

DOI:10.3969/j.issn.1003-5060.2024.02.017

## 姜黄素对黄曲霉菌的生长抑制

杨友洋, 张丹凤, 王永海, 马志桃, 叶应旺

(合肥工业大学 食品与生物工程学院, 安徽 合肥 230601)

**摘要:** 文章研究姜黄素对黄曲霉的抗真菌效果。实验发现, 0.3 mmol/L 的姜黄素对黄曲霉孢子萌发率、芽管长度以及菌丝生长均有显著抑制作用, 抑制率分别为 11.4%、28.8%、21.4%。姜黄素显著抑制黄曲霉毒素产生量, 姜黄素处理组比污染阳性对照组减少了 46.9%。在马铃薯葡萄糖琼脂 (potato dextrose agar, PDA) 培养基中生长后发现黄曲霉孢子颜色由原来的黄绿色变成白色, 说明姜黄素抑制了黄曲霉孢子色素的合成。此外, 姜黄素显著降低黄曲霉菌丝穿透力, 从而使得黄曲霉的致病性下降。在连续处理 3 代后, 黄曲霉侵染花生的能力也明显降低, 说明黄曲霉没有产生耐受性。该实验结果为防控食品和饲料中黄曲霉污染提供了理论依据和数据支持。

**关键词:** 姜黄素; 黄曲霉; 黄曲霉毒素; 耐受性

**中图分类号:** Q93-331

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1003-5060(2024)02-0252-06

## Curcumin inhibits the growth of *Aspergillus flavus*

YANG Youyang, ZHANG Danfeng, WANG Yonghai, MA Zhitao, YE Yingwang

(School of Food and Biological Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230601, China)

**Abstract:** The antifungal activity of curcumin against *Aspergillus flavus* was investigated in this study. Those experiments showed that 0.3 mmol/L curcumin significantly inhibited the spore germination rate, germ tube length and mycelial growth of *Aspergillus flavus*, and the inhibition rates were 11.4%, 28.8% and 21.4%, respectively. Curcumin obviously inhibited the production of aflatoxin, which decreased by 46.9% in the curcumin treatment group compared with the positive control group. After growing in potato dextrose agar (PDA) medium, it was found that the color of *Aspergillus flavus* spores changed from yellow green to white, indicating that curcumin inhibited the synthesis of *Aspergillus flavus* spore pigment. In addition, curcumin significantly reduced the penetration of *Aspergillus flavus*, which reduced the pathogenicity of *Aspergillus flavus*. After continuous treatment for three generations, the ability of *Aspergillus flavus* to infect peanut also decreased significantly, indicating that *Aspergillus flavus* did not produce tolerance. This experimental study provides a theoretical basis and data support for the prevention and control of *Aspergillus flavus* pollution in food and feed.

**Key words:** curcumin; *Aspergillus flavus*; aflatoxin; tolerance

## 0 引言

黄曲霉菌 (*Aspergillus flavus*) 是一种土壤

腐殖真菌, 玉米、花生等谷类收获前后都会腐烂作物的种子<sup>[1]</sup>。黄曲霉最适生长温度范围为 25~42 °C, 其中最适毒素产生温度为 28 °C<sup>[2]</sup>。这些

收稿日期: 2022-02-28; 修回日期: 2022-05-27

基金项目: 国家重点研发计划资助项目 (2017YFC101202)

作者简介: 杨友洋 (1995—), 男, 安徽长丰人, 合肥工业大学硕士生;

张丹凤 (1985—), 女, 安徽安庆人, 博士, 合肥工业大学副教授, 硕士生导师;

叶应旺 (1977—), 男, 安徽安庆人, 博士, 合肥工业大学教授, 博士生导师, 通信作者, E-mail: yeyingwang04@126.com.

