

引用格式:

刘泽民, 何流琴, 李铁军, 何兴国, 欧阳龙, 印遇龙. 氧化应激对断奶仔猪能量代谢和氨基酸表观消化率的影响[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版), 2022, 48(2): 208–214.

LIU Z M, HE L Q, LI T J, HE X G, OUYANG L, YIN Y L. Effects of oxidative stress on energy metabolism and apparent digestibility of amino acids of the weaned piglets[J]. Journal of Hunan Agricultural University(Natural Sciences), 2022, 48(2): 208–214.

投稿网址: <http://xb.hunau.edu.cn>



氧化应激对断奶仔猪能量代谢和氨基酸表观消化率的影响

刘泽民^{1,2}, 何流琴^{1,3}, 李铁军^{1,2}, 何兴国⁴, 欧阳龙⁵, 印遇龙^{1,2,6*}

(1.中国科学院亚热带农业生态研究所, 湖南 长沙 410125; 2.中国科学院大学资源与环境学院, 北京 100049; 3.湖南师范大学生命科学学院, 湖南 长沙 410081; 4.长沙绿叶生物技术有限公司, 湖南 长沙 430121; 5.湖南省兽药饲料监察所, 湖南 长沙 410017; 6.湖南农业大学动物科学技术学院, 湖南 长沙 410128)

摘要: 选取 12 头、21 日龄、平均体质量为(8.10±0.89) kg 的健康二元杂(杜×长)断奶仔猪, 于回肠末端实施“T”形瘘管手术, 随机平均分为 2 组, 处理组 and 对照组均饲喂基础饲料, 但处理组在基础日粮中根据每周体质量, 每天拌入 10 g/kg 剂量的 D-半乳糖, 建立 D-半乳糖诱导断奶仔猪慢性氧化应激模型, 探讨氧化应激对断奶仔猪血清生理生化指标、能量代谢和回肠末端氨基酸表观消化率的影响, 试验期为 28 d。结果表明: D-半乳糖处理显著降低了断奶仔猪血清中总抗氧化能力、过氧化氢酶和总氧化物歧化酶的活性, 显著提高了丙二醛的浓度; 氧化应激显著降低了断奶仔猪血清尿素氮水平, 而其他所测血清生化指标在两组间的差异均无统计学意义; 氧化应激显著提高了断奶仔猪的氧气消耗量、二氧化碳产生量、产热量、呼吸熵和粪能; 氧化应激显著或极显著降低了回肠末端必需氨基酸中的赖氨酸、蛋氨酸、苏氨酸、亮氨酸和异亮氨酸的表观消化率, 同时也显著或极显著降低除脯氨酸和甘氨酸外的其他非必需氨基酸的表观消化率。使用 10 g/kg 剂量的 D-半乳糖建立断奶仔猪慢性氧化应激模型, 断奶仔猪产生慢性氧化应激, 不但降低了仔猪机体抗氧化酶系统活性和提高了氧化物水平, 同时还抑制了仔猪能量代谢和回肠末端氨基酸消化水平, 对断奶仔猪的生产产生不利影响。

关键词: 断奶仔猪; D-半乳糖; 氧化应激; 血清生理生化指标; 能量代谢; 呼吸测热; 氨基酸表观消化率

中图分类号: S858.28

文献标志码: A

文章编号: 1007-1032(2022)02-0208-07

Effects of oxidative stress on energy metabolism and apparent digestibility of amino acids of the weaned piglets

LIU Zemin^{1,2}, HE Liuqin^{1,3}, LI Tiejun^{1,2}, HE Xingguo⁴, OUYANG Long⁵, YIN Yulong^{1,2,6*}

(1.Institute of Subtropical Agriculture, Chinese Academy of Sciences, Changsha, Hunan 410125, China; 2.College of Resources and Environment, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3.College of Life Sciences, Hunan Normal University, Changsha, Hunan 410081, China; 4.Changsha Green Leaf Bio-technology Co. Ltd, Changsha, Hunan 430121, China; 5.Supervision of Veterinary Medicine Feed in Hunan Institute, Changsha, Hunan 410017, China; 6.College of Animal Science and Technology, Hunan Agricultural University, Changsha, Hunan 410128, China)

