

响应面法优化澳洲坚果真空油炸工艺及品质分析

黄克昌, 郭刚军, 马尚玄, 付稼榕, 徐文婷, 魏元苗, 杨悦雪, 贺熙勇

Optimization of Vacuum Frying Process and Quality Analysis of Macadamia Kernels by Response Surface Methodology

HUANG Kechang, GUO Gangjun, MA Shangxuan, FU Jiarong, XU Wenting, WEI Yuanmiao, YANG Yuexue, and HE Xiyong

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2023050079>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

响应面法优化低温真空油炸鱼糜脆片加工工艺

Optimization of Processing Technology for Low Temperature Vacuum Frying Surimi Chips by Response Surface Methodology

食品工业科技. 2018, 39(15): 181-188 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2018.15.033>

响应面优化菠萝蜜果粉真空冷冻干燥工艺

Optimization of vacuum freeze-drying of jackfruit powder by response surface methodology

食品工业科技. 2018, 39(12): 177-184 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2018.12.031>

模糊数学评价结合响应面法优化红枣脆片真空干燥工艺

Technology Optimization of Jujube Chips by Vacuum Drying Technology based on Fuzzy Mathematics Evaluation Combined with Response Surface Method

食品工业科技. 2018, 39(21): 164-171 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2018.21.030>

模糊数学感官评价法结合响应面法优化即食莲子片的工艺研究

Study on Optimization of Instant Lotus Seed Slices Processing by Fuzzy Mathematical Evaluation Method and Response Surface Methodology

食品工业科技. 2020, 41(1): 158-164 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2020.01.026>

澳洲坚果青皮多酚提取工艺优化及其抗氧化活性

Optimization of extraction and antioxidant activity of polyphenols from macadamia green peel

食品工业科技. 2017(22): 195-199 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2017.22.038>

响应面法优化板枣热风-真空分段联合干燥工艺

Optimization of Hot Air-vacuum Segment-combined Drying Process of Jishan Jujube by Response Surface Method

食品工业科技. 2020, 41(3): 131-138 <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2020.03.024>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

黄克昌, 郭刚军, 马尚玄, 等. 响应面法优化澳洲坚果真空油炸工艺及品质分析 [J]. 食品工业科技, 2024, 45(5): 197-204. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2023050079

HUANG Kechang, GUO Gangjun, MA Shangxuan, et al. Optimization of Vacuum Frying Process and Quality Analysis of Macadamia Kernels by Response Surface Methodology[J]. Science and Technology of Food Industry, 2024, 45(5): 197-204. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2023050079

· 工艺技术 ·

响应面法优化澳洲坚果真空油炸工艺及品质分析

黄克昌, 郭刚军*, 马尚玄, 付稼榕, 徐文婷, 魏元苗, 杨悦雪, 贺熙勇*

(云南省热带作物科学研究所, 云南省澳洲坚果农业工程研究中心, 云南景洪 666100)

摘要:以澳洲坚果果仁为原料, 制备真空油炸产品。采用单因素实验和响应面 Box-Behnken 试验进行真空油炸工艺优化; 以原料果仁为对照, 测定真空油炸果仁含油率、酸价、过氧化值、色差与感官品质指标。结果表明: 冷冻温度、真空油炸温度、真空油炸时间和真空度对澳洲坚果果仁的口感和风味品质影响差异极显著 ($P<0.01$), 澳洲坚果果仁真空油炸最佳工艺条件: 冷冻温度 $-24\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、真空油炸温度 $113\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、真空油炸时间 58 min 、真空度 -0.095 MPa , 在该工艺条件下制得的澳洲坚果果仁香味浓郁、口感酥松, 感官评分为 95.90 分, 酸价、过氧化值分别为 0.23 mg/g 、 0.14 g/100 g , 在低水平范围内, 符合 LY/T 1963-2018 的标准要求。因此, 真空油炸工艺极显著提高了澳洲坚果果仁的品质。

关键词:澳洲坚果果仁, 真空油炸, 响应面法, 工艺优化, 品质分析

中图分类号: TS255.6

文献标识码: B

文章编号: 1002-0306(2024)05-0197-08

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2023050079



本文网刊:

Optimization of Vacuum Frying Process and Quality Analysis of Macadamia Kernels by Response Surface Methodology

HUANG Kechang, GUO Gangjun*, MA Shangxuan, FU Jiarong, XU Wenting, WEI Yuanmiao, YANG Yuexue, HE Xiyong*

(Yunnan Institute of Tropical Crops, Yunnan Macadamia Agricultural Engineering Research Center, Jinghong 666100, China)

Abstract: Vacuum-fried products were prepared with macadamia kernels as raw material. Single factor experiment and response surface Box-Behnken test were used to optimize the vacuum frying process of macadamia kernels. Oil content, acid value, peroxidation value, color difference and sensory quality of vacuum-fried kernel were determined by comparing with raw kernel. The results showed that the effects of freezing temperature, vacuum frying temperature, vacuum frying time and vacuum degree on taste and flavor quality of macadamia kernels were significantly different ($P<0.01$). The optimum conditions for vacuum frying of macadamia kernels were as follows: Freezing temperature $-24\text{ }^{\circ}\text{C}$, vacuum frying temperature $113\text{ }^{\circ}\text{C}$, vacuum frying time 58 min , vacuum degree -0.095 MPa . Macadamia kernels were rich in flavor, crisp and delicious, and the sensory score reached 95.90 points. Acid value and peroxide value were 0.23 mg/g and 0.14 g/100 g respectively, which were in the low level and met the standard of LY/T 1963-2018. Therefore, the vacuum frying process significantly improved the quality of macadamia kernels.

