

# 不同芥菜品种对发酵泡菜品质的影响规律

罗文珊<sup>1,2</sup>, 张艳<sup>3</sup>, 徐玉娟<sup>2</sup>, 江彪<sup>3</sup>, 余元善<sup>2</sup>, 傅曼琴<sup>2</sup>, 李璐<sup>2\*</sup>

(1. 江西农业大学食品科学与工程学院, 江西南昌 330000) (2. 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)

(3. 广东省农业科学院蔬菜研究所, 广东广州 510640)

**摘要:** 为探究不同品种芥菜发酵后品质和挥发性物质的差异, 该研究通过分析不同品种新鲜芥菜的总糖含量选取 12 个芥菜品种进行发酵, 对发酵后的芥菜进行感官分析、微生物、pH 值、总酸、有机酸、亚硝酸盐、抗氧化能力、生物胺和挥发性风味物质的分析。结果表明, 发酵竹冲芥菜各项理化指标均优于其它发酵芥菜, 其中, 感官评价为 87.0 分, 菌落总数和乳酸菌数分别为  $1.18 \times 10^7$  CFU/g 和  $1.01 \times 10^7$  CFU/g, pH 值 4.80, 总酸 1.73 g/kg, 亚硝酸盐含量 11.82 mg/kg, DPPH 自由基清除率 84.60%, 有机酸含量 1543.69 mg/100 g, 生物胺含量 30.03 mg/kg, 其各项理化指标均位于试验品种前列。此外, 发酵竹冲芥菜中共检出 40 类挥发性化合物, 总含量达 21.0  $\mu\text{g/g}$ , 优于平均水平。该研究为芥菜发酵品种的选择提供理论基础。

**关键词:** 芥菜; 发酵; 泡菜; 品质; 挥发性物质

文章编号: 1673-9078(2022)05-43-55

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2022.5.0726

## Effects of Different Mustard Varieties on the Quality of Fermented Pickle

LUO Wenshan<sup>1,2</sup>, ZHANG Yan<sup>3</sup>, XU Yujuan<sup>2</sup>, JIANG Biao<sup>3</sup>, YU Yuanshan<sup>2</sup>, FU Manqin<sup>2</sup>, LI Lu<sup>2\*</sup>

(1. School of Food Science and Engineering, Jiangxi Agricultural University, Nanchang 330000, China) (2. Sericultural & Agri-Food Research Institute Guangdong Academy of Agricultural Sciences, Key Laboratory of Functional Foods, Ministry of Agriculture, Guangdong Key Laboratory of Agricultural Products Processing, Guangzhou 510610, China)

(3. Vegetable Research Institute, Guangdong Academy of Agricultural Sciences, Guangzhou 510640, China)

**Abstract:** In order to explore the differences in the quality and volatile substances of different varieties of mustards after fermentation, 12 mustard varieties were selected in this study for fermentation through analyzing total sugar contents of different varieties of fresh mustards. The sensory analysis, microbial analysis, and measurements of pH, total acids, organic acids, nitrites, antioxidant capacity, biogenicamines, and volatile flavor substances of the fermented mustards were performed. Results showed that all the physical and chemical indexes of the fermented Zhuchong mustard were better than those of other fermented mustards. Among which, the fermented Zhuchong mustard had a sensory score of 87.0, total colony of  $1.18 \times 10^7$  CFU/g, lactic acid bacteria of  $1.01 \times 10^7$  CFU/g, pH of 4.80, total acid content of 1.73 g/kg, nitrite content of 11.82 mg/kg, DPPH radical scavenging rate of 84.60%, organic acid content of 1543.69 mg/100 g, and biogenicamine content of 30.03 mg/kg. All the physico-chemical indices of fermented Zhuchong mustard were ranked frontier than other fermented mustards. In addition, a total of 40 volatile compounds were detected in fermented Zhuchong mustard, with a total content of 21.0  $\mu\text{g/g}$  (which exceeded the average level of the tested varieties). This research provides a theoretical basis for the selection of fermented mustard varieties.

**Key words:** mustard, fermentation, pickle, quality, volatile substances

引文格式:

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 and Technology, 2022, 38(5): 43-55

收稿日期: 2021-07-13

基金项目: 广东省重点领域研发计划资助项目 (2020B020220003); 科技创新战略专项资金 (高水平农科院建设) - 优秀博士项目 (R2019YJ-YB3008); 广州市科技计划项目 (202102021197)

作者简介: 罗文珊 (1996-), 女, 硕士生在读, 研究方向: 果蔬发酵, E-mail: luowenshan3@163.com

通讯作者: 李璐 (1990-), 男, 博士, 助理研究员, 研究方向: 食品微生物, E-mail: lilu045@163.com

泡菜是典型的中华民族传统发酵食品,通常以青菜、萝卜、生姜、莴笋、蒜头等新鲜蔬菜为原料,经乳酸菌等微生物发酵而成<sup>[1]</sup>。此外,泡菜被报道具有促进代谢、保护肠道、缓解肠道炎症、降低胆固醇、抗癌等功效<sup>[2-4]</sup>。与咸菜、榨菜等发酵加工相比,泡菜属于低盐发酵,可避免摄入过多钠盐造成肾脏损伤等一系列健康问题,但其还存在质量不稳定、可控性差、加工效率低等情况<sup>[5]</sup>。

芥菜 (*Brassica juncea*) 为十字花科芸苔属一年生草本植物,是一种重要的蔬菜作物<sup>[6]</sup>。据统计,截至2020年我国培育的芥菜类新品种达60个,栽培面积约 $1.0 \times 10^6$  hm<sup>2</sup>,产值约2000亿元,在蔬菜产业中占据重要地位<sup>[7]</sup>。芥菜富含多种营养物质,有研究表明芥菜中氨基酸、维生素C、粗纤维、蛋白质和可溶性糖含量分别为10.02、45.47、6.60、14.70、25.70 mg/g,同时含有大量的钾、钙、钠、镁等微量元素<sup>[8,9]</sup>。传统医学认为芥菜具有治疗腹胀气滞、止咳通肺、温胃散热等作用<sup>[10]</sup>,现代研究发现芥菜还具有改善糖尿病、抗氧化、抗衰老等作用<sup>[11,12]</sup>。然而,芥菜味苦、辛辣,主要源于其含有的异硫氰酸盐,因此芥菜在我国除了极少部分鲜食外,大部分用于酸菜、咸菜、泡菜等加工生产。

有研究表明,蔬菜经微生物发酵后不仅可保留其营养物质,还可赋予发酵蔬菜独特的风味<sup>[13]</sup>。田艳等<sup>[14]</sup>研究发现通过发酵可降低芥菜中异硫氰酸盐的含量,有助于改善其口感。目前国内外对芥菜发酵进行了大量研究,主要集中于发酵工艺对发酵芥菜品质的影响。邹小欠等<sup>[15]</sup>通过控制温度和时间使发酵芥菜的质地、色泽等品质得到优化;Lee等<sup>[16]</sup>利用功能菌强化发酵,不仅抑制发酵过程有害病菌的繁殖,还增强其保鲜作用。原料对发酵制品的品质有极大影响,黄润秋等<sup>[17]</sup>发现不同原料制成发酵泡菜后亚硝酸盐含量存在显著差异。然而,目前针对芥菜品种对发酵泡菜品质和风味影响的研究鲜有报道。基于此,本研究通过总糖分析,选取12个芥菜品种为原料,经自然发酵为泡菜后感官评价、微生物、pH值、总酸、有机酸、亚硝酸盐、抗氧化能力、生物胺和挥发性风味物质分析,挖掘适宜于制成泡菜的芥菜品种,为芥菜泡菜研究及其工业化生产提供理论依据和技术参考,以促进新鲜芥菜的合理利用,提高发酵芥菜产品品质。

## 1 材料与amp;方法

### 1.1 主要材料与试剂

芥菜,产于广东省农业科学院蔬菜研究所种植基

地,品种如表1所示;草酸、酒石酸、丙酮酸、D-苹果酸、乳酸、柠檬酸、琥珀酸、L-苹果酸、色胺、苯乙胺、腐胺、尸胺、组胺、酪胺、亚精胺、精胺、1,1-二苯基-2-三硝基苯肼(1,1-diphenyl-2-picrylhydrazyl, DPPH),上海源叶生物科技有限公司;亚硝酸钠,福晨(天津)化学试剂有限公司;PCA琼脂培养基、MRS琼脂培养基、孟加拉红琼脂培养基,广东环凯微生物科技有限公司;其它试剂均为国产分析纯。

表1 各编号对应的芥菜品种

Table 1 Mustard varieties corresponding to each number

编号	品种	编号	品种
4	港种优先甜竹芥	53	华青包心芥
10	扁哈大肉甜芥菜	73	竹冲芥菜
11	四季甜脆大肉芥	85	小叶芥菜
17	大肉甜芥菜	90	蕉岭大芥菜
38	大坪埔大肉包心芥菜	101	从化大芥菜
41	包心大芥菜	112	水东芥菜
42	凯特包心芥	122	香芥菜
43	广西888甜脆芥菜心	129	阳山芥菜
45	大坪埔11号包心芥	146	罗定大芥菜
46	严选包心芥	154	石笋大芥菜
50	永胜大肉包心芥	158	联农芥菜
52	柳叶甜芥菜茎	159	006甜芥菜

### 1.2 主要仪器与设备

LC-20AT 高效液相色谱仪、UV1800 型紫外分光光度计,岛津仪器(苏州)有限公司;PB-10 型 pH 计,德国 Sartorius 公司;HH-2 型数显恒温水浴锅,常州金坛精达仪器制造有限公司;7890-5977B 气相色谱-质谱联用仪,美国 Agilent 科技公司;HWS24 恒温磁力搅拌器,上海一恒科学仪器有限公司;SW-OJ-2FD 无菌工作台,苏净集团苏州安泰空气技术有限公司;SPX-250B-Z 生化培养箱、YXQ-LS-50SII 型立式压力蒸汽灭菌器,上海博迅实业有限公司医疗设备厂;D3024R 台式高速冷冻离心机,美国赛洛捷克 SCILOGEX 公司;SQP 电子分析天平,赛多利斯科学仪器(北京)有限公司;PBJ-G01E 破壁料理机,江门市贝尔斯顿电器有限公司。

