

亚甲基水杨酸杆菌肽对白羽肉鸡生长性能和肠道菌群结构的影响

江宇航^{1,2}, 辛维岗^{1,2}, 周寰宇^{1,2}, 杨瑞思^{1,2}, 张棋麟^{1,2}, 林连兵^{*1,2}

(1. 昆明理工大学 生命科学与技术学院, 云南 昆明 650500; 2. 云南省高校饲用抗生素替代技术工程研究中心, 云南 昆明 650500)

摘要: 亚甲基水杨酸杆菌肽(bacitracin methylene disalicylate, BMD)具有良好的抑菌活性与安全性,可作为一种药物添加剂用于预防和治疗动物疾病。然而,目前关于BMD对白羽肉鸡的生长性能和肠道菌群结构的影响尚不明确。作者选用3日龄健康白羽肉鸡作为实验对象,分别在基础饲料上添加50 mg/kg 金霉素制剂与高(60.0 mg/kg)、中(40.0 mg/kg)、低(20.0 mg/kg)剂量的BMD进行比较饲喂管理。记录28 d内白羽肉鸡料重比变化,利用第二代高通量测序技术对28 d的白羽肉鸡肠道微生物菌群和组成变化进行测序分析,比较各组间与组内的肠道微生物多样性及主要优势菌群相对丰度差异。结果发现,饲喂不同剂量的BMD和金霉素制剂对白羽肉鸡的生长性能均有一定影响,饲喂60.0 mg/kg的BMD时,白羽肉鸡料重比最低,效果最佳。同时,饲喂BMD与金霉素制剂对白羽肉鸡的肠道菌群也产生了一定影响,造成了菌群多样性下降、丰度上升。与空白组相比,添加BMD和金霉素后拟杆菌门、软壁菌门的优势菌群显著上升($P < 0.05$),而厚壁菌门显著下降($P < 0.05$)。在属水平上,*Fournierella*的相对丰度显著上升($P < 0.05$),而粪杆菌属的相对丰度显著下降($P < 0.05$)。研究结果表明,饲喂BMD对白羽肉鸡的生长性能和肠道菌群结构均有促进作用,能够有效降低白羽肉鸡料重比且能够促进肠道菌群的微生态健康。

关键词: 亚甲基水杨酸杆菌肽;白羽肉鸡;第二代测序技术;生长性能;肠道菌群

中图分类号:S 816.7 文章编号:1673-1689(2024)03-0094-08 DOI:10.12441/spyswjs.20210627002

Effect of Bacitracin Methylene Disalicylate on Growth Performance and Intestinal Microflora Structure of White-Feathered Broilers

JIANG Yuhang^{1,2}, XIN Weigang^{1,2}, ZHOU Huanyu^{1,2}, YANG Ruisi^{1,2}, ZHANG Qilin^{1,2}, LIN Lianbing^{*1,2}

(1. Faculty of Life Science and Technology, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, China; 2. Engineering Research Center for Replacement Technology of Feed Antibiotics of Yunnan College, Kunming 650500, China)

Abstract: Bacitracin methylene disalicylate (BMD) has good antibacterial activity and safety, which can be used as a pharmaceutical additive to prevent and treat animal diseases. However, the effects of BMD on white-feathered broilers, particularly regarding growth performance and intestinal

收稿日期: 2021-06-27 修回日期: 2021-08-30

基金项目: 云南省重大科技项目(202202AG050008)。

* 通信作者: 林连兵(1969—),男,硕士,教授,博士研究生导师,主要从事噬菌体与肠道微生物研究。E-mail:linlb@kmust.edu.cn

microflora structure, remains unclear. This study selected three-day-old healthy white-feathered broilers as experimental subjects, and compared the feeding management of high (60.0 mg/kg), medium (40.0 mg/kg), and low (20.0 mg/kg) dosages of BMD added in the basal ration, with the addition of 50 mg/kg of chlortetracycline preparation as the positive control group. The changes in feed-weight-ratio of white-feathered broilers within 28 days were recorded, and the second generation high-throughput sequencing technology was used to sequence and analyze the changes in their intestinal microflora and composition at 28 d. The differences in intestinal microflora diversity and relative abundance of major dominant groups were compared between and within groups. The results showed that feeding different doses of BMD and chlortetracycline preparation had an effect on the growth performance of white-feathered broilers chickens. The feed-to-weight ratio of white-feathered broilers was the lowest when 60.0 mg/kg dose of BMD was fed, and the effect was the optimal. Meanwhile, feeding BMD and chlortetracycline preparations also affected the intestinal microflora of white-feathered broilers, resulting in decreased diversity and increased abundance. In addition, for the dominant microflora, compared with the blank group, the BMD and chlortetracycline groups had a significant increase in Bacteroidetes and Tenericutes ($P<0.05$), while a significant decrease in Firmicutes ($P<0.05$). At the generic level, the relative abundance of *Fournierella* significantly increased ($P<0.05$), while that of *Faebacterium* significantly decreased ($P<0.05$). Overall, the results reveal that feeding BMD can promote the growth performance and intestinal microflora structure of white-feathered broilers, effectively reducing the feed-to-weight ratio of white-feathered broilers and promote the micro-ecological health of the intestinal microflora.

