

DOI: 10.16210/j.cnki.1007-7561.2019.02.010

棉粕脱毒工艺及游离棉酚对蛋鸡性能影响的研究进展

王 丽, 王薇薇, 周 航, 王永伟, 李爱科, 刘宽博, 宋 丹, 成俊林

(国家粮食和物资储备局科学研究院, 北京 100037)

摘 要: 我国棉粕资源丰富, 棉粕是优良的植物性蛋白饲料, 粗蛋白含量高, 基本都在 40%以上, 氨基酸种类丰富, 但是棉粕中的游离棉酚 (FG) 严重限制了棉粕的利用。长期饲喂棉粕日粮会引起蛋鸡一系列的不良反应。对 FG 的毒性机理和脱除方法进行了阐述, 总结了 FG 对产蛋性能、蛋品质的影响以及在体内各组织的残留规律, 为棉粕的利用提供参考, 并进一步指出棉粕在畜禽生产应用中需要解决的问题。

关键词: 游离棉酚; 脱毒; 生产性能; 蛋品质; 残留

中图分类号: TS229 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007-7561(2019)02-0050-05

Research progress on detoxification of gossypol in cottonseed meal and the effects of free gossypol on the performance of laying hens

WANG Li, WANG Wei-wei, ZHOU Hang, WANG Yong-wei, LI Ai-ke,

LIU Kuan-bo, SONG Dan, CHENG Jun-lin

(Academy of National Food and Strategic Reserves Administration, Beijing 100037)

Abstract: China is rich in cottonseed meal resources, which contains high-quality protein with more than 40% of crude protein content and high amount of amino acid. However, it contains free gossypol (FG), a antinutrient, which seriously limits its utilization in feed industry. Laying hens can catch a series of untoward effect if being fed cottonseed meal for a long time. The toxicity mechanism of FG and the detoxification methods were summarized, as well as the effects of FG on production performance, egg quality and residual. It provides reference for application of cottonseed meal, and further points out the problems to be solved in the application of cotton meal in livestock and poultry production.

Key words: free gossypol; detoxification; production performance; egg quality; residual

我国是棉花生产大国, 2017 年棉花总产量 548.6 万 t, 棉籽饼 (粕) 产量 440 万 t 左右, 棉籽粕含粗蛋白质 40%以上, 全脱壳棉籽粗蛋白可达 50%以上, 此外, 棉粕中的脂肪和矿物等营养素与豆粕非常接近, 是动物良好的非常规蛋白质饲料资源。但棉粕中含有棉酚等抗营养因子, 极大限制了其在畜禽饲料中的应用。

按存在形式不同, 棉酚可分为游离棉酚 (Free Gossypol, FG) 和结合棉酚 (Bound Gossypol, BG), 其中结合棉酚是游离棉酚与生物体内的蛋白质或游离氨基酸结合而形成的结构稳定的化合物, 其化学键不易打开, 通常情况下无毒^[1]。游离棉酚为纯棉酚与衍生物及其异构体的总和。AOCS (1985)^[2]定义棉酚中易被乙醚或丙酮水溶液提取的物质为游离棉酚。大量摄入游离棉酚会引起中毒, 其毒性主要由于醛基和羟基的高活性引起, 大量游离棉酚进入消化道后可刺激胃肠粘膜引起胃炎, 随后从消化道进入血液, 随血液循

收稿日期: 2018-10-30

基金项目: 国家重点研究计划项目 (2016YFD0501200)

作者简介: 王丽, 1986 年出生, 女, 硕士研究生。

通讯作者: 李爱科, 1963 年出生, 男, 博士, 研究员。

环广泛分布于体内各个器官, 损害肝、肾、脾、心等实质性器官^[3], 造成一系列病变。

1 游离棉酚的毒性及机理

1.1 游离棉酚的毒性

棉酚中毒后, 会出现采食量下降, 体重减轻, 腹泻、粪便色浅、四肢无力、抽搐、呼吸困难等症状; 内脏组织心、肝等实质性病变、坏死^[4]; 睾丸和卵巢病变, 精子致畸; 甚至引起死亡。单胃动物棉酚急性中毒时会引起循环衰竭, 单次口服棉酚的半致死量为: 大鼠 2 400~3 340 mg/kg 体重, 小鼠 500~950 mg/kg 体重, 豚鼠 280~300 mg/kg 体重, 兔子 350~600 mg/kg 体重, 猪 550 mg/kg 体重^[5]。家禽由于受到日龄、品种以及饲料中蛋白质的含量和品质、微量元素尤其是铁的含量等因素的影响, 对 FG 的耐受从 160 mg/kg^[6]到 1 000 mg/kg^[7]不等^[8-10], 不同的实验环境对耐受结果影响也较大。肉鸡日粮中添加醋酸棉酚纯品到 1 600 mg/kg 时, 肉鸡死亡率达 28%^[11]。以蛋鸡产蛋率为指标, 部分研究表明蛋鸡可耐受的游离棉酚为 200 mg/kg^[12]。

