

微波加热饲料原料对断奶仔猪生长性能、营养物质表观消化率以及血清生化指标的影响

乔鹏飞¹ 曹恒¹ 陈忠洪² 陆文清^{1*}

(1. 中国农业大学动物科技学院, 动物营养学国家重点实验室, 北京 100193;

2. 广西奇昌生物科技有限公司, 桂林 537000)

摘要: 本研究旨在探究微波加热饲料原料对断奶仔猪生长性能、营养物质表观消化率以及血清生化指标的影响。试验选择 108 头初始体重为 (8.12±0.58) kg 的 28 日龄“杜×长×大”断奶仔猪, 随机分为 3 组, 每组 6 个重复, 每个重复 6 头猪, 公母各占 1/2。负对照组 (NC 组) 饲喂玉米-豆粕型基础饲料, 正对照组 (PC 组) 饲喂基础饲料+75 mg/kg 金霉素, 微波加热组 (MH 组) 饲喂用微波加热的玉米和豆粕完全等量取代基础饲料中玉米和豆粕的饲料。预试期 3 d, 正试期 35 d。结果表明: 在试验前期 (第 1~14 天), 与 NC 组和 PC 组相比, MH 组断奶仔猪腹泻率趋于降低 ($P=0.07$), 粗蛋白质 (CP) 和粗脂肪的表观消化率显著提高 ($P<0.05$), 血清总胆红素 (T-BIL) 含量显著降低 ($P<0.05$), 血清总抗氧化能力 (T-AOC) 显著提高 ($P<0.05$); 与 NC 组相比, PC 组和 MH 组断奶仔猪血清超氧化物歧化酶活性显著提高 ($P<0.05$); 与 PC 组相比, MH 组断奶仔猪酸性洗涤纤维 (ADF) 的表观消化率显著提高 ($P<0.05$)。在试验后期 (第 15~35 天), 与 NC 组和 PC 组相比, MH 组断奶仔猪 CP 和 ADF 的表观消化率显著提高 ($P<0.05$), 血清尿素氮含量显著降低 ($P<0.05$); 与 NC 组相比, PC 组和 MH 组断奶仔猪血清 T-BIL 含量显著降低 ($P<0.05$); 与 PC 组相比, MH 组断奶仔猪血清 T-AOC 显著提高 ($P<0.05$), 血清内毒素含量趋于降低 ($P=0.09$), 血清中免疫球蛋白 A ($P=0.06$) 和免疫球蛋白 G ($P=0.09$) 含量趋于增加。综上所述, 微波加热饲料原料可以通过提高营养物质的表观消化率以及增强血清抗氧化能力和免疫功能来改善断奶仔猪生长性能和肠道健康。

关键词: 微波加热; 生长性能; 营养物质表观消化率; 抗氧化能力; 免疫功能; 断奶仔猪

中图分类号: S816

文献标识码: A

文章编号: 1006-267X(2020)10-4852-10

在现代化规模的养殖场中, 采用早期隔离断奶技术^[1] 来提高母猪生产性能 and 经济效益的同时, 也使断奶仔猪产生断奶应激综合征^[2], 严重时导致仔猪死亡。自 20 世纪以来, 广泛使用抗生素来缓解仔猪的断奶应激^[3], 然而高剂量的抗生素导致耐药性增强^[4] 以及在畜产品和环境中残留量过高等问题; 因此, 药物饲料添加剂将在 2020 年全部退出中国畜牧行业, 这加速了饲料领域减抗、

禁抗的步伐^[5]。

微波具有热效应和非热效应, 可以利用微波这一特点来加热饲料原料, 用于微波加热的频率一般为 2 450 MHz^[6]。对饲料原料进行微波加热具有众多优点: 一方面, 微波加热可以改变饲料原料中某些营养物质的化学结构; 破坏纤维素的结构, 促进木质纤维素的分解, 降低半纤维素的含量^[7]; 可以发生糊化反应, 提高淀粉的糊化度^[8],

收稿日期: 2020-04-14

基金项目: 校企合作项目“固态发酵工艺技术攻关和微生物发酵饲料安全验证”(2019B020218001)

作者简介: 乔鹏飞 (1995—), 男, 山东海阳人, 硕士研究生, 研究方向为动物营养与饲料科学。E-mail: 2949078448@qq.com

* 通信作者: 陆文清, 副研究员, 硕士生导师, E-mail: luwq196825@126.com

同时,在冷却的过程中,饲料原料中相邻的直链淀粉之间可因新氢键的形成而生成一定数量的抗性淀粉^[9];还可以使饲料原料中蛋白质的螺旋状结构发生变性作用,结构更加松弛,肽链更具韧性,促进蛋白质的消化吸收^[10]。有研究表明,微波处理会增加稻谷中直链淀粉的含量,降低粗蛋白质(CP)和粗脂肪(EE)的含量^[11],形成可溶性蛋白^[12],提高蛋白质的消化率^[13]以及肠道和瘤胃对淀粉的利用程度^[14],同时,可有效维持不饱和脂肪酸的稳定性^[15]。另一方面,微波加热可以消灭附着在饲料原料表面的有害微生物^[16]。因此,微波加热使饲料原料更易被畜禽消化吸收,能减少对断奶仔猪胃肠道的应激作用,从而减少抗生素的使用^[17]。从艳霞等^[18]研究表明,微波预处理能促进菜籽中硫葡萄糖甙的热降解。Zeng 等^[19]研究表明,对饲料原料进行微波加热后,在冷却的过程中会形成抗性淀粉。Stein 等^[20]研究表明,膨化豌豆有助于改善育肥猪的生长性能。因此,本试验旨在通过微波加饲料原料对断奶仔猪生长性能、营养物质消化率以及血清生化指标的影响来探究其替代抗生素的效果,并依据中华人民共和国农业农村部第 2513 号公告中允许的金霉素预混剂添加量设计了试验的正对照组(positive control group, PC 组),以期为饲料原料预处理技术在断奶仔猪饲料中的推广应用提供理论依据。

