

甘蔗有机物料还田对土壤理化性质、微生物及甘蔗生长的影响

林兆里¹, 孔冉², 姚俊丽³, 高世武¹, 李诗燕¹, 张华^{1*}, 罗俊^{1*}

1. 福建农林大学国家甘蔗工程技术研究中心, 福建福州 350002; 2. 中国热带农业科学院亚热带作物研究所, 广东湛江 524091; 3. 福建农林大学植物保护学院, 福建福州 350002

摘要: 针对我国旱坡地蔗田土壤酸化、有机质衰减及结构劣化等问题, 本研究系统探究甘蔗有机物料还田对土壤理化性质、微生物群落及甘蔗产量的长期调控效应。通过 3 a 桶栽试验(新植季+2 a 宿根季), 设置滤泥(T₁)、蔗渣灰(T₂)、蔗叶(T₃)和蔗渣(T₄) 4 种甘蔗有机物料还田处理, 以不添加甘蔗有机物料作为空白对照(CK), 测定土壤养分、物理结构、微生物多样性、根系形态、产量与糖分等指标。结果表明: 在土壤理化性质方面, 4 种甘蔗有机物料还田处理均降低土壤容重, 改善土壤力学性能和孔隙结构, 但不同物料处理的还田效果存在显著差异。T₁和T₂处理显著提升土壤 pH、总有机碳、碱解氮和有效磷含量, 其中 T₁处理持续优化深层土壤结构, T₂处理对速效钾含量和保水性的提升效果突出; T₃和T₄处理主要提高土壤总有机碳含量, 但 T₄处理在新植季加剧土壤酸化。此外, T₃和T₄处理促进高稳定性大团聚体形成, 短期效应显著; T₁和T₂处理虽促进土壤机械稳定性大团聚体生成, 但水稳性较差。在微生物多样性方面, T₁和T₂处理对土壤细菌、真菌多样性及丰富度提升效果显著且长效; T₃处理初期促进微生物活动而后期抑制; T₄处理后显著恢复微生物多样性。在甘蔗生长方面, T₁处理增产增糖效果最显著; T₂处理促进根系发育效果突出, 增产增糖效果显著; T₃处理后期有一定的增产效应; T₄处理导致减产且不利于糖分积累。综合来看, 不同甘蔗有机物料还田效果差异显著。滤泥为最优还田物料, 兼具长效改良土壤、提升微生物多样性与增产增糖的优势; 蔗渣灰适于短期保水促根, 但需防控深层板结风险; 蔗叶还田宜配施氮肥; 蔗渣还田需腐解预处理。研究结果为甘蔗有机物料精准还田及红壤区耕地可持续管理提供理论支撑。

关键词: 甘蔗; 有机物料; 土壤; 理化性质; 微生物

中图分类号: S566.1 文献标志码: A

Effect of Sugarcane Organic Material Returning to the Field on Soil Physicochemical Properties, Microbial Activity and Sugarcane Growth

LIN Zhaoli¹, KONG Ran², YAO Junli³, GAO Shiwu¹, LI Shiyan¹, ZHANG Hua^{1*}, LUO Jun^{1*}

1. National Engineering Research Center for Sugarcane, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou, Fujian 350002, China; 2. South Subtropical Crop Research Institute, Chinese Academy of Tropical Agricultural Sciences, Zhanjiang, Guangdong 524091, China; 3. College of Plant Protection, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou, Fujian 350002, China

Abstract: The study systematically investigated the long-term regulatory effects of returning sugarcane organic materials to the field on soil physicochemical properties, microbial communities, and sugarcane growth to solve the problems of soil acidification, organic matter attenuation and structural degradation in sugarcane fields on dry slopes in China. Through a three-year barrel planting experiment (including one new planting season and two-year ratoon season), four types of sugarcane organic materials were returned to the field, including filter mud (T₁), sugarcane bagasse ash (T₂), sugarcane leaves (T₃), sugarcane bagasse (T₄), along with control (without organic amendment). Soil nutrients, physical structure, microbial diversity, root morphology, yield and sugar content were measured. The four sugarcane organic materials returned to the field reduced soil bulk density and improved soil mechanical properties and pore structure, but

收稿日期 2025-08-28; 接受日期 2025-11-18

基金项目 国家重点研发计划项目 (No. 2022YFD23011005); 现代农业产业技术体系项目 (No. CARS-17)。

作者简介 林兆里 (1987—), 男, 硕士, 实验员, 研究方向: 甘蔗农机农艺融合。*通信作者 (Corresponding author): 张华 (ZHANG Hua), E-mail: zhanghua4553@sina.com; 罗俊 (LUO Jun), E-mail: sisluojun@126.com。

significant difference were observed in the effects of different materials. T_1 and T_2 significantly increased soil pH, total organic carbon (TOC), alkali-hydrolyzable nitrogen (AN) and available phosphorus (AP). T_1 consistently optimized deep soil structure, and T_2 had a significant effect on improving available potassium (AK) and water retention. T_3 and T_4 mainly increased soil TOC content, but T_4 aggravated soil acidification during the new planting season. T_3 and T_4 promoted the formation of highly stable large aggregates, with significant short-term effect. Although T_1 and T_2 promoted the formation of mechanically stable large aggregates, the water stability was poor. T_1 and T_2 had significant and long-lasting effects on improving the diversity and richness of soil bacteria and fungi, T_3 promoted microbial activity in the early stage but inhibited it in the later stages, and T_4 significantly restored microbial diversity in the later stages. T_1 had the most significant effect on increasing yield and sugar content, T_2 had an outstanding effect on promoting root development and had significantly effects on increasing yield and sugar content. T_3 had a certain yield-increasing effect in the later stages. T_4 led to a yield reduction and was not conducive to sugar accumulation. Overall, the effects of returning different sugarcane organic materials to the field varied significantly. Filter mud (T_1) proved to be the optimal material, combining long-term soil improvement, enhanced microbial diversity, and increased yield and sugar content. Sugarcane bagasse ash (T_2) was suitable for short-term water retention and root growth, but the risk of deep soil compaction must be controlled. Sugarcane leaves (T_3) should be accompanied by nitrogen fertilizer. Sugarcane bagasse (T_4) returning to field requires decomposition pretreatment. This study could provides theoretical support for the precise return of sugarcane organic materials to the field and the sustainable management of cultivated land in red soil areas.

Keywords: sugarcane; organic materials; soil; physicochemical properties; microorganisms

DOI: 10.3969/j.issn.1000-2561.2026.01.011

甘蔗 (*Saccharum officinarum* L.) 是我国重要的糖料和生物能源作物, 其高产稳产与土壤质量可持续性密切相关。当前, 我国约 80% 的蔗田分布于旱坡地, 长期集约化种植和过度施用化学肥料已导致蔗田土壤呈现多维度退化特征, 如土壤酸化加剧, 有机质持续下降, 养分动态失衡, 物理结构劣化及微生物群落功能退化^[1]。同时, 土壤团聚体稳定性显著下降, 削弱了保水保肥能力, 进而抑制甘蔗根系发育与养分吸收, 成为制约甘蔗产量与品质提升的关键限制因子^[2-3]。为缓解和改善上述土壤退化问题, 目前主要采用机械深翻深松、保护性耕作、合理轮作和生物改良等技术手段。其中, 以提升土壤有机质含量为核心的生物改良措施, 凭借多维度修复效应和持续改良特性, 已成为治理退化蔗田和提升耕地质量的关键策略之一^[1]。

甘蔗产业每年产生大量有机物料资源。田间残留的蔗叶约占收获生物量的 12%~20%^[4], 蔗糖加工过程中产生的蔗渣、滤泥和蔗渣灰等副产品也具有资源化利用价值。这些有机物料不仅来源广泛, 成本低廉, 具有低碳循环属性, 更蕴含巨大的生态修复潜力。近年来, 随着农业可持续发展和循环经济理念的深化, 甘蔗有机物料还田技术因兼具土壤改良和废弃物资源化利用的双重效益, 正成为改善土壤健康、提升系统生产力的重要突破口^[5]。研究表明, 有机物料富含多种营养

元素, 在缺乏有机肥输入的农田中, 秸秆等有机物料还田是影响土壤碳氮含量和质量的关键因素, 其通过物理、化学和生物等多途径协同改善土壤环境^[6]。在养分调控方面, 谭裕模等^[4]通过连续 9 a 蔗叶粉碎还田试验证实, 土壤有机质年均增加 0.42 g/kg, 速效钾含量提升 43.30%, 并显著促进甘蔗增产。明雪等^[2]发现滤泥和生物炭凭借其碱性特征和高矿质含量, 可有效中和土壤酸性, 激活磷酸酶活性, 缓解热带土壤磷素快速固定难题。生物炭类有机物料也可显著提高土壤氮、磷、钾含量, 并优化甘蔗干物质积累和产量。在物理结构改良方面, 有机物料通过生物胶结和孔隙重构, 促使微团聚体 (<0.25 mm) 向大团聚体 (>0.25 mm) 转化, 从而降低容重, 提升总孔隙度, 增强土壤抗侵蚀能力和保水能力^[7-10]。赵丽萍^[11]指出, 蔗叶腐解产生的胶结物质和根系分泌物协同作用, 可提高大团聚体比例, 改善孔隙结构, 优化根系对水分和养分的吸收效率。FENG 等^[12]认为秸秆还田主要通过改善团聚体结构促使作物增产。在微生物调控方面, 有机物料输入为土壤微生物提供了碳源、养分和适宜的栖息场所, 驱动微生物群落结构的优化^[13]。韩新忠等^[14]研究表明, 农作物秸秆还田可向土壤输送大量的可溶性有机碳、氮, 为土壤微生物增殖提供所需的营养, 从而增强微生物活性, 提高微生物生物量。KHAN 等^[15]通过联合施用生物肥料和氮肥, 显著增加根

际微生物多样性,富集固氮菌和解磷菌,优化土壤氮磷循环效率。长期施用有机肥还可提高土壤酶活性(如磷酸酶、 β -葡萄糖苷酶),加速有机质矿化和养分释放。

前人研究揭示,甘蔗有机物料对土壤具有改良潜力,但多聚焦于单一物料或短期效应,缺乏多物料改良差异和长期动态响应的系统解析^[1, 4, 9],这与实际田间管理的多样化施用模式存在差异。本研究通过比较不同甘蔗有机物料还田方式和施用年限下土壤理化性质、微生物多样性的变化差异,系统解析甘蔗有机物料调控土壤养分库容、优化物理结构、激活微生物功能和促进甘蔗生长的作用机理,为建立甘蔗绿色高产栽培和提升红壤区耕地质量提供理论依据,对实现农田土壤环境的可持续管理具有重要意义。

1 材料与方法

1.1 材料

1.1.1 试验地概况 试验于 2021—2024 年在中国热带农业科学院南亚热带作物研究所基地(110°16'46"E, 21°9'47"N)连续进行。该基地位于广东省湛江市霞山区,属热带北缘季风气候区,年平均气温 23.1℃,年平均降雨量为 1560 mm^[9]。供试土壤为砖红壤,前茬作物为甘蔗,取旋耕后的 0~30 cm 蔗田耕层土壤,风干后剔除石块及植株残体备用。

1.1.2 试验材料 供试甘蔗品种为 ROC22,由中国热带农业科学院南亚热带作物研究所提供。滤泥、蔗渣灰及蔗渣均由广东大华糖业有限公司提供。滤泥是甘蔗制糖固体废弃物,自然发酵 6 个月, pH 为 6.4,有机质含量为 38.6%,全氮含量为 20.96 g/kg,有效磷含量为 1860 mg/kg,速效钾含量为 1400 mg/kg。蔗渣灰为甘蔗渣焚烧炭灰,呈黑色粉末状, pH 为 8.4,有机质含量为 12.1%,全氮含量为 1.90 g/kg,有效磷含量为 1480 mg/kg,速效钾含量为 3670 mg/kg。蔗叶取自田间甘蔗收获后残留蔗叶及蔗梢,模拟机械化收获切碎成约 10 cm 片段。蔗叶养分含量:全氮为 21.74 g/kg,全磷为 1610 mg/kg,全钾为 9130 mg/kg。蔗渣为甘蔗压榨后纤维残渣,室外自然发酵 1 a。蔗渣养分含量:全氮为 5.02 g/kg,全磷为 1560 mg/kg,全钾为 7240 mg/kg。

