

DOI: 10.16210/j.cnki.1007-7561.2021.06.022

郭超, 韩伟, 任菲, 等. 粮油食品防霉微生物筛选及其活性物质初步研究[J]. 粮油食品科技, 2021, 29(6): 231-237.

GUO C, HAN W, REN F, et al. Research on the screening of anti-mold microorganisms in cereals, oils and foods and their bioactive substances[J]. Science and Technology of Cereals, Oils and Foods, 2021, 29(6): 231-237.

# 粮油食品防霉微生物筛选及其活性物质初步研究

郭超, 韩伟, 任菲, 王超✉

(国家粮食和物资储备局科学研究院, 北京 100037)

**摘要:** 为开发新型防霉剂, 降低粮油食品储藏、运输、流通等过程中霉变对其品质和食用安全的影响, 研究筛选获得具有强防霉活性的微生物。采用抑菌圈法, 以禾谷镰刀菌 (*Fusarium graminearum*) 为指示菌筛选具有防霉活性的菌株。利用形态学观察、生化特征鉴定和 16S rDNA 基因序列比对进行菌株鉴定; 通过不同温度、pH 和蛋白酶 K 处理对防霉活性物质进行初步分析。结果显示: 通过初筛获得 33 株对禾谷镰刀菌具有强抑制活性的菌株, 复筛后选择的 7 株菌归属为芽孢杆菌属 (*Bacillus*); 活性物质分析发现 7 株菌的活性物质均不耐高温和强酸碱, 同时蛋白酶 K 处理对其防霉效果没有明显影响, 初步推断为肽类; 通过抑菌谱测定发现菌株 ASAG 62 对常见霉菌 (产黄青霉 *Penicillium flavum*、黑曲霉 *Aspergillus Niger*、赭曲霉 *Aspergillus ochre*、黄曲霉 *Aspergillus flavus*、禾谷镰刀菌 *F. graminearum*) 均具有良好的抑制效果。

**关键词:** 防霉活性; 芽孢杆菌; 筛选; 禾谷镰刀菌; 粮油食品; 抗菌肽

中图分类号: TQ455.5 文献标识码: A 文章编号: 1007-7561(2021)06-0231-07

## Research on the Screening of Anti-mold Microorganisms in Cereals, Oils and Foods and their Bioactive Substances

GUO Chao, HAN Wei, REN Fei, WANG Chao✉

(Academy of National Food and Strategic Reserves Administration, Beijing 100037)

**Abstract:** In order to develop new anti-mold agents and reduce the effect of mildew on the quality and safety during storage, transportation, and circulation of cereals, oils and foods, microorganisms with strong anti-mold activity were screened in this study. Bacteriostasis method was applied and *Fusarium graminearum* was taken as indicator. Morphological observation, biochemical characterization and 16S rDNA gene sequences alignment were used to identify the strains. The anti-mold bioactive substances were analyzed in different temperatures, pH, and proteinase K treatment. After primary screening, 33 strains with strong inhibitory activity against *F. graminearum* were obtained. Seven strains were selected after secondary screening and classified as *Bacillus*. Through the analysis of bioactive substances, the anti-mold effects of the seven strains were not of high temperature and strong acid or base resistant, or obviously influenced by proteinase K

收稿日期: 2021-04-09

基金项目: 十三五重点研发计划课题 (2017YFC1600604)

Supported by: National Key Research and Development Project of the 13th five-year plan, China (No.2017YFC1600604)

作者简介: 郭超, 女, 1988 年出生, 助理研究员, 研究方向为粮油食品中活性物质研究与应用。E-mail: gc@ags.ac.cn.

通讯作者: 王超, 男, 1981 年出生, 博士, 副研究员, 研究方向为粮油食品中活性物质研究与应用。E-mail: wc@ags.ac.cn.

treatment. It indicated that the bioactive substances were peptides. Finally, the strain ASAG 62 had good inhibitory effect on common molds (*Penicillium flavum*, *Aspergillus Niger*, *Aspergillus ochre*, *Aspergillus flavus* and *F. graminearum*).

