

纪春晓, 王东亮, 聂祝运, 等. 后生元对断奶仔猪生长性能、血清生化指标的影响及抗蓝耳病效果研究 [J]. 畜牧与兽医, 2025, 57 (12): 59-67.
JI C X, WANG D L, NIE Z Y, et al. Effects of postbiotics on growth performance, serum biochemistry, and anti-PRRSV efficacy in weaned piglets [J]. Animal Husbandry & Veterinary Medicine, 2025, 57 (12): 59-67.

后生元对断奶仔猪生长性能、血清生化指标的影响及抗蓝耳病效果研究

纪春晓¹, 王东亮¹, 聂祝运^{1,2}, 刘剑英¹, 徐子文¹, 向源德¹,
田伟³, 印遇龙², 唐宇龙^{2*}

1. 湖南农业大学动物医学院, 湖南 长沙 410128;
2. 中国科学院亚热带农业生态研究所, 湖南 长沙 410125;
3. 山东合正生物科技有限公司, 山东 济南 250000

摘要: 旨在探讨后生元制剂对断奶仔猪生长性能、血液指标以及蓝耳病病原猪繁殖与呼吸综合征病毒 (PRRSV) 感染抵抗力的影响。断奶仔猪饲喂试验采用 24 头“杜长大”健康断奶仔猪, 分为对照组、低剂量后生元组和高剂量后生元组, 连续饲喂 35 d, 检测后生元对其生长性能、血常规及血清生化指标的影响, 并评估后生元对仔猪抗蓝耳病的效果。结果: 添加后生元可以显著提高仔猪体重与日增重 ($P<0.05$), 改善料重比并显著降低腹泻发生率 ($P<0.05$), 断奶后第 14~35 天, 高剂量后生元组的平均日增重达 (0.53 ± 0.03) kg, 腹泻率降至 0。血常规及血清生化分析表明, 高剂量后生元组血红蛋白浓度显著升高, 白蛋白与总蛋白水平提升 ($P<0.05$), 提示其对机体造血功能及蛋白质代谢具有一定促进作用。PRRSV 攻毒试验表明, 后生元组病毒载量较对照组显著降低, 后生元组抗体滴度显著低于对照组 ($P<0.01$), 肺部组织病理损伤明显缓解, 终末体重、日增重提升, 料重比改善 ($P<0.01$)。体外试验显示, 后生元在非毒性剂量下能有效抑制 PRRSV 复制。综上, 后生元制剂可显著提高断奶仔猪的生产性能, 改善营养代谢指标, 并在 PRRSV 感染过程中表现出良好的抗病毒潜力, 具有良好的推广应用前景。

关键词: 后生元; 断奶仔猪; PRRSV; 生长性能; 抗病毒

中图分类号: S828 **文献标志码:** A **文章编号:** 0529-5130(2025)12-0059-09

Effects of postbiotics on growth performance, serum biochemistry, and anti-PRRSV efficacy in weaned piglets

JI Chunxiao¹, WANG Dongliang^{1,2}, NIE Zhuyun^{1,2}, LIU Jianying¹, XU Ziwen¹, XIANG Yuande¹,
TIAN Wei³, YIN Yulong², TANG Yulong^{2*}

1. College of Veterinary Medicine, Hunan Agricultural University, Changsha 410128, China;
2. Institute of Subtropical Agricultural Ecology, Chinese Academy of Sciences, Changsha 410125, China;
3. Hezheng Biology, Jinan 250000, China)

Abstract: This study aimed to investigate the effects of postbiotics supplementation on growth performance, blood parameters, and resistance to porcine reproductive and respiratory syndrome virus (PRRSV) infection in weaned piglets. A feeding trial was conducted using 24 healthy “Duroc × Landrace × Yorkshire” weaned piglets, which were divided into a control group, a low-dose postbiotics group, and a high-dose postbiotics group. The piglets were fed continuously for 35 days, and the effects of postbiotics on growth performance, blood routine parameters, and serum biochemistry were assessed. The results showed that postbiotics supplementation significantly increased body weight and average daily gain ($P<0.05$), improved the feed-to-gain ratio, and significantly reduced the incidence of diarrhea ($P<0.05$), in the weaned piglets. From days 14 to 35 post-weaning, the high-dose postbiotics group achieved an average daily gain of (0.53 ± 0.03) kg/d, and their diarrhea rate dropped to 0. The blood routine and serum biochemical analyses showed that the high-dose postbiotics group exhibited a significant increase in hemoglobin concentration, as well as elevation at albumin and total protein levels ($P<0.05$), suggesting a

收稿日期: 2025-07-16; 修回日期: 2025-10-11

基金项目: 国家自然科学基金项目 (U23A20232); 湖南省自然科学基金项目 (2023JJ50314)

第一作者: 纪春晓, 女, 博士, 讲师

* 通信作者: 唐宇龙, 博士, 副研究员, 研究方向为益生菌饲料添加剂与抗病研究, E-mail: tangyulong@isa.ac.cn.

potential promoting effect on hematopoietic function and protein metabolism. The PRRSV challenge test demonstrated that the postbiotics groups had a significantly lower viral load compared with the control group, along with a significantly lower antibody titer ($P < 0.01$). Additionally, pathological lung tissue damage in the piglets was markedly alleviated, while their final body weight and average daily gain increased, and the feed-to-gain ratio improved ($P < 0.01$) in them. The in vitro experiments revealed that postbiotics effectively inhibited PRRSV replication at non-toxic doses. In conclusion, postbiotics supplementation significantly enhanced the production performance of weaned piglets, improved their nutritional metabolism indicators, and exhibited considerable antiviral potential against PRRSV infection; which indicated promising prospects for widespread application in pig production.

