

## 小麦根际溶钾细菌对小麦生长和吸收钾素的影响

李九美, 曹媛媛, 白莉敏, 姜孝珣, 孙乐妮, 唐欣昀, 张 明\*

(安徽农业大学生命科学学院, 合肥 230036)

**摘 要:** 为了考察小麦根际亲和性溶钾细菌对小麦生长和小麦钾肥利用的影响, 采用盆栽法栽培小麦, 测定小麦干物质积累、叶片含钾量、土壤速效钾含量, 考察溶钾细菌对小麦地上部分植株钾素积累量和钾肥利用率的影响。结果显示, 11 株溶钾细菌接种处理使小麦地上部分干重超过施 100% 钾肥的对照 CK2 的水平, WS25 和 WS27 处理的小麦干物质积累显著高于 CK2, 分别比 CK2 高 11.66 % 和 23.34 %; 在小麦苗期, 11 株溶钾细菌处理的小麦根干重和小麦植株钾素积累量均高于 CK2; 在旺长期, 11 株溶钾细菌处理的植株钾素积累量均高于施 50 % 钾肥的 CK1, 3 株菌 (WS25、WS27、WS28) 处理的小麦植株钾素积累量高于 CK2, 其中 WS27 极显著高于 CK2; 11 株溶钾细菌处理的钾肥利用率均高于 CK1 和 CK2, 其中 WS27 使得小麦的钾肥利用率在苗期和旺长期分别比 CK2 高出 17 % 和 40 %。溶钾细菌可以促进小麦植株对土壤中钾素的吸收和利用, 提高肥料利用率, 促进小麦植株的生长和发育。

**关键词:** 小麦; 溶钾细菌; 干物质积累; 钾素积累量; 钾肥利用率

中图分类号: S512.1; S154.3

文献标识码: A

文章编号: 1672-352X (2016)06-1010-07

### Wheat potassium-releasing bacteria influence the growth and potassium absorption of wheat seedlings

LI Jiumei, CAO Yuanyuan, BAI Limin, JIANG Xiaoxun, SUN Leni, TANG Xinyun, ZHANG Ming

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

**Abstract:** The aim of this paper was to investigate the influence of wheat potassium releasing bacteria on growth and potassium absorption of wheat seedlings. The effects of 11 strains on seedlings potassium accumulation and the recovery efficiency (RE) of potassium fertilizer were evaluated by investigating the dry matter accumulation of wheat seedlings and soil available potassium content with a pot experiment. As results, the shoot dry weight treated with 11 strains was higher than that of the control group (CK2) with 100 % potassium fertilizer application. The shoot dry weight of the wheat seedlings treated with WS25 or WS27 was 11.6 % and 23.34 % higher, respectively than that of CK2. At the seedling stage, both root dry weight and seedlings potassium accumulation in plants treated with 11 strains were higher than that of CK2. At the vigorous growing stage, the potassium accumulation in seedlings treated with 11 strains was higher than that of CK1 (the control group with 50 % potassium fertilizer application). Three strains (WS25, WS27 and WS28) promoted seedling potassium accumulation compared with that of CK2, especially strain WS27 significantly promoted the seedlings potassium accumulation. The recovery efficiencies of all soils treated with 11 strains were higher than that of CK1 and CK2, and the values treated with WS27 were significantly higher than those of CK2, increasing by 17 % and 40 % at the seedling stage and in vigorous growing stage, respectively. A pot experiment showed that wheat potassium releasing bacteria tested in this research can promote the potassium absorption, the recovery efficiency (RE) of potassium fertilizer and wheat growth.

**Key words:** wheat; potassium releasing bacteria; dry matter accumulation; potassium accumulation; the recovery efficiency

植物根际促生菌 (plant growth-promoting rhizobacterial, PGPR) 存活于土壤或植物根表或根

内, 具有溶磷、溶钾和固氮作用, 可促进植物吸收营养物质, 促进植物生长、防止病害、增加作物产

收稿日期: 2016-04-20

基金项目: 国家自然科学基金 (41401269) 和国家自然科学基金 (4140010884) 共同资助。

作者简介: 李九美, 硕士。E-mail: 1019103630@qq.com

\* 通信作者: 张 明, 博士, 教授。E-mail: Zhangming@ahau.edu.cn

量<sup>[1-2]</sup>。小麦是重要的粮食作物,在其根际周围存在大量 PGPR。已有大量关于小麦根际 PGPR 与植物之间相互关系的研究,常惠萍等<sup>[3]</sup>研究了小麦不同根际 PGPR 之间相互促进的关系;张建<sup>[2]</sup>、韦兵等<sup>[4]</sup>利用标记菌株检测 PGPR 在土壤与小麦根部的吸附与定殖的情况。

