



不同添加水平的磷酸一二钙对肉鸡生产性能、钙磷代谢及盲肠微生物的影响

刘 景¹, 陈炳钊^{1,2}, 李忠荣¹, 何姝颖³, 张世忠¹, 邱华玲¹,
缪伏荣¹, 陈 卓⁴, 陈鑫珠^{1,2*}

(1. 福建省农业科学院畜牧兽医研究所, 福州 350013; 2. 福建省新闽科生物科技开发有限公司, 福州 350008;
3. 中化云龙有限公司, 成都 655204; 4. 福建商学院工商管理学院, 福州 350016)

摘 要: 本试验旨在研究磷酸一二钙(MDCP)对 AA 肉鸡生产性能、血液生化指标、胫骨强度、骨骼中钙、磷代谢和盲肠微生物生态的影响以及在饲料中完全替代磷酸氢钙的适宜磷酸一二钙添加水平。试验选取健康的 1 日龄 AA 肉鸡 450 只, 随机分为 5 组。对照组(CK)以磷酸氢钙(DCP)补充饲料非植酸磷, 试验组以 MDCP 补充饲料非植酸磷, 试验 1 组至试验 4 组饲料中非植酸磷水平分别为对照组的 60%、80%、100% 及 120%, 即 T1、T2、T3 和 T4。每组 6 个重复, 每个重复 15 只, 试验期 42 d。于试验第 19~21 天和第 39~41 天进行代谢试验, 于第 21、42 天分别进行生产性能、血液、盲肠微生物等指标测定和样品采集及分析。结果表明: 1) 与对照组相比, 不同试验组均显著提高 21 d 和 42 d 肉鸡的生产性能($P < 0.05$), 其中试验 2 组欧洲指数最高; 2) 除试验 1 组钙表观代谢率外, 其他 3 个试验组 21 d 钙、磷的表观代谢率显著降低($P < 0.05$), 试验 1 组和试验 2 组 42 d 的钙、磷表观代谢率显著提高($P < 0.05$); 3) 试验 1 组 21 d 胫骨的钙含量较对照组显著升高($P < 0.05$), 磷和最大应力显著降低($P < 0.05$), 试验 3 组 42 d 胫骨的钙和磷含量较对照组和试验 1 组显著提高($P < 0.05$), 试验 2 组和试验 3 组的最大应力显著高于其他处理组($P < 0.05$); 4) 试验 1 组 21 d 血磷含量较对照组显著降低($P < 0.05$), 试验 4 组较对照组显著提高($P < 0.05$); 5) 肉鸡盲肠微生物高通量测序结果表明, 对照组和 4 个试验组 21 d 肉鸡盲肠微生物有明显差异, 聚类分支距离较远, 42 d 肉鸡试验组的微生物多样性较对照组丰富, 其多样性明显高于 21 d。综合各项指标结果表明, 添加 MDCP 磷源的量为 DCP 磷源量的 80% 时, 肉鸡 1~21 和 1~42 d 的生产性能、血液、骨骼指标均能达到最佳效果, 同时有助于肠道微生物的稳定和健康。
关键词: 肉鸡; 磷酸一二钙; 磷酸氢钙; 生产性能; 血液生化指标; 盲肠微生物
中图分类号: S816.71 文献标志码: A 文章编号: 0366-6964(2020)06-1306-14

Effects of Different Dietary Mono-dicalcium Phosphate Supplementation on Production Performance, Blood Parameters, Bone Calcium, Phosphorus Metabolism and Cecal Microecology in Broilers

LIU Jing¹, CHEN Bingdian^{1,2}, LI Zhongrong¹, HE Shuying³, ZHANG Shizhong¹,
QIU Hualing¹, MIAO Furong¹, CHEN Zhuo⁴, CHEN Xinzhu^{1,2*}

(1. *Animal Husbandry and Veterinary Medicine Institute, Fujian Academy of Agricultural Sciences, Fuzhou 350013, China*; 2. *Fujian Xinminke Biology Science and Technology Development Co., Ltd., Fuzhou 350008, China*; 3. *Sinochem Yunlong Co., Ltd., Chengdu 655204, China*; 4. *Business Administration College, Fujian Business University, Fuzhou 350016, China*)

收稿日期: 2020-01-07
基金项目: 省属公益类科研院所(2016R1022-4); 福建省农业科学院对外合作项目(DEC201909)
作者简介: 刘 景(1967-), 男, 福建长乐人, 副研究员, 本科, 主要从事动物营养需要及资源化利用研究, E-mail: 184660569@qq.com
* 通信作者: 陈鑫珠, 主要从事动物营养与饲料科学方面的研究, E-mail: 010622051@163.com

Abstract: The purpose of this experiment was to study the effects of mono-dicalcium phosphate (MDCP) on growth performance, serum biochemical indices, tibia indices, metabolism of calcium and phosphorous in bone and cecal microecology of AA broilers and to evaluate the appropriate level of addition for the complete replacement of dicalcium phosphate (DCP) with MDCP in diet. A total of 450 one-day old AA broilers were randomly divided into 5 groups. DCP was used as the control group(CK). Four levels of MDCP were used to replace DCP to provide non-phytate phosphorus which was provided 60%, 80%, 100%, and 120% of the total non-phytate phosphorus labeled as treatment 1 (T1), treatment 2(T2), treatment 3(T3) and treatment 4(T4), respectively, with 6 replicates per group and 15 broilers per replicate for a 42-day trial period. Metabolic traits were conducted from day 19 to 21 and day 39 to 41, respectively. Data of production performance, blood samples, and cecal microbes were collected and analyzed on 21 and 42 d, respectively. The results showed as follows: 1) Compared with the CK group, the MDCP test groups improved the performance of broilers at 21 and 42 d significantly ($P < 0.05$), and T2 group had the highest European index. 2) The apparent metabolic rate of calcium and phosphorus were decreased significantly in T2, T3 and T4 groups ($P < 0.05$) at 21 d, and was increased significantly in T1 and T2 groups at 42 d ($P < 0.05$). 3) Tibia calcium content of T1 group was significantly increased and phosphorus and maximum stress were significantly decreased at 21 d compared with CK group ($P < 0.05$), tibia calcium and phosphorus content of T3 group were significantly increased compared with CK and T1 group at 42 d ($P < 0.05$), the maximum stress of T2 and T3 group were significantly higher than the other groups at 42 d ($P < 0.05$). 4) Compared with CK group, the blood phosphorus content was significantly decreased in T1 group ($P < 0.05$), and was significantly increased in T4 group ($P < 0.05$). 5) The results of high-throughput sequencing of cecal microbes in broiler chickens showed that there were significant differences in cecal microbes between the CK group and the T1-T4 groups, and the clustering distance was farther at 21 d. The diversity of cecal microbes at 42 d was significantly higher than at 21 d. The results of various indicators showed that MDCP could replace DCP as a source of non-phytate phosphorus in broiler chickens. According to European index, tibia indices, serum biochemical indices and cecal microbes of broilers, the MDCP at 80% replacement level had the best performance.

Key words: broiler; mono-dicalcium phosphate (MDCP); dicalcium phosphate (DCP); growth performance; serum biochemical indices; cecal microbes

* **Corresponding author:** CHEN Xinzhu, E-mail: 010622051@163.com

饲料磷酸盐是矿物元素添加剂,参与动物体内新陈代谢,能够提高动物生长和生产性能,防止和减少疾病,主要用于畜禽、水产等养殖动物饲料中^[1]。目前,饲料磷酸盐产品主要包括:磷酸氢钙(DCP) $[\text{CaHPO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}]$ 、磷酸二氢钙(MCP) $[\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}]$ 、脱氟磷酸钙(DFP) $[\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2]$ 、磷酸一二钙(MDCP) $[\text{CaHPO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O} \cdot \text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}]$ 等,其他磷酸盐产品,如磷酸一铵(MAP)、磷酸二铵(DAP)、磷酸钙镁、尿素磷酸盐等较少应用在畜禽饲料中^[2]。当前 DCP 是使用最多的磷酸盐,但 DCP 中磷难溶

于水,动物对其有效成分的吸收率低(不到 60%),其余磷、钙元素随粪便排出,会对地下水资源、土壤等造成污染问题^[3]。MDCP 是磷酸二氢钙(MCP)与磷酸氢钙(DCP)的共晶结合物,有效成分的吸收率高于 DCP ($> 75\%$),且粪便中残留的磷较少,其用于取代 DCP 成为近年来的研究热点之一^[2-3]。

磷是家禽必需的矿物质元素,在核酸代谢、能量代谢、骨骼发育和钙化过程中具有重要作用^[4]。上世纪 90 年代,以 DCP 为主的无机磷源是家禽主要的磷源补充原料^[2]。随着科技发展,科学家研制出了一种 MCP 和 DCP 的共晶结合物 MDCP,因其磷

