

酵母生物脱毒的研究进展

胡晓清^{1,2}, 褚召娟¹, 张继祥², 刘帅², 易勇², 孙春阳², 王栋²

(1. 江南大学食品科学与技术国家重点实验室, 生物工程学院, 江苏无锡 214122)

(2. 山东圣琪生物有限公司, 山东济宁 271537)

摘要: 酵母是广泛用于食品酿造及工业生物技术的一大类单细胞真核微生物, 广泛用于生产乙醇、蛋白和有机酸等。近年研究揭示, 酵母还具有生物脱毒的功能, 在饲料、食品和环保领域具有重要应用前景。有基于此本文阐述了酵母生物脱毒最新研究进展, 首先介绍了饲料和食品中常见真菌毒素的危害及不同脱毒方法, 然后综述了不同酵母菌株对各种真菌毒素(黄曲霉毒素、赭曲霉毒素、棒曲霉毒素、玉米赤霉烯酮和脱氧雪腐镰刀菌烯醇)的减毒或消除作用, 归纳了酵母 β -葡聚糖及糖蛋白参与的生物脱毒机制, 同时介绍了酿酒酵母和解脂耶氏酵母对细菌内毒素的脱毒作用及可能机制, 最后还介绍了酵母对重金属及其他污染物的脱毒作用及可能机制, 并就酵母生物脱毒的研究方向做了展望。

关键词: 酵母; 真菌毒素; 细菌内毒素; 重金属; 脱毒; 机制

文章编号: 1673-9078(2017)12-272-277

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2017.12.041

Advances on Yeast Biological Detoxification

HU Xiao-qing^{1,2}, CHU Zhao-juan¹, ZHANG Ji-xiang², LIU Shuai², YI Yong², SUN Chun-yang², WANG Dong²

(1.State Key Laboratory of Food Science and Technology, Biotechnology School, Jiangnan University, Wuxi 214122, China) (2.Shandong Sunkeen Biological Company, Jining 271537, China)

Abstract: Yeast is a large class of unicellular eukaryotic microorganism and widely used in food brewing and industrial biotechnology for the production of ethanol, protein, and organic acid. Recent studies have revealed that yeast also has the function biological detoxification and the application prospects in the field of environmental protection, food and feed. Based on this, the review summarized the latest research advances on yeast biological detoxification. The harmfulness of common mycotoxins in food and feed and the detoxification methods were introduced first and then the application of different yeast strains in attenuating or eliminating mycotoxins (aflatoxin, ochratoxin A, patulin, zearalenone, and deoxynivalenol) was summarized. The mechanism of biological detoxification mediated by yeast β -glucan and glycoprotein was introduced, and the detoxification effect of *Saccharomyces cerevisiae* and *Yarrowia lipolytica* on bacterial endotoxin and the possible mechanism were also summarized. Finally, the detoxification effect of yeast on heavy metals and other pollutants and the possible mechanism were introduced, and the research of yeast biological detoxification was prospected.

Key words: yeast; mycotoxin; bacterial endotoxin; heavy metal; detoxification; underlying mechanism

酵母是人类利用较早的一大类真核微生物, 酵母中的很多菌株, 如酿酒酵母(*Saccharomyces cerevisiae*)广泛用于酿造和其他工业生物行业, 除了生产有益代谢产物如乙醇、各种酶类, 酵母也是研究真核生物的模式菌株, 此外, 酵母还具有脱毒作用, 近年研究不断揭示酵母细胞对越来越多的有毒有害物质具有减毒甚至消除作用, 引起了食品、饲料、制药和环保等各领域学者的关注。一方面发现酵母对真菌毒素、细菌内毒素及其他有害有毒物质具有减毒或脱毒作用。食品和饲料中常见的真菌毒素有: 黄曲霉毒素(aflatoxin,

收稿日期: 2017-07-12

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(30471225)

