南京农业大学学报 2026,49(3):614-624
Journal of Nanjing Agricultural University
http://nauxb.njau.edu.cn
DOI:10.7685/jnau.202410006

徐欢,岳东庆,谭子超,等. 棒晶束解离凹凸棒石对肉鸡生长性能、肠道形态和消化功能的影响[J]. 南京农业大学学报,2026,49(3):614-624.
Xu H,Yue D Q,Tan Z C,et al. Effects of crystal-bundles disaggregated palygorskite on growth performance,intestinal morphology and digestive function of broilers[J]. Journal of Nanjing Agricultural University,2026,49(3):614-624.

棒晶束解离凹凸棒石对肉鸡生长性能、肠道形态和消化功能的影响

徐欢,岳东庆,谭子超,邓先乐,孙笑玮,温超,陈跃平,周岩民*

(南京农业大学动物科技学院,江苏 南京 210014)

摘要:[**目的**]本试验旨在研究棒晶束解离凹凸棒石对肉鸡生长性能、肠道形态和消化功能的影响。[**方法**]将 320 只体重相近、健康雄性 1 日龄爱拔益加(AA)肉雏鸡随机分为 5 组,每组 8 个重复,每个重复 8 只,分别饲喂基础饲粮、基础饲粮中添加 1%常规凹凸棒石(C-Pal)以及分别添加 0.25%、0.5%和 1%棒晶束解离凹凸棒石(CD-Pal)的试验饲粮,试验期 42 d。在 21 日龄和 42 日龄时每个重复选取 1 只接近平均体重的肉鸡屠宰取样。[**结果**]与对照组相比,添加 0.5%CD-Pal 显著降低肉鸡 22~42 日龄和 1~42 日龄的料重比($P<0.05$);0.5%和 1%CD-Pal 显著提高 40~42 日龄肉鸡饲粮中干物质和有机物的表观利用率($P<0.05$)。与对照组和 C-Pal 组相比,添加 0.5%CD-Pal 显著提高 21 日龄肉鸡空肠和回肠绒毛高度、回肠绒毛高度与隐窝深度比以及 42 日龄肉鸡回肠绒毛高度($P<0.05$),1%CD-Pal 显著提高 21 日龄肉鸡回肠绒毛高度以及十二指肠和回肠绒毛高度与隐窝深度比($P<0.05$);添加 0.5%CD-Pal 显著提高 21 日龄肉鸡空肠食糜淀粉酶活性($P<0.05$),1%CD-Pal 显著提高 21 日龄肉鸡空肠黏膜麦芽糖酶活性($P<0.05$)。与对照组或 C-Pal 组相比,添加 1%CD-Pal 显著提高 42 日龄肉鸡空肠黏膜中 *CAT1* 和 *GLUT2* mRNA 表达水平($P<0.05$),0.5%CD-Pal 显著提高 42 日龄肉鸡空肠黏膜 B^0AT mRNA 表达水平($P<0.05$)。[**结论**]日粮中添加棒晶束解离凹凸棒石能够改善肠道形态,提高消化酶活性以及肠道营养物质转运载体相关基因表达水平,进而提高肉鸡对营养物质的利用率,提高肉鸡生长性能;以添加 0.5%的棒晶束解离凹凸棒石为佳。

关键词:棒晶束解离;凹凸棒石;肉鸡;生长性能;肠道形态;消化功能
中图分类号:S831.5 **文献标志码**:A **文章编号**:1000-2030(2026)03-0614-11

Effects of crystal-bundles disaggregated palygorskite on growth performance,intestinal morphology and digestive function of broilers

XU Huan,YUE Dongqing,TAN Zichao,DENG Xianle,SUN Xiaowei,
WEN Chao,CHEN Yueping,ZHOU Yanmin*

(College of Animal Science and Technology,Nanjing Agricultural University,Nanjing 210014,China)

Abstract:[**Objectives**]The purpose of this study was to investigate the effects of crystal-bundles disaggregated palygorskite on growth performance,intestinal morphology and digestive function of broilers. [**Methods**]A total of 320 one-day old male Arbor Acres(AA) broilers with similar body weight were randomly divided into 5 groups with 8 replicates per group and 8 chickens per pen. Chicks in the 5 treatments were given a basal diet(control group),and the basal diet supplemented with 1% conventional palygorskite(C-Pal) and crystal-bundles disaggregated palygorskite(CD-Pal) at levels of 0.25%,0.5%,and 1% for 42 days,respectively. At 21 and 42 days of age,one broiler with close to average body weight was selected and slaughtered for sampling in each replicate. [**Results**]Compared with the control group,the supplementation of 0.5% CD-Pal could significantly decrease the feed to gain ratio of broilers from 22 to 42 days and 1 to 42 days($P<0.05$). The supplementation of 0.5% and 1% CD-Pal significantly increased apparent utilization of dry matter and organic matter of broilers during 40 to 42 days when compared with the control group($P<0.05$). Compared with the control group and C-Pal group,dietary supplementation with 0.5% CD-Pal significantly increased villus height in jejunum and ileum and the ratio of villus height to crypt depth in ileum of broilers at 21 days of age($P<0.05$);and it also significantly increased villus height in the ileum of broilers at 42 days of age($P<0.05$);1% CD-Pal could significantly increase villus height in the ileum of broilers at 21 days of age and the ratio of villus height to crypt depth in the duodenum and ileum of broilers at 42 days of age($P<0.05$). 0.5% CD-Pal significantly increased amylase activities in jejunal chyme of broilers at 21 days of age and 1% CD-Pal could significantly increase sucrase activities of jejunum mucosa of broilers at 21 days of age($P<0.05$). Compared with the control group or C-Pal group,1% CD-

收稿日期:2024-10-08
基金项目:淮安市重点研发计划(产研院专项)项目(HACYY202503)
* **通信作者**:周岩民,教授,主要从事动物营养与饲料科学研究,E-mail:zhouym@njau.edu.cn。

Pal could significantly increase mRNA expression levels of *CAT1* and *GLUT2* in jejunal mucosa of broilers at 42 days of age($P<0.05$); 0.5% CD-Pal could significantly increase mRNA expression levels of B^0AT in jejunal mucosa of broilers at 42 days of age($P<0.05$). [**Conclusions**] Dietary crystal-bundles disaggregated palygorskite supplementation could improve intestinal morphology, increase the activity of digestive enzymes and the expression of genes related to intestinal nutrient transporters, thereby improving the utilization of nutrients and improving the production performance of broilers. In addition, dietary supplementation with 0.5% crystal-bundles disaggregated palygorskite was the best.

Keywords: disaggregation of crystal-bundles; palygorskite; broiler; growth performance; intestinal morphology; digestive function

肠道是肉鸡营养物质消化吸收的主要场所,肠道健康失衡会导致其对营养物质的消化吸收能力下降[1],通过营养调控手段保护肉鸡肠道功能和健康显得尤为重要。保护肉鸡肠道健康常用的营养调控手段主要有氨基酸、微量元素、益生菌和植物提取物等[2-4]。研究表明,黏土矿物亦可有效保护肠道健康[5],凹凸棒石是一种 2∶1 型层链状含水富镁铝硅酸盐黏土矿物[6],独特的晶体结构使其具有更大的比表面积、良好的吸附性、胶体性和阳离子交换性等特性[7],已广泛应用于医药、环保、食品等领域[8-10]。2013 年,我国将凹凸棒石纳入饲料原料目录[11]。凹凸棒石适量添加于饲粮中不会对动物产生不利影响[12],还能够提高营养物质利用率,提高动物生长性能,改善肠道形态结构、机体免疫和抗氧化功能,保护肠道屏障[13-16]。此外,凹凸棒石可有效吸附饲料中的霉菌毒素[17]和重金属元素[18]及动物肠道中的有害细菌[19],从而保障肠道健康。目前,凹凸棒石的应用研究以常规凹凸棒石及其改性产品为主,然而,自然界中开采的凹凸棒石多以棒晶束或聚集体形式存在,其比表面积较小[6],影响其功能。对凹凸棒石棒晶束进行解离和分散能更好地发挥其理化性能,解离处理后的凹凸棒石粒度分布变窄,粒径更小、更均匀,比表面积变大,其分散性、胶体性和悬浮性得到明显改善,吸附能力更强、胶体性质更优,具有更佳的理化性质[20-22]。王世祺[22]研究发现,肉仔鸡饲粮中添加 0.5%解离凹凸棒石能够显著降低肉鸡前期(1~21 日龄)的料重比,提高机体抗氧化能力,提示解离凹凸棒石具有更优的生物学功能。因此,本试验通过在肉鸡饲粮中添加不同水平的棒晶束解离凹凸棒石,研究其对肉鸡全期生长性能和消化功能的影响,以期为棒晶束解离凹凸棒石在肉鸡饲粮中的应用提供科学依据。

