

两株链霉菌对玉米的促生增产作用及机理

马军妮¹ 刘玉涛¹ 李玉龙¹ 孙跃跃¹ 杨邦民² 来航线¹ 薛泉宏^{1*}

(¹西北农林科技大学资源环境学院, 陕西杨凌 712100; ²陕西省宜君县农技推广中心, 陕西宜君 727200)

摘要 为探索娄彻氏链霉菌(D74)和密旋链霉菌(Act12)及其混合菌剂对玉米生长的影响,采用皿内发芽试验、沙培试验及小区试验观察供试链霉菌无细胞发酵滤液及活菌制剂种子包衣对玉米生物学性状、叶片诱导酶活性、光合作用、穗性状、产量及品质的影响。结果表明:供试链霉菌无细胞发酵滤液处理玉米种子可促进玉米胚根、胚轴及幼苗生长,提高玉米幼苗叶片诱导酶活性。D74发酵液稀释1000倍处理可使玉米胚根长度、胚轴长度及须根数较对照分别增加43.4%、26.4%和100.7% ($P<0.05$);D74原液可使玉米叶片多酚氧化酶(PPO)活性较对照增加40.2%。Act12发酵液稀释100倍处理可使玉米胚根长度、胚轴长度和须根数较对照分别增加36.3%、36.3%和117.5% ($P<0.05$),玉米幼苗总鲜质量、根系鲜质量分别较对照增加31.1%、36.6% ($P<0.05$);Act12稀释10及1000倍处理玉米种子可使玉米叶片PPO活性分别较对照增加38.1%和39.5% ($P<0.05$)。混合菌剂种子包衣具有以下作用:1)促进玉米根系发育;2)显著增强叶片光合能力;3)显著改善穗性状并提高籽粒产量;4)显著促进籽粒灌浆速度;5)明显提高灌浆期玉米叶片诱导酶活性。表明供试链霉菌制剂包衣玉米种子可显著影响玉米的生物学特性、光合生理及生化代谢,刺激根系发育,促进玉米生长,提高产量。

关键词 放线菌剂;生物量;光合作用;种子包衣;根系发育

Effects and mechanism of two *Streptomyces* strains on promoting plant growth and increasing grain yield of maize. MA Jun-ni¹, LIU Yu-tao¹, LI Yu-long¹, SUN Yue-yue¹, YANG Bang-min², LAI Hang-xian¹, XUE Quan-hong^{1*} (¹College of Natural Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling 712100, Shaanxi, China; ²Agricultural Technology Extension Center of Yijun County, Yijun 727200, Shaanxi, China).

Abstract: This paper was mainly to explore the effects of two *Streptomyces* strains (*S. roche* D74 and *S. pactum* Act12) and their mixed actinomycetes agent on maize growth. Petri dish germination test, sand culture trial and plot trial were performed to determine the biological properties, leaf inducible enzyme activities, photosynthesis, ear characteristics, grain yield and quality of maize after seed soaking with acellular culture filtrate of D74 or Act 12 and seed coating with the mixed actinomycetes agent of two *Streptomyces* stains. The result showed that the seed soaking treatment significantly contributed to hypocotyls, radical and seedling growth, and increased the leaf inducible enzyme activities of maize seedlings. The 1000-fold dilution of D74 improved hypocotyl length, radicle length, and fibrous root number by 43.4%, 26.4%, and 100.7% ($P<0.05$), respectively, whereas the undiluted solution of D74 improved leaf polyphenol oxidase (PPO) activity by 40.2% ($P<0.05$). The 1000-fold dilution of Act12 improved hypocotyl length, radicle length, and fibrous root number by 36.3%, 36.3%, and 117.5% ($P<0.05$), the total fresh mass and root fresh mass by 31.1% and 36.6%, respectively ($P<0.05$). The 10-fold and 1000-fold dilutions of Act12 improved leaf PPO activity by 38.1% and 39.5%, respectively ($P<0.05$). The seed coating treatment showed the following significant effects, compared with the control: 1) Improving the root development. 2) Enhancing the leaf photosynthesis. 3) Improving the ear characteristics and grain yield. 4) Promoteing the grain filling. 5) Improving the leaf inducible enzyme activities. The results indi-

cated that seed coating with the mixed actinomycetes agent of two *Streptomyces* strains could significantly affect the biological characteristics, photosynthesis and biochemical metabolism of maize seedlings, stimulate root development, promote plant growth, and improve grain yield of maize.

Key words: actinomycetes agent; biomass; photosynthesis; seed coating; root growth.

玉米为中国第一大粮食作物。据统计,2013年全国玉米种植面积为3631.8万 hm^2 ,占农作物总种植面积的22.1%;陕西玉米面积116.62万 hm^2 ,占陕西农作物总种植面积的27.3%^[1]。除食用外,玉米还是重要的饲料和工业原料,需求量很大,但目前我国玉米单产尚未达到理想水平。2008—2009年,中国玉米最高单产5480 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,与美国玉米年均单产9650 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 有很大差距^[2]。提高单产是我国玉米生产亟待解决的问题。除育种及优化传统栽培技术外,引入新的微生物技术,刺激玉米根系生长,将在提高玉米对水肥光热资源的利用能力及玉米单产上产生重要作用。目前已有细菌^[3-8]、真菌^[9-11]等活菌制剂及放线菌发酵液浇灌对玉米促生作用的探索研究^[12],但对放线菌活菌制剂的促生增产作用研究较少。放线菌种类繁多,代谢类型各异,能在土壤中长期生存,其中的链霉菌是放线菌中抗生素的主要产生菌,除抗生素外,还可合成多种具有不同功能的活性代谢产物,目前已发现链霉菌活菌制剂对辣椒^[13]、草莓^[14]、棉花^[15]、烟苗^[16]及丹参^[17]等作物根系生长、产量提高、品质改善有显著的促进作用,表明链霉菌活菌制剂具有促进玉米生长、提高玉米单产的潜力,但目前尚无利用链霉菌活菌制剂进行种子包衣对玉米促生增产作用及其机理的报道。本研究以陕西关中夏玉米为材料,研究链霉菌无细胞发酵液和链霉菌活菌制剂种子包衣对玉米生物学特性、生理生化特性及产量的影响,并对其增产机理做出初步解释,旨在为玉米高产栽培探索新的生物技术途径。

1 材料与方法

1.1 供试材料

供试玉米为‘正大12号’和‘华农128’,均从市场购买。

供试放线菌分别为娄彻氏链霉菌(*Streptomyces roche*,代号D74)和密旋链霉菌(*Streptomyces pactum*,代号Act12)。由西北农林科技大学资源环境学院微生物资源研究室分离筛选,均具有显著的防病促生功能^[18-21]。

将上述两株放线菌通过固态单菌发酵分别制成

粉末状菌剂,其中D74、Act12的有效活菌数分别为 3.5×10^{10} 、 2.3×10^8 cfu $\cdot\text{g}^{-1}$,二者按质量比1:1均匀混合成复合制剂。

沙培材料为建筑用普通黄沙过2 mm筛即可。

1.2 放线菌无细胞发酵滤液的促生作用试验

用竹签挑取活化好的两株供试放线菌斜面培养物适量,分别接种到装有100 mL高氏1号液体培养基的500 mL培养瓶中,28 $^{\circ}\text{C}$ 150 r $\cdot\text{min}^{-1}$ 摇床振荡培养8 d,用真空泵抽滤放线菌发酵液,然后在无菌条件下用0.45 μm 灭菌微孔滤膜抽滤除菌,得无细胞发酵滤液。

采用平皿试验法进行滤液对玉米胚根、胚轴生长的影响试验。挑选饱满的玉米种子,经70%酒精、1 $\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 升汞分别消毒30 s、1 min后,用无菌水冲洗5次,分别放入稀释倍数为0(原液)、10、100、1000倍的无细胞发酵滤液中,浸泡24 h。弃去浸液,用无菌水冲洗种子5次,放入装有1 mL无菌水浸润滤纸的培养皿中,每皿6粒,重复3皿,28 $^{\circ}\text{C}$ 下恒温培养7 d后,挑选促生效果最明显的稀释度(D74为1000倍稀释液,Act12为100倍稀释液),测量胚根、胚轴长度,统计根条数及须根数。

