田雨菲, 李格晴, 孙佳欣, 等. 内蒙古四种角椒制浆适宜性的化学计量学评价 [J]. 食品工业科技, 2026, 47(17): 1−14. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025100244

TIAN Yufei, LI Geqing, SUN Jiaxin, et al. Chemometric Evaluation of Pulping Suitability of Four Kinds of Horn Peppers from Inner Mongolia[J]. Science and Technology of Food Industry, 2026, 47(17): 1−14. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025100244

·特邀主编专栏—果蔬基料制造: 基础理论、新型加工、质量控制与智能制造（客座主编: 徐贞贞、王永涛、李涛; 产业顾问: 李仁杰）·

内蒙古四种角椒制浆适宜性的化学计量学评价

田雨菲[1], 李格晴[1], 孙佳欣[1], 周戚薇[1], 马　燕[2,*], 赵　靓[1,*], 廖小军[1]

（1.中国农业大学食品科学与营养工程学院, 国家果蔬加工工程技术研究中心, 农业农村部果蔬加工重点实验室, 食品非热加工北京市重点实验室, 北京 100083;
2.新疆维吾尔自治区农业科学院农产品加工研究所, 新疆主要农副产品精深加工工程技术研究中心, 新疆农产品加工与保鲜重点实验室, 新疆乌鲁木齐 830091）

摘　要: 辣椒浆是一种新型辣椒制品，可作为辣椒酱、火锅底料及复合调味料等下游产品的核心基料，其品质直接影响终端产品的市场竞争力。本研究以内蒙古四个品种角椒（LZ-1-R01、H1、7#、红龙 23）为研究对象，采用化学计量法结合多元统计对比分析了不同品种辣椒浆的色泽（色差 L^*、a^*、b^*，色价）、组织状态（流变特性、粒径）、营养成分（类胡萝卜素、辣椒碱类物质）以及挥发性风味物质等多维品质指标，并评估其加工适宜性。结果表明：H1 辣椒浆的亮度最高（38.38±0.5），粒径最小（分布范围在 3.12~1430 μm、体积平均粒径为 407.47±1.50 μm、面积平均粒径为 146.53±1.94 μm），流动性最佳（初始黏度 241.07 Pa·s、δ<0.4），说明其外观组织状态最好；LZ-1-R01 辣椒浆的类胡萝卜素含量（699.78±9.04 μg/g）最高；7#辣椒浆的辣椒碱和二氢辣椒碱含量最高（12.12±0.17 μg/g 和 24.14±0.86 μg/g）；红龙 23 辣椒浆的各项品质指标相对均衡。利用气相色谱-离子迁移谱联用仪（Gas Chromatography-Ion Mobility Spectrometry，GC-IMS）从四种辣椒浆中共鉴定出 48 种挥发性风味化合物，其中 7#辣椒浆的总挥发性风味化合物峰强度最高，水杨酸甲酯为 H1 辣椒浆的特色挥发性成分，3-甲基-2-丁烯醛（D）为 7#及 LZ-1-R01 的关键差异物质，红龙 23 的关键差异物质则包括 3-羟基-2-丁酮（M/D）、丁苯、2-庚酮、丁醛（M/D）；进一步结合相对气味活度值（Relative Odor Activity Value，ROAV）判定 3-甲硫基丙醛为辣椒浆中的关键挥发性风味物质。基于不同品种辣椒浆品质指标分析认为四种辣椒均适宜制浆，可以根据不同场景需求选择不同特性辣椒浆，例如 H1 辣椒浆适宜开发佐餐酱料等高顺滑度产品，7#与 LZ-1-R01 辣椒浆可应用于产品的复配调色。研究为辣椒加工多场景应用提供了新视角。

关键词: 辣椒浆, 多元统计分析, 多维品质, 加工适宜性, 品种差异

中图分类号: TS255.2　　**文献标识码:** A　　**文章编号:** 1002−0306(2026)17−0001−14

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2025100244

本文网刊:

Chemometric Evaluation of Pulping Suitability of Four Kinds of Horn Peppers from Inner Mongolia

TIAN Yufei[1], LI Geqing[1], SUN Jiaxin[1], ZHOU Qiwei[1], MA Yan[2,*], ZHAO Liang[1,*], LIAO Xiaojun[1]

（1.College of Food Science and Nutritional Engineering, China Agricultural University, National Engineering Research

收稿日期: 2025−10−23

基金项目: 国家重点研发计划资助（2024YFD2101403）; 财政部和农业农村部: 国家现代农业产业技术体系（CARS-24-E-03）; 自治区“天池英才”引进计划; 新疆维吾尔自治区重点研发任务专项（2022B02008-4）。

作者简介: 田雨菲（2001−）, 女, 硕士研究生, 研究方向: 食品科学与工程, E-mail: tianyufei0810@outlook.com。

*** 通信作者:** 马燕（1984−）, 女, 博士, 研究员, 研究方向: 农产品加工及副产物综合利用, E-mail: 282568949@qq.com。

赵靓（1987−）, 女, 博士, 教授, 研究方向: 农产品加工及贮藏工程, E-mail: zhaoliang1987@cau.edu.cn。

Centre for Fruit and Vegetable Processing, Key Laboratory of Fruit and Vegetable Processing, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Key Laboratory for Food Non-thermal Processing, Beijing 100083, China;
2.Xinjiang Academy of Agricultural Sciences, Institute of Agricultural Products Processing, Xinjiang Engineering Technology Research Center for Deep Processing of Major Agricultural and Sideline Products, Xinjiang Key Laboratory of Agricultural Products Processing and Preservation, Urumqi 830091, China)

Abstract: Chili pulp represents a new category of chili-based products, functioning as the fundamental base material for downstream applications including chili sauces, hot pot soup bases, and compound seasonings. Consequently, the quality of the pulp directly influences the market competitiveness of the terminal products. This study investigated four cultivars of horn peppers (*Capsicum annuum* L.) from Inner Mongolia (LZ-1-R01, H1, 7#, and HL23). Chemometric methods combined with multivariate statistical analysis were employed to comparatively evaluate the multi-dimensional quality attributes and assess the processing suitability of the resultant chili pulp. These attributes included color properties (L^*, a^*, b^* values, and color value), textural characteristics (rheological properties and particle size distribution), nutritional components (carotenoids and capsaicinoids), and volatile flavor compounds. Results showed that, H1 chili pulp exhibited the best overall appearance and consistency, showing the highest brightness (L^* value: 38.38±0.5) and the smallest particle size (distribution range: 3.12 to 1430 μm; volume mean diameter: 407.47±1.50 μm; area mean diameter: 146.53±1.94 μm), and it also demonstrated optimal fluidity (initial viscosity: 241.07 Pa·s, δ<0.4). LZ-1-R01 chili pulp contained the highest carotenoid content (699.78±9.04 μg/g). And 7# chili pulp showed the highest content of capsaicin and dihydrocapsaicin (12.12±0.17 μg/g and 24.14±0.86 μg/g, respectively). HL23 chili pulp presented a relatively balanced profile across all quality indicators. A total of 48 volatile flavor compounds were identified in the four chili pulps using GC-IMS. Among them, 7# chili pulp exhibited the highest total peak intensity of volatile flavor compounds. Methyl salicylate was identified as the characteristic volatile component of H1, while 3-methyl-2-butenal (D) was the key differential compound for 7# and LZ-1-R01. The key differential markers for HL23 included 3-hydroxybutan-2-one (M/D), butylbenzene, 2-heptanone, and butanal (M/D). Furthermore, combined with the ROAV, 3-methylthiopropanal was identified as a key volatile flavor substance in the chili pulp. Based on the quality attribute analysis, all four chili varieties were deemed suitable for pulping. Chili pulps with distinct characteristics could be selected according to specific application requirements; for instance, H1 was suitable for developing high-smoothness products such as table sauces, while 7# and LZ-1-R01 could be utilized for color blending in product formulations. This research provides a novel perspective for the multi-scenario application of chili processing.

Key words: chili pulp; multivariate statistical analysis; multidimensional quality; processing suitability; variety differences

辣椒(*Capsicum* spp.)作为全球最重要的调味品作物之一,在中国农业经济与食品工业中占据着重要战略地位。内蒙古因其独特的地理优势及便利的机械化条件已成为国内红辣椒主产区之一,加工用辣椒主要分布在通辽市、巴彦淖尔等地[1],已成为当地主要经济作物[2],据统计,截至 2025 年 9 月份,内蒙古自治区辣椒播种面积为 105.3 万亩,产量为 217.4 万吨[3]。目前市场辣椒加工制品主要涵盖传统调味品(剁椒、辣椒酱、辣椒油、辣椒粉等)与深加工产品(辣椒素提取物、辣椒红色素、辣椒精等工业原料),传统调味品多为基础单一形态,面临同质化严重、附加值低的问题;深加工产品则长期局限于工业原料属性,辣椒膳食纤维零食、辣椒抗氧化物功能性饮品等终端消费品开发不足,功能性研究则集中于提取效率提升。随着预制菜产业爆发、餐饮连锁化升级及年轻群体对“便捷化、健康化、场景化”食品需求的增长,导致现有产品已无法满足市场对多元化辣椒产品的需求,因此,多场景辣椒加工产品的开发将成为拓展辣椒加工产业高质量发展的新路径。

随着消费者对食品品质与健康属性的需求持续提升,蔬菜浆作为核心加工基料愈发受到关注,其优势主要集中在三个维度:一是具有方便快捷的加工适配性,无需复杂预处理即可直接投入工业化生产,既能大幅缩短食品企业的生产周期,又能灵活适配酱料、饮品、预制菜等多品类加工场景[4];二是能完整保留蔬菜原生膳食纤维,低能量高纤维的健康特性精准契合当下消费者控糖、控脂的健康需求[5−6];三是借助温和制浆工艺,对活性营养成分有较好的保留效果,其营养密度显著高于传统脱水蔬菜制品[7−8]。当前,蔬菜浆在食品行业已应用于烘焙、婴幼儿辅食、代餐等多元化应用场景[9−10],而蔬菜浆加工相关研究多聚焦于南瓜浆、胡萝卜浆、甜菜浆及番茄浆等典型蔬菜浆理化及感官特性研究[11−12]。

近年来,辣椒浆因加工便捷、适用性广,正成为辣椒酱、火锅底料和复合调味品的重要基料,市场前景良好。鲜椒集中成熟、难储藏的问题限制了原料供应周期,而采后集中制浆可有效延长贮藏期并保障高附加值辣椒产品的稳定生产。同时,相较于干制与发酵方式,鲜椒制浆更能保留天然风味与营养,契合“新鲜、健康”的消费趋势。国际上以辣椒浆为基础的产品(如欧美拉差酱以及韩式甜辣酱)需求亦持续上升。开展鲜椒浆制备与品质研究,有助于延伸产业链、丰

富产品结构并提升我国辣椒产业的竞争力。目前针对辣椒加工制品的研究基础较为扎实，但多聚焦于干制辣椒（如干燥动力学[13]、干制工艺[14−15]）及发酵辣椒（如微生物群落演替[16−18]、特征风味形成[18−19]）领域。相比之下，针对鲜椒制品尤其是辣椒基料的品质特性研究相对匮乏，且缺乏系统的原料适宜性评价体系。本研究聚焦于鲜食及加工基料这一薄弱环节，创新性地选取内蒙古地区 4 种红辣椒为对象，构建了辣椒浆综合评价体系，旨在明确不同品种辣椒浆的品质差异，为辣椒的深加工利用提供理论支撑。

