

## 盐度对紫甘蓝酸菜发酵过程中挥发性风味物质及理化指标的影响

李智, 解双瑜, 孙波\*, 柳凯, 张宇

(东北农业大学食品学院 哈尔滨 150030)

**摘要** 为考察不同盐度(1%,3%,5%,10%)对紫甘蓝酸菜发酵过程中挥发性风味物质及理化指标的影响,利用顶空固相微萃取-气相色谱-质谱联用(HS-SPME/GC-MS)方法分析挥发性风味物质的差异性,比较在发酵过程中,其感官得分、pH、总酸、亚硝酸盐、氨基酸态氮、还原糖含量及乳酸菌数的差异。结果表明:盐度对紫甘蓝酸菜的感官得分及理化指标中的 pH、总酸、氨基酸态氮、还原糖含量及乳酸菌数有显著影响( $P<0.05$ )。盐度过高( $>5%$ )不利于紫甘蓝酸菜的发酵及感官品质,其中 3%盐度发酵酸菜的感官综合得分最高。HS-SPME/GC-MS 分析结果表明,发酵末期(60 d),3%盐度发酵的酸菜的风味物质总含量最高;其中,部分烯烃类、醇类、醛类、酮类、异硫氰酸酯类及腈类等风味物质的含量显著高于其它盐度的酸菜( $P<0.05$ ),随着盐度的增加,这些风味物质相应减少。结合 OAV 值分析得到酸菜中 21 种关键挥发性风味物质,其在较高的盐度( $>5%$ )下对应的 OAV 值显著降低( $P<0.05$ );通过 PCA 可知,发酵中期(30 d)和末期(60 d),不同盐度发酵的酸菜间风味物质组成差异较大,其中 3%盐度的风味物质组成更为丰富;Pearson 相关性分析表明,盐度与总酸、氨基酸态氮含量、乳酸菌数、感官综合得分及大部分挥发性风味物质之间呈负相关,其中与总酸呈显著负相关( $P<0.05$ ),而与 pH 值、还原糖含量呈正相关。结论:相比其它盐度的酸菜,3%盐度发酵的紫甘蓝酸菜风味品质较好,可直接用于紫甘蓝的发酵工艺,对紫甘蓝酸菜的的生产具有一定的指导意义。

**关键词** 紫甘蓝酸菜; 盐度; 理化指标; 挥发性风味物质; 顶空固相微萃取-气相色谱-质谱联用

**文章编号** 1009-7848(2023)04-0214-14 **DOI:** 10.16429/j.1009-7848.2023.04.021

紫甘蓝 (*Brassica oleracea* L. var. capitata f. rubra)又名红甘蓝,紫卷心菜,是芸薹属十字花科植物结球甘蓝的一种,其富含花色苷、多酚及硫苷等物质,具有抗氧化,缓解炎症,抑制肿瘤及预防心脑血管疾病等功效<sup>[1-3]</sup>。紫甘蓝因具有适应性强,病虫害少等优点而在全世界许多国家大面积种植,其通常以鲜食或提取花青素等形式被消费<sup>[4]</sup>。新鲜的紫甘蓝在流通过程中常容易发生损耗和污染变质,营养成分也会部分丢失,因此选择适当的加工方法,如蒸煮、热烫、冷冻及发酵等,不仅可以延长紫甘蓝的保质期,还能最大限度地保留其营养成分<sup>[4-6]</sup>。

风味主要由味道、香气和质地等 3 部分组成,食物的整体风味在很大程度上是香气的作用;风味物质的组成及含量对发酵蔬菜的感官品质有直接影响,被视为发酵蔬菜最重要的指标之一,蔬菜经发酵后其风味及口感可以得到明显改善<sup>[7]</sup>。盐对于发酵蔬菜的风味及感官品质起重要作用,其不

仅可以调控蔬菜发酵过程的微生物生长代谢<sup>[8]</sup>,而且对蔬菜发酵过程中的酸类、醛类、醇类、酯类等风味成分的组成产生影响<sup>[7,9]</sup>,同时还能形成一定的渗透压,使蔬菜中的可溶性物质,如糖类等从蔬菜细胞内渗出,供乳酸菌等微生物代谢利用;盐度过高可能影响蔬菜发酵速度,而盐度过低或将导致发酵蔬菜失脆,感官品质下降,甚至引发食品安全问题<sup>[10-11]</sup>。Seo 等<sup>[12]</sup>研究了不同盐度对 Kimchi 中挥发性风味物质的影响,结果发现 Kimchi 中的代谢产物因盐度的不同而产生差异;徐丹萍等<sup>[13]</sup>研究了不同发酵方式对结球甘蓝泡菜及原料的挥发性物质的影响,结果发现不同的菌种会对于其挥发性风味物质产生影响;汪冬冬等<sup>[14]</sup>研究了不同温度对甘蓝泡菜发酵过程中风味的影响。而国内外对于紫甘蓝的研究主要集中在鲜食<sup>[15]</sup>、运输<sup>[16]</sup>及烹饪方式对抗氧化活性成分的影响<sup>[17]</sup>等方面,关于发酵紫甘蓝酸菜的的研究还比较少,特别是不同盐浓度对发酵紫甘蓝酸菜的理化指标及风味物质的变化规律还不清楚。

目前,对于发酵蔬菜中的风味物质的研究手段主要是顶空固相萃取-气相色谱-质谱联用

收稿日期: 2022-04-12

第一作者: 李智,男,硕士生

通信作者: 孙波 E-mail: bosun1962@163.com

(HS-SPME/GC-MS)技术,该技术是目前分析食品风味物质的主流手段<sup>[18]</sup>。而 PCA (Principal components analysis) 等多元统计学分析方法是能与 GC-MS 结合的有效分析食品风味成分的常用方法,其能有效区分不同条件下发酵食品的风味物质差异<sup>[19]</sup>。

基于上述问题,本文以紫甘蓝为原料,选择 1%,3%,5%,10% 4 种盐度发酵紫甘蓝,得到紫甘蓝酸菜,探究盐度对其发酵过程中挥发性风味物质及理化指标的影响,以期为提升紫甘蓝附加值及其酸菜制品的品质提供参考。

## 1 材料与方 法

### 1.1 材料与试剂

新鲜紫甘蓝,哈尔滨市农贸市场,选择新鲜无破损、无虫害、无霉变的结球紫甘蓝。食盐(NaCl,  $\geq 98.5\%$ ),中国盐业集团有限公司。

氢氧化钠、盐酸、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),天津市科密欧化学试剂有限公司;环己酮(GC级,  $\geq 99.9\%$ ),美国 Sigma-Aldrich 公司。

### 1.2 仪器与设备

Shimadzu Nexis 2030/QP2020NX GC-MS 联用仪,配有毛细管柱(DB-5MS,内径 30 m $\times$ 0.25 mm,膜厚 0.25  $\mu$ m),日本岛津公司;SPME 装置(57328-U,50/30mm DVB/CAR/PDMS),美国 Supelco 公司;Sigma3-18K 高速冷冻离心机,德国 Sigma 公司;TU-1800 型紫外可见分光光度计,北京普析通用仪器有限责任公司;PHS-3C 型精密 pH 计,上海精密科学仪器有限公司;HWS-24 型电热恒温水浴锅,上海齐欣科学仪器有限公司;SQP 电子天平(0.01 g),赛多利斯科学仪器(北京)有限公司。

### 1.3 方 法

1.3.1 发酵紫甘蓝的制备 将 1.1 节中的紫甘蓝洗净,切成 1.0 cm $\times$ 6.0 cm 左右大小的菜丝,混合均匀后装入 3.0 L 的发酵玻璃罐,每个发酵罐装 2.0 kg 左右,层层压实,再分别加入配制好的盐度为 1%,3%,5%,10% 的盐水,将玻璃发酵罐密封放入(20 $\pm$ 0.5) $^{\circ}$ C 的恒温环境中,发酵 60 d,编号分别

记为 SC1,SC3,SC5 和 SC10。

1.3.2 取样及样品处理 取样:根据自然发酵规律,分别取发酵第 1,5,15,30,45,60 天的样品,每次分别取盐水 50.0 mL 及紫甘蓝 100.0 g,用无菌取样袋密封好放入-20  $^{\circ}$ C 的环境保存,以便后续分析。