**Key words:** anti-mold activity; *Bacillus*; screening; *Fusarium graminearum*; cereals, oils and foods; antimicrobial peptide

根据 FAO 估计, 每年至少有 2% 的粮食因霉变而不能食用。我国粮食每年因霉变造成的损失占总产量的 1.5%~3%<sup>[1]</sup>。真菌及其真菌毒素污染是威胁粮食储藏运输流通环节安全、造成粮食损失的主要因素之一, 许多真菌能引起粮食变色、发热, 同时产生大量的真菌毒素。我国每年因真菌及真菌毒素污染造成的粮食减产、浪费和安全风险, 不仅使得国民的身体健康受到威胁, 还直接影响我国的粮油食品安全<sup>[2-4]</sup>。目前解决粮食霉变的途径可分为物理、化学、生物三类。物理方法主要包括气调储藏、低温储藏、微波以及纳米氧化锌、纳米银等的吸附作用; 化学方法主要是利用丙酸、山梨酸、双乙酸钠、苯甲酸等酸类物质及其盐<sup>[1,5-7]</sup>。生物学方法主要有利用生物来源的具有防霉功能的活性物质, 如香辛料、中草药等植物中提取的精油, 具有抑菌性能的活性物质主要为醛类、酚类、酯类和醇类<sup>[8-10]</sup>; 来源于动物的壳聚糖、鱼精蛋白等<sup>[11-12]</sup>; 目前见报道的产生防霉活性物质的微生物主要有链霉菌属 (*Streptomyces*)、芽孢杆菌属 (*Bacillus*)、假单胞菌属 (*Pseudomonas putida*)、根霉属 (*Rhizopus*)、木霉属 (*Trichoderma*) 等<sup>[7]</sup>。

芽孢杆菌属枯草芽孢杆菌 (*Bacillus subtilis*) 于 1945 年即被发现其代谢物具有抑菌活性<sup>[13]</sup>, 因具有稳定性好、抗逆性高、抑菌谱广等优点, 其产生的大量抗菌化合物已应用于食品加工和作物保护领域, 如食品防腐剂、治疗剂和生物农药<sup>[14]</sup>。有效成分包含芽孢杆菌的防霉菌剂产品有普滤仕日本九州的日本鬼粉、湖北省武汉天惠公司的枯草芽孢杆菌、山东泰诺药业的木霉菌蜡质芽孢杆菌泰诺-维克等<sup>[7]</sup>。枯草芽孢杆菌类成员包括枯草芽孢杆菌、解淀粉芽孢杆菌 (*Bacillus amyloliquefaciens*)、萎缩芽孢杆菌 (*Bacillus atrophaeus*)、地衣芽孢杆菌 (*Bacillus licheniformis*)、短小芽孢杆菌 (*Bacillus pumilus*) 等。其产生的

抑菌物质根据其生物合成途径和化学性质可区分为非核糖体途径合成的脂肽类抗菌肽、核糖体途径合成的蛋白类抗菌物质以及挥发性化合物<sup>[15-17]</sup>。

本研究以禾谷镰刀菌 (*F. graminearum*) 为指示菌, 筛选产防霉活性物质微生物, 得到防霉活性较高的 7 株芽孢杆菌, 初步确定活性物质为肽类, 本研究结果为新型防霉剂开发提供了菌株来源。

## 1 材料与方 法

### 1.1 试验材料

#### 1.1.1 菌种

待筛菌种及常见指示霉菌: 国家粮食和物资储备局科学研究院筛选和保藏。

#### 1.1.2 培养基

肉汤培养基 (LB 培养基): 胰蛋白胨 10 g/L, 酵母浸粉 5 g/L, NaCl 10 g/L, 115 °C 灭菌 25 min;

马铃薯葡萄糖琼脂培养基 (PDA 固体培养基): 马铃薯浸出粉 10 g/L, 葡萄糖 20 g/L, 121 °C 灭菌 25 min。

### 1.2 试验方法

#### 1.2.1 菌株培养

菌株活化: 菌株接种于 LB 液体培养基, 接种量 1%, 30 °C、200 r/min 震荡培养。

菌株培养: 活化培养 24 h 后接种于 LB 液体培养基, 接种量 1%, 30 °C、200 r/min 震荡培养。

#### 1.2.2 防霉活性筛选

禾谷镰刀菌菌块放置于 PDA 固体平板中间, 30 °C 培养 24 h。平板上等距离放置 3~4 个圆形滤纸片, 滤纸片滴加 10  $\mu$ L 待测样品后 30 °C 培养。平板培养 48~72 h 后, 采取交叉法测定抑菌圈直径。以抑菌圈直径大于 30 mm 判定为防霉效果强, 以抑菌圈直径处于 20~30 mm 之间判定为防霉效果中等, 以抑菌圈直径处于 10~20 mm 之间判定为防霉效果弱, 以抑菌圈直径小于 10 mm 判定为没有抑菌效果。