### 1.3 试验方法

#### 1.3.1 泡菜制作工艺

芥菜清洗后切分,放入沸水中热烫 1 min 并沥干水分,同时将含 3% 的食盐水煮沸后进行冷却,将 200 g 芥菜和 400 g 食盐水(芥菜与食盐水质量比 1:2)加入 1 L 的泡菜坛中,30 °C 下密封发酵 15 d。

表2 泡菜感官评分表

Table 2 Pickles sensory score sheet

指标	评分标准	分值
色泽	具有芥菜泡菜应有的色泽, 且有光泽	21~25
	色泽发暗	11~20
	色泽发黑, 且有发霉现象	0~10
体态	具有芥菜泡菜应有的质地, 脆性较好	21~25
	具有芥菜泡菜应有的质地, 但脆性较差	11~20
	组织过软, 脆性基本全无	0~10
香气	具有芥菜泡菜固有的香气, 香气浓郁, 无不良气味	21~25
	具有芥菜泡菜固有的香气, 无不良气味, 但香气较淡	11~20
	无芥菜泡菜固有的香气, 且有不良气味	0~10
滋味	具有芥菜泡菜应有的滋味, 滋味较好, 无苦涩味	21~25
	具有芥菜泡菜应有的滋味, 无苦涩味, 但滋味较差	11~20
	无芥菜泡菜应有的滋味, 且有苦涩味	0~10

### 1.3.2 理化指标的测定

泡菜试验设置3个平行。取各发酵泡菜样品沥干汁液后分别置于破壁机进行破碎, 混匀芥菜各部位, 用于泡菜各项理化指标的测定。pH值、微生物、总酸、有机酸、亚硝酸盐、抗氧化能力、生物胺等理化指标均重复测定三次, 取平均值。

还原糖测定: 新鲜蔬菜置于破壁机进行破碎, 参照 GB 5009.7-2016《食品中还原糖的测定》;

感官品质评价: 参照 SB/T 10756-2012《泡菜》, 取发酵完成的泡菜请10名评分员对样品的感官进行评分, 取平均值, 感官评分见表2。

微生物检验: 参照 GB 4789.2-2016《食品微生物学检验菌落总数测定》、GB 4789.35-2016《食品微生物学检验乳酸菌检验》、GB 4789.15-2016《食品微生物学检验霉菌和酵母计数》的平板计数法;

pH值测定: 取各泡菜发酵液使用pH计直接测定法;

总酸测定: 参照 GB/T 12456-2008《食品中总酸的测定》;

有机酸的测定: 参照 GB 5009.157-2016《食品有机酸的测定》;

亚硝酸盐测定: 参照 GB 5009.33-2016《食品中亚硝酸盐与硝酸盐的测定》的分光光度法;

抗氧化能力的测定: 参照吴万林等<sup>[18]</sup>的方法, 取样品稀释液50 μL, 加入150 μL DPPH溶液(0.2 mmol/L), 混匀后室温条件下避光反应20 min, 用酶标仪测定波长517 nm处的吸光度, 同时设样品空白组、试剂空白组和对照组。计算公式如下:

$$\text{清除率}/\% = \frac{(A_1 - A_0) - (A_i - A_j)}{A_1 - A_0} \times 100\%$$

式中:

$A_0$ ——试剂空白组吸光度;

$A_1$ ——对照组吸光度;

$A_i$ ——样品组吸光度;

$A_j$ ——样品空白组吸光度。

生物胺的测定: 参照 GB 5009.208-2016《食品中生物胺的测定》的液相色谱法;

挥发性风味物质的测定: 采用气相色谱-质谱联用方法进行测定。(1) 顶空固相微萃取条件: 参考杜玫等<sup>[19]</sup>的方法, 取5 g 泡菜匀浆和20 μL 50 mg/L 的癸酸乙酯标准品至于20 mL 顶空瓶中, 放入转子于60 °C 水浴中平衡10 min 后, 将老化后的萃取头插入顶空瓶内吸附40 min, 随后将萃取头插至气相色谱仪进样口, 同时启动仪器采集数据, 解吸5 min。(2) GC-MS 条件: 使用 HP-5MS 非极性毛细管柱(30 m×0.25 mm×0.25 μm), He 为载气, 流速为1 mL/min, 分流比为3:1; 进样口温度为270 °C; 程序升温方式为初始温度35 °C, 保持2 min, 以4 °C/min 的速率升至220 °C 并保持2 min。GC-MS 的质谱条件: 采用EI 离子源(70 eV), 其温度230 °C, 接口温度280 °C, 全程扫描范围  $m/z$  10~450。

### 1.4 数据分析

GM-MS 数据的定性定量: 将 GC-MS 分析获得的挥发性成分的质谱信息与标准信息谱库 NIST 14.0 进行相似度检索匹配, 选取匹配度不低于80%的化合物进行分析, 并结合已发表的文献确定挥发性风味组分。采用内标法对挥发性物质进行定量, 计算出各挥发性物质的含量。其它试验数据运用 Excel 2019 整理, 利用 IBM SPSS Statistics 22 进行统计分析; 采用 Origin

作图。

## 2 结果与分析

### 2.1 芥菜品种的选取

微生物的生长代谢需要碳源，糖类是发酵泡菜体系的主要碳源，发酵前期微生物的快速生长繁殖对碳源的需求量极大，并产生大量乳酸，使泡菜 pH 值显著下降<sup>[20]</sup>。隋明等<sup>[21]</sup>研究泡菜的发酵过程时发现 pH 值随糖的添加量增加而降低，总酸含量随糖的添加量增加而增加，但添加糖会使其成本增加，因此可选用总糖含量高的芥菜品种以降低成本。各芥菜品种的总糖见表 3。由表 3 可知，41、43、45、46、53、73、101、112、129、154、158 和 159 号芥菜样品的总糖含量均在 8.0 mg/g 以上，本研究选取的包心大芥菜、大坪埔 11 号包心芥、竹冲芥菜、从化大芥菜等 12 个品种主要形态特征为叶宽阔肥厚，叶脉明显，叶柄宽肥多肉，爽脆可口，泡制不易软烂，因此选择这几种芥菜作为发酵芥菜的候选品种。

表 3 不同品种芥菜中总糖的含量

Table 3 Total sugar content and texture results of different varieties of mustard

芥菜编号	还原糖含量/(mg/g)	芥菜编号	还原糖含量/(mg/g)
4	7.87±0.18 <sup>h</sup>	53	11.77±0.18 <sup>c</sup>
10	3.53±0.06 <sup>lm</sup>	73	18.25±0.15 <sup>a</sup>
11	3.64±0.01 <sup>l</sup>	85	3.20±0.06 <sup>m</sup>
17	6.59±0.02 <sup>j</sup>	90	7.22±0.17 <sup>i</sup>
38	5.57±0.10 <sup>k</sup>	101	10.89±0.06 <sup>d</sup>
41	8.49±0.08 <sup>g</sup>	112	8.0±0.06 <sup>h</sup>
42	6.62±0.04 <sup>d</sup>	122	3.19±0.06 <sup>m</sup>
43	8.96±0.08 <sup>f</sup>	129	8.68±0.06 <sup>fg</sup>
45	9.76±0.17 <sup>e</sup>	146	6.47±0.09 <sup>j</sup>
46	11.20±0.09 <sup>d</sup>	154	8.96±0.11 <sup>f</sup>
50	6.58±0.17 <sup>j</sup>	158	14.07±0.12 <sup>b</sup>
52	6.66±0.03 <sup>j</sup>	159	11.81±0.09 <sup>c</sup>

注：同列不同字母表示不同品种间具有显著差异 ( $p < 0.05$ )。

### 2.2 不同品种芥菜发酵后的感官评价

不同品种芥菜发酵为泡菜后的感官评分如图 1 所示，评分在 80 分以上的有 43、73、158 号芥菜发酵样品，其中 73 号芥菜发酵样品的评分最高 (87.0 分)，脆度好，香气浓郁，滋味较佳，各指标得分均位于前列，而 112 号芥菜发酵样品评分最低，各项指

标均较差 (45.80 分)，出现些许发霉现象，组织结构较软。

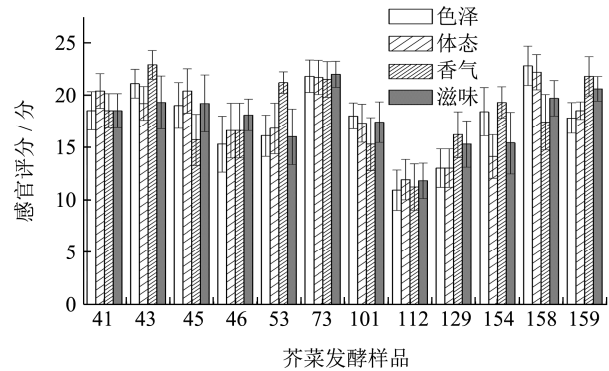


图 1 不同品种芥菜发酵后的感官评价

Fig.1 Sensory evaluation after different breed mustard fermentation

### 2.3 不同品种芥菜发酵对微生物情况的影响

泡菜是新鲜蔬菜经微生物发酵而成的制品，目前普遍认为乳酸菌在泡菜中起着重要的作用，是形成泡菜风味、保留营养成分的决定性因素，对发酵芥菜的 pH、总酸、亚硝酸盐和有机酸含量等均有影响，而菌落总数可直观反映泡菜中的微生物数量<sup>[22]</sup>。不同品种芥菜自然发酵后的微生物情况如图 2 所示。

