

基于响应面法和气相色谱-离子迁移谱优化 藏羊羊肝粉腥味去除工艺

伍悦, 马娜娜, 韩丽娟*, 孙胜男, 院珍珍, 桂林生, 侯生珍, 王志有, 杨葆春
(青海大学农牧学院, 青海西宁 810016)

摘要: 羊肝是羊的副产物之一, 富含多种营养成分, 具有较高的研究价值, 但因其难以去除的腥膻味, 制约了其副产物的精深加工利用, 为促进这一副产物的开发利用, 该文以羊肝为原料制作羊肝粉以感官评分为指标并对羊肝粉腥味的去除工艺进行研究。采用单因素试验考察漂洗次数、漂洗时间、煮制时间、添加辅料浓度、干燥时间和干燥温度 6 个因素, 在单因素试验基础上进行 Box-Behnken 响应面设计法优化羊肝粉去腥的最佳工艺; 其次, 采用气相-离子迁移谱 (Gas Chromatography-ion Mobility Spectrometry, GC-IMS) 分析最优去腥工艺及未去腥的羊肝的挥发性物质, 确定处理工艺的有效性。结果表明, 漂洗温度 40 ℃, 漂洗 5 次, 添加辅料质量分数为 4% (m/m), 煮制 50 min, 65 ℃ 下干燥时间 4 h 的工艺条件下对羊肝粉去腥获得的感官评分最高。GC-IMS 结果表明: 通过最优去腥工艺, 可去除多种不良风味并富集大量挥发性香味的醛类、酮类、醇类等物质, 去腥效果显著, 风味改良较好。该研究结果可为后续羊肉及其副产品的去腥工艺优化提供理论依据和参考价值。

关键词: 羊肝粉; 去腥; 响应面优化; 感官评价; 气相色谱-离子迁移谱; 挥发性化合物

文章编号: 1673-9078(2025)08-215-226

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2025.8.0707

Optimization of Removal of Fishy Odor from Tibetan Sheep Liver Powder Using Response Surface Methodology and Gas Chromatography-ion Mobility Spectrometry

WU Yue, MA Na'na, HAN Lijuan*, SUN Shengnan, YUAN Zhenzhen, GUI Linsheng,
HOU Shengzhen, WANG Zhiyou, YANG Baochun

(College of Agriculture and Animal Husbandry, Qinghai University, Xining 810016, China)

Abstract: Sheep liver is a by-product of lamb or mutton production, which is rich in various nutrients and has high research value. However, the fishy smell of sheep liver, which is difficult to remove, restricts its further processing and utilization. To promote the development and utilization of this by-product, lamb liver was used as a raw material to produce

引文格式:

伍悦,马娜娜,韩丽娟,等.基于响应面法和气相色谱-离子迁移谱优化藏羊羊肝粉腥味去除工艺[J].现代食品科技, 2025,41(8):215-226.

WU Yue, MA Na'na, HAN Lijuan, et al. Optimization of removal of fishy odor from tibetan sheep liver powder using response surface methodology and gas chromatography-ion mobility spectrometry [J]. Modern Food Science and Technology, 2025, 41(8): 215-226.

收稿日期: 2024-05-22

基金项目: 藏羊产业提质增效标准化生产体系构建 (2022-NK-169); 藏羊肉冷链关键技术 with 高值化利用技术集成与示范 (2022-NK-169-4)

作者简介: 伍悦 (2003-), 女, 本科, 研究方向: 肉品科学, E-mail: 2877343737@qq.com

通讯作者: 韩丽娟 (1988-), 女, 博士, 副教授, 研究方向: 肉品科学与肉品质量控制, E-mail: hlj880105@163.com

lamb liver powder, which was characterized through sensory evaluation, as an indicator, and the removal of the fishy smell of lamb liver powder was assessed. Six factors were evaluated using single-factor experiments: the rinsing frequency, rinsing time, cooking time, concentration of additives, drying time, and drying temperature. Based on the single-factor experiment, the Box Behnken response surface design method was used to optimize the process for removing the fishy smell from sheep liver powder. Secondly, gas chromatography-ion mobility spectroscopy (GC-IMS) was used to analyze the optimal deodorization process and the volatile substances in sheep liver that had not been deodorized, to determine the effectiveness of the treatment process. The sensory score for removing the fishy smell from sheep liver powder was the highest when the process was conducted by rinsing at 40 °C, rinsing 5 times, adding 4% (*m/m*) excipient, cooking for 50 min, and drying for four hours at 65 °C. The GC-IMS results indicate that through the optimal deodorization process, various undesirable flavors and a large number of volatile aroma compounds such as aldehydes, ketones, and alcohols can be removed. The deodorization effect is significant, and the flavor improvement is good. The results provide a theoretical basis and reference parameters for optimizing the deodorization of lamb and its by-products.

Key words: sheep liver powder; removal of fishy odor; response surface; sensory evaluation; gas chromatography-ion mobility spectrometry; volatile compounds

羊肝, 是羊的副产物之一, 具有较高的营养价值, 不仅含有丰富的蛋白质、脂肪、维生素^[1], 且羊肝中的营养物质是人体生化代谢中许多酶和辅酶的成分, 可加速人体新陈代谢, 增强人体免疫力^[2,3]。由于对羊肉及其副产物的加工大多停留在初加工阶段, 羊肝主要被用作饲料加工的原料, 导致羊肝资源不能充分利用而造成资源浪费。随着加工研究的深入, 以羊肝为原料开发了羊肝酱^[4]、羊肝干^[5]等产品, 但由于在加工过程中羊肉及其副产物的特殊气味—膻腥味, 严重影响了相关产品的口感品质, 导致产品类型相对简单, 在一定程度限制了对羊肉及相关副产物的开发利用^[6]。因此, 深入研究去除羊肝膻腥味工艺对羊肉及其相关副产品的开发利用具有重要意义。

羊肉的膻腥味主要与肌肉和脂肪组织中支链脂肪酸的存在有关, 尤其是 4-甲基辛酸 (MOA)、4-乙基辛酸 (EOA) 和 4-甲基壬酸 (MNA), 是导致羊肉产生膻腥味的主要成分^[7]。马丽珍等^[8]论述了羊肉的致膻成分、脱膻方法和机理, 发现羊肉致膻成分的主要是一些低级挥发性脂肪酸, 其中 C10 成分对羊肉膻味起主要影响作用。韩志慧等^[9]以羊肝为原料, 通过发酵和脱膻营养液方法去除羊肝的膻味。代启超^[10]对比了 8 种除羊肝膻味的方法, 明确了最佳的去膻味方法和条件。青海藏羊作为青藏高原的主要优势家畜, 除了具有极强的适应性外, 还具有蛋白质含量高、脂肪含量低和氨基酸种类齐全等特点, 是其它羊品种不可替代的优良品种。羊肉风味受诸多因素影响, 包括不同的漂洗^[11]及烹调方

式^[12], 辅料添加如紫苏、大蒜等物质能够改善羊肉风味^[13], 大蒜中蒜氨酸可分解许多硫化物, 能掩蔽羊肉在加热过程中释放的挥发性硫化物^[14]。因此, 本文以藏羊肝为原料加工制作成羊肝粉为原料, 采用不同的前处理方法并结合大蒜等辅料去除羊肝腥味, 并采用响应面设计方法优化羊肝粉去腥的最佳工艺, 以达到较好的去腥效果, 为羊肝及其产品的加工方向提供新思路。最后基于最佳工艺, 采用 GC-IMS 技术对去腥工艺优化和未优化的羊肝粉中的挥发性物质进行检测^[15], 明确优化工艺去腥效果, 期为羊肝去腥及羊肝副产品开发利用提供理论基础。