利用率高而被用来替代 DCP。相较 DCP, MDCP 是家禽更好的磷源^[1], 动物对其有效成分的吸收率远高于 DCP (>75%)。万敏艳等^[5]研究 MDCP 对肉鸡相对生物学利用率结果表明, 相对于 DCP (100%), MDCP 对肉鸡的生物学利用率是 112.5%。另有报道表明, 肉鸡肠道微生物区系受饲料因素的影响^[6], 饲料中的碳水化合物、脂质、粗蛋白质水平及来源、益生元的添加等均对肉鸡肠道微生物有影响^[7]。小麦饲料中的豆油被癸酸和月桂酸替代, 肉鸡回肠乳杆菌科 (Lactobacillaceae) 的乳杆菌属以及细球菌科 (Micrococcaceae) 和肠球菌科一些菌属的数量显著降低, 肠杆菌科数量显著升高, 同时回肠食糜 pH 显著降低^[8]。当肉鸡饲料粗蛋白质水平在 NRC(1994) 基础上均下调 1.8 个百分点时, 其回肠大肠杆菌的数量有降低^[9]。饲喂动物性蛋白的饲料, 肉鸡盲肠中双歧杆菌属数量显著增加^[10]。矿物质元素中磷源的改变是否对肉鸡肠道微生物产生影响, 目前未见报道。因此, 本研究在无植酸酶添加的条件下, 采用无抗日粮配方探讨肉鸡饲料中不

同添加水平的 MDCP 对肉鸡生产性能、钙磷代谢及盲肠微生物的影响, 以期 MDCP 在饲料中经济合理的利用提供科学依据和理论指导。

1 材料与方法

1.1 试验材料

磷酸一二钙 (MDCP) 和磷酸氢钙 (DCP) 均由中化云龙有限公司提供, 其中饲料级 MDCP 的钙和无机磷含量分别为 14.7% 和 21.4%; 饲料级 DCP 纯度为 99%, 钙、无机磷含量分别为 23.0% 和 17.7%。AA 肉鸡购于福建圣农集团有限公司。

1.2 试验设计

选取 1 日龄 AA 肉鸡 450 只, 随机分为 5 组, 每组 6 个重复, 每重复 15 只, 各组肉鸡初始体重差异不显著。对照组 (CK) 以磷酸氢钙 (DCP) 补充饲料非植酸磷, 试验组以磷酸一二钙 (MDCP) 补充饲料非植酸磷, 试验 1 至 4 组饲料中非植酸磷水平分别为对照组的 60%、80%、100% 和 120%, 即 T1、T2、T3 和 T4。试验设计见表 1, 试验期 42 d。

表 1 试验设计

Table 1 The design of experiments

组别 Group	饲料中非植酸磷来源 Phosphorus source
CK	磷酸氢钙 (DCP)
T1	磷酸一二钙 (MDCP), 非植酸磷水平为对照组的 60%
T2	磷酸一二钙 (MDCP), 非植酸磷水平为对照组的 80%
T3	磷酸一二钙 (MDCP), 非植酸磷水平为对照组的 100%
T4	磷酸一二钙 (MDCP), 非植酸磷水平为对照组的 120%

1.3 试验饲料

试验饲料参考《鸡饲养标准》(NY/T33—2004) 营养推荐量和 AA 商品代肉鸡营养标准配制, 饲料中除钙磷水平不同外, 其他营养水平均一致, 钙与总磷比值 (钙磷比) 保持在 1.2~1.4 之间。试验饲料组成与营养水平见表 2。所有饲料均添加 0.40% 二氧化钛作为外源性指示剂。

1.4 饲养管理

试验采用全封闭式鸡舍笼养方式, 自由采食和饮水。各组间重复采用随机排列。按 (AA) 商品代肉鸡饲养管理手册进行日常管理和免疫, 粉料食槽投喂, 每日记录饲料消耗量和鸡死亡及淘汰数, 记录试验鸡疫苗接种情况、疾病发生及治疗情况。

1.5 样品采集与制备

于试验第 19~21 天和第 39~41 天进行消化代谢试验, 每天下午定时收集全部新鲜粪样 (挑出里面的羽毛、饲料、皮屑等杂物), 混合后取 20% 放于自封袋内, 喷洒 10% 盐酸溶液后 4 °C 冰箱保存, 最后将 3 d 收集的粪样于 65 °C 烘箱中烘干, 置室温下回潮 24 h, 粉碎过 40 目筛, 待测钙和磷的含量。

于试验期第 20 和 41 天晚上 20:00 起试验鸡禁食, 12 h 后个体称重, 并从每个重复选取 2 只接近平均体重的肉鸡, 翅静脉采血 5 mL, 静置 30 min 后, 将血液 3 000 r·min⁻¹ 离心 10 min, 取血清分 2 份装于 1.5 mL 冷冻管于 -20 °C 保存, 待测血清钙、磷含量和碱性磷酸酶活性。采血后的鸡通过颈部移位处

表 2 试验饲粮组成与营养水平(风干基础)

Table 2 Composition and nutrient levels of experimental diets (air-dry basis)

%

项目 Item	1-21 d					22-42 d				
	CK	T 1	T 2	T 3	T 4	CK	T 1	T 2	T 3	T 4
原料 Ingredient										
玉米 Corn	55.5	55.5	55.5	55.5	55.5	54.8	54.8	54.8	54.8	54.8
豆粕 Soybean meal	22.0	22.0	22.0	22.0	22.0	23	23	23	23	23
发酵豆粕 Fermented soybean meal	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0					
膨化大豆 Puffed soybeans	10.0	10.0	10.0	10.0	10.0	16	16	16	16	16
豆油 Soybean oil						2	2	2	2	2
石粉 Limestone	1.25	1.89	1.78	1.65	1.36	1.15	1.67	1.60	1.5	1.25
磷酸氢钙 CaHPO_4	1.85	—	—	—	—	1.65	—	—	—	—
磷酸一二钙 $\text{CaHPO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O} \cdot \text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$	—	0.87	1.16	1.45	1.74	—	0.78	1.04	1.3	1.55
氯化钠 NaCl	0.22	0.22	0.22	0.22	0.22	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3
DL-蛋氨酸 DL-Met	0.18	0.18	0.18	0.18	0.18	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10
沸石粉 Zeolite powder	—	0.35	0.16	—	—		0.36	0.16	—	—
预混料 Premix ¹⁾	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
合计 Total	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
营养水平 Nutrient level ²⁾										
代谢能/(MJ·kg ⁻¹) ME	12.4	12.4	12.4	12.4	12.4	12.9	12.9	12.9	12.9	12.9
粗蛋白质 CP	21.45	21.45	21.45	21.45	21.45	20.0	20.0	20.0	20.0	20.0
粗脂肪 EE	4.13	4.13	4.13	4.13	4.13	6.98	6.98	6.98	6.98	6.98
钙 Ca	1.0	1.0	1.0	1.0	0.94	0.91	0.90	0.91	0.91	0.86
总磷 TP	0.71	0.58	0.64	0.70	0.77	0.64	0.5	0.59	0.64	0.69
非植酸磷 AP	0.45	0.32	0.38	0.45	0.51	0.40	0.30	0.35	0.40	0.46
赖氨酸 Lys	1.16	1.16	1.16	1.16	1.16	1.08	1.08	1.08	1.08	1.08
蛋氨酸 Met	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.40	0.40	0.40	0.40	0.40
蛋+胱氨酸 Met+Cys	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.75	0.75	0.75	0.75	0.75
苏氨酸 Thr	0.82	0.82	0.82	0.82	0.82	0.77	0.77	0.77	0.77	0.77
色氨酸 Try	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.23	0.23	0.23	0.23	0.23

¹⁾. 1~21 d, 预混料为每千克饲料提供: 铜 8 mg、铁 72 mg、锰 78 mg、锌 60 mg、碘 0.36 mg、硒 0.24 mg、氯化胆碱 600 mg、VA 9 900 IU、VD₃ 2 200 IU、VE 22 mg、VK₃ 2.2 mg、VB₁ 2.2 mg、VB₂ 5.5 mg、VB₆ 2.2 mg、VB₁₂ 16.5 μg、烟酸 22 mg、泛酸钙 11 mg、叶酸 1.1 mg、生物素 88 μg; 22~42 d, 预混料为每千克饲料提供: 铜 8 mg、铁 72 mg、锰 78 mg、锌 60 mg、碘 0.36 mg、硒 0.24 mg、VA 9 000 IU、VD₃ 2 000 IU、VE 20 mg、VK₃ 2 mg、VB₁ 2 mg、VB₂ 5 mg、VB₆ 2 mg、VB₁₂ 15 μg、烟酸 20 mg、泛酸钙 10 mg、叶酸 1 mg、生物素 80 μg。²⁾. 表中的饲粮营养组成值均为计算值

¹⁾. d 1-21, premix is provided per kg of feed: Cu 8 mg, Fe 72 mg, Mn 78 mg, Zn 60 mg, I 0.36 mg, Se 0.24 mg, choline chloride 600 mg, VA 9 900 IU, VD₃ 2 200 IU, VE 22 mg, VK₃ 2.2 mg, VB₁ 2.2 mg, VB₂ 5.5 mg, VB₆ 2.2 mg, VB₁₂ 16.5 μg, VB₃ 22 mg, VB₅ 11 mg, VB₉ 1.1 mg, VH 88 μg; d 22-42, premix is provided per kg of feed: Cu 8 mg, Fe 72 mg, Mn 78 mg, Zn 60 mg, I 0.36 mg, Se 0.24 mg, VA 9 000 IU, VD₃ 2 000 IU, VE 20 mg, VK₃ 2 mg, VB₁ 2 mg, VB₂ 5 mg, VB₆ 2 mg, VB₁₂ 15 μg, VB₃ 20 mg, VB₅ 10 mg, VB₉ 1 mg, VH 80 μg. ²⁾. The dietary nutrition composition values in the table are calculated values

