# 链霉菌 SG17 代谢产物对玉米黄曲霉的抑制作用及其稳定性分析

宋根娣， 王佳伟， 周 斌， 孙新嫄， 周 阳， 黄珍珍
（洛阳理工学院 环境工程与化学学院，河南 洛阳 471023）

**摘要：** 黄曲霉是玉米贮存过程中主要的污染之一，直接影响食品以及饲料的品质和安全。利用微生物及其代谢产物进行生物防治具有广泛的应用价值。作者以前期筛选获得的 SG17 菌株为材料，通过形态学观察、生理生化检测及 16S rRNA 序列分析，初步确定为链霉菌；平板对峙实验显示该菌株能够显著抑制黄曲霉等多种病原真菌的生长，具有一定的广谱性；进一步提取 SG17 的抑菌粗提物 100 ℃处理 60 min，抑菌率为(41.24±0.32)%，与对照组相比降低了 16%；室温条件下放置 15 d 的抑菌率为(25.95±0.68)%，仍保留约 50%的活性，具有较好的热稳定性和环境适应性；50 μg/mL 的抑菌粗提物可以有效抑制黄曲霉孢子的萌发，100 μg/mL 的抑菌粗提物能够显著抑制玉米黄曲霉菌的生长，且继续培养至 14 d，抑菌率仍保持 80%以上，具有较高的应用价值。

**关键词：** 黄曲霉；链霉菌；抑菌活性；玉米；稳定性
**中图分类号：**TS 264　**文章编号：**1673-1689(2022)03-0046-07　**DOI：**10.3969/j.issn. 1673-1689.2022.03.006

# Inhibitory Effect and Stability Analysis of *Streptomyces* SG17 Metabolites Against *Aspergillus Flavus* in Corns

*SONG Gendi*， *WANG Jiawei*， *ZHOU Bin*， *SUN Xinyao*， *ZHOU Yang*， *HUANG Zhenzhen*
（Department of Environmental Engineering and Chemistry, Luoyang Institute of Science and Technology, Luoyang 471023, China）

**Abstract：** *Aspergillus flavus* is one of the main contaminants in corns during storage, which directly affects the quality and safety of food and feed. The biological control by microorganisms and their metabolites has a wide range of practical application value. In this study, the SG17 strain obtained from previous screening was preliminarily identified as *Streptomyces* sp. strain through morphological observation, physiological and biochemical detection, and 16S rRNA sequence analysis. The dural culture method showed that this strain had a broad-spectrum antibacterial effect on various pathogenic fungi such as *Aspergillus flavus*. The inhibition rate of SG17 was (41.24 ± 0.32)% when the crude extracts were further treated at 100 ℃ for 60 min, decreasing by 16% compared with that of the control group. After 15 days storage at room temperature, the antibacterial

**收稿日期：** 2021-02-01
**基金项目：** 国家自然科学基金项目(31900005)。
**作者简介：** 宋根娣(1984—)，男，博士，讲师，主要从事微生物资源的开发与应用研究。E-mail：songgendi@163.com

rate was (25.95 ±0.68)% and retained about 50% activity, showing good thermal stability and environmental adaptability. The germination of *Aspergillus flavus* spores could be effectively inhibited by 50 μg/mL of antibacterial crude extract. Furthermore, the growth of *Aspergillus flavus* on corns could be significantly inhibited by 100 μg/mL antibacterial crude extract, and the antifungal rate remained above 80% after 14 days of continuous culture, which suggested high application value.
**Keywords:** *Aspergillus flavus*, *Streptomyces*, inhibitory effect, corn, stability

玉米是全球重要的谷类作物,也是我国大宗粮食之一。据联合国粮农组织统计资料表明,我国玉米种植面积和总产量位居世界第二，仅 2017 年我国玉米总产量达 2.6 亿吨，居三大粮食作物之首[1]。玉米因其具有高蛋白质、高脂肪含量的特点,广泛应用于食品、饲料等行业。我国每年用作饲料加工的玉米占总产量的 60%左右,并呈现逐年上升的趋势,玉米总消费量的 80%~90%均与人和动物有关,因此玉米的品质安全直接影响人们的健康[2]。