采用沙培试验进行滤液对玉米幼苗生长的影响试验。用无细胞发酵滤液处理种子,方法同胚根、胚轴生长试验。种子处理结束后种在装有0.8 kg黄沙、直径为10 cm的塑料盆中,每盆6粒,待玉米出苗后生长到第7天,将盆内基质倒出,小心抖掉根上附着的沙粒,洗净后采用称量法测定植株地上茎叶及根系鲜质量,并用直尺测量株高,游标卡尺测定幼苗根茎交界处直径。每处理重复3盆,每盆6株,对照、处理各测定18株。

待沙培幼苗生物量测定结束后,将每盆幼苗的全部地上部分洗净,用吸水纸吸干,用剪刀剪碎,混匀,称取1.000 g 3份,参照高俊凤^[22]的方法测定叶片过氧化物酶(POD)、苯丙氨酸解氨酶(PAL)活性和丙二醛(MDA)含量,参照郑莲姬等^[23]的方法测定叶片多酚氧化酶(PPO)活性。所有处理均重复测定9次,酶活性均用单位鲜质量表示。

1.3 活菌制剂种子包衣的促生作用试验

试验地点为陕西省咸阳市杨陵区毕公村(正大

12 号)和元树村(华农 138),均为陕西关中灌区,属小麦收获后播种的夏玉米。

设对照(常规种植)和菌剂种子包衣两个处理,每处理重复 3 个小区。毕公村试验的小区面积为 $8.4 \times 5.0 = 42.0 \text{ m}^2$,株距 46 cm,行距 60 cm,每小区 8 行,每行 18 株,密度为每公顷 3.4 万株,用点播器人工播种,播种深度为 6 cm,每小区共留苗 144 株,2014 年 6 月 12 日播种。元树村试验小区面积 $5.8 \times 2.4 = 14 \text{ m}^2$,株距、行距均为 40 cm,每小区 6 行,每行 14 株,密度每公顷 6.0 万株,播种机播种,播种深度 6 cm,每小区共留苗 84 株,2014 年 6 月 10 日播种。两块试验田均按正常方法管理,并于玉米生长拔节期采用穴施的方法,按 $900 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 用量再追施含氮量为 46.4% 的尿素。

挑选大小均匀、颗粒饱满的玉米种子,以 $6 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 羧甲基纤维素钠(CMCNa)溶液为胶结剂,按 $50 \text{ mL} \cdot \text{kg}^{-1}$ 种子的用量将 CMCNa 溶液加到玉米种子中搅拌,使种子表面均匀布满胶结剂;将供试粉状菌剂加入玉米种子中搅拌,使每粒种子表面都均匀沾附菌剂。将包裹好菌剂的玉米种子在阴凉处风干备用。毕公村和元树村试验点每粒玉米的菌剂包衣量分别为 88 和 130 mg。

1.4 测定项目与方法

1.4.1 灌浆期光合指标及叶片绿色度测定 采用 LI-6400P 便携式光合测定仪及 SPAD-502 便携式叶绿素仪于 2014 年 9 月 3 日灌浆期进行。每小区随机选取 3 株具有代表性的玉米植株,做好标记,每处理共选 9 株,测定叶片为穗位叶。光合指标测定位置在穗位叶长度 1/2 处叶片中部主脉右侧,叶片绿色度测定位置在叶片中部主脉左侧,光合指标与叶片绿色度测定同步进行。毕公村、元树村试验点的测定时间分别为 9:00—12:00、13:00—15:00,测定项目为净光合速率(P_n)、蒸腾速率(T_r)、气孔导度(g_s)及胞间 CO_2 浓度(C_i)。对照与菌剂处理光合指标及叶片绿色度测定均重复 9 片叶。

1.4.2 生物学性状测定 于 2014 年 9 月 3 日灌浆期及 2014 年 10 月 3 日收获期分两次进行。灌浆期所选植株为光合作用测定时的标记植株,每小区 3 株,将植株完整挖出。测定指标为植株高度、地径(根茎交界处的茎秆直径),茎叶总鲜质量,穗位叶长度、宽度及鲜质量,整株玉米所有绿色叶片数量;剪下根系后洗净根上附着土壤,风干称量。收获期,每小区随机选 3 株具有代表性的玉米植株,测定指标为植株高度、地径,茎叶鲜质量、根系干质量。方法同灌浆

期生物学性状测定。以上对照与菌剂处理的生物学性状指标测定均重复 9 株。

1.4.3 灌浆期叶片诱导酶活性测定 2014 年 9 月 3 日采样。待光合作用、叶片绿色度及生物学性状测定结束,采集已完成测定植株的穗位叶,将每小区所采 3 片叶按其形状重叠,在叶片长度 1/2 处对折,并在对折后长度的 1/2 处再次对折,用直径 15 mm 的打孔器在叶片中部主脉两侧等距离处切取等量叶片,剪碎并充分混匀,称取 1.000 g,重复 3 次,所测酶活性均值为小区测定值。每处理 3 个小区,共采 9 片穗位叶,制备 3 个混合样,重复测定 9 次。叶片过氧化物酶(POD)、苯丙氨酸解氨酶(PAL)及多酚氧化酶(PPO)活性测定方法同幼苗生化指标测定。

1.4.4 次生根分析 分两个时期进行。灌浆期:待该期生物学性状测定结束,从每小区所采 3 株玉米中选出 1 株具有代表性植株的根系,风干,自上而下按根系生长中自然形成的 3 个层次将玉米次生根分为 3 种类型:将最上层的气生根定义为表层次生根,将分布在最底层的根系定义为底层次生根,二者之间的根系定义为中层次生根。另外,将表面布满须根有吸收功能的次生根定义为吸收根。按上述分类先将 3 种次生根分别剪下,计数根条数,测定其质量;随后,将每种次生根中有须根的部位剪下,分别计数吸收根条数,测定吸收根质量。对照与菌剂处理各重复 3 株。收获期:待该期生物学性状测定结束,采用上述方法对收获期所采植株的根系进行次生根分析,对照与菌剂处理均重复 9 株。

1.4.5 穗分析 分两个时期进行。灌浆期生物学性状测定结束后,测定 9 株玉米单株穗个数、穗中部周长及单个穗鲜质量,并从毕公试验田每小区所采 3 个标记植株穗中选取具有代表性的玉米穗 1 穗,测定其百粒鲜质量、百粒干质量、含水量及单穗籽粒质量,对照、种衣剂处理各重复 3 穗。收获期:每小区选 10 株代表性植株,每株采集 1 穗进行穗性状分析,测定穗鲜质量、风干质量、穗中部周长、单穗籽粒质量及百粒重,该期对照、种衣剂处理各采 30 穗。

1.4.6 产量测定 2014 年 10 月 3 日将试验小区玉米全部收获,分别称小区穗总鲜质量,计数小区总穗个数,将小区产量折合为每公顷穗鲜质量,按式(4)计算产量(每公顷籽粒干质量)。

1.4.7 玉米籽粒品质分析 收获期穗性状分析结束后,将每穗的籽粒混匀后称取 10.0 g,每小区 10 穗混匀成 1 个混合样,对照、处理各为 3 个混合样;将

对照、处理混合样分别粉碎过 80 目筛, 80 °C 烘干 24 h; 称取烘干粉碎样品 0.2000 g, 凯氏法消解, 靛酚蓝比色法测定全氮含量^[24], 乘以 6.25 计算籽粒蛋白质含量; 称取上述烘干粉碎样品 1.000 g, 参照于鲁浩等^[25]的方法测定籽粒淀粉含量. 以上测定均重复 3 次.

1.5 结果计算

菌剂效应 (ΔCK)、穗(叶片)含水量、出籽率、籽粒干质量 ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$) 按下式计算:

$$\Delta\text{CK} = (\text{处理} - \text{对照}) / \text{对照} \times 100\% \quad (1)$$

$$\text{含水量} = (\text{鲜质量} - \text{干质量}) / \text{干质量} \times 100\% \quad (2)$$

$$\text{出籽率} = \text{单穗籽粒干质量} / \text{单穗干质量} \times 100\% \quad (3)$$

$$\text{籽粒干质量} = \text{每区穗鲜质量} \times \frac{\text{单穗干质量}}{\text{单穗鲜质量}} \times \text{出籽率} \times \frac{667}{\text{小区面积}} \times 15 \quad (4)$$

1.6 数据处理

采用 Excel、SPSS 19.0 软件进行数据统计分析, 采用 LSD 多重比较法进行差异性检验.

