

不同盐添加量对芥菜腌制过程中理化性质及细菌菌群多样性的影响

霍虹燕^{1,2}, 曾瑶英^{1,2}, 余焯均^{1,2}, 熊玉帛^{1,2}, 赵 野³, 余杰海^{1,2}, 张 凯^{1,2}, 周文化^{1,2,*}

(1.中南林业科技大学食品科学与工程学院, 湖南 长沙 410004;

2.特医食品加工湖南省重点实验室, 湖南 长沙 410004;

3.永州市零陵区市场监督管理局, 湖南 永州 425000)

摘 要: 以不同盐添加量(9%、12%、15%、18%, 以芥菜质量计)干腌法自然发酵过程(1~45 d)中的芥菜为研究对象, 采用常规检测方法高通量测序技术分别对其基本理化指标、色泽及细菌菌群多样性的变化规律进行检测。结果表明, 发酵过程中, 各组腌制芥菜的pH值均先下降后趋于平缓, 总酸含量变化与其相反, 而还原糖、亚硝酸盐及氨基酸态氮含量均先升高后下降; 随着盐添加量升高, 腌制芥菜的pH值及还原糖含量均升高, 总酸含量降低, 发酵45 d时, 盐添加量15%腌制芥菜中氨基酸态氮含量最高, 盐添加量12%腌制芥菜亚硝酸盐含量最低。各组腌制芥菜发酵过程中颜色变暗, 黄色的饱和度增加, 但随盐添加量增大, 色泽变亮。发酵45 d时, 盐添加量9%和12%腌制芥菜的细菌菌群多样性较高, 盐添加量15%腌制芥菜的细菌菌群丰富度最高; 各组腌制芥菜细菌菌群的差异主要体现在相对丰度上, 发酵45 d时, 盐添加量9%腌制芥菜中主要优势细菌属为乳植杆菌属(*Lactiplantibacillus*)和棒状杆菌属(*Corynebacterium*), 而其他盐添加量腌制芥菜中的主要优势细菌属均为葡萄球菌属(*Staphylococcus*)。综上, 腌制芥菜适宜的盐添加量应为12%~15%。

关键词: 腌制芥菜; 盐添加量; 理化指标; 色泽; 细菌菌群多样性

Effects of Different Salt Addition Levels on Physicochemical Properties and Bacterial Diversity of Mustard During Pickling Process

HUO Hongyan^{1,2}, ZENG Yaoying^{1,2}, YU Zhuojun^{1,2}, XIONG Yubo^{1,2}, ZHAO Ye³, SHE Jiehai^{1,2}, ZHANG Kai^{1,2}, ZHOU Wenhua^{1,2,*}

(1. College of Food Science and Engineering, South Central University of Forestry Science & Technology, Changsha 410004, China;

2. Hunan Provincial Key Laboratory of Speciality Food Processing, Changsha 410004, China;

3. The Market Supervision and Administration Bureau of Lingling District, Yongzhou 425000, China)

Abstract: The mustard in the natural fermentation process (1–45 days) of dry-salting method under different salt levels (9%, 12%, 15%, 18%, based on mustard mass) was used as the research object. The basic physical and chemical indexes, color and bacterial flora diversity were detected by conventional detection methods and high-throughput sequencing technology. The results showed that the pH value of pickled mustard in each group decreased first and then tended to be gentle, the change of total acid content was opposite, while the contents of reducing sugar, nitrite and amino acid nitrogen increased first and then decreased during the fermentation process. With the increase of salt addition level, the pH value and reducing sugar content of pickled mustard increased, and the total acid content decreased. At 45 days of fermentation, the amino acid nitrogen content of pickled mustard with salt addition level 15% was the highest, and the nitrite content of pickled mustard with salt addition level 12% was the lowest. The color of pickled mustard in each group became darker during fermentation, and the saturation of yellow increased, but the color became brighter with the increase of salt addition level. At 45 days of fermentation, the bacterial flora diversity

收稿日期: 2025-08-05

基金项目: 湖南省重点研发项目(2024JK2147; 2023NK2033); 湖南林业科技攻关与创新项目(XLK202428);

林草科技推广项目(2023133127); 湖南省研究生科研创新项目(LXBZZ2024185)

第一作者简介: 霍虹燕(2001—), 女, 硕士研究生, 研究方向为农产品加工与贮藏。E-mail: 1274793571@qq.com

*通信作者简介: 周文化(1969—), 男, 教授, 博士, 研究方向为农产品加工与贮藏。E-mail: zhowenhua@126.com

of pickled mustard with salt addition levels 9% and 12% was higher, and the bacterial flora richness of pickled mustard with salt addition level 15% was the highest. The difference in bacterial flora of pickled mustard in each group was mainly reflected in the relative abundance. At 45 days of fermentation, the main dominant bacterial genera in pickled mustard with salt addition level 9% were *Lactiplantibacillus* and *Corynebacterium*, while the main dominant bacterial genera in pickled mustard with other salt concentrations were *Staphylococcus*. In summary, the suitable salt addition level for pickled mustard should be 12%–15%.

