中国油料作物学报
Chinese Journal of Oil Crop Sciences
2026,48(5):248-258
doi:10.19802/j.issn.1007-9084.2025220

不同市售亚麻籽粉感官品质特征差异分析

禹晓[1],李升[1],杨帆[1],张晨[1],陈亚淑[2],周琦[2],邓乾春[2*],朱莹莹[1],汪厚银[3]
(1.郑州轻工业大学食品与生物工程学院,冷链食品加工与安全控制教育部重点实验室,河南 郑州,450001;
2.中国农业科学院油料作物研究所 油料脂质化学与营养湖北省重点实验室,湖北 武汉,430062;
3.中国标准化研究院食品与农业标准化研究所,北京,100091)

摘要:为了给亚麻籽粉感官评价体系构建、质量控制与品质提升和标准化生产提供参考,本研究比较分析了20种市售亚麻籽粉的感官品质特性,重点梳理了原料品种和熟化方式对亚麻籽粉颗粒尺寸、微观形态、香气属性、口感滋味以及表面属性的影响。结果表明,20种市售亚麻籽粉的粒径主要分布在0.20~0.45 mm,仅在颗粒尺寸较大且未结块样品中观察到完整的胚子叶细胞腔室结构,以及少量近球形蛋白体,但油脂体均已发生塌陷。多数亚麻籽粉呈现出“烤香”、“油脂味”香气属性和“鼻后香气浓郁程度”,“酥脆性”、“沙粒感”、“黏牙性”口感属性,但部分样品呈现较强“海苔味”和“生青味”,以及“哈喇味”和“生核桃皮味”。大部分亚麻籽粉“光泽性”良好,颗粒大小和均匀性差异明显,少数样品“表面松散性”较差,出现结块现象。主成分分析和聚类分析将市售亚麻籽粉基于口感滋味、香气和表面属性差异进行分类。其中,采用低温烘焙工艺的亚麻籽粉“鼻后香气浓郁程度”和“酥脆性”较好,但部分样品“哈喇味”、“生青味”、“生核桃皮味”和“异味程度”较强,“光泽性”好、“表面松散程度”较强;微波熟制亚麻籽粉感官品质稳定,未呈现明显“哈喇味”、“生青味”等不良气味;高温炒制亚麻籽粉的“黏牙性、“均匀性”较强。总之,通过筛选原料品种、调整熟制方式和关键参数,有望提升亚麻籽粉“烤香”、“酥脆性”,减少“哈喇味”、“沙粒感”和“黏牙性”等不良口感。

关键词:亚麻籽粉;微观结构;感官品质;熟制工艺;多元统计分析
中图分类号:TS202.1　　**文献标识码:** A　　**文章编号:**1007-9084(2026)05-0248-11
OSID

Variation analysis on sensory quality of different commercially available flaxseed flours

YU Xiao[1], LI Sheng[1], YANG Fan[1], ZHANG Chen[1], CHEN Ya-shu[2], ZHOU Qi[2], DENG Qian-chun[2*], ZHU Ying-ying[1], WANG Hou-yin[3]
(1. *College of Food and Bioengineering, Zhengzhou University of Light Industry, Key Laboratory of Cold Chain Food Processing and Safety Control, Ministry of Education, Zhengzhou* 450001, *China*; 2. *Hubei Key Laboratory of Lipid Chemistry and Nutrition, Key Laboratory of Oilseeds Processing, Oil Crops Research Institute, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Wuhan* 430062, *China*; 3. *Institute for Food and Agricultural Standardization, China National Institute of Standardization, Beijing* 100091, *China*)

Abstract: To provide references for construction of sensory evaluation system, and also for quality control and improvement and standardized production of flaxseed flours, this study comparatively analyzed the sensory quality properties of 20 commercially available flaxseed flours, focusing on exploring the effects of raw material varieties and maturation processing on particle size, microstructure, aroma profile, taste and mouthfeel, as well as surface properties. Results showed that particle sizes of the samples mainly ranged from 0.20 to 0.45 mm. Only in the samples with large particle sizes without lumps were complete embryo cotyledon cell cavity structures observed, along with a small number of nearly spherical proteomes, but the lipid bodies had all collapsed. Most flaxseed flours displayed "roasted fragrance" and "oily flavor", as well as the taste attributes of "postnasal aroma", "crispiness", "san-

收稿日期:2025-10-13
基金项目:“十四五”国家重点研发计划项目(2024YFD1600104);国家自然科学基金项目(32472390)
作者简介:禹晓(1986-),女,副教授,博士,主要从事功能性脂质营养和递送研究,E-mail: yuxiao@zzuli.edu.cn
* 通讯作者:邓乾春(1979-),男,研究员,博士,主要从事脂质化学与营养研究,E-mail: dengqianchun@caas.cn

dy texture" and "stickiness". However, some samples showed strong "seaweed flavor", "raw green flavor", "rancid flavor" and "raw walnut peel flavor". Most flaxseed flours possessed well "luster", but displayed apparent differences in particle size and uniformity, and some samples showed lumps with poor "surface looseness". Principal component analysis and cluster analysis classified different commercially available flaxseed flours based on differences in taste, flavor, aroma and surface attributes. Among them, low-temperature baking produced flaxseed flours with off-flavors, such as "rancid flavor", while low-temperature baking formulated flaxseed flours with "raw green flavor", "raw walnut peel flavor" and stronger "stickiness". Microwave-roasting produced flaxseed flours with stable sensory quality without obvious off-flavors of "rancid flavor" or "raw green flavor". High-temperature baking makes flours have stronger "stickiness" and "uniformity" features. In conclusion, "roasted aroma" and "crispness" of flaxseed flours could be enhanced by screening flaxseed materials, adjusting key parameters of maturation process, while the unpleasant flavors and textures, such as "rancid flavor", "sandy texture" and "sticky texture" could be also reduced.

Key words: flaxseed flours; microstructure; sensory quality; maturation process; multivariate statistical analysis

亚麻(*Linum usitatissimum* L.)又称胡麻,是我国重要经济作物和功能型油料作物之一,对推动乡村振兴战略与农村区域经济协同发展具有重要意义。除了富含n-3系列唯一必需脂肪酸—α-亚麻酸外,亚麻籽还含有优质蛋白质、可溶性膳食纤维多糖,以及木酚素等活性组分[1,2]。已有研究证明,亚麻籽及其活性组分具有促进脑细胞和视力发育的作用,具有抗炎、抗肿瘤、改善肠道菌群和非酒精性脂肪肝病、预防心脑血管疾病等多重健康功效[3-5]。因此,亚麻籽作为一种具有极高营养价值和健康功效的食品配料,逐渐从保健食品拓展到焙烤食品、肉制品、乳制品、谷物早餐食品、传统面制品等领域[6-11]。与单一活性组分摄入不同,亚麻籽全籽化产品,比如全籽/脱脂粉、酱乳产品,不仅能够实现全组分利用,还能够实现α-亚麻酸、木酚素等营养素和活性组分的共摄入和协同增效,极具开发利用潜力[11,12]。