钾是植物体必需的营养元素,虽然土壤中的全钾含量很高,能够被植物体直接利用的速效钾含量却较低。目前农业生产施用的钾肥量已经超过植物本身所需,导致钾肥的养分流失、施肥效率下降,严重污染环境<sup>[5]</sup>。土壤中溶钾细菌能分解钾长石、云母等硅酸盐类原生态矿物,将土壤中难溶性的钾、磷、硅等转变为可溶态钾素。可以利用小麦有关钾素转化的 PGPR 菌株,提高施肥效率,减少肥料浪费、减轻环境污染。已有大量关于小麦 PGPR 的应用研究,这些研究重点考察接种 PGPR 菌株对植物体生长或对土壤理化性质的影响,如方华舟等<sup>[6]</sup>用复合菌剂处理稻田土壤,水稻苗高、鲜重、干重及植株全氮、全磷、全钾显著优于对照组;李冰等<sup>[7]</sup>采用半固体实验、盆栽实验评价了小麦 PGPR 对小麦根系发育和植物生长的促生作用;李俊等<sup>[8]</sup>阐述了微生物在土壤生物肥力形成和维系过程中的核心作用;张清敏等<sup>[9]</sup>论述了微生物在土壤生态系统中的修复和指示作用。但 PGPR 菌株对作物肥料利用率的影响尚需考察。本试验选取安徽农业大学微生物实验室筛选的小麦特异性高效促生菌株,采用盆栽试验考察这些菌株对小麦干物质积累、植株钾积累和钾肥利用率等相关指标的影响,将溶钾细菌、植株生长和土壤肥力三者联系起来,为探究溶钾细菌促生长机理、研发微生物肥料、提高钾肥的利用率及挖掘土壤潜在肥力以及维持农业可持续发展提供理论基础。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料

**1.1.1 试验菌株** 本试验采用 11 株小麦特异性具有溶钾性能的根本促生菌,保存于安徽农业大学微生物学实验室<sup>[2]</sup>。

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

**1.1.3 试验土壤** 黄褐土( $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ):第一批盆栽试验土壤养分为速效钾( $\text{K}_2\text{O}$ ) 158,有效磷( $\text{P}_2\text{O}_5$ ) 22.9,铵态氮( $\text{NH}_4^+\text{-N}$ ) 50.8;第二批盆栽试验土壤养分为速效钾( $\text{K}_2\text{O}$ ) 176,有效磷( $\text{P}_2\text{O}_5$ ) 16.8,铵态氮( $\text{NH}_4^+\text{-N}$ ) 53.5。

**1.1.4 培养基配方** LB 培养基( $\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ ):酵母粉 5,蛋白胨 10,氯化钠 10,  $\text{pH}7.0\sim 7.2$ 。添加 1.5%~2%琼脂即为固体培养基。

表 1 试验菌株  
Table 1 Strains tested

菌株编号 Strain No.	试验菌株 Strains tested	
WS16	<i>Paenibacillus</i> sp.	类芽孢杆菌
WS19	<i>Bacillus megaterium</i>	巨大芽孢杆菌
WS20	<i>Arthrobacter</i> sp.	节细菌
WS21	<i>Bacillus megaterium</i>	巨大芽孢杆菌
WS22	<i>Bacillus megaterium</i>	巨大芽孢杆菌
WS23	<i>Bacillus</i> sp.	芽孢杆菌
WS24	<i>Bacillus</i> sp.	芽孢杆菌
WS25	<i>Paenibacillus</i> sp.	类芽孢杆菌
WS26	<i>Paenibacillus</i> sp.	类芽孢杆菌
WS27	<i>Micrococcus luteus</i>	藤黄微球菌
WS28	<i>Paenibacillus</i> sp.	类芽孢杆菌

**1.1.5 主要仪器与设备** ZHYW-211C 恒温培养振荡箱,上海智城分析仪器制造有限公司;LDZX-408 I 型立式自动电热压力蒸汽灭菌器,上海申安医疗器械厂;SW-CJ-1C 双人单面净化工作台,苏州净化设备有限公司;DHP-9052 电热恒温干燥培养箱,上海一恒科技公司;FP6410A 火焰光度计,上海精密科学仪器有限公司;JAI103 型电子分析天平,上海民桥精密科学仪器有限公司。

### 1.2 方法

**1.2.1 菌悬液的制备** 将菌株接入含 5 mL LB 液体培养基的试管中,28 °C、180  $\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$  培养 16 h,取 1 mL 种子液接入三角瓶中(含 50 mL LB 液体培养基),28 °C、180  $\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$ ,摇床培养至  $OD_{600\text{nm}}=1.0$ (1 cm 玻璃比色皿)。

