DOI: 10.19812/j.cnki.jfsq11-5956/ts.20260128001
引用格式: 王越, 赵志浩, 刘光, 等. 市售速冻油条特征品质评价方法研究[J]. 食品安全质量检测学报, 2026, 17(16): 236–247.
Wang Yue, Zhao Zhihao, Liu Guang, et al. Study on the evaluation method for the characteristic quality of commercial frozen fried dough sticks [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2026, 17(16): 236–247. (in Chinese with English abstract).

市售速冻油条特征品质评价方法研究

王 越[1,2], 赵志浩[2], 刘 光[2], 曾嘉锐[2], 钟南京[1*], 周鹏飞[2*]

(1. 广东药科大学食品科学学院, 中山 528458; 2. 广东省农业科学院蚕业与农产品加工研究所, 农业农村部功能食品重点实验室, 广东省农产品加工重点实验室, 广州 510610)

摘 要: 目的 建立科学、系统的速冻油条特征品质评价体系方法。**方法** 以 12 个市售主流品牌速冻油条为研究对象, 系统测定质构特性、色度、风味成分、营养成分等品质指标。采用模糊二元对比决策法从视觉、嗅觉、听觉、味觉、触觉 5 个维度筛选出关键感官评价指标。通过相关性分析、主成分分析和聚类分析筛选关键指标并做出综合评价。**结果** 共选出 20 项指标, 可分为 6 个主成分, 累计方差贡献率达 91.217%, 结合聚类分析确定滋味、内部结构、亮度(L^*)、红绿值(a^*)、氯化钠含量、水分含量及脂肪含量为速冻油条品质核心评价指标。**结论** 研究构建的品质评价体系实现了速冻油条综合品质的客观量化评估, 不仅为消费者选购提供参考, 更为低油低盐健康型速冻油条的配方优化与产业化升级提供了精准的科学依据。

关键词: 速冻油条; 主成分分析; 聚类分析; 品质评价
中图分类号: TS213.2 **文献识别码:** A **文章编号:** 2095–0381(2026)16–0236–12

Study on the evaluation method for the characteristic quality of commercial frozen fried dough sticks

WANG Yue[1,2], ZHAO Zhi-Hao[2], LIU Guang[2], ZENG Jia-Rui[2], ZHONG Nan-Jing[1*], ZHOU Peng-Fei[2*]

(1. *School of Food Science*, *Guangdong Pharmaceutical University*, *Zhongshan* 528458, *China*; 2. *Sericultural* & *Agri-food Research Institute*, *Guangdong Academy of Agricultural Sciences*, *Key Laboratory of Functional Foods*, *Ministry of Agriculture and Rural Affairs*, *Guangdong Key Laboratory of Agricultural Products Processing*, *Guangzhou* 510610, *China*)

ABSTRACT: Objective To establish a scientific and systematic methodology for evaluating the characteristic quality attributes of frozen fried dough sticks. **Methods** The 12 commercially available mainstream brands of frozen fried dough sticks were selected as the research subjects. The measurements of quality indicators including textural properties, chromaticity, flavor compounds and nutritional composition were conducted. The fuzzy binary comparison decision-making method was performed to identify key sensory evaluation indicators across 5 dimensions: visual, olfactory, auditory, gustatory and tactile perceptions. Key indicators were further screened and comprehensively evaluated through correlation analysis, principal component analysis and cluster analysis. **Results** The total of 20 indicators that could be categorized into 6 principal components with a cumulative variance contribution rate of

收稿日期: 2026-01-28
基金项目: 国家重点研发计划项目(2024YFD2101501)
第一作者: 王越(2000—), 男, 主要研究方向为食品工程。E-mail: 1125072237@qq.com
***通信作者:** 钟南京(1980—), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为油脂生物改性。E-mail: 25801476@qq.com
周鹏飞(1987—), 男, 博士, 研究员, 主要研究方向为粮油加工。E-mail: pfzhougz@foxmail.com

91.217% were selected. The cluster analysis, taste, internal structure, brightness (L^*), red green ratio index (a^*), sodium chloride content, moisture content and fat content were identified as the core evaluation indicators for the quality of frozen fried dough sticks. **Conclusion** The quality evaluation system developed in this study enables an objective and quantitative assessment of the overall quality of frozen fried dough sticks. It not only provides guidance for consumer decision-making but also offers a precise scientific basis for optimizing formulations and advancing the industrial production of healthier, low-oil, and low-salt frozen fried dough sticks.

KEY WORDS: frozen fried dough sticks; principal component analysis; cluster analysis; quality evaluation

0　引　言

油条作为我国传统谷物油炸面制品的典型代表, 凭借其独特的蓬松口感与焦香风味, 长期占据大众早餐消费市场的核心地位, 是承载民俗饮食文化的重要载体[1]。随着食品冷冻加工技术的迭代升级, 速冻油条以其储存便利、食用快捷、品质稳定性强等优势逐步跻身即食食品市场, 成为传统油条产业化升级的重要方向[2]。然而在传统油条加工中, 食盐的添加不仅是风味形成的关键, 更与面团的面筋网络构建密切相关, 而高温油炸工艺则直接决定了油条的特有口感, 这使得油条天然存在高油高盐的固有属性, 不利于践行《“健康中国 2030”规划纲要》低油低盐饮食目标[3–4]。

目前, 对于速冻油条的理化指标与感官评价通常被独立分析, 缺乏对其品质特征的系统性、综合性评价, 无法清晰揭示不同品牌产品在品质特性与营养构成上的核心差异, 且难以明确速冻油条品质评价的关键指标体系, 无法为产品配方优化、健康改良提供精准指导, 与国民膳食健康发展需求不相适应, 构建科学完善的速冻油条综合品质评价体系已成为亟待解决的研究缺口。在食品评价方法中, 模糊数学法[5–6]通过对不同指标两两对比, 多次重复筛选较优秀的食品感官指标。主成分分析[7–9]、相关性分析[10]和聚类分析[11–12]三者结合则能将多个相关性较高的指标降维为少数几个独立的主成分, 进而对样品进行综合排序[13]。本研究选取市售 12 个主流品牌的速冻油条产品为研究载体, 测定 20 种品质指标, 通过模糊二元对比决策法[14]筛选感官评价指标, 采用相关性分析、主成分分析和聚类分析, 系统剖析不同品牌速冻油条在品质特性与营养构成上的核心差异, 明确速冻油条品质评价的关键指标体系及优质产品的核心特征。在此基础上, 确立油条品质改良实验的基础参照参数, 为其配方优化、品质提升及健康化升级提供坚实的科学依据, 兼具重要的理论创新性与产业实践必要性。

1　材料与方法

1.1　材料与试剂

选取市售销量较高的 12 个品牌速冻油条, 涵盖全国各区域油条品牌, 将其分别标记为 A、B、C、D、E、F、G、H、I、J、K、L。

石油醚(分析纯, 天津市富宇精细化工有限公司); 硝酸(分析纯, 广东广试试剂科技有限公司); 亚铁氰化钾(分析纯, 天津市大茂化学试剂厂); 氯化钠、乙酸锌、铬酸钾(分析纯, 福晨化学试剂有限公司); 硝酸银(分析纯, 天津东聚隆化工技术开发有限公司)。

1.2　仪器与设备

WNS-ZL3 电炸炉(佛山伟斯纳有限公司); BS124S 分析天平(精度 0.1 mg, 北京赛多利斯科学仪器有限公司); AstreeAstree II V5 电子舌(法国 Alpha M.O.S 公司); 7980N 气相色谱-质谱仪(美国 Agilent 公司); TA-XT-Plus 质构仪(英国 Stable Micro System 公司); CR-400 色差仪(日本 Chroma Meter 公司); Agilent J&W DB-5ms Ultra 柱(30 m×0.25 mm, 0.25 μm, 美国 Agilent 公司)。

