

减施化肥条件下复合内生菌剂与黄腐酸钾配施对甘蔗生长的影响

刘 涵¹, 谢林艳¹, 狄义宁¹, 曹莉斯¹, 李富生^{1,2*}, 刘鲁峰^{1*}

1. 云南农业大学, 云南昆明 650201; 2. 云南省作物生产与智慧农业重点实验室, 云南昆明 650201

摘 要: 本研究在常规化肥量减半条件下, 研究黄腐酸钾 (FA-K) 和内生菌剂 (单/复合) 对云蔗 08-1609 甘蔗生长的影响, 以期为糖蔗产业研制高效有机复合菌肥提供参考依据。通过浸种催芽试验和盆栽试验, 探究内生菌剂对甘蔗种苗生长的作用, 不同施肥配方处理[常规施化肥 (F_1)、50%常规施化肥量+黄腐酸钾 (F_2)]和内生菌剂处理对甘蔗苗期生长的促生效应及其交互作用。结果表明: B9+YC89 复合菌剂可以显著促进甘蔗种苗生长, 采用 F_2 施肥配方和施内生菌剂可以显著提高甘蔗苗期农艺性状、光合及生理指标, F_2 较 F_1 处理能显著提高蔗苗的茎粗、鲜干质量、+1 叶面积、根系活力、光合参数、可溶性蛋白含量、可溶性糖含量、谷氨酰胺合成酶 (glutamine synthetase, GS) 活性、谷氨酸合成酶 (glutamate synthase, GOGAT) 活性; F_2 B9+YC89 处理促进+1 叶长、+1 叶面积、主茎叶片数、干质量、根系活力、光合作用、可溶性物质含量及 GS、GOGAT 活性效果最为显著。因此, 在甘蔗生产中, 采用 B9+YC89 复合菌剂浸种催芽可促进甘蔗种苗萌发; 在 50%常规施化肥条件下, 黄腐酸钾较常规施化肥处理进一步促进云蔗 08-1609 甘蔗苗期生长, 黄腐酸钾与 B9+YC89 复合菌剂配合施用能有效促进云蔗 08-1609 甘蔗苗期生长。本研究结果有利于推动甘蔗产业减肥增效方向的发展, 为新型栽培种植技术提供思路。

关键词: 甘蔗; 黄腐酸钾; 内生菌剂; 化肥; 促生作用; 交互作用

中图分类号: S566.1 文献标志码: A

Effect of Combined Application of Compound Endophytic Agent and Potassium Fulvic Acid on Sugarcane Growth under Reduced Chemical Fertilizer Application

LIU Han¹, XIE Linyan¹, DI Yining¹, CAO Lisi¹, LI Fusheng^{1,2*}, LIU Lufeng^{1*}

1. Yunnan Agricultural University, Kunming, Yunnan 650201; 2. Yunnan Provincial Key Laboratory of Crop Production and Smart Agriculture, Kunming, Yunnan 650201, China

Abstract: The study was aimed to study the effects of potassium fulvic acid (FA-K) and endophytic agents (single/combined) on the growth of sugarcane of Yuncane 08-1609 under the condition of halving the amount of conventional chemical fertilizers and to provide a reference for the subsequent research on high-efficiency organic compound bacterial fertilizer for increasing yield and weight loss in the sugar cane industry. The effects of endophytic agents on the growth of sugarcane seedlings and the growth-promoting effects of different fertilization formula treatment [conventional fertilizer application rate (F_1), 50% conventional fertilizer application rate + potassium fulvic acid (F_2)] and endophytic agent treatment on the growth of sugarcane seedlings and the interaction were investigated through soaking seed germination test and pot experiment. The “B9+YC89” compound agent could significantly promote the growth of sugarcane seedlings, compared with F_1 , F_2 fertilization formula and endophytic agent could significantly improve agro-

收稿日期 2024-09-10; 接受日期 2024-11-04

基金项目 云南省重大科技专项 (No. 202202AE090021); 云南省教育厅科学研究基金项目 (No. 2022J0286); 云南省现代农业甘蔗产业技术体系建设专项 (2023—2024 年)。

作者简介 刘 涵 (1996—), 女, 硕士研究生, 研究方向: 甘蔗种质资源评价与利用。*通信作者 (Corresponding author): 刘鲁峰 (LIU Lufeng), E-mail: llf8839@sina.com; 李富生 (LI Fusheng), E-mail: lfs810@sina.com。

onomic traits, photosynthetic and physiological indexes of sugarcane seedlings, and F₂ treatment could significantly increase stem diameter, fresh dry weight, +1 leaf area, root activity, photosynthetic index, soluble protein and soluble sugar content, and glutamine synthetase and glutamate synthase (GS and GOGAT) activities of sugarcane plants. F₂ “B9+YC89” treatment had the most significant effects on +1 leaf length, +1 leaf area, number of main stem leaves, dry weight, root activity, photosynthesis, soluble matter content and two enzyme activities. In summary, in sugarcane production, the use of “B9+YC89” compound microbial agent soaking and germination can promote the germination of sugarcane seedlings. Under the condition of 50% conventional chemical fertilizer, potassium fulvic acid further promoted the seedling growth of Yuncane 08-1609 compared with conventional chemical fertilizer treatment, and the combined application of potassium fulvic acid and “B9+YC89” compound microbial agent could effectively promote the seedling growth of Yuncane 08-1609. The study are conducive to promoting the development of weight loss and efficiency increase in sugarcane industry, and provide ideas for new cultivation and planting technologies.

Keywords: sugarcane; potassium fulvic-acid; endophytic agent; chemical fertilizer; growth-promoting effect; interaction

DOI: 10.3969/j.issn.1000-2561.2025.03.014

甘蔗 (*Saccharum officinarum* L.) 在热带、亚热带 110 多个国家和地区均有种植, 贡献了糖生产量的 85% 以上^[1]。我国是世界第三大甘蔗生产国^[2], 云南省为我国第二大甘蔗种植区, 产业倍受当地政府关注, 然而, 云南甘蔗大部分为旱坡地种植, 旱情、冷害等农业气象灾害会导致苗弱苗黄甚至大量死苗, 严重影响甘蔗产量^[3]。甘蔗生育期长, 生物量大, 养分需用量大, 化肥能显著提高产量, 但常规化肥利用率低, 过量施用会导致大量盈余养分残留在土壤或释放到大气中, 严重威胁生态环境^[4-5]。因此, 我国甘蔗产业迫切需要研究一系列新型栽培技术, 通过施用有机肥, 利用内生菌减少常规化肥施用量, 提高蔗苗抗逆性, 促进甘蔗生长, 从而实现减肥增产, 推动产业可持续发展。

农田生态系统的高产、稳产、高效、环境友好是国家粮食安全与可持续发展的关键, 可持续农业的重要目标之一是用有机肥代替化肥, 有机肥作为化肥的低成本且安全的替代品, 不仅含有作物生长发育的必需营养物质, 还能够改善土壤条件, 促进植物生长, 提高产量^[6]。甘蔗是典型的喜钾作物, 由蔗渣蔗叶等产业废弃物经生化反应制得的腐殖酸类有机肥黄腐酸钾, 因其含有丰富的优良生物活性物质, 能够增强植株体内酶活, 参与调节代谢, 促进作物吸收和养分转化^[7-8], 不仅能为甘蔗提供生长发育所必须的钾元素, 还能促进微量元素吸收及转化、提高抗逆性^[9]、增强土壤养分有效性^[10], 在提高甘蔗产量和品质上作用显著, 但在减少常规化肥施用量的条件下, 黄腐酸钾施用对甘蔗生长影响的相关研究较为欠缺。

相关研究表明, 农业生态系统中的微生物与植物间存在积极的相互作用, 合理利用微生物能有效提高植物应对农业气象灾害的能力^[11]。生物菌肥是一种以微生物为基础的肥料, 促生长内生菌是生物菌肥中特殊的一类有益微生物^[12-13], 具有溶磷、解钾、固氮、产生植物激素、分泌有机酸等能力。前人研究表明, 促生长内生菌对作物的促生效应主要表现在增加株高、株茎、主茎叶片数, 促进根系构建, 提高光合效率, 调节叶片可溶性物质含量和酶活性等^[14-20]。近年来, 甘蔗内生菌的深入研究^[21], 为甘蔗复合菌肥提供了丰富的菌种资源, 枯草芽孢杆菌 (*Bacillus subtilis*) B9, 具有固氮、溶磷、解钾、产吲哚乙酸 (IAA) 的能力^[16]; 贝莱斯芽孢杆菌 (*Bacillus velezensis*) YC89^[22]能够促进甘蔗生长并有效抑制多种病原菌。同为贝莱斯芽孢杆菌的 FZB42 菌是用于促进植物生长和生物防治的革兰氏阳性模型菌株^[23], 但迄今为止, 该菌株在促进甘蔗生长的相关研究还不多。目前, 甘蔗内生菌的研究主要为单一菌株, 含有多种内生菌株的复合菌剂对甘蔗萌发及苗期生长方面的研究还较少, 内生菌剂与黄腐酸钾组合施用方面的研究也不多。