与其他谷物相比,玉米胚部的占比大,吸湿性强,易受黄曲霉的侵染,特别是转入贮存后,腐生型的黄曲霉菌极易侵染玉米籽粒并迅速生长产生毒素[3]。高秀芬等对我国不同地区玉米的黄曲霉污染情况进行调查发现,在吉林、河南、湖北、四川、广东、广西采集的 279 份玉米样品中,黄曲霉毒素阳性率为 75.63%,毒素平均为 44.04 μg/kg[4]。及华等对河北省贮存玉米样品进行分析,结果显示河北中南部的低平原区,玉米黄曲霉污染率达 100%,检出黄曲霉毒素 $B_1$ 最高为 61.5 μg/kg[5]。全球每年因黄曲霉污染而废弃的粮食占农作物产量的 0.5%。因此,黄曲霉污染已经成为现代农业特别是玉米加工行业急需解决的问题之一。

目前,防治黄曲霉菌的方法主要有两种:一是通过抑制孢子萌发和菌丝生长,从源头上控制黄曲霉污染,进而减少毒素产生;二是对已经感染的农作物进行脱毒或毒素降解处理[6]。针对毒素的处理在实际操作过程中存在成本较高、具有较强刺激、毒副作用大、易残留、降解周期长等缺点,影响玉米的品质和适口性,不符合目前玉米加工行业对绿色健康的要求[7]。因此,从源头上防控玉米霉变,进而减少黄曲霉毒素危害具有非常重要的研究意义。源头防治主要是通过筛选能够抑制黄曲霉生长的微生物及其次生代谢产物或提取植物天然成分进行防治。其中天然植物来源的防霉抑菌剂虽然也具有绿色、安全、无残留的特点,但是其生产成本高,稳定性差,直接制约了其在生产中的应用[8]。因此,筛选能够显著抑制黄曲霉菌生长的拮抗菌,以其发酵液制备抑菌剂,具有更加广阔的应用前景[9-10]。

作者从畜禽养殖场动物粪便堆积区的土壤中分离获得一株能够显著抑制黄曲霉生长的菌株,暂命名为 SG17。通过形态学检测、培养特征分析、生理生化分析及 16S rRNA 序列对比进行初步鉴定,并对其抑菌广谱性、发酵液抑菌粗提物的活性及稳定性进行了分析测定，进一步以霉变玉米作为对象,探究该抑菌粗提物对玉米黄曲霉的抑制效果,为开发新型生物防霉剂提供资源。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料与试剂

SG17 菌株由作者所在实验室从洛阳本地畜禽养殖场粪便堆积地土壤中分离获得；玉米黄曲霉(*Aspergillus flavus*)、黑斑病菌(*Alternaria brassicae*)、炭疽病菌(*Colletotrichum*)、辣椒疫霉病菌(*Phytophthora capsici*)保存于洛阳理工学院微生物实验室。

PDA 培养基:马铃薯 200 g、葡萄糖 20 g、琼脂 18 g、蒸馏水 1 L;自然 pH。

高氏一号培养基:可溶性淀粉 20 g、琼脂 20 g、$KNO_3$ 1 g、$K_2HPO_4$ 0.5 g、$MgSO_4 \cdot 7H_2O$ 0.5 g、NaCl 0.5 g、$FeSO_4 \cdot 7H_2O$ 0.01g;pH 7.4~7.6。

伊莫松培养基:葡萄糖 10 g、酵母膏 10 g、牛肉膏 4 g、蛋白胨 4 g、NaCl 2.5 g、蒸馏水 1 L;自然pH。

酵母葡萄糖培养基:酵母膏 10 g、蛋白胨 20 g、葡萄糖 20 g、琼脂粉 18 g、蒸馏水 1 L;自然 pH。

细菌 DNA 快速提取试剂盒、PCR 扩增试剂、染色液制备试剂:天根生化科技(北京)有限公司产品;凝胶回收试剂盒:北京全式金生物工程有限公司产品;其他试剂均为分析纯:国药集团化学试剂有限公司产品。

### 1.2 仪器与设备

SPX 型智能生化培养箱、Olympus 光学显微镜：美国 Bio-Rad 公司产品；PTC-200 型 PCR 仪：美国 MJ Research 公司产品；全自动凝胶成像分析系统：美国 Bio-Rad 公司产品；HZQ-F160 全温振荡培养箱：华美生化仪器(江苏)公司产品；台式高速冷冻离心机：德国 Heraeus 公司产品。

