

DOI: 10.13758/j.cnki.tr.2022.05.014

陈杰, 乔美霞, 郭一晓, 等. 外源放线菌对谷子生长和成熟期根际可培养微生物的影响. 土壤, 2022, 54(5): 978–985.

外源放线菌对谷子生长和成熟期根际可培养微生物的影响^①

陈杰^{1,2}, 乔美霞¹, 郭一晓¹, 杨珍平^{1,2}, 高志强^{1,2}, 刘玉涛³, 林文^{1,2*}

(1 山西农业大学农学院, 山西太谷 030801; 2 黄土高原特色作物优质高效生产省部共建协同创新中心, 山西太谷 030801; 3 陕西博秦生物工程有限公司, 陕西咸阳 713899)

摘要: 为研究外源放线菌对谷子生长及成熟期根际可培养微生物的影响, 采用盆栽和田间试验分析施加放线菌微白黄链霉菌 (*Streptomyces albidoflavus*, T4)和密旋链霉菌(*Streptomyces pactum*, Act12)后成熟期谷子生物量、产量形成指标及根际可培养微生物结构组成的差异, 并对谷子生长与根际微生物之间相互关系进行分析。结果表明: ①T4 促进了盆栽和田间试验中谷子生物量的增加, T4 和 Act12 使田间试验中单株谷子籽粒干物质质量和产量增加了 13.7%~22.6%。②对于根际微生物, T4 处理使培养箱盆栽试验中谷子根际可培养细菌(B)、真菌(F)、放线菌(A)及微生物总数量增加了 29.5%~56.9%; T4 和 Act12 使室外盆栽试验中根际真菌数量分别提高了 73.3% 和 222.0%, A/F 和 B/F 降低了 34.7%~72.4%。③相关分析表明, 成熟期谷子茎叶干物质质量、单株谷子籽粒干物质质量与根际细菌、真菌、放线菌和总微生物数量显著正相关($r=0.748\sim0.971$, $P<0.01$), 而与 A/F 和 B/F 显著负相关($r=-0.764\sim-0.906$, $P<0.01$)。综上, 供试放线菌通过调整根际可培养微生物群落结构促进了谷子生长, 增加了谷子产量。因此, 通过外源施加放线菌优化根际可培养微生物群落结构是谷子促生增产的可行途径之一。

关键词: 谷子; 放线菌; 土壤微生物; 根际; 促生

中图分类号: S515 文献标志码: A

Effects of Exogenous Actinobacteria on Growth of Foxtail Millet (*Setaria italica*) and Culturable Microorganisms in Rhizosphere Soil at Mature Stage

CHEN Jie^{1,2}, QIAO Meixia¹, GUO Yixiao¹, YANG Zhenping^{1,2}, GAO Zhiqiang^{1,2}, LIU Yutao³, LIN Wen^{1,2*}

(1 College of Agriculture, Shanxi Agricultural University, Taigu, Shanxi 030801, China; 2 Ministerial and Provincial Co-Innovation Centre for Endemic Crops Production with High-quality and Efficiency in Loess Plateau, Taigu, Shanxi 030801, China; 3 Shaanxi Boqin Biological Engineering limited Company, Xianyang, Shaanxi 713899, China)

Abstract: In order to understand the effects of the application of extra actinobacteria on the growth of foxtail millet and culturable microorganisms in rhizosphere soil at the mature stage, pot and field experiments were conducted to study the differences in the biomass and yield formation of foxtail millet and the culturable microorganism structure in rhizosphere soil at the mature stage after *Streptomyces albidoflavus* (T4) and *Streptomyces pactum* (Act12) application, and the relationship between the growth of foxtail millet and soil microorganisms were also investigated. Results show that the biomass of foxtail millet is increased under T4 both in the pot and field trials, while the grain weight of single plant and the yield of foxtail millet are increased by 13.7%–22.6% under T4 and Act12 in the field trial than that of the control. The population of bacteria (B), fungi (F), actinobacteria (A), and total of microorganisms are increased by 29.5%–56.9% under T4 in the light incubator pot trial. The population of fungi is increased by 73.3% and 222.0% respectively under T4 and Act12 in outdoor pot trial compared with the control, while the population rates A/F and B/F are reduced by 34.7%–72.4%. The stem and leaf dry weights and the grain weight of single foxtail millet plant at the mature stage are positively correlated with the population of B, F, A and the total population of the culturable microorganisms in the rhizosphere soils ($r=0.748\sim0.971$, $P<0.01$), whereas negatively correlated with A/F and B/F ($r=-0.764\sim-0.906$, $P<0.01$). In conclusion, the tested actinobacteria can promote the growth and yield of foxtail millet through

①基金项目: 黄土高原特色作物优质高效生产省部共建协同创新中心自主研发项目(SBGJXTZX-36)、山西省高等学校科技创新项目(2020L0159)和山西农业大学青年科技创新项目(2019002)资助。

* 通讯作者(slwrdey@163.com)

作者简介: 陈杰(1986—), 女, 河北永清人, 博士, 高级实验师, 主要从事土壤放线菌资源开发与利用研究。E-mail: chenjie03306@163.com

adjusting soil culturable microbial environment, thus, the application of extra actinobacteria to optimize the culturable microorganism structure in rhizosphere soil is a useful measure to promote foxtail millet growth.