2 结果与分析

2.1 放线菌无细胞发酵滤液对玉米的促生作用

2.1.1 胚根、胚轴生长 由图 1 及表 1 可以看出, 用供试菌株的无细胞发酵滤液处理玉米种子, 其胚根长度、胚根数、须根数及胚轴长度均有增加. 其中, D74 发酵液稀释 1000 倍处理可使玉米胚根长度、胚轴长度及须根数较对照分别增加 43.4%、26.4% 和 100.7% ($P < 0.05$); Act12 发酵液稀释 100 倍处理可使玉米胚根长度、胚轴长度和须根数较对照分别增加 36.3%、36.3% 和 117.5% ($P < 0.05$).

2.1.2 幼苗生长 由图 2 及表 2 沙培试验结果可以看出, 用供试菌株无细胞发酵滤液浸泡玉米种子, 可促进玉米幼苗生长. 其中, 稀释倍数为 100 的 Act12

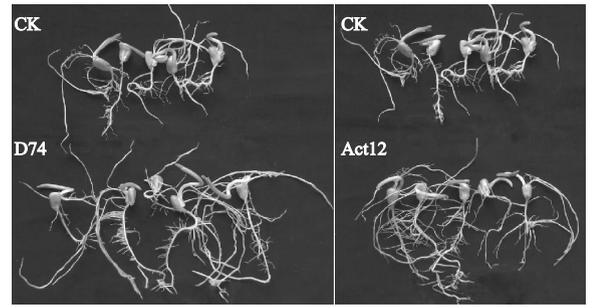


图 1 放线菌无细胞发酵滤液处理后玉米胚轴和胚根的生长状况

Fig.1 Growth of maize hypocotyls and radicles after seed treatment with acellular culture filtrates of actinomycetes.

CK: 对照 Control; D74: 娄彻氏链霉菌 *Streptomyces roche*; Act12: 密螺旋链霉菌 *Streptomyces pactum*. 下同 The same below.

处理可使玉米幼苗总鲜质量、根系鲜质量分别较对照增加 31.1%、36.6% ($P < 0.05$). 稀释倍数为 1000 的 D74 处理可使玉米幼苗总鲜质量、根系鲜质量及地径较对照分别增加 20.1%、19.3% 和 13.9%, 但差异除地径外均未达到显著水平.

2.1.3 叶片生化特性 由表 3 可以看出, 用不同稀释度供试菌株的无细胞发酵滤液浸泡玉米种子, 可使玉米叶片 PPO 活性显著增加 ($P < 0.05$), 其中, Act12 稀释 10 及 1000 倍处理玉米种子可使玉米叶片的 PPO 活性分别较对照增加 38.1% 和 39.5% ($P < 0.05$), D74 原液处理玉米种子可使玉米叶片的 PPO 活性较对照增加 40.2%. 部分原液及低稀释度处理叶片 PAL 及 POD 活性与对照的差异也达到显著水平 ($P < 0.05$), 其中, D74 原液处理玉米种子可使玉米叶片的 PAL 活性较对照增加 15.1%; D74 原液、Act12 原液可使玉米叶片的 POD 活性分别较对照增加 15.4%、13.5% ($P < 0.05$). 不同稀释度供试菌株的无细胞发酵滤液处理玉米叶片 MDA 含量较对照减少 4.5%~16.3%, 但与对照的差异均未达到显著水平.

2.2 活菌制剂种子包衣对玉米生物学特性的影响 由表 4 可以看出, 供试菌剂包衣对玉米生长有

表 1 放线菌无细胞发酵液浸种后玉米胚根和胚轴的长度和数量

Table 1 Lengths and numbers of maize hypocotyls and radicles after seed treatment with acellular culture filtrates of actinomycetes ($n = 18$)

处理 Treatment	胚根长度 Radicle length (cm)		单株胚根数 Radicle number per plant		胚轴长度 Hypocotyl length (cm)		单株须根数 Fibrous root number per plant	
	$\bar{X} \pm S$	ΔCK (%)	$\bar{X} \pm S$	ΔCK (%)	$\bar{X} \pm S$	ΔCK (%)	$\bar{X} \pm S$	ΔCK (%)
CK	6.0±0.6b	-	4.5±1.3a	-	4.0±1.5b	-	4.9±2.1b	-
D74	8.6±1.0a	43.4	4.9±1.0a	7.4	5.0±1.7a	26.4	9.9±3.2a	100.7
Act12	8.1±0.8a	36.3	4.6±1.0a	0.8	5.4±1.8a	36.3	10.7±1.0a	117.5

CK: 对照 Control; D74: 娄彻氏链霉菌 *Streptomyces roche*; Act12: 密螺旋链霉菌 *Streptomyces pactum*. $\bar{X} \pm S$: 平均值±标准差 Mean±SD. 同列不同字母表示差异达到显著水平 ($P < 0.05$) Different letters in the same column indicated significant difference at 0.05 level. 下同 The same below.

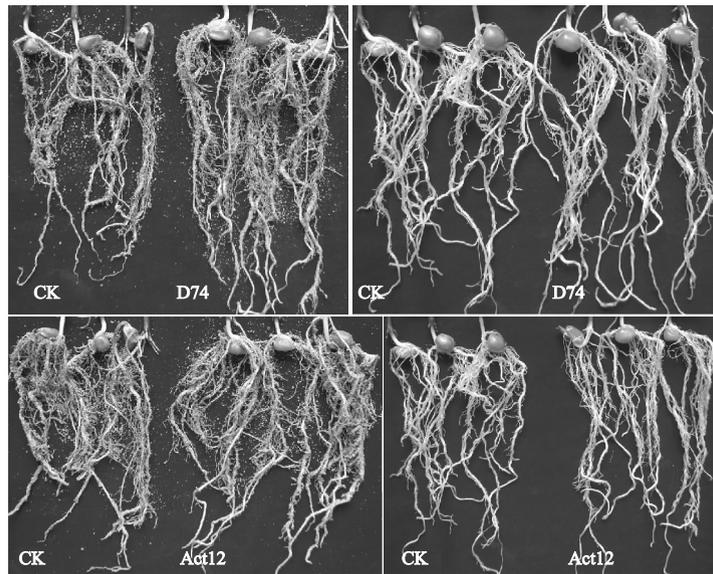


图2 放线菌无细胞发酵滤液处理后沙培玉米幼苗根系的生长状况

Fig.2 Root growth of maize seedlings in sand culture after seed treatment with acellular culture filtrates of actinomycetes.

表2 放线菌无细胞发酵液浸种处理后沙培玉米幼苗的生物学特性

Table 2 Biological characteristics of maize seedlings in sand culture after seed treatment with acellular culture filtrates of actinomycetes ($n=18$)

处理 Treatment	稀释倍数 Dilution times	总鲜质量 Total fresh mass ($g \cdot plant^{-1}$)		茎叶鲜质量 Stem and leaf fresh mass ($g \cdot plant^{-1}$)		根系鲜质量 Root fresh mass ($g \cdot plant^{-1}$)		株高 Plant height (cm)		地径 Ground diameter (mm)	
		$\bar{X} \pm S$	ΔCK (%)	$\bar{X} \pm S$	ΔCK (%)	$\bar{X} \pm S$	ΔCK (%)	$\bar{X} \pm S$	ΔCK (%)	$\bar{X} \pm S$	ΔCK (%)
CK	-	2.3±0.5b	-	1.3±0.4a	-	1.1±0.3c	-	29.6±3.5a	-	3.1±0.2c	-
D74	0	2.6±0.4ab	12.6	1.3±0.2a	-1.3	1.2±0.2bc	10.3	28.1±3.2a	-5.0	3.2±0.2bc	3.5
	10	2.4±0.4ab	6.5	1.3±0.1a	1.3	1.2±0.2bc	9.4	29.5±2.8a	-0.1	3.1±0.3c	0.6
	10 ²	2.5±0.3ab	7.8	1.3±0.1a	-2.7	1.3±0.2abc	16.9	29.7±3.6a	0.3	3.2±0.3c	1.6
	10 ³	2.7±0.5ab	20.1	1.4±0.3a	7.2	1.3±0.2abc	19.3	30.9±3.1a	4.5	3.5±0.4ab	13.9
	10 ⁴	2.7±0.5ab	18.4	1.3±0.3a	1.8	1.3±0.2abc	14.2	31.0±3.6a	4.9	3.4±0.3bc	8.2
Act12	0	2.5±0.5ab	8.4	1.3±0.2a	-3.2	1.2±0.3bc	6.3	28.7±1.5a	-3.1	3.5±0.4ab	13.2
	10	2.8±0.8ab	25.1	1.4±0.3a	4.2	1.3±0.3abc	14.0	30.7±5.5a	3.6	3.6±0.2ab	14.8
	10 ²	3.0±0.6a	31.1	1.5±0.3a	10.5	1.5±0.3a	36.6	31.6±4.0a	6.9	3.3±0.2bc	6.7
	10 ³	2.8±0.4ab	23.9	1.5±0.1a	15.5	1.4±0.1ab	27.1	30.6±1.9a	3.3	3.5±0.5ab	13.5
	10 ⁴	2.6±0.5ab	13.4	1.4±0.2a	8.3	1.2±0.1bc	4.9	30.2±3.5a	1.9	3.7±0.3a	20.3