国家卫生计生委办公厅2017年关于通报亚麻籽适用标准的函中明确指出,亚麻籽因含有生氰糖苷等抗营养因子,必须经熟制后食用。烘焙、微波等熟制过程不仅能够有效消减亚麻籽中抗营养因子,还能够促进胞内α-亚麻酸、蛋白质、木酚素等营养素和活性组分增效释放,灭活与脂质水解及氧化相关的内源性脂肪酶、磷脂酶、过氧化物酶等[13-16]。亚麻籽中不饱和脂肪酸含量高达90%以上,主要以油脂体形式存在,在萌动等环境胁迫下易被脂肪酶、磷脂酶等水解生成游离脂肪酸,进一步被脂肪氧化酶、过氧化物酶氧化生成醛类及醇类化合物[17]。因此,亚麻籽整体呈现青草味、脂香味、谷子味、甜味、辛辣味和鱼腥味,而2-乙基己醇、己醇、(E)-2-己烯醛、己醛、(E,E)-2,4-庚二烯醛是冷榨亚麻籽油青草味来源,(Z)-4-庚烯醛是鱼腥味来源[18]。微波等熟制处理还能够促进亚麻籽中美拉德反应产物生成,赋予亚麻籽粉更强的烤香和木香的香气属性,一方面提升了富含α-亚麻酸的油脂氧化稳定性,还强化亚麻籽相关产品风味物质生成[19,20]。此外,除了熟制时间、温度等因素影响外,储存温度、隔氧程度以及避光等,也会影响亚麻籽粉的氧化稳定性和产品货架期。此外,亚麻籽及相关产品风味特性还表现出明显的品种产地差异性[21]。

感官评价常用的描述性分析方法,包括风味剖面法、质地剖面法、定量描述分析法,是亚麻籽粉质量评价的重要指标之一。目前研究主要聚焦在亚麻籽粉添加量对多组分食品体系色泽、风味、质地等感官品质的影响,用以确定亚麻籽粉的最优添加量[10,11],而对亚麻籽粉本身感官评价的研究相对较少。基于此,本研究收集了20种市售亚麻籽粉,针对颗粒尺寸、微观形态、香气属性、口感滋味以及表面属性等感官品质进行比较分析,解析产地和加工方式等对市售亚麻籽粉感官品质的影响规律,以期为基于风味导向的亚麻籽粉品质提升和标准化生产提供理论依据,也为高质量推动亚麻籽全值化利用提供数据支撑和技术指导。

1 材料与方法

1.1 材料

20款市售亚麻籽粉购自通过线下超市和线上商城,同一生产企业相同产品共搜集2批次,置于4 ℃条件下密封,待分析,样品基本信息见表1。

1.2 方法

1.2.1 市售亚麻籽粉粒度测定 采用分级筛选方法,对20种市售亚麻籽粉进行筛分,具体为:分别称

表1 市售20种亚麻籽粉基本信息

Table 1 Basic information of 20 kinds of commercially available flaxseed flours

编号 No.	原料 Material	产品产地 Producing area	熟化工艺 Thermal processing	生产规格 Production specification	包装形式 Packaging form	保质期 Shelf life
1	金色亚麻籽 Golden flaxseed	陕西,中国 Shaanxi,China	微波低温熟制 Low-temperature microwave processing	500 g/袋 500 g/ bag	真空袋装、避光 Vacuum packed, light-proof	6个月 6 months
2	褐色亚麻籽 Brown flaxseed	陕西,中国 Shaanxi,China	微波低温熟制 Low-temperature microwave processing	250 g/袋 250 g/bag	真空袋装、避光 Vacuum packed, light-proof	6个月 6 months
3	金色亚麻籽 Golden flaxseed	内蒙古,中国 Inner Mongolia,China	微波熟制 Microwave processing	250 g/袋 250 g/bag	袋装、未避光 Bagged, non-light-proof	9个月 9 months
4	金色亚麻籽 Golden flaxseed	内蒙古,中国 Inner Mongolia,China	微波熟制 Microwave processing	300 g/袋 300 g/bag	罐装、未避光 Canned, non-light-proof	12个月 12 months
5	金色亚麻籽 Golden flaxseed	河北,中国 Hebei,China	低温烘焙 Low-temperature roasting	500 g/袋 500 g/bag	袋装、避光 Bagged, light-proof	6个月 6 months
6	金色亚麻籽 Golden flaxseed	山东,中国 Shandong,China	低温烘焙 Low-temperature roasting	300 g/罐 300 g/can	罐装、未避光 Canned, non-light-proof	6个月 6 months
7	金色亚麻籽 Golden flaxseed	安徽,中国 Anhui,China	108℃低温烘焙 Low-temperature roasting at 108 ℃	230 g/罐 230 g/can	袋装、未避光 Bagged, non-light-proof	12个月 12 months
8	金色亚麻籽 Golden flaxseed	安徽,中国 Anhui,China	低温烘焙 Low-temperature roasting	200 g/罐 200 g/can	罐装、未避光 Canned, non-light-proof	12个月 12 months
9	金色亚麻籽 Golden flaxseed	东北 Northeast China	低温烘焙 Low-temperature roasting	500 g/袋 500 g/bag	袋装、避光 Bagged, light-proof	6个月 6 months
10	褐色亚麻籽 Brown flaxseed	内蒙古,中国 Inner Mongolia,China	低温烘焙 Low-temperature roasting	160 g/罐 160 g/can	罐装、未避光 Canned, non-light-proof	18个月 18 months
11	金色亚麻籽 Golden flaxseed	山东,中国 Shandong,China	低温烘焙 Low-temperature roasting	500 g/罐 500 g/can	脱氧防护锁鲜袋包装、避光 Deoxidation fresh-keeping bag, light-proof	6个月 6 months
12	金色亚麻籽 Golden flaxseed	内蒙古,中国 Inner Mongolia,China	低温烘焙(<45℃) Low-temperature roasting (<45℃)	250 g/罐 250 g/can	袋装、避光 Bagged, light-proof	12个月 12 months
13	金色亚麻籽 Golden flaxseed	内蒙古,中国 Inner Mongolia,China	低温烘焙 Low-temperature roasting	300 g/袋 300 g/bag	罐装、未避光 Canned, non-light-proof	6个月 6 months
14	金色亚麻籽 Golden flaxseed	安徽,中国 Anhui, China	低温烘焙 Low-temperature roasting	500 g/罐 500 g/can	袋装、避光 Bagged, light-proof	6个月 6 months
15	金色亚麻籽 Golden flaxseed	美国 USA	低温烘焙 Low-temperature roasting	453 g/袋 453 g/bag	罐装、未避光 Canned, non-light-proof	12个月 12 months
16	金色亚麻籽 Golden flaxseed	河北,中国 Hebei,China	低温烘焙 Low-temperature roasting	250 g/袋 250 g/bag	罐装、未避光 Canned, non-light-proof	9个月 9 months
17	褐色亚麻籽 Brown flaxseed	东北 Northeast China	低温烘焙 Low-temperature roasting	250 g/袋 250 g/bag	袋装、避光 Bagged, light-proof	12个月 12 months
18	褐色亚麻籽 Brown flaxseed	新西兰 New Zealand	低温烘焙 Low-temperature roasting	250 g/袋 250 g/bag	袋装、避光 Bagged, light-proof	12个月 12 months
19	金色亚麻籽 Golden flaxseed	内蒙古,中国 Inner Mongolia,China	高温炒制 High-temperature roasting	250 g/袋 250 g/bag	采用吸氧器包装、袋装、未避光 Oxygen absorber packaging, bagged, non-light-proof	12个月 12 months
20	金色亚麻籽 Golden flaxseed	安徽,中国 Anhui,China	高温炒制 High-temperature roasting	160 g/罐 160 g/can	罐装、未避光 Canned, non-light-proof	18个月 18 months

取10 g亚麻籽粉依次通过粒径为20目、40目、80目和100目的筛子,分别得到< 0. 15 mm,0. 15~0. 45 mm,0. 45~0. 85 mm,> 0. 85 mm的4种粒度级别的亚麻籽粉,称重并计算每种粒度级别亚麻籽粉的重量。

