

不同品种芥菜的理化性质和风味品质分析

江荟静^{1,2}, 陈浩睿¹, 徐玉娟¹, 余元善¹, 程丽娜¹, 彭健¹, 张晓艳^{3*}, 李璐^{1*}

(1. 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, 广东广州 510610) (2. 华南农业大学生命科学学院, 广东广州 510642)

(3. 梅州市农林科学院蔬菜研究所, 广东梅州 514021)

摘要: 芥菜是我国特色加工蔬菜, 不同品种在理化特性和风味物质等方面存在显著差异, 但针对不同品种芥菜的品质特征及加工适配性研究仍较为匮乏。为筛选适用于不同加工场景的芥菜品种, 明确各品种的品质优势与加工潜力, 本研究以 15 个品种芥菜为对象, 系统测定其 pH 值、还原糖、可溶性固形物 (Total Soluble Solids, TSS)、总酚、2,2'-联氮-二(3-乙基-苯并噻唑-6-磺酸)二铵盐 (2,2'-Azinobis(3-ethylbenzothiazoline-6-sulfonate), ABTS) 自由基清除率、有机酸、游离氨基酸及挥发性风味物质。结果发现, 揭美扁合大肉甜油芥总酚与抗氧化活性最高, 大合甜芥菜还原糖含量最高, 盈科宽叶厚肉高脚芥风味物质与异硫氰酸烯丙酯含量最高, 广联大芥菜为唯一检出谷氨酸的品种; 综合指标可分为发酵加工型、鲜食型、辛辣提取型、脱水干制型和混用型五类。本研究揭示了不同芥菜品种的品质差异与加工适配性, 建立了基于多维度指标的分类方法, 为加工型芥菜品种选育、原料定向选配及加工工艺优化奠定了理论基础, 有助于推动芥菜产业的科学利用与高质量发展。

关键词: 芥菜; 品种; 品质分析; 加工适配性

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2027.5.0357

Analysis of Physicochemical Properties and Flavor Qualities of Different Mustard Varieties

JIANG Huijing^{1,2}, CHEN Haorui¹, XU Yujuan¹, YU Yuanshan¹, CHENG Lina¹, PENG Jian¹, ZHANG Xiaoyan^{3*}, LI Lu^{1*}

(1. 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) (2. College of Life Sciences, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China) (3. Vegetable Research Institute, Meizhou Academy of Agriculture and Forestry Sciences, Meizhou 514021, China)

Abstract: Mustard is a characteristic processed vegetable in China. Significant differences exist in physicochemical characteristics, and flavor substances among different varieties. However, research on the quality characteristics and processing suitability of different mustard varieties remains relatively insufficient. To screen for Chinese mustard varieties suitable for different processing scenarios and to clarify the quality advantages and processing potential of each variety, this study systematically analysed 15 varieties of Chinese mustard, measuring their pH, reducing sugars, soluble solids, total phenols, 2,2'-azino-bis(3-ethylbenzothiazoline-6-sulfonate) (ABTS) radical scavenging activity, organic acids, free amino acids and volatile flavour compounds. Among these, Jiemei bianhe Darou Tianyou Mustard exhibited the highest total phenolic content and antioxidant activity; Dahe Sweet Mustard had the highest reducing sugar content; Yingke Broad-Leaf Thick-Fleshed Tall Mustard had the highest levels of flavour compounds and allyl isothiocyanate; and Guanglian Large Mustard was the only variety in which glutamic acid was detected; Based on comprehensive indicators, the varieties can be classified into five categories: fermentation and processing type, fresh consumption type, pungent extract type, dehydration and drying type, and mixed-use type. This study has revealed the quality differences and

收稿日期: 2026-03-09; 修回日期: 2026-05-10; 接受日期: 2026-05-12

基金项目: 广州市科技计划项目 (2025B03J0018); 广东省科学技术协会青年人才培育计划 (SKXRC2025475); 广东省农业科学院现代种业创新能力提升工程 (2026ZYTS0703)

作者简介: 江荟静 (2000-), 女, 硕士研究生, 研究方向: 微生物, E-mail: 2889505045@qq.com

通讯作者: 李璐 (1990-), 男, 博士, 副研究员, 研究方向: 微生物, E-mail: lilu045@163.com; 共同通讯作者: 张晓艳, 女, (1989-), 硕士, 高级农艺师, 研究方向: 蔬菜种质资源, E-mail: zh36xiaoyan@163.com

processing suitability of various mustard varieties, establishing a classification method based on multi-dimensional indicators. It lays a theoretical foundation for the breeding of processing-type mustard varieties, the targeted selection of raw materials, and the optimisation of processing techniques, thereby contributing to the scientific utilisation and high-quality development of the mustard industry.

Keywords: mustard; varieties; quality analysis; processing suitability

芥菜 (*Brassica juncea*) 是十字花科芸薹属一年生或二年生草本植物^[1], 是一种重要的蔬菜、调味品和油料作物^[2], 在农业生产、饮食文化及传统医药领域均占据重要地位。芥菜在我国具有悠久的栽培历史, 我国考古学者在“半坡遗址”发现了距今 6 000~7 000 年炭化芥菜种子^[3]。芥菜地理适应性广泛, 栽培范围横跨亚洲、欧洲、非洲、美洲和澳大利亚^[4], 而我国芥菜的种植主要集中于华南、西南等地区。芥菜含有多种营养物质和生物活性化合物, 如抗坏血酸、类胡萝卜素、酚类物质、硫代葡萄糖苷 (Glucosinolates, GSLs) 和矿物质^[5-7]。其中 GSLs 在黑芥子酶的催化下会生成异硫氰酸酯类 (Isothiocyanates, ITCs), 赋予芥菜独特的辛辣风味^[8-10]。已有研究证实, 芥菜具有多种药用功效, Mehmood 等^[11]明确芥菜叶片中的酚类物质能显著改善糖尿病模型动物的血糖代谢, 降低血清胰岛素水平; Palliyaguru 等^[12]发现芥菜的 ITCs 具有抗癌能力。然而, 芥菜的保质期短, 采收期集中, 除鲜食外, 常被加工成榨菜、大头菜、发酵芥菜等产品, 以延长其货架期。而品种差异对芥菜加工品质与产品风味具有较大的影响, 因此明确芥菜品种特性对其加工利用具有重要意义。

已有大量研究证实品种对蔬菜品质及其加工特性具有较大影响, 例如不同辣椒品种的辣度、可溶性固形物含量差异显著, 高辣度品种适配调味品加工, 高可溶性固形物品种适合干制及提取物制备, 而厚果肉品种更宜鲜切或制酱^[13]。芥菜经长期的自然和人工选择使芥菜形成了丰富的亚种和品种资源, 根据其食用部位不同, 可将芥菜分为叶芥、根芥、芽芥、茎芥和籽芥^[14], 不同类型及品种在形态特征与品质特性上呈现显著多样性。近年来, 国内外学者围绕着芥菜品种展开了一系列研究工作。莫传园等^[15]对 14 个叶用芥菜品种的含水量、维生素 C、总多酚等指标进行测定, 为优质叶用芥菜筛选提供了依据。夏枫等^[16]对比分析紫叶芥菜与绿叶芥菜的营养品质, 发现紫叶芥菜的可溶性蛋白、花青素含量显著更高, 明确了其开发潜力。课题组前期研究^[17]也发现不同芥菜品种对发酵泡菜品质存在显著影响, 明确竹冲芥菜为适宜发酵的优异品种。然而目前针对芥菜品种的研究多集中于单一类型芥菜 (如根芥、叶芥) 或单一加工场景, 针对不同芥菜品种理化和风味品质的系统性研究仍较为匮乏, 阻碍芥菜加工专用品种的明确。

