

DOI: 10.13930/j.cnki.cjea.170918

罗俊, 林兆里, 阙友雄, 张华, 李诗燕, 罗会, 张才芳, 陈建峰. 不同耕整地方式对甘蔗耕层结构特性及产量的影响[J]. 中国生态农业学报, 2018, 26(6): 824-836

LUO J, LIN Z L, QUE Y X, ZHANG H, LI S Y, LUO H, ZHANG C F, CHEN J F. Effect of tillage mode on soil structure characteristics of plough layer and sugarcane yield[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2018, 26(6): 824-836

不同耕整地方式对甘蔗耕层结构特性及产量的影响*

罗俊¹, 林兆里¹, 阙友雄¹, 张华^{1**}, 李诗燕¹, 罗会¹, 张才芳¹, 陈建峰²

(1. 福建农林大学农业部福建甘蔗生物学与遗传育种重点实验室 福州 350002; 2. 广西来宾市利拓农业服务有限公司 来宾 546100)

摘要: 为探讨不同耕整地方式对甘蔗地耕层土壤结构特性和产量的影响, 以 1.4 m 和 1.6 m 两种种植行距为主处理, 以深松 35 cm+旋耕 25 cm、深翻 50 cm+旋耕 25 cm、不深松(旋耕 25 cm)3 种耕整地作业方式为副处理, 对甘蔗产量性状, 土壤容重、紧实度、孔隙度、三相容积率、田间持水量、土壤贯入阻力和抗剪强度等土壤结构特性进行研究。结果表明: 1.6 m 行距处理甘蔗蔗茎产量显著低于 1.4 m 行距处理; 1.6 m 行距处理土壤紧实度显著小于 1.4 m 行距, 容重显著高于 1.4 m 行距处理, 1.6 m 行距处理显著改善土壤贯入阻力和抗剪强度。与对照不深松(旋耕 25 cm)相比, 深松 35 cm+旋耕 25 cm 及深翻 50 cm+旋耕 25 cm 处理通过增加土壤耕作深度, 显著改善了耕层土壤紧实度和耕层土壤容重, 改善了耕层的整体疏松程度; 深松作业通过提高耕层土壤总孔隙度, 尤其增加了 30~40 cm 土层的毛管孔隙度, 提高了深层土壤的保水能力, 对甘蔗中后期株高伸长和茎径增粗产生显著的促进效应。深松 35 cm+旋耕 25 cm 与深翻 50 cm+旋耕 25 cm 均显著降低了耕层土壤贯入阻力, 但对土壤抗剪强度的改善效果不显著; 深松 35 cm+旋耕 25 cm 的固相容积率最小, 气相容积率最大, 不深松(旋耕 25 cm)耕作措施的固相容积率最大, 气相容积率最小, 3 种耕作措施的液相容积率没有显著差异。深松 35 cm+旋耕 25 cm 和深翻 50 cm+旋耕 25 cm 均对土壤物理结构的改善具有积极作用, 能显著提高甘蔗产量, 在具有大马力拖拉机和高质量深松器的蔗区建议采用深松 35 cm+旋耕 25 cm 的耕整地方式, 在缺乏大马力拖拉机和高质量深松器的蔗区, 可以采用铧式犁深翻 50 cm+旋耕 25 cm 的耕整地方式来代替深松, 以达到增厚耕层的目的。

关键词: 甘蔗; 耕作措施; 深松; 行距; 耕层; 土壤结构; 土壤物理性状; 产量

中图分类号: S566.103.7 文献标识码: A 文章编号: 1671-3990(2018)06-0824-13

Effect of tillage mode on soil structure characteristics of plough layer and sugarcane yield*

LUO Jun¹, LIN Zhaoli¹, QUE Youxiong¹, ZHANG Hua^{1**}, LI Shiyun¹, LUO Hui¹, ZHANG Caifang¹, CHEN Jianfeng²

(1. Key Lab of Sugarcane Biology and Genetic Breeding, Ministry of Agriculture, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, China; 2. LiTuo Agricultural Services Co. Ltd, Laibin 546100, China)

* 公益性行业(农业)科研专项项目(201503119-04-01)、国家现代农业产业技术体系建设专项资金(CARS-17)、福建农林大学科技创新专项基金(CXZX2017345)和国家甘蔗工程技术研究中心开放课题(2016-3-1, 2017-2-1)资助

** 通信作者: 张华, 研究方向为甘蔗田间管理机械化。E-mail: zhanghua4553@sina.com

罗俊, 研究方向为甘蔗育种与机械化栽培。E-mail: sisluojun@126.com

收稿日期: 2017-10-17 接受日期: 2018-01-22

* This study was supported by the Special Fund for Agro-scientific Research in the Public Interest of China (201503119-04-01), the Special Fund for Construction of Modern Agricultural Technology System of China (CARS-17), the Science Foundation of Fujian Agriculture and Forestry University (CXZX2017345) and the Open Fund of National Engineering Research Center of Sugarcane, China (2016-3-1, 2017-2-1).

** Corresponding author, E-mail: zhanghua4553@sina.com

Received Oct. 17, 2017; accepted Jan. 22, 2018

Abstract: In order to establish the mechanical deep-ploughing technology of sugarcane for formation of good plough layer soil structure, the effect of tillage modes on soil plough layer structure and yield components of sugarcane were investigated. An experiment with 3 tillage measures under two planting rows of sugarcane were conducted. The two planting rows were 1.4 m and 1.6 m, respectively, while the subsidiary treatments included three tillage modes as follows — 25 cm rotary tillage (as control), 35 cm sub-soiling plus 25 cm rotary tillage (sub-soiling), 50 cm deep plowing plus 25 cm rotary tillage (deep plowing). Sugarcane yield characteristics, together with soil bulk density, compactness, porosity, three-phase volumetric rate, field water holding capacity, penetration resistance and shear strength were investigated. The results demonstrated that stem yield of 1.6 m rows spacing was significantly lower than that of 1.4 m rows spacing. Also soil compactness of 1.6 m rows spacing was remarkably lower than that of 1.4 m rows spacing. Soil bulk density of 1.6 m rows spacing was strikingly higher than that of 1.4 m rows spacing. The results also indicated that 1.6 m rows spacing significantly improved penetration resistance and shear strength of soil. Also both the sub-soiling and deep plowing significantly increased sugarcane yield. Compared with the control, the sub-soiling and deep plowing treatments increased soil tillage layer depth, and also improved soil compactness and bulk density along with the overall porosity of plough layer. It also showed that sub-soiling dramatically increased total porosity of plough layer soil especially capillary porosity of soil. Field water holding capacity of deep soil also greatly improved by sub-soiling, which finally significantly enhanced plant height elongation and stem diameter thickening at the middle and late growth stages of sugarcane. Also both sub-soiling and deep plowing significantly decreased soil penetration resistance, but with insignificant effect on soil shear strength. Among the three tillage measures, there was no significant difference in volume rate of the liquid phase. However, sub-soiling had the smallest solid volume rate and the largest gas phase volume rate. Then the control resulted in the largest solid volume rate, but the smallest gas phase volume rate. In conclusion, sub-soiling and deep plowing had positive effects on soil physical structure and significantly increased yield of sugarcane. We also concluded that in sugarcane planting areas where large horsepower tractors and high quality loosen machines were used, 35 cm sub-soiling + 25 cm rotary tillage method was the most suitable tillage mode. However, in areas without large horsepower tractors and high quality sub-soiling devices, thick plough layer was maintained by the use of 50 cm deep plowing + 25 cm rotary tillage measure.

