

DOI: 10.12101/j.issn.1004-390X(n).201909003

棉籽粕脱毒技术及其在家禽生产中的应用 研究进展*

汤小鹏^{1,2}, 陈 磊^{1,2}

(1. 贵州师范大学 喀斯特研究院, 贵州 贵阳 550001;

2. 贵州省喀斯特山地生态环境国家重点实验培育基地, 贵州 贵阳 550001)

摘要: 棉籽粕 (cottonseed meal, CSM) 是棉籽榨油后产生的副产物, 其粗蛋白质含量高, 氨基酸种类丰富, 是一种潜在的优质蛋白饲料原料。但棉籽粕因游离棉酚等抗营养因子的存在限制了其在畜禽生产中的应用。本文综述了棉籽粕的营养特点、棉籽粕脱毒的常用方法及脱毒棉籽粕在家禽中的应用情况, 以期棉籽粕在家禽生产上的合理应用提供参考。

关键词: 棉籽粕; 游离棉酚; 脱毒; 家禽; 发酵

中图分类号: S 816.43

文献标识码: A

文章编号: 1004-390X (2020) 01-0180-07

Advance in Detoxication Technology of Cottonseed Meal and Its Application in Poultry Production

TANG Xiaopeng^{1,2}, CHEN Lei^{1,2}

(1. School of Karst Science, Guizhou Normal University, Guiyang 550001, China; 2. State Key Laboratory Cultivation for Karst Mountain Ecology Environment of Guizhou Province, Guiyang 550001, China)

Abstract: Cottonseed meal (CSM) is a by-product of cottonseed oil extraction. CSM is rich in protein and amino acids, and often considered as a potential source of high-quality protein. However, the application of CSM in livestock and poultry production is limited due to the existence of free gossypol and other anti-nutrients. The nutritional characteristics of cottonseed meal, detoxification methods of cottonseed meal and their applications in poultry production were reviewed in this paper, attempting to provide references for the reasonable application of cottonseed meal in animal production.

Keywords: cottonseed meal; free gossypol; detoxification; poultry; fermentation

随着畜牧业的不断发展, 饲料原料 (尤其是蛋白原料) 的需求量不断增大, 而中国优质蛋白饲料原料缺口严重, 大部分依靠进口, 严重制约了中国畜牧业的可持续发展。因此, 非常规蛋白饲料资源的开发与利用对缓解中国蛋白饲料资源短缺具有重要意义。中国是产棉大国, 据《中国

统计年鉴》资料显示: 2017 年中国棉花种植面积 323 万 hm^2 , 棉花产量 549 万 $\text{t}^{[1]}$ 。棉花加工后会产生大量的棉籽, 棉籽榨油后会产生大量的副产物——棉籽粕^[2]。中国棉籽粕资源丰富, 年产量在 300 万~500 万 t 之间, 棉籽粕中粗蛋白质含量高达 37.15%~46.91%^[3], 其营养价值仅次于豆

收稿日期: 2019-09-03

修回日期: 2019-10-09

网络首发时间: 2020-01-09 10:55:10

*基金项目: 贵州省科技计划重大专项 (黔科合平台人才[2017]5411 号); 贵州师范大学 2018 年博士科研启动项目 (GZNU[2018]26 号); 贵州省研究生教育创新计划项目 (黔教研合 GZS 字[2016]4 号)。

作者简介: 汤小鹏 (1986—), 男, 湖南邵阳人, 博士, 讲师, 主要从事动物营养与饲料研究。

E-mail: tangxiaopeng110@126.com

网络首发地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/53.1044.S.20200109.0930.001.html>



粕, 是一种潜在的优质蛋白饲料原料。在中国饲料原料尤其是蛋白饲料原料严重短缺的形势下, 合理开发利用棉籽粕, 对缓解中国蛋白饲料原料短缺问题, 促进畜牧业可持续发展具有重要意义。但是, 棉籽粕因游离棉酚、植酸等抗营养因子的存在以及氨基酸消化率低等不利因素限制了其在畜禽生产中的应用^[4]。游离棉酚是棉籽粕主要的抗营养因子, 对动物具有毒害作用, 对动物生长和繁殖性能造成不良影响, 严重者甚至造成动物死亡^[5]。因此, 棉籽粕需经过脱毒处理才能在动物日粮中使用, 而未经脱毒处理的棉籽粕在动物饲料中必须限量使用。本研究主要综述了棉籽粕的营养特点、棉籽粕脱毒的常用方法及其在家禽养殖中的应用情况, 为棉籽粕在动物生产上的合理应用提供参考。

1 棉籽粕营养特性

1.1 蛋白含量高, 氨基酸不平衡

棉籽粕是棉籽榨油后产生的副产物, 产量巨大, 价格低廉, 在动物饲料工业中具有极大的优势, 是畜禽饲料中非常有价值的一种饲料原料。由于棉籽粕产地及加工工艺不同, 各文献所报道的棉籽粕营养成分差异较大, 其粗蛋白含量 36.34%~50.54%, 粗纤维含量 5.97%~13.96%, 粗灰分含量 4.28%~6.63%, 粗脂肪含量 0.63%~5.50% (表 1)。棉籽粕可检测出 18 种氨基酸, 种类丰

