

丁酸梭菌对小尾寒羊宰后成熟过程中挥发性风味物质的影响及机理研究

侯冉¹, 窦露¹, 任钦¹, 张敏¹, 张月¹, 谢骏康¹, 敖登图雅², 郭月英¹, 苏琳¹, 赵丽华¹, 靳焱^{1,*}

(1. 内蒙古农业大学食品科学与工程学院, 内蒙古 呼和浩特 010018;

2. 内蒙古乌拉特中旗农牧和科技局, 内蒙古 乌拉特中旗 015300)

摘要: 为探究丁酸梭菌对小尾寒羊宰后成熟过程中挥发性风味物质的影响及其可能机制, 以6月龄小尾寒羊为研究对象, 取其背最长肌进行宰后成熟(4℃), 然后分别在第0、1、2、3、4、5天对羊肉中的挥发性风味物质和腺苷酸活化蛋白激酶(adenosine monophosphate activated protein kinase, AMPK)、乙酰辅酶A羧化酶(acetyl CoA carboxylase, ACC)和肉毒碱脂酰转移酶1(carnitine palmitoyltransferase, CPT1)等脂肪代谢相关酶活性进行测定。电子鼻测定结果显示, 丁酸梭菌组小尾寒羊肉中的烷类、氢过氧化物和氮氧化合物的含量更加丰富; 结合气相色谱-质谱联用技术测定结果可知, 丁酸梭菌组小尾寒羊肉中醛、醇及酮类化合物的种类较为丰富, 而脂肪氧化产物如辛醛、壬醛、癸醛、庚醛的含量均明显降低; 利用相对气味活度值法筛选了宰后成熟过程中两组小尾寒羊肉中共有的关键风味物质, 包括辛醛、壬醛、反-2-癸烯醛和1-辛烯-3-醇, 其中癸醛对羊肉风味的贡献最大。与对照组相比, 丁酸梭菌组小尾寒羊肉中AMPK和CPT1的含量在宰后成熟过程中均显著降低($P<0.05$), 而丁酸梭菌组小尾寒羊肉中ACC含量在宰后成熟第0、1、3、5天显著高于对照组($P<0.05$); 相关性分析结果表明, AMPK和CPT1与壬醛均呈极显著正相关($P<0.001$), 而ACC与壬醛和癸醛呈极显著负相关($P<0.001$)。综上, 日粮添加丁酸梭菌可能通过调控AMPK-ACC-CPT1通路进而影响小尾寒羊宰后成熟过程中的挥发性风味物质。

关键词: 宰后成熟; 挥发性风味物质; 电子鼻; 脂肪代谢相关酶活性; 小尾寒羊

Effect and Mechanism of Dietary Supplementation of *Clostridium butyricum* on Volatile Flavor Compounds in Meat of Small Tailed-Han Sheep during Postmortem Aging

HOU Ran¹, DOU Lu¹, REN Qin¹, ZHANG Min¹, ZHANG Yue¹, XIE Junkang¹, Aodengtuya², GUO Yueying¹, SU Lin¹, ZHAO Lihua¹, JIN Ye^{1,*}

(1. College of Food Science and Engineering, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010018, China; 2. Bureau of Agriculture, Animal Husbandry and Science and Technology of Wulate Zhongqi, Inner Mongolia, Wulate Middle Banner 015300, China)

Abstract: In order to explore the effect of dietary supplementation of *Clostridium butyricum* on the volatile flavor substances in the meat of small-tailed Han sheep during postmortem aging and its possible mechanism, the *Longissimus dorsi* muscle of small-tailed Han sheep slaughtered at the age of six months was taken for postmortem maturation at 4℃, and then the volatile flavor substances, the contents of lipid metabolism-related enzymes including adenosine monophosphate activated protein kinase (AMPK), acetyl CoA carboxylase (ACC) and carnitine lipoyltransferase 1 (CPT1) were measured on days 0, 1, 2, 3, 4 and 5. The results of electronic nose test showed that the contents of alkanes, hydroperoxide and nitrogen oxides in the *C. butyricum* supplementation group were higher than in the control group without *C. butyricum* supplementation. According to the results of gas chromatography-mass spectrometry (GC-MS), the types of aldehydes, alcohols and ketones in the *C. butyricum* group were more than in the control group, while the contents of fatty oxidation products such as octanal, nonanal, decanal and heptaldehyde were obviously reduced. The key flavor substances common to both groups, as

收稿日期: 2022-09-17

基金项目: 国家自然科学基金地区科学基金项目(32160589); 内蒙古自治区自然科学基金重大专项(2020ZD11);

内蒙古自治区科技成果转化专项(2019CG066); 内蒙古自治区食品科学与工程一流学科建设项目(SPFC202004);

内蒙古自治区自然科学基金项目(2022MS03055)

第一作者简介: 侯冉(1998—)(ORCID: 0000-0002-4181-2473), 女, 硕士研究生, 研究方向为肉品科学与技术。

E-mail: 2397126550@qq.com

*通信作者简介: 靳焱(1964—)(ORCID: 0000-0001-8960-879X), 男, 教授, 博士, 研究方向为肉品科学与技术。

E-mail: jinyeyc@sohu.com

determined by relative odor activity value (ROAV), included octanal, nonanal, *trans*-2-decenal and 1-octen-3-ol, nonanal being the greatest contributor to the flavor of lamb meat. Compared with the control group, the contents of AMPK and CPT1 in the *C. butyricum* group decreased significantly during postmortem aging ($P < 0.05$), while the contents of ACC in the *C. butyricum* group were significantly higher than those in the control group at 0, 1, 3 and 5 days postmortem ($P < 0.05$). The correlation analysis showed that AMPK and CPT1 were significantly positively correlated with nonanal ($P < 0.001$), while ACC was significantly negatively correlated with nonanal and decanal ($P < 0.001$). In conclusion, the addition of *C. butyricum* to the diet can affect the volatile flavor substances in the meat of small-tailed Han sheep during postmortem aging by regulating the AMPK-ACC-CPT1 signaling pathway.

Keywords: postmortem aging; volatile flavor substances; electronic nose; fat metabolism related enzyme activity; small-tailed Han sheep

DOI:10.7506/spkx1002-6630-20220917-160

中图分类号: TS251.1

文献标志码: A

文章编号: 1002-6630(2023)12-0181-08

引文格式:

侯冉, 窦露, 任钦, 等. 丁酸梭菌对小尾寒羊宰后成熟过程中挥发性风味物质的影响及机理研究[J]. 食品科学, 2023, 44(12): 181-188. DOI:10.7506/spkx1002-6630-20220917-160. <http://www.spkx.net.cn>

HOU Ran, DOU Lu, REN Qin, et al. Effect and mechanism of dietary supplementation of *Clostridium butyricum* on volatile flavor compounds in meat of small tailed-Han sheep during postmortem aging[J]. Food Science, 2023, 44(12): 181-188. (in Chinese with English abstract) DOI:10.7506/spkx1002-6630-20220917-160. <http://www.spkx.net.cn>

宰后成熟是肉的“增值”过程, 能改善其食用价值, 包括肉的嫩度、多汁性和风味等^[1]。冷鲜肉是近年来国内外市场上较常见的鲜肉, 是指将动物屠宰后的胴体迅速冷却排酸, 并充分完成“后熟”阶段, 使胴体的中心温度在1 d之内降至0~4℃, 并在此温度下进行加工、储运、销售的肉类^[2]。风味是消费者对肉总体可接受性评分的关键指标。风味是指肉中的风味前体物质(脂肪酸和氨基酸等)经过脂肪氧化、美拉德和Strecker降解等反应, 生成挥发性风味物质, 如醛、醇、酮、炔类等, 使肉产生香味。近年来, 大量研究学者发现宰后成熟是改善冷鲜肉风味的重要举措, Watanabe等^[3]研究发现, 随着成熟时间的延长, 牛肉中挥发性化合物的含量增加。牛珺等^[4]通过检测牦牛宰后1~28 d挥发性风味物质的变化, 发现其风味物质种类随成熟时间整体呈上升趋势。