### 1.2.3 菌种鉴定

1.2.3.1 形态观察 LB 平板上划线分单菌落, 观察单菌落形态; 取菌液制片, 10×100 倍镜下观察显微形态。

1.2.3.2 生化反应鉴定 采用梅里埃芽孢杆菌鉴定试剂盒进行生化反应鉴定。

1.2.3.3 16S rDNA 基因序列比对 测序结果由美国国立生物技术信息中心 (NCBI) 网站进行 Blast 比对, 再使用 MEGA5.1 软件, 采取邻接法 (Neighbor-Joining 法) 构建系统发育树, 可靠性检验 bootstrap 法。

### 1.2.4 抑菌谱的测定

采用打孔法, 指示菌禾谷镰刀菌菌块放置于平板中间, 30 °C 培养 24 h, 其余霉菌 (灰绿曲霉 *Aspergillus glaucus*、黄曲霉 *A. flavus*、亮白曲霉 *Aspergillus candidus*、黑曲霉 *A. nige*、赭曲霉 *A. ochraceus*、青霉 *Penicillium* sp. 和产黄青霉 *P. Chrysogenum*) 调整孢子液浓度约为  $10^7$  cfu/mL 后吸取 100  $\mu$ L 涂布于打孔平板上。将菌液 4 000 r/min 离心 10 min, 向孔中加入 100  $\mu$ L 上清液后静置, 直至上清液被吸收, 30 °C 培养。平板培养 48~72 h 后, 测量抑菌圈直径。

### 1.2.5 培养时间对防霉活性的影响

菌株按照方法 1.2.1 进行培养, 不同时间段取样测量 OD<sub>600</sub> 吸光度值并以禾谷镰刀菌为指示菌, 查看抑菌效果。

### 1.2.6 活性物质分析

菌株按照方法 1.2.1 培养后, 离心取上清液分别进行热处理、蛋白酶 K 处理及耐酸碱性实验, 采用打孔法查看防霉效果, 指示菌选用禾谷镰刀菌。热处理: 在 2 mL 离心管中加入 1 mL 上清液, 于 50、75 和 100 °C 处理 60 min, 对照为未经处理的上清液; 蛋白酶 K 处理: 在 2 mL 离心管中加入 900  $\mu$ L 上清液和 100  $\mu$ L 10 mg/mL 蛋白酶 K, 37 °C 处理 60 min, 对照为未经处理的上清液和以同样方法处理的蛋白酶 K; 耐酸碱性: 取 10 mL 上清液分别调节 pH 至 2、4、6、10、12, 30 °C 静置 1 h 后 4 000 r/min 离心 10 min, 取上清液调节 pH 至 8.6, 用 0.22  $\mu$ m 滤器过滤, 对照为未调节 pH 的过膜上清液。

## 1.3 数据分析

数据处理采用 Origin 2018、Mega5.1、Excel 等软件进行分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 菌株防霉效果筛选

对菌种库中自酸菜、青贮饲料、老面馒头、玉米种植田地土壤等环境分离保存的 364 株细菌进行防霉效果筛选 (见表 1)。由表 1 可知, 近 50% 的菌株具有防霉活性, 其中抑菌圈直径大于 20 mm 的菌株占 38.47%。将初筛防霉活性强的 33 株菌进行复筛验证后选取活性较高且稳定的 7 株菌, 编号分别为 ASAG 62、ASAG 112、ASAG 2ME6、ASAG 2MF8、ASAG 2MD10、ASAG M6 和 ASAG M9。

表 1 防霉活性菌株筛选

防霉活性评价	抑菌圈直径/mm	数目/株	比例/%
无	<10	175	48.08
弱	10~20	49	13.46
中	20~30	107	29.40
强	>30	33	9.07
总计		364	100.00

### 2.2 菌种鉴定

所选菌株在 LB 平板上培养 24 h 后菌落形态如图 1 所示。ASAG 62 菌落直径 2 mm 左右, 菌落整体表面光滑, 凸起; ASAG 112 菌落较小, 直径 1~1.5 mm 左右, 边缘不规则, 整个菌落表面有褶皱状凸起; ASAG M6、ASAG M9 和 ASAG 2MD10 形态相近, 菌落直径 2~3 mm, 边缘清晰光滑, 边缘有环状凸起, 环状凸起中间凹陷; ASAG 2MF8 菌落直径 2~3 mm, 边缘不规则, 表面不光滑有黏液, 菌落中间有少许褶皱状凸起; ASAG 2ME6 菌落直径 1~1.5 mm, 中间有凸起, 表面不光滑有黏液。在 10×100 倍下观察 7 株菌均为短杆菌。