有机菌肥替代部分化肥施用, 能够利用微生物加速无机肥分解, 提高养分吸收利用率^[24], 同时较常规化肥具有促进植物生长发育、增强抗逆性、提质增产等作用^[25-27]。因此, 研究有机肥和内生菌对甘蔗萌芽及苗期生长的影响是目前解决云南蔗区产业发展掣肘最为绿色高效的措施。但复合菌剂与单一菌剂, 不同内生菌剂与黄腐酸钾替代部分常规化肥施用对甘蔗萌发及苗期生长的影响必然存在差异。因此, 本研究首先通过浸种

催芽试验,明确复合菌剂对甘蔗萌发的影响;然后采用裂区试验设计进行盆栽试验,以不同施肥方案为主区,内生菌剂处理为副区,以不施肥和内生菌剂为对照,分析不同处理对甘蔗苗期主要农艺性状、光合参数、叶片可溶物含量及酶活性等指标的影响,研究黄腐酸钾、复合菌剂对甘蔗苗期的促生效应,确定黄腐酸钾与内生菌剂配施对甘蔗苗期促生效果最优的组合,以期为后续复合菌剂开发和减肥增效的有机复合菌肥研究提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 材料

1.1.1 供试甘蔗 云南省农业科学院甘蔗研究所选育出的甘蔗品种云蔗 08-1609。

1.1.2 供试内生菌剂 单一内生菌剂:B9、YC89、FZB42;复合内生菌剂:B9+YC89、B9+FZB42, B9、YC89 由云南农业大学甘蔗研究所提供;FZB42 由云南农业大学何月秋教授惠赠。B9、YC89、FZB42 菌剂为菌株浓度 1.0×10^6 CFU/mL 的 B9、YC89、FZB42 菌株悬浮液;B9+YC89、B9+FZB42 分别为等体积菌株浓度 1.0×10^6 CFU/mL 的 B9、YC89 菌株及 B9、FZB42 菌株悬浮液混合所得的复合菌液。

1.1.3 供试施肥方案 (1) F_1 : 常规施化肥, N 228 kg/hm^2 、 P_2O_5 117 kg/hm^2 、 K_2O 281 kg/hm^2 , 参照周一帆等^[28]的云南产区推荐施肥量;(2) F_2 : 50%常规施化肥量+黄腐酸钾 600 kg/hm^2 , 黄腐酸钾施用量参考樊仙等^[29]的推荐施用量。试验采用传统化肥尿素(N 46%), 磷、钾肥为过磷酸钙(P_2O_5 12%)和硫酸钾(K_2O 50%), 黄腐酸钾由云南紫辰集团生物科技有限公司提供, 生物源黄腐酸含量为 54.3%, 有机质含量为 76%, 腐殖酸含量为 44.3%, 全钾含量为 14.0%, pH 6.4 (1:100 倍稀释)。

1.2 方法

1.2.1 蔗茎的浸种与催芽处理 选择生长良好无病虫害的蔗茎,经 2%石灰水浸泡 1 d 进行表面灭菌,清水完全冲洗附着在表面的石灰后,选择同位芽切分成单芽茎段,芽眼向上整齐摆放于催芽盘(50 cm×35 cm×4.8 cm)中,于室温 32 ℃进行浸种催芽。内生菌剂处理用浓度 1.0×10^6 CFU/mL 的 B9、YC89、FZB42、B9+YC89、B9+FZB42 菌剂进行浸种催芽;用同体积无菌清水(Q)作为

对照,根据所需种苗数,每组设置重复数大于 20。7 d 后观察和测定甘蔗种苗的芽长、根数与根长。

1.2.2 甘蔗盆栽与菌剂接种 (1)甘蔗幼苗移栽。甘蔗浸种催芽 1 周后,将蔗苗移入育苗盆(30 cm×30 cm)进行盆栽培养,移栽时,各施肥处理肥料一次性拌入基质土中,每盆基质土的质量为 5 kg。甘蔗盆栽试验于 2023 年 4—9 月,在云南农业大学甘蔗研究所大棚(25°8'N, 102°45'E, 海拔 1970 m)中进行。采用裂区试验设计,施肥配方为主区,内生菌剂处理类型为副区,设置 2 种施肥(F_1 、 F_2)和 6 种内生菌剂处理(Q、B9、YC89、FZB42、B9+YC89、B9+FZB42),设置一个不施肥不施内生菌剂的处理为 CK,共 13 个处理。各处理 9 次重复,每盆栽 1 株甘蔗种苗,共计 117 盆,117 株苗。

(2)菌剂制备。供试菌剂原始菌株 B9、YC89、FZB42 接种于 LB 液体培养基中并放入适宜温度,160 r/min 摇床下进行扩繁培养,3 d 后待培养液浑浊,将发酵液移至离心管,在 12 000 r/min,4 ℃条件下离心 5 min 后,用无菌水重悬,然后再度离心。重复 3 次操作充分除去培养基残留成分。采用无菌水重悬,所得悬浮液通过稀释涂布平板法测定悬浮液中的菌株浓度后,加入无菌水将菌体浓度稀释为 10^9 CFU/mL,后放入 4 ℃冰箱备用。

(3)菌剂施用及盆栽日常管理。每 10 d,采用灌根法施用菌剂(每次施用量为 1 L,保证菌株浓度与浸种处理浓度一致),共接种 3 次,对照组同时采用同体积清水浇施替代。试验期间管理措施和常规甘蔗栽培措施一致,棚内空气湿度保持在 50%~60%,温度维持在 20~30 ℃。移栽 60 d 后,观察甘蔗苗长势差异,测量甘蔗农艺性状及生理指标(测定生理指标的取材部位,除测定可溶性糖及可溶性蛋白采用+2 叶,其余均采用+1 叶,即甘蔗顶端的第一片完全展开的叶片)。

1.2.3 甘蔗农艺性状的测定 将甘蔗于盆中完整取出清水冲洗后,用吸水纸擦拭植株表面以除去多余水分及土粒,至苗株表面无明显水分后用剪刀去除种茎,采用电子天平称量记录为鲜质量;将地下部分与地上部分分离,采用烘干法测定干质量,于 105 ℃下杀青后,65 ℃下烘干 24 h,采用电子天平称量,记录为地上/地下部分干质量。测量苗长、茎粗、主茎叶片数、+1 叶叶片长、+1 叶叶面积:采用钢卷尺测量甘蔗苗株,基部至最上部展开叶片的叶尖的距离为苗长(植株全长);

采用游标卡尺测量蔗株具有一定长度的茎秆的直径为茎粗；+1 叶枕至叶片顶部的距离为+1 叶叶长；叶片计数时，叶枕可见但未完全展开叶片计为 0.5；+1 叶面积采用便携式叶面积仪测量。

1.2.4 生理指标的测定 在晴天上午 9：30—11：30，采用 LI-6400XT 便携式光合测定仪(Li-COR，美国)测定处理组与对照组主要光合参数净光合速率 (P_n)、气孔导度 (G_s)、胞间二氧化碳浓度 (C_i) 及蒸腾速率 (T_r)；根系活力按照氯化三苯基四氮唑 (TTC)^[30]方法测定；可溶性蛋白 (SP)、可溶性糖 (SS) 含量参照高俊凤等^[31]的测定方法，SS 含量采用蒽酮比色法测定，SP 含量采用考马斯亮蓝 G-250 法测定；谷氨酰胺合成酶 (Glutamine synthetase，GS)、谷氨酸合成酶 (Glutamate synthase，GOGAT) 活力采用 GS、GOGAT 试剂盒测定；测定生理指标检测试剂盒均采购于云南表达科技有限公司。

1.3 数据处理

采用 Microsoft Excel 2016 和 SPSS 26.0 软件进行数据统计与分析。采用双因素方差分析 (Two-way ANOVA) 确定施用黄腐酸钾和内生菌剂在常规化肥施用量减少条件下对甘蔗生长的作用及其交互作用，采用 LSD (Least-Significant Difference) 最小显著性差异法进行显著性分析，用 Microsoft Excel 2016 软件制图，数据结果以重复的平均值±标准偏差 (SD) 表示。

2 结果与分析

2.1 不同处理对云蔗 08-1609 种芽萌发的影响

不同内生菌剂处理后，除 B9+FZB42 菌剂处理外，其余各菌剂处理的芽长、根长及根数均显著高于清水浸种，且促进效果各有差异 (表 1)。其中，以复合菌剂 B9+YC89 处理表现效果最佳，与清水浸种相比，芽长增长 116.0%，根长增长 300.0%，根数增加 62.4%；与表现最佳的单菌剂 YC89 浸种处理相比，芽长增长 16.2%，根长增长 21.4%，根数增加 12.1%。各菌剂对云蔗 08-1609 种苗芽长、根长、根数生长发育影响情况不一致，对根长的影响大于对根数和芽长的影响。

2.2 不同处理对云蔗 08-1609 农艺性状的影响

黄腐酸钾和内生菌剂施用对云蔗 08-1609 甘蔗农艺性状有显著影响 ($P<0.05$)。F₂Q 处理的鲜/干质量显著高于 F₁Q 和 CK，F₁Q 处理显著高于

表 1 不同处理后云蔗 08-1609 幼苗的生长情况
Tab. 1 Growth of sugarcane seedlings of Yuncane 08-1609 after inoculation after different treatments

内生菌剂 Endophytic agent	芽长 Bud length/cm	根长 Root length/cm	根数 Number of roots
Q	1.06±0.20 ^c	0.17±0.08 ^c	12.83±2.59 ^d
B9	1.76±0.12 ^c	0.43±0.08 ^c	16.75±1.66 ^b
YC89	1.97±0.17 ^b	0.56±0.07 ^b	18.58±2.15 ^b
FZB42	1.52±0.15 ^d	0.33±0.11 ^d	14.83±2.08 ^c
B9+YC89	2.29±0.14 ^a	0.68±0.10 ^a	20.83±2.33 ^a
B9+FZB42	1.09±0.22 ^c	0.17±0.08 ^c	12.25±2.96 ^d
F	99.668 ^{**}	72.350 ^{**}	24.770 ^{**}

注：F 为方差分析中的 F 值，同列数据后不同小写字母表示处理间差异显著 ($P<0.05$)；**表示处理间差异极显著 ($P<0.01$)。
Note: F indicates F values in the ANOVA, different lowercase letters after the same column of data indicate significant difference ($P<0.05$); ** indicates extremely significant difference among treatments ($P<0.01$).