死,取鸡的左右腿胫骨,去除肌肉和结缔组织,右胫骨放入 -20°C 保存以备分析胫骨强度。左胫骨用无水乙醇脱脂 48 h,再于 105°C 烘干 48 h,粉碎以备分析钙和磷的含量。使用无菌操作采集肉鸡盲肠新鲜内容物放入 10 mL 无菌冻存管中,快速放入液氮罐,带回实验室用 -80°C 冰箱保存。

1.6 指标测定

1.6.1 生产性能 以重复为单位,测定试验第 1、21 和 42 天肉鸡空腹体重,每天记录各重复饲料消耗量、死淘数,计算 1~21 和 22~42 d 平均日采食量(ADFI)、平均日增重(ADG)及料重比(F/G)。

1.6.2 钙磷表观消化率 在 1~21 和 22~42 d 两个阶段各 3 d 收粪期,采取全收粪法代谢试验。试验饲料和代谢排泄物均测定钙、磷和二氧化钛含量,并测定饲料酸力,计算干物质、钙和磷表观代谢率。其中钙和磷含量的测定参考张丽英^[11]方法;按照 Short 等^[12]描述的方法进行二氧化钛含量的测定。

1.6.3 血清生化指标 采用 DIRUI 600 全自动生化分析仪测定血清中的血钙、血磷、全套生化指标。

1.6.4 胫骨强度 采用日本岛津 AG-IC 20KN 骨强度测定仪对解剖剥净的右胫骨进行骨强度测定。

1.6.5 欧洲指数 肉鸡欧洲指数(EPI)的计算方法: $\text{EPI} = [\text{成活率} \times \text{体重}(\text{kg})] / (\text{料肉比} \times \text{出栏天数}) \times 10\,000$ 。

1.6.6 盲肠微生物菌群分析 按照粪便基因组提取试剂盒(Omega D40-15)操作说明,提取盲肠内容物总 DNA,用核酸浓度测定仪检测其浓度和纯度。采用 0.8% 琼脂糖凝胶电泳检测 DNA 完整性。

16S rRNA V3-V4 区扩增、基因测序文库构建和 Illumina Miseq 测序及数据生物学分析委托诺禾致源生物信息科技有限公司完成。

1.7 数据统计

试验数据用“平均值±标准差”表示,采用 Excel 软件对数据进行初步整理统计,采用 SPSS19.0 对试验数据进行单因子方差分析(one-way ANOVA),Duncan 氏多重比较检验, $P < 0.05$ 判定为差异显著。

2 结果

2.1 MDCP 不同添加水平对肉鸡生产性能影响

由表 3 可知,4 个 MDCP 试验组 21 d 的平均活

体重(BW)、平均日采食量(ADFI)和平均日增重(ADG)显著高于对照组($P < 0.05$),料重比(F/G)显著低于对照组($P < 0.05$);另外,试验 2 组和试验 4 组 F/G 显著低于试验 1 组($P < 0.05$)。42 d 试验 2 组、试验 3 组和试验 4 组的平均活体重(BW)、平均日采食量(ADFI)和平均日增重(ADG)显著高于对照组($P < 0.05$)。21 和 42 d 各组死亡率均无显著差异($P > 0.05$)。各组的欧洲指数(EPI)排序为:试验 2 组 > 试验 3 组 > 试验 4 组 > 对照组 > 试验 1 组。

2.2 MDCP 不同添加水平对肉鸡养分表观代谢率的影响

由表 4 可见,21 d 钙表观代谢率,对照组和试验 1 组显著高于试验 2 组、3 组和试验 4 组($P < 0.05$);磷表观代谢率,对照组显著高于 4 个试验组($P < 0.05$)。42 d 钙、磷表观代谢率,对照组显著低于试验 1 组和试验 2 组($P < 0.05$),试验 1 组钙、磷的表观代谢率显著高于其他组($P < 0.05$)。

2.3 MDCP 不同添加水平对肉鸡胫骨指标的影响

由表 5 可见,21 d 试验 1 组肉鸡胫骨中的钙含量显著高于对照组($P < 0.05$),磷含量和最大应力显著低于对照组($P < 0.05$);试验 3 组最大应力显著高于对照组和试验 1 组($P < 0.05$);42 d 试验 3 组肉鸡胫骨中钙、磷含量和最大应力显著高于对照组和试验 1 组($P < 0.05$),试验 3 组的最大应力显著高于试验 4 组($P < 0.05$);另外,试验 2 组最大应力显著高于对照组、试验 1 组和试验 4 组($P < 0.05$)。

2.4 MDCP 不同添加水平对肉鸡血清生化指标的影响

2.4.1 MDCP 不同添加水平对肉鸡血钙、血磷和碱性磷酸酶的影响 由表 6 可见,21 d 肉鸡血钙含量对照组与 4 个试验组无显著差异($P > 0.05$),试验 1 组显著低于试验 2 组和试验 4 组($P < 0.05$);对照组血磷含量显著高于试验 1 组($P < 0.05$),显著低于试验 4 组($P < 0.05$),试验 1 组显著低于试验 4 组($P < 0.05$);各组碱性磷酸酶含量无显著差异($P > 0.05$)。42 d 肉鸡各组的血钙、血磷和碱性磷酸酶含量均无显著差异($P > 0.05$)。

2.4.2 MDCP 不同添加水平对肉鸡血清蛋白的影响 由表 7 可见,21 d 肉鸡血清中的白蛋白和球蛋白试验 1 组显著低于试验 2 组、试验 3 组和试验 4 组($P < 0.05$),总蛋白和白球比各组间无显著差异($P > 0.05$)。42 d 肉鸡血清中的各种蛋白成分均无显著差异($P > 0.05$)。

表 3 MDCP 不同添加水平对肉鸡生产性能的影响

Table 3 Effects of dietary MDCP supplementation on growth performance of broilers

项目 Item	CK	T1	T2	T3	T4
1~21 d					
体重/g BW	564.31±20.77 ^b	717.52±81.23 ^a	796.26±4.62 ^a	751.11±12.16 ^a	733.50±34.94 ^a
平均日采食量/(g·d ⁻¹)	45.14±0.37 ^b	53.47±6.40 ^a	54.23±1.42 ^a	53.61±0.58 ^a	51.00±1.19 ^a
ADFI					
平均日增重/(g·d ⁻¹)	25.06±0.98 ^b	32.35±3.87 ^a	36.10±0.22 ^a	33.95±0.58 ^a	33.11±1.66 ^a
ADG					
料重比 F/G	1.80±0.07 ^a	1.65±0.01 ^b	1.50±0.03 ^c	1.58±0.03 ^{bc}	1.54±0.05 ^c
死亡率/% Mortality	3.33±2.89	1.67±2.89	1.67±2.89	0.00±0.00	1.67±2.89
1~42 d					
体重/g BW	2 866.75±78.54 ^c	2 961.01±111.94 ^c	3 535.57±83.04 ^a	3 364.71±75.81 ^{ab}	3 242.90±141.70 ^b
平均日采食量/(g·d ⁻¹)	110.45±2.22 ^b	122.51±14.27 ^{ab}	134.59±5.96 ^a	129.19±2.87 ^a	126.74±6.45 ^a
ADFI					
平均日增重/(g·d ⁻¹)	109.60±2.22 ^b	121.66±14.27 ^{ab}	133.74±5.96 ^a	128.34±2.87 ^a	125.89±6.45 ^a
ADG					
料重比 F/G	1.76±0.04	1.88±0.18	1.73±0.04	1.75±0.02	1.78±0.04
死亡率/% Mortality	1.67±2.89	0.00±0.00	0.00±0.00	0.00±0.00	0.00±0.00
欧洲指数 EPI	381.24±5.79	357.00±6.88	486.59±7.34	457.78±3.65	433.77±5.78

同行(下表为同列)数据肩标不同小写字母表示差异显著($P < 0.05$),相同或无字母表示差异不显著($P > 0.05$);下同
 Values in the same row (column in the other tables) with different small letter superscripts mean significant difference ($P < 0.05$), while with the same or no letter superscripts mean no significant difference ($P > 0.05$); The same as below

表 4 MDCP 不同添加水平对肉鸡养分表观代谢率的影响

Table 4 Effects of dietary MDCP supplementation on apparent nutrient metabolic rates of broilers

组别 Group	21 d		42 d	
	钙 Ca	磷 P	钙 Ca	磷 P
CK	0.50±0.06 ^a	0.56±0.04 ^a	0.66±0.01 ^d	0.56±0.02 ^c
T1	0.54±0.02 ^a	0.47±0.06 ^b	0.84±0.02 ^a	0.67±0.01 ^a
T2	0.38±0.10 ^b	0.41±0.07 ^{bc}	0.80±0.02 ^b	0.62±0.01 ^b
T3	0.38±0.03 ^b	0.29±0.04 ^d	0.73±0.01 ^{cd}	0.55±0.01 ^c
T4	0.34±0.07 ^b	0.34±0.01 ^{cd}	0.65±0.02 ^d	0.54±0.02 ^c