Key words: Foxtail millet; Actinobacteria; Soil microorganism; Rhizosphere; Growth promotion

谷子(*Setaria italica*)最早起源于中国,是我国北方重要的杂粮作物。与小麦、玉米和水稻等谷物粮食相比,谷子的营养成分种类多、含量丰富,尤其以非必需氨基酸、维生素 B、膳食纤维和不饱和脂肪酸等含量较高^[1-2]。近年来,随着人们对健康饮食结构的关注逐渐增加,对谷子的需求量也日益扩大。由于低产仍是目前谷子生产中面临的主要问题,因此,寻找适宜增产方式对于维持谷子在农业生产中的地位具有重要意义。增施化肥和选育高产品种是谷子增产的两种主要措施。然而,过量施用化肥易对土壤和环境造成污染,而高产品种的培育往往需要较长时间,因此,有必要寻找新的促生增产方式来增加谷子产量。

外源添加有益微生物促进植物生长是一种高效便捷、环保无害、符合可持续发展要求的措施。目前,利用外源微生物促进小麦^[3-4]、水稻^[5]和玉米^[6-7]等粮食作物生长已有不少报道。谷子促生微生物的研究目前多集中在细菌和真菌上:方瑞琳等^[8]的田间试验表明施加细菌和真菌菌剂增加了谷子的根系生物量和产量;张笛等^[9]试验发现利用枯草芽孢杆菌(*Bacillus subtilis*)进行种子包衣促进了谷子种子的萌发;杨永青等^[10]研究表明,枯草芽孢杆菌(*B. subtilis*)和地衣芽孢杆菌(*B. licheniformis*)微生物菌剂与肥料配施促进了谷子植株的生长;Ahmadvand 和 Hajinia^[11]田间试验接种印度梨形孢(*Piriformospora indica*)的菌丝体提高了谷子产量。放线菌尤其是链霉菌属在促进植物生长、减轻作物病害和增强植物抗逆性等方面发挥着重要的作用^[12-14]。然而,目前关于放线菌对谷子促生作用的了解仍不足。

根际微生物与植物生长关系密切,被视为植物的第二基因组^[15]。根际微生物可通过活化土壤养分、分解土壤有机质、产生代谢物质、调控植物的系统抗性、基因表达等途径影响植物的生长发育^[16-17]。因此,根际微生物群落结构变化会影响植物的生长状况。外源放线菌对根际微生物群落的调控作用已被证实^[17-19]。然而,尚无外源放线菌对谷子根际微生物的影响及其与谷子生长之间联系报道。此外,由于外源微生物施入土壤后的效果存在因试验条件不同出现差异的现象,因此从不同试验规模和条件出发展开研究,能够更准确地反映外源微生物的实际作用效果。可培养微生物是土壤微生物中的一类特殊菌群,尽管在总微生物中

所占比例较小,但由于都是由活体微生物组成,更能反映某一时间点土壤微生物群落与植物之间的关系。不少研究表明,土壤可培养微生物的数量及结构组成与植物的生长密切相关^[18, 20-21]。因此,本研究通过培养箱盆栽、室外盆栽结合田间试验的方法,研究包衣施加 2 种多功能的放线菌剂微白黄链霉菌(*Streptomyces albidoflavus*, T4)和密旋链霉菌(*Streptomyces pactum*, Act12)对成熟期谷子根际三大类可培养微生物数量及结构组成的影响,及其与谷子生长之间的联系,旨在为谷子促生增产提供新的有效途径及有应用前景的放线菌株。

1 材料与方 法

1.1 试验材料

供试放线菌剂:微白黄链霉菌(*Streptomyces albidoflavus*, T4)和密旋链霉菌(*Streptomyces pactum*, Act12)均由西北农林科技大学微生物资源研究室分离筛选自青藏高原极端生境土壤中。2 株供试放线菌对多种作物病原菌具有拮抗作用且对多种作物具有促生功能。供试放线菌以粉状孢子制剂(经固态发酵制得)的形式施加,其中放线菌的活孢子含量均为 10^9 CFU/g。

供试谷子品种:本研究共设置培养箱盆栽试验、室外盆栽试验和田间试验 3 个不同条件下的试验。由于培养箱内空间有限,因此选择了超早熟谷子品种“小米”(由山西农业大学农学院农业生物工程研究所提供),室外盆栽试验选用的是山西主栽品种晋谷 21,田间试验由于播种时间较晚,选用了适合夏季种植的品种晋谷 29。

1.2 试验设计

各试验分别设置无菌剂接种的对照(CK)、T4 菌剂包衣和 Act12 菌剂包衣共 3 个处理。菌剂包衣方法:将已知粒数的谷子种子用 6.0 g/L 的羧甲基纤维钠溶液浸湿后放入 T4 或 Act12 菌剂中至种子表面均匀沾附菌剂后将种子取出,播种。通过称量放入种子前后菌剂质量变化,计算得出种子平均沾附的活孢子数为 10^7 CFU/粒。

培养箱小盆栽试验:取田间耕层土壤,过 2 mm 筛后加入 100 g/kg 的有机质和 3.0 g/kg 的复合肥(N : P₂O₅ : K₂O = 15 : 15 : 15),混匀后装入直径

