

# 诱导小麦抗叶锈病生防细菌的筛选、鉴定及其防效评价

徐爽, 陈立杰, 王媛媛, 朱晓峰, 刘晓宇, 范海燕, 段玉玺\*

(沈阳农业大学植物保护学院, 沈阳 110866)

**摘要** 小麦叶锈病是小麦生产上的重要病害,防治该病害主要采用抗病品种和喷施化学农药,而探索生物防治是防治该病的一种新方法。本研究使用3株细菌菌悬液对小麦种子进行处理,于小麦一叶期接种叶锈病菌10 d后调查其发病率和严重度。结果表明,在盆栽试验中,Sneb1462菌株菌悬液诱导小麦抗叶锈病的效果最好,可使发病率和严重度比对照分别降低27.54%和49.90%;Sneb1462还可促进小麦根部生长,施用后小麦根长和地下部鲜重分别比对照提高30.19%和29.03%。在大田试验中,用Sneb1462菌悬液处理小麦种子后叶锈病的严重度降低38.60%,小麦株高和穗重分别提高16.44%和34.98%,表明该菌株是一株优良的抗病促生菌。经透射电镜观察、16S rDNA序列分析及生理生化的检测,鉴定该菌株为多黏类芽胞杆菌 *Paenibacillus polymyxa*。利用生防细菌Sneb1462进行种子处理防控小麦叶锈病将是一种新型的植保措施,具有重要的研究意义。

**关键词** 小麦叶锈病; 多黏类芽胞杆菌; 诱导抗性; 防效

**中图分类号:** S 435.121.43 **文献标识码:** A **DOI:** 10.16688/j.zwbh.2017427

## Identification of the biocontrol bacterial strains for induced resistance against wheat leaf rust and control effect evaluation

XU Shuang, CHEN Lijie, WANG Yuanyuan, ZHU Xiaofeng, LIU Xiaoyu, FAN Haiyan, DUAN Yuxi

(College of Plant Protection, Shenyang Agricultural University, Shenyang 110866, China)

**Abstract** Wheat leaf rust is an important wheat disease, which can be controlled by using resistant varieties and chemical fungicides, and biological control is a new method. In this study, wheat seeds were coated with the fermentation broth of three biocontrol strains that were selected in a field experiment. The seedlings were inoculated by spraying spore suspension of *Puccinia triticina*. The incidence and severity were investigated 10 days after inoculation. The results showed that wheat seeds coated with strain Sneb1462 had obvious control efficacy against wheat leaf rust in pot experiments; the incidence and severity decreased by 27.54% and 49.90%, and the length and fresh weight of wheat root increased by 30.19% and 29.03%, respectively. The severity decreased by 38.60%, and the plant height and spike weight of wheat increased by 16.44% and 34.98% in the field, respectively. It was clear that this strain was a plant growth-promoting rhizobacteria, which was identified as *Paenibacillus polymyxa* based on morphological and biochemical characteristics as well as 16S rDNA sequence analysis. It may be a new type of plant protection measure for controlling wheat leaf rust by coating seeds with the strain Sneb1462, and therefore has important research significance.

**Key words** wheat leaf rust; *Paenibacillus polymyxa*; induced resistance; control efficacy

小麦叶锈病由 *Puccinia triticina* 引起,是世界小麦生产上的主要病害之一,发生严重时可使小麦减产40%以上<sup>[1]</sup>。在我国主要麦区曾发生4次中度以上的小麦叶锈病大暴发,给小麦生产带来严重的产

量损失<sup>[2-3]</sup>。近年来该病害在我国呈现扩大发展的趋势,2012年在甘肃、河南、陕西、安徽和四川等地小麦叶锈病大面积发生<sup>[4]</sup>,2015年和2016年黄淮麦区小麦叶锈病也较往年发生提前了近一个月<sup>[5]</sup>。

小麦叶锈病的防治方法多以选用抗病品种和化学防治为主<sup>[6]</sup>。化学杀菌剂的使用易使病原菌产生抗药性,污染环境,危害生态平衡<sup>[7]</sup>。而具有防效好、无毒性、无污染等特点的生物防治也成为学者们的研究热点<sup>[8]</sup>。利用生防菌防治小麦条锈病已有报道。Pang等<sup>[9]</sup>和Li等<sup>[10]</sup>研究表明恶臭假单胞菌 *Pseudomonas putida* 和枯草芽胞杆菌 *Bacillus subtilis* 均可抑制锈菌的夏孢子侵染,并诱导小麦抗条锈病。但对小麦叶锈病的生物防治报道却不多<sup>[11]</sup>。因此,利用生防菌诱导防控小麦叶锈病具有重要的意义。

