

周灵芝, 黄渝岚, 周佳, 等. 粉垄耕作与绿肥还田对土壤酶活性和甘蔗产量的影响 [J]. 福建农业学报, 2024, 39 (4): 409–417.

ZHOU L Z, HUANG Y L, ZHOU J, et al. Advantages of Fenlong Tillage and Green Manure Use on Soil Enzyme Activity and Sugarcane Yield [J].

Fujian Journal of Agricultural Sciences, 2024, 39 (4): 409–417.

粉垄耕作与绿肥还田对土壤酶活性和甘蔗产量的影响

周灵芝, 黄渝岚, 周佳, 劳承英, 申章佑, 李艳英,

韦本辉*, 张宪, 王锋, 李素平

(广西壮族自治区农业科学院经济作物研究所, 广西 南宁 530007)

摘要:【目的】探明不同耕作和绿肥还田方式对长期连作蔗地土壤养分、酶活性和甘蔗产量的影响。【方法】采用随机区组设计, 设置4个处理: 传统旋耕甘蔗单作(TCK)、粉垄耕作甘蔗单作(FLCK)、粉垄耕作甘蔗/大豆还田甘蔗根部(FLG)和大豆还田宽行(FLK)。测定土壤有机质、速效养分含量和脲酶、蔗糖酶、酸性磷酸酶、过氧化氢酶活性及甘蔗产量品质。【结果】(1)耕作方式和绿肥还田对土壤养分和酶活性影响显著。与TCK相比, 所有处理的根部和宽行土壤有机质含量显著提高($P<0.05$), 增幅40.6%~76.7%。FLG、FLK和FLCK处理根部土壤碱解氮和有效磷含量比TCK显著提高, 增幅16.1%~41.8%。(2)所有处理的土壤脲酶、蔗糖酶、酸性磷酸酶和过氧化氢酶活性比TCK提高(FLG处理宽行土壤脲酶活性除外)0.7%~166.7%。(3)FLG、FLK和FLCK处理的2年平均产量显著高于TCK, 增幅13.1%~30.5%; FLG和FLK处理的2年平均产量显著高于FLCK, 增幅9.9%~15.3%; 其中以FLG处理平均产量最高, 为86 043 kg·hm⁻²。FLG、FLK和FLCK处理的蔗糖分、锤度、重力纯度、视纯度和转光度均比TCK高。(4)甘蔗产量与土壤脲酶活性显著正相关, 与土壤蔗糖酶、酸性磷酸酶、过氧化氢酶活性、有机质、碱解氮和有效磷含量极显著正相关。【结论】利用粉垄耕作结合绿肥还田可以提高连作蔗地土壤养分、土壤酶活性和甘蔗产质量; 结合田间操作的便捷性, 本地区生产推荐应用粉垄耕作结合绿肥还田到宽行的模式。

关键词: 粉垄耕作; 绿肥还田; 土壤养分; 土壤酶活性; 甘蔗产量

中图分类号: S142; S341

文献标志码: A

文章编号: 1008-0384 (2024) 04-0409-09

Advantages of Fenlong Tillage and Green Manure Use on Soil Enzyme Activity and Sugarcane Yield

ZHOU Lingzhi, HUANG Yulan, ZHOU Jia, LAO Chengying, SHEN Zhangyou, LI Yanying,

WEI Benhui*, ZHANG Xian, WANG Feng, LI Suping

(Cash Crops Research Institute, Guangxi Academy of Agricultural Sciences, Nanning, Guangxi 530007, China)

Abstract:【Objective】Effects of practices of tillage and green manure utilization on fertility and enzyme activity of soil and yield of sugarcane crop under a continuous cultivation were evaluated.【Method】On a sugarcane field, the traditional rotary tillage (TCK), Fenlong tillage (FLCK), Fenlong tillage with sugarcane and soybean discards returned to sugarcane roots (FLG), and soybean discards returned to wide rows (FLK) were applied with a random block design. Contents of organic matter and available nutrients and activities of urease, saccharase, acid phosphatase, and catalase as well as yield and quality of sugarcane crop under treatments were compared.【Result】(1) The treatments induced significantly varied effects on the fertility and enzyme activity of the soil. The 40.6% to 76.7% organic matter contents in the soil around the roots and wide rows were significantly higher than that of TCK ($P<0.05$). FLG, FLK, and FLCK significantly raised the available N and P in the soil around the roots with an increase of 16.1%–41.8%. (2) The activities of urease (except under FLG), sucrose, acid phosphatase, and catalase in the soil under FLG, FLK, and FLCK were 0.7–166.7% higher than those under TCK. (3) The 2-year average

收稿日期: 2023-10-18 修回日期: 2024-01-18

作者简介: 周灵芝 (1979—), 女, 硕士, 高级农艺师, 主要从事粉垄耕作与栽培技术研究, E-mail: 59810551@qq.com,

* 通信作者: 韦本辉 (1954—), 男, 研究员, 主要从事粉垄耕作与栽培技术研究, E-mail: weibenhui@126.com

基金项目: 广西科技重大专项 (桂科 AA20302020-1); 广西自然科学基金项目 (2022GXNSFAA035518); 广西农业科学院稳定资助科研团队项目 (桂农科 2021YT056)

sugarcane yields under FLG, FLK, and FLCK were 13.1%–30.5% higher than under TCK. Those of FLG and FLK were significantly higher than that of FLCK by 9.9%–15.3% with FLG showing the highest average of 86 043 kg·hm⁻². The sucrose content, brix, gravity purity, apparent purity, and pol of sugarcane grown under FLG, FLK, and FLCK were higher than those under TCK. (4) The sugarcane yield significantly correlated with soil urease activity, and extremely significantly correlated with soil sucrase, acid phosphatase, catalase activity, organic matter, available N, and available P. 【Conclusion】 Fenlong tillage with green manure returned to the land significantly improved the nutrient contents and enzyme activities in the soil as well as the sugarcane yield and quality on a continuous cropping field. Ease for field operation, Fenlong tillage using green manure on wide rows was recommended for local farming.