样品处理:取上述紫甘蓝 50.0 g,用组织破碎机进行破碎,快速用无菌密封袋密封放入-20  $^{\circ}$ C 的环境中保存备用。

1.3.3 理化指标的分析 pH 值的测定:利用 pH 计直接测定不同发酵时间的酸菜盐水中的 pH 值;总酸的测定:参照 GB 12456-2021《食品安全国家标准 食品中总酸的测定》<sup>[20]</sup>;氨基酸态氮含量的测定:参照 GB5009.235-2016《食品安全国家标准 食品中氨基酸态氮的测定》<sup>[21]</sup>;还原糖含量的测定:参照 GB 5009.7-2016《食品安全国家标准 食品中还原糖的测定》<sup>[22]</sup>;亚硝酸盐含量的测定:参照 GB 5009.33-2016《食品安全国家标准 食品中亚硝酸盐与硝酸盐的测定》<sup>[23]</sup>;乳酸菌数的测定:参照 GB 4789.35-2016《食品安全国家标准 食品微生物学检验 乳酸菌检验》<sup>[24]</sup>。

1.3.4 挥发性风味物质分析 参照徐丹萍等<sup>[13]</sup>的方法,在此基础上略作修改:取 1.3.2 节中的发酵前期(1 d)、中期(30 d)和后期(60 d)的紫甘蓝预处理样品各 5.00 g,加入 20 mL 顶空进样瓶内,密封后置于 60  $^{\circ}$ C 下水浴加热 30 min,期间每隔 5 min 均匀摇晃一下瓶体,之后再将固相萃取纤维头插入瓶内进行 30 min 的吸附,最后将吸附平衡好的萃取纤维头插入到 GC 进样口,在进样口温度为 250  $^{\circ}$ C 下解吸 5 min。

GC-MS 条件设置:将柱温箱温度梯度保持在 40  $^{\circ}$ C 下 3 min,再以 5  $^{\circ}$ C/min 增加到 100  $^{\circ}$ C,然后以 3  $^{\circ}$ C/min 增加到 175  $^{\circ}$ C,再以 10  $^{\circ}$ C/min 增加到 215  $^{\circ}$ C,随后保持 10 min。在 70 eV 下用 230  $^{\circ}$ C 的离子源温度获得质谱,质量扫描范围  $m/z$  设置为 35~550 u。

气质数据的定性和定量分析:根据 GC-MS 得到的图谱,经与工作站的 NIST Library17 检索对比各色谱峰的质谱信息,选择相似度达到 80% 以上的成分结构信息作为风味物质的定性分析,采用内标法进行半定量,得到各组分的质量浓度

( $\mu\text{g}/\text{kg}$ ), 计算公式如下:

$$C_v = (A_v/A_i) \times (M_i/M_s) \times 1000 \quad (1)$$

式中,  $C_v$ ——某一挥发性风味物质的浓度,  $\mu\text{g}/\text{kg}$ ;  $A_v$ ——某一挥发性风味物质的峰面积;  $A_i$ ——内标物(环己酮)的峰面积;  $M_s$ ——样品质量,  $\text{g}$ ;  $M_i$ ——内标质量,  $\text{mg}$ 。

紫甘蓝酸菜中挥发性风味成分的香气活性值(OAV)计算参考王华杰等<sup>[29]</sup>的方法, 即:

$$\text{OAV} = C/T \quad (2)$$

式中,  $C$ ——组分在样品中的质量浓度,  $\mu\text{g}/\text{kg}$ ;  $T$ ——对应组分在水中或空气中的气味阈值,  $\mu\text{g}/\text{kg}$ 。

1.3.5 感官评价 参考赵敏<sup>[26]</sup>和赵国忠等<sup>[27]</sup>关于酸菜的感官评价方法, 在此基础上调整, 形成如下感官评价标准(表1)。取发酵 60 d 的紫甘蓝酸菜, 挑选 10 名训练有素的食物专业的学生(5 名男生和 5 名女生)对其进行感官评价, 相关人员保持一定距离, 且不能相互交流。

表 1 紫甘蓝酸菜感官评价标准

Table 1 Sensory evaluation standard of red cabbage sauerkraut

项目(权重)	评分标准	得分
色泽(15%)	酸菜为新鲜蔬菜色泽, 紫红中透出清亮, 汤汁清澈	8~10
	颜色略暗, 汤汁略浑浊	5~7
	颜色灰暗, 汤汁浑浊	1~4
香味(30%)	有典型乳酸发酵香味, 无腐臭味	8~10
	乳酸发酵香味较弱, 腐臭味较弱	5~7
	无乳酸发酵香味, 腐臭味严重	1~4
滋味(30%)	咸度适宜, 鲜味较强, 酸味较强, 无苦涩味	8~10
	咸度适中, 鲜味较弱, 酸味较弱, 有微弱苦涩味	5~7
	咸度过咸, 基本无鲜味, 酸味较弱	1~4
质地(25%)	蔬菜组织完好, 硬度较好, 质地脆嫩	8~10
	蔬菜组织略有破碎, 较为软绵, 质地较脆	5~7
	蔬菜组织破碎严重, 软绵无韧性, 质地不脆	1~4

## 1.4 数据处理

采用 Excel 2016 及 SPSS 26.0 软件进行数据统计及处理, 本试验均重复 3 次, 所有结果均以“平均值 $\pm$ 标准差(Mean $\pm$ SD)”表示, 所有计算结果保留两位小数; 试验数据采用单因素方差分析(Analysis of variance, ANOVA)和 Duncan 检验( $P < 0.05$ )其显著性, 利用 Origin 2021 绘图。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同盐度紫甘蓝酸菜的感官评价

表 2 不同盐度紫甘蓝酸菜感官评价结果

Table 2 Sensory evaluation of red cabbage sauerkraut with different salinity

样品	色泽	香味	滋味	质地	综合得分
SC1	6.95 $\pm$ 0.69 <sup>a</sup>	7.45 $\pm$ 0.47 <sup>a</sup>	6.45 $\pm$ 0.47 <sup>a</sup>	5.80 $\pm$ 0.46 <sup>d</sup>	6.66 $\pm$ 0.26 <sup>a</sup>
SC3	7.70 $\pm$ 0.64 <sup>b</sup>	8.35 $\pm$ 0.39 <sup>b</sup>	7.90 $\pm$ 0.44 <sup>b</sup>	8.05 $\pm$ 0.35 <sup>a</sup>	8.04 $\pm$ 0.20 <sup>d</sup>
SC5	7.45 $\pm$ 0.47 <sup>b</sup>	7.65 $\pm$ 0.50 <sup>a</sup>	7.40 $\pm$ 0.49 <sup>b</sup>	7.30 $\pm$ 0.40 <sup>b</sup>	7.46 $\pm$ 0.29 <sup>c</sup>
SC10	6.85 $\pm$ 0.55 <sup>a</sup>	6.10 $\pm$ 0.58 <sup>c</sup>	4.10 $\pm$ 0.37 <sup>c</sup>	4.10 $\pm$ 0.66 <sup>c</sup>	5.11 $\pm$ 0.33 <sup>b</sup>

注: 同列不同行小写字母表示差异显著( $P < 0.05$ )。

不同盐度的紫甘蓝酸菜感官评价结果如表 2 所示。SC1, SC3, SC5 及 SC10 分别从色泽、香味、滋味及质地 4 个方面进行评分, 并根据表 1 中的权重得到最终的感官综合得分, 其中 SC3 具有最高的感官综合得分, 为 8.04, 其次是 SC5 为 7.46, SC1 为 6.66, 而 SC10 的综合得分最低为 5.11, 不同盐度发酵的紫甘蓝酸菜的感官综合得分具有显著性差异( $P < 0.05$ ), 说明盐度能够显著影响紫甘蓝酸菜的感官品质, 盐度过高感官得分降低。

## 2.2 不同盐度对紫甘蓝酸菜发酵过程中理化指标的影响

**2.2.1 不同盐度对紫甘蓝酸菜发酵过程中 pH 值的影响** pH 值的变化是衡量酸菜发酵的重要指标之一, 主要与乳酸菌等微生物代谢有关, 能够影响发酵的进程<sup>[28]</sup>。如图 1 所示, SC1, SC3, SC5 及 SC10 紫甘蓝酸菜在发酵前期(1 d)具有最高的 pH 值, 并随其盐度的不同而产生差异, 其中 SC1 和 SC10 分别具有最低和最高的 pH 值, 分别为 4.35 和 6.38, 具有显著性差异( $P < 0.05$ )。随着发酵时间的延长, 所有盐度发酵的酸菜, 其 pH 值均呈下降趋势, 且在发酵中期(30 d)后趋于稳定。发酵末期(60 d), SC3 酸菜的 pH 值最低为 2.91, 而 SC10 酸菜的 pH 值最高为 3.30, 这可能是由于 SC10 的盐度高于其它盐度发酵的酸菜, 导致发酵过程产酸速率较低, 这与 Xiong 等<sup>[29]</sup>研究结果相似。

