

# 紫外光对米酵菌酸的降解效果及动力学分析

胡均鹏, 梁明, 陈荣桥, 冼燕萍, 吴玉玺, 侯向昶, 戴航, 王斌, 王莉

(广州质量监督检测研究院, 广州市食品安全风险动态监测与预警研究中心, 广州市食品安全检测技术重点实验室, 广东广州 511447)

**摘要:** 米酵菌酸(BA)具有剧烈毒性, 为了研究BA经紫外照射后的降解效果, 以BA-甲醇水为研究模型, 考察紫外照射强度、BA初始浓度、液层厚度对BA的降解效果, 并对其降解曲线和降解方程进行拟合。结果表明, 紫外光照射能有效降解BA, 且降解过程符合一级动力学方程; 紫外强度越强、BA初始越低、液层厚度越薄, BA的降解速率越快。在紫外强度为 $187 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ , 初始浓度为 $2.5 \mu\text{g}/\text{mL}$ , 厚度为 $2 \text{ mm}$ 时, 2 h后的降解率达到96.82%。用SPSS软件建立各影响因素与光解速率常数的单独模型并进行线性回归, 紫外照射强度、BA初始浓度、液层厚度三个影响因素的模型拟合度分别为0.9540、0.9347、0.9643。在此基础上, 用多元线性回归方法建立紫外照射强度( $X_1$ )、BA初始浓度( $X_2$ )、液层厚度( $X_3$ )与紫外降解速率常数 $k$ ( $Y$ )的综合模型, 模型的拟合度为0.972, 回归方程显著。本研究结果为紫外降解BA提供了理论基础。

**关键词:** 米酵菌酸; 紫外照射; 降解; 动力学

文章篇号: 1673-9078(2021)08-208-213

DOI: 10.13982/j.mfst.1673-9078.2021.8.0125

## Degradation Effect and Kinetic Analysis of Bongkrekkic Acid by Ultraviolet Light

HU Jun-peng, LIANG Ming, CHEN Rong-qiao, XIAN Yan-ping, WU Yu-luan, HOU Xiang-chang, DAI Hang, WANG Bin, WANG Li

(Guangzhou Quality Supervision and Testing Institute, Guangzhou City Research Center of Risk Dynamic Detection and Early Warning for Food Safety, Guangzhou City Key Laboratory of Detection Technology for Food Safety, Guangzhou 511447, China)

**Abstract:** Bongkrekkic acid is a highly toxic compound, in order to study the degradation effect of bongkrekkic acid (BA) after ultraviolet irradiation, the standard solution of bongkrekkic acid (BA) - methanol/water was used as the research object in this research, and the degradation effect of UV irradiation intensity, initial concentration of bongkrekkic acid and thickness of liquid layer were investigated, and the degradation curve and degradation equation were fitted. Results showed that the UV irradiation can effectively reduce bongkrekkic acid, and the higher degradation rate can be achieved under the higher UV intensity, the lower initial bongkrekkic acid as well as the smaller thickness of the liquid layer; a degradation rate of 96.82% can be reached under  $187 \mu\text{W}/\text{cm}^2$  of intensity and  $2.5 \mu\text{g}/\text{mL}$  of initial concentration as well as a  $2 \text{ mm}$  thickness liquid layer. Using SPSS software to establish a separate model of each factor and photolysis rate constant, and the linear regression was conducted, the model fitting degrees of the three factors were 0.9540, 0.9347 and 0.9643, respectively. On this basis, the comprehensive model of UV irradiation intensity ( $X_1$ ), initial concentration of myelic acid ( $X_2$ ), liquid layer thickness ( $X_3$ ) and UV irradiation constant ( $Y$ ) was established by multiple linear regression method, the fitting degree of the model was 0.972, meaning that the regression equation was significant. The results of this study provide a theoretical basis for the degradation of bongkrekkic acid by ultraviolet irradiation.

