刘梦婷, 刘独臣, 刘佳琦, 等. 不同品种芥菜发酵过程中硫苷及其挥发性代谢产物差异分析 [J]. 食品工业科技, 2026, 47(15): 327−336. doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025070275

LIU Mengting, LIU Duchen, LIU Jiaqi, et al. Differential Analysis of Glucosinolates and Their Volatile Metabolites during Fermentation of Different Mustard Varieties[J]. Science and Technology of Food Industry, 2026, 47(15): 327−336. (in Chinese with English abstract). doi: 10.13386/j.issn1002-0306.2025070275

· 分析检测 ·

不同品种芥菜发酵过程中硫苷及其挥发性代谢产物差异分析

刘梦婷[1,2], 刘独臣[3], 刘佳琦[1,2], 王彬尧[1,2], 张　敏[1,2], 赵　楠[2], 葛黎红[1,4,*], 梅　源[2,*]

（1.四川师范大学生命科学学院, 四川 成都 610101;
2.四川省农业科学院农产品加工研究所（食物与营养健康研究所）, 四川 成都 610066;
3.四川省农业科学院园艺研究所/蔬菜品种改良与种质创新四川省重点实验室, 四川 成都 610066;
4.西南土地资源评价与监测教育部重点实验室（四川师范大学）, 四川 成都 610101）

摘　要: 不同品种芥菜中硫苷及硫苷代谢产物种类、含量存在差异，一定程度上影响着酸菜发酵品质的形成。通过对比两种宽柄芥发酵过程中的微生物数量、理化指标、有机酸、硫苷及其挥发性代谢产物含量等评估不同品种芥菜发酵加工特性差异。结果表明，两种宽柄芥发酵过程中微生物数量、总酸和有机酸含量均存在差异。发酵末期川芥 1 号水样酵母菌数量比川芥 2 号高了约 1 lg CFU/mL，川芥 2 号总酸含量比川芥 1 号高 0.156 g/100 g，乳酸增加量高了 2.3 mg/mL。硫苷及其主要挥发性代谢产物方面，川芥 2 号鲜芥总硫苷含量比川芥 1 号高 50.09%，烯丙基异硫氰酸酯、3-丁烯基异硫氰酸酯、苯乙基异硫氰酸酯、3-丁烯腈和乙腈是区分川芥 1 号和川芥 2 号不同发酵时期风味的重要差异性硫苷代谢产物。相关性分析表明，发酵过程中总硫苷与细菌、乳酸菌呈现负相关，异硫氰酸酯类挥发性硫苷代谢产物与细菌、乳酸菌呈现负相关，与总硫苷含量呈正相关。不同品种芥菜的硫苷含量可能影响着发酵微生物生长代谢及发酵品质，导致最终产品的风味存在较大差异。实验结果为高品质发酵芥菜的定向筛选提供理论依据。

关键词: 芥菜品种, 发酵, 硫苷, 硫苷代谢产物, 风味物质

中图分类号: TS255.54　　**文献标识码:** A　　**文章编号:** 1002−0306(2026)15−0327−10

DOI: 10.13386/j.issn1002-0306.2025070275　　本文网刊:

Differential Analysis of Glucosinolates and Their Volatile Metabolites during Fermentation of Different Mustard Varieties

LIU Mengting[1,2], LIU Duchen[3], LIU Jiaqi[1,2], WANG Binyao[1,2], ZHANG Min[1,2], ZHAO Nan[2], GE Lihong[1,4,*], MEI Yuan[2,*]

（1.College of Life Sciences, Sichuan Normal University, Chengdu 610101, China;
2.Institute of Agro-products Processing Science and Technology (Institute of Food Nutrition and Health), Sichuan Academy of Agricultural Sciences, Chengdu 610066, China;
3.Horticulture Research Institute, Sichuan Academy of Agricultural Sciences/Vegetable Germplasm Innovation and Variety Improvement Key Laboratory of Sichuan Province, Chengdu 610066, China;
4.Key Laboratory of Land Resources Evaluation and Monitoring in Southwest (Sichuan Normal University) of Ministry of Education, Chengdu 610101, China）

收稿日期: 2025−07−23

基金项目: “十四五”国家重点研发计划重点专项（2023YFD2100500）; 四川省育种联合攻关项目（2023YZ002）; 四川省农业科学院“1+9”揭榜挂帅项目（1+9KJGG007）。

作者简介: 刘梦婷（2000−）（ORCID: 0009−0005−7543−5871）, 女, 硕士研究生, 研究方向: 发酵食品生物技术, E-mail: 2583926894@qq.com。

*** 通信作者:** 葛黎红（1989−）（ORCID: 0000−0002−3262−4622）, 女, 博士, 副教授, 研究方向: 发酵食品生物技术, E-mail: gelihong89@163.com。
梅源（1995−）（ORCID: 0000−0001−7558−5179）, 女, 硕士, 研究方向: 发酵工程, E-mail: mymeiyuanzw@163.com。

Abstract: The variety of mustard greens is a key factor influencing the formation of fermented pickle quality. By comparing microbial counts, physicochemical indicators, organic acids, glucosinolates and volatile metabolites during the fermentation of mustard (*Brassica juncea*) varieties, this study assessed differences in fermentation characteristics among distinct mustard cultivars. The results indicated that differences existed in microbial counts, total acidity, and organic acid content during the fermentation of the two mustard (*Brassica juncea*) varieties. At the end of fermentation, the yeast count in the fermentation broth of Chuanjie No.1 was approximately 1 lg CFU/mL higher than that of Chuanjie No.2. The total acid content of Chuanjie No.2 was 0.156 g/100 g higher than that of Chuanjie No.1, and the increase in lactic acid was 2.3 mg/mL higher. In terms of glucosinolates and their primary volatile metabolites, the total glucosinolate content in fresh Chuanjie No.2 was 50.09% higher than that in Chuanjie No.1, Allyl isothiocyanate, 3-butenyl isothiocyanate, phenethyl isothiocyanate, 3-butenonitrile, and acetonitrile were key differential glucosinolate metabolites that distinguished the flavor profiles of Chuanjie No.1 and Chuanjie No.2 during different fermentation stages. Correlation analysis indicated that total glucosinolates showed a negative correlation with bacteria and lactic acid bacteria during fermentation. Volatile glucosinolate metabolites of the isothiocyanate class showed a negative correlation with bacteria and lactic acid bacteria, while exhibiting a positive correlation with total glucosinolate content. The glucosinolate content in different mustard varieties might influence the growth and metabolism of fermenting microorganisms as well as fermentation quality, leading to significant variations in the final product's flavor. The experimental results provided a theoretical basis for the targeted selection of high-quality fermented mustard.

Key words: mustard varieties; fermentation; glucosinolates; glucosinolate metabolites; flavor compounds

发酵是一种传统的蔬菜加工方式，利用内源性酶和微生物诱导的一系列反应改变蔬菜中生物活性化合物的种类和类型，从而赋予发酵蔬菜独特的风味[1]。四川酸菜作为我国深受人们喜爱的传统发酵食品，其产品占市场份额的 70% 以上，是制作酸菜鱼、酸菜火锅等特色菜肴不可或缺的关键食材[2]。芥菜作为四川酸菜的主要蔬菜原料，经过盐渍后二次发酵或直接坛泡发酵等工艺后制成酸脆爽口的酸菜[3]。芥菜具有十字花科蔬菜所特有的风味，其特有风味物质主要来源于硫代葡萄糖苷（简称硫苷）[4]。硫苷是芥菜中一类含硫次级代谢产物，在芥菜发酵过程中将会降解为各种具有独特辛辣刺激呈味效果的挥发性硫苷代谢产物，对于发酵芥菜风味的形成发挥着重要作用[5−6]。芥菜原料品种是影响其发酵品质的重要因素。不同品种芥菜中硫苷含量及种类存在差异，而硫苷及其代谢产物被证实具有一定的抑菌作用，可能会影响芥菜发酵过程中发酵微生物的生长代谢，导致不同品种芥菜发酵后呈现出不同的风味效果，从而一定程度上影响着酸菜品质的形成[7]。

本研究团队在前期的实验中[8−9] 已对不同品种和变种芥菜发酵前后的品质特性及风味特性上的差异进行了探究。然而，不同品种芥菜发酵过程中硫苷及代谢产物种类和含量等与微生物生长情况及风味特性的关系尚不明确，获得这些信息可以为选育具有较好加工发酵适应性的芥菜品种提供一定的理论基础。因此本研究选用 2 种具有田间性状差异的宽柄芥（*Brassica juncea* var. *latipa* Li）川芥 1 号和川芥 2 号为蔬菜原料，采用自然发酵工艺制备酸菜，系统监测发酵过程中其发酵微生物数量、理化指标、有机酸谱及挥发性物质等的变化，明确不同品种芥菜发酵过程中硫苷及代谢产物种类和含量等与微生物生长情况及风味特性的关系，旨在为高品质发酵芥菜的定向筛选提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料与仪器