### 2.2.2 不同盐度对紫甘蓝酸菜发酵过程中总酸的变化

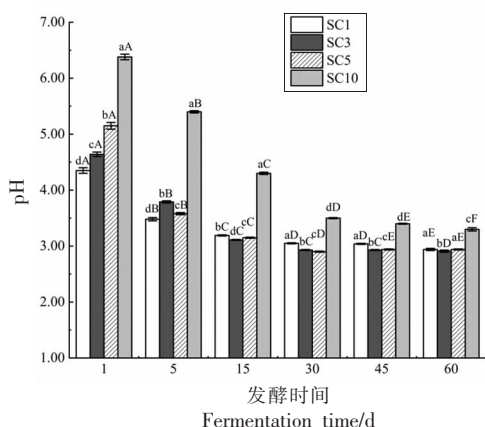


图 1 不同盐度紫甘蓝酸菜发酵过程中 pH 值的变化  
Fig.1 Changes of pH value in red cabbage sauerkraut with different salinity during fermentation

**2.2.3 不同盐度对紫甘蓝酸菜发酵过程中还原糖含量的影响** 还原糖是酸菜发酵过程中重要的营养物质, 其能够被乳酸菌代谢产生酸类、醇类及酯类等风味物质。还原糖含量的变化可以反应酸菜发酵的程度。如图 3 所示, 不同盐浓度紫甘蓝酸菜中的还原糖含量均先增加后减少, 并最终趋于稳定。发酵末期(60 d), SC1 和 SC3 中还原糖含量最低, 分别为 1.35, 1.26 g/L; SC5 和 SC10 中的还原糖含量最高, 分别为 4.25, 5.39 g/L, 与 SC1 和 SC3

影响 总酸含量的多少决定了酸菜中酸味物质的多少, 也是评估酸菜发酵程度的重要指标之一。酸菜中的酸类物质主要是由乳酸菌代谢产生包括乳酸在内的有机酸<sup>[30]</sup>。如图 2 所示, 不同盐度的紫甘蓝酸菜在发酵过程中的总酸含量呈现逐渐上升的趋势, 发酵前期(1 d), SC1, SC2, SC3 及 SC10 中总酸含量分别为 1.34, 1.02, 0.55, 0.24 g/L, 不同盐度紫甘蓝酸菜的总酸含量随发酵时间的延长而逐渐增加。发酵末期(60 d), SC1 中的总酸含量最高, 为 17.23 g/L, 与其它盐度紫甘蓝酸菜之间具有显著性差异( $P < 0.05$ ); 而 SC10 总酸含量最低, 为 8.73 g/L, SC3 和 SC5 的总酸含量差异不显著( $P > 0.05$ ), 分别为 14.08, 14.55 g/L, 这与 Yang 等<sup>[31]</sup>的研究结果相似。乳酸菌虽然对盐度具有一定的耐受能力, 但是盐度过高可能对于其生长产生抑制作用, 从而导致产酸能力下降。

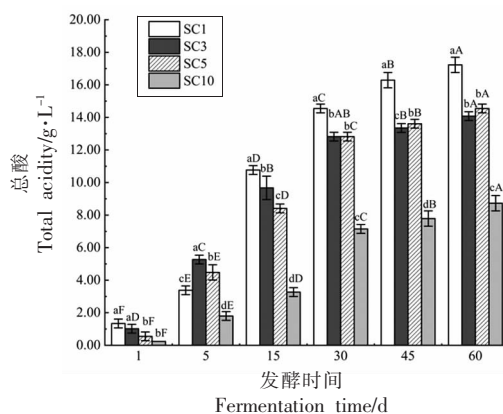


图 2 不同盐度紫甘蓝酸菜发酵过程中总酸含量的变化  
Fig.2 Changes of total acidity in red cabbage sauerkraut with different salinity during fermentation

有显著性差异( $P < 0.05$ )。这可能是由于较高盐度抑制了乳酸菌的生长代谢, 从而将糖转化为酸类及其它物质的能力显著降低。Yang 等<sup>[31]</sup>研究了不同盐度对接种发酵的东北酸菜品质的影响, 发现盐度越高, 最终酸菜发酵液中的残余还原糖含量也越高, 与本研究的的结果相似。

**2.2.4 不同盐度对紫甘蓝酸菜发酵过程中亚硝酸盐含量的影响** 亚硝酸盐是蔬菜发酵过程中产生的一种对人体有害的物质。如图 4 所示, 不同盐度

发酵的紫甘蓝酸菜,在发酵初期具有最低的亚硝酸盐含量,随着发酵时间的延长,亚硝酸盐含量先显著( $P<0.05$ )上升而后下降,并在发酵 15 d 左右达到峰值,且 SC1 中的亚硝酸盐含量最高,为 35.34 mg/kg,SC10 中亚硝酸盐含量最低,为 15.67 mg/kg,且具有显著性差异( $P<0.05$ ),说明盐浓度对亚硝酸盐峰值具有显著性影响;发酵末期(60 d),SC3 中亚硝酸盐水平最低为 1.93 mg/kg,与 SC1 及 SC5 中的亚硝酸盐含量(分别为 2.10,2.27 mg/kg)无显著性差异( $P>0.05$ ),然而与 SC10 有显著性差异。所有紫甘蓝酸菜中的亚硝酸盐含量均降低至 5 mg/kg 以下,均处于国家规定的安全水平

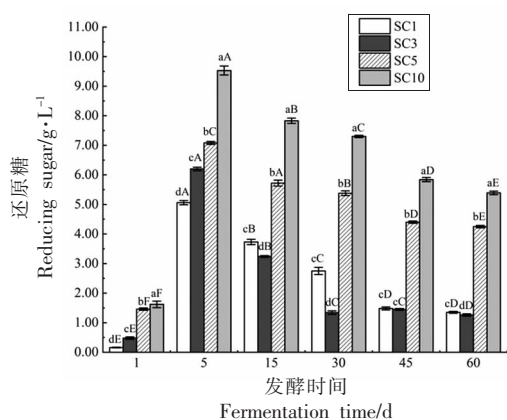


图3 不同盐度紫甘蓝酸菜发酵过程中还原糖含量的变化  
Fig.3 Changes of reducing sugar content in red cabbage sauerkraut with different salinity during fermentation

2.2.5 不同盐度对紫甘蓝酸菜发酵过程中氨基酸态氮含量的影响 氨基酸态氮含量反映了紫甘蓝酸菜中含有鲜物质的多少,一定程度上决定了酸菜的鲜味,对于酸菜的风味有着重要的影响。如图5所示,随着发酵时间的延长,紫甘蓝酸菜中的氨基酸态氮含量呈先增加后减少的趋势,这可能是由蛋白质的水解及微生物的代谢消耗所引起。发酵 15 d 左右其达到最大值,SC1,SC3,SC5 及 SC10 中的氨基酸态氮含量分别为 0.17,0.15,0.14,0.10 g/100 g。然而,随着盐度的增加,紫甘蓝酸菜中氨基酸态氮的含量整体呈下降的趋势,这与吴凯等<sup>[34]</sup>研究不同盐度腌渍艳红辣椒及 Yang 等<sup>[31]</sup>研究不同盐度的东北酸菜中的氨基酸态氮含量变化趋势相同,说明盐度与发酵蔬菜中的氨基酸态氮呈负相关,这可能是由于盐度过高,影响了

( $\leq 20$  mg/kg)<sup>[32]</sup>。盐度能影响发酵紫甘蓝酸菜中亚硝酸盐的含量,一般过低的盐度不能很好地抑制发酵初期其体系有害微生物的生长,从而导致较高的亚硝酸盐峰值的出现,随着发酵时间的延长,乳酸菌逐渐成为优势菌,产生大量的乳酸等有机酸,导致体系 pH 值迅速下降,一方面抑制了有害微生物的生长,另一方面也加速了亚硝酸盐的分解<sup>[33]</sup>;过高的盐度(如 SC10)虽然能够有效抑制酸菜中有害菌群生长,却同时又抑制了乳酸菌的生长,进而影响酸菜的最终品质,因此本研究中 SC3 的盐度(3.0%)是较为适合紫甘蓝酸菜的发酵。

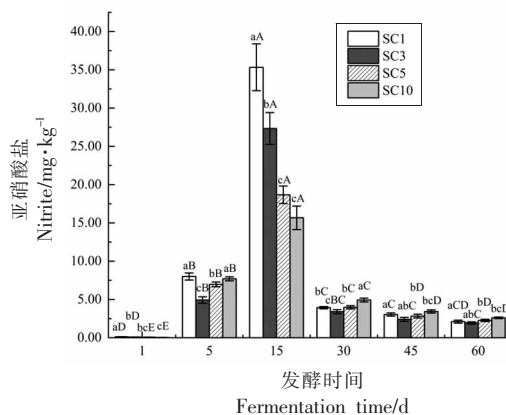


图4 不同盐度紫甘蓝酸菜发酵中亚硝酸盐含量的变化  
Fig.4 Changes of nitrite content in red cabbage sauerkraut with different salinity during fermentation