1.2 游离棉酚的毒性机理

1.2.1 游离棉酚对酶促反应的影响

酶促反应是酶催化底物的化学反应。棉酚可通过与酶结合或者与底物结合两种方式阻止酶促反应。研究发现, 在棉籽蛋白中加入棉酚, 可降低胰蛋白酶和胃蛋白酶对酪蛋白和棉籽蛋白的消化率^[13]。Lyman 等^[14]研究发现棉酚与底物形成棉酚-蛋白复合体后, 蛋白酶对其的消化作用将降低。棉酚还可以抑制多种蛋白激酶 C 的活性, 如蛋白酶、透明质酸酶、顶体酶、芳香基硫酸酯酶^[15]。不仅如此, 棉酚还通过呼吸链解偶联作用, 抑制三羧酸循环中腺苷酸环化酶等活性, 降低精子活力^[16]。

1.2.2 游离棉酚对矿物质的影响

棉酚能与镁离子、铁离子等结合, 影响动物机能。Herman 等^[17]认为铁离子对棉酚的脱毒作用是通过与棉酚形成不可溶的化合物来实现的。戴云等^[18]研究表明, 棉酚可引起兔左心室收缩力不可逆被抑制, 但是可通过补充镁离子后缓解。Braham 等^[19]报道棉酚可引起猪贫血, 适当补充钙

离子和铁离子贫血症状消失, 从而也表明棉酚可与金属离子结合。

2 棉粕常见的脱毒工艺

为了降低成本, 提高棉粕在家畜和家禽饲料中的用量, 通常需要先进行棉粕脱毒, 常用的脱毒技术有物理、化学、微生物等方法。

2.1 物理脱毒

常用的物理脱毒方法是通过膨化、干热、浸泡、蒸煮等方式脱毒。棉籽粕 130 干热处理 30 min 和 60 min, FG 含量从 880 mg/kg 分别降低到 740 和 680 mg/kg^[20]。如将棉粕加压蒸煮 5、10、15 min, FG 含量从 2 700 mg/kg 分别降低到 2 400、2 200 和 1 500 mg/kg。德国卡尔公司利用膨化加工技术, 将棉籽中的游离棉酚从 5 000 mg/kg 降到 700 mg/kg, 脱毒率高达 86%, 并使过瘤胃蛋白含量提高 20%~30%, 同时可增加蛋白吸收率。综合看来, 物理方法中膨化法不仅能有效降低毒素含量, 还具有成本低, 易操作的优点。

2.2 化学处理

化学法常用的有钝化法、碱处理法、萃取法。化学钝化法是利用 FG 的化学性质, 在一定条件下, 活性醛基和羟基形成螯合物, 使 FG 变成结合态。钝化法常用的试剂是硫酸亚铁、硫酸铵等。硫酸亚铁是目前公认的最有效的去除 FG 的方法。机榨棉籽饼 FG 含量为 873 mg/kg, 加入 1%FeSO₄·7H₂O 脱毒后, 其 FG 含量为 502 mg/kg^[21]。棉酚是一种酚类化合物, 偏酸性, 能够与碱反应生成盐, 因此在棉籽饼粕中添加碱性化合物, 可有效的降低棉酚含量, 但是处理过的棉粕味道大, 适口性差, 且对设备抗腐蚀要求高, 投资大, 成本高。碱处理法常用的试剂有硫酸亚铁、尿素、氨水、石灰水、碱、草木灰等。混合溶剂萃取法使用混合溶剂从棉粕中萃取棉酚, 处理后的棉粕蛋白质质量高, 品质好, 但是投资大, 不易推广。

2.3 微生物处理

目前, 生物发酵是脱毒效果最好, 最安全, 生产成本较低, 是最有发展前途的脱毒方法。棉粕经过发酵后, 可有效降低 FG 含量, 改善营养价值, 主要体现在以下几个方面: 1) 蛋白质含量