腺苷酸活化蛋白激酶(adenosine monophosphate-activated protein kinase, AMPK)可以通过调节脂代谢、糖代谢等机体代谢影响肉品质, 主要是通过调控脂肪代谢相关的酶或者基因的表达影响脂肪沉积或脂肪酸组成实现。研究发现, AMPK激活后可以抑制乙酰辅酶A羧化酶(acetyl-CoA carboxylase, ACC)的活性, 使丙二酸单酰辅酶A含量减少, 从而减弱对肉毒碱脂酰转移酶1(carnitine palmitoyl transferase 1, CPT1)的抑制作用, 脂肪酸进入线粒体进行氧化分解的程度增加, 从而使脂肪沉积减少, 进而影响肉品质^[5]。丁酸梭菌(*Clostridium butyricum*)是一种广泛分布于动物肠道的有益菌, 属于革兰氏阳性厌氧菌, 具有改善胃肠道微生物菌群的组成和促进消化的作用^[6]。Yang等^[7]提出日粮添

加丁酸梭菌可以通过改善鸡肉中脂肪酸组成, 进而改善肉的风味。Liu Xuan等^[8]研究发现丁酸梭菌的添加可以提高鸡肉中醛、醇、酮等挥发性风味物质的含量。丁酸梭菌进入动物机体后产生大量代谢物, 如丁酸等能够调节体内脂质代谢通路^[9]。张月等^[10]研究发现日粮中乳酸菌的添加可以通过抑制AMPK α 2-ACC-CPT1-B通路, 促进脂肪酸合成, 提高苏尼特羊脂肪代谢水平。宰后细胞能量失衡和Ca²⁺浓度变化都会激活AMPK活性引发一系列生理变化, 其中脂肪代谢产生的醛、酮、醇类物质是肉中主要的风味物质, 与宰后肉品质密切相关。AMPK-ACC-CPT1是调控脂肪代谢的典型信号通路, 因此可以作为探究丁酸梭菌对小尾寒羊宰后脂肪代谢及其对风味影响的重要途径。

目前国内外对于宰后成熟过程中脂肪代谢及挥发性风味物质的研究大多集中于牛肉、猪肉等, 在羊肉方面, 尤其是丁酸梭菌对宰后成熟过程中羊肉脂肪代谢及挥发性风味物质的影响研究相对较少。因此, 本实验以小尾寒羊为研究对象, 探究丁酸梭菌对小尾寒羊宰后不同成熟时间(0~5 d)脂肪代谢相关酶活性及挥发性风味物质的影响, 旨在为改善和提高我国冷鲜寒羊肉风味提供参考。

1 材料与方法

1.1 材料与试剂

从内蒙古呼和浩特市和林格尔县选取3月龄小尾寒羊32只, 平均体质量为(28.53±1.83) kg, 分为对照组(记为C组)和丁酸梭菌组(记为R组), 每组各16只。

对照组饲喂基础日粮, 丁酸梭菌组在基础日粮中每天每只羊添加5 g丁酸梭菌(活菌数为 5×10^8 CFU/g)。

饲料成分: 玉米46.6%、精饲料20%、青贮33.4%、石粉1.00%、磷酸氢钙0.40%、氯化钠0.82%、赖氨酸0.70%和预混料2.00%。其营养成分为: 蛋白质14.79%、灰分8.00%、钙1.13%和磷0.67%。实验期间采食和饮水自由。实验结束后, 每组选取体质量相近的小尾寒羊各8只(公母各半)进行屠宰。

丁酸梭菌 山东宝来利来生物工程股份有限公司; 绵羊AMPK酶联免疫吸附剂测定(enzyme linked immunosorbent assay, ELISA)试剂盒(Cat No.EIA07313Sh)、绵羊ACC ELISA试剂盒(Cat No.EIA06940Sh)、CPT1 ELISA试剂盒(Cat No.EIA06818Sh) 武汉新启迪生物科技有限公司。

1.2 仪器与设备

Trace 1300-ISQ型气相色谱-质谱(gas chromatography-mass spectrometry, GC-MS)联用仪 美国赛默飞世尔科技公司; 固相微萃取头 美国Supelco公司; JXFSTPRP-CLN型低温冷冻研磨仪 上海净信实业发展有限公司; HWS-24电热恒温水浴锅 上海一恒科学仪器有限公司; PEN3电子鼻 德国Airsense公司; YNERGY H1型酶标仪 美国BioTek Instruments公司。

1.3 方法

1.3.1 样品制备

实验用羊屠宰后, 迅速在胴体两侧取背最长肌肉样, 并均分成6份。随机选取其中1份作为0 d样品, 取2 g肉样置于无菌无酶冻存管中, 迅速投入液氮, 带回实验室-80℃保存, 用于脂肪代谢相关酶活性测定; 同时采集肉样20 g左右, 置于-20℃冰箱, 用于后续风味的测定。将其余5份在屠宰后30 min内分别放于标记好的自封袋中, 4℃条件下进行成熟(1~5 d), 并分别在成熟的不同时间点采集脂肪代谢相关酶活性和风味测定所需的肉样。

1.3.2 电子鼻分析检测

样品的处理及电子鼻设备的设定参考窦露等^[11]的方法。电子鼻性能和参数如表1所示。

表1 电子鼻传感器性能描述

Table 1 Performance description of electronic nose sensors

传感器	敏感物质	检测范围/(mL/m ³)
W1C	芳香烃化合物	10
W5S	氮氧化合物	1
W3C	氨, 香气分子	10
W6S	氢化物	100
W5C	烯烃, 芳族, 极性分子	1
W1S	烷类	100
W1W	硫化物	1
W2S	检测醇, 部分芳香族化合物	100
W2W	芳香化合物, 硫的有机化合物	1
W3S	烷类和脂肪族	100

1.3.3 挥发性物质的测定

参考罗玉龙等^[12]方法进行挥发性成分的提取, 然后进行GC-MS检测。

GC-MS条件: TR-5毛细色谱柱(30 m×0.25 mm, 0.25 μm); 载气He; 载气流速1.0 mL/min; 传输线温度250℃; 不分流进样; 进样时间1 min; 升温程序: 初始温度40℃, 保持3 min; 以4℃/min升温到150℃, 保持1 min; 再以5℃/min升温到200℃; 最后以20℃/min升至230℃, 保持5 min; 进样口温度250℃; 质量扫描范围m/z 30~400; 溶剂延迟时间1.0 min。

MS数据经与Meanlib、NIST Demo和Wiley Library检索定性, 鉴定依据为匹配度>800, 利用面积归一化法计算各物质峰面积相对含量^[13]。

1.3.4 关键风味物质确定

采用相对气味活度值(relative odor activity value, ROAV)法分析各挥发性物质对羊肉风味的贡献^[14]。定义对样品风味贡献最大的风味物质ROAV_{stan}=100, 按下式计算其他风味物质ROAV:

$$ROAV_i \approx 100 \times \frac{C_i}{C_{stan}} \times \frac{T_{stan}}{T_i}$$

式中: C_i 为各挥发性物质的质量浓度/(μg/L); T_i 为各挥发性物质相对应的感觉阈值/(μg/L); C_{stan} 为样品总体风味贡献最大组分的质量浓度; T_{stan} 为样品总体风味贡献最大组分相对应的感觉阈值/(μg/L)。

1.3.5 脂肪代谢相关酶含量测定

取约0.5 g样品于10 mL离心管中, 加入9倍体积的0.85%生理盐水和研磨珠, 放于冷冻研磨机中研磨2 min(4℃, 65 Hz), 待充分匀浆后, 离心10 min(4℃, 3 500 r/min), 收集上清液进行测定。根据试剂盒说明书, 使用双抗体夹心ELISA法测定AMPK、ACC和CPT1含量。

1.4 数据处理

数据用Microsoft Excel 2010软件进行统计分析, 使用IBM SPSS Statistics软件进行单因素方差分析、最小显著差法和Duncan差异显著性分析, $P < 0.05$, 差异显著, 结果表示为 $\bar{x} \pm s$ 。脂肪代谢相关酶活性数据采用Origin 2021 64Bit软件进行绘图。