**1.2.2 小麦种子的消毒** 挑选完整饱满的小麦种子,放入 100 mL 的小烧杯中,用自来水选种(1~2 min),剔除漂浮的干瘪种子。用 70% 的乙醇中处理 3 min,用无菌水清洗 3~5 次;再用 3%  $\text{NaClO}$  中浸泡 4 min,用无菌水清洗 3~5 次。

**1.2.3 播种** 花盆规格为上口径 17 cm,下口径 11.7 cm,盆高 14 cm。每盆装 2.5 kg 风干黄褐土。盆栽试验设置 4 组处理,实验组:施 50% 钾肥( $\text{KCl}$ ,  $60\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ),用菌悬液处理种子。设 3 组对照:CK0 不施钾肥,CK1 施 50% 钾肥( $\text{KCl}$ ,  $60\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ),CK2 施 100% 钾肥( $\text{KCl}$ ,  $120\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ );用 LB 液体培养基处理对照组种子。每组氮肥和磷肥施用量:

尿素  $183 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,  $(\text{NH}_4)_2\text{PO}_4$   $37 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。挑选颗粒大小一致的消毒后的小麦种子, 每盆均匀播种 10 粒小麦种子, 播种深度约 1~2 cm, 取 5 mL 菌液处理种子, 用浅土覆盖种子, 补足水分, 每株菌 3 个重复。将所有处理置于自然状态生长, 定期浇水, 使土壤保持湿润。分别于小麦苗期 (90 d, 2015.10.10—2016.01.10) 和旺长期 (150 d, 2014.10.15—2015.03.15) 取样测定各项指标。

**1.2.4 小麦地上部分钾的测定** 将盆栽小麦的地上部分收集后烘干至恒重, 用湿灰化法对样品进行预处理, 用火焰分光光度计测定小麦地上部分钾素积累量<sup>[10-11]</sup>。

**1.2.5 土壤速效钾测定** 收集盆栽实验土壤样品, 采用  $\text{NH}_4\text{OAc}$ -火焰分光光度法测定试验后土壤速效钾含量<sup>[12]</sup>。

**1.2.6 计算公式** 钾肥利用率计算公式<sup>[13-14]</sup>如下:

$$\text{钾肥利用率 (RE, \%)} = \frac{A - A_0}{B} \times 100$$

A: 施肥组植株钾积累量( $\text{K}_2\text{O}$ , mg);  $A_0$ : 不施肥组植株钾积累量( $\text{K}_2\text{O}$ , mg); B: 施肥钾素总量( $\text{K}_2\text{O}$ , mg)。

钾素水平计算公式:

试验前=试验前土壤平均速效钾含量×每盆土

壤重量+施钾量

试验后=试验后土壤平均速效钾含量×每盆土壤重量+植株钾积累量

钾素固定量=试验前总钾量-试验后总钾量

盆栽种植的条件相同, 土壤淋溶流失的养分量忽略不计。

**1.2.7 数据处理** 采用软件 SPSS19.0 对试验数据进行差异显著性分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 溶钾细菌接种处理对小麦地上部分干重影响

收集 2 批试验的小麦地上部分植株, 烘干至恒重, 结果如表 2 所示。在小麦苗期, 采用 11 株溶钾细菌处理的小麦地上部分干重显著高于 CK1, 比 CK1 高 38.35%~73.18%。9 株溶钾细菌处理的小麦地上部分干重达到了 CK2 的水平。在旺长期, 溶钾细菌处理的小麦地上部分干重均达到了 CK1 和 CK2 的水平, 其中有 7 株菌处理的小麦地上部分干重显著高于 CK1 和 CK2, WS25 和 WS27 处理的极显著高于 CK1 和 CK2, 分别比 CK2 高 11.66% 和 23.34%。结果显示溶钾细菌能够显著促进小麦地上部分干物质的积累。