提高；2)多数必需氨基酸含量及其消化率提高，氨基酸平衡得到改善；3)小肽含量提高；4)部分酶的活性增强；5)风味改善，适口性提高。

王晓玲等^[22]把醋酸棉酚与多种菌株在液体条件下共同培养，筛选获得了一株棉酚脱除率达90%以上的枯草芽孢杆菌(ST-141)。Khalaf等^[23]采用热带假丝酵母进行发酵，游离棉酚降解率达92.5%。朱德伟等^[24]用两种不同酵母菌混合发酵棉粕，脱毒率高达91.3%，棉酚含量从987.5 mg/kg降解至85.9 mg/kg。研究表明，用制取氨基酸液肥剩余的发酵棉粕配制饲料饲喂蛋鸡，当棉粕添加量为9%~12%时，对鸡的健康和生产性能无影响，并且可降生产成本，提高经济效益^[25]。

3 游离棉酚对蛋鸡的影响

3.1 游离棉酚对蛋鸡生产性能的影响

FG可以钝化消化道组织内的多种酶，导致动物消化不良，生长受阻^[26]；FG抑制胃泌素引起腹胀，从而影响动物生产性能。我国饲料卫生标准(GB 13078—2017)规定蛋鸡日粮中FG含量应20 mg/kg。日粮中高含量FG会影响蛋鸡的生产性能，李建国等^[27]研究表明，当日粮FG达到120 mg/kg时，蛋鸡生产性能显著降低($P<0.05$)。Panigrahi^[28]研究显示，在饲料中添加30%棉粕(游离棉酚含量255 mg/kg)，蛋鸡产蛋量显著降低($P<0.05$)。然而，刘茵茵^[29]研究表明，蛋鸡日粮中FG含量为140 mg/kg时，对海赛克斯蛋雏鸡生产性能没有影响。杨茹洁^[30]用FG含量为179 mg/kg的日粮饲喂蛋鸡12周，蛋鸡生产性能和死淘率没有影响。Lordelo等^[31]研究发现，用含200 mg/kg和400 mg/kg棉酚异构体饲料饲喂蛋鸡，实验各期产蛋率均无显著($P>0.05$)差异。可见，国内外有关蛋鸡饲料中FG限制量的研究结果差异较大。并且，以生产性能为衡量指标时，蛋鸡对FG的耐受性较高。但是长期饲喂，会增加蛋鸡的死亡率，尤其会显著增加产蛋后期的死亡率，这可能与棉酚长期蓄积造成蛋鸡肝脏功能损伤有关。

3.2 游离棉酚对鸡蛋品质的影响

FG可与蛋黄中的铁离子结合，形成黄绿或红褐色复合物，影响蛋黄品质；FG可降低鸡蛋蛋

白浓度，降低蛋清品质。陈连颐等^[32]研究表明，FG可导致蛋黄颜色加深，且随色泽增加煮熟后的蛋黄逐渐变硬。方琴音^[33]用FG含量为30 mg/kg的饲料饲喂蛋鸡，实验第1周即出现蛋黄变色。滑鹏欢等^[34]研究表明日粮中添加FG含量达172.6 mg/kg可显著降低蛋壳强度和蛋质量($P<0.05$)。Lordelo等^[31]实验表明，蛋鸡采食400 mg/kg正消旋纯棉酚饲料20天后，异常蛋检出率及蛋黄颜色评分显著升高($P<0.05$)。焦洪超等^[35]分别用20 mg/kg和40 mg/kg游离棉酚日粮饲喂蛋鸡45周，并未引起鸡蛋蛋白和哈夫单位的显著性变化，但是蛋黄颜色加深。但是，刘茵茵等^[29]研究表明，FG含量添加到400 mg/kg，对蛋鸡常规蛋品质(哈夫单位、蛋壳强度、蛋壳厚度、蛋形指数、蛋黄色泽、蛋黄比重)均无显著性($P>0.05$)影响。某些研究表明，FG对新产鸡蛋品质无影响，但是鸡蛋储存一段时间后大多出现蛋黄变色问题。Panigrahi^[28]研究表明，HGC蛋鸡采食30%棉籽粕饲料(FG 218 mg/kg)10周，虽然新产鸡蛋无蛋黄变色，但在5℃低温条件下储存2个月蛋黄变为褐色^[36]；采食含FG 262 mg/kg的棉粕日粮后，鸡蛋在5℃存储3个月后会呈现微微的桃红色，且随着时间延长，颜色加深^[37]。Waldeoup^[38]研究表明，蛋鸡采食含118 mg/kg或更高(400~1200 mg/kg)FG的饲料，所产鸡蛋经5~6个月存储可致大量蛋黄变色，但是采食含20~59 mg/kg FG饲料的蛋鸡，其所产鸡蛋蛋黄颜色未受影响^[38]，因此，学者们推荐蛋鸡饲料中FG含量应小于40 mg/kg，以保证鸡蛋储存6个月后蛋黄颜色不改变^[38]。