2 结果与分析

2.1 丁酸梭菌对小尾寒羊宰后成熟过程中电子鼻传感器响应值的影响

电子鼻对肉的气味信息非常敏感, 挥发性化合物即使发生微小的变化, 传感响应系统也能检测到其

差异^[15],因此能较为准确、客观地反映出肉中总体挥发性物质的变化^[16]。如表2所示,宰后不同成熟时间小尾寒羊的气味轮廓差异明显,其中W5S、W6S、W1S、W2S和W3S传感器的响应值均在1以上,是评判气味特征的主要指标。电子鼻传感器W1S对烷类物质的反应较强,由表2可知,该传感器对所有样品的信号强度均较高,说明宰后成熟过程中小尾寒羊肉中的烷类物质气味较强。此外,与对照组相比,丁酸梭菌组W1S的响应值在成熟第1、3、4、5天均显著升高($P<0.05$)。W2S传感器对醛类、醇类和酮类物质敏感,由表2可知,丁酸梭菌组W2S的响应值与对照组相比无显著差异($P>0.05$)。W5S传感器对氮氧化合物的反应较强,由表2可知,与对照组相比,丁酸梭菌组W5S的响应值在宰后成熟第0、1、5天均显著升高($P<0.05$)。W3S传感器主要对烷烃类敏感,与对照组相比,丁酸梭菌组W3S的响应值在宰后成熟0~5 d显著升高($P<0.05$)。W6S传感器对氢过氧化物敏感,由表2可知,丁酸梭菌组W6S的响应值在宰后成熟第0天和2~5 d均显著高于对照组($P<0.05$)。综上,宰后成熟过程中丁酸梭菌组W1S、W5S、W3S、W6S传感器的响应值显著升高,说明添加丁酸梭菌后小尾寒羊肉中的烷类、氢过氧化物和氮氧化合物的含量更加丰富。

表2 丁酸梭菌对小尾寒羊宰后成熟过程中气味响应值的影响($n=8$)
Table 2 Effect of *C. butyricum* supplementation on odor response values of meat of small-tailed Han sheep during postmortem aging ($n=8$)

传感器	组别	0d	1d	2d	3d	4d	5d
W1C	C	0.682±0.037 ^{hi}	0.635±0.039 ^{hi}	0.590±0.046 ^{hi}	0.619±0.022 ^{hi}	0.624±0.036 ^{hi}	0.564±0.071 ^{hi}
	R	0.680±0.043 ^{hi}	0.597±0.037 ^{hi}	0.557±0.032 ^{hi}	0.607±0.012 ^{hi}	0.609±0.013 ^{hi}	0.554±0.023 ^{hi}
W5S	C	1.230±0.038 ^{hi}	1.295±0.018 ^{hi}	1.505±0.038 ^{hi}	1.941±0.073 ^{hi}	1.952±0.028 ^{hi}	1.402±0.017 ^{hi}
	R	1.467±0.037 ^{hi}	1.580±0.018 ^{hi}	1.533±0.031 ^{hi}	2.067±0.026 ^{hi}	2.033±0.021 ^{hi}	1.513±0.013 ^{hi}
W3C	C	0.825±0.040 ^{hi}	0.817±0.048 ^{hi}	0.797±0.024 ^{hi}	0.817±0.014 ^{hi}	0.823±0.037 ^{hi}	0.789±0.041 ^{hi}
	R	0.854±0.026 ^{hi}	0.811±0.017 ^{hi}	0.786±0.021 ^{hi}	0.815±0.015 ^{hi}	0.819±0.026 ^{hi}	0.815±0.024 ^{hi}
W6S	C	1.236±0.027 ^{hi}	1.237±0.022 ^{hi}	1.248±0.024 ^{hi}	1.278±0.035 ^{hi}	1.369±0.038 ^{hi}	1.340±0.069 ^{hi}
	R	1.253±0.021 ^{hi}	1.240±0.025 ^{hi}	1.269±0.050 ^{hi}	1.304±0.045 ^{hi}	1.416±0.051 ^{hi}	1.393±0.041 ^{hi}
W5C	C	0.868±0.038 ^{hi}	0.857±0.050 ^{hi}	0.847±0.020 ^{hi}	0.861±0.020 ^{hi}	0.868±0.028 ^{hi}	0.836±0.039 ^{hi}
	R	0.911±0.023 ^{hi}	0.860±0.023 ^{hi}	0.827±0.020 ^{hi}	0.867±0.024 ^{hi}	0.869±0.025 ^{hi}	0.859±0.035 ^{hi}
W1S	C	2.215±0.033 ^{hi}	2.665±0.047 ^{hi}	3.086±0.031 ^{hi}	2.769±0.033 ^{hi}	2.867±0.024 ^{hi}	2.982±0.046 ^{hi}
	R	2.303±0.031 ^{hi}	2.861±0.035 ^{hi}	3.096±0.024 ^{hi}	3.024±0.056 ^{hi}	3.806±0.026 ^{hi}	3.037±0.048 ^{hi}
W1W	C	0.795±0.017 ^{hi}	0.891±0.018 ^{hi}	0.955±0.019 ^{hi}	0.937±0.005 ^{hi}	1.271±0.016 ^{hi}	1.201±0.013 ^{hi}
	R	0.711±0.015 ^{hi}	0.866±0.021 ^{hi}	1.029±0.026 ^{hi}	0.842±0.003 ^{hi}	1.109±0.014 ^{hi}	0.902±0.014 ^{hi}
W2S	C	1.761±0.009 ^{hi}	1.833±0.016 ^{hi}	1.843±0.012 ^{hi}	1.792±0.018 ^{hi}	2.502±0.040 ^{hi}	2.252±0.040 ^{hi}
	R	1.791±0.017 ^{hi}	1.879±0.022 ^{hi}	1.869±0.017 ^{hi}	1.800±0.017 ^{hi}	2.513±0.032 ^{hi}	2.323±0.037 ^{hi}
W2W	C	0.869±0.011 ^{hi}	0.933±0.023 ^{hi}	0.981±0.026 ^{hi}	0.979±0.012 ^{hi}	0.998±0.016 ^{hi}	0.986±0.026 ^{hi}
	R	0.944±0.051 ^{hi}	0.976±0.036 ^{hi}	0.976±0.025 ^{hi}	0.923±0.024 ^{hi}	1.010±0.018 ^{hi}	0.971±0.019 ^{hi}
W3S	C	1.537±0.061 ^{hi}	1.845±0.020 ^{hi}	1.850±0.042 ^{hi}	1.964±0.053 ^{hi}	1.983±0.048 ^{hi}	1.858±0.033 ^{hi}
	R	1.595±0.041 ^{hi}	1.943±0.038 ^{hi}	1.955±0.031 ^{hi}	2.226±0.032 ^{hi}	2.113±0.033 ^{hi}	2.091±0.032 ^{hi}

注:不同大写字母表示宰后同一时间不同组别差异显著($P<0.05$);不同小写字母表示同一组别宰后不同时间差异显著($P<0.05$)。下同。

2.2 丁酸梭菌对小尾寒羊宰后成熟过程中挥发性风味物质的影响

本实验共测出了5类共28种挥发性风味物质,包括醛类13种、醇类8种、酮类2种、烃类2种和其他类物质3种。如图1所示,对照组宰后成熟第0、1、2、3、4、5天分别检测出19、19、20、25、22、22种挥发性风味物质,在丁酸梭菌组宰后成熟第0、1、2、3、4、5天分别检测出23、22、25、27、26、25种挥发性风味物质,两组小尾寒羊肉中挥发性风味物质的种类随着宰后成熟时间的延长整体均呈先升高后降低趋势,并于成熟第3天达到最大值,初步判断成熟第3天小尾寒羊肉的挥发性风味物质较为丰富。王亚娜等^[17]通过研究大足黑山羊成熟前后挥发性风味物质的差异,发现宰后成熟72 h后羊肉的挥发性风味物质种类最多,与本实验结果一致。推测其原因可能是由于宰后初期,羊肉中的不饱和脂肪酸与氧气发生氧化作用,使醛类物质种类增加,并逐渐释放,然而随着成熟时间的延长,醛类物质被进一步氧化,进而使得风味物质种类降低^[18-19]。此外,丁酸梭菌组宰后成熟过程中挥发性风味物质种类在宰后成熟的每个时间点均高于对照组,说明丁酸梭菌的添加丰富了小尾寒羊肉中的风味物质。Wang Yan等^[20]研究发现,日粮中益生菌的添加使肉鸡中风味物质的种类显著增加。