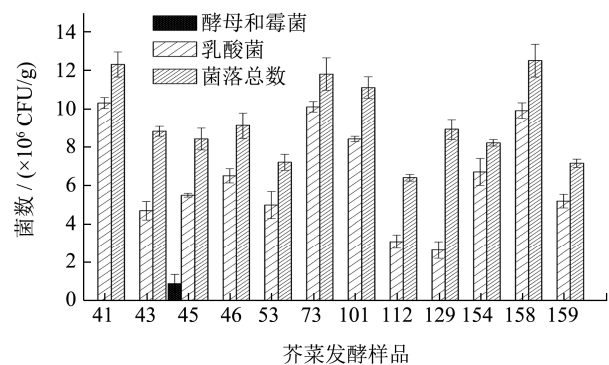


图 2 不同品种芥菜发酵后微生物情况

Fig.2 Microorganisms of different varieties of mustard after fermentation

41、73、101 和 158 号芥菜发酵样品中菌落总数均在  $1.10 \times 10^7$  CFU/g 以上，乳酸菌数均  $8.40 \times 10^6$  CFU/g 以上，处于较高水平。Xiong 等<sup>[23]</sup>对发酵圆白菜研究发现发酵过程中的优势微生物是乳酸菌。而 129 号芥菜发酵样品中菌落总数和乳酸菌数差异较大，表明该发酵样品中含有大量杂菌。此外，发酵芥菜样品中酵母和霉菌数也进行了检测，仅在 45 号芥菜发酵样品中检测到  $9 \times 10^5$  CFU/g 的酵母和霉菌，表明芥菜发酵样品中出现酵母和霉菌的几率较小。

### 2.4 不同品种发酵芥菜中 pH 值和总酸的差异

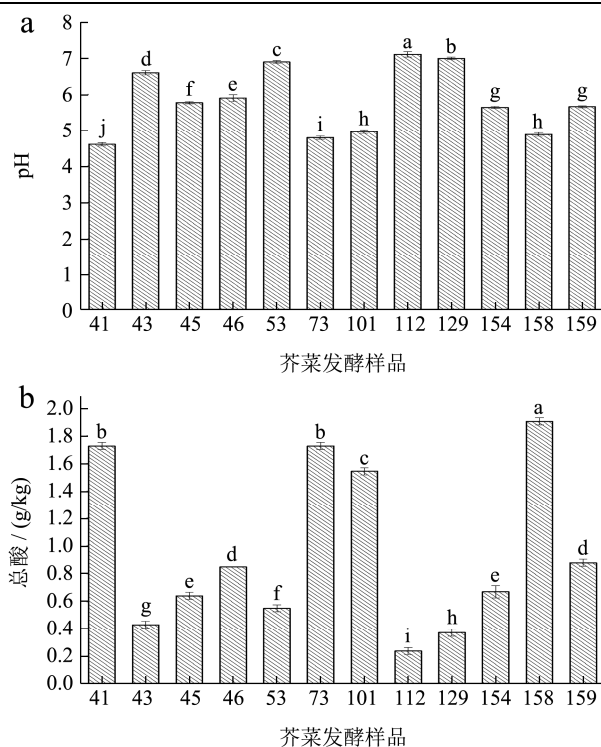


图3 不同品种芥菜发酵后的pH值(a)和总酸(b)

Fig.3 pH value (a) and total acid (b) of different varieties of mustard after fermentation

注：同一图内不同字母表示不同品种间具有显著差异 ( $p < 0.05$ )，下同。

pH值和总酸是泡菜重要的理化指标，不仅可反映微生物的生长情况，同时与泡菜的风味口感有着密切的关系<sup>[24]</sup>。芥菜发酵过程中，微生物生长代谢产生乳酸及其它酸性物质，导致pH下降，总酸含量增加。由图3可知，自然发酵情况下41、73、101和158号芥菜发酵样品pH值均显著低于 ( $p < 0.05$ ) 其它组，

表4 不同品种芥菜发酵后的有机酸含量(mg/100g)

Table 4 Organic acid content of different varieties of mustard after fermentation (mg/100g)

项目	草酸	酒石酸	D-苹果酸	乳酸	柠檬酸	琥珀酸	L-苹果酸
41	395.35±2.86 <sup>d</sup>	-	47.12±3.74 <sup>b</sup>	580.80±63.10 <sup>a</sup>	99.23±0.60 <sup>bc</sup>	264.81±5.79 <sup>b</sup>	82.55±4.66 <sup>c</sup>
43	4.58±0.74 <sup>i</sup>	19.98±1.18 <sup>b</sup>	69.81±15.36 <sup>a</sup>	161.30±73.18 <sup>f</sup>	88.12±38.84 <sup>bc</sup>	12.32±3.16 <sup>f</sup>	15.98±0.44 <sup>f</sup>
45	237.89±1.23 <sup>g</sup>	-	-	504.0±5.55 <sup>ab</sup>	85.51±1.24 <sup>c</sup>	128.10±1.80 <sup>cd</sup>	49.47±2.19 <sup>e</sup>
46	544.68±2.76 <sup>b</sup>	-	21.19±5.59 <sup>cd</sup>	571.36±21.99 <sup>a</sup>	76.85±3.90 <sup>c</sup>	182.07±10.43 <sup>c</sup>	21.33±0.52 <sup>f</sup>
53	22.86±0.32 <sup>i</sup>	28.58±0.60 <sup>a</sup>	30.70±0.25 <sup>c</sup>	154.44±12.64 <sup>f</sup>	-	107.94±21.72 <sup>de</sup>	-
73	21.38±5.60 <sup>j</sup>	5.93±1.83 <sup>c</sup>	61.66±0.83 <sup>a</sup>	396.87±96.26 <sup>c</sup>	164.53±18.74 <sup>a</sup>	893.32±158.12 <sup>a</sup>	-
101	587.95±7.10 <sup>a</sup>	-	-	335.40±21.23 <sup>cd</sup>	77.96±2.79 <sup>c</sup>	112.97±1.08 <sup>de</sup>	58.67±1.68 <sup>d</sup>
112	9.07±4.35 <sup>i</sup>	4.87±0.18 <sup>c</sup>	17.40±6.52 <sup>de</sup>	518.14±71.33 <sup>a</sup>	32.77±29.30 <sup>d</sup>	52.13±25.97 <sup>ef</sup>	48.55±4.97 <sup>c</sup>
129	308.49±53.21 <sup>e</sup>	18.60±2.67 <sup>bc</sup>	-	206.05±21.51 <sup>ef</sup>	-	125.96±29.41 <sup>cd</sup>	142.48±8.74 <sup>a</sup>
154	201.13±5.19 <sup>h</sup>	16.16±0.87 <sup>c</sup>	59.64±3.04 <sup>a</sup>	278.04±17.94 <sup>de</sup>	90.28±4.97 <sup>bc</sup>	95.70±6.13 <sup>de</sup>	114.07±3.17 <sup>b</sup>
158	439.09±27.82 <sup>c</sup>	-	-	417.34±100.34 <sup>bc</sup>	95.07±8.12 <sup>bc</sup>	123.99±16.41 <sup>cd</sup>	58.01±2.18 <sup>d</sup>
159	272.58±87.0 <sup>f</sup>	9.31±1.04 <sup>d</sup>	9.31±1.04 <sup>c</sup>	495.25±8.42 <sup>ab</sup>	116.29±5.28 <sup>b</sup>	72.10±6.70 <sup>def</sup>	54.13±4.08 <sup>de</sup>

注：1.“-”表示未检测出；2.同列不同字母表示不同品种间具有显著差异 ( $p < 0.05$ )，下同。

均在5以下；与此同时，这些组的总酸含量均在1.50 g/kg以上，显著高于 ( $p < 0.05$ ) 其它组。本实验结果与杜玫<sup>[19]</sup>和江玉琴<sup>[25]</sup>发现芥菜发酵15d后总酸含量分别为2.90 g/kg和1.60 g/kg的结果相近，但因芥菜品种与发酵方法不同存在些许差异。以上结果表明41、73、101和158号芥菜发酵情况较好，微生物代谢旺盛，样品含酸量较高。

### 2.5 不同品种芥菜发酵对有机酸的影响

有机酸是影响泡菜风味和口感的重要因素，是微生物发酵过程中的重要代谢产物，泡菜含有丰富的有机酸，如乳酸、苹果酸、柠檬酸、琥珀酸和酒石酸等，赋予了泡菜爽快的酸味和发酵的清香<sup>[26]</sup>。12个芥菜品种发酵样品的有机酸情况见表4，12个芥菜品种经微生物发酵后均被检测出草酸、乳酸和琥珀酸，且含量普遍较高，其中46和101号芥菜发酵样品的草酸含量显著 ( $p < 0.05$ ) 高于其它组；41、45、46、112和159号芥菜发酵样品的乳酸含量显著 ( $p < 0.05$ ) 高于其它组；73号芥菜发酵样品的琥珀酸含量最高。此外，73号芥菜发酵样品中D-苹果酸和柠檬酸含量均显著 ( $p < 0.05$ ) 高于其它品种，且其有机酸总含量(1543.69 mg/100g)在所有样品中是最高的，表明产酸微生物在该品种发酵过程中生长代谢旺盛，而53号芥菜发酵样品的有机酸含量较低(344.52 mg/100g)。结合图2和表4可知，发酵后的芥菜中主要存在的微生物为乳酸菌，而7种有机酸中乳酸在每个样品中的含量均处于较高水平，说明乳酸是发酵过程的主要代谢产物。杨希等<sup>[27]</sup>发现影响泡菜口感的主要有机酸是乳酸，草酸、酒石酸、苹果酸等有机酸起辅助作用。