本次研究采用的 4 种内蒙古红辣椒与当前内蒙古地区主栽的加工专用型品种‘北京红’同为角型椒，但具有更高的产量、更强的抗病性、更优的加工品质以及更好的机械化适配性，能有效解决辣椒加工中现有品种瓶颈。研究分别从色泽、组织状态、营养成分以及挥发性风味物质四个维度探究了不同品种辣椒浆的品质，旨在明确不同辣椒浆的加工适宜性，为辣椒浆的品种选择、工艺优化提供了一定的科学理论指导。

1　材料与方法

1.1　材料与仪器

四个品种鲜辣椒，包括 LZ-1-R01、H1、7#、红龙 23（HL23），椒形均为角型椒，如图 1 所示，于 2024 年 9 月采收自内蒙古自治区巴彦淖尔市种植基地，由内蒙古自治区包头市农牧业科学研究院提供；丙酮、正庚烷　分析纯，天津市致远化学仪器有限公司；甲醇　色谱纯，德国默克公司；无水硫酸钠　国药集团化学试剂有限公司；类胡萝卜素试剂盒　上海酶联生物有限公司；辣椒碱、二氢辣椒碱标准品　上海源叶生物科技有限公司。



图 1　四个品种鲜辣椒

Fig.1　Four varieties of fresh pepper

LE204E/02 电子天平　梅特勒-托利多仪器（上海）有限公司；MA35 红外水分测定仪　德国赛多利斯公司；TMS-PRO 研究型食品物性分析仪　美国 FTC 公司；CR-400 色差仪　深圳市立新精密仪器设备有限公司；PBJ-G51S 破壁机　德国贝尔斯顿科技有限公司；Mastersizer 3000 智能激光粒度仪　马尔文帕纳科公司；DHR-2 流变仪　沃特世科技（上海）有限公司；TGL-20bR 离心机　上海安亭科学仪器厂；KQ3200DE 型数控超声波清洗器　昆山市超声仪器有限公司；T9 紫外分光光度计　北京普析通用仪器有限公司；1260 高效液相色谱仪　安捷伦科技（中国）有限公司；FlavourSpec®气相色谱-离子迁移谱联用风味分析仪（GC-IMS）　海能未来技术集团股份有限公司。

1.2　实验方法

1.2.1　辣椒浆制备　将四种鲜椒去梗去蒂去籽后分别置于破壁机，在 25 ℃，8 档转速处理 2 min 的条件下破碎成浆，并于−40 ℃ 保存待测。

1.2.2　色差测定　将鲜椒清洗擦干后，每个品种随机选择 3 个辣椒，采用全自动色差仪，在大孔反射模式下测定每个辣椒在 5 个不同位置的 L^*、a^*、b^*，计算其平均值表示该辣椒的色差测定结果，其中 L^*是亮度指数，a^*表示红绿值，b^*表示黄蓝值。

1.2.3　色价测定　参照 GB 1886.34-2015《食品安全国家标准 食品添加剂 辣椒红》的方法并稍作修改。

称取 0.5 g 的辣椒浆（精确至 0.001 g）于 50 mL 离心管中，加入 20 mL 丙酮，置于超声波中 40 ℃ 提取 20 min，8000 r/min 离心 5 min，转移上清液至 50 mL 离心管；重复提取，合并上清液并定容至 50 mL。根据实际情况用丙酮进行稀释，使提取液 Abs 值在 0.3~0.7 之间，于 460 nm 下测定吸光度。

根据公式计算辣椒浆色价：

$$E^{1\%}_{1\,cm}460\ nm = \frac{A \times v \times f}{m \times 100}$$

式中：A 表示样品吸光度；v 表示提取时定容体积，mL；f 表示稀释倍数；m 表示称样质量，g；100 为换算系数。

1.2.4　粒径测定　参照王勋等[20] 的测定方法并稍作修改。取 1 g 辣椒浆样品置于智能激光粒度仪中，设置其折射率 1.53、颗粒密度 1.1，以水作为分散剂，设置其折射率 1.33，测定持续时间 20 s。以特征数值 Dx（10）、Dx（50）、Dx（90）、D[4,3]、D[3,2]、粒径跨度 Span 值表示具体的粒径分布。其中 Dx（10）、Dx（50）、Dx（90）分别代表着四种辣椒浆的累计粒度分布百分数达到 10%、50%、90% 时所对应的粒径；D[4,3] 为体积平均粒径，反映体系中占据体积优势的颗粒尺寸；D[3,2] 表示表面积平均粒径，主要体现颗粒的表面积贡献，反映体系的界面特性；Span 值反映浆体粒径整体分布宽度。

1.2.5　流变性质测定

1.2.5.1　静态流变学测定　参照李筱等[21] 的测定方法并稍作修改。采用 DHR-2 流变仪测定辣椒浆的流变特性曲线，选取平板式夹具（直径 40 mm，间隙 10 mm），使用水循环系统控制测定温度为 25±1 ℃。取 3 mL 辣椒浆置于夹具和平板转子之间，在稳态剪切模式下，设置剪切速率从 0.1 s^{-1} 指数增加到 500 s^{-1}，测定剪切黏度随剪切速率的变化。

1.2.5.2　动态流变频率测定　参照胡隆孝等[22] 的测定方法并稍作修改。仪器、夹具及测定温度同 1.2.5.1。振荡剪切模式下，为保证实验在线性粘弹区内进行，设定角频率为 10 rad/s，振荡应变由 0.001%

增加到 100%, 记录储能模量 G'和损耗模量 G"随振荡应变的变化; 设定应变振幅为 0.1%, 角频率由 0.1 rad/s 增加到 100 rad/s, 记录储能模量 G'和损耗模量 G"随角频率的变化。

1.2.6 类胡萝卜素含量测定 采用植物类胡萝卜素含量检测试剂盒(微板法)进行检测。

类胡萝卜素提取: 取 0.1 g 辣椒浆样品置于 10 mL 离心管中, 加入 50 mg 提取粉剂和少量 Carotenoid Assay Buffer, 混匀后补加 Carotenoid Assay Buffer 至 10 mL, 避光放置 12~36 h, 期间晃动数次, 使组织与提取试剂充分接触, 当组织接近白色时提取完成, 在 4000 r/min 离心 5 min, 取上清液待测。

类胡萝卜素测定: 酶标仪开机预热 30 min 以上, 调节波长至 440 nm。取类胡萝卜素提取液 200 μL 加入 96 孔板中, 以 Carotenoid Assay Buffer 调零, 用酶标仪测定提取液在 440 nm 处吸光度(A_{440})。

根据公式计算辣椒浆类胡萝卜素含量:

$$C = \frac{A_{440} \times V \times N \times 1000}{250 \times 0.6 \times W} \times 1000$$

式中: C 表示试样中类胡萝卜素含量, μg/g; V 表示类胡萝卜素提取液体积, 0.01 L; N 表示稀释倍数; W 表示样品质量, g; 250 为类胡萝卜素经验消光系数, L/g/cm; 0.6 为 200 μL 提取液在酶标板中的光径, cm。

1.2.7 辣椒素含量测定 参照 GB/T 40348-2021《植物源产品中辣椒素类物质的测定 液相色谱-质谱/质谱法》。

样品前处理: 将辣椒制品搅拌均匀, 称取 5.0 g 样品(精确到 0.001 g)于 50 mL 离心管。试样提取: 加入 3 g 无水硫酸钠、15 mL 甲醇, 涡旋混匀, 60 ℃ 水浴超声 15 min, 8000 r/min 离心 5 min, 取上清液于 50 mL 容量瓶中, 残渣重复提取两次。合并提取液, 过 0.22 μm 有机膜。

LC 仪器条件: PDA 检测器, 检测波长 280 nm, C_{18} 色谱柱(4.6×250 mm, 5 μm), 柱温 30 ℃, 流动相 A 为甲醇; B 为超纯水, 流速 1.0 mL/min, 等度洗脱条件为 A∶B=65∶35, 进样量 10 μL。

标准曲线绘制: 准确称取辣椒碱、二氢辣椒碱标准品 1 mg, 用甲醇溶解并定容至 10 mL, 配制成 100 μg/mL 的标准溶液, 稀释为 1.0、2.5、5.0、10.0、25.0 μg/mL 的标准溶液, 过 0.22 μm 有机膜后在上述 LC 条件下测定, 绘制标准曲线。辣椒素标曲为 y=8.8134x+1.8881, R^2=0.9999; 二氢辣椒素标曲为 y=3.5577x+0.5456, R^2=0.9998。

根据公式计算辣椒浆中辣椒素含量、二氢辣椒素含量:

$$W = \frac{C \times V}{m}$$

式中: W 表示试样中辣椒素或二氢辣椒素的含量, μg/g; C 表示由标准曲线上查到的辣椒素或二氢辣椒素含量, μg/mL; V 表示样品定容体积, mL; m 表示样品质量, g。计算结果表示到小数点后两位。

1.2.8 GC-IMS 测定挥发性风味化合物

1.2.8.1 GC-IMS 条件与方法 参照韩蓉等[23] 的测定方法并稍作修改。

进样条件: 准确称取 3.00 g 辣椒浆样品, 置于 20 mL(2 cm×4 cm)顶空进样瓶中, 在 80 ℃ 下以 500 r/min 孵育 10 min 后进样, 顶空进样针温度 45 ℃, 进样量 500 μL, 清洗时间 0.50 min, 采用不分流模式。

GC 条件: 色谱柱: MXT-5(15 m, 0.53 mm ID), 柱温 60 ℃, 载气/漂移气为高纯氮气(>99.999%)。载气的流速梯度: 0~2 min, 2 mL/min; 2~5 min, 2~15 mL/min; 5~10 min, 15~50 mL/min; 10~15 min, 50~100 mL/min; 15~20 min, 100 mL/min。

IMS 条件: IMS 在温度 45 ℃ 和流速 150 mL/min 条件下运行。

通过 FlavourSpec®配套的 Libraries search 软件内置 NIST 数据库和 IMS 数据库对挥发性风味化合物进行定性分析, 每个样品重复 3 次。

1.2.8.2 关键挥发性风味化合物评价 采用 ROAV 对不同品种辣椒浆的关键挥发性风味化合物进行鉴定[24]。选定相对含量较高且感官阈值较低的物质为关键性风味化合物, 并设定其 ROAV=100, 根据公式计算其他挥发性风味化合物的 ROAV:

$$ROAV = \frac{T_{stan} \times C_{ri}}{C_{rstan} \times T_i} \times 100$$

式中: T_{stan} 表示关键性风味化合物的感觉阈值, μg/kg; C_{rstan} 表示关键性风味化合物的相对百分含量, %; C_{ri} 表示待测成分相对百分含量, %; T_i 表示待测成分感觉阈值, μg/kg。

1.3 数据处理

所有样品开展三重复两平行实验, 结果均以平均值±标准差表示。使用 Excel 2019 记录和处理数据, 使用 Origin 2025、IBM SPSS Statistic 27 及 GraphPad Prism 等软件系统进行显著性分析(α=0.05)、聚类分析及图表绘制。

2 结果与分析

2.1 辣椒浆颜色品质

2.1.1 辣椒浆色泽 色泽是蔬菜浆的重要感官指标之一, 直接影响了消费者的接受程度[25]。如表 1 所

表 1 四种辣椒浆的色泽差异

Table 1 Color differences of four kinds of chili pulp

品种	L^*	a^*	b^*
LZ-1-R01	32.3±1.16^c	26.09±1.35^a	14.48±1.36^a
H1	38.38±0.5^a	23.17±0.29^b	12.67±0.37^{ab}
7#	34.87±0.2^b	23.47±0.26^b	11.53±0.17^b
红龙23	35.55±1.09^b	23.38±1.32^b	12.2±0.96^b

