

科 研 专 著

霉菌毒素对猪危害及 生物降解法研究

冯艳忠 主编

刘 娣 主审

中国农业科学技术出版社

科研专著

5816.3
3

霉菌毒素对猪危害及 生物降解法研究

冯艳忠 主编

刘 娣 主审

中国农业科学技术出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

霉菌毒素对猪危害及生物降解法研究 / 冯艳忠主编. —北京: 中国农业科学技术出版社, 2014. 9

ISBN 978 - 7 - 5116 - 1786 - 6

I. ①霉… II. ①冯… III. ①饲料 - 真菌毒素 - 生物降解 - 研究 IV. ①S816. 3

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2014) 第 184400 号

责任编辑 朱 绯 李 雪
责任校对 贾晓红

出 版 者 中国农业科学技术出版社
北京市中关村南大街 12 号 邮编: 100081

电 话 (010)82109704(发行部) (010)82106626(编辑室)
(010)82109703(读者服务部)

传 真 (010) 82106626

网 址 <http://www.castp.cn>

经 销 者 各地新华书店

印 刷 者 北京富泰印刷有限责任公司

开 本 787 mm × 1 092 mm 1/16

印 张 10.25

字 数 200 千字

版 次 2014 年 9 月第 1 版 2014 年 9 月第 1 次印刷

定 价 36.00 元

现代农业产业技术体系建设专项 (CARS - 36)

科技部国际合作项目 “天然抗霉菌毒素饲料添加剂
生产技术的引进与开发” (2011DFA30760)

资助出版

《霉菌毒素对猪危害及生物降解法研究》

编著委员会

主 编 冯艳忠 黑龙江省农业科学院

副主编 何鑫淼 黑龙江省农业科学院

刘焕奇 青岛农业大学

陈赫书 黑龙江省农业科学院

主 审 刘 娣 黑龙江省农业科学院

郑世民 东北农业大学

秦国庆 加拿大奥特奇公司

编 委 (按姓氏笔画排序)

冯艳忠 黑龙江省农业科学院

何鑫淼 黑龙江省农业科学院

刘焕奇 青岛农业大学

陈赫书 黑龙江省农业科学院

刘 娣 黑龙江省农业科学院

郑世民 东北农业大学

王文涛 黑龙江省农业科学院

秦国庆 加拿大奥特奇公司

徐会连 日本自然农法研究中心

么红霞 大庆市粮食局第五粮库

任庆娜 青岛农业大学

序 言

研究表明，95% 饲料中存在的霉菌毒素已在田间产生，尤其在潮湿或洪涝的恶劣气候条件下，农作物中霉菌毒素的发生率和浓度往往比较高，在饲料原料、饲料产品储存期间又可产生新的霉菌毒素。目前，已知霉菌毒素有 200 多种，在我国最常见的、对养猪业危害最大的主要有黄曲霉毒素、T-2 毒素、玉米赤霉烯酮等，此外还有烟曲霉毒素、赭曲霉毒素等，猪所有生产阶段对霉菌毒素都非常敏感。霉菌毒素可以抑制猪的免疫功能，导致抵抗力下降，诱发慢性感染并降低药物的治疗效果，这些影响会给对猪的生产带来巨大的损失。我国处在亚洲霉菌毒素高发区，华南、华东乃至华北地区收获季节雨量较多，农作物在田间就会受到霉菌毒素的污染，特别是黄曲霉毒素广泛存在于玉米、花生粕等饲料原料中，变质的饲料不仅影响生猪健康，最终也影响人类健康。近年，东北也出现玉米霉变率增高趋势，大大影响养猪业的生产效率。

所以，研究霉菌毒素的脱毒方法尤为重要。在众多的降解方法中，生物降解法较好，因此，研究霉菌毒素、特别是黄曲霉毒素的生物降解方法特别有必要。我们联合加拿大、日本等国的相关专家，共同研制了益生菌酵解物对饲料霉菌毒素降解作用的研究、乳酸菌对寄生曲霉生长的抑制及其毒素降解的研究，并研发出了微生物及其酵解的天然抗霉菌毒素饲料添加剂产品，并对其使用效果进行了评估试验。

