

李全芬,张婷婷,马磊. 羽毛针禾根部内生假单胞菌 XG11 在小麦上的定殖动态及促生效应[J]. 江苏农业科学,2022,50(3):219-224.
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2022.03.036

羽毛针禾根部内生假单胞菌 XG11 在小麦上的定殖动态及促生效应

李全芬,张婷婷,马磊

(石河子大学生命科学学院,新疆石河子 832000)

摘要:为探究荒漠植物羽毛针禾根部内生菌假单胞菌 XG11 的促生作用及其定殖动态,将菌株 XG11 灌于沙土种植的小麦根部,通过四环素标记,观察定殖动态;测定接种菌株 XG11 菌悬液后的小麦株高、丙二醛含量、过氧化物酶活性等指标,评估菌株 XG11 对小麦植株生长发育的促生作用。抗性标记假单胞菌(XG11^{TC})能在根际土壤和小麦根内定殖 28 d 以上,在小麦叶内定殖 14 d 左右,菌株定殖量随时间延长而下降。不同部位的定殖量表现为根际土壤 > 根 > 叶。在沙土种植与水系培养中的定殖趋势不同,土培定殖量高于水培。小麦的发芽率、株高、过氧化物酶活性、丙二醛含量等指标,均显示菌株能促进植物生长发育。菌株 XG11 在沙土中具有较强的定殖能力和促生性能,能有效提高植物的抗逆性,可为荒漠治理提供新思路。

关键词:羽毛针禾;内生菌;定殖;沙土;促生作用

中图分类号:S182;S512.101 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-1302(2022)03-0219-06

荒漠在地球上分布广泛,荒漠化问题会影响人类的生产生活,危害地球的生态系统。羽毛针禾(*Stipagrostis pennata*)是新疆沙漠上的先锋植物,在与环境的长期斗争中,形成了抗旱、耐高温严寒、耐沙埋等沙生适应特性,其根鞘内的微生物及分泌

物,能与根毛共同黏结沙粒,保水固沙。笔者所在课题组前期在羽毛针禾根部分离获得了 1 株具有良好特性的内生假单胞菌 XG11。研究羽毛针禾根部微生物的作用机制,对防治沙漠化和保护生物多样性等方面有着重要意义。

假单胞菌(*Pseudomonas*)分布广泛,在土壤细菌群落中占比可高达 34%^[1],定殖能力强,对多种植物病原菌有较明显的拮抗作用^[2],能够有效促进植物生长和增产,是一类具有较大应用价值的植物根际促生菌,常用于植物来提高其抗逆性及增产^[3-4]。其中,荧光假单胞菌应用最广泛。荧光假单胞菌不仅能抑制多种土传病害病原真菌、卵菌^[5]、霉菌^[6]和线虫^[7],甚至通过分泌碱性磷酸酶在内的抗病毒

收稿日期:2021-06-19

基金项目:国家自然科学基金(编号:31760302、31560310、32060145、32060300)。

作者简介:李全芬(1995—),女,山西省应县人,硕士,主要从事微生物方面的研究。E-mail:1838569444@qq.com。

通信作者:张婷婷,博士,副教授,主要从事遗传学方面的研究, E-mail:zting@shzu.edu.cn;马磊,博士,教授,主要从事生物信息与遗传资源方面的研究,E-mail:mlei@shzu.edu.cn。

[J]. 现代农业科技,2011(20):360-362.

[5]Williamson G,Richardson D. Bioassay for allelopathic potencial and its modes of action on banyardgrass (*Echinochloa crusgalli*) [J]. Allelopathy Journal,2000,7(2):215-224.

[6]王亚男,黄鹤平,邹志艳,等. 麻风树叶水浸提液对大豆根细胞的化感效应[J]. 四川师范大学学报(自然科学版),2014,37(6):899-904.

[7]曹崇岚,王亚男,李洁,等. 麻风树叶片化感作用对入侵植物紫茎泽兰幼苗生长的影响[J]. 西南农业学报,2012,25(6):2300-2304.

[8]韩利红,冯玉龙. 发育时期对紫茎泽兰化感作用的影响[J]. 生态学报,2007,27(3):1185-1191.

[9]邓鸢远,王亚男,罗通,等. 麻风树叶水浸提液对蚕豆根尖细胞的遗传毒性[J]. 西南农业学报,2012,25(6):2396-2398.

[10]林嵩,翁伯琦. 外来植物化感作用研究综述[J]. 福建农业学报,2005,20(3):202-210.

[11]李文瑾,常永义,曹刚,等. ‘乍娜’葡萄试管苗水浸液对油菜的化感作用[J]. 甘肃农业大学学报,2010,45(4):63-68,73.