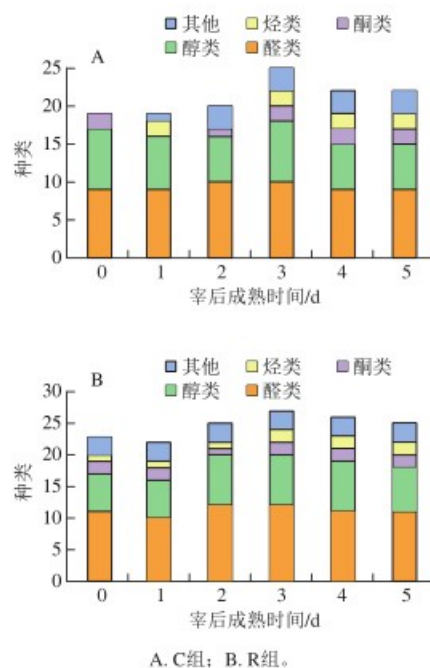


图1 丁酸梭菌对小尾寒羊宰后成熟过程中挥发性风味物质种类的影响($n=8$)

Fig. 1 Effect of *C. butyricum* supplementation on volatile flavor substances in meat of small-tailed Han sheep during postmortem aging ($n=8$)

表3 丁酸梭菌对小尾寒羊宰后成熟过程中挥发性风味物质含量的影响 ($n=8$)

Table 3 Effect of *C. butyricum* supplementation on the contents of volatile flavor substances in meat of small-tailed Han sheep during postmortem aging ($n=8$)

类别	挥发性风味物质	组别	相对含量/%					
			0 d	1 d	2 d	3 d	4 d	5 d
醛类	戊醛	C	1.482±0.051 ^{ab}	0.973±0.011 ^b	1.057±0.041 ^b	0.804±0.011 ^b	0.864±0.012 ^b	0.776±0.022 ^b
		R	ND	ND	ND	ND	ND	ND
	己醛	C	1.824±0.026 ^{ab}	1.744±0.129 ^{ab}	1.831±0.019 ^{ab}	1.348±0.016 ^{ab}	1.745±0.021 ^{ab}	1.780±0.067 ^{ab}
		R	1.789±0.031 ^{ab}	1.145±0.120 ^{ab}	1.504±0.031 ^{ab}	0.559±0.023 ^b	0.659±0.020 ^b	1.185±0.110 ^{ab}
	庚醛	C	0.928±0.012 ^{ab}	0.966±0.014 ^{ab}	1.070±0.028 ^{ab}	1.783±0.016 ^{ab}	1.263±0.019 ^{ab}	1.056±0.014 ^{ab}
		R	0.815±0.031 ^{ab}	0.801±0.033 ^{ab}	0.893±0.009 ^{ab}	1.379±0.013 ^{ab}	0.986±0.070 ^{ab}	0.861±0.028 ^{ab}
	辛醛	C	6.474±0.210 ^{ab}	5.181±0.198 ^{ab}	4.172±0.147 ^{ab}	3.728±0.196 ^{ab}	3.376±0.139 ^{ab}	2.628±0.126 ^{ab}
		R	6.407±0.257 ^{ab}	5.086±0.288 ^{ab}	3.648±0.206 ^{ab}	3.651±0.080 ^{ab}	3.345±0.170 ^{ab}	1.766±0.028 ^{ab}
	壬醛	C	15.612±1.381 ^{ab}	19.101±1.291 ^{ab}	15.265±0.680 ^{ab}	11.398±0.470 ^{ab}	11.954±0.297 ^{ab}	7.906±0.131 ^{ab}
		R	14.753±1.444 ^{ab}	18.783±1.280 ^{ab}	14.000±1.235 ^{ab}	9.048±0.598 ^{ab}	10.680±0.438 ^{ab}	6.693±0.153 ^{ab}
	癸醛	C	2.180±0.083 ^{ab}	2.399±0.151 ^{ab}	2.455±0.048 ^{ab}	5.492±0.101 ^{ab}	2.729±0.155 ^{ab}	2.588±0.101 ^{ab}
		R	1.278±0.211 ^{ab}	1.276±0.132 ^{ab}	1.721±0.041 ^{ab}	4.512±0.331 ^{ab}	1.539±0.190 ^{ab}	0.969±0.035 ^{ab}
醇类	苯甲醇	C	5.094±0.181 ^{ab}	3.996±0.131 ^{ab}	1.433±0.280 ^{ab}	1.041±0.197 ^{ab}	1.547±0.190 ^{ab}	1.338±0.179 ^{ab}
		R	5.720±0.209 ^{ab}	3.218±0.142 ^{ab}	3.530±0.160 ^{ab}	2.330±0.134 ^{ab}	ND	2.492±0.152 ^{ab}
	十一醇	C	ND	ND	ND	ND	ND	ND
		R	0.457±0.032 ^{ab}	ND	0.625±0.010 ^{ab}	0.798±0.040 ^{ab}	0.756±0.067 ^{ab}	0.569±0.021 ^{ab}
	十二醇	C	ND	ND	ND	ND	ND	ND
		R	ND	0.368±0.024 ^{ab}	0.444±0.010 ^{ab}	0.571±0.043 ^{ab}	0.541±0.045 ^{ab}	0.423±0.032 ^{ab}
	十四醇	C	ND	ND	ND	ND	ND	ND
		R	5.236±0.301 ^{ab}	3.374±0.260 ^{ab}	3.068±0.150 ^{ab}	1.971±0.064 ^{ab}	2.366±0.080 ^{ab}	1.228±0.070 ^{ab}
	反-2-辛烯醇	C	ND	ND	0.332±0.015 ^{ab}	0.437±0.011 ^{ab}	0.296±0.014 ^{ab}	0.670±0.041 ^{ab}
		R	0.465±0.019 ^{ab}	ND	0.442±0.027 ^{ab}	0.577±0.060 ^{ab}	0.464±0.010 ^{ab}	ND
	反-2-癸烯醇	C	1.227±0.043 ^{ab}	0.978±0.030 ^{ab}	0.301±0.007 ^{ab}	0.313±0.010 ^{ab}	0.335±0.031 ^{ab}	0.252±0.011 ^{ab}
		R	1.213±0.025 ^{ab}	0.965±0.028 ^{ab}	0.413±0.004 ^{ab}	0.342±0.008 ^{ab}	0.328±0.006 ^{ab}	0.265±0.007 ^{ab}
酯类	3-羟基-丁酯	C	0.559±0.018 ^{ab}	0.497±0.028 ^{ab}	0.417±0.013 ^{ab}	0.538±0.024 ^{ab}	ND	ND
		R	1.034±0.056 ^{ab}	1.277±0.042 ^{ab}	1.068±0.018 ^{ab}	1.839±0.016 ^{ab}	1.279±0.022 ^{ab}	0.955±0.012 ^{ab}
	戊酯	C	5.765±0.030 ^{ab}	6.079±0.128 ^{ab}	ND	7.198±0.281 ^{ab}	ND	ND
		R	ND	ND	4.236±0.028 ^{ab}	4.781±0.179 ^{ab}	3.143±0.121 ^{ab}	ND
	己酯	C	1.584±0.041 ^{ab}	1.219±0.090 ^{ab}	1.428±0.141 ^{ab}	2.566±0.120 ^{ab}	1.737±0.110 ^{ab}	1.416±0.282 ^{ab}
		R	1.456±0.018 ^{ab}	1.402±0.027 ^{ab}	2.086±0.026 ^{ab}	2.411±0.051 ^{ab}	2.439±0.069 ^{ab}	2.398±0.044 ^{ab}
	庚酯	C	3.859±0.241 ^{ab}	1.662±0.156 ^{ab}	1.448±0.031 ^{ab}	3.826±0.150 ^{ab}	2.147±0.040 ^{ab}	4.248±0.442 ^{ab}
		R	3.833±0.194 ^{ab}	1.106±0.032 ^{ab}	2.752±0.347 ^{ab}	3.343±0.407 ^{ab}	3.774±0.178 ^{ab}	3.020±0.033 ^{ab}
	1-辛烯-3-醇	C	12.907±0.530 ^{ab}	8.236±0.021 ^{ab}	11.661±1.020 ^{ab}	15.512±0.933 ^{ab}	10.219±0.871 ^{ab}	8.188±1.540 ^{ab}
		R	15.267±0.726 ^{ab}	15.334±0.678 ^{ab}	18.997±0.720 ^{ab}	24.058±0.738 ^{ab}	20.784±0.944 ^{ab}	20.392±0.019 ^{ab}
	顺-2-辛烯-1-醇	C	2.671±0.190 ^{ab}	2.767±0.042 ^{ab}	2.458±0.470 ^{ab}	2.192±0.060 ^{ab}	1.999±0.221 ^{ab}	1.471±0.077 ^{ab}
		R	2.991±0.139 ^{ab}	3.045±0.188 ^{ab}	2.451±0.123 ^{ab}	2.480±0.183 ^{ab}	2.306±0.144 ^{ab}	2.095±0.127 ^{ab}
	辛酯	C	4.549±0.193 ^{ab}	5.405±0.217 ^{ab}	5.811±0.120 ^{ab}	8.133±0.287 ^{ab}	ND	ND
		R	5.521±0.294 ^{ab}	5.284±0.318 ^{ab}	6.670±0.388 ^{ab}	7.803±0.375 ^{ab}	8.219±0.435 ^{ab}	6.248±0.277 ^{ab}
	壬酯	C	1.598±0.080 ^{ab}	ND	ND	1.251±0.026 ^{ab}	1.514±0.027 ^{ab}	1.199±0.080 ^{ab}
		R	1.554±0.032 ^{ab}	ND	1.400±0.015 ^{ab}	1.980±0.020 ^{ab}	2.239±0.039 ^{ab}	1.772±0.015 ^{ab}
酮类	2-十六酮	C	0.460±0.036 ^{ab}	0.439±0.050 ^{ab}	0.428±0.010 ^{ab}	0.298±0.011 ^{ab}	0.347±0.031 ^{ab}	0.239±0.012 ^{ab}
		R	ND	0.539±0.036 ^{ab}	0.345±0.022 ^{ab}	0.266±0.010 ^{ab}	0.258±0.011 ^{ab}	0.235±0.005 ^{ab}
	3-羟基-2-丁酮	C	0.510±0.021 ^{ab}	ND	ND	0.495±0.081 ^{ab}	0.551±0.264 ^{ab}	0.430±0.010 ^{ab}
		R	0.497±0.028 ^{ab}	0.538±0.034 ^{ab}	0.534±0.024 ^{ab}	0.648±0.023 ^{ab}	0.519±0.037 ^{ab}	0.617±0.014 ^{ab}
	2-庚酮	C	1.119±0.390 ^{ab}	ND	0.681±0.022 ^{ab}	1.258±0.026 ^{ab}	1.517±0.021 ^{ab}	1.197±0.084 ^{ab}
		R	1.116±0.243 ^{ab}	0.824±0.040 ^{ab}	ND	1.323±0.019 ^{ab}	1.407±0.023 ^{ab}	1.142±0.033 ^{ab}
	癸酮	C	ND	0.798±0.056 ^{ab}	ND	0.977±0.060 ^{ab}	0.976±0.081 ^{ab}	0.848±0.042 ^{ab}
		R	0.900±0.053 ^{ab}	0.532±0.045 ^{ab}	1.025±0.119 ^{ab}	0.994±0.035 ^{ab}	0.958±0.035 ^{ab}	0.465±0.024 ^{ab}
	6-甲基-十八烷	C	ND	0.738±0.010 ^{ab}	ND	0.469±0.011 ^{ab}	0.525±0.023 ^{ab}	0.268±0.033 ^{ab}
		R	ND	ND	ND	0.663±0.021 ^{ab}	0.598±0.012 ^{ab}	0.431±0.016 ^{ab}
	苯酮	C	ND	ND	4.313±0.711 ^{ab}	3.383±0.944 ^{ab}	3.929±0.580 ^{ab}	3.208±0.716 ^{ab}
		R	3.299±0.296 ^{ab}	5.273±0.560 ^{ab}	4.306±0.515 ^{ab}	6.567±0.366 ^{ab}	7.714±0.282 ^{ab}	5.340±0.369 ^{ab}
其他	2-乙基丁酸烯丙酯	C	ND	ND	6.169±0.171 ^{ab}	3.271±0.150 ^{ab}	2.867±0.073 ^{ab}	2.455±0.092 ^{ab}
		R	3.385±0.211 ^{ab}	5.791±0.179 ^{ab}	6.757±0.244 ^{ab}	3.879±0.193 ^{ab}	3.795±0.238 ^{ab}	2.872±0.129 ^{ab}
	N,N'-二甲基苯胺	C	ND	3.937±0.220 ^{ab}	2.511±0.192 ^{ab}	3.519±0.091 ^{ab}	3.429±0.154 ^{ab}	3.318±0.070 ^{ab}
		R	2.648±1.241 ^{ab}	3.419±1.414 ^{ab}	2.837±1.350 ^{ab}	2.805±1.285 ^{ab}	3.417±0.922 ^{ab}	3.531±0.938 ^{ab}