1.3　实验方法

1.3.1　样品制备

各品牌样品均在室温解冻后, 使用大豆油在 180 ℃进行油炸处理, 取油炸前后的油条中段作为测试样品, 确保样品一致性。

1.3.2　质构特性测定

使用质构仪, 切取油条样品中段 2 cm, 采用 P36R 探头测定油条油炸前后的硬度、弹性、咀嚼性、回复性。实验参数: 测前速率 2.0 mm/s, 测试速率 1.0 mm/s, 测后速率 1.0 mm/s, 触发力 5 g, 压缩比 50%, 2 次压缩时间间隔 1 s。每种样品做 5 次平行实验, 去除最大值和最小值后, 取剩余 3 组数据的平均值[15]。

1.3.3　色度分析

使用色差仪测定油条的色度指标, 每个样品测量 3 处不同位置, 测量指标包括亮度(L^*)、红绿值(a^*)、蓝黄值(b^*)。每种样品做 5 次平行实验, 去除极值后取平均值, 依据 L^*、a^*、b^*评价外观品质[16]。

1.3.4　风味成分分析

电子舌分析: 取 10 g 样品加入 100 mL 纯水均质 2 min, 5000 r/min 离心 10 min, 滤纸过滤后取清液稀释 10 倍, 测定酸、甜、咸、苦、鲜等味觉指标, 分析主成分贡献率[17]。

气相色谱-质谱仪(gas chromatography-mass spectrometry, GC-MS)分析: 根据李汶玥[18]的方法, 采用顶空固相微萃取法萃取挥发性成分, 样品经 60 ℃水浴平衡 10 min 后萃取 30 min, 解析 5 min 进样; 程序升温分离, 质

谱检测(离子源温度 200 ℃, 接口温度 250 ℃, 扫描范围 m/z 45~450), 通过美国国家标准技术研究所(National Institute of Standards and Technology, NIST)14 谱库检索化合物, 保留相似度(similarity, SI)大于 80 的结果, 峰面积归一化法计算相对含量。

1.3.5 营养成分测定

氯化钠含量: 依据 GB 5009.44—2016《食品安全国家标准 食品中氯化物的测定》中的银量法测定, 每组 3 次平行实验, 取平均值。

水分含量: 按照 GB 5009.3—2016《食品安全国家标准 食品中水分的测定》方法测定。

脂肪含量: 采用 GB 5009.6—2016《食品安全国家标准 食品中脂肪的测定方法》测定, 分别检测油炸前后样品的湿基水分及脂肪含量。

1.3.6 感官评价指标筛选

采用模糊二元对比决策法[19], 根据表 1 从视觉、嗅觉、听觉、味觉和触觉 5 个维度, 确立 12 个感官评价指标。由 15 位从事食品加工专业评价人员(男性 8 人, 女性 7 人, 年龄为 24~30 岁)进行两两对比评分, 1~10 分, 满分 150 分。得出优选比矩阵 $R=(r_{ij})_{n\times n}$, 该矩阵满足以下条件: ① $r_{ij}+r_{ji}=1$ (i=1, 2, 3, ..., n; j=1, 2, 3, ..., n); ② $r_{ii}=0$; ③ $0\leqslant r, ij\leqslant 1$。其中选定一个阈值 λ ($\lambda\in[0, 1]$), 根据公式(1), λ 取值从 1 开始逐渐减小, 当首次出现某一行元素全部为 1 时, 那么该行所对应的指标为第一优先指标。去除优先指标所在的行和列, 得到新的模糊优先关系矩阵, 重复上述过程, 即可得到所有评价指标的优先顺序。随后 15 位评价人员对 8 个指标进行 0~10 分的重要程度打分, 换算成百分制进行分值的分配, 最后进行感官评价, 每次评价前均使用纯净水漱口, 以消除前一个样品的影响。

$$r_{ij}^{(\lambda)}=\begin{cases}1, r_{ij}\geqslant\lambda\\ 0, r_{ij}\leqslant\lambda\end{cases} \tag{1}$$

1.4 数据处理

除特殊说明, 所有数据均为 3 次平行试验的平均值, 使用 Excel 2019 软件进行数据处理, 使用 SPSS 31.0 软件进行显著性分析、相关性分析和主成分分析, 使用 Origin 2024 软件进行聚类分析和绘制图表。

2 结果与分析

2.1 质构特性分析

由表 2 所示, 油炸后 F 弹性最高; 其中 I 硬度最高, 但回复性最低; J 硬度与咀嚼性最低; F 的弹性与回复性最高, 可能是由于 F 厚度最大, 油炸后未被油脂取代水分的面筋比例相较其他样品大。而 I 最长, 尺寸最大的样品, 且表面相对更粗糙, 所以油炸后比其他品牌硬度更大[20]。

2.2 色度分析结果

各品牌油条色度指标存在显著性差异(P<0.05, 表 3)。其中品牌 K 的 L^* 最高为 71.43±4.79, a^* 最小为 3.42±1.22, 且 b^* 处于较低水平为 14.93±4.14, 表明其外观色泽最佳; 品牌 I 的 L^* 最低为 48.67±5.13 为, a^* 较高为 14.27±0.59, 外观品质相对较差, 呈褐色。整体来看, L^*、a^*、b^* 的组合差异可有效区分不同品牌油条的外观优劣[21]。

表 1 油条感官评价一览表

Table 1 Overview table of sensory evaluation of fried dough sticks

感官类别		评价指标	序号	感觉特征描述
T_1	视觉	色泽	U_1	表皮的颜色, 以及颜色分布是否均匀
		表面形貌	U_2	表皮不粗糙、无气泡、膨发性好
		大小	U_3	质量和体积的大小
		内部结构	U_4	纵剖面气孔大小、均匀程度
T_2	嗅觉	气味	U_5	油条清香
T_3	听觉	咬破声音	U_6	咬破油条时发出的声音是否清脆
T_4	味觉	滋味	U_7	无异味, 咸香味
T_5	触觉	硬度	U_8	咬断油条所需要的力
		黏着性	U_9	油条的黏牙程度, 是否爽口
		弹性	U_{10}	受力形变, 除去外力后的回复程度
		咀嚼性	U_{11}	咀嚼到吞咽所做的功
		油腻性	U_{12}	表面干爽, 不油腻

表 2 油条质构特性

Table 2 Textural characteristics of fried dough sticks

品牌	硬度/g	弹性	咀嚼性	回复性
A	524.67±144.65^{cd}	0.77±0.01^{e}	250.81±73.84^{c}	0.20±0.01^{c}
B	338.68±122.59^{ef}	0.89±0.03^{a}	208.00±65.35^{cde}	0.28±0.00^{b}
C	815.34±100.85^{b}	0.86±0.01^{abc}	381.78±57.29^{ab}	0.28±0.03^{b}
D	627.86±200.28^{c}	0.83±0.04^{bcd}	351.04±79.90^{b}	0.29±0.03^{b}
E	613.08±28.53^{c}	0.86±0.01^{abc}	382.76±17.78^{ab}	0.30±0.01^{ab}
F	411.87±30.13^{de}	0.90±0.03^{a}	269.27±25.14^{c}	0.33±0.02^{a}
G	285.90±14.52^{ef}	0.82±0.01^{d}	174.66±13.58^{de}	0.29±0.02^{b}
H	676.02±16.48^{bc}	0.87±0.01^{ab}	427.99±25.32^{a}	0.30±0.01^{ab}
I	1010.07±160.95^{a}	0.80±0.02^{de}	261.11±22.10^{c}	0.11±0.01^{d}
J	254.75±30.49^{f}	0.82±0.05^{cd}	142.98±2.36^{e}	0.29±0.02^{b}
K	423.03±27.49^{de}	0.89±0.02^{a}	234.43±33.70^{cd}	0.29±0.05^{b}
L	422.21±53.87^{de}	0.87±0.01^{ab}	247.33±19.89^{c}	0.29±0.02^{b}