1　材料与方法

1.1　试验材料

试验所用常规凹凸棒石(conventional palygorskite, C-Pal)和棒晶束解离凹凸棒石(crystal-bundles disaggregated palygorskite, CD-Pal)样品均由盱眙某黏土材料有限公司提供。C-Pal 由天然凹凸棒石晒干、粉碎制得,CD-Pal 由 C-Pal 通过凹凸棒石棒晶束解离工艺处理后制得。

1.2　试验设计与饲养管理

选取 320 只 1 日龄体重相近的健康雄性爱拔益加肉雏鸡,随机分为 5 组,每组 8 个重复,每个重复 8 只鸡。对照组饲喂基础饲粮,试验组饲喂在基础饲粮中分别添加质量分数为 1%的 C-Pal 及 0.25%、0.5%和 1% CD-Pal 的试验饲粮。试验为期 42 d,1~21 d 为试验前期,22~42 d 为试验后期,各组全程饲喂添加不同质量分数凹凸棒石的相应阶段试验日粮。基础饲粮配制参照《家禽营养需要》NRC(1994)。基础饲粮组成及营养水平见表 1。试验期间肉鸡自由采食和饮水,光照、温度、湿度及通风条件按照标准化养殖程序进行。

1.3　样品采集

在试验前期的第 19~21 天和后期的第 40~42 天开展添加凹凸棒石代谢试验。试验开始前,以重复为单位,从每个重复中选出 1 只体重相近的肉鸡单笼饲养,禁食排空 24 h。分别于第 19 天和第 40 天 08:00 开始饲喂,按原试验组饲喂方式,分别饲喂添加不同质量分数凹凸棒石的试验日粮。进行 3 d 全收粪代谢试验。正试期记录每个重复鸡群的给料量和剩料量,定时收集粪便,剔除羽毛、饲料等杂物后称重并记录。收集后的粪便样品加入 10%硫酸进行固氮,置于-20 ℃冰箱保存。分别于试验期的第 21 天和第 42 天,从每个重复中选取 1 只接近平均体重的健康肉鸡屠宰。先使用颈静脉采血法采集血液于 10 mL 离心管中,4 ℃、4 000 $r\cdot min^{-1}$离心 10 min 分离出血清分装备用,-20 ℃保存待测。再剖开腹腔,分离十二指肠、空肠和回肠,选取各肠段 2 cm,用生理盐水冲洗内容物后放入 4%(体积分数)多聚甲醛溶液中浸泡固定。取各肠段食糜于离心管中,保存于-20 ℃待测。剩余肠段纵向切开后用洁净的玻璃片刮取肠道黏膜至冻存管中,置于-80 ℃保存。

表1 基础饲粮组成及营养水平(风干基础)

Table 1 Compositions and nutrient levels of the basal diet(air-dry basis) %

原料组成 Ingredients composition	1~21 d	22~42 d	营养水平 Nutrient level[2)]	1~21 d	22~42 d
玉米 Corn	56.30	61.10	代谢能 Metabolizable energy[3)]	12.55	13.08
豆粕 Soybean meal	32.25	25.50	粗蛋白 Crude protein	21.66	19.90
玉米蛋白粉 Corn gluten meal	3.30	4.60	钙 Calcium	1.04	0.94
大豆油 Soybean oil	3.10	4.10	有效磷 Available phosphorus	0.45	0.42
石粉 Limestone	1.30	1.20	赖氨酸 Lysine	1.17	1.04
磷酸氢钙 Dicalcium phosphate	2.00	1.80	蛋氨酸 Methionine	0.50	0.43
L-赖氨酸 *L*-lysine	0.29	0.30	蛋氨酸+半胱氨酸 Methionine+cysteine	0.86	0.77
DL-蛋氨酸 *DL*-methionine	0.16	0.10			
氯化钠 NaCl	0.30	0.30			
预混料 Premix[1)]	1.00	1.00			
合计 Total	100.00	100.00			

注:1)预混料为每千克饲粮提供:维生素A,10 000 IU;维生素D_3,3 500 IU;维生素E,35 mg;维生素K_3,4 mg;硫胺素,4 mg;核黄素,8 mg;维生素B_{12},0.04 mg;烟酸,60 mg;胆碱,600 mg;泛酸钙,15 mg;吡哆醇,5 mg;生物素,0.04 mg;叶酸,2 mg;铁,80 mg;铜,8 mg;锰,100 mg;锌,80 mg;碘,0.7 mg;硒,0.3 mg。2)营养水平为计算值。3)代谢能单位为$MJ\cdot kg^{-1}$。

Note:1)The premix provided the following per kg of diets:vitamin A,10 000 IU;vitamin D_3,3 500 IU;vitamin E,35 mg;menadione,4 mg;thiamin,4 mg;riboflavin,8 mg;vitamin B_{12},0.04 mg;nicotinamide,60 mg;choline chloride,600 mg;*D*-calcium pantothenate,15 mg;pyridoxine·HCl,5 mg;biotin,0.04 mg;folic acid,2 mg;Fe,80 mg;Cu,8 mg;Mn,100 mg;Zn,80 mg;I,0.7 mg;Se,0.3 mg. 2)Nutrient levels are calculated values. 3)The unit of metabolic energy is $MJ\cdot kg^{-1}$.

1.4 指标测定与方法

1.4.1 生长性能 在试验的第21天和第42天,以重复为单位对肉鸡进行空腹称重(禁食12 h,不禁水),记录饲养过程中的饲料消耗量,分别计算试验肉鸡不同时期的平均日增重(ADG)、平均日采食量(ADFI)和料重比(F/G)。

1.4.2 营养物质表观利用率 采用全收粪法代谢试验测定营养物质表观利用率。将肉鸡代谢试验收集的粪样在室温解冻并混匀后置于烘箱中65 ℃干燥48 h,再置于室温环境下回潮24 h。然后用粉碎机对粪样和饲料样进行粉碎并过孔径为425 μm的筛,用自封袋收集筛下物待测。饲料和粪样中的干物质、有机物、粗蛋白以及粗脂肪含量,参照张丽英[23]的方法进行测定。

干物质含量的测定:将饲料和粪便样品于105 ℃烘干至恒重,计算烘干前后的质量变化即为干物质含量。

有机物含量的测定:将饲料和粪便样品置于恒重的坩埚中,先低温炭化再高温灼烧至恒重,计算样品灼烧前后质量差即为灰分含量,进而得出有机物含量(有机物含量=100%-灰分含量)。

粗蛋白含量的测定:称取一定量饲料和粪便样品放入消化管中,加入浓硫酸和催化剂置于消化炉上进行消化,消化结束后使用凯式定氮仪测定粗蛋白含量。

粗脂肪含量的测定:称取一定量饲料和粪便样品装入索氏提取器的滤纸筒,加入无水乙醚,在索氏提取器中加热回流提取数小时,提取结束后蒸去有机溶剂,烘干至恒重,称量脂肪质量并计算粗脂肪含量。

1.4.3 小肠形态结构 将固定于多聚甲醛中的肠段组织制成HE染色切片,每个切片选取6根绒毛,用尼康ECLIPSE 80i正置显微镜测量绒毛高度和隐窝深度,取平均值计算绒毛高度(VH)、隐窝深度(CD)以及绒毛高度/隐窝深度(VH/CD)值。

1.4.4 肠道消化酶 分别称取0.15 g十二指肠和空肠的食糜、黏膜,按照质量与体积1∶9的比例加入预冷的生理盐水进行匀浆,4 ℃、3 500 $r\cdot min^{-1}$离心10 min后得到上清液。采用试剂盒测定食糜上清液中的胰蛋白酶(A080-2-2)、淀粉酶(C016-1-1)和脂肪酶(A054-2-1)活性,以及黏膜上清液中的蔗糖酶(A082-2-1)和麦芽糖酶(A082-3-1)活性。操作步骤严格按照南京建成生物工程研究所试剂盒说明书执行。

