

谷物及其制品中脱氧雪腐镰刀菌烯醇控制的 研究进展

蔡 硕, 王周利, 岳田利, 崔 璐*

(西北农林科技大学食品学院, 咸阳 712100)

摘 要: 脱氧雪腐镰刀菌烯醇(deoxynivalenol, DON)属 B 型单端孢霉烯族毒素, 是目前谷物及其制品中污染最为普遍的一种真菌毒素, 食用后会导致人体多种急、慢性中毒, 增加人体患胃癌、食管癌等恶性肿瘤的几率, 具有明显的毒理学危害。为了保护消费者健康及最大限度的减少经济损失, 国内外学者一直在积极的寻找控制 DON 的方法, 反复测试比对各种方法的优点和弊端, 不断优化物理脱毒和化学脱毒方法, 发展生物脱毒方法。近年来, 随着社会经济和科学技术的发展, 我国在脱氧雪腐镰刀菌烯醇的控制和脱毒领域已经探索出许多新的成果。例如, 电化学氧化法、酶的利用法和生物转化法等都是近些年来新兴的高效脱毒技术。本文总结了目前食品中 DON 的控制方法并对其做出比较, 讨论和展望未来社会在这一领域的发展方向并举例说明小麦、玉米及其制品中 DON 的全产业链控制, 详细说明 DON 如何实现从农田到餐桌的全产业链控制, 以期更全面的保障食品安全。

关键词: 脱氧雪腐镰刀菌烯醇; 物理脱毒; 化学脱毒; 生物脱毒

Research progress of deoxynivalenol control in cereals and their products

CAI Shuo, WANG Zhou-Li, YUE Tian-Li, CUI Lu*

(College of Food Science, Northwest A & F University, Xianyang 712100, China)

ABSTRACT: Deoxynivalenol (DON) belongs to the B-type trichothecenes toxin, which is currently the most common mycotoxin in grains and their products. It can cause various acute and chronic poisonings after consumption, increase the risk of gastric cancer, esophageal cancer and other malignant tumors, and has obvious toxicological hazards. In order to protect the health of consumers and minimize economic losses, scholars at home and abroad have been actively looking for ways to control DON, repeatedly testing and comparing the advantages and disadvantages of various methods, continuously optimizing physical and chemical detoxification methods, and developing Biological detoxification method. In recent years, with the development of social economy and science and technology, our country has explored many new results in the field of deoxynivalenol control and detoxification. For example, electrochemical oxidation, enzyme utilization and biotransformation are all emerging high-efficiency detoxification technologies in recent years. This paper summarized and compared the current control methods of DON in food, discussed and looked

基金项目: 陕西省重点研发项目(2019NY-107)

Fund: Supported by Key Research and Development Projects of Shaanxi Province (2019NY-107)

*通信作者: 崔璐, 博士, 主要研究方向为食品科学与工程。E-mail: cuiluctl@nwsuaf.edu.cn

*Corresponding author: CUI Lu, Ph.D, College of Food Science, Northwest A & F University, Xianyang 712100, China. E-mail: cuiluctl@nwsuaf.edu.cn

forward to the future development direction of the society in this field, illustrated the whole industrial chain control of DON in wheat, corn and its products with examples, and explained in detail how DON can achieve the whole industrial chain control from farmland to table, in order to more comprehensively protect food safety.

KEY WORDS: deoxynivalenol; physical detoxification; chemical detoxification; biological detoxification

0 引言

脱氧雪腐镰刀菌烯醇(deoxynivalenol, DON)是一种单端孢霉烯族毒素, 主要由禾谷镰刀菌(*Fusarium graminearum*)和黄色镰刀菌(*Fusarium culmorum*)等产生^[1]。因感染 DON 的人和动物常出现呕吐等现象, 因此 DON 也被称作呕吐毒素。脱氧雪腐镰刀菌烯醇主要存在于谷物及其制品中, 主要的谷物包括小麦、玉米等, 是全球污染率较高的真菌毒素。DON 中毒的地方性和季节性极为明显, 糠麸类、玉米、饼粕类等饲料原料以及成品料等处于高温高湿环境时, 较容易滋生霉菌并产生毒素, 因为最适宜这种霉菌存活的地带是温带地区, 所以这种毒素对我国粮食造成的危害比较严重。尤其是在多雨年份, 会造成更严重的 DON 污染。重灾年麦穗发病率为 50%~100%, 产量损失率为 10%~40%^[2]。本文总结了目前食品中 DON 的控制方法并对其做出比较, 讨论和展望未来社会在这一领域的发展方向, 以期保障谷物及其制品的安全性。

1 脱氧雪腐镰刀菌烯醇的简介

1.1 基本性质

DON 是一种化学结构和生物活性相似的高毒性代谢产物, 对人和动物可以产生广泛的毒性效应。常温状态下是一种无色针状结晶, 熔点为 151~153 ℃, 可溶于水和极性溶剂, 一般可长期保存在乙酸乙酯中。除此之外, DON 具有非常强的耐热性和耐酸性, 低 pH 值几乎不能破坏其结构。只有在 pH 值为 10.0、温度为 120 ℃条件下加热 30 min 或 170 ℃条件下加热 15 min 才能完全破坏其结构。

1.2 结构与毒性特征

DON 化学名称为 3, 7, 15-三羟基-12, 13-环氧单端孢霉-9-烯-8-酮 (3, 7, 15-trihydroxy-12, 13-epoxytrichothec

-9-en-8-one), 分子式为 C₁₅H₂₀O₆, 相对分子质量为 297.32, 结构如图 1^[3]。DON 可与核糖体 60 s 亚基的肽转移酶活性中心结合引发核糖体应激反应, 抑制 DNA、RNA 和蛋白的合成, 诱导细胞凋亡等作用, 对人体和多种动物有毒^[4], 严重时会造成造血系统导致死亡^[5], 还有研究发现鱼类感染 DON 后会引起肠道的氧化损伤^[6]。