11.0 cm、高 10.0 cm 的小花盆, 每盆装土 0.5 kg。播种谷子种子(7 粒/盆)后将各花盆放置于光照培养箱中培养。设置培养条件为: 白天和夜间时间分别为 16 h 和 8 h; 温度分别为 25 °C 和 22 °C; 白天光照强度为 30 000 lx, 夜间光照为 0 lx。播后正常管理, 按需浇水。各处理 10 盆重复。

室外大盆栽试验: 取田间耕层土壤, 过 2 mm 筛后加入 3.0 g/kg 的复合肥(N : P₂O₅ : K₂O = 15 : 15 : 15), 混匀后装入直径 21.0 cm、高 20.0 cm 的大花盆, 每盆装土 5.0 kg。播种包衣后谷子种子(14 粒/盆)后将各花盆放置于山西农业大学农作站(37°25'21" N, 112°34'45" E)内培养, 正常管理, 按需浇水。各处理 7 盆重复。

田间小区试验: 试验于 2020 年 6 月 20 日至 10 月 10 日于山西农业大学农作站内进行。各处理设置 3 个 2 m × 4 m 的小区重复, 各小区完全随机排列。播前充分灌水后按 1 000 kg/hm² 基施复合肥(N : P₂O₅ : K₂O = 18 : 18 : 18), 旋耕后按行距 40 cm、播量 11.3 kg/hm² 播种谷子, 待出苗后按株距 10 ~ 15 cm 定苗, 播种密度约 25 000 株/hm², 之后正常管理。

1.3 测定指标

生长指标: 于各试验谷子的成熟期(培养箱小盆栽、室外大盆栽和田间试验分别为播种后 80、130 和 110 d), 采集谷子根系和茎叶样品, 测定根系干物质量、茎叶干物质量、单株籽粒干物质量和千粒重。田间试验中, 各小区随机选取 5 株, 测定其根系干物质量、茎叶干物质量和单株籽粒干物质量。同时各小区随机选取 2 行, 分别收获籽粒, 进行产量计算。

根际微生物: 用抖土法采集根际土壤, 即取出各盆谷子完整根系后, 先将与根际结合不紧密的土壤抖掉, 再用软毛刷将根系表面约 0.5 mm 区域土壤转移至自封袋中, 这部分土壤被视为根际土。培养箱小盆栽和室外大盆栽试验中, 分别随机选取其中的 9 盆和 6 盆, 将每 3 盆和 2 盆土壤混匀后作为 1 个测定重复。田间试验中, 将各小区随机选取的 5 株谷子的根际土壤混匀, 作为一个测定重复。采用稀释涂布平板法^[22]对根际土壤中细菌(B)、真菌(F)和放线菌(A)三大类可培养微生物进行分离计数, 并计算微生物总数(细菌、真菌和放线菌的数量之和)及各类微生物的数量比值(B/F、A/F 和 A/B)。

1.4 数据分析

采用 Excel 2016 对数据进行处理, SPSS 18.0 软件进行方差分析; 采用 LSD 方法在 $P < 0.05$ 或 $P < 0.01$ 水平进行统计检验, 计算微生物与谷子生长指标之间

的 Pearson 相关系数; 采用 Origin 2021 软件进行作图。

2 结果与分析

2.1 外源放线菌对成熟期谷子生物量和产量的影响

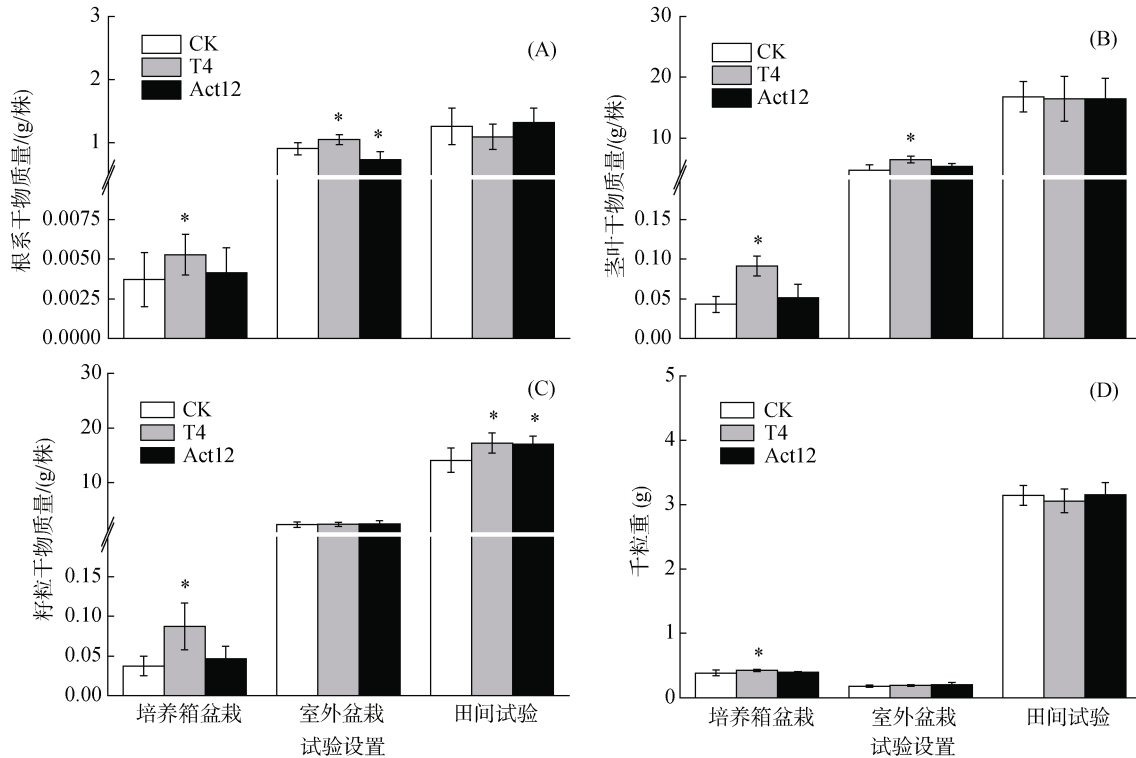
在培养箱盆栽和室外盆栽试验中, 与对照相比, T4 处理使成熟期谷子根系干物质量分别显著增加了 41.3% 和 15.3%, 茎叶干物质量分别显著增加了 112.6% 和 37.1% ($P < 0.05$), 而 Act12 处理使室外盆栽中谷子根系干物质量有所降低(图 1A、1B)。此外, 在培养箱盆栽试验中, T4 还使单株谷子籽粒干物质量比对照提高了 133.8% ($P < 0.05$); 田间小区试验中, 施加 T4 和 Act12 的处理中, 单株谷子籽粒干物质量分别为 17.3 g 和 17.0 g, 与对照相比分别增加了 22.6% 和 20.7% ($P < 0.05$, 图 1C)。培养箱盆栽试验中, T4 菌剂处理使谷子千粒重增加了 10.4%, 而在室外盆栽和田间试验中, 施加两种放线菌剂对谷子千粒重均无显著影响(图 1D)。田间小区试验中, 种子包衣施加 T4 和 Act12 菌剂后, 谷子产量分别提高了 13.7% 和 17.7%, 且与无菌剂对照之间差异显著 ($P < 0.05$, 图 2)。