1.2 方法

1.2.1 试验设计 采用直径为 40 cm、高度为 30 cm

的圆柱形美植袋进行桶栽试验。试验设置 5 个处理:滤泥还田(T_1)、蔗渣灰还田(T_2)、蔗叶还田(T_3)和蔗渣还田(T_4),以不添加有机物料为空白对照(CK)。每个处理 3 次重复,每重复种植 4 桶,随机区组排列。参考前人研究,按 3 a 总还田量一次性施入,还田量根据桶栽面积进行换算,滤泥还田量为 45 t/hm²(干质量计)^[16],每桶还田量 0.565 kg;蔗渣灰还田量为 30 t/hm²(干质量计)^[17],每桶还田量 0.377 kg;蔗叶还田量为 36 t/hm²(干质量计)^[18],每桶还田量 0.452 kg;蔗渣还田量为 27 t/hm²(干质量计)^[19],每桶还田量 0.339 kg。

种植前田间起垄(垄高 25 cm,垄面宽 60 cm),按桶规格挖穴后放入美植袋,使其袋口高于垄面 5 cm。将各处理的甘蔗有机物料与备用土壤充分混匀后装袋,装土深度为 25 cm,桶间间隔 30 cm。每桶种植 3 段单芽甘蔗种茎,覆土 5 cm 至与袋口齐平。待甘蔗生长至 3 叶龄时定苗,每桶保留 2 株长势均匀一致的蔗苗。试验分为新植季、第 1 年宿根季和第 2 年宿根季 3 个阶段进行,于 2021 年 2 月种植,2022 年 3 月进行新植季收获,2023 年 3 月进行第 1 年宿根季收获,2024 年 3 月进行第 2 年宿根季收获。砍收后进行宿根管理,生长期保持各处理水肥管理条件一致。

1.2.2 样品采集 分别于新植季、第 1 年宿根季和第 2 年宿根季甘蔗收获时,每处理采集 4 桶样品。砍收地上部植株后,将美植袋从垄面完整取出。按以下方法采集土壤与根系样品。(1)测定土壤养分指标样品:从每桶中纵向挖取 0~30 cm 土层 500 g 土壤样品,风干过筛、备用。(2)测定土壤物理指标样品:纵向挖取土壤剖面,按 0~10、10~20、20~30 cm 深度分层取样测定。(3)测定土壤团聚体指标样品:按上述土层分层采集 1 kg 原状土,自然风干后沿自然纹理剥离成约 1 cm³的小土块,充分混匀作为待测样品。(4)测定土壤微生物多样性样品:采用 3 点取样法取 0~30 cm 土层土壤,混匀后装入无菌自封袋,-80℃冰箱内保存待测。(5)测定根系形态指标样品:土壤样品采集完成后,挖掘整株蔗莖,剪取根系并采用流水洗净泥沙,用于甘蔗根系形态测定。

1.2.3 指标测定 (1)土壤养分指标。采用电位法测定土壤 pH;采用杜马斯燃烧法测定土壤总有机碳(TOC)和全氮(TN)含量,计算碳氮比(C/N);采用碱解扩散法测定土壤碱解氮(AN)含量;采

用连续流动分析仪测定土壤的有效磷 (AP) 和速效钾 (AK) 含量。

(2) 土壤物理指标。采用 PT 型袖珍贯入仪测定各土层贯入阻力; 采用 PS-VST-M 型剪切仪测定各土层抗剪强度; 采用环刀法测定各土层的土壤容重、田间持水量; 采用比重瓶法测定土壤密度, 计算各土层土壤的总孔隙度、毛管孔隙度和通气孔隙度。

采用干筛法和湿筛法^[20]测定土壤团聚体组成。干筛法: 称取 500 g 风干土样, 置于孔径 10、7、5、3、2、1、0.5、0.25 mm 的套筛中, 使用 TRX-6 土壤振筛仪以 30 次/min 振荡 5 min, 称量各粒级筛子上的土壤团聚体质量, 计算各粒级团聚体质量百分比, 并依此配置 3 份 80 g 的土样用于湿筛分析。湿筛法: 将干筛法配置的 80 g 土样充分浸润 5 min, 置于 5、3、2、1、0.5、0.25 mm 的套筛中, 使用 TPF-100 土壤团粒结构分析仪以 4 cm 振幅、30 次/min 振荡 6 min。结束后将各级筛上的土壤团聚体洗入铝盒, 烘干至恒重并称重, 计算土壤团聚体分布和稳定特征指标。采用杨培岭等^[21]的方法计算土壤团聚体的分形维度 (D)。

1.2.4 土壤微生物多样性 采用 E.Z.N.A.@soil DNA kit 试剂盒抽提土壤微生物总 DNA, 使用 1% 琼脂糖凝胶电泳检测 DNA 质量, 使用 NanoDrop 2000 测定 DNA 浓度和纯度。细菌 *16S rRNA* 基因 V3~V4 可变区扩增引物为: 338F (5'-ACTCCTACGGGAGGCAGCAG-3') 和 806R (5'-GGACTACHVGGGTWTCTAAT-3'), 真菌 ITS 区扩增引物为: ITS1F (5'-CTTGGTCATTTAGAGGAAGTAA-3') 和 ITS2R (5'-GCTGCGTTCTTCATCGATGC-3')。PCR 反应条件为: 95 °C 预变性 3 min, 27 个循环 (95 °C 变性 30 s, 60 °C 退火 30 s, 72 °C 延伸 30 s), 然后 72 °C 稳定延伸 10 min, 最后在 4 °C 进行保存。PCR 产物混合后使用 2% 琼脂糖凝胶检测, 使用 Qubit 4.0 试剂盒进行检测定量。DNA 提取、PCR 扩增及高通量测序均由上海美吉生物医药科技有限公司完成^[22]。对分类单元 OTUs 进行分析, 计算 Alpha 多样性指数: Shannon 指数、Chao 指数和 Ace 指数。

1.2.5 根系形态 采用根系扫描仪 WinRHIZO Pro 测定根系总长度、根表面积、根体积、根平均直径、根尖数、根分枝数和根交叉数。根系干质量测定: 根系扫描完成后, 将根系于 105 °C 杀青 30 min, 80 °C 烘干至恒重后称重。

1.2.6 甘蔗产量性状 蔗茎产量: 甘蔗收获时去除地上部蔗茎的蔗叶及梢部, 称量蔗茎鲜质量为蔗茎产量。采用锤度计测定田间锤度, 并计算蔗糖分, 蔗糖分 (%) = 田间锤度 $\times$ 1.0825 - 7.7030。

1.3 数据处理

采用 IBM SPSS Statistics 22 软件进行数据统计和单因素方差分析 (One-way ANOVA), 采用 Origin 2021 软件绘制柱形图。

2 结果与分析

2.1 不同甘蔗有机物料还田下的土壤养分

从表 1 可知, 甘蔗有机物料还田显著影响土壤 pH。与 CK 相比, T_1 和 T_2 处理在 3 个植期均显著提升土壤 pH, T_3 处理仅在新植季显著提升, T_4 处理则在第 2 年宿根季显著提升, 其中, T_2 处理对土壤 pH 的提升效果最显著。在土壤总有机碳含量方面, 3 个植期中, T_1 ~ T_4 处理的土壤总有机碳含量均显著高于 CK, T_1 处理的总有机碳含量最高, 其次是 T_2 处理, 二者均显著高于 T_3 和 T_4 处理。土壤全氮含量方面, 在 2 a 宿根季, T_1 处理的土壤全氮含量均显著高于 CK; 在第 1 年宿根季, T_4 处理的土壤全氮含量也显著高于 CK。在土壤碳氮比 (C/N) 方面, T_1 和 T_2 处理的土壤碳氮比在 3 个植期均显著高于 CK。在土壤碱解氮方面, T_1 处理在 3 个植期均最高, 且显著高于其他处理; 在 2 a 宿根季, T_2 、 T_3 和 T_4 处理的土壤碱解氮含量均高于 CK, 且在第 1 年宿根季差异显著。在土壤有效磷方面, 3 个植期中 T_1 处理均最高, 且显著高于其他处理; 其次是 T_2 处理, 均显著高于 T_3 、 T_4 和 CK。土壤速效钾方面, 3 个植期中, T_2 处理均高于 CK, 且在新植季达到显著差异; 而 T_1 处理均低于 CK, 且在第 1 年宿根季达到显著差异。

滤泥还田 (T_1) 和蔗渣灰还田 (T_2) 在 3 个植期均显著提升土壤 pH、总有机碳含量、碱解氮和有效磷含量, 滤泥还田还显著提升了宿根季的全氮含量, 而蔗渣灰还田显著增加整个植期的土壤速效钾含量。蔗叶还田 (T_3) 和蔗渣还田 (T_4) 在 3 个植期均显著提高土壤总有机碳含量, 蔗渣还田还显著提升 2 a 宿根季的土壤碱解氮含量。

2.2 不同甘蔗有机物料还田下的土壤物理性质

2.2.1 土壤容重 与 CK 相比, 4 种甘蔗有机物料还田处理均显著降低了 0~30 cm 土层的平均土壤容重, 在新植季中的改善效果最为显著, 并随

表 1 不同甘蔗有机物料还田下的土壤养分

Tab. 1 Soil nutrients under different sugarcane organic materials returned to the field

植期 Plant period	处理 Treatment	pH	总有机碳 TOC/(g·kg ⁻¹)	全氮 TN/(g·kg ⁻¹)	C/N	碱解氮 AN/(mg·kg ⁻¹)	有效磷 AP/(mg·kg ⁻¹)	速效钾 AK/(mg·kg ⁻¹)
新植	CK	4.5±0.1 ^b	7.17±0.56 ^c	1.32±0.20 ^a	5.50±0.48 ^b	64±11 ^b	37.6±3.0 ^c	257±48 ^b
	T ₁	6.4±0.2 ^a	14.69±1.20 ^a	1.50±0.11 ^a	9.80±0.38 ^a	141±6 ^a	187.4±25.6 ^a	178±44 ^b
	T ₂	7.8±0.1 ^a	14.02±1.12 ^a	1.31±0.15 ^a	10.86±1.99 ^a	72±8 ^b	64.3±14.9 ^b	381±112 ^a
	T ₃	5.1±0.8 ^a	9.13±1.53 ^b	1.46±0.09 ^a	6.32±1.29 ^b	64±16 ^b	38.0±13.0 ^c	269±104 ^{ab}
	T ₄	4.1±0.2 ^b	10.44±1.18 ^b	1.53±0.11 ^a	6.84±0.63 ^b	72±7 ^b	33.3±13.0 ^c	218±19 ^b
第 1 年宿根	CK	4.8±0.2 ^b	6.49±0.52 ^d	1.23±0.08 ^b	5.29±0.19 ^b	65±10 ^c	32.9±9.0 ^c	208±55 ^{ab}
	T ₁	6.6±0.5 ^a	15.75±1.71 ^a	1.49±0.11 ^a	10.62±1.32 ^a	193±11 ^a	167.9±24.6 ^a	129±29 ^c
	T ₂	7.5±0.1 ^a	13.19±0.96 ^b	1.22±0.02 ^b	10.81±0.87 ^a	101±6 ^c	55.1±7.9 ^b	254±70 ^a
	T ₃	5.2±0.5 ^b	8.63±0.48 ^c	1.34±0.15 ^b	6.53±0.90 ^b	87±5 ^d	30.9±5.8 ^c	219±13 ^{ab}
	T ₄	5.0±0.2 ^b	8.84±0.47 ^c	1.55±0.03 ^a	5.70±0.41 ^b	120±4 ^b	32.3±4.7 ^c	177±46 ^{bc}
第 2 年宿根	CK	4.8±0.1 ^b	6.28±0.30 ^d	1.40±0.05 ^{bc}	4.49±0.23 ^c	96±4 ^c	39.4±8.6 ^c	156±22 ^{ab}
	T ₁	6.7±0.2 ^a	14.88±2.27 ^a	1.59±0.07 ^a	9.36±1.48 ^a	213±39 ^a	143.8±33.7 ^a	139±31 ^b
	T ₂	7.0±0.1 ^a	14.53±3.48 ^a	1.37±0.09 ^{bc}	10.62±2.68 ^a	128±31 ^{bc}	68.9±18.9 ^b	216±38 ^a
	T ₃	4.9±0.3 ^b	7.63±0.88 ^c	1.36±0.07 ^c	5.20±0.67 ^{bc}	103±8 ^{bc}	32.6±8.3 ^c	195±51 ^{ab}
	T ₄	5.4±0.5 ^a	10.28±1.28 ^b	1.48±0.07 ^b	6.96±0.86 ^b	136±10 ^b	43.1±6.4 ^{bc}	180±55 ^{ab}

注：同列不同小写字母表示同一植期不同处理间差异显著 ($P<0.05$)。

Note: Different lowercase letters in the same column indicate significant difference between treatments at the same planting stage ($P<0.05$).