富, 且总氨基酸含量在粗蛋白中的比例可达 35%~52% (表 2)。但是棉籽粕存在氨基酸不平衡问题, JAZI 等^[9]研究报道棉籽粕赖氨酸仅为 1.56%, 低于豆粕的 2.79%^[13]。SUN 等^[6]研究报道棉籽粕谷氨酸含量 11.14%, 远远高于豆粕的 7.35%^[13]。因此, 在应用棉籽粕作为饲料蛋白原料时, 因充分考虑棉籽粕氨基酸组成, 平衡配方中的氨基酸, 确保饲料满足动物氨基酸需要量。

1.2 游离棉酚含量高

棉酚是一种不溶于水而溶于有机溶剂的黄褐色多酚类化合物, 按其存在形式可分为结合棉酚和游离棉酚。结合棉酚在动物消化道内不被吸收, 可随粪便排出, 不具有毒性。而游离棉酚可被动物机体吸收, 在体内蓄积并对动物产生毒害。游离棉酚可造成动物的繁殖性能下降, 肺脏、心脏及肝脏受损, 严重者导致死亡^[4-5, 16-17], 同时它能够抑制电子传递链作用, 并刺激细胞产生活性氧自由基 (ROS), 降低氨基酸消化率^[18], 严重制约棉籽粕在动物饲料上的应用。棉籽粕中游离棉酚含量见表 1, 其含量可能因生产工艺而异。一般来说, 螺旋压榨制得棉籽粕的游离棉酚含量最低, 预压浸提法次之, 直接浸提法最高^[15]。游离棉酚的存在是限制棉籽粕在动物生产中应用的主要因素, 在使用未经脱毒处理的棉籽粕作为蛋白原料时应充分考虑其游离棉酚含量, 调整其在饲料配方中的使用比例。

表 1 棉籽粕常规营养成分
Tab. 1 Chemical composition contents of cottonseed meal

干物质/% DM	粗蛋白/% CP	粗脂肪/% EE	粗纤维/% CF	粗灰分/% ash	游离棉酚/(mg·kg ⁻¹) free gossypol	参考文献 references
90.39	46.86	1.49	10.12	5.49	745.57	SUN 等 ^[6]
91.20	43.99	0.63	5.97	6.63	1 240	YUAN 等 ^[7]
88.23	46.52	1.08	10.21	5.43	820.00	TANG 等 ^[8]
92.62	36.34	1.10	12.58	5.20	584.33	JAZI 等 ^[9]
92.0	40.2	2.5	—	—	1 030	BATONON-ALAVO ^[10]
90.82	50.54	2.27	11.28	6.21	589.47	倪海球等 ^[11]
—	39.79	3.64	13.86	4.28	585.29	王永强等 ^[12]
90.69	39.22	5.50	13.96	6.39	—	NRC ^[13]

2 棉籽粕脱毒技术

游离棉酚是制约棉籽粕在动物饲料中应用的瓶颈。棉籽粕脱毒是指采用合适的方法, 使棉籽粕中的游离棉酚降解或者变成结合棉酚, 降低或

钝化其毒性。脱毒的方法主要包括物理法^[15]、化学法^[5]及微生物固态发酵法^[12]。

2.1 物理法

物理脱毒法包括热处理法、辐射技术、膨化技术和蒸汽爆破技术等。热处理法是利用加热加

表 2 棉籽粕氨基酸含量 (占粗蛋白比例)

Tab. 2 Amino acids (AA) content of cottonseed meal (expressed as a percentage of CP)

氨基酸 AA	TANG 等 ^[1]	SUN 等 ^[6]	JAZI 等 ^[9]	ZHANG 等 ^[14]	王清华 等 ^[15]	% NRC ^[13]
赖氨酸 Lys	2.49	2.09	1.56	1.93	1.98	1.50
色氨酸 Try	0.66	—	—	0.30	—	0.53
苯丙氨酸 Phe	3.21	2.77	2.24	2.18	2.42	1.98
蛋氨酸 Met	0.77	0.49	0.51	0.67	—	0.51
苏氨酸 Thr	1.73	1.55	1.24	1.40	1.56	1.36
异亮氨酸 Ile	1.46	1.71	1.28	1.40	1.35	1.21
亮氨酸 Leu	3.32	2.89	2.17	2.52	2.70	2.18
缬氨酸 Val	2.39	2.23	1.77	1.94	1.97	1.86
组氨酸 His	1.52	1.70	1.13	1.10	1.29	1.11
天门冬氨酸 Asp	5.63	4.42	3.52	3.80	4.16	3.28
谷氨酸 Glu	10.47	11.14	8.71	8.06	8.91	6.93
甘氨酸 Gly	2.02	2.08	1.63	1.77	1.83	1.58
丙氨酸 Ala	2.07	2.05	1.42	1.69	1.68	1.51
半胱氨酸 Cys	1.48	—	0.55	0.66	—	0.82
酪氨酸 Tyr	2.53	1.16	0.94	1.15	1.01	0.98
精氨酸 Arg	6.67	5.16	4.17	4.52	5.26	4.04
脯氨酸 Pro	1.75	2.07	1.46	1.63	1.82	1.50
丝氨酸 Ser	2.58	2.25	1.60	1.76	1.89	1.80
总氨基酸 TAA	52.65	45.79	35.90	38.48	39.83	34.68

