

25-羟基维生素 D₃ 与维生素 D₃ 共晶对肉鸭生长性能、免疫功能及胫骨发育的影响

王昊宇 刘延芬 张克英 丁雪梅 白世平 王建萍 彭焕伟
玄 玥 宿卓薇 曾秋风*

(四川农业大学动物营养研究所,动物抗病营养教育部、农业部和四川省重点实验室,成都 611130)

摘要: 本试验旨在探讨一种新型的维生素 D 添加剂,即 25-羟基维生素 D₃(25-OH-D₃)与维生素 D₃ 共晶对肉鸭生长性能、免疫功能及胫骨发育的影响。选取 360 只 1 日龄健康樱桃谷肉公鸭,随机分为 3 个组,每组 6 个重复,每个重复 20 只。T1 组在基础饲料中添加 69.0 μg/kg 25-OH-D₃ 与 66.0 μg/kg 维生素 D₃ 物理混合物,T2 组在基础饲料中添加 135.0 μg/kg 25-OH-D₃ 与维生素 D₃ 共晶,T3 组在基础饲料中添加 67.5 μg/kg 25-OH-D₃ 与维生素 D₃ 共晶。试验期 35 d,分为 1~14 日龄和 15~35 日龄 2 个阶段。结果表明:1)与 T1 组相比,T2 组肉鸭 35 日龄体重以及 15~35 日龄和 1~35 日龄平均日增重(ADG)和平均日采食量(ADFI)显著提高($P < 0.05$),35 日龄胸肌肉色亮度值显著增加($P < 0.05$),35 日龄脾脏指数显著降低($P < 0.05$),14 日龄血清 I 型胶原 C 端肽含量和 35 日龄血清钙含量显著升高($P < 0.05$),35 日龄胫骨粗灰分含量及胫骨生长板宽度和宽度系数显著增加($P < 0.05$)。2)与 T1 组相比,T3 组肉鸭 1~35 日龄 ADG 和 15~35 日龄 ADFI 显著提高($P < 0.05$),14 日龄血液嗜酸细胞百分率和 35 日龄血液单核细胞计数显著增加($P < 0.05$),14 日龄血清钙和降钙素含量显著降低($P < 0.05$),14 日龄胫骨钙含量以及 35 日龄胫骨体积和粗灰分含量显著降低($P < 0.05$),35 日龄胫骨生长板厚度、厚度系数、宽度系数和横截面积显著增加($P < 0.05$)。3)与 T2 组相比,T3 组肉鸭 35 日龄胸肌剪切力显著提高($P < 0.05$),14 日龄法氏囊指数和 35 日龄脾脏指数显著提高($P < 0.05$),14 日龄血液中粒细胞百分率、单核细胞百分率、嗜碱细胞百分率以及单核细胞计数显著升高($P < 0.05$),14 日龄血液淋巴细胞百分率显著降低($P < 0.05$),14 日龄血清降钙素含量和 35 日龄血清钙和 I 型胶原 C 端肽含量显著降低($P < 0.05$),14 日龄胫骨粗灰分和磷含量以及 35 日龄胫骨钙含量显著降低($P < 0.05$),14 日龄胫骨生长板宽度和宽度系数显著增加($P < 0.05$)。由此可见,饲料中添加 25-OH-D₃ 与维生素 D₃ 共晶对于肉鸭的生长性能、免疫功能及胫骨发育有显著影响,且具有剂量依赖性,表现为饲料中添加 135.0 μg/kg 25-OH-D₃ 与维生素 D₃ 共晶效果更佳。

关键词: 25-OH-D₃ 与维生素 D₃ 共晶;肉鸭;生长性能;免疫功能;胫骨发育;生长板系数

中图分类号: S834

文献标识码: A

文章编号: 1006-267X(2021)03-1469-13

维生素 D₃ 是维生素 D 的一种活性形式,是调节动物体内钙吸收和骨骼形成的重要激素前体,

在肝细胞内经 25-羟化酶作用转化成为 25-羟基维生素 D₃(25-OH-D₃),且 25-OH-D₃ 是维生素 D

收稿日期:2020-07-27

基金项目:现代农业产业技术体系(CARS-42-10);上海药物研究所资金资助

作者简介:王昊宇(1997—),男,内蒙古鄂尔多斯人,硕士研究生,从事家禽营养研究。E-mail: 804898567@qq.com

* 通信作者:曾秋风,教授,博士生导师,E-mail: zqf@sicau.edu.cn

在动物机体内的活性代谢物^[1]。Bar等^[2]指出, 25-OH-D₃和 维生素 D₃都能被禽类肠道所吸收。Atencio等^[3]研究表明, 14日龄的雏鸡对25-OH-D₃的吸收率(74.9%)高于对维生素 D₃的吸收率(66.5%)。在肉鸡生长过程中, 25-OH-D₃在提高胫骨粗灰分含量上的效果优于维生素 D₃^[4]。当基础饲料中含有较低水平的维生素 D₃时, 添加25-OH-D₃对肉鸡胫骨粗灰分含量的改进效果是维生素 D₃的2倍^[5]。同时, 在增重和降低肉鸡胫骨发育不良方面, 25-OH-D₃也有较好的效果^[6]。Cantor等^[7]发现, 25-OH-D₃还可改善肉鸡饲料转化效率, 并提高胸肌重量。25-OH-D₃价格较维生素 D₃高, 基于成本考虑倾向于将25-OH-D₃和维生素 D₃在饲料中配合使用。因此, 为提高25-OH-D₃和维生素 D₃联合使用的效果, 上海药物研究所研发出了一种新型的25-OH-D₃和维生素 D₃共晶。维生素共晶是在低于任一种组成物熔点的温度下所有成分的融合, 对比物理混合而言, 维生素共晶具有结晶度高、吸湿性小的优点, 并形成规整的晶体形态, 稳定性增强, 因而有利于提高其成药性能^[8]。因此, 本试验旨在通过研究25-OH-D₃与维生素 D₃共晶对肉鸭生长性能、免疫功能及胫骨发育的影响, 初步探讨25-OH-D₃与维生素 D₃共晶在肉鸭上的作用效果, 为新型饲料添加剂的研发提供技术支持。

