

DOI: 10.16210/j.cnki.1007-7561.2021.03.026

郭倩倩, 周海芳, 郝佳容, 等. 西藏酵母对玉米赤霉烯酮的清除效果及作用机理研究[J]. 粮油食品科技, 2021, 29(3): 192-197.

GUO Q Q, ZHOU H F, HAO J R, et al. Research on the removal effect and mechanism of tibet *Rhodotorula mucilaginosa* on zearalenone[J]. Science and Technology of Cereals, Oils and Foods, 2021, 29(3): 192-197.

西藏酵母对玉米赤霉烯酮的清除效果及作用机理研究

郭倩倩¹, 周海芳¹, 郝佳容¹, 叶昀恺¹, 曹 阳², 刘兴泉¹, 胡 浩¹✉(1. 浙江农林大学 农业与食品科学学院, 浙江 杭州 311300;
2. 国家粮食和物资储备局科学研究院, 北京 100037)

摘要: 为研究清除粮食真菌毒素的绿色方法并克服生物法稳定性差的难题, 以西藏酵母菌种为试验对象, 筛选对玉米赤霉烯酮(Zearalenone, ZEN)具有较好清除效果的菌种, 并研究其作用机理。结果表明: 西藏胶红酵母对ZEN具有较好的降解效果, 且随菌液浓度的升高其降解效果逐步提高; 对酵母不同处理液的毒素清除效果评价, 发现该酵母对ZEN的清除机理主要为吸附作用, 同时伴有一定的胞内生物降解作用; 采用液质联用对ZEN的降解产物进行测定, 发现其降解产物可能为玉米赤霉烯醇和玉米赤霉酮, 降解产物的安全性需进一步验证; 经西藏胶红酵母的胁迫耐受试验, 表明具有一定的低温和氧化胁迫耐受能力。

关键词: 玉米赤霉烯酮; 生物清除; 西藏酵母; 胁迫耐受

中图分类号: TS210.1 文献标识码: A 文章编号: 1007-7561(2021)03-0192-06

网络首发时间: 2021-04-16 17:06:27

网络首发地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.3863.TS.20210416.1252.006.html>

Research on the Removal Effect and Mechanism of Tibet *Rhodotorula mucilaginosa* on Zearalenone

GUO Qian-qian¹, ZHOU Hai-fang¹, HAO Jia-rong¹, YE Yun-kai¹,
CAO Yang², LIU Xing-quan¹, HU Hao¹✉

(1. Zhejiang Agriculture and Forestry University, College of Agriculture and Food Science, Hangzhou, Zhejiang 311300, China; 2. Academy of National Food and Strategic Reserves Administration, Beijing 100037, China)

Abstract: In order to explore an environmental removal method of grain mycotoxins and to overcome the problem of poor stability of biodegradation method, the Tibetan yeast strains were selected as the research object, and the strains with better degradation effects on zearalenone (ZEN) were screened to explore the functions and mechanisms in this study. The results showed that Tibet *Rhodotorula mucilaginosa* had a good degradation effect on ZEN, and the degradation effect gradually improved with the increase of the bacterial concentration. Through the evaluation of the toxin removal effect of different yeast treatment solutions, it was found that the removal mechanism of the yeast on ZEN was mainly adsorption, accompanied by a

收稿日期: 2020-11-26

基金项目: 学校科技发展基金项目(2019FR014); 国家级高等学校大学生创新创业训练计划项目(2003200165)

Supported by: School Research and Development Fund Project (No. 2019FR014); National Undergraduate Training Program for Innovation and Entrepreneurship (No. 2003200165)

作者简介: 郭倩倩, 女, 1998年出生, 在读本科生, 研究方向为粮油储检方向。E-mail: 462030453@qq.com.

通讯作者: 胡浩, 男, 1986年出生, 博士, 讲师, 研究方向为粮食质量安全。E-mail: 20180015@zafu.edu.cn.

certain degree of intracellular biodegradation. The degradation products of ZEN were determined by liquid chromatography-mass spectrometry. It was found that the degradation products may be zearalenol and zearalenone, and the safety of the degradation products needed further verification. The stress tolerance test of Tibet *R. mucilaginosa* showed that it had a certain tolerance to low temperature and oxidative stress.

