

DOI: 10.11766/trxb202009100511

于亚楠, 邬海燕, 王盼星, 丁明月, 马行聪, 姜斯琪, 蔡枫, 沈其荣, 陈巍. 木霉生物有机肥应用于滨海盐土甘蓝种植的生物效应[J]. 土壤学报, 2022, 59 (4): 1112–1124.

YU Ya'nan, WU Haiyan, WANG Panxing, DING Mingyue, MA Xingcong, JIANG Siqi, CAI Feng, SHEN Qirong, CHEN Wei. Biological Effect of *Trichoderma*-enriched Biofertilizers on Cabbage Cultivation in Coastal Saline Soil[J]. Acta Pedologica Sinica, 2022, 59 (4): 1112–1124.

木霉生物有机肥应用于滨海盐土甘蓝种植的生物效应*

于亚楠, 邬海燕, 王盼星, 丁明月, 马行聪, 姜斯琪, 蔡枫, 沈其荣,
陈巍[†]

(江苏省固体有机废弃物资源化高新技术研究重点实验室, 江苏省有机固体废弃物资源化协同创新中心, 南京农业大学, 南京 210095)

摘 要: 本文旨在研究滨海盐土种植体系下, 2 种木霉生物有机肥与不同比例化肥配施对甘蓝产量、结球品质及土壤理化性质的影响。以甘蓝 (*Brassica oleracea* L.) “绿宝石”为试验材料, 分别设置田间试验和盆栽试验, 设计 8 个处理: 不施肥对照 (CON)、100% 化肥 (CF)、30% 的木霉生物有机肥+70% 化肥、60% 的木霉生物有机肥+40% 化肥、100% 的木霉生物有机肥 (无化肥), 其中木霉生物有机肥分 2 种, 分别由贵州木霉 *T. guizhouense* NJAU 4742 和滩涂木霉 *T. arenarium* 1A131 菌株制成。施肥处理间总氮、总磷和总钾养分均等。盆栽和田间试验结果均表明, 60% 木霉生物有机肥+40% 的化肥处理, 相比于 CON 和 CF 处理可显著提高甘蓝的地上部鲜物质量、叶绿素含量 (SPAD 值) 和根系生物量, 且 30% 和 60% 生物有机肥配施化肥的处理均显著提高了土壤硝态氮和有效磷含量 ($P < 0.05$)。同时, 田间试验表明, 相对于其他处理, 60% 的木霉生物有机肥+40% 化肥处理对甘蓝产量的提高和结球品质的改善 (还原糖、维生素 C 含量提高, 硝酸盐含量降低) 效果最为显著 ($P < 0.05$)。综上, 在滨海盐土甘蓝种植体系中, 60% 的木霉生物有机肥与 40% 化肥配施为最优配比。该施肥模式下, 甘蓝根系生长发育最佳; 且与通过施肥引入的养分相比, 功能菌木霉在该生物效应中发挥更为重要的作用。

关键词: 木霉功能菌; 生物有机肥; 盐土; 甘蓝; 根系发育; 产量与品质

中图分类号: S144.1 文献标志码: A

Biological Effect of *Trichoderma*-enriched Biofertilizers on Cabbage Cultivation in Coastal Saline Soil

YU Ya'nan, WU Haiyan, WANG Panxing, DING Mingyue, MA Xingcong, JIANG Siqi, CAI Feng, SHEN Qirong, CHEN Wei[†]

(Jiangsu Provincial Key Lab for Organic Solid Waste Utilization, Jiangsu Collaborative Innovation Center for Solid Organic Waste Resource Utilization, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China)

* 国家重点研发计划项目 (2016YFD0800605)、江苏省自然科学基金项目 (BK20180533) 和大学生创新创业训练专项计划项目 (S20190038) 共同资助 Supported by the National Key Research and Development Program of China (No. 2016YFD0800605), the Natural Science Foundation of Jiangsu Province of China (No. BK20180533) and the College Students' Innovative Entrepreneurial Training Plan Program of China (No. S20190038)

[†] 通讯作者 Corresponding author, E-mail: chenwei@njau.edu.cn

作者简介: 于亚楠 (1996—), 女, 河南人, 硕士研究生, 主要从事功能微生物肥料研究。E-mail: 3057859393@qq.com

收稿日期: 2020-09-10; 收到修改稿日期: 2021-03-06; 网络首发日期 (www.cnki.net): 2021-05-06

Abstract: 【Objective】 The area of coastal saline soil is recognized as an important land resource with utilization value for agriculture. However, coastal mudflat area is usually characterized by poor plant growth and low microbial activity due to its high salinity suppressing most crops via the high osmotic stress, nutrient deficiency, toxicity and poor physical soil conditions. Soil microbes like *Trichoderma* spp. play a significant role in assisting plants to tolerate salinity stress. The present study aimed to investigate the effect of two *Trichoderma*-enriched bio-organic fertilizers on the yield and quality of cabbages (*Brassica oleracea* L.) grown in coastal saline soil as well as their effect on soil nutrient availabilities. 【Method】 Field and pot experiments were carried out with eight treatments: 100% chemical fertilizer (CF), 30% bio-organic fertilizer plus 70% chemical fertilizer, 60% bio-organic fertilizer plus 40% chemical fertilizer, 100% bio-organic fertilizer (without chemical fertilizers), and using the non-fertilization treatment as the control (CON). The two bio-organic fertilizers were respectively prepared with strains of *Trichoderma guizhouense* NJAU 4742 (which is commercially available in China as a plant-growth-promoting agent) and *T. arenarium* 1A131 (which was previously isolated from saline mudflat of Dafeng, Jiangsu). The nutrient load of the seven fertilization treatments was set up to equal in the aspect of the contents of total N, P and K. 【Result】 Results obtained from both the field and pot experiments demonstrated that there was no significant difference in the effect of the two bio-organic fertilizers. Compared to the non-fertilized control (CON) and the full chemical fertilization (CF), 30% or 60% bio-organic fertilizer significantly increased the contents of nitrate N and available P in soil. The treatment of 60% bio-organic fertilizer plus 40% chemical fertilizer influenced the cabbage growth by significantly ($P < 0.05$) promoting the biomass of shoot and roots, and the chlorophyll content (shown by the SPAD values) in leaves. Among the fertilization treatments, application of 60% bio-organic fertilizer plus 40% chemical fertilizer resulted in the significantly highest yield and best quality of cabbage heads (with increased sugar and vitamin C contents, and less nitrate accumulation, $P < 0.05$). Moreover, principal component analysis (PCA) demonstrated that the significantly better plant growth effect did not correspond to the variation of soil nutrients. Rather, it may be related to the loaded microbes which were previously reported to be able to promote plant growth via producing phytohormones and activating the local microbiome. 【Conclusion】 Application of 60% bio-organic fertilizer combined with 40% chemical fertilizer, which allows the roots to develop to the maximum in such a saline ecosystem, is the optimized fertilization regime to cultivate cabbages in saline agriculture in coastal mud flats. Besides, compared to the nutrient load from the fertilizers, the function of the *Trichoderma* strains was found to be more directly linked to the plant-beneficial effect of this fertilization regime. The biological effect from the applied strains did not significantly rely on the origination of a specific strain. Moreover, the requirement of applying a local saline soil strain to the saline agriculture was not fully addressed here at least not in this study, and thus, needs further investigations.

