



低蛋白饲料钙、非植酸磷水平与电解质平衡值对肉仔鸡生长、血清指标及养分代谢率的影响

李顺英¹, 邓仕伟², 廖秀冬¹, 黄 靓¹, 李笑然¹, 王 冲¹, 张丽阳¹, 吕 林^{1*}

(1. 中国农业科学院北京畜牧兽医研究所 矿物元素营养研究室, 北京 100193;

2. 四川吉隆达生物科技集团有限公司, 德阳 618300)

摘 要: 旨在研究低蛋白饲料不同钙(calcium, Ca)、非植酸磷(non-phytic phosphorus, NPP)与电解质平衡(dietary electrolyte balance, DEB)对肉仔鸡生长性能、血清生化指标及养分代谢率的影响。采用3×3双因子完全随机试验设计,将饲料钙和非植酸磷设3个水平,分别为0.70% Ca和0.35% NPP、0.80% Ca和0.40% NPP、0.90% Ca和0.45% NPP,饲料电解质平衡值($\text{Na}^+ + \text{K}^+ - \text{Cl}^-$)设3个水平,分别为200、250和300 $\text{mmol} \cdot \text{kg}^{-1}$,饲料粗蛋白水平为19.5%。选用324只1日龄爱拔益加(Arbor Acres, AA)肉公鸡,按平均体重随机分为9个处理组,每组6个重复,每个重复笼6只鸡,试验期21 d。结果表明:1)饲料钙、非植酸磷与电解质平衡值及两者的互作对1~21日龄白羽肉鸡生长性能无显著影响($P > 0.05$)。2)饲料钙、非植酸磷与电解质平衡值两者的互作对血清谷丙转氨酶(alanine aminotransferase, ALT)活性有显著影响($P < 0.05$),当饲料钙、非植酸磷水平分别为0.70%和0.35%时,300 $\text{mmol} \cdot \text{kg}^{-1}$ 电解质平衡值组的ALT活性显著高于200和250 $\text{mmol} \cdot \text{kg}^{-1}$ 组($P < 0.05$),当饲料钙、非植酸磷水平分别为0.80%和0.40%时,250和300 $\text{mmol} \cdot \text{kg}^{-1}$ 电解质平衡值组的ALT活性显著低于200 $\text{mmol} \cdot \text{kg}^{-1}$ 组($P < 0.05$),饲料钙、非植酸磷水平分别为0.90%和0.45%时,不同电解质平衡值对ALT活性无显著影响($P > 0.05$)。3)随饲料钙和非植酸磷水平的升高,钙表观代谢率显著下降($P < 0.05$);饲料电解质平衡值为300 $\text{mmol} \cdot \text{kg}^{-1}$ 组的干物质、粗蛋白和钙的表观代谢率显著高于250和200 $\text{mmol} \cdot \text{kg}^{-1}$ 组($P < 0.05$);当饲料钙和非植酸磷水平为0.70%和0.35%时,300 $\text{mmol} \cdot \text{kg}^{-1}$ 电解质平衡值组的磷表观代谢率显著高于200和250 $\text{mmol} \cdot \text{kg}^{-1}$ 组($P < 0.05$);当饲料钙和非植酸磷水平为0.90%和0.45%时,300 $\text{mmol} \cdot \text{kg}^{-1}$ 电解质平衡值组的磷表观代谢率水平显著高于200 $\text{mmol} \cdot \text{kg}^{-1}$ 组($P < 0.05$)。综上所述,低蛋白饲料(粗蛋白水平为19.5%)钙和非植酸磷水平为0.80%和0.40%、电解质平衡值为300 $\text{mmol} \cdot \text{kg}^{-1}$ 对于1~21日龄肉仔鸡生长和养分利用较为适宜。

关键词: 钙;非植酸磷;电解质平衡;低蛋白饲料;肉仔鸡

中图分类号: S831.5

文献标志码: A

文章编号: 0366-6964(2026)01-0294-11

Effects of Calcium and Non-Phytate Phosphorus Levels and Electrolyte Balance Value in a Low-Protein Diet on the Growth Performance, Serum Parameters and Metabolic Rate of Nutrients in Broilers

LI Shunying¹, DENG Shiwei², LIAO Xiudong¹, HUANG Liang¹, LI Xiaoran¹, WANG Chong¹,
ZHANG Liyang¹, LÜ Lin^{1*}

(1. Mineral Nutrition Research Division, Institute of Animal Science, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100193, China; 2. Sichuan Chelota Biotech Corporation Limited, Deyang 618300, China)

收稿日期: 2024-12-25

基金项目: 国家重点研发计划课题(2022YFD1300504); 中国农业科学院科技创新工程专项经费(ASTIP-IAS09)

作者简介: 李顺英, 硕士生, 主要从事家禽营养与饲料科学研究, E-mail: 2746799167@qq.com; 邓仕伟, 高级兽医师, 主要从事动物传染病及矿物元素营养研究, E-mail: 632943264@qq.com。李顺英与邓仕伟为同等贡献作者

* 通信作者: 吕 林, 主要从事肉鸡营养与饲料研究, E-mail: lvlin1225@163.com

Abstract: The objective of this experiment was to investigate the effects of different calcium (Ca), non-phytic phosphorus (NPP) levels and electrolyte balance (DEB) value in a low protein diet on growth performance, serum biochemical indices and metabolic rate of nutrients in broilers. A 3×3 two-factor completely randomized design was adopted. Three dietary calcium and non-phytate phosphorus levels were 0.70% Ca and 0.35% NPP, 0.80% Ca and 0.40% NPP, 0.90% Ca and 0.45% NPP, respectively. And three levels of dietary electrolyte balance ($\text{Na}^+ + \text{K}^+ - \text{Cl}^-$) were 200, 250 and 300 $\text{mmol} \cdot \text{kg}^{-1}$, respectively. In addition, dietary crude protein level was 19.5%. A total of 324 1-day-old Arbor Acres (AA) male broilers were randomly allotted to 1 of 9 treatments with 6 replicate cages per treatment and 6 birds per cage. The experimental period was 21 days. The results showed that: 1) Dietary Ca, NPP and DEB value and their interaction had no significant effect ($P > 0.05$) on growth performance of broilers from 1 to 21 d of age; 2) The interaction of dietary Ca, NPP and DEB value had significant effect ($P < 0.05$) on the alanine aminotransferase (ALT) activity in serum. As dietary Ca and NPP levels were 0.70% and 0.35%, the serum ALT activity from broilers in the 300 $\text{mmol} \cdot \text{kg}^{-1}$ DEB value group was significantly higher ($P < 0.05$) than that of the 200 and 250 $\text{mmol} \cdot \text{kg}^{-1}$ DEB value groups. As the levels of Ca and NPP were 0.80% and 0.40%, the serum ALT activity from broilers in the 250 or 300 $\text{mmol} \cdot \text{kg}^{-1}$ DEB value groups was significantly lower ($P < 0.05$) than that in the 200 $\text{mmol} \cdot \text{kg}^{-1}$ DEB value group. As the levels of Ca and NPP were 0.90% and 0.45%, DEB levels had no significant effect ($P > 0.05$) on serum ALT activity; 3) As dietary Ca and NPP levels increased, the apparent metabolic rate of Ca decreased significantly ($P < 0.05$). The apparent metabolic rates of dry matter, crude protein and Ca in broilers from 300 $\text{mmol} \cdot \text{kg}^{-1}$ DEB value group were significantly higher ($P < 0.05$) than those in 250 and 200 $\text{mmol} \cdot \text{kg}^{-1}$ DEB value groups. As the levels of dietary Ca and NPP were 0.70% and 0.35%, 300 $\text{mmol} \cdot \text{kg}^{-1}$ DEB value could significantly increase ($P < 0.05$) the apparent metabolic rate of P compared with the 200 and 250 $\text{mmol} \cdot \text{kg}^{-1}$ DEB value. And as the levels of Ca and NPP were 0.90% and 0.45%, the apparent metabolic rate of P in 300 $\text{mmol} \cdot \text{kg}^{-1}$ DEB value group was significantly higher ($P < 0.05$) than that in the 200 $\text{mmol} \cdot \text{kg}^{-1}$ group. These results indicated that the Ca and NPP levels of 0.80% and 0.40% and DEB value of 300 $\text{mmol} \cdot \text{kg}^{-1}$ in a low protein diet (Crude protein: 19.5%) were optimal for the growth and nutrient utilization in broilers from 1 to 21 d of age.