注: ND, 未检出, 表4同。

表4 关键风味物质及对应ROAV ($n=8$)

Table 4 ROAV of key volatile flavor substances ($n=8$)

序号	关键 风味物质	阈值/ ($\mu\text{g/kg}$)	气味描述	组别	ROAV					
					0 d	1 d	2 d	3 d	4 d	5 d
1	戊醛	12	麦芽香、 烤坚果味	C	0.966	0.098	0.512	0.122	0.429	0.667
				R	ND	ND	ND	ND	ND	ND
2	己醛	4.5	青草味、果香	C	3.172	3.037	2.364	0.545	2.310	4.082
				R	3.369	1.819	2.297	0.275	0.847	2.420
3	庚醛	3	脂味、花香、 柑橘	C	2.420	2.524	2.072	1.082	2.507	3.633
				R	2.302	1.909	2.046	1.019	1.901	2.638
4	辛醛	0.7	甜香、淡脂香、 肥皂	C	72.368	58.005	34.631	9.697	28.725	38.744
				R	77.567	51.935	35.817	11.560	27.638	23.188
5	壬醛	1	脂肪香、花香、 柑橘	C	67.387	86.998	48.024	11.650	39.631	48.566
				R	74.178	69.929	59.471	11.188	38.635	43.134
6	癸醛	0.1	橡胶味、 油脂味	C	100	100	100	100	100	100
				R	100	100	100	100	100	100
7	苯甲醛	350	坚果、杏仁	C	0.114	0.089	0.024	0.005	0.026	0.039
				R	0.138	0.066	0.069	0.015	ND	0.065
8	十一醛	5	花香、柑橘味	C	ND	ND	ND	ND	ND	ND
				R	0.775	ND	0.859	0.354	0.874	1.046
9	十二醛	0.53	脂肪香、 洋葱味、橙子味	C	ND	ND	ND	ND	ND	ND
				R	ND	4.963	5.758	2.388	5.904	7.336
10	反-2-癸烯醛	0.3	水果味	C	32.003	25.549	5.830	1.900	6.651	7.981
				R	34.266	22.993	9.462	2.527	6.324	8.119
11	反-2-辛烯醛	3	油脂香、肉味	C	ND	ND	0.643	0.265	0.588	2.305
				R	1.314	ND	1.013	0.426	0.895	ND
12	戊醇	4 000	面包香、 果香、酒香	C	0.011	0.012	ND	0.003	ND	ND
				R	ND	ND	0.007	0.003	0.005	ND
13	己醇	500	花香、脂肪香	C	0.025	0.019	0.017	0.009	0.021	0.029
				R	0.025	0.020	0.029	0.011	0.028	0.044
14	庚醇	520	脂肪、酒香	C	0.058	0.025	0.016	0.013	0.025	0.084
				R	0.062	0.015	0.036	0.014	0.042	0.053
15	辛醇	126	脂肪、蜡质、 坚果	C	0.282	0.336	0.268	0.118	ND	ND
				R	0.371	0.300	0.364	0.137	0.377	0.456
16	1-辛烯-3-醇	1	蘑菇香、 玫瑰、柑橘	C	23.510	64.546	67.757	28.245	60.864	84.499
				R	87.008	66.719	89.326	37.806	73.939	95.515
17	2-庚酮	140	杏仁味	C	0.063	ND	0.028	0.016	0.065	0.088
				R	0.068	0.042	ND	0.021	0.340	0.075
18	3-羟基-2- 丁酮	55	黄油味、脂肪味	C	0.073	ND	ND	0.016	0.060	0.081
				R	0.077	0.070	0.067	0.026	0.055	0.103
19	苯酚	3.9	甜香味	C	ND	ND	6.426	1.579	6.000	8.489
				R	7.169	9.664	7.588	3.732	11.440	1.454

