

# 小麦赤霉病生防菌的筛选及其活性物的初步研究

刘 锐, 韩 龙, 何张江, 范 翠, 康冀川\*

(贵州大学/教育部西南药用生物资源工程研究中心, 贵阳 550025)

**摘要:**本研究以课题组前期筛选获得的8株具有生防活性潜力的细菌为基础,从中筛选具有防治小麦赤霉病的活性菌株,并初步探究其生防活性基础。通过平板对峙法初步筛选,结果发现,2株解淀粉芽孢杆菌(*Bacillus amyloliquefaciens*) DEB-2与D<sub>1</sub>具有较高的抑菌活性,抑菌率分别为51.32%和49.48%,DEB-2发酵物的抑菌活性高于D<sub>1</sub>。菌株遗传稳定性和菌株发酵液对紫外照射敏感性检测发现,DEB-2和D<sub>1</sub>都具较高的稳定性,且二者之间均无明显差异。在pH值和温度稳定性方面,DEB-2的稳定性显著高于D<sub>1</sub>,DEB-2不受pH值影响,D<sub>1</sub>随pH值升高而活性降低;在121℃时,DEB-2发酵液抑菌率仍保持在62.35%,D<sub>1</sub>下降至15.74%。生测结果表明,DEB-2的防治效果明显高于同类市售枯草芽孢杆菌。由此,以DEB-2作为小麦赤霉病生物防治的候选菌株。为进一步探究DEB-2活性的物质基础,利用GC-MS分析活性乙酸乙酯层,发现一个环-(L-苯丙氨酸-L-脯氨酸)化合物,其已被报道具有较强的拮抗小麦赤霉病菌的作用。由此推测,DEB-2对小麦赤霉病菌具有较高的拮抗作用可能与其产生的环-(L-苯丙氨酸-L-脯氨酸)相关。

**关键词:**生物防治;小麦赤霉病;禾谷镰刀菌;解淀粉芽孢杆菌DEB-2

中图分类号:S435.121.4\*5

文献标识码:A

文章编号:2096-5877(2023)06-0090-06

## A Preliminary Study on Screening of Biocontrol Bacteria Against Wheat Head Blight and their Bioactive Compounds

LIU Rui, HAN Long, HE Zhangjiang, FAN Cui, QIAN Shengyan, MENG Juan, WANG Jiankang, KANG Jichuan\*

(Guizhou University / Engineering Research Center of Southwestern Bio-pharmaceutical Resources, Ministry of Education, Guiyang 550025, China)

**Abstract:** Based on the eight bacteria strains with potential bio-control activities obtained by our research group in the early stage, this study screens the bioactive strains against *F. graminearum*, and initially explores the substantial basis of their bio-control activities. Preliminary screening of the strains *via* the plate confrontation method showed that two strains of *Bacillus amyloliquefaciens* DEB-2 and D<sub>1</sub> had high antifungal activities with the rates of 51.32% and 49.48% respectively. The fermentation broth of DEB-2 had significantly greater antifungal activities than that of D<sub>1</sub> ( $P < 0.01$ ). The genetic stabilities of the strains and the sensitivities of the fermentation broth of the strains to ultraviolet radiation revealed that both DEB-2 and D<sub>1</sub> had high stabilities with no significant difference. However, in terms of pH and temperature stabilities, the stabilities of DEB-2 were significantly higher than that of D<sub>1</sub> ( $P < 0.01$ ). DEB-2 was not affected by pH change, while D<sub>1</sub> decreased in activity with pH increasing. At 121 °C, the antifungal activities of DEB-2 fermentation broth remained 62.35%, while D<sub>1</sub> dropped to 15.74%. The bioassay results also showed that the control effects of DEB-2 was significantly higher ( $P < 0.01$ ) than commercial bio-control agent *Bacillus subtilis* strain. Therefore, DEB-2 was selected as a candidate strain for biological control of wheat head blight. In order to explore the substantial basis of DEB-2 bioactivity, a cyclic-(L-phenylalanine-L-proline) was found *via* GC-MS analysis of the bioactive ethyl acetate layer, which was reported to have a relatively strong antifungal effect on wheat head blight. It can be speculated that DEB-2 had a antifungal effect against *F. graminearum*, which may be related to the production of cyclo-(L-phenylalanine-L-proline).

