

# 畜禽饲料淀粉消化与代谢机制研究进展

李 敬<sup>1</sup>, 田亚东<sup>1\*</sup>, 康相涛<sup>1,2</sup>

(1. 河南农业大学 牧医工程学院, 河南 郑州 450002; 2. 河南省家禽种质资源创新工程研究中心, 河南 郑州 450002)

**摘要:** 淀粉是畜禽能量的主要来源。研究动物体内淀粉消化及其相关的代谢机制对养殖生产实践有着相当重要的意义。因此, 阐述了淀粉的特性、结构特征及其组成、加工处理方式对畜禽淀粉消化率的影响, 并简要综述了淀粉消化对机体血糖水平和肝脏糖脂代谢的影响。

**关键词:** 淀粉; 畜禽; 消化; 代谢机制

**中图分类号:** S816.11 **文献标识码:** A **文章编号:** 1004-3268(2011)02-0029-04

## Research Progress on Dietary Starch Digestion and Metabolic Mechanism in Livestock

LI Jing<sup>1</sup>, TIAN Ya-dong<sup>1\*</sup>, KANG Xiang-tao<sup>1,2</sup>

(1. College of Animal Science and Veterinary Medicine, Henan Agricultural University, Zhengzhou 450002, China; 2. Henan Research Center of Breeding Resources for Poultry, Zhengzhou 450002, China)

**Abstract:** Starch is the main energy source for livestock. Different sources and compositions of starch affect starch digestive rate, blood glucose response and nutrient availability of the body. Therefore, it's very important to study the metabolism of starch digestion and its related mechanism in vivo for production practice. This paper reviewed in terms of starch properties, structure and composition, processing technique of starch digestion and its metabolic mechanism of livestock.

**Key words:** Starch; Livestock; Digestion; Metabolic mechanism

淀粉不仅是人类赖以生存的营养物质, 也是畜禽主要的能量来源。饲料淀粉来源不同, 淀粉结构、直链淀粉/支链淀粉比例也不同, 淀粉在肠道中的消化速率和微生物菌落生长也存在着差异。淀粉在动物小肠内水解为葡萄糖被吸收, 并转运至肝脏进行代谢。肠道淀粉消化越快, 在小肠前段水解为葡萄糖的速度越快, 可能会影响肝脏代谢中相关酶的活性和其他营养物质的利用效率。研究动物体内淀粉消化及其相关的代谢机制对养殖生产实践有着相当重要的意义。为此, 综述了淀粉在畜禽体内的消化和代谢机制研究进展。

### 1 淀粉的特性

天然淀粉可以分为 2 类, 直链淀粉与支链淀粉。直链淀粉是 D-葡萄糖基以  $\alpha$ -(1, 4)糖苷键连接的多糖链, 分子中有 200 个左右葡萄糖基, 分子量  $(1 \sim 2) \times 10^5$ , 聚合度 990, 空间构象卷曲成螺旋形, 每一回转为 6 个葡萄糖基。支链淀粉分子中除有  $\alpha$ -(1, 4)糖苷键的糖链外, 还有  $\alpha$ -(1, 6)糖苷键连接的分支, 分子中含 300~400 个葡萄糖基, 分子量  $> 2 \times 10^7$ , 聚合度 7 200, 各分支也都是卷曲成螺旋形<sup>[1]</sup>。而淀粉的特性由支链淀粉的化学结构决定, 根据支链淀

收稿日期: 2010-11-15

基金项目: 河南省科技攻关项目(072102210102); 国家“十一五”科技支撑计划(2008BA DB2B07-5)

作者简介: 李 敬(1987-), 女, 河南新乡人, 在读硕士研究生, 研究方向: 家禽营养。E-mail: lijing090@gmail.com

\*通讯作者: 田亚东(1971-), 男, 河南上蔡人, 副教授, 博士, 主要从事家禽生产与营养研究。

E-mail: ydtian111@163.com

粉的侧链结构的不同可将天然淀粉晶粒分为 A、B 和 C 3 种类型: A 型淀粉支链键较分散, 连接的支链较多, 易受各种淀粉酶的作用, 存在于谷物中且认为可被完全消化; 而 B 型淀粉支链键较集中, 连接的支链很少, 能抵抗淀粉酶的水解, 主要存在于马铃薯和香蕉中, 高度抵抗消化; C 型淀粉居中<sup>[2]</sup>。淀粉与水一起加热后变成凝胶, 结晶结构遭到破坏, 使得淀粉分子颗粒更易被消化酶所利用。因此, 淀粉又可分为快消化淀粉、慢消化淀粉和抗消化淀粉<sup>[3]</sup>。消化速度对家禽来说尤为重要, 因为淀粉通过肠道的速度与物种高度相关。高消化速度保证了淀粉在小肠中几乎完全消化, 而缓慢的消化速度则可能导致大量的淀粉在盲肠发酵, 或者不消化淀粉较多。

