



不同消化速度的淀粉影响肉鸡对饲料能量和蛋白质利用率的研究

田 凯,叶晓梦,任 聪,王钰明,解竞静,赵 峰*

(中国农业科学院北京畜牧兽医研究所 畜禽营养与饲养全国重点实验室,北京 100193)

摘 要: 本研究旨在探究不同消化速度的淀粉对肉鸡饲料能量和蛋白质利用率的影响。采用单因素完全随机试验设计,选用4种不同消化速度的淀粉,即木薯淀粉(消化速度常数 $k_d=4.29\text{ h}^{-1}$)、小麦淀粉($k_d=2.51\text{ h}^{-1}$)、玉米淀粉($k_d=2.55\text{ h}^{-1}$)和豌豆淀粉($k_d=1.03\text{ h}^{-1}$);2种蛋白质饲料即豆粕和玉米蛋白粉,配制8个饲料。在考察不同消化速度的淀粉对肉鸡饲料氮沉积和代谢能的影响中,选取22日龄、体重接近($BW=1\,050\pm6\text{ g}$)的 Arbor Acres plus 肉鸡192只,随机分配至8个饲料处理,每个处理6个重复,每个重复4只鸡,测定25~28日龄肉鸡对饲料的能量代谢率及氮沉积率。在考察不同消化速度的淀粉对肉鸡淀粉表观回肠消化率和标准回肠氨基酸消化率(SIDAA)的影响中,选取25日龄、体重接近($BW=1\,270\pm10\text{ g}$)的 Arbor Acres plus 肉鸡432只,随机分配至8个试验饲料和1个无氮饲料处理,每个处理6个重复,每个重复8只鸡,测定肉鸡在28日龄对试验饲料的淀粉回肠消化率、SIDAA。结果表明:1)在淀粉-豆粕饲料中,肉鸡对中速消化淀粉(小麦淀粉和玉米淀粉)饲料的淀粉表观回肠消化率显著地高于快、慢速消化淀粉(木薯淀粉和豌豆淀粉)饲料($P<0.05$),快速消化淀粉(木薯淀粉)饲料的淀粉表观回肠消化率显著地高于慢速消化淀粉(豌豆淀粉)饲料($P<0.05$);对快、中速消化淀粉(木薯淀粉、玉米淀粉和小麦淀粉)饲料的能量代谢率高于慢速消化淀粉(豌豆淀粉)饲料($P<0.05$);不同消化速度的淀粉对豆粕SIDAA无统计显著性影响,对玉米淀粉饲料的氮沉积率高于其他3个淀粉饲料($P<0.05$)。2)在淀粉-玉米蛋白粉饲料中,肉鸡对中速消化淀粉(小麦淀粉和玉米淀粉)饲料的淀粉表观回肠消化率显著地高于快、慢速消化淀粉(木薯淀粉和豌豆淀粉)饲料($P<0.05$);对中速消化淀粉(玉米淀粉)的能量代谢率高于快、慢速消化淀粉(木薯淀粉和豌豆淀粉)饲料($P<0.05$);与快速消化淀粉(木薯淀粉)相比,中速消化淀粉(小麦淀粉和玉米淀粉)提高了玉米蛋白粉13种氨基酸和总氨基酸的标准回肠消化率($P<0.05$),但不同消化速度淀粉下饲料的氮沉积率无统计显著差异。3)8个试验饲料的AME与AMEn与可消化淀粉和可代谢蛋白之间存在显著的线性回归关系($P<0.05$);饲料的能量代谢率、总氨基酸消化率随淀粉消化率与总氨基酸消化率比值的增加而下降($P<0.05$)。由此可见,中等消化速度的淀粉(小麦淀粉、玉米淀粉)在肉鸡回肠的淀粉消化率及饲料能量代谢率上均高于慢速消化淀粉(豌豆淀粉);而快速消化淀粉(木薯淀粉)与快速消化蛋白(玉米蛋白粉)配合时,降低了肉鸡回肠的淀粉消化率、饲料能量代谢率及氨基酸消化率。总体上,淀粉消化率与总氨基酸消化率的比值与饲料能量代谢率及氨基酸消化率呈负相关。

关键词: 淀粉;消化速度;蛋白质利用效率;肉鸡

中图分类号: S831

文献标志码: A

文章编号: 0366-6964(2026)01-0282-12

收稿日期: 2024-12-12

基金项目: 国家自然科学基金(32372896);现代农业产业技术体系北京市家禽创新团队(BAIC06-2024-G4);中国农业科学院科技创新工程(ASTIP-IAS-08)

作者简介: 田 凯,硕士生,主要从事饲料养分生物学效价评定研究, E-mail: tk2806092201@163.com

* 通信作者: 赵 峰,主要从事饲料养分生物学效价评定研究, E-mail: zhaofeng@caas.cn

Effects of Starch with Different Digestion Rates on Dietary Energy and Protein Utilization in Broilers

TIAN Kai, YE Xiaomeng, REN Cong, WANG Yuming, XIE Jingjing, ZHAO Feng*

(State Key Laboratory of Animal Nutrition and Feeding, Institute of Animal Science, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100193, China)

Abstract: The objective of this study was to investigate the effects of starch with different digestion rates on dietary energy and protein utilization in broilers. Eight dietary treatments from each of 4 starches with different digestion rates including cassava starch ($k_d=4.29\text{ h}^{-1}$), wheat starch ($k_d=2.51\text{ h}^{-1}$), corn starch ($k_d=2.55\text{ h}^{-1}$), and pea starch ($k_d=1.03\text{ h}^{-1}$) combined with soybean meal or corn gluten meal were arranged in a single-factor completely randomized experiment. In the study on the effects of starch with different digestion rates on nitrogen retention and metabolizable energy of diets, a total of 192 Arbor Acres plus broilers of 22 days of age with similar body weight ($BW=1\,050\pm6\text{ g}$) were selected and randomly assigned to 8 diets. Each treatment contained 6 replicates of 4 broilers in each replicate. The energy metabolizability and nitrogen retention rates were determined for diets fed to broilers aged 25 to 28 days. In the study on the effects of starch with different digestion rates on apparent ileal digestibility of starch and standardized ileal digestibility of amino acid (SIDAA) of diets, a total of 432 Arbor Acres plus broilers of 25 days of age with similar body weight ($BW=1\,270\pm10\text{ g}$) were selected and randomly assigned to 8 diets and a nitrogen-free diet. Each treatment contained 6 replicates of 8 broilers in each replicate. The apparent ileal digestibility of starch and SIDAA were determined for diets fed to broilers at 28 days of age. The results showed as follows: 1) In the starch-soybean meal diets, the apparent ileal digestibility of starch in diets of moderately digestible starch (wheat starch and corn starch) were greater than these in diet of rapidly or slowly digestible starch (cassava starch or pea starch) ($P<0.05$). The apparent ileal digestibility of starch in rapidly digestible starch (cassava starch) diet was greater than that in slowly digestible starch (pea starch) diet ($P<0.05$). The diets of rapidly or moderately digestible starch (cassava starch, corn starch and wheat starch) had greater energy metabolizability than slowly digestible starch (pea starch) diet ($P<0.05$). Starch with different digestion rates didn't significantly affect the SIDAA of soybean meal. The nitrogen retention rate of corn starch diet was higher than other 3 starch diets ($P<0.05$). 2) In the starch-corn gluten meal diets, the apparent ileal digestibility of starch in diets of moderately digestible starch (wheat starch and corn starch) were greater than these in diet of rapidly or slowly digestible starch (cassava starch or pea starch) ($P<0.05$). The moderately digestible starch (corn starch) diet had greater energy metabolizability than diet of rapidly or slowly digestible starch (cassava starch or pea starch) ($P<0.05$). Compared with rapidly digestible starch (cassava starch), moderately digestible starch (wheat starch and corn starch) enhanced the standardized ileal digestibility of 13 amino acids and total amino acids in corn gluten meal ($P<0.05$). However, no statistically significant difference was observed in nitrogen retention rate across diets with different digestion rates of starch. 3) A significant linear regression relationship between apparent metabolizable energy or nitrogen-corrected apparent metabolizable energy and digestible starch and metabolizable protein was observed in the 8 experimental diets ($P<0.05$). The dietary energy metabolizability and total amino acid digestibility decreased as the increase of the ratio of starch digestibility to total amino