Key words: macadamia kernels; vacuum frying; response surface methodology; process optimization; quality analysis

收稿日期: 2023-05-10

基金项目: 云南省重大科技专项计划 (202202AE090006); 云南省盈江县澳洲坚果产业科技特派团 (202104BI090004); 云南省热带作物科技创新体系建设专项 (RF2023-15); 云南省技术创新人才培养对象项目郭刚军; “兴滇英才支持计划”项目经费支持; 西双版纳州“雨林英才支持计划”产业创新人才项目。

作者简介: 黄克昌 (1970-), 男, 本科, 副研究员, 研究方向: 农产品加工与品质控制, E-mail: huangkechang@sina.com。

* 通信作者: 郭刚军 (1980-), 男, 硕士, 研究员, 研究方向: 食品加工和植物中天然产物提取分离与功能, E-mail: guogangjun2001@126.com。

贺熙勇 (1973-), 男, 硕士, 研究员, 研究方向: 澳洲坚果种质资源、品种选育、栽培技术和产业经济研究, E-mail: heda0691@163.com。

澳洲坚果(*Macadamia* spp.)是山龙眼科(Proteaceae)澳洲坚果属(*Macadamia* F. Muell.)多年生常绿果树,原产于澳大利亚昆士兰东南部和南威尔士东北部沿岸的亚热带雨林地区,是世界著名的坚果^[1]。我国澳洲坚果种植区域主要分布在云南、广西、贵州和四川,2020年末种植面积为26.61万hm²,其中云南种植面积23.53万hm²,占全国的88.43%,占世界的53.87%,带壳果产量7.50万t^[2]。澳洲坚果果仁营养丰富,脂肪含量高达75%,特别是单不饱和和脂肪含59%^[3-4],碳水化合物14%、蛋白质8%,以及丰富的维生素B₁与B₆和锰、铁、镁矿物质^[5]。经常食用澳洲坚果可降低血清胆固醇和低密度脂蛋白(LDL)的水平,并降低患心血管疾病的风险^[6],能有效预防慢性疾病,如心血管疾病、癌症和血脂异常等^[7-8]。

常压油炸是在120~200℃的温度下,食物在油中发生物理和化学变化,致使宏观和微观层面的结构发生改变^[9]。常压油炸食品有相对较高的含油量,容易产生丙烯酰胺^[10]、油氧化和营养损失^[11],这会增大癌症、心脏病、肥胖、糖尿病和高血压等疾病的患病几率^[12]。真空油炸是在负压条件下,低于50 Torr(6.65 kPa)的真空度下,食品在封闭系统中进行油炸脱水的过程^[13-14]。真空油炸在低温(90~120℃)和低氧浓度^[15]下进行,能防止油炸食品产生有害化合物^[16],减少油炸食品中丙烯酰胺的形成^[17],减少食品对油吸收^[18]和表面油^[19],减轻甚至避免氧化作用带来的危害^[20]。因此,真空油炸保留食品原有色泽和营养,产品味道香郁、组织结构疏松和口感柔酥细腻^[21-22]。

目前,真空油炸技术广泛应用于各种食品,比如山药、红枣、芒果等^[23-25],但应用于澳洲坚果果仁方面的研究很少。为了进一步开发澳洲坚果高附加值产品以及丰富产品种类,本研究以澳洲坚果干燥果仁为原料制备澳洲坚果真空油炸果仁,通过单因素和响应面Box-Behnken试验对其制备工艺进行优化,考察原料果仁和真空油炸果仁的理化及感官指标。为澳洲坚果精深加工以及高值化产品开发提供参考,拟为澳洲坚果果仁的产品开发开辟新的途径,助推和扩大澳洲坚果产业的发展。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

澳洲坚果果仁(2022年9月采收) 西双版纳云垦澳洲坚果科技开发有限公司;精炼食用棕榈油 泰国巴吞油厂有限公司;乙醚 汕头市达濠精细化学品公司;冰乙酸、无水硫酸钠 天津市风船化学试剂科技有限公司;氢氧化钾、重铬酸钾 国药集团化学试剂有限公司;碘化钾 上海化学试剂有限公司;三氯甲烷 上海申博化工有限公司;硫代硫酸钠 天津市致远化学试剂有限公司;乙醇、异丙醇、石油醚(30~60℃)、可溶性淀粉、酚酞 西陇科学股份有限

公司。

VC-500型真空油炸机 上海焱昌食品机械有限公司;BCD-610W冰箱 博西华家用电器有限公司;FA2004电子天平 上海良平仪器仪表有限公司;BGZ-240恒温干燥箱 上海博讯实业有限公司医疗设备厂;B-811脂肪提取仪 瑞士BUCHI公司;CNMR-1000核磁共振含油量测量仪 武汉辰目科技有限责任公司;NS800型3nh分光测色仪 深圳市三恩时科技有限公司。

1.2 实验方法

1.2.1 真空油炸工艺 参考穆树旗等^[26]的方法,经过多次实验后,确定真空油炸澳洲坚果果仁的基本工艺流程为:果仁→干燥→冷冻→解冻→真空油炸→脱油→成品。操作要点:将脱壳后的澳洲坚果果仁在40℃4h→50℃4h→60℃4h升温方式下,干燥至含水率1.5%,按照GB 5009.3-2016《食品安全国家标准 食品中水分的测定》中的方法进行果仁含水率测定^[27]。果仁置于-24℃的冰箱中冷冻24h,解冻后在真空度-0.09 MPa、油炸温度110℃、时间50 min的条件下油炸至果仁内外色泽均匀一致,质地均匀柔酥细腻,酥脆可口,然后400 r/min离心脱油5 min,包装即为成品。

1.2.2 真空油炸澳洲坚果果仁的单因素实验 选取冷冻温度、油炸温度、油炸时间和真空度4个因素进行单因素实验。

1.2.2.1 冷冻温度对真空油炸澳洲坚果果仁感官品质的影响 设定油炸温度110℃,油炸时间50 min,油炸真空度-0.09 MPa,考察冷冻温度-6、-12、-18、-24、-30℃对澳洲坚果果仁感官品质的影响。

1.2.2.2 油炸温度对真空油炸澳洲坚果果仁感官品质的影响 设定冷冻温度-24℃,油炸时间50 min,油炸真空度-0.09 MPa,考察油炸温度80、90、100、110、120℃对澳洲坚果果仁感官品质的影响。

1.2.2.3 油炸时间对真空油炸澳洲坚果果仁感官品质的影响 设定冷冻温度-24℃,油炸温度110℃,油炸真空度-0.09 MPa,考察油炸时间20、30、40、50、60 min对澳洲坚果果仁感官品质的影响。

1.2.2.4 油炸真空度对真空油炸澳洲坚果果仁感官品质的影响 设定冷冻温度-24℃,油炸温度110℃,油炸时间50 min,考察油炸真空度-0.06、-0.07、-0.08、-0.09、-0.1 MPa对澳洲坚果果仁感官品质的影响。

1.2.3 真空油炸澳洲坚果果仁的响应面优化试验

在单因素实验的基础上,以冷冻温度(A)、油炸温度(B)、油炸时间(C)和油炸真空度(D)为自变量,根据Box-Behnken模型试验设计原理,以感官评分(Y)为响应值,进行四因素三水平响应面试验,优化澳洲坚果果仁真空油炸工艺条件,响应面因素水平见表1。