Key words: *Trichoderma* functional strain; Bio-organic fertilizer; Saline soil; Cabbage; Root development; Yield and quality

我国有 1 亿 hm^2 左右盐土, 是我国主要的后备土地资源, 随着其自然脱盐碱和人为改良速度的加快, 盐土的农业利用成为我国农业科技和生产中的重要组成部分^[1-2]。江苏沿海滩涂盐土总面积为 68.73 万 hm^2 , 约占全国滩涂总面积的 1/4, 且每年净增面积约 1 100 hm^2 。虽然江苏沿海滩涂围垦开发历史悠久, 已取得巨大社会经济效益, 但目前, 盐渍化依然是制约苏北海涂土壤开发利用的主要障碍因子之一, 其土壤盐分重、保水保肥性差、结构不稳定, 不经改良作物很难适应生长^[3]。目前, 江苏滩涂种植的作物出苗率低, 产量仅为一般耕地的 50% 左右^[4]。

因此, 前人尝试通过化学、物理、生物和工程等多种技术手段, 对滨海盐土进行改良^[5-6]。Liu 等^[7]用化学改良剂石膏改善盐土的物理和化学性质。此外, 施加牛粪、生物质炭、有机肥和木醋液等也一定程度上改良了盐渍土^[8]。有研究^[2]表明有机肥是改良土壤性状的优良材料, 不仅能疏松板结的土壤, 提高土壤养分含量、微生物活性, 而且成本低廉、质量稳定。吕丽媛等^[9]将菌肥和农家肥应用于滨海盐土, 研究其对蓖麻生长的影响, 结果表明有机肥能很好地调控盐胁迫下蓖麻苗的生理适应性, 有利于用滨海盐土培育蓖麻。刘彩霞和黄为一^[10]将有机物和耐盐碱细菌混合施用于滨海盐土, 显著促进

了滨海盐土团聚体的形成。王福友等^[11]研究表明,添加蚯蚓粪或菌肥能够调控土壤生物性状以发挥土壤自身生物潜力改良滨海盐土质量。因此,利用微生物有机肥改良滨海盐土也是行之有效的方法。

木霉菌是一类具有农业开发应用前景的有益真菌。研究发现,木霉菌不仅对植物病原菌有拮抗作用,还可促进多种植物生长。在盐胁迫条件下,某些木霉菌可诱导植物产生系统抗性,降低盐胁迫对植物的不良影响,从而缓解植物在盐胁迫条件下的生长抑制^[12-14]。Brotman 等^[15]也发现,拟棘孢木霉(*Trichoderma asperelloides*)可通过 ACC-脱氨酶降解乙烯的前体以提高木霉菌自身和寄主植物对盐胁迫的耐受度,暗示了利用木霉菌作为盐土作物栽培促生因子的可行性。本实验室先前的工作也发现,减施 25% 的化肥同时配施功能木霉菌 *T. guizhouense* NJAU 4742 制成的生物有机肥,可通过调控土壤养分有效性和土壤酶活性来改善盐土的可耕种性,但该研究并未对生物有机肥与化肥的配施比例进行优化^[16]; Jiang 等^[3]的研究表明,生物有机肥能够显著改变盐土作物的细菌区系,但过多的肥料施入,特别是化肥,反而会抑制微生物菌群活性。因此,很有必要对盐土中施入肥料的形式与数量,比如生物有机肥与化肥的配比等开展研究。

本研究采用自主研发的含滩涂土著木霉菌株 *T. arenarium* 1A131 生物有机肥和已报道的具有显著生防促生功能的木霉菌株 *T. guizhouense* NJAU 4742 生物有机肥,探究(1)木霉生物有机肥与化肥应用于滨海盐土的最优配施比例;(2)木霉生物有机肥的作用机制;(3)土著滩涂木霉与非土著木霉在盐土农业中的作用是否有显著差异,旨在为木霉功能菌株的应用和木霉生物有机肥的推广提供基础数据和参考案例。

1 材料与方 法

1.1 供试菌株和植株品种

贵州木霉 *Trichoderma guizhouense* NJAU 4742 (CGMCC 3308) 和瑞氏木霉 *T. reesei* 917 (QM6a) 由南京农业大学江苏省固体有机废弃物资源化高新技术研究重点实验室提供。滩涂木霉 *T. arenarium* 1A131 (CGMCC 19611) 菌株由本实验室筛选并保

存^[17]。甘蓝品种为“绿宝石”,购于武汉市九头鸟种菌有限公司。

1.2 菌株的耐盐性鉴定

将实验室保存的木霉 *T. guizhouense* NJAU 4742、木霉 *T. arenarium* 1A131 和木霉 *T. reesei* 917 活化后,接种至不同 NaCl 浓度的马铃薯葡萄糖固体培养基(PDA, BD Difco, Becton, 美国)上(15 mL), 25℃培养 4 d, NaCl 浓度设置为 3 个梯度,即 0 mmol·L⁻¹、500 mmol·L⁻¹、750 mmol·L⁻¹,每个浓度 3 个重复,于 24 h、48 h、60 h、72 h、96 h 分别测量 3 种木霉菌的菌落直径,观察测试菌株的生长情况。

1.3 木霉生物有机肥的制备

木霉 *T. guizhouense* NJAU 4742 和木霉 *T. arenarium* 1A131 孢子悬液的制备参见文献^[18],化肥包括尿素、过磷酸钙和硫酸钾(N、P、K 质量分数分别为 46%、12%、51%),牛粪有机肥由江苏峻德生态农业科技有限公司提供,pH 7.42,含盐量 25.39 g·kg⁻¹,有机质 457.5 g·kg⁻¹,总氮、总磷、总钾含量分别为 13.25 g·kg⁻¹、17.78 g·kg⁻¹、24.34 g·kg⁻¹。生物有机肥由木霉 *T. guizhouense* NJAU 4742 或 *T. arenarium* 1A131 与牛粪有机肥二次发酵制成,具体过程如下:将 PDA 培养获得的木霉孢子悬液接种至牛粪有机肥中,二次发酵 7 d,其最终活菌数达到 10⁶ cfu·g⁻¹ 以上。

1.4 盆栽试验设计

盆栽试验于南京农业大学智能气候室进行,温度控制在 20~25℃之间,光照时间 12 h。试验共设置 8 个处理,分别为:不施肥对照(CON),100% 化肥(CF),70%化肥+30%木霉 *T. guizhouense* NJAU 4742 生物有机肥(30%BFG),40%化肥+60%木霉 *T. guizhouense* NJAU 4742 生物有机肥(60%BFG),100%木霉 *T. guizhouense* NJAU 4742 生物有机肥(100%BFG),70%化肥+30%木霉 *T. arenarium* 1A131 生物有机肥(30%BFA),40%化肥+60%木霉 *T. arenarium* 1A131 生物有机肥(60%BFA),100%木霉 *T. arenarium* 1A131 生物有机肥(100%BFA)。每盆装 0.5~1 mm 沙子 1 kg,盆钵直径 12 cm,底部不开孔(以防止盐分流失),每盆种植甘蓝苗 1 株,每个处理设置 10 个重复。其中 100%BFG 和 100%BFA 处理每盆分别施入 10 g 木霉生物有机肥(沙子干物质量的 1%)。其他施肥处理以此为标准,不足养分用

化肥补齐,施肥处理间总氮、总磷和总钾养分均等。移苗一周后每盆浇 100 mL 0.5% 盐水(仅含 NaCl)和 10%MS 营养液(含硝酸钾、硝酸铵、氯化钙、硫酸镁、磷酸二氢钾等基础盐类),以 KOH 调节 pH 至 8.0,以此模拟滨海盐土土壤环境,每隔 3~5 天补充 5 mL 的 10%MS 营养液,保证植株养分供应。

1.5 田间试验设计

田间试验在江苏省盐城市大丰区剑丰农场滩涂围垦的大棚内进行,供试土壤为滨海盐土,土壤基本理化性状如下: pH 8.57,电导率(EC) 1.21 $\text{mS}\cdot\text{cm}^{-1}$,含盐量 4.45 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$,有机质 4.54 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$,全氮 0.14 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$,全磷 0.69 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$,全钾 6.13 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$,硝态氮 15.26 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,铵态氮 9.22 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,有效磷 12.13 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,速效钾 249.7 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。试验共设置 8 个处理,与盆栽试验相同。其中 100% 化肥处理的每小区尿素、过磷酸钙、硫酸钾的施用量分别为 173 g、889 g、287 g,100% 生物肥处理的每小区生物肥施用量为 6 kg。施肥处理间总氮、总磷和总钾养分设置均等。每个处理设置 4 个小区,随机区组排列,每个小区面积 8 m^2 ,行间距 30 cm,株间距 10 cm,每小区种植甘蓝 100 棵,播种前每个小区撒施相应的肥料,再将表层 0~20 cm 土壤与肥料充分混匀。