采用梅里埃芽孢杆菌鉴定试剂盒对 7 株菌进行生化反应鉴定, 部分结果如表 2 所示。7 株菌的 %ID 接近 100, T 值大于 0.4, 有意义的分类单位均被归类为枯草/解淀粉芽孢杆菌。区别主要集中在

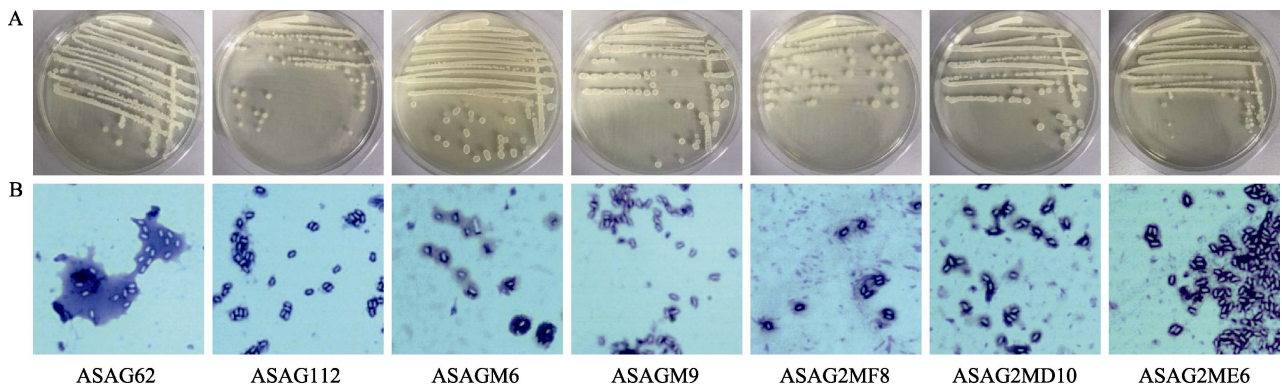


图 1 菌落形态 (A) 和显微形态 (10×100 倍, B)

Fig.1 Colony morphology (A) and microscopic morphology (10×100 times, B)

表 2 生化反应鉴定结果

Table 2 Identification results of biochemical reactions

实验代码	底物成分	ASAG 62/ASAG 2MD10	ASAG M6/ASAG M9	ASAG 2ME6	ASAG 112	ASAG 2MF8
DXYL	D-木糖	+	+	+	+	-
MEL	D-蜜二糖	+	-	-	+	-
RAF	D-棉子糖	+	+	-	+	-
AMD	淀粉	+	+	+	-	-
GLYG	糖原	+	+	+	-	-
%ID		94.7	98.9	98.2	99.6	99.8
T 值		0.51	0.52	0.5	0.42	0.4

于能否利用 D-木糖、D-蜜二糖、D-棉子糖、淀粉与糖原。

为进一步确定种属, 将 7 株菌 16s rDNA 序列经 Blast 比对。结果显示, 其与贝莱斯芽孢杆菌 (*Bacillus velezensis*)、暹罗芽孢杆菌 (*Bacillus siamensis*)、解淀粉芽孢杆菌等芽孢杆菌属菌株 Query coverly 达到 99% 以上。选取芽孢杆菌属模式菌株构建系统发育树, 结果显示, 该 7 株益生菌与贝莱斯芽孢杆菌、暹罗芽孢杆菌在同一分支上, 与解淀粉芽孢杆菌、枯草芽孢杆菌也具有极高的亲缘性 (见图 2)。贝莱斯芽孢杆菌因与解淀粉芽孢杆菌具有极高的相似性而被认为是解淀粉芽孢杆菌的同物异名, 于 2016 年由 Dunlap 等<sup>[16]</sup> 认定其在细菌命名法中的分类地位。暹罗芽孢杆菌又译为西姆芽孢杆菌, 于 2010 年被收录为有效种名<sup>[17]</sup>。

### 2.3 培养时间对防霉活性的影响

通过绘制生长曲线可知: 7 株菌在培养 17 h 后进入对数期, 29~41 h 时菌株浓度达到最大值, 其中 ASAG 62、ASAG 112、ASAG M6 和 ASAG 2MD10 生长较快, 菌株浓度于培养 29 h 达到最大