CK (表 2)，F₂Q 较 F₁Q 处理鲜质量、地上部分干质量、地下部分干质量分别提高 5.6%、12.6%、13.5%。B9+YC89 复合菌剂较 Q 处理对鲜质量、地上/地下部分干质量促进效果最佳，F₁B9+YC89 较 F₁Q 处理分别提高 15.8%、58.3%、94.4%，F₂B9+YC89 较 F₂Q 处理分别提高 17.1%、74.6%、131.8%；单菌剂处理中，YC89 较 Q 处理对鲜质量、地上/地下部分干质量促进效果最佳，F₁YC89 较 F₁Q 处理分别提高 13.4%、62.7%、73.2%，F₂YC89 较 F₂Q 处理分别提高 5.6%、59.8%、106.1%。

由表 3 可知，F₂Q、F₁Q 处理的苗长、+1 叶长、+1 叶面积差异不显著，但显著高于 CK；F₂Q、F₁Q、CK 处理的叶片数差异不显著；F₂Q 处理的茎粗显著高于 F₁Q、CK 处理，同时，F₁Q 处理的茎粗显著高于 CK，F₂Q 较 F₁Q 处理茎粗提高 8.4%。F₁B9+YC89 较 F₁Q 处理的苗长、茎粗、主茎叶片数、+1 叶长、+1 叶面积分别提高 4.56%、13.1%、7.9%、5.31%、55.8%，F₁YC89 较 F₁Q 处理苗长、茎粗、+1 叶面积分别提高 2.80%、10.9%、48.9%；F₂B9+YC89 各农艺性状较 F₂Q 处理分别增加 6.93%、13.1%、9.23%、8.00%、51.7%，F₂YC89 处理茎粗、主茎叶片数、+1 叶面积较 F₂Q 处理分别提高 12.1%、7.76%、44.1% (表 3)。

F₂B9+YC89 和 F₂YC89 处理的苗长显著高于 CK、F₁Q、F₁B9、F₁YC89、F₁FZB42、F₁B9+FZB42、F₂Q、F₂FZB42、F₂B9+FZB42 处理，F₂B9+YC89 和 F₂YC89 处理的茎粗显著高于其余

11 个处理, F₂ B9+YC89 处理的+1 叶面积最大, 显著高于其他施肥施菌剂处理; F₂ B9+YC89 处理的鲜/干质量最大, 显著高于除 F₂ YC89 的其余各 11 个处理, F₂ YC89、F₂ B9+YC89 处理间差异不显著(表 2、表 3)。方差分析结果表明, 对苗长和鲜/干质量而言, 黄腐酸钾和内生菌剂间交互作用极显著, 对于除苗长和鲜/干质量外的其余各农艺性状交互作用均不显著。总体来看, F₂ B9+YC89 处理对农艺促进效果最佳, 其次为 F₂ YC89 处理。

2.3 不同处理对云蔗 08-1609 根系活力的影响

F₂ 施肥处理能够提高云蔗 08-1609 的根系活力(图 1), F₂ Q 处理的根系活力显著高于 F₁ Q 和 CK, F₁ Q 处理显著高于 CK, F₂ Q 较 F₁ Q 处理根系活力提高 38.6%。不同内生菌剂处理间根系活力差异显著, 其中, 复合菌剂 B9+YC89 较 Q 处理对根系活力的促进效果最佳, F₁ B9+YC89 较 F₁ Q 处理的根系活力提高 90.2%, F₂ B9+YC89 较 F₂ Q 处理的根系活力提高 85.7%; 单菌剂处理中, YC89 表现最佳, F₁ YC89 较 F₁ Q 处理提高 55.1%, F₂ YC89 较 F₂ Q 处理提高 49.8%。

方差分析结果表明, 黄腐酸钾与内生菌剂处理对根系活力的促进存在极显著交互作用。施用黄腐酸钾, 同时施用合适的内生菌剂有利于在减少传统施肥 50%的条件下, 提高甘蔗苗期根系活力, 进而促进根系构建, 有利于促进蔗苗生长, 其中以 F₂ B9+YC89 对增加云蔗 08-1609 根系活力效果最佳。

2.4 不同处理对云蔗 08-1609 光合作用的影响

F₂ 施肥处理能够增强叶片光合作用(图 2), 叶片的 P_n、G_s、C_i、T_r 均表现为 F₂ Q 处理显著高于 F₁ Q 和 CK 处理, F₁ Q 处理显著高于 CK, F₂ Q 处理较 F₁ Q 处理的 P_n、G_s、C_i、T_r 分别提高 12.0%、11.1%、32.9%、8.9%。内生菌剂对叶片光合作用有显著影响, F₁、F₂ 处理下, 各内生菌剂处理间均差异显著。F₁ 处理下, F₁ B9+YC89 菌剂处理对叶片光合作用的促进效果最佳, 较 F₁ Q 处理的 P_n、G_s、C_i、T_r 分别提高 34.7%、31.1%、87%、60.9%; 单菌剂处理中, YC89 表现最佳, F₁ YC89 较 F₁ Q 处理分别提高 30.1%、24.2%、78.6%、55.6%; F₂ 处理下, F₂ B9+YC89 菌剂处理对叶片光合作用的促进效果最佳, 较 F₂ Q 处理的 P_n、

表 2 不同处理后云蔗 08-1609 的鲜、干质量
Tab. 2 Fresh and dry weight of Yuncane 08-1609 after different treatments

处理 Treatment		鲜质量 Fresh weight/g	干质量 Dry weight/g	
施肥配方 Fertilization formulation	菌剂 Endophytic agent		地上部分 Underground part	地下部分 Overground part
F ₁	Q	291.63±2.15 ^f	68.10±2.98 ^f	5.93±0.25 ⁱ
	B9	318.07±2.76 ^d	95.57±4.83 ^d	8.60±0.56 ^{fg}
	YC89	330.67±2.60 ^c	110.83±2.02 ^c	10.27±0.42 ^d
	FZB42	303.00±5.56 ^e	95.67±2.01 ^d	8.13±0.35 ^g
	B9+YC89	337.60±5.31 ^{bc}	107.83±4.12 ^c	11.53±0.25 ^c
	B9+FZB42	278.40±4.65 ^g	62.67±2.93 ^f	6.13±0.35 ^{hi}
F ₂	Q	308.00±2.91 ^e	76.67±2.35 ^e	6.73±0.21 ^h
	B9	343.67±2.81 ^b	112.10±3.22 ^c	11.63±0.15 ^c
	YC89	356.07±3.18 ^a	122.53±3.15 ^b	13.87±0.35 ^b
	FZB42	321.33±3.86 ^d	109.20±0.87 ^c	9.37±0.55 ^e
	B9+YC89	360.77±3.66 ^a	133.83±4.99 ^a	15.60±0.70 ^a
	B9+FZB42	289.83±5.35 ^f	79.83±2.12 ^e	8.83±0.06 ^{ef}
CK	Q	145.23±6.45 ^h	41.23±4.40 ^g	3.47±0.31 ^j
F	F	237.148 ^{**}	215.185 ^{**}	387.647 ^{**}
	E	257.365 ^{**}	271.250 ^{**}	295.870 ^{**}
	F×E	3.144 [*]	5.322 ^{**}	16.507 ^{**}

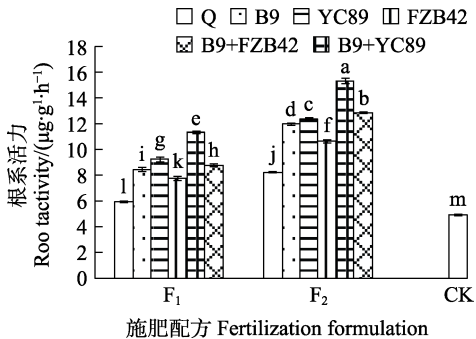
注: F 为施肥配方处理, E 为内生菌剂处理; 同列数据后不同小写字母表示处理间差异显著 (P<0.05), **表示处理间差异极显著 (P<0.01)。

Note: F indicates Fertilization formulation treatment, E indicates Endophytic agent treatment; Different lowercase letters after the same column of data indicate significant difference (P<0.05), ** indicates extremely significant difference among treatments (P<0.01).