Keywords: pickled mustard; salt addition level; physicochemical property; color; bacterial flora diversity

DOI:10.11882/j.issn.0254-5071.2026.05.013

中图分类号: TS255.54; TS205.2

文献标志码: A

文章编号: 0254-5071 (2026) 05-0103-08

引文格式:

霍虹燕, 曾瑶英, 余焯均, 等. 不同盐添加量对芥菜腌制过程中理化性质及细菌菌群多样性的影响[J]. 中国酿造, 2026, 45(5): 103-110. DOI:10.11882/j.issn.0254-5071.2026.05.013. <http://www.chinabrewing.net.cn>

HUO Hongyan, ZENG Yaoying, YU Zhuojun, et al. Effects of different salt addition levels on physicochemical properties and bacterial diversity of mustard during pickling process[J]. China Brewing, 2026, 45(5): 103-110. (in Chinese with English abstract) DOI:10.11882/j.issn.0254-5071.2026.05.013. <http://www.chinabrewing.net.cn>

腌制芥菜具有独特的风味、爽脆的质地及开胃的功能, 通常由新鲜的叶用芥菜盐渍后经微生物发酵而成^[1]。因而, 盐对于腌制芥菜的感官品质及特征风味的形成起着重要作用, 高盐会抑制发酵进程, 低盐则会导致发酵蔬菜品质下降, 口感失脆, 严重时甚至引发食品安全问题^[1-2]。适宜的盐浓度不仅能提供一定的渗透压, 使之具有良好风味^[3-4], 同时也能抑制有害微生物的生长, 调控芥菜发酵过程中微生物的生长代谢^[5-6]。张长贵等^[7]研究发现, 盐含量对苦笋-辣椒复合腌制的理化指标、感官品质及发酵周期均产生不同程度的影响; 李雄波等^[8]研究发现, 随着盐含量的降低, 甜瓣子总酸和氨基酸态氮含量升高, 而还原糖含量降低, 且细菌菌群在不同盐含量之间存在显著差异; Lee等^[9]通过研究不同盐含量条件下泡菜发酵时的微生物菌群变化, 发现在长期发酵过程中, 盐含量会对乳酸、4-氨基丁酸和腐胺等代谢产物的水平产生影响; Tang Jianbo等^[10]研究发现, 盐含量对泡椒发酵过程中微生物菌群结构有显著影响。

近年来, 高通量测序技术的发展为微生物多样性研究提供了新的手段。通过高通量测序技术, 研究人员可以深入了解泡菜发酵过程中微生物菌群的动态变化, 揭示不同蔬菜种类、发酵条件等因素对微生物多样性的影响。Wang Dongdong等^[11]采用高通量测序技术发现泡菜中细菌菌群多样性高于真菌菌群, 高盐度改善了工业泡菜的风味, 简化了微生物菌群。刘大群等^[12]采用高通量测序技术分析发现不同盐量榨菜胚料之间的菌群存在差异, 低盐榨菜胚料菌群多样性高于高盐; Chen Mengjuan等^[13]采用高通量技术揭示了不同盐含量的辣椒细菌菌群结构在贮藏10个月内的连续性。目前, 关于腌制芥菜的

研究还比较少, 尤其是不同盐添加量对腌制芥菜的理化指标、感官及微生物菌群变化的影响鲜见报道。

本研究以新鲜芥菜为原料, 采用盐渍中的干腌法^[14], 选取4种盐添加量(9%、12%、15%、18%)分别对芥菜进行腌制处理, 于自然条件下发酵45 d, 对腌制过程中的芥菜进行品质分析, 比较不同盐添加量处理对芥菜主要理化指标及色泽的影响, 此外, 使用高通量测序技术研究不同盐添加量对腌制芥菜细菌菌群多样性的影响, 以期为工业生产中提高腌制芥菜的品质及特性菌种的筛选提供理论参考。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

叶用芥菜采集自湖南省华容县芥菜基地(112.53°E, 29.53°N); 食盐 雪天盐业集团股份有限公司; 氢氧化钠、盐酸、氯化钠、乙酸锌、亚铁氰化钾、酒石酸钾钠、硫酸铜、亚甲蓝、氨水、硫酸锌、正辛醇、甲醛等(均为分析纯级) 国药集团化学试剂有限公司; E.Z.N.A.®土壤DNA提取试剂盒 美国Omega公司。

1.2 仪器与设备

ABI GeneAmp® 9700型聚合酶链式反应(polymerase chain reaction, PCR)仪 美国ABI公司; MiSeq测序仪 美国Illumina公司; PRX-150A型智能人工气候箱 宁波赛福实验仪器有限公司; FE28-Standard型精密pH计 梅特勒-托利多仪器(上海)有限公司; BLueStar B型紫外分光光度计 北京莱伯泰科仪器股份有限公司; ZNCL-DLS190*90型四联磁力搅拌加热锅 上海弘懿仪

器设备有限公司; TGL-16M型高速台式冷冻离心机 湘仪离心机仪器有限公司。

1.3 方法

1.3.1 芥菜腌制工艺

参考湖南华容芥菜基地大池室温完全发酵工艺^[15]并稍作修改。将新鲜芥菜洗净并晾干, 切分备用。称取2 kg晾晒后芥菜, 分别称取芥菜质量9%、12%、15%、18%的盐, 按照一层芥菜一层盐分别放入干净的陶瓷坛, 层层压实, 分别命名为S9、S12、S15、S18组, 每个盐添加量腌制3坛, 置于25℃人工气候箱中自然发酵45 d, 分别在发酵1、5、15、25、35、45 d, 按照5点取样法进行随机取样(腌制芥菜、芥菜腌制液), 编号为SA_dB(A表示组别, B表示时间), 样品取出后立即使用液氮速冻并置于一80℃冰箱。腌制芥菜样品用于基本理化指标及色泽测定, 芥菜腌制液用于细菌菌群多样性分析。

1.3.2 腌制芥菜基本理化指标测定

采用pH计测定pH值。采用酸碱滴定法测定总酸含量, 结果以乳酸计^[16]。参照GB 5009.7—2016《食品安全国家标准 食品中还原糖的测定》及文献[17]测定还原糖含量。参照GB 5009.235—2016《食品安全国家标准 食品中氨基酸态氮的测定》及文献[18]中的滴定法测定氨基酸态氮含量。参照GB 5009.33—2025《食品安全国家标准 食品中亚硝酸盐与硝酸盐的测定》及文献[19]测定亚硝酸盐含量。