3.3 游离棉酚在鸡蛋及体组织中残留规律

随着蛋鸡每日FG摄入量的增加，蛋中FG残留量显著升高^[39]，体组织内FG残留量也逐渐增加。Mohamed^[40]利用¹⁴C放射追踪的方法研究鼠体内棉酚排出情况，发现76.5%棉酚都可以通过粪便排出体外，3.1%的棉酚通过尿液排出，有8.1%进入到组织中，2.4%集中在肝脏，2.3%集中在肌肉，9天以后，97.5%排出体外，但是，加入铁元素后，可减少棉酚在胃肠道吸收，增加排放速度。Proctor^[40]采用放射性元素标记的棉酚对家禽进行研究，摄入的棉酚89.3%从粪便排出，将

近 8.9% 进入鸡的组织中,而组织中 50% 的棉酚聚集在肝脏。棉酚在动物体内沉积量的多少排序为: 肝脏>肌肉>血液>肾脏>肺,之后为心脏、脾脏和脑组织^[41]。当肉鸡日粮 FG 含量达到 100 mg/kg 时,肉鸡肝脏、肾脏和肌肉中 FG 含量分别为 32.7、6.3、1.1 mg/kg; 日粮 FG 含量为 30 mg/kg 时,肝脏、肾脏肌肉中 FG 含量分别为 10.8、2.1、0.39 mg/kg^[42]。Lordelo 等^[43]用含游离棉酚 200、400 mg/kg 的日粮饲喂蛋鸡,第 3 周时发现蛋黄中 FG 浓度分别达到 235、386 mg/kg。而杨茹洁^[30]用添加 200 g/kg 棉粕的日粮饲喂蛋鸡,第 10 周时鸡蛋中残留 FG 为 35.27 mg/kg。焦洪超^[35]用含游离棉酚 20 和 40 mg/kg 的饲料饲喂蛋鸡,虽然生产性能没有变化,但是其肝脏中游离棉酚的沉积量呈现显著的时间和剂量效应,蛋鸡饲喂 5、25 和 45 周后,其肝脏中游离棉酚含量分别达到 60、185、462 mg/kg 和 462、642、955 mg/kg。研究还表明,含量为 20 mg/kg FG 的饲料长期饲喂蛋鸡,也会引起棉酚在蛋鸡肝脏中的蓄积,剂量效应明显,45 周时蛋鸡肝细胞结构发生紊乱,内质网和线粒体损伤。可见虽然低含量棉酚不会造成畜禽生产性能和产蛋率的变化,但是 FG 在蛋鸡体内蓄积作用明显,即使是低 FG 含量日粮长期饲喂蛋鸡,也会造成蛋鸡内脏损伤。

4 棉粕在畜禽生产应用中需要解决的问题

随着中美贸易战的拉开,豆粕价格水涨船高,寻找优质的豆粕替代原料迫在眉睫,棉粕作为优质的蛋白质饲料资源,一直未得到广泛应用,主要由于我国对棉粕的评价还不够系统,评价结果差异较大。棉粕在畜禽生产中应用问题还很多,但是主要体现在以下几个方面。一是,我国在棉酚检测技术还不成熟,组织中游离棉酚检测方法差异较大,没有形成统一的标准。二是,我国饲料卫生标准中规定蛋鸡饲料游离棉酚含量 20 mg/kg,但是对于鸡蛋及组织中棉酚残留的安全值数据研究的还比较少,棉粕经过脱毒后对蛋鸡毒性研究数据也比较少,不同蛋鸡品种、不同日龄、以及棉粕不同的加工工艺、饲料蛋白质水平等得出的蛋鸡的毒性反应也不同,对其他畜禽的相关研究

也比较少。三是,我国缺乏棉粕利用的系统的预警体系,缺乏畜禽产品质量安全风险评估系统。这些都严重限制了棉粕的广泛应用,为了能够充分利用棉粕资源,降低人类饮食风险,还需加大对棉酚及发酵棉粕安全限量等方面的研究。