表 3 不同处理后云蔗 08-1609 的农艺性状
Tab. 3 Agronomic characters of Yuncane 08-1609 after different treatments

处理 Treatment		苗长	茎粗	主茎叶片数	+1 叶长	+1 叶面积
施肥配方	内生菌剂	Seedling length/cm	Stem thick/mm	Leaf number of stem	+1 Leaf length/cm	+1 Leaf area/cm ²
Fertilization formulation	Endophytic agent					
F ₁	Q	208.03±2.49 ^{de}	19.63±0.83 ^{ef}	10.50±0.55 ^d	147.02±10.21 ^b	317.94±8.69 ^j
	B9	210.43±6.09 ^{cde}	20.18±0.80 ^{de}	10.83±0.41 ^{cd}	148.73±5.66 ^b	453.28±4.51 ^g
	YC89	213.85±2.79 ^{bcd}	21.77±0.64 ^{bc}	10.83±0.75 ^{cd}	150.47±6.12 ^b	473.42±4.25 ^f
	FZB42	205.25±8.61 ^e	19.62±0.75 ^{ef}	10.67±0.52 ^{cd}	148.13±4.68 ^b	419.54±2.78 ^h
	B9+YC89	217.52±4.12 ^{abc}	22.20±0.99 ^b	11.33±0.52 ^{abc}	154.83±6.54 ^{ab}	495.21±3.56 ^{de}
	B9+FZB42	183.78±7.75 ^f	19.02±0.51 ^f	11.33±0.52 ^{abc}	147.62±3.38 ^b	429.21±3.13 ^h
F ₂	Q	208.62±4.83 ^{de}	21.28±0.62 ^{bc}	10.83±0.41 ^{cd}	147.53±5.73 ^b	374.36±13.25 ⁱ
	B9	218.75±2.71 ^{ab}	22.12±0.70 ^b	11.00±0.00 ^{bcd}	154.52±5.25 ^{ab}	515.76±6.59 ^c
	YC89	222.02±4.03 ^a	23.85±0.76 ^a	11.67±0.52 ^{ab}	154.83±7.79 ^{ab}	539.42±1.39 ^b
	FZB42	210.70±9.29 ^{cde}	20.80±1.40 ^{cd}	11.00±0.63 ^{bcd}	153.15±5.31 ^{ab}	488.27±3.29 ^e
	B9+YC89	223.07±4.80 ^a	24.07±0.53 ^a	11.83±0.41 ^a	159.33±4.48 ^a	567.86±1.52 ^a
	B9+FZB42	205.08±8.00 ^e	21.03±0.96 ^{cd}	11.67±0.52 ^{ab}	154.17±3.58 ^{ab}	500.70±0.85 ^d
CK	Q	160.72±2.46 ^g	16.85±0.96 ^g	10.50±0.55 ^d	125.18±4.13 ^c	256.45±7.80 ^k
F	F	34.632 ^{**}	84.730 ^{**}	12.097 ^{**}	9.925 ^{**}	789.264 ^{**}
	E	29.813 ^{**}	32.423 ^{**}	6.548 ^{**}	3.416 ^{**}	1252.616 ^{**}
	F×E	4.165 ^{**}	0.487	0.613	0.366	1.761

注：F 为施肥配方处理，E 为内生菌剂处理；同列数据后不同小写字母表示处理间差异显著（ $P<0.05$ ），**表示处理间差异极显著（ $P<0.01$ ）。
Note: F indicates Fertilization formulation treatment, E indicates Endophytic agent treatment; Different lowercase letters after the same column of data indicate significant difference ($P<0.05$), ** indicates extremely significant difference among treatments ($P<0.01$).



不同小写字母表示处理间差异显著（ $P<0.05$ ）。
Different lowercase letters indicate significant difference among treatments ($P<0.05$).

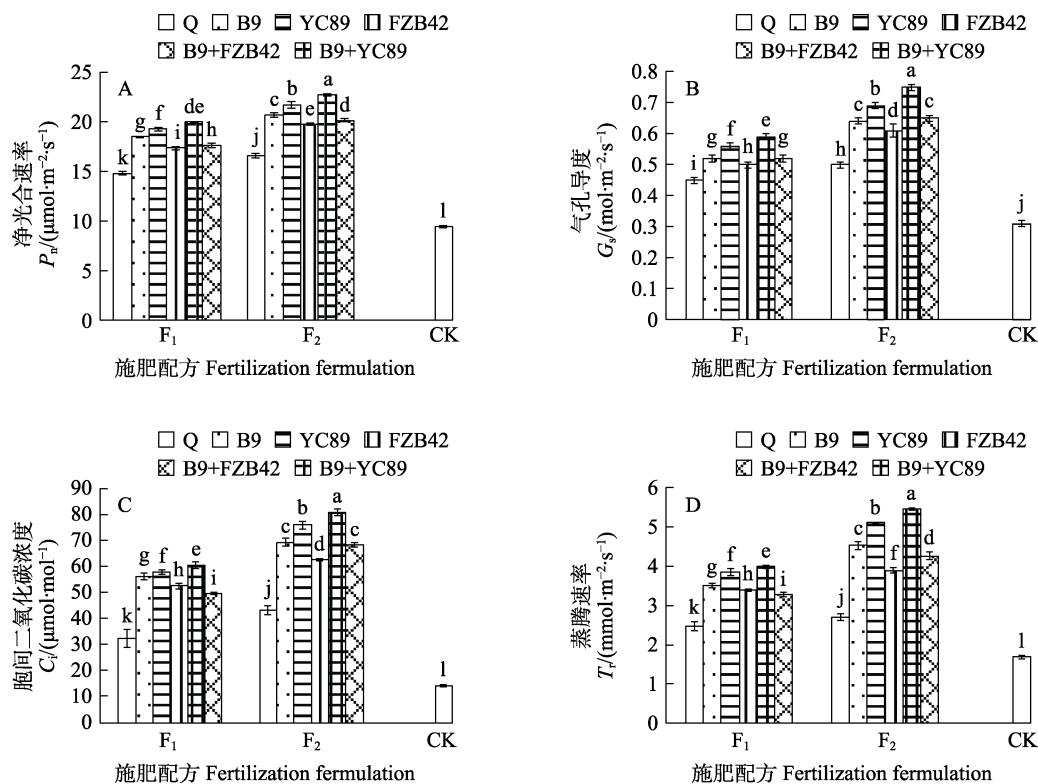
图 1 不同处理后云蔗 08-1609 的根系活力
Fig. 1 Root viability of Yuncane 08-1609 after different treatments

G_s 、 C_i 、 T_r 分别提高 37.1%、50%、87.5%、102.2%；单菌剂处理中，YC89 表现最佳， F_2 YC89 较 F_2 Q 处理分别提高 31%、38%、76.2%、89.2%。

方差分析结果表明，黄腐酸钾与内生菌剂处理对叶片光合作用的促进存在极显著交互作用，黄腐酸钾与内生菌剂共同施用有利于在减少传统施肥 50% 的条件下，增强叶片光合作用，其中以 F_2 B9+YC89 处理对云蔗 08-1609 蔗苗叶片光合作

用的促进效果最佳。
2.5 不同处理对云蔗 08-1609 叶片中可溶性蛋白和可溶性糖含量的影响

F_2 施肥处理能提高叶片可溶性蛋白和可溶性糖含量（图 3、图 4），可溶性蛋白和可溶性糖含量均表现为 F_2 Q 处理显著高于 F_1 Q 和 CK 处理， F_1 Q 处理显著高于 CK， F_2 Q 较 F_1 Q 处理的可溶性蛋白含量增加 18.9%，可溶性糖含量增加 5.0%。 F_1 、 F_2 施肥条件下，不同内生菌剂处理间的可溶性蛋白含量差异显著，其中 B9+YC89 对叶片可溶性蛋白含量促进效果最佳， F_1 B9+YC89 较 F_1 Q 处理提高 97%， F_2 B9+YC89 较 F_2 Q 处理提高 96.3%；单菌剂处理中，B9 表现最佳， F_1 B9 较 F_1 Q 处理提高 61.9%， F_2 B9 较 F_2 Q 处理提高 50.7%。2 种施肥处理下，不同内生菌剂处理间的可溶性糖含量差异显著，其中 B9+YC89 对可溶性糖含量促进效果最佳， F_1 B9+YC89 较 F_1 Q 处理提高 57.8%， F_2 B9+YC89 较 F_2 Q 处理提高 75.4%；单菌剂处理中，B9 表现最佳， F_1 B9 较 F_1 Q 处理提高 39.5%， F_2 B9 较 F_2 Q 处理提高 54.4%。

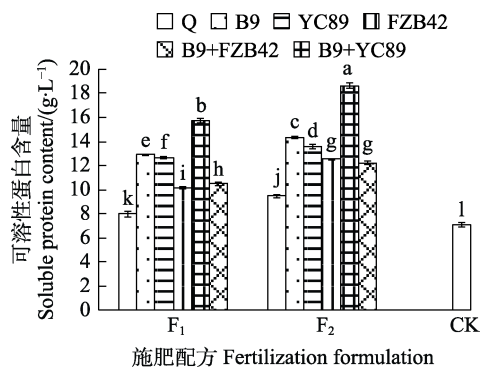


不同小写字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$)。

Different lowercase letters indicate significant difference among treatments ($P < 0.05$).