Keywords: Sugarcane; Tillage measure; Sub-soiling; Rows spacing; Plough layer; Soil structure; Soil physical properties; Yield

生产全程机械化是我国甘蔗产业节本增效、提升国际竞争力的重大关键技术^[1-4]。在耕整地、种植、田间管理与收获诸环节中,蔗地耕整地已普遍实现机械化;在中、大规模的平缓地多采用拖拉机牵引犁、耙、旋耕机具进行作业,地块较小的陡坡地采用手扶拖拉机装配相应小型农具进行作业^[5]。甘蔗(*Saccharum officinarum*)是多年宿根生产、深根型作物,通过植前耕整地创建一个耕层深厚、结构特性良好、水肥持续供给能力强的植床尤为重要,而机械化深松便是耕整地环节的一项关键技术^[6-7]。受深松机具机械强度要求高、匹配动力较大、投资运行成本略高等影响,我国蔗地深松作业质量普遍不高,部分蔗区因缺乏相应机具,以深翻替代深松,以期达到同样的深耕效果^[8]。

机械化深松是一种作业深度超过常规耕层厚度,不翻转和打乱土壤上下层次的耕作方式,一般要求穿透犁底层,旨在逐渐增厚耕层,提升土壤的水肥协调能力,促进土体熟化^[9-10]。深松可降低土壤密度,有助于促进作物根系纵深生长,增加根长及根重,提高作物水分利用效率和产量^[11];对于增加土壤蓄水、减少蒸发损失、提高水分有效性显示出良好的效果^[12-13]。机械化翻耕可逐年增加对犁底层的耕翻

利用深度,通过作业面土体上下层次的翻转、曝晒,促进耕层土壤的水分和热量交换,有利于提高耕层土壤的宜耕性,并兼具覆草灭虫的效果^[14-15]。

由于蔗区多丘陵山地,大型、大马力、高强度拖拉机、深耕机具较少,长期以来蔗区耕整地作业深度多不足 30 cm,还有相当比重仍依靠微型旋耕机具进行耕深不足 25 cm 的耕整地作业,耕层浅薄,甘蔗根系难以深扎,肥水持续利用能力差,造成早衰、减产、易倒伏、宿根蔗表现差等不利影响。廖青等^[8]评价了机械化深耕深松栽培技术对甘蔗生长及产量的影响,结果表明,深耕深松栽培技术种植甘蔗能增加土壤含水量,利于甘蔗前期早生快发,并促进后期糖分积累,从而提高甘蔗的糖分和产量。郑超等^[7]对雷州半岛深松中耕对甘蔗产量影响及其作用机理进行了研究,结果表明,深松降低了土壤容重和坚硬度,增加了土壤的蓄水保水能力,改善根系生长的生态条件,提高甘蔗的根系活力和抗逆性。可见利用中大马力拖拉机悬挂高强度铧式犁、深松犁进行标准化深耕作业,可以提高耕层生态条件协调能力,提高甘蔗蔗茎产量和甘蔗蔗糖分^[5,8]。在国家糖料产业技术体系的支持下,本课题组通过适应机械化的品种选择、土壤

改良、营养管理和水肥一体化、虫草害综合防控等技术集成,建立了以宽行宽幅播种技术,耕前、芽前和苗期除草技术,中后期水肥一体化技术,宿根机械破垄管理技术为重点的机械化农艺模式,农机农艺融合的大规模示范取得显著成效。但不同的深耕技术(深松、深翻)对土壤结构、生态条件的影响,进而促进甘蔗增产的研究尚欠系统化,机理性讨论的基础较单薄,关键性影响因子尚未见深入揭示。通过本研究及配套的系统性试验,将更加精准地掌握深耕作业的针对性土壤区位和障碍因子,实现更加高效节能的机具匹配和增产效益,形成甘蔗良好耕层构建的深耕关键技术体系。

本研究在广西廖平农场进行,根据生产全程机械化作业要求,针对当前生产上进行土壤深层耕作增厚耕层的两种常用机具配置系统应用,设置 3 种耕整地作业方式,以评价生产全程机械化蔗园深耕整地作业方式对耕层结构特性及新植蔗产量构成的影响,为甘蔗生产全程机械化农机农艺融合提供配套关键技术,对指导建立良好耕层构建的深耕技术体系具有重要意义。

1 材料与方 法

1.1 试验区概况

试验地点位于广西壮族自治区来宾市兴宾区廖平农场,23°24'53"N,108°57'47"E,海拔 200 m,试验地为坡度 5°~6°的缓坡地,土壤类型为砂质黏土,0~30 cm 土层全氮 0.62 g·kg⁻¹、碱解氮 76 mg·kg⁻¹、有效磷 15.4 mg·kg⁻¹、速效钾 53 mg·kg⁻¹、有机质 16.4 g·kg⁻¹。

1.2 试验设计

深松作业一般深松 35 cm 即可达到增厚耕层的效果,而采用铧式犁进行深耕作业的蔗区通常采用深翻 50 cm 来实现增厚耕层的目的并区别于植蔗苗床整备的常规作业。本试验采用裂区设计,设置 2 个主处理:1.4 m 行距(A1)和 1.6 m 行距(A2);3 个副处理:不深松(旋耕 25 cm)(B1)、深翻 50 cm+旋耕 25 cm(B2)、深松 35 cm+旋耕 25 cm(B3)。旋耕作业采用约翰迪尔 1204 轮式拖拉机(120 马力)悬挂济南华倍农牧机械有限公司生产的 1GKN-300 中高箱型旋耕机完成,深翻作业采用约翰迪尔 6J-1854 轮式拖拉机(185 马力)悬挂柳工农业机械有限公司自行组装的三铧犁完成,深松作业采用约翰迪尔 6J-1854 轮式拖拉机(185 马力)悬挂德国 Lemken 农业机械有限公司生产的 Labrador 深松犁完成。每个处理 5 次重复,5 行区,小区行长 20 m,小区面积 140~160 m²。供试甘蔗品种为‘柳城 05-136’,2016 年 4 月上旬

种植,下种量为 10 t·hm⁻²,下种时施用基肥 51% (17-17-17)复合肥 750 kg·hm⁻²,试验周期 1 年,生产全程采用机种、机管、机收。前季作物为甘蔗,采用柳工农业机械有限公司生产的 350 马力切段式甘蔗收获机于 2016 年 1 月进行机收。

