

肉鸡淀粉消化动力学的实际关联性分析

田亚东¹, 王 岩² 摘译; 康相涛¹ 审校

(1.河南农业大学牧医工程学院, 河南郑州 450002;

2.郑州牧业工程高等专科学校动物医药系, 河南郑州 450011)

淀粉是家禽饲料的主要成分, 它所提供的表观代谢能 AME 超过 50%。通常, 淀粉消化率系数被认定为 1.0 左右。但是, 研究发现肉仔鸡对小麦^[1]、大麦^[2]、豌豆^[3]以及从其它几种饲料原料中分离出的淀粉^[4]消化是不完全的。

小麦 AME 与淀粉消化率呈正相关^[1,5], 而非淀粉多糖 (NSP) 含量呈负相关^[6]。在许多饲料评价体系中, 淀粉含量不作为一种特殊成分计算能量, 而是作为无氮浸出物 (NFE) 的一部分。这样就影响原料的能值计算, 尤其是对淀粉含量变化的原料。

淀粉的理化性质取决于来源及工艺处理。理化性质的差异可能会影响其在胃肠道中消化的程度和速度。消化速度对家禽来说尤为重要, 在小肠中, 高的消化速度可以保证淀粉在小肠中几乎完全消化; 但如果消化速度缓慢, 则可能导致大量的淀粉在盲肠发酵, 或者未消化的淀粉较多。

本文重点讨论淀粉消化速度对肉仔鸡生长性能的影响。

1 饲料原料间淀粉特性的差异

目前众多饲料配方中, 不同淀粉源都得以应用, 其特性也呈多样化。差异原因归结于淀粉颗粒或者原料本身的组成和结构。淀粉颗粒对酶的降解非常

敏感, 但如果淀粉被一层保护膜包裹, 就很难接近消化酶, 特别是淀粉酶。淀粉降解率是淀粉颗粒表面积、结构和结晶度的函数^[7]。

1.1 颗粒大小

Franco 等 (1992)^[8]把淀粉颗粒分为小 (<10 μm)、中 (10~15 μm)、大 (>16 μm) 3 级, 通过体外试验研究了木薯和玉米淀粉颗粒大小对淀粉水解速度的影响。发现小颗粒的淀粉比大颗粒水解迅速 (尤其是木薯淀粉)。显微镜观测值显示酶对淀粉小颗粒和大颗粒作用的模式不同, 这表明不同粒度的淀粉其结构不同。2 种淀粉源的小颗粒都显示出有较高的初始糊化温度和较低的直链淀粉含量。与大颗粒相比, 来自木薯的淀粉小颗粒具有较少的结晶区域, 这也许是小颗粒淀粉有较高水解速度的解释。文献中报道不同淀粉源的颗粒大小有很宽的范围 (见表 1)。来源于大米、木薯、高粱、玉米和燕麦的淀粉颗粒属小或中等颗粒, 而豌豆、蚕豆和土豆的淀粉颗粒相对较大^[9]。

1.2 直链淀粉含量

常规的淀粉源直链淀粉含量在 17%~33%之间。直链淀粉含量与作物的生长阶段有关。在淀粉颗粒增长过程中, 颗粒中的直链淀粉所占比例以及直链和支链淀粉的分子量都在增加^[10]。这也许解释了

Franco 等 (1992)^[8]研究的部分结果。在大麦、玉米、稻谷和高粱的育种中已培养出蜡样淀粉和高直链淀粉的品种类型。蜡样淀粉中仅含有支链淀粉, 几乎没有直链淀粉。高直链淀粉的玉米品种淀粉颗粒中直链淀粉含量高达 50%~70%。常规的淀粉源依据直链淀粉含量大致分为高、中、低 3 种类型。豆类淀粉平均含直链淀粉 33%, 谷物含 25%, 块茎类直链淀粉含量相对较低 (土豆 20%和木薯 17%), 大米不同于其它谷物, 其直链淀粉含量仅为 17%。