蛋白质水解酶活性,进而抑制了蛋白质的水解,导致氨基酸态氮含量降低。发酵末期(60 d),SC3 和 SC5 中氨基酸态氮含量最高,且无显著性差异( $P>0.05$ ),SC10 含量最低,与其它盐度紫甘蓝酸菜中的氨基酸态氮含量有显著性差异( $P<0.05$ )。

2.2.6 不同盐度对紫甘蓝酸菜发酵过程中乳酸菌数的影响 有研究表明,盐度可以影响东北酸菜发酵过程中乳酸菌的生长,较高的乳酸菌数与 pH 值降低以及包括酸在内的相关代谢物的产生有关,从而影响酸菜的感官特性<sup>[35]</sup>。因此本文研究不同盐度条件下,紫甘蓝酸菜发酵过程中的乳酸菌数变化情况,如图6所示。发酵前期(1 d),所有盐度下的紫甘蓝酸菜的乳酸菌数均具有最小值,分别为 4.53,5.05,4.97,4.06 lg(CFU/mL),随着发酵时间的延长,乳酸菌数呈先上升后下降的趋势,并

在发酵 15 d 达到最大值,其中 SC5 中的乳酸菌数最大为 9.92 lg(CFU/mL)。发酵末期(60 d),紫甘蓝酸菜中的乳酸菌数趋于稳定,分别为 6.72, 6.42, 5.87, 4.53 lg(CFU/mL),具有显著性差异( $P <$

0.05),说明盐度对于紫甘蓝酸菜中乳酸菌增殖产生重要的影响,过高的盐度会抑制乳酸菌的生长增殖,进而影响发酵酸菜的品质。

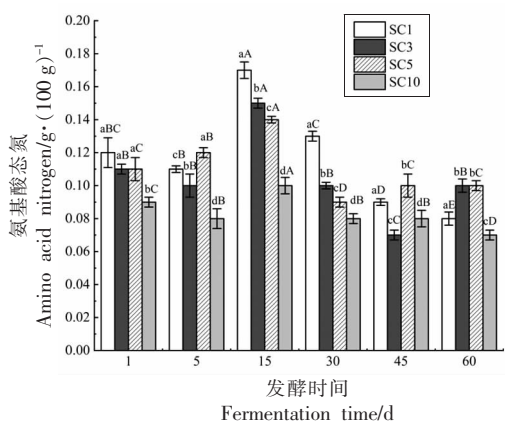


图 5 不同盐度紫甘蓝酸菜发酵过程中氨基酸态氮含量的变化

Fig.5 Changes of amino acid nitrogen content in red cabbage sauerkraut with different salinity during fermentation

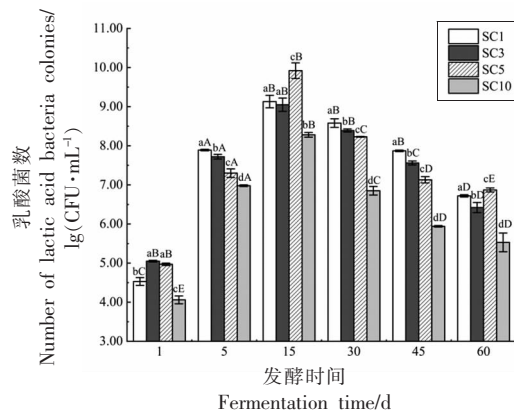
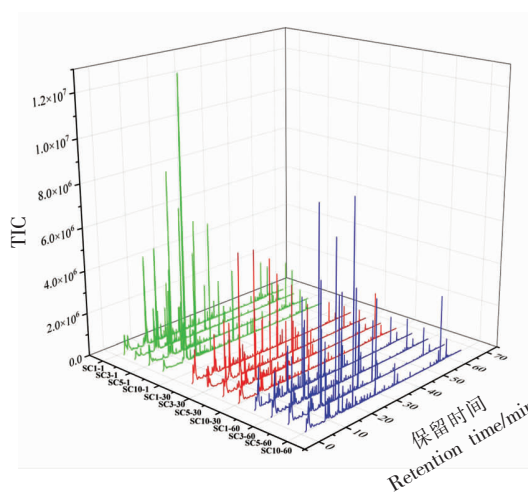


图 6 不同盐度紫甘蓝酸菜发酵过程中乳酸菌数的变化

Fig.6 Changes of number of lactic acid bacteria colonies in red cabbage sauerkraut with different salinity during fermentation

### 2.3 不同盐度对紫甘蓝酸菜发酵过程中挥发性风味物质的影响

通过 HS-SPME/GC-MS 分析了不同盐浓度紫甘蓝酸菜在发酵前期(1 d)、中期(30 d)和末期(60 d)其挥发性风味物质组成的变化。总离子流色谱图如图 7 所示,由 TIC 图可以看出随着发酵时间及盐度的变化,紫甘蓝酸菜中的挥发性风味物质的丰度有着较为明显的差异,为进一步解析不同盐度对紫甘蓝酸菜中的挥发性风味物质的影响,将每个色谱峰与 NIST Library 17 谱库进行匹配,选择相似度  $\geq 80$  的物质作为目标化合物,通过对比筛选发现,在不同盐度的紫甘蓝酸菜发酵过程中,共检测到 103 种挥发性风味化合物,其中烃类 5 种,醇类 22 种,醛类 15 种,酮类 8 种,酸类 6 种,酯类 24 种,酚类 5 种,腈类及杂环类 13 种及硫醚类 5 种。通过内标定量分析酸菜中每一类风味化合物在不同发酵时间及盐度条件下的总含量,如图 8 所示。发酵前期,所有盐度酸菜中的酯类含量最多,其中异硫氰酸烯丙酯的含量最大,分别为 6 060.73, 6 375.83, 7 050.90, 14 028.49  $\mu\text{g}/\text{kg}$ ;发酵中期,SC3 中的挥发性风味成分总含量最高,其中酯类含量也最高;发酵末期,SC3 中的挥



注:不同颜色代表紫甘蓝酸菜不同的发酵时期,其中绿色代表发酵前期(1 d),红色代表发酵中期(30 d),蓝色代表发酵末期(60 d);SC1,SC3,SC5,SC10 分别代表盐度为 1%,3%,5%,10%。

图 7 不同盐度紫甘蓝酸菜发酵过程中风味物质的总离子流色谱图

Fig.7 The total ions chromatogram of red cabbage sauerkraut with different salinity

发性风味物质含量最高,而 SC10 中含量最低,分别为 36 394.51, 11 412.58  $\mu\text{g}/\text{kg}$ ,这说明发酵紫甘蓝酸菜中的挥发性风味物质的含量随着盐度及时

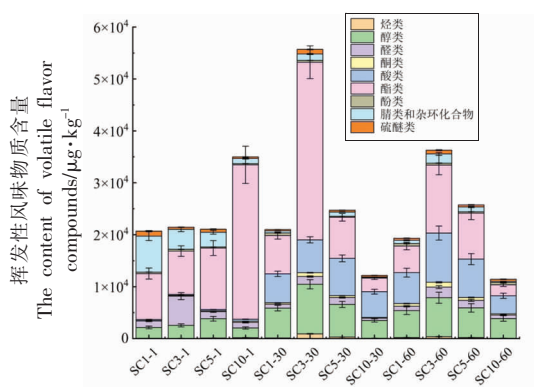


图8 不同盐度紫甘蓝酸菜发酵过程中挥发性风味物质含量的变化

Fig.8 Changes of volatile flavor compounds content in red cabbage sauerkraut with different salinity during fermentation