1.3 测定项目与方法

1.3.1 甘蔗产量性状

在甘蔗成熟期调查甘蔗株高、茎径、有效茎数、锤度及蔗茎产量。每个小区随机选取 30 条甘蔗用株高尺和游标卡尺测量株高和茎径,选取 10 条甘蔗用 PAL-1 手持式数显锤度计测量锤度;统计每个小区 1 m 以上甘蔗条数,换算为单位面积有效茎数;按公式:单茎重=(0.785×株高×茎径²)/1 000,蔗茎产量=单茎重×单位面积有效茎数,计算单茎重和蔗茎产量^[16]。

1.3.2 土壤性状

甘蔗苗期(6 月)采用托普 TJSJSD-750-II 型紧实度仪测定 0~30 cm 耕层全土层土壤紧实度,每个小区测定 4 个点。甘蔗成熟期(11 月)取样测定剖面土壤的理化性质。每个小区选取 3 个采样点,挖宽 60 cm、长 60 cm、深 40 cm 的土壤剖面,按照 0~10 cm、10~20 cm、20~30 cm、30~40 cm 4 个土层测定各土层的土壤贯入阻力、土壤紧实度和抗剪强度,用环刀取样法测定土壤容重、孔隙度和田间持水量等指标^[17]。贯入阻力采用 PT 型袖珍贯入仪测定,土壤紧实度采用托普 TJSJSD-750-II 型紧实度仪测定,抗剪强度采用 PS-VST-M 微型十字板剪切仪测定,土壤容重采用环刀法测定,土壤含水率采用烘干法进行测定,田间持水量、饱和含水量采用室内环刀法测定,土壤比重采用比重瓶法测定,毛管孔隙度根据土壤容重和田间持水量计算,土壤孔隙度根据土壤容重和比重计算,三相容积率根据土壤容重和土壤含水率计算。

1.4 数据处理

采用 DPSv 14.10 统计软件进行方差分析。

2 结果与分析

2.1 不同耕整地方式下土壤耕层结构特性

2.1.1 土壤容重和紧实度

1.4 m 行距下(表 1),3 种耕整地处理土壤容重无显著差异,0~10 cm 土层土壤容重显著小于其他 3 个土层($P<0.05$);1.6 m 行距下,深松 35 cm+旋耕 25 cm(B3)处理土壤容重显著小于其他 2 种耕整地处理方式($P<0.05$),深翻 50 cm+旋耕 25 cm(B2)处理土壤容重与旋耕 25 cm 处理无显著差异,0~10 cm 和 10~20 cm 土层土壤容重显著小于 20~30 cm 和 30~40

cm 土层($P<0.05$)。总体看 1.6 m 行距植蔗土壤容重显著高于 1.4 m 行距($P<0.05$), B3 处理土壤容重显著小于其他 2 种耕整地处理方式($P<0.05$)。从耕作措施与行距交互作用分析(表 2), 主处理为 1.6 m 行距、

副处理为旋耕 25 cm 土壤容重最大, 主处理为 1.4 m 行距、副处理为 B3 及主处理为 1.4 m 行距、副处理为 B2 的土壤容重最小, 两者差异达显著水平($P<0.05$)。

表 1 不同耕作措施对蔗地土壤容重和紧实度的影响

Table 1 Effects of different tillage measures on bulk density and compactness of soil of sugarcane field

耕作措施 Tillage measure	行距 Rows spacing (m)	土层 Soil layer (cm)	土壤容重 Soil bulk density ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	土壤紧实度 Soil compactness ($\text{N}\cdot\text{cm}^{-2}$)	
				苗期 Seedling stage	成熟期 Mature stage
旋耕 25 cm 25 cm rotary tillage (control, B1)	1.4	0~10	0.85±0.11b	—	157.71±78.87b
		10~20	1.14±0.17a	—	378.97±117.83a
		20~30	1.23±0.07a	—	419.19±50.97a
		30~40	1.11±0.07a	—	379.76±43.88a
		平均 Average	1.08 BC	329.10A	333.91A
	1.6	0~10	1.09±0.04b	—	80.18±23.56c
		10~20	1.16±0.17b	—	239.83±63.24b
		20~30	1.32±0.09a	—	343.20±77.91a
		30~40	1.36±0.09a	—	366.63±52.19a
		平均 Average	1.23A	264.39B	257.46C
平均 Average		1.16 α	296.74 α	295.68 α	
深翻 50 cm+旋耕 25 cm 50 cm deep plowing + 25 cm rotary tillage (B2)	1.4	0~10	0.89±0.09c	—	103.58±37.26c
		10~20	1.01±0.08bc	—	268.70±101.79b
		20~30	1.16±0.11a	—	389.58±67.68a
		30~40	1.12±0.11ab	—	373.85±56.29a
		平均 Average	1.04C	252.96B	283.92B
	1.6	0~10	0.99±0.05b	—	84.55±49.79d
		10~20	1.11±0.11b	—	156.64±44.59c
		20~30	1.34±0.11a	—	321.95±65.11b
		30~40	1.36±0.09a	—	375.95±47.24a
		平均 Average	1.20A	167.80D	234.77D
平均 Average		1.12 $\alpha\beta$	210.38 β	259.35 β	
深松 35cm+旋耕 25 cm 35 cm sub-soiling + 25 cm rotary tillage (B3)	1.4	0~10	0.86±0.05c	—	111.01±42.68d
		10~20	1.00±0.09b	—	213.84±53.86c
		20~30	1.21±0.10a	—	368.19±66.93b
		30~40	1.13±0.08a	—	409.01±51.92a
		平均 Average	1.05C	210.66C	275.51bC
	1.6	0~10	0.92±0.08b	—	118.24±44.32c
		10~20	1.14±0.09a	—	247.98±71.17b
		20~30	1.23±0.04a	—	331.78±89.31a
		30~40	1.23±0.07a	—	374.06±86.06a
		平均 Average	1.18B	229.98BC	268.02BC
平均 Average		1.09 β	220.32 β	271.76 β	
F	行距 Row spacing (A)		54.19**	16.99**	55.19**
	耕作措施 Tillage measure (B)		4.77**	26.72**	12.75**
	土层 Soil layer (C)		68.25**	—	436.27**
	A × B		2.33	9.17**	11.26**
	A × C		2.07	—	4.87**
	B × C		0.52	—	5.71**
A × B × C			1.86	—	5.08**

同列不同小写字母表示同一行距同一耕作措施下不同土层间差异显著($P<0.05$)。同列不同大写字母表示同一行距不同耕作措施间差异显著($P<0.05$)。同列不同小写希腊字母表示不同耕作措施间差异显著($P<0.05$)。*、**分别表示在 0.05 和 0.01 水平上显著。Different lowercase letters in the same column indicate significant differences among soil layers under the same rows spacing and the same tillage measure ($P < 0.05$). Different capital letters in the same column indicate significant differences among tillage measures under the same rows spacing ($P < 0.05$). Different Greek letters in the same column indicate significant differences among tillage measures ($P < 0.05$). * and ** indicate significant effects at 0.05 and 0.01 levels, respectively.