表 2 溶钾细菌接种处理对小麦地上部分干重的影响

Table 2 Effects of wheat potassium-releasing bacteria on shoot dry weight

菌株编号 Strain No.	地上部分干重/g Shoot dry weight	增加百分比/% Increased percentage		地上部分干重/g Shoot dry weight	增加百分比/% Percent increase	
	苗期 (90 d) Seedling stage	与 CK1 比 Compare with CK1	与 CK2 比 Compare with CK2	旺长期 (150 d) Vigorous stage	与 CK1 比 Compare with CK1	与 CK2 比 Compare with CK2
CK0	5.540 <sup>dC</sup>	-39.57	-59.14	9.517 <sup>eD</sup>	-38.42	-40.2
CK1	9.167 <sup>cC</sup>	—	-32.40	15.455 <sup>cdBC</sup>	—	-2.89
CK2	13.560 <sup>bA</sup>	47.92	—	15.915 <sup>cBC</sup>	2.98	—
WS16	12.683 <sup>abAB</sup>	38.35	-6.47	17.54b <sup>BC</sup>	13.49	10.21
WS19	15.177 <sup>abA</sup>	65.56	11.92	17.485 <sup>bBC</sup>	13.13	9.86
WS20	13.140 <sup>abA</sup>	43.34	-3.10	15.585 <sup>cdBC</sup>	0.84	-2.07
WS21	15.033 <sup>abA</sup>	63.99	10.86	16.715 <sup>bcBC</sup>	8.15	5.03
WS22	15.865 <sup>abA</sup>	73.07	17.00	16.750 <sup>bcBC</sup>	8.38	5.25
WS23	14.853 <sup>abA</sup>	62.03	9.54	16.090 <sup>cdBC</sup>	4.11	1.10
WS24	15.875 <sup>aA</sup>	73.18	17.07	17.083 <sup>bBC</sup>	10.53	7.34
WS25	13.605 <sup>abA</sup>	48.41	0.33	17.770 <sup>bA</sup>	14.98	11.66
WS26	14.753 <sup>abA</sup>	60.94	8.80	17.253 <sup>bBC</sup>	11.63	8.41
WS27	14.803 <sup>abA</sup>	61.48	9.17	19.630 <sup>aA</sup>	27.01	23.34
WS28	14.830 <sup>abA</sup>	61.78	9.37	17.675 <sup>bBC</sup>	14.36	11.06

注: 同列数值后不同小、大写字母分别表示处理间差异达 5% 和 1% 显著水平 (下同)。

Note: Values followed by different small and capital letters in same column mean significant difference among treatments at the 5% and 1% levels, respectively. The same below.

## 2.2 溶钾细菌接种处理对小麦根干重的影响

收集盆栽试验的小麦根部, 烘干至恒重, 结果如表 3 所示。在小麦苗期, 9 株溶钾细菌处理使小麦根干重显著高于 CK1, 8 株菌处理后小麦的小麦根干重极显著高于 CK1 和 CK2, 其中 WS27 处理的

小麦根干重比 CK1 和 CK2 分别高 75.93 % 和 92.57 %。在旺长期, 6 株溶钾细菌处理的根干重高于 CK1, WS16 和 WS27 处理的小麦根干重比 CK2 分别高 2.93 % 和 13.35 %。可以看出, 接种溶钾细菌可以增加小麦根干重。

表 3 溶钾细菌接种处理对小麦根干重的影响  
Table 3 Effects of potassium-releasing bacteria from wheat on root dry weight

菌株编号 Strain No.	根干重/g Root dry weight	增加百分比/% Increased percentage		根干重/g Root dry weight	增加百分比/% Percent increase	
	苗期 (90 d) Seedling stage	与 CK1 比 Compare with CK1	与 CK2 比 Compare with CK2	旺长期 (150 d) Vigorous stage	与 CK1 比 Compare with CK1	与 CK2 比 Compare with CK2
CK0	2.725 <sup>dc</sup>	-30.75	-24.20	4.200 <sup>cc</sup>	-38.55	-43.53
CK1	3.935 <sup>cc</sup>	—	9.46	6.835 <sup>abAB</sup>	—	-8.09
CK2	3.595 <sup>cdC</sup>	-8.64	—	7.437 <sup>aAB</sup>	8.81	—
WS16	3.387 <sup>bC</sup>	-13.93	-5.79	7.655 <sup>aAB</sup>	12.00	2.93
WS19	4.573 <sup>bb</sup>	16.21	27.20	7.310 <sup>abAB</sup>	6.95	-1.71
WS20	4.280 <sup>bBC</sup>	8.77	19.05	6.313 <sup>bb</sup>	-7.64	-15.11
WS21	4.773 <sup>bb</sup>	21.30	32.77	7.113 <sup>abAB</sup>	4.07	-4.36
WS22	4.235 <sup>bcBC</sup>	7.62	17.80	7.120 <sup>abAB</sup>	4.17	-4.26
WS23	5.125 <sup>bb</sup>	30.24	42.56	5.787 <sup>bBC</sup>	-15.33	-22.19
WS24	4.913 <sup>bb</sup>	24.85	36.66	6.593 <sup>bAB</sup>	-3.54	-11.35
WS25	4.835 <sup>bb</sup>	22.87	34.49	6.360 <sup>bAB</sup>	-6.95	-14.48
WS26	4.770 <sup>bb</sup>	21.22	32.68	6.730 <sup>bAB</sup>	-1.54	-9.51
WS27	6.923 <sup>aA</sup>	75.93	92.57	8.430 <sup>aA</sup>	23.34	13.35
WS28	4.703 <sup>bb</sup>	19.52	30.82	7.170 <sup>abAB</sup>	4.90	-3.59

表 4 盆栽接种试验结束时土壤速效钾含量

Table 4 The available potassium content in the soil at the end of pot experiment  $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$

