

脱氧雪腐镰刀菌烯醇生物降解途径研究进展

罗金凤, 肖 洪, 张亚琼, 任美燕, 龙 悦, 王 健, 丁晓雯*

(西南大学食品科学学院, 重庆市农产品加工重点实验室, 重庆 400716)

摘 要: 脱氧雪腐镰刀菌烯醇(DON)作为分布最为广泛的镰刀菌毒素之一, 不但给全球粮食产业造成巨大损失, 而且也严重威胁食品安全, 利用微生物代谢来降解原料中DON已成为目前研究的热点。本文主要介绍现已发现的生物降解、转化与吸收途径, 包括3C—OH氧化、开环氧化、水合作用、糖苷化、3C-异构化、结合与吸收等作用机制, 以期从原理上了解DON的各种生物降解途径, 为研究生物学方法控制粮食与饲料中DON含量提供一定参考。

关键词: DON; 生物降解; 途径

Research Progresses in Biodegradation Pathways of Deoxynivalenol

LUO Jin-feng, XIAO Hong, ZHANG Ya-qiong, REN Mei-yan, LONG Yue, WANG Jian, DING Xiao-wen*

(Chongqing Key Laboratory of Agricultural Product Processing, College of Food Science, Southwest University, Chongqing 400716, China)

Abstract: As one of the most widely distributed *Fusarium* mycotoxin, deoxynivalenol (DON) not only results in the enormous loss of global food industry, but also lead to serious threat for food safety. The appropriate application of microbial degradation metabolism of DON in raw materials has become a hot topic. In this paper, biodegradation, transformation and absorption pathways including 3C—OH oxidation, de-epoxidation, hydration, glycosylation, 3C-epimerization, binding and absorption and other mechanisms are summarized, which will provide the better understanding of biodegradation, transformation or absorption mechanisms of DON, and theoretical basis for the control of DON in food and feed through microbiological strategies.

Key words: deoxynivalenol (DON); biodegradation; pathways

中图分类号: Q815

文献标识码: A

文章编号: 1002-6630(2012)23-0405-05

全球每年约有25%的农作物被真菌毒素污染, 约2%的农作物因污染严重而失去营养和经济价值, 造成数千亿美元的经济损失^[1]。常见的真菌毒素有黄曲霉毒素、玉米赤霉烯酮、单端孢霉烯族毒素、伏马菌素、赭曲霉毒素和杂色曲霉毒素, 其中脱氧雪腐镰刀菌烯醇(DON)是分布最广泛的单端孢霉烯族毒素之一。它存在于多种谷物及其制品中, 如玉米、小麦、大麦、燕麦、麦芽、啤酒和面包中^[2], 其对饲料的污染率和污染水平居镰刀菌毒素之首^[3], DON不但给全球粮食产业造成巨大损失, 而且还严重威胁着人畜健康。DON会导致动物摄食减少、呕吐、体质量减轻、腹泻、免疫损伤、神经功能障碍等副作用^[4-5], 其毒性大小与动物种属有很大关系, 猪对DON最为敏感, 其他动物种属毒性敏感性排序为啮齿类动物>狗>猫>家禽类>反刍动物^[6]。DON的毒性主要通过结合核糖体来抑制蛋白质的合成^[4,7-8], 其毒性作用主要包括急性毒性^[9]、慢性毒性^[10]以及胚胎毒性^[11], DON的毒性作用与12,13-环氧结构密切相关^[4]。如何控制该毒素在食品及饲料中的含量, 减少其进入食物链的程度显得

越来越迫切, 寻找高效降解DON的方法已成为目前学者研究的热点和焦点, 现已发现多种细菌、真菌具有DON降解、转化与吸收作用。

1 DON性质简介

DON, 即脱氧雪腐镰刀菌烯醇(deoxynivalenol), 化学名称为3 α ,7 α ,15-三羟基-12,13-环氧单端孢霉-9-烯-8-酮, 属单端孢霉烯族化合物, 又名呕吐毒素(vomitoxin), 分子式为C₁₅H₂₀O₆, 其结构式如图1所示。