1 材料与方法

1.1 试验材料

1.1.1 材料与试剂

藏羊肝 (6 月龄舍饲喂养, 常规屠宰方法, 采自共和县哇玉香味梅朵牧业有限公司); 白萝卜、大蒜, 均为市售。正构酮: 2-丁酮、2-戊酮、2-己酮、2-庚酮、2-辛酮和 2-壬酮均为分析纯, 阿拉丁公司; 99.999% 氮气; 20 mL 顶空瓶, 山东海能科学仪器有限公司; MXT-5 毛细管色谱柱 (15 m×0.53 mm, 1.0 μm), 美国 Restek 公司。

1.1.2 主要仪器和设备

C22-RT22E01 电磁炉, 广东美的生活电器制造有限公司; 101 型电热鼓风干燥箱, 北京中兴伟业仪器有限公司; FlavourSpec[®] 气相离子迁移谱,

G.A.S. 公司（德国，Dortmund）；CTC-PAL 3 静态顶空自动进样装置，CTC Analytics AG 公司（瑞士，Zwingen）。

1.2 试验方法

1.2.1 羊肝粉加工方法

1.2.1.1 优化后羊肝粉的加工工艺流程

原料→切块→漂洗→剁碎→添加辅料煮制→沥干冷却→打碎研磨→干燥→研钵磨粉→成品

1.2.1.2 操作要点

（1）切块：将羊肝切块，切成 1 cm×2 cm×5 cm 的小块便于漂洗、煮制时能更好的去腥；

（2）漂洗：用清水冲洗去部分污物，依据羊肝：水=1:5（m/m）的比例使用试验条件用水多次漂洗，漂洗过程中需多次翻动，去除表面及内部的血筋，剥去最外面的薄膜，保证漂洗充分；

（3）添加辅料煮制：选取添加辅料萝卜、大蒜（萝卜：大蒜=2:1），水沸腾后将辅料按照占水质量比例（m/m）加入各份试验，沸腾后依据羊肝：水=1:5（m/m）的比例加入羊肝继续煮制，其煮制过程需除去浮沫，并来回翻动羊肝达到更好去腥效果；

（4）沥干冷却：将煮后的羊肝放置室温内冷却，并沥干表面水分；

（5）打碎研磨：把羊肝用搅碎机打碎成较粗颗粒状；

（6）干燥：将打碎研磨后羊肝均匀铺平在铁盘中，放入干燥箱在最佳条件下进行干燥；

（7）研钵磨粉：干燥后的粗羊肝颗粒置于室温冷却，再通过研钵制成细粉末状。

1.2.1.3 未处理羊肝粉加工工艺

羊肝粉的加工工艺流程：

原料→切块（1 cm×2 cm×5 cm 的小块）→常温漂洗 1 次→剁碎→沥干冷却→打碎研磨→干燥→研钵磨粉→成品

1.2.2 羊肝粉去腥工艺单因素试验设计

1.2.2.1 漂洗温度对去腥效果的影响

称取 5 份相同质量（每份 100 g）的羊肝，分别放入不同温度的水中漂洗 5 次，在漂洗的水温度分别为 20、30、40、50 ℃条件下进行去腥单因素试验，评价其去腥效果并得最佳的漂洗去腥条件。

1.2.2.2 漂洗次数对去腥效果的影响

称取 5 份等质量（每份 100 g）的羊肝，分别放入 40 ℃水中漂洗不同次数，在漂洗次数分别为 2、

3、4、5、6 次条件下进行去腥单因素试验，评价其去腥效果并得最佳的漂洗去腥条件。

1.2.2.3 不同质量分数辅料对去腥效果的影响

称取 5 份相同质量（每份 100 g）的羊肝，经最佳漂洗条件工艺后，分别放入不同辅料质量分数的沸水中煮制 60 min，分别加入质量分数为 1%、2%、3%、4%、5% 的辅料进行去腥单因素试验，评价其去腥效果并得最佳的漂洗去腥条件。

1.2.2.4 煮制时间对去腥效果的影响

称取 5 份相同质量（每份 100 g）的羊肝，经最佳漂洗条件工艺后，分别放入辅料质量分数为 3% 的沸水中煮制不同时间，在煮制时间分别为 30、40、50、60、70 min 条件下进行去腥单因素试验，评价其去腥效果并得最佳的漂洗去腥条件。

1.2.2.5 干燥时间对去腥效果的影响

称取 5 份相同质量（每份 100 g）的羊肝，经最佳漂洗条件、最佳辅料煮制条件工艺后，分别放入 65 ℃的恒温干燥箱中干燥不同时间，在干燥时间分别为 1、2、3、4、5 h 条件下进行去腥单因素试验，评价其去腥效果并得最佳的漂洗去腥条件。

1.2.2.6 干燥温度对去腥效果的影响

称取 5 份相同质量（每份 100 g）的羊肝，经最佳洗条件、添加最佳辅料煮制条件工艺后，分别放入不同干燥温度的恒温干燥箱中干燥 4 h，分别在 35、45、55、65、75 ℃条件下进行去腥单因素试验，评价其去腥效果并得最佳的漂洗去腥条件。

1.2.3 响应面优化设计试验

根据上述单因素试验效果选取最合适的条件范围，选择煮制时间、添加辅料质量分数、干燥时间三个因素，以感官评分为指标，进行三因素三水平的响应面优化设计，得出最佳工艺参数，试验因素水平见表 1。

表 1 响应面试验因素和水平

Table 1 Response surface test factors and levels			
水 平	因素		
	A 煮制时间/min	B 添加辅料质量分数/%	C 干燥时间/h
-1	50	2	3
0	60	3	4
1	70	4	5

1.2.4 感官评定

本试验以感官评分为评定指标，邀请了 7 位（4 男 3 女）经过培训的专业的感官评定人员进行感官

评价,按表中感官评分标准对其进行打分,总分为10分,去掉了最高分与最低分的数据,即采用了五位评定员对不同条件下制备的羊肝的风味进行感官评分的结果,不同条件羊肝的感官综合评分为五位评定员(3男2女)的评价分值的平均值。

表 2 羊肝粉去腥感官评价表
Table 2 Sensory evaluation of Tibetan sheep liver powder (100 points)

感官指标	特征	分值 / 分
风味 (40 分)	没有腥味,且无其他异味	35~40
	稍有腥味,带有辅料香气	25~35
	有一些腥味,稍有辅料味	15~25
	腥味较为厚重,伴有辅料味	5~15
	有浓烈的腥味	0~5
色泽 (30 分)	呈浅的土白色	20~30
	焦黄色,颜色均一	10~20
	颜色较暗,呈褐色	0~10
质地形态 (30 分)	无明显颗粒感,粉状质地细腻	20~30
	稍有颗粒感,粉末状质地均匀	10~20
	颗粒粗糙,质地不均匀	0~10

1.2.5 GC-IMS挥发性成分分析

采用气相色谱-离子迁移谱(GC-IMS)技术对羊肝粉中的挥发性风味物质进行分析。参考董阳阳^[16]的方法略作修改,具体操作方法如下:准确称取藏羊肝粉1.0 g置于20 mL顶空瓶中,孵育15 min后进样,每个样品测定3组平行,共检测两个样品。顶空进样条件设定为:孵化温度50℃;孵化时间20 min;孵化转速500 r/min。采用自动顶空进样方式进行进样,不分流进样,进样体积500 μL,进样针温度85℃。

GC条件:采用MXT-5(15 m×0.53 mm,1.0 μm)色谱柱,柱温条件为60℃;载气:高纯氮气(纯度≥99.999%);程序升压:初始流量2.0 mL/min保持2 min,在8 min内线性增至10.0 mL/min,在10 min内线性增至100.0 mL/min,色谱运行时间:20 min;进样口温度:80℃。IMS条件:电离源:氙源(3H);迁移管长度53 mm;电场强度500 V/cm;迁移管温度45℃;漂移气:高纯氮气(纯度≥99.999%);流速150 mL/min;正离子模式。气相色谱条件如表3所示。