1. 2. 2 市售亚麻籽粉直观观察 使用索尼DP-200数码相机,选择适宜放大倍数与拍摄距离,在黑色背景下对20种市售亚麻籽粉进行拍摄,获得亚麻籽粉的直观信息。

1. 2. 3 市售亚麻籽粉微观结构观察 使用Regulus 8100高分辨率发射扫描电子显微镜(日本日立公司)观察20种市售亚麻籽粉的微观形态,取少量粉末样品置于样品台上的导电胶,溅射120 s后,在3. 0 kV电压下进行观察。

1. 2. 4 市售亚麻籽粉感官评价 Napping实验参考赵镭等[22]方法组建感官评价小组和指标评价体系,具体为:评价小组有8名学生(23-25岁、1名男性和7名女性),且具有1年以上的感官评价经验。由于熟制工艺和品种(如金色、褐色)不同,造成亚麻籽粉表观颜色深浅差异,为消除颜色的影响和提高感官评价的客观性,分别取5 g样品放置在黑色带盖品评杯中,随后对亚麻籽粉样品随机编号,并根据拉丁方设计确定样品呈递的随机顺序。评价员按照给出的顺序依次品评所有亚麻籽粉,在A_0的坐标纸上距离由近到远,相似性由高到低,并在评价表上写下对每个样品的描述。根据ISO 8589感官分析室建立导则,在通风良好、无气味、20±2℃感官分析实验室开展相关实验。对Napping实验得到的描述词进行整理,整体考虑亚麻籽粉的风味特性,评价小组进行讨论,确定描述词的定义,作为后续定量描述分析(QDA)实验参考,最终形成的描述词见表2。

QDA实验参考Tian等[23]方法,采用QDA法进行感官评价,评价过程应处于室温、日光、良好通风条件下。20种亚麻籽粉均在-4℃下冷藏,直至实验前取出,在20±2℃室温下平衡30 min。将5 g亚麻籽粉样品置于黑色品评杯中,用3位随机编码进行标记,随后对亚麻籽粉香气属性、口感滋味属性、表面属性进行评价打分。打分标尺为10 cm线性标度(0分代表不可感知的,10分代表强烈可感知的),且在连续两天内完成实验重复。按照打分标尺刻度获取属性值,最终分值为重复实验的平均值。

1. 2. 5 统计分析 实验结果以均值±标准差表示(n= 3)。采用Origin 2021对数据进行作图,SPSS 21. 0软件进行统计学分析,Duncan检验对数据进行比较,显著性水平设定为P< 0. 05,Hiplot Pro软件进行聚类分析。感官评价结果使用Pannel Check对最终参加正式试验的评价人员进行一致性检验。

2 结果与分析

2. 1 不同市售亚麻籽粉粒径分布分析

图1为不同市售亚麻籽粉粒径分布。由图1可知,20种市售亚麻籽粉粒径主要分布在0. 20~0. 45 mm。其中,1#~3#、7#、10#、16#和17#亚麻籽粉粒径较小,粒径分布在0. 20~0. 45 mm的比例超过50%,且17#亚麻籽粉细腻均匀,粒径分布在0. 15~0. 45 mm的比例达到95%。相比较而言,4#~6#、8#、9#、13#、15#、18#和19#亚麻籽粉颗粒较大,粒径分布在0. 45~0. 85 mm的比例超过50%,且5#和18#亚麻籽粉中粒径分布>0. 85 mm的占比分别达23%和29%,表明颗粒大小存在明显异质性。

2. 2 不同市售亚麻籽粉表面形态分析

图2为不同市售亚麻籽粉直观形态。由图2可知,20种市售亚麻籽粉的直观图差异明显。其中,2#、10#、17#和18#亚麻籽粉原料为褐籽,整体颜色较深。其余16份亚麻籽粉原料均为金色亚麻籽,其中7#和8#亚麻籽粉色泽较深,其次为10#、13#和20#亚麻籽粉,而1#、5#、6#、16#亚麻籽粉色泽金黄。因此,金色亚麻籽是目前亚麻籽粉制备的主要原料素材,而差异化的色泽可能与亚麻籽差异化的熟化程度、研磨筛分等工序有关。

2. 3 不同市售亚麻籽粉颗粒表面微观结构分析

图3为不同市售亚麻籽粉颗粒表面微观结构。由图3可知,20种市售亚麻籽粉微观形态存在明显差异。其中,2#、10#、14#和17#亚麻籽粉颗粒较小,且分布均匀;3#、6#、9#、11#~13#和20#亚麻籽粉颗粒大小异质性较大,这与图1、图2亚麻籽粉粒径分布和直观观察的结果类似;1#、8#和16#亚麻籽粉颗粒较大,这与图1亚麻籽粉粒径分布图有所差异,而与图2亚麻籽粉直观观察图类似,可能是亚麻籽粉轻微结块而非大尺寸颗粒,经筛分后趋于均匀所致。采用扫描电子显微镜进一步对图片进行放大可知,6#、7#、10#、11#、13#和20#亚麻籽粉中极少量近球形的蛋白体,部分亚麻籽粉能观察到基本完整或部分胚子叶细胞腔室结构。20种市售亚麻籽粉均经过熟制加工,亚麻籽胚子叶细胞内油脂体已发生原位塌陷和中性脂质溢出,进一步磨粉过程则不同程度地破坏了亚麻籽外种皮和胚子叶细胞壁

表2 市售亚麻籽粉感官评价表

Table 2 Sensory evaluation form of commercially available flaxseed flours

指标 Index	属性 Attributes	评分标准(0-10分) Scoring Standards (0-10 points)
香气属性 Aroma attributes	烤香 Roast aroma	一种让人联想到烘烤谷物的香气 An aroma reminiscent of baked grains
	海苔味 Seaweed flavor	一种让人联想到海产品小零食的咸香 A salty aroma reminiscent of seafood snacks
	哈喇味 Rancid flavor	一种让人联想到油脂氧化变质的气味 An odor reminiscent of oxidized and deteriorated oil
	生青味 Green flavor	一种可以联想到生青麦芽的气味 An odor reminiscent of green malt
	油脂味 Oil flavor	一种可以联想到新鲜食用油的气味 An odor reminiscent of fresh cooking oil
	生核桃皮味 Raw walnut peel flavor	一种让人联想到生核桃皮的气味 An odor reminiscent of raw walnut peel
口感滋味属性 Taste and flavor attributes	酥脆性 Crispness	指口感脆脆,带有松脆感 Refers to a crisp and crunchy taste
	沙粒感 Gritty sensation	一种让人咀嚼后产生酥酥麻麻的感觉 A tingling and crispy sensation after chewing
	黏牙性 Stickiness to teeth	一种让人咀嚼后黏牙的程度 A degree of stickiness to teeth after chewing
	异味程度 Off-flavor degree	一种可以联想到煳味、哈喇味的气味 An odor reminiscent of burnt or rancid flavor
	鼻后香气浓郁程度 Retronasal aroma intensity	鼻后香气强度 Intensity of retronasal aroma
表面属性 Surface attributes	光泽性 Luster	呈金黄色,色泽均匀 Golden yellow with uniform color
	颗粒大小 Particle size	颗粒细腻 Fine particle size.
	颗粒均匀性 Particle uniformity	颗粒大小均匀 Uniform particle size
	表面松散性 Surface looseness	大小均匀,质地松散 Uniform size with loose texture