[12]梁晓华,冯建孟,李国树,等. 紫茎泽兰不同器官水浸液对小白菜种子萌发和幼苗生长的影响[J]. 甘肃农业大学学报,2011,46(3):56-58.

[13]程宏波,李新荣,郭凤霞. 唐古特白刺种子浸提液对小麦种子发芽及生长的抑制效应[J]. 甘肃农业大学学报,2010,45(1):58-61.

蛋白抑制烟草花叶病毒 (TMV) 侵染^[8]; 还能改善植物营养促进生长, 提高品质, 增加产量^[5-9]。

植物根际促生菌的作用机制主要包括生物固氮、磷溶作用、产生铁载体 (嗜铁素)、产生促生物质、诱导抗性系统等^[10], 而且功能菌株在发挥作用机制时与其属性、植物属性、环境等情况相关。假单胞菌的诱导抗病性主要表现在提高寄主植株防御酶活性和影响寄主的次生代谢通路^[2]。逆境胁迫会使植物产生过量的活性氧自由基, 同时植物会启动自身的保护酶系统来调节抗氧化酶、抗氧化剂活性等生理生化过程, 清除活性氧自由基, 减轻或消除其毒害。镉胁迫时, 接种铜绿假单胞菌, 增强了水稻抗氧化酶活性, 提高了类黄酮和总酚等抗氧化物质含量, 从而缓解逆境胁迫, 促进水稻生长^[11]。荧光假单胞菌 FP7 菌液也能提高根茎组织中过氧化物酶、过氧化氢酶等防御酶的活性, 增强根茎抗病性, 具有促生和增产效果^[12]。

目前, 利用功能微生物促生和防治的研究较多, 而促生和防治效果与其在根际的定殖能力有关, 菌株发挥作用的前提和关键就是其在作物根际建立起一定的种群密度^[13-14]。研究表明, 功能菌株对 21 种抗生素的敏感值与其在土壤中的定殖能力具有相关性^[15], 这表明采用抗生素法能够定性地探究菌株的定殖动态。

本研究采用抗生素标记法标记荒漠植物羽毛针禾根部内生假单胞菌 XG11, 通过盆栽试验检测该菌株在小麦植株根部、叶片及根际土壤中的定殖动态; 比较不同培养方式下的定殖规律, 同时通过测定株高、丙二醛含量、过氧化物酶活性等指标, 鉴定该菌株对小麦植株生长发育的促生作用, 旨在评价该菌株的应用潜力, 为菌株有效提高植物的抗逆性提供理论依据, 为解决荒漠化问题, 改善生态环境提供新思路。

1 材料与方法

1.1 供试材料

试验时间及地点: 本试验于 2020 年在新疆石河子大学生命科学学院进行。

供试菌株: 羽毛针禾根部内生假单胞菌 XG11^[16], 该菌株为笔者所在课题组前期研究分离获得。

受试植株: 津农 6 号小麦, 由石河子大学农学院惠赠。

供试培养基: 牛肉膏蛋白胨培养基, LB 培养基, 含四环素、链霉素、罗红霉素等抗生素的 LB 培养基。

1.2 试验方法

1.2.1 菌株的天然抗药性检测 分别配制含浓度为 20、50、100、200、300 $\mu\text{g/mL}$ 的四环素、链霉素、罗红霉素的抗性 LB 培养基平板, 对供试菌株 XG11 进行天然抗药性检测。取 100 μL 菌悬液 (1 环原始菌株溶于 2 mL 无菌水) 均匀涂布在抗性平板上, 以无抗生素的 LB 培养基平板为对照, 重复 3 次, 于 28 $^{\circ}\text{C}$ 培养 24 h 后观察结果, 以确定抗生素的标记种类及浓度。

1.2.2 抗生素标记菌株的筛选及稳定性分析 通过对菌株的抗药性检测, 筛选出四环素作为抗药性突变体的标记抗生素。逐步诱导菌株能在浓度为 300 $\mu\text{g/mL}$ 的四环素抗性平板上稳定生长。将抗性菌株连续纯化 8 次后, 将其在无抗生素 LB 培养基平板上连续接种 19 次, 再接入 300 $\mu\text{g/mL}$ 四环素抗性平板, 若菌株能够生长, 说明获得的抗生素标记菌株具有良好的抗药稳定性。把稳定性菌株纯化, 保存到 4 $^{\circ}\text{C}$, 备用。

