

不同发酵方式盐渍萝卜挥发性成分动态分析

汪冬冬¹, 唐 垚¹, 陈 功^{1,2}, 李 恒^{1,2}, 明建英¹, 蔡地烽¹, 王 勇¹, 伍亚龙¹, 张其圣^{1,2,*}

(1.四川东坡中国泡菜产业技术研究院, 四川 眉山 620000;

2.四川省食品发酵工业研究设计院, 四川 成都 611130)

摘 要:以不同发酵方式盐渍萝卜为研究对象,分析发酵过程中挥发性成分及其差异性。制备水分活度为0.95、0.90和0.85的盐渍萝卜模拟湿态、半干态和干态工艺,采用顶空固相微萃取-气相色谱-质谱联用法分析不同发酵方式盐渍萝卜发酵过程中挥发性风味成分变化,结合多元统计方法分析盐渍萝卜的主成分及特征挥发性成分。结果表明,湿态盐渍萝卜以乳酸菌为主导发酵,半干态和干态盐渍萝卜微生物影响较小,其发酵程度弱或不发酵。3种不同发酵方式的盐渍萝卜发酵30 d共分析出挥发性风味物质61种,基于主成分分析发现4-异硫代氰酸甲基戊酯、己醇、癸醛、壬醛、二甲基四硫醚、3-羟基-2-丁酮、1-辛烯-3-醇、1-异硫代氰酸己酯、3,5-辛二烯-3-酮、4-仲丁基苯酚、1-庚醇和顺-2-戊烯醇为正影响挥发性物质的典型代表。采用偏最小二乘法判别分析和层次聚类方法筛选出重要度(VIP>1.2)以及t检验($P<0.05$)的挥发性特征成分12种。其中乙酸为湿态盐渍萝卜特征性成分;1-戊烯-3-醇、顺-2-戊烯醇、1,1-二(甲硫基)乙烷和甲氧基苯酚为半干态盐渍萝卜特征性成分;己酸、二甲基三硫醚、3-羟基-2-丁酮、2-正戊基呋喃、二甲基四硫醚、庚醛和苯乙醇为干态盐渍萝卜特征性成分。这些特征挥发性风味成分有助于区分3种发酵方式盐渍萝卜的工艺特性和发酵状态。研究结果为提升盐渍萝卜风味品质提供一定的理论依据。

关键词:盐渍萝卜;挥发性成分;顶空固相微萃取-气相色谱质谱联用法;多元统计分析

Dynamic Analysis of Volatile Components of Salted Radish during Different Fermentation Processes

WANG Dongdong¹, TANG Yao¹, CHEN Gong^{1,2}, LI Heng^{1,2}, MING Jianying¹, CAI Difeng¹, WANG Yong¹, WU Yalong¹, ZHANG Qisheng^{1,2,*}

(1. Sichuan Dongpo Chinese Paocai Industrial Technology Research Institute, Meishan 620000, China;

2. Sichuan Food Fermentation Industry Research and Design Institute, Chengdu 611130, China)

Abstract: The changes of volatile flavor components during the fermentation of salt radishes with water activities of 0.95, 0.90 and 0.85, respectively simulating the wet, semi-dry and dry state were analyzed by headspace solid phase microextraction-gas chromatography-mass spectrometry (HS-SPME-GC-MS). To identify the main components and characteristic volatile components, the data acquired were processed by multivariate statistical analysis (MSA). The results showed that the microflora of wet salted radish was dominated by lactic acid bacteria, while fermentation was very weak or did not occur in the semi-dry and dry state. A total of 61 volatile flavor substances were detected from the three samples fermented for 30 days. Based on principal component analysis (PCA), it was found that 4-methylpentyl isothiocyanate, 1-hexanol, decanal, nonanal, tetrasulfide, dimethyl, acetoin, 1-octen-3-ol, 1-isothiocyanatohexane, 3,5-octadien-2-one, 4-(1-methylpropyl)phenol, 1-heptanol and *cis*-2-pentenol were identified as typical representatives of the volatile substances. Twelve volatile components were selected with variable importance in the projection (VIP > 1.2) and *t*-test ($P < 0.05$) by partial least squares discriminant analysis and hierarchical clustering. Among them, acetic acid was the characteristic component of wet salted radish. 1-penten-3-ol, *cis*-2-pentenol, 1,1-bis(methylthio)ethane, oxime-, methoxy-phenyl-were the characteristic components of semi-dry salted radish, and hexanoic acid, dimethyl trisulfide, acetoin, 2-pentylfuran, dimethyl tetrasulfide, heptanal, and phenylethyl alcohol were the characteristic components of dry salted radish. These characteristic

收稿日期: 2019-04-14

基金项目: “十三五”国家重点研发计划重点专项(2018YFD0400403); 四川省转移支付项目(2017NZYZF0099); 四川省科技计划项目(2019YFN0003)

第一作者简介: 汪冬冬(1990—)(ORCID: 0000-0001-5940-5123), 男, 工程师, 硕士研究生, 研究方向为食品微生物。
E-mail: 185751947@qq.com

*通信作者简介: 张其圣(1967—)(ORCID: 0000-0002-6558-0013), 男, 正高级工程师, 博士, 研究方向为发酵工程。
E-mail: bigbeastone@163.com

volatile flavor components could clearly distinguish the three salted radishes. These research results provide a theoretical basis for improving the flavor quality of salted radish.

Keywords: salted radish; volatile components; headspace solid phase microextraction-gas chromatography-mass spectrometry; multivariate statistical analysis

DOI:10.7506/spkx1002-6630-20190414-186

中图分类号: TS207.3

文献标志码: A

文章编号: 1002-6630 (2020) 06-0146-09

引文格式:

汪冬冬, 唐焱, 陈功, 等. 不同发酵方式盐渍萝卜挥发性成分动态分析[J]. 食品科学, 2020, 41(6): 146-154. DOI:10.7506/spkx1002-6630-20190414-186. <http://www.spkx.net.cn>

WANG Dongdong, TANG Yao, CHEN Gong, et al. Dynamic analysis of volatile components of salted radish during different fermentation processes[J]. Food Science, 2020, 41(6): 146-154. (in Chinese with English abstract) DOI:10.7506/spkx1002-6630-20190414-186. <http://www.spkx.net.cn>

新鲜蔬菜的盐(泡)渍贮藏加工起源于中国, 并在上千年的发展过程中成为我国最普遍和大众化的蔬菜加工方法。其中盐渍菜是一种传统发酵蔬菜制品的典型代表, 其利用以乳酸菌为主的优势本土益生菌群发酵产酸, 形成具有“清香、嫩脆、爽口”特点的蔬菜制品。泡渍与发酵伴随着一系列复杂的物理、化学和生物反应的变化, 产生出柔和的风味与芳香物质成分^[1]。受原料、区域、工艺等因素的影响, 我国盐渍菜呈现出多样化。根据成品形态不同, 可分为湿态、半干态和干态3种, 三者之间没有具体的划分界线, 但都是用盐直接渍制而成。一般认为, 湿态盐渍是指新鲜蔬菜和水一同添加进行发酵, 如四川盐渍菜、东北酸菜等; 半干态是指加工前不加水直接进行盐渍, 如涪陵榨菜、韩国盐渍菜等; 干态盐渍是指加工前或加工后进行干燥, 如萧山萝卜干、宜宾芽菜等^[2]。