1.3.3 腌制芥菜色泽评价

采用色差仪对腌制芥菜样品进行色泽评价, 得到色泽参数 L^* 值(亮度)、 a^* 值(红(正)绿(负)值)、 b^* 值(黄(正)蓝(负)值), 并计算总色差值 ΔE , 其计算公式如下:

$$\Delta E = \sqrt{(\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2}$$

式中: ΔL^* 、 Δa^* 、 Δb^* 分别为样品与对照的色泽参数差值。

1.3.4 芥菜腌制液细菌菌群多样性分析

DNA提取和PCR扩增: 按土壤DNA提取试剂盒说明书提取不同腌制液中微生物菌群的宏基因组DNA, 使用1%琼脂糖凝胶电泳和NanoDrop 2000分别评估DNA完整性及浓度和纯度。以提取的基因组DNA为模板, 采用引物338F(5'-ACTCCTACGGGAGGCAGCAG-3')和806R(5'-GGACTACHVGGGTWTCTAAT-3')对细菌菌群的16S rRNA基因V3~V4区基因序列进行PCR扩增。PCR程序: 95℃预变性3 min; 27个循环(95℃变性30 s, 55℃退火30 s, 72℃延伸30 s); 72℃终延伸10 min。PCR扩增体系: 4 μL 5×TransStart FastPfu缓冲液、2 μL 2.5 mmol/L dNTPs、0.8 μL上、下游引物(5 μmol/L)、0.4 μL TransStart FastPfu DNA聚合酶、10 ng DNA模板, 双蒸水补足至20 μL。

Illumina MiSeq高通量测序: PCR扩增产物委托上海美吉生物医药科技有限公司基于Illumina MiSeq PE300/NovaSeq PE250平台进行高通量测序, 测序结果经拼接、过滤、剔除嵌合体, 舍弃低质量序列等得到clean tags, 利用USEARCH(v11.0.667)对clean tags进行过滤和分析, 按97%的相似性划分操作分类单元(operational taxonomic unit, OTU), 提取OTU代表序列获得丰度表, 利用Silva 132数据库(<http://www.arb-silva.de>)对代表序列进行比对, 得到OTU的物种分类信息。测序数据利用Mothur(v1.42.1)进行均一化处理, 计算 α -多样性指数。

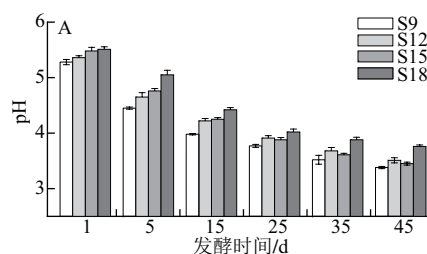
1.4 数据处理

实验均重复3次, 采用Microsoft Excel 2021和SPSS 19.0软件进行数据处理和单因素方差分析, 结果以 $\bar{x} \pm s$ 表示; 利用Origin Pro 2021软件作图。

2 结果与分析

2.1 不同盐添加量下芥菜腌制过程中基本理化指标变化

pH值变化是衡量芥菜发酵的重要指标之一^[20]。pH值小于4表明芥菜已发酵完成^[21]。由图1A可知, pH值随着发酵的进行均呈先下降后趋于平缓的趋势, S9、S12、S15、S18组的pH值分别在发酵15、25、25、35 d降至4以下, 表明芥菜发酵完成, S18组即18%盐添加量条件下延长了发酵周期且pH值高于其他组, 与周艺萍等^[22]的研究结果一致。由图1B可知, 总酸含量随着发酵的进行呈上升趋势, 与pH值变化趋势相对应。由图1C可知, 还原糖含量随着发酵的进行呈先上升后下降的趋势, 在发酵5 d时达到最大值, 并于发酵后期逐渐趋于稳定, 其中S18组的还原糖含量均高于其他组。李玉荣等^[23]研究发现, 盐添加量越高, 剁辣椒发酵过程pH值下降越慢, 还原糖消耗越少, 总酸含量越低, 与本研究结果相一致。随着发酵进行, 乳酸菌大量繁殖, 通过发酵代谢将芥菜中的还原糖转化为乳酸、乙酸等有机酸, 导致腌制环境中pH值下降, 总酸含量上升, 还原糖含量下降; 同时, 高盐环境下, 渗透压较高使微生物细胞失水, 抑制乳酸菌等微生物的生长代谢, 降低其产酸量及产酸速度, 进而影响其正常发酵, 延长发酵时间^[23-24]。



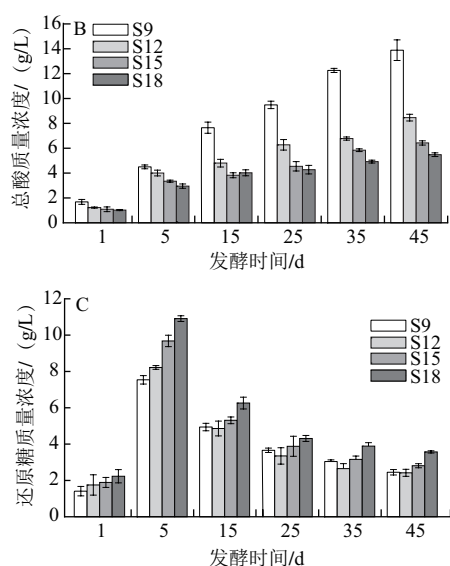


图1 不同盐添加量下芥菜腌制过程中pH值(A)、总酸(B)及还原糖(C)含量的变化
Fig. 1 Changes of pH (A), total acid (B) and reducing sugar (C) content in mustard during the pickling with different salt addition levels

