

高粱的营养价值与抗营养因子及在猪和家禽生产中的应用

冯滢熠 李 瑞* 黄瑞林 印遇龙

(中国科学院亚热带农业生态研究所,中国科学院亚热带农业生态过程重点实验室,畜禽养殖污染控制与资源化技术国家工程实验室,动物营养生理与代谢过程湖南省重点实验室,长沙 410125)

摘 要:近年来,随着高粱进口量的增加,高粱的饲用价值受到了学术界、饲料与养殖行业的高度关注。高粱的营养价值与玉米近似,有效能值与玉米相当,可替代畜禽饲料中的部分玉米,减少玉米用量。本文主要就高粱的营养价值、抗营养因子及在猪和家禽生产中的应用作一综述。

关键词:高粱;营养价值;抗营养因子;猪生产;家禽生产

中图分类号:S816

文献标识码:A

文章编号:1006-267X(2022)04-2073-14

玉米是畜禽饲料中的主要能量原料,随着饲料工业和畜禽养殖业的快速发展,其需求量也迅猛增长。然而,近年来,玉米的种植面积逐年下降,加之“贸易战”“非洲猪瘟”“新冠”和“禁抗”等多重冲击,使得玉米进口配额进一步受限,其价格一直处于高位运行,这导致饲料成本增加,给饲料和养殖企业造成了巨大的生存压力。面对玉米资源紧张的新形势,开发并合理利用“非常规”能量饲料资源十分必要。

高粱,又称乌禾、蜀黍,为禾本科高粱属一年生草本植物,是人类栽培的重要谷类作物之一,已有3 000多年的种植历史。高粱是全球第五大粮食作物,在农业生产中占据着极其重要的地位^[1]。高粱因具有耐旱涝、耐盐碱、耐贫瘠和易于种植等特性,在食用与饲用价值等方面备受关注^[2]。我国高粱的总产量近年来呈上升趋势,初步形成了以北方及西南高粱生产优势区为主导,华北、西北高粱生产区为补充的高粱生产格局^[3],其中黑龙江、吉林、辽宁、内蒙古、四川、重庆和贵州等是我国高粱的主产省份,种植面积占全国高粱的80%以上^[3-5]。自2013年以来,受玉米临时收储政策的影响,我国高粱进口量逐年攀升,2014年以后进

口量稳居全球首位。我国的进口高粱主要来自美国和澳大利亚,其中,美国高粱因单宁含量低、价格便宜,故而在我国饲用高粱市场上占据优势地位^[6]。据中国海关统计,2020年中国高粱进口数量为481万t,同比增长478.6%,进口金额达11.56亿,同比增长501.2%。近年来,玉米价格的高位运行使得我国的高粱进口量逐年增加,而高粱作为一种玉米替代品,性价比优越,且在进口配额受限程度上低于玉米,因而在我国的饲料和养殖行业备受青睐^[6-7]。本文主要综述了高粱的营养价值、抗营养因子及在猪和家禽生产上的应用。

1 高粱的营养价值

高粱营养价值高,含有人体所需的多种营养成分,对人体健康有益^[8]。表1比较了国内外饲料原料数据库中有关高粱的常规营养成分含量,并由此可知,高粱的营养价值变异性较大,且主要与各国高粱的品种、产地和生长环境差异有关,其次可能与各国实验室的检测分析差异有关。因此,准确测定高粱的营养价值是实现饲料精准配制的基础,也是饲料企业科学合理使用高粱的前提^[9]。

收稿日期:2021-09-23

基金项目:国家重点研发计划(2021YFD1300201,2021YFD1301004);生长育肥猪常用能量饲料原料营养价值评定与参数建立(16190298,16200142,20210406);湖南省科技创新计划资助(2020RC2063);中国科学院亚热带农业生态过程重点实验室开放基金项目(ISA2021103)

作者简介:冯滢熠(1998—),男,湖南湘乡人,博士研究生,动物生态营养与环境专业。E-mail:1324658055@qq.com

*通信作者:李 瑞,助理研究员,E-mail:lirui181000@163.com

表 1 国内外饲料原料数据库中高粱的营养成分含量

Table 1 Nutrient contents of sorghum in in domestic and international feed ingredient databases		%												
饲料原料数据库名称 Name of feed ingredient databases	饲料原料名称 Name of feed ingredients	干物质 DM	白质 CP	粗蛋 白质	粗脂肪 EE	粗纤维 CF	无氮 浸出物 NFE	粗灰分 Ash	中性洗 涤纤维 NDF	酸性洗 涤纤维 ADF	淀粉 Starch	钙 Ca	总磷 TP	有效磷 AP
中国饲料成分及营养价值表 (第 30 版) Tables of feed composition and nutritive values in China (30 th edition)	成熟高粱, GB 8231—87	88.0	8.7	3.4	1.4	70.7	1.8	17.4	8.0	68.0	0.13	0.36	0.09	
中国猪营养需要(2020) Nutrient requirements of swine in China (2020)	单宁含量<0.5%的 高粱,4-07-0012	87.91	9.27	1.93	3.40	71.76	1.55	12.18	3.32	64.04	0.06	0.27	0.09	
中国猪营养需要(2020) Nutrient requirements of swine in China (2020)	0.5%≤单宁含量< 1.0%的高粱, 4-07-0013	87.71	9.14	2.45	3.44	71.18	1.50	12.67	4.13	61.76	0.05	0.26	0.08	
中国猪营养需要(2020) Nutrient requirements of swine in China (2020)	单宁含量≥1.0%的 高粱,4-07-0014	87.88	9.6	2.38	3.67	70.34	1.89	13.07	4.37	59.41	0.07	0.25	0.07	
美国 NRC(2012) NRC in America (2012)	高粱	89.39	9.36	3.42	2.14	72.83	1.64	10.63	4.93	70.05	0.02	0.27	0.09	
法国 INRA(2012) INRA in France (2012)	高粱	86.5	9.4	2.9	2.4	71.7	0.1	9.4	3.8	64.1	—	—	—	
荷兰 CVB(2018) CVB in Netherlands (2018)	高粱,1008.000/0/0	87.2	8.7	2.7	2.3	72.0	1.5	7.4	5.1	—	0.03	0.27	—	

1.1 高粱中的有效能

能量占饲料成分的 60%~70%,成本占饲料成本的 50%以上^[2]。据 Nyannor 等^[10]报道,与玉米相比,猪对普渡高可消化高粱 1 (Purdue high digestible sorghum 1, PHD1)、普渡高可消化高粱 2 (Purdue high digestible sorghum 2, PHD2) 和普通高粱 P721N 的消化率及回肠消化率无显著差异。但猪对上述 3 种高粱中能量的表观回肠消化率 (AID) 均低于玉米,其中对 PHD1、PHD2 中能量的 AID 分别为 75.99% 和 75.37%,分别是玉米的 98.4% 和 97.6%;对普通高粱 P721N 中能量的 AID 为 72.31%,是玉米的 93.6%。Pan 等^[11]研究发现,对生长猪而言,美国高粱的消化能 (DE) 为 16.35 MJ/kg,代谢能 (ME) 为 16.09 MJ/kg;而中国黄玉米的 DE 为 16.36 MJ/kg,ME 为 16.10 MJ/kg,两者无显著差异,且在总能 (GE) 的

全肠道表观总消化率上,玉米籽粒和高粱亦无显著差异。上述报道均反映出高粱的有效能值与玉米相近,表 2 汇总了国内外饲料原料数据库中高粱 GE 及生长猪对高粱 DE、ME 和净能 (NE) 的测定值,由表可知,就中国、美国和法国的饲料原料数据库而言,高粱 GE 的差异不大,而荷兰的数据库中除高粱 NE 外,并没有展示有关高粱的其他能值,这说明荷兰对高粱能值有一套独特的评价体系。在中美法 3 国的数据库中,生长猪对高粱 DE、ME 和 NE 这 3 项指标差异不大,但值得注意的是,美国高粱在产量上不但领先于其他国家,而且经过多年的选种和育种工作,已经形成了低单宁、甚至不含单宁的高粱品种,而单宁的消除有利于提高生长猪对高粱中能量的利用率,因此在美国的大部分地区,高粱已经被普遍用于畜禽饲料中。

表 2 国内外饲料原料数据库中高粱 GE 及生长猪对其的有效能值

Table 2 GE of sorghum and effective energy values in growing pigs fed sorghum in domestic and international feed ingredient databases