参考文献:

- [1] 曾秋凤, 柏鹏. 棉酚在肉禽体内的毒性和残留及其营养对策的研究进展[J]. 动物营养学报, 2013, 25(5): 917-922.
- [2] LUSAS E, RHEE K C. Method of producing low-gossypol cottonseed protein material. In: Google Patents: 1985.
- [3] 周瑞宝. 棉酚毒性实验研究进展[J]. 郑州粮食学院学报, 1991(1): 99-103.
- [4] ROBINSON P H, GETACHEW G, DEPETERS E J, et al. Influence of variety and storage for up to 22 days on nutrient composition and gossypol level of pimacottonseed (*Gossypium* spp.)[J]. Animal Feed Science and Technology, 2001, 91(34): 149-156.
- [5] EFSA. Gossypol as undesirable substance in animal feed[J]. The EFSA Journal, 2008, 908: 1-55.
- [6] HEYWANG B W, BIRD H. Relationship between the weight of chickens and levels of dietary free gossypol supplied by different cottonseed products[J]. Poultry Science, 1955, 34(6): 1239-1247.
- [7] LIPSTEIN B, BORNSTEIN S. Studies with acidulated cottonseed-oil soapstock 2 attempts to reduce its gossypol content[J]. Poultry Science, 1964, 43(3): 694-701.
- [8] RESSANI R, ELIAS L G, BRAHAM J E. All-vegetable protein mixtures for human feeding XV. studies in dogs on the absorption of gossypol from cottonseed flour-containing vegetable protein mixtures[J]. The Journal of Nutrition, 1964, 83(3): 209-217.
- [9] NARAIN R, LYMAN C, DEYOE C, et al. Effect of protein level of the diet on free gossypol tolerance in chicks[J]. Poultry Science, 1960, 39(6): 1556-1559.
- [10] NARAIN R, LYMAN C, DEYOE C, et al. Paper electrophoresis and albumin/globulin ratios of the serum of normal chickens and chickens fed free gossypol in the diet[J]. Poultry Science, 1961, 40(1): 21-25.
- [11] HENRY M, PHENRY M, PESTI G, et al. Pathology and hislopathology of gossypol toxicity in broiler chicks[J]. Avian Diseases, 2001, 45(3): 598-604.
- [12] 高玉时, 唐梦君, 陆俊贤, 等. 高棉籽粕饲料对蛋鸡生产性能及蛋品质的影响研究[J]. 中国家禽, 2012, 34(6): 16-19.
- [13] JONES D, WATERMAN H. Studies on the digestibility of proteins in vitro IV. On the digestibility of the cottonseed globulin and the effect of gossypol upon the peptio-tryptic digestion of proteins[J]. J Biol Chem, 1923, 56: 501-511.
- [14] LYMAN C M, BALIGA B, SLAY M W. Reactions of proteins with gossypol[J]. Archives of Biochemistry and Biophysics, 1959, 84(2): 486-497.
- [15] 袁玉英, 张燕林. 棉酚抑制仓鼠精子顶体酶类活性及其与受