Keywords: postbiotics; weaned piglets; PRRSV; growth performance; antiviralness

近年来,随着动物源性抗生素使用的限制与耐药性问题的加剧,微生态制剂作为绿色、高效、安全的替代策略受到广泛关注。后生元(postbiotics)是指益生菌在生长、代谢或裂解过程中产生的功能性产物及灭活菌体成分的混合物,主要包括有机酸、细菌素、酶类、多糖、维生素、胞外多肽及细胞壁成分等^[1]。相比传统益生菌,后生元不含活菌,在加工、储运及饲养过程中更为稳定,不受胃酸、胆盐等因素影响,同时避免了菌群移位或感染等潜在安全隐患^[2-3]。随着分析技术和菌种研究的深入,后生元的功能逐渐明确,表现出抗菌、抗炎、调节免疫、促进肠道健康等多种生物学效应,正成为动物健康干预的重要研究方向之一^[4-5]。

在养猪生产中,断奶阶段是仔猪面临营养应激、免疫低下与肠道失衡等问题的高发期。断奶应激可导致肠道屏障功能下降、病原易感性上升,腹泻频发、生长性能下降,严重影响经济效益^[6]。已有研究表明,后生元可通过改善肠道菌群组成、增强肠黏膜结构完整性、抑制炎症反应等机制,显著提高采食量与日增重,降低腹泻发生率^[7-8]。同时,后生元作为饲料添加剂的安全性较高,便于长期使用,具备良好的推广前景。

除用于营养支持外,后生元在动物病毒性疾病的辅助防控中也逐渐展现潜力。已有研究发现,多种乳酸菌来源的后生元可通过抑制病毒吸附与复制、诱导抗病毒因子的表达、增强黏膜免疫反应等途径,在体内均表现出一定的抗病毒能力^[9-10]。鼠李糖乳杆菌和植物乳杆菌发酵产物对肠道病毒、流感病毒和疱疹病毒等均具有明显抑制作用^[11]。这为后生元应用于猪蓝耳病(PRRS)等疫病的综合防控提供了新的思路。

本研究选用多种益生菌联合发酵制备后生元,分别在断奶仔猪营养试验和猪繁殖与呼吸综合征病毒(PRRSV)攻毒模型中进行验证。通过比较其在促进生长性能、改善血液及生化指标、降低腹泻率,以及提高 PRRSV 感染抵抗力等方面的作用,为后生元在生猪健康养殖中的科学应用提供理论依据和试验支撑。

1 材料与方法

1.1 试验材料

24头同批次健康状况良好的21日龄健康仔猪,12头30日龄非洲猪瘟病毒(ASFV)、PRRSV核酸及抗体阴性的健康仔猪,购自湖南新五丰猪场。非洲绿猴胚胎肾细胞(MARC-145)、高致病性PRRSV(WH-1)、青春双歧杆菌(*Bifidobacterium adolescentis*)、动物双歧杆菌(*Bifidobacterium*)、短双歧杆菌(*Bifidobacterium*)、瑞士乳杆菌(*Lactobacillus helveticus*)、罗伊氏黏液乳杆菌(*Lactobacillus reuteri*)、植物乳杆菌(*Lactobacillus plantarum*),均由中国科学院亚热带农业生态研究所保存。TaKaRa MiniBESTU niversal RNA Extraction kit、PrimeScript™ RT reagent Kit、TB Green® Premix Ex Taq™均购自TaKaRa Bio公司。PRRSV Antibody ELISA Kit购自科自生物股份有限公司。PBS缓冲液购于美伦生物公司。乙醇、二甲苯购于上海沪试有限公司。多聚甲醛固定液、中性树脂胶购于上海碧云天生物科技。

1.2 后生元制作工艺

后生元制备所需菌种:青春双歧杆菌,动物双歧杆菌,短双歧杆菌,瑞士乳杆菌,罗伊氏黏液乳杆菌,植物乳杆菌。

将上述混合菌群与复合牛初乳蛋白、酵母蛋白、乳清蛋白等物质混合,用1 mmol/L NaOH溶液和1 mmol/L HCl溶液将pH值调至6.5~7.0,37℃发酵60~70 h后,进行37℃与40℃变温发酵,交替5 h循环4~5次,吸附发酵液中营养物质与微量元素,经超高温瞬时灭活(UHT),10 000 r/min离心,去除上清液,剩余沉淀干燥后与吸附的营养物质和代谢产物混合即为后生元制剂。

1.3 后生元细胞毒性测定

将 Marc-145 细胞以 2×10^5 个/孔接种于 96 孔板中,置于细胞培养箱以 37℃、5% CO₂ 条件培养至其长成单层细胞。将后生元稀释得到浓度分别为 1、10、100、1 000 μg/mL 的后生元液,分别为后生元组 1、2、3 和 4。将 100 μL 每个浓度的后生元液加入 96 孔板中,每个浓度设置 5 个重复孔,对照组用

100 μL PBS 代替。将培养板在培养箱中孵育 24 h。使用 CCK8 法检测细胞毒性。使用全自动分光光度计在 450 nm (检测波长) 和 600 nm (参比波长) 下测定吸光度值。各孔的吸光度值 (A) 按公式 $A = A_{450\text{nm}} - A_{600\text{nm}}$ 计算。以阴性对照孔 (仅加 PBS) 的 A 值均值为 100% 细胞存活率基准。处理组细胞存活率按以下公式计算: 细胞存活率 = $A_{\text{处理组}} \div A_{\text{阴性对照}} \times 100\%$ 。