两种宽柄芥（川芥 1 号、川芥 2 号） 四川省农业科学院园艺提供，由四川省成都市新都区四川省农业科学院新都试验基地种植采收（附图 1，详见本刊官网 http://www.spgykj.com/文章的网络版）；发酵老母水 四川眉山某泡菜企业；食用盐、纯净水 成都观音桥菜市场；孟加拉红培养基、MRS 培养基、平板计数琼脂培养基 青岛海博生物技术有限公司；烯丙基硫苷标准品、氯化钯、羧甲基纤维素钠 上海源叶生物有限公司；3,5-二硝基水杨酸 阿拉丁试剂（上海）有限公司；氢氧化钠、乳酸、琥珀酸、柠檬酸、苹果酸、乙酸 成都科隆试剂有限公司；所有试剂均为分析纯。

Synergy HTX 多功能型酶标仪 美国 Bio Tek 有限公司；Intuvo9000-GC System-5977b 气质联用色谱仪、1260 液相色谱仪 美国 Agilent 公司；JA5003 型电子天平 上海佑科仪器仪表有限公司；Seven Compact S210 型 pH 计 梅特勒-托利多仪器（上海）有限公司；SPME 萃取纤维（50/30 μm DVB/CAR/PDMS） 美国 Supeico 公司。

1.2 实验方法

1.2.1 泡芥菜准备 将川芥 1 号与川芥 2 号的茎、叶进行切割处理后，装入丝口瓶内，随后注入 4%（质量分数，下同）盐度的发酵母水按照料液比 1∶3 填满容器并密封瓶口，置于 25 ℃ 的恒温环境中进行为期 7 d 的发酵。分别在发酵第 0、1、3、5、7 d 五个时间点取样测定相关指标，部分菜样经过液氮速冻后冻干并研磨成粉，于−80 ℃ 等待后续指标测定。

1.2.2 微生物计数 无菌环境下称取 25 g 样品，加入 225 g 无菌生理盐水均质处理后使用稀释涂布法

进行微生物计数；水样样品无需均质，直接梯度稀释后进行微生物计数。分别使用 PCA 平板、MRS 平板和孟加拉红平板计数细菌总数、乳酸菌数量和酵母菌数量。

1.2.3　理化指标检测　准确称取 10.0 g 待测菜样，加入 10 mL 蒸馏水，充分混匀后使用 pH 计测定样品 pH；水样直接测定 pH。泡芥菜前处理方法参考 ZHAO 等[10]，收集前处理后的上清液用于后续理化分析。采用酸碱中和滴定法测定可滴定酸含量[11]；采用二硝基水杨酸法测定样品还原糖含量[12]。

1.2.4　有机酸测定　参考 GE 等[12] 的方法对芥菜样品进行前处理操作，样品提取液经过 10000 r/min 常温离心 10 min 处理后，取上清液通过 0.22 μm 滤膜过滤，采用 HPLC 检测有机酸组成[12]。

1.2.5　总硫苷含量测定

1.2.5.1　样品处理　参考胡相云等[13] 的方案并稍作修改，取 0.2 g 经冻干打粉后的样品，加入 2 mL 70% 乙醇溶液，在 70 ℃ 条件下加热 15 min 灭酶。在 90 ℃ 条件下提取 28 min。样液经 10000 r/min 离心 10 min 后吸取上清液，用超纯水定容至 5 mL，使用上述离心参数二次离心后取上清液为硫苷提取液。

1.2.5.2　硫苷标准曲线绘制　精确称取 10 mg 烯丙基硫苷标准品，加入 1 mL 超纯水配制成浓度为 25.16 μmol/mL 的烯丙基硫苷储备液。取 7 支 10 mL 离心管，依次加入 0、0.01、0.025、0.05、0.1 mL 上述储备液，并用超纯水补至 1 mL。随后各管依次加入 2 mL 0.1% 羧甲基纤维素钠溶液和 1 mL 8 mmol/L 氯化钯溶液，于 24 ℃ 环境下静置反应 2 h 后以第 1 管为空白参比，测定其余各管在 540 nm 处的吸光度值，并以硫苷浓度为横坐标，测定的吸光度值为纵坐标绘制硫苷标准曲线。

1.2.5.3　含量测定　取 1 mL 1.2.5.1 中制备好的硫苷提取液，加入 2 mL 0.1% 羧甲基纤维素钠溶液和 1 mL 8 mmol/L 氯化钯，于 24 ℃ 环境下静置反应 2 h 后，测定各样品在 540 nm 处吸光度值，再根据烯丙基硫苷标准曲线（$Y=0.2985X+0.01888$，$R^2=0.9998$）计算样品中的总硫苷含量。

1.2.6　挥发性化合物测定　采用顶空微萃取气相色谱质谱联用技术（headspace soild-phase microextraction gas chromatography-mass spec-trometry，HS-SPME-GC-MS）进行测定。称取 0.5 g 泡芥菜冻干粉样品用于 GC-MS 分析，GC-MS 条件设定[14]：HP-5MS UI 色谱柱（30 m×0.25 mm×0.25 μm）；载气为高纯氦气（He），流速 1.0 mL/min；自动无分流进样；升温程序：初温 40 ℃，先维持 5 min，后以 4 ℃/min 升至 100 ℃，最后以 6 ℃/min 升高至 250 ℃，保持 10 min；电子电离（electronic ionization，EI）源，电子能量 70 eV，MS 传输线和离子源温度均为 250 ℃；扫描范围：35~550 m/z。测定结果在美国国家标准技术研究所 2001 标准谱库中进行检索比对，对匹配度大于 75 的物质进一步定性分析，对比质谱图和标准谱图，结合保留指数和已有文献报道进行挥发性物质定性分析，以面积归一化法计算相对含量，内标法进行半定量[8]。

1.3　数据处理

采用 Microsoft Excel 软件进行数据的标准差、平均值等归类、分析和计算，采用 SIMCA 14.1 进行正交偏最小二乘判别分析（orthogonal partial least squares discriminant analysis，OPLS-DA），柱状图和折线图由 Graphpad Pism 9.5 绘制，相关性热图在美吉生信云平台（https://cloud.majorbio.com/）进行绘制，相关性系数选择 Pearson，选择发酵过程中微生物数与硫苷及挥发性代谢产物进行相关性分析，结果由相关性 Heatmap 图展示。

2　结果与分析

2.1　不同品种芥菜发酵微生物含量差异分析

泡菜风味由多种微生物群落协同代谢而来，乳酸菌和酵母菌等将菜中的营养物质转化为呈香呈味化合物，从而影响泡菜的产品品质[15−16]。为明确不同品种芥菜在发酵过程中微生物的含量差异，对不同发酵时期的芥菜菜样和水样中的细菌总数、乳酸菌和酵母菌进行计数，如图 1 所示。

芥菜发酵过程中，菜样和发酵液中细菌总数（图 1(a、d)）和乳酸菌数量（图 1(b、e)）总体呈现先增加，在第 3 d 后趋于稳定的趋势。川芥 1 号和川芥 2 号新鲜菜样（发酵 0 d）中细菌总数和酵母菌数未见明显差异，但川芥 1 号菜样中的乳酸菌数显著高于川芥 2 号（$P<0.05$），分别为 6.25 lg CFU/g 和 5.48 lg CFU/g；随着发酵的进行，乳酸菌数量在发酵中期趋同，但发酵末川芥 1 号菜样中的乳酸菌数仍显著高于川芥 2 号（$P<0.05$），此时两者乳酸菌数分别为 7.90 lg CFU/g 和 7.31 lg CFU/g。不同品种芥菜菜样酵母菌数量（图 1(c)）变化趋势不同，川芥 1 号菜样酵母菌在发酵过程中呈现下降趋势，整体波动较稳定，而川芥 2 号菜样中酵母菌数量变化波动更为剧烈，在第 3 d 达到峰值（5.77 lg CFU/g）后逐渐下降，发酵末期川芥 1 号菜样和发酵液中酵母菌数比川芥 2 号高了约 1 lg CFU/g 和 1 lg CFU/mL。