Key words: Zearalenone; biodegradation; Tibetan yeast; stress tolerance

玉米赤霉烯酮 (Zearalenone, ZEN) 是一种非类固醇霉菌毒素, 广泛存在于玉米、小麦、大麦等谷物及其加工副产物中^[1]。该毒素主要由镰刀菌属 (*Fusarium* sp.) 真菌通过聚酮类合成代谢途径产生, 具有生殖和发育毒性, 细胞和遗传毒性, 对肿瘤细胞生长具有促进作用, 可导致生殖器官发生癌变^[2]。因此迫切需要相关手段对 ZEN 进行清除、脱毒, 从而保证谷物及其加工产物的安全性, 对我国的粮食安全具有十分重要的意义。

清除 ZEN 主要通过化学、物理、生物三种方法^[3]。物理化学清除法能耗高、易造成营养损失, 甚至造成二次污染^[4]。生物清除法不易造成粮食的营养成分流失, 且具有专一性强、转化率高、环境污染小等特点, 已成为真菌毒素清除的研究热点。相关研究发现一株枯草芽孢杆菌在 48 h 内对初始浓度为 10 mg/L 的 ZEN 降解率为 99.7%^[5]; 一株解淀粉芽孢杆菌 NS2 对 5 mg/L 的 ZEN 标准品的降解率为 96.0%^[6]; 11 株对 ZEN 有降解能力的芽孢杆菌, 72 h 后其降解率在 58%~96.9%^[7]。上述研究表明, 生物法对 ZEN 具有较好清除效果, 但该方法易受环境因素影响, 稳定性较差。

目前, 用于 ZEN 生物降解的微生物主要为细菌、真菌、霉菌^[8]。其中, 根霉菌和酵母菌等可将 ZEN 降解为低毒的 β -玉米赤霉烯醇或其他无毒产物。特别是酵母菌, 降解效果好, 其本身大多对人畜无致病性危害^[9-10], 同时对多种胁迫、逆境具有较强耐受力、对营养要求低。西藏地区微生物不仅种类丰富, 而且受高海拔、强紫外线、低温、低氧等环境因素影响, 具有更好的功能特性和环境胁迫耐受能力。因此利用西藏地区菌种资源进行粮食毒素清除研究更具应用和开发价值, 且可克服生物清除效果稳定性差的难题。

1 材料与方 法

1.1 试验材料

本试验酵母均由西藏大学提供, 其中胶红酵

母 (*Rhodotorula mucilaginosa*) 为已鉴定保藏菌种 (编号 CGMCC10223), NYDA 培养基 4 °C 冰箱保存; 甲醇 (色谱级)、乙醇 (色谱级): Fisher 科学世界公司; ZEN 毒素标准品: 北京百奥莱博公司; 牛肉膏、无水葡萄糖、酵母粉、琼脂粉: 北京奥博星生物技术有限公司。

1.2 仪器与设备

Agilent 1100 液相色谱仪: 美国安捷伦公司; 岛津 8060NX 液质联用色谱仪: 日本岛津公司。

1.3 试验方法

1.3.1 HPLC-FLD 检测条件

激发波长 274 nm, 发射波长 440 nm; 流动相 V (甲醇) : V (水) = 80 : 20; 流速 1.5 mL/min; 柱温 30 °C; 进样量 10 μ L。

1.3.2 液质联用检测条件

色谱检测条件: 液相系统流速: 0.7 mL/min; 柱温: 30 °C; 进样量: 20.0 μ L; 荧光检测器, 检测波长: 274 nm, 发射波长: 440 nm; 流动相: 流动相 A 为 0.1% 甲酸水溶液, 流动相 B 为色谱级甲醇。

质谱检测条件: 电喷雾离子源 (ESI); 检测方式为多反应监测模式 (MRM); 离子源温度: 350 °C; 干燥气流速度: 9.0 L/min; 雾化气压力: 30 psi; 毛细管电压: 3.5 kV; 碎裂电压: 0.1 kV; 碰撞电压: 40 eV; 检测驻留时间: 100 s。