间的变化而产生显著性差异 ( $P < 0.05$ ), 这与前人研究东北酸菜中风味物质变化的趋势相同<sup>[36]</sup>。

为进一步分析不同盐度对紫甘蓝酸菜发酵过程中挥发性风味物质变化的影响, 对上述 103 种挥发性风味物质进行热图聚类分析(图 9)并计算分析主要挥发性风味物质的气味活性值(OAV)(表 3), 热图中的不同色阶代表每一种挥发性风味物质在发酵过程中的相对含量的变化(即在国标法计算数值基础上进行标准化处理)。发酵前期, 所有盐度(SC1, SC3, SC5 和 SC10)的紫甘蓝酸菜酯类物质含量较高, 如硫氰酸烯丙酯、1-丁烯-4-异硫氰酸酯、异硫氰酸环丙酯等, 同时还具有较多的 3-丁烯腈、5-(甲硫基)-戊腈、苯丙腈、4-甲基噻唑、4,5-二甲基噻唑等腈类及杂环化合物, 此外还具有较高含量的二甲基二硫醚、二甲基三硫醚及正丁基甲基硫醚等硫醚化合物。发酵中期及末期, 4,4-二甲基-1-戊烯、乙醇、2,3-丁二醇、戊醇、(E)-3-己烯醇、正己醇、2-乙基己醇、芳樟醇、 $\beta$ -苯乙醇、香叶醇、己醛、(E,E)-2,4-庚二烯醛、异佛尔酮、二氢茉莉酮、乙酸、硫氰酸甲酯、异硫氰酸烯丙酯、1-丁烯-4-异硫氰酸酯、甲基丙烯腈、2-丙基咪唑及 5-(甲硫基)-戊腈等挥发性风味物质含量在不同的盐度紫甘蓝酸菜中有显著性差异 ( $P < 0.05$ ), 上述成分在 SC3 中的含量较其它盐度的酸菜高。紫甘蓝属于典型的十字花科植物, 含有较多的硫苷, 并在芥子酶的作用下被水解为一系

列的硫氰酸酯类化合物、腈类和硫醚类化合物<sup>[37]</sup>, 它们构成紫甘蓝酸菜的典型风味物质。Wei 等<sup>[38]</sup>研究表明, 紫甘蓝原料本身具有辛辣的强烈刺激性气味主要来自于硫氰酸甲酯及异硫氰酸烯丙酯等物质, 这是其典型的风味属性。随着发酵时间的延长, 这些化合物的含量呈现动态变化, 其中在发酵末期, SC10 中的上述物质的含量总体最低, 说明过高的盐度可能会加速硫氰酸酯类、腈类及硫醚类化合物的代谢分解, 这与 Liang 等<sup>[8]</sup>的研究结果一致。

气味活性值(OAV)是衡量香气物质对整体风味的贡献程度指标, 其值大于 1 的成分被视为关键有效的挥发性风味物质<sup>[38-39]</sup>。如表 3 所示, 紫甘蓝酸菜中共有 21 种挥发性风味物质的 OAV 值大于 1, 其中醇类有 8 种, 分别是 (Z)-3-己烯醇、正己醇、2-乙基己醇、芳樟醇、2-壬醇、 $\beta$ -苯乙醇、壬醇和香叶醇; 醛类有 4 种, 分别为己醛、(E,E)-2,4-庚二烯醛、壬醛和癸醛; 酸类 1 种, 为乙酸; 酯类 4 种, 分别为硫氰酸甲酯、异硫氰酸烯丙酯、1-丁烯-4-异硫氰酸酯和硫氰酸-2-苯乙酯; 酚类和腈类各 1 种, 分别为丁香酚、苯丙腈; 硫醚类 2 种, 分别为二甲基二硫醚和二甲基三硫醚。芳樟醇、 $\beta$ -苯乙醇及香叶醇等物质具有较低的阈值, 具有花香和果香, 对总体的风味贡献较大<sup>[18]</sup>。硫氰酸酯作为芥子甘油的水解产物, 对人体健康有益<sup>[40]</sup>, 而腈类物质及硫醚类物质具有刺激性气味, 对于紫甘蓝酸菜的风味也有重要的影响。随着盐度的增加, 大部分的挥发性风味物质(如芳樟醇、 $\beta$ -苯乙醇、香叶醇、异硫氰酸烯丙酯等)的 OAV 值有显著性差异, SC10 中大部分挥发性风味物质的 OAV 值显著低于其它盐度的酸菜 ( $P < 0.05$ ), 这说明过高的盐度对于紫甘蓝酸菜中的关键挥发性风味物质有不利影响。

## 2.4 不同盐度的紫甘蓝酸菜主成分分析及相关性分析

利用 PCA 对不同盐度的紫甘蓝酸菜发酵过程中各大类挥发性风味成分进行差异性分析(图 10), 其共解释了 66.3% 总方差变量, 其中, 主成分 1(F1)和主成分 2(F2)分别解释了 41.8% 和 24.5% 的变量, 且大部分样品点能够被很好地区分。发酵前期、中期和末期, 不同盐度的紫甘蓝酸菜中炔

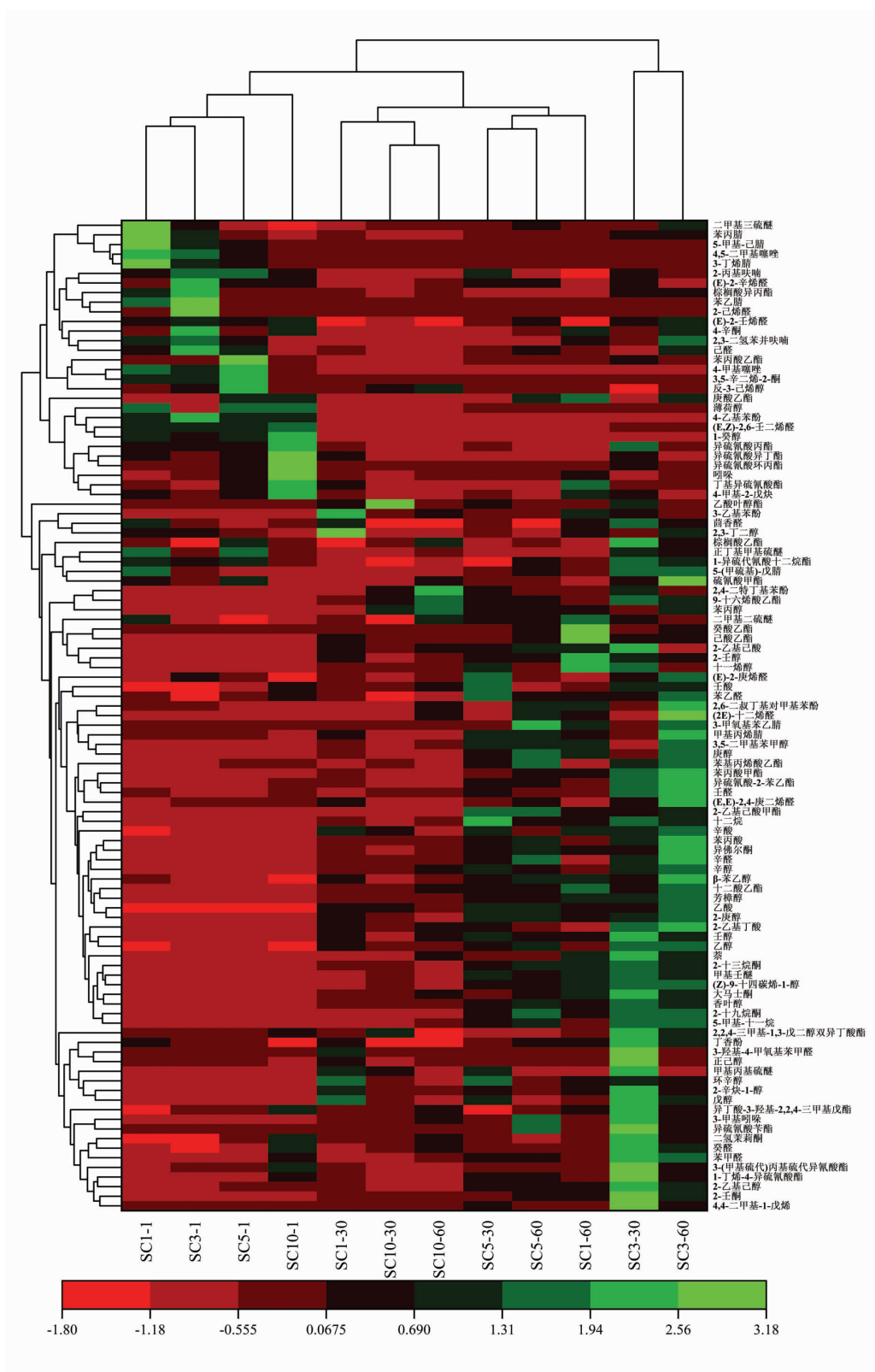


图 9 不同盐度紫甘蓝酸菜发酵过程中挥发性风味物质相对含量热图

Fig.9 Heatmap of volatile flavor compounds relative content in red cabbage sauerkraut with different salinity during fermentation



表3 不同盐度紫甘蓝酸菜关键挥发性风味物质 OAVs 值  
Table 3 The odour activity values (OAVs) of potent volatile flavor compounds in red cabbage sauerkraut with different salinity