Key words: Fenlong tillage; green manure returning; soil nutrients; soil enzyme activity; sugarcane yield

0 引言

【研究意义】甘蔗 (*Saccharum* spp.) 是一种重要的糖料作物, 是国家的战略资源之一。广西甘蔗年种植面积约 80 万 hm², 产糖约 600 万 t, 约占全国总产糖量的 65%, 是中国最大的糖业生产基地^[1]。但广西山多地少土地资源限制和甘蔗生产周期长、蔗地不具备休闲条件等特点, 导致广西甘蔗生产处于长期连作状态。长期连作引起土壤板结、酸化、土壤有机质减少、土壤养分过度消耗和土壤微生态失衡等土壤质量问题^[2]; 而且由于受自然条件、经济基础和机械装备条件等局限, 蔗农大多采取小型拖拉机旋耕作业, 旋耕深度通常只有 12~15 cm, 导致土壤犁底层上移, 耕作层越来越浅薄^[3]; 引起甘蔗产量和品质下降^[4]。探讨如何提高连作蔗地土壤质量和甘蔗产质量对生产有重要意义。【前人研究进展】绿肥还田在培肥土壤和改善土壤微环境^[5]等方面起着重要作用。苏利荣等^[6-7]认为新植蔗和宿根蔗间作绿豆全量还田代替 25% 的化肥, 可促进甘蔗产量和蔗地地力提升; 刘鹏飞等^[8]认为沙打旺、苜蓿和羊茅花等绿肥压青可以提高旱坡地甘蔗抗旱性和产量。合适的耕作方式亦有利于土壤理化性质和微生态环境的改善, 当前生产上常用的耕作方式有旋耕、翻耕、深松和免耕等^[9]。广西农业科学院韦本辉等发明的粉垄耕作技术 (简称粉垄或粉垄耕作), 是利用粉垄机的立式钻头垂直深入土壤 20~50 cm 进行耕作。粉垄耕作可打破部分犁底层, 加深土壤耕作层, 改善甘蔗土壤理化性状^[10]、提高蔗地土壤生物多样性和酶活性等^[11], 促进甘蔗生长^[12]并最终提高甘蔗产量和品质^[13]。【本研究切入点】前人关于粉垄耕作对土壤和作物的影响报道较多, 但粉垄耕作结合绿肥还田对土壤和甘蔗产量的影响鲜见报道。【拟解决的关键问题】采用 2 年大田定位试验, 以传统种植模式和粉垄宽窄行单作为对照, 探讨粉垄结合绿肥还田对连作甘蔗土壤养分、土壤酶

活性和甘蔗产质量的影响, 以期为提高广西蔗区土壤质量和甘蔗产质量提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验地及试验材料

试验于 2021 年 3 月至 2022 年 12 月在广西南宁市宾阳县邹圩镇马脚塘试验基地 (107°52'E, 22°58'N) 进行; 试验地属亚热带季风气候, 年均气温 20.8℃, 年均降水量约 1 500 mm。前茬作物为连作 10 年以上的甘蔗; 土壤为赤红壤, 基本理化性状: pH 4.03, 全氮 0.82 g·kg⁻¹, 有机质 17.11 g·kg⁻¹, 碱解氮 89.23 mg·kg⁻¹, 有效磷 47.37 mg·kg⁻¹, 速效钾 84.12 mg·kg⁻¹。

供试甘蔗品种为桂糖 55 号; 供试大豆品种为桂夏 7 号。

1.2 试验设计

采用随机区组试验设计, 设 4 个处理: 传统旋耕甘蔗单作 (TCK)、粉垄耕作甘蔗单作 (FLCK)、粉垄耕作甘蔗/大豆 (2:3) 条带间套种, 按大豆还田方式分成大豆还田甘蔗根部 (FLG) 和大豆还田宽行 (FLK) 2 种处理。用传统大型旋耕拖拉机耕作深度 20 cm, 把前作旧蔗蔸打碎平整土地后, TCK 处理按等行距 120 cm、用开沟机开宽 50 cm、深 20 cm 的种植沟; FLCK、FLG 和 FLK 处理为宽窄行种植, 宽行行距 120 cm、窄行行距 90 cm, 利用粉垄机在窄行上耕作宽 90 cm、深 40 cm 的粉垄带, 耕作时后面加挂开沟机开出宽 50 cm、深 20 cm 的种植沟。

2021 年 3 月选择健康甘蔗砍为双芽段作为种茎, 每个种植沟内平行种植 2 行; 种植密度均为 75 000 芽·hm⁻²。每个处理设 3 个重复, 共 12 个小区, 每小区种植 5 行, 随机区组排列。其中 TCK 行距 1.2 m, 行长 14.0 m; 其余处理行距 2.1 m, 行长 8 m。

粉垄耕作甘蔗/大豆间作处理: 3 月份, 在宽行 (120 cm) 等行距 (30 cm) 种植 3 行大豆, 穴间距为 20 cm, 每穴点播 2~3 颗种子; 大豆整个生育期

不施肥。每年 6 月大豆开花期进行还田。大豆还田甘蔗根部处理 (FLG)，将大豆拔起，均匀覆盖在甘蔗根部，结合追肥进行甘蔗大培土；大豆还田宽行

间处理 (FLK)，用旋耕机就地将大豆旋翻在宽行间，甘蔗正常追肥培土；2 个还田处理大豆绿肥还田量约 $6\,000\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。各处理田间布置见图 1。