1.3.3 酵母培养

1.3.3.1 培养基 NYDA 培养基: 牛肉膏 8 g, 无水葡萄糖 10 g, 酵母粉 5 g, 琼脂粉 20 g, 蒸馏水 1 000 mL; NYDB 培养基: 牛肉膏 8 g, 无水葡萄糖 10 g, 酵母粉 5 g, 蒸馏水 1 000 mL。培养基配置好后, 高压蒸汽灭菌 (121 °C, 15 min)。

1.3.3.2 酵母菌活化 用无菌接种环挑取一环保存在 4 °C 冰箱中的酵母接种于 NYDA 培养基中, 在 28 °C 下恒温培养 48 h。

1.3.3.3 液体培养 挑取一环经活化后的酵母接

种于装有 50 mL NYDB 培养基的锥形瓶中, 然后将上述培养液在 150 r/min, 28 °C 下进行摇床培养 24 h。

1.3.3.4 调整浓度 将液体培养 24 h 后的酵母菌液, 在 4 °C、5 000×g 转速下, 离心 10 min, 除去上层清液, 无菌水洗涤两次后, 再用无菌水重新悬浮。悬浮后的酵母细胞用无菌水进行梯度稀释并用血球计数板计数, 选择试验所需浓度加入培养基。

1.3.4 清除 ZEN 的酵母菌株的筛选

在装有 50 mL NYDB 培养基的锥形瓶中, 加入 1 mL 浓度为 1×10^8 cells/mL 的酵母菌悬液, 再加入适量 ZEN 储备液, 控制 ZEN 初始浓度为 5 μ g/mL, 在摇床转速 150 r/min, 28 °C 条件下培养 24 h, 分别在 0 h 和 24 h 取样。对照组加入 1 mL 无菌水, 设置三组平行。取样品 500 μ L 于 1.5 mL 离心管中, 加入 500 μ L 乙醇 (HPLC 级), 涡旋震荡均匀后, 静置 30 min, 用 0.22 μ m 滤膜过滤后置于 -20 °C 冰箱中保存待测。

1.3.5 酵母对 ZEN 的清除效果研究

1.3.5.1 酵母对不同浓度 ZEN 的清除效果 酵母培养方法同 1.3.3, ZEN 终浓度分别为 5、10、15 μ g/mL, 在摇床转速 150 r/min, 28 °C 条件下培养 24 h, 分别在 0 h 和 24 h 取样。对照组加入 1 mL 无菌水, 设置三组平行。取样品 500 μ L 于 1.5 mL 离心管中, 加入 500 μ L 乙醇 (HPLC 级), 涡旋震荡均匀后, 静置 30 min, 用 0.22 μ m 滤膜过滤后置于 -20 °C 冰箱中保存待测。

1.3.5.2 不同菌种浓度对 ZEN 清除效果的影响 在装有 50 mL NYDB 培养基的锥形瓶中, 加入 1 mL 浓度分别为 1×10^6 、 1×10^7 、 1×10^8 、 1×10^9 cells/mL 的酵母菌液的酵母菌悬液, 再加入适量 ZEN 储备液, 控制 ZEN 初始浓度为 5 μ g/mL, 在摇床转速 150 r/min, 28 °C 条件下培养 24 h, 分别在 0 h 和 24 h 取样。对照组加入 1 mL 无菌水, 设置三组平行。取样品 500 μ L 于 1.5 mL 离心管中, 加入 500 μ L 乙醇 (HPLC 级), 涡旋震荡均匀后, 静置 30 min, 用 0.22 μ m 滤膜过滤后置于 -20 °C 冰箱中保存待测。