值且 OD<sub>600</sub> 均高于 3.0; ASAG M9、ASAG 2ME6、ASAG 2MF8 相对缓慢, 培养 41 h OD<sub>600</sub> 最高, 其中 ASAG 2ME6 与 ASAG 2MF8 菌株浓度相对较小, OD<sub>600</sub> 低于 2.5 (图 3A)。以禾谷镰刀菌为指示菌, 测定不同培养时间菌液上清的抑菌效果, 发现进入对数期后抑菌效果显著增加, 而菌株浓度达到最大值后, 抑菌效果基本保持稳定, 因此采用培养 48 h 的发酵液进行防霉实验 (图 3B)。

### 2.4 菌株对粮油食品中常见霉菌的抑菌效果

取 7 株高防霉活性菌株上清液采用打孔法对 8 种粮食中常见霉菌进行防霉实验, 如表 3 所示。7 株菌的活性物质对亮白曲霉和禾谷镰刀菌抑制效果最显著, 能够完全抑制亮白曲霉的生长; ASAG 2MD10 对青霉、禾谷镰刀菌的抑制效果最好, 抑菌直径分别为 19.0 mm 和 35.0 mm; ASAG 62 对产黄青霉、黑曲霉、赭曲霉、黄曲霉抑制效果最好, 对黄黄曲霉的抑菌直径为 15 mm; ASAG 2ME6 对灰绿曲霉抑制效果最好。

### 2.5 防霉活性物质初步分析

贝莱斯芽孢杆菌与暹罗芽孢杆菌均为枯草芽孢杆菌的近缘种, 同样具有广谱抗菌性和高稳定

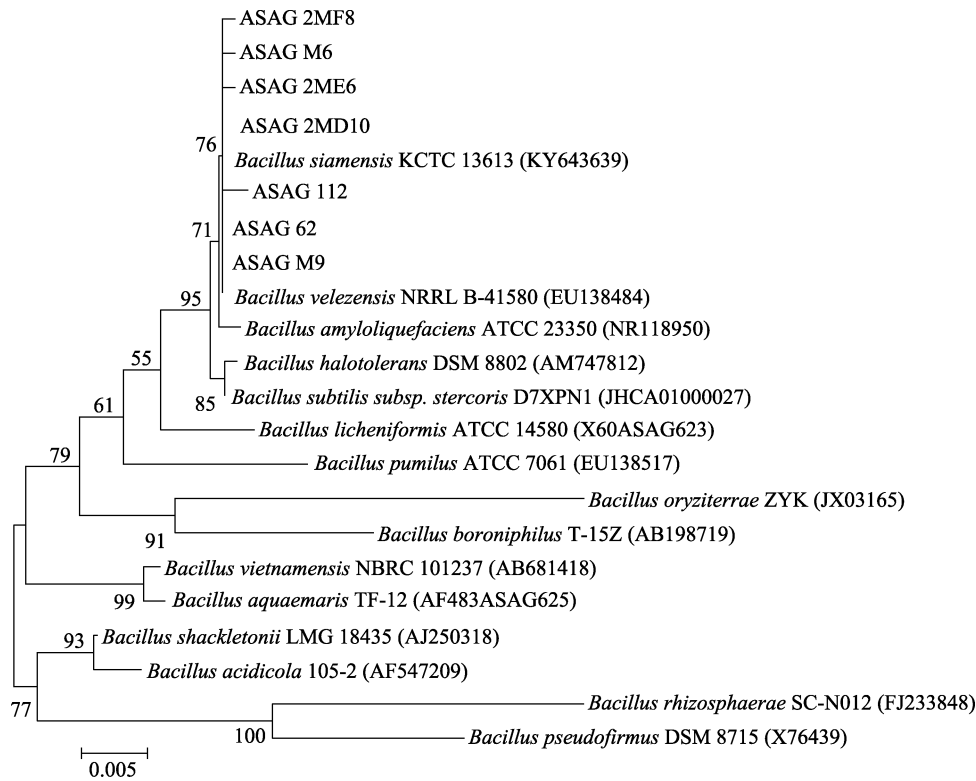


图 2 菌株与芽孢杆菌属模式菌株 16S rDNA 基因系统发育树

Fig.2 Phylogenetic tree based on 16S rRNA gene sequences of the screening strains and type strains of *Bacillus* sp.