作者简介: 胡晓清(1977-), 男, 博士, 副教授, 研究方向: 微生物结构修饰与基因调控

AF)、赭曲霉毒素(ochratoxin A, OTA)、玉米赤霉烯酮(zearalenon, ZEA)、脱氧雪腐镰刀菌烯醇(deoxynivalenol, DON)、T-2毒素、伏马菌素(fumonisin, FB)等, 每一种毒素均可由好几种真菌产生, 这些毒素的生物法去除具有重要应用前景; 细菌内毒素也是食品、药品中分布广泛的污染源, 某些酵母细胞对其具有脱毒效果; 此外酵母在对环境重金属包括钒、铜和镉以及有机污染物也展现了一定的减毒效果。另外一方面揭示了酵母脱毒作用的分子机制, 多项研究表明酵母细胞壁中的 β -葡聚糖及糖蛋白参与了生物脱毒过程, 酵母细胞壁也作为高效脱毒剂得到了应用, 这些研究成果对于饲料和食品安全控制具有重要意义。有基于此, 笔者综述了酵母在生物脱毒方面的最新进展, 具体如下。

1 酵母对真菌毒素的脱毒作用及机理

1.1 真菌毒素危害及其脱毒方法

真菌毒素是真菌次生代谢产物,广泛存在于谷物和饲料中,全球有25%谷物受到各种真菌毒素污染。2013年,Repedkiene等报道^[1]储存条件下谷物被真菌重度污染,达 7.5×10^5 CFU/g,真菌种类众多,可分离出24个属和81个种,最常见的为青霉属(*Penicillium*),占24%;链孢菌(*Fusarium*)次之,占18%;结合菌(*Zygomycetes*)占16%;皮盘菌科(*Demateaceae*)占14%;曲霉属(*Aspergillus*)占9%^[2]。大多数真菌可合成一种以上毒素,合成最多次生代谢产物的是链格孢菌(*Alternaria alternata*),可产生9种化合物,其中包括细交链孢菌酮酸、棒曲霉素。在不同培养基上,真菌所产毒素含量不一,如灰黄青霉(*Penicillium griseofulvum* Dierckx)分别污染麦芽汁琼脂、麸皮、面粉和燕麦后,OTA分别达5.30、10.50、10.80和14.50 $\mu\text{g}/\text{kg}$,棒曲霉素分别达10.00、8.00、6.50和7.00 $\mu\text{g}/\text{kg}$ ^[2]。

真菌毒素对人畜健康危害极大,据估计,至少有300种真菌代谢产物对动物和人类有潜在毒性^[3],其中有些真菌毒素是致癌物质,如黄曲霉毒素B1(AFB1)可促进DNA-鸟嘌呤加和物的形成,从而诱发肝癌。多种霉菌毒素协同作用对动物健康的危害作用远大于任何一种毒素单独危害^[4],通常情况下,几种霉菌毒素往往会同时存在于饲料原料和配合饲料中,如ZEA和AFB是我国饲料原料和配合饲料中最为常见,因此真菌毒素对饲料原料损害极大。真菌毒素污染发生在所有的食品及饲料的生产、储运和销售环节。据估计,亚太地区配合饲料每年在1.6亿t以上,由此推算约有4000万t饲料被霉菌毒素污染,造成的经济损失高达100亿美元,如中国每年仅养猪业就损失50亿人民币以上。

真菌毒素的脱毒包括减少、破坏甚至去除真菌毒素。生物脱毒法利用微生物生长过程的代谢产物或细胞进行脱毒,方式包括微生物降解和微生物吸附^[5]。其优点是特异性强、过程温和、不使用有害化学试剂、不导致营养物质大量流失^[6]。酵母、细菌、霉菌、放线菌和藻类均被报道用于清除或降解饲料和食品中的真菌毒素^[7]。如Bata和Lásztity^[8]研究表明,酵母对真菌毒素具有减毒作用,但不同菌株对毒素敏感性不同;Devegowda报道酵母细胞壁中葡甘露聚糖可作为保护家禽免遭霉菌毒素侵害的成分^[9],其作为霉菌毒素吸附剂在肉鸡^[10]、仔猪^[11]、蛋鸡^[11]、鸭^[12]和马^[13]等畜禽