**Key words:** Biological control; Wheat head blight; *Fusarium graminearum*; *Bacillus amyloliquefaciens* DEB-2

收稿日期:2020-09-30

基金项目:国家自然科学基金项目(31670027)

作者简介:刘 锐(1988-),男,在读硕士,主要从事生物防治研究。

通讯作者:康冀川,男,博士,教授,E-mail: jckang@gzu.edu.cn

小麦赤霉病(wheat head blight)是由禾谷镰刀菌(*Fusarium graminearum*)引起的一种世界性真菌病害<sup>[1]</sup>。小麦是我国重要的粮食之一<sup>[2]</sup>,目前防治小麦赤霉病的主要方式有培育抗病品种、加强田间管理、化学防治和生物防治等<sup>[3]</sup>。培育抗病小麦品种是最经济最有效的措施,但目前尚未培育出理想的抗病品种。靠加强田间管理也难以遏制病害的发生<sup>[4]</sup>。当前,该病的防治仍以化学农药为主,但化学农药的大量使用,会产生环境污染和病原菌的抗药性增强等一系列问题<sup>[5]</sup>。生物防治具有对环境友好,无残留等优点<sup>[6]</sup>,因此,对生物防治的研究逐渐引起重视。生物防治在小麦赤霉病的防控上已有报道<sup>[7]</sup>,如芽孢杆菌属、假单胞菌属及链霉菌属等拮抗菌对赤霉病均具有抑制作用<sup>[8-9]</sup>。

本研究旨在筛选出对小麦赤霉病菌具有较高拮抗活性的菌株,为开发新型小麦赤霉病的生防制剂提供候选菌株。通过平板对峙初筛、生防活性评价和生物测定检验,获得了一株具有开发成生防制剂的潜力菌株解淀粉芽孢杆菌 DEB-2。利用 GC-MS 方法,并结合文献发现环-(L-苯丙氨酸-L-脯氨酸)对小麦赤霉病具有较好的抑制作用,推测该化合物为 DEB-2 拮抗小麦赤霉病菌的物质基础。

## 1 材料与方 法

### 1.1 供试菌株

解淀粉芽孢杆菌(*Bacillus amyloliquefaciens*): D<sub>1</sub>、HD213、DEB-2,嗜麦芽寡养单胞菌(*Stenotrophomonas maltophilia*): HE41,枯草芽孢杆菌(*Bacillus subtilis*): F<sub>2</sub>、H<sub>3</sub>,缺陷假单胞菌(*Brevundimonas bul-lata*): HD13 和纺锤形赖氨酸芽孢杆菌(*Lysinibacillus fusiformis*): HE14,均由贵州大学贵州省生物工程中心分离保藏提供。病原菌禾谷镰刀菌购于中国微生物菌种保藏中心。市售枯草芽孢杆菌生防菌剂(粉剂)购于德强生物股份有限公司。

### 1.2 菌株培养

将各供试生防菌在 NA 培养基中采用划线培养法<sup>[10]</sup>进行活化。培养 1 d 后,挑取单菌落转至 NA 平板培养基中,并置于 28 °C 培养箱中培养 2 d,最后再将其放入 4 °C 冰箱中保存备用。

### 1.3 平板对峙法及相对抑菌率计算

将病原菌菌饼(5 mm)置于 PDA 培养基平板中央,在其两侧对称等距 2 cm 处接种经活化后的各供试生防菌。再于 28 °C 暗箱培养 4 d 后,观察抑菌作用、测量抑菌圈大小,以在供试细菌位置处

放置琼脂块为对照,每株菌设 3 次重复,计算相对抑菌率<sup>[11]</sup>。抑菌率(%)=[(对照菌落直径-处理菌落直径)/对照菌落直径]×100。

## 1.4 生防菌活性评价

### 1.4.1 发酵液制备

把细菌单菌落接种到 50 mL NB 液体培养基中,在 28 °C、120 r/min 条件的摇床(下同)中培养 1 d 后,即得该菌的发酵液。在 600 nm 条件下测得发酵液的 OD 为 0.8;取 1 mL 细菌发酵液母液接种于装有 100 mL NB 液体培养基的三角瓶中,在摇床中培养 4 d 后,发酵液在 4 °C、12 000 r/min 的条件下离心 15 min 后,收集上清液(下同),用 0.22 μm 无菌过滤器除菌得无菌发酵液(下同),并于 4 °C 保存备用。

### 1.4.2 发酵液浓度对病原菌的抑制作用

采用生长速率法<sup>[12]</sup>,将菌株无菌发酵液用 PDA 培养基分别配制成含发酵液浓度为 1%、2%、4%、8%、16%、32%、64% 各 100 mL,分别将其倒入无菌平板中。待凝固后,再接种病原菌菌饼于平板中央(下同)。以不加发酵液的 PDA 平板为对照,每个浓度的 PDA 平板设置 3 个重复试验组,于 28 °C 暗箱培养 4 d 后(下同),测量菌落直径,计算抑菌率(下同)。

### 1.4.3 发酵液的热稳定性

将菌株发酵液分别置于 4、20、40、60、80、100、121 °C 温度条件下<sup>[13]</sup>,处理 1 h。然后冷却至室温 25 °C。将其离心过滤的无菌发酵液用 PDA 培养基配制成含发酵液 32% 的平板后接种病原菌,以含 32% 无菌水的 PDA 平板为对照,最后于暗箱中培养,计算抑菌率。