Abstract: This study aims to understand the effects of oxidative stress on serum biochemical indexes, energy metabolism and apparent digestibility of amino acids in terminal ileum. In the study, twelve healthy 21-day age weaned piglets

收稿日期: 2020-06-30

修回日期: 2022-03-30

基金项目: 国家自然科学基金项目(31872371、31902168); 湖南省重点研究发展计划(2017NK2321)

作者简介: 刘泽民(1995—), 男, 广东广州人, 硕士研究生, 主要从事单胃动物营养研究, liuzemin17@mailsucas.edu.cn; *通信作者, 印遇龙, 博士, 研究员, 主要从事功能性氨基酸调控仔猪应激研究, yinyulong@isa.ac.cn

(Duroc×Landrace) with an average weight of (8.10±0.89) kg were performed T cannula fit surgeon and then divided into 2 groups at random. The studied 2 groups were fed basal diets, and the body weight was weighed once a week. The treatment group was supplemented with *D*-galactose in the basal diet at a daily dose of 10 g/kg. We used *D*-galactose as a model to induce chronic oxidative stress in weaned piglets for 28 days. The results showed that, *D*-galactose supplementation significantly reduced the total antioxidant capacity, catalase and total superoxide dismutase activities in serum of weaned piglets, but significantly increased the concentration of malondialdehyde. Oxidative stress significantly reduced serum urea nitrogen levels in weaned piglets, while other serum biochemical indicators were not significantly different from the control group. Compared with the control group, oxidative stress significantly increased oxygen consumption, carbon dioxide production, heat production, respiratory quotient and fecal energy. Oxidative stress significantly or extremely significantly reduced the apparent digestibility of lysine, methionine, threonine, leucine and isoleucine among the terminal ileal essential amino acids, and it also significantly or extremely significantly reduced the apparent digestibility of non-essential amino acids except proline and glycine. A model of chronic oxidative stress in weaned piglets could be established using *D*-galactose at a dose of 10 g/kg. Chronic oxidative stress in weaned piglets not only reduced the activity of the antioxidant enzyme system and increases the level of oxidation, but also inhibited energy metabolism and terminal ileal amino acid digestion levels, which adversely affected the production of weaned piglets.

Keywords: weaned piglets; *D*-galactose; oxidative stress; serum biochemical indexes; energy metabolism; measure heat of respiration; apparent amino acid digestibility

氧化应激被认为是生物机体自由基急剧增多或清除自由基的能力下降,从而破坏了氧化和抗氧化反应之间的动态平衡的过程^[1]。在养猪生产过程中,出生、断奶、饲料污染变质和环境改变等均会诱发仔猪产生氧化应激,其中断奶应激是最常见的一种氧化应激现象,其主要是由于仔猪在断奶后由吸吮易消化的母乳变为采食固体饲料以及自身结构和社会环境的变化而引起的应激,这将导致仔猪肠道免疫功能、养分利用、生长性能下降或产生疾病^[2]。

营养物质的消化吸收不仅关系着动物的健康和生产水平与效率,也是自由基系统动态平衡的物质基础。目前,用于断奶仔猪氧化应激研究的模型多采用腹腔注射敌草快或口服多不饱和脂肪酸^[3-4]。由于腹腔注射敌草快会引起仔猪严重的病理反应,如厌食和腹泻,甚至引发仔猪产生其他疾病^[5],而多不饱和脂肪酸的制备非常复杂,同时脂质过氧化产物的浓度难以确定^[6],使得该类模型难以适用于营养物质消化代谢的研究,这也导致在氧化应激条件下针对营养物质代谢变化规律的研究较少。近年来,*D*-半乳糖诱导大鼠和小鼠建立氧化应激模型已被国际公认^[7-8]。*D*-半乳糖是不能被哺乳动物吸收的单糖,在动物体内可通过 3 种不同方式诱发氧化应激:①*D*-半乳糖作为还原糖与氨基酸的游离胺反应生成席夫碱^[9],席夫碱被