因此, 本研究以 15 个芥菜品种作为研究对象, 对其理化 (pH 值、还原糖、可溶性固形物、有机酸、总酚) 和风味 (游离氨基酸、挥发性物质) 品质进行系统分析, 旨在明确不同品种的品质差异, 筛选优异加工种质资源, 为芥菜的品种改良和加工品种筛选提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料与试剂

芥菜采收于梅州市农林科学院种植基地 (2025 年 2 月 11 日), 采收的芥菜品种如图 1 所示: (1) 揭美扁合大肉甜油芥、(2) 港种改良扁哈芥、(3) 蔬优种业本地高脚大芥菜、(4) 大合甜芥菜、(5) 宽叶厚肉高脚芥本地大菜、(6) 客家甜竹芥、(7) 本地三月大菜花叶芥、(8) 梅菜三梗里、(9) 梅州三梗里、(10) 广联大芥菜、(11) 广联特选种客家芥菜、(12) 盈科宽叶厚肉高脚芥、(13) 盈科无渣甜芥菜、(14) 强坤港选甜客家芥、(15) 东绿厚肉大板芥; 草酸、酒石酸、柠檬酸、苹果酸均为色谱纯, 阿拉丁试剂 (上海) 有限公司; 其他试剂均为国产分析纯。





图 1 不同芥菜品种图

Fig.1 Images of different mustard varieties

1.2 主要仪器与设备

UV1800 紫外可见分光光度计, 日本岛津; LC20AT 高效液相色谱仪 (High Performance Liquid Chromatography, HPLC), 日本岛津; Infinite M200PRO 多功能酶标仪, 瑞士 TECAN 公司; 7890-5977B 气相质谱联用仪, 安捷伦科技有限公司; PB-10 pH 计, 德国 Sartorius 公司; Rp-101 阿贝折光计, 日本东京 ATAGO (爱拓) 公司; HITACHI-8900 自动氨基酸分析仪, 日立高科技公司。

1.3 试验方法

1.3.1 样品的处理

将取回的各芥菜品种分别去除杂质以及使用去离子水进行洗净, 沥干水分后, 使用破碎机将各个品种的芥菜充分破碎混匀, 确保样品各部位混合均匀。将各个品种分装至密封袋中, 做好标记后放置于 -20°C 冻库密封保存备用。

1.3.2 pH 值测定

pH 值使用 pH 计进行测定。

1.3.3 还原糖含量测定

采用 3,5-二硝基水杨酸法测定^[18]。具体操作如下: 首先制备质量浓度 $1\text{ mg}\cdot\text{mL}^{-1}$ 葡萄糖标准液, 绘制标准曲线。准确称取芥菜样品 2.0 g , 转移至 25 mL 具塞试管中, 加入蒸馏水定容至刻度, 于 80°C 恒温水浴浸提 30 min 以充分释放还原糖; 浸提结束后, 使用定量滤纸过滤, 滤液转移至 100 mL 容量瓶中, 用蒸馏水定容并摇匀, 即得样品还原糖提取液。取 2 mL 提取液与 1.5 mL DNS 试剂于 25 mL 试管中, 于沸水浴中加热 5 min , 取出后立即使用流动水进行冷却, 加入蒸馏水至刻度线, 在 540 nm 处测吸光值, 通过葡萄糖标准曲线计算还原糖含量。

1.3.4 TSS 测定

TSS 使用阿贝折光计在 20°C 的环境条件下测量。

1.3.5 ABTS 自由基清除能力测定

参考 Ozgen 等^[19]的方法稍作修改测定芥菜样品的 ABTS 自由基清除能力。配制浓度 7 mmol L^{-1} ABTS 储备液和浓度 2.45 mmol L^{-1} 过硫酸钾溶液。取 20 mL ABTS 储备液与 2.4 mL 过硫酸钾溶液充分混合, 置于室温下避光静置 12 h 。用无水乙醇稀释混合液, 于 734 nm 下用分光光度计测吸光度, 调整稀释比例使吸光度达到 0.70 ± 0.02 , 即为工作液。将 10 mg 样品与 $200\text{ }\mu\text{L}$ 工作液混匀后避光反应 6 min , 在 734 nm 波长下测定吸光值。同时设置样品

空白组、试剂空白组以及对照组。样品的 ABTS 自由基清除能力计算公式如下：

$$X = \frac{(A_1 - A_0) - (A_i - A_j)}{A_1 - A_0} \times 100\% \quad (1)$$

式中：

X ——ABTS 自由基清除能力，%；

A_1 ——对照组吸光度；

A_0 ——试剂空白组吸光度；

A_i ——样品组吸光度；

A_j ——样品空白组吸光度。

1.3.6 总酚含量的测定

芥菜样品总酚含量的测定参考王海丹等^[20]的方法，稍作修改。称取 1.0 g 样品，使用 80% (ϕ) 甲醇定容至 10 mL，超声 10 min 后，10 000 r min⁻¹ 离心 10 min，将 50 μ L 样品上清液、100 μ L 福林试剂和 100 μ L 7 wt.% 碳酸钠溶液混合，避光静置 1 h，于 760 nm 波长处测定吸光值，总酚含量以没食子酸当量计。

1.3.7 游离氨基酸含量的测定

芥菜样品游离氨基酸含量的测定参考李俊健等^[21]的方法，取 1.0 g 样品于 10 mL 离心管中，加入 2 mL 0.02 mol L⁻¹ 盐酸溶液后涡旋混合，提取游离氨基酸。取全部上清液加入 2 mL 石油醚进行脱脂，吸取 0.5 mL 下层溶液加入 1.5 mL 15 wt.% 5-磺基水杨酸溶液后混合，10 000 r min⁻¹ 离心 10 min，上清液经 0.22 μ m 滤膜处理后使用氨基酸分析仪进行分析。

1.3.8 有机酸含量的测定

参考 GB 5009.157-2016《食品安全国家标准食品中有机酸的测定》测定芥菜样品的有机酸含量，使用 HPLC 进行分析，色谱条件：色谱柱为 OSAKA SODA 的 CAPCELL PAK C18 色谱柱 (4.6 mm×250 mm, 5 μ m)；流动相为 0.1% (ϕ) 磷酸溶液和甲醇，体积比为 97.5:2.5；流量、柱温、检测波长和进样体积分别为 1.0 mL min⁻¹、30 $^{\circ}$ C、210 nm 和 20 μ L。

1.3.9 电子鼻测定

参考陈尊旭等^[22]的方法，分别称取不同芥菜品种 5.0 g，置于离心管中并用封口膜封住，60 $^{\circ}$ C 水浴 10 min。设置清洗时间和测定时间均为 120 s，采样间隔时间和气体流量分别为 10 s 和 400 mL min⁻¹。传感器敏感物质如表 1 所示。