引文格式:

胡均鹏,梁明,陈荣桥,等.紫外光对米酵菌酸的降解效果及动力学分析[J].现代食品科技,2021,37(8):208-213

HU Jun-peng, LIANG Ming, CHEN Rong-qiao, et al. Degradation effect and kinetic analysis of bongkrekkic acid by ultraviolet light [J]. Modern Food Science and Technology, 2021, 37(8): 208-213

收稿日期: 2021-02-03

基金项目: 广东省科技计划项目 (2019B020208008)

作者简介: 胡均鹏 (1994-), 男, 硕士, 研究方向: 食品及食品相关产品分析技术

通讯作者: 冼燕萍 (1975-), 女, 教授级高工, 研究方向: 食品安全及风险预警

**Key words:** bongkreic acid; ultraviolet irradiation; degradation; kinetics

米酵菌酸 (Bongkreic acid, BA) 是由椰毒假单胞菌酵米面亚种产生的一种可以引起食物中毒的脂类毒素<sup>[1,2]</sup>, 分子式为  $C_{28}H_{38}O_7$ , 结构上含有 2 个不对称中心的长碳链、1 个非共轭烯烃、2 个共轭二烯烃、1 个甲氧基和 3 个羧基(其中 C2=C3 上两个羧基为反式排列, 结构式见图 1)。变质银耳、木耳、酵米面食品等易受其污染, 食用了这些被污染的食品会引发恶心、呕吐、休克等中毒症状, 严重可以导致死亡<sup>[3-5]</sup>。研究表明 BA 主要是作用于线粒体膜, 与腺嘌呤载体 ANT(电压依赖性阴离子通道)的结合成为 ANT 的特异性非竞争性抑制剂, 阻碍了 ADP 与 ATP 在线粒体内膜的交换, 使 ATP 生成减少或消失, 导致细胞凋亡、损伤<sup>[6-8]</sup>。国内外时有 BA 的中毒事件发生, 2018 年和 2020 年广东发生了多起因食用“湿河粉”而引发 BA 中毒致死事件<sup>[9-11]</sup>, 2019 年莫桑比克发生了非洲首例因饮用由玉米粉发酵制得的传统非洲饮料引起 200 多人中毒和 75 人死亡<sup>[12]</sup>, 引起社会高度关注, 也成为研究的热点。因此, 研究 BA 降解减毒的动力学机理, 可为开发食品中 BA 的去毒方法和制定风险防控措施提供理论基础。

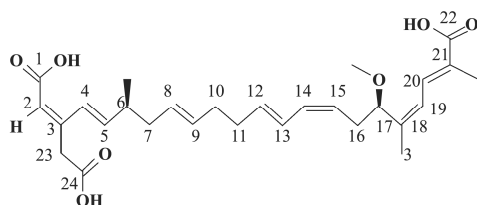


图 1 米酵菌酸的结构式

Fig.1 The structural formula of bongkreic acid

针对毒素去毒脱毒的方法主要有物理法(紫外照射、活性炭吸附等)、化学法(碱处理、臭氧处理等)和生物法(微生物吸附、微生物降解等)<sup>[13-15]</sup>, 各有其特点。其中紫外照射技术具有高效、污染少、操作简便等特点, 被广泛用于生物毒素、农药等有害化合物的光化学降解。王雅玲等<sup>[16]</sup>研究表明在最佳紫外照射条件下, 可以有效消减饼干中真菌毒素。余以刚等<sup>[17]</sup>研究表明, 用臭氧及紫外线处理, 可在短时间内有效降低受污染面粉中 DON 含量, 且对面粉品质无显著影响。卢海清等<sup>[18]</sup>研究表明紫外照射处理能有效降解苹果汁中展青霉素。目前, 采用紫外照射使 BA 去毒脱毒的文献报道很少, 主要是八、九十年代的一些研究, 如陈晓明等<sup>[19]</sup>用日晒法去除银耳中 BA, 俞世荣等<sup>[20]</sup>用紫外线照射研究 BA 的去毒, 通过测定抑菌圈的大小进行判断, 未见对 BA 紫外降解动力学进行研究。因此, 本研究以 BA-甲醇水体系模型, 考察紫

