日粮添加棉籽对生乳中棉酚残留安全性影响的评估研究

马宏伟，高丽南，许孝峰，王 静，王 飞，蒙 勇，葛旭升*

内蒙古蒙牛乳业（集团）股份有限公司，内蒙古呼和浩特 010000

摘 要：棉籽作为优质蛋白质原料具有来源广泛、营养丰富、价格低廉等优点，在中国畜禽生产中应用日渐广泛，但棉籽饼（粕）在日粮中若使用不当，易造成动物棉酚中毒。对奶牛而言，棉酚向乳中的迁移不仅涉及反刍动物对棉酚的代谢，也牵涉乳制品质量安全，因此应给予重视。基于此，本文对日粮添加棉籽对生乳中棉酚残留进行安全性评估。人体通过饮用牛奶摄入游离棉酚量为0.002 3 mg/kg·d，远低于《GB 2716—2018 食品安全国家标准 植物油》中通过植物油摄入游离棉酚的限定值0.086 mg/kg·d。

关键词：棉籽；游离棉酚；风险评估

文章编号：1671–4393（2025）06–0112–08 DOI:10.12377/1671–4393.25.06.19

0 引言

奶业是健康中国、强壮民族不可或缺的产业[1]。国家统计局数据显示，2024年全国原奶产量达4 079 万吨，稳居世界第五位。原奶产量增长的背后是产业素质的整体提高，2023年，全国奶牛存栏百头以上规模养殖比例达76%，平均单产9.4 吨，较上年增加200 kg[2]。对于规模化牧场运营成本而言，饲料成本约占总成本的60%，随着国际地缘政治风险和贸易摩擦不断升级、国内粮食饲用占比继续增加，我国奶牛饲料原料价格逐年上涨，尤其是豆粕等蛋白饲料，导致公斤奶饲料成本持续升高[3]，为此2023年农业农村部制定《饲用豆粕减量替代三年行动方案》，为开发潜在蛋白饲料资源，替代饲用豆粕提供有力支撑。

作者简介：马宏伟（1998–），男，新疆乌鲁木齐人，硕士，研究方向为生乳质量与食品安全；
高丽南（1986–），女，吉林榆树人，硕士，副高级畜牧师，研究方向为生乳质量与食品安全；
许孝峰（1990–），男，吉林敦化人，本科，研究方向为原奶食品安全管控；
王 静（1983–），女，内蒙古通辽人，本科，轻工高级工程师，研究方向为生乳质量与食品安全；
王 飞（1983–），男，内蒙古乌兰察布人，本科，研究方向为原奶质量管理；
蒙 勇（1982–），女，内蒙古乌兰察布人，本科，轻工中级工程师，研究方向为原奶质量管理。
*通信作者：葛旭升（1985–），男，河北保定市，硕士，中级畜牧师，研究方向为原奶食品安全管控。

中国乳业线上阅读

棉籽是轧棉过程中的副产物，我国作为棉花产量大国，棉籽产量也位居世界前列。国家统计局数据显示，2024年我国棉花产量约616.4 万吨，通常每生产1 kg皮棉，产生1.65～1.70 kg棉籽[4]，折算出2024年我国棉籽产量为1017.06~1047.88 万吨。棉籽作为一种优质低廉的植物蛋白备受牧场青睐，在饲料原料中，棉籽主要以全棉籽、棉籽粕和棉籽饼形式被广泛应用。在美国南部与西南地区，40%～50%棉籽以全棉籽的形式饲喂奶牛；我国主要以棉籽饼（粕）的形式被应用[5]。合理利用棉籽不但能降低公斤奶饲料成本，同时也能缓解蛋白质饲料原料紧缺的压力。但由于棉籽类产品饲用过程中存在抗营养因子，当奶牛摄入过多游离棉酚，不但会影响其生长发育和繁殖健康，还会对牛奶质量和人类健康造成潜在风险。本文就棉籽饲喂价值、棉酚毒性以及脱毒工艺进行论述，同时对生乳中游离棉酚的残留进行安全性评估，旨在为安全、合理饲用棉籽蛋白提供参考。