表 1 电子鼻传感器响应特征

Table 1 Response characteristics of electronic nose sensors

编号	型号	响应特性
1	W1C	芳香族化合物
2	W5S	对氮氧化合物很灵敏
3	W3C	对芳香族化合物、氨类灵敏
4	W6S	烃类化合物
5	W5C	烷烃类和芳香族化合物
6	W1S	对甲烷敏感
7	W1W	含硫化物、吡嗪和萜烯类化合物
8	W2S	对醇类、醛酮类灵敏
9	W2W	对有机硫化物灵敏
10	W3S	对烯烃类化合物灵敏

1.3.10 挥发性风味物质的测定

挥发性风味物质采用气相色谱-质谱联用仪 (GC-MS) 进行测定。

样品前处理：每个芥菜品种称取 5.0 g 置于顶空瓶中，并加入 20 μ L 质量浓度 50 mg L⁻¹ 的癸酸乙酯作为内标，在 60 $^{\circ}$ C 的条件下平衡 10 min，萃取 40 min 后进行检测。

GC-MS 条件^[23]: 色谱柱、载气、气体流量、分流比和进样口温度分别为 HP-5MS (30 m×0.25 mm×0.25 μm)、氦气、1 mL min⁻¹、3:1 和 270 °C。升温程序: 初始温度 35 °C, 维持 2 min, 然后以 4 °C min⁻¹ 升至 220 °C, 保持 2 min。质谱条件: EI 离子源, 电子能量、离子源温度、接口温度和质量扫描范围分别为 70 eV、230 °C、280 °C 和 10~450 m/z。

定性: 将挥发性成分的质谱信息与 NIST 14.0 标准谱库进行相似度检索, 选取匹配度不低于 80% 的化合物, 结合 CAS 号确定挥发性风味组分;

定量: 采用内标法, 以癸酸乙酯为内标, 通过组分峰面积与内标峰面积的比值计算, 计算公式如下:

$$W = \frac{A_i}{A_s} \times \frac{m_s}{m} \quad (2)$$

式中:

W ——样品中待测组分的含量, μg·g⁻¹;

A_i ——待测组分的峰面积;

A_s ——内标物的峰面积;

m_s ——内标物的质量, μg;

m ——样品的质量, g。

1.3.11 数据分析

所有试验重复 3 次, 取平均值, 结果以平均值±标准差表示。使用 IBM SPSS Statistics 27 软件进行显著性分析, 采用单因素方差分析, $P<0.05$ 表示显著差异, $P<0.01$ 表示极显著差异。通过 Origin 2023 软件进行数据可视化, 绘制柱状图及相关性分析图。

2 结果分析

2.1 理化性质

2.1.1 不同品种芥菜的 pH 值

pH 值是影响芥菜的鲜食、加工与贮藏稳定性的关键指标, 并可间接作用于风味形成与营养保留^[24]。首先, 对 15 个不同梅州芥菜品种的 pH 值进行测定。15 个芥菜样品的 pH 值介于 6.4~7.03, 其中 10 号样品的 pH 值最高 (7.03), 其次为 8 号 (6.93)、7 号 (6.89) 和 11 号 (6.83) (图 2)。5 号样品的 pH 值最低, 为 6.04。本研究所用的这 15 个芥菜样品的 pH 值总体上呈现弱酸性至中性, 可为后续鲜食开发、加工利用及贮藏保鲜提供参考依据。

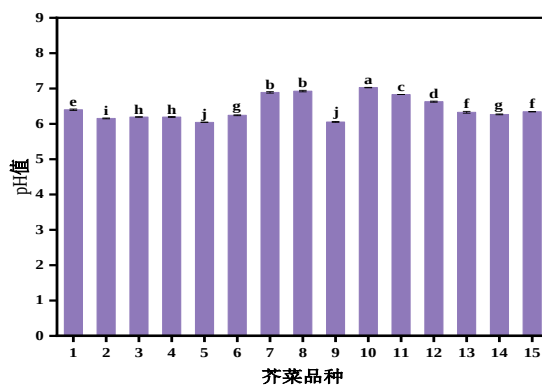


图 2 不同品种芥菜的 pH 值

Fig.2 pH values of different mustard varieties

注: 图中不同小写字母表示不同芥菜品种在 $P<0.05$ 水平差异显著, 下同 (图 2~6、9)。

2.1.2 不同品种芥菜的还原糖含量

芥菜发酵过程中, 其所含有的还原糖可为乳酸菌的生长提供充足的碳源^[19], 因此还原糖含量可作为芥菜发酵加工品种的重要筛选指标。还原糖是美拉德反应的底物^[25], 当样品中的还原糖含量低时, 在样品的干制过程中起发生的非酶促褐变会变弱, 减少因菜干颜色褐变导致的品质劣变。15 个芥菜样品的还原糖含量介于

1.65~3.98 mg g⁻¹。其中4号的还原糖含量最高(3.98 mg g⁻¹)，其次为11号(3.90 mg g⁻¹)、9号(3.27 mg g⁻¹)和2号(3.02 mg g⁻¹) (图3)，上述品种具备更高的发酵加工潜力，可为后续发酵制品筛选提供参考。13号的还原糖含量最低，为1.65 mg g⁻¹，仅为4号的41.46%，在干制加工中具有较低的褐变风险，有利于维持产品色泽稳定性。

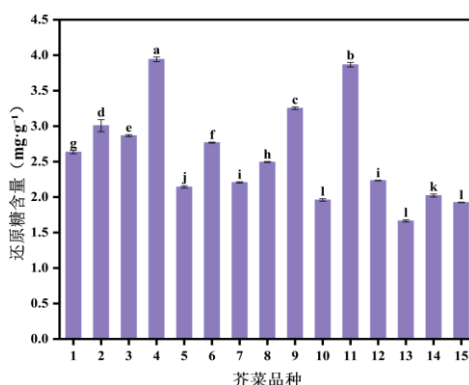


图3 不同品种芥菜的还原糖含量

Fig.3 Reducing sugar contents of different mustard varieties

2.1.3 不同品种芥菜的可溶性固形物含量

TSS 是糖类、有机酸、氨基酸等多种可溶于水的物质的统称^[26,27]，其含量高低直接关系到芥菜的营养价值和风味浓郁度。通常情况下，TSS 含量高的蔬菜样品，营养成分和风味物质更为丰富，口感浓郁醇厚^[13]。如图4所示，15个芥菜样品的TSS含量介于4.03~7.43 °Brix，其中10号的TSS含量最高(7.43 °Brix)，其次是8号(6.54 °Brix)、9号(6.18 °Brix)和7号(6.17 °Brix)，表明以上品种的风味物质(如糖、酸)富集程度高，口感更浓郁。6号、12号和13号的TSS含量则处于较低水平，远低于10号，说明这三个品种为低香型清淡口感，可满足部分消费者对清淡口感的需求。