氧化形成高级糖基化产物,可与特定受体相互作用,然后诱导产生活性氧(ROS)^[10];②高剂量的*D*-半乳糖被半乳糖氧化酶氧化并产生过氧化氢,从而降低抗氧化酶活性,如超氧化物歧化酶(SOD)^[9];③*D*-半乳糖被半乳糖还原酶还原,过剩的*D*-半乳糖转化为半乳糖醇,不能被代谢,且会在细胞中积聚,产生大量 ROS,并引起渗透压不平衡^[11]。有研究表明,持续对小鼠腹腔注射*D*-半乳糖会增加其体内的 ROS,诱发脂质过氧化,降低抗氧化酶(SOD, GSH-Px 等)的活性^[12]。*D*-半乳糖在不同组织内的积累会上调促炎性因子的表达和分泌,从而诱发肠道炎症等疾病^[13]。为此,笔者通过建立*D*-半乳糖诱导断奶仔猪慢性氧化应激模型,探讨氧化应激对断奶仔猪血清生理生化指标、能量代谢和回肠末端氨基酸表观消化率的影响,旨在为缓解断奶仔猪氧化应激提供依据。

1 材料和方法

1.1 材料

D-半乳糖购自湖北育英生物科技有限公司,有效成分质量分数>98%。12 头、21 日龄、平均体质量为(8.26±0.37) kg 的健康二元杂(杜×长)断奶仔猪(均为阉公猪)购自湖南新五丰股份有限公司永安分公司养殖基地。试验基础饲料营养水平参照 NRC(2012)推荐的断奶仔猪营养需要量进行配制,由湖南粒丰生物科技有限公司生产,参照文献 [14]

配置基础饲料。

1.2 试验设计

试验于2018年11月至2019年1月在中国科学院亚热带农业生态研究所湖南省新五丰种猪场试验基地开展。试验期28 d。断奶仔猪于回肠末端实施“T”形瘻管手术,按体质量相近的原则随机分为2组(处理组和对照组),每组6头,每个重复1头。试验期间每周对试验猪称量1次,处理组D-半乳糖每天按10 g/kg的剂量添加到基础饲料中,于早晨一次性直接拌入饲料搅匀后饲喂。试验猪采用单栏饲养,各组栏舍条件一致。试验正式开始前进行7 d的预试期。预试期间,每组均饲喂基础饲料。试验正式开始后,试验猪按照常规饲养管理,每天喂食粉料3次,时间分别为07:30、12:00和18:30,自由饮水和采食,以食槽无剩料为原则。每天清扫圈舍2次,保持清洁。整个圈舍采取自然通风,在养殖期内对所有圈舍进行不定期消毒。第21天开始,将试验猪转入呼吸测热仓检测能量代谢水平;第24天从“T”形瘻管连续收集2 d回肠末端食糜,用于检测氨基酸表观消化率;第28天进行前腔静脉采血,分离血清,用于检测血清中抗氧化关键酶和生化指标。

1.3 测定指标和方法

1.3.1 血清采集及检测指标

用普通真空管采血10 mL,静置15 min后在4℃下以3000 r/min离心15 min,分离制备血清,于-80℃保存,待用。采用瑞士罗氏公司生产的Cobas-c311型全自动生化分析仪测量血清生化指标,包括总蛋白(TP)、白蛋白(ALB)、丙氨酸转氨酶(ALT)、谷氨酸转氨酶(AST)、碱性磷酸酶(ALP)、血尿素氮(BUN)、葡萄糖(GLU)、甘油三酯(TG)、胆固醇(CHOL)、血氨(NH₃L)。采用酶联免疫ELISA测定试剂盒(苏州科铭生物技术有限公司)检测血清中总抗氧化能力(T-AOC)、丙二醛(MDA)浓度、过氧化氢酶(CAT)和总超氧化物歧化酶(T-SOD)活性。

1.3.2 粪和尿及饲料能量测定

连续收集每头猪的全天粪、尿量48 h。粪便称量后每天取50 g,加入10 mL 10% H₂SO₄固氮,

烘干,保存;尿液记录总体积后每天取20 mL,用10% H₂SO₄按照10:1的比例固氮,于-80℃保存。采用氧弹式测热法测定尿样和粪样中所含的能量。称取约0.2 g粪样,使用长沙凯德测控仪器有限公司生产的5E-AC8018型等温式全自动量热仪直接测定。尿样采用滤纸烘干法进行测定:在滤纸上滴2 mL尿液,待尿液被滤纸充分吸收后放入坩埚内烘干,再将烘干后的滤纸放入等温式全自动量热仪中进行测量,同时还需测量空白滤纸的能量。含尿滤纸的能量减去空白滤纸的能量,即为尿液中所含的能量。