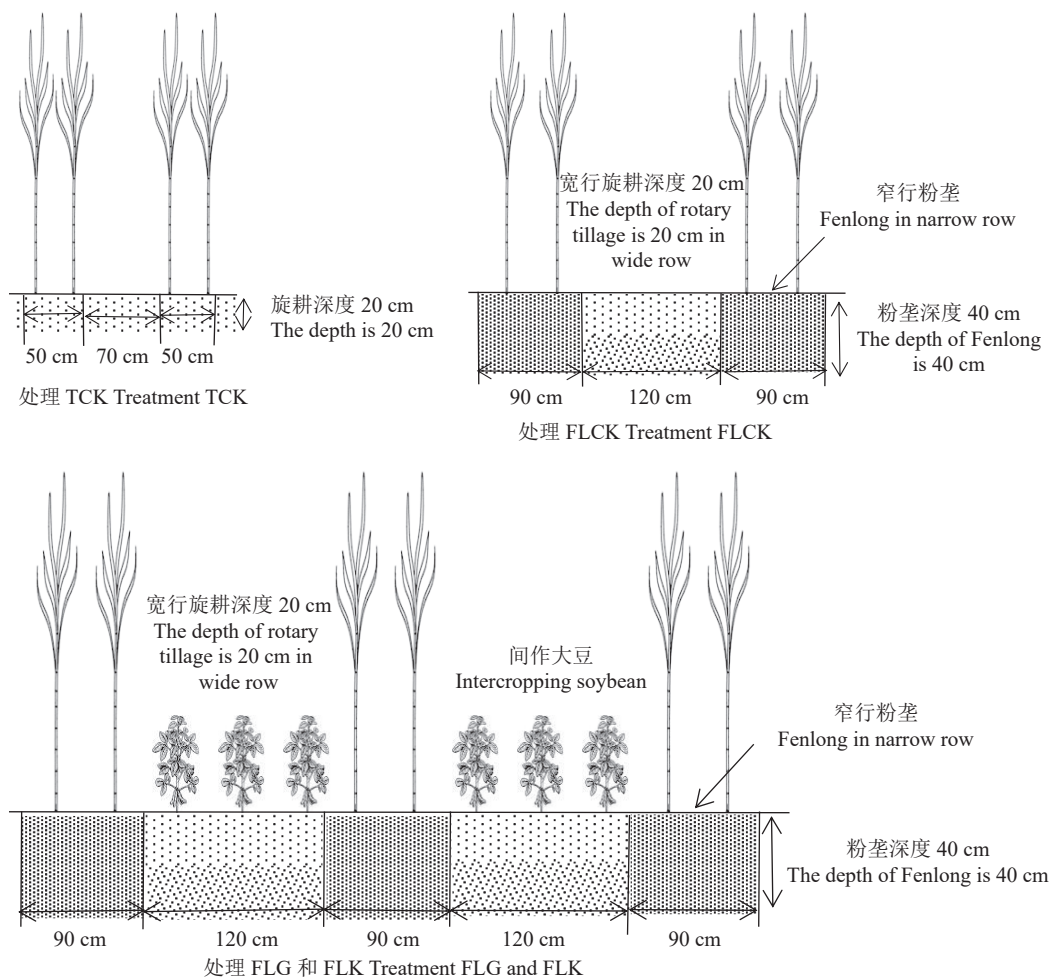


图 1 各处理田间设计

Fig. 1 Design of field experiment

试验第一年为新植蔗，第二年为宿根蔗；施肥和田间管理参照当地生产进行。种植甘蔗时（第二年为宿根蔗破垄覆土）施复合肥 $[m(\text{N}):m(\text{P}_2\text{O}_5):m(\text{K}_2\text{O})=15:15:15]$ $300\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ，大豆还田时结合大培土施尿素 $300\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ （总 $\text{N}\geq 46.4\%$ ）、氯化钾 $300\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ （ $\text{K}_2\text{O}\geq 60\%$ ）、复合肥 $[m(\text{N}):m(\text{P}_2\text{O}_5):m(\text{K}_2\text{O})=15:15:15]$ $450\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。所有处理甘蔗田间各项管理措施一致。

1.3 样品采集与测定

1.3.1 土壤样品采集

2022 年 12 月甘蔗成熟时，用刻度土钻在甘蔗种植部距离蔗根部 10 cm（根部）和 2 行甘蔗之间的行间（宽行）分别采集 0~20 cm 土层，每个小区取 5 个样点，剔除杂物后充分混匀，带回实验室置于室内阴凉处风干待测。0~20 cm 土层的土壤容重（bulk

density, BD），利用 100 cm^3 的环刀，每 10 cm 取一次样， $105\text{ }^\circ\text{C}$ 烘干至恒重取平均值；土壤孔隙度/% = $(1 - \text{土壤容重}/\text{土壤比重}) \times 100$ 。其中，土壤比重取 $2.65\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ ；土壤含水量采用烘干法测定。

1.3.2 甘蔗植株性状与品质测定

甘蔗成熟时每小区连续取样 10 株，测量株高、茎径；根据株高和茎径平均值每小区取有代表性植株 6 条送农业农村部甘蔗品质监督检验测试中心（南宁）进行品质（蔗糖分、纤维分、锤度、重力纯度、还原糖分、视纯度和转光度）测定。

1.3.3 土壤养分测定

土壤养分参照常规农化分析方法^[14]进行测定。有机质（soil organic matter content, SOM）用重铬酸钾硫酸氧化-滴定法测定，土壤 pH 值采用 pH 计测定（土水质量比 1:2.5），水解性氮（alkali hydrolyzed

nitrogen conten, AN) 用碱解扩散皿滴定法测定, 有效磷 (available phosphorus, AP) 用钼锑抗比色法测定, 速效钾 (available potassium, AK) 用乙酸铵浸提-火焰光度计法测定。

1.3.4 土壤酶活性

土壤酶活性参照关松荫^[15]的方法进行测定。脲酶 (urease, UE) 用靛酚蓝比色法测定, 蔗糖酶 (saccharase, SC) 用 3,5-二硝基水杨酸比色法测定, 酸性磷酸酶 (acid phosphatase, ACP) 用对硝基苯磷酸二钠比色法测定, 过氧化氢酶 (catalase, CAT) 用 CAT 比色法测定。

1.4 统计分析

试验数据采用 Excel 2010 和 SPSS 22 进行统计分析, 数据用平均值±标准误表示。采用双因素方差分析耕作、绿肥还田处理及两者的交互作用, 年度检测指标不同处理间数据采用单因素方差分析, 利用 Duncan 法进行多重比较, 以 Pearson 系数进行相关分析。

2 结果与分析

2.1 不同处理对土壤理化性状的影响

从表 1 可知, 所有粉垄处理根部和宽行土壤有机质含量比 TCK 显著提高 ($P<0.05$), 增幅分别为 55.9%~69.7% 和 40.6%~76.7%。根部 FLCK 处理土壤 pH 值为 4.03, 显著高于其他处理。在根部, 所有

处理根部土壤碱解氮含量比 TCK 显著提高, 增幅为 29.5%~41.8%。在宽行, FLK 处理土壤碱解氮含量显著高于其他处理; 除 FLK 处理外, 其余 3 个处理各自根部和宽行之间的土壤碱解氮含量差异显著。所有处理根部土壤有效磷含量比 TCK 显著提高, 增幅为 16.1%~40.8%。FLK 处理宽行土壤有效磷含量显著高于其他处理。除 TCK 处理外, 其余 3 个处理各自根部和宽行之间的土壤有效磷含量差异显著。FLG 处理根部土壤速效钾含量比 TCK 显著提高, 增幅 7.3%; FLCK 处理土壤速效钾含量比 TCK 显著下降, 降幅 7.7%。在宽行, FLK 处理土壤速效钾含量显著高于其他处理。除 TCK 处理外, 其余 3 个处理各自根部和宽行之间的土壤速效钾含量差异显著。各处理的土壤容重比 TCK 下降, 幅度为 2.9%~13.8%; 各处理土壤孔隙度和土壤含水量上升, 增幅分别为 2.9%~15.0% 和 2.2%~14.2%。从表 1 可看出, 土壤理化性状对不同耕作、不同绿肥还田处理的响应不同。土壤碱解氮、有效磷和速效钾含量在耕作、绿肥还田处理及两者的交互作用差异显著 ($P<0.05$) 或极显著 ($P<0.01$); 土壤容重、孔隙度和含水量在耕作和绿肥还田处理上差异极显著。

2.2 不同处理对土壤酶活性的影响

从表 2 看出, 与 TCK 相比, 所有处理的根部土壤脲酶活性显著提升, 增幅为 5.0%~31.4%; 在宽行, FLK 处理的土壤脲酶活性显著高于其他处理。

表 1 不同处理对土壤理化性状的影响
Table 1 Effects of treatments on soil physicochemical properties