挑取原始菌株和单抗菌株单菌落, 分别接入装有 5 mL LB 培养基的试管中 (编号分别为 0、4、8、12、16、20、24 h), 于 28 $^{\circ}\text{C}$ 、180 r/min 振荡培养, 以未接菌的 LB 培养液为空白对照。按时间取出对应的试管, 4 $^{\circ}\text{C}$ 冷藏保存, 直到取完 24 h 的样品后, 在 600 nm 波长处测定吸光度 ($D_{600\text{nm}}$), 以时间为横轴、 $D_{600\text{nm}}$ 为纵轴绘制生长曲线, 比较原始菌株和抗性菌株的生长速率。

1.2.3 抗性菌株在小麦根际的定殖动态 将标记菌株接种至 LB 液体培养基中培养 3 d, 10 000 r/min 离心 10 min, 收集沉淀, 配制成 $D_{600\text{nm}}$ 为 1.0 的菌悬液, 4 $^{\circ}\text{C}$ 低温保存备用。

挑选籽粒饱满、健康、大小均匀、无霉变的小麦种子, 用无菌水反复清洗 3 遍, 置于无菌的 9 cm 培养皿中, 加入 15 mL 无菌水, 于 30 $^{\circ}\text{C}$ 黑暗培养 16 h, 吸取代谢物后, CK 加无菌水 4 mL, 其他的处理组加菌悬液 4 mL, 继续黑暗培养 8 h, 待其露白。

培养皿试验: 在铺有滤纸的 11 cm 培养皿中, 加 3 mL 无菌水湿润整张滤纸, 挑选 10 粒露白发芽的小麦种子, 种植方向、间隔保持一致, 重复 3 次。置于人工气候培养箱中, 在白天 28 $^{\circ}\text{C}$ 14 h、晚上 22 $^{\circ}\text{C}$ 10 h 的条件下培养。种下第 1 天, CK 组、菌悬液组

都加 6 mL 无菌水,直到小麦全部发芽,CK 组加 6 mL 无菌水,菌悬液组加 6 mL 菌悬液,此后再不加菌悬液,根据实际情况,适当增加浇水量。于接种第 7 天采集根、叶子,用清水清洗,吸水纸吸干后,称取根与叶组织 0.5 g,在无菌环境下,用 75% 无水乙醇浸泡 30 s,用无菌水清洗 3 次后,置于无菌研钵中,加入 9 mL 无菌水研磨充分,装入 10 mL 无菌离心管振荡 30 min,充分混匀后,静置 10 min 后用无菌水进行梯度稀释^[17],选择 10^{-3} 、 10^{-4} 、 10^{-5} 的土样 200 μL 均匀涂布在含 300 $\mu\text{g/mL}$ 四环素的 LB 培养基平板上,37 $^{\circ}\text{C}$ 培养 48 h,记录每皿菌落数,并计算每克鲜组织中的菌落数(CFU/g)。

盆栽试验:在长 4.8 cm、宽 4.8 cm、高 5.0 cm 的无菌种植盘中装入灭过 2 次菌的沙土,种植 10 粒/孔露白发芽的小麦种子,种植方向、深度保持一致,每个处理重复 5 次。培养条件同培养皿试验。于接种 7、14、21、28 d 后采集土壤(1.0 g)、根(0.5 g)与叶(0.5 g),测定菌株的定殖含量,方法同培养皿试验的菌株定殖测定。

1.2.4 菌株 XG11 对小麦的促生作用 参照“1.2.3”节中的方法制备 $D_{600\text{ nm}}=0.3$ 的菌悬液和萌发小麦种子,并进行小麦盆栽试验。每隔 2 d 浇灌菌悬液 5 mL,根据实际情况,适当增加浇水量。在幼苗生长 7、14、21、28 d 后采样,测定株高、丙二醛含量^[18]、过氧化物酶(peroxidase, POD)活性^[19],并记录发芽率。

1.3 数据分析

利用 Excel 2019、GraphPad Prism 8.02 软件进行数据统计分析并作图,采用单因素方差分析(one-way ANOVA)和 Duncun’s 法进行方差分析和多重比较($P<0.05$)。图中数据形式为平均值 \pm 标准误差。

2 结果与分析

2.1 菌株天然抗药性筛选结果

由表 1 可知,羽毛针禾根部内生菌 XG11 对四环素、链霉素、罗红霉素均具有天然抗性。在一定程度上,四环素具有较好的抗药可控性。接种 24 h,菌株可在含低浓度四环素的 LB 培养基平板上生长,而在较高浓度(200、300 $\mu\text{g/mL}$)下不生长。因此,本研究选用四环素对菌株进行标记。

