

基于智能感官和气相色谱-质谱联用技术研究 食盐添加量对风干肠风味特征的影响

李永杰, 唐月, 李慧瑶, 孔保华, 王见钊, 任静, 陈倩*
(东北农业大学食品学院, 黑龙江 哈尔滨 150030)

摘要: 将智能感官技术(电子舌和电子鼻)与气相色谱-质谱仪相结合研究食盐添加量(2.50%、2.00%、1.75%和1.50%)对风干肠风味特征的影响。结果表明, 随食盐添加量的减少, 水分含量、水分活度和乳酸菌总数逐渐升高, pH值逐渐下降($P < 0.05$)。电子舌和电子鼻结果表明, 食盐添加量为2.00%和1.75%的处理组滋味和气味特征最为接近。此外, 挥发性物质含量受食盐添加量影响显著($P < 0.05$), 整体而言, 低盐处理促进了来源于碳水化合物代谢的挥发性化合物的形成, 而降低了源于酯化反应的挥发性化合物的形成。最后, 感官评定表明, 在食盐添加量为2.00%和1.75%时的总体可接受性最佳, 但1.75%的食盐添加量咸味稍有不足。

关键词: 食盐添加量; 风干肠; 电子鼻; 电子舌; 风味特征

Effect of Salt Content on the Flavor Profile of Air-dried Sausages as Determined by Instrumental Sensory Technologies and Gas Chromatography-Mass Spectrometry

LI Yongjie, TANG Yue, LI Huiyao, KONG Baohua, WANG Jianzhao, REN Jing, CHEN Qian*
(College of Food Science, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China)

Abstract: The effect of different salt contents (2.50%, 2.00%, 1.75% and 1.50%) on the flavor characteristics of air-dried sausages was explored by intelligent sensory technologies (electronic tongue and electronic nose) and gas chromatography-mass spectrometry (GC-MS). The results showed that the moisture content, water activity and lactic acid bacterial count increased gradually, while pH significantly decreased with the decrease in NaCl level ($P < 0.05$). The results of electronic tongue and electronic nose showed that the taste and odor characteristics of sausages with 1.75% and 2.00% NaCl were the closest to each other. Additionally, the contents of volatile compounds were significantly affected by NaCl level ($P < 0.05$). On the whole, salt reduction improved the formation of volatile compounds from carbohydrate metabolism and reduced the formation of volatile compounds from esterification. Finally, sensory evaluation indicated that the overall acceptability of sausages with 2.00% and 1.75% NaCl was the highest, but the saltiness of the sausage with 1.75% NaCl was not enough.

Keywords: NaCl level; air-dried sausages; electronic nose; electronic tongue; flavor profile

DOI:10.7506/spkx1002-6630-20210221-221

中图分类号: TS251.1

文献标志码: A

文章编号: 1002-6630(2022)04-0001-07

引文格式:

李永杰, 唐月, 李慧瑶, 等. 基于智能感官和气相色谱-质谱联用技术研究食盐添加量对风干肠风味特征的影响[J]. 食品科学, 2022, 43(4): 1-7. DOI:10.7506/spkx1002-6630-20210221-221. <http://www.spkx.net.cn>

LI Yongjie, TANG Yue, LI Huiyao, et al. Effect of salt content on the flavor profile of air-dried sausages as determined by instrumental sensory technologies and gas chromatography-mass spectrometry[J]. Food Science, 2022, 43(4): 1-7. (in Chinese with English abstract) DOI:10.7506/spkx1002-6630-20210221-221. <http://www.spkx.net.cn>

收稿日期: 2021-02-21

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(31972139); 国家自然科学基金青年科学基金项目(31901660);
黑龙江省自然科学基金项目(优秀青年)(YQ2020C012)

第一作者简介: 李永杰(1993—)(ORCID: 0000-0002-3667-3499), 男, 硕士研究生, 研究方向为畜产品加工。
E-mail: liyongjie25@163.com

*通信作者简介: 陈倩(1988—)(ORCID: 0000-0001-6412-3315), 女, 副教授, 博士, 研究方向为畜产品加工。
E-mail: chenqianego7@126.com

食盐是传统肉制品加工中必不可少的成分,其既能增加肌原纤维蛋白的溶解性,改善肉制品的保水性和加工特性,又可降低水分活度(a_w),抑制腐败微生物生长代谢,提高产品的安全特性^[1-2];另外,NaCl对传统肉制品的风味形成也有着重要作用,一方面具有咸味和增鲜作用,另一方面还可影响蛋白质和脂质等营养物质的水解和氧化,进而影响相应风味物质的产生^[3-5]。但长期过量食用高钠盐食品会增加患高血压、心血管疾病、骨质疏松、中风、慢性肾脏疾病、胃癌和肥胖等诸多疾病的风险^[6-8]。为此,世界卫生组织和《中国居民膳食指南》分别于2012年和2016年提出成人每日NaCl摄入量应不高于5 g和6 g,但目前我国人均每日食盐摄入量在12 g左右^[9-10]。而由食用肉制品而摄入的食盐通常占居民摄入食盐的20%~30%^[11]。风干肠作为一种传统发酵肉制品的代表,因其独特的口感和风味而深受东北地区消费者的欢迎。但是为了保证产品的安全性及加工特性,在风干肠加工时通常加入2.5% NaCl,历经发酵风干后的产品NaCl质量分数会高达3.3%~4.2%^[1]。因此,降低风干肠NaCl含量的同时又可保证产品的品质及安全特性是亟需解决的问题。

目前减盐策略主要包括4种:直接减盐^[1,12]、使用NaCl替代物和风味增强剂^[13-14]、改变NaCl颗粒的大小和形态^[15]以及使用非热加工技术^[16],其中直接减盐法相比与其他方法较为简单直接,且符合天然、绿色和无添加的“清洁标签”理念^[17],但该方法会影响食品原有的特征风味和食用期限。因此,在减盐的同时尽量保证产品的品质特性至关重要。气相色谱-质谱(gas chromatography-mass spectrometry, GC-MS)技术是食品中常用的挥发性、半挥发性物质定性和定量方法;电子鼻和电子舌是仿生智能感官技术,主要用于食品中的气味和滋味特征分析^[18]。这些仪器具有灵敏度高、选择性好和客观准确等优点,三者相结合使用能够实现对食品风味快速、准确和互补的分析效果,近年来已被应用到红肠^[19]、熏鸡腿^[20]、金鲳鱼鱼片^[21]、烤咖啡豆^[22]和苹果^[23]等多种食品的风味分析。因此,本研究运用智能感官技术结合GC-MS技术研究不同NaCl添加量(2.50%、2.00%、1.75%和1.50%)对风干肠的风味特征的影响,以期对减盐风干肠的开发及品质提升提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