表3 放线菌无菌发酵液浸种处理后沙培玉米幼苗的叶片诱导酶活性

Table 3 Leaf enzyme activities of maize seedlings in sand culture after seed treatment with acellular culture filtrates of actinomycetes ($n=9$)

处理 Treatment	稀释倍数 Dilution times	过氧化物酶 POD ($\mu g \cdot g^{-1} \cdot min^{-1}$)		苯丙氨酸解酶 PAL ($U \cdot g^{-1} \cdot h^{-1}$)		多酚氧化酶 PPO ($U \cdot g^{-1} \cdot h^{-1}$)		丙二醛 MDA ($mmol \cdot g^{-1}$)	
		$\bar{X} \pm S$	ΔCK (%)	$\bar{X} \pm S$	ΔCK (%)	$\bar{X} \pm S$	ΔCK (%)	$\bar{X} \pm S$	ΔCK (%)
CK	-	20.2±1.1cd	-	318.4±21.4e	-	55.6±3.6c	-	0.74±0.09a	-
D74	0	23.4±2.2a	15.4	366.6±11.8a	15.1	78.0±2.1a	40.2	0.70±0.02a	-5.8
	10	22.2±2.2abc	9.9	346.4±21.7abcd	8.8	68.1±4.2b	22.4	0.70±0.08a	-6.2
	10 ²	20.6±1.0bcd	1.7	315.3±8.7e	-1.0	67.8±2.6b	21.9	0.71±0.04a	-4.5
	10 ³	21.2±2.7abcd	5.0	328.6±23.1de	3.2	63.6±2.5b	14.3	0.66±0.06a	-10.3
	10 ⁴	20.0±2.1cd	-1.1	355.0±12.4ab	11.5	64.5±6.8b	15.9	0.69±0.15a	-6.5
Act12	0	23.0±2.7ab	13.5	331.6±5.5cde	4.1	64.6±0.3b	16.1	0.64±0.03a	-12.8
	10	22.7±3.7abc	11.8	350.9±31.0abcd	10.2	76.8±5.5a	38.1	0.65±0.10a	-12.2
	10 ²	20.2±1.1cd	-0.2	343.4±12.8bcd	7.8	68.2±4.6b	22.6	0.62±0.04a	-15.9
	10 ³	22.6±0.6abc	11.6	359.4±13.0ab	10.2	77.6±1.5a	39.5	0.62±0.06a	-16.3
	10 ⁴	19.1±2.1d	-5.9	324.9±7.2de	2.0	55.5±3.9c	-0.2	0.71±0.03a	-4.2

表4 放线菌剂包衣处理后小区试验玉米生物学特性

Table 4 Biological characteristics of maize seedlings in plot trials after seed coating with mixed actinomycetes ($n=9$)

指标 Index	测定时期 Testing stage	毕公 Bigong			元树 Yuanshu		
		对照 CK	菌剂包衣 Coating	Δ CK (%)	对照 CK	菌剂包衣 Coating	Δ CK (%)
茎叶鲜质量	灌浆期 Filling stage	909.2±0.9b	1175.9±81.6a	29.3	653.4±9.1b	742.3±16.8a	13.6
Stem and leaf fresh mass ($g \cdot plant^{-1}$)	收获期 Harvest stage	655.6±48.6a	724.4±24.9a	10.5	432.2±10.2b	496.7±36.2a	14.9
叶片数量 Leaf number	灌浆期 Filling stage	14.1±0.9b	15.3±0.7a	8.7	12.0±1.1a	12.3±0.9a	2.1
根系干质量	灌浆期 Filling stage	205.5±2.3b	270.3±12.1a	31.6	96.2±5.2a	113.2±42.8a	17.7
Root mass ($g \cdot plant^{-1}$)	收获期 Harvest stage	53.7±12.9a	61.5±9.4a	14.6	49.8±3.1b	60.4±4.1a	21.2
株高	灌浆期 Filling stage	257.3±5.2a	261.6±7.2a	1.7	276.4±4.8a	290.4±8.8a	5.1
Plant height (cm)	收获期 Harvest stage	248.4±8.8a	249.7±6.6a	0.5	278.1±11.8b	309.0±36.7a	11.1
地径	灌浆期 Filling stage	2.3±0.3a	2.4±0.2a	4.7	1.7±0.1b	1.9±0.1a	9.3
Ground diameter (cm)	收获期 Harvest stage	2.8±0.2b	3.2±0.2a	13.3	2.3±0.1b	2.4±0.1a	5.0

同一试验点同行数据后不同小写字母表示菌剂包衣处理与对照的差异达到显著水平 ($P<0.05$)。Different lowercase letters in the same row of the each site indicated significant difference between the experimental treatment and control at 0.05 level. 下同 The same below.

明显促进作用。在灌浆期,毕公玉米菌剂处理茎叶鲜质量及根系干质量分别较对照提高了 29.3% 和 31.6%;元树菌剂处理玉米茎叶鲜质量、地径分别较对照提高 13.6%、9.3%,与对照差异均达到显著水平 ($P<0.05$)。在收获期,毕公玉米菌剂处理地径较对照提高 13.3%,元树玉米菌剂处理茎叶鲜质量、根系干质量、株高及地径分别较对照提高 14.9%、21.2%、11.1% 和 5.0%,与对照差异均达到显著水平 ($P<0.05$)。

从表 5 可以看出,供试菌剂对灌浆期玉米叶片生长有促进作用。毕公菌剂处理玉米穗位叶鲜质量、干质量分别较对照增加 45.0% 和 34.7%;元树菌剂处理玉米穗位叶干质量、叶片绿色度分别较对照增加 9.5% 和 5.3%,两个试验点处理与对照上述指标差异均达到显著水平 ($P<0.05$)。

2.3 活菌制剂种子包衣对玉米次生根系发育的影响

由图 3 及表 6 可以看出,供试菌剂对灌浆期玉米根系发育有促进作用。毕公菌剂处理玉米表层次

生根的吸收根数较对照增加 30.2%,中层次生根的根系总干质量、吸收根干质量及吸收根数分别较对照增加 98.3%、122.3% 和 36.9%,底层次生根的数量较对照增加 26.6%,以上差异均达显著水平 ($P<0.05$)。元树试验点,灌浆期菌剂处理玉米表层次生根吸收根数较对照增加 60.6% ($P<0.05$),菌剂处理根系其他指标虽有一定程度的增加,但与对照的差异均未达到显著水平。此外,元树试验点有些次生根的根系参数呈现菌剂处理小于对照的现象,但差异均未达到显著水平。

2.4 活菌制剂种子包衣对玉米光合特性的影响

由表 7 可以看出,供试菌剂包衣处理对灌浆期玉米叶片的光合特性有一定影响。其中,毕公菌剂处理玉米叶片的净光合速率、蒸腾速率及单叶水利用率分别较对照增加 13.6%、22.4% 和 6.5%,元树菌剂处理玉米叶片的胞间 CO_2 浓度和蒸腾速率分别较对照增加 16.6% 和 15.5%,两个试验点以上指标处理与对照的差异均达到显著水平 ($P<0.05$)。其余指

表5 放线菌剂包衣处理后小区玉米灌浆期穗位叶性状

Table 5 Characteristics of ear leaves of maize plants at the filling stage in plot trials after seed coating with mixed actinomycetes ($n=9$)

测定指标 Index	毕公 Bigong			元树 Yuanshu		
	对照 CK	菌剂包衣 Coating	Δ CK (%)	对照 CK	菌剂包衣 Coating	Δ CK (%)
鲜质量 Fresh mass ($g \cdot plant^{-1}$)	101.4±11.0b	147.1±8.9a	45.0	79.1±7.8a	95.5±7.0a	20.8
干质量 Dry mass ($g \cdot plant^{-1}$)	34.2±0.3b	46.1±3.2a	34.7	28.9±0.1b	31.6±0.7a	9.5
含水量 Water content (%)	196.5±24.6a	219.6±15.3a	11.6	174.0±19.9a	202.4±23.2a	16.3
长度 Length (cm)	90.3±6.6a	90.8±2.6a	0.55	94.6±2.5a	97.1±5.5a	2.6
宽度 Width (cm)	10.5±1.1a	10.7±0.4a	1.9	9.5±0.6a	9.6±0.5a	0.9
面积 Area (cm^2)	950.0±132.7a	971.8±53.5a	2.3	896.2±51.9a	928.2±67.6a	3.6
绿色度 Chlorophyll (SPAD)	60.4±0.7a	61.2±0.8a	1.3	59.0±2.2b	62.1±3.2a	5.3