## 2.6 不同品种芥菜发酵对亚硝酸盐的影响

亚硝酸盐是蔬菜腌制品中广泛存在的有害物质，是蔬菜腌制品中的重要安全指标，我国蔬菜腌制品中亚硝酸盐的安全限量为 20 mg/kg<sup>[17]</sup>。发酵芥菜过程中发酵条件和环境会影响亚硝酸盐的产生，除此之外，发酵过程中的微生物也会影响发酵芥菜亚硝酸盐的形成，芥菜发酵过程中部分微生物会产生硝酸盐还原酶，催化硝酸盐生成亚硝酸盐<sup>[28]</sup>。不同品种芥菜发酵后亚硝酸盐含量如图 4 所示，仅有 53、73 和 112 号芥菜发酵样品的亚硝酸盐含量在安全限量范围内，其中 73 号芥菜发酵样品的亚硝酸盐含量最低（11.82 mg/kg），而 45、46 和 129 号芥菜发酵样品的亚硝酸盐含量远远超过安全限量，表明 45、46 和 129 号芥菜发酵样品中含有大量具有硝酸盐还原酶的微生物。Pu 等<sup>[29]</sup>以家庭方式腌制泡菜中亚硝酸盐含量达 235.90 mg/kg，表明自然发酵蔬菜易产生较高含量的亚硝酸盐。

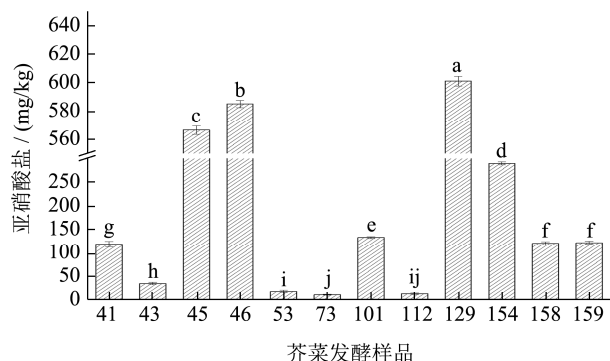


图 4 不同品种芥菜发酵后亚硝酸盐的含量

Fig.4 Nitrite content of different varieties of mustard after fermentation

## 2.7 不同品种芥菜发酵对 DPPH 自由基清除能力的影响

抗氧化能力是发酵蔬菜的重要品质参数之一<sup>[30]</sup>，因此对不同品种芥菜发酵而成的样品进行抗氧化能力分析。通过分析发酵芥菜样品对 DPPH 自由基的清除率评价其抗氧化能力。DPPH 自由基清除率试验结果如图 5 所示，12 个品种的芥菜发酵后均具有较强的 DPPH 自由基清除能力，其中由 73 号芥菜发酵样品清除 DPPH 自由基的能力最好，为 84.60%，其次是 43 和 53 号芥菜发酵样品，分别为 83.40%和 83.30%，129 号芥菜发酵样品对 DPPH 自由基清除能力最低，为 72.10%，其余品种芥菜发酵样品对 DPPH 自由基清除能力均在 75%以上，这是可能是因为芥菜中酚类化合物含量不同<sup>[31]</sup>。

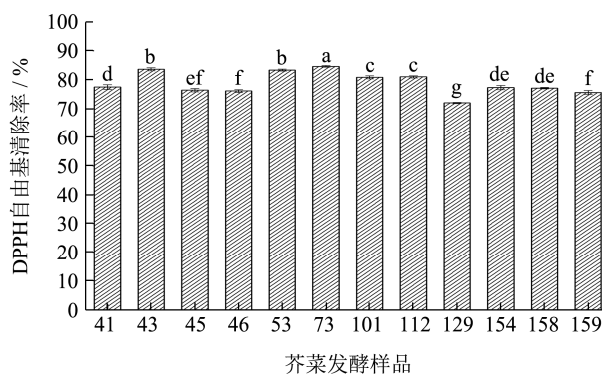


图 5 不同品种芥菜发酵后对 DPPH 自由基清除率

Fig.5 The scavenging rate of DPPH free radicals of different mustard varieties after fermentation

## 2.8 不同品种芥菜发酵对生物胺的影响

表 5 不同品种芥菜发酵后生物胺的检测结果 (mg/kg)

Table 5 Detection results of biogenic amines after fermentation of different mustard varieties (mg/kg)

项目	色胺	苯乙胺	腐胺	尸胺	组胺	酪胺	亚精胺	精胺
41	2.91±0.16 <sup>e</sup>	4.75±0.51 <sup>cd</sup>	1.94±0.21 <sup>f</sup>	3.80±0.08 <sup>f</sup>	10.51±0.56 <sup>d</sup>	4.50±0.48 <sup>e</sup>	4.22±0.60 <sup>a</sup>	2.08±0.04 <sup>g</sup>
43	3.20±0.05 <sup>e</sup>	8.17±0.08 <sup>ab</sup>	5.36±0.21 <sup>c</sup>	1.07±0.08 <sup>i</sup>	28.36±2.10 <sup>ab</sup>	1.50±0.10 <sup>g</sup>	4.68±0.17 <sup>a</sup>	4.27±0.12 <sup>c</sup>
45	4.79±0.65 <sup>cd</sup>	2.77±0.09 <sup>de</sup>	3.14±0.03 <sup>e</sup>	3.75±0.15 <sup>f</sup>	25.76±1.14 <sup>bc</sup>	7.18±0.95 <sup>d</sup>	2.38±0.06 <sup>c</sup>	3.53±0.07 <sup>d</sup>
46	4.39±0.40 <sup>d</sup>	3.48±0.43 <sup>de</sup>	1.12±0.13 <sup>hi</sup>	5.75±0.10 <sup>c</sup>	29.58±2.26 <sup>a</sup>	2.35±0.36 <sup>g</sup>	1.33±0.02 <sup>e</sup>	2.61±0.09 <sup>f</sup>
53	36.32±0.94 <sup>a</sup>	6.10±0.33 <sup>bc</sup>	6.98±0.14 <sup>b</sup>	5.45±0.15 <sup>d</sup>	6.80±0.23 <sup>e</sup>	2.06±0.04 <sup>g</sup>	3.40±0.54 <sup>b</sup>	5.22±0.11 <sup>a</sup>
73	1.89±0.03 <sup>f</sup>	4.08±0.22 <sup>cd</sup>	0.98±0.02 <sup>j</sup>	3.37±0.11 <sup>g</sup>	13.19±0.21 <sup>d</sup>	4.0±0.19 <sup>ef</sup>	1.24±0.01 <sup>e</sup>	1.28±0.03 <sup>h</sup>
101	3.0±0.23 <sup>e</sup>	1.46±0.25 <sup>e</sup>	1.61±0.04 <sup>g</sup>	1.20±0.03 <sup>i</sup>	3.48±0.11 <sup>f</sup>	9.81±1.36 <sup>c</sup>	2.56±0.50 <sup>c</sup>	3.59±0.06 <sup>d</sup>
112	2.77±0.31 <sup>e</sup>	2.43±0.55 <sup>de</sup>	0.99±0.12 <sup>j</sup>	4.50±0.24 <sup>e</sup>	2.77±0.42 <sup>f</sup>	11.49±0.44 <sup>b</sup>	3.38±0.05 <sup>b</sup>	2.74±0.04 <sup>e</sup>
129	3.33±0.57 <sup>e</sup>	9.10±0.12 <sup>a</sup>	1.19±0.08 <sup>hi</sup>	13.86±0.26 <sup>a</sup>	2.14±0.05 <sup>f</sup>	1.83±0.31 <sup>g</sup>	1.37±0.02 <sup>e</sup>	2.15±0.04 <sup>g</sup>
154	5.40±0.60 <sup>c</sup>	2.20±0.07 <sup>de</sup>	4.43±0.10 <sup>d</sup>	7.52±0.25 <sup>b</sup>	13.50±0.70 <sup>d</sup>	1.34±0.03 <sup>g</sup>	1.86±0.05 <sup>d</sup>	2.71±0.04 <sup>ef</sup>
158	6.44±0.42 <sup>b</sup>	10.49±4.57 <sup>a</sup>	7.58±0.28 <sup>a</sup>	4.76±0.16 <sup>e</sup>	1.76±0.03 <sup>f</sup>	13.47±0.29 <sup>a</sup>	2.66±0.01 <sup>c</sup>	4.60±0.04 <sup>b</sup>
159	2.81±0.31 <sup>e</sup>	2.50±0.18 <sup>de</sup>	1.35±0.06 <sup>f</sup>	2.49±0.08 <sup>h</sup>	23.42±5.01 <sup>c</sup>	3.35±0.45 <sup>f</sup>	1.26±0.03 <sup>e</sup>	2.82±0.04 <sup>e</sup>

适量的生物胺在人体中可调节各种正常的生理功能,但过量的生物胺则会引起人体产生一些不良反应。此外,生物胺还是致癌物质亚硝胺的前体物质,它在食品中的存在对人体的健康存在潜在威胁。生物胺广泛存在于发酵食品中,有研究表明泡菜中也存在生物胺<sup>[32]</sup>。泡菜中的生物胺除了蔬菜自身存在的,主要来源于具有产生氨基酸脱羧酶能力的微生物<sup>[33,34]</sup>。因此,分析不同品种芥菜发酵对生物胺的影响是十分必要的。不同品种芥菜发酵后生物胺含量见表 5,芥菜发酵样品中组胺含量普遍较高,其中 43 和 46 号芥菜发