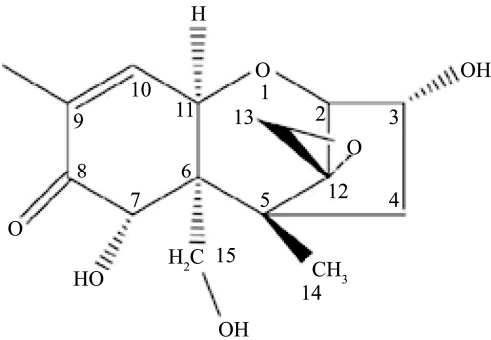


图 1 DON 结构图
Fig.1 DON structure diagram

1.3 限量标准

近年来, 随着社会经济的发展, 人们对于食品安全的要求越来越高, 我国参考国际食品法典委员会的标准, 对于 DON 的安全限量颁布了新的规定。2017 版国家标准增加了对婴幼儿谷类辅食中 DON 的限量标准; 对未加工小麦、玉米和大麦 DON 限量值和面粉等碾磨加工品的 DON 限量值分别作了不同要求。具体如表 1。

2 DON 的脱毒技术研究进展

常见的 DON 毒素脱毒方法包括物理脱毒、化学脱毒和生物脱毒^[8]。虽然许多方法已经取得了较好的脱除效果, 但各类方法均存在各自的优缺点, 具体见表 2。对于不同的脱毒方法, 其作用机制也不尽相同(表 3)。

表 1 不同国家对于脱氧雪腐镰刀菌烯醇的限量标准^[7]
Table 1 Limits standard of fusarium oxysporum enol in different countries^[7]

国家及国际组织	食品类别(名称)	DON 限量/(μg/kg)
中国	谷物及其制品: 玉米、玉米面(渣、片)	1000
	大麦、小麦、麦片、小麦粉	1000
	未加工谷物(硬质小麦、燕麦、玉米除外)	1250
	未加工硬质小麦、燕麦	1750
	人类直接食用的谷物、谷物淀粉、麦麸、干面食	750

表 1(续)

国家及国际组织	食品类别(名称)	DON 限量/(μg/kg)
欧盟	面包、糕点、饼干、谷物点心、早餐用麦片	500
	婴幼儿及儿童食用加工谷物食品及婴幼儿食品	200
	非直接食用玉米粉(粒度≤直接食用玉米)	1250
	非直接食用玉米粉(粒度>500 食用)	750
美国	用于食用的小麦制品中(如面粉、麸皮和胚芽)	1000
俄罗斯	小麦	700
	大麦	1000
加拿大	未清洗软质小麦	2000
	婴儿食品	1000
日本	进口非主食食品	1200
	去皮小麦	1100

表 2 各类 DON 脱毒方法的优缺点
Table 2 Advantages and disadvantages of various DON detoxification methods

脱毒方法	优点	缺点
物理脱毒技术	易操作; 成本低; 对环境无污染	脱毒不彻底; 不同食品的成分、添加剂等可能对物体脱毒条件造成限制
化学脱毒技术	脱毒彻底、高效	实施条件苛刻; 可能在食品中有残留; 安全性有待考证
生物脱毒技术	能避免像强酸、强碱、高温等对原料营养物质的破坏; 特异性强; 环境友好; 脱毒彻底 ^[9]	吸附剂产品质量稳定性有待提高; 酶在使用过程中易受影响

表 3 各种脱毒方法的概念辨析
Table 3 Concept differentiation of various detoxification methods

脱毒原理	概念
脱除	去除、排除。通过各种方法手段使得毒素从食品中被去除的措施
吸附	物质(主要是固体物质)表面吸住周围介质(液体或气体)中的分子或离子现象。即通过某一吸附力强的物质将食品中的毒素吸附的现象
降解	有机化合物分子中的碳原子数目减少, 分子量降低的现象。即通过某种技术手段使食品中的毒素讲解为毒性小甚至是无毒的过程
转化	将某一物质通过某种方法或途径转变为另一物质的手段

2.1 物理脱毒技术

在经济、科技均不发达的古代中国, 人们就已经开始了探索谷物脱毒的道路。早在几千年前, 清洗小麦、晒麦等的传统民间生活真实的记录着祖先们探索出的简易的脱毒方法。其应用效果虽不明显且局限性比较强, 但预示着人类对食品脱毒和食品安全有了初步的兴趣和探究。

2.1.1 超声波处理

超声波是一种频率高于 20000 Hz 的声波, 方向性好, 反射能力强, 易于获得较集中的声能, 已经广泛应用在测量、清洗、碎石、杀菌消毒等多方面领域。杨龙等^[10]研究发现超声处理可以帮助降解小麦中的脱氧雪腐镰刀菌烯醇,

其中影响超声波降解赤霉病小麦中 DON 的关键因素是超声时间和超声振幅。实验结果和对其他因素的综合考虑, 超声时间为 15 min、振幅为 60%时, 赤霉病小麦籽粒中 DON 降解率最高可达 37.59%。这表明超声波处理对赤霉病小麦籽粒中的 DON 有较好地降解效果。此外, 研究人员还加入了超声波对 DON 纯品的处理实验, 结果与其一致。因此我们认为, 超声波处理可以作为一种降解 DON 的有效方法。

除此之外, 超声波和臭氧水联合处理也是近些年研究人员集中的方向。杨龙^[11]得出其最佳处理方式: 先超声波处理 5 min, 再臭氧水处理 5 min, 可使 DON 降解率最高

达到 46.99%。再通过正交实验优化降解工艺,得出最优工艺参数,使得 DON 降解率最高可达到 51.02%。并且此方法对小麦粉的粉质特性影响非常小。

2.1.2 清洗去除处理

我国的传统农业中,最典型的小麦清理工艺中是洗麦。这一具有中国传统文化底蕴的洗麦工艺一直流传在我国北方的农村地区,在过去的小麦清理工艺中占有非常重要的地位。它不仅具有打麦、去石、水分调节等多种功能,还能清除小麦表面的大部分农药残留,对小麦籽粒凹凸处藏匿的灰尘清理起着独到的作用^[12]。小麦中 DON 毒素主要集中在外皮层,面粉中的毒素含量相对也较低,且毒素含量从外向内依次降低。ABBAS 等^[13]实验证明,通过清洗可使小麦中的 DON 降低 5.5%~19.5%,对小麦在食品中的发展有一定促进作用。另外,侯芮^[14]研究发现制粉工艺对小麦中的 DON 毒素也有一定程度的去除,去除率从 10%至 50%不等。