### 1.3 研究方法

**1.3.1 菌株的形态特征分析** 将活化后的 SG17 接种于 PDA 培养基上培养 6 d，挑取部分单菌落置于载玻片，加入无菌水涂匀，干燥，固定后用结晶紫混合染液染色 30~60 s，水洗，干燥后用显微镜观察形态特征。

**1.3.2 菌株培养特征及生理生化鉴定** 参照链霉菌鉴定手册[11]，28 ℃恒温培养，在 7~14 d 中进行观察并记录特征。

**1.3.3 菌株分子鉴定及系统发育分析** 采用 DNA 快速提取试剂盒进行菌体 DNA 的提取。16S rRNA 的扩增采用通用引物进行，27F：5′-AGAGTITGATCCTGGCTCAG-3′，1492R：5′-GGTTACCTTGTTACGACTT-3′，扩增片段约 1.6 kb，PCR 产物进行琼脂糖(1 g/dL)凝胶电泳。目的片段切胶回收后，送至上海生工测序。目的序列在 GenBank 数据库中进行 BLAST 比对，选择同源性相近的种属序列，利用 MEGA6.0 软件计算遗传距离，用邻近法构建系统发育树。

**1.3.4 SG17 抗菌谱的测定** 采用对峙法在 PDA 固体培养基两侧分别接种 SG17 及已经活化培养 5 d 的病原菌（直径约 6 mm 的圆形菌饼），以不接种 SG17 的平板为对照，28 ℃恒温培养 5 d，观察抑菌情况，重复 3 次，根据抑菌带直径确定抑菌效果。

**1.3.5 SG17 抑菌粗提物的制备** 以接种体积分数 3%将 SG17 接种于 100 mL PDA 液体培养基中，在 30 ℃以 160 r/min 振荡发酵培养 5 d。将发酵液在 4 ℃下以 12 000 r/min 离心 10 min，上清液经吸附树脂吸附后解吸，洗脱液冷冻干燥后得到抗菌物质粗提物。将粗提物加入 2 mL 无菌水进行稀释，并用 0.22 μm 除菌过滤器过滤，制备抑菌粗提物原液，4 ℃保存备用。

**1.3.6 SG17 抑菌粗提物的稳定性分析**

1)热稳定性测定采用无菌水配制 2 mL 质量浓度为 1 000 μg/mL 的抑菌粗提物，过滤除菌后置于 40、60、80、100 ℃的水浴锅中分别处理 30 min 和 60 min，将处理后的抑菌溶液采用牛津杯法检测其抑菌圈大小，按照下述公式计算抑菌率，加入等体积的无菌水为对照，重复 3 次，确定抑菌活性的变化。

$$抑菌率(\%)=\frac{D_0-D_1}{D_0}\times 100$$

式中：$D_0$ 为加入无菌水的菌落直径，mm；$D_1$ 为加入抑菌粗提物的菌落直径，mm。

2)储存稳定性测定按照上述方法配制抗菌粗提物，并在室内环境分别保存 5、10、15、20 d，采用牛津杯法检测其抑菌圈大小，计算抑菌率确定抑菌活性的变化。

**1.3.7 SG17 抑菌粗提物对黄曲霉孢子萌发的抑制分析** 参考文献[12]的方法，取 1.5 mL 无菌离心管，分别加入不同质量浓度的抑菌粗提物和黄曲霉孢子，每管中孢子终浓度为 $2\times10^5$ CFU/mL，粗提物的最终质量浓度分别为：1 000、500、200、100、50、20、10 μg/mL，以同体积无菌水为对照。将各管放置在 30 ℃恒温培养箱中孵育 3 d 后，分别取 100 μL 混合菌液，均匀涂布于 PDA 培养基，28 ℃培养 2 d，重复 3 次，观察孢子萌发结果。

**1.3.8 SG17 抑菌粗提物对玉米黄曲霉的抑制分析** 挑选颗粒饱满、大小均匀的玉米粒，用体积分数 75%的乙醇浸泡处理 1 min，再用质量分数 1%的次氯酸钠溶液浸泡处理 1 min，最后用体积分数 75%乙醇浸泡处理 1 min，无菌水清洗 3 次。将处理后的玉米粒放入无菌培养皿中，每个约 20 粒，加入 1 mL 浓度为 $2\times10^5$ CFU/mL 的黄曲霉孢子悬液，摇匀至玉米表面微干，再加入 1 mL 质量浓度分别为 200、100、50 g/mL 的抑菌粗提物，空白对照加入等体积的无菌水，摇匀后，30 ℃恒温培养箱中培养，重复 3 次，观察玉米上黄曲霉的生长状况。