1.4 病毒扩增与滴度测定

PRRSV 扩增与滴度测定方法参考课题组前期研究^[12]。

1.5 后生元体外抗病毒作用检测

采用 24 孔板培养 MARC-145 至其长成单层细胞, 在孔中加入 100 TCID₅₀/100 μL 的 WH-1 稀释液 100 μL 感染 MARC145 细胞。1 h 后吸出稀释液, 用 PBS 清洗单层细胞, 分别加入浓度为 1, 10, 100 $\mu\text{g}/\text{mL}$ 的后生元稀释液, 分别为后生元组 1、2、3。在未经处理的感染细胞中, 用 PBS 代替接种液 (对照组)。24 h 后将 24 孔板放置于 -80 $^{\circ}\text{C}$ 冰箱反复冻融 3 次, 收集所有经过处理和未经过处理细胞的上清液。病毒 RNA 的提取按照 TaKaRa 的 RNA 提取试剂盒的操作说明书进行, 从收集上清液中提取病毒 RNA。以提取的病毒 RNA 为模板, 按照 TaKaRa 逆转录试剂盒的说明书操作, 进行反转录, 反应体系: PrimeScript RT Master Mix 2 μL , RNA 2 μL , ddH₂O 6 μL 。反应条件: 37 $^{\circ}\text{C}$ 15 min, 85 $^{\circ}\text{C}$ 5 s, 4 $^{\circ}\text{C}$ 保温, 并将获得的 cDNA 放置 -20 $^{\circ}\text{C}$ 保存备用。以上述 cDNA 作为模板, 按照 TaKaRa 染料法荧光定量试剂盒说明书进行实时荧光定量 PCR (qPCR) 反应, 上游引物为 5'-CAATGCCAGGGTGTGG-3', 下游引物为 5'-TGGTCATTCGTGCAATCGGA-3', 得出各个样品 Ct 值。

1.6 试验设计

1.6.1 仔猪生长性能和血清生化指标检测

选取体重相近、无跛脚、健康状况良好的 21 日龄、体重为 (6.5 \pm 0.2) kg 的同批次“杜长大”健康仔猪 24 头, 随机分为 3 组, 每组 8 头, 单栏饲养。试验开始前所有仔猪, 采用基础日粮饲喂 5 d。试验分为对照组、低剂量后生元组和高剂量后生元组, 在基础饲料中分别添加 0.1% (1 kg/t) 和 0.5% (5 kg/t) 后生元, 试验期 35 d。于正式试验第 1、14 和 35 天 8:00, 进行个体称重, 计算平均日增重。试验期间, 统计饲料消耗量, 计算平均日采食量, 并计算料重比。正式试验期间, 分别于每天 08:00、13:00 和 18:00, 由相同人员负责逐头观察试验仔猪粪便排泄情况, 记录腹泻仔猪头数和天数, 并以重复为单位计算腹泻率。腹泻率计算公式如下: 腹泻

率 = (腹泻仔猪头数 \times 试验仔猪腹泻天数) / (试验仔猪总头数 \times 正试期天数) \times 100%。

试验结束时, 用有抗凝剂和无抗凝剂的采血管经前腔静脉采集全血样本, 有抗凝剂的血液样品于 4 $^{\circ}\text{C}$ 保存, 无抗凝剂的血液样本尽快放入离心机中进行离心, 离心条件为: 4 000 r/min、4 $^{\circ}\text{C}$ 、10 min。离心后, 取上清液即为血清样本, 于 -20 $^{\circ}\text{C}$ 保存。抗凝血和血清分别用于血常规和生化指标检测。

1.6.2 PRRSV 攻毒试验

选用 12 头 30 日龄 PRRSV/ASFV 核酸及抗体阴性健康仔猪, 随机分为 2 组, 每组 6 头猪。

后生元组: 预饲喂 0.5% 后生元全价粮 10 d 后, 接种 PRRSV WH-1 株 (1 000 TCID₅₀), 攻毒方式为颈侧肌肉注射 0.5 mL + 双侧鼻孔滴注 0.5 mL (每侧 0.25 mL); 对照组: 饲喂全价粮, 攻毒方式同后生元组。攻毒后观察 29 d。记录初始体重、终末体重、每日采食量, 用于评估生长性能。定期通过实时荧光定量 PCR 检测口鼻拭子中的病毒载量。试验结束时, 对存活猪采血, 通过 ELISA 检测抗体水平, 然后对试验猪进行人道处死, 进行剖检和组织采样。

采集组织并切取 1 cm \times 1 cm \times 1 cm 组织块, 置于 4% 多聚甲醛固定液中进行固定。

1.7 基础日粮

基础日粮参照 NRC (2012) 配置, 日粮组成及营养成分如表 1 所示。

1.8 血液常规分析与血清生化指标检测

采集的血液采用全自动动物血液细胞分析仪 (BC-5000VET) 测定血液常规指标, 包括血红蛋白 (HGB)、白细胞计数 (WBC)、红细胞计数 (RBC)、红细胞体积分布宽度 (RDW)、平均红细胞体积 (MCV)、红细胞压积 (HCT)、平均血红蛋白含量 (MCH)、红细胞平均血红蛋白浓度 (MCHC)、血红蛋白浓度 (HGB)。

血清样本按照编号准确放入血清生化分析仪中分别检测总蛋白 (TP)、白蛋白 (ALB)、球蛋白 (GLB)、总胆固醇 (TC)、尿素氮 (BUN)、葡萄糖 (GLU)、甘油三酯 (TG)、肌酐 (SCR)、谷丙转氨酶 (ALT)、谷草转氨酶 (AST) 的含量。

1.9 病理切片制作

将固定后的组织依次经 70%、80%、90%、95%、100% 乙醇梯度脱水处理。脱水完成后, 组织在二甲苯中进行透明化处理。透明组织于熔融石蜡中浸渍 2 h。浸蜡后的组织块转移至包埋框, 使用融化石蜡包埋。包埋块冷却固化后, 利用切片机切片。切片经二甲苯脱蜡以去除石蜡。脱蜡切片依次在 100%、95%、90%、80%、70% 乙醇中各浸泡 3 min,

最后用蒸馏水漂洗。切片置于苏木精染液染色 10 min, 蒸馏水冲洗后, 再于伊红染液染色 10 min。染色完毕, 蒸馏水冲洗去除多余染液。染色切片再次经 70%、80%、90%、95%、100% 乙醇梯度脱水。脱水后的切片在二甲苯中浸泡 10 min 进行透明化处理。透明切片取出后, 滴加中性树脂, 覆盖盖玻片封固。封片后的切片即可置于显微镜下观察。