1.6 盆栽样品采集和养分测定

待甘蓝生长周期满 4 周,测量植株株高和叶绿素含量(SPAD),每盆采集 1 棵植株和土体土,分别测定地上部和地下部鲜物质量,并将新鲜根系进行根系扫描,根系发育参数采用 LA1600+根系扫描成像系统和 WinRHizo 2003b 分析软件获得,包括根尖数、根长、根体积和根表面积。植株杀青后测定干物质量。植株样品粉碎后用于测定植株中的氮、磷、钾含量。收集的土样自然风干后过孔径为 20 目筛,用于测定土壤理化性质。采用流动分析仪(AUTOAnalyzer3, BRAN+LUEBBE, 德国)测定土壤铵态氮、硝态氮、植株全氮和全磷含量^[19],采用火焰光度计测定土壤速效钾和植株全钾含量^[19];采用 0.5 $\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ NaHCO_3 浸提—钼蓝比色法测定土壤有效磷含量,参照文献[20];分别采用玻璃电极酸度计和电导率仪测定土壤 pH 和 EC;采用重铬酸钾氧化—分光光度法测定土壤有机质含量^[21]。

1.7 田间试验样品采集和产量分析

在甘蓝的苗期和结球期分别采集植株和土壤样品:每个小区随机采取植株样品 2 颗(即每处理 8

颗),并收集土体土样。对植株样进行根系扫描和养分测定,具体方法同 1.6 所述。在甘蓝结球期采摘各处理结球,每个小区随机选取 10 棵,统计各处理的平均单球物质量。

1.8 甘蓝品质的测定

采用斐林试剂比色法^[22]测定甘蓝叶球还原糖含量,采用硝基水杨酸比色法^[21]测定甘蓝叶球硝酸盐含量,采用滴定法^[22]测定甘蓝叶球维生素 C 含量。

1.9 数据统计与分析

试验数据采用 Excel 2016 和 SPSS 22.0 软件进行统计,并进行单因素方差分析(One-way ANOVA, $P < 0.05$)。

2 结 果

2.1 三种木霉菌耐盐能力差异

由图 1 可以看出,3 种木霉菌在 3 种盐浓度的 9 cm PDA 培养基上的生长抑制率均随着盐浓度的增加而增加。无盐处理下,3 种木霉均在 48 h 时菌丝布满整个平板,且无显著差异;500 $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 盐浓度下,24~96 h 菌落平均直径均表现为木霉 *T. arenarium* 1A131 显著高于 *T. guizhouense* NJAU 4742, *T. guizhouense* NJAU 4742 显著高于 *T. reesei* 917;750 $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 盐浓度下,木霉 *T. guizhouense* NJAU 4742 和木霉 *T. arenarium* 1A131 生长速度显著高于 *T. reesei* 917,但 NJAU 4742 和 1A131 菌株间差异不显著。因此,木霉 *T. guizhouense* NJAU 4742 和木霉 *T. arenarium* 1A131 具有良好的耐盐能力,将木霉 *T. guizhouense* NJAU 4742 和木霉 *T. arenarium* 1A131 分别与有机肥发酵制成生物有机肥用于后续的盆栽和田间试验。

2.2 不同施肥处理对盆栽甘蓝生物量和植株养分的影响

由表 1 可见,所有施用生物有机肥处理的植株地上部鲜物质量和氮含量均显著高于 CON 和 CF 处理,其中 60%BFA 处理效果最佳。根系扫描结果如下:60%BFG、100%BFG、100%BFA 处理根长和根尖数最高,三者无显著差异;其次是 60%BFA 处理,而 CON 和 CF 处理平均根围显著高于其他处理。施肥可提高植株 SPAD 值和氮、磷、钾含量。60%BFG 处理 SPAD 值显著高于其他处理,100%BFG 处理次之,其余处理差异不显著。CF、30%BFG、60%BFG、

30%BFA 处理植株磷含量均显著高于其他处理，且上述四个处理间无显著差异；100%BFA 处理显著高于 100%BFG 处理。100%BFA 和 100%BFG 处理植株钾含量显著高于其他处理，其次是 30%BFG、60%BFG、30%BFA 处理。

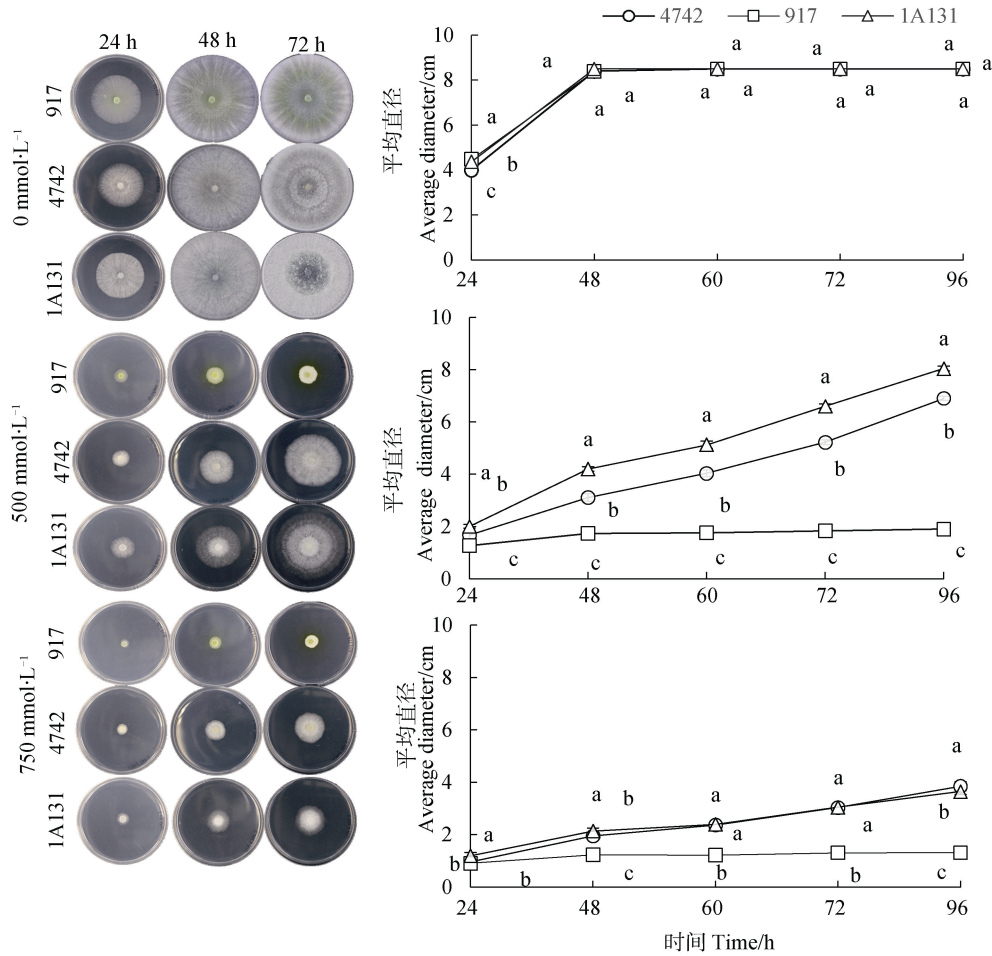
2.3 不同施肥处理对盆栽甘蓝土壤理化性质的影响

由表 2 可知，CON 处理的土壤 pH 显著高于其他施肥处理，说明施肥可显著降低土壤 pH；60%BFA 和 60%BFG 处理的土壤 pH 显著低于其他处理，且两者之间差异不显著。土壤盐分在 60%生物肥+40%化肥处理中含量最高，其中 60%BFG 处理显著高于其他处理，30%BFG 处理次之，CON 处理最低，其余处理间无显著差异，说明施肥本身

会增加土壤含盐量。施用木霉生物有机肥大于 30% 时土壤有机质含量增加显著。生物肥配施化肥处理的土壤硝态氮含量均显著高于 CON 和 CF 处理，其中 60%BFG 和 60%BFA 处理显著高于其他比例生物肥配施化肥处理，两者之间无显著差异；土壤铵态氮含量则表现出相反趋势，即 60%BFG 和 60%BFA 处理铵态氮含量最低，CON 和 30%BFG 处理含量最高。施肥可提高土壤有效磷含量，且木霉 *T. arenarium* 1A131 生物有机肥效果显著优于木霉 *T. guizhouense* NJAU 4742。土壤速效钾分别在 CF 处理和 CON 处理含量最高和最低，其余处理间无明显规律。

2.4 不同施肥处理对田间甘蓝产量和品质的影响

由图 2 可见，在甘蓝品质方面，生物肥配施化



注：4742：贵州木霉 NJAU 4742；917：瑞氏木霉 917；1A131：滩涂木霉 1A131；处理间不同字母表示差异显著（ $P < 0.05$ ）。下同。Note: 4742: *Trichoderma guizhouense* NJAU 4742; 917: *Trichoderma reesei* 917; 1A131: *T. arenarium* 1A131; Different letters mean a significant difference between treatments ($P < 0.05$). The same below.