1.2.6 数据分析

应用SPSS 23.0进行方差分析,显著性分析采

用单因素方差分析进行比较, $P<0.05$ 为差异显著, $P<0.01$ 为差异极显著。采用Excel 2019进行数据处理和作图。GC-IMS挥发性成分数据分析使用VOCal软件内置的GC保留指数(NIST 2020)数据库和IMS迁移时间数据库检索和比对,对目标物进行定性分析;使用软件中的Reporter、Gallery Plot和Dynamic PCA等插件分别生成挥发性成分的三维谱图、二维谱图、差异谱图、指纹图谱及PCA图,用于样品间挥发性有机物的对比。

表 3 GC条件(100分)

Table 3 Conditions of GC

时间/min	E1 漂移气流量/ (mL/min)	E2 载气流量/ (mL/min)	R 数据采集
0.0	150	2	recording
2.0	150	2	—
10.0	150	10	—
20.0	150	100	stop

2 结果与分析

2.1 单因素试验结果与分析

2.1.1 不同漂洗条件对去腥效果的影响

漂洗温度和漂洗次数是影响去腥效果的重要因素,不同漂洗温度和漂洗次数对去腥效果的影响如图1所示。去腥效果随漂洗温度的升高呈先上升以后下降的趋势,漂洗温度为40℃时的感官评分的峰值为86分,显著高于20℃和50℃时的感官评分($P<0.05$),因此选择40℃左右的温度对羊肝进行漂洗去腥效果最佳。这主要是由于低温不利于水溶性蛋白的溶出,而温度过高易导致蛋白质变性,产生不良风味,影响感官评分^[17]。

当漂洗温度恒定为40℃时,漂洗次数对去腥效果没有显著的影响($P<0.05$),但根据图中趋势可以看出随着漂洗次数增加,羊肝粉的感官评分逐渐增高,在漂洗5次时达到最佳,感官评分峰值为76分。

2.1.2 不同辅料质量分数对去腥效果的影响

由图2可知,在其他因素不变的情况下,随着辅料质量分数的增加,在质量分数为3%时感官评分达到峰值,呈现先下降后缓慢上升趋势,其感官评分值变化依次为52、68、72、50、58分,在3%质量分数时已达到72分最高。当白萝卜、大蒜添加量过多,辅料风味较重会掩盖产品的风味,使其

滋味较差, 导致失去羊肝特有的香味, 感官评分下降, 白萝卜、大蒜添加量较少则达不到很好的去腥效果, 因此去腥材料添加量过多过少都会对羊肝干的整体品质有一定的影响^[5]。

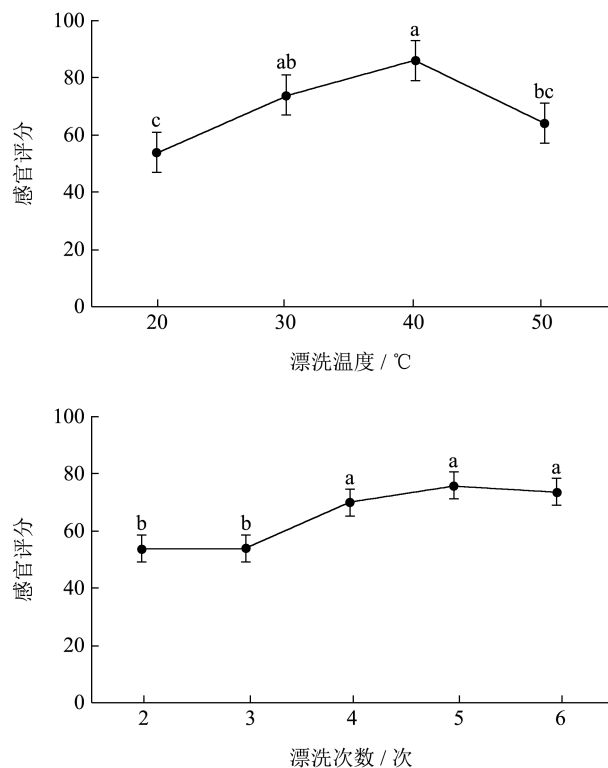


图 1 不同漂洗条件对去腥效果的影响

Fig.1 The influence of different rinsing conditions on the deodorization effect

注: 图中标注不同小写字母表示差异显著 ($P < 0.05$), 相同小写字母或无字母表示差异不显著 ($P > 0.05$)。下图同。

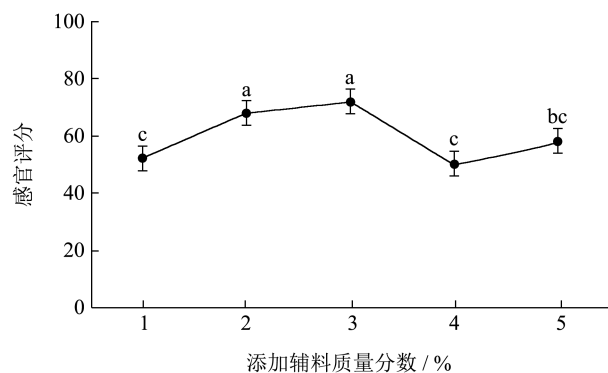


图 2 不同辅料质量分数对去腥效果的影响

Fig.2 The influence of different excipient concentrations on the deodorization effect

2.1.3 不同煮制时间对去腥效果的影响

景安琪等^[5]在制作羊肝干时, 将羊肝撕成条块状煮制 20 min, 羊肝的形态没有被过大破坏, 腥味

未得到大量散发, 而本文对羊肝打碎后, 导致煮制时羊肝腥味被全面散发, 煮制时间受产品形态影响会有大幅度增加。由 3 图知, 感官评分随着煮制时间的延长呈现先升高后降低的趋势, 煮制 60 min 时的感官评分最高, 且显著高于煮制 80 min 时的感官评分 ($P < 0.05$), 而当煮制时间超过 60 min 后, 感官评分呈下降趋势。这主要是由于煮制时间过短, 羊肝粉内部的血水以及腥味不能很好的去除, 使得羊肝干在风味和口感上都达不到很好的效果导致评分不是很高^[5]。而煮制时间太长羊肝中的蛋白质受热分解成游离氨基酸, 氨基酸发生氧化或美拉德反应导致氨基酸的数量和种类减少, 产生不良风味, 影响感官评价^[18]。因此, 合适的煮制时间有利于羊肝腥味的去除和感官评价。

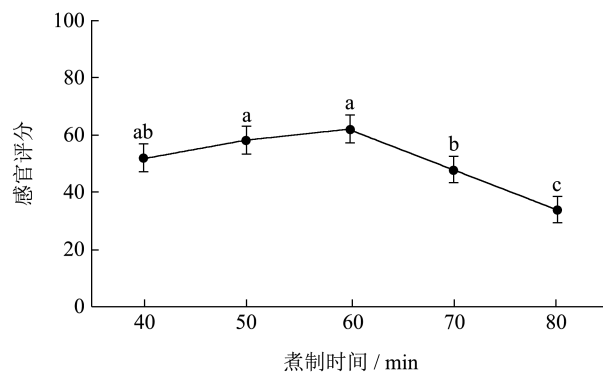


图 3 不同煮制时间对去腥效果的影响

Fig.3 The influence of different cooking times on the deodorization effect

2.1.4 不同干燥条件对去腥效果的影响

由图 4 可知, 干燥时间和干燥温度均对去腥效果有一定的影响。干燥 2、3、4、5 h 时羊肝粉的感官评分显著高于 1 h 时的感官评分 ($P < 0.05$), 在干燥 4 h 时对羊肝粉去腥效果达到最佳值为 87 分。在干燥时间恒定为 4 h 时, 干燥温度为 45、55 和 65 °C 的感官评分值显著高于 75 °C 条件下的感官评分, 其中干燥 65 °C 时的感官评分值最高, 为 84 分, 此时羊肝粉的去腥效果最佳。干燥温度过高会导致羊肝粉的内部水分不易蒸发, 造成羊肝粉外干内湿, 内外水分不一致, 影响羊肝粉的风味、口感以及组织形态等品质, 进而导致感官评分呈现先升高后下降的趋势。干燥温度较低则所需时间延长, 效率则降低。同时干燥温度过高和干燥时间的延长也会对羊肝粉的理化性质造成直接的影响, 导致羊肝粉中一些营养成分损失。

