

褚晨晨, 周小勇, 翟云飞, 等. 热改性凹凸棒石对哺乳犊牛瘤胃发酵参数和微生物区系的影响 [J]. 畜牧与兽医, 2026, 58 (5): 23-28.

CHU C C, ZHOU X Y, ZHAI Y F, et al. Effects of thermal-modified attapulgite on rumen fermentation parameters and microflora of suckling calves [J]. Animal Husbandry & Veterinary Medicine, 2026, 58 (5): 23-28.

热改性凹凸棒石对哺乳犊牛瘤胃发酵参数和微生物区系的影响

褚晨晨¹, 周小勇², 翟云飞¹, 韩兆玉^{1*}

(1. 南京农业大学动物科技学院, 江苏 南京 210014;

2. 北京大友汉腾畜牧技术有限公司, 北京 101318)

摘要: 旨在研究热改性凹凸棒石 (thermal-modified attapulgite, T-mAPT) 对哺乳犊牛瘤胃发酵参数和微生物区系的影响。选取 48 头出生体重约 37 kg 且健康的 0~3 日龄的哺乳期犊牛, 随机分为 3 组, 每组 16 头, 每头单独在犊牛岛饲养, 其中对照组 (CON) 饲喂基础日粮, 试验组在基础日粮中分别添加 0.05% (0.05%T-mAPT 组) 和 0.1% (0.1%T-mAPT 组) 的 T-mAPT, 饮奶按照牛场计划进行, 试验期为 63 d。结果: 哺乳期犊牛添加 T-mAPT 后, 与 CON 组相比, 瘤胃内容物总挥发性脂肪酸含量显著升高 ($P<0.05$); 瘤胃微生物菌群的 ACE 指数显著提高 ($P<0.05$); 在门水平上, 瘤胃微生物的优势菌门有拟杆菌门 (Bacteroidetes)、厚壁菌门 (Firmicutes)、变形菌门 (Proteobacteria) 和放线杆菌门 (Actinobacteriota), 厚壁菌门丰度显著升高 ($P<0.05$); 在属水平上, 普雷沃菌属 (*Prevotella*) 和理研菌科 RC9 肠道菌属 (*Rikenellaceae_RC9_gut_group*) 丰度显著升高 ($P<0.05$)。综上, 日粮中添加 T-mAPT 能够提高犊牛瘤胃微生物菌群的丰富度, 促进瘤胃中总挥发性脂肪酸的生成, 有利于犊牛的生长发育。

关键词: 热改性凹凸棒石; 犊牛; 瘤胃; 发酵参数; 微生物区系

中图分类号: S823 文献标志码: A 文章编号: 0529-5130(2026)05-0023-06

Effects of thermal-modified attapulgite on rumen fermentation parameters and microflora of suckling calves

CHU Chenchen¹, ZHOU Xiaoyong², ZHAI Yunfei¹, HAN Zhaoyu^{1*}

(1. College of Animal Science and Technology, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210014, China;

2. Beijing Dairy Cattle Supply Co., Ltd., Beijing 101318, China)

Abstract: The present study was conducted to investigate the effects of thermal-modified attapulgite on rumen fermentation parameters and microflora of suckling calves. A total of 48 healthy suckling calves of 3 to 7 days of age with similar birth weight (37 kg) were randomly divided into 3 groups with 16 calves per group, each of which was kept separately on Calf Island. The control group (CON) was fed with a basal diet, and the experimental groups were fed with a basal diet supplemented with different doses of thermal-modified attapulgite, which were 0.05% (the 0.05%T-mAPT group) and 0.1% (the 0.1%T-mAPT group), respectively. The milk drink was carried out according to the cattle farm plan and the trial period was 63 days. The results were as follows: After the addition of thermal-modified attapulgite to the diet, the total volatile fatty acid content in rumen contents significantly increased ($P<0.05$) in the experimental groups, compared with the control group. The ACE index of rumen microbial flora significantly increased ($P<0.05$). At the phylum level, the predominant phyla of rumen microorganisms were Bacteroidetes, Firmicutes, Proteobacteria, and Actinobacteriota. A significant increase in the abundance of Firmicutes was observed ($P<0.05$). At the genus level, the abundance of *Prevotella* and *Rikenellaceae_RC9_gut_group* significantly increased ($P<0.05$). In conclusion, adding thermal-modified attapulgite to the daily ration enhanced the richness of rumen microbial flora in the suckling calves, promoted the production of total volatile fatty acids in their rumen, and was beneficial to their growth and development.