图 1 3 种木霉菌的耐盐能力
Fig. 1 Effects of different salt concentrations on the growth of three *Trichoderma* strains

表 1 不同施肥处理下盆栽甘蓝生物量和植株养分

Table 1 Effect of different fertilization on growth and nutrition of *Brassica oleracea* L. in the pot experiment

处理 Treatment	SPAD 值 SPAD value	植株鲜物质量 Plant fresh biomass/g	根长 Root length/cm	根尖数 Tips
CON	7.52±2.11e	4.24±0.08e	38.47±11.88c	160.7±46.39e
CF	57.88±3.87f	4.51±0.10d	27.48±13.94c	288.7±176.2de
30%BFG	52.07±1.79d	4.91±0.17c	129.9±29.03ab	515.5±114.1c
60%BFG	69.12±3.13a	5.10±0.11b	165.9±43.40a	900.2±212.8a
100%BFG	63.83±2.65b	5.17±0.12b	150.9±24.38a	798.2±186.5a
30%BFA	60.49±8.93bc	5.14±0.18b	46.92±10.84c	438.6±219.7cd
60%BFA	60.07±3.18bc	5.51±0.24a	109.0±35.94b	582.2±127.3bc
100%BFA	60.25±3.19bc	5.20±0.18b	157.3±49.77a	743.7±150.0ab
处理 Treatment	平均根围 Average root diameter/mm	植株氮 Plant N content/(g·kg ⁻¹)	植株磷 Plant P content/(g·kg ⁻¹)	植株钾 Plant K content/(g·kg ⁻¹)
CON	0.52±0.04a	7.15±0.61e	0.59±0.04d	9.96±0.26d
CF	0.47±0.12a	9.49±0.43d	1.81±0.08a	13.74±0.91c
30%BFG	0.35±0.04bc	22.71±0.97b	1.88±0.08a	15.42±0.34b
60%BFG	0.33±0.02c	23.09±1.18b	1.81±0.21a	14.80±0.79b
100%BFG	0.32±0.01c	18.33±1.05c	1.47±0.11c	16.33±1.00a
30%BFA	0.40±0.03b	25.60±1.39a	1.79±0.06a	14.82±0.35b
60%BFA	0.35±0.01bc	19.18±1.32c	1.55±0.05bc	13.11±0.53c
100%BFA	0.31±0.01c	18.91±0.67c	1.61±0.02b	17.01±0.33a

注：CON：不施肥；CF：100%施用化肥；30%BFG：30%的 NJAU 4742 生物有机肥+70%化肥；60%BFG：60%的 NJAU 4742 生物有机肥+40%化肥；100%BFG：100%的 NJAU 4742 生物有机肥；30%BFA：30%的 1A131 生物有机肥+70%化肥；60%BFA：60%的 1A131 生物有机肥+40%化肥；100%BFA：100%的 1A131 生物有机肥。下同。Note: Con, Non-fertilizer application (control); CF, Application of 100% chemical fertilizer; 30%BFG, Application of 30% NJAU 4742 bio-organic fertilizer plus 70% chemical fertilizer; 60%BFG, Application of 60% NJAU 4742 bio-organic fertilizer plus 40% chemical fertilizer; 100%BFG, Application of 100% NJAU 4742 bio-organic fertilizer; 30%BFA, Application of 30% 1A131 bio-organic fertilizer plus 70% chemical fertilizer; 60%BFA, Application of 60% 1A131 bio-organic fertilizer plus 40% chemical fertilizer; 100%BFA, Application of 100% 1A131 bio-organic fertilizer. The same below.

表 2 不同施肥处理下盆栽土壤理化性质

Table 2 Effect of different fertilization treatments on chemical properties of soil in the pot experiment

处理 Treatment	pH	含盐量 Salt content /(g·kg ⁻¹)	有机质 Organic matter /(g·kg ⁻¹)	铵态氮 Ammonium N /(mg·kg ⁻¹)	硝态氮 Nitrate N /(mg·kg ⁻¹)	有效磷 Available P /(mg·kg ⁻¹)	速效钾 Available K /(mg·kg ⁻¹)
CON	8.91±0.02a	6.97±0.08d	0.01±0.01d	16.50±1.75a	25.01±0.71c	2.02±0.14d	121.5±1.73e
CF	8.47±0.04bc	7.46±0.04bc	0.02±0.00bcd	3.61±1.47c	23.35±1.36c	12.73±0.96c	320.6±9.21a
30%BFG	8.29±0.11de	7.55±0.14b	0.01±0.00cd	19.34±3.40a	33.79±1.42b	13.14±0.89c	302.8±2.22bc
60%BFG	8.27±0.02de	8.03±0.48a	0.03±0.01bc	2.40±0.92c	46.84±8.88a	14.03±0.75c	300.2±5.89c
100%BFG	8.50±0.07b	7.06±0.40cd	0.04±0.01ab	5.16±4.13bc	36.49±5.18b	17.60±1.02b	292.3±4.35d
30%BFA	8.36±0.14cd	7.09±0.19cd	0.04±0.01ab	7.32±2.96b	38.68±4.41b	20.71±1.26a	308.4±3.58b
60%BFA	8.24±0.02e	7.40±0.09bc	0.05±0.02a	2.64±0.70c	47.54±10.24a	20.99±2.18a	309.0±2.58b
100%BFA	8.35±0.10cde	7.37±0.20bc	0.05±0.01a	3.32±1.81c	37.68±5.38b	20.63±2.57a	297.8±2.63cd