1 材料与amp;方法

1.1 试验材料

微波加热的饲料原料由广西某生物科技有限公司提供。微波加热是分批进行的,每批 100 kg 左右,功率为 100 kW,加热时间是 25~30 min,加热温度为 80 ℃ 左右,加热设备由公司自行定制。

1.2 试验动物与饲养管理

选择 108 头体况相近的 28 日龄健康“杜×长×大”三元杂交仔猪[初始体重(8.12±0.58) kg],随机分为 3 组,每组 6 个重复,每个重复 6 头猪,公母各占 1/2,各重复间初始体重差异不显著($P > 0.05$)。负对照组(negative control group, NC 组)饲喂玉米-豆粕型基础饲料,PC 饲喂添加 75 mg/kg 金霉素的基础饲料,微波加热组(microwave-heated group, MH 组)饲喂用微波加热的玉米和豆粕完全等量取代基础饲料中玉米豆粕的饲料。饲料的营养需要量符合 NRC(2012)^[21]的要

求,基础饲料组成及营养水平见表 1。断奶仔猪自由采食饮水,预试期 3 d,正试期 35 d,分为前期(第 1~14 天)和后期(第 15~35 天)2 个阶段。试验开始前对猪舍进行全面清扫、消毒,按照常规的管理和免疫程序进行饲养管理。动物试验在中国农业大学农业农村部饲料工业中心动物试验基地进行,舍内温度由恒温控制仪自动调节。

1.3 样品采集和指标测定

1.3.1 生长性能测定

在正式试验开始后的第 14 和 35 天准确称量每一头仔猪的重量和每一栏剩余饲料的重量,用于计算平均日增重(ADG)、平均日采食量(ADFI)和料重比(F/G)。

表 1 基础饲料组成及营养水平(饲喂基础)

Table 1 Composition and nutrient levels of basal diets (as-fed basis) %

项目 Items	%	
	前期 Early period	后期 Later period
原料 Ingredients		
玉米 Corn	58.07	60.54
豆粕 Soybean meal	12.00	18.00
大豆浓缩蛋白 Soy protein concentrate	4.00	2.00
膨化全脂大豆 Extruded full-fat soybean	12.00	8.00
鱼粉 Fish meal	4.00	2.00
乳清粉 Dried whey	4.00	4.00
豆油 Soybean oil	2.37	2.07
磷酸氢钙 CaHPO ₄	0.95	0.80
石粉 Limestone	0.88	0.90
食盐 NaCl	0.30	0.30
L-赖氨酸盐酸盐 L-Lys·HCl	0.43	0.40
DL-蛋氨酸 DL-Met	0.08	0.09
苏氨酸 Thr	0.14	0.13
色氨酸 Try	0.03	0.02
三氧化二铬 Cr ₂ O ₃	0.25	0.25
预混料 Premix ¹⁾	0.50	0.50
合计 Total	100.00	100.00
营养水平 Nutrient levels ²⁾		
消化能 DE/(MJ/kg)	14.82	14.60
粗蛋白质 CP	20.11	19.00
钙 Ca	0.80	0.70
有效磷 AP	0.40	0.33

续表 1

项目 Items	前期 Early period	后期 Later period
可消化赖氨酸 DLys	1.35	1.23
可消化蛋氨酸 DMet	0.39	0.36
可消化苏氨酸 DThr	0.79	0.73
可消化色氨酸 DTry	0.22	0.20

1) 预混料为每千克饲料提供 The premix provided the following per kg of diets: VA 12 000 IU, VD₃ 2 500 IU, VE 30 IU, VK₃ 3 mg, VB₁₂ 12 μg, 核黄素 riboflavin 4 mg, D-泛酸 D-pantothenic acid 15 mg, 烟酸 nicotinic acid 40 mg, 氯化胆碱 choline chloride 400 mg, 叶酸 folic acid 0.7 mg, VB₁ 1.5 mg, VB₆ 3 mg, Mn (as manganese sulfate) 30 mg, Fe (as ferrous sulfate) 90 mg, Zn (as zinc sulfate) 80 mg, Cu (as copper sulfate) 10 mg, I (as potassium iodide) 0.35 mg, Se (as sodium selenite) 0.3 mg。

2) 粗蛋白质和钙为实测值,其余为计算值。CP and Ca were measured values, while the others were calculated values.

1.3.2 腹泻率测定

在试验的前 14 d,每天 2 次观察并记录仔猪的腹泻状况,仔猪是否腹泻主要观察仔猪的尾部状态与塑料漏缝地板上的粪便痕迹为准。计算公式如下:

$$\text{腹泻率}(\%) = 100 \times \frac{\sum (\text{腹泻仔猪数} \times \text{腹泻天数})}{\text{圈总猪数} \times \text{总天数}}。$$

1.3.3 粪便的采集、处理及测定

在试验第 12~14 天和第 33~35 天进行粪样采集,每天从每个重复中收集粪样 150 g, -20 ℃ 保存;将 3 d 的粪样充分混合均匀,一部分用于挥发性脂肪酸 (volatile fatty acid, VFA) 含量的测定,剩下的放入 65 ℃ 的烘箱中处理 72 h,回潮,样品粉碎过 40 目筛保存待测。