压过程中游离棉酚能与蛋白质、氨基酸等物质结合的特点,以此达到脱毒效果的一种传统脱毒方法^[19]。但此法有一定的不足,热处理过程需要消耗大量的能源,增加了生产成本,同时高温会破坏棉籽粕营养物质,导致营养物质的利用率降低。辐射技术是将材料暴于伽马射线、高能电子束或 X 射线等辐射下,达到减少抗营养因子的目的^[17,20]。同时,在适宜的剂量范围内,辐射对营养物质,特别是蛋白质的损害较小,不形成难消化物质,可消除饲料中的微生物污染^[17,21-23]。研究表明:伽马射线和高能电子束可有效降低棉籽粕中游离棉酚含量^[21-23],还可降低棉籽粕中粗纤维含量^[20]。膨化技术是借助挤压机螺杆的推动力,将物料向前挤压,物料受到混合、搅拌和摩擦以及高剪切力作用而获得和积累能量达到高温高压,在挤出模孔的瞬间由于骤然降压而实现体积膨大,使产品的形态发生变化的工艺操作^[11,24]。棉籽粕在膨化过程中游离棉酚一部分被降解,另一部分与蛋白质结合形成结合棉酚,达到脱毒的目的^[7,11,24-25]。蒸汽爆破技术是一种利用蒸汽热裂解的物理化学反应,它基于短时间的高温高压蒸

汽蒸煮,然后在毫秒级的时间范围内将容器内的全部原料炸散,引起物料物理化学结构发生变化^[15]。王清华等^[15]研究表明:利用蒸汽爆破技术可使棉籽粕中游离棉酚由 642 mg/kg 降低到 85 mg/kg,脱毒率达到 87%。

2.2 化学法

化学脱毒法是指在棉籽粕中加入某种化学添加剂进行化学处理,在一定条件下破坏游离棉酚,或使其成为结合棉酚而失去毒性,达到脱毒的目的^[5]。化学脱毒法包括硫酸亚铁法(FeSO_4)、碱处理法和氧化法^[5,26-27]。硫酸亚铁法是目前公认的棉酚脱毒的有效方法,其原理是 Fe^{2+} 与双醛式游离棉酚反应生成变性棉酚—铁络合物,使游离棉酚的活性羟基失去作用^[26]。但此法有一定的缺陷,硫酸亚铁处理可使棉籽粕变黑,且带有铁锈味,影响棉籽粕适口性^[5]。棉酚是酸性物质,可与碱性物质发生化学反应生成复合盐,因此可在棉籽粕中添加碱性化合物如烧碱、纯碱、石灰水、氨水和草木灰等进行脱毒^[27-28]。但此法对设备的抗腐蚀性能要求高,且经碱处理后的棉籽粕需要清洗、干燥,处理成本较高,因此不适宜工业化生产。棉酚是一类极活泼的酚类物质,利用氧化性较强的氧化剂(如 H_2O_2 等)使其发生氧化反应改变棉酚的结构,达到降解游离棉酚的目的^[28]。研究表明:混合化学脱毒剂效果要好于单独化学脱毒剂。王薇薇等^[5]研究表明: H_2O_2 与 CuSO_4 混合脱毒剂对棉籽粕的游离棉酚脱毒率达 84% 以上,脱毒效果优于 FeSO_4 、 H_2O_2 和 CuSO_4 单独处理,且 H_2O_2 与 CuSO_4 混合脱毒可提高棉籽粕粗蛋白质消化率和仿生消化能。

2.3 微生物发酵法

微生物发酵是最具有应用前景的棉籽粕脱毒方法,不仅能有效降解游离棉酚,还能避免化学添加剂和物理法对棉籽蛋白功能性质造成影响,且在发酵过程中还能产生大量的菌体蛋白、小肽、氨基酸、酶类、维生素以及一些促生长因子,达到改善棉籽粕的营养价值、提高利用率的目的^[29-31]。固态发酵(solid-state fermentation)是微生物在呈固态、几乎没有自由流动的水的培养基上发生的发酵过程,具有投入少、能耗低、回收率高、技术简单、需控制的参数少和环境友好等优点,饲料工业上常用来改善非常规饲料原料品质^[32]。微生物发酵中优良菌种的选育是关键,不

同微生物产酶种类及能力不同, 在发酵过程中应根据不同的需求筛选不同的菌株, 如降解纤维素应选择产纤维素酶能力强的菌株, 降解棉酚则要筛选降解棉酚能力强的微生物菌种。不同微生物菌种对棉酚的降解能力有较大的差异, 筛选降解棉酚能力强的微生物菌种是保证棉籽粕脱毒效果的关键步骤^[30]。目前用于棉籽粕发酵降解游离棉酚

的菌株有黑曲霉^[33]、枯草芽孢杆菌^[6, 29, 34]、嗜酸乳杆菌^[12, 35]、热带假丝酵母^[36-37]和白地霉^[38]等。研究表明: 采用单菌发酵或混菌发酵均可有效降解棉籽粕中的游离棉酚, 同时对棉籽粕营养价值具有一定的改善作用 (表 3), 这对提高棉籽粕在畜禽生产中的利用率、缓解中国蛋白饲料资源短缺的现状具有重要意义。

表 3 微生物发酵降解棉籽粕棉酚
Tab. 3 Degradation of gossypol in cottonseed meal by microbial fermentation