表 1 Box-Behnken 响应面试验因素水平
Table 1 Factors and levels of Box-Behnken response surface test

水平	因素			
	A 冷冻温度 (°C)	B 油炸温度 (°C)	C 油炸时间 (min)	D 真空度 (MPa)
-1	-18	100	40	-0.08
0	-24	110	50	-0.09
1	-30	120	60	-0.1

1.2.4 感官评价方法 参照 GB/T 29605-2013《感官分析 食品感官质量控制导则》^[27] 和参考郭刚军等^[28] 的方法进行修改,由 10 名科技人员进行感官品质评价,感官评价指标包括:色泽、口感、风味和质地 4 个指标,各指标分别占 30、30、20、20 分,满分 100 分,评价人员打分后取平均值进行数据统计,评分标准见表 2。

表 2 真空油炸澳洲坚果果仁感官评分标准
Table 2 Sensory evaluation standard of vacuum fried macadamia kernels

项目	得分	评分标准
色泽(30分)	20~30分	果仁表面呈奶油色,内部色泽均匀一致
	10~19分	果仁表面奶油色,内部色泽较均匀一致
	0~9分	果仁表面焦黄色,内部色泽均匀度较差,呈红色或焦褐色
口感(30分)	20~30分	酥脆可口,质地柔酥细腻
	10~19分	有香脆感,有柔酥感,质地较硬、不细腻
	0~9分	有脆感,质地不酥松,入口硬度较大
风味(20分)	15~20分	果仁香味浓郁
	9~14分	有果仁香味,但带有生果仁味
	0~8分	有焦香苦涩味或严重生果仁味
质地(20分)	15~20分	果仁表面、内部光滑亮丽,质地均匀一致
	9~14分	果仁表面较光滑,内部质地较均匀一致
	0~8分	果仁表面受损,有粉状物,整体质地不一致

1.2.5 真空油炸澳洲坚果果仁品质分析 对原料果仁和真空油炸后的果仁进行品质分析。

1.2.5.1 含水率测定方法 按照 GB 5009.3-2016《食品安全国家标准 食品中水分的测定》中的方法进行果仁含水率的测定^[29]。含水率均用湿基表示,重复 3 次实验,取平均值。

1.2.5.2 含油率测定方法 按照 GB 5009.6-2016《食品安全国家标准 食品中脂肪的测定》中的方法进行果仁含油率的测定^[30]。含油率均用湿基表示,重复 3 次取平均值。

1.2.5.3 色差测定 参考静玮等^[31] 的方法,修改后用于测定澳洲坚果果仁样品的色泽。利用 NS800 型 3nh 分光测色仪进行测定。以分光测色仪自带的黑板和白板分别盖扣到测定区域进行校正,按照实验要求将果仁样品放入测定区域盖上密封盖进行测定,分别记录果仁样品的亮度值(L^*)、红度值(a^*)、黄度值(b^*)。

1.2.5.4 酸价和过氧化值测定方法 按照 GB 5009.229-2016《食品安全国家标准 食品中酸价的测定》^[32]、GB 5009.227-2016《食品安全国家标准 食品中过氧化值的测定》^[33] 中的方法分别进行澳洲坚果果仁样品的酸价和过氧化值测定。

1.3 数据处理

数据处理及分析采用 IBM SPSS Statistics 25.0, 每组实验重复 3 次, $P < 0.05$ 差异显著, $P < 0.01$ 差异极显著; 响应面试验设计及结果分析采用 Design-Expert 13 软件; 用 Origin2021 绘图软件绘制实验结果图。

2 结果与分析

2.1 单因素实验的结果分析

2.1.1 冷冻温度对真空油炸澳洲坚果果仁感官品质的影响 冷冻温度对真空油炸澳洲坚果果仁感官品质的影响见图 1。

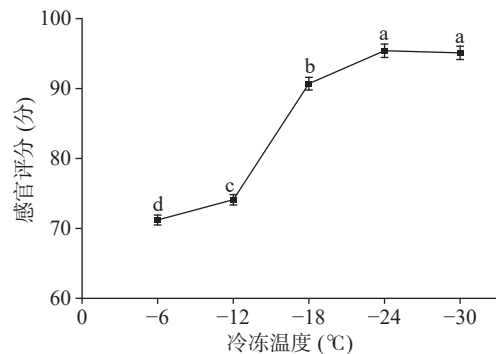


图 1 冷冻温度对澳洲坚果果仁感官品质的影响

Fig.1 Effect of freezing temperature on sensory quality of macadamia kernels

注: 图中不同小写字母表示差异显著 $P < 0.05$, 图 2~图 4 同。

由图 1 可知, 澳洲坚果果仁感官评分随着冷冻温度下降而上升, 最后达到一定值之后基本保持不变。在 $-6\text{ }^{\circ}\text{C}$ 至 $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ 间随着冷冻温度不断下降果仁感官评分不断升高, 当冷冻温度为 $-24\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时基本达到最高值(95.4 分)。张文堂等^[34] 认为, 在缓冻情况下, 冰晶主要在细胞间隙中形成, 随着晶体的成长, 细胞内水分不断外流进行补充, 使冰晶体体积膨大, 其结果是造成组织不可逆的破坏, 果仁感官评分较低; 在均匀速冻的情况下(冷冻温度: $-18\sim-30\text{ }^{\circ}\text{C}$, 表面冻结时间: $0.5\sim 2\text{ h}$), 冰晶体在细胞内外均匀而广泛地分布, 且冰晶体微小, 组织内部水分基本不流动, 保持了内部组织的完整性, 果仁感官评分达最高。因此, 选择冷冻温度 $-24\text{ }^{\circ}\text{C}$ 为真空油炸澳洲坚果果仁响应面试验设计的零水平。

2.1.2 真空油炸温度对澳洲坚果果仁感官品质的影响 油炸温度对真空油炸澳洲坚果果仁感官品质的影响见图 2。

由图 2 可知, 澳洲坚果果仁感官评分随着油炸温度升高先上升后下降, 当油炸温度为 $110\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时感

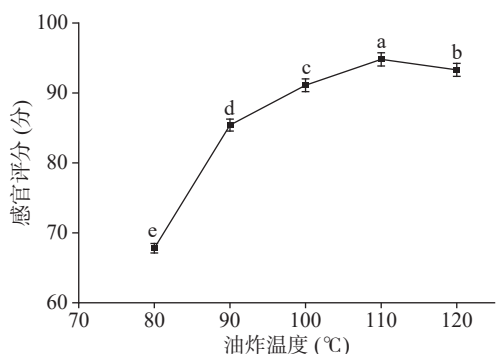


图2 油炸温度对澳洲坚果果仁感官品质的影响

Fig.2 Effect of vacuum frying temperature on sensory quality of macadamia kernels