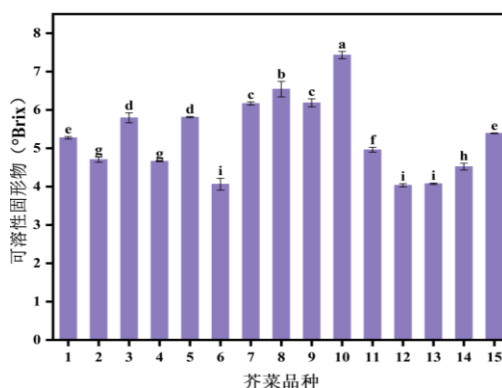


图4 不同品种芥菜的可溶性固形物含量

Fig.4 Soluble solids content of different mustard varieties

2.1.4 不同品种芥菜的有机酸组成及含量

有机酸具有独特的酸味，能够提升蔬菜的口感以及风味，还会影响其稳定性和货架期^[28]。本研究对15个芥菜样品的有机酸组成进行了分析，在15个样品中共检出4种有机酸，分别为草酸、苹果酸、柠檬酸和酒石酸。不同芥菜样品的有机酸组成存在显著差异。由图5可知，草酸是芥菜样品的优势有机酸，在15个样品中均能够检测到，其中在11个芥菜样品中草酸的含量远高于其他三种有机酸，14号的草酸含量最高，达21.54 mg g⁻¹。高草酸含量的品种通常适合腌渍加工，较高的草酸含量能够提升腌制品的防腐性和酸度稳定性，延长产品的保质期^[29]。苹果酸是芥菜样品中另一主要有机酸，在部分样品(6号、8号、10号、11号)中其含量高于草酸。此外，2号、3号、4号、7号和9号的苹果酸含量显著高于其他品种。虽然在15个芥菜样品中均检测到柠檬酸，但各个样品的柠檬酸含量均不高，只有2号(4.07 mg g⁻¹)、6号(4.15 mg g⁻¹)、1号(3.51 mg g⁻¹)、5号(3.56 mg g⁻¹)和13号(3.83 mg g⁻¹)的柠檬酸含量高于3.50 mg g⁻¹。与草酸、苹果酸和柠檬酸不同，酒石酸仅在8个芥菜样品(4号、5号、6号、8号、9号、11号、14号、15号)中检出，其中5号、6号、9号和15号的酒石酸含量超过5 mg g⁻¹，

其中 15 号的酒石酸含量最高 (8.36 mg g^{-1})。综合来看, 这 15 个芥菜样品的有机酸以草酸和苹果酸为主, 不同样品的有机酸组成各有特点, 可根据用途选择适宜的芥菜品种。

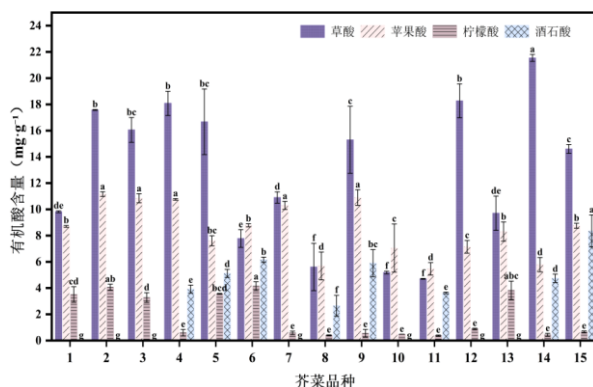


图 5 不同品种芥菜的有机酸含量

Fig.5 Organic acid contents of different mustard varieties

2.1.5 不同品种芥菜的总酚含量及 ABTS 自由基清除率

酚类物质是芥菜中一类重要的功能性成分, 其含量是衡量芥菜营养价值的核心指标^[30]。酚类化合物中存在的酚羟基 ($-\text{OH}$) 基团具有与蛋白质结合的性质, 并且具有抗癌、抗氧化剂的生理活性^[31]。ABTS 自由基清除率是评价蔬菜抗氧化活性的常用方法, 且酚类物质是芥菜抗氧化活性的主要物质基础^[32], 因此本研究同步分析了 15 个芥菜样品的总酚含量及其 ABTS 自由基清除能力。如图 6 所示, 15 个芥菜样品的总酚含量介于 $1.14 \sim 1.91 \text{ mg GAE g}^{-1}$, 品种间差异显著, 其中 1 号的总酚含量最高 ($1.91 \text{ mg GAE g}^{-1}$), 其次是 4 号 ($1.83 \text{ mg GAE g}^{-1}$) 和 12 号 ($1.80 \text{ mg GAE g}^{-1}$)。芥菜样品的 ABTS 自由基清除率介于 $35.4\% \pm 0.80\% \sim 55.82\% \pm 0.98\%$, 其中 7 号的 ABTS 自由基清除率最高 (55.82%), 其次是 1 号 (54.22%)。在 15 个芥菜样品中, 11 号和 14 号的总酚含量处于较低水平, 且其 ABTS 自由基清除率也较低。虽然个别芥菜样品的总酚含量和其 ABTS 自由基清除率并未呈绝对正相关的关系, 但大多数芥菜样品的总酚含量和其 ABTS 自由基清除率呈正相关 (图 10), 这与已有研究结果一致^[33]。

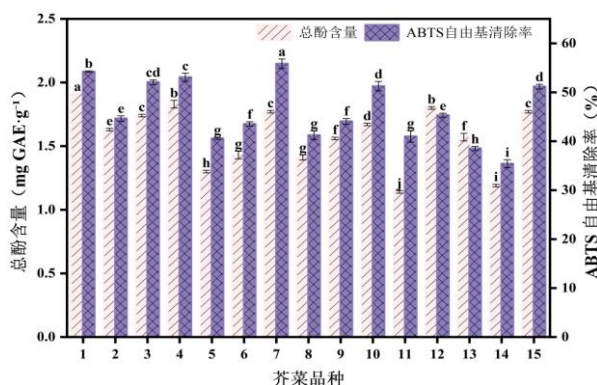


图 6 不同品种芥菜的总酚含量与 ABTS 自由基清除率

Fig.6 Total phenol content and ABTS free radical scavenging rate of different mustard varieties

2.2 风味品质

2.2.1 不同品种芥菜的氨基酸组成

游离氨基酸作为食品风味评价的核心指标之一, 其含量水平直接影响食品的风味特征与适口性^[34]。15 个芥菜样品的游离氨基酸分布如图 7 所示, 15 个样品中共检测出 14 种氨基酸, 分为 8 种必需氨基酸 (苏氨酸、缬氨酸、甲硫氨酸、异亮氨酸、亮氨酸、苯丙氨酸、赖氨酸、组氨酸) 和 6 种非必需氨基酸 (甘氨酸、丙氨酸、半胱氨酸、脯氨酸、丝氨酸、谷氨酸)。14 种氨基酸中包括了 5 种甜味氨基酸 (甘氨酸、丙氨酸、脯氨酸、丝氨酸、苏氨酸)、6 种苦味氨基酸 (缬氨酸、亮氨酸、异亮氨酸、苯丙氨酸、赖氨酸、甲硫氨酸) 和 1 种鲜味氨基酸 (谷氨酸)^[35]。根据 15 个芥菜样品的游离氨基酸分布和氨基酸特性, 可将芥菜样品分为四类风味类型: 强甜味主导型、中甜味主