1.3.6 酵母清除 ZEN 的主要途径研究

将活化培养得到的酵母细胞浊液分成三组进

行不同处理。活酵母细胞: 用无菌水重新悬浮, 并用血球计数板计数将浓度调整为 1×10^8 cells/mL; 热杀死酵母细胞: 将酵母菌悬液置于 100 °C 水浴中加热 30 min 杀死酵母, 用血球计数板计数将浓度调整为 1×10^8 cells/mL; 酵母上清液: 将活化、培养后的酵母液, 在 4 °C、5 000 r/min 下离心 10 min, 取上清液用经灭菌的 0.22 μ m 滤膜过滤, 得到无细胞滤液。加入适量 ZEN 储备液, 控制 ZEN 初始浓度分别为 5 μ g/mL, 然后分别在 50 mL NYDB 培养基的锥形瓶中分别加入浓度为 1×10^8 cells/mL 的活酵母细胞和热杀死酵母细胞悬浮液 1 mL, 在摇床转速 150 r/min, 温度 28 °C 下培养 48 h, 分别在 0、6、12、18、24、30、36、48 h 取样。对照组加入 1 mL 无菌水, 设置三组平行。将样品在 4 °C、5 000 r/min 下离心 10 min 后, 经 0.22 μ m 滤膜过滤, 取上清液 500 μ L 于 1.5 mL 离心管中, 加入 500 μ L 乙醇 (HPLC 级), 涡旋震荡均匀后, 静置 30 min 使其充分浸提, 置于 -20 °C 冰箱中保存待测。

1.3.7 酵母 ZEN 降解作用的测定

酵母培养方法同 1.2.3。对照组加入 1 mL 无菌水, 处理组加入终浓度为 5 μ g/mL 的 ZEN, 每个处理设置三组平行。每组样品取 500 μ L 于 1.5 mL 离心管中, 加入 500 μ L 乙醇 (HPLC 级), 涡旋震荡均匀后, 静置 30 min, 用 0.22 μ m 滤膜过滤后利用 LC-MS 进行产物测定。

1.3.8 胁迫耐受能力测定

1.3.8.1 氧化胁迫 制备浓度为 1×10^8 cells/mL 的酵母悬浮液, 分别加入过氧化氢, 制备过氧化氢终浓度为 10、20 和 50 mmol/L 的 10 mL 酵母悬浮液。将配制好的悬浮液在 28 °C、200 r/min 下放置 40 min 后, 稀释后, 各取 100 μ L 涂布于 NYDA 平板, 同体积未经过氧化氢处理的酵母悬浮液为对照, 实验室酿酒酵母做对比。平板 28 °C 培养 2 天后统计菌落数。3 个平行处理, 试验重复 2 次。

1.3.8.2 低温胁迫 低温胁迫采用快速冷冻方法进行。将培养好的西藏胶红酵母用 0.05 mol/L PBS 缓冲液 (pH 7) 配制成浓度为 1×10^8 cells/mL 的细胞悬浮液, 取 1 mL 置于 1.5 mL 离心管中, 在 -80 °C 下快速冷冻 30 min 后取出, 常温水浴 (25 °C) 孵育 20 min, 梯度稀释后取 100 μ L 涂布于 NYDA

平板, 28 °C 下培养 48 h 后统计低温处理前后菌落总数, 同样处理的实验室酿酒酵母为对照。3 个平行处理, 试验重复 2 次。

1.4 数据分析

试验每组处理设置 3 次平行, 结果以均值±SD 表示。采用 SPSS 25.0 软件进行单因素方差分析, $P < 0.05$ 表示差异显著。利用 GraphPad Prism 8 软件作图。

2 结果与分析

2.1 筛选降解 ZEN 的酵母

以西藏大学提供的西藏地区 10 株酵母为研究对象, 研究其在实验条件下对 ZEN 的清除效果, 如表 1 所示, 经 24 h 培养后, 西藏胶红酵母对 ZEN 具有较好的清除效果, 对 ZEN 的清除率达到 90% 以上, 其余菌种对 ZEN 的清除效果则较为有限, 因此, 本试验选取西藏胶红酵母开展进一步研究。

表 1 不同酵母对 ZEN 的清除率

Table 1 The elimination rate of ZEN by different yeasts

菌种名称	0 h	24 h	清除率/%
256	6.06±0.36 ^a	6.51±0.29 ^a	0
274	3.72±2.81 ^a	4.22±2.47 ^a	0
胶红酵母	4.10±0.30 ^a	0.19±0.13 ^b	93.17±0.04
181	8.07±0.21 ^a	7.61±0.51 ^a	5.70±4.12
78	6.15±0.57 ^a	6.11±0.30 ^a	0.67±4.38
333	7.23±0.14 ^a	6.98±0.30 ^a	3.46±2.23
87	6.69±1.13 ^a	7.65±0.65 ^a	0
28	2.36±0.14 ^a	2.29±0.19 ^a	2.82±1.12
336	2.13±0.09 ^a	2.20±0.05 ^a	0
226.3	2.42±0.23 ^a	2.57±0.17 ^a	0

