DOI: 10.19812/j.cnki.jfsq11-5956/ts.20260323005
引用格式: 欧阳灿, 刘祎宁, 李小平. 万能蒸烤箱制作干煸四季豆工艺优化及其挥发性风味物质分析[J]. 食品安全质量检测学报, 2026, 17(16): 127–134.
Ouyang Can, Liu Yining, Li Xiaoping. Process optimization for dry-fried *Phaseolus vulgaris* L. in a combi-steam oven and analysis of its volatile flavor compounds [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2026, 17(16): 127–134. (in Chinese with English abstract).

万能蒸烤箱制作干煸四季豆工艺优化及其挥发性风味物质分析

欧阳灿[1*], 刘祎宁[1,2], 李小平[1]
(1. 四川旅游学院烹饪与食品科学工程学院, 成都 610100; 2. 中国农业大学食品科学与营养工程学院, 北京 100083)

摘 要: 目的 优化基于万能蒸烤箱的干煸四季豆烹饪工艺, 并对比分析传统炒制与万能蒸烤箱制备样品的挥发性风味物质差异。**方法** 以干煸四季豆为对象, 通过单因素与正交试验优化万能蒸烤箱的加热温度、湿度和时间参数; 采用气相色谱-质谱技术(gas chromatography-mass spectrometry, GC-MS)检测传统炒制与万能蒸烤箱制作两种方式所得样品的挥发性成分, 并结合相对气味活度值(relative odor activity value, ROAV)确定关键风味物质。**结果** 万能蒸烤箱最佳烹饪条件为加热温度 200 ℃、湿度 70%、时间 8.5 min, 此条件下产品感官品质最优。GC-MS 共鉴定出 30 种挥发性化合物, 涵盖酯类、醛类、烯烃等 9 类。ROAV 分析表明, 2-甲基丁醛、异戊醛和庚醛为两种方式共有的关键风味物质, 对干煸风味起主导作用; 苯乙烯、异戊醛、庚醛等物质在蒸烤箱组的 ROAV 更高, 对整体风味的贡献更为突出。**结论** 本研究确立了干煸四季豆的标准化万能蒸烤箱制作工艺参数, 揭示了关键风味物质及加工方式对其贡献的影响规律, 为其标准化与数字化加工提供了可靠的工艺参数和风味理论依据。

关键词: 干煸四季豆; 万能蒸烤箱; 配方; 工艺; 挥发性风味物质
中图分类号: TS971 **文献识别码:** A **文章编号:** 2095–0381(2026)16–0127–08

Process optimization for dry-fried *Phaseolus vulgaris* L. in a combi-steam oven and analysis of its volatile flavor compounds

OUYANG Can[1*], LIU Yi-Ning[1,2], LI Xiao-Ping[1]
(1. *College of Culinary and Food Science Engineering*, *Sichuan Tourism University*, *Chengdu* 610100, *China*; 2. *College of Food Science and Nutritional Engineering*, *China Agricultural University*, *Beijing* 100083, *China*)

ABSTRACT: Objective To optimize the cooking process of dry-fried *Phaseolus vulgaris* L. in a combi-steam oven, and compare the differences in volatile flavor compounds between samples prepared by traditional stir-frying and by the combi-steam oven. **Methods** Taking dry-fried *Phaseolus vulgaris* L. as the research object, the heating temperature,

收稿日期: 2026-03-23
基金项目: 川菜人工智能重点试验室科研项目(CR23Z14); 四川旅游学院校级重点项目(2023SCTUZD08); 四川省烹饪科学重点试验室项目(PRKX2020Z12)
第一作者/*通信作者: 欧阳灿(1986—), 男, 硕士, 讲师, 主要研究方向为烹饪技艺传承与创新、川菜标准化。E-mail: ouyangcan520@126.com

humidity and cooking time of the combi-steam oven were optimized through single-factor and orthogonal experiments. Gas chromatography-mass spectrometry (GC-MS) was employed to detect the volatile components of products obtained by the 2 kinds of methods, and the relative odor activity value (ROAV) was calculated to identify the key flavor compounds. **Results** The optimal cooking conditions for the combi-steam oven were a heating temperature of 200 ℃, a humidity of 70%, and a cooking time of 8.5 min, under which the product achieved the best sensory quality. A total of 30 volatile compounds were identified by GC-MS, covering 9 chemical classes including esters, aldehydes and olefins. ROAV analysis demonstrated that 2-methylbutanal, isovaleraldehyde and heptanal were the key flavor compounds common to both cooking methods, playing a dominant role in the dry-fried flavor. The ROAV values of styrene, isovaleraldehyde, heptanal and other compounds were higher in the combi-steam oven group, making their contributions to the overall flavor more prominent. **Conclusion** This study establishes standardized combi-steam oven process parameters for dry-fried *Phaseolus vulgaris* L., reveals the key flavor compounds and the influence of processing methods on their contributions, and provides reliable process parameters and a flavor chemistry foundation for the standardized and digital processing of this dish.

KEY WORDS: dry-fried *Phaseolus vulgaris* L.; combi-steam oven; formulation; technological; volatile flavor compounds

0 引 言

干煸是川菜中一种具有代表性的经典烹调技法，以中火、少油、缓煸为特点，成菜具有干香脆嫩、滋味醇厚的质感，被誉为川菜四大绝活之一，广泛应用于蔬菜、肉类、豆制品等食材的烹饪加工[1]。四季豆(*Phaseolus vulgaris* L.)质地脆嫩、营养丰富，富含膳食纤维、多种维生素及矿物质，是中式烹饪中应用最为广泛的鲜食豆类蔬菜[2−3]。干煸四季豆作为川菜代表性家常菜与宴席菜，以四季豆为主要原料，搭配芽菜、猪肉末辅以调味制成，凭借干香脆嫩的独特口感深受消费者喜爱。目前国内关于干煸类菜品的研究多集中于传统烹饪技艺总结、食材搭配改良与感官品质评价，相关研究多停留在经验性工艺描述阶段。现有文献多针对传统炒制工艺的风味特点、口感优化进行分析，而对于干煸菜品智能化、标准化、低油化加工技术的研究较为薄弱。传统干煸四季豆采用宽油预炸后明火煸炒的加工模式，存在工序烦琐、用油量高、火候依赖人工经验、成品品质稳定性差、难以批量标准化生产等突出问题[4]。