2.2 标记菌株的稳定性检测

进一步筛选出能耐 300 $\mu\text{g/mL}$ 四环素的标记

表 1 菌株 XG11 的天然抗药性测定结果

抗生素	菌株 XG11 在不同抗生素浓度下的抗性				
	20 $\mu\text{g/mL}$	50 $\mu\text{g/mL}$	100 $\mu\text{g/mL}$	200 $\mu\text{g/mL}$	300 $\mu\text{g/mL}$
四环素	+	+	+	-	-
链霉素	+	+	+	+	+
罗红霉素	+	+	+	+	+

注:“+”表示生长良好,“-”表示不能生长。

菌株。由图 1 可知,经 19 次传代培养后,其仍能在含抗生素的平板上稳定生长,而且标记菌株(XG11^{TC})和原始菌株(XG11)的生长曲线趋势一致。标记菌株生长曲线略低于原始菌株,这可能是在诱变菌株时,有一定的损耗,但是不影响后续试验的定殖检测,说明标记菌株具有良好的抗药稳定性。

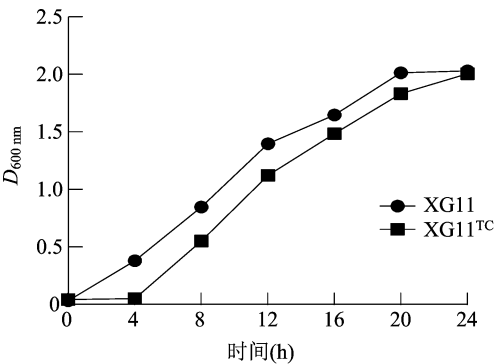
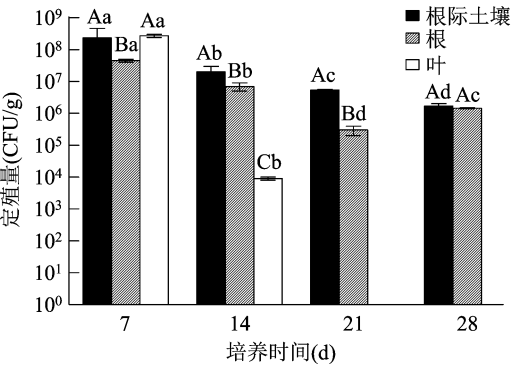


图 1 菌株 XG11 的生长曲线

2.3 标记菌株的定殖动态

利用含 300 $\mu\text{g/mL}$ 四环素的 LB 培养基平板,检测菌株 XG11^{TC}在小麦根际土壤、根与叶中的定殖数量及其动态变化规律。由图 2 可知,随着培养时间的延长,菌株在根际土壤和叶中的定殖量均呈现下降的趋势;菌株在小麦根系中的定殖量呈现先降低后升高的趋势,但是低于起初(7 d 后)的定殖量。

在不同部位定殖具有一定差异。在 7 d 后,叶中



小写字母代表同一部位不同培养时间之间差异显著,大写字母表示同一培养时间下不同部位之间差异显著($P<0.05$)。下图同图2 菌株 XG11^{TC} 的定殖动态

的定殖量略高于根际土壤和根 (2.70×10^8 CFU/g > 2.33×10^8 CFU/g > 4.50×10^7 CFU/g); 其他时间, 菌株在不同部位中的定殖量呈现出根际土壤 > 根 > 叶。菌株在土壤和根部能够定殖 28 d, 此时含量分别为 1.70×10^6 、 1.45×10^6 CFU/g, 而在叶片中只能定殖 14 d。

2.4 2 种培养方式下的菌株在小麦根与叶中的定殖量差异

采用土培 (盆栽试验) 和水培 (培养皿试验) 2 种方式培养小麦。在小麦根部与叶片中的 XG11^{TC} 定殖量及其定殖动态不同 (图 3)。在相同培养时间 (7 d) 土培方式下根与叶中的 XG11^{TC} 定殖量远高于水培方式的定殖量。水培时, 菌株 XG11^{TC} 在根中的