图 2 不同处理后云蔗 08-1609 苗期叶片的光合参数

Fig. 2 Photosynthetic parameters of leaves of Yuncane 08-1609 seedlings after different treatments

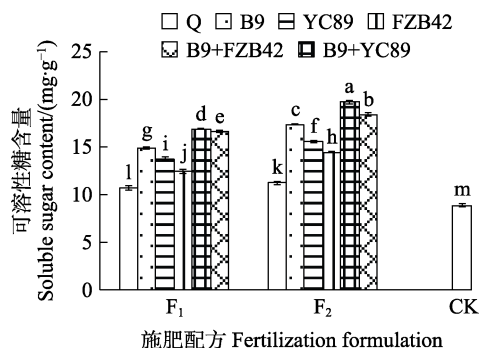


不同小写字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$)。

Different lowercase letters indicate significant difference among treatments ($P < 0.05$).

图 3 不同处理后云蔗 08-1609 苗期叶片可溶性蛋白含量
Fig. 3 Soluble protein content in leaves of Yuncane 08-1609 at seedling stage after different treatments

方差分析结果表明,黄腐酸钾和内生菌剂对于促进可溶性糖及可溶性蛋白含量存在极显著的交互作用,内生菌剂处理对 2 种可溶性物质含量的促进效果大于黄腐酸钾处理。黄腐酸钾和内生菌剂共同施用有利于在减少传统施肥 50% 的条件下,提高蔗苗叶片可溶性蛋白和可溶性糖含量,从而增强蔗苗抗逆性,有利于蔗苗生长发育。



不同小写字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$)。

Different lowercase letters indicate significant difference among treatments ($P < 0.05$).

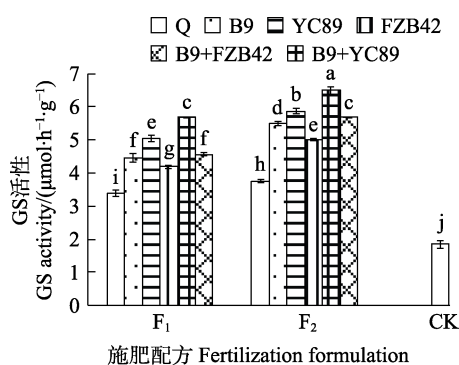
图 4 不同处理后云蔗 08-1609 苗期叶片可溶性糖含量
Fig. 4 Soluble sugar content in leaves of Yuncane 08-1609 at seedling stage after different treatments

总体来看, F₂ B9+YC89 处理对叶片可溶性蛋白及可溶性糖含量促进效果最佳, F₂ B9 处理次之。

2.6 不同处理对云蔗 08-1609 叶片中 GS 和 GOGAT 活性的影响

由图 5、图 6 可以看出,各处理对云蔗 08-1609 叶片中的谷氨酸合成酶 (GOGAT)、谷氨酰胺合成酶 (GS) 活性均表现出不同程度的促进作用。

F_2 处理能提高 GOGAT、GS 活性, GS 和 GOGAT 活性均表现为 F_2 Q 处理显著高于 F_1 Q 和 CK 处理, F_1 Q 处理显著高于 CK, F_2 Q 较 F_1 Q 处理的 GS 活性提高 11.1%, GOGAT 活性提高 5.8%。 F_1 处理下, F_1 B9+YC89 菌剂处理较 F_1 Q 处理的 GOGAT、GS 分别提高 30.7%、68.5%, 单菌剂处理中, YC89 表现最佳, F_1 YC89 处理较 F_1 Q 的 GOGAT、GS 分别提高 22.2%、49.5%; F_2 处理下, F_2 B9+YC89 菌剂处理较 F_2 Q 处理的 GOGAT、GS 分别提高 40%、73.1%, 单菌剂处理中, YC89 表现最佳, F_2 YC89 处理较 F_2 Q 处理的 GOGAT、GS 分别提高 35.8%、61.4%。

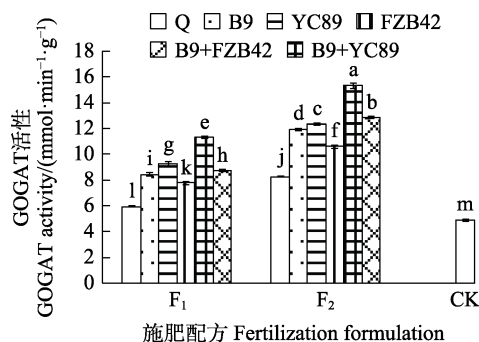


不同小写字母表示处理间差异显著 ($P<0.05$)。

Different lowercase letters indicate significant difference among treatments ($P<0.05$).

图5 不同处理后云蔗 08-1609 苗期叶片谷氨酰胺合成酶活性

Fig. 5 Glutamine synthetase in leaves of Yuncane 08-1609 at seedling stage after different treatments



不同小写字母表示处理间差异显著 ($P<0.05$)。

Different lowercase letters indicate significant difference among treatments ($P<0.05$).

图6 不同处理后云蔗 08-1609 苗期叶片谷氨酸合成酶活性

Fig. 6 Glutamate synthase in leaves of Yuncane 08-1609 at seedling stage after different treatments

方差分析结果表明, 黄腐酸钾和内生菌剂施用对 GS 的促进效应更强, 二者对于增强 GS 和

GOGAT 活性存在极显著交互作用, 其中, 以 F_2 B9+YC89 处理促进云蔗 08-1609 叶片中 GS 和 GOGAT 的活性效果最佳, 其次为 F_2 YC89 处理。

3 讨论

内生细菌能够定殖于宿主植物的组织内部, 促进植物生长发育, 提高植物抗逆性, 使用内生细菌作为生物肥料的趋势越来越明显^[32]。前人研究表明, 内生菌处理能够显著增强水稻秧苗的根系活力^[33]; 采用内生固氮菌浸种能有效提高多枝怪柳根系活力及株高^[34]; 接种特基拉芽孢杆菌 (*Bacillus tequilensis*) HS10 对花生株高、鲜质量和干质量与对照相比分别增加 23.0%、76.2%和 23.0%^[35]; 接种菌剂 B9 后, 叶片光合作用有一定程度的提升, 但在各甘蔗品种中表现不一致^[36]。与前人研究结果相似, 本试验研究表明, 施用甘蔗内生细菌 B9、YC89 以及模式菌株 FZB42 菌剂对云蔗 08-1609 甘蔗种苗萌发和苗期生长促进效果显著, 这是由于植物与内生菌在长期协同进化过程中, 形成共生互惠的关系, 内生菌通过溶磷、固氮、解钾和铁螯合等作用, 活化土壤养分, 分泌胞外多糖来促进植物根系生长, 调节植物体酶的浓度及活性, 从而影响植物叶片的光合作用^[37-39]。与前人研究结果的不同之处在于, 本研究进一步发现, B9+YC89 复合菌剂对甘蔗种苗萌发的促进效果最佳, 对于甘蔗苗期农艺性状、光合作用、叶片可溶性物质含量及 GS、GOGAT 活性的促生效应最强。这可能是由于微生物群相关的细菌间存在共生、竞争及捕食的相互作用, 共生相互作用涉及营养物质、酶和遗传物质的交换^[40], 相关研究表明, 细菌能够通过共生关系来确保它们的集体代谢活动并保持其与其他微生物的竞争力^[41]。B9 和 YC89 两种内生细菌均来源于甘蔗, 二者间可能产生了协同作用, 进一步促进了生长激素 IAA 等促生物质的产生, IAA 能够促进植物组织的生长、促进组织及器官分化等^[42], 通过促进根系发育, 进而强化了植株对水分和矿质营养元素的吸收利用^[43]。然而, 对于 B9 与 YC89 两种甘蔗内生菌间相互作用的具体机制还有待进一步研究。

有机肥是一种动植物残体 (如蔗叶蔗渣)、人畜粪便等通过微生物分解发酵所得的有机肥料, 含有大量有益物质及丰富的微量元素, 不仅能够

为甘蔗生长提供较为全面的营养,而且肥效长,可以增加和更新土壤有机质,促进微生物繁殖,改善土壤的理化性质和生物活性^[44]。黄腐酸钾是一种有机肥,前人研究表明,黄腐酸钾能缓解干旱低温胁迫对西葫芦幼苗生长的抑制作用,叶面积、鲜质量及干质量分别增加 13.89%、16.2%和 17.43%^[45];基肥减施 40%条件下,随黄腐酸钾施用量增加,羊角椒植株形态指标逐渐提升甚至超过常规施肥处理^[46];化肥施用量减少 25%时,施用黄腐酸钾能改善植物营养,增强光合参数和生长特性,并增加玉米的生物量^[47]。与前人研究结果相似,本研究发现,常规施化肥量减少 50%情况下,黄腐酸钾施用对甘蔗农艺性状、光合作用、可溶性物质含量及 GS、GOGAT 活性较传统施肥处理均有不同程度的促进作用。黄腐酸是黄腐酸钾中,分子量最小,活性最高的一类物质,相关研究发现,黄腐酸能提升植株体内酶活、参与调节代谢,促进作物吸收和转化养分,抑制分解叶绿素的酶活性,维持较高的叶绿素含量,显著提高植株光合作用^[48],因此,在减少常规化肥施用量条件下,黄腐酸钾施用能够有效维持甚至促进甘蔗生长