真菌会导致食物变质,甚至还会产生有剧毒的毒素,其中黄曲霉毒素 B<sub>1</sub> (aflatoxin B<sub>1</sub>, AFB<sub>1</sub>) 因其对肝的毒性和极强的致癌性而备受关注。动物食用含有黄曲霉毒素的谷物,严重情况可导致死亡,人类长时间食用含低浓度黄曲霉毒素的食物被认为是导致胃癌、肝癌、肠癌等疾病的主要原因<sup>[3]</sup>。黄曲霉毒素对人类和牲畜造成严重的健康问题,因此超过 100 多个国家在食品与饲料中严格限制毒素水平,其中用于人类和奶牛的玉米受到最严格限制,为 20/1 000 000 000<sup>[4]</sup>。近年来,尽管引进了新的抗真菌药物和防腐剂,但是由于耐药性和环境污染逐渐增加,寻找安全可靠的抗真菌药物引起全世界研究者的兴趣。

姜黄素(C<sub>21</sub>H<sub>20</sub>O<sub>6</sub>)是从姜黄根茎中提取的小分子量疏水多酚类化合物,也是姜黄的主要成分,具有抗菌、抗炎、抗肿瘤等广泛的药理活性<sup>[5-6]</sup>。姜黄素被世界卫生组织、联合国粮食及农业组织归列为食品添加剂<sup>[7]</sup>,也是我国在《食品添加剂使用卫生标准》(GB 2760—1981)中最早颁布的,是在食品中被允许使用的 9 种天然色素之一<sup>[8]</sup>。姜黄素作为天然光敏剂,对金黄色葡萄球菌、沙门氏菌、拟茎点霉、灰霉等致病菌均有抑制效果<sup>[9]</sup>。由于姜黄素良好的抑菌效果,在食品安全领域得到人们的关注和重视。

## 1 实验材料和方法

### 1.1 材料和试剂

黄曲霉菌株(JXZS-117-1)由中国农业科学院油作物研究所惠赠;姜黄素(纯度≥98%)购自 Sigma-Aldrich(St. Louis, USA)。

### 1.2 实验方法

#### 1.2.1 孢子萌发率和芽管长度

参考文献[10]的方法,在 90 mm 的培养皿中加入 10 mL 的 PDA,取 100 μL 收集的孢子液并用玻璃涂布棒在平板表面涂抹均匀。放置在 28 °C 的恒温培养箱中静置培养 12 h。在光学显微镜下观察萌发情况。记录和计算平板上孢子的芽管长度和萌发率,萌发率计算公式如下:

$$R = \frac{S_2}{S_1} \times 100\%,$$

其中:S<sub>1</sub> 为总的孢子个数;S<sub>2</sub> 为萌发的孢子个数。

#### 1.2.2 抑菌剂对致病菌生长抑制效果

根据文献[11]的方法,将在马铃薯葡萄糖琼脂(potato dextrose agar, PDA)培养基培养 7 d 正常生长的黄曲霉使用 5 mm 打孔器,取菌饼于

含 0.3 mmol/L 的姜黄素 PDA 的培养皿正中央,在空白对照组中只加入 PDA。将样品放入 28 °C 的恒温培养箱中培养 3 d。观察并测量黄曲霉菌落直径。每个处理重复 3 次,进行 3 次实验。

#### 1.2.3 毒素检测

根据文献[12]的方法并稍作改动。在 10 mL 的试管中加入 5 mL 的马铃薯葡萄糖培养液(potato dextrose broth, PDB),添加姜黄素使最终浓度为 0.3 mmol/L,加入 100 μL 已过滤的 5 × 10<sup>5</sup> 个/mL 的黄曲霉孢子液,然后放置在转速为 180 r/min、温度为 28 °C 的恒温摇床中。在摇床中培养 7 d 后收集菌丝和培养液。将收集的菌丝在 50 °C 的烘箱中烘干水分并不时地记录菌丝质量,待质量不再变化记录最终菌丝干重。