### 1.4.4 细菌发酵液的 pH 稳定性试验

将细菌发酵液的 pH 值调为 1、3、5、7、9、11,分别处理 1 h 后,再将发酵液 pH 值调为中性<sup>[14]</sup>。之后方法同 1.4.3,计算抑菌率。

### 1.4.5 细菌发酵液的紫外稳定性试验

将细菌的发酵液置于紫外灯 10 cm 处,分别光照处理 0、1、2、3、4、5、6 h<sup>[15]</sup>。之后方法同 1.4.3,计算抑菌率。

### 1.4.6 细菌转接培养稳定性试验

将细菌在 NA 培养基上连续转接培养 30 次。分别取 1、5、10、15、20、25、30 转接次数为试验对象<sup>[16]</sup>。将各转接次数的菌株进行培养发酵。之后方法同 1.4.3,计算抑菌率。

## 1.5 生测

采用小穗单花滴注法<sup>[17]</sup>,将扬花期的健康麦

穗每穗注入 10  $\mu\text{L}$  浓度约为  $10^5$  个/mL 的病原菌孢子液(下同),并置于湿度 80%,光照强度 60% 的人工气候箱中(下同),培养 1 d 后取出,再将每穗喷施 10 mL 的 DEB-2 菌株的发酵液,为试验组;按照商品使用说明书,将市售生防菌剂配制成浓度为 0.25 g/L 的溶液后,再喷施 10 mL 市售生防菌剂溶液于每穗上(下同),为阳性对照组;喷施 10 mL 中性无菌水于每穗上(下同),为阴性对照组。再置于人工气候箱中培养 5 d。每个试验组设置 3 个重复,每个重复组 5 穗。记录发病情况并计算防治效果,计算公式参考相应文献<sup>[18]</sup>。

剪取健康扬花期小麦麦穗,喷施 10 mL 的 DEB-2 菌株发酵液于每穗上,为试验组;喷施 10 mL 市售生防菌剂的溶液于每穗上,为阳性对照组;喷施无菌水于每穗上,为阴性对照组。自然晾干后,每穗上均注入病原菌孢子液,再置于人工气候箱中培养 5 d。每个试验组设 3 个重复,每个重复组 5 穗。记录发病情况并计算防治效果。

### 1.6 GC-MS 分析

将 DEB-2 的种子母液加入 80 L NB 培养基溶液中,再将其置入发酵罐中进行发酵培养 2 d,其发酵温度为 28  $^{\circ}\text{C}$ ,即得 80 L DEB-2 菌株的发酵液,离心除去菌体后,用乙酸乙酯萃取,旋转蒸干后,即得乙酸乙酯层浸膏、水层浸膏。用打孔法分别对其进行活性检测(下同)。用正相硅胶柱色谱法对活性层进行梯度洗脱,分成若干粗分段后,再对各粗分段进行活性检测。最后对其活性段进行 GC-MS 分析。

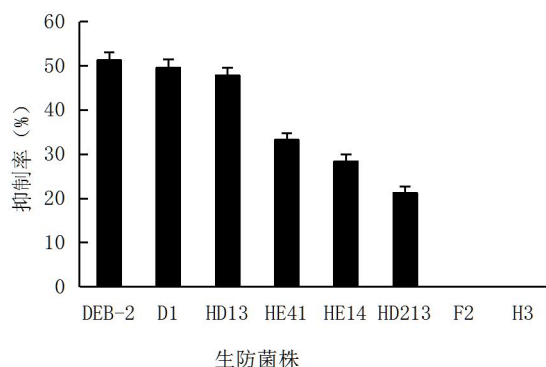
### 1.7 数据处理

采用 SPSS 17.0 统计软件进行数据处理,数据用“平均值 $\pm$ 标准差(SD)”表示,采用单因素方差进行组间比较, $P < 0.05$  表示差异有统计学意义。采用 Excel 2007 软件制图。

## 2 结果与分析

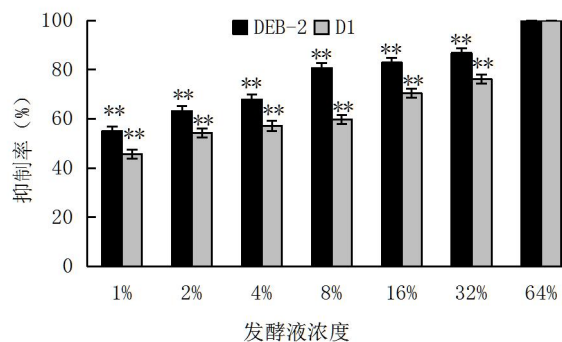
### 2.1 小麦赤霉病生防菌株的初筛

为了探究具有拮抗小麦赤霉病的活性菌株,对编号 DEB-2、D<sub>1</sub> 等 8 株具有潜力的生防菌进行平板对峙试验。结果发现除枯草芽孢杆菌(*Bacillus subtilis*)F<sub>2</sub> 和 H<sub>3</sub> 对病原菌无拮抗活性外,其余 6 株对病原菌均有不同程度的抑制作用,其中解淀粉芽孢杆菌 DEB-2 和 D<sub>1</sub> 的抑制活性较高,抑制率达 51.32% 和 49.48%(图 1)。此外,为明确生防菌株拮抗作用的物质基础,选取抑制活性较高的 DEB-2 和 D<sub>1</sub> 的发酵液进行抑菌试验,如图 2 所示,