注: 同一列不同小写字母表示样品间存在显著性差异, P<0.05, 表 3、10 同。

表 3　油条色度分析

Table 3　Color analysis of fried dough sticks

品牌	L^*	a^*	b^*
A	68.41±0.92^{abcd}	5.75±0.98^{de}	23.91±1.82^{cde}
B	68.56±2.14^{abc}	4.96±1.26^{def}	26.21±3.44^{cd}
C	65.70±0.22^{bcd}	4.33±0.50^{ef}	27.11±1.82^{bc}
D	68.94±1.36^{ab}	5.91±0.52^{de}	25.61±2.33^{cd}
E	64.71±1.80^{cd}	8.36±1.56^{bc}	32.05±1.85^{ab}
F	71.01±2.17^{a}	5.31±0.9^{def}	23.22±0.56^{cde}
G	69.20±0.29^{ab}	4.10±0.54^{ef}	21.47±0.54^{de}
H	65.26±2.14^{bcd}	9.58±2.28^{b}	32.75±0.31^{a}
I	48.67±5.13^{e}	14.27±0.59^{a}	19.31±8.66^{ef}
J	70.87±3.89^{a}	6.80±1.51^{cd}	21.59±2.91^{de}
K	71.43±4.79^{a}	3.42±1.22^{f}	14.93±4.14^{f}
L	64.30±1.15^{d}	8.92±1.94^{b}	33.74±1.58^{a}

2.3　油条风味成分分析

电子舌分析结果如图 1 所示，PC1 贡献率为 62.7%，PC2 贡献率达 18.5%，累计贡献率为 81.2%，各品牌苦味、甜味和咸味强度较为突出(图 1)，对比度没有显著差别，其中苦味物质可能来自呋喃类化合物，需结合 GC-MS 进一步验证。

通过 GC-MS 筛选出 SI≥80 的风味物质，采用峰面积归一化法计算出各成分相对含量。结果如表 4 所示，不同品牌所检测出的风味物质含量各不相同，其中(*E*,*E*)-2,4-癸二烯醛和 2-呋喃甲醇的相对含量含量较高且绝大多数样品都存在，2-呋喃甲醇过高时会产生苦辣味[22]，与电子舌检测结果相互印证；C 的(*E*,*E*)-2,4-癸二烯醛相对含量最高为 31.10±2.23，风味表现突出[23]，后续选择(*E*,*E*)-2,4-癸二烯醛与 2-呋喃甲醇进行品质指标筛选。

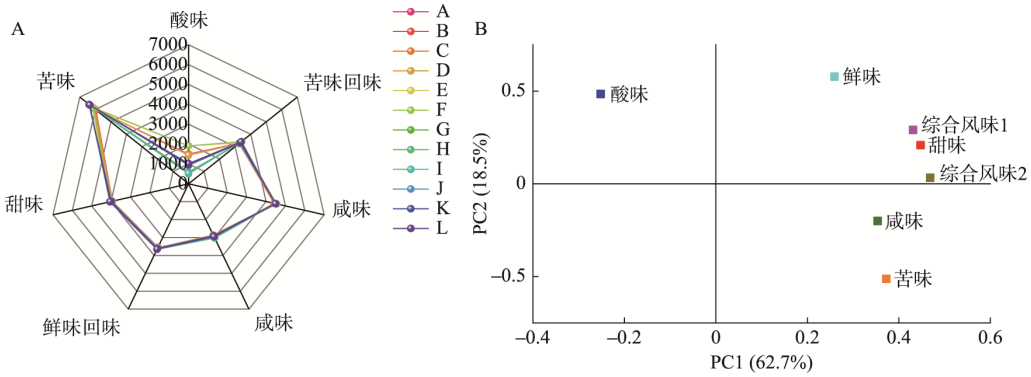


图 1　不同油条电子舌雷达图(A)和主成分分析图(B)

Fig.1　Radar chart (A) and principal component analysis chart (B) of different fried dough sticks by electronic tongue

表 4　油条风味关键成分相对含量(%)

Table 4　Relative content of key flavor components in fried dough sticks (%)

风味成分	气味描述	不同油条关键成分相对含量											
		A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
己醛	油脂味、草香、果香	7.87±0.15	8.30±0.23	12.59±0.28	12.70±1.35	3.68±0.45	9.90±0.68	6.45±0.75	7.14±0.44	3.24±0.23	/	/	/
庚醛	脂肪味、柑橘味、草香味	2.91±0.36	2.75±0.12	3.07±0.11	/	/	2.65±0.24	/	2.62±0.23	/	/	/	/
壬醛	柑橘、牛油、花香味	4.05±0.02	2.42±0.23	/	3.84±1.12	/	/	2.59±0.07	4.75±0.60	/	/	/	2.97±0.03
癸醛	脂肪、花香味	/	/	4.03±0.23	/	/	/	/	/	/	/	/	/
(*E*)-2-庚烯醛	油脂、果香、青草味	14.15±0.25	9.47±0.23	6.32±0.12	9.54±0.98	3.63±0.23	5.27±0.12	4.56±0.11	/	3.65±0.21	6.44±0.23	/	/
(*E*,*E*)-2,4-庚二烯醛	脂肪、坚果、油腻味	9.47±0.26	4.62±0.15	3.20±0.15	1.71±0.47	/	/	/	/	/	/	/	/
(*E*,*E*)-2,4-癸二烯醛	油炸香	19.57±0.45	25.34±0.14	31.10±2.23	30.41±2.25	12.82±1.54	17.73±1.56	13.71±1.17	10.44±1.12	10.57±1.52	21.74±0.71	9.45±0.01	1.38±0.02
D-柠檬烯	柑橘类清香	/	1.14±0.02	3.91±0.55	/	13.03±2.78	3.27±0.23	17.65±2.46	14.98±1.41	/	/	1.80±0.01	30.14±1.95
2-呋喃甲醇	焦甜味	15.91±0.16	23.21±0.35	7.08±1.21	11.14±1.32	5.12±1.02	19.61±2.11	20.35±1.32	23.51±1.38	38.46±1.59	21.45±0.84	10.76±0.93	/
十二烷	油脂味	/	0.77±0.05	1.13±0.04	1.91±0.24	1.34±0.02	1.82±0.36	1.26±0.18	1.01±0.01	0.40±0.01	1.36±0.01	1.43±0.34	0.27±0.05
十四烷	油脂味	0.64±0.01	0.25±0.01	0.42±0.01	0.64±0.12	0.31±0.03	0.70±0.46	0.42±0.06	0.30±0.01	0.21±0.02	0.58±0.06	0.36±0.01	13.46±0.03

注：/表示未检出。

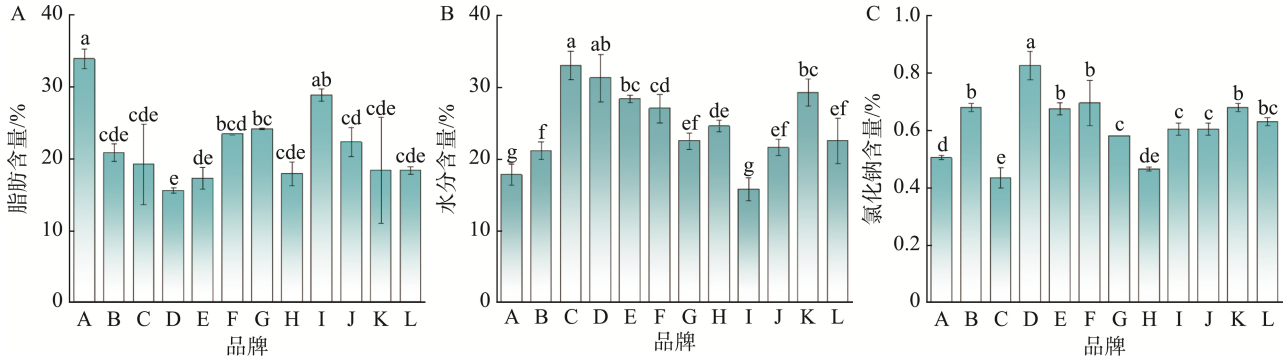
2.4 油条营养成分测定结果

如图 2 所示, 各品牌油条氯化钠含量差异显著, D 品牌含量最高为 0.835%, C 品牌最低为 0.435%, 12 个品牌平均值为 0.615%。A 品牌脂肪含量最高为 33.84%, D 脂肪含量最低为 15.61%; 水分含量最高为 C 达到 32.97%, I 最低为 15.82%。