表 1 基础日粮组成及营养水平 (风干基础)

日粮组成	含量%	营养水平	含量
玉米	15.13	粗蛋白/%	17.5
膨化玉米	15.07	粗脂肪/%	5
熟化的大米+ 膨化大豆半成品	24.5	灰分/%	6.5
面粉	12.9	粗纤维/%	2.6
麸皮	2	钙/%	0.65
膨化大豆	5	总磷/%	0.54
蔗糖半成品	2.9	净能/(kJ·kg ⁻¹)	10 460
葡萄糖	3	可消化赖氨酸/%	1.3
进口秘鲁鱼粉	4.5	可消化苏氨酸/%	0.84
豆粕	4.3	可消化含硫氨基酸/%	0.8
发酵豆粕	5	可消化色氨酸/%	0.27
碳酸氢钙	0.8		
石粉	0.6		
豆油	1.35		
氯化钠	0.13		
预混料	1		
赖氨酸盐酸盐	0.7		
苏氨酸	0.31		
蛋氨酸	0.36		
L-色氨酸	0.15		
L-缬氨酸	0.3		

1.10 数据统计与分析

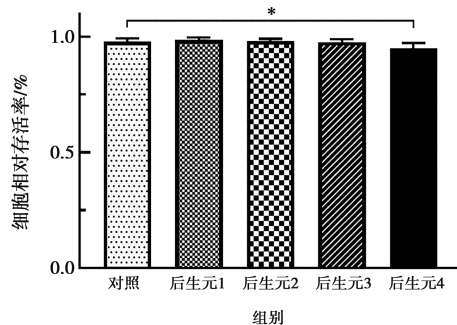
数据均采用 GraphPad Prism 8 软件进行统计学处理, 以“平均值±标准差”表示, 组间比较用单因素方差分析 (One-way ANOVA) 和独立样品 *t* 检验, 当 $P < 0.05$ 时, 表示差异显著。

2 结果

2.1 后生元细胞毒性

采用 CCK-8 法检测后生元对 Marc-145 的细胞毒性。结果显示 (图 1), 与对照组相比, 后生元在低浓度 (1、10、100 μg/mL) 时对 Marc-145 无毒性作用 ($P > 0.05$), 在 1 000 μg/mL 浓度时, 细胞存活

率显著下降 ($P < 0.05$), 但存活率仍在 90% 以上。

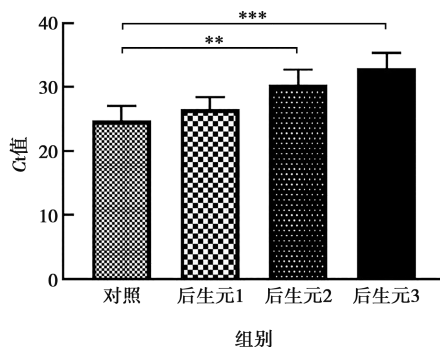


* 表示 $P < 0.05$, 下同。

图 1 后生元对 Marc-145 细胞毒性分析

2.2 后生元体外抗病毒作用

宿主细胞经病毒感染后, 分别用不同浓度后生元处理 24 h, qPCR 检测细胞上清液中病毒载量, 结果如图 2 所示, 与对照组相比, 感染 WH-1 的 Marc-145 细胞在 10 μg/mL 后生元处理 24 h 后, Ct 值显著升高 ($P < 0.05$), 在 100 μg/mL 浓度时极显著升高 ($P < 0.001$), 说明 10 和 100 μg/mL 后生元具有明显抗病毒作用。



** 表示 $P < 0.01$, *** 表示 $P < 0.001$, 下同。

图 2 细胞上清液中病毒载量

2.3 断奶仔猪饲喂试验情况

断奶仔猪生长性能试验开始时, 各组仔猪初始体重接近, 差异不显著 ($P > 0.05$)。第 14 天和第 35 天, 所有组仔猪体重均明显增加, 其中添加后生元的 2 个试验组体重均显著高于对照组 ($P < 0.05$)。第 35 天, 高剂量后生元组体重达到 22.70 kg, 显著高于对照组的 20.75 kg。

从平均日增重来看, 1~14 d 和 14~35 d 这两个阶段, 试验组均高于对照组, 尤其是高剂量后生元组在 14~35 d 阶段平均日增重达到 0.53 kg, 显著高于对照组 ($P < 0.05$)。在料重比方面, 试验组整体低于

对照组, 其中 1~14 d 阶段, 高剂量后生元组料重比为 1.41, 显著优于对照组的 1.65 ($P<0.05$), 表明添加后生元能提高饲料利用效率。

在整个试验期间, 试验组仔猪腹泻情况显著改善。1~14 d 阶段, 对照组腹泻率为 28.5%, 而 2 个

试验组分别为 5.35% 和 3.57%, 显著低于对照组 ($P<0.05$); 在 14~35 d 阶段, 试验组腹泻率降为 0, 而对照组仍有 7.14%, 差异显著 ($P<0.05$)。表明后生元添加可显著降低断奶仔猪腹泻率。(表 2)

表 2 后生元对断奶仔猪生长性能的影响

项目		对照组	低剂量后生元组	高剂量后生元组
平均体重/kg	初重	7.18±0.16	7.19±0.08	7.23±0.17
	第 14 天重	10.40±0.81 ^a	11.45±0.19 ^b	11.57±0.23 ^b
	第 35 天重	20.75±0.75 ^a	21.73±0.68 ^b	22.70±0.60 ^b
平均日采食量/kg	1~14 d	0.38±0.02	0.44±0.03	0.43±0.04
	14~35 d	0.79±0.02	0.78±0.02	0.82±0.02
平均日增重/kg	1~14 d	0.23±0.04 ^a	0.30±0.03 ^b	0.30±0.02 ^b
	14~35 d	0.49±0.01 ^a	0.49±0.03 ^a	0.53±0.03 ^b
料重比	1~14 d	1.65±0.28 ^a	1.46±0.14 ^{ab}	1.41±0.20 ^b
	14~35 d	1.65±0.31	1.61±0.14	1.54±0.10
腹泻率/%	1~14 d	28.5 ^a	5.35 ^b	3.57 ^b
	14~35 d	7.14 ^a	0 ^b	0 ^b