从表 1 可看出, 1.4 m 行距下, 传统耕整地方式 (B1) 苗期全土层土壤紧实度高达 $329.1 \text{ N}\cdot\text{cm}^{-2}$, B2、B3 处理土壤紧实度分别下降至 $252.96 \text{ N}\cdot\text{cm}^{-2}$ 和 $210.66 \text{ N}\cdot\text{cm}^{-2}$, 降幅分别达 23.13% 和 35.99%, 差异均达显著水平 ($P<0.05$)。甘蔗成熟期, B2 和 B3 处理土壤紧实度差异不显著, 而 B1 土壤紧实度为 $333.91 \text{ N}\cdot\text{cm}^{-2}$, 且显著高于 B3 和 B2 ($P<0.05$)。1.6 m 行距下土壤紧实度表现略有不同 (表 1), 在甘蔗苗期 B2 处理的土壤紧实度最小, B1 处理最大, B3 处理介于两者之间; B2 处理全土层土壤紧实度显著小于 B3 处理 ($P<0.05$); 到甘蔗成熟期则表现为 3 种处理土壤紧实度没有显著差异。总体看 1.6 m 行距植蔗土壤的紧实度显著小于 1.4 m 行距 ($P<0.05$)。其中, B2 处理的土壤紧实度最小, B1 处理的土壤紧实度最大, B3 处理的土壤紧实度介于两者之间, B1 处理的土壤紧实度显著小于 B2 处理的土壤紧实度 ($P<0.05$)。从耕作措施与行距交互作用分析, 主处理为 1.6 m 行距、副处理为深翻 50 cm+旋耕 25 cm 土壤紧实度最小; 主处理为 1.4 m 行距、副处理为旋耕 25 cm 土壤紧实度最大。蔗地耕层各土层土壤紧实度均呈上低下高的趋势, 0~10 cm 土层紧实度显著小于其他 3 个土层 ($P<0.05$), 而各处理土面 20 cm 以下土壤紧实度均无显著差异, 可以反映出 20~40 cm 甚至更深土层可能形成一个整体的结构, 机械耕作的效应不显著, 或 20~30 cm 之间存在犁底层。

2.1.2 土壤贯入阻力和抗剪强度

土壤贯入阻力可以反映出土壤的机械化适耕性。从表 2 可知, 1.4 m 行距下, 旋耕 25 cm (B1) 处理的耕层土壤贯入阻力最大, 其次为 B2 处理, B3 处理的耕层土壤贯入阻力最小, 三者差异均达显著水平 ($P<0.05$)。蔗地耕层各土层土壤贯入阻力呈上小下大的趋势, 0~10 cm 土层土壤贯入阻力最小, 30~40 cm 土层土壤贯入阻力最大, 各土层间土壤贯入阻力差异均达显著水平 ($P<0.05$)。1.6 m 行距下, 则表现为 B3 处理的耕层土壤贯入阻力最大, 其次为 B1 处理, 而 B2 处理的耕层土壤贯入阻力最小, 三者差异未达显著水平。蔗地耕层各土层土壤贯入阻力呈上小下大的趋势, 0~10 cm 土层土壤贯入阻力最小, 30~40 cm 土层土壤贯入阻力最大, 各土层间土壤贯入阻力差异均达显著水平 ($P<0.05$)。总之, 1.6 m 行距植蔗土壤贯入阻力显著小于 1.4 m 行距 ($P<0.05$); 深松 35 cm 与翻耕 50 cm 均显著降低了耕层土壤贯入阻力 ($P<0.05$), 但两者之间差异不显著; 0~10 cm 土层土壤贯入阻力最小, 30~40 cm 土层土壤贯入阻力最大, 各土层间土壤贯入阻力差异均达显著水平 ($P<0.05$)。

从耕作措施与行距交互作用分析, 主处理为 1.4 m 行距、副处理为旋耕 25 cm 耕层土壤贯入阻力最大, 主处理为 1.6 m 行距、副处理为深翻 50 cm+旋耕 25 cm 的耕层土壤贯入阻力最小, 两者差异达显著水平 ($P<0.05$)。

土壤抗剪强度是指土体抵抗剪切破坏的极限强度, 地表径流对土壤会产生一定的剪切力, 当地表径流所产生的剪切力大于土壤具有的抗剪强度时, 部分土壤结构便会被破坏从而发生土壤侵蚀。1.4 m 行距下 (表 2), B1 处理的耕层土壤抗剪强度最大, 其次为 B2 处理, B3 处理的耕层土壤抗剪强度最小, 三者差异均达显著水平 ($P<0.05$)。蔗地耕层各土层土壤抗剪强度呈上小下大的趋势, 各土层间土壤抗剪强度差异均达显著水平 ($P<0.05$)。1.6 m 行距下, B3 处理显著大于其他 2 种耕整地方式 ($P<0.05$), 而 B1 与 B2 处理的耕层土壤抗剪强度没有显著差异。蔗地耕层土壤抗剪强度呈上小下大的趋势, 各土层间差异显著 ($P<0.05$)。总体看 1.6 m 行距植蔗土壤抗剪强度显著小于 1.4 m 行距 ($P<0.05$); 3 种耕整地方式之间土壤抗剪强度差异不显著; 0~10 cm 土层土壤抗剪强度最小, 30~40 cm 土层土壤抗剪强度最大, 各土层间土壤抗剪强度差异均达显著水平 ($P<0.05$)。从耕作措施与行距交互作用分析, 主处理为 1.4 m 行距、副处理为旋耕 25 cm 耕层土壤抗剪强度最大, 主处理为 1.6 m 行距、副处理为深翻 50 cm+旋耕 25 cm 的耕层土壤抗剪强度最小, 两者差异达显著水平 ($P<0.05$)。

2.1.3 土壤孔隙度

1.4 m 行距下 (表 3), 3 种耕整地方式耕层土壤总孔隙度、毛管孔隙度、通气孔隙度均没有显著差异。蔗地耕层各层土壤毛管孔隙度均没有显著差异; 土壤总孔隙度和通气孔隙度从上到下呈逐步减少趋势, 0~10 cm 土层土壤总孔隙度和通气孔隙度显著大于其他 3 个土层 ($P<0.05$)。1.6 m 行距下, B3 处理的土壤总孔隙度显著大于其他 2 种耕整地方式 ($P<0.05$), 而 B1 与 B2 处理的耕层土壤总孔隙度没有显著差异; B2 处理的土壤毛管孔隙度显著小于其他 2 种耕整地方式 ($P<0.05$), B3 和 B2 处理的土壤通气孔隙度显著大于旋耕 25 cm ($P<0.05$)。蔗地耕层各土层土壤毛管孔隙度均没有显著差异, 土壤总孔隙度和通气孔隙度从上到下呈逐步减少趋势, 0~10 cm 土层和 10~20 cm 土层的土壤总孔隙度和通气孔隙度显著大于其他 2 个土层 ($P<0.05$)。总体看, 1.6 m 行距植蔗土壤总孔隙度和通气孔隙度显著小于 1.4 m 行距 ($P<0.05$), 而 2 种行距下土壤毛管孔隙度没有显著差异, B3 处

