

综述

乳酸菌去除脱氧雪腐镰刀菌烯醇研究进展

李瑜玲, 黄若琪, 杨恩

(昆明理工大学, 生命科学与技术学院, 云南 昆明 650093)

摘要: 脱氧雪腐镰刀菌烯醇(DON)是镰刀菌属产生的一种主要侵袭小麦、玉米等谷物的有毒次级代谢产物,不仅给农业产业造成巨大经济损失,对人类和动物健康也有潜在威胁,所以如何高效去除粮食中的DON迫在眉睫。当前,运用微生物与其代谢物对DON进行生物脱毒在成本和大规模推广应用方面有良好的发展空间。本文对DON的危害、检测技术和就近年来利用乳酸菌对DON脱毒机制研究以及应用作出了较为详尽的阐述,为乳酸菌在谷物和饲料中DON的生物防治及其规模化产业运用提供参考。

关键词: 脱氧雪腐镰刀菌烯醇; 真菌毒素; 乳酸菌; 生物脱毒

中图分类号: R155 文献标识码: A 文章编号: 1004-8456(2024)07-0878-08

DOI: 10.13590/j.cjfh.2024.07.015

Research progress on the removal of deoxynivalenol by lactic acid bacteria

LI Yuling, HUANG Ruoqi, YANG En

(Kunming University of Science and Technology, College of Life Sciences and Technology,
Yunnan Kunming 650093, China)

Abstract: Deoxynivalenol (DON) is a toxic secondary metabolite produced by *Fusarium*, which mainly infects wheat, corn and other grains. It not only causes huge economic losses to the agricultural industry, but also has a potential threat to human and animal health. Therefore, how to efficiently remove DON from grains has always been an urgent problem. Currently, there is good development space in terms of cost and large-scale promotion of the use of microorganisms and their metabolites for biological detoxification of DON. This article makes a detailed description of the harm and detection technology of DON, as well as the research and application of the detoxification mechanism of DON by lactic acid bacteria in recent years, which provides a reference for the biological pest control of DON in grains and feedstuffs by lactic acid bacteria and its large-scale industrial application.

Key words: Deoxynivalenol; mycotoxins; lactic acid bacteria; biological detoxification

真菌毒素污染是全球主要关注的食品安全问题之一,目前已鉴定出300多种对动物和人类具有潜在毒性的真菌毒素,在食品中经常出现的毒素主要包括脱氧雪腐镰刀菌烯醇(Deoxynivalenol, DON)、黄曲霉素(Aflatoxin, AF)、展青霉素(Patulin, PAT)等^[1]。中国工程院重大咨询研究项目“中国食品安全现状、问题及对策战略研究”结果显示^[2],我国每年有3100多万公吨粮食在生产、储存、运输过程中被真菌污染,约占粮食总产量的6.2%。而且

人类还会额外接触到真菌毒素,如喂食了被真菌毒素污染的肉、蛋和牛奶等的动物,或者受到污染的蔬菜、水果和谷物的衍生产品。

DON在玉米、小麦、大麦、燕麦等谷物的生长和储存过程中极易感染,近年来镰刀菌属引发的赤霉病严重影响着我国各地的农作物,小麦赤霉病在大流行年份可使小麦减产59%以上^[3]。根据2020年统计数据显示,全国各地黑米和糙米中DON的检出率高达100%;玉米产品整体检出率可达98.76%,并且玉米产品整体和面粉中DON超标率分别为6.02%和3.34%;其余粮食产品的检出率均不低于90%^[4]。可见像镰刀菌的真菌产生的毒素对食品供应的可持续性产生了负面的影响,并造成了粮食生产上的经济损失,因此除去谷物及其相关制品中的DON迫在眉睫。

尽管一些物理与化学处理法如微波处理、热处

收稿日期: 2023-06-02

基金项目: 云南省科技厅2021年基础研究计划面上项目
(140520210031)

作者简介: 李瑜玲 女 硕士生 研究方向为应用微生物
E-mail: 3063796967@qq.com

通信作者: 杨恩 女 副教授 研究方向为食品微生物
E-mail: yangen@kust.edu.cn

理和磷酸钠处理等能够在一定程度上除去 DON,但远远不能满足粮食生产与加工的需要,并且存在安全性低和破坏谷物营养等缺点。另外,DON 对食品加工过程中如油炸、烹饪、烘烤、煮沸和巴氏消毒具有抗性,传统技术并不能将真菌毒素从食物中显著除去^[5]。而生物脱毒具有其他方法无法替代的优势,其毒性低、污染小、安全性高、特异性强、对谷物饲料无损,可用于不同食品加工阶段。目前已经有一些真菌、细菌和酶被发现能够降解真菌毒素,并能直接应用在谷物等食品加工过程中,乳酸菌就是其中一类。乳酸菌(Lactic acid bacteria, LAB)是一类在乳糖发酵过程中产生乳酸的无芽孢、革兰氏阳性菌,厌氧或者兼性厌氧,细胞形态具有杆状或者球状^[6]。乳酸菌广泛存在于营养物质丰富的食品中,其不仅能够改善食品的风味和质地,而且在免疫调节改善结肠炎^[6]、降低血清的胆固醇^[7]、抑制幽门螺杆菌^[8]、降解各类真菌毒素^[1]方面有着显著效果。因此,乳酸菌被广泛运用于畜牧业、食品业、医药业等行业中。本文从乳酸菌对谷物及其相关制品中 DON 的控制技术和降解机制的研究进展作一综述,为乳酸菌对 DON 脱毒应用可能性、食品的生产 and 流通提供参考。

1 DON 理化性质及其毒性

DON 又称呕吐毒素,由禾谷镰刀菌产生的单端孢霉烯族毒素,其化学结构较为复杂,如图 1 所示,其中环氧基团、C₃ 位羟基和 C₁₆ 位甲基为主要毒性结构^[5]。DON 易溶于水和极性溶剂如甲醇、乙醇、乙腈、丙酮及乙酸乙酯等,不溶于正己烷和乙醚。