上具有吸附霉菌毒素、缓解动物中毒症状的功效,而且添加量少、吸附霉菌毒素种类多、在胃肠道中吸附快和环境友好。以下加以详细介绍。

1.2 酵母的脱毒作用

1.2.1 酵母对AF脱毒作用

Pasha等考察在奶牛饲料添加酵母泥后AF的脱毒情况。奶牛粉三组:A(无AF污染、无酵母泥添加);B(饲料污染500 $\mu\text{g}/\text{kg}$ 的AFM1、无酵母泥添加);C(饲料污染500 $\mu\text{g}/\text{kg}$ 的AFM1、酵母泥添加)。喂养哺乳期的萨希瓦尔牛14d后结果显示,牛奶中残留的AFM1分别为 2.87 ± 0.76 、 15.51 ± 2.63 和 12.74 ± 1.02 $\mu\text{g}/\text{kg}$;此外进食量也有显著变化,分别为 170.10 ± 1.98 kg、 163.37 ± 2.27 kg、 177.00 ± 1.99 kg。结果表明酵母泥可对降低AF水平,并提高动物摄食量和产奶量,还可改善奶质量(脂质、总固体量均有提高)^[14]。Repedkiene等针对3种酵母菌株:*S. cerevisiae* S.1.5(T)、美极梅奇酵母菌(*Metschnikowia pulcherrima*) M.1和马克思克鲁维酵母(*Kluyveromyces marxianus*) K.7.1(T)菌株,研究显示3株菌可完全消除面粉中痕量AF,此外3株菌还可将猪混合草料中0.003 mg/kg AF完全消除^[2]。

研究显示酵母细胞壁在脱毒中发挥了重要作用。Wu等^[15]发现酵母细胞壁作为AF生物吸附剂,可阻止AF进入人类和动物肠道。Firmin等研究了改性酵母细胞壁提取物YCW对AFB1和AFM1在奶羊粪便、尿液和乳品中分布的影响。结果显示:在饲料中添加YCW可降低AFB1吸收,增加粪便中母羊AFB1和AFM1的排泄,增幅达156%^[16]。Sun等调查了AF污染(20 $\mu\text{g}/\text{kg}$)的玉米喂食幼猪后毒素及中毒情况,结果显示饲料中添加2 g/kg酵母细胞壁提取物(富含 β 葡聚糖和甘露聚糖)后,可降低AF,并改善猪进食量和生长^[17]。

1.2.2 酵母对OTA脱毒作用

Schatz-mayr等^[18]从酵母中筛选出菌株,可通过裂解苯丙氨酸基团(phenylalanine group)而使OTA失活。Caridi等^[19]调查在葡萄酒酿造中20株狭义酵母(*Saccharomyces sensu stricto*)去除OTA的性能。酵母接种于天然葡萄汁(污染1.58 ng/mL的OTA),另外一组中酵母接种后又补加OTA达7.63 ng/mL。25 $^{\circ}\text{C}$ 发酵90 d,结果显示二组OTA均有降低,前者降幅达68.50%,后者降幅达78.20%。

酵母细胞壁同样对OTA脱毒发挥着作用。Ringot等研究了OTA体外吸附效果,考察了三种酵母副产物:含16%酵母细胞壁酒糟EX16(干物质含量56%),

纯化的酵母 β -葡聚糖 BETA (干物质含量 95%) 和干燥的酵母细胞壁成分 LEC (干物质含量 97.60%), 前两种为酵母工业废弃物^[20]。结果显示 25 °C 下, EX16 可吸附 32~43% 的 OA, BETA 可吸附 37~51%, 而 LEC 最有效, 可吸附 95~100%^[20]。结合 4~37 °C 吸附模型分析认为, LEC 吸附过程是自发进行的 (ΔG^0 为负), 且为放热反应 (ΔH^0 为负)。有效的 LEC 和 OA 吸附包括极性和非极性的非共价互作, 以及溶剂水分子的合并重组。OTA 在 EX16 和 BETA 吸附中 ΔS^0 为负, 显示固液界面的随机减少, 然而对于 LEC 吸附毒素, ΔS^0 为正, 显示疏水相互作用, 以及本体溶液中水分子自由度的增加^[21]。