2.2 外源放线菌对成熟期谷子根际微生物的影响

2.2.1 外源放线菌对根际可培养微生物数量的影响 在培养箱盆栽试验中, T4 处理使成熟期根际可培养细菌与对照相比显著增加了 56.9% ($P < 0.05$); 在室外盆栽和田间试验中, 外源施加 T4 和 Act12 菌剂对根际可培养细菌数量影响均不显著(图 3A)。对于成熟期根际可培养真菌, T4 处理使培养箱盆栽和室外盆栽中其数量与对照相比显著增加了 35.5% 和 73.3% ($P < 0.05$), 也使田间试验中其数量增加了 21.8%; Act12 菌剂使室外盆栽中可培养真菌数量显著增加了 2.22 倍, 但使田间试验中可培养真菌数量减少了 22.7% ($P < 0.05$, 图 3B)。对于成熟期可培养放线菌数量和微生物总数, 培养箱盆栽试验中, 施加 T4 菌剂, 与无菌剂对照相比分别显著增加了 29.5% 和 44.1% ($P < 0.05$); 而在室外盆栽和田间试验中, 包衣施加 2 种供试菌剂对成熟期谷子根际可培养放线菌数量和微生物总数影响均不显著(图 3C、3D)。

2.2.2 外源放线菌对根际可培养微生物比例的影响

对于 A/B, 在室外盆栽试验中, T4 处理使其增加了 15.7%, 而 Act12 处理使其降低了 17.2%, 且与对照间差异均显著 ($P < 0.05$); 施加 2 种菌剂对培养箱试验和田间试验中成熟期根际土壤中 A/B 影响均不大(图 4A)。对于 A/F, T4 和 Act12 菌剂使室外盆栽谷子根际土壤中其数值与对照相比分别降低了 34.7% 和 72.4% ($P < 0.05$, 图 4B)。与 A/F 结果相似,



(图中 *表示与对照相比差异显著 ($P < 0.05$), 下图同)

图 1 放线菌对成熟期谷子生物量及籽粒干物质质量的影响

Fig. 1 Effects of tested actinobacteria on millet biomass and grain dry weight at mature stage

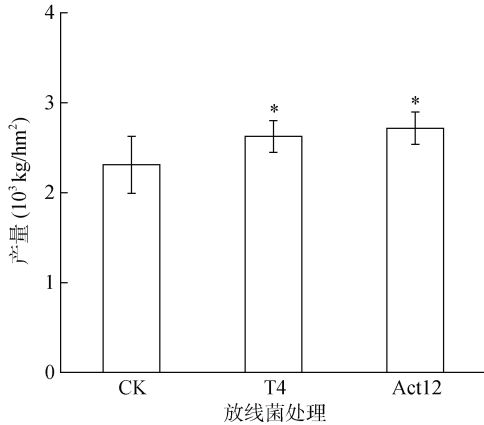


图 2 放线菌对田间试验成熟期谷子产量的影响

Fig. 2 Effects of tested actinobacteria on millet yield at mature stage

T4 和 Act12 菌剂处理使室外盆栽试验中成熟期谷子根际土壤中 B/F 与对照相比分别减少了 43.9% 和 67.1% ($P < 0.05$, 图 4C)。