表 5 MDCP 不同添加水平对肉鸡胫骨指标的影响

Table 5 Effects of dietary MDCP supplementation on tibia indices of broilers

组别 Group	21 d			42 d		
	钙/% Ca	磷/% P	最大应力/(N·mm ⁻²) Strength	钙/% Ca	磷/% P	最大应力/(N·mm ⁻²) Strength
CK	14.13±1.41 ^b	6.85±0.36 ^a	864.10±103.48 ^b	14.81±1.40 ^b	6.49±0.76 ^b	3 410.80±1 059.30 ^b
T1	16.64±3.02 ^a	6.39±0.38 ^b	707.66±130.85 ^c	15.14±0.92 ^b	6.49±0.21 ^b	3 535.37±631.70 ^b
T2	16.02±1.88 ^{ab}	6.58±0.28 ^{ab}	966.07±131.87 ^{ab}	15.86±0.68 ^{ab}	6.74±0.28 ^{ab}	4 129.58±919.14 ^a
T3	15.88±0.79 ^{ab}	6.92±0.32 ^a	1 027.31±44.78 ^a	16.50±0.87 ^a	7.10±0.30 ^a	4 233.55±1 005.76 ^a
T4	15.50±0.83 ^{ab}	6.95±0.20 ^a	958.85±147.26 ^{ab}	16.00±0.73 ^{ab}	6.80±0.30 ^{ab}	3 638.50±670.85 ^b

表 6 MDCP 不同添加水平对肉鸡血钙、血磷和碱性磷酸酶的影响

Table 6 Effects of dietary MDCP supplementation on serum calcium, phosphorus contents and alkaline phosphatase activity of broilers

组别 Group	21 d			42 d		
	血钙/ (mmol · L ⁻¹) Serum Ca	血磷/ (mmol · L ⁻¹) Serum P	碱性磷酸酶/ (U · L ⁻¹) ALP	血钙/ (mmol · L ⁻¹) Serum Ca	血磷/ (mmol · L ⁻¹) Serum P	碱性磷酸酶/ (U · L ⁻¹) ALP
CK	1.18 ± 0.56 ^{ab}	1.57 ± 0.92 ^b	4 823.38 ± 1 102.94	1.15 ± 0.90	0.85 ± 0.94	2 517.12 ± 1 505.72
T1	0.73 ± 0.82 ^b	1.31 ± 0.20 ^c	5 206.75 ± 789.66	0.88 ± 1.00	1.04 ± 1.15	1 775.73 ± 349.13
T2	1.43 ± 0.21 ^a	1.44 ± 1.16 ^{bc}	5 023.05 ± 1 065.25	1.18 ± 0.92	1.05 ± 1.15	1 736.70 ± 1 153.69
T3	1.22 ± 0.65 ^{ab}	1.44 ± 1.13 ^{bc}	5 009.77 ± 795.70	0.88 ± 0.97	1.13 ± 1.24	1 314.05 ± 1 430.81
T4	1.61 ± 0.20 ^a	2.40 ± 0.27 ^a	5 186.43 ± 748.93	0.90 ± 0.99	1.15 ± 1.26	1 104.15 ± 1 050.21

表 7 MDCP 不同添加水平对肉鸡血清蛋白的影响

Table 7 Effects of dietary MDCP supplementation on serum protein contents of broilers

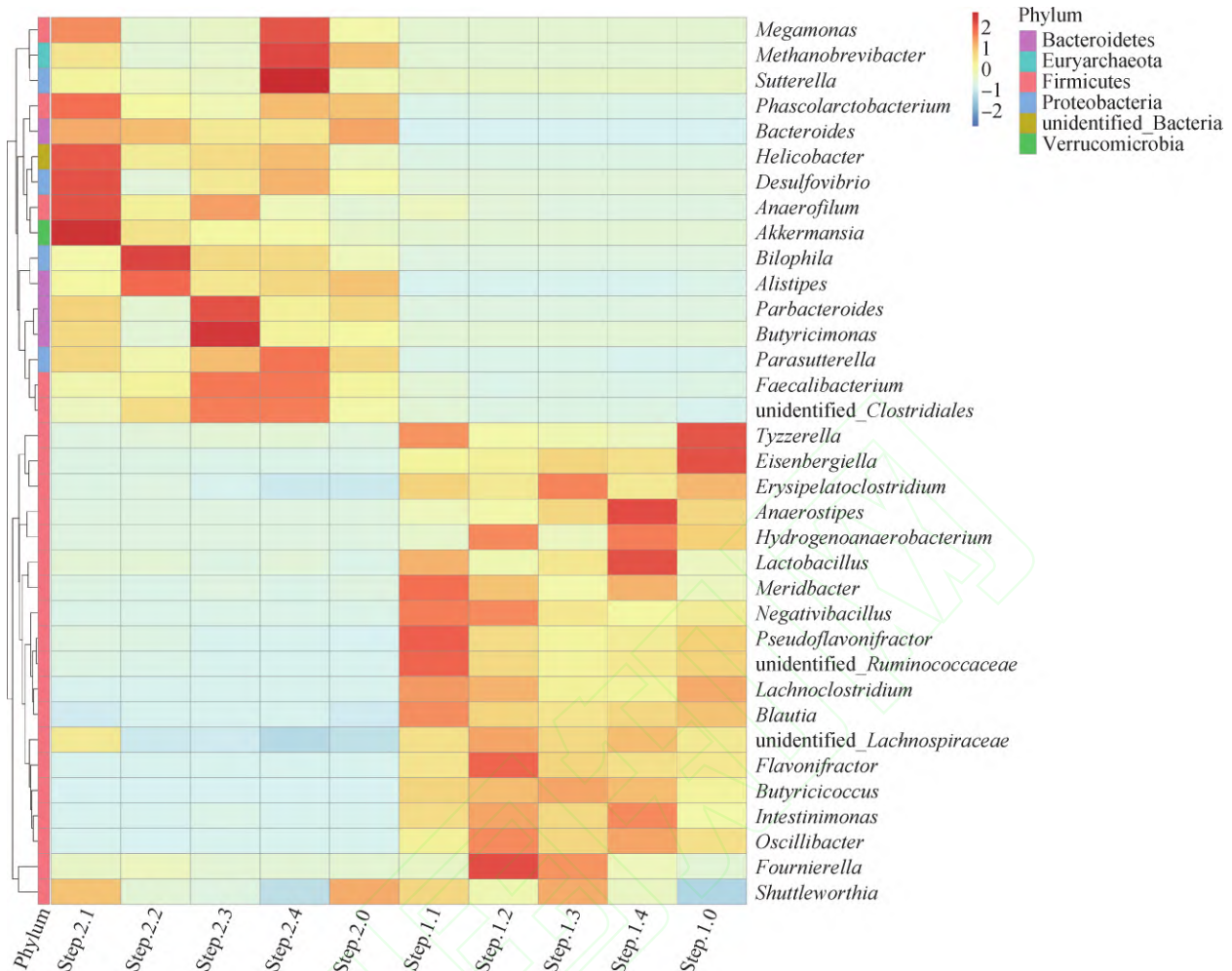
组别 Group	21 d				42 d			
	总蛋白/ (g · L ⁻¹) TP	白蛋白/ (g · L ⁻¹) ALB	球蛋白/ (g · L ⁻¹) GLB	白球比例 A/G	总蛋白/ (g · L ⁻¹) TP	白蛋白/ (g · L ⁻¹) ALB	球蛋白/ (g · L ⁻¹) GLB	白球比例 A/G
CK	20.32 ± 10.48	10.35 ± 2.21 ^{ab}	14.23 ± 1.32 ^{ab}	0.72 ± 0.11	34.48 ± 23.97	18.38 ± 20.41	16.10 ± 8.75	1.06 ± 1.37
T1	17.72 ± 13.73	7.43 ± 5.85 ^b	10.28 ± 8.03 ^b	0.49 ± 0.40	33.45 ± 37.47	19.05 ± 29.25	14.40 ± 11.30	0.82 ± 1.15
T2	27.27 ± 1.82	11.58 ± 0.74 ^a	15.68 ± 1.19 ^a	0.74 ± 0.04	42.27 ± 34.23	24.47 ± 29.31	17.80 ± 9.03	1.14 ± 1.32
T3	27.65 ± 1.98	11.80 ± 2.25 ^a	15.85 ± 0.97 ^a	0.75 ± 0.16	62.67 ± 26.74	39.72 ± 22.25	22.95 ± 5.25	1.65 ± 0.77
T4	28.02 ± 2.52	11.93 ± 0.97 ^a	16.08 ± 1.94 ^a	0.75 ± 0.09	68.07 ± 20.16	44.82 ± 15.14	23.25 ± 6.97	1.99 ± 0.61