将去除菌丝的培养液加入到 50 mL 的离心管中并加入 1 g NaCl,用 pH=7 的磷酸缓冲液稀释至 25 mL,将溶液震荡混匀并超声 30 min,过滤备用。准确量取 5 mL 滤液加入到免疫亲和柱中,然后将免疫亲和柱接到 5 mL 的注射器下,调整注射器流速使溶液以 2 mL/min 的流速缓慢流过免疫亲和柱,再以 2 mL/min 的流速用 0.1% 吐温/PBS 清洗,用 10 mL 的蒸馏水清洗 2 次。弃去全部流出的液体,并将 3 mL 的空气注入免疫亲和柱,再用 2 mL 的色谱级甲醇洗脱毒素,收集洗脱液。洗脱液用 0.22 μm 的有机相过滤器过滤收集。准确吸取 300 μL 的样品加入样品收集瓶中待测。液相条件为:流动相为甲醇和水(体积比为 70:30),流速 1 mL/min,柱温 40 °C。荧光检测激发波长 360 nm,发射波长 440 nm。

计算单位质量菌丝产生的毒素,计算公式为:

$$T = \frac{10c}{m},$$

其中:T 为单位菌丝产生的毒素量;c 为毒素的检测浓度;m 为菌丝的干质量。

#### 1.2.4 洋葱穿透实验

参照文献[13]的方法,准备一个新鲜、无损伤的洋葱,用刀片在内表皮上切出一个边长 1 cm 的正方形,用无菌的镊子剥去洋葱的表皮,将撕下的洋葱内表皮装入含有 50 mL 无菌水的培养瓶中。密封之后将培养瓶放置在 68 °C 的水浴锅中加热 1 h 以杀死洋葱细胞。加热结束后使用无菌蒸馏水将内表皮清洗 2 遍,清除表皮上的多余组织。配制 5 × 10<sup>5</sup> 个/mL 的黄曲霉孢子液,并在孢子液中加入姜黄素使其浓度为 0.3 mmol/L,设置不含有姜黄素的空白对照。然后用移液枪取 100 μL 的

孢子液加入到洋葱表皮,将孢子液在表皮涂抹均匀。将处理后的洋葱表皮放置在培养皿中保湿、避光、室温下孵育 12 h 后,加入 0.25% 的台盼蓝染液染色 4 min,然后用移液枪小心地除去染液,再吸取无菌蒸馏水吹洗掉剩余的染液。最后制片在普通光学显微镜下观察拍照。

### 1.2.5 侵染花生实验

参考文献[14]的方法,并且稍作改进。准备孢子悬浮液并用血球计数板计数,制成  $5 \times 10^5$  个/mL 的孢子液 100 mL。将花生粒称重记录,用 1% 的次氯酸钠浸泡 1 min,取出后用无菌水冲洗 2 次,放置在超净台吹干。将花生放入孢子液中浸泡 30 s,取出后放置在含少量无菌水滤纸的培养皿中,将培养皿放置在 28 °C 恒温培养箱中培养 7 d。对照组是用未处理的黄曲霉孢子液浸泡,设置空白对照。每个处理重复 3 次,进行 3 次实验。

### 1.2.6 花生感官评价

为了评价姜黄素的加入对花生的感官是否会产生影响,参考文献[15]的方法,对加入姜黄素的花生进行感官评价。具体操作为:将花生加入到 0.3 mmol/L 的姜黄素中进行浸泡,使用清水浸泡的花生做空白对照,浸泡结束后将花生放置在通风处晾干,2 d 后将部分姜黄素处理的花生进行清水清洗。实验邀请 13 位人员对花生进行感官评价,通过对样品仔细观察、嗅闻和品尝,对各项指标进行评分,具体评价标准见表 1 所列。

表 1 花生感官评价标准

项目	评分标准	感官评分
色泽	乳白色	8~10
	淡黄色	5~7
	黄色	<5
气味	无刺激性气味	8~10
	少量刺激性气味	5~7
	刺激性气味	<5
口感	无苦涩	8~10
	少量苦涩	5~7
	苦涩	<5

### 1.2.7 抑菌剂对病原菌形态学的影响

根据文献[16]的方法并稍作修改,从 7 d 正常生长的黄曲霉菌板中截取菌饼,加入到含无菌水的培养瓶中,振荡充分,用两层擦镜纸进行过滤,取 10  $\mu$ L 菌液放置在血球计数板中进行计数,获得  $5 \times 10^5$  个/mL 的孢子液;然后在添加 0.3 mmol/L 姜黄素的 PDA 培养皿中,吸取 100  $\mu$ L 的孢子液加到培养皿中,用玻璃涂布棒将孢子液涂抹均匀,放