2.1.3 过热蒸汽处理

过热蒸汽来源于干饱和蒸汽定压加热的过程,具有安全性高、环境友好无污染、热效率高、干燥速率快、干燥质量好、灭菌消毒等优点^[15],是一种非常理想的真菌处理物质。刘远晓等^[16]利用过热蒸汽处理赤霉病小麦,发现其 DON 降解率最高可达 79.8%。除此之外,提高蒸汽温度、增加处理时间均可明显提高赤霉病小麦中 DON 的降解率。但此法的缺陷在于它会对小麦的品质造成一定程度的影响,这使得部分消费者和生产者在接受这一新型脱毒方式时出现阻碍,因此该方法在实际生产中的应用仍需要进一步探索和改进。

2.1.4 紫外光辐照处理

选择适当的紫外线波长可以导致微生物细胞内的分子键和链断裂、股间交联和形成光化产物等,从而对微生物造成辐射损伤和核酸的破坏,改变或降低微生物 DNA 的生物活性^[17]。邹忠义等^[17]研究发现紫外光辐照对 DON 具有明显的去除作用,实验结果表明随着辐照时间的延长、辐照距离的减小和环境 pH 值的减小,辐照效果越来越好,降解率逐渐升高,最高可达到 84.9%。

2.1.5 吸附剂吸附处理

吸附剂的脱毒主要通过 2 种方式实现。一种是通过静电吸附力以及分子间作用力吸附毒素,使其转变为无活性的物质;另一种是将霉菌毒素置于动物胃肠道,以降低毒素在肠道内的吸收利用效率。这些吸附剂的功效取决于霉菌毒素的种类及其在饲料中的浓度^[18]。目前在生产过程中应用较多的吸附剂有黏土类和酵母类,黏土类吸附剂具有比表面大,吸附容量大等特点;而酵母类物质作为吸附剂具有低成本、应用广、效率高等优点^[19]。

2.1.6 高压处理

高压处理在各领域工业中是最常用的杀菌消毒的物理方法之一,具有对环境无污染、对被处理物无残留、操

作简单等优点,因此常被用来处理食品以改善其功能特性。KALAGATUR 等^[20]采用热变化的高压处理技术控制玉米籽粒中 DON 的生长和含量,通过抑制孢子在蛋白胨水中的萌发,研究高压处理对孢子地灭活作用。实验结果表明,适当的高压处理条件完全可以抑制 DON 在玉米籽粒中的蔓延,这一研究无疑为高压技术应用于农业和食品工业管理领域做出了巨大贡献。

2.2 化学脱毒技术

化学脱毒随着社会和科技的发展逐渐推广至生物化学中的各个领域。当然化学脱毒的难度也要高于物理脱毒,技术相比来说也要更先进。它是利用某些技术或者化学物质来实现真菌毒素的降解,从而起到减小或消除真菌毒素的危害。在此过程中,真菌毒素的化学结构发生变化^[21]。

2.2.1 碱法脱毒^[22]

通过 Na_2CO_3 、 NaHCO_3 等试剂处理感染 DON 的样品,表明 DON 在碱性环境下不稳定,而且 pH 值越高, DON 的化学结构越容易被破坏。用 NaHSO_3 处理 DON 时发现,在一定条件下, DON 可转化为磺酸盐,而这种 DON 磺酸盐已被证明对猪无毒。未来我们可以进一步通过动物实验以及样品检测确认此法的可行性和安全性,为以后地应用推广和相关研究提供理论依据。

2.2.2 氧化脱毒

ClO_2 是最理想的绿色消毒杀菌剂之一,具有高效、安全、无毒的优势。它可以杀灭微生物,包括细菌、真菌和病毒,并且这些微生物并不会对其产生抗药性。李晓等^[23]通过液体浸泡法,探究 ClO_2 对 DON 纯品以及玉米乙醇发酵糟液中 DON 的降解效果。结果显示, ClO_2 的确对 DON 有一定的降解效果,且 DON 降解率随 ClO_2 溶液浓度的增大以及处理时间的延长而提高。

也有学者研究表明^[24],当 pH 值为 4~6 时,臭氧对 DON 氧化效果更好。臭氧氧化被认为是一种高效地脱毒方式。臭氧本身具有较强地氧化性,可以起到一定的杀菌消毒作用。若利用高效气水涡轮混合器,使臭氧混合于水中,则可以产生臭氧水,即超氧离子水。同样,超氧离子水也具有非常强地氧化性,杀菌能力更强。曹慧英等^[25]研究饱和臭氧水降解 DON 的处理方式。实验得出,此种降解方法最好在中性和室温条件下进行,因为臭氧能够高效地抑制丝状真菌繁殖并降解多种真菌毒素,之后会很快分解成氧气,在食品中可以达到 0 残留,因此常用来处理食品原料。这种降解毒素的方法安全性较高,对环境也比较友好,在未来或许会成为一个大有所为的发展方向。除此之外, SUN 等^[26]建立臭氧杂化自由基降解 DON 的处理系统,通过对 DON 降解过程中地跟踪、检测、以及对降解产物地验证,整体分析了样品中 DON 的降解程度。此实验为臭氧水溶液系统在真菌毒素污染的谷物解毒中地应用提供了新的见解。

谭琳等^[27]实验发现经臭氧降解小麦中 DON 后,面粉中的 DON 含量会明显降低至国家限量标准(1 mg/kg)以下。王莉等^[28]研究表明在一定臭氧条件下,全麦粉中 DON 的最大降解率可达 78.55%。此外,采用臭氧水浸泡小麦籽粒会得到比臭氧水润麦更好的降解效果。然而,臭氧地应用受限于所感染真菌的种类、生长阶段、应用浓度等因素,因此这依然是一个挑战和机遇并存的领域。

电化学氧化(electrochemical oxidation, EO)是一种利用氧化还原反应实现杀菌消毒的处理技术,这种脱毒技术具有反应条件温和、装置简单、环境友好等特点,已被广泛用于工业生产中地污水处理。熊栗栗等^[29]研究发现,电化学氧化法能够迅速高效地降解 DON,这为利用电化学氧化技术在乙醇发酵过程中去除 DON 以及在食品工业地应用提供了新思路。