万能蒸烤箱是一种集干热、蒸汽及组合模式于一体的现代化厨房设备，可同时实现炸制[5]、炖制[6]、预熟[7]等多种烹饪工艺，具有烹饪时间短、原料失水少、增香上色及脆皮效果好等特点[8]，且操作简便，易于大批量标准化生产，兼具节能环保优势[9]。目前，该设备已在西式烤肉、烘焙及部分中式蒸制菜肴的工业化中得到较广泛研究，但在传统川式“煸”制技法中的应用鲜见报道。若能将万能蒸烤箱的热风与蒸汽组合模式应用于干煸过程，有望在精确控制温度和湿度的前提下，模拟甚至优化“干煸”的脱水增香效果，大幅降低用油量并实现工艺标准化。

基于上述研究现状与行业痛点，本研究首次以干煸四季豆为对象，利用万能蒸烤箱对其烹饪工艺进行优化。通过单因素与正交试验确定最佳加热温度、湿度和时间参数，建立标准化的制作流程；同时采用气相色谱-质谱(gas chromatography-mass spectrometry, GC-MS)技术结合相对气味活度值(relative odor activity value, ROAV)，系统比较传统炒锅与万能蒸烤箱所制样品的挥发性风味物质差异，明确两种加工方式下的关键风味化合物及其贡献变化。研究旨在为干煸四季豆从经验式烹饪向数字化、标准化加工转型提供科学参数和风味理论依据，也为其他传统干煸菜品的工业化生产提供方法学参考[10−11]。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

四季豆(新鲜蔬菜，购于成都市龙泉驿区永辉超市)；猪肉末(新鲜猪肥瘦肉绞肉，购于成都市龙泉驿区永辉超市)；碎米芽菜(酱腌菜，四川宜宾碎米芽菜有限公司)；福临门非转基因大豆油[一级大豆油，中纺粮油(四川)有限公司]；精盐、味精、料酒、酱油、香油、大葱等调味料及辅料由四川旅游学院烹饪与食品实验中心采购提供。

1.2 仪器与设备

SCC101 万能蒸烤箱(德国 Rational 公司)；GC-MS-QP 2010 Plus 气相色谱-质谱联用仪(日本 SHIMADZU 公司)；KFS-C 电子秤(最大量程 1 kg，分度值 0.01 g，凯丰集团有限公司)；固相微萃取装置(75 μm CAR/PDMS 萃取头，美国 Supelco 公司)；HH-S11-8 型恒温水浴锅(上海博迅医疗生物仪器股份有限公司)；Rtx-5MS 色谱柱(30 m×0.25 mm, 0.25 μm，美国 Restek 公司)。

1.3　工艺流程

将四季豆清洗干净, 去筋摘成段(约 8 cm), 滤干水分后称重 250 g 备用, 干煸四季豆的制作工艺如图 1 所示。干煸四季豆的基本配方参考《菜肴制作技术标准化教程》[12]中“干煸四季豆”的配方及工艺, 并结合预试验结果, 得出该菜肴的基础配方, 其主辅料包括: 四季豆(250 g)、猪肉末(50 g)、碎米芽菜(15 g)和大葱末(10 g); 所用调味料及其用量分别为: 精盐(2.5 g)、味精(0.5 g)、料酒(6 g)、酱油(3 g)、香油(2 g)以及大豆油(50 g), 将全部材料混合均匀, 铺平于烤盘中加热制熟。

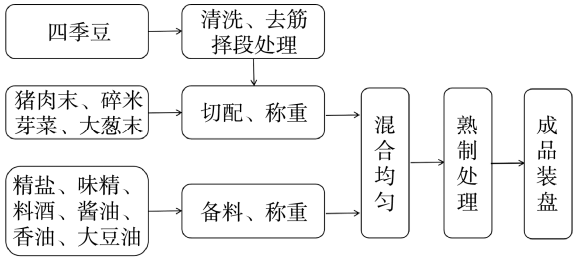


图 1　干煸四季豆制作工艺流程

Fig.1　Flowchart of the preparation process of dry-fried *Phaseolus vulgaris* L.

1.4　感官评分方法

感官评价小组由 20 位经过感官评价专业培训的烹饪与食品专业的师生组成(男女各 10 人)。评定在标准感官评价试验室中进行, 每个评价人员独立在日光灯光源下完成。所有样品以随机 3 位数编码, 随机顺序呈递。评价员分别对干煸四季豆的色泽、香气、滋味、口感 4 个指标进行打分, 每个指标满分 25 分, 最低 1 分, 精确到 1 分; 根据表 1 描述的强度与特征, 在对应的分数区间内给出具体分值。评定每个样品之间用饮用纯净水漱口, 并间隔 1 min 后再评价下一个样品。分别评出 4 个指标得分, 和为感官总分(满分 100 分)。感官评分标准如表 1 所示。

1.5　干煸四季豆的制作工艺单因素试验

分别以加热时间、加热湿度、加热温度为考察因素, 以感官评分结果为标准, 对干煸四季豆的制作工艺进行优化。各单因素试验的固定条件如下。

加热时间单因素试验: 固定加热温度为 180 ℃、加热湿度为 80%, 考察加热时间(7.0、7.5、8.0、8.5、9.0 min)对感官品质的影响。

加热湿度单因素试验: 固定加热温度为 180 ℃、加热时间为 8.0 min, 考察加热湿度(60%、70%、80%、90%、100%)对感官品质的影响。

加热温度单因素试验: 固定加热湿度为 80%、加热时间为 8.0 min, 考察加热温度(160、170、180、190、200 ℃)对感官品质的影响。

表 1　干煸四季豆的感官评分标准

Table 1　Sensory evaluation criteria for dry-fried *Phaseolus vulgaris* L.