注:柱状图显示的是 3 次试验的“平均值 $\pm$ 标准差(SD)”,下同

图 1 平板对峙



注:“\*\*\*”表示差异极显著( $P < 0.01$ ),下同

图 2 发酵液抑菌试验

发现在较低浓度条件下(1%、2%、4%、8%、16% 和 32%),DEB-2 菌株抑菌活性优于 D<sub>1</sub> 菌株。由此表明,DEB-2 菌株具有较高拮抗小麦赤霉病菌的活性,拮抗活性可能来源于其代谢产物。

### 2.2 解淀粉芽孢杆菌 DEB-2 生防活性稳定性

为了明确菌株是否具有开发为生防制剂的可能,对其生防活性稳定性进行评估,包括菌株的遗传稳定性,发酵液对 pH 值、紫外和温度的敏感性。结果发现,2 株较高拮抗活性的解淀粉芽孢杆菌都具有良好的遗传稳定性,转接 1 次后与转接 30 次后的抑菌活性无明显差异(图 3)。检测 pH 值因素对发酵液拮抗活性影响发现,无论 pH 值高低,DEB-2 的抑菌活性明显高于 D<sub>1</sub> 菌株(图 4),由此表明,DEB-2 具有较高的 pH 值稳定性。紫外对发酵液拮抗活性无明显影响(图 5),表明 2 个菌株都具有较好的紫外稳定性。温度稳定性检测发现,DEB-2 和 D<sub>1</sub> 在 100  $^{\circ}\text{C}$  变化范围以内二者都具有较好的稳定性;达到 100  $^{\circ}\text{C}$  时,D<sub>1</sub> 抑菌活性明显下降,121  $^{\circ}\text{C}$  时抑制率仅为 15.74%,DEB-2 仅在 121  $^{\circ}\text{C}$  时抑菌活性略有下降,仍保持较高的活性,抑制率为 62.35%(图 6)。上述结果表明,DEB-2 较 D<sub>1</sub> 具有更强的生防活性稳定性,DEB-2 可作为候选的生防菌株。