发酵菌株 fermentation strains	游离棉酚含量/(mg·kg ⁻¹) content of free gossypol		粗蛋白质含量/% content of crude protein		粗纤维含量/% content of crude fiber		参考文献 references
	发酵前 before	发酵后 after	发酵前 before	发酵后 after	发酵前 before	发酵后 after	
	fermentation	fermentation	fermentation	fermentation	fermentation	fermentation	
枯草芽孢杆菌 <i>Bacillus subtilis</i>	745.67	284.00	46.86	52.59	10.12	9.3	SUN 等 ^[6]
枯草芽孢杆菌 <i>Bacillus subtilis</i>	820	210	46.52	50.51	10.21	9.03	TANG 等 ^[8]
嗜酸乳杆菌 <i>Lactobacillus acidophilus</i>	585.29	152.33	39.79	42.49	13.86	11.67	王永强等 ^[12]
嗜酸乳杆菌 <i>Lactobacillus acidophilus</i>	571.73	302.73	37.95	42.79	13.86	11.67	张晓羊等 ^[35]
热带假丝酵母 <i>Candida tropiana</i>	549.1	29.8	23.79	26.73	—	—	ZHANG 等 ^[36]
热带假丝酵母 <i>Candida tropiana</i>	550	76	20.46	23.58	—	—	KHALAF 等 ^[39]
热带假丝酵母 <i>Candida tropiana</i>	126.71	44.87	34.15	37.63	—	—	NIE 等 ^[40]
产朊假丝酵母 <i>Candida utilis</i>	583	192	43.5	44.5	10.21	9.32	XIONG 等 ^[41]
热带假丝酵母和黑曲霉 <i>Candida tropiana</i> and <i>Aspergillus niger</i>	549.06	45.92	23.79	30.41	—	—	ZHANG 等 ^[42]
枯草芽孢杆菌、黑曲霉和米曲霉 <i>Bacillus subtilis</i> , <i>Aspergillus niger</i> and <i>Aspergillus oryzae</i>	584.33	68.00	36.34	39.22	12.58	8.21	JAZI 等 ^[9]
热带假丝酵母和酿酒酵母 <i>Candida tropiana</i> and <i>Saccharomyces cerevisiae</i>	126.71	32.99	34.15	37.49	—	—	NIE 等 ^[40]

3 脱毒棉籽粕在家禽生产中的应用

棉籽粕因游离棉酚等抗营养因子的存在限制了其在家禽生产中的应用。家禽采食含游离棉酚的日粮后, 肌肉、蛋等产品中会有游离棉酚的残留, 威胁食品安全^[43-45]。ZHU 等^[43]研究表明: 肉鸭日粮中游离棉酚达到 320 mg/kg 时会显著降低肉鸭平均日采食量 (ADFI) 和平均日增重 (ADG), 显著提高料重比, 增加鸭的生产成本, 同时, 随着日粮中游离棉酚含量的增加, 肉鸭肝脏及肌肉中的游离棉酚残留量呈线性增加, 严重威胁食品安全。ZENG 等^[44]研究表明: 随着日粮游离棉酚的增加, 肉鸭肝脏、肾脏、心脏、胸部和腿部肌肉游离棉酚残留量呈线性增加, 并得出肉鸭日粮中游离棉酚的安全含量为不高于 36 mg/kg。ZHU 等^[45]研究表明: 蛋鸡饲料中添加棉籽粕 (游离棉酚 693.81 mg/kg), 鸡蛋蛋黄中总棉酚残留随棉籽

粕的添加量增加而增加, 虽然检出蛋黄中总棉酚水平较低, 但还是存在潜在的食用安全风险。中国《饲料卫生标准》(GB 13078—2001) 规定: 肉用仔鸡、生长鸡配合饲料中游离棉酚含量需≤100 mg/kg, 产蛋鸡配合饲料游离棉酚含量需≤20 mg/kg, 生长肥育猪配合饲料游离棉酚含量需≤60 mg/kg。因此, 在棉籽粕的使用过程中应根据游离棉酚的含量确定其使用量, 这大大限制了棉籽粕的利用。

随着棉籽粕脱毒技术的发展, 棉籽粕使用的限制减小, 在家禽生产上的应用越来越广泛 (表 4)。膨化处理是棉籽粕脱毒的常用方法之一, 有良好的脱毒效果。倪海珠等^[11]研究表明: 棉籽粕经膨化处理游离棉酚含量从 589.4 mg/kg 降低至 71.06 mg/kg, 脱毒率达 87.95%。YUAN 等^[7]研究表明: 棉籽粕经膨化处理游离棉酚含量从 1 240 mg/kg 降低至 400 mg/kg, 脱毒率达 68%。

表 4 脱毒棉籽粕在家禽生产中的应用
Tab. 4 Application of detoxicated cottonseed meal in poultry production