酵样品的组胺含量显著 ( $p<0.05$ ) 高于其它样品,而组胺被国际认为是生物胺中毒性最大的物质,限量为 100 mg/kg,酪胺也是一种具有危害作用的生物胺,限量为 100~800 mg/kg,总生物胺限量为 1000 mg/kg<sup>[32,35,36]</sup>,在不同品种芥菜发酵的样品中酪胺普遍存在,其中 158 号芥菜发酵样品的酪胺含量最高(13.47 mg/kg)。101 和 73 号芥菜发酵样品的总生物胺含量较低,分别为 26.71 mg/kg 和 30.03 mg/kg,而总生物胺含量最高的样品来自于 53 号芥菜,53 号芥菜发酵样品的总生物胺含量达 72.33 mg/kg。

表 6 不同品种芥菜发酵后挥发性组分及其含量

Table 6 Different varieties of mustard and volatile component content of the fermentation

类别	保留时间 /min	物质名称	不同品种芥菜发酵后风味物质含量/( $\mu\text{g/g}$ )												
			41	43	45	46	53	73	101	112	129	154	158	159	
醇类	5.45	二甲基硅烷二醇	1.21	0.50	0.03	1.50	0.14	0.32	2.02	0.24	0.44	-	0.23	0.03	
	7.32	2,3-丁二醇	0.03	0.05	-	-	-	0.72	-	-	-	-	0.02	0.08	
	12.33	4-庚烯-1-醇	0.10	3.51	0.10	0.45	2.53	1.87	0.08	0.33	0.21	0.58	0.29	0.70	
	12.54	1-庚醇	-	-	-	-	0.76	0.50	-	0.10	0.08	0.18	-	0.19	
	12.84	1-辛烯-3-醇	0.49	-	0.33	0.22	-	0.16	0.41	-	0.10	-	0.33	0.21	
	16.02	环辛醇	-	-	-	-	-	-	-	-	0.07	-	-	-	
	17.15	芳樟醇	-	-	-	-	-	-	0.07	-	-	-	0.05	-	
	17.48	2,6-二甲基-环己醇	-	-	-	-	-	-	-	-	0.15	-	-	-	
	18.41	香茅醇	0.02	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
	19.64	1-壬醇	0.29	-	0.38	0.30	0.13	0.11	0.23	0.16	0.15	0.17	0.26	-	
		总计	2.14	4.06	0.84	2.47	3.56	3.68	2.81	0.83	1.20	0.93	1.18	1.21	
醛类	6.97	己醛	0.13	-	0.09	0.04	-	-	-	-	0.05	-	0.06	0.06	
	8.41	(E)-2-己烯醛	0.15	-	0.08	0.04	0.01	-	0.06	-	0.03	-	0.04	0.02	
	10.09	庚醛	0.06	0.14	-	-	0.18	-	-	0.24	0.14	0.41	-	0.16	
	12.01	(Z)-2-庚烯醛	0.71	0.03	0.40	0.38	0.03	0.11	0.71	-	0.14	0.05	0.56	0.32	
	12.18	苯甲醛	0.12	-	0.13	0.11	0.78	-	0.08	0.10	0.18	0.07	0.05	-	
	13.65	辛醛	0.08	-	-	-	0.06	0.10	-	0.06	0.07	-	-	0.19	
	13.98	(E,E)-2,4-庚二烯醛	1.13	0.60	0.53	0.44	0.38	0.29	0.46	0.22	0.29	0.29	0.35	0.50	
	15.19	苯乙醛	-	-	-	-	-	-	-	0.04	-	-	-	-	
	15.63	(E)-2-辛烯醛	-	-	-	-	0.11	-	-	-	0.12	-	-	-	
	17.29	壬醛	0.44	-	0.44	0.40	0.34	-	0.31	0.19	0.32	0.22	0.37	0.37	
	19.23	(E)-2-壬烯醛	0.06	-	0.05	-	-	-	-	-	0.32	-	-	-	
	19.40	4-乙基苯甲醛	0.02	-	0.03	-	-	-	-	-	0.02	0.02	-	-	
	19.40	2,6-二甲基苯甲醛	-	-	-	-	0.03	-	0.03	-	0.02	0.06	-	-	
	20.81	癸醛	0.24	0.13	0.25	0.22	0.15	0.10	0.18	0.05	0.12	0.06	0.21	0.43	
	21.11	(E,E)-2,4-壬二醛	0.05	-	0.02	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
	21.40	2,6,6-三甲基-1-环己烯-1-甲醛	-	0.20	0.07	0.01	-	0.06	0.13	0.10	0.19	0.15	0.13	0.20	
	22.64	2,6,6-三甲基-1-环己烯-1-乙醛	-	0.02	-	0.14	0.03	-	-	-	0.02	0.02	-	-	
	22.72	(E)-2-癸烯醛	0.60	-	0.75	0.26	0.05	0.12	0.24	-	-	-	-	0.30	
26.01	2-十一碳烯醛	0.31	-	0.42	0.19	-	0.07	0.17	-	-	-	0.14	0.22		
		总计	4.10	1.12	3.26	2.23	2.15	0.85	2.37	1.0	2.03	1.35	1.91	2.77	

续表 6

类别	保留时间/min	物质名称	不同品种芥菜发酵后风味物质含量/( $\mu\text{g/g}$ )											
			41	43	45	46	53	73	101	112	129	154	158	159
烷烯类	7.58	六甲基-环三硅氧烷	0.81	0.40	0.67	1.22	0.01	2.03	1.32	1.24	0.71	1.18	1.58	1.91
	10.00	异硫氰基环丙烷	-	-	0.09	-	-	0.08	-	-	-	-	0.03	-
	11.22	2-异硫氰酸丁烷	-	0.04	-	-	0.04	0.04	0.03	0.04	0.03	0.08	0.06	0.28
	13.47	八甲基-环四硅氧烷	1.0	0.83	0.74	0.88	0.61	0.85	1.12	0.66	0.73	0.96	0.86	0.76
	14.47	邻异丙基苯甲烷	-	0.02	-	-	-	-	-	0.01	-	0.04	-	-
	15.12	1-硝基己烷	-	-	0.15	-	-	-	0.04	-	-	-	0.04	-
	17.09	十一烷	0.05	-	0.03	-	-	-	-	-	-	-	0.03	-
	19.10	十甲基-环戊硅氧烷	3.50	4.22	1.85	3.66	2.65	0.51	3.72	0.42	3.90	1.60	2.18	0.39
	19.34	1-氯-壬烷	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.07	-
	20.57	十二烷	0.06	-	-	0.06	-	-	0.04	-	0.05	0.01	0.05	-
	23.03	戊基-环戊烷	-	-	-	-	-	-	-	0.02	-	0.02	0.03	-
	23.90	十三烷	0.07	-	-	0.06	0.11	-	0.05	-	0.03	0.01	0.03	-
	27.07	十四烷	0.06	-	0.05	0.06	0.02	-	-	-	-	-	-	-
	28.95	2,6,10-三甲基十三烷	0.03	0.12	0.03	0.03	0.12	-	0.03	-	0.12	0.03	0.03	0.04
	29.35	环十二烷	0.02	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.01	0.05
	9.87	苏合香烯	-	-	-	-	-	-	0.12	-	-	-	-	-
	13.02	4-异硫氰酸-1-丁烯	-	0.10	0.19	0.57	0.13	0.40	0.22	0.36	0.24	0.50	0.18	0.23
	14.59	D-柠檬烯	0.33	0.30	0.26	0.19	0.40	0.17	0.24	0.14	0.46	0.58	0.15	0.86
	14.78	(Z)-3-甲基-1,3-戊二烯	-	-	0.27	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	14.81	反式 1,4-己二烯	0.07	-	-	0.07	-	-	0.04	-	-	-	-	-
	16.17	1,3-环辛二烯	1.03	-	0.79	0.56	-	-	-	-	-	-	-	-
	21.39	1-甲醛-2,6,6-三甲基-1-环己烯	0.07	-	-	-	0.17	0.03	-	-	-	-	-	-
	23.03	(E)-3-十四碳烯	0.04	-	-	0.03	-	-	-	-	-	-	-	-
	26.48	雪松烯	-	-	0.02	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	26.49	古巴烯	0.02	0.02	-	0.02	-	-	0.01	-	-	-	-	-
	26.83	1-十四碳烯	-	-	0.01	0.02	-	-	-	-	0.01	-	-	-
	27.49	1,2,3,4,5-五甲基-1,3-环戊二烯	-	-	-	0.02	-	-	0.03	-	-	0.04	0.02	-
	29.34	1-癸烯	-	-	0.08	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	39.21	新植二烯	-	-	-	-	-	-	-	0.02	-	0.01	-	-
	总计			7.16	6.05	5.23	7.45	4.26	4.11	7.01	2.91	6.28	5.06	5.35
酯类	9.14	异硫氰酸烯丙酯	1.12	5.54	5.58	8.86	6.23	8.44	4.81	10.16	6.47	13.07	5.51	11.96
	24.29	乙酸壬基酯	-	-	-	-	-	0.04	-	-	-	-	-	-
	26.37	丁酸丁酯	-	-	-	-	-	0.11	-	-	0.05	-	0.10	0.23
	26.38	2-甲基-3-羟基-2,2,4-三甲基丙酸戊酯	0.08	0.06	0.07	0.06	0.07	-	0.04	0.03	-	0.03	-	-
	27.03	$\beta$ -苯基乙基丁酸酯	-	0.08	-	-	0.06	0.01	-	-	0.05	-	-	-
	28.86	邻苯二甲酸二甲酯	-	-	-	-	-	-	-	0.02	-	0.02	-	-
	32.95	2,2,4-三甲基-1,3-戊二醇二异丁酸酯	0.02	-	-	-	0.02	-	-	-	-	-	-	-
	32.94	2,2,4-三甲基-3-羧基异丙基异戊酸丁酯	-	-	-	0.01	-	-	0.01	-	-	-	0.01	0.02
	41.33	棕榈酸甲酯	-	0.01	-	-	0.06	-	-	-	-	-	-	-
	42.93	棕榈酸乙酯	-	-	-	-	0.01	-	-	-	-	-	-	-
总计			1.22	5.69	5.65	8.93	6.45	8.60	4.86	10.21	6.57	13.12	5.62	12.21



