [WANG T, ZHAO Y, ZHANG Q M, et al. Analysis of phenolic components in *Gastrodia elata* Bl. from different areas by HPLC fingerprint[J]. *Journal of Chinese Pharmaceutical Sciences*, 2022, 57(10): 791-798.]
- [3] SUN X N, JIA B, SUN J G, et al. *Gastrodia elata* Blume: A review of its mechanisms and functions on cardiovascular systems[J]. *Fitoterapia*, 2023: 105511.
- [4] LIAO Q C, WU T, FU Q H, et al. Effects of dietary inclusion of β -hydroxy- β -methylbutyrate on growth performance, fat deposition, bile acid metabolism, and gut microbiota function in high-fat and high-cholesterol diet-challenged layer chickens[J]. *Current Issues in Molecular Biology*, 2022, 44(8): 3413-3427.
- [5] WU G Y. Nutrition and metabolism: Foundations for animal growth, development, reproduction, and health[J]. *Recent Advances in Animal Nutrition and Metabolism*, 2022: 1-24.
- [6] QI J, DU C, YAO X N, et al. Enrichment of taste and aroma compounds in braised soup during repeated stewing of chicken meat[J]. *LWT*, 2022, 168: 113926.
- [7] GUAN H N, XU X J, FENG C M, et al. Effects of stewing modes on physicochemical quality and formation of flavour compounds of Chinese dagu chicken soup[J]. *Polish Journal of Food and Nutrition Sciences*, 2024, 74(1): 26-40.
- [8] 刘嘉玲.蛹虫草鸡汤工艺优化及其风味研究[D].广州:仲恺农业工程学院,2017. [LIU J L. Study on processing optimizing and characteristic flavor compounds of cordyceps militaris chicken soup[D]. Guangzhou: Zhongkai University of Agriculture and Engineering, 2017.]
- [9] ZHAN H, HAYAT K, CUI H P, et al. Characterization of flavor active non-volatile compounds in chicken broth and correlated contributing constituent compounds in muscle through sensory evaluation and partial least square regression analysis[J]. *LWT*, 2020, 118: 108786.
- [10] 续建国,延雨竹,苗恒,等.不同烹饪方式对金针菇营养成分的影响[J].*中国食物与营养*,2023,1-5. [XU J G, YAN Y Z, MIAO H, et al. Effects of different cooking methods on the nutritional components of flammulina mushrooms[J]. *Food and Nutrition in China*, 2023, 1-5.]
- [11] 赵培静,冯浩森,李湘銮,等.微波复热对竹笋鸡汤品质的影响[J].*食品安全质量检测学报*,2023,14(22):107-115. [ZHAO P J, FENG H S, LI X L, et al. Effects of microwave reheating on the quality of chicken soup with bamboo shoots[J]. *Journal of Food Safety & Quality*, 2023, 14(22): 107-115.]
- [12] 高瑞萍,冯敏,王福强,等.新鲜乌天麻浓缩汤料加工工艺[J].*食品工业*,2023,44(1):67-72. [GAO R P, FENG M, WANG F Q, et al. Processing technology of the concentrated soups of fresh *Gastrodia Elata* Bl. *f. glauca* S. chow[J]. *Food Industry*, 2023, 44(1): 67-72.]
- [13] 章健.鸡汤抗氧化蛋白和肽的胞内外抗氧化活性研究[D].杭州:浙江工商大学,2019. [ZHANG J. Study on intracellular and extracellular antioxidant activities of antioxidant proteins and peptides in chicken soup[D]. Hangzhou: Zhejiang Gongshang University, 2019.]
- [14] 段桂媛.不同加工处理条件对天麻品质及风味的影响分析[D].重庆:西南大学,2023. [DUAN G Y. Analysis of the effect of different processing conditions on the quality and flavor of Tianma[D]. Chongqing: Southwest University, 2023.]
- [15] 周淑仪.五指毛桃鸡汤粉活性稳态工艺及储藏性研究[D].广州:仲恺农业工程学院,2019. [ZHOU S Y. Study on the active steady state technology and storage property of Fici Hirtae Radix chicken soup powder[D]. Guangzhou: Zhongkai University of Agriculture and Engineering, 2019.]