风味是评价盐渍菜品质的重要指标, 很大程度上决定了消费者的选择, 而不同工艺的产品, 风味迥异。湿态盐渍菜研究中, Xiao Zuobing等^[3]通过气相色谱-质谱(gas chromatography-mass spectrometry, GC-MS)发现泡辣椒含有67种挥发性化合物, 结合多重分析发现主成分为乙酸、2-乙基苯酚、L-芳樟醇、十三烷、丁酸丁酯和3-萜烯。徐丹萍等^[4]研究发现四川泡萝卜发酵以后主体风味为酯类, 主要为1-异硫代氰酸丁酯、异硫氰酸乙酯, 相对含量在10%以上。侯晓艳等^[5]采用接种发酵和自然发酵对比发现, 泡萝卜中挥发性风味物质主要是烯类、酯类和酮类。Kim等^[6]研究韩国盐渍泡萝卜中主要为含硫化物, 特征性风味物质为硫氰酸甲酯、己醛、四氢噻吩和苯甲酸苯乙酯。半干态盐渍菜研究中, Hwang^[7]和Hong等^[8]研究发现韩国泡菜的主要风味物质为二甲基二硫醚、二甲基三硫醚等含硫化物。汪冬冬等^[9]采用GC-MS研究6种典型工业盐渍菜得到174种挥发性成分, 其中乙醇、苯乙醇、2-乙基己醇、乙酸、丁酸、乙酸乙酯可以用于区分发酵

型和非发酵型盐渍菜。干态盐渍菜研究中, 吴华昌等^[10]采用GC-MS对不同发酵时间芽菜的挥发性香气进行分析, 共鉴定出75个挥发组分, 其中醇类、酸类、酯类和烷烃类等化合物为主体香味物质。刘大群等^[11]使用电子鼻和GC-MS从风脱水盐和脱水萧山萝卜干中检测出58种和35种挥发性香气成分, 其中风脱水萝卜干挥发性香气成分种类高于盐脱水萝卜干。

由此可看出, 盐渍菜的风味受工艺、原辅料、微生物等影响。湿态、半干态和干态工艺盐渍菜为我国的传统盐渍菜中的典型工艺, 然而目前少见报道3种发酵方式的盐渍菜品质特性和挥发性风味成分研究。本实验以盐渍菜中常用的萝卜为原料, 通过设定3种不同水分活度的盐渍萝卜模拟湿态、半干态和干态工艺, 测定发酵过程中的理化性质、微生物数量和挥发性风味等指标, 研究不同发酵方式盐渍萝卜发酵过程中挥发性风味成分, 为盐渍萝卜的加工和风味调控提供数据参考。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

2018年4月于四川眉山当地农贸市场采购直径9~11 cm、长度20~25 cm无腐烂及变软的新鲜长根型白萝卜约200 kg, 总计3次采购完, 采购回的原料放置于冷库密封贮藏待用。

无碘食盐 市购; MRS培养基、PDA培养基、PCA培养基 北京陆桥技术股份有限公司; 其他均为国产分析纯试剂。

1.2 仪器与设备

GCMS-QP2010 GC-MS联用仪 日本岛津仪器公司; DB-WAX色谱柱(60 m×0.25 mm, 0.25 μm) 美国安捷伦公司; 15 mL顶空进样瓶、固相微萃取(solid phase microextraction, SPME)装置、50/30 μm二乙烯基苯/碳分子筛/聚二甲基硅氧烷萃取头 美国Supelco公司;

HD-3A智能水分活度检测量仪 无锡市华科仪器仪表有限公司; JN-400i无菌均质器 宁波江南仪器厂; 雷磁PHS-3C型pH计 上海仪电科学仪器股份有限公司。

1.3 方法

1.3.1 盐渍菜制作及取样

根据传统盐渍萝卜的工艺^[1]和预实验的优化, 本实验湿态盐渍萝卜(S)设计如下: 将萝卜洗干净, 切成长宽为2~4 cm的块状, 按菜和灭菌盐水质量比1:1装入玻璃盐渍菜坛, 平衡后盐度为3%, 盐渍萝卜水分活度控制在0.95, 坛沿加水密封发酵, 每坛菜水总质量1 kg, 装满至坛沿口处。半干态盐渍萝卜(B): 将萝卜洗干净晾干切成长为6~8 cm, 宽为1 cm的条状, 晒干后用水清洗干净后再拧干除去多余水分, 装坛发酵, 平衡后盐度为7%, 水分活度控制在0.90, 压紧装满至坛沿处, 加水密封, 每坛菜总质量1 kg; 干态盐渍萝卜(G): 制备同半干态, 但水分活度控制在0.85。3种工艺类型盐渍萝卜各制备10坛, 为避免盐渍初期食盐渗透不均匀等影响, 盐渍1 d后开始取样分析, 取发酵1、5、10、20、30 d的萝卜固体进行分析; 为了避免取样对盐渍萝卜的影响, 每次分析各取2坛。

1.3.2 理化性质测定

水分活度: 取粉碎混匀后的样品约20 g, 置于恒质量后的康氏皿中, 置于水分活度测试仪器中进行测试, 水分活度仪常温下测定30 min至稳定后结束。

水分质量分数: 参考GB/T 5009.3—2016《食品中水分的测定》中直接干燥法测定萝卜水分。

pH值测定: 参考GB/T 10468—1989《水果和蔬菜产品pH值的测定方法》, pH值用PHS-3C型pH计进行测定。

总酸测定: 参考GB/T 12456—1990《食品中总酸的测定方法》中电位滴定法, 用0.05 mol/L盐酸标准滴定溶液反滴定至pH值为8.2, 总酸含量以乳酸计。

1.3.3 微生物数量变化

取25 g萝卜固体加入到225 mL含0.85% NaCl无菌生理盐水的均质袋中, 用拍击式均质器拍打2 min, 匀浆后进行1:10梯度稀释, 选取合适的稀释度和培养基, 将0.5 mL稀释液采用倾注法分别分析乳酸菌数量、细菌总数和真菌总数。乳酸菌和细菌分别在MRS、PCA培养基中于37 °C培养48 h, 真菌在PDA培养基中于30 °C培养48~72 h, 菌落数在30~300之间的平板记录菌落数。平行重复3次, 取其平均值, 以未接菌株的培养基作为空白对照。

1.3.4 挥发性成分分析

样品处理和检测条件: 样品的前处理参照Choi等^[12]的方法略改, 取组织捣碎后的样品2.0 g, 2.5 g NaCl, 5 μ L内标(4-甲基-2-戊醇甲醇溶液, 质量浓度为0.4 μ g/mL)

于15 mL顶空进样瓶中, 混匀密封置于40 °C恒温槽中水浴加热平衡30 min, 将老化后的SPME萃取头插入到顶空进样瓶中吸附30 min, 然后拔出萃取头插入到GC-MS进样口, 250 °C解吸5 min, 每个样品独立测定2次。

GC条件: 不分流进样模式; 进样温度40 °C; 进样口温度250 °C; 总流量50 mL/min; 进样时间1 min; 控制流量方式: 线速度; 载气为He; 载气流量1.2 mL/min。程序升温参考文献[13]和[9]的方法并作优化。程序升温: 40 °C, 保持0 min; 以16 °C/min升温到75 °C, 保持0 min; 以2 °C/min升温到94 °C(保持1 min), 以2 °C/min升温到110 °C, 保持1 min; 以3 °C/min升温到122 °C, 保持1 min; 以2 °C/min升温到130 °C, 保持1 min; 以2 °C/min升温到136 °C, 保持1 min; 以2 °C/min升温到143 °C, 保持1 min; 以6 °C/min升温到200 °C, 保持5 min。