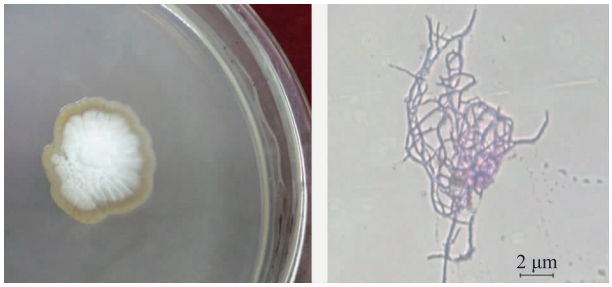
**1.3.9 数据统计分析** 采用 SPSS 17.0 软件进行统计分析，实验结果中数据为 3 个平行样品平均值，并用平均数±标准差表示。组间的差异性分析采用 one-way ANOVA 方法，其中 $P<0.05$ 表示差异显著。图中分别以数值和误差棒表示，采用 Origin Lab 2017 绘图分析。

## 2 结果与讨论

### 2.1 菌株 SG17 的形态观察结果

将菌株 SG17 接种于 PDA 培养基培养 5 d。如

图 1 所示,菌落具有质地致密,表面呈较紧密的绒状,干燥,多皱,菌落不蔓延,近规则的圆形,微隆起等特征。在显微镜下观察,气生菌丝发育良好,多分枝,缠绕较紧密,不形成横隔;基内菌丝有隔膜,较易断裂,略短,致密,多分枝,菌丝较平直,基本符合链霉菌属的形态特征。




(a) 菌落直观形态　　(b) 显微镜下菌落形态

**图 1　SG17 菌株的形态特征**

**Fig. 1　Morphological characteristics of strain SG17**

## 2.2　SG17 的培养及生理生化特征

菌株 SG17 在 5 种培养基上生长的结果见表 1,菌株生长较好,气生菌丝发达,基内菌丝丰富,气生菌丝颜色从白色到黄色,基内菌丝颜色从褐色到黄褐色。在伊莫松和营养琼脂培养基上菌落较大,柴纳斯培养基次之,在高氏一号和葡萄糖酵母膏培养基上菌落较小,且在葡萄糖酵母膏培养基上长势最好,培养 3 d 首先出现肉眼可见菌落。在伊莫松培养基上菌落呈颗粒状,在葡萄糖酵母膏培养基上为绒状,其余均为表面光滑,且伊莫松和葡萄糖酵母培养基上菌落有明显突起。在高氏一号培养基上产生黑褐色色素,其余的产生褐色可溶性色素。根据菌落特征观察,该菌株具有链霉菌属的特征。

生理生化鉴定结果见表 2,菌株 SG17 可以使明胶液化,产生淀粉酶,具有酪氨酸酶活性;产生 $H_2S$,使牛奶凝固与胨化,但是不能分解纤维素;并且能较好地利用葡萄糖、麦芽糖、蔗糖、肌醇和乳糖等多种碳源。根据上述的生理生化实验,该菌株具有链霉菌的特征,初步鉴定 SG17 为链霉菌属。

**表 1　菌株 SG17 的培养特征**

**Table 1　Cultural characteristics of SG17**

| 培养基 | 气生菌丝 | 基内菌丝 | 可溶性色素 | 菌落特征 |
|---|---|---|---|---|
| 高氏一号 | 白色$^{+}$ | 褐色$^{+}$ | 黑褐色$^{+}$ | 菌落小,表面光滑、不突出 |
| 伊莫松 | 淡白色$^{++}$ | 黄褐色$^{++}$ | 褐色$^{+}$ | 菌落大、颗粒状、突起 |
| 葡萄糖酵母膏 | 淡白色$^{+++}$ | 黄褐色$^{++}$ | 褐色$^{+}$ | 菌落小、绒状、突起 |
| 柴纳斯 | 黄色$^{+++}$ | 褐色$^{+++}$ | 褐色$^{+}$ | 菌落小、表面光滑、不突出 |
| 营养琼脂 | 浅灰色$^{++}$ | 黄褐色$^{++}$ | 褐色$^{++}$ | 菌落大、表面光滑、不突出 |

注:“+”“++”“+++”表示生长的程度。

**表 2　菌株 SG17 的生理生化特征**

**Table 2　Physiological and biochemical properties of SG17**

| 检测项目 | 检测结果 | 检测项目 | 检测结果 |
|---|---|---|---|
| 明胶液化 | +++ | 产 $H_2S$ | ++ |
| 淀粉水解 | +++ | 牛奶凝固 | ++ |
| 产黑色素 | +++ | 牛奶胨化 | ++ |
| 纤维素水解 | – | 蔗糖 | + |
| 葡萄糖 | + | 肌醇 | + |
| 麦芽糖 | + | 乳糖 | + |