1.4.5 空肠黏膜营养物质转运载体相关基因mRNA表达水平 用实时定量PCR(qPCR)法测定空肠黏膜转运相关基因*CAT1*、B^0AT、*EAAT3*、*PepT1*、*SGLT1*、*GLUT2*、*FATP4* mRNA相对表达水平。使用RNAex Pro RNA提取剂裂解空肠黏膜组织样品,按照Steady Pure通用型RNA提取试剂盒说明书提取总RNA,按照Evo M-MLV RT-PCR试剂盒说明书将总RNA反转录成cDNA,采用SYBR Green Pro *Taq* HS预混型qPCR试剂盒Ⅳ进行qPCR。以上试剂盒均购于湖南艾科瑞生物工程有限公司。相关基因的qPCR引物序列见表2,由北京擎科生物科技股份有限公司合成。以*β-actin*作为内参,用$2^{-\Delta\Delta Ct}$法计算基因相对表达水平,将对照组的基因表达量设定为1。

表 2　本试验 qPCR 的引物序列

Table 2　Primer sequences for real-time quantitative PCR

基因 Genes	登录号 GenBank ID	引物序列 Primer sequence(5′→3′)	产物长度/bp Product size
CAT1	XM_046908303.1	CTCTTCTGCCCCTTCTTCCT/TGAGCATCCAGACTGCAAAC	102
B^0AT	XM_040663289.2	TATCCTGGCTGGGTCTATGC/AGGCCTGTACGATCCCTTCT	125
EAAT3	XM_046936555.1	ACCCTTTTGCCTTGGAAACT/TTGAGATGTTTGCGTGAAG	122
PepT1	XM_046906441.1	CCCCTGAGGAGGATCACTGTT/CAAAAGAGCAGCAGCAACGA	66
SGLT1	XM_046928028.1	GCTTCACTCTTTGCCAGTAACA/CATTCCATTCATACCCTCCAAT	100
GLUT2	NM_207178.2	TCCTGCTAAGTGATCCGATGC/CCCTTCCAACCCAAACCA	105
FATP4	XM_046929199.1	ACAGTCGTCATCCGCAAGAAGTTC/GCCGCTCCACCTCCTGGTAG	136
β-actin	NM_205518.2	TATGTGCAAGGCCGGTTTC/TGTCTTTCTGGCCCATACCAA	110

注:*CAT1*:碱性氨基酸转运载体 1 基因 Cationic amino acid transporter 1 gene;*B^0AT*:B^0 氨基酸转运载体基因 B^0 amino acid transporter gene;*EAAT3*:兴奋性氨基酸转运载体 3 基因 Excitatory amino acid transporter 3 gene;*PepT1*:小肽转运载体 1 基因 Peptide transporter 1 gene;*SGLT1*:钠依赖性葡萄糖转运载体 1 基因 Sodium glucose cotransporter 1 gene;*GLUT2*:易化葡萄糖转运载体 2 基因 Glucose transporter 2 gene;*FATP4*:脂肪酸转运载体 4 基因 Fatty acid transporter 4 gene;*β-actin*:β-肌动蛋白基因 Beta-actin gene.

1.5　数据统计与分析

使用 Excel 2016 软件对所有数据进行初步统计和整理,结果数据用平均值±标准误($\bar{x}\pm SE$)表示,使用 SPSS 26.0 软件对均值数据进行单因素方差分析和 Duncan's 法多重比较。

2　结果与分析

2.1　棒晶束解离凹凸棒石(CD-Pal)对肉鸡生长性能的影响

由表 3 可知:与对照组相比,添加 0.5%CD-Pal 显著降低试验 22~42 d 和 1~42 d 肉鸡的 F/G($P<0.05$)。与 C-Pal 组相比,不同水平 CD-Pal 对肉鸡的 BW、ADG、ADFI 和 F/G 无显著影响($P>0.05$);C-Pal 组 22~42 d 和 1~42 d 肉鸡的 F/G 显著低于对照组($P<0.05$)。不同类型凹凸棒石对 21 和 42 d 肉鸡的 BW、试验各阶段的 ADG、ADFI 以及试验前期的 F/G 均无显著影响($P>0.05$)。

表 3　棒晶束解离凹凸棒石(CD-Pal)对肉鸡生长性能的影响

Table 3　Effects of crystal-bundles disaggregated palygorskite(CD-Pal) on growth performance of broilers

项目 Items	时间/d Time	对照组 Control group	1%C-Pal 组 1%C-Pal group	CD-Pal 组 CD-Pal group		
				0.25%	0.5%	1%
体重/g	1	44.13±0.35	44.25±0.41	44.00±0.27	44.38±0.38	44.63±0.26
Body weight	21	874.44±11.20	852.36±10.43	836.53±15.00	866.67±10.68	869.72±10.63
(BW)	42	2 703.28±29.88	2 788.50±35.39	2 731.90±33.87	2 788.71±48.52	2 784.33±23.05
平均日采食量/(g·d^{-1})	1~21	53.07±1.41	49.59±1.13	51.30±1.57	51.52±0.59	52.63±0.53
Average daily feed intake	22~42	157.11±2.48	152.08±3.18	156.59±1.68	148.87±2.13	154.60±3.00
(ADFI)	1~42	105.09±1.56	100.84±1.55	103.94±1.39	100.19±1.27	103.61±1.51
平均日增重/(g·d^{-1})	1~21	39.54±0.54	38.48±0.49	37.74±0.71	39.16±0.51	39.29±0.51
Average daily gain	22~42	87.09±5.13	91.47±5.46	90.52±3.74	91.53±6.34	91.17±2.62
(ADG)	1~42	63.31±0.71	64.98±0.96	64.00±0.81	65.34±1.15	65.23±0.55
料重比	1~21	1.34±0.02	1.29±0.04	1.37±0.06	1.32±0.02	1.34±0.01
Feed to gain ratio	22~42	1.81±0.06^{a}	1.67±0.04^{b}	1.74±0.03^{ab}	1.63±0.04^{b}	1.70±0.04^{ab}
(F/G)	1~42	1.66±0.04^{a}	1.55±0.02^{b}	1.63±0.03^{ab}	1.53±0.03^{b}	1.59±0.03^{ab}

注:1)C-Pal:常规凹凸棒石;CD-Pal:棒晶束解离凹凸棒石。2)同行平均值肩标不同字母表示差异显著($P<0.05$)。下同。

Note:1)C-Pal:Conventional palygorskite;CD-Pal:Crystal-bundles disaggregated palygorskite. 2)Means not sharing the same superscript in each row are significantly different ($P<0.05$). The same below.

2.2　棒晶束解离凹凸棒石(CD-Pal)对肉鸡营养物质表观利用率的影响

由表 4 可知:与对照组相比,添加 0.5%和 1%CD-Pal 显著提高肉鸡 40~42 d 饲粮中干物质和有机物的表观利用率($P<0.05$);C-Pal 亦显著提高肉鸡 40~42 d 饲粮中干物质和有机物的表观利用率($P<0.05$)。添加不同类型凹凸棒石对肉鸡 19~21 d 饲粮中营养物质表观利用率(干物质、有机物、粗蛋白和粗脂肪)及肉鸡 40~42 d 饲粮中粗蛋白和粗脂肪的表观利用率无显著影响($P>0.05$)。

表4 CD-Pal对肉鸡营养物质表观利用率的影响

Table 4 Effects of CD-Pal on apparent nutrient utilization of broilers %

时间/d Time	项目 Item	对照组 Control group	1%C-Pal组 1%C-Pal group	CD-Pal组 CD-Pal group 0.25%	0.5%	1%
19~21	干物质 Dry matter	72.18±2.44	74.09±2.09	71.61±1.26	74.53±0.48	77.17±1.44
	有机物 Organic matter	70.67±2.02	72.68±1.18	70.53±1.42	73.74±0.76	76.61±1.25
	粗蛋白 Crude protein	49.32±1.58	53.08±3.68	51.58±2.27	55.67±2.06	55.80±3.16
	粗脂肪 Ether extract	65.22±3.15	66.19±1.93	63.19±2.92	67.55±3.61	72.57±1.68
40~42	干物质 Dry matter	67.33±1.66^{c}	73.05±1.92^{ab}	69.93±0.36^{bc}	76.14±1.06^{a}	71.94±1.45^{ab}
	有机物 Organic matter	64.55±1.74^{c}	71.56±2.05^{ab}	68.42±0.70^{bc}	75.38±1.11^{a}	70.55±1.73^{ab}
	粗蛋白 Crude protein	49.94±2.74	54.97±3.66	52.36±1.64	60.90±1.52	53.16±3.05
	粗脂肪 Ether extract	64.07±2.52	72.82±4.33	67.57±3.39	76.46±1.78	71.64±3.52