亚硝酸盐含量是衡量腌制芥菜品质安全的一个重要指标^[25]。由图2可知,随着发酵的进行,4组腌制芥菜的亚硝酸盐含量均呈先上升后下降的趋势,于发酵后期趋于稳定,均在发酵15 d时达到最高,其中S9组的亚硝酸盐含量峰值最大,为 (23.58 ± 0.63) mg/kg,而S18组最低,为 (17.34 ± 0.39) mg/kg。这可能是由于发酵前期乳酸菌处于增殖阶段,数量较少,还未形成酸性环境,大量杂菌群在较短发酵时间内迅速繁殖,导致亚硝酸盐含量上升到峰值^[10]。进一步发酵至45 d, S9、S12、S15组亚硝酸盐含量均低于S18组。汪莉莎等^[26]研究发现,盐浓度越低,大叶麻竹笋中亚硝酸盐含量峰值越高且最快达到峰值,与本研究结果相一致。分析原因可能是高盐环境导致硝酸盐还原酶的活性受到抑制,使亚硝酸盐峰值降低^[27],此外,随着发酵的进行,低盐对降亚硝酸盐菌株的抑制作用较弱,导致发酵后期S18组的亚硝酸盐含量高于其他组。芥菜经4种盐添加量腌制发酵后,亚硝酸盐含量均符合GB 2762—2022《食品安全国家标准 食品中污染物限量》限量(≤ 20 mg/kg)^[28]。

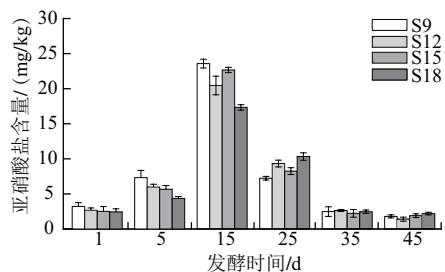


图2 不同盐添加量下芥菜腌制过程中亚硝酸盐含量变化
Fig. 2 Changes of nitrite content in mustard during the pickling with different salt addition levels

氨基酸态氮是判定发酵产品发酵情况的指标^[29-30]。由图3可知,随着发酵的进行,4组腌制芥菜的氨基酸态氮含量均呈先上升后下降的趋势,在发酵25 d时含量均达到最高,分别为 $(0.156 \pm 0.001 4)$ 、 $(0.15 \pm 0.001 2)$ 、 $(0.14 \pm 0.003 0)$ 、 $(0.13 \pm 0.002 2)$ g/100 g,其中S9组含量最高,S18组含量最低。这可能是因为蛋白质在蛋白酶的作用下分解为氨基酸等物质,但随着发酵的进行,氨基酸又作为氮源被微生物利用;同时盐度过高会抑制蛋白质水解反应,从而使氨基酸态氮含量偏低^[31-33]。吴凯等^[34]研究发现,高盐腌渍辣椒的氨基酸态氮含量减少,这与本研究结果一致。

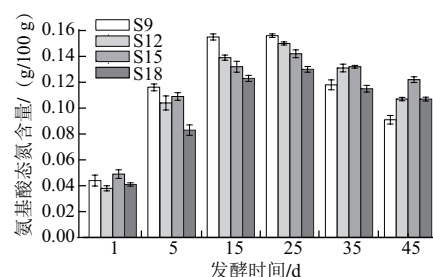
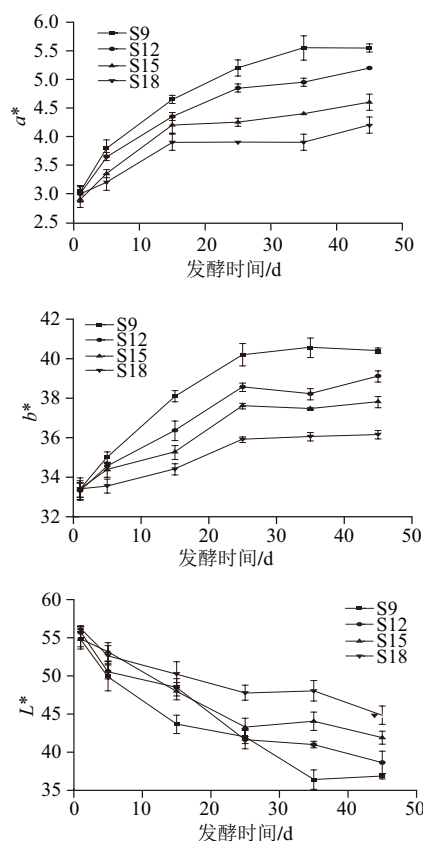


图3 不同盐添加量下芥菜腌制过程中氨基酸态氮含量的变化
Fig. 3 Changes of amino acid nitrogen content in mustard during the pickling with different salt addition levels

2.2 不同盐添加量下芥菜腌制过程中色泽变化



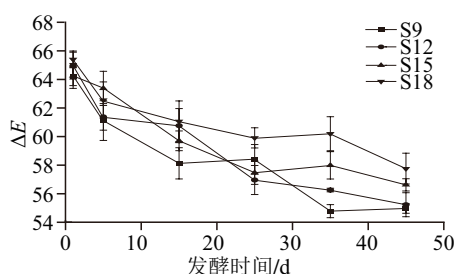


图4 不同盐添加量下芥菜腌制过程中色泽的变化

Fig. 4 Color change of mustard during the pickling with different salt addition levels

L^* 值表示亮度, ΔE 值表示总色差, a^* 值表示样品的红(正)绿(负)值, b^* 值表示黄(正)蓝(负)值^[35]。由图4可知, 随着发酵的进行, 4组腌制芥菜的 a^* 值和 b^* 值均逐渐升高后趋于平稳, 而 L^* 值和 ΔE 值均呈下降趋势, 尤其是S9组下降速率最快。此外, 盐添加量越大, a^* 值和 b^* 值均越小, L^* 值和 ΔE 值均越大。结果表明, 随着发酵进行, 芥菜发生了氧化褐变^[35], 颜色变暗, 黄色的饱和度增加, 但随盐添加量增大, 芥菜颜色变亮。这可能是因为盐能抑制多酚氧化酶活性, 减少酶促褐变产物的生成, 保留更明亮的色泽^[36]。