指标	评价标准	分值
色泽 (25 分)	色泽鲜艳明亮, 呈翠绿色	17~25
	色泽稍暗, 但略有光泽亮度, 呈黄绿色	9~<17
	色泽较差, 暗淡无光泽, 并呈淡黄色	1~<9
香气 (25 分)	芽菜香气浓郁	17~25
	有一定的香气, 但不够浓郁	9~<17
	香气微弱难以察觉, 并略有异味	1~<9
滋味 (25 分)	咸鲜、芽菜香味浓郁, 有独特香味	17~25
	咸鲜、芽菜香味不突出, 但无异味	9~<17
	无咸鲜滋味, 无芽菜香味, 有异味	1~<9
口感 (25 分)	口感干香脆嫩	17~25
	口感较干香脆嫩, 但略硬	9~<17
	口感过硬或过软, 四季豆过生	1~<9

1.6　干煸四季豆的制作工艺正交试验

根据单因素试验结果, 以加热温度、加热湿度、加热时间为因素, 以成品的感官评分为标准, 进行正交试验, 筛选最优制作工艺, 正交试验因素水平如表 2 所示。

表 2　干煸四季豆工艺正交试验设计表

Table 2　Orthogonal experimental design table for the processing of dry-fried *Phaseolus vulgaris* L.

水平	因素			
	A(加热温度)/℃	*B*(加热湿度)/%	*C*(加热时间)/min	*D*(空列)
1	180	90	9.0	1
2	190	80	8.5	2
3	200	70	8.0	3

1.7　干煸四季豆挥发性风味物质分析

采用顶空固体微萃取 GC-MS 分析不同样品的香气成分, 相关条件参照陈丽兰等[13]的研究, 同时结合蔬菜风味检测的优化参数开展试验[14–15]。

萃取条件: 取干煸四季豆 5.0 g 置于密封空瓶中, 60 ℃下恒温水浴 30 min, 将老化(250 ℃, 10 min)过的固相萃取针插入样品瓶中, 吸附 30 min, 然后在 250 ℃气相色谱进样口解吸 5 min。

GC 条件: 色谱柱: Rtx-5MS (30 m×0.25 mm, 0.25 μm), 柱箱初始温度 40 ℃, 进样口温度 270 ℃, 在压力 49.5 kPa 下进样, 柱流量 1.00 mL/min, 分流比 3:0; 柱温箱升温程

序: 40 ℃。保持 5 min, 以 5 ℃/min 的速度升温至 150 ℃, 保持 2 min, 再以 10 ℃/min 的速度升温至 280 ℃, 保持 3 min。

MS 条件: 电子电离源, 离子源温度 200 ℃, 接口温度 220 ℃; 溶剂延迟时间 0.1 min; MS 开始时间 0.2 min, 结束时间 45 min, 间隔 0.5 s; 质量扫描范围 30~500 *m*/*z*。

数据处理分析: 使用 NIST 2014 质谱数据库资源对采集的数据进行筛选与鉴定。纳入匹配度高于 500 的化合物, 采用峰面积归一化法, 计算各挥发性成分的相对百分含量[16]。

1.8 相对气味活度值计算

通过计算相对气味活度值(relative odor activity value, ROAV)以评估挥发性成分对干煸四季豆风味形成的贡献, ROAV≥1 的化合物通常被认为对香气贡献显著。ROAV 值的计算公式(1)如下。

$$\mathrm{ROAV}_i \approx \frac{C_{\mathrm{ri}}}{C_{\mathrm{stan}}} \times \frac{T_{\mathrm{stan}}}{T_{\mathrm{ri}}} \times 100 \quad (1)$$

式中: C_{ri} 为该物质的相对含量, %; C_{stan} 为风味贡献最大化合物的相对含量, %; T_{stan} 为风味贡献最大化合物阈值, μg/kg; T_{ri} 为该挥发性化合物在空气中的阈值, μg/kg。

1.9 数据处理

试验均设置 3 次平行重复, 所有结果数据均以“平均值±标准偏差”表示, 试验原始数据采用 Microsoft Excel 2019 进行记录、初步整理与计算。使用 SPSS 17.0 对数据进行统计分析。所有图表均使用 Origin 2024 进行绘制。

2 结果与分析

2.1 干煸四季豆工艺的单因素试验结果

2.1.1 加热时间对感官评分的影响

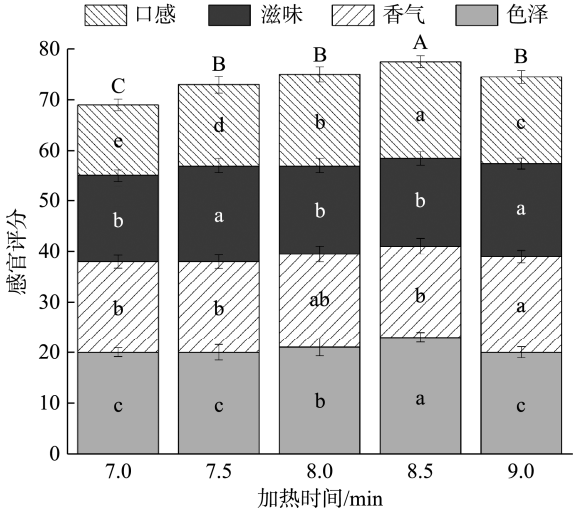
如图 2 所示, 当加热时间为 8.5 min 时, 干煸四季豆的感官评分最高, 四季豆色泽较翠绿, 表皮起皱明显, 口感较干香脆嫩。当加热时间过长时(9.0 min), 过度脱水使豆荚皱缩过度, 造成色泽黄化、口感干硬、不够脆嫩, 且稍伴有焦煳味。当加热时间较短(7.0 min、7.5 min)时则出现未成熟的现象。在后续试验中, 选择评分较高的 3 组(加热时间为 8.0、8.5、9.0 min)进行正交试验。