acid digestibility ($P < 0.05$). In conclusion, starches with moderate digestion rates (wheat starch, corn starch) have higher ileal digestibility of starch and dietary energy metabolizability compared to slowly digestible starch (pea starch). However, when rapidly digestible starch (cassava starch) is combined with rapidly digestible protein (corn gluten meal), the ileal digestibility of starch, dietary energy metabolizability and amino acid digestibility in broilers is reduced. Generally, the ratio of starch digestibility to total amino acid digestibility is negatively related with the energy metabolizability and amino acid digestibility.

Keywords: starch; digestion rate; protein utilization; broiler

* **Corresponding author:** ZHAO Feng, E-mail: zhaofeng@caas.cn

淀粉在肉鸡饲料中的比例约为30%~40%,是能量供应的主要来源。然而,不同来源的淀粉在动物体内的消化速度存在差异并影响了肉鸡对氮的利用效率,进而影响了生长性能。因此,进一步探讨不同消化速度的淀粉影响肉鸡对饲料能量及蛋白质利用的规律,对提高饲料转化效率和实施低蛋白低豆粕多元化饲料配方具有重要意义。Moss等^[1]发现,由于玉米淀粉的消化速度高于玉米中淀粉的消化速度,导致了肉鸡对氨基酸的消化率及蛋白质的消化速度均下降,影响了生产性能。其原因可能是快速消化淀粉加快了葡萄糖的释放,与氨基酸的吸收形成竞争,从而导致了不同消化速度的淀粉影响了蛋白质的利用。Herwig等^[2]通过模型计算得出,当豌豆淀粉与小麦淀粉以25:75的比例组合时,能够提高肉鸡对饲料的转化效率,这可能是淀粉的消化特性影响了肉鸡对饲料养分的代谢及其在体内的分配。Yin等^[3]研究表明,在低蛋白饲料下,淀粉的消化速度影响了肠黏膜中氨基酸的氧化,从而加大了肉鸡对饲料低蛋白水平的敏感性。由此可见,不同消化速度的淀粉主要是通过影响蛋白质的利用而影响肉鸡的生产性能。然而,不同消化速度的淀粉在淀粉的消化率上是否有差异?它们对不同来源蛋白质的氨基酸消化率是否有相同的影响规律,并最终影响了养分的利用率?这些问题的探讨是研究不同消化速度的淀粉影响肉鸡饲料利用率的关键。为此,本试验选用4种不同消化速度的淀粉与肉鸡饲料中常用的2个蛋白质饲料(豆粕、玉米蛋白粉)配制成8个饲料,探讨不同消化速度的淀粉在消化率上的差异及其对饲料能量代谢率和氨基酸消化率影响的规律,为肉鸡饲料中碳氮适配的应用提供参考。

1 材料与方法

1.1 试验动物及饲养管理

从孵化场购进800只0日龄雄性Arbor Acres plus商品肉鸡,饲养于三层代谢鸡笼中,1~21日龄饲喂玉米-豆粕型生长饲料,鸡只自由采食和饮水。舍内温湿度、光照等饲养管理参考AA肉鸡饲养管理手册^[4]进行。

1.2 不同消化速度的淀粉及试验饲料

采集4个不同消化速度的食品级淀粉,分别为木薯淀粉(消化速度常数 $k_d=4.29\text{ h}^{-1}$)、小麦淀粉($k_d=2.51\text{ h}^{-1}$)、玉米淀粉($k_d=2.55\text{ h}^{-1}$)和豌豆淀粉($k_d=1.03\text{ h}^{-1}$)^[5-6]。试验饲料的蛋白质来源为常用的豆粕和玉米蛋白粉。按照白羽肉鸡饲养标准的营养需要推荐量^[7]配制8个试验饲料和1个无氮饲料(表1)。饲料原料粉碎过3 mm筛,混合后使用非蒸汽制粒机(机器型号:KL-200,山东省莱州市成达机械有限公司)制成颗粒,直径为3 mm。

1.3 试验设计

在考察不同消化速度的淀粉对肉鸡饲料氮沉积和代谢能的影响中,采用单因素完全随机试验设计,选取22日龄、体重接近($BW=1\ 050\pm6\text{ g}$)的Arbor Acres plus肉鸡192只,随机分为8组,每组6个重复,每个重复4只鸡,饲养于肉鸡笼中,用于测定肉鸡在25~28日龄对试验饲料的表观代谢能(AME)、氮校正表观代谢能(AMEn)及氮沉积率。

在考察不同消化速度的淀粉对肉鸡淀粉表观回肠消化率和标准回肠氨基酸消化率(SIDAA)的影响中,采用单因素完全随机试验设计,选取25日龄、体重接近($BW=1\ 270\pm10\text{ g}$)的Arbor Acres plus肉鸡432只,随机分为9组,每组6个重复,每个重复8只鸡,饲养于肉鸡笼中,用于测定肉鸡在28日龄对试验饲料的淀粉回肠消化率、SIDAA。

1.4 样品采集及处理

1.4.1 肉鸡排泄物的收集 肉鸡在 25~28 日龄,采用全收粪法每天(24 h)分 3 次收集每个重复笼中肉鸡的排泄物。将杂物(如羽毛、皮屑和碎屑)去除后,放于 1 L 锡纸盒中,随后置于 65 ℃的鼓风干燥箱中烘干后室温回潮 24 h,粉碎过 0.42 mm 筛备用。

1.4.2 肉鸡回肠食糜的采集 肉鸡在 28 日龄时,将每个试验单元的肉鸡用二氧化碳(处置浓度 $\geq 45\%$)致死,打开腹腔,将卵黄囊憩室至距离回盲结 2 cm 处的肠段取出,将后 1/2 肠段的食糜用去离子水冲洗至培养皿中,于 -20 ℃冷冻保存。样品经过冷冻干燥(冻干机型号:scientz-50YD,宁波新芝生物科技股份有限公司)后,室温回潮 24 h,粉碎过 0.25 mm 筛备用。

1.5 测定指标与方法

1.5.1 肉鸡对试验饲粮代谢能的测定 按照农业农村部《白羽肉鸡饲粮原料代谢能和净能测定技术规程》进行为期 7 d 的代谢试验,前 3 d 为适应期,后 4 d 为试验期。试验第 3 天 16:00 至第 4 天 9:00