1 棉籽饲喂价值

棉籽主要包括棉籽壳和棉籽仁。棉籽壳质地坚硬，可防止棉籽中的蛋白质和粗脂肪在瘤胃内降解，起到过瘤胃保护的作用。全棉籽含有大约29.0%的粗纤维、17.8%的粗脂肪和23.0%的粗蛋白质。不同棉籽产品的营养组成见表1[6]。《奶牛营养需要（NRC）2001）》推荐日粮中脂肪总量不应超过干物质的6%～7%，由于谷物和粗料中含约3%的脂肪，因此奶牛日粮额外添加脂肪约占干物质的3%，添加全棉籽可在配方基本不变的情况下提高日粮能量[7]。此外，棉籽中还含有较丰富的钙、磷、钾、锌等矿物质和维生素 E 、木糖醇等有益物质[8]。目前，棉籽及其副产品作为饲料原料对奶牛产奶量、奶品质、成本等影响已有广泛研究。

1.1 棉籽对产奶量的影响

奶牛日粮中添加适量棉籽及其副产品能提高泌乳牛生产性能，因为棉籽不但可以直接为奶牛提供能量和蛋白质，棉籽的降解还能为瘤胃微生物提供氮源和能量，促进瘤胃发酵，提高饲料降解率[9]。周建民等[10]饲喂近4 000 头泌乳牛脱酚棉籽蛋白，替代精料配方中10%～15%豆粕，结果表明牛群产奶量提高13.83%（2.5 kg）。刘建雷等[11]为研究不同水平全棉籽对产奶性能的影响，在日粮中添加7.5%、10.0%和12.5%全棉籽，结果表明，添加不同水平全棉籽均可提高奶牛产奶量和乳脂校正乳产量。朱文涛等[12]在日粮中添加8.0%全棉籽，研究其对奶牛生产性能的影响，与对照组相比，产奶量提高5.65%。钟荣珍等[13]在日粮中添加5.0%、10.0%、15.0%全棉籽，结果表明，与对照组相比，随着日粮添加全棉籽比例的增加，奶牛乳脂校正乳产量显著提高，其中，全棉籽比例为10%时，乳脂校正乳产量提高3.55 kg/d。

但也有研究表明，日粮中添加过量全棉籽可能产生反作用。Grainger等[14]在日粮中添加13%～23%全棉籽，随全棉籽添加比例的增加，奶牛瘤胃中甲烷生成量显著降低，泌乳牛平均体增重和产奶量分别降低31%和10%。因此，全棉籽添加的比例尤为重要。

1.2 棉籽对乳品质的影响

日粮中添加适量全棉籽可显著提高乳脂率，并通过减少短链和中链脂肪酸，增加长链脂肪酸和共

表 1 不同棉籽产品的营养组成 [6]

项目	豆粕	全棉籽	棉籽饼	棉籽粕	菜籽饼	菜籽粕
干物质 DM（%）	89.0	91.0	88.0	90.0	88.0	88.0
粗蛋白质 CP（%）	44.2	23.0	36.3	47.0	35.7	38.6
粗脂肪 EE（%）	1.9	17.8	7.4	0.5	7.4	1.4
粗纤维 CF（%）	5.9	29.0	12.5	10.2	11.4	11.8
粗灰分 ASH（%）	6.1	4.0	5.7	6.0	7.2	7.3

中国乳业线上阅读

轭亚油酸的比例，优化脂肪酸结构[7, 15]。刘建雷等[11]在日粮中不同水平全棉籽均能显著提高乳脂率。钟荣珍等[13]研究结果也证实全棉籽对乳脂率提升的贡献，即添加全棉籽通过提高乳中多不饱和脂肪酸和单不饱和脂肪酸的含量可改善乳品质。

1.3 棉籽使用的限制因素

尽管棉籽作为优质饲料原料具有高性价比、高蛋白、高能量和改善泌乳性能等优势，但由于其本身含有单宁、环丙烯类脂肪酸和游离棉酚等抗营养因子，限制了棉籽的利用。单宁能抑制瘤胃消化酶及微生物活性，阻碍小肠对营养素的吸收[16, 17]。环丙烯类脂肪酸是限制棉籽及其副产品利用的第二大抗营养因子，能够改变脂肪酸分布，引起肝脏脂肪变性，影响肝脏健康[18]。游离棉酚毒性较大，是限制该饲料原料应用的最主要因素，其浓度过高会导致动物急性中毒，并干扰繁殖和免疫功能。此外，游离棉酚在动物体内会产生积累效应，长时间摄入低浓度棉酚也会造成动物中毒[17, 19]。近几年游离棉酚在生乳中残留的安全性问题引起了广泛关注。