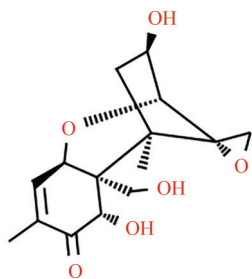


图 1 DON 化学结构

Figure 1 Chemical structure of DON

除了对谷物和食品的影响外,人类和以谷物饲养的动物接触受到 DON 污染的谷物会导致恶心、呕吐、腹泻、内毒素血症、胃肠道出血和死亡^[5,9-10]。人体中肝脏是 DON 毒性作用的主要靶器官,DON 能引起肝脏氧化应激,对肝脏细胞凋亡产生影响。DON 也会改变肠道形态,诱导产生过量自由基,抑制蛋白质合成,激活参与增殖、分化和凋亡相关信号转导关键的细胞激酶,从而进一步诱导细胞死

亡,诱发胃肠道炎症和坏死^[10]。DON 还会导致雌性动物生殖器官形态和功能异常,抑制卵巢颗粒细胞和卵母细胞的增殖和活力,使成熟率降低^[11]。国际癌症研究机构(International Agency for Research on Cancer, IARC)已认定 DON 为 3 类致癌物^[12]。

2 DON 的检测方法

迄今为止,已经开发出多种用于 DON 筛查和精确定量的检测方法,用来检测食品、谷物和饲料中 DON 的含量。酶联免疫吸附测定(Enzyme-linked immunosorbent assay, ELISA)、薄层色谱法(Thin layer chromatography, TLC)、高效液相色谱法(High performance liquid chromatography, HPLC)、高效液相色谱-串联质谱法(Ultra performance liquid chromatography-tandem mass spectrometry, UPLC-MS)等都是常见的 DON 检测方法。

基于以上常见的 DON 检测方法,黄伟等^[13]研制了应用于现场快速检测谷物中 DON 的化学发光光纤免疫传感器,陈斌等^[14]也建立了基于多酶辅助信号放大的 DON 免疫检测法,还有 HAO 等^[15]基于距离读数的视觉电化学发光生物传感器芯片开发了能够检测 DON 的生物传感器芯片,详见表 1。这些检测方法条件的不断优化和开发,大力推进了降解 DON 的研究进展。尽管已有多种检测方法,但是它们各自具有独特的优势和不足,在实际运用过程中需要结合研究对象情况来进行方法的选择。

3 微生物去除 DON 的机制研究

3.1 其他微生物去除 DON 的机制

目前,研究人员已从不同的微生物群落中发现了一些能够通过微生物的细胞壁吸附 DON 和产生特定酶和代谢物来降解 DON^[16]的菌株,或是菌株直接抑制真菌的生长和 DON 的产生,这些去除 DON 的机制不是单独或冲突的,如今已有多种微生物(如真菌、细菌等)被鉴定出能够去除 DON。

3.1.1 吸附机制

吸附法去除 DON 主要是通过微生物细胞壁上存在的例如葡甘露聚糖、蛋白质之间的分子作用力来完成。胶红类酵母(*Rhodotorula mucilaginosa*)、马克思克鲁维酵母(*Kluyveromyces marxianus*)等就可以通过位于细胞壁上的葡聚糖吸附 DON,使 DON 含量减少 44%~84.6%^[17]。酵母细胞壁生物大分子甘露聚糖/ β -葡聚糖也有抑制 DON 引起的细胞毒性和凋亡,同时减少细胞氧化损伤,减弱 DON 对细胞的诱导自噬^[18]。酵母 A15(*Saccharomyces pastorianus*)

表1 DON的检测方法
Table 1 Detection methods for DON

名称	检出限/(ng/mL)	优点	缺点
酶联免疫吸附法 ^[5]	2.13	检测时间更短、能够大批量地快速筛查检测样品	存在抗原抗体制备困难、假阳性,成本高等问题
高效液相色谱法 ^[5]	0.01	灵敏度高、应用范围广、可同时检测多种真菌毒素	检测耗时长,设备昂贵,前处理操作复杂等问题
高效液相色谱-三重四级杆质谱法 ^[13]	0.07	检测样品假阳性率低、可同时检测多种毒素	样品前处理复杂,检测周期较长,不适用于大量样品快速检测。
化学发光光线免疫传感器 ^[13]	0.062 7	灵敏度高,线性范围宽,器材尺寸小,适合现场快速检测	只可检测单一毒素,光纤探传感器成品少,设备无法多根光纤探针同步进行检测。
多酶辅助信号免疫检测法 ^[14]	3.12	操作简单、灵敏度高、快速	成本高,检测试剂成品难获得
视觉电化学发光生物传感器 ^[15]	0.33	操作简单,成本低	易受环境因素和信号采集过程影响检测结果

A15 lager yeast)也通过与DON物理结合和还原作用去除了15%的DON^[18]。

3.1.2 生物酶降解DON机制

在微生物代谢物去除DON中,酶降解DON的机制备受关注,已有研究确定某些微生物降解DON的主要物质是酶类,但却并没有鉴定酶的类型和代谢产物类型的,例如从猪肠道中分离得到的贝莱斯芽孢杆菌(*Bacillus velezensis*)^[19]和驴肠道中分离的枯草杆菌ASAG 216^[9]都产生能够降解DON的胞外酶,并且发酵上清液对禾谷镰刀菌也有较好的拮抗效果。阿氏芽孢杆菌MB-1的包内液、菌悬液、发酵上清液分别能降解9.5%、12.7%、82.3%的DON,但并没有对胞外活性物质进行进一步探究^[20]。但也有研究是通过对降解产物的鉴定和分析确定脱毒靶点和发生的转化反应,后续可以结合转录组、代谢组等组学分析进一步确定生物酶类型和编码基因。目前已确定生物酶能够将DON脱环氧化、羟化、异构化、糖基化、乙酰化等。