菌株编号 Strain No.	土壤速效钾含量 Soil available potassium content		菌株编号 Strain No.	土壤速效钾含量 Soil available potassium content	
	苗期 (90 d) Seedling stage	旺长期 (150 d) Vigorous stage		苗期 (90 d) Seedling stage	旺长期 (150 d) Vigorous stage
CK0	117.617 <sup>aA</sup>	128.313 <sup>aA</sup>	WS22	106.794 <sup>abcAB</sup>	117.665 <sup>bcAB</sup>
CK1	105.351 <sup>abcAB</sup>	115.589 <sup>cB</sup>	WS23	105.251 <sup>abcAB</sup>	119.323 <sup>bcAB</sup>
CK2	108.237 <sup>abcAB</sup>	123.057 <sup>abAB</sup>	WS24	102.465 <sup>bcdAB</sup>	114.329 <sup>cB</sup>
WS16	115.452 <sup>abA</sup>	117.249 <sup>bcAB</sup>	WS25	106.126 <sup>abcAB</sup>	121.523 <sup>bAB</sup>
WS19	109.680 <sup>abcAB</sup>	118.568 <sup>bcAB</sup>	WS26	99.579 <sup>cdAB</sup>	119.475 <sup>bcAB</sup>
WS20	111.123 <sup>abcAB</sup>	115.430 <sup>cB</sup>	WS27	109.680 <sup>abcAB</sup>	129.050 <sup>aA</sup>
WS21	103.908 <sup>abcAB</sup>	124.813 <sup>abAB</sup>	WS28	91.643 <sup>dB</sup>	123.068 <sup>abAB</sup>

## 2.3 溶钾细菌接种处理对土壤速效钾含量的影响

分别于小麦苗期 (90 d) 和旺长期 (150 d) 取样, 收集 2 批盆栽试验的土壤样品, 采用  $\text{NH}_4\text{OAc}$ -火焰分光光度法研究小麦根际溶钾细菌对土壤速效钾含量影响, 结果如表 4 所示。在小麦苗期时, 有

5 株菌处理后使得土壤速效钾含量低于对照组, 其中 WS26 和 WS28 处理后, 土壤速效钾含量明显少于 CK1 和 CK2。在小麦旺长期, 7 株溶钾细菌处理的土壤速效钾含量低于 CK2, 说明溶钾细菌能分解土壤中难溶性钾以供植物体吸收利用。

## 2.4 溶钾细菌接种处理对小麦地上部分平均钾含量的影响

收集小麦地上部分, 烘干至恒重, 用湿灰化法对样品进行预处理, 再用火焰分光光度计法测定小麦地上部分速效钾含量, 结果如表 5 所示。在小麦苗期, 11 株溶钾细菌处理的地上部分钾含量均达到

甚至超出 CK2 的水平, 其中 WS20 处理后叶片速效钾含量显著高于对照 CK2。在小麦旺长期时, 9 株菌处理的小麦地上部分钾含量达到了 CK1 水平, WS16、WS19、WS22、WS23、WS24 和 WS26 处理后叶片速效钾含量显著高于对照 CK1。

表 5 解钾菌对小麦地上部分平均钾含量的影响

Table 5 Effects of potassium-releasing bacteria from wheat on potassium content in wheat leaves

g·kg<sup>-1</sup>

菌株编号 Strain No.	叶片平均钾含量		菌株编号 Strain No.	叶片平均钾含量	
	Average potassium content in wheat leaves			Average potassium content in wheat leaves	
	苗期 (90 d) Seedling stage	旺长期 (150 d) Vigorous stage		苗期 (90 d) Seedling stage	旺长期 (150 d) Vigorous stage
CK0	6.200 <sup>abAB</sup>	9.381 <sup>bAB</sup>	WS22	6.300 <sup>abAB</sup>	9.278 <sup>bcAB</sup>
CK1	6.600 <sup>abAB</sup>	8.873 <sup>bcAB</sup>	WS23	6.067 <sup>bAB</sup>	8.803 <sup>bcB</sup>
CK2	5.867 <sup>bAB</sup>	10.725 <sup>aA</sup>	WS24	5.733 <sup>bB</sup>	8.317 <sup>cB</sup>
WS16	6.533 <sup>abAB</sup>	9.037 <sup>bcAB</sup>	WS25	6.300 <sup>abAB</sup>	9.970 <sup>abAB</sup>
WS19	6.333 <sup>abAB</sup>	9.027 <sup>bcAB</sup>	WS26	6.200 <sup>abAB</sup>	9.182 <sup>bcAB</sup>
WS20	7.300 <sup>aA</sup>	9.934 <sup>abAB</sup>	WS27	6.333 <sup>abAB</sup>	9.671 <sup>abAB</sup>
WS21	6.267 <sup>abAB</sup>	9.381 <sup>bAB</sup>	WS28	5.600 <sup>bAB</sup>	9.773 <sup>abAB</sup>