Keywords: bacitracin methylene disalicylate, white-feathered broiler, second-generation sequencing technology, growth performance, intestinal microflora

白羽肉鸡自 1979 年开始在中国饲养,具有产蛋率高、生长速度快、肉质好等优点,在肉禽类食品供应中占据重要地位^[1-3]。据统计,我国白羽肉鸡制品产量在畜禽肉类产品供应中仅次于猪肉,在 2020 年间产量达到 977 万 t,占全年禽肉类产量的 41.38%^[2]。白羽肉鸡作为当前畜禽养殖品种中工业化程度最高、养殖规模化和产业化高度集群的禽类,已逐渐成为大众肉类膳食结构中的主流消费品。因此,保障白羽肉鸡规模化养殖对于我国肉类制品的供应有着十分重要的作用^[2]。随着食品安全问题越来越受到重视,为进一步有解决抗生素的耐药与残留问题,农业农村部在《兽用抗菌药使用减量化行动试点工作方案(2018—2021 年)》中明确指出,将于 2020 年 7 月 1 日起全面退出抗生素在饲料端的使用,这将导致畜禽的生长性能下降,发病率上升,养殖经济效益大幅缩减等问题加剧^[1,3]。白羽肉鸡等家禽的规模化养殖也将会面临更加严峻的挑战。因此,找到有效的替抗药物添加剂并进行

多方面的评价,对于保障白羽肉鸡等肉类制品的供应意义重大。

肠道菌群在维持动物机体生命活动、避免病原菌的侵害、协调宿主健康与疾病等方面发挥着重要作用,被称为宿主的第二基因组^[4]。通常动物体内的肠道菌群与宿主之间维持着动态平衡,但当动物体内的肠道菌群动态平衡受到破坏时,就会导致肠道菌群紊乱,引发诸多病理性疾病^[5-6]。例如,饲喂小鼠传统抗生素头孢哌酮后,小鼠肠道内的乳酸菌属(*Lactobacillus* sp)、肠球菌属(*Enterococcus* sp)、双歧杆菌属(*Bifidobacterium* sp)等有益菌群数量显著减少,而白假丝酵母菌(*Candida albicans*)等致病性菌群数量显著增加,导致由肠道菌群紊乱诱发的变应性气道反应^[4]。此外,当动物体内的肠道菌群微生态平衡遭到破坏时,也会诱发动物机体内的某些次级代谢产物发生变化,引发相关的动物组织器官发生病变。例如,利用具有致癌作用的二元胆汁酸和 Toll 受体家族作用于动物机体时,会导致动物肠道

出现泄漏并破坏肠道微生态平衡,还可能诱发肝损伤、慢性肝病、原发性肝癌等肝脏疾病^[1-9]。因此,找到安全性好、无残留和无毒副作用的药物添加剂的同时,还应该考虑其对畜禽肠道菌群及机体代谢等多方面的影响。

亚甲基水杨酸杆菌肽 (bacitracin methylene disalicylate, BMD) 是一种由益生菌产生的新型杆菌多肽类药物添加剂,具有无残留、无耐药性和休药期等特点^[7-9]。以往药效学实验表明, BMD 预混剂按照 55 mg/(kg·d) 的剂量连续饲喂给药 42 d 时,就可有效治疗由产气荚膜梭菌引起的肉鸡坏死性肠炎。当 BMD 使用量达到 100 mg/kg 时, 畜禽组织中也未有残留检出,符合中国无休药期的规定^[10-12]。此外,美国 FDA 批准的 BMD 适应证中也明确指出, BMD 能够有效提高畜禽的采食量、繁殖性能以及增强畜禽的抗氧化功能等^[8-9]。然而,目前关于 BMD 对畜禽的影响主要集中于对兔、鹅、肉鸡等畜禽的安全性评价、免疫性能、治疗部分疾病等方面,对于肉类食品供应中占有重要地位的白羽肉鸡生长性能及其肠道菌群结构的影响研究甚少^[11-13]。因此,利用不同质量分数的 BMD 与金霉素制剂进行比较饲喂,评估其对白羽肉鸡生长性能和肠道菌群结构的影响,可为探讨 BMD 对家禽的有益作用提供理论参考。

1 材料与方法

1.1 实验材料

3 日龄白羽肉鸡苗、饲用金霉素制剂、BMD:昆明三正生物科技(集团)有限公司;DNA 提取试剂盒:天根生物技术公司;无添加肉鸡基础日粮参照前期研究进行配制^[3]。

1.2 饲料配制与分组饲养

饲料分为以下 5 个组:CHE 组(空白组)为基础日粮;BMD-A 组为基础日粮中添加 20.0 mg/kg 的 BMD;BMD-B 为基础日粮中添加 40.0 mg/kg 的 BMD;BMD-C 为基础日粮中添加 60.0 mg/kg 的 BMD;CKB 组(阳性对照组)为基础日粮添加 50 mg/kg 的饲用金霉素制剂^[3,14-15]。将 100 只 3 日龄健康白羽肉鸡随机分配至 5 个组,每个组重复数量为 20 只。白羽肉鸡饲喂周期为 28 d,按照《GB/T 19664—2005》规定的饲养标准,分笼饲养,常规免疫。所有基础日粮按照等氮等能原则进行配制,配制完成后保存于阴凉干燥处备用。