2.1.2 加热湿度对感官评分的影响

如图 3 所示, 当加热的湿度为 70%时感官评分最高, 此时四季豆色泽翠绿、表皮起皱明显、口感较干香脆嫩, 这可能是因为当加热湿度为 70%时, 四季豆表面与内部水分迁移速率匹配, 豆荚表层得以迅速且均匀皱缩, 既锁定嫩度又形成干香外壳。在后续试验中, 选择评分较高的 3 组(加热湿度为 70%、80%、90%)进行正交试验。

2.1.3 加热温度对感官评分的影响

如图 4 所示, 当加热温度为 190 ℃时, 四季豆色泽较翠绿, 表皮起皱明显, 口感干香较脆嫩, 所对应的感官评分最高。加热温度在 180 ℃和 200 ℃时, 感官评分较高; 180 ℃时口感较干香且脆嫩, 表皮略微起皱, 200 ℃时口感干香且较脆嫩, 表皮起皱明显, 但稍伴有焦煳味; 在温度低于 180 ℃时, 口感不够干香, 且成熟度不够, 感官评分降低。因此选取的加热温度为 180、190、200 ℃, 进行正交试验。



注: 不同大写字母表示感官评分差异显著性(P<0.05); 不同小写字母表示单项感官评分差异显著性(P<0.05), 下同。

图 2 加热时间对感官评分的影响

Fig.2 Effects of heating time on sensory quality scores

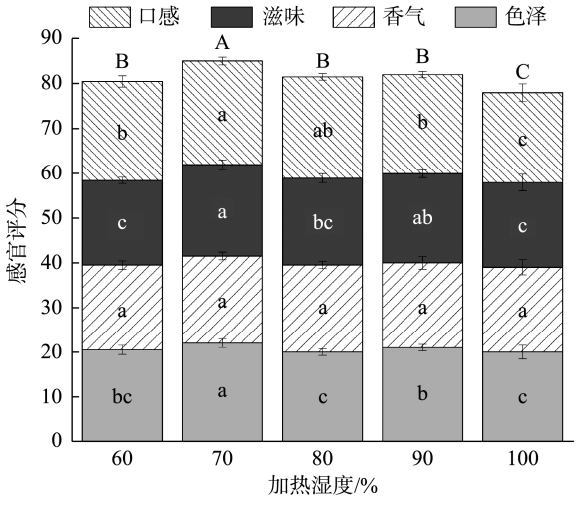


图 3 加热湿度对感官评分的影响

Fig.3 Effects of heating humidity on sensory quality scores

2.2 正交试验结果与分析

采用极差分析结合方差分析处理数据。由表 3 极差 R 可知, 各因素对感官评分的影响主次顺序为 B>A>C, 且空白列 R_{D}=0.8 与 R_{C}=0.7 均较小, 提示试验误差控制较好, 因素 C 在这 3 水平内可能影响较小。加热湿度极差值最大, 是决定菜品干香口感与色泽成型的核心因素; 湿度直接调控

物料脱水速率, 湿度不足易造成表皮焦煳、内部夹生, 湿度过高则无法形成干煸特有褶皱脆感。加热温度次之, 高温促进美拉德反应形成干煸特征香气; 加热时间极差仅 0.7, 对成品感官影响最弱, 说明在单因素筛选的 8.0~9.0 min 区间内, 时间小幅变动不会造成品质大幅波动。

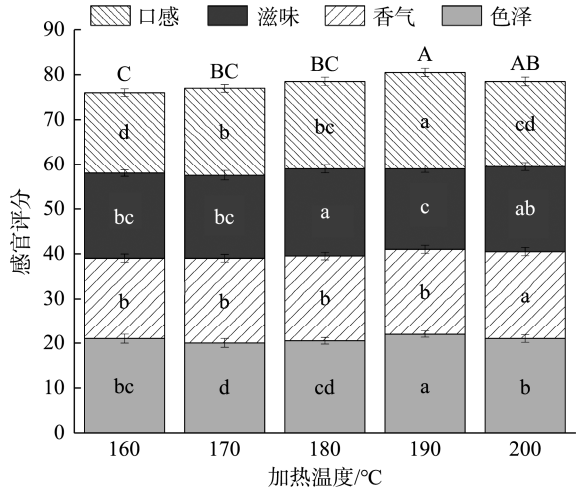


图 4　加热温度对感官评分的影响

Fig.4　Effects of heating temperature on sensory quality scores

空白列 *D* 极差(0.8)与加热时间 *C* 极差接近, 说明本试验条件下, 温度、湿度、加热时间 3 者间存在微弱交互效应, 交互作用带来的品质波动幅度略高于加热时间单一变量的影响。根据各因素均值 *k* 最大值对应的水平, 不考虑交互作用时理论最优工艺组合为 $A_3B_3C_2$(高温 200 ℃、高湿度 70%、中时间 8.5 min); 该组合并未出现在 9 组正交试验组别中。

表 3　干煸四季豆的工艺优化正交试验结果

Table 3　Orthogonal test results for process optimization of dry-fried *Phaseolus vulgaris* L.