2.3 外源放线菌作用下谷子生长指标与根际微生物之间的相关性

相关分析结果(图 5)显示, 成熟期根际细菌数量与真菌和放线菌数量均呈极显著正相关关系, 相关系数分别为 0.871 和 0.971 ($P < 0.01$)。成熟期茎叶干物质和单株籽粒干物质与根际细菌、真菌、放线菌和

微生物总数及 A/B 正相关, 相关系数 $r = 0.748 \sim 0.971$ ($P < 0.01$); 而与 B/F 呈负相关关系 ($r = 0.764 \sim 0.948$, $P < 0.01$)。根系干物质质量与 A/F 和 B/F 呈正相关关系 ($r = 0.638$ 和 0.791 , $P < 0.01$), 千粒重与细菌、放线菌、微生物总数及 A/B 均呈负相关关系 ($r = -0.419 \sim -0.441$, $P < 0.05$)。

3 讨论

外源施加有益微生物能够促进植物生长, 增加作物产量。张笛等^[9]试验结果表明, 用枯草芽孢杆菌(*B. subtilis*)种子包衣促进了谷子种子的萌发; Pal 和 Sonali^[23]的研究表明, 接种丛枝菌根真菌(*Glomus mosseae*, *G. fasciculatum*, *G. decipiens*)能够促进谷子的生长, 并改变谷子植株的生物化学和组织化学结构; Ahmadvand 和 Hajinia^[11]通过田间试验发现接种印度梨形孢(*P. indica*)的菌丝体促进了谷子生长, 并增加了谷子产量。本研究结果表明, 种子包衣施加供试放线菌剂 T4 和 Act12 均促进了谷子地上部和根系生物量的累积, 同时提高了谷子的产量。表明 T4 和 Act12 均具有促进谷子生长、增加谷子产量的能力, 证实了放线菌作为谷子促生微生物的可能性。值得注意的是, 在田间试验中, 添加放线菌增加了谷子单株

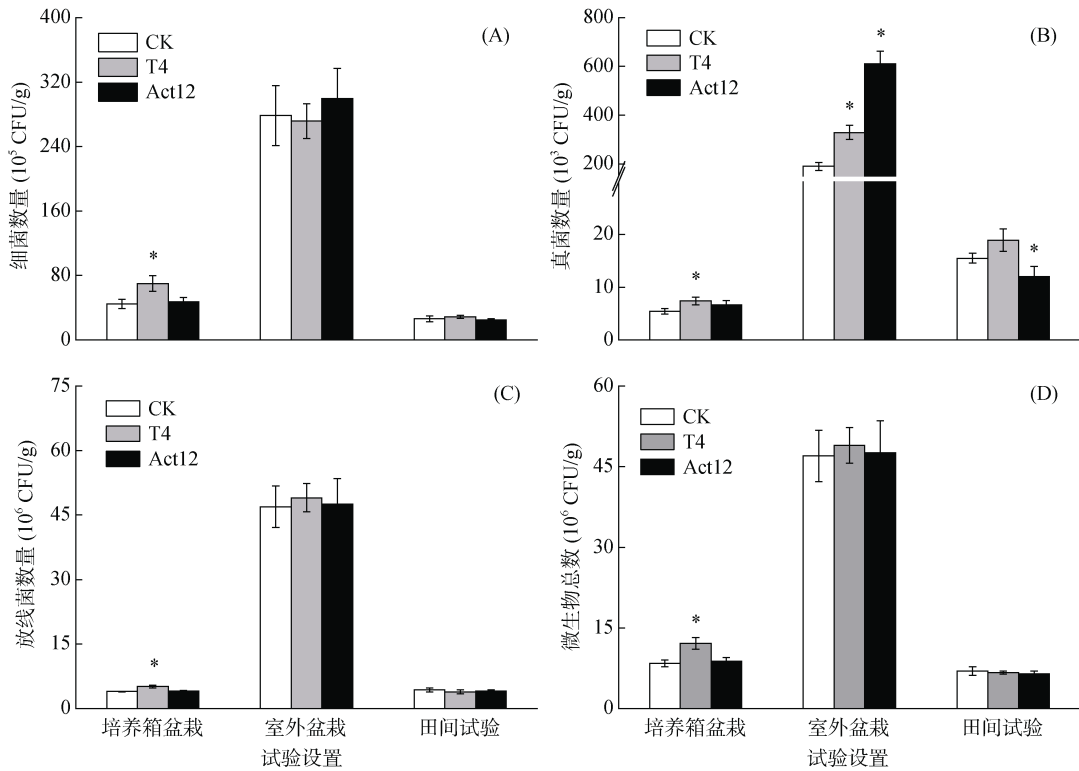
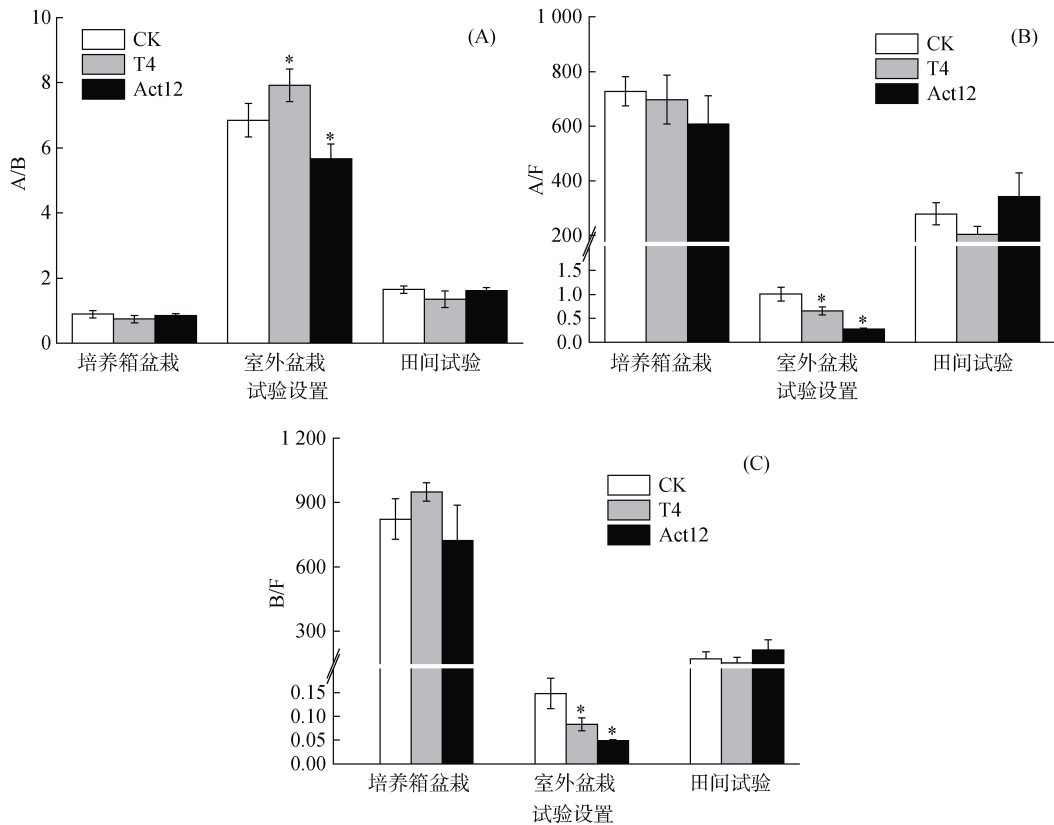