Keywords: thermal-modified attapulgite; calves; rumen; fermentation parameters; microbial flora

收稿日期: 2025-08-25; 修回日期: 2026-03-16

基金项目: 江苏省自主创新项目 [CX (23) 1045]

第一作者: 褚晨晨, 女, 硕士研究生

* 通信作者: 韩兆玉, 教授, 研究方向为反刍动物生理调控研究, E-mail: zyhan6708@njau.edu.cn.

瘤胃作为反刍动物最重要的消化吸收器官,起着重要的屏障及免疫作用^[1]。反刍动物幼畜的饲养水平和饲养方式等都会影响其消化道的发育。研究表明,反刍动物在幼龄期的瘤胃微生物调控会持续影响到成年后期^[2]。因此,幼龄期反刍动物瘤胃的充分发育对其成年后的健康状况及生产性能的提高至关重要。初生犊牛的瘤胃组织未发育不具备消化功能,随着生长发育,瘤胃的组织形态学发生巨大转变,而固体饲料的摄入能刺激犊牛瘤胃充分发育,说明饲料影响瘤胃微生物组成和代谢功能。瘤胃微生物和宿主之间存在互利共生关系^[3]。因此,调控瘤胃微生物和促进瘤胃发育是保障反刍动物宿主健康的关键。

凹凸棒石(attapulgite, APT)又名坡缕石,是一种层链状结构的镁铝硅酸盐矿物。由于其特殊的孔道结构及棒状晶型,APT具有比表面积大、吸附性强及阳离子交换性能强等特性^[4]。在动物生产中,APT常作为饲料添加剂来吸附动物肠道中霉菌毒素、细菌毒素和致病微生物从而保护消化道黏膜^[5]。此外,APT还具有改善机体免疫及提高动物生产性能和产品品质等功能^[6]。国内外研究者对APT进行了有机和无机改性处理,提高了其生物活性,使其在生产中应用更广泛^[7]。热处理是改性APT的一种有效手段,旨在通过焙烧脱除其不同形态的结合水(包括吸附水、沸石水和结构水),能扩容孔道、增加比表面积并活化吸附位点,最终增强其吸附性能^[8]。王栋等^[9]研究发现,犊牛饲料中添加2 000 mg/kg的APT能够维持肠道微生态平衡和促进机体健康。Zeng等^[10]发现添加3%的APT可有效改善瘤胃发酵性能,其中热改性处理效果尤为显著,热改性凹凸棒石(T-mAPT)显著提高了总挥发性脂肪酸产量及乙酸/丙酸比值,同时降低乳酸积累,提升发酵液pH值,并促进氨氮利用效率。Su等^[11]报道肉鸡日粮中添加改性APT提高了肠黏膜的抗氧化能力,并改善了肠道完整性和屏障功能。然而T-mAPT在犊牛的研究尚缺乏,因此本试验通过在犊牛日粮中添加不同剂量的T-mAPT,探索犊牛瘤胃发酵参数和微生物区系的变化,旨在为T-mAPT在犊牛的生产应用中提供试验依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

T-mAPT粉由江苏神力特生物股份有限公司提供。优质APT原矿去杂及酸化改性后在380~500℃高温烘焙经处理得到T-mAPT粉。

1.2 试验设计和动物饲养

选择出生时间和出生体重(37.76±0.71)kg并

饲喂过初乳的48头哺乳期犊牛,随机分为3组,每组16头。对照组(CON组)饲喂基础日粮,试验组在对照组的基础上添加不同剂量的T-mAPT,添加量分别为0.05%(0.05%T-mAPT组)和0.1%(0.1%T-mAPT组)。试验在南京卫岗乳业有限公司附属奶牛场进行,犊牛饲养在犊牛岛单圈饲养和自由采食,饮奶按照牛场计划进行,试验周期为63d。犊牛基础日粮成分组成及营养组成水平见表1。

表1 犊牛基础日粮组成及营养水平(干物质基础)

原料	含量/%	营养成分	水平/%
玉米	50.00	干物质	88.17
次粉	5.00	粗蛋白	20.87
豆粕	23.00	粗脂肪	4.73
膨化大豆	5.00	粗灰分	7.51
干酒糟及其可溶物	1.80	总钙	0.96
石粉	1.00	总磷	0.47
葡萄糖	10.00		
低蛋乳清粉	3.00		
预混料 ^①	2.00		
双乙酸钠	0.20		
小苏打	0.50		
发酵料	3.00		