猪后臀肉、猪背脂、肠衣、食盐、大曲酒、味素、淀粉、香辛料 市购;亚硝酸钠(食品级) 天津市福晨化学试剂厂;葡萄糖(食品级) 河南万邦实业有限公司。

1.2 仪器与设备

JD500-2电子天平 沈阳龙腾电子称量仪器有限公司;AL-104精密电子天平 梅特勒-托利多仪器(上海)设备有限公司;DHG-9000电热恒温鼓风干燥箱 上海一恒科学仪器有限公司;DELTA320 pH计 美国Mettler Toledo公司;HWS-70BX恒温恒湿箱 天津市泰斯特仪器有限公司;GC-3L小型灌肠机 瑞安市鸿飞机械有限公司;GL-21M高速冷冻离心机 湖南湘仪实验仪器开发有限公司;SPX-250B-D型振荡培养箱 上海博讯实业有限公司;AquaLab智能水分活度仪 美国Decagon Devices公司;SA402B电子舌 日本Insent公司;PEN3便携式电子鼻气味分析仪 德国Airsense公司;GCMS-QP2020单四极杆型气相色谱-质谱联用仪 日本岛津公司。

1.3 方法

1.3.1 风干肠的制备

共有4组风干肠处理组,其NaCl添加量分别为2.50%(对照组)、2.00%、1.75%和1.50%。参照Chen Qian等^[24]的方法制作风干肠并部分改动,首先,将瘦肉和肥肉用孔径为1.5 cm筛板的绞肉机绞碎,按瘦肥质量比9:1混合。然后,加入0.01%亚硝酸盐(以瘦肉质量计)、1%玉泉大曲、1%葡萄糖、0.3%味素、5%水和0.8%香辛料(主要包括花椒、橘皮、砂仁、小茴香和丁香等),并按照实验设计加入相应的NaCl混匀。随后灌入猪小肠衣,风干肠长度约15 cm,直径约2.5 cm。然后在温度为(25±2)℃、相对湿度为30%~50%的环境中风干24 h,随后转移到恒温恒湿发酵箱中发酵11 d,温度为(25±2)℃,相对湿度为65%~70%。分别在第0、3、6、9、12天进行取样,测定其水分含量、 a_w 、pH值、乳酸菌总数;在0 d和12 d测定电子鼻、电子舌以及挥发性物质含量,并在12 d对风干肠进行感官评价。

1.3.2 水分含量和 a_w 的测定

水分含量的测定参照GB 5009.3—2016《食品中水分的测定》中的直接干燥法; a_w 参考陈佳新等^[1]的方法,取5 g肉样铺满盒底,然后置于水分活度仪中测定。

1.3.3 pH值和乳酸菌总数的测定

取10.0 g肉样,加入90.0 mL去离子水并振荡混匀,静置30 min后过滤,测定滤液的pH值。乳酸菌总数参照GB 4789.35—2016《食品微生物学检验 乳酸菌测定检验》进行测定。

1.3.4 电子鼻的测定

取3.00 g碎肉样于顶空瓶中密封,室温下自然放置1 h使其内部挥发性风味物质平衡,随后使用电子鼻进行测定。测定参数如下:采样时间间隔1 s,预采样时间5 s,自清洗时间100 s,归零时间10 s,进样流量300 mL/min,样品测定时间90 s。电子鼻配有10个传

感器,能对相应敏感气味物质产生响应:W1C(芳烃物质)、W5S(氮氧化物)、W3C(氮类,芳香组分)、W6S(氢化物)、W5C(芳香烯烃,极性化合物)、W1S(烷类化合物)、W1W(硫化物)、W2S(醇类、醛酮类)、W2W(含硫有机物,芳香组分)和W3S(长链烷烃)。

1.3.5 电子舌的测定

参考Yin Xiaoyu等^[19]的方法,并稍作改动。取25.0 g碎肉与125.0 mL去离子水混合并在40 ℃条件下水浴30 min,随后绞肉机低速搅拌1 min,将混合物离心(5 000 r/min, 10 min, 4 ℃),取上清液过滤,然后对滤液进行电子舌分析。该仪器配有鲜味、涩味、咸味、酸味和苦味5个味觉传感器以及两个参比电极。

1.3.6 挥发性化合物的测定

参照Wen Rongxin等^[25]的方法测定。取3.00 g碎肉样和4.0 μL邻二氯苯(内标物)置于顶空瓶,随即密封,并置于45 ℃条件下平衡25 min。平衡后将萃取头(50/30 μm DVB/CAR/PDMS)插入顶空瓶中萃取30 min(45 ℃),然后将萃取头置于GC-MS进样口热解吸(3 min, 230 ℃),并通过该仪器对挥发性物质进行分离鉴定。通过比较NIST 14质谱库对挥发性化合物进行鉴定,取相似度大于85%的结果,采用内标法定量,结果以μg/kg表示。

1.3.7 感官评价

参考扈莹莹等^[26]的方法,并作适当改动。选取10名食品专业学生进行评定,将100 ℃熟制20 min的风干肠切成5 mm厚的薄片,通过双盲法7分制对风干肠评定,感官评价成员每次评定样品前都要漱口。感官评定指标包括气味(干肠特有气味浓郁7分;有异味或气味不足1分)、色泽(颜色鲜红7分;颜色暗淡1分)、咸味(咸味过重7分;基本无咸味1分)、酸味(酸味过重7分;基本无酸味1分)、口感(质地干硬7分;质地柔软1分)及总体可接受度(可接受性最佳7分;可接受性最差1分)。