禁饲。第 4 天 9:00 至第 6 天 16:00 饲喂试验饲粮,第 6 天 16:00 至第 7 天 9:00 禁饲。记录第 4 天 9:00 至第 6 天 16:00 肉鸡的采食量,全收粪法收集第 4 天 9:00 至第 7 天 9:00 肉鸡的排泄物,于 65 ℃干燥箱中烘干,室外冷却回潮 24 h 后称重,粉碎过 0.42 mm 筛,同步测定干物质含量。

1.5.2 肉鸡对试验饲粮淀粉表观回肠消化率、SIDAA 的测定 按照农业农村部《白羽肉鸡饲料原料标准回肠氨基酸消化率评定技术规程》进行淀粉表观回肠消化率和 SIDAA 的测定。28 日龄时,将各试验单元的肉鸡用二氧化碳致死,收集回肠食糜,冻干混合后,粉碎备用。

1.5.3 化学分析方法 饲粮及排泄物水分含量的测定参照 GB/T 6435—2014 的方法测定;饲粮及排泄物总能(GE)的含量参照 ISO 9831:1998 的方法,以 PARR-6400 氧弹计测定;饲粮及排泄物 CP 含量的测定参照 GB/T 6432—2018 的方法,以 K-9840 自动凯氏定氮仪测定;饲粮及回肠食糜 TiO_2 含量参照 GB 5009.246—2016 的方法测定;饲粮及

表 1 试验饲粮组成及其养分含量(风干基础)

Table 1 Composition and nutrient contents of the experimental diets (air-dry basis)

%

项目 Item	淀粉-豆粕饲粮 Starch-soybean meal diet				淀粉-玉米蛋白粉饲粮 Starch-corn gluten meal diet				无氮饲粮 Nitrogen-free diet
	木薯 淀粉 Cassava starch	小麦 淀粉 Wheat starch	玉米 淀粉 Corn starch	豌豆 淀粉 Pea starch	木薯 淀粉 Cassava starch	小麦 淀粉 Wheat starch	玉米 淀粉 Corn starch	豌豆 淀粉 Pea starch	
饲粮组成 Dietary composition									
淀粉 Starch	47.45	47.45	47.45	47.45	63.53	63.53	63.53	63.53	59.80
豆粕 Soybean meal	44.70	44.70	44.70	44.70					
玉米蛋白粉 Corn gluten meal					32.20	32.20	32.20	32.20	
豆油 Soybean oil	4.00	4.00	4.00	4.00					
葡萄糖 Glucose									31.50
纤维素 Cellulose									4.20
磷酸氢钙 Dicalcium phosphate	1.78	1.78	1.78	1.78	1.93	1.93	1.93	1.93	1.90
石粉 Limestone	0.77	0.77	0.77	0.77	1.04	1.04	1.04	1.04	1.30
氯化钠 Sodium chloride	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30
二氧化钛 Titanium dioxide	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50
预混料 Premix ¹	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50
合计 Total	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00

(转下页 Carried forward)

(续表1 Continued)

项目 Item	淀粉-豆粕饲料 Starch-soybean meal diet				淀粉-玉米蛋白粉饲料 Starch-corn gluten meal diet				无氮饲料 Nitrogen-free diet
	木薯 淀粉 Cassava starch	小麦 淀粉 Wheat starch	玉米 淀粉 Corn starch	豌豆 淀粉 Pea starch	木薯 淀粉 Cassava starch	小麦 淀粉 Wheat starch	玉米 淀粉 Corn starch	豌豆 淀粉 Pea starch	
营养水平 Nutrient levels ²									
干物质 Dry matter	92.02	92.42	92.02	92.20	91.35	90.75	90.78	90.21	94.34
粗蛋白质 Crude protein	20.31	20.51	20.45	20.50	20.34	20.53	20.48	20.28	0.51
粗脂肪 Ether extract	3.88	3.90	3.89	3.91	0.37	0.39	0.39	0.43	0.03
总淀粉 Total starch	44.15	45.09	45.81	45.49	66.49	64.12	62.60	63.62	—
总能/(MJ·kg ⁻¹) Gross energy	17.16	17.26	17.16	17.17	16.76	16.82	16.82	16.60	15.06
必需氨基酸 Indispensable amino acid									
精氨酸 Arg	1.317	1.313	1.336	1.429	0.565	0.578	0.579	0.572	0.003
组氨酸 His	0.510	0.487	0.494	0.505	0.409	0.419	0.414	0.413	0.003
亮氨酸 Leu	1.494	1.469	1.486	1.564	3.283	3.378	3.304	3.268	0.021
异亮氨酸 Ile	0.848	0.836	0.852	0.906	0.724	0.745	0.735	0.728	0.006
赖氨酸 Lys	1.181	1.169	1.177	1.230	0.287	0.302	0.310	0.307	0.046
蛋氨酸 Met	0.240	0.239	0.243	0.252	0.437	0.449	0.441	0.438	0.004
苯丙氨酸 Phe	0.987	0.956	0.963	1.023	1.213	1.251	1.226	1.211	0.003
苏氨酸 Thr	0.773	0.771	0.779	0.820	0.656	0.671	0.665	0.660	0.007
缬氨酸 Val	0.928	0.892	0.920	0.958	0.854	0.878	0.873	0.858	0.012
非必需氨基酸 Dispensable amino acid									
天冬氨酸 Asp	2.329	2.303	2.334	2.422	1.188	1.220	1.219	1.212	0.022
丝氨酸 Ser	1.008	1.008	1.012	1.064	1.043	1.065	1.054	1.041	0.012
谷氨酸 Glu	3.585	3.575	3.627	3.798	4.548	4.668	4.576	4.546	0.048
甘氨酸 Gly	0.841	0.837	0.849	0.887	0.522	0.537	0.537	0.532	0.008
丙氨酸 Ala	0.839	0.840	0.850	0.886	1.848	1.895	1.860	1.835	0.016
半胱氨酸 Cys	0.294	0.291	0.309	0.306	0.343	0.358	0.341	0.341	0.021
脯氨酸 Pro	0.951	0.961	0.964	1.011	1.808	1.876	1.846	1.833	0.023
总氨基酸 TAA	18.125	17.947	18.195	19.061	19.728	20.290	19.980	19.795	0.255

¹. 预混料为每千克饲料提供 VA 6 000 IU, VB₁ 2 mg, VB₂ 6 mg, VB₆ 4 mg, VB₁₂ 0.01 mg, VD₃ 1 000 IU, VE 15 IU, VK₃ 0.5 mg, 生物素 biotin 0.2 mg, 叶酸 folic acid 0.6 mg, D-泛酸 D-pantothenic 10 mg, 烟酸 nicotinic acid 35 mg, Cu (硫酸铜) 8 mg, Fe (硫酸亚铁) 80 mg, Mn (硫酸锰) 100 mg, Zn (硫酸锌) 80 mg, I (碘化钾) 0.70 mg, Se (亚硒酸钠) 0.30 mg, 氯化胆碱 choline chloride 1 200 mg。². 粗蛋白质、粗脂肪、总淀粉、总能及氨基酸为实测值