表 6 溶钾细菌对小麦植株钾积累量的影响

Table 6 Effects of potassium-releasing bacteria from wheat on potassium accumulation in seedlings

菌株编号 Strain No.	植株钾积累量/mg		增加百分比/%		植株钾积累量/mg		增加百分比/%	
	Potassium accumulation in seedlings		Percent increase		Potassium accumulation in seedlings		Percent increase	
	苗期 (90 d) Seedling stage	与 CK1 比 与 CK2 比			旺长期 (150 d) Vigorous stage	与 CK1 比 与 CK2 比		
CK0	34.370 <sup>dB</sup>	-43.14	-57.12	89.51 <sup>dC</sup>	-34.79	-47.64		
CK1	60.451 <sup>cC</sup>	—	-24.59	137.27 <sup>cB</sup>	—	-19.70		
CK2	80.163 <sup>bAC</sup>	32.61	—	170.95 <sup>aB</sup>	24.54	—		
WS16	79.740 <sup>bAC</sup>	31.91	-0.53	158.64 <sup>bB</sup>	15.57	-7.20		
WS19	95.821 <sup>aA</sup>	58.51	19.53	157.77 <sup>bB</sup>	14.93	-7.71		
WS20	94.822 <sup>abA</sup>	56.86	18.29	154.19 <sup>bB</sup>	12.33	-9.80		
WS21	94.075 <sup>abA</sup>	55.62	17.35	156.90 <sup>bB</sup>	14.30	-8.22		
WS22	99.978 <sup>aA</sup>	65.39	24.72	155.39 <sup>bB</sup>	13.20	-9.10		
WS23	89.337 <sup>abA</sup>	47.78	11.44	141.77 <sup>bB</sup>	3.28	-17.07		
WS24	91.061 <sup>abA</sup>	50.64	13.59	141.84 <sup>bB</sup>	3.33	-17.03		
WS25	85.614 <sup>abA</sup>	41.63	6.80	176.95 <sup>aA</sup>	28.91	3.51		
WS26	91.329 <sup>abA</sup>	51.08	13.93	158.51 <sup>bB</sup>	15.47	-7.28		
WS27	93.557 <sup>abA</sup>	54.77	16.71	190.23 <sup>aA</sup>	38.58	11.28		
WS28	83.048 <sup>abA</sup>	37.38	3.60	172.11 <sup>aB</sup>	25.38	0.68		

## 2.5 溶钾细菌接种处理对小麦植株钾积累量影响

根据小麦叶片速效钾含量和地上部分干重数据计算小麦植株钾素积累量, 结果如表 6 所示。在小麦苗期, 11 株解钾菌处理的植株速效钾积累量均显著高于 CK1, 10 株解钾菌处理后该指标极显著高于 CK1, 比 CK1 高 31.91%~65.39%; WS19 处理后

植株速效钾积累量显著高于 CK2, 比 CK2 高 19.53%。在小麦旺长期, 溶钾细菌处理后植株钾积累量均显著高于 CK1, WS25、WS27 和 WS28 处理后该指标显著高于 CK2, 其中 WS27 处理后该指标极显著高于 CK2。

比较两批试验, 各组植株的钾积累量均增加,

在小麦苗期溶钾细菌促进小麦吸收钾素的作用更明显, 到旺长期, 与 CK1 比较, 接菌处理的小麦在钾积累方面仍有优势, 与 CK2 比, 有 3 株菌处理后使

得小麦钾积累有优势。可以表明溶钾细菌能够促进小麦植株对钾素的吸收和利用, 从而促进植株对钾素的积累。

表 7 溶钾细菌处理对钾素平衡的影响

Table 7 Effects of potassium-releasing bacteria from wheat on potassium balance

mg

菌株编号 Strain No.	苗期 (90 d) Seedling stage			旺长期 (150 d) Vigorous stage		
	试验前总钾量 Total K content before test	试验后总钾量 Total K content after test	钾素平衡 Potassium fixed	试验前总钾量 Total K content before test	试验后总钾量 Total K content after test	钾素平衡 Potassium fixed
CK0	327.50	328.4	-0.90	365.00	410.3	-45.30
CK1	406.02	323.8	82.22	443.52	424.8	18.72
CK2	484.55	350.8	133.75	522.04	478.5	43.54
WS16	406.02	368.4	37.62	443.52	451.1	-7.58
WS19	406.02	370.0	36.02	443.52	454.0	-10.48
WS20	406.02	372.6	33.42	443.52	441.7	1.82
WS21	406.02	353.8	52.22	443.52	466.9	-23.38
WS22	406.02	367.0	39.02	443.52	449.6	-6.08
WS23	406.02	352.5	53.52	443.52	440.0	3.52
WS24	406.02	347.2	58.82	443.52	427.7	15.82
WS25	406.02	350.9	55.12	443.52	480.7	-37.18
WS26	406.02	340.3	65.72	443.52	456.0	-12.48
WS27	406.02	367.8	38.22	443.52	512.7	-69.18
WS28	406.02	312.2	93.82	443.52	479.6	-36.08