1 材料与方法

1.1 试验设计

25-OH-D₃与维生素 D₃共晶中25-OH-D₃与维生素 D₃比例为1:1, 又称骨化二醇共晶, 由上海药物研究所提供。

试验采用单因素设计, 选择360只1日龄樱桃谷肉鸭, 随机分为3个组, 每组6个重复, 每个重复20只。T1组在基础饲料中添加69.0 μg/kg 25-OH-D₃与66.0 μg/kg 维生素 D₃物理混合物(即为饲料提供5 520 IU/kg 维生素 D₃), T2组在基础饲料中添加135.0 μg/kg 25-OH-D₃与维生素 D₃共晶(即为饲料提供5 520 IU/kg 维生素 D₃), T3组在基础饲料中添加67.5 μg/kg 25-OH-D₃与维生素 D₃共晶(即为饲料提供2 760 IU/kg 维生素 D₃)。试验期35 d, 分为1~14日龄和15~35日龄2个阶段。

1.2 试验饲料及饲养管理

试验饲料参照NRC(1994)和我国《肉鸭饲养标准》(NY/T 2122—2012)配制。基础饲料采用玉米-豆粕型饲料, 其组成及营养水平见表1。试验于2019年7—8月在四川农业大学动物营养研究所试验场进行, 网上平养, 24 h光照。自由采食和饮水。前期采用红外灯给温, 温控标准: 1~3日龄30~32℃, 4~7日龄28~30℃, 以后每周降低2℃, 直到24℃, 并维持在24℃, 其他管理按照常规进行。

1.3 样品采集与指标测定

1.3.1 样品采集

试验第14天和第35天称重后以重复为单位随机选取接近均重的肉鸭1只($n=6$)。称量每只肉鸭宰前活重, 颈静脉采血, 静置后在4℃下4 000 r/min离心10 min, 分离血清。另采集3 mL抗凝血, 送到雅安市人民医院测定血常规指标, 包括白细胞、中性粒细胞、淋巴细胞、单核细胞、嗜酸细胞和嗜碱细胞数目与百分率。采血结束后, 颈静脉放血致死, 剥离两侧胫骨, 剔除附着的组织, 4℃下保存用于后续测定。取左侧胸肌置冰箱4℃贮存24 h后测定肉品质, 最后分离脾脏、胸腺、法氏囊和肝脏, 并称重用于计算器官指数(器官重/活体重)。

1.3.2 指标测定

生长性能: 在第1天、第14天和第35天以重复为单位记录肉鸭体重, 称重前断料8 h, 结算余料。计算平均日增重(ADG)和平均日采食量(ADFI), 根据ADG和ADFI计算料重比(F/G)。

屠宰性能及肉品质: 测定肉鸭活体重、屠体重、半净膛重、全净膛重、鸭胸肉和腿肌肉重, 测定方法参照NY/T 823—2004进行。测定鸭胸肉品质, 包括肉色[亮度(L*)、红度(a*)和黄色度(b*)值]、剪切力和滴水损失, 测定参照席鹏彬等^[9]的方法。

血清免疫球蛋白含量: 血清免疫球蛋白A(IgA)、免疫球蛋白G(IgG)、免疫球蛋白M(IgM)含量采用免疫比浊法进行测定, 检测方法参照试剂盒说明书进行, 试剂盒购自南京建成生物工程研究所。

血清骨代谢指标: 血清钙、磷含量及碱性磷酸酶(AKP)活性在四川农业大学动物营养研究所温江实验室用自动生化分析仪进行检测, 采用甲基

百里香酚蓝 (MTB) 比色法测定血清钙含量, 采用磷钼酸法测定血清磷含量, 采用 4-氨基安替吡啉比色法测定血清碱性磷酸酶活性。采用酶联免疫吸附试验 (ELISA) 法测定血清甲状旁腺激素

(PTH) 和降钙素 (CT) 含量, 血清抗酒石酸酸性磷酸酶 (TRAP) 活性及骨钙素、I 型胶原 C 端肽 (CTX-I) 含量使用 ELISA 试剂盒检测, 试剂盒购自南京建成生物工程研究所。

表 1 基础饲料组成及营养水平 (干物质基础)

Table 1 Composition and nutrient levels of basal diets (DM basis)

%

项目 Items	含量 Content	
	1~14 日龄	15~35 日龄
	1 to 14 days of age	15 to 35 days of age
原料 Ingredients		
玉米 Corn	58.63	57.51
豆油 Soybean oil	2.41	4.60
豆粕 Soybean meal	33.09	26.70
L-赖氨酸盐酸盐 L-Lys · HCl	0.17	0.07
L-苏氨酸 L-Thr	0.04	0.06
DL-蛋氨酸 DL-Met	0.20	0.19
碳酸钙 CaCO ₃	0.94	0.87
磷酸氢钙 CaHPO ₄	1.61	1.58
食盐 NaCl	0.35	0.35
氯化胆碱 Choline chloride	0.10	0.15
维生素预混料 Vitamin premix ¹⁾	0.10	0.10
微量元素预混料 Trace element premix ²⁾	0.50	0.50
统糠 Unite bran	1.86	7.32
合计 Total	100.00	100.00
营养水平 Nutrient levels ³⁾		
代谢能 ME/(MJ/kg)	12.14	12.14
粗蛋白质 CP	19.50	16.50
钙 Ca	0.80	0.75
有效磷 AP	0.40	0.38
赖氨酸 Lys	1.15	0.90
蛋氨酸 Met	0.48	0.40
苏氨酸 Thr	0.78	0.63
色氨酸 Trp	0.22	0.19

1) 维生素预混料为每千克饲料提供 Vitamin premix provided the following per kg of diets: VA 14 000 IU, VE 70 mg, VK₃ 4.5 mg, VB₁ 3 mg, VB₂ 7 mg, VB₆ 7 mg, VB₁₂ 0.04 mg, 泛酸钙 calcium pantothenate 15 mg, 叶酸 folic acid 1.8 mg, 生物素 biotin 0.22 mg, 烟酸 nicotinic acid 79 mg, VC 100 mg。

2) 微量元素预混料为每千克饲料提供 Trace element premix provided the following per kg of diets: Fe (FeSO₄ · H₂O) 80 mg, Cu (CuSO₄ · 5H₂O) 8 mg, Mn (MnSO₄ · H₂O) 70 mg, Zn (ZnSO₄ · H₂O) 90 mg, I (KI) 0.4 mg, Se (Na₂SeO₃) 0.3 mg。

3) 营养水平为计算值。Nutrient levels were calculated values.