2.3 生物脱毒技术

生物脱毒是真菌脱毒中技术最先进、难度最大的方法。然而,随着科技地发展和进步,人们逐渐意识到生物对于脱毒技术的巨大潜力,并研究出更多微生物在真菌脱毒领域中地应用。

2.3.1 微生物吸附

利用微生物吸附法脱除 DON 主要与葡甘露聚糖在细胞壁上有关,在这一领域真菌类和乳酸菌类对呕吐毒素的吸附效果较好,效率高且对环境安全,被广泛应用。例如,使用乳酸菌去除 DON,形成可逆的复合物,从而去除真菌毒素^[30]。SHETTY 等^[31]也发现了此种脱毒机制。这种做法不会影响产品的品质,且效率高,易操作。胡杉杉等^[32]经实验筛选出一株能够高效去除 DON 的乳酸菌—副干酪乳杆菌。这种乳酸菌对 DON 有一定的耐受能力,中低浓度的 DON 几乎不影响它地生长,其为应用于饲料以及谷物中霉菌毒素地脱毒提供了依据。然而,研究发现,微生物菌体细胞壁对 DON 吸附具有可逆性,产品中的安全性得不到绝对保证。因此,这种处理方式还有待进一步改善吸附剂的质量和稳定性^[33]。

2.3.2 微生物降解

微生物降解法脱除 DON 的原理在于通过微生物释放胞外酶作用于毒素分子,使其发生各类化学反应而分解转化为低毒化合物。这些微生物主要包含诺卡氏菌属、动物肠道内的厌氧细菌、芽孢杆菌和真菌等。徐剑宏等^[34]从土壤和麦穗样品中分离到一株德沃斯氏菌,该菌株能产生一种具有氧化作用的酶,与 DON 发生氧化反应之后产生一种低毒化合物。经实验,该菌株对液体培养基中 DON 的降解率可高达 95%以上,对小麦饲料中 DON 的降解率可达 75.47%,对 DON 纯品和被污染样品均有很好的降解效果^[35]。同样,何伟杰等^[36]也发现了一批具有脱毒活性的微生物菌株,这些菌株可用于开发饲料脱毒剂,很大程度上促进了畜牧业地发展,减轻了动物承受的负担和痛苦。

2.3.3 脱毒酶

大多数酶均产自动物或微生物体内,因此,脱毒酶的脱毒机制与微生物的脱毒息息相关。利用脱毒菌或脱毒酶可将 DON 经某种过程转化成低毒或无毒代谢产物,减少毒素对人畜健康的危害。HE 等^[37]提出了一种 DON 解毒酶,他们利用一株高度活跃的酶株—D6-9 菌株,将 DON 分解为 3-酮-DON 和 3-epi-DON 2 种低毒化合物,并通过基因组分析验证了自己的观点。这些结果无疑肯定了微生物和酶在去除农业样品中 DON 上的潜力,并有助于我们更加深入了解 DON 解毒的潜在机制和分子进化。

然而,生物酶的本质是蛋白质。蛋白质在加工过程中很容易因为高温、剧烈振荡等不良条件而失活。若想改进这方面的缺点,则必须对加工条件进行精确的实验和设定,这在很大程度上增加了脱毒成本。

2.3.4 生物转化

ANA 等^[38]利用生物转化生产了 DON 的 2 种细菌生物转化产物 3-epi-deoxynivalenol (3-epi-DON) 和 de-epoxy-deoxynivalenol (DOM-1)。利用实验动物研究其毒性,通过对实验对象的血液参数、细胞因子的表达、细胞蛋白连接等综合对比分析,最终实验表明:DOM-1 和 3-epi-DON 对仔猪没有毒性。因此,细菌生物转化或许可以发展为一种降低甚至消除霉菌毒素毒性的有效方法

3 小麦、玉米及其制品中 DON 的全产业链控制

3.1 种植过程

DON 多见于粮食作物中,在生长过程中的感染情况较储藏运输过程中的感染情况少,但这并不意味着可以放心田间管理环节。田间病虫害的发生是真菌毒素产生的重要途径之一。在小麦和玉米的种植过程中田间管理是很重要的一环:包括土壤的透气和保水度、灌溉管理、合理施肥以及病虫害处理药剂等^[39],任何一个环节的操作不当可能都会导致植物感染真菌。

3.2 收获、储藏过程

随着科技和经济的发展,我国谷物种植逐渐发展为人工收获和机械收穗 2 种方式。小麦与玉米的收获与晾晒过程操作时间长,一定程度上增加了真菌毒素污染的风险^[40]。李轩复等^[41]通过对全国 3251 家农户地实地调研,发现对比于人工收获方式,机械化收获总体上降低了小麦和玉米的收获损失。另外,科学地确定收获时期,优化作业流程,均可有效减少田间损失和籽粒霉变粒数量。

小麦具有耐储、耐热、易吸湿及易感染虫害的特性^[42],收获之后的储藏期,更应保证环境清洁、通风。而玉米的亲水性和吸湿性较强,酶系反应旺盛,具有较大的呼吸强度^[43],因此保证玉米粒的完整度,将玉米按照容重划分等

级后分类储存都是较好的储藏技巧^[44]。一般情况下,玉米贮存时的籽粒含水率必须控制在 14% 以下^[45]。BAHRENTHIEN 等^[46]将 DON 污染玉米分为 3 个浓度进行湿保藏实验,处理不同浓度的亚硫酸钠,最终结果显示 DON 污染玉米的亚硫酸钠湿保存能成功地将 DON 解毒到其无毒的磺酸盐中,从而恢复肥育者的不良性能,这也为玉米的储藏方式提供了一个新的选择。

3.3 运输过程

运输过程中的环境条件要求与储藏环节的条件要求大同小异,然而传统的运输过程常因天气变化、包装方式、长距离运输颠簸而无法保证环境条件的稳定性,且抛散损失十分严重。针对这问题,张博洋^[47]设计了一款多功能散粮运输车,在降低成本、减少浪费、高效运输等方面都具有重大意义。值得一提的是, DON 与玉米赤霉烯酮同由一种霉菌产生,对于水分也有较高要求,因此保持干燥可以同时有效预防这 2 种毒素的产生。

3.4 不同谷物加工过程中毒素的控制

3.4.1 小麦及其制品

刘坚等^[48]通过实验发现呕吐毒素在小麦中含量分布并不均匀:全麦粉中检出含量在 608.1~3356.5 $\mu\text{g}/\text{kg}$;小麦粉中呕吐毒素检出的含量普遍较低,在 62.7~346.4 $\mu\text{g}/\text{kg}$;小麦粉洗成干面筋后,未检出呕吐毒素。由此可见,全麦粉中呕吐毒素的含量是小麦粉中呕吐毒素的 10 倍,呕吐毒素污染主要集中在小麦的麸皮层中。