生防菌可诱导植物产生诱导抗病性,进而起到防治病害的作用。利用植物根际促生菌(plant growth promoting rhizobacteria, PGPR)诱导植物防控植物病害在国内外已被广泛报道,Chowdappa等<sup>[12]</sup>用枯草芽胞杆菌 *B. subtilis* 和哈茨木霉 *Trichoderma harzianum* 诱导番茄对晚疫病产生抗性;Yoshioka等<sup>[13]</sup>用棘孢木霉 *T. asperellum* 诱导水稻对细菌性叶斑病产生抗性。芽胞杆菌作为重要的生防因子,利用其诱导植物产生抗病性的研究也有很多。项鹏等<sup>[14]</sup>发现简单芽胞杆菌 *B. simplex* Sneb545可诱导大豆抑制大豆孢囊线虫 *Heterodera glycines* 的入侵;Niu等<sup>[15]</sup>发现蜡样芽胞杆菌 *B. cereus* 可诱导番茄产生防御反应,抵抗灰霉菌 *Botrytis cinerea* 的侵染。

本研究通过大田初步筛选试验获得3株抗小麦叶锈病的生防细菌,室内测定其促生作用和防治效果,获得最优菌株 Sneb1462,进一步对 Sneb1462 菌株进行鉴定和田间防效试验验证,探讨其作为生防菌株防治小麦叶锈病的应用潜力。

## 1 材料与方法

### 1.1 供试材料

3株细菌菌株 Sneb1197、Sneb1289、Sneb1462 经过大田筛选获得,由沈阳农业大学北方线虫研究所提供。小麦品种‘新春20’和病原菌叶锈菌 *P. triticina* 由沈阳农业大学植物免疫研究所李天亚老师提供。

### 1.2 试验方法

#### 1.2.1 细菌发酵液制备

牛肉膏蛋白胨琼脂培养基(NA):酵母浸膏 1 g,蛋白胨 5 g,牛肉浸膏 3 g,蔗糖 10 g,蒸馏水 1 000 mL,

pH 6.8~7.0。

将供试的3株细菌菌株接种在NA培养基上进行纯培养,28℃下培养3 d。将纯化的细菌菌株接种于装有NA液体培养基的三角瓶,置于恒温振荡培养箱中(28℃,165 r/min)摇瓶发酵3 d。将菌悬液用无菌水稀释至  $1.0 \times 10^8$  cfu/mL 备用。

#### 1.2.2 小麦种子处理

小麦种子用75%乙醇表面消毒30 s,无菌水冲洗5次<sup>[9]</sup>。将50 g小麦种子与1 mL菌悬液混匀进行种子处理,以空白培养基处理为对照。

#### 1.2.3 细菌菌株对小麦种子萌发的影响

在培养皿中放入无菌滤纸,无菌水润湿,分别将20粒经细菌菌悬液包衣的小麦种子均匀分布于培养皿( $d=10$  cm)中。以空白培养基包衣为对照。共4组处理,每个处理5次重复。恒温培养箱中(25℃,相对湿度100%)培养,2 d时观察记录发芽率,测量其芽长与根长。

发芽率=(发芽种子数/供试种子总数)×100%。

#### 1.2.4 细菌菌株对小麦苗期生长的作用

将灭菌的土壤( $V_{\pm}:V_{\text{沙}}=1:1$ )混匀,装入规格为21 cm×21 cm塑料花盆中。将细菌菌悬液处理后的小麦种子播种于花盆中,每盆20粒。以空白培养基处理为对照,共4组处理,每个处理5次重复。在日光温室中正常培养30 d时,每个处理随机选取10株小麦植株,保持根系完整,用自来水将植株根部泥土冲洗干净,吸水纸吸干,测量单株小麦的株高、地上部分以及地下部分鲜重。

#### 1.2.5 细菌菌株对小麦叶锈病的盆栽防效试验

分别将浓度为  $1.0 \times 10^8$  cfu/mL 的3株细菌菌悬液处理后的小麦种子播种于塑料花盆中,每盆20粒小麦种子,以空白培养基处理为对照,共4组处理,每个处理5次重复,在日光温室中正常培养。待小麦长至一叶一心期,每盆留下15株长势一致的小麦植株,进行小麦叶锈菌 *P. triticina* 喷雾接种,菌悬液浓度为  $1.0 \times 10^5$  孢子/mL,接种量每盆10 mL,黑暗保湿12 h以上。接种后10 d,每个处理随机调查20株发病情况,并计算其发病率和严重度。病害严重度参照李振岐等<sup>[2]</sup>的方法,依据病叶上锈菌夏孢子堆所占据的面积与叶片总面积的百分比来确定病级,用分级法表示,设1%、5%、10%、20%、40%、60%、80%和100%八级,其他百分比值分级归于各自在上述分级值区间的最大值那一级,叶片未发病,

