

## 植物根际促生菌株对小麦根系发育的影响

李冰, 龚文秀, 李清, 孙乐妮, 曹媛媛\*, 唐欣昀\*

(安徽农业大学生命科学学院, 合肥 230036)

**摘要:** 用从小麦、棉花、水稻根际分离的 24 株植物根际促生菌株处理小麦幼苗, 进行半固体和/或盆栽试验, 测定小麦根系和地上部分的 9 项指标。半固体试验对根干重促进显著的 9 株菌株中, 7 株对根总长、9 株对根总表面积、5 株对根尖数、8 株对分支数和株高及 7 株对茎干重促进显著。盆栽试验对根干重促进显著的 10 株菌株中, 全部对根总长和根总表面积、6 株对根尖数、8 株对根分支数、9 株对株高及 7 株对茎干重促进显著。半固体和盆栽试验中显著促进指标均达 5 个以上的 5 株菌株中, 4 株为假单胞菌, 表明假单胞菌对小麦的促生效果较好。PGPR 对小麦根的总长度、总表面积、根尖数、分支数有明显促进作用, 这些指标与小麦根干重、株高和茎干重显著相关。

**关键词:** 根际促生菌; 小麦; 根系发育参数; 半固体试验; 盆栽试验

中图分类号: S512.1

文献标识码: A

文章编号: 1672-352X (2015)02-0276-07

### Effects of plant growth-promoting rhizobacteria on root development in wheat

LI Bing, GONG Wenxiu, LI Qing, SUN Leni, CAO Yuanyuan, TANG Xinyun

(School of Life Science, Anhui Agricultural University, Hefei 230036)

**Abstract:** Wheat seedlings inoculated with 24 plant growth-promoting rhizobacteria (PGPR) strains isolated from the rhizosphere of wheat, cotton, and rice were cultured in the semisolid medium or potting soil. Nine growth parameters of the root and stem were measured. In the semi-solid experiment, among 9 PGPR strains that significantly promoted the root dry weight, 7 promoted the total root length, 9 promoted the total root surface area, 5 increased the number of root tips, 8 increased the number of lateral roots and the stem height, and 7 improved the stem dry weight. In the pot experiment, in 10 PGPR strains that significantly promoted the dry weight of root, 10 promoted the total root length and total root surface area, 6 increased the number of root tips, 8 increased the number of lateral roots, 9 promoted the height of stem, and 7 enhanced the dry weight of stem. Five strains showed more than 5 significant growth-promoting parameters in both semisolid and pot experiment, among which 4 strains were *Pseudomonas* spp., indicating that *Pseudomonas* had better growth-promoting effects on wheat growth. PGPRs promoted the total length of the root, total surface area of the root, the number of root tips and lateral roots significantly. These parameters had significant correlations with the root dry weight, stem height and stem dry weight.

**Key words:** PGPR; wheat; root development parameter; semisolid experiment; pot experiment

植物根际促生菌 (plant growth promoting rhizobacteria, PGPR) 指存在于植物根际, 对植物生长有促进作用或对病原菌有拮抗作用的有益细菌的统称<sup>[1]</sup>。自 1978 年 Burr 等首先在马铃薯上报道 PGPR 以来, 国内外已发现包括芽孢杆菌、荧光假单胞菌、根瘤菌、沙雷氏菌属等 20 多个种属的根际

微生物具有防病促生潜能。PGPR 有固氮、解磷、解钾等生理活性, 可产生植物生长调节物质, 促进植物根系生长, 提高对土壤中有效养分水分的吸收效率<sup>[2]</sup>, 竞争养分和生存空间抑制病原菌生长, 杀死病原菌, 诱导植物对病原菌产生抗性 (ISR)<sup>[3-4]</sup>。PGPR 以生物膜形式吸附于植物根部, 能定殖于植

收稿日期: 2014-04-18

基金项目: 国家自然科学基金 (41401269), 安徽省自然科学基金 (1208085QC62), 安徽省高校青年基金重点项目 (2013SQRL015ZD), 安徽农业大学稳定和引进人才基金 (yj2011-25) 和安徽农业大学校青年科研基金 (2012zr006) 共同资助。

作者简介: 李冰, 硕士研究生。

\* 通信作者: 曹媛媛, 博士, 副教授。E-mail: yq4339@ahau.edu.cn 唐欣昀, 教授, 博士生导师。E-mail: txyah@126.com