Keywords: calcium; non-phytic phosphorus; electrolyte balance; low protein diet; broilers

* **Corresponding author:** LÜ Lin, E-mail: lvlin1225@163.com

蛋白质资源的短缺已成为制约我国畜牧业发展的主要因素之一,高蛋白饲料造成的蛋白资源浪费和环境控制问题也日益凸显^[1]。低蛋白饲料在改善胴体品质、提高饲料利用率、减少氮排放、降低生产投入方面有着巨大的优势和发展前景^[2]。研究表明,肉仔鸡日粮蛋白水平降低2~3百分点不影响生长性能,并能抑制肠道中的有害菌生长,促进肠道健康^[3-4]。本实验室前期研究表明,当饲喂1~21日龄白羽肉鸡的玉米-豆粕型饲料中粗蛋白质水平由21.52%降至19.43%,对生长性能、血清生化指标和免疫功能无明显影响,但可降低氮的排放^[5]。因

此,低蛋白饲料的推广对肉鸡产业的可持续发展有重要意义。

钙和磷是动物生长发育过程中重要的矿物质元素,电解质在维持渗透压、调节酸碱平衡、调节水代谢等生理过程中发挥重要作用^[6]。维持动物最佳的生理状况和生产性能需要适宜的日粮钙磷和电解质水平。研究证实,日粮蛋白质水平的改变会影响钙、磷的吸收^[7]。Nieto等^[8]研究表明,提高日粮中的蛋白质水平,可以提高育肥猪钙磷的利用率,在大鼠方面也发现类似结果^[9]。此外,肉鸡对饲料中电解质的需求会受到蛋白质水平和钙、磷水平的

影响^[10]。郭小权等^[11]研究表明,高钙高蛋白饲料会破坏鸡的电解质平衡状态,使鸡的血液 pH 升高,引发代谢性碱中毒,进而对肉鸡生长产生不利影响。Ravindran 等^[12]研究表明,高电解质水平会引起家禽消化能力和蛋白质的代谢功能异常。Adedokun 等^[13]发现,将饲料电解质平衡值从 208 降至 106 mmol·kg⁻¹可使肉鸡无蛋白日粮中的内源氨基酸流量增加 5.24%。然而,以往研究主要集中在正常饲料蛋白质水平下不同钙、磷和电解质水平对肉鸡生长性能等指标的影响,缺乏低蛋白饲料不同钙、磷和电解质水平对肉鸡影响的相关研究,因此,肉鸡低蛋白饲料钙磷及电解质的平衡模式尚有待进一步研究。因此,本试验通过研究低蛋白饲料不同钙、非植酸磷和电解质水平对肉仔鸡生长性能、血清生化指标及养分代谢率的影响,确定肉鸡低蛋白日粮适宜钙磷需要量及电解质平衡值,为肉鸡低蛋白日粮的推广应用提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验设计与处理

采用 3×3 双因子完全随机试验设计。根据大多数文献报道,1~21 日龄肉鸡饲料中适宜的钙与非植酸磷比为 2:1,因此,本试验所有饲料钙与非植酸磷之比保持一致,均为 2:1。试验饲料钙和非植酸磷设 3 个水平,分别为 0.70% Ca 和 0.35% NPP、0.80% Ca 和 0.40% NPP、0.90% Ca 和 0.45% NPP;饲料电解质平衡值($\text{Na}^+ + \text{K}^+ - \text{Cl}^-$)设 3 个水平,分别为 200、250 和 300 mmol·kg⁻¹,饲料粗蛋白水平为 19.5%,共设置 9 个处理组,每个处理组 6 个重复。

1.2 试验动物

选用 324 只 1 日龄爱拔益加(AA)肉仔鸡,按平均体重随机分为 9 个处理组,每组 6 个重复,每个重复笼 6 只鸡,饲养于不锈钢镀塑鸡笼内。试验期 21 d。肉仔鸡 24 h 恒定光照,自由采食和饮自来水。常规免疫,试验鸡饲养管理按《AA 肉仔鸡饲养管理手册》进行。试验过程中,每日观察并记录鸡只健康状况,如有鸡只发病或死亡,立即解剖,观察分析病理死因,并结料。试验场地和鸡舍清洁卫生,并进行正常消毒;试验鸡舍通风良好,并保持所需的温度;饲料生产按标准进行,不受潮,不结块,无霉变,不添加任何其它促生长剂;饮水水质良好,无污染;试验用雏鸡健壮,达到商品雏鸡标准。每周末按总鸡数的 15% 进行抽检,称其体重,保证鸡只体

重达标。

1.3 试验饲料

饲料中除钙磷与电解质水平除外,其他成分参照美国 NRC(1994)和我国农业部颁布的鸡饲养标准(NY/T33—2004)的 1~21 日龄肉仔鸡营养建议量配制玉米-豆粕型基础饲料。通过调整各组饲料中磷酸氢钙、石粉、砂砾比例使饲料钙磷水平达到处理设置要求。通过调整各组饲料中的碳酸氢钠添加量使饲料电解质平衡值达到处理设置要求。

1.4 生长性能指标观测

于肉鸡 21 日龄晚 22:00 时,以重复笼为单元结料,禁食,但自由饮水,次日(22 日龄)早 08:00 时,以重复笼为单元称鸡空腹重,计算平均日增重、日采食量、耗料/增重。