处理 Treatment	有机质 SOM/ (g·kg ⁻¹)	pH	碱解氮 AN/(mg·kg ⁻¹)	有效磷 AP/(mg·kg ⁻¹)	速效钾 AK/(mg·kg ⁻¹)	容重 BD/(g·cm ⁻³)	孔隙度 Porosity/%	含水量 Water content/%
TCK	18.41±0.63d	3.93±0.01c	88.02±5.52e	51.46±2.30c	92.90±2.10cd	1.31±0.03bc	50.56±1.30de	16.51±0.26de
FLCK	28.70±1.26ab	4.03±0.01a	114.00±2.51c	59.73±1.61b	85.76±4.55e	1.24±0.02de	53.21±0.99bc	17.20±0.23c
FLG	31.24±2.71a	3.95±0.07bc	124.79±4.86a	72.48±0.90a	99.71±0.92b	1.16±0.03f	56.22±1.13a	18.85±0.25a
FLK	29.81±1.67ab	3.92±0.04c	115.67±1.94bc	62.24±1.16b	93.79±1.41cd	1.13±0.06f	57.23±2.45a	17.87±0.45b
TCK	17.36±0.74d	4.03±0.01a	98.98±6.12d	50.56±2.81c	91.15±3.56d	1.38±0.04a	47.92±1.72f	14.96±0.03f
FLCK	24.40±1.18c	4.02±0.01a	102.70±0.87d	51.88±2.28c	96.92±0.92bc	1.34±0.01ab	49.30±0.43ef	15.29±0.33f
FLG	28.16±1.99b	4.04±0.01a	106.44±0.77d	50.83±1.49c	94.89±2.17cd	1.26±0.02cd	52.45±0.99cd	16.24±0.26e
FLK	30.67±1.41ab	4.00±0.01ab	122.63±6.44ab	71.70±0.65a	111.77±1.51a	1.19±0.01ef	55.09±0.65ab	16.81±0.31cd
耕作 Tillage	0.042*	0.127	0.001**	0.000**	0.000**	0.005**	0.005**	0.000**
绿肥 Green manure	0.008**	0.55	0.000**	0.000**	0.000**	0.007**	0.007**	0.000**
耕作×绿肥 Tillage×green manure	0.078	0.71	0.042*	0.000**	0.031*	0.057	0.057	0.657

同一个指标根部和宽行数据后面不同字母表示处理间差异在0.05水平上显著; *, **分别表示在0.05、0.01水平显著。
Different lowercase letters in the same testing index indicate significant differences between different treatments at $P<0.05$ level. * and ** indicate significant differences at $P<0.05$ level and $P<0.01$ level.

表 2 不同处理对土壤酶活性的影响
Table 2 Effects of treatments on soil enzyme activities (单位: mg·g⁻¹·d⁻¹)

处理 Treatment	脲酶 UE	蔗糖酶 SC	酸性磷酸酶 ACP	过氧化氢酶 CAT
TCK	1.40±0.00def	2.64±0.12g	1.64±0.06c	108.70±5.91f
FLCK	1.49±0.02c	3.89±0.24e	2.13±0.05b	146.47±4.79bc
FLG	1.84±0.02a	7.04±0.18a	2.76±0.17a	158.33±1.05a
FLK	1.47±0.04cd	4.39±0.18d	2.24±0.10b	150.32±2.40ab
TCK	1.39±0.02ef	2.59±0.15g	1.45±0.07d	119.93±5.10e
FLCK	1.46±0.01cde	3.45±0.22f	1.46±0.01d	124.09±1.44e
FLG	1.34±0.07f	4.96±0.19c	2.18±0.16b	135.74±3.31d
FLK	1.63±0.04b	6.44±0.16b	2.26±0.01b	138.52±8.59cd
耕作 Tillage	0.000**	0.087	0.000**	0.000**
绿肥 Green manure	0.000**	0.000**	0.000**	0.005**
耕作*绿肥 Tillage*green manure	0.011*	0.874	0.961	0.444

FLG 和 FLK 处理各自的根部和宽行之间的土壤脲酶活性差异显著; FLG 和 FLK 处理的宽行土壤脲酶活性与 FLCK 处理差异显著。与 TCK 相比, 所有处理的根部和宽行土壤蔗糖酶活性显著提升, 增幅分别为 47.3%~166.7% 和 33.2%~148.6%。FLG、FLK 和 FLCK 处理各自的根部和宽行之间的土壤蔗糖酶活性差异显著。FLG 和 FLK 处理根部和宽行的土壤蔗糖酶活性显著高于 FLCK 处理, 增幅分别为 12.9%~81.0% 和 43.8%~86.7%。与 TCK 相比, 所有处理的根部土壤酸性磷酸酶活性均显著提升, 增幅为 29.9%~68.3%。在宽行, FLG 和 FLK 处理的土壤酸性磷酸酶活性显著高于 FLCK 和 TCK 处理。除 FLK 处理外, 其他处理根部和宽行之间的土壤酸性磷酸酶活性差异显著。与 TCK 相比, 所有处理的根部土壤过氧化氢酶活性显著提升, 增幅为 34.7%~45.7%。在宽行, FLG 和 FLK 处理的土壤过氧化氢酶活性显著高于 FLCK 和 TCK 处理。4 个处理各自根部和宽行之间的土壤过氧化氢酶活性差异显著。从表 2 可知, 耕作和绿肥还田对土壤脲酶、蔗糖酶、酸性磷酸酶和过氧化氢酶活性有显著影响 (耕作对土壤蔗糖酶活性影响不显著, $P=0.087$); 耕作和绿肥还田的交互作用对土壤脲酶活性影响显著 ($P=0.011$)。