总体来看，两种芥菜菜样和水样在发酵过程中细菌总数和乳酸菌数的变化趋势相似，均在发酵初期迅速增加，达到峰值后逐渐趋于稳定，这与以往的研究一致[17]。微生物在发酵初期开始迅速繁殖，随着发酵的进行，微生物数量在后期达到一定水平后逐渐趋于平稳，这种变化可能与发酵过程中营养物质的消耗和环境条件的变化有关[17]。相较于细菌总数和乳酸菌数来说，不同品种芥菜发酵过程中的酵母菌数量差异更大，发酵末，川芥 1 号酵母菌数显著高于川芥 2 号，其主要原因可能是不同品种芥菜中初始化学物质组成和含量上的差异对于微生物的生长具有一定

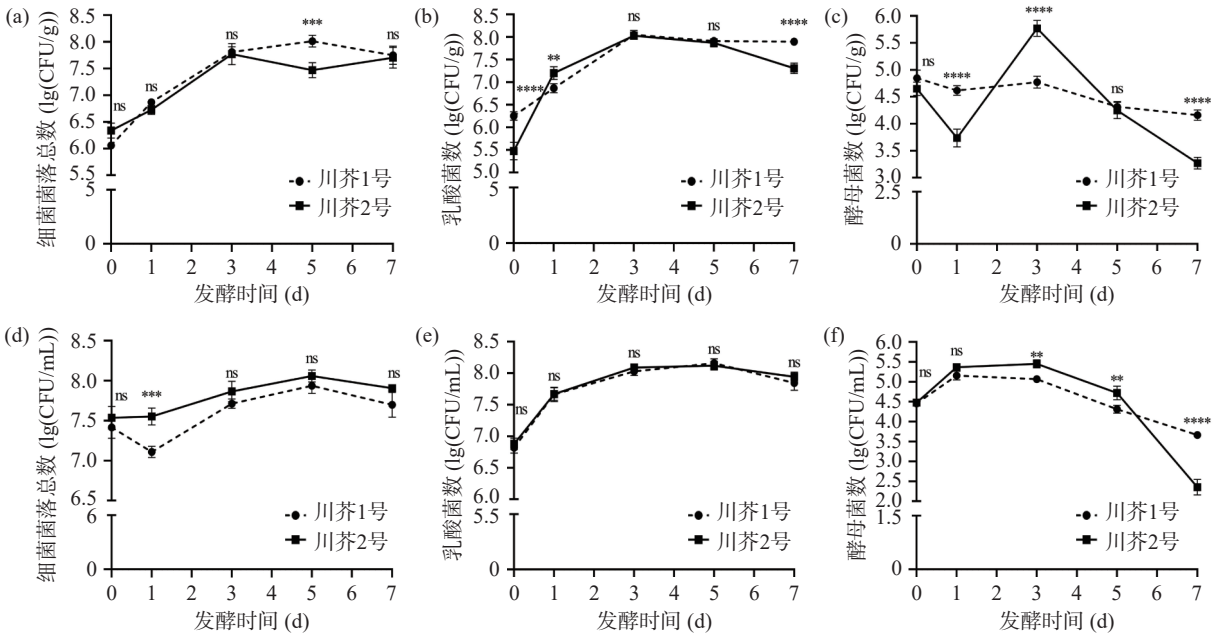


图 1　不同品种芥菜发酵过程中微生物数量变化

Fig.1　Changes in microbial counts during fermentation of different mustard varieties

注: a: 菜中细菌菌落总数, b: 菜中乳酸菌数, c: 菜中酵母菌数, d.水中细菌菌落总数, e: 水中乳酸菌数, f: 水中酵母菌数; *表示 $P<0.05$, **表示 $P<0.01$, ***表示 $P<0.001$, ****表示 $P<0.0001$, ns 表示没有显著差异, $P>0.05$, 图 2~图 4 同。

的影响, 对比两种芥菜发酵过程中微生物的数量变化情况发现: 品种对于发酵过程中酵母菌数量的影响大于细菌。

2.2　不同品种芥菜发酵理化指标差异分析

在泡菜发酵过程中, pH、总酸和还原糖等理化指标对于评估和控制发酵质量至关重要[18]。还原糖作为微生物发酵的主要底物, 其含量的变化直接关联到发酵进程和最终产品的风味[19]。如图 2 所示, 两种芥菜发酵初期其菜样和水样中的还原糖含量均无显著差异, 分别为 0.022 g/100 g 和 0.093 g/100 g。发酵初期, 水样中的还原糖含量由于微生物分泌的酶类将原辅料多糖降解为还原糖而上升, 然后随着发酵的进行, 发酵微生物不断生长, 消耗还原糖代谢产酸, 从而导致还原糖含量总体呈下降趋势[20]。到发酵终点时, 菜样中的还原糖含量仍无显著差异($P>0.05$), 而川芥 1 号水样中的还原糖含量则显著低于川芥 2 号($P<0.05$), 其含量分别为 0.016 g/100 g 和 0.138 g/100 g。川芥 2 号水样还原糖发酵第 7 d 含量有所上升, 可能的原因是发酵过程中芥菜中的多糖被分解消耗, 产生一定量的还原糖, 并且此时酵母菌数量一定程度上有所下降, 发酵微生物数量的相对下降导致其对于还原糖的消耗量有所减少, 还原糖被发酵微生物消耗的量小于芥菜中多糖代谢转化而来的还原糖生成量, 因此川芥 2 号水样中的还原糖含量有所上升[21]。

总酸(Total acid, TTA)和 pH 不仅调控发酵菌群增殖及代谢活动, 亦充当判定泡菜成熟度的核心指标[22−23]。随着发酵的进行, 两种芥菜菜样的 pH 在发酵末期分别降至 3.74 和 3.69; 而水样中的总酸含量则整体呈上升趋势, 川芥 1 号和川芥 2 号水样中的总酸含量在发酵末期差异显著, 分别达到 0.41 g/100 g 和 0.57 g/100 g。研究表明, 发酵液 pH<4.0, 可滴定酸含量>0.3 g/100 g 时, 泡菜基本发酵成熟[24]。发酵

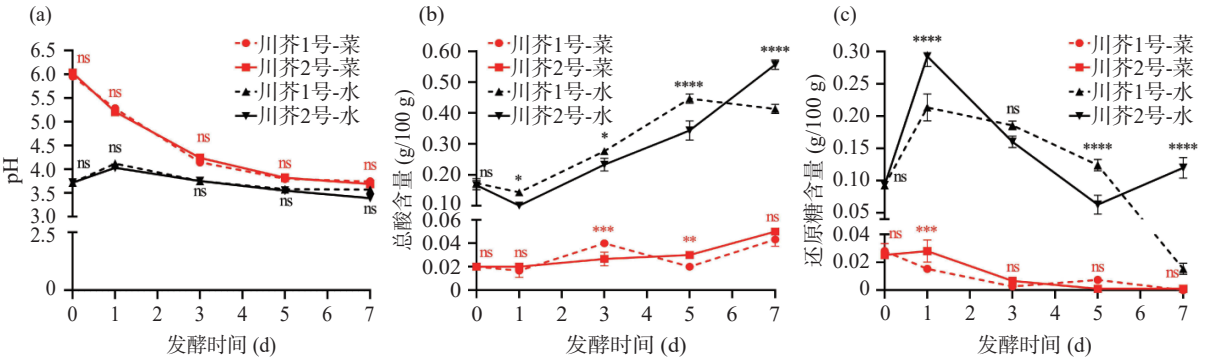


图 2　不同品种芥菜发酵过程中理化指标变化

Fig.2　Changes in physicochemical indices during fermentation of different mustard varieties

注: a: pH; b: 总酸含量; c: 还原糖含量。

第 5 d 时，川芥 1 号和川芥 2 号水样总酸含量已分别达到 0.45 g/100 g 和 0.35 g/100 g，此时泡芥菜基本发酵成熟。此外，川芥 1 号水样中的总酸含量在 5~7 d 时并未如川芥 2 号一样持续上升，而是一定程度的下降，其原因为川芥 1 号中的还原糖含量已消耗殆尽，微生物转而消耗酸，以此获取能量[25]。两种芥菜发酵过程中的理化指标变化趋势基本一致，但发酵过程中不同品种芥菜微生物对于水样还原糖的消耗量及总酸的增加量存在显著差异。