外光照强度、BA 溶液初始浓度、液层厚度对 BA 紫外降解的影响, 初步探讨 BA 的紫外降解效果和动力学过程。旨在为 BA 的去除提供理论依据和技术指导。

## 1 材料与方法

### 1.1 仪器与试剂

四极杆/静电场轨道阱高分辨质谱 (Orbitrap HRMS): Q Exactive Focus 型, 美国 Thermo Fisher Scientific 公司; 超高效液相色谱(HPLC): Uultimate 3000 型, 美国 Thermo Fisher Scientific 公司; 电子分析天平: 德国赛多利斯公司; N-EVAP112 水浴氮吹仪, 美国 OA 公司; KDC-40 低速离心机, 安徽中科中佳公司; MS3 digital 涡旋混合器, IKA 公司; KQ-500E 超声波清洗器, 昆山市超声仪器有限公司; 紫外灯(功率 30 W, 波长: 254 nm); 紫外灯辐照计, 北京师范大学光电仪器厂。

米酵菌酸标准品 (1 mg/mL, Tris 溶液, 纯度 96.9%), 上海 ANPEL 公司; 甲醇 (HPLC), 德国 Merk 公司; 乙腈 (HPLC 级), 德国 Merk 公司; 甲酸 (HPLC 级), 上海阿拉丁生化科技股份有限公司; 超纯水 (18.2 MΩ·cm), 实验室 Milli-Q 自制。

### 1.2 标准溶液配制

准确移取 100 μL 米酵菌酸标准品, 用甲醇定容于 10 mL 容量瓶, 配制成 10 μg/mL 米酵菌酸标准储备液, 于 -18 °C 保存。临用 HPLC-Orbitrap HRMS 检测时, 用甲醇-水 (5:5, V/V) 配制成 1、2、5、10、20、50、100 μg/L 系列浓度的 BA 标准工作液, 现用现配。

### 1.3 紫外照射降解试验

照射实验前, 先将紫外灯(波长 254 nm)预热 30 min, 使光源达到稳定辐射。取一定浓度的 BA 标准溶液 2.5 mL 于石英培养皿中, 置于紫外灯下不同距离进行照射。分析不同紫外照射强度 (71 μW/cm<sup>2</sup>、106 μW/cm<sup>2</sup>、184 μW/cm<sup>2</sup>)、不同 BA 初始浓度 (1.0、2.5、5.0 μg/mL)、不同液层厚度 (2、4、6 mm) 下分别照射 0、10、20、30、40、50、60、90、120 min 的 BA 含量, 同时设空白对照组。

利用 HPLC-Orbitrap 高分辨质谱采集的全谱信息, 对 BA 紫外降解规律进行了初步探索。

### 1.4 米酵菌酸含量的检测

### 1.4.1 色谱条件

BEH C18 色谱柱 (50 mm×2.1 mm, 1.7 μm); 流动相为乙腈 (A) 和 0.1% 甲酸水溶液 (B), 梯度洗脱程序为: 0.0~3.0 min, 50%~70% A; 3.0~3.6 min, 70%~95% A; 3.6~5.5 min, 95% A; 5.5~5.6 min, 95%~50% A; 5.6~7.0 min, 50% A。流速 0.3 mL/min; 柱温 40 °C; 进样量 5 μL。

### 1.4.2 质谱条件

电离方式为电喷雾负离子 (ESI-) 模式, 喷雾电压为 3.0 kV, 毛细管温度为 320 °C, 辅助气为 10 arb, 鞘气为 45 arb, 碰撞能量 (NCE) 为 10%, 采集模式为全扫描触发二级质谱扫描 (触发扫描离子为  $m/z$  485.25485)。Full MS 分辨率设为 7000, 质谱扫描范围为 50~550  $m/z$ ,  $dd/MS^2$  的分辨率采用 17500 FWHM, 自动增益控制目标离子数 (AGC) 设为  $1.0 \times 10^5$ , IT 设为 50 ms。米酵菌酸的特征离子为  $m/z$  485.25485 (定量离子)、 $m/z$  441.26489 和  $m/z$  397.27359。

