

小麦中呕吐毒素研究进展

姜冬梅¹, 王 荷^{1,2}, 武琳霞¹, 王刘庆¹, 王 多¹, 王 蒙^{1*}

(1. 北京农业质量标准与检测技术研究中心, 农业农村部农产品质量安全风险评估实验室(北京), 农产品产地环境监测北京市重点实验室, 北京 100097; 2. 河北大学质量技术监督学院, 保定 071000)

摘 要: 小麦是全球三大谷物之一。由镰刀菌引起的小麦赤霉病是我国最主要的小麦病害之一, 能造成小麦严重减产、品质下降, 而且镰刀菌还能产生多种真菌毒素, 进一步危害小麦及其制品的质量安全, 其中, 呕吐毒素(deoxynivalenol, DON)是小麦中检出率最高、危害最严重的真菌毒素之一, 已成为关系小麦及其制品食用安全的重要问题。DON 在小麦等谷物及其制品中的污染和防控是全球面临的严峻挑战, 对 DON 进行定期检测和污染分析, 研究高效、安全的降解技术, 确保消费者安全, 已成为目前世界各国政府和公众广泛关注和高度重视的热点问题。本文综述了 DON 的理化性质及毒性、影响产生的因素、污染现状及防控与脱毒方面的研究进展情况, 以期小麦中 DON 的风险评估及防控策略的制定提供有利参考。

关键词: 小麦; 呕吐毒素; 镰刀菌; 赤霉病; 防控

Research progress of deoxynivalenol in wheat

JIANG Dong-Mei¹, WANG He^{1,2}, WU Lin-Xia¹, WANG Liu-Qing¹, WANG Duo¹, WANG Meng^{1*}

(1. Beijing Research Center for Agricultural Standards and Testing (BRCAT), Laboratory of Quality & Safety Risk Assessment for Agro-products (Beijing), Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Beijing 100097, China; 2. College of Quality and Technology Supervision, Hebei University, Baoding 071000, China)

ABSTRACT: Wheat is one of the 3 major grains in the world. Wheat head blight caused by *Fusarium* spp. is one of the most important wheat diseases in China, and it can cause serious losses in yield and quality. *Fusarium* spp. can also produce mycotoxins which can threaten the quality and safety of wheat and its products. Among these mycotoxins, deoxynivalenol (DON) is one of the most serious toxins high detection rate in wheat, and it becomes an important issue concerning food safety of wheat and its products. Contamination and prevention of DON in grains including wheat and their produces is a serious global challenge, and regular detection, contamination analysis, and research on efficient and safe degradation technology to ensure consumer safety for DON have become a hot issue that widely concerned and highly valued by governments and the public all over the world. This paper reviewed the structure, physicochemical characteristics and toxicity of DON, factors affecting their formation, and the current status of its contamination level and prevention and control measures, and discussed the future prospects for the research on DON, so as to provide beneficial reference for risk assessment and prevention and control of DON in wheat.

KEY WORDS: wheat; deoxynivalenol; *Fusarium*; *Fusarium* head blight; prevention and control

基金项目: 国家农产品质量安全风险评估项目(GJFP2019002)

Fund: Supported by National Project for Quality and Safety Risk Assessment of Agricultural Products of China (GJFP2019002)

*通讯作者: 王蒙, 博士, 副研究员, 主要研究方向为农产品质量与安全。E-mail: wangm@brcast.org.cn

*Corresponding author: WANG Meng, Ph.D, Associate Professor, Beijing Research Center for Agricultural Standards and Testing, No.11 Middle Road of Shuguanghuayuan, Haidian District, Beijing 100097, China. E-mail: wangm@brcast.org.cn

1 引言

小麦是全球三大谷物之一, 极易受到真菌毒素的污染。呕吐毒素, 又名脱氧雪腐镰刀菌烯醇(deoxynivalenol, DON), 由 Yoshizawa 等于 20 世纪 70 年代在被镰刀菌污染的小麦等禾谷类食物中发现并鉴定^[1], 属单端孢霉烯 B 族化合物, 主要由镰刀菌(*Fusarium* spp.)产生, 因会引起猪的呕吐反应而得名, 是小麦中普遍污染的真菌毒素, 严重影响小麦的品质和安全^[2]。研究表明, DON 具有很强的毒性^[3-6], 易对人类健康造成极大的威胁, 已被联合国粮农组织(Food and Agriculture Organization of the United Nations, FAO)和世界卫生组织(World Health Organization, WHO)定为最危险的天然发生的食品污染物, 也已被国际癌症研究机构公布为三类致癌物^[7]。本文以小麦中的 DON 为出发点, 主要从理化性质及毒性、影响产生的因素、污染现状及防控与脱毒 4 个方面展开综述, 以期对小麦中 DON 的风险评估及综合防控研究提供参考。

2 理化性质、毒性及限量标准

DON 化学名称为 3 α ,7 α ,15-三羟基草镰孢菌-9-烯-8-酮, 化学式如图 1 所示, 分子式为 C₁₅H₂₀O₆, 相对分子质量为 296.32^[8]。DON 纯品为无色针状结晶, 熔点为 151~153 °C, 在水和极性溶剂中溶解度良好, 如二氯甲烷、含水甲醇、含水乙醇或乙酸乙酯等; DON 理化性质稳定, 对高压、高热和弱酸条件具有较强的耐受性, 因此谷物磨粉、日常食物烹调和加工很难破坏 DON, 但 DON 在碱性条件下不稳定^[7]。

由于 DON 性质稳定, 一般的食品生产及加工过程很难破坏其毒性, DON 能抑制蛋白质、DNA 和 RNA 的合成, 因此, DON 会对人和动物产生广泛且明显的毒性效应, 许多研究表明, 人畜如果长期食用被 DON 污染的食物, 会引起胃肠道和免疫系统功能损伤, 也会引起内分泌系统和神经系统的病变, 另外, DON 还能与其他真菌毒素如玉米赤霉烯酮(zearalenone, ZEN)等产生协同效应, 对人和动物的健康造成更大的威胁, DON 慢性中毒症状包括细胞毒性和神经毒性等, 急性中毒症状表现为呕吐、头昏和腹泻等, 严重时甚至可能损害造血系统而导致死亡^[3-7]。

基于 DON 的性质及毒性, 其对小麦等谷物的污染严重威胁人畜的生命健康, 已经引起了世界各国的重视^[9], 除了已被 FAO 和 WHO 定为最危险的天然发生食品污染物, 且被国际癌症研究机构公布为 3 类致癌物^[7]外, 随着人们对食品安全的愈加重视, 人们对所食用的小麦等谷物及其制品的要求越来越严格, 目前世界上至少有 37 个国家和组织制定了 DON 的限量标准^[10], 美国的食物及药物管理局(Food and Drug Administration, FDA)规定食品中的 DON