(1) 小麦粉

磨粉是小麦和玉米加工过程中最常见的机械加工方式之一。小麦磨粉常使用干法磨粉,在干法磨粉中,毒素可能被重新分配并富集于芽和麸皮层。因此我们在食用小麦粉时,可以选择丢弃麸皮层以预防和减少 DON 对人体的危害^[49]。

(2) 面食

在我国传统饮食习惯中,小麦常被制作成面条、馒头等面食产品。经研究显示^[50],制作馒头时面团的发酵过程不仅不会降低 DON 毒素含量,甚至在一些条件下出现了含量增大的现象。2001 年 WHO 的报道指出, DON 在 120 $^{\circ}\text{C}$ 下是稳定的,在 180 $^{\circ}\text{C}$ 甚至是更高温度下才会部分降解。因此,在制作产品的过程中,选择优质的面粉才是预防 DON 感染的最佳选择。

3.4.2 玉米及其制品

职爱民等^[51]通过实验,发现在完整玉米子粒中, DON 主要分布在玉米种皮,其次是玉米胚乳,最后是玉米胚;主要原因可能是玉米种皮容易与外部环境中的各类霉菌接触而被侵染。并且粉质玉米的 DON 含量无论在玉米的哪一个部分,其含量均要远大于胶质玉米。

(1) 玉米粉

玉米粉是由玉米磨粉后去掉尘芥和杂质之后得到的,

对于玉米的磨粉过程, KATTA^[52]指出:干法磨粉会将毒素富集于通常用来做动物饲料的玉米糠中,其次是用于饲养动物或者提油的胚芽部分。用于加工食品的部分是剥落的粗粉和面粉,它们含有的毒素最少。由于玉米粉的质量直接由玉米粒的质量决定,因此建议在玉米的储藏过程中尽可能地减少玉米生霉粒现象地发生。可以采取以下几种方式:一是尽量做到低温低湿储存;二是使玉米在安全水分下储存;三是在玉米入仓前进行整理,去除破损粒^[53]。

(2) 玉米发酵酒

玉米常被用来酿造具有独特风味的发酵酒,这一工艺可以增强玉米的质量和营养价值,促进人体肠道利用无机元素,其发酵工艺如下^[54]:玉米 $\rightarrow$ 预处理 $\rightarrow$ 加入酶打浆 $\rightarrow$ 液化 $\rightarrow$ 调节 pH 值 $\rightarrow$ 加入糖化酶糖化 $\rightarrow$ 调整成分 $\rightarrow$ 加入酵母接种 $\rightarrow$ 发酵 $\rightarrow$ 倒酒 $\rightarrow$ 后发酵 $\rightarrow$ 陈酿 $\rightarrow$ 澄清过滤 $\rightarrow$ 调配 $\rightarrow$ 杀菌 $\rightarrow$ 灌装 $\rightarrow$ 成品。

近年来,虽然相关玉米发酵酒制作过程中 DON 毒素的变化研究较少,但保持生产设备、环境的干净整洁则能大概率保证发酵酒的食用安全性。

(3) 玉米油

玉米胚芽油是采取现代工艺压榨,并经过脱色、脱胶、脱臭、脱腊等工序从玉米胚中提取而得,具有较高的营养价值^[55]。裴娅晓^[56]对不同地区玉米胚样品分别进行压榨法制油和溶剂浸出法制油,研究了这 2 种不同的制油工艺对玉米毛油及压榨饼和浸出粕中真菌毒素地影响。结果表明玉米胚中的玉米赤霉烯酮会通过压榨或浸出制油过程富集至毛油中,且迁移率很高。因此,严格把控玉米胚的品质是控制玉米油质量安全的重要前提。

3.4.3 其他

啤酒是世界上最受欢迎的酒精类饮品之一,由于其酿造原料大多以大麦、玉米等粮食作物为主,这些谷物又常被各种真菌毒素感染,因此所酿造的啤酒中常常会有 DON 或其他真菌毒素检出。经研究发现^[57],啤酒酿造过程中的料液比、温度和酶地控制不当会使 DON 含量增加。在这一方面,微生物控制似乎可以帮到忙:基于乳酸菌的抗菌活性,可以利用乳酸菌作为起发剂以产生抗菌及去毒活性,这一方式在研究人员的实验中已经取得成功。不仅如此,乳酸菌在啤酒生产中还能起到增加酶的活性、泡沫稳定性、麦芽降解性及发酵率等作用^[58]。因此,乳酸菌作为一种益生菌,将会在啤酒生产的工业发展中起到不可或缺的作用。

4 展 望

人和动物常因误食被 DON 污染的粮食和饲料而感染,马跃亭等^[59]通过对 52 个供试品种(系)的小麦进行实验,发现小麦籽粒 DON 的含量与小麦的病粒率呈极显著的正相关关系。因此,严格把控谷物的质量、加强监测,能很大

程度上减少此类感染事件地发生。同时也表明,可以依据病粒率较好地预测籽粒感染 DON 含量情况,为小麦的高效生产实践做出一定贡献。类似此类的实验研究还有很多,如 LEE 等^[60]使用机械方法研究出奶牛乳腺上皮细胞中 DON 相关的毒性机制,为增强牛奶的稳定性提供了理论帮助,同时建立安全概况,以防止更多畜牧场和食品工业中 DON 污染情况的出现。

不难看出, DON 的脱毒是综合性、多因素控制的复杂反应。现如今的 DON 脱毒手段虽然针对降解微生物的筛选、鉴定和脱毒条件进行了优化,但对脱毒物质的分离、纯化、降解产物的获得和其毒理学研究仍相对较少。综合上述的 3 大脱毒方法,今后的研究可以更深入研究相关生物脱毒方法,利用相关基因序列构建高效生物酶高效表达工程菌,不断优化现有脱毒手段。除此之外,我们应在现有毒素检测手段的基础上,在实际农产品和食品限量制定和防控监管过程中,适当考虑毒素暴露的风险,综合各项指标,找到更高效、快速的检测方法,做到及时发现及时解决^[61]。

科技发展日新月异,许多新毒素不断被发现或变异而来,食物链和生态循环使得这些未知或已知危险毒素不断靠近人类本身。控制真菌毒素、保证食品质量安全仍是我国乃至全世界食品行业的重大难题。今后的研究需要不断开拓新的研究课题和研究思路,努力找到一种操作简易、成本不高、效果良好的控制方法,推动 DON 毒素地控制研究及其在食品行业的广泛应用,为食品行业真菌毒素地控制提供充分的依据。