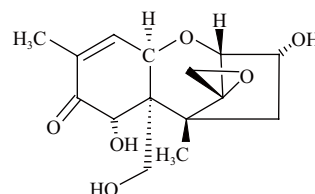


图1 DON的结构式^[9]

Fig.1 Structure of DON^[9]

收稿日期: 2011-12-14

作者简介: 罗金凤(1988—), 女, 硕士研究生, 研究方向为食品安全与质量控制。E-mail: luojf_58@163.com

*通信作者: 丁晓雯(1963—), 女, 教授, 博士, 研究方向为食品安全和保健食品。E-mail: xiaowend@sina.com

DON主要来自于镰刀菌属,尤其是禾谷镰刀菌和黄色镰刀菌代谢产毒,现已证实,拟枝镰刀菌、梨孢镰刀菌等多种镰刀菌株以及头孢菌属、漆斑菌属、木霉属等菌株都可产生该毒素^[12]。该毒素具有较强的热抵抗力和耐酸性,在pH4.0条件下,100、120℃加热60min均不被破坏,170℃加热60min仅少量被破坏;在pH10.0条件下,100℃加热60min部分被破坏,120℃加热30min和170℃加热15min完全被破坏^[13]。因此,一般的食品加工和烹调过程很难破坏DON毒素,只有通过其他方法来降低DON毒素在食品中的含量。

2 DON毒素降解途径

由于DON在粮谷类食物中的高含量、对健康的急性毒性以及各标准的严格限制,要求降低其在食品中的含量显得尤为重要。目前,国内外去除DON的方法主要有采前预防、物理法、化学处理和生物学方法^[14]。生物学方法可以在温和的条件下使真菌毒素的毒力降低,而且对原料的感官性状、适口性等影响极小而备受人们关注。现已发现,部分种属的细菌、真菌具有DON毒素的转化或者吸收能力,使原料中DON毒素含量降低。DON降解的靶位主要有3个,首先是3号位的碳原子,在这里发生的3C—OH氧化、糖苷化作用可以使DON毒性作用降低,3C异构化作用代谢的最终产物还未得到阐明;其次是环氧结构,通过开环氧化使DON得到降解;再次是8号位的氧原子,通过水合作用降解DON;最后通过细菌的结合与吸收作用将DON从目标物中除去。DON生物降解的靶位如图2所示。

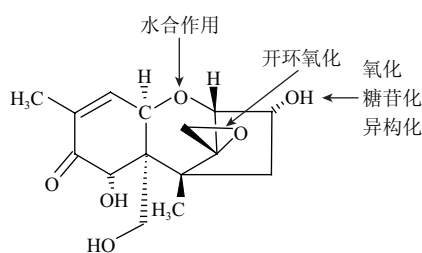


图2 DON毒性生物降解靶位
Fig.2 Biological detoxification target of DON

2.1 3C—OH氧化作用

此条降解途径主要是微生物将DON中的3—OH氧化为3—酮基而实现。Shima等^[15]通过富集培养从土壤中分离得到一株土壤杆菌属的细菌E3-39,30℃厌氧条件下,该菌的胞外提取液能在1d内将培养基中200μg/mL的DON代谢掉,主要形成产物3-酮基-DON,占代谢产物的70%,其结构式如图3所示。

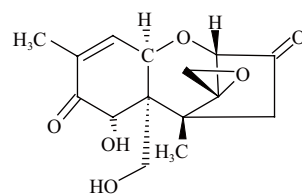


图3 3-酮基-DON的结构式
Fig.3 Structure of 3-keto-DON

3-酮基-DON对小鼠淋巴细胞的免疫毒性仅为DON的1/10,薄层层析色谱检测到该菌代谢DON还存在2种次要产物,Rf分别为0.76和0.38,3-酮基-DON的Rf为0.46。Völkl等^[16]从土壤、谷物、昆虫及其他资源的共1285份微生物培养物中分离一株具有将DON氧化为3-酮基-DON功效的细菌,该菌在20℃条件下保存6个月仍能保持将DON转化为3-酮基-DON的能力,无论是采用0.22μm滤膜过滤还是离心获得的上清液都具有转化的能力,但该菌代谢DON只产生2种代谢产物,主要产物为3-酮基-DON,另一种产物的结构有待进一步鉴定。