酵母细胞壁对 OTA 的去除归因于酵母细胞壁像海绵吸附 OTA。其吸附效率在不同酵母菌株间差别较大, 酵母细胞壁甘露糖蛋白很可能发挥着重要作用^[19]。

1.2.3 酵母对棒曲霉毒素脱毒作用

水果中扩展青霉 (*Penicillium expansum*) 生长会导致棒曲霉毒素污染。利用红冬孢酵母 (*Rhodosporidium kratochvilovae*) LS11 菌株将棒曲霉毒素 (Patulin) 转化为低毒的脱氧棒曲霉毒素 (Desoxypatulinic)^[22]。当棒曲霉毒素和 *R. kratochvilovae* LS11 菌株在有氧条件下共培养时, 薄层层析分析发现棒曲霉毒素点消失, 同时出现 2 个新点, 其中 1 个随时间延长而消失, 2 个新点经核磁共振解析发现为棒曲霉毒素降解产物脱氧棒曲霉毒素。用含有 ¹³C-标记的棒曲霉毒素培养 LS11 菌株时, 发现 ¹³C 转移到脱氧棒曲霉毒素, 证实了脱氧棒曲霉毒素源自棒曲霉毒素。脱氧棒曲霉毒素源于内酯环的水解和巯基反应基团的缺失, 不会和含巯基的 GSH 反应, 因此具有更低毒性, 该研究代表着一种新的生物降解途径。Zhu 等^[23]证明, 一种海洋红酵母 (*Rhodosporidium paludigenum*) 中的酶可将棒曲霉毒素转化为脱氧棒曲霉毒素酸 (desoxypatulinic acid), 从而降低其毒性。

1.2.4 酵母对 ZEA 脱毒作用

针对面粉中 0.15 mg/kg ZEA, *S. cerevisiae* S.1.5(T) 菌株可将其降低至 0.02 mg/kg, *M. pulcherrima* M.1 和 *K. marxianus* K.7.1 (T) 则可完全消除。针对混合猪草料中 0.40 mg/kg ZEA, *K. marxianus* K.7.1 (T) 可降低至 0.03 mg/kg, 其余两株可完全消除^[2]。体外实验结合 Hill 氏方程发现, ZEA 吸附能力与酵母细胞壁组分密切相关^[24]。分离纯化后的 *S. cerevisiae* 细胞壁吸附 ZEA 效率近 30%, 可降低其在消化道的生物可利用度 (bioavailability)。

1.2.5 酵母对 DON 及白僵菌素脱毒作用

Meca 等^[25]发现 4 株 *S. cerevisiae* 菌株 LO9、YES、

A34、A17 所产的酶均可降低玉米粉中白僵菌素。Repedkiene 等报道 *S. cerevisiae* S.1.5(T)、*M. pulcherrima* M.1、*K. marxianus* K.7.1 (T) 可将面粉中 0.65 mg/kg DON 分别降低至 0.10、0.12 和 0.05 mg/kg, 将混合猪草料中 0.40 mg/kg AF 分别降低至 0.13、0.08 和 0.10 mg/kg^[2]。

1.3 酵母对真菌毒素脱毒机理

多项研究显示, 微生物细胞壁在真菌毒素脱毒中扮演着重要角色, β -葡聚糖在其中扮演着重要角色。 β -葡聚糖是一种具有特殊结构的多糖, 通常由 10~20 个单糖组成, 分子量为 6500~7500, 大多数为水不溶性或胶质颗粒。不同于其他糖类中单糖之间以 β -1,4 键结合, β -葡聚糖中单糖之间以 β -1,3 键和 β -1,6 键相连, 由于这种特殊键结方式, 加上分子氢键的存在, β -葡聚糖呈螺旋形分子结构, 该构型可与多种真菌毒素形成特异的互补构造, 从而结合毒素并通过肠道排出体外^[24]。葡聚糖不同三维结构也影响着吸附过程, 碱性 β -D-葡聚糖吸附效率为 16%, 而碱性不溶性葡聚糖吸附效率为 50%, 碱性不溶性葡聚糖易形成单股或三股螺旋线, 后者为吸附 ZEA 最有利的结构。此外, β -葡聚糖可通过激活酚氧化酶系统, 将酚氧化酶原氧化成酚氧化酶, 后者特异性降解霉菌毒素, 从而起到降低甚至消除毒素的效果。