胫骨发育指标: 采用 WD-1 型电子万能试验机测定骨强度, 测定后于烘箱内 105 ℃ 烘干后称量胫骨重量; 粗灰分含量的测定参照 GB/T 6438—2007; 钙含量的测定参照 GB/T 6436—2018; 磷含量的测定参照 GB/T 6437—2018。胫

骨长度与宽度采用电子游标卡尺进行测量; 宽度选取 3 个点测量结果取均值, 精确到 0.02 mm。将胫骨近端沿其顶部纵向切开, 用电子游标卡尺测定生长板宽度和厚度, 计算其指数和横截面积。

生长板宽度系数 = 生长板宽度 / 胫骨长度;

生长板厚度系数=生长板厚度/胫骨长度;

横截面积=生长板宽度×生长板厚度。

1.4 数据统计

试验数据采用 SAS 9.2 统计软件的一般线性模型 (GLM) 过程进行单因素方差分析,用 LSD 法进行多重比较。试验结果以平均值和均值标准误表示,以 $P \leq 0.05$ 表示差异显著。

2 结果

2.1 25-OH-D₃ 与维生素 D₃ 共晶对肉鸭生长性能的影响

如表 2 所示,与 T1 组相比,T2 组肉鸭 35 日龄体重以及 15~35 日龄和 1~35 日龄 ADG 和 ADFI

显著提高 ($P < 0.05$),但 F/G 无显著差异 ($P > 0.05$);T3 组肉鸭 1~35 日龄 ADG 和 15~35 日龄 ADFI 显著提高 ($P < 0.05$)。与 T2 组相比,T3 组肉鸭生长性能指标均无显著差异 ($P > 0.05$)。

2.2 25-OH-D₃ 与维生素 D₃ 共晶对肉鸭屠宰性能和肉品质的影响

如表 3 所示,与 T1 组相比,T2 组肉鸭 35 日龄胸肌肉色 L* 值显著增加 ($P < 0.05$),而其他屠宰性能和肉品质指标无显著差异 ($P > 0.05$);T3 组肉鸭屠宰性能和肉品质指标无显著差异 ($P > 0.05$)。与 T2 组相比,T3 组肉鸭 35 日龄胸肌剪切力显著提高 ($P < 0.05$)。

表 2 25-OH-D₃ 与维生素 D₃ 共晶对肉鸭生长性能的影响

Table 2 Effects of 25-OH-D₃ and vitamin D₃ eutectic on growth performance of meat ducks

项目 Items	组别 Groups			均值标准误 SEM
	T1	T2	T3	
体重 BW/g				
1 日龄 1 day of age	52.17	52.29	52.27	0.05
14 日龄 14 days of age	590.5	597.0	594.8	6.43
35 日龄 35 days of age	1 993 ^a	2 154 ^b	2 098 ^{ab}	50.10
平均日增重 ADG/(g/d)				
1~14 日龄 1 to 14 days of age	38.43	38.91	38.75	0.46
15~35 日龄 15 to 35 days of age	66.78 ^a	74.12 ^b	71.58 ^{ab}	2.24
1~35 日龄 1 to 35 days of age	52.60 ^a	56.50 ^b	55.17 ^b	1.43
平均日采食量 ADFI/(g/d)				
1~14 日龄 1 to 14 days of age	46.38	46.57	46.03	0.54
15~35 日龄 15 to 35 days of age	136.40 ^a	152.30 ^b	145.50 ^b	3.14
1~35 日龄 1 to 35 days of age	91.39 ^a	99.44 ^b	95.75 ^{ab}	1.92
料重比 F/G				
1~14 日龄 1 to 14 days of age	1.21	1.20	1.19	0.01
15~35 日龄 15 to 35 days of age	2.05	2.06	2.03	0.05
1~35 日龄 1 to 35 days of age	1.63	1.63	1.61	0.03

同行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 ($P > 0.05$)。下表同。

In the same row, values 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 3 25-OH-D₃ 与维生素 D₃ 共晶对肉鸭屠宰性能和肉品质的影响

Table 3 Effects of 25-OH-D₃ and vitamin D₃ eutectic on slaughter performance and meat quality of meat ducks

项目 Items	组别 Groups			均值标准误 SEM
	T1	T2	T3	
屠宰率 Dressing percentage/%	84.51	84.24	84.32	0.73
半净膛率 Percentage of half-eviscerated yield/%	78.65	78.95	79.15	0.86
全净膛率 Percentage of eviscerated yield/%	72.00	71.85	72.04	0.81
腹脂率 Abdominal fat rate/%	0.99	1.30	1.31	0.25

续表 3

项目 Items	组别 Groups			均值标准误 SEM
	T1	T2	T3	
胸肌率 Breast muscle rate/%	10.06	9.14	9.22	0.68
腿肌率 Leg muscle rate/%	14.68	13.76	13.43	0.76
肉色 Meat color				
亮度 L*	51.63 ^a	56.51 ^b	52.12 ^{ab}	1.87
红度 a*	9.29	8.79	9.54	0.84
黄度 b*	4.08	4.05	4.46	1.04
滴水损失 Drip loss/%	3.06	2.72	2.49	0.38
剪切力 Shear force/N	4.74 ^{ab}	4.16 ^a	4.82 ^b	0.23

2.3 25-OH-D₃ 与维生素 D₃ 共晶对肉鸭免疫功能的影响

2.3.1 25-OH-D₃ 与维生素 D₃ 共晶对肉鸭免疫器官指数的影响

如表 4 所示,与 T1 组相比,T2 组肉鸭 35 日龄

脾脏指数显著降低($P<0.05$);T3 组肉鸭免疫器官指数无显著差异($P>0.05$)。与 T2 组相比,T3 组肉鸭 14 日龄法氏囊指数和 35 日龄脾脏指数显著提高($P<0.05$)。

表 4 25-OH-D₃ 与维生素 D₃ 共晶对肉鸭免疫器官指数的影响

Table 4 Effects of 25-OH-D₃ and vitamin D₃ eutectic on immune organ indices of meat ducks %

项目 Items	组别 Groups			均值标准误 SEM
	T1	T2	T3	
胸腺指数 Thymus index				
14 日龄 14 days of age	0.64	0.72	0.74	0.06
35 日龄 35 days of age	0.23	0.25	0.31	0.05
脾脏指数 Spleen index				
14 日龄 14 days of age	0.09	0.10	0.13	0.01
35 日龄 35 days of age	0.08 ^a	0.05 ^b	0.09 ^a	0.01
法氏囊指数 Bursa of Fabricius index				
14 日龄 14 days of age	0.20 ^{ab}	0.18 ^a	0.23 ^b	0.02
35 日龄 35 days of age	0.09	0.09	0.08	0.01

2.3.2 25-OH-D₃ 与维生素 D₃ 共晶对肉鸭血常规指标的影响

如表 5 所示,与 T1 组相比,T2 组肉鸭 14 和 35 日龄血常规指标无显著差异($P>0.05$);T3 组肉鸭 14 日龄血液嗜酸细胞百分率和 35 日龄血液单核细胞计数显著增加($P<0.05$)。与 T2 组相