MJ/kg

饲料原料数据库名称 Name of feed ingredient databases	饲料原料名称 Name of feed ingredients	总能 GE	消化能 DE	代谢能 ME	净能 NE
中国猪营养需要 (2020) Nutrient requirements of swine in China (2020)	单宁含量<0.5%的高粱,4-07-0012	16.23	14.47	14.19	11.19
美国 NRC (2012) NRC in America (2012)	高粱	16.25	15.05	14.78	11.63
法国 INRA (2012) INRA in France (2012)	高粱	16.3	14.2	13.9	11.0
荷兰 CVB (2018) CVB in Netherlands (2018)	高粱,1008.000/0/0	—	—	—	11.27

1.2 高粱中的蛋白质与氨基酸

NRC (2012) 收录了 19 种高粱的粗蛋白质 (CP) 含量的平均值为 9.36%,其范围为 8.26%~10.46%,近似甚至略高于普通黄玉米 (7.31%~9.17%)。彭安琪^[12]在对 AS6023、AS7193、AS7194 青贮甜高粱及 AS6016、AS6018 高丹草等饲用高粱的 CP 含量进行测定后得出其范围为 5.29%~12.80%。Subramanian 等^[13]测出 M35-1、CSH6、CSH8、CSV3、P721、RY49、IS11167、IS11758 等 8 个品种的高粱籽粒 CP 含量为 6.8%~

19.6%。粒用高粱的 CP 含量主要受其基因型、生长环境及氮肥施用量的影响,一般为 7%~12%^[14]。高粱中的蛋白质主要是由谷蛋白、白蛋白和球蛋白以及醇溶蛋白组成^[13]。高粱蛋白质中的氨基酸种类齐全,必需氨基酸的含量较高,但赖氨酸、蛋氨酸与半胱氨酸的含量均低于玉米,其他必需氨基酸含量都近似或高于玉米^[2]。据 Pan 等^[11]报道,除缬氨酸、亮氨酸、苯丙氨酸以外,生长猪对高粱中 CP 和其他氨基酸的 AID 和标准回肠消化率 (SID) 均不如玉米,这在一定程度上揭示出高粱蛋白质存在消化率低、品质较差的缺点。

表 3 国内外饲料原料数据库中高粱的氨基酸含量及猪对高粱中氨基酸的 AID 与 SID

Table 3 Amino acid content of sorghum and AID and SID of amino acids in sorghum of pigs in domestic and international feed ingredient databases

项目 Items	含量 Content		标准回肠 消化率 SID		表现回肠 消化率 AID		含量 Content		标准回肠 消化率 SID		表现回肠 消化率 AID		含量 Content		标准回肠 消化率 SID		表现回肠 消化率 AID		
	AID	SID	AID	SID	AID	SID	AID	SID	AID	SID	AID	SID	AID	SID	AID	SID	AID	SID	
饲料原料数据库名称																			
Name of feed ingredient databases																			
中国猪营养需要(2020)																			
美国 NRC(2012)																			
法国 INRA(2012)																			
荷兰 CVB																			
饲料原料名称																			
Name of feed ingredients																			
单宁含量<0.5%的 高粱,4-07-0012																			
粗蛋白质 CP	9.27	63	77	77	9.36	63	77	9.4	63	77	77	77	9.4	63	77	77	8.7	73	84
必需氨基酸 Essential amino acids																			
精氨酸 Arg	0.31	52	81	80	0.36	68	80	0.38	68	80	80	0.38	68	80	80	0.40	77	86	86
组氨酸 His	0.20	53	74	74	0.21	64	74	0.21	64	74	74	0.21	64	74	74	0.24	75	83	83
异亮氨酸 Ile	0.44	29	41	41	0.36	69	78	0.40	69	78	83	0.40	69	78	83	0.40	79	88	88
亮氨酸 Leu	1.33	94	96	96	1.22	78	83	1.28	78	83	86	1.30	78	86	86	1.30	85	89	89
赖氨酸 Lys	0.22	40	67	74	0.20	53	74	0.22	53	74	74	0.24	63	74	74	0.24	64	80	80
蛋氨酸 Met	0.13	72	79	79	0.16	74	79	0.15	74	79	85	0.18	81	85	85	0.18	83	89	89
苯丙氨酸 Phe	0.57	58	95	95	0.48	76	83	0.50	76	83	85	0.53	81	85	85	0.53	83	89	89
苏氨酸 Thr	0.30	54	76	76	0.30	54	75	0.31	54	75	76	0.33	67	76	76	0.33	68	86	86
色氨酸 Trp	0.07	65	74	74	0.07	65	74	0.10	65	74	74	0.11	71	79	79	0.11	74	86	86
缬氨酸 Val	0.54	88	94	94	0.46	66	77	0.51	66	77	81	0.50	75	81	81	0.50	77	87	87
非必需氨基酸 Non-essential amino acids																			
丙氨酸 Ala	0.86	78	86	86	0.84	73	79	0.27	73	79	81	0.89	77	81	81	0.89	79	85	85
天冬氨酸 Asp	0.63	64	64	64	0.60	66	66	0.18	66	66	79	0.71	75	82	82	0.71	73	84	84
半胱氨酸 Cys	0.28	40	63	63	0.18	56	67	0.18	56	67	77	0.19	71	77	77	0.19	75	86	86
谷氨酸 Glu	2.27	79	85	85	1.84	74	81	1.97	74	81	86	2.00	83	86	86	2.00	87	93	93
甘氨酸 Gly	0.31	34	67	67	0.31	34	67	0.29	34	67	66	0.34	53	66	66	0.34	56	82	82
脯氨酸 Pro	0.72	46	74	74	0.74	46	74	0.80	46	74	50	0.81	44	50	50	0.81	79	93	93
丝氨酸 Ser	0.39	65	81	81	0.39	66	81	0.43	66	81	81	0.46	75	81	81	0.46	77	91	91
酪氨酸 Tyr	0.29	49	69	69	0.32	69	75	0.38	69	75	85	0.39	80	85	85	0.39	82	90	90

高粱蛋白质的分子间交联较多,且淀粉颗粒被高粱醇溶蛋白体所包裹,共同嵌入高粱胚乳的谷蛋白基质中,高粱蛋白质与淀粉之间形成了强结合键最终又限制了营养成分的水解与有效性的发挥,因此,在生产中经常利用发芽、挤压加工等方式提高动物对高粱蛋白质的消化率,并改善其品质^[15-16]。表3汇总了国内外饲料原料数据库中有关高粱的氨基酸含量,并整理了猪对高粱中氨基酸的消化率数值。由表可知,不同数据库中高粱的氨基酸含量及猪对高粱中各氨基酸的AID与SID差异较大,导致这一现象的原因是:1)高粱的营养价值本身就存在高变异性的特点,而氨基酸作为高粱中一种重要的营养成分,可能会受到品种、收获期、产区和生长环境等多重因素的影响^[16];2)在评价高粱的氨基酸营养时,各国所使用的猪品种、猪生长状况及测定方法也可能存在差异。在各国的数据库中,有关猪对高粱中各氨基酸消化率的数据呈现出单一化、静态化的特点,多数是基于文献报道或预测,所选择的高粱品种较少,因此要更加客观、准确地预测饲喂高粱的猪对各类氨基酸的AID与SID,就必须结合高粱中营养成分的高变性这一特点,构建“高粱的营养成分——猪对高粱中各类氨基酸的AID与SID”的动态预测方程。

1.3 高粱中的淀粉

高粱中的淀粉主要存在于胚乳,作为高粱中能量的主要来源,占高粱籽粒的60%~80%,且高粱的淀粉颗粒一般含有20%~30%的直链淀粉和70%~80%的支链淀粉^[9]。高粱淀粉在工业生产并未得到大规模的应用,主要有以下3个原因:1)高粱籽粒小且与种皮结合比较紧密,难以分离;2)高粱种皮含有大量色素,导致高粱淀粉往往被染成红色或黄褐色;3)高粱中的一部分淀粉存在于种皮中,在提取高粱淀粉时会随着种皮的脱落直接影响到淀粉得率^[17]。查阅NRC(2012)可得高粱的总淀粉含量为61.34%~78.76%,在数值上近似甚至高于普通黄玉米(57.94%~67.16%),但高粱的慢消化淀粉及抗性淀粉的含量显著高于玉米、大米和小麦等谷物^[18]。张若辰^[17]选取“晋中0823号”等34份国内高粱,测定得到高粱中抗性淀粉的含量为0~22.21%,除临沂R、西糯1号外,大部分品种高粱中的抗性淀粉含量为10%~20%,以“吉杂131号”为代表的8个高粱品种,其抗性