1.3 生长性能测试

实验期间每日记录白羽肉鸡的采食量,分别于实验开始后第 1、10、20、28 天早上 8:00 空腹称质量,记录实验周期平均日采食量(ADFI)和实验周期平均日增质量(ADG),分别计算不同组白羽肉鸡的料重比(F/G)变化。每个分组选取 5 只健康白羽肉鸡称质量,每只独立重复 3 次。

1.4 DNA 提取和测序

饲养 29 d 时在空白组、金霉素制剂组以及促生长最佳 BMD 组中各取 5 只体质量接近的健康白羽肉鸡进行屠宰采样。随后,将白羽肉鸡盲肠取出,迅速用灭菌棉线进行结扎,使用无菌去离子水反复冲洗 3 次并转移至已灭菌的 5.0 mL 无菌离心管中,迅速液氮处理并置于-80℃超低温冰箱保存备用。供试样品的总 DNA 提取严格按照总 DNA 提取试剂盒的操作说明书步骤进行。提取到的总 DNA 经 NanoDrop200 检测合格后,由北京百迈客生物科技有限公司进行高通量测序和 HiSeq 文库构建。

1.5 数据处理与分析

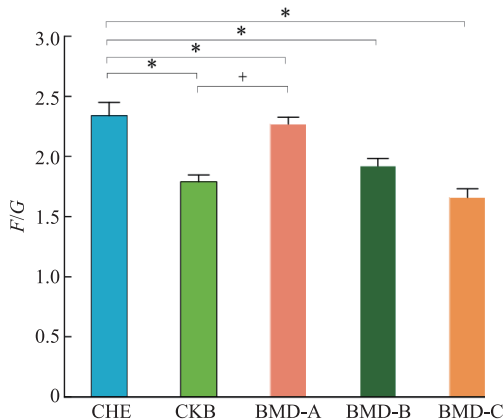
使用 FLASH Version 1.2.7 软件,根据 barcodes 序列区分各供试样本数据。为保证数据的可靠性,先对供试样品的全部原始序列信息进行质量控制,并对读取序列进行拼接、过滤及去除其中的嵌合体序列,从而得到高质量的标签数据。利用 UCHIME Version 4.2 软件对全长注释数据库进行比对分析,得到各供试样本的 Alpha 多样性、Beta 多样性及门、属分类水平等信息。基于北京百迈客云平台进行第二代微生物多样性分析,完成各供试样品间的肠道菌群结构差异性和相似性分析。数据采用 Excel 2010 进行初步整理,以平均数±标准差表示,均至少包含 3 次重复,显著差异性水平定为 $P<0.05$ 。

2 结果与分析

2.1 BMD 对白羽肉鸡生长性能的影响

将 5 组饲料分别饲喂白羽肉鸡,在 28 d 实验周期内记录并计算出每组的 ADFI 和 ADG,以 F/G 评估每组白羽肉鸡的生长状况,见图 1。结果显示,饲喂不同剂量的 BMD 组中,随着 BMD 质量分数的增加,白羽肉鸡的 F/G 逐渐下降,BMD-C 组的 F/G 达到最低,且各剂量 BMD 组与 CHE 组均存在显著差异($P<0.05$)。同时,比较各 BMD 组与 CKB 组的 F/G 差异,发现 BMD-A、BMD-B 组的 F/G 均高于 CKB

组,且 BMD-A 组与 CKB 组存在显著差异 ($P<0.05$),但 BMD-C 组的 F/G 低于 CKB 组。



*表示各组与 CHE 组差异显著 ($P<0.05$);+表示 BMD 组与金霉素制剂组差异显著 ($P<0.05$)。

图 1 不同组白羽肉鸡生长性能比较

Fig. 1 Comparison of growth performance of different groups of white feather broilers

2.2 Alpha 多样性分析

由表 1 可知,经数据质量控制后,各分组供试样本的有效序列数目均为 54 709~55 678 个,拥有相对较高的有效序列数目;各分组供试样本组间与组内的操作分类单元(OTU)数目不存在显著差异 ($P>$

0.05),且覆盖度均为 0.999。分析各组间的多个 Alpha 多样性指数发现,CKB 组和 BMD 组的 Ace、Chao1 指数均低于 CHE,而 Shannon、Simpson 指数均高于 CHE 组,且 BMD 组的 Shannon、Simpson 指数与 CHE 组存在显著差异 ($P<0.05$)。对比 BMD 组与 CKB 组之间的 alpha 多样性指数发现,BMD 组的 Ace、Chao1 指数低于 CKB 组,而 Shannon、Simpson 指数高于 CKB 组。