的安全标准是 1 mg/kg, 同时, 美国也制定了饲料用小麦及小麦制品中 DON 的允许限量不得超过 4 mg/kg^[11]; 而欧盟对未加工的小麦等谷物中 DON 的限量值为 1250~1750 μ g/kg, 但对以小麦、玉米等为原料制成的供人直接食用的面粉、粗粉或麦片中 DON 的限量标准则较为严格, 允许限量值为 750 μ g/kg; 国际食品法典委员会(Codex Alimentarius Commission, CAC)对小麦等原粮中 DON 的限定值为 2000 μ g/kg, 对以小麦等原料制成的面粉、粗粉或麦片等成品粮中 DON 的限量值为 1000 μ g/kg^[12]。由于在我国饮食习惯中, 粮谷类占的比重远高于西方国家, 因此严格控制 DON 在我国更具重要性, 我国现行食品安全国家标准 GB 2761-2017《食品安全国家标准 食品中真菌毒素限量》^[13]对小麦等谷物及其制品中 DON 含量有严格的限定, 规定谷物及其制品中 DON 含量不超过 1000 μ g/kg; 我国现行饲料卫生标准 GB 13078-2017《饲料卫生标准》中规定小麦类饲料原料中 DON 的允许量为小于 5000 μ g/kg^[14], 以上标准作为强制性的食品安全标准和饲料卫生标准, 成为我国各级政府、质检机构监管食品及饲料中真菌毒素, 保证《食品安全法》和《农产品质量安全法》顺利实施的标准依据^[7]。

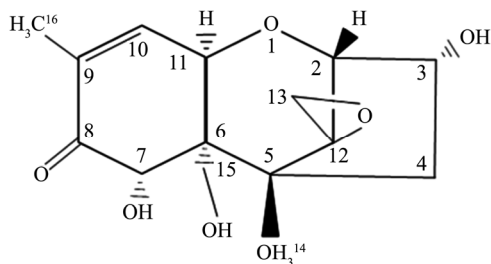


图 1 DON 结构式^[8]

Fig.1 Molecular structure of DON^[8]

3 影响 DON 产生的因素

3.1 产毒菌株

小麦等粮食受霉菌和真菌毒素的污染通常是一个具有连续效应的过程, 霉菌在田间开始侵染, 随后在收获、干燥和储藏过程中累积^[15], 研究表明, 小麦中的 DON 和赤霉病粒含量之间存在显著线性关系^[15,16], DON 是小麦等谷物赤霉病的重要指示性毒素, 主要由镰刀菌(*Fusarium* spp.), 特别是禾谷镰刀菌(*F. graminearum*)和黄色镰刀菌(*F. culmorum*)产生, 此外, 产 DON 的镰刀菌还包括拟枝镰刀菌(*F. sporotrichioides*)、粉红镰刀菌(*F. roseum*)、三线镰刀菌(*F. tricinctum*)、锐顶镰刀菌(*F. acuminatum*)等^[15,17]。

3.2 环境因素

无论是收获还是储藏过程中, DON 的产生不仅与产

毒菌株有关, 还与温度、湿度、培养基质等环境条件息息相关。水分是真菌生长繁殖并产生毒素的主要条件之一, 水活度(water activity, A_w)越接近于 1, 微生物越易生长繁殖, 研究表明一定的水分含量(20%~50%)是影响镰刀菌产 DON 的关键因子之一^[18]。温度对产毒真菌的繁殖和产毒具有重要影响, 适宜的温度条件和一定的作用是产毒真菌生长繁殖及代谢产毒的必备条件, 温度过高或过低都会抑制其生长代谢, 导致菌株产毒能力减弱甚至不产毒, 实验室培养研究表明, 产 DON 镰刀菌的生长繁殖的适宜

温度为 15~25 °C, 适宜水活度为 0.97~0.99^[15]。

4 污染现状

DON 广泛分布在小麦等粮谷类农作物中, 直接影响相关农产品及食品、饲料的质量安全, 对人和动物的健康存在巨大的安全风险, 已引起世界各国政府和公众广泛关注和高度重视。自 DON 首次被发现并鉴定以来^[1], 目前世界上已有多个国家报道了 DON 的发生及污染状况(表 1)。

表 1 近年来小麦及其副产品中 DON 的污染状况
Table 1 Recent report of deoxynivalenol in wheat and its derived products

国家	样品	DON			参考文献
		样品数	检出率/%	检出值/($\mu\text{g}/\text{kg}$)	
中国(河北省)	小麦粉	672	91.5	2.4~1130	[19]
中国(28 省市)	小麦粉	5678	58.74	0~56100	[20]
中国(拉萨)	小麦粉	85	27.1	0~630	[21]
中国(四川省)	小麦	11	72.7	0~1460	[22]
	小麦制品	14	71.4	0~1562	
中国(26 省市)	小麦	200	89	0~10481	[23]
	小麦制品	408	94.8	0~9459	
中国(江苏省)	小麦	180	74.4	14.52~41157.13	[24]
中国	小麦	25	32	0.54~24	[25]
中国(18 省市)	小麦粉	189	74.1	4.6~2287.3	[26]
中国(新疆)	小麦粉	84	51.2	8.7~152.6	[27]
中国(上海市)	小麦粉	230	98.7	0~410.3	[28]
中国(北京市)	小麦粉	50	74	21.9~236	[29]
中国(19 省市)	小麦	62	100	0~1.4	[30]
中国(山东省)	麸皮	19	94.74	250~2341.0	[31]
	小麦次粉	26	100	430~5140.0	
	小麦胚芽	17	70.59	210~3950.0	
中国(10 省市)	小麦及其副产物	162	100	0~12633.25	[32]
中国(15 省市)	小麦及麸皮	77	100	0~8324.6	[33]
中国(20 省市)	小麦	37	100	0~13515.7	
中国(10 省市)	麸皮	77	100	0~12896.2	
	面粉	9	100	0~10084.5	
	次粉	8	100	0~10609.9	[34]
	小麦及其副产物	140	98.57	0~12633.25	[35]
中国(江苏省)	小麦	25	85.4	0~2207.4	[36]
中国(9 省市)	麦麸	24	98.5	0~24831.4	[37]
	米糠	12	100	0~735.1	