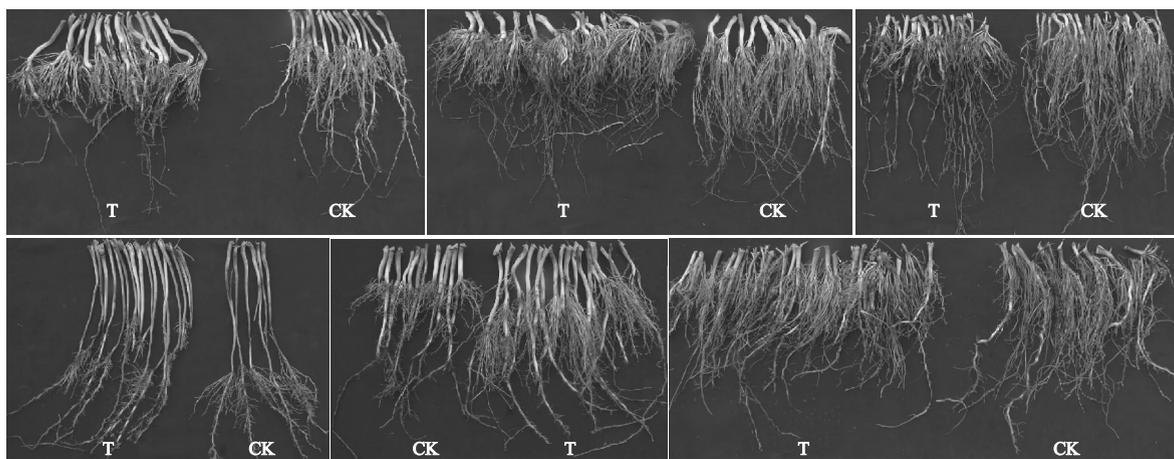


图3 放线菌菌剂包衣后小区试验灌浆期玉米次生根系的生长状况

Fig.3 Secondary root growth of maize plants at the filling stage in plot trials after seed coating with mixed actinomycetes.

上图 Top: 毕公 Bigong; 下图 Bottom: 元树 Yuanshu. 左 Left: 表层次生根 Superficial layer secondary root; 中 Middle: 中层次生根 Middle layer secondary root; 右 Right: 底层次生根 Bottom layer secondary root.

表6 放线菌剂包衣处理后小区试验玉米次生根系数量和质量

Table 6 Root number and mass of maize plants in plot trials after seed coating with mixed actinomycetes ($n=3$)

次生根 Secondary roots	指标 Index	测定时间 Testing stage	毕公 Bigong			元树 Yuanshu		
			对照 CK	菌剂包衣 Coating	Δ CK (%)	对照 CK	菌剂包衣 Coating	Δ CK (%)
表层次生根(气生根) Secondary roots in the superficial layer (Aerial roots)	根数量 Root number	灌浆期 Filling stage	16.3±4.0a	18.3±0.6a	12.2	14.5±0.7a	15.5±4.9a	6.9
		收获期 Harvest stage	16.4±2.6a	16.7±1.4a	1.4	18.1±0.6a	15.6±0.5a	-13.9
	根系总质量 Root total mass ($g \cdot plant^{-1}$)	灌浆期 Filling stage	34.9±32.5a	35.8±15.5a	2.5	21.4±7.0a	21.9±13.8a	2.1
	吸收根质量 Absorbing root mass ($g \cdot plant^{-1}$)	收获期 Harvest stage	5.4±1.9b	7.7±1.2a	42.9	7.3±1.6a	8.4±2.5a	15.4
	吸收根数 Absorbing root number	灌浆期 Filling stage	19.2±18.4a	20.7±12.4a	7.8	7.0±1.4a	7.7±4.9a	10.6
		收获期 Harvest stage	3.1±0.8b	4.5±0.6a	46.8	2.1±0.7b	3.8±0.5a	76.2
中层次生根 Secondary roots in the middle layer	根数量 Root number	灌浆期 Filling stage	40.7±9.8b	53.0±9.5a	30.2	27.9±6.4b	44.8±12.8a	60.6
		收获期 Harvest stage	12.7±1.2a	15.0±1.7a	18.4	14.6±2.6a	14.7±2.1a	4.8
	根系总质量 Root total mass ($g \cdot plant^{-1}$)	灌浆期 Filling stage	14.4±2.5a	15.0±2.7a	3.9	15.8±1.3a	15.3±1.7a	-3.3
	吸收根质量 Absorbing root mass ($g \cdot plant^{-1}$)	收获期 Harvest stage	40.6±15.0b	80.5±17.9a	98.3	35.2±11.1a	30.7±15.0a	-13
	吸收根数 Absorbing root number	灌浆期 Filling stage	6.6±1.9b	9.1±0.9a	37.2	6.1±0.9b	8.3±0.7a	36.5
		收获期 Harvest stage	31.3±11.5b	69.5±20.2a	122.3	26.8±13.3a	21.9±8.5a	-18.1
底层次生根 Secondary roots in the bottom layer	根数量 Root number	灌浆期 Filling stage	42.0±15.4b	57.5±5.9a	36.9	52.4±18.3a	61.9±34.1a	18.2
		收获期 Harvest stage	21.3±1.5b	27.0±1.7a	26.6	22.0±7.5a	21.7±4.5a	-1.5
	根系总质量 Root total mass ($g \cdot plant^{-1}$)	灌浆期 Filling stage	21.4±4.7b	26.5±3.2a	24.0	25.8±2.1a	27.3±5.7a	5.7
	吸收根质量 Absorbing root mass ($g \cdot plant^{-1}$)	收获期 Harvest stage	27.5±8.3a	32.4±11.2a	17.9	23.3±8.1a	28.7±22.8a	23.2
	吸收根数 Absorbing root number	灌浆期 Filling stage	5.1±2.2a	5.5±2.0a	7.1	5.1±0.4b	8.9±3.0a	72.9
		收获期 Harvest stage	25.0±6.8a	32.3±4.8a	28.9	20.5±6.1a	23.3±18.4a	13.9

标对照与菌剂处理差异不显著。

2.5 活菌制剂种子包衣对玉米叶片诱导酶活性的影响

由表8可以看出,供试菌剂包衣处理对灌浆期玉米叶片诱导酶活性有一定影响.其中,毕公菌剂处理玉米穗位叶片的PPO和PAL活性分别较对照增

加15.3%和6.2%,元树菌剂处理玉米叶片的PPO和POD活性分别较对照增加17.4%和4.4%,且差异均达到显著水平($P<0.05$).

2.6 活菌制剂种子包衣对玉米果穗的影响

由表9可以看出,供试菌剂包衣处理对玉米果穗发育及产量有一定影响.其中,毕公试验点灌浆期

表7 放线菌剂包衣处理后小区试验灌浆期玉米穗位叶光合作用特征

Table 7 Photosynthetic characteristics of maize plants at the filling stage in plot trials after seed coating with mixed actinomycetes ($n=9$)

指标 Index	毕公 Bigong			元树 Yuanshu		
	对照 CK	菌剂包衣 Coating	Δ CK (%)	对照 CK	菌剂包衣 Coating	Δ CK (%)
净光合速率 P_n ($\mu\text{mol CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)	17.5±1.6b	19.9±1.9a	13.6	22.5±2.8a	24.0±2.3a	6.5
气孔导度 g_s ($\mu\text{mol H}_2\text{O} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)	0.09±0.01a	0.11±0.02a	11.3	0.17±0.07a	0.17±0.01a	1.5
胞间 CO_2 浓度 C_i ($\mu\text{mol CO}_2 \cdot \text{mol}^{-1}$)	88.5±5.5a	92.6±14.7a	4.6	114.7±7.0b	133.8±11.9a	16.6
蒸腾速率 T_r ($\text{mmol H}_2\text{O} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)	1.22±0.07b	1.50±0.19a	22.4	3.87±0.30b	4.47±0.26a	15.5
单叶水分利用率 Leaf water use efficiency ($\mu\text{mol} \cdot \text{mmol}^{-1}$)	1.27±0.04b	1.35±0.06a	6.5	2.40±0.20a	2.52±0.07a	5.2