MS条件: 电子电离源; 电子能量70 eV; 离子源温度230 °C; 接口温度250 °C; 检测器电压0.1 kV; Scan采集方式; 质量扫描范围35.00~350.00 u。

定性和定量分析: 由GC-MS得到的色谱图, 经计算机在标准谱库NIST 11和Wiley中比对检索, 选取相似度大于80(最大值为100)的物质进行定性分析, 并准确地鉴定出各样品的挥发性成分, 同时采用4-甲基-2-戊醇的甲醇溶液(0.4 μ g/mL)为内标进行半定量分析^[14], 得到各组分的质量浓度。

1.3.5 多元统计分析

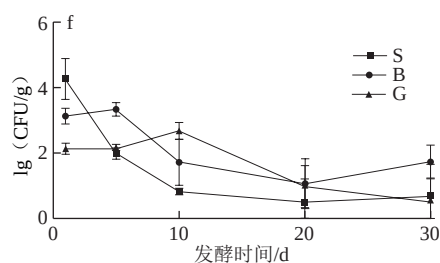
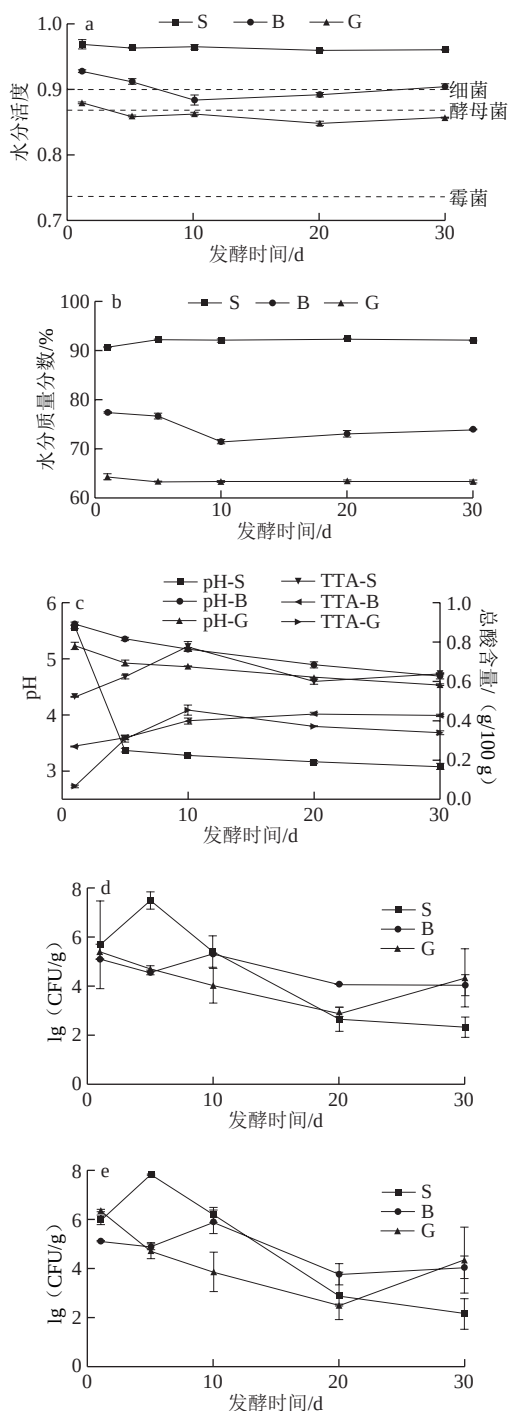
离子流图、微生物计数和理化性质的结果使用Origin Pro 9.1进行处理与分析。挥发性成分导入SPSS 22.0软件中进行极值法标准化处理, 然后在SIMCA 14.1中进行层次聚类分析(hierarchical cluster analysis, HCA)、主成分分析(principal component analysis, PCA)和偏最小二乘法-判别分析(partial least squares-discrimination analysis, PLS-DA)^[15]。HCA按照样本数大小分类, 使用离差平方和算法。PCA图中椭圆为Hotelling的T2区域, 表示建模变异的95%置信区间。PCA模型的质量由 R^2 (数据的方差)和 Q^2 值(模型的预测)表示, PLS-DA模型进行200次迭代置换测试以避免模型过度拟合, 将分析变量重要性得分值大于1.2且t检验($P < 0.05$)作为特征挥发性成分。

2 结果与分析

2.1 3种盐渍菜发酵过程中的微生物数量和理化特性变化

如图1a、b所示, 3种发酵方式盐渍萝卜水分活度: 湿态盐渍萝卜>半干态盐渍萝卜>干态盐渍萝卜。水分含量: 湿态盐渍萝卜>半干态盐渍萝卜>干态盐渍萝卜。其中湿态盐渍萝卜发酵过程中水分活度维持在

0.96左右,水分质量分数维持在91%左右;半干态盐渍萝卜水分活度介于0.88~0.92之间,水分质量分数维持在71%~77%之间;干态盐渍萝卜水分活度介于0.84~0.87之间,水分质量分数维持在63%附近。3种盐渍萝卜的水分活度和水分含量总体都保持稳定趋势,差异明显。根据Beuchat^[16]有关水分活度对微生物生长的影响,结合盐渍萝卜水分分布,可知大多数细菌可以在湿态和半干态盐渍萝卜上生长,而对干态盐渍萝卜影响不大,说明水分的差异会对3种盐渍萝卜发酵程度产生一定影响。



a.水分活度; b.水分质量分数; c. pH值和总酸; d.细菌数量; e.乳酸菌数量; f.真菌数量。S.湿态盐渍萝卜发酵样品; B.半干态盐渍萝卜发酵样品; G.干态盐渍萝卜发酵样品。下同。

图1 不同发酵方式盐渍萝卜微生物数量和理化特性变化

Fig. 1 Changes in microbial quantity and physicochemical properties of salted radish during fermentation

pH值和酸度显示盐渍萝卜品质,而且还显示盐渍萝卜中乳酸菌的生长情况^[17-18]。如图1c所示,随着发酵的进行,盐渍萝卜pH值都呈下降趋势,但湿态盐渍萝卜pH值下降速度较快。发酵5 d后湿态盐渍萝卜的pH值变化平缓,而半干态和干态盐渍萝卜整个阶段pH值都大于4.5,表明半干态和干态盐渍萝卜发酵过程中产酸较弱。湿态工艺发酵初期总酸(以乳酸计)含量快速升高,发酵到第10天,达到峰值4.5%,半干态和干态盐渍萝卜总酸含量呈现缓慢上升至稳定的趋势,但远高于湿态盐渍萝卜的总酸,这是由于原料中的有机酸在脱水过程中出现富集。