续表 1

国家	样品	样品数	DON		参考文献
			检出率/%	检出值/($\mu\text{g}/\text{kg}$)	
中国(10 省市)	小麦及其副产物	65	100	0~11028.93	[38]
中国(山东省)	小麦	34	41.2	209.28~5224.31	[39]
中国(19 省市)	小麦及麸皮	170	-	0~35392.9	[40]
中国(10 省市)	小麦及其副产物	104	100	0~6174.93	[41]
中国(27 省市)	小麦	200	89	0~10481	[42]
	小麦副产物	408	94.8	0~9459	
中国(10 省市)	小麦及副产物	42	100	0~3503.23	[43]
中国(10 省市)	小麦粉	50	30	0~862	[44]
中国(上海市)	麸皮	22	95.5	550~11190	[45]
中国(10 省市)	小麦及其副产物	42	100	0~3503.23	[46]
中国(山东省)	小麦	36	80.6	0~9289	[47]
	小麦副产物	62	98.4	0~9356	
中国(4 省市)	小麦	181	82.9	<33~3030	[48]
巴西	小麦粉	172	77.9	73.50~2794.63	[49]
伊朗	小麦	162	74	150.7~1650.5	[50]
波兰	小麦	92	83	10.5~1265.4	[51]
塞尔维亚	小麦	40	100	175~1440	[52]
意大利	小麦	47	59.6	13~1230	[53]
叙利亚	小麦	40	22.5	9~550	[53]
阿根廷	小麦	84	100	0~9480	[54]
斯洛伐克	小麦	178	82	0~5100	[55]
罗马尼亚	小麦	52	46.2	254~3390	[56]
奥地利、德国和斯洛伐克	小麦	23	100	203~4130	[57]

我国作为小麦生产和食用大国,对 DON 的污染问题也高度重视,2013 年国家风险监测计划已将小麦粉中 DON 含量的监测列为重点。目前,我国多个研究学者对来自 30 余个省份中的小麦及其制品进行了包括 DON 在内的真菌毒素检测,陆晶晶等^[20]从中国 28 个省(自治区、直辖市)的流通环节,以随机抽样的方式采集定型包装或散装小麦粉样品 5678 份,检测结果显示 DON 检出率为 58.74%,超标率为 4.60%,平均含量为 317 $\mu\text{g}/\text{kg}$,含量范围 0~56100 $\mu\text{g}/\text{kg}$,虽然小麦粉中 DON 污染比较普遍,但超标率并不高,且各地区污染程度不同,总体上华东、西南和西北地区超标率相对较高,与当地温湿度条件相关。程传民等^[23]对全国 7 大地区 26 个省市的 608 份小麦及其制品中的 DON 等 4 种真菌毒素进行了检测,结果表明,小麦类样品受 DON 的污染最严重,且我国大部分地区小麦及其副产物都受到 DON 的污染,小麦及其副产物中 DON 的全年检出率分别为

89%和 94.8%,超标率分别为 22%和 48%,由此可见,小麦副产物受 DON 污染的程度远高于小麦。王淞等^[44]对我国山东、河北、吉林等 10 个地区小麦粉中 DON 污染情况进行了调查,并对小麦粉中 DON 膳食暴露量进行分析,结果发现,虽然未发现超标现象,但 DON 检出率为 30%,污染较为广泛,且存在一定的膳食暴露风险。黄俊恒等^[40]对 2015 年采自我国 19 个省市的 170 份小麦及麸皮样品进行了检测,结果表明,样品中 DON 污染严重,检出均值为 2928.1 $\mu\text{g}/\text{kg}$,超标率为 54.7%。谢文梅等^[35]对 2016 年采自全国 10 个省市的 140 份小麦及其副产物样品进行了调查,结果显示,138 份(98.57%)样品呈现 DON 阳性,检出均值为 2704.8 $\mu\text{g}/\text{kg}$,与往年相比,小麦及其副产物中 DON 污染呈上升趋势。王丹等^[26]随机抽取全国 18 个省份市售 189 份面粉,检测结果显示,140 份(74.1%)样品污染了 DON,其中超标率为 0.4%,DON 检出值为 4.6~2287.3 $\mu\text{g}/\text{kg}$,DON

污染平均值相对偏低, 超标率明显下降, 但检出率有所升高, 小麦粉中 DON 污染呈现出高污染率, 低污染程度的特点。黄俊恒等^[30]对 2018 年从北京、福建、安徽、山东、河南等 19 个省市收集的 14 份小麦和 48 份麸皮进行了真菌毒素检测, 结果显示, 62 份样品均受到不同程度的 DON 污染, 检出率为 100%, 且小麦和麸皮中的 DON 检出均值分别为 5173.4 $\mu\text{g}/\text{kg}$ 和 2184.6 $\mu\text{g}/\text{kg}$, 超标率分别为 28.6% 和 6.3%。小麦粉是中国居民主要消费的粮食制品, DON 污染已经成为我国小麦质量安全的重大问题。我国地域辽阔, 南北气候差异显著, 小麦及其制品中 DON 污染状况和含量因气候地域的不同而不同, 更多小麦类样品中 DON 污染调查和污染规律的研究有助于综合分析小麦中 DON 的污染风险, 有利于后续有针对性地系统防控小麦中 DON 污染措施的开发与应用。

5 防控与脱毒

小麦等农产品中真菌毒素的污染已成为不可忽视的问题, 如何有效地控制小麦等谷类作物中真菌毒素的产生, 降低真菌毒素的水平, 对于保障谷物食用安全具有重要意义^[58]。不同小麦品种对赤霉病的抗性水平和耐毒素积累的能力具有显著性差异, 研究表明, 种植赤霉病抗性品种能显著降低籽粒中 DON 的积累, 因此, 小麦种植阶段, 筛选具有稳定抗赤霉病和毒素积累的品种材料是防控赤霉毒素最安全有效的措施^[17]。

由于小麦中的 DON 在田间生长期就已经积累, 因此在后期的收获和储藏阶段对 DON 的防治要从 2 方面入手: (1) 阻止真菌的生长及 DON 的产生, 控制小麦储存及加工过程中水分含量及温湿度, 必要时可使用防霉剂; (2) 对已经产生的毒素进行降解和脱除, 目前小麦中 DON 的降解和脱除方法主要包括物理方法、化学方法以及生物方法等。

5.1 物理方法

物理法主要包括物理分级、热处理法、水洗浸泡法、辐照法和吸附脱毒法等。

物理分级是降低小麦中呕吐毒素最直接的方法。DON 在不同类型小麦籽粒中分布不同, 主要集中在赤霉病粒、发芽粒等不完善粒中, 且小麦中 DON 含量与不完善粒之间存在正相关性, 特别是与赤霉病粒和发芽粒之间存在显著的正相关关系, 而在色泽正常颗粒饱满籽粒中分布较低^[16,59]。研究表明, 利用筛选设备对小麦进行物理分级并清除不完善粒有助于小麦中 DON 的富集和去除^[60-62], 如郑颂等在小麦入仓机械作业环节中利用比重复式清选机增设清选环节, 显著降低入仓小麦中的 DON^[60]; 吴建章等^[61]采用筛选设备对小麦分级去杂后, 小麦中 DON 含量发生明显变化。物理分级主要是通过去除不完善粒从而降低

DON 含量, 因此对于表观正常的小麦籽粒中 DON 的去除效果有限。

热处理法是利用温度破坏食品中的真菌毒素, 由于 DON 具有较好的热稳定性, 热处理法设备要求较高, 且高温会破坏食品的营养和口感, 而且 DON 加热分解的产物尚未明确, 其毒性尚不清楚, 所以此法应用范围较小^[63]。