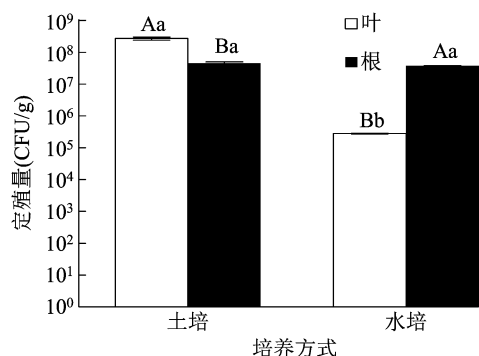


图3 不同培养方式下菌株定殖动态差异

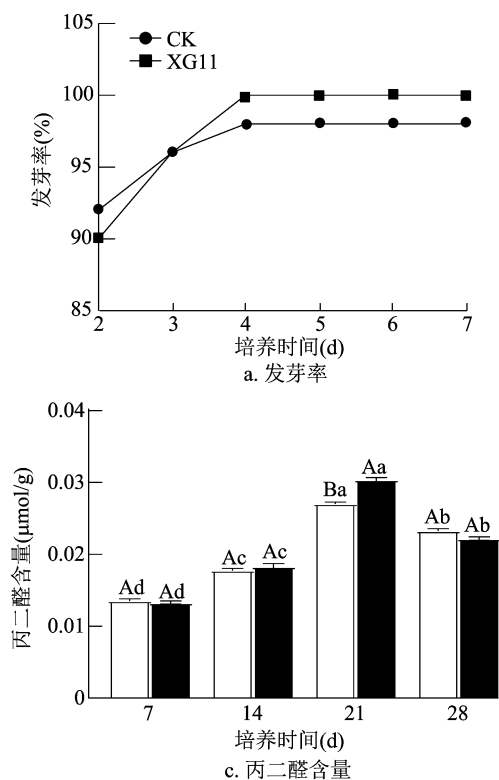


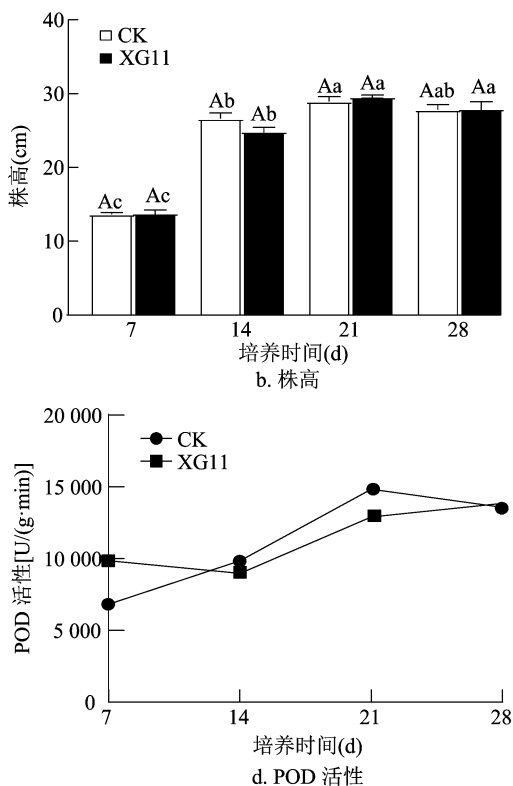
图4 菌株 XG11 对小麦幼苗的促生作用测定

定殖量大于叶中; 而土培时, 定殖情况则相反, 叶中的定殖量略高于根中。

2.5 菌株对小麦幼苗生长的影响

由图 4 可知, 接种假单胞菌 XG11 能够促进小麦发芽、增加株高、提高叶片 POD 活性, 降低丙二醛含量, 对小麦幼苗生长具有促生作用。处理 3 d 后, 菌株 XG11 处理组和对照组的小麦发芽率一致, 此后, 随着培养时间延长, 菌株 XG11 处理的小麦发芽率均高于对照组, 且菌株 XG11 处理组的小麦发芽率接近 100%。除在 14 d 后外, 菌株 XG11 处理的小麦株高均高于对照组。28 d 后小麦的株高低于 21 d 后, 可能是由于干旱胁迫加剧 (沙土中利于植物生长的营养物质耗尽), 小麦植株开始死亡。

随着培养时间延长, 小麦叶片中丙二醛含量呈现先升高后降低的趋势。接种菌株 XG11, 在 7、28 d 后, 小麦叶片的丙二醛含量低于对照组, 28 d 后的丙二醛含量高于 7 d 后; 14、21 d 后与 7、28 d 后小麦叶片的丙二醛含量变化规律相反, 菌株 XG11 处理组丙二醛含量高于对照组; 21 d 后的丙二醛含量最高, 为 $0.0304 \mu\text{mol/g}$, 比 CK 高 12%; 其次是 28 d 后的丙二醛含量, 为 $0.0222 \mu\text{mol/g}$, 比 CK 低 5%; 7 d 后的丙二醛含量最低, 为 $0.0133 \mu\text{mol/g}$, 比 CK 低 2% (图 4)。