家禽 poultry	脱毒方式 detoxification way	显著的实验结果 significant experimental results	参考文献 references
蛋鸡 laying hens	膨化 expanded	添加8%膨化棉籽粕组的蛋鸡产蛋率和平均蛋重显著高于添加6%未膨化棉籽粕组，且蛋黄、蛋清中游离棉酚的浓度显著低于 6% 棉籽粕组	YUAN 等 ^[7]
蛋鸡 laying hens	膨化 expanded	蛋鸡饲料中添加 8% 膨化棉籽粕对蛋鸡生产性能、蛋品质及血清生化指标无明显影响	张爱婷等 ^[24]
肉鸡 broiler	发酵 fermentation	日粮中添加10%、20%发酵棉籽粕，肉鸡生产性能与对照组相比无显著差异，但显著高于 10%、20% 未发酵棉籽粕组，添加发酵棉籽粕可显著降低腹部脂肪含量	JAZI 等 ^[9]
肉鸡 broiler	发酵 fermentation	饲料中添加发酵棉籽粕可以提高黄羽肉鸡肉肌中总氨基酸和挥发性脂肪酸含量，以 6% 和 9% 添加效果好	王永强等 ^[12]
肉鸡 broiler	发酵 fermentation	饲料中添加6%发酵棉籽粕可以提高黄羽肉鸡的生长性能和屠宰性能，增强黄羽肉鸡对蛋白质、脂肪和钙等营养物质的消化吸收	张晓羊等 ^[35]
肉鸡 broiler	发酵 fermentation	日粮添加8.9%发酵棉籽粕黄羽肉鸡免疫球蛋白水平、抗氧化能力、盲肠乳酸菌和总厌氧菌数均高于饲喂未发酵棉籽粕肉鸡	WANG 等 ^[46]
肉鸡 broiler	发酵 fermentation	发酵棉籽粕替代50%豆粕不影响肉鸡生长性能，但会导致肝脏器官指数和血清丙氨酸转氨酶含量增加，对肉鸡具有一定的毒性	XIONG 等 ^[41]
肉鸡 broiler	发酵 fermentation	发酵棉籽粕提高肉鸡平均日增重和肉料比，显著提高营养物质消化率，降低肉鸡腹脂率	NIE 等 ^[47]
肉鸡 broiler	电子辐射 electronic radiation	添加12%经电子辐射处理过的棉籽粕组的肉鸡采食量、体重、饲料转化效率均高于添加 12% 未经处理棉籽粕组	NAYEFI 等 ^[22]
肉鸭 meat duck	发酵 fermentation	添加 9% 发酵棉粕能显著提高肉鸭对营养物质利用率，较低料肉比，且不影响屠宰性能	周媛媛等 ^[48]
鹅 goose	发酵 fermentation	日粮添加 30% 发酵棉籽粕能提高生长鹅生长性能和消化酶活性，降低腹泻率和死亡率	刘长忠等 ^[49]

膨化脱毒后的棉籽粕可作为蛋鸡蛋白饲料，对蛋鸡生产性能、蛋品质无不良影响，蛋黄、蛋清中游离棉酚的残留量较低^[7, 24]。脱毒棉籽粕在肉鸡日粮中的应用较广泛，且主要集中在发酵棉籽粕方面。肉鸡日粮中添加适宜比例的发酵棉籽粕对肉鸡具有一定的正效应，如不影响甚至提高生产性能^[9, 35, 41, 47]、降低腹部脂肪含量^[9, 47]、提高肌肉中总氨基酸和挥发性脂肪酸含量^[12]、提高营养物质消化率^[35]、提高肉鸡免疫水平、抗氧化能力及肠道微生物多样性^[45]。但是，肉鸡日粮中添加发酵棉籽粕对肉鸡也有一定的负效应，如导致肝脏器官指数增大，血清丙氨酸转氨酶含量增加，对肉鸡具有一定的毒性^[41]。脱毒棉籽粕还可应用在肉鸭及鹅等家禽日粮中，可提高肉鸭营养物质利用率，降低料肉比，不影响屠宰性能^[48]，提高生长鹅生长性能和消化酶活性，降低腹泻率和死亡率^[49]。发酵棉籽粕在家禽中良好的应用效果与以下因素有关：首先，棉籽粕经发酵后可降解棉酚，减少游离棉酚对家禽的毒害作用^[6, 8, 12]；其次，棉籽粕在发酵过程中可改善棉籽粕的品质，如提高粗蛋白含量^[39-40]，降低粗纤维含量^[35, 41]，提高小肽含量^[50-51]；最后，发酵菌株本身可作为益生菌调节家禽免疫功能及肠道微生物结构，从而提高生产性能^[46]。这些研究均表明：棉籽粕经脱毒后，在不影响生产性能的前提下，生产的禽产品安全性满足食品要求，说明脱毒棉籽粕可以作为一种良好的蛋白原料在家禽日粮中使用。

4 展望与小结

综上所述，棉籽粕蛋白质含量高，氨基酸种类丰富，其营养价值仅次于豆粕，是一种潜在的优质蛋白饲料原料，但是游离棉酚等抗营养因子的存在限制了其在畜牧生产中的应用。通过物理、化学、微生物等方法处理棉籽粕后可有效降低棉籽粕中游离棉酚的含量，随着棉籽粕脱毒技术的发展，使得限制棉籽粕使用的不利因素越来越小，在家禽中的研究均表明脱毒棉籽粕不影响家禽生产性能，说明脱毒棉籽粕可作为蛋白原料应用在家禽饲料中。然而，棉籽粕营养成分复杂，在家禽生产中的应用尚存在一些问题。如：物理、化学、微生物等方法处理对棉籽粕产品质量的稳定性如何目前尚无统一标准。因此，优化棉籽粕脱毒工艺，生产质量稳定的棉籽粕产品可能是未来研究的方向；同时，不同脱毒处理的脱毒棉籽粕功能性作用的发挥及其机理尚不明确，有待进一步研究；最后，脱毒棉籽粕作为畜禽饲料中蛋白来源的饲料配方的优化也将是未来的重要研究方向。这些问题的解决对棉籽粕在家禽饲料中的高效利用有重要意义。

[参考文献]

[1] TANG X P, XIANG R, CHEN S J, et al. Effects of fermented cottonseed meal and enzymatic hydrolyzed cottonseed meal on amino acid digestibility and metabolic energy in white leghorn rooster[J]. Pakistan Journal of Zo-