2 游离棉酚毒性评估

棉酚是存在于棉花根、茎、叶、种子色素腺内的一种多酚羟基双萘醛类化合物，在棉籽仁中含量最高，占棉籽仁总重的0.15%～2.5%[20]。根据旋光异构体划分可分为右旋棉酚（+）与左旋棉酚（−），发挥主要活性成分是左旋棉酚。根据是否与蛋白质、磷脂和糖类结合，可分为游离棉酚和结合棉酚两种形式，两者之和称为总棉酚[21]。结合棉酚的生物活性弱，不能被胃肠道吸收，可随粪便排出体外。棉酚的毒性主要来源于游离棉酚，游离棉酚在棉籽仁中呈游离状态，其萘单元上的醛基是产生毒性的主要原因[22]。游离棉酚的含量随棉花品种、土壤肥力、加工工艺不同而有所差异，浓度范围为365～8 416 mg/kg。不同棉籽产品游离棉酚含量见表2[23]。

棉酚主要在机体肝脏中蓄积。肝脏是哺乳动物最重要的解毒器官，部分棉酚在肝脏中分解并通过胆汁随粪便排出。赵红波等[24]分别用含373.29 mg/kg、644.60 mg/kg、920.27 mg/kg棉酚的精料饲喂育肥牛，探究棉酚在组织中残留情况，结果发现：肝脏棉酚含量最高，其余依次为脾、肺、心、肌肉、肾，血清中未检测出棉酚。万发春等[25]用含2.9 g、3.9 g和5.8 g棉酚的饲料饲喂奶牛，结果表明，棉酚残留在组织的含量依次为肝、肌肉、血液。Colin-Negrete等[26]在日粮中添加15%、30%全棉籽饲喂奶牛，结果发现，粪中右旋棉酚和左旋棉酚浓度分为别0.12%、0.03%。Chen等[27]给大鼠口服5 mg棉酚后，70.4%的右旋棉酚和80.2%的左旋棉酚经粪便排出，而2.30%的右旋棉酚和2.79%的左旋棉酚随尿液排出。棉酚除经组织、粪便、尿液排出外，也可通过乳汁排出，当人类通过食物链摄入过量游离棉酚时，机体健康会受到侵害。

2.1 细胞毒性

细胞水平研究有助于更好了解游离棉酚的毒性作用。棉酚可诱导红细胞渗透脆性增加，从而引发溶血，这一作用在动物试验中已被广泛报道[21, 28, 29]。细胞暴露于高浓度棉酚时能引起细胞内Ca^{2+}浓度增加，激活Ca^{2+}-K^{+}通道，导致细胞内K^{+}和Cl^{-}流失，使细胞渗透压改变，发生皱缩，这是红细胞自杀性死亡的标志[30]。此外，Ca^{2+}浓度增加会触发磷脂分子重新分布，导致原本位于细胞内侧的磷脂酰丝氨酸暴露

表 2 不同棉籽产品游离棉酚含量 [23]

项目	样本数（个）	平均值（mg/kg）	标准差（mg/kg）	变异系数（%）	范围（mg/kg）
全棉籽	35	5 271	1 440	27.3	1 962 ~ 8 416
棉籽粕，油萃取，去皮	43	901	988	109.7	1 290 ~ 6 968
棉籽饼，挤压，去皮	21	974	401	41.2	365 ~ 1 650

中国乳业线上阅读

至细胞膜外侧，为吞噬细胞提供识别和清除凋亡细胞的信号[31]。棉酚与铁离子结合，形成棉酚-铁复合物，能影响血红蛋白的生成并导致缺铁性贫血等一系列症状。棉酚还可诱导氧自由基生成而引起氧化应激，损伤细胞的脂质、蛋白质，进一步促进细胞凋亡。