因此, β -D-葡聚糖可添加于食品和饲料中, 用作肠道中霉菌毒素的吸附剂, 且其排泄后无环境危害性^[24]。Raju 和 Vevegowda^[26]研究表明, 葡甘露聚糖可降低单独和复合霉菌毒素 AF、OTA 和 T-2 毒素对肉鸡生产性能的不利影响。葡甘露聚糖能保护猪免受呕吐毒素、FB 和 ZEA 等毒素的影响, 使得血清中免疫球蛋白的含量维持在正常水平^[10]。Swamy 等^[1]在污染单端孢霉毒素的饲料中添加葡甘露聚糖, 可显著改善毒素对仔猪的不良影响, 且可提高蛋品质^[11]。

此外, 糖蛋白也可能参与了细胞壁对毒素的吸附, 酵母细胞壁中的糖蛋白主要由甘露寡糖与蛋白质结合而成, 这些糖蛋白可黏附细菌荚膜, 激发机体的多级免疫反应, 起到保护机体的作用^[27]。

2 酵母对细菌内毒素的脱毒作用及可能机制

内毒素又称脂多糖 (lipopolysaccharide, LPS), 在大多数革兰氏阴性菌外膜分布数以百万计。通过激活宿主细胞内 TLR4 受体信号, LPS 可促进炎性细胞分泌多种细胞因子并引发强烈的免疫反应, 可引起动物多种症状诸如发热、内毒素休克、多器官功能障碍乃至死亡。是食品、饲料及药品中常见细菌源危害

因子。Shen 等^[28]从发酵食品中分离多株酵母菌,均有一定程度的 LPS 降解潜能。该研究首先通过 KDO 定量方法检测酵母对 LPS 分子的吸附能力,从发酵食品中筛选到 LPS 吸附能力菌株若干,与 1.00 mg/mL 来源于 *E. coli* O111:B4 的 LPS 共存后, *S. cerevisiae* BY4742 使 LPS 含量近 30%,而解脂耶氏酵母 (*Yarrowia lipolytica*) CLIB122 可使 LPS 水平降低约 70%,证实酵母细胞与 LPS 共存一段时间后,会降低 LPS 含量^[28]。其中最强者为 *Y. lipolytica* CSW 菌株。

为了确定 LPS 的减毒是因为黏附于酵母细胞表面,还是由于被降解,借助荧光追踪法观察 FITC-LPS 与酵母细胞共存体系。在一定浓度 FITC-LPS 作用下, *Y. lipolytica* 细胞表面有明显的 LPS 附着现象,而 *S. cerevisiae* BY4742 细胞周围则没有检测到荧光信号。*Y. lipolytica* 体系中 LPS 降低幅度较大(约 70%),与其细胞表面的吸附特性有关^[28]。推测 *S. cerevisiae* BY4742 对 LPS 有一定脱毒作用(<30%)可能与某种未知作用有关,而根据筛选出的不同 LPS 吸附强度的菌株中均有酵母菌株出现,且在一定 LPS 浓度共存条件下均有美蓝着色反应,可以推测 LPS 是在与酵母相互作用一段时间后, LPS 可能被酵母分泌的未知物质降解,所以表现出不同程度的含量降低现象。

为通过更多信息揭示 LPS 脱毒机制,以已公布的 *S. cerevisiae* S288C 全基因组序列为参考,通过 LPS 添加与不添加的两种培养体系下的细胞转录组测序结果的信息分析,获得了 LPS 诱导 *S. cerevisiae* 细胞产生 595 个差异表达基因,筛选样品间差异表达水平显著的基因。结果显示差异表达的基因编码蛋白主要参与了细胞膜壁结构及细胞外围区域组成、细胞抗氧化活性功能、类脂氧化还原代谢过程等生物学功能,以及参与糖物质代谢、过氧化物酶体合成和能量代谢等途径,为进一步揭示酵母对 LPS 脱毒机制奠定理论基础^[28]。