物根际且作用稳定, 具有较好的应用效果<sup>[5]</sup>。大部分研究集中在 PGPR 促进植物生长、作物增产、对抗病原菌等方面, 已有报道指出 PGPR 能提高植物根系活力<sup>[6-7]</sup>, 促进植物株高、根干重和茎干重的增加<sup>[8-9]</sup>。刘芳春等研究表明以冬枣 PGPR 为主的生物肥可有效提高冬枣根系活力, 促进表层土壤根系的细根生长, 增加树体养分的吸收<sup>[7]</sup>; 刘静洋等研究表明棉花根际细菌对棉花的株高和根干重促生效果较佳<sup>[10]</sup>。植物根际促生菌定殖于植物根部, 与植物根系相互作用<sup>[11]</sup>, 其促生机理与植物根系状况密切相关, 已有少数 PGPR 与植物根系部分指标相关的报道<sup>[12]</sup>, 但尚缺乏 PGPR 与植物根系发育各项指标

相关的详细报道。本文研究从不同作物根际分离的 PGPR 菌株对小麦根系发育各指标的影响, 综合分析这些指标与小麦根系、秸秆干重的关系, 揭示 PGPR 促进植物根系发育和植物生长的机理, 为揭示 PGPR 的促生机制提供依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料

**1.1.1 试验菌株** 小麦 PGPR 8 株<sup>[13]</sup>, 水稻 PGPR 8 株<sup>[14]</sup>, 棉花 PGPR 8 株<sup>[10]</sup>, 由安徽农业大学微生物实验室提供, 详见表 1。

表 1 试验菌株  
Table 1 Tested strains

菌株属名 Strain name	菌株编号 Strain No.
芽孢杆菌属 <i>Bacillus</i> spp.	WS24、WS31、r-K7802、r-K7804、r-K2915、r-P5304
假单胞菌属 <i>Pseudomonas</i> spp.	WS32、c-P1、c-P1108、r-K7801、r-K7808、r-P1201、r-P5350
节杆菌属 <i>Arthrobacter</i> sp.	WS03
藤黄微球菌 <i>Micrococcus luteus</i>	WS27
固氮菌属 <i>Azotobacter</i> spp.	c-N1111、c-N3101
德克斯氏菌属 <i>Dexia</i> spp.	c-N1120、c-N1105
氮单胞菌属 <i>Azomonas</i> sp.	c-N1125
未鉴定菌株 Unidentified strains	WS02、WS04、WS26、c-P2106

注: WS 编号系列为小麦 PGPR 菌株, r 编号系列为水稻 PGPR 菌株, c 编号系列为棉花 PGPR 菌株。

Note: "WS", "r" and "c" refer to wheat PGPR, rice PGPR and cotton PGPR, respectively.

**1.1.2 小麦种子** 皖麦 68 (*Triticum aestivum* L.), 由安徽农业大学农学院提供。

**1.1.3 黄褐土** 总氮 11.11 g·kg<sup>-1</sup>; 有机质 21.33 g·kg<sup>-1</sup>; 有效磷(P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>) 0.0315 g·kg<sup>-1</sup>; 速效钾(K<sub>2</sub>O) 0.154 g·kg<sup>-1</sup>。

**1.1.4 培养基** 牛肉膏蛋白胨培养基、LB 培养基、Hoagland 半固体培养基<sup>[15]</sup>等。

**1.1.5 主要仪器** EPSON Perfection V700/750 根系扫描仪(WinRHIZO 根系分析软件); VIS-7220 型可见分光光度计; sw-cJ-1c 双人单面净化工作台。

## 1.2 方法

**1.2.1 半固体试验** 接种供试菌株单菌落于盛有 3.5 mL 牛肉膏蛋白胨液体培养基的试管中, 28℃、160 r·min<sup>-1</sup> 摇床过夜培养, 制作种子液, 取 1 mL 种子液接入盛有 50 mL 牛肉膏蛋白胨液体培养基的三角瓶中, 28℃、160 r·min<sup>-1</sup> 震荡培养至 OD<sub>600</sub>=1.0。小麦消毒催芽, 挑选长势均一的萌发小麦种子, 用各供试菌株菌悬液 (10<sup>8</sup> CFU·mL<sup>-1</sup>) 10 mL 浸种处理 1 h 后栽培到试管中 (试管规格规格: 30 mm×60 mm, 灭菌后每管分装 60 mL Hoagland 半固体培养