1.3.3 呼吸测热

采用间接测热法测定动物向环境散失的热量。使用吉林省农业科学院畜牧分院能量代谢研究室研发设计的猪、羊用八室联排开放回流式呼吸测热装置测量呼吸产热量和呼吸熵。采用呼吸代谢室气体分析仪采集室内外的O₂和CO₂,根据室内外O₂和CO₂的含量计算差值,从而统计猪只自身的O₂消耗量和CO₂产生量。气体分析仪每30 min循环1次,保存数据用于后续的分析。参照文献[15]计算净能;参照武斌等^[16]的方法计算耗氧量和CO₂生成量;根据刘伟等^[17]的方法计算产热量和呼吸熵。

1.3.4 回肠食糜收集和水解氨基酸检测

用5号自封袋套在瘻管口处,用橡皮筋缠绕数圈固定,防止脱落。连续收集每只猪从回肠末端瘻管口流出的食糜48 h,其间每隔4 h检查自封袋收集情况,一旦装满半袋,马上换上新的自封袋。每天将收集的食糜称量后全部烘干,保存。准确称取烘干后食糜样品0.2 g,装入安瓿瓶中,加入10 mL的6 mol/L盐酸,用乙醇喷灯封口,于(110±2)℃下水解24 h,冷却后转移至100 mL容量瓶中定容,再从中取1 mL定容至25 mL,用0.22 μm滤膜过滤至进样瓶中,运用氨基酸分析仪L8900(日立)测定水解氨基酸的质量分数。测定的氨基酸分为必需氨基酸(EAA)和非必需氨基酸(NEAA),其中必需氨基酸包括赖氨酸(Lys)、蛋氨酸(Met)、苏氨酸(Thr)、亮氨酸(Leu)、异亮氨酸(Ile)、缬氨酸(Val)、组氨酸(His)、苯丙氨酸(Phe)和精氨酸(Arg);非必需氨基酸包括丙氨酸(Ala)、

谷氨酸(Glu)、甘氨酸(Gly)、脯氨酸(Pro)、丝氨酸(Ser)、酪氨酸(Tyr)和天冬氨酸(Asp)。

1.3.5 回肠末端氨基酸表观消化率测量

参照MORGAN等^[18]的方法,以TiO₂为内源指示剂,采用电感耦合等离子光谱发生仪(安捷伦)测量回肠末端氨基酸表观消化率^[19]。

1.4 数据处理

原始数据运用Excel 2016整理;运用SPSS 22.0进行独立样本*t*检验分析。

2 结果与分析

2.1 D-半乳糖对断奶仔猪血清抗氧化酶系统的影响

从表1可知,D-半乳糖诱导断奶仔猪后,仔猪血清中T-AOC、CAT和T-SOD的活性显著降低,但MDA的浓度显著升高。可见,D-半乳糖可作为断奶仔猪慢性氧化应激的诱导因子,此应激模型

用于断奶仔猪氧化应激研究是可行的。

表1 D-半乳糖诱导后断奶仔猪血清的抗氧化指标

Table 1 Antioxidant indexes in serum of weaned piglets after D-galactose induction

组别	T-AOC/ (U·mL ⁻¹)	CAT/ (U·mL ⁻¹)	MDA/ (nmol·mL ⁻¹)	T-SOD/ (U·mL ⁻¹)
处理组	8.51*	12.48*	6.29*	18.23*
对照组	11.55	22.15	4.55	23.68
标准误	0.54	1.92	0.35	1.32

“*”示两组间差异在 0.05 水平有统计学意义。

2.2 氧化应激对断奶仔猪血清生化指标的影响

从表2可知,氧化应激可显著降低断奶仔猪血清BUN的浓度。与对照组相比,除处理组的CHOL浓度略有升高外,处理组的TP、ALB质量浓度和ALT、AST、ALP活性及GLU、TG、NH₃L浓度均有下降趋势,但这些指标两组间的差异均无统计学意义。