注: 不同小写字母表示不同菌种在同一时间下 ZEN 清除率差异显著 ($P < 0.05$), 反之同一小写字母表示差异不显著。

2.2 胶红酵母对 ZEN 的清除效果研究

胶红酵母对不同浓度 ZEN 清除效果的影响结果见表 2 所示, 当 ZEN 初始浓度为 5 $\mu\text{g/mL}$ 时, 经 24 h 培养后, 西藏胶红酵母将 ZEN 清除至 0.19 $\mu\text{g/mL}$ 。当 ZEN 初始浓度为 10 $\mu\text{g/mL}$ 和 15 $\mu\text{g/mL}$ 时, 该酵母将 ZEN 清除至 1.14 $\mu\text{g/mL}$ 和 1.49 $\mu\text{g/mL}$ 。由此可见, 随着 ZEN 初始浓度的增加, 胶红酵母对 ZEN 的清除效果会有所降低, 但其清除率仍可

达 80% 以上。上述结果表明该酵母对 ZEN 的清除作用相对较为稳定。不同浓度胶红酵母悬浮液对 ZEN 的清除效果研究表明该酵母在低浓度时即可有效清除 ZEN (见表 3), 随着浓度的增加, 其清除效果具有一定的提升。

表 2 胶红酵母对不同浓度 ZEN 清除效果的影响

Table 2 Effect of *R. mucilaginosa* on the removal effect of ZEN at different concentrations

菌种	毒素浓度					
	5 $\mu\text{g/mL}$		10 $\mu\text{g/mL}$		15 $\mu\text{g/mL}$	
	0 h	24 h	0 h	24 h	0 h	24 h
胶红酵母	4.10±0.30 ^a	0.19±0.13 ^b	6.79±0.47 ^a	1.14±0.21 ^b	12.37±0.31 ^a	1.49±0.61 ^b

注: 不同字母表示差异显著 ($P < 0.05$)。

表 3 不同浓度胶红酵母对 ZEN 的清除效果

Table 3 The removal effect of different concentrations of *R. mucilaginosa* on ZEN

酵母浓度/ (cells/mL)	时间		
	0 h	24 h	清除率/%
Control	4.48±0.25 ^a	4.45±0.07 ^a	1.58±4.65
1×10 ⁶	4.71±0.16 ^a	0.20±0.15 ^b	95.92±3.03
1×10 ⁷	4.63±0.06 ^a	0.17±0.14 ^b	96.38±2.96
1×10 ⁸	4.31±0.32 ^a	0.18±0.13 ^b	95.60±3.18
1×10 ⁹	4.74±0.13 ^a	0.00±0.00 ^b	100.00±0.00

注: 不同字母表示差异显著 ($P < 0.05$)。

2.3 胶红酵母清除 ZEN 的作用途径研究

试验通过评价不同胶红酵母处理液对 ZEN 的清除效果来确定其主要作用途径。如图 1 所示, 与对照组相比, 经过灭活处理的酵母热杀死液可以显著降低培养基中 ZEN 含量。其中, 前 6 h 对 ZEN 的清除效果与活酵母组基本相同, 可使 ZEN 含量迅速降低, 而活酵母组中 ZEN 含量随着时间

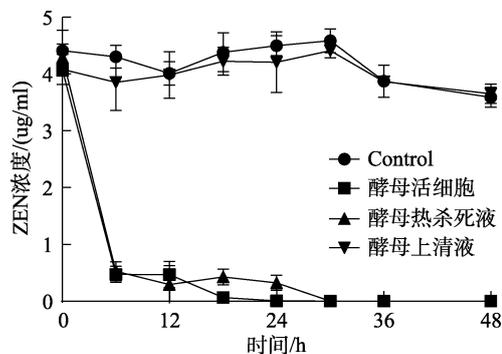


图 1 胶红酵母不同处理液对 ZEN 的清除作用
 Fig. 1 The removal effect of different treatments of *R. mucilaginosa* on ZEN

的延长继续降低, 24 h 时 ZEN 含量基本为 0。酵母热杀死液 18 h 后对 ZEN 的清除效果略逊于活酵母, 30 h 时无 ZEN 检出, 而酵母上清液对 ZEN 的清除效果较为有限。