注: 上标不同字母表示不同组别间存在显著性差异(P<0.05), 表2同。

示，四个品种辣椒浆中，H1 辣椒浆的 L^*值最高，为 38.38±0.5，表明其亮度最高；其次为红龙 23 辣椒浆，L^*值为 35.55±1.09。a^*、b^*分别代表红色值及黄色值，其中 LZ-1-R01 辣椒浆的 a^*值（26.09±1.35）显著高于其他样品（P<0.05），且其 b^*值最大（14.48±1.36）。辣椒浆的色泽差异可能与辣椒品种、色素含量等有关。不同品种辣椒中类胡萝卜素的组成会因其基因表达、农业气候和采获后条件等因素而产生差异，而这种色素组成差异又会影响辣椒的色泽表现，辣椒红素含量高的品种 a^*值更高，玉米黄素含量高的品种 b^*值更高[26−28]。本研究中 LZ-1-R01 辣椒浆的较高的 a^*值可能归因于其类胡萝卜素的高效积累，正如文献 [29] 所指出，红色素含量与 a^*值呈极显著正相关关系，表明该品种在类胡萝卜素合成代谢方面具有遗传优势。H1辣椒浆的 L^*值最高，这可能与辣椒浆的微观结构有关，与文献 [30−31] 关于果蔬浆料光学特性的研究类似，较高的 L^*值往往意味着浆料颗粒更小，对光的反射率更高，这提示 H1 辣椒浆的颗粒可能更加细腻。

2.1.2　辣椒浆色价　色价是评价加工辣椒色泽的主要指标之一[32]。如图 2 所示，四种辣椒浆的色价变化范围在 2.50~4.26，不同品种辣椒浆差异显著（P<0.05），其中 7#的色价最高（4.26±0.07），H1 辣椒浆的色价最低（2.5±0.04），这与辣椒品种及成熟度差异有关[33]。杨志刚等[34] 测定了 92 份色素辣椒色价值为 5.90~20.62；尹成刚等[35] 测定了 109 份色素辣椒育种材料的色价，发现当前我国色素辣椒主产区主栽品种的色价主要分布区间在 9~15。品种间类胡萝卜素含量和色素累积能力等差异是导致色价水平不同的主要因素之一；其次，本研究样品多在适宜加工的技术成熟期采收，相较于文献报道中采用的充分成熟或深红熟期样品，成熟度不足也会导致色素合成不完全，从而降低色价[36]；此外，本研究以鲜椒浆为测定对象，而前人的研究对象为干椒，样品水分含量的差异也是测定结果差异的影响因素之一[34−35]。上述品种类型、采收成熟度及测定方法等多种因素的综合作用，可能共同导致本研究辣椒浆色价值普遍低于前人关于色素辣椒材料的研究结果。

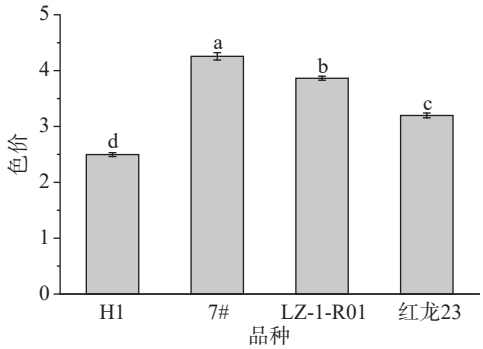


图 2　四种辣椒浆的色价对比

Fig.2　Comparison of color value of four kinds of chili pulp

注：标注的不同字母表示不同组别间存在显著性差异（P<0.05），图 6、图 7、图 9 同。

2.2　辣椒浆组织状态

2.2.1　辣椒浆粒径　粒径反映了辣椒浆的质地细腻度、口感粗糙程度、流动性等特性，粒径越小，辣椒浆质地越细腻、口感更顺滑、流动性更佳，且稳定性较好[37−39]。由表 2 可知，四种辣椒浆的粒径之间差异显著（P<0.05）。H1 品种在多指标中表现突出，其 Dx（50）（352.40±1.78 μm）、Dx（90）（789.20±6.94 μm）、D[4,3]（407.47±1.50 μm）、D[3,2]（146.53±1.94 μm）以及 Span 值（1.94±0.03）均显著低于其他样品（P<0.05），说明其浆体颗粒均一性高、粒径分布范围窄、无拖尾现象，小颗粒主导表面积贡献，更利于通过界面效应提升体系稳定性[40]。结合图 3 可知，H1 辣椒浆的浆体中小颗粒占比与细化程度均较高、粒度最小且分布最集中。相比之下，红龙 23 的 Dx（10）（133.20±2.11 μm）、Dx（50）（496.20±6.16 μm）及 D[3,2]（196.40±3.50 μm）最高，说明其颗粒较大，可能会影响产品的质地与稳定性，导致辣椒浆口感粗糙，在贮藏期间存在沉降风险[41]。四种辣椒浆的不同粒径分布趋势基本一致，如图 3 所示，其中 H1 辣椒浆的粒径最小且分布更集中，表明浆体均一细腻、稳定性

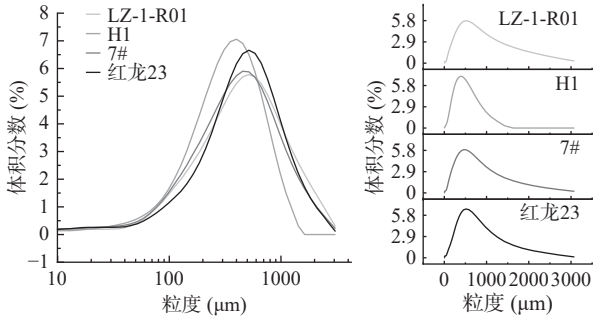


图 3　四种辣椒浆的粒径分布曲线

Fig.3　Particle size distribution curves of four kinds of chili pulp

注：左图为样品粒度的对数分布曲线；右图为十进制粒度分布曲线的多面板呈现，方便更直观地展示各样品粒度分布。

表 2　四种辣椒浆粒径指标的对比

Table 2　Comparison of particle size parameters of four kinds of chili pulp

品种	Dx（10）（μm）	Dx（50）（μm）	Dx（90）（μm）	D[4,3]（μm）	D[3,2]（μm）	Span
LZ-1-R01	124.40±1.31^{b}	475.00±6.24^{b}	1307.33±31.39^{a}	619.13±10.00^{a}	177.93±1.81^{b}	2.49±0.04^{a}
H1	106.87±2.14^{c}	352.40±1.78^{d}	789.20±6.94^{c}	407.47±1.50^{c}	146.53±1.94^{d}	1.94±0.03^{c}
7#	109.73±1.81^{c}	432.47±3.35^{c}	1184.00±20.30^{b}	563.00±5.89^{b}	155.27±3.78^{c}	2.48±0.05^{a}
红龙23	133.20±2.11^{a}	496.20±6.16^{a}	1241.33±37.54^{ab}	613.80±12.84^{a}	196.40±3.50^{a}	2.23±0.05^{b}

好, 具有较好的形态特征。

2.2.2　辣椒浆流变特性　流变学特性反映了辣椒浆的黏弹特性, 是表征其感官品质的重要参数[42]。适当的黏度可为辣椒浆提供更丰富、饱满的口感。本研究考察了不同辣椒浆表观黏度随剪切速率变化的特性, 其静态流变曲线如图 4 所示。各组样品的流变曲线趋势一致: 在低剪切速率阶段, 样品表现出较高的表观黏度, 随着剪切速率的上升, 辣椒浆的黏度随之下降, 出现剪切稀化现象, 说明辣椒浆属于典型的非牛顿流体。相较于其他样品, LZ-1-R01 辣椒浆的黏度更高, 达 575.21 Pa·s, 这可能是由于浆体的颗粒较大且不规则, 从而影响了其流动性; H1 辣椒浆的初始黏度最低, 仅为 241.07 Pa·s, 表现出最优的流动性。

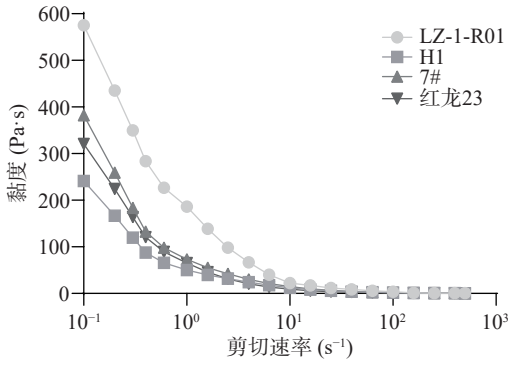


图 4　四种辣椒浆的静态流变曲线

Fig.4　Static rheological curves of four kinds of chili pulp

G"与 G'的比值称为损耗因子(δ), 又称阻尼因子或损耗正切值, 用于表征体系的黏弹性比例[43]。由图 5 可知, δ 始终小于 1, 说明辣椒浆的 G'始终大于 G", 即弹性大于黏性, 固态特性强于液态特性, 同时所有样品的 δ 均小于 0.5, 说明四种辣椒浆均为弱凝胶体系[44]。其中 H1 辣椒浆的 δ<0.4, 低于其他品种(0.4<δ<0.5), 表现出更好的液态特性。流变特性与浆料的微观结构密切相关, 前人研究表明, 果蔬分散体系的流变行为受到分散相粒径大小及其分布特征的影响[45−46]。一般而言, 在相同固形物含量下, 浆料中颗粒粒径越大, 颗粒间易形成较强的物理互锁或网络结构, 导致体系的表观黏度和屈服应力增大, 流动性降低[47]。本研究中, 不同品种流变特性的差异证实了这一规律: H1 辣椒浆具有最小的平均粒径且分布最为均匀, 颗粒间相互作用力相对较弱, 因而表现出最好的流动性。

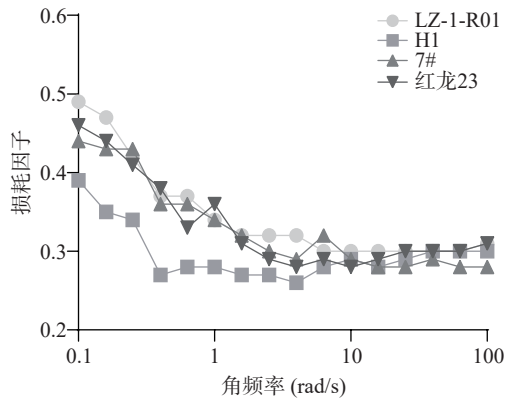


图 5　四种辣椒浆的动态流变损耗因子

Fig.5　Dynamic rheological loss factor of four kinds of chili pulp

上述结果表明, H1 辣椒浆在静态流变中表现出最低初始黏度和最佳流动性, 动态流变特性显示其液体特性更强、弱凝胶结构更松散, 其流变性显著优于其他品种辣椒浆。

2.3　辣椒浆关键营养成分分析

2.3.1　辣椒浆类胡萝卜素含量　类胡萝卜素是辣椒呈现红色、橙色或黄色的主要色素来源, 直接影响了辣椒浆的色泽和商品价值[48]。由图 6 可知, 四种辣椒浆的类胡萝卜素含量分布在 411.52~699.78 μg/g, 其中 LZ-1-R01 辣椒浆中的类胡萝卜素含量显著高于其他品种(P<0.05), H1 和 7#辣椒浆中的类胡萝卜素含量相近。类胡萝卜素含量与红辣椒成熟度呈强正相关, 在成熟过程中, 果实内的叶绿体逐渐解体并转化为富含类胡萝卜素的有色体, 同时伴随着类胡萝卜素快速积累[32]; 此外, 基因型差异也是导致品种间含量不同的关键因素, 不同辣椒品种(如二荆条、朝天椒、甜椒等)拥有不同的等位基因, 调控着类胡萝卜素的合成效率及代谢路径[49]。红龙 23 含量最低且变异系数最大(20.1%), 这可能归因于原料成熟度的均一性较差或其色素稳定性较低。前人研究指出, 辣椒果实的成熟度差异会导致色素含量的波动[36]; 同时, 不同基因型辣椒的抗氧化能力及相关酶(如脂氧合酶)活性存在差异[50−51], 部分品种在制浆及接触空气过程中, 类胡萝卜素极易发生随机的氧化降解[52], 从而导致测定结果出现较低均值和较大标准差的现象。因此, 红龙 23 较大的数据波动提示该品种在加工中对原料筛选标准和护色工艺可能有更高的要求。