1.5 样品采集与制备

配试验饲料时现场采样,将分别采集的玉米、豆粕和各处理饲料样品,粉碎过 200 目筛后置于封口样品袋中低温干燥保存,以备分析饲料粗蛋白质、钙、磷、植酸磷、钠、钾、氯含量。于 22 日龄早上鸡只生长性能数据采集完毕后,以重复笼为单元选择 2 只接近笼平均体重的试验鸡,翅静脉采血 5 mL,于 3 000 r·min⁻¹离心 10 min,取上清血清分装,置-20℃冰箱冻存,以备测定血清生化指标。22 日龄屠宰试验后,2 个处理组的每个重复笼留 2 只体重接近平均体重的鸡,开始代谢试验,下午 15:00 恢复喂料,同时采用全收类法开始收集粪便。饲喂 55 h 后停料,计算耗料量;继续收集粪便 17 h(总共 72 h)。禁食期间鸡只自由饮水,并补饮葡萄糖生理盐水(5% 葡萄糖溶液,NaCl 浓度为 0.9%)。收集粪便后按每 100 g 鲜粪加 10% 盐酸 10 mL,避免粪中氨氮的损失。然后将粪便装入带盖容器中;粪便每天收集,保存于 4℃以下冰箱,3 d 收集完毕,称重,将全部粪便 55℃~65℃烘干,粉碎,过 40 目分析筛,筛上物研碎后混匀,取适量样品装入自封袋;于 0℃~4℃冰箱保存,用以测定粪中氮、钙和磷含量。

1.6 样品分析

用常规凯氏定氮法(GB/T 6432—2018)测定饲料粗蛋白质、粪氮含量;用 5110 型等离子体光谱发射光谱仪(5110 ICP-OES, Agilent Technologies Australia(M) Pty Ltd, Australia)测定饲料钠、钾、钙、总磷以及粪尿中钙、磷含量;用电感耦合等离子体质谱仪测定饲料中氯含量(inductively coupled plasma mass spectrometry, ICP-MS);用氯化铁沉淀

表1 基础饲料组成及营养水平(饲喂基础)

Table 1 Feed ingredients and nutrient levels of the basal diet (as-fed basis)

%

饲料钙和非植酸磷水平/% Dietary Ca and NPP level	Ca 0.70%+ NPP 0.35%			Ca 0.80%+ NPP 0.40%			Ca 0.90%+ NPP 0.45%		
饲料电解质平衡值/(mmol·kg ⁻¹) DEB value	200	250	300	200	250	300	200	250	300
原料 Ingredients									
玉米 Corn	56.30	56.30	56.30	56.30	56.30	56.30	56.30	56.30	56.30
豆粕 Soybean meal	34.10	34.10	34.10	34.10	34.10	34.10	34.10	34.10	34.10
大豆油 Soybean oil	4.43	4.43	4.43	4.43	4.43	4.43	4.43	4.43	4.43
磷酸氢钙 Dicalcium phosphate ¹	0.95	0.95	0.95	1.25	1.25	1.25	1.50	1.50	1.50
碳酸钙 Calcium carbonate ¹	0.94	0.94	0.94	1.04	1.04	1.04	1.15	1.15	1.15
氯化钠 Sodium chloride ¹	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30
DL-蛋氨酸 DL-Methionine ¹	0.31	0.31	0.31	0.31	0.31	0.31	0.31	0.31	0.31
L-赖氨酸 L-Lysine hydrochloride	0.16	0.16	0.16	0.16	0.16	0.16	0.16	0.16	0.16
L-苏氨酸 L-Threonine	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08
色氨酸 Tryptophan	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
沙砾 Gravel ²	0.81	0.81	0.81	0.41	0.41	0.41	0.05	0.05	0.05
碳酸氢钠 NaHCO ₃	0.002	0.42	0.85	0.002	0.42	0.85	0.002	0.42	0.85
沸石粉 Zeolite powder ³	1.30	0.88	0.45	1.30	0.88	0.45	1.30	0.88	0.45
预混料 Premix ⁴	0.31	0.31	0.31	0.31	0.31	0.31	0.31	0.31	0.31
营养水平 Nutrition level									
代谢能/(MJ·kg ⁻¹) Metabolizable energy	12.55	12.55	12.55	12.55	12.55	12.55	12.55	12.55	12.55
粗蛋白质 Crude protein ⁵	19.67	19.55	19.54	19.46	19.62	19.36	19.38	19.65	19.46
赖氨酸 Lysine	1.18	1.18	1.18	1.18	1.18	1.18	1.18	1.18	1.18
蛋氨酸 Methionine	0.61	0.61	0.61	0.61	0.61	0.61	0.61	0.61	0.61
苏氨酸 Threonine	0.83	0.83	0.83	0.83	0.83	0.83	0.83	0.83	0.83
色氨酸 Tryptophan	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24
蛋氨酸+胱氨酸 Methionine+Cystine	0.93	0.93	0.93	0.93	0.93	0.93	0.93	0.93	0.93
钙 Calcium ⁵	0.67	0.68	0.68	0.78	0.77	0.80	0.89	0.86	0.93
总磷 Total phosphorus ⁵	0.56	0.54	0.53	0.60	0.58	0.58	0.62	0.62	0.64
非植酸磷 Non-phytate phosphorus ⁵	0.32	0.32	0.34	0.38	0.42	0.36	0.46	0.48	0.48
钠 Sodium ⁵	0.11	0.21	0.34	0.12	0.24	0.36	0.13	0.22	0.32
钾 Kalium ⁵	0.96	1.08	0.98	0.98	0.95	0.98	0.97	1.00	0.96
氯 Chlorine ⁵	3.87	4.34	3.40	3.24	3.35	2.89	2.54	3.07	2.17
饲料电解质平衡值/(mmol·kg ⁻¹) DEB value ⁵	201	244	304	214	253	326	235	265	323

¹. 饲料级。². 用于调整各处理组饲料中的磷酸氢钙和碳酸钙用量。³. 用于调整各处理组饲料中的碳酸氢钠用量。⁴. 预混料为每千克饲料提供:VA 11 000 IU, VD₃ 4 800 IU, VE 70 IU, VK₃ 3.5mg, VB₁ 4.45 mg, VB₂ 9 mg, VB₆ 6.25 mg, VB₁₂ 0.04 mg, 泛酸 21.75 mg, 烟酰胺 70 mg, 叶酸 2.2 mg, 生物素 0.3 mg, 胆碱 700 mg, 铜 8 mg, 锰 110 mg, 铁 40 mg, 锌 60 mg, 碘 0.35 mg, 硒 0.35 mg。⁵. 实测值,其他为计算值