3 酵母对重金属及其他污染物的脱毒作用及可能机制

钒是在城市、工业区及医院常见环境污染物质。粗糙脉孢菌 (*Neurospora crassa*) 和白假丝酵母 (*Candida albicans*) 对环境中的钒有一定抗性,归因于磷酸传输途径的缺失,导致摄取受阻^[29]。而 *S. cerevisiae* 对钒具有一定脱除作用,其原因不是抑制钒摄取,而是在胞内消除钒。在较低钒浓度下,某些 *S. cerevisiae* 菌株可启动脱毒机制,在胞内把钒转化为氧钒,并分泌至胞外。但在较高钒浓度下,钒摄取速率大于转化速率,

导致钒在胞内逐渐积累。Bisconti 报道 3 株 *S. cerevisiae* 具有不同的钒抗性,但仅有 1 株可将钒还原为氧钒,其他 2 株不能转化,所以仍积累钒酸盐^[30]。但是,重金属的减毒也有其他不同机制,比如通过细胞壁组分进行诱捕、改变重金属摄取效率、通过分泌物在胞外螯合和淀积、或通过金属硫蛋白和植物络合素 (phytochelatins) 在胞内螯合^[31,32]。

此外,微生物对钒酸盐的脱除伴随着其他表型改变,如细胞膜和细胞壁的差异,分泌转化酶的糖基化不足,产孢缺陷和对潮霉素和洗涤剂敏感性的增强^[33],这位揭示脱毒机制提供了线索。这表明参与对抗钒酸盐的蛋白质可能参与了分泌途径的组织 and 改变,高尔基体也显示在分泌途径存在钒酸盐敏感的靶标。微生物对钒脱毒方式存在两个假说:其一是野生菌高尔基体可聚集毒性钒或其靶标,因此钒的减毒归因于高尔基体囊泡的增殖,从而导致细胞质中钒的稀释;模型之二是钒耐受性源自分泌囊泡的融合缺陷,后者可能归因于膜受体改变^[31]。

除了钒,过量的铜和镉也是重要的环境污染物质。*S. cerevisiae* 菌株对二者具有一定减毒作用,金属硫蛋白同源蛋白 Cup1 和谷胱甘肽是参与铜和镉减毒的两个关键组分。通过对不同谷胱甘肽合成量和 Cup1 表达量的酵母研究表明,过量 Cup1 蛋白可缓解铜损伤,而不论单个或多个 Cup1 基因,酵母对铜的脱毒能力均不依赖谷胱甘肽。但过量铜会导致谷胱甘肽的氧化和耗竭^[34]。*S. cerevisiae* 的 Cup1 蛋白还参与了镉的减毒,此外谷胱甘肽发挥了不可或缺的作用,即使无 Cup1 表达但有谷胱甘肽合成,酵母也能耐受高浓度镉^[34]。

此外,酵母对有机污染物的减毒或降解也有报道^[35]。Sassi 等从摩洛哥橄榄油厂分离出 105 株酵母菌,针对其中 9 株评估有机污染物毒性去除能力。结果表明,至少有 4 株酵母可有效地降低废水的毒性,最佳菌株为白假丝酵母 *Candida*。废水中的总酚可降低 44%,化学需氧量降低 63%。经处理后的废水可用于灌溉用水,且获得较多酵母生物量^[35]。

4 展望

如何针对霉菌饲料寻求一种有效、高效的脱毒策略具有重要应用前景,在饲料中培养酵母细胞,或添加酵母及其细胞壁提取物作为毒素吸附剂,将有助于减少饲料中真菌毒素、内毒素及各种重金属污染。进一步揭示细胞壁中不同结构 β -葡聚糖对脱毒效果的作用,将有助于选育更加高效的具有特异 β -葡聚糖结构的酵母,开发更为有效的毒素吸附剂和降解剂。此外,

酵母对其他有毒有害物质的脱毒作用有待进一步评价,而且针对不同结构的毒素分子或污染物,开发多重酵母复合提取物是未来发展趋势,将为实现酵母的高值化利用提供理论支撑,在饲料、食品和环保行业具有重要应用价值。