官评分最高,其值为 94.8 分。油炸温度较低时,澳洲坚果果仁水分含量相对较高,未完全汽化,产品不酥脆,随着温度的升高,产品逐渐酥脆,当油炸温度 110 °C 时,产品迅速脱水完毕,澳洲坚果果仁感官评分达到最大,随着温度的继续升高,表面焦化变褐色,影响感官评分。因此,选取油炸温度 110 °C 为真空油炸澳洲坚果果仁响应面试验设计的零水平。

2.1.3 真空油炸时间对澳洲坚果果仁感官品质的影响 油炸时间对真空油炸澳洲坚果果仁感官品质的影响见图 3。

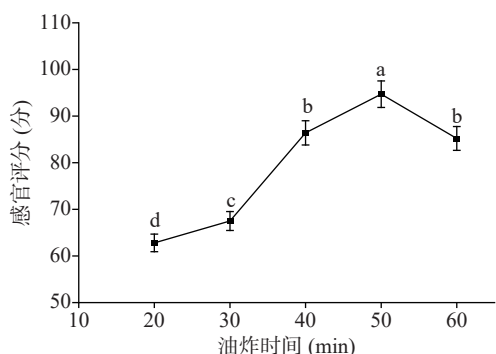


图3 油炸时间对澳洲坚果果仁感官品质的影响

Fig.3 Effect of vacuum frying time on sensory quality of macadamia kernels

由图 3 可知,澳洲坚果果仁感官评分随着油炸时间的延长先上升后下降,呈中间高两头小特点,当油炸时间为 50 min 时感官评分最高(94.7 分)。可能是油炸前期水分快速蒸发,感官评分迅速上升,而当水分已经完全蒸发之后,感官评分达最高,随着时间再延长,导致色泽下降,营养物质遭到破坏,感官评分下降。因此,选取油炸时间 50 min 为真空油炸澳洲坚果果仁响应面试验设计的零水平。

2.1.4 真空度对澳洲坚果果仁感官品质的影响 由图 4 可知,澳洲坚果果仁感官评分随着真空度的提高先直线上升,当真空度到达-0.09 MPa 时,感官评分最高(92.8 分),之后感官评分开始有缓慢下降趋势。真空度可形成食品内部的多孔结构,使其口感酥脆,随着真空度增加而持续上升,水分含量持续下降,

会导致食品内部孔隙增大,数量增多,产品损伤,感官品质下降。因此,选取真空度-0.09 MPa 为真空油炸澳洲坚果果仁响应面试验设计的零水平。

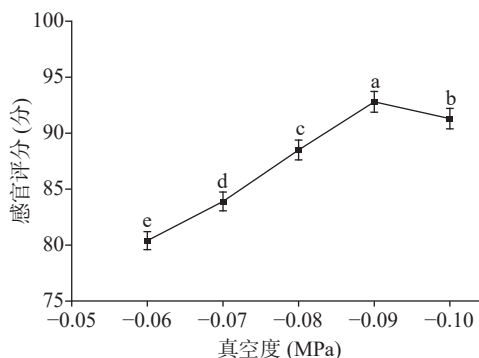


图4 真空度对澳洲坚果果仁感官品质的影响

Fig.4 Effect of vacuum degree on sensory quality of macadamia kernels

2.2 响应面试验的结果分析

根据 Box-Behnken 设计原理,在单因素实验的基础上,以冷冻温度、真空油炸温度、真空油炸时间和真空度四个因素为自变量,感官评分为响应值,作四因素三水平的响应面分析试验,区组设为 1,中心点设为 3,共 27 个试验点,其中 24 个为分析因子试验,3 个为中心试验用以估计误差。

2.2.1 试验结果 真空油炸澳洲坚果果仁 Box-Behnken 试验设计方案及感官评分结果见表 3。

表 3 Box-Behnken 试验设计及结果
Table 3 Box-Behnken experimental design and results

试验号	A冷冻温度	B油炸温度	C油炸时间	D真空度	Y感官评分(分)
1	-1	-1	0	0	90.40
2	1	-1	0	0	91.30
3	-1	1	0	0	93.90
4	1	1	0	0	88.70
5	0	0	-1	-1	92.60
6	0	0	1	-1	92.80
7	0	0	-1	1	87.40
8	0	0	1	1	96.00
9	-1	0	0	-1	90.10
10	1	0	0	-1	94.90
11	-1	0	0	1	94.80
12	1	0	0	1	89.20
13	0	-1	-1	0	87.60
14	0	1	-1	0	89.60
15	0	-1	1	0	94.40
16	0	1	1	0	95.10
17	-1	0	-1	0	89.50
18	1	0	-1	0	85.70
19	-1	0	1	0	93.80
20	1	0	1	0	94.20
21	0	-1	0	-1	91.90
22	0	1	0	-1	93.40
23	0	-1	0	1	93.70
24	0	1	0	1	91.80
25	0	0	0	0	96.30
26	0	0	0	0	95.20
27	0	0	0	0	95.70

2.2.2 模型的建立及方差分析 软件分析得到各因素对感官评分 Y 的二次多项式回归方程如下:

$$Y=95.73+0.7083A+0.2667B+2.83C+0.2333D+1.53AB-1.05AC-2.06AD-0.3250BC+0.8500BD-2.10CD-2.59A^2-1.93B^2-2.31C^2-1.07D^2。$$

对得到的模型进行方差分析, 结果见表 4。

表 4 真空油炸澳洲坚果果仁感官评分方差分析结果

Table 4 Analysis of variance results of sensory score of vacuum fried macadamia kernels

方差来源	平方和	自由度	均方	F值	P值	显著性
模型	217.02	14	15.50	27.01	<0.0001	**
A	6.02	1	6.02	10.49	0.0071	**
B	0.8533	1	0.8533	1.49	0.2461	
C	95.77	1	95.77	166.85	<0.0001	**
D	0.6533	1	0.6533	1.14	0.3070	
AB	9.30	1	9.30	16.21	0.0017	**
AC	4.41	1	4.41	7.68	0.0169	*
AD	27.04	1	27.04	47.11	<0.0001	**
BC	0.4225	1	0.4225	0.7361	0.4077	
BD	2.89	1	2.89	5.04	0.0445	*
CD	17.64	1	17.64	30.73	0.0001	**
A ²	35.71	1	35.71	62.21	<0.0001	**
B ²	19.76	1	19.76	34.43	<0.0001	**
C ²	28.52	1	28.52	49.69	<0.0001	**
D ²	6.16	1	6.16	10.74	0.0066	**
残差	6.89	12	0.5740			
失拟项	6.28	10	0.6281	2.07	0.3694	不显著
纯误差	0.6067	2	0.3033			
总离差	223.91	26				