小麦中的 DON 主要集中在小麦的皮层, 因此, 通过水洗浸泡可显著降低小麦籽粒中的 DON 含量^[64]。然而, 水洗浸泡后, 毒素仍留存在溶液中, 可能会造成二次污染。

辐照法去除 DON 主要分为电子束辐照、紫外辐照和 γ 射线辐照等。电子束辐照对溶液中的 DON 具有降解效果, 但对干燥状态的 DON 无降解效果, 因此不适用于小麦等谷物^[65]。紫外线辐照^[66]和 $^{60}\text{Co-}\gamma$ ^[67]辐照对 DON 具有明显的降解作用, 但紫外线可诱导本来不产毒的菌株产毒, 可能导致小麦等谷物中毒素含量反而上升, 且紫外线穿透力差, 处理效果不稳定, 易破坏食物中的营养成分, 因此, 紫外辐照法的应用也较为有限。

吸附脱毒法是利用吸附剂的疏水作用在一定程度上将粮食中的 DON 去除。常用的吸附剂包括活性炭、皂土、硅铝酸盐类、葡甘聚糖、酵母细胞壁等。研究表明, 根据活性炭的疏水作用, 每克活性炭可吸附 35.1 μmol DON, 但用量大, 成本高^[68]。以水合硅酸铝钠钙为基础, 配合葡甘露聚糖, 以合理配比制备成的新型复合吸附剂 HG 对 DON 的等温吸附无规律, 平均吸附率为 28.08%^[69]。吸附法能够起到部分清除 DON 的效果, 但通常清除不彻底, 且条件要求较高, 同时能吸附小麦等谷物中的营养成分, 如果 DON 被吸附后不被分解处理, 可能还会造成二次污染, 因此目前应用并不广泛。

5.2 化学方法

化学方法主要是通过强碱、强氧化剂或还原性物质等处理, 破坏 DON 的分子结构, 部分或彻底去除 DON, 使其转化为低毒或无毒物质。DON 在碱性条件下不稳定^[7,70], 且 pH 越高, DON 越容易被降解, 因此, 碱性环境能有效降低 DON 的含量。研究表明, 0.1 mol/L 碳酸钠去除麦粒中 DON 效果平均值为 83.9%, 对麦麸中 DON 的去除效果更为明显, 平均脱毒效果高达 90.4%^[71]。磷酸三钠(5000 $\mu\text{g}/\text{mL}$, pH 11.8)对 DON 的去除率为(76.60 \pm 3.70)%^[72], 但由于强酸强碱类化学物质会破坏基质中的营养物质, 且存在残留及二次污染等潜在风险, 实际应用可能性很低。

DON 在还原性条件下不稳定, 研究表明, 22 $^{\circ}\text{C}$ 条件下, 用 2% 维生素处理小麦 24 h, 可有效降低 DON 含量, 其浓度可降低 50%^[73]。谷胱甘肽可作为面制品中的食品添加剂起到还原作用, 并强化食品营养, 研究表明, 谷胱甘肽能减少面团中的 DON 达 38%~46%^[74], 因此通过添加还原剂可在一定程度上降低 DON 含量, 但降解效率有限。

常见的可降解 DON 的氧化物质为臭氧、过氧化氢、二氧化氯等,其中臭氧和过氧化氢的分解产物均没有毒性,应用价值较高。研究表明,利用臭氧(100 mg/L)处理含水量为 20.1%的小麦 60 min 后, DON 的降解率可达 78.7%^[75]。利用臭氧(80 mg/L)对小麦处理 10 min 后, DON 的降解率可达 74.86%^[76]。相比臭氧,其他氧化物质对 DON 的降解效果并不明显^[77]。

此外,近年来,研究学者证实多种植物精油可对黄曲霉、镰刀菌等危害粮食作物的真菌的生长及毒素产生具有良好的抑制效果,且部分精油对真菌毒素还具有一定的降解作用,如袁媛^[78]证实了柠檬醛、丁香酚等精油可有效抑制镰刀菌的生长,对玉米中禾谷镰刀菌产 DON 的抑制率分别高达 98.33%和 95.64%。目前小麦中关于植物精油抑菌及抑制产毒的报道较少。植物精油天然、无毒、高效和挥发持续期长,因此,其应用于防控小麦等粮食作物霉变及毒素污染具有广阔的应用前景。

5.3 生物方法

目前,生物脱毒法是 DON 脱毒研究的热点和重点,主要包括生物吸附法和生物降解法。利用具有吸附或降解能力的细菌、真菌等微生物及其产物酶等对 DON 进行去除,既能避免物理及化学方法中高温、强碱等对食品中营养物质的破坏,同时不会引入其他有毒有害化学物质,有的还能增加微生物源营养物质,又能实现 DON 的温和降解^[79]。

生物吸附法,即在原料或饲料中添加特定的微生物以吸附毒素是实际生产中应用最广泛的 DON 脱毒方法,微生物与 DON 结合后形成复合体,不经吸收直接排出体外,达到降低 DON 对动物机体健康损害的目的,研究表明,对 DON 具有吸附作用的微生物菌株主要是乳酸菌类和真菌类,如真菌米根霉和米曲霉能够通过将 DON 吸附到菌丝体的方式去除^[80],费氏丙酸杆菌及鼠李属乳酸菌株对 DON 的吸附率为 64%~93%。且在相同培养条件下灭活细胞与活细胞对 DON 具有相同的吸附能力^[81]。但需注意的是生物吸附法的过程是可逆的,吸附效果受微生物的浓度和种类的影响,因此生物吸附法降解效率不稳定,需调整吸附条件以提高吸附效果^[79]。

DON 的生物降解法主要是利用从土壤、动物肠道及植物中分离出的可降解 DON 的微生物或酶,将 DON 代谢为无毒或低毒产物,从而降低原料和饲料中 DON 含量或毒性,是一种环保高效的方法,且该方法具有专一性,使用条件温和,对粮谷的品质影响很小,在 DON 脱毒方面具有很好的应用前景,目前研究发现的能够降解 DON 的微生物有细菌、真菌、酵母菌等^[79,82-91]。Yu 等^[85]利用变性凝胶电泳方法从鸡肠道中分离了 10 株细菌,可将 DON 转化为毒性大大降低的脱环氧产物(deepoxy-deoxynivalenol,

DOM-1),且 10 株菌在继代培养过程中具有稳定的活性。徐剑宏等^[86,87]筛选到 DON 高效降解菌株德沃斯氏菌 DDS-1,该菌能够产生降解酶,对液体培养基中的 DON 的降解能力达 95%以上,对小麦饲料中的 DON 降解率达到 75.47%。Li 等筛选得到的芽孢杆菌 LS100 能将 DON 转化成 DOM-1,从而达到降解 DON 的目的^[89]。He 等^[90]从南京郊外土壤中分离得到可水解 DON 的塔宾曲霉(*Aspergillus bingensis*),降解率达 94.4%。Fuchs 等^[91]从牛瘤胃的富集培养物中分离到真杆菌(*Eubacterium*)BBSH797,该菌可以在 24~48 h 内转化 DON 等毒素,而且此脱毒机理被成功开发应用于微生物饲料脱毒制剂真杆菌 BBSH797, DON 脱毒菌的商品化展示出其巨大的发展应用潜力。另外,研究发现,通过生物基因工程手段,将降解酶在微生物中高效表达,可有效转化 DON,如 Khatibi^[92]等把 3-O-乙酰基转移酶的基因片段克隆到酵母菌中表达后,能够有效将酒精发酵产物中的 DON 转化为 3-ADON,从而降低 DON 对动物机体的危害,此法将在 DON 生物降解应用上具有很好的应用前景,但降解产物未知及酶活不高等问题还亟待解决。