基) 每管 3 粒, 光照培养箱中培养 12 d<sup>[13,16]</sup>, 测定株高, 用扫描仪扫描小麦完整根系, 将小麦根、茎 105℃ 杀青 30 min, 于 80℃ 烘干至恒重, 称干重<sup>[6]</sup>。试验设置 3 次重复。

**1.2.2 盆栽试验** 接种供试菌株单菌落于盛有 3.5 mL 牛肉膏蛋白胨液体培养基的试管中, 28℃、160 r·min<sup>-1</sup> 摇床过夜培养, 制作种子液, 取 1 mL 种子液接入盛有 50 mL 牛肉膏蛋白胨液体培养基的三角瓶中, 28℃、160 r·min<sup>-1</sup> 震荡培养至 OD<sub>600</sub>=1.0。小麦消毒催芽, 挑选长势均一的萌发小麦种子, 用各供试菌株菌悬液 (10<sup>8</sup> CFU·mL<sup>-1</sup>) 10 mL 浸种处理 1 h 后栽培到花盆中 (花盆规格: 上口径 17 cm, 下口径 11.7 cm, 盆高 14 cm, 每盆装 500 g 土壤, 170 g 珍珠岩), 每盆 4 粒, 花盆中每颗幼苗根部接种 1 mL 菌液, 自然状态培养 18 d; 测定株高, 用扫描仪扫描小麦完整根系<sup>[17-18]</sup>, 将小麦根、茎 105℃ 杀青 30 min, 于 80℃ 烘干至恒重, 称干重。试验设置 3 次重复。

**1.2.3 数据处理** 用 SPSS17.0 软件对数据进行差异显著性分析。用 Microsoft Excel 2007 对各相关指

标数据拟合线性关系。

## 2 结果与分析

### 2.1 半固体栽培

采用 Hoagland 半固体培养基栽培小麦幼苗, 考察 3 种作物的 PGPR 对小麦幼苗的根总长、根总表面积、根总体积、根系平均直径、根尖数、根分枝数、株高、茎干重、根干重这 9 项指标的促生效果, 见表 2 和表 3。表 2 和表 3 显示: 促生指标数达到 5 个以上的有 11 株菌株: WS04、WS26、WS32、c-P1、c-P1108、c-N1120、c-1105、c-N3101、r-K7802、r-P1201 和 r-P5350, 其中小麦 PGPR 3 株, 棉花 PGPR 5 株, 水稻 PGPR 3 株。对根干重有显著促生作用的有 9 株菌株: WS04、WS26、WS32、c-P1、c-P2106、c-P1108、c-N3101、r-K7802 和 r-P5350, 其中 7 株对根总长、9 株对根总表面积、4 株对根平均直径、

9 株对根体积、5 株对根尖数、8 株对根分枝数促生显著; 这 9 株菌株中, 8 株对株高、7 株对茎干重促生显著, 对根干重及根系各项指标促生显著的供试菌株基本一致, 对地上部分和地下部分促生显著的供试菌株基本一致。

进一步对试验中各相关指标数据线性拟合显示, 供试菌株处理过后的 wheat, 其幼苗根总长、根总表面积、根总体积、根尖数、根分枝数均与小麦根干重存在极显著的线性相关性; 根总长、根总表面积、根总体积、根分枝数与小麦株高存在极显著的线性相关性, 根总长、根总体积、根尖数与小麦茎干重存在极显著的线性相关性, 具体见表 4。表明供试菌株促进小麦根系中根总长、根总表面积、根总体积、根尖数、根分枝数等指标生长与小麦根干重增加, 与地上部分株高及茎干重也存在一定关系。

表 2 半固体试验中各菌株对小麦幼苗根系各项指标的促生效果

Table 2 Effects of strains on the development of wheat root development parameters in the semi-solid test