2.2 开环氧化作用

DON的毒性作用与12,13-环氧结构密切相关^[17],若能将DON结构当中的环氧结构破坏,对于DON的解毒具有明显作用,目前通过微生物的作用,能实现这一目的。He Ping等^[17]从牛瘤胃液、土壤、以及鸡和猪的肠道中分离得到的微生物可将DON转化为DOM-1,DOM-1与DON相比环氧结构得到了破坏。DOM-1对DNA中BrdU合成的毒性实验表明,其毒性仅为DON的1/55,目前它是DON毒素生物降解得到的毒性最低的产物^[18],DOM-1结构式如图4所示。

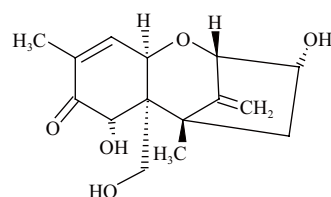


图4 DOM-1的结构式
Fig.4 Structure of DOM-1

Binder等^[19]发现真细菌属DSM 11798细菌同样具有将DON转化为DOM-1的能力,Awad等^[20-21]研究证实,DSM 11798细菌能有效缓解DON对家禽引起的副作用。Fuchs等^[22]在牛瘤肠道中发现了一株真细菌属BBSH 797细菌,BBSH 797被Biomim GmbH公司开发为降低家禽和食用猪饲料中单端孢霉烯族化合物的真细菌,商品名为Mycohix^[23]。动物实验结果表明,Mycofix可以明显降低小猪、母猪和奶牛对DON的不良反应,其机理可能是通过提高瘤胃中菌群的活力来降低毒性反应^[24-25]。Yu Hai等^[26]采用PCR-DGGE方法从鸡肠道中分离了10株具有将

DON转化为DOM-1的菌株,有效提高了筛选具有转化作用菌株的能力。Guan Shu等^[27]从褐色大头鲈(*Ameiurus nebulosus*)肠道中分离得到一株C133细菌,只有在完全培养基中,C133才具有将DON转变为DOM-1的能力,相同培养时间下,基础培养基和LB培养基中没有这种转化能力;单一氮源培养基中,DON的转化能力相对完全培养基的低;低温(4、7.5℃)条件下的保持较低的转化能力,37℃条件下转化能力消失;C133的最适转化pH值为7.2~8.9,但其在pH4.5~10.4之间都具有较高DON转化能力,低于4.5转化能力消失。Li等^[28]研究发现LS100杆菌具有将DON转化为DOM-1的能力,连续9d的动物饲喂实验表明,LSP100杆菌发酵DON产生的DOM-1不会影响饲料的营养,DOM-1不会对饲养猪产生不利影响。

2.3 水合作用

水合作用主要发生在8号位的氧原子上,通过包内酶系的水解形成2个羟基而使DON得以降解。He Chenghua等^[29]以DON毒素为唯一碳源从土壤中分离得到一株塔宾曲霉属细菌NJA-1,它的 β -tubulin基因序列在GenBank中的登录号为DQ902579,将NJA-1与DON作用14d后,它能在体外转化94.4%的DON,可能转化过程如图5所示。

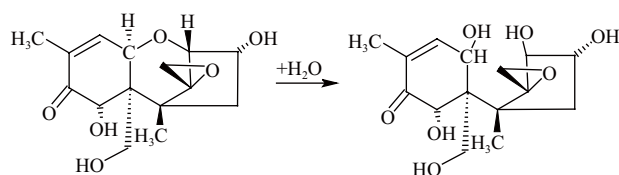


图5 DON水解示意图

Fig.5 Diagram of DON hydrolysis

将5g/kg的NAJ-1菌与5mg/kg的DON和饲料混合饲喂昆明小鼠20d后分别测定小鼠的生长性能、血清生化、血常规和免疫器官的质量等指标,并且观察肝脏、脾脏、十二指肠、胃、肾脏和胸腺的病理变化,结果表明,与5mg/kg的DON组对比,5g/kg的NAJ-1菌能减少DON引起的毒性作用^[30]。