结构。

2.4 不同市售亚麻籽粉感官评价

2.4.1 亚麻籽粉香气属性剖面分析 附图S1(见首页OSID二维码)为香气属性一致性检验图,通过Pannel Check进行一致性检验,对样品中六个香气属性的评价通过了一致性检验。应用QDA对20个市售亚麻籽粉的香气属性进行了分析,分别是“烤香”、“海苔味”、“哈喇味”、“生青味”、“油脂味”和“生核桃皮味”。图4为不同市售亚麻籽粉感官评价结果。如图4A所示,大多数亚麻籽粉样品呈现出“烤香”和“油脂味”香气属性,部分样品呈现出较强的“海苔味”和“生青味”,少数样品呈现“哈喇味”和“生核桃皮味”。其中,7#、8#和11#亚麻籽粉表现出较强的“烤香”,分值分别为5.38、5.44和5.69;20#亚麻籽粉表现出明显的“海苔味”,分值超过6.00分。此外,5#和9#亚麻籽粉呈现出较重的“哈喇味”,其次为10#和19#亚麻籽粉,而1#、7#和18#亚麻籽粉“哈喇味”最小。值得注意的是,12#亚麻籽粉“生青味”最为明显,分值为6.56,其次为15#和18#亚麻籽粉,6#亚麻籽粉“生青味”最小;所有样品均呈现出一定的油脂味,但分值不高。此外,不同亚麻籽粉中“生核桃皮味”的差异较大,仅15#和18#亚麻籽粉分值较高(5.69和4.75),其他亚麻籽粉得分为2.00~3.50。不同品种原料表现出差异化的风味属性,还将影响亚麻籽熟化增香程度。因此,品种筛选有利于获得基于提质和绿色的最小程度的热加工方式。

2.4.2 亚麻籽粉口感滋味属性剖面分析 附图S2

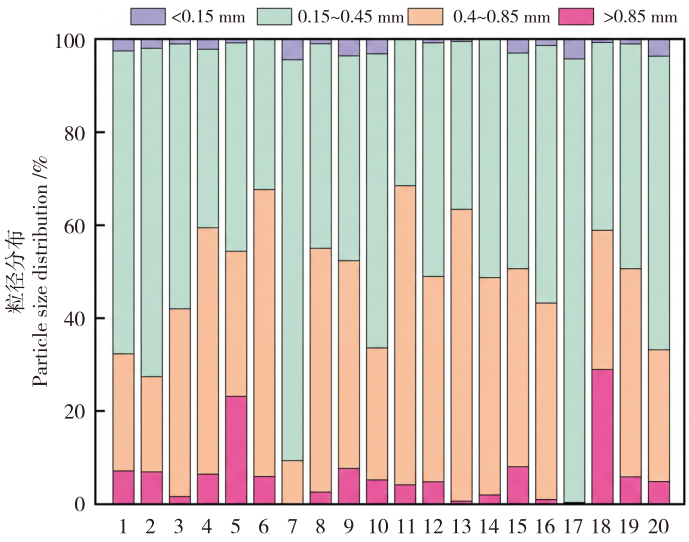


图1 不同市售亚麻籽粉粒径分布

Fig. 1 Particle size distribution of different commercially available flaxseed flours

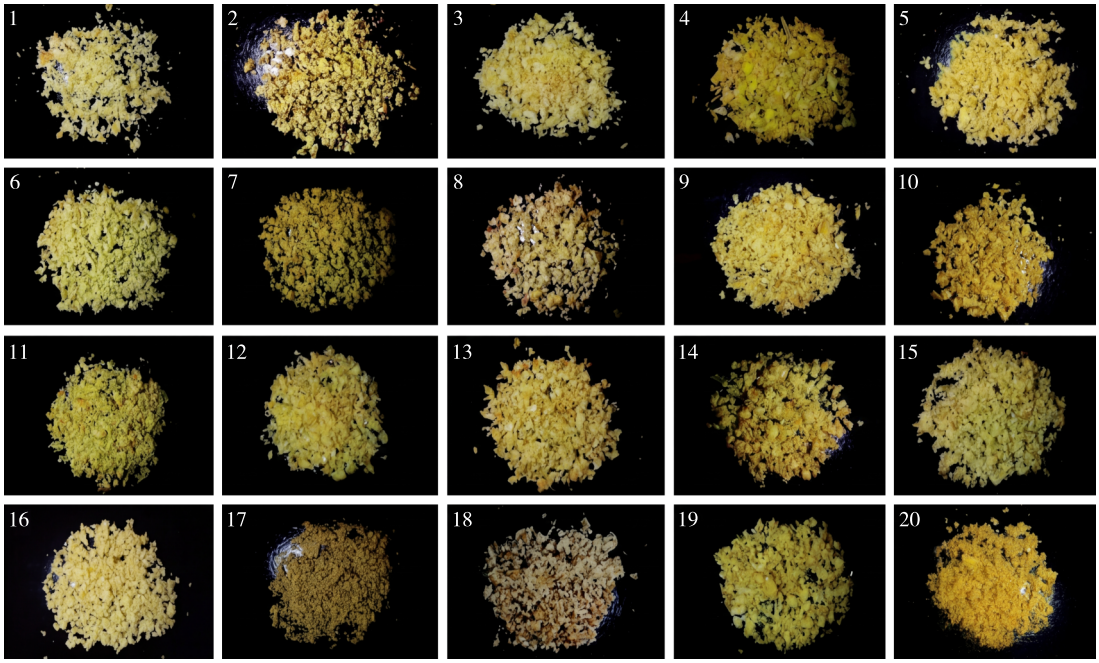


图2 不同市售亚麻籽粉直观形态

Fig. 2 Visual morphology of different commercially available flaxseed flours

(见首页OSID二维码)为口感滋味属性一致性检验图,通过Pannel check进行一致性检验,对样品中5个口感滋味属性的评价均通过了一致性检验,表明最终评价小组能力成熟可靠。应用QDA对20个亚麻籽粉的口感滋味属性进行了分析,分别为“酥脆性”、“沙粒感”、“黏牙性”、“异味程度”和“鼻后香气浓郁程度”。如图4B所示,在所有亚麻籽粉中都能感知到“鼻后香气浓郁程度”,大部分样品得分在4.00~5.00分之间;在大多数亚麻籽粉中可以感知到“酥脆性”、“沙粒感”和“黏牙性”,其中,5#亚麻籽粉“酥脆性”最好,得分为6.19分,7#亚麻籽粉“酥脆性”最差,得分为1.38分,8#亚麻籽粉“沙粒感”最强,得分为6.00分,而7#亚麻籽粉“沙粒感”最弱,得分为1.81分,17#亚麻籽粉“黏牙感”最强,得分为6.88分,而4#和11#亚麻籽粉“黏牙感”最弱,得分为4.00分。在少数亚麻籽粉中感知到异味程度,其中,9#亚麻籽粉异味程度较大,得分为4.50分,而1#亚麻籽粉异味程度最低,得分为1.44分。酥脆程度、沙粒感可能与亚麻籽粉含水量及粒径分布有关,5#亚麻籽粉颗粒较大且水分含量相对较低,“酥脆性”较好。1#、2#、7#和17#亚麻籽粉“沙粒感”较弱,粒径范围在0.15~0.45 mm颗粒占比较多,而