2.5 MDCP 不同添加水平对肉鸡盲肠微生物的影响

2.5.1 OTU 分析 OTU 热图(图 1)分析中,Z 值表示菌属的丰度,其颜色越红,Z 值越大,菌属丰度越大。21 d 肉鸡盲肠微生物中对照组(Step 1.0) *Tyzzerella* 和 *Eisenbergiella* 两个属菌 Z 值较大; 试验 1 组(Step 1.1) *Merdibacter*、*Pseudoflavonifactor* 和 *unidentified-Ruminococcaceae* 3 个属菌 Z 值较大; 试验 2 组(Step 1.2) *Flavonifactor* 和 *Fournierella* 两个属菌 Z 值较大; 试验 3 组(Step 1.3) *Erysipelatoclostridium* 属菌 Z 值较大, 试验 4 组(Step 1.4) *Anaerostipes*、*Hydrogenoanaerobacterium* 和 *Lactobacillus* 3 个属菌 Z 值较大。42 d 对对照组(Step 2.0)中 *Bacterioides* 属菌 Z 值较大; 试验 1 组(Step 2.1) *Akkermansia*、*Anaerofilum*、*Desulfovibrio*、*Helicobacter* 和 *Phascolarctobacterium* 5 个属菌 Z 值较大, 试验 2 组(Step 2.2)中 *Bilophila* 和 *Alistipes* 两个属菌 Z 值较大; 试验 3 组(Step

2.3) *Parabacteroides* 和 *Butyricimonas* 两个属菌 Z 值较大, 试验 4 组(Step 2.4) *Megamonas*、*Methanobrevibacter* 和 *Sutterella* 3 个属菌 Z 值较大。

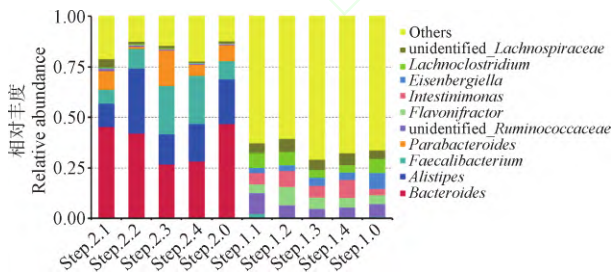
根据物种注释结果, 选取每个样本属水平上最大丰度排名前 10 的物种, 生成物种相对丰度柱形累加图, 可直观反映各样本在属水平上, 相对丰度较高的物种及其比例(图 2)。结果发现, 在 21 d 肉鸡盲肠中, 与对照组相比, 试验 1 组中 *unidentified-Ruminococcaceae* 增加, 而其他 3 个试验组减少; 试验 2 组中 *Flavonifactor* 增加; 各试验组中 *Intestimonas* 和 *unidentified-Lachnospiraceae* 增加, *Eisenbergiella* 减少; 试验 3 组和试验 4 组中 *Lachnoclostridium* 减少; 42 d 肉鸡盲肠中, 与对照组相比, 各试验组的 *Bacterioides* 减少; 试验 2 组中 *Alistipes* 增加, 而其他 3 个试验组减少; 试验 2 组和试验 3 组中 *Faecalibacterium* 增加; 试验 3 组中 *Parabacteroides* 增加, 而其他 3 个试验组减少。



Step1. 0. 21 d 对照组; Step1. 1. 21 d 试验 1 组; Step1. 2. 21 d 试验 2 组; Step1. 3. 21 d 试验 3 组; Step1. 4. 21 d 试验 4 组; Step2. 0. 42 d 对照组; Step2. 1. 42 d 试验 1 组; Step2. 2. 42 d 试验 2 组; Step2. 3. 42 d 试验 3 组; Step2. 4. 42 d 试验 4 组。下同 Step 1. 0. 21 d CK; Step 1. 1. 21 d T1; Step 1. 2. 21 d T2; Step 1. 3. 21 d T3; Step 1. 4. 21 d T4; Step 2. 0. 42 d CK; Step 2. 1. 42 d T1; Step 2. 2. 42 d T2; Step 2. 3. 42 d T3; Step 2. 4. 42 d T4; The same as below

图 1 MDCP 不同添加水平 21 和 42 d 肉鸡盲肠微生物 OTU 表达谱热图

Fig. 1 OTU heat map of 21 and 42 d broiler cecal microbes of different MDCP addition levels



Others 表示图中这 10 个属之外的其他所有属的相对丰度之和

Others indicates the sum of the relative abundances of all the genus except the 10 genus in the figure

图 2 肉鸡盲肠微生物属水平上的物种相对丰度柱形图

Fig. 2 Spectral relative abundance of cecal microbes of broiler chickens at the level of genus

2.5.2 α -多样性分析 MDCP 不同添加水平 21 和 42 d 肉鸡盲肠微生物基于 OTU 的花瓣图见图 3。从图中可以看出肉鸡盲肠中微生物的多样性,其中有 98 种微生物种类是共同的,其余的各组也有不同微生物种类。21 d 肉鸡的盲肠微生物多样性中,除试验 4 组的种类较少外,其他各组微生物的种类数量相似;42 d 肉鸡的盲肠微生物多样性中,对照组的微生物种类显著低于 4 个试验组。

2.5.3 β -多样性分析 NMDS 是基于 Bray-Curtis 距离来进行分析的非线性模型,根据样本中包含的物种信息,以点的形式反映在二维平面上,应用 NMDS 分析,根据样本中包含的物种信息,以点的形式反映在多维空间上,而对不同样本间的差异程

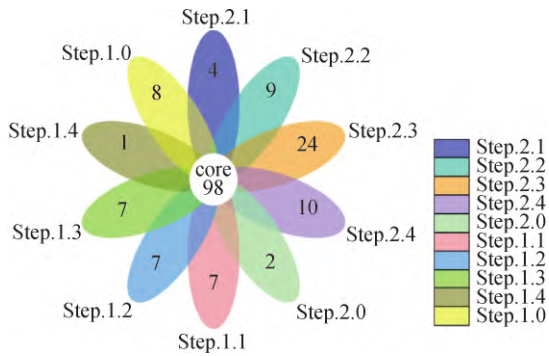
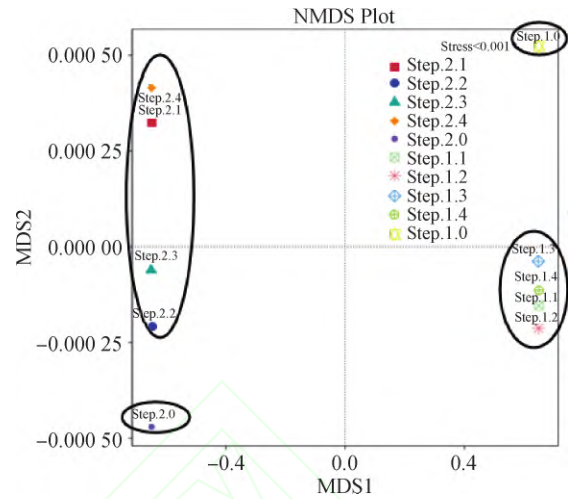


图 3 MDCP 不同添加水平 21 和 42 d 肉鸡盲肠微生物基于 OTU 的花瓣图
Fig. 3 Petal map of 21 and 42 d broiler cecal microbes of different MDCP addition levels

度,则是通过点与点间的距离体现,能够反映样本的组间和组内差异。NMDS 分析中的 Stress 小于 0.001,可以准确反映样本间的差异程度。图 4 中 21 d 对照组(Step 1.0)在第一象限,而其他 4 个处理组(Step 1.1、Step 1.2、Step 1.3 和 Step 1.4)均分布在第四象限,与之距离较远。42 d 对照组(Step 2.0)分布在第三现象最底部,与其他处理(Step 2.1、Step 2.2、Step 2.3 和 Step 2.4)的距离也较远。说明 21 或 42 d,MDCP 替代 DCP 对肠道微生物种群分布有显著影响。

为了研究不同替代水平 21 和 42 d 肉鸡盲肠微生物的相似性,对样本进行聚类分析,构建样本的聚类树。基于 Unweighted Unifrac 距离的 UPGMA (Unweighted Pair-group Method with Arithmetic Mean) 聚类树见图 5。在 21d 肉鸡盲肠微生物中,



NMDS. 无度量多维标立法
NMDS. Non-Metric Multi-Dimensional Scaling
图 4 MDCP 不同添加水平 21 和 42 d 肉鸡盲肠微生物 NMDS 分析
Fig. 4 NMDS analysis of 21 and 42 d broiler cecal microbes of different MDCP addition levels

试验 3 组和试验 4 组微生物相似性较高,距离最近,首先聚为一类,其次与试验 2 组聚为一类后,再与试验 1 组聚为一类,最后才与对照组聚为一类;在 42 d 肉鸡盲肠微生物中,试验 1 组和试验 4 组首先聚为一类,其次与对照组聚为一类后,再与试验 2 组聚为一类,最后与试验 3 组聚为一类。这说明 21 d 时肉鸡试验组盲肠的微生物菌群相似度较高,与对照组相似度距离最远,而 42 d 时肉鸡试验 3 组与其他组的距离较远。