表8 放线菌剂包衣处理后小区试验灌浆期玉米穗位叶诱导酶活性

Table 8 Ear leaf enzyme activities of maize plants at the filling stage in plot trials after seed coating with mixed actinomycetes ($n=9$)

指标 Index	毕公 Bigong			元树 Yuanshu		
	对照 CK	菌剂包衣 Coating	Δ CK (%)	对照 CK	菌剂包衣 Coating	Δ CK (%)
过氧化物酶 POD ($\mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$)	105.8±4.7a	111.0±5.5a	4.9	121.9±4.0b	127.3±3.3a	4.4
多酚氧化酶 PPO ($\text{U} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$)	49.0±9.1b	56.5±3.9a	15.3	58.6±6.3b	68.8±9.0a	17.4
苯丙氨酸解氨酶 PAL ($\times 10^3 \text{U} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$)	29.2±1.4b	31.0±1.0a	6.2	29.6±2.4a	30.7±1.0a	3.7

表9 放线菌剂包衣处理后小区试验玉米果穗及产量

Table 9 Ear and yield of maize plants in plot trials after seed coating with mixed actinomycetes

时期 Stage	指标 Index	毕公 Bigong			元树 Yuanshu		
		对照 CK	菌剂包衣 Coating	Δ CK (%)	对照 CK	菌剂包衣 Coating	Δ CK (%)
灌浆期穗参数 Ear parameters at the filling stage ($n=9$)	周长 Perimeter (cm)	20.1±0.4a	21.2±0.8a	5.6	17.7±0.7a	18.3±0.8a	3.6
收获期穗参数 Ear parameters at the harvest stage ($n=30$)	穗鲜质量 Fresh mass per ear (g)	371.3±29.8b	448.3±19.9a	20.8	310.5±40.0a	336.8±31.0a	8.5
	穗数 Ear number	1.11±0.3a	1.33±0.5a	20.0	1.0±0.0a	1.0±0.0a	0
收获期穗参数 Ear parameters at the harvest stage ($n=30$)	周长 Perimeter (cm)	20.7±0.2b	21.5±0.2a	3.4	21.4±0.2b	21.9±0.2a	2.3
	长度 Length (cm)	22.0±0.2b	22.8±0.1a	3.5	17.3±0.1a	17.6±0.2a	1.9
收获期小区穗参数 Ear parameters of plots at the harvest stage ($n=3$)	穗鲜质量 Fresh mass per ear (g)	461.2±9.7b	501.7±22.1a	8.8	368.1±6.8a	379.3±3.8a	3.1
	穗干质量 Dry mass per ear (g)	264.4±5.4b	290.9±15.4a	10.0	244.5±2.8b	254.1±2.9a	3.9
实收产量 Harvest yield	含水量 Water content (%)	74.9±6.7b	71.3±6.9a	-4.8	50.7±10.0a	46.6±11.8a	-8.1
	穗籽粒质量 Kernel mass per ear (g)	219.9±3.6b	242.0±9.4a	10.1	217.9±1.7b	227.8±2.8a	4.5
实收产量 Harvest yield	出籽率 Kernel rate (%)	83.2±1.3a	83.3±2.2a	0.1	89.2±0.1a	89.4±1.9a	0.2
	百粒重 100-kernel mass (g)	33.8±0.1b	35.9±0.9a	6.2	32.6±1.8a	33.8±0.7a	3.4
实收产量 Harvest yield	穗鲜质量 Fresh mass per plot (kg)	53.0±1.9b	65.9±0.6a	19.5	22.5±1.9b	26.2±0.7a	16.4
	穗数 Ear number per plot	161.3±10.8a	174.3±20.0a	8.1	83.0±2.6b	97.3±3.1a	17.3
实收产量 Harvest yield	平均穗鲜质量 Average fresh mass per ear (g)	327.8±20.4b	379.2±15.9a	15.7	273.2±29.2b	337.0±21.0a	23.4
	穗鲜质量 Fresh mass per ear ($\times 10^3 \text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)	12.6±0.4b	15.7±0.1a	24.3	16.1±1.3b	18.7±0.5a	16.4
实收产量 Harvest yield	籽粒干质量 Kernel dry mass ($\times 10^2 \text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)	7.1±0.3b	8.8±0.3a	25.3	8.2±0.6b	9.8±0.2a	19.1

菌剂处理玉米单个果穗鲜质量较对照增加 20.8% ($P<0.05$); 收获期菌剂包衣处理玉米穗周长、穗长度及穗鲜质量与对照差异均达到显著水平 ($P<0.05$), 穗干质量及穗粒质量较对照分别增加 10.0% 和 10.1%, 含水量较对照降低 3.0%, 百粒重较对照增加 6.2%, 包衣处理与对照差异均达到显著水平 ($P<0.05$), 但包衣处理与对照出籽率无显著差

异。收获期, 小区玉米穗总鲜质量及平均穗鲜质量较对照分别增加 19.5% 和 15.7% ($P<0.05$), 穗个数增加 8.1%, 但与对照差异不显著。包衣处理小区实收产量较对照显著增加, 其中, 穗鲜质量增加 24.3%, 单位面积籽粒干质量增加 25.3%。元树试验点穗鲜质量及单位面积籽粒干质量分别较对照增加 16.4% 和 19.1% ($P<0.05$)。

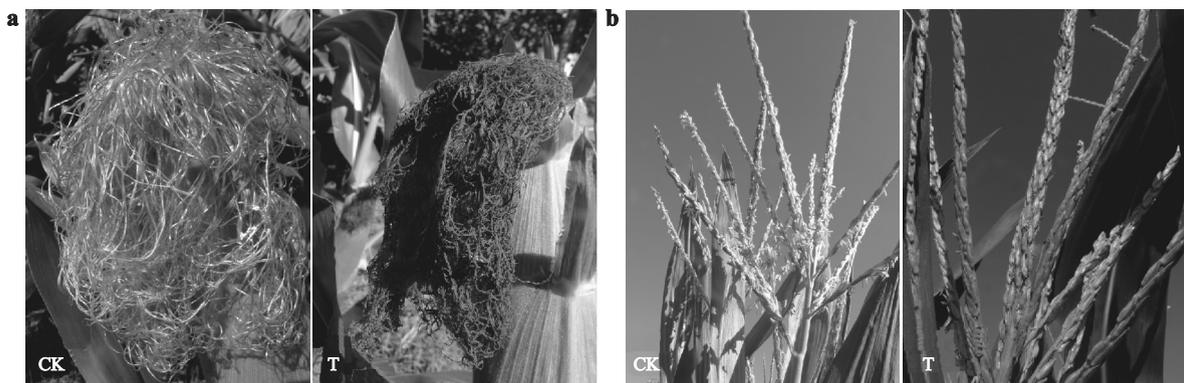


图 4 放线菌菌剂包衣处理后毕公小区灌浆期玉米开花及授粉

Fig.4 Maize flowering and pollination at the filling stage in plot trial at Bigong after seed coating with mixed actinomycetes.

a) 雌花 Female flowers; b) 雄花 Male flowers.

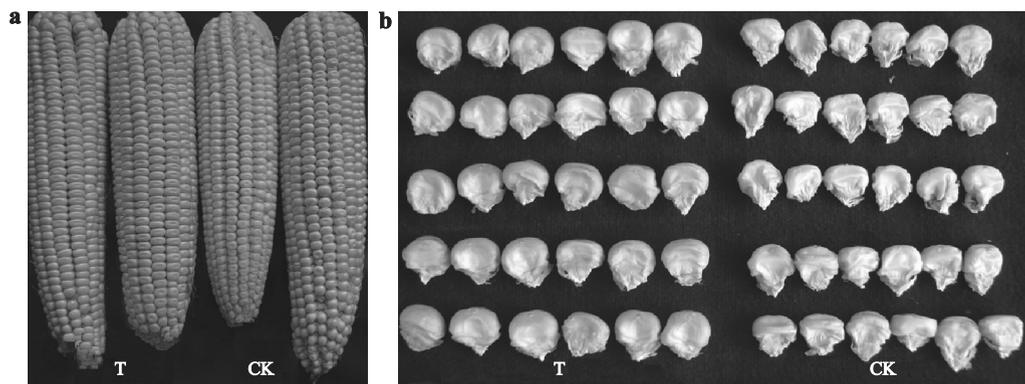


图 5 放线菌菌剂包衣处理后毕公小区灌浆期玉米穗及籽粒

Fig.5 Maize ears and kernel at the filling stage in plot trial at Bigong after seed coating with mixed actinomycetes.

a) 果穗 Ears; b) 籽粒 Kernels.