此外,本研究表明,黄腐酸钾与内生菌剂对甘蔗苗期苗长、茎粗、根系活力、鲜干质量及光合作用的促进具有交互影响,可能是因为黄腐酸钾与内生菌剂之间,在促进甘蔗苗期生长发育的过程中产生了某种协同作用,也有可能是黄腐酸钾施用影响了甘蔗根际微生态系统,从而增强了内生菌剂的促生效应。相关研究发现,黄腐酸钾能够调节根际微生物群落、渗透物质和酶活性,从而缓解植物所面对的非生物胁迫^[49],添加黄腐酸钾和腐植酸钾,能显著增加土壤 pH 和养分含量,使微生物群落的结构发生根本性变化^[50],腐殖酸和植物促生长细菌 PGPB 共同施用,能够增加玉米的地上部生物量及根干质量,促进玉米生长^[51]。黄腐酸钾与内生菌协同提升了甘蔗叶片细胞的合成能力,从而提高可溶性蛋白、甘蔗可溶性糖含量,进而提高甘蔗植株抗逆性^[20];同时,氮代谢关键酶 GS 和 GOGAT 活性的提高,增强了甘蔗的产量潜力^[52-54]。此外,土壤中细菌群落丰富,黄腐酸钾增大土壤的孔隙度,加快了细菌群落的繁殖速度,为富集根际有益微生物创造了条件,而施用内生菌剂(组合)能促进植株根系发育,提高肥料的利用率,并能促进根系分泌物

产生,从而富集根际细菌,在促进甘蔗生长发育的同时,有效增强其抗病性^[55-57]。但黄腐酸钾与内生菌的协同作用,以及二者对甘蔗根际微生态的具体影响和相关机制还有待进一步研究,

4 结论

本研究结果表明,相较于采用传统的清水浸种而言,内生菌剂浸种能有效促进甘蔗种苗生根发芽,其中,采用 B9+YC89 复合菌剂浸种催芽效果最佳,较清水浸种种芽长、根长及根数分别提高 116%、300%和 62.4%,因此,在甘蔗生产中,推荐采用 B9+YC89 复合菌剂浸种催芽,更有利于甘蔗种苗早发。

常规化肥推荐施用量减少 50%情况下,施用黄腐酸钾相较常规施用化肥能够显著提高甘蔗苗期茎粗、+1 叶面积、生物量、根系活力、光合参数、可溶性糖和可溶性蛋白含量及酶(GOGAT、GS)活性,说明施用黄腐酸钾有利于甘蔗产业减少常规化肥施用并有效促进甘蔗苗期生长。在减少 50%常规化肥施用量的条件下,B9+YC89 复合菌剂配合黄腐酸钾施用对云蔗 08-1609 甘蔗苗期促生效果最佳,为甘蔗产业生物有机肥的生产提供了新的思路,即通过向黄腐酸钾中添加已被分离并进行过深入研究的一种或多种甘蔗促生内生菌制成生物有机肥,该思路充分体现了“取之于蔗,用之于蔗”,在减少常规化肥施用的同时有利于甘蔗苗期早发快生、健壮苗势,从而增强蔗苗抗逆性,提高苗期存活率,为后期产量形成奠定坚实基础,推动了甘蔗产业减肥增效发展。

参考文献

- [1] 张跃彬, 吴才文. 国内外甘蔗产业技术进展及发展分析[J]. 中国糖料, 2017, 39(3): 47-50.
ZHANG Y B, WU C W. Progress and development analysis of sugarcane industry in the world[J]. Sugar Crops of China, 2017, 39(3): 47-50. (in Chinese)
- [2] 李杨瑞. 现代甘蔗学[M]. 北京: 中国农业出版社, 2010.
LI Y R. Modern sugarcane science[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2010. (in Chinese)
- [3] 曹钰培. 农业气象灾害对甘蔗生产的影响研究[J]. 中国糖料, 2024, 46(3): 45-52.
CAO Y P. Study on the impact of agro-meteorological disasters on sugarcane production[J]. Sugar Crops of China, 2024, 46(3): 45-52. (in Chinese)

- [4] 张跃彬, 邓军, 杨绍林, 樊仙, 李如丹, 全怡吉. 国际上甘蔗栽培的研究进展[J]. 甘蔗糖业, 2021, 50(2): 1-5, 140.
ZHANG Y B, DENG J, YANG S L, FAN X, LI R D, QUAN Y J. Research progress of sugarcane cultivation technology in the world[J]. Sugarcane and Canesugar, 2021, 50(2): 1-5, 140. (in Chinese)
- [5] 何天春, 闫青云. 硫、锌素养分对甘蔗产量与品质影响[J]. 广西蔗糖, 2003, 30(1): 20-22.
HE T C, YAN Q Y. Effects of sulfur and zinc nutrients on yield and quality of sugarcane[J]. Guangxi Sugarcane & Canesugar, 2003, 30(1): 20-22. (in Chinese)
- [6] ROSTAEI M, FALLAH S, CARRUBBA A, LORIGOOINI Z. Organic manures enhance biomass and improve content, chemical compounds of essential oil and antioxidant capacity of medicinal plants: a review[J]. Heliyon, 2024, 10(17): e36693-e36693.
- [7] 曾宪成. 中国腐植酸叶面肥行业调查报告[J]. 腐植酸, 2004(3): 1-5, 29.
ZENG X C. Survey report on humic acid foliar fertilizer industry in China[J]. Humic Acid, 2004(3): 1-5, 29. (in Chinese)
- [8] 郭伟, 王庆祥. 腐植酸浸种对盐碱胁迫下小麦根系抗氧化系统的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2011, 29(6): 222-226.
GUO W, WANG Q X. Effects of simulated drought stress by PEG on sprouting and seeding growth of flax (*Linum usitatissimum* L.) [J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2011, 29(6): 222-226. (in Chinese)
- [9] 王静蕾, 李文星, 亓守贺, 曲威. 镉胁迫下生化黄腐酸对玉米种子萌发及幼苗生长的影响[J]. 贵州农业科学, 2023, 51(4): 17-24.
WANG J L, LI W X, QI S H, QU W. Effects of biochemical fulvic acid on seed germination and seedling growth of maize under cadmium stress[J]. Guizhou Agricultural Sciences, 2023, 51(4): 17-24. (in Chinese)
- [10] 李艳红. 浅谈生化黄腐酸钾的实用技术[J]. 现代农业, 2015, 12: 34-35.
LI Y H. Practical discussion on the practical technology of biochemical potassium fulvic acid[J]. Modern Agriculture, 2015, 12: 34-35. (in Chinese)
- [11] SENA L, MICA E, VALÈ G, VACCINO P, PECCHIONI N. Exploring the potential of endophyte-plant interactions for improving crop sustainable yields in a changing climate[J]. Frontiers in Plant Science, 2024, 15: 1349401.
- [12] 王哲, 屠春宝, 马琨, 范雯慧, 吴鹏飞, 潘东福. 生物菌肥对土壤及农作物的影响研究进展[J]. 浙江农业科学, 2024, 65(10): 2523-2528.
WANG Z, TU C B, MA K, FAN W H, WU C F, PAN D F. Research progress on the effects of biological fertilizer on soil and crops[J]. Journal of Zhejiang Agricultural Sciences, 2024, 65(10): 2523-2528. (in Chinese)
- [13] PARRAY J A, JAN S, KAMILI A N, QADRI R A, EGAMBERDIEVA D, AHMAD P. Current perspectives on plant growth-promoting rhizobacteria[J]. Journal of Plant Growth Regulation, 2016, 35(3): 877-902.
- [14] 潘晓曦, 张淋淋, 关一鸣, 张悦, 王秋霞. 植物内生促生菌多样性及促生作用研究进展[J/OL]. 特产研究, (2024-07-29) [2024-09-10]. https://kns.cnki.net/kcms2/article/abstract?v=VcTOyLYtvEx64hDl4Mph_3T0Wf7SNdWiTFZ-UH0Y3LpELa-LF-Hu5JbLkk7wj1GANY6tF1HUbwGyqqkePcnGkwUTZrNJxMwm9-3RX_5g42Rh0f0CtgXqX6_h_k4Z4fB9Y8yQGsoAZr2a0n02gOTVGwNk7yMNscJxW6d1CHYGlucfgMEG8S1EIWSOV37_jh&uniplatform=NZKPT&language=CHS.
PAN X X, ZHANG L L, GUAN Y M, ZHANG Y, WANG Q X. Research progress on diversity and growth promoting effects of plant growth promoting endophytes[J/OL]. Special Wild Economic Animal and Plant Research, (2024-07-29) [2024-09-10]. https://kns.cnki.net/kcms2/article/abstract?v=VcTOyLYtvEx64hDl4Mph_3T0Wf7SNdWiTFZ-UH0Y3LpELa-LF-Hu5JbLkk7wj1GANY6tF1HUbwGyqqkePcnGkwUTZrNJxMwm9-3RX_5g42Rh0f0CtgXqX6_h_k4Z4fB9Y8yQGsoAZr2a0n02gOTVGwNk7yMNscJxW6d1CHYGlucfgMEG8S1EIWSOV37_jh&uniplatform=NZKPT&language=CHS. (in Chinese)
- [15] IMRAN M, SUN Z, ELYOUSR A A K, ALI H, ALDAYEL F M, LI C. One stone two birds: endophytes alleviating trace elements accumulation and suppressing soilborne pathogen by stimulating plant growth, photosynthetic potential and defense related gene expression[J]. Journal of Hazardous Materials, 2024, 476: 135084.
- [16] 狄义宁, 刘鲁峰, 胡一凡, 谢林艳, 李咏梅, 何鹏杰, 崔文艳, 何鹏飞, 李富生, 何丽莲. 甘蔗内生菌 B9 的鉴定及其促生长机制和定殖能力的研究[J]. 中国土壤与肥料, 2019, 3: 186-193.
DI Y N, LIU L F, HU Y F, XIE L Y, LI Y M, HE P J, CUI W Y, HE P F, LI F S, HE L L. Identification of endophyte B9 from sugarcane and its growth-promoting mechanism and colonization ability[J]. Soil and Fertilizer Sciences in China, 2019, 3: 186-193. (in Chinese)
- [17] 郭士伟, 夏士健, 朱虹霞, 张云华, 施卫明. 水稻根系活力测定方法及超级稻两优培九生育后期根系活力研究[J]. 土壤, 2012, 44(2): 308-311.
GUO S W, XIA S J, ZHU H X, ZHANG Y H, SHI W M. Factors influencing collecting amount of rice roots bleeding and investigation on roots vigor after heading[J]. Soils, 2012, 44(2): 308-311. (in Chinese)