表 2 不同耕作措施对蔗地土壤贯入阻力和抗剪强度的影响

Table 2 Effects of different tillage measures on penetration resistance and shear strength of soil of sugarcane field

耕作措施 Tillage measure	行距 Rows spacing (m)	土层 Soil layer (cm)	贯入阻力 Penetration resistance (KPa)	抗剪强度 Shear strength of soil (kg·cm ⁻²)
旋耕 25 cm 25 cm rotary tillage (control, B1)	1.4	0~10	12.30±7.10c	0.83±0.34c
		10~20	50.94±26.05b	4.02±2.16b
		20~30	67.86±15.34a	5.39±1.68a
		30~40	67.63±9.88a	4.80±1.06ab
		平均 Average	49.68A	3.76A
	1.6	0~10	10.34±6.40d	0.84±0.44d
		10~20	20.55±9.09c	1.81±0.76c
		20~30	48.35±13.19b	3.41±0.79b
		30~40	60.08±9.87a	3.95±0.62a
		平均 Average	34.83D	2.50D
	平均 Average		42.26α	3.13α
	深翻 50 cm+旋耕 25 cm 50 cm deep plowing + 25 cm rotary tillage (B2)	1.4	0~10	7.78±3.41c
10~20			29.99±10.96b	2.43±1.26c
20~30			61.65±11.44a	4.97±1.40b
30~40			66.83±6.44a	5.67±1.04a
平均 Average			41.56B	3.45B
1.6		0~10	8.65±3.71d	0.80±0.38d
		10~20	17.79±6.14c	1.67±0.55c
		20~30	41.76±14.64b	3.09±0.63b
		30~40	66.53±6.90a	4.40±0.73a
		平均 Average	33.68D	2.49D
平均 Average		37.62β	2.97α	
深松 35cm+旋耕 25 cm 35 cm sub-soiling + 25 cm rotary tillage (B3)		1.4	0~10	5.49±3.00d
	10~20		18.18±9.60c	1.56±0.60c
	20~30		52.70±17.44b	3.76±1.16b
	30~40		69.79±4.91a	5.62±0.64a
	平均 Average		36.54CD	2.86C
	1.6	0~10	7.08±2.29c	0.89±0.38d
		10~20	30.19±14.37b	1.88±0.98c
		20~30	55.86±14.77a	4.57±1.00b
		30~40	59.58±15.01a	5.31±1.27a
		平均 Average	38.18BC	3.16B
	平均 Average		37.36β	3.01α
	F	行距 Row spacing (A)		45.08**
耕作措施 Tillage measure (B)			9.22**	1.16
土层 Soil layer (C)			599.45**	462.16**
A × B			20.83**	29.34**
A × C			6.71**	9.07**
B × C			3.47**	9.89**
A × B × C			9.68**	5.88**

同列不同小写字母表示同一行距同一耕作措施下不同土层间差异显著($P < 0.05$)。同列不同大写字母表示同一行距不同耕作措施间差异显著($P < 0.05$)。同列不同小写希腊字母表示不同耕作措施间差异显著($P < 0.05$)。*、**分别表示在 0.05 和 0.01 水平上显著。Different lowercase letters in the same column indicate significant differences among soil layers under the same rows spacing and the same tillage measure ($P < 0.05$). Different capital letters in the same column indicate significant differences among tillage measures under the same rows spacing ($P < 0.05$). Different Greek letters in the same column indicate significant differences among tillage measures ($P < 0.05$). * and ** indicate significant effects at 0.05 and 0.01 levels, respectively.

表 3 不同耕作措施对蔗地土壤孔隙度的影响
Table 3 Effects of different tillage measures on porosity of soil of sugarcane field

耕作措施 Tillage measure	行距 Rows spacing (m)	土层 Soil layer (cm)	孔隙度 Porosity (%)	毛管孔隙度 Capillary porosity (%)	通气孔隙度 Ventilation porosity (%)	
旋耕 25 cm 25 cm rotary tillage (control, B1)	1.4	0~10	68.68±3.58a	38.59±2.23a	30.09±4.10a	
		10~20	58.08±9.01b	37.67±3.62a	20.41±11.86b	
		20~30	54.13±2.28b	40.19±3.42a	13.93±3.63b	
		30~40	59.55±2.26b	41.28±1.70a	18.27±2.24b	
		平均 Average	60.11A	39.43AB	20.68AB	
	1.6	0~10	61.02±1.83a	40.60±1.73a	20.42±2.91a	
		10~20	57.92±5.77a	39.25±6.58a	18.67±2.91a	
		20~30	52.63±2.76b	39.29±1.72a	13.35±2.69b	
		30~40	51.46±3.47b	40.90±3.70a	10.56±2.02b	
		平均 Average	55.76B	40.00A	15.75C	
	平均 Average			57.93 β	39.72 α	18.21 β
	深翻 50 cm+旋耕 25 cm 50 cm deep plowing + 25 cm rotary tillage (B2)	1.4	0~10	67.18±2.79a	40.20±6.38a	26.98±7.31a
10~20			63.21±3.51ab	40.32±1.73a	22.90±4.38ab	
20~30			57.62±3.28c	40.00±3.65a	17.62±2.27b	
30~40			59.06±3.37bc	40.90±2.09a	18.17±2.25b	
平均 Average			61.77A	40.35A	21.42AB	
1.6		0~10	64.43±1.05a	39.33±3.06a	25.10±3.10a	
		10~20	60.46±3.29b	37.73±2.54a	22.72±3.38a	
		20~30	51.77±4.01c	36.18±2.11a	15.59±2.26b	
		30~40	51.62±2.63c	37.49±3.28a	14.14±1.62b	
		平均 Average	57.07B	37.68B	19.39B	
平均 Average			59.42 β	39.02 α	20.40 $\alpha\beta$	
深松 35cm+旋耕 25 cm 35 cm sub-soiling + 25 cm rotary tillage (B3)		1.4	0~10	69.09±1.96a	33.44±2.79b	35.65±3.10a
	10~20		64.32±3.10b	38.90±6.52a	25.42±6.47b	
	20~30		56.61±3.79c	40.40±1.73a	16.21±4.73c	
	30~40		58.93±3.04c	43.46±2.51a	15.47±1.96c	
	平均 Average		62.24A	39.05AB	23.19A	
	1.6	0~10	67.26±2.54a	37.91±1.80b	29.36±3.26a	
		10~20	61.82±6.50b	42.07±4.34a	19.75±7.94b	
		20~30	56.12±1.11c	40.31±1.83ab	15.81±1.76b	
		30~40	56.77±2.19c	41.43±0.47ab	15.34±2.28b	
		平均 Average	60.49A	40.43A	20.07B	
	平均 Average			61.37 α	39.74 α	21.63 α
	F	行距 Row spacing (A)		28.30**	0.15	17.12**
耕作措施 Tillage measure (B)			8.63**	0.60	6.05**	
土层 Soil layer (C)			58.83**	2.95*	54.82**	
A × B			1.90	4.04*	1.09	
A × C			1.77	2.23	1.68	
B × C			0.56	2.87*	1.75	
A × B × C			1.22	0.27	1.26	