1.4 数据处理

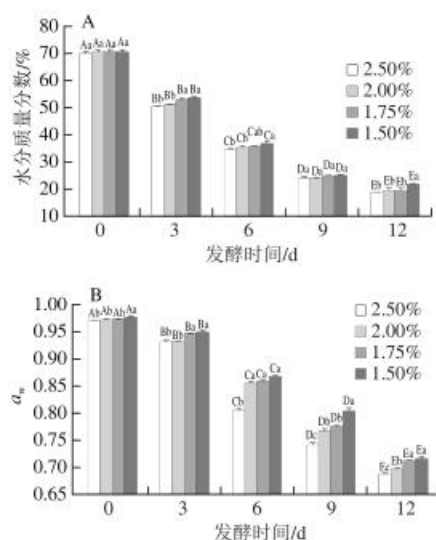
实验进行3次重复,每次实验均选3个平行样测定所有指标,结果以 $\bar{x} \pm s$ 表示。数据统计分析采用Statistix 8.1软件,显著性分析使用Tukey HSD程序($P < 0.05$,差异显著),绘图采用Origin 2019软件绘制。

2 结果与分析

2.1 NaCl添加量对风干肠水分含量及 a_w 的影响

由图1A可知,各组风干肠中水分含量随着发酵的进行均呈降低趋势($P < 0.05$)。2.50%、2.00%、1.75%和1.50%处理组中水分质量分数经12 d发酵后分别降至

18.53%、19.30%、19.43%和21.66%,这是由于风干肠在发酵过程中风干失水造成的。此外,同一发酵时间不同处理组中水分含量随NaCl添加量的降低而呈不断上升的趋势。除3 d外,2.50%、2.00%和1.75%处理组间差异不显著($P > 0.05$),在发酵末期(12 d),1.50%处理组的水分含量均显著大于其他处理组($P < 0.05$)。由图1B可知,不同处理组的 a_w 变化趋势与水分含量一致,但并不呈线性关系,与Chen Jiabin等^[27]的研究结果类似。在0 d,NaCl添加量为1.50%的处理组显著高于其他处理组($P < 0.05$)。随着发酵的进行, a_w 不断下降,发酵3 d后,对照组(2.50%)的 a_w 显著低于其他处理组($P < 0.05$),发酵6 d后,处理组的 a_w 均在0.850以下,此时风干肠中大部分微生物和内源酶的活性受到抑制^[28]。上述 a_w 的变化主要受发酵过程中水分不断散失以及 a_w 抑制剂NaCl含量增加的影响^[1,29]。



不同大写字母表示不同发酵时间差异显著($P < 0.05$);不同小写字母表示不同NaCl添加量差异显著($P < 0.05$)。下同。

图1 NaCl添加量对风干肠发酵过程中水分含量(A)和 a_w (B)的影响
Fig. 1 Effects of different NaCl levels on the moisture content (A) and a_w (B) of air-dry sausages during fermentation

2.2 NaCl添加量对风干肠pH值和乳酸菌总数的影响

由图2A可知,在0 d各处理组的pH值在6.38左右,经过3 d的发酵,pH值迅速下降($P < 0.05$),2.00%、1.75%和1.50%处理组的pH值均在5.50以下。pH值的降低对发酵肉制品很重要,不仅能够抑制腐败菌的生长^[30],而且对产品最终颜色和风味的形成也十分重要^[2]。pH值在发酵3 d后趋于平稳,这可能与非蛋白氮以及氨基酸代谢的碱性产物积累有关^[31]。除0 d外,处理组间的pH值随NaCl添加量的减少而降低,对照组的pH值显著高于其他处理组($P < 0.05$),这可能是由于高含量的NaCl抑制了乳酸菌的生长^[32],而1.75%和1.50%处理组间差异不显

著 ($P>0.05$)。由图2B可知,发酵初期乳酸菌总数在 $5.18\sim 5.31$ ($\lg$ (CFU/g)) 之间,这些微生物主要来源于原料肉、调味料和加工环境等,随发酵时间的延长,各处理组中乳酸菌总数先迅速增加,在3 d达到最大,随后各处理组均呈降低趋势。这可能是由于发酵环境不利所致,如供乳酸菌生长的碳水化合物不足,以及可利用的水分逐渐减少^[30]。与此同时,肠体水分损失造成高含量的NaCl也可能对乳酸菌生长具有一定的抑制作用。此外,NaCl添加量对乳酸菌的生长具有明显抑制作用,但在发酵末期不同处理组间差异不显著 ($P>0.05$)。

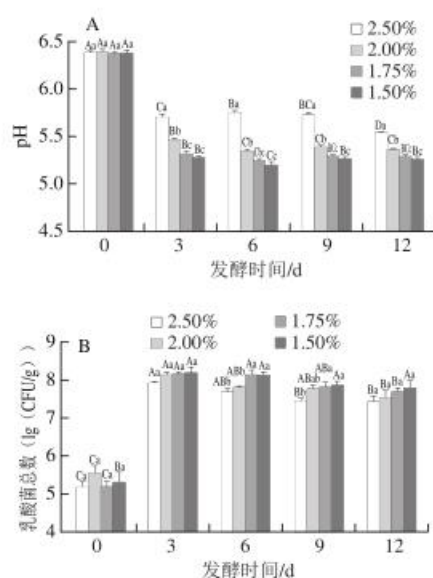


图2 NaCl添加量对风干肠发酵过程中pH值(A)和乳酸菌总数(B)的影响

Fig. 2 Effects of different NaCl levels on the pH (A) and lactic acid bacterial count (B) of air-dried sausages during fermentation

2.3 NaCl添加量对风干肠滋味特征的影响

电子舌是一种仿生味觉分析仪器,能基于人工味觉传感器阵列膜电势的变化,客观反映食品滋味的变化^[33]。由图3A可知,经12 d发酵风干肠的滋味变化显著 ($P<0.05$),其中酸味、涩味、苦味、鲜味、咸味增加,回味B(苦回味)和丰富度减少,回味A(涩回味)基本未变。这可能与发酵过程中水分减少,蛋白质、脂质和碳水化合物代谢以及微生物活动有关。0 d,随NaCl添加量的降低,除咸味外,鲜味和涩味也逐渐降低 ($P<0.05$),这可能与滋味间的相互作用有关;12 d,随NaCl添加量的降低,酸味逐渐增加,这可能与乳酸菌代谢产生的有机酸有关。此外,咸味、鲜味和涩味随NaCl添加量的降低而呈下降趋势。这与Tian Xing等^[34]的结论类似,研究发现在NaCl添加量为0%~5%的干腌猪肉中,咸味、鲜味和涩味随NaCl添加量的减少而减少。由图3B可知,主成分分析(principal component

analysis, PCA)中,PC1和PC2的方差贡献率分别为76.4%和12.6%,累计方差贡献率为89% ($>85\%$),这表明前2个PC能反映有关样本总体特征的许多信息^[20]。0 d样品分布在PC1负半轴,与丰富度和回味B相关,这表明0 d样品中这2种味道贡献较大,12 d样品与其他味道相关,说明发酵结束后的风干肠中滋味更加复杂丰富。此外,可以明显看出对照组(处于第1象限)与其他处理组(处于第4象限)的总体滋味相差较大,尤其是与1.50%处理组,而2.00%和1.75%处理组间的整体滋味最为接近。