图 3 放线菌对成熟期谷子根际可培养微生物数量的影响

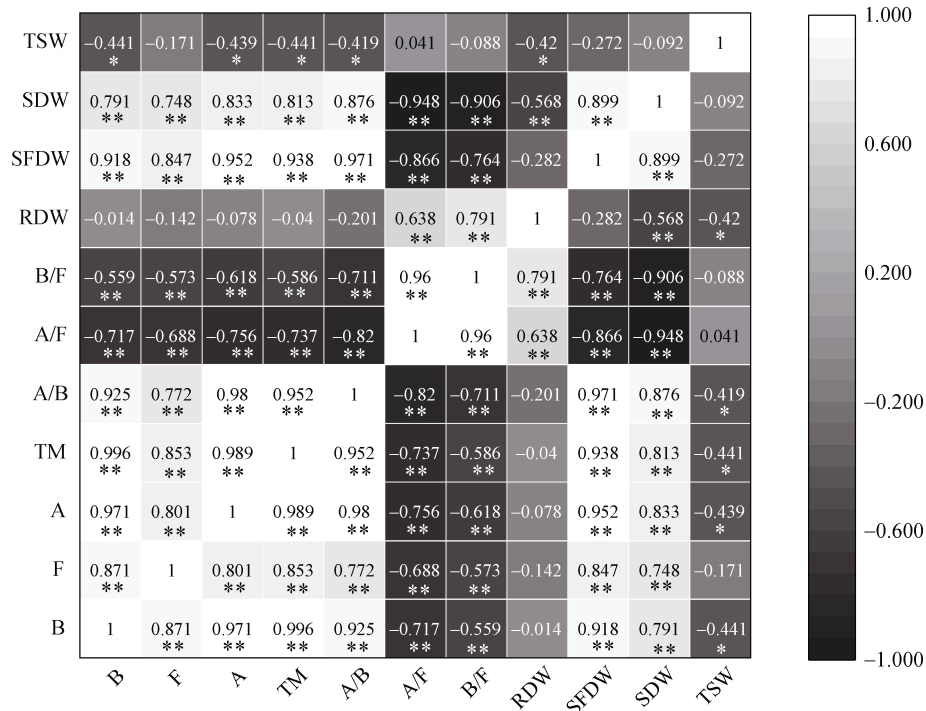
Fig. 3 Effects of tested actinobacteria on population of culturable microorganisms in rhizosphere soils at millet mature stage



(A/B、A/F、B/F 分别表示放线菌与细菌、放线菌与真菌及细菌与真菌的数量之比)

图 4 放线菌对成熟期谷子根际微生物数量比例的影响

Fig. 4 Effects of tested actinobacteria on population ratios of microorganisms in rhizosphere soils at millet mature stage



(B、F、A、TM 分别表示可培养细菌、真菌、放线菌、微生物总数，A/B、A/F、B/F 分别表示放线菌与细菌、放线菌与真菌、细菌与真菌的数量比值，RDW、SFDW、SDW、TSW 表示根系干物质量、茎叶干物质量、单株籽粒干物质量和千粒重。*、** 分别表示在 $P < 0.05$ 和 $P < 0.01$ 水平相关性显著)