年份递增逐渐减弱，其中，T₁处理降幅最大，T₂处理次之，T₄也显著低于CK，T₃处理在新植季和第2年宿根季显著降低。不同土层中，0~10 cm 土层 T₁和 T₂处理的土壤容重最低；T₃和 T₄处理在新植季和第2年宿根季显著低于CK。10~20 cm 土层的各处理在3个植期均显著低于CK。20~30 cm 土层仅 T₁和 T₂处理在3个植期显著低于CK；T₃和 T₄处理在新植季和第1年宿根季低于CK（表2）。

2.2.2 土壤田间持水量 T₂处理的土壤田间持水量提升效果最为显著且持久，在3个植期均显著高于CK；T₁处理在第1年和第2年宿根季显著高于CK；T₃处理与CK无显著差异；而T₄处理在新植季显著低于CK。0~10 cm 土层中，T₁和 T₂处理在3个植期均显著高于CK；10~20 cm 土层的T₂处理在各植期、T₁处理在第2年宿根季显著高于CK；20~30 cm 土层中，仅T₁处理在第2年宿根季、T₂处理在新植季和第2年宿根季显著高于CK（表2）。

2.2.3 土壤贯入阻力 T₁、T₃和 T₄处理在3个植期的土壤贯入阻力均显著低于CK，T₂处理在新植季和第1年宿根季显著低于CK。各处理的改善效果随植期而变化，新植季和第1年宿根季以T₄处理最优，降幅分别为45.45%和36.06%；第2

年宿根季以T₁处理最优，降幅达39.32%。在3个植期中，T₁处理和CK的土壤贯入阻力随种植年限增加而下降，而T₂和T₄处理则逐年上升。0~10 cm 土层中，T₁、T₃和 T₄处理在各植期均显著低于CK，而T₂处理在新植季和第2年宿根季显著低于CK；10~20 cm 土层中，T₁和 T₃处理在2a宿根季显著低于CK，T₂和 T₄处理在新植季和第1年宿根季显著低于CK，但T₂处理在第2年宿根季反而显著高于CK；20~30 cm 土层的T₁、T₃和 T₄处理在3个植期均显著低于CK，而T₂处理在新植季和第1年宿根季显著低于CK（表2）。

2.2.4 土壤抗剪强度 T₁和 T₃处理在3个植期的平均土壤抗剪强度均显著低于CK，T₄处理在新植季和第1年宿根季显著低于CK，而T₂处理仅在新植季显著低于CK。不同植期间，T₁处理在2a宿根季均低于新植季，而T₄处理随着种植年限增加而增强。分土层来看，0~10 cm 土层的T₁~T₄处理在新植季均显著低于CK，T₄处理在第1年宿根季显著低于CK；10~20 cm 土层的T₄处理在新植季显著低于CK，T₁和 T₃处理在第2年宿根季显著低于CK；20~30 cm 土层，T₁处理3个植期均显著低于CK，T₄处理在新植季和第1年宿根季显著低于CK（表2）。

表 2 不同甘蔗有机物料还田下的土壤物理性质
Tab. 2 Soil physical properties under different sugarcane organic materials returned to the field

土层 Soil layer/cm	处理 Treatment	土壤容重 Soil bulk density/(g·cm ⁻³)		田间持水量 Field moisture capacity/%		贯入阻力 Penetration resistance/100 kPa		抗剪强度 Shear strength/(kg·cm ⁻²)	
		新植 New plant	第 1 年宿根 1 st year ratoon	新植 New plant	第 1 年宿根 1 st year ratoon	新植 New plant	第 1 年宿根 1 st year ratoon	新植 New plant	第 1 年宿根 1 st year ratoon
0-10	CK	1.04±0.05 ^a	0.99±0.07 ^a	28.46±1.39 ^c	30.00±3.57 ^b	1.47±0.57 ^a	1.45±0.24 ^a	0.13±0.04 ^a	0.07±0.04 ^a
	T ₁	0.76±0.07 ^c	0.80±0.06 ^b	40.83±9.31 ^b	51.92±6.74 ^a	0.88±0.34 ^b	0.62±0.15 ^b	0.08±0.03 ^b	0.05±0.01 ^{ab}
	T ₂	0.75±0.04 ^c	0.82±0.05 ^b	59.03±1.99 ^a	55.41±5.10 ^a	0.46±0.10 ^b	1.03±0.09 ^a	0.04±0.01 ^{bc}	0.06±0.01 ^{ab}
	T ₃	0.91±0.03 ^b	1.00±0.08 ^a	29.77±6.42 ^c	34.63±8.60 ^b	0.58±0.25 ^b	0.60±0.08 ^b	0.05±0.01 ^{bc}	0.05±0.01 ^{ab}
10-20	T ₄	0.87±0.03 ^b	0.93±0.05 ^a	24.83±1.36 ^c	34.08±8.26 ^b	0.52±0.11 ^b	0.67±0.25 ^b	0.04±0.01 ^c	0.04±0.01 ^b
	CK	0.97±0.04 ^a	1.02±0.02 ^a	33.24±2.51 ^b	35.25±2.04 ^{bc}	2.28±0.33 ^a	2.03±0.14 ^a	0.20±0.03 ^a	0.14±0.03 ^a
	T ₁	0.83±0.06 ^b	0.81±0.08 ^c	30.84±2.17 ^b	41.33±4.04 ^{ab}	1.80±0.17 ^{abc}	1.39±0.24 ^b	0.17±0.02 ^a	0.10±0.01 ^c
	T ₂	0.85±0.04 ^b	0.87±0.02 ^{bc}	44.89±2.76 ^a	43.27±8.53 ^a	1.67±0.62 ^{bc}	1.62±0.22 ^b	0.15±0.06 ^a	0.14±0.01 ^{ab}
20-30	T ₃	0.82±0.02 ^b	0.96±0.10 ^{ab}	33.70±4.70 ^b	33.67±2.20 ^c	2.05±0.28 ^{ab}	1.45±0.18 ^b	0.18±0.03 ^a	0.11±0.02 ^a
	T ₄	0.83±0.02 ^b	0.89±0.05 ^{ab}	30.42±4.90 ^b	35.77±1.83 ^{bc}	1.44±0.18 ^c	1.43±0.17 ^b	0.08±0.05 ^b	0.11±0.03 ^a
	CK	1.02±0.08 ^a	1.03±0.03 ^a	31.24±3.42 ^b	32.86±1.91 ^a	2.53±0.56 ^a	2.30±0.15 ^a	0.22±0.02 ^a	0.16±0.03 ^a
	T ₁	0.82±0.02 ^c	0.82±0.02 ^c	32.30±4.85 ^b	42.05±3.06 ^a	2.03±0.16 ^b	1.63±0.17 ^{bc}	0.19±0.03 ^b	0.11±0.01 ^b
均值	T ₂	0.93±0.04 ^b	0.90±0.04 ^b	41.15±2.42 ^a	39.43±11.71 ^a	1.94±0.17 ^{bc}	1.84±0.18 ^b	0.17±0.02 ^b	0.14±0.04 ^{ab}
	T ₃	0.86±0.04 ^{bc}	0.95±0.08 ^b	30.78±4.87 ^b	32.86±1.98 ^a	1.54±0.08 ^{cd}	1.45±0.08 ^b	0.13±0.01 ^c	0.12±0.02 ^{ab}
	T ₄	0.89±0.04 ^{bc}	0.88±0.03 ^{bc}	21.77±6.47 ^c	38.42±2.08 ^a	1.47±0.25 ^d	1.41±0.17 ^c	0.11±0.03 ^c	0.11±0.01 ^b
	CK	1.01±0.05 ^a	1.01±0.02 ^a	30.98±0.96 ^b	32.70±1.99 ^b	2.09±0.65 ^a	1.83±0.54 ^a	0.18±0.05 ^a	0.12±0.05 ^a
F 值	T ₁	0.80±0.04 ^c	0.81±0.02 ^c	34.66±2.60 ^b	45.10±3.44 ^a	1.57±0.56 ^b	1.21±0.48 ^c	0.15±0.06 ^b	0.09±0.03 ^b
	T ₂	0.84±0.04 ^{bc}	0.86±0.03 ^{bc}	48.36±1.57 ^a	46.04±5.89 ^a	1.36±0.75 ^{bc}	1.50±0.39 ^b	0.12±0.07 ^c	0.12±0.05 ^a
	T ₃	0.86±0.03 ^b	0.97±0.07 ^a	31.42±4.73 ^b	33.72±2.84 ^b	1.39±0.67 ^{bc}	1.20±0.47 ^c	0.12±0.06 ^c	0.09±0.04 ^b
	T ₄	0.86±0.03 ^b	0.90±0.03 ^b	25.67±0.30 ^c	36.09±3.39 ^b	1.14±0.49 ^c	1.17±0.41 ^c	0.08±0.04 ^d	0.09±0.04 ^b
处理	土层 (S)	5.31 ^{**}	0.09	6.56 ^{**}	2.93	75.24 ^{**}	145.62 ^{**}	62.72 ^{**}	53.76 ^{**}
	处理 (T)	36.73 ^{**}	23.13 ^{**}	42.76 ^{**}	15.03 ^{**}	14.54 ^{**}	27.80 ^{**}	20.86 ^{**}	5.46 ^{**}
	交互 (S×T)	5.15 ^{**}	1.15	5.56 ^{**}	2.88 [*]	1.43	1.09	1.91	0.26

注：同列不同小写字母表示同一土层不同处理间差异显著 ($P<0.05$)。*表示显著相关 ($P<0.05$)；**表示极显著相关 ($P<0.01$)。

Note: Different lowercase letters in the same column indicate significant difference between different treatments in the same soil layer ($P<0.05$). * indicates significant correlation ($P<0.05$); ** indicates extremely significant correlation ($P<0.01$).