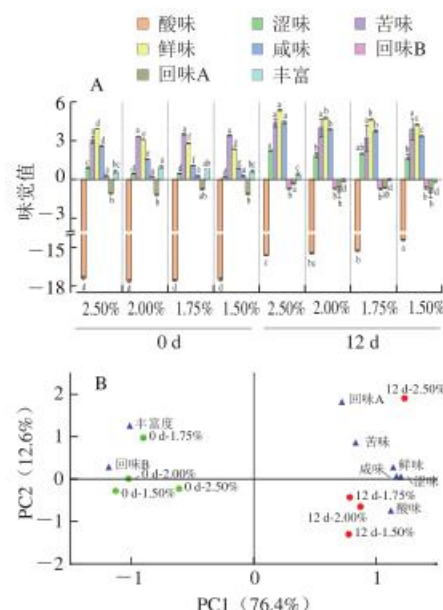


图3 不同NaCl添加量的风干肠基于电子舌的滋味分析(A)和PCA(B)

Fig. 3 Taste assessment (A) and PCA plot (B) based on electronic tongue data of air-dried sausages with different NaCl levels

2.4 NaCl添加量对风干肠气味特征的影响

电子鼻和电子舌的工作原理类似,是一种仿生嗅觉分析技术,可无损、快速和灵敏地实现对样品中挥发性气味信息进行全面评估^[35]。由图4A可知,传感器W2W、W3S、W2S、W1W、W6S和W1S的响应值在0 d的样品中较大,尤其是W6S、W1S和W2S,这说明0 d样品中含有较多的含硫芳香有机物、长链烷烃和醇类等物质,其中W2S响应值较高可能与0 d风干肠中含有大量乙醇有关。传感器W1C、W3C和W5C的响应值在发酵12 d的样品中显著增加 ($P<0.05$),这说明发酵12 d后,风干肠中含有大量芳香成分(芳烃物质和芳香氮类组分等物质),这与GC-MS的结果一致。另外, W5S在1.50%处理组中的响应值最大,这表明该处理组中含有较多的氮氧化合物。由图4B可知,PC1和PC2的方差贡献率分别为85.3%和12.1%,累计方差贡献率为97.4%。0 d和12 d的处理组间的气味相差较大,分别分布在PC1的正负两轴。在

发酵初期,处理组间整体气味较为相近,这与6种传感器(W2W、W3S、W2S、W1W、W6S和W1S)对应的挥发性气味物质相关,而在发酵末期,处理组间差异较大,这与W5S、W1C、W3C和W5C传感器对应的挥发性气味物质相关,其中NaCl添加量为2.00%和1.75%的处理组相互靠近,这说明这2个处理组的整体气味相近。

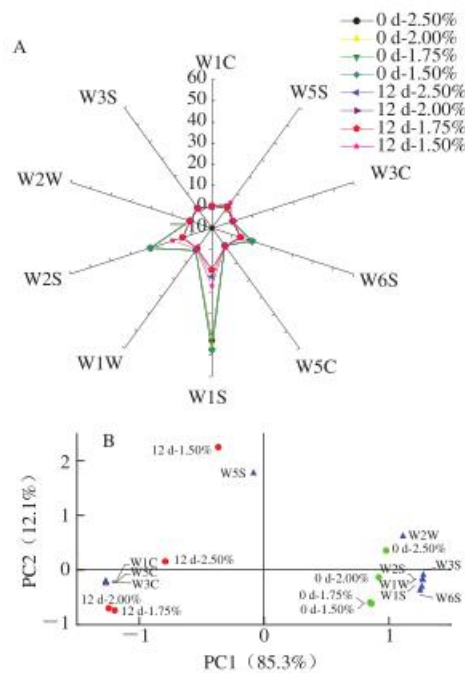


图4 不同NaCl添加量的风干肠基于电子鼻的气味分析(A)和PCA(B)
Fig. 4 Odor radar plot (A) and PCA plot (B) based on electronic nose data of air-dried sausages with different NaCl levels

2.5 NaCl添加量对风干肠挥发性物质的影响

表1 不同NaCl添加量的风干肠在发酵过程中挥发性化合物含量的变化
Table 1 Changes in volatile compound contents of air-dried sausages with different NaCl levels during fermentation

		μg/kg				
挥发性化合物	气味描述	0 d	12 d			
			2.50%	2.00%	1.75%	1.50%
醛类						
己醛	青草、脂肪	ND	9.52±0.39 ^a	9.64±0.31 ^a	9.50±0.47 ^a	9.68±0.34 ^a
辛醛	脂肪、肥皂、柠檬、绿色	ND	21.34±0.44 ^a	20.85±0.49 ^a	21.11±0.17 ^a	21.50±0.75 ^a
壬醛	脂肪、柑橘、清新	2.05±0.09 ^d	50.35±1.48 ^a	43.25±1.34 ^a	29.90±0.88 ^a	29.43±1.33 ^a
肉桂醛	肉桂、油漆	5.64±0.03 ^b	12.48±0.20 ^a	11.82±0.68 ^a	11.63±0.21 ^a	11.79±0.54 ^a
酮类						
2-壬酮	玫瑰、茶	2.77±0.17 ^a	4.34±0.30 ^a	4.45±0.13 ^a	4.08±0.14 ^a	4.55±0.36 ^a
甲基庚酮	榛子	1.05±0.04 ^a	4.59±0.15 ^a	5.83±0.13 ^a	4.64±0.36 ^a	5.43±0.39 ^a
小茴香酮	青甜、樟脑	5.56±0.11 ^a	7.36±0.55 ^a	8.28±0.47 ^a	6.42±0.33 ^a	6.53±0.45 ^a
醇类						
乙醇	甘甜、酒	295.88±28.49 ^a	32.83±2.68 ^a	32.89±3.36 ^a	46.57±3.30 ^a	93.99±6.11 ^a
2,3-丁二醇	奶油	ND	31.07±2.11 ^a	27.57±1.87 ^a	29.26±1.13 ^a	10.51±0.83 ^a
2-庚醇	成熟香蕉、花	1.83±0.07 ^a	2.08±0.10 ^a	2.76±0.09 ^a	2.15±0.05 ^a	2.69±0.11 ^a
辛醇	金属、烧焦	3.50±0.16 ^a	7.39±0.13 ^a	6.43±0.24 ^a	9.90±0.38 ^a	12.52±0.45 ^a
6-甲基-5-庚烯-2-醇	甜、水果	ND	4.34±0.32 ^a	6.57±0.45 ^a	4.97±0.23 ^a	6.11±0.28 ^a