表 8 溶钾细菌处理对钾素吸收利用率的影响

Table 8 Effects of potassium-releasing bacteria from wheat on the potassium recovery efficiency

菌株编号 Strain No.	肥料利用率/% Recovery efficiency		菌株编号 Strain No.	肥料利用率/% Recovery efficiency	
	苗期 (90 d) Seedling stage	旺长期 (150 d) Vigorous stage		苗期 (90 d) Seedling stage	旺长期 (150 d) Vigorous stage
CK0	—	—	WS22	43.73	44.08
CK1	17.43	31.90	WS23	37.18	34.91
CK2	15.07	27.14	WS24	37.77	35.20
WS16	32.34	46.15	WS25	34.24	58.59
WS19	41.18	45.70	WS26	38.08	46.09
WS20	41.05	43.69	WS27	39.60	67.04
WS21	39.91	45.02	WS28	32.47	55.64

## 2.6 溶钾细菌处理对钾素平衡的影响

考察溶钾细菌对钾素平衡的影响, 结果如表 7 所示。在苗期, CK0 的钾素总量在试验前后无差异, 其余 13 组处理在试验后的钾素水平均低于试验前的钾素水平, 试验前后钾素总量的差值即为被固定的钾素量, 其中施 50% 钾肥的 CK1 试验前后的钾素固定量为 82.22 mg, CK2 试验前后钾素固定量为 133.75 mg, 说明施肥水平越高, 被固定量越大。10 株溶钾细菌处理的各试验组的钾素固定量较 CK1 和 CK2 低, 说明溶钾细菌可以减少钾的固定, 减缓速效钾向缓效钾转化, 使更多的速效钾为植物体吸收和利用。在旺长期, CK0 由于未施肥, 土壤中的

钾会被土壤中的微生物活化为可被植物吸收利用的钾; CK1 处理的有少量钾被固定, 试验前后的总钾量基本保持平衡; CK2 施钾肥越高, 被固定的钾素量越大; 8 株溶钾细菌处理后的钾素水平高于试验前钾素水平, 说明溶钾细菌将土壤中难溶性的钾分解为可溶性钾, 其中 WS25、WS27 和 WS28 作用更加明显。

## 2.7 溶钾细菌对小麦钾素吸收利用率的影响

根据施肥钾素总量 (mg, K<sub>2</sub>O) 和表 6 数据, 结合钾肥利用率公式求得小麦植株钾肥利用率, 结果如表 8 所示。在苗期和旺长期, 施 100% 钾肥的 CK2 小麦钾肥利用率低于其他各组处理, 说明钾肥施用

量过多,小麦钾素利用率越低。在小麦苗期和旺长期,溶钾细菌处理的各实验组对钾肥的利用率均高于对照 CK1 和 CK2。WS25、WS27、WS28 明显高于对照 CK2,说明本试验所选的溶钾细菌可以促进植物体对速效钾的吸收和利用,提高钾肥的利用率。

### 3 讨论与结论

植物根际溶钾促生细菌具有多重作用机制。盛下放<sup>[15]</sup>、林启美<sup>[16]</sup>等研究表明溶钾细菌能够破坏钾矿物的晶体结构、释放植物所需营养元素; Sheng<sup>[17]</sup>,付雪琴等<sup>[18]</sup>表明溶钾细菌能够改善土壤结构、提高土壤肥力和酶活;孟丽媛等<sup>[19]</sup>和崔松松等<sup>[20]</sup>研究表明溶钾细菌产生刺激植物生长的化学物质、增强作物的抗逆性等。本试验采用盆栽法栽培小麦综合考察溶钾细菌与作物生长和肥料利用之间的关系。结果表明,在苗期,10株溶解细菌处理后钾素固定量低于对照,说明溶钾细菌可以减缓土壤中速效钾转变为缓效钾,使更多的速效钾被植物体吸收、利用;在旺长期,8株溶钾细菌处理后总钾量高于实验前的总钾量,说明它们可以促进土壤中缓效钾转化为可被植物体直接吸收利用的速效钾。溶钾细菌释放难溶性钾,使小麦植株钾积累量高于不接菌处理的对照组,因此小麦对钾肥的利用率也高于对照组,从而促进了小麦植株的生长发育,使各试验组的小麦干物质积累量优于对照组,其中7株溶钾细菌处理的小麦干物质积累量显著高于CK1和CK2。由盆栽试验可以看出溶钾细菌在生长早期可以减缓速效钾的固定,在旺长期可以释放土壤难溶钾,形成可供植物体利用的速效钾,促进植物体对肥料的吸收和利用,促进植物的生长与发育;其中WS25、WS27和WS28等菌株可以显著提高小麦生长的多项指标,具有进一步的研究和应用潜力。