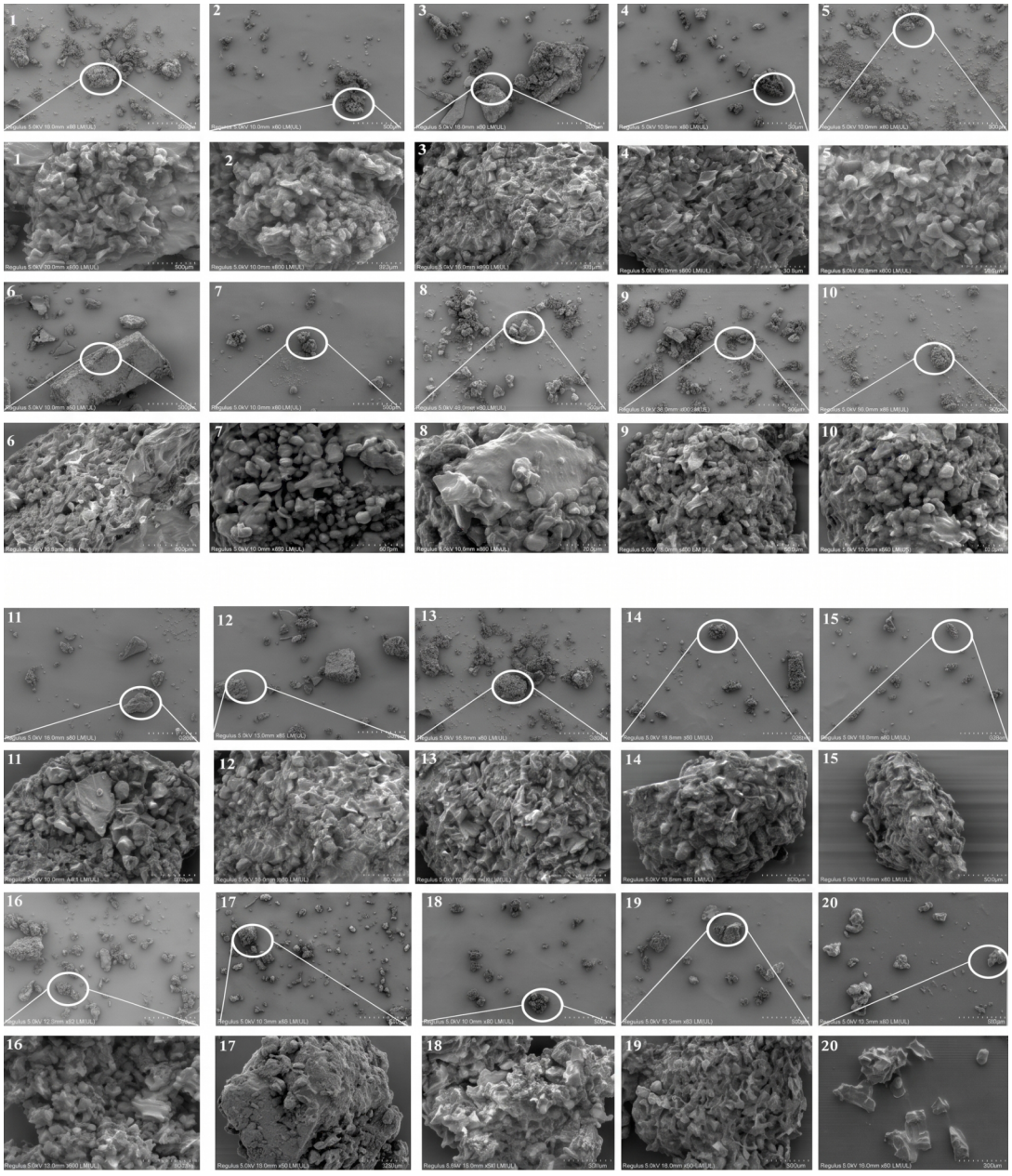


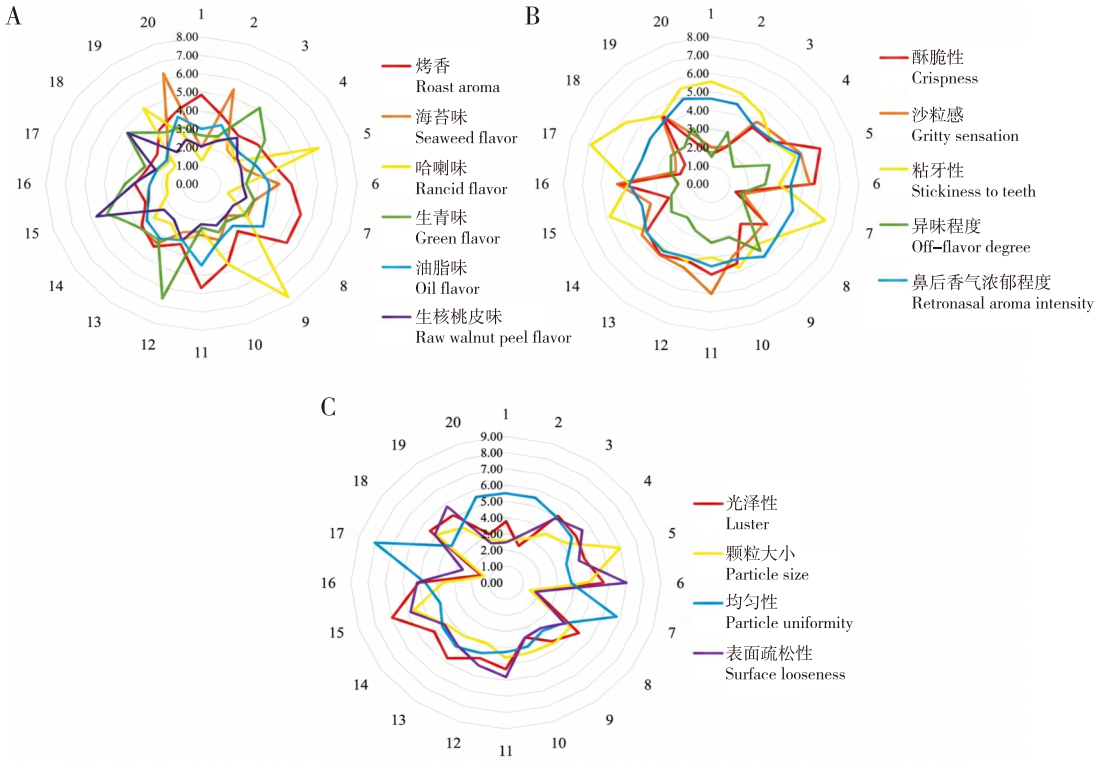
图3 不同市售亚麻籽粉颗粒表面微观结构

Fig. 3 Microstructure imaging of different commercially available flaxseed flours

5#、6#、11#和16#亚麻籽粉沙粒感较强,粒径范围>0.45 mm颗粒占比较高。

2.4.3 亚麻籽粉表面属性剖面分析 附图S3(见首页OSID二维码)为表面属性一致性检验图,通过Pannel check进行一致性检验,对样品中四个表面属性的评价通过了一致性检验,表明最终评价小组能力成熟可靠。应用QDA对20个市售亚麻籽粉的表面属性进行了分析,分别为“光泽性”、“颗粒大小”、“均匀性”和“表面松散性”。如图4C所示,20个亚麻籽粉表面属性存在明显差异。其中,11个亚麻籽粉“光泽性”得分>5.00分,其余样品得分范围为1.56~4.81;5#亚麻籽粉颗粒最大,7#和17#亚麻籽粉颗粒最小,呈粉末状,且17#亚麻籽粉颗粒“均匀性”最高;1#、7#、17#和20#亚麻籽粉出现结块现象,“表面松散性”得分较低,这可能归因于亚麻籽粉中不同水分、脂肪含量以及磨粉筛分程度。