序号	挥发性风味物质名称	阈值 <sup>[38,41)]</sup> $\mu\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	OAV				气味描述 <sup>[32,35]</sup>
			SC1	SC3	SC5	SC10	
1	(Z)-3-己烯醇	70	8.05 ± 1.41 <sup>b</sup>	7.65 ± 1.34 <sup>b</sup>	8.05 ± 1.41 <sup>b</sup>	14.07 ± 2.46 <sup>a</sup>	青草味
2	正己醇	400	1.11 ± 0.19 <sup>a</sup>	0.89 ± 0.16 <sup>a</sup>	0.93 ± 0.16 <sup>a</sup>	0.82 ± 0.14 <sup>a</sup>	树脂味,花香,青草味
3	2-乙基己醇	130	5.96 ± 1.04 <sup>b</sup>	7.96 ± 1.39 <sup>a</sup>	5.51 ± 0.96 <sup>b</sup>	2.84 ± 0.50 <sup>c</sup>	玫瑰香,青草香
4	芳樟醇	6	17.57 ± 3.07 <sup>b</sup>	25.07 ± 4.38 <sup>a</sup>	14.35 ± 2.51 <sup>b</sup>	9.12 ± 1.59 <sup>c</sup>	花香,薰衣草香
5	2-壬醇	80	3.35 ± 0.59 <sup>a</sup>	1.43 ± 0.25 <sup>b</sup>	1.76 ± 0.31 <sup>b</sup>	0.68 ± 0.12 <sup>c</sup>	黄瓜味
6	$\beta$ -苯乙醇	2.5	19.28 ± 3.37 <sup>b</sup>	26.48 ± 4.63 <sup>a</sup>	18.78 ± 3.28 <sup>b</sup>	10.94 ± 1.91 <sup>c</sup>	蜂蜜味,香味,玫瑰味
7	壬醇	2	76.82 ± 13.42 <sup>b</sup>	123.36 ± 21.56 <sup>a</sup>	93.90 ± 16.41 <sup>ab</sup>	69.75 ± 12.19 <sup>b</sup>	脂肪味,青草味
8	香叶醇	10	18.68 ± 3.26 <sup>b</sup>	25.88 ± 4.52 <sup>a</sup>	24.65 ± 4.31 <sup>ab</sup>	10.39 ± 1.82 <sup>c</sup>	玫瑰香,天竺葵香
9	己醛	5	51.82 ± 9.05 <sup>b</sup>	105.91 ± 18.51 <sup>a</sup>	100.16 ± 17.50 <sup>a</sup>	6.56 ± 1.15 <sup>c</sup>	青草味,脂肪香
10	(E,E)-2,4-庚二烯醛	15.4	0.98 ± 0.17 <sup>c</sup>	5.86 ± 1.02 <sup>a</sup>	3.05 ± 0.53 <sup>b</sup>	1.24 ± 0.22 <sup>c</sup>	坚果香
11	壬醛	1	114.48 ± 20.00 <sup>b</sup>	282.83 ± 49.42 <sup>a</sup>	136.94 ± 23.93 <sup>b</sup>	117.62 ± 20.55 <sup>b</sup>	脂肪味,橘子味
12	癸醛	2	36.15 ± 6.32 <sup>bc</sup>	69.20 ± 12.09 <sup>a</sup>	43.04 ± 7.52 <sup>b</sup>	58.81 ± 10.28 <sup>ab</sup>	肥皂味,橘子皮味
13	乙酸	150	35.37 ± 6.18 <sup>b</sup>	56.53 ± 9.88 <sup>a</sup>	45.78 ± 8.00 <sup>ab</sup>	19.44 ± 3.40 <sup>c</sup>	酸味
14	硫氧酸甲酯	10	0.00 ± 0.00 <sup>c</sup>	90.26 ± 15.77 <sup>a</sup>	17.61 ± 3.08 <sup>b</sup>	33.64 ± 5.88 <sup>b</sup>	硫味
15	异硫氧酸烯丙酯	8	123.14 ± 21.52 <sup>c</sup>	303.14 ± 52.97 <sup>a</sup>	206.39 ± 36.06 <sup>b</sup>	46.94 ± 8.20 <sup>d</sup>	刺激性,硫味,大蒜味
16	1-丁烯-4-异硫氧酸酯	17	89.49 ± 15.64 <sup>b</sup>	237.52 ± 41.50 <sup>a</sup>	268.36 ± 46.89 <sup>a</sup>	5.79 ± 1.01 <sup>c</sup>	芳香味,辛辣味
17	异硫氧酸-2-苯乙酯	6	92.38 ± 16.14 <sup>b</sup>	301.88 ± 52.75 <sup>a</sup>	138.25 ± 24.16 <sup>b</sup>	2.74 ± 0.48 <sup>c</sup>	青草味,辛辣味
18	丁香酚	6	2.51 ± 0.44 <sup>ab</sup>	3.01 ± 0.53 <sup>b</sup>	1.96 ± 0.34 <sup>b</sup>	0.00 ± 0.00 <sup>c</sup>	丁香味,蜂蜜味
19	苯丙腈	15	7.03 ± 1.23 <sup>b</sup>	20.46 ± 3.58 <sup>a</sup>	9.91 ± 1.73 <sup>b</sup>	1.46 ± 0.25 <sup>c</sup>	辛辣味,玫瑰味
20	二甲基二硫醚	12	7.28 ± 1.27 <sup>b</sup>	3.51 ± 0.61 <sup>bc</sup>	4.56 ± 0.80 <sup>b</sup>	5.93 ± 1.04 <sup>ab</sup>	洋葱味,卷心菜味
21	二甲基三硫醚	6	10.04 ± 1.75 <sup>c</sup>	26.08 ± 4.56 <sup>a</sup>	16.95 ± 2.96 <sup>b</sup>	14.13 ± 2.47 <sup>ab</sup>	硫味,鱼腥味,白菜味

类、醇类、醛类、酮类、酸类、酯类、酚类、腈类及杂环类和硫醚类化合物具有较明显的差异。发酵前期 (1 d), SC1, SC3, SC5 和 SC10 主要集中在第二象限, SC1 和 SC10 在 F1 和 F2 上的投影得分具有较大差异, 发酵末期 (60 d), SC3 位于第二象限而与位于第三、四象限的 SC1, SC5 和 SC10 在 F1 和 F2 方向上投影得分具有较大差异, 而 SC1 和 SC5 之间的差异则较小, SC3 盐度酸菜在硫醚类、酯类、酸类、酮类及醇类等化合物方向上的得分较高, 表明 SC3 中这些风味物质含量较其它盐度的酸菜高。

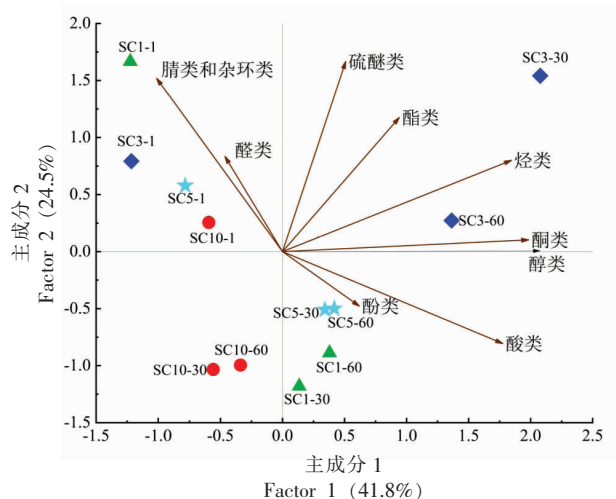


图 10 不同盐度紫甘蓝酸菜主成分分析  
Fig.10 The principal component analysis  
of red cabbage sauerkraut with different salinity

### 3 结论

根据 4 种盐度发酵的紫甘蓝酸菜的感官评价结果分析可知, 1% 盐度发酵的紫甘蓝酸菜其色泽、脆度、香气及滋味得分都较低, 5% 以上盐度发酵紫甘蓝酸菜的香气及滋味得分也较低。根据测定 4 种盐度的紫甘蓝酸菜发酵过程的主要理化指标的变化, 结果表明: 盐度与 pH 值、还原糖、亚硝酸盐呈正相关, 而与总酸、氨基酸态氮含量及乳酸菌数呈负相关。根据 HS-SPME/GC-MS 检测结果分析可知, 不同盐度对于紫甘蓝酸菜中的挥发性风味物质的影响不同, 盐度过高会使挥发性风味物质的总含量降低, 能够显著影响其关键挥发性风味物质的含量。同时过高的盐度也不利于健康,