¹. Feed grade. ². It was used to adjust the dietary dosage of calcium hydrogen phosphate and calcium carbonate in each treatment group. ³. It was used to adjust the dietary sodium bicarbonate dosage in each treatment group. ⁴. Premix provided per kilogram of diet: VA 11 000 IU, VD₃ 4 800 IU, VE 70 IU, VK₃ 3.5mg, VB₁ 4.45 mg, VB₂ 9 mg, VB₆ 6.25 mg, VB₁₂ 0.04 mg, pantothenic acid 21.75 mg, nicotinic acid 70 mg, folic acid 2.2 mg, biotin 0.3 mg, choline 700 mg, copper 8 mg, iron 40 mg, manganese 110 mg, zinc 60 mg, selenite 0.35 mg, iodine 0.35 mg. ⁵. Measured values, others are calculated values

法测定饲料植酸磷含量^[14];以饲料总磷含量减去饲料植酸磷含量而得到饲料非植酸磷含量。用光电比色法利用生化分析仪测定血清生化指标,包括甘油三酯(triglycerides, TG)、总胆固醇(total cholesterol, TC)、葡萄糖(glucose, GLU)、总蛋白(total protein, TP)、白蛋白(albumin, ALB)、球蛋白(globulin, GLB)、尿酸(uric acid, UA)、尿氮(urea, UREA)含量及谷丙转氨酶(alanine aminotransferase, ALT)和谷草转氨酶(aspartate aminotransferase, AST)活性。粗蛋白质、钙、磷的表现代谢率计算公式为:某养分代谢率(%)=[(食入营养分量-粪中该养分分量)/食入营养分量]×100。

1.7 数据统计分析

用 SAS 9.4 系统中的一般线性模型(GLM)程

序对所得数据进行双因素方差分析,分析中包括饲料钙、非植酸磷水平和电解质平衡值的主效应,以及这两个因素之间的交互作用。如果方差分析结果显著,进一步使用最小显著差异法(LSD)对各组平均值之间的差异显著性进行比较。在本研究中,每个重复笼作为一个独立的试验单元。显著性检验水平设定为 $P \leq 0.05$ 。

2 结 果

2.1 饲料不同钙、非植酸磷水平与电解质平衡值对肉仔鸡生长性能的影响

由表2可知,饲料钙、非植酸磷水平与电解质平衡值及两者的互作对1~21日龄肉仔鸡平均日采食量、平均日增重和料重比均无显著影响($P > 0.05$)。

表2 饲料不同钙、非植酸磷水平与电解质平衡值对1~21日龄肉仔鸡生长性能的影响¹

Table 2 Effects of different levels of dietary calcium, non-phytic phosphorus and electrolyte balance value on growth performance of broilers from 1 to 21 d of age¹

饲料钙和非植酸磷水平 Dietary Ca and NPP level	饲料电解质平衡值/ (mmol·kg ⁻¹) DEB value	平均日采食量/(g·d ⁻¹) Average daily feed intake	平均日增重/ (g·d ⁻¹) Average daily gain	料重比 The ratio of feed to gain
钙0.70% 非植酸磷0.35% Ca 0.70% NPP 0.35%	200	40.27	32.47	1.25
	250	45.49	33.10	1.37
	300	44.78	34.56	1.30
钙0.80% 非植酸磷0.40% Ca 0.80% NPP 0.40%	200	50.76	32.78	1.55
	250	45.84	34.00	1.35
	300	45.30	32.97	1.37
钙0.90% 非植酸磷0.45% Ca 0.90% NPP 0.45%	200	42.24	32.43	1.30
	250	45.65	33.57	1.36
	300	43.44	32.20	1.35
集合标准误 SEM		2.21	0.92	0.07
P值 P-value				
饲料钙和非植酸磷 Dietary Ca and NPP		0.076	0.668	0.124
饲料电解质平衡 DEB		0.747	0.408	0.921
饲料钙和非植酸磷*电解质平衡 Dietary Ca and NPP*DEB		0.128	0.542	0.169

¹. 数值表示6个重复的平均值($n=6$)。NPP. 非植酸磷;DEB. 饲料电解质平衡($\text{Na}^+ + \text{K}^+ - \text{Cl}^-$)。下同

¹. Value represents the mean of six replicates ($n=6$). NPP. Non-phytate phosphorus; DEB. Dietary electrolyte balance. The same as below

2.2 饲料不同钙、非植酸磷水平与电解质平衡值对肉仔鸡血清生化指标的影响

由图1可知,饲料钙和非植酸磷水平对血清ALT活性有显著影响($P < 0.05$),饲料钙、非植酸磷水平与电解质平衡值的互作对血清ALT也有显著

影响($P < 0.05$)。饲料钙、非植酸磷水平与电解质平衡值及两者的互作对其他血清生化指标均无显著影响($P > 0.05$)。当钙和非植酸磷水平分别为0.70%和0.35%时,电解质平衡值为300 mmol·kg⁻¹组的ALT活性显著高于200和250 mmol·kg⁻¹的组

表 3 饲料不同钙、非植酸磷水平与电解质平衡值对 21 日龄肉仔鸡血清生化指标的影响²
Table 3 Effects of different levels of dietary calcium, non-phytic phosphorus and electrolyte balance value on serum biochemical indices of 21 d broilers²

饲料钙和非植酸磷水平 Dietary Ca and NPP level	饲料电解质 平衡值/ (mmol·kg ⁻¹) DEB value		AST/ (U·L ⁻¹)	TP/ (g·L ⁻¹)	ALB/ (g·L ⁻¹)	GLB/ (U·L ⁻¹)	TC/ (mmol·L ⁻¹)	TG/ (mmol·L ⁻¹)	GLU/ (mmol·L ⁻¹)	UREA/ (mmol·L ⁻¹)	UA/ (μmol·L ⁻¹)
钙 0.70% 非植酸磷 0.35% Ca 0.70% NPP 0.35%	200		65.13	6.000	2.417	3.583	0.865	0.154	2.660	0.255	76.60
	250		126.6	9.517	4.133	5.383	1.458	0.218	3.853	0.278	140.4
钙 0.80% 非植酸磷 0.4% Ca 0.80% NPP 0.40%	300		107.3	9.242	3.728	5.513	1.335	0.214	3.468	0.318	145.1
	200		101.2	6.870	2.47	4.400	0.951	0.143	2.482	0.243	95.14
钙 0.90% 非植酸磷 0.45% Ca 0.90% NPP 0.45%	250		95.03	8.168	3.06	5.108	1.073	0.197	3.065	0.199	114.6
	300		83.98	7.443	2.742	4.702	1.023	0.186	2.887	0.277	124.8
集合标准误差 SEM P 值 P-value	200		78.45	6.567	2.407	4.160	0.975	0.168	2.862	0.338	121.7
	250		83.35	5.634	1.974	3.660	1.027	0.186	2.505	0.260	102.3
饲料钙和非植酸磷水平 Dietary Ca and NPP level	300		61.63	5.340	2.295	3.045	0.713	0.133	2.073	0.244	74.21
	集合标准误差 SEM P 值 P-value		26.21	2.108	0.965	1.089	0.324	0.046	0.787	0.048	24.94
饲料电解质平衡值 DEB value	饲料钙和非植酸磷水平 Dietary Ca and NPP level		0.489	0.383	0.393	0.344	0.489	0.683	0.444	0.417	0.580
	饲料电解质平衡值 DEB value		0.623	0.753	0.694	0.760	0.623	0.490	0.772	0.714	0.549
饲料钙和非植酸磷水平*电解质平衡值 Dietary Ca and NPP level*DEB value	饲料钙和非植酸磷水平 Dietary Ca and NPP level		0.692	0.828	0.927	0.714	0.822	0.873	0.846	0.508	0.217
	饲料电解质平衡值 DEB value										