## 1.5 计算与统计方法<sup>[18]</sup>

米酵菌酸降解率:

$$R = \frac{C_0 - C_t}{C_0} \times 100\% \quad (1)$$

反应速率表达式为:

$$C_t = C_0 \cdot e^{-kt} \quad (2)$$

对于一级动力学反应, 其动力学方程和半衰期分别为:

$$\ln \frac{C_t}{C_0} = -kt \quad (3)$$

$$t_{1/2} = \frac{\ln 2}{k} \quad (4)$$

式中,  $C_0$  和  $C_t$  分别为 BA 的初始浓度和  $t$  时刻时的残存浓度,  $k$  为光解速率常数。

## 1.6 数据处理

所有试验做 3 次平行, 采用 Origin 9.0 软件进行作图, 采用 SPSS 22.0 软件对试验数据进行统计分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 BA 线性方程与定量限

用 HPLC-Orbitrap HRMS 检测系列浓度 BA 标准溶液, 以 BA 的质量浓度为横坐标, 定量离子提取色谱峰面积为纵坐标, 得到标准曲线为  $y=227755x+6789$ ,  $R^2=0.9995$ , 定量限为 1 μg/L。

### 2.2 紫外照射处理对 BA 降解效果的影响

#### 2.2.1 紫外照射强度对 BA 降解效果的影响

在 BA 初始浓度为 2.5 μg/mL, 液层厚度为 2 mm, 分析不同紫外照射强度和照射时间下 BA 的降解效果。由图 2 可知, 紫外照射能有效降解 BA, 在 3 种照射强度下, BA 的降解率与时间呈一定的正相关, 均随着照射时间的延长, 降解效果提高, 3 种紫外强度照射 10 min 时, BA 降解率为 64.36%~70.88%, 照射 120 min 时, BA 降解率为 92.02%~96.82%。在相同的照射时间下, 紫外照射强度越大, 降解效果越好, 照射时间为 10 min 时, 最低紫外强度 (71 μW/cm<sup>2</sup>) 下 BA 降解率为 64.36%, 紫外强度增加至 106 μW/cm<sup>2</sup> 和 184 μW/cm<sup>2</sup> 时, BA 降解率分别为 67.63% 和 70.92%。说明当紫外强度越大、照射时间越长时, BA 的降解效果越好。

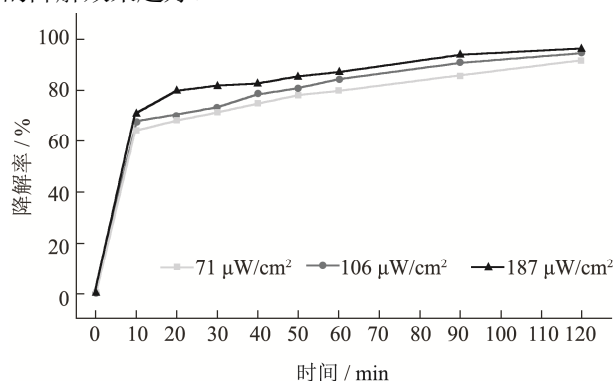


图 2 紫外照射强度对 BA 降解效果的影响

Fig.2 Effect of UV intensity on degradation of bongkrekkic acid

用一级动力学方程对不同紫外照射强度下 BA 的降解情况进行拟合, 其光解方程、半衰期、速率常数、相关系数见表 1。可见, 其相关系数在 0.9812~0.9954 之间, 线性拟合较好。表明 BA 的降解过程与照射强度能较好符合一级动力学假设, 且随着紫外照射强度的增大, BA 降解速率常数增大, 半衰期缩短。

表 1 不同紫外照射强度下 BA 降解的动力学方程

Table 1 Kinetic equations of UV degradation of bongkrekkic acid under different UV intensity

紫外强度/(μW/cm <sup>2</sup> )	光解方程	速率常数 $k$ /(min <sup>-1</sup> )	半衰期 $t_{1/2}$ /min	$R^2$
71	$y=-0.017x$	0.017	40.76	0.9954
106	$y=-0.019x$	0.019	36.48	0.9934
184	$y=-0.021x$	0.021	33.01	0.9812