3.1.2.1 脱环氧化反应

微生物通过对DON的C₁₂、C₁₃位脱环氧化生成产物DOM-1(图2)降低DON毒性的作用。真杆菌属的菌株BBSH 797、伊格尔兹氏菌分离株D11-9^[21]就有该功能,但降解作用的酶类尚未明确。并且这两种菌株需要严格的厌氧环境才能进行脱环氧化反应,在一定程度上限制了实际应用。研究人员又从土壤中获得一株脱硫杆菌PGC-3-9^[22],它能在有氧和无氧条件下去除小麦中的DON,并在PH 6-10、温度15~50℃范围内表现出较高DON脱环氧化活性。以*Proteus vulgaris*、*Tissierella praeacuta*、*Fusobacterium varium*等菌属为主的YM-1的发酵上清液也能将DON氧化成DOM-1^[23]。

3.1.2.2 C₃-糖苷化、氧化和异构化反应

C₃-糖苷化反应是通过糖苷酶或乙酰基转移酶将葡萄糖基或乙酰基转移到DON的C₃上,从而产

生低毒产物3-ADON或3-GDON(图2),且镰刀菌能够抵挡自身所产生的毒素也是因为乙酰基转移酶的存在。德沃斯氏菌(*Devosia* sp. DDS-1)^[24]菌株产生的高活性胞内酶也能降解3-AC-DON,而且DDS-1产生的粗酶液也能降解小麦中的DON和3-AC-DON。

C₃的氧化反应则是C₃-OH氧化为低毒产物3-酮基-DON(3-keto-DON),或进一步转化为3-异构化-DON(3-epi-DON)^[25](图2)。鞘氨醇单胞菌(*Sphingomonas* S3-4)的AKR18A1酶和德沃斯氏菌属(*Devosiamutans* 17-2-E-8)的DepA、DepB酶就能将DON转化为3-keto-DON最终产物为3-epi-DON^[25]。一株从土壤中获得根瘤农杆菌^[26](*Agrobacterium rhizobium*)能完全降解DON,代谢产物是3-keto-DON,其毒性低于DON(图2)。诺卡氏菌株ZHH-013^[27]也被发现它能以DON和DON降解产物3-epi-DON为碳源,先将DON降解为3-keto-DON,再转化为3-epi-DON,再孵育39h后3-epi-DON也被彻底降解(图2)。孙晶等^[28]从河流污泥等样品中分离获得的一株德沃斯氏菌D-8,能在培养基中将DON完全降解,其产生的活性物质可将DON转化为3-epi-DON,能够降解污染小麦中98.11%的DON,但并没有对降解DON的具体活性物质进行更深地挖掘。

3.1.2.3 羟基化反应

C₁₆位上的羟基化反应则是将DON生成16-羟基-DON(16-HDON)(图2),来源于日本湖泊中的鞘氨醇单胞菌属菌株KSM1^[29]就能够利用细胞色素P450系统代谢DON,通过对氧化还原酶基因进行克隆和功能验证后发现是DanA-Kdx-KdR酶催化体系对DON的羟基化过程,目前仅有该菌株是通过C₁₆位上的羟基化降解DON。

3.2 乳酸菌去除DON机制

目前,已报道的可去除DON的乳酸菌有植物

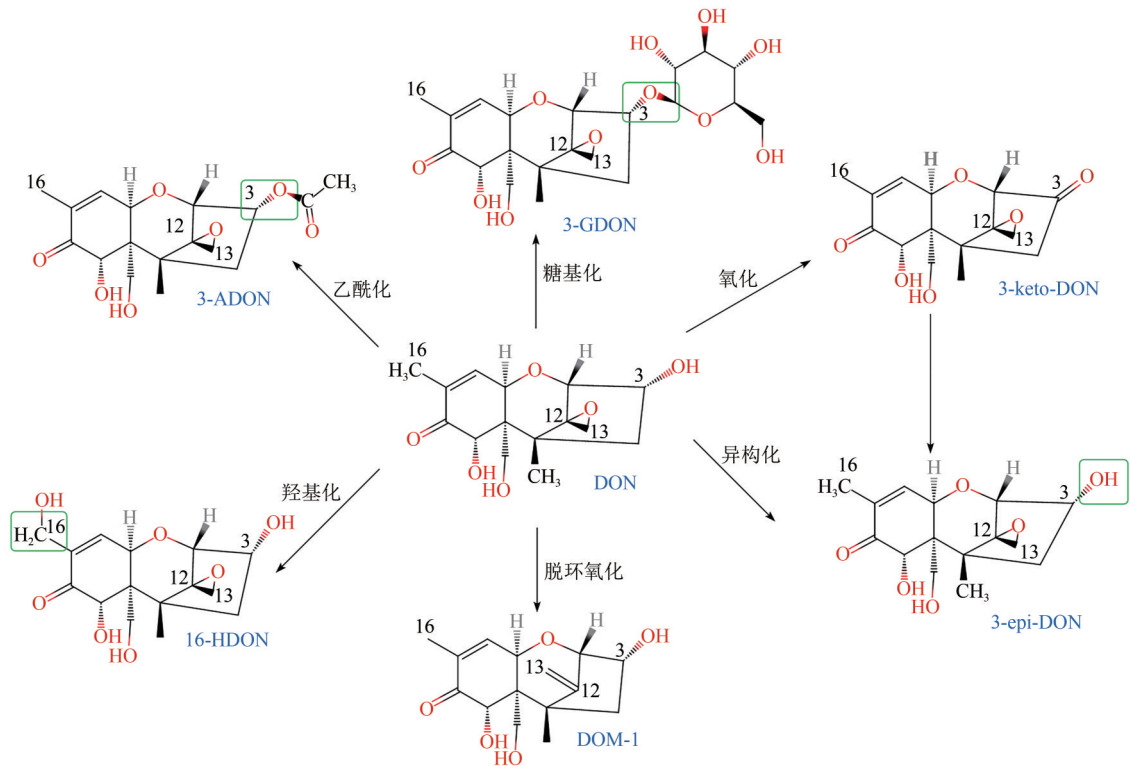


图2 DON降解途径

Figure 2 DON degradation pathway

乳杆菌、戊糖乳杆菌、嗜酸乳杆菌、干酪乳杆菌、清酒乳杆菌、罗伊氏乳杆菌、副干酪乳杆菌、短乳杆菌、乳酸乳杆菌等^[30]。乳酸菌去除 DON 的方法根据作用方式和产物的不同分为吸附和降解等。