同列不同小写字母表示同一行距同一耕作措施下不同土层间差异显著($P < 0.05$)。同列不同大写字母表示同一行距不同耕作措施间差异显著($P < 0.05$)。同列不同小写希腊字母表示不同耕作措施间差异显著($P < 0.05$)。*、**分别表示在 0.05 和 0.01 水平上显著。Different lowercase letters in the same column indicate significant differences among soil layers under the same rows spacing and the same tillage measure ($P < 0.05$). Different capital letters in the same column indicate significant differences among tillage measures under the same rows spacing ($P < 0.05$). Different Greek letters in the same column indicate significant differences among tillage measures ($P < 0.05$). * and ** indicate significant effects at 0.05 and 0.01 levels, respectively.

理显著提高了耕层土壤总孔隙度和通气孔隙度 ($P<0.05$), 尤其显著增加了 30~40 cm 土层的毛管孔隙度, B2 处理也显著提高了耕层土壤通气孔隙度 ($P<0.05$), 可见深耕作业对土壤深层水分蓄积与运输具有显著促进作用。蔗地耕层各土层土壤总孔隙度、通气孔隙度从表层至深层呈减少趋势, 20 cm 以下土层差异不显著, 而毛管孔隙度则随着土层的深入而显著提高。从耕作措施与行距交互作用分析, 主处理为 1.4 m 行距、副处理为深松 35 cm+旋耕 25 cm 耕层土壤总孔隙度和通气孔隙度最大, 主处理为 1.6 m 行距、副处理为旋耕 25 cm 的耕层土壤总孔隙度和通气孔隙度最小, 两者差异达显著水平 ($P<0.05$)。

2.1.4 土壤三相容积率

从表 4 中可看出, 1.4 m 行距下, 3 种耕整地方式耕层土壤固相容积率均没有显著差异; B3 处理的土壤液相容积率显著小于其他 2 种耕整地方式 ($P<0.05$), 而 B1 与 B2 处理间没有显著差异; B3 处理的土壤气相容积率显著大于 B1 ($P<0.05$), 而 B1 与 B2 处理的耕层土壤气相容积率没有显著差异。随土层深度增加气相容积率呈下降趋势, 液相容积率和固相容积率呈上升趋势, 0~10 cm 土层液相容积率和固相容积率显著小于其他 3 个土层 ($P<0.05$), 气相容积率则显著大于其他 3 个土层 ($P<0.05$)。1.6 m 行距下, 3 种耕整地方式耕层土壤气相容积率均没有显著差异, B3 处理的土壤固相容积率显著小于其他 2 种耕整地方式 ($P<0.05$), 液相容积率显著大于其他 2 种耕整地方式 ($P<0.05$), 而 B1 与 B2 处理之间耕层土壤液相容积率和固相容积率没有显著差异。随土层深度增加气相容积率呈下降趋势, 液相容积率和固相容积率呈上升趋势, 0~10 cm 和 10~20 cm 土层液相容积率和固相容积率显著小于其他 2 个土层 ($P<0.05$), 气相容积率则显著大于其他 2 个土层 ($P<0.05$), 0~10 cm 和 10~20 cm 土层之间气相容积率、液相容积率和固相容积率没有显著差异。总体看, 1.4 m 行距气相容积率大于 1.6 m 行距 ($P<0.05$), 固相容积率小于 1.6 m 行距 ($P<0.05$), 而液相容积率则没有显著差异, B1 处理的固相容积率最大, B2 的固相容积率次之, B3 的固相容积率最小, 3 者之间均存在显著差异 ($P<0.05$); B3 的气相容积率最大, B2 的气相容积率次之, B1 的气相容积率最小, B3 处理的土壤气相容积率显著大于 B1 ($P<0.05$), 3 种耕作措施的液相容积率均没有显著差异, 说明深耕和深松均对土壤物理结构的改善具有积极作用。不同行距和不同耕作措施下土壤三相比均表现为随土层深度增加气相容积率呈下降趋势, 液相容积率和固相容积

率呈上升趋势。从耕作措施与行距交互作用分析, 主处理为 1.6 m 行距、副处理为旋耕 25 cm 耕层土壤固相容积率最大, 而气相容积率最小; 主处理为 1.4 m 行距、副处理为深松 35 cm+旋耕 25 cm 的耕层土壤固相容积率最小, 而气相容积率最大, 两者差异达显著水平 ($P<0.05$)。

2.1.5 土壤含水量

从表 5 中可看出, 1.4 m 行距下, 3 种耕整地方式耕层土壤田间持水量和饱和含水量均没有显著差异, B3 处理的土壤含水率显著小于其他 2 种耕整地方式 ($P<0.05$), 而 B1 与 B2 处理 2 者之间耕层土壤含水率没有显著差异。随土层深度增加田间持水量和饱和含水量呈下降趋势, 土壤含水率呈上升趋势, 0~10 cm 土层土壤含水率显著小于其他 3 个土层 ($P<0.05$), 田间持水量和饱和含水量则显著大于其他 3 个土层 ($P<0.05$)。1.6 m 行距下, B3 处理的土壤含水率、田间持水量和饱和含水量均大于其他 2 种耕整地方式 ($P<0.05$), 而 B1 与 B2 处理的耕层土壤含水率、田间持水量和饱和含水量没有显著差异。0~10 cm 和 10~20 cm 土层土壤含水率显著小于其他 2 个土层 ($P<0.05$), 田间持水量和饱和含水量则显著大于其他 2 个土层 ($P<0.05$), B1 与 B2 处理 0~10 cm、10~20 cm 土层之间土壤含水率、田间持水量和饱和含水量没有显著差异。总体看, 不同的耕整地作业方式对土壤含水率、田间持水量和饱和含水量的影响尚未见显著。1.6 m 行距下的 3 个土壤含水量指标均显著低于 1.4 m 行距 ($P<0.05$), 这可能与宽行距下地表裸露面积大, 水分蒸腾程度略高有关; 宽行距下机具作业顺畅, 深耕效果较彻底, 种植后适度镇压是减少地表水分蒸腾的必要措施。从耕作措施与行距交互作用分析, 主处理为 1.6 m 行距、副处理为旋耕 25 cm 耕层土壤含水率、田间持水量和饱和含水量显著小于其他处理 ($P<0.05$)。而主处理为 1.6 m 行距、副处理为深松 35 cm+旋耕 25 cm 耕层土壤含水率最大, 主处理为 1.4 m 行距、副处理为深翻 50 cm+旋耕 25 cm 耕层田间持水量和饱和含水量最大。