随着培养时间延长,接种菌株 XG11 处理组,小麦叶片 POD 活性呈现先降低后升高的趋势。在 7、28 d 后,小麦叶片 POD 活性高于对照组,28 d 后的 POD 活性高于 7 d 后;14、21 d 后与 7、28 d 后小麦叶片 POD 活性变化规律相反,POD 活性低于对照组;28 d 后的 POD 活性最高,为 $13\ 860\ \text{U}/(\text{g} \cdot \text{min})$,比 CK 高 2%;14 d 后的 POD 活性最低,为 $8\ 980\ \text{U}/(\text{g} \cdot \text{min})$,比 CK 低 9%;7 d 后的 POD 活性为 $9\ 860\ \text{U}/(\text{g} \cdot \text{min})$,比 CK 高 45% (图 4)。

3 讨论

植物根际促生菌在实际应用时,效果不稳定。造成不稳定的因素主要是植物根际促生菌的定殖能力存在差别^[20]。本试验结果表明,菌株 XG11^{TC}在不同采集部位的定殖时间和定殖量及变化规律不同,在根际土壤和植株根内的定殖时间最长,均在 28 d 以上,而在叶片中只能够定殖 14 d 左右,说明该菌株能在小麦植株体内和土壤中长期有效定殖。定殖量表现为根际土壤 > 根 > 叶,差异显著,与姚锦爱等的研究结果^[17]一致。菌株 XG11^{TC}接种至小麦 21 d 内,在根际土壤、小麦根与叶中的定殖规律一样,均呈现下降趋势,这表明菌株的活性在降低,从而导致对植株的作用减弱。有研究表明,枯草芽孢杆菌在胡椒叶片上能够定殖长达 21 d,且定殖量呈现下降趋势^[21]。荧光假单胞菌能在杨树根际和菌根际长期稳定定殖,定殖规律一样呈现下降态^[22]。

采用不同的培养方式,菌株 XG11^{TC}在小麦根与叶片中的定殖量差异显著,定殖量表现为土培 > 水培,与刘东平等的研究结果^[23]相似。有研究表明,在进行菌株接种时采用灌根方式优于涂茎方式^[17]。因此,本研究发现在利用功能菌株 XG11 提高植物的抗逆性、抗病能力的最好方式是土壤培养植物,将菌株菌悬液浇灌到植物根围。

种子发芽率是测试种子萌发能力强弱的一个指标,为选择优势种子提供理论基础,甚至在逆境中,种子萌发率的高低与植株后来的生长状况也密切相关^[24]。菌株 XG11 处理下,小麦发芽率趋近于 100%,高于对照组,这表明菌株能提高小麦发芽率,和汤丽斯等的研究结果^[25]一致。

植物株高是描述植物形态性状的指标,它能够直观地表现出植物的生长状况,并且直接影响着植物的抗逆性和抗倒伏性,甚至严重影响着植物高

产、稳产等状况,也是一个衡量植物长势、健康程度的重要指标^[26-27]。在 7、21、28 d 后,接种菌株 XG11 的小麦株高均高于对照组,表明菌株 XG11 利于植物生长。随着培养时间延长,株高降低,可能是由于干旱胁迫加剧以及土壤养分减少所致,应须额外补充养分。

丙二醛是植物细胞膜在逆境胁迫下发生膜脂过氧化的产物,其可以交联脂类、核酸、蛋白质、糖类等大分子结构物质,从而损害细胞质膜的结构和功能,能够指示植物受到逆境胁迫的伤害程度^[28-30]。丙二醛含量越高,受到迫害越大,抗逆性越低。本研究结果表明,随着培养时间延长,小麦叶片的丙二醛含量呈现先升高后降低的趋势,28 d 后的丙二醛含量低于 21 d 后,这表明随着培养时间延长,植物受到的干旱胁迫加剧。施加菌株后,在 7、28 d 后,叶片丙二醛含量下降,说明菌株通过降低丙二醛的含量,从而缓解胁迫。

丙二醛含量与抗氧化酶活性呈现负相关,能反映小麦的品种特性^[31]。本研究发现接种菌株 XG11 后,小麦叶片 POD 活性与丙二醛含量变化规律呈现相反的趋势,即小麦叶片 POD 活性呈现先降低后升高的趋势,这可能是由于干旱胁迫加剧,植物体内产生了过量的活性氧自由基,需要更多的 POD,从而抵抗逆境对植物的伤害^[32-33]。有研究表明,低浓度的硒可提高 POD 活性,增加青花菜幼苗的抗氧化能力,保护植物细胞膜稳定性,从而提高植物的抗逆性^[34]。本试验中在根部接入菌株 XG11 使得小麦的 POD 活性增高,提高了植物的耐旱性与之相一致。内生细菌与氧化应激酶有一定的联系,在盐浓度下番茄的 POD、过氧化氢酶(CAT)、多酚氧化酶(PPO)的活性降低,而经过内生细菌处理后,POD 等这些酶活性提升 3 倍,并且内生细菌可以像植物生长调节剂一样作用于植物,从而起到保护植物的作用^[35]。