比,T3 组肉鸭 14 日龄血液中性粒细胞百分率、单核细胞百分率、嗜碱细胞百分率以及单核细胞计数显著升高($P<0.05$),14 日龄血液淋巴细胞百分率显著降低($P<0.05$);但 35 日龄血常规指标无显著差异($P>0.05$)。

表 5 25-OH-D₃ 与维生素 D₃ 共晶对肉鸭血常规指标的影响

Table 5 Effects of dietary 25-OH-D₃ and vitamin D₃ eutectic on blood routine parameters of meat ducks

项目 Items	组别 Groups			均值标准误 SEM
	T1	T2	T3	
白细胞计数 WBC/($\times 10^9$ 个/L)				
14 日龄 14 days of age	137.60	150.70	105.60	30.50

续表 5

项目 Items	组别 Groups			均值标准误 SEM
	T1	T2	T3	
35 日龄 35 days of age	88.53	58.51	94.53	28.82
中性粒细胞百分率 NEUT percentage/%				
14 日龄 14 days of age	8.37 ^{ab}	7.12 ^a	9.63 ^b	0.71
35 日龄 35 days of age	7.80	8.30	8.76	3.05
淋巴细胞百分率 LYM percentage/%				
14 日龄 14 days of age	86.32 ^{ab}	89.80 ^a	82.43 ^b	1.44
35 日龄 35 days of age	85.23	81.27	83.62	4.54
单核细胞百分率 MONO percentage/%				
14 日龄 14 days of age	4.76 ^{ab}	2.43 ^a	6.58 ^b	1.24
35 日龄 35 days of age	0.70	0.93	1.15	0.23
嗜酸细胞百分率 EO percentage/%				
14 日龄 14 days of age	0.47 ^a	0.62 ^{ab}	1.25 ^b	0.29
35 日龄 35 days of age	0.44	0.29	0.32	0.12
嗜碱细胞百分率 BASO percentage/%				
14 日龄 14 days of age	0.08 ^{ab}	0.03 ^a	0.10 ^b	0.02
35 日龄 35 days of age	0.13	0.07	0.14	0.04
中性粒细胞计数 NEUT count/($\times 10^9$ 个/L)				
14 日龄 14 days of age	12.43	11.01	9.97	2.96
35 日龄 35 days of age	7.80	8.30	8.76	3.05
淋巴细胞计数 LYM count/($\times 10^9$ 个/L)				
14 日龄 14 days of age	119.90	136.60	89.19	28.4
35 日龄 35 days of age	79.84	49.32	84.60	28.77
单核细胞计数 MONO count/($\times 10^9$ 个/L)				
14 日龄 14 days of age	4.57 ^{ab}	2.36 ^a	5.30 ^b	0.93
35 日龄 35 days of age	0.33 ^a	0.45 ^{ab}	0.72 ^b	0.11
嗜酸细胞计数 EO count/($\times 10^9$ 个/L)				
14 日龄 14 days of age	0.56	0.74	1.07	0.24
35 日龄 35 days of age	0.44	0.29	0.32	0.12
嗜碱细胞计数 BASO count/($\times 10^9$ 个/L)				
14 日龄 14 days of age	0.09	0.11	0.08	0.04
35 日龄 35 days of age	0.13	0.07	0.14	0.04

2.3.3 25-OH-D₃ 与维生素 D₃ 共晶对肉鸭血清免疫球蛋白含量的影响

如表 6 所示,各组肉鸭 14 和 35 日龄血清免疫球蛋白含量无显著差异 ($P>0.05$)。

2.4 25-OH-D₃ 与维生素 D₃ 共晶对肉鸭胫骨发育的影响

2.4.1 25-OH-D₃ 与维生素 D₃ 共晶对肉鸭血清骨代谢相关指标的影响

如表 7 所示,与 T1 组相比,T2 组 14 日龄血清 I 型胶原 C 端肽含量和 35 日龄血清钙含量显著升高 ($P<0.05$);T3 组 14 日龄血清钙和降钙素含

量显著降低 ($P<0.05$)。与 T2 组相比,T3 组 14 日龄血清降钙素含量和 35 日龄血清钙和 I 型胶原 C 端肽含量显著降低 ($P<0.05$)。

2.4.2 25-OH-D₃ 与维生素 D₃ 共晶对肉鸭胫骨发育的影响

如表 8 所示,与 T1 组相比,T2 组肉鸭 35 日龄胫骨粗灰分含量显著增加 ($P<0.05$);T3 组肉鸭 14 日龄胫骨钙含量以及 35 日龄胫骨体积和胫骨粗灰分含量显著降低 ($P<0.05$)。与 T2 组相比,T3 组肉鸭 14 日龄胫骨粗灰分和磷含量以及 35 日龄胫骨钙含量显著降低 ($P<0.05$)。

表 6 25-OH-D₃ 与维生素 D₃ 共晶对肉鸭血清免疫球蛋白含量的影响Table 6 Effects of 25-OH-D₃ and vitamin D₃ eutectic on serum immunoglobulin contents of meat ducks ng/mL

项目 Items	组别 Groups			均值标准误 SEM
	T1	T2	T3	
免疫球蛋白 A IgA				
14 日龄 14 days of age	106.10	99.04	103.60	5.79
35 日龄 35 days of age	94.99	107.90	94.53	5.71
免疫球蛋白 M IgM				
14 日龄 14 days of age	56.49	54.15	51.74	3.89
35 日龄 35 days of age	59.17	57.54	54.66	3.50
免疫球蛋白 G IgG				
14 日龄 14 days of age	772.2	768.2	840.4	56.64
35 日龄 35 days of age	717.8	842.4	854.9	65.30

表 7 25-OH-D₃ 与维生素 D₃ 共晶对肉鸭血清骨代谢相关指标的影响Table 7 Effects of 25-OH-D₃ and vitamin D₃ eutectic on serum bone metabolism related parameters of meat ducks