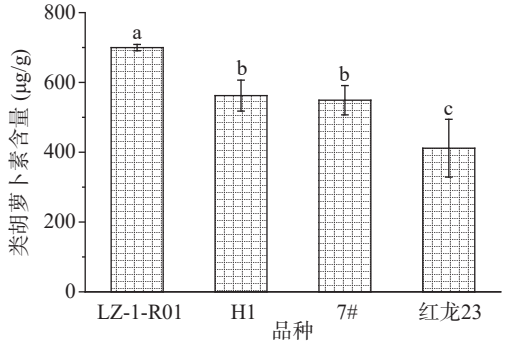


图 6　四种辣椒浆类胡萝卜素含量对比

Fig.6　Comparison of carotenoid content of four kinds of chili pulp

2.3.2　辣椒浆辣椒碱含量　辣椒碱类是辣椒浆中的重要生物活性成分之一, 也是辣椒辛辣味的来源, 主要包括辣椒碱和二氢辣椒碱, 二者占辣椒碱类物质总量约 90%[53]。如图 7 所示, 不同品种辣椒浆中的辣椒碱、二氢辣椒碱的范围分别为 3.91~12.12 μg/g 和

6.51~24.14 μg/g，其中 7#辣椒浆中的辣椒碱（12.12±0.17 μg/g）和二氢辣椒碱的含量最高（24.14±0.86 μg/g），H1 辣椒浆中的辣椒碱含量最低（3.91±0.17 μg/g），LZ-1-R01 辣椒浆中的二氢辣椒碱含量最低（6.51±0.58 μg/g）。这种显著的品种间差异主要源于辣椒种质资源的遗传特性不同。辣椒素类物质的生物合成受到 *Pun1* 等关键基因及其编码酶活性的调控[54−55]，不同基因型辣椒在果实发育过程中合成次生代谢产物的潜能存在天然差异，导致了最终辣度水平的不同[56]。此外，受试辣椒浆中的辣椒碱含量整体较二氢辣椒碱低，这可能与辣椒浆中自身辣椒碱含量及二者结构稳定性有关[57]。二氢辣椒碱含量高于辣椒碱含量是由于二氢辣椒碱中的双键被氢化，结构相对稳定，不易破坏，而辣椒碱分子中的双键（C8-C9）则更易在加工、储存等条件下氧化降解[57−58]。本研究中辣椒碱与二氢辣椒碱的含量整体低于宋晓妍等[59]报道的干制辣椒中对应指标（辣椒碱 0.89~2.52 mg/g，二氢辣椒碱 0.52~1.55 mg/g），这一差异可能源于加工基质的不同：干辣椒为脱水干燥的固体形态，生物碱稳定性更强，而辣椒浆含有大量水分，加工过程中的破碎、均质操作会破坏辣椒细胞结构，导致部分生物碱溶于水相并发生轻微降解[60−61]。

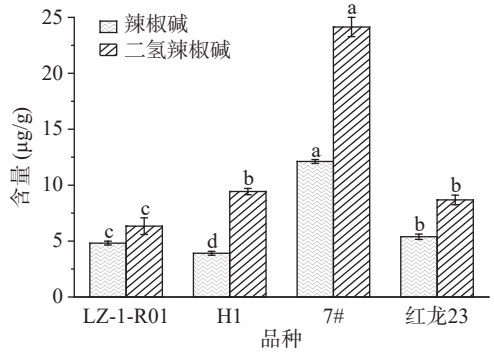


图 7　四种辣椒浆中辣椒碱及二氢辣椒碱的含量差异

Fig.7　Differences of capsaicinoid and dihydrocapsaicinoid contents of four kinds of chili pulp

2.4　辣椒浆风味特性

2.4.1　挥发性风味化合物成分分析　采用 GC-IMS 技术对四种辣椒浆的挥发性风味化合物进行分析。图 8 为辣椒浆样品的总挥发性有机物的二维图谱及差异图谱，样品从左到右依次为 H1、7#、LZ-1-R01、红龙 23。结果表明，信号集中于迁移时间 8.00~10.00 ms、保留时间 400 s 的区域内，出峰位置、峰数量大致相同，峰强呈现出一定变化，表明不同品种辣椒浆所含挥发性风味化合物种类相似，但含量存在一定差异。

四种辣椒浆中共鉴定出 48 种挥发性风味化合物，如表 3 所示，包括 22 种醛类、10 种酮类、7 种醇类、3 种酯类、3 种芳香烃类、2 种酸类和 1 种呋喃类物质。

其中苯乙醛、苯甲醛、3-甲硫基丙醛、（E）-2-己

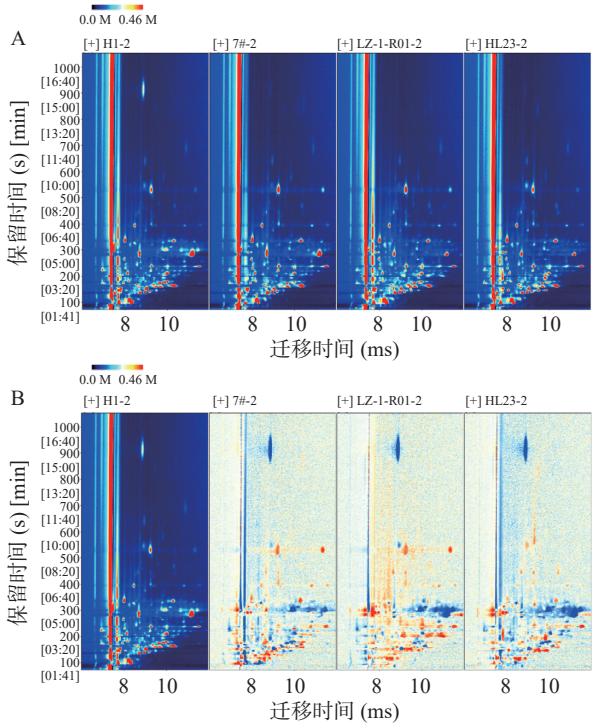


图 8　四种辣椒浆中挥发性风味物质的 GC-IMS 二维图谱（A）和差异图谱（B）

Fig.8　GC-IMS two-dimensional spectrum (A) and differential spectra (B) of volatile flavor compounds of four kinds of chili pulp

烯醛等 11 种化合物展现出多特征峰现象，即同时检测到单体（Monomer，M）与二聚体（Dimer，D）的信号峰。这一现象的产生主要归因于 IMS 的电离与迁移机制：经 GC 分离的挥发性组分进入电离区后被离子化，当分析物浓度较高时，迁移管中的产物离子在电场驱动下与中性分子发生碰撞并结合，形成离子-分子聚合物，其中二聚体是最常见的形态[62]。

醛类、酮类、醇类和酯类是辣椒浆挥发性风味化合物中的重要组分。其中，醛类物质是不同辣椒浆中的关键风味物质，主要由脂质氧化降解生成[63]，赋予了辣椒浆特殊的果香、青草香和脂肪味；酮类物质主要由氨基酸分解代谢及不饱和脂肪酸降解产生，具有花果香和奶油香味，但其阈值较高，且易在高温条件下发生转化[64−65]，对辣椒浆的风味影响较弱；检出的 7 种醇类（如正己醇、1-戊醇、乙醇、1-丙醇等）主要由脂氧合酶及脱氨酶催化生成，赋予辣椒浆柔和的香气特征，这与葛艳争等[66]对辣椒油挥发性风味物质分析的研究结果一致；酯类物质（乙酸甲酯、丙酸甲酯和水杨酸甲酯）则主要贡献了果香与甜香。

进一步的品种差异性分析（图 9）表明，不同辣椒浆在挥发性组分的构成上存在显著差异。其中 H1 辣椒浆的醛类物质相对含量最高（56.06%），其特征成分（E）-2-己烯醛相对含量（13.37%±0.16%）显著高于其他样品（P<0.05），是制浆过程中辣椒组织受到机械损伤导致细胞膜破裂，释放出亚油酸和亚麻酸的氧化产物[67]，具有青草香、香蕉味和脂肪味；红龙

表 3　四种辣椒浆的风味成分分析结果

Table 3　Analysis results of the flavor component analysis of four kinds of chili pulp