3.2.1 乳酸菌吸附机制

约氏乳杆菌 NJD412^[31] 其体外 DON 的降解效率为 $52.49\% \pm 2.45\%$, 可以有效降解 DON 的含量, 且进行小鼠试验后发现口服约氏乳杆菌 NJD412 可以降低动物体内和血清内 DON 含量, 除此以外, 植物乳杆菌、戊糖乳杆菌、类干酪乳杆菌的活细胞、通过热、酸灭活细胞的细胞壁或细胞膜对 DON 的吸附效率平均达到 60% ^[32]。副乳杆菌 LHZ-1^[33] 可以通过细胞壁中的多糖、蛋白质以及脂质之间的分子间作用力、官能团的化学键与 DON 相结合, 形成复合体, 从而达到吸附的效果, 降解率高达 40.7% 。此外, 根据本实验室已有研究结果显示, 从云南传统菜市场购买的乳饼和酸菜中筛选出 5 株具有去除 DON 的菌株, 其中 1 株为乳酸片球菌 (*Pediococcus acidilactici*), 其他 4 株则为植物乳杆菌 (*Lactiplantibacillus plantarum*), 5 株菌株的细胞壁碎片对 DON 也有良好的吸附性^[34]。副乳杆菌亚种 (*Lactobacillus paracasei* subsp. *tolerans*)^[35] 经过热灭活处理后细胞的细胞壁和 DON 物理结合使得液体培养中的 DON 浓度显著降低, 以上诸多研究结果显示乳酸菌能够降低 DON 的含量, 且依靠的是细

胞壁的吸附作用。

3.2.2 乳酸菌对禾谷镰刀菌的抑制

乳酸菌对禾谷镰刀菌菌株生长也具有抑制作用, 乳酸菌产生的有机酸(乳酸、山梨酸、甲酸、丙酸和苯甲酸)能够将禾谷镰刀菌生长环境中的 PH 值降低, 从而抑制菌株生长和菌株代谢水平。罗伊氏乳杆菌 R29^[36] 上清液中的乳酸、醋酸、聚乳酸和苯甲酸这些代谢物能抑制禾谷镰刀菌的萌发和生长, 从根本上降低 DON 的产生。植物乳杆菌、戊糖乳杆菌、类干酪乳杆菌也被发现可以直接抑制禾谷镰刀菌 IAPSR 2218 的菌体生长和 DON 的产生, 但也发现这些乳酸菌产生的有机酸(乳酸和醋酸)对禾谷镰刀菌 IAPAR 2218 活性并没有影响^[32]。

3.2.3 乳酸菌酶降解 DON 机制

除吸附作用外, 一些乳酸菌株的胞内酶或胞外酶也具有降解 DON 的作用。实验筛选出的乳酸菌除吸附作用外, 它们的发酵上清液也具有明显降解 DON 的效果^[33], 从发酵上清液中提取的胞外蛋白降解 DON 的效果也较为显著。TRAKSELYTE-RUPSIENE 等^[37] 将酪乳杆菌 210、植物乳杆菌 135、副乳杆菌 244 和乳酸菌 245 添加含有不同浓度(1 330、786、504 和 314 $\mu\text{g}/\text{kg}$) DON 的小麦样品发酵后, 小麦样品中的 DON 分别降低了 42% 、 56.6% 、 53.1% 和 56.7% , 通过对降解 DON 效果最佳的 245 号菌株在发酵过程中生长活性和明显的 pH 变化进行分析,

推测小麦中 DON 含量降低也可能是由这些乳酸菌株产生的酶和代谢产物引起的,但降解或结合的机制和产物仍有待探索。活的和热灭活的嗜酸乳杆菌 CIP 76.13T、德氏乳杆菌亚种和保加利亚乳杆菌 CIP 101027T 对 DON 的降解率平均可达 30%,此外研究人员发现除细胞吸附外,生物酶也能够降解 DON^[38],但并没有鉴定此生物酶的类型。QU 等^[39]也通过体外实验发现鼠李糖乳杆菌 SHA113 对 DON 的降解率可达 60%,且只有活细胞能将 DON 转化为 3-epi-DON,小鼠体内实验也表明 SHA113 能缓解 DON 的体内毒性。今后还可从降解产物 3-epi-DON 为切入点,深入探索 SHA113 菌株是否产生了将 DON 异构化为 3-epi-DON 的酶类或其他物质。

此外有研究发现植物乳杆菌和短乳杆菌中含

有与鞘氨醇单胞菌(*Spingomonas* S3-4)的 AKR18A1 酶和德沃斯氏菌属(*Devosiamutans* 17-2-E-8)的 DepA、DepB 酶这种能够降解 DON 的酶类似蛋白^[35]。通过利用 Blast 技术对能降解 DON 的微生物降解酶进行生物信息学分析,并运用 NJ 法构建进化树,吴宛芹等^[35]发现有部分乳酸菌存在与 AKR18A1 和 DepA 相似的蛋白,其中 *Lactobacillus* sp. 2-3、*Lactobacillus paralimentarius* 和 *Lactobacillus midensis* 这三种菌株最有可能存在降解 DON 为 3-epi-DON 的能力(图 2)。此外鼠李糖乳杆菌植物乳杆菌 ATCC14917 和从小麦籽分离出的植物乳杆菌,它们发酵上清液中的可溶性因子减少了 DON 对猪肠道组织的损伤^[40],但也未具体探究可溶性因子中具体降解 DON 的物质。不同微生物对 DON 去除作用总结如表 2 所示。