综上所述,无论是物理方法、化学方法还是生物方法,都能在一定程度上降低小麦中 DON 的含量。整体而言,物理方法简单,但 DON 去除效果有限,同时也存在一定的不足,如物理分级法对不完善粒以外的籽粒中 DON 的去除效果有限,水洗浸泡及吸附法等可造成二次污染等问题不容忽视。化学方法对 DON 的去除效果优于其他方法,但由于化学物质能够破坏食品品质,易造成二次污染,且不适用于处理干物质且存在潜在风险,因此,强酸强碱等化学方法在小麦中的应用价值不高,而且世界上许多国家禁止采用化学法对真菌毒素进行处理,但臭氧及植物精油应用于防控小麦等粮食作物霉变及毒素污染具有广阔的应用前景。生物方法对 DON 的去除具有高效专一的特点,而且不会破坏食品中的营养成分,但同时也存在一定的弊端,如成本高、见效周期长,因此经济效益低,而且微生物代谢产物稳定性、毒性及对小麦等粮食作物营养价值的影响未知,因此目前生物法的实际应用较少。由此可见,目前单一方法很难长期有效防控 DON 的污染,将物理、化学及生物防控等方法相结合,制定出安全高效的综合防控措施对小麦及其制品的安全生产和食用具有重要意义。

6 展望

DON 是小麦中检出率最高、危害最严重的真菌毒素之一,已成为关系粮食安全和食品安全的重要问题。实时了解 DON 的污染情况并针对性地对其进行防控,对确保粮食和食品安全具有重要意义,因此,目前世界各国政府都十分重视对 DON 的污染分析和定期监测,并制定了相应的限量标准。另外,探索 DON 在小麦整个加工链条中的

消解、转移规律, 寻找安全高效的脱毒技术, 将毒素含量降至安全水平, 减少因 DON 污染而导致的经济损失和对人畜的危害, 能够为小麦及其制品中霉菌毒素污染风险及危害评价指标的建立提供依据, 也是目前科学研究亟需解决的问题。

参考文献

- [1] Yoshizawa T, Morooka N. Deoxynivalenol and its monoacetate: New mycotoxins from fusarium roseum and moldy barley [J]. *Agric Biol Chem*, 1973, 37(12): 2933–2934.
- [2] Streit E, Schatzmayr G, Tassis P, *et al.* Current situation of mycotoxin contamination and co-occurrence in animal feed-focus on Europe [J]. *Toxins*, 2012, 4(10): 788–809.
- [3] Sprando RL, Collins TF, Black TN, *et al.* Characterization of the effect of deoxynivalenol on selected male reproductive endpoints [J]. *Food Chem Toxicol*, 2005, 43(4): 623–635.
- [4] Tardivel C, Airault C, Djelloul M, *et al.* The food born mycotoxin deoxynivalenol induces low-grade inflammation in mice in the absence of observed-adverse effects [J]. *Toxicol Lett*, 2015, 232(3): 601–611.
- [5] Maresca M. From the gut to the brain: Journey and pathophysiological effects of the food-associated trichothecene mycotoxin deoxynivalenol [J]. *Toxins*, 2013, 5(4): 784–820.
- [6] Payros D, Alassane-Kpembi I, Pierron A, *et al.* Toxicology of deoxynivalenol and its acetylated and modified forms [J]. *Arch Toxicol*, 2016, 90(12): 2931–2957.
- [7] 邵慧丽. 臭氧处理对呕吐毒素污染小麦品质及安全性的影响[D]. 无锡: 江南大学, 2016.
Shao HL. Effect of ozone treatment on the quality and safety of deoxynivalenol-contaminated wheat [D]. Wuxi: Jiangnan University, 2016.
- [8] Alizadeh A, Braber S, Akbari P, *et al.* Deoxynivalenol and its modified forms: are there major differences? [J]. *Toxins*, 2016, 8(11): 334.
- [9] 尚艳娥, 杨卫民. CAC、欧盟、美国与中国粮食中真菌毒素限量标准的差异分析[J]. *食品科学技术学报*, 2019, 37(1): 10–15.
Shang YE, Yang WM. Variation analysis of cereals mycotoxin limit standards of CAC, EU, USA, and China [J]. *J Food Sci Technol*, 2019, 37(1): 10–15.
- [10] 佚名. 国内外呕吐毒素限量标准[J]. *粮食加工*, 2018, 43(2): 78.
Anonymous. Domestic and international limit standards for deoxynivalenol [J]. *Grain Process*, 2018, 43(2): 78.
- [11] FDA: Advisory levels for deoxynivalenol (DON) in finished wheat products for human consumption and grains and grain by-products used for animal feed [EB/OL]. [2018-10-10].