- [18] 单羽, 任晓宁, 姚禹希, 李鑫, 李雪梅. 碱蓬内生菌 EF0801 对感染稻瘟病水稻幼苗抗氧化酶及叶绿素荧光的影响[J]. 西南农业学报, 2021, 34(12): 2646-2652.
SHAN Y, REN X N, YAO Y X, LI X, LI X M. Effect of *suaeda salsa* endophyte EF0801 on antioxidant enzymes and chlorophyll fluorescence in rice seedlings infected with rice blast[J]. Southwest China Journal of Agricultural Sciences, 2021, 34(12): 2646-2652. (in Chinese)
- [19] 陈珣, 杨镇, 曹君, 刘国丽, 龚娜. 人参内生菌提取物对硝酸盐胁迫下番茄幼苗生长及氮代谢相关指标的影响[J]. 江苏农业学报, 2017, 33(5): 1111-1116.
CHEN X, YANG Z, CAO J, LIU G L, GONG N. Effects of extracts from Ginseng endophytic fungi on the growth and nitrogen metabolism of tomato seedlings under $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ stress[J]. Jiangsu Journal of Agricultural Sciences, 2017, 33(5): 1111-1116. (in Chinese)
- [20] 李佐同, 靳学慧, 张亚玲, 吴成龙. 水稻幼苗可溶性糖及可溶性蛋白含量与抗瘟性的关系[J]. 北方水稻, 2009, 39(4): 6-9.
LI Z T, JIN X H, ZHANG Y L, WU C L. The relationship between soluble protein, soluble sugar content and rice blast resistance of rice seedlings[J]. Northern Rice, 2009, 39(4): 6-9. (in Chinese)
- [21] 狄义宁, 谢林艳, 谷书杰, 马豪, 刘鲁峰, 何丽莲, 李富生. 甘蔗及甘蔗近缘属内生菌的筛选、鉴定与功能研究[J]. 中国农业大学学报, 2021, 26(11): 70-83.
DI Y N, XIE L Y, GU S J, MA H, LIU L F, HE L L, LI F S. Screening, identification and biological function study of endophytic bacteria isolated from sugarcane and its related genera[J]. Journal of China Agricultural University, 2021, 26(11): 70-83. (in Chinese)
- [22] 谢林艳, 狄义宁, 何丽莲, 刘鲁峰, 沈先岳, 李富生. 甘蔗赤腐病内生拮抗菌 YC89 的筛选及鉴定[J]. 微生物学报, 2020, 60(4): 739-748.
XIE L Y, DI Y N, HE L L, LIU L F, SHEN X Y, LI F S. Screening and identification of endophytic antagonistic Bacteria YC89 in sugarcane red rot[J]. Acta Microbiologica Sinica, 2020, 60(4): 739-748. (in Chinese)
- [23] FAN B, WANG C, SONG X F, DING X L, WU L M, WU H J, GAO X W, RAINERET B. *Bacillus velezensis* FZB42 in 2018: the gram-positive model strain for plant growth promotion and biocontrol[J]. Front Microbiol, 2018, 9: 2491.
- [24] 苏英京. 微生物肥替代化肥的实践研究[J]. 农业科技通讯, 2019, 571(7): 253-255.
SU Y J. Practical research on the substitution of microbial fertilizer for chemical fertilizer[J]. Bulletin of Agricultural Science and Technology, 2019, 571(7): 253-255. (in Chinese)
- [25] 郑国栋, 龚岫, 黄炎霞, 黄金堂. 不同用量有机肥与菌剂组合对花生产量、品质及土壤肥力的影响[J]. 花生学报, 2022, 51(2): 25-31, 48.
ZHENG G D, GONG S, HUANG Y X, HUANG J T. Effects of different amounts of combination of organic fertilizer and microbial agent on yield, quality of peanut and soil fertility[J]. Journal of Peanut Sinica, 2022, 51(2): 25-31, 48. (in Chinese)
- [26] 孙得翔, 石铭福, 王勇, 陈喜鹏, 刘玉汇, 张俊莲, 秦舒浩. 有机肥部分替代化肥对马铃薯农艺性状、产量和品质的影响[J]. 甘肃农业大学学报, 2022, 57(6): 43-51.
SUN D X, SHI M F, WANG Y, CHEN X P, LIU Y H, ZHANG J L, QIN S H. Effects of partial substitution of chemical fertilizer with organic fertilizer on potato agronomic traits, yield and quality[J]. Journal of Gansu Agricultural University, 2022, 57(6): 43-51. (in Chinese)
- [27] 胡清玉, 刘力伟, 刘欣, 党建美, 范军印, 王树桐, 曹克强. 木美土里生物菌肥对苹果树腐烂病的防治作用评价[J]. 中国果树, 2015(4): 52-55.
HU Q Y, LIU L W, LIU X, DANG J M, FAN J Y, WANG S T, CAO K Q. Evaluation of the control effect of Mumeituli biological fertilizer on apple tree rot disease[J]. China Fruits, 2015(4): 52-55. (in Chinese)
- [28] 周一帆, 杨林生, 孟博, 战健, 邓燕. 中国甘蔗主产区产量差及影响因素分析[J]. 中国农业科学, 2021, 54(11): 2377-2388.
ZHOU Y F, YANG L S, MENG B, ZHAN J, DENG Y. Analysis of yield gaps and limiting factors in China's main sugarcane production areas[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2021, 54(11): 2377-2388. (in Chinese)
- [29] 樊仙, 全怡吉, 代光伟, 杨绍金, 陈国伟, 邓军. 配施黄腐酸钾对甘蔗生长和产量的影响[J]. 亚热带农业研究, 2022, 18(1): 7-11.
FAN X, QUAN Y J, DAI G W, YANG S J, CHEN G W, DENG J. Effect of supplementation of potassium fulvic acid on sugarcane growth and yield[J]. Subtropical Agriculture Research, 2022, 18(1): 7-11. (in Chinese)
- [30] 张志良, 瞿伟菁. 植物生理学实验指导[M]. 北京: 高等教育出版社, 2003.
ZHANG Z L, QU W J. Experimental guidance of plant physiology[M]. Beijing: Higher Education Press, 2003. (in Chinese)
- [31] 高俊凤. 植物生理学实验指导[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006.
GAO J F. Experimental guidance of plant physiology[M]. Beijing: Higher Education Press, 2006. (in Chinese)
- [32] SEHRISH M, MUHAMMAD S, RIZWAN M T, ADNAN A, SHAH M R N, TARIQ H M B, SALEEM M H, SALEHA S, TAQQI M A, MUJAHID H, ADNAN M S. Interaction be-