为提高养猪效率，现把笔者的科研成果写成此书，希望能够给读者以参考，在生猪产业生产中关注霉菌毒素的危害并做出防范措施。

由于水平和时间仓促，错误之处在所难免，恳请各位老师、专家、生产者批评指正！

编著委员会

2013 年

目 录

第一章 绪 论	(1)
1 霉菌毒素的研究进展	(1)
1.1 霉菌毒素的种类	(2)
1.2 霉菌毒素对家畜的危害	(5)
2 霉菌毒素对猪的影响	(8)
2.1 黄曲霉毒素对猪的影响	(8)
2.2 玉米赤霉烯酮素对猪的影响	(9)
2.3 呕吐毒素对猪的影响	(10)
2.4 T-2 毒素对猪的影响	(10)
2.5 赭曲霉毒素对猪的影响	(11)
2.6 烟曲霉毒素对猪的影响	(11)
3 饲料中霉菌毒素的污染	(11)
3.1 饲料中霉菌毒素的种类及对饲料的影响	(12)
3.2 饲料中霉菌毒素的限量标准	(13)
3.3 饲料中霉菌毒素污染的原因	(14)
4 饲料中黄曲霉毒素的污染	(14)
4.1 产生黄曲霉毒素菌群的接种和无性繁殖	(14)
4.2 黄曲霉毒素的性质和毒性作用	(17)
5 饲料霉菌毒素的脱毒方法	(19)

2 霉菌毒素对猪危害及生物降解法研究

5.1	物理脱毒	(20)
5.2	化学脱毒	(21)
5.3	酶制剂脱毒法	(22)
5.4	生物解毒法	(22)
6	饲料黄曲霉毒素的脱毒方法	(23)
6.1	机械脱毒	(23)
6.2	物理脱毒	(23)
6.3	高温处理及紫外线照射	(24)
6.4	化学脱毒	(25)
6.5	脱毒	(25)
6.6	营养解毒法	(25)
6.7	黄曲霉毒素的检测方法	(25)
7	研究目的意义	(28)

第二章 乳酸菌对寄生曲霉生长的抑制作用及其影响因素 (31)

1	试验材料	(31)
1.1	培养基	(31)
1.2	菌种	(32)
1.3	试剂	(32)
1.4	仪器	(32)
2	试验方法	(33)
2.1	寄生曲霉孢子悬液的制备	(33)
2.2	植物乳酸杆菌活化培养和活菌计数	(33)
2.3	保加利亚乳酸杆菌的分离培养和活菌计数	(33)
2.4	植物乳酸杆菌和保加利亚乳酸杆菌对寄生曲霉孢子活性的影响	(34)
2.5	植物乳酸杆菌和保加利亚乳酸杆菌抑制寄生曲霉产毒	(34)
2.6	温度对乳酸菌抑制寄生曲霉孢子活性的影响	(34)
2.7	pH 值对乳酸菌抑制寄生曲霉孢子活性的影响	(35)
2.8	乳酸菌的初始浓度对乳酸菌抑制寄生曲霉孢子活性的影响	(35)
2.9	数据处理	(35)