2.4 糖苷化作用

糖苷化作用主要发生在3号位碳源子上,微生物产生的糖苷酶或者乙酰基转移酶可以将葡萄糖基或者乙酰基转移到DON的3号位碳源子上,得到DON-葡萄糖苷酸或者3-ADON而使DON得到降解。Kimra等^[31]在研究镰刀霉时发现的一种乙酰基转移酶,可以将DON转化成3-ADON,3-ADON的毒性比DON低,其结构式如图6所示。

据推测正是由于乙酰基转移酶的存在,才使镰刀霉可以抵抗自身产生毒素的毒性^[31]。Poppenberger等^[32]从阿拉伯芥中分离出UDP-葡萄糖基转移酶可以将一分子葡萄糖基转移到DON的3号位碳源子上,得到DON-葡萄糖苷酸。实验结果表明,DON-葡萄糖苷酸的细胞毒性作用比

DON低^[33]。除了霉菌、阿拉伯芥中存在糖苷化作用外,在酵母菌(*Saccharomyces cerevisiae*)^[34]中也发现了这种防御机制。

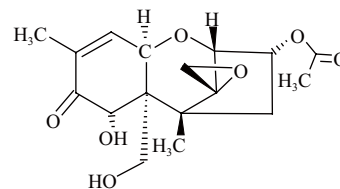


图6 3-ADON的结构式

Fig.6 Structure of 3-ADON

目前,通过基因工程,糖苷化转移酶基因片段已成功克隆进入到宿主细胞并成功表达,具有实际应用价值。Ma Lulin等^[35]从小麦(*Triticum aestivum* L.)变种中获得UDP-葡萄糖基转移酶基因片段(TaUGT3),并将其克隆到大肠杆菌(*Escherichia coli*)DH10B中成功表达,接种这种大肠杆菌的拟南芥提高了对DON的抵抗能力。Khatibi等^[36]将两种3-O-乙酰基转移酶基因片段(FgTRI101和FtTRRI201)克隆到酵母菌(*Saccharomyces cerevisiae*)中表达,有效地将燃料酒精发酵副产物中的高浓度DON转化为3-ADON,这项研究表明转3-O-乙酰基转移酶的酵母细胞可用于商业化的燃料酒精发酵,以降低其副产物中DON的含量。

2.5 3C-异构化作用

3C-异构化作用会使DON形成DON的C3位差向异构体,3-epi-DON,由于3-epi-DON中存在12,13-环氧化基团,其毒性作用仍与DON相当,但3-epi-DON只是一种中间产物,并不是代谢的终产物。Ikunaga等^[37]从小麦地里分离到一株具有DON转化能力的诺卡氏细菌WSN05-2,经质谱和核磁共振分析表明DON代谢转化的产物有2两种,一种为DON C3位差向异构体,3-epi-DON,另一种降解产物的结构未得到阐明。小麦谷粒DON降解能力实验表明,在DON含量为1000μg/mL的基础培养基中接种WSN05-2菌株7d后,DON的转化率达到了90%;10d后两种降解产物均不能被检测到,且上清液乙酸乙酯提取物核磁共振成像分析未发现一种典型的单端孢霉烯族化合物,单端孢霉烯族的骨架结构完全被破坏,这表明3-epi-DON和另一种代谢产物并不是WSN05-2代谢DON的终产物,而只是2种中间产物。

2.6 结合与吸收

微生物也可以将DON吸附到细胞壁、菌丝或者直接吸收进入细胞内,通过这条途径,不但可以降低目标物中DON的含量,而且不用担心产生DON的代谢产物。Shetty等^[38]在研究酵母菌和乳酸菌的毒素吸收结合机制时发现,酵母菌和乳酸菌主要是通过将毒素物质吸收到细胞壁上,吸收能力大小与菌株有直接关系。Styriak等^[39]