项目 Items	组别 Groups			均值标准误 SEM
	T1	T2	T3	
钙 Ca/(mmol/L)				
14 日龄 14 days of age	1.83 ^a	1.81 ^{ab}	1.52 ^b	0.12
35 日龄 35 days of age	1.92 ^a	2.17 ^b	1.94 ^a	0.06
磷 P/(mmol/L)				
14 日龄 14 days of age	3.58	4.07	3.65	0.45
35 日龄 35 days of age	10.46	9.39	7.14	1.48
碱性磷酸酶 ALP/(mmol/L)				
14 日龄 14 days of age	752.8	662.8	651.8	63.2
35 日龄 35 days of age	708.3	589.0	640.0	50.4
骨钙素 BGP/(ng/L)				
14 日龄 14 days of age	606.1	635.2	615.4	38.1
35 日龄 35 days of age	580.2	579.6	550.8	35.0
I 型胶原 C 端肽 CTX-I/(nmol/L)				
14 日龄 14 days of age	16.23 ^a	18.43 ^b	17.55 ^{ab}	0.87
35 日龄 35 days of age	16.80 ^{ab}	18.14 ^a	16.21 ^b	0.77
甲状旁腺素 PTH/(mIU/L)				
14 日龄 14 days of age	23.77	21.65	23.17	1.51
35 日龄 35 days of age	19.33	21.91	21.72	1.28
降钙素 CT/(ng/L)				
14 日龄 14 days of age	134.3 ^a	133.1 ^a	122.0 ^b	3.76
35 日龄 35 days of age	138.4	140.1	140.3	6.41
抗酒石酸酸性磷酸酶 TRAP/(pg/mL)				
14 日龄 14 days of age	4 085	3 823	3 652	196.9
35 日龄 35 days of age	3 771	4 088	3 750	176.9

表 8 25-OH-D₃ 与维生素 D₃ 共晶对肉鸭胫骨发育的影响Table 8 Effects of 25-OH-D₃ and vitamin D₃ eutectic on tibia development of meat ducks

项目 Items	组别 Groups			均值标准误 SEM
	T1	T2	T3	
长度 Length/mm				
14 日龄 14 days of age	74.73	75.45	75.98	1.11
35 日龄 35 days of age	110.2	112.0	109.7	1.27
直径 Diameter/mm				
14 日龄 14 days of age	4.41	4.43	4.35	0.11
35 日龄 35 days of age	8.24	7.93	7.90	0.19
强度 Intensity/N				
14 日龄 14 days of age	17.34	15.28	15.08	1.27
35 日龄 35 days of age	22.65	23.03	20.89	3.15
体积 Volume/mL				
14 日龄 14 days of age	3.13	3.33	3.38	0.15
35 日龄 35 days of age	8.60 ^a	7.97 ^{ab}	7.12 ^b	0.38
脱脂重 Fat-free dry weight/g				
14 日龄 14 days of age	1.52	1.44	1.51	0.07
35 日龄 35 days of age	5.29	5.40	4.86	0.23
粗灰分 Ash/%				
14 日龄 14 days of age	42.58 ^{ab}	43.55 ^a	38.09 ^b	1.94
35 日龄 35 days of age	44.17 ^a	48.93 ^b	48.42 ^b	0.97
钙 Ca/%				
14 日龄 14 days of age	13.47 ^a	12.33 ^{ab}	11.01 ^b	0.92
35 日龄 35 days of age	16.24 ^a	15.25 ^a	12.02 ^b	1.04
磷 P/%				
14 日龄 14 days of age	4.19 ^{ab}	4.81 ^a	3.24 ^b	0.39
35 日龄 35 days of age	7.36	8.18	6.99	0.51

2.4.3 25-OH-D₃ 与维生素 D₃ 共晶对肉鸭胫骨生长板发育的影响

如表 9 所示,与 T1 组相比,T2 组肉鸭 35 日龄胫骨生长板宽度和宽度系数显著增加 ($P < 0.05$);

T3 组肉鸭 35 日龄胫骨生长板厚度、厚度系数、宽度系数和横截面积显著增加 ($P < 0.05$)。与 T2 组相比,T3 组肉鸭 14 日龄胫骨生长板宽度和宽度系数显著增加 ($P < 0.05$)。

表 9 25-OH-D₃ 与维生素 D₃ 共晶对肉鸭生长板发育的影响Table 9 Effects of dietary 25-OH-D₃ and vitamin D₃ eutectic on tibia growth plate development of meat ducks

项目 Items	组别 Groups			均值标准误 SEM
	T1	T2	T3	
厚度 Thickness/mm				
14 日龄 14 days of age	2.02	1.81	1.83	0.17
35 日龄 35 days of age	0.75 ^a	0.85 ^{ab}	1.03 ^b	0.10
宽度 Width/mm				
14 日龄 14 days of age	10.60 ^{ab}	9.81 ^a	11.44 ^b	0.52
35 日龄 35 days of age	13.22 ^a	14.25 ^b	13.85 ^{ab}	0.31
厚度系数 Thickness index				
14 日龄 14 days of age	0.027	0.024	0.024	0.01
35 日龄 35 days of age	0.006 ^a	0.007 ^{ab}	0.009 ^b	0.01

续表 9

项目 Items	组别 Groups			均值标准误 SEM
	T1	T2	T3	
宽度系数 Width index				
14 日龄 14 days of age	0.14 ^{ab}	0.13 ^a	0.15 ^b	0.01
35 日龄 35 days of age	0.12 ^a	0.13 ^b	0.13 ^b	0.01
横截面积 Cross-sectional area/mm ²				
14 日龄 14 days of age	20.95	17.82	21.22	2.10
35 日龄 35 days of age	9.87 ^a	12.28 ^{ab}	14.23 ^b	1.46

3 讨论

3.1 25-OH-D₃ 与维生素 D₃ 共晶对肉鸭生长性能、屠宰性能及肉品质的影响

25-OH-D₃ 是目前唯一获得一般公认安全级 (GRAS) 的维生素 D₃ 代谢物。研究认为, 25-OH-D₃ 不受肠道胆酸分泌和脂肪含量的影响, 比维生素 D₃ 更易吸收^[1]。维生素 D 的吸收与脂类相似, 通过胆酸形成微团的形式吸收, 而 25-OH-D₃ 则是直接吸收到门静脉中, 无须生成微团, 也无须胆酸的存在, 因此, 25-OH-D₃ 的吸收受肠道损伤的影响较小; 25-OH-D₃ 添加到实际饲料中时, 会产生单独使用维生素 D 或简单地提高饲料维生素 D 水平所不能获得的效果^[10]。本试验结果显示, 与 25-OH-D₃ 与维生素 D₃ 物理混合相比, 饲料中添加 25-OH-D₃ 与维生素 D₃ 共晶提高了肉鸭的 ADG 和 ADFI, 且添加 135.0 μg/kg 25-OH-D₃ 与维生素 D₃ 共晶的效果更好。维生素组成、生产工艺和添加形式的不同对其效价和利用率具有较大的影响。研究发现, 相对于传统维生素 D, 一种通过新型的光化学合成 25-OH-D₃ 的方法所得到的 25-OH-D₃ 晶体提高了原料利用率, 有更好的生物效应, 同时也节约了成本^[11]。吴东峰^[12] 研究发现, 相对于固体维生素, 采用液体维生素后喷涂技术可提高异育银鲫的生长性能和抗氧化能力。以上研究结果表明, 维生素的形态可以影响其功能的发挥, 25-OH-D₃ 和维生素 D₃ 共晶可能比其物理混合具有更高的生物学效价, 但需要进一步研究证实。