试验结果表明, 胶红酵母对 ZEN 清除主要通过吸附作用进行, 酵母活细胞由于酵母活性较好, 细胞数不断增多, 对培养基中 ZEN 可持续吸附;

而酵母热杀死液在细胞灭活时, 可能由于部分细胞的葡聚糖结构发生变化, 葡聚糖能够通过糖苷键与毒素产生吸附作用^[11]。

2.4 胶红酵母对 ZEN 降解作用研究

为进一步确定胶红酵母是否在胞内对 ZEN 具有降解作用, 试验提取了酵母胞内的 ZEN, 并利用 LC-MS 进行了鉴定。通过比较图 2~4 可知, 西

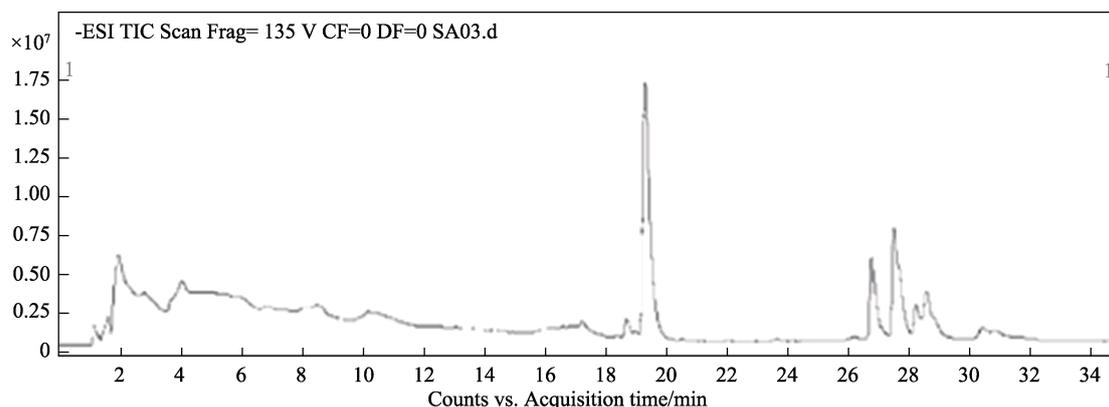


图 2 西藏胶红酵母对玉米赤霉烯酮的降解产物 LC-MS 检测色谱图

Fig. 2 LC-MS detection chromatogram of the degradation product of zearalenone by Tibet *R. mucilaginosa*