续表 6

类别	保留时间/min	物质名称	不同品种芥菜发酵后风味物质含量/( $\mu\text{g/g}$ )												
			41	43	45	46	53	73	101	112	129	154	158	159	
酮类	13.13	6-甲基-5-庚烯-2-酮	0.99	0.10	0.08	-	0.08	0.13	0.08	0.10	0.13	0.13	0.10	0.09	
	14.84	2,2,6-三甲基-环己酮	-	0.04	-	-	-	0.04	-	-	0.04	0.05	-	-	
	16.92	(E,E)-3,5-辛二烯-2-酮	0.24	0.07	0.09	-	0.09	-	0.08	0.07	0.13	-	0.10	-	
	25.81	2-十二烷酮	-	0.02	0.03	-	-	-	-	-	0.05	-	-	0.04	
	28.05	4-(2,2-二甲基-6-亚甲基环己基)-3-丁烯-2-酮	-	0.01	0.01	-	-	-	-	-	0.01	-	-	-	
	28.05	4-(2,6,6-三甲基-1-环己烯-1-基)-3-丁烯-2-酮	0.08	-	0.03	0.01	0.01	-	0.23	-	-	0.30	-	-	
	28.04	$\alpha$ -紫罗兰酮	0.01	-	-	-	-	-	0.03	-	-	0.01	0.02	-	
	28.74	(E)-6,10-二甲基-5,9-十一碳二烯-2-酮	-	0.14	0.09	0.11	0.15	0.05	0.07	0.05	0.09	0.13	0.06	0.1	
	29.83	$\beta$ -紫罗兰酮	-	0.59	0.04	0.23	0.71	0.10	-	0.24	0.50	0.36	0.21	0.31	
	30.00	2-十三烷酮	-	0.12	-	0.02	0.13	-	-	-	0.09	0.02	-	-	
	31.17	5,6,7,7a-四氢-4,4,7a-三甲基-2(4H)-苯并呋喃酮	-	0.04	0.01	0.01	0.05	0.02	0.01	0.07	0.02	0.09	-	-	
	32.07	2-十四烷酮	-	0.02	-	-	0.01	-	-	-	0.01	-	-	-	
	34.59	(Z)-二氢-5-(2-辛烯基)-2(3H)-呋喃酮	0.01	-	-	-	-	-	-	0.01	-	0.01	0.03	0.02	
	39.38	6,10,14-三甲基-2-十五烷酮	-	-	0.04	-	0.01	-	-	-	0.04	-	-	-	
		总计	1.33	1.15	0.42	0.38	1.24	0.34	0.50	0.54	1.11	1.10	0.52	0.56	
酸类	5.27	乙酸	0.18	0.26	0.20	0.05	0.19	0.48	0.10	0.02	0.27	0.29	0.15	0.32	
	25.79	氢化肉桂酸	-	-	-	-	-	0.33	-	-	-	-	-	-	
	26.27	正癸酸	-	-	-	-	-	0.04	-	-	-	-	-	-	
	32.95	2,2,4-三甲基-3-羧基异丙基异丁酯戊酸	-	-	0.02	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
	42.23	棕榈酸	-	-	-	-	-	0.03	-	0.02	-	-	-	-	
		总计	0.18	0.26	0.22	0.05	0.19	0.88	0.10	0.04	0.27	0.29	0.15	0.32	
杂环类	16.43	对甲苯酚	-	0.06	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
	16.83	2-甲氧基苯酚	0.05	-	-	-	0.11	-	-	0.07	-	-	-		
	23.34	4-乙基-2-甲氧基苯酚	0.10	9.72	-	-	5.32	2.23	-	0.55	0.28	0.23	-	-	
	30.53	2,4-二叔丁基苯酚	0.01	-	0.01	-	-	-	-	-	-	0.02	-	-	
	30.53	2,5-双(1,1-二甲基乙基)苯酚	-	0.01	-	0.01	0.02	0.01	-	0.01	-	-	-	0.01	
	14.45	1-甲基-3-(1-甲基乙基)-苯	0.03	-	-	-	0.03	-	0.02	-	0.04	-	-	0.07	
	14.38	1,2,3-三甲基苯	0.04	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0.02	0.04	
	19.41	1-乙烯基-4-甲氧基苯	-	0.03	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
	29.25	(2-异硫氰酸乙酯基)-苯	-	-	0.05	0.10	-	0.03	-	-	-	-	-	-	
	10.62	甲氧基苯胺	0.95	-	-	-	-	-	-	0.05	-	0.02	1.54	1.46	
	13.19	2-戊基呋喃	-	-	0.04	-	-	-	-	-	-	-	0.03	-	
	15.22	2-甲基-5-(1-甲基乙基)-吡嗪	-	0.06	-	-	0.06	-	-	-	-	-	-	-	
	18.38	2-异丁基-3-甲氧基吡嗪	-	-	-	0.03	-	-	-	-	-	-	-	-	
	18.36	N-异丁基-异丁酰胺	-	-	-	-	0.06	-	-	-	0.08	-	-	-	
	18.58	苜蓿/苯甲腈	-	-	-	0.03	-	0.04	-	-	-	-	-	-	
	22.09	苯代丙腈	-	-	-	0.03	-	0.12	-	-	-	-	-	-	
	20.13	茶	0.03	-	0.03	-	-	-	-	-	-	-	-	-	
	总计	1.21	9.88	0.13	0.20	5.49	2.54	0.02	0.61	0.47	0.27	1.59	1.58		

## 2.9 不同品种芥菜发酵对挥发性风味物质的影响

由表 6 可知,从 12 个芥菜品种共检测出 104 种挥发性物质,醇类 10 种、醛类 19 种、烷烯类 29 种、酯类 10 种、酮类 14 种、酸类 5 种和杂环类 17 种。不同品种芥菜发酵样品中烷烯类和酯类物质的含量较高,分别占总挥发性物质的 27.18%和 37.08%。不同样品中的挥发性物质种类和含量存在差异,41 号(51 种,17.34  $\mu\text{g/g}$ )、43 号(38 种,28.21  $\mu\text{g/g}$ )、45 号(49 种,15.75  $\mu\text{g/g}$ )、46 号(44 种,21.71  $\mu\text{g/g}$ )、53 号(47 种,23.34  $\mu\text{g/g}$ )、73 号(40 种,21.0  $\mu\text{g/g}$ )、101 号(40 种,17.67  $\mu\text{g/g}$ )、112 号(36 种,16.14  $\mu\text{g/g}$ )、129 号(51 种,17.93  $\mu\text{g/g}$ )、154 号(42 种,22.12  $\mu\text{g/g}$ )、158 号(44 种,16.32  $\mu\text{g/g}$ )和 159 号(37 种,23.17  $\mu\text{g/g}$ )。检测出的挥发性物质中异硫氰酸烯丙酯含量最高,其次是十甲基-环戊硅氧烷、4-乙基-2-甲氧基苯酚和六甲基-环三硅氧烷。一些挥发性物质在 12 个品种中均有检出,如 4-庚烯-1-醇、(E,E)-2,4-庚二烯醛、癸醛、六甲基-环三硅氧烷、八甲基-环四硅氧烷、十甲基-环戊硅氧烷、D-柠檬烯、异硫氰酸烯丙酯、乙酸;而一些挥发性物质仅存在于某品种中,如香茅醇(41 号样品),对甲苯酚和 1-乙基-4-甲氧基苯(43 号样品),(Z)-3-甲基-1,3-戊二烯、雪松烯、1-癸烯和 2,2,4-三甲基-3-羧基异丙基异丁酯戊酸(45 号样品),2-异丁基-3-甲氧基吡嗪(46 号样品),棕榈酸乙酯(53 号样品),乙酸壬基酯、氯化肉桂酸和正癸酸(73 号样品),苏合香烯(101 号样品),苯乙醛(112 号样品),环辛醇和 2,6-二甲基-环己醇(129 号样品),1-氯-壬烷(158 号样品)。

由表 6 及表 7 可知,样品中醇类化合物共检测出 10 种,总含量为 24.91  $\mu\text{g/g}$ , 占有挥发性组分的 10.35%, 不同样品中的醇类物质总量存在差异,其中 45 和 112 号样品中的醇类物质总含量较低,仅 0.84  $\mu\text{g/g}$  和 0.83  $\mu\text{g/g}$ , 43 号样品中的醇类物质总含量最高(4.05  $\mu\text{g/g}$ )。发酵芥菜样品中的醇类物质主要有二甲基硅烷二醇、2,3-丁二醇、4-庚烯-1-醇、1-壬醇等脂肪醇,以及芳樟醇、香茅醇等芳香醇。12 个样品中 4-庚烯-1-醇含量最高,占总醇类含量的 43.16%, 其中 43 号样品中的 4-庚烯-1-醇含量最高(3.51  $\mu\text{g/g}$ )。

醛类化合物主要由不饱和脂肪酸氧化而成,阈值一般很低,但其对泡菜的风味有较大影响<sup>[37]</sup>。不同样品中共检测到 19 种醛类物质,总含量为 25.14  $\mu\text{g/g}$ , 占总挥发性物质含量的 10.44%, 其中 129 号样品的醛

类化合物种类最多,达 15 种,而 43 号样品仅有 6 种。41 号样品的总醛类化合物含量最高(4.10  $\mu\text{g/g}$ ), 而 73 号样品的总醛类化合物含量最低(0.85  $\mu\text{g/g}$ )。不同醛类物质在发酵后的芥菜中差异明显,如具有脂香、清香的(E,E)-2,4-庚二烯醛在所有品种中均能检出,12 个品种的总含量占总醛类物质的 21.80%, 而具有花香的苯乙醛仅在 112 号样品中被检出,占 0.16%。