同时, 本试验也发现, 相对 135.0 μg/kg 25-OH-D₃ 与维生素 D₃ 共晶组, 降低 1/2 的添加量 (67.5 μg/kg) 时肉鸭生长性能降低, 表明维生素的添加量是影响其效果的重要因素。Edwards^[13]

研究发现, 饲料中添加 27.5 μg/kg 维生素 D₃ 和 5.0 μg/kg 25-OH-D₃ 对于肉鸡 ADG 和 F/G 无显著影响。Yarger 等^[14] 试验表明, 饲料中添加 70 μg/kg 25-OH-D₃ 可以显著提高 49 日龄肉鸡体重和胸肌率; 但添加量到达 105 μg/kg 时, 则会降低胸肌率^[15]。也有研究表明, 肉鸡采食高剂量 (100 μg/kg) 25-OH-D₃ 会出现肾组织钙化^[16]。

本试验中, 饲料中添加 25-OH-D₃ 与维生素 D₃ 共晶对肉鸭的屠宰性能及胸肌率、腿肌率无显著影响, 但添加 135.0 μg/kg 25-OH-D₃ 与维生素 D₃ 共晶可改善肉色, 增加肌肉嫩度。近年来, 有研究表明, 25-OH-D₃ 会影响肉鸡骨骼肌生长、肌纤维组成和大小^[17]。由此推断, 25-OH-D₃ 可能会影响肉色和肉品质。本试验中, 肉色 L*、a* 和 b* 值与 Bozkurt 等^[18] 研究结果一致, 表明这些值在正常范围内^[17]。

3.2 25-OH-D₃ 与维生素 D₃ 共晶对肉鸭免疫功能的影响

研究表明, 维生素 D 受体可活化 T 细胞, 激活巨噬细胞合成 1, 25-二羟维生素 D₃ [1, 25-(OH)₂-D₃], 对免疫细胞的分化和增殖具有重要调节作用^[18]。25-OH-D₃ 在肾脏中转化为 1, 25-(OH)₂-D₃。1, 25-(OH)₂-D₃ 对单核/巨噬细胞有重要调节作用, 可诱导单核细胞抵抗微生物的侵袭, 保护细胞的正常功能并加快热应激后正常组织蛋白质的合成, 这对巨噬细胞在环境高温下的存活及功能发挥具有重要意义^[19]。李德发等^[20] 试验表明, 饲料中添加适量维生素 D₃ 可提高动物机体免疫反应, 增加抗体浓度。Chou 等^[21] 研究表明, 肉鸡在感染沙门氏菌时, 饲料中添加 25-OH-D₃ 会改善其保护性体液免疫。本试验结果发现, 饲料中添加 25-OH-D₃ 与维生素 D₃ 共晶对肉鸭的免疫功能能有一定影响, 且具有剂量效应。从免

疫器官指数和 14 日龄血常规指标可看出, 67.5 $\mu\text{g}/\text{kg}$ 25-OH-D₃ 与维生素 D₃ 共晶组肉鸭体内免疫反应比 135.0 $\mu\text{g}/\text{kg}$ 25-OH-D₃ 与维生素 D₃ 共晶组更强烈。这种现象一方面说明机体免疫活化后需要消化营养物质, 导致用于生长的营养物质减少, 生长性能降低, 这与生长性能指标一致; 另一方面也说明免疫活化后是增强了抗病能力还是增加了机体对外界环境应激的敏感性, 有待进一步研究证实。

3.3 25-OH-D₃ 与维生素 D₃ 共晶对肉鸭骨代谢及胫骨发育的影响

钙对家禽骨骼强度及其发育具有重要的生物学作用, 饲料中钙水平下降会导致肉鸡胫骨粗灰分含量的下降^[21], 充足的钙含量会提高骨骼矿物质沉积^[22]。维生素 D₃ 及其代谢物可提高肉鸡的钙、磷利用率^[23]。本试验结果表明, 与 25-OH-D₃ 与维生素 D₃ 物理混合相比, 饲料添加 135.0 $\mu\text{g}/\text{kg}$ 25-OH-D₃ 与维生素 D₃ 共晶显著提高了 35 日龄肉鸭血清钙含量; 同是共晶的情况下, 饲料添加 67.5 $\mu\text{g}/\text{kg}$ 25-OH-D₃ 与维生素 D₃ 共晶显著降低了肉鸭 14、35 日龄血清钙含量和 14 日龄血清降钙素含量。有研究表明, 只有一种矿物元素长期缺乏, 超出动物的调节能力时, 血液中矿物元素含量会降低, 而血液中的钙主要存在于血清之中^[24]。这表明饲料添加 135.0 $\mu\text{g}/\text{kg}$ 25-OH-D₃ 与维生素 D₃ 共晶能更好地促进胫骨发育及矿化。成骨细胞是骨形成的主要功能细胞, 通过分泌骨基质矿化而形成新骨, 破骨与成骨过程的平衡是维持正常骨量的关键^[25]。有研究发现, 饲料中添加 25-OH-D₃ 会提高肉鸡血清钙含量, 表明维生素 D 代谢物会对肉鸡饲料中钙的利用有促进作用^[18]。饲料中维生素 D₃ 水平的变化会直接反映在肉鸡胫骨粗灰分含量上^[26]。本试验结果显示, 与 25-OH-D₃ 与维生素 D₃ 共晶物理混合相比, 饲料添加 25-OH-D₃ 与维生素 D₃ 共晶显著增加了肉鸭 35 日龄胫骨灰分含量; 同是共晶的情况下, 饲料添加 67.5 $\mu\text{g}/\text{kg}$ 25-OH-D₃ 与维生素 D₃ 共晶显著降低了肉鸭 14 日龄胫骨粗灰分和磷含量以及 35 日龄胫骨钙含量。张金龙等^[27]研究表明, 基础饲料中添加 12.5 和 25.0 $\mu\text{g}/\text{kg}$ 25-OH-D₃ 会显著提高肉鸡胫骨重量及粗灰分、钙、磷含量。Zhang 等^[28]也研究发现, 饲料中添加 69 $\mu\text{g}/\text{kg}$ 25-OH-D₃ 可增加肉仔鸡胫骨钙含量。