4 种还田处理中, 滤泥还田和蔗渣灰还田处理对降低土壤容重、提升田间持水量效果最优, 且滤泥还田处理在改善土壤贯入阻力与抗剪强度方面表现最突出, 改善效果随年限增强。蔗叶还田处理与蔗渣还田处理则主要显著改善土壤贯入阻力与抗剪强度, 尤其在 20~30 cm 土层效果稳定。蔗渣灰对表层土壤力学性能的改善仅限于新植季, 宿根季后效果消失。所有处理对土壤容重的改善效果均随种植年限延长而减弱。

2.2.5 土壤孔隙度 甘蔗有机物料还田显著改善了土壤孔隙结构。 T_1 ~ T_4 处理在 3 个植期的平均总孔隙度均显著高于 CK, 其中, T_1 处理的平均总孔隙度最高, T_2 处理在 3 个植期的平均毛管孔隙度均显著高于 CK, T_1 、 T_3 和 T_4 处理在新植季的平均通气孔隙度显著高于 CK。0~10 cm 土层中,

与 CK 相比, T_1 和 T_2 处理显著提高了 3 个植期的总孔隙度和毛管孔隙度, T_3 和 T_4 处理显著提高了新植季和第 2 年宿根季的总孔隙度, T_4 处理显著提升了新植季的通气孔隙度; 10~20 cm 土层中, T_1 ~ T_4 处理在 3 个植期的总孔隙度显著高于 CK, T_1 和 T_4 处理在新植季和第 1 年宿根季的通气孔隙度显著高于 CK; 20~30 cm 土层中, T_1 和 T_2 在 3 个植期的总孔隙度均显著高于 CK, T_3 和 T_4 处理在新植季和第 1 年宿根季的总孔隙度显著高于 CK, T_1 、 T_3 和 T_4 处理在新植季的通气孔隙度显著高于 CK (表 3)。

4 种甘蔗有机物料还田处理在 3 个植期均显著提升了 0~30 cm 土层的土壤总孔隙度。蔗渣还田能快速提升土壤通气孔隙度, 而滤泥还田和蔗渣灰还田能长期 (3 个植期) 改善土壤总孔隙度和

表 3 不同甘蔗有机物料还田下的土壤孔隙度

Tab. 3 Soil porosity characteristics under different sugarcane organic materials returned to the field

土层 Soil layer/cm	处理 Treatment	总孔隙度 Total porosity/%			毛管孔隙度 Capillary porosity/%			通气孔隙度 Non-capillary porosity/%		
		新植 New plant	第 1 年宿根 1 st year ratoon	第 2 年宿根 2 nd year ratoon	新植 New plant	第 1 年宿根 1 st year ratoon	第 2 年宿根 2 nd year ratoon	新植 New plant	第 1 年宿根 1 st year ratoon	第 2 年宿根 2 nd year ratoon
0~10	CK	60.83±2.04 ^c	62.68±2.51 ^b	56.55±2.87 ^c	29.54±1.17 ^{bc}	29.47±2.25 ^c	23.75±3.27 ^b	31.29±2.81 ^{bc}	33.21±2.38 ^a	32.81±4.66 ^{ab}
	T_1	71.31±2.47 ^a	69.71±2.33 ^a	66.77±2.34 ^a	31.25±9.22 ^b	41.11±2.42 ^{ab}	37.17±5.45 ^a	40.07±11.09 ^{ab}	28.60±1.18 ^{ab}	29.60±5.23 ^b
	T_2	71.73±1.55 ^a	69.08±2.04 ^a	66.68±2.66 ^a	44.19±3.83 ^a	45.31±4.87 ^a	36.30±4.25 ^a	27.53±5.36 ^c	23.77±6.20 ^b	30.38±4.20 ^b
	T_3	65.80±1.31 ^b	62.34±2.90 ^b	62.60±1.67 ^b	26.83±5.35 ^{bc}	34.18±6.74 ^{bc}	27.69±6.72 ^b	38.97±4.82 ^{ab}	28.16±5.63 ^{ab}	34.91±6.16 ^{ab}
	T_4	67.04±1.28 ^b	64.77±1.84 ^b	63.01±1.40 ^b	21.71±1.85 ^c	31.43±6.13 ^c	23.08±5.17 ^b	45.33±3.07 ^a	33.35±4.30 ^a	39.93±5.96 ^a
10~20	CK	63.35±1.37 ^b	61.70±0.58 ^c	63.06±2.59 ^b	32.30±3.43 ^b	35.81±2.26 ^a	27.09±3.19 ^c	31.05±4.65 ^b	25.89±2.55 ^b	35.97±3.08 ^a
	T_1	68.75±2.11 ^a	69.25±2.93 ^a	67.36±1.71 ^a	25.35±0.28 ^c	33.50±2.72 ^a	31.87±1.43 ^b	43.40±2.14 ^a	35.74±4.81 ^a	35.49±1.47 ^a
	T_2	68.09±1.68 ^a	67.17±0.90 ^{ab}	67.05±1.93 ^a	37.97±2.07 ^a	37.59±7.58 ^a	36.94±1.49 ^a	30.12±3.01 ^b	29.59±7.93 ^{ab}	30.11±1.51 ^b
	T_3	69.04±0.80 ^a	63.93±3.75 ^{bc}	65.78±0.92 ^a	27.57±3.26 ^c	32.03±2.70 ^a	27.05±4.40 ^c	41.46±2.78 ^a	31.90±6.09 ^{ab}	38.73±4.08 ^a
	T_4	68.62±0.65 ^a	66.42±1.74 ^{ab}	66.34±1.40 ^a	25.26±3.82 ^c	31.80±1.41 ^a	28.72±1.51 ^{bc}	43.36±3.71 ^a	34.62±2.66 ^a	37.61±2.64 ^a
20~30	CK	61.43±2.92 ^c	61.17±1.20 ^c	63.44±1.78 ^{bc}	31.74±2.61 ^b	33.81±1.67 ^a	30.50±1.42 ^{bc}	29.69±4.05 ^b	27.36±2.04 ^a	32.95±2.22 ^a
	T_1	69.20±0.76 ^a	69.17±0.86 ^a	66.56±2.23 ^a	26.34±4.50 ^b	34.33±2.36 ^a	32.65±1.81 ^b	42.85±5.19 ^a	34.83±2.56 ^a	33.91±2.29 ^a
	T_2	64.93±1.65 ^b	65.93±1.36 ^b	66.79±1.30 ^a	38.21±2.56 ^a	35.47±10.54 ^a	37.18±2.85 ^a	26.71±3.69 ^b	30.46±10.64 ^a	29.61±4.05 ^a
	T_3	67.58±1.39 ^{ab}	64.21±3.12 ^b	61.62±2.19 ^c	26.26±3.26 ^b	31.06±1.36 ^a	32.43±2.30 ^b	41.33±2.83 ^a	33.15±4.26 ^a	29.19±2.31 ^a
	T_4	66.58±1.69 ^{ab}	66.73±1.03 ^{ab}	65.09±2.12 ^{ab}	19.15±5.48 ^c	33.89±2.72 ^a	30.28±4.16 ^b	47.42±5.09 ^a	32.84±3.68 ^a	34.81±5.81 ^a
均值	CK	61.87±1.96 ^c	61.85±0.93 ^c	61.02±0.33 ^c	31.19±1.62 ^b	33.03±1.31 ^b	27.11±2.16 ^b	30.68±3.42 ^b	28.82±0.39 ^a	33.91±2.27 ^{abc}
	T_1	69.75±1.62 ^a	69.37±0.76 ^a	66.90±1.80 ^a	27.65±3.14 ^c	36.31±2.31 ^{ab}	33.90±2.60 ^a	42.11±4.53 ^a	33.06±2.33 ^a	33.00±2.40 ^{bc}
	T_2	68.25±1.32 ^{ab}	67.39±1.15 ^{ab}	66.84±1.06 ^a	40.13±1.41 ^a	39.46±6.62 ^a	36.81±1.73 ^a	28.12±2.47 ^b	27.94±7.61 ^a	30.03±0.94 ^c
	T_3	67.47±0.96 ^b	63.49±2.58 ^c	63.34±1.25 ^b	26.89±3.40 ^c	32.42±2.56 ^b	29.06±1.83 ^b	40.59±2.76 ^a	31.07±4.18 ^a	34.28±2.56 ^{ab}
	T_4	67.41±1.01 ^b	65.98±1.14 ^b	64.81±1.07 ^b	22.04±0.83 ^d	32.37±2.53 ^b	27.36±2.88 ^b	45.37±1.78 ^a	33.60±2.27 ^a	37.45±3.74 ^a
F 值	土层 (S)	5.43 ^{**}	0.10	9.70 ^{**}	1.70	1.77	3.65 [*]	0.38	1.27	3.79 [*]
	处理 (T)	37.66 ^{**}	23.43 ^{**}	18.34 ^{**}	32.87 ^{**}	5.34 ^{**}	16.48 ^{**}	30.06 ^{**}	2.91 [*]	5.25 ^{**}
	互作 (S×T)	5.30 ^{**}	1.12	3.19 ^{**}	1.65	2.28 [*]	2.26 [*]	0.49	1.65	1.66

注: 同列不同小写字母表示同一土层不同处理间差异显著 ($P<0.05$)。*表示显著相关 ($P<0.05$); **表示极显著相关 ($P<0.01$)。

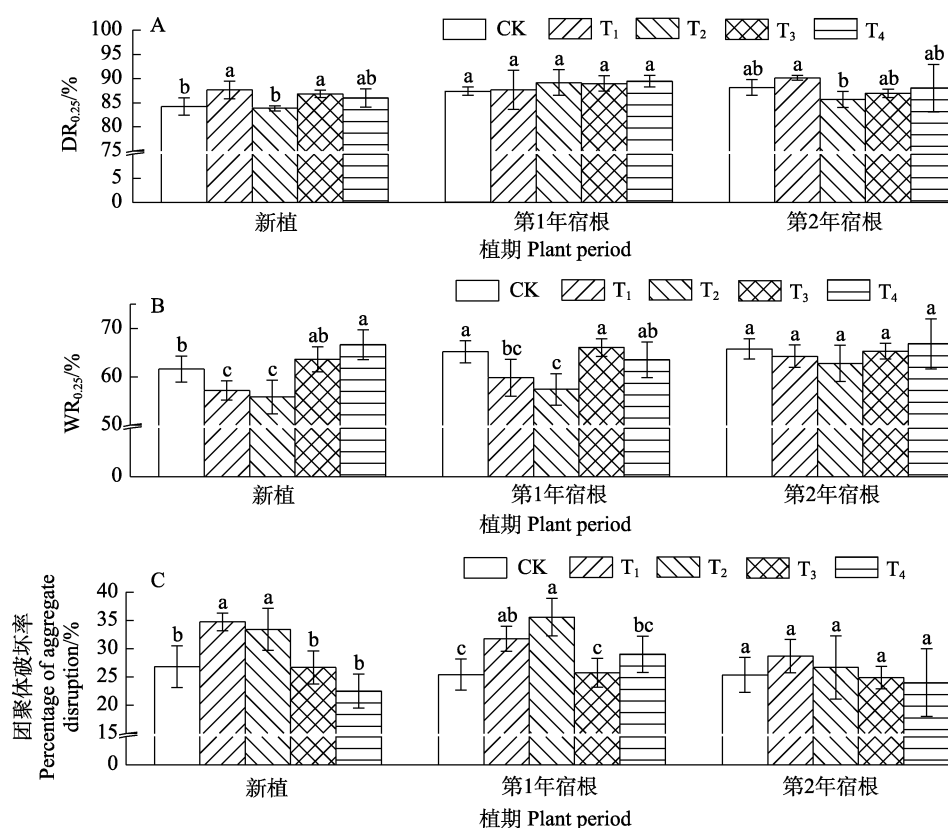
Note: Different lowercase letters in the same column indicate significant difference between different treatments in the same soil layer ($P<0.05$). * indicates significant correlation ($P<0.05$); ** indicates extremely significant correlation ($P<0.01$).