菌株编号 Strain No.	根总长/cm Total length of root	根总表面积/cm <sup>2</sup> Total surface area of root	根平均直径/mm Average diameter of root	根体积/cm <sup>3</sup> Volume of root	根尖数 Number of root tips	根分枝数 Number of root forks
CK	35.635±0.639	3.770±0.103	0.342±0.001	0.034±0.002	45±2.646	72±2.082
WS02	37.040±2.063	4.143±0.116	0.365±0.011**	0.038±0.001*	53±2.646	85±5.033*
WS03	32.759±0.993	4.334±0.104*	0.347±0.005	0.038±0.003*	47±0.577	83±1.528
WS04	45.846±2.444**	4.901±0.203**	0.376±0.007**	0.041±0.002**	70±1.732**	95±1.528**
WS24	36.130±2.375	3.915±0.134	0.345±0.009	0.040±0.004**	50±2.082	58±8.145*
WS26	38.318±2.127	4.443±0.061**	0.375±0.008**	0.041±0.001**	54±4.000*	97±11.846**
WS27	39.425±3.434*	3.866±0.838	0.312±0.008**	0.030±0.001	43±3.055	65±1.155
WS31	39.991±1.757**	4.221±0.155	0.368±0.004**	0.035±0.002	47±6.658	70±3.786
WS32	51.793±4.163**	5.127±0.539**	0.316±0.011**	0.040±0.004**	60±1.528**	111±7.211**
c-P1	51.254±2.396**	5.405±0.227**	0.337±0.010	0.046±0.002**	63±19.655**	100±6.557**
c-P2106	38.737±1.092	4.304±0.027*	0.354±0.006	0.038±0.002**	51±4.359	82±7.234
c-P1108	42.766±1.642**	5.105±0.143**	0.379±0.007**	0.048±0.001**	50±4.726	97±6.429**
c-N1111	33.124±1.717	3.931±0.114	0.380±0.011**	0.040±0.004**	35±4.583*	66±5.859
c-N1120	40.973±0.963**	4.763±0.080**	0.371±0.017**	0.044±0.001**	45±6.429	130±9.452**
c-N1125	33.820±2.348	4.021±0.437	0.379±0.014**	0.038±0.005*	35±4.933*	68±15.567
c-N3101	40.697±1.547**	4.906±0.151**	0.384±0.009**	0.047±0.001**	56±5.508*	95±9.866**
c-N1105	39.982±0.793**	4.765±0.766**	0.379±0.011**	0.045±0.002**	47±2.517	92±4.359**
r-K7801	32.089±1.500*	3.508±0.070	0.349±0.009	0.030±0.001	32±2.082**	61±5.000
r-K7802	48.986±0.676**	5.516±0.097**	0.359±0.009*	0.049±0.002**	58±2.646**	105±5.686**
r-K7804	31.955±0.919*	3.646±0.120	0.364±0.005**	0.033±0.001	40±1.528	82±13.279
r-K7808	35.365±1.567	3.940±0.061	0.354±0.006	0.035±0.003	53±4.163	88±6.506*
r-K2915	37.337±1.950	4.077±0.183	0.351±0.010	0.036±0.001	41±2.309	73±10.693
r-P1201	41.701±1.700**	4.268±0.257*	0.330±0.0160	0.035±0.001	54±2.000*	94±5.568**
r-P5304	38.755±1.667	4.319±0.245*	0.356±0.006	0.039±0.001**	45±4.583	81±13.051
r-P5350	47.384±1.005**	4.894±0.140**	0.334±0.011	0.040±0.002**	60±4.509**	111±11.93**

注: “\*”、“\*\*”分别表示在  $P < 0.05$ 、 $P < 0.01$  水平上有显著性差异。下同。

Note: “\*” and “\*\*” refer to different significance at 0.05 and 0.01 levels, respectively. The same below.

表 3 半固体试验中各菌株对小麦幼苗株高、茎干重、根干重的促生效果  
Table 3 Growth promotion effects of strains on wheat seedlings in the semi-solid test

菌株编号 Strain No.	小麦株高/cm Wheat plant height	茎干重/g Dry weight of stem	根干重/g Dry weight of root
CK	21.917±0.236	0.0190±0.0003	0.0029±0.0001
WS02	22.720±1.883	0.0261±0.0012**	0.0031±0.0001
WS03	24.067±1.205**	0.0206±0.0006	0.0029±0.0001
WS04	24.687±1.013**	0.0244±0.0005**	0.0039±0.0001**
WS24	22.817±0.601	0.0173±0.0015*	0.0030±0.0001
WS26	22.740±0.469	0.0187±0.0002	0.0034±0.0001**
WS27	23.167±0.379	0.0161±0.0005**	0.0030±0.0001
WS31	20.157±0.550**	0.0148±0.0003**	0.0032±0.0002
WS32	25.617±0.465**	0.0220±0.0017**	0.0036±0.0007**
c-P1	25.267±0.640**	0.0230±0.0003**	0.0038±0.0001**
c-P2106	23.700±0.656**	0.0199±0.0008	0.0035±0.0001**
c-P1108	24.817±0.875**	0.0213±0.0004**	0.0038±0.0002**
c-N1111	21.883±0.548	0.0173±0.0007*	0.0032±0.0001
c-N1120	25.983±0.126**	0.0227±0.0010**	0.0031±0.0001
c-N1125	24.923±0.891**	0.0227±0.0006**	0.0030±0.0002
c-N3101	24.890±0.870**	0.0237±0.0010**	0.0035±0.0001**
c-N1105	25.200±0.304**	0.0213±0.0002**	0.0031±0.0002
r-K7801	23.377±0.696*	0.0193±0.0020	0.0027±0.0002
r-K7802	26.400±0.400**	0.0243±0.0012**	0.0038±0.0001**
r-K7804	21.623±1.132	0.0175±0.0006	0.0022±0.0001**
r-K7808	22.707±0.447	0.0187±0.0004	0.0030±0.0001
r-K2915	25.907±0.410**	0.0242±0.0013**	0.0027±0.0001
r-P1201	24.867±0.831**	0.0234±0.0007**	0.0032±0.0002
r-P5304	22.583±1.377	0.0195±0.0023	0.0032±0.0002
r-P5350	24.710±0.177**	0.0219±0.0009**	0.0035±0.0001**