淀粉的含量超过了20%。祁瑜婷^[18]选取“吉杂6号”等32种国内高粱,测定得到淀粉的含量为65.29%~72.72%,并发现这些高粱品种的直链、支链淀粉的含量差异显著,以“辽粘3号”为代表的8个蜡质高粱的直链淀粉的含量在2%左右,但含有较高的支链淀粉;而其余24个高粱品种的直链淀粉的含量则为16.73%~25.98%。综上可知,高粱淀粉这一化学组分呈现出较高的变异性与种质因素密不可分,亦可能与当地气候条件深度相关。

高粱淀粉具备一定的生理功能,董吉林等^[19]探究了高粱淀粉与高粱抗性淀粉对超重和肥胖模型大鼠体重以及肾脏、肠、睾丸周围脂肪组织的含量、分布及形态结构的影响,结果表明,高粱淀粉与高粱抗性淀粉对超重大鼠的体重产生了显著的影响,给予超重大鼠含30%高粱淀粉与高粱抗性淀粉高脂饲料8周,即可显著降低其体重;高粱淀粉与高粱抗性淀粉可以通过影响脂肪细胞的大小,进而影响脂肪组织的合成和重量,最终影响到肾脏、肠、睾丸周围的脂肪组织分布情况。因此,高粱淀粉及高粱抗性淀粉在一定程度上具备降脂的作用。

1.4 高粱中的油脂和脂肪酸

袁蕊等^[20]选取青壳洋、国窖红1号、泸糯8号以及内蒙古、辽宁、黑龙江等6种高粱的籽粒,测定得到其脂肪含量为2.32%~4.68%,其中国窖红1号高粱的油脂含量最高,内蒙古高粱则最低。高粱胚作为含油量最高的部位,约占籽实中脂肪总量的75%;6种高粱的饱和脂肪酸含量为0.63%~0.94%,不饱和脂肪酸含量为1.92%~3.87%,约占总脂肪酸含量的82%;且人体所需的亚油酸、亚麻酸含量均较高,约占高粱中不饱和脂肪酸总量的51%。杨士春^[21]测定了wtw、wt、罗马1号、罗马2号、丽欧1号、丽欧2号、浙能1号等7种甜高粱籽粒的脂肪酸,发现它们的油酸和亚油酸含量均较高,其中罗马1号的油酸含量及wtw、wt的亚油酸含量为供测高粱样品中最高值,分别为0.28、0.25和0.25 g/L,故而这3个品种的高粱具有较高的营养和开发利用价值。

2 高粱中的抗营养因子及酶解

高粱中的固有抗营养因子主要有3个,分别是单宁、高粱醇溶蛋白以及植酸盐,这3种物质都能影响动物对氨基酸的可利用性^[22],进而降低高

梁的应用价值。

2.1 单宁

单宁又被称为多酚,根据其化学性质可分为缩合单宁与水解单宁^[23]。需要注意的是,高粱的种皮颜色及强度并不能较好地指示出单宁的含量,即并非只有具备红色或褐色种皮的高粱品种才含有单宁,在种皮颜色为黄色或白色的高粱品种中也可能存在一定含量的单宁,单宁的存在与否取决于着色种皮基因的控制^[24]。含有有色种皮的高粱必须同时具备 B1_B2_2 个显性基因,才能含有缩合型单宁,在这一前提下,S 基因又控制着内外果皮中单宁的存在形式,以 B1_B2SS 为基因型的高粱籽粒,单宁主要存在于种皮的细胞壁及果皮内,其缩合型单宁的含量也是所有基因型中最高的,而以 B1_B2ss 为基因型的高粱籽粒,单宁则沉积于种皮层的小泡中,必须用酸化后的甲醇破坏其囊泡的结构,才能使单宁被完全释放出来^[25-26]。

高粱单宁主要分布在其种皮和胚乳中,Scalbert^[27]测得其含量为 0.2%~2.3%。潘龙^[9]测定了国内外 28 种高粱的单宁含量,并划分出 8 个低单宁高粱品种,测得单宁含量为 0.02%~0.16%,平均值为 0.08%;又划分出 10 个中单宁高粱品种,测得单宁含量为 0.67%~0.98%,平均值为 0.84%;最后筛选出 10 个高单宁高粱品种,测得单宁含量为 1.11%~1.51%,平均值为 1.29%。张一中等^[28]在对 90 份高粱种质资源的单宁含量进行测定后发现,不同高粱种质资源的单宁含量差异较大,平均含量为 0.58%,但变异系数高达 66.33%;该研究还指出,高粱单宁的含量与粒色呈极显著正相关($r=0.643, P<0.01$),因此在一定程度上可以通过粒色情况来挑选单宁含量较低的高粱品种。

Pan 等^[29-30]研究发现,单宁是高粱籽粒中 DE、ME 的关键预测因子,并提出 2 个与高粱有效能相关的预测方程: $DE=6\ 974-236\times\text{单宁}-43.27\times\text{酸性洗涤纤维(ADF)}-24.96\times\text{CP}-0.71\times\text{GE}$ ($R^2=0.95$); $ME=3\ 973-262\times\text{单宁}-27.24\times\text{ADF}$ ($R^2=0.94$);并由此推测,当单宁含量每增加 1%时,DE 与 ME 可降低 837.17 kJ/kg 以上。在此基础上,Pan 等^[31]选取 3 个低单宁白高粱品种、3 个高单宁红高粱品种和 1 个玉米品种,分别测定了生长猪对于它们的 DE 与 ME,结果显示:3 个低单宁白高粱的 DE 为 16.5~16.8 MJ/kg,ME 为 16.2~

16.5 MJ/kg,显著高于玉米、3 个高单宁红高粱的 DE 与 ME 测定值;3 个高单宁红高粱的 DE 为 15.0~15.5 MJ/kg,ME 为 14.7~15.2 MJ/kg,显著低于玉米的 DE 与 ME 测定值。因此,在实际生产中需要结合高粱的品种与单宁含量考虑其 DE 与 ME 的差异性,进而便于饲料企业更好地利用高粱,并实现精准配方。

高粱单宁的抗营养作用机制主要有以下 5 点:1)能抑制动物采食,还能对畜禽消化道上多个位点处的消化酶产生抑制效应,并最终影响到动物的生长性能^[32];高粱单宁可以同糖蛋白、唾液蛋白相互作用,并产生苦涩味,降低适口性^[33]。Nyachoti 等^[34]用低单宁(1.12 g/kg)和高单宁(25.7 g/kg)的高粱饲喂肉鸡试验表明,当饲喂高单宁高粱时,肉鸡在增重上减少约 19.6%,采食量减少约 10.1%,饲料转化率降低 14.1%。2)易与维生素、多糖、矿物质及蛋白质结合,形成难以消化的螯合物,降低动物对绝大多数营养成分的消化率。Vasan 等^[35]测定了 30 周龄成年白来航公鸡对高单宁高粱和低单宁高粱中 15 种氨基酸的 AID 及真消化率(true digestibility, TD),发现低单宁高粱中以天冬氨酸为首的 15 种氨基酸的 AID 及 TD 均显著高于高单宁高粱,且 2 个试验组 AID 的差异为 4.00%~21.62%,TD 的差异为 13.17%~35.05%。这些结果都说明单宁含量会直接影响到肉鸡对氨基酸的消化率。3)能抑制畜禽的消化酶活性,这主要是通过与其相互凝结作用而实现的。据 Bae 等^[36]报道,含单宁的高粱品系对 α -淀粉酶、 β -淀粉酶的抑制率显著高于不含单宁的高粱品系,其中含单宁的高粱品系对 α -淀粉酶的抑制率超过了 97%,对蛋白酶的抑制率也高达 70%。4)增加内源性蛋白渗出。Mitjavila 等^[37]观察到,反复给大鼠饲喂单宁酸会刺激胃蛋白酶的分泌,最终导致胃蛋白酶总量增加 64%,胃酸总量增加 55%,这种现象的出现可能是由于单宁酸与蛋白质的结合产物难以被胃蛋白酶消化,而这种抵抗作用又在不断刺激着胃蛋白酶的高水平分泌。5)单宁及其代谢产物的具有毒害性。王吉等^[38]以猪肾细胞系 PK-15 细胞为模型,综合研究了单宁酸对猪肾细胞的毒害作用,结果发现,30 $\mu\text{mol/L}$ 的单宁酸能够抑制 PK-15 细胞的增殖,且经 30 $\mu\text{mol/L}$ 的高浓度单宁酸处理 24 h 后,PK-15 细胞中谷胱甘肽过氧化物酶、过氧化氢酶、超氧化物歧化酶的