注: *表示差异显著($P<0.05$), **表示差异极显著($P<0.01$); $R^2=0.9692$, $R^2_{adj}=0.9334$ 。

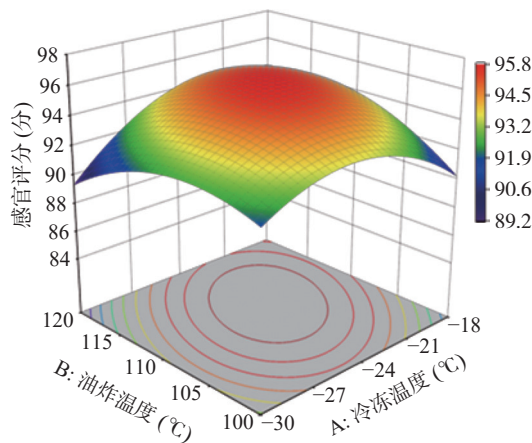
由表 4 可知, 回归模型的 $P<0.0001$, 表明感官评分与自变量之间的关系高度显著, 失拟误差项 $P>0.05$, 不显著, 说明该模型误差相对较小, 拟合度好, 可用该回归方程进行试验分析。模型决定系数 $R^2=0.9692$, 表明该回归方程与试验结果具有较好的拟合度, 可用该方程表示感官评分与冷冻温度、油炸温度、油炸时间和真空度之间的关系。校正决定系

数 $R^2_{adj}=0.9334$, 表明该回归方程的预测性较好, 实际值与预测值不存在大的差异。显著性检验表明, 在所取各因素范围内, 影响澳洲坚果果仁感官评分的因素主次顺序分别为 C(油炸时间) $>$ A(冷冻温度) $>$ B(油炸温度) $>$ D(真空度)。其中一次项 A、C, 交互项 AB、AD、CD, 二次项 A^2 、 B^2 、 C^2 、 D^2 对澳洲坚果果仁感官影响极显著($P<0.01$); 交互项 AC 和 BD 对澳洲坚果果仁感官影响显著($P<0.05$); 一次项 B、D 和交互项 BC 对澳洲坚果果仁感官影响不显著($P>0.05$)。

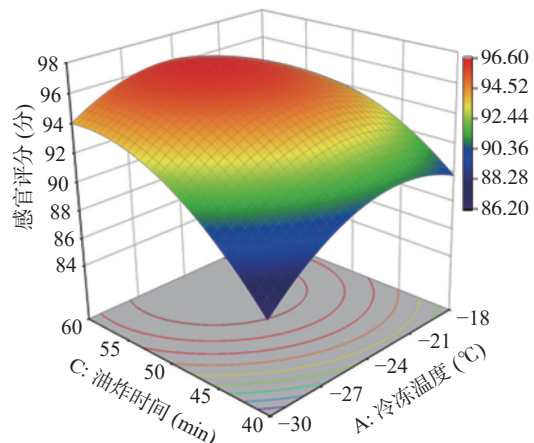
2.2.3 响应面分析 各因素交互作用对澳洲坚果果仁感官评分的响应面见图 5。

响应面三维图谱和等高线图能够更加直观地研究交互因素间的相互作用。等高线图形趋于圆形、响应面坡度平缓, 说明交互作用不显著; 反之, 等高线图形趋于椭圆, 响应面坡度陡峭, 说明交互作用显著。由图 5(a)、图 5(b)、图 5(c)、图 5(e)和图 5(f)可知, 等高线的形状与椭圆形相近, 响应面陡峭, 表明 AB(冷冻温度与油炸温度)、AC(冷冻温度与油炸时间)、AD(冷冻温度与真空度)、BD(油炸温度与真空度)和 CD(油炸时间与真空度)之间有显著交互作用, 对油炸澳洲坚果果仁感官评分影响显著。图 5(d)的等高线形状与圆形非常相近, 响应面较为平缓, 说明 BC(油炸温度与油炸时间)两因素之间的交互作用对油炸澳洲坚果果仁感官评分影响不显著。

2.2.4 最佳工艺参数预测与验证 通过回归模型预测真空油炸澳洲坚果果仁的最佳工艺参数为: 冷冻温度 $-24.46\text{ }^\circ\text{C}$ 、油炸温度 $113.52\text{ }^\circ\text{C}$ 、油炸时间 58.26 min 、真空度 -0.098 MPa , 感官评分为 96.33 分。根据实际情况和为了方便操作, 将工艺参数调整为: 冷冻温度 $-24\text{ }^\circ\text{C}$ 、油炸温度 $113\text{ }^\circ\text{C}$ 、油炸时间 58 min 、真空度 -0.095 MPa , 在此条件下进行 3 次平行实验, 澳洲坚果果仁的感官评分为 95.90 ± 0.10 分, 实测值接近模型预测值, 拟合良好, 模型有效, 表明该模型在实践中可行。