². 同一列中具有不同上标字母的数值间差异显著 ($P \leq 0.05$), 无字母或相同字母表示无显著差异 ($P > 0.05$), 下同
². Different letters in the same column with different superscript letters were significantly different ($P \leq 0.05$), with the same letter or with no letter mean no significant difference ($P > 0.05$), the same as below

($P < 0.05$), 当饲粮钙和非植酸磷水平分别为 0.80% 和 0.40% 时, 电解质平衡值为 250 和 300 $\text{mmol} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的 ALT 活性显著低于 200 $\text{mmol} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的组 ($P <$

0.05), 饲粮钙和非植酸磷水平分别为 0.90% 和 0.45% 时, 不同电解质平衡值组的 ALT 活性无显著差异 ($P > 0.05$)。

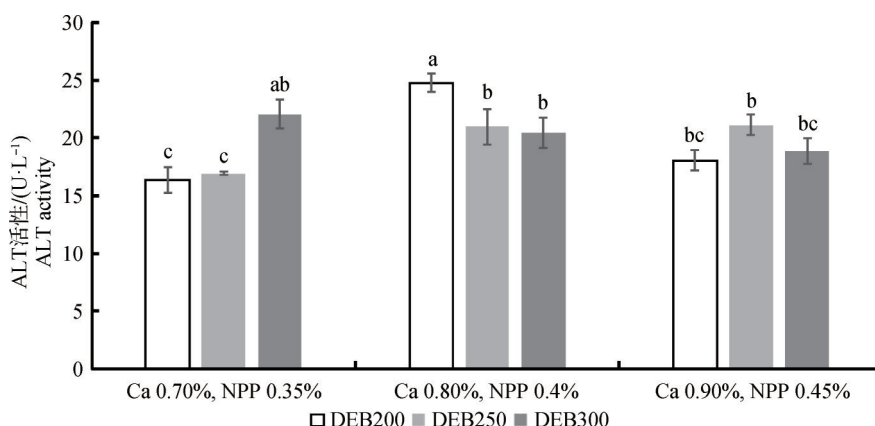


图1 饲粮不同钙、非植酸磷水平与电解质平衡值对 21 日龄肉仔鸡谷丙转氨酶活性的影响

Fig. 1 Effects of different levels of dietary calcium, non-phytic phosphorus and electrolyte balance value on alanine aminotransferase activity of 21 d broilers

2.3 饲粮不同钙、非植酸磷水平及电解质平衡值对肉仔鸡养分表观代谢率的影响

由表 4 可知, 饲粮钙、非植酸磷水平对钙表观代谢率有显著影响 ($P < 0.05$); 饲粮不同电解质平衡值对干物质、粗蛋白及钙表观代谢率有显著影响 ($P < 0.05$); 饲粮钙、非植酸磷水平与电解质平衡值两者的互作对磷表观代谢率有显著影响 ($P < 0.05$), 但对其他养分代谢指标无显著影响 ($P > 0.05$)。随着饲粮钙和非植酸磷水平的升高, 钙表观代谢率显著下降 ($P < 0.05$); 相较于其他饲粮电解质平衡值, 电解质值为 300 $\text{mmol} \cdot \text{kg}^{-1}$ 组的干物质、粗蛋白和钙的表观代谢率显著高于 250 和 200 $\text{mmol} \cdot \text{kg}^{-1}$ 组 ($P < 0.05$)。当饲粮钙和非植酸磷水平为 0.70% 和 0.35% 时, 300 $\text{mmol} \cdot \text{kg}^{-1}$ 电解质值可显著提高磷表观代谢率 ($P < 0.05$), 当饲粮钙和非植酸磷水平为 0.80% 和 0.40% 时, 3 个电解质平衡值组的磷表观代谢率无显著差异 ($P > 0.05$)。当钙和非植酸磷水平为 0.90% 和 0.45% 时, 300 $\text{mmol} \cdot \text{kg}^{-1}$ 电解质值组的磷表观代谢率水平显著高于 200 $\text{mmol} \cdot \text{kg}^{-1}$ 组 ($P < 0.05$), 但与 250 $\text{mmol} \cdot \text{kg}^{-1}$ 组无显著差异 ($P > 0.05$)。

3 讨论

钙、磷是肉鸡饲粮中重要的营养元素。国内外学者对饲粮不同钙、非植酸磷水平对家禽生产性能

的影响均做了大量的研究。关于 1~21 日龄肉仔鸡, 前人研究指出, 最佳饲料钙水平为 0.6%~1.0%, 非植酸磷水平为 0.33%~0.5%^[15-18]。在饲粮粗蛋白质水平 20.5% 的情况下, 不同钙 (0.8%~1.0%) 和非植酸磷 (0.30%~0.46%) 水平及其二者的互作对 1~21 日龄黄羽肉鸡的生长性能无显著影响^[19]。在另一项有关 1~21 日龄白羽肉鸡的研究中发现, 与本试验相同的 3 组钙、非植酸磷水平对肉鸡生长性能均无显著影响^[20], 这与本试验的结果一致。Gautier 等^[21]研究发现, 低钙低磷 (钙和非植酸磷水平分别为 0.4% 和 0.2%), 并未导致 1~21 日龄 ROSS 肉鸡生长性能降低, 可能与试验采用适宜钙磷比例 (2:1) 有关。在饲粮电解质平衡水平方面, Murakmi 等^[22]提出, 肉仔鸡饲喂正常蛋白质水平饲粮时获得最佳生长性能的适宜饲粮电解质平衡值为 246~264 $\text{mmol} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。姜金庆^[23]研究表明, 11~49 日龄肉仔鸡适宜饲粮电解质平衡值为 50~300 $\text{mmol} \cdot \text{kg}^{-1}$, 其中 200 $\text{mmol} \cdot \text{kg}^{-1}$ 组的肉仔鸡平均日增重最高。而 Karunajeewa 等^[24]发现饲粮电解质平衡值为 150~300 $\text{mmol} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时, 1~21 日龄饲喂正常蛋白水平饲粮的肉鸡的生长性能无显著变化。本试验结果显示, 低蛋白饲粮钙、非植酸磷水平和电解质平衡值对生长性能无显著影响, 说明饲粮粗蛋白水平降低 2 个百分点时, 生长性能不是评价适宜饲粮钙、非植酸磷水平和电解质平衡值的敏感指标。