毛管孔隙度;不同甘蔗有机物料对不同土层孔隙度的影响存在差异,蔗渣灰还田对表层土壤毛管孔隙度改善效果显著,而滤泥还田和蔗叶还田对深层土壤的总孔隙度和通气孔隙度改善效果更显著。

2.2.6 土壤团聚体分布 在 $>0.25\text{ mm}$ 粒级机械稳定性团聚体含量 ($\text{DR}_{0.25}$) 方面 (图 1A), T_1 处理在 3 个植期均高于 CK, 分别比 CK 高 3.39%、0.23%和 1.97%, 且在新植季达到显著差异; 而 T_3 和 T_4 处理在新植季和第 1 年宿根季高于 CK。在 $>0.25\text{ mm}$ 粒级水稳性团聚体含量 ($\text{WR}_{0.25}$) 方面 (图 1B), T_1 和 T_2 处理在 3 个植期均低于 CK, 且在新植季和第 1 年宿根季达到显著差异; T_3 处

理在新植季和第 1 年宿根季显著高于 CK; T_4 处理在新植季和第 2 年宿根季显著高于 CK。在团聚体破坏率方面 (图 1C), T_1 和 T_2 处理在 3 个植期均高于 CK, 且在新植季和第 1 年宿根季达到显著差异; T_4 处理除在第 1 年宿根季高于 CK 外, 在新植季和第 2 年宿根季均低于 CK。

蔗叶还田和蔗渣还田均能促进土壤大团聚体的形成, 其中蔗渣还田形成的大团聚体稳定性较高, 不易水解。滤泥还田有助于机械稳定性大团聚体的形成, 但滤泥还田和蔗渣灰还田显著抑制了水稳性大团聚体的形成, 其团聚体结构稳定性较差。



不同小写字母表示不同处理间差异显著 ($P < 0.05$)。

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

图 1 不同甘蔗有机物料还田下的土壤团聚体含量及团聚体破坏率

Fig. 1 Soil aggregate content and aggregate disruption rates under different sugarcane organic materials returned to the field

2.2.7 土壤团聚体稳定特征指标 平均重量直径 (MWD) 和几何平均直径 (GWD) 是反映土壤团聚体分布状况的常用指标, 其值越大, 团聚体稳定性越强。如图 2A、图 2B 所示, 在新植季, T_3 和 T_4 处理的土壤 MWD 和 GWD 均高于 CK, 其中 T_4 处理与 CK 相比差异显著; 而 T_1 和 T_2 处理的土壤 MWD 和 GWD 则均低于 CK。在第 1 年

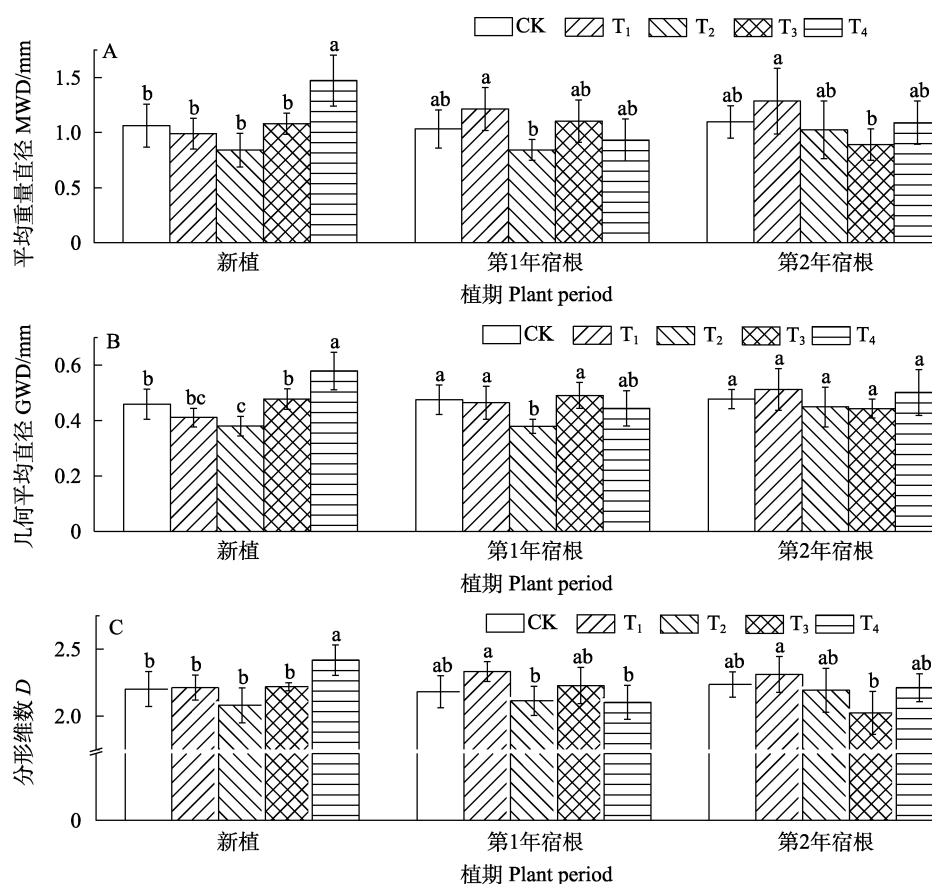
宿根季, T_3 处理的土壤 MWD 和 GWD 均高于 CK, T_1 处理的 MWD 高于 CK, 但 T_2 处理的土壤 GMD 和 MWD 低于 CK, 且其 GMD 与 CK 相比差异显著。在第 2 年宿根季, T_1 和 T_4 处理的 GWD 和 MWD 高于 CK, 而 T_2 和 T_3 处理的 GWD 和 MWD 则低于 CK。

分形维数 (D) 反映土壤颗粒的大小、分布

和均一程度,其值越小,表明土壤结构越好、稳定性越强,抗蚀能力越强^[23]。由图 2C 可见, T_1 处理的土壤分形维数在 3 个植期均高于 CK, T_2 处理在 3 个植期均低于 CK, T_3 处理在新植季和第 1 年宿根季低于 CK, T_4 处理在新植季和第 2 年宿根季高于 CK, 其中在新植季与 CK 相比差异显著。

滤泥还田显著提升 2 a 宿根季的水稳性大团

聚体含量,表明滤泥对土壤团聚体结构和长期稳定性的改善效果较好。蔗叶还田和蔗渣还田均能改善土壤团聚体结构,使土壤趋于疏松,增强稳定性和抗侵蚀能力,其中蔗渣还田在新植季的改良效果尤为突出,具有显著的短期效应;而蔗叶还田在第 2 年宿根季团聚体结构变劣,稳定性有所下降。蔗渣灰还田在 3 个植期均降低了土壤的团聚体结构和稳定性,不利于土壤大团聚体形成。



不同小写字母表示不同处理间差异显著 ($P < 0.05$)。

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

图 2 不同甘蔗有机物料还田下的土壤团聚体稳定特征指标

Fig. 2 Stability characteristic indicators of soil aggregates under different sugarcane organic materials returned to the field

2.3 不同甘蔗有机物料还田下的土壤微生物多样性

Shannon 指数反映微生物群落的多样性与均匀性,其值越高,表明物种的丰富度和均匀度越高;Chao 指数和 Ace 指数则表征物种丰富度,其值越大物种越丰富。由表 4 可知,在细菌多样性方面,在 3 个植期中, T_1 和 T_2 处理的土壤细菌 Shannon、Chao 和 Ace 指数均显著高于 CK;在新植季和第 1 年宿根季, T_3 处理的这 3 个指数均高于 CK, 其中 Chao 和 Ace 指数达到显著差异;但在第 2 年宿根

季,这 3 个指数均低于 CK, 其中 Shannon 和 Ace 指数达到显著差异;在 2 a 宿根季中, T_4 处理的 3 个指数均高于 CK, 其中 Chao 和 Ace 指数达到显著差异。在真菌多样性方面,4 个甘蔗有机物料还田的土壤真菌 Shannon 指数在新植季和第 1 年宿根季均与 CK 无显著差异,但在第 2 年宿根季均显著高于 CK;在新植季,4 个还田处理的 Chao 和 Ace 指数均高于 CK, 其中 T_1 、 T_3 和 T_4 处理达到显著差异;在第 2 年宿根季,与 CK 相比, T_3 处理的 Chao 和 Ace 指数显著下降,而 T_4 处理则显著提高。

不同甘蔗有机物料还田对土壤细菌和真菌的多样性和丰富度的影响各异。其中以滤泥还田和蔗渣灰还田的提升效应最为突出，在 3 a 植期均表现出显著促进作用，具有长效性。蔗叶还田在新植季和第 1 年宿根季促进土壤细菌和真菌的多样性和丰富度，但在第 2 年宿根季则表现出明显的抑制作用。蔗渣还田在第 2 年宿根季也极大促进了土壤细菌和真菌的多样性和丰富度。

表 4 不同甘蔗有机物料还田下的土壤微生物多样性
Tab. 4 Soil microbial diversity under different sugarcane organic materials returned to the field

植期 Plant period	处理 Treatment	细菌 Bacteria			真菌 Fungus		
		Shannon	Chao	Ace	Shannon	Chao	Ace
新植	CK	5.48±0.31 ^b	1840±182 ^b	1819±160 ^b	3.77±0.15 ^a	246±57 ^b	245±60 ^b
	T ₁	6.33±0.05 ^a	2468±81 ^a	2482±80 ^a	3.42±0.82 ^a	387±57 ^a	389±55 ^a
	T ₂	6.39±0.10 ^a	2580±37 ^a	2581±53 ^a	3.94±0.47 ^a	356±8 ^{ab}	359±10 ^{ab}
	T ₃	5.85±0.41 ^b	2325±406 ^a	2341±412 ^a	3.91±0.57 ^a	456±88 ^a	469±95 ^a
	T ₄	5.39±0.19 ^b	1662±171 ^b	1675±145 ^b	3.08±0.71 ^a	387±88 ^a	388±90 ^a
第 1 年宿根	CK	5.95±0.10 ^c	2646±166 ^b	2637±158 ^b	4.12±0.17 ^a	531±110 ^a	534±113 ^a
	T ₁	6.43±0.15 ^{ab}	3419±68 ^a	3401±59 ^a	3.82±0.49 ^a	516±62 ^a	526±66 ^a
	T ₂	6.49±0.14 ^a	3273±57 ^a	3261±67 ^a	4.39±0.34 ^a	460±28 ^a	462±26 ^a
	T ₃	6.19±0.10 ^{abc}	3413±333 ^a	3403±338 ^a	4.11±0.24 ^a	589±166 ^a	592±168 ^a
	T ₄	6.09±0.32 ^{bc}	3148±282 ^a	3108±311 ^a	3.87±0.17 ^a	445±34 ^a	448±39 ^a
第 2 年宿根	CK	5.64±0.11 ^b	2390±360 ^b	2399±338 ^b	2.90±0.25 ^b	403±25 ^{ab}	404±26 ^{ab}
	T ₁	6.42±0.08 ^a	3330±217 ^a	3334±225 ^a	3.64±0.25 ^a	594±91 ^a	597±81 ^a
	T ₂	6.43±0.10 ^a	3042±213 ^a	3029±230 ^a	3.60±0.26 ^a	601±172 ^a	560±164 ^a
	T ₃	5.42±0.08 ^c	1962±256 ^b	1953±245 ^c	3.39±0.38 ^a	338±112 ^b	346±123 ^b
	T ₄	6.27±0.02 ^a	3246±89 ^a	3248±108 ^a	3.51±0.06 ^a	566±72.51 ^a	567±68 ^a

注：同列不同小写字母表示同一植期不同处理间差异显著（ $P<0.05$ ）。
Note: Different lowercase letters in the same column indicate significant difference between treatments at the same planting stage ($P<0.05$).