2.5 油条感官评价指标确定与结果

得分结果与优选比如表 5 所示, 之后计算出优选比(各组的评分总分与满分的比值)得出优先比矩阵(表 6)。根据表 7, 可知 U_7(滋味)排名第一, U_1(色泽)和 U_2(表面形貌)分别排名第二、第三, U_5(气味)排名第四, 说明评价人员优先关注风味与外观。排名第五的为 U_8(硬度), 即咬断的油条的难易。第六位是 U_4(内部结构), 反映了纵剖面气孔大小、均匀程度, 在一定程度上决定油条的口感。之后是 U_9(黏着性)和 U_{12}(油腻性)。在听觉方面, 油条咬破时的声音虽直接对应其内部结构。比如内部气孔均匀、外壳酥脆, 咬破时会产生清晰、清脆的断裂声; 而品质较差的产品, 咬破时声音沉闷、微弱, 甚至无明显脆响, 但对评价人员来说感知不强。

根据综合上述结果, 在感官评价指标的选择中, 味觉、视觉和嗅觉更为重要, 最终选择排名前八的指标进行感官评价[24]。



注: 不同字母表示组间具有显著性差异, $P<0.05$。

图 2 不同油条的脂肪(A)、水分(B)和氯化钠(C)含量

Fig.2 Fat (A), moisture (B) and sodium chloride (C) content of different fried dough sticks

表 5 感官评价指标模糊二元对比评分结果

Table 5 Results of fuzzy binary comparison scoring for sensory evaluation indicators

对比元	基准元	评分统计/人										总分	优先选择比
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		
色泽	表面形貌			1	2	5	6	3	1			101	0.561
色泽	大小					7	2	6	2	1		114	0.633
色泽	内部结构				2	2	2	5	5	2		123	0.683
色泽	气味			2	3	6	4	2	1			94	0.522
色泽	咬破声音							8	8	1	1	139	0.772
色泽	滋味	1	2	2	8	4	1					69	0.383
色泽	硬度			2	3	2	6	3	2			101	0.561
色泽	黏着性				2	4	8	3	1			105	0.583
色泽	弹性				2	7	5	3	3			118	0.656
色泽	咀嚼性			1	2	9	1	3	2			99	0.550
色泽	脂肪含量				3	7	2	6				101	0.561
						…							
咀嚼性	脂肪含量		3	1	7	5		2				76	0.422

注: …表示以表面形貌、大小、内部结构、气味、咬破声音、滋味、硬度、黏着性、弹性、咀嚼性、脂肪含量为对比因子时, 评分统计及计算结果在此省略。

表 6　优先选择比矩阵
Table 6　Priority selection ratio matrix

评价指标	U_1	U_2	U_3	U_4	U_5	U_6	U_7	U_8	U_9	U_{10}	U_{11}	U_{12}
U_1	1.000	0.561	0.633	0.683	0.522	0.750	0.383	0.561	0.583	0.656	0.550	0.561
U_2	0.439	1.000	0.717	0.617	0.511	0.789	0.356	0.456	0.506	0.672	0.522	0.372
U_3	0.367	0.283	1.000	0.400	0.256	0.522	0.206	0.383	0.311	0.433	0.317	0.239
U_4	0.317	0.383	0.600	1.000	0.450	0.744	0.272	0.461	0.567	0.633	0.606	0.506
U_5	0.478	0.489	0.744	0.550	1.000	0.800	0.444	0.522	0.644	0.711	0.656	0.639
U_6	0.250	0.211	0.478	0.256	0.200	1.000	0.156	0.311	0.206	0.206	0.189	0.178
U_7	0.617	0.611	0.772	0.728	0.556	0.844	1.000	0.661	0.783	0.789	0.806	0.783
U_8	0.439	0.544	0.617	0.539	0.478	0.689	0.339	1.000	0.556	0.517	0.589	0.533
U_9	0.417	0.494	0.656	0.433	0.356	0.794	0.217	0.444	1.000	0.483	0.544	0.567
U_{10}	0.344	0.328	0.567	0.367	0.289	0.794	0.211	0.483	0.517	1.000	0.361	0.261
U_{11}	0.450	0.478	0.683	0.394	0.344	0.811	0.194	0.411	0.456	0.639	1.000	0.422
U_{12}	0.439	0.628	0.761	0.494	0.361	0.822	0.217	0.467	0.433	0.739	0.578	1.000

表 7　油条各指标排名
Table 7　Ranking of various indicators of fried dough sticks

项目	U_1	U_2	U_3	U_4	U_5	U_6	U_7	U_8	U_9	U_{10}	U_{11}	U_{12}
λ	0.522	0.489	0.522	0.506	0.522	1.000	0.556	0.483	0.483	0.506	0.811	0.578
排序	2	3	10	6	4	12	1	5	7	9	11	8

通过 8 个指标进行 0~10 分的重要程度打分, 换算成百分制分值进行分值的分配, 可得表 8。

根据不同指标得分的差异性, 给予不同指标的分值, 其中滋味 20 分, 色泽、气味和表面形貌 15 分, 硬度、油腻性和内部结构 10 分, 黏着性 5 分。速冻油条感官评价满分为 100 分, 确定各项感官评价指标的评分细则及评语, 每项指标分为 3 个等级[25], 建立速冻油条感官评价评分标准。选择 15 位感官评价人员进行感官评价, 依据表 9 进行感官评价打分, 可得到不同品牌感官指标分值。通过表 10 可以看出, 各品牌感官评价总分之间存在显著差异(P<0.05), 其中 D 总分最高, A 最低。

2.6　油条品质指标相关性分析

如图 3 所示, 将所测得的 20 种速冻油条相关性指标进行相关性分析, 可得各指标之间存在不同程度的相关性。其中 L^*与 a^*和硬度呈极显著负相关(P<0.01), 与咀嚼性呈极显著正相关(P<0.01)。脂肪含量与水分含量呈极显著负相关(P<0.01), 与滋味、咀嚼性和弹性呈显著负相关(P<0.05)。硬度与回复性呈显著正相关(P<0.05), 与油腻性和咀嚼性呈显著负相关(P<0.05)。气味与表面形貌、感官硬度(P<0.05)、滋味和黏着性均(P<0.01)呈显著正相关。上述相关分析结果表明, 速冻油条的 20 种指标之间的信息出现重叠现象, 因此可以应用主成分分析和聚类分析的方法对不同品种速冻油条的品质指标通过降维来简化数据结构, 进而提高不同品牌速冻油条品质特性综合评价的准确性[26–27]。

表 8　油条品质评价分值统计
Table 8　Statistical scores of fried dough sticks quality evaluation

指标	总分	计算分值	分配分值
滋味	141	16.02	20
色泽	121	13.75	15
表面形貌	115	13.07	15
气味	119	13.52	15
硬度	98	11.14	10
黏着性	86	9.77	5
油腻性	97	11.02	10
内部结构	103	11.70	10