2.3 Beta 多样性分析

PcoA 和 NMDS 分析见图 2。发现各组样品间明显分开,彼此距离相隔较远,呈三角形,且各自生物学重复间距离相隔较近并紧密靠拢。

2.4 肠道菌群组成及优势菌群相对丰度分析

由图 3 可知,在门分类单元中,BMD 组和 CHE 组的主要构成菌群依次为厚壁菌门(Firmicutes)、拟杆菌门(Bacteroidetes)、变形菌门(Proteobacteria)、软壁菌门(Tenericutes)、放线菌门(Actinobacteria)、梭杆菌门(Fusobacteria)等。各组间相对丰度差异见表 2, BMD 组、CKB 组与 CHE 组相比,拟杆菌门、软壁菌门相对丰度显著上升 ($P<0.05$),而厚壁菌门相对丰度则显著下降 ($P<0.05$)。此外,CKB 组软壁菌门的相对丰度显著低于 BMD 组 ($P<0.05$),其他则无明显变化。

表 1 Alpha 多样性指数

Table 1 Alpha diversity index

组别	有效序列/个	OTU 数目/个	Ace 指数	Chao1 指数	Shannon 指数	Simpson 指数	覆盖度
CHE	55 296±228	331±5	332.789±7.478	321.012±6.897	0.956±0.006	5.659±0.115	0.999
CKB	55 678±405	329±6	312.726±4.212	316.278±3.984	0.948±0.002	5.715±0.096	0.999
BMD	54 709±1 417	310±4	314.358±7.065	312.221±6.862	0.963±0.001*	5.832±0.023*	0.999

注:*表示不同组与 CHE 组差异显著 ($P<0.05$);+表示 BMD 组与金霉素制剂组差异显著 ($P<0.05$)。

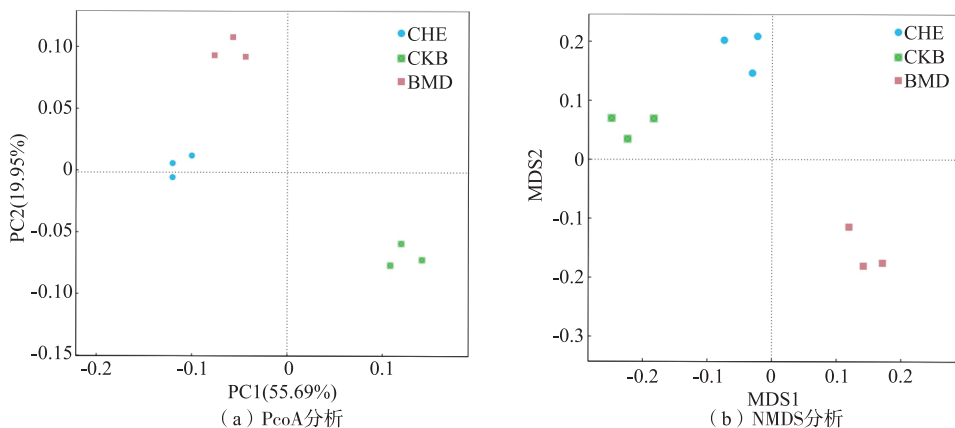


图 2 不同组白羽肉鸡肠道菌群的 PcoA 和 NMDS 分析

Fig. 2 NMDS and PCoA analysis of intestinal flora of white feather broilers with different groups

在属水平上, 相对丰度最高的为粪杆菌属 (*Faecalibacterium*)、另枝菌属 (*Alistipes*)、*Fournierella*、瘤胃菌科菌属 (*Ruminococcaceae*)、*Erysipelatoclostridium* 等。与 CHE 组相比, BMD 组中 *Fournierella*、*Erysipelatoclostridium*、布劳特菌属 (*Blautia*)、*Subdoligranulum*、毛螺菌科菌属 (*Lachnospiraceae*)、拟杆菌属 (*Bacteroides*) 显著上升 ($P<0.05$), 而粪杆菌属、瘤胃球菌属则显著下降 ($P<$

0.05); CKB 组中的另枝菌属、*Fournierella* 也显著上升 ($P<0.05$), 粪杆菌属显著下降 ($P<0.05$), 其他则呈现不同程度的下降和上升。此外, 比较 BMD 组与 CKB 组发现, BMD 组的 *Erysipelatoclostridium*、毛螺菌科菌属、拟杆菌属的相对丰度显著高于 CKB 组 ($P<0.05$), 而瘤胃菌科菌属相对丰度显著低于 CKB 组 ($P<0.05$), 其他则与 CKB 组无明显差异, 见表 3。

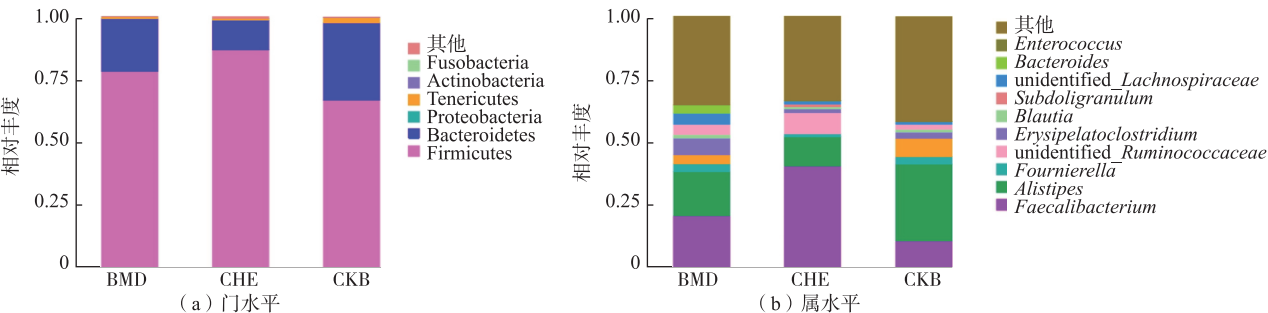


图 3 门水平和属水平白羽肉鸡肠道菌群相对丰度差异

Fig. 3 Differences in the relative abundance of intestinal flora of white feather broilers in phylum and genus levels