醛类物质主要通过脂肪的氧化和降解反应产生,其气味阈值较低,因此对肉的整体风味作出重要贡献^[22]。壬醛来源于油酸的氧化,呈脂肪香味^[23],是两组小尾寒羊宰后成熟过程中的关键性风味物质($ROAV>1$) (表4)。由表3可知,两组小尾寒羊肉中壬醛的相对含量在宰后成熟1 d后显著高于0 d和2~4 d,这与王柏辉等^[24]实验结果相同,并推测可能因为羊肉中的油酸被氧化生成壬醛,含量因此增加^[25-26]。与对照组相比,宰后成熟2~5 d,丁酸梭菌组小尾寒羊肉中壬醛的含量显著降低($P<0.05$),可能的原因是丁酸梭菌的添加降低了小尾寒羊肉中AMPK的活化程度,减少了AMPK对ACC的磷酸化,使肌肉中更多的ACC具有活性,减少了肉中脂肪酸的 β 氧化反应,导致脂肪酸氧化产生的醛类物质含量减少。辛醛和庚醛均为小尾寒羊宰后成熟过程中的关键性风味物质($ROAV>1$) (表4),赋予羊肉脂味、花香和柑橘味。由表3可知,日粮添加丁酸梭菌显著降低了小尾寒羊宰后成熟0~5 d庚醛的相对含量($P<0.05$),同时显著降低了小尾寒羊宰后成熟2、5 d辛醛的相对含量($P<0.05$)。罗玉龙等^[27]研究发现当动物机体抗氧化能力较高时,其脂质氧化产物庚醛、壬醛等含量明显较低。窦露等^[28]发现乳酸菌的添加降低了苏尼特羊肉中庚醛、辛醛的含量。结合以上研究可以推测,丁酸梭菌的添加可能通过提高宰后成熟过程中小尾寒羊的抗氧化能力,进而降低不饱和脂肪酸的氧化程度,最终使得丁酸梭菌组的庚醛和辛醛较对照组低(表3)。十一醛(花香味)仅在丁酸梭菌组中测得(表3),说明日粮添加丁酸梭菌使小尾寒羊肉的风味更加丰富。对照组小尾寒羊肉中反-2-辛烯醛(油脂香)只在宰后成熟2~5 d检测到(表3),单启梅等^[29]推测其原因可能是在成熟过程中肉的部分风味前体物质会转化为另一种物质,或者生成新的物质。十二醛(脂肪香、洋葱味、橙子味)仅在丁酸梭菌组中测得(表3),说明日粮添加丁酸梭菌赋予羊肉独特的洋葱和橙子味。癸醛的阈值较低,是小尾寒羊成熟过程中贡献最大的物质,赋予羊肉橡胶味和油脂味。由表3可知,在宰后成熟0~5 d,丁酸梭菌组小尾寒羊肉中癸醛的含量显著低于对照组($P<0.05$)。由此可知,对照组的羊肉油脂味较重,可能是因为丁酸梭菌的添加使AMPK的含量减少,脂肪酸氧化和甘油三酯的分解能力减弱,也有可能是醛类物质被进一步被氧化成酸和其他物质,导致其含量下降^[30]。

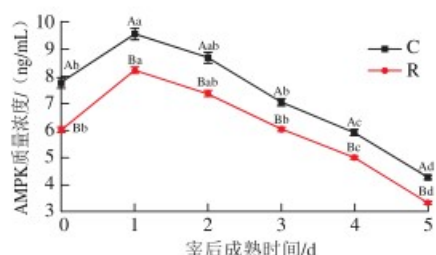
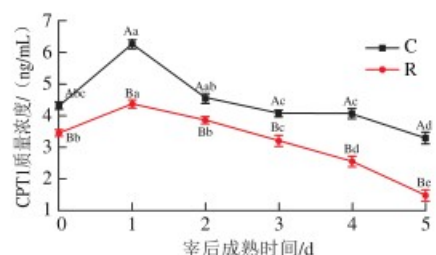
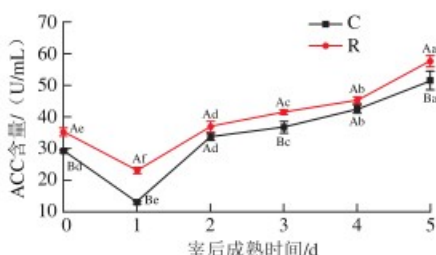
醇类物质由脂肪氧合酶和氢过氧化酶将肌肉中的共轭亚油酸降解产生^[31],虽然醇类的阈值相对于醛类较高,但对羊肉的风味也有很大贡献。1-辛烯-3-醇可呈现

蘑菇香、玫瑰、柑橘味,其阈值较低,是两组小尾寒羊宰后各个成熟时间点的关键风味物质($ROAV>1$) (表4)。两组小尾寒羊背最长肌中1-辛烯-3-醇的相对含量在成熟0~5 d整体呈先增加后减少趋势,在成熟3 d时显著增加($P<0.05$)。与对照组相比,丁酸梭菌组小尾寒羊肉中1-辛烯-3-醇的相对含量在宰后各个成熟点均显著升高($P<0.05$),说明丁酸梭菌组小尾寒羊肉中的蘑菇香味和玫瑰味更加浓烈。酮类化合物是由氨基酸降解和脂肪氧化而产生^[32]。酮类物质对羊肉的贡献虽小于醛类和醇类,但也无法替代。2-庚酮能赋予羊肉杏仁味,是修饰型风味物质($0.1<ROAV<1$) (表4)。由表3可知,两组小尾寒羊宰后成熟3~4 d 2-庚酮的相对含量显著高于成熟0 d和5 d($P<0.05$)。

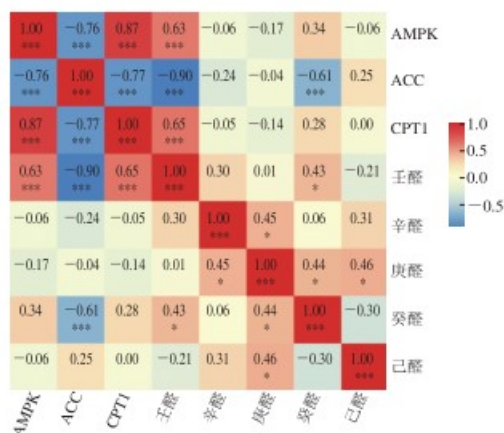
2.3 丁酸梭菌对小尾寒羊宰后成熟过程中脂肪代谢相关酶含量的影响

畜禽屠宰后,肌肉及各细胞内的生物化学反应仍然在进行,但由于失血导致体液平衡被破坏、供氧停止,机体很快进入无氧状态,三磷酸腺苷含量迅速降低, Ca^{2+} 浓度升高,进而激活AMPK调控机体的能量平衡^[33]。AMPK被活化后会迅速抑制ACC活性,同时降低ACC mRNA表达从而减少脂肪酸合成,此外,ACC活性的降低还可以减少丙二酰辅酶A的表达,减弱其对CPT1的抑制作用,加速脂肪酸氧化过程,进而加速脂肪代谢^[34]。