1.3.3.1 营养物质表观消化率的测定

饲料和粪便样品中的干物质 (DM)、有机物 (OM)、CP、EE、中性洗涤纤维 (NDF) 和酸性洗涤纤维 (ADF) 含量的测定分别按照 GB/T 6435—2014、GB/T 6438—2007、GB/T 6438—2007、GB/T 6432—1994、GB/T 6433—2006、GB/T 20806—2006 和 NY/T 1459—2007 的方法进行测定,饲料与粪样中铬 (Cr) 含量则利用原子吸收光谱仪 (Hitachi Z-5000, Tokyo, 日本) 进行测定。营养物质表观消化率的计算公式如下:

$$\text{某营养物质表观消化率}(\%) = 1 - 100 \times (\text{饲料}$$

$$\text{Cr 含量} / \text{粪样 Cr 含量}) \times (\text{粪样该营养物质含量} / \text{饲料该营养物质含量})。$$

1.3.3.2 粪便中 VFA 含量的测定

粪便在 4 ℃ 下自然解冻后称取 0.5 g 于 10 mL 离心管内,用超纯水稀释至 8 mL,超声振荡 30 min,在 4 000 r/min 的条件下离心 10 min,取上清液 160 μL 用超纯水稀释至 8 mL。将稀释液用 2 mm 过滤器过滤后利用离子色谱分析仪 (Ionpac AS11, 美国) 进行 VFA 含量测定。

1.3.4 血样的采集、处理与测定

分别在正试期第 14 天和第 35 天晨饲前,每个重复选择 1 头猪使用前腔静脉采血 5 mL 于采血管中,静置 2 h,在 3 000 r/min 条件下离心 10 min,将血清放在 2 mL 离心管中放在 -20 ℃ 中保存,用于血清常规生化、抗氧化和免疫指标的测定。

血清谷草转氨酶 (aspartate aminotransferase, AST)、谷丙转氨酶 (alanine aminotransferase, ALT) 活性,白蛋白 (albumin, ALB)、总蛋白 (total protein, TP)、尿素氮 (urea nitrogen, UN)、肌酐 (creatinine, CREA)、总胆红素 (total bilirubin, T-BIL) 含量,超氧化物歧化酶 (superoxide dismutase, SOD)、谷胱甘肽过氧化物酶 (glutathione peroxidase, GSH-Px) 活性、总抗氧化能力 (total antioxidative capacity, T-AOC) 和丙二醛 (malondialdehyde, MDA) 含量等指标采用全自动生化分析仪 (山东高密彩虹 GF-D200 型) 和分光光度计 (山东高密彩虹 722) 进行测定。

血清免疫球蛋白 A (immunoglobulin A, IgA)、免疫球蛋白 M (immunoglobulin M, IgM)、免疫球蛋白 G (immunoglobulin G, IgG)、内毒素 (endotoxin, ET)、肿瘤坏死因子-α (tumor necrosis factor alpha, TNF-α)、白细胞介素-6 (interleukin-6, IL-6)、白细胞介素-10 (interleukin-10, IL-10) 含量和二胺氧化酶 (diamine oxidase, DAO) 活性采用相应的购自南京建成生物工程研究所的试剂盒进行测定。

1.4 数据分析

所有原始数据通过 Excel 2010 整理后,使用 SAS 9.2 统计软件对相关指标进行单因子方差分析 (one-way ANOVA) 和 LSD 多重比较,以 $P < 0.05$ 为差异显著,以 $0.05 \leq P < 0.10$ 为有变化趋势,结果用平均值和均值标准误表示。

2 结果

2.1 微波加热饲料原料对断奶仔猪生长性能和腹泻率的影响

由表2可知,在试验前期(第1~14天),与PC

组相比,MH组断奶仔猪的腹泻率趋于降低($P=0.07$);在饲料中使用微波加热处理的饲料原料对断奶仔猪各阶段的ADG、ADFI以及F/G均无显著影响($P>0.05$)。

表2 微波加热饲料原料对断奶仔猪生长性能和腹泻率的影响

Table 2 Effects of microwave-heated feedstuff on growth performance and diarrhea rate of weaned piglets

项目 Items	负对照组 NC group	正对照组 PC group	微波加热组 MH group	均值标准误 SEM	P值 P-value
第1~14天 Day 1 to 14					
平均日增重 ADG/g	264.51	301.40	307.56	15.96	0.17
平均日采食量 ADFI/g	365.54	424.68	361.93	29.92	0.29
料重比 F/G	1.40	1.39	1.19	0.07	0.14
腹泻率 Diarrhea rate/%	1.23	2.31	0.62	0.46	0.07
第15~35天 Day 15 to 35					
平均日增重 ADG/g	579.12	605.48	592.68	15.23	0.55
平均日采食量 ADFI/g	925.57	1 000.70	955.00	28.83	0.23
料重比 F/G	1.60	1.65	1.62	0.03	0.62
第1~35天 Day 1 to 35					
平均日增重 ADG/g	439.72	466.55	457.82	11.15	0.27
平均日采食量 ADFI/g	701.56	770.30	717.77	27.48	0.23
料重比 F/G	1.60	1.64	1.57	0.04	0.24

同行数据肩标不同小写字母表示差异显著($P<0.05$)。下表同。

In the same row, values with different small letter superscripts mean significant difference ($P<0.05$). The same as below.