- ology, 2018, 50(3): 957. DOI: [10.17582/journal.pjz/2018.50.3.957.962](https://doi.org/10.17582/journal.pjz/2018.50.3.957.962).
- [2] 国家统计局. 中国统计年鉴-2018[M]. 北京: 中国统计出版社, 2018.
- [3] 王文策, 龚红, 叶慧, 等. 不同产地棉籽粕营养成分、代谢能及氨基酸利用率的研究[J]. 饲料工业, 2015, 36(16): 32. DOI: [10.13302/j.cnki.fi.2015.16.008](https://doi.org/10.13302/j.cnki.fi.2015.16.008).
- [4] HE T, ZHANG H J, WANG J, et al. Application of low-gossypol cottonseed meal in laying hens' diet[J]. Poultry Science, 2015, 94(10): 2456. DOI: [10.3382/ps/pev247](https://doi.org/10.3382/ps/pev247).
- [5] 王薇薇, 周天兵, 李爱科, 等. 棉籽粕化学脱除棉酚的试验研究[J]. 动物营养学报, 2016, 28(2): 564. DOI: [10.3969/j.issn.1006-267x.2016.02.031](https://doi.org/10.3969/j.issn.1006-267x.2016.02.031).
- [6] SUN H, TANG J W, YAO X H, et al. Improvement of the nutritional quality of cottonseed meal by *Bacillus subtilis* and the addition of papain[J]. International Journal of Agriculture Biology, 2012, 14(4): 563. DOI: [10.1007/s00234-001-0760-0](https://doi.org/10.1007/s00234-001-0760-0).
- [7] YUAN C, SONG H H, ZHANG X Y, et al. Effect of expanded cottonseed meal on laying performance, egg quality, concentrations of free gossypol in tissue, serum and egg of laying hens[J]. Animal Science Journal, 2014, 85(5): 549. DOI: [10.1111/asj.12169](https://doi.org/10.1111/asj.12169).
- [8] TANG J W, SUN H, YAO X H, et al. Effects of replacement of soybean meal by fermented cottonseed meal on growth performance, serum biochemical parameters and immune function of yellow-feathered broilers[J]. Asian-Australasian Journal of Animal Sciences, 2012, 25(3): 393. DOI: [10.5713/ajas.2011.11381](https://doi.org/10.5713/ajas.2011.11381).
- [9] JAZI V, BOLDAJI F, DASTAR B, et al. Effects of fermented cottonseed meal on the growth performance, gastrointestinal microflora population and small intestinal morphology in broiler chickens[J]. British Poultry Science, 2017, 58(4): 402. DOI: [10.1080/00071668.2017.1315051](https://doi.org/10.1080/00071668.2017.1315051).
- [10] BATONON-ALAVO D I, BASTIANELLI D, LESCOAT P, et al. Simultaneous inclusion of sorghum and cottonseed meal or millet in broiler diets: effects on performance and nutrient digestibility[J]. Animal, 2016, 10(7): 1118. DOI: [10.1017/s1751731116000033](https://doi.org/10.1017/s1751731116000033).
- [11] 倪海珠, 孙杰, 杨玉娟, 等. 棉籽粕膨化前后品质变化及对生长育肥猪生长性能、血清生化指标及营养物质表观消化率的影响[J]. 动物营养学报, 2018, 30(5): 1936. DOI: [10.3969/j.issn.1006-267x.2018.05.038](https://doi.org/10.3969/j.issn.1006-267x.2018.05.038).
- [12] 王永强, 张晓羊, 刘建成, 等. 嗜酸乳杆菌发酵棉籽粕对黄羽肉鸡肌肉营养成分和风味特性的影响[J]. 动物营养学报, 2017, 29(12): 4419. DOI: [10.3969/j.issn.1006-267x.2017.12.022](https://doi.org/10.3969/j.issn.1006-267x.2017.12.022).
- [13] National Research Council. Nutrient requirements of swine[M]. 11th Ed. Washington, DC.: National Academy Press, 2012.
- [14] ZHANG F, ADEOLA O. Energy values of canola meal, cottonseed meal, bakery meal, and peanut flour meal for broiler chickens determined using the regression method[J]. Poultry Science, 2016, 96(2): 397. DOI: [10.3382/ps/pew239](https://doi.org/10.3382/ps/pew239).