置于 28 °C 的恒温培养箱中培养 7 d;再将处理后的黄曲霉菌重新提取孢子,加入含姜黄素的平板中,进行连续 3 代的培养并观察菌落形态和色素产生情况。每个处理重复 3 次,进行 3 次实验。

### 1.2.8 黄曲霉菌对姜黄素的耐受性分析

为了探究黄曲霉菌对姜黄素的长期处理会不会产生耐受性,在含有 0.3 mmol/L 姜黄素的 PDA 平板上培养黄曲霉菌,待产孢后观察菌落形态并收集孢子,用无菌水过滤黄曲霉孢子,制成  $5 \times 10^5$  个/mL 的黄曲霉孢子悬浮液;取 100  $\mu$ L 孢子悬浮液加入到含姜黄素和不含姜黄素的 PDA 板中,然后用玻璃涂布棒涂抹均匀。将接种好的平板放置在 28 °C 的培养箱中,培养 7 d。第 7 天收集平板上的孢子过滤,得到第 1 代姜黄素处理的孢子液;继续将得到的孢子液在姜黄素处理的平板中连续培养 3 代,获得第 3 代姜黄素处理后的黄曲霉孢子。然后使用第 3 代孢子进行花生侵染实验。每个处理重复 3 次,进行 3 次实验。

### 1.3 数据分析

所得数据使用 Excel 2013 进行统计计算,并用 SPSS 17.0 进行方差分析(ANOVA),计算平均值之间是否存在显著性差异用 Duncan 多重检验法, $P < 0.05$  认为差异显著,不同字母表示不同处理之间具有显著性差异。文中柱状图使用 Origin 8.0 进行绘制。

## 2 结果与分析

### 2.1 孢子萌发率和芽管长度分析

真菌侵染花生、玉米等主要通过如下途径孢子附着在其表面、在适当的环境下萌发、菌丝不断扩张,从而导致食物污染。抑制孢子萌发率和芽管长度是抑制真菌污染的重要指标。

姜黄素连续处理对黄曲霉的孢子萌发率和芽管长度抑制情况如图 1 所示。

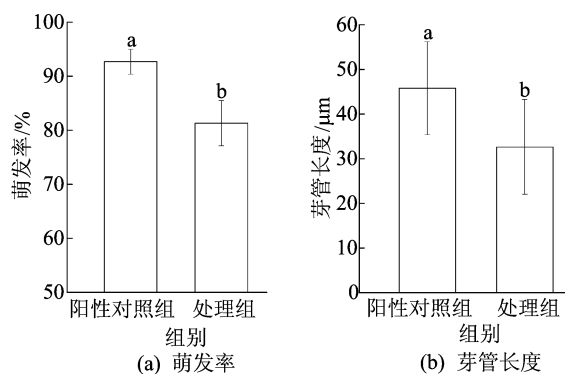


图 1 姜黄素对黄曲霉孢子萌发率和芽管长度的抑制作用

由图1可知:与污染阳性对照组相比,姜黄素处理组的黄曲霉孢子萌发率和芽管长度降低;污染阳性对照组的黄曲霉孢子萌发率为92.7%,姜黄素处理组的黄曲霉孢子萌发率为81.3%,降低了11.4%;黄曲霉孢子芽管长度实验中污染阳性对照组长度为45.8  $\mu\text{m}$ ,姜黄素处理组为32.6  $\mu\text{m}$ ,芽管长度降低了28.8%。结果表明,姜黄素连续处理可以在一定程度上抑制黄曲霉孢子萌发率和芽管长度( $P < 0.05$ )。