(a) 冷冻温度与油炸温度



(b) 冷冻温度与油炸时间

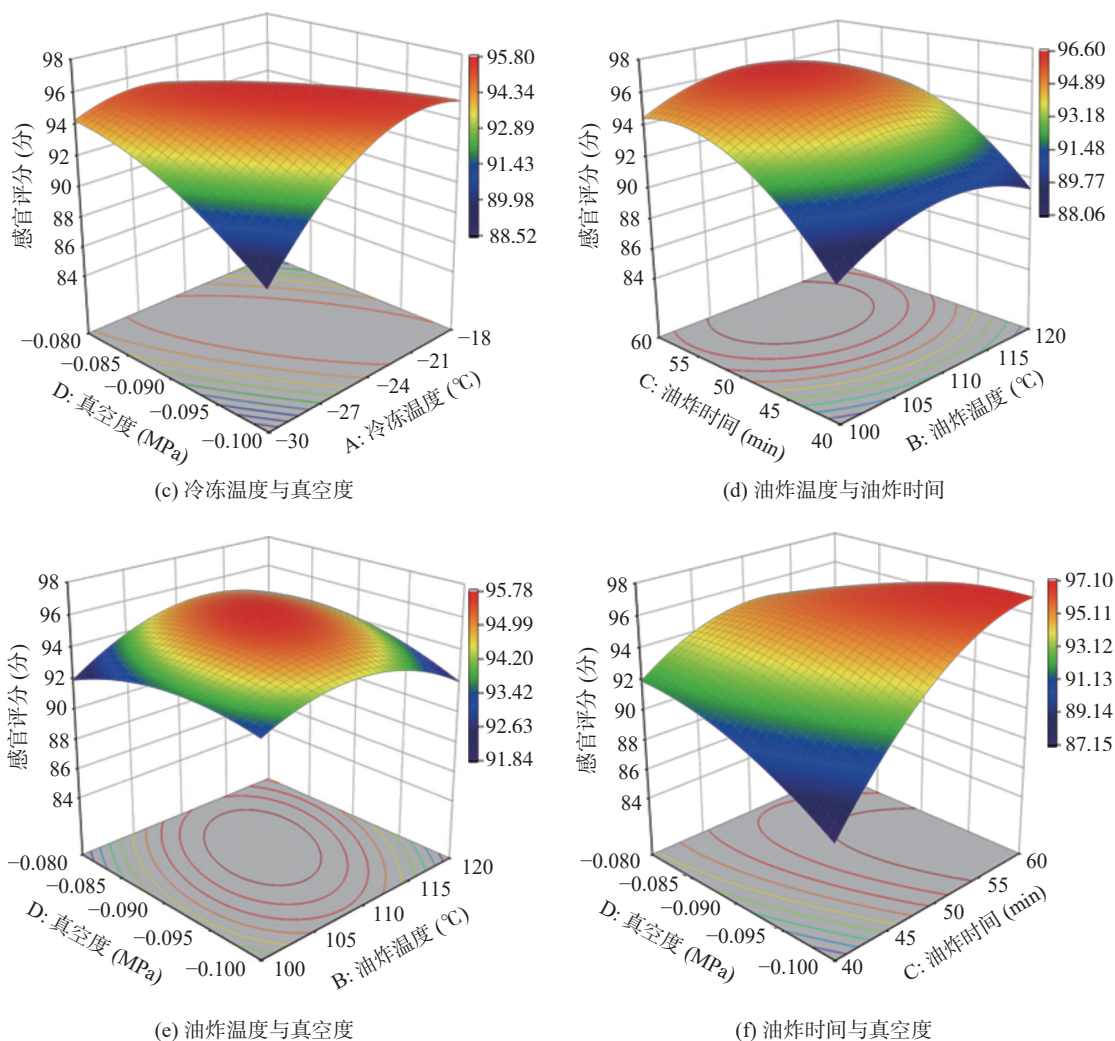


图5 响应面分析图

Fig.5 Response surface analysis diagram

2.3 真空油炸澳洲坚果果仁品质分析

对澳洲坚果原料果仁和最佳工艺参数条件下加工的真空油炸澳洲坚果果仁进行理化检测与感官评价,各指标结果见表5。

表5 真空油炸澳洲坚果果仁品质比较

Table 5 Quality comparison of vacuum fried macadamia kernels

指标	原料果仁	真空油炸果仁
含水率(%)	1.57±0.04 ^a	0.73±0.05 ^b
含油率(%)	75.64±0.67 ^a	74.50±0.58 ^a
酸价(mg/g)	0.20±0.03 ^a	0.23±0.03 ^a
过氧化值(g/100 g)	0.12±0.03 ^a	0.14±0.03 ^a
L*值	76.37±3.73 ^a	74.76±2.66 ^a
a*值	2.13±0.73 ^a	2.62±0.95 ^a
b*值	22.35±1.96 ^a	23.29±1.18 ^a
色泽	28.93±0.42 ^a	28.23±0.45 ^a
口感	8.70±0.66 ^B	29.67±0.35 ^A
感官评分(分)	7.67±0.55 ^B	19.33±0.38 ^A
质地	17.43±0.47 ^a	18.67±0.55 ^a
总分	62.73±0.68 ^B	95.90±0.10 ^A

注:同行不同上标小写字母表示有显著性差异(P<0.05),不同上标大写字母表示有极显著性差异(P<0.01)。

由表5可知,经过真空油炸果仁含水率降低至0.73%,与原料果仁相比有差异显著性(P<0.05)。果仁内部水分在真空油炸过程中进行释放,使果仁具有酥脆可口的特征^[35]。含水率是影响真空油炸澳洲坚果果仁品质的重要因素。

真空油炸果仁含油率为74.50%,比原料果仁降低1.14%,差异不显著(P>0.05)。Dueik等^[36]采用真空油炸土豆片、苹果片、胡萝卜片后,产品含油率增高,与本实验得到的真空油炸澳洲坚果果仁含油率降低相反。可能由于细胞结构的破坏,澳洲坚果果仁自身含油率非常高(75%),真空油炸时向外渗出,含油率降低,而土豆片、苹果片、胡萝卜片等其它食品自身含油率低,油炸时向内渗透,导致含油率增高。

酸价和过氧化值是评价澳洲坚果品质的重要指标,酸价是脂肪水解产物的含量,反映脂肪水解的程度,可表示游离脂肪酸总量的多少;过氧化值是脂质氧化初期氢过氧化物形成的重要指标,而氢过氧化物是油脂氧化酸败的关键产物^[37]。由表5可知,真空油炸后的澳洲坚果果仁酸价、过氧化值升高微小,分别为0.03 mg/g、0.02 g/100 g,油炸前后整体大小值处于低水平位,符合澳洲坚果果仁(LY/T 1963-

2018)^[38]产品标准要求,所以经过真空油炸后的澳洲坚果果仁脂质氧化品质未改变。

通过较长时间的真空油炸,澳洲坚果果仁 L^* 值略微降低,降低的 ΔL^* 值为 1.61, 差异不显著 ($P > 0.05$); a^* 值与 b^* 值上升微小,分别为 0.49、0.94, 都差异不显著 ($P > 0.05$)。澳洲坚果果仁的表面色泽 (L^* 值) 变化微弱,产生的变化是红色(正 a^* 值)和黄色(正 b^* 值)颜色的组合。因此,果仁外表面经真空油炸后色泽基本没有变化,保持果仁原有颜色。