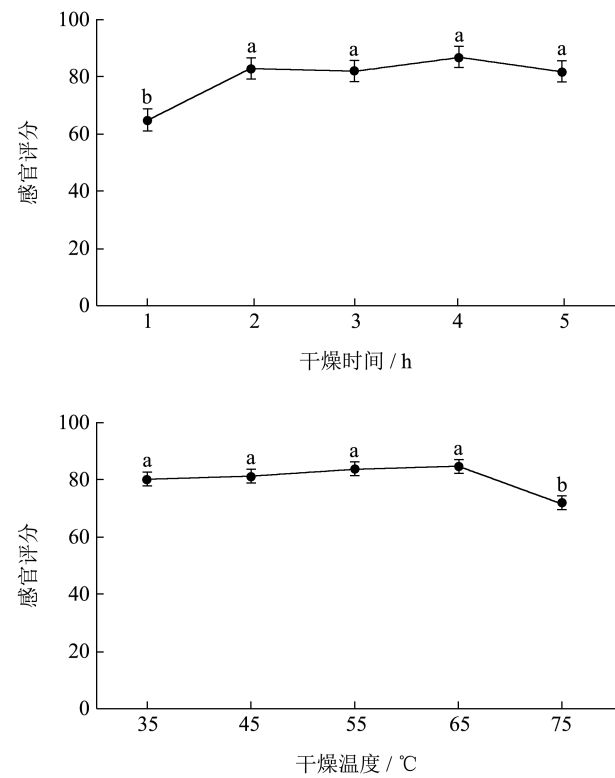


图 4 不同干燥条件对去腥效果的影响
Fig.4 The influence of different drying times on the deodorization effect

2.2 响应面优化工艺试验及结果

2.2.1 试验设计

本试验采用 DesignExpert 13.0 软件进行最初模型设计，并按照模型设计进行响应面优化试验，得到相关数据后进行回归性和方差分析^[19]。采用 Box-Behnken 设计方法，选择煮制时间、添加辅料的浓度、干燥时间三个因素，进行三因素三水平的响应面优化设计试验，得出羊肝粉去腥的最佳工艺优化条件。

使用 Box-Behnken 设计试验模型，采取三因素三水平试验设计，进行 17 组试验，得到相应的感官评分结果如表 4。

2.2.2 试验结果与分析

对上表所得到的试验结果进行数据的分析处理，由 DesignExpert 13.0 分析导出二次回归方程： $Y=+82.24-1.00\times A+2.13\times B+0.72\times C-2.55\times AB+5.55\times AC+3.70\times BC-7.02\times A^2-2.57\times B^2-5.67\times C^2$ ，回归分析数据如表 5。

表 4 响应面优化试验设计及结果
Table 4 Experimental design and results for response surface analysis

序号	A 煮制时间/min	B 添加辅料质量分数/%	C 干燥时间/h	感官评分/分
1	0	1	1	81.00 ± 5.61
2	-1	1	0	77.60 ± 2.34
3	0	0	0	78.60 ± 8.19
4	-1	-1	0	68.60 ± 3.02
5	1	0	1	74.00 ± 4.22
6	0	0	0	81.60 ± 3.56
7	-1	0	1	66.00 ± 7.35
8	1	-1	0	72.80 ± 3.28
9	0	0	0	82.60 ± 1.36
10	0	-1	1	69.00 ± 2.83
11	0	0	0	80.80 ± 4.57
12	0	-1	-1	74.40 ± 3.82
13	1	0	-1	62.00 ± 2.55
14	1	1	0	71.60 ± 6.37
15	-1	0	-1	76.20 ± 8.12
16	0	1	-1	71.60 ± 5.06
17	0	0	0	87.60 ± 3.24

表 5 回归模型的方差分析
Table 5 Analysis of variance for the fitted quadratic polynomial model

变异来源	自由度	平方和	均方	F	P	显著性	相关性
模型	659.24	9	73.25	10.71	0.002 5	*	相关
A	8.00	1	8.00	1.17	0.315 2		
B	36.13	1	36.13	5.28	0.055 1		
C	4.20	1	4.20	0.61	0.458 6		
AB	26.01	1	26.01	3.80	0.092 1		
AC	123.21	1	123.21	18.02	0.003 8	**	
BC	54.76	1	54.76	8.01	0.025 4	*	
A2	207.50	1	207.50	30.35	0.000 9	**	
B2	27.81	1	27.81	4.07	0.083 5		
C2	135.36	1	135.36	19.80	0.003 0	**	
残差	47.86	7	6.84				
失拟项	3.27	3	1.09	0.10	0.957 2		不相关
误差	44.59	4	11.15				
总和	707.10	16					

注：“*”表示 $P<0.05$ ，差异显著；“**”表示 $P<0.01$ ，差异极显著。

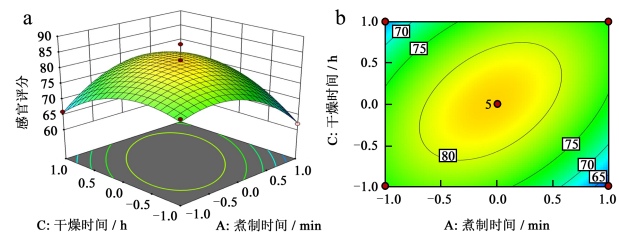


图 5 煮制时间和干燥时间对羊肝粉去腥影响的等高线图和响应面

Fig.5 Contour plot and response surface of the effect of cooking time and drying time on the deodorization of sheep liver powder

模型 F 值为 10.71，表示该模型具有显著性，对羊肝粉去腥的感官评分的数学模型进行方差分析， R^2 为 0.932 3，校正 R^2 为 0.845 3，预测 R^2 为 0.827 5，由表 5 可知：模型 P 值 =0.002 5<0.01，说明该模型达到了极显著水平，且失拟项 P =0.957 2 远大于 0.05，说明失拟项不显著，表示该回归方程拟合度较好，各单因素之间的交互作用较好，可以对羊肝粉去腥的感官评分进行分析和预测。由 F 值可知，各单因素对产品感官评分的影响大小顺序依次为 (B)>(A)>(C)，即辅料质量分数>煮制时间>干燥时间，但影响效果不显著；分析比较各因素之间交互作用 AC 极显著，BC 显著，表明煮制时间与干燥时间交互作用极显著，辅料质量分数与干燥时间交互显著，由 P 值可得出影响大小为 AC>BC>AB，各交互因素之间具体影响结果见图 5、图 6、图 7。

由图 5 可知，羊肝粉去腥效果随煮制时间和干燥时间的增加，感官评分值先上升后下降，A 煮制时间比 C 干燥时间的曲面更为陡峭，表明 A 煮制时间对羊肝粉去腥的感官评分影响更大；等高线为椭圆，表明 AC 煮制时间和干燥时间之间交互作用显著。

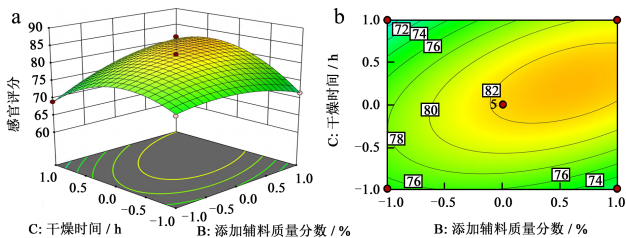


图 6 添加辅料质量分数和干燥时间对羊肝粉去腥影响的等高线图和响应面

Fig.6 Contour plot and response surface of the effect of excipient concentration and drying time on the deodorization of sheep liver powder