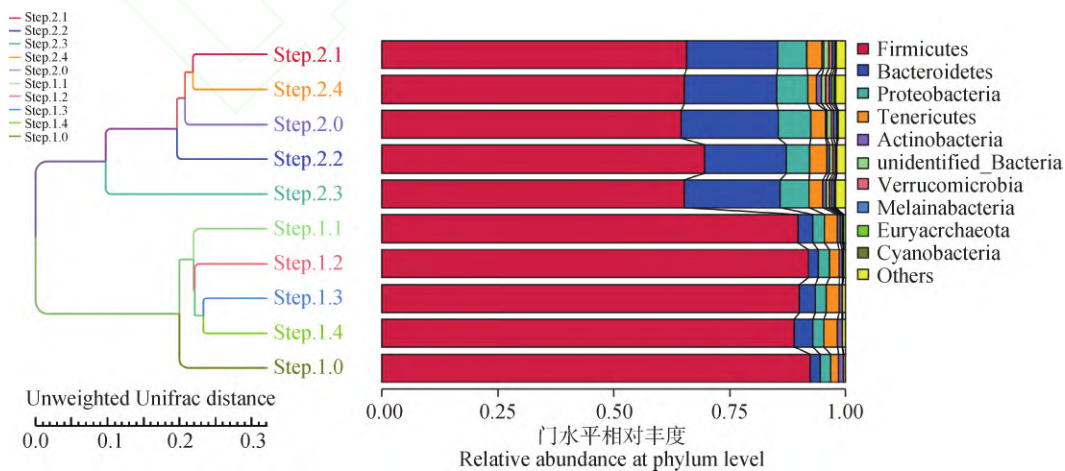


图 5 基于 Unweighted Unifrac 距离的 UPGMA 聚类树
Fig. 5 UPGMA clustering tree based on Unweighted Unifrac distance

3 讨 论

3.1 MDCP 不同添加水平对肉鸡生产性能、血液指标、骨骼钙、磷代谢等指标的影响

在体内所有矿物元素之中,磷元素参与了机体构成及体内几乎全部的代谢活动,包括骨骼及牙齿的构成与完成性,参与能量代谢,促进维生素吸收,细胞膜、遗传物质和酶类的结构物质,维持渗透压,维持酸碱平衡,调控动物采食等^[13-15]。钟文文等^[16]研究报道,磷缺乏日粮显著降低蛋壳厚度,显著降低蛋鸡胫骨灰分和钙的含量。韩进诚等^[17]报道,随着饲料非植酸磷水平升高,肉鸡体增重、采食量、饲料转化率、血清无机磷浓度、胫骨长度、强度、灰分含量与重量、胫骨磷含量以及粗蛋白质、TP 和 Ca 利用率呈二次曲线上升。刘帅等^[18]研究报道,饲料磷水平对育成期水貂的末重、平均日增重有极显著影响,对平均日采食量、料重比有显著影响。因此,动物饲料中磷的添加非常重要,能够对动物机体的生产性能、骨骼、血液生化指标等产生显著影响。

然而,磷资源是不可再生资源,降低畜禽粪便中磷的排放,减少环境污染,具有重要的现实意义^[2-3, 9-10, 19]。除了在饲料中添加植酸酶提高日粮中植酸磷的利用外,选择生物效价较高的磷源是实现减排的另一个有效的措施^[19-23]。而 MDCP 的生物学效价较 DCP 更高,其做磷源更有优势^[19-23]。本试验结果表明,采用 MDCP 组的肉鸡生产性能显著提高($P < 0.05$),其中 80% 替代水平的 MDCP 组的生产性能和欧洲指数最高;采用 MDCP 的各试验组中肉鸡的钙、磷的表观代谢率、胫骨、磷含量和最大应力及血液中钙、磷含量和生化指标均有一定影响。说明 MDCP 在肉鸡中的应用效果优于 DCP。这是因为 MDCP 是 DCP 和磷酸二氢钙(MCP)的共晶物,其水溶磷的含量高达 17.5%,远远高于 10% 的国际标准^[23]。Rucker 等^[24]报道,与不含结晶的磷酸氢钙相比,含有结晶水的磷酸氢钙更易溶于酸性环境,且动物的利用率更高。MDCP 为 MCP 与 DCP 的络合物,pH 值约为 4,呈酸性,有利于增强动物口感,提高采食量。本试验结果与许多研究结果相类似,再次证实了 MDCP 的应用价值。Ghiyasi 等^[9]研究结果表明,DCP 与 MDCP 同等添加量下,MDCP 能够提高肉鸡的体重和体增重。万敏艳等^[5]研究表明,磷添加水平提高,肉鸡采食量、体增重显著增加,而料重比和死淘率显著降低。因此,在

经济和效益原则下,使用 MDCP 替代 DCP 提供非植酸磷总量的 80% 水平即可有效提高肉鸡的生产性能,具有极高经济价值。

饲料中的钙、磷通过消化道吸收进入血液供机体形成骨骼,二者的作用密切相关,只有在比例约为 1~2:1,才能很好地发挥其功能,促进畜禽的生长,其在动物体内的平衡是受机体非常精确地控制的^[25-26]。本次试验,设计钙水平固定,磷源和添加水平不同,其钙磷比例在 1~2:1 范围内,各组生长状况良好,在生产性能上 MDCP 组显示了其优越性,两个阶段各组表观代谢率、血液指标等的表现不完全一致。21 d 钙表观代谢率,对照组和试验 1 组显著高于试验 2 组、3 组和试验 4 组,胫骨中的试验 1 组钙含量显著高于对照组,血钙含量对照组与 4 个试验组无显著差异,试验 1 组显著低于试验 2 组和试验 4 组;磷表观代谢率,对照组显著高于 4 个试验组,胫骨中试验 1 组磷含量和最大应力显著低于对照组;试验 3 组最大应力显著高于对照组和试验 1 组;血磷含量,对照组显著高于试验 1 组,显著低于试验 4 组,试验 1 组显著低于试验 4 组;而 42 d 钙、磷表观代谢率,对照组显著低于试验 1 组和试验 2 组,试验 1 组钙、磷的表观代谢率显著高于其他组,胫骨中试验 3 组钙、磷含量和最大应力显著高于对照组和试验 1 组,试验 3 组的最大应力显著高于试验 4 组;各组的血钙、血磷和碱性磷酸酶含量均无显著差异。21 d 肉鸡日龄较小,机体的对血钙、血磷等指标的调控能力较弱,因此出现磷水平较低时即试验 1 组的血磷、血钙等指标与其他组存在较多差异,而到 42 d 时,肉鸡机体各方面均成熟,在一定范围内,调控能力增强^[25],因此,各组的血钙、血磷和碱性磷酸酶含量均无显著差异。日粮钙磷比过高或过低时都会降低血液、肝以及肌肉组织中的钙磷沉积,且不同钙磷比对血液、肝以及肌肉组织中的钙磷含量影响程度不一,这可能与饲料条件和时间有关^[27]。动物对钙、磷的摄入量与排出量相等,骨组织中的钙、磷与体液中的钙、磷交换量相等,血浆中钙和磷的含量亦保持相对恒定^[27-28]。本试验中,21 d 钙表观代谢率,对照组和试验 1 组显著高于试验 2 组、3 组和试验 4 组,说明试验 2、3 和 4 组饲料中机体可吸收钙磷量较高,因此多余的钙排出较多,另一侧面说明,MDCP 的生物效价较 DCP 高。余洋^[19]研究表明,碱性磷酸酶水平高成骨作用较强。本试验各组间碱性磷酸酶无显著差异,21 d 肉鸡正是骨骼

生长的旺盛时期,MDCP 试验组的碱性磷酸酶水平稍高于 DCP 组,其胫骨最大应力也稍高,再次说明使用磷源 MDPC 优于 DCP。

3.2 MDPC 不同添加水平对肉鸡盲肠微生物的影响

采用 16S rDNA 高通量测序技术分析肉鸡盲肠菌群组成结果,无论是 OTU 的热图分析和堆叠图分析,还是花瓣图、无度量多维标定法分析和聚类分析等多样性分析均表明,MDPC 替代 DCP 后,肉鸡盲肠微生物发生明显变化,同时 MDPC 添加水平不同,其盲肠微生物也会有所差异。本试验肉鸡 21 d 磷的表观消化率对照组高于试验组,而 42 d 对照组低于试验 1 组和试验 2 组,花瓣图 α -多样性分析中结果也显示,21 d 中盲肠中对照组的微生物多样性多于试验组,因此,其原因可能与肉鸡肠道微生物多样性有关。磷元素参与体内的生长代谢,对机体的生命活动起着重要的作用,微生物的生长繁殖也离不开磷元素的参与^[13-15]。本试验测序结果分析表明,肉鸡盲肠中门水平上 OTU top 5 的为厚壁菌门(Firmicutes)、拟杆菌门(Bacteroidetes)、变形菌门(Proteobacteria)、广古菌门(Euryarchaeota)和软壁菌门(Tenericutes)。这与许多报道结果相似^[29-33]。林奕岑等^[31]利用 Illumina MiSeq 测序平台对 22 d 肉鸡盲肠微生物的多样性进行探索研究,结果发现了拟杆菌门、厚壁菌门、变形菌门和蓝菌门(Cyanobacteria) 4 个共享优势菌门。宫玉杰等^[32]报道,肉鸡盲肠菌群中厚壁菌门、变形菌门和拟杆菌门为早期肉鸡肠道内的优势菌门。陈荣等^[33]研究表明,拜城油鸡盲肠细菌优势菌门为厚壁菌门、拟杆菌门和变形菌门。另外,本试验结果发现,肉鸡盲肠中 top10 的菌属主要是拟杆菌属(*Bacteroides*)、另枝菌属(*Alistipes*)、柔嫩梭菌属(*Faecalibacterium*)、副拟杆菌(*Parabacteroides*)、瘤胃菌科未确定菌属(unidentified-Ruminococcaceae)、黄杆菌属(*Flavonifractor*)、*Intestinimonas* 属、*Eisenbergiella* 属、梭状芽孢杆菌属(*Lachnoclostridium*)和毛螺科未确定菌属(unidentified-Lachnospiraceae)。其中盲肠中益生菌菌属有乳杆菌属(*Lactobacillus*)、双歧杆菌(*Bifidobacterium*)、链球菌属(*Streptococcus*)、片球菌属(*Pediococcus*)等,虽占比例较低,但与对照组相比,有所提高。林奕岑等^[31]也报道,有益菌群如乳酸杆菌属、双歧杆菌属等虽然存在于盲肠微生物中,但相对丰度不高。本研究中,在相对丰度大