经过真空油炸,原料果仁感官总评分由 62.73 分增加到 95.90 分,增加了 33.17 分,是极显著性差异 ($P < 0.01$),表明真空油炸果仁感官品质极显著提高。从色泽、口感、风味和质地各分项看,口感评分变化了 20.97 分,是单项变化的 69.9%, 风味评分改变 11.66 分,是单项变化的 58.3%, 二者占总感官评分的 32.63%; 口感与风味变化属差异极显著性 ($P < 0.01$), 色泽与质地属差异不显著 ($P > 0.05$)。Fischer 等^[39]对坚果(杏仁、巴西坚果、腰果、花生、榛子、山核桃、松子和核桃)烘烤过程进行了在线多维变化气体分析,认为在烘烤过程中由于结构和化学变化,产生的芳香族化合物,如苯甲醛、甲基酚、酒精和烷基使坚果果仁的香气增强和口感酥脆,澳洲坚果果仁在真空油炸过程可能有相似的变化。因此,引起感官评分变化主要是口感和风味,真空油炸澳洲坚果果仁品质明显优于原料果仁。

3 结论

在本研究中,通过响应面法得到澳洲坚果果仁真空油炸的最佳工艺参数:冷冻温度 $-24\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、真空油炸温度 $113\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、真空油炸时间 58 min、真空度为 -0.095 MPa ,在此工艺条件下澳洲坚果果仁香味浓郁,质地均匀,口感酥脆,感官评分为 95.90 分,结果表明,真空油炸工艺极显著 ($P < 0.01$) 提高了澳洲坚果果仁的品质。真空油炸澳洲坚果果仁酸价、过氧化值分别为 0.23 mg/g 、 0.14 g/100 g ,处于低标准范围内,表明真空油炸过程中的脂质氧化是可以完全接受,完好地保持了澳洲坚果果仁的脂质氧化品质。真空油炸工艺为澳洲坚果精深加工以及高值化产品开发提供参考,助推和扩大澳洲坚果产业的发展。

参考文献

- [1] SHABALALA M, TOUCHER M, CLULOW A. The macadamia bloom—What are the hydrological implications?[J]. *Scientia Horticulturae*, 2022, 292: 110628.
- [2] 贺照勇, 聂艳丽, 吴霞, 等. 云南澳洲坚果产业高质量发展的建议[J]. *中国南方果树*, 2022, 51(4): 205–210. [HE Xiyong, NIE Yanli, WU Xia, et al. Suggestions for high-quality development of macadamia industry in Yunnan[J]. *South China Fruits*, 2022, 51(4): 205–210.]
- [3] CARRILLO W, CARPIO C, MORALES D, et al. Fatty acids composition in macadamia seed oil (*Macadamia integrifolia*) from Ecuador[J]. *Asian Journal of Pharmaceutical and Clinical Research*, 2017, 10: 303–306.
- [4] MERELES L G, FERRO E A, ALVARENGA N L, et al.

Chemical composition of *Macadamia integrifolia* (Maiden and Betche) nuts from Paraguay[J]. *International Food Research Journal*, 2017, 24(6): 2599–2608.

- [5] HU W, FITZGERALD M, TOPP B, et al. A review of biological functions, health benefits, and possible de novo biosynthetic pathway of palmitoleic acid in macadamia nuts[J]. *Journal of Functional Foods*, 2019, 62: 103520.
- [6] SHUAI X, DAI T, MCCLEMENTS D J, et al. Hypolipidemic effects of macadamia oil are related to AMPK activation and oxidative stress relief: *In vitro* and *in vivo* studies[J]. *Food Research International*, 2023, 168: 112772.
- [7] CLIFTON P M, KEOGH J B. A systematic review of the effect of dietary saturated and polyunsaturated fat on heart disease[J]. *Nutrition, Metabolism and Cardiovascular Diseases*, 2017, 27(12): 1060–1080.
- [8] NETTLETON J A, BROUWER I A, GELEIJNSE J M, et al. Saturated fat consumption and risk of coronary heart disease and ischemic stroke: A science update[J]. *Annals of Nutrition and Metabolism*, 2017, 70(1): 26–33.
- [9] MANJUNATHA S S, RAVI N, NEGI P S, et al. Kinetics of moisture loss and oil uptake during deep fat frying of Gethi (*Dioscorea kamoensis* Kunth) strips[J]. *Journal of Food Science and Technology*, 2014, 51: 3061–3071.
- [10] SAFARI A, SALAMAT R, BAIK O D. A review on heat and mass transfer coefficients during deep-fat frying: Determination methods and influencing factors[J]. *Journal of Food Engineering*, 2018, 230: 114–123.
- [11] HEREDIA A, CASTELLÓ M L, ARGÜELLES A, et al. Evolution of mechanical and optical properties of French fries obtained by hot air-frying[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2014, 57(2): 755–760.
- [12] MESIAS M, DELGADO-ANDRADE C, HOLGADO F, et al. Effect of consumer's decisions on acrylamide exposure during the preparation of French fries. part 1: Frying conditions[J]. *Food and Chemical Toxicology*, 2021, 147: 111857.
- [13] MARISCAL M, BOUCHON P. Comparison between atmospheric and vacuum frying of apple slices[J]. *Food Chemistry*, 2008, 107(4): 1561–1569.
- [14] SU Y, ZHANG M, ZHANG W. Effect of low temperature on the microwave-assisted vacuum frying of potato chips[J]. *Drying Technology*, 2016, 34(2): 227–234.
- [15] AYUSTANINGWARNO F, DEKKER M, FOGLIANO V, et al. Effect of vacuum frying on quality attributes of fruits[J]. *Food Engineering Reviews*, 2018, 10: 154–164.
- [16] MAITY T, BAWA A S, RAJU P S. Effect of vacuum frying on changes in quality attributes of jackfruit (*Artocarpus heterophyllus*) bulb slices[J]. *International Journal of Food Science*, 2014, 2014: 752047.
- [17] BELKOVA B, HRADECKY J, HURKOVA K, et al. Impact of vacuum frying on quality of potato crisps and frying oil[J]. *Food Chemistry*, 2018, 241: 51–59.
- [18] RAVINDRA M R. Vacuum processing of food—a mini review[J]. *MOJ Food Process Technol*, 2018, 6(3): 283–290.
- [19] YAGUA C V, MOREIRA R G. Physical and thermal properties of potato chips during vacuum frying[J]. *Journal of Food Engineering*, 2011, 104(2): 272–283.
- [20] 王辉, 刘敏, 董楠, 等. 真空油炸苹果脆片预处理工艺优化[J]. *食品工业科技*, 2019, 40(17): 184–190. [WANG Hui, LIU Min, DONG Nan, et al. Optimization of pretreatment technique for