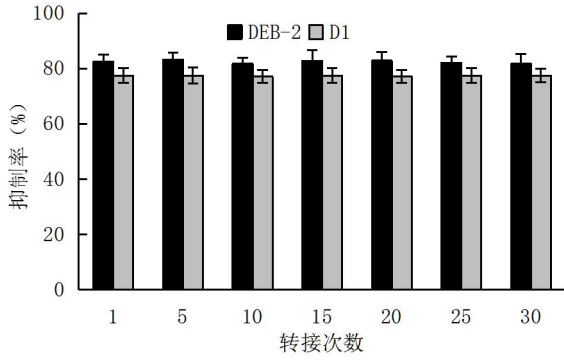


图3 转接稳定性

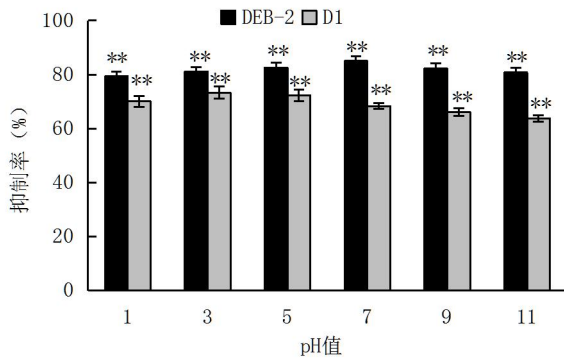


图4 pH稳定性

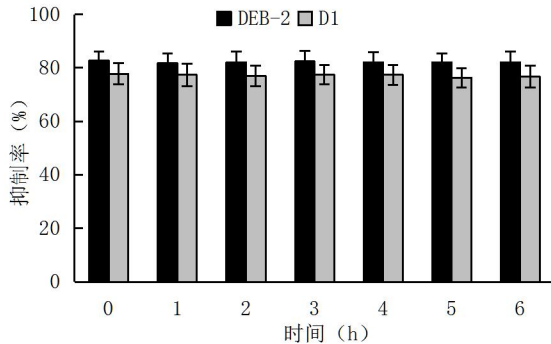


图5 紫外稳定性

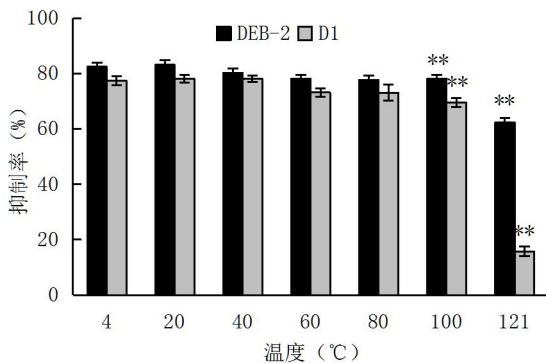


图6 温度稳定性

### 2.3 在试验室中 DEB-2 防治效果优于市售的枯草芽孢杆菌制剂

为验证 DEB-2 生防潜力,以市售枯草芽孢杆

菌制剂为阳性对照,以清水处理为阴性对照,进行生物测定。先施用生防菌后再接种病原菌的防效结果显示,清水处理组麦穗长满菌丝,市售枯草芽孢杆菌制剂处理组病原菌菌丝较对照组少,DEB-2 处理组只能零星观察到病原菌菌丝。防效结果统计发现,DEB-2 防效明显优于枯草芽孢杆菌,防效分别为 66.68% 和 23.43%(图 7)。采用先接种病原菌后施用生防菌的治效与防效结果趋势一致,其治效分别为 46.00% 和 22.90%(图 8)。由此表明,在试验室中 DEB-2 防治效果优于市售枯草芽孢杆菌制剂,具有开发为生防制剂的可能。由图 7、图 8 可知,DEB-2 防治效果优于市售枯草芽孢杆菌制剂。先施用生防菌后再接种病原菌的防效

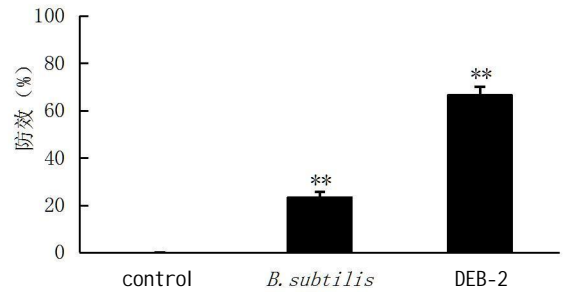


图7 先施用生防菌后再接种病原菌的防效试验

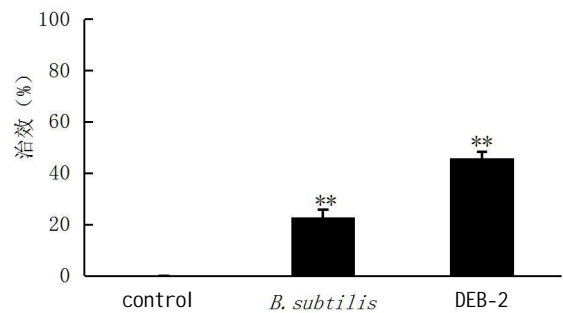


图8 先接种病原菌后施用生防菌的治效试验

### 2.4 环-(L-苯丙氨酸-L-脯氨酸)可能为 DEB-2 活性来源

为探究 DEB-2 拮抗病原菌活性的物质基础,用乙酸乙酯对 DEB-2 发酵液进行萃取。结果发现,水层部分无抑菌作用,乙酸乙酯层部分具有一定的抑菌活性(图 9)。进一步用二氯甲烷:甲醇为 30:1、25:1、20:1、15:1、12:1、10:1、8:1、5:1、3:1、1:1 和纯甲醇进行逐级梯度洗脱乙酸乙酯部分得 11 个组分,其中只有 Fr 甲醇层抑菌活性为 20%(图 10)。利用 GC-MS 对 Fr 甲醇层进行分析,共分析出 43 个化合物,25 个为已知化合物,18 个为未知化合物。其中化合物环-(L-苯丙氨酸-L-