表 2 不同微生物对 DON 的去除作用

Table 2 Degradation of DON by different microorganisms

微生物种类	去除率/%	起降解作用的主要物质	影响因素
副乳杆菌 LHZ-1 ^[33]	40.70	细胞壁	—
副干酪乳杆菌 ^[41]	40.40	细胞悬浮液	菌体数量、pH 值、温度、时长
鼠李糖乳杆菌 RC007 ^[42]	13.33	发酵上清液	温度
阿氏芽孢杆菌 MB-1 ^[20]	9.50~82.30	胞内液、细胞悬浮液、发酵上清液	pH 值变化、菌体数量、孵育时长、温度
植物乳杆菌 RB-4 ^[34]	65	细胞悬浮液、发酵上清液	菌体数量、孵育时长
植物乳杆菌 A14-2 ^[43]	80	有机酸、非蛋白类热敏感物质	pH 值变化、温度
嗜酸乳杆菌 CIP 76.13T、德氏乳杆菌亚种和保加利亚乳杆菌 CIP 101027T ^[38]	30	细胞悬浮液、细胞壁	温度
诺卡氏菌株 ZHH-013 ^[27]	80	细胞悬浮液	菌体数量
胶红类酵母、发酵地酶酵母、马克斯克鲁维酵母 ^[17]	44~84.60	细胞壁	—
贝莱斯芽孢杆菌(<i>Bacillus velezensis</i>) ^[19]	76.70	胞外酶(未明确酶类型)	孵育时长
枯草杆菌 ASAG 216 ^[9]	81	胞外酶(未明确酶类型)	温度、pH 值
德沃斯氏菌 D6-9 ^[25]	100	依赖酮的脱氢酶 QDDH、依赖 NADPH 的醛酮还原酶 AKR13B2、AKR6D1	孵育时长

DON 的毒性与其 C₁₂、C₁₃ 的环氧结构、C₃ 位的羟基以及 C₁₆ 位相关,降解 DON 通常是真菌或细菌的酶类与其脱毒位点相互作用,而乳酸菌可能是一种有效的降解方式,但目前尚未有明确研究发现乳酸菌中降解 DON 的具体酶类,因此可以从分析降解产物的分子结构入手,了解脱毒的主要靶点,判断是 C₁₂、C₁₃ 的脱环氧化反应抑或是 C₃ 位的氧化、异构化、糖苷化、乙酰化和硫化反应等,然后与已经被鉴定具有降解 DON 的生物酶对比分析,推断出起作用的酶的种类,随后进行蛋白鉴定等蛋白组学分析,从而深入研究乳酸菌降解 DON 的机制。

4 乳酸菌在食品加工业中的应用

乳酸菌被人体吸收后,不仅在一定程度上能够保证肠道菌群的平衡,还能提高人体免疫,促进肠道消化,减缓 DON 对人体造成的危害。随着消费水平的升高,消费者对食品的质量和关注安全关注度逐渐提高,与经过化学处理法和物理处理法的食品相

比,消费者更倾向于选择通过生物降解法处理的绿色环保食品。目前,乳酸菌脱毒是一种温和的方法,它既可以保留需脱毒食品的营养价值和风味,又可以在作为饲料中的添加剂时缓解 DON 毒素对家畜和家禽引起的肝脏、肠胃等损伤。

乳酸菌作为绿色添加剂被广泛运用于动物饲料中,它不仅能抑制镰刀菌、黄曲霉菌等真菌在饲料中的生长,还能降低饲料中 DON 此类毒素的含量,避免了动物食用毒素含量超标的饲料而引起腹泻、肝脏受损等危害。有研究表明,将乳酸菌 JM113 添加在饲料中不仅能缓解和修复 DON 引起的肉鸡肝脏毒性和肝脏损伤^[44],还能有效改善 DON 导致的肉鸡营养物质转运基因表达的下调,缓解肉鸡肠道发育不良的情况^[45]。可见,乳酸菌的应用在饲料安全和畜牧健康方面有着不容小觑的价值。

现实生活中面包、糕点、馒头等谷物制品的储存时间较短,且在储存过程中容易受到真菌毒素的污染。但棒状乳杆菌 BCH-4^[46]不仅能抑制原材料

玉米这类谷物中的黄曲霉,而且经过它所产生的抗菌化合物处理的玉米谷物比感染黄曲霉的玉米谷物还具有更高的营养价值。在麦芽制造过程中也检测出罗伊氏乳杆菌 R29 具有抗真菌活性,且对镰刀菌生长和产生 DON 有着抑制作用^[36]。除镰刀菌和 DON 外面包中的黑曲霉和棘孢曲霉都会加速面包腐败,而植物乳杆菌 21B 能抑制面包中黑曲霉的生长,罗氏乳杆菌 LD108 则防止棘孢曲霉(*Aspergillus aculeatus*)的生长,从而延长面包的保质期^[47]。此外,植物乳杆菌 L244^[48]被发现可以抑制面包和糕点制作中用到的酸奶油和奶酪上青霉菌的生长,并且 COSENTINO 等^[49]还进行了 9 株植物乳杆菌、6 株副乳杆菌、4 株短乳杆菌对奶酪中常见真菌产青霉菌 ATCC 9179(*Penicillium chrysogenum* ATCC 9179)和黄曲霉 ATCC 46283(*Aspergillus flavus* ACTT 46283)抑制效果的评估,发现这些乳酸菌株有效延长了奶酪保质期。王庆宇等^[50]还将乳酸菌进行筛选用来抑制馒头中会产生的展青霉素和黄曲霉素,为馒头等相关谷物制品的工业化生产开发安全且高效的生物防腐剂奠定基础。可见乳酸菌作为益生菌在除去农作物中 DON 此类的真菌毒素研究发展中有着巨大潜力,在食品、饲料等真菌毒素含量控制中也有应用前景。