- [15] 王清华, 贺永惠, 鲁红伟, 等. 蒸汽爆破技术对棉籽粕中游离棉酚脱毒效果研究[J]. 动物营养学报, 2016, 28(2): 524. DOI: [10.3969/j.issn.1006-267x.2016.02.026](https://doi.org/10.3969/j.issn.1006-267x.2016.02.026).
- [16] ŚWIĄTKIEWICZ S, ARCZEWSKAWŁOSEK A, JÓZEFIK D. The use of cottonseed meal as a protein source for poultry: an updated review[J]. Worlds Poultry Science Journal, 2016, 72(3): 473. DOI: [10.1017/S0043933916000258](https://doi.org/10.1017/S0043933916000258).
- [17] BAHRAINI Z, SALARI S, SARI M, et al. Effect of radiation on chemical composition and protein quality of cottonseed meal[J]. Animal Science Journal, 2017, 88(9): 1425. DOI: [10.1111/asj.12784](https://doi.org/10.1111/asj.12784).
- [18] ARINBASAROVA A Y, MEDENTSEV A G, KRUPYANKO O V I. Gossypol inhibits electron transport and stimulates ROS generation in *Yarrowia lipolytica* mitochondria[J]. The Open Biochemistry Journal, 2012, 6: 11. DOI: [10.2174/1874091X01206010011](https://doi.org/10.2174/1874091X01206010011).
- [19] 刘惠琴. 固态发酵棉粕菌株的筛选鉴定及发酵工艺的研究[D]. 兰州: 兰州交通大学, 2014.
- [20] NAYEFI M, SALARI S, SARI M, et al. Treatment by gamma or electron radiation decreases cell wall and gossypol content of cottonseed meal[J]. Radiation Physics and Chemistry, 2014, 99: 23. DOI: [10.1016/j.radphyschem.2014.02.005](https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2014.02.005).
- [21] SHAWRANG P, MANSOURI M H, SADEGHI A A, et al. Evaluation and comparison of gamma- and electron beam irradiation effects on total and free gossypol of cottonseed meal[J]. Radiation Physics and Chemistry, 2011, 80: 761. DOI: [10.1016/j.radphyschem.2011.01.010](https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2011.01.010).
- [22] NAYEFI M, SALARI S, SARI M, et al. Nutritional value of electron beam irradiated cottonseed meal in broiler chickens[J]. Journal of Animal Physiology and Animal Nutrition, 2015, 100(4): 643. DOI: [10.1111/jpn.12418](https://doi.org/10.1111/jpn.12418).
- [23] EL-NEILY H F G, EL-SHENNAWY H M. Influence of irradiated cotton seed meal on biochemical responses of growing albino rats[J]. Arab Journal of Nuclear Science and Applications, 2013, 46(4): 287.
- [24] 张爱婷, 朱巧明, 顾林英, 等. 膨化棉籽粕对蛋鸡生产性能、蛋品质及血清生化指标的影响[J]. 动物营养学报, 2012, 24(6): 1143. DOI: [10.3969/j.issn.1006-267x.2012.06.022](https://doi.org/10.3969/j.issn.1006-267x.2012.06.022).
- [25] 胡维岗, 黄庆德, 张强, 等. 挤压膨化温度对棉粕游离棉酚及营养成分的影响[J]. 食品工业科技, 2015, 36(5): 247. DOI: [10.13386/j.issn1002-0306.2015.05.043](https://doi.org/10.13386/j.issn1002-0306.2015.05.043).
- [26] BARRAZA M L, COPPOCK C E, BROOKS K N, et al. Iron sulfate and feed pelleting to detoxify free gossypol in cottonseed diets for dairy cattle[J]. Journal of Dairy Science, 1991, 74(10): 3457. DOI: [10.3168/jds.S0022-0302\(91\)78536-6](https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(91)78536-6).
- [27] 王冬梅, 郭书贤, 梁运祥. 棉籽饼粕中棉酚的危害与脱毒方法研究进展[J]. 湖北农业科学, 2009, 48(2): 487. DOI: [10.3969/j.issn.0439-8114.2009.02.074](https://doi.org/10.3969/j.issn.0439-8114.2009.02.074).
- [28] NAGALAKSHMI D, SASTRY V R B, AGRAWAL D K. Detoxification of undecorticated cottonseed meal by various physical and chemical methods[J]. Animal Nutri-