由图 6 可知，羊肝粉去腥效果随 B 添加的辅料质量分数和 C 煮制时间的增加而发生变化，感官评分值呈先增后降趋势，B 添加辅料质量分数比 C 干燥时间对羊肝粉去腥的感官评分影响较大；等高线为椭圆形，其交互作用 BC 添加辅料质量分数和干燥时间之间作用显著。

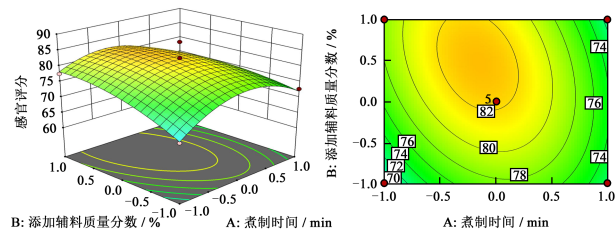


图 7 煮制时间和添加辅料质量分数对羊肝粉去腥影响的等高线图和响应面

Fig.7 Contour plot and response surface of the effect of cooking time and concentration of excipients on the deodorization of sheep liver powder

由图 7 可知，羊肝粉去腥效果随 A 煮制时间和 B 添加辅料质量分数的增加发生变化，感官评分值先上升后下降，变化程度平缓，表明 A 煮制时间和 B 添加辅料质量分数对羊肝粉去腥的感官评分影响相近；等高线趋近于圆形，其交互作用 AB 煮制时间和添加辅料质量分数之间作用不显著。

由以上分析得到，AC 和 BC 响应面陡峭，AB 响应面陡峭程度较平缓，说明 AC 交互作用对羊肝粉去腥的感官评分影响极显著，BC 交互作用对羊肝粉去腥的感官评分影响显著，AB 交互作用对羊肝粉去腥的感官评分影响不显著；AC、BC 的等高线呈现椭圆形，表明交互作用显著，AB 的等高线趋于圆形，表明交互作用不显著。由此得出，在羊肝粉去腥的感官评分中，交互作用影响的显著性顺序也为 AC>BC>AB。

通过 Design-Expert 13.0 软件进行回归模型得到预测的羊肝粉去腥的最佳工艺条件为：煮制时间为 50.91 min，添加的辅料质量分数为 3.77%，干燥时间为 3.87 h，考虑试验实际操作情况所以取整数值，可得最佳煮制时间为 50 min，添加的最佳辅料质量分数为 4%，最佳干燥时间为 4 h，按照此工艺制备羊肝粉，待测挥发性风味物质。

景安琪等^[5]研究中添加的辅料浓度为 3%，小于本试验所得质量分数 4%，原因为一方面受羊肝形态影响，所需辅料质量分数大才能去除打碎状态下散发出的大量羊肝腥味，另一方面本文的羊肝粉与

磨碎的辅料如果混合煮制，后期感官评分会受辅料残渣的影响，因此在试验过程中将其装入无纺的辅料包中煮制，导致辅料未能充分起到去腥效果，所需浓度也有所增加。

在干燥过程中，李美君等^[20]表明恒温干燥后水分活度最低不易微生物生长，干燥 3 h 为去腥效果最佳，而本试验所得干燥时间最佳为 3.87 h，由于试验是完成研磨后再进行感官评分，受羊肝的不同形态和研磨过程中时间消耗的影响，外置时间变长一部分腥味挥发于空气中，最终对羊肝粉去腥的感官评分产生一定变动。

2.3 GC-IMS挥发性风味成分分析结果

2.3.1 藏羊肝中挥发性成分谱图对比分析

为直观地识别已优化和未优化样品中挥发性风味物质的差异，使用 Reporter 插件制作的 2 个样品羊肝的 GC-IMS 三维谱图，如图 8 所示。左侧代表未优化处理样品（WC），右侧代表已优化处理样品（YC），三个坐标轴分别表示迁移时间（X 轴）、保留时间（Y 轴）和信号峰强度（Z 轴）。由图 8 可知，不同样品中挥发性有机物的种类和含量均有所差异，样品 YC 中新增了一些风味物质，可能是因为优化工艺引入了一些新的风味。

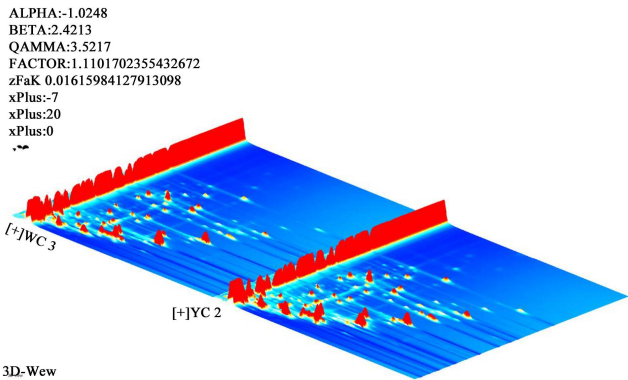


图 8 藏羊肝中挥发性成分 GC-IMS 三维谱图
Fig.8 GC-IMS three-dimensional spectrum of volatile components in Tibetan sheep liver

为便于观察，将图 8 的三维谱图投影到二维平面上的俯视图如图 9 所示。横坐标 1.0 处红色竖线为 RIP 峰为经归一化处理的反应离子峰，RIP 峰两侧的每一个点代表一种挥发性有机物，颜色代表物质的峰强度，从蓝色到红色，颜色越深表示峰强度越大。样品中大部分挥发性物质的迁移时间为 6.0~8.0 s，保留时间为 100~800 s。

为进一步直观对比藏羊肝中挥发性成分的差异，采用差异对比模式进行观察，选取藏羊肝样品 WC 的谱图作为参比，样品 YC 的谱图扣减参比，得到不同藏羊肝样品的差异对比图，如图 10 所示。如果目标样品和参比中的挥发性有机物含量一样，则扣减后的背景为白色，而红色代表该物质的体积分数在目标样品中高于参比，蓝色代表该物质的体积分数在目标样品中低于参比。由图 10 可知，两种样品的挥发性化合物含量存在较大差异。

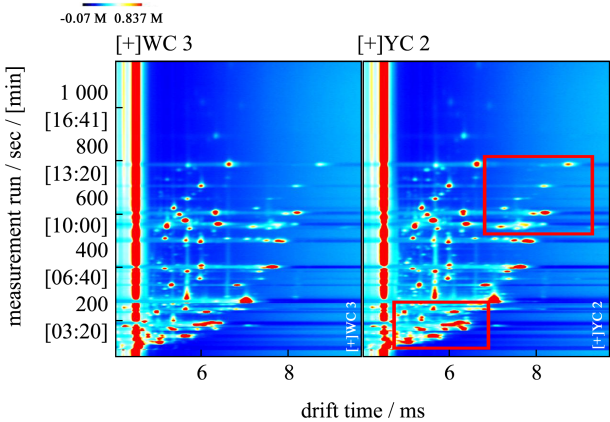


图 9 藏羊肝中挥发性成分 GC-IMS 二维谱图
Fig.9 GC-IMS two-dimensional spectrum of volatile components in Tibetan sheep liver

2.3.2 藏羊肝中挥发性成分定性分析

熟肉中的挥发性化合物主要来自脂质氧化反应和来自美拉德反应^[21]。两种样品中共检测出 90 种挥发性物质，其中，定性检测出 63 种化合物，包括醛类 31 种、酮类 14 种、醇类 12 种、吡嗪类 2 种、呋喃类 2 种、烯类 1 种、酯类 1 种，具体物质见表 6。酮类、醇类和醛类为样品中主要挥发性物质，与孟新涛等^[22]测定的新疆地区羊肉中的主要挥发性物质结果相似。化合物的体积分数和阈值是其对肉类风味产生影响重要依据^[2]，酮类、醇类和醛类其气味强度值高于吡嗪类、呋喃类、烯类、酯类等化合物，因此前 3 类被认为是挥发性香气的主要贡献者，后 4 类化合物被认为是次要贡献者，但因它们在羊肝中的体积分数较前三类高，从而认为它们成为羊肝的主要香气贡献者^[23]。