于 1% 的优势菌群中,有相当大一部分为尚未命名的菌属,说明有关肉鸡盲肠微生物在属水平上的研究还不够深入,这与技术限制有关,同时也表明肉鸡盲肠微生物有待进一步研究。

肉鸡中磷源不同对盲肠微生物的影响,鲜有报道。万荣等^[34]报道,与 DCP 相比,MDPC 和 MCP 可显著提高空肠总菌数和盲肠乙酸及丙酸含量,有增加空肠和盲肠乳酸杆菌及空肠双歧杆菌趋势,但差异不显著。本试验结果表明,与 DCP 相比,MDPC 提高了盲肠的微生物的种类和数量。这可能与 MDPC 改善了肠道内环境 pH 有关。DCP 与 MDPC 的 pH 值存在较大差异,DCP 为 7.2~7.9, MCP 为 2.4~3.0,而 MDPC 根据 DCP 和 MCP 比例的不同,其 pH 发生相应的改变,水溶性磷为 10% 时, pH 为 4.4^[35]。环境 pH 可引起细胞膜电荷的变化,从而影响微生物对营养物质的吸收,影响代谢过程中酶的活性,介质的 pH 不仅影响微生物的生长,甚至影响微生物的形态^[36]。徐运杰等^[37]在培养液磷含量和 pH 对鸡离体小肠磷吸收的影响研究中发现,培养液 pH 和磷含量对鸡离体小肠的磷吸收量有明显影响, pH 5.0~7.0 时,肠囊的磷吸收量线性增加,与 pH 5.0 比较, pH 7.0 时,肠囊的磷吸收量极显著增加, pH 8.0 时,肠囊的磷吸收量开始降低;磷含量在 50~200 $\mu\text{g} \cdot \text{mL}^{-1}$ 时,肠囊的磷吸收量与磷含量呈正相关,当磷含量增加到 400 $\mu\text{g} \cdot \text{mL}^{-1}$,十二指肠肠囊和空肠肠囊的磷吸收量开始降低。杨胜香等^[38]研究不同碳氮磷源改良剂对铅锌尾矿废弃地土壤微生物群落结构的影响中表明,添加不同碳氮磷源改良剂对土壤微生物群落组成、多样性、微生物活性和微生物生物量均有显著性影响。因此,不同磷源的添加,对肉鸡肠道微生物的多样性有影响,其中有益微生物的增多,有益于肉鸡肠道的健康。

4 结 论

综上所述,不同磷源对肉鸡生产性能和盲肠微生物有显著影响,与 DCP 相比,MDPC 显著提高肉鸡的生产性能,提高 42 d 肉鸡盲肠微生物的多样性和有益菌的数量,提高肠道的微生物稳定性和肠道健康。不同 MDPC 添加量对肉鸡的钙、磷表观消化率有差异,对血液和胫骨的钙、磷含量和胫骨的最大应力等均有一定的影响。使用 MDPC 替代 DCP 提供非植酸磷总量的 80% 水平时,肉鸡的欧洲指数最高,可获得较好的生产性能和经济效益。

参考文献 (References):

- [1] 贾海康. 不同磷酸盐对肉鸡的适宜用量研究[D]. 成都:四川农业大学,2016.
JIA H K. The study of suitable supplement level from different phosphates in broiler diets[D]. Chengdu: Sichuan Agricultural University, 2016. (in Chinese)
- [2] 龚家竹. 我国饲料磷酸盐技术发展纪事[J]. 磷肥与复肥, 2018, 33(12): 38-43, 69.
GONG J Z. Development notes of feed-grade phosphate technology in China[J]. *Phosphate & Compound Fertilizer*, 2018, 33(12): 38-43, 69. (in Chinese)
- [3] 李文静, 常文环, 陈志敏, 等. 磷酸一二钙对肉鸭相对生物学利用率的研究[J]. 动物营养学报, 2018, 30(9): 3364-3376.
LI W J, CHANG W H, CHEN Z M, et al. A study of relative bioavailability of mono-dicalcium phosphate on meat ducks[J]. *Chinese Journal of Animal Nutrition*, 2018, 30(9): 3364-3376. (in Chinese)
- [4] 邵玉新, 邢冠中, 张丽阳, 等. 饲料钙、磷缺乏对 1~21 日龄肉仔鸡生长性能、佝偻病发病特征及胫骨组织结构的影响[J]. 动物营养学报, 2019, 31(5): 2107-2118.
SHAO Y X, XING G Z, ZHANG L Y, et al. Effects of dietary calcium and phosphorus deficiency on growth performance, rickets incidence characters and tibia histological structure of broilers during 1 to 21 days of age[J]. *Chinese Journal of Animal Nutrition*, 2019, 31(5): 2107-2118. (in Chinese)
- [5] 万敏艳, 张保海, 王宏博, 等. 磷酸一二钙对肉仔鸡相对生物学利用率的研究[J]. 动物营养学报, 2018, 30(9): 3353-3363.
WAN M Y, ZHANG B H, WANG H B, et al. A study of relative bioavailability of mono-dicalcium phosphate on broilers[J]. *Chinese Journal of Animal Nutrition*, 2018, 30(9): 3353-3363. (in Chinese)
- [6] LUDVIGSEN J, SVIHUS B, RUDI K. Rearing room affects the non-dominant chicken cecum microbiota, while diet affects the dominant microbiota[J]. *Front Vet Sci*, 2016, 3: 16.
- [7] 刘迎森, 张莹莹, 张 林, 等. 肉鸡消化道微生物区系分布特征及其关键影响因素[J]. 动物营养学报, 2019, 31(6): 2515-2524.
LIU Y S, ZHANG Y Y, ZHANG L, et al. Gastrointestinal microflora distribution characteristics of broilers and its key influencing factors[J]. *Chinese Journal of Animal Nutrition*, 2019, 31(6): 2515-2524. (in Chinese)
- [8] VAN DER HOEVEN-HANGOOR E, VAN DER VOSSSEN J M B M, SCHUREN F H J, et al. Ileal microbiota composition of broilers fed various commercial diet compositions[J]. *Poult Sci*, 2013, 92(10): 2713-2723.
- [9] GHIYASI M, REZAEI M, SAYYAHZADEH H, et al. Effects of prebiotic (*Fermacto*) in low protein diet on some blood parameters and intestinal microbiota of broiler chicks[J]. *Ital. J Anim Sci*, 2008, 7(3): 313-320.
- [10] WISE M G, SIRAGUSA G R. Quantitative analysis of the intestinal bacterial community in one- to three-week-old commercially reared broiler chickens fed conventional or antibiotic-free vegetable-based diets[J]. *J Appl Microbiol*, 2007, 102(4): 1138-1149.
- [11] 张丽英. 饲料分析及饲料质量检测技术[M]. 2 版. 北京: 中国农业大学出版社, 2003: 96-105.
ZHANG L Y. Feed analysis and feed quality testing technology[M]. 2nd ed. Beijing: China Agricultural University Press, 2003: 96-105. (in Chinese)
- [12] SHORT F J, GORTON P, WISEMAN J, et al. Determination of titanium dioxide added as an inert marker in chicken digestibility studies[J]. *Anim Feed Sci Technol*, 1996, 59(4): 215-221.
- [13] SMART M E. Bioavailability of nutrients for animals[J]. *Can Vet J*, 1996, 37(12): 753-754.
- [14] MILES R D, HENRY P R. Defluorinated phosphate may provide advantages[J]. *Feedstuffs (USA)*, 1997, 69(1): 12-15.
- [15] BAR A, HURWITZ S. Egg shell quality, medullary bone ash, intestinal calcium and phosphorus absorption, and calcium-binding protein in phosphorus-deficient hens[J]. *Poult Sci*, 1984, 63(10): 1975-1979.
- [16] 钟文文, 许俊杰, 孙 晴. 缺磷日粮添加有机酸对蛋鸡生产性能、脂代谢、磷利用率及回肠微生物组分的影响[J]. 中国饲料, 2018(6): 41-46.
ZHONG W W, XU J J, SUN Q, et al. Effects of organic acids on laying performance, lipid metabolism, phosphorus utilization and Ileal microflora in laying hens fed with phosphorus-deficient diets[J]. *China Feed*, 2018(6): 41-46. (in Chinese)
- [17] 韩进诚, 杨晓丹, 杨凤霞, 等. 微生物植酸酶与 1~21 日龄肉鸡饲料无机磷当量模型研究[J]. 畜牧兽医学报, 2008, 39(7): 907-914.
HAN J C, YANG X D, YANG F X, et al. Model to