注: 同一行肩标不同字母表示差异显著 ($P<0.05$), 下同。

断奶仔猪血常规结果如表 3 所示, WBC 在低剂量后生元组显著升高至 $32.83 \times 10^9/L$ ($P<0.05$), 说明后生元可能激活机体免疫反应。然而在高剂量后生

元组中该值回落, 与对照组无显著差异。HGB 浓度在高剂量后生元组显著高于对照组 ($P<0.05$), 提示高剂量后生元可能改善机体造血功能。

表 3 后生元对断奶仔猪血常规的影响

项目	对照组	低剂量后生元组	高剂量后生元组
WBC/ ($10^9 \cdot L^{-1}$)	25.80±1.45 ^a	32.83±1.22 ^b	24.41±1.64 ^a
RBC/ ($10^9 \cdot L^{-1}$)	6.62±0.46	6.73±0.67	7.03±0.73
HCT/%	31.92±2.34	32.88±2.77	34.25±1.97
MCH/pg	17.18±1.34	16.90±1.22	17.15±1.32
MCV/fL	48.25±1.87	48.38±2.56	49.70±2.74
RDW/%	22.42±1.54	23.70±2.74	22.23±1.94
MCHC/ ($g \cdot L^{-1}$)	353.28±5.14	351.63±2.74	348.70±2.41
HGB/ ($g \cdot L^{-1}$)	112.74±3.21 ^a	114.18±2.64 ^a	121.49±1.24 ^b

由表 4 可知, 与对照组相比, 2 个试验组的血清 TP 和 ALB 水平均显著升高 ($P<0.05$), 表明后生元可能促进蛋白质合成与吸收; 尤其在高剂量后生元组, TP 和 ALB 分别为 68.65 g/L 和 46.80 g/L, 明显高于对照组。其他指标无显著差异 ($P>0.05$)。

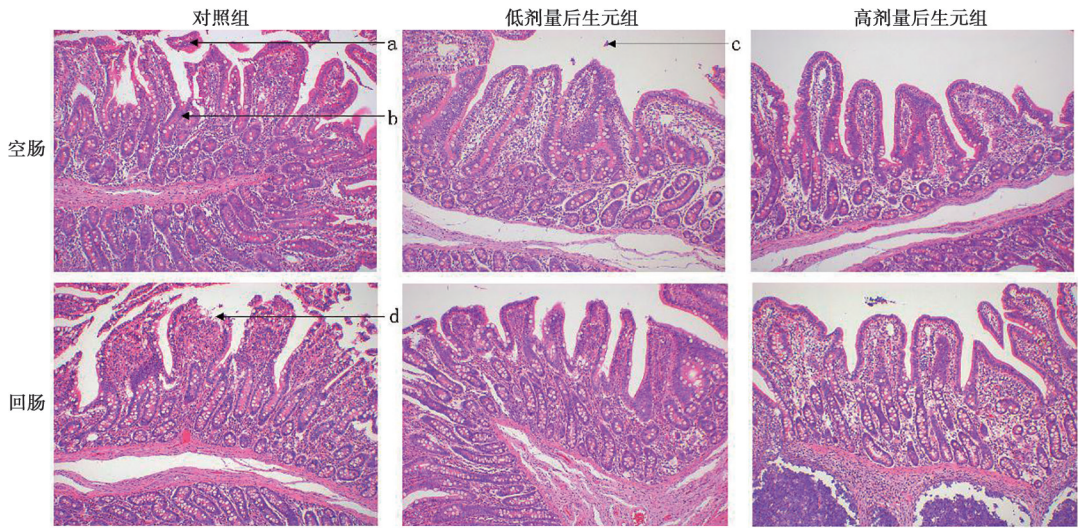
空肠组织切片观察显示 (图 3), 对照组仔猪空肠绒毛排列稀疏, 部分绒毛顶端结构破损, 隐窝区域加深, 上皮完整性较差。低剂量后生元组绒毛排列较对照组略为紧密, 绒毛轮廓清晰, 隐窝结构规整, 黏膜上皮完整性有所改善。高剂量后生元组绒毛排列致

密, 绒毛结构高大完整, 隐窝深度适中, 上皮细胞排列规整, 未见明显脱落。

回肠组织切片观察显示 (图 3), 对照组仔猪回肠绒毛排列紊乱, 隐窝区结构不清, 部分区域上皮细胞脱落, 杯状细胞数量减少, 黏膜屏障完整性受损。低剂量后生元组回肠绒毛形态相对完整, 排列紧密, 隐窝结构清晰, 杯状细胞分布相对均匀。高剂量后生元组回肠绒毛排列整齐, 隐窝形态规整, 上皮细胞完整性增强。

表 4 后生元对断奶仔猪血清生化的影响

指标	对照组	低剂量后生元组	高剂量后生元组
TP/ (g · L ⁻¹)	62.00±2.54 ^a	67.70±2.74 ^b	68.65±2.09 ^b
ALB/ (g · L ⁻¹)	41.64±1.32 ^a	46.28±1.54 ^b	46.80±1.22 ^b
ALT/ (U · L ⁻¹)	60.52±1.24	74.25±2.78	79.21±2.97
AST/ (U · L ⁻¹)	65.26±2.74	66.43±2.11	60.01±1.87
BUN/ (mol · L ⁻¹)	3.38±0.37	3.30±0.64	3.29±0.41
SCR/ (mol · L ⁻¹)	88.40±3.41	88.79±2.14	86.32±2.33
GLU/ (mol · L ⁻¹)	6.34±0.12	5.88±0.41	5.93±0.31
TG/ (mol · L ⁻¹)	0.70±0.02	0.62±0.07	0.58±0.05
TC/ (mol · L ⁻¹)	3.28±0.21	3.47±0.54	3.35±0.32