通过工艺优化处理后，藏羊肝中减少了戊醇类的刺激性不良气味，2-呋喃甲醇的焦味等不良风味的同时引入了酮类、醛类等物质带来的青草香、坚果香味、香料气味等良好风味^[24,25]，一定程度上减轻了藏羊肝的腥膻味，具体风味见表 6。

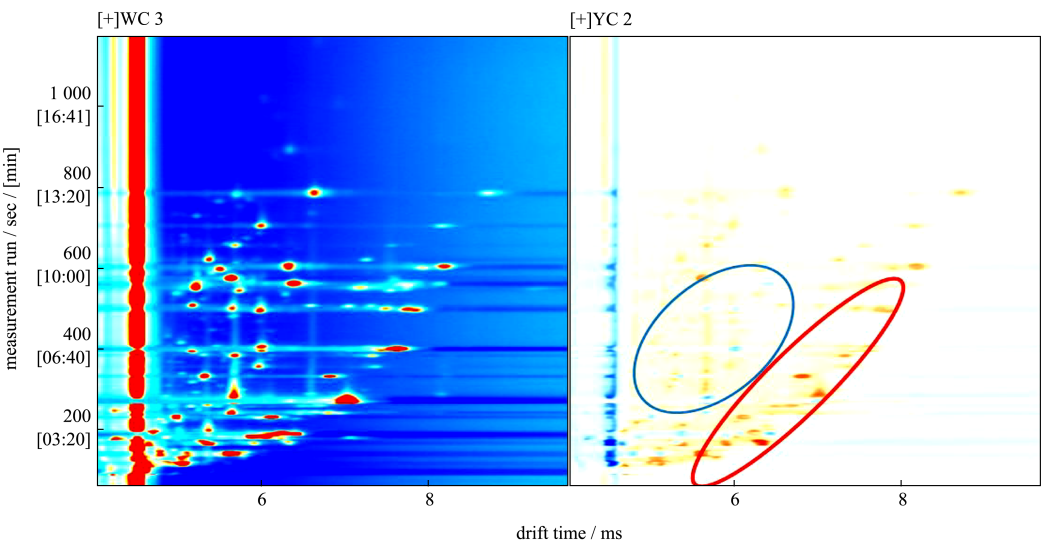


图 10 藏羊肝中挥发性成分 GC-IMS 差异谱图

Fig.10 GC-IMS difference spectrum of volatile components in Tibetan sheep liver

表 6 不同样品羊肝粉挥发性化合物测定结果

Table 6 Determination results of volatile compounds in different samples of sheep liver powder

序号	保留时间 (Rt)/s	化合物中文名	化合物	样品 (相对含量/%)		气味描述
				WC	YC	
1	1 022.207	(E,E)-2,4-壬二烯醛	(E,E)-2,4-nonadienal	0.15 ± 0.01	0.16 ± 0.08	谷物、油炸、肥肉、湿羊毛
2	500.42	(E)-2-庚烯醛二聚体	(E)-2-Heptenal dimer	1.34 ± 0.04	0.89 ± 0.45	
3	499.95	(E)-2-庚烯醛单体	(E)-2-heptenal monomer	1.01 ± 0.06	1.18 ± 0.60	
4	895.98	(E)-2-壬烯醛	(E)-2-Nonenal	0.33 ± 0.01	0.42 ± 0.21	烤、杏仁味
5	705.632	(E)-2-辛烯醛二聚体	(E)-2-Octenal dimer	0.53 ± 0.04	0.77 ± 0.39	青香、油脂香
6	705.258	(E)-2-辛烯醛单体	(E)-2-Octenal monomer	1.77 ± 0.05	1.88 ± 0.94	
7	233.014	(E)-2-戊烯醛二聚体	(E)-2-pentenal dimer	2.93 ± 0.15	3.12 ± 1.56	水果味、果香味
8	231.921	(E)-2-戊烯醛单体	(E)-2-pentenal monomer	1.73 ± 0.05	1.15 ± 0.58	
9	620.952	(E,E)-2,4-庚二烯醛二聚体	(E,E)-2,4-Heptadienal dimer	0.42 ± 0.06	0.57 ± 0.29	青草、奶油香味
10	620.952	(E,E)-2,4-庚二烯醛单体	(E,E)-2,4-Heptadienal monomer	1.88 ± 0.10	1.83 ± 0.92	
11	414.172	(E,E)-2,4-己烯醛二聚体	(E,E)-2,4-Hexadienal dimer	0.04 ± 0.01	0.05 ± 0.03	脂肪味、坚果味
12	416.704	(E,E)-2,4-己烯醛单体	(E,E)-2,4-Hexadienal monomer	0.29 ± 0.03	0.35 ± 0.18	
13	248.67	(Z)-2-戊烯-1-醇	(Z)-2-Penten-1-ol	0.72 ± 0.03	0.59 ± 0.29	脂肪香
14	395.812	(Z)-4-庚烯醛	(Z)-4-heptenal	0.98 ± 0.01	0.75 ± 0.38	香蕉、青香、橡胶
15	272.52	1-己醛二聚体	1-hexanal dimer	12.65 ± 0.23	12.09 ± 6.05	乳品
16	271.503	1-己醛单体	1-hexanal monomer	5.23 ± 0.15	4.45 ± 2.23	青草味
17	357.236	1-己醇二聚体	1-Hexanol dimer	0.25 ± 0.01	0.48 ± 0.24	
18	356.735	1-己醇单体	1-Hexanol monomer	1.16 ± 0.01	1.22 ± 0.61	辛辣味
19	734.098	1-辛醇	1-Octanol	0.14 ± 0.00	0.18 ± 0.09	焦味
20	552.099	1-辛烯-3-醇二聚体	1-Octen-3-ol dimer	0.98 ± 0.02	1.06 ± 0.53	蘑菇味、青草香
21	551.327	1-辛烯-3-醇单体	1-Octen-3-ol monomer	3.74 ± 0.13	3.02 ± 1.51	
22	545.772	1-辛烯-3-酮二聚体	1-Octen-3-one dimer	0.48 ± 0.03	0.52 ± 0.27	
23	545.772	1-辛烯-3-酮单体	1-Octen-3-one monomer	1.12 ± 0.02	0.86 ± 0.43	蘑菇味
24	241.68	1-戊醇二聚体	1-Pentanol dimer	1.44 ± 0.09	1.95 ± 0.98	刺激性、酵母味
25	242.358	1-戊醇单体	1-Pentanol monomer	2.04 ± 0.03	1.56 ± 0.78	