表 2 不同初始浓度下 BA 紫外降解的动力学方程

Table 2 Kinetic equations of UV degradation of bongkreic acid under different initial concentration

初始浓度/( $\mu\text{g/mL}$ )	光解方程	速率常数 $k/(\text{min}^{-1})$	半衰期 $t_{1/2}/\text{min}$	$R^2$
1.0	$y=-0.020x$	0.020	34.65	0.9902
2.5	$y=-0.017x$	0.017	40.76	0.9954
5.0	$y=-0.015x$	0.015	46.20	0.9816

表 3 不同液层厚度下 BA 紫外降解的动力学方程

Table 3 Kinetic equations of UV degradation of bongkreic acid under different layer thickness

液层厚度/mm	光解方程	速率常数 $k/(\text{min}^{-1})$	半衰期 $t_{1/2}/\text{min}$	$R^2$
2	$y=-0.017x$	0.017	40.76	0.9954
4	$y=-0.011x$	0.011	63.01	0.9881
6	$y=-0.008x$	0.008	86.62	0.9624

### 2.2.2 不同 BA 初始浓度的紫外降解效果

在紫外强度为  $71 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ ，液层厚度为 2 mm 时，分析不同 BA 初始浓度下紫外降解情况，由图 3 可知，当 BA 浓度为  $1 \mu\text{g/mL}$ ，照射时间为 10 min 时，BA 的降解率为 68.01%，照射时间不变，当 BA 初始浓度增加至  $2.5 \mu\text{g/mL}$ 、 $5.0 \mu\text{g/mL}$  时，BA 的降解率依次下降为 64.36% 和 49.01%，表明在相同照射时间下，BA 初始浓度与其降解率呈一定的负相关，即 BA 初始浓度越低，其降解率越高。BA 初始浓度相同时，随着紫外照射时间的延长，BA 降解率逐步提高，当照射时间在 120 min 时，3 种初始浓度的 BA 降解率为 92.02%~96.82%。

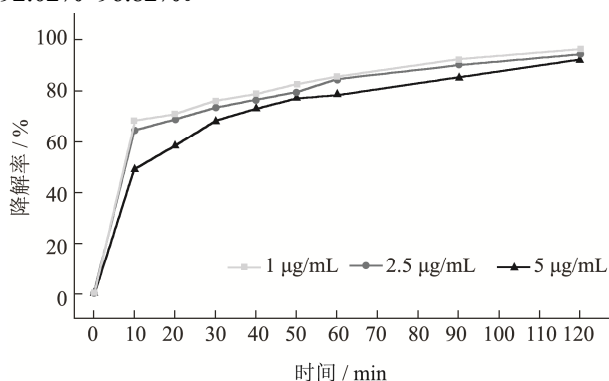


图 3 初始浓度对 BA 紫外降解效果的影响

Fig.3 Effect of initial concentration on degradation of bongkreic acid

用一级动力学方程对不同初始浓度下 BA 的降解情况进行拟合，其光解方程、半衰期、速率常数、相关系数见表 2。可见，其相关系数在 0.9816~0.9954 之间，线性拟合较好。表明 BA 的降解过程与初始浓度能较好符合一级动力学假设；且随着 BA 初始浓度的增大，BA 降解速率常数减少，半衰期延长。

### 2.2.3 不同液层厚度对酵母酸降解效果的影响

在紫外强度为  $71 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ ，BA 初始浓度为  $2.5 \mu\text{g/mL}$  时，分析不同液层厚度的 BA 的降解效果。由

图 4 可知，BA 液层厚度与其降解率呈一定的负相关。当液层厚度为 2 mm 时，照射时间 10 min，BA 降解率为 64.36%；照射时间不变，液层厚度增加至 4 mm 和 6 mm 时，降解率分别降为 62.45% 和 60.01%。在液层厚度相同的情况下，BA 降解率与紫外照射时间呈正相关，3 种液层厚度经紫外照射 10 min 时，BA 降解率约为 60%，照射 120 min 时，3 种液层厚度（由厚到薄）BA 降解率分别为 83.53%、88.96% 和 94.17%。说明液层厚度越薄，BA 的降解效果越佳。