- tion and Feed Technology, 2002, 2: 117.
- [29] DAI C H, ZHANG L P, MA H L, et al. Ultrasound-assisted detoxification of free gossypol from cottonseed meal[J]. Journal of Food Process Engineering, 2017, 40(1): e12265. DOI: [10.1111/jfpe.12265](https://doi.org/10.1111/jfpe.12265).
- [30] 元秀晔, 谢全喜, 陈振, 等. 高效降解游离棉酚并改善棉籽粕营养品质的菌株筛选[J]. 动物营养学报, 2017, 29(9): 3258. DOI: [10.3969/j.issn.1006-267x.2017.09.029](https://doi.org/10.3969/j.issn.1006-267x.2017.09.029).
- [31] 葛洪, 房诗宏. 多菌种混合固体发酵底物对棉籽粕脱毒效果的研究[J]. 扬州大学学报(农业与生命科学版), 2012, 33(4): 87. DOI: [10.16872/j.cnki.1671-4652.2012.04.018](https://doi.org/10.16872/j.cnki.1671-4652.2012.04.018).
- [32] 汤小鹏, 赵华, 汤加勇, 等. 黑曲霉固态发酵改善木薯渣品质的研究[J]. 动物营养学报, 2014, 26(7): 2026. DOI: [10.3969/j.issn.1006-267x.2014.07.039](https://doi.org/10.3969/j.issn.1006-267x.2014.07.039).
- [33] YANG X, SUN J Y, GUO J L, et al. Identification and proteomic analysis of a novel gossypol-degrading fungal strain[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2012, 92: 943. DOI: [10.1002/jsfa.4675](https://doi.org/10.1002/jsfa.4675).
- [34] 元秀晔, 谢全喜, 于佳民, 等. 高效降解游离棉酚菌株的鉴定、安全性评价及发酵工艺研究[J]. 现代食品科技, 2018, 34(5): 158. DOI: [10.13982/j.mfst.1673-9078.2018.05.023](https://doi.org/10.13982/j.mfst.1673-9078.2018.05.023).
- [35] 张晓羊, 王永强, 张文举, 等. 嗜酸乳杆菌发酵棉籽粕对黄羽肉鸡生长性能、屠宰性能和血清生化指标的影响[J]. 动物营养学报, 2016, 28(12): 3885. DOI: [10.3969/j.issn.1006-267x.2016.12.021](https://doi.org/10.3969/j.issn.1006-267x.2016.12.021).
- [36] ZHANG W J, XU Z R, ZHAO S H, et al. Development of a microbial fermentation process for detoxification of gossypol in cottonseed meal[J]. Animal Feed Science and Technology, 2007, 135: 176. DOI: [10.1016/j.anifeedsci.2006.06.003](https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2006.06.003).
- [37] ZHANG W J, XU Z R, SUN J Y, et al. Effect of selected fungi on the reduction of gossypol levels and nutritional value during solid substrate fermentation of cottonseed meal[J]. Journal of Zhejiang University (Science B), 2006, 7(9): 690. DOI: [10.1631/jzus.2006.B0690](https://doi.org/10.1631/jzus.2006.B0690).
- [38] 王文奇, 侯广田, 刘艳丰, 等. 棉籽粕固体发酵脱毒工艺参数的优化研究[J]. 新疆农业科学, 2014, 51(1): 103. DOI: [10.6048/j.issn.1001-4330.2014.01.015](https://doi.org/10.6048/j.issn.1001-4330.2014.01.015).
- [39] KHALAF M A, MELEIGY S A. Reduction of free gossypol levels in cottonseed meal by microbial treatment[J]. International Journal of Agricultural and Biology, 2008, 10(2): 185.
- [40] NIE C X, ZHANG W J, GE W X, et al. Effect of cottonseed meal fermented with yeast on the lipid-related gene expression in broiler chickens[J]. Brazilian Journal of Poultry Science, 2015, 17: 57. DOI: [10.1590/1516-635xSpecialIssue](https://doi.org/10.1590/1516-635xSpecialIssue).
- [41] XIONG J L, WANG Z J, MIAO L H, et al. Growth performance and toxic response of broilers fed diets containing fermented or unfermented cottonseed meal[J]. Journal of Animal Feed Science, 2016, 25: 348. DOI: [10.22358/jafs/67667/2016](https://doi.org/10.22358/jafs/67667/2016).
- [42] ZHANG W J, XU Z R, SUN J Y, et al. A study on the reduction of gossypol levels by mixed culture solid substrate fermentation of cottonseed meal[J]. Asian-Australasian Journal of Animal Sciences, 2006, 19(9): 1314. DOI: [10.5713/ajas.2006.1314](https://doi.org/10.5713/ajas.2006.1314).
- [43] ZHU Y W, PAN Z Y, QIN J F, et al. Relative toxicity of dietary free gossypol concentration in ducklings from 1 to 21 d of age[J]. Animal Feed Science and Technology, 2017, 228: 32. DOI: [10.1016/j.anifeedsci.2017.03.013](https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2017.03.013).
- [44] ZENG Q F, BAI P, WANG J P, et al. The response of meat ducks from 15 to 35 d of age to gossypol from cottonseed meal[J]. Poultry Science, 2015, 94(6): 1277. DOI: [10.3382/ps/pev070](https://doi.org/10.3382/ps/pev070).
- [45] ZHU L Y, YANG A, MU Y, et al. Effects of dietary cottonseed oil and cottonseed meal supplementation on the structure, nutritional composition of egg yolk and gossypol residue in eggs[J]. Poultry Science, 2019, 98(1): 381. DOI: [10.3382/ps/pey359](https://doi.org/10.3382/ps/pey359).
- [46] WANG Y W, DENG Q Q, SONG D, et al. Effects of fermented cottonseed meal on growth performance, serum biochemical parameters, immune functions, antioxidative abilities, and cecal microflora in broilers[J]. Food and Agricultural Immunology, 2017, 28(4): 725. DOI: [10.1080/09540105.2017.1311308](https://doi.org/10.1080/09540105.2017.1311308).
- [47] NIE C X, ZHANG W J, GE W X, et al. Effects of fermented cottonseed meal on the growth performance, apparent digestibility, carcass traits, and meat composition in yellow-feathered broilers[J]. Turkish Journal of Veterinary and Animal Sciences, 2015, 39(3): 350. DOI: [10.3906/vet-1410-1465](https://doi.org/10.3906/vet-1410-1465).
- [48] 周媛媛, 朱泉, 陈生琴, 等. 瘤胃微生物发酵棉粕对肉鸭生产性能的影响[J]. 中国油脂, 2016, 41(7): 24. DOI: [10.3969/j.issn.1003-7969.2016.07.006](https://doi.org/10.3969/j.issn.1003-7969.2016.07.006).
- [49] 刘长忠, 刘兴友, 胡建和, 等. 发酵棉仁粕对生长鹅生长性能和消化酶活性的影响[J]. 中国家禽, 2015, 37(11): 27. DOI: [10.16372/j.issn.1004-6364.2015.11.007](https://doi.org/10.16372/j.issn.1004-6364.2015.11.007).
- [50] SUN H, YAO X H, WANG X, et al. Chemical composition and *in vitro* antioxidant property of peptides produced from cottonseed meal by solid-state fermentation[J]. CyTA - Journal of Food, 2015, 13(2): 264. DOI: [10.1080/19476337.2014.948072](https://doi.org/10.1080/19476337.2014.948072).
- [51] LIU J C, SUN H, NIE C X, et al. Oligopeptide derived from solid-state fermented cottonseed meal significantly affect the immunomodulatory in BALB/c mice treated with cyclophosphamide[J]. Food Science and Biotechnology, 2018, 27(6): 1791. DOI: [10.1007/s10068-018-0414-1](https://doi.org/10.1007/s10068-018-0414-1).

责任编辑: 何馨成