发现DON与酵母菌株13培养物作用后,与空白对照组相比,DON浓度降低高达37%。Niderkorn等^[40]研究了29种乳酸菌和丙酸菌对DON的清除作用,其中有6种具有DON结合能力,结合能力大小与细菌浓度和细菌种类有关,同样的细菌浓度,丙酸菌对DON的清除能力低于乳酸菌;活细菌与死细菌对DON的清除能力没有显著性差异($P<0.05$),HPLC没有检测到毒素的代谢产物。Garda-Buffon等^[41]研究丝状真菌米曲霉(*Aspergillus oryzae*)和稻根霉(*Rhizopus oryzae*)深层发酵对DON降解的动力学时发现,这两种真菌利用DON作为碳源,在发酵的前144h内将DON吸收到菌丝体上,是DON含量在培养液中降低的主要途径。

2.7 其他作用

除了上述明确的降解途径之外,还存在着一些尚未被阐明的降解途径。Cheng Bocai等^[42]从59种乳酸菌和杆菌中发现了2株具有清除DON毒素的菌株:枯草芽孢杆菌ZZ和地衣芽孢杆菌DY,这两种菌本身没有DON降解作用,但他们的上清液可以降解DON。两种杆菌在37℃的发酵液DON降解率较高,但温度上升到65~75℃时,其发酵液的降解率急剧降低,100℃时完全失去降解作用,这表明DON降解机制与上清液中存在的一些热敏性物质有关。

3 结 语

DON生物降解途径主要有3C—OH氧化、开环氧化、糖苷化和吸收与结合作用,水合作用和异构化作用研究较少,其DON代谢转化产物结构式和毒性作用还需要做进一步的研究和证实。12,13-环氧结构的开环氧化途径是目前DON代谢产毒较小的途径,但3C—OH氧化和开环氧化途径的进行一般需要严格厌氧环境,实际应用过程中需对环境条件进行严格控制。经基因工程技术改造,糖苷化途径已在转基因植物上成功实现,今后希望通过基因优化来提高子代遗传性状的稳定性,应用于采前预防。吸收与结合途径由于不产生DON的代谢产物,若能筛选出合适的高效率吸收与结合DON作用的菌株,将可作为清除DON的一个良好途径。

目前虽然有很多关于DON生物转化途径的研究,但是由于缺乏转化机制、转化产物的毒性作用、转化反应对粮食和饲料营养价值的系统性评价,因此今后的研究除发掘更多有效的降解途径之外,还应对转化机制、转化产物的结构、稳定性、毒性作用、转化反应对粮食和饲料的营养价值进行深入研究,为实际应用提供可靠的理论依据。

参考文献:

- [1] BENNETT J W, KLICH M. Mycotoxins[J]. Clinical Microbiology Reviews, 2003, 16(3): 497-516.
- [2] GOSWAMI RS, XU J R, TRAIL F, et al. Genomic analysis of host-pathogen interaction between *Fusarium graminearum* and wheat during early stages of disease development[J]. Microbiology, 2006, 152(Pt 6): 1877-1890.
- [3] ERIKSEN G S, ALEXANDER J. *Fusarium* toxins in cereals a risk assessment[J]. Nordic Council of Ministers, Terma Nord, 1998, 508: 7-44.
- [4] ROTTER B A, PRELUSKY D B, PESTKA J J, et al. Toxicology of deoxynivalenol(vomitoxin)[J]. Journal of Toxicol Environmental Health, 1996, 48(1): 1-34.
- [5] SCHLATTER J. Toxicity data relevant for hazard characterization[J]. Toxicology Letters, 2004, 153: 83-89.
- [6] PESTKA J J, SMOLINSKI A T. Deoxynivalenol: toxicology and potential effects on humans[J]. Journal of Toxicology and Environmental Health: Part B, Critical Reviews, 2005, 8(1): 39-69.
- [7] EFSA. Opinion of the scientific panel on contaminants in the food chain on a request from the commission related to deoxynivalenol (DON) as undesirable substance in animal feed[J]. EFSA, 2004, 73: 1-41.
- [8] JAMES J, PESTKA, ZHOU Hui ren, et al. Cellular and molecular mechanisms for immune modulation by deoxynivalenol and other trichothecenes: unraveling a paradox[J]. Toxicology Letters, 2004, 153: 61-73.
- [9] VESONDER R F, CIEGLER A, JENSEN A H. Isolation of the emetic principle from *Fusarium*-infected corn[J]. Applied microbiology, 1973, 26(6): 1008-1010.
- [10] JAMES J, PESTKA. Deoxynivalenol: toxicity, mechanisms and animal health risks[J]. Animal Feed Science and Technology, 2007, 137: 283-298.
- [11] JEANETTE K S, NIELSEN, ANNA C, et al. Deoxynivalenol transport across the human placental barrier[J]. Food and Chemical Toxicology, 2011, 49: 2046-2052.
- [12] MIROCHA C J, PATHRE S V, SCHAUERHAMER B, et al. Natural occurrence of *Fusarium* toxins in feedstuff[J]. Applied Environmental Microbiology, 1976, 32: 553-556.
- [13] WOLF C E, BULLERMAN L B. Heat and pH alter the concentration of deoxynivalenol in an aqueous environment[J]. Food Product, 1998, 61(3): 365-367.
- [14] AWAD W A, GHAREEB K, BOHM J, et al. Decontamination and detoxification strategies for the *Fusarium* mycotoxin deoxynivalenol in animal feed and the effectiveness of microbial biodegradation[J]. Food Additives and Contaminants, 2010, 27(4): 510-520.
- [15] SHIMA J, TAKASE S, TAKAHASHI Y, et al. Novel detoxification of the trichothecene mycotoxin deoxynivalenol by a soil bacterium isolated by enrichment culture[J]. Applied Environmental Microbiology, 1997, 63(10): 3825-3830.
- [16] VÖLKL A, VOGLER B, SCHOLLENBERGER M, et al. Microbial detoxification of mycotoxin deoxynivalenol[J]. Journal of Basic Microbiology, 2004, 44(2): 147-156.
- [17] HE Ping, YOUNG L G, FORSBERG C. Microbial transformation of deoxynivalenol(vomitoxin)[J]. Applied Environmental Microbiology, 1992, 58(12): 3857-3863.
- [18] ERIKSEN G S, PETTERSSON H, LUNDH T. Comparative cytotoxicity of deoxynivalenol, nivalenol, their acetylated derivatives and de-epoxy metabolites[J]. Food and Chemical Toxicology, 2004,