综上,接种菌株 XG11,小麦的发芽率、株高、POD 活性均高于对照组(28 d 后),丙二醛含量低于对照组(28 d 后),这可能都是由于菌株 XG11 在植物体内定殖成功,从而提高了植物的抗逆性、促进植物生长,高毓晗等的研究结果^[36]有力地支撑了此结论。

4 结论

荒漠植物羽毛针禾根部内生菌假单胞菌 XG11 能在小麦根部土壤及幼苗组织中定殖,在土壤和根内定殖时间长达 28 d 以上,且定殖量表现为根际土

壤>根>叶,土壤盆栽>培养皿水培;能提高小麦发芽率、株高和 POD 活性,降低丙二醛含量,从而提高小麦的抗旱性,促进小麦幼苗的生长发育,是一株有潜力的促生菌。

参考文献:

- [1] Aislabie J, Deslippe J R. Soil microbes and their contribution to soil services [C]//Dymond J R. Ecosystem services in New Zealand – conditions and trends. New Zealand: Manaaki Whenua Press, Lincoln, 2013: 143–161.
- [2] 沙月霞, 张 昂, 伍顺华, 等. 假单胞菌 S149 对水稻防御酶的诱导及定殖能力[J]. 中国植保导刊, 2020, 40(7): 10–16.
- [3] Meena V S, Mishra P K, Bisht J K, et al. Agriculturally important microbes for sustainable agriculture [M]. Singapore: Springer, 2017.
- [4] Tewari S, Arora N K. Fluorescent *Pseudomonas* sp. PF17 as an efficient plant growth regulator and biocontrol agent for sunflower crop under saline conditions [J]. Symbiosis, 2016, 68(1/2/3): 99–108.
- [5] 闫小雪, 张力群, 杨之为, 等. 调控基因 *gacA* 在荧光假单胞菌 2P24 防治土传病害中的作用[J]. 植物病理学报, 2004, 34(3): 272–279.
- [6] 董国菊, 马冠华, 肖崇刚. 荧光假单胞菌拮抗菌株对烟草疫霉的抑菌机制及控病效果[J]. 植物保护学报, 2012, 39(2): 115–120.
- [7] 杨亚茹, 茆少星, 闫淑珍, 等. 内生菌荧光假单胞菌 DLJ1 和蜡状芽孢杆菌 SZ5 对南方根结线虫胁迫下辣椒植株抗性与产量品质的影响[J]. 植物保护, 2020, 46(6): 96–102, 116.
- [8] 曲萧玲, 张俊英, 刘笑玮, 等. 荧光假单胞菌 CZ 菌株定殖及抗病毒活性研究[J]. 植物保护, 2020, 46(6): 14–21.
- [9] 张 亮, 盛 浩, 袁 红, 等. 荧光假单胞菌 PEF-5#18 防控番茄枯萎病的定殖机理[J]. 中国生物防治学报, 2017, 33(5): 658–666.
- [10] 袁仁文, 刘 琳, 张 蕊, 等. 植物根际分泌物与土壤微生物互作关系的机制研究进展[J]. 中国农学通报, 2020, 36(2): 26–35.
- [11] 汪敦飞, 郑新宇, 肖清铁, 等. 铜绿假单胞菌对镉胁迫苗期水稻根系活力及叶片生理特性的影响[J]. 应用生态学报, 2019, 30(8): 2767–2774.
- [12] Prabhukarthikeyan S R, Keerthana U, Raguchander T. Antibiotic – producing *Pseudomonas fluorescens* mediates rhizome rot disease resistance and promotes plant growth in turmeric plants [J]. Microbiological Research, 2018, 210: 65–73.
- [13] Lugtenberg B, Kamilova F. Plant – growth – promoting rhizobacteria [J]. Annual Review of Microbiology, 2009, 63(3): 541–556.
- [14] 杨 威, 刘苏闵, 郭坚华. 细菌定殖能力与其生物防治功能相关性研究进展[J]. 中国生物防治, 2010, 26(增刊): 90–94.
- [15] 吴 翔, 唐 亚, 甘炳成, 等. 一种初步判断细菌类微生物在土壤中东定殖能力的方法[J]. 中国土壤与肥料, 2020(3): 204–209.
- [16] 李旭东, 马 磊, 张婷婷. 羽毛针禾内生细菌分离鉴定及系统发育树分析[J]. 北方园艺, 2020(3): 77–84.
- [17] 姚锦爱, 黄 鹏, 侯翔宇, 等. 海洋细菌解淀粉芽孢杆菌 BA-3