记为“0”。调查时目测估计每片调查叶片的发病严重度,计算公式如下:

平均严重度 =  $\sum$ (各严重度级别  $\times$  各级病叶数)/调查叶片总数;

发病率 = (发病的叶片数/调查的叶片总数)  $\times$  100%。

### 1.2.6 细菌 Sneb1462 对小麦叶锈病的田间防效试验

田间小区设计:以边长 2 m 的正方形区域为一个处理小区,每个小区含 5 垄。每垄播种 10 g 经菌株 Sneb1462 处理的小麦种子,以空白培养基处理为对照,共 2 组处理,每个处理设 3 次重复,小区周围设保护行。30 d 时,每个处理的各个重复小区均随机选取 10 株苗,测量其株高,并进行叶锈菌接种,接种后 10 d 调查病害严重度(方法同上)。在成熟期时,每个处理随机选取 30 株小麦植株,测量穗长、穗重。

### 1.2.7 细菌 Sneb1462 的鉴定

形态特征观测:在 NA 培养基上观察菌落形态及其培养性状,参考东秀珠等<sup>[16]</sup>所描述的方法进行革兰氏染色、芽胞染色,透射电子显微镜(JEM100CX-Ⅱ)下观察鞭毛着生方式。

16S rDNA 测序:采用细菌基因组 DNA 提取试剂盒(天根)提取本试验细菌的基因组 DNA。通用引物 27F(5'-AGAGTTTGATCATGGCTCAG-3')和 1492R(5'-ACGGTTACCTTGTTACGACTT-3')扩增细菌的 16S rDNA 序列。PCR 产物凝胶电泳纯化进行测序(金唯智)。测序结果经 BLAST 系统序列比对分析,利用 MEGA 6 软件构建系统进化树。

生理生化特征反应:参照东秀珠等<sup>[16]</sup>的方法进行检测。

## 1.3 数据统计分析

本研究中所有数据均采用 SPSS 20.0 软件进行统计分析,室内盆栽试验结果采用 Duncan 氏方差

分析,田间试验结果采用配对样本 *t* 检验分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 细菌菌株对小麦种子萌发的影响

为获得促生抗病优良的菌株,本试验采用 Sneb1197、Sneb1289 和 Sneb1462 细菌菌株菌悬液处理小麦种子,测定它们对种子萌发的影响。结果(表 1)表明,3 个菌株都对小麦种子萌发具有促进作用。Sneb1462 菌株促生效果尤为显著,小麦发芽率达 99%,显著高于空白对照,其芽长和根长均与空白对照差异显著,分别提高了 13.8% 和 9.3%。

表 1 不同菌株浸种处理对小麦种子萌发的影响<sup>1)</sup>

Table 1 Effects of soaking seeds with different strains on the germination of wheat seeds

处理 Treatment	发芽率/% Budding rate	芽长/cm Bud length	根长/cm Root length
Sneb1197	(97.00±4.47)a	(1.41±0.07)b	(2.29±0.05)ab
Sneb1289	(99.00±2.24)a	(1.47±0.10)ab	(2.32±0.12)ab
Sneb1462	(99.00±2.24)a	(1.57±0.11)a	(2.47±0.10)a
CK	(93.00±5.70)b	(1.38±0.05)b	(2.26±0.04)b

1) 表中数据为平均值±标准差。同列数据后不同字母分别表示在 0.05 水平差异显著(Duncan 氏法)。下同。

Data in the table are mean±SD. Different letters in the same column indicate significant difference at the 0.05 level by Duncan's test. The same below.

### 2.2 细菌菌株对小麦苗期生长的作用

温室条件下测定了不同菌株发酵液对小麦苗期生长的促生作用(表 2)。结果表明,3 株菌株菌悬液处理的小麦植株株高和地上部鲜重与对照相比无显著差异。但细菌 Sneb1462 菌悬液处理的小麦根长和地下部鲜重与空白对照差异显著,分别提高了 30.19% 和 29.03%,说明细菌 Sneb1462 菌悬液促进了小麦苗期根部的生长(图 1)。

表 2 不同菌株浸种处理对小麦苗期生长的作用

Table 2 Effects of soaking seeds with different strains on the growth of wheat seedlings

处理 Treatment	株高/cm Height	根长/cm Root length	地上部鲜重/g Above-ground fresh weight	地下部鲜重/g Fresh root weight
Sneb1197	(19.63±0.95)a	(19.07±1.31)ab	(1.42±0.15)a	(0.79±0.09)ab
Sneb1289	(18.29±0.79)a	(18.07±1.13)bc	(1.37±0.27)a	(0.82±0.05)a
Sneb1462	(19.66±0.33)a	(20.74±1.03)a	(1.46±0.15)a	(0.80±0.02)a
CK	(17.00±1.17)a	(15.93±0.63)c	(1.25±0.11)a	(0.62±0.04)b