注:①每千克预混料中包括:320 000 IU维生素A,16 000 IU维生素D,2 000 IU维生素E,0.7 mg维生素B₁,0.8 mg维生素B₂,1.5 mg维生素B₅,0.7 mg维生素B₆,0.1 mg钴胺素,0.6 mg叶酸,0.2 mg生物素,35 mg铁,4 mg铜,12 mg锌,12.5 mg锰,1.1 mg碘。

1.3 瘤胃样品采集

试验结束前,每组采集5头犊牛瘤胃液。利用瘤胃液采集器经口腔到瘤胃采集瘤胃液,经搅拌后用4层纱布过滤,立即测定pH值。用于测定发酵参数的样品,分装入10 mL离心管中,-20℃冷冻保存;用于送测瘤胃微生物的样品,分装于2 mL冻存管中,密封后-80℃保存。

1.4 瘤胃发酵参数测定

瘤胃液样品采集后立即经4层纱布过滤。随后使用便携式pH计立即测定其pH值。微生物蛋白浓度参考文献[15]的方法测定,通过离心收集微生物菌体,经碱水解后采用福林-酚法于640 nm波长下进行定量。氨态氮浓度采用苯酚-次氯酸钠比色法^[16]测定,在625 nm波长下读取吸光值并根据标准曲线计算。挥发性脂肪酸的测定参照文献[17]的方法并加以改进,样品经离心后,用含内标(2-乙基丁酸)的偏磷酸溶液处理,通过内标法进行定量。

1.5 微生物信息学分析

为了进行细菌多样性分析,微生物 DNA 的提取按照 HiPure Soil DNA 提取试剂盒 (Magen, 广州) 操作指南进行,用带有分子标签 (barcode) 的特异引物扩增 rDNA 的保守区,然后 PCR 扩增产物切胶回收,用 QuantiFluor™ 荧光计进行定量,将纯化的扩增产物进行等量混合,连接测序接头,构建测序文库, Illumina PE250 上机测序。测序工作由广州基迪奥生物科技有限公司完成。对数据进行质控处理,并聚类、去嵌合体,获得操作分类单元 (OTU) 代表序列和丰度信息。使用 UPARSE 流程将有效标签 (clean tag) 按 $\geq 97\%$ 相似度聚类 OTU。物种丰度堆叠图使用 R 语言 ggplot2 包展示,接着使用 R 语言 VennDiagram 包进行 Venn 分析。Chao1、ACE、Shannon、Simpson、Good's coverage 等多样性指数在 QIIME 中计算。最后使用 Omicsmart 动态实时交互在

线数据分析平台 (<http://www.omicsmart.com>) 进行犊牛瘤胃微生物相对丰度、 α 多样性和物种组成 (门、属水平) 分析。

1.6 数据统计与分析

瘤胃发酵参数数据使用 Excel 2019 处理,随后使用 IBM SPSS 27.0 进行单因素方差分析。数据以“平均数 \pm 标准误”表示, $P < 0.05$ 为差异显著。

2 结果与分析

2.1 T-mAPT 对犊牛瘤胃发酵参数的影响

由表 2 可知,日粮中添加 T-mAPT 后,犊牛瘤胃液 pH 值无显著变化,与 CON 组相比,0.05% T-mAPT 组和 0.1% T-mAPT 组总挥发性脂肪酸含量显著升高 ($P < 0.05$),0.05% T-mAPT 组丙酸含量显著升高 ($P < 0.05$)。