参考文献

- [1] 李国林,薛华丽,毕阳,等. 脱氧雪腐镰刀菌烯醇的毒性及脱毒研究进展[J]. 食品工业科技, 2013, 34(24): 380–384.
- [2] 周雪婷. 粮食中 DON 的危害分析及快速测定方法研究进展[J]. 现代食品, 2019(10): 169–172.
- [3] 霍星华,赵宝玉,万学攀,等. 脱氧雪腐镰刀菌烯醇的毒性研究进展[J]. 毒理学杂志, 2008, 22(2): 151–154.
- [4] 郭明伟,康波,胡晓维,等. 真菌毒素快检仪在粮食收购过程中的应用[J]. 粮油仓储科技通讯, 2019, 35(6): 43–44, 46.
- [5] 陈晋莹,秦静雯,杨娟,等. 计算机分子对接(MD)与分子动力学方法(ADMET)技术在模拟呕吐毒素降解中的应用[J]. 粮食储藏, 2019, 48(6): 32–37.
- [6] HUANG C, WU P, JIANG WD, et al. Deoxynivalenol decreased the growth performance and impaired intestinal physical barrier in juvenile grass carp (*Ctenopharyngodon idella*) [J]. Fish Shellfish Immun, 2018, 80.
- [7] 常敬华. 脱氧雪腐镰刀菌烯醇(DON)在面粉加工中的变化规律研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2014.
- [8] 尹杰,伍力,彭智兴,等. 脱氧雪腐镰刀菌烯醇的毒性作用及其机理[J]. 动物营养学报, 2012, 24(1): 48–54.
- [9] 周建川,史东辉,计成. 玉米赤霉烯酮和脱氧雪腐镰刀菌烯醇对动物毒性的研究进展[J]. 动物营养学报, 2020, 32(6): 2460–2466.
- [10] 杨龙,杨玉玲,关二旗,等. 超声波处理对脱氧雪腐镰刀菌烯醇(DON)的降解效果研究[J]. 中国粮油学报, 2020, 35(6): 114–119.
- [11] 杨龙. 臭氧水协同超声波处理对小麦中呕吐毒素的降解效果研究[D]. 郑州: 河南工业大学, 2018.
- [12] 李林轩,李硕,黄鹏. 浅析小麦制粉企业工艺技术改造[J]. 现代面粉工业, 2019, 33(1): 1–4.
- [13] ABBAS HK, MIROCHA CJ, PAWLOSKY RJ, et al. Effect of cleaning, milling, and baking on deoxynivalenol in wheat [J]. Appl Environ Microbiol, 1985, 50(2): 482–486.
- [14] 侯芮. 清理与制粉工艺去除污染小麦中真菌毒素的效果及面粉品质的变化[D]. 广州: 华南理工大学, 2016.
- [15] 白丽青,马晓建. 过热蒸汽干燥及其在食品干燥中的应用[J]. 农机化研究, 2008, (9): 158–161.
- [16] 刘远晓,关二旗,卞科,等. 过热蒸汽处理对赤霉病小麦中 DON 的降解效果[J]. 河南工业大学学报(自然科学版), 2016, 37(5): 57–63.
- [17] CHEN JY, QIN JW, YANG J, et al. Application of computer molecular docking (MD) and molecular dynamics method (ADMET) technology in simulating degradation of vomiting toxin [J]. Grain Stor, 2019, 48(6): 32–37.
- [18] CHANG JH. Study on the changing law of deoxynivalenol (DON) in the processing of flour products [D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2014.
- [19] YIN J, WU L, PENG ZX, et al. Toxicity and mechanism of deoxynivalenol [J]. Chin J Anim Nutr, 2012, 24(1): 48–54.
- [20] YANG L, YANG YL, GUAN EQ, et al. Study on the degradation effect of ultrasonic treatment on deoxynivalenol (DON) [J]. J Cere Oils Ass, 2020, 35(6): 114–119.
- [21] YANG L. Study on the degradation effect of ozone water and ultrasonic treatment on vomiting toxin in wheat [D]. Zhengzhou: Henan University of Technology, 2018.
- [22] LI LX, LI S, HUANG P. Analysis on the technological transformation of wheat flour milling enterprises [J]. Mod Flour Ind, 2019, 33(1): 1–4.
- [23] LIU YX, GUAN EQ, BIAN K, et al. Degradation effect of DON in scab wheat treated with superheated steam [J]. J Henan Univ Technol (Nat Sci Ed), 2016, 37(5): 57–63.