2.3 不同处理对甘蔗产量的影响

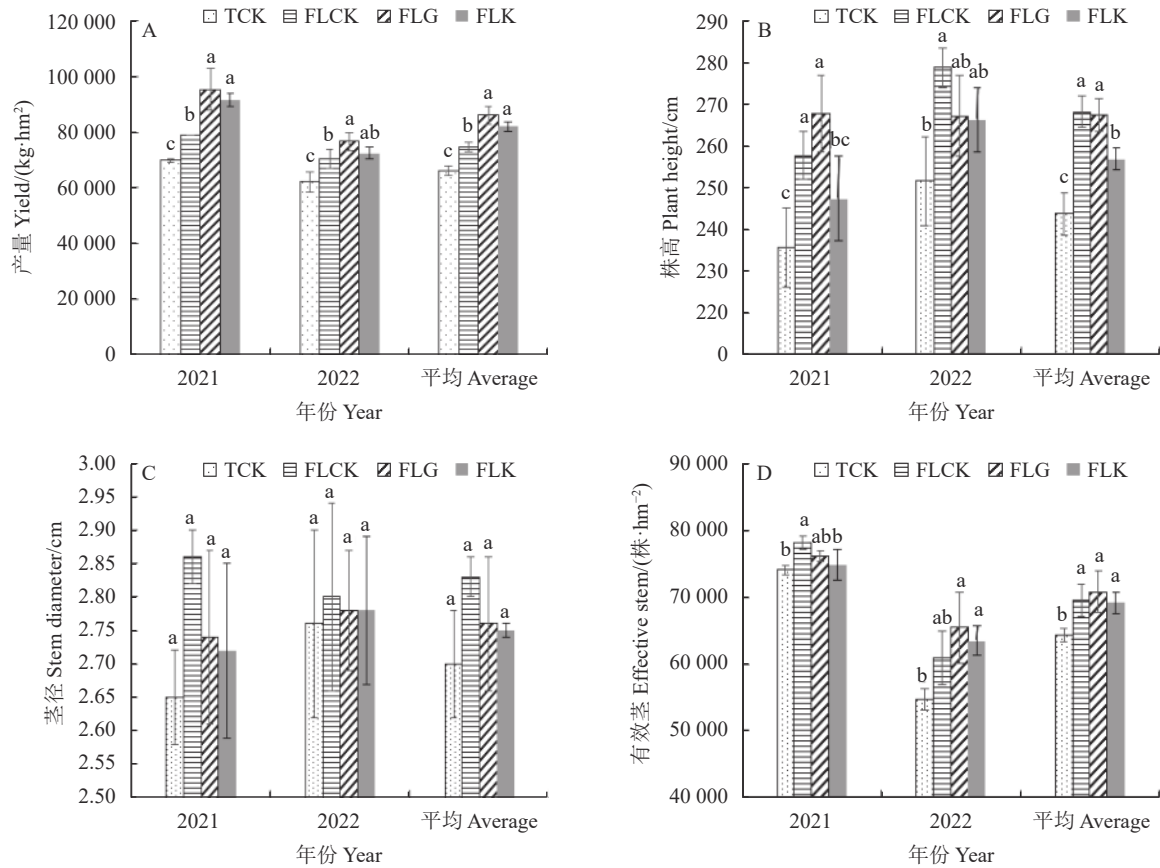
从图 2A 可看出, 2021 年和 2022 年 FLG、FLK 和 FLCK 处理的产量比 TCK 显著提高, 增幅分别为 13.0%~36.7% 和 13.2%~23.5%; 试验 2 年平均增幅为 13.1%~30.5%。FLG 和 FLK 处理 2 年平均产量比

FLCK 处理增加 9.9%~15.3%, 差异显著。在试验 2 年中, FLG 和 FLK 处理平均产量无明显差异, 以 FLG 处理平均产量最高, 为 86043 kg·hm⁻²。

图 2B 表明, 2021 年 FLG 和 FLCK 处理株高均显著高于 FLK 和 TCK 处理; 试验 2 年 FLCK 和 TCK 处理平均株高差异显著, FLG 和 FLCK 处理的平均株高显著高于 FLK 处理。试验 2 年, 各处理的茎径无明显差异 (图 2C)。2021 年 FLCK 处理有效茎最多, 显著高于 FLK 和 TCK 处理; 2022 年 FLG 处理有效茎最多, 显著多于 TCK 处理; FLG、FLK 和 FLCK 处理间的有效茎无明显差异 (图 2D)。

2.4 不同处理对甘蔗品质的影响

从表 3 可看出, 2021 年, FLG、FLK 和 FLCK 处理的甘蔗蔗糖分、锤度、蔗汁蔗糖分和转光度显著高于 TCK 处理; 4 个处理的纤维分无明显差异。FLCK 处理的甘蔗蔗糖分、锤度、蔗汁蔗糖分、重力纯度、视纯度和转光度的数值最高; 其中, FLCK 处理的甘蔗蔗糖分、锤度、蔗汁蔗糖分和转光度显著高于 FLG 和 FLK 处理。TCK 处理的还原糖分最大 (0.52%), 显著高于 FLG 和 FLCK 处理。2022 年, FLG、FLK 和 FLCK 处理的甘蔗蔗糖分、纤维分、蔗汁蔗糖分、视纯度和转光度显著高于 TCK 处理; FLG 处理的甘蔗蔗糖分、纤维分、锤度、蔗汁蔗糖分、重力纯度、视纯度和转光度的数值最高。FLG 和 FLK 处理的甘蔗蔗糖分、纤维分、锤度、蔗汁蔗糖分和转光度与 FLCK 无明显差异。FLK 处理的还原糖分最大 (0.45%), 显著高于其他处理。从 2 年的平均值来看, 除还原糖分外, FLG、FLK 和 FLCK



Data with different lowercase letters on top of a column represent significant differences at $P < 0.05$.

图 2 不同处理对甘蔗产量性状的影响

Fig. 2 Effects of treatments on sugarcane yield traits

表 3 不同处理对甘蔗品质的影响

Table 3 Effects of treatments on quality of sugarcane

年份 Year	处理 Treatment	甘蔗蔗糖分 Sucrose content in cane/%	纤维分 Fiber content/%	锤度 Brix/(°)	蔗汁蔗糖分 Sucrose content in cane juice/%	重力纯度 Gravity purity/%	还原糖分 Reducing sugar content/%	视纯度 Apparent purity/%	转光度 Pol/%
2021	TCK	12.88±0.18 c	10.67±0.31 a	18.10±0.01 c	15.39±0.13 c	85.00±0.64 c	0.52±0.06 a	84.53±0.51 c	15.31±0.15 c
	FLCK	14.29±0.01 a	10.51±0.22 a	19.43±0.13 a	17.04±0.13 a	87.80±0.34 a	0.35±0.00 bc	87.67±0.04 a	17.01±0.01 a
	FLG	13.78±0.24 b	10.94±0.39 a	19.02±0.12 b	16.53±0.14 b	86.93±1.02 ab	0.28±0.10 c	86.36±1.25 ab	16.42±0.21 b
	FLK	13.72±0.04 b	10.85±0.20 a	18.95±0.05 b	16.36±0.05 b	86.33±0.71 bc	0.43±0.03 ab	85.46±0.65 bc	16.19±0.04 b
2022	TCK	14.03±0.06 b	10.54±0.26 b	19.28±0.28 b	16.54±0.07 b	85.81±1.04 b	0.36±0.02 b	86.44±1.04 c	16.66±0.04 b
	FLCK	14.92±0.30 a	11.46±0.28 a	19.80±0.66 ab	17.93±0.58 a	90.54±0.16 a	0.32±0.02 c	90.51±0.19 a	17.92±0.57 a
	FLG	15.22±0.30 a	12.03±0.36 a	20.24±0.28 a	18.37±0.19 a	90.79±0.27 a	0.33±0.02 bc	91.36±0.42 a	18.48±0.17 a
	FLK	14.83±0.26 a	11.54±0.30 a	20.10±0.39 ab	17.81±0.32 a	88.56±0.78 b	0.45±0.00 a	88.78±0.87 b	17.85±0.59 a
平均 Average	TCK	13.46±0.15 c	10.61±0.06 c	18.69±0.19 b	15.97±0.04 c	85.41±0.62 c	0.44±0.05 a	85.49±0.83 c	15.99±0.04 c
	FLCK	14.61±0.13 a	10.99±0.23 b	19.62±0.22 a	17.49±0.17 a	89.17±0.06 a	0.34±0.01 b	89.09±0.11 a	17.47±0.27 a
	FLG	14.50±0.15 ab	11.49±0.25 a	19.63±0.38 a	17.45±0.34 a	88.86±0.25 a	0.31±0.01 b	88.86±0.12 a	17.45±0.29 a
	FLK	14.28±0.06 b	11.20±0.05 ab	19.53±0.13 a	17.09±0.03 b	87.45±0.84 b	0.44±0.02 a	87.12±0.77 b	17.02±0.06 b