表 2 犊牛瘤胃发酵参数的比较分析

指标	CON 组	0.05% T-mAPT 组	0.1% T-mAPT 组
瘤胃液 pH 值	6.42 \pm 0.18	6.46 \pm 0.16	6.58 \pm 0.10
微生物蛋白/ (mg · mL ⁻¹)	0.79 \pm 0.08	0.84 \pm 0.05	0.93 \pm 0.11
氨态氮/ (mg · dL ⁻¹)	11.63 \pm 4.30	14.69 \pm 3.23	13.91 \pm 5.70
总挥发性脂肪酸/ (mmoml · L ⁻¹)	77.07 \pm 3.94 ^b	95.46 \pm 5.85 ^a	94.71 \pm 4.36 ^a
乙酸/ (mmom · L ⁻¹)	46.74 \pm 4.42	54.22 \pm 4.09	53.57 \pm 1.41
丙酸/ (mmom · L ⁻¹)	20.31 \pm 1.31 ^b	26.68 \pm 2.02 ^a	25.45 \pm 1.93 ^{ab}
丁酸/ (mmom · L ⁻¹)	7.73 \pm 1.57	10.63 \pm 2.10	12.31 \pm 1.52
异丁酸/ (mmom · L ⁻¹)	0.85 \pm 0.23	0.79 \pm 0.38	0.83 \pm 0.18
戊酸/ (mmom · L ⁻¹)	1.39 \pm 0.34	1.72 \pm 0.28	2.12 \pm 0.58
异戊酸/ (mmom · L ⁻¹)	1.43 \pm 0.49	3.15 \pm 1.34	2.54 \pm 0.74
乙酸/丙酸	2.36 \pm 0.31	2.11 \pm 0.29	2.15 \pm 0.15

注:同行数据肩标不同字母表示差异显著 ($P < 0.05$)。

2.2 T-mAPT 对犊牛瘤胃微生物区系的影响

2.2.1 犊牛瘤胃微生物 OTU 及相对丰度分析

如图 1A 所示,本次测序共得 OTU 1 354 条,CON 组共获得 779 条 OTU,0.05% T-mAPT 组有 862 条 OTU,0.1% T-mAPT 组有 853 条 OTU,其中 CON 组独有 OTU 为 183 个,0.05% T-mAPT 组独有 OTU 为 235 个,0.1% T-mAPT 组独有 OTU 为 250 个。Rank 丰度曲线能够表示样品所含物种的丰富程度和均匀程度,图 1B 中曲线下下降平缓,说明该群落的物种分布均匀,样本量的测序深度足够覆盖样品中所有物种。

2.2.2 犊牛瘤胃微生物 α 多样性分析

如图 2 所示,与 CON 组相比,0.05% T-mAPT 和 0.1% T-mAPT 组的丰富度指数 ACE 显著升高

($P < 0.05$), Chao 指数和多样性指数 Shannon、Simpson 均差异不显著。

2.2.3 犊牛瘤胃微生物物种组成 (门、属水平) 分析

如图 3A 所示,在门水平上,排名前十的菌门分别为拟杆菌门 (Bacteroidota)、厚壁菌门 (Firmicutes)、变形菌门 (Proteobacteria)、放线杆菌门 (Actinobacteriota)、螺旋体门 (Spirochaetota)、脱硫菌门 (Desulfobacterota)、髌骨细菌门 (Patescibacteria)、互氧菌门 (Synergistota)、广古菌门 (Euryarchaeota) 和弯曲菌门 (Campilobacterota),其中瘤胃微生物的优势菌门有拟杆菌门、厚壁菌门、变形菌门和放线杆菌门。添加 T-mAPT 后,犊牛瘤胃中厚壁菌门相对丰度显著升高 ($P < 0.05$) (图 3B)。如图 3C 所示,在

属水平上,排名前十的菌属分别为普雷沃菌属 (*Prevotella*)、理研菌科 RC9 肠道菌属 (*Rikenellaceae_RC9_gut_group*)、拟普雷沃菌属 (*Alloprevotella*)、解琥珀酸菌属 (*Succiniclasticum*)、未分类 UCG-005、瘤胃球菌属 (*Ruminococcus*)、琥珀酸弧菌科 UCG-001 (*Succinivibrionaceae_UCG-001*)、未分类 UCG-002、

未分类 U29-B03、克里斯滕森菌科 R-7 群 (*Christensenellaceae_R-7_group*)。0.05% T-mAPT 和 0.1% T-mAPT 组中犊牛瘤胃中的普雷沃菌属和理研菌科 RC9 肠道菌属丰度较 CON 组显著升高 ($P < 0.05$) (图 3D)。