表 2 门水平白羽肉鸡肠道主要菌群的相对丰度差异

Table 2 Relative abundance differences at the phylum classification level of major bacteria in the intestinal flora of white feathered broilers

门水平菌群名	CHE	CKB	BMD
厚壁菌门	0.869±0.025	0.669±0.001*	0.783±0.003*
拟杆菌门	0.117±0.001	0.307±0.003*	0.210±0.003*
变形菌门	0.001±0.000	0	0.001±0.000
软壁菌门	0.001±0.001	0.022±0.001*	0.007±0.002*
放线菌门	0	0	0
梭杆菌门	0	0	0
其他	0.006±0.001*	0.001±0.001*	0

注: * 表示不同组与 CHE 组差异显著 ($P<0.05$); + 表示 BMD 组与金霉素制剂组差异显著 ($P<0.05$)。

3 讨论

BMD 作为一种新型的杆菌多肽类药物添加剂, 在提升畜禽生长性能和有效预防与治疗畜禽细菌性疾病等方面发挥着重要作用^[1-4]。添加不同剂量的 BMD 来研究其对白羽肉鸡生长性能和肠道菌群的影响, 并与传统抗生素金霉素制剂进行比较。结果发现, CKB 组白羽肉鸡的料重比呈显著下降趋势 ($P<0.05$), 这与以往同类产品对畜禽生长性能的影响相似^[16-18]。随着 BMD 剂量的上升, 各剂量 BMD 组

均与 CHE 组存在显著差异 ($P<0.05$), 这表明 BMD 对于畜禽的生长具有明显促进作用。对比不同剂量的亚甲基水杨酸杆菌肽与金霉素制剂组之间的料重比发现, 除 20 mg/kg 剂量组料重比显著高于金霉素制剂组 ($P<0.05$) 外, 其余各剂量组料重比更低, 这表明了 BMD 与抗生素作用效果相似, 能够通过提高畜禽免疫力或减少疾病的发生来间接提升畜禽生长性能^[19]。此外, 饲喂 BMD 与抗生素产品均对白羽肉鸡生长有促进作用, 且在饲喂过程无非正常死亡现象出现, 进一步证明了 BMD 对白羽肉鸡的生长健康是安全有效的。

对饲喂 BMD 组与金霉素制剂组后的白羽肉鸡肠道菌群相对丰度与多样性进行多个 Alpha 指数评估后发现, 金霉素制剂组和 BMD 组的白羽肉鸡肠道菌群相对丰度和多样性发生了不同程度上升与下降, 这与以往类似抗生素药物添加剂影响其他畜禽肠道菌群的结果相似^[20-22]。对比饲喂金霉素制剂组与 BMD 组白羽肉鸡的肠道菌群丰富度和多样性发现, 两个组之间无显著差异 ($P>0.05$) 且多个 Alpha 指数相差较小, 这表明了 BMD 和传统抗生素产品对白羽肉鸡肠道菌群的丰富度和多样性影响相似。Beta 多样性分析发现, 各供试样品不同组间明显分开且不同供试样品的各自生物学重复相隔较近, 说明饲喂金霉素制剂和 BMD 制剂会促使白

表 3 属分类水平白羽肉鸡肠道主要菌群的相对丰度差异

Table 3 Relative abundance differences at the genus classification level of major bacteria in the intestinal flora of white feathered broilers

属水平菌群名	CHE	CKB	BMD
粪杆菌属	0.400±0.001	0.103±0.003*	0.202±0.001*
另枝菌属	0.117±0.001	0.300±0.035*	0.177±0.003
<i>Fournierella</i>	0.015±0.010	0.030±0.001*	0.031±0.001*
瘤胃菌科菌	0.082±0.001	0.071±0.002	0.036±0.001**
<i>Erysipelatoclostridium</i>	0.014±0.002	0.021±0.001	0.067±0.001**
布劳特菌属	0.008±0.001	0.011±0.001	0.014±0.001*
<i>Subdoligranulum</i>	0.011±0.001	0.021±0.001	0.041±0.001*
毛螺菌科菌属	0.012±0.001	0.010±0.001	0.044±0.001**
拟杆菌属	0	0	0.033±0.001**
肠球菌属	0.001±0.000	0.000 2±0.000 1	0
其他	0.338±0.001	0.414±0.003*	0.354±0.002*