2.4.4 市售亚麻籽粉感官特性多变量分析 图5为20种市售亚麻籽粉感官特性多变量分析结果。由图5A、B可知,第1~4主成分累积贡献率为83.4%。其中第一主成分(PC1)的贡献率为36.7%,主要由“酥脆性”、“沙粒感”、“哈喇味”、“光泽性”、“颗粒大小”和“表面疏松程度”决定;第二主成分(PC2)的贡献率为25.8%,主要由“油脂味”、“海苔味”、“鼻后香气浓郁程度”和“异味程度”决



注:A:香气属性雷达图;B:口感滋味属性雷达图;C:表面属性雷达图;最外层数字代表亚麻籽粉编号,内圈代表赋分

Note: A: radar chart of aroma properties; B: radar chart of taste and flavor properties; C: radar chart of surface properties; The outermost numbers represent the sample numbers of flaxseed flours, and the inner circle represents the score

图4 不同市售亚麻籽粉感官评价

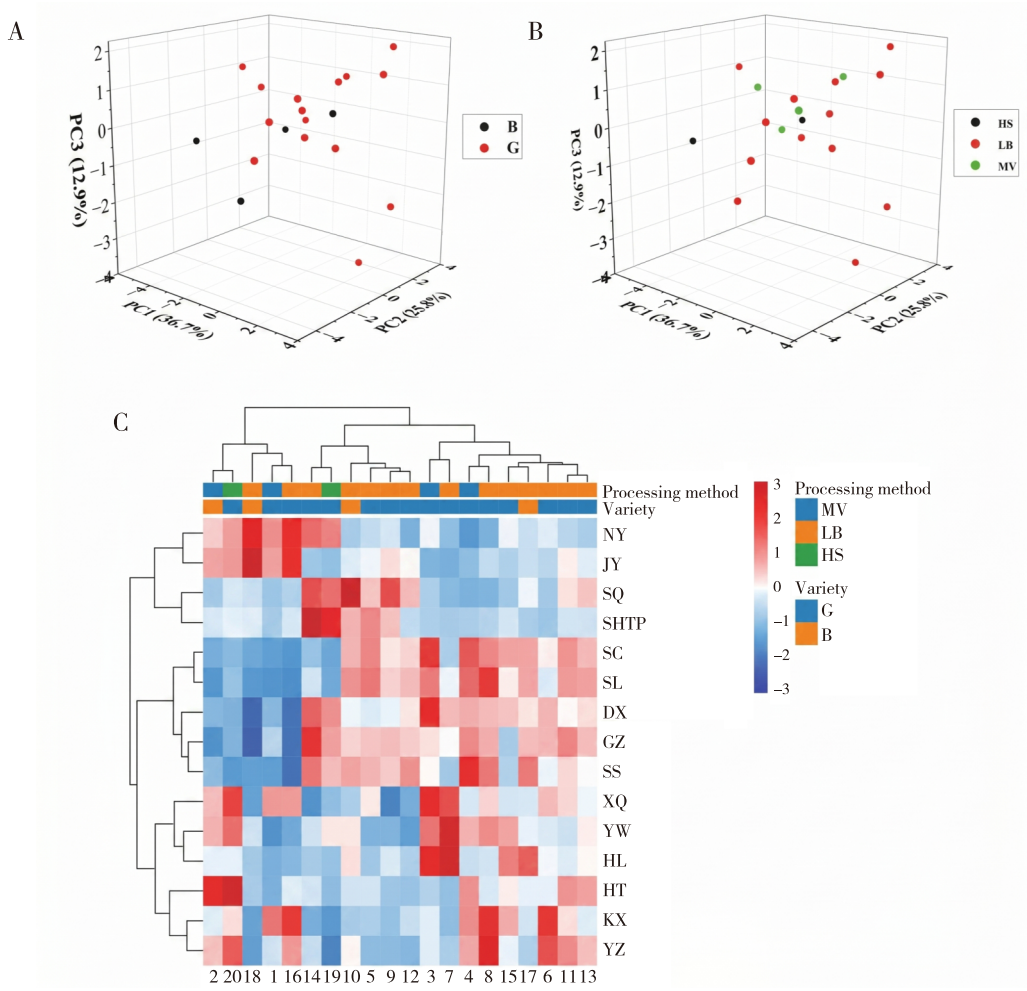
Fig. 4 Sensory evaluation of different commercially available flaxseed flours

定;第三主成分(PC3)的贡献率为12.9%,主要由“烤香”、“均匀性”、“生青味”、“生核桃皮味”和“黏牙性”决定。不同亚麻籽粉数据点表现出明显的分散性,表明亚麻籽粉原料品种、熟化方式和磨粉工艺等均可能对亚麻籽粉香气属性、表面属性、口感滋味属性具有重要影响。其中,6#、8#、11#和13#亚麻籽粉口感酥脆,“光泽性”较好,“颗粒大小”均匀、香气浓郁;5#和9#亚麻籽粉具有明显“哈喇味”,“异味程度”较大,但粉粒具有光泽;7#和17#亚麻籽粉颗粒较小,但“酥脆性”和“光泽性”差。

如图5C所示,20种市售亚麻籽粉基于香气属性、表面属性、口感滋味属性被分为3大类。第一类为“酥脆性”、“沙粒感”、“烤香”、“海苔味”、“鼻后香气浓郁程度”、“光泽”、“表面松散性”较好,颗粒大小均匀,没有“生核桃皮味”、“生青味”的亚麻籽粉,包括6#、8#~11#、13#、14#和19#亚麻籽粉;第二类为“酥脆性”、“沙粒感”较强,不黏牙、没有“生核桃皮味”和“生青味”,“光泽性”和“表面松散性”较好,颗粒大小均匀,但“鼻后香气浓郁程度”、“烤香”、“海苔味”、“油脂味”较弱的亚麻籽粉,包括3#~5#、12#、15#、16#和18#亚麻籽粉;第三类为“黏牙”、“异味程度”重,有“哈喇味”、“生青味”、“生核桃皮味”,且“光泽性”和“均匀性”差,出现结块现象的亚麻籽粉,包括1#、2#、7#、17#和20#亚麻籽粉。就不同原料品种而言,2#、10#、17#、18#褐色亚麻籽粉的异质性较强,口感、滋味及表面属性差异较大,例如,2#、10#、17#亚麻籽粉“生青味”属性值较小,17#、18#亚麻籽粉则“异味程度”属性值较小。就不同熟化工艺来说,采用低温烘焙工艺的金色亚麻籽粉,“烤香”、“海苔味”和“鼻后香气浓郁程度”明显,而“酥脆性”、“沙粒感”、“光泽性”较强。

3 讨论

随着亚麻籽营养健康功效深入挖掘和认知度逐渐增加,以全籽或脱脂粉形式引入食品体系以实现营养强化的应用研究正逐步开展。与其他油籽不同,亚麻籽具有独特的物性特征,外种皮坚硬、与胚乳结合紧密,且覆盖致密胶质层,为高黏性、强持水性的胶多糖。与褐色亚麻籽相比,金色亚麻籽具有较低的总膳食纤维含量,但可溶性胶多糖含量稍高,赋予了金色亚麻籽粉特有的感官品质属性。适度打磨脱胶、脱皮、筛分工艺等能够降低亚麻籽粉