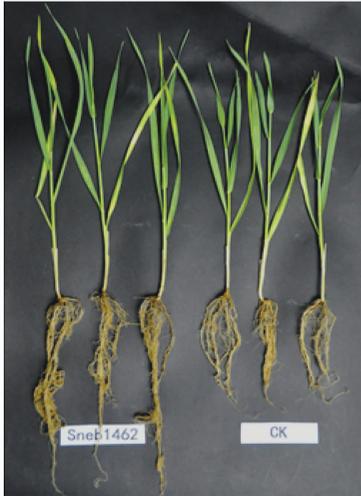


图 1 Sneb1462 促进小麦根部生长

Fig. 1 Wheat root growth promoted by strain Sneb1462

### 2.3 细菌菌株对小麦叶锈病的盆栽防效

盆栽防效试验结果表明, Sneb1197、Sneb1289 和 Sneb1462 菌悬液处理的小麦植株的叶锈病发病率(图 2 a)和严重度(图 2 b)均显著低于空白对照。其中菌株 Sneb1462 处理对小麦叶锈病防治效果最好(图 3), 发病率为 53.82%, 严重度为 10.27%, 分别比对照处理降低 27.54% 和 49.90%, 说明菌株 Sneb1462 菌悬液能诱导小麦产生抗性, 减少叶锈病菌的侵染。

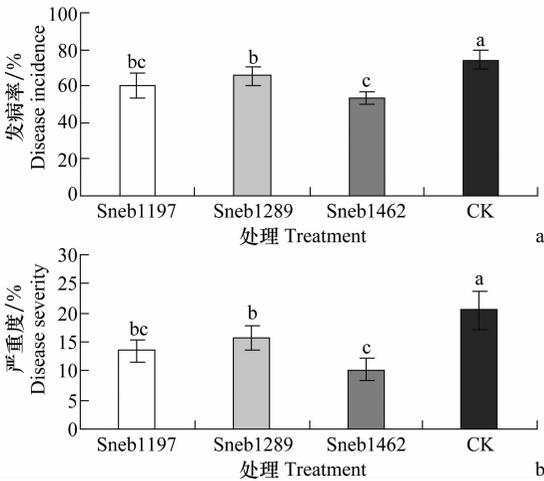


图 2 不同菌株浸种处理对小麦叶锈病发病率(a)和严重度(b)的影响

Fig. 2 Effects of soaking seeds with different strains on the incidence (a) and severity (b) of wheat leaf rust

### 2.4 细菌 Sneb1462 对小麦叶锈病的田间防效

依据室内盆栽试验结果, 获得一株最优细菌菌株 Sneb1462 进行田间防效验证试验。结果显示在

田间叶锈病发病程度上, 菌株 Sneb1462 菌悬液处理的病害严重度为 26.26%, 与空白对照相比, 降低了 38.60%(图 4)。菌株 Sneb1462 菌悬液处理的小麦植株的株高和穗重也显著高于对照, 分别提高 16.44% 和 34.98%(表 3)。穗长与对照相比差异不显著。



图 3 盆栽试验 Sneb1462 对小麦叶锈病的防治效果  
Sneb1462 处理: a: 第二叶; b: 第一叶; CK 处理: c: 第一叶; d: 第二叶  
Sneb1462 treatment: a: The second leaf; b: The first leaf; CK: c: The first leaf; d: The second leaf

图 3 盆栽试验 Sneb1462 对小麦叶锈病的防治效果  
Fig. 3 Control effects of the strain Sneb1462 on wheat leaf rust in pot experiments

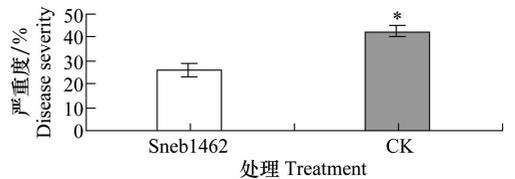


图 4 Sneb1462 浸种处理对小麦叶锈病田间防治效果  
Fig. 4 Control efficacy of wheat seeds soaked with Sneb1462 on wheat leaf rust in the field

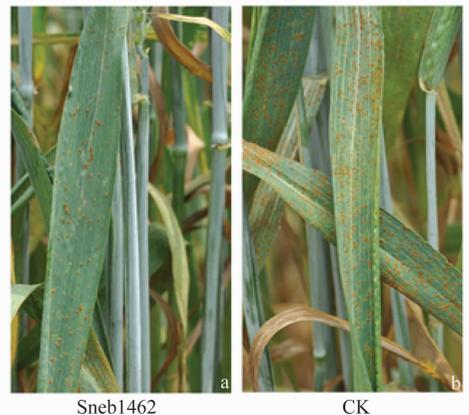


图 5 Sneb1462 对小麦叶锈病的田间防治效果  
Fig. 5 Control effects of strain Sneb1462 on wheat leaf rust in field experiments