- [17] 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. Ultraviolet light irradiation to remove deoxynivalenol and T-2 toxin [J]. Food Sci, 2015, 36(19): 7-11.
- [18] 胡永婷, 李彦明, 李颖靓. 酵母培养物降低黄曲霉毒素和呕吐毒素对猪生长性能、器官健康和免疫状态影响的研究[J]. 中国饲料, 2019, (10): 45-49.
HU YT, LI YM, LI YL. Yeast culture reduces the effects of aflatoxin and vomiting toxin on growth performance, organ health and immune status of pigs [J]. China Feed, 2019, (10): 45-49.
- [19] 夏亚穆, 王艳. 酿酒酵母菌对重金属的生物吸附作用研究进展[J]. 云南化工, 2007, 34(5): 81-84.
XIA YM, WANG Y. Research progress on the biosorption of heavy metals by *Saccharomyces cerevisiae* [J]. Yunnan Chem Ind, 2007, 34(5): 81-84.
- [20] NAVEEN KK, JALARAMA RK, VENKATARAMANA M, et al. Effect of high pressure processing on growth and mycotoxin production of *Fusarium graminearum* in maize [J]. Food Biosci, 2018, 21: 53-59.
- [21] 张雪洁, 安娜, 高艺璇, 等. 真菌毒素的脱毒进展[J]. 药学研究, 2019, 38(2): 95-99.
ZHANG XJ, AN N, GAO YX, et al. Progress in detoxification of mycotoxins [J]. Pharm Res, 2019, 38(2): 95-99.
- [22] 程波财, 熊凯华, 郭亮, 等. 脱氧雪腐镰刀菌烯醇的生物降解研究进展[J]. 食品与发酵工业, 2009, 35(1): 120-123.
CHENG BC, XIONG KH, GUO L, et al. Research progress on the biodegradation of deoxynivalenol [J]. Food Ferment Ind, 2009, 35(1): 120-123.
- [23] 李晓, 方帷, 熊粟粟, 等. 二氧化氯对玉米乙醇发酵槽液中脱氧雪腐镰刀菌烯醇的降解[J]. 食品与发酵工业, 2019, 45(9): 35-40.
LI X, FANG W, XIONG SL, et al. Deoxidation of deoxynivalenol in corn ethanol fermented grains by chlorine dioxide [J]. Food Ferment Ind, 2019, 45(9): 35-40.
- [24] 常敬华, 栾雨婷, 周安群, 等. 脱氧雪腐镰刀菌烯醇的物理和化学脱毒方法研究进展[J]. 粮食与饲料工业, 2017, (11): 21-27.
CHANG JH, LUAN YT, ZHOU AQ, et al. Research progress in physical and chemical detoxification methods of deoxynivalenol [J]. Food Feed Ind, 2017, (11): 21-27.
- [25] 曹慧英, 伍松陵, 沈晗, 等. 粮食中真菌毒素的控制策略[J]. 粮油食品科技, 2012, 20(6): 45-48.
CAO HY, WU SL, SHEN H, et al. Control strategy of mycotoxins in food [J]. Sci Technol Cere Oils Foods, 2012, 20(6): 45-48.
- [26] SUN XL, JI J, GAO YH, et al. Fate of deoxynivalenol and degradation products degraded by aqueous ozone in contaminated wheat [J]. Food Res Int, 2020, 137: 109357.
- [27] 谭琳, 杜华英, 吴国平, 等. 饱和臭氧水对脱氧雪腐镰刀菌烯醇的降解研究[J]. 江西农业大学学报, 2018, 40(6): 1306-1314.
TAN L, DU HY, WU GP, et al. Study on the degradation of deoxynivalenol by saturated ozone water [J]. J Jiangxi Agric Univ, 2018, 40(6): 1306-1314.
- [28] 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. The effect of ozone degrading vomiting toxin in polluted wheat and the prediction of degradation products [J]. Food Sci, 2016, 37(18): 164-170.
- [29] 熊粟粟, 袁文娟, 高婧琪, 等. 电化学氧化降解湿态玉米酒精糟中脱氧雪腐镰刀菌烯醇[J]. 食品与发酵工业, 2019, 45(24): 22-26.
XIONG SL, YUAN WJ, GAO JQ, et al. Electrochemical oxidation degradation of deoxynivalenol in wet corn alcohol grains [J]. Food Ferment Ind, 2019, 45(24): 22-26.
- [30] 吴宛芹, 曲睿, 艾重阳, 等. 乳酸菌去除脱氧雪腐镰刀菌烯醇的研究进展[J]. 饲料工业, 2019, 40(16): 51-59.
WU WQ, QU R, AI CY, et al. Research progress on removal of deoxynivalenol by lactic acid bacteria [J]. Feed Ind, 2019, 40(16): 51-59.
- [31] SHETTY PH, JESPESEN L. *Saccharomyces cerevisiae* and lactic acid bacteria as potential mycotoxin decontaminating agents [J]. Trends Food Sci Tech, 2006, (17): 48-55.
- [32] 胡杉杉, 翟瑶瑶, 陆兆新, 等. 去除脱氧雪腐镰刀菌烯醇乳酸菌的筛选及其作用条件[J]. 食品工业科技, 2018, 39(21): 114-118.
HU SS, ZHAI YY, LU ZX, et al. Screening of lactic acid bacteria for removing deoxynivalenol and its action conditions [J]. Sci Technol Food Ind, 2018, 39(21): 114-118.
- [33] 张晓莉, 孙伟, 张红印, 等. 脱氧雪腐镰刀菌烯醇的毒性及生物脱毒研究进展[J]. 食品科学, 2016, 37(17): 245-251.
ZHANG XL, SUN W, ZHANG HY, et al. Research progress on the toxicity and biological detoxification of deoxynivalenol [J]. Food Sci, 2016, 37(17): 245-251.
- [34] 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-AC-DON oxidase produced by degrading bacteria DDS-1 [J]. China Agric Sci, 2013, 46(11): 2240-2248.
- [35] 彭俊, 励飞, 刘维, 等. 饲料中黄曲霉毒素 B₁ 和呕吐毒素生物法降解研究进展[J]. 饲料博览, 2020, (1): 28-32, 36.
PENG J, LI F, LIU W, et al. Research progress in biodegradation of aflatoxin B₁ and vomitin in feed [J]. Feed Exp, 2020, (1): 28-32, 36.
- [36] 何伟杰, 刘易科, 朱展望, 等. 镰刀菌毒素脱氧雪腐镰刀菌烯醇脱毒菌及脱毒酶研究进展[J]. 植物病理学报, 2019, 49(5): 577-589.
HE WJ, LIU YK, ZHU ZW, et al. Research progress on detoxifying bacteria and detoxifying enzymes of fusarium toxin deoxynivalenol [J]. Acta Phytopathol, 2019, 49(5): 577-589.
- [37] HE WJ, SHI MM, YANG P, et al. A quinone-dependent dehydrogenase and two NADPH-dependent aldo/keto reductases detoxify deoxynivalenol in wheat via epimerization in a *Devosia* strain [J]. Food Chem, 2020, 321: 126703.
- [38] ANA PFL, BRACARENSE. Reduced toxicity of 3-epi-deoxynivalenol and de-epoxy-deoxynivalenol through deoxynivalenol bacterial biotransformation: *In vivo* analysis in piglets [J]. Food Chem Toxicol, 2020, 140: 111241.
- [39] 郭俊浩. 浅析绿色小麦种植田间管理[J]. 农家参谋, 2020, (12): 70.
GUO JH. Analysis on the field management of green wheat planting [J]. Farm Staff, 2020, (12): 70.
- [40] 郭庄园, 李瑶, 张翼飞, 等. 玉米生产环节对饲料原料真菌毒素产生的影响途径与对策[J]. 中国饲料, 2018, (16): 70-74.
GUO ZY, LI Y, ZHANG YF, et al. The influence ways and countermeasures of corn production process on the production of mycotoxins in feed materials [J]. China Feed, 2018, (16): 70-74.
- [41] 李轩复, 黄东, 屈雪, 等. 不同收获方式对粮食损失的影响——基于全