2.2 微波加热饲料原料对断奶仔猪营养物质表观消化率的影响

由表3可知,在试验前期(第1~14天),与NC组和PC组相比,MH组断奶仔猪CP和EE的表观消化率显著提高($P<0.05$);与PC组相比,MH组断奶仔猪NDF和ADF的表观消化率显著

提高($P<0.05$)。在试验后期(第15~35天),与NC组相比,PC组断奶仔猪DM和OM的表观消化率显著提高($P<0.05$);与NC组和PC组相比,MH组断奶仔猪CP和ADF的表观消化率显著提高($P<0.05$);与NC组相比,MH组和PC组断奶仔猪EE的表观消化率趋于提高($P=0.09$)。

表3 微波加热饲料原料对断奶仔猪营养物质表观消化率的影响

Table 3 Effects of microwave-heated feedstuff on nutrient apparent digestibility of weaned piglets

项目 Items	负对照组 NC group	正对照组 PC group	微波加热组 MH group	均值标准误 SEM	P值 P-value
第1~14天 Day 1 to 14					
干物质 DM	81.14	80.35	79.30	0.59	0.21
粗蛋白质 CP	64.91 ^b	60.01 ^b	71.33 ^a	1.94	<0.01
中性洗涤纤维 NDF	52.38 ^{ab}	44.32 ^b	60.33 ^a	2.96	0.01
酸性洗涤纤维 ADF	51.44 ^a	35.21 ^b	52.82 ^a	3.54	<0.01
有机物 OM	83.07	82.37	81.06	0.59	0.10
粗脂肪 EE	37.67 ^b	35.88 ^b	68.35 ^a	2.33	<0.01
第15~35天 Day 15 to 35					
干物质 DM	84.53 ^b	86.61 ^a	83.49 ^b	0.38	<0.01

续表 3

项目 Items	负对照组 NC group	正对照组 PC group	微波加热组 MH group	均值标准误 SEM	<i>P</i> 值 <i>P</i> -value
粗蛋白质 CP	77.47 ^b	77.08 ^b	82.11 ^a	0.85	<0.01
中性洗涤纤维 NDF	61.92	65.62	70.56	0.60	0.11
酸性洗涤纤维 ADF	58.97 ^b	56.42 ^b	70.20 ^a	1.83	<0.01
有机物 OM	86.40 ^b	88.36 ^a	85.15 ^c	0.39	<0.01
粗脂肪 EE	49.53	51.07	51.28	1.51	0.09

2.3 微波加热饲料原料对断奶仔猪血清常规生化指标的影响

由表 4 可知,在试验前期(第 1~14 天),与 NC 组和 PC 组相比,MH 组断奶仔猪血清中 T-BIL 的含量显著降低($P<0.05$)。在试验后期(第 15~35 天),与 NC 组和 PC 组相比,MH 组断奶仔猪血清中 UN 的含量显著降低($P<0.05$);与 NC 组相

比,MH 组和 PC 组断奶仔猪血清中 T-BIL 的含量显著降低($P<0.05$);与 PC 组相比,MH 组断奶仔猪血清中 ET 的含量趋于降低($P=0.09$)。微波加热饲料原料对断奶仔猪血清中 ALT、AST、DAO 的活性和 TP、ALB、CREA 的含量无显著影响($P>0.05$)。

表 4 微波加热饲料原料对断奶仔猪血清常规生化指标的影响

Table 4 Effects of microwave-heated feedstuff on serum conventional biochemical indices of weaned piglets

项目 Items	负对照组 NC group	正对照组 PC group	微波加热组 MH group	均值标准误 SEM	<i>P</i> 值 <i>P</i> -value
第 1~14 天 Day 1 to 14					
谷丙转氨酶 ALT/(U/L)	40.17	38.83	41.00	3.39	0.90
谷草转氨酶 AST/(U/L)	54.00	68.00	53.83	6.31	0.24
尿素氮 UN/(mmol/L)	3.06	3.37	3.01	0.19	0.37
总蛋白 TP/(g/L)	44.83	45.17	45.00	1.47	0.99
白蛋白 ALB/(g/L)	28.33	27.67	26.50	1.09	0.51
肌酐 CREA/(μ mol/L)	51.50	52.83	60.17	3.32	0.84
总胆红素 T-BIL/(μ mol/L)	1.58 ^a	1.12 ^a	0.45 ^b	0.18	<0.01
内毒素 ET/(EU/mL)	8.72	10.58	7.63	1.18	0.25
二胺氧化酶 DAO/(U/mL)	4.80	5.93	4.01	0.82	0.30
第 15~35 天 Day 15 to 35					
谷丙转氨酶 ALT/(U/L)	42.17	38.00	40.50	2.91	0.61
谷草转氨酶 AST/(U/L)	35.67	47.67	38.83	4.40	0.19
尿素氮 UN/(mmol/L)	3.44 ^a	4.48 ^a	2.41 ^b	0.41	0.02
总蛋白 TP/(g/L)	52.83	54.00	51.67	1.47	0.55
白蛋白 ALB/(g/L)	32.00	34.00	31.17	1.35	0.35
肌酐 CREA/(μ mol/L)	57.67	56.67	56.17	2.11	0.88
总胆红素 T-BIL/(μ mol/L)	1.53 ^a	0.85 ^b	0.93 ^b	0.16	0.03
内毒素 ET/(EU/mL)	8.78	10.54	8.10	0.72	0.09
二胺氧化酶 DAO/(U/mL)	4.51	4.68	4.12	0.43	0.65

2.4 微波加热饲料原料对断奶仔猪血清抗氧化和免疫指标的影响

由表 5 可知,在试验前期(第 1~14 天),与

NC 组相比,PC 组和 MH 组断奶仔猪血清中 SOD 的活性显著提高($P<0.05$);与 NC 组和 PC 组相比,MH 组断奶仔猪血清中 T-AOC 显著提高($P<$

0.05)。在试验后期(第 15~35 天),与 PC 组相比, MH 组断奶仔猪血清中 T-AOC 显著提高($P < 0.05$),血清中 IgA ($P = 0.06$) 和 IgG ($P = 0.09$) 的

含量有增加的趋势。微波加热饲料原料对断奶仔猪血清中其他抗氧化和免疫指标无显著影响($P > 0.05$)。

表 5 微波加热饲料原料对断奶仔猪血清抗氧化和免疫指标的影响

Table 5 Effects of microwave-heated feedstuff on serum antioxidant and immune indices of weaned piglets