2.4 不同甘蔗有机物料还田下的根系形态

不同甘蔗有机物料还田对根系形态的影响如表 5 所示。从甘蔗根系干质量来看，新植季中以 T₂ 和 CK 最高，显著高于其他处理；第 1 年宿根季以 T₂ 处理最高，其次为 CK、T₁ 和 T₃ 处理，T₄ 处理最低；第 2 年宿根季以 T₂ 处理最高，其次是 T₁ 和 T₃ 处理，T₄ 和 CK 最低。从根总长度、根表面积和根体积来看，新植季以 CK 最高，其次是 T₂ 处理，T₁、T₃ 和 T₄ 处理较低；第 1 年宿根季中，均以 T₂ 处理最高，其根总长度显著高于 CK，其次是 T₁、T₃ 和 CK，T₄ 处理最低；第 2 年宿根季中，以 T₂ 处理最高，其根总长度和根表面积均显著高于 CK，其次是 T₁ 和 T₃ 处理，T₄ 处理和 CK 较低。从根尖数、根分枝数、根交叉数来看，在新植季，以 CK 最高，其次是 T₂ 处理，T₁、T₃ 和 T₄ 处理较低；在第 1 年宿根季，T₂ 处理的各项指标均最高，且显著高于 CK 处理，其次为 T₁、CK 和 T₃ 处理，T₄ 处理最低；第 2 年宿根季中，T₁、T₂ 和 T₃ 处理的各指标均较高，T₄ 处理较低，CK

最低。

总体来看，蔗渣灰还田在 3 个植期均显著提高甘蔗地下部根系生物量，对甘蔗根系的总长度、表面积、体积、根尖数、分枝数和交叉数等根系形态有促进作用，对甘蔗根系的促进效果最为显著；滤泥还田在 2 a 宿根季中根系形态指标普遍高于 CK，其促进效应随种植年限增加而增强；蔗叶处理在第 2 年宿根季对根系生长有一定促进作用；而蔗渣还田在新植季和第 1 年宿根季对甘蔗根系生长有一定的抑制作用。

2.5 不同甘蔗有机物料还田下的甘蔗产量情况

不同甘蔗有机物料还田下的蔗茎产量和蔗糖分如表 6 所示。在蔗茎产量方面，T₁ 处理在 3 个植期均高于 CK，分别比 CK 增产 13.15%、209.38% 和 113.03%，其中，2 a 宿根季的增产达到显著差异，T₁ 处理的 3 a 总产量最高，较 CK 增产 94.96%；T₂ 处理在 3 个植期也高于 CK，分别比 CK 增产 22.09%、84.09% 和 107.64%，其中，第 2 年宿根季的增产达到显著差异，3 a 总产量较 CK 增产

表 5 不同甘蔗有机物料还田下的根系形态

Tab. 5 Root morphology under different sugarcane organic materials returned to the field

植期 Plant period	处理 Treatment	根系干质量 RW/g	根总长度 RL/cm	根表面积 RSA/cm ²	根体积 RV/cm ³	根平均直径 RAD/mm	根尖数 RTN	根分枝数 RBN	根交叉数 RCN
新植	CK	56.33±10.22 ^a	21 790±7407 ^a	3505±1158 ^a	45.73±16.66 ^a	0.51±0.07 ^a	105 662±43 935 ^a	201 859±93 899 ^a	18 047±9338 ^a
	T ₁	24.01±4.21 ^b	12 484±4954 ^b	1901±925 ^{bc}	23.46±13.84 ^b	0.47±0.04 ^a	71 446±23 858 ^a	119 452±47 255 ^a	10 617±3970 ^a
	T ₂	49.10±15.11 ^a	19 032±5350 ^{ab}	3016±639 ^{ab}	38.79±6.52 ^{ab}	0.51±0.03 ^a	113 606±34 630 ^a	169 119±50 886 ^a	15 201±5452 ^a
	T ₃	25.67±9.37 ^b	14 409±2491 ^{ab}	2080±311 ^{bc}	24.57±5.89 ^b	0.46±0.06 ^a	84 150±17 807 ^a	134 123±30 327 ^a	13 354±4667 ^a
	T ₄	26.03±12.68 ^b	12 414±3342 ^b	1735±633 ^c	20.36±9.95 ^b	0.43±0.08 ^a	80 124±23 627 ^a	121 022±31 887 ^a	13 535±3692 ^a
第 1 年宿根	CK	16.81±7.97 ^{ab}	11 975±6676 ^b	2711±1429 ^{ab}	49.84±25.18 ^{ab}	0.70±0.06 ^a	50 308±30 672 ^b	69 392±43 711 ^b	3639±2264 ^b
	T ₁	15.67±4.36 ^{ab}	15 260±3410 ^{ab}	3201±580 ^{ab}	54.45±11.33 ^{ab}	0.67±0.08 ^a	64 885±10 483 ^{ab}	89 968±18 157 ^{ab}	4962±2143 ^b
	T ₂	20.94±6.87 ^a	21 261±9267 ^a	4408±2204 ^a	74.04±41.32 ^a	0.63±0.08 ^a	89 394±36 443 ^a	127 878±52 761 ^a	7995±2276 ^a
	T ₃	15.04±8.99 ^{ab}	9427±4132 ^b	2248±1157 ^b	43.66±26.25 ^{ab}	0.74±0.07 ^a	40 113±15 807 ^b	53 298±21 433 ^b	2538±1010 ^b
	T ₄	8.88±2.59 ^b	6771±1464 ^b	1566±448 ^b	29.46±10.54 ^b	0.74±0.05 ^a	32 737±6924 ^b	40 904±9019 ^b	2216±398 ^b
第 2 年宿根	CK	8.39±3.03 ^a	6446±1069 ^b	1430±325 ^b	25.83±3.53 ^{ab}	0.74±0.02 ^a	31 589±13 525 ^a	39 152±17 647 ^a	2500±1195 ^a
	T ₁	12.30±11.29 ^a	8866±3534 ^{ab}	1975±882 ^{ab}	35.69±17.98 ^{ab}	0.72±0.04 ^a	42 742±13 777 ^a	54 092±19 107 ^a	3303±1087 ^a
	T ₂	15.93±7.90 ^a	11 173±1235 ^a	2567±649 ^a	50.91±26.00 ^a	0.80±0.08 ^a	42 459±13 476 ^a	56 736±20 257 ^a	3649±1345 ^a
	T ₃	12.57±1.08 ^a	9181±2082 ^{ab}	2085±332 ^{ab}	38.48±6.99 ^{ab}	0.74±0.09 ^a	44 619±9775 ^a	54 461±11 926 ^a	3689±1072 ^a
	T ₄	7.98±4.02 ^a	6323±4239 ^b	1374±776 ^b	24.57±11.52 ^b	0.76±0.10 ^a	35 255±27 056 ^a	42 006±36 359 ^a	2981±3140 ^a

注：同列不同小写字母表示同一植期不同处理间差异显著（ $P<0.05$ ）。

Note: Different lowercase letters in the same column indicate significant difference between treatments at the same planting stage ($P<0.05$).

表 6 不同甘蔗有机物料还田下的甘蔗产量及蔗糖分

Tab. 6 Sugarcane production and sugar content under different sugarcane organic materials returned to the field

处理 Treatment	蔗茎产量 Cane production/kg				蔗糖分 Sugar content/%			
	新植 New plant	第 1 年宿根 1 st year ratoon	第 2 年宿根 2 nd year ratoon	3 a 总产量 Three years total	新植 New plant	第 1 年宿根 1 st year ratoon	第 2 年宿根 2 nd year ratoon	平均 Average
CK	5.93±2.03 ^{ab}	3.52±2.20 ^b	4.45±1.27 ^b	13.89	17.82±0.48 ^a	16.49±0.96 ^a	13.41±3.61 ^{bc}	15.91±1.68
T ₁	6.71±1.90 ^a	10.89±3.68 ^a	9.48±1.07 ^a	27.08	19.24±0.65 ^a	16.69±1.26 ^a	18.00±0.44 ^a	17.97±0.42
T ₂	7.24±1.75 ^a	6.48±2.58 ^{ab}	9.24±2.74 ^a	22.96	17.53±0.95 ^a	17.84±0.61 ^a	17.30±0.87 ^a	17.56±0.18
T ₃	5.20±1.09 ^{ab}	5.87±4.15 ^b	4.36±1.45 ^b	15.43	17.33±0.96 ^a	16.22±0.75 ^a	15.91±2.36 ^{ab}	16.49±0.88
T ₄	3.51±1.91 ^b	2.86±0.86 ^b	2.88±0.92 ^b	9.24	17.10±2.69 ^a	11.72±3.23 ^b	10.88±2.59 ^c	13.23±0.35

注：同列不同小写字母表示同一植期不同处理间差异显著（ $P<0.05$ ）。

Note: Different lowercase letters in the same column indicate significant difference between treatments at the same planting stage ($P<0.05$).

65.30%；T₃ 处理在 3 个植期的蔗茎产量与 CK 均无显著差异，3 a 总产量较 CK 增产 11.09%；而 T₄ 处理在 3 个植期的蔗茎产量均低于 CK，3 a 总产量较 CK 减产 33.48%。

在蔗糖分方面，新植季各处理与 CK 均无显著差异。第 1 年宿根季，T₁~T₃ 处理的蔗糖分与 CK 均无显著差异，而 T₄ 处理显著低于 CK；第 2 年宿根季，T₁ 和 T₂ 处理显著高于 CK，T₄ 处理仍显著低于 CK。T₁、T₂、T₃ 处理的 3 个植期平均蔗糖分分别比 CK 提高 2.06%、1.65% 和 0.58%，而 T₄ 处理较 CK 降低 2.68%。

滤泥还田、蔗渣灰还田和蔗叶还田均能促进

甘蔗产量增产和糖分提高，其中以滤泥还田的效果最显著，蔗渣还田对蔗茎产量和蔗糖分均产生了不利影响。

3 讨论

土壤酸化是我国蔗区的普遍现象，本研究发现，滤泥还田和蔗渣灰还田在 3 个植期持续提升土壤 pH，其含有的钙、镁、钾等盐基离子可能是主要驱动力。蔗渣灰（pH 8.4）因富含灰分矿物质，可显著提高土壤盐基饱和度，降低可交换铝水平，对供试红壤 pH 的提升效果最显著^[24]。蔗叶还田在新植季和第 1 年宿根季分别使土壤 pH

较 CK 提升 0.6 和 0.4, 归因于蔗叶腐解释放的 K^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 等阳离子以及形成的腐殖质的缓冲作用, 与廖青等^[25]的研究结论一致。蔗渣还田对土壤 pH 的影响呈阶段性: 新植季因腐解产生大量有机酸, 导致土壤酸化, 该效应在第 1 年宿根季得到缓解, 在第 2 年宿根季显著改善。4 种甘蔗有机物料还田均显著提升了土壤总有机碳含量。其中, 滤泥和蔗渣灰因含有易分解有机质, 提升效果显著; 蔗叶分解较慢, 碳积累效率较低但持续有效; 蔗渣中纤维素和半纤维素前期降解较快, 而木质素的降解周期较长, 故其对土壤的总有机碳影响呈阶段性。滤泥富含矿物有机氮和磷酸盐, 对土壤碱解氮和速效磷含量的提升效果尤为显著且持久; 蔗渣灰经高温炭化可稳定磷元素, 减少淋溶损失并促进有机磷向无机磷转化^[26], 其还田后土壤的有效磷含量虽低于滤泥还田, 但仍显著高于 CK; 蔗叶还田和蔗渣还田在 2 a 宿根季均显著提高了土壤碱解氮含量, 这与 CAO 等^[27]关于小麦秸秆还田促进氮素固定, 提高土壤氮积累的研究结果一致。蔗渣灰还田的土壤速效钾含量显著高于其他处理, 源于钾素直接输入以及生物炭改善钾的有效性, 但供钾能力随种植年限增加而下降^[28-29]。滤泥还田的速效钾含量在 3 个植期均低于 CK, 因自身钾含量低, 且高氮磷条件促进了作物对钾的吸收, 导致土壤钾库耗竭。总体来看, 滤泥还田对土壤养分的提升效果最为显著且长效: 能显著提高土壤的 pH、有机碳、碱解氮和有效磷含量, 但种植过程中需补充钾肥。蔗渣灰还田可显著提升土壤 pH、有机碳和速效钾, 并补充一定量的有效磷。蔗叶还田和蔗渣还田均能提高土壤的有机碳含量, 并在 2 a 宿根季提升碱解氮含量, 其中蔗叶还田还能缓解土壤酸化, 而蔗渣还田则在新植季加剧了土壤酸化。

本研究中, 4 种甘蔗有机物料还田通过增加有机质含量、优化孔隙结构、降低土壤容重, 提升孔隙度, 增强了土壤的通气性和持水量, 同时降低了耕层土壤贯入阻力和抗剪强度, 提升了蔗园土壤的宜耕性。然而, 物料特异性导致改良效果存在一定差异。比如, 滤泥还田显著降低了耕层土壤容重, 对深层土壤 (20~30 cm) 的改良效果持续稳定; 还显著降低了土壤的贯入阻力和抗剪强度, 对宿根季的深层土壤的抗剪强度有持续改善作用; 并且提升土壤的总孔隙度和通气孔隙度, 提高田间持水量。这可能是因为滤泥富含有机