2.3 不同盐添加量下芥菜腌制过程中细菌菌群多样性

2.3.1 稀释曲线分析

由图5可知, 随序列数增加, OTU数在前期呈现出急剧增长趋势, 尤其是发酵1 d, 最后趋于平稳, 表明测序深度良好, 继续增加测序数据量所能发现的新物种很少, 测序数据量足以反映芥菜腌制过程中的物种多样性。

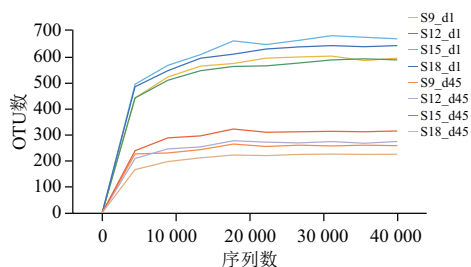


图5 不同盐添加量下芥菜腌制过程中细菌菌群的稀释曲线

Fig. 5 Dilution curves of bacterial flora in mustard during the pickling with different salt addition levels

2.3.2 α -多样性分析

由表1可知, 4组腌制芥菜细菌菌群的覆盖率均大于99%, 表明测序深度较好, 所测数据量能够覆盖腌制芥菜中几乎所有的细菌菌群类型, 可反映样品细菌菌群丰度及多样性的真实情况^[37]。随着发酵进行, 4组腌制芥菜细菌菌群的Chao1指数均下降, 表明细菌菌群丰富度降低。其中, S15组腌制芥菜的细菌菌群丰富度在发酵1 d和发酵45 d均高于其他组。随着发酵进行, S9和S12组腌制芥菜的Shannon指数和Simpson指数增大, 表明细菌菌群多样性增加, 而

S15和S18组腌制芥菜的细菌菌群多样性降低。这可能是由于低盐对细菌生长的抑制较弱, 从而有更多的细菌种类能存活并参与发酵, 细菌菌群丰富度和多样性增加; 高盐抑制不耐盐细菌生长, 但随发酵不断进行, 某些细菌逐渐适应高盐环境, 从而细菌菌群的丰富度增大; 然而随着盐添加量继续升高, 细菌不能再适应更高盐环境, 因而S18组细菌菌群丰富度降低。

表1 不同盐添加量下芥菜腌制过程中细菌菌群 α -多样性分析结果Table 1 α -Diversity analysis results of bacterial flora in mustard during the pickling with different salt addition levels

样品	覆盖率/%	Chao1指数	Shannon指数	Simpson指数
S9_d1	99.79	619.73±38.35 ^{bc}	3.34±0.12 ^d	0.54±0.02 ^d
S12_d1	99.81	588.65±33.28 ^c	3.37±0.15 ^d	0.57±0.03 ^d
S15_d1	99.77	683.60±8.95 ^a	4.49±0.29 ^b	0.72±0.03 ^b
S18_d1	99.79	643.45±14.87 ^b	4.91±0.32 ^a	0.79±0.04 ^a
S9_d45	99.95	258.76±2.51 ^{ef}	3.85±0.03 ^c	0.81±0.00 ^a
S12_d45	99.94	283.14±13.17 ^{de}	3.48±0.11 ^d	0.79±0.01 ^a
S15_d45	99.91	309.67±20.20 ^d	2.82±0.05 ^c	0.65±0.01 ^c
S18_d45	99.94	232.31±20.64 ^e	2.84±0.08 ^c	0.73±0.01 ^b

注: 同列小写字母不同表示差异显著 ($P<0.05$)。

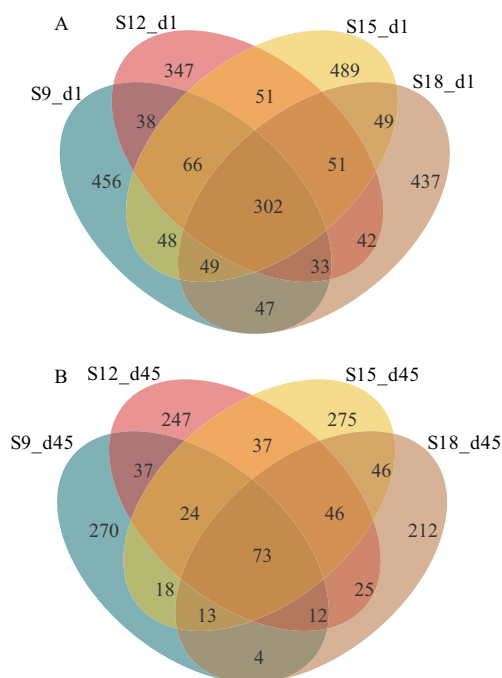


图6 不同盐添加量下芥菜腌制发酵1 d (A) 和45 d (B) 细菌OTU的Venn图

Fig. 6 Venn diagram of bacterial operational taxonomic units for cured mustard fermented for 1 (A) and 45 days (B) with different salt addition levels

由图6可知, 当发酵1 d时, 4组腌制芥菜中的细菌OTU数分别为1 039、930、1 105、1 010个, 共有的OTU为302个, 分别占S9、S12、S15、S18组样品OTU总数的29.07%、32.47%、27.33%、29.90%, 而各自特有的OTU

数分别为456、347、489、437个。当发酵45 d时, 4组腌制芥菜中的细菌OTU数分别为451、501、532、431个。S15组的细菌OTU数高于其他组, 而S18组的最低, 说明15%盐添加量处理对腌制芥菜中的细菌影响程度低于其他盐添加量处理。4组腌制芥菜中共有的OTU为73个, 分别占S9、S12、S15、S18组样品OTU数的16.19%、14.57%、13.72%、16.94%, 而各自特有的OTU数分别为270、247、275、212个。