盐渍萝卜发酵过程中伴随着微生物演替和数量变化,发酵初期附着在萝卜表面的微生物利用萝卜原料中的营养物质迅速繁殖。如图1d所示,发酵过程中湿态盐渍萝卜的细菌数量呈现先上升后下降的趋势,在第5天达到峰值,而半干态和干态盐渍萝卜呈逐渐下降趋势。结合图1e,乳酸菌数量变化趋势和数量级同细菌相同,表明盐渍萝卜发酵过程中的细菌主要是以乳酸菌为主,该结论和相关文献^[19-22]研究结果相一致。如图1f所示,3种盐渍萝卜真菌数量都呈下降的趋势,且初期真菌数量级远低于细菌,表明盐渍萝卜中微生物主要以细菌为主导,真菌影响较小。

综上所述,湿态盐渍萝卜属于乳酸菌主导发酵的蔬菜制品,发酵程度高,产酸快,而半干态和干态盐渍萝卜整个过程微生物数量较低,发酵程度弱或不发酵。

2.2 3种盐渍萝卜发酵过程中的挥发性成分

基于GC-MS途径分析3种发酵方式下盐渍萝卜的挥发性风味物质,如图2所示。3种盐渍萝卜离子强度大的物质出峰时间类似,但强度差异较大,表明有共同挥发性物质,但含量存在差异。湿态盐渍萝卜在15 min附近的离子强度随着发酵进行先增强后减弱;半干态盐渍萝卜在20 min附近的离子强度随着发酵进行先逐渐增强后减弱,而干态工艺是逐渐增强。说明3种盐渍萝卜初始风味物质有共性和个性,随着发酵的进行,部分风味物质逐渐累积或被转换。

表 1 不同发酵方式盐渍萝卜发酵过程中挥发性风味成分
Table 1 Contents of volatile flavor components in salted radishes fermented for different days

编号	成分	保留 时间/min	挥发性成分含量/(μg/g)														
			S-1	S-5	S-10	S-20	S-30	B-1	B-5	B-10	B-20	B-30	G-1	G-5	G-10	G-20	G-30
醇类																	
A1	乙醇	5.790	—	—	—	—	—	0.02±0.00	—	—	—	0.01±0.02	0.05±0.00	—	0.04±0.02	—	—
A2	1-戊烯-3-醇	10.165	—	—	—	—	—	0.01±0.00	0.07±0.00	0.06±0.02	0.05±0.00	0.08±0.00	0.01±0.00	0.02±0.00	0.01±0.00	—	—
A3	异戊醇	11.779	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0.02±0.00	0.04±0.04	—	—
A4	1-戊醇	13.404	—	—	—	—	—	0.01±0.01	0.02±0.00	0.03±0.00	—	0.04±0.00	0.02±0.00	0.02±0.00	0.00±0.01	—	—
A5	顺-2-戊烯醇	16.536	—	—	—	—	—	0.01±0.02	0.11±0.01	0.13±0.00	0.09±0.00	0.14±0.00	—	0.01±0.00	0.01±0.00	—	—
A6	己醇	18.243	—	—	—	—	—	0.03±0.02	0.05±0.00	0.06±0.01	0.02±0.00	0.02±0.00	0.17±0.02	0.2±0.08	0.09±0.01	0.09±0.02	0.06±0.02
A7	3-己烯-1-醇	19.825	—	—	—	—	—	0.001452	0.01±0.01	0.00±0.00	—	—	—	—	—	—	—
A8	2-壬烯-1-醇	20.375	0.04±0.05	—	—	0.11±0.04	0.02±0.03	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
A9	反-2-己烯醇	20.930	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0.01±0.01	0.01±0.01	—	—	—
A10	1-辛烯-3-醇	23.332	—	—	—	—	—	—	0.01±0.00	0.02±0.00	—	0.01±0.01	0.01±0.02	0.03±0.04	0.03±0.05	—	—
A11	1-庚醇	23.691	—	—	—	—	—	0.02±0.01	0.02±0.00	0.05±0.01	—	0.01±0.00	0.03±0.00	0.03±0.01	0.02±0.00	0.01±0.00	0.01±0.00
A12	异辛醇	25.624	0.13±0.04	0.06±0.02	0.01±0.00	0.27±0.06	0.15±0.04	0.08±0.04	0.07±0.00	0.03±0.01	0.16±0.01	0.18±0.02	0.04±0.01	0.05±0.01	0.1±0.05	0.03±0.00	0.08±0.08
A13	1-辛醇	29.377	0.02±0.00	—	0.01±0.00	—	—	0.06±0.01	0.04±0.00	0.10±0.03	0.02±0.00	0.02±0.00	0.04±0.00	0.05±0.01	0.03±0.00	0.03±0.00	0.03±0.01
A14	2,3-丁二醇	30.459	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0.00±0.00	0.01±0.01	—	—	—
A15	1-壬醇	35.403	—	—	—	—	—	0.02±0.02	0.03±0.00	0.05±0.02	—	0.01±0.01	—	0.01±0.01	0.02±0.00	—	—
A16	苯乙醇	46.340	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0.01±0.02
A17	苯甲醇	46.343	0.01±0.01	0.01±0.00	—	—	—	0.01±0.01	0.02±0.00	0.05±0.03	—	—	0.03±0.00	0.02±0.00	0.04±0.00	—	—
含硫化合物																	
B1	二甲基二硫醚	8.338	0.46±0.58	0.14±0.08	0.13±0.09	0.14±0.03	0.08±0.11	0.11±0.16	0.36±0.19	0.46±0.25	0.08±0.01	0.03±0.04	1.06±0.54	—	—	0.09±0.13	—
B2	二甲基三硫醚	20.121	0.13±0.12	0.04±0.01	0.13±0.10	0.09±0.03	0.07±0.08	0.31±0.36	0.62±0.23	1.82±1.10	0.51±0.02	0.54±0.20	1.81±0.74	2.02±1.23	1.72±0.47	3.86±0.10	3.08±2.11
B3	4-异硫代羧酸甲基戊酯	28.312	—	—	—	—	—	0.02±0.03	0.01±0.00	0.10±0.14	0.02±0.01	0.02±0.01	0.16±0.06	0.1±0.06	0.08±0.05	0.08±0.01	0.03±0.04
B4	1-异硫代羧酸己酯	31.146	—	—	—	—	—	0.00±0.01	—	0.06±0.02	—	—	0.08±0.05	0.03±0.02	0.02±0.01	0.01±0.00	—
B5	1,1-二(甲硫基)乙烷	34.945	—	—	—	—	—	—	0.00±0.01	0.42±0.13	0.05±0.01	0.04±0.02	—	—	—	—	—
B6	二甲基四硫醚	40.400	—	—	—	—	—	—	—	0.02±0.03	—	—	0.06±0.02	0.06±0.03	0.06±0.01	0.04±0.00	0.03±0.00
醛类																	
C1	正己醛	8.340	—	0.08±0.11	0.23±0.31	—	—	—	—	0.99±0.53	0.20±0.01	0.15±0.21	—	—	—	—	—
C2	庚醛	11.196	—	—	0.02±0.00	—	—	—	—	—	—	—	0.06±0.08	0.06±0.09	0.05±0.08	0.06±0	0.02±0.04
C3	2-己烯醛	12.422	—	—	—	—	—	—	—	0.10±0.14	0.05±0.08	0.04±0.07	0.05±0.07	0.05±0.07	0.04±0.05	0.03±0.00	0.01±0.01
C4	辛醛	15.244	—	—	0.05±0.00	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
C5	2-庚烯醛	16.941	—	—	—	—	—	—	—	0.01±0.00	—	—	—	—	—	—	—
C6	壬醛	20.302	0.04±0.05	0.05±0.00	0.10±0.00	—	0.04±0.06	0.15±0.01	0.10±0.02	0.30±0.14	0.15±0.01	0.15±0.01	0.29±0.12	0.25±0.13	0.21±0.09	0.19±0.03	0.19±0.01
C7	反-2-辛烯醛	22.370	—	—	0.01±0.00	—	—	—	—	0.03±0.01	—	0.02±0.03	0.02±0.00	0.01±0.01	0.01±0.00	—	—
C8	3-呋喃甲醛	24.070	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0.01±0.01	—	—
C9	(E,E)-2,4-庚二烯醛	25.765	—	—	—	—	—	—	—	0.05±0.01	—	—	0.03±0.01	0.01±0.01	0.01±0.01	—	—
C10	癸醛	26.000	—	—	0.01±0.00	—	—	—	—	0.03±0.01	—	—	0.02±0.01	0.02±0.02	0.02±0.01	0.01±0.00	0.01±0.00
酮类																	
D1	2,6-二甲基-4-庚酮	10.829	—	—	0.07±0.01	—	—	—	—	—	—	—	0.04±0.06	0.04±0.05	0.03±0.05	0.04±0.00	0.02±0.03
D2	3-羟基-2-丁酮	15.197	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0.10±0.02	0.11±0.04	0.09±0.02	0.07±0.00	0.08±0.03
D3	甲基庚烯酮	17.475	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0.04±0.03	0.03±0.03	—	—
D4	3,5-辛二烯-3-酮	30.074	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0.11±0.00	0.08±0.02	0.05±0.01	0.02±0.00	0.01±0.02
D5	2-十一酮	31.623	—	0.01±0.00	0.04±0.02	0.01±0.00	0.01±0.01	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
D6	1-(甲硫代)-3-戊酮	31.643	—	—	—	—	—	—	—	0.02±0.00	—	—	—	—	—	—	—
D7	2-十三烷酮	43.727	—	—	0.02±0.00	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
D8	香叶基丙酮	45.521	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0.01±0.00	0.01±0.00	—	—	—
酸类																	
E1	乙酸	23.283	—	0.21±0.04	0.17±0.06	0.32±0.08	0.24±0.09	—	—	—	—	—	0.02±0.02	—	—	0.07±0.00	0.07±0.01
E2	2-甲基丁酸	35.905	—	—	0.00±0.00	0.00±0.00	0.00±0.00	0.00±0.00	0.00±0.00	0.00±0.00	0.00±0.00	0.00±0.00	0.00±0.00	0.01±0.00	0.01±0.00	—	—
E3	(E)-5-癸烯基乙酸	44.414	—	—	0.01±0.01	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
E4	己酸	45.140	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0.02±0.00	0.03±0.00	0.03±0.00	0.03±0.00	0.03±0.00
E5	葡萄糖酸	48.606	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0.01±0.00	0.01±0.00	0.01±0.00	—	—
E6	辛酸	51.444	—	—	—	—	—	—	—	0.01±0.00	—	0.01±0.00	—	—	—	—	—
酯类																	
F1	乳酸乙酯	17.759	—	—	—	—	0.00±0.01	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—