- 在兰花的定殖及对根际微生态的影响[J]. 中国生物防治学报, 2019, 35(6): 915–921.
- [18] 李合生. 植物生理生化实验原理和技术 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2000: 261–263.
 - [19] Zhang Q M, Zhu L S, Wang J, et al. Oxidative stress and lipid peroxidation in the earthworm *Eisenia fetida* induced by low doses of fomesafen [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2013, 20(1): 201–208.
 - [20] 孙 真, 郑 亮, 邱浩斌. 植物根际促生细菌定殖研究进展 [J]. 生物技术通报, 2017, 33(2): 8–15.
 - [21] 高圣风, 刘爱勤, 桑利伟, 等. 枯草芽孢杆菌 VD18R19 在胡椒上的定殖动态及促生作用和对胡椒瘟病的防治效果[J]. 中国生物防治学报, 2017, 33(5): 650–657.
 - [22] 刘 辉, 吴小芹, 叶建仁, 等. 荧光假单胞菌的溶磷机制及其在杨树菌根际的定殖动态[J]. 林业科学, 2021, 57(3): 90–97.
 - [23] 刘东平, 张忠良, 李 嫚, 等. 两株生防细菌对苦瓜枯萎病的防治效果及其定殖密度的研究[J]. 北方园艺, 2019(3): 69–73.
 - [24] 孟祥浩, 林 琪, 张玉梅, 等. 盐胁迫对小麦萌发的影响及耐盐指标的筛选[J]. 华北农学报, 2014, 29(4): 175–180.
 - [25] 汤丽斯, 孙宗玖, 武文超, 等. 生物菌剂浸种对干旱胁迫下伊犁绢蒿种子萌发的影响[J]. 中国草地学报, 2021, 43(2): 17–27.
 - [26] Wang J X, Sun J A, Li C X, et al. Genetic dissection of the developmental behavior of plant height in rice under different water supply conditions [J]. Journal of Integrative Agriculture, 2016, 15(12): 2688–2702.
 - [27] 张向前, 张贺飞, 钱益亮. 不同秸秆覆盖模式下小麦植株性状、光合及产量的差异[J]. 麦类作物学报, 2016, 36(1): 120–127.
 - [28] 李永霞, 陈向珍, 杨小林. 晾晒对拉萨河谷 5 种乡土树种叶片脯氨酸和丙二醛含量的影响[J]. 贵州农业科学, 2017, 45(9): 17–20.
 - [29] 刘易见, 颜 韦, 刘春辰, 等. 萘和镉对米氏凯伦藻的生长及叶绿素 a、丙二醛含量的影响[J]. 生态科学, 2016, 35(4): 47–51.
 - [30] 张 凯, 马兰英, 马丽媛. 不同温度条件下模拟干旱胁迫对小麦种子萌发的影响[J]. 江苏农业科学, 2020, 48(20): 79–82.
 - [31] 韩丽萍, 韩晓凡, 朱玉鹏, 等. 干旱对不同类型冬小麦根系可溶性物质、相关酶活性及地上部形态的影响[J]. 中国农学通报, 2020, 36(31): 1–6.
 - [32] 赵龙飞, 徐亚军, 赖心河, 等. 内生细菌 252 和 254 对盐胁迫下小麦幼苗过氧化物酶和过氧化氢酶活性的影响[J]. 应用生态学报, 2017, 28(9): 2984–2992.
 - [33] Zan Y L, Wei S Z. Effect of NaCl stress on seeding growth of sunflower [J]. Plant Diseases and Pests, 2016, 7(1): 32–35.
 - [34] 成 凯, 何 茂, 黄 志, 等. 硒、硫互作对青花菜幼苗渗透调节物质和抗氧化酶的影响[J]. 西北农业学报, 2018, 27(1): 98–107.
 - [35] Halo B A, Khan A L, Waqas M, et al. Endophytic bacteria (*Sphingomonas* sp. LK11) and gibberellin can improve *Solanum lycopersicum* growth and oxidative stress under salinity [J]. Journal of Plant Interactions, 2015, 10(1): 117–125.
 - [36] 高毓晗, 李世东, 郭荣君. *sfp* 基因转化增强了 *Bacillus subtilis* 168 的定殖能力和对黄瓜茎内枯萎病菌的抑制作用[J]. 中国生物防治学报, 2016, 32(1): 76–85.