- 42: 619-624.
- [19] BINDER E M, BINDER J, ELLEND N, et al. Microbiological degradation of deoxynivalenol and 3-acetyl-deoxynivalenol[C]// MIRAGLIA M, van EGMOND H, BRERA C, et al. Mycotoxins and phycotoxins-developments in chemistry, toxicology and food safety. Fort Collins: Alaken, Inc, 1998: 279-285.
- [20] AWAD W A, BÖHM J, RAZZAZI-FAZELI E, et al. Effects of deoxynivalenol on general performance and electrophysiological properties of intestinal mucosa of broiler chickens[J]. Poultry Science, 2004, 83: 1964-1972.
- [21] AWAD W A, RAZZAZI-FAZELI E, BÖHM J, et al. Effect of addition of a probiotic microorganism to broiler diets contaminated with deoxynivalenol on performance and histological alterations of intestinal villi of broiler chickens[J]. Poultry Science, 2006, 85: 974-979.
- [22] FUCHS E, BINDER E M, HEIDLER D, et al. Structural characterization of metabolites after the microbial degradation of type A trichothecenes by the bacterial strain BBSH 797[J]. Food Additives and Contaminants, 2002, 19(4): 379-386.
- [23] HE Jianwei, ZHOU Ting, CHRISTOPHER Y J, et al. Chemical and biological transformations for detoxification of trichothecene mycotoxins in human and animal food chains: a review[J]. Trends in Food Science & Technology, 2010, 20: 67-76.
- [24] HOCHSTEINER W, SCHUH M, LUGER K, et al. Influence of mycotoxins contaminated feed blood parameters and milk production[J]. Berliner und Münchener Tierärztliche Wochenschrift, 2000, 113: 14-21.
- [25] PLANK B, SCHUH M, BINDER E M, et al. Investigations on the effect of two feed additives, Biomin (R) BBSH 797 and Mycofix Plus (R) 3.E, as detoxificants of DON contaminated feed of piglets[J]. Wiener Tierärztliche Monatsschrift, 2009, 96(3/4): 55-71.
- [26] YU Hai, ZHOU Ting, GONG Jianhua, et al. Isolation of deoxynivalenol-transforming bacteria from the chicken intestines using the approach of PCR-DGGE guided microbial selection[J]. BMC Microbiology, 2010, 10: 182-186.
- [27] GUAN Shu, HE Jianwei, CHRISTOPHER J Y, et al. Transformation of trichothecene mycotoxins by microorganisms from fish gigesta[J]. Aquaculture, 2009, 290: 290-295.
- [28] LI X Z, ZHU C, de LANG C F M, 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 Additives and Contaminants: Part A, 2011, 28(7): 894-901.
- [29] HE Chenghua, FAN Yanhong, LIU Guofang, et al. Isolation and identification of a strain of *Aspergillus tubingensis* with deoxynivalenol biotransformation capability[J]. International Journal of Molecular Sciences, 2008, 9: 2366-2375.
- [30] 何成华. 脱氧雪腐镰刀菌烯醇毒性和生物转化的研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2007.
- [31] KIMURA M, KANEKO I, KOMIYAMA M, et al. Trichothecene 3-O-acetyltransferase protects both the producing organism and transformed yeast from related mycotoxins[J]. Journal of Biological Chemistry, 2007, 273: 1654-1661.
- [32] POPPENBERGER B, BERTHILLER F, LUCYSHYN D, et al. Detoxification of the *Fusarium* mycotoxin deoxynivalenol by a UDP-glucosyltransferase from *Arabidopsis thaliana*[J]. Journal of Biological Chemistry, 2003, 278: 47905-47914.
- [33] WU Xianai, MURPHY P, CUNNICK J, et al. Synthesis and characterization of deoxynivalenol glucuronide: its comparative immunotoxicity with deoxynivalenol[J]. Food and Chemical Toxicology, 2007, 45: 1846-1855.
- [34] ADAM G, MITTERBAUER R, RADITSCHNIG A, et al. Molecular mechanisms of deoxynivalenol resistance in the yeast *Saccharomyces cerevisiae*[J]. Mycotoxin Research, 2001, 17(9): 19-23.
- [35] MA Lulin, SHANG Yi, CAO Aizhong, et al. Molecular cloning and characterization of an up-regulated UDP-glucosyltransferase gene induced by DON from *Triticum aestivum* L. cv. Wangshuibai[J]. Molecular Biology Reports, 2010, 37(2): 785-795.
- [36] KHATIBI P, MONTANTI J, NGHIEM N, et al. Conversion of deoxynivalenol to 3-acetyldeoxynivalenol in barley-derived fuel ethanol co-products with yeast expressing trichothecene 3-O-acetyltransferases[J]. Biotechnology for Biofuels, 2011, 4: 26-38.
- [37] IKUNAGA Y, SATO I, GROND S, et al. *Nocardioides* sp. strain WSN05-2, isolated from a wheat field, degrades deoxynivalenol, producing the novel intermediate 3-epi-deoxynivalenol[J]. Applied Microbiology and Biotechnology, 2011, 89(2): 419-427.
- [38] SHETTY P H, JESPESEN L. *Saccharomyces cerevisiae* and lactic acid bacteria as potential mycotoxin decontaminating agents[J]. Trends in Food Science & Technology, 2006, 17: 48-55.
- [39] STYRIAK I, KONKOVA E, KMEC V, et al. The use of yeast for microbial degradation of some selected mycotoxins[J]. Mycotoxin Research, 2011, 17(1): 24-27.
- [40] 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.
- [41] GARDA-BUFFON J, BADIALE-FURLONG E. Kinetics of deoxynivalenol degradation by *Aspergillus oryzae* and *Rhizopus oryzae* in submerged fermentation[J]. Journal of the Brazilian Chemical Society, 2010, 21(4): 710-714.
- [42] CHENG Bocai, WAN Cuixiang, YANG Shiliang, et al. Detoxification of deoxynivalenol by *Bacillus* strains[J]. Journal of Food Safety, 2010, 30: 599-614.