5 结论及展望

目前,真菌和真菌毒素对食品的污染情况和如何保持食物原本的营养价值和风味的前提下降解 DON 一直都是迫在眉睫的问题。现已经鉴定和分离出诸多能够除去 DON 的微生物菌株,但除去 DON 是多因素、综合性的复杂过程,且 DON 取代基的改变所产生的降解产物毒性都不尽相同,德沃斯氏菌 17-2-E-8 的 DepA 和 DepB 能将 DON 最终降解成为 3-epi-DON,德沃斯氏菌 D6-9 的 AKR13B2、AKR6D1 酶也能将 DON 彻底降解,但这些降解过程中所需要使用的辅助因子吡咯喹啉醌(Pyrroloquinoline quinone, PQQ)和 NADH、NADPH 的价格昂贵,菌株也大多是从土壤等此类非食品中分离得到,这不利于将菌株运用于食品中,可见寻求一株能高效降解食品中 DON 的乳酸菌具有一定的应用前景。

尽管在乳酸菌去除 DON 的菌株筛选方面已发现有植物乳杆菌、戊糖乳杆菌、嗜酸乳杆菌、干酪乳杆菌、清酒乳杆菌等诸多菌株,但对这些菌株降解 DON 作用机制的研究与其他微生物相比仍然比较少,较多研究只探究出发酵上清液、细胞壁、细胞裂解液对 DON 具有去除作用,并没有深入探究发酵

上清液、细胞裂解液中具体是哪些酶类对 DON 起主要降解作用,吴宛芹等^[35]也只通过 Blast 技术对能降解 DON 的微生物降解酶进行生物信息学分析得到 *Lactobacillus* sp. 2-3、*Lactobacillus paralimentarius* 和 *Lactobacillus midensis* 可能存在 DepA 类似蛋白,并没有筛选鉴定出乳酸菌中降解 DON 的具体酶类。

随着组学技术不断发展,可以将筛选出的脱毒菌株进行基因组、转录组学、代谢组学和蛋白组学等测序,从差异表达基因、代谢产物、表达蛋白等方面进行分析,进一步探索菌株的脱毒代谢路径以及降解酶基因,但相较于物理法和化学法,生物降解成本高、效果不稳定,因此,在筛选可以除去 DON 的乳酸菌菌株和研究乳酸菌产生的酶等代谢物降解 DON 机制的同时,还应该格外关注生物酶此类代谢物的特点,根据特点规避生物酶降解效果不稳定的类似情况,为乳酸菌在食品、饲料等行业利用中提供有效的理论支撑。

参考文献

- [1] 何丽君,霍荣珍,蔡理文,等.农产品中真菌毒素的生物控制研究概况[J].轻工科技,2022,38(1):4-9.
HE L J, HUO R Z, CAI L W, et al. Research on biological control of mycotoxins in agricultural products[J]. Light Industry Science and Technology, 2022, 38(1): 4-9.
- [2] 郭志明,尹丽梅,石吉勇,等.粮食真菌毒素的光谱检测技术研究进展[J].光谱学与光谱分析,2020,40(6):1751-1757.
GUO Z M, YIN L M, SHI J Y, et al. Spectroscopic techniques for detection of mycotoxin in grains[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2020, 40(6): 1751-1757.
- [3] 夏秋霞,荣利,张权,等.2021年江阴市小明白粉病、小麦赤霉病防治药剂筛选试验简报[J].上海农业科技,2022(1):130-131.
XIA Q X, RONG L, ZHANG Q, et al. Brief report on screening test of pesticides for controlling wheat powdery mildew and wheat scab in Jiangyin city in 2021[J]. Shanghai Agricultural Science and Technology, 2022(1): 130-131.
- [4] 段鸿渐,李汶霞,郝得隆,等.2020年我国粮食及其产品中脱氧雪腐镰刀菌烯醇毒素污染情况与分布特征[J].食品安全质量检测学报,2021,12(22):8948-8953.
DUAN H J, LI W X, HAO D L, et al. Pollution situation and distribution characteristics of deoxynivalenol toxin in grains and their products in China in 2020[J]. Journal of Food Safety & Quality, 2021, 12(22): 8948-8953.
- [5] ALSHANNAQ A, YU J H. Occurrence, toxicity, and analysis of major mycotoxins in food [J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2017, 14(6): 632.
- [6] LIU M L, DING J H, ZHANG H M, et al. *Lactobacillus casei* LH23 modulates the immune response and ameliorates DSS-induced colitis via suppressing JNK/p-38 signal pathways and