试验号	*A*(加热温度)/℃	*B*(加热湿度)/%	*C*(加热时间)/min	*D*(空白列)	感官评分
1	1	1	1	1	67.2
2	1	2	2	2	72.7
3	1	3	3	3	74.8
4	2	1	3	2	65.3
5	2	2	1	3	72.2
6	2	3	2	1	75.3
7	3	1	2	3	74.0
8	3	2	3	1	79.8
9	3	3	1	2	81.8
K_1	214.7	206.5	221.2	222.3	
K_2	212.8	224.7	222.0	219.8	
K_3	235.6	231.9	219.9	221.0	
k_1	71.6	68.8	73.7	74.1	
k_2	70.9	74.9	74.0	73.3	
k_3	78.5	77.3	73.3	73.7	
R	7.6	8.5	0.7	0.8	

为判断各因素效应的显著性, 以空白列(*D*)的偏差平方和作为误差项, 进行方差分析, 结果见表 4。由方差分析可知, 加热湿度(*B*)对感官评分有极显著影响($P<0.01$), 加热温度(*A*)有显著影响($P<0.05$), 而加热时间(*C*)影响不显著($P>0.05$)。这表明, 在万能蒸烤箱加工过程中, 湿度和温度是控制干煸四季豆风味品质的关键因素, 而时间在所选范围内波动对评分影响较小。因此, 最优工艺应优先取 *A* 和 *B* 的高水平, 即 A_3(200 ℃)、B_3(70%); 对于不显著的 *C* 因素, 结合 *k* 值(C_2=74.0 略高于 C_1=73.7)及实际操作可行性, 选择 C_2(8.5 min)。由此确定最优工艺组合为 $A_3B_3C_2$, 该组合未出现在正交表中。因此需开展验证试验, 以确定使用万能蒸烤箱制作干煸四季豆的最佳工艺。

表 4　正交试验方差分析表

Table 4　Table of analysis of variance for orthogonal test

方差来源	偏差平方和	自由度	均方	*F*	显著性
A(加热温度)	101.36	2	50.68	97.24	*
B(加热湿度)	114.27	2	57.13	109.63	**
C(加热时间)	0.75	2	0.37	0.72	
D(误差)	1.04	2	0.52		
总计		8			

注: *表示差异显著($P<0.05$), **表示差异极显著($P<0.01$)。

将正交试验极差与方差分析计算出的最佳组合 $A_3B_3C_2$ 与正交试验表中的最高分组合 $A_3B_3C_1$ 开展验证试验, 并根据感官评分标准对其制作出的干煸四季豆成品进行感官评定。由表 5 可知, 使用万能蒸烤箱对干煸四季豆进行加热制熟处理的最优工艺组合为 $A_3B_3C_2$, 即在加热温度 200 ℃、加热湿度 70%、加热时间 8.5 min 的条件下, 可得到感官品质最佳的干煸四季豆。

表 5　工艺优化验证试验结果

Table 5　Verification test results of process optimization

检验配方	加热温度/℃	加热湿度/%	加热时间/min	感官评分
$A_3B_3C_1$	200	70	9.0	81.8
$A_3B_3C_2$	200	70	8.5	83.1

2.3　干煸四季豆挥发性成分分析

不同加工方式对干煸四季豆中挥发性风味成分的影响不同。本研究涉及的处理条件分别为: 传统烹饪组指由专业厨师在明火灶台通过炒锅完成翻炒、煸制等典型中式烹饪操作; 万能蒸烤箱组则采用万能蒸烤箱进行加热处理。

由表 6 可知, 各挥发性成分中, 酸类物质具有最高的

比例, 在万能蒸烤箱烹饪组中占比达 82.54%, 传统烹饪组为 69.55%, 成为影响干煸四季豆风味的重要挥发性成分之一。酯类在传统烹饪组相对含量为 0.13%, 万能蒸烤箱组为 0.19%。烯烃在万能蒸烤箱组含量提升明显, 达 4.99%, 传统烹饪组为 1.41%。酮类物质在传统烹饪组占优, 为 8.17%。

表 6 不同烹饪方法制得的干煸四季豆挥发性风味物质相对含量
Table 6 Relative content of volatile flavor substances in dry-fried *Phaseolus vulgaris* L. under different cooking methods

组别	挥发性风味物质相对含量	
	传统烹饪组/%	万能蒸烤箱组/%
酯类	0.13±0.05	0.19±0.07
烯烃	1.41±0.28	4.99±0.77
烷烃	0.11±0.08	0.06±0.02
酮类	8.17±1.28	0.44±0.12
酸类	69.55±7.63	82.54±11.47
醛类	11.88±3.58	9.75±1.17
苯类	0.19±0.05	1.66±0.12
呋喃类	0.10±0.04	0.36±0.14
其他	8.46±1.27	0.00

由表 7 可知, 干煸四季豆的挥发性风味物质中, 醛类化合物的种类最为丰富, 其次是烯烃和酸类物质。两组样品中所鉴定出的挥发性成分种类具有明显区别。其中传统烹饪组挥发性成分共检测出 24 种, 万能蒸烤箱组为 18 种。导致风味物质含量降低甚至无法检出可能原因包括高温烹饪导致的物质分解、逸出, 以及各风味物质之间的相互作用[17–19]等。

特征挥发性成分的种类和 ROAV 值(ROAV≥0.1)如表 8 所示。香气阈值是指某一挥发性化合物在特定介质中被 50%受试者刚刚能嗅辨到的最低浓度, 因此, 香气阈值越低, 该物质越可能在极低浓度下即可被感知, 从而成为塑造干煸四季豆特征香气的关键赋香成分。醛类物质是脂质氧化和氨基酸分解代谢的产物, 具有低气味阈值, 通常具有强烈的清香味或脂肪味[20], 是食品特征风味的主要贡献者[21]。呋喃类化合物具有较低的气味阈值[22], 对菜品香味有重要贡献[23–24]。烹饪成熟后含量最高的为酸类物质, 共检出 2 种, 其中甲酸在两组中皆为含量最高的挥发性成分。这类物质通常来源于原料自身以及烹饪过程中的水解反应[25]。酯类化合物作为酯化反应的产物[26], 与其他物质一同对整体风味主要起调和作用。

ROAV 是定量评估挥发性风味物质对食品整体香气贡献程度的重要方法, ROAV≥1 的物质被视为关键风味化合物, 其对整体风味的形成具有直接影响; 而 0.1≤ROAV<1.0 的物质则被视为修饰性或协同性风味成分。本研究中, 不同烹饪方式处理的干煸四季豆样品挥发性风味物质的 ROAV 值呈现出明显差异。两组干煸四季豆分别检出特征性风味物质 5 种、6 种, 修饰性风味物质 4 种、2 种。