为了更进一步揭示不同盐度对紫甘蓝酸菜的挥发性风味物质, 理化指标及感官品质之间的影响, 本文对不同盐度与挥发性风味物质, 理化指标, 感官综合得分进行 Pearson 相关性分析 (图 11), 可以发现盐度与总酸、氨基酸态氮含量、乳酸菌数、感官综合得分及大部分挥发性风味物质之间呈负相关, 其中与总酸含量呈显著负相关 ( $P < 0.05$ ), 而与 pH 值、还原糖含量呈正相关, 这进一步表明盐度对紫甘蓝酸菜发酵过程的挥发性风味物质、理化指标及感官品质产生显著影响。

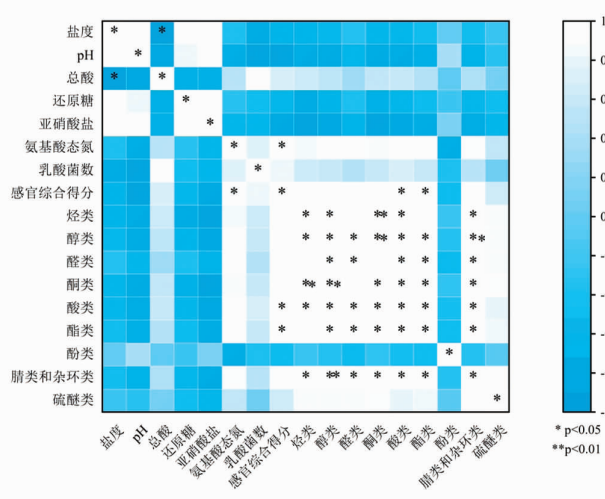


图 11 Pearson 相关性分析  
Fig.11 Pearson correlation analysis

综合分析可以得出盐度为 3% 的紫甘蓝酸菜风味及品质较好, 可直接用于紫甘蓝酸菜的加工, 对紫甘蓝酸菜的产业化生产具有一定的指导意义。

### 参 考 文 献

- [1] RADZIEJEWSKA -KUBZDELA E, BIEGAŃSKA-MARECIK R. A comparison of the composition and antioxidant capacity of novel beverages with an addition of red cabbage in the frozen, purée and freeze-dried forms [J]. LWT - Food Science and Technology, 2015, 62(1): 821-829.
- [2] DE NICOLA G R, BAGATTA M, PAGNOTTA E, et al. Comparison of bioactive phytochemical content and release of isothiocyanates in selected brassica

- sprouts[J]. *Food Chemistry*, 2013, 141(1): 297–303.
- [3] WICZKOWSKI W, SZAWARA-NOWAK D, TOPOLSKA J. Changes in the content and composition of anthocyanins in red cabbage and its antioxidant capacity during fermentation, storage and stewing[J]. *Food Chemistry*, 2015, 167: 115–123.
- [4] MARTÍNEZ S, ARMESTO J, GÓMEZ-LIMIA L, et al. Impact of processing and storage on the nutritional and sensory properties and bioactive components of *Brassica spp.* a review[J]. *Food Chemistry*, 2020, 313: 126065.
- [5] SUN J, WANG Y, PANG X, et al. The effect of processing and cooking on glucoraphanin and sulforaphane in brassica vegetables[J]. *Food Chemistry*, 2021, 360: 130007.
- [6] LEKCHAROENKUL P, TANONGKANKIT Y, CHIEWCHAN N, et al. Enhancement of sulforaphane content in cabbage outer leaves using hybrid drying technique and stepwise change of drying temperature[J]. *Journal of Food Engineering*, 2014, 122: 56–61.
- [7] YANG X Z, HU W Z, XIU Z L, et al. Microbial dynamics and volatilome profiles during the fermentation of Chinese northeast sauerkraut by *Leuconostoc mesenteroides* ORC 2 and *Lactobacillus plantarum* HBUAS 51041 under different salt concentrations[J]. *Food Research International*, 2020, 130: 12.
- [8] LIANG H, HE Z, WANG X, et al. Effects of salt concentration on microbial diversity and volatile compounds during suancai fermentation[J]. *Food Microbiology*, 2020, 91: 103537.
- [9] LIANG H, HE Z, WANG X, et al. Bacterial profiles and volatile flavor compounds in commercial Suancai with varying salt concentration from Northeastern China[J]. *Food Research International*, 2020, 137: 109384.
- [10] 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.
- LI F Z, ZHANG Y, WU H, et al. Effect of salt on microbial population and fermentation quality of fermented vegetables[J]. *China Condiment*, 2018, 43(3): 150–154, 200.
- [11] WOLKERS-ROOIJACKERS J C M, THOMAS S M, NOUT M J R. Effects of sodium reduction scenarios on fermentation and quality of sauerkraut[J]. *LWT – Food Science and Technology*, 2013, 54(2): 383–388.
- [12] SEO S H, PARK S E, KIM E J, et al. A GC-MS based metabolomics approach to determine the effect of salinity on Kimchi[J]. *Food Research International*, 2018, 105: 492–498.
- [13] 徐丹萍, 蒲彪, 刘书亮, 等. 不同发酵方式的泡菜挥发性成分分析[J]. *食品科学*, 2015, 36(16): 94–100.
- XU D P, PU B, LIU S L, et al. Analysis of volatile components in pickles fermented with different starter cultures[J]. *Food Science*, 2015, 36(16): 94–100.
- [14] 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 D D, BAO Y B, GUAN R, et al. Effect of temperature on flavor of cabbage Paocai during fermentation[J]. *Food and Fermentation Industries*, 2021, 47(2): 233–240.
- [15] 王丹, 鲁榕榕, 马越, 等. 切分方式对鲜切紫甘蓝营养品质和挥发性风味物质的影响[J]. *食品科学技术学报*, 2020, 38(4): 27–36, 62.
- WANG D, LU R R, MA Y, et al. Effect of cutting direction on nutritional quality and volatile flavor substances of fresh-cut purple cabbage[J]. *Journal of Food Science and Technology*, 2020, 38(4): 27–36, 62.
- [16] 许青莲, 王冉冉, 王丽, 等. 不同预冷方式对鲜切紫甘蓝冷链贮运品质变化的影响[J]. *食品与发酵工业*, 2019, 45(7): 135–143.
- XU Q L, WANG R R, WANG L, et al. Effects of different pre-cooling methods on quality changes in fresh-cut purple cabbage during cold-chain transportation[J]. *Food and Fermentation Industries*, 2019, 45(7): 135–143.
- [17] 陈景秋, 陈土国, 傅丽, 等. 中式烹饪对紫甘蓝的抗氧化物质和抗氧化活性的影响[J]. *中国食品学报*, 2020, 20(2): 136–144.
- CHEN J Q, CHEN S G, FU L, et al. Effects of Chinese cooking methods on antioxidants activity of red cabbage[J]. *Journal of Chinese Institute of Food Science and Technology*, 2020, 20(2): 136–144.
- [18] 叶子, 商智勋, 李美奇, 等. 基于HS-SPME-GC-