- 国 3251 个农户粮食收获的实地调研[J]. 自然资源学报, 2020, 35(5): 1043–1054.
- LI XF, HUANG D, QU X, *et al.* The impact of different harvesting methods on food loss—Based on a field investigation of the grain harvest of 3, 251 farmers nationwide [J]. *J Na Res*, 2020, 35(5): 1043–1054.
- [42] 刘园, 杨鹏. 小麦安全储藏过程中的关键点及管理措施[J]. 现代食品, 2020, (3): 1–3.
- LIU Y, YANG P. Key points and management measures in the process of safe wheat storage [J]. *Mod Food*, 2020, (3): 1–3.
- [43] 刘粤华, 周健, 张重咏. 浅谈玉米特性与安全储藏技术[J]. 粮食流通技术, 2012, (4): 27–29.
- LIU EH, ZHOU J, ZHANG CY. Talking about corn characteristics and safe storage technology [J]. *Grain Circulat Technol*, 2012, (4): 27–29.
- [44] 袁辉, 鲍磊. 玉米存储过程中真菌毒素污染控制与检测的研究进展[J]. 南方农机, 2018, 49(10): 137.
- YUAN H, BAO L. Research progress in the control and detection of mycotoxins pollution during corn storage [J]. *Southern Agric Mach*, 2018, 49(10): 137.
- [45] RAGAI H, LOOMIS WE. Respiration of maize grain [J]. *Plant Physiol*, 1954, 29(1): 49–55.
- [46] BAHRENTHIEN L, KLUSS J, BERK A, *et al.* Detoxifying deoxynivalenol (DON)—contaminated feedstuff: consequences of sodium sulphite (SoS) treatment on performance and blood parameters in fattening pigs [J]. *Mycotoxin Res*, 2020, 36(2): 213–223.
- [47] 张博洋. 多功能散粮运输车的设计研究[D]. 郑州: 河南农业大学, 2019.
- ZHANG BY. Design and research of multifunctional bulk grain transporter [D]. Zhengzhou: Henan Agricultural University, 2019.
- [48] 刘坚, 毛红霞. 小麦籽粒中脱氧雪腐镰刀菌烯醇的检测及分布研究[J]. 粮食科技与经济, 2018, 43(6): 83–86.
- LIU J, MAO HX. The detection and distribution of deoxynivalenol in wheat grains [J]. *Food Sci Technol Econ*, 2018, 43(6): 83–86.
- [49] 吴丽. DON 及其乙酰基衍生物在面包和馒头加工过程中的转化研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2016.
- WU L. Study on the transformation of DON and its acetyl derivatives in the processing of bread and steamed bread [D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2016.
- [50] 张慧杰. 小麦真菌毒素在加工过程中的消解、转移规律研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2014.
- ZHANG HJ. Study on digestion and transfer rule of wheat mycotoxin during processing [D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2014.
- [51] 职爱民, 张培蕾, 贾国超, 等. 玉米各部位中呕吐毒素分布规律探究[J]. 粮食与饲料工业, 2016, (10): 58–60.
- ZHI AM, ZHANG PL, JIA GC, *et al.* Study on the distribution of emetic toxin in different parts of maize [J]. *Grain Feed Ind*, 2016, (10): 58–60.
- [52] KATTA SK, CAGAMPANG AE, JACKSON LS, *et al.* Distribution of *Fusarium* molds and fumonisins in dry-milled corn fractions [J]. *Cereal Chem*, 1997, 74: 858–863.
- [53] 纪立波. 浅析脱氧雪腐镰刀菌烯醇含量随玉米生霉粒的变化关系[J]. 中国农业信息, 2013, (7): 113.
- JI LB. Analysis of the relationship between the content of deoxynivalenol and the mold growth of corn [J]. *China Agric Inform*, 2013, (7): 113.
- [54] 马先红, 房忠慧, 李雪晶, 等. 玉米发酵食品研究现状[J]. 食品工业, 2020, 41(4): 264–267.
- MA XH, FANG ZH, LI XJ, *et al.* Research status of corn fermented food [J]. *Food Ind*, 2020, 41(4): 264–267.
- [55] 王敬. 玉米胚芽油的发展和制取工艺[J]. 科学大众(科学教育), 2020, (1): 197.
- WANG J. Development and preparation technology of corn germ oil [J]. *Sci Popular (Sci Ed)*, 2020, (1): 197.
- [56] 裴娅晓. 玉米油中玉米赤霉烯酮的控制和脱除方法研究[D]. 郑州: 河南工业大学, 2016.
- PEI YX. Research on the control and removal method of zearalenone in corn oil [D]. Zhengzhou: Henan University of Technology, 2016.
- [57] 吴丽. DON 及其乙酰基衍生物在面包和馒头加工过程中的转化研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2016.
- WU L. Study on the transformation of DON and its acetyl derivatives in the processing of bread and steamed bread [D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2016.
- [58] 胡杉杉. 去除脱氧雪腐镰刀菌烯醇的乳酸菌筛选及其机理研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2018.
- HU SS. Screening of lactic acid bacteria for removing deoxynivalenol and its mechanism [D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2018.
- [59] 马跃亭, 吴琴燕, 杨红福, 等. 小麦籽粒脱氧雪腐镰刀菌烯醇(DON)含量影响因素相关性分析[J]. 江苏农业科学, 2020, 48(8): 223–228.
- MA YT, WU QY, YANG HF, *et al.* Correlation analysis of factors influencing the content of deoxynivalenol (DON) in wheat grains [J]. *Jiangsu Agric Sci*, 2020, 48(8): 223–228.
- [60] LEE JY, LIM W, PARK S, *et al.* Deoxynivalenol induces apoptosis and disrupts cellular homeostasis through MAPK signaling pathways in bovine mammary epithelial cells [J]. *Environ Pollut*, 2019, 252(Pt A): 879–887.
- [61] 袁航. 粮食中主要真菌毒素危害及联合毒性研究进展[J]. 食品与机械, 2019, 35(11): 223–227.
- YUAN H. Research progress on the hazards and combined toxicity of main mycotoxins in food [J]. *Food Mach*, 2019, 35(11): 223–227.

(责任编辑: 王 欣)

作者简介

蔡 硕, 主要研究方向为食品质量与安全。

E-mail: cs1547374964@163.com

崔 璐, 博士, 主要研究方向为食品科学与工程。

E-mail: cuiluctl@nwsuaf.edu.cn