3 结果与分析	(35)
3.1 试验组不同时间寄生曲霉孢子的活性	(35)
3.2 试验组不同时间 AFB ₁ 的含量	(36)
3.3 温度对乳酸菌抑制寄生曲霉孢子活性影响	(37)
3.4 pH 值对乳酸菌抑制寄生曲霉孢子活性的影响	(40)
3.5 浓度对乳酸菌抑制寄生曲霉孢子活性的影响	(41)
4 讨论	(42)
第三章 乳酸菌对黄曲霉毒素 B ₁ 的吸附作用及影响因素	(44)
1 试验材料	(44)
1.1 培养基	(44)
1.2 菌种	(44)
1.3 试剂	(45)
1.4 仪器	(45)
2 试验方法	(46)
2.1 菌种的恢复培养	(46)
2.2 乳酸菌的活菌计数 (细菌平板计数法)	(46)
2.3 乳酸菌对 AFB ₁ 的吸附作用	(46)
2.4 时间对乳酸菌吸附 AFB ₁ 的影响	(47)
2.5 温度对乳酸菌吸附 AFB ₁ 的影响	(47)
2.6 乳酸菌有无活性对吸附 AFB ₁ 的影响	(47)
2.7 乳酸菌的浓度对乳酸菌吸附 AFB ₁ 的影响	(48)
2.8 ELISA 法测定 AFB ₁ 的含量	(48)
2.9 数据分析	(49)
3 结果与分析	(49)
3.1 乳酸菌对 AFB ₁ 的吸附强度	(49)
3.2 时间对乳酸菌吸附 AFB ₁ 的影响	(49)
3.3 温度对乳酸菌吸附 AFB ₁ 的影响	(50)
3.4 乳酸菌有无活性对吸附 AFB ₁ 的影响	(51)
3.5 浓度对乳酸菌吸附 AFB ₁ 的影响	(51)

4 讨论 (52)

第四章 乳酸菌对饲料中寄生曲霉生长和产毒影响的研究 (55)

1 试验材料 (55)

1.1 培养基 (55)

1.2 菌种 (55)

1.3 试剂 (56)

1.4 主要仪器 (56)

2 试验方法 (56)

2.1 寄生曲霉孢子悬液的制备 (56)

2.2 发酵试验 (56)

2.3 AFB₁ 的提取 (57)

2.4 ELISA 法测定 AFB₁ 的含量 (57)

3 结果与分析 (58)

3.1 10d 不同试验组发酵的情况 (58)

3.2 不同试验组 AFB₁ 的含量 (58)

4 讨论 (59)

5 结论 (60)

第五章 益生菌酵解物对饲料霉菌毒素降解作用的研究 (61)

1 材料与方法 (61)

1.1 试验材料 (61)

1.2 主要研究内容和方法 (64)

1.3 数据处理 (85)

2 结果与分析 (85)

2.1 复合益生菌发酵条件优化及其保质期的确定 (85)

2.2 复合益生菌品质评价 (89)

2.3 复合益生菌对寄生曲霉生长的抑制作用及其影响因素 (92)

2.4 抗霉菌毒素植物的筛选及其对寄生曲霉生长的抑制作用 (96)

2.5 复合益生菌酵解抗霉菌毒素植物的方法与工艺 (98)

2.6 复合益生菌降解物的检测及饲喂效果试验 (99)

2.7	益生菌酵解物对育肥猪霉变饲料霉菌毒素的降解作用	(100)
2.8	益生菌酵解物对母猪饲料霉菌毒素降解的影响	(113)
2.9	益生菌酵解物在常规饲料中添加剂量确定及饲喂效果	(115)
3	讨论	(116)
3.1	复合益生菌发酵最佳条件的选择及其优化	(116)
3.2	霉菌毒素对猪饲料的污染	(117)
3.3	霉菌毒素对猪免疫力的影响	(118)
3.4	益生菌酵解物对猪饲料霉菌毒素的降解作用	(119)
4	结论	(121)
5	创新点	(122)
参考文献		(123)
附录1 商品猪免疫程序		(144)
附录2 种母猪免疫程序		(145)
附录3 各国饲料中霉菌毒素的标准		(146)

第一章 绪 论

1 霉菌毒素的研究进展

凡是在基质上长成棉絮状、绒毛状或蜘蛛网状菌丝体的真菌，统称为霉菌。霉菌在自然界中主要是以仓储霉菌和田间霉菌两种形式存在。无论是在储存条件下还是在田间收割，都可导致霉菌的发生，并且霉菌可以在自然条件下越冬，在低温条件下也可以繁殖^[1]。饲料中的霉菌会不断消耗饲料中养分，造成营养物质的消耗，且被霉菌污染的饲料感官性状很差，严重影响动物适口性。霉菌在污染饲料的过程中会产生霉菌毒素及其他次级代谢产物，这些毒素对动物具有很强的毒副作用，即使在饲料中的含量很低，也会导致畜禽生长受阻，繁殖性能降低，免疫机能下降。目前，已知能够产生霉菌毒素的主要有三大类，即曲霉菌、青霉菌和镰刀霉菌。这些霉菌产生的对动物毒害作用的霉菌毒素主要包括黄曲霉毒素（*Aflatoxin*）、赭曲霉毒素（*Ochratoxions*）、烟曲霉毒素（*Fumonisin*）、玉米赤霉毒素（*Zearlenone*）、单端孢霉毒素；单端孢霉毒素又包括：呕吐素（DON）、雪腐镰刀菌烯醇、T-2 毒素和 DAS 等。