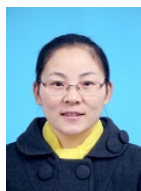
- Yang XL, Zhang GX, Yang QD. Contamination survey of the deoxynivalenols in wheat flour from in the market of Xinjiang [J]. *Chin J Health Lab Technol*, 2016, 26(4): 578-581.
- [28] 殷芳媛, 田明胜, 李王伟, 等. 上海市居民小麦粉中脱氧雪腐镰刀菌烯醇及其乙酰衍生物的暴露评估[J]. *卫生研究*, 2015, 44(4): 661-665.
- Yin FY, Tian MS, Wang LW, *et al.* Dietary exposure assessment of deoxynivalenol and its acetylated derivatives in wheat flour in Shanghai [J]. *J Hyg Res*, 2015, 44(4): 661-665.
- [29] 武亭亭, 杨丹. 粮食加工品中玉米赤霉烯酮和呕吐毒素污染情况调查[J]. *食品安全质量检测学报*, 2019, 10(12): 3674-3678.
- Wu TT, Yang D. Investigation on zearalenone and deoxynivalenol contamination in grains [J]. *J Food Saf Qual*, 2019, 10(12): 3674-3678.
- [30] 黄俊恒, 黄广明. 2018年19省市饲料及饲料原料霉菌毒素污染状况分析[J]. *养猪*, 2019, (3): 6-8.
- Huang JH, Huang GM. Study on mycotoxin contamination of feed and feed raw materials in 19 provinces in 2018 [J]. *Swine Prod*, 2019, (3): 6-8.
- [31] 朱风华, 陈甫, 刘文华, 等. 2017年山东省饲料原料及配合饲料霉菌毒素污染状况调查[J]. *中国畜牧杂志*, 2018, 54(6): 154-160.
- Zhu FH, Chen F, Liu WH, *et al.* Investigation on mycotoxin contamination of feed raw materials and formula feeds in Shandong province in 2017 [J]. *Chin J Anim Husband*, 2018, 54(6): 154-160.
- [32] 谢文梅, 周丽丽, 吴蓉, 等. 2017年饲料及原料霉菌毒素分析报告[J]. *养猪*, 2018, (2): 25-28.
- Xie WM, Zhou LL, Wu R, *et al.* Report on mycotoxins in feed and raw materials in 2017 [J]. *Swine Prod*, 2018, (2): 25-28.
- [33] 周建川, 郑文革, 赵丽红, 等. 2016年中国饲料和原料中霉菌毒素污染调查报告[J]. *中国猪业*, 2017, 12(6): 22-26, 32.
- Zhou JC, Zheng WG, Zhao LH, *et al.* Investigation report on mycotoxin contamination in feed and raw materials of China in 2016 [J]. *China Swine Ind*, 2017, 12(6): 22-26, 32.
- [34] 黄俊恒, 黄广明. 2016年20省市饲料及饲料原料霉菌毒素污染状况分析[J]. *养猪*, 2017, (2): 21-24.
- Huang JH, Huang GM. Study on mycotoxin pollution of feed and feed materials in 20 provinces and cities in 2016 [J]. *Swine Prod*, 2017, (2): 21-24.
- [35] 谢文梅, 钱英, 黄萃茹, 等. 2016年全国部分地区饲料及原料霉菌毒素分析报告[J]. *养猪*, 2017, (2): 25-27.
- Xie WM, Qian Y, Huang CR, *et al.* Study on mycotoxins in feeds and raw materials in some regions of China in 2016 [J]. *Swine Prod*, 2017, (2): 25-27.
- [36] 曹伟. 江苏省2016年上半年市售饲料及原料中霉菌毒素污染及调查报告[J]. *饲料研究*, 2017, (6): 8-10.
- Cao W. Mycotoxin contamination and investigation report of feed and raw materials sold in Jiangsu Province in the first half of 2016 [J]. *Feed Res*, 2017, (6): 8-10.
- [37] 龚阿琼, 戴晋军, 胡骏鹏. 2016年我国饲料原料及其毒素检测分析[J]. *中国饲料*, 2017, (4): 38-39, 44.
- Gong AQ, Dai JJ, Hu JP. Study on toxins in feed raw materials in China in 2016 [J]. *J China Feed*, 2017, (4): 38-39, 44.
- [38] 谢文梅, 苏永腾, 钱英, 等. 2016年1-6月饲料及原料霉菌毒素分析报告[J]. *养猪*, 2016, (4): 17-19.
- Xie WM, Su YT, Qian Y, *et al.* Report of mycotoxin in feed and raw materials from January to June 2016 [J]. *Swine Prod*, 2016, (4): 17-19.
- [39] 朱风华, 陈甫, 徐进栋, 等. 2015年山东省饲料原料霉菌毒素污染状况调查[J]. *饲料研究*, 2016, (14): 47-50, 55.
- Zhu FH, Chen F, Xu JL, *et al.* Investigation on mycotoxin contamination of feed materials in Shandong province in 2015 [J]. *Feed Res*, 2016, (14): 47-50, 55.
- [40] 黄俊恒, 黄广明, 李婉华. 2015年19省区饲料及饲料原料霉菌毒素污染状况分析[J]. *养猪*, 2016, (2): 14-16.
- Huang JH, Huang GM, Li WH. Study on mycotoxin contamination of feed and feed materials in 19 provinces and regions in 2015 [J]. *Swine Prod*, 2016, (2): 14-16.
- [41] 季海霞, 钱英, 黄萃茹, 等. 2015年全国部分地区饲料及原料霉菌毒素分析报告[J]. *养猪*, 2016, (1): 21-24.
- Ji HX, Qian Y, Huang CR, *et al.* Study on mycotoxins in feeds and raw materials in some regions of China in 2015 [J]. *Swine Prod*, 2016, (1): 21-24.
- [42] 程传民, 柏凡, 李云, 等. 2013年呕吐毒素在饲料原料中的污染分布规律[J]. *畜牧与兽医*, 2015, 47(5): 41-45.
- Cheng CM, Bo F, Li Y, *et al.* Distribution of DON in feed materials in 2013 [J]. *Anim Husband Veter Med*, 2015, 47(5): 41-45.
- [43] 季海霞, 苏永腾. 2014年饲料霉菌毒素分析报告[J]. *广东饲料*, 2015, 24(2): 39-41.
- Ji HX, Su YT. Investigation report of mycotoxins in feed in 2014 [J]. *J Guangdong Feed*, 2015, 24(2): 39-41.
- [44] 王淞, 章骅, 崔颖, 等. 小麦粉中呕吐毒素污染调查及膳食暴露分析[J]. *食品研究与开发*, 2014, 35(22): 94-96.
- Wang S, Zhang H, Cui Y, *et al.* The Investigation of DON contents in wheat powder samples and analysis of DON dietary exposure risk [J]. *Food Res Dev*, 2014, 35(22): 94-96.
- [45] 王政, 严敏鸣, 张海颖, 等. 2013年上海浦东地区规模养殖场中饲料及原料霉菌毒素污染状况调查[J]. *上海畜牧兽医通讯*, 2014, (6): 53-55.
- Wang Z, Yan HM, Zhang HY, *et al.* Investigation on mycotoxin contamination of feed and raw materials in scale aquaculture farms in Pudong district of Shanghai in 2013 [J]. *Shanghai Anim Husband Veter Commun*, 2014, (6): 53-55.
- [46] 季海霞, 苏永腾. 2014年饲料霉菌毒素分析与探讨[J]. *养猪*, 2015, (1): 17-19.
- Ji HX, Su YT. Study and discussion of feed mycotoxin in 2014 [J]. *Swine Prod*, 2015, (1): 17-19.
- [47] 程传民, 柏凡, 李云, 等. 山东地区2013年饲料原料霉菌毒素污染情况调查[J]. *今日养猪业*, 2014, (7): 48-51.
- Cheng CM, Bo F, Li Y, *et al.* Investigation on mycotoxin contamination of feed materials in Shandong province in 2013 [J]. *Pigs Today*, 2014, (7): 48-51.
- [48] Zhao Y, Guan X, Zong Y, *et al.* Deoxynivalenol in wheat from the Northwestern region in China [J]. *Food Addit Contam B*, 2018, 11(4): 281-285.
- [49] Silva MV, Pante GC, Romoli JCZ, *et al.* Occurrence and risk assessment of population exposed to deoxynivalenol in foods derived from wheat flour in Brazil [J]. *Food Addit Contam A*, 2018, 35(3): 546-554.
- [50] Abeditizaki M, Zafari DM. Natural occurrence of deoxynivalenol and its acetylated derivatives in wheat in north of Iran [J]. *J Plant Pathol*, 2015, 97(3): 431-437.
- [51] Bryła M, Ksieniewiczwoźniak E, Waśkiewicz A, *et al.* Natural occurrence