表 1 不同淀粉源的淀粉颗粒大小与形状

淀粉源	类型	颗粒大小 (直径/μm)	平均值	形状	资料来源
玉米	谷物	3~26	15	圆形, 多边形	1
土豆	块茎	5~100	33	椭圆形, 球形	1
小麦	谷物	2~10	15	饼状	1,3
		20~35		圆形	3
木薯	块茎	4~35	20	椭圆形, 截顶	1
高粱	谷物	3~26	15	圆形, 多边形	1
大米	谷物	3~8	5	多边形, 角状	1
		20~25		圆形	3
大麦	谷物	2~6	15	饼状	3
		19		圆形	3
小黑麦	谷物	28	12	圆形, 饼状	3
黑麦	谷物	3~10		多面体	3
燕麦	谷物	3~26		圆形, 多边形	1
蜡玉米	谷物	3~24		圆形, 变形	1
淀粉玉米					
绿豆	豆类	10~32		圆形, 不规则	2
蚕豆	豆类	20~48		圆形	2
光滑豆	豆类	20~40		椭圆形, 球形	2
皱豆	豆类	6~80		椭圆形, 圆形	2
				圆形	2

1) Swinkels, 1985^[10]; 2) Hoover 和 Sosulski, 1991^[11]; 3) Hosney, 1986^[12].

高直链淀粉通常被认为可消化性差。支链淀粉的分子比直链淀粉大的多, 因此其单个分子的表面积也比较大。此外, 直链淀粉分子中连接葡萄糖链的氢键对淀粉酶的水解不敏感。如果淀粉受到热处理, 形成的抗性淀粉总量与抵抗体外消化的淀粉群系呈线性关系^[13]。

直链淀粉对结晶度的影响目前仍不清楚。Zobel (1988)^[14]报道了几种淀粉源的结晶度, 没有发现直链淀粉含量与结晶度之间存在明显的关系, 尽管高直链淀粉含量的淀粉源似乎表现出直链淀粉含量低可导致较高结晶度的结果。由于淀粉颗粒的结晶度出于支链淀粉, 那么认为高直链淀粉含量引起结晶度差是合乎逻辑的。Eliasson 和 Gudmundsson (1996)^[15]复查了淀粉的物理、化学和功能方面的特性, 进一步证实了这种联系。直链淀粉含量不同的淀粉源具有相似结晶度的事实表明结晶度的差异在于支链淀粉的结构 (如: 链长、分支模式等)。

2 工艺学

淀粉在动物饲料中的一个重要特性是它的加工特性。饲料暴露在热力、压力和湿度或者这些综合加工过程之中, 均会影响淀粉的糊化。通常来说, 工艺处理的越深入, 淀粉的糊化度越高, 消化得越快。淀粉糊化的温度范围随原材料和加工过程中供给的水量而变化。与淀粉质的玉米、大米和高粱相比, 大麦、燕麦和小黑麦的糊化温度范围较窄, 因此加工对淀粉消化特性的影响跟随淀粉源而变化^[10]。此外, 加工处理也会改变淀粉的其它理化性质。加热和高压处理会改变淀粉的粘性。热处理后小麦、玉米和高粱淀粉粘性低而土豆淀粉粘性高。这些属性会影响其消化动力学。

其它属性包括持水力、水溶性和膨胀力也随淀粉源而变化, 并对淀粉的消化速度产生一定影响。

3 淀粉源和消化率

淀粉消化率随淀粉源的不同而变化。Yutste 等 (1991)^[4]研究了从不同原料中分离的淀粉的消化率。试验中发现消化率差异主要在于淀粉的结构不同。另外, 同一种原料淀粉的消化率也会变化。Rogel 等 (1987)^[1]获得了不同小麦品种间淀粉消化率的差异, 在 0.82~1.00 之间。但是, 来自消化率差的原料的淀粉不论是单独的还是组合到饲料中, 其消化率与容易消化的小麦的淀粉相似。这表明低能小麦的

淀粉碎片消化酶不易接近。

不仅是淀粉的消化程度取决于淀粉源，淀粉的消化速度同样如此。淀粉在小肠不同区域的消化程度取决于淀粉的来源。差异既是绝对的又是相对的。可消化淀粉在回肠近端消化的比例越小，淀粉消化的越慢。Weurding 等(2001) [16]观察到具有相似粪消化率的淀粉源在空肠后段消化率不同(见表 2)。土豆淀粉回肠后段的消化率为 0.97, 而高粱在此区域的消化率却是 0.83。豆类淀粉不但总肠道消化率较低，而且在小肠第 1 段也仅有少量的片断被消化。