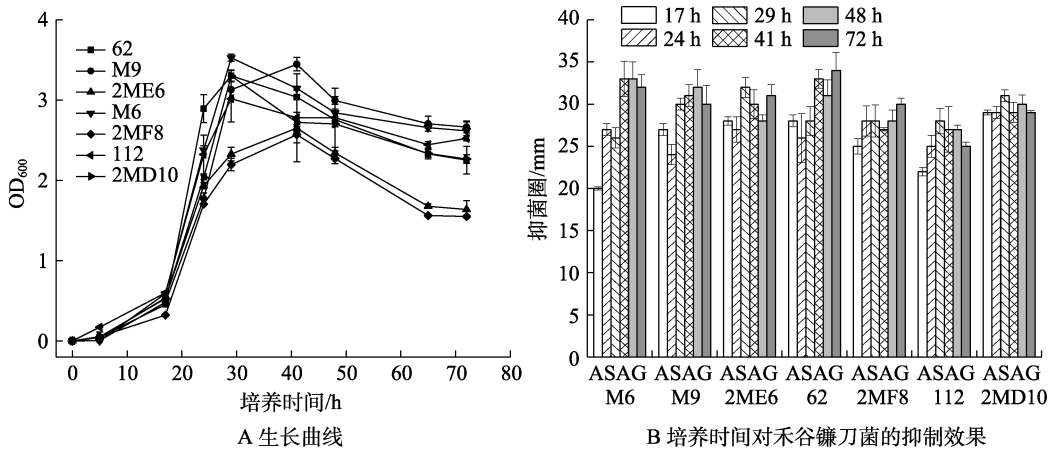


图 3 培养时间对防霉活性的影响

Fig.3 Effect of culture time on bacteriostasis of *F. graminearum*

表 3 筛选菌株对常见霉菌的抑制效果

Table 3 Inhibition effect of screening strains on common molds

编号	亮白曲霉	产黄青霉	黑曲霉	青霉	灰绿曲霉	赭曲霉	黄曲霉	禾谷镰刀菌
ASAG M6	+	16.5±1.1	15.5±1.3	13.0±1.1	19.0±1.0	14.0±1.9	-	28.0±2.2
ASAG 62	+	<b>19.5±1.2</b>	<b>19.5±1.5</b>	15.0±1.1	23.0±1.1	<b>19.5±1.1</b>	<b>15.0±0.4</b>	31.0±1.9
ASAG 2MF8	+	15.0±0.8	14.5±0.7	15.5±1.3	18.0±1.2	14.5±1.5	11.5±0.5	27.0±0.7
ASAG 2MD10	+	18.0±0.4	16.5±0.5	<b>19.0±1.6</b>	22.0±0.9	16.5±0.3	12.5±0.5	<b>35.0±2.1</b>
ASAG M9	+	15.5±1.7	15.5±0.3	16.0±1.3	18.0±1.4	12.5±0.7	-	28.0±2.0
ASAG 2ME6	+	18.9±1.2	16.5±0.3	14.0±0.5	<b>25.0±1.4</b>	12.0±0.3	11.5±0.2	30.5±1.7
ASAG 112	+	16.0±0.3	17.5±1.4	10.0±0.2	23.0±1.2	11.5±0.4	12.5±0.4	26.0±2.1

注：“+”为完全抑制，“-”为无抑制效果。

Note: “+” is for complete inhibition, “-” is for no inhibition effect.

性, 主要抗菌活性物质为非核糖体合成的脂肽类抗生素<sup>[18-19]</sup>。通过对筛选所得 7 株菌上清液进行蛋白酶 K 处理后其防霉效果基本没有变化, 而对照蛋白酶 K 溶液对禾谷镰刀菌完全没有抑菌效果; 进行不同温度处理发现 100 °C 高温处理使防霉活性明显降低甚至消失, 说明活性物质在高温

下不稳定; 经测定发现上清液 pH 位于 8.4~8.8 之间, 酸性环境下上清液产生沉淀, 离心后调节 pH 至 8.6, 通过防霉实验发现在 pH6~10 之间除 ASAG 112 外其它 6 株菌具有防霉活性, 初始 pH 条件下防霉活性最高, 酸碱度影响防霉活性, 初步推测其活性物质为肽类物质 (见图 4)。