项目 Items	负对照组 NC group	正对照组 PC group	微波加热组 MH group	均值标准误 SEM	P 值 P-value
第 1~14 天 Day 1 to 14					
超氧化物歧化酶 SOD/(U/mL)	51.66 ^b	53.93 ^a	53.79 ^a	0.46	<0.01
谷胱甘肽过氧化物酶 GSH-Px/($\mu\text{mol/L}$)	23.67	22.72	23.94	0.97	0.66
总抗氧化能力 T-AOC/(U/mL)	12.46 ^b	12.98 ^b	15.27 ^a	0.65	0.03
丙二醛 MDA/(nmol/mL)	1.62	1.63	1.45	0.07	0.15
免疫球蛋白 A IgA/($\mu\text{g/mL}$)	25.73	28.11	27.72	2.62	0.79
免疫球蛋白 G IgG/($\mu\text{g/mL}$)	13.25	14.55	13.67	1.95	0.89
免疫球蛋白 M IgM/(ng/mL)	12.83	11.11	13.41	1.30	0.46
白细胞介素-6 IL-6/(ng/L)	40.88	33.04	43.37	8.02	0.65
白细胞介素-10 IL-10/(ng/L)	21.81	20.22	18.65	3.97	0.86
肿瘤坏死因子- α TNF- α /(ng/L)	125.52	113.81	127.31	9.51	0.57
第 15~35 天 Day 15 to 35					
超氧化物歧化酶 SOD/(U/mL)	53.22	53.58	53.89	0.23	0.17
谷胱甘肽过氧化物酶 GSH-Px/($\mu\text{mol/L}$)	25.57	23.38	26.96	1.50	0.28
总抗氧化能力 T-AOC/(U/mL)	13.75 ^{ab}	12.35 ^b	15.58 ^a	0.80	0.04
丙二醛 MDA/(nmol/mL)	1.47	1.55	1.26	0.12	0.23
免疫球蛋白 A IgA/($\mu\text{g/mL}$)	25.20	24.52	28.67	1.15	0.06
免疫球蛋白 G IgG/($\mu\text{g/mL}$)	10.77	9.92	15.06	1.55	0.09
免疫球蛋白 M IgM/(ng/mL)	11.64	11.28	12.80	0.87	0.46
白细胞介素-6 IL-6/(ng/L)	35.31	31.69	42.29	4.82	0.33
白细胞介素-10 IL-10/(ng/L)	16.37	18.79	18.29	1.78	0.61
肿瘤坏死因子- α TNF- α /(ng/L)	137.23	123.02	137.28	7.56	0.32

2.5 微波加热饲料原料对断奶仔猪粪便中 VFA 含量的影响

由表 6 可知,与 NC 组和 PC 组相比,微波加热饲料原料可以提高前期断奶仔猪粪便中乙酸、丙酸、丁酸和总挥发性脂肪酸的含量,但是差异不显著($P > 0.05$)。

3 讨论

3.1 微波加热饲料原料对断奶仔猪生长性能、营养物质表观消化率和腹泻率的影响

Liu 等^[22] 研究表明,在饲料中添加膨化碎米可以提高仔猪的 ADG 和 ADFI。Amornthewaphat 等^[23] 研究表明,与对照组相比,在饲料中添加 48% 的膨化玉米可以使仔猪的 ADG 增加 5.79%。本试验结果表明,饲料中使用微波

加热的饲料原料使得断奶仔猪在整个保育阶段的 ADG 和 ADFI 略有降低,但是差异不显著,可能是因为微波加热处理后饲料的水分含量减少,DM 含量增加,增加了饱腹感,因此采食量略有降低,进而影响了日增重。牛春艳等^[24] 研究表明,利用微波-酶法可使玉米中抗性淀粉的产率达到 28.4%,因此,本试验中添加微波加热的饲料原料使 DM 的表观消化率降低,是由微波加热生成的抗性淀粉吸收了一部分淀粉导致的。李燕燕^[25] 研究表明,采用酰化、微波及两者结合的方法可以提高大米中蛋白质的体外消化率,本试验中微波加热可提高饲料中 CP、EE、ADF 和 NDF 的表观消化率,与前人的研究结果一致,这是因为微波加热可以破坏纤维素的结构,降低半纤维素的含量^[7];且相比于 PC 组, MH 组断奶仔猪腹泻率有降低趋势,

表明 MH 组仔猪具有较为完整的肠道微生物区系,更有利于 NDF 和 ADF 在盲肠和结肠中降解,从而有利于提高其表观消化率;同时,微波加热使蛋白质结构的某些键断裂发生变性作用,蛋白质结构更加松弛,增加了肽链的柔韧性,易于被蛋白酶接近并降解^[10],从而提高畜禽对饲料中蛋白质

的消化吸收,而断奶仔猪对 EE 表观消化率的提高可能是由于微波加热降低了饲料原料中 EE 的含量^[11]导致的。因此,微波加热可改善断奶仔猪对饲料营养物质的表观消化率,降低其采食量,但不影响生长性能。

表 6 微波加热饲料原料对断奶仔猪粪便中 VFA 含量的影响

项目 Items	负对照组 NC group	正对照组 PC group	微波加热组 MH group	均值标准误 SEM	P 值 P-value
第 1~14 天 Day 1 to 14					
乙酸 Acetic acid	4.16	3.85	4.63	0.34	0.30
丙酸 Propionic acid	2.32	2.14	2.37	0.37	0.90
丁酸 Butyric acid	0.93	0.97	1.18	0.19	0.63
总挥发性脂肪酸 Total VFA	7.42	6.95	8.18	0.70	0.48
第 15~35 天 Day 15 to 35					
乙酸 Acetic acid	4.01	3.84	3.62	0.37	0.75
丙酸 Propionic acid	2.51	2.37	2.55	0.26	0.87
丁酸 Butyric acid	1.54	1.49	1.70	0.27	0.85
总挥发性脂肪酸 Total VFA	8.06	7.70	7.80	0.85	0.95