- 精能力的关系[J]. 生殖与避孕, 1996, 16(3): 203-208.
- [16] WICHMANN K, KAPYAH O, SINERVIRTA R, et al. Effect of gossypol on the motility and metabolism of human spermatozoa[J]. Journal of Reproduction and Fertility, 1983, 69(1): 259-264.
- [17] HERMAN D, SMITH F. Effect of bound gossypol on the absorption of iron by rats[J]. The Journal of Nutrition, 1973, 103(6): 882-889.
- [18] 戴云, 郑慧敏. 镁离子棉酚对心脏的影响[J]. 微量元素与健康研究, 2002, 19(1): 10-11.
- [19] BRAHAM J, JARQUIN R, BRESSANI R, et al. Effect of gossypol on the iron-binding capacity of serum in swine[J]. The Journal of Nutrition, 1967, 93(2): 241-248.
- [20] MAYORGA H, GONZLEZ J, MENCH J F, et al. Preparation of a low free gossypol cottonseed flour by dry and continuous processing[J]. Journal of Food Science, 1975, 40(6): 1270-1274.
- [21] 张跃顺. 棉籽饼的脱毒方法及其效果[J]. 山东畜牧兽医, 2004(1): 13.
- [22] 王晓玲, 刘倩, 韩伟, 等. 棉酚脱除菌株的筛选及棉粕混菌固态发酵研究[J]. 粮油食品科技, 2016, 24(1): 81-85.
- [23] MAHMOUD A, KHALA, SAMIR A M. Reduction of free gossypol levels in cottonseed meal by microbial treatment[J]. International Journal of Agriculture and Biology, 2008, 10: 185-190.
- [24] 朱德伟, 刘志鹏, 蔡国林, 等. 高效降解棉酚菌种的筛选及棉粕发酵脱毒工艺研究[J]. 中国油脂, 2010, 35(2): 24-28.
- [25] 张维德, 杨景芝, 孙衍华, 等. S9606 菌发酵脱毒棉籽粕饲喂蛋鸡[J]. 山东农业大学学报, 1999, 30(4): 359-362.
- [26] 赛买提·艾买提, 欧阳宏飞, 赵丽. 五种不同方法对棉副产品棉酚脱毒效果的比较研究[J]. 饲料工业, 2008, 29(1): 27-30.
- [27] 李建国. 游离棉酚对蛋鸡的毒性研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2005.
- [28] PANIGRSHI S V, PLUM E, MACHIN D H. Effects of dietary cottonseed meal, with and without iron treatment on laying hens[J]. Br Poult Sci, 1989(30): 641-651.
- [29] 刘茵茵, 王大祥, 陈大伟, 等. 醋酸棉酚对蛋鸡生产性能及蛋品质的影响[J]. 中国家禽, 2016, 3(23): 28-31.
- [30] 杨茹洁. 可消化 AA 平衡的高棉粕饲料对蛋鸡的生产性能健康状况及蛋品质的影响[D]. 山西太古: 山西农业大学, 2003.
- [31] LORDELO M M, CALHOUN M C, DALE N M, et al. Relative toxicity of gossypol enantiomers in laying and broiler breeder hens[J]. Poultry Science, 2007, 86(3): 582-590.
- [32] 陈连颐, 唐梦君, 陆俊贤, 等. 棉籽粕对海赛克斯蛋鸡生产性能及蛋品质的影响[J]. 中国家禽, 2012, 34(24): 29-32.
- [33] 方琴音. 饲料不同棉籽饼用量对商品蛋鸡生产性能、蛋品质、血液生化指标的影响研究[D]. 雅安: 四川农业大学, 2004: 17-18.
- [34] 滑鹏欢, 李方龙, 王哲鹏, 等. 鸡蛋游离棉酚残留与蛋鸡日粮棉酚水平及饲喂期限的关系[J]. 西北农林科技大学学报, 2014, 42(3): 23-33.
- [35] 焦洪超, 侯楠楠, 姜明君, 等. 饲料游离棉酚水平对蛋鸡肝脏棉酚蓄积及生产性能、蛋品质的影响[J]. 动物营养学报, 2015, 27(10): 3207-3217.
- [36] PANIGRAHI S. Effects of treating cottonseed meal with a solution of ferrous sulphate on laying hen performance and discolorations in eggs[J]. Animal Feed Science and Technology, 1992, 38(2-3): 89-103.
- [37] PANIGRAHI S, HAMMONDS T W. Egg discoloration effects of including screw-press cottonseed meal in laying hen diets and their prevention[J]. British Poultry Science, 1990, 31(1): 107-120.
- [38] WALDEOUP P W, GOODNER TO. Tolerance levels of free gossypol in layer diets as influenced by iron: gossypol ratios[J]. Poultry Science, 1973, 52(1): 20-28.
- [39] STEPHENSON E L, SMITH R M. The storage quality of eggs produced by hens fed screw pressed cottonseed meal[J]. Poultry Science, 1952, 31(1): 98-100.
- [40] MOHAMED B, ABOU-DONIA, CARL M. LYMAN, et al. Metabolic fate of gossypol: the metabolism of ¹⁴C-Gossypol in rats[J]. Lipids, 1969, 5(11): 938-946.
- [41] PROCTOR J, O'NEILL H J, REILICH H G, et al. Physiological evaluation of solvent-treated cottonseed meals in rations for laying hens[J]. Journal of the American Oil Chemists' Society, 1968, 45(5): 393-396.
- [42] Baram N I, ISMAILOV A I. Biological activity of gossypol and its derivatives[J]. Chemistry of Natural Compounds, 1993, 29(3): 275-287.
- [43] LORDELO M M, CALHOUN M C, DALE N M, et al. Relative toxicity of gossypol enantiomers in laying and broiler breeder hens[J]. Poultry Science, 2007, 86: 582-590. 完