## 2.2 抑菌剂对病原菌抑制效果

为了探究姜黄素对黄曲霉是否抑制,首先在体外实验中,通过平板实验,在培养基中加入姜黄素观察其对黄曲霉菌落的生长情况。

姜黄素对黄曲霉的抑制情况如图2所示。从图2可以看出:姜黄素处理后明显地抑制了黄曲霉菌落的生长;相对于污染阳性对照组,黄曲霉正常生长直径平均为14 cm,而姜黄素处理组的黄曲霉生长直径为11 cm,抑制生长率为21.4%。可以看出,加入姜黄素对黄曲霉的生长具有抑制作用( $P < 0.05$ )。

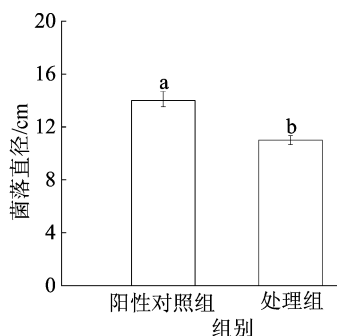


图2 姜黄素对黄曲霉生长抑制情况

## 2.3 姜黄素对 AFB<sub>1</sub> 产生量的抑制作用

农产品遭受黄曲霉的污染主要是由于它能够产生致命性黄曲霉毒素 B<sub>1</sub>,通过检测黄曲霉毒素 B<sub>1</sub> 含量,能够进一步评估姜黄素对黄曲霉的抑制作用。样品经过滤处理后,通过免疫亲和柱的富集,再经过三氟乙酸进行柱前衍生,样品置于高效液相色谱 (high performance liquid chromatography, HPLC) 荧光检测器检测。黄曲霉毒素 B<sub>1</sub> 产量如图3所示。

由图3可知:姜黄素处理组的黄曲霉毒素 B<sub>1</sub> 的产生量为23.8 ng/g,污染阳性对照组的产生量为47.5 ng/g;相比之下,姜黄素处理组毒素降低了46.9%。分析结果可知,姜黄素能够显著降低黄曲霉毒素 B<sub>1</sub> 的产生( $P < 0.05$ )。因此,姜黄

素作为天然的抑菌剂具有极大的开发潜力。

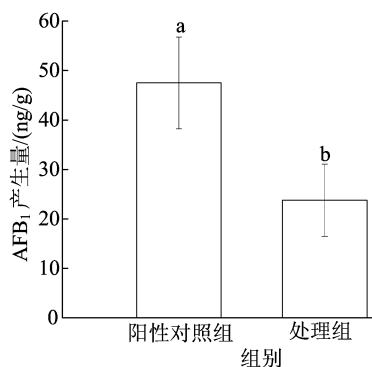


图3 姜黄素对 AFB<sub>1</sub> 产生量的抑制作用

## 2.4 洋葱穿透实验结果

黄曲霉在发生侵染时,本文首先通过芽孢萌发产生菌丝,然后通过菌丝汲取生存所需要的养分。菌丝的活力强弱会影响黄曲霉侵染的严重程度。通过对菌丝做洋葱表皮穿透实验,测试菌丝活力。

台盼蓝染色后在显微镜下观察,孢子穿透洋葱表皮如图4所示。从图4可以看出,污染阳性对照组在萌发生长后,菌丝穿透洋葱表皮进入洋葱细胞内,这会导致在洋葱细胞外部的菌丝会被台盼蓝染成蓝色,而留在内部的菌丝未被染色。姜黄素处理组的黄曲霉菌丝大都被染上了蓝色,黄曲霉的菌丝活性降低,说明姜黄素降低了黄曲霉菌丝的穿透能力。

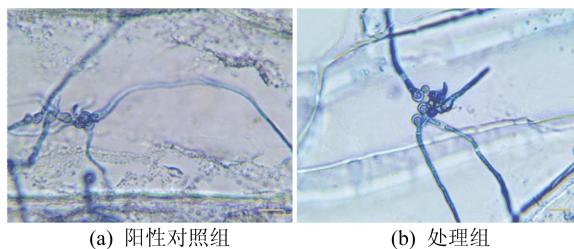


图4 姜黄素对黄曲霉菌丝穿透力的影响

## 2.5 侵染花生实验结果

因为花生易受黄曲霉的侵染,所以在之前平板抑制实验的基础上,进一步评估姜黄素对黄曲霉的防控效果。黄曲霉侵染花生情况如图5所示。

从图5可以看出,培养7 d后,污染阳性对照组花生全部发病,而姜黄素处理组的花生仅是轻微感染,发病情况明显低于污染阳性对照组,因此姜黄素具有开发为新型抑菌剂控制食品和饲料原