类别	序号	化合物英文名	化合物中文名	风味描述[68]	保留指数	保留时间(s)	迁移时间(ms)	相对含量(%)			
								H1	7#	LZ-1-R01	红龙23
醛	1	phenylacetaldehyde-M	苯乙醛-M	风信子、水果甜香、杏仁、樱桃、三叶草蜜、可可	1034.9	530.46	1.25856	2.28±0.31^{ab}	3.00±0.11^{a}	2.86±0.16^{a}	2.21±0.23^{b}
	2	phenylacetaldehyde-D	苯乙醛-D	风信子、水果甜香、杏仁、樱桃、三叶草蜜、可可	1034.1	528.943	1.54147	0.55±0.12^{bc}	0.92±0.05^{a}	0.83±0.07^{ab}	0.53±0.09^{c}
	3	Benzaldehyde-M	苯甲醛-M	苦杏仁、樱桃及坚果香	948.5	393.14	1.15211	2.22±0.18^{a}	2.57±0.03^{a}	2.49±0.01^{a}	2.59±0.14^{a}
	4	Benzaldehyde-D	苯甲醛-D	苦杏仁、樱桃及坚果香	950.2	395.416	1.47049	0.72±0.1^{a}	0.93±0.02^{a}	0.96±0.02^{a}	0.91±0.11^{a}
	5	3-methylthiopropanal-M	3-甲硫基丙醛-M	洋葱、肉香、果香	903.1	338.515	1.08902	3.6±0.08^{a}	4.16±0.06^{a}	3.94±0.08^{a}	4.13±0.05^{a}
	6	3-methylthiopropanal-D	3-甲硫基丙醛-D	洋葱、肉香、果香	901.7	336.997	1.40149	2.96±0.23^{b}	4.54±0.04^{a}	3.85±0.25^{ab}	3.86±0.24^{ab}
	7	(E)-2-hexenal-M	(E)-2-己烯醛-M	青香、香蕉、脂肪	849.3	285.879	1.18286	3.27±0.04^{a}	3.28±0.06^{c}	3.08±0.1^{c}	3.48±0.06^{b}
	8	(E)-2-hexenal-D	(E)-2-己烯醛-D	青香、香蕉、脂肪	847.9	284.643	1.51893	10.1±0.12^{a}	9.5±0.15^{b}	4.91±0.09^{c}	4.51±0.1^{d}
	9	2-furaldehyde	2-糠醛	甜味、木头、杏仁香、烤面包	823.4	264.441	1.08437	2.04±0.1^{a}	2.04±0.03^{bc}	2.22±0.12^{ab}	1.81±0.09^{c}
	10	1-hexanal-M	1-己醛-M	新鲜的、青香、脂肪味、水果味	784.2	236.024	1.26042	2.47±0.05^{a}	2.64±0.05^{b}	2.34±0.13^{c}	2.77±0.02^{ab}
	11	1-hexanal-D	1-己醛-D	新鲜的、青香、脂肪味、水果味	785.7	237.02	1.56533	3.26±0.13^{c}	5.22±0.18^{b}	6.06±0.16^{b}	6.99±0.11^{a}
	12	3-Methyl-2-butenal-M	3-甲基-2-丁烯醛-M	果香	777.1	231.346	1.09373	1.45±0.05^{d}	2.17±0.03^{a}	2±0.03^{b}	1.81±0.02^{c}
	13	3-Methyl-2-butenal-D	3-甲基-2-丁烯醛-D	果香	775.2	230.141	1.36299	1.07±0.04^{b}	2.07±0.04^{a}	2.14±0.21^{a}	1.52±0.08^{b}
	14	(E)-2-Pentenal-M	(E)-2-戊烯醛-M	土豆、豌豆	744.7	211.758	1.10716	2.7±0.04^{a}	2.43±0.05^{b}	1.96±0.09^{c}	1.94±0.15^{c}
	15	(E)-2-Pentenal-D	(E)-2-戊烯醛-D	土豆、豌豆	742.5	210.552	1.3606	4.5±0.33^{a}	2.91±0.13^{b}	2.89±0.14^{b}	2.66±0.09^{b}
	16	3-methylbutanal-M	3-甲基丁醛-M	巧克力、脂肪味	651.1	167.954	1.16478	2.34±0.07^{b}	2.33±0.06^{b}	1.92±0.11^{c}	2.67±0.05^{a}
	17	3-methylbutanal-D	3-甲基丁醛-D	巧克力、脂肪味	640.5	163.968	1.40524	6.34±0.15^{c}	8.89±0.07^{a}	7.52±0.08^{c}	8.24±0.14^{b}
	18	Butanal-M	丁醛-M	刺激性气味、果香、绿叶气味	587.4	146.523	1.09831	1.44±0.03^{b}	1.06±0.29^{c}	1.55±0.12^{b}	2.79±0.05^{a}
	19	Butanal-D	丁醛-D	刺激性气味、果香、绿叶气味	589.1	147.032	1.3395	0.53±0.07^{c}	0.41±0.16^{c}	1.18±0.04^{b}	4.33±0.2^{a}
	20	2-Methyl-2-propenal	2-甲基-2-丙烯醛	风信子叶	560.9	139.134	1.21897	4.12±0.2^{c}	5.71±0.07^{ab}	5.82±0.19^{a}	5.2±0.02^{b}
	21	Heptanal	庚醛	青草香混合柑橘皮气息	894.4	329.262	1.33232	0.77±0.01^{a}	0.79±0.02^{a}	0.81±0.05^{a}	0.83±0.08^{a}
	22	Pentanal	戊醛	青草气味、微弱香蕉味	679.5	179.489	1.18926	0.77±0.01^{c}	1.28±0.09^{b}	1.12±0.03^{b}	1.54±0.04^{a}
酮	23	3-Hexanone	3-己酮	果香(葡萄)、甜香、朗姆酒	786.5	237.582	1.46983	0.9±0.01^{c}	1.39±0.01^{b}	1.51±0.08^{a}	1.34±0.03^{b}
	24	3-penten-2-one-M	3-戊烯-2-酮-M	水果香,贮藏期间变为辛辣的刺激味	733.8	205.731	1.07744	1.02±0.02^{a}	0.97±0.05^{ab}	1.04±0.06^{a}	0.92±0.15^{b}

续表 3

类别	序号	化合物英文名	化合物中文名	风味描述[68]	保留指数	保留时间(s)	迁移时间(ms)	相对含量(%)			
								H1	7#	LZ-1-R01	红龙23
	25	3-penten-2-one-D	3-戊烯-2-酮-D	水果香，贮藏期间变为辛辣的刺激味	728.7	203.018	1.33657	1.49±0.03^{c}	1.51±0.08^{c}	2.56±0.08^{a}	2.09±0.2^{b}
	26	1 -Hydroxy-2-propanone	1-羟基-2-丙酮	焦糖香气	668.8	174.987	1.07867	1.85±0.07^{a}	1.78±0.02^{bc}	1.65±0.12^{c}	1.89±0.02^{b}
	27	2(3H)-Furanone	2(3H)-呋喃酮	草药、烟草	885.9	320.438	1.12201	0.79±0.05^{b}	1.01±0.03^{b}	1.11±0.04^{a}	0.97±0.02^{b}
	28	2-Propanone	2-丙酮(丙酮)	清新、苹果、梨	523.3	129.99	1.1132	0.79±0.27^{a}	1.75±0.28^{a}	1.54±0.34^{a}	1.06±0.17^{a}
	29	2-heptanone	2-庚酮	梨、香蕉似的果香、轻微的药香	886.8	321.319	1.26324	0.55±0.02^{c}	0.55±0^{c}	0.6±0.03^{b}	0.92±0.03^{a}
	30	3-hydroxybutan-2-one-M	3-羟基-2-丁酮-M	黄油味、奶油味	711.4	194.18	1.06105	1.53±0.01^{b}	1.33±0.07^{c}	1.39±0.14^{c}	2.49±0.11^{a}
	31	3-hydroxybutan-2-one-D	3-羟基-2-丁酮-D	黄油味、奶油味	711.4	194.18	1.33327	1.02±0.03^{b}	1.12±0.02^{b}	1.13±0.05^{b}	2.63±0.33^{a}
	32	methyl-5-hepten-2-one	甲基庚烯酮	柑橘味、果味、霉香、酮香	983.8	443.302	1.18033	0.47±0.01^{c}	0.6±0.01^{c}	0.75±0.03^{a}	0.68±0.02^{b}
	33	2-Furanmethanol	2-呋喃甲醇	甜焦糖味	955.3	402.244	1.26054	0.65±0.02^{c}	0.85±0.01^{b}	0.9±0.03^{a}	0.82±0.02^{b}
	34	n-Hexanol	正己醇	淡青的嫩枝叶气息，微带酒香、果香和脂肪气息	869.2	304.02	1.32714	0.99±0.02^{a}	0.84±0.01^{c}	0.93±0.04^{b}	1±0.02^{a}
醇	35	1-Pentanol	1-戊醇	香膏	758.1	219.593	1.25415	1.44±0.07^{b}	1.83±0.05^{a}	1.48±0.06^{b}	1.61±0.09^{ab}
	36	1-Propanethiol	1-丙硫醇	卷心菜味	620.6	156.969	1.17949	2.24±0.16^{a}	2.44±0.06^{a}	1.93±0.06^{b}	2.66±0.02^{a}
	37	Ethanol	乙醇	芳香气味	418.3	110.854	1.12114	3.32±0.11^{a}	4.73±0.44^{a}	4.55±0.53^{a}	3.78±0.15^{a}
	38	1-propanol	1-丙醇	酒精、刺激性气味	574.1	142.701	1.24815	3.05±0.12^{c}	4.1±0.11^{ab}	4.45±0.27^{a}	3.46±0.19b^{c}
	39	1-Penten-3-ol	1-戊烯-3-醇	空灵、青香、热带果香	679.7	179.567	1.35739	3.78±0.14^{a}	2.29±0.07^{c}	3.63±0.09^{b}	1.58±0.03^{d}
	40	Methyl acetate	乙酸甲酯	甜香、果香	552	136.841	1.18722	3.99±0.59^{b}	8.5±0.07^{a}	7.4±0.52^{a}	5.57±0.19^{b}
酯	41	Methyl propanoate	丙酸甲酯	果香，类似苹果、菠萝或朗姆酒香	633.1	161.3	1.31424	2.63±0.09^{b}	3.22±0.07^{ab}	3.3±0.08^{a}	2.62±0.04^{c}
	42	Methyl salicylate	水杨酸甲酯	冬青、薄荷	1183.6	913.974	1.21039	1.31±0.15^{a}	0.27±0.07^{b}	0.22±0^{b}	0.23±0.01^{b}
	43	1,4-Dimethylbenzene	1,4-二甲苯	芳香味	856.5	292.261	1.06227	0.53±0^{c}	1.97±0.03^{b}	2.18±0.23^{b}	2.71±0.18^{a}
芳香烃	44	ethylbenzene	乙苯	类似汽油或苯的刺鼻芳香味	857	292.738	1.083	0.44±0^{d}	1.23±0.01^{c}	1.77±0.12^{b}	2.47±0.13^{a}
	45	Butylbenzene	丁苯	弱化芳烃味，类似稀释的甲苯气息	1044.5	548.838	1.21436	0.58±0.02^{a}	0.45±0.01^{b}	0.42±0.03^{b}	0.75±0.08^{a}
酸	46	butanoic acid	丁酸	发酵酸奶酪味道	796.2	244.239	1.16731	1.12±0.03^{a}	1±0.04^{b}	1.17±0.11^{a}	1.03±0.05^{b}
	47	Propanoic acid	丙酸	发酵味	684.2	181.552	1.1136	2.04±0.07^{a}	1.61±0.04^{bc}	1.71±0.1^{b}	1.41±0.02^{c}
呋喃	48	Tetrahydrofuran	四氢呋喃	微弱醚香，略带甜味	609.8	153.402	1.23013	2±0.09^{a}	1.58±0.12^{c}	1.84±0.07^{bc}	1.91±0.13^{b}

注：M为单体；D为二聚体。上标不同字母表示不同组别间存在显著性差异(P<0.05)。

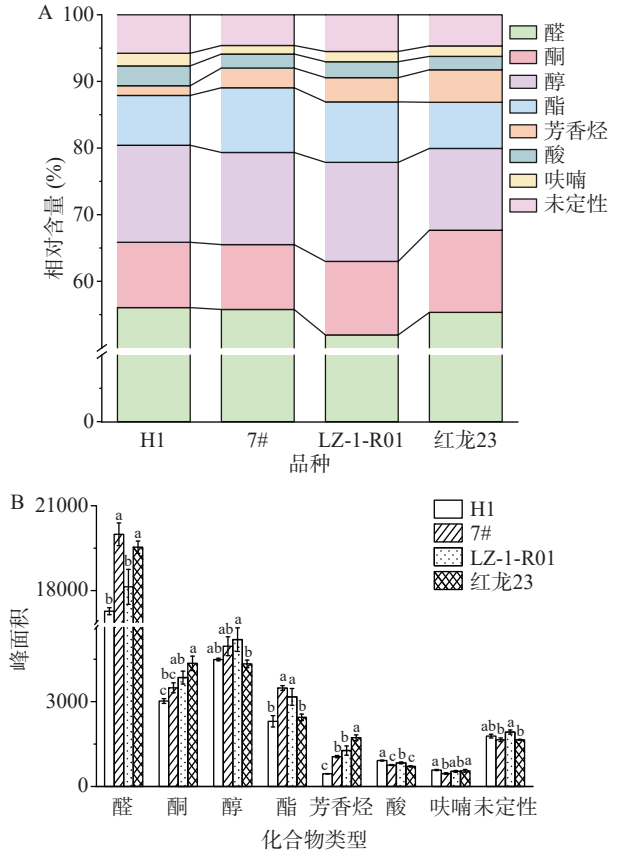


图 9　四种辣椒浆挥发性风味化合物相对含量(A)和挥发性风味化合物峰面积的定量分析(B)