图 5 放线菌作用下谷子生长指标与根际微生物之间的相关性

Fig. 5 Correlation between millet growth indexes and microorganisms in rhizosphere soil

籽粒干物质量和产量，但对千粒重无显著影响(图 1 和 2)，表明供试放线菌是通过增加单株籽粒数，而不是增加单粒种子质量来使谷子增产。

根际微生物在维持土壤环境健康、调控植物生长等方面发挥重要作用。外源施加多种有益微生物能够调整植物根际微生物群落结构^[24-26]。外源有益微生物通过优化作物根际微生物群落结构进而促进作物生长、增强植物抗病和抗逆性的功能也已被证实^[17-18, 27]。然而，外源微生物对谷子根际微生物影响的报道仍较少。与高通量测序手段中对土壤中所有微生物进行分析不同，从土壤中分离出的微生物均为活体微生物，是土壤微生物中的一个特殊群体，直接参与土壤环境调节及根系生长的调控作用。因此，尽管高通量测序手段已经被广泛应用，不少学者仍致力于土壤可培养微生物与植物生长互作关系的研究。细菌、真菌和放线菌是可培养微生物中最主要的三大类群，其数量及比例能够反映可培养微生物群体的状况。不少研究表明，通过调节上述三大类微生物的数量和比例能够影响植物的生长和抗胁迫能力^[18, 21, 28]。本研究发现外源添加放线菌剂 T4 和 Act12 均增加了成熟期谷子根际可培养微生物的数量，调整了细菌、真菌和放线菌三大类微生物的数量比例，同时促进了

谷子生长，增加了谷子产量。相关分析结果表明，三大类微生物数量和比例与谷子生物量和产量显著相关(图 5)。表明通过刺激根际微生物的生长、优化根际可培养微生物结构，使土壤微生物环境维持在有利于谷子生长的健康状态是供试放线菌使谷子促生增产的重要机制。此外，放线菌施加于土壤中，还可能通过产生抗生素类物质，抑制病原菌等有害微生物的生长繁殖或促进有益微生物数量的增长来使土壤微生物环境维持健康状态。本试验所用 2 株放线菌均为对多种作物病原菌有拮抗作用的生防放线菌^[29-30]，因此，T4 或 Act12 进入土壤后也可能通过减少土壤中有害微生物的数量、增加有益微生物的数量来影响谷子生长。

本研究中，尽管在不同试验条件下成熟期根际三大类可培养微生物的数量和比值存在差异，但供试菌剂对微生物群落的调整作用总体来看趋势一致。本试验设置了光照培养箱小盆栽试验、室外大盆栽试验及田间小区试验 3 个不同规模的试验来研究 T4 和 Act12 菌剂包衣处理对谷子成熟期根际微生物的影响。同一种作物不同品种之间根际微生物会存在差异，且土壤微生物也会受土壤环境和外界气候条件等多种因素的影响。本研究对不同试验规模及不同试验

品种的数据进行分析, 得出了基本一致的试验结果, 更能说明供试菌剂具有调整谷子根际微生物的能力, 并能够通过这种调控作用间接影响谷子植株的生长。

此外, 根际微生物与植物的互作是一个动态变化的过程。本研究选择了成熟期这一关键生育时期来探究外源放线菌作用下根际微生物与谷子生长之间的关系, 获得了一定有意义的结果。在今后的研究中, 应从时间序列出发, 研究外源放线菌干扰下根际微生物的动态变化规律及其作用方式, 进而更深入地揭示外源放线菌对谷子生长的调控机理。

4 结论

包衣施加 T4 和 Act12 菌剂均能够促进谷子植株生长, 增加谷子产量; 外源放线菌通过优化谷子根际可培养微生物群落结构, 即增加细菌、真菌、放线菌三大类可培养微生物总数, 降低放线菌/真菌和细菌/真菌比值, 从而间接影响谷子生长, 使谷子增产; 调控根际可培养微生物群落结构是促进作物增产的有效途径之一。

参考文献:

- [1] 刘俊英, 谢国莉, 危晴, 等. 小米中脂肪酸的 GC-MS 法测定及营养价值分析[J]. 食品研究与开发, 2012, 33(2): 165-168.
- [2] 张超, 张晖, 李冀新. 小米的营养以及应用研究进展[J]. 中国粮油学报, 2007, 22(1): 51-55, 78.
- [3] 刘玉涛, 杨斌, 张凯, 等. 链霉菌剂种子包衣对小麦幼穗分化及生物学特性的影响[J]. 麦类作物学报, 2020, 40(8): 990-1001.
- [4] 高雁, 张永强, 张志东, 等. 功能性微生物菌剂对小麦生长和根际土壤生态的影响[J]. 新疆农业科学, 2021, 58(1): 115-124.
- [5] Gopalakrishnan S, Srinivas V, Vidya M S, et al. Plant growth-promoting activities of *Streptomyces* spp. in sorghum and rice[J]. SpringerPlus, 2013, 2: 574.
- [6] 方成, 岳明灿, 王东升, 等. 化肥减施配施微生物菌剂对鲜食玉米生长和土壤肥力的影响[J]. 土壤, 2020, 52(4): 743-749.
- [7] 肖让, 张永玲, 赵芸晨, 等. 不同抗旱措施配施菌肥对河西绿洲土壤改良和制种玉米产量的影响[J]. 水土保持学报, 2021, 35(3): 341-349.
- [8] 方瑞琳, 王帝, 王雨婷, 等. 不同微生物菌剂对谷子主要农艺性状及产量的影响[J]. 黑龙江八一农垦大学学报, 2021, 33(2): 1-6, 39.
- [9] 张笛, 辛秋宇, 苗兴芬. 微生物种衣剂拌种及水引发对谷子种子萌发的影响[J]. 黑龙江八一农垦大学学报, 2019, 31(5): 15-21, 72.
- [10] 杨永青, 高芳芳, 马亚君, 等. 山西省旱作农业区不同施肥处理对谷子产量、品质及经济效益的影响[J]. 作物杂志, 2020(4): 195-201.
- [11] Ahmadvand G, Hajinia S. Effect of endophytic fungus *Piriformospora indica* on yield and some physiological traits of millet (*Panicum miliaceum*) under water stress[J]. Crop and Pasture Science, 2018, 69(6): 594.
- [12] Palazzini J, Roncallo P, Cantoro R, et al. Biocontrol of *Fusarium graminearum sensu stricto*, reduction of deoxynivalenol accumulation and phytohormone induction by two selected antagonists[J]. Toxins, 2018, 10(2): 88.
- [13] Vurukonda S S K P, Giovanardi D, Stefani E. Plant growth promoting and biocontrol activity of *Streptomyces* spp. as endophytes[J]. International Journal of Molecular Sciences, 2018, 19(4): 952.
- [14] Li Y L, Guo Q, He F, et al. Biocontrol of root diseases and growth promotion of the tuberous plant *Aconitum carmichaelii* induced by actinomycetes are related to shifts in the rhizosphere microbiota[J]. Microbial Ecology, 2020, 79(1): 134-147.
- [15] Berendsen R L, Pieterse C M J, Bakker P A H M. The rhizosphere microbiome and plant health[J]. Trends in Plant Science, 2012, 17(8): 478-486.
- [16] Li H Y, Guo Q, Jing Y X, et al. Application of *Streptomyces pactum* Act12 enhances drought resistance in wheat[J]. Journal of Plant Growth Regulation, 2020, 39(1): 122-132.
- [17] Li Y L, Guo Q, Li Y Z, et al. *Streptomyces pactum* Act12 controls tomato yellow leaf curl virus disease and alters rhizosphere microbial communities[J]. Biology and Fertility of Soils, 2019, 55(2): 149-169.
- [18] Ma Y Y, Li Y L, Lai H X, et al. Effects of two strains of *Streptomyces* on root-zone microbes and *Nematodes* for biocontrol of root-knot nematode disease in tomato[J]. Applied Soil Ecology, 2017, 112: 34-41.
- [19] 李堆淑, 何念武, 冀玉良. 干旱胁迫下灰色链霉菌对桔梗幼苗根际土壤酶活性、养分及微生物的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2017, 35(6): 173-180.
- [20] 魏蔚, 吴昊, 宋时丽, 等. 复合菌剂对小麦秸秆降解速率、土壤酶和土壤微生物类群的影响[J]. 土壤, 2019, 51(5): 955-963.
- [21] Chen J, Xue Q H, Ma Y Q, et al. *Streptomyces pactum* may control *Phelipanche aegyptiaca* in tomato[J]. Applied Soil Ecology, 2020, 146: 103369.
- [22] 程丽娟, 薛泉宏. 微生物学实验技术第 2 版[M]. 北京: 科学出版社, 2012.
- [23] Pal A, Sonali-Pandey. A study on pearl millet (*Pennisetum glaucum* L.) plant Biochemical and histochemical changes inoculated with indigenous AM fungi under Barren soil[J]. Journal of Plant Biotechnology, 2017, 44(2): 203-206.
- [24] 宋以玲, 于建, 陈士更, 等. 复合微生物菌剂对棉花生理特性及根际土壤微生物和化学性质的影响[J]. 土壤, 2019, 51(3): 477-487.

- [25] 罗佳煜, 宋瑞清, 邓勋, 等. PGPR 与外生菌根菌互作对樟子松促生作用及根际微生态环境的影响[J]. 中南林业科技大学学报, 2021, 41(9): 22–34.
- [26] 姚有华, 王玉林, 姚晓华, 等. 促生菌接种对青稞根际土壤微生物群落结构的影响[J]. 西南农业学报, 2021, 34(6): 1277–1285.
- [27] 胡振兴, 刘灵, 陈丽萍, 等. 干旱胁迫下丛枝菌根对大豆抗氧化代谢及根围微生物的影响[J]. 中国生态农业学报, 2018, 26(4): 526–537.
- [28] 隋宗明, 殷洁, 李轩, 等. 紫茎泽兰堆肥的质量及对土壤有机质、养分和微生物的影响[J]. 土壤, 2017, 49(3): 527–533.
- [29] 赵娟, 薛泉宏, 王玲娜, 等. 多功能放线菌 Act12 对土传病原真菌的拮抗性及其鉴定[J]. 中国生态农业学报, 2011, 19(2): 394–398.
- [30] 陈杰, 汤琳, 郭天文, 等. 马铃薯土传病原真菌拮抗放线菌的抗病促生作用[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2014, 42(1): 111–119.