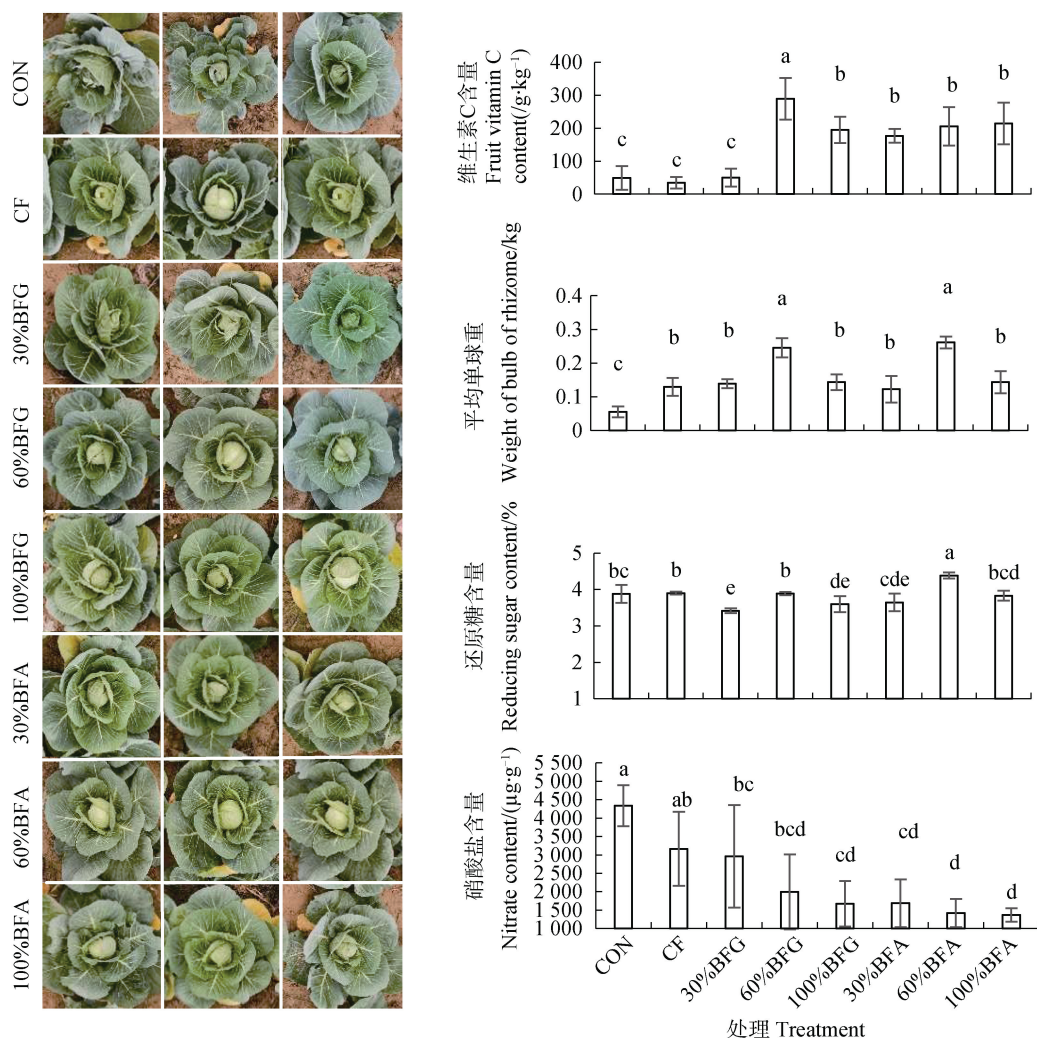


图2 不同施肥处理对田间甘蓝产量和品质的影响

Fig. 2 Effects of different fertilization treatments on yield and quality of *Brassica oleracea* L. in the field

肥显著提高甘蓝叶球维生素 C 含量,降低硝酸盐含量。60%BFA 处理甘蓝还原糖含量显著高于其他处理,其次是 60%BFG 处理和 CF 处理。甘蓝维生素 C 含量在 60%BFG 处理最高,显著高于其他处理。60%BFA 和 100%BFA 处理的甘蓝硝酸盐含量明显低于 CON 和 CF。在甘蓝产量方面,60%BFG 和 60%BFA 处理甘蓝平均单球物质量显著高于其他处理,CON 处理甘蓝平均单球物质量显著低于其他处理,其余处理之间无显著差异。

2.5 不同施肥处理对田间甘蓝土壤理化性质的影响

从表 3 可知,在田间试验中,60%BFA 和 100%BFA 处理的土壤 pH 显著高于其他处理,60%BFA 和 100%BFA 处理两者无显著差异;100%BFG 和

30%BFA 处理次之,且两者无显著差异;CON、CF、30%BFG、60%BFG 处理最低,处理间无显著差异。土壤含盐量在 30%BFA 处理最高,100%BFA 处理最低,60%BFA 和 60%BFG 处理较低,其他处理间无显著差异。在添加木霉 *T. arenarium* 1A131 生物有机肥的处理中,随着生物肥添加比例增加,土壤含盐量降低,有机质含量逐渐升高;添加木霉 *T. guizhouense* NJAU 4742 生物有机肥的处理中,土壤含盐量在 60%BFG 处理最低。与盆栽试验相同,施肥可增加土壤有机质含量,所有施肥处理土壤有机质含量显著高于不施肥对照 CON 处理,其中 100%BFG 处理最高,其他处理间无显著差异。CF 处理的土壤铵态氮含量显著高于除 30%BFG 处理外的其他处理,铵态氮含量在 100%BFG 处理最低,

表 3 不同施肥处理下田间土壤理化性质

Table 3 Effect of different fertilization treatments on chemical properties of soil in the field experiment

处理 Treatment	pH	含盐量 Salt content (g·kg ⁻¹)	有机质 Organic matter (g·kg ⁻¹)	铵态氮 Ammonium N / (mg·kg ⁻¹)	硝态氮 Nitrate N (mg·kg ⁻¹)	有效磷 Available P (mg·kg ⁻¹)	速效钾 Available K (mg·kg ⁻¹)
CON	8.33±0.06c	5.84±0.88abc	4.42±0.13d	8.03±1.30bc	80.06±19.80ab	22.88±3.22d	294.3±17.17e
CF	8.27±0.09c	5.77±0.85abc	5.04±0.59bc	11.17±3.03a	92.70±29.40a	32.75±6.55c	348.3±24.23b
30%BFG	8.24±0.03c	6.14±0.46ab	5.67±0.09ab	9.11±1.47ab	94.00±13.57a	32.48±2.28c	418.3±17.06a
60%BFG	8.24±0.04c	5.24±0.81bcd	5.41±0.70b	7.37±0.65bc	53.36±9.63bc	29.96±2.82cd	335.8±7.18cd
100%BFG	8.43±0.03b	6.02±0.45abc	6.50±1.03a	6.33±0.53c	65.21±5.87abc	35.14±7.48bc	361.0±14.77bc
30%BFA	8.47±0.09b	6.50±0.56a	5.64±0.19ab	8.05±0.77bc	92.30±23.19a	59.13±4.33a	370.3±16.48b
60%BFA	8.62±0.08a	5.00±0.45cd	5.78±0.88ab	7.19±2.33bc	86.35±25.10a	33.17±6.35c	308.8±21.69d
100%BFA	8.69±0.07a	4.56±0.70d	5.81±0.10ab	7.91±1.13bc	48.08±18.72c	37.11±2.39b	313.5±25.75d

其余处理无显著差异。100%BFA、60%BFG、100%BFG 处理硝态氮含量明显低于其他处理,其中 100%BFA 处理最低。此外,相比于 CON,施肥处理均显著提高了土壤有效磷和速效钾含量。其中,土壤有效磷含量在 30%BFA 处理最高,显著高于其他处理,其次是 100%BFA 处理,其余处理间无显著差异;土壤速效钾含量最高的处理为 30%BFG。

2.6 不同施肥处理对田间甘蓝根系生长的影响

图 3 结果表明,所有施加生物有机肥处理甘蓝的根体积显著高于 CON 和 CF 处理,在木霉生物有机肥配施化肥的处理中,甘蓝的根体积、根尖数、根长在 60%生物肥+40%化肥处理均最高。其中甘蓝根体积在 60%BFG 处理最高,其次为 100%BFG、60%BFA、100%BFA 处理,四个处理间无显著差异,且 60%BFG 处理显著高于 30%BFG 处理,30%BFG 处理显著高于 30%BFA 处理。60%BFA 处理甘蓝根尖数、根长显著高于其他处理。所有施肥处理的根系鲜物质量显著高于 CON 处理,同时,60%BFA 和 60%BFG 处理根系鲜物质量显著高于其他处理,两者无显著差异。

2.7 甘蓝植株生长与田间土壤理化性质的关系

为了探究田间土壤环境因素中影响甘蓝植株在盐土生长的主要因子,对上文得出的最优生物肥与化肥配比处理及对照处理的土壤理化性质数据和植株生长指标数据分别进行了主成分因子分析(PCA)(图 4)。由图 4a 可以看出,在植株生长的各项指标

中,第一个主成分(PC1)可显著地将 CON 和 CF 与 60%BFG 和 60%BFA 分开,其解释了 56.7%的差异;第二个主成分(PC2)解释了 12.5%的差异,这表明 60%生物有机肥+40%化肥处理与 CON、CF 处理相比显著促进植株生长。图 4b 则表明,60%BFG 和 60%BFA 与 CON、CF 处理样本间聚类不分化,表明各处理间土壤理化指标的差异并不显著影响其生物效应。