表 3 Sneb1462 浸种处理对小麦田间生长及产量的影响<sup>1)</sup>

Table 3 The effects of wheat seeds soaked with Sneb1462 on wheat growth and yield in the field

处理 Treatment	株高/cm Height	穗长/cm Spike length	穗重/g Spike weight	千粒重/g TKW
Sneb1462	(34.77±2.23)*	(9.76±0.51)	(2.74±0.09)*	(46.43±0.87)
CK	(29.86±3.66)	(8.84±0.55)	(2.03±0.22)	(45.13±1.93)

1) 表中数据为平均值±标准差。\* 表示经配对样本 *t* 检验在  $P < 0.05$  水平差异显著。

Data in the table are mean±SD. \* ; Indicates significant difference at  $P < 0.05$  level by paired samples *t* test.

## 2.5 细菌 Sneb1462 的鉴定

经盆栽试验和田间防效试验,筛选出一株促生效果及对叶锈病防效优良的细菌菌株 Sneb1462。在 NA 培养基上 Sneb1462 菌落表面光滑,呈乳白色,有黏性(图 6a)。菌体为杆状,单个或排列分布,大小为(1.2~2.3) $\mu\text{m} \times$ (0.3~0.7) $\mu\text{m}$ 。芽胞呈椭圆形,胞囊膨大,中生到端生。革兰氏染色为阳性,透射电镜放大  $2.5 \times 10^3$  倍观察,鞭毛为周生(图 6b)。

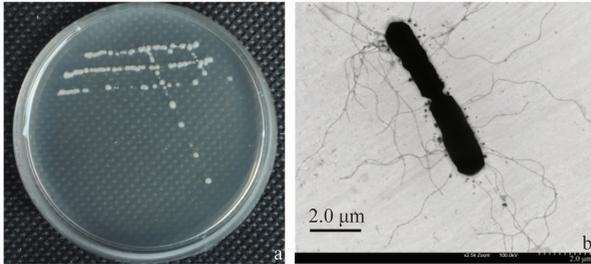


图 6 菌株 Sneb1462 的菌落(a)及其鞭毛(b)的透射电镜形态  
Fig. 6 The shapes of colonies of strain Sneb1462 (a) and its flagellum (b) under transmission electron microscope

PCR 扩增产物经测序后获得菌株 Sneb1462 16S rDNA 部分序列(MG132172)。通过 MEGA 6 软件构建系统发育分析结果显示,其 DNA 序列与多

黏类芽胞杆菌 *P. polymyxa* 相似度达 100%,在系统发育树中也与其属于同一分支(图 7)。

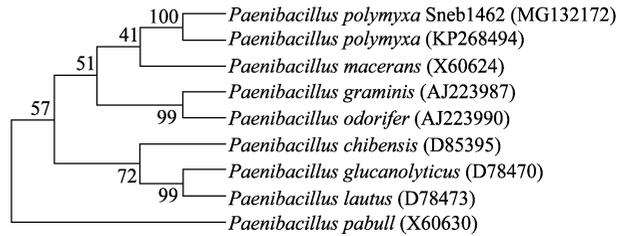


图 7 基于 16S rDNA 序列构建的部分类芽胞杆菌属 *Paenibacillus* spp. 的系统发育树

Fig. 7 Phylogenetic tree of some *Paenibacillus* spp. based on 16S rDNA sequences

菌株 Sneb1462 生理生化特征显示(表 4),Sneb1462 可以利用葡萄糖、D-木糖、L-阿拉伯糖、蔗糖、甘油等作为碳源;其硝酸还原反应、V-P 反应、水解淀粉、接触酶等反应均为阳性,柠檬酸盐利用、 $\text{H}_2\text{S}$  产生、氧化酶等反应为阴性;在耐盐性方面,该菌株不能在含盐 5%、10%培养基上生长。而且鉴定结果与东秀珠等<sup>[16]</sup>描述的多黏类芽胞杆菌 *P. polymyxa* 的生理生化特征一致,综合 16S rDNA 序列分析和生理生化鉴定结果,将菌株 Sneb1462 鉴定为多黏类芽胞杆菌 *P. polymyxa*。