续表1

编号	成分	保留 时间/min	挥发性成分含量/(μg/g)														
			S-1	S-5	S-10	S-20	S-30	B-1	B-5	B-10	B-20	B-30	G-1	G-5	G-10	G-20	G-30
F2	2,4,4-三甲基戊烷-1,3-二基双异丁酸酯	46.386	0.00±0.00	0.00±0.00	0.09±0.14	0.00±0.00	0.03±0.04	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	其他类																
G1	2-乙基呋喃	6.079	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0.04±0.05	0.08±0.12	0.06±0.09	—	—
G2	2,6-二甲基-十一烷	6.630	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0.01±0.02	0.00±0.01	0.01±0.01	—	—
G3	正十二烷	11.359	0.01±0.01	0.00±0.01	—	—	—	0.01±0.01	0.02±0.00	0.00±0.01	0.03±0.00	—	—	—	0.01±0.01	0.02±0.03	—
G4	2-正戊基呋喃	12.741	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0.01±0.01	0.04±0.06	0.03±0.03	0.06±0.01	0.04±0.06
G5	反-2-(2-戊烯基)-呋喃	15.738	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0.00±0.00	0.01±0.01	0.00±0.01	0.00±0.01	0.01±0.02
G6	3,5,5-三甲基-2-己烯	25.309	—	—	—	—	—	—	0.01±0.00	0.01±0.01	—	—	—	—	0.01±0.01	—	—
G7	十六烷	25.730	—	—	—	—	0.01±0.01	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
G8	3-甲基-5-丙基壬烷	25.756	0.01±0.00	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
G9	十五烷	25.756	0.01±0.01	0.00±0.00	0.00±0.00	0.02±0.03	0.02±0.00	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
G10	甲氧基苯酚	41.519	—	0.01±0.02	—	—	—	0.01±0.02	0.02±0.03	0.01±0.02	—	0.02±0.00	—	—	—	—	—
G11	2,6-二叔丁基-4-甲基苯酚	47.420	—	—	—	0.01±0.02	0.01±0.02	—	—	0.01±0.02	0.01±0.02	—	—	—	—	—	—
G12	4-仲丁基苯酚	50.295	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0.01±0.02	0.01±0.02	0.01±0.02	—	—

注：—，未检测出或含量低于表达值。

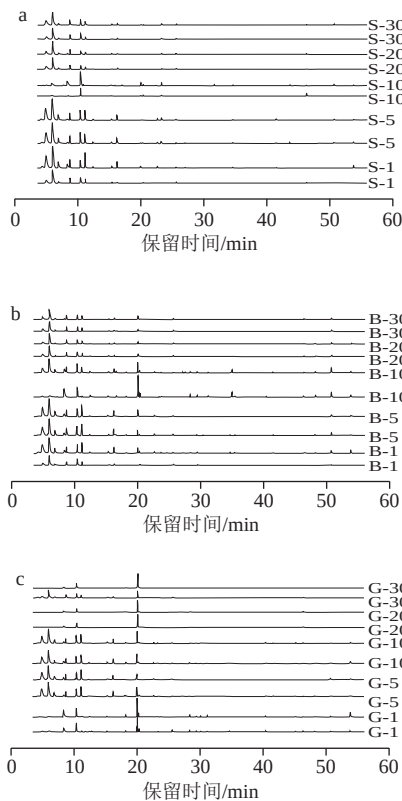


图2 不同发酵方式盐渍萝卜总离子流图
a.湿态盐渍萝卜；b.半干态盐渍萝卜；c.干态盐渍萝卜。
S-1.湿态盐渍萝卜发酵1 d样品；B-1.半干态盐渍萝卜发酵1 d样品；G-1.干态盐渍萝卜发酵1 d样品。下同。

图2 不同发酵方式盐渍萝卜总离子流图
Fig. 2 Total ion current chromatograms of volatile components from salted radishes fermented for different days