## 2 影响淀粉消化的因素

机体淀粉消化的影响因素有很多, 淀粉的来源和组成、结构、颗粒大小、加工方式、小肠对淀粉的吸收能力和停留时间, 以及消化酶活性等都会影响淀粉在肠道中的吸收利用。

### 2.1 饲料加工工艺对畜禽淀粉消化率的影响

谷物是畜禽日粮的主要能量来源, 其成分主要是淀粉, 不同加工处理的饲料对动物生产性能的影响也存在着差异, 因此, 最大限度提高淀粉消化率是提高畜禽生产性能的基础。Cooper 等认为, 经蒸煮处理后的饲料能显著提高成年牛的瘤胃淀粉消化率<sup>[4]</sup>。王潇等研究发现, 膨化玉米显著提高了仔猪断奶后较早时期的平均日增体质量和饲料转化率, 同时也提高了蛋氨酸和缬氨酸的表观消化率<sup>[5]</sup>。Svihus 等认为, 淀粉糊化可增加消化道内淀粉降解的敏感性, 糊化温度和糊化程度是由淀粉的特性决定的, 而饲料加工中低水分含量只限制了糊化的程度<sup>[6]</sup>。

### 2.2 淀粉结构对畜禽淀粉消化率的影响

淀粉结构的差异主要取决于淀粉颗粒的大小、黏性和结晶程度。Franco 等认为, 饲料中小颗粒料比大颗粒料更易被动物体吸收利用, 这可能是由于小的淀粉颗粒中直链淀粉含量和结晶度均比大颗粒淀粉低所致<sup>[7]</sup>。不同谷物品种与发育阶段不同, 其淀粉颗粒大小也不同, 淀粉的消化率也可能存在着差异。

Knudsen 等的研究表明, 燕麦麸中富含  $\beta$ -D-葡萄糖, 饲喂猪燕麦麸比燕麦粉更能增加丁酸在大肠中的比率, 增加粪便中蛋白质和脂肪的含量; 并且饲喂燕麦麸可降低回肠末端对蛋白质和脂肪的消化

率<sup>[8]</sup>。动物对单纯淀粉的消化可能不同于对谷物籽实中淀粉的消化。有研究发现, 成年肉公鸡对小麦提纯淀粉的消化率要高于小麦粉中淀粉的消化率<sup>[9]</sup>。Gutierrez 等认为, 不同小麦品种的淀粉消化率存在着差异, 这可能与淀粉结构不同有关<sup>[9]</sup>。Ghaid 等的研究表明, 不同的大麦和高粱磨碎粒度影响了  $\alpha$ -淀粉酶的弥散系数和迁移率, 适宜的颗粒粒度能够改善淀粉消化率<sup>[10]</sup>。

## 3 淀粉在畜禽胃肠道中的消化特点

动物消化道均富含  $\alpha$ -淀粉酶。哺乳动物中,  $\alpha$ -淀粉酶主要是通过唾液和胰液进入肠道, 小肠是淀粉进行消化和吸收的主要场所。据报道, 在鸡肠道中约有 65% 的淀粉在十二指肠末端消化, 85% 的淀粉在空肠段消化, 约 97% 的淀粉在回肠末端消化。其中, 约有 97% 的可消化淀粉以葡萄糖的形式被吸收, 十二指肠是葡萄糖吸收的主要场所<sup>[11]</sup>。

动物采食后, 小肠壁吸收的葡萄糖总量中有 1/3 以上转化为乳酸, 通过这种方式, 血液中葡萄糖供给的高峰将得到缓冲, 而小肠和肌肉的乳酸被运送肝脏重新转化为葡萄糖, 或在葡萄糖过量情况下转化为脂肪酸。Vander 等研究发现, 饲喂玉米淀粉组猪的门静脉血液中葡萄糖出现速度快, 葡萄糖净流量高, 但持续的时间较豌豆淀粉短, 门静脉血中必需氨基酸总量与豌豆淀粉日粮相比较<sup>[12]</sup>, 这也说明了淀粉的消化速度可能与氨基酸节约效应有关。