- of nivalenol, deoxynivalenol, and deoxynivalenol-3-glucoside in polish winter wheat [J]. *Toxins*, 2018, 10(2): 81.
- [52] Krnjaja V, Tomic Z, Stankovic S, *et al.* Fusarium infection and deoxynivalenol contamination in winter wheat [J]. *Biotech Anim Husband*, 2015, 31(1): 123–131.
- [53] Alkadri D, Ruber TJ, Prodi A, *et al.* Natural co-occurrence of mycotoxins in wheat grains from Italy and Syria [J]. *Food Chem*, 2014, 157: 111–118.
- [54] Palacios SA, Erazo JG, Ciasca B, *et al.* Occurrence of deoxynivalenol and deoxynivalenol-3-glucoside in durum wheat from Argentina [J]. *Food Chem*, 2017, 230: 728–734.
- [55] Slikova S, Gavurnikova S, Hasana R, *et al.* Deoxynivalenol in grains of oats and wheat produced in Slovakia [J]. *Turk J Agric For*, 2016, 62(1): 343–348.
- [56] Alexa E, Dehelean CA, Poiana-A, *et al.* The occurrence of mycotoxins in wheat from western Romania and histopathological impact as effect of feed intake [J]. *Chem Cent J*, 2013, 7(1): 99.
- [57] Van-Der-Fels-Klerx HJ, De-Rijk TC, Booij CJ, *et al.* Occurrence of Fusarium Head Blight species and Fusarium mycotoxins in winter wheat in the Netherlands in 2009 [J]. *Food Addit Contam Part A Chem Anal Control Expo Risk Assess*, 2012, 29(11): 1716–1726.
- [58] 薛金文, 顾惠敏, 施盛山. 小麦中呕吐毒素降解的研究进展[J]. *粮油加工(电子版)*, 2014, (1): 61–64.
- Xue JW, Gu HM, Shi SS. Research Progress on Vomitoxin Degradation in Wheat [J]. *Cere Oils Process (Electron Ver)*, 2014, (1): 61–64.
- [59] 孙宝胜. 小麦中呕吐毒素含量与不完善粒关系研究[J]. *现代面粉工业*, 2018, 32(5): 28–31.
- Sun BS. Study on the relationship between the content of vomitoxin and imperfect grain in wheat [J]. *Mod Flour Mill Ind*, 2018, 32(5): 28–31.
- [60] 郑颂, 方江坤, 谢雅茜, 等. 比重复式清选机在小麦入库过程中的应用[J]. *粮油仓储科技通讯*, 2017, 33(5): 43–46.
- Zheng S, Fang JK, Xie YQ, *et al.* Application of specific gravity compound cleaner in storage processing of wheat [J]. *Grain Oil Storage Technol Communication*, 2017, 33(5): 43–46.
- [61] 吴建章, 郑学玲, 李力, 等. 呕吐毒素污染小麦气流分级分离技术研究[J]. *粮食与饲料工业*, 2017, 7: 7–10.
- Wu JZ, Zheng XL, Li L, *et al.* Air classification technology of wheat polluted by deoxynivalenol [J]. *Cere Feed Ind*, 2017, 7: 7–10.
- [62] 胡斌, 潘跃东, 张丹丹. 入库筛选对小麦呕吐毒素含量的分析[J]. *中国农业信息*, 2016, 6: 105–111.
- Hu B, Pan YD, Zhang DD. Influence of warehousing screening on vomitoxin content in wheat [J]. *China Agric Inform*, 2016, 6: 105–111.
- [63] Pronyk C, Cenkowski S, Abramson D. Superheated steam reduction of deoxynivalenol in naturally contaminated wheat kernels [J]. *Food Control*, 2006, 17(10): 789–796.
- [64] Bullerman LB, Bianchini A. Stability of mycotoxins during food processing [J]. *Int J Food Microbiol*, 2007, 119(1): 140–146.
- [65] 张昆, 卞科, 关二旗, 等. 电子束辐照降解脱氧雪腐镰刀菌烯醇的研究[J]. *粮食与饲料工业*, 2014, (2): 13–16.
- Zhang K, Bian K, Guan EQ, *et al.* Deoxynivalenol degradation by electron beam irradiation [J]. *Cere Feed Ind*, 2014, (2): 13–16.
- [66] 邹忠义, 黄斐, 李洪军. 紫外光辐照对脱氧雪腐镰刀菌烯醇和 T-2 毒素的去除作用[J]. *食品科学*, 2015, 36(19): 7–11.
- Zou ZY, Huang F, Li HJ. Removal of deoxynivalenol and T-2 toxin by ultraviolet irradiation [J]. *Food Sci*, 2015, 36(19): 7–11.
- [67] 李萌萌, 关二旗, 卞科. (60)Co- γ 辐照对赤霉病小麦中 DON 的降解效果[J]. *中国粮油学报*, 2015, 30(10): 1–5, 14.
- Li MM, Guan EQ, Bian K. Effects of 60 Co- γ Irradiation on degradation of DON in Scabbed Wheat [J]. *J Chin Cere Oils Assoc*, 2015, 30(10): 1–5, 14.
- [68] Huwig A, Freimund S, Kappeli O, *et al.* Mycotoxin detoxication of animal feed by different adsorbents [J]. *Toxicol Lett*, 2001, 122(2): 179–188.
- [69] 李荣佳, 李治忠, 周闯, 等. 新型复合吸附剂 HG 对黄曲霉毒素 B1 和呕吐毒素的吸附脱毒研究[J]. *南京农业大学学报*, 2015, 38(1): 113–119.
- Li RJ, Li ZZ, Zhou C, *et al.* Detoxification of aflatoxin B1 and deoxynivalenol by new compound adsorbent HG [J]. *J Nanjing Agric Univ*, 2015, 38(1): 113–119.
- [70] Young JC, Blackwell BA, Apsimon JW. Alkaline degradation of the mycotoxin 4-deoxynivalenol [J]. *Tetrahedron Lett*, 1986, 27(9): 1019–1022.
- [71] 谢茂昌, 王明祖. 用化学方法脱除赤霉病麦毒素的研究[J]. *上海农业学报*, 2000, (1): 58–61.
- Xie MC, Wang MZ. Decontamination of deoxynivalenol (DON) by chemical methods for wheat infected by scab [J]. *Acta Agric Shanghai*, 2000, (1): 58–61.
- [72] 邹忠义, 黄斐, 孙建利, 等. 食品添加剂对脱氧雪腐镰刀菌烯醇和 T-2 毒素体外去除作用研究[J]. *食品安全质量检测学报*, 2016, 7(4): 1613–1624.
- Zou ZY, Huang F, Sun JL, *et al.* *In vitro* removal of deoxynivalenol and T-2 toxin by food additives [J]. *J Food Saf Qual*, 2016, 7(4): 1613–1624.
- [73] 邹忠义, 贺雅非, 李洪军, 等. 单端孢霉烯族毒素转化降解研究进展[J]. *食品科学*, 2010, 31(19): 443–448.
- Zou ZY, He ZF, Li HJ, *et al.* Research progress in transformation and degradation of trichothecenes [J]. *Food Sci*, 2010, 31(19): 443–448.
- [74] Stephanie AG, Jayanand B, Franz B, *et al.* Transcriptome analysis of the barley-deoxynivalenol interaction: Evidence for a role of glutathione in deoxynivalenol detoxification [J]. *Mol Plant Microb Int*, 2010, 23(7): 962–976.
- [75] 王莉, 罗颖鹏, 罗小虎, 等. 臭氧降解污染小麦中呕吐毒素的效果及降解产物推测[J]. *食品科学*, 2016, 37(18): 164–170.
- Wang L, Luo YP, Luo XH, *et al.* Efficacy of deoxynivalenol detoxification by ozone treatment in wheat and prediction of degradation products [J]. *Food Sci*, 2016, 37(18): 164–170.
- [76] Sun C, Ji J, Wu SL, *et al.* Saturated aqueous ozone degradation of deoxynivalenol and its application in contaminated grains [J]. *Food Control*, 2016, (69): 185–190.
- [77] 常晓娇, 王峻, 孙长坡, 等. 二氧化氯对几种主要真菌毒素的降解效果研究[J]. *中国粮油学报*, 2016, 31(9): 113–118.
- Chang CJ, Wang J, Sun CP, *et al.* Research on degradation of chlorine dioxide in primary mycotoxins [J]. *J Chin Cere Oils Assoc*, 2016, 31(9): 113–118.
- [78] 袁媛. 植物精油熏蒸控制玉米中真菌毒素的研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2013.
- Yuan Y. Study on the control of mycotoxins by essential oils fumigation in maize [D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2013.
- [79] 梁含. 呕吐毒素降解菌的筛选、鉴定及应用[D]. 洛阳: 河南科技大学,