- enhancing histone H3K9 acetylation [J]. *Food & Function*, 2020, 11(6): 5473-5485.
- [7] KELESZADE E, KOLIDA S, COSTABILE A. The cholesterol lowering efficacy of *Lactobacillus plantarum* ECGC 13110402 in hypercholesterolemic adults: A double-blind, randomized, placebo controlled, pilot human intervention study [J]. *Journal of Functional Foods*, 2022, 89: 104939.
- [8] ZHENG P X, FANG H Y, YANG H B, et al. *Lactobacillus pentosus* strain LPS16 produces lactic acid, inhibiting multidrug-resistant *Helicobacter pylori* [J]. *Journal of Microbiology, Immunology and Infection*, 2016, 49(2): 168-174.
- [9] JIA R, CAO L R, LIU W B, et al. Detoxification of deoxynivalenol by *Bacillus subtilis* ASAG 216 and characterization the degradation process [J]. *European Food Research and Technology*, 2021, 247(1): 67-76.
- [10] WU S R, LIU Y L, DUAN Y L, et al. Intestinal toxicity of deoxynivalenol is limited by supplementation with *Lactobacillus plantarum* JM113 and consequentially altered gut microbiota in broiler chickens [J]. *Journal of Animal Science and Biotechnology*, 2018, 9(1): 1-13.
- [11] YANG S, GONG P, PAN J, et al. *Pediococcus pentosaceus* xy46 can absorb Zearalenone and alleviate its toxicity to the reproductive systems of male mice [J]. *Microorganisms*, 2019, 7(8): 266.
- [12] LYON F. IARC monographs on the evaluation of carcinogenic risks to humans [R]. World Health Organization, International Agency for Research on Cancer, 2014.
- [13] 黄伟, 何慧禹, 鲁鹏, 等. 化学发光光纤免疫传感器的研制及其对谷物中呕吐毒素的快速检测 [J]. *华中农业大学学报*, 2022, 41(5): 273-282.
- HUANG W, HE H Y, LU P, et al. Development of a chemiluminescent optical fiber immunosensor and its application in rapid detection of deoxynivalenol in grains [J]. *Journal of Huazhong Agricultural University*, 2022, 41(5): 273-282.
- [14] 陈斌, 曾昆, 吴琴燕, 等. 基于多酶辅助信号放大的脱氧雪腐镰刀菌烯醇高灵敏免疫检测方法的建立 [J]. *江苏农业科学*, 2022, 50(17): 211-217.
- CHEN B, ZENG K, WU Q Y, et al. Establishment of a highly sensitive immunoassay for deoxynivalenol based on multi-enzyme assisted signal amplification [J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2022, 50(17): 211-217.
- [15] HAO N, ZOU Y, QIU Y, et al. Visual electrochemiluminescence biosensor chip based on distance readout for deoxynivalenol detection [J]. *Analytical Chemistry*, 2023, 95(5): 2942-2948.
- [16] BANGAR S P, SHARMA N, KUMAR M, et al. Recent developments in applications of lactic acid bacteria against mycotoxin production and fungal contamination [J]. *Food Bioscience*, 2021, 44: 101444.
- [17] 沈跃丽, 高艳, 王睿, 等. 粮食中脱氧雪腐镰刀菌烯醇的研究进展分析 [J]. *现代面粉工业*, 2022, 35(1): 16-20.
- SHEN Y L, GAO Y, WANG R, et al. Research progress analysis of deoxynivalenol in grain [J]. *Modern Flour Milling Industry*, 2022, 35(1): 16-20.
- [18] TU Y A, LIU S Q, CAI P R, et al. Global distribution, toxicity to humans and animals, biodegradation, and nutritional mitigation of deoxynivalenol: A review [J]. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, 2023.
- [19] 曹荣耀, 谢岩黎, 刘晨, 等. 贝莱斯芽孢杆菌降解脱氧雪腐镰刀菌烯醇及抑制禾谷镰刀菌的研究 [J]. *河南工业大学学报(自然科学版)*, 2022, 43(3): 74-80.
- CAO R Y, XIE Y L, LIU C, et al. Degradation of deoxynivalenol by *Bacillus velezensis* and its inhibition on the growth of *Fusarium gramineis* [J]. *Journal of Henan University of Technology (Natural Science Edition)*, 2022, 43(3): 74-80.
- [20] 王明清, 龚魁杰, 于丽娜, 等. 降解呕吐毒素微生物的筛选鉴定及其应用 [J]. *食品安全质量检测学报*, 2021, 12(9): 3449-3454.
- WANG M Q, GONG K J, YU L N, et al. Screening, identification and application of microorganism for degrading deoxynivalenol [J]. *Journal of Food Safety & Quality*, 2021, 12(9): 3449-3454.
- [21] LI F C, WANG J Q, HUANG L B, et al. Effects of adding *Clostridium* sp. WJ06 on intestinal morphology and microbial diversity of growing pigs fed with natural deoxynivalenol contaminated wheat [J]. *Toxins*, 2017, 9(12): 383.
- [22] HE W J, SHI M M, YANG P, et al. Novel soil bacterium strain *Desulfotobacterium* sp. PGC-3-9 detoxifies trichothecene mycotoxins in wheat via de-epoxidation under aerobic and anaerobic conditions [J]. *Toxins*, 2020, 12(6): 363.
- [23] WU Y, ZHAO C, SONG G, et al. YM-1: A novel deoxynivalenol-detoxifying bacterial consortium from intestines of free-range chickens [J]. *Annals of Agricultural Sciences*, 2023, 68(2): 87-95.
- [24] 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 J H, PAN Y M, HU X D, et al. Enzymatic characteristics of 3-acetyl deoxynivalenol oxidase by *Devosia* sp. DDS-1 [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2013, 46(11): 2240-2248.
- [25] HE W J, SHI M M, 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 Chemistry*, 2020, 321: 126703.
- [26] 李凯琳, 余佃贞, 刘娜, 等. 呕吐毒素生物脱毒研究进展 [J]. *中国食品卫生杂志*, 2023, 35(4): 630-638.
- LI K L, SHE D Z, LIU N, et al. Recent progress on biological detoxification of vomitoxin [J]. *Chinese Journal of Food Hygiene*, 2023, 35(4): 630-638.
- [27] ZHANG H H, ZHANG H, QIN X, et al. Biodegradation of deoxynivalenol by *Nocardioides* sp. ZHH-013: 3-keto-deoxynivalenol and 3-epi-deoxynivalenol as intermediate products [J]. *Frontiers in Microbiology*, 2021, 12: 658421.
- [28] 孙晶, 杜稳, 赵程程, 等. 一株高效降解呕吐毒素的德沃斯氏菌筛选鉴定及效果评价 [J]. *中国粮油学报*, 2022, 37(10): 14-20.
- SUN J, DU W, ZHAO C C, et al. Screening, identification and evaluation of a *Devosia* sp. strain with high efficiency in degrading deoxynivalenol [J]. *Journal of the Chinese Cereals and Oils Association*, 2022, 37(10): 14-20.