¹. The premix provided the following per kg of diets: VA 6 000 IU, VB₁ 2 mg, VB₂ 6 mg, VB₆ 4 mg, VB₁₂ 0.01 mg, VD₃ 1 000 IU, VE 15 IU, VK₃ 0.5 mg, biotin 0.2 mg, folic acid 0.6 mg, D-pantothenic 10 mg, nicotinic acid 35 mg, Cu (as copper sulfate) 8 mg, Fe (as ferrous sulfate) 80 mg, Mn (as manganese sulfate) 100 mg, Zn (as zinc sulfate) 80 mg, I (as potassium iodide) 0.70 mg, Se (as sodium selenite) 0.30 mg, choline chloride 1 200 mg. ². Crude protein, ether extract, total starch, gross energy and amino acid contents were determined values

回肠食糜中氨基酸含量参照 GB/T 18246—2019 的方法,以全自动氨基酸分析仪(日立 L-8900,日本)测定;饲料及回肠食糜淀粉含量参照 AOAC 925.10 的方法测定。

1.6 计算公式与统计分析

本研究所涉及的计算公式如下:

$$\text{AME}(\text{MJ} \cdot \text{kg}^{-1} \text{DM}) = [\text{饲料摄入量}(\text{kg DM}) \times \text{饲料总能}(\text{MJ} \cdot \text{kg}^{-1} \text{DM}) - \text{排泄物量}(\text{kg DM}) \times \text{排泄}$$

物总能($\text{MJ} \cdot \text{kg}^{-1} \text{DM}$)]/饲料摄入量(kg DM);

$\text{AMEn} (\text{MJ} \cdot \text{kg}^{-1} \text{DM}) = \text{AME} (\text{MJ} \cdot \text{kg}^{-1} \text{DM}) - \text{RN} \times 34.39 (\text{MJ/kg DM})$;

饲料氮沉积率($\% \text{DM}$) = [食入氮量(g DM) - 排泄物氮量(g DM)]/食入氮量(g DM) $\times 100$;

淀粉的表观回肠消化率($\%$) = $100 - [\text{食糜淀粉浓度} (\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1} \text{DM}) \times \text{饲料 TiO}_2 \text{浓度} (\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1} \text{DM})] / [\text{饲料淀粉浓度} (\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1} \text{DM}) \times \text{食糜 TiO}_2 \text{浓度} (\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1} \text{DM})] \times 100$;

氨基酸表观回肠消化率($\%$) = $100 - [\text{食糜氨基酸浓度} (\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1} \text{DM}) \times \text{饲料 TiO}_2 \text{浓度} (\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1} \text{DM})] / [\text{饲料氨基酸浓度} (\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1} \text{DM}) \times \text{食糜 TiO}_2 \text{浓度} (\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1} \text{DM})] \times 100$;

无氮饲料内源性氨基酸流量($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1} \text{DMI}$) = $[\text{食糜氨基酸浓度} (\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1} \text{DM}) \times \text{饲料 TiO}_2 \text{浓度} (\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1} \text{DM})] / \text{食糜 TiO}_2 \text{浓度} (\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1} \text{DM})$;

标准回肠氨基酸消化率($\%$) = 氨基酸表观回肠消化率($\%$) + 无氮饲料内源性氨基酸流量($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1} \text{DMI}$) / 饲料氨基酸浓度($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1} \text{DM}$) $\times 100$ 。

采用 SAS 9.4 的 MEANS 模块计算基本统计量。通过 GLM 模块分析不同消化速度的淀粉对饲料 AME、氮沉积率和淀粉回肠消化率,以及豆粕和玉米蛋白粉 SIDAA 的影响,并采用 LSMeans Student's T-test 对平均值进行多重比较。通过 REG 分析饲料 AME、AMEn 对可消化养分含量,能量代谢率、总氨基酸标准回肠消化率对淀粉消化率/总氨基酸消化率的线性回归模型。以 $P < 0.05$ 表示差异显著。

2 结 果

2.1 不同消化速度的淀粉对肉鸡饲料淀粉表观回肠消化率、粗脂肪消化率和能量代谢率的影响

由表 2 可知,在淀粉-豆粕饲料下,小麦淀粉和玉米淀粉饲料的淀粉表观回肠消化率无显著性差异,且均显著高于木薯淀粉和豌豆淀粉饲料($P < 0.05$)。木薯淀粉饲料的表观回肠消化率显著高于豌豆淀粉饲料($P < 0.05$)。玉米淀粉饲料可消化淀粉含量显著高于其他 3 个淀粉饲料($P < 0.05$),小麦淀粉饲料的可消化淀粉含量显著高于木薯淀粉和豌豆淀粉饲料($P < 0.05$),而木薯淀粉与豌豆淀粉饲料的可消化淀粉含量差异不显著。木薯淀粉饲料和玉米淀粉的粗脂肪消化率显著高于小麦淀粉饲料($P < 0.05$),而与豌豆淀粉饲料的粗脂肪消化

率无显著性差异。木薯淀粉、玉米淀粉和豌豆淀粉饲料的可消化脂肪含量均显著高于小麦淀粉饲料($P < 0.05$)。木薯淀粉饲料的 AME 和 AMEn 与玉米淀粉饲料无显著性差异,但均显著高于小麦淀粉饲料及豌豆淀粉饲料($P < 0.05$);小麦淀粉饲料的 AME 和 AMEn 显著高于豌豆淀粉饲料。木薯淀粉饲料的 AME/GE 和 AMEn/GE 与玉米淀粉饲料无显著性差异,但均显著高于小麦淀粉饲料和豌豆淀粉饲料($P < 0.05$)。小麦淀粉饲料的 AME/GE 和 AMEn/GE 显著高于豌豆淀粉饲料($P < 0.05$)。

在淀粉-玉米蛋白粉饲料下,小麦淀粉与玉米淀粉饲料的淀粉表观回肠消化率无显著性差异,但均显著高于木薯淀粉和豌豆淀粉饲料($P < 0.05$)。木薯淀粉饲料的淀粉表观回肠消化率与豌豆淀粉饲料无显著性差异。木薯淀粉饲料的可消化淀粉含量与小麦淀粉饲料无显著性差异,且均显著高于玉米淀粉和豌豆淀粉饲料($P < 0.05$)。玉米淀粉和豌豆淀粉饲料的粗脂肪消化率和可消化脂肪含量显著高于小麦淀粉饲料($P < 0.05$),木薯淀粉饲料的粗脂肪消化率和可消化脂肪含量与小麦淀粉、玉米淀粉和豌豆淀粉饲料无显著差异。玉米淀粉饲料的 AME 及 AMEn 与小麦淀粉饲料无显著性差异,但显著高于木薯淀粉饲料和豌豆淀粉饲料($P < 0.05$)。小麦淀粉饲料的 AME 显著高于豌豆淀粉饲料($P < 0.05$),AMEn 显著高于木薯淀粉饲料和豌豆淀粉饲料($P < 0.05$)。玉米淀粉饲料的 AME/GE 及 AMEn/GE 与小麦淀粉饲料无显著性差异,但显著高于木薯淀粉饲料及豌豆淀粉饲料($P < 0.05$),小麦淀粉饲料的 AME/GE 与其他 2 个饲料差异不显著,但 AMEn/GE 显著高于豌豆淀粉饲料($P < 0.05$)。