续表 6

序 号	保留时 间 (Rt)/s	化合物中文名	化合物	样品 (相对含量/%)		气味描述
				WC	YC	
26	181.56	1-戊烯-3-醇	1-Penten-3-ol	1.09 ± 0.05	0.61 ± 0.31	黄油、鱼、青香、氧化、湿土
27	182.766	1-戊烯-3-酮二聚体	1-Penten-3-one dimer	2.97 ± 0.1	2.48 ± 1.25	
28	181.674	1-戊烯-3-酮单体	1-Penten-3-one monomer	0.19 ± 0.03	0.09 ± 0.04	鱼、青香、芥末、辛辣
29	256.78	2,3-丁二醇	2,3-Butanediol	0.07 ± 0.01	0.11 ± 0.05	油脂味
30	765.553	2,3-对乙基吡嗪	2,3-diethylpyrazine	0.16 ± 0.00	0.24 ± 0.12	谷物、榛子、肉类、坚果
31	430.632	2,6-对甲基吡嗪	2,6-dimethyl pyrazine	0.08 ± 0.00	0.11 ± 0.06	可可、咖啡、青香、烤牛肉、烤坚果
32	140.689	2-丁酮二聚体	2-Butanone dimer	4.62 ± 0.12	5.51 ± 2.75	
33	140.689	2-丁酮单体	2-Butanone monomer	1.81 ± 0.08	0.97 ± 0.48	芬芳、水果、宜人
34	386.316	2-丁基呋喃	2-Butylfuran	0.24 ± 0.01	0.32 ± 0.16	湿干草香
35	338.202	2-呋喃甲醇	2-Furanmethanol	0.12 ± 0.00	0.04 ± 0.02	焦味
36	383.273	2-庚酮二聚体	2-Heptanone dimer	0.60 ± 0.01	1.05 ± 0.53	
37	382.272	2-庚酮单体	2-Heptanone monomer	1.30 ± 0.03	1.21 ± 0.61	肉香
38	260.254	2-己酮二聚体	2-Hexanone dimer	0.40 ± 0.01	0.74 ± 0.37	
39	260.254	2-己酮单体	2-Hexanone monomer	0.34 ± 0.02	0.30 ± 0.15	特殊辛辣气味
40	332.07	2-己烯醛二聚体	2-Hexenal dimer	1.98 ± 0.12	3.03 ± 1.52	
41	332.07	2-己烯醛单体	2-Hexenal monomer	2.39 ± 0.02	2.07 ± 1.04	青草香、脂肪香
42	172.356	2-甲基丁醛二聚体	2-Methylbutanal dimer	0.46 ± 0.04	1.29 ± 0.65	
43	172.674	2-甲基丁醛单体	2-Methylbutanal monomer	0.64 ± 0.01	0.55 ± 0.28	杏仁、可可、发酵、榛子、麦芽
44	496.182	2-甲基丁酸丙酯	2-methylpropyl butanoate	1.71 ± 0.11	1.43 ± 0.72	果香、甜香
45	576.944	2-戊基呋喃	2-Pentyl furan	3.91 ± 0.08	4.44 ± 2.23	清香、水果、黄油味
46	252.307	3-己酮	3-Hexanone	0.15 ± 0.01	0.12 ± 0.06	葡萄味
47	166.619	3-甲基丁醛二聚体	3-methyl butanal dimer	0.37 ± 0.02	1.14 ± 0.57	
48	164.388	3-甲基丁醛单体	3-methyl butanal monomer	2.04 ± 0.08	2.17 ± 1.09	焦糖味、坚果味、麦香味
49	539.354	3-甲基-2-环戊酮	3-Methyl-2-cyclopentenone	0.23 ± 0.01	0.22 ± 0.11	
50	559.807	3-辛酮	3-Octanone	1.03 ± 0.03	1.22 ± 0.61	黄油、香草
51	120.694	丙酮	Acetone	4.40 ± 0.17	4.88 ± 2.46	刺鼻
52	598.031	α -水芹烯	alpha-Phellandrene	1.71 ± 0.03	1.46 ± 0.73	柑橘、新鲜、薄荷、胡椒、香料
53	509.098	苯甲醛二聚体	Benzaldehyde dimer	0.52 ± 0.04	0.57 ± 0.28	
54	508.181	苯甲醛单体	Benzaldehyde monomer	1.33 ± 0.01	1.09 ± 0.54	杏仁味、焦糖味
55	1 007.97	癸醛	Decanal	0.15 ± 0.00	0.15 ± 0.08	花香、油炸、橙皮、渗透、牛油
56	401.983	庚醛二聚体	Heptanal dimer	5.82 ± 0.10	5.73 ± 2.87	
57	398.896	庚醛单体	Heptanal monomer	2.78 ± 0.07	2.00 ± 1.00	柑橘、脂肪、青香、坚果
58	535.817	庚醇	Heptanol	0.20 ± 0.01	0.28 ± 0.14	药草香
59	784.535	N-壬醛二聚体	n-Nonanal dimer	0.87 ± 0.00	1.42 ± 0.71	
60	783.402	N-壬醛单体	n-Nonanal monomer	2.67 ± 0.03	2.83 ± 1.41	脂肪、花香、青香、柠檬
61	189.975	正戊醛	n-pentanal	1.79 ± 0.16	1.28 ± 0.64	杏仁、苦味、麦芽、油、辛辣
62	605.222	辛醛二聚体	Octanal dimer	2.18 ± 0.06	2.97 ± 1.48	
63	604.58	辛醛单体	Octanal monomer	3.34 ± 0.01	2.78 ± 1.39	柑橘、脂肪、青香、油、辛辣

注：由于 GC-IMS 数据库有限，仅展示已定性的化合物；相对含量表示为 $X \pm SD$ ；物质后缀 Monomer、Dimer 分别为同一个物质的单体、二聚体。气味描述来源于 GC-IMS 数据库数据库。

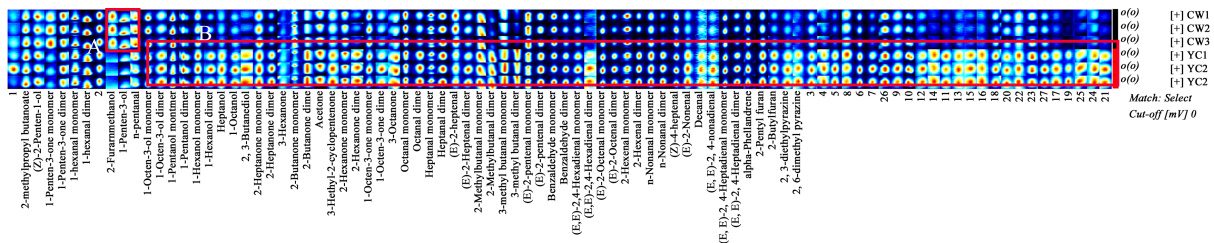


图 11 藏羊肝中挥发性成分指纹图谱

Fig.11 Fingerprint of volatile components in Tibetan sheep liver

2.3.3 藏羊肝中挥发性成分指纹图谱比对分析

指纹图谱可以清晰直观地展示每种样品的完整挥发性有机物信息以及样品之间挥发性有机物的差异，具体见图 11。图中每一行代表一个样品中选取的全部信号峰，每一列代表同一挥发性有机物在不同样品中的信号峰，颜色越深表示该挥发性成分浓度越高，因数据库有限，27 种物质未被定性，以数字表示。由图可知，2 种样品的挥发性物质的差异较大，明显大部分 YC 中的挥发性物质浓度更高。图中 A 区域物质在 WC 样品中浓度最高，主要物质有 1-戊烯-3-醇、戊醛等。图中 B 区域物质在 YC 样品中浓度最高，主要挥发性物质有：醇类（1-辛烯-3-醇、戊醇、己醇、庚醇、辛醇、2,3-丁二醇等）、酮类（2-庚酮、3-己酮、2-丁酮、丙酮、3-甲基-2-环戊酮、2-己酮、1-辛烯-3-酮和 3-辛酮等）、醛类（辛醛、庚醛、2-甲基丁醛、3-甲基丁醛、苯甲醛、(E,E)-2,4-己烯醛、壬醛）、 α -水芹烯、呋喃类（2-戊基呋喃、2-丁基呋喃等）、吡嗪类（2,3-对乙基吡嗪、2,6-对甲基吡嗪等）等。

其中 A 中的戊醛类物质具有苦味，2-呋喃甲醇具有焦味等不良风味，在 YC 样品中，含量显著减少，而 YC 样品中增加的 1-辛烯-3-醇、2-戊基呋喃、辛醛等物质均具有良好风味（具体风味见表 6），减弱羊肝膻味的同时为羊肝提供了丰富的风味和口感。由此可见，经过去腥优化工艺处理的样品减少了不良风味的同时增加了香味，去腥效果显著。

2.3.4 藏羊肝中挥发性成分PCA分析

PCA 可用于初步了解各组样品间的总体差异和组内样品间的变异程度^[24]，样品相近则代表差异小，相隔远则代表组分差异明显，结果见图 12。由图可知，同一份样品的平行品相互靠拢，2 组样品可被完全分离，说明处理前后的样品成分有显著差异，处理效果对比明显。