Fig.9　Quantitative analysis of relative content of volatile substances (A) and peak volume of volatile substances in four kinds of chili pulp (B)

23 辣椒浆中酮类物质的相对含量最高(12.33%), LZ-1R-01 辣椒浆(11.03%)次之; 醇类方面, LZ-1-R01 的醇类相对含量最高(14.87%), 红龙 23 相对含量最低(12.27%); 7#的酯类相对含量最高(9.71%), 其乙酸甲酯相对含量(8.5%±0.07%)也显著高于其他样品(P<0.05), 红龙 23 的酯类相对含量最低(6.93%)。

为了阐明不同辣椒浆挥发性风味的指纹差异, 将 GC-IMS 指纹图谱划分为 a、b、c、d、e 五个特征区域, 如图 10 所示。区域 a 中为四种辣椒浆的共性挥发性化合物组分, 包括 14 种醛、6 种醇、3 种酮、2 种酸以及丙酸甲酯, 这些化合物在各样本间不仅普遍存在且信号强度无显著差异, 表明辣椒品种遗传背景对这些基础代谢产物的合成影响较小, 具有较高的保守性。区域 b 反映了 H1 样品的低丰度特征, 其中乙苯、1,4-二甲苯、戊醛、1-己醛(D)、3-己酮等物质的含量显著低于其他三个品种。区域 c 主要显示 H1 中的特征性挥发性风味化合物, 其中水杨酸甲酯在 H1 辣椒浆中的信号强度显著高于其他品种, 这种独特的酯类物质为 H1 提供了丰富的药香与清凉感, 显著提升了其风味层次。区域 d 主要由 3-戊烯-2-酮(D)、甲基庚烯酮、3-甲基-2-丁烯醛(D)、乙酸甲酯、苯乙醛(D)、丙酮等 8 种挥发性有机物组成。其中赋予辣椒浆果香味的 3-甲基-2-丁烯醛(D)、苯乙醛(D)、乙酸甲酯在 7#、LZ-1-R01 中含量高于其它品种。区域 e 为红龙 23 辣椒浆的差异性化合物, 信号显著高于其他品种辣椒浆, 包括 3-羟基-2-丁酮(M/D)、丁苯、2-庚酮、丁醛(M/D), 其中 3-羟基-2-丁酮赋予辣椒浆黄油味、奶油味带来的浓厚感[69]; 丁醛及丁苯等物质的存在加强了辣椒浆的刺激性气味[70]。

2.4.2　特征性风味物质分析　ROAV 是评估挥发性风味成分对整体香气贡献强度的关键指标, 其值越大, 表明该成分对整体香气的贡献越大, ROAV≥1 的成分通常被认为是关键香气物质, 而 ROAV 在 0.1~1 范围的挥发性风味化合物可能通过潜在协同作用影响样品的整体香气, 即对香气仅具有一定的修饰作用[71]。

在不同品种辣椒浆中, 选定相对含量较高且感官阈值较低的 3-甲硫基丙醛为关键性风味化合物, 设定其 $ROAV_{stan}$ 为 100, ROAV 分析结果如表 4 所示, H1、7#、LZ-1-R01 和红龙 23 四组辣椒浆样品中分别筛选出 5、5、5 和 6 种关键挥发性风味化合物, 其中共有的关键香气成分 5 种, 包括 3-甲硫基丙醛、3-戊烯-2-酮、1-丙硫醇、1-己醛、3-甲基丁醛, 它们共同构建了辣椒浆水果香、青蔬香及油脂香的基础风味轮廓。此外, 在红龙 23 辣椒浆中, 丁醛也作

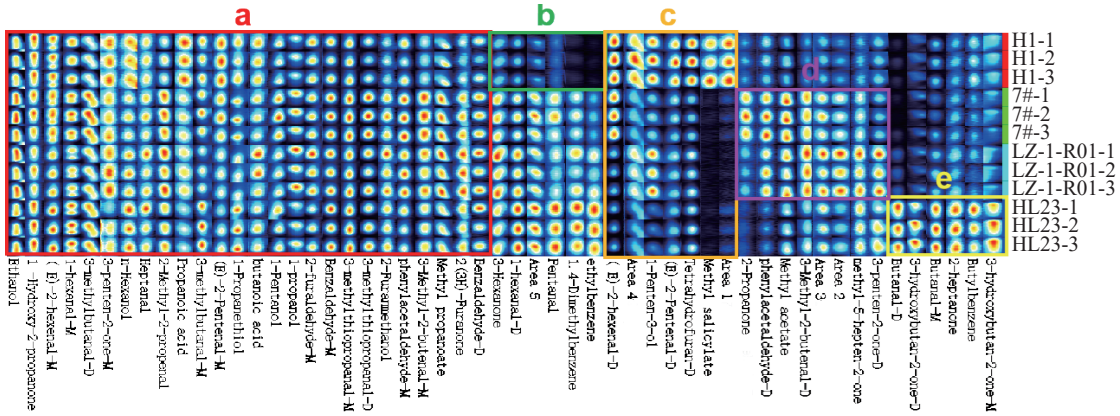


图 10　四种辣椒浆挥发性风味物质的 GC-IMS 指纹图谱

Fig.10　GC-IMS fingerprint of volatile flavor compounds in four kinds of chili pulp

表 4　四种辣椒特征性风味成分 ROAV

Table 4　ROAV of characteristic flavor components of four kinds of chili pulp

物质名称	阈值(μg/kg)[74]	ROAV			
		H1	7#	LZ-1-R01	红龙23
3-甲硫基丙醛	0.2	100	100	100	100
3-戊烯-2-酮	1.5	5.11	3.80	6.15	5.03
1-丙硫醇	3.1	2.20	1.81	1.60	2.15
1-己醛	4.5	3.88	4.02	4.79	5.43
丁醛	11	0.54	0.31	0.64	1.62
戊醛	12	0.20	0.25	0.24	0.32
3-甲基丁醛	13	2.04	1.98	1.86	2.10
2-糠醛	20	0.31	0.23	0.28	0.23
2-甲基-2-丙烯醛	25	0.50	0.52	0.60	0.52
水杨酸甲酯	40	0.10	0.02	0.01	0.01
苯甲醛	60	0.15	0.13	0.15	0.15

为关键香气物质，贡献了果香和绿叶气味。同时，研究还筛选出对辣椒浆香气具有修饰作用的挥发性风味化合物（0.1<ROAV<1）共 6 种，包括 5 种醛类和 1 种酯类。其中，3-甲硫基丙醛、3-甲基丁醛、丁醛等醛类可以通过激活口腔中的钙感知受体 CaSR，作为其正向变构调节剂，增强咸味和鲜味的感知强度[72]；同时，具有不同香气特征的化合物之间存在协同作用，这种复杂的相互作用使辣椒浆香气更加复杂和立体，而非单一维度的刺激[73]。

2.4.3　关键挥发性风味化合物聚类分析　由样品的聚类分析结果（图 11）可知，4 种辣椒浆样品在欧氏距离聚类下可分为两大支系：红龙 23 单独聚为一支，其对应热图红色系区域较多，丁醛、1-己醛的相对含量高于其他样品，结合风味属性，这些组分赋予红龙 23 以强烈的刺激性青草香、清新果香为主的醛酮类风味轮廓；H1、7#、LZ-1-R01 共同聚为另一支，热图显示其高含量化合物集中于 3-甲基丁醛、3-甲硫基丙醛等组分，整体呈现柔和的脂肪香-果香复合轮廓，刺激性香气弱于红龙 23，其中，7#和 LZ-1-R01 辣椒浆中的挥发性风味化合物更为相似，这可能与品种间的亲缘性有关[73−75]。从化合物聚类结果来看，所有关

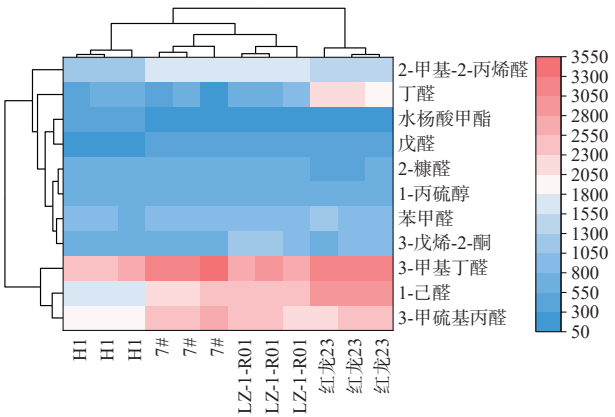


图 11　关键挥发性风味化合物聚类分析图

Fig.11　Cluster analysis diagram of key volatile compounds

键挥发性化合物可进一步分为 2 个核心簇，其中簇 1（包含 2-甲基-2-丙烯醛、丁醛等）为 4 种辣椒浆中含量较低且品种间差异较小的挥发性化合物，簇 2（3-甲基丁醛、1-己醛、3-甲硫基丙醛）则是辣椒浆中含量较高的核心风味贡献物质，其中 1-己醛在 H1 中的含量显著低于其他品种。鲜椒品种等因素可影响辣椒浆挥发性风味化合物的形成，这与 Li 等[76] 针对不同品种辣椒制备辣椒油的研究结果一致。例如，朝天椒辣椒油中，己醛、辛醛等脂肪族醛类化合物的相对含量较甜椒品种高 40% 以上，这类醛类物质是赋予辣椒油青草香、果香特征的核心组分；而灯笼椒品种辣椒油中，乙酸乙酯、苯甲酸甲酯等酯类物质的占比显著高于辛辣型品种，使其呈现更柔和的甜香气息；同时，该研究还指出，辣椒品种的风味物质差异与其自身的辣椒素合成能力、脂肪酸代谢水平等生理特性直接相关。

综上所述，不同品种辣椒浆香气成分存在一定的相似性和差异性，这与生长条件、成熟度和遗传背景等因素有关，造成它们风味的普遍性与独特性。7#及 LZ-1-R01 辣椒浆中含有较多提供果香味的挥发性风味化合物；H1 辣椒浆具有独特的冬青及薄荷味；红龙 23 辣椒浆中油脂风味化合物含量较高；后续生产可根据其风味不同，选择适宜不同应用场景的辣椒加工品种。

3　结论

本研究运用多维品质指标检测与化学计量学方法，系统证实了四种内蒙古角椒均具制浆潜力，但受遗传背景影响，其在物理质地、营养活性及风味轮廓上呈现出品种特异性分化。研究发现，H1 凭借较小的浆体粒径及低黏度展现出最优的流变特性，适宜开发佐餐酱料等高顺滑度产品；7#与 LZ-1-R01 则分别呈现出“高辣高色”与富含类胡萝卜素的特征，可应用于辣椒酱或预制菜等产品的复配调色；红龙 23 表现出较为均衡的品质特性。通过 GC-IMS 技术构建的风味指纹图谱进一步解析了以 3-甲硫基丙醛为核心的风味物质差异分布。研究建立了基于“质地-营养-风味”多维视角的原料筛选策略，为企业辣椒制浆加工基料选择和辣椒浆深度开发利用提供了理论参考依据。未来研究中，深入挖掘辣椒品种资源中的特征功效组分，建立辣椒制浆加工适宜性数据库，探寻不同预处理方式对辣椒浆的稳态化影响，将为辣椒资源的精准化分级利用与高附加值产品的定制化开发提供坚实的科学依据。

© The Author(s) 2026. This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/).