活性显著或极显著降低,丙二醛和活性氧的含量极显著提高,猪肾细胞受到了明显的氧化损伤,活性氧含量的升高介导了线粒体途径的细胞凋亡与细胞 S 期阻滞。Kumar 等^[39]选取单宁含量为 23 和 16 g/kg 的生红高粱与重组型红高粱为试验材料,开展了肉鸡饲养试验,结果显示,饲喂生红高粱的仔鸡与饲喂重组型红高粱的仔鸡相比具有更强的免疫应答能力,且它们的肝肾组织也出现了轻微的组织病理学变化,这说明高粱单宁存在一定的毒害作用,因此在动物生产中需要严格把控高单宁高粱的安全添加量。

2.2 醇溶蛋白

醇溶蛋白是高粱胚乳的主要成分,其直径为 0.4~2.0 μm ,占高粱蛋白质的 77%~82%^[40],是高粱蛋白质的主要存在形式;而在氨基酸组成上则以脯氨酸、丙氨酸、亮氨酸等中性氨基酸为主,约占总氨基酸的 60% 以上,这也是高粱醇溶蛋白疏水性较强的原因之一^[41]。高粱醇溶蛋白的氨基酸组成极不平衡,缺少蛋氨酸、赖氨酸和色氨酸等必需氨基酸^[42],因这 3 种氨基酸都是关乎猪与家禽生产领域且极为重要的限制性氨基酸,故醇溶蛋白的大量存在使得高粱谷物的饲用价值受到了一定程度的限制。醇溶蛋白根据溶解度、结构和分子量可分为 α -醇溶蛋白、 β -醇溶蛋白、 γ -醇溶蛋白、 δ -醇溶蛋白,其中 α -醇溶蛋白沉积于蛋白体中央核心,被 β -醇溶蛋白、 γ -醇溶蛋白在外围紧密包裹^[43]。这种特殊的蛋白质组成形式导致 α -醇溶蛋白很难被动物的消化酶所降解,在一定程度上决定了动物对高粱中的氮素和氨基酸的低利用率。同时,蛋白质与淀粉的镶嵌结构也决定了动物对高粱淀粉的低利用率,在高粱胚乳中,淀粉颗粒被醇溶蛋白紧密包裹,淀粉与蛋白质的交互作用最终导致淀粉的糊化与淀粉酶的分解作用均受到了一定程度的负面影响^[9]。Elkin 等^[44]对高粱单宁、高粱醇溶蛋白与高粱氨基酸消化率之间的相关性进行了研究,在 12 个样品中,CP 含量平均为 107.1 g/kg,单宁含量为 2.0~38.8 g/kg,单宁含量平均为 16.4 g/kg;试验结果显示:单宁、醇溶蛋白含量与氨基酸消化率均为负相关,从相关系数上看,醇溶蛋白含量对 9 种必需氨基酸的平均消化率比单宁影响更大,此外,醇溶蛋白含量还与 ME 呈显著负相关。

Chandrashekar 等^[45]指出,高粱的醇溶蛋白含

量越高,淀粉的糊化程度越低;其原因可能是与淀粉颗粒结合的蛋白质不利于淀粉的完全糊化,蛋白质影响了热处理后高粱淀粉的消化率,而且高粱淀粉-蛋白质的交互作用可能影响糊化淀粉的消化率,醇溶蛋白的交互作用又影响了蒸汽处理后高粱淀粉的消化率,因此高温蒸煮不利于改善动物对高粱蛋白质的消化率。据 Emmambux 等^[46]报道,蒸煮处理使动物对高粱醇溶蛋白的消化率降低了 24%,体外蛋白质消化率降低了 27%,谷蛋白的消化率也受到了负面影响。

Watterson 等^[47]研究发现,在含 90% 玻璃质的角质胚乳高粱中,醇溶蛋白含量约为 59.6%,而在只含 45% 玻璃质的软质胚乳高粱中,醇溶蛋白含量约为 47.5%;利用肉鸡的饲喂试验也表明,软质胚乳高粱对其生长性能的改善效果更好,与角质胚乳高粱相比,饲料转化率提高了 12.75%。因此,为了尽可能地降低高粱醇溶蛋白的含量,研究人员往往在高粱育种时定向选择那些含软质胚乳的高粱籽实,实现对其胚乳质地的遗传改良。

2.3 植酸和植酸磷

植酸是高粱籽粒中一种有机酸(6-肌醇磷酸),而植酸磷的化学结构由 Anderson^[48]于 1914 年提出,是一种含 6 个磷酸基团的环状化合物(化学式为 $\text{C}_6\text{H}_{18}\text{O}_{24}\text{P}_6$)。植酸磷的抗营养作用机制主要为:1) 动物所需要的微量元素主要是以金属离子的形式参与机体正常的生理代谢过程,而植酸磷能与 Fe、Ca、Mg 和 Zn 发生螯合反应^[49],形成稳定的植酸盐,且人和非反刍动物的消化道内缺少植酸酶,因此它们不能被直接吸收利用,进而降低微量元素的吸收,最终将诱发严重的微量元素缺乏症^[9]。2) 植酸盐可与蛋白质、淀粉及脂肪相结合,进而与内源性淀粉酶、蛋白酶和脂肪酶相互竞争,最终降低这些酶的活性,直接影响动物对营养物质的消化^[9]。3) 植酸盐会降低动物消化道内蛋白质的溶解度和消化率,因此到达小肠前段(如十二指肠)的未消化蛋白质增多,这刺激了胃泌素、胃蛋白酶原和胃酸的分泌,而盐酸与胃蛋白酶的增加又会提高动物的内源性损失^[50];在此条件下,胰腺会产生 NaHCO_3 来与过多的胃酸形成缓冲体系,生成的 Na^+ 会激发肠道上皮组织细胞上钠泵的活跃程度,加剧 Na^+ 的跨膜运输, Na^+ 被大量消耗之后,抑制了小肠黏膜对某些氨基酸的吸收与内源性氨基酸的重吸收作用,因为它们非常依

赖钠/磷泵的主动运输^[50-51]。

郭存柱等^[52]测得高粱试验饲料中的总磷含量为0.18%,较小麦、稻谷而言,生长猪对高粱中磷的表观消化率及沉积率最低,分别为16.51%和16.20%,这说明高粱中的植酸磷含量较高,而高粱中的植酸酶含量和活性较小麦、稻谷低,这都限制了动物对高粱中磷的利用率。Selle等^[53]援引霍恩海姆大学的一项研究数据,即选取了15个高粱品种,测得总磷含量为0.21%~0.43%,其中植酸磷含量为0.17%~0.37%,占总磷的66%~93%;植酸酶活性为10~125 FTU/kg,平均值为35 FTU/kg,低于大麦(348 FTU/kg)、小麦(503 FTU/kg)、米糠(129 FTU/kg)和小麦副产物(2 173 FTU/kg)。因此,向高粱-豆粕型饲料中添加外源性植酸酶,进而将植酸磷转化为可利用磷,是提高高粱营养价值所必需的一项关键性技术。

2.4 高粱中抗营养因子的酶解

在高粱基础饲料中可以添加外源性植酸酶、蛋白酶和复合酶以提高淀粉、蛋白质、钙和磷的利用率,从而改善动物生产性能^[54]。郭琦等^[55]指出,在动物饲养阶段可以利用单宁降解消化酶、水果和菌类中天然存在的多酚氧化酶来降低单宁含量,促进动物对高单宁高粱的消化与吸收。Liu等^[56]报道,在高粱型饲料中添加外源性植酸酶,可显著提高雄性罗斯308雏鸡的体重、采食量和饲料转化率,但对表观代谢能(AME)、氮校正表观代谢能(AMEn)和氮沉积量的影响不如添加植酸酶后的玉米饲料,这可能与传统植酸酶无法彻底消除高粱中多种抗营养因子的综合作用有关。于明等^[57]研究发现,添加植酸酶使生长猪对高粱饲料中的总磷表观消化率提高了47.87%,总磷沉积率亦提高了47.35%;同时饲料中CP与钙的表观消化率在加入植酸酶后显著提高。陈静等^[58]在50%高粱替代玉米-豆粕型基础饲料中添加外源型复合蛋白酶,发现仔猪生长前期(1~35 d)的料重比显著降低,仔猪生长后期对CP、干物质、GE和有机物的利用率显著提高,分别提升了11.94%、6.25%、5.00%和2.35%;此外,添加复合蛋白酶还降低了仔猪粪氮与尿氮的排泄量,使仔猪的氮消化率、氮沉积率和氮沉积量显著提高了13.16%、28.57%和25.43%。Pan等^[11]也得到了类似的结论,虽然饲喂高粱-豆粕型饲料的生长猪与饲喂玉米-豆粕型基础饲料的对照组相比,在氮的排放量