据 BIOMIN 公司 2011 年对来自世界 731 个不同地区的饲料原料、食品、肉制品、DDGS 等进行分析（表 1-1）。从数据可以看出，在亚洲、南美洲、北美洲、欧洲、非洲等地区都有霉菌毒素的发生和存在，尤以亚洲最为严重，亚洲霉菌毒素的污染率高于北美洲，而且，亚洲样本霉菌毒素的含量是北美洲含量的数倍到数十倍。同时，BIOMIN 公司对 2010 年 7 月到 9 月同一饲料样本中霉菌毒素的含量变化进行了检测，结果

表明，2010 年 7 月到 9 月霉菌毒素含量增加，说明，仅 3 个月时间霉菌毒素增长30% ~ 62%，变化之快让人触目惊心^[2]。

表 1-1 BIOMIN 2011 年第一季度亚洲和北美洲的霉菌毒素调查报告

毒素种类	亚洲				北美洲			
	受检样品数量	污染率 (%)	平均含量 (μg/kg)	极量 (μg/kg)	受检样品数量	污染率 (%)	平均含量 (μg/kg)	极量 (μg/kg)
Afla	267	36	94	677	14	14	2	2
ZON	272	51	511	511	17	35	197	506
DON	266	59	1 768	1 768	17	47	577	1 141
FUM	267	45	1 717	1 717	10	60	1 167	2 088
OTA	260	32	12	12	10	30	30	2

1.1 霉菌毒素的种类

霉菌毒素是由霉菌产生的有毒有害物质，在土壤和植物中，包括谷物、饲草和青储饲料均可发现霉菌毒素。霉菌毒素可在农作物大田收获时形成，在不适宜的储存条件下，霉菌毒素也可继续在收获后的农作物上形成。这些霉菌毒素物质对饲料和家畜都会造成影响^[3~4]。

1.1.1 黄曲霉毒素

黄曲霉毒素（Afla）是高毒性和高致癌性毒素，是由黄曲霉菌属（*Aspergillus*）微生物产生。黄曲霉毒素是由两个不等的二氢呋喃妥因环组成的化合物，均为二呋喃香豆素（*Difuranocoum*）的衍生物。粮食中污染的黄曲霉毒素只有黄曲霉毒素 B₁、B₂、G₁和 G₂ 4 种。这些霉菌毒素的命名主要是根据其在紫外线下发出的颜色不同而命名，AFB₁ 和 AFB₂ 发出的荧光颜色为蓝色光，而 AFG₁ 和 AFG₂ 发出黄绿色的光。在所有黄曲霉毒素中，几乎对所有动物的肝脏都具有原发毒性，其中，AFB₁ 的毒性最强，是氰化钾的 10 倍，砒霜的 68 倍，常见的黄曲霉毒素的毒性按大小顺序排列依次是 B₁、G₁、B₂ 和 G₂，而且 AFB₁ 已经被国际癌症研究机构确定为人和家畜均有致病性的 I 类致癌物。在日常饲料中黄曲霉毒素的污染主要以 AFB₁ 数量最多，毒性最大，因此，在我国饲料质量监督中以 AFB₁ 作为黄曲霉毒素污染的指标^[5]。

黄曲霉毒素性质非常稳定，在 268 ~ 269℃ 时才可以将其毒性破坏。在酸性和中性

溶液中相当稳定，在 pH 值 1~3 的强酸溶液中才稍有分解，但在 pH 值 9~10 的 NaOH 强碱溶液中能够迅速分解，形成钠盐，荧光也随之消失，但此过程是可逆的，在酸性条件下又会恢复原来的结构。5% 次氯酸钠溶液和 Cl_2 、 NH_3 、 SO_2 等强氧化剂都能够使黄曲霉毒素结构完全被破坏^[6]。