由图2、3可知,两组小尾寒羊肉中AMPK和CPT1的含量均随着宰后成熟时间的延长均呈先升高后降低的趋势,且在宰后成熟1 d两组AMPK和CPT1的含量最高。杨致昊等^[35]在研究苏尼特羊宰后成熟过程中AMPK含量的变化时也得出相似结果;并解释动物被屠宰后,机体从有氧呼吸变为无氧酵解,三磷酸腺苷含量急剧下降,磷酸腺苷/三磷酸腺苷比值随之升高,从而激活了AMPK,导致AMPK含量升高,然而随着宰后成熟时间的延长,由无氧酵解产生的大量乳酸使肌肉中pH值呈下降趋势,当pH值低于酶的最适pH值时,AMPK变性失活,AMPK含量不断下降^[36]。由图4可知,宰后成熟过程中两组小尾寒羊肉中ACC含量先下降后升高,且在宰后成熟1 d含量最低,究其原因可能是AMPK激活后,使得ACC 79位点上的苏氨酸被磷酸化后失活,导致其含量下降^[37-38]。由图2~4可知,丁酸梭菌组AMPK和CPT1的含量在宰后成熟过程中均显著低于对照组($P<0.05$),而ACC含量在宰后成熟0、1、3、5 d显著高于对照组($P<0.05$),其原因可能是丁酸梭菌的添加降低了AMPK活力,AMPK-ACC信号通路受阻,对CPT1的抑制作用增强,导致脂肪酸从头合成增加^[39]。

图2 丁酸梭菌对小尾寒羊宰后成熟过程中AMPK含量的影响 ($n=8$)Fig. 2 Effect of *C. butyricum* supplementation on AMPK content in meat of small-tailed Han sheep during postmortem aging ($n=8$)图3 丁酸梭菌对小尾寒羊宰后成熟过程中CPT1含量的影响 ($n=8$)Fig. 3 Effect of *C. butyricum* supplementation on CPT1 content in small-tailed Han sheep during postmortem aging ($n=8$)图4 丁酸梭菌对小尾寒羊宰后成熟过程中ACC含量的影响 ($n=8$)Fig. 4 Effect of *C. butyricum* supplementation on ACC content in small-tailed Han sheep during postmortem aging ($n=8$)

2.4 脂肪代谢相关酶活性与风味物质的相关性分析

*显著相关 ($P<0.05$)；***极显著相关 ($P<0.001$)。图5 脂肪代谢相关酶活性与关键性风味物质的相关性分析 ($n=8$)Fig. 5 Correlation analysis of lipid metabolism-related enzymes and key flavor substances ($n=8$)

脂肪氧化是脂肪降解的第2阶段，它是将脂肪水解产生的游离脂肪酸进一步氧化生成一些小分子物质（如醛类和酮类），这个过程对肉制品风味有很大贡献^[40]。由图5可知，AMPK和CPT1含量与壬醛含量均呈极显著正相关 ($P<0.001$)，而ACC含量与壬醛和癸醛含量呈极显著负相关 ($P<0.001$)。通过分析脂肪代谢相关酶活性之间的相关性发现，AMPK含量与ACC呈极显著负相关 ($P<0.001$)，而与CPT1的含量呈极显著正相关 ($P<0.001$)，进一步印证了上述实验结果（图2~4）。研究表明AMPK可以调控脂肪酸转移酶对细胞脂肪酸的摄入，AMPK的下游基因ACC可以减弱丙二酰辅酶A的表达，并抑制CPT1活性，而CPT1是脂肪酸 β 氧化的关键限速酶，可以影响脂肪氧化进程。综上，日粮添加丁酸梭菌可能通过调控AMPK-ACC-CPT1通路进而影响小尾寒羊宰后成熟过程中的挥发性风味物质。

3 结论

电子鼻测定结果显示，丁酸梭菌组小尾寒羊肉中的烷类、氢过氧化物和氮氧化合物的含量高于对照组；乳酸菌的添加丰富了宰后成熟过程中小尾寒羊肉中挥发性风味物质的种类；与对照组相比，丁酸梭菌组小尾寒羊肉中的脂肪氧化产物如辛醛、壬醛、癸醛、庚醛均明显降低，说明丁酸梭菌的添加抑制了AMPK含量，使肌肉中ACC表达量增加，加大对CPT1的抑制作用，使肌肉中脂肪氧化反应减弱，从而降低脂质氧化产物的含量；通过ROAV筛选发现丁酸梭菌组的特征风味为洋葱、花香和橙子香味，对照组为油脂、麦芽香和烤坚果味；日粮添加丁酸梭菌降低了宰后成熟过程中小尾寒羊肉中AMPK和CPT1的含量，增加了小尾寒羊肉中ACC含量；相关性结果显示，AMPK和CPT1均与壬醛呈极显著正相关 ($P<0.001$)，而ACC含量与壬醛和癸醛含量呈极显著负相关 ($P<0.001$)。综上，日粮添加丁酸梭菌通过介导AMPK-ACC-CPT1通路进而影响小尾寒羊宰后成熟过程中的挥发性风味物质。

参考文献：

- [1] HUANG C, HOU C, IJAZ M, et al. Proteomics discovery of protein biomarkers linked to meat quality traits in post-mortem muscles: current trends and future prospects: a review[J]. Trends in Food Science & Technology, 2020, 105: 416-432. DOI:10.1016/j.tifs.2020.09.030.
- [2] 姚倩儒, 陈历水, 李慧, 等. 冷鲜肉保鲜包装技术现状和发展趋势[J]. 包装工程, 2021, 42(9): 194-200. DOI:10.19554/j.cnki.1001-3563.2021.09.027.
- [3] WATANABE A, UEDA Y, HIGUCHI M. Effects of slaughter age on the levels of free amino acids and dipeptides in fattening cattle[J]. Animal Science Journal, 2015, 75(4): 361-367. DOI:10.1111/j.1740-0929.2004.00198.x.