表 10 放线菌菌剂包衣处理后毕公小区灌浆期玉米籽粒质量与含水量

Table 10 Kernel mass and water content of maize plants at the filling stage in plot trial at Bigong after seed coating with mixed actinomycetes ($n=3$)

指标 Index	对照 CK	菌剂包衣 Coating	Δ CK (%)
百粒鲜质量 100-kernel fresh mass (g)	24.8 \pm 3.8b	32.8 \pm 2.5a	32.5
百粒干质量 100-kernel dry mass (g)	5.6 \pm 1.2b	10.3 \pm 0.4a	83.1
含水量 Water content (%)	347.8 \pm 29.0a	219.5 \pm 38.0b	-36.1
单穗籽质量 Kernel mass per ear (g)	22.6 \pm 6.7b	45.0 \pm 3.3a	98.7

同行不同小写字母表示差异显著 ($P<0.05$) Different lowercase letters in the same row indicated significant difference at 0.05 level. 下同 The same below.

表 11 放线菌菌剂处理后小区玉米籽粒品质

Table 11 Grain quality of maize kernels in plot trials after seed coating with mixed actinomycetes ($n=3$)

指标 Index	毕公 Bigong			元树 Yuanshu		
	对照 CK	菌剂包衣 Coating	Δ CK (%)	对照 CK	菌剂包衣 Coating	Δ CK (%)
蛋白质 Protein ($g \cdot kg^{-1}$)	98.3 \pm 7.8a	95.3 \pm 8.3a	-3.0	97.9 \pm 7.1a	98.7 \pm 5.9a	0.9
淀粉 Starch ($g \cdot kg^{-1}$)	629.3 \pm 29.0a	649.2 \pm 43.4a	3.2	703.8 \pm 23.4a	690.5 \pm 21.6a	-1.9

2.7 活菌制剂种子包衣对玉米生育进程的影响

以毕公村为例,从图 4 可以看出,毕公菌剂包衣处理玉米抽雄及雌穗授粉结束较早。

由图 5 及表 10 可以看出,供试菌剂对毕公灌浆期玉米籽粒灌浆程度有显著影响.其中,菌剂包衣处理玉米百粒鲜质量、百粒干质量及单穗籽粒质量较对照分别增加了 32.5%、83.1%和 98.7%,籽粒含水量降低 36.1%,处理与对照差异均达到显著水平 ($P<0.05$).

2.8 活菌制剂种子包衣对玉米籽粒品质的影响

由表 11 可以看出,供试菌剂包衣处理对玉米籽粒蛋白质和淀粉含量无显著影响 ($P>0.05$).

3 讨论

为提高玉米单产,研究人员已在育种及栽培条件改善方面进行了长期研究,取得了显著成效^[26].在光热资源不变、水肥条件及栽培措施优化的情况下,除良种选育外,探索新的单产提高途径具有重要意义.利用微生物技术提高玉米单产具有巨大潜力,是值得关注和探索的新途径.

已有研究表明,微生物制剂可以促进玉米植株生长,提高玉米产量^[3-5].目前利用微生物促进玉米生长的研究大多集中在细菌^[3-8]及真菌^[9-11]上,发现硅酸盐细菌^[8]、光合细菌^[4]、固氮菌^[5]及芽孢杆菌^[6-7]等细菌及菌根真菌^[11]与解磷真菌^[9-10]均能促进玉米生长,提高产量.放线菌发酵液浇灌也有类似效应^[12],但尚无利用放线菌活菌制剂促进玉米生长的报道.尽管已有不少微生物促进玉米生长的探索研究,但这些技术并未在生产上广泛应用,主要原因可能与现有微生物制剂或发酵液不能长期保存、应用不便有关.研制保存期较长、使用方法简单且有实用价值的微生物制剂是利用微生物技术提高玉米单产亟待解决的问题.

本研究表明,利用固态发酵制备的放线菌活菌菌粉对玉米种子进行包衣处理,可较大幅度提高玉米产量,其可能的增产机制如下:

1) 促进玉米根系发育.本研究发现,供试放线菌粉包衣处理促进了田间玉米上、中、下3层次生根发育,灌浆期及收获期包衣处理玉米根系生物量均高于对照,且具有吸收功能的须根量大幅度增加,对提高玉米对水肥的吸收能力有重要作用.两株供试放线菌无细胞发酵滤液浸种处理的皿内发芽试验及沙培试验结果,从另一角度再次证实了供试放线菌对玉米根系发育促进作用的存在,支持了田间试验结果.总根量增加及具有吸收功能的须根数量增加将大幅度提高玉米对土壤中养分和水分的吸收利用能力,为玉米其他器官的生长及高产奠定了基础.

2) 促进玉米光合能力增强.本研究发现,供试放线菌粉包衣处理灌浆期玉米全株茎叶鲜质量及灌浆期穗位叶干质量均显著大于对照,表明其光合器官的生物量较大,光合面积增加,且叶片绿色度增加表明光合色素含量增加,光合能力增强,灌浆期菌粉包衣处理穗位叶的净光合速率大于对照,为菌剂处理提高玉米产量提供了可靠证据.玉米叶片光合面积增大及光合能力增强是产量提高的直接原因.

3) 对玉米的穗性状有显著影响.研究发现,供试

菌剂处理对两个试验点穗中部周长、单穗干质量及单穗粒质量均有显著增加效果.百粒重均有增加,但仅毕公试验点的差异达到显著水平;对出籽率无显著影响.

4) 可促进玉米的发育进程及灌浆程度.研究发现,供试放线菌粉包衣处理使毕公玉米的抽雄及吐丝时间提前;同一时间所采玉米穗的籽粒灌浆程度不同,包衣处理的灌浆程度要远高于对照,此时包衣处理的籽粒含水量较对照低36.0%.因品种不同及播种时间较早,在元树试验点未看到此现象.菌剂的这一作用尚待后续研究进一步观察验证.

5) 可提高玉米的抗病性.研究发现,沙培玉米幼苗全叶及灌浆期玉米穗位叶的3种诱导酶活性均有不同程度提高.其中,多酚氧化酶PPO活性的显著提高对提高玉米的抗病性有重要作用.

6) 对玉米植株的水分生理有一定影响.研究发现,供试菌粉包衣处理灌浆期玉米穗位叶含水量高于对照11.6%~16.3%,表明在相同生态条件下菌剂处理玉米叶片的持水及保水能力强于对照.该现象显示菌剂处理可能会提高玉米的抗旱性.供试菌在棉花上也显示出较强的抗旱性^[27].但菌剂对玉米抗旱性的影响尚待进一步研究证实.

供试菌剂处理对玉米籽粒品质无显著影响.菌剂包衣处理与对照的玉米籽粒蛋白质及淀粉含量基本相同,表明供试菌剂在提高玉米产量的同时并未降低籽粒的营养品质.

本研究还发现,供试放线菌可产生多种次级代谢产物.其中已经确定的活性物质有4种:在D74的代谢产物中发现吡啶-3-乙酸及6-苄基嘌呤,在Act12的代谢产物中存在激动素及脱落酸,前3种激素与根系及茎叶生长促进有关,生长发育提前及抗逆性增强与脱落酸产生可能有关.其他未知成分正在鉴定中(详细结果另文发表).

供试放线菌均为链霉菌,除具有促生作用外,还具有广谱抗病作用,对多种能引起植物根系病害的病原菌有较强抗性^[18,28-29].利用供试链霉菌固态发酵制备的活菌粉在干燥条件下可长期保存,菌粉的活菌数量高,进行种子包衣工艺简单,有望作为玉米高产栽培的新生物技术在生产上推广应用.