续表1

挥发性化合物	气味描述	0 d	12 d			
			2.50%	2.00%	1.75%	1.50%
酯类						
苯乙醇	玫瑰	1.66±0.09 ^a	20.35±1.26 ^a	23.57±1.05 ^a	14.71±0.72 ^a	15.56±0.82 ^a
α-松油醇	松油、茴香、薄荷	33.79±2.63 ^a	36.90±2.78 ^a	39.70±2.93 ^a	35.04±1.39 ^a	35.19±1.56 ^a
香叶醇	玫瑰、天竺葵	9.64±0.48 ^a	17.58±0.37 ^a	16.59±0.16 ^a	13.45±0.49 ^a	12.61±0.49 ^a
橙花叔醇	木头、花、蜡	58.20±4.62 ^a	97.61±2.53 ^a	75.18±4.66 ^a	67.38±3.85 ^a	76.42±6.64 ^a
α-萜品醇	油、薄荷、茴香	36.63±2.12 ^a	62.01±4.34 ^a	67.90±4.05 ^a	56.98±2.60 ^a	56.56±4.68 ^a
芳樟醇	花、橘子、蜡	118.67±5.90 ^a	146.31±15.04 ^a	163.81±7.64 ^a	135.53±9.84 ^a	134.25±12.43 ^a
酸类						
乙酸	刺激性酸	ND	128.09±7.24 ^a	236.54±9.11 ^a	270.44±9.66 ^a	330.55±15.55 ^a
丁酸	腐败、奶酪、汗	ND	5.54±0.44 ^a	7.55±0.38 ^a	6.77±0.45 ^a	7.17±0.66 ^a
己酸	刺激性酸、干燥	3.74±0.20 ^a	27.34±2.34 ^a	25.84±1.65 ^a	25.48±1.95 ^a	28.52±1.23 ^a
辛酸	汗、奶酪	ND	23.56±0.92 ^a	21.05±1.19 ^a	22.25±0.67 ^a	23.35±1.92 ^a
壬酸	绿色、脂肪	ND	9.17±0.72 ^a	11.35±0.90 ^a	5.61±0.29 ^a	9.81±0.67 ^a
癸酸	腐臭、脂肪	ND	11.94±0.36 ^a	11.00±0.42 ^a	10.78±0.41 ^a	10.11±0.43 ^a
酯类						
己酸甲酯	水果、新鲜、甜	10.29±0.48 ^a	18.83±0.79 ^a	14.13±0.59 ^a	14.82±0.54 ^a	13.26±1.07 ^a
乙酸乙酯	水果、溶剂	ND	15.50±0.64 ^a	18.54±1.02 ^a	22.29±1.95 ^a	31.22±1.93 ^a
乳酸乙酯	水果	ND	30.72±2.05 ^a	29.81±2.28 ^a	27.33±1.87 ^a	18.67±1.15 ^a
己酸乙酯	苹果皮、水果	12.46±1.04 ^a	32.57±0.90 ^a	27.81±0.82 ^a	25.45±0.97 ^a	22.49±1.15 ^a
辛酸乙酯	水果、油脂	2.31±0.18 ^a	10.60±0.82 ^a	8.33±0.90 ^a	8.15±0.73 ^a	7.55±0.35 ^a
癸酸乙酯	椰子	ND	15.89±1.04 ^a	17.38±0.95 ^a	20.68±1.10 ^a	20.29±1.76 ^a
萜烯类						
β-石竹烯	辛香、木头	117.14±10.23 ^a	180.05±7.42 ^a	163.89±6.71 ^a	149.21±6.68 ^a	146.61±8.80 ^a
β-榄香烯	草药、蜡、新鲜	3.61±0.24 ^a	24.62±1.25 ^a	27.40±0.89 ^a	25.59±2.28 ^a	25.63±2.54 ^a
萜草烯	木头	11.52±1.06 ^a	21.70±2.08 ^a	23.41±1.83 ^a	25.46±1.08 ^a	27.34±1.95 ^a
α-蒎烯	辛香、新鲜、刺激	202.15±10.97 ^a	281.12±17.25 ^a	275.10±12.64 ^a	216.98±8.72 ^a	238.12±9.72 ^a
α-萹烯	草药	155.70±7.13 ^a	315.69±18.10 ^a	265.39±9.55 ^a	303.23±20.24 ^a	250.12±7.70 ^a
α-金合欢烯	木头、甜	58.54±3.91 ^a	79.41±2.99 ^a	74.59±2.75 ^a	63.53±3.54 ^a	62.90±3.50 ^a
β-金合欢烯	木头、樟脑、甜	7.19±0.41 ^a	12.49±1.02 ^a	11.58±0.96 ^a	10.64±1.11 ^a	12.62±0.84 ^a
蒎烯	樟脑	4.22±0.34 ^a	9.20±0.59 ^a	8.50±1.12 ^a	9.39±0.96 ^a	7.75±0.45 ^a
月桂烯	甜、辛香	5.58±0.44 ^a	10.71±0.72 ^a	8.29±0.91 ^a	9.59±0.45 ^a	6.65±0.53 ^a
水芹烯	柠檬	2.24±0.07 ^a	6.49±1.01 ^a	4.86±0.29 ^a	3.42±0.11 ^a	4.20±0.10 ^a
柠檬烯	柠檬、薄荷	73.71±5.72 ^a	102.54±9.27 ^a	107.53±7.39 ^a	102.23±11.74 ^a	81.86±7.52 ^a
α-松油烯	木头、金属	12.32±0.52 ^a	19.01±0.52 ^a	18.85±0.66 ^a	17.31±0.25 ^a	17.53±0.64 ^a
α-依兰烯	木头	8.47±0.56 ^a	18.67±0.94 ^a	20.42±2.06 ^a	16.60±1.02 ^a	15.52±1.07 ^a
肉豆蔻醛	辛香、脂肪	15.33±0.87 ^a	19.68±1.18 ^a	17.78±0.58 ^a	17.78±0.92 ^a	21.74±1.56 ^a
檀香素	辛香、花	7.43±0.41 ^a	11.84±0.99 ^a	12.84±0.63 ^a	12.54±1.02 ^a	13.20±0.98 ^a
黄樟素	辛香、甜	16.35±0.61 ^a	49.56±3.47 ^a	45.34±2.04 ^a	42.71±3.09 ^a	42.19±3.92 ^a
草蒿烯	甘草、茴香	292.60±15.98 ^a	367.64±20.86 ^a	328.14±21.07 ^a	330.38±19.00 ^a	333.00±12.53 ^a
茴香烯	甜、清凉、药草	661.69±50.64 ^a	746.53±31.95 ^a	726.19±39.12 ^a	725.85±47.99 ^a	668.24±51.04 ^a