表 9 感官评价打分表

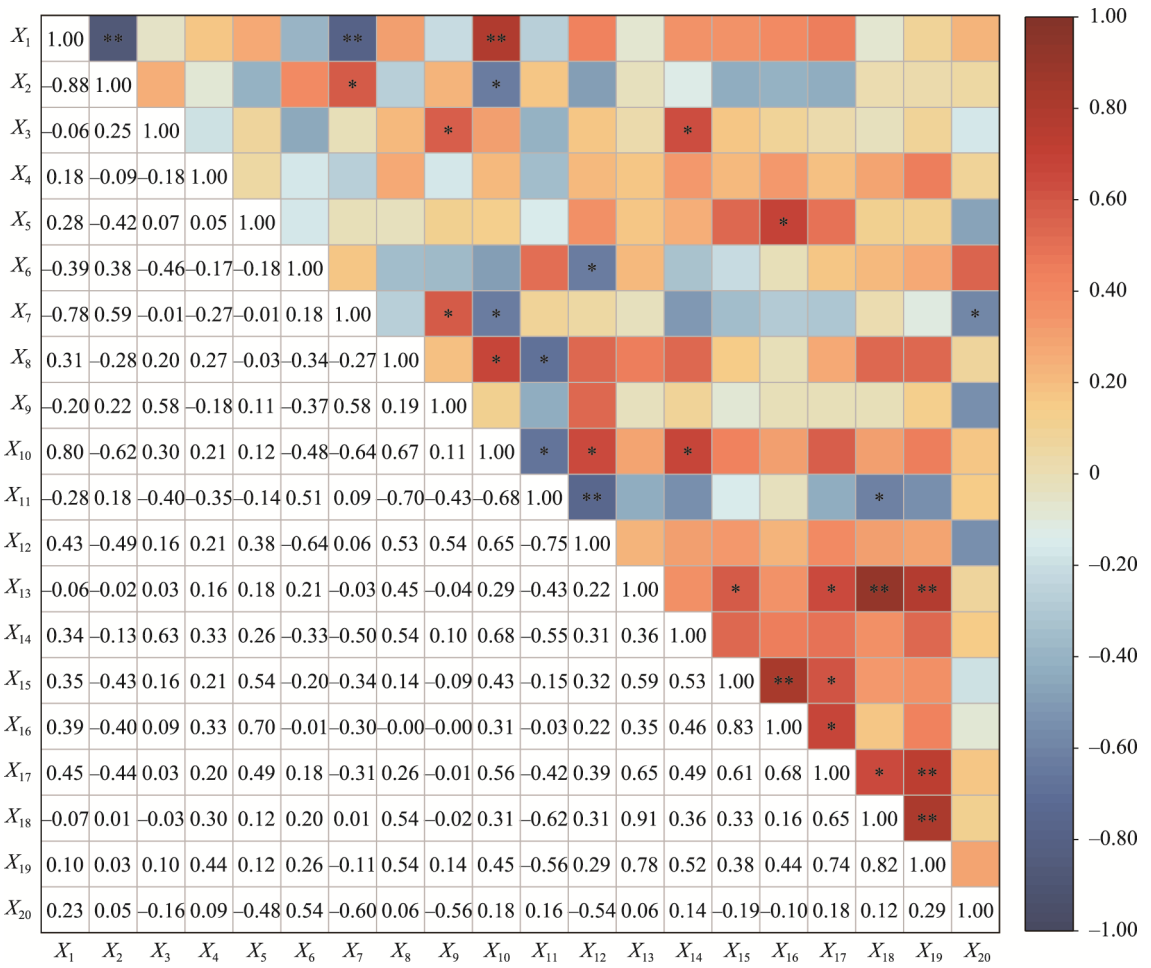
Table 9 Table of sensory evaluation scoring

指标	评分标准	分值/分
气味(15 分)	香气飘逸, 有油炸香味, 无异味	11~15
	面香味弱, 基本无异味	6~10
	无香味, 有异味	1~5
色泽(15 分)	色泽金黄、深黄	11~15
	黄白色	6~10
	白色或发灰发暗	1~5
表面形貌(15 分)	外型整齐对称, 膨胀度好	11~15
	外型较整齐对称, 膨胀度较好	6~10
	不整齐对称或膨胀度差	1~5
内部结构(10 分)	气孔多而细密, 孔壁薄	8~10
	气孔较少且大小不均匀, 或孔大壁厚	4~7
	内部气孔少, 孔壁厚, 结构坚实死板	1~3
滋味(20 分)	咸香适口	14~20
	咸味较重或无咸味	7~13
	有异味	0~6
硬度(10 分)	咬力适中	8~10
	较费力	4~7
	咬劲差	1~3
黏着性(5 分)	咀嚼时爽口, 不黏牙	4~5
	较爽口	2~3
	不爽口	0~1
油腻性(10 分)	表皮干爽, 咬时无油流出	8~10
	表皮油滑, 咬时基本无油流出	4~7
	表皮含油多, 咬时有油流出	1~3

表 10 感官评价指标得分

Table 10 Scores of sensory evaluation indicators

品牌	指标								
	气味	色泽	表面形貌	内部结构	硬度	滋味	黏着性	油腻性	总分
A	10.60±2.16^{a}	10.67±3.27^{a}	11.53±1.64^{a}	7.60±1.40^{bcd}	7.07±1.58^{a}	11.13±3.81^{b}	3.13±1.06^{b}	7.67±1.29^{a}	71.00±6.28^{c}
B	12.07±2.34^{a}	12.40±1.72^{a}	12.00±1.96^{a}	8.00±1.13^{abc}	8.00±1.00^{a}	15.67±2.38^{a}	4.13±0.64^{a}	8.13±1.13^{a}	81.40±6.38^{a}
C	12.07±1.58^{a}	11.60±2.56^{a}	12.47±1.30^{a}	7.73±1.49^{abcd}	7.87±1.06^{a}	15.13±2.61^{a}	3.73±0.80^{ab}	6.80±1.93^{a}	79.13±6.76^{ab}
D	12.07±1.49^{a}	11.93±2.49^{a}	12.60±1.45^{a}	8.67±1.05^{a}	8.13±1.64^{a}	15.53±3.09^{a}	4.27±0.59^{a}	7.33±1.95^{a}	82.00±7.20^{a}
E	11.27±2.09^{a}	12.40±1.18^{a}	11.47±1.60^{a}	7.07±1.16c^{de}	7.53±1.64^{a}	14.13±2.33^{a}	3.80±0.77^{b}	7.60±1.59^{a}	75.60±7.61^{bc}
F	12.13±1.25^{a}	12.40±1.55^{a}	12.80±1.52^{a}	8.40±0.63^{ab}	7.87±1.25^{a}	14.87±2.53^{a}	4.27±0.59^{a}	7.93±1.44^{a}	81.13±5.89^{a}
G	12.40±1.30^{a}	11.47±1.88^{a}	12.73±1.49^{a}	7.87±0.83^{abcd}	8.20±1.47^{a}	15.73±2.55^{a}	4.00±0.85^{a}	8.13±1.46^{a}	80.87±5.73^{a}
H	11.93±1.53^{a}	11.67±1.40^{a}	11.27±2.94^{a}	7.13±1.92^{cde}	7.80±1.26^{a}	15.07±3.84^{a}	4.20±1.74^{a}	8.13±0.99^{a}	78.53±5.93^{ab}
I	11.93±1.03^{a}	10.53±4.16^{a}	11.20±2.65^{a}	6.87±1.46^{de}	7.20±1.97^{a}	15.13±3.62^{a}	3.87±1.06^{ab}	7.67±1.50^{a}	78.73±6.68^{ab}
J	11.67±1.45^{a}	12.07±2.02^{a}	11.73±2.19^{a}	7.47±0.99^{bcde}	7.93±1.10^{a}	14.93±2.22^{a}	3.93±0.70^{a}	8.33±0.90^{a}	78.07±6.52^{ab}
K	11.53±1.13^{a}	10.60±3.54^{a}	11.00±3.27^{a}	6.47±1.81^{e}	7.33±1.72^{a}	14.80±2.98^{a}	3.73±1.03^{ab}	7.80±1.66^{a}	77.33±5.84^{ab}
L	12.00±1.46^{a}	12.40±1.72^{a}	12.27±1.75^{a}	7.13±1.64^{cde}	7.20±1.74^{a}	14.80±3.38^{a}	3.73±0.88^{ab}	7.67±1.59^{a}	78.60±6.79^{ab}