Weurding 等研究发现, 马铃薯和豆类淀粉消化率比谷物和木薯淀粉的消化率低, 且在快速消化淀粉日粮中加入额外的氨基酸能改善饲料转化率 (FCR), 而在慢速消化淀粉日粮中加入额外的氨基酸则无此效果<sup>[13]</sup>。这表明, 具有不同消化特性的饲料淀粉对氨基酸和葡萄糖的供应平衡状态影响不同, 小肠中葡萄糖和氨基酸的平衡供给能节约饲料氨基酸而提高饲料利用率。Weurding 等研究表明, 饲喂慢速消化淀粉可以改善肉鸡蛋白和能量利用率<sup>[14]</sup>。这可能是由于持续不断的葡萄糖供应能够增加直接利用的葡萄糖数量, 从而提高葡萄糖的利用效率, 减少氨基酸用于氧化供能, 达到节约氨基酸的作用。而且这种血糖长期维持在较高的水平, 就会使得肝脏糖原异生作用相对减弱, 氨基酸用于糖异生的数量减少, 用于蛋白质合成的数量增多, 因而蛋白质沉积增加。

戴求仲等研究认为, 淀粉来源不同, 对猪回肠末端消化率也不同, 改变了粪和食糜中氮的流量及回肠食糜氨基酸中微生物氨基酸的比率, 采食抗性淀

粉日粮试验猪粪氮、食糜氮和回肠食糜氨基酸中大部分微生物氨基酸显著增加<sup>[15]</sup>。有研究表明,不同直/支淀粉比对肉仔鸡能量及养分利用率的影响差异显著<sup>[16]</sup>。这可能是因为不同日粮直/支淀粉比改变消化道中葡萄糖的供给状态,从而影响了饲料蛋白质和氨基酸在消化道的代谢情况,改变了饲料蛋白质和氨基酸的消化和利用。Gutierrez 等研究认为,淀粉的消化随小麦的品种和来源的不同而存在差异,但并不影响蛋白的消化吸收和血糖应答(升胰岛素指数)<sup>[17]</sup>。

#### 4 淀粉消化对机体血糖水平和肝脏糖脂代谢的影响

肝脏是机体的重要代谢器官,也是葡萄糖代谢的主要场所,淀粉在小肠被消化分解后,以葡萄糖、乳酸等形式被小肠壁吸收运输,通过门静脉到达肝脏,进行葡萄糖的代谢。

##### 4.1 淀粉消化对血糖水平的影响

升胰岛素指数和抗性淀粉含量是淀粉消化的2个重要的指标。Englyst 等认为,淀粉消化率可能影响血糖水平和升胰岛素指数<sup>[17]</sup>。Frei 等研究认为,不同淀粉来源其升胰岛素指数和淀粉消化率都有着显著性差异<sup>[18]</sup>。杨月欣等的研究表明,抗性淀粉可降低血糖生成指数,从而可降低动物进食后的血糖值<sup>[19]</sup>。直链淀粉是一种抗性淀粉,可在小肠中不完全消化,因此与支链淀粉相比,其进食后胰岛素的增加较慢。Morvarid 等的研究表明,日粮中高水平的支链淀粉比高水平的直链淀粉更能促进鼠产生更高的血糖指数<sup>[20]</sup>。康萍研究认为,抗性淀粉可调节血中葡萄糖含量,降低血中脂肪酸和胆固醇的浓度,提高矿物质的吸收及增加蛋白质的沉积,此外,在小肠中未消化部分可在结肠中发酵生成的挥发性脂肪酸,对结肠具有重要影响,并可在一定程度上预防结肠癌的发生<sup>[21]</sup>。

##### 4.2 淀粉消化对肝脏糖脂代谢关键酶的影响

当动物摄食不同碳水化合物水平的饲料时,吸收的糖类很大一部分转化为脂肪,并在肝胰脏与肠系膜中积累。有研究报道显示,长期高脂饮食诱导肝脏协同刺激因子和肝脏磷酸烯醇羧激酶基因表达,糖异生增加,同时肝糖分解不能相应受到抑制,从而导致肝糖输出增加及空腹血糖升高<sup>[18]</sup>。