- 2019.
- Liang H. Screening, Identification and application of vomiting toxin degrading bacteria [D]. Luoyang: Henan University of Science and Technology, 2019.
- [80] Jaqueline GB, Larine K, Eliana BF, *et al.* Deoxynivalenol (DON) degradation and peroxidase enzyme activity in submerged fermentation [J]. *Ciência E Tecnol De Aliment*, 2011, 31(1): 198–203.
- [81] El-Nezami HS, Chrevatidis A, Auriola S, *et al.* Removal of common fusarium toxins in vitro by strains of lactobacillus and propionibacterium [J]. *Food Addit Contam*, 2002, 19(7): 680–686.
- [82] Karlovsky P. Biological detoxification of the mycotoxin deoxynivalenol and its use in genetically engineered crops and feed additives [J]. *Appl Microbiol Biot*, 2011, 91(3): 491–504.
- [83] 孙宝胜. 小麦中呕吐毒素分布特点及去除技术研究进展[J]. *现代面粉工业*, 2019, 33(2): 11–14.
- Sun BS. Research progress on distribution and removal of vomitoxin in wheat [J]. *Mod Flour Mill Ind*, 2019, 33(2): 11–14.
- [84] 张海棠, 王晓斐, 职爱民, 等. 呕吐毒素污染现状、毒性效应、危害作用及脱毒利用[J]. *河南科技学院学报(自然科学版)*, 2018, 46(5): 40–45.
- Zhang HT, Wang XF, Zhi AM, *et al.* Pollution status, toxic effect, harmful effect and detoxification of vomitoxin [J]. *J Henan Instit Sci Technol (Nat Sci Ed)*, 2018, 46(5): 40–45.
- [85] Yu H, Zhou T, Gong J, *et al.* Isolation of deoxynivalenol-transforming bacteria from the chicken intestines using the approach of PCR-DGGE guided microbial selection [J]. *BMC Microbiol*, 2010, 10(1): 182.
- [86] 徐剑宏, 潘艳梅, 胡晓丹, 等. 降解菌 DDS-1 产 3-AC-DON 氧化酶的酶学特性[J]. *中国农业科学*, 2013, 46(11): 2240–2248.
- Xu JH, Pan YM, Hu XD, *et al.* Enzymatic characteristics of 3-acetyl deoxynivalenol oxidase by devosia sp. DDS-1 [J]. *Sci Agric Sin*, 2013, 46(11): 2240–2248.
- [87] 徐剑宏, 祭芳, 王宏杰, 等. 脱氧雪腐镰刀菌烯醇降解菌的分离和鉴定[J]. *中国农业科学*, 2010, 43(22): 4635–4641.
- Xu JH, Cai F, Wang HJ, *et al.* Isolation and identification of deoxynivalenol degradation strains [J]. *Sci Agric Sin*, 2010, 43(22): 4635–4641.
- [88] 程亮, 伍松陵, 沈晗, 等. 脱氧雪腐镰刀菌烯醇降解菌的筛选与鉴定[J]. *粮油食品科技*, 2013, 21(5): 95–97.
- Cheng L, Wu SL, Shen H, *et al.* Screen and identification of deoxynivalenol degradation strains [J]. *Sci Technol Cere, Oils Foods*, 2013, 21(5): 95–97.
- [89] Li XZ, Zhu C, De LC, *et al.* Efficacy of detoxification of deoxynivalenol-contaminated corn by *Bacillus* sp. LS100 in reducing the adverse effects of the mycotoxin on swine growth performance [J]. *Food Addit Contam A*, 2011, 28(7): 894–901.
- [90] He CH, Fan YH, Liu GF, *et al.* Isolation and identification of a strain of *Aspergillus tubingensis* with deoxynivalenol biotransformation capability [J]. *Int J Mol Sci*, 2008, 9(12): 2366–2375.
- [91] Fuchs E, Binder EM, Heidler D, *et al.* Characterisation of metabolites after the microbial degradation of A- and B-trichothecenes by BBSH 797 [J]. *Mycotoxin Res*, 2000, 16(S1): 66–69.
- [92] Khatibi PA, Monysnyi J, Nghiem NP, *et al.* Conversion of deoxynivalenol to 3-acetyldeoxynivalenol in barley derived fuel ethanol co-products with yeast expressing trichothecene 3-o-acetyltransferases [J]. *Biotechnol Biofuels*, 2011, (4): 26–38.

(责任编辑: 韩晓红)

作者简介



姜冬梅, 博士, 助理研究员, 主要研究方向为农产品质量与安全。
E-mail: jiangdm@brcast.org.cn



王蒙, 博士, 副研究员, 主要研究方向为农产品质量与安全。
E-mail: wangm@brcast.org.cn