参考文献

[1] 贺殊敏，高旭，温馨，等. 内蒙古巴彦淖尔地区不同栽培密度辣椒的生长表现[J]. 农技服务，2025，42(1)：51−54. [HE

Shumin, GAO Xu, WEN Xin, et al. Growth performance of pepper with different planting densities in Bayannaoer area of Inner Mongolia[J]. Agricultural Technology Service, 2025, 42(1): 51−54.]
[2] 邹学校, 杨莎, 戴雄泽, 等. 中国辣椒产业快速发展 40 年回顾与展望[J]. 园艺学报, 2025, 52(1): 247−258. [ZOU Xuexiao, YANG Sha, DAI Xiongze, et al. The rapid development of China's chili pepper industry over the past 40 years[J]. Acta Horticulturae Sinica, 2025, 52(1): 247−258.]
[3] 内蒙古自治区农牧厅. 关于对政协内蒙古自治区第十三届委员会第三次会议第 0151 号提案的答复[EB/OL]. (2025-09-15)[2026-01-13]. https://nmt.nmg.gov.cn/gk/zfxxgk/fdzdgknr/rdjy/202511/t20251104_2812795.html. [Department of Agriculture and Animal Husbandry of Inner Mongolia Autonomous Region. Reply to Proposal No. 0151 from the 3rd Session of the 13th Inner Mongolia Regional Committee of the Chinese People's Political Consultative Conference[EB/OL]. (2025-09-15)[2026-01-13]. https://nmt.nmg.gov.cn/gk/zfxxgk/fdzdgknr/rdjy/202511/t20251104_2812795.html.]
[4] 赵希荣. 蔬菜凝胶软糖的研制[J]. 食品工业, 2001, 22(2): 33−35. [ZHAO Xirong. Development of vegetable-based gelatin candies[J]. The Food Industry, 2001, 22(2): 33−35.]
[5] 石婷, 陈雪梅, 张以恒. 基于体外合成生物学的健康糖生物制造新技术与产业化进展[J/OL]. 合成生物学, 1−17[2026-10-07]. DOI: 10.12211/2096-8280.2025-054. [SHI T, CHEN X M, ZHANG Y H. New technologies and industrialization progress in healthy sugar biomanufacturing based on *in vitro* synthetic biology[J/OL]. Synthetic Biology Journal, 1−17[2026-10-07]. DOI: 10.12211/2096-8280.2025-054.]
[6] 张孟恩, 王典, 李颖丽, 等. 酱油渣的生物学功能及在反刍动物生产中的应用[J]. 中国畜牧杂志, 2025, 61(10): 41−46. [ZHANG Meng'en, WANG Dian, LI Yingli, et al. Biological function of soy sauce residue and its application in livestock and poultry production[J]. Chinese Journal of Animal Science, 2025, 61(10): 41−46.]
[7] KAUR R, KAUR K. Preservation of sweet pepper purees: Effect on chemical, bioactive and microbial quality[J]. Journal of Food Science and Technology, 2021, 58(9): 3655−3660.
[8] SAARNIIT K, LANG H N, KULDJÄRV R, et al. The stability of phenolic compounds in fruit, berry, and vegetable purees based on accelerated shelf-life testing methodology[J]. Foods, 2023, 12(9): 1777.
[9] 李小晗. 酶处理南瓜浆对面包和蛋糕品质的影响[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2023. [LI Xiaohan. Effect of enzymatic treatment of pumpkin pulp on the quality of bread and cake[D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2023.]
[10] 徐勤伟. 贝塔菜汁乳酸菌发酵过程研究[D]. 无锡: 江南大学, 2024. [XU Q W. Study on lactic acid bacteria fermentation of Beita juice[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2024.]
[11] 徐君飞, 耿倩. 南瓜-胡萝卜-西红柿复合澄清蔬菜汁饮料的研制[J]. 食品研究与开发, 2015, 36(22): 56−60. [XU Junfei, GENG Qian. Development of compound clarifying vegetable drinks made from pumpkin, carrot and tomato[J]. Food Research and Development, 2015, 36(22): 56−60.]
[12] HASSAN M F Y, BARAKAT H. Effect of carrot and pumpkin pulps adding on chemical, rheological, nutritional and organoleptic properties of ice cream[J]. Food and Nutrition Sciences, 2018, 9(8): 969−982.
[13] KRZYKOWSKI A, RUDY S, POLAK R, et al. Drying of red chili pepper (*Capsicum annuum* L.): Process kinetics, color changes, carotenoid content and phenolic profile[J]. Molecules, 2024, 29(21): 5164.
[14] del CIELO VALDEZ-CÁRDENAS M, MARTÍNEZ-RODRÍGUEZ B A, QUINTERO-RAMOS A, et al. Effect of intensive smoking combined with drying process for chipotle pepper production: Physicochemical properties, volatile compounds profile and anthraquinone level[J]. Food Chemistry Advances, 2025, 9: 101179.
[15] LUČIĆ M, POTKONJAK N, SREDOVIĆ I I, et al. Influence of ultrasonic and chemical pretreatments on quality attributes of dried pepper (*Capsicum annuum*)[J]. Foods, 2023, 12(13): 2468.
[16] DENG Weiqin, LU Zhenming, WANG Zeliang, et al. Comprehensive analysis of microbial communities, metabolites, and biogenic amines in bagged fermented chili paste at varying salt levels[J]. Food Bioscience, 2025, 73: 107750.
[17] LI Meilun, LAO Fei, PAN Xin, et al. Insights into the mechanisms driving microbial community succession during pepper fermentation: Roles of microbial interactions and endogenous environmental changes[J]. Food Research International, 2024, 179: 114033.
[18] LIAO Hui, LUO Yi, HUANG Xinlei, et al. Dynamics of quality attributes, flavor compounds, and microbial communities during multi-driven-levels chili fermentation: Interactions between the metabolome and microbiome[J]. Food Chemistry, 2023, 405: 134936.
[19] LIU Miao, DENG Na, HOU Xiaoyi, et al. Characterisation of flavour profiles and microbial communities of fermented peppers with different fermentation years by combining flavouromics and metagenomics[J]. Food Chemistry, 2024, 443: 138550.
[20] 王勋, 顾玉梅, 米生喜, 等. 胶磨破碎和冷冻破碎对芒果浆品质的影响[J]. 现代食品科技, 2024, 40(5): 171−180. [WANG Xun, GU Yumei, MI Shengxi, et al. Effects of colloid milling and freeze milling on the quality of mango pulp[J]. Modern Food Science & Technology, 2024, 40(5): 171−180.]
[21] 李筱, 刘牧雯, 钟蓉莲, 等. 融合魏斯氏菌发酵制备凝固型大豆酸奶及其稳定性分析[J]. 食品与发酵工业, 2025, 51(15): 118−124. [LI Xiao, LIU Muwen, ZHONG Ronglian, et al. Preparation and stability analysis of set-style soybean yogurt fermented by *Weissella confusa* strain[J]. Food and Fermentation Industries, 2025, 51(15): 118−124.]
[22] 胡隆孝, 刘琳, 谭葆瑶, 等. 催熟过程中芒果浆营养成分及流变学性质变化[J]. 现代食品科技, 2024, 40(1): 233−239. [HU Longxiao, LIU Lin, TAN Baoyao, et al. Changes in the nutritional content and rheological properties of mango pulp during accelerated ripening[J]. Modern Food Science and Technology, 2024, 40(1): 233−239.]
[23] 韩蓉, 马燕, 敖羽, 等. 基于多元分析法综合评价新疆不同品种大果沙棘汁品质特性及加工适宜性[J]. 食品工业科技, 2025, 46(3): 322−332. [HAN Rong, MA Yan, AO Yu, et al. Comprehensive evaluation of quality characteristics and processing suitability of different varieties of large-fruited sea buckthorn juice from Xinjiang using multivariate analysis method[J]. Science and Technology of Food Industry, 2025, 46(3): 322−332.]
[24] MIAO Xiaoqing, ZHANG Rui, JIANG Shan, et al. Volatile flavor profiles of douchis from different origins and varieties based on GC-IMS and GC-O-QTOF/MS analysis[J]. Food Chemistry, 2024, 460: 140717.
[25] 虎鑫, 连敏, 刘世伟, 等. 超声-冻融对紫甘蓝脆片干燥特性的影响[J]. 食品科学, 2025, 46(20): 286−296. [HU Xin, LIAN Min, LIU Shiwei, et al. Effect of ultrasonic-freeze-thaw pretreatment on the drying characteristics of purple cabbage crisps[J]. Food