表 4 菌株 Sneb1462 的生理生化测定

Table 4 Physiological and biochemical characteristics of strain Sneb1462

特征 Character	Sneb1462	特征 Character	Sneb1462
葡萄糖 Glucose	+	V-P 反应 V-P test	+
D-木糖 D-Xylose	+	水解淀粉 Starch hydrolysis	+
L-阿拉伯糖 L-Arabinose	+	氧化酶 Oxidase	-
蔗糖 Sucrose	+	接触酶 Catalase	+
乳糖 Lactose	+	厌氧生长 Anaerobic growth	+
甘油 Glycerol	+	耐盐性 NaCl tolerance	
甘露醇 Mannitol	+	1% NaCl	+
柠檬酸盐利用 Utilization of citrate	-	2% NaCl	+
$\text{H}_2\text{S}$ 产生 $\text{H}_2\text{S}$ production	-	5% NaCl	-
硝酸还原反应 Deoxidize nitrate	+	10% NaCl	-

## 3 讨论

本研究采用透射电镜观察、16S rDNA 序列分

析及生理生化反应特征等方法,将 Sneb1462 菌株鉴定为多黏类芽胞杆菌 *P. polymyxa*。室内防效试验结果表明,经多黏类芽胞杆菌 Sneb1462 处理的小

麦,其叶锈病的发病率和严重度与对照相比降低 27.54%和 49.90%;田间试验显示,其病害严重度降低了 38.60%,并对小麦促生增产都具有显著效果。田间试验叶锈病的严重度低于室内试验,可能是由于田间环境复杂,温湿度、土壤 pH、含水量等不同生态条件以及微生物区系等因素均对其有影响<sup>[14]</sup>。

在以往关于生防菌的研究中,多采用以生防菌菌悬液灌根或叶片涂抹喷施的方法进行筛选和防效评价试验<sup>[17-19]</sup>。在本研究中,通过多黏类芽胞杆菌 Sneb1462 对小麦种子进行处理,发现也能诱导小麦对叶锈病产生抗性。因此,利用有益微生物进行种子处理防控病害将是一种新型的植保措施,具有重要的研究意义。

植物根际促生菌(PGPR)是可以参与植物的固氮和溶磷反应,产生及调节植物体内激素水平,促进植物的生长发育,直接或间接对病原物产生抑制作用<sup>[9, 20]</sup>,增加农作物产量的有益微生物,其作为重要的生物防治资源不容忽视。植物根际促生菌的研究主要集中于芽胞杆菌属和假单胞菌属细菌,其中多黏类芽胞杆菌就是一种重要的植物病害生防菌和根际促生菌<sup>[21]</sup>。

多黏类芽胞杆菌诱导植物抗病性的研究已有报道。Du 等<sup>[22]</sup>研究发现多黏类芽胞杆菌 NSY50 菌悬液灌根处理可以诱导黄瓜抗枯萎病,并显著提高黄瓜的生物量;Ryu 等<sup>[23]</sup>报道通过包埋处理将多黏类芽胞杆菌 E681 定殖于芝麻根部,可以诱导其对猝倒病产生抗性,并促进芝麻生长。此外,童蕴慧等<sup>[24]</sup>报道采用多黏类芽胞杆菌 W3 菌悬液及其滤液进行叶片涂抹处理可以诱导番茄产生系统抗性,增强番茄植物对灰霉菌菌侵染的抵抗力,并能提高番茄产量。本研究中发现,在温室和田间条件下,采用多黏类芽胞杆菌 Sneb1462 进行种子处理可诱导小麦产生对叶锈病菌的抗性,显著降低其严重度,同时也对小麦的促生增产有显著作用。

Liu 和 Kim 等<sup>[25-26]</sup>已测定了多黏类芽胞杆菌全基因组序列,几个具有生防促生功能的相关基因被发现。上述针对多黏类芽胞杆菌生物防治的研究多采用叶面涂抹喷施或灌根处理的方法,种子处理却很少见报道。本研究中,多黏芽胞杆菌 Sneb1462 诱导小麦抗叶锈病及促生增产作用机理尚不明确,还有待进一步研究。