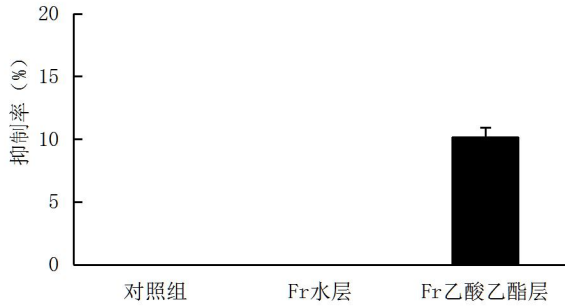


图9 DEB-2菌株发酵液的活性追踪



图10 DEB-2发酵液乙酸乙酯层各组分的活性试验

脯氨酸)已被报道对小麦赤霉病菌有较强的活性(表1)。由此推测,DEB-2具有较高的拮抗作用

可能与其分泌较高浓度的环-(L-苯丙氨酸-L-脯氨酸)<sup>[19]</sup>有关。

表1 GC-MS Fr甲醇层段物质组成成分表

化合物	分子式	分子量	含量 (%)	化合物	分子式	分子量	含量 (%)
2-甲基丙醛	C <sub>4</sub> H <sub>8</sub> O	72	0.734	Unknown			2.082
乙酸	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> O <sub>2</sub>	60	1.186	吡啶	C <sub>5</sub> H <sub>7</sub> N	117	0.441
3-甲基-丁醛	C <sub>5</sub> H <sub>10</sub> O	86	3.739	六氢吡咯并[1,2-a]吡嗪-1,4-二酮	C <sub>7</sub> H <sub>10</sub> N <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	154	1.952
2-甲基丁醛	C <sub>5</sub> H <sub>10</sub> O	86	1.284	Unknown			2.419
Unknown		91	0.605	环-(L-脯氨酸-L-缬氨酸)	C <sub>10</sub> H <sub>16</sub> N <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	196	1.498
2-丙酸	C <sub>3</sub> H <sub>4</sub> O <sub>2</sub>	72	2.523	Unknown			0.433
Unknown		94	0.382	Unknown			0.593
2,2-二甲氧基丁烷	C <sub>6</sub> H <sub>14</sub> O <sub>2</sub>	118	0.107	环-(L-苯丙氨酸-L-脯氨酸)	C <sub>14</sub> H <sub>16</sub> N <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	244	1.202
N-异丁烯-异丁基胺	C <sub>8</sub> H <sub>17</sub> N	127	0.272	Unknown			4.303
二甲亚砜	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> OS	78	0.213	Unknown			1.980
5-甲基-2(3H)-咪唑酮	C <sub>5</sub> H <sub>6</sub> O <sub>2</sub>	98	1.640	Unknown			1.231
苯乙烯	C <sub>8</sub> H <sub>8</sub>	104	0.603	Unknown			11.061
Unknown			0.277	Unknown			3.037
Unknown			0.174	十六烷酰胺	C <sub>16</sub> H <sub>33</sub> NO	255	1.525
5-甲基-2(5H)-咪唑酮	C <sub>5</sub> H <sub>6</sub> O <sub>2</sub>	98	0.984	Unknown			1.213
二甲基三硫醚	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> S <sub>3</sub>	126	6.078	Unknown			3.093
S-甲硫基亚硫酸甲酯	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> OS <sub>2</sub>	110	2.547	Unknown			15.399
Unknown			2.761	(Z)-9-十八碳酰胺	C <sub>18</sub> H <sub>35</sub> NO	281	1.208
2-甲基-N-(2-甲基亚丁基)-1-丁胺	C <sub>10</sub> H <sub>21</sub> N	155	0.829	Unknown			2.474
泛内酯	C <sub>6</sub> H <sub>10</sub> O <sub>3</sub>	130	0.274	Unknown			1.657
3-甲基-N-(3-甲基亚丁基)-1-丁胺	C <sub>10</sub> H <sub>21</sub> N	155	1.096	(Z)-13-多糖酰胺	C <sub>22</sub> H <sub>43</sub> NO	337	11.926
S-甲硫基磺酸甲酯	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> O <sub>2</sub> S <sub>2</sub>	126	0.964				

### 3 讨论

相较于前人对石斛内生细菌 DEB-2 对各病原菌的研究,DEB-2 菌株对小麦赤霉病等病原菌有强烈的抑制作用,但对其在小麦上的防治作用未做研究<sup>[20]</sup>,以黑曲霉为指示菌的 DEB-2 发酵液的

稳定性表现优异<sup>[21]</sup>。本试验以小麦赤霉病病原菌作为主要的研究对象,对试验室的 8 株不同供试菌株进行平板对峙、发酵液的热、酸碱等前期试验筛选出优势菌株 DEB-2。为探索该菌是否具有商业开发的潜力,后续还对 DEB-2 菌株进行生测试验,结果发现该菌具有一定的商业开发潜力。