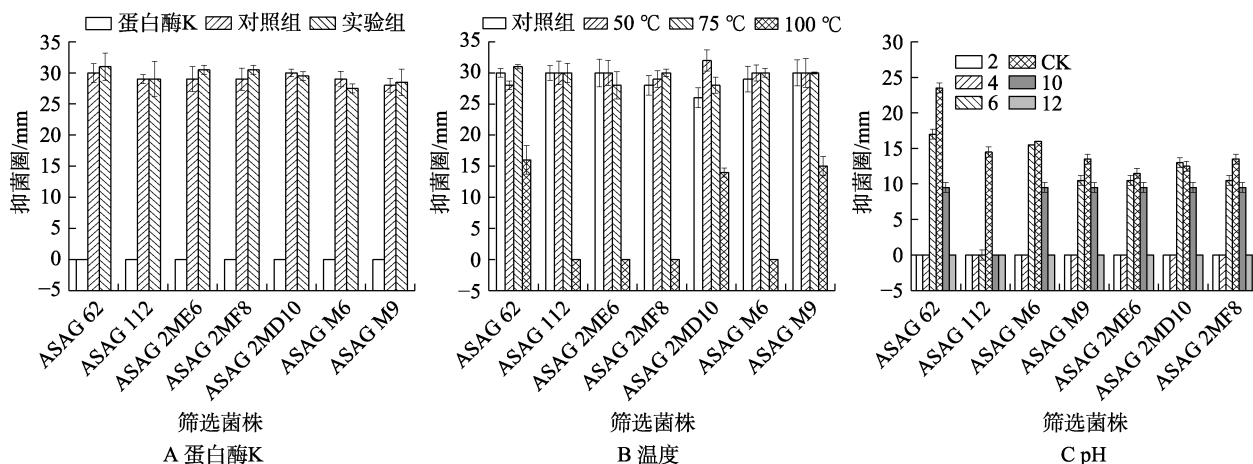


图 4 蛋白酶 K、温度及 pH 对防霉活性的影响

Fig.4 Effect of different treatment (A Proteinase K, B Temperature, C pH) on anti-mold activity

### 3 结论

本研究通过对大量菌株进行筛选得到 7 株防霉活性较强的菌株, 均与贝莱斯芽孢杆菌、暹罗芽孢杆菌具有较近的亲缘关系, 初步归属为芽孢杆菌属。绘制生长曲线并测定不同时间上清液的抑菌活性, 确定培养时间为 48 h。活性物质不易被蛋白酶 K 分解, 不耐高温, 耐受 pH 范围为 6~10, 初步分析为肽类物质。其中 ASAG 62 对常见霉菌, 尤其是高毒霉菌黄曲霉具有一定抑菌活性。下一步拟对 ASAG 62、ASAG 2MD10 和 ASAG 2ME6 菌株进行发酵液的复配研究, 进一步提高防霉效果、扩大抑菌谱, 寻找新的推广途径。

### 参考文献:

[1] 项芳芝, 赵凯, 邵倩, 等. 防霉剂在储粮中的应用研究进展[J]. 中国粮油学报, 2019, 34(1): 131-137.  
XIANG F Z, ZHAO K, SHAO Q, et al. Research progress on the application of mildew inhibitor in grain storage[J]. Journal of the Chinese Cereals and Oils Association, 2019, 34(1): 131-137.

[2] PITT J I. Toxigenic fungi and mycotoxins[J]. British medical bulletin, 2000, 56(1): 184-192.

[3] GAZINSKA P, HERMAN D, GILLET C, et al. Comparative immunohistochemical analysis of ochratoxin A tumorigenesis

in rats and urinary tract carcinoma in humans; mechanistic significance of p-S6 ribosomal protein expression[J]. Toxins (Basel), 2012, 4(9): 643-62.


[4] 杜稳, 刘虎军, 王峻, 等. 酸性条件下降解玉米赤霉烯酮菌株的分离鉴定和初步应用[J]. 粮油食品科技, 2018, 26(3): 60-66.  
DU W, LIU H J, WANG J, et al. Isolation, identification and preliminary application of zearalenone-degrading bacterium under acidic condition[J]. Science and Technology of Cereals, Oils and Foods, 2018, 26(3): 60-66.

[5] 李娜, 周红丽, 周涛, 等. 稻谷储藏条件及储藏技术分析[J]. 粮油食品科技, 2020, 28(3): 155-160.  
LI N, ZHOU H L, ZHOU T, et al. Analysis of paddy storage conditions and technology[J]. Science and Technology of Cereals, Oils and Foods, 2020, 28(3): 155-160.

[6] 王娟, 裴英鸿, 程丽佳, 等. 茶多酚抑菌作用研究进展及作为天然防霉剂的开发前景[J]. 中国食品添加剂, 2020, 11: 130-138.  
WANG J, PEI Y H, CHENG L J, et al. Research progress on bacteriostasis of tea polyphenols and its development prospect as natural antifungal agent[J]. China Food Additives, 2020, 11: 130-138.