表 4 饲料不同钙、非植酸磷水平及电解质平衡值对肉仔鸡养分表现代谢率的影响
Table 4 Effects of different levels of dietary calcium, non-phytic phosphorus and electrolyte balance value on apparent metabolic rate of nutrients in broilers

饲料钙和非植酸磷水平 Dietary Ca and NPP level	饲料电解质 平衡值/ (mmol·kg ⁻¹) DEB value	干物质表 观代谢率/% DM apparent metabolic rate	粗蛋白表观 代谢率/% CP apparent metabolic rate	钙表观 代谢率/% Ca apparent metabolic rate	磷表观 代谢率/% P apparent metabolic rate
钙 0.70% 非植酸磷 0.35%	200	69.59	60.62	47.63	27.35 ^c
Ca 0.70% NPP 0.35%	250	70.37	61.58	51.83	28.93 ^{de}
	300	71.27	61.39	54.56	40.20 ^a
钙 0.80% 非植酸磷 0.40%	200	68.90	59.62	43.59	32.33 ^{cd}
Ca 0.80% NPP 0.40%	250	69.63	58.08	44.56	35.28 ^{abc}
	300	71.92	63.97	52.33	35.11 ^{abc}
钙 0.90% 非植酸磷 0.45%	200	68.46	58.42	42.92	32.99 ^{bcd}
Ca 0.90% NPP 0.45%	250	69.67	59.70	40.32	37.06 ^{ab}
	300	71.06	61.72	46.86	39.01 ^a
集合标准误 SEM		0.886 8	1.214	1.838	1.566
饲料钙和非植酸磷水平 Dietary Ca and NPP level					
钙 0.70% 非植酸磷 0.35%		70.41	61.19	51.34 ^a	32.16
Ca 0.7% NPP 0.35%					
钙 0.80% 非植酸磷 0.40%		70.15	60.56	46.82 ^b	34.24
Ca 0.80% NPP 0.40%					
钙 0.90% 非植酸磷 0.45%		69.73	59.95	43.37 ^c	36.35
Ca 0.90% NPP 0.45%					
集合标准误 SEM		0.5120	0.700 9	1.178	1.004
饲料电解质平衡值/(mmol·kg ⁻¹)DEB value					
200		68.98 ^b	59.56 ^b	44.71 ^b	30.90
250		69.89 ^b	59.79 ^b	45.57 ^b	33.76
300		71.41 ^a	62.36 ^a	51.25 ^a	38.10
集合标准误 SEM		0.512 0	0.700 9	1.178	1.004
P 值 P-value					
饲料钙和非植酸磷水平 Dietary Ca and NPP level		0.644	0.460	<0.000 1	0.018
饲料电解质平衡值 DEB value		0.006	0.012	0.000 4	<0.000 1
饲料钙和非植酸磷水平*电解质平衡值 Dietary Ca and NPP level*DEB value		0.928	0.183	0.413	0.017

在本试验中,饲料钙和非植酸磷水平和电解质平衡值对除 ALT 以外的血清生化指标无显著影响。姜金庆^[23]研究指出,当 DEB 值为 250 mmol·kg⁻¹时,可以显著提高三黄肉鸡血清总蛋白浓度,降低血清尿酸含量。刘景等^[25]对 21~42 日龄 AA 肉鸡进行不同磷酸一二钙添加水平处理,发现钙磷水平对血清中的肌酐和球蛋白含量有显著影响。上述研究与本试验结果不一致的原因可能是鸡的品种以及试验周期不同。肉鸭中研究发现,无论在高蛋

白还是低蛋白的条件下,电解质平衡值对其血糖和脂质代谢中的胆固醇和甘油三酯均无显著影响,与本试验的结果一致^[26]。当肝受到损害时会导致血清中 ALT 浓度升高^[27]。本试验结果显示,饲料不同钙、非植酸磷水平和电解质平衡值的交互作用对 ALT 活性有显著影响。在饲料钙水平为 0.70%、非植酸磷水平为 0.35% 时,电解质平衡值为 300 mmol·kg⁻¹的组的肉鸡血清 ALT 活性显著高于 200 和 250 mmol·kg⁻¹电解质平衡值组,但当钙水平

为0.80%,非植酸磷水平为0.40%时,在电解质平衡值达200 mmol·kg⁻¹时,肉鸡的血清ALT活性显著高于250和300 mmol·kg⁻¹这两个组。而在生长肉兔中的研究表明,不同电解质平衡值(-150~350 mmol·kg⁻¹)水平对血清ALT活性无显著影响。以上结果说明不同动物对日粮电解质平衡值的敏感度不同^[28]。

肉鸡的养分代谢与生长性能密切相关^[29-30]。研究表明,高钙磷水平对干物质消化有不利影响^[31]。与正常磷水平组相比,肉鸡饲料1.0%磷水平组的干物质代谢率会降低7.83%^[32]。但在本试验中,不同钙磷水平对干物质代谢率无显著影响。可能是本试验的钙磷水平处在一个比较适宜的浓度范围之内。氮代谢是指鸡体内氮的吸收、利用和排泄的过程^[33]。严毅梅^[34]认为,低蛋白日粮水平下,电解质水平的降低也是导致肉鸡生长发育受阻的一个重要因素。在本试验中,发现电解质水平对粗蛋白表观代谢率有显著影响,电解质水平为300 mmol·kg⁻¹可显著提高粗蛋白表观代谢率。Koreleski等^[35]研究发现,在日粮中额外补充钠可改善鸡的生长性能和肉质品质,促进鸡体内氮的转化和利用,提高氮的利用效率。Mushtaq等^[36]发现,将饲料钠水平增加至0.30%可提高肉鸡胸肌产量,并减少腹部脂肪沉积。Canh等^[37]认为,电解质对氮利用率影响的机制可能与动物体内离子的排泄有关,当日粮钾浓度从0.1%提高到0.6%时,育肥猪会通过减少NH₄⁺的排泄来维持钾离子的平衡。钙和磷在肉鸡的生长和发育中起着关键作用。钙是构成骨骼和牙齿的主要成分,而磷则是能量代谢和细胞功能的重要参与者^[38]。玉米-豆粕型饲料中粗蛋白质的减少主要通过降低豆粕含量来实现,豆粕中含有的植酸盐是影响钙磷等矿物元素吸收的主要螯合剂^[39]。因此,低蛋白饲料可能会影响肉鸡对矿物质的吸收和利用。现阶段,有关低蛋白饲料的电解质平衡水平对肉鸡钙磷养分利用率的研究较少,但关于笼养蛋鸭饲料电解质和蛋白质水平对体内酸碱平衡的影响的研究中发现,低蛋白(16%)和高电解质水平(电解质平衡值为500 mmol·kg⁻¹)组合时钙和磷的利用率最高^[26],这与本试验中当钙和非植酸磷分别为0.70%和0.35%时,电解质水平的提高可显著提高磷表观代谢率的结果一致。电解质平衡值虽不会直接影响钙磷的吸收率,但可能通过影响血清中钠、钾离子浓度来调节体内的酸碱平衡,从而影响动物体内钙磷的代谢率^[40]。