表 2 含有不同淀粉源的肉鸡饲料淀粉在不同肠段的消化率系数

淀粉源	空肠后段	回肠前段	回肠后段	总肠道
小麦	0.882 ^d	0.929 ^d	0.944 ^d	0.938 ^d
玉米, 锤片粉碎	0.888 ^g	0.953 ^e	0.969 ^d	0.974 ^g
玉米, 轧辊粉碎	0.913 ^g	0.966 ^f	0.974 ^f	0.977 ^g
蜡质玉米	0.839 ^d	0.943 ^{ab}	0.966 ^e	0.972 ^f
普通豆, 热处理	0.361 ^b	0.629 ^b	0.723 ^b	0.745 ^b
大麦	0.898 ^g	0.973 ^g	0.981 ^g	0.983 ^h
高粱	0.837 ^d	0.930 ^d	0.953 ^d	0.954 ^e
豌豆	0.574 ^c	0.730 ^c	0.804 ^c	0.810 ^c
蚕豆	0.570 ^c	0.748 ^c	0.815 ^c	0.815 ^c
木薯淀粉颗粒	0.977 ^h	0.987 ^h	0.989 ^h	0.989 ^g
原土豆淀粉	0.198 ^a	0.253 ^a	0.329 ^a	0.317 ^a
棕色大米, 没抛光	0.851 ^{ab}	0.948 ^e	0.968 ^e	0.973 ^f

Weurding 等, 2001

观测值的差异在测定方面可能存在酶可接近度的因素。但由 Weurding 等(2001) [17]开发的体外测定法能很好预测淀粉在不同肠段的消化量。通过此方法既可测定淀粉源对淀粉消化率的影响，而且也可测定不同工艺处理对淀粉消化率的影响。

4 淀粉消化速度的关联性

一系列试验设计用于测定淀粉消化速度对肉鸡生长性能的影响。第 1 个试验饲料中回肠可消化淀粉含量相同。回肠可消化淀粉测定在早期的试验中已完成[16]。源于木薯和玉米的淀粉消化较快，而源于豌豆和高粱的淀粉消化相对较慢。结果见表 3。

表 3 饲喂高或低剂量慢速可消化淀粉 (SDS) 的雌性肉鸡体重、增重、采食量和饲料转化率 (n=6)

日龄	参数	SDS 添加量(g/kg)		SEM	P 值
		高 52	低 7		
0~15	体重	434	406	6	<0.01
	采食量	577	568	12	0.62
	饲料转化率	1.464	1.555	0.023	0.02
15~31	增重	926	862	6	<0.01
	采食量	1578	1528	15	0.04
	饲料转化率	1.703	1.772	0.011	<0.01
31~38	增重	463	461	7	0.86
	采食量	939	911	13	0.17
	饲料转化率	2.03	1.976	0.016	0.04
0~38	体重	1823	1729	13	<0.01
	采食量	3093	3002	32	0.07
	饲料转化率	1.734	1.777	0.009	0.01

从 1~31 日龄的数据可看出，饲料中添加慢速可消化淀粉稍微提高了采食量，显著改善了增重和饲料转化率。而在试验的最后 1 周(31~38 日龄)，增重和采食量没有显著变化，但饲料转化率显著改善。本试验得出结论，第 1 周，肉鸡可从慢速可消化淀粉中受益。

接下来的试验研究的是消化速度的影响。2 种饲料分别由不同消化速度的淀粉配制：一种饲料以豌豆和玉米作为淀粉源的慢速可消化淀粉配制；另一种则是以小麦和木薯为淀粉源的快速可消化淀粉配制。对淀粉源的工艺处理同样会导致淀粉消化速度的变异。在混入饲料前，富含淀粉的原料没有经过冷制粒或膨化处理。

体外消化试验的数据显示，工艺处理对快速可消化淀粉源的消化速度没有影响，但是慢速可消化淀粉源的消化速度被提高了，并且膨化对其的影响较制粒大。通过选用特殊原料提高淀粉的消化速度再次使含有慢速可消化淀粉饲料的转化率得到改善。工艺处理并不是引起通过采食量的差异对饲料转化率发挥影响作用。而膨化使慢速可消化淀粉水解速度加快的同时，也降低了饲料 AME 利用效率(见表 4)。

表 4 淀粉源和加工处理对肉鸡生长性能的影响

参数	豌豆和玉米饲料			土豆和小麦饲料			SEM
	未处理	蒸汽制粒	膨化制粒	未处理	蒸汽制粒	膨化制粒	
体重/g	2 087 ^{bc}	2 143 ^{ab}	2 092 ^{abc}	2 039 ^c	2 151 ^a	2 098 ^{abc}	29
采食量/g	3 613 ^c	3 640 ^c	3 611 ^c	3 627 ^c	3 846 ^a	3 743 ^b	50
饲料转化率	1.765 ^b	1.731 ^c	1.760 ^b	1.815 ^a	1.822 ^a	1.819 ^a	0.014
能量转化率/kJ/g	20.82 ^b	20.73 ^b	21.74 ^a	21.42 ^a	21.67 ^a	21.56 ^a	0.17