料中黄曲霉污染的前景。

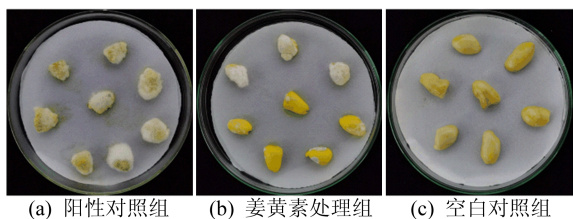


图 5 姜黄素对花生黄曲霉病的抑制作用

## 2.6 花生感官评价结果

花生感官评价结果见表 2 所列。由表 2 可知,浓度为 0.3 mmol/L 姜黄素的加入并不会显著影响花生的口感和气味( $P > 0.05$ ),但是对于花生的色泽产生了显著性的影响( $P < 0.05$ ),使用清水清洗后会显著减少姜黄素对花生色泽的影响( $P < 0.05$ )。结果表明,姜黄素的加入并不会影响花生的气味和口感,对姜黄素应用具有重要的意义。

表 2 花生感官评价结果

花生处理	色泽评分	气味评分	口感评分
清水	8.69±0.85 <sup>a</sup>	9.08±0.85 <sup>a</sup>	8.30±0.95 <sup>a</sup>
姜黄素	5.23±1.42 <sup>c</sup>	9.15±0.55 <sup>a</sup>	8.54±0.78 <sup>a</sup>
水洗姜黄素	6.85±0.80 <sup>b</sup>	9.46±0.66 <sup>a</sup>	8.38±1.50 <sup>a</sup>

## 2.7 抑菌剂对病原菌形态学的影响

通过实验发现,姜黄素连续处理 3 代对黄曲霉形态的影响如图 6 所示。由图 6 可知,在添加抑菌剂的黄曲霉中,姜黄素处理组连续处理 3 代孢子的颜色呈现出乳白色,而污染阳性对照组培养连续 3 代仍然呈现黄绿色。结果表明,姜黄素会抑制黄曲霉孢子色素的合成。

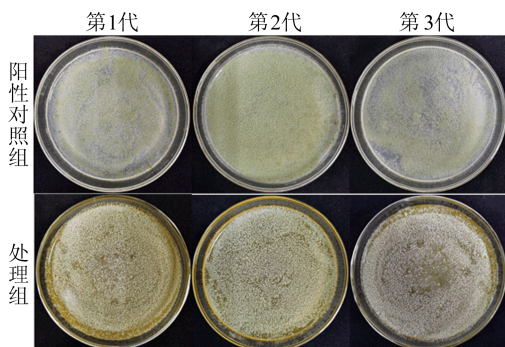


图 6 姜黄素连续处理 3 代对黄曲霉形态的影响

## 2.8 黄曲霉对姜黄素的耐受性

为了探究黄曲霉对姜黄素的耐受性,通过对黄曲霉 3 代的不断培养,第 3 代孢子感染花生情况如图 7 所示。

从图 7 可以看出,在污染阳性对照组中花生全部发病,而在姜黄素处理组中,花生仅部分感染。这说明经过姜黄素处理 3 代后的黄曲霉孢子侵染能力明显下降。结果表明,经过姜黄素处理后产生的黄曲霉孢子的活性同样受到一定的抑制作用,黄曲霉对姜黄素并没有产生耐受性,因此姜黄素具有作为一种长期抑菌剂的潜力。