导型、甜苦复合型和清淡清爽型。其中强甜味主导型芥菜包括 1 号、2 号、4 号、6 号，这类芥菜的甜味氨基酸含量远高于苦味氨基酸。中甜味主导型芥菜包括 3 号、5 号、7 号、9 号、12 号和 13 号，这个类型的芥菜中甜味氨基酸含量仍占主导，但是与强甜味主导型芥菜相比，中甜味主导型芥菜中的苦味氨基酸含量较高。甜苦复合型包括 8 号、11 号和 14 号，这类芥菜的苦味、甜味氨基酸含量占比相对均衡，使得风味层次更为丰富。清淡鲜爽型芥菜主要是 10 号和 15 号，其中 10 号是唯一一种检测出鲜味氨基酸（谷氨酸）的芥菜，并且其苦味氨基酸含量最低。而 15 号的苦味氨基酸和甜味氨基酸含量均偏低。虽然芥菜样品中检测到的游离氨基酸被分为了甜味氨基酸、苦味氨基酸、鲜味氨基酸，但芥菜样品的游离氨基酸组成并不能完全代表样品感官评价中的甜度与苦味强度。芥菜的甜味感知通常由可溶性糖、甜味氨基酸等物质共同决定，甜味氨基酸含量高低不能直接等同于甜味强弱；而苦味感知除受苦味氨基酸影响外，还与多种物质密切相关。

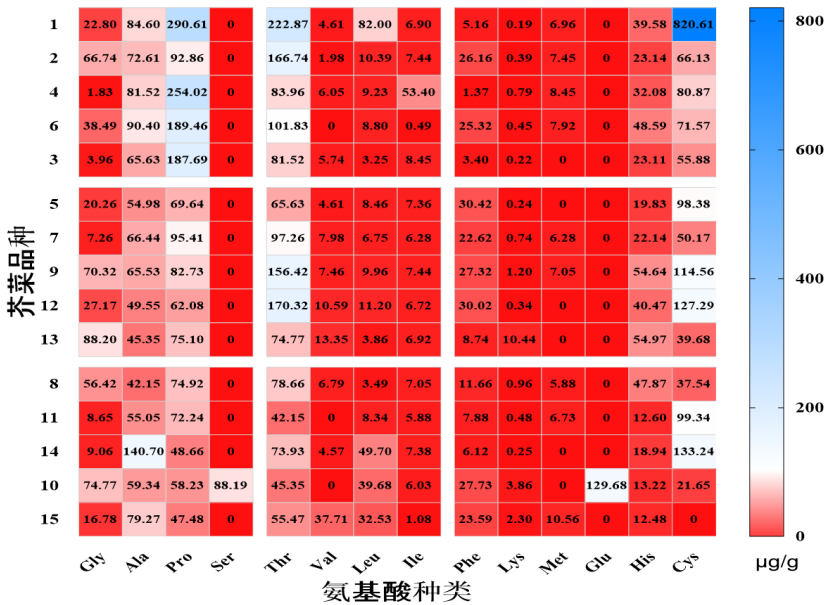


图 7 不同品种芥菜的游离氨基酸组成

Fig.7 Free amino acid composition of different mustard varieties

注：图中氨基酸简称对应全称：甘氨酸（Glycine, Gly）、丙氨酸（Alanine, Ala）、脯氨酸（Proline, Pro）、丝氨酸（Serine, Ser）、苏氨酸（Threonine, Thr）、缬氨酸（Valine, Val）、亮氨酸（Leucine, Leu）、异亮氨酸（Isoleucine, Ile）、苯丙氨酸（Phenylalanine, Phe）、赖氨酸（Lysine, Lys）、甲硫氨酸（Methionine, Met）、谷氨酸（Glutamic acid, Glu）、组氨酸（Histidine, His）、半胱氨酸（Cysteine, Cys）。

2.2.2 不同品种芥菜的挥发性风味物质组成

为了全面解析 15 个芥菜样品的挥发性风味物质组成，使用电子鼻和 GC-MS 分析芥菜样品的挥发性风味物质。电子鼻基于加热型传感器能够精确感知挥发性化合物的存在与浓度^[36]，从而确定样品中挥发性风味物质的分布。使用电子鼻采集 15 个芥菜样品的传感器数据，进而建立芥菜样品的挥发性风味物质信息雷达图。由图 8 可知，15 个芥菜样品对应的雷达图轮廓相似，说明不同芥菜样品的挥发性风味物质组成较为接近。传感器 W1C、W1S、W5C、W6S、W3C 响应较弱，且样品间无明显差异。而芥菜样品在 W1W、W2W 和 W5S 传感器表现出较高响应，尤其是 W1W 传感器，表明这 15 个芥菜样品中均含有大量的萜、硫化物（无机硫、有机硫）、芳香族化合物以及氮氧化合物。然而，不同芥菜样品的挥发性物质组成也存在差异。进一步对比雷达图响应强度可以发现，8 号、12 号、15 号等样品在 W1W 传感器上的响应值明显高于其他品种，说明 4 号、8 号、12 号、15 号的萜类、含硫化物化合物等可能远高于其他芥菜样品。

为了进一步明确不同芥菜样品挥发性化合物的组成，对 15 个芥菜样品的 GC-MS 数据进行分析。如表 S1 所示，从 15 个芥菜样品中共检测出 80 种挥发性风味物质，涵盖酯类（27 种）、烷烃类（16 种）、酸类（3 种）、酮类（5 种）、杂环类（3 种）、醛类（21 种）和醇类（5 种）。其中酯类物质在 15 个芥菜样品的挥发性风味物质中占比最高，表明酯类物质是芥菜样品的主要挥发性风味物质。酯类物质主要包括异硫氰酸烯丙酯、异硫氰酸-2-苯乙酯和异硫氰酸 3-丁烯-1-基酯等异硫氰酸酯类(图 9)，它们是芥菜的典型风味物质，也是芥菜辛辣风味的核心来源，

并且具有抗氧化、抗炎及抑菌活性^[37,38]。不同芥菜样品的这三个化合物的含量差异显著品种间含量差异显著,其中12号的异硫氰酸烯丙酯含量最高($21.60\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$),而1号最低($0.47\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$)。其次是醛类物质,以反-2-己烯醛为主,其含量在不同品种中也存在显著差异,1号的反-2-己烯醛含量仅为 $0.39\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$,而11号的反-2-己烯醛含量则高达 $4.03\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ 。反-2-己烯醛具有青苹果香和青草香,能增添清新的风味,从而中和芥菜的辛辣感^[39],使芥菜更适口。芥菜样品中的烷烯类、酮类、醇类等物质的含量较低,但对芥菜风味层次的丰富性具有不可替代的作用。柠檬烯(12号 $1.21\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$ 、15号 $0.95\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$)具有柑橘类清新香气^[40],可与异硫氰酸酯类的辛辣味进行中和。 β -紫罗兰酮(15号 $0.62\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$)具有玫瑰香气与果香味^[41],醇类中的苯乙醇(15号 $0.21\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$)带有花香^[42],这两种物质均能够提升芥菜的香气复杂度,使其风味更具层次感。芥菜样品的酸类与杂环类物质含量极低,主要是起调节芥菜风味的功能,避免了风味过于单一。从芥菜样品的挥发性物质总含量来看,15个芥菜样品的挥发性风味物质总含量存在显著差异性,其中12号的挥发性物质总含量最高($34.48\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$),而1号的挥发性物质总含量最低($1.42\text{ }\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$),差异达24倍。这种差异不仅体现在风味浓郁度上,还可以为加工品种的筛选提供参考,例如12号、8号等挥发性物质含量高的品种适合开发特色辛辣风味制品,而1号、2号等挥发性物质含量低的品种则更适配鲜食或清淡型加工场景。