处理的 7 个品质指标值均显著大于 TCK 处理。

2.5 相关性分析

对 2022 年根部酶活性、土壤理化性状和 2022 年产量性状进行 Pearson 相关性分析（表 4），结果表明，株高与过氧化氢酶活性、有机质和碱解氮含量显著正相关。有效茎数与脲酶、蔗糖酶、酸性磷酸酶活性、有机质和有效磷含量显著正相关，与过氧化氢酶活性和碱解氮含量极显著正相关。产量与脲酶活性、土壤容重、孔隙度和含水量显著正相关，与蔗糖酶、酸性磷酸酶、过氧化氢酶活性、有机质、碱解氮和有效磷含量极显著正相关。

表 4 土壤酶活性、理化性状与产量及其构成因素的 Pearson 相关性分析

Table 4 Pearson correlation between soil enzyme activity, physicochemical properties, sugarcane yield and yield factors

项目 Item	株高 Plant height	茎径 Stem diameter	有效茎数 Effective stem	产量 Yield
脲酶 UE	0.143	-0.006	0.579*	0.706*
蔗糖酶 SC	0.292	0.014	0.649*	0.819**
酸性磷酸酶 ACP	0.426	0.2	0.693*	0.894**
过氧化氢酶 CAT	0.633*	0.036	0.753**	0.879**
有机质 SOM	0.649*	0.114	0.596*	0.868**
pH	0.358	-0.071	0.203	0.019
碱解氮 AN	0.592*	-0.011	0.738**	0.851**
有效磷 AP	0.35	0.086	0.701*	0.870**
速效钾 AK	-0.244	-0.004	0.108	0.493
容重 BD	-0.558	-0.179	-0.094	-0.958*
孔隙度 Porosity	0.570	0.186	0.104	0.962*
含水量 Water content	0.823	0.171	0.203	0.962*

*, **分别表示在0.05、0.01水平显著。
* and ** indicate significant differences at $P<0.05$ and $P<0.01$, respectively.

3 讨论

3.1 耕作方式与绿肥还田对土壤理化性状的影响

不同的耕作方式对土壤扰动和作用强度的差异，会引起土壤性状的变化^[16]；李纯燕等^[17]研究表明玉米秸秆深翻还田可以提高土壤碱解氮和速效钾含量；刘洪等^[18]发现甘蔗地粉垄耕作后土壤有机质和有效磷含量显著高于旋耕耕作。绿肥养分含量丰富，能为土壤提供各种营养成分、改善土壤质量^[19]。谢金兰等^[20]发现绿豆压青后增加了蔗地土壤有机质、有效磷和速效钾含量；苏利荣等^[21]认为间作绿

豆还田后增加了蔗地土壤速效氮含量；从而提高了甘蔗产量。本研究表明，耕作方式和绿肥还田显著影响了土壤有机质、碱解氮、有效磷、速效钾含量、容重、孔隙度和含水量；粉垄耕作降低了土壤容重、提高了土壤孔隙度和含水量。与 TCK 和 FLCK 相比，FLG 和 FLK 处理根部和宽行的土壤有机质、土壤碱解氮、有效磷和速效钾含量增加；而甘蔗产量与土壤有机质、碱解氮和有效磷含量都有极显著的正相关关系，因此 FLG 和 FLK 处理的甘蔗产量明显提高。

3.2 耕作方式与绿肥还田对土壤酶活性的影响

土壤酶参与土壤中各种生物化学过程，在土壤物质和能量转化中发挥重要作用，是评价土壤肥力的重要指标之一^[22]，其活性与耕作方式、施肥方法等农业措施紧密相关^[23]。陈彦云等^[24,11]研究表明粉垄耕作土壤脲酶和蔗糖酶等的活性均显著高于旋耕。张爱加等^[25]研究表明甘蔗套种大豆明显提高了宿根蔗根际土壤蔗糖酶、脲酶等活性并具有明显的产量优势。陈海生等^[26]研究表明甘蔗/花生间作提高了根际土壤脲酶、酸性磷酸酶等活性。本研究中，粉垄耕作结合绿肥还田后，土壤脲酶、蔗糖酶、酸性磷酸酶和过氧化氢酶活性均比旋耕单作显著提高，并且 4 个酶活性与甘蔗产量有显著的正相关关系，因此 FLG 和 FLK 处理的产量显著高于单作处理。

3.3 耕作方式与绿肥还田对甘蔗产质量的影响

不同的耕作方法、栽培模式、气候和土壤等因素对作物产量的影响也不一样^[27-28]。刘富成等^[29]认为种植深度 40 cm 比种植深度 30 cm 可增加甘蔗产糖量和产量；韦剑锋等^[30]发现深松 45 cm 种植甘蔗干物质、氮、磷及钾积累均高于深翻 40 cm 和旋耕 25 cm。本研究发现，相比旋耕单作，粉垄耕作提高了甘蔗的株高、茎径和有效茎等性状、提高了产量。韩上等^[31]认为单纯深耕对玉米和小麦的产量无明显提高作用。这可能是因为粉垄耕作并非传统意义上的将生土上翻熟土下翻的深翻耕作方式，而是在基本不打乱原土层层次的基础上进行的立式耕作，耕作层加深了 1~2 倍，土壤理化性状和植株性状得到改善。

谢金兰等^[32]研究发现新植蔗和宿根蔗间作绿豆压青+减施氮量 20% 和减施 40% 对甘蔗株高、茎径、有效茎数和产量与对照相比均无明显影响；绿豆压青+减施氮量可提高甘蔗蔗糖分。苏利荣等^[6-7]认为化肥减施 25%+全量绿豆绿肥还田，新植蔗有效茎数比对照显著下降、产量略降低；宿根甘蔗产量和锤度则比对照提高。本研究中，粉垄耕作甘蔗株

高、茎径和有效茎数均比旋耕单作提高,可能是因为宽行行距较大,即使间作绿肥但其对甘蔗的竞争影响也较小。相比旋耕单作,粉垄耕作显著提高了甘蔗的蔗糖分,这是因为粉垄耕作后甘蔗根系发达、光合作用增加等促进了干物质和糖分积累^[33];加之绿肥还田后土壤得到改良,对甘蔗品质的提升也有一定的作用。值得注意的是,2021 年新植蔗 FLCK 处理的蔗糖分显著高于 FLG 和 FLK 处理,到 2022 年宿根蔗时三者却无明显差异,表明绿肥还田对甘蔗品质的影响有滞后效应,其机理尚需进一步研究。

本研究中采用粉垄耕作宽窄行种植模式,窄行深耕深松、改善甘蔗生长的土壤环境;宽行通过休耕或套种绿肥以恢复蔗地地力;而且宽行利于甘蔗田间管理和收获机械化作业,降低人工费用。当前,此模式已研发配套有相应的栽培技术和专用机械,在广西已有一定的推广应用面积^[33-34]。