2.2 生殖毒性

雄性生殖器官是游离棉酚毒害的主要靶向器官，研究表明，棉酚破坏生精上皮细胞而影响精子数量及质量[32，33]。王辉等[34]用9 mg／kg·bw棉酚对小鼠灌胃14 d，与对照组相比，棉酚给药组小鼠睾丸生精上皮层细胞数量减少，生精小管变圆，生精小管间空隙明显变大，睾丸间质萎缩。睾丸支持细胞能合成与分泌雄激素结合蛋白，并为生精细胞分裂、增殖、分化提供所需营养，支持细胞与生精细胞相互作用才能维持正常生殖功能，过量棉酚能促使睾丸支持细胞发生形态学变化，细胞间隙连接能力减弱，破坏睾丸生理结构，影响正常生殖功能[32，35]。此外，棉酚还会降低细胞氧化酶活性并破坏DNA，减少精子细胞、精母细胞内的微管蛋白含量，抑制mRNA合成，诱导生精细胞凋亡[36]。

雌性动物接触过量棉酚会干扰发情周期、妊娠和早期胚胎发育[37]。李继俊等[38]研究发现，棉酚能抑制卵泡发育和成熟，减少窦状卵泡，增加闭锁卵泡，降低血浆雌二醇，大剂量棉酚可抑制性激素合成，导致排卵停止。此外，饲喂棉籽粕的母牛卵巢中大卵泡（>5 mm）少于饲喂豆粕的母牛，影响体外卵巢类固醇形成以及牛卵丘颗粒细胞的扩增和核成熟[39]。综上所述，过量棉酚不但影响奶牛生殖细胞的增殖、分化，而且可通过改变体内激素水平和胚胎毒性，引起着床率降低、流产或早产[40，41]。

3 棉籽脱毒技术

3.1 物理脱酚

物理脱酚主要是利用高温、高压释放腺体中的游离棉酚，与赖氨酸结合形成无毒物质进而达到脱毒目的。常见的物理脱酚方法有热处理、挤压膨化、辐射等。胡维岗等[42]研究发现挤压膨化温度在120 ℃时，既能保持棉籽粕的营养价值，又可降低约85%游离棉酚。伽玛射线和电子辐射可减少棉籽粕中存在的游离棉酚。在一项研究中，应用40 kGy的电子辐射（82.37%）比伽马射线（59.16%）更能有效降低游离棉酚含量，且基本不破坏营养物质[43]。但由辐射造成的突变存在安全监管问题以及生成辐射线的装置成本问题，限制了该技术的应用。

3.2 化学脱酚

化学脱酚主要是利用棉酚的化学性质（例如棉酚呈酸性，可与碱性物质反应生成盐）达到脱酚目的。常见的化学脱酚方法有碱处理法和萃取法。硫酸亚铁能与游离棉酚的反应性基团结合，形成络合物。据研究报道，加入5 倍量硫酸亚铁处理棉籽时，脱酚率可达83.12%[44]，但形成的络合物残留在棉籽中，影响适口性。棉酚可溶于有机溶剂，不同溶剂对游离棉酚的去除效率为7.27%~95.43%。丙酮和乙醇对棉酚有较高溶解度，是去除游离棉酚的理想溶剂[45]，但萃取溶剂难以去除，还会导致部分氨基酸含量降低。因此，有必要开发一种既能降解游离棉酚又能保证棉籽饲喂价值的方法。

3.3 生物脱酚

生物脱酚主要是利用微生物降低棉籽中游离棉酚含量，包括微生物发酵法、酶解法。微生物的解毒机制有两种解释：一是棉酚被微生物作为碳源，降解为无毒物质，二是在微生物发酵过程中，游离棉酚向结合棉酚转化而降低毒性。目前已对枯草芽孢杆菌、米曲霉、热带假丝酵母、酿酒酵母等菌株进行了广泛研究，游离棉酚的去除效率为60%~94%[46，47]。该方法不仅能降低游离棉酚的含量，还能在发酵过程中产生氨基酸，提高棉籽的营养价值和适口性，Wang等[48]使用瘤胃安氏乳杆菌的脱酚率达83%，粗蛋白含量增加约4%。Sun等[47]使用

中国乳业线上阅读

枯草芽孢杆菌的脱酚率达61.91%，粗蛋白质含量增加12.23%。生物脱酚是一种理想方法，但是微生物发酵条件不易掌握，且利用真菌发酵其安全性尚待考证。

4 食用含棉酚牛奶的安全性评估

4.1 游离棉酚限量标准

《GB 2716—2018 食品安全国家标准 植物油》规定，食用植物油中游离棉酚限量为200 mg/kg，煎炸过程中的食用植物油游离棉酚限量也为200 mg/kg，并未对乳及乳制品中游离棉酚限量作出规定[49]。此外，《GB 13078—2017 饲料卫生标准》规定，棉籽中游离棉酚允许量不超过5 000 mg/kg；棉籽加工产品不超过1 200 mg/kg；泌乳牛精料补充料不超过500 mg/kg[50]。美国食品和药物监督管理局以及世界卫生组织分别将食品中游离棉酚的限量设定为0.045%和0.060%。