- [16] RUAN J Y, HAN Y, KENNEDY J F, et al. A review on polysaccharides from jujube and their pharmacological activities[J]. *Carbohydrate Polymer Technologies and Applications*, 2022, 3: 100220.
- [17] 诸琼姐,祝超智,赵改名,等.煮制过程中食盐引起猪肉汤成分含量变化的研究[J].*食品工业科技*,2019,40(22):7-12. [ZHU Q N, ZHU C Z, ZHAO G M, et al. Changes of pork broth

- composition contents caused by salt during cooking[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2019, 40(22): 7–12.]
- [18] GUAN H N, YANG C, TIAN Y L, et al. Changes in stability and volatile flavor compounds of self-emulsifying chicken soup formed during the stewing process[J]. *LWT*, 2023, 175: 114520.
- [19] WU Z, GAO R P, LI H, et al. How steaming and drying processes affect the active compounds and antioxidant types of *Gastrodia elata Bl. f. glauca S. chow*[J]. *Food Research International*, 2022, 157: 111277.
- [20] 罗紫屹, 邱俊杰, 吴伊莉, 等. 不同变型与产地天麻中 6 种多酚类成分的比较 [J]. *华西药学杂志*, 2022, 37(3): 280–284.
- [21] LUO Z Y, QIU J J, WU Y L, et al. Study on processing optimizing and characteristic flavor compounds of cordyceps militaris chicken soup[J]. *West China Journal of Pharmaceutical Sciences*, 2022, 37(3): 280–284.]
- [22] WU Y N, WEN S H, ZHANG W, et al. *Gastrodia elata Bl.*: A comprehensive review of its traditional use, botany, phytochemistry, pharmacology, and pharmacokinetics[J]. *Evidence-Based Complementary and Alternative Medicine*, 2023, 2023(1): 5606021.
- [23] CHEN X T, HE Y, CHEN J Y. Pharmacological effects and mechanisms of *Gastrodia elata* and its active ingredients in the treatment of cardiovascular diseases[J]. *Tradit Med Res*, 2023, 8(9): 52.
- [24] 赵杨, 康志娇, 周欣, 等. 药食两用植物-天麻[J]. *贵州师范大学学报(自然科学版)*, 2013, 31(4): 9–12. [ZHAO Y, KANG Z J, ZHOU X, et al. An edible medicinal plant-*Gastrodia elata Bl.*[J]. *Journal of Guizhou Normal University(Natural Sciences)*, 2013, 31(4): 9–12.]
- [25] 胡云飞, 周德, 曾青兰, 等. 天麻多糖酶解工艺优化、结构表征及其抗氧化活性分析[J]. *食品工业科技*: 2024, 1–17. [HU Y F, ZHOU D, ZENG Q L, et al. Optimization of enzymatic hydrolysis process, structural characterization and antioxidant activity analysis of *Gastrodia elata* polysaccharide[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2024, 1–17.]
- [26] 周琪, 张佳敏, 王博, 等. 肉制品风味形成机制及加工方式对风味影响的研究进展[J]. *西华大学学报(自然科学版)*, 2024, 43(4): 74–84. [ZHOU Q, ZHANG J M, WANG B, et al. Research progress on the formation mechanism of meat flavor and the influence of processing methods on it[J]. *Journal of Xihua University (Natural Science Edition)*, 2024, 43(4): 74–84.]
- [27] 李秋燕, 朱文学. 食品添加剂在改善肉制品色泽中的应用 [J]. *肉类工业*, 2009, (1): 44–46. [LI Q Y, ZHU W X. Application of additive in improving color of meat products[J]. *Meat Industry*, 2009, (1): 44–46.]
- [28] 姚嫚, 徐幸莲, 朱纯, 等. 不同原料鸡肉熬制鸡汤鲜香性分析及与市售鸡汤的对比[J]. *食品工业科技*, 2023, 44(19): 86–98.
- [29] YAO M, XU X L, ZHU C, et al. Analysis of the umami and aroma of chicken soup made from different raw materials and comparison with commercial chicken soups[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2023, 44(19): 86–98.]