表2 氧化应激断奶仔猪血清的生化指标

Table 2 Biochemical indices in serum of weaned piglets under oxidative stress

组别	TP/ (g·L ⁻¹)	ALB/ (g·L ⁻¹)	ALT/ (U·L ⁻¹)	AST/ (U·L ⁻¹)	ALP/ (U·L ⁻¹)	BUN/ (mmol·mL ⁻¹)	GLU/ (mmol·mL ⁻¹)	TG/ (mmol·mL ⁻¹)	CHOL/ (mmol·mL ⁻¹)	NH ₃ L/ (μmol·mL ⁻¹)
处理组	78.08	41.58	73.13	70.25	204.50	5.70*	4.40	0.58	4.00	307.68
对照组	87.64	42.12	80.58	82.40	219.80	7.78	5.16	0.69	3.91	312.98
标准误	6.42	3.90	12.86	9.08	34.65	0.85	1.19	0.32	0.37	43.70

“*”示两组间差异在 0.05 水平有统计学意义。

2.3 氧化应激对断奶仔猪产热量和呼吸熵及能量水平的影响

由表3可知,氧化应激显著提高了断奶仔猪O₂消耗量、CO₂产生量、产热量、呼吸熵和粪能,使断奶仔猪的总能、消化能、代谢能和净能分别降低了7.28%、11.13%、12.08%和27.63%,使其尿能

提高了40.83%,但这些指标在两组间的差异均无统计学意义。处理组和对照组代谢能转化为净能的效率分别为50.37%和62.76%,相差12.39个百分点;总能转化为净能的效率分别为43.04%和56.75%,相差13.71个百分点,两组间的差异也均无统计学意义。

表3 氧化应激断奶仔猪的产热量和呼吸熵及能量水平

Table 3 Heat production, respiratory entropy and energy levels of weaned piglets under oxidative stress

组别	体质量/kg	O ₂ 消耗量/(L·d ⁻¹)	CO ₂ 产生量/(L·d ⁻¹)	产热量/kJ	呼吸熵	总能/kJ	粪能/kJ
处理组	10.46	243.25*	179.11*	4468.15*	0.73*	11 245.33	1308.97*
对照组	11.65	193.58	133.18	3799.81	0.69	12 128.36	877.59
标准误	0.84	5.32	4.13	90.47	0.01	1664.82	114.27

组别	消化能/kJ	尿能/kJ	代谢能/kJ	净能/kJ	代谢能转化为净能的效率/%	总能转化为净能的效率/%
处理组	9936.36	281.51	9654.85	5185.93	50.37	43.04
对照组	11 180.69	199.90	10 980.80	7165.66	62.76	56.75
标准误	1714.47	77.80	1729.29	1497.58	5.12	5.76

“*”示两组间差异在 0.05 水平有统计学意义。

2.4 氧化应激对断奶仔猪回肠末端氨基酸表观消化率的影响

从表4可知, *D*-半乳糖诱导断奶仔猪产生氧化应激后, 回肠末端必需氨基酸中Met的表观消化率显著降低了9.20%; Lys、Thr、Leu和Ile的表观消化率均极显著降低, 分别降低了3.87%、3.10%、3.52%和3.56%; Val、His和Phe的表观消化率分别

降低了2.94%、1.07%和4.44%, 但它们在两组间的差异均无统计学意义。非必需氨基酸中Ala和Glu的表观消化率均显著降低, 分别降低了10.20%、1.70%; Ser、Tyr和Asp的表观消化率极显著降低, 分别降低了3.11%、6.28%和3.09%; Gly和Pro的表观消化率则均极显著上升, 分别上升了8.57%和5.96%。

表4 氧化应激断奶仔猪回肠末端的氨基酸表观消化率

Table 4 Apparent digestibility of amino acids in the terminal ileum of weaned piglets under oxidative stress %									
组别	必需氨基酸表观消化率								
	Lys	Met	Thr	Leu	Ile	Val	His	Phe	Arg
处理组	92.99**	84.28*	92.19**	91.58**	90.24**	89.07	97.59	91.39	98.98
对照组	96.73	92.82	95.14	94.92	93.57	91.77	98.65	95.64	98.70
标准误	0.38	0.83	0.31	0.26	0.33	0.66	0.15	0.81	0.24
组别	非必需氨基酸表观消化率								
	Ala	Glu	Gly	Pro	Ser	Tyr	Asp		
处理组	77.16*	96.94*	91.21**	96.12**	93.74**	87.89**	93.96**		
对照组	85.92	98.62	84.01	90.71	96.75	93.78	96.96		
标准误	0.7	0.21	0.96	0.35	0.21	0.54	0.25		