同行没有相同肩标者差异显著 ($P < 0.05$)。

肉仔鸡对慢速与快速可消化淀粉产生不同反应的生理机制必须被阐明。推测的几种可能机制为：第一，葡萄糖吸收的快慢引起的代谢反应不同。快速吸收的葡萄糖在肠壁中经物质转化为乳酸盐。血液中葡萄糖的供应是具有缓冲作用的^[18]。在肝中，乳酸盐可重新转化为葡萄糖。当淀粉消化缓慢时，只有较少的葡萄糖转化为乳酸盐，这样可节省能量。第二，葡萄糖的吸收速度影响采食后胰岛素的反应^[19]和灵敏性^[20]。肉鸡生长过程中，胰岛素对蛋白质的沉积起关键性作用^[21]。高的淀粉消化速度导致血液中胰岛素短期内迅速增加。另一方面，淀粉消化慢可使胰岛素反应低而持久，肉仔鸡蛋白质沉积效率更高，饲料转化率更好。第三，能量(淀粉)和蛋白质消化的同步性可能影响饲料效率。以上3种可能的机制都与淀粉消化速度直接相关。第4种可能的机制虽然与淀粉消化速度间接相关，但与淀粉消化位点直接相关。小肠黏膜和肌肉组织的能量需要必须由饲料来满足^[22]。葡萄糖和氨基酸的氧化可能就是为了此目的^[23]。淀粉消化越缓慢，就会有越多的葡萄糖供应肠道下部，也许可节省此位点氨基酸的氧化。这样，当肉仔鸡饲喂含有充足的慢速可消化淀粉的饲料时，更多的氨基酸可用于蛋白质沉积。

5 蛋白质节省效应

在一个典型试验中，Weurding等(2001)^[17]发现饲料中追加氨基酸供应能弥补工艺处理对饲料效率的负面影响。因此，要求慢速可消化淀粉节省蛋白质的效应似乎更像是假说。Weurding(2002)^[24]指出，肉鸡饲料最佳的可消化氨基酸水平取决于淀粉消化

的速度。以快速可消化淀粉源为主的饲料，追加供应氨基酸的效应大于以慢速可消化淀粉源为主的饲料。2种饲料中追加氨基酸供应对9~30日龄肉鸡生长和饲料转化的影响见图1。氨基酸的供应量以可消化赖氨酸来表示，所有必需氨基酸都按比例增加。追加氨基酸在快速降解淀粉饲料中的效应大于慢速降解淀粉饲料。基于以上数据，计算出淀粉快速消化的饲料要获得最佳的生长性能，其氨基酸的需要量大致要提高7%。

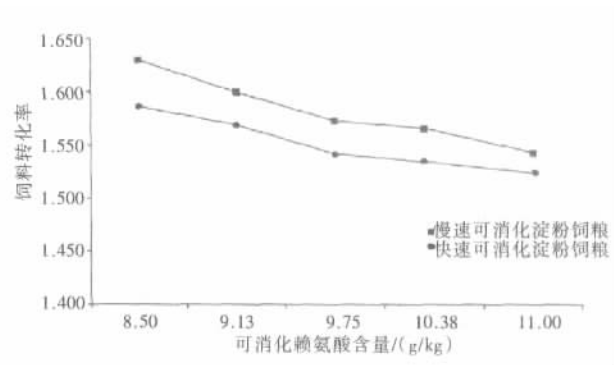


图 1 可消化赖氨酸对 9-31 日龄肉鸡慢速和快速可消化淀粉饲料转化率的影响

6 对微生物区系的影响

淀粉消化速度不仅影响小肠内氨基酸利用，而且影响微生物菌落的组成。慢速可消化淀粉含量越多的饲料中含有的抗性淀粉较多。这种抗性淀粉进入盲肠将成为盲肠微生物区系的底物。由于其具有相对快速的发酵性，抗性淀粉可能会改变菌群的组成。在2个试验中，抗性淀粉对产气荚膜芽孢梭菌和乳糖杆菌的影响被测定。一个试验中，抗性淀粉越多导致产气荚膜芽孢梭菌数量越少，而乳糖杆菌

数量不受影响。另一个试验中^[24], 对这些菌数量的影响虽没有什么显著不同。但是, 尤其对产气荚膜芽孢梭菌的影响可能具有潜在价值, 因为在没有抗生素的饲喂方案中, 坏死性肠炎看起来成为一个非常大的问题。