4 结论

饲料中添加 25-OH-D₃ 和维生素 D₃ 共晶对于肉鸭的生长性能、免疫功能、骨骼发育有显著影响, 且具有剂量依赖性, 表现为添加 135.0 $\mu\text{g}/\text{kg}$ 25-OH-D₃ 与维生素 D₃ 共晶效果更佳。

参考文献:

- [1] 周维善, 田伟生. 维生素 D 及其代谢物合成的进展 [J]. 药理学, 1988(6): 464-480.
ZHOU W S, TIAN W S. Advances in the synthesis of vitamin D and its metabolites [J]. Acta Pharmacologica Sinica, 1988(6): 464-480. (in Chinese)
- [2] BAR A, SHARVIT M, NOFF D, et al. Absorption and excretion of cholecalciferol and of 25-hydroxycholecalciferol and metabolites in birds [J]. The Journal of Nutrition, 1980, 110(10): 1930-1934.
- [3] ATENCIO A, EDWARDS H M, Jr., PESTI G M. Effect of the level of cholecalciferol supplementation of broiler breeder hen diets on the performance and bone abnormalities of the progeny fed diets containing various levels of calcium or 25-hydroxycholecalciferol [J]. Poultry Science, 2005, 84(10): 1593-1603.
- [4] MCNUTT K W, HAUSSLER M R. Nutritional effectiveness of 1, 25-dihydroxycholecalciferol in preventing rickets in chicks [J]. The Journal of Nutrition, 1973, 103(5): 681-689.
- [5] FRITTS C A, WALDROUP P W. Effect of source and level of vitamin D on live performance and bone development in growing broilers [J]. Journal of Applied Poultry Research, 2003, 12(1): 45-52.
- [6] AMEENUDDIN S, SUNDE M L, DELUCA H F, et al. Support of embryonic chick survival by vitamin D metabolites [J]. Archives of Biochemistry and Biophysics, 1983, 226(2): 666-670.
- [7] CANTOR A H, BACON W L. Performance of caged broilers fed vitamin D₃ and 25-hydroxyvitamin D₃ [J]. Poultry Science, 1978, 57(2): 1123-1124.
- [8] 中国科学院上海药物研究所. 维生素 D₂ 与 D₃ 的共晶及其制备方法和用途: 中国, 201410546268.5 [P]. 2015-02-18.
Shanghai Institute of Materia Medica Chinese Academy of Sciences. The eutectic of vitamins D₂ and D₃ and their preparation methods and applications; CN201410546268.5 [P]. 2015-02-18. (in Chinese)
- [9] 席鹏彬, 蒋守群, 蒋宗勇, 等. 黄羽肉鸡肉质评定技术

- 操作规程的建立[J].中国畜牧杂志,2011,47(1):72-76.
- XI P B,JIANG S Q,JIANG Z Y,et al.Establishment of technical regulation for evaluation of meat quality of yellow-feathered broilers [J]. Chinese Journal of Animal Science 2011,47(1):72-76.(in Chinese)
- [10] 钟道强.25-OH-D₃在家禽生产中的应用[C]//家禽营养与饲料科技进展——第二届全国家禽营养与饲料科技研讨会论文集.北京:中国畜牧兽医学动物营养学分会,2007.
- ZHONG D Q. Application of 25-OH-D₃ in poultry production[C]//National symposium on poultry nutrition and feed science and technology.Beijing: Animal Nutrition Branch of China Animal Husbandry and Veterinary Association 2007.(in Chinese)
- [11] 中国科学院理化技术研究所.光化学合成25-羟基维生素 D₃的方法:中国,201110315031.2[P].2013-04-17.
- Technical Institute of Physics and Chemistry CAS. Method for photochemical synthesis of 25-hydroxyvitamin D₃:CN201110315031.2[P].2013-04-17.(in Chinese)
- [12] 吴东峰.液体维生素在异育银鲫饲料中应用效果研究[D].硕士学位论文.苏州:苏州大学,2013.
- WU D F.Study on the efficacy of liquid vitamin in the feed of allogynogenetic crucian carp [D]. Master's Thesis.Jiangsu; Suzhou University,2013.(in Chinese)
- [13] EDWARDS H M Jr.Studies on the efficacy of cholecalciferol and derivatives for stimulating phytate utilization in broilers [J].Poultry Science,2002,81(7):1026-1031.
- [14] YARGER J G,SAUNDERS C A,MCNAUGHTON J L,et al.Comparison of dietary 25-hydroxycholecalciferol and cholecalciferol in broiler chickens[J].Poultry Science,1995,74(7):1159-1167.
- [15] 朱建军,袁建敏,田科雄,等.25-羟胆钙化醇与维生素 D₃对北京鸭生产性能和骨骼发育的影响[J].中国畜牧杂志,2011,47(3):30-35.
- ZHU J J,YUAN J M,TIAN K X,et al. Effects of 25-hydroxycholecalciferol and vitamin D₃ on the performance and bone development of Peking duck [J]. Chinese Journal of Animal Science,2011,47(3):30-35.(in Chinese)
- [16] MORRISSEY R L,COHN R M,EMPSON R N,et al. Relative toxicity and metabolic effects of cholecalciferol and 25-hydroxycholecalciferol in chicks [J]. The Journal of Nutrition,1977,107(6):1027-1034.
- [17] HUTTON K C,VAUGHN M A,LITTA G,et al. Effect of vitamin D status improvement with 25-hydroxycholecalciferol on skeletal muscle growth characteristics and satellite cell activity in broiler chickens [J]. Journal of Animal Science,2014,92(8):3291-3299.
- [18] BOZKURT M,YALÇIN S,KOÇER B,et al. Effects of enhancing vitamin D status by 25-hydroxycholecalciferol supplementation, alone or in combination with calcium and phosphorus, on sternum mineralisation and breast meat quality in broilers [J]. British Poultry Science,2017,58(4):452-461.
- [19] 林岚,关智平.维生素 D 对免疫功能调节作用的初步研究[J].中华儿科杂志,1999,37(2):119-120.
- LING L,GUAN Z P.Preliminary study on the regulation of vitamin D on immune function.Chinese Journal of Pediatrics.1999,37(2):119-120.(in Chinese)
- [20] 李德发,刘焕龙,席鹏彬,等.维生素 D₃对断奶仔猪生长性能和免疫机能的影响[J].中国农业大学学报,2001,6(5):87-94.
- LING D F,LIU H L,XING P B,et al. Effects of vitamin D₃ on growth performance and immune function of weaned piglets [J]. Journal of China Agricultural University,2001,6(5):87-94.(in Chinese)
- [21] CHOU S H,CHUNG T K,YU B.Effects of supplemental 25-hydroxycholecalciferol on growth performance, small intestinal morphology, and immune response of broiler chickens [J].Poultry Science,2009,88(11):2333-2341.
- [22] THEOBALD H E.Dietary calcium and health [J]. Nutrition Bulletin,2005,30(3):237-277.
- [23] HAMDI M. Dietary factors influencing calcium and phosphorus utilization in broiler chicken [EB/OL]. (2016-02-12). <https://tesisenred.net/handle/10803/400305#page=1>.
- [24] 倪可德,阎素梅,郝俊玺,等.农畜矿物质营养[M].上海:上海科技文献出版社,1995.
- NI K D,YAN S M,HAO J X,et al.Mineral nutrition of farm animals [M]. Shanghai: Shanghai Scientific and Technological Literature Press,1995.(in Chinese)
- [25] 童安莉,陈璐璐,丁桂芝.成骨细胞骨形成机制研究进展[J].中国骨质疏松杂志,1999,5(3):60-64.
- TONG A L,CHEN L L,DING G Z.Advances in research on osteoblast bone formation mechanism [J]. Chinese Journal of Osteoporosis,1999,5(3):60-64.(in Chinese)
- [26] KASIM A B,EDWARDS H M Jr. Evaluation of