注: 气味描述参考文献[42]、数据库<http://www.flavornet.org>和<http://www.odour.org.uk>。同行不同小写字母表示差异显著($P<0.05$)。ND:未检出。

由表1可知,在风干肠中共检出48种挥发性物质,包括醛类、酮类、醇类、酸类、酯类和萜烯类,这些化合物主要源于脂质氧化、蛋白质和碳水化合物分解代谢、细菌酯化反应、白酒和香辛料^[36-37]。在风干肠中共检测到4种醛类,己醛、壬醛和辛醛为常见的挥发性醛类物质,主要源于不饱和脂肪酸的自动氧化,由于其阈值较低且有明显的脂肪香味,对发酵肉制品的风味形成具有重要贡献^[26]。随着发酵的进行,这些化合物含量显著增加($P<0.05$),在发酵末期,壬醛的含量最大,但不同处理组间多数醛类(除壬醛外)含量差异不显著

($P>0.05$)。通常而言,多数醇和酮类化合物源自碳水化合物代谢、脂质 β -氧化和氨基酸分解代谢^[32],酮类相比其同分异构体的醛类阈值要高,而醇类(除不饱和醇外)的阈值也较高,因此它们对风干肠的整体风味贡献相对较小^[26]。酮类物质中甲基酮(2-壬酮)源于微生物对不饱和脂肪酸的 β -氧化,是发酵香肠的特征发酵风味物质^[38],其不同处理组间差异不显著($P>0.05$)。对于醇类而言,由于风干肠在制作时添加了1%的白酒,因此乙醇在0 d时含量最大。但发酵12 d后其含量显著降低($P<0.05$),这可能是发酵过程中乙醇参与了乙酯类化合物的形成。同时,在发酵末期,乙醇含量随NaCl添加量的降低而显著增加($P<0.05$),这可能与风干肠中乳酸菌的数量有关,发酵过程中,乙醇主要源于乳酸菌对碳水化合物的发酵作用^[32]。此外,2,3-丁二醇是由碳水化合物代谢形成的,具有典型奶油气味^[39],经发酵后产生,其含量随着NaCl添加量的降低而呈现降低趋势($P<0.05$);而2-庚醇和辛醇呈相反的趋势,其可在乳酸菌作用下由某些氨基酸转化形成^[40],另外,苯乙醇呈玫瑰味,由微生物代谢苯丙氨酸产生^[41],但在不同处理组间未呈明显的变化趋势。酸类物质在0 d时仅有己酸被检测出,但随着发酵的进行有大量酸类物质产生。其中乙酸和丁酸主要源于乳酸菌对糖类物质的代谢,因此在低盐处理组中有大量的检出,这些物质气味阈值低,对发酵风味影响较大。其他酸类物质(如己酸、辛酸和壬酸)则由脂质氧化产生^[42],其中除壬酸和癸酸外,处理组间差异不显著($P<0.05$)。酯类共检出6种,多数都具有果香或酒香,对风干肠的最终风味贡献很大,其主要来源于醇类与酸类间的酯化反应、在转移酶作用下由乙酰辅酶A和高级醇为底物形成以及原材料的大曲酒^[37]。相比于0 d,12 d的处理组中酯类种类和含量显著增加($P<0.05$),且多数(除乙酸乙酯和癸酸乙酯)在较高NaCl添加量的处理组中含量较高,这可能与较高NaCl含量风干肠中细菌酯化活性更强有关^[32]。此外,风干肠中检测到大量源于香辛料的风味物质(如反式肉桂醛、小茴香酮、香叶醇以及萜烯化合物),这些风味物质在发酵过程中随着风干的进行,含量显著增加($P<0.05$),且整体而言在高盐处理组中含量较高,这可能与其中的水分含量有关。

2.6 NaCl添加量对风干肠感官评价的影响

如图5所示,NaCl可通过影响水分含量以及蛋白质和脂质氧化间接影响产品的颜色,但不同NaCl添加量风干肠的色泽差异不显著($P>0.05$),这可能与熟制风干肠中肌红蛋白受热变性呈灰褐色有关^[43]。另外,口感和气味在处理组间差异亦不显著($P>0.05$)。对于咸味和酸味而言,降低NaCl添加量显著降低了风干肠的咸味,提升了酸味($P<0.05$),这与电子舌的结果一致。在NaCl

添加量为2.00%时,风干肠咸度适中,具备风干肠“咸香”的特征。就总体可接受性而言,NaCl添加量为1.75%和2.00%的风干肠得分最高($P>0.05$),但NaCl添加量为1.75%的风干肠咸度稍有不足。