7 实际关联性

饲料配制中淀粉消化速度的实际关联性取决于饲料配方的一般操作。从报道的试验中可得出如下结论: 饲料生产系统中, 饲料没有不遭受热处理的, 包括粉碎或软制粒, 原料间淀粉降解速度的差异是需要考虑的一个因素。在这些饲粮中, 蛋白质节省效应也许是一个重要的经济因素。但是, 假如加工涉及到高温, 对微生物净化来说, 效应会变小或者无任何变化。

参考文献

- [1] Rogel A M, Annison E F, Bryden W L, et al. The digestion of wheat starch in broiler chickens[J]. Australian Journal of Agricultural Research, 1987, 38: 639- 649.
- [2] Hesselman K, Aman P. The effect of α -glucanase on the utilization of starch and nitrogen by broiler chickens fed on barley of low- or high- viscosity [J]. Animal Feed Science and Technology, 1986, 15: 83- 93.
- [3] Longstaff M, McNab J M. Digestion of starch and fibre carbohydrates in peas by adult cockerels [J]. British Poultry Science, 1987, 28: 261- 285.
- [4] 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]. Animal Feed Science and Technology, 1991, 35: 289- 300.
- [5] Wiseman J, Nicol N T, Norton G. Relationship between apparent metabolizable (AME) values and in vivo / in vitro starch digestibility of wheat for broilers [J]. World's Poultry Science Journal, 2000, 56: 305- 318.
- [6] Choct M, Hughes R J, Wang J, et al. Increased small intestinal fermentation is partly responsible for the anti-nutritive activity of non-starch polysaccharides in chickens [J]. British Poultry Science, 1996, 37: 609- 621.
- [7] Moran E T. Starch digestion in fowl. Poultry Science, 1982, 61: 1257- 1267.
- [8] 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 (11): 422- 426.
- [9] Cone J W, Wolters M G E. Some properties and degradability of isolated starch granules[J]. Starch, 1990, 42:298- 301.
- [10] Swinkels J J M. Sources of starch, its chemistry and physics[C]. In: Starch Conversion Technology. Ed: Beynum van G M A and Roels J A, 1985: 15- 46.
- [11] Hoover R, Sosulski F W. Composition, and chemical modification of legume starches: A review[J]. Canadian Journal of Physiology and Pharmacology, 1991, 69(1), 79- 92.
- [12] Hoseney R C. Chapter 2: Cereal starch[M]. In: Principles of cereal science and technology, 1986:33- 68.
- [13] Sievert D, Pomeranz Y. Enzyme-resistant starch. . Characterization and evaluation by enzymatic, thermoanalytical, and microscopic methods[J]. Cereal chem.1989, 66(4):342- 347.
- [14] Zobel H F. Starch crystal transformation and their industrial importance[J]. Starch/starke, 1988, 40:1- 7.
- [15] Eliasson A C, Gudmundsson M. Physicochemical and functional aspects [M]. In: Carbohydrates in Food, edited by Eliasson A C, Marcel Dekker Inc., New York, 1996:431- 503.
- [16] Weurding R E, Veldman A, Veen W A G, et al. Starch digestion rate in the small intestine of broiler chickens differs between feedstuffs[J]. Journal of Nutrition, 2001, 131: 2329- 2335.
- [17] 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]. Journal of Nutrition, 2001, 131: 2336- 2342.
- [18] Riesenfeld G, Geva A, Hurwitz S. Glucose homeostasis in the chicken[J]. Journal of Nutrition, 1982, 112: 2261- 2266.
- [19] Björck I, Liljeberg H, Östman E. Low glycaemic-index foods[J]. British Journal of Nutrition, 2000, 83: 609- 621.83 (Suppl. 1): S149- S155.
- [20] Wolever T M S. Dietary carbohydrates and insulin action in humans [J]. British Journal of Nutrition, 2000, 83 (Suppl. 1):S97- S102.
- [21] Fox S I. Human Physiology, 1996: 588, Wm. C. Brown.
- [22] McBride B W, Kelly J M. Energy cost of absorption and metabolism in the ruminant gastrointestinal tract and liver: A review[J]. Journal of Animal Science, 1990, 68: 2997- 3010.
- [23] Fleming S E, Zambell K L, Fitch M D. Glucose and glutamine provide similar proportions of energy to mucosal cells of rat small intestine[J]. American Journal of Physiology, 1997, 273: 968- 978.
- [24] Weurding R E. Kinetics of starch digestion and performance of broiler chickens[D]. Wageningen: Wageningen University, 2002.