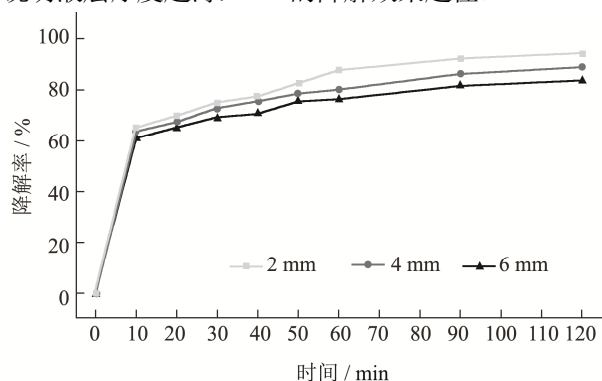


图 4 液层厚度对 BA 降解效果的影响

Fig.4 Effect of layer thickness on degradation of bongkreic acid

用一级动力学方程对不同液层厚度下 BA 的降解情况进行拟合，其光解方程、半衰期、速率常数、相关系数见表 3。可见，其相关系数在 0.9624~0.9954 之间，线性拟合较好。表明 BA 的降解过程与液层厚度能较好符合一级动力学假设；且随着 BA 液层厚度的增大，BA 降解速率常数减少，半衰期延长。

### 2.2.4 BA 降解主要因素的回归分析

用 SPSS 软件中的方差分析研究 BA 降解各个因素的显著性，结果显示，紫外照射强度、BA 初始浓度、液层厚度 3 个影响因素的  $p$  依次为 0.000、0.006、0.005，均小于 0.05，表明这 3 个因素对紫外降解 BA 的影响显著。用回归分析建立各因素与光解速率常数

的单独模型见表 4, 在此基础上, 用多元线性回归方法建立紫外照射强度 ( $X_1$ )、BA 初始浓度 ( $X_2$ )、液层厚度 ( $X_3$ ) 与紫外照射常数  $k$  ( $Y$ ) 的综合模型, 回归方程为  $Y=0.023+3.347\times 10^{-5}X_1-0.01X_2-0.03X_3$ , 模型拟合度为  $R^2=0.972$ , 回归方程  $F=58.049$ ,  $p=0.000<0.01$ , 说明回归方程非常显著, 其中自变量  $X_1$ 、 $X_2$ 、 $X_3$  的  $t$  检验分别为 0.011、0.013、0.000, 表明紫外照射强度、BA 初始浓度、液层厚度对 BA 光解速率常数的影响显著。由模型方程可知, 当紫外照射强度越大、BA 溶液初始浓度越低、液层厚度越小, BA 紫外降解速率越快。

表 4 BA 紫外降解各影响因子的回归分析

Table 4 Regression analysis of the factors affecting the UV degradation of bongkrekkic acid

因素	回归方程	回归方法	$R^2$
照射强度	$y=-3\times 10^{-5}x+0.016$	线性	0.9540
BA 初始浓度	$y=-0.0012x+0.021$	线性	0.9347
液层厚度	$y=-0.0023x+0.021$	线性	0.9643

现有相关文献中, 陈晓明等<sup>[19]</sup>利用阳光中的紫外线作用, 通过日晒去除银耳中米酵菌酸, 日晒两天可去毒 95%~97%。本研究利用紫外灯 (光强为  $187 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ ) 照射 2 h, 米酵菌酸降解率可达到 96%, 相比日晒法, 紫外灯强度更集中, 脱毒效率更高。俞世荣等<sup>[20]</sup>研究表明, 随紫外线照射 BA 的时间延长, 含有 0.4 g 毒素的滤纸片所形成的抑菌圈逐渐缩小, 表明紫外线照射有去毒效果, 但没有对 BA 紫外降解动力学进行研究。本研究发现米酵菌酸紫外降解符合一级动力学方程, 这与卢海清等<sup>[18]</sup>研究获得的苹果汁中展青霉素的紫外降解规律类似。