- tween bacterial endophytes and host plants[J]. *Front Plant Science*, 2023, 13: 1092105.
- [33] 吴秀红, 戚厚芸, 孙婷, 成钟, 张天雨, 张振华. 内生菌根菌剂对水稻秧苗生长及生理特性的影响[J]. *江苏农业科学*, 2018, 46(21): 65-68.
- WU X H, QI H Y, SUN T, CHENG Z, ZHANG T Y, ZHANG Z H. Effects of endophytic mycorrhizal agents on growth and physiological characteristics of rice seedlings[J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2018, 46(21): 65-68. (in Chinese)
- [34] 罗达. 干旱及盐胁迫下内生固氮菌接种对多枝怪柳的生理生态效应[D]. 乌鲁木齐: 新疆农业大学, 2011.
- LUO D. Ecophysiological effect of inoculation with endophytic diazotrophic bacteria strains to *Tamarix ramosissima* Ledeb. under salt-drought stress[D]. Urumqi: Xinjiang Agricultural University, 2011. (in Chinese)
- [35] 张东艳, 刘晔, 吴越, 王国文, 万兵兵, 姜瑛. 花生根际产 IAA 菌的筛选鉴定及其效应研究[J]. *中国油料作物学报*, 2016, 38(1): 104-110.
- ZHANG D Y, LIU Y, WU Y, WANG G W, WAN B B, JIANG Y. Isolation and identification of IAA-producing strains from peanut rhizosphere and its promoting effects on peanut growth[J]. *Chinese Journal of Oil Crop Sciences*, 2016, 38(1): 104-110. (in Chinese)
- [36] 狄义宁, 李自超, 谢林艳, 刘鲁峰, 谷书杰, 马豪, 李富生, 何丽莲. 接种甘蔗内生菌 B9 对不同甘蔗品种生长的影响[J]. *热带作物学报*, 2021, 42(1): 149-158.
- DI Y N, LI Z C, XIE L Y, LIU L F, GU S J, MA H, LI F S, HE L L. Impact of endophyte inoculation on the growth of different sugarcane varieties[J]. *Chinese Journal of Tropical Crops*, 2021, 42(1): 149-158. (in Chinese)
- [37] SHABANAMOL S, DIVYA K, GEORGE K T, RISHAD K S, SREEKUMAR T S, JISHA M S. Characterization and *in planta* nitrogen fixation of plant growth promoting endophytic diazotrophic *Lysinibacillus sphaericus* isolated from rice (*Oryza sativa*)[J]. *Physiological and Molecular Plant Pathology*, 2018, 102: 46-54.
- [38] 姚领爱, 胡之璧, 王莉莉, 周吉燕, 黎万奎. 植物内生菌与宿主关系研究进展[J]. *生态环境学报*, 2010, 19(7): 1750-1754.
- YAO L A, HU Z B, WANG L L, ZHOU J Y, LI W K. Research development of the relationship between plant endophyte and host[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2010, 19(7): 1750-1754. (in Chinese)
- [39] 丁绍武, 张鹏, 刘梦铭. 植物内生菌对植物生长的影响研究进展[J]. *现代农业科技*, 2020, 11: 132-134.
- DING S W, ZHANG P, LIU M M. Research progress on the effect of plant endophytes on plant growth[J]. *Modern Agricultural Science and Technology*, 2020, 11: 132-134. (in Chinese)
- [40] KERN L, ABDEEN S K, KOLODZIEJCZYK A A, ELINAV E. Commensal inter-bacterial interactions shaping the microbiota[J]. *Current Opinion in Microbiology*, 2021, 63: 158-171.
- [41] GE Z B, ZHAI Z Q, XIE W Y, DAI J, HUANG K, JOHNSON D R, ZHAO F J, WANG P. Two-tiered mutualism improves survival and competitiveness of cross-feeding soil bacteria[J]. *The ISME Journal*, 2023, 17(11): 2090-2102.
- [42] 朱振华. 施用吡啶乙酸对不同玉米品种幼苗镉吸收和生理生化影响[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2018.
- ZHU Z H. Effect of Indole acetic acid on cadmium uptake and physiological and biochemical changes of different maize cultivars[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2018. (in Chinese)
- [43] 徐慧芳, 陈栩. 生长素研究现状及其在大豆育种中的应用[J]. *中国科学: 生命科学*, 2024, 54(2): 247-259.
- XU H F, CHEN X. Current opinions on auxin research and its application in soybean breeding[J]. *Scientia Sinica (Vita)*, 2024, 54(2): 247-259. (in Chinese)
- [44] 宁川川, 王建武, 蔡昆争. 有机肥对土壤肥力和土壤环境质量的影响研究进展[J]. *生态环境学报*, 2016, 25(1): 175-181.
- NING C C, WANG J W, CAI K Z. The effects of organic fertilizer on soil fertility and soil environmental quality: a review[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2016, 25(1): 175-181. (in Chinese)
- [45] 孔繁荣, 李海平, 郭文忠, 武月胜, 郭建林, 周可杰. 干旱低温复合胁迫下黄腐酸钾对西葫芦幼苗生长和生理生化特性的影响[J]. *山东农业科学*, 2024, 56(1): 74-80.
- KONG F R, LI H P, GUO W Z, WU Y S, GUO J L, ZHOU K J. Effects of potassium fulvic acid on growth and physiological and biochemical characteristics of zucchini seedlings under combined stress of drought and low temperature[J]. *Shandong Agricultural Sciences*, 2024, 56(1): 74-80. (in Chinese)
- [46] 姬振蒙, 朱丽, 顾闽峰, 李斌, 陈满霞, 费月跃. 减施基肥及追施黄腐酸钾对羊角椒生长及产量的影响[J]. *长江蔬菜*, 2023, 22: 73-76.
- JI Z M, ZHU L, GU M F, LI B, CHEN M X, FEI Y Y. Effects of basal fertilizer reduction and top dressing of potassium fulvic acid on growth and yield of horn pepper[J]. *Journal of Changjiang Vegetables*, 2023, 22: 73-76. (in Chinese)
- [47] SUPANUN N, CHOOSAK J, CHAISIT T, WEERASIN S, KANOKPORN C, KANAPOL J. Potassium fulvate for improving nutrient status, photosynthesis, and agronomic traits

- of maize[J]. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 2022, 53(13): 1607-1622.
- [48] 李大勇. 黄腐酸对番茄生长和产量及光合特性的影响[J]. *农业与技术*, 2017, 37(22): 52.
- LI D Y. Effects of fulvic acid on growth, yield and photosynthetic characteristics of tomato[J]. *Agriculture and Technology*, 2017, 37(22): 52. (in Chinese)
- [49] ZHANG M M, LI X Y, WANG X L, FENG J P, ZHU S P. Potassium fulvic acid alleviates salt stress of citrus by regulating rhizosphere microbial community, osmotic substances and enzyme activities[J]. *Frontiers in Plant Science*, 2023, 14: 1161469.
- [50] JIN Q, ZHANG Y Y, WANG Q X, LI M J, SUN H, LIU N, ZHANG L L, ZHANG Y, LIU Z B. Effects of potassium fulvic acid and potassium humate on microbial biodiversity in bulk soil and rhizosphere soil of *Panax ginseng*[J]. *Microbiological Research*, 2022, 254: 126914.
- [51] CANELLAS L P, SILVA S F D, OLK D C, OLIVARES F L. Foliar application of plant growth-promoting bacteria and humic acid increase maize yields[J]. *Journal of Food Agriculture & Environment*, 2015, 1313(11): 131-138.
- [52] 袁丹. 不同施氮水平对不同甘蔗品种叶绿体结构和 GS 表达的影响[D]. 南宁: 广西大学, 2017.
- YUAN D. Effects of different nitrogen levels on chloroplast structure and GS expression in different sugarcane varieties[D]. Nanning: Guangxi University, 2017. (in Chinese)
- [53] 冯万军, 邢国芳, 牛旭龙, 窦晨, 韩渊怀. 植物谷氨酰胺合成酶研究进展及其应用前景[J]. *生物工程学报*, 2015, 31(9): 1301-1312.
- FENG W J, XING G F, NIU X L, DOU C, HAN Y H. Progress and application prospect of glutamine synthase[J]. *Chinese Journal of Biotechnology*, 2015, 31(9): 1301-1312. (in Chinese)
- [54] KUSANO M, TABUCHI M, FUKUSHIMA A, FUNAYAMA K, DIAZ C, KOBAYASHI M, HAYASHI N, TSUCHIYA Y N, TAKAHASHI H, KAMATA A, YAMAYA T, SAITO K. Metabolomics data reveal a crucial role of cytosolic glutamine synthetase 1;1 in coordinating metabolic balance in rice[J]. *Plant Journal*, 2011, 66(3): 456-466.
- [55] 李倩, 马琨, 冶秀香, 杨金娟, 牛红霞, 马玲. 不同培肥方式对土壤有机碳与微生物群落结构的影响[J]. *中国生态农业学报*, 2018, 26(12): 1866-1875.
- LI Q, MA K, YE X X, YANG J J, NIU H X, MA L. Effect of fertilization managements on soil organic carbon and microbial community structure[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2018, 26(12): 1866-1875. (in Chinese)
- [56] 钟俊杰, 李晓镜, 尹泽润, 盛浩, 聂三安. 紫泥田水稻土细菌群落对不同农艺调控措施的响应[J]. *农业环境科学学报*, 2022, 41(2): 367-374.
- ZHONG J J, LI X J, YIN Z R, SHENG H, NIE S A. Response of bacterial communities to different agronomic regulation measures in purple mud paddy fields[J]. *Journal of Agri-Environmental Science*, 2022, 41(2): 367-374. (in Chinese)
- [57] XIE L Y, LIU L F, LUO Y J, RAO X B, LV S Z, QIAN Z F, DI Y N, LOU H B, HE L L, LI F S. *Bacillus velezensis* YC89-mediated recruitment of rhizosphere bacteria improve resistance against sugarcane red rot[J]. *Chemical and Biological Technologies in Agriculture*, 2024, 11(1): 114.