2.2 不同消化速度的淀粉对豆粕和玉米蛋白粉标准回肠氨基酸消化率的影响

由表 3 可知,不同消化速度的淀粉对豆粕的 SIDAA、总氨基酸消化率及可消化总氨基酸含量均无显著性影响。玉米淀粉饲料的氮沉积率及可代谢粗蛋白含量显著高于其他 3 个淀粉饲料($P < 0.05$),木薯淀粉饲料的氮沉积率显著高于小麦淀粉饲料($P < 0.05$),而与豌豆淀粉饲料无显著性差异。小麦淀粉饲料与豌豆淀粉饲料的氮沉积率无显著差异。木薯淀粉、小麦淀粉及豌豆淀粉饲料的可代谢粗蛋白含量无显著性差异,但显著低于玉米淀粉饲料($P < 0.05$)。不同消化速度的淀粉对玉米蛋白粉 SIDAA 有显著影响($P < 0.05$)。相对于

木薯淀粉,小麦淀粉和玉米淀粉均显著提高了14种氨基酸及总氨基酸的消化率($P<0.05$),而豌豆淀粉显著提高了4种氨基酸的消化率($P<0.05$)。小麦淀粉、玉米淀粉和豌豆淀粉对玉米蛋白粉的氨基酸消化率、总氨基酸消化率无显著作用。4种淀粉饲料在氮沉积率及可代谢粗蛋白含量上均无显著差异。

表2 不同消化速度的淀粉对淀粉-豆粕和淀粉-玉米蛋白粉饲料淀粉消化率、粗脂肪消化率、代谢能和能量代谢率(AME/GE, AMEn/GE)的影响(绝干基础)

Table 2 The effects of starch with different digestion rates on digestibility of starch and ether extract, metabolizable energy and metabolizability of energy (AME/GE, AMEn/GE) in starch-soybean meal diets and starch-corn gluten meal diets (Dry matter basis)

项目 Item	不同消化速度的淀粉 Starch with different digestion rates				SEM	P 值 P-value
	木薯淀粉 Cassava starch	小麦淀粉 Wheat starch	玉米淀粉 Corn starch	豌豆淀粉 Pea Starch		
淀粉-豆粕饲料 Starch-soybean meal diet						
淀粉表观回肠消化率/% Apparent ileal digestibility of starch	96.44 ^b	98.64 ^a	98.16 ^a	94.34 ^c	0.33	<0.001
可消化淀粉/% Digestible starch	46.27 ^c	48.12 ^b	48.86 ^a	46.55 ^c	0.16	<0.001
粗脂肪消化率/% Digestibility of ether extract	92.95 ^a	91.12 ^b	92.71 ^a	91.80 ^{ab}	0.44	0.027
可消化脂肪/% Digestible ether extract	3.91 ^a	3.84 ^b	3.92 ^a	3.90 ^a	0.02	0.034
AME/(MJ·kg ⁻¹ DM)	14.22 ^a	14.06 ^b	14.14 ^{ab}	13.86 ^c	0.04	<0.001
AMEn/(MJ·kg ⁻¹ DM)	13.64 ^a	13.49 ^b	13.54 ^{ab}	13.29 ^c	0.04	<0.001
AME/GE(%)	76.24 ^a	75.29 ^b	75.83 ^{ab}	74.44 ^c	0.21	<0.001
AMEn/GE(%)	73.15 ^a	72.27 ^b	72.62 ^{ab}	71.33 ^c	0.20	<0.001
淀粉-玉米蛋白粉饲料 Starch-corn gluten meal diet						
淀粉表观回肠消化率/% Apparent ileal digestibility of starch	95.39 ^b	98.77 ^a	98.87 ^a	96.44 ^b	0.50	<0.001
可消化淀粉/% Digestible starch	69.43 ^a	69.79 ^a	68.17 ^b	68.02 ^b	0.36	0.004
粗脂肪消化率/% Digestibility of ether extract	7.57 ^{ab}	0.25 ^b	24.34 ^a	19.71 ^a	6.21	0.047
可消化脂肪/% Digestible ether extract	0.03 ^{ab}	0.00 ^b	0.11 ^a	0.09 ^a	0.03	0.045
AME/(MJ·kg ⁻¹ DM)	15.67 ^{bc}	16.02 ^{ab}	16.27 ^a	15.55 ^c	0.12	0.002
AMEn/(MJ·kg ⁻¹ DM)	15.34 ^b	15.67 ^a	15.83 ^a	15.24 ^b	0.09	<0.001
AME/GE(%)	85.43 ^b	86.45 ^{ab}	87.83 ^a	84.50 ^b	0.67	0.014
AMEn/GE(%)	83.63 ^{bc}	84.57 ^{ab}	85.46 ^a	82.82 ^c	0.48	0.006

同行数据上标不同字母表示差异显著($P<0.05$),无字母或上标相同字母表示差异不显著($P>0.05$)。下同
Data within the same row with different letter superscripts mean significant difference ($P<0.05$), with no letter or the same letter superscript mean no significant difference ($P>0.05$). The same as below

2.3 饲料代谢能与可消化养分,能量代谢率及总氨基酸消化率与淀粉消化率同总氨基酸消化率比值的线性关系

肉鸡饲料代谢能与可消化淀粉及可代谢蛋白之间存在显著的线性关系($P<0.01$,图1)。饲料AME、AMEn与可消化淀粉(dstarch)、可代谢蛋白(MCP)之间的回归模型为 $AME=0.133\times dstarch+0.258\times MCP+5.06$ ($R^2=0.972$, $P<0.01$); $AMEn=0.133\times dstarch+0.203\times MCP+5.08$

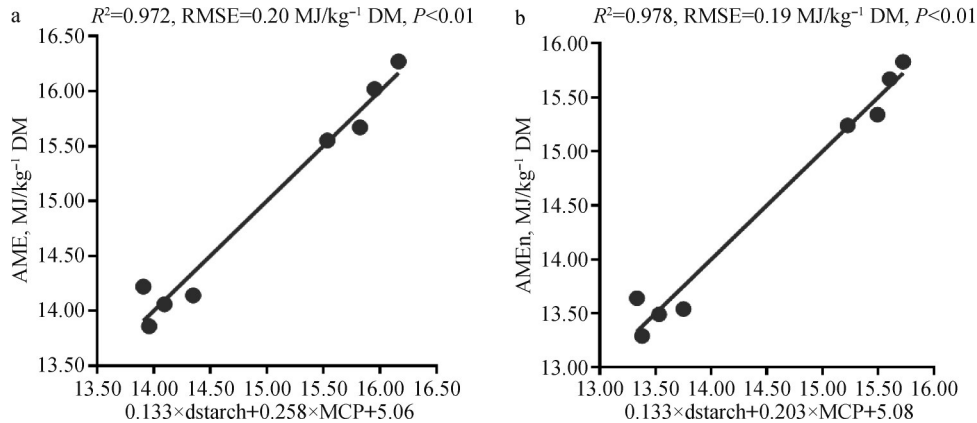
($R^2=0.978$, $P<0.01$)。肉鸡饲料能量代谢率(AME/GE)与淀粉消化率同总氨基酸消化率比值呈显著的线性关系($P<0.01$,图2),随淀粉消化率与总氨基酸消化率比值的增加而显著降低($P<0.01$)。