“**”“***”示两组间差异在 0.05、0.01 水平有统计学意义。

3 结论与讨论

D-半乳糖建立的慢性氧化应激模型有着较好的特异性和敏感性。JIN等^[20]研究显示, *D*-半乳糖处理的小鼠血清氧化物MDA浓度显著提高, 而还原型谷胱甘肽浓度、CAT和T-AOC活性均极显著低于对照组的。RUAN等^[21]研究发现, *D*-半乳糖可显著降低肝和肾的SOD和CAT活性及GSH的浓度, 增加肝和肾的MDA水平。本研究中, *D*-半乳糖处理显著增加了血清中MDA浓度, 显著降低了T-AOC、CAT和T-SOD活性, 表明采食*D*-半乳糖可损伤断奶仔猪抗氧化酶系统, 提高仔猪机体内氧自由基的含量。这与JIN等^[20]和RUAN等^[21]的研究结果一致。由此可认为, *D*-半乳糖能诱导仔猪产生氧化应激, 使用10 g/kg剂量的*D*-半乳糖建立断奶仔猪慢性氧化应激模型是可行的。

尿素氮为人体蛋白质分解代谢的产物, 其含量的高低可直接反应动物机体的健康状况。本研究中, *D*-半乳糖处理可显著降低仔猪血清尿素氮的浓度。YUE等^[22]研究表明, 血清尿素氮水平低可能与蛋白质摄入不足有关。试验组和对照组配方粗蛋白含量相同, 这提示*D*-半乳糖有降低仔猪

消化、吸收饲料蛋白质和氨基酸的作用。血清总蛋白含量能反映早期断奶仔猪对饲料的蛋白代谢状况^[23]。对照组的血清总蛋白质量浓度高于*D*-半乳糖处理组的, 说明*D*-半乳糖抑制了仔猪对蛋白质的消化吸收, 损伤了仔猪机体免疫力。除尿素氮外, 其他所测血清生化指标在两组间的差异均无统计学意义, 这表明本试验所选10 g/kg的剂量对仔猪内脏器官的损伤不大, 基本在合理范围之内。使用敌草快建立的模型, 氧化应激状态一般只能维持3~5 d的时间, 而仔猪断奶应激会持续1~2周^[24], 不能准确反映仔猪的氧化应激状态。笔者通过*D*-半乳糖建立的慢性氧化应激模型可更好的研究仔猪断奶应激对营养物质消化代谢和能量利用的影响。

本研究中, *D*-半乳糖处理能提高断奶仔猪氧气的摄入和二氧化碳的排出, 上调机体的能量消耗, 增加机体产热, 使得更多能量被排出体外, 粪能增加, 从而降低了断奶仔猪的饲料利用率, 不利于生产实践。这种情况可能是由2种原因导致的: 一方面, *D*-半乳糖抑制了仔猪对营养物质的消化、吸收; 另一方面, *D*-半乳糖导致的氧化应

激使肠道细胞大量死亡并随着粪便排出体外,增加了内源氮的损失。本研究结果也显示,*D*-半乳糖处理组的消化能和代谢能均呈现出与总能相同的下降趋势,但是降低的趋势不显著,而*D*-半乳糖处理显著提高了仔猪产热量,这可能是由于*D*-半乳糖诱导仔猪产生应激产热造成的。对照组总能转化为净能的能量转化效率高于处理组,证明*D*-半乳糖能抑制断奶仔猪对饲料能量的吸收和利用,这与预期结果相符合。净能包括生产净能和维持净能。维持净能又包括了基础代谢能、随意活动能和维持体温的能量^[25]。*D*-半乳糖处理降低了仔猪代谢能转化为净能的效率,这表明*D*-半乳糖处理增加了断奶仔猪的维持净能,降低了能量的转化效率。