2.3　不同品种芥菜发酵有机酸含量差异分析

有机酸是微生物发酵的关键产物，直接决定泡菜的风味与口感，赋予了泡菜爽快的酸味和发酵的清香[26−27]。不同品种芥菜在发酵过程中各类有机酸的动态变化见图 3。

川芥 1 号和 2 号鲜芥中含量最高的有机酸均为乙酸，且川芥 2 号鲜芥乙酸含量（23.89±1.08 mg/g）显著高于川芥 1 号（14.30±1.76 mg/g）（P<0.05）；其次分别是苹果酸、琥珀酸、乳酸和柠檬酸；同时，川芥 2 号鲜芥琥珀酸含量也显著高于川芥 1 号，分别达 3.944±0.251 mg/g 和 2.653±0.636 mg/g（P<0.05）。苹果酸、琥珀酸和柠檬酸均参与三羧酸循环，在发酵过程中被发酵微生物消耗利用，转化为其他物质；鲜芥中乙酸含量较高，且两种芥菜中初始乙酸含量存在一定的差异性，这可能是芥菜品种不同带来的差异，随着发酵的进行，乳酸菌成为优势菌群，产生大量乳酸导致环境的酸化，耐酸能力差的异型发酵菌生长被抑制，耐酸的同型乳酸菌（植物乳杆菌等）几乎只产乳酸，乙酸的生成增量较少，并且乙酸还会在此过程中被逐渐代谢转化为其他物质[28]。由此，发现在发酵 1~3 d，菜样中除乳酸之外的四种有机酸主要呈现快速下降趋势，至发酵末期其含量低至无法检出，发酵水中乙酸、琥珀酸、苹果酸和柠檬酸含量较低，均保持在 0~0.3 mg/g；发酵第 7 d 乳酸的含量则达到了 8.316±0.073 mg/g（川芥 1 号菜样）和 8.11±0.17 mg/g（川芥 2 号菜样），这与王芮东等[28] 的研究相似，说明泡菜发酵以乳酸发酵为主导，随发酵周期延长，有机酸谱趋于简化[29]。

2.4　不同品种芥菜发酵总硫苷含量差异分析

硫代葡萄糖苷（以下简称硫苷）是芥菜在生长和发酵过程中的关键次生代谢物，其代谢产物，如异硫氰酸酯类化合物和腈类等，赋予了泡芥菜独特的辛辣风味，是评价泡芥菜品质的重要指标[30−31]。如图 4 所示，由于芥菜品种的差异性，川芥 2 号鲜芥菜样中的总硫苷含量比川芥 1 号高 50.09%，分别为 40.33±5.62 μmol/g DW（川芥 2 号）和 26.87±4.15 μmol/g DW（川芥 1 号）。

随着发酵进行，不同品种芥菜菜样中的总硫苷含量间差异缩小，到发酵末期，川芥 1 号和川芥 2 号中总硫苷含量分别下降至 15.20±1.60 μmol/g DW 和 18.95±4.39 μmol/g DW，已无明显差异。鲜芥中总硫苷含量差异较大，而发酵后差异缩小的主要原因可能在于发酵过程所带来的品质均一化，使得不同品种蔬菜中的物质最终呈现相似的含量[32]。

此外，随着发酵进行，植物组织中的硫苷析出水解，部分进入发酵液中，因此水样中的总硫苷含量呈上升趋势，至发酵末期分别达到 0.131 μmol/mL 和 0.315 μmol/mL，川芥 2 号水样中总硫苷含量基本高于川芥 1 号，可能由于川芥 2 号鲜样中的起始总硫苷含量更高。

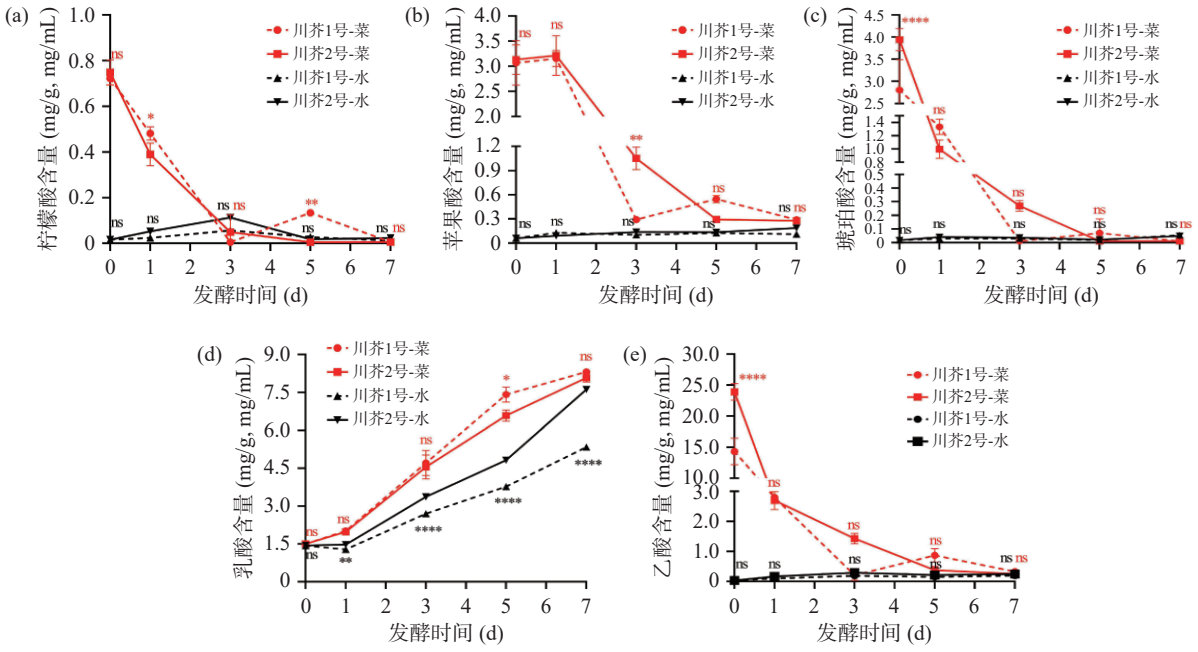


图 3　不同品种芥菜发酵过程中有机酸含量变化

Fig.3　Changes in organic acid content during fermentation of different mustard varieties

注：a：柠檬酸；b：苹果酸；c：琥珀酸；d：乳酸；e：乙酸；其中菜样和水样的单位分别为 mg/g、mg/mL。

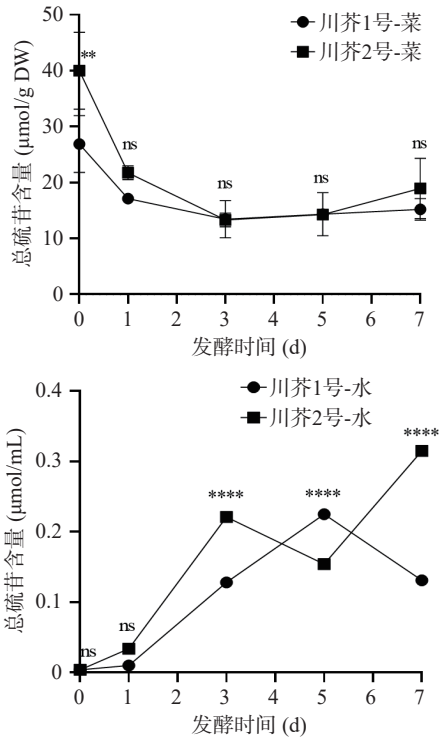


图 4 不同品种芥菜发酵过程中总硫苷含量变化

Fig.4 Changes in total glucosinolate content during fermentation of different mustard varieties

2.5 不同品种芥菜发酵过程中的挥发性化合物分析

2.5.1 挥发性物质测定结果 从 10 个芥菜样品中一共检测出 127 种挥发性物质，其中酯类较多，共有 47 种，其次是酮类（12 种）、醛类（12 种）、醇类（11 种）、烃类（10 种）和酸类（10 种），最后是含硫化合物（7 种）、含氮化合物（6 种）、醚类（5 种）、腈类（4 种）、酚类（2 种）和呋喃类（1 种）（附表 1，详见本刊官网 http://www.spgykj.com/文章的网络版）。

图 5 为不同品种芥菜发酵过程中的挥发性物质丰度图。川芥 2 号鲜芥中挥发性物质更为丰富，主要由酯类（45.22%）、含硫化合物（20.95%）、酸类（18.32%）和醚类（15.18%）等多种物质组成，含硫化合物和醚类物质占比更高，发酵蔬菜中的醚类和含硫化合物主要表现为刺激性气味[9]；而川芥 1 号鲜芥中