1.1.2 单端孢霉烯族毒素

单端孢霉烯族毒素 (*Trichothecenes*) 主要由镰刀菌在低温条件下产生的次生代谢产物，自然界中广泛存在，多见于长久储藏的粮食作物中，误食后易导致严重疾病甚至死亡。单端孢霉烯族毒素被分成 4 个亚类，其中，A 类和 B 类最为重要。A 类单端孢霉烯族毒素主要由拟枝镰孢菌和梨孢镰孢菌所产生，包括 T-2 毒素、HT-2 毒素、镰孢菌酸 (NEO) 和双乙酸基蕈草烯醇 (DAS)；B 类单端孢霉烯族毒素主要由黄色镰孢菌和禾谷镰孢菌产生，包括脱氧雪腐镰刀菌烯醇毒素 (呕吐毒素，DON) 及其 3-乙酰基或 15-乙酰基衍生物、雪腐镰孢菌烯醇 (NIV) 和镰孢菌烯酮-X (Fusarenon-X, FX)^[2]。这些毒素中以 A 型 T-2 毒素和 B 型呕吐毒素为最常见。

单端孢霉烯族毒素对人和动物均具有毒性，能够造成急性和慢性疾病，包括呕吐、腹泻、刺激皮肤、拒食、恶心、神经障碍和流产等^[7]。此外，高剂量的单端孢霉烯族毒素能促进白细胞的快速凋亡^[8]。

1.1.3 玉米赤霉烯酮

玉米赤霉烯酮 (ZEA) 又称 F-2 毒素，首先从有赤霉病的玉米中分离得到^[9]。玉米赤霉烯酮产毒菌主要包括禾谷镰刀菌、黄色镰刀菌和三线镰刀菌等^[10]。这些毒素对玉米、小麦、大米、大麦、小米和燕麦等谷物具有很强的污染性^[11]。其中，玉米的阳性检出率为 45%，小麦的检出率为 20%。玉米赤霉烯酮的耐热性较强，110℃ 下处理 1h 才被完全破坏^[12]。

作物和动物饲料中 ZEA 的浓度可以从几微克到 276mg/kg，人类可食谷类中 ZEA 污染浓度在 0.001 5~175mg/kg^[13]。此外，玉米赤霉烯酮具有较强的稳定性，在食品的制作过程，不会由于加工工艺而受到降解^[14]。

玉米赤霉烯酮具有雌激素的作用，其强度为雌激素的 1/10，可造成家禽和家畜的雌激素水平提高，从而影响动物的生殖生理，类似雌激素过多的症状，即生殖器官的功能和形态变化，各种动物对玉米赤霉烯酮的敏感程度依次是猪、牛和禽，青年母猪对玉米赤霉烯酮的敏感性最强^[15]。玉米赤霉烯酮可以导致家畜出现急性和慢性中毒，急性

中毒主要表现为对家畜的神经系统和脏器如心脏、肾脏、肝和肺造成毒害，毒害的最根本原因是导致神经系统亢奋、脏器出血，从而导致家畜死亡，同时对家畜的繁殖系统和消化系统也可造成较大的影响。在慢性中毒时，主要是影响母畜的繁殖系统，可导致死胎、流产和木乃伊胎的出现^[16]。

越来越多的资料证明，ZEA 的内分泌作用除已知的能与雌激素受体结合，还有其他机制作用。ZEA 是甾类合成和代谢酶的竞争底物，可作为一种内分泌分裂剂^[17]。还有研究表明，ZEA 与类固醇激素的同源性，它可作为重要的转录因子参与生物转化的所有阶段，相当于内分泌干扰素^[18]。