表 4 半固体试验中各相关指标数据线性拟合结果  
Table 4 The linear fitting results of relevant indicator data in the semi-solid test

指标类型 Relevant index	线性拟合公式 Linear fitting formula	R <sup>2</sup>	r
根总长与根干重 Total length and dry weight of root	y=0.00006x+0.00097	0.64340	0.80212**
根总表面积与根干重 Total surface area and dry weight of root	y=0.00061x+0.00053	0.70428	0.83921**
根尖数与根干重 Number of root tips and dry weight of root	y=0.00003x+0.00157	0.56824	0.75382**
根分支数与根干重 Number of root forks and dry weight of root	y=0.00001x+0.00218	0.27597	0.52533**
根总长与株高 Total length of root and plant height	y=0.15865x+17.57465	0.32320	0.56851**
根总表面积与株高 Total surface area of root and plant height	y=1.93448x+15.35053	0.45131	0.67180**
根尖数与株高 Number of root forks and plant height	y=0.06112x+20.85200	0.12281	0.35044
根分支数与株高 Number of root forks and plant height	y=0.05430x+19.17449	0.36107	0.60089**
根总长与茎干重 Total length of root and dry weight of stem	y=0.00022x+0.01188	0.19295	0.43926*
根总表面积与茎干重 Total surface area of root and dry weight of stem	y=0.00290x+0.00800	0.30321	0.55065**
根尖数与茎干重 Number of root forks and dry weight of stem	y=0.00014x+0.01371	0.20143	0.44881*
根分支数与茎干重 Number of root forks and dry weight of stem	y=0.00009x+0.01314	0.28620	0.53498**

注：“\*”、“\*\*”分别表示置信度在 95%、99% 两组数据显著相关。

Note: “\*” and “\*\*” refer to two sets of data significantly correlated in the degree of confidence of 95% and 99%, respectively.

## 2.2 盆栽试验

供试菌株处理小麦幼苗的盆栽实验中, 3 种作

物的 PGPR 对小麦幼苗的各项指标促生效果, 见表 5 和表 6。从表 5 和表 6 可以看出, 促生指标数达到 5

个以上的有 12 株菌株: WS02、WS24、WS31、WS32、c-P1、c-P1108、c-P2106、c-N1111、c-N3101、r-K7808、r-P1201 和 r-P5304, 其中小麦 PGPR 4 株, 棉花 PGPR 5 株, 水稻 PGPR 3 株。对根干重有显著促生作用的有 10 株菌株: WS02、WS24、WS31、WS32、c-P1、c-P1108、c-N3101、r-K7808、r-P1201 和 r-P5304,

全部对根总长和根总表面积、8 株对根平均直径、6 株对根尖数、8 株对根分支数, 这 10 株菌株中, 9 株对株高、7 株对茎干重促生显著。对根干重及根系各项指标促生显著的供试菌株基本一致, 对地上部分和地下部分促生显著的供试菌株基本一致。

表 5 盆栽试验中各菌株对小麦幼苗根系各项指标的促生效果

Table 5 Effects of strains on the growth promoting of wheat root development parameters in pot test