- the vacuum fried apple chips[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2019, 40(17): 184-190.]
- [21] 刘增强, 丁文平, 庄坤, 等. 香菇脆片加工技术的研究进展[J]. *食品工业科技*, 2018, 39(6): 345-349. [LIU Zengqiang, DING Wenping, ZHUANG Kun, et al. Research progress in processing technology of *Lentinus edodes* chips[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2018, 39(6): 345-349.]
- [22] DUEIK V, ROBERT P, BOUCHON P. Vacuum frying reduces oil uptake and improves the quality parameters of carrot crisps[J]. *Food Chemistry*, 2010, 119(3): 1143-1149.
- [23] 王文成, 高惠安, 郑守斌, 等. 低温真空油炸山药脆片的工艺研究[J]. *食品研究与开发*, 2021, 42(4): 101-106. [WANG Wencheng, GAO Huian, ZHENG Shoubin, et al. Study on low temperature vacuum frying of yam chips[J]. *Food Research and Development*, 2021, 42(4): 101-106.]
- [24] 李鹏飞, 朱香香, 李世娜, 等. 响应面法优化低温真空油炸红枣脆片工艺[J]. *食品与发酵科技*, 2021, 57(2): 97-102. [LI Pengfei, ZHU Xiangxiang, LI Shina, et al. Optimization of low temperature vacuum fried jujube chips by response surface methodology[J]. *Food and Fermentation Sciences & Technology*, 2021, 57(2): 97-102.]
- [25] AYUSTANINGWARNO F, VAN GINKEL E, VITORINO J, et al. Nutritional and physicochemical quality of vacuum-fried mango chips is affected by ripening stage, frying temperature, and time[J]. *Frontiers in Nutrition*, 2020, 7: 95.
- [26] 穆树旗, 李万鑫, 侯受健, 等. 不同加工工艺对真空油炸花生品质特性的影响分析[J]. *现代食品*, 2019(18): 124-125, 128. [MU Shuqi, LI Wanxin, HOU Shoujian, et al. Analysis of the effects of different processing techniques on the quality characteristics of vacuum fried peanuts[J]. *Modern Food*, 2019(18): 124-125, 128.]
- [27] 中国国家标准化管理委员会. 感官分析食品感官质量控制导则 GB/T 29605-2013[S]. 北京: 中国标准出版社, 2013: 2-17. [China National Standardization Administration Committee. Sensory analysis Guidelines for sensory quality control of food GB/T 29605-2013[S]. Beijing: Standards Press of China, 2013: 2-17.]
- [28] 郭刚军, 邹建云, 徐荣, 等. 调味开口带壳澳洲坚果加工工艺条件研究[J]. *热带作物学报*, 2012, 33(11): 2054-2059. [GUO Gangjun, ZOU Jianyun, XU Rong, et al. Study on processing technology of flavouring opening macadamia nut-in-shell[J]. *Journal of Tropical Crops*, 2012, 33(11): 2054-2059.]
- [29] 中华人民共和国国家卫生和计划生育委员会. 食品安全国家标准 食品中水分的测定 GB 5009.3-2016[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016: 3. [National Health and Family Planning Commission of the People's Republic of China. National food safety standard Determination of moisture in food GB 5009.3-2016[S]. Beijing: China Standards Press, 2016: 3.]
- [30] 国家食品药品监督管理总局国家卫生和计划生育委员会. 食品安全国家标准 食品中脂肪的测定 GB 5009.6-2016[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016: 3-4. [National Health and Family Planning Commission of the State Food and Drug Administration. National food safety standard Determination of fat in food GB 5009.6-2016[S]. Beijing: China Standards Press, 2016: 3-4.]
- [31] 静玮, 苏子鹏, 林丽静. 不同焙烤温度和时间对澳洲坚果果仁颜色的影响[J]. *热带农业科学*, 2016, 36(8): 56-61, 75. [JING Wei, SU Zipeng, LIN Lijing. Effects of different roasting temperatures and times on the color of macadamia nut kernels[J]. *Tropical Agricultural Sciences*, 2016, 36(8): 56-61, 75.]
- [32] 中华人民共和国国家卫生和计划生育委员会. 食品安全国家标准 食品中酸价的测定 GB5009.229-2016[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016: 2-5. [National Health and Family Planning Commission of the People's Republic of China. National food safety standard Determination of acid value in food GB5009.229-2016[S]. Beijing: Standards Press of China, 2016: 2-5.]
- [33] 中华人民共和国国家卫生和计划生育委员会. 食品安全国家标准 食品中过氧化值的测定 GB 5009.227-2016[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016: 2-5. [National Health and Family Planning Commission of the People's Republic of China. National food safety standard Determination of peroxide value in food GB5009.227-2016[S]. Beijing: Standards Press of China, 2016: 2-5.]
- [34] 张文堂, 杨立新. 果蔬脆片生产工艺的开发研制[J]. *食品工业*, 1995(5): 46-48. [ZHANG Wentang, YANG Lixin. Development of processing technology for fruit and vegetable chips[J]. *Food Industry*, 1995(5): 46-48.]
- [35] SCHLÖRMANN W, BIRNINGER M, BÖHM V, et al. Influence of roasting conditions on health-related compounds in different nuts[J]. *Food Chemistry*, 2015, 180: 77-85.
- [36] DUEIK V, MORENO M C, BOUCHON P. Microstructural approach to understand oil absorption during vacuum and atmospheric frying[J]. *Journal of Food Engineering*, 2012, 111(3): 528-536.
- [37] 秦力悦, 石萍萍, 李荣辉, 等. 基于主成分分析和聚类分析的烘烤类澳洲坚果果仁综合品质评价[J/OL]. *食品工业技*: 1-21 [2023-03-03]. <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2022100124>. [QIN Liyue, SHI Pingping, LI Ronghui, et al. Comprehensive quality evaluation of roasted kernels in macadamia nuts based on principal component analysis and cluster analysis[J/OL]. *Science and Technology of Food Industry*: 1-21 [2023-03-03]. <https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2022100124>.]
- [38] 国家林业和草原局. 澳洲坚果果仁 LY/T 1963-2018[S]. 北京: 中国标准出版社, 2018: 1-5. [National Forestry and Grassland Administration. Macadamia kernels LY/T 1963-2018[S]. Beijing: Standards Press of China, 2018: 1-5.]
- [39] FISCHER M, WOHLFAHRT S, VARGA J, et al. Evolution of volatile flavor compounds during roasting of nut seeds by thermogravimetry coupled to fast-cycling optical heating gas chromatography-mass spectrometry with electron and photoionization[J]. *Food Analytical Methods*, 2017, 10: 49-62.