注: *表示差异显著(P<0.05); **表示差异极显著(P<0.01)。X_1: L^*; X_2: a^*; X_3: b^*; X_4: 氯化钠含量; X_5: (*E*,*E*)-2,4-癸二烯醛; X_6: 2-呋喃甲醇; X_7: 硬度; X_8: 弹性; X_9: 回复性; X_{10}: 咀嚼性; X_{11}: 脂肪含量; X_{12}: 水分含量; X_{13}: 气味; X_{14}: 色泽; X_{15}: 表面形貌; X_{16}: 内部结构; X_{17}: 感官硬度; X_{18}: 滋味; X_{19}: 黏着性; X_{20}: 油腻性。

图 3　油条品质指标相关性分析

Fig.3　Correlation analysis of quality indicators of fried dough sticks

2.7　油条特征品质主成分分析

通过对市售速冻油条的 20 项品质指标的测定值进行主成分分析。一般认为，当主成分特征值大于 1 且累计方差贡献率大于 85%时，可以使用提取的主成分表示原始变量大部分的主要信息[28]。本研究对 12 种速冻油条样品进行 20 种品质指标的评价测定，评价测定数据取平均值进行标准化，使用标准化后的数据进行主成分分析。根据图 2 与表 11 可知，特征值大于 1 的主成分共有 6 个，累计贡献率为 91.217%，表明前 6 个主成分可以反映速冻油条品质评价的主要信息。

表 11　油条主成分特征值、方差贡献率和累计贡献率

Table 11　Eigenvalues, variance contribution rate and cumulative contribution rate of the main components of fried dough sticks

成分	初始特征值			提取载荷平方和		
	总计	方差贡献率/%	累积方差贡献率/%	方差贡献率/%	累积方差贡献率/%	
1	6.879	34.394	34.394	6.879	34.394	34.394
2	3.331	16.655	51.050	3.331	16.655	51.050
3	3.087	15.433	66.483	3.087	15.433	66.483
4	2.349	11.743	78.226	2.349	11.743	78.226
5	1.543	7.713	85.939	1.543	7.713	85.939
6	1.056	5.278	91.217	1.056	5.278	91.217

表 12 为旋转后主成分载荷矩阵，可看出主成分与各成分之间的相关性关系，绝对值越大对主成分贡献越大，正负值表示正相关或负相关关系[29]。在第 1 主成分中，滋味、黏着性和气味为正向作用，载荷值分别为 0.957、0.906 和 0.879。脂肪含量呈负向作用，载荷值为–0.598。在第 2 主成分中 L^* 呈正相关且载荷值最高，为 0.953，a^* 为–0.868 是最高的负相关值。第 3 主成分中水分含量正向载荷值最高为 0.805，而油腻性呈负向作用，载荷值为–0.866。第 4、5、6 主成分贡献值最大的指标分别为内部结构、b^* 和氯化钠。

根据表 13 的 6 个主成分得分，结合公式(2)~(7)，可得各主成分因子得分。

$$F_1=-0.049X_1+0.026X_2-0.068X_3-0.043X_4-0.048X_5+0.154X_6+0.076X_7+0.139X_8+0.032X_9+0.053X_{10}-0.128X_{11}+0.063X_{12}+0.234X_{13}-0.017X_{14}-0.019X_{15}-0.053X_{16}+0.160X_{17}+0.266X_{18}+0.216X_{19}+0.075X_{20} \quad (2)$$

$$F_2=0.279X_1-0.271X_2-0.072X_3-0.115X_4-0.034X_5-0.079X_6-0.194X_7+0.107X_8-0.066X_9+0.215X_{10}-0.050X_{11}+0.105X_{12}-0.067X_{13}-0.024X_{14}-0.037X_{15}-0.068X_{16}+0.056X_{17}-0.048X_{18}-0.065X_{19}+0.102X_{20} \quad (3)$$

$$F_3=-0.018X_1-0.071X_2-0.040X_3+0.020X_4+0.094X_5-0.189X_6+0.200X_7+0.074X_8+0.202X_9+0.005X_{10}-0.150X_{11}+0.271X_{12}-0.019X_{13}-0.106X_{14}-0.034X_{15}-0.057X_{16}-0.045X_{17}+0.021X_{18}-0.047X_{19}-0.299X_{20} \quad (4)$$

$$F_4=-0.001X_1-0.042X_2+0.039X_3+0.027X_4+0.297X_5+0.027X_6+0.003X_7-0.189X_8-0.023X_9-0.078X_{10}+0.139X_{11}-0.035X_{12}+0.047X_{13}+0.075X_{14}+0.281X_{15}+0.338X_{16}+0.131X_{17}-0.050X_{18}+0.002X_{19}-0.135X_{20} \quad (5)$$

$$F_5=-0.055X_1+0.222X_2+0.497X_3-0.066X_4-0.061X_5-0.107X_6-0.117X_7+0.012X_8+0.139X_9+0.088X_{10}-0.036X_{11}-0.137X_{12}-0.052X_{13}+0.359X_{14}+0.065X_{15}+0.061X_{16}-0.049X_{17}-0.109X_{18}+0.022X_{19}+0.102X_{20} \quad (6)$$

$$F_6=-0.093X_1+0.131X_2-0.143X_3+0.797X_4-0.048X_5-0.223X_6-0.083X_7+0.049X_8-0.193X_9-0.116X_{10}-0.079X_{11}-0.010X_{12}-0.087X_{13}+0.124X_{14}+0.040X_{15}+0.090X_{16}-0.228X_{17}+0.050X_{19}-0.083X_{20} \quad (7)$$

式中：X_1~X_{20} 为 20 个品质指标，F_1~F_6 为各主成分因子得分。

最终以主成分方差贡献率为权重，结合各主成分因子得分通过公式(8)计算不同品牌速冻油条品质综合得分 F。

$$F=0.344F_1+0.167F_2+0.154F_3+0.117F_4+0.077F_5+0.053F_6 \quad (8)$$

表 12 旋转后主成分载荷矩阵

Table 12 Principal component load matrix after rotation

指标	主成分					
	1	2	3	4	5	6
L^*	–0.023	0.953	–0.028	0.223	0.007	0.041
a^*	0.029	–0.868	–0.143	–0.339	0.280	0.029
b^*	–0.007	–0.062	0.231	0.049	0.945	–0.152
氯化钠	0.233	0.090	–0.009	0.112	–0.038	0.933
(*E*,*E*)-2,4-癸二烯醛	0.028	0.103	0.322	0.813	–0.059	–0.055
2-呋喃甲醇	0.293	–0.436	–0.665	0.005	–0.369	–0.275
硬度	0.018	–0.782	0.509	–0.124	–0.207	–0.231
弹性	0.582	0.440	0.268	–0.253	0.251	0.200
咀嚼性	0.093	–0.231	0.738	–0.059	0.395	–0.248
回复性	0.379	0.818	0.149	0.068	0.361	0.051
脂肪含量	–0.598	–0.323	–0.528	0.138	–0.336	–0.211
水分含量	0.315	0.432	0.805	0.135	0.032	0.075
气味	0.879	–0.066	–0.035	0.282	0.015	–0.001
色泽	0.357	0.311	–0.038	0.285	0.747	0.250
表面形貌	0.266	0.229	0.018	0.811	0.165	0.108
内部结构	0.170	0.160	–0.060	0.916	0.114	0.140
感官硬度	0.684	0.332	–0.074	0.551	0.015	–0.122
滋味	0.957	–0.031	0.037	0.064	–0.043	0.111
黏着性	0.906	0.020	–0.083	0.177	0.166	0.177
油腻性	0.222	0.252	–0.866	–0.300	0.075	0.003