上提高了25%以上,CP的表观总消化率也降低了7%以上,但在饲料中添加150 mg/kg外源型蛋白酶后,高粱-豆粕型饲料组生长猪粪氮排放量减少12%以上,CP的表观消化率提升幅度也超过6%。唐千甯^[59]在高粱-豆粕型饲料中添加复合酶制剂(含2 000 U/g单宁酶+20 000 U/g木聚糖酶+1 500 U/g β -甘露聚糖酶+3 000 U/g蛋白酶+500 U/g淀粉酶)和枯草芽孢杆菌后,发现肉鸡对粗纤维的消化率和半净膛率较对照组均显著提高,且复合酶制剂对肉品质、AME没有不良影响。唐一波等^[60]在高粱饲料中添加500 g/t的复合酶制剂后,发现试验组生长育肥猪的末重和平均日增重均显著提高,料重比和死亡率则分别显著下降了0.19%和1.33%,这意味着生长育肥猪的部分生产性能得到了改善,同时,在高粱-豆粕型饲料中添加500 g/t的复合酶制剂对降低生长育肥猪饲养成本,提高经济收益也有非常积极的作用。

3 高粱在猪和家禽生产中的应用

3.1 高粱在猪生产中的应用

高粱在作为饲料原料时,相较于其他谷物类饲料而言,营养品质较差。这主要是因为在国内的许多高粱品种中,单宁含量较高,且主要应用于酿酒,这些高单宁的高粱若应用于饲用领域,会直接影响到动物对营养物质的消化与吸收,但据Awika等^[61]报道,经过数十年的育种工作后,已有超过99%以上的美国高粱不含单宁,且能值与玉米几乎相同,这些高粱品种已经被广泛应用于畜禽的饲料中。近年来我国也进口了不少来自美国的饲用高粱,在玉米进口配额日益紧张而高粱的进口配额不受限制的情况下,在养猪生产中若使用高粱原料来制作配方,不失为降低饲料成本、提高养殖效益的良策。

尚秀国等^[62]研究发现,饲喂无单宁高粱-豆粕型饲料的猪在平均日采食量、平均日增重和饲料转化率等指标上与饲喂玉米-豆粕型饲料的猪相比并无显著差异,因此用无单宁高粱替代玉米有助于降低饲料成本,提高养猪收益。袁敏等^[63]分别用33.33%、66.66%和100.00%的高粱替代玉米饲喂给育肥猪,进而组成低、中、高剂量的3个高粱饲料组,结果显示:与玉米对照组相比,各高粱饲料组的猪在平均日增重、平均日采食量、料重比、胴体长、眼肌面积和屠宰率等指标上均无显著

差异;且低高粱组胴体重显著高于中高梁组和高高粱组,这说明高粱替代部分玉米饲喂给育肥猪是完全可行的,且对育肥猪的胴体性状有改善作用。

李思思等^[64]探讨了不同高粱水平的低蛋白质饲料对生长猪生长性能的影响,试验结果显示:当饲料中 CP 含量为 18% 时,饲料中若含有 50% 的高粱,与无高粱饲料比较,可使生长猪的平均日采食量显著提高 28.90%, 平均日增重显著提高 15.07%。当饲料中 CP 含量为 15% 时,饲料中若含有 50%、80% 的高粱,与无高粱饲料比较,可使生长猪的平均日采食量分别显著提高 11.05%、20.00%;饲料中若含有 20%、50% 的高粱,与无高粱饲料比较,可使生长猪的平均日增重分别提高 2.67%、8.00%,但差异不显著;若饲料中的高粱比例增至 80%,与无高粱饲料比较,则生长猪的平均日增重将显著提高 18.67%。综上所述,降低饲料中 3 个百分点的 CP,且高粱水平在 20%~80% 在养猪生产实践中是可行的,对生长猪的生产性能无负面影响。

张凯等^[65]研究发现,当饲料中高粱替代玉米的比例为 30%、65% 和 100% 时,育肥猪背膘厚度分别显著提高了 3.0%、5.2% 和 4.3%;在 65%、100% 高粱替代玉米试验组中,背最长肌中的粗脂肪含量、45 min 后 pH 均显著提高,且背最长肌中反式油酸、花生酸和花生四烯酸的含量升高。这说明用高粱替代部分玉米有助于改善猪肉品质。

宋献艺等^[66]用高粱替代 65% 和 100% 的玉米后,生长育肥猪血液中的葡萄糖含量显著降低,血清中超氧化物歧化酶活性显著增强,血清中的丙二醛含量显著降低,这说明用高粱替代玉米有助于改善育肥猪的血清抗氧化能力。Pan 等^[67]将断奶仔猪随机分为 2 组,于 1~14 d 分别饲喂玉米-豆粕型饲料和含有 300 g/kg 内蒙古高粱的试验饲料(部分替代玉米),又于 15~28 d 对试验组的猪饲喂含有 566 g/kg 内蒙古高粱的试验饲料(100% 替代玉米),结果发现:饲喂高粱的断奶仔猪,其血清中尿素氮与丙二醛的含量显著增加,血清中过氧化氢酶活性显著降低,血清与肝脏中超氧化物歧化酶活性显著降低;其十二指肠、空肠中的脂肪酶、胰蛋白酶和淀粉酶活性都有显著降低或降低的趋势,十二指肠中隐窝深度显著增加,回肠中绒毛高度/隐窝深度值显著降低。这说明用高粱替

代部分玉米后,断奶仔猪的肠道形态发生了改变,消化酶的活性减弱,血清和肝脏中与抗氧化能力相关的酶活性亦减弱。这可能与内蒙古高粱的单宁含量较高有关,最终可能会影响断奶仔猪对此类高粱中能量与蛋白质的利用率。值得注意的是,我们还可以发现上述 2 个试验的部分结果并不一致,其原因可能与所选用的高粱品种、以单宁为首的抗营养因子含量、在饲料中高粱的添加比例、猪只所处的生长阶段和对高粱的吸收效率有很大的关系。

Pan 等^[11]将 144 头健康断奶仔猪按性别与体重平均分配到 4 个组中,在这 4 个组的饲料中,高粱:玉米分别为 0:60、20:40、40:20 和 60:0,将这 4 种饲料分别喂给 6 个重复栏中的猪,每个猪栏 6 头猪(3 公 3 母),统计断奶仔猪生长性能与粪便评分等数据。结果显示:在试验全期(1~28 d),各组平均日增重、平均日采食量之间无显著差异;1~14 d,饲喂高粱的猪的粪便评分显著低于饲喂玉米的猪;15~28 d,饲喂高粱的猪与饲喂玉米的猪相比,其粪便评分有降低的趋势($P=0.086$);而就试验全期(1~28 d)而言,饲喂高粱的猪的粪便评分亦显著低于饲喂玉米的猪,初步推测该结果的出现可能与高粱中的多酚类物质相关,且这种抗腹泻的作用对断奶仔猪而言是非常积极的,但确切的机制尚待进一步研究。

3.2 高粱在家禽生产中的应用

陈伟等^[68]为探讨高粱在蛋鸭饲料中的适宜添加量,在玉米-豆粕型基础饲料中分别添加 10%、20%、30%、40%、50% 和 60% 的低单宁高粱及 30% 膨化低单宁高粱,并以玉米-豆粕型基础饲料为对照组,饲喂给 130 日龄的龙岩蛋鸭,结果表明:无论是在产蛋初期(35 d)还是产蛋高峰期(65 d),20% 低单宁高粱组的产蛋率都是最高的;在产蛋高峰期,不同高粱水平及膨化高粱对平均蛋重影响显著,30% 膨化低单宁高粱的平均蛋重最高,显著高于对照组与 30% 低单宁高粱组;而 20% 低单宁高粱组的日产蛋重最高,料蛋比最低;因此,在产蛋高峰期,饲料中添加 20% 低单宁高粱对改善蛋鸭的生产性能最为有利,且应用膨化高粱也有益于改善蛋重。