2.2 不同处理对甘蔗农艺性状和产量构成的影响

从表 6 中可看出, 1.4 m 行距下, B3 处理的株高、单茎重、锤度和蔗茎产量均显著高于 B1 处理 ($P<0.05$), B2 处理的有效茎数和蔗茎产量显著高于 B1 处理 ($P<0.05$), B3 处理的株高、单茎重、锤度显著高于 B2 处理 ($P<0.05$); 1.6 m 行距下, B3 处理的株高、茎径、单茎重、锤度和蔗茎产量均显著高于 B1 处理 ($P<0.05$), B2 处理的有效茎数、锤度和蔗产量显著高于 B1 处理 ($P<0.05$), B3 处理的茎径、单茎重、

表 4 不同耕作措施对蔗地土壤三相容积率的影响

Table 4 Effects of different tillage measures on three-phase volume fractions of soil of sugarcane field

耕作措施 Tillage measure	行距 Rows spacing (m)	土层 Soil layer (cm)	固相容积率 Solid volume fraction (%)	液相容积率 Liquid volume fraction (%)	气相容积率 Gas volume fraction (%)
旋耕 25 cm 25 cm rotary tillage (control, B1)	1.4	0~10	31.32±3.58b	19.89±2.61b	48.79±6.18a
		10~20	41.92±9.01a	24.80±6.02a	33.28±14.87b
		20~30	45.87±2.28a	28.71±1.32a	25.41±2.93b
		30~40	40.45±2.26a	27.80±0.61a	31.75±2.65b
		平均 Average	39.89BC	25.30A	34.81BC
	1.6	0~10	38.98±1.83b	19.24±1.84c	41.78±2.99a
		10~20	42.08±5.77b	21.91±3.99bc	36.01±9.44a
		20~30	47.37±2.76a	24.49±1.90ab	28.14±2.72b
		30~40	48.54±3.47a	26.27±3.05a	25.19±4.63b
		平均 Average	44.24A	22.98B	32.78C
平均 Average		42.07 α	24.14 α	33.79 β	
深翻 50 cm+旋耕 25 cm 50 cm deep plowing + 25 cm rotary tillage (B2)	1.4	0~10	32.82±2.79c	19.31±2.02c	47.87±4.12a
		10~20	36.79±3.51bc	23.63±2.95b	39.58±6.38b
		20~30	42.38±3.28a	26.37±1.42ab	31.25±3.52c
		30~40	40.94±3.37ab	26.80±1.60a	32.26±3.18c
		平均 Average	38.23BC	24.03AB	37.74AB
	1.6	0~10	35.57±1.05c	20.83±2.11c	43.60±2.54a
		10~20	39.54±3.29b	23.14±1.98bc	37.32±4.61b
		20~30	48.23±4.01a	24.54±1.91b	27.23±5.71c
		30~40	48.38±2.63a	28.14±1.81a	23.48±1.71c
		平均 Average	42.93A	24.16AB	32.91C
平均 Average		40.58 β	24.10 α	35.32 $\alpha\beta$	
深松 35cm+旋耕 25 cm 35 cm sub-soiling + 25 cm rotary tillage (B3)	1.4	0~10	30.91±1.96c	17.20±1.08b	51.90±2.92a
		10~20	35.68±3.10b	20.40±2.71b	43.92±5.16b
		20~30	43.39±3.79a	26.24±3.33a	30.37±6.75c
		30~40	41.07±3.04a	28.10±2.46a	30.83±3.78c
		平均 Average	37.76C	22.98B	39.25A
	1.6	0~10	32.74±2.54b	20.44±1.56c	46.83±3.91a
		10~20	41.00±3.39a	25.27±1.78b	33.73±5.04b
		20~30	43.88±1.11a	27.94±1.54a	28.18±2.43c
		30~40	43.23±2.19a	29.01±1.31a	27.76±2.95c
		平均 Average	40.21B	25.67A	34.12C
平均 Average		38.99 γ	24.32 α	36.69 α	
F	行距 Row spacing (A)		35.42**	0.13	16.54**
	耕作措施 Tillage measure (B)		7.62**	0.10	2.89
	土层 Soil layer (C)		63.96**	66.30**	79.01**
	A × B		1.18	10.34**	1.01
	A × C		1.41	1.72	1.32
	B × C		0.63	0.97	0.52
A × B × C			1.96	0.80	1.53

同列不同小写字母表示同一行距同一耕作措施下不同土层间差异显著($P < 0.05$)。同列不同大写字母表示同一行距不同耕作措施间差异显著($P < 0.05$)。同列不同小写希腊字母表示不同耕作措施间差异显著($P < 0.05$)。*、**分别表示在 0.05 和 0.01 水平上差异显著。Different lowercase letters in the same column indicate significant differences among soil layers under the same rows spacing and the same tillage measure ($P < 0.05$). Different capital letters in the same column indicate significant differences among tillage measures under the same rows spacing ($P < 0.05$). Different Greek letters in the same column indicate significant differences among tillage measures ($P < 0.05$). * and ** indicate significant effects at 0.05 and 0.01 levels, respectively.

表 5 不同耕作措施对蔗地土壤含水量的影响
Table 5 Effects of different tillage measures on soil moisture content of sugarcane field

耕作措施 Tillage measure	行距 Rows spacing (m)	土层 Soil layer (cm)	土壤含水率 Soil moisture content (%)	田间持水量 Field capacity (%)	土壤饱和含水量 Soil saturated water content (%)
旋耕 25 cm 25 cm rotary tillage (control, B1)	1.4	0~10	19.89±2.61b	46.31±6.57a	51.93±8.14a
		10~20	24.80±6.02a	33.43±3.75b	36.65±5.18b
		20~30	28.71±1.32a	32.70±3.77b	35.16±4.27b
		30~40	27.80±0.61a	37.49±3.26b	40.42±3.56b
		平均 Average	25.30A	37.48A	41.04AB
	1.6	0~10	19.24±1.84c	37.36±1.67a	40.85±1.45a
		10~20	21.91±3.99bc	34.89±8.96a	38.64±5.60ab
		20~30	24.49±1.90ab	29.98±2.80a	33.72±2.62b
		30~40	26.27±3.05a	30.29±4.77a	33.03±5.01b
		平均 Average	22.98B	33.13B	36.56C
平均 Average		24.14 α	35.31 α	38.80 α	
深翻 50 cm+旋耕 25 cm 50 cm deep plowing + 25 cm rotary tillage (B2)	1.4	0~10	19.31±2.02c	46.67±7.42a	51.51±9.89a
		10~20	23.63±2.95b	41.00±3.82ab	44.71±4.01ab
		20~30	26.37±1.42ab	35.70±5.91b	38.15±6.86b
		30~40	26.80±1.60a	37.57±4.29b	39.93±5.55b
		平均 Average	24.03AB	39.49A	43.58A
	1.6	0~10	20.83±2.11c	39.84±5.02a	47.76±6.90a
		10~20	23.14±1.98bc	34.29±4.23a	41.19±5.22a
		20~30	24.54±1.91b	27.18±4.16b	30.44±4.66b
		30~40	28.14±1.81a	27.71±4.11b	30.49±4.26b
		平均 Average	24.16AB	32.26B	37.47BC
平均 Average		24.10 α	35.87 α	40.52 α	
深松 35cm+旋耕 25 cm 35 cm sub-soiling + 25 cm rotary tillage (B3)	1.4	0~10	17.20±1.08b	38.99±4.69a	45.32±6.24a
		10~20	20.40±2.71b	39.21±8.72a	43.10±8.64ab
		20~30	26.24±3.33a	33.44±2.10a	36.22±2.57b
		30~40	28.10±2.46a	38.55±4.60a	41.42±4.82ab
		平均 Average	22.98B	37.55A	41.51A
	1.6	0~10	20.44±1.56c	41.56±3.75a	49.15±6.52a
		10~20	25.27±1.78b	37.38±6.75ab	41.25±7.08b
		20~30	27.94±1.54a	32.76±2.04b	36.57±2.50b
		30~40	29.01±1.31a	33.90±1.87b	36.61±2.03b
		平均 Average	25.67A	36.40A	40.89AB
平均 Average		24.32 α	36.97 α	41.20 α	
F	行距 Row spacing (A)		0.13	20.82**	13.55**
	耕作措施 Tillage measure (B)		0.10	1.10	1.99
	土层 Soil layer (C)		66.30**	20.26**	30.55**
	A × B		10.34**	3.57*	2.57
	A × C		1.72	1.23	1.58
	B × C		0.97	1.07	1.07
	A × B × C		0.80	1.00	1.49