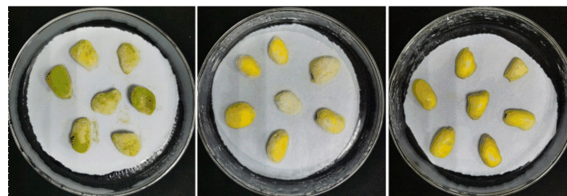


图 7 姜黄素平板连续培养 3 代黄曲霉侵染花生发病情况

## 3 结 论

本文主要研究了姜黄素对黄曲霉的抗真菌效果。通过姜黄素对黄曲霉抑制效果、形态学影响、菌丝的活力检验、毒素产量检测、侵染花生实验以及黄曲霉对姜黄素的耐受性实验,初步证明姜黄素对黄曲霉具有抑制作用。下一步实验将对相关抑制机理进行研究,以期对黄曲霉抑制提供新的思路。

### [参 考 文 献]

- [1] 荆丹,岳晓凤,白艺珍,等. 黄曲霉对花生和玉米的侵染研究[J]. 中国油料作物学报,2022,44(2):442-450.
- [2] HEDAVATI M T, PASQUALOTTO A C, WARN P A, et al. *Aspergillus flavus*: human pathogen allergen and mycotoxin producer[J]. Microbiology, 2007, 153(6): 1677-1692.
- [3] NEME K, MOHAMMED A. Mycotoxin occurrence in grains and the role of postharvest management as a mitigation strategies[J]. Food Control, 2017, 78: 412-425.
- [4] ABDEL-KAREEM M M, RASMEY A M, ZOHRI A. The action mechanism and biocontrol potentiality of novel isolates of *Saccharomyces cerevisiae* against the aflatoxinigenic *Aspergillus flavus* [J]. Lett Appl Microbiol, 2019, 68(2): 104-111.
- [5] SCHMIDT M A, MAO Y J, MEHL H L. Enzymatic degradation is an effective means to reduce aflatoxin contamination in maize[J]. BMC Biotechnol, 2021, 21(1): 70.
- [6] 骆恒芳,潘成明,冯凌思,等. 金黄色葡萄球菌耐药的临床分析及姜黄素对其抑制效果分析[J]. 检验医学与临床, 2013, 10(18): 2376-2377.
- [7] 赵文竹,张瑞雪,于志鹏,等. 生姜的化学成分及生物活性研究进展[J]. 食品工业科技, 2016, 37(11): 383-389.

(下转 269 页)