在检测出的烷烯类化合物中,烯类化合物比烷类化合物含量低,多以烷烃为主,烃类物质的香气阈值较高,对发酵芥菜的影响不大,但也有助于提高整体香味<sup>[38]</sup>。12 个样品中烷烯类化合物总含量为 65.39  $\mu\text{g/g}$ , 其中十甲基-环戊硅氧烷含量高达 28.60  $\mu\text{g/g}$ , 雪松烯含量仅为 0.02  $\mu\text{g/g}$ ; 41、45 和 46 号样品中均检测到 15 种烷烯类化合物,但含量稍有差异,15 种烷烯类化合物含量分别为 7.16  $\mu\text{g/g}$ 、5.23  $\mu\text{g/g}$  和 7.45  $\mu\text{g/g}$ 。

结合表 6 和表 7 可知,酯类化合物是发酵芥菜的重要挥发性风味物质,占有挥发性物质的 37.0%。其中 12 个样品中均含有类似芥末辛辣气味的异硫氰酸烯丙酯,且在各样品中的含量均为所含醛类物质的最高含量,12 个样品的异硫氰酸烯丙酯总含量为 87.75  $\mu\text{g/g}$ , 占总酯类化合物的 98.45%, 占有挥发性风味物质的 36.46%, 这与杜玫等<sup>[19]</sup>的结论一致,表明该化合物是发酵芥菜的特性风味物质,但在不同样品中其含量存在较大差异,154 号样品中异硫氰酸烯丙酯的含量高达 13.07  $\mu\text{g/g}$ , 而在 41 号样品中其含量仅为 1.12  $\mu\text{g/g}$ 。具有蜡质香气的棕榈酸乙酯仅在 53 号样品中被检出,含量仅为 0.01  $\mu\text{g/g}$ 。

酮类是不饱和脂肪氧化的产物,具有花香和果香味,对发酵芥菜的气味具体增强作用,但化学性质不稳定,在发酵过程可能会形成相应的醇或酸<sup>[13,39]</sup>。因此,不同样品中的酮类物质含量均低。与其它组相比,41、43、53、129 和 154 号样品中的酮类化合物含量相对较高(表 7)。具有类似松香的  $\beta$ -紫罗兰酮是所有检出酮类化合物含量最高的(3.29  $\mu\text{g/g}$ ), 而总含量最低的是 4-(2,2-二甲基-6-亚甲基环己基)-3-丁烯-2-酮(0.03  $\mu\text{g/g}$ )。

发酵芥菜样品中检测到的酸类化合物中主要物质为乙酸,来源于芥菜自身和微生物代谢,可降低泡菜 pH 值改善风味,同时可与醇类发生反应生成酯类,对泡菜风味有一定贡献。由表 6 可知,乙酸在不同发酵芥菜样品中的含量存在差异,73 号样品中乙酸含量达 0.48  $\mu\text{g/g}$ , 而 112 号样品中的乙酸含量仅有 0.02  $\mu\text{g/g}$ , 其它酸性物质含量较少,且仅在少数样品中检出。

检测出的 18 种杂环化合物含量占总挥发性物质

的 10.0%，4-乙基-2-甲氧基苯酚在 7 个样品中被检出，其在 43 号样品中含量最高 (9.72  $\mu\text{g/g}$ )。杂环化合物阈值较低<sup>[40]</sup>，如具有坚果香的呋喃类物质，仅在 45 (0.04  $\mu\text{g/g}$ ) 和 158 号 (0.03  $\mu\text{g/g}$ ) 样品中检测出，

性质稳定、具有芳香气味的腈类物质，仅在 46 (0.06  $\mu\text{g/g}$ ) 和 73 号 (0.16  $\mu\text{g/g}$ ) 样品中检测出，但对发酵芥菜整体香味产生较大影响，与陈艳等<sup>[38]</sup>对芥菜发酵的研究结果相似。

表 7 各类化合物在不同品种芥菜发酵后的含量 ( $\mu\text{g/g}$ )

Table 7 The content of various compounds after fermentation of different varieties of mustard ( $\mu\text{g/g}$ )

项目	醇类	醛类	烷烃类	酯类	酮类	酸类	杂环类
41	2.14	4.10	7.16	1.22	1.33	0.18	1.21
43	4.06	1.12	6.05	5.69	1.15	0.26	9.88
45	0.84	3.26	5.23	5.65	0.42	0.22	0.13
46	2.47	2.23	7.45	8.93	0.38	0.05	0.20
53	3.56	2.15	4.26	6.45	1.24	0.19	5.49
73	3.68	0.85	4.11	8.60	0.34	0.88	2.54
101	2.81	2.37	7.01	4.86	0.50	0.10	0.02
112	0.83	1.0	2.91	10.21	0.54	0.04	0.61
129	1.20	2.03	6.28	6.57	1.11	0.27	0.47
154	0.93	1.35	5.06	13.12	1.10	0.29	0.27
158	1.18	1.91	5.35	5.62	0.52	0.15	1.59
159	1.21	2.77	4.52	12.21	0.56	0.32	1.58

### 3 结论

3.1 本试验通过总糖含量选取 12 个芥菜品种进行自然发酵，并对芥菜发酵为泡菜后的品质和风味成分进行对比分析。结果表明，不同芥菜发酵样品的感官评价、微生物、pH 值、总酸、有机酸、亚硝酸盐、抗氧化能力和生物胺均存在显著差异。发酵竹冲芥菜感官评价最佳 (87.0 分)；包心大芥菜、竹冲芥菜、从化大芥菜和联农芥菜发酵样品的微生物生长情况较好，pH 均在 5 以下，总酸均在 1.50 g/kg 以上；华青包心芥、竹冲芥菜和水东芥菜发酵样品的亚硝酸盐含量在安全限量内，而大坪埔 11 号包心芥、严选包心芥和阳山芥菜发酵样品的亚硝酸盐含量远超出安全限量；抗氧化能力较好的是竹冲芥菜；同时，竹冲芥菜发酵样品的有机酸含量最高 (1543.69 mg/100 g)，生物胺含量最低的是从化大芥菜发酵样品 (26.71 mg/kg)，其次是竹冲芥菜发酵样品 (30.03 mg/kg)。

3.2 此外，本研究通过顶空固相微萃取结合气相色谱-质谱联用法对 12 个芥菜发酵样品进行检测，结果表明，不同品种芥菜发酵样品所含挥发性物质各有不同，其中异硫氰酸烯丙酯是主要风味物质，占总挥发性风味物质的 36.46%；广西 888 甜脆芥菜心发酵样品的挥发性化合物含量最高，达 28.21  $\mu\text{g/g}$ 。综上所述，竹冲芥菜发酵样品的各项理化指标均位于试验品种前列，且挥发性风味物质种类含 40 种，含量达 21.0  $\mu\text{g/g}$ ，可作为芥菜发酵的潜在品种。

### 参考文献

- [1] Sebastian Torres, Hernán Verón, Luciana Contreras, et al. An overview of plant-autochthonous microorganisms and fermented vegetable foods [J]. Food Science and Human Wellness, 2020, 9(2): 112-123
- [2] Barigela Anuradha, Bhukya Bhima. Probiotic *Pediococcus acidilactici* strain from tomato pickle displays anti-cancer activity and alleviates gut inflammation *in-vitro* [J]. 3 Biotech, 2021, 11(1):23
- [3] Park Min Young, Kim Jonggun, Kim Saehun, et al. *Lactobacillus curvatus* KFP419 and *Leuconostoc mesenteroides* subsp. *mesenteroides* KDK411 isolated from kimchi ameliorate hypercholesterolemia in rats [J]. Journal of Medicinal Food, 2018, 21(7): 647-653
- [4] Bohkyung Kim, Jia-Le Song, Jae-Hyun Ju, et al. Anticancer effects of kimchi fermented for different times and with added ingredients in human HT-29 colon cancer cells [J]. Food Science and Biotechnology, 2015, 24(2): 629-633
- [5] 李文青, 卿泉, 唐清苗, 等. 发酵芥菜工艺及品质变化研究进展[J]. 中国酿造, 2019, 38(12): 1-4
- [6] LI Wenqing, QING Quan, TANG Qingmiao, et al. Progress in the process and quality changes of fermented mustard [J]. China Brewing, 2019, 38(12): 1-4
- [6] Yan Tian, Fangming Deng. Phytochemistry and biological activity of mustard (*Brassica juncea*): a review [J]. CyTA -