4.2 生乳中游离棉酚安全性评估

安全性评估是评价污染物质是否会对生态环境和人类健康造成影响的重要手段。棉酚能经粪便、尿液、乳汁排出体外，国内外学者对通过饲喂棉籽时游离棉酚在血液、牛奶中残留的研究较少，部分国内研究结果见表3，其中，游离棉酚在牛奶中的残留量为0.221 0 μg/kg~0.325 2 mg/kg。

表 3 国内棉酚在血液和牛奶中残留量[25，51~54]

饲喂项目	最大摄入量（mg/d）	最大血液残留量（mg/kg）	最大牛奶残留量（mg/kg）	检测方法
棉酚	5 800	0.419 2	未检出	分光光度计法
游离棉酚	18 930	0.143 0	0.325 2	液相色谱法
游离棉酚	13 017	$0.223\ 3\times10^{-3}$	$0.222\ 0\times10^{-3}$	液相色谱法
游离棉酚	3 169	0.18	0.12	液相色谱法
游离棉酚	8 000	$0.223\ 0\times10^{-3}$	$0.221\ 0\times10^{-3}$	液相色谱法

人体通过食物摄入是接触游离棉酚的最直接方式，由于游离棉酚的细胞、生殖毒性，评估其摄入风险尤为重要。由于国家标准并未对乳及乳制品中无游离棉酚的限量作出规定，本研究基于食用植物油中游离棉酚的规定限量，计算人体可接受游离棉酚的限定值。并根据表3数据，结合《中国居民膳食指南（2022）》[55]中推荐的饮食摄入量标准，使用牛奶中游离棉酚丰度的最大值评估人体游离棉酚的日摄入量（EDI）。

本研究运用以下公式计算EDI（mg/kg·d）：

EDI=（C×IR）/BW

式中，C为食物中游离棉酚丰度（mg/kg）；IR为推荐摄入量（kg/d或L/d）；BW为假定成人70 kg体重。

$EDI_{（限定值）}=200\times30\times10-3/70=0.086$ mg/kg·d

$EDI_{（牛奶中游离棉酚）}=0.325\ 2\times500\times10-3/70=0.002\ 3$ mg/kg·d

《中国居民膳食指南（2022）》推荐每天食用油摄入量为25~30 g，推荐每天乳及乳制品摄入量为300~500 g。本文所提及试验中，牛奶中游离棉酚丰度的最大值为0.325 2 mg/kg，由此计算出人体游离棉酚日摄入量EDI（牛奶中游离棉酚）为0.002 3 mg/kg/d，远低于GB 2716—2018[49]中通过食用植物油摄入游离棉酚的规定限量EDI（限定值）0.086 mg/kg/d，换言之，假定成人70 kg体重，每天饮用约18.4 L的牛奶才会超过限量。

5 结论

棉籽作为一种优质且经济的蛋白质来源，在畜禽生产中应用广泛，但其中含有的游离棉酚可能对动物健康和乳及乳制品质量安全构成风险。通过对奶牛日粮中添加棉籽的影响进行综合分析，发现适量添加棉籽能提高产奶量和乳品质，但过量添加可能产生负面影响。游离棉酚的毒性主要源于其对细胞和生殖系统的损害，而合理的棉籽脱毒技术能有效降低其在饲料中的含量。本研究依据《中国居民膳食指南（2022）》推荐的乳及乳制品摄入量进行

中国乳业线上阅读

EDI保守计算，通过牛奶摄入的游离棉酚量远低于GB 2716—2018[49, 50]中通过食用植物油摄入游离棉酚的规定限量，表明在合理控制棉籽添加量的前提下，生乳中的游离棉酚含量对人体健康的风险较低。因此，严格控制棉籽在奶牛日粮中的添加比例并加强生乳质量监测，对于保障乳及乳制品质量安全和营养价值有重要意义。

参考文献

[1] 毕美家，刘亚清，王加启，等.中国奶业高质量发展战略研究报告[J].中国奶牛，2023（11）：1–15.