[7] 邹锦群, 王明兹, 陈必链. 微生物防霉菌剂开发应用研究进展[J]. 福建师范大学学报(自然科学版), 2015, 31(4): 117-124.  
ZHOU J Q, WANG M Z, CHEN B L. The progress of application on control fungi by microbial agent[J]. Journal of Fujian Normal University (Natural Science Edition), 2015, 31(4): 117-124.

[8] 王利敏, 邢福国, 吕聪, 等. 复合植物精油防霉剂对玉米霉菌

- 及真菌毒素的控制效果[J]. 核农学报, 2018, 32(4): 732-739.
- WANG L M, XING G F, LYU C et al. Study on the anti-mould and anti-mycotoxins effects of combined essential oils in maize [J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 2018, 32(4): 732-739.
- [9] 龙娅, 胡文忠, 李元政, 等. 植物精油对果蔬霉菌的抑制及在果蔬保鲜中的应用[J]. 食品工业科技, 2020, 446(6): 317-323.
- LONG Y, HU W Z, LI Y Z, et al. Inhibition of plant essential oils on mold of fruits and vegetables and its application in preservation of fruits and vegetables[J]. Science and Technology of Food Industry, 2020, 446(6): 317-323.
- [10] MUTLU-INGOK A, DEVECIOGLU D, DIKMETA D N, et al. Antibacterial, antifungal, antimycotoxigenic, and antioxidant activities of essential oils: an updated review[J]. Molecules, 2020, 25(20): 4711.
- [11] 王军华, 赵双枝, 陈相艳, 等. 壳聚糖酶解产物抑制真菌活性研究[J]. 核农学报, 2021, 35(3): 660-666.
- WANG J H, ZHAO S Z, CHEN X Y, et al. Antifungal activities of chitosan hydrolysates[J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 2021, 35(3): 660-666.
- [12] HATA T, SATO T, ICHIKAWA T, et al. Antifungal activity of protamine salmine hydrochloride and  $\epsilon$ -poly-L-lysine in actual food systems, rice- or wheat- based confectioneries[J]. Journal of Food Processing and Preservation, 2016, 40(6): 1180-1187.
- [13] JOHNSON B A, ANKER H, MELENEY F L. Bacitracin: a new antibiotic produced by a member of the *B. subtilis* group[J]. Science, 1945, 102(2650): 376-377.
- [14] CAULIER S, NANNAN C, Gillis A, et al. Overview of the antimicrobial compounds produced by members of the *Bacillus subtilis* group[J]. Frontiers in Microbiology, 2019, 10: 302.
- [15] HASHEM A, TABASSUM B, ABD-ALLAH E F. *Bacillus subtilis*: a plant-growth promoting rhizobacterium that also impacts biotic stress[J]. Saudi Journal of Biological Sciences, 2019, 26(6): 1291-1297.
- [16] 马佳, 李颖, 胡栋, 等. 芽胞杆菌生物防治作用机理与应用研究进展[J]. 中国生物防治学报, 2018, 34(4): 639-648.
- MA J, LI Y, HU D, et al. Progress on mechanism and applications of *Bacillus* as a biocontrol microbe[J]. Chinese Journal of Biological Control, 2018, 34(4): 639-648.
- [17] RAJER F U, WU H, XIE Y, et al. Volatile organic compounds produced by a soil-isolate, *Bacillus subtilis* FA26 induce adverse ultra-structural changes to the cells of *Clavibacter michiganensis* ssp. *Sepedonicus*, the causal agent of bacterial ring rot of potato [J]. Microbiology, 2017, 163(4): 523-530.
- [18] 刘洋, 刘晓昆, 陈文浩. 贝莱斯芽孢杆菌(*Bacillus velezensis*) 物种名称的“前世今生”[J]. 生物技术通报, 2019, 35(7): 230-232.
- LIU Y, LIU X K, CHEN W H. “Past and present” species name of *Bacillus velezensis*[J]. Biotechnology Bulletin, 2019, 35(7): 230-232.
- [19] 林志楷, 林文珍. 暹罗芽孢杆菌研究进展[J]. 亚热带植物科学, 2019, 48(4): 391-396.
- LIN Z K, LIN W Z. Research progress on *Bacillus siamensis*[J]. Subtropical Plant Science, 2019, 48(4): 391-396. 
- 备注: 本文的彩色图表可从本刊官网 (<http://lspkj.ijournal.cn>)、中国知网、万方、维普、超星等数据库下载获取。