值得注意的是,结合电子鼻与GC-MS结果发现,4号在传感器W1W上的响应值显著高于多数品种,但在GC-MS检测中其挥发性风味物质含量却并没有格外突出,这可能是因为电子鼻的W1W传感器对4号的某种挥发性物质更加敏感。

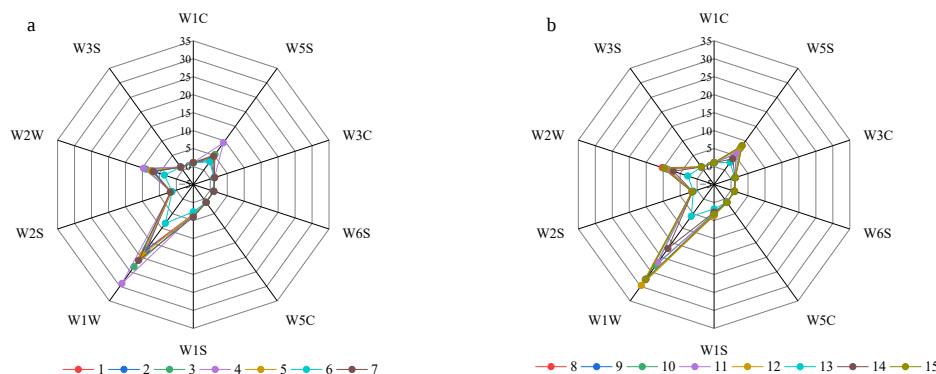


图8 不同品种芥菜的电子鼻传感器响应值雷达图

Fig.8 Radar diagram of the electronic nose sensor response values of different mustard varieties

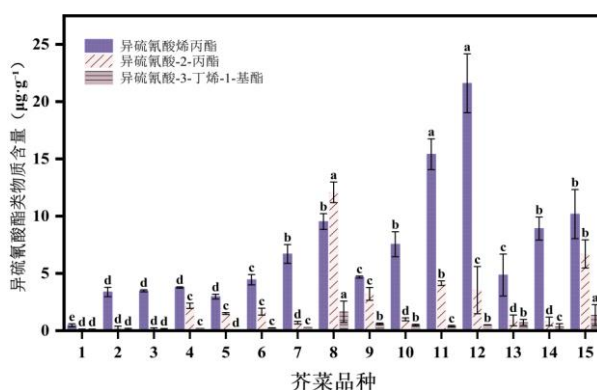


图9 不同品种芥菜的异硫氰酸酯类含量

Fig.9 Isothiocyanate contents of different mustard varieties

2.3 芥菜品质指标的相关性分析

对15个芥菜样品的各项品质及功能指标进行相关性分析,结果如图10所示。ABTS自由基清除率与总酚含量呈极显著正相关($P<0.01$),这说明酚类物质是芥菜抗氧化活性的主要物质基础,这与已有研究结论一致。在氨基酸组分中,Thr、Gly和Cys三者之间两两呈极显著正相关($P<0.01$),说明这几种氨基酸在芥菜不同品种中的含量变化趋势高度一致,其代谢调控可能存在内在关联。三种异硫氰酸酯类物质(异硫氰酸烯丙酯、异硫氰酸-2-

苯乙酯、异硫氰酸 3-丁烯-1-基酯)之间均呈极显著正相关 ($P<0.01$), 说明芥菜中异硫氰酸酯类化合物的生物合成具有协同性, 辛辣风味物质的形成可能受共同的代谢通路调控。pH 值与有机酸呈极显著负相关 ($P<0.01$), 表明有机酸积累是决定芥菜 pH 值的关键因素, 有机酸含量越高, 样品 pH 值越低。此外, pH 值与异硫氰酸烯丙酯呈显著正相关 ($P<0.05$), 提示酸碱度可能对辛辣风味物质的合成或稳定性产生影响。

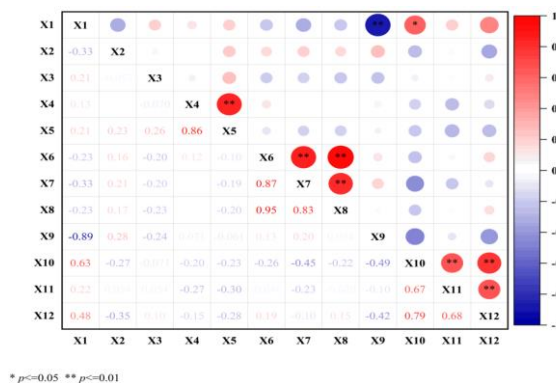


图 10 芥菜中各品质与功能指标的相关性热图

Fig.10 Correlation heatmap of quality and functional indicators in mustard

注: X1: pH 值; X2: 还原糖; X3: 可溶性固形物; X4: 总酚; X5: ABTS 自由基清除率; X6: Thr; X7: Gly; X8: Cys; X9: 有机酸; X10: 异硫氰酸烯丙酯; X11: 异硫氰酸-2-苯乙酯; X12: 异硫氰酸-3-丁烯-1-基酯。* $P<0.05$, ** $P<0.01$ 。红色代表正相关, 蓝色代表负相关, 颜色深浅代表强弱。

2.4 芥菜样品加工适宜性分类

综合 15 个芥菜样品的理化指标和风味特征, 结合不同加工方式对原料的要求将 15 个芥菜品种分为了 5 类。发酵加工型芥菜以还原糖含量高、有机酸适宜、甜味氨基酸丰富为核心标准; 鲜食型芥菜以有机酸含量低、异硫氰酸烯丙酯适中、适口性好为核心标准; 辛辣提取型芥菜以异硫氰酸酯类含量高、辛辣特征突出为核心标准; 脱水干制型芥菜以可溶性固形物高、还原糖低、有机酸低为核心标准; 混用型芥菜各指标无明显突出优势, 综合表现中等, 无专一加工指向, 可灵活搭配使用。

I类发酵加工型芥菜包括 1 号、2 号、3 号、4 号、6 号、9 号, 这类样品的核心特征为还原糖充足, 可以为发酵提供充足的碳源。其中 4 号 (3.98 mg g^{-1})、2 号 (3.02 mg g^{-1}) 和 9 号 (3.27 mg g^{-1}) 的还原糖含量较高。这些样品的氨基酸总量处于 $794\sim 106.79 \text{ } \mu\text{g g}^{-1}$ 之间, 可在发酵过程中通过代谢途径转化为醇、酯类等风味成分, 其中 1 号、2 号、4 号、6 号为强甜味主导型, 3 号、9 号为中甜味主导型。2 号、3 号、4 号、9 号有机酸含量较高, 在实际生产中可通过接种耐酸乳酸菌等方式进行发酵。这类芥菜适合制作酸菜、泡菜等发酵制品。