通过GC-MS分析3种盐渍萝卜发酵30 d共得到挥发性风味物质61种，其中湿态工艺盐渍萝卜26种，半干态盐渍萝卜30种，干态盐渍萝卜46种，结果如表1

所示。这些挥发性成分中包括醇类（17种）、含硫化物（6种）、醛类（10种）、酮类（8种）、酸类（6种）、酯类（2种）和其他类化合物（12种）。湿态发酵盐渍萝卜主要为含硫化物、醇类、醛类和酸类，主要包含异辛醇、二甲基二硫醚、二甲基三硫醚、乙酸和正己醛；半干态发酵主要为含硫化物、醇类和醛类，主要包括异辛醇、顺-2-戊烯醇、二甲基二硫醚、二甲基三硫醚和正己醛；干态发酵主要为含硫化物、醇类、醛类和酮类，主要包括己醇、4-异硫代氰酸甲基戊酯、二甲基三硫醚、二甲基二硫醚、壬醛、3-羟基-2-丁酮。

2.3 3种发酵方式的盐渍萝卜挥发性风味组分PCA

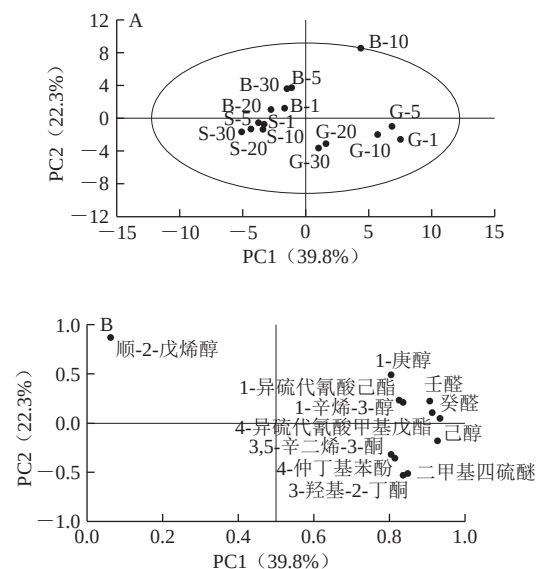
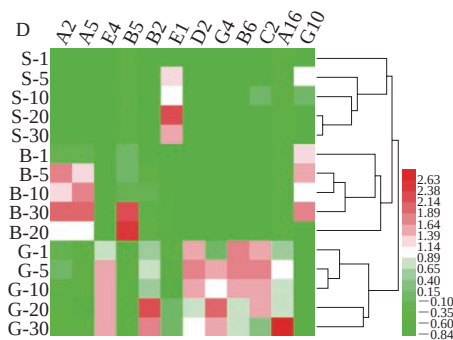
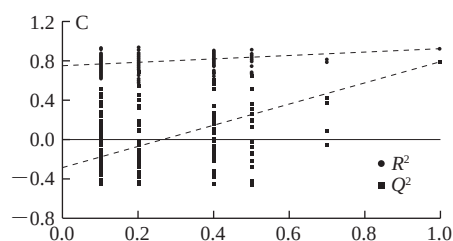
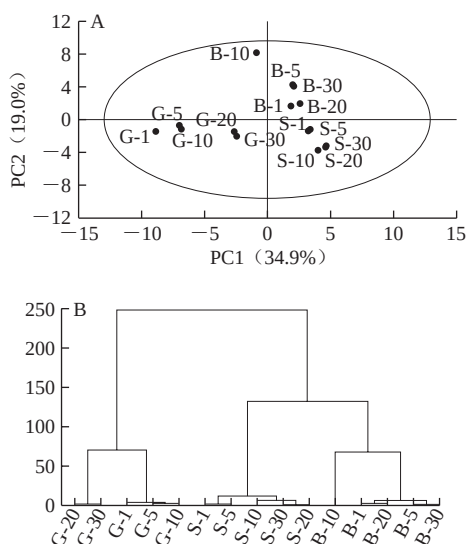


图3 基于PCA解析不同发酵方式盐渍萝卜挥发性风味组分
A. PCA得分图；B.主成分载荷矩阵图。
Fig. 3 PCA analysis of volatile flavor components of three salted radishes

为反应3种盐渍萝卜挥发性风味差异和组间样本差异,采用PCA无监督的多元变量统计分析。筛选在3个样品上都含有的46种风味成分进行PCA,3种盐渍萝卜特征变量62.1%的累计差异被描述,包含39.8%的PC1和22.3%的PC2,结果如图3A所示。同一95%置信区域显示3种盐渍萝卜得到明显的区分。根据发酵周期,湿态盐渍萝卜样品点处于第3象限,随着发酵进行,样品点逐渐移动;半干态盐渍萝卜处于第1象限和第2象限,其中发酵10 d样品差异较大,可能发酵过程中受到污染,风味异常;干态盐渍萝卜处于第4象限,各发酵阶段样品之间差异明显,这与干态样品干基质量,风味物质含量高有关。同时结合图1a、c可知,3种盐渍萝卜初始风味差异大,半干态和干态盐渍萝卜风味主要发生氧化、分解等理化过程,而湿态盐渍萝卜发酵产酸,其风味产生有理化及微生物等作用。

3种发酵方式的盐渍萝卜风味物质由筛选的46种降维到2个不相关的主成分,以46种风味物质的PC1载荷值为横坐标,PC2的载荷值为纵坐标,结果如图3B所示。PC1中正影响挥发性物质载荷系数达到0.8以上有11种,4-异硫代氰酸甲基戊酯(0.934)、己醇(0.928)、癸醛(0.913)、壬醛(0.907)、二甲基四硫醚(0.850)、3-羟基-2-丁酮(0.837)、1-辛烯-3-醇(0.834)、1-异硫代氰酸己酯(0.827)、3,5-辛二烯-3-酮(0.816)、4-仲丁基苯酚(0.805)和1-庚醇(0.805),这些成分与PC1有高度相关性,是PC1中正影响挥发性物质的典型代表。PC2中正影响挥发性物质载荷系数达到0.8以上只有顺-2-戊烯醇(0.869)与PC2有高度相关性,PC1和PC2上的负影响挥发性物质载荷系数都小于0.8,表明与主成分相关性不高。

2.4 不同发酵方式盐渍萝卜特征挥发性成分



A. PLS-DA得分图; B. PLS-DA模型置换测试; C. HCA; D. Heatmap分析。

图4 不同发酵方式盐渍萝卜挥发性成分PLS-DA及特征性成分
Fig. 4 PLS-DA analysis of volatile components and identification of characteristic components of three salted radishes

为了将3种盐渍萝卜在风味上最大化分离,采用监督模式识别方法PLS-DA。如图4A所示,模型解释率 R^2_X 、 R^2_Y 和模型预测能力 Q^2 值分别为0.685、0.949和0.826,其中 R^2_Y 和 Q^2 都大于0.5,说明模型质量较好^[23]。根据PCA模型显示3种盐渍萝卜在95%置信区域内得到了明显的区分。同时采用HCA模型,如图4B所示,根据样本点间的距离可以将湿态、半干态和干态盐渍萝卜各分为一类。随着发酵进行,区分越明显,说明3种盐渍萝卜的挥发性风味具有显著差异。

PLS-DA模型经过200次置换测试进行验证,发现 Q^2 和 R^2 值高于其原始值(最右侧大于左侧),证明该模型的适用性和有效性^[24],如图4C所示。为了确定3种盐渍萝卜的特征性风味成分,筛选出重要度(>1.2)以及 t 检验($P < 0.05$)的差异代谢物12种,按照重要度从大到小分别为1-戊烯-3-醇、顺-2-戊烯醇、己酸、1,1-二(甲硫基)乙烷、二甲基三硫醚、乙酸、3-羟基-2-丁酮、2-正戊基呋喃、二甲基四硫醚、庚醛、苯乙醇和甲氧基苯酚。