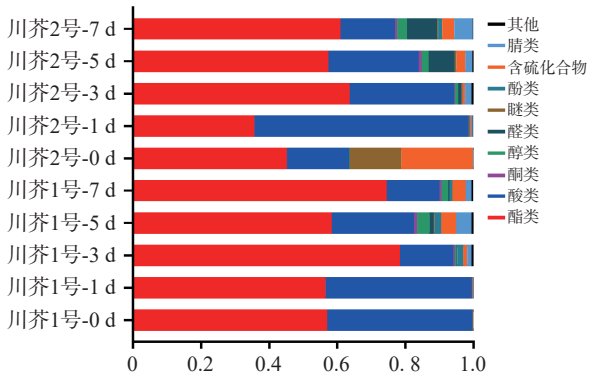


图 5 不同品种芥菜发酵过程中的挥发性物质丰度图

Fig.5 Changes in volatile compound abundance during fermentation of different mustard varieties

挥发性物质则主要由酯类和酸类组成，分别占比 56.99% 和 42.56%，其他物质则占比极微。酯类始终是川芥 1 号和川芥 2 号芥菜发酵过程中的优势化合物，平均占比达 45% 以上。两种芥菜发酵后期的挥发性化合物种类相较发酵前期更加丰富，醇类、醛类、含硫化合物和腈类等物质占比逐渐增加。对比两种芥菜发酵末期的物质组成，酯类物质仍为绝对的优势化合物，其次是酸类；不同的是，川芥 2 号发酵末期醛类物质表现出更高占比（8.81%），而川芥 1 号中仅含有 0.37% 的醛类。在以往的研究中醛类物质一般通过脂质氧化及乳酸菌代谢途径生成，主要表现为青草香和果香[26]，赋予了泡菜清新感。此外，发酵末期川芥 2 号中的腈类占比高于川芥 1 号，分别为 5.50% 和 1.78%。泡菜中的腈类多源于硫苷降解，其香气谱系跨越怡人青草、草药、肉汤，也可能呈现刺鼻硫磺或汗味[33]。

2.5.2 差异性挥发性化合物筛选 为了明确不同芥菜在发酵过程中挥发性化合物的差异性，采用正交偏最小二乘判别分析（OPLS-DA）分析了不同品种芥菜中的挥发性物质，通过交叉验证和 200 次随机重分类进行建模，得分图见图 6。图 6(a)显示，其 X 轴方向解释变量（R^2X）为 0.927，Y 轴方向解释变量（R^2Y）为 0.958，预测能力（Q^2）为 0.920，表明模型稳定可靠[30]。发酵 1、3 d 和发酵 5、7 d 的样品在 OPLS-DA 得分图中区分较明显，两种芥菜发酵 1、3 d 的样品与第一主成分呈正相关，与第二主成分呈正相关；而发酵 5、7 d 的样品则与第一主成分呈正相关，与第二主成分呈负相关，说明挥发性组分随发酵阶段显著分化。

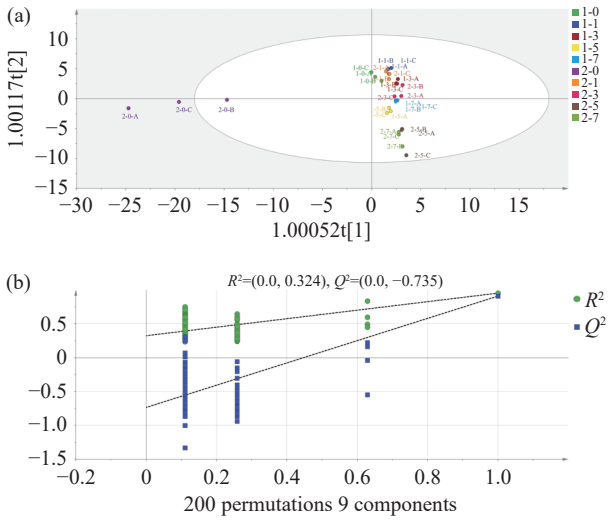


图 6 不同品种芥菜发酵过程挥发性成分 OPLS-DA 得分图（a）及交叉验证模型（b）

Fig.6 OPLS-DA score plot (a) and cross-validation model (b) of volatile aroma compounds during fermentation of different mustard varieties

注：a 图中 1-0 表示川芥 1 号发酵第 0 d 样品；2-0 表示川芥 2 号发酵第 0 d 样品，以此类推。

对于两种芥菜不同发酵时间点进行了 VIP>1 的挥发性成分分析，见表 1。其中川芥 1 号和川芥 2 号

表 1　基于 OPLS-DA 模型分析 VIP>1 的挥发性化合物成分

Table 1　Identification of volatile aroma compounds with VIP>1 based on OPLS-DA model

发酵时间(d)	VIP大于1的化合物
0	异硫氰酸烯丙酯、4-甲基异噻唑、叔戊基甲基醚、庚酸、3-丁烯基异硫氰酸酯、异硫氰酸苯乙酯
1	异硫氰酸烯丙酯、庚酸、异硫氰酸苯乙酯、3-丁烯基异硫氰酸酯、二硫化碳
3	异硫氰酸烯丙酯、庚酸、庚酸乙酯、3-丁烯腈、3-丁烯基异硫氰酸酯
5	异硫氰酸烯丙酯、庚酸乙酯、2,4-二叔丁基苯酚、3-丁烯腈、苯乙醇、二硫化碳、反式-2,4-庚二烯醛、2-丁烯醛、己酸烯丙酯、乙酸、异硫氰酸苯乙酯、癸酸甲酯、2-甲基丙烯醛、2-十一烯醛、乙氯戊烯炔醇、2-正丙基呋喃、5, 7-辛烯二酸乙酯、(E)-2-庚烯醛、(Z)-癸-2-烯醛、反-2-辛烯醛、辛酸甲酯、丙烯酸-5-亚甲基-6-庚烯基酯、辛酸、苯甲醛、庚酸、1, 1-二甲氧基-2-甲基丙烷、壬酸、2-(甲酰氧基)-1-苯基乙酮
7	异硫氰酸烯丙酯、庚酸乙酯、庚酸、反式-2,4-庚二烯醛、乙腈、乙氯戊烯炔醇、癸酸甲酯、2-十一烯醛、(Z)-癸-2-烯醛、反-2-辛烯醛、(E)-2-庚烯醛、辛酸3-甲基丁酯、3-丁烯腈、2,4-二叔丁基苯酚、2-正丙基呋喃、己酸甲酯、5,7-辛烯二酸乙酯、2-丁烯醛

在 0、1、3、5 和 7 d 中 VIP>1 的挥发性成分分别有 6 种、5 种、5 种、28 种和 18 种。随着发酵的进行，区分两种芥菜风味的挥发性物质种类数量呈现上升趋势，基于不同品种芥菜中原有化学物质上的差异，发酵过程中微生物的生长代谢情况发生变化，川芥 1 号和川芥 2 号发酵过程中酵母菌和乳酸菌等的数量不同，后续由微生物分解代谢作用而产生的挥发性化学物质组成及含量存在一定的差异性，由此导致了发酵中后期两种芥菜中差异性挥发性物质种类的增多。

2.5.3　挥发性硫苷代谢产物差异分析　在上述发酵过程中众多的差异性挥发性化合物中，值得注意的是由硫苷代谢而来的异硫氰酸酯类和腈类化学物质，这些挥发性物质大多呈现辛辣刺激性气味，这也是芥菜独特气味的主要来源之一，不同品种芥菜中原有硫苷组成和含量的差异对于发酵后芥菜的风味特性具有重要的影响[34−35]。

从不同发酵时期的芥菜样品中共检测出 14 种挥发性硫苷代谢产物，其中含有 10 种异硫氰酸酯类、4 种腈类物质(附表 2，详见本刊官网 http://www.spgykj.com/文章的网络版)。在这 14 种挥发性硫苷代谢产物中烯丙基异硫氰酸酯、3-丁烯基异硫氰酸酯、苯乙基异硫氰酸酯、3-丁烯腈和乙腈在整个发酵过程中 VIP>1，是区分川芥 1 号和川芥 2 号不同发酵时期风味的重要差异性物质，其相对含量见图 7。

不同的硫苷代谢产物表现出不同的风味特性[36]。在一些文献中，烯丙基异硫氰酸酯被描述为硫味、硫磺味，苯乙基异硫氰酸酯为尖锐刺激性气味，而 3-丁烯基异硫氰酸酯通常表现为辛辣味[37]。烯丙基异硫氰酸酯是两种新鲜芥菜中相对含量最高的硫苷代谢产物，但在不同品种芥菜中的含量存在明显的差异性，分别为 890.442±299.36 mg/kg 和 4990.705±329.16 mg/kg(图 7(a))。川芥 2 号鲜芥中的差异性硫苷代谢产物，如烯丙基异硫氰酸酯、3-丁烯基异硫氰酸酯、苯乙基异硫氰酸酯和 3-丁烯腈等的含量均高于川芥 1 号鲜芥。