为了解 DEB-2 菌株对病原菌的拮抗机制,前人在对 DEB-2 对 5 种辣椒病原真菌的抑制作用研究时发现,DEB-2 菌株可造成真菌菌丝尖端出现变粗、膨大、崩解等现象,抑菌原因可能是菌丝细胞壁被破坏,使胞内原生质流出而抑制其生长<sup>[22]</sup>,该现象与脂肽类、fengycins(丰原素类)、surfactins(表面活性素类)、iturins(伊枯草菌素类)等所引起的现象相似。因此推测 DEB-2 对辣椒病原真菌的抑制作用可能与大分子的脂肽类化合物有关。现脂肽类化合物的拮抗机理均已报道<sup>[23]</sup>。本试验用乙酸乙酯对 DEB-2 菌株的发酵液进行萃取浓缩,并上柱分离与活性追踪而得出其有效活性段。最后通过 GC-MS 分析与查阅文献,得出其活性化合物可能为环-(L-苯丙氨酸-L-脯氨酸),该化合物属于小分子的环二肽类化合物。洋葱伯克霍尔德菌 CF-66 产生的环二肽类化合物也可使病原真菌菌丝膨胀弯曲等<sup>[24]</sup>。但目前环二肽类化合物的抑菌机制尚未明确,对该类化合物的作用机制等方面的研究仍处于早期阶段,因此还有待于进一步研究<sup>[25]</sup>。生物防治是利用生态系统中各种生物之间相互依存、相互制约的生态学现象和某些生物学特性,以一种或多种生物(包括寄主植物,人除外)来减少病原菌数量或病害的发生,以实现病害防治的方法<sup>[26]</sup>。基于上述理论,本研究中有一个问题需要得到合理的解释,即 DEB-2 的生测结果中,如果把 DEB-2 的拮抗效果完全归于菌株的次级代谢产物,那么接种防和治的菌液浓度是一致的情况下,为什么其防效显著高于治效?推测以先施用生防菌后再接种病原菌的防御手段,其实为生防菌提前给予了抢占生态位的契机,使其在植株繁殖,产生次级代谢产物。然而,先接种病原菌后施用生防菌的治疗手段截然相反,生防菌株首先需要与病原菌进行抗争抢占生态位<sup>[27]</sup>,其次才治疗。因此,防效显著优于治效,建议在生防制剂的应用中,策略以防为主治为辅。

此外,为进一步明确 DEB-2 菌株是否具有商业开发的潜力,本试验的后期还将进行田间试验以及针对其他小麦品种的生测活性测定等,以期小麦赤霉病的生物防控及其粮食安全生产等奠定基础。

#### 参考文献:

[1] He Y, Ahmad D, Zhang X, et al. Genome-wide analysis of family-1 UDP glycosyltransferases (UGT) and identification of UGT genes for FHB resistance in wheat (*Triticum aestivum* L.) [J]. BMC Plant Biol, 2018,18(1):67.

[2] 李新伟,田敏,肖新.基于小麦养分快速诊断的施肥决

策与控制系统设计[J].东北农业科学,2019,44(2):23-27.

[3] 张洁,伊艳杰,王金水,等.小麦赤霉病的防治技术研究进展[J].中国植保导刊,2014,34(1):24-28.

[4] 周红姿,周方圆,赵晓燕,等.小麦赤霉病生防菌的筛选及其田间防效研究[J].中国农业科技导报,2020,22(1):67-77.

[5] 唐琳,张焕丽.源自3种茄科蔬菜土壤木霉菌的分离与鉴定[J].东北农业科学,2020,45(5):52-56.

[6] 邓进超,关一鸣,吴连举,等.人参锈腐病菌拮抗菌的筛选、鉴定及发酵条件优化[J].东北农业科学,2017,42(3):31-38.

[7] 陈然,李俊凯,李黎,等.小麦赤霉病生物防治研究进展[J].河南农业科学,2014,43(12):1-5.

[8] Palazzina J M, Ramirez M L, Torres A M. Potential biocontrol agents for *Fusarium* head blight and deoxynivalenol production in wheat[J].Crop Protection, 2007,26(11):1702-1710.

[9] Schisler D A, Khan N I, Boehm M J, et al. Selection and evaluation of the potential of choline-metabolizing microbial strains to reduce *Fusarium* head blight[J].Biological Control, 2006,39(3):497-506.

[10] 赵春霞,刘惠荣,冯福应,等.乌梁素海可培养细菌丰度和多样性分析[J].内蒙古农业大学学报(自然科学版),2010,31(2):193-197.

[11] 孔阳,马养民,王佳运,等.一株烟曲霉抗植物病原菌活性次生代谢产物的研究[J].东北农业科学,2019,44(2):34-38.

[12] 韩龙,康冀川,雷帮星,等.马铃薯早疫病拮抗菌及其抑菌作用研究[J].山地农业生物学报,2018,37(1):27-31.

[13] 马桂珍,付泓润,王淑芳,等.海洋多粘类芽孢杆菌 L<sub>1</sub>-9 菌株发酵液抗菌谱及稳定性测定[J].海洋通报,2013,32(3):316-320.

[14] 张艳军.杨树溃疡病菌拮抗菌发酵液抗菌谱及稳定性研究[J].浙江农业学报,2014,26(4):981-985.

[15] 肖春萍,韩梅,杨利民.2株人参生防真菌发酵液稳定性的研究[J].东北师范大学学报(自然科学版),2015,47(1):105-110.

[16] 范万泽,薛应钰,张树武,等.拮抗放线菌 ZZ-9 菌株发酵液的抑菌谱及稳定性测定[J].西北农业学报,2017,26(3):463-470.

[17] 杜军凯,余桂红,王秀娥,等.赤霉病主效抗性 QTL 区域 SSCP 标记的发掘与验证[J].麦类作物学报,2010,30(5):829-834.