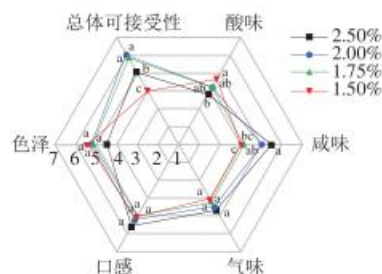


图5 不同NaCl添加量风干肠的感官评定

Fig. 5 Sensory evaluation of air-dried sausages with different NaCl levels

3 结论

本研究基于智能感官和GC-MS联用技术分析不同NaCl添加量对风干肠风味特征的影响。结果表明,减少NaCl添加量增加了风干肠的水分含量、 a_w 和乳酸菌总数,降低了pH值。电子鼻和电子舌结果表明,NaCl添加量为2.00%和1.75%的风干肠整体气味和滋味最为相近。此外,降低NaCl添加量会促进源于碳水化合物代谢的挥发性化合物的形成,而降低源于酯化反应的挥发性化合物的形成。感官评价结果表明,NaCl添加量为2.00%和1.75%的风干肠总体可接受性最高,但后者风干肠“咸香”特征稍有不足。基于本研究可以将风干肠中NaCl添加量降低20%~30%,在后续研究中仍需考虑低盐风干肠的微生物特性及安全性,同时协同“增咸”技术提高NaCl添加量为1.75%风干肠的咸味,为低盐风干肠的研发提供基础。

参考文献:

- [1] 陈佳新,陈倩,孔保华.食盐添加量对哈尔滨风干肠理化特性的影响[J].食品科学,2018,39(12):85-92. DOI:10.7506/spkx1002-6630-201812014.
- [2] 柴子惠,李洪军,李少博,等.低盐腊肉贮藏期间菌相和理化性质的变化[J].食品科学,2019,40(11):201-206. DOI:10.7506/spkx1002-6630-20180615-309.
- [3] ZHAO B, ZHOU H M, ZHANG S L, et al. Changes of protein oxidation, lipid oxidation and lipolysis in Chinese dry sausage with different sodium chloride curing salt content[J]. Food Science and Human Wellness, 2020, 9(4): 328-337. DOI:10.1016/j.fshw.2020.04.013.
- [4] 温荣欣,扈莹莹,殷小钰,等.食盐添加量对哈尔滨风干肠脂质和蛋白氧化及挥发性化合物形成的影响[J].食品科学,2020,41(2):29-36. DOI:10.7506/spkx1002-6630-20190203-020.
- [5] ZHAO S L, HE L C, ZHANG M, et al. Effect of salt promote the muscle triglyceride hydrolysis during dry-salting by inducing the