注:“–”表示负反应,“+”“++”“+++”表示生长的程度。

## 2.3　16S rRNA 序列分析结果

菌株 SG17 的 16S rRNA 序列扩增结果见图 2。将测序后的片段与 GenBank 数据库中的序列进行对比，同源性较高的菌株均属于链霉菌属。选取 7 株与目标序列相似性高的菌株，利用 MEGA6.0 软件通过邻近法构建系统发育树(见图 3)。结果表明 SG17 菌株与 *Streptomyces* sp. JXJ 0089 KP193140.1 菌株的亲缘关系最近，处于同一分支，相似度为 98%。结合显微观察、培养特征和生理生化特征,初步确定为链霉菌属。最终的分类还需通过该菌株与其他已报道的相似菌株之间的核酸杂交实验进行分析。

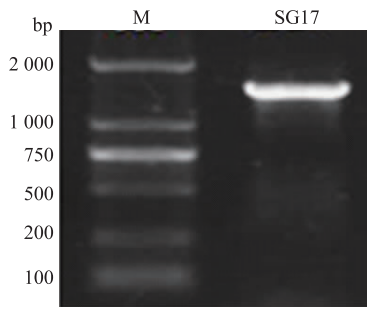



**图 2　SG17 菌株 16S rRNA 扩增结果**

**Fig. 2　Electrophoresis result of 16S rRNA**

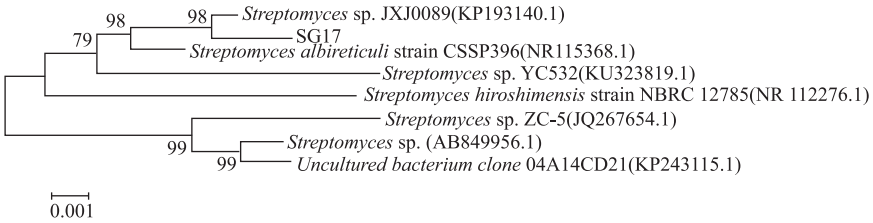
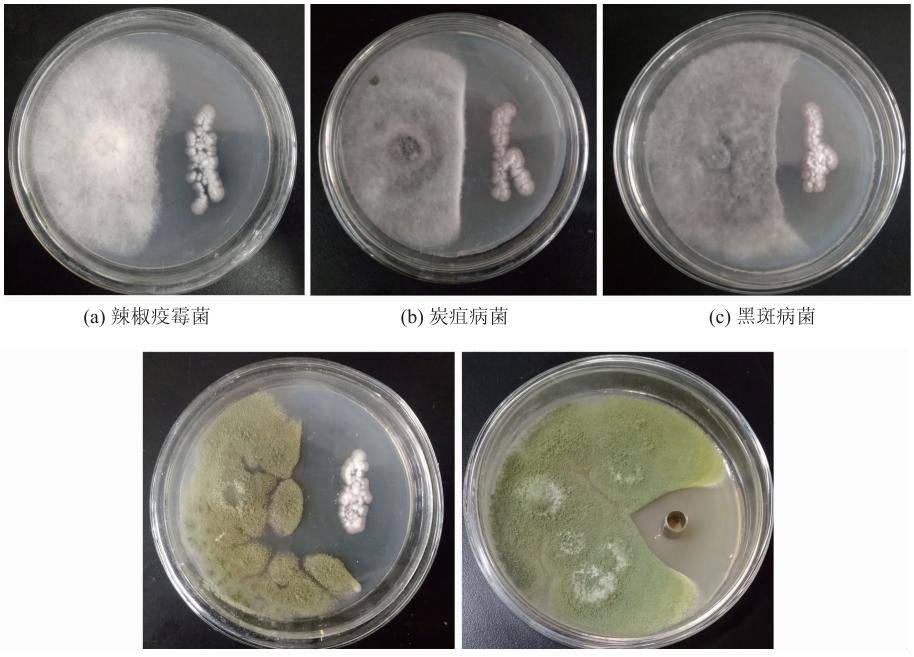