如图4D所示,12种成分进行聚类分析分为3类,结果同图4B,说明12种风味成分分为3种盐渍萝卜的特征性物质。其中乙酸主要为湿态盐渍萝卜特征性成分,发酵5 d后出现,是盐渍萝卜中常见的挥发性有机酸,其风味刺激,适量的乙酸对盐渍萝卜风味具有提升作用^[25]。乙酸主要为盐渍萝卜发酵前期出现的醋酸菌和异型乳酸菌等微生物代谢产生^[26],也有报道大肠杆菌等分解葡萄糖

产生乙酸^[27], 这与大量报道盐渍萝卜发酵前期出现丰度较高的肠杆菌科细菌相一致^[28-29]。发酵后期不耐酸的微生物消失, 乙酸含量出现稳定或下降, 可能与醇类物质发生酯化反应生成乙酸乙酯或其他转化。

1-戊烯-3-醇、顺-2-戊烯醇、1,1-二(甲硫基)乙烷和甲氧基苯酚为半干态盐渍萝卜特征性成分, 其中1-戊烯-3-醇具有水果香味和陈气味^[30]。甲氧基苯酚在湿态盐渍萝卜中也有少量检出, 在其他植物、罗非鱼中常被检测出^[31-33], 该物质可能为原料自身携带, 易受到环境影响而转化。

己酸、二甲基三硫醚、3-羟基-2-丁酮、2-正戊基呋喃、二甲基四硫醚、庚醛和苯乙醇为干态盐渍萝卜特征性成分。己酸是己酸菌的代谢产物, 常在厌氧发酵产生^[34], 这与盐渍萝卜发酵环境一致。同时, 也有报道脂质氧化产生的小分子醛类物质^[35], 在干态盐渍萝卜中可能来源于原料长时晾晒脱水发生氧化。二甲基三硫醚在3种盐渍萝卜中都大量发现, 在湿态盐渍萝卜中随着发酵进行逐渐减少, 在半干态和干态盐渍萝卜中经过脱水含量较高, 该物质常被报道是四川盐渍菜^[36-37]、韩国泡菜^[7-8]等主要风味物质, 其阈值低, 呈葱香味^[36]。2-正戊基呋喃具有烘烤香, 其在干制植物如干黄芩^[38]、干制绿茶^[30]等中大量发现, 说明该物质为干态盐渍萝卜制作过程中产生的风味成分。苯乙醇在天然植物中发现, 具有果香、玫瑰花香^[39]。庚醛呈强烈和不愉快脂肪气味, 是干制鱼类中的特征性风味成分^[40]。3-羟基-2-丁酮具有强烈的奶油味香气^[41]。二甲基四硫醚常被报道为干制香菇和蔬菜原料含硫物质分解成分^[42-43], 结合图1a、c、e可知, 干态盐渍萝卜的特征性风味成分主要为原料在经过氧化、干燥脱水等过程中形成的风味成分, 该类物质往往阈值低, 呈味明显。结果与其他研究学者有相同也有差异, 这主要是挥发性风味物质还与原辅料、温度、盐度和检测条件等因素有关, 研究结果难以相互比较。本实验盐渍萝卜采用理想的状态(恒温、不含香辛料)进行分析, 可以从风味的角度区分盐渍萝卜的发酵程度和发酵方式。但现实的盐渍萝卜往往是一个复杂的环境, 要进一步研究盐渍萝卜风味产生机理、环境因子影响等, 才更有利于盐渍萝卜风味物质的调控。

3 结 论

本研究以不同发酵方式盐渍萝卜为研究对象, 从发酵过程中的微生物数量变化和理化特性分析3种盐渍萝卜的品质及发酵特性, 表明了湿态盐渍萝卜更有利于乳酸菌越快生长, 发酵产酸快, 而半干态和干态

盐渍萝卜微生物影响较小, 其发酵弱或不发酵。基于GC-MS途径定量分析出湿态、半干态和干态盐渍萝卜风味物质61种, 结合PCA、HCA和PLS-DA, 揭示了3种盐渍萝卜发酵过程中的重要影响成分和特征挥发性成分, 从风味角度区分3种发酵方式盐渍萝卜的工艺特性和发酵状态。然而, 盐渍萝卜需更详细的研究水分活度、氧气、盐度等环境因子对盐渍萝卜感官特征、微生物群落和挥发性风味物质的相互关系, 能为盐渍萝卜风味的定向调控提供理论依据。

参考文献:

- [1] 陈功. 中国泡菜加工技术[M]. 北京: 中国轻工业出版社, 2011.
- [2] 徐莹. 发酵食品学[M]. 郑州: 郑州大学出版社, 2011.
- [3] XIAO Z B, ZHU J C, FENG T, et al. Comparison of volatile components in Chinese traditional pickled peppers using HS-SPME-GC-MS, GC-O and multivariate analysis[J]. *Natural Product Research*, 2010, 24(20): 1939-1953. DOI:10.1080/14786419.2010.506875.
- [4] 徐丹萍, 蒲彪, 陈安均, 等. 传统四川泡菜中挥发性成分分析[J]. *食品与发酵工业*, 2014, 40(11): 227-232. DOI:10.13995/j.cnki.11-1802/ts.201411039.
- [5] 侯晓艳, 陈安均, 罗惟, 等. 不同乳酸菌纯种发酵萝卜过程中品质的动态化[J]. *食品工业科技*, 2015, 36(2): 181-185. DOI:10.13386/j.issn1002-0306.2015.02.030.
- [6] KIM M K, LEE M A, LEE K G. Determination of compositional quality and volatile flavor characteristics of radish-based Kimchi suitable for Chinese consumers and its correlation to consumer acceptability[J]. *Food Science and Biotechnology*, 2018, 27(5): 1265-1273. DOI:10.1007/s10068-018-0387-0.
- [7] HWANG Y S, LEE H W, CHANG J Y, et al. Characterization of kimchi flavor with preconcentration by head space solid-phase microextraction and stir bar sorptive extraction and analysis by gas chromatography-mass spectrometry[J]. *Analytical Letters*, 2019, 52(8): 1247-1257. DOI:10.1080/00032719.2018.1530256.
- [8] HONG S P, LEE E J, KIM Y H, et al. Effect of fermentation temperature on the volatile composition of Kimchi[J]. *Journal of Food Science*, 2016, 81(11): 2623-2629. DOI:10.1111/1750-3841.13517.
- [9] 汪冬冬, 张其圣, 陈功, 等. 不同蔬菜原料发酵泡菜挥发性成分解析[J]. *食品工业科技*, 2018, 39(3): 234-242. DOI:10.13386/j.issn1002-0306.2018.03.046.
- [10] 吴华昌, 张良, 邓静, 等. 芽菜发酵过程中挥发性香气成分的研究[J]. *中国调味品*, 2012, 37(10): 98-104.
- [11] 刘大群, 华颖. 基于电子鼻与SPME-GC-MS法分析不同脱水方式下萧山萝卜干中的挥发性风味物质[J]. *现代食品科技*, 2014, 30(2): 279-284. DOI:10.13982/j.mfst.1673-9078.2014.02.048.
- [12] CHOI Y J, YONG S, LEE M J, et al. Changes in volatile and non-volatile compounds of model Kimchi through fermentation by lactic acid bacteria[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2019, 105: 118-126. DOI:10.1016/j.lwt.2019.02.001.
- [13] TRIPATHI J, CHATTERJEE S, GAMRE S, et al. Analysis of free and bound aroma compounds of pomegranate (*Punica granatum* L.)[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2014, 59(1): 461-466. DOI:10.1016/j.lwt.2014.05.055.
- [14] HUANG X, YU S, HAN B, et al. Bacterial community succession and metabolite changes during sufu fermentation[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2018, 97: 537-545. DOI:10.1016/j.lwt.2018.07.041.
- [15] 李春林, 陈旭红. 应用多元统计分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 2013.