- phosphorylation of adipose tissue triglyceride lipase (ATGL) and hormone-sensitive lipase (HSL) and lipid droplets splitting[J]. Food Chemistry, 2020, 327: 127061. DOI:10.1016/j.foodchem.2020.127061.
- [6] HE F J, TAN M, MA Y, et al. Salt reduction to prevent hypertension and cardiovascular disease[J]. Journal of the American College of Cardiology, 2020, 75(6): 632-647. DOI:10.1016/j.jacc.2019.11.055.
- [7] KRAMERS B J, KOOREVAAR I W, DRENTH J P H, et al. Salt, but not protein intake, is associated with accelerated disease progression in autosomal dominant polycystic kidney disease[J]. Kidney International, 2020, 98(4): 989-998. DOI:10.1016/j.kint.2020.04.053.
- [8] CAPPUCIO F P, BEER M, STRAZZULLO P. Population dietary salt reduction and the risk of cardiovascular disease. A scientific statement from the European Salt Action Network[J]. Nutrition, Metabolism and Cardiovascular Diseases, 2019, 29(2): 107-114. DOI:10.1016/j.numecd.2018.11.010.
- [9] 刘世欣, 张雅玮, 郭秀云, 等. 肉制品绿色制造--低钠干腌肉制品研究进展[J]. 肉类研究, 2020, 34(3): 82-87. DOI:10.7506/rlyj1001-8123-20191204-293.
- [10] 张杰, 赵志峰, 郝罗, 等. 减盐策略及低钠盐研究进展[J]. 中国调味品, 2021, 46(3): 179-184. DOI:10.3969/j.issn.1000-9973.2021.03.037.
- [11] CAMPAGNOL P C B, SANTOS B A D, WAGNER R, et al. The effect of yeast extract addition on quality of fermented sausages at low NaCl content[J]. Meat Science, 2011, 87(3): 290-298. DOI:10.1016/j.meatsci.2010.11.005.
- [12] DELGADO-PANDO G, FISCHER E, ALLEN P, et al. Salt content and minimum acceptable levels in whole-muscle cured meat products[J]. Meat Science, 2018, 139: 179-186. DOI:10.1016/j.meatsci.2018.01.025.
- [13] 汤鹏宇, 胡可, 刘春丽, 等. 钠盐替代物对西式火腿品质的影响[J]. 肉类研究, 2019, 33(11): 36-42. DOI:10.7506/rlyj1001-8123-20190904-211.
- [14] 张东, 李洪军, 吴练军, 等. 减少肉制品中氯化钠含量的研究进展[J]. 食品与发酵工业, 2017, 43(11): 238-243. DOI:10.13995/j.cnki.11-1802/ts.014561.
- [15] RIOS-MERA J D, SELANI M M, PATINHO I, et al. Modification of NaCl structure as a sodium reduction strategy in meat products: an overview[J]. Meat Science, 2021, 174: 108417. DOI:10.1016/j.meatsci.2020.108417.
- [16] GÓMEZ-SALAZAR J A, GALVÁN-NAVARRO A, LORENZO J M, et al. Ultrasound effect on salt reduction in meat products: a review[J]. Current Opinion in Food Science, 2020, 40: 32-39. DOI:10.1016/j.cofs.2020.10.030.
- [17] 张连慧, 应欣, 王勇. 清洁标签在食品行业中的应用[J]. 食品科技, 2018, 43(6): 326-330. DOI:10.13684/j.cnki.spkj.2018.06.060.
- [18] 彭金月, 姜水, 高韶婷, 等. 基于智能感官与人工感官评价的中国三大干腌火腿风味特性分析[J]. 食品工业科技, 2020, 41(17): 231-236. DOI:10.13386/j.issn1002-0306.2020.17.038.
- [19] YIN X Y, LV Y C, WEN R X, et al. Characterization of selected Harbin red sausages on the basis of their flavour profiles using HS-SPME-GC/MS combined with electronic nose and electronic tongue[J]. Meat Science, 2021, 172: 108345. DOI:10.1016/j.meatsci.2020.108345.
- [20] ZHANG L, HU Y Y, WANG Y, et al. Evaluation of the flavour properties of cooked chicken drumsticks as affected by sugar smoking times using an electronic nose, electronic tongue, and HS-SPME/GC-MS[J]. LWT-Food Science and Technology, 2021, 140: 110764. DOI:10.1016/j.lwt.2020.110764.
- [21] ZHANG J H, CAO J, PEI Z S, et al. Volatile flavour components and the mechanisms underlying their production in golden pompano (*Trachinotus blochii*) fillets subjected to different drying methods: a comparative study using an electronic nose, an electronic tongue and SDE-GC-MS[J]. Food Research International, 2019, 123: 217-225. DOI:10.1016/j.foodres.2019.04.069.
- [22] DONG W J, HU R S, LONG Y Z, et al. Comparative evaluation of the volatile profiles and taste properties of roasted coffee beans as affected by drying method and detected by electronic nose, electronic tongue, and HS-SPME-GC-MS[J]. Food Chemistry, 2019, 272: 723-731. DOI:10.1016/j.foodchem.2018.08.068.
- [23] ZHU D S, REN X J, WEI L W, et al. Collaborative analysis on difference of apple fruits flavour using electronic nose and electronic tongue[J]. Scientia Horticulturae, 2020, 260: 108879. DOI:10.1016/j.scienta.2019.108879.
- [24] CHEN Q, KONG B H, SUN Q X, et al. Antioxidant potential of a unique LAB culture isolated from Harbin dry sausage: *in vitro* and in a sausage model[J]. Meat Science, 2015, 110: 180-188. DOI:10.1016/j.meatsci.2015.07.021.
- [25] WEN R X, HU Y Y, ZHANG L, et al. Effect of NaCl substitutes on lipid and protein oxidation and flavor development of Harbin dry sausage[J]. Meat Science, 2019, 156: 33-43. DOI:10.1016/j.meatsci.2019.05.011.
- [26] 扈莹莹, 王妍, 于晶, 等. 脂肪添加量对发酵香肠脂质和蛋白质氧化及挥发性化合物形成的影响[J]. 食品科学, 2019, 40(18): 8-14. DOI:10.7506/spkx1002-6630-20181022-233.
- [27] CHEN J X, HU Y Y, WEN R X, et al. Effect of NaCl substitutes on the physical, microbial and sensory characteristics of Harbin dry sausage[J]. Meat Science, 2019, 156: 205-213. DOI:10.1016/j.meatsci.2019.05.035.
- [28] 赵君哲. 食品的水分活度与微生物菌群[J]. 肉类工业, 2014(7): 51-54. DOI:10.3969/j.issn.1008-5467.2014.07.015.
- [29] ZHANG D, LI H J, WANG Z F, et al. Effects of NaCl substitutes on physicochemical properties of salted pork[J]. Meat Science, 2020, 169: 108205. DOI:10.1016/j.meatsci.2020.108205.
- [30] XIAO Y Q, LIU Y N, CHEN C G, et al. Effect of *Lactobacillus plantarum* and *Staphylococcus xylosus* on flavour development and bacterial communities in Chinese dry fermented sausages[J]. Food Research International, 2020, 135: 109247. DOI:10.1016/j.foodres.2020.109247.
- [31] 李文东, 韩玲, 余群力, 等. 冷却方式对牦牛肉贮藏过程中品质变化的影响[J]. 食品与发酵工业, 2020, 46(20): 199-207. DOI:10.13995/j.cnki.11-1802/ts.023957.
- [32] HU Y Y, ZHANG L, ZHANG H, et al. Physicochemical properties and flavour profile of fermented dry sausages with a reduction of sodium chloride[J]. LWT-Food Science and Technology, 2020, 124: 109061. DOI:10.1016/j.lwt.2020.109061.
- [33] DI ROSA A R, LEONE F, CHELI F, et al. Fusion of electronic nose, electronic tongue and computer vision for animal source food authentication and quality assessment: a review[J]. Journal of Food Engineering, 2017, 210: 62-75. DOI:10.1016/j.jfoodeng.2017.04.024.
- [34] TIAN X, LI Z J, CHAO Y Z, et al. Evaluation by electronic tongue and headspace-GC-IMS analyses of the flavor compounds in dry-cured pork with different salt content[J]. Food Research International, 2020, 137: 109456. DOI:10.1016/j.foodres.2020.109456.
- [35] 裴正钰, 张香美, 卢涵, 等. 风味分析技术在发酵肉制品中的应用研究进展[J]. 食品科技, 2021, 46(2): 91-96. DOI:10.13684/j.cnki.spkj.2021.02.015.
- [36] CHEN Q, HU Y Y, WEN R X, et al. Characterisation of the flavour profile of dry fermented sausages with different NaCl substitutes using HS-SPME-GC-MS combined with electronic nose and electronic tongue[J]. Meat Science, 2020, 172: 108338. DOI:10.1016/j.meatsci.2020.108338.
- [37] HU Y Y, WANG H, KONG B H, et al. The succession and correlation of the bacterial community and flavour characteristics of Harbin dry sausages during fermentation[J]. LWT-Food Science and Technology, 2021, 138: 110689. DOI:10.1016/j.lwt.2020.110689.
- [38] CHEN Q, KONG B H, HAN Q, et al. The role of bacterial fermentation in lipolysis and lipid oxidation in Harbin dry sausages and its flavour development[J]. LWT-Food Science and Technology, 2017, 77: 389-396. DOI:10.1016/j.lwt.2016.11.075.
- [39] MARCO A, NAVARRO J L, FLORES M. The influence of nitrite and nitrate on microbial, chemical and sensory parameters of slow dry fermented sausage[J]. Meat Science, 2006, 73(4): 660-673. DOI:10.1016/j.meatsci.2006.03.011.
- [40] SIDIRA M, KANDYLIS P, KANELAKI M, et al. Effect of immobilized *Lactobacillus casei* on the evolution of flavor compounds in probiotic dry-fermented sausages during ripening[J]. Meat Science, 2015, 100: 41-51. DOI:10.1016/j.meatsci.2014.09.011.
- [41] ARDÓ Y. Flavour formation by amino acid catabolism[J]. Biotechnology Advances, 2006, 24: 238-242. DOI:10.1016/j.biotechadv.2005.11.005.
- [42] HU Y Y, ZHANG L, LIU Q, et al. The potential correlation between bacterial diversity and the characteristic volatile flavour of traditional dry sausages from Northeast China[J]. Food Microbiology, 2020, 91: 103505. DOI:10.1016/j.fm.2020.103505.
- [43] 周广宏. 畜产品加工学[M]. 北京: 中国农业出版社, 2011: 60-61.