醛类化合物是煮制羊肉中含量最高的挥发性化

合物，主要是由于不饱和脂肪酸的氧化分解^[24]，不饱和醛类，是肉制品的主要风味来源，可以给肉增加脂肪、坚果、黄瓜等味道，减轻膻味，同时，不饱和醛还能进一步降解产生新的风味化合物^[25]，但浓度不宜过高，否则将引起脂肪酸败产生不良气味。酮类常被认为是在脂质氧化、烷烃降解和二级醇脱氢过程中形成的次级产物^[12]，大多数酮类具有水果味，阈值高于醛类^[26]，对羊肉的腥味有一定的消减作用^[27]。醇类是由糖代谢、脂质氧化、氨基酸脱羧和脱氢形成的，其阈值高于醛类，因此总体对羊肉风味影响不大，但在风味形成中起协同作用^[28]。一些醇类能给羊肝带来青草香、脂肪的香味。吡嗪类具有坚果和焙烤香气^[29]。呋喃类具有肉汁的香味^[27]及清香味。 α -水芹烯具有胡椒、香料气味。酯类源于羧酸和醇的酯化，具有芳香味。综上所述，羊肝风味是多种风味物质共同作用的效果。

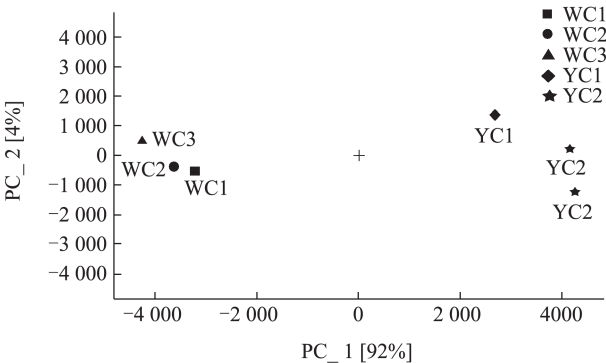


图 12 藏羊肝中挥发性成分的 PCA 得分图

Fig.12 PCA score map of volatile components in Tibetan sheep liver

3 结论

本试验采用藏羊肝为原料，以感官评定为指标，通过单因素试验，运用 Box-Behnken 试验设计，对其响应面回归过程进行数据分析，得到羊肝粉去腥的工艺最佳条件，并对样品进行 GC-IMS 风味分

析。羊肝粉的腥味去除的工艺最佳条件为：煮制 50 min，添加辅料浓度为 4%，干燥 4 h，得到的羊肝粉色泽呈均一的土白色，粉状质地细腻，去腥效果最佳，同时，经过 GC-IMS 进行风味分析，该去腥工艺遮蔽多种不良风味的同时富集大量挥发性香味的醛类、酮类、醇类等芳香物质，去腥工艺效果显著。通过本试验进一步优化了羊肝粉去腥的工艺条件，为羊肝及其产品的精深加工发展方向提供新思路。

参考文献

- [1] VAN SAUN R J. Trace mineral nutrition of sheep [J]. The Veterinary Clinics of North America. Food Animal Practice, 2023, 39(3): 517-533.
- [2] LIU T, ZHANG T, YANG L, et al. Effects of fermentation on the physicochemical properties and aroma of lamb liver paste [J]. Fermentation, 2022, 8(12): 676.
- [3] STAPAJ P V, STAKHIV N P, HAVRYLIAK V V, et al. Lipid nutrition of sheep[J]. Biol. Tvarin., 2020, 22 (2): 3-8.
- [4] 都日玛.羊肝酱制作工艺及超高压处理对其风味的影响[D].呼和浩特:内蒙古农业大学,2022.
- [5] 景安琪,吕南,双全,等.羊肝干的加工工艺优化及食用品质的研究[J].食品研究与开发,2020,41(17):64-70.
- [6] 吕南.羊肝干的加工工艺及其品质功能特性的研究[D].呼和浩特:内蒙古农业大学,2020.
- [7] 冯宇隆.北京鸭风味物质的分离鉴定及其脂类对鸭肉风味的影响[D].北京:中国农业科学院,2014.
- [8] 马丽珍,蒋福虎,刘会平.羊肉脱膻及全羊系列肉制品的开发研究现状[J].中国农业科技导报,2001,6:21-24.
- [9] 韩志慧,隋姣,马俪珍.明目羊肝羹的工艺技术研究[J].山西农业科学,2013,41(3):254-258.
- [10] 代启超.无膻味羊肝羹的制作工艺[J].农业科技与装备,2010,5:45-47.
- [11] LI Z Z, WARNER R D, MINH H. Rinse and chill®, frozen storage and retail packaging influence the quality of lamb loins [J]. Meat Science, 2023, 195: 109000.
- [12] WU Q R, ZANG M W, WANG S W, et al. Changes in flavors profiles of stewed bone-in lamb loin during cooking by DHS/GC-MS combined with electronic bionic systems [J]. Food Bioscience, 2023, 53: 102767.
- [13] YU Y, ZHANG B Y, JIANG X Z, et al. Exploring the metabolomic landscape: *Perilla frutescens* as a promising enhancer of production, flavor, and nutrition in tan lamb meat [J]. Meat Science, 2024, 209: 109419.
- [14] 杨东松,高爽,袁红,等.羊肉中呈膻物质的形成机制及降膻方式的研究进展[J].食品科学,2024,45(8):331-341.
- [15] DENG S Y, LIU Y H, HUANG F, et al. Evaluation of volatile flavor by different pig breeds during storage time [J]. Food compounds in Bacon Made Chemistry, 2021, 357: 129765.
- [16] 董阳阳.水煮羊肉在贮藏期风味物质变化及工艺优化[D].乌鲁木齐:新疆农业大学,2023.
- [17] 陆海霞,傅玉颖,李学鹏,等.漂洗工艺对秘鲁鱿鱼鱼糜凝胶特性的影响[J].食品研究与开发,2010,31(9):1-5,33.
- [18] 赵洪雷,冯媛,徐永霞,等.海鲈鱼肉蒸制过程中品质及风味特性的变化[J].食品科学,2021,42(20):145-151.
- [19] 何小龙,单康,戴阳军,等.响应曲面法优化花椒去腥工艺研究[J].中国调味品,2015,40(3):60-63.
- [20] 李美君,王德宝,杨帆,等.不同干燥方式对羊肉干的影响及其研究[J].食品工业,2015,36(1):127-129.
- [21] INSAUSTI K, MURILLO-ARBIZU M T, URRUTIA O, et al. Volatile compounds, odour and flavour attributes of lamb meat from the navarra breed as affected by ageing [J]. Foods, 2021, 10(3): 493.
- [22] 孟新涛,乔雪,潘俨,等.新疆不同产区羊肉特征风味成分离子迁移色谱指纹谱的构建[J].食品科学,2020,41(16): 218-226.
- [23] FLORES M. Understanding the implications of current health trends on the aroma of wet and dry cured meat products [J]. Meat Science, 2018, 144: 53-61.
- [24] 陈春梅.超声波辅助炖煮羊肉汤的工艺优化及风味分析[D].扬州:扬州大学,2021.
- [25] 张蓝月,孙万成,罗毅皓.基于气相色谱-离子迁移谱分析不同地区羊肉的挥发性风味化合物[J].食品与发酵工业, 2023,49(10):265-272.
- [26] 顾赛麒,唐锦晶,周绪霞,等.腌腊鱼传统日晒干制过程中品质变化与香气形成[J].食品科学,2019,40(17):36-44.
- [27] 张欢欢,张玲,黄桃翠,等.油菜籽品种对浓香菜籽油风味的影响[J].食品与发酵工业,2023,49(2):187-194.
- [28] 陈鹏羽,张德权,李少博,等.基于电子鼻和顶空固相微萃取结合气相色谱-嗅闻-质谱联用技术分析不同品种羊肉煮制风味特征[J].食品与发酵工业,2024,50(10):298-305.
- [29] REINHARD H, SAGER F, ZOLLER O. Citrus juice classification by SPME-GC-MS and electronic nose measurements [J]. LWT-Food Science and Technology, 2008, 41(10): 1906-1912.