### 3 结论

本实验结果表明, 紫外照射能有效降解 BA, 且 BA 紫外降解符合一级动力学方程; 随着照射时间的延长, BA 和 IBA 分别再进一步降解, 毒性再进一步降低。显著性分析结果表明, 紫外照射强度、初始浓度、液层厚度对 BA 的降解均有显著影响。建立了紫外照射强度、初始浓度、液层厚度与 BA 紫外降解速率常数的综合回归方程:  $Y=0.023+3.347\times 10^{-5}X_1-0.01X_2-0.03X_3$ , 模型拟合度为  $R^2=0.972$ , 回归方程显著。本研究为探索食品中 BA 的紫外降解去毒提供了理论基础。

### 参考文献

[1] Ruijuan Shi, Chaoyang Long, Yunda Dai, et al. Bongkrekkic acid poisoning: Severe liver function damage combined with

multiple organ failure caused by eating spoiled food [J]. Legal Medicine, 2019, 41: 52-58

[2] Antoine Français, Antonio Leyva-Pérez, Etxebarria-Jardi G, et al. Total synthesis of iso- and bongkrekkic acids: natural antibiotics displaying potent antiapoptotic properties [J]. Chemistry A European Journal, 2010, 17(1): 329-343

[3] 宋兴田, 吴洪娟, 庄宝祥. 米酵菌酸中毒小鼠肝和脑组织的形态学改变[J]. 中国医药导报, 2010, 7(26): 36-38

SONG Xing-tian, WU Hong-juan, ZHAUNG Bao-xiang. Morphologic changes of intoxicated mice hepatocyte and brain tissues of bongkrekkic acid [J]. China Medical Herald, 2010, 7(26): 36-38

[4] 宋兴田, 吴洪娟, 庄宝祥, 等. 米酵菌酸对小鼠肾组织毒性作用的超微结构观察[J]. 中国医学创新, 2010, 24: 145-146

SONG Xing-tian, WU Hong-juan, ZHAUNG Bao-xiang, et al. Ultrastructure of kidney toxicity about bongkrekkic acid in mice [J]. Medical Innovation of China, 2010, 24: 145-146

[5] Rafael A Garcia. The effect of lipids on bongkrekkic (bongkrekk) acid toxin production by *Burkholderia cocovenenans* in coconut media [J]. Food Additives and Contaminants, 1999, 16(2): 63-69

[6] Arihiro Kano, Takuma Iwasaki, Mitsuru Shindo. Bongkrekkic acid facilitates glycolysis in cultured cells and induces cell death under low glucose conditions [J]. Biochemistry and Biophysics Reports, 2019, 20: 100683-100688

[7] Martial Rey, Eric Forest, Ludovic Pelosi. Exploring the conformational dynamics of the bovine ADP/ATP carrier in mitochondria [J]. Biochemistry, 2012, 51(48): 9727-9735

[8] Mehruba Anwar, Amelia Kasper, Alaina R Steck, et al. Bongkrekkic acid - a review of a lesser-known mitochondrial toxin [J]. Journal of Medical Toxicology, 2017, 13(2): 173-179

[9] Li Jing-hua, Zhou Lu, Long Chao-yang, et al. An investigation of bongkrekkic acid poisoning caused by consumption of a nonfermented rice noodle product without noticeable signs of spoilage [J]. Journal of Food Protection, 2019, 82(10): 1650-1654

[10] 陈荣桥, 陈汉金, 胡均鹏, 等. 米和食用淀粉中椰毒假单胞菌酵米面亚种污染调查与风险分析[J]. 现代食品科技, 2021, 37(1): 260-267

CHEN Rong-qiao, CHEN Han-jin, HU Jun-peng, et al. Investigation and risk analysis of *Pseudomonas cocovenenans* subsp. *farinofermentans* from rice and edible starch [J]. Modern Food Science and Technology, 2021, 37(1): 260-267