菌株编号 Strain No.	根总长/cm Total length of roots	根总表面积/cm <sup>2</sup> Total surface area of roots	根平均直径/mm Average diameter of roots	根体积/cm <sup>3</sup> Volume of roots	根尖数 Number of root rip	根分支数 Number of root forks
CK	76.994±1.439	10.058±0.113	0.379±0.002	0.096±0.001	150±2.646	299±4.359
WS02	88.828±1.771**	11.951±1.629**	0.414±0.002**	0.121±0.002	161±7.234	317±5.568
WS03	84.572±1.702*	10.544±0.822	0.438±0.007**	0.115±0.003	157±8.622	305±5.568
WS04	73.928±2.433	10.208±0.767	0.440±0.000**	0.112±0.011	158±3.464	321±16.773
WS24	106.326±5.734**	13.850±0.608**	0.416±0.010**	0.144±0.006	232±5.196**	422±16.862**
WS26	91.800±3.689**	11.077±0.474	0.388±0.008*	0.107±0.001	184±8.622*	370±5.000**
WS27	73.090±0.820	9.288±0.290	0.412±0.004**	0.095±0.001	148±4.583	257±25.515*
WS31	96.895±4.192**	11.679±0.686**	0.388±0.003*	0.113±0.002	173±4.163	441±22.869**
WS32	112.401±4.553**	14.531±0.666**	0.411±0.001**	0.150±0.003	209±5.859**	462±30.892**
c-P1	129.800±4.535**	15.474±0.825**	0.379±0.002	0.147±0.001	280±80.299**	542±17.098**
c-P2106	104.695±2.235**	11.831±0.329**	0.362±0.003**	0.106±0.002	186±15.948*	371±27.074**
c-P1108	123.942±3.240**	16.196±0.315**	0.416±0.004**	0.168±0.007	291±2.517**	641±17.214**
c-N1111	102.432±5.433**	11.370±0.853*	0.364±0.003**	0.101±0.005	212±20.664**	287±7.506
c-N1120	96.400±3.141**	11.101±0.754	0.368±0.007**	0.102±0.010	163±5.686	256±27.025*
c-N1125	78.224±5.238	10.741±0.575	0.437±0.005**	0.118±0.004	116±3.215*	260±10.214*
c-N3101	129.294±9.397**	15.848±1.651**	0.393±0.010**	0.155±0.004	245±35.233**	463±59.431**
c-N1105	79.519±2.743	8.795±0.106*	0.354±0.007**	0.078±0.003	159±6.245	221±9.609**
r-K7801	68.961±4.831*	8.246±0.078**	0.379±0.005	0.079±0.004	121±5.568	204±5.132**
r-K7802	90.738±6.627**	11.184±0.274	0.395±0.003**	0.110±0.006	143±12.055	304±3.215
r-K7804	78.897±3.204	9.439±0.503	0.379±0.002	0.093±0.011	133±4.509	295±11.590**
r-K7808	107.016±1.649**	15.195±0.889**	0.450±0.009**	0.172±0.004	278±7.371**	632±40.698
r-K2915	81.606±5.403	10.325±0.280	0.409±0.003**	0.401±0.508**	143±6.083	269±31.086
r-P1201	86.258±2.080*	11.309±0.304*	0.419±0.001**	0.119±0.003	185±4.359*	336±12.530
r-P5304	88.524±4.991**	11.872±0.969**	0.416±0.004**	0.120±0.003	164±6.658	370±31.432**
r-P5350	80.372±3.164	10.395±0.461	0.410±0.004**	0.108±0.008	126±5.196	275±28.355

### 3 讨论

PGPR 分泌多种植物激素促进植物根系生长, 增加根的长度, 促进根毛的增生和延伸, 使植物获得更多营养成分, 促进地上部分生长, 这些综合体现为促进植物的生长和发育<sup>[1,19]</sup>。本研究对半固体试验中各相关指标数据进行线性相关性拟合, 发现小麦幼苗根总长、根总表面积、根总体积、根尖数、根分支数均与小麦根干重存在极显著的线性相关性。本试验采用的试验方法可以反映小麦根的生长发育情况。

韦丹丹研究重金属胁迫下植物促生菌对大麻的生长调控, 表明 PGPR 能够提高大麻根系活力, 根分叉数增加<sup>[12]</sup>。Hamdali 等从摩洛哥含无机磷酸盐土壤中分离出的 8 株解磷菌, 使该地区小麦株高增加 70%, 根长度增加 30%<sup>[20]</sup>。本文半固体试验和盆栽试验中对根干重及根系各项指标促生显著的供试菌株基本一致, 对地上部分和地下部分促生显著的供试菌株基本一致。本试验采用 PGPR 处理显著促进小麦根系各项指标的增加, 综合表现为增加根干重; 这些指标均与小麦株高、茎干重也存在极显著