[18] 周苗苗.小麦赤霉病菌拮抗内生菌的分离筛选及抑菌活性研究[D].雅安:四川农业大学,2015.

[19] 陈文华.禾谷镰刀菌拮抗菌的筛选及拮抗机理的研究[D].泰安:山东农业大学,2019.

[20] 何劲.石斛内生菌及其拮抗真菌的研究[D].贵阳:贵州大学,2006.

[21] 雷帮星,康冀川,吴旋,等. DEB-2 菌株产抗真菌活性物质的初步研究[J].贵州农业科学,2009,37(7):89-91.

[22] 何劲,雷帮星,宋贞富,等.石斛内生细菌 DEB-2 对 5 种辣椒病原真菌的抑制作用[J].植物保护学报,2014,41(2):157-162.

- [10] Berglund E D, Yong Xu, Elmquist J K, et al. Serotonin 2C receptors in pro-opiomelanocortin neurons regulate energy and glucose homeostasis[J]. Journal of Clinical Investigation, 2013, 123(12): 5061-5070.
- [11] Waldbillig R J, Bartness T J, Stanley B G. Increased food intake, body weight, and adiposity in rats after regional neurochemical depletion of serotonin[J]. Journal of Comparative and Physiological, 1981, 95(3): 391-405.
- [12] Nau Felix, Yu B N, Martin D, et al. Serotonin 5-HT<sub>2A</sub> receptor activation blocks TNF- $\alpha$  mediated inflammation in vivo[J]. PLoS One, 2013, 8(10), e75426.
- [13] 赵聪哲, 胡忠昌, 张立春, 等. 大白猪 *pGH* 基因的多态性与生长性状的关联研究[J]. 东北农业科学, 2019, 44(2): 39-43.
- [14] Kaye, Walter H, Bailer U F, et al. "Neurobiology of anorexia nervosa: clinical implications of alterations of the function of serotonin and other neuronal systems"[J]. International Journal of Eating Disorders, 2005, 46(2): 144.
- [15] Gersh M D, Ross L L. Location of sites of 5-hydroxytryptamine storage and metabolism by radioautography[J]. Journal of Physiology, 1966, 186(2): 477-492.
- [16] Yun J, Jin H, Cao Y, et al. RNA-Seq Analysis Reveals a Positive Role of *HTR2A* in Adipogenesis in Yan Yellow Cattle [J]. International Journal of Molecular Sciences, 2018, 19(6):1760.
- [17] Heisler L K, Kanarek R B, Gerstein A. Fluoxetine decreases fat and protein intakes but not carbohydrate intake in male rats[J]. Pharmacology Biochemistry and Behavior, 1997, 58(3):767-773.
- [18] Sohn J W, Xu Y, Jones J E, et al. Serotonin 2C receptor activates a distinct population of arcuate pro-opiomelanocortin neurons via TRPC channels[J]. Neuron, 2011, 71(3): 488-497.
- [19] Pessin J E, Sahiel A R. Signaling pathways in insulin action: molecular targets of insulin resistance[J]. Journal of Clinical Investigation, 2000, 106(2): 165-169.
- [20] Kim S P, Ha J M, Yun S J, et al. Transcriptional activation of peroxisome proliferator-activated receptor- $\gamma$  requires activation of both protein kinase A and Akt during adipocyte differentiation[J]. Biochemical and Biophysical Research Communications, 2010, 399(1):55-59.
- [21] Serretti A, Mandelli L. Antidepressants and body weight: a comprehensive review and meta-analysis[J]. The Journal of Clinical Psychiatry [J]. 2010, 71(10): 1259-1272.
- [22] Simansky K J, Vaidya A H. Behavioral mechanisms for the anorectic action of the serotonin (5-HT) uptake inhibitor sertraline in rats: comparison with directly acting 5-HT agonists[J]. Brain Research Bulletin, 1990, 25(6): 953-960.

(责任编辑:王 昱)

(上接第95页)

- [23] 周 维, 田丹丹, 杨 扬, 等. 解淀粉芽孢杆菌 G9R-3 脂肽类化合物抑制香蕉枯萎病菌机理及防效评价[J]. 西南农业学报, 2019, 32(8): 1810-1816.
- [24] 王艾晶, 权春善, 王建华, 等. 洋葱伯克霍尔德菌 CF-66 环二肽的分离纯化及抑菌活性研究[J]. 中国生物工程杂志, 2009, 29(12): 43-48.
- [25] 魏贵香. 环二肽的研究进展[J]. 当代化工, 2020, 49(2): 406-409.
- [26] 宁荣彬, 孙海峰. 贝母类中药材病害防治研究进展[J]. 东北农业科学, 2018, 43(5): 34-37.
- [27] 张丽辉, 王永吉, 廖 林, 等. 生防菌 06-4 对魔芋软腐病的防治及机理的初步研究[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版), 2011, 37(3): 286-289.

(责任编辑:王 昱)