4 结论

经 2 年的定位试验表明,相比传统旋耕作单作和粉垄耕作单作,粉垄耕作结合绿肥还田对土壤养分、酶活性和甘蔗产质量有显著提升作用。因此,针对广西蔗区当前长期连作土壤劣变的形势,提倡推广应用粉垄耕作结合绿肥种植的宽窄行模式;同时,考虑田间作业的简易便捷和工作效率,建议绿肥还田时采用旋耕机就地旋翻的还田方式。

参考文献:

- [1] 梅景泰. 基于 SWOT 分析的广西蔗糖产业发展策略研究 [J]. 海峡科技与产业, 2023, 36 (3): 23-25.
- MEI J T. Research on development strategy of sugar industry in Guangxi based on SWOT analysis [J]. *Technology and Industry Across the Straits*, 2023, 36(3): 23-25. (in Chinese)
- [2] 耿贵, 杨瑞瑞, 於丽华, 等. 作物连作障碍研究进展 [J]. 中国农学通报, 2019, 35 (10): 36-42.
- GENG G, YANG R R, YU L H, et al. Crop continuous cropping obstacles: Research progress [J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2019, 35(10): 36-42. (in Chinese)
- [3] 王小明, 覃逸明, 廖政达, 等. 糖料蔗生产中土壤劣变原因、机制与治理对策综述 [J]. 江苏农业科学, 2018, 46 (21): 6-11.
- WANG X M, QIN Y M, LIAO Z D, et al. Summary on the causes, mechanisms and control countermeasures of soil deterioration in sugarcane production [J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2018, 46(21): 6-11. (in Chinese)
- [4] 苏利荣. 间作绿豆绿肥压青还田对甘蔗生长及蔗地土壤的影响 [D]. 南宁: 广西大学, 2018.
- SU L R. Effect of mung bean intercropping and returning as green manure on sugarcane growth and field soil [D]. Nanning: Guangxi University, 2018. (in Chinese)
- [5] 陈子英, 孙小凤, 韩梅, 等. 国内外绿肥研究进展 [J]. 青海农林科技, 2020, (3): 54-58.
- CHEN Z Y, SUN X F, HAN M, et al. Research progress of green manure at home and abroad [J]. *Science and Technology of Qinghai Agriculture and Forestry*, 2020(3): 54-58. (in Chinese)
- [6] 苏利荣, 谭裕模, 何铁光, 等. 新植蔗间作不同绿肥压青还田的试验研究及经济效益分析 [J]. 热带作物学报, 2021, 42 (3): 747-753.
- SU L R, TAN Y M, HE T G, et al. Experimental study and Economic Benefit Analysis of Different Green Manures Intercropping and Green Manure Returning in Newly Planted Sugarcane [J]. *Chinese Journal of Tropical Crops*, 2021, 42(3): 747-753. (in Chinese)
- [7] 苏利荣, 谭裕模, 秦芳, 等. 绿豆/黑豆压青还田下减量施肥对宿根甘蔗产量和主要农艺性状的影响 [J]. 作物杂志, 2022, (6): 105-110.
- SU L R, TAN Y M, QIN F, et al. Effects of reduced chemical fertilizer on yield and main agronomic traits of ratoon sugarcane under conditions of returning green mung bean/black bean into field [J]. *Crops*, 2022(6): 105-110. (in Chinese)
- [8] 刘鹏飞, 李向勇, 张正学, 等. 绿肥压青对甘蔗产量及抗旱性的影响 [J]. 贵州农业科学, 2015, 43 (9): 35-37, 41.
- LIU P F, LI X Y, ZHANG Z X, et al. Effects of green manures on sugarcane yield and drought resistance [J]. *Guizhou Agricultural Sciences*, 2015, 43(9): 35-37, 41. (in Chinese)
- [9] 张向前, 杨文飞, 徐文姬. 中国主要耕作方式对旱地土壤结构及养分和微生态环境影响的研究综述 [J]. 生态环境学报, 2019, 28 (12): 2464-2472.
- ZHANG X Q, YANG W F, XU Y J. Effects of Main Tillage Methods on Soil Structure, Nutrients and Micro-ecological Environment of upland in China: A Review [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2019, 28(12): 2464-2472. (in Chinese)
- [10] 王世佳, 蒋代华, 朱文国, 等. 粉垄耕作对农田赤红壤团聚体结构的影响 [J]. 土壤学报, 2020, 57 (2): 326-335.
- WANG S J, JIANG D H, ZHU W G, et al. Effect of deep vertical rotary tillage on aggregate structure in farmland of lateritic red soil [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2020, 57(2): 326-335. (in Chinese)
- [11] 黎佐生, 蒋代华, 韦本辉. 粉垄耕作对宿根蔗地根际微生物及酶活性的影响 [J]. 新农业, 2020, (7): 45-47.
- LI Z S, JIANG D H, WEI B H. Effects of powder ridge tillage on rhizosphere microorganisms and enzyme activities of ratoon sugarcane [J]. *New Agriculture*, 2020(7): 45-47. (in Chinese)
- [12] 赵钧洋, 覃树涛, 常媛, 等. 粉垄耕作促进甘蔗根系生长、养分吸收及增产 [J]. 热带作物学报, 2022, 43 (3): 529-538.
- ZHAO J Y, QIN S T, CHANG Y, et al. Fenlong tillage promotes sugarcane root growth, nutrient absorption and yield increase [J]. *Chinese Journal of Tropical Crops*, 2022, 43(3): 529-538. (in Chinese)
- [13] 李素丽, 黄金玲, 韦本辉, 等. 粉垄耕作对甘蔗光合生理特性及产量品质的影响 [J]. 热带作物学报, 2021, 42 (3): 726-731.
- LI S L, HUANG J L, WEI B H, et al. Effects of fenlong tillage on photosynthetic and physiological characteristics, yield and quality of sugarcane (*Saccharum officinarum*) [J]. *Chinese Journal of Tropical Crops*, 2021, 42(3): 726-731. (in Chinese)
- [14] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法 [M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000.
- [15] 关松荫. 土壤酶及其研究法 [M]. 北京: 农业出版社, 1986.
- [16] 刘红梅, 李睿颖, 高晶晶, 等. 保护性耕作对土壤团聚体及微生物学