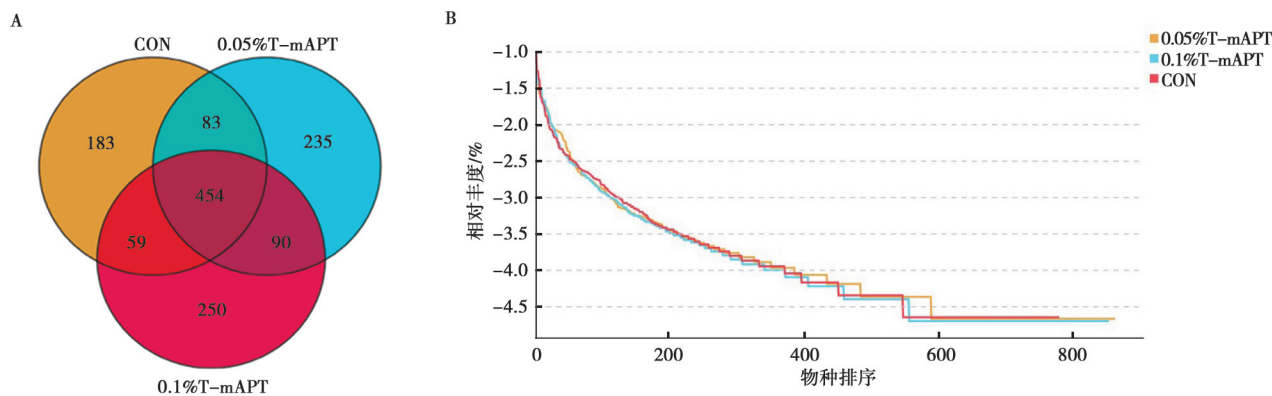


图 1 犊牛瘤胃微生物韦恩图 (A) 和相对丰度分析 (B)