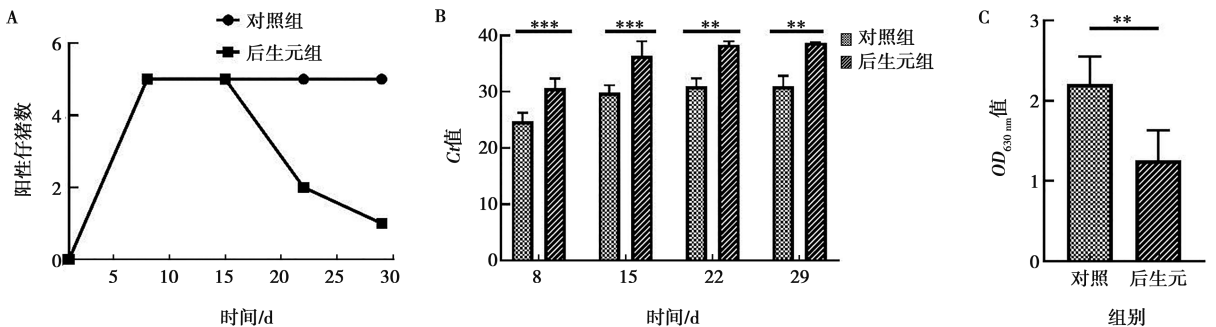
a. 上皮细胞脱落; b. 隐窝增生; c. 上皮细胞脱落; d. 上皮细胞脱落。

图 3 断奶仔猪空肠与回肠组织切片 (HE 染色, 100×)

2.4 后生元体内抗 PRRSV 感染效果

由图 4 可知, 攻毒后第 8、15、22、29 天, 对照组仔猪血液中病毒载量均极显著高于后生元组 ($P < 0.01$)。在试验第 22 天, 后生元组出现 PRRSV 检测

阴性仔猪, 试验结束时, 仅剩 1 头阳性猪。攻毒后第 29 天, 后生元组仔猪血液中抗体滴度极显著低于对照组 ($P < 0.01$)。

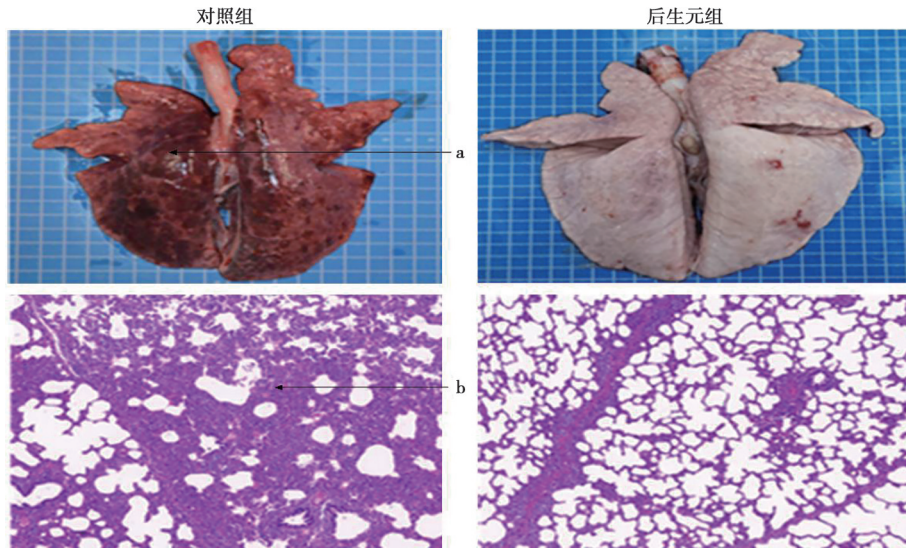


A. PRRSV 攻毒后阳性仔猪数量; B. PRRSV 攻毒后仔猪体内病毒载量; C. 试验结束时仔猪体内 PRRSV 抗体滴度。

图 4 PRRSV 攻毒后仔猪血液中病毒载量及抗体滴度

2.5 后生元对 PRRSV 攻毒后仔猪肺脏损伤的保护效果

攻毒后第 29 天对肺脏组织进行观察,如图 5 所示,与后生元组相比,对照组肺脏组织充血出血明



a. 肺部充血; b. 肺泡壁重度增厚。

图 5 PRRSV 攻毒后肺脏剖检观察 (切片 HE 染色, 100×)

2.6 后生元对 PRRSV 攻毒后仔猪生长性能的影响

如表 5 所示, 2 组仔猪初始体重, 平均日采食量无显著差异 ($P>0.05$), 试验结束后后生元组终末体重、总增重和平均日增重均极显著高于对照组 ($P<0.01$), 料重比 ($1.760 0\pm 0.102 0$) 较对照组极显著降低 ($P<0.01$)。

表 5 后生元对 PRRSV 攻毒后仔猪生长性能的影响

项目	对照组	后生元组
初始体重/kg	9.676 0±0.419 6	9.600 0±0.417 9
终末体重/kg	14.600 0±0.623 5	17.280 0±0.902 0
总增重/kg	4.920 0±0.622 1 ^a	7.680 0±0.622 1 ^b
平均日增重/kg	0.164 0±0.020 7 ^a	0.256 0±0.020 7 ^b
平均日采食量/kg	0.407 0±0.049 5	0.450 7±0.045 4
料重比	2.490 0±0.211 9 ^b	1.760 0±0.102 0 ^a

3 讨论

断奶初期, 仔猪常因营养摄入不稳定和免疫发育不完善, 面临较高的腹泻发生率及生长停滞风险。研究指出, 断奶过程中的应激会迅速诱发肠道黏膜损伤、绒毛萎缩及炎症反应, 显著削弱其对营养物质的吸收能力^[13-14]。因此, 在饲料中补充能够维护肠道稳态的功能性物质, 成为提升仔猪断奶后成活与生长