川芥 2 号发酵 0 d 硫苷代谢产物含量高于川芥

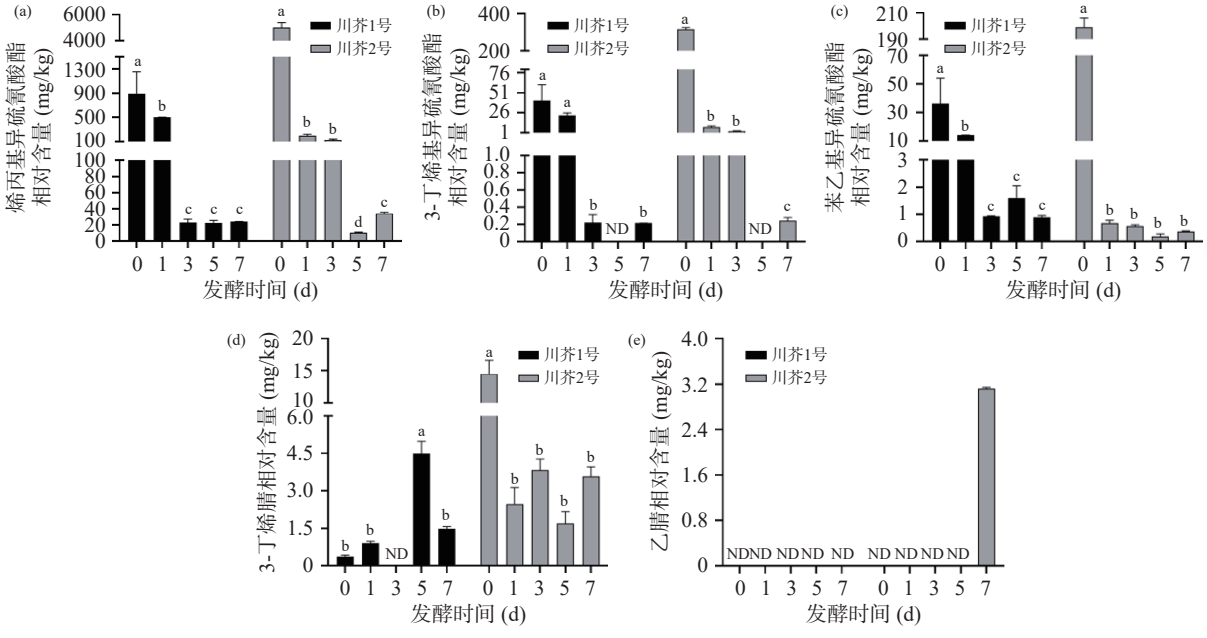


图 7　不同芥菜发酵过程中硫苷代谢产物差异分析

Fig.7　Differential analysis of glucosinolate metabolites during fermentation of different mustard varieties

注：a：烯丙基异硫氰酸酯；b：3-丁烯基异硫氰酸酯；c：苯乙基异硫氰酸酯；d：3-丁烯腈；e：乙腈；ND 表示未检出；字母不同表示不同品种芥菜样品发酵过程中挥发性硫苷代谢物质含量差异显著(P<0.05)。

1 号，可能的原因是川芥 2 号中总硫苷含量高于川芥 1 号，鲜芥经切分后细胞破碎，其中的黑芥子酶流出与硫苷相反应，将硫苷分解为不同的代谢产物[31]，鲜芥中总硫苷含量较高的川芥 2 号代谢得到的挥发性代谢产物含量因此高于川芥 1 号。发酵显著降低了三种异硫氰酸酯的含量，这一点在部分关于十字花科蔬菜发酵的研究中同样有所体现[38]。至发酵末期，川芥 1 号和 2 号中三种异硫氰酸酯类物质的降解率分别为 97.5%~98.3% 和 99.3%~99.9%。两种芥菜中的差异性异硫氰酸酯类物质降解主要时间点不同：川芥 1 号集中在发酵 1~3 d，而川芥 2 号中这些物质的降解分别集中于 0~1 d 以及 3~5 d，川芥 2 号中异硫氰酸酯类硫苷代谢产物的完全降解速率更慢，持续时间更长，其原因可能是除黑芥子酶外，硫苷还可被部分发酵微生物选择性的分解代谢，川芥 1 号和川芥 2 号中硫苷的组成及含量存在差异，因此可能在不同的时期被不同的发酵微生物分解代谢为相应的异硫氰酸酯类物质[31]。并且发酵过程中部分硫苷代谢产物含量有所回升，这可能是由于硫苷的前体物质在某些阶段被合成或释放，进而转化为硫苷，导致硫苷代谢产物含量升高，或是微生物的代谢途径发生改变，使得部分硫苷被重新合成或释放，导致硫苷代谢产物含量小幅度升高[7]。

研究表明，3-丁烯腈和乙腈主要表现为辛辣气味[6]。对比发酵前后，两种芥菜中 3-丁烯腈含量的变化趋势具有极大的差别：川芥 1 号中 3-丁烯腈含量由 0.368±0.052 mg/kg 升至 1.472±0.083 mg/kg，增加了 300.10%；而川芥 2 号中 3-丁烯腈含量则主要呈现下降趋势，由 14.49±1.74 mg/kg 降至 3.572±0.308 mg/kg，下降了 75.35%，不同芥菜发酵过程中 3-丁烯腈变化趋势的不同与上文所述异硫氰酸酯类的差异性原因一致。除此以外，仅在川芥 2 号发酵 7 d 的样品中检出乙腈，其含量为 3.122±0.02 mg/kg（图 7(e)），且乙腈也是发酵第 7 d 挥发性风味化合物的重要区分物质之一。

2.5.4 相关性分析 为了验证硫苷代谢产物与发酵微生物的相关性，对微生物参数与硫苷及其挥发性代谢产物进行 Spearman 相关分析（图 8）。

分析结果表明：异硫氰酸酯类硫苷代谢产物、细菌、乳酸菌和总硫苷四者之间存在显著相关性。多数硫苷代谢产物（如异硫氰酸烯丙酯、3-丁烯基异硫氰酸酯、异硫氰酸丁酯、异硫氰酸异戊酯、异硫氰酸异丁酯、异硫氰酸戊酯、3-(甲硫基)丙基异硫氰酸酯、2-甲基丁基异硫氰酸酯、苯乙基异硫氰酸酯等）与细菌总数、乳酸菌数呈显著负相关，而与酵母菌数不呈现相关关系。然而前文微生物计数结果显示不同品种芥菜发酵过程中酵母菌数量差距较为明显，对此可能的原因是硫苷及其代谢产物并不直接影响酵母菌演替，而是通过影响部分乳酸菌的生长代谢，在一定程度上改变发酵环境，从而间接性对酵母菌数

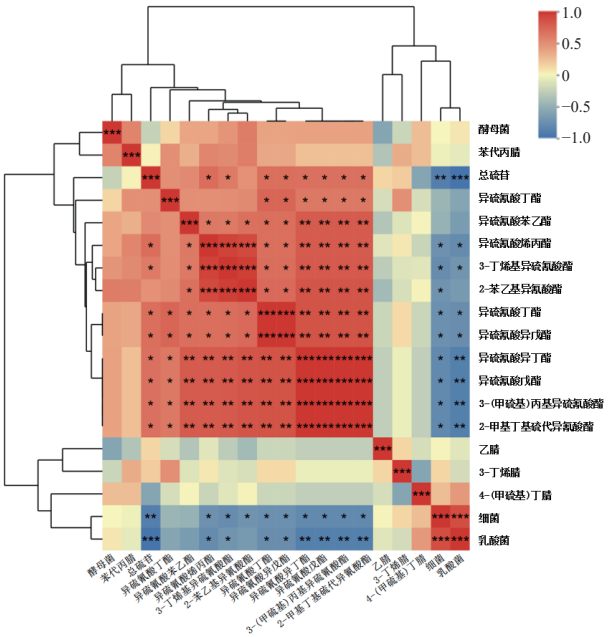


图 8 不同品种芥菜发酵微生物与硫苷代谢物相关性热图

Fig.8 Heatmap of correlation between fermentation microbiota and glucosinolate metabolites in different mustard varieties

注：图中*表示 $P<0.05$，**表示 $P<0.01$，***表示 $P<0.001$。

量进行调控[9]。在此期间未受硫苷影响的其他乳酸菌迅速生长，补充了受硫苷影响乳酸菌数量上的空隙[39-43]，因此发酵过程中乳酸菌和细菌总数没有太大的区别。发酵体系中微生物群落结构及菌株差异对硫苷转化的具体作用机制仍需深入解析。