Science, 2025, 46(20): 286−296.]
[26] ARIMBOOR R, NATARAJAN R B, MENON K R, et al. Red pepper (*Capsicum annuum*) carotenoids as a source of natural food colors: Analysis and stability-a review[J]. Journal of Food Science and Technology, 2015, 52(3): 1258−1271.
[27] LÜ Junheng, ZHANG Ruihao, MO Yunrong, et al. Integrative metabolome and transcriptome analyses provide insights into carotenoid variation in different-colored peppers[J]. International Journal of Molecular Sciences, 2023, 24(23): 16563.
[28] PRAVALLIKA K, CHAKRABORTY S. Effect of pulsed light on enzyme inactivation, colour, firmness, surface morphology, and bioactive compounds in fresh and dried whole red chilies (*Capsicum annuum* var. Longum)[J]. Food and Bioproducts Processing, 2024, 148: 377−391.
[29] 谢林君, 何洁, 韦璐, 等. 原料低温浸渍处理对火龙果酒品质的影响研究[J]. 酿酒科技, 2025(5): 34−38. [XIE Linjun, HE Jie, WEI Lu, et al. Effect of low-temperature steeping of pitaya pulp on the quality of pitaya wine[J]. Liquor-Making Science & Technology, 2025(5): 34−38.]
[30] TEPIC A, SUMIC Z, VUKAN M. Influence of particle diameter on the colour of ground pepper (*Capsicum annuum* L.)[J]. Acta Periodica Technologica, 2010(41): 87−93.
[31] YANG Y C, BUREAU S, WANG X C, et al. Use of optical absorption and scattering properties to monitor the change of chemical characteristics, particle structure and viscoelasticity during apple puree processing[J]. Food Chemistry, 2024, 461: 140935.
[32] 陶兴林, 朱惠霞, 张玉鑫, 等. 基于主成分和聚类分析的加工辣椒品质特性及相关性分析[J]. 食品研究与开发, 2024, 45(14): 148−156. [TAO Xinglin, ZHU Huixia, ZHANG Yuxin, et al. Quality characteristics and correlation analysis of processed peppers based on principal component analysis and cluster analysis[J]. Food Research and Development, 2024, 45(14): 148−156.]
[33] 叶文斌, 孔红强, 张明国, 等. 瓜尔胶与中草药纹党可食用复合膜对大樱桃常温贮藏的效果[J]. 西北农业学报, 2015, 24(10): 101−108. [YE Wenbin, KONG Hongqiang, ZHANG Mingguo, et al. Effects of edible film compound coating of *Cyamopsis tetragonoloba* gum and treatment of Chinese herbal medicine codonopisis on storage quality of *Prunus pseudocerasus*[J]. Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica, 2015, 24(10): 101−108.]
[34] 杨志刚, 胡栓红, 王勇, 等. 辣椒种质色价及主要果实性状指标的聚类分析[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2015, 43(5): 149−155. [YANG Zhigang, HU Shuanhong, WANG Yong, et al. Cluster analysis of color value units and main fruit characters of red chili breeding resources[J]. Journal of Northwest A & F University (Natural Science Edition), 2015, 43(5): 149−155.]
[35] 尹成刚, 刘建萍, 易晓华, 等. 色素辣椒品种资源色价评估及育种潜力分析[J]. 中国农学通报, 2009, 25(23): 303−307. [YIN Chenggang, LIU Jianping, YI Xiaohua, et al. The evaluation of color value unite and analysis of breeding potential of paprika red chilli breeding resources[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2009, 25(23): 303−307.]
[36] 赵海云. 丘北小椒在文山两种不同生长环境下的品质规律性研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2015. [ZHAO Haiyun. Quality regularity study of Qiubei hot pepper in two different growth environment in Wenshan[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2015.]
[37] ZHANG Huan, CHI Yutong, XIN Yichen, et al. Rhizosphere microbiota mediated by sulfur fertilizer regulates flavor quality in peppers (*Capsicum annuum* L.)[J]. Protoplasma, 2026, 263(1): 119−133.
[38] OH S H, HWANG I G, KIM H Y, et al. Quality characteristics by particle size of red pepper powders for pepper paste and kimchi[J]. Journal of the Korean Society of Food Science and Nutrition, 2011, 40: 725−730.
[39] WOLDEMARIAM H W, ADMASSU E S, GETACHEW T P, et al. Physicochemical, functional, oxidative stability and rheological properties of red pepper (*Capsicum annuum* L.) powder and paste[J]. International Journal of Food Properties, 2021, 24(1): 1416−1437.
[40] JAFARI S M, ASSADPOOR E, HE Y H, et al. Re-coalescence of emulsion droplets during high-energy emulsification[J]. Food Hydrocolloids, 2008, 22(7): 1191−1202.
[41] WANG Q, SOLTANAHMADI S, CHEN J S, et al. Lubrication and delubrication behaviour of micron-sized whey protein microgels[J]. Food Hydrocolloids, 2026, 172: 111908.
[42] 颜宇鸽, 段桂媛, 唐鑫静, 等. 不同品种辣椒制作的辣椒酱品质对比分析[J]. 食品与发酵工业, 2023, 49(11): 225−232. [YAN Yuge, DUAN Guiyuan, TANG Xinjing, et al. Comparative analysis of the quality of chili sauce made from different varieties of peppers[J]. Food and Fermentation Industries, 2023, 49(11): 225−232.]
[43] ZHANG Qian, ZHANG Xuening, FAN Yan, et al. Rheological properties of the swim bladder colloid from Atlantic cod (*Gadus morhua*) and its digestive characteristics[J]. Food Hydrocolloids, 2024, 156: 110347.
[44] 陈大钧, 赵莹, 于小荣, 等. 新型弱凝胶的交联及其性能研究[J]. 应用化工, 2014, 43(7): 1168−1170. [CHEN Dajun, ZHAO Ying, YU Xiaorong, et al. Crosslink and properties of a new weak gel[J]. Applied Chemical Industry, 2014, 43(7): 1168−1170.]
[45] TANGLERTPAIBUL T, RAO M A. Rheological properties of tomato concentrates as affected by particle size and methods of concentration[J]. Journal of Food Science, 1987, 52(1): 141−145.
[46] MOELANTS K R N, CARDINAELS R, JOLIE R P, et al. Relation between particle properties and rheological characteristics of carrot-derived suspensions[J]. Food and Bioprocess Technology, 2013, 6(5): 1127−1143.
[47] RAO M A. Rheology of fluid, semisolid, and solid foods: Principles and applications[M]. NY: Springer US, 2014.
[48] KELANNE N, YANG B R, LAAKSONEN O. Potential of cyclodextrins in food processing for improving sensory properties of food[J]. Food Innovation and Advances, 2024, 3(1): 1−10.
[49] NATHOO S, YADAV R K, LATA S, et al. Nutri-biochemical traits' analysis in biotic stress condition in okra (*Abelmoschus esculentus* L.)[J]. Journal of Plant Biochemistry and Biotechnology, 2026, 35(2): 599−622.
[50] GONZÁLEZ-GORDO S, CAÑAS A, MUÑOZ-VARGAS M A, et al. Lipoxygenase (LOX) in sweet and hot pepper (*Capsicum annuum* L.) fruits during ripening and under an enriched nitric oxide (NO) gas atmosphere[J]. International Journal of Molecular Sciences, 2022, 23(23): 15211.
[51] KOVÁCS Z, BEDŐ J, PÁPAI B, et al. Ripening-induced changes in the nutraceutical compounds of differently coloured pepper (*Capsicum annuum* L.) breeding lines[J]. Antioxidants, 2022, 11(4): 637.
[52] VILLA-RIVERA M G, OCHOA-ALEJO N. Chili pepper carotenoids: Nutraceutical properties and mechanisms of action[J]. Molecules, 2020, 25(23): 5573.
[53] UARROTA V G, MARASCHIN M, de FÁTIMA M, et al.

Factors affecting the capsaicinoid profile of hot peppers and biological activity of their non-pungent analogs (Capsinoids) present in sweet peppers[J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2021, 61(4): 649−665.

[54] STEWART C J, KANG B C, LIU K D, et al. The *Pun1* gene for pungency in pepper encodes a putative acyltransferase[J]. The Plant Journal, 2005, 42(5): 675−688.

[55] OGAWA K, MUROTA K, SHIMURA H, et al. Evidence of capsaicin synthase activity of the Pun1-encoded protein and its role as a determinant of capsaicinoid accumulation in pepper[J]. BMC Plant Biology, 2015, 15(1): 93.

[56] ARCE-RODRÍGUEZ M L, OCHOA-ALEJO N. Biochemistry and molecular biology of capsaicinoid biosynthesis: Recent advances and perspectives[J]. Plant Cell Reports, 2019, 38(9): 1017−1030.

[57] OU Chunyan, BI Xiaolin, LIU Yonghai, et al. Thermal degradation of capsaicin and dihydrocapsaicin: Mechanism and hazards of volatile products[J]. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, 2024, 182: 106714.

[58] BORUSIEWICZ R, MARTYNA A, ZADORA G. The impact of time and storage conditions on samples containing OC pepper sprays on the quantitative ratios of capsaicinoids[J]. Forensic Science International, 2024, 362: 112169.

[59] 宋晓妍, 姜典典, 葛勇韬, 等. 不同品种辣椒的品质特性分析及复水工艺的影响研究[J]. 中国调味品, 2025, 50(7): 78−83. [SONG Xiaoyan, JIANG Diandian, GE Yongtao, et al. Analysis of quality characteristics of different varieties of chili and study on effect of rehydration process[J]. China Condiment, 2025, 50(7): 78−83.]

[60] JALGAONKAR K, MAHAWAR M K, GIRIJAL S, et al. Post-harvest profile, processing and value addition of dried red chillies (*Capsicum* annum L.)[J]. Journal of Food Science and Technology, 2024, 61(2): 201−219.

[61] ZHANG Rui, CHEN Guangjing, YANG Bing, et al. Insights into the stability of carotenoids and capsaicinoids in water-based or oil-based chili systems at different processing treatments[J]. Food Chemistry, 2021, 342: 128308.

[62] ZHOU Mingzhu, HUANG Qi, HU Chuanfeng, et al. Characterization of the key odorants in fried channel catfish based on GC-IMS and GC-MS and investigation of the changes during processing[J]. International Journal of Gastronomy and Food Science, 2025, 41: 101209.

[63] ZHANG Wenwen, LI Songling, TANG Hua, et al. Investigation of the flavor profiles on chili rapeseed oil: A study on flavor generation by chili addition and frying oil temperature[J]. LWT, 2025, 228: 118064.

[64] WANG Siyuan, BAI Yibo, GAO Xing, et al. Exploring the changes in flavor compounds during the storage of clear oil hot pot seasoning[J]. International Journal of Gastronomy and Food Science, 2025, 41: 101234.

[65] YE Zi, SHANG Zhixun, LI Meiqi, et al. Effect of ripening and variety on the physiochemical quality and flavor of fermented Chinese chili pepper (Paojiao)[J]. Food Chemistry, 2022, 368: 130797.

[66] 葛艳争, 孙晓雪, 安永强, 等. 基于气相色谱—离子迁移谱、感官、电子鼻分析不同贮藏时间辣椒油风味成分[J]. 食品与机械, 2025, 41(2): 12−21. [GE Yanzheng, SUN Xiaoxue, AN Yongqiang, et al. Flavor components of chili oil with different storage durations based on gas chromatography-ion mobility spectrometry, sensory evaluation, and electronic nose analysis[J]. Food & Machinery, 2025, 41(2): 12−21.]

[67] LIU Yu, ZHU Di, ZHAO Liangyi, et al. Trans-2-hexenal maintains the quality of postharvest fresh common beans (*Phaseolus vulgaris* L.) by regulating reactive oxygen species metabolism, cell wall metabolism, and lignin biosynthesis[J]. Food Chemistry, 2025, 489: 145002.

[68] GARG N, SETHUPATHY A, TUWANI R, et al. FlavorDB flavor molecular dataset[DS/OL]. 2018[2026-07-14]. https://cosylab.iiitd.edu.in/flavordb.

[69] 王梦松, 魏超昆, 范敏, 等. GC-MS、DSA 结合化学计量学分析稀奶油发酵过程中挥发性风味物质变化[J]. 食品科学, 2023, 44(16): 267−273. [WANG Mengsong, WEI Chaokun, FAN Min, et al. Gas chromatography-mass spectrometry and descriptive sensory analysis combined with chemometrics to analyze the changes of volatile flavor substances during the fermentation of cream[J]. Food Science, 2023, 44(16): 267−273.]

[70] MU Zhonghui, ZHU Yuzhang, RAN Li, et al. Characterization of the sensory evaluation system for fermented chili pepper (*Capsicum annuum* L.) using GC-O-MS and sensory analysis techniques[J]. International Journal of Gastronomy and Food Science, 2025, 40: 101191.

[71] 刘登勇, 周光宏, 徐幸莲. 确定食品关键风味化合物的一种新方法: "ROAV" 法[J]. 食品科学, 2008, 29(7): 370−374. [LIU Dengyong, ZHOU Guanghong, XU Xinglian. ROAV method: A new method for determining key odor compounds of Rugao ham[J]. Food Science, 2008, 29(7): 370−374.]

[72] KITAJIMA S, MARUYAMA Y, KURODA M. Volatile short-chain aliphatic aldehydes act as taste modulators through the orally expressed calcium-sensing receptor CaSR[J]. Molecules, 2023, 28(12): 4585.

[73] MALDONADO-TORRES D A, JARA-ROMERO G J, ROSAS-CÁRDENAS F F, et al. Engineering concanavalin B to release bioactive peptides against metabolic syndrome[J]. Foods, 2021, 10(7): 1554.

[74] van GEMERT L J. Compilations of flavour threshold values in water and other media (Second enlarged and revised edition)[M]. Zeist: Oliemans Punter Partners, 2011.

[75] 许九红, 王修俊, 聂黔丽, 等. 遵义泡辣椒二次发酵过程中挥发性风味物质的变化[J]. 中国食品学报, 2024, 24(5): 415−427. [XU Jiuhong, WANG Xiujun, NIE Qianli, et al. The changes of volatile flavor compounds during secondary-fermentation of Zunyi pickled peppers[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2024, 24(5): 415−427.]

[76] LI Dingding, CHU Beibei, LI Bo, et al. The difference analysis of physicochemical indexes and volatile flavor compounds of chili oil prepared from different varieties of chili pepper[J]. Food Research International, 2024, 190: 114657.