注:G:金色亚麻籽;B:褐色亚麻籽;MV:微波熟制;LB:低温烘焙;HS:高温炒制;K:口感滋味属性;X:香气属性;M:表面属性;KX:烤香;HT:海苔味;HL:哈喇味;SQ:生青味;YZ:油脂味;SHTP:生核桃皮味;SC:酥脆性;SL:沙粒感;NY:黏牙性;YW:异味程度;XQ:鼻后香气浓郁程度;GZ:光泽性;DX:颗粒大小;JY:均匀性;SS:表面疏松性

Note: G: golden flaxseed; B: brown flaxseed; MV: microwave processing; LB: low-temperature roasting; HS: high-temperature roasting; K: taste and flavor attribute; X: aroma attribute; M: surface attribute; KX: roasted aroma; HT: seaweed flavor; HL: rancid smell; SQ: fresh green flavor; YZ: oil flavor; SHTP: fresh walnut shell flavor; SC: crispy; SL: sand grain sensation; NY: sticky teeth; YW: odor intensity; XQ: intensity of posterior nasal aroma; GZ: luster; DX: particle size; JY: uniformity; SS: surface porosity

图5 不同市售亚麻籽粉感官特性主成分和聚类分析

Fig. 5 Principal component and cluster analysis of sensory characteristics for different commercially available flaxseed flours

中胶质组分的含量,提高亚麻籽粉的适口性,同时也使亚麻籽粉呈现籽仁的金黄色[24,25]。此外,微波、烘焙等熟制时间、温度等也会通过生成可溶性糖和游离氨基酸介导的美拉德反应产物和脂质氧化产物明显影响亚麻籽粉的色泽[20]。

由于亚麻籽原料中含有生氰糖苷等抗营养因子,因此必须熟制后才能食用。前期研究发现,微波熟化能够诱导亚麻籽胚子叶细胞内油脂体塌陷、核内中性脂质释放[14]。针对烘烤等熟制处理对杏仁中油脂体结构的影响研究,也观察到了类似的结果[26]。此外,磨粉过程将不同程度地破坏胚子叶细胞壁结构完整性。其中,尺寸较大的亚麻籽粉颗粒可能由外种皮/胚子叶细胞碎片及其包裹的蛋白体颗粒和溢出脂质共同组成,而尺寸较少的亚麻籽粉颗粒则由外种皮细胞、胚子叶细胞壁碎片、部分完整的胞内蛋白体颗粒,及其与溢出中性脂质复合物组成[27-30]。粒径尺寸大小能够一定程度上决定亚麻籽粉在面包、饼干、面条等不同类别的多组分食品体系中应用的特异性,也一定程度上决定了富含亚麻籽粉的健康食品感官特性和营养品质[25]。研究发现,面包中适宜添加粒径>0.5 mm的亚麻籽粉,可增加面团弹性和面包柔软度,而饼干、松饼中可添加粒径<0.5 mm的亚麻籽粉,可提高松饼的硬度,增加饼干的香气等[11]。

不同市售亚麻籽粉香气属性、口感滋味和表面属性也表现出明显的差异性。其中,6#、8#、11#和13#亚麻籽粉“烤香味”、“海苔味”、“酥脆性”、“鼻后香浓郁程度”属性值较高,“生青味”、“哈喇味”和“异味程度”属性值较低。这可能受样品原料与产地、熟制方式与程度、梯次磨粉和筛分、包装形式与货架时间等因素的共同影响。袁彬宏等[21]基于风味导向可以将不同品种的浓香亚麻籽油按照烤香味和海鲜味、谷物味、焦糊味和油脂味以及哈喇味进行了差异化分类,并与不同的关键挥发性风味物质进行了关联性分析,发现不同的香气属性与不同的关键挥发性风味物质具有一定的关联性。此外,在未处理和微波处理亚麻籽粉中分别鉴定出22种和46种挥发性物质,主要为醛、醇、酸、酮、萜烯、呋喃和杂环化合物,其中微波处理能够赋予亚麻籽粉更强的“烤香和木香”香气属性[31]。然而,尽管中性脂质在亚麻籽熟化过程中历经从结构塌陷油脂体中溢出,但在磨粉加工过程中不同程度的胞外暴露会增加α-亚麻酸等多不饱和脂肪酸在长期贮藏过程中的氧化易感性,从而导致亚麻籽粉中脂质过氧化加剧,从而产生不愉快的气味。亚麻籽粉颗粒大小一定程度上影响贮藏过程中氧化稳定性,较大的颗粒中胚子叶细胞结构相对完整,能够有效包封胞内溢出的中性脂质,抑制空气中氧气参与的脂质氧化过程[32]。亚麻籽经过熟制后将历经油脂体界面膜塌陷和中性脂质溢出,随着磨粉过程分散在颗粒表面,较高的脂肪含量和较低的颗粒尺寸会赋予亚麻籽粉较差的表面疏松性[13]。然而,研磨处理通过降低颗粒尺寸和破坏细胞结构也是实现亚麻籽中游离酚酸、木酚素等抗氧化组分与中性脂质接触的关键环节,且对提升亚麻籽中α-亚麻酸胃肠道消化氧化稳定性和吸收效率是极为有利的[27,28]。

4 结论

综上,20种市售亚麻籽粉的颗粒尺寸存在明显差异,主要分布在0.25~0.45 mm。其中,3#和19#亚麻籽粉粒径较大,粒径分布>0.45 mm的颗粒超过50%,而17#亚麻籽粉因其特殊磨粉工艺,粒径尺寸最小,超过95%粒径颗粒分布在0.15~0.45 mm。亚麻籽经过熟制和磨粉工艺后可观察到基本完整或部分胚子叶细胞腔室结构,因油脂体原位塌陷和中性脂质溢出,无法观察出完整的油脂体结构,但可观察到少量蛋白体颗粒。不同市售亚麻籽粉感官特性存在明显差异。其中,6#、8#、11#和13#亚麻籽粉口感酥脆,“光泽性”较好,“颗粒大小”均匀、香气浓郁。主成分分析和聚类分析将不同市售亚麻籽粉基于口感滋味、香气和表面属性差异进行分类。其中,低温烘焙的金色亚麻籽粉有较高的“酥脆性”,“光泽性”较好,颗粒大小均匀。总之,原料品种、熟化方式、磨粉工艺等均会影响亚麻籽粉感官品质特性,且这些因素之间可能存在一定的交互作用。因此,通过筛选原料品种、调整熟制方式、温度、时间以及磨粉关键参数,有望减少亚麻籽粉的不良风味,提高产品“酥脆性”。

参考文献:

[1] Kauser S, Hussain A, Ashraf S, et al. Flaxseed (*Linum usitatissimum*) phytochemistry, pharmacological characteristics and functional food applications[J]. Food Chem Adv, 2024, 4: 100573. DOI:10.1016/j.focha.2023.100573.

[2] Goyal A, Sharma V, Upadhyay N, et al. Flax and flaxseed oil: an ancient medicine & modern functional food[J]. J Food Sci Technol, 2014, 51(9): 1633-1653. DOI:10.1007/s13197-013-1247-9.

[3] Tian Y Y, Zhou Y H, Liao W, et al. Flaxseed powder supplementation in non-alcoholic fatty liver disease: a randomized controlled clinical trial[J]. Food Funct, 2025, 16(4): 1389-1406.

[4] Imran S, Munir S, Altemimi A B, et al. Therapeutic implications of flaxseed peptides and bioactive components against various diseases[J]. J Funct Foods, 2024, 119: 106324. DOI:10.1016/j.jff.2024.106324.