在断奶早期,仔猪肠道微生物菌落尚未稳定和完美,微生物菌群处于不断变化的过程,易受到外界饲料、环境等因素的干扰而发生腹泻。本试验结果表明,与 NC 组和 PC 组相比,微波加热饲料原料可以降低断奶仔猪的腹泻率。一方面,加热处理后的原料中淀粉^[8]和蛋白质^[10]的结构都发生改变,增加了饲料的可消化性,降低了对肠道菌群的应激,有利于肠道微生物区系形成;另一方面,微波加热可以杀灭饲料中大肠杆菌和霉菌等有害微生物^[26],保证饲料的卫生安全,消灭致病菌的潜在危害,从而降低了断奶仔猪的腹泻率。

3.2 微波加热饲料原料对断奶仔猪血清常规生化、抗氧化和免疫指标的影响

血液生化指标可以反映出畜禽机体对营养物质消化吸收代谢水平、健康状态和生长性能等状况,也能反映出部分组织器官机能的变化^[27]。血清中 ALB 的含量可以反映出体内蛋白质代谢和合成能力的强弱^[28],腹泻时造成的肝脏损伤可能降低血清中 ALB 的含量^[29],而血清中 UN 的含量能够说明蛋白质在动物体内的代谢情况;血清中 TP 的含量可反映肝脏蛋白质代谢及机体蛋白质的沉积状态,与免疫球蛋白含量之间存在相关性^[30]。

ALT 主要存在于肝细胞中,血清中 ALT 和 AST 的活性高低是反映相应器官功能好坏的重要指标;CREA 是动物肌肉分解的主要产物,用于评价肾脏功能的强弱;DAO 是仔猪小肠黏膜上皮细胞内的特异性酶,可间接反映畜禽肠道屏障作用的损伤程度^[31]。本试验结果表明,微波加热饲料原料可以降低断奶仔猪血清中 ET、UN 和 T-BIL 的含量,说明断奶仔猪肠道功能以及肝脏、肾脏等器官功能未造成损伤,可能是因为微波加热改变饲料的化学特性,使抗原蛋白等抗营养因子失活,降低对肠道的损伤,从而保护肠道屏障功能。

动物体内的各种细胞在健康的状况下都会代谢产生自由基,但是自由基过多会对机体产生一定的损害作用^[32],导致疾病的发生。T-AOC 则能够反映机体酶及非酶促系统抗氧化水平的高低,SOD 和 GSH-Px 是畜禽体内主要的酶类抗氧化剂,可以清除体内过量的自由基;MDA 则是脂质过氧化物的最终产物^[33],反映机体的损伤程度。本试验的研究结果表明,微波加热饲料原料可以显著提高前期断奶仔猪血清中 T-AOC 和 SOD 的活性,表明微波加热饲料原料有提高断奶仔猪血清抗氧化能力的效果,其原因可能是微波加热的

饲料原料更容易被断奶仔猪消化吸收,有利于促进仔猪肠道绒毛的发育,减少由于消化不良而对肠道造成的一系列氧化损伤,保持肠道的健康,从而提高机体的抗氧化能力和健康水平。

免疫球蛋白在幼龄动物机体免疫系统发生免疫作用具有重要的意义^[34],反映机体免疫能力强弱的重要指标,一般由 IgM、IgG 和 IgA 3 类球蛋白组成。IgM 是机体防御初期产生的免疫球蛋白;IgA 是非特异性免疫的重要组成部分,是机体的第 1 道防线^[35];IgG 占血清中免疫球蛋白的 75%^[36],能够抵御和清除抗原。TNF- α 是由巨噬细胞和淋巴细胞等分泌的一种细胞因子,具有调节免疫应答、减少感染、修复组织、凋亡肿瘤细胞等功能^[37]。关于微波加热饲料原料对畜禽的免疫功能的影响没有报道,本试验结果表明,MH 组第 35 天时断奶仔猪血清中 IgA 和 IgG 的含量有增加的趋势,说明微波加热饲料原料能够增强机体的免疫机能,较少疾病的发生。

3.3 微波加热饲料原料对断奶仔猪粪便中 VFA 含量的影响

仔猪的后肠道内大量的微生物形成了一个动态的微生物生态系统,能够发酵肠道中的膳食纤维形成多种 VFA^[38](如乙酸、丙酸和丁酸),而 VFA 对肠道健康具有保护作用,能为结肠细胞提供所需能量的 9%^[39],促进上皮细胞的增殖^[40-41],降低肠道的 pH,抑制病原菌的定植。断奶仔猪粪便中 VFA 的含量可以间接反映肠道的健康程度。Zeng 等^[42]研究表明,给小鼠饲喂天然莲子抗性淀粉可以改变肠道微生物的菌群结构,增加粪便中 VFA 的含量。本试验结果表明,MH 组断奶仔猪在第 35 天时粪便中 VFA 含量略有增加,差异不显著,可能是因为:一方面,微波加热饲料原料有利于肠道微生物的生长代谢,保障了畜禽肠道微生物结构的平衡,有利于后肠道中碳水化合物的发酵;另一方面,微波加热使玉米中一部分淀粉转化为抗性淀粉,为微生物发酵提供充足的底物,与高卫帅^[43]的研究结果一致,玉米淀粉通过微波加热的方法可以制备抗性淀粉。

4 结 论

微波加热饲料原料可以提高断奶仔猪对饲料营养物质表观消化率,趋于降低断奶仔猪的腹泻率,增强血清抗氧化能力和免疫功能,降低断奶

应激对肠道健康的损伤,对于改善断奶仔猪的生长性能具有一定的效果。

参考文献:

- [1] WIJTTEN P J A, VAN DER MEULEN J, VERSTEGEN M W A. Intestinal barrier function and absorption in pigs after weaning: a review [J]. *British Journal of Nutrition*, 2011, 105(7): 967-981.
- [2] STARKE I C, PIEPER R, NEUMANN K, et al. The impact of high dietary zinc oxide on the development of the intestinal microbiota in weaned piglets [J]. *FEMS Microbiology Ecology*, 2014, 87(2): 416-427.
- [3] PAN L, ZHAO P F, MA X K, et al. Probiotic supplementation protects weaned pigs against enterotoxigenic *Escherichia coli* K88 challenge and improves performance similar to antibiotics [J]. *Journal of Animal Science*, 2017, 95(6): 2627-2639.
- [4] 陈红兵. 抗生素对肠道细菌变迁影响的研究进展 [J]. *中国临床新医学*, 2017, 10(12): 1231-1234.
- [5] 乔鹏飞, 杨宁, 曹恒, 等. 饲料预消化技术的研究进展 [J]. *饲料工业*, 2019, 40(14): 45-51.
- [6] 吴春会, 杨富裕, 高凤芹, 等. 微波预处理对木质纤维素产沼气效能研究进展 [J]. *草业与畜牧*, 2015(2): 1-4.
- [7] 牟群英, 李贤军. 微波加热技术的应用与研究进展 [J]. *物理*, 2004, 33(6): 438-442.
- [8] 傅晓丽. 饲料中淀粉原料的微波加热糊化及添加物对其影响研究 [D]. 北京: 中国农业大学, 2012.
- [9] 原沙沙. 微波对马铃薯淀粉特性影响的研究 [D]. 硕士学位论文. 郑州: 河南工业大学, 2012.
- [10] YOSHIDA H, TAKAGI S, HIRAKAWA H. Molecular species of triacylglycerols in the seed coats of soybeans (*Glycine max* L.) following microwave treatment [J]. *Food Chemistry*, 2000, 70(1): 63-69.
- [11] 万忠民, 王胜录, 马倩婷. 稻谷微波处理工艺条件的优化 [J]. *中国粮油学报*, 2020, 35(2): 116-122.
- [12] 黄运红, 高兴强, 李良华, 等. 微波法提取脐橙皮黄酮工艺研究 [J]. *安徽农业科学*, 2010, 38(4): 2047-2049.
- [13] BAX M L, AUBRY L, FERREIRA C, et al. Cooking temperature is a key determinant of *in vitro* meat protein digestion rate: investigation of underlying mechanisms [J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2012, 60(10): 2569-2576.
- [14] 麻宝恩. 谷物饲料热处理加工技术要点 [J]. *饲料博览*, 2018(1): 72.
- [15] 商红萍. 微波处理对食品营养成分的影响分析研究

- [J].现代食品,2020,1(1):118-119,122.
- [16] YAGHMAEE P, DURANCE T D. Destruction and injury of *Escherichia coli* during microwave heating under vacuum [J]. *Journal of Applied Microbiology*, 2005, 98(2):498-506.
- [17] 赵茹茜.仔猪消化道生理与预消化营养[J].饲料与畜牧,2019(1):59-64.
- [18] 从艳霞,郑明明,郑畅,等.微波技术对油菜籽品质影响研究进展[J].中国油料作物学报,2019,41(1):151-156.
- [19] ZENG S X, WU X T, LIN S, et al. Structural characteristics and physicochemical properties of lotus seed resistant starch prepared by different methods [J]. *Food Chemistry*, 2015, 186:213-222.
- [20] STEIN H H, PETERS D N, KIM B G. Effects of including raw or extruded field peas (*Pisum sativum* L.) in diets fed to weanling pigs [J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2010, 90(9):1429-1436.
- [21] NRC. Nutrient requirements of poultry [S]. 9th ed. Washington, D.C.: National Academy Press, 1994.
- [22] LIU H, WAN H F, XU S Y, et al. Influence of extrusion of corn and broken rice on energy content and growth performance of weaning pigs [J]. *Animal Science Journal*, 2016, 87(11):1386-1395.
- [23] AMORNTHEWAPHAT N, ATTAMANGKUNE S. Extrusion and animal performance effects of extruded maize quality on digestibility and growth performance in rats and nursery pigs [J]. *Animal Feed Science and Technology*, 2008, 144(3/4):292-305.
- [24] 牛春艳,唐远发.微波-酶法制备玉米抗性淀粉工艺优化[J].食品与机械,2016,32(6):198-200.
- [25] 李燕燕.改性提高大米蛋白体外消化率的研究[D].硕士学位论文.无锡:江南大学,2015.
- [26] 杨红军,时建忠,顾宪红,等.微波在SPF实验动物饲料灭菌中的应用[J].中国饲料,2007(4):14-16,18.
- [27] NKRUMAH J D, SHERMAN E L, LI C, et al. Primary genome scan to identify putative quantitative trait loci for feedlot growth rate, feed intake, and feed efficiency of beef cattle [J]. *Journal of Animal Science*, 2007, 85(12):3170-3181.
- [28] 张宏福,吴维达,张莉,等.日粮纤维调节猪肠道微生物和肠黏膜屏障功能的研究进展[J].饲料工业,2019,40(1):2-12.
- [29] KLINKON M, JEŽEK J. Values of blood variables in calves [M]//PEREZ-MARIN C C. A bird's-eye view of veterinary medicine. Slovenia: University of Ljubljana, 2012:301-320.
- [30] TYLER J W, PARISH S M, BESSER T E, et al. Detection of low serum immunoglobulin concentrations in clinically ill calves [J]. *Journal of Veterinary Internal Medicine*, 1999, 13(1):40-43.
- [31] YANG C M, FERKET P R, HONG Q H, et al. Effect of chito-oligosaccharide on growth performance, intestinal barrier function, intestinal morphology and cecal microflora in weaned pigs [J]. *Journal of Animal Science*, 2012, 90(8):2671-2676.
- [32] 武书庚.肉仔鸡氧化应激模型的研究[D].博士学位论文.北京:中国农业科学院,2007.
- [33] 伏润奇,陈代文,郑萍,等.酵母水解物对断奶仔猪生长性能、血清免疫和抗氧化能力及粪便菌群的影响[J].动物营养学报,2019,31(1):351-359.
- [34] 杨汉春.动物免疫学[M].北京:中国农业大学出版社,1996.
- [35] TURNER J L, DRITZ S S, HIGGINS J J, et al. Effects of *Ascophyllum nodosum* extract on growth performance and immune function of young pigs challenged with *Salmonella typhimurium* [J]. *Journal of Animal Science*, 2002, 80(7):1947-1953.
- [36] XAVIER R J, PODOLSKY D K. Unravelling the pathogenesis of inflammatory bowel disease [J]. *Nature*, 2007, 448(7152):427-434.
- [37] LEE P A, HILL R. Voluntary food intake of growing pigs given diets containing rapeseed meal, from different types and varieties of rape, as the only protein supplement [J]. *British Journal of Nutrition*, 1983, 50(3):661-671.
- [38] 郭元晟,靳鹏.发酵乳酸杆菌对肉鸡血清抗氧化性能及肠道挥发性脂肪酸(VFA)的影响[J].畜牧与饲料科学,2016,37(2):10-13.
- [39] READ W N. Physiological and clinical aspects of short chain fatty acids [J]. *Gut*, 1996, 38(1):156-157.
- [40] ROEDIGER E W. Role of anaerobic bacteria in the metabolic welfare of the colonic mucosa in man [J]. *Gut*, 1980, 21(9):793-798.
- [41] DEFAZIO A, CHIEW Y E, DONOGHUE C, et al. Effect of sodium butyrate on estrogen receptor and epidermal growth factor receptor gene expression in human breast cancer cell lines [J]. *The Journal of Biological Chemistry*, 1992, 267(25):18008-18012.
- [42] ZENG H L, HUANG C C, LIN S, et al. Lotus seed resistant starch regulates gut microbiota and increases short-chain fatty acids production and mineral absorp-