- [30] 胡孟, 武书庚, 王晶, 等. 组氨酸的生理功能及在动物生产中的应用[J]. *中国饲料*, 2018(7): 38–45. [HU M, WU S G, WANG J, et al. Physiological function and application of histidine in animal production[J]. *China Feed*, 2018(7): 38–45.]
- [31] GUAN J J, CHEN Z W, GUO L P, et al. Evaluation of how sulfur-fumigation reduces the edible quality and flavor of *Gastrodia elata Blume Rhizoma*[J]. *LWT*, 2023, 187: 115296.
- [32] 蓝鑫, 黄浩洲, 方玉宇, 等. 基于顶空微萃取-气质联用的天麻气味成分研究 [J]. *天然产物研究与开发*, 2023, 35(2): 21.
- [33] LAN X, HUANG H Z, FANG Y Y, et al. Analysis of aroma components in *Gastrodia elata* based on HS-SPME-GC-MS[J]. *Research and Development of Natural Products*, 2023, 35(2): 21.]
- [34] 李小林, 陈诚, 黄羽佳, 等. 顶空固相微萃取-气质联用分析 4 种野生食用菌干品的挥发性香气成分[J]. *食品与发酵工业*, 2015, 41(9): 174. [LI X L, CHEN C, HUANG Y J, et al. The volatile aroma components of 4 kinds of dried wild edible fungi were analyzed by headspace solid-phase microextraction combined with GC[J]. *Food and Fermentation Industries*, 2015, 41(9): 174.]
- [35] CHENG K X, LIU T, YANG C, et al. Relationship between phospholipid molecules species and volatile compounds in grilled lambs during the heating process[J]. *Food Chemistry*: X, 2024, 21: 101113.
- [36] Beldarrain L R, Morán L, Sentandreu M Á, et al. Effect of aging time on the volatile compounds from cooked horse meat[J]. *Meat Science*, 2022, 184: 108692.
- [37] 朱思洁, 刘良禹, 田多, 等. 酱香天麻健康酒制备工艺 [J]. *食品研究与开发*, 2024, 45(5): 171–177. [ZHU S J, LIU L Y, TIAN D, et al. Production of maotai-flavor *Gastrodia elata* health-care Chinese Baijiu[J]. *Food Research and Development*, 2024, 45(5): 171–177.]
- [38] CHEN M L, WANG Z H, YU J T, et al. Effects of electron beam irradiation and ultrahigh-pressure treatments on the physicochemical properties, active components, and flavor volatiles of jujube jam[J]. *LWT*, 2023, 187: 115292.
- [39] CHEN D W, YANG X Y, LIU S Y, et al. Effect of phospholipids in chicken oil on the formation of volatile flavor compounds in chicken oil[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2020, 36(23): 279–284.]
- [40] ADAMS A, BOUCKAERT C, VAN L F, et al. Amino acid catalysis of 2-alkylfuran formation from lipid oxidation-derived α , β -unsaturated aldehydes[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2011, 59(20): 11058–11062.
- [41] SONG J F, CHEN J Q, LI D J, et al. Thermal isomerization and degradation behaviours of carotenoids in simulated sweet corn juice[J]. *Food and Bioprocess Technology*, 2018, 11: 836–844.
- [42] 叶欣, 卢金清, 曹利. 顶空-固相微萃取技术在中药领域的运用 [J]. *中国药房*, 2017, 28(6): 861–864. [YE X, LU J Q, CAO L. Application of headspace-solid phase microextraction technology in the field of traditional Chinese medicine[J]. *China Pharmacy*, 2017, 28(6): 861–864.]
- [43] 于思文, 王玉超, 黄一承, 等. 黑曲霉纤维素酶对蓝靛果酚素中挥发性化合物和有机酸的影响 [J]. *食品研究与开发*, 2023, 44(11): 36–42. [YU S W, WANG Y C, HUANG Y C, et al. Effect of aspergillus niger cellulase on volatiles and organic acids in fermented blue honeysuckle berry[J]. *Food Research and Development*, 2023, 44(11): 36–42.]