试验饲料的总氨基酸消化率对淀粉消化率与总氨基酸消化率比值呈显著的线性关系($P<0.01$;图2),随淀粉消化率与总氨基酸消化率比值的增加而显著降低($P<0.01$)。

表 3 不同消化速度的淀粉对豆粕和玉米蛋白粉的氨基酸消化率及氮沉积率的影响

Table 3 The effects of starch with different digestion rates on the amino acid digestibility and nitrogen retention rate in soybean meal and corn gluten meal

项目 Item	豆粕标准回肠氨基酸消化率/% Standardized ileal amino acid digestibility of soybean meal					玉米蛋白粉标准回肠氨基酸消化率/% Standardized ileal amino acid digestibility of corn gluten meal				
	木薯 Cassava		小麦 Wheat		P 值 P-value	木薯 Cassava		小麦 Wheat		P 值 P-value
	淀粉 starch	豌豆 Pea	淀粉 starch	豌豆 Pea		淀粉 starch	豌豆 Pea	淀粉 starch	豌豆 Pea	
必需氨基酸 Indispensable amino acid										
精氨酸 Arg	86.54	87.10	85.61	87.74	1.74	87.08 ^b	93.63 ^a	92.74 ^a	89.98 ^{ab}	1.49
组氨酸 His	81.07	82.05	80.64	83.47	1.70	83.30 ^b	90.91 ^a	89.96 ^a	87.28 ^{ab}	1.88
亮氨酸 Leu	80.74	83.13	80.98	83.64	1.95	87.19 ^b	96.00 ^a	95.23 ^a	93.09 ^a	1.99
异亮氨酸 Ile	80.37	82.82	80.83	83.62	1.99	84.86 ^b	93.49 ^a	92.56 ^a	89.81 ^{ab}	1.91
赖氨酸 Lys	81.97	83.25	81.79	84.84	1.55	83.18 ^b	88.94 ^a	89.35 ^a	85.20 ^{ab}	1.57
蛋氨酸 Met	83.57	86.37	84.26	85.44	1.88	86.79 ^b	95.29 ^a	94.55 ^a	92.61 ^a	1.78
苯丙氨酸 Phe	81.73	83.87	81.00	82.92	2.08	86.95 ^b	95.00 ^a	94.27 ^a	91.94 ^{ab}	1.81
苏氨酸 Thr	76.18	78.09	75.16	79.03	2.29	80.90 ^b	89.43 ^a	88.70 ^a	85.45 ^{ab}	1.87
缬氨酸 Val	76.47	77.68	75.71	78.11	2.67	82.01 ^b	90.84 ^a	89.90 ^a	86.58 ^{ab}	1.80
天冬氨酸 Asp	76.29	78.31	76.39	80.23	2.01	82.96 ^b	91.09 ^a	90.70 ^a	87.60 ^{ab}	1.81
丝氨酸 Ser	78.68	80.71	78.00	81.78	2.13	85.28 ^b	93.65 ^a	93.15 ^a	90.52 ^a	1.77
谷氨酸 Glu	81.74	82.94	81.21	83.44	2.04	86.54 ^b	94.99 ^a	94.21 ^a	91.86 ^{ab}	2.10
甘氨酸 Gly	74.23	75.69	74.23	77.86	2.09	80.51	87.31	86.56	83.12	1.87
丙氨酸 Ala	79.00	81.35	79.60	82.30	1.82	87.36 ^b	95.56 ^a	94.97 ^a	92.73 ^a	1.84
半胱氨酸 Cys	66.72	68.52	67.51	71.83	3.59	80.60	87.23	85.47	83.16	2.07
脯氨酸 Pro	78.27	79.99	77.41	81.37	2.15	85.86 ^b	93.98 ^a	92.99 ^a	90.46 ^{ab}	2.00
总氨基酸 Total amino acid	79.68	81.35	79.38	82.31	2.01	85.60 ^b	93.85 ^a	93.08 ^a	90.55 ^{ab}	1.89
可消化总氨基酸 Digestible total amino acid	15.70	15.80	15.70	17.02	0.40	18.49 ^b	20.98 ^a	20.49 ^a	19.87 ^a	0.41
氮沉积率/% Nitrogen retention rate	47.53 ^b	46.22 ^c	48.86 ^a	47.39 ^{bc}	0.44	27.00	27.95	35.32	24.94	3.17
可代谢粗蛋白/% Metabolizable crude protein	10.49 ^b	10.26 ^b	10.86 ^a	10.54 ^b	0.10	6.01	6.32	7.97	5.61	0.71

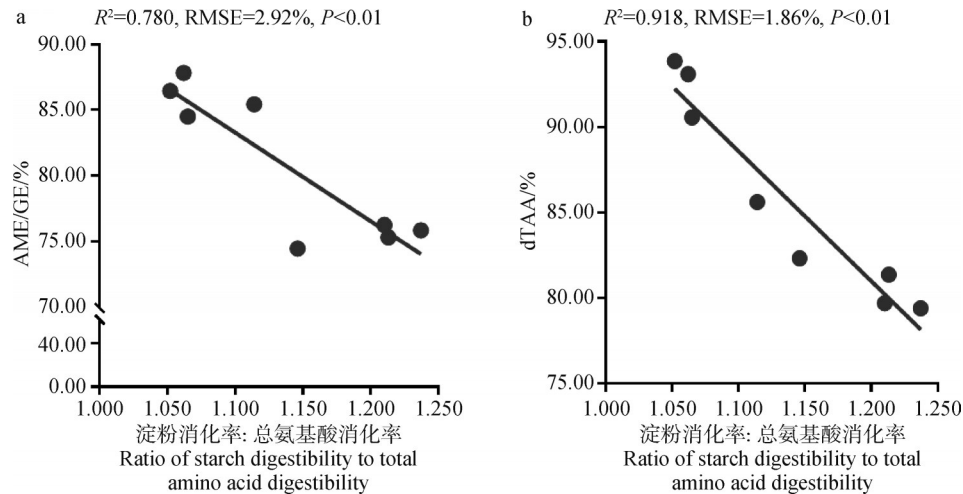


a. 饲料 AME 与可消化淀粉、可代谢蛋白之间的回归模型; b. 饲料 AMEn 与可消化淀粉、可代谢蛋白之间的回归模型;

a. Regression model of AME on digestible starch and metabolizable protein; b. Regression model of AMEn on digestible starch and metabolizable protein

图 1 饲料 AME, AMEn 与可消化养分含量之间的回归模型

Fig. 1 The regression models of dietary AME and AMEn on digestible nutrients



a. 饲料能量代谢率与淀粉消化率:总氨基酸消化率之间的回归模型; b. 饲料总氨基酸消化率与淀粉消化率:总氨基酸消化率之间的回归模型

a. Regression model of AME/GE on ratio of starch digestibility to total amino acid digestibility; b. Regression model of total amino acid digestibility on ratio of starch digestibility to total amino acid digestibility

图 2 饲料能量代谢率和总氨基酸消化率与淀粉消化率:总氨基酸消化率之间的回归模型

Fig. 2 The regression models of AME/GE and total amino acid digestibility on ratio of starch digestibility to total amino acid digestibility