- Journal of Food, 2020, 18(1): 704-718
- [7] 万正杰,范永红,孟秋峰,等.中国芥菜种业发展与展望[J].中国蔬菜,2020,12:1-6  
WAN Zhengjie, FAN Yonghong, MENG Qiufeng, et al. Development and prospects of Chinese mustard seed industry [J]. Chinese Vegetables, 2020, 12: 1-6
- [8] Alessandro Miceli, Aurora Aleo, Onofrio Corana, et al. Antibacterial activity of *Borago officinalis* and *Brassica juncea* aqueous extracts evaluated *in vitro* and *in situ* using different food model systems [J]. Food Control, 2014, 40: 157-164
- [9] 刘独臣,李跃建,房超,等.四川叶用芥菜主要营养成分分析[J].西南农业学报,2014,27(2):763-767  
LIU Duchun, LI Yuejian, FANG Chao, et al. Analysis of main nutrients in Sichuan leaf mustard [J]. Southwest Agricultural Journal, 2014, 27(2): 763-767
- [10] 李时珍.本草纲目白话精译[M].北京:科学技术出版社,2006  
LI Shizhen. Compendium of Materia Medica [M]. Beijing: Science and Technology Press, 2006
- [11] Thakur Ajit Kumar, Chatterjee Shyam Sunder, Kumar Vikas. Anxiolytic-like activity of leaf extract of traditionally used Indian-mustard (*Brassica juncea*) in diabetic rats [J]. Tang [Humanitas Medicine], 2013, 3(1): 7.1-7.7
- [12] Hee-Yeon Kwon, Sun-Il Choi, Hye-In Park, et al. Comparative analysis of the nutritional components and antioxidant activities of different *Brassica juncea* cultivars [J]. Foods, 2020, 9(6): 840
- [13] Sudhanshu S Behera, Aly Farag El Sheikha, Riadh Hammami, et al. Traditionally fermented pickles: how the microbial diversity associated with their nutritional and health benefits [J]. Journal of Functional Foods, 2020, 70: 103971
- [14] 田艳,赵玲艳,陈秋佳,等.芥菜自然发酵过程中主要化学成分的变化[J].湖南农业大学学报(自然科学版),2021,47(1): 117-124  
TIAN Yan, ZHAO Lingyan, CHEN Qiujia, et al. Changes in the main chemical components of mustard during natural fermentation [J]. Journal of Hunan Agricultural University (Natural Science Edition), 2021, 47(1): 117-124
- [15] 邹小欠,高倩妮,杨婷婷,等.储藏温度和时间对腌制芥菜品质的影响[J].安徽科技学院学报,2018,32(6):96-102  
ZOU Xiaoqian, GAO Qianni, YANG Tingting, et al. Influence of storage temperature and time on marinated mustard [J]. Journal of Anhui University of Science and Technology, 2018, 32(6): 96-102
- [16] Jae-Jun Lee, Yun-Jeong Choi, Min Jung Lee, et al. Effects of combining two lactic acid bacteria as a starter culture on model kimchi fermentation [J]. Food Research International, 2020, 136: 109591
- [17] 黄润秋,陈功,贺云川,等.原料和工艺对泡菜亚硝酸盐含量的影响[J].食品与发酵科技,2020,56(4):1-5,49  
HUANG Runqiu, CHEN Gong, HE Yunchuan, et al. The influence of raw materials and processes on the nitrite content of kimchi [J]. Food and Fermentation Technology, 2020, 56(4): 1-5, 49
- [18] 吴万林,余元善,肖更生,等.蓝莓汁乳酸菌的发酵特性[J].现代食品科技,2020,36(3):159-166  
WU Wanlin, YU Yuanshan, XIAO Gengsheng, et al. Fermentation characteristics of lactic acid bacteria in blueberry juice [J]. Modern Food Science and Technology, 2020, 36(3): 159-166
- [19] 杜玫,蔡玥,杨潇然,等.前处理方式对小叶芥菜发酵过程的影响[J].食品科技,2020,45(12):67-72  
DU Mei, CAI Yue, YANG Xiaoran, et al. The influence of pretreatment methods on the fermentation process of small leaf mustard [J]. Food Science and Technology, 2020, 45(12): 67-72
- [20] 邓文艺,林辉,王锋.淮山泡菜发酵过程中的主要品质指标变化[J].农产品加工,2020,23:57-60  
DENG Wenwen, LIN Hui, WANG Feng. Changes in main quality indicators of yam pickle during fermentation [J]. Agricultural Products Processing, 2020, 23: 57-60
- [21] 隋明,李俊儒,张凤英,等.接种乳酸菌制作发酵型甘蓝泡菜过程的研究[J].中国调味品,2020,45(5):152-156,162  
SUI Ming, LI Junru, ZHANG Fengying, et al. Study on the process of inoculating lactic acid bacteria to make fermented cabbage pickles [J]. Chinese Condiments, 2020, 45(5): 152-156, 162
- [22] Moon Eun Woo, Yang Jisu, Yoon So Ra, et al. Application of colorimetric indicators to predict the fermentation stage of kimchi [J]. Journal of Food Science, 2020, 85(12):4170-4179
- [23] XIONG Tao, LI Junbo, LIANG Fan, et al. Effects of salt concentration on Chinese sauerkraut fermentation [J]. LWT - Food Science and Technology, 2016, 69: 169-174
- [24] 汪冬冬,鲍永碧,管锐,等.温度对甘蓝泡菜发酵过程中风味的影响[J].食品与发酵工业,2021,47(2):233-240  
WANG Dongdong, BAO Yongbi, GUAN Rui, et al. The influence of temperature on the flavor of cabbage pickles during fermentation [J]. Food and Fermentation Industry, 2021, 47(2): 233-240
- [25] 江玉琴,罗凤莲,李文青,等.不同食盐添加量对芥菜腌制过

- 程中主要成分的影响[J].农产品加工,2018,16:47-50
- JIANG Yuqin, LUO Fenglian, LI Wenqing, et al. The effect of different salt additions on the main components of mustard greens in the pickling process [J]. Agricultural Products Processing, 2018, 16: 47-50
- [26] Soon-Mi Shim, Ji Yun Kim, Sang Mi Lee, et al. Profiling of fermentative metabolites in kimchi: volatile and non-volatile organic acids [J]. Journal of the Korean Society for Applied Biological Chemistry, 2012, 55(4): 463-469
- [27] 杨希,武爱群.酸菜发酵过程中理化因子及原核微生物群落结构差异分析[J].食品与发酵工业,2020,46(22):245-251
- YANG Xi, WU Aiqun. Analysis of the differences in physicochemical factors and prokaryotic microbial community structure during the fermentation of sauerkraut [J]. Food and Fermentation Industries, 2020, 46(22): 245-251
- [28] Małgorzata Karwowska, Anna Kononiuk. Nitrates/nitrites in food-risk for nitrosative stress and benefits [J]. Antioxidants, 2020, 9(3): 241-241
- [29] Pu C, Xia C, Li K, et al. Research on the dynamic variation and elimination of nitrite content in sauerkraut during pickling [J]. Journal of Hygiene Research, 2001, 30(6): 352-354
- [30] Jeong Jin-Wonng, Kim Ok-Sun, Sung Jung-Min. Quality and fermentation characteristics of kimchi made with different types of dried red pepper (*Capsicum annum* L.) [J]. Preventive Nutrition and Food Science, 2011, 16(1): 74-82
- [31] Park Seo-Yeon, Jang Hye-Lim, Lee Jong-Hun, et al. Changes in the phenolic compounds and antioxidant activities of mustard leaf (*Brassica juncea*) kimchi extracts during different fermentation periods [J]. Food Science and Biotechnology, 2017, 26(1): 105-112
- [32] Young Hun Jin, Jae Hoan Lee, Young Kyung Park, et al. The occurrence of biogenic amines and determination of biogenic amine-producing lactic acid bacteria in kkakdugi and chonggak kimchi [J]. Foods, 2019, 8(2): 73
- [33] Ah Ran Jeon, Jae Hoan Lee, Jae-Hyung Mah. Biogenic amine formation and bacterial contribution in *Cheong guk jang*, a Korean traditional fermented soybean food [J]. LWT - Food Science and Technology, 2018, 92: 282-289
- [34] FAN Peixin, SONG Peixia, LI Linsen, et al. Roles of biogenic amines in intestinal signaling [J]. Current Protein & Peptide Science, 2017, 18(6): 532-540
- [35] Claudia Ruiz Capillas, Ana M Herrero. Impact of biogenic amines on food quality and safety [J]. Foods, 2019, 8(2): 62
- [36] Carpéné Christian, Galitzky Jean, Belles Chloé, et al. Mechanisms of the antilipolytic response of human adipocytes to tyramine, a trace amine present in food [J]. Journal of Physiology and Biochemistry, 2018, 74(4): 623-633
- [37] HONG Sang Pil, Lee Eun Joo, Kim Young Ho, et al. Effect of fermentation temperature on the volatile composition of kimchi [J]. Journal of Food Science, 2016, 81(11): C2623-C2629
- [38] 陈艳,蒋依琳,唐玉娟,等.大叶芥菜发酵过程中挥发性成分变化研究[J].食品科技,2019,44(11):90-96
- CHEN Yan, JIANG Yilin, TANG Yujuan, et al. Study on the changes of volatile components in large-leaf mustard during fermentation [J]. Food Science and Technology, 2019, 44(11): 90-96
- [39] 陈丽丽,江勇,白春清,等.不同种类鱼露中挥发性风味化合物的比较研究[J].中国调味品,2020,45(9):11-17,28
- CHEN Lili, JIANG Yong, BAI Chunqing, et al. Comparative study on volatile flavor compounds in different kinds of fish sauce [J]. Chinese Seasoning, 2020, 45(9): 11-17, 28
- [40] 叶繁,陈康,陶美洁,等.5种市售鳕鱼肠品质比较及风味分析[J].南方水产科学,2019,15(6):96-105
- YE Fan, CHEN Kang, TAO Meijie, et al. Quality comparison and flavor analysis of five commercially available cod intestines [J]. Southern Fisheries Science, 2019, 15(6): 96-105

---

(上接第 349 页)

- [110] 贾惠娟,水口京子,冈本五郎.果实大小对白肉桃果实品质的影响[J].果树学报,2003,20(6):439-444
- JIA Huijuan, Kyoko M, Golo O. Effect of fruit size on the quality of white-fleshed peach cultivars [J]. Journal of Fruit Science, 2003, 20(6): 439-444
- [111] Do J Y, Salunkhe D K, Olson L E. Isolation, identification and comparison of the volatiles of peach fruit as related to harvest maturity and artificial ripening [J]. Journal of Food Science, 2010, 34(6): 618-621
- [112] 刘璇,赖必辉,毕金峰,等.不同干燥方式芒果脆片香气成分分析[J].食品科学,2013,34(22):179-184
- LIU Xuan, LAI Bihui, BI Jinfeng, et al. Analysis of aroma components in mango chips prepared by different drying methods [J]. Food Science, 2013, 34(22): 179-184