## 参考文献

- [1] KHAN M, BUKHARI A, DAR Z, et al. Status and strategies in breeding or rust resistance in wheat [J]. *Philippine Agricultural Scientist*, 2013, 4: 292-301.
- [2] 李振岐,曾士迈. 中国小麦锈病[M]. 北京: 中国农业出版社, 2002: 2-3.
- [3] 杜咨毅. 两个小麦品种抗叶锈病和白粉病 QTL 研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2015.
- [4] ZHOU Huixin, XIA Xianchun, HE Zhonghu, et al. Molecular mapping of leaf rust resistance gene LrNJ97 in Chinese wheat line Neijiang 977671 [J]. *Theoretical and Applied Genetics*, 2013, 126: 2141-2147.
- [5] 金夏红, 冯国华, 刘东涛, 等. 小麦抗叶锈病遗传研究进展 [J]. *麦类作物学报*, 2017, 37(4): 504-512.
- [6] 夏得壮, 刘天国, 刘博, 等. 不同杀菌剂对小麦叶锈病的防治效果 [J]. *植物保护*, 2016, 42(2): 225-228.
- [7] CHEN Da, LIU Xin, LI Chunyu, et al. Isolation of *Bacillus amyloliquefaciens* S20 and its application in control of eggplant bacterial wilt [J]. *Journal of Environmental Management*, 2014, 137: 120-127.
- [8] 邱德文. 我国植物病害生物防治的现状与发展策略 [J]. *植物保护*, 2010, 36(4): 15-18.
- [9] PANG Fahu, WANG Tan, ZHAO Chenchen, et al. Novel bacterial endophytes isolated from winter wheat plants as bio-control agent against stripe rust of wheat [J]. *Biological Control*, 2016, 61: 207-219.
- [10] LI Hui, ZHAO Jie, FENG Hao, et al. Biological control of wheat stripe rust by an endophytic *Bacillus subtilis* strain E1R-j in greenhouse and field trials [J]. *Crop Protection*, 2013, 43: 201-206.
- [11] HAFEZ Y M, SOLIMAN N K, SABER M M, et al. Induced resistance against *Puccinia triticina*, the causal agent of wheat leaf rust by chemical inducers [J]. *Egyptian Journal of Pest Control*, 2014, 24(1): 173-181.
- [12] CHOWDAPPA P, KUMAR S P M, LAKSHMI M J, et al. Growth stimulation and induction of systemic resistance in tomato against early and late blight by *Bacillus subtilis* OTPB1 or *Trichoderma harzianum* OTPB3 [J]. *Biological Control*, 2013, 65(1): 109-117.
- [13] YOSHIOKA Y, ICHIKAWA H, NAZIN H A, et al. Systemic resistance induced in *Arabidopsis thaliana* by *Trichoderma asperellum* SKT-1, a microbial pesticide of seedborne diseases of rice [J]. *Pest Management Science*, 2015, 68(1): 60-66.
- [14] 项鹏, 陈立杰, 朱晓峰, 等. 种子处理诱导大豆抗胞囊线虫病的生防细菌筛选与鉴定 [J]. *中国生物防治学报*, 2013, 29(4): 661-669.

- problems [J]. *Soil Science and Plant Analysis*, 2005, 36(11/12):1625-1639.
- [11] 杨梢娜. 杭嘉湖平原稻田不同施氮水平下氮素利用效率及环境效应研究[D]. 杭州:浙江农林大学,2010.
- [12] 郭井祥. 不同施肥量对水稻产量效益的影响[J]. *北方水稻*, 2009, 39(4):36-37.
- [13] 刘文忠. 稻-菌-鱼复合生态系统水稻产量性状及经济效益分析[J]. *黑龙江农业科学*, 2013(10):24-27.
- [14] HAN Guangyu, LANG Jie, SUN Yan, et al. Intercropping of rice varieties increases the efficiency of blast control through reduced disease occurrence and variability [J]. *Journal of Integrative Agriculture* 2016, 15(4): 795-802.
- [15] JI Y F, ZHENG Y, TANG L, et al. Effects of optimized nitrogen application on rice (Huangkenuo and Hexi 41) yield and rice blast under intercropping [J]. *Journal of Yunnan Agricultural University*, 2009:82-86.
- [16] 毛建辉, 何明, 何忠全. 抗感品种混植对水稻主要病害的效应[J]. *植物病理学报*, 1991, 21(2):155-160.
- [17] 刘红敏, 宁万光, 徐畅, 等. 不同品种水稻间作栽培对褐飞虱发生及水稻产量的影响[J]. *江苏农业科学*, 2015, 43(4):124-126.
- [18] 刘二明, 朱有勇, 肖放华, 等. 水稻品种多样性混栽持续控制稻瘟病研究[J]. *中国农业科学*, 2003, 36(2):164-168.
- [19] AKITA K, TANAKA N. Effects of planting density and planting patterns of young seedlings transplanting on the growth and yield of rice plants [J]. *Japanese Journal of Crop Science*, 1992, 61 (1):80-86.
- [20] 刘浩官, 陈元洪, 罗克昌, 等. 福建水稻病虫综合防治[J]. *福建省农科院学报*, 1997, 12 (3):21-25.
- [21] 董鹏, 吴冠清, 陈观浩. 水稻细菌性条斑病发病率与病情指数关系初步研究[J]. *广东农业科学* 2008(5):58-59.
- [22] 汪军, 王建德, 张刚. 太湖地区稻麦轮作体系下秸秆还田配施氮肥对水稻产量及经济效益的影响[J]. *中国生态农业学报*, 2011, 19(2):265-270.
- [23] 周鸿凯, 曹珠平, 叶昌辉, 等. 杂交水稻产量性状品质性状的因子分析[J]. *热带作物学报*, 2009, 30(2):148-152.
- [24] 王飞, 姚明华, 李宁. 不同栽培处理方式对秋辣椒产量及发病率的影响[J]. *湖北农业科学*, 2010, 49(11):2840-2841
- [25] 齐春燕. 不同密度和叶龄移栽对水稻生长发育及产量的影响[D]. 吉林:吉林农业大学 2005.
- [26] MEW T W, BORROMEO E, HARDY B. Exploiting biodiversity for sustainable pest management [R]. *International Rice Research Institute Press*, 2001:143-157, 159-167.
- [27] PENG S, GARCIA F V, LAZA R C, et al. Increased N-use efficiency using a chlorophyll meter on high-yielding irrigated rice [J]. *Field Crops Research*, 1996, 47(2/3):243-252.
- [28] 沈嘉炜, 刘志超, 蔡尤俊, 等. 水稻品种多样性对褐飞虱及蜘蛛的影响[J]. *中国生物防治学报*, 2015, 31(3):327-332.
- [29] ZHU Y Y, CHEN H R, FAN J H, et al. Genetic diversity and disease control in rice [J]. *Nature*, 2000, 406(6797): 718-722.
- [30] 周念, 章家恩, 罗明珠. 不同水稻品种混合种植模式及其应用效果研究概述[J]. *广东农业科学*, 2011(9):9-12.