**图 3　菌株 SG17 的系统发育树**

**Fig. 3　Phylogenetic tree of SG17**

## 2.4　菌株 SG17 的抑菌谱分析

由图 4 可知，菌株 SG17 对 4 种病原真菌均有较强的抑制作用,抑制率在 50%以上。图 4(e)是 SG17 发酵液抑制黄曲霉菌的结果，抑菌圈直径约为 38 mm,证明菌株 SG17 发酵液能够显著抑制黄曲霉菌的生长。链霉菌属于放线菌,在土壤、海洋中分布广泛。目前已经应用的天然活性物质中有 70%~80%来自链霉菌,具有抗病原细菌、抗病原真菌、抗寄生虫、抗肿瘤等作用[13]。刘春静等从土壤中分离一株链霉菌 TD-1，其代谢产物对构巢曲霉、(*Aspergillus nidulans*)、纯绿青霉(*Penicillium verrucosum*)、赭曲霉(*Aspergillus ochraceus*)、黄曲霉(*Aspergillus flavus*)、黑曲霉(*Aspergillus niger*)等污染粮食作物的病原真菌均具有明显的抑制活性[14]。SG17 同属于土壤源链霉菌，能够显著抑制 4 种病原真菌的生长,具有一定的广谱性,并且产生的抑菌活性物质在发酵液中,初步确定为胞外物质。



(a) 辣椒疫霉菌　(b) 炭疽病菌　(c) 黑斑病菌

(d) 黄曲霉菌　(e) 黄曲霉菌(发酵液抑菌结果)

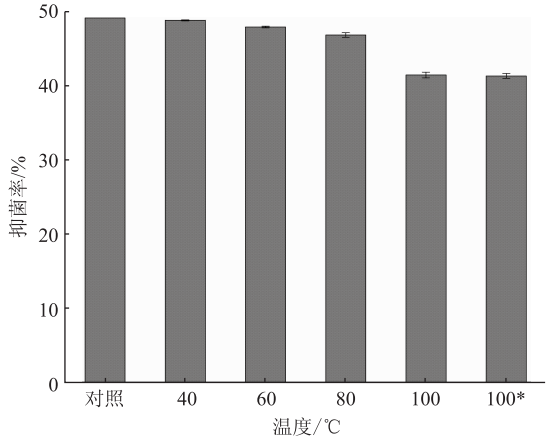
**图 4　SG17 菌株及其发酵液的抑菌活性**

**Fig. 4　Inhibition effect of strain and fermentation filtrate of SG17**

## 2.5　SG17 抑菌粗提物的稳定性分析

目前,利用微生物次级代谢产物制备生物抑菌剂的研究很多,而实际产品很少,其主要原因在于发酵产生的抑菌物质对环境耐受性差,制约了其应用。该研究中,SG17 抑菌粗提物对玉米黄曲霉病原菌的抑制率随着温度升高呈现下降趋势,但仍保持在 40%以上。如图 5 所示,40 ℃处理后的抑菌率与对照无显著差异,60、80、100 ℃处理 30 min 后,抑菌率分别为 (47.81±0.07)%、(46.75.81±0.31)%、(41.36±0.37)%,显著低于对照组($P$<0.05),而 100 ℃处理 60 min 与 30 min 的抑菌率无显著差异。周启升等分离的 S24 菌株,其抗菌物质经 100 ℃水浴 20 min 处理后效价无显著变化，加热到 100 min 效价降低 18.18%，证明该活性物质对热比较稳定,具

有潜在的应用价值[12]。相似地,SG17 抑菌物质在 100 ℃条件下处理 60 min,其抑菌率降低了 16%,且 30 min 和 60 min 处理后抑菌率无显著差异，证明 SG17 产生的抑菌物质中,主要活性成分具有较好的热稳定性。




* 为 100 ℃处理 60 min。

**图 5　SG17 抑菌物质的热稳定性结果**

**Fig. 5　Thermal stability of antifungal active substances of SG17**

存放稳定性的结果见图 6,放置 15 d 的抑菌率为(25.95±0.68)%,显著低于对照组($P$<0.05),而放置 20 d 的抑菌率仅为(3.64±0.31)%,已无明显的抑菌作用。而刘春静等获得的一株链霉菌 TD-1,其发酵产物在不同温度条件下抑菌活性均高于未处理的对照组,且保存 20 d 抑菌活性不变。而 SG17 的抑菌粗提物在室内分别放置 15、20 d，其抑菌率显著低于对照组,其原因可能是菌种差异导致的。