cholecalciferol sources using broiler chick bioassays [J]. Poultry Science, 2000, 79(11):1617-1622.

- [27] 张金龙, 张宁, 杨雪, 等. 25-羟基维生素 D₃ 对肉鸡生长性能、骨骼矿化及肠道维生素 D 受体基因表达的影响[J]. 中国饲料, 2017(24):24-29.

ZHANG J L, ZHANG N, YANG X, et al. Effects of 25-hydroxyvitamin D₃ on growth performance, bone mineralization and intestinal vitamin D receptor gene

expression in broilers[J]. China Feed, 2017(24):24-29. (in Chinese)

- [28] ZHANG L H, HE T F, LI M, et al. Effects of dietary calcium and phosphorus levels and supplementation of 25-hydroxycholecalciferol on performance and bone properties of broiler starters [J]. Archives of Animal Nutrition, 2019, 73(6):445-456.

Effects of 25-Hydroxyvitamin D₃ and Vitamin D₃ Eutectic on Growth Performance, Immune Function and Tibia Development of Meat Ducks

WANG Haoyu LIU Yanfen ZHANG Keying DING Xuemei BAI Shiping WANG Jianping
PENG Huanwei XUAN Yue SU Zhuowei ZENG Qiufeng*

(Key Laboratory for Animal Disease-Resistance Nutrition of Ministry of Education, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Sichuan Province, Institute of Animal Nutrition, Sichuan Agricultural University, Chengdu 611130, China)

Abstract: This study was conducted to investigate the effects of a new type vitamin additive containing 25 hydroxyvitamin D₃ (25-OH-D₃) and vitamin D₃ eutectic on growth performance, immune function and tibial development of meat ducks. A total of 360 one-day-old healthy Cherry Valley male ducks were randomly assigned to 3 groups with 6 replicates per group and 20 ducks per replicate. Ducks in T1 group 1 were fed a basal diet supplemented with 69.0 μg/kg 25-OH-D₃ and 66.0 μg/kg vitamin D₃ physical mixture, ducks in T2 group 2 were fed a basal diet supplemented with 135.0 μg/kg 25-OH-D₃ and vitamin D₃ eutectic, and ducks in T3 group 3 were fed a basal diet supplemented with 67.5 μg/kg 25-OH-D₃ and vitamin D₃ eutectic. The experiment lasted for 35 days, and consisted two phases of 1 to 14 days of age and 15 to 35 days of age. The results showed as follows: 1) compared with T1 group, the body weight at 35 days of age and average daily gain (ADG) and average daily feed intake (ADFI) during 15 to 35 days of age and 1 to 35 days of age of meat ducks of T2 group were significantly increased ($P < 0.05$), the breast muscle brightness value at 35 days of age was significantly increased ($P < 0.05$), the spleen index at 35 days of age was significantly decreased ($P < 0.05$), the serum type I C-terminal peptide content at 14 days of age and serum calcium content at 35 days of age were significantly increased ($P < 0.05$), and the tibial ash content and tibial growth plate width and width coefficient were significantly increased ($P < 0.05$). 2) Compared with T1 group, the ADG during 1 to 35 days of age and ADFI during 15 to 35 days of age of meat ducks of T3 group were significantly increased ($P < 0.05$), the blood acidophile percentage at 14 days of age and blood monocyte count at 35 days of age were significantly increased ($P < 0.05$), the contents of calcium and calcitonin in serum at 14 days of age were significantly decreased ($P < 0.05$), the tibia calcium content at 14 days of age and tibia volume and ash content at 35 days of age were significantly decreased ($P < 0.05$), and the thickness, thickness index, width index and cross-sectional area of tibia growth plate at 35 days of age were significantly increased ($P < 0.05$). 3) Compared with T2 group, the breast muscle shear force at 35 days of age of meat ducks of T3 group was significantly increased ($P < 0.05$), the bursa of Fabricius index at 14 days of age and spleen index at 35 days of age were significantly increased ($P < 0.05$), the blood neutrophils percentage, monocyte percentage, basophils per-

* Corresponding author, professor, E-mail: zqf@sicau.edu.cn

centage and monocyte count at 14 days of age were significantly increased ($P<0.05$), the blood lymphocyte percentage at 14 days of age was significantly decreased ($P<0.05$), the serum calcitonin content at 14 days of age and serum calcium and type I C-terminal peptide content at 35 days of age were significantly decreased ($P<0.05$), and the width and width index of tibia growth plate at 14 days of age were significantly increased ($P<0.05$). In conclusion, dietary 25-OH-D₃ and vitamin D₃ eutectic supplementation have significant effects on the growth performance, immune function and tibial development of meat ducks, and has a dose dependence, it is showed that dietary 135.0 μg/kg 25-OH-D₃ and vitamin D₃ eutectic have better results. [*Chinese Journal of Animal Nutrition*, 2021, 33(3):1469-1481]

Key words: 25-hydroxyvitamin D₃ and vitamin D₃ eutectic; meat ducks; growth performance; immune function; tibial development; growth plate coefficient