在发酵过程中4种盐添加量处理下腌制芥菜间的细菌菌群组成拥有相似性的同时也存在一定差异性。当发酵45 d时, 4种盐添加量处理的腌制芥菜所共有的OTU数明显降低, 且各自特有的OTU数也减少, 说明不同盐添加量芥菜发酵1 d共有的细菌菌群较多, 在发酵45 d, 共有的细菌菌群减少, 各自特有的细菌菌群也减少了, 可能是因为随着发酵的进行, 乳酸菌等微生物代谢产生大量乳酸, 导致环境酸度(pH值)逐渐降低, 对微生物具有抑制作用, 尤其是对不耐酸的菌种, 且由于盐添加量不同, 细菌的耐受性和生长能力也不同, 高盐环境可能进一步筛选出少数耐盐菌种, 导致不同盐添加量样品间的共有OTU减少^[8]。此外, S15组的OTU数为最高, 可能是盐添加量升高至15%时, 某些耐盐细菌与逐渐适应高盐环境的细菌均可继续生长繁殖, 使得细菌数量及多样性增加, 而随盐添加量继续升高, 许多细菌不能够再适应更高盐环境, 因而盐添加量为18%时的细菌数量较少^[38]。

2.3.3 细菌菌群组成分析

由图7A可知, 4组腌制芥菜样品中的细菌菌群组成相似, 但其相对丰度差异较大。4组腌制芥菜的优势细菌门(相对丰度>1%)为厚壁菌门(Firmicutes)、蓝菌门(Cyanobacteria)、变形菌门(Proteobacteria)、放线菌门(Actinobacteriota)和拟杆菌门(Bacteroidota)。当发酵1 d时, 各组腌制芥菜中的厚壁菌门相对丰度均较低, 尤其是盐添加量为18%时其相对丰度仅为1.34%, 直至发酵45 d, 相对丰度达到最高, S9、S12、S15、S18组分别为62.12%、68.47%、85.37%、87.43%, 成为绝对优势细菌门, 且随盐添加量升高, 厚壁菌门的相对丰度增大。而蓝菌门的变化规律与厚壁菌门相反, 当发酵1 d时, 蓝菌门占据主导优势, 随发酵不断进行, 其相对丰度呈降低趋势, 且盐添加量越高, 相对丰度越小, 这与陈雪玲等^[39]的研究结果一致。此外, 变形菌门在发酵1 d以及高盐腌制芥菜中的相对丰度较高, 在发酵45 d及低盐腌制芥菜中的相对丰度减少且较为平稳。当发酵1 d时, S9、S12、S15、S18组放线菌门的相对丰度分别为1.49%、2.10%、2.43%、2.09%, 当发酵45 d时, S9和S12组放线菌门的相对丰度增大, 分别为20.61%和2.89%, 而其他2组相对丰度减小。与发酵45 d相比, 拟杆菌门在发酵1 d

时相对丰度更高, 且盐添加量越高, 相对丰度较大。厚壁菌门中的许多菌种(如乳杆菌属(*Lactobacillus*))是兼性厌氧或专性厌氧菌且耐酸, 对低pH值和高盐环境具有较强的耐受性, 能够在此环境中高效代谢并繁殖^[9]。而蓝菌门是光合自养微生物, 需要氧气进行光合作用^[40], 变形菌门中有些细菌属于好氧型细菌, 适宜在有氧环境中生长。发酵1 d容器中可能残留一定的氧气, 因而适合蓝菌门和变形菌门生长, 但随发酵进行, 氧气逐渐被消耗, 且随有机酸(如乳酸、乙酸)的积累, 环境pH值明显下降, 导致许多微生物逐渐被更适应酸性、厌氧环境的细菌取代, 从而使得蓝菌门和变形菌门在发酵45 d相对丰度降低。许多放线菌(如链霉菌属(*Streptomyces*))对低pH值环境具有较强耐受性, 且较低的盐添加量对微生物的抑制作用较弱, 相较于高盐环境, 更有利于微生物存活^[41]。绝大多数拟杆菌是嗜中性或微酸性微生物, 强酸性环境可抑制其生长, 因而其在发酵45 d相对丰度降低。

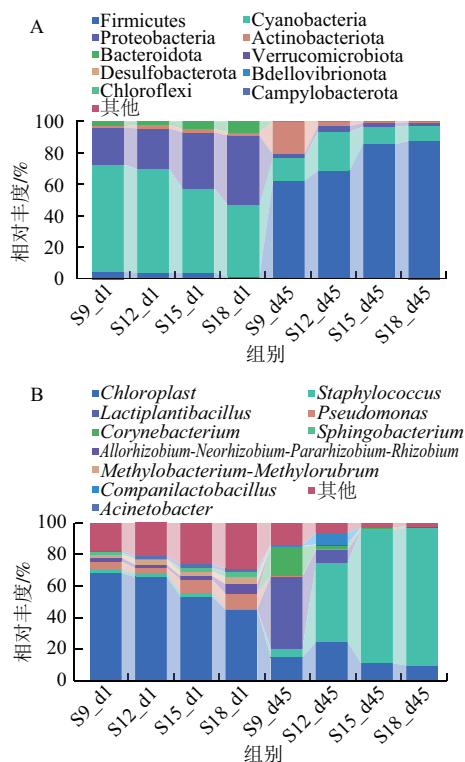


图7 基于门(A)和属(B)水平不同盐添加量下芥菜腌制过程中细菌菌群结构

Fig. 7 Bacterial community structure of cured mustard during the pickling with different salt addition levels at the phylum (A) and genus (B) levels