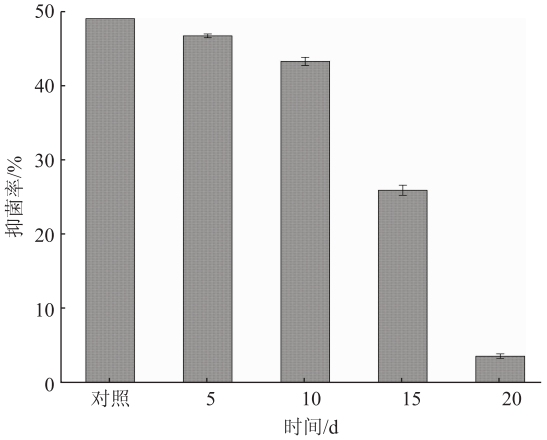



**图 6　保存时间对 SG17 抑菌物质的影响**

**Fig. 6　Effects of storage time on antifungal active substances of SG17**

### 2.6　SG17 抑菌粗提物对玉米黄曲霉的抑制结果分析

对比不同质量浓度抑菌物质对黄曲霉孢子萌发的影响见图 7。加入 20 μg/mL 抑菌物质的平板上,菌落数显著低于对照组,抑制效果比较明显。加入 50 μg/mL 抑菌物质的混合菌液平板上，没有肉眼可见的菌落萌发，说明 50 μg/mL 的抑菌物质粗提液可以有效抑制黄曲霉孢子的萌发。

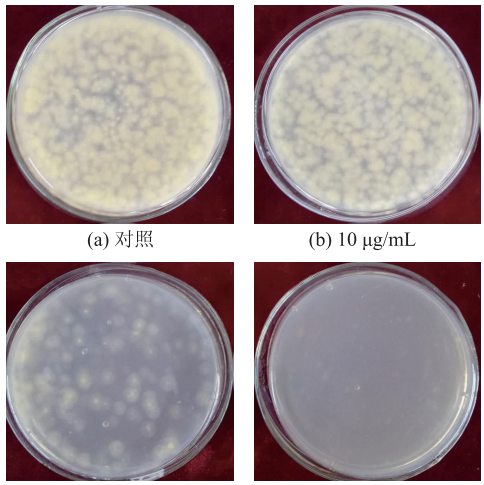



**图 7　SG17 抑菌物质对黄曲霉孢子萌发的影响**

**Fig. 7　Effects of SG17 antibacterial substances on the spore germination of *Aspergillus flavus***

以往围绕黄曲霉污染的生物防治及其抑菌活性研究主要通过培养基平板对峙实验完成[15-16]。为了分析 SG17 的实际应用价值，在平板对峙实验的基础上,将抑菌粗提液直接加入黄曲霉处理的玉米中进行培养,结果见图 8。加入 50 μg/mL 抑菌物质的玉米上仅有 6 粒玉米有明显的黄曲霉菌生长,加入 100 μg/mL 抑菌物质的玉米上未见到明显的黄曲霉菌。继续培养至 14 d,100 μg/mL 抑菌物质处理的玉米上有 3 粒出现黄曲霉菌生长,抑菌率为 80%以上,这与稳定性研究的结果一致(见图 6)。因此,SG17 抑菌物质在玉米黄曲霉污染防治方面具有广泛的应用潜力。

## 3　结　语

目前,黄曲霉污染仍然是全球玉米作物在饲料及其他深加工领域应用的主要问题之一。研究表明,各种细菌、放线菌、真菌等均有抑制黄曲霉生长的作用。且具有不破坏营养成分、环境友好等特点。通过筛选对黄曲霉菌生长有显著抑制作用的微生