- 特性的影响研究进展 [J]. 生态环境学报, 2020, 29 (6): 1277–1284.
- LIU H M, LI R Y, GAO J J, et al. Research progress on the effects of conservation tillage on soil aggregates and microbiological characteristics [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2020, 29(6): 1277–1284. (in Chinese)
- [17] 李纯燕, 杨恒山, 萨如拉, 等. 不同耕作措施下秸秆还田对土壤速效养分和微生物量的影响 [J]. 水土保持学报, 2017, 31 (1): 197–201, 210.
- LI C Y, YANG H S, SA R L, et al. Effect of straw returning on soil available nutrients and microbe biomass under different tillage methods [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2017, 31(1): 197–201, 210. (in Chinese)
- [18] 刘洪, 韦本辉, 党柯柯, 等. 粉垄耕作对甘蔗土壤微生物群落的影响 [J]. 热带作物学报, 2022, 43 (3): 597–605.
- LIU H, WEI B H, DANG K K, et al. Effect of deep vertical rotary tillage on microbial community in sugar cane soil [J]. *Chinese Journal of Tropical Crops*, 2022, 43(3): 597–605. (in Chinese)
- [19] 曹卫东, 黄鸿翔. 关于我国恢复和发展绿肥若干问题的思考 [J]. 中国土壤与肥料, 2009, (4): 1–3.
- CAO W D, HUANG H X. Ideas on restoration and development of green manures in China [J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2009(4): 1–3. (in Chinese)
- [20] 谢金兰, 王维赞, 李毅杰, 等. 绿豆压青对蔗地培肥及甘蔗产量的效应 [J]. 江苏农业科学, 2014, 42 (6): 78–79, 231.
- XIE J L, WANG W Z, LI Y J, et al. Effect of mung bean pressing on sugarcane field fertilization and sugarcane yield [J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2014, 42(6): 78–79, 231. (in Chinese)
- [21] 苏利荣, 何铁光, 苏天明, 等. 甘蔗-绿豆间作压青还田和施氮水平对甘蔗性状的影响 [J]. 华南农业大学学报, 2019, 40 (3): 20–28.
- SU L R, HE T G, SU T M, et al. Effects of sugarcane-mungbean intercropping, bean straw returning and nitrogen application level on sugarcane traits [J]. *Journal of South China Agricultural University*, 2019, 40(3): 20–28. (in Chinese)
- [22] 裴小龙, 韩小龙, 钱建利, 等. 自然资源综合观测视角下的土壤肥力评价指标 [J]. 资源科学, 2020, 42 (10): 1953–1964.
- PEI X L, HAN X L, QIAN J L, et al. Soil fertility assessment indicators from the perspective of natural resources comprehensive observation [J]. *Resources Science*, 2020, 42(10): 1953–1964. (in Chinese)
- [23] 王理德, 王方琳, 郭春秀, 等. 土壤酶学研究进展 [J]. 土壤, 2016, 48 (1): 12–21.
- WANG L D, WANG F L, GUO C X, et al. Review: Progress of soil enzymology [J]. *Soils*, 2016, 48(1): 12–21. (in Chinese)
- [24] 陈彦彦, 夏皖豫, 赵辉, 等. 粉垄耕作对耕地土壤酶活性、微生物群落结构和功能多样性的影响 [J]. 生态学报, 2022, 42 (12): 5009–5021.
- CHEN Y Y, XIA W Y, ZHAO H, et al. Effects of deep vertical rotary tillage on soil enzyme activity, microbial community structure and functional diversity of cultivated land [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2022, 42(12): 5009–5021. (in Chinese)
- [25] 张爱加, 周明明, 林文雄. 不同种植模式对甘蔗根际土壤生物学特性的影响 [J]. 植物营养与肥料学报, 2013, 19 (6): 1525–1532.
- ZHANG A J, ZHOU M M, LIN W X. Effects of different cultivation patterns on microorganism of soil rhizosphere in sugarcane fields [J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2013, 19(6): 1525–1532. (in Chinese)
- [26] 陈海生, 秦昌鲜, 彭崇, 等. 甘蔗间作花生对根际土壤微生物种群及酶活性的影响 [J]. 江苏农业科学, 2019, 47(3): 223–226.
- CHEN H S, QIN C X, PENG C, et al. Effects of sugarcane intercropping with peanut on rhizosphere soil microbial community and enzyme activity [J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2019, 47(3): 223–226. (in Chinese)
- [27] MAILLARD É, MCCONKEY B G, ST LUCE M, et al. Crop rotation, tillage system, and precipitation regime effects on soil carbon stocks over 1 to 30 years in Saskatchewan, Canada [J]. *Soil and Tillage Research*, 2018, 177: 97–104.
- [28] WILHELM W W, WORTMANN C S. Tillage and rotation interactions for corn and soybean grain yield as affected by precipitation and air temperature [J]. *Agronomy Journal*, 2004, 96(2): 425–432.
- [29] 刘富成, 李照杰, 蔡文伟, 等. 种植密度和深度对甘蔗产量及抗倒伏的影响 [J]. 热带作物学报, 2024, 45 (2): 330–339.
- LIU F C, LI Z J, CAI W W, et al. Effects of planting densities and planting depths on yield and lodging resistance in sugarcane [J]. *Chinese Journal of Tropical Crops*, 2024, 45(2): 330–339. (in Chinese)
- [30] 韦剑锋, 张灵, 韦冬萍, 等. 机械耕作方式对甘蔗干物质与养分积累的影响 [J]. 湖北农业科学, 2022, 61 (21): 86–89.
- WEI J F, ZHANG L, WEI D P, et al. Effects of mechanical tillage patterns on dry matter and nutrient accumulation of sugarcane [J]. *Hubei Agricultural Sciences*, 2022, 61(21): 86–89. (in Chinese)
- [31] 韩上, 武阮, 李敏, 等. 深耕结合秸秆还田提高作物产量并改善耕层薄化土壤理化性质 [J]. 植物营养与肥料学报, 2020, 26 (2): 276–284.
- HAN S, WU J, LI M, et al. Deep tillage with straw returning increase crop yield and improve soil physicochemical properties under topsoil thinning treatment [J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2020, 26(2): 276–284. (in Chinese)
- [32] 谢金兰, 林丽, 李长宁, 等. 氮肥减量条件下间作绿豆压青对甘蔗生长及氮代谢的影响 [J]. 作物杂志, 2020, (4): 164–169.
- XIE J L, LIN L, LI C N, et al. Effects of intercropping mungbean straw returning on sugarcane growth and nitrogen metabolism under nitrogen fertilizer reduction [J]. *Crops*, 2020(4): 164–169. (in Chinese)
- [33] 曾伟聪, 覃东爽, 韩世健, 等. 粉垄“145”模式在新植蔗上的应用效应及其生理生态基础 [J]. 广西植物, 2023, 43 (2): 357–367.
- ZENG W C, QIN D S, HAN S J, et al. Application effect of the model of Fenlong “145” on newly planted sugarcane and its physiological and ecological bases [J]. *Guihaia*, 2023, 43(2): 357–367. (in Chinese)
- [34] 韦本辉. 甘蔗粉垄“145”技术体系的构建与应用探讨 [J]. 甘蔗糖业, 2021, 50 (3): 1–4.
- WEI B H. The study on the construction and application of sugarcane fenlong “145” technology system [J]. *Sugarcane and Canesugar*, 2021, 50(3): 1–4. (in Chinese)

(责任编辑: 林海清)