叶小飞^[69]研究了湖南高粱、美国高粱和内蒙古高粱替代不同比例的玉米对黄羽肉鸡生长性能、免疫器官指数、肠道形态和血液生化指标的影

响,综合评价了这3种不同来源的饲用高粱对黄羽肉鸡的营养价值,结果表明:3种不同来源高粱以30%、50%比例替代玉米的各试验饲粮对黄羽肉鸡生长性能均无抑制反而有提高的作用,在试验前期(1~28 d),替代30%玉米的湖南高粱、内蒙古高粱及替代50%玉米的美国高粱试验组中,黄羽肉鸡的平均日增重较玉米-豆粕型基础饲粮对照组均显著提高,平均日采食量均显著提高;在试验后期(29~56 d),各试验组的平均日采食量较玉米-豆粕型基础饲粮对照组均极显著提高。不同来源的高粱替代玉米后对黄羽肉鸡的屠宰性能总体没有不良影响,各项免疫器官指数评价正常,总抗氧化能力亦未见异常;就主要营养成分与价值而言,美国、内蒙古高粱优于湖南高粱,以内蒙古高粱替代50%的玉米能够将黄羽肉鸡的整体生长性能发挥至最佳水平。此外,在试验全期,高粱替代50%玉米组的腹脂率显著提高;在试验前期(1~28 d),高粱替代50%玉米组的回肠绒毛高度/隐窝深度值显著高于对照组;在试验后期(29~56 d),血清总抗氧化能力随着湖南高粱与内蒙古高粱替代玉米比例的升高而增强,且当2种高粱替代玉米的比例为50%时,相较于对照组,血清总抗氧化能力更高。综合而言,在黄羽肉鸡的饲粮中添加内蒙古高粱替代50%的玉米对提高其生长性能最为适宜。

4 小结与展望

高粱与玉米的有效能值相近,价格也更加低廉,且营养价值比较丰富,与玉米-豆粕型饲粮相比对动物的生产性能无不良影响,具备广泛的开发与利用前景。多项研究表明,高粱中虽然有诸如单宁、醇溶蛋白和植酸磷等抗营养因子,可能会限制饲喂高粱型饲粮的猪与家禽的生产性能,但通过酶制剂处理之后,可以消除大部分抗营养因子,实现对高粱的高效化利用。

然而,目前国内有关高粱有效能、氨基酸消化率等重要营养参数的研究较少,且现有文献与数据库中提供的数值无法适应因品种、产地和加工工艺等因素所造成的高粱营养价值的变化。因此,我们需要对国内绝大多数高粱品种的营养价值进行准确评估,并对饲喂高粱型饲粮的猪的有效能及氨基酸消化率做动态预测,逐步完善高粱原料数据库,这是充分利用高粱,实现精准配方的

前提与关键所在。

参考文献:

- [1] SUHENDRO E L, MCDONOUGH C M, ROONEY L W, et al. Effects of processing conditions and sorghum cultivar on alkaline-processed snacks [J]. *Cereal Chemistry*, 1998, 75(2): 187-193.
- [2] 袁保京, 王若瑾, 姜洁凌, 等. 高粱的营养价值及其在猪、鸡饲料与养殖生产中的应用研究进展 [J]. *中国畜牧杂志*, 2014, 50(18): 70-75.
YUAN B J, WANG R J, JIANG J L, et al. Nutritional values of sorghum and its practical application in animal and feed production [J]. *Chinese Journal of Animal Science*, 2014, 50(18): 70-75. (in Chinese)
- [3] 邹剑秋, 王艳秋, 柯福来. 高粱产业发展现状及前景展望 [J]. *山西农业大学学报(自然科学版)*, 2020, 40(3): 1-8.
ZOU J Q, WANG Y Q, KE F L. Development status and prospect of sorghum industry in China [J]. *Journal of Shanxi Agricultural University (Natural Science Edition)*, 2020, 40(3): 1-8. (in Chinese)
- [4] 曲祥春, 杨微, 梁军, 等. 中国粒用高粱产业问题探讨 [J]. *东北农业科学*, 2020, 45(2): 16-19, 35.
QU X C, YANG W, LIANG J, et al. Discussion on the problems of grain sorghum industry in China [J]. *Journal of Northeast Agricultural Sciences*, 2020, 45(2): 16-19, 35. (in Chinese)
- [5] 桂松, 牛静, 胡建. 中国高粱产业发展现状分析 [J]. *农业与技术*, 2019, 39(1): 18-20.
GUI S, NIU J, HU J. Analysis on the development status of sorghum industry in China [J]. *Agriculture & Technology*, 2019, 39(1): 18-20. (in Chinese)
- [6] 周腰华, 李蔚青, 张森, 等. 中国高粱贸易与美国高粱生产成本收益分析 [J]. *浙江农业学报*, 2017, 29(9): 1589-1594.
ZHOU Y H, LI W Q, ZHANG M, et al. Analysis of China's sorghum trade and production cost of sorghum in the United States [J]. *Acta Agriculturae Zhejiangensis*, 2017, 29(9): 1589-1594. (in Chinese)
- [7] 周腰华. 中国高粱贸易分析 [J]. *农业经济*, 2019(8): 122-123.
ZHOU Y H. Analysis of sorghum trade in China [J]. *Agricultural Economy*, 2019(8): 122-123. (in Chinese)
- [8] 王红育, 李颖. 高粱营养价值及资源的开发利用 [J]. *食品研究与开发*, 2006, 27(2): 91-93.
WANG H Y, LI Y. Nutritional value of sorghum and

- development and exploitation of resource [J]. Food Research and Development, 2006, 27 (2) : 91-93. (in Chinese)
- [9] 潘龙.高粱的猪有效能预测方程及高效应用的研究 [D].博士学位论文.北京:中国农业大学,2018:10-11,15-16.
PAN L. Prediction equations for the available energy and efficient application of sorghum grain fed to pigs [D]. Ph.D. Thesis. Beijing: China Agricultural University, 2018: 10-11, 15-16. (in Chinese)
- [10] NYANNOR E K D, ADEDOKUN S A, HAMAKER B R, et al. Nutritional evaluation of high-digestible sorghum for pigs and broiler chicks [J]. Journal of Animal Science, 2007, 85 (1) : 196-203.
- [11] PAN L, SHANG Q H, WU Y, et al. Concentration of digestible and metabolizable energy, standardized ileal digestibility, and growth performance of pigs fed diets containing sorghum produced in the United States or corn produced in China [J]. Journal of Animal Science, 2017, 95 (11) : 4880-4892.
- [12] 彭安琪.饲用玉米和饲用高粱生产性能评价 [D].硕士学位论文.雅安:四川农业大学,2019:40.
PENG A Q. Performance evaluation of forage corn and forage sorghum [D]. Master's Thesis. Ya'an, Sichuan Agricultural University, 2019: 40. (in Chinese)
- [13] SUBRAMANIAN V, SEETHARAMA N, JAMBUNATHAN R, et al. Evaluation of protein quality of sorghum [*Sorghum bicolor* (L.) Moench] [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 1990, 38 (6) : 1344-1347.
- [14] 唐茂妍,陈旭东.高粱在饲料中的应用 [J].中国饲料,2013(4):39-41.
TANG M Y, CHEN X D. Application of sorghum in feed [J]. China Feed, 2013 (4) : 39-41. (in Chinese)
- [15] ABDELRAHMAN A A, HOSENEY R C. Basis for hardness in pearl millet, grain sorghum, and corn [J]. Cereal Chemistry, 1984, 61 (3) : 232-235.
- [16] LIU S Y, SELLE P H, COWIESON A J. Strategies to enhance the performance of pigs and poultry on sorghum-based diets [J]. Animal Feed Science and Technology, 2013, 181 (1/4) : 1-14.
- [17] 张若辰.高粱中抗性淀粉的研究 [D].硕士学位论文.济南:齐鲁工业大学,2014:15.
ZHANG R C. Study on resistant starch in sorghum [D]. Master's Thesis. Jinan: Qilu University of Technology, 2014: 15. (in Chinese)
- [18] 祁瑜婷.高粱淀粉制备及其功效评价研究 [D].硕士学位论文.济南:山东大学,2018:5,15-16.
QI Y T. Preparation and efficacy evaluation of sorghum starch [D]. Master's Thesis. Jinan: Shandong University, 2018: 5, 15-16. (in Chinese)
- [19] 董吉林,林娟,申瑞玲,等.高粱淀粉及抗性淀粉对高脂饮食诱导大鼠体脂分布研究 [J].粮食与油脂,2013,26(10):14-17.
DONG J L, LIN J, SHEN R L, et al. The study of effect of sorghum starch and resistant starch on body fat distribution of high-fat diet-induced rats [J]. Cereals & Oils, 2013, 26 (10) : 14-17. (in Chinese)
- [20] 袁蕊,敖宗华,丁海龙,等.高粱中脂肪酸和低分子有机酸气相色谱测定 [J].酿酒,2011,38(4):42-43.
YUAN R, AO Z H, DING H L, et al. Measuring on the fatty acids and low molecular weight organic acids from sorghum by gas chromatography [J]. Liquor Making, 2011, 38 (4) : 42-43. (in Chinese)
- [21] 杨士春.甜高粱籽粒中脂肪酸含量的气相色谱分析 [J].中国粮油学报,2012,27(11):100-104.
YANG S C. Analysis of content of fatty acids in sweet sorghum grains by GC [J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2012, 27 (11) : 100-104. (in Chinese)
- [22] SELLE P H, CADOGAN D J, LI X, et al. Implications of sorghum in broiler chicken nutrition [J]. Animal Feed Science and Technology, 2010, 156 (3/4) : 57-74.
- [23] 杨露,谭会泽,刘松柏,等.单宁的抗营养作用及其在畜禽营养中的研究进展 [J].粮食与饲料工业,2019(6):53-56.
YANG L, TAN H Z, LIU S B, et al. The function of anti-nutrition of tannin and its research progress in animal nutrition [J]. Cereal & Feed Industry, 2019 (6) : 53-56. (in Chinese)
- [24] BOREN B, WANISKA R D. Sorghum seed color as an indicator of tannin content [J]. Journal of Applied Poultry Research, 1992, 1 (1) : 117-121.
- [25] BLAKELY M E, ROONEY L W, SULLINS R D, et al. Microscopy of the pericarp and the testa of different genotypes of sorghum [J]. Crop Science, 1979, 19 (6) : 837-842.
- [26] EARP C F, MCDONOUGH C M, AWIKA J, et al. Testa development in the caryopsis of *Sorghum bicolor* (L.) Moench [J]. Journal of Cereal Science, 2004, 39 (2) : 303-311.
- [27] SCALBERT A. Quantitative methods for the estimation of tannins in plant tissues [M] // HEMINGWAY