注:*表示不同组与 CHE 组差异显著($P<0.05$);+表示 BMD 组与金霉素制剂组差异显著($P<0.05$)。

羽肉鸡肠道菌群具有不同的结构特征,证实了金霉素制剂和 BMD 对白羽肉鸡的肠道菌群结构均造成了一定的影响,但略有差异。

饲喂白羽肉鸡促生长最佳剂量的 BMD 与金霉素制剂后,其肠道菌群在门分类水平下主要是由厚壁菌门、拟杆菌门、变形菌门构成,尤其是厚壁菌门与拟杆菌门占比较高,这与成年肉鸡肠道菌群组成研究结果相似^[23-24]。饲喂 BMD 后白羽肉鸡肠道菌群中的拟杆菌门丰度上升,厚壁菌门丰度下降,这也与其他部分抗生素与替代抗生素产品饲喂家禽后的结果类似^[4,24]。与此同时,家禽肠道菌群中的厚壁菌门相对丰度降低或拟杆菌门相对丰度提高都有利于提升家禽的免疫与消化能力,且厚壁菌门/拟杆菌门的比例越低越有利于调节家禽的新陈代谢与脂肪沉积^[24-25]。因此,推测饲喂 BMD 后可能有助于提高白羽肉鸡的免疫力、促吸收与消化能力以及有效改善白羽肉鸡的新陈代谢功能。在属分类水平上,饲喂 BMD 后白羽肉鸡肠道菌群中的 *Fournierella*、*Erysipelatoclostridium*、布劳特菌属、*Subdoligranulum*、毛螺菌科菌属和拟杆菌属相对丰度均显著上升($P<0.05$)。以往研究发现,饲粮中添加抗生素产品可以提高肉鸡拟杆菌属的相对丰度^[15];部分研究表明患有腹泻的畜禽肠道中拟杆菌属相对丰度显著减少^[16],因此拟杆菌属的相对丰度上升有助于增强白羽肉鸡的机体抵抗力、减少腹泻等肠道疾病。柔嫩梭菌群可利用纤维素发酵产生包含丁

酸在内的多种挥发性脂肪酸,而 *Subdoligranulum* 菌属是柔嫩梭菌属的一个亚属,其特性与柔嫩梭菌属相似,也可以利用纤维素发酵产生丁酸^[26],且 *Erysipelatoclostridium* 属也与丁酸的产生具有相关性^[27-28]。因此,饲喂 BMD 后白羽肉鸡肠道菌群中 *Subdoligranulum* 和 *Erysipelatoclostridium* 的相对丰度增加,可以促进白羽肉鸡机体内产生丁酸,达到改善白羽肉鸡肠道微生态健康、提高其免疫力的功效。与此同时,布劳特菌属细菌也可产生短链脂肪酸,通过刺激动物机体免疫反应达到抵挡病原微生物入侵的目的^[29]。饲喂 BMD 后白羽肉鸡肠道菌群中布劳特菌属的相对丰度上升,或许有益于增强肠道抵抗力。研究发现,脂肪因子、能量代谢^[30]及丁酸盐代谢^[31]都与毛螺菌科菌属的生物学功能有较强的相关性。例如郭晓红等研究发现,毛螺菌科菌属对于仔猪发育过程中能量代谢等有重要作用^[32]。因此,饲喂 BMD 后白羽肉鸡肠道菌群中毛螺菌科菌属的相对丰度增加,可以增强白羽肉鸡肠道对食物的消化代谢能力。总之,适宜剂量的 BMD 作为新型药物添加剂饲喂白羽肉鸡后,可有效改善白羽肉鸡的肠道微生态健康。

4 结 语

利用 BMD 和传统抗生素金霉素制剂分别饲喂白羽肉鸡后,比较其促生长性能和对肠道菌群结构的影响。证实了 BMD 的添加可以降低白羽肉鸡的

料重比,促进白羽肉鸡快速生长发育,同时改善白羽肉鸡肠道菌群的健康情况,表现为益生菌的相对丰度增加。这对于应用BMD促进白羽肉鸡生长性

能和改善肠道菌群健康以及更好地保障白羽肉鸡制品的供应提供了依据。

参考文献:

- [1] CHEN Q C, W SAATKAMP H, CORTENBACH J, et al. Comparison of Chinese broiler production systems in economic performance and animal welfare[J]. **Animals**, 2020, 10(3):491.
- [2] 陈来华, 李娟, 王亚辉. 2020年我国白羽肉鸡产业回顾与展望[J]. 中国畜牧杂志, 2021, 57(5):253-258.
CHEN L H, LI J, WANG Y H. Review and prospect of China's white feather broiler industry in 2020[J]. **Chinese Journal of Animal Science**, 2021, 57(5):253-258. (in Chinese)
- [3] 杨瑞思, 江宇航, 张关令, 等. 复合噬菌体裂解酶对白羽肉鸡肠道菌群结构和肝脏抗氧化酶指标的影响[J]. 微生物学通报, 2021, 48(9):3116-3129.
YANG R S, JIANG Y H, ZHANG G L, et al. Effects of complex phage lysis on growth performance, organ index and major antioxidant enzyme activities in white feather broilers[J]. **Microbiology China**, 2021, 48(9):3116-3129. (in Chinese)
- [4] 刘崇海, 杨锡强, 刘春花, 等. 变应性气道反应与抗生素诱导的肠道菌群失调关系研究[J]. 中华儿科杂志, 2007, 45(6):450-454.
LIU C H, YANG X Q, LIU C H, et al. Allergic airway response associated with the intestinal microflora disruption induced by antibiotic therapy[J]. **Chinese Journal of Pediatrics**, 2007, 45(6):450-454. (in Chinese)
- [5] 王娜, 商志伟, 赵敏. 微生态制剂对仔猪生长性能及肠道菌群的影响[J]. 食品与生物技术学报, 2014, 33(3):255-260.
WANG N, SHANG Z W, ZHAO M. Effects of probiotics on growth and intestinal microflora of piglets[J]. **Journal of Food Science and Biotechnology**, 2014, 33(3):255-260. (in Chinese)
- [6] 蒋正宇, 周岩民, 许毅, 等. 低聚木糖、益生菌及抗生素对肉鸡肠道菌群和生产性能的影响[J]. 家畜生态学报, 2005, 26(2):11-15.
JIANG Z Y, ZHOU Y M, XU Y, et al. Effects of xylooligosaccharides, probiotics and antibiotics on intestinal microflora and performance of broilers[J]. **Ecology of Domestic Animal**, 2005, 26(2):11-15. (in Chinese)
- [7] ROBINSON K, XIAO Y P, JOHNSON T J, et al. Chicken intestinal mycobiome: initial characterization and its response to bacitracin methylene disalicylate[J]. **Applied and Environmental Microbiology**, 2020, 86(13):e00304-e00320.
- [8] 刘明, 朱杰, 李佳丽, 等. 亚甲基水杨酸杆菌肽对断奶仔猪血清与肠道抗氧化指标的影响[J]. 云南农业大学学报(自然科学), 2020, 35(2):276-281.
LIU M, ZHU J, LI J L, et al. Effects of bacitracin methylene disalicylate on the serum and intestine antioxidant indicators of weaning rabbits[J]. **Journal of Yunnan Agricultural University (Natural Science)**, 2020, 35(2):276-281. (in Chinese)
- [9] 何文峰, 唐钧. 日粮中添加亚甲基水杨酸杆菌肽对肉鸡生长及屠宰性能的影响[J]. 安徽农业科学, 2020, 48(9):121-124.
HE W F, TANG J. Effects of adding methylenesalicylic bacitracin in the diet on the growth and slaughter performance of broilers[J]. **Journal of Anhui Agricultural Sciences**, 2020, 48(9):121-124. (in Chinese)
- [10] PROCTOR A, PHILLIPS G J. Differential effects of bacitracin methylene disalicylate (BMD) on the distal colon and cecal microbiota of young broiler chickens[J]. **Frontiers in Veterinary Science**, 2019, 6:114-121.
- [11] GADDE U D, OH S, LILLEHOJ H S, et al. Antibiotic growth promoters virginiamycin and bacitracin methylene disalicylate alter the chicken intestinal metabolome[J]. **Scientific Reports**, 2018, 8(1):3592-3601.
- [12] 胡雪. 亚甲基水杨酸杆菌肽可溶性粉防治兔坏死性肠炎的有效性和靶动物安全性评价[D]. 扬州:扬州大学, 2019.
- [13] CHEN Y, HU S S, LI J L, et al. Bacitracin methylene disalicylate improves intestinal health by modulating its development and microbiota in weaned rabbits[J]. **Frontiers in Microbiology**, 2021, 12:579006.
- [14] 王乙茹, 柳成东, 白华毅, 等. 一株凝结芽孢杆菌 YNAU5517 对热应激肉鸡生长性能影响的初探[J]. 饲料工业, 2019, 40(5):16-22.
WANG Y R, LIU C D, BAI H Y, et al. Effects of the diet supplement of *Bacillus coagulans* YNAU 5517 on broiler growth performance under heat stress conditions[J]. **Feed Industry**, 2019, 40(5):16-22. (in Chinese)
- [15] 杨保和, 白华毅, 王桂瑛, 等. 添加凝结芽孢杆菌对生长猪生产性能的影响[J]. 饲料博览, 2018(2):5-8.
YANG B H, BAI H Y, WANG G Y, et al. Effects of *Bacillus coagulans* additive on the production performance of growing pigs[J]. **Feed Review**, 2018(2):5-8. (in Chinese)
- [16] 卢盛勇, 陈胜昌, 张滔滔, 等. 酸汤对断奶仔猪生长性能、免疫性能、抗氧化性能及肠道微生物区系的影响[J]. 动物营养学报, 2021, 33(1):1-8.