本试验选取筛选的小麦特异性高效促生菌株,初步探讨了溶钾细菌对小麦植株生长和钾素平衡变化两方面的影响,考察了溶钾细菌在促进作物生长和肥料利用方面的作用机理,证明其具有优良的促生效果,应用这类菌株可以提高肥料利用率,挖掘土壤潜在肥力,提升土壤肥力,为维持农业可持续发展提供理论基础。需要进一步考察这些菌株在大田试验中促生效果,为研发高效生物肥料提供指导。

### 参考文献:

- [1] MEENA V S, MAURYA B R, VERMA J P, et al. Potassium solubilizing rhizobacteria (KSR): Isolation, identification, and K-release dynamics from waste mica[J]. *Ecol Eng*, 2015, 81: 340-347.
- [2] 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.
- [3] 常慧萍, 祝凌云, 姚丽娟, 等. 小麦根际固氮菌、解磷菌及解钾菌的互作效应[J]. *中国土壤与肥料*, 2008(4): 57-59.
- [4] 韦兵, 唐欣昀. 假单胞菌 JK45 菌株 lux 基因标记及在土壤中的存活[J]. *农业环境科学学报*, 2006, 25(6): 1524-1528.
- [5] 党雯, 郜春花, 张强, 等. 解钾菌的研究进展及其在农业生产中的应用[J]. *山西农业科学*, 2014, 42(8): 921-924.
- [6] 方华舟, 左雪枝. 稻田固氮解磷解钾菌筛选及其复合菌剂对土壤培肥作用[J]. *中国土壤与肥料*, 2014(2): 82-87.
- [7] 李冰, 龚文秀, 李清, 等. 植物根际促生菌株对小麦根系发育的影响[J]. *安徽农业大学学报*, 2015, 42(2): 276-282.
- [8] 李俊, 姜昕, 李力, 等. 微生物肥料的发展与土壤生物肥力的维持[J]. *中国土壤与肥料*, 2006(4): 1-5.
- [9] 张清敏, 刘曼, 周湘婷. 微生物肥料在土壤生态修复中的作用[J]. *农业环境科学学报*, 2006, 25(增刊): 283-284.
- [10] 郝春玲. 火焰光度法测定烟草中钾含量的预处理方法[J]. *安徽农学通报*, 2010, 16(13): 47-48.
- [11] 李力, 冯瑞华, 关大伟, 等. 火焰原子吸收法测定微生物肥料中总钾含量的研究[J]. *中国土壤与肥料*, 2009(6): 87-90.
- [12] 杨小秋, 汪健, 王林, 等. 火焰原子吸收光谱法测定植烟土壤中的速效钾[J]. *烟草科技*, 2012(10): 65-67.
- [13] 蔡立旺, 陈源, 王永慧, 等. 棉花钾素吸收利用效率与产量的关系[J]. *江苏农业学报*, 2014, 30(5): 972-979.
- [14] 王利, 陈防, 万开元. 植物钾效率及其评价的研究进展与展望[J]. *土壤*, 2010, 42(2): 164-170.
- [15] 盛下放, 黄为一. 硅酸盐细菌 NBT 菌株释钾条件的研究[J]. *中国农业科学*, 2002, 35(6): 673-677.
- [16] 林启美, 熊顺贵, 孙明德. 微生物肥料中微生物对土壤养分转化的影响[J]. *中国农业大学学报*, 1997, 2(增刊): 32-37.
- [17] SHENG X F, HE L Y. Solubilization of potassium-bearing minerals by a wild-type strain of *Bacillus edaphicus* and its mutants and increased potassium uptake by wheat[J]. *Can J Microbiol*, 2006, 52(1): 66-72.
- [18] 付学琴, 龙中儿, 魏赛金, 等. 硅酸盐细菌肥料对水稻土壤微生物及肥力的影响[J]. *中国土壤与肥料*, 2009(5): 69-71.
- [19] 孟丽媛, 李冰, 孙乐妮, 等. 水稻根际促生细菌促生生理活性评价[J]. *中国土壤与肥料*, 2014(1): 90-94.
- [20] 崔松松, 白莉敏, 周可金, 等. 油菜亲和性根际菌株的筛选及其促生效果[J]. *西北农林科技大学学报(自然科学版)*, 2016, 44(1): 91-96.