2.3 棒晶束解离凹凸棒石(CD-Pal)对肉鸡肠道形态结构的影响

由表5可知:与对照组相比,添加0.25%CD-Pal显著提高21 d时肉鸡十二指肠VH、CD和VH/CD($P<0.05$),降低回肠VH和VH/CD($P<0.05$);0.5%CD-Pal显著提高21 d时肉鸡小肠VH、空肠CD以及十二指肠和空肠VH/CD($P<0.05$);1%CD-Pal显著提高肉鸡21 d小肠VH、回肠CD以及十二指肠和空肠VH/CD($P<0.05$)。与C-Pal组相比,0.25%CD-Pal显著提高21 d肉鸡十二指肠VH($P<0.05$),降低空肠和回肠VH以及空肠CD($P<0.05$);0.5%CD-Pal显著提高21 d时肉鸡空肠和回肠VH以及回肠VH/CD($P<0.05$),降低十二指肠VH和VH/CD($P<0.05$);1%CD-Pal显著增加十二指肠与回肠VH/CD以及空肠和回肠VH($P<0.05$)。C-Pal添加21 d肉鸡十二指肠VH、CD、VH/CD和空肠VH以及回肠CD显著高于对照组($P<0.05$)。添加不同类型凹凸棒石对21 d肉鸡空肠VH/CD无显著影响($P>0.05$)。

表5 CD-Pal对肉鸡21日龄肠道形态结构的影响

Table 5 Effects of CD-Pal on intestinal morphology of broilers at 21 days

项目 Item	对照组 Control group	1%C-Pal组 1%C-Pal group	CD-Pal组 CD-Pal group 0.25%	0.5%	1%
十二指肠 Duodenum					
绒毛高度/μm Villus height(VH)	1 234.91±10.71^{d}	1 545.57±19.52^{b}	1 622.00±12.69^{a}	1 398.95±11.22^{c}	1 560.83±10.63^{b}
隐窝深度/μm Crypt depth(CD)	175.24±2.66^{c}	186.02±3.07^{ab}	192.23±1.54^{a}	184.42±14.47^{abc}	178.81±2.79^{bc}
VH/CD	7.06±0.15^{d}	8.32±0.10^{b}	8.44±0.06^{ab}	7.61±0.19^{c}	8.74±0.13^{a}
空肠 Jejunum					
绒毛高度/μm Villus height(VH)	907.20±11.84^{d}	1 009.72±13.76^{c}	911.99±11.74^{d}	1 161.60±7.40^{a}	1 048.67±10.38^{b}
隐窝深度/μm Crypt depth(CD)	141.55±4.98^{bc}	152.06±3.60^{ab}	137.56±3.45^{c}	160.82±2.76^{a}	152.57±3.13^{ab}
VH/CD	6.47±0.27	6.67±0.17	6.66±0.19	7.24±0.15	6.89±0.12
回肠 Ileum					
绒毛高度/μm Villus height(VH)	672.33±9.08^{c}	673.91±7.24^{c}	638.12±4.56^{d}	792.73±3.65^{a}	764.87±6.19^{b}
隐窝深度/μm Crypt depth(CD)	138.69±1.67^{c}	145.14±1.53^{ab}	140.60±2.51^{bc}	141.56±2.09^{bc}	147.53±0.99^{a}
VH/CD	4.85±0.07^{c}	4.64±0.08^{cd}	4.55±0.08^{d}	5.61±0.08^{a}	5.18±0.07^{b}

由表6可知:与对照组相比,添加0.25%CD-Pal显著降低42 d肉鸡空肠和回肠VH以及回肠CD($P<0.05$);除1%CD-Pal组回肠CD外,0.5%与1%CD-Pal显著提高42 d肉鸡空肠和回肠VH以及VH/CD($P<0.05$)。与C-Pal组相比,0.5%CD-Pal显著提高回肠VH和CD($P<0.05$)。0.25%CD-Pal组空肠VH、0.25%CD-Pal组空肠和回肠VH/CD和空肠CD、回肠VH以及1%CD-Pal组回肠CD均低于对照组($P<0.05$)。

表6 CD-Pal对肉鸡42日龄肠道形态结构的影响

Table 6 Effects of CD-Pal on intestinal morphology of broilers at 42 days

项目 Item	对照组 Control group	1%C-Pal组 1%C-Pal group	CD-Pal组 CD-Pal group 0.25%	0.5%	1%
十二指肠 Duodenum					
绒毛高度/μm Villus height(VH)	1 527.92±8.91	1 517.41±8.61	1 528.29±12.11	1 533.60±9.01	1 497.92±5.25
隐窝深度/μm Crypt depth(CD)	148.57±6.14	145.07±3.33	144.55±4.59	145.69±2.30	137.87±3.91
VH/CD	10.45±1.67	10.50±0.82	10.64±0.83	10.55±0.57	10.92±0.86
空肠 Jejunum					
绒毛高度/μm Villus height(VH)	1 161.59±9.20^{c}	1 425.64±21.11^{a}	1 108.95±11.48^{d}	1 338.85±19.50^{b}	1 376.61±20.60^{b}
隐窝深度/μm Crypt depth(CD)	133.09±2.32^{ab}	142.21±2.95^{a}	128.02±3.85^{b}	137.81±3.54^{ab}	143.13±4.86^{a}
VH/CD	8.74±0.18^{b}	10.05±0.21^{a}	8.71±0.26^{b}	9.74±0.19^{a}	9.67±0.24^{a}
回肠 Ileum					
绒毛高度/μm Villus height(VH)	854.64±7.78^{c}	903.05±11.78^{b}	831.88±5.52^{d}	1 034.11±7.19^{a}	886.98±4.11^{b}
隐窝深度/μm Crypt depth(CD)	134.74±2.97^{a}	124.13±1.91^{b}	121.46±2.07^{b}	138.95±2.72^{a}	121.46±2.88^{b}
VH/CD	6.36±0.14^{b}	7.32±0.09^{a}	6.86±0.12^{b}	7.33±0.13^{a}	7.32±0.19^{a}

C-Pal 组 42 d 肉鸡空肠和回肠 VH 和 VH/CD 显著高于对照组(P<0.05)。添加不同类型凹凸棒石对 42 d 肉鸡十二指肠 VH、CD 和 VH/CD 无显著影响(P>0.05)。

2.4　棒晶束解离凹凸棒石(CD-Pal)对肉鸡肠道食糜消化酶活性的影响

由表 7 可知:与对照组相比,添加 0.5%CD-Pal 显著提高 21 d 肉鸡空肠食糜淀粉酶、脂肪酶及 42 d 肉鸡空肠食糜胰蛋白酶活性(P<0.05)。与 C-Pal 组相比,0.25%CD-Pal 组 21 和 42 d 肉鸡空肠食糜脂肪酶活性显著降低(P<0.05),0.5%CD-Pal 组 21 d 肉鸡空肠食糜淀粉酶活性显著提高(P<0.05);C-Pal 亦显著提高 21 和 42 d 肉鸡空肠食糜脂肪酶活性(P<0.05)。添加不同类型凹凸棒石对 21 和 42 d 肉鸡十二指肠食糜消化酶、21 d 肉鸡空肠食糜胰蛋白酶以及 42 d 肉鸡空肠食糜淀粉酶活性无显著影响(P>0.05)。

表 7　CD-Pal 对肉鸡肠道食糜消化酶活性的影响

Table 7　Effects of CD-Pal on the digestive enzyme activity in the intestinal chyme of broilers