- 2021,33(2):769-778.
- LU S Y, CHEN S C, ZHANG T T, et al. Effects of sour soup on growth performance, immune performance, antioxidant performance and intestinal microflora of weaned piglets[J]. **Chinese Journal of Animal Nutrition**, 2021, 33(2):769-778. (in Chinese)
- [17] YAN H L, YU B, DEGROOTE J, et al. Antibiotic affects the gut microbiota composition and expression of genes related to lipid metabolism and myofiber types in skeletal muscle of piglets[J]. **BMC Veterinary Research**, 2020, 16(1):392.
- [18] LIANG D Z, YANG Q H, TAN B P, et al. Dietary vitamin A deficiency reduces growth performance, immune function of intestine, and alters tight junction proteins of intestine for juvenile hybrid grouper (*Epinephelus fuscoguttatus* ♀ × *Epinephelus lanceolatus* ♂)[J]. **Fish & Shellfish Immunology**, 2020, 107(A):346-356.
- [19] YAMASHIRO Y. Gut microbiota in health and disease[J]. **Annals of Nutrition & Metabolism**, 2017, 71(3/4):242-246.
- [20] 曾晨熾, 林茂, 李忠琴, 等. 基于 16S rRNA 基因扩增子测序分析日本囊对虾肠道菌群结构与功能的特征[J]. 微生物学报, 2020, 47(6):1857-1866.
- ZENG C X, LIN M, LI Z Q, et al. The structural and functional characteristics of the gut microbiota of *Marsupenaeus japonicus* as revealed by 16S rRNA gene amplicon sequencing[J]. **Microbiology China**, 2020, 47(6):1857-1866. (in Chinese)
- [21] 魏本良, 刘长根, 肖阳生, 等. 基于 Illumina HiSeq 技术分析浆水中细菌多样性及理化性质[J]. 食品科学, 2019, 40(6):62-68.
- WEI B L, LIU C G, XIAO Y S, et al. Bacterial diversity analysis using illumina HiSeq sequencing of Jiangshui, a Chinese fermented vegetable food, and its physicochemical properties[J]. **Food Science**, 2019, 40(6):62-68. (in Chinese)
- [22] EDGAR R C, HAAS B J, CLEMENTE J C, et al. UCHIME improves sensitivity and speed of chimera detection [J]. **Bioinformatics**, 2011, 27(16):2194-2200.
- [23] HIROI M, MATSUI S, KUBO R, et al. Factors for occurrence of extended-spectrum β -lactamase-producing *Escherichia coli* in broilers[J]. **The Journal of Veterinary Medical Science**, 2012, 74(12):1635-1637.
- [24] 贾刚, 晏家友, 王辉, 等. 缓释复合酸化剂对艾维茵白羽肉鸡消化道酸度、免疫指标及鸡舍氨浓度的影响[J]. 动物营养学报, 2009, 21(5):747-754.
- JIA G, YAN J Y, WANG H, et al. Effects of slow-release compound acidifiers on gastrointestinal pH and immune index of avine broilers and ammonia concentration in chicken house [J]. **Chinese Journal of Animal Nutrition**, 2009, 21(5):747-754. (in Chinese)
- [25] 于佳民, 陈振, 齐秀晔, 等. 复合微生态制剂、饲用抗生素对肉鸡生长性能、肠道菌群数量和免疫性能的影响[J]. 中国畜牧兽医, 2018, 45(8):2219-2226.
- YU J M, CHEN Z, QI X Y, et al. Effects of compound probiotics and antibiotics on growth performance, intestinal flora and immune function of broilers[J]. **China Animal Husbandry and Veterinary Medicine**, 2018, 45(8):2219-2226. (in Chinese)
- [26] 张铮, 朱坤, 朱伟云, 等. 发酵饲料对生长育肥猪结肠微生物发酵及菌群组成的影响[J]. 微生物学报, 2019, 59(1):93-102.
- ZHANG Z, ZHU K, ZHU W Y, et al. Effect of a fermented feed on colonic fermentation and microbial composition in finishing pig[J]. **Acta Microbiologica Sinica**, 2019, 59(1):93-102. (in Chinese)
- [27] POZUELO M, PANDA S, SANTIAGO A, et al. Reduction of butyrate- and methane-producing microorganisms in patients with irritable bowel syndrome[J]. **Scientific Reports**, 2015, 5:12693.
- [28] FUKUDA S, TOH H, HASE K, et al. Bifidobacteria can protect from enteropathogenic infection through production of acetate[J]. **Nature**, 2011, 469(7331):543-547.
- [29] 宦徽, 涂庆丽, 魏清, 等. 16S rDNA 测序探讨藏族和汉族肠易激综合征患者肠道菌群的差异[J]. 中国临床研究, 2020, 33(12):1601-1606.
- HUAN H, TU Q L, WEI Q, et al. 16S rDNA sequencing in exploring the difference of intestinal flora between Tibetan and Han patients with irritable bowel syndrome[J]. **Chinese Journal of Clinical Research**, 2020, 33(12):1601-1606. (in Chinese)
- [30] GOMEZ-ARANGO L F, BARRETT H L, MCINTYRE H D, et al. Connections between the gut microbiome and metabolic hormones in early pregnancy in overweight and obese women[J]. **Diabetes**, 2016, 65(8):2214-2223.
- [31] SARESELLA M, MENDOZZI L, ROSSI V, et al. Immunological and clinical effect of diet modulation of the gut microbiome in multiple sclerosis patients: a pilot study[J]. **Frontiers in Immunology**, 2017, 8:1391.
- [32] 郭晓红, 郭玉龙, 刘亚丹, 等. 仔猪不同发育阶段结肠微生物菌群特征分析[J]. 畜牧兽医学报, 2019, 50(9):1759-1774.
- GUO X H, GUO Y L, LIU Y D, et al. Characteristics of intestinal microflora of colon at different developmental stages in piglets [J]. **Acta Veterinaria et Zootechnica Sinica**, 2019, 50(9):1759-1774. (in Chinese)