1.1.4 赭曲霉毒素

赭曲霉毒素（OT）是一组结构类似的真菌毒素，能够对人和动物的肾脏、肝脏造成损害，从而造成免疫系统的破坏，同时还有致畸和致癌作用^[19~20]，其毒性仅次于黄曲霉毒素。在赭曲霉毒素中毒性最大、对动物危害性最强的为赭曲霉毒素 A^[21]。OTA 是一种稳定的无色结晶化合物，溶于极性溶剂和碳酸氢钠溶液，微溶于水，在紫外线照射下呈绿色荧光。熔点为 134℃，其甲醇溶液在冰箱中保存一年而不会分解^[22]。赭曲霉毒素耐热，焙烤只能使其毒性减少 20%，蒸煮对其毒性不具有破坏作用^[23]。

动物饲料中 OTA 的污染也非常严重。饲料被赭曲霉毒素污染后被动物采食，这些毒素就会在动物的脏器、血液和乳汁中积蓄，从而导致动物性食品的毒素污染^[24]。世界上很多国家都对食品和饲料中赭曲霉毒素的含量进行了限定。

1.1.5 烟曲霉毒素

烟曲霉毒素（FB）是由镰刀菌属在一定温度和湿度下产生的水溶性代谢产物，是一类由不同多氢醇和丙三羧酸组成的结构类似的双酯化合物。到目前为止，发现的烟曲霉毒素有 FA₁、FA₂、FB₁、FB₂、FB₃、FB₄、FC₁、FC₂、FC₃、FC₄ 和 FP₁ 共 11 种。目前已知在粮食和饲料中的烟曲霉毒素有 6 种，但毒性最强和污染性最严重的主要是烟曲霉毒素 B₁ 和烟曲霉毒素 B₂^[25]。其中 60% 以上是 FB₁，其毒性也最强^[26]。这些毒素对高温具有很强的耐受性，化学结构非常稳定^[27]。

烟曲霉毒素主要是诱发肝毒性，可以提高家畜的血清胆固醇浓度。烟曲霉毒素可以导致家畜发生肺、肝的损伤，同时导致家畜出现免疫系统疾病和免疫抑制。同时，这些毒素还可以影响饲料利用率和畜产品的品质，给绿色养殖带来巨大危害。当前，烟曲霉毒素很可能是饲料中污染最严重的霉菌毒素。世界卫生组织（WHO）报道，全球 59%

的玉米和玉米制品都受到 FB_1 的污染。有研究表明,在巴西和美国 FB_1 的污染量为 $2 \sim 333\text{mg/kg}$ [28]。

1.2 霉菌毒素对家畜的危害

高浓度的霉菌毒素会使动物急性中毒,即使饲喂含低浓度霉菌毒素的饲料也可使动物发生慢性中毒症状。霉菌毒素的危害主要表现在可以破坏和降低原料或饲料中的养分,造成动物脏器和组织损伤,造成严重的繁殖障碍和免疫抑制等,这些影响还可以通过肉、蛋和奶等食物链对人类健康产生危害[29]。

1.2.1 黄曲霉毒素对家畜的危害

黄曲霉毒素 (AF) 是一种具高毒性、诱变性和致癌性的化合物[30]。黄曲霉毒素的危害主要表现在以下几个方面:①降低动物采食量,降低饲料营养价值,导致其生长速度和生产能力下降,对 AF 耐受性最差的动物为猪[31]。②对组织器官造成损伤:主要可以损伤家畜的肝、胆以及黏膜和浆膜等,严重时也可以导致肝脏出血而死亡[32]。③免疫机能的抑制:AF 的免疫抑制主要表现在对蛋白质的合成,可导致血清蛋白浓度的改变。④致畸作用:AF 可以导致家畜出现畸形,这些畸形变化与致癌力密切相关,对蛋白质合成具有很强的抑制作用[33]。