在特征性风味物质中, 2-甲基丁醛为两组共同的关键风味物质, 该物质高浓度时具有窒息性霉味, 稀释后呈可可、坚果、麦芽及发酵香韵。异戊醛来源于亮氨酸的 Strecker 降解反应[27], 是美拉德反应的特征产物, 其浓郁的坚果香、焦糖香是“煸炒”风味的典型标志, 其与庚醛、正辛醛、壬醛在万能蒸烤箱处理后 ROAV 均高于传统烹饪, 这可能是由于均匀高温可以通过促进油脂反应, 使中链醛类累积。2-正戊基呋喃则通常由大豆植物油的氧化产生[28], 它提供了菜肴所需的植物性清香和轻微的脂肪香气, 该物质在传统烹饪组仅为修饰性成分, 而万能蒸烤箱组中该物质的 ROAV 高于传统烹饪组, 提示万能蒸烤箱组油脂氧化程度可能高于传统烹饪组。传统烹饪组中具有两种特有的修饰性风味物质, 分别为(*E*)-2-庚烯醛与邻-异丙基苯; 万能蒸烤箱组中特有的修饰性风味成分为 2-庚烯醛。

综上, 万能蒸烤箱烹饪的四季豆中醛类等挥发物的风味贡献度明显提升, 构建了更为圆润、果香突出的风味轮廓, 苯乙烯、异戊醛等组分的变化规律与热加工蔬菜风味形成机理一致[29]。本研究与干煸牛肉风味研究[13,30]数据对比, 结果显示, 干煸四季豆与干煸牛肉之间存在一定共性物质, 这些物质可能为干煸风味的关键成分。如 2-甲基丁醛、苯甲醛作为脂质氧化的典型产物, 可以赋予菜品油脂焦香与烘烤风味; 甲苯、邻-异丙基甲苯则标志着干煸是一种在高温下发生相似芳香族氨基酸热解或脂肪裂解的化学反应的烹饪方式; 乙酸丁酯与 2-正戊基呋喃也共同检出。这些物质共同影响干煸风味的形成[31–32]。

表 7 各组干煸四季豆挥发性风味物质种类
Table 7 Categories of volatile flavor substances in dry-fried *Phaseolus vulgaris* L. of different groups

烹饪方式	酯类	烯烃类	烷烃类	酮类	酸类	醛类	苯类	呋喃类	其他
传统烹饪	2	3	3	1	2	9	2	1	1
万能蒸烤箱	2	2	1	1	1	7	3	1	0

表 8　不同烹饪方法制得的干煸四季豆特征挥发性风味物质种类及 ROAV

Table 8　Types and ROAV of characteristic volatile flavor compounds in dry-fried *Phaseolus vulgaris* L. prepared by different cooking methods

序号	组别	中文名称	气味描述	阈值/(μg/kg)	ROAV	
					传统烹饪	万能蒸烤箱
1	烯烃	苯乙烯	香脂、汽油	65.00	0.21	0.69
2	醛	异戊醛	可可味、杏仁香	5.00	8.38	9.92
3		2-甲基丁醛	霉味、发酵烘焙味	1.00	100.00	100.00
4		庚醛	脂肪气味、柑橘香、腐臭味	2.80	1.21	3.48
5		(*E*)-2-庚烯醛	肥皂味、脂肪气味、杏仁香	13.00	0.18	ND
6		2-庚烯醛	辛辣的绿色蔬菜、新鲜的脂肪	46.67	ND	0.21
7		正辛醛	脂肪气味、肥皂味、柠檬香、涩味	0.80	3.60	13.23
8		壬醛	脂肪气味、柑橘香、涩味	1.00	5.50	36.21
9	呋喃	2-正戊基呋喃	青豆味、黄油味	6.00	0.35	1.72
10	苯	邻-异丙基苯	-	3.75	0.63	ND

注: 表中列出的检出物质均为可查到该物质阈值且至少一个处理组中的 ROAV>0.1; ND 为未检出。-为未查询到香气描述。风味描述来源于 http://www.flavornet.org/flavornet.html; 阈值来源于《化合物嗅觉阈值汇编》第二版。

3　结　论

本研究以传统川菜干煸四季豆为研究对象, 依托万能蒸烤箱智能化烹饪设备, 系统开展烹饪工艺优化与风味物质解析研究。通过单因素试验与正交试验, 明确了加热温度、湿度与时间对菜品感官品质的影响规律, 最终确立万能蒸烤箱制备干煸四季豆的最优工艺参数为: 加热温度 200 ℃、相对湿度 70%、加热时间 8.5 min。该工艺可稳定实现菜品干香脆嫩的典型品质特征, 有效解决传统炒制工艺火候难控、用油量大、成品稳定性差、难以标准化量产的行业痛点。

GC-MS 结合 ROAV 风味分析结果可知, 两种烹饪方式制备的干煸四季豆挥发性风味组成存在明显差异。GC-MS 共鉴定出 30 种挥发性化合物, 涵盖酯类、醛类、烯烃等 9 类。万能蒸烤箱加工样品中异戊醛、庚醛、苯乙烯等关键风味物质的气味贡献度更高, 特征干煸风味更纯正突出[29,33], 表明温湿度耦合的智能烹饪模式能够更好地保留与生成菜品特征风味物质, 为干煸类川菜绿色、智能化加工提供了风味层面的理论支撑。

未来在此工艺参数的基础上, 可对干煸四季豆的质构特性、水分分布、微观组织结构及非挥发性滋味物质等方面进行更深入全面的研究, 为川菜干煸类菜品的数字化、精细化、标准化、智能化加工与品质调控提供更完善的理论依据与技术支撑。

参考文献

[1] 周彤. 干煸牛肉丝[J]. 上海调味品, 2007(10): 23–24.
Zhou Tong. Sautéed shredded beef with chili sauce [J]. Shanghai Seasoning, 2007(10): 23–24.