机质, 缓慢分解后形成稳定的孔隙结构, 对深层土壤改良效果显著, 整体改良作用显著且持续稳定。同时, 蔗渣灰还田显著改善土壤物理性质及宜耕性, 降低土壤容重, 但随种植年限增加改善效果减弱; 可显著提升毛管孔隙度, 使其在保水性上效果突出。这与 KARHU 等^[30]的研究结果相符, 即蔗渣灰因其微孔结构利于水分留存, 提高了土壤持水能力和渗透性, 对土壤有效水含量有明显促进作用。研究还发现, 蔗叶还田对降低土壤容重有一定效果, 能显著降低土壤贯入阻力和抗剪强度, 提高土壤总孔隙度, 但对田间持水量无改善作用。本研究中, 蔗叶还田对深层土壤 (20~30 cm) 的力学性能改善最显著, 能短期内改善土壤通气性, 因其分解速率较快, 更适合于短期耕作改良。蔗渣还田显著降低土壤容重, 在新植季对土壤力学性能改善尤为突出, 但随着种植年限增加改良效果减弱; 新植季通气孔隙度大幅提升, 短期内促进气体交换, 但长期效果因有机物快速分解而减弱; 毛管孔隙度显著下降导致田间持水量显著降低, 在宿根季逐步恢复。蔗渣能短期内显著改善土壤通气性 (新植季效果显著), 适合于短期土壤疏松。

4 种甘蔗有机物料还田对土壤团聚体结构和稳定性的影响效果有差异。蔗叶还田和蔗渣还田促进机械稳定性大团聚体形成, 尤其在短期 (新植季) 效果突出。二者的土壤分形维数低于 CK, 表明土壤结构稳定性和抗侵蚀性增强。作物秸秆腐解产生的有机质是土壤团聚体形成的重要胶结物, 其含量与团聚体数量及稳定性呈正相关^[31-32]。WANG 等^[33]和王峻等^[34]也认为秸秆还田有助于土壤大团聚体形成和增强稳定性。滤泥还田和蔗渣灰还田虽能促进机械稳定性大团聚体产生, 但水稳定性较差, 湿润条件下易崩解。二者的分形维数均高于 CK, 表明土壤结构均一性较差。廖雅汶等^[35]研究认为, 秸秆生物炭自身分解能力小, 较难被土壤微生物分解, 对大团聚体表现为结合能力不足。因此, 在湿润地区利用滤泥和蔗渣灰还田时, 需关注其因水稳定性不足而可能导致的侵蚀风险。

4 种甘蔗有机物料还田均对土壤物理性质有改善效果, 然而, 其改善效果随种植年限增加而减弱, 可能与有机质分解后结构稳定性下降有关。甘蔗有机物料还田对土壤养分和物理性质具有调控作用, 但也存在一定负效应。例如, 秸秆体积

较大,腐解慢,田间直接腐解产生次生物质影响甘蔗生长。蔗渣灰还田和滤泥还田虽能促进机械稳定性大团聚体形成,但其形成的水稳性大团聚体遇水极易崩解。鉴于甘蔗广泛种植于旱坡地,需关注其对蔗田土壤抗侵蚀性的潜在影响。蔗渣因其多孔隙的结构导致通气孔隙度大幅提升,但可能伴随土壤的保水能力下降和田间持水量降低,这与王西和等^[36]关于秸秆还田增加表层土壤孔隙,容易导致土壤干旱的研究结果一致。研究还发现,蔗渣灰因其灰分钙化,可能导致第 2 年宿根季深层(10~30 cm)土壤板结,贯入阻力升高。

针对土壤微生物多样性的响应机制,滤泥还田和蔗渣灰还田在 3 个植期均显著提高土壤细菌的 Shannon、Chao 和 Ace 指数,表明其能持续改善土壤细菌多样性和丰富度。这主要得益于二者富含矿物质元素和有机碳,为土壤微生物提供了充足营养;同时其多孔隙度和高比表面积的物理结构,也为土壤微生物提供良好的栖息环境^[37-38]。蔗叶还田在初期促进土壤细菌的多样性,初期养分快速释放促进土壤细菌生长,但后期因高碳氮比(C/N)导致氮素固定抑制了土壤细菌活动。蔗渣还田在初期(新植季)土壤微生物响应不显著,但后期木质素缓慢分解,土壤细菌的多样性和丰富度恢复显著。4 种甘蔗有机物料还田在新植季和第 1 年宿根季对土壤真菌 Shannon 指数均无显著影响,但在第 2 年宿根季均显著高于 CK,表明有机物料还田对土壤真菌多样性的促进作用具有滞后性。蔗叶还田在第 2 年宿根季的土壤真菌 Chao 和 Ace 指数显著下降,可能与分解后期释放酚类物质抑制真菌生长有关。甘蔗有机物料还田对土壤微生物的影响具有明显的物料特异性和时间依赖性,均能促进耕层土壤微生物多样性和丰度。其中以滤泥和蔗渣灰效果最优,可长期促进土壤微生物多样性;蔗叶在还田初期显著促进土壤微生物活动,但后期需关注其潜在的负面效应;蔗渣在还田初期效果不显著,但在还田后期可有效恢复土壤微生物多样性。

不同甘蔗有机物料还田对甘蔗产量、糖分积累的影响存在差异。滤泥还田增产效果最显著,3 a 总产量较 CK 提高 94.46%,尤其在宿根季增产幅度超过 200%。滤泥在还田初期养分资源丰富且易于获取,植物将更多的光合产物和能量优先供应地上部生长,因此根系并不发达,但在宿根季根系表现出生长优势,这与滤泥缓慢释放养分、

长期改善土壤肥力的特性密切相关,凸显出长期养分供应对宿根蔗的重要性。滤泥还田还显著提升宿根季甘蔗蔗糖分,3 a 植期平均提高了 2.06%。蔗渣灰还田在 3 个植期均显著促进根系发育,其根系性状指标优于其他还田处理。3 a 总产量较 CK 提高 65.30%,增产主要贡献来自宿根季。蔗渣灰还田还显著提高了宿根季蔗糖分,3 a 植期平均提高了 1.65%。蔗叶在还田初期(新植季)产量低于 CK,但随着种植年限增加,产量逐渐提高,这与崔思远^[39]关于秸秆还田对小麦产量的影响结果一致。蔗叶还田仅在第 2 年宿根季对甘蔗根系有促进作用,具有滞后性。蔗渣还田对根系持续产生负面影响,导致甘蔗减产,且不利于糖分积累。值得注意的是 CK 在新植季土壤相对较贫瘠,促使植株通过大量增殖和伸长根系去“主动获取”养分,而在宿根季随着土壤养分的消耗,植株减少对新生根系的“投资”,优先将有限的资源用于植株地上部生长发育,导致了宿根季甘蔗根系的衰减,反映了植物在不同生理阶段和不同土壤环境下的适应性。

综上所述,甘蔗有机物料还田可有效促进土壤有机质积累,提升养分供给的有效性和长效性。未来可以将甘蔗有机物料还田当作维系蔗田地力和改良土壤的重要措施,通过提升土壤有机质含量,为作物提供氮、磷、钾及微量元素等养分,改善耕层土壤的物理结构,促进土壤微生物多样性的形成,优化根系生长环境,为甘蔗的高产稳产奠定基础。

4 结论

滤泥、蔗渣灰、蔗叶和蔗渣 4 种甘蔗有机物料均富含有机碳,还田可显著提升土壤总有机碳含量,促进腐殖质形成,改善土壤保水保肥能力;能显著降低耕层土壤容重、贯入阻力和抗剪强度,增加土壤孔隙度,缓解土壤紧实,提升耕作宜耕性;可促进大团聚体(>0.25 mm)的形成,优化土壤结构;同时为土壤微生物提供碳源与养分,促进土壤微生物(细菌和真菌)的多样性和丰富度。因此,甘蔗有机物料还田是改善土壤健康、提升甘蔗产量和品质的有效措施,但不同有机物料的效果存在显著差异。滤泥还田的综合改善效果最为突出,能显著提升土壤 pH,增加碱解氮和有效磷含量,改善土壤容重和力学性能,并长期促进土壤微生物多样性的提升,对土壤质量具有

协同增效作用。此外, 滤泥还田还可大幅提升宿根季甘蔗产量和蔗糖分。4 种甘蔗有机物料还田能不同程度改善土壤养分、物理性质和微生物多样性, 促进甘蔗产量和蔗糖分提高, 其效果依次为: 滤泥>蔗渣灰>蔗叶>蔗渣。需要强调的是, 尽管不同有机物料在分解速率、养分释放模式及副作用方面存在差异, 但其核心作用机制一致, 即通过促进碳-养分循环、改良土壤结构和提升生物活性, 最终实现土壤综合肥力的提升。研究结果为甘蔗可持续种植提供了科学依据, 强调了根据土壤特性和种植目标科学选择有机物料并配套相应土壤健康管理措施的重要性。

参考文献

- [1] 张华. 甘蔗农机农艺融合[M]. 北京: 中国农业出版社, 2021.
ZHANG H. The integration of sugarcane mechanization and agronomy technologies[M]. Beijing: China Agricultural Press, 2021. (in Chinese)
- [2] 明雪, 康振威, 黄智刚. 广西扶绥县亚热带典型丘陵区耕地土壤 pH 的时空变异特征[J]. 西南农业学报, 2022, 35(1): 217-225.
MING X, KANG Z W, HUANG Z G. Temporal and spatial variation characteristics of cultivated soil pH in subtropical hilly region of Fusui county, Guangxi[J]. Southwest China Journal of Agricultural Sciences, 2022, 35(1): 217-225. (in Chinese)
- [3] 温中海, 陈丽君, 王晓飞, 魏萌萌, 许桂苹. 广西某甘蔗产区土壤养分现状及其质量评价研究[J]. 大众科技, 2015, 17(11): 90-94.
WEN Z H, CHEN L J, WANG X F, WEI M M, XU G P. Research on the nutrient situation and its quality evaluation of study sugarcane productive area of Guangxi[J]. Popular Science & Technology, 2015, 17(11): 90-94. (in Chinese)
- [4] 谭裕模, 黎焕光, 许树宁, 刘斌, 江泽普, 韦广泼. 蔗田农业废弃物资源化利用对土壤养分的影响[J]. 中国糖料, 2010(1): 1-4, 9.
TAN Y M, LI H G, XU S N, LIU B, JIANG Z P, WEI G P. Effects of cane leave residue on the soil fertility[J]. Sugar Crops of China, 2010(1): 1-4, 9. (in Chinese)
- [5] LIMA I M, WHITE P M. Four-year field study: increased yields in soils amended with biochar from sugarcane residues[J]. Biochar Journal, 2025(24): 970-991.
- [6] CHOUDHARY V K, GURJAR D S, MEENA R S. Crop residue and weed biomass incorporation with microbial inoculation improve the crop and soil productivity in the rice (*Oryza sativa* L.) -toria (*Brassica rapa* L.) cropping system[J]. Environmental and Sustainability Indicators, 2020, 7: 100048.
- [7] XIN J J, YAN L, CAI H G. Response of soil organic carbon to straw return in farmland soil in China: a meta-analysis[J]. Journal of Environmental Management, 2024, 359: 121051.
- [8] 张艺, 戴齐, 廖超林, 尹力初. 增施或减施有机物料对长期培肥红壤性水稻土团聚体组成的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2017(1): 28-32.
ZHANG Y, DAI Q, LIAO C L, YIN L C. Effects of organic material on the aggregation in long-term cultivated red soil paddy soils[J]. Soils and Fertilizers Sciences in China, 2017(1): 28-32. (in Chinese)
- [9] 宋书会, 焦静, 李普旺, 王超, 何祖宇, 周闯, 刘运浩, 张宇晗, 李云娜, 杨子明. 热带典型有机物料对砖红壤理化性质及微生物群落结构的影响[J]. 热带作物学报, 2023, 44(4): 834-845.
SONG S H, JIAO J, LI P W, WANG C, HE Z Y, ZHOU C, LIU Y H, ZHANG Y H, LI Y N, YANG Z M. Effects of tropical typical organic materials on physicochemical properties and microbial community structure of laterite soils[J]. Chinese Journal of Tropical Crops, 2023, 44(4): 834-845. (in Chinese)
- [10] AKHTAR K, WANG W Y, REN G X, KHAN A, FENG Y Z, YANG G H. Changes in soil enzymes, soil properties, and maize crop productivity under wheat straw mulching in Guangzhong, China[J]. Soil and Tillage Research, 2018(1): 94-102.
- [11] 赵丽萍. 蔗叶还田对土壤理化性状、生态环境及甘蔗产量的影响[J]. 土壤通报, 2014, 45(2): 500-507.
ZHAO L P. Effect of trash returning on physical and chemical properties of soil, ecological environment and yields of sugarcane[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2014, 45(2): 500-507. (in Chinese)
- [12] FENG H L, HAN X Z, BISWAS A, ZHANG M, ZHU Y C, JI Y X, LU X C, CHEN X, YAN J, ZOU W X. Long-term organic material application enhances black soil productivity by improving aggregate stability and dissolved organic matter dynamics[J]. Field Crop Research, 2025, 328: 109946.
- [13] MAARASTAWI S A, FRINDTE K, BODELIER P L E, KNIEF C K U D. Rice straw serves as additional carbon source for rhizosphere microorganisms and reduces root exudate consumption[J]. Soil Biology & Biochemistry, 2019(135): 235-238.
- [14] 韩新忠, 朱利群, 杨敏芳, 俞琦, 卞新民. 不同小麦秸秆还田量对水稻生长、土壤微生物生物量及酶活性的影响[J]. 农业环境科学学报, 2012, 31(11): 2192-2199.
HAN X Z, ZHU L Q, YANG M F, YU Q, BIAN X M. Ef-