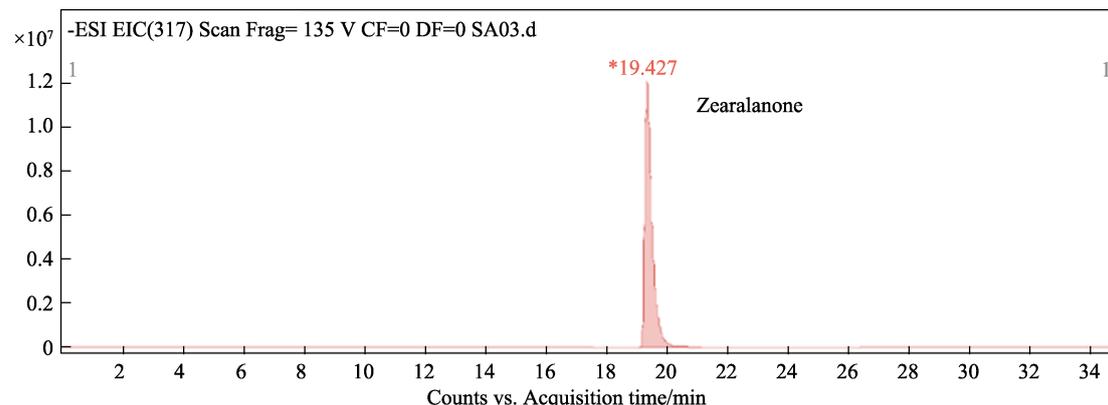


图 3 玉米赤霉烯酮 LC/MS 检测质谱图

Fig. 3 LC/MS detection mass spectrum of zearalenone

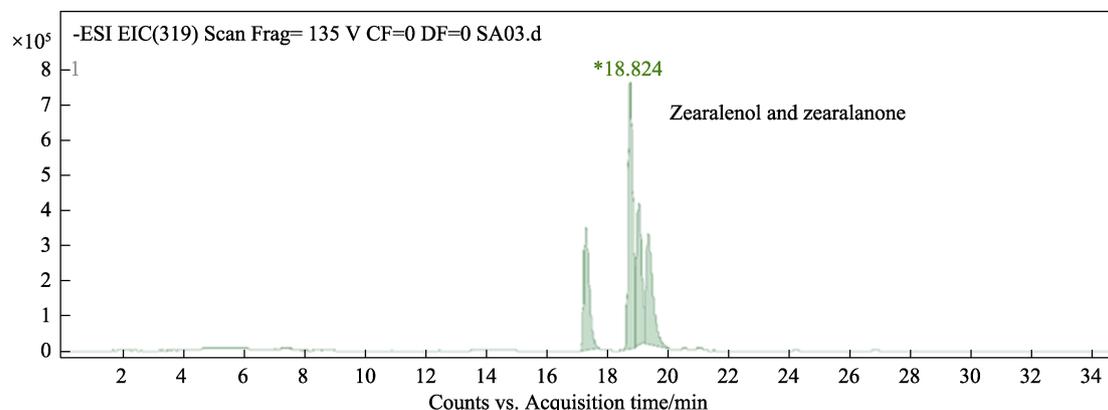


图 4 玉米赤霉烯醇、玉米赤霉酮 LC-MS 检测质谱图

Fig. 4 LC-MS detection mass spectrum of zearalenol and zearalanone

藏胶红酵母吸附 ZEN 后具有一定的降解作用, ZEN 的降解产物相对分子质量为 320, 可能是玉米赤霉烯醇或玉米赤霉酮。但其具体降解产物的化学结构进一步的确认。

2.5 胶红酵母胁迫耐受能力研究

西藏胶红酵母对胁迫的耐受特性是其影响生物清除法稳定性的关键。如表 4 所示, 西藏胶红酵母与实验室普通酿酒酵母 XZ-9 和 XZ-10 相比, 在 10 和 20 mmol/L 的低浓度氧化胁迫条件下具有较好的胁迫耐受能力; 同时, 经 -80 °C 下快速低温胁迫后, 胶红酵母的活菌菌落数显著高于 XZ9 和 XZ10 ($P < 0.05$)。上述结果表明, 西藏胶红酵母具有较好的环境胁迫耐受能力, 降低细胞损伤和凋亡的速率, 提高酵母胞内物质活性对 ZEN 的吸附作用, 具有较好的清除效果。

表 4 胶红酵母对氧化胁迫的耐受能力

Table 4 The tolerance of *R. mucilaginosa* to oxidative stress

酵母种类	过氧化氢浓度/ (mmol/L)		
	10	20	50
XZ-9 号	54.33±10.79b	47.00±4.58b	44.67±3.79b
XZ-10 号	64.67±7.23b	47.33±2.52b	47.33±5.13b
胶红酵母	80.67±3.06a	64.00±5.57a	47.00±4.00b

注: 不同字母表示差异显著($P < 0.05$)。

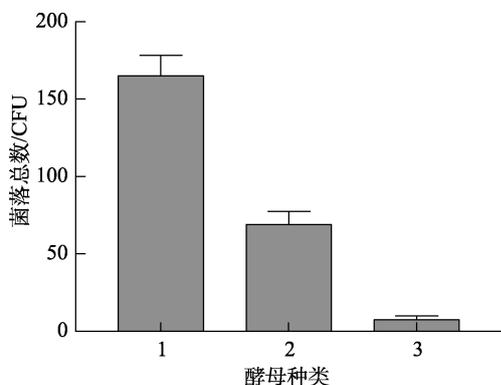


图 5 胶红酵母对低温胁迫的耐受能力

Fig. 5 The tolerance of *R. mucilaginosa* to low temperature stress

注: 1 为胶红酵母, 2 和 3 为实验室普通酵母, 编号分别为 XZ-10、XZ-9。

3 结论

通过研究西藏酵母对玉米赤霉烯酮的清除效果, 发现西藏胶红酵母对 ZEN 具有较好的清除能力, 具体作用规律如下: (1) 西藏胶红酵母对 ZEN 的清除机制主要为吸附作用, 同时该酵母在吸附 ZEN 后存在一定的胞内降解作用; (2) 西藏胶红