的线性相关性, 说明 PGPR 促进植物地下部分根的生长, 进而促进地上部分的生长。其中根尖数与株高线性相关性不明显, 可能是因为根尖数的增加虽

有利于根部养分的吸收, 但其促生作用在幼苗期表现不明显, 其效果有待随后的积累。

表 6 盆栽试验中各菌株对小麦幼苗株高、茎干重、根干重的促生效果  
Table 6 Growth promotion effects of strains on wheat seedlings in pot test

菌株编号 Strain No.	小麦株高/cm Wheat plant height	茎干重/g Dry weight of stem	根干重/g Dry weight of root
CK	11.070±0.062	0.0178±0.0003	0.0072±0.0003
WS02	12.767±0.247**	0.0185±0.0004	0.0083±0.0005*
WS03	12.467±0.922**	0.0175±0.0005	0.0071±0.0006
WS04	11.933±0.236**	0.0176±0.0008	0.0068±0.0003
WS24	12.990±0.104**	0.0204±0.0005*	0.0099±0.0008**
WS26	12.400±0.132**	0.0196±0.0009	0.0076±0.0003
WS27	11.523±0.575	0.0166±0.0008	0.0074±0.0002
WS31	12.627±0.200**	0.0235±0.0004**	0.0088±0.0003**
WS32	12.183±0.333**	0.0226±0.0006**	0.0113±0.0002**
c-P1	9.620±0.279**	0.0217±0.0002**	0.0096±0.0004**
c-P2106	13.100±0.170**	0.0192±0.0011	0.0072±0.0004
c-P1108	13.833±0.161**	0.0231±0.0004**	0.0106±0.0016**
c-N1111	11.900±0.265**	0.0168±0.0007	0.0085±0.0004*
c-N1120	11.350±0.482	0.0201±0.0006*	0.0083±0.0004
c-N1125	10.380±0.128*	0.0166±0.0005	0.0079±0.0003
c-N3101	13.440±0.340**	0.0232±0.0007**	0.0105±0.0011**
c-N1105	13.033±0.076**	0.0200±0.0039*	0.0070±0.0007
r-K7801	13.550±0.180**	0.0175±0.0010	0.0060±0.0011*
r-K7802	12.943±0.125**	0.0201±0.0002*	0.0077±0.0006
r-K7804	10.343±0.150**	0.0149±0.0015**	0.0067±0.0009
r-K7808	14.240±0.036**	0.0257±0.0029**	0.0108±0.0001**
r-K2915	13.003±0.395**	0.0185±0.0012	0.0070±0.0001
r-P1201	13.267±0.480**	0.0210±0.0021**	0.0078±0.0002
r-P5304	11.693±0.352*	0.0183±0.0018	0.0085±0.0005*
r-P5350	10.970±0.238	0.0203±0.0003*	0.0079±0.0002

本试验采用分离自小麦、棉花、水稻根际分离的各 8 株 PGPR 进行试验, 半固体试验中促生指标数达到 5 个以上的有 11 株菌; 盆栽试验中促生指标数达到 5 个以上的有 12 个菌株。初步的实验结果没有显示明显的种属特异性, 可能供试菌株数量有限, 需要进一步实验来探索其中的机理。

假单胞菌属(*Pseudomonas spp.*)是普遍存在于植物根际的一类革兰氏阴性细菌, 目前已经从多种植物根际筛选出了具有生防作用和促生作用的假单胞菌<sup>[21]</sup>。张建国用 *lux-AB* 发光酶基因标记具有溶磷能力的 WS32 (*P. fluorescens*) 菌株, 证明 WS32 在小麦根际能很好定殖<sup>[13]</sup>。本实验在半固体和盆栽试验中促生指标数均达到 5 个以上的有 5 株菌, 其中有 4 株是假单胞菌 (WS32、c-P1108、c-P1、r-P1201)。

说明假单胞菌对小麦的促生效果显著。

本试验用分离自小麦、棉花、水稻根际的 24 株 PGPR 处理小麦萌发种子, 进行半固体和盆栽试验, 测定小麦根系及地上部分的 9 个促生指标, 评价分析这 24 株菌对小麦的促生效果及各指标间的相互关系, 初步揭示了这些菌株对小麦根系、地上部分生长的促生机制, 为揭示 PGPR 的促生机制提供参考。尽管 PGPR 对植物的促生作用已被公认, 并得到大量研究, 但由于 PGPR 促进植物生长的作用机制很复杂, 特别是其促进地下根部生长、进而促进地上部分生长的过程尚不清楚, 需深入研究这些菌株与植物的相互作用机制, 阐明其在植物根际存活、定殖、表达生理特性的机理, 为开发应用这些菌株提供参考。