3 讨论

3.1 三种木霉菌耐盐能力鉴定

在本实验室先前的研究中,从滨海盐土芦苇根际筛选出的滩涂木霉 *T. arenarium* 1A131 被证实,在高盐浓度下(0.75%含盐量)仍能较好地促进番茄幼苗生长^[17]。本研究中,将木霉 *T. arenarium* 1A131 与本实验室已实行商业化使用的生防促生菌株 *T. guizhouense* NJAU 4742 及工业模式菌株瑞氏木霉 *T. reesei* 917 进行耐盐能力比较,发现木霉 *T. arenarium* 1A131、*T. guizhouense* NJAU 4742 具有良好的耐盐能力(图 1)。基于该结果,本研究将木霉 *T. arenarium* 1A131 与木霉 *T. guizhouense* NJAU 4742 分别制成生物有机肥并与化肥按照不同比例配施,通过盆栽和田间试验进一步探究 2 株木霉菌在滨海盐土种植体系下对甘蓝的产量、结球品质、根系发育和土壤养分的作用效果。

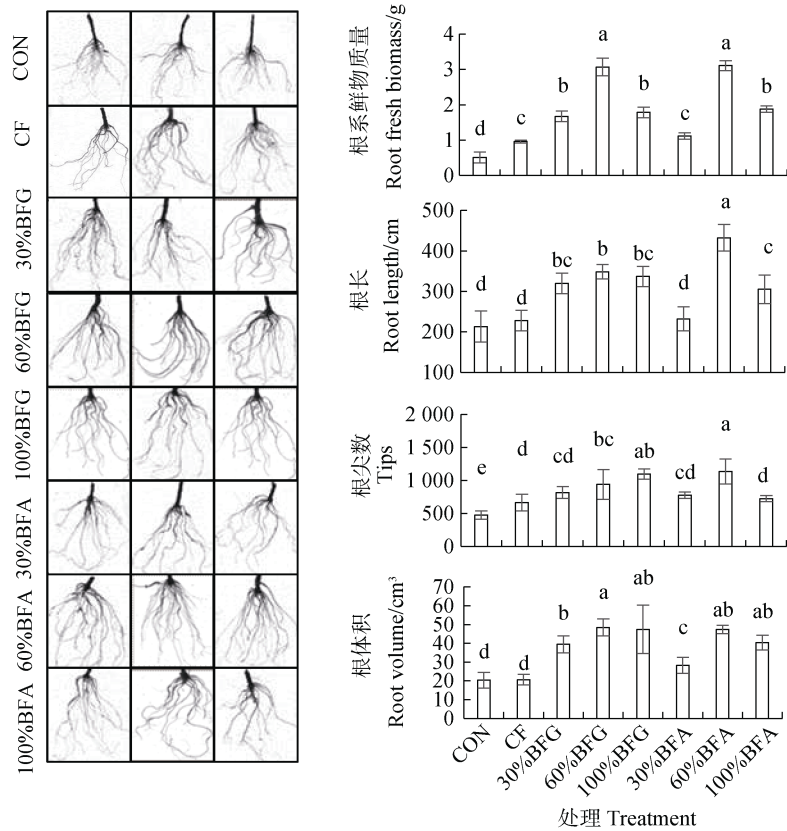
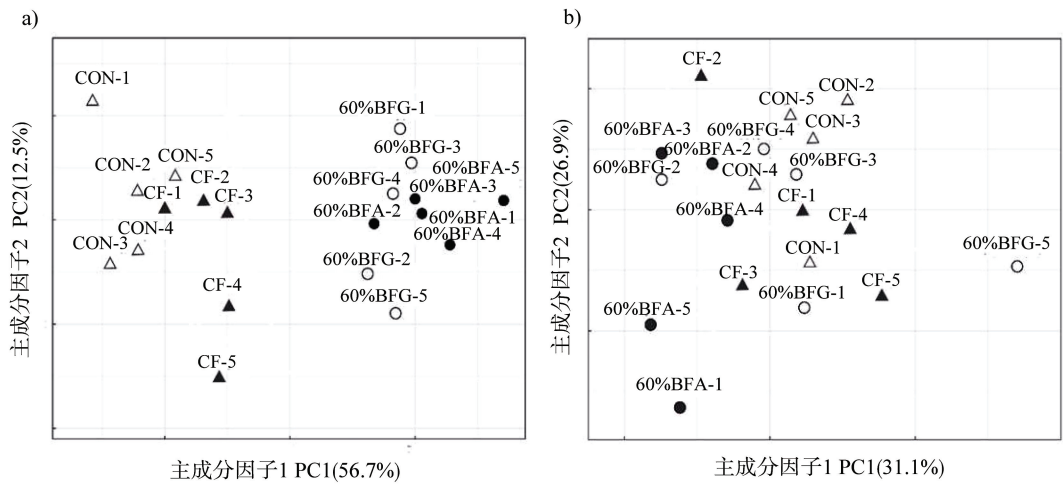


图 3 不同施肥处理下田间甘蓝根系指标

Fig. 3 Effects of different fertilization treatments on root growth of *Brassica oleracea* L. in the field



注: CON-1~CON-5、CF-1~CF-5、60%BFA-1~60%BFA-5、60%BFG-1~60%BFG-5 分别指代 CON、CF、60%BFA、60%BFG 处理的 5 个生物学重复。Note: CON-1~CON-5, CF-1~CF-5, 60%BFA-1~60%BFA-5, and 60%BFG-1~60%BFG-5 respectively represent the five biological repeats of the treatments of CON, CF, 60%BFA, and 60%BFG.

图 4 甘蓝植株生长 (a) 与田间土壤理化性质 (b) 的主成分分析 (PCA)

Fig. 4 Principal coordinate analysis (PCA) of *Brassica oleracea* L. growth (a) and soil chemical properties (b)

3.2 不同比例木霉生物有机肥施用对盆栽甘蓝生长的影响

盆栽试验表明, 相比不施肥 CON 对照处理, 木霉生物有机肥配施化肥处理均显著提高了甘蓝植株氮、磷、钾含量 (表 1); 这符合 Cai 等^[18]对番茄的报道, 其指出减施 25% 的化肥而配施以一定量的木霉生物有机肥可显著提高番茄苗期植株氮、磷的积累量。牛振明等^[23]的研究显示, 配施生物肥与单纯施用化肥相比, 既可能增加也可能降低甘蓝叶球和功能叶钾的吸收量。此外, 盆栽试验中, 60% 木霉生物有机肥配施 40% 化肥处理可显著提高甘蓝的地上部鲜物质量、SPAD 值 (表 1)。文平兰和黄敏^[24]在小白菜上的研究结果也证明, 生物有机肥可使叶菜叶绿素含量增高, 提高叶菜的单株鲜物质量, 进而提高产量。与 CON、CF 处理相比, 60% 木霉生物有机肥配施 40% 化肥处理显著增加了甘蓝的根长和根尖数 (表 1)。徐子恒等^[25]的研究结果也证明, 施用生物菌肥可明显改善不同栽培条件下青钱柳根系构型和根系形态 (包括根长、根尖数、根体积等), 从而提高植株对土壤养分和水分的吸收能力。根系的生长发育情况直接决定根系吸收养分的效率和对逆境的适应能力^[26]。因此, 推测本研究中 60% 木霉生物有机肥处理可促进植株根系生长发育, 对植物在盐土中抵抗盐胁迫起到至关重要的作用。田间试验中, 根系结果与盆栽试验一致 (图 3)。

3.3 不同比例木霉生物有机肥施用对田间甘蓝生长的影响

田间试验中, 60% 的木霉生物有机肥配施 40% 的化肥处理, 显著增强甘蓝植株的根系生长和养分吸收, 从而获得较高的产量 (图 2)。田家明等^[27]证实, 施用适量生物有机肥能够使盐碱地花生单株产量提高 17.25%。本试验中, 60%BFG 和 60%BFA 处理相比不施肥 CON 对照处理, 甘蓝的单株产量分别提高了 376%、422%。而且, 在田间试验中, 一定范围内施用生物有机肥, 可显著提高甘蓝的品质 (图 2)。有研究^[28-31]报道, 生物有机肥不仅能够将土壤中难以被作物吸收的无效养分分解转化为易吸收的形态, 提高养分供应速率, 而且其本身具有长效、抗病、改良土壤和抗板结的多重作用, 因而可有效提高农作物产量、改善产品品质。因此, 本研究的盆栽和田间试验结果均有效验证了施加木霉生