时间/d Time	项目 Items	对照组 Control group	1%C-Pal 组 1%C-Pal group	CD-Pal 组 CD-Pal group		
				0.25%	0.5%	1%
21	十二指肠 Duodenum					
	淀粉酶活性/(U·mg^{-1}) Amylase activity	8.71±0.59	10.30±0.55	9.98±0.31	8.87±0.30	9.06±0.58
	脂肪酶活性/(U·mg^{-1}) Lipase activity	9.75±0.84	10.96±0.56	10.70±0.64	9.42±1.10	10.88±1.13
	胰蛋白酶/(U·g^{-1}) Trypsin activity	1.26±0.07	1.57±0.12	1.59±0.17	1.33±0.13	1.34±0.14
	空肠 Jejunum					
	淀粉酶活性/(U·mg^{-1}) Amylase activity	12.61±1.13^{b}	11.88±1.40^{b}	14.37±1.03^{ab}	17.51±1.56^{a}	11.74±0.93^{b}
	脂肪酶活性/(U·mg^{-1}) Lipase activity	33.52±3.56^{b}	48.55±5.30^{a}	31.29±2.71^{b}	47.79±3.09^{a}	38.93±5.29^{ab}
	胰蛋白酶活性/(U·g^{-1}) Trypsin activity	5.26±0.39	5.25±0.29	5.86±0.14	5.85±0.33	5.02±0.26
42	十二指肠 Duodenum					
	淀粉酶活性/(U·mg^{-1}) Amylase activity	11.01±1.41	12.34±2.02	12.76±1.65	13.03±0.83	12.93±1.52
	脂肪酶活性/(U·mg^{-1}) Lipase activity	28.16±2.96	33.23±4.69	44.42±7.67	42.75±4.79	46.33±6.94
	胰蛋白酶活性/(U·g^{-1}) Trypsin activity	3.13±0.34	4.48±0.39	3.58±0.47	3.71±0.24	3.68±0.37
	空肠 Jejunum					
	淀粉酶活性/(U·mg^{-1}) Amylase activity	24.78±4.33	29.98±3.21	35.69±5.56	37.89±4.70	32.87±4.30
	脂肪酶活性/(U·mg^{-1}) Lipase activity	109.18±5.51^{bc}	147.44±10.50^{a}	100.12±4.54^{c}	130.30±10.32^{abc}	135.43±19.95^{ab}
	胰蛋白酶活性/(U·g^{-1}) Trypsin activity	10.75±0.77^{b}	11.69±0.29^{ab}	13.92±0.96^{a}	13.30±0.91^{a}	11.72±0.63^{ab}

2.5　棒晶束解离凹凸棒石(CD-Pal)对肉鸡肠道黏膜二糖酶活性的影响

由表 8 可知:与对照组和 C-Pal 组相比,添加 1%CD-Pal 可显著提高 21 d 肉鸡空肠黏膜麦芽糖酶活性(P<0.05);C-Pal 组 42 d 肉鸡空肠黏膜麦芽糖酶活性显著高于对照组(P<0.05)。添加不同类型凹凸棒石对 21 和 42 d 肉鸡十二指肠黏膜二糖酶活性、空肠黏膜蔗糖酶活性无显著影响(P>0.05)。

表 8　CD-Pal 对肉鸡肠道黏膜二糖酶活性的影响

Table 8　Effects of CD-Pal on intestinal mucosal disaccharidase activity of broilers

时间/d Time	项目 Items	对照组 Control group	1%C-Pal 组 1%C-Pal group	CD-Pal 组 CD-Pal group		
				0.25%	0.5%	1%
21	十二指肠 Duodenum					
	蔗糖酶活性/(U·mg^{-1}) Maltase activity	42.76±2.00	42.60±1.38	44.80±1.99	41.37±1.80	39.64±1.95
	麦芽糖酶活性/(U·mg^{-1}) Sucrase activity	25.00±3.65	21.09±1.51	29.72±4.17	23.91±3.46	21.42±2.53
	空肠 Jejunum					
	蔗糖酶活性/(U·mg^{-1}) Maltase activity	78.48±6.10	72.96±3.42	66.08±5.53	89.54±7.04	80.53±8.94
	麦芽糖酶活性/(U·mg^{-1}) Sucrase activity	31.45±2.59^{bc}	31.08±4.49^{bc}	27.78±2.91^{c}	45.27±7.03^{ab}	47.49±6.23^{a}
42	十二指肠 Duodenum					
	蔗糖酶活性/(U·mg^{-1}) Maltase activity	33.69±2.61	33.45±1.39	35.76±3.47	31.76±0.83	33.31±1.68
	麦芽糖酶活性/(U·mg^{-1}) Sucrase activity	36.36±5.19	42.60±7.63	36.47±3.67	35.75±4.23	36.76±6.22
	空肠 Jejunum					
	蔗糖酶活性/(U·mg^{-1}) Maltase activity	54.14±4.96	56.36±6.41	60.71±5.12	59.82±4.20	57.43±4.45
	麦芽糖酶活性/(U·mg^{-1}) Sucrase activity	38.24±1.47^{b}	50.49±2.95^{a}	39.89±3.24^{b}	41.83±3.47^{b}	42.61±2.66^{ab}

2.6　棒晶束解离凹凸棒石(CD-Pal)对肉鸡空肠黏膜营养物质转运载体 mRNA 表达水平的影响

由表 9 可知:与对照组相比,添加 0.25%和 1%CD-Pal 显著提高 21 d 肉鸡空肠黏膜中 *B^0AT* mRNA 表达水平(P<0.05),1%CD-Pal 显著提高 42 d 肉鸡空肠黏膜中 *GLUT2* mRNA 表达水平(P<0.05)。与 C-Pal 组相比,不同水平 CD-Pal 均显著提高 21 d 肉鸡空肠黏膜中 *B^0AT* mRNA 表达水平(P<0.05),0.5%CD-Pal

显著提高42 d肉鸡空肠黏膜 B^0AT mRNA表达水平($P<0.05$),1%CD-Pal显著提高42 d肉鸡空肠黏膜中 *CAT1* 和 *GLUT2* mRNA表达水平($P<0.05$)。添加不同类型凹凸棒石对21 d肉鸡空肠黏膜中 *CAT1* 和 *GLUT2* mRNA表达水平以及21和42 d肉鸡空肠黏膜中 *EAAT3*、*PepT1*、*SGLT1* 和 *FATP4* mRNA表达水平无显著影响($P>0.05$)。

表9 CD-Pal对肉鸡空肠黏膜营养物质转运载体基因mRNA表达水平的影响

Table 9 Effects of CD-Pal on mRNA relative expression levels of nutrient transporters gene in jejunal mucosa of broilers

时间/d Time	基因 Gene	对照组 Control group	1%C-Pal组 1%C-Pal group	CD-Pal组 CD-Pal group		
				0.25%	0.5%	1%
21	*CAT1*	1.00±0.11	1.21±0.18	1.28±0.16	0.94±0.12	1.13±0.18
	B^0AT	1.00±0.05^{bc}	0.93±0.07^{c}	1.42±0.14^{a}	1.35±0.12^{ab}	1.39±0.21^{a}
	EAAT3	1.00±0.11	1.19±0.15	1.23±0.20	1.02±0.18	1.09±0.07
	PepT1	1.00±0.05	1.55±0.28	1.16±0.20	0.84±0.12	1.29±0.18
	GLUT2	1.00±0.08	1.56±0.18	1.33±0.15	1.39±0.17	1.47±0.20
	SGLT1	1.00±0.08	1.52±0.13	1.52±0.20	1.39±0.14	1.30±0.10
	FATP4	1.00±0.05	1.07±0.19	0.90±0.13	1.02±0.12	0.94±0.16
42	*CAT1*	1.00±0.09^{b}	0.83±0.11^{b}	0.64±0.13^{b}	0.87±0.14^{b}	1.44±0.16^{a}
	B^0AT	1.00±0.09^{ab}	0.86±0.08^{b}	0.83±0.11^{b}	1.30±0.15^{a}	0.83±0.13^{b}
	EAAT3	1.00±0.08	1.07±0.15	0.92±0.14	1.01±0.17	1.29±0.12
	PepT1	1.00±0.13	0.72±0.06	0.83±0.09	0.73±0.04	1.03±0.14
	GLUT2	1.00±0.10^{bc}	1.18±0.10^{b}	0.78±0.06^{c}	1.05±0.13^{bc}	1.56±0.17^{a}
	SGLT1	1.00±0.06	1.02±0.09	0.97±0.08	0.95±0.07	1.09±0.21
	FATP4	1.00±0.10	0.87±0.04	0.90±0.11	1.04±0.15	0.92±0.15