参考文献

- [1] Swamy H V, Smith T K, MacDonald E J. Effects of feeding blends of grains naturally contaminated with *Fusarium* mycotoxins on brain regional neurochemistry of starter pigs and broiler chickens [J]. *Journal of Animal Science*, 2004, 82(7): 2131-2139
- [2] Repedkiene J, Levinskaite L, Paskevicius A, et al. Toxin-producing fungi on feed grains and application of yeasts for their detoxification polish [J]. *Journal of Veterinary Sciences*, 2013, 16(2): 391-393
- [3] Heidler D, Schatzmayr G. A new approach to managing mycotoxins [J]. *World Poult Reed*, 2003, 19: 12-15
- [4] Swamy H V, Smith T K, Karrow N A, et al. Effects of feeding blends of grains naturally contaminated with *Fusarium* mycotoxins on growth and immunological parameters of broiler chickens [J]. *Poultry Science*, 2004, 83(4): 533-543
- [5] 孙建和,陆苹,顾红香.真菌毒素的微生物脱毒技术[J].*微生物学通报*,2003,30(1):60-63
SUN Jian-he, LU Ping, GU Hong-xiang. Detoxification of mycotoxin by microorganisms [J]. *Microbiology*, 2003, 30(1): 60-63
- [6] 曹铭,樊明涛.黄曲霉毒素脱除技术研究进展[J].*食品与机械*,2015,31(1):260-264
CAO Ming, FAN Ming-tao. Progress on aflatoxin removing technique [J]. *Food and Machinery*, 2015, 31(1): 260-264
- [7] Hathout A S, Aly S E. Biological detoxification of mycotoxins: a review [J]. *Annals of Microbiology*, 2014, 64(3): 905-919
- [8] Bata A, Lásztity R. Detoxification of mycotoxin-contaminated food and feed by microorganisms [J]. *Trends in Food Science & Technology*, 1999, 10(6-7): 223-228
- [9] Devegewda G, Araving B I R, Morton M G. *Saccharomyces cerevisiae* and mannanoligosaccharides to counteract aflatoxicosis in broilers [J]. *Proceedings of the Australian Poultry Science Symposium*, Sydney, 1996
- [10] Swamy H V, Smith T K, Cotter P F, et al. Effects of feeding blends of grains naturally contaminated with *Fusarium* mycotoxins on production and metabolism in broilers [J]. *Poultry Science*, 2002, 81: 966-975
- [11] Chowdhury S R, Smith T K. Effects of feeding blends of grains naturally contaminated with *Fusarium* mycotoxins on performance and metabolism of laying hens [J]. *Poultry Science*, 2004, 83(11): 1849-1856
- [12] Chowdhury S R, Smith T K, Boermans H J, et al. Effects of feeding blends of grains naturally contaminated with *Fusarium* mycotoxins on performance, metabolism, hematology, and immunocompetence of ducklings [J]. *Poultry Science*, 2005, 84: 1179-1185
- [13] Raymond S L, Smith T K. Effects of feeding a blend of grains naturally contaminated with *Fusarium* mycotoxins on feed intake, metabolism, and indices of athletic performance of exercised horses [J]. *Journal of Animal Science*, 2005, 83(6): 1267-1273
- [14] Pasha T N. Detoxification of aflatoxin by yeast sludge in the feed of dairy cattle and its impact on increased milk production [J]. *International Journal for Agro Veterinary and Medical Sciences*, 2008, 2: 18-26
- [15] Wu Q, Jezkova A, Yuan Z, et al. Biological degradation of aflatoxins [J]. *Drug Metabolism Reviews*, 2009, 41: 1-7
- [16] Firmin S, Morgavi D P, Yiannikouris A, et al. Effectiveness of modified yeast cell wall extracts to reduce aflatoxin B1 absorption in dairy ewes [J]. *Journal of Dairy Science*, 2011, 94(11): 5611-5619
- [17] Sun Y, Park I, Guo J, et al. Impacts of low level aflatoxin in feed and the use of modified yeast cell wall extract on growth and health of nursery pigs [J]. *Animal Nutrition*, 2015, 1(3): 177-183
- [18] Schatzmayr G, Heidler D, Fuchs E, et al. Microorganism for biological detoxification of mycotoxins, namely ochratoxins and/or zearalenons, as well as method and use thereof: United States Patent, US20040843305 [P] 2004-10-21
- [19] Caridi A, Galvano F A T, Ritieni A, et al. Ochratoxin A removal during winemaking [J]. *Enzyme & Microbial Technology*, 2006, 40(1): 122-126
- [20] Ringot D, Lerzy B, Chaplain K, et al. *In vitro* biosorption of ochratoxin A on the yeast industry by-products: comparison of isotherm models [J]. *Bioresource Technology*, 2007, 98(9): 1812-1821
- [21] Ringot D, Lerzy B, Bonhoure J P, et al. Effect of temperature on *in vitro* ochratoxin A biosorption onto yeast cell wall derivatives [J]. *Process Biochemistry*, 2005, 40(9): 3008-3016
- [22] Castoria R, Mannina L, Duran-Patron R, et al. Conversion of