[2] 马淑然. 漫谈蔬菜在健康养生中的食疗价值[J]. 生命世界, 2020(9): 66–71.
Ma Shuran. On the dietotherapy value of vegetables in health preservation [J]. Life World, 2020(9): 66–71.

[3] 松林. 食用四季豆减轻脂肪肝促进肠道健康[J]. 健与美, 2023(10): 67.
Song Lin. Kidney beans alleviating fatty liver and improving intestinal health after consumption [J]. Fitness & Beauty, 2023(10): 67.

[4] 李罡. 教你做干煸四季豆[J]. 农村新技术, 2005(9): 44.
Li Gang. Teach you how to stir-fry green beans [J]. Rural New Technology, 2005(9): 44.

[5] 王雨寒, 欧阳灿. 基于万能蒸烤箱的整鱼炸制工艺优化研究[J]. 肉类工业, 2021(12): 27–32.
Wang Yuhan, Ouyang Can. Optimization of whole fish frying technology based on universal oven [J]. Meat Industry, 2021(12): 27–32.

[6] 陈丽兰, 陈祖明, 袁灿. 基于万能蒸烤箱的鸡汤炖制工艺分析[J]. 现代食品科技, 2023, 39(1): 262–269.
Chen Lilan, Chen Zuming, Yuan Can. Process analysis of the stewing method of chicken soup based on a combi-steamer [J]. Modern Food Science and Technology, 2023, 39(1): 262–269.

[7] 徐子昂, 司明志, 朱兆威, 等. 基于万能蒸烤箱的叉烧肉制熟工艺研究[J]. 美食研究, 2019, 36(3): 45–48.
Xu Ziang, Si Mingzhi, Zhu Zhaowei, et al. A study on technology of pork roasting with a universal steaming oven [J]. Journal of Researches on Dietetic Science and Culture, 2019, 36(3): 45–48.

[8] 于泉, 赵雪, 曹仲文. 基于万能蒸烤箱的南瓜饼制作的工艺优化[J]. 美食研究, 2017, 34(4): 48–50.
Yu Quan, Zhao Xue, Cao Zhongwen. Making pumpkin pie by using a selfcooking center [J]. Journal of Researches on Dietetic Science and Culture, 2017, 34(4): 48–50.

[9] 宁月莲, 黄晓燕, 胡文慧, 等. 电感耦合等离子体质谱法测定乳制品中硒含量[J]. 食品安全质量检测学报, 2020, 11(23): 8816–8821.
Ning Yuelian, Huang Xiaoyan, Hu Wenhui, et al. Determination of selenium in dairy products by inductively coupled plasma mass spectrometry [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2020, 11(23): 8816–8821.

[10] 彭斌, 胡文婷, 胡祥飞, 等. 热风干燥和微波干燥对草鱼肉品质的影响[J]. 食品安全质量检测学报, 2022, 13(18): 5804–5812.
Peng Bin, Hu Wenting, Hu Xiangfei, et al. Effects of hot air drying and microwave drying on the quality of *Ctenopharyngodon idella* meat [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2022, 13(18): 5804–5812.

[11] 李栋, 张立攀. 全二维气相色谱-飞行时间质谱结合 ROAV 法解析山茱萸挥发性风味组分[J]. 河南科学, 2022, 40(4): 524–532.
Li Dong, Zhang Lipan. Analysis of the volatile compounds of *Cornus officinalis* based on GC × GC-TOFMS combined with ROAV [J]. Henan Science, 2022, 40(4): 524–532.

[12] 潘涛. 菜肴制作技术标准化教程-川菜篇[M]. 成都: 西南交通大学出版社, 2011: 72–85.
Pan Tao. Course on standardization of cooking techniques-Sichuan cuisine [M]. Chengdu: Southwest Jiaotong University Press, 2011: 72–85.

[13] 陈丽兰, 吴华昌, 胡琦锋, 等. 不同部位牛肉制作的干煸牛肉品质及挥发性风味成分差异性分析[J]. 中国调味品, 2023, 48(1): 80–86.
Chen Lilan, Wu Huachang, Hu Qifeng, et al. Analysis of difference of quality and volatile flavor components of dry-fried beef made of different parts of beef [J]. China Condiment, 2023, 48(1): 80–86.

[14] 许春平, 刘亚龙, 刘远上, 等. 响应面法优化顶空固相微萃取分析茉莉加香颗粒挥发性成分[J]. 食品安全质量检测学报, 2024, 15(7): 202–210.
Xu Chunping, Liu Yalong, Liu Yuanshang, et al. Analysis optimization of the volatile components of jasmine flavored granules by head space-solid phase microextraction using response surface method [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2024, 15(7): 202–210.

[15] 王玉杰, 冯素萍, 郭熠, 等. 基于顶空气相色谱-离子迁移谱技术分析花生烘烤后挥发性风味物质的变化[J]. 食品安全质量检测学报, 2024, 15(10): 224–233.
Wang Yujie, Feng Suping, Guo Yi, et al. Analysis of volatile flavor compounds in peanuts after baking using headspace-gas chromatography-ion mobility spectrometry technology [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2024, 15(10): 224–233.

[16] 林丹, 吴宝珠, 冷朝杰, 等. 宫保鸡丁微波烹饪工艺优化及其挥发性风味物质分析[J]. 食品安全质量检测学报, 2022, 13(19): 6171–6180.
Lin Dan, Wu Baozhu, Leng Zhaojie, et al. Optimization of processing technology of Kung *Pao* chicken by microwave and analysis of volatile flavor components [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2022, 13(19): 6171–6180.

[17] 张静, 张迪, 车振明, 等. 调味料对鱼香肉丝风味品质的影响[J]. 美食研究, 2023, 40(1): 80–87.
Zhang Jing, Zhang Di, Che Zhenming, et al. Effect of auxiliary materials on aroma of Yuxiang rousi [J]. Journal of Researches on Dietetic Science and Culture, 2023, 40(1): 80–87.