[2] 中国奶业协会.中国奶业质量报告（2024）[R].北京：中国奶业协会，2024.

[3] 武瑞，王建发.规模化奶牛场节本提质增效关键技术分析[J].饲料工业，2024，45（4）：1–5.

[4] Sunilkumar G，Campbell L M，Puckhaber L，et al.Engineering cottonseed for use in human nutrition by tissue–specific reduction of toxic gossypol[J].Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America，2006，103（48）：18054–18059.

[5] 苏义童，孙晓格，王雅晶，等奶牛高能高蛋白精料资源——全棉籽的加工与利用[J].中国畜牧杂志，2020，56（8）：9–15.

[6] 中国饲料成分及营养价值表（2022年第33版）制订说明[J].中国饲料，2022（23）：109–119.

[7] 张宜辉，尹文兵.全棉籽营养特性及其在奶牛饲粮中的应用[J].饲料与畜牧：新饲料，2015（10）：10–12.

[8] 刘永明，关淑仙，王文静，等.棉籽作畜禽饲料的营养价值、脱毒方法及应用研究进展[J].中国棉花，2023，50（9）：35–41.

[9] Mena H，Santos J E P，Huber J T，et al.The effects of varying gossypol intake from whole cottonseed and cottonseed meal on lactation and blood parameters in lactating dairy cows[J].Journal of Dairy Science，2004，87（8）：2506–2518.

[10] 周建民，梁乙明，顾东，等.用脱酚棉籽蛋白饲料替代部分饼粕饲喂泌乳牛的试验报告[J].中国奶牛，2003（2）：26–28.

[11] 刘建雷，吕永艳，胡昌军，等.全棉籽对奶牛产奶性能及血液生化指标的影响[J].饲料研究，2010（12）：1–3，6.

[12] 朱文涛，王加启，王建平，等.不同水平全棉籽日粮对奶牛生产性能的影响[J].中国畜牧兽医，2008，35（6）：6–9.

[13] 钟荣珍，高艳霞，李秋凤，等.饲粮全棉籽比例对奶牛泌乳性能及乳脂脂肪酸组成的影响[J].动物营养学报，2012，24（4）：762–768.

[14] Grainger C，Williams R，Clarke T，et al.Supplementation with whole cottonseed causes long–term reduction of methane emissions from lactating dairy cows offered a forage and cereal grain diet[J].Journal of Dairy Science，2010，93（6）：2612–2619.

[15] Pierce R B，Adeniji Y A，Bomberger R，et al.Effect of feeding increasing levels of whole cottonseed on milk and milk components，milk fatty acid profile，and total–tract digestibility in lactating dairy cows[J].Journal of Dairy Science，2024，107（5）：2916–2929.

[16] Besharati M，Maggiolino A，Palangi V，et al.Tannin in ruminant nutrition：Review[J].Molecules（Basel，Switzerland），2022，27（23），8273.

[17] 路顺萍，李龙龙，陈雪文，等.棉副产品在畜禽养殖业中应用的研究进展[J].饲料研究，2024，47（3）：143–148.

[18] 王大祥.棉酚和环丙烯脂肪酸对蛋鸡生产性能、蛋品质及肝脏的影响[D].扬州：扬州大学，2016.

[19] European Food Safety Authority（EFSA），et al.Gossypol as undesirable substance in animal feed – Scientific Opinion of the Panel on Contaminants in the Food Chain[J].EFSA Journal，2009，7（1）：908–n/a.

[20] 唐吉旺，何浩，王淑霞，等.固相萃取–高效液相色谱–串联质谱法同时测定动物源性食品中五氯酚和游离棉酚[J].食品科技，2020，45（7）：364–371.

[21] 汤超华.棉酚旋光异构体在泌乳奶牛体内转移规律及其代谢组研究[D].北京：中国农业科学院，2017.

[22] 冯婉滢，罗燕，张玲，等.食品中棉酚的检测方法研究进展[J].食品安全质量检测学报，2018，9（21）：5623–5628.

[23] 吕云峰，王修启，赵青余，等.棉酚在饲料中安全限量及畜产品中残留研究进展[J].中国农学通报，2010，26（24）：1–5.

[24] 赵红波，刘晓牧，刘倚帆，等.日粮棉酚含量对育肥牛血液指标及组织中棉酚残留的影响[J].畜牧兽医学报，2014，45（11）：1809–1814.