- R W, LAKS P E. Plant polyphenols-synthesis, properties, significance. New York: Plenum Press, 1992: 259-280.
- [28] 张一中, 周福平, 张晓娟, 等. 高粱种质籽粒蛋白质含量和单宁含量的测定及聚类分析[J]. 天津农业科学, 2017, 23(8): 10-14, 50.
- ZHANG Y Z, ZHOU F P, ZHANG X J, et al. Cluster analysis and determination of protein and tannin content in sorghum germplasms[J]. Tianjin Agricultural Sciences, 2017, 23(8): 10-14, 50. (in Chinese)
- [29] PAN L, LI P, MA X K, et al. Tannin is a key factor in the determination and prediction of energy content in sorghum grains fed to growing pigs[J]. Journal of Animal Science, 2016, 94(7): 2879-2889.
- [30] PAN L, PIAO X S, WU Y, et al. Digestible energy of sorghum grain for pigs could be predicted using a computer-controlled simulated digestion system[J]. Animal Feed Science and Technology, 2018, 240: 31-39.
- [31] PAN L, MA X K, HU J X, et al. Low-tannin white sorghum contains more digestible and metabolisable energy than high-tannin red sorghum if fed to growing pigs[J]. Animal Production Science, 2019, 59(3): 524-530.
- [32] PRICE M L, HAGERMAN A E, BUTLER L G. Tannin in sorghum grain: effect of cooking on chemical assays and on antinutritional properties in rats[J]. Nutrition Reports International, 1980, 21(5): 761-767.
- [33] OLA S I, SHOBOOYEO O, DARAMOLA E A. Preliminary studies on the metabolism of vegetative parts of *Terminalia catappa* (almond tree) in chicken[C]. Proceedings of the 1st Nigeria International Poultry Summit (NIPS). Otta, Ogun State: The World's Poultry Science Association, 2005.
- [34] NYACHOTI C M, ATKINSON J L, LEESON S. Sorghum tannins: a review[J]. World's Poultry Science Journal, 1997, 53(1): 5-21.
- [35] VASAN P, AMUTHA R, MANDAL A B. Apparent and true digestibility of amino acids in high tannin sorghum and low tannin sorghum cultivars[J]. Indian Journal of Poultry Science, 2011, 46(3): 295-298.
- [36] BAE J S, KO H S, CHOI H J, et al. Effect of tannin content in sorghum on digestive enzymes[J]. Korean Journal of Food Preservation, 2016, 23(5): 738-745.
- [37] MITJAVILA S, DE SAINT BLANQUAT G, DERACHE R. Effet de l'acide tannique sur la sécrétion gastrique chez le rat[J]. Annals of Nutrition and Metabolism, 1973, 15(3): 163-170.
- [38] 王吉, 张琳玉, 刘翔燕, 等. 单宁酸诱导猪肾细胞氧化损伤和凋亡[J]. 动物营养学报, 2020, 32(9): 4327-4336.
- WANG J, ZHANG L Y, LIU X Y, et al. Tannic acid induces oxidative damage and apoptosis in pig kidney cells[J]. Chinese Journal of Animal Nutrition, 2020, 32(9): 4327-4336. (in Chinese)
- [39] KUMAR V, ELANGO VAN A V, MANDAL A B, et al. Effects of feeding raw or reconstituted high tannin red sorghum on nutrient utilisation and certain welfare parameters of broiler chickens[J]. British Poultry Science, 2007, 48(2): 198-204.
- [40] BELTON P S, DELGADILLO I, HALFORD N G, et al. Kafirin structure and functionality[J]. Journal of Cereal Science, 2006, 44(3): 272-286.
- [41] XIAO J, LI Y Q, LI J, et al. Structure, morphology, and assembly behavior of kafirin[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2015, 63(1): 216-224.
- [42] 张伟敏, 肖祖能, 钟耕. 高粱蛋白质消化率研究进展[J]. 粮食与油脂, 2004(9): 14-17.
- ZHANG W M, XIAO Z N, ZHONG G. Study on digestibility of sorghum protein[J]. Cereals & Oils, 2004(9): 14-17. (in Chinese)
- [43] TAYLOR J R, SCHÜSSLER L, VAN DER WALT W H. Fractionation of proteins from low-tannin sorghum grain[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 1984, 32(1): 149-154.
- [44] ELKIN R G, FREED M B, HAMAKER B R, et al. Condensed tannins are only partially responsible for variations in nutrient digestibilities of sorghum grain cultivars[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 1996, 44(3): 848-853.
- [45] CHANDRASHEKAR A, KIRLEIS A W. Influence of protein on starch gelatinization in sorghum[J]. Cereal Chemistry, 1988, 65: 457-462.
- [46] EMMAMBUX M N, TAYLOR J R N. Properties of heat-treated sorghum and maize meal and their prolamin proteins[J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2009, 57(3): 1045-1050.
- [47] WATTERSON J J, SHULL J M, KIRLEIS A W. Quantitation of alpha-, beta-, and gamma-kafirins in vitreous and opaque endosperm of sorghum bicolor[J]. Cereal Chemistry, 1993, 70: 452-457.
- [48] ANDERSON R J. A contribution to the chemistry of phytin; I. composition of barium phytate and phytic acid. II. a study of the properties of phytic acid and its