表 13　主成分得分系数矩阵

Table 13　Matrix of principal component score coefficients

指标	主成分					
	1	2	3	4	5	6
L^*	–0.049	0.279	–0.018	–0.001	–0.055	–0.093
a^*	0.026	–0.271	–0.071	–0.042	0.222	0.131
b^*	–0.068	–0.072	–0.040	0.039	0.497	–0.143
氯化钠	–0.043	–0.115	0.020	0.027	–0.066	0.797
(*E*,*E*)-2,4-癸二烯醛	–0.048	–0.034	0.094	0.297	–0.061	–0.048
2-呋喃甲醇	0.154	–0.079	–0.189	0.027	–0.107	–0.223
油炸后硬度	0.076	–0.194	0.200	0.003	–0.117	–0.083
油炸后弹性	0.139	0.107	0.074	–0.189	0.012	0.049
油炸后咀嚼性	0.032	–0.066	0.202	–0.023	0.139	–0.193
油炸后回复性	0.053	0.215	0.005	–0.078	0.088	–0.116
油炸后脂肪	–0.128	–0.050	–0.150	0.139	–0.036	–0.079
油炸后水分	0.063	0.105	0.271	–0.035	–0.137	–0.010
气味	0.234	–0.067	–0.019	0.047	–0.052	–0.087
色泽	–0.017	–0.024	–0.106	0.075	0.359	0.124
表面形貌	–0.019	–0.037	–0.034	0.281	0.065	0.040
内部结构	–0.053	–0.068	–0.057	0.338	0.061	0.090
感官硬度	0.160	0.056	–0.045	0.131	–0.049	–0.228
滋味	0.266	–0.048	0.021	–0.050	–0.109	0.000
黏性	0.216	–0.065	–0.047	0.002	0.022	0.050
油腻性	0.075	0.102	–0.299	–0.135	0.102	–0.083

根据品质综合得分计算公式, 计算 12 种油条综合品质得分并进行排序, F 越大, 排名越高。通过表 14 可得 D 排名第一, 其 F 为 0.518, A 排在最后 F 为–1.029, 二者综合排名与感官评价排名相同。

表 14　主成分得分与综合排名

Table 14　Principal component scores and comprehensive rankings

品牌	主成分分值						F	排名
	F_1	F_2	F_3	F_4	F_5	F_6		
A	–2.882	0.047	–0.492	0.697	–0.267	–0.577	–1.029	12
B	0.622	0.404	–0.892	0.306	0.299	0.381	0.223	4
C	0.124	0.000	2.016	1.065	–0.393	–1.606	0.362	2
D	0.482	–0.304	1.064	1.497	–0.168	1.452	0.518	1
E	–0.441	–0.011	0.827	–1.058	1.315	0.648	–0.014	8
F	0.547	0.580	–0.410	0.532	0.245	0.626	0.336	3
G	0.701	0.538	–1.156	0.677	–0.676	–0.717	0.142	6
H	0.915	–0.200	0.006	–1.089	1.141	–1.807	0.147	5
I	0.218	–2.838	–0.462	–0.349	–1.039	0.244	–0.578	11
J	0.100	0.584	–1.321	0.010	–0.208	–0.160	–0.095	10
K	0.023	1.290	0.793	–1.679	–1.848	0.663	0.042	7
L	–0.411	–0.091	0.028	–0.609	1.597	0.853	–0.055	9

2.8 油条品质指标聚类分析

将速冻油条的各指标以欧氏距离平方为准则采用组间连接的系统聚类方法[30]。聚类分析结果如图 4 所示，当距离为 0.7 时可分为 5 大类，其中氯化钠单独聚为一类，a^* 和硬度聚为一类，(*E*,*E*)-2,4-癸二烯醛、表面形貌、内部结构、气味、滋味、黏着性、感官硬度为一大类，2-呋喃甲醇、油腻性、脂肪含量为一类，其余指标为一类。结合主成分载荷结果最终选用滋味、内部结构、L^*、a^*、氯化钠、水分含量和脂肪含量为关键性指标。

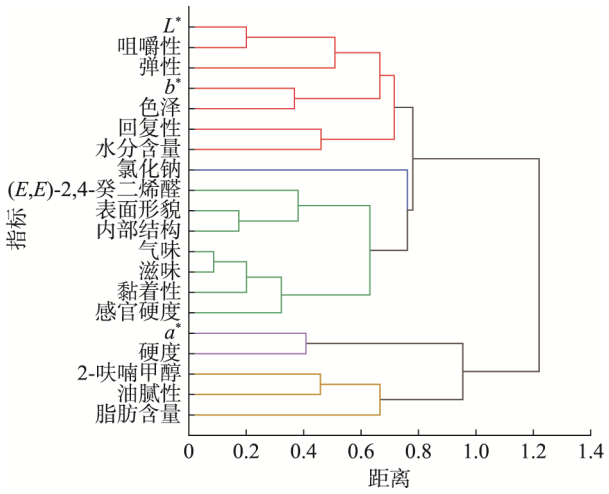


图 4 油条品质指标聚类分析

Fig.4 Cluster analysis of quality indicators of fried dough sticks

3 结 论

通过对 12 种市售速冻油条的营养指标进行检测，采用模糊数学法筛选出 8 种最优感官评价指标，最终筛选出 20 种指标进行相关性分析，发现不同指标之间存在一定的相关性。采用主成分分析和聚类分析对速冻油条的 20 项指标进行系统分析，提取出 6 个主成分，累计方差贡献率为 91.217%。综合确定滋味、内部结构、L^*、a^*、氯化钠、水分含量和脂肪含量为评判速冻油条品质关键指标。同时进行品质综合得分计算，得出 D 品牌综合得分最高，感官评价总分最高；A 品牌综合得分最低且感官评价总分最低。

本研究综合模糊数学法、相关性分析、主成分分析以及聚类分析方法，构建速冻油条的品质评价体系，对速冻油条的综合品质进行系统性评价，其结果为消费者选择综合品质优良的速冻油条提供参考依据。同时为低油低盐的健康化速冻油条特征品质评价提供参考。

参考文献

[1] 朱锦凤, 管军军, 徐照勇, 等. 基于油条品质的速冻油条生坯关键技术研究[J]. 食品科技, 2022, 47(9): 116–124.
Zhu Jinfeng, Guan Junjun, Xu Zhaoyong, et al. Key technology of quick-frozen raw-dough sticks based on the quality of dough sticks [J]. Food Science and Technology, 2022, 47(9): 116–124.

[2] 刘高峰, 田天娥, 陈新朋, 等. 速冻油条生胚配方及生产工艺[J]. 粮食加工, 2022, 47(1): 42–43.
Liu Gaofeng, Tian Tiane, Chen Xinpeng, et al. Formulation and production technology of quick-frozen cruller embryo [J]. Grain Processing, 2022, 47(1): 42–43.

[3] Andrea C, Theresa M, Poilin B, et al. The state of food and agriculture 2023: revealing the true cost of food to transform agrifood systems: cc7724en [R/OL]. 2023-11-06. https://doi.org/10.4060/cc7724en

[4] Niu Mengli, Guo Jinying, Yang Xue, et al. Quality analysis of dough and steamed bread under various freezing conditions [J]. Journal of Food Science, 2024, 89(7): 4345–4358.

[5] 张珍林, 陈科, 程微微, 等. 基于模糊数学法和定量描述分析优化甘薯皮多酚酸奶发酵与灭菌条件工艺[J]. 食品安全质量检测学报, 2025, 16(18): 232–239.
Zhang Zhenlin, Chen Ke, Cheng Weiwei, et al. Optimization of fermentation and sterilization conditions for sweet potato peel polyphenol yogurt *via* fuzzy mathematical approach and quantitative descriptive analysis [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2025, 16(18): 232–239.