酵母与实验室普通酵母相比, 对氧化胁迫和低温胁迫具有较好的耐受能力, 可作为克服真菌毒素生物清除缺陷的潜在菌种。

参考文献:

- [1] MA R, ZHANG L, LIU M, et al. Individual and combined occurrence of mycotoxins in feed ingredients and complete feeds in China[J]. *Toxins*, 2018, 10(3).
- [2] DIQI Y, TINGTING J, PENGFEI L, et al. Apoptosis inducing factor gene depletion inhibits zearalenone-induced cell death in a goat Leydig cell line[J]. *Reproductive Toxicology*, 2017, 67.
- [3] NEME K, MOHAMMED A. Mycotoxin occurrence in grains and the role of postharvest management as a mitigation strategies. A review[J]. *Food control*, 2017, 78: 412-425.
- [4] 冯春露, 郭祯祥, 郭嘉. 玉米的真菌毒素及生物脱毒研究进展[J]. *粮食与油脂*, 2018, 31(9):14-17.
FENG C L, GUO Z X, GUO J. Research progress on mycotoxins and biological detoxification of corn[J]. *Cereals & Oils*, 2018, 31(9): 14-17.
- [5] 杨凡, 张俊楠, 王金全, 等. 玉米赤霉烯酮降解菌的筛选与鉴定[J]. *中国粮油学报*, 2020, 35(7): 104-108.
YANG F, ZHANG J N, WANG J Q, et al. Isolation and identification of zearalenone-degrading bacterium[J]. *Journal of the Chinese Cereals and Oils Association*, 2020, 35(7): 104-108.
- [6] 张晨曦, YAWA M E F, 赵月菊, 等. 解淀粉芽孢杆菌 NS2 降解玉米赤霉烯酮的研究[J]. *核农学报*, 2020, 34(7): 1507-1517.
ZHANG C X, YAWA M E F, ZHAO Y J, et al. Degradation effects of *Bacillus amyloliquefaciens* NS2 on Zearalenone[J]. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 2020, 34(7): 1507-1517.
- [7] GONZÁLEZ PEREYRA M L, DI GIACOMO A L, LARA A L, et al. Aflatoxin-degrading *Bacillus* sp. strains degrade zearalenone and produce proteases, amylases and cellulases of agro-industrial interest[J]. *Toxicon (Oxford)*, 2020, 180: 43-48.
- [8] BARTKIENE E, ZAVISTANAVICIUTE P, LELE V, et al. *Lactobacillus plantarum* LUHS135 and *paracasei* LUHS244 as functional starter cultures for the food fermentation industry: Characterisation, mycotoxin-reducing properties, optimisation of biomass growth and sustainable encapsulation by using dairy by-products[J]. *Food science & technology*, 2018, 93: 649-658.
- [9] ZEIDAN R, UL-HASSAN Z, AL-THANI R, et al. Application of low-fermenting yeast lachancea thermotolerans for the control of toxigenic fungi *Aspergillus parasiticus*, *Penicillium verrucosum* and *Fusarium graminearum* and their mycotoxins[J]. *Toxins*, 2018, 10(6).
- [10] JAKOPOVI, ELJKO, HANOUSEK I A, et al. Properties and fermentation activity of industrial yeasts *Saccharomyces cerevisiae*, *S. uvarum*, *Candida utilis* and *Kluyveromyces marxianus* Exposed to AFB1, OTA and ZEA[J]. *Food Technology and Biotechnology*, 2018.
- [11] 赵璐宇, 方洛云, 蒋林树, 等. β -葡聚糖的生物学功能及在反刍动物饲养中的应用[J]. *动物营养学报*, 2020, 32(5): 2003-2009.
ZHAO L Y, FAN L Y, JIANG L S, et al. Biological function of β -glucan and its application in ruminant feeding[J]. *Chinese Journal of Animal Nutrition*, 2020, 32(5): 2003-2009. 完

备注: 本文的彩色图表可从本刊官网 (<http://lyspkj.ijournal.cn/ch/index.aspx>)、中国知网、万方、维普、超星等数据库下载获取。