II类鲜食型芥菜包括 7 号、13 号, 这类样品以有机酸低、辛辣适中为核心特征。7 号和 13 号有机酸含量分别为 21.80 mg g^{-1} 和 21.85 mg g^{-1} , 均处于低水平, 确保口感清爽不酸; 异硫氰酸烯丙酯含量分别为 $6.70 \text{ } \mu\text{g g}^{-1}$ 和 $4.86 \text{ } \mu\text{g g}^{-1}$, 辛辣程度适中, 适合直接食用。两样品均属中甜味主导型, 甜味氨基酸占主导赋予清甜基础。7 号抗氧化能力优异, ABTS 自由基清除率达 55.82%, 总酚含量 $1.77 \text{ mg GAE g}^{-1}$; 13 号的 ABTS 自由基清除率为 38.51%, 总酚含量 $1.57 \text{ mg GAE g}^{-1}$ 。鲜食能够最大程度保留原料中的天然抗氧化物质, 避免高温长时间加工或发酵过程造成的酚类降解和抗氧化活性损失。两者可溶性固形物分别为 $6.17 \text{ }^\circ\text{Brix}$ 和 $4.07 \text{ }^\circ\text{Brix}$, 因此 7 号口感浓郁, 13 号则因可溶性固形物较低而呈现相对清淡的口感, 两者均适合凉拌、清炒等直接食用方式。

III类辛辣提取型芥菜包括 8 号、11 号、12 号、15 号, 这类样品以异硫氰酸酯类含量高为核心特征, 辛辣风味物质富集。12 号、11 号的异硫氰酸烯丙酯的含量分别为 $21.60 \text{ } \mu\text{g g}^{-1}$ 、 $15.41 \text{ } \mu\text{g g}^{-1}$, 处在所有样品的前列; 15 号异硫氰酸烯丙酯含量为 $10.18 \text{ } \mu\text{g g}^{-1}$, 同时异硫氰酸-2-苯乙酯含量较高 ($6.70 \text{ } \mu\text{g g}^{-1}$); 8 号异硫氰酸烯丙酯含量为 $9.53 \text{ } \mu\text{g g}^{-1}$, 但其异硫氰酸-2-苯乙酯含量高达 $12.08 \text{ } \mu\text{g g}^{-1}$ 。11 号的虽含有较高的还原糖含量 (3.90 mg g^{-1}), 但其异硫氰酸烯丙酯含量极高, 辛辣提取价值远高于发酵价值。这类样品适合提取芥末油、开发辛辣调味品等产品。

IV类干制型芥菜仅有 10 号, 10 号的可溶性固形物含量是所有样品中最高的, 达到 $7.43 \text{ }^\circ\text{Brix}$, 可溶性风味物质富集, 有利于脱水加工后风味物质的保留。该样品属清淡清爽型, 是唯一检出鲜味氨基酸 (谷氨酸) 的芥菜品

种, 苦味氨基酸含量最低, 有机酸含量极低 (12.73 mg g^{-1}), 异硫氰酸烯丙酯的含量为 $7.55 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$, 辛辣适中, 而且还具有还原糖含量低 (1.94 mg g^{-1}) 的特征, 这可以减弱干制过程中因美拉德反应产生的非酶促褐变, 有利于保持产品色泽。综合来看, 该样品适合制作梅干菜、脱水蔬菜等产品。

V类混用型芥菜包括 5 号、14 号, 这类样品各项指标各有高低, 但均未形成突出的单一加工优势, 适合作为混合原料与其他样品搭配使用。在实际生产中可根据需求灵活应用, 例如与高糖样品混合发酵以提升发酵效率, 或作为其他加工方向的辅助原料。

3 总结

本研究通过对 15 个不同品种芥菜的理化指标、功能性成分及风味特征进行系统分析, 揭示了品种间存在的显著差异。相关性分析进一步证实, 芥菜的总酚含量与其 ABTS 自由基清除率呈极显著正相关, 表明了酚类物质是芥菜抗氧化能力的主要来源; 异硫氰酸酯类化合物之间呈极显著正相关, 表明辛辣风味物质的形成存在协同代谢机制; pH 值与有机酸含量呈极显著负相关, 与异硫氰酸烯丙酯呈显著正相关, 表明风味物质的积累对 pH 值具有一定影响。基于各项指标的综合特征, 将 15 个芥菜品种划分为五种加工类型。揭美扁合大肉甜油芥、港种改良扁哈菜、蔬优种业本地高脚大芥菜、大合甜芥菜、客家甜竹芥、梅菜州三梗里等 6 个品种还原糖含量高、氨基酸总量高, 适宜制作酸菜、泡菜等发酵制品; 本地三月大菜花叶芥和盈科无渣甜芥菜有机酸低、辛辣适中, 适宜鲜食; 梅菜三梗里、广联特选种客家芥菜、盈科宽叶厚肉高脚芥、东绿厚肉大板芥等 4 个品种异硫氰酸酯类物质富集, 辛辣风味突出, 适合提取芥末油及开发辛辣调味品; 广联大芥菜可溶性固形物含量最高且为唯一检出谷氨酸的品种, 可以作为脱水干制的原料; 宽叶厚肉高脚芥本地大菜和强坤港选甜客家芥类样品各项指标各有高低, 但均未形成突出的单一加工优势, 所以需要根据场景进行调整, 灵活应用。本研究明确了不同芥菜品种的品质特性及其适宜加工方向, 可为芥菜加工产业的品种筛选、定向利用及产品开发提供理论依据和数据支撑。

参考文献

- [1] ZHAO D, TANG J, DING X. Analysis of volatile components during potherb mustard (*Brassica juncea* Coss.) pickle fermentation using SPME-GC-MS[J]. LWT-Food Science and Technology, 2007, 40(3): 439-447.
- [2] CHEN S, WAN Z, NELSON M N, et al. Evidence from genome-wide simple sequence repeat markers for a polyphyletic origin and secondary centers of genetic diversity of *Brassica juncea* in China and India [J]. Journal of Heredity, 2013, 104(3): 416-427.
- [3] 柳子明.中国栽培稻的起源及其发展[J].遗传学报,1975,2(1):24-30.
- [4] KANG L, QIAN L, ZHENG M, et al. Genomic insights into the origin, domestication and diversification of *Brassica juncea* [J]. Nature Genetics, 2021, 53(9): 1392-1402.
- [5] 郑奇林,邓放明,赵玲艳.不同预处理方式对发酵芥菜品质的影响[J].中国酿造,2025,44(3):156-164.
- [6] DI H, MA J, ZHANG Y, et al. Correlations between flavor and glucosinolates and changes in quality-related physiochemical characteristics of Guizhou suancai during the fermentation process [J]. Food Chemistry, 2023, 405: 134965.
- [7] ZHANG F, ZHANG J, DI H, et al. Effect of long-term frozen storage on health-promoting compounds and antioxidant capacity in baby mustard [J]. Frontiers in Nutrition, 2021, 8: 665482.
- [8] BELL L, OLOYEDE O, LIGNOU S, et al. Taste and flavor perceptions of glucosinolates, isothiocyanates, and related compounds [J]. Molecular Nutrition & Food Research, 2018, 62(18): 1700990.
- [9] WU J, CUI S, LIU J, et al. Recent advances of glucosinolates and their metabolites: Metabolism, physiological functions and potential application strategies [J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2023, 63(20): 4217-4234.
- [10] LIETZOW J. Biologically active compounds in mustard seeds: a toxicological perspective [J]. Foods, 2021, 10(9): 2089.
- [11] MEHMOOD A, ZEB A, ATEEQ M K. In vivo antidiabetic effects of phenolic compounds of spinach, mustard, and cabbage leaves in mice [J]. Heliyon, 2023, 9(6): e16616.
- [12] PALLIYAGURU D L, YUAN J M, KENSLER T W, et al. Isothiocyanates: translating the power of plants to people [J]. Molecular Nutrition & Food Research, 2018, 62(18): 1700965.
- [13] 褚泽军,彭思嘉,侯鹏颀,等.我国辣椒主产地特色鲜椒品质评价及加工适宜性分析[J].食品科学,2025,46(20):47-56.
- [14] YAO Q L, CHEN F B, FANG P, et al. Genetic diversity of Chinese vegetable mustard (*Brassica juncea* Coss.) landraces based on SSR