1.2.2 玉米赤霉烯酮对家畜的危害

玉米赤霉烯酮具有雌激素作用,其强度为雌激素的 $1/10$,可造成畜禽的雌激素水平提高。大多数动物对 ZEA 都比较敏感,如猪、肉牛、绵羊、鸡和火鸡等。ZEA 可对雌性动物的生殖系统造成毒害,并通过胎盘的吸收从母体传给胎儿,损害幼体健康甚至造成流产。国外早在 1962 年就有因喂饲霉变玉米而引起母猪乳房肿大、阴户肿大及流产现象的报道。D'Mello 等人研究发现,ZEA 能降低怀孕动物的胚胎成活率及新生胎儿的出生重[34~35]。研究表明,玉米赤霉烯酮具有类雌激素作用,不仅可以造成家畜繁殖机能的障碍,同时还可以造成肝毒性、免疫毒性、细胞毒性和遗传毒性等[36]。另外,ZEA 还对雄性动物的生殖系统造成破坏,导致睾丸癌、隐睾病、尿道下裂和降低精液质量[37]。

McNutt 等研究结果表明,饲用发霉玉米的猪可以出现雌激素综合征,可以导致母猪出现早产、流产,死胎、胎儿吸收等症状。对于种公猪也有较大影响,主要表现为睾丸萎缩、性欲降低、甚至出现乳腺增大[36,38]。

1.2.3 单端孢霉烯族毒素对家畜的危害

单端孢霉烯族毒素对粮食和饲料的污染非常普遍，是对食品安全的重大威胁。仅调查中国饲料样本中超过 70% 被 DON 污染^[39~40]。致病机理主要是抑制蛋白质、RNA、DNA 等生物大分子物质的合成，破坏细胞膜和酶类的功能，对造血系统和免疫系统有很强的毒性^[41~42]。低剂量的呕吐毒素造成动物生产性能和免疫机能下降，高剂量的毒素则引起动物急性死亡^[43]。其中，T-2 毒素还能引起骨髓坏死，导致血液白细胞数量减少^[44]。DON 毒素相对 T-2 毒性较小，且 DON 的另一个显著特征是在动物和人体内以很低的浓度引起疾病，研究表明，若摄入量超过 0.25mg/kg 体重，则导致小鼠免疫系统受损，猪类更为敏感^[45]。

单端孢霉烯族毒素广泛存在于粮食、饲料以及粮谷类食品中，主要来源于被真菌污染的小麦、大麦和玉米等粮食^[46~47]。由这些污染原料制成的食品和饲料中，往往含有单端孢霉烯族毒素^[48~49]。如果饲料中含有单端孢霉烯族毒素，它们不仅对饲养动物造成伤害，影响产量和质量，还可能将这些毒素转移到肉、蛋、奶等动物源性食品中，危害人类健康^[50~52]。其中，以呕吐毒素和 T-2 毒素对家畜的影响最为严重^[53]。

1.2.3.1 呕吐毒素

DON 污染谷物类现象非常普遍，它对动物可造成免疫毒性，诱导免疫细胞的凋亡，且依赖剂量与作用时间影响免疫球蛋白的产生和抗炎性细胞因子的分泌呕吐毒素^[54~55]。DON 对动物机体毒性主要分为免疫毒性和细胞毒性。DON 在低浓度时能诱导辅助性 T 细胞超诱导产物——炎性细胞因子和趋化因子在巨噬细胞中的表达^[56~57]。高浓度 DON 可抑制免疫，诱导免疫细胞凋亡，抑制其增殖，同时还影响免疫细胞因子的分泌、减弱免疫应答、抑制淋巴细胞增殖、吞噬作用和巨噬细胞的杀菌作用^[58]。呕吐毒素既是一种免疫抑制剂，又是一种免疫促进剂，其作用与剂量有关。呕吐毒素可以抑制动物对病原体的免疫应答，同时又可以诱发自身免疫反应^[59~60]。

在很多物种上已经得到证实，DON 可以通过胎盘转移到胎儿^[61~62]。怀孕母猪感染 DON 后在胎儿的血浆、肝和肾中均检测到 DON^[63]。

1.2.3.2 T-2 毒素

T-2 毒素是单端孢霉毒素类中的主要毒素之一，属镰刀菌毒素类^[64]。T-2 可以引起骨髓造血功能障碍，对其功能有较强的抑制作用，并导致骨髓造血组织坏死。T-2 毒素还能引起凝血功能障碍，使凝血时间延长，而且还可以对家畜的黏膜和皮肤造成强烈