氧化应激会引发细胞凋亡或自噬,造成肠道生理形态变化,导致肠上皮细胞脱落,破坏肠道屏障,减少对蛋白质氨基酸的消化吸收^[26]。本研究中,通过*D*-半乳糖诱导断奶仔猪产生氧化应激后,除Gly和Pro的回肠末端表观消化率极显著上升外,其他所测回肠末端氨基酸表观消化率均降低。ZUPRIZAL等^[27]研究发现,长期处于氧化应激条件下的肉鸡,除Arg外的大多数氨基酸在回肠末端的消化率显著降低。本研究结果与其相似。研究表明,Pro可增加仔猪的SOD活性^[28],肠道黏膜细胞可通过摄取和积累Gly直接保护肠道遭受的氧化损伤^[29]。断奶仔猪回肠末端Pro和Gly表观消化率提高,可能是肠道选择性吸收Pro来提高抗氧化能力和直接利用Gly降低肠道氧化应激水平所致。此外,*D*-半乳糖可能通过刺激肠道吸收Gly和Pro,从而提高了回肠末端的消化率。

综上所述,受饲料添加*D*-半乳糖的影响,处理组断奶仔猪机体产生慢性氧化应激,导致仔猪总能转化为净能的效率降低,回肠末端氨基酸消化率也随之降低,严重影响断奶仔猪对饲料能量和氨基酸的利用效率。从氧化应激造模来看,使用10 g/kg剂量的*D*-半乳糖日粮添加,具有较好的慢性氧化应激效果,可用于后续的模式研究。

致谢:中国科学院亚热带农业生态研究所公共技术服务中心(实验室管理中心)对本试验给予了大力支持,特致谢忱。

参考文献:

- [1] 尹杰, 韩慧, 刘泽民, 等. 功能性氨基酸调控猪氧化应激的研究进展[J]. 中国科学: 生命科学, 2019, 49(3): 193-201.
- [2] YIN J, WU M M, XIAO H, et al. Development of an antioxidant system after early weaning in piglets[J]. Journal of Animal Science, 2014, 92(2): 612-619.
- [3] CAO S T, WU H, WANG C C, et al. Diquat-induced oxidative stress increases intestinal permeability, impairs mitochondrial function, and triggers mitophagy in piglets[J]. Journal of Animal Science, 2018, 96(5): 1795-1805.
- [4] SHEN Y, WAN H F, ZHU J T, et al. Fish oil and olive oil supplementation in late pregnancy and lactation differentially affect oxidative stress and inflammation in sows and piglets[J]. Lipids, 2015, 50(7): 647-658.
- [5] XU Y Q, XING Y Y, WANG Z Q, et al. Pre-protective effects of dietary chitosan supplementation against oxidative stress induced by diquat in weaned piglets[J]. Cell Stress & Chaperones, 2018, 23(4): 703-710.
- [6] DI GIANCAMILLO A, ROSSI R, PASTORELLI G, et al. The effects of dietary verbascoside on blood and liver oxidative stress status induced by a high n-6 polyunsaturated fatty acids diet in piglets[J]. Journal of Animal Science, 2015, 93(6): 2849-2859.
- [7] QIAN Y, ZHANG J, ZHOU X R, et al. *Lactobacillus plantarum* CQPC11 isolated from Sichuan pickled cabbages antagonizes D-galactose-induced oxidation and aging in mice[J]. Molecules (Basel, Switzerland), 2018, 23(11): 3026.
- [8] SHEN Y X, XU S Y, WEI W, et al. Melatonin reduces memory changes and neural oxidative damage in mice treated with D-galactose[J]. Journal of Pineal Research, 2002, 32(3): 173-178.
- [9] SHWE T, PRATCHAYASAKUL W, CHATTIPAKORN N, et al. Role of D-galactose-induced brain aging and its potential used for therapeutic interventions[J]. Experimental Gerontology, 2018, 101: 13-36.
- [10] ZHANG B, LI L, LIU Y X, et al. Antiviral mechanism study of gossypol and its Schiff base derivatives based on reactive oxygen species (ROS)[J]. RSC Advances, 2016, 6(90): 87637-87648.
- [11] KUMAR A, PRAKASH A, DOGRA S. Naringin alleviates cognitive impairment, mitochondrial dysfunction and oxidative stress induced by D-galactose in mice[J]. Food and Chemical Toxicology, 2010, 48(2): 626-632.
- [12] ZHOU Y, XU Q, DONG Y, et al. Supplementation of mussel peptides reduces aging phenotype, lipid