3 讨论与结论

3.1 棒晶束解离凹凸棒石对肉鸡生长性能的影响

生长性能是评价动物养殖经济效益的主要指标,饲料中添加凹凸棒石能够改善动物生长性能。Tang等[24]在断奶仔猪饲粮中添加凹凸棒石后发现,1 800 mg·kg^{-1}的添加量能显著提高断奶仔猪的平均日增重。杨雪等[25]发现,常规凹凸棒石或热改性凹凸棒石均能一定程度增加育肥猪平均日增重并降低料重比。Zhang等[26]研究表明,在饲粮中添加5、10、15、20 g·kg^{-1}的凹凸棒石均能增加肉鸡的采食量和平均日增重,提高生长性能。本试验中,饲粮中添加0.5%CD-Pal和1.0%C-Pal显著降低了肉鸡后期和全期的料重比,可能是由于凹凸棒石具有较大的比表面积以及很强的吸附力和黏滞性,进入消化道后可以减缓食糜的流动速度,增加食糜在消化道的停留时间,增加饲料养分与消化酶的作用时间,促进饲粮营养物质的消化吸收[27]。在本试验中,0.5%解离凹凸棒石对肉鸡前期生长性能无显著影响,与王世祺等[28]的研究结果不一致,其原因可能与雏鸡差异和饲养环境有关。此外,Chen等[29]发现,添加0.5%和1%常规凹凸棒石并不能影响肉鸡的生长性能,Cheng等[30]也得到了类似结果。出现这种差异性原因可能与凹凸棒石的品质、结构性质以及肉鸡的日粮配方和饲养管理等有关。Du等[31]研究发现,与常规粉碎的凹凸棒石相比,超微粉碎处理的凹凸棒石能显著提高肉鸡的饲料转化率,改善动物机体对营养物质的消化吸收,而经过棒晶束解离处理后的凹凸棒石在其改善功能方面与超微粉碎的凹凸棒石相似,甚至更强,所以本试验中,添加0.5%的CD-Pal达到了添加1%C-Pal的作用。而Cheng等[30]研究发现,添加20 g·kg^{-1}凹凸棒石会增加料重比。因此,饲粮中添加凹凸棒石时需要充分考虑其添加量。

3.2 棒晶束解离凹凸棒石对肉鸡肠道形态结构的影响

肠道是动物消化吸收的主要器官,小肠绒毛高度越高,肠黏膜表面积越大,越有利于食糜与肠黏膜的充分接触,促进营养物质吸收[32]。隐窝深度的降低代表小肠上皮细胞的成熟率升高,绒毛高度和隐窝深度的比值可以反映小肠结构的形态变化和对营养物质的消化吸收能力[32]。黏土矿物具有促进肠道黏膜上皮细胞增殖、改善肠道绒毛形态的功能[33]。本试验中,无论添加C-Pal还是CD-Pal均能提高肉鸡肠道绒毛高度,提高绒毛隐窝比,改善肠道形态结构,这与Chen等[29]的研究结果一致。肠道结构的改善可能是由于摄入的凹凸棒石分散覆盖在肠黏膜表面而形成屏障,减少应激源对肠黏膜的刺激,维持了肠黏膜结构的完整性。Zhang等[13]也发现,添加凹凸棒石能增加仔猪空肠和回肠的绒毛高度。凹凸棒石也可能是

通过其自身的矿物质与消化液相互作用来保护肠道黏膜[34]。绒毛高度增加也归结于凹凸棒石促进了肠上皮细胞的增殖所致[35]。本试验发现,0.5%和 1%凹凸棒石添加组的改善效果优于 0.25%添加组,说明过低的添加剂量并不能完全充分发挥其生物学功能,影响其作用效果。综合本试验结果,CD-Pal 改善肉鸡肠道形态的效果优于 C-Pal,这可能与棒晶束解离后凹凸棒石具有更强的生物学功能有关,Du 等[31]的研究也发现超微粉碎的凹凸棒石改善肠道形态的效果优于常规粒度凹凸棒石。

3.3　棒晶束解离凹凸棒石对肉鸡消化功能的影响

营养物质表观利用率是衡量肉鸡对饲粮中各种营养成分消化吸收能力的一个重要指标。本试验中,添加凹凸棒石能显著提高肉鸡对饲粮中干物质和有机物的表观利用率,与 Chen 等[16]结果一致。Zhou 等[36]发现,添加凹凸棒石能提高肉鸡对日粮中能量和蛋白质的表观利用率,Lv 等[37]在仔猪的研究上也得到了类似结果。其原因可能是凹凸棒石进入动物肠道内,其较大的比表面积及良好的胶体性能,增大了食糜的黏稠度,使得食糜在动物肠道内流动速度变缓、停留时间变长,更有利于肠道对营养物质的充分吸收[38]。张磊[35]研究发现,添加凹凸棒石增加了消化道中食糜的残余量,证实了食糜的排空速度减缓,增加了食糜中营养物质与消化酶的相互作用时间,从而提高营养物质利用率。本试验中,添加 0.5%CD-Pal 的作用效果优于添加 1%C-Pal,与其更优的生物学功能有关。

消化酶活性与机体对养分的消化利用率密切相关。Xia 等[39]研究表明饲粮中添加黏土矿物能够提高动物的消化酶活性,改善养分利用率。Chen 等[16]研究发现,添加凹凸棒石能提高肉鸡空肠食糜中的胰蛋白酶和脂肪酶活性。Du 等[31]在肉鸡饲粮中添加 1%超微粉碎凹凸棒石显著提高了胰腺中的胰蛋白酶活性。本试验中,添加凹凸棒石显著提高了 21 d 肉鸡空肠食糜中淀粉酶、脂肪酶活性以及 42 d 肉鸡空肠食糜中脂肪酶和胰蛋白酶活性。肠道中的淀粉酶、糜蛋白酶和胰蛋白酶等消化酶的分泌和活性受肠道 pH 值影响[34]。凹凸棒石的添加提高了空肠中的消化酶活性,其原因可能是离子交换特性改变胃肠道液的 pH 值和离子组成,凹凸棒石中所含的金属离子在肠道偏酸的环境下释放出来,起到催化激活酶的作用,增加消化酶分泌,从而改变胃肠道消化酶活性[34,40]。而棒晶束解离后的凹凸棒石比表面积增大,孔道更加发达,能够与外界离子更充分地接触,从而具有更强的离子交换能力[41],因此其效果优于常规凹凸棒石。另有研究报道[42],消化酶可以吸附于黏土表面形成稳定的复合物,使其在广泛的 pH 值范围内均可保持较高的活性。但 Qiao 等[43]在蛋鸡饲料及 Zhang 等[26]在肉鸡颗粒饲料中添加凹凸棒石均发现其对肠道食糜消化酶活性无显著影响,这可能与凹凸棒石的添加量、动物种类和饲料类型有关。

家禽肠道中的二糖酶主要为蔗糖酶和麦芽糖酶,主要来源于肠道黏膜代谢脱落的肠道上皮细胞,二糖酶可以用来衡量肠道黏膜上皮细胞发育程度和功能[44]。本试验中,添加凹凸棒石能提高空肠黏膜麦芽糖酶活性,这与 Zhou 等[36]的研究结果一致。可能是由于凹凸棒石的吸附作用,降低了饲粮中的重金属、霉菌毒素以及肠道中的致病菌对肠道的有害影响[45],保证了肠道健康,从而促进二糖酶的分泌。张磊[35]发现凹凸棒石能够提高肉鸡空肠黏膜蔗糖酶活性,且酶活性随着凹凸棒石添加水平的增加而提高,本试验中也发现较高水平的凹凸棒石添加量(1%的添加量)提高麦芽糖酶活性的效果更明显。