[6] Wang Ying, Lv Chengzhuang, Zhang Ping, et al. Formulation optimization and quality evaluation of walnut protein sausage based on fuzzy mathematics sensory evaluation combined with random centroid optimization [J]. Food Science & Nutrition, 2025, 13(8): e70747.

[7] 胡明明, 张权, 吴思纷, 等. 基于主成分分析的西式快餐条件下煎炸油品质评价[J]. 食品工业科技, 2023, 44(11): 287–296.
Hu Mingming, Zhang Quan, Wu Sifen, et al. Quality evaluation of frying oils under the conditions of western fast food restaurants based on principal component analysis [J]. Science and Technology of Food Industry, 2023, 44(11): 287–296.

[8] Tan F J, Li D C, Kaewkot C, et al. Application of principal component analysis with instrumental analysis and sensory evaluation for assessment of chicken breast meat juiciness [J]. British Poultry Science, 2022, 63(2): 164–170.

[9] Wang Li, Xie Dingwen, Han Yueran, et al. Comprehensive quality evaluation of specific brand of sauce-flavor Baijiu based on fingerprints and chemometrics [J]. Food Chemistry, 2026, 501: 147531.

[10] Francis N, Packiaraj D. Genetic uniformity of varieties and an assessment on the diversity among the elite varieties of rice (*Oryza* sativa L.) [J]. Electronic Journal of Plant Breeding, 2026, 11(3): 896–900.

[11] Kumar R, Chambers E IV. Unreliability of clustering results in sensory studies and a strategy to address the issue [J]. Frontiers in Food Science and Technology, 2024, 4: 1271193.

[12] Wang Yan, Yuan Xiaoxuan, Liu Linan, et al. Multielement principal component analysis and origin traceability of rice based on ICP-MS/MS [J]. Journal of Food Quality, 2021, 2021: 5536241.

[13] 郝慧敏, 黄丽萍, 纵伟. 基于主成分及聚类分析的不同产地红枣功能成分品质分析[J]. 食品安全质量检测学报, 2023, 14(18): 253–259.
Hao Huimin, Huang Liping, Zong Wei. Quality analysis of functional components of jujube from different producing areas by principal component analysis and cluster analysis [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2023, 14(18): 253–259.

[14] 邓敏. 基于模糊二元对比决策法建立黑全麦饺子皮感官评价体系[J].

保鲜与加工, 2024, 24(7): 64–70.
Deng Min. Establishment of sensory evaluation system for whole rye dumpling wrapper based on fuzzy binary contrast decision method [J]. Storage and Process, 2024, 24(7): 64–70.

[15] Liu Ying, Tian Jianjun, Zhang Tingting, et al. Effects of frying temperature and pore profile on the oil absorption behavior of fried potato chips [J]. Food Chemistry, 2021, 345: 128832.

[16] Wang Xiangcun, McClements D J, Xu Zhenlin, et al. Recent advances in the optimization of the sensory attributes of fried foods: appearance, flavor, and texture [J]. Trends in Food Science & Technology, 2023, 138: 297–309.

[17] 张懿, 张璐, 李凤, 等. 油炸食品中挥发性风味物质的研究进展[J]. 食品科技, 2024, 49(4): 124–132.
Zhang Yi, Zhang Lu, Li Feng, et al. Review on volatile flavor substances of fried foods [J]. Food Science and Technology, 2024, 49(4): 124–132.

[18] 李汶玥. 冷冻油条生坯工艺优化及食品添加剂对其品质影响和冻藏特性研究[D]. 成都: 西华大学, 2023: 13–14.
Li Wenyue. Process optimization of frozen youtiao dough and study on effects of food additives on its quality and its frozen storage characteristics [D]. Chengdu: Xihua University, 2023: 13–14.

[19] 康志敏, 郭祯祥, 孙冰华, 等. 运用模糊数学方法建立油条感官评价体系[J]. 农产品加工, 2012(3): 70–73, 78.
Kang Zhimin, Guo Zhenxiang, Sun Binghua, et al. Establishment of sensory evaluation system of fried dough sticks by fuzzy mathematics method [J]. Farm Products Processing, 2012(3): 70–73, 78.

[20] 韩冰霜. 紫甘薯全粉对面团特性与饼干品质影响研究[D]. 合肥: 安徽农业大学, 2020: 17–19.
Han Bingshuang. The effects of purple sweet potato powder on the characteristics of dough and quality of biscuit [D]. Hefei: Anhui Agricultural University, 2020: 17–19.

[21] 周娜, 袁剑龙, 赵甜甜, 等. 真空油炸马铃薯薯条品质评价方法及模型构建[J]. 食品与发酵工业, 2026, 52(10): 33–41.
Zhou Na, Yuan Jianlong, Zhao Tiantian, et al. Quality evaluation method and model construction of vacuum-fried French fries [J]. Food and Fermentation Industries, 2026, 52(10): 33–41.

[22] Kreppenhofer S, Frank O, Hofmann T. Identification of (furan-2-yl)methylated benzene diols and triols as a novel class of bitter compounds in roasted coffee [J]. Food Chemistry, 2011, 126(2): 441–449.

[23] Yang Zixuan, Xu Dan, Zhou Hongling, et al. Rheological, microstructure and mixing behaviors of frozen dough reconstituted by wheat starch and gluten [J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2022, 212: 517–526.

[24] Ye Hongyan, Zhang Dawei, Li Yang, et al. Study on processing conditions for lotus root starch and red bean dumpling [J]. Journal of Food Processing and Preservation, 2020, 44(7): e14492.

[25] 郝文, 李曼杰, 谢霞, 等. 预炸对速冻油条食用品质的影响[J]. 河南科技学院学报(自然科学版), 2023, 51(6): 26–31.
Hao Wen, Li Manjie, Xie Xia, et al. Effects of pre-frying on the quality of frozen deep-fried sticks [J]. Journal of Henan Institute of Science and Technology (Natural Science Edition), 2023, 51(6): 26–31.

[26] 赵雪, 丛中笑, 孙华军, 等. 市售调味面制品品质评价体系的建立与应用[J]. 食品科学, 2025, 46(8): 25–33.
Zhao Xue, Cong Zhongxiao, Sun Huajun, et al. Establishment and application of a quality evaluation system for commercial flavored extruded noodles [J]. Food Science, 2025, 46(8): 25–33.

[27] 王养平, 焦建军. 运动营养饼干品质指标的主成分分析及聚类分析[J]. 食品安全质量检测学报, 2022, 13(5): 1405–1413.
Wang Yangping, Jiao Jianjun. Principal component analysis and cluster analysis of quality indexes of sports nutrition biscuits [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2022, 13(5): 1405–1413.

[28] 陈璐, 张平英, 米艳华, 等. 基于主成分与聚类分析的云南特色鲜食辣椒特征品质分析[J]. 食品安全质量检测学报, 2025, 16(14): 169–180.
Chen Lu, Zhang Pingying, Mi Yanhua, et al. Characteristic quality analysis of Yunnan specialty fresh *Capsicum annuum* L. based on principal component and cluster analysis [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2025, 16(14): 169–180.

[29] Rota F S, Bollani L, Lucia M G, et al. Food quality and risk perception: an empirical study based on the opinion of university students [J]. Sustainability, 2024, 16(18): 8116.

[30] Montecchiarini M L, Silva-Sanzana C, Valderramo L, et al. Biochemical differences in the skin of two blueberries (*Vaccinium corymbosum*) varieties with contrasting firmness: implication of ions, metabolites and cell wall related proteins in two developmental stages [J]. Plant Physiology and Biochemistry, 2021, 162: 483–495.

(责任编辑: 曹岱琳　安香玉)