4 结论

用供试放线菌活菌制剂进行玉米种子包衣接种可刺激玉米根系发育,增大叶片光合面积并提高净光合速率,影响玉米的发育进程及生理生化代谢,进

而较大幅度地提高玉米产量。

参考文献

- [1] National Bureau of Statistics of China (国家统计局). China Statistical Yearbook. Beijing: China Statistics Press, 2014 (in Chinese)
- [2] Liu J-B (刘京宝), Yang K-J (杨克军), Shi S-B (石书兵), *et al.* Maize cultivation in Northern China. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2012 (in Chinese)
- [3] He G-Q (贺国强), Deng Z-P (邓志平), Liu Z-Z (刘展志), *et al.* Effect of azotobacter slurry and their combination on economic characters and yield of maize. *Journal of China Agricultural University* (中国农业大学学报), 2011, **16**(4): 24-29 (in Chinese)
- [4] Shi Q-L (史清亮), Ma Y-Z (马玉珍), Zhang Z-M (张肇铭), *et al.* The fertilizer efficiency of photosynthetic bacterial manure on corn. *Journal of Shanxi Agricultural Sciences* (山西农业科学), 1993, **21**(4): 22-25 (in Chinese)
- [5] Li C-M (李春明), Zhang L (张磊), Xu Z (徐征), *et al.* Yield-improving effect of rhizosphere associate nitrogen-fixing bacteria on maize wheat and sweet potato. *Journal of Southwest Agricultural University* (Natural Science) (西南农业大学学报:自然科学版), 2003, **25**(6): 506-509 (in Chinese)
- [6] Tao G-C (陶光灿), Wang S-Y (王素英), Wang Y-P (王玉平), *et al.* Effects of mixed inoculants of *Bacillus* sp. on crop emergence and seedling growth. *Chinese Journal of Applied and Environmental Biology* (应用与环境生物学报), 2003, **9**(6): 598-602 (in Chinese)
- [7] Sun J-D (孙军德), Chi R (迟冉), Wang H (王辉), *et al.* Screening and identification of the growth promoting bacteria in maize rhizosphere. *Journal of Shenyang Agricultural University* (沈阳农业大学学报), 2013, **44**(4): 440-444 (in Chinese)
- [8] Liang S-N (梁盛年). Application study of silicate bacteria preparation in maize production. *Journal of Maize Sciences* (玉米科学), 2006, **14**(2): 75-77 (in Chinese)
- [9] Shi F-C (史发超), Yin Z-W (殷中伟), Jiang H-M (江红梅), *et al.* Screening, identification of P-dissolving fungus P83 strain and its effects on phosphate solubilization and plant growth promotion. *Acta Microbiologica Sinica* (微生物学报), 2014, **54**(11): 1333-1343 (in Chinese)
- [10] Gong M-B (龚明波), Fan B-Q (范丙全), Jin Z-G (金振国), *et al.* Screening and application of phosphate-dissolving microorganism suitable for corn production. *Acta Microbiologica Sinica* (微生物学报), 2010, **50**(12): 1619-1625 (in Chinese)
- [11] Feng G (冯固), Li X-L (李晓林), Zhang F-S (张福锁), *et al.* Effect of AM fungi on water and nutrition status of corn plants under salt stress. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2000, **11**(4): 595-598 (in Chinese)
- [12] Tan Z-L (谭之磊), Wang L-F (王来福), Xiao X-Z (肖湘政), *et al.* Optimization of fermentation conditions and its applications to maize of *Streptomyces microflavus* 005. *Soil and Fertilizer Sciences in China* (中国土壤与肥料), 2008(2): 61-64 (in Chinese)
- [13] Shi G-H (石国华), Liang Y-L (梁银丽), Yao X-W (姚晓玮), *et al.* Effects of actinomycetes on yields and qualities of tomato and pepper under different fore crops. *Bulletin of Soil and Water Conservation* (水土保持通报), 2013, **33**(1): 275-279 (in Chinese)
- [14] Mao N (毛宁), Xue Q-H (薛泉宏), Tang M (唐明), *et al.* Degradation of para-hydroxybenzoic acid by actinomycetes and its effects on strawberry growth. *Journal of Agricultural Science and Technology* (中国农业科技导报), 2010, **12**(5): 103-108 (in Chinese)
- [15] Wei X-L (魏晓丽), Chen J (陈杰), He F (何斐), *et al.* Colonization and effects of antagonistic streptomycetes on leaf photosynthetic characteristics and growth of cotton seedlings. *Journal of Northwest A&F University* (Natural Science) (西北农林科技大学学报:自然科学版), 2015, **26**(4): 1231-1236 (in Chinese)
- [16] Zhang L (张良), Liu H-B (刘好宝), Gu J-G (顾金刚), *et al.* Effects of *Trichoderma longibrachitum* and *Streptomyces jingyangensis* combination on the growth and disease resistance of tobacco seedlings. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2013, **24**(10): 2961-2969 (in Chinese)
- [17] Duan J-L (段佳丽), Xue Q-H (薛泉宏), Shu Z-M (舒志明), *et al.* Effects of combined application of actinomycetes Act12 bio-control agents and potassium humate on growth and microbial flora in rooting zone of *Salvia miltiorrhiza* Bge. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2015, **35**(6): 1-16 (in Chinese)
- [18] He F (何斐), Zhang Z-L (张忠良), Cui M (崔鸣), *et al.* Disease prevention and growth promotion of actinomycete strain D74 on *Amorphophallus konjac*. *Acta Horticulturae Sinica* (园艺学报), 2015, **42**(2): 367-376 (in Chinese)
- [19] Zhang H-Y (张鸿雁), Xue Q-H (薛泉宏), Shen G-H (申光辉), *et al.* Effects of actinomycetes agent on ginseng growth and rhizosphere soil microflora. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2013, **24**(8): 2287-2293 (in Chinese)
- [20] Duan J-L (段佳丽), Shu Z-M (舒志明), Sun Q (孙群), *et al.* Effects of antimicrobial actinomycetes on growth and medicine quality of *Salvia miltiorrhiza* Bge. *Journal of Northwest A&F University* (Natural Science) (西北农林科技大学学报:自然科学版), 2012, **40**(2): 195-200 (in Chinese)
- [21] Shen G-H (申光辉), Xue Q-H (薛泉宏), Chen Q (陈秦), *et al.* Effects of combined application of potassium silicate and *Streptomyces pactum* bio-control agents on growth, yield and quality of strawberry under continuous cropping in greenhouse. *Chinese Journal of Eco-Agriculture* (中国生态农业学报), 2012, **20**(3): 315-321 (in Chinese)
- [22] Gao J-F (高俊凤). Experimental Technique in Plant

- Physiology. Beijing: World Book Publishing Company, 2000 (in Chinese)
- [23] Zheng L-J (郑莲姬), Zhong G (钟耕), Zhang S-L (张盛林). PPO activity determination and anti-browning measure for *Amorphophallus albus*. *Journal of Southwest University (Natural Science)* (西南大学学报:自然科学版), 2007(2): 118-121 (in Chinese)
- [24] Bao S-D (鲍士旦). *Soil and Agrochemistry Analysis*. 3rd Ed. Beijing: China Agriculture Press, 2005: 285-286 (in Chinese)
- [25] Yu L-H (于鲁浩), Yang J-H (杨俊慧), Meng Q-J (孟庆军), *et al.* Fast determination of maize starch content in cornflour. *Shandong Science* (山东科学), 2012, **25**(1): 19-23 (in Chinese)
- [26] Zhang X-H (张兴华). The Maize Variety Shandan 609 Achieves a Yield Per Mu over 1,400 Kilograms for Three Consecutive Years [EB/OL]. (2014-10-15) [2016-02-08]. <http://news.nwsuaf.edu.cn/xnxw/46350.htm> (in Chinese)
- [27] Chen Q (陈秦), Xue Q-H (薛泉宏), Shen G-H (申光辉), *et al.* Effect of actinomycetes seed coating agent on cotton growth and drought resistance. *Acta Agricultrae Boreali-occidentalis Sinica* (西北农业学报), 2010, **19**(8): 84-89 (in Chinese)
- [28] Zhao J (赵娟), Du J-Z (杜军志), Xue Q-H (薛泉宏), *et al.* The growth-promoting effect and resistance induction of 3 antagonistic actinomycetes on *Cucumis melo* L. *Journal of Northwest A&F University (Natural Science)* (西北农林科技大学学报:自然科学版), 2010, **38**(2): 109-116 (in Chinese)
- [29] Sun J-Z (孙敬祖), Xue Q-H (薛泉宏), Tang M (唐明), *et al.* Study on the effect of actinomycetes on microflora of replanted strawberry's root domain and the bio-control effectiveness. *Journal of Northwest A&F University (Natural Science)* (西北农林科技大学学报:自然科学版), 2009, **37**(12): 153-158 (in Chinese)

作者简介 马军妮,女,1988年生,硕士研究生.主要从事微生物资源利用研究. E-mail: 417848224@qq.com

责任编辑 肖红