- deposition and oxidative stress in D-galactose-induce aging mice[J]. *The Journal of Nutrition, Health & Aging*, 2017, 21(10): 1314–1320.
- [13] ZHANG X, WU J Z, LIN Z X, et al. Ameliorative effect of supercritical fluid extract of *Chrysanthemum indicum* Linnén against D-galactose induced brain and liver injury in senescent mice via suppression of oxidative stress, inflammation and apoptosis[J]. *Journal of Ethnopharmacology*, 2019, 234: 44–56.
- [14] GAO J, YIN J, XU K, et al. Protein level and infantile diarrhea in a postweaning piglet model[J]. *Mediators of Inflammation*, 2020, 2020: 1937387.
- [15] 杨凤. 动物营养学[M]. 2版. 北京: 中国农业出版社, 2001.
- [16] 武斌, 张芳毓, 班志彬, 等. 产蛋高峰期吉林芦花鸡与海兰褐鸡饲料净能效率比较研究[J]. *动物营养学报*, 2020, 32(3): 1172–1177.
- [17] 刘伟, 蔡辉益, 闫海洁, 等. 肉鸡体重对净能评定中总产热量和绝食产热量的影响[J]. *动物营养学报*, 2014, 26(8): 2118–2125.
- [18] MORGAN N K, SCHOLEY D V, BURTON E J. A comparison of two methods for determining titanium dioxide marker content in broiler digestibility studies[J]. *Animal*, 2014, 8(4): 529–533.
- [19] 陈将, 于耀, 邹轶, 等. 去盲肠法、套管法和屠宰法测定鸡饲料氨基酸表观消化率的比较[J]. *动物营养学报*, 2021, 33(7): 4098–4109.
- [20] JIN S L, YIN Y G. *In vivo* antioxidant activity of total flavonoids from *Indocalamus* leaves in aging mice caused by D-galactose[J]. *Food and Chemical Toxicology*, 2012, 50(10): 3814–3818.
- [21] RUAN Q W, LIU F, GAO Z J, et al. The anti-inflamm-aging and hepatoprotective effects of huperzine A in D-galactose-treated rats[J]. *Mechanisms of Ageing and Development*, 2013, 134(3/4): 89–97.
- [22] YUE L Y, QIAO S Y. Effects of low-protein diets supplemented with crystalline amino acids on performance and intestinal development in piglets over the first 2 weeks after weaning[J]. *Livestock Science*, 2008, 115(2/3): 144–152.
- [23] TANG Z R, YIN Y L, NYACHOTI C M, et al. Effect of dietary supplementation of chitosan and galactomannan-oligosaccharide on serum parameters and the insulin-like growth factor-I mRNA expression in early-weaned piglets[J]. *Domestic Animal Endocrinology*, 2005, 28(4): 430–441.
- [24] 高中锦. 如何解决仔猪断奶应激[J]. *中国畜牧兽医文摘*, 2017, 33(4): 78.
- [25] 王旭莉. 蛋鸡玉米和豆粕净能值的测定及其净能体系的应用[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2010.
- [26] KAPLAN M, MUTLU E A, BENSON M, et al. Use of herbal preparations in the treatment of oxidant-mediated inflammatory disorders[J]. *Complementary Therapies in Medicine*, 2007, 15(3): 207–216.
- [27] ZUPRIZAL, LARBIER M, CHAGNEAU A M, et al. Influence of ambient temperature on true digestibility of protein and amino acids of rapeseed and soybean meals in broilers[J]. *Poultry Science*, 1993, 72(2): 289–295.
- [28] KANG P, ZHANG L L, HOU Y Q, et al. Effects of L-proline on the growth performance, and blood parameters in weaned lipopolysaccharide (LPS)-challenged pigs[J]. *Asian-Australasian Journal of Animal Sciences*, 2014, 27(8): 1150–1156.
- [29] WANG W W, WU Z L, LIN G, et al. *Glycine* stimulates protein synthesis and inhibits oxidative stress in pig small intestinal epithelial cells[J]. *The Journal of Nutrition*, 2014, 144(10): 1540–1548.

责任编辑: 邹慧玲

英文编辑: 柳正