其次，异硫氰酸酯类与总硫苷含量呈现正相关，但腈类与发酵微生物及总硫苷含量之间却不存在直接相关性。在前人对于硫苷降解条件及相应产物的报道中[31]，发现硫苷在发酵前期中性条件下经植物中黑芥子酶分解转化为异硫氰酸酯类；硫苷在发酵过程中也可由部分发酵微生物选择性分解为其他非异硫氰酸酯类代谢产物，因此异硫氰酸酯类与总硫苷含量呈现正相关，与发酵微生物呈现反相关。

腈类主要在酸性条件下合成，可能不受发酵微生物的直接影响，但受发酵中后期产酸菌产酸导致的酸性环境影响。该阶段硫苷已基本被分解为其他代谢产物，腈类物质极有可能由硫苷代谢后的小分子物质经酸性环境的促使合成，因此与总硫苷含量和发酵微生物没有直接相关关系。

3 结论

本研究使用具有一定农艺性状差异的两种宽柄芥（川芥 1 号和川芥 2 号）进行自然发酵，对发酵过程中的品质指标进行了对比分析，不同品种芥菜发酵过程中微生物数量、还原糖、总酸、有机酸和挥发性风味物质含量均表现出显著差异。两种芥菜发酵状况良好，在还原糖消耗情况和酵母菌数量上表现出了显著差异，发酵末期川芥 1 号水样中的还原糖含量显著性低于川芥 2 号，川芥 1 号菜样和水样中的酵母菌数相较川芥 2 号高了约 1 lg CFU/g 和

1 lg CFU/mL。不同品种宽柄芥均进行了良好的乳酸发酵，川芥 2 号水样总酸含量较川芥 1 号高 0.156 g/100 g，乳酸增加量比川芥 1 号高了约 2.3 mg/mL。

此外，本研究进一步分析了不同品种芥菜发酵过程中硫苷及代谢产物的变化规律，并与微生物数量进行了相关性分析。结果表明，不同品种鲜芥硫苷总含量差异显著，川芥 2 号鲜芥总硫苷含量比川芥 1 号高 50.09%。发酵过程中川芥 2 号挥发性成分组成更丰富，烯丙基异硫氰酸酯、3-丁烯基异硫氰酸酯、苯乙基异硫氰酸酯、3-丁烯腈和乙腈是区分川芥 1 号和川芥 2 号不同发酵时期风味的重要差异性硫苷代谢产物，两种宽柄芥中的这些差异性硫苷代谢产物在发酵过程中表现出的含量、消耗速率和被消耗的时间点上具有一定的区别。发酵过程中异硫氰酸酯类与细菌、乳酸菌呈现负相关，与总硫苷含量呈正相关，腈类与微生物和总硫苷没有相关关系。不同品种芥菜中硫苷及其代谢产物的含量与组成一定程度上影响着发酵微生物的生长代谢，导致最终产品的风味存在较大差异。但仍需进一步分析发酵体系中不同组成的硫苷对于微生物结构以至于最终对于酸菜风味呈现的影响。实验结果为芥菜发酵品质评价和发酵专用芥菜变种与品种筛选提供了一定的理论依据。

© 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] 赵吉春, 余洁, 谭正卫, 等. 发酵十字花科蔬菜中硫代葡萄糖苷代谢研究进展[J]. 食品科学, 2021, 42(23): 381−389. [ZHAO Jichun, YU Jie, TAN Zhengwei, et al. Recent advances in glucosinolates metabolism in fermented cruciferous vegetables[J]. Food Science, 2021, 42(23): 381−389.]

[2] 王浩文, 王传明, 王红强, 等. 不同青菜品种对老坛酸菜鱼调料风味的影响[J]. 中国调味品, 2022, 47(4): 160−163. [WANG Haowen, WANG Chuanming, WANG Hongqiang, et al. Effects of different varieties of vegetables on the flavor of pickled fish seasonings[J]. China Condiment, 2022, 47(4): 160−163.]

[3] ZHAO Yajiao, WEI Wenli, TANG Li, et al. Characterization of aroma and bacteria profiles of Sichuan industrial Paocai by HS-SPME-GC-O-MS and 16S rRNA amplicon sequencing[J]. Food Research International, 2021, 149: 110667.

[4] TIAN Yan, DENG Fangming. Phytochemistry and biological activity of mustard (*Brassica juncea*): A review[J]. CyTA-Journal of Food, 2020, 18(1): 704−718.

[5] 张秀海. 野生十字花科蔬菜硫苷鉴定及风味研究[D]. 张家口: 河北北方学院, 2023. [ZHANG Xiuhai. Studies on the glucosinolates identification and flavor of wild cruciferous vegetables[D]. Zhangjiakou: Hebei North University, 2023.]

[6] JIA Xiao, WANG Lifeng, ZHENG Chang, et al. Key odorant differences in fragrant *Brassica napus* and *Brassica juncea* oils revealed by gas chromatography-olfactometry, odor activity values, and aroma recombination[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2020, 68(50): 14950−14960.

[7] YANG Jinghua, WANG Jing, LI Zhangping, et al. Genomic signatures of vegetable and oilseed allopolyploid *Brassica juncea* and genetic loci controlling the accumulation of glucosinolates[J]. Plant Biotechnology Journal, 2021, 19(12): 2619−2628.

[8] 梅源, 赵楠, 夏枫, 等. 不同品种和变种芥菜发酵制备酸菜的品质及风味特征差异分析[J]. 中国酿造, 2024, 43(10): 178−185. [MEI Yuan, ZHAO Nan, XIA Feng, et al. Differential analysis of quality and flavor characteristics of Suancai prepared with different varieties and variation leaf mustard[J]. China Brewing, 2024, 43(10): 178−185.]

[9] 梅源, 刘独臣, 赖海梅, 等. 不同芥菜变种发酵过程中品质因子及硫代葡萄糖苷代谢产物差异分析[J]. 食品与发酵工业, 2023, 49(15): 92−99. [MEI Yuan, LIU Duchen, LAI Haimei, et al. Differential analysis of quality factors and glucosinolate metabolites in different mustard varieties during fermentation[J]. Food and Fermentation Industries, 2023, 49(15): 92−99.]

[10] ZHAO Nan, GE Lihong, LAI Haimei, et al. Unraveling the contribution of pre-salting duration to microbial succession and changes of volatile and non-volatile organic compounds in Suancai (a Chinese traditional fermented vegetable) during fermentation[J]. Food Research International, 2022, 159: 111673.

[11] 赵楠, 葛黎红, 郭壮, 等. 盐含量对泡辣椒发酵过程中质构劣化及相关理化指标变化的影响[J]. 中国酿造, 2020, 39(5): 82−86. [ZHAO Nan, GE Lihong, GUO Zhuang, et al. Effect of salt content on texture deterioration and related physicochemical properties of pickled pepper during fermentation[J]. China Brewing, 2020, 39(5): 82−86.]

[12] GE Lihong, LAI Haimei, HUANG Yuli, et al. Comparative evaluation of package types in alleviating textural softening and package-swelling of Paocai during storage: Insight into microbial invasion, cell wall pectinolysis and alteration in sugar and organic acid profiles[J]. Food Chemistry, 2021, 365: 130489.

[13] 胡相云, 何华. 茎瘤芥叶芥子油苷的提取工艺优化研究[J]. 食品科技, 2015, 40(7): 217−220. [HU Xiangyun, HE Hua. Optimization of extraction process of glucosinolate in leaf of tumorous stem mustard[J]. Food Science and Technology, 2015, 40(7): 217−220.]

[14] 谭春梅, 梅源, 陈龙, 等. 复合香辛料在不同粉碎和浸提工艺下挥发性风味物质的差异分析[J]. 中国调味品, 2023, 48(11): 11−17. [TAN Chunmei, MEI Yuan, CHEN Long, et al. Difference analysis of volatile flavor substances of compound spices under different grinding and extraction processes[J]. China Condiment, 2023, 48(11): 11−17.]

[15] 毕芸杰. 葡萄品种、陈酿时间与橡木制品对白兰地香气成分的影响[D]. 烟台: 烟台大学, 2021. [BI Yunjie. Effects of grape varieties, aging time and oak products on aroma components of brandy[D]. Yantai: Yantai University, 2021.]