[25] 万发春，吴乃科，宋恩亮，等.棉酚对乳牛繁殖性能的影响及体内残留研究[J].中国畜牧杂志，2003（3）：20–21.

[26] Colin–Negrete J，Kiesling H E，Ross T T，et al.Effect of whole cottonseed on serum constituents，fragility of erythrocyte cells，and reproduction of growing Holstein heifers[J].Journal of Dairy Science，1996，79（11）：2016–2023.

[27] Chen Q Q，Chen H，Lei H P.Comparative study on the metabolism of optical gossypol in rats[J].Journal of Ethnopharmacology，1987，20（1）：31–7.

[28] Zbidah M，Lupescu A，Shaik N，et al.Gossypol–induced suicidal erythrocyte death[J].Toxicology，2012，302（2–3）：101–105.

[29] Hawkins G E，Guthrie L D，Lindsey T O.Physiological responses of lactating cows to gossypol from cottonseed meal rations[J].Journal of Dairy Science，1980，63（4）：562–573.

[30] Xu W B，Xu L H，Lu H S，et al.The immunosuppressive effect of gossypol in mice is mediated by inhibition of lymphocyte proliferation and by induction of cell apoptosis[J].

中国乳业杂志网络版

Acta Pharmacol Sin，2009，30（5）：597–604.
[31] 王燕群.凋亡细胞被巨噬细胞清除机制的研究[D].广州：第一军医大学，2006.
[32] 胡波，郑文新，高维明，等.游离棉酚毒理学与脱毒技术的研究进展[J].草食家畜，2020（3）：1–7，38.
[33] Randel R D，Chase C C Jr，Wyse S J.Effects of gossypol and cottonseed products on reproduction of mammals[J].Journal of Animal Science，1992，70（5）：1628–1638.
[34] 王辉，朴智燕，马慧，等.棉酚短期给药对小鼠的生殖毒性和肾毒性具有可逆性[J].南方医科大学学报，2023，43（2）：251–256.
[35] 邓思君，袁慧.棉籽饼饲料中棉酚生殖毒性的研究进展[J].畜牧与饲料科学，2011，32（7）：37–38，41.
[36] Zhang M，He Z，Yuan H，et al.DNA damage and decrease of cellular oxidase activity in piglet Sertoli cells exposed to arsanilic acid[J].Journal of Veterinary Medical Science，2011，73（2）：199–203.
[37] Luz V B，Gadelha I C N，Cordeiro L A V，et al.In vitro study of gossypol's ovarian toxicity to rodents and goats[J].Toxicon，2018，145：56–60.
[38] 李继俊，李志诚.棉酚女性抗生育研究[J].现代妇产科进展，1994（4）：367–371.
[39] Randel R D，Willard S T，Wyse S J，et al.Effects of diets containing free gossypol on follicular development，embryo recovery and corpus luteum function in Brangus heifers treated with bFSH[J].Theriogenology，1996，45（5）：911–922.
[40] Lin Y C，Rajamahendran P，Rikihisa Y.Inhibition of rat embryo implantation in the gossypol–treated uterine horn[J].Theriogenology，1991，35（4）：769.
[41] Dodou K，Anderson R J，Small D A P，et al.Investigations on gossypol：Past and present developments[J].Expert Opinion on Investigational Drugs，2005，14（11）：1419–1434.
[42] 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）：247–250.
[43] 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 & Chemistry，2014，99：23–25.
[44] 王倩，张力莉，赵婷，等.不同处理方式对棉籽粕中游离棉酚和常规养分含量的影响[J].饲料研究，2015（2）：50–53.
[45] Pelitire S M，Dowd M K，Cheng H N.Acidic solvent extraction of gossypol from cottonseed meal[J].Animal Feed Science and Technology，2014，195：120–128.
[46] Zhang Y，Zhang Z，Dai L，et al.Isolation and characterization of a novel gossypol–degrading bacteria Bacillus subtilis strain Rumen Bacillus Subtilis[J].Animal Bioscience，2018，31（1）：63–70.
[47] 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 and Biology，2012，14（4）：563–568.
[48] Wang W K，Li W J，Wu Q C，et al.Isolation and identification of a Rumen Lactobacillus Bacteria and its degradation potential of gossypol in cottonseed meal during solid–state fermentation[J].Microorganisms，2021，9（11）：2200.
[49] 温金梅.GB 2716—2018《食品安全国家标准 植物油》标准解读[J].中国质量与标准导报，2018，253（11）：21–23.
[50] 侯敏，刘亚男，王宁，等.微生物发酵技术在新疆棉籽壳饲料化的应用研究进展[J].黑龙江畜牧兽医，2020（21）：44–47，56.
[51] 钟荣珍.日粮添加全棉籽对泌乳早期奶牛生产性能及乳脂组成的影响[D].保定：河北农业大学，2007.
[52] 王安平.棉粕和棉籽营养成分与棉酚含量测定及其对奶牛产奶量和乳品质的影响[D].长沙：湖南农业大学，2009.
[53] Sun X，Su Y，Hao Y，et al.Novel process methods for the whole cottonseed：Effect on the digestibility，productivity，fat profile，and milk gossypol levels in lactating dairy cows[J].Frontiers in Nutrition，2022，9：801712.
[54] Wang A P，Zhang J M，Meng Y L，et al.Effects of different sources and levels of dietary gossypol on gossypol residues in plasma and milk of lactating cows[J].Journal of Dairy Science，2012，95（9）：5127–5132.
[55] 张丽丽，周艳，王培玉，等.中国居民平衡膳食宝塔（2022）评价[J].环境与职业医学，2023，40（9）：1074–1078.