- [11] LIANG Ming, CHEN Rong-qiao, XIAN Yan-ping, et al. Determination of bongkrekkic acid and isobongkrekkic acid in rice noodles by HPLC-orbitrap HRMS technology using magnetic halloysite nanotubes [J]. Food Chemistry, 2020, 12: 344-352
- [12] Gudo Eduardo Samo, Cook Kyla, Kasper Amelia M, et al. Description of a mass poisoning in a rural district in Mozambique: the first documented bongkrekkic acid poisoning in Africa [J]. Clinical Infectious Diseases, 2018, 66(9): 1400-1406
- [13] 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 Wan-qin, QU Rui, AI Chong-yang, et al. Progress in removal of deoxynivalenol by *Lactobacillus* [J]. Feed Industry, 2019, 40(16): 51-59
- [14] 李智高, 毛永杨, 狄朋敏, 等. 食品中黄曲霉毒素的降解方法的研究进展[J]. 食品安全质量检测学报, 2019, 10(14): 4597-4602  
LI Zhi-gao, MAO Yong-yang, DI Peng-min, et al. Research progress on the degradation methods of aflatoxin in food [J]. Food Safety and Quality Detection Technology, 2019, 10(14): 4597-4602
- [15] 赵仁勇, 宋斌. 玉米赤霉烯酮生物脱毒研究进展[J]. 河南工业大学学报(自然科学版), 2018, 39(2): 113-121  
ZHAO Ren-yong, SONG Bin. Advances in biological detoxification of zearalenone [J]. Journal of Henan University of Technology (Natural Science Edition), 2018, 39(2): 113-121
- [16] 王雅玲, 叶林, 张玮芸, 等. 鱼干中黄曲霉毒素 B1 的紫外辐照消减技术参数[J]. 广东海洋大学学报, 2020, 40(1): 69-77  
WANG Ya-ling, YE Lin, ZHANG Wei-yun, et al. Parameters of ultraviolet irradiation degradation technology of AFB1 toxin in dried *Trachinotus ovatus* and *Lutjanus erythropterus* [J]. Journal of Zhanjiang Ocean University, 2020, 40(1): 69-77
- [17] 余以刚, 马涵若, 侯芮, 等. 臭氧和紫外降解面粉中的 DON 及对面粉品质的影响[J]. 现代食品科技, 2016, 32(9): 196-202  
YU Yi-gang, MA Han-ruo, HOU Rui, et al. Degradation of deoxynivalenol in flour by ozone and ultraviolet light and their effects on flour quality [J]. Modern Food Science and Technology, 2016, 32(9): 196-202
- [18] 卢海青, 胡冯垞, 陈川, 等. 苹果汁中展青霉素的紫外降解效果及动力学研究[J]. 核农学报, 2018, 32(12): 2380-2387  
LU Hai-qing, HU Feng-zai, CHEN Chuan, et al. UV degradation and kinetics of patulin in apple juice [J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 2018, 32(12): 2380-2387
- [19] 陈晓明, 刘秀梅, 王玉华, 等. 用日晒法去除银耳中黄杆菌毒素 A 的试验报告[J]. 卫生研究, 1986, 2: 34-36  
CHEN Xiao-ming, LIU Xiu-mei, WANG Yu-hua, et al. Experimental report on the removal of *Flavobacterium* toxin A from tremella by solarization [J]. Journal of Hygiene Research, 1986, 2: 34-36
- [20] 俞世荣, 刘秀梅, 杜春明, 等. “安全银耳”生产的研究[J]. 卫生研究, 1993, 22(2): 101-104  
YU Shi-rong, LIU Xiu-mei, DU Chun-ming, et al. Studies on production of "safety tremella" [J]. Journal of Hygiene Research, 1993, 22(2): 101-104

---

(上接第 66 页)

- [16] Danial N N, Korsmeyer S J. Cell death: critical control points [J]. Cell, 2004, 116(2): 205-19
- [17] Kim D S, Jeon B K, Lee Y E, et al. Diosgenin induces apoptosis in HepG2 cells through generation of reactive oxygen species and mitochondrial pathway [J]. Evidence-Based Complementary and Alternative Medicine, 2012, 2012(2): 981675