- [16] BEUCHAT L R. Microbial stability as affected by water activity[J]. Cereal Foods World, 1981, 26(7): 345-349.
- [17] 邓维琴, 伍亚龙, 陈功, 等. 多代发酵泡菜母水微生物多样性及其理化指标动态研究[J]. 食品与发酵工业, 2018, 44(8): 49-56. DOI:10.13995/j.cnki.11-1802/ts.016817.
- [18] CHEIGH H, PARK K, LEE C Y. Biochemical, microbiological, and nutritional aspects of paocai (Korean fermented vegetable products)[J]. CRC Critical Reviews in Food Technology, 1994, 34(2): 175-203.
- [19] XIONG T, GUAN Q, SONG S, et al. Dynamic changes of lactic acid bacteria flora during Chinese sauerkraut fermentation[J]. Food Control, 2012, 26(1): 178-181. DOI:10.1016/j.foodcont.2012.01.027.
- [20] 李文婷, 车振明, 雷激, 等. 不同发酵方式泡菜理化指标及微生物数量变化的研究[J]. 中国调味品, 2011, 36(9): 45-50. DOI:10.3969/j.issn.1000-9973.2011.09.012.
- [21] JEONG S H, JUNG J Y, LEE S H, et al. Microbial succession and metabolite changes during fermentation of dongchimi, traditional Korean watery Kimchi[J]. International Journal of Food Microbiology, 2013, 164(1): 46-53. DOI:10.1016/j.ijfoodmicro.2013.03.016.
- [22] LEE M, SONG J H, JUNG M Y. Large-scale targeted metagenomics analysis of bacterial ecological changes in 88 Kimchi samples during fermentation[J]. Food Microbiology, 2017, 66: 173-183. DOI:10.1016/j.fm.2017.05.002.
- [23] YIN P, WAN D, ZHAO C, et al. A metabonomic study of hepatitis B-induced liver cirrhosis and hepatocellular carcinoma by using RP-LC and HILIC coupled with mass spectrometry[J]. Molecular Biosystems, 2009, 5(8): 868-876. DOI:10.1039/B820224A.
- [24] PARK S E, SEO S H, KIM E J, et al. Effects of different fermentation temperatures on metabolites of Kimchi[J]. Food Bioscience, 2018, 23: 100-106. DOI:10.1016/j.fbio.2018.03.009.
- [25] KANDLER O. Carbohydrate metabolism in lactic acid bacteria[J]. Antonie Van Leeuwenhoek, 1983, 49(3): 209-224. DOI:10.1007/BF00399499.
- [26] 彭飞. 我国传统盐渍菜自然发酵与接种发酵中微生物及其代谢特性研究[D]. 南昌: 南昌大学, 2015.
- [27] 张艳军, 张晓云, 李志敏, 等. 大肠杆菌及其耐乙酸突变菌的连续培养和代谢流比较[J]. 化工学报, 2008, 59(1): 160-166. DOI:10.3321/j.issn:0438-1157.2008.01.026.
- [28] JEONG S H, LEE S H, JUNG J Y, et al. Microbial succession and metabolite changes during long-term storage of Kimchi[J]. Journal of Food Science, 2013, 78(5): 763-769. DOI:10.1111/1750-3841.12095.
- [29] ZHANG Q, CHEN G, SHEN W, et al. Microbial safety and sensory quality of instant low-salt Chinese paocai[J]. Food Control, 2016, 59: 575-580. DOI:10.1016/j.foodcont.2015.06.041.
- [30] 李艳, 何春雷, 孟雪莉, 等. 干热后处理改善夏季成品绿茶风味品质研究[J]. 食品与机械, 2016, 32(12): 189-195. DOI:10.13652/j.issn.1003-5788.2016.12.041.
- [31] 邓娇, 郑金萍. 6 种莲花花瓣的挥发性物质成分的分析[J]. 贵州师范大学学报(自然科学版), 2017, 35(4): 56-63. DOI:10.16614/j.cnki.issn1004-5570.2017.04.007.
- [32] 敖常伟, 吕姗, 吴香菊, 等. 枣花及枣花蜜香气成分分析[J]. 食品科学, 2018, 39(20): 193-200. DOI:10.7506/spkx1002-6630-201820027.
- [33] 张志平. 罗非鱼皮明胶的脱腥、流变性质及其对酸奶品质的影响[D]. 上海: 上海海洋大学, 2016.
- [34] 赵辉, 敞颜, 王藏, 等. 浓香型白酒窖泥中高产己酸兼性厌氧细菌的分离鉴定[J]. 食品科学, 2012, 33(5): 177-182.
- [35] CHAN W K M, FAUSTMAN C, DECKER E A. Oxymyoglobin oxidation as affected by oxidation products of phosphatidylcholine liposomes[J]. Journal of Food Science, 2010, 62(4): 709-712. DOI:10.1111/j.1365-2621.1997.tb15441.x.
- [36] 徐丹萍. 结球甘蓝盐渍菜发酵过程中挥发性成分分析[D]. 雅安: 四川农业大学, 2015.
- [37] 陈功, 张其圣, 余文华, 等. 四川盐渍菜挥发性成分及主体风味物质的研究(二)[J]. 中国酿造, 2010, 29(12): 19-23. DOI:10.3969/j.issn.0254-5071.2010.12.006.
- [38] 李燕敏, 杨克玉, 孙洁雯, 等. SPME-GC-MS分析不同产地干黄芪中挥发性风味成分[J]. 中国酿造, 2016, 35(5): 175-181. DOI:10.11882/j.issn.0254-5071.2016.05.037.
- [39] 曹建宏. 霞多丽营养系品种葡萄与葡萄酒香气成分的研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2006.
- [40] 龙斌, 王锡昌, 张凤枰, 等. 川鲢挥发性风味成分和脂肪酸分析[J]. 食品科学, 2013, 34(22): 250-256. DOI:10.7506/spkx1002-6630-201322050.
- [41] 苗君莅, 莫蓓红, 高红艳, 等. 植物乳杆菌SP-3对干酪挥发性风味物质的影响[J]. 中国乳品工业, 2010, 38(3): 31-33. DOI:10.3969/j.issn.1001-2230.2010.03.008.
- [42] 高伦江, 曾顺德, 李晶, 等. 热风微波联合干制对香菇品质及风味的影响[J]. 食品工业科技, 2017, 38(21): 80-83. DOI:10.13386/j.issn1002-0306.2017.21.016.
- [43] 孙颖, 陈怡颖, 丁奇, 等. 小根蒜挥发性风味成分分析[J]. 食品科学, 2015, 36(16): 117-121. DOI:10.7506/spkx1002-6630-201516021.