[18] Müller C, Vetter F, Richter E, et al. Determination of caffeine, myosmine, and nicotine in chocolate by headspace solid-phase microextraction coupled with gas chromatography-tandem mass spectrometry [J]. Journal of Food Science, 2014, 79(2): T251–T255.

[19] 卿明义, 叶银凤, 李玉蟾, 等. 预包装柳州螺蛳粉汤料风味物质分析研究[J]. 食品安全质量检测学报, 2025, 16(20): 257–266.
Qing Mingyi, Ye Yinfeng, Li Yuchan, et al. Analysis of flavor substances in pre-packaged Liuzhou Luosifen soup [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2025, 16(20): 257–266.

[20] 郭宁静, 徐流芳, 李翔, 等. 川式美味牛肝菌香肠制作工艺及品质特性研究[J]. 美食研究, 2024, 41(3): 80–87.
Guo Ningjing, Xu Liufang, Li Xiang, et al. Study on the production process and quality characteristics of Sichuan *Boletus* edulis-style sausage [J]. Journal of Researches on Dietetic Science and Culture, 2024, 41(3): 80–87.

[21] 尚海燕, 宋莎莎, 王文亮, 等. 加工方式对食用菌风味物质影响的研究进展[J]. 食品与发酵工业, 2025, 51(23): 399–409.
Shang Haiyan, Song Shasha, Wang Wenliang, et al. Research progress on influence of processing methods on flavor substances of edible fungi [J]. Food and Fermentation Industries, 2025, 51(23): 399–409.

[22] 杜云, 张玉斌. 基于 GC×GC-TOF-MS 法分析黄焖羊肉中的挥发性物质[J]. 美食研究, 2024, 41(2): 62–69.
Du Yun, Zhang Yubin. Analysis of volatile substances in three kinds ofbraised mutton by GC×GC-TOF-MS [J]. Journal of Researches on Dietetic Science and Culture, 2024, 41(2): 62–69.

[23] 王美仁, 王柏辉, 杨帆, 等. 不同加工方式对牛肉干产品风味物质的影响[J]. 食品安全质量检测学报, 2025, 16(2): 127–137.
Wang Meiren, Wang Bohui, Yang Fan, et al. Effects of different processing methods on flavor substances of beef jerky products [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2025, 16(2): 127–137.

[24] 李骏函, 邓鹏, 马斯迪, 等. 不同热加工条件下植物汉堡肉中杂环胺和晚期糖基化末端终产物的同步生成规律[J]. 食品安全质量检测学报, 2025, 16(7): 45–54.
Li Junhan, Deng Peng, Ma Sidi, et al. Synchronous generation pattern of heterocyclic amines and advanced glycation end products in plant hamburger meat under different thermal processing conditions [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2025, 16(7): 45–54.

[25] 万凤林. 牛肝菌中挥发性风味物质与米酒中水溶性风味物质的活性研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2019: 10.
Wan Fenglin. Study on the activity of volatile flavor substances in bolete and water-soluble flavor substances in rice wine [D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2019: 10.

[26] 倪兴婷, 孙细珍, 严玲, 等. 白酒中重要风味物质的味觉阈值测定[J]. 食品与发酵工业, 2025, 51(22): 376–381.
Ni Xingting, Sun Xizhen, Yan Ling, et al. Determination of taste threshold of important flavor substances in Baijiu [J]. Food and Fermentation Industries, 2025, 51(22): 376–381.

[27] 田红玉, 孙宝国, 张洁, 等. *α*-二羰基类化合物与 *L*-亮氨酸组成模型体系的 Strecker 降解反应研究[J]. 食品科学, 2010, 31(4): 24–27.
Tian Hongyu, Sun Baoguo, Zhang Jie, et al. Investigation of strecker degradation in model systems consisting of alpha-dicarbonyls and *L*-leucine [J]. Food Science, 2010, 31(4): 24–27.

[28] 李金林, 涂宗财, 张露, 等. SPME-GC-MS 法分析草鱼汤烹制过程中挥发性成分变化[J]. 食品科学, 2016, 37(22): 149–154.
Li Jinlin, Tu Zongcai, Zhang Lu, et al. SPME-GC-MS analysis of changes in volatile compounds during preparation of grass carp soup [J]. Food Science, 2016, 37(22): 149–154.

[29] 耿宇凤. 半连续加热过程中大豆油挥发性化合物形成机制[D]. 大连: 大连工业大学, 2018: 10.
Geng Yufeng. Mechanism of volatile compound formation from soybean oils in a semi-continuous heating process [D]. Dalian: Dalian Polytechnic University, 2018: 10.

[30] 陈丽兰, 易宇文, 吴华昌, 等. GC-MS 结合电子鼻分析不同品牌郫县豆瓣对干煸牛肉品质的影响[J]. 中国调味品, 2022, 47(9): 39–43.
Chen Lilan, Yi Yuwen, Wu Huachang, et al. Analysis on effect of different brands of Pixian bean paste on the quality of stir-fried beef by gas chromatography-mass SpectrometryCombined with electronic nose [J]. China Condiment, 2022, 47(9): 39–43.

[31] Zhu Guangtao, Gou Junbo, Klee H, et al. Next-gen approaches to flavor-related metabolism [J]. Annual Review of Plant Biology, 2019, 70: 187–212.

[32] Joo J H, Hussein K A. Volatile organic compounds from *Trichoderma* spp. and their function in plant growth regulation [J]. Frontiers in Plant Science, 2022, 13: 897668.

[33] 张浩, 易宇文, 张振宇, 等. 基于固相微萃取-气相色谱-质谱法结合相对气味活度值分析影响牦牛肉风味的关键化合物[J]. 食品安全质量检测学报, 2023, 14(15): 195–205.
Zhang Hao, Yi Yuwen, Zhang Zhenyu, et al. Analysis the key compounds affecting the flavor of yak meat based on solid-phase microextraction-gas chromatography-mass spectrometry combined with relative odor activity value [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2023, 14(15): 195–205.

(责任编辑: 蔡世佳 安香玉)