Liarn 等的研究表明,在肉仔鸡日粮中添加甲基吡啶铬,提高了肉仔鸡柠檬酸裂解酶的活性,增强了鸡对葡萄糖的摄取能力<sup>[22]</sup>。Capilla 等在虹鳟的肝胰脏中分离到了葡萄糖激酶(GK),并发现饲

料中高碳水化合物能增加肝胰脏 GK 活性及表达<sup>[23]</sup>。Berradi 等研究认为,过度采食饲料可以使杂种鸭肝脏类葡萄糖激酶活性增加,产生脂肪肝<sup>[24]</sup>。也有研究显示,在哺乳类动物中,摄食高碳水化日粮也增加了 GK 酶活性及其表达,并增加了血糖及胰岛素的水平<sup>[25]</sup>。

脂肪酸合成酶(FAS)是葡萄糖转化为脂肪的关键酶之一,脂肪酸合成酶的多少和活性的高低,对动物体脂沉积有着重要意义。曾有研究显示,FAS 表达水平的升高能够显著增加甘油三脂在体内的沉积。与畜禽相比,鱼类对糖的利用能力较低,糖的添加会增加鱼体脂肪含量,能量水平越高,体脂沉积和糖原含量越多,这主要是由于鱼体摄入糖后,肝脏葡萄糖 6-磷酸脱氢酶(G-6-P)、异柠檬酸脱氢酶(ICDH)和苹果酸酶(ME)活性升高,而 G-6-P、ME 和 ICDH 是细胞内生成辅酶(NADPH)的主要途径。这3种酶活性的升高会增加脂肪酸合成酶辅酶的含量,从而促进鱼体脂肪合成<sup>[26]</sup>。这也说明,动物体对葡萄糖的吸收效率不同,可能对肝脏中脂肪沉积和蛋白质合成效率产生影响。

#### 5 结语

大量研究结果表明,动物机体对淀粉的消化和吸收是一个动态的过程。淀粉的降解率和吸收速度不仅受到淀粉形式和组成结构的影响,同时也受到动物肠道发育、肠道中酶的活性以及微生物菌落变化的影响。淀粉在肠道中停留时间不同,动物对其的消化能力不同,同时也影响了饲料的养分利用率和葡萄糖的吸收速率。因此,研究不同淀粉的理化性质及其利用率对动物胃肠道微生物菌落平衡和葡萄糖转化效率的影响有着极其重要的意义,同时也为提高淀粉的营养价值提供理论依据。

#### 参考文献:

- [1] Hizukuri S. Polymodal distribution of the chain lengths of amylopectins and its significance [J]. Carbohydrate Research, 1986, 147: 342-347.
- [2] Oates C G. Towards an understanding of starch granule structure and hydrolysis [J]. Trends in Food Sci Technol, 1997, 8: 375-382.
- [3] Normand S, Pachiaudi C, Khalfallah Y. Cappearance in plasma glucose and breath CO<sub>2</sub> during feeding with naturally Gerlriched starchy food in normal human [J]. Am J Clin Nutr, 1992, 55: 43-46.
- [4] Cooper R J, Milton C T, Klopfenstein T J, et al. Mass effect of corn processing on starch digestion and bacte-