- [4] 牛珺, 张丽, 孙宝忠, 等. 西藏“斯布”牦牛宰后成熟过程中挥发性风味物质差异分析[J]. 甘肃农业大学学报, 2017, 52(6): 127-133. DOI:10.13432/j.cnki.jgsau.2017.06.021.
- [5] 王宇, 袁倩, 王柏辉, 等. 腺苷酸活化蛋白激酶活性及其级联效应对肉品质影响研究进展[J]. 食品科学, 2018, 39(17): 298-304. DOI:10.7506/spkx1002-6630-201817047.
- [6] GIANG H H, VIET T Q, OGLE B, et al. Growth performance, digestibility, gut environment and health status in weaned piglets fed a diet supplemented with potentially probiotic complexes of lactic acid bacteria[J]. Livestock Science, 2010, 129(1/3): 95-103. DOI:10.1016/j.livsci.2010.01.010.
- [7] YANG X, ZHANG B, GUO Y, et al. Effects of dietary lipids and *Clostridium butyricum* on fat deposition and meat quality of broiler chickens[J]. Poultry Science, 2010, 89(2): 254-260. DOI:10.3382/ps.2009-00234.
- [8] LIU X, LI S R, WANG Z Y, et al. Effects of dietary lipids and *Clostridium butyricum* on chicken volatile flavour compounds[J]. Indian Journal of Animal Research, 2018, 52(8): 1167-1173. DOI:10.18805/IJAR.V010F.6998.
- [9] JIA Y, JIAN H, LI H, et al. Butyrate stimulates adipose lipolysis and mitochondrial oxidative phosphorylation through histone hyperacetylation-associated β_3 -adrenergic receptor activation in high-fat diet-induced obese mice[J]. Experimental Physiology, 2017, 102(2): 273-281. DOI:10.1113/EP086114.
- [10] 张月, 郭月英, 要铎, 等. 日粮添加乳酸菌对苏尼特羊脂质代谢及肉品质的影响[J]. 食品科学技术学报, 2022, 40(2): 151-160. DOI:10.12301/spxb202100397.
- [11] 窦露, 罗玉龙, 孙雪峰, 等. 苏尼特羊、巴美肉羊和乌拉特山羊的肉品质和挥发性风味物质比较[J]. 食品工业科技, 2020, 41(15): 8-14. DOI:10.13386/j.issn1002-0306.2020.15.002.
- [12] 罗玉龙, 王柏辉, 赵丽华, 等. 苏尼特羊和小尾寒羊的屠宰性能、肉品质、脂肪酸和挥发性风味物质比较[J]. 食品科学, 2018, 39(8): 103-107. DOI:10.7506/spkx1002-6630-201808017.
- [13] 王德宝, 马文淑, 王柏辉, 等. 成熟时间对燕麦羊肉香肠食用品质、脂质氧化及风味物质积累的影响[J]. 食品与发酵工业, 2020, 46(11): 191-198. DOI:10.13995/j.cnki.11-1802/ts.023187.
- [14] 刘登勇, 周光宏, 徐幸莲. 确定食品关键风味化合物的一种新方法: “ROAV”法[J]. 食品科学, 2008, 29(7): 370-374.
- [15] 李培, 牛智有, 朱明, 等. 基于SPME-GC-MS和电子鼻的鱼粉挥发性物质分析[J]. 农业机械学报, 2020, 51(7): 397-405. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2020.07.045.
- [16] BOOTHE D D, ARNOLD J W. Electronic nose analysis of volatile compounds from poultry meat samples, fresh and after refrigerated storage[J]. Journal of the Science of Food & Agriculture, 2010, 82(3): 315-322. DOI:10.1002/jsfa.1036.
- [17] 王亚娜, 王晓香, 王振华, 等. 大足黑山羊宰后成熟过程中挥发性风味物质的变化[J]. 食品科学, 2015, 36(22): 107-112. DOI:10.7506/spkx1002-6630-201522019.
- [18] 肖雄, 张德权, 李铮, 等. 宰后僵直和解僵过程羊肉风味品质分析[J]. 现代食品科技, 2019, 35(6): 287-294. DOI:10.13982/j.mfst.1673-9078.2019.6.038.
- [19] KIM Y H B, MA D, SETYABRATA D, et al. Understanding postmortem biochemical processes and post-harvest aging factors to develop novel smart-aging strategies[J]. Meat Science, 2018, 144: 74-90. DOI:10.1016/j.meatsci.2018.04.031.
- [20] WANG Y, SUN J, ZHONG H, et al. Effect of probiotics on the meat flavour and gut microbiota of chicken[J]. Scientific Reports, 2017, 7(1): 1-13. DOI:10.1038/s41598-017-06677-z.
- [21] 罗玉龙, 赵丽华, 王柏辉, 等. 苏尼特羊不同部位肌肉挥发性风味成分和脂肪酸分析[J]. 食品科学, 2017, 38(4): 165-169. DOI:10.7506/spkx1002-6630-201704026.
- [22] 赵梦瑶, 赵健, 侯莉, 等. 炖煮羊肉香气物质分析鉴定[J]. 食品工业科技, 2016, 37(19): 284-293. DOI:10.13386/j.issn1002-0306.2016.19.047.
- [23] 张娜. 中华绒螯蟹风味物质的研究[D]. 无锡: 江南大学, 2008: 29-31.
- [24] 王柏辉, 韩利伟, 王德宝, 等. 绒山羊宰后成熟过程中羊肉品质和风味的变化分析[J]. 食品工业科技, 2020, 41(8): 230-235. DOI:10.13386/j.issn1002-0306.2020.08.036.
- [25] NIETO G, BANON S, GARRIDO M D. Effect of supplementing ewes' diet with thyme (*Thymus zygis* ssp. *gracilis*) leaves on the lipid oxidation of cooked lamb meat[J]. Food Chemistry, 2011, 125(4): 1147-1152. DOI:10.1016/j.foodchem.2010.09.090.
- [26] VARLET V, KNOCKAERT C, PROST C, et al. Comparison of odor-active volatile compounds of fresh and smoked salmon[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2006, 54(9): 3391-3401. DOI:10.1021/JF053001P.
- [27] 罗玉龙, 刘畅, 李文博, 等. 两种饲养方式下苏尼特羊肉的氧化稳定性[J]. 食品科学, 2019, 40(17): 30-35. DOI:10.7506/spkx1002-6630-20180727-328.
- [28] 窦露, 刘畅, 巴吉木色, 等. 日粮添加乳酸菌对苏尼特羊生长、肉品质、风味物质和抗氧化能力的影响[J]. 食品科学, 2021, 42(1): 25-32. DOI:10.7506/spkx1002-6630-20191217-182.
- [29] 单启梅, 罗瑞明, 杨波, 等. 不同贮藏期冷却滩羊肉煮制后挥发性气味物质的变化[J]. 食品科学, 2022, 43(6): 265-271. DOI:10.7506/spkx1002-6630-20210419-253.
- [30] 马良, 王若兰. 玉米储藏过程中挥发性成分变化研究[J]. 现代食品科技, 2015, 31(7): 316-325. DOI:10.13982/j.mfst.1673-9078.2015.7.049.
- [31] MA Q L, HAMID N, BEKHIT A, et al. Evaluation of pre-rigor injection of beef with proteases on cooked meat volatile profile after 1 day and 21 days post-mortem storage[J]. Meat Science, 2012, 92(4): 430-439. DOI:10.1016/j.meatsci.2012.05.006.
- [32] ZOU Y H, KANG D C, LIU R, et al. Effects of ultrasonic assisted cooking on the chemical profiles of taste and flavor of spiced beef[J]. Ultrasonics Sonochemistry, 2018, 46: 36-45. DOI:10.1016/j.ultrsonch.2018.04.005.
- [33] LIN Z, XIAO J X, SHENG X, et al. Involvement of AMP-activated protein kinase (AMPK) in regulation of cell membrane potential in a gastric cancer cell line[J]. Scientific Reports, 2018, 8(1): 6028. DOI:10.1038/s41598-018-24460-6.
- [34] WITCZAK C A, SHAROFF C G, GOODYEAR L J. Amp-activated protein kinase in skeletal muscle: from structure and localization to its role as a master regulator of cellular metabolism[J]. Cellular & Molecular Life Sciences, 2008, 65(23): 3737-3755. DOI:10.1007/s00018-008-8244-6.
- [35] 杨致昊, 刘畅, 窦露, 等. 苏尼特羊宰后成熟过程中单磷酸腺苷活化蛋白激酶活性、糖酵解与肉品质指标的变化分析[J]. 食品科学, 2022, 43(11): 156-162. DOI:10.7506/spkx1002-6630-20210426-377.
- [36] HARDIE D G. AMP-activated protein kinase: maintaining energy homeostasis at the cellular and whole-body levels[J]. Annual Review of Nutrition, 2012, 34(1): 31-55. DOI:10.1146/annurev-nutr-071812-161148.
- [37] LINGESH A, PAUL D, VGM N, et al. AMPK activating and anti adipogenic potential of *Hibiscus rosa sinensis* flower in 3T3-L1 cells[J]. Journal of Ethnopharmacology, 2019, 233: 123-130. DOI:10.1016/j.jep.2018.12.039.
- [38] JIAO Y, ZHAO J J, ZHANG Z J, et al. Erratum. SRY-Box containing gene 4 promotes liver steatosis by upregulation of SREBP-1c. diabetes[J]. Diabetes, 2018, 67: 2227-2238. DOI:10.2337/db18-0184.
- [39] KWAK M J, TAN P L, OH J K, et al. The effects of multispecies probiotic formulations on growth performance, hepatic metabolism, intestinal integrity and fecal microbiota in growing-finishing pigs[J]. Animal Feed Science and Technology, 2021, 274: 114833. DOI:10.1016/J.ANIFEDSCI.2021.114833.
- [40] MANDAL S, DAHUA A, KAR A, et al. *In vitro* kinetics of soybean lipoxigenase with combinatorial fatty substrates and its functional significance in off flavour development[J]. Food Chemistry, 2014, 146: 394-403. DOI:10.1016/j.foodchem.2013.08.100.