- lines; a comparative/collective analysis/study[J]. *Frontiers in Cellular Neuroscience*, 2015(9):91.
- [3] 李春艳,赵洪庆,杨蕙,等. 谷氨酸兴奋毒性及其调节剂的研究进展[J]. *中国药理学通报*, 2022, 38(5):645-649.
- [4] GRACE M S, BONVINI S J, BELVISI M G, et al. Modulation of the TRPV4 ion channel as a therapeutic target for disease[J]. *Pharmacology & Therapeutics*, 2017 (177): 9-22.
- [5] 贾振华,黄渊,唐景峰,等. TRP 通道超家族的基本特征及其与疾病的关系[J]. *生命科学*, 2020, 32(9):903-914.
- [6] VETETO A B, PEANA D, LAMBERT M D, et al. Transient receptor potential vanilloid-4 contributes to stretch-induced hypercontractility and time-dependent dysfunction in the aged heart[J]. *Cardiovascular Research*, 2020, 116(11): 1887-1896.
- [7] HONG Z W, TIAN Y J, YUAN Y B, et al. Enhanced oxidative stress is responsible for TRPV4-induced neurotoxicity [J]. *Frontiers in Cellular Neuroscience*, 2016(10):323.
- [8] LIU M Y, LIU X, WANG L, et al. TRPV4 inhibition improved myelination and reduced glia reactivity and inflammation in a cuprizone-induced mouse model of demyelination [J]. *Frontiers in Cellular Neuroscience*, 2018(12):392.
- [9] LIU N, WU J L, CHEN Y X, et al. Channels that cooperate with TRPV4 in the brain[J]. *Journal of Molecular Neuroscience*, 2020, 70(11):1812-1820.
- [10] SHEN J J, TU L, CHEN D, et al. TRPV4 channels stimulate  $\text{Ca}^{2+}$ -induced  $\text{Ca}^{2+}$  release in mouse neurons and trigger endoplasmic reticulum stress after intracerebral hemorrhage[J]. *Brain Research Bulletin*, 2019(146):143-152.
- [11] JIE P H, TIAN Y J, HONG Z W, et al. Blockage of transient receptor potential vanilloid 4 inhibits brain edema in middle cerebral artery occlusion mice[J]. *Frontiers in Cellular Neuroscience*, 2015(9):141.
- [12] WANG Z Q, ZHOU L, AN D, et al. TRPV4-induced inflammatory response is involved in neuronal death in pilocarpine model of temporal lobe epilepsy in mice[J]. *Cell Death & Disease*, 2019, 10(6):386.
- [13] BAI J, LIPSKI J. Involvement of TRPV4 channels in  $\text{A}\beta_{40}$ -induced hippocampal cell death and astrocytic  $\text{Ca}^{2+}$  signalling[J]. *Neuro Toxicology*, 2014(41):64-72.
- [14] JIE P H, LU Z H, HONG Z W, et al. Activation of transient receptor potential vanilloid 4 is involved in neuronal injury in middle cerebral artery occlusion in mice[J]. *Molecular Neurobiology*, 2016, 53(1):8-17.
- [15] RAKERS C, SCHMID M, PETZOLD G C. TRPV4 channels contribute to calcium transients in astrocytes and neurons during peri-infarct depolarizations in a stroke model [J]. *Glia*, 2017, 65(9):1550-1561.
- [16] 陈奕芝,方永奇,梁毅,等.  $\beta$ -细辛醚对谷氨酸所致 PC12 细胞损伤的保护作用[J]. *中国中医药信息杂志*, 2007(6): 22-23.

(责任编辑 闫杏丽)

**(上接第 256 页)**

- [8] 袁鹏,陈莹,肖发,等. 姜黄素的生物活性及在食品中的应用 [J]. *食品工业科技*, 2012, 33(14):371-375.
- [9] TIAN M Y, LIU T T, WU X G, et al. Chemical composition, antioxidant, antimicrobial and anticancer activities of the essential oil from the rhizomes of *Zingiber striolatum* Diels[J]. *Nat Prod Res*, 2020, 34(18):2621-2625.
- [10] 侯颖,徐建强,宋宇州,等. 三种杀菌剂对牡丹黑斑病菌菌丝生长及分生孢子萌发的影响[J]. *植物保护学报*, 2014, 41(3):367-372.
- [11] 李倩,赵颖,乔苏瑞,等. 二氢杨梅素抑制黄曲霉菌生长的机制[J]. *食品科学*, 2021, 22(6):1-11.
- [12] 王伟岗,强敏,端礼钦,等. 复合免疫亲和柱净化高效液相色谱同时测定谷物及其制品 9 种真菌毒素[J]. *色谱*, 2018, 36(12):1330-1336.
- [13] BERNDT P, HAHN M. Different signalling pathways involving a G protein, c AMP and a MAP kinase control germination of *Botrytis cinerea* conidia [J]. *Molecular Microbiology*, 2010, 59(3):821-835.
- [14] TANG X, SHAO Y L, TANG Y J, et al. Antifungal activity of essential oil Compounds (geraniol and citral) and inhibitory mechanisms on grain pathogens (*Aspergillus flavus* and *Aspergillus ochraceus*) [J]. *Molecules*, 2018, 23(9):1-18.
- [15] 刘潇潇,张龙飞,甘钰培,等. 油炸花生米生产工艺及挥发性风味成分研究[J]. *食品研究与开发*, 2021, 42(24): 68-73.
- [16] HUA C Y, KAI K, WANG X F, et al. Curcumin inhibits gray mold development in kiwifruit by targeting mitogen-activated protein kinase (MAPK) cascades in *Botrytis cinerea* [J]. *Postharvest Biology and Technology*, 2019, 151: 152-159.

(责任编辑 闫杏丽)