- [29] ITO M, SATO I, ISHIZAKA M, et al. Bacterial cytochrome P450 system catabolizing the *Fusarium* toxin deoxynivalenol[J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 2013, 79(5): 1619-1628.
- [30] NIDERKORN V, BOUDRA H, MORGAVI D P. Binding of *Fusarium* mycotoxins by fermentative bacteria *in vitro* [J]. *Journal of Applied Microbiology*, 2006, 101(4): 849-856.
- [31] 黄克和, 葛雷, 郭俊妍, 等. 一种约氏乳杆菌及其在降解脱氧雪腐镰刀菌烯醇及抑制致病菌中的应用: CN202210430039.1[P]. 2022-08-09.
- HUANG K H, GE L, GUO J Y, et al. A type of *Lactobacillus acidophilus* and its application in degrading deoxynivalenol and inhibiting pathogenic bacteria: CN202210430039.1[P]. 2022-08-09.
- [32] FRANCO T S, GARCIA S, HIROOKA E Y, et al. Lactic acid bacteria in the inhibition of *Fusarium graminearum* and deoxynivalenol detoxification [J]. *Journal of Applied Microbiology*, 2011, 111(3): 739-748.
- [33] ZHAI Y Y, HU S S, ZHONG L, et al. Characterization of deoxynivalenol detoxification by *Lactobacillus paracasei* LHZ-1 isolated from yogurt [J]. *Journal of Food Protection*, 2019, 82(8): 1292-1299.
- [34] 张乐. 具有降解真菌毒素乳酸菌的筛选、鉴定及其降解机理研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2020.
- ZHANG L. Screening, identification and degradation mechanism of lactic acid bacteria capable of degrading mycotoxins [D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2020.
- [35] 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 W Q, QU R, AI C Y, et al. Progress in removal of deoxynivalenol by *Lactobacillus* [J]. *Feed Industry*, 2019, 40(16): 51-59.
- [36] OLIVEIRA P, BROSAN B, JACOB F, et al. Lactic acid bacteria bioprotection applied to the malting process. Part II: Substrate impact and mycotoxin reduction [J]. *Food Control*, 2015, 51: 444-452.
- [37] TRAKSELYTE-RUPSINIENE K, JUODEIKIENE G, HAJNAL E J, et al. Challenges of *Lactobacillus* fermentation in combination with acoustic screening for deoxynivalenol and deoxynivalenol conjugates reduction in contaminated wheat - based products[J]. *Food Control*, 2022, 134: 108699.
- [38] RAGOUBI C, QUINTIERI L, GRECO D, et al. Mycotoxin removal by *Lactobacillus* spp. and their application in animal liquid feed[J]. *Toxins*, 2021, 13(3): 185.
- [39] QU R, JIANG C M, WU W Q, et al. Conversion of DON to 3-epi-DON *in vitro* and toxicity reduction of DON *in vivo* by *Lactobacillus rhamnosus* [J]. *Food & Function*, 2019, 10(5): 2785-2796.
- [40] MAIDANA L G, GEREZ J, PINHO F, et al. *Lactobacillus plantarum* culture supernatants improve intestinal tissue exposed to deoxynivalenol [J]. *Experimental and Toxicologic Pathology*, 2017, 69(8): 666-671.
- [41] 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 S S. Screening of lactic acid bacteria for removing deoxynivalenol and its mechanism [D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2018.
- [42] GARCÍA G R, PAYROS D, PINTON P, et al. Intestinal toxicity of deoxynivalenol is limited by *Lactobacillus rhamnosus* RC007 in pig jejunum explants [J]. *Archives of Toxicology*, 2018, 92(2): 983-993.
- [43] 罗炜, 宋春艳, 李彦林, 等. 抑制呕吐毒素生物合成的乳酸菌的筛选及鉴定[J]. *食品与发酵工业*, 2018, 44(9): 41-47.
- LUO W, SONG C Y, LI Y L, et al. Screening and identification of lactic acid bacteria inhibiting the biosynthesis of deoxynivalenol [J]. *Food and Fermentation Industries*, 2018, 44(9): 41-47.
- [44] 王方圆. 乳酸菌缓解采食呕吐毒素污染饲料肉鸡肝脏毒性的研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2020.
- WANG F Y. Study on lactic acid bacteria alleviating liver toxicity of broilers contaminated with vomiting toxin [D]. Yangling: Northwest A & F University, 2020.
- [45] 段永乐. 乳酸菌对采食呕吐毒素污染饲料肉鸡肠道健康的影响[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2018.
- DUAN Y L. Effect of lactic acid bacteria on intestinal health of broilers with vomiting toxin contaminated diet [D]. Yangling: Northwest A & F University, 2018.
- [46] SALMAN M, TARIQ A, IJAZ A, et al. *In vitro* antimicrobial and antioxidant activities of *Lactobacillus coryniformis* BCH-4 bioactive compounds and determination of their bioprotective effects on nutritional components of maize (*Zea mays* L.) [J]. *Molecules*, 2020, 25(20): 4685.
- [47] 王燕霞, 王刚, 王宇, 等. 脱氧雪腐镰刀菌烯醇(DON)降解菌 *Devosia* sp. A8 和 *Paracoccus yeei* A9 的生理生化及生长特性[J]. *生物加工过程*, 2023, 21(2): 191-197.
- WANG Y X, WANG G, WANG Y, et al. Physiological and growth characteristics of DON degrading consortium comprising *Devosia* sp. A8 and *Paracoccus yeei* A9 [J]. *Chinese Journal of Bioprocess Engineering*, 2023, 21(2): 191-197.
- [48] LEYVA SALAS M, THIERRY A, LEMAITRE M, et al. Antifungal activity of lactic acid bacteria combinations in dairy mimicking models and their potential as bioprotective cultures in pilot scale applications [J]. *Frontiers in Microbiology*, 2018, 9: 1787.
- [49] COSENTINO S, VIALE S, DEPLANO M, et al. Application of autochthonous *Lactobacillus* strains as biopreservatives to control fungal spoilage in caciotta cheese [J]. *BioMed Research International*, 2018, 2018: 1-10.
- [50] 王庆宇, 李啸, 宋宜兵, 等. 抑制馒头中腐败霉菌活性乳酸菌的筛选及其应用[J]. *中国酿造*, 2021, 40(10): 139-143.
- WANG Q Y, LI X, SONG Y B, et al. Screening and application of lactic acid bacteria inhibiting spoilage mold activity in Mantou [J]. *China Brewing*, 2021, 40(10): 139-143.