- predict inorganic phosphate release from phytate phosphorus by microbial phytase in 1 to 21-day-old broilers[J]. *Acta Veterinaria et Zootechnica Sinica*, 2008, 39(7):907-914. (in Chinese)
- [18] 刘帅,李欣彤,邢敬亚,等. 饲粮不同磷水平和钙磷比对育成期水貂生长性能、营养物质消化率及氮、钙、磷代谢的影响[J]. *动物营养学报*, 2016, 28(12):3836-3845.
LIU S, LI X T, XING J Y, et al. Effects of different dietary phosphorus levels and calcium/phosphorus ratios on growth performance, nutrient digestibility, and nitrogen, calcium and phosphorus metabolism of growing minks[J]. *Chinese Journal of Animal Nutrition*, 2016, 28(12):3836-3845. (in Chinese)
- [19] 余洋. 不同类型磷酸盐对蛋鸡生产性能、骨骼质量和鸡蛋品质的影响[D]. 雅安:四川农业大学, 2016.
YU Y. Effect of different type of phosphorus on performance, bone quality and egg quality of laying hens[D]. Ya'an: Sichuan Agricultural University, 2016. (in Chinese)
- [20] 刘国庆,张丽阳,马雪莲,等. 我国畜禽饲料资源中矿物质元素磷含量的调查研究[J]. *畜牧兽医学报*, 2019, 50(9):1841-1848.
LIU G Q, ZHANG L Y, MA X L, et al. A survey on distribution of phosphorus contents in feedstuffs for livestock and poultry in China[J]. *Acta Veterinaria et Zootechnica Sinica*, 2019, 50(9):1841-1848. (in Chinese)
- [21] 杨维仁,王庆云,杨在宾,等. 不同无机磷水平日粮添加植酸酶对肉鸡生长性能和血清矿物质的影响[J]. *中国农业大学学报*, 2008, 13(4):87-92.
YANG W R, WANG Q Y, YANG Z B, et al. Effects of phytase supplementation on growth and serum minerals in broiler chicks fed diets with different levels of inorganic phosphorus[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2008, 13(4):87-92. (in Chinese)
- [22] FORSBERG C W, PHILLIPS J P, GOLOVAN S P, et al. The enviropig physiology, performance, and contribution to nutrient management advances in a regulated environment; the leading edge of change in the pork industry[J]. *J Anim Sci*, 2003, 81(14 Suppl 2):E68-E77.
- [23] 何万领,李晓丽,李旺,等. 磷源与磷水平对蛋鸡生产性能及钙、磷、氮代谢的影响[J]. *畜牧兽医学报*, 2018, 49(5):1061-1073.
HE W L, LI X L, LI W, et al. Effects of phosphorus forms and levels on the production performance and metabolism of calcium, phosphorus and nitrogen in laying hens[J]. *Acta Veterinaria et Zootechnica Sinica*, 2018, 49(5):1061-1073. (in Chinese)
- [24] RUCKER R B, PARKER H E, ROGLER J C. Utilization of calcium and phosphorus from hydrous and anhydrous dicalcium phosphates[J]. *J Nutr*, 1968, 96(4):513-520.
- [25] 高树华. 低能量水平下商品产蛋鸡钙磷适宜需要量的研究[D]. 郑州:河南农业大学, 2012.
GAO S H. Calcium and phosphorus requirement for commercial laying hens fed low energy diets[D]. Zhengzhou: Henan Agricultural University, 2012. (in Chinese)
- [26] 谭占坤. 磷来源和水平对蛋鸡生产性能、蛋品质和骨骼质量的影响[D]. 雅安:四川农业大学, 2012.
TAN Z K. Effect of phosphorus source and level on performance, egg quality, and bone quality of laying hens[D]. Ya'an: Sichuan Agricultural University, 2012. (in Chinese)
- [27] 王宗伟,牟晓玲,杨国伟,等. 日粮营养水平对肉鹅血清钙磷、碱性磷酸酶及胫骨钙磷的影响[J]. *中国家禽*, 2009, 31(15):16-20.
WANG Z W, MOU X L, YANG G W, et al. Effects of dietary nutritional levels on calcium, phosphorus concentrations and ALP activity in serum and calcium, phosphorus contents in tibia for geese[J]. *China Poultry*, 2009, 31(15):16-20. (in Chinese)
- [28] 王晋晋. 0~6周龄白羽肉鸡钙磷需要量的研究[D]. 郑州:河南工业大学, 2010.
WANG J J. Calcium and phosphorus requirements of broilers from 3 to 6 week of age[D]. Zhengzhou: Henan University of Technology, 2010. (in Chinese)
- [29] POPE P B, DENMAN S E, JONES M, et al. Adaptation to herbivory by the tammar wallaby includes bacterial and glycoside hydrolase profiles different from other herbivores[J]. *Proc Natl Acad Sci U S A*, 2010, 107(33):14793-14798.
- [30] JAMI E, MIZRAHI I. Composition and similarity of bovine rumen microbiota across individual animals[J]. *PLoS One*, 2012, 7(3):e33306.
- [31] 林奕岑,徐帅,倪学勤,等. 利用 Illumina MiSeq 测序平台分析肉鸡盲肠微生物多样性[J]. *中国农业大学学报*, 2016, 21(12):65-73.
LIN Y C, XU S, NI X Q, et al. Diversity of the cecal microbiome of broiler chicken based on Illumina MiSeq sequencing platform[J]. *Journal of China Ag-*

- gricultural University*, 2016, 21(12): 65-73. (in Chinese)
- [32] 宫玉杰,邹晓庭,肖英平,等. 生理盐水实验性干预对肉鸡盲肠微生物区系和短链脂肪酸含量的影响[J]. 中国实验动物学报, 2019, 27(1): 38-45.
GONG Y J, ZOU X T, XIAO Y P, et al. Effects of experimental intervention with normal saline on the microflora and short-chain fatty acid content in the cecum of broilers[J]. *Acta Laboratorium Animalis Scientia Sinica*, 2019, 27(1): 38-45. (in Chinese)
- [33] 陈 荣,刘利林,格明古丽·木哈台,等. 16SrDNA 克隆文库法分析拜城油鸡盲肠细菌多样性研究[J]. 家畜生态学报, 2017, 38(2): 18-21.
CHEN R, LIU L L, GEMINGULI-MUHATAI, et al. Study on baicheng soy sauce chicken caecum bacterial diversity through 16SrDNA clone library analysis[J]. *Acta Ecologiae Animalis Domastici*, 2017, 38(2): 18-21. (in Chinese)
- [34] 万 荣,何姝颖,谢木林. 不同无机磷源对仔猪腹泻及肠道微生态的影响[J]. 饲料研究, 2015(23): 25-28.
WAN R, HE S Y, XIE M L. Effects of different inorganic phosphorus sources on piglet diarrhea and mutual microecology[J]. *Feed Research*, 2015(23): 25-28. (in Chinese)
- [35] 李 霞,万 荣,吴 波,等. 不同种类和来源饲料磷酸钙盐 pH 和系酸力比较[J]. 饲料广角, 2014(10): 29-31.
LI X, WAN R, WU B, et al. Comparison of pH and acidity of calcium phosphate in different types and sources of feed[J]. *Feed China*, 2014(10): 29-31. (in Chinese)
- [36] 许国静. 铬渣的微生物“解毒—介囊化”稳定化机制研究[D]. 重庆:重庆大学, 2017.
XU G J. Study on the stabilization mechanism of microbial detoxification and encapsulation of chromium slag[D]. Chongqing: Chongqing University, 2017. (in Chinese)
- [37] 徐运杰,方热军,霍振华,等. 培养液磷含量和 pH 对鸡离体小肠磷吸收的影响[J]. 中国农学通报, 2009, 25(7): 1-6.
XU Y J, FANG R J, HUO Z H, et al. Study on Effect of phosphate Levels and pH in culture medium on phosphorus absorption of small intestine of broiler[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2009, 25(7): 1-6. (in Chinese)
- [38] 杨胜香,李凤梅,彭禧柱,等. 不同碳氮磷源改良剂对铅锌尾矿废弃地土壤微生物群落结构的影响[J]. 农业环境科学学报, 2019, 38(6): 1256-1264.
YANG S X, LI F M, PENG X Z, et al. Effects of amendments with different C/N/P ratios on the microbial community structure in Pb-Zn mine tailings[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2019, 38(6): 1256-1264. (in Chinese)

(编辑 范子娟)