- rial crude protein flow in finishing cattle[ J ]. *Journal of Animal Science*, 2002, 80(3): 797-804.
- [ 5 ] 王潇, 何瑞国. 膨化与加酶玉米对断奶仔猪血液指标及胰腺和肠道淀粉酶活性的影响[ J ]. *中国兽医学报*, 2006, 26(3): 329-331.
- [ 6 ] Svihus B, Uhlen A, Harstad O. Effect of starch granule structure associated components and processing on nutritive value of cereal starch; A review[ J ]. *Animal Feed Science and Technology*, 2008, 122(3): 303-320.
- [ 7 ] Franco C M L, Preto S J R, Ciacco C F. Factors that affect the enzymatic degradation of natural starch granules-effect of the size of the granules[ J ]. *Starch*, 1992, 44: 422-426.
- [ 8 ] Knudsen K E B, Jensen B B, Inge H. Digestion of polysaccharides and other major components in the small and large intestine of pigs fed on diets consisting of oat fractions rich in  $\beta$ -D-glucan[ J ]. *British Journal of Nutrition*, 1993, 70: 537-556.
- [ 9 ] Gutierrez del Alamo A, Verstegen M W A, Den Hartog L A, *et al.* Wheat starch digestion rate affects broiler performance[ J ]. *Poultry Science*, 2009, 88: 1666-1675.
- [ 10 ] Ghaid J S Al-Rabadi, Robert G Gilbert, Michael J Gidley. Effect of particle size on kinetics of starch digestion in milled barley and sorghum grains by porcine  $\alpha$ -amylase[ J ]. *Journal of Cereal Science*, 2009, 50: 198-204.
- [ 11 ] Utierrez del Alamo A, Verstegen M W A, Den Hartog L A, *et al.* Effect of wheat cultivar and enzyme addition to broiler chicken diets on nutrient digestibility, performance and apparent metabolisable energy content[ J ]. *Poult Sci*, 2008, 87: 759-767.
- [ 12 ] Vander Muelen, Bakker J G, Smiths B, *et al.* Effects of source of starch on net portal flux of glucose, lactate, volatile fatty acids in pig[ J ]. *Br J Nutr*, 1997, 78: 533-544.
- [ 13 ] Weurding Roelof E, Albertus Veldman, Willem A G, *et al.* Digestion rate in the small Intestine of broiler chickens differs among feedstuffs[ J ]. *Journal of Nutrition*, 2001, 131: 2329-2335.
- [ 14 ] Weurding R E, Enting H, Verstegen M W. The relation between starch digestion rate and amino acid level for broiler chickens[ J ]. *Poultry Science*, 2003, 82(2): 279-284.
- [ 15 ] 戴求仲, 王康宁, 印遇龙, 等. 不同淀粉来源对生长猪回肠食糜中微生物氮和氨基酸含量的影响[ J ]. *动物营养学报*, 2008, 20(4): 404-410.
- [ 16 ] 戴求仲, 李湘, 张石蕊, 等. 日粮直/支链淀粉比对黄羽肉仔鸡生产性能和养分利用率的影响[ J ]. *动物营养学报*, 2008, 20(3): 249-255.
- [ 17 ] Englyst H N, Veenstra J, Hudson G. Measurement of rapidly available glucose (RAG) in plant foods: A potential *in vitro* predictor of the glycaemic response[ J ]. *Br J Nutr*, 1996, 75: 327-337.
- [ 18 ] Frei M, Siddhuraju P, Becker K. Studies on the *in vitro* starch digestibility and the glycemic index of six different indigenous rice cultivars from the Philippines[ J ]. *Food Chemistry*, 2003, 83: 395-402.
- [ 19 ] 杨月欣, Vonk R, Stellard F. 三种类型玉米淀粉在小肠中消化吸收研究[ J ]. *营养学报*, 1999, 21(3): 284-287.
- [ 20 ] Morvarid K, Salwa W R, Martine C, *et al.* Dietary amylose-amylopectin starch content affects glucose and lipid metabolism in adipocytes of normal and diabetic rats[ J ]. *The Journal of Nutrition*, 1998, 128(1): 35-43.
- [ 21 ] 康萍. 抗性淀粉的营养研究进展[ J ]. *中国饲料*, 2007(12): 15-16.
- [ 22 ] Liarn T F, Chen S, Horng Y. The effect of adding chromium picolinate on the growth performance serum traits liver ATP-citrate lyase, fructose-1, 6-diphosphatase activities and carcass characteristics of broilers[ J ]. *Taiwan J Vet Med Anim Husband*, 1993, 62: 1-5.
- [ 23 ] Capilla E, Medale F, Navarro, *et al.* Muscle insulin binding and plasma levels in relation to liver glucokinase activity, glucose metabolism and dietary carbohydrates in rainbow trout[ J ]. *Regulatory Peptides*, 2003, 110(2): 123-132.
- [ 24 ] Berradi H, Guy G, Rideau N. A glucokinase-like enzyme induced in mule duck livers by overfeeding[ J ]. *Poultry Science*, 2004, 83: 161-168.
- [ 25 ] Barroso J B, Peragon J, Garia-Salguero L, *et al.* A Carbohydrate deprivation reduces NADPH-production in fish liver but not in adipose tissue[ J ]. *The International Journal of Biochemistry & Cell Biology*, 2001, 33: 785-796.
- [ 26 ] Fynn-Aikins K, Hung S S H, Liu W. Growth, lipogenesis and liver composition of juvenile white sturgeon fed different levels of D-glucose[ J ]. *Aquaculture*, 1992, 105: 61-72.