Evaluation and Study on the Impact of Adding Cottonseed to the Diet on the Safety of Gossypol Residues in Raw Milk

MA Hongwei，GAO Linan，XU Xiaofeng，WANG Jing，WANG Fei，MENG Yong，GE Xusheng*

下转126页

中国乳业编辑部

[1]Shanghai Agricultural Products Quality and Safety Center，Shanghai 201708
[2]University of Shanghai for Science and Technology，Shanghai 200093

Abstract：*Pseudomonas* spp. is one of the most common genera of cryophilic bacteria in raw milk，and in order to explore the main factors affecting the kinetic parameters of *Pseudomonas* spp.，this study carried out a meta-analysis by quantitatively integrating the kinetic parameters of microorganisms and quantifying the variability of the strains. By statistically analyzing the growth parameters of more than 750 *Pseudomonas* spp. under different conditions and predicting their minimum growth temperatures（Tmin）based on the square root model，the results showed that the overall Tmin value of Pseudomonas spp. was -4.06 ℃，with the Tmin of strains 1248 and E52 in the culture medium being -5.38 ℃ and -6.36 ℃，respectively.In a low-temperature environment，the high initial inoculum size（Y_0，log CFU/mL）in UHT milk significantly shortened the growth retardation period，allowing the microorganisms to enter the logarithmic growth period（λ）more quickly even at lower temperatures.The distribution of maximum specific growth rate（μmax）under the combined effect of temperature，pH value，activity water（Aw）and NaCl concentration ranged from 0.04 h^{-1} to 1.63 h^{-1}.In addition，NaCl concentration（1.0% to 7.5%）had a significant inhibitory effect on the growth of *Pseudomonas* spp..This study provided important reference basis for the safety，production optimisation and quality control during the production of milk and dairy products.

Keywords：*Pseudomonas* spp.；meta-analysis；growth；inactivation；modelling

▲上接118页

Inner Mongolia Mengniu Dairy（Group）Co.，Ltd.，Hohhot Inner Mongolia 010000

Abstract：Cottonseed，as a high-quality protein source，has the advantages of wide availability，rich nutrition and low price，and its application in China's livestock and poultry production is becoming more and more widespread. However，if cottonseed（meal）is not used properly in the diet，it is easy to cause gossypol poisoning in animals. For dairy cows，the migration of gossypol into milk not only involves the metabolism of gossypol by ruminants but also the quality and safety of dairy products，thus it should be given due attention.Based on this，the paper conducted a safety assessment of gossypol residues in raw milk by adding cottonseed to the diet on raw milk. The amount of free gossypol ingested by the human body through drinking milk was 0.002 3 mg/kg·d，which is far below the limit value of 0.086 mg/kg·d for free gossypol intake through vegetable oil in the GB 2716-2018 National Food Safety Standard for Vegetable Oils.

Keywords：cottonseed；free gossypol；risk assessment

中国乳业线上阅读