- decomposition products. eighth paper on phytin [J]. Journal of Biological Chemistry, 1914, 17 (2) : 171 - 190.
- [49] ERDMAN J W. Oilseed phytates; nutritional implications [J]. Journal of the American Oil Chemists' Society, 1979, 56 (8) : 736-741.
- [50] SANTOS T. Phytate as an anti-nutrient for poultry and swine [J]. AFMA Matrix, 2014, 23 (1) : 32-35.
- [51] VAINTRAUB I A, BULMAGA V P. Effect of phytate on the *in vitro* activity of digestive proteinases [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 1991, 39 (5) : 859-861.
- [52] 郭存柱, 边连全, 刘显军, 等. 生长猪小麦、高粱、稻谷中有效磷的评定 [J]. 中国饲料, 2004 (6) : 25-27.
- GUO C Z, BIAN L Q, LIU X J, et al. Assessing digestible phosphorus in wheat, kaoliang and rice for [J]. China Feed, 2004 (6) : 25-27. (in Chinese)
- [53] SELLE P H, WALKER A R, BRYDEN W L. Total and phytate-phosphorus contents and phytase activity of Australian-sourced feed ingredients for pigs and poultry [J]. Australian Journal of Experimental Agriculture, 2003, 43 (5) : 475-479.
- [54] 米雁, 朱琳娜, 陈国莹, 等. 酶制剂在高粱基础型日粮中的研究与应用 [J]. 广东饲料, 2015, 24 (8) : 31-33.
- MI Y, ZHU L N, CHEN G Y, et al. Research and application of enzyme preparation in sorghum basic diet [J]. Guangdong Feed, 2015, 24 (8) : 31-33. (in Chinese)
- [55] 郭琦, 梁笃, 张一中, 等. 影响高粱饲用价值的主要内在因素及其利用措施 [J]. 农业工程技术, 2021, 41 (5) : 88, 90.
- GUO Q, LIANG D, ZHANG Y Z, et al. Main internal factors affecting sorghum forage value and their utilization measures [J]. Applied Engineering Technology, 2021, 41 (5) : 88, 90. (in Chinese)
- [56] LIU S Y, CADOGAN D J, PÉRON A, et al. Effects of phytase supplementation on growth performance, nutrient utilization and digestive dynamics of starch and protein in broiler chickens offered maize-, sorghum- and wheat-based diets [J]. Animal Feed Science and Technology, 2014, 197 : 164-175.
- [57] 于明, 边连全, 程波. 低磷日粮中添加植酸酶对生长猪生产性能及饲料中磷、钙和蛋白质表观消化率的影响 [J]. 畜牧与兽医, 2013, 45 (2) : 32-36.
- YU M, BIAN L Q, CHENG B. Effects of phytase on growth performance and apparent digestibility of phosphorus, calcium and protein in feed of growing pigs [J]. Animal Husbandry & Veterinary Medicine, 2013, 45 (2) : 32-36. (in Chinese)
- [58] 陈静, 单柳跃, 戴劲. 高粱-豆粕型日粮添加复合蛋白酶对仔猪生长性能、养分利用率及粪中细菌组分的影响 [J]. 中国饲料, 2018 (6) : 71-76.
- CHEN J, SHAN L Y, DAI J. Effects of supplementation of compound proteases on growth performance, nutrient utilization and fecal bacteria in pigs fed with sorghum-soybean meal basal diets [J]. China Feed, 2018 (6) : 71-76. (in Chinese)
- [59] 唐千甯. 高粱饲料中添加复合酶和益生菌对肉鸡的生长及养分消化率的影响 [D]. 硕士学位论文. 长沙: 湖南农业大学, 2016.
- TANG Q N. Effects of compound enzymes and probiotics supplementation on sorghum diets on broilers growth performance and nutrient digestibility [D]. Master's Thesis. Changsha: Hunan Agricultural University, 2016. (in Chinese)
- [60] 唐一波, 赖家宏, 吴细波. 高粱日粮中添加复合酶制剂对育肥猪生产性能的影响 [J]. 四川畜牧兽医, 2017, 44 (3) : 39-41.
- TANG Y B, LAI J H, WU X B. Effect of sorghum diet supplemented multi-enzyme additive on production performance of growing-finishing pigs [J]. Sichuan Animal & Veterinary Sciences, 2017, 44 (3) : 39-41. (in Chinese)
- [61] AWIKA J M, ROONEY L W. Sorghum phytochemicals and their potential impact on human health [J]. Phytochemistry, 2004, 65 (9) : 1199-1221.
- [62] 尚秀国, 朱晓萍, 郭维先. 无单宁高粱替代玉米对肥育猪生产性能的影响 [J]. 中国畜牧杂志, 2004, 40 (7) : 51-52.
- SHANG X G, ZHU X P, GUO W X. Effect of tannin free sorghum replacing corn on the production performance of finishing pigs [J]. Chinese Journal of Animal Science, 2004, 40 (7) : 51-52. (in Chinese)
- [63] 袁敏, 杨文凯, 袁庆刚, 等. 育肥猪饲料中添加高粱对饲料加工特性、生长性能以及胴体性状的影响 [J]. 粮食与饲料工业, 2020 (5) : 43-47, 52.
- YUAN M, YANG W K, YUAN Q G, et al. Effects of sorghum supplementation on feed processing characteristics, growth performance and carcass traits in finishing pigs [J]. Cereal & Feed Industry, 2020 (5) : 43-47, 52. (in Chinese)
- [64] 李思思, 朱晓彤, 黎育颖, 等. 不同高粱水平低粗蛋白饲料对生长猪生长性能、肉品质和血清氨基酸浓

- 度的影响[J]. 动物营养学报, 2018, 30(8): 2969-2978.
- LI S S, ZHU X T, LI Y Y, et al. Effects of low crude protein diets with different sorghum levels on growth performance, meat quality and serum amino acid concentrations of growing pigs [J]. Chinese Journal of Animal Nutrition, 2018, 30(8): 2969-2978. (in Chinese)
- [65] 张凯, 杜丽英, 张伯池, 等. 高粱替代不同水平玉米对育肥猪生长性能、胴体性状及肉品质的影响[J]. 动物营养学报, 2019, 31(7): 3058-3066.
- ZHANG K, DU L Y, ZHANG B C, et al. Effects of replacing different levels of corn with sorghum on growth performance, carcass traits and meat quality of finishing pigs [J]. Chinese Journal of Animal Nutrition, 2019, 31(7): 3058-3066. (in Chinese)
- [66] 宋献艺, 杜丽英, 贾丽军, 等. 高粱替代玉米对育肥猪生长性能、血液生化指标、抗氧化性能和免疫力的影响[J]. 中国畜牧杂志, 2019, 55(11): 116-120.
- SONG X Y, DU L Y, JIA L J, et al. Effect of sorghum replacing corn on growth performance, serum biochemical parameters, antioxidant trait and immune function of finishing pigs [J]. Chinese Journal of Animal Science, 2019, 55(11): 116-120. (in Chinese)
- [67] PAN L, AN D, ZHU W Y. Sorghum as a dietary substitute for corn reduces the activities of digestive enzymes and antioxidant enzymes in pigs [J]. Animal Feed Science and Technology, 2021, 273: 114831.
- [68] 陈伟, 阮栋, 王爽, 等. 饲料中应用不同水平高粱对蛋鸭产蛋性能和蛋品质的影响[J]. 中国家禽, 2016, 38(15): 31-36.
- CHEN W, RUAN D, WANG S, et al. Effects of dietary inclusion of sorghum on laying performance and egg quality of laying duck [J]. China Poultry, 2016, 38(15): 31-36. (in Chinese)
- [69] 叶小飞. 不同来源高粱饲料对黄羽肉鸡生长的影响及高粱能量与养分代谢率的评估[D]. 硕士学位论文. 长沙: 湖南农业大学, 2015.
- YE X F. Effects of different sources of sorghum in diets on yellow-feathered broilers growth and evaluation of sorghum energy and nutrient metabolic rate [D]. Master's Thesis. Changsha: Hunan Agricultural University, 2015. (in Chinese)

Nutritional Value and Anti-Nutritional Factors of Sorghum and Its Application in Pig and Poultry Production

FENG Ganyi LI Rui* HUANG Ruilin YIN Yulong

(Key Laboratory of Animal Nutritional Physiology and Metabolic Process of Hunan, National Engineering Laboratory for Poultry Breeding Pollution Control and Resource Technology, CAS Key Laboratory of Agro-Ecological Processes in Subtropical Region, Institute of Subtropical Agriculture, Chinese Academy of Sciences, Changsha 410125, China)

Abstract: In recent years, with the increase of sorghum import, sorghum feeding value has been highly concerned by the academia, feed and breeding industry. Sorghum has similar nutritional value and effective energy value to corn, which can replace part of corn in livestock and poultry diets and reduce the consumption of corn. The nutritional value, anti-nutritional factors and application of sorghum in pig and poultry production were reviewed in this paper. [Chinese Journal of Animal Nutrition, 2022, 34(4): 2073-2086]

Key words: sorghum; nutritional value; anti-nutritional factors; pig production; poultry production

* Corresponding author, assistant professor, E-mail: lirui181000@163.com

(责任编辑 田艳明)