由图7B可知, 4组腌制芥菜的优势细菌属(相对丰度>1%)为绿菌属(*Chloroplast*)、葡萄球菌属(*Staphylococcus*)、乳植杆菌属(*Lactiplantibacillus*)、假单胞菌属(*Pseudomonas*)和棒状杆菌属(*Corynebacterium*)。其中, 绿菌属和假单

胞菌属是芥菜发酵1 d时的优势菌属。当发酵1 d时, 4组腌制芥菜中绿菌属的相对丰度分别为68.27%、65.67%、53.42%、45.31%, 假单胞菌属的相对丰度分别为5.77%、3.10%、8.37%、9.36%; 当发酵45 d时, 绿菌属的相对丰度降低, 其优势地位下降, 但葡萄球菌属的相对丰度上升, 尤其是在盐添加量为12%、15%和18%时达到最高, 分别为50.14%、84.75%、87.07%, 占据主导优势, 这可能是由于发酵初期乳酸菌产生乳酸, pH值下降, 抑制不耐酸菌。但随着乳酸菌活性减弱, pH值可能回升, 葡萄球菌属适应中性或弱碱性环境, 且耐高盐环境, 竞争力增强^[42]。盐添加量为9%腌制芥菜中, 乳植杆菌属和棒状杆菌属的相对丰度明显高于其他组, 分别为45.84%、18.38%, 说明这2种菌属下的某些发酵菌适宜在该盐浓度下生长, 与唐睿^[43]的研究结果一致。

3 结 论

在不同盐添加量下自然发酵制备腌制芥菜发现, 在理化指标方面, 发酵过程中, 各组腌制芥菜的pH值均先下降后趋于平缓, 总酸含量变化与其相反, 而还原糖、亚硝酸盐及氨基酸态氮含量均先升高后下降; 随着盐添加量升高, 腌制芥菜的pH值及还原糖含量均升高, 总酸含量降低, 发酵45 d时盐添加量15%腌制芥菜中氨基酸态氮含量最高, 盐添加量12%腌制芥菜亚硝酸盐含量最低。在色泽方面, 各组腌制芥菜发酵过程中颜色变暗, 黄色的饱和度增加, 但随盐添加量增大, 色泽变亮。在细菌菌群多样性方面, 发酵45 d时, 盐添加量9%和12%腌制芥菜的细菌菌群多样性较高, 盐添加量15%腌制芥菜的细菌菌群丰富度最高; 各组腌制芥菜细菌菌群的差异主要体现在相对丰度上, 发酵45 d时, 盐添加量9%腌制芥菜中主要优势细菌属为乳植杆菌属 (*Lactiplantibacillus*) 和棒状杆菌属 (*Corynebacterium*), 而其他盐添加量腌制芥菜中的主要优势细菌属均为葡萄球菌属 (*Staphylococcus*)。综上, 腌制芥菜适宜的盐添加量应为12%~15%, 在此盐添加量下既能保证腌制效果, 又能兼顾风味和微生物安全性, 为芥菜腌制产业的标准化生产提供了有力指导。

参考文献:

- [1] 王馨蕊, 汤回花, 刘毕琴, 等. 发酵蔬菜中生物胺控制技术研究进展[J]. 食品研究与开发, 2022, 43(14): 219-224.
- [2] 王馨蕊, 汤回花, 刘毕琴, 等. 发酵蔬菜中亚硝酸盐的控制技术研究进展[J]. 云南农业科技, 2021(5): 62-64.
- [3] BEHERA S S, SHEIKHA A F E, HAMMAMI R, et al. Traditionally fermented pickles: how the microbial diversity associated with their nutritional and health benefits?[J]. J Funct Foods, 2020, 70: 103971.
- [4] 李凤姿, 张媛, 吴昊, 等. 盐对发酵蔬菜微生物群体和发酵质量的影响[J]. 中国调味品, 2018, 43(3): 150-154; 200.
- [5] LIANG H P, HE Z, WANG X Y, et al. Effects of salt concentration on microbial diversity and volatile compounds during suancai fermentation[J]. Food Microbiol, 2020, 91: 103537.
- [6] YANG X Z, HU W Z, XIU Z L, et al. Microbial dynamics and volatile profiles during the fermentation of Chinese northeast sauerkraut by *Leuconostoc mesenteroides* ORC 2 and *Lactobacillus plantarum* HBUAS 51041 under different salt concentrations[J]. Food Res Int, 2020, 130: 108926.
- [7] 张长贵, 郑耀伟, 张耕. 盐度对苦笋-剁辣椒复合腌制品品质的影响[J]. 中国调味品, 2023, 48(9): 98-103.
- [8] 李雄波, 李恒, 邓维琴, 等. 盐度对郫县豆瓣甜瓣子发酵过程中微生物及产品品质的影响[J]. 食品科学, 2020, 41(22): 193-199.
- [9] LEE D Y, PARK S E, KIM E J, et al. A comparative study of the physicochemical, microbial, and metabolic profiling of kimchi during long-term fermentation under varying salinity conditions[J]. LWT-Food Sci Technol, 2024, 196: 115838.
- [10] TANG J B, WU X M, LÜ D, et al. Effect of salt concentration on the quality and microbial community during pickled peppers fermentation[J]. Food Chem: X, 2024, 23: 101594.
- [11] WANG D D, CHEN G, TANG Y, et al. Correlation between autochthonous microbial communities and flavor profiles during the fermentation of mustard green paocai (*Brassica juncea* Coss.), a typical industrial-scaled salted fermented vegetable[J]. LWT-Food Sci Technol, 2022, 172: 114212.
- [12] 刘大群, 张程程, 童川. 基于高通量测序分析不同盐量榨菜坯料中细菌群落多样性[J]. 中国食品学报, 2017, 17(12): 215-224.
- [13] CHEN M J, QIN Y Y, DENG F M, et al. Illumina MiSeq sequencing reveals microbial community succession in salted peppers with different salinity during preservation[J]. Food Res Int, 2021, 143: 110234.
- [14] 徐欢欢, 戴临雪, 吴志康, 等. 食盐盐度及钙含量对腌制芥菜自然发酵过程的影响[J]. 食品工业, 2023, 44(6): 73-77.
- [15] 侯爱香, 王一淇, 黄晴, 等. 自然发酵与人工接种发酵湖南芥菜的挥发性风味组分和品质分析[J]. 食品科学, 2018, 39(6): 237-245.
- [16] 赵楠. 四川泡菜的主要特性及其成因分析[D]. 无锡: 江南大学, 2017.
- [17] 余丽梅, 向平, 叶丽娟, 等. 四种水果中还原糖含量的测定与分析[J]. 广东化工, 2021, 48(16): 243-244; 248.
- [18] 丁奇, 马立利, 郎爽, 等. 不同调味品中氨基酸态氮、总酸含量的分析及比较研究[J]. 分析仪器, 2021(3): 70-74.
- [19] 刘淑好, 程贵兰, 刘迪, 等. 常温贮藏可食中药嫩芽和常见叶菜的感官品质及亚硝酸盐含量动态演变比较[J]. 辽宁农业职业技术学院学报, 2025, 27(2): 1-5.
- [20] LEI L, XIAO S, XING C, et al. Microbiota succession and chemical composition involved in the radish fermentation process in different containers[J]. Front Microbiol, 2020, 11: 445.
- [21] QI C, YING L, KANGLING Y, et al. Variations of volatile flavors and microbial communities in Chinese Chaozhou pickle during natural fermentation revealed by GC-IMS and high-throughput sequencing[J]. LWT-Food Sci Technol, 2024, 191: 115610.
- [22] 周艺萍, 熊智, 李选文, 等. 不同盐浓度对新平酸腌菜发酵过程的影响[J]. 中国调味品, 2021, 46(5): 13-17.
- [23] 李玉荣, 袁滨锋, 陈震, 等. 不同盐添加量剁辣椒自然发酵过程中品质变化研究[J]. 食品安全导刊, 2025(14): 88-92.
- [24] XIONG T, LI J B, LIANG F, et al. Effects of salt concentration on Chinese sauerkraut fermentation[J]. LWT-Food Sci Technol, 2016, 69: 169-174.
- [25] 周美琪, 周其德, 田赛莺, 等. 低盐腌制对缙云梅干菜加工品质的影响[J]. 核农学报, 2018, 32(8): 1562-1571.
- [26] 汪莉莎, 陈光静, 郑炯, 等. 大叶麻竹笋腌制过程中品质变化规律[J]. 食品与发酵工业, 2013, 39(10): 73-77.

- [27] 石振兴, 胡永金, 朱仁俊. 腌制蔬菜的品质及亚硝酸盐问题研究进展[J]. 中国调味品, 2009, 34(5): 25-29.
- [28] 国家卫生健康委员会, 国家市场监督管理总局食品安全国家标准食品中污染物限量: GB 2762—2022[S]. 北京: 中国标准出版社, 2022.
- [29] 赵阳, 张思蓉, 邓建朝, 等. 变质蚝油中微生物的分离鉴定及其对蚝油品质的影响[J]. 食品与发酵工业, 2025, 51(12): 53-61.
- [30] 王迪, 王智荣, 陈渭慧, 等. 不同后发酵温度下曲霉型豆豉的氨基酸态氮生成动力学及品质变化研究[J]. 食品与发酵工业, 2021, 47(9): 91-99.
- [31] 李学贵. 对榨菜在腌制过程中主要成分变化的探讨[J]. 中国酿造, 2003, 22(3): 9-12.
- [32] 刘永逸, 林华, 杨超, 等. 不同发酵方式对酸豆角品质和风味的影响[J]. 食品工业科技, 2022, 43(14): 43-51.
- [33] 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.
- [34] 吴凯, 覃业优, 蒋立文, 等. 不同质量分数食盐腌渍红辣椒的风味物质分析[J]. 食品科学, 2021, 42(24): 175-182.
- [35] 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.
- [36] 张国民, 洪鑫月, 费晓芸. NaCl对橙皮素抑制多酚氧化酶活性的影响[J]. 南昌大学学报(理科版), 2025, 49(3): 258-269.
- [37] WANG L, HUANG J, HU S, et al. The dynamic changes and correlations between biochemical properties, flavor and microbial community during fermentation of asparagus by-products[J]. Food Chem, 2025, 463(P2): 141173.
- [38] 杨瑞, 张伟, 陈炼红, 等. 发酵条件对泡菜发酵过程中微生物菌系的影响[J]. 食品与发酵工业, 2005(3): 90-92.
- [39] 陈雪玲, 刘琨毅, 王琪, 等. 宜宾芽菜发酵过程中微生物群落与风味物质的变化及其相关性分析[J]. 食品工业科技, 2025, 46(13): 36-45.
- [40] 汪浩, 张芬芳, 陈磊, 等. 基于合成生物学改造蓝细菌的光合碳固定[J]. 生命科学, 2024, 36(10): 1250-1259.
- [41] LIU H, YANG S J, LIU J, et al. Effect of salt concentration on Chinese soy sauce fermentation and characteristics[J]. Food Biosci, 2023, 53: 102825.
- [42] 赵睿, 邵长春, 高世功, 等. 高通量测序分析不同腌腊肉制品细菌多样性[J]. 食品科学, 2020, 41(20): 90-96.
- [43] 唐睿. 腌制华容大叶芥菜微生物多样性分析[D]. 长沙: 湖南农业大学, 2021.