- data [J]. *Biochemical Systematics and Ecology*, 2012, 45: 41-48.
- [15] 莫传园,唐兵,付文苑,等.14 个叶用芥菜营养成分及抗氧化能力分析[J]. *安徽农业科学*, 2024, 52(21): 168-172.
- [16] 夏枫,莫旭,刘独臣.不同紫叶芥菜营养品质与色素含量分析[J]. *四川农业科技*, 2024, 8: 143-146.
- [17] 罗文珊,张艳,徐玉娟,等.不同芥菜品种对发酵泡菜品质的影响规律[J]. *现代食品科技*, 2022, 38(5): 43-55.
- [18] 曾志恒,曾辉,程翊,等.双孢蘑菇发酵液还原糖和总糖的含量测定[J]. *中国食用菌*, 2018, 37(6): 40-43.
- [19] OZGEN M, REESE R N, TULIO A Z, et al. Modified 2,2'-Azino-bis-3-ethylbenzothiazoline-6-sulfonic Acid (ABTS) Method to Measure Antioxidant Capacity of Selected Small Fruits and Comparison to Ferric Reducing Antioxidant Power (FRAP) and 2,2'-Diphenyl-1-picrylhydrazyl (DPPH) Methods [J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2006, 54(4): 1151-1157.
- [20] 王海丹,普红梅,杨庭,等.不同保鲜剂处理对鲜切结球生菜贮藏品质的影响[J]. *保鲜与加工*, 2024, 24(9): 30-38.
- [21] 李俊健,高杰贤,林锦铭,等.不同发酵方式对柚皮泡菜理化特性和风味的影响[J]. *食品与发酵工业*, 2021, 47(20): 212-218.
- [22] 陈尊旭,肖雯丽,梁浩斌,等.基于电子鼻和 GC-MS 分析不同干燥方式香蕉果干的风味品质差异及判别预测模型建立[J]. *现代食品科技*, 2025: 1-15.
- [23] 杜文文,段青,贾文杰,等.4 种秋海棠花香挥发性物质测定与特征香气成分分析[J]. *云南大学学报(自然科学版)*, 2022, 44(5): 1043-1053.
- [24] CUI H, CHEN F, YU J, et al. Accurate pH decrease induced inactivation of myrosinase and Polyphenol oxidase in salted radish for color improvement [J]. *Food Bioscience*, 2023, 53: 102703.
- [25] NOOSHKAM M, VARIDI M, BASHASH M. The Maillard reaction products as food-born antioxidant and antibrowning agents in model and real food systems [J]. *Food Chemistry*, 2019, 275: 644-660.
- [26] SHEN L, WANG H, LIU Y, et al. Prediction of soluble solids content in green plum by using a sparse autoencoder [J]. *Applied Sciences*, 2020, 10(11): 3769.
- [27] IWANAMI H, MORIYA-TANAKA Y, HANADA T, et al. Factors explaining variations in soluble solids content of apples during ripening and storage [J]. *The Horticulture Journal*, 2024, 93(2): 135-142.
- [28] KARPIŃSKI T M, OŻAROWSKI M. Plant organic acids as natural inhibitors of foodborne pathogens [J]. *Applied Sciences*, 2024, 14(14): 6340.
- [29] MIRA N P, MARSHALL R, PINHEIRO M J F, et al. On the potential role of naturally occurring carboxylic organic acids as anti-infective agents: Opportunities and challenges [J]. *International Journal of Infectious Diseases*, 2024, 140: 119-123.
- [30] HU Y, YAN Z. Comprehensive advances in phytochemical components, bioactive functionality, and processing applications of mustard (*Brassica juncea* (L.) Czern.): A review [J]. *Frontiers in Nutrition*, 2025, 12: 1626333.
- [31] KWON H Y, CHOI S I, PARK H I, et al. Comparative analysis of the nutritional components and antioxidant activities of different *Brassica juncea* cultivars [J]. *Foods*, 2020, 9(6): 840.
- [32] PODSEDEK A. Natural antioxidants and antioxidant capacity of Brassica vegetables: A review [J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2007, 40(1): 1-11.
- [33] KOTORA P, ŠERŠEŇ F, FILO J, et al. The scavenging of DPPH, galvinoxyl and ABTS radicals by imine analogs of resveratrol [J]. *Molecules*, 2016, 21(1): 127.
- [34] LEE H J, LEE M J, CHOI Y J, et al. Free amino acid and volatile compound profiles of jeotgal alternatives and its application to kimchi [J]. *Foods*, 2021, 10(2): 423.
- [35] LIU L, SHE X, QIAN Y, et al. Effect of different fermenting containers on the deterioration of Sichuan pickle [J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2019, 111: 829-836.
- [36] 赖新竹,张博,王君晓,等.复合重组技术对砀山梨片真空冷冻干燥效率及品质的影响[J]. *食品科学*, 2025, 41(7): 418-431.
- [37] TIAN Y, DENG F. Phytochemistry and biological activity of mustard (*Brassica juncea*): A review [J]. *CyTA - Journal of Food*, 2020, 18(1): 704-718.
- [38] KRISANITS B A, KAUR B, FAHEY J W, et al. The anti-AGEing and RAGEing potential of isothiocyanates [J]. *Molecules*, 2024, 29(24): 5986.
- [39] KEBEDE B, TING V, EYRES G, et al. Volatile changes during storage of shelf stable apple juice: Integrating GC-MS fingerprinting and chemometrics [J]. *Foods*, 2020, 9(2): 165.
- [40] ROTH K, BAUER H, SJURSNES B J, et al. The persistent myth of limonene's smell [J]. *ChemBioChem*, 2025, 26(10): e202401085.

-
- [41] TENA G. The sweet smell of ionones [J]. Nature Plants, 2025, 11(3): 380.
- [42] TIEMAN D, TAYLOR M, SCHAUER N, et al. Tomato aromatic amino acid decarboxylases participate in synthesis of the flavor volatiles 2-phenylethanol and 2-phenylacetaldehyde [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2006, 103(21): 8287-8292.