氨基酸、小肽、葡萄糖和脂肪酸转运载体共同参与机体对蛋白质、碳水化合物和脂类的吸收利用,转运载体的正常表达对营养物质吸收至关重要。CAT1 是 Na^+非依赖性 y^+碱性氨基酸转运载体家族的载体蛋白之一,是 *L*-精氨酸跨膜转运的最主要转运载体;B^0AT1 是小肠中唯一参与色氨酸转运的载体,能转运所有的中性氨基酸;EAAT3 是酸性氨基酸转运载体,主要转运 *L*-谷氨酸和天冬氨酸;PepT1 是寡肽转运蛋白,能将消化道中的小肽转运至肠道上皮细胞内[46];SGLT1 主要分布在肠上皮细胞刷状缘,与 *D*-葡萄糖和 *D*-半乳糖的吸收有关;GLUT2 位于肠上皮细胞基底侧膜,负责单糖转运,两者共同参与葡萄糖的吸收和转运[47];FATP4 是动物肠道中唯一存在的脂肪酸转运载体,是调控肠道吸收脂肪酸的重要调控因子[48]。陈继发[49]研究表明,饲粮中添加蒙脱石能够显著上调蛋鸡空肠 *CAT1* mRNA 表达量,提高肠道对碱性氨基酸的吸收能力。本试验中,添加凹凸棒石显著提高了肉鸡 *CAT1*、*B^0AT* 和 *GLUT2* mRNA 表达水平,其原因可能是添加凹凸棒石能够改善肠道形态,而肠道结构完整有利于肠上皮细胞增生,确保氨基酸和葡萄糖转运蛋白表达[50]。结果提示添加凹凸棒石能提高肠道对氨基酸和葡萄糖的吸收能力,与上述添加凹凸棒石能提高肉鸡对饲粮的干物质和有机物的利用率相互佐证。本试验中,添加凹凸棒石并未对饲粮中粗蛋白利用率产生显著影响,这与氨基酸转运载体表达结果不一致,可能是凹凸棒石虽然促进了肠黏膜对氨基酸的吸收,但是在代谢过程中受其他因素的影响,导致其利用率并没有显著提高。此外,营养

物质底物浓度的改变也会影响肠道上皮细胞营养物质转运载体的表达[51],而凹凸棒石可能是通过促进肠道对饲粮中营养物质消化,使肠道中小分子营养物质浓度增加,上调了肠细胞营养转运载体蛋白的表达,从而促进营养物质吸收[47]。

综上所述,在饲粮中添加棒晶束解离凹凸棒石能够提高肉鸡生长性能,改善其肠道形态,提高肠道中消化酶活性以及肠道黏膜二糖酶活性,提高肉鸡肠道养分转运载体相关基因 mRNA 表达水平,提高肉鸡对营养物质的利用率,改善消化功能。以添加 0.5%棒晶束解离凹凸棒石效果为优,且优于常规凹凸棒石。

参考文献 References:

[1] Wickramasuriya S S, Park I, Lee K, et al. Role of physiology, immunity, microbiota, and infectious diseases in the gut health of poultry[J]. Vaccines, 2022, 10(2): 172.

[2] 张盛,蒋守群,王一冰. 黄羽肉鸡肠道健康及营养调控研究进展[J]. 动物营养学报,2023,35(2):738-754.
Zhang S, Jiang S Q, Wang Y B. Research progress on intestinal health and nutritional regulation in yellow-feathered chickens[J]. Chinese Journal of Animal Nutrition, 2023, 35(2): 738-754(in Chinese with English abstract).

[3] 连丽娜,侯金旺,孙寒雪,等. 复合益生菌对黄羽肉鸡生长发育、肠道形态及免疫功能的影响[J]. 畜牧与兽医,2022,54(9):26-31.
Lian L N, Hou J W, Sun H X, et al. Effects of compound probiotics on growth and development, intestinal morphology and immunity of yellow-feathered broilers. Animal Husbandry & Veterinary Medicine, 2022, 54(9): 26-31(in Chinese with English abstract).

[4] 马龙飞,陈顺,庄苏,等. 饲粮添加芦丁对肉仔鸡免疫功能和空肠形态、黏膜屏障、抗氧化功能的影响[J]. 南京农业大学学报,2024,47(4):721-730. DOI:10.7685/jnau.202308022.
Ma L F, Chen S, Zhuang S, et al. Effects of dietary rutin supplementation on immune function, jejunum morphology, mucosal barrier function and antioxidant capacity of broilers[J]. Journal of Nanjing Agricultural University, 2024, 47(4): 721-730(in Chinese with English abstract).

[5] 王海波,杨姣姣,裴文刚,等. 硅酸盐矿物的生物学功能及其在家禽生产中应用的研究进展[J]. 中国畜牧杂志,2021,57(7):43-48.
Wang H B, Yang J J, Pei W G, et al. Biological function of silicate clay and its application in poultry production[J]. Chinese Journal of Animal Science, 2021, 57(7): 43-48(in Chinese with English abstract).

[6] Wang W B, Wang A Q. Palygorskite nanomaterials: structure, properties, and functional applications[M]//Nanomaterials from Clay Minerals. Amsterdam: Elsevier, 2019: 21-133.

[7] Lu Y S, Wang A Q. From structure evolution of palygorskite to functional material: a review[J]. Microporous and Mesoporous Materials, 2022, 333: 111765.

[8] Ke Y X, Zhu X L, Si S C, et al. A novel adsorbent of attapulgite and carbon composites derived from spent bleaching earth for synergistic removal of copper and tetracycline in water[J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2023, 20(2): 1573.

[9] Cao L H, Xie W J, Cui H Y, et al. Fibrous clays in dermopharmaceutical and cosmetic applications: traditional and emerging perspectives[J]. International Journal of Pharmaceutics, 2022, 625: 122097.

[10] Wu Y Y, Hu Q H, Li Z X, et al. Effect of nanocomposite-based packaging on microstructure and energy metabolism of *Agaricus bisporus*[J]. Food Chemistry, 2019, 276: 790-796.

[11] 中国农业部. 中华人民共和国农业部公告 第2038号[J]. 中国饲料添加剂,2014(5):36-38.
Ministry of Agriculture of the PRC. Announcement No. 2038th of the People's Republic of China(PRC) Ministry of Agriculture[J]. China Feed Additive, 2014(5): 36-38(in Chinese).

[12] Chalvatzi S, Arsenos G, Tserveni-Goussi A, et al. Tolerance and efficacy study of palygorskite incorporation in the diet of laying hens[J]. Applied Clay Science, 2014, 101: 643-647.

[13] Zhang J M, Lv Y F, Tang C H, et al. Effects of dietary supplementation with palygorskite on intestinal integrity in weaned piglets[J]. Applied Clay Science, 2013, 86: 185-189.

[14] Tan Z C, Chen Y P, Wen C, et al. Dietary supplementation with a silicate clay mineral(palygorskite) alleviates inflammatory responses and intestinal barrier damage in broiler chickens challenged with *Escherichia coli*[J]. Poultry Science, 2024, 103(9): 104017.

[15] Kanoulas V, Papadopoulos G A, Tassis P, et al. Dietary supplementation of attapulgite improves growth performance in pigs from weaning to slaughter[J]. Veterinary Sciences, 2022, 9(10): 557.

[16] Chen Y P, Cheng Y F, Yang W L, et al. An evaluation of palygorskite inclusion on the growth performance and digestive function of broilers[J]. Applied Clay Science, 2016, 129: 1-6.

[17] Akbar S, Akhtar M S, Khan A, et al. Efficacy of clay minerals for controlling aflatoxin B1 toxicity in commercial broilers[J]. Pakistan Journal of Agricultural Sciences, 2022, 59(2): 231-239.

[18] Cheng Y F, Chen Y P, Wen C, et al. Evaluation of dietary palygorskite supplementation on growth performance, mineral accumulations, antioxidant capacities, and meat quality of broilers fed lead-contaminated diet[J]. Biological Trace Element Research, 2018, 181(2): 314-322.

[19] Tan Z C, Chen Y P, Zhou Y M. Palygorskite improves growth performance and prevents liver damage in avian pathogenic *Escherichia coli*-challenged broiler chickens at an early age[J]. Journal of Animal Science, 2024, 102: skae302.

[20] Xu J, Wang W B, Lu Y S, et al. Ultrasonic disaggregation of dioctahedral palygorskite crystal bundles to enhance the stability and antibacterial

properties of pickering emulsion[J]. Applied Clay Science,2023,238:106933.

[21] Xu J,Wang W B,Lu Y S,et al. Scale-up disaggregation of palygorskite crystal bundles *via* ultrasonic process for using as potential drilling fluid [J]. Ultrasonics Sonochemistry,2022,89:106128.

[22] 王世祺. 棒晶束解离凹凸棒石对大肠杆菌的吸附及其在肉鸡饲粮中的应用研究[D]. 南京:南京农业大学,2022.
Wang S Q. Study on the absorption of *Escherichia coli* by crystal-bundles disaggregated palygorskite and its application in the diet of broilers [D]. Nanjing:Nanjing Agricultural University,2022(in Chinese with English abstract).