(责任编辑: 田 喆)

(上接 52 页)

- [15] NIU Dongdong, WANG Chunjuan, GUO Yahui, et al. The plant growth-promoting rhizobacterium *Bacillus cereus* AR156 induces resistance in tomato with induction and priming of defence response [J]. *Biocontrol Science and Technology*, 2012, 22(9): 991-1004.
- [16] 东秀珠, 蔡妙英. 常见细菌系统鉴定手册[M]. 北京: 科学出版社, 2001: 57-59.
- [17] LI Mei, WANG Yongjun, GUO Yanbin, et al. Induced systemic resistance and growth promotion in tomato by an indole-3-acetic acid-producing strain of *Paenibacillus polymyxa* [J]. *Annals of Applied Biology*, 2014, 165(2): 270-279.
- [18] FANG Rui, LIN Jia, YAO Shanshan, et al. Promotion of plant growth, biological control and induced systemic resistance in maize by *Pseudomonas aurantiaca*, JD37 [J]. *Annals of Microbiology*, 2013, 63(3): 1177-1185.
- [19] JIANG Chunhao, FAN Zhihang, XIE Ping, et al. *Bacillus cereus* AR156 extracellular polysaccharides served as a novel micro-associated molecular pattern to induced systemic immunity to Pst DC3000 in *Arabidopsis* [J]. *Frontiers in Microbiology*, 2016, 7(9):1-16.
- [20] SIDDIQUI I A, EHETSHAMULHAQUE S, SHAUKAT S S. Use of rhizobacteria in the control of root rot-root knot disease complex of mungbean [J]. *Journal of Phytopathology*, 2001, 149(6): 337-346.
- [21] LAL S, TABACCHIONI S. Ecology and biotechnological potential of *Paenibacillus polymyxa*: a minireview [J]. *Indian Journal of Microbiology*, 2009, 49(1): 2.
- [22] DU Nanshan, SHI Lu, YUAN Yinghui, et al. Isolation of a potential biocontrol agent *Paenibacillus polymyxa* NSY50 from vinegar waste compost and its induction of host defense responses against *Fusarium* wilt of cucumber [J]. *Microbiological Research*, 2017, 202: 1-10.
- [23] RYU C M, KIM J, CHOI O, et al. Improvement of biological control capacity of *Paenibacillus polymyxa* E681 by seed pelleting on sesame [J]. *Biological Control*, 2006, 39(3):282-289.
- [24] 童蕴慧, 郭桂萍, 徐敬友, 等. 拮抗细菌诱导番茄植株抗灰霉病机理研究[J]. *植物病理学报*, 2004, 34(6): 507-511.
- [25] LIU Hu, LIU Kai, LI Yuhuan, et al. Complete genome sequence of *Paenibacillus polymyxa* YC0136, a plant growth-promoting rhizobacterium isolated from tobacco rhizosphere [J]. *Genome Announcements*, 2017, 5(6): 1635-1636.
- [26] KIM J F, JEONG H, PARK S Y, et al. Genome sequence of the polymyxin-producing plant-probiotic rhizobacterium *Paenibacillus polymyxa* E681 [J]. *Journal of Bacteriology*, 2010, 192(22): 6103-6104.

(责任编辑: 田 喆)