- the mycotoxin patulin to the less toxic desoxyapatulinic acid by the biocontrol yeast *Rhodospiridium kratochvilovae* strain LS11 [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2011, 59(21): 11571-11578
- [23] Zhu R, Feussner K, Wu T, et al. Detoxification of mycotoxin patulin by the yeast *Rhodospiridium paludigenum* [J]. Food Chemistry, 2015, 179: 1-5
- [24] Yiannikouris A, Francois J, Poughon L, et al. Alkali extraction of beta-d-glucans from *Saccharomyces cerevisiae* cell wall and study of their adsorptive properties toward zearalenone [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2004, 52(11): 3666-3673
- [25] Meca G, Ritieni A, Manes J. Influence of the heat treatment on the degradation of the minor *Fusarium* mycotoxin beauvericin [J]. Food Control, 2012, 28: 13-18
- [26] Raju M V, Devegowda G. Influence of esterified-glucomannan on performance and organ morphology, serum biochemistry and haematology in broilers exposed to individual and combined mycotoxicosis (aflatoxin, ochratoxin and T-2 toxin) [J]. British Poultry Science, 2000, 41(5): 640-650
- [27] 侯然然. 酵母细胞壁中葡甘露聚糖的提取及其霉菌毒素吸附效果[D]. 北京: 中国农业科学院硕士学位论文, 2007
HOU Ran-ran. Preparation of Glucomannan from *Saccharomyces cerevisiae* and its effects on adsorption of mycotoxin [D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Science, 2007
- [28] Shen L, Li Y, Jiang L, et al. Response of *Saccharomyces cerevisiae* to the stimulation of lipopolysaccharide [J]. PLoS One, 2014, 9(8): 1-11
- [29] Mahanty S K, Khaware R, Ansari S, et al. Vanadate-resistant mutants of *Candida albicans* show alterations in phosphate uptake [J]. FEMS Microbiology Letters, 1991, 84(2): 163-166
- [30] Bisconti L, Pepi M, Mangani S, et al. Reduction of vanadate to vanadyl by a strain of *Saccharomyces cerevisiae* [J]. Biometals, 1997, 10(4): 239-246
- [31] Mannazzu I. Vanadium detoxification and resistance in yeast [J]. Annals of Microbiology, 2001, 51: 1-9
- [32] Mannazzu I, Guerra E, Ferretti R, et al. Vanadate and copper induce overlapping oxidative stress responses in the vanadate-tolerant yeast *Hansenula polymorpha* [J]. Biochimica et Biophysica acta, 2000, 1475(2): 151-156
- [33] Mannazzu I, Guerra E, Strabbioli R, et al. Vanadium affects vacuolation and phosphate metabolism in *Hansenula polymorpha* [J]. FEMS Microbiology Letters, 1997, 147: 23-28
- [34] Bi W X, Kong F, Hu X Y, et al. Role of glutathione in detoxification of copper and cadmium by yeast cells having different abilities to express cup1 protein [J]. Toxicology Mechanisms and Methods, 2007, 17(6): 371-378
- [35] Ben Sassi A, Ouazzani N, Walker G M, et al. Detoxification of olive mill wastewaters by Moroccan yeast isolates [J]. Biodegradation, 2008, 19(3): 337-346

勘误

我刊于2017年第11期刊发的《花椒籽黑种皮超微粉吸附 Pb^{2+} 的动力学及热力学研究》一文，作者应为：杨沫，薛媛，王小晶，雷宏杰，徐怀德（徐怀德为通讯作者），遗漏第三作者王小晶。