4 结 论

低蛋白饲料(粗蛋白质水平为19.5%)钙和非植酸磷水平为0.80%和0.40%、电解质平衡值为300 mmol·kg⁻¹对于1~21日龄肉仔鸡的生长和养分利用较为适宜。

参考文献(References):

- [1] OLUWABIYI C T, SONG Z G. Branched-chain amino acids supplementation in low-protein broiler diets: A review [J]. *Anim Feed Sci Technol*, 2024, 318:116114.
- [2] 冯倩倩,武书庚,齐广海,等. 肉仔鸡低蛋白质饲料的研究进展[J]. *动物营养学报*, 2020, 32(9): 4010-4019.
FENG Q Q, WU S G, QI G H, et al. Advances on study of low protein diets in broilers [J]. *Chinese Journal of Animal Nutrition*, 2020, 32(9): 4010-4019. (in Chinese)
- [3] HARN J V, DIJKSLAG M A, KRIMPEN M M V. Effect of low protein diets supplemented with free amino acids on growth performance, slaughter yield, litter quality, and footpad lesions of male broilers [J]. *Poult Sci*, 2019, 98:4868-4877.
- [4] CHRYSTAL P V, MOSS A F, KHODDAMI A, et al. Impacts of reduced-CP diets on key parameters in male broiler chickens offered maize-based diets [J]. *Poult Sci*, 2020, 99:505-516.
- [5] LI X R, WANG C, LI S Y, et al. Low protein diet influences mineral absorption and utilization in medium-growing yellow-feathered broilers from 1 to 30 days of age [J]. *Poult Sci*, 2024, 103(12):104512.
- [6] LAUTROU M, NARCY A, DOURMAD J Y. Dietary phosphorus and calcium utilization in growing pigs: requirements and improvements [J]. *Front Vet Sci*, 2022, 8:734365.
- [7] MUSCHER A S, WILKENS M R, MROCHEN N, et al. *Ex vivo* intestinal studies on calcium and phosphate transport in growing goats fed a reduced nitrogen diet [J]. *Br J Nutr*, 2012, 108(4):628-637.
- [8] NIETO R, SEIQUER I, AGUILERA J F. The effect of dietary protein content on calcium and phosphorus retention in the growing Iberian pig [J]. *Livest Sci*, 2008, 116(1-3):275-288.
- [9] GAFFNEY-STOMBERG E, SUN B, CUCCHI C E, et al. The effect of dietary protein on intestinal calcium absorption in rats [J]. *Endocrinology*, 2010, 151(3): 1071-1078.

- [10] ADEKUNMISI A A, Robbins K R. Effects of dietary crude protein, electrolyte balance, and photoperiod on growth of broiler chickens[J]. *Poult Sci*, 1987, 66(2): 299-305.
- [11] 郭小权, 黄克和, 骆建兵, 等. 高钙高蛋白日粮对青年蛋鸡体液酸碱度和电解质的影响[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2005, 10: 80-84.
GUO X Q, HUANG K H, LUO J B, et al. Effect of dietary high calcium and high protein on acid-base and electrolyte in growers [J]. *Journal of Northwest Agriculture and Forestry University (Natural Science Edition)*, 2005, 10: 80-84. (in Chinese)
- [12] RAVINDRAN V, COWIESON A J, SELLE P H. Influence of dietary electrolyte balance and microbial phytase on growth performance, nutrient utilization, and excreta quality of broiler chickens[J]. *Poult Sci*, 2008, 87(4): 677-688.
- [13] ADEDOKUN S A, PESCATORE A J, FORD M J, et al. Examining the effect of dietary electrolyte balance, energy source, and length of feeding of nitrogen-free diets on ileal endogenous amino acid losses in broilers [J]. *Poult Sci*, 2017, 96(9): 3351-3360.
- [14] LETOURNEAU-MONTMINY M P, LESCOAT P, NARCY A, et al. 2008. Effects of reduced dietary calcium and phytase supplementation on calcium and phosphorus utilisation in broilers with modified mineral status. *Br poult sci*, 49(6): 705-715.
- [15] GAUTIER A E, WALK C L, DILGER R N. Influence of dietary calcium concentrations and the calcium-to- non-phytate phosphorus ratio on growth performance, bone characteristics, and digestibility in broilers[J]. *Poult Sci*, 2017, 96(8): 2795-2803.
- [16] 王晋晋, 王金荣, 付佐龙, 等. 日粮中钙、磷水平对1~3周龄肉鸡骨骼生长的影响[J]. 动物营养学报, 2010, 22(4): 1088-1095.
WANG J J, WANG J R, FU Z L, et al. Effects of dietary calcium and phosphorus levels on bone growth in broilers from 1 to 3 weeks of age [J]. *Chinese Journal of Animal Nutrition*, 2010, 22(4): 1088-1095. (in Chinese)
- [17] HAMDI M, LÓPEZ-VERGÉ S, MANZANILLA E G, et al. Effect of different levels of calcium and phosphorus and their interaction on the performance of young broilers[J]. *Poult Sci*, 2015, 94(9): 2144-2151.
- [18] KARIMI A, BEDFORD M R, SADEGHI G H, et al. Influence of dietary non-phytate phosphorous levels and phytase supplementation on the performance and bone characteristics of broilers[J]. *Braz J Poult Sci*, 2011, 13: 43-51.
- [19] 邹 轶, 刘松柏, 张 齐, 等. 不同钙和非植酸磷水平对快大型黄羽肉鸡生长性能和胫骨性状的影响[J]. 中国畜牧兽医, 2022, 49(1): 109-121.
ZOU Y, LIU S B, ZHANG Q, et al. Effect of dietary calcium and non-phytate phosphorus levels on growth performance and tibial characteristics of yellow-feathered broilers [J]. *China Animal Husbandry & Veterinary Medicine*, 2022, 49(1): 109-121. (in Chinese)
- [20] WU J X, MA X Y, LIAO X D, et al. Dietary calcium and non-phosphate phosphorus interaction influences bone development and related gene expression of broiler chickens[J]. *Poult Sci*, 2023, 102(8): 102851.
- [21] GAUTIER A E, WALK C L, DILGER R N. Influence of dietary calcium concentrations and the calcium-to-non-phytate phosphorus ratio on growth performance, bone characteristics, and digestibility in broilers[J]. *Poult Sci*, 2017, 96(8): 2795-2803.
- [22] MURAKAMI A E, OVIEDO RONDON E O, MARTINS E N, et al. Sodium and chloride requirements of growing broiler chickens (twenty one to forty two days of age) fed corn soy bean diets[J]. *Poult Sci*, 2001, 80: 289-294.
- [23] 姜金庆. 日粮中不同电解质平衡值对肉鸡生产性能和血液生化指标的影响[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2006.
JIANG J Q. The effects of different value of dietary electrolyte balance on performances and blood biochemical indices of san huang chickens [D]. Yangling: Northwest A & F University, 2006. (in Chinese)
- [24] KARUNAJEEWA H, BARR D A, FOX M, et al. Effect of dietary phosphorus concentration and electrolyte balance on the growth-performance of broiler-chickens [J]. *Br Poult Sci*, 1986, 27(4): 601-612.
- [25] 刘 景, 陈炳钿, 李忠荣, 等. 磷酸一二钙不同添加水平对肉鸡后期生产性能、胫骨和血液指标的影响[J]. 家畜生态学报, 2021, 42(4): 40-44.
LIU J, CHEN B D, LI Z R, et al. Effects of different levels of monocalcium phosphate on production performance, tibia and blood parameters of broilers at late stage [J]. *Journal of Domestic Animal Ecology*, 2021, 42(4): 40-44. (in Chinese)
- [26] 刘永学, 王 安. 笼养蛋鸭日粮电解质和蛋白质水平对体内酸碱平衡的影响[J]. 动物营养学报, 2006, 18(4): 244-251.
LIU X Y, WANG A. Effects of dietary protein and dietary electrolyte balance on acid-base balance of