[23] 张丽英. 饲料分析及饲料质量检测技术[M]. 4 版. 北京:中国农业大学出版社,2016:47-89.
Zhang L Y. Feed Analysis and Quality Test Technology[M]. 4th ed. Beijing:China Agricultural University Press,2016:47-89(in Chinese).

[24] Tang C H,Wang X Q,Zhang J M. Effects of supplemental palygorskite instead of zinc oxide on growth performance,apparent nutrient digestibility and fecal zinc excretion in weaned piglets[J]. Animal Science Journal,2014,85(4):435-439.

[25] 杨雪,冷智贤,颜瑞,等. 凹凸棒石黏土对生长育肥猪生产性能、金属含量及肉品质的影响[J]. 中国粮油学报,2015,30(4):96-101.
Yang X,Leng Z X,Yan R,et al. Effects of attapulgite on growth performance,metal content in blood,muscle and meat quality of growing-finishing pigs[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association,2015,30(4):96-101(in Chinese with English abstract).

[26] Zhang L,Yan R,Zhang R Q,et al. Effect of different levels of palygorskite inclusion on pellet quality,growth performance and nutrient utilization in broilers[J]. Animal Feed Science and Technology,2017,223:73-81.

[27] de Lemos M J,Calixto L F L,dos Santos Alves O,et al. Kaolin in the diet and its effects on performance,litter moisture and intestinal morphology of broiler chickens[J]. Ciência Rural,2015,45(10):1835-1840.

[28] 王世祺,赵浩然,杜明芳,等. 棒晶束解离凹凸棒石对肉鸡生长性能、血清生化指标、抗氧化功能和肉品质的影响[J]. 动物营养学报,2022,34(6):3570-3582.
Wang S Q,Zhao H R,Du M F,et al. Effects of crystal-bundles disaggregated palygorskite on growth performance,serum biochemical indices,antioxidant function and meat quality of broilers[J]. Chinese Journal of Animal Nutrition,2022,34(6):3570-3582(in Chinese with English abstract).

[29] Chen Y P,Cheng Y F,Li X H,et al. Dietary palygorskite supplementation improves immunity,oxidative status,intestinal integrity,and barrier function of broilers at an early age[J]. Animal Feed Science and Technology,2016,219:200-209.

[30] Cheng Y F,Chen Y P,Li X H,et al. Effects of palygorskite inclusion on the growth performance,meat quality,antioxidant ability,and mineral element content of broilers[J]. Biological Trace Element Research,2016,173(1):194-201.

[31] Du M F,Chen Y P,Cheng Y F,et al. A comparison study on the effects of dietary conventional and ultra-fine ground palygorskite supplementation on the growth performance and digestive function of broiler chickens[J]. Applied Clay Science,2019,181:105211.

[32] Wang W X,Dang G Q,Hao W,et al. Dietary supplementation of compound probiotics improves intestinal health by modulating microbiota and its SCFA products as alternatives to in-feed antibiotics[J]. Probiotics and Antimicrobial Proteins,2025,17(4):1969-1984.

[33] Nadziakiewicza M,Kehoe S,Micek P. Physico-chemical properties of clay minerals and their use as a health promoting feed additive[J]. Animals,2019,9(10):714.

[34] Damato A,Vianello F,Novelli E,et al. Comprehensive review on the interactions of clay minerals with animal physiology and production[J]. Frontiers in Veterinary Science,2022,9:889612.

[35] 张磊. 凹凸棒石对肉鸡饲料制粒质量与肠道功能的影响及其相关机制研究[D]. 南京:南京农业大学,2016.
Zhang L. A study on the effect of palygorskite on feed pellet quality and intestinal function and its mechanism in broilers[D]. Nanjing:Nanjing Agricultural University,2016(in Chinese with English abstract).

[36] Zhou P,Tan Y Q,Zhang L,et al. Effects of dietary supplementation with the combination of zeolite and attapulgite on growth performance,nutrient digestibility,secretion of digestive enzymes and intestinal health in broiler chickens[J]. Asian-Australasian Journal of Animal Sciences,2014,27(9):1311-1318.

[37] Lv Y F,Tang C H,Wang X Q,et al. Effects of dietary supplementation with palygorskite on nutrient utilization in weaned piglets[J]. Livestock Science,2015,174:82-86.

[38] Ouhida I,Pérez J F,Piedrafita J,et al. The effects of sepiolite in broiler chicken diets of high,medium and low viscosity. Productive performance and nutritive value[J]. Animal Feed Science and Technology,2000,85(3/4):183-194.

[39] Xia M S,Hu C H,Xu Z R. Effects of copper-bearing montmorillonite on growth performance,digestive enzyme activities,and intestinal microflora and morphology of male broilers[J]. Poultry Science,2004,83(11):1868-1875.

[40] 肖金松,罗有文. 凹凸棒石黏土在动物生产上的应用及其作用机制[J]. 江西农业学报,2008,20(10):97-99,107.
Xiao J S,Luo Y W. Application of attapulgite in animal production and its mechanism[J]. Acta Agriculturae Jiangxi,2008,20(10):97-99,107(in Chinese with English abstract).

[41] Lu Y S,Mu B,Wang Q,et al. Insight into the microstructure and physicochemical properties of palygorskite in dry state and moisture condition by mechanical pulverizing[J]. Powder Technology,2024,436:119525.

[42] Cabezas M J,Salvador D,Sinisterra J V. Stabilization-activation of pancreatic enzymes adsorbed on to a sepiolite clay[J]. Journal of Chemical Technology & Biotechnology,1991,52(2):265-274.

[43] Qiao L H,Chen Y P,Wen C,et al. Effects of natural and heat modified palygorskite supplementation on the laying performance,egg quality,intestinal morphology,digestive enzyme activity and pancreatic enzyme mRNA expression of laying hens[J]. Applied Clay Science,2015,104:

303-308.

[44] Burke M. Carbohydrate intolerance and disaccharidase measurement:a mini-review[J]. The Clinical Biochemist Reviews,2019,40(4):167-174.

[45] 袁勇,文伟,冯智茂,等. 凹凸棒石的作用机制及其在动物生产中的应用[J]. 动物营养学报,2020,32(6):2533-2542.
Yuan Y,Wen W,Feng Z M,et al. Mechanism of attapulgite and its application in animal production[J]. Chinese Journal of Animal Nutrition,2020,32(6):2533-2542(in Chinese with English abstract).

[46] Yu M,Li Z M,Wang G,et al. Dietary supplementation with *Citrus* extract alters the plasma parameters,circulating amino acid profiles and gene expression of small intestinal nutrient transporters in Chinese yellow-feathered broilers[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture,2020,100(14):5126-5135.

[47] Miska K B,Fetterer R H. Expression of amino acid and sugar transporters,aminopeptidase,and the di- and tri-peptide transporter PepT1;differences between modern fast growing broilers and broilers not selected for rapid growth[J]. Poultry Science,2019,98(5):2272-2280.

[48] Miner G E,So C M,Edwards W,et al. PLIN5 interacts with FATP4 at membrane contact sites to promote lipid droplet-to-mitochondria fatty acid transport[J]. Developmental Cell,2023,58(14):1250-1265.e6.

[49] 陈继发. 蒙脱石及其与枯草芽胞杆菌联用对蛋鸡生产性能和肠道功能的影响[D]. 长沙:湖南农业大学,2019.
Chen J F. Effects of montmorillonite and its combination with *Bacillus subtilis* on production performance and intestinal function of laying hens[D]. Changsha:Hunan Agricultural University,2019(in Chinese with English abstract).

[50] 王海波. 载锌蒙脱石对肉鸡组织金属元素沉积、抗氧化功能及小肠养分转运和屏障功能的影响[D]. 兰州:甘肃农业大学,2021.
Wang H B. Effects of zinc-loaded montmorillonite on metal element deposition,antioxidant function,nutrient transport and barrier function in the small intestine of broilers[D]. Lanzhou:Gansu Agricultural University,2021(in Chinese with English abstract).

[51] 张爱华. 肉仔鸡肠道主要营养素转运载体 mRNA 表达发育规律的研究[D]. 北京:中国农业科学院,2014.
Zhang A H. Ontogenetic regulation of nutrient transporters in the small intestine broilers[D]. Beijing:Chinese Academy of Agricultural Sciences,2014(in Chinese with English abstract).

责任编辑:周广礼