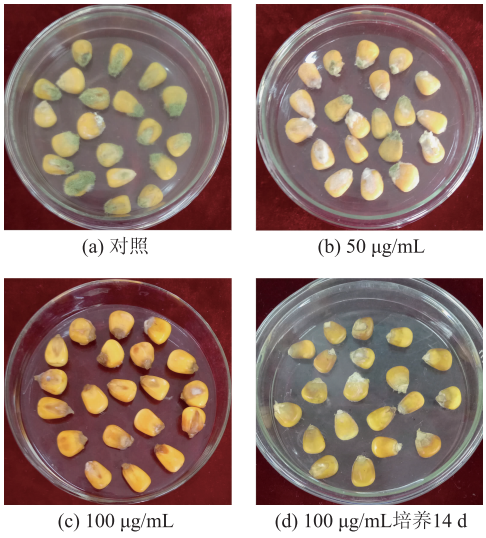



**图 8　SG17 抑菌物质对玉米黄曲霉的抑制作用**

**Fig. 8　Inhibition effects of SG17 antibacterial substances on *Aspergillus flavus* in corn**

物及其代谢产物制备生物抑菌剂，从源头进行防治，具有广泛的应用价值。作者从洛阳本地畜禽养殖场动物粪便堆积区的土壤中筛选获得多种对黄曲霉有抑制活性的菌株，其中 SG17 菌株的抑菌活性最强。通过形态学观察、培养鉴定、生理生化检测及 16S rRNA 序列对比分析，初步确定为链霉菌属。进一步研究表明 SG17 产生的抑菌活性物质具有较好的热稳定性和环境适应性，并能有效抑制玉米黄曲霉的污染。

而作者仅对 SG17 发酵液中的抑菌成分进行了简单提取和浓缩，在粗提物中是否存在其他风险物质，仍不确定。因此，下一步的研究重点在于发酵液粗提物中直接抑菌物质的分离提取，进而制备抑菌剂用于黄曲霉的生物防治。目前作者所在课题组已经完成了发酵条件优化的工作，正在对 SG17 菌株发酵液中直接抑菌物质进行分离纯化和结构解析，这将进一步扩大该菌株及其代谢产物在粮食特别是玉米中对于黄曲霉防治方面的应用。

## 参考文献：

[1] 徐甜甜，孟婷，穆月英. 我国省域玉米生产比较优势及其影响因素——基于 20 个玉米主产区 2008—2017 年面板数据实证[J]. 中国农业大学学报，2020，25(6)：102-111.

[2] 袁航，丁同英. 食品中主要真菌毒素检测方法研究进展[J]. 食品与机械，2020，36(12)：203-206.

[3] 张耀磊，翟焕趁，张帅兵，等. 基于监测过氧化氢酶活性对储藏玉米 $AFB_1$ 污染的早期预警[J]. 食品与机械，2017，33(1)：110-113，121.

[4] 高秀芬，荫士安，张宏元，等.中国部分地区玉米中 4 种黄曲霉毒素污染调查[J]. 卫生研究，2011，40(1)：46-49.

[5] 及华，李运朝，温之雨，等. 河北省玉米贮藏期黄曲霉毒素 $B_1$ 污染调查及安全性评价[J]. 粮食与饲料工业，2017(3)：19-21.

[6] SHARMA S，CHOUDHARY B，YADAV S，et al. Metabolite profiling identified pipecolic acid as an important component of peanut seed resistance against *Aspergillus flavus* infection[J]. **Journal of Hazardous Materials**，2021，404：1-11.

[7] 涂彩虹. 黄曲霉拮抗菌分离鉴定、培养条件优化及其发酵上清液部分特性初步研究[D]. 雅安：四川农业大学，2011.

[8] 李昌主. 一例鸡黄曲霉素中毒的诊断与防治[J]. 家禽科学，2012(9)：38-39.

[9] 郭静佩. 花生品种对黄曲霉菌的抗性鉴定和抗侵染机制研究[D]. 新乡：河南师范大学，2012.

[10] DU R，ZHANG Y，YAO Y. Influencing factors and biological control of aflatoxin contamination in peanuts[J]. **Agricultural Biotechnology**，2018，7(2)：22-26.

[11] 李平. 14 株海洋放线菌活性产物筛选及菌株 MA03 抑 AFT 效能研究[D]. 哈尔滨：哈尔滨工业大学，2015.

[12] 周启升，孙长坡，张楠，等. 拮抗放线菌 S24 的鉴定及其对黄曲霉的抑制作用[J]. 微生物学通报，2009，36(12)：1832-1837.

[13] 钱瑶，潘园园，李二伟，等. 链霉菌 IMS002 的分类鉴定及其抗真菌活性物质解析[J]. 微生物学报，2020，60(1)：60-68.

[14] 刘春静，王昌禄，李风娟，等. 链霉菌 TD-1 代谢产物对饲料中污染霉菌的抑制作用及稳定性[J]. 北京工商大学学报：自然科学版，2012，30(4)：54-58.

[15] 孙会刚，高兆建，何美娟，等. 链霉菌 HMJ-7 的鉴定及其抗菌物质稳定性分析[J]. 食品与生物技术学报，2013，32(11)：1183-1187.

[16] 翟翠萍. 红平红球菌的培养及其对黄曲霉毒素 $B_1$ 的降解研究[D]. 青岛：中国海洋大学，2012.