性能的重要策略。后生元作为含有短链脂肪酸、细菌素、多糖和代谢酶类的复合物, 已被证实可在肠道内发挥抗菌、促进屏障修复和调节免疫等作用^[15-16]。Wang 等^[17]报道, 对新生仔猪在出生后第 1、3、5 天口服鼠李糖杆菌 (*Lactobacillus rhamnosus* GG, LGG), 可显著增强仔猪断奶前的肠道屏障功能并降低腹泻发生率; Diao 等^[18]通过胃内灌注短链脂肪酸 (包括乙酸、丙酸和丁酸) 研究其对断奶仔猪肠道屏障的影响, 结果显示短链脂肪酸 (SCFAs) 可显著上调空肠闭合蛋白和紧密连接蛋白的 mRNA 表达水平, 增强紧密连接结构的完整性, 抑制小肠和结肠中白细胞介素-1 β 和白细胞介素-8 的表达水平, 减轻炎症反应, 此外, 该研究还发现 SCFAs 可激活 GPR41/GPR43 受体表达, 并增加黏液蛋白 (MUC1) 和杯状细胞数量, 从而进一步加强肠道黏膜的物理与免疫屏障功能。Canani 等^[19]以 12~48 月龄健康儿童为研究对象, 连续 3 个月每日口服含热灭活副干酪乳酪杆菌的牛乳发酵粉, 发现该干预显著富集 *Lactobacillus*、*Oscillospira*、*Faecalibacterium* 及特定 *Roseburia* 和 *Blautia* 寡型, 提升丁酸合成相关基因丰度并增加粪便丁酸水平, 同时上调 α -防御素、 β -防御素 2 和 LL-37 抗菌肽等免疫标志物, 从而强化肠道菌群-免疫互作并减少婴幼儿呼吸道和胃肠道感染发生。本研究结果显示, 后生元的添加在提高生长性能、改善饲

料利用率及降低腹泻率方面效果显著,验证了其作为肠道调节剂的有效性。高剂量后生元组在多个指标上效果更优,但部分免疫指标(如WBC)变化呈非线性趋势,在之前的研究中并未发现此现象,这提示其在免疫刺激与免疫稳态调节之间可能存在反馈调控机制,为后续剂量优化研究提供了思路。此外,试验中还观察到血清TP和ALB水平的提升,提示后生元不仅改善肠道健康,还可能通过提高营养吸收效率或改善肝脏合成功能间接提升系统性蛋白代谢水平,但这一现象在既往关于后生元的研究中鲜有报道,可能反映出不同菌种组合或原料来源对其功能特性存在影响。

PRRSV因其高度变异性和免疫抑制特性,常造成仔猪生长性能下降与继发感染风险升高,是养猪生产中亟需控制的重要疫病之一。研究显示,PRRSV造成肺组织病变的同时还会通过诱导炎症破坏肠道中的物理和免疫屏障来损害肠道完整性,进一步影响生猪健康与生产效率^[20-21]。已有研究表明益生菌或其代谢产物具有一定的抗病毒潜力。Rather等^[22]报道植物乳杆菌Probio-88发酵产物(P88-CFS)可通过下调活性氧、细胞外信号调节激酶磷酸化及干扰素- α /干扰素- β /白细胞介素-6表达,显著抑制新型冠状病毒的体外复制;Vilhelmova-Ilieva等^[10]发现乳酸菌来源的胞外多肽对疱疹病毒复制具有抑制活性。本研究在PRRSV攻毒模型下观察到,添加复合后生元显著降低了感染仔猪的病毒载量,并改善了肺部病理损伤,这一结果与现有研究一致。后生元组中抗体滴度水平明显低于对照组,这并不意味着免疫应答受抑,而是反映了病毒复制水平较低、抗原刺激不足所致的“低负荷-低应答”现象。Johnson等^[23]在研究PRRSV感染过程时发现,病毒载量与抗体滴度间存在高度正相关,说明抗体水平并非唯一判断免疫保护的指标。此外,在PRRSV感染背景下,后生元组仔猪仍表现出更好的生长性能和饲料转化效率,说明其在病毒应激状态下仍具有维持营养代谢与免疫稳态的能力。这可能与后生元中含有的SCFAs所具有的抗氧化、抗炎活性有关。Yang等^[24]在断奶仔猪模型中发现,高纤维饮食显著提高SCFAs水平,并通过抑制NLRP3炎症小体及其下游效应分子(如白细胞介素-1 β 、白细胞介素-18)的表达,减轻了肺部免疫应激引起的组织炎症与损伤,从而改善了动物整体的肺部健康状态。此外,多个研究表明,后生元可以对免疫系统发挥正向调节作用^[25],还可以提升免疫器官的形态和功能^[26]。

4 结论

本研究通过断奶仔猪饲喂试验和PRRSV攻毒试

验,评估了后生元对断奶仔猪生长性能、血清生化指标以及对PRRSV感染的抗病毒效果。研究表明,适量添加后生元能够显著提高断奶仔猪的平均日增重、改善饲料转化率,并降低腹泻率,证实了其对断奶应激具有缓解作用。在血清指标方面,后生元显著调节了抗氧化能力与免疫相关因子,表现出良好的免疫调控效应。PRRSV攻毒试验进一步验证了后生元可通过降低病毒载量,减轻肺组织病理损伤等方式,发挥一定的抗病毒作用。综上,后生元在促进仔猪健康生长、增强抗病能力方面具有良好潜力,为其在无抗养殖中的应用提供了理论依据和实践参考。

参考文献:

- [1] SALMINEN S, COLLADO M C, ENDO A, et al. The international scientific association of probiotics and prebiotics (ISAPP) consensus statement on the definition and scope of postbiotics [J]. *Nat Rev Gastroenterol Hepatol*, 2021, 18 (9): 649-667.
- [2] ŻÓŁKIEWICZ J, MARZEC A, RUSZCZYŃSKI M, et al. Postbiotics: a step beyond pre- and probiotics [J]. *Nutrients*, 2020, 12 (8): 2189.
- [3] MA L, TU H, CHEN T. Postbiotics in human health: a narrative review [J]. *Nutrients*, 2023, 15 (2): 291.
- [4] WU Z, PAN D, GUO Y, et al. Peptidoglycan diversity and anti-inflammatory capacity in *Lactobacillus* strains [J]. *Carbohydr Polym*, 2015, 128: 130-137.
- [5] DUARTE M E, KIM S W. Efficacy of *Saccharomyces* yeast postbiotics on cell turnover, immune responses, and oxidative stress in the jejunal mucosa of young pigs [J]. *Sci Rep*, 2024, 14 (1): 19235.
- [6] ZHENG L, DUARTE M E, SEVAROLLI LOFTUS A, et al. Intestinal health of pigs upon weaning: challenges and nutritional intervention [J]. *Front Vet Sci*, 2021, 8: 628258.
- [7] CLAES I J J, LEBEER S, SHEN C, et al. Impact of lipoteichoic acid modification on the performance of the probiotic *Lactobacillus rhamnosus* GG in experimental colitis [J]. *Clin Exp Immunol*, 2010, 162 (2): 306-314.
- [8] CHEN Y, ZHANG M, REN F. A role of exopolysaccharide produced by *Streptococcus thermophilus* in the intestinal inflammation and mucosal barrier in caco-2 monolayer and dextran sulphate sodium-induced experimental murine colitis [J]. *Molecules*, 2019, 24 (3). DOI: 10.3390/molecules24030513.
- [9] SUNMOLA A A, OGBOLE O O, FALEYE T O C, et al. Antiviral potentials of *Lactobacillus plantarum*, *Lactobacillus amylovorus*, and *Enterococcus hirae* against selected Enterovirus [J]. *Folia Microbiol*, 2019, 64 (2): 257-264.
- [10] VILHELMOVA-ILIEVA N, ATANASOV G, SIMEONOVA L, et al. Anti-herpes virus activity of *Lactobacillus* postbiotics [J]. *Bio-medicine*, 2022, 12 (1): 21-29.
- [11] KALINICHENKO S V, MELENTYEVA K V, MANEE H, et al. Study of anti-virus actions of metabolites of lactobacteria [J]. *Wiad Lek*, 2020, 73 (7): 1484-1488.
- [12] 刘广, 龚成燕, 牛凯敏, 等. 莲花清瘟药渣及发酵产物的生物

- 活性研究 [J]. 畜牧兽医学报, 2023, 54 (3): 1281-1299.
- [13] HU C H, XIAO K, LUAN Z S, et al. Early weaning increases intestinal permeability, alters expression of cytokine and tight junction proteins, and activates mitogen-activated protein kinases in pigs [J]. J Anim Sci, 2013, 91 (3): 1094-1101.
- [14] KING M R, KELLY D, MOREL P C H, et al. Aspects of intestinal immunity in the pig around weaning [M]. The Netherlands: Wageningen Academic, 2003: 219-257.
- [15] AGUILAR-TOALÁ J E, GARCIA-VARELA R, GARCIA H S, et al. Postbiotics: an evolving term within the functional foods field [J]. Trends Food Sci Technol, 2018, 75: 105-114.
- [16] SHEETAL K, DIKSHA K, SWATI K, et al. A new therapeutic approach utilizes probiotics, prebiotics, synbiotics, postbiotics, and gut microbiota [J] Biology and Life Sciences, 2024, 29: 1-16.
- [17] WANG Y, GONG L, WU Y P, et al. Oral administration of *Lactobacillus rhamnosus* GG to newborn piglets augments gut barrier function in pre-weaning piglets [J]. J Zhejiang Univ Sci B, 2019, 20 (2): 180-192.
- [18] DIAO H, JIAO A R, YU B, et al. Gastric infusion of short-chain fatty acids can improve intestinal barrier function in weaned piglets [J]. Genes Nutr, 2019, 14: 4.
- [19] BERNI CANANI R, DE FILIPPIS F, NOCERINO R, et al. Specific signatures of the gut microbiota and increased levels of butyrate in children treated with fermented cow's milk containing heat-killed *Lactobacillus paracasei* CBA L74 [J]. Appl Environ Microbiol, 2017, 83 (19): e01206-17.
- [20] ZHAO J, WAN S, SUN N, et al. Damage to intestinal barrier integrity in piglets caused by porcine reproductive and respiratory syndrome virus infection [J]. Vet Res, 2021, 52 (1): 93.
- [21] RUEDAS-TORRES I, SÁNCHEZ-CARVAJAL J M, SALGUERO F J, et al. The scene of lung pathology during PRRSV-1 infection [J]. Front Vet Sci, 2024, 11: 1330990.
- [22] RATHER I A, CHOI S B, KAMLI M R, et al. Potential adjuvant therapeutic effect of *Lactobacillus plantarum* probio-88 postbiotics against SARS-COV-2 [J]. Vaccines, 2021, 9 (10): 1067.
- [23] JOHNSON W, ROOF M, VAUGHN E, et al. Pathogenic and humoral immune responses to porcine reproductive and respiratory syndrome virus (PRRSV) are related to viral load in acute infection [J]. Vet Immunol Immunopathol, 2004, 102 (3): 233-247.
- [24] YANG Y, JIANG X, CAI X, et al. Deprivation of dietary fiber enhances susceptibility of piglets to lung immune stress [J]. Front Nutr, 2022, 9: 827509.
- [25] ZENG W, SHEN J, BO T, et al. Cutting edge: probiotics and fecal microbiota transplantation in immunomodulation [J]. J Immunol Res, 2019, 2019 (1): 1603758.
- [26] LIN W H, YU B, LIN C K, et al. Immune effect of heat-killed multistrain of *Lactobacillus acidophilus* against *Salmonella typhimurium* invasion to mice [J]. J Appl Microbiol, 2007, 102 (1): 22-31.