tion in mice [J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2017, 65(42):9217-9225.

[43] 高卫帅. 交联回生复合抗性淀粉的微波法制备及应用[D]. 硕士学位论文. 无锡: 江南大学, 2008.

Effects of Microwave-Heated Feedstuff on Growth Performance, Nutrient Apparent Digestibility and Serum Biochemical Indices of Weaned Piglets

QIAO Pengfei¹ CAO Heng¹ CHEN Zhonghong² LU Wenqing^{1*}

(1. State Key Laboratory of Animal Nutrition, College of Animal Science and Technology, China Agricultural University, Beijing 100193, China; 2. Guangxi Qichang Biotechnology Co., Ltd., Guilin 537000, China)

Abstract: This experiment was conducted to investigate the effects of microwave-heated feedstuff on growth performance, nutrient apparent digestibility, and serum biochemical indices of weaned piglets. One hundred and eight 28-day-old weaned piglets (Duroc×Landrace×Yorkshire) with an initial body weight of (8.12±0.58) kg were randomly allocated to 3 groups in a randomized complete block design. Each group contained 6 replicates and each replicate contained 6 piglets (3 males and 3 females). Piglets in the negative control group (NC group) were fed a corn-soybean meal basal diet, and those in the positive control group (PC group) were fed the basal diet+75 mg/kg aureomycin. In the microwave-heated group (MH group), microwave-heated corn and soybean meal were used to completely replace the same amount of corn and soybean meal in the basal diet. The pre-experimental period lasted for 3 days, and the experimental period lasted for 35 days. The results showed that, in the early period (day 1 to 14), compared with the NC group and PC group, the diarrhea rate of piglets in the MH group tended to be reduced ($P=0.07$), the apparent digestibility of crude protein (CP) and ether extract was significantly increased ($P<0.05$), the serum total bilirubin (T-BIL) content was significantly decreased ($P<0.05$), and the serum total antioxidant capacity (T-AOC) was significantly increased ($P<0.05$); compared with the NC group, the serum superoxide dismutase activity of piglets in the PC group and MH group was significantly increased ($P<0.05$); compared with the PC group, the acid detergent fiber (ADF) apparent digestibility of piglets in the MH group was significantly increased ($P<0.05$). In the later period (day 15 to 35), compared with the NC group and PC group, the apparent digestibility of CP and ADF of piglets in the MH group was significantly increased ($P<0.05$), the serum urea nitrogen content was significantly decreased ($P<0.05$); compared with the NC group, the serum T-BIL content of piglets in the PC group and MH group was significantly decreased ($P<0.05$); compared with the PC group, the serum T-AOC of piglets in the MH group was significantly increased ($P<0.05$), the serum endotoxin content tended to be decreased ($P=0.09$), and the serum contents of immunoglobulin A ($P=0.06$) and immunoglobulin G ($P=0.09$) tended to be increased. In conclusion, microwave-heated feedstuff can improve the growth performance and intestinal health of weaned piglets by improving the nutrient apparent digestibility and enhancing the antioxidant capacity and immune function in serum. [*Chinese Journal of Animal Nutrition*, 2020, 32(10):4852-4861]

Key words: microwave-heated; growth performance; nutrient apparent digestibility; antioxidant capacity; immune function; weaned piglets