## 参考文献:

- [1] Vessey J K. Plant growth promoting rhizobacteria as bio-fertilizers [J]. *Plant and Soil*, 2003, 255(2): 571-586.
- [2] Haichar F Z, Marol C, Berge O, et al. Plant host habitat and root exudates shape soil bacterial community structure [J]. *The ISME Journal*, 2008, 2(12): 1221-1230.
- [3] Beneduzi A, Ambrosini A, Passaglia L M. Plant growth-promoting rhizobacteria (PGPR): Their potential as antagonists and biocontrol agents [J]. *Genetics and Molecular Biology*, 2012, 35(4): 1044-1051.
- [4] Compant S, Duffy B, Nowak J, et al. Use of plant growth-promoting bacteria for biocontrol of plant diseases: principles, mechanisms of action, and future prospects [J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 2005, 71(9): 4951-4959.
- [5] Palmer J, Flint S, Brooks J. Bacterial cell attachment, the beginning of a biofilm [J]. *Journal of Industrial Microbiology & Biotechnology*, 2007, 34(9): 577-588.
- [6] 刘静洋, 崔松松, 唐欣昀, 等. 棉花根际细菌的生理活性和促生效果[J]. *中国土壤与肥料*, 2013(6): 88-92.
- [7] 刘方春, 邢尚军, 马海林, 等. 生物肥对冬枣生物学特性及产量和品质的影响[J]. *水土保持学报*, 2010, 24(6): 222-226.
- [8] 吴兴兴, 吴毅歆, 赵正龙, 等. 4个PGPR菌株拌种对干旱条件下蚕豆生长及产量的影响[J]. *干旱区研究*, 2012, 29(2): 203-207.
- [9] 顾杰, 孟丽媛, 唐欣昀, 等. 水稻根际固氮菌促生特性评价[J]. *安徽农业大学学报*, 2012, 39(3): 426-429.
- [10] 刘静洋. 棉花根际促生菌株促生生理活性的研究[D]. 合肥: 安徽农业大学, 2013.
- [11] Thomashow L S, Weller D M. Current concepts in the use of introduced bacteria for biological disease control: mechanisms and antifungal metabolites [M]. Springer US: *Plant-microbe Interactions*, 1996: 187-235.
- [12] 韦丹丹. 重金属胁迫下植物促生菌对大麻(*Cannabis sativa* L.)生长调控的研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2012.
- [13] 张建. 小麦高效 PGPR 菌的筛选鉴定及多色 FISH 检测促生菌在根部的定殖[D]. 合肥: 安徽农业大学, 2012.
- [14] 孟丽媛. 水稻根际细菌促生特性评价[D]. 合肥: 安徽农业大学, 2013.
- [15] Rodrigues E P, Rodrigues L S, de Oliveira A L M, et al. *Azospirillum amazonense* inoculation: effects on growth, yield and N<sub>2</sub> fixation of rice (*Oryza sativa* L.) [J]. *Plant and Soil*, 2008, 302 (1/2): 249-261.
- [16] 赵焯, 杨恩东, 唐欣昀, 等. 西瓜枯萎病内生拮抗细菌 YGRE24 的分离鉴定及其特性研究[J]. *安徽农业大学学报*, 2013, 40(5): 765-770.
- [17] 汪晓丽, 陶玥玥, 盛海君, 等. 硝态氮供应对小麦根系形态发育和氮吸收动力学的影响[J]. *麦类作物学报*, 2010, 30 (1): 129-134.
- [18] 高翔. 硝态氮供应条件下不同基因型小麦根系形态的变化特征[D]. 北京: 中国农业科学院, 2010.
- [19] 马元喜. 小麦的根[M]. 北京: 中国农业出版社, 1998.
- [20] Hamdali H, Hafidi M, Virolle M J, et al. Rock phosphate-solubilizing Actinomycetes: screening for plant growth-promoting activities [J]. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, 2008, 24 (11): 2565-2575.
- [21] 张霞, 张杰, 李国勋, 等. 绿色荧光蛋白标记荧光假单胞菌 P303 及其生存能力检测[J]. *植物保护学报*, 2005, 32(3): 280-286.