物有机肥在滨海盐土上的生物效应, 其中 60% 生物有机肥配施 40% 化肥为最适配比。

3.4 土壤养分投入与甘蓝植株生长的关系

土壤 pH 是反映土壤盐碱性的重要指标, pH 的改变也会对土壤养分的释放、矿物质转化和土壤生物学性质产生很大的影响^[8]。盆栽试验结果表明, 60% 生物肥配施 40% 化肥处理显著降低了土壤 pH (表 2); 田间试验结果也显示, 土壤 pH 在 60%BFG 处理最低 (表 3)。所有施肥处理土壤含盐量相对于不施肥对照均不同程度地增加了, 其中, 盆栽土壤含盐量最高的是 60%BFG 处理, 其次为 30%BFG 处理 (表 2)。这可能与 60% 的生物有机肥与 40% 的化肥配施有关, 因为土壤盐分的来源除了土壤本身, 则主要来自施入的生物有机肥和化肥, 虽然各施肥处理的主要养分 (氮、磷、钾) 相等, 但 60% 的生物有机肥与 40% 的化肥在一定程度上引入的盐分最多; 而不同菌株在同一比例配施处理下土壤盐分的差异则可能与菌株自身的生理生态功能有关, 本地筛选的耐盐菌株 *T. arenarium* 1A131 或许对盐分有一定转运作用, 但这有待进一步研究。因此, 在土壤含盐量方面, 在不影响作物正常生长的情况下, 应尽量减少盐土中肥料的施入, 并因地调整生物有机肥和化肥配比。

崔士友和张蛟蛟^[32]的报道表明, 即使是小量的有机质含量增加也可对盐土的结构、通气性、透水保水性以及微生物及其酶活性产生重要而积极的影响。另有研究^[33]表明, 土壤有机质的增加可以增加土壤团聚体的数量。本研究中, 盆栽和田间试验结果均表明, 随着木霉生物有机肥添加比例的增加, 土壤有机质含量明显增加 (表 2, 表 3), 说明可通过提高生物有机肥比例提高土壤有机质含量, 从而对盐土理化性质改良产生积极影响。然而, 本研究盆栽结果显示有机质产生的积极效应并不呈线性规律, 盐土中有效态氮的含量 (主要包括铵态氮和硝态氮) 不随有机肥施入量的增加而递增^[34-35], 这与土壤通气性质、微生物菌群组成及活性等诸多因素有关; 盐土中有机物对铵-硝态氮转化的作用机制有待进一步研究。而由田间试验结果可知, 30%BFA 和 30%BFG 处理分别显著增加了土壤有效磷和速效钾含量 (表 3)。因此, 在土壤养分方面, 30% 或 60% 生物肥配施化肥处理对于滨海盐土土壤养分的活化

作用最佳。结合上文对有机质组分的探讨, 本研究认为 60%生物有机肥的施入量最佳。

通过上述结果发现, 与不施肥相比, 生物有机肥与化肥配施增加了滨海盐土土壤养分, 促进了植株生长; 与等养分的 100%化肥相比, 同样是生物有机肥配施化肥改良盐土理化性质和促进甘蓝生长效果更好, 说明养分并不是影响滨海盐土植株生长发育的唯一因素; 而在不同比例的生物肥配施化肥处理中, 60%生物肥配施 40%化肥改良、促生效果最佳, 其关键体现在该比例配施条件下根系生长发育最佳, 这一比例的生物有机肥与化肥协同作用, 对植株在滨海盐土中的立地扎根作用最显著。结合图 4 的主成分分析结果, 本研究认为, 在滨海盐土种植体系中, 相较于养分施入, 功能菌木霉在生物有机肥的生物效应中发挥更为重要的作用。王福有等^[11]也认为菌肥中的功能菌通过发挥自身生物潜力来改良滨海盐土质量的作用可以较养分载体本身更直接。

4 结 论

相对于单施化肥和不施肥对照处理及其他比例生物有机肥与化肥配施处理, 60%的木霉生物有机肥与 40%化肥配施为最优配比, 该施肥模式可显著改善滨海盐土种植体系中甘蓝的立地条件, 促进根系充分发育, 从而提高甘蓝产量, 改善品质; 与肥料施入的养分相比, 功能菌木霉在该生物效应中或许发挥更为重要的作用。

参考文献 (References)

- [1] Long X H, Liu L P, Shao T Y, et al. Developing and sustainably utilize the coastal mudflat areas in China [J]. Science of the Total Environment, 2016, 569/570: 1077—1086.
- [2] Liu L P, Liu Z P, Long X H. Effect of two soil ameliorant on soil salinity and plant in coastal saline-alkali soil of north Jiangsu Province[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2014, 28 (2): 127—131, 153. [刘莉萍, 刘兆普, 隆小华. 2 种盐土改良剂对苏北滨海盐碱土壤盐分及植物生长的影响[J]. 水土保持学报, 2014, 28 (2): 127—131, 153.]
- [3] Jiang S Q, Yu Y N, Gao R W, et al. High-throughput absolute quantification sequencing reveals the effect of different fertilizer applications on bacterial community in a tomato cultivated coastal saline soil[J]. Science of the Total Environment, 2019, 687: 601—609.
- [4] Li R X. Activation of mineral elements by *Trichoderma guizhouense* NJAU 4742 and its effect on tomato growth [D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2016. [李瑞霞. 贵州木霉 NJAU 4742 对矿质元素的活化及对番茄的促生效果研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2016.]
- [5] Liu X, Wu H Y, Yang S, et al. Formation of soil aggregates and nutrient distribution in rhizosphere of different salt tolerant tree species in coastal reclamation area [J]. Acta Pedologica Sinica, 2020, 57 (5): 1270—1279. [刘星, 吴华勇, 杨升, 等. 海涂围垦区不同耐盐树种根际土壤团聚体形成及养分分布特征[J]. 土壤学报, 2020, 57 (5): 1270—1279.]
- [6] Zhang T, Li S Y, Sun X Y, et al. Effect of amendments of phosphogypsum and brown sugar on earthworms ameliorating coastal saline soil[J]. Acta Pedologica Sinica, 2017, 54 (1): 255—264. [张涛, 李素艳, 孙向阳, 等. 磷石膏、红糖等对蚯蚓改良滨海盐土的促进作用[J]. 土壤学报, 2017, 54 (1): 255—264.]
- [7] Liu L P, Long X H, Shao H B, et al. Ameliorants improve saline-alkaline soils on a large scale in northern Jiangsu Province, China [J]. Ecological Engineering, 2015, 81: 328—334.
- [8] Li Y F. Effects of organic fertilizer and wood vinegar on chemical properties and enzyme activities of coastal saline soil [D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2016. [李莹飞. 有机肥和木醋液对滨海盐土化学性质和酶活性的影响[D]. 北京: 北京林业大学, 2016.]
- [9] Lü L Y, Wu Y P, Sun Z J, et al. The readjustment of organic fertilizer on coastal solonchak castor seedlings growth [J]. Journal of China Agricultural University, 2013, 18 (3): 73—80. [吕丽媛, 伍玉鹏, 孙振钧, 等. 有机肥对盐碱土蓖麻苗生长的调控作用[J]. 中国农业大学学报, 2013, 18 (3): 73—80.]
- [10] Liu C X, Huang W Y. Influence of saline-alkali -tolerant bacteria combined with organic matter on formation of saline-alkali soil aggregates[J]. Soils, 2010, 42 (1): 111—116. [刘彩霞, 黄为一. 耐盐碱细菌与有机物料对盐碱土团聚体形成的影响[J]. 土壤, 2010, 42 (1): 111—116.]
- [11] Wang F Y, Wang C, Liu Q Q, et al. Improved effect of humic acid, earthworm protein fertilizer and vermicompost on coastal saline soils[J]. Journal of China Agricultural University, 2015, 20 (5): 89—94. [王福友, 王冲, 刘全清, 等. 腐植酸、蚯蚓粪及蚯蚓蛋白肥料对滨海盐碱土壤的改良效应[J]. 中国农业大学学报, 2015, 20 (5): 89—94.]
- [12] Rinu K, Sati P, Pandey A. *Trichoderma gamsii* (NFCCI 2177): A newly isolated endophytic, psychrotolerant, plant growth promoting, and antagonistic fungal strain[J]. Journal of Basic Microbiology, 2014, 54 (5): 408—417.
- [13] Qi W Z. Study on salt-soluble and salt-promoting effect of *Trichoderma* biocontrol on plants and its mechanism