3 讨论

肉鸡饲料中淀粉的含量在 30%~40% 之间,且消化率通常在 90% 以上^[8-9],是主要的供能物质^[10]。不同来源的淀粉在消化率和消化速度上存在差异,高含量的直链淀粉通常会降低淀粉的消化速度及消化率^[11-12]。其次,淀粉颗粒的结晶度(如 C 型和 B 型)、表面特性(尺寸、形状和是否有孔)都会影响淀粉的消化率^[12]。玉米和小麦的淀粉颗粒大小接近

(2~35 μm),直链淀粉/支链淀粉比值(0.33)^[12]接近,且均低于木薯淀粉(0.43)^[13]和豌豆淀粉(0.45)^[14]中直链淀粉/支链淀粉的比值。本研究中,饲料的淀粉主要来源于食品级的淀粉,而来自豆粕和玉米蛋白粉的淀粉占比非常低,中等消化速度的小麦淀粉和玉米淀粉的淀粉消化率最高,且高于快速(木薯淀粉)和慢速消化淀粉(豌豆淀粉)。这一规律与 Yutste 等^[15]的研究结果一致。这表明,适中的淀粉消化速度有利于淀粉在肉鸡消化道内

的消化吸收,同时,快速(木薯淀粉)和慢速消化淀粉(豌豆淀粉)因直链淀粉/支链淀粉比值高,导致了淀粉消化率的降低,该现象与 Ma 等^[16]和 Zhou 等^[17]的报道结果一致。

目前,鲜见文献报道淀粉的消化速度对脂肪消化率的影响,但未消化的淀粉在后肠发酵后产生的短链脂肪酸被吸收进入血液后可能会影响体内的脂质代谢,其中快速消化淀粉上调了脂肪酸合成酶、乙酰辅酶 A 羧化酶的活性及 mRNA 水平,从而加快了餐后血清脂质水平达到峰值^[18]。饲粮脂肪在动物体内的消化率主要受脂肪酸饱和程度、甘油三酯中脂肪酸的位置、谷物类型、饲粮脂肪含量水平等因素的影响^[19]。构成脂肪的饱和脂肪酸含量及脂肪酸与甘油连接的位置是由脂肪的类型或来源决定。而谷物类型对脂肪消化率的影响可能与谷物的某些特性有关,如黏性的非淀粉多糖影响了胆汁的分泌或干扰了胆汁与脂肪酸的结合^[19]。饲粮脂肪水平对其消化率的影响受内源脂肪损失量及是否超过肉鸡的消化能力有关。肉鸡消化道内源脂肪损失量约为 $1.71 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 干物质摄入量,变异系数 24.1% ^[20],当饲粮的粗脂肪含量较低时,则测定的脂肪表观消化率较低,且变异大。在本试验中,淀粉-豆粕饲粮的粗脂肪主要来自于大豆油(添加了 4%),大大高于内源脂肪损失量(0.171%),因此,内源脂肪损失对饲粮粗脂肪的表观消化率影响较小。虽然 4 种饲粮的粗脂肪消化率相差较小,介于 $91.12\% \sim 92.95\%$,但仍然可以得出小麦淀粉饲粮中粗脂肪的消化率最低的结论。而淀粉-玉米蛋白粉饲粮的粗脂肪含量在 0.43% 以内,与内源脂肪损失量(0.171%)相差较小,因此,其表观消化率的测定受内源脂肪损失量影响较大,测值较低且变异大,但仍然统计得出 4 种饲粮中小麦淀粉饲粮的粗脂肪消化率最低。上述结果表明,淀粉消化速度或结构影响了脂肪的消化率。其是否是通过影响肉鸡胆汁的分泌或后段微生物代谢干扰了胆汁与脂肪酸的结合,从而影响了脂肪的消化有待进一步研究。

淀粉的消化速度对氨基酸消化率的影响可能不是通过改变内源氨基酸损失量,而主要是淀粉消化释放的葡萄糖与蛋白质水解释放的氨基酸竞争小肠的转运载体而影响了氨基酸的吸收,从而改变了氨基酸的消化率。Zhou 等^[17]报道直链淀粉/支链淀粉比例从 0.2 增加到 1.0,肉鸡回肠大部分氨基酸

的内源损失量呈线性减少。本研究中,相对于快速消化的木薯淀粉和慢速消化的豌豆淀粉(直链淀粉/支链淀粉比例 $0.43 \sim 0.45$),中速消化的玉米淀粉和小麦淀粉(直链淀粉/支链淀粉比例 0.33)将导致回肠内源氨基酸排泄量更高,从而使得饲粮的 SIDAA 趋向于更低。然而,3 种消化速度的淀粉对豆粕的 SIDAA 无显著性影响,而快速消化的木薯淀粉相对于中、慢速消化淀粉却降低了玉米蛋白粉的 SIDAA。这一结果表明,不同消化率速度的淀粉不是通过影响内源氨基酸损失而影响饲粮的 SIDAA。本试验中,豆粕的蛋白质消化速度适中,而玉米蛋白粉的蛋白质消化速度较快。因此,木薯淀粉作为快速消化淀粉相对于玉米蛋白粉提供的快速消化蛋白,在小肠前段产生较多的葡萄糖导致与氨基酸吸收的竞争,同时,小肠后段葡萄糖的减少,从而供给氨基酸吸收所需的能量可能不足^[1,21],减少了氨基酸的吸收,导致了快速消化的木薯淀粉降低了玉米蛋白粉的 SIDAA。

肉鸡对豆粕和玉米蛋白粉的氮沉积率主要受氨基酸平衡的影响。相对于豆粕的氨基酸组成,玉米蛋白粉的亮氨酸和异亮氨酸含量高,而赖氨酸含量低,氨基酸平衡较差,由此导致了玉米蛋白粉的氮沉积率低于豆粕。在不同消化速度的淀粉中,中速消化的玉米淀粉对豆粕和玉米蛋白粉的氮沉积率在数值上均高于其他 3 种淀粉,这表明适中消化速度的淀粉有利于氨基酸的吸收,减少氨基酸的氧化供能。这一现象与 Herwig 等^[2]和 Liu 等^[22]的研究结果相似。

代谢能是饲粮中可消化淀粉、可消化脂肪及可代谢蛋白的综合效应值。总体上,快、中速消化淀粉(木薯淀粉、小麦淀粉和玉米淀粉)饲粮的代谢能高于慢速消化淀粉(豌豆淀粉)饲粮,这与 Yutste 等^[15]的研究规律相一致。本研究中,无论是淀粉-豆粕饲粮还是淀粉-玉米蛋白粉饲粮,中速消化的玉米淀粉饲粮供给的可消化淀粉和可代谢粗蛋白均高于慢速消化的豌豆淀粉饲粮,由此导致了其代谢能值升高。这也表明,不同消化速度的淀粉是通过影响淀粉的消化率以及氮的利用率而影响代谢能。

Liu 和 Selle^[23]以及 Sydenham 等^[24]采用肠道某一位点的淀粉与蛋白质消化率的比值看作是淀粉与蛋白质消化速度的比值,并试图建立与肉鸡增重或耗料增重比最优的淀粉与蛋白质消化速度适配范围。本试验中,能量代谢率和总氨基酸消化率随