- MS非靶向分析不同发酵小米辣的风味差异[J]. 食品科学, 2022, 43(6): 309-316.
- YE Z, SHANG Z X, LI M Q, et al. Untargeted analysis on flavor differences of different fermented chili peppers (Xiaomila) based on the HS-SPME-GC-MS[J]. Food Science, 2022, 43(6): 309-316.
- [19] 左勇, 王小龙, 江鹏, 等. 主成分分析法在研究宜宾芽菜风味物质变化中的应用[J]. 食品工业科技, 2015, 36(16): 68-74.
- ZUO Y, WANG X L, JIANG P, et al. Principal component analysis in the study of Yibin sprouts flavor changing application[J]. Science and Technology of Food Industry, 2015, 36(16): 68-74.
- [20] 国家食品药品监督管理总局. 食品安全国家标准 食品中总酸的测定: GB 12456-2021[S]. 北京: 中国标准出版社, 2021: 1-3.
- China Food and Drug Administration. National food safety standard Determination of total acidity in foods: GB 12456-2021[S]. Beijing: Standards Press of China, 2021: 1-3.
- [21] 国家食品药品监督管理总局. 食品安全国家标准 食品中氨基酸态氮的测定: GB 5009.235-2016[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016: 1-3.
- China Food and Drug Administration. National food safety standard Determination of amino acid nitrogen in foods: GB 5009.235-2016[S]. Beijing: Standards Press of China, 2016: 1-3.
- [22] 国家食品药品监督管理总局. 食品安全国家标准 食品中还原糖的测定: GB 5009.7-2016[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016: 1-4.
- China Food and Drug Administration. National food safety standard Determination of reducing sugar in foods: GB 5009.7-2016[S]. Beijing: Standards Press of China, 2016: 1-4.
- [23] 国家食品药品监督管理总局. 食品安全国家标准 食品中亚硝酸盐与硝酸盐的测定: GB 5009.33-2016[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016: 10-12.
- China Food and Drug Administration. National food safety standard Determination of nitrites and nitrates in foods: GB 5009.33-2016[S]. Beijing: Standards Press of China, 2016: 10-12.
- [24] 国家食品药品监督管理总局. 食品安全国家标准 食品微生物学检验 乳酸菌检验: GB 4789.35-2016[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016: 1-4.
- China Food and Drug Administration. National food safety standard Food microbiological examination Lactic acid bacteria examination: GB 4789.35-2016[S]. Beijing: Standards Press of China, 2016: 1-4.
- [25] 王华杰, 滑金杰, 余勤艳, 等. 基于 IRAE-HS-SPME/GC-MS 分析杀青方式对绿茶栗香形成的影响[J]. 食品科学, 2021, 42(14): 209-217.
- WANG H J, HUA J J, YU Q Y, et al. Effects of fixation methods on the formation of the chestnut-like aroma of green tea analyzed by infrared-assisted extraction coupled to headspace solid-phase microextraction combined with gas chromatography-mass spectrometry[J]. Food Science, 2021, 42(14): 209-217.
- [26] 赵敏. 东北酸菜保藏过程中褐变影响因素及其动力学模型研究[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2017.
- ZHAO M. Influence factors on the northeast pickled cabbage browning of preservation and its dynamic model[D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2017.
- [27] 赵国忠, 王梦颖, 韩俊燕, 等. 东北酸菜品质评定及发酵优良菌株筛选[J]. 中国酿造, 2014, 33(8): 33-37.
- ZHAO G Z, WANG M Y, HAN J Y, et al. Quality assessment of northeast sauerkrauts and screening of superior fermented strains[J]. China Brewing, 2014, 33(8): 33-37.
- [28] LIU L, SHE X, CHEN X, et al. Microbiota succession and chemical composition involved in the radish fermentation process in different containers[J]. Frontiers in Microbiology, 2020, 11: 445.
- [29] 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.
- [30] 马艺荧, 孙波, 张宇, 等. 东北酸菜不同发酵时间有机酸变化及其对产品酸感的影响[J]. 食品与发酵工业, 2019, 45(5): 45-50.
- MA Y Y, SUN B, ZHANG Y, et al. Changes in organic acids at different fermentation time of northeastern sauerkraut and their effects on products sourness[J]. Food and Fermentation Industries, 2019, 45(5): 45-50.
- [31] YANG X, HU W, JIANG A, et al. Effect of salt concentration on quality of Chinese northeast sauerkraut fermented by *Leuconostoc mesenteroides* and *Lactobacillus plantarum* [J]. Food Bioscience, 2019, 30: 100421.
- [32] HUANG T T, WU Z Y, ZHANG W X. Effects of

- garlic addition on bacterial communities and the conversions of nitrate and nitrite in a simulated pickle fermentation system[J]. *Food Control*, 2020, 113: 107215.
- [33] 黄丽慧, 张雁, 陈于陇, 等. 发酵蔬菜中亚硝酸盐消长规律及调控技术的研究进展[J]. *食品科学*, 2013, 34(5): 303-307.
- HUANG L H, ZHANG Y, CHEN Y L, et al. Research advances in dynamic change and control technology of nitrite in fermented vegetables[J]. *Food Science*, 2013, 34(5): 303-307.
- [34] 吴凯, 覃业优, 蒋立文, 等. 不同质量分数食盐腌渍艳红辣椒的风味物质的分析[J]. *食品科学*, 2021, 42(24): 175-182.
- WU K, QIN Y Y, JIANG L W, et al. Analysis of flavor substances in pickled peppers (*Capsicum annuum* L. cv. Yanhong) with different salt content[J]. *Food Science*, 2021, 42(24): 175-182.
- [35] YANG X, HU W, XIU Z, et al. Comparison of northeast sauerkraut fermentation between single lactic acid bacteria strains and traditional fermentation [J]. *Food Research International*, 2020, 137: 109553.
- [36] YANG X, HU W, XIU Z, et al. Effect of salt concentration on microbial communities, physicochemical properties, and metabolite profile during spontaneous fermentation of Chinese northeast sauerkraut [J]. *Journal of Applied Microbiology*, 2020, 129(6): 1458-1471.
- [37] 田艳, 邓放明, 卿志星, 等. 十字花科植物中硫代葡萄糖苷类物质的结构与功能研究进展[J]. *食品科学*, 2020, 41(1): 292-303.
- TIAN Y, DENG F M, QING Z X, et al. Advances in understanding the structure and function of glucosinolates in brassicaceae[J]. *Food Science*, 2020, 40(1): 292-303.
- [38] WEI S, XIAO X, WEI L, et al. Development and comprehensive HS-SPME/GC-MS analysis optimization, comparison, and evaluation of different cabbage cultivars (*Brassica oleracea* L. var. capitata L.) volatile components[J]. *Food Chemistry*, 2021, 340: 128166.
- [39] 樊艳. SPME-GC-MS 结合 ROAV 分析腐乳中的主体风味物质[J]. *食品工业科技*, 2021, 42(8): 227-234.
- FAN Y. Analysis of main flavor substances in fermented soybean curd by SPME-GC-MS and ROAV [J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2021, 42(8): 227-234.
- [40] HANSCHEN F S. Domestic boiling and salad preparation habits affect glucosinolate degradation in red cabbage (*Brassica oleracea* var. capitata f. rubra)[J]. *Food Chemistry*, 2020, 321: 126694.
- [41] ALENYOREGE E A, MA H, AHETO J H, et al. Effect of sequential multi-frequency ultrasound washing processes on quality attributes and volatile compounds profiling of fresh-cut Chinese cabbage[J]. *LWT*, 2020, 117: 108666.

### Effect of Salinity on Volatile Flavor Compounds and Physicochemical Properties in Red Cabbage Sauerkraut during Fermentation

Li Zhi, Xie Shuangyu, Sun Bo\*, Liu Kai, Zhang Yu  
(College of Food Science, Northeast Agricultural University, Harbin 150030)

**Abstract** In order to study the effects of different salinities on the volatile flavor compounds and physicochemical properties of red cabbage sauerkraut during the fermentation, there were four different salt concentrations of 1%, 3%, 5%, and 10% were designed. The volatile flavor compounds (VOCs) in red cabbage sauerkraut were detected by using the headspace solid-phase microextraction-gas chromatograph-mass spectrometry (HS-SPME/GC-MS) The differences of VOCs as well as sensory scores, pH, total acidity, nitrite, amino acid nitrogen, reducing sugar content and number of lactic acid bacteria (LAB) colonies in different samples were analyzed during the fermentation. The results showed that salinity had a significant effect on the sensory score of red cabbage sauerkraut and physicochemical indexes such as the pH, total acidity, amino acid nitrogen, reducing sugar content and the number of LAB colonies ( $P < 0.05$ ). High salinity (>5%) is not conducive to the fermentation and sensory quality of sauerkraut and fermented at 3% salinity has the highest sen-

sory score. The results of HS-SPME/GC-MS analysis showed that at the end of fermentation (60 days), the total content of flavor substances in red cabbage sauerkraut fermented at 3% salinity was the highest. Among them, the content of some flavor compounds such as alkenes, alcohols, aldehydes, ketones, isothiocyanates and nitriles was significantly higher than that of sauerkraut with other salinity ( $P<0.05$ ). With the increase of salinity, these flavor substances decreased accordingly. Combined with odour activity values (OAVs) analysis, 21 key VOCs in sauerkraut were obtained, and it was found that their OAVs would be significantly reduced ( $P<0.05$ ) at higher salinity ( $>5\%$ ). According to principal component analysis (PCA), in the middle (30 days) and end (60 days) of fermentation, the component of flavor substances in sauerkraut fermented at different salinity was not quite similar, and the flavor substances at 3% salinity were more abundant. The Pearson correlation analysis disclosed that there was negative correlation between salinity and total acidity ( $P<0.05$ ), amino acid nitrogen, LAB number, sensory scores as well as most volatile flavor compounds while the salinity was positively correlated to pH and reducing sugar content. Conclusion: Compared with other salinity, red cabbage fermented at 3% salinity has better flavor quality, and can be directly used in red cabbage sauerkraut making, which has certain guiding significance for processing red cabbage products.

**Keywords** red cabbage sauerkraut; salinity; physicochemical properties; volatile flavor compounds; headspace-solid phase microextraction-gas chromatography-mobility spectroscopy