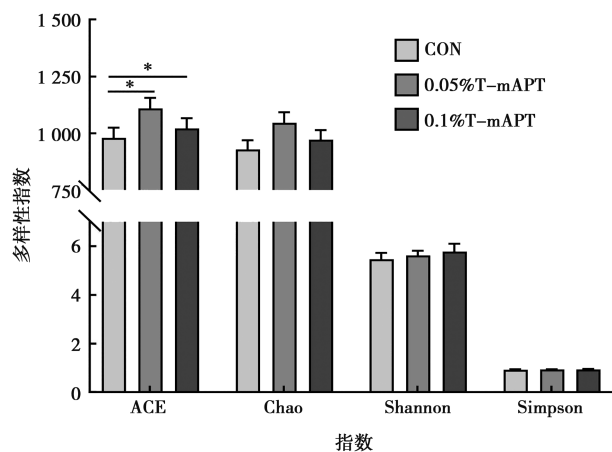


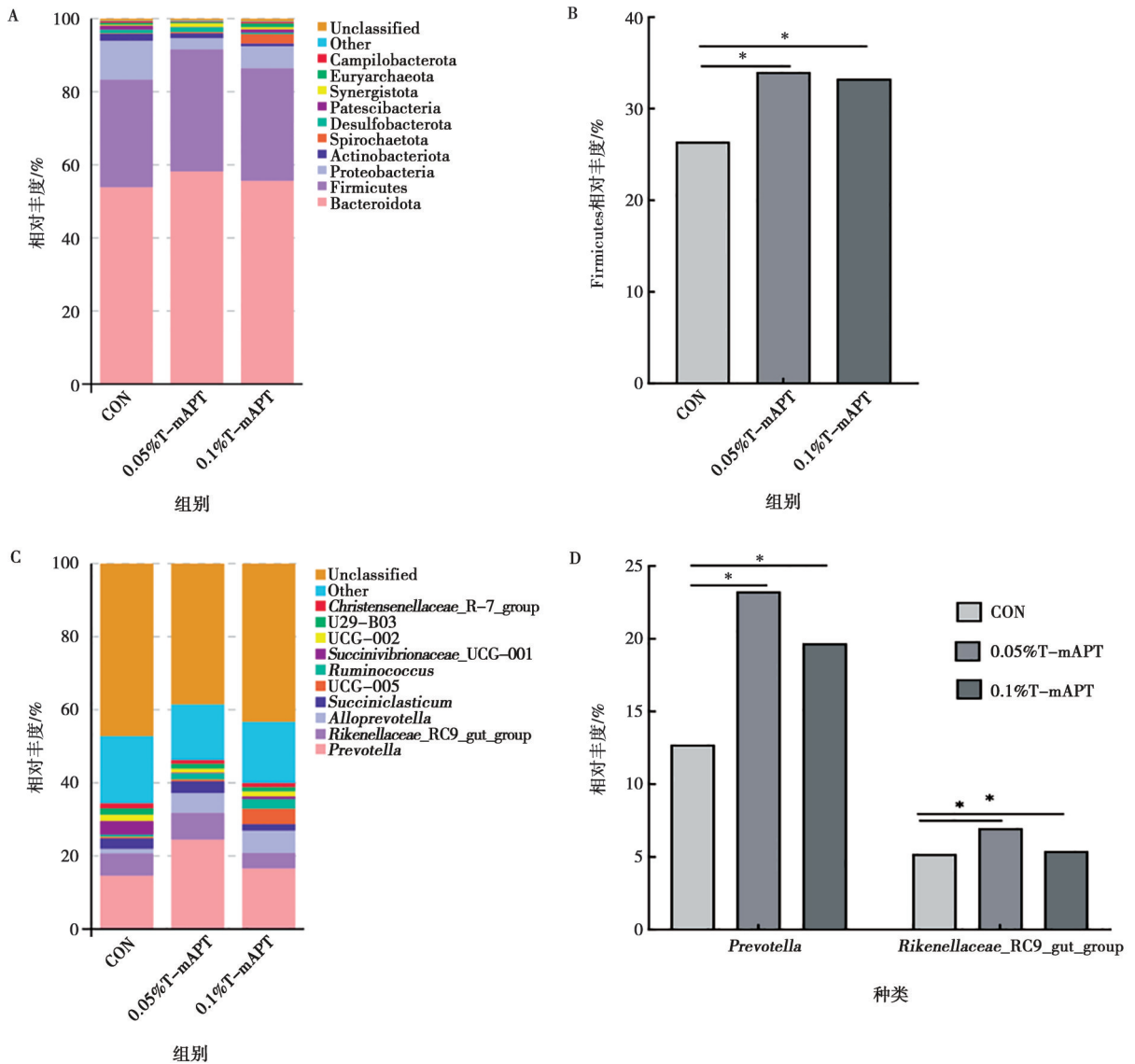
图 2 犊牛瘤胃微生物 α 多样性分析

3 讨论

3.1 T-mAPT 对犊牛瘤胃发酵参数的影响

瘤胃发酵参数能够衡量瘤胃微生物系统代谢的平衡状况^[12]。瘤胃液 pH 值能够反映出瘤胃发酵的健康程度,本试验中,犊牛瘤胃液 pH 值在 6.42 ~ 6.58,属于正常范围 (5.5 ~ 7.7)^[13],说明添加 T-

mAPT 能够维持犊牛瘤胃发酵的健康状况。氨态氮是微生物蛋白质合成的重要原料,其含量直接影响到饲料蛋白的分解效率及瘤胃微生物氮素利用效率。随着饲料中微生物活力的提高,蛋白利用效率也随之提高^[14]。瘤胃液 $\text{NH}_3\text{-N}$ 浓度的适宜范围在 6.3 ~ 27.5 $\text{mg} \cdot \text{dL}^{-1}$ ^[15],添加量为 0.05% 和 0.1% 的 T-mAPT 组的 $\text{NH}_3\text{-N}$ 浓度较 CON 组分别提高了 26.31% 和 19.60%,并且都处于适宜浓度范围中。汪长建^[16]研究表明凹凸棒土、植物精油与低聚壳聚糖三者的协同共存是显著提升犊牛瘤胃 $\text{NH}_3\text{-N}$ 浓度并促进瘤胃发育的关键,缺失其中任一均无此效果。挥发性脂肪酸是影响瘤胃上皮细胞增殖和生长的主要物质,对瘤胃组织的发育及正常的生理功能具有重要作用^[17],其主要成分为乙酸、丙酸和丁酸。丙酸作为反刍动物体内关键的糖异生前体物质,其含量升高能够显著提升机体的能量利用效率,当瘤胃内丙酸比例增加时,可为反刍动物提供更多代谢可利用能量^[18]。在本试验中,添加量为 0.05% 的 T-mAPT 显著增加了犊牛的总挥发性脂肪酸和丙酸浓度,表明在饲粮中添加适量的 T-mAPT 可能通过调控瘤胃微生物发酵模式,促进丙酸型发酵的形成,从而优化能量代谢途径,提高饲料能量转化效率。