着淀粉与蛋白质消化率的比值的增加而降低。这表明,淀粉的消化速度大幅度超过蛋白质的消化速度将降低能量代谢率和氨基酸消化率。因此,使淀粉与蛋白质消化相对同步对提高饲料的营养利用效率非常关键。

4 结 论

4.1 不同消化速度的淀粉在肉鸡回肠的表观消化率有差异。其中,中速消化淀粉(小麦淀粉和玉米淀粉)的饲料淀粉消化率及能量代谢率高于慢速消化淀粉(豌豆淀粉)饲料。而快速消化淀粉(木薯淀粉)与快速消化蛋白(玉米蛋白粉)配合时,降低了饲料的淀粉消化率和能量代谢率。总体上,淀粉消化率与总氨基酸消化率的比值与能量代谢率呈负相关。

4.2 淀粉的消化速度与蛋白质的消化速度对氨基酸消化率的影响有互效应。中、慢速消化淀粉(小麦淀粉、玉米淀粉、豌豆淀粉)对豆粕或玉米蛋白粉的SIDAA无显著性影响。快速消化淀粉(木薯淀粉)对豆粕的SIDAA无显著性影响,但降低了玉米蛋白粉的SIDAA。总体上,淀粉消化率与总氨基酸消化率的比值与氨基酸消化率呈负相关。

参考文献 (References):

- [1] MOSS A F, SYDENHAM C J, KHODDAMI A, et al. Dietary starch influences growth performance, nutrient utilisation and digestive dynamics of protein and amino acids in broiler chickens offered low-protein diets[J]. *Anim Feed Sci Technol*, 2018, 237: 55-67.
- [2] HERWIG E, ABBOTT D, SCHWEAN-LARDNER K V, et al. Effect of rate and extent of starch digestion on broiler chicken performance[J]. *Poult Sci*, 2019, 98 (9): 3676-3684.
- [3] YIN D, SELLE P H, MOSS A F, et al. Influence of starch sources and dietary protein levels on intestinal functionality and intestinal mucosal amino acids catabolism in broiler chickens[J]. *J Anim Sci Biotechnol*, 2019, 10(3): 658-672.
- [4] AVIAGEN. Arbor Acres Broiler Management Handbook [EB/OL]. 2025. https://aviagen.com/assets/Tech_Center/AA_Broiler/Aviagen-AA-Broiler-Handbook-EN.pdf.
- [5] WEURDING R E, VELDMAN A, VEEN W A, et al. Starch digestion rate in the small intestine of broiler chickens differs among feedstuffs [J]. *J Nutr*, 2001, 131(9): 2329-2335.
- [6] WEURDING R E, VELDMAN A, VEEN W A G, et al. *In vitro* starch digestion correlates well with rate and extent of starch digestion in broiler chickens [J]. *J Nutr*, 2001, 131(9): 2336-2342.
- [7] AVIAGEN. Arbor Acres Broiler Nutrition Specifications [EB/OL]. 2022. https://aviagen.com/assets/Tech_Center/AA_Broiler/AA-BroilerNutritionSpecifications2022-EN.pdf.
- [8] COWIESON A J, VIEIRA S L, STEFANELLO C, et al. Exogenous microbial amylase in the diets of poultry: what do we know? [J]. *J Appl Poult Res*, 2019, 28(3): 556-565.
- [9] MOSS A F, KHODDAMI A, CHRYSTAL P V, et al. Starch digestibility and energy utilisation of maize-and wheat-based diets is superior to sorghum-based diets in broiler chickens offered diets supplemented with phytase and xylanase [J]. *Anim Feed Sci Technol*, 2020, 264: 114475.
- [10] ZAEFARIAN F, ABDOLLAHI M R, RAVINDRAN V, et al. Starch digestion in broiler chickens fed cereal diets [J]. *Anim Feed Sci Technol*, 2015, 209: 16-29.
- [11] LI Z, XU J, ZHANG F, et al. Dietary starch structure modulates nitrogen metabolism in laying hens via modifying glucose release rate [J]. *Int J Biol Macromol*, 2024, 279: 135554.
- [12] ZURAK D, VLAJSOVIĆ D, DUVNJAK M, et al. Factors affecting starch digestibility rate of maize grain in poultry [J]. *Worlds Poult Sci J*, 2023, 79(1): 43-68.
- [13] WANG X, DU B, NIAN F, et al. Effects of processing methods and conditioning temperatures on the cassava starch digestibility and growth performance of broilers [J]. *Animals*, 2023, 13(8): 1373.
- [14] PERZ K, KACZMAREK S A, NOWACZEWSKI S, et al. The effect of reduction of resistant starch content of faba bean and pea by amylase supplementation on performance, nutrient digestibility, and sialic acid excretion of broiler chickens [J]. *Anim Feed Sci Technol*, 2023, 298: 115621.
- [15] YUTSTE P, LONGSTAFF M A, MCNAB J M, et al. The digestibility of semipurified starches from wheat, cassava, pea, bean and potato by adult cockerels and young chicks [J]. *Anim Feed Sci Technol*, 1991, 35 (3-4): 289-300.
- [16] MA J, YANG T, YANG M, et al. Effects of dietary amylose/amylopectin ratio and amylase on growth performance, energy and starch digestibility, and

- digestive enzymes in broilers [J]. *J Anim Physiol Anim Nutr*, 2020, 104(3):928-935.
- [17] ZHOU H, MAHMOOD T, WU W, et al. High amylose to amylopectin ratios in nitrogen-free diets decrease the ileal endogenous amino acid losses of broiler chickens[J]. *Anim Nutr*, 2023, 14:111-120.
- [18] YIN F, YIN Y, ZHANG Z, et al. Digestion rate of dietary starch affects the systemic circulation of lipid profiles and lipid metabolism-related gene expression in weaned pigs[J]. *Br J Nutr*, 2011, 106(3):369-77.
- [19] RAVINDRAN V, TANCHAROENRAT P, ZAEFARIAN F, et al. Fats in poultry nutrition: Digestive physiology and factors influencing their utilisation [J]. *Anim Feed Sci Technol*, 2016, 213: 1-21.
- [20] TANCHAROENRAT P, RAVINDRAN V, ZAEFARIAN F, et al. Digestion of fat and fatty acids along the gastrointestinal tract of broiler chickens[J]. *Poult Sci*, 2014, 93(2):371-379.
- [21] WU G. Intestinal mucosal amino acid catabolism[J]. *J Nutr*, 1998, 128(8):1249-1252.
- [22] LIU S Y, SELLE P H, COWIESON A J, et al. Influence of conditioning temperatures on amino acid digestibility coefficients at four small intestinal sites and their dynamics with starch and nitrogen digestion in sorghum-based broiler diets [J]. *Anim Feed Sci Technol*, 2013, 185(1-2):85-93.
- [23] LIU S Y, SELLE P H. A consideration of starch and protein digestive dynamics in chicken-meat production [J]. *Worlds Poult Sci J*, 2015, 71(2):297-310.
- [24] SYDENHAM C J, TRUONG H H, MOSS A F, et al. Fishmeal and maize starch inclusions in sorghum-soybean meal diets generate different responses in growth performance, nutrient utilisation, starch and protein digestive dynamics of broiler chickens [J]. *Anim Feed Sci Technol*, 2017, 227:32-41.

(编辑 范子娟)