[16] 陈巧红, 李敏, 陈云霞. 汕尾咸菜自然发酵中理化、微生物及质构分析[J]. 山东化工, 2024, 53(17): 109−112. [CHEN Qiaohong, LI Min, CHEN Yunxia. Physical, chemical, microbial and texture analysis of Shanwei salted cabbage during natural fermentation[J]. Shandong Chemical Industry, 2024, 53(17): 109−112.]

[17] 黄玉立, 葛黎红, 马思尧, 等. 乳酸菌与酵母菌互作对萝卜泡菜发酵进程及风味品质的影响[J]. 中国酿造, 2024, 43(4): 197−202. [HUANG Yuli, GE Lihong, MA Siyao, et al. Effect of the interaction between lactic acid bacterium and yeast on the fermentation process and flavor quality of radish Paocai[J]. China Brewing, 2024, 43(4): 197−202.]

[18] 黄玉立, 葛黎红, 郭才富, 等. 添加不同有机酸发酵对四川泡菜品质的影响[J]. 中国酿造, 2025, 44(6): 212−217. [HUANG

Yuli, GE Lihong, GUO Caifu, et al. Effect of adding different organic acids for fermentation on the quality of Sichuan Paocai[J]. China Brewing, 2025, 44(6): 212−217.]
[19] 王雅利, 赵楠, 葛黎红, 等. 酵母菌对发酵萝卜品质的影响[J]. 食品与发酵工业, 2024, 50(24): 68−75. [WANG Yali, ZHAO Nan, GE Lihong, et al. Effect of yeast on quality of fermented radish[J]. Food and Fermentation Industries, 2024, 50(24): 68−75.]
[20] 史梅蓉, 伍亚龙, 吕鹏军, 等. 不同乳酸菌接种发酵对泡白菜理化特征及风味的影响[J]. 食品与发酵工业, 2024, 50(1): 80−88. [SHI Meimei, WU Yalong, LÜ Pengjun, et al. Effect of different lactic acid bacteria inoculation fermentation on the physicochemical characteristics and flavor of Chinese cabbage pickles[J]. Food and Fermentation Industries, 2024, 50(1): 80−88.]
[21] 韩宏娇, 丛敏, 李欣蔚, 等. 自然发酵酸菜化学成分含量和微生物数量的动态变化及其相关性分析[J]. 食品工业科技, 2019, 40(2): 148−153. [HAN Hongjiao, CONG Min, LI Xinwei, et al. Dynamic changes and correlation analysis of chemical components contents and microbial quantity in naturally fermented sauerkraut[J]. Science and Technology of Food Industry, 2019, 40(2): 148−153.]
[22] HOU Xinlei, WANG Jin, MEI Yuan, et al. Antibiofilm mechanism of dielectric barrier discharge cold plasma against *Pichia manshurica*[J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2023, 85: 103340.
[23] ZHAO Nan, GE Lihong, HUANG Yuli, et al. Impact of cold plasma processing on quality parameters of packaged fermented vegetable (radish Paocai) in comparison with pasteurization processing: Insight into safety and storage stability of products[J]. Innovative Food Science & Emerging Technologies, 2020, 60: 102300.
[24] 吴建梅, 汪铃, 刘金, 等. 香辛料对传统发酵泡菜中细菌群落结构及理化特性的影响研究[J]. 中国酿造, 2023, 42(10): 150−155. [WU Jianmei, WANG Ling, LIU Jin, et al. Effects of spices on bacterial community structure and physicochemical properties of traditional fermented pickles[J]. China Brewing, 2023, 42(10): 150−155.]
[25] 宁志雪, 朱立斌, 朱丹, 等. 复合乳酸菌发酵沙棘汁降酸的工艺优化及特性分析[J]. 食品工业科技, 2023, 44(18): 235−243. [NING Zhixue, ZHU Libin, ZHU Dan, et al. Process optimization and characteristic analysis of sea buckthorn juice deacidification by compound lactic acid bacteria fermentation[J]. Science and Technology of Food Industry, 2023, 44(18): 235−243.]
[26] 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. [LUO Wenshan, ZHANG Yan, XU Yujuan, et al. Effects of different mustard varieties on the quality of fermented pickle[J]. Modern Food Science & Technology, 2022, 38(5): 43−55.]
[27] 胡此海, 杨絮, 郭全友, 等. 四川泡菜母水的微生物群落与理化特性分析[J]. 中国食品学报, 2024, 24(2): 281−291. [HU Cihai, YANG Xu, GUO Quanyou, et al. Analysis of microbial community and physicochemical characteristics in Sichuan pickle brine[J]. Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology, 2024, 24(2): 281−291.]
[28] 王芮东, 李楠, 卫博慧, 等. 高效液相色谱法测定甘蓝泡菜发酵过程中的有机酸[J]. 食品工业科技, 2018, 39(6): 236−240. [WANG Ruidong, LI Nan, WEI Bohui, et al. Determination of organic acids in the fermentation process of cabbage kimchi by HPLC[J]. Science and Technology of Food Industry, 2018, 39(6): 236−240.]
[29] LIU Daqun, ZHANG Chengcheng, ZHANG Jianming, et al. Metagenomics reveals the formation mechanism of flavor metabolites during the spontaneous fermentation of potherb mustard (*Brassica juncea* var. *multiceps*)[J]. Food Research International, 2021, 148: 110622.
[30] SIKORSKA-ZIMNY K, BENEDUCE L. The glucosinolates and their bioactive derivatives in *Brassica*: A review on classification, biosynthesis and content in plant tissues, fate during and after processing, effect on the human organism and interaction with the gut microbiota[J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2021, 61(15): 2544−2571.
[31] 刘梦婷, 梅源, 刘佳琦, 等. 硫苷及其代谢产物对十字花科蔬菜风味形成的作用研究进展[J]. 食品科学, 2024, 45(23): 349−357. [LIU Mengting, MEI Yuan, LIU Jiaqi, et al. Research progress on the role of glucosinolates and their metabolites for the flavor formation in cruciferous vegetables[J]. Food Science, 2024, 45(23): 349−357.]
[32] DI Hongmei, MA Jie, ZHANG Yi, 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.
[33] MARCINKOWSKA M A, JELEŃ H H. Role of sulfur compounds in vegetable and mushroom aroma[J]. Molecules, 2022, 27(18): 6116.
[34] HUANG Xiaoxin, CHENG Bing, WANG Yaqin, et al. Effects of fresh-cut and storage on glucosinolates profile using broccoli as a case study[J]. Horticultural Plant Journal, 2023, 9(2): 285−292.
[35] ZHU Biao, LIANG Zhile, ZANG Yunxiang, et al. Diversity of glucosinolates among common Brassicaceae vegetables in China[J]. Horticultural Plant Journal, 2023, 9(3): 365−380.
[36] BELL L, OLOYEDE O O, LIGNOU S, et al. Taste and flavor perceptions of glucosinolates, isothiocyanates, and related compounds[J]. Molecular Nutrition & Food Research, 2018, 62(18): 1700990.
[37] EIB S, RAMOS GAJEK S, SCHNEIDER D J, et al. Determination of detection thresholds of sinigrin in water-based matrix and allyl isothiocyanate in water- and oil-based matrices[J]. Journal of Sensory Studies, 2020, 35(4): e12571.
[38] LIANG Miao, WANG Rui, WU Yajian, et al. Comparative analysis of volatile flavor compounds in seven mustard pastes via HS-SPME-GC-MS[J]. Molecules, 2023, 28(14): 5482.
[39] BOURANIS J A, BEAVER L M, HO E. Metabolic fate of dietary glucosinolates and their metabolites: A role for the microbiome[J]. Frontiers in Nutrition, 2021, 8: 748433.
[40] CÁMARA-MARTOS F, BOLÍVAR A, RABASCO-VÍLCHEZ L, et al. Exploring the bioaccessibility, *in vitro* colonic fermentation, and the impact on the intestinal microbiota of allyl-and benzyl-isothiocyanate from white and Ethiopian mustard[J]. Food Research International, 2025, 203: 115781.
[41] BOURANIS J A, BEAVER L M, CHOI J, et al. Composition of the gut microbiome influences production of sulforaphane-nitrile and iberin-nitrile from glucosinolates in broccoli sprouts[J]. Nutrients, 2021, 13(9): 3013.
[42] WANG Yingyu, ZHANG Chenhao, LIU Fengsong, et al. Ecological succession and functional characteristics of lactic acid bacteria in traditional fermented foods[J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2023, 63(22): 5841−5855.
[43] de VUYST L, LEROY F. Functional role of yeasts, lactic acid bacteria and acetic acid bacteria in cocoa fermentation processes[J]. FEMS Microbiology Reviews, 2020, 44(4): 432−453.