A. 门水平不同菌群; B. 厚壁菌门; C. 属水平不同菌群; D. 普雷沃菌属和理研菌科 RC9 肠道菌属。

图3 门、属水平下犊牛瘤胃菌群相对丰度比较

3.2 T-mAPT 对犊牛瘤胃微生物区系的影响

犊牛的营养代谢过程中，瘤胃微生物群落扮演着核心枢纽角色，其菌群结构（包括组成、丰度及活性）直接决定了日粮养分被分解为挥发性脂肪酸、微生物蛋白等营养物质的速度与程度，即消化发酵模式，也成为影响犊牛饲料转化率及健康水平的关键内在因素。本试验结果显示，0.05% T-mAPT 和 0.1% T-mAPT 组特有的 OTU 条数高于 CON 组，并且 0.05% T-mAPT 和 0.1% T-mAPT 组的丰富度指数 ACE 显著高于 CON 组，表明添加 T-mAPT 增加了犊牛瘤胃微生物多样性。犊牛瘤胃菌群中的优势菌门包括拟杆菌门和厚壁菌门^[19]。本试验中的优势菌门依次为拟杆菌门、厚壁菌门和变形菌门，与上述研究结果一致，说明添加 T-mAPT 对犊牛瘤胃菌群的组成

没有影响。与 CON 组相比，添加了 T-mAPT 组的厚壁菌门相对丰度显著升高。厚壁菌门对犊牛体内能量利用起着重要作用，能够分解纤维类物质^[20]，有利于挥发性脂肪酸（乙酸、丙酸等）的转化，这也与前文中丙酸浓度显著增加有关联。Li 等^[21]研究证实，在犊牛日粮中添加 APT 及其他抗菌添加剂能够提高犊牛瘤胃微生物菌群丰度，并促进瘤胃健康。在属水平上，有研究表明普雷沃氏菌属是反刍动物瘤胃菌群的优势菌属^[22]，对维持瘤胃微生物系统的平衡有着重要作用。普雷沃氏菌属不仅能够有效降解多种非纤维碳水化合物，还能够促进瘤胃内环境的健康发展，提高宿主动物的营养吸收效率^[23]。在本试验中，瘤胃液中丰度最高的属是普雷沃氏菌属，与上述研究结果一致。与对照组相比，添加了 T-mAPT 组的普雷

沃氏菌属和理研菌科 RC9 菌属相对丰度显著升高。王新玲等^[24]研究表明,在属水平上对排名前 30 微生物的分析发现,壳寡糖/ZnO/凹凸棒石复合剂显著改变了湖羊的瘤胃菌群结构。尤为显著的是,理研菌科 RC9 菌属的相对丰度在复合剂组中呈现显著上升,这与本研究一致。日粮纤维含量是驱动理研菌科 RC9 菌属丰度的关键因素,该菌属在纤维素降解过程中起着积极作用^[25]。结果表明 T-mAPT 有利于犍牛瘤胃中纤维降解菌的增加。

综上,日粮中添加 T-mAPT 能够增加犍牛瘤胃微生物多样性,通过调控瘤胃微生物发酵模式,促进丙酸型发酵的形成,同时对瘤胃菌群丰度具有调节作用,有利于犍牛瘤胃中纤维降解菌的增加。

参考文献:

- [1] 刘军花,张凯,毛胜勇,等.反刍动物瘤胃营养生理研究进展[J].动物营养学报,2022,34(10):6178-6184.
- [2] ABECIA L, MARTÍN-GARCÍA A I, MARTÍNEZ G, et al. Nutritional intervention in early life to manipulate rumen microbial colonization and methane output by kid goats postweaning [J]. J Anim Sci, 2013, 91 (10): 4832-4840.
- [3] STEELE M A, PENNER G B, CHAUCHEYRAS-DURAND F, et al. Development and physiology of the rumen and the lower gut: targets for improving gut health [J]. J Dairy Sci, 2016, 99 (6): 4955-4966.
- [4] KANG C, GAO L, ZHU H, et al. Adsorption of Hg (II) in solution by mercaptofunctionalized palygorskite [J]. Environ Sci Pollut Res Int, 2021, 28 (46): 66287-66302.
- [5] TANG C H, WANG X Q, ZHANG J M. Effects of supplemental palygorskite instead of zinc oxide on growth performance, apparent nutrient digestibility and fecal zinc excretion in weaned piglets [J]. Animal Science Journal, 2014, 85 (4): 435-439.
- [6] CHEN Y, GONG X, LI G, et al. Effects of dietary alfalfa flavonoids extraction on growth performance, organ development and blood biochemical indexes of Yangzhou geese aged from 28 to 70 days [J]. Anim Nutr, 2016, 2 (4): 318-322.
- [7] 袁勇,文伟,冯智茂,等.凹凸棒石的作用机制及其在动物生产中的应用[J].动物营养学报,2020,32(6):2533-2542.
- [8] 张婧.凹凸棒土处理含铅废水与高氟水的吸附热力学及机理研究[D].北京:北京大学,2008.
- [9] 王栋,杜垣逸,郑铎,等.饲料中添加凹凸棒土对荷斯坦犍牛生长性能、腹泻率、血清生化指标和肠道菌群的影响[J].动物营养学报,2021,33(12):6843-6852.
- [10] ZENG H F, LIN L J, XI Y M, et al. Effects of raw and heated palygorskite on rumen fermentation *in vitro* [J]. Applied Clay Science, 2017, 138: 125-130.
- [11] SU Y, CHEN Y, CHEN L, et al. Effects of different levels of modified palygorskite supplementation on the growth performance, immunity, oxidative status and intestinal integrity and barrier function of broilers [J]. J Anim Physiol Anim Nutr (Berl), 2018, 102 (6): 1574-1584.
- [12] 解彪,张乃锋,张春香,等.粗饲料对幼龄反刍动物瘤胃发育的影响及其作用机制[J].动物营养学报,2018,30(4):1245-1252.
- [13] LIU Q, WANG C, HUANG Y X, et al. Effects of Sel-Plex on rumen fermentation and purine derivatives of urine in Simmental steers [J]. J Anim Feed Sci, 2007, 16 (Suppl 2): 133-138.
- [14] HOSSEINI S H, MIRZAEI-ALAMOUTI H, VAZIRIGOHAR M, et al. Effects of whole milk feeding rate and straw level of starter feed on performance, rumen fermentation, blood metabolites, structural growth, and feeding behavior of Holstein calves [J]. Anim Feed Sci Technol, 2019, 255: 114238.
- [15] KAZEMI-BONCHENARI M, SALEM A Z M, LÓPEZ S. Influence of barley grain particle size and treatment with citric acid on digestibility, ruminal fermentation and microbial protein synthesis in Holstein calves [J]. Animal, 2017, 11 (8): 1295-1302.
- [16] 汪长建.不同组合抗菌材料对哺乳犍牛生长和健康以及瘤胃微生物区系的影响[D].南京:南京农业大学,2023.
- [17] GÓRKA P, KOWALSKI Z M, ZABIELSKI R, et al. Invited review: Use of butyrate to promote gastrointestinal tract development in calves [J]. J Dairy Sci, 2018, 101 (6): 4785-4800.
- [18] ZHANG C, ZHANG J, YU Z, et al. Effects of supplementation with *Saccharomyces cerevisiae* products on dairy calves: a meta-analysis [J]. J Dairy Sci, 2022, 105 (9): 7386-7398.
- [19] GUO W, NIEKERK J K V, ZHOU M, et al. Longitudinal assessment revealed the shifts in rumen and colon mucosal-attached microbiota of dairy calves during weaning transition [J]. J Dairy Sci, 2021, 104 (5): 5948-5963.
- [20] EVANS N J, BROWN J M, MURRAY R D, et al. Characterization of novel bovine gastrointestinal tract *Treponema* isolates and comparison with bovine digital dermatitis treponemes [J]. Appl Environ Microbiol, 2011, 77 (1): 138-147.
- [21] LI S, WANG C, ZENG H, et al. Effects of different combinations of antibacterial compound supplements in calf pellets on growth performance, health, blood parameters, and rumen microbiome of dairy calves [J]. Front Vet Sci, 2024, 11: 1376758.
- [22] LIU Y Z, CHEN X, ZHAO W, et al. Effects of yeast culture supplementation and the ratio of non-structural carbohydrate to fat on rumen fermentation parameters and bacterial-community composition in sheep [J]. Anim Feed Sci Technol, 2019, 249: 62-75.
- [23] 张洁,张力莉,徐晓锋.反刍动物瘤胃内普雷沃氏菌的研究进展[J].中国饲料,2020(7):17-21.
- [24] 王新玲,李书杰,林红,等.壳寡糖/ZnO/凹凸棒石复合剂对湖羊瘤胃微生物区系和瘤胃液代谢组学的影响[J].南京农业大学学报,2022,45(1):174-182.
- [25] ZHANG X M, MEDRANO R F, WANG M, et al. Corn oil supplementation enhances hydrogen use for biohydrogenation, inhibits methanogenesis, and alters fermentation pathways and the microbial community in the rumen of goats [J]. J Anim Sci, 2019, 97 (12): 4999-5008.