- fects of different amount of wheat straw returning on rice growth, soil microbial biomass and enzyme activity[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2012, 31(11): 2192-2199. (in Chinese)
- [15] KHAN A, GILLANI S W, JIANG H T, WEI Y B, LI M L, YU Z H, ADNAN M, ZHANG M Q. Combine application of N and biofertilizers improved plant morphology and soil environment via regulating rhizosphere bacterial community under sugarcane monocropping[J]. *Industrial Crops and Products*, 2024, 210: 118074.
- [16] 张跃彬, 郭家文. 蔗区土壤与甘蔗科学施肥[M]. 昆明: 云南科技出版社, 2016.
- ZHANG Y B, GUO J W. Sugarcane-growing area soil and scientific fertilization for sugarcane[M]. Kunming: Yunnan Science and Technology Press, 2016. (in Chinese)
- [17] ISLAMI T, NUGROHO E I W A. Biochar derived from sugarcane industry waste increasing productivity of degraded land[J]. *International Journal of Soil Science*, 2017(1): 1-9.
- [18] 李浩杰. 不同蔗叶还田模式对土壤养分和甘蔗产量品质的影响[D]. 重庆: 西南大学, 2023.
- LI H J. Effects of different sugarcane leaf returning patterns on soil nutrients and sugarcane yield and quality[D]. Chongqing: Southwest University, 2023. (in Chinese)
- [19] 郭强, 莫勇武, 唐利球, 谭宏伟, 马文清, 秦昌鲜, 何为中, 闭德金, 彭崇, 施泽升, 何洪良, 陈海生. 蔗渣还田和减量施肥对甘蔗农艺性状和品质的影响[J]. *广西糖业*, 2019(3): 31-35.
- GUO Q, MO Y W, TANG L Q, TAN H W, MA W Q, QIN C X, HE W Z, BI D J, PENG C, SHI Z S, HE H L, CHEN H S. Effects of sugarcane bagasse mulching and reduced fertilization on agronomic characters and quality of sugarcane[J]. *Guangxi Sugar Industry*, 2019(3): 31-35. (in Chinese)
- [20] 石宗琳, 王加旭, 梁化学, 史红平, 魏彬萌, 王益权. 渭北不同园龄苹果园土壤团聚体状况及演变趋势研究[J]. *土壤学报*, 2017, 54(2): 387-399.
- SHI Z L, WANG J X, LIANG H X, SHI H P, WEI B M, WANG Y Q. Status and evolution of soil aggregates in apple orchards different in age in Weibei[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2017, 54(2): 387-399. (in Chinese)
- [21] 杨培岭, 罗远培, 石元春. 用粒径的重量分布表征的土壤分形特征[J]. *科学通报*, 1993(20): 1896-1899.
- YANG P L, LUO Y P, SHI Y C. Fractal characteristics of soil characterized by particle-size distribution[J]. *Chinese Science Bulletin*, 1993(20): 1896-1899. (in Chinese)
- [22] 杨悦, 顾广军, 胡颖慧, 卜海东, 刘畅, 于文全, 程显敏, 程杜娟, 邢立伟, 盖禹含. 不同种植年限寒地苹果根际土壤微生物多样性及养分关联分析[J]. *江苏农业科学*, 2025, 53(3): 229-239.
- YANG Y, GU G J, HU Y H, BU H D, LIU C, YU W Q, CHENG X M, CHENG D J, XING L W, GAI Y H. Microbial diversity and nutrient correlation analysis of rhizosphere soil of apples in cold regions with different planting years[J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2025, 53(3): 229-239. (in Chinese)
- [23] 张香凝, 史福刚, 李太魁, 郭战玲, 寇长林. 接种蚯蚓对有机茶园土壤结构及有机碳库的影响[J]. *生态学报*, 2024, 44(4): 1747-1754.
- ZHANG X N, SHI F G, LI T K, GUO Z L, KOU C L. Soil structure and soil organic carbon distribution in organic tea plantation following earthworm inoculation[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2024, 44(4): 1747-1754. (in Chinese)
- [24] XU R K. Progresses on amelioration of red soil acidity with crop straw biochar: a review[J]. *Journal of Agriculture Resources and Environment*, 2016, 33(4): 303-309.
- [25] 廖青, 韦广泼, 陈桂芬, 刘斌, 黄东亮, 李杨瑞. 蔗叶还田对土壤微生物、理化性状及甘蔗生长的影响[J]. *西南农业学报*, 2011, 24(2): 658-662.
- LIAO Q, WEI G P, CHEN G F, LIU B, HUANG D L, LI Y R. Effect of trash returning on microbial communities, physical and chemical properties of soil and plant growth of sugarcane[J]. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences*, 2011, 24(2): 658-662. (in Chinese)
- [26] 蒋潇潇, 宁凯, 潘复静, 杨希, 贺新宇, 梁月明. 蔗渣生物质炭对岩溶森林土壤磷素有效性的影响[J]. *广西植物*, 2025, 45(6): 1071-1079.
- JIANG X X, NING K, PAN F J, YANG X, HE X Y, LIANG Y M. Effect of bagasse biochar on phosphorus availability in soil of karst forest ecosystem[J]. *Guihaia*, 2025, 45(6): 1071-1079. (in Chinese)
- [27] CAO Y S, SUN H F, ZHANG J N, CHEN G F, ZHU H T, ZHOU S, XIAO H Y. Effects of wheat straw addition on dynamics and fate of nitrogen applied to paddy soils[J]. *Soil and Tillage Research*, 2018(1): 92-98.
- [28] 包正荣, 戴皖宁, 苏旭, 陈义轩, 林利, 兰宇, 杨旭, 孟军. 九年低量生物炭还田和钾肥对棕壤土钾素、玉米产量和钾平衡的影响[J]. *生态学杂志*, 2023, 42(9): 2129-2137.
- BAO Z R, DAI W N, SU X, CHEN Y X, LIN L, LAN Y, YANG X, MENG J. Effects of nine-year low amount biochar return and potassium fertilization on potassium, maize yield and potassium balance in brown soil[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2023, 42(9): 2129-2137. (in Chinese)
- [29] 梁成华, 魏丽萍, 罗磊. 土壤固钾与释钾机制研究进展[J]. *地球科学进展*, 2002(5): 679-684.
- LIANG C H, WEI L P, LUO L. Advance in research on mechanisms of potassium releasing and fixing in soils[J]. *Advances in Earth Science*, 2002(5): 679-684. (in Chinese)

- [30] KARHU K, MATTILA T, IRINA B, REGINA K. Biochar addition to agricultural soil increased CH₄ uptake and water holding capacity - results from a short-term pilot field study[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2011, 140(1): 309-313.
- [31] 彭新华, 张斌, 赵其国. 红壤侵蚀裸地植被恢复及土壤有机碳对团聚体稳定性的影响[J]. *生态学报*, 2003(10): 2176-2183.
PENG X H, ZHANG B, ZHAO Q G. Effect of soil organic carbon on aggregate stability after vegetative restoration on severely eroded red soil[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2003(10): 2176-2183. (in Chinese)
- [32] 章明奎, 何振立, 陈国潮, 黄昌勇. 利用方式对红壤水稳定性团聚体形成的影响[J]. *土壤学报*, 1997(4): 359-366.
ZHANG M K, HE Z L, CHEN G C, HUANG C Y. Formation of water-stable aggregates in red soil as affected by land use[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 1997(4): 359-366. (in Chinese)
- [33] WANG X, QI J Y, ZHANG X Z, LI S S, LATIF VIRK A, ZHAO X, XIAO X P, ZHANG H L. Effects of tillage and residue management on soil aggregates and associated carbon storage in a double paddy cropping system[J]. *Soil and Tillage Research*, 2019, 194: 104339.
- [34] 王峻, 薛永, 潘剑君, 郑宪清, 秦秦, 孙丽娟, 宋科. 耕作和秸秆还田对土壤团聚体有机碳及其作物产量的影响[J]. *水土保持学报*, 2018, 32(5): 121-127.
WANG J, XUE Y, PAN J J, ZHENG X Q, QIN Q, SUN L J, SONG K. Effects of tillage and straw incorporation on sequestration of organic carbon and crop yields[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2018, 32(5): 121-127. (in Chinese)
- [35] 廖雅汶, 廖萍, 刘建秀, 刘佳慧, 胡贝, 夏思微, 高志强, 姚锋先, 朱博, 成臣. 秸秆生物炭对红壤菜地土壤团聚体组成及其碳氮分布的短期效应[J]. *扬州大学学报(农业与生命科学版)*, 2023, 44(5): 41-48.
LIAO Y W, LIAO P, LIU J X, LIU J H, HU B, XIA S W, GAO Z Q, YAO F X, ZHU B, CHENG C. Short-term effects of straw biochar on the composition of soil aggregates and their carbon and nitrogen distribution in red soil vegetable fields[J]. *Journal of Yangzhou University (Agricultural and Life Science Edition)*, 2023, 44(5): 41-48. (in Chinese)
- [36] 王西和, 刘骅, 贾宏涛, 蒋平安. 长期施肥对灰漠土有机质和物理性质的影响[J]. *新疆农业科学*, 2014, 51(1): 58-65.
WANG X H, LIU H, JIA H T, JIANG P A. Effects of long-term fertilization on soil organic matter and physical properties in gray desert soil[J]. *Xinjiang Agricultural Sciences*, 2014, 51(1): 58-65. (in Chinese)
- [37] STEINBEISS S, GLEIXNER G, ANTONIETTI M. Effect of biochar amendment on soil carbon balance and soil microbial activity[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2009(6): 1301-1310.
- [38] FU G Q, QIU X N, XU X Y, ZHANG W, ZANG F, ZHAO C Y. The role of biochar particle size and application rate in promoting the hydraulic and physical properties of sandy desert soil[J]. *Catena*, 2021, 207: 105607.
- [39] 崔思远. 稻麦轮作区秸秆还田的土壤生态效应[M]. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2021.
CUI S Y. Soil ecological effects of straw incorporation in rice-wheat rotation systems[M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2021. (in Chinese)