- cage-rearing ducks [J]. *Chinese Journal of Animal Nutrition*, 2006, 18(4): 244-251. (in Chinese)
- [27] 汪尧春, 周毓平, 吴于明, 等. 日粮硫、镁水平对肉鸡血液酸碱平衡和胫骨软骨发育不良的影响[J]. 中国畜牧杂志, 2000(1): 3-5.
- WANG Y C, ZHOU Y P, GUO Y M, et al. Effects of dietary sulfur and magnesium levels on acid-base homeostasis and tibial dyschondroplasia development in broiler chickens [J]. *Chinese Journal of Animal Science*, 2000(1): 3-5. (in Chinese)
- [28] 李君伟, 麻名文, 王雪鹏, 等. 饲料电解质平衡对断奶至2月龄生长肉兔生长性能和血液生理生化指标的影响[J]. 动物营养学报, 2011, 23(5): 755-762.
- LI J W, MA M W, WANG X P, et al. Effects of dietary electrolyte balance on growth performance and blood physiological and biochemical indices of weanling to 2-month-old growing meat rabbits [J]. *Chinese Journal of Animal Nutrition*, 2011, 23(5): 755-762. (in Chinese)
- [29] MEHMOOD K, ZHANG H, IQBAL M K, et al. Tetramethylpyrazine mitigates toxicity and liver oxidative stress in tibial dyschondroplasia chickens [J]. *Pak Vet J*, 2018, 38(1): 76-80.
- [30] 邢瑞虎, 孙研研, 陈继兰, 等. 不同光照对“黄羽肉鸡”生长性能、养分代谢和屠宰性能的影响[J]. 甘肃农业大学学报, 2015, 50(1): 19-24.
- XING R H, SUN Y Y, CHEN J L, et al. Effect of lighting schedules on growth, nutrient metabolism and carcass traits in ‘yellow feathered broilers’ [J]. *Journal of Gansu Agricultural University*, 2015, 50(1): 19-24. (in Chinese)
- [31] 郭文文, 杨维仁, 郭宝林, 等. 不同磷水平和钙磷比饲料添加植酸酶对妊娠母猪养分表观消化率的影响[J]. 动物营养学报, 2015, 27(3): 893-901.
- GUO W W, YANG W R, GUO B L, et al. Effects of different phosphorus levels and calcium to phosphorus ratios with phytase supplementation on dietary nutrients apparently digestibility in pregnant sows [J]. *Chinese Journal of Animal Nutrition*, 2015, 27(3): 893-901. (in Chinese)
- [32] 贺佳. 日粮磷水平对肉鸡磷代谢及小肠Na/Pi-IIb基因mRNA表达的影响[D]. 长沙: 湖南农业大学, 2010.
- HE J. Effects of dietary phosphorus on phosphorus metabolism and regulation of sodium-dependent phosphate transporter mRNA for broilers [D]. Changsha: Hunan Agricultural University, 2010. (in Chinese)
- [33] MACCELLINE S P, WICKRAMASURIYA S S, CHO H M, et al. Broilers fed a low protein diet supplemented with synthetic amino acids maintained growth performance and retained intestinal integrity while reducing nitrogen excretion when raised under poor sanitary conditions [J]. *Poult Sci*, 2020, 99(2): 949-958.
- [34] 严毅梅. 降低粗蛋白水平、日粮电解质平衡和能量密度对饲喂玉米基础日粮的肉鸡的生产性能及淀粉、蛋白质和氨基酸代谢的影响[J]. 中国饲料添加剂, 2021, 4: 21-32.
- YAN Y M. The effects of reducing crude protein level, dietary electrolyte balance and energy density on the production performance and the metabolism of starch, protein and amino acids in broilers fed a corn-based diet [J]. *China Feed Additive*, 2021, 4: 21-32. (in Chinese)
- [35] KORELESKI J, SWIATKIEWICZ S, ARCZEWSKA A. The effect of dietary potassium and sodium on performance, carcass traits, and nitrogen balance and excreta moisture in broiler chicken [J]. *J Anim Feed Sci*, 2010, 19(2): 244-256.
- [36] MUSHTAQ T, SARWAR M, NAWAZ H, et al. Effect and interactions of dietary sodium and chloride on broiler starter performance (hatching to twenty-eight days of age) under subtropical summer conditions [J]. *Poult Sci*, 2005, 84(11): 1716-1722.
- [37] CANH T T, AARNINK A J A, MROZ Z, et al. Influence of electrolyte balance and acidifying calcium salts in the diet of growing-finishing pigs on urinary pH, slurry pH and ammonia volatilisation from slurry [J]. *Livest Prod Sci*, 1998, 56(1): 1-13.
- [38] 吴静璇. 饲料钙和非植酸磷水平对1~21日龄肉鸡生长性能、骨发育及相关基因表达的影响[D]. 保定: 河北科技师范学院, 2023.
- WU J X. Effects of dietary calcium and non-phytate phosphorus levels on growth performance, bone development and related gene expression of broilers from 1 to 21 d of age [D]. Baoding: Hebei Normal University of Science & Technology, 2023. (in Chinese)
- [39] PRAJAPATI M, SHAN H. Impacts and industrial applications of phytic acid and phytase [J]. *J Pure Appl Microbiol*, 2022, 16: 2292-2302.
- [40] OLANREWaju H A, THAXTON J P, DOZIER W A, et al. Electrolyte diets, stress, and acid-base balance in broiler chickens [J]. *Poult Sci*, 2007, 86(7): 1363-1371.

(编辑 范子娟)