[5] Shim Y Y, Kim J H, Cho J Y, et al. Health benefits of flaxseed and its peptides (linusorbs)[J]. Crit Rev Food Sci Nutr, 2024, 64(7): 1845-1864. DOI: 10.1080/10408398.2022.2119363.

[6] Gao Y, Liu T T, Su C H, et al. Fortification of Chinese steamed bread with flaxseed flour and evaluation of its physicochemical and sensory properties[J]. Food Chem X, 2022, 13: 100267. DOI:10.1016/j.fochx.2022.100267.

[7] Karakurt G, Özkaya B, Saka I. Chemical composition and quality characteristics of cookies enriched with microfluidized flaxseed flour [J]. LWT, 2022, 154: 112773. DOI:10.1016/j.lwt.2021.112773.

[8] Dong P, Xiao L, Fan W J, et al. Effect of fat replacement by flaxseed flour on the quality parameters of pork meatballs[J]. Food Sci Technol Int, 2025, 31(1): 48-58. DOI:10.1177/10820132231173158.

[9] Duan Y T, Zhou S, Liu R, et al. Physicochemical, sensorial and microcosmic properties of Chinese dried noodles fortified with unhulled and hulled flaxseed flour[J]. Int J Food Sci Tech, 2022, 57(1): 676-683. DOI:

10.1111/ijfs.15449.

[10] Suleman R, Choudhary H, Waseem M, et al. Nutritional and antioxidative characterization, antimicrobial and sensorial stability of flaxseed powder supplemented mutton patties[J]. Food Chem X, 2025, 25: 102098. DOI: 10.1016/j.fochx.2024.102098.

[11] Zhang S, Chen Y S, McClements D J, et al. Composition, processing, and quality control of whole flaxseed products used to fortify foods[J]. Comp Rev Food Sci Food Safe, 2023, 22(1): 587-614. DOI: 10.1111/1541-4337.13086.

[12] Ursoniu S, Sahebkar A, Andrica F, et al. Effects of flaxseed supplements on blood pressure: a systematic review and meta-analysis of controlled clinical trial[J]. Clin Nutr, 2016, 35(3): 615-625. DOI: 10.1016/j.clnu.2015.05.012.

[13] 秦晓鹏, 黄沙沙, 聂成镇, 等. 微波处理对萌动亚麻籽酚类化合物油相迁移的影响[J]. 食品科学技术学报, 2022, 40(3): 124-136. DOI: 10.12301/spxb202100607.

[14] Yu X, Nie C Z, Zhao P, et al. Influences of microwave exposure to flaxseed on the physicochemical stability of oil bodies: Implication of interface remodeling[J]. Food Chem, 2022, 368: 130802. DOI: 10.1016/j.foodchem.2021.130802.

[15] 赵冉, 岳杨, 陈亚淑, 等. 亚麻籽乳制备过程中内源酶与关键香气的变化规律[J]. 农业工程学报, 2025, 41(8):318-326DOI10.11975/j.issn.1002-6819.202411068.

[16] 张珊, 陈亚淑, 郑若凡, 等. 水分调制耦合微波对亚麻籽乳食用品质的影响[J]. 农业工程学报, 2023, 39(18): 277-286. DOI: 10.11975/j.issn.1002-6819.202306170.

[17] Kumar R R, Bhargava D V, Pandit K, et al. Lipase - The fascinating dynamics of enzyme in seed storage and germination - A real challenge to pearl millet[J]. Food Chem, 2021, 361: 130031. DOI: 10.1016/j.foodchem.2021.130031.

[18] 衡新蕊, 王天亮, 姚云平, 等. 冷榨亚麻籽油特征风味成分分析[J]. 食品科学, 2024, 45(2): 211-217. DOI: 10.7506/spkx1002-6630-20230425-242.

[19] 韩国玮, 吕虹霞, 田欢, 等. 焙烤和微波两种不同加工方式对亚麻籽品质的影响比较分析[J]. 中国调味品, 2024, 49(5): 71-75. DOI: 10.3969/j.issn.1000-9973.2024.05.012.

[20] 杜玥, 熊倩, 李可瑶, 等. 亚麻籽炒籽过程美拉德反应底物变化及其模拟体系产物的抗氧化活性[J]. 中国油脂, 2022, 47(8): 62-70. DOI: 10.19902/j.cnki.zgyz.1003-7969.220226.

[21] 袁彬宏, 贾懿敏, 杨旖旎, 等. 不同品种浓香亚麻籽油的呈香特征解析[J]. 食品安全质量检测学报, 2023, 14(8). DOI: 10.19812/j.cnki.jfsq11-5956/ts.2023.08.051.

[22] 赵镭, 刘文, 汪厚银. 食品感官评价指标体系建立的一般原则与方法[J]. 中国食品学报, 2008(3): 121-124. DOI: 10.16429/j.1009-7848.2008.03.011.

[23] Tian P, Zhan P, Tian H L, et al. Analysis of volatile compound changes in fried shallot (*Allium cepa* L. var. aggregatum) oil at different frying temperatures by GC - MS, OAV, and multivariate analysis[J]. Food Chem, 2021, 345: 128748. DOI: 10.1016/j.foodchem.2020.128748.

[24] 禹晓, 孙好嚣, 乔好, 等. 不同品种亚麻籽物性学特性、脂代谢关键酶活性和抗营养因子分析[J]. 中国油料作物学报, 2025, 47(6): 1533-1543. DOI: 10.19802/j.issn.1007-9084.2024260.

[25] Chang L L, Shi R J, Dai F, et al. Current flaxseed dehulling technology in China[J]. Agriculture, 2024, 14(4): 632. DOI: 10.3390/agriculture14040632.

[26] Grassby T, Mandalari G, Grundy M M, et al. *In vitro* and *in vivo* modeling of lipid bioaccessibility and digestion from almond muffins: The importance of the cell-wall barrier mechanism[J]. J Funct Foods, 2017, 37: 263-271. DOI: 10.1016/j.jff.2017.07.046.

[27] Grundy M M, Lapsley K, Ellis P R. A review of the impact of processing on nutrient bioaccessibility and digestion of almonds[J]. Int J Food Sci Tech, 2016, 51(9): 1937-1946. DOI: 10.1111/ijfs.13192.

[28] Li C H, Shelp G V, Wright A J. Influence of nut structure and processing on lipid bioaccessibility and absorption[J]. Curr Opin Food Sci, 2023, 49: 100966. DOI: 10.1016/j.cofs.2022.100966.

[29] Mandalari G, Grundy M M, Grassby T, et al. The effects of processing and mastication on almond lipid bioaccessibility using novel methods of *in vitro* digestion modelling and micro-structural analysis[J]. Br J Nutr, 2014, 112(9): 1521-1529. DOI: 10.1017/s0007114514002414.

[30] Yu X, Huang S S, Yang F, et al. Effect of microwave exposure to flaxseed on the composition, structure and techno-functionality of gum polysaccharides[J]. Food Hydrocoll, 2022, 125: 107447. DOI: 10.1016/j.foodhyd.2021.107447.

[31] Yang Y N, Deng Q C, Jia X, et al. Characterization of key odorants in peeled and unpeeled flaxseed powders using solvent-assisted flavor evaporation and odor activity value calculation[J]. Lwt, 2021, 138: 110724. DOI: 10.1016/j.lwt.2020.110724.

[32] Mandalari G, Parker M, Grundy M, et al. Understanding the effect of particle size and processing on almond lipid bioaccessibility through microstructural analysis: from mastication to faecal collection[J]. Nutrients, 2018, 10(2): 213. DOI: 10.3390/nu10020213.

(责任编辑:郭学兰)