- [D]. Jinan: Shandong Normal University, 2012. [戚玮真. 生防木霉菌对植物的解盐促生作用及其机制的研究[D]. 济南: 山东师范大学, 2012.]
- [14] Chen L H, Zheng J H, Shao X H, et al. Effects of *Trichoderma harzianum* T83 on *Suaeda salsa* L. in coastal saline soil [J]. Ecological Engineering, 2016, 91: 58—64.
- [15] Brotman Y, Landau U, Álvaro C I, et al. *Trichoderma*-plant root colonization: Escaping early plant defense responses and activation of the antioxidant machinery for saline stress tolerance [J]. PLoS Pathogens, 2013, 9(3): 1—15.
- [16] Li R X, Chen W, Cai F, et al. Effects of *Trichoderma*-enriched biofertilizer on tomato plant growth and fruit quality[J]. Journal of Nanjing Agricultural University, 2017, 40(3): 464—472. [李瑞霞, 陈巍, 蔡枫, 等. 贵州木霉 NJAU4742 生物有机肥对番茄种植的影响[J]. 南京农业大学学报, 2017, 40(3): 464—472.]
- [17] Ding M Y, Chen W, Ma X C, et al. Emerging salt marshes as a source of *Trichoderma arenarium* sp. nov. and other fungal bioeffectors for biosaline agriculture [J]. Journal of Applied Microbiology, 2020, 130: 179—195.
- [18] Cai F, Chen W, Wei Z, et al. Colonization of *Trichoderma harzianum* strain SQR-T037 on tomato roots and its relationship to plant growth, nutrient availability and soil microflora[J]. Plant and Soil, 2015, 388(1/2): 337—350.
- [19] Raigon M D, Garcia M P, Maquieira, et al. Determination of available nitrogen (nitric and ammoniacal) in soils by flow-injection analysis [J]. Analysis, 1992, 20(8): 483—487.
- [20] Bao S D. Soil and agricultural chemistry analysis[M]. 3rd ed. Beijing: Chinese Agriculture Press, 2000. [鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3 版. 北京: 中国农业出版社, 2000.]
- [21] Ministry of Environmental Protection of the People's Republic of China. Environmental Protection Standard of the People's Republic of China: Soil-determination of organic carbon-potassium dichromate oxidation. HJ 615—2011[S]. Beijing: China Environmental Science Press, 2011. [环境保护部. 中华人民共和国环保行业标准: 土壤 有机碳的测定 重铬酸钾氧化-分光光度法 HJ 615—2011[S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2011.]
- [22] Li H S. Principles and techniques of plant physiological biochemical experiment[M]. Beijing: Higher Education Press, 2000. [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.]
- [23] Niu Z M, Zhang G B, Liu Z F, et al. Effects of partial replacement of fertilizer by biological fertilizer on nutrient uptake, photosynthesis, and quality of *Brassica oleracea* [J]. Journal of Desert Research, 2014, 34(2): 464—471. [牛振明, 张国斌, 刘赵帆, 等. 生物肥部分替代化肥对甘蓝 (*Brassica oleracea*) 养分吸收、光合作用以及品质的影响[J]. 中国沙漠, 2014, 34(2): 464—471.]
- [24] Wen P L, Huang M. Application effect of bio-organic fertilizer on vegetables [J]. Modern Agricultural Science and Technology, 2010(13): 110—113. [文平兰, 黄敏. 生物有机肥在蔬菜上的应用效果研究[J]. 现代农业科技, 2010(13): 110—113.]
- [25] Xu Z H, Wang Z K, Chen Z Y, et al. Effects of bio-bacterial fertilizer on root architecture and root morphology of *Cyclocarya paliurus* [J]. Soil and Fertilizer in China, 2021. [徐子恒, 王志康, 陈紫云, 等. 生物菌肥对青钱柳根构型和根系形态的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2021.]
- [26] Min W, Guo H, Zhou G, et al. Root distribution and growth of cotton as affected by drip irrigation with saline water [J]. Field Crops Research, 2014, 169: 1—10.
- [27] Tian J M, Zhang G C, Luo Z T, et al. Effect of bio-organic fertilizer on agronomic traits and pod development of peanut in saline-alkali soil[J]. Journal of Peanut Science, 2020, 49(1): 66—71. [田家明, 张冠初, 罗庄田, 等. 生物有机肥对盐碱土花生农艺性状及荚果发育的影响[J]. 花生学报, 2020, 49(1): 66—71.]
- [28] Zhao Z, Chen W, Wang H, et al. Effects of *Trichoderma* microbe fertilizer combined with reduced fertilizer on yield, quality and soil fertility of tomato [J]. Acta Pedologica Sinica, 2018, 55(5): 1243—1253. [赵政, 陈巍, 王欢, 等. 木霉微生物肥与减量化肥配施对番茄产量、品质及土壤肥力的影响[J]. 土壤学报, 2018, 55(5): 1243—1253.]
- [29] Xia G L, Bi J, Zhang P, et al. Effect of a new bio-organic fertilizer on tomato growth and soil activity quality[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2007, 38(3): 519—522. [夏光利, 毕军, 张萍, 等. 新型生物有机肥 (NAEF) 对番茄生长及土壤活性质量效应研究[J]. 土壤通报, 2007, 38(3): 519—522.]
- [30] Ni Z H, Ma G R. Effect of Bio-activated organo-inorgano-mixed fertilizer on growth of cabbage and soil biological activity[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2002, 33(3): 212—215. [倪治华, 马国瑞. 有机无机生物活性肥料对蔬菜作物生长及土壤生物活性的影响[J]. 土壤通报, 2002, 33(3): 212—215.]
- [31] Han X L, Zhang N W, Jia J F. Effects of biological organic-inorganic compound fertilizer on yield, quality of tomato and soil[J]. Soils and Fertilizers, 2005(3): 51—53. [韩晓玲, 张乃文, 贾敬芬. 生物有机无机复混肥对番茄产量、品质及土壤的影响[J]. 土壤肥料, 2005(3): 51—53.]
- [32] Cui S Y, Zhang J J. Carbon management: A new way of treating saline soil [J]. Chinese Journal of Agriculture, 2015, 5(12): 44—50. [崔士友, 张蛟蛟. 碳管理: 盐土治理的一种新思路[J]. 农学学报, 2015, 5(12):

- 44—50.]
- [33] Liu R J, Wu Y C, Zhang Y, et al. Comparison of soil active organic carbon pools between natural secondary forests and *Cunninghamia lanceolata* plantations in North subtropical China [J]. *Journal of Plant Ecology*, 2012, 36 (5): 431—437. [刘荣杰, 吴亚丛, 张英, 等. 中国北亚热带天然次生林与杉木人工林土壤活性有机碳库的比较[J]. *植物生态学报*, 2012, 36 (5): 431—437.]
- [34] Wei J, Guo S F, Zhai L M, et al. Effects of combined application of organic and inorganic fertilizers on nitrogen use efficiency and nitrogen loss risk of rice [J]. *Soils*, 2018, 50 (5): 874—880. [魏静, 郭树芳, 翟丽梅, 等. 有机无机肥配施对水稻氮素利用率与氮流失风险的影响[J]. *土壤*, 2018, 50 (5): 874—880.]
- [35] Tian C, Zhou X, Yang J Y, et al. Effects of reducing nitrogen and phosphorous fertilizers on rice yield, nitrogen and phosphorus losses in paddy field[J]. *Soils*, 2020, 52 (2): 311—319. [田昌, 周旋, 杨俊彦, 等. 化肥氮磷优化减施对水稻产量和田面水氮磷流失的影响[J]. *土壤*, 2020, 52 (2): 311—319.]

(责任编辑: 陈荣府)