同列不同小写字母表示同一行距同一耕作措施下不同土层间差异显著($P < 0.05$)。同列不同大写字母表示同一行距不同耕作措施间差异显著($P < 0.05$)。同列不同小写希腊字母表示不同耕作措施间差异显著($P < 0.05$)。*、**分别表示在 0.05 和 0.01 水平上差异显著。Different lowercase letters in the same column indicate significant differences among soil layers under the same rows spacing and the same tillage measure ($P < 0.05$). Different capital letters in the same column indicate significant differences among tillage measures under the same rows spacing ($P < 0.05$). Different Greek letters in the same column indicate significant differences among tillage measures ($P < 0.05$). * and ** indicate significant effects at 0.05 and 0.01 levels, respectively.

表 6 不同耕作措施对不同行距种植的甘蔗产量性状的影响

Table 6 Effects of tillage measures on yield traits of sugarcane planted with different rows spacings under different tillage measures

耕作措施 Tillage measure	行距 Rows spacing (cm)	株高 Plant height (cm)	茎径 Stem diameter (cm)	单茎重 Stem weight (kg·stem ⁻¹)	有效茎数 Effective stems number (stems·hm ⁻²)	锤度 Brix (%)	蔗茎产量 Cane yield (t·hm ⁻²)
旋耕 25 cm 25 cm rotary tillage (control, B1)	1.4	198.32±8.04d	2.58±0.05b	1.04±0.07b	60 888±1 818b	17.46±0.55de	63.21±5.60c
	1.6	204.02±3.41cd	2.59±0.05b	1.07±0.04b	50 442±3 303d	16.81±0.70e	54.04±4.29d
	平均 Average	201.17±6.60C	2.58±0.048B	1.05±0.06C	55 665±6 018B	17.13±0.69C	58.62±6.75B
深翻 50 cm+旋耕 25 cm 50 cm deep plowing + 25 cm rotary tillage (B2)	1.4	209.57±5.59bcd	2.61±0.09b	1.13±0.08b	64 318±1 782a	18.04±1.01cd	72.41±5.85a
	1.6	213.23±3.98abc	2.59±0.07b	1.13±0.05b	64 616±1 845a	18.65±0.76bc	72.79±4.99a
	平均 Average	211.40±5.01B	2.60±0.082B	1.13±0.07B	64 467±1 737A	18.34±0.91B	72.60±5.19A
深松 35cm+旋耕 25 cm 35 cm sub-soiling + 25 cm rotary tillage (B3)	1.4	221.83±18.04a	2.66±0.07ab	1.23±0.11a	57 648±2 254c	19.07±0.54b	70.90±7.80ab
	1.6	216.13±10.04ab	2.72±0.08a	1.25±0.12a	51 693±3 681d	20.03±0.77a	64.82±7.37bc
	平均 Average	218.98±14.24A	2.69±0.077A	1.24±0.11A	54 670±4 259B	19.55±0.81A	67.86±7.30A
F	行距 Row spacing (A)	0.15	0.40	0.49	39.45**	1.52	5.92*
	耕作措施 Tillage measure (B)	10.46**	7.14**	14.44**	53.07**	31.91**	16.23**
	A × B	1.21	1.03	0.13	13.29**	3.96*	1.91

同列不同小写字母表示同一耕作措施不同行距间差异显著($P < 0.05$), 同列不同大写字母表示不同耕作措施间差异显著($P < 0.05$), *、**分别表示在 0.05 和 0.01 水平上差异显著。Different lowercase letters in the same column indicate significant differences among row spacings under the same tillage measure ($P < 0.05$). Different capital letters in the same column indicate significant differences among tillage measures ($P < 0.05$). * and ** indicate significant effects at 0.05 and 0.01 levels, respectively.

锤度显著高于 B2 处理($P < 0.05$), 而有效茎数和蔗茎产量显著低于 B2 处理($P < 0.05$)。从种植行距对产量构成的影响来看, 1.4 m 行距的甘蔗成熟期有效茎数、蔗茎产量均显著高于 1.6 m 行距($P < 0.05$), 表明有效茎数是行距对蔗茎产量造成影响的主要因子。从耕整地方式对产量构成的影响来看, B3 与 B2 的蔗茎产量显著高于 B1 的传统耕整地方式($P < 0.05$), B3 与 B2 间蔗茎产量差异不显著。B2 的甘蔗成熟期有效茎数显著高于 B1 的传统耕整地方式($P < 0.05$), 说明耕作深度对成熟期有效茎数的效应可能大于耕作方式的影响, B3 处理对个体生长指标, 如株高、茎径、单茎重则表现出显著的促进效应($P < 0.05$)。从行距与耕整地方式的互作效应看, 无论是 1.4 m 还是 1.6 m 行距, 耕作深度达 50 cm 的深翻模式(B2)显著优于其他耕整地方式, 表现为成熟期有效茎数显著增加, 从而提高了蔗茎产量; 两种行距下, B3 处理都表现出对甘蔗个体生长水平(株高、茎径、单茎重)的更显著促进作用, 反映出对甘蔗分蘖成茎和后期生长的良好促进作用, 在有效茎数不如 B1 处理的情况下, 促进了甘蔗产量的增加。

3 讨论与结论

蔗茎深层土壤结构的改良和优化是我国甘蔗生

产全程机械化下保证甘蔗高产稳产的重要措施。机械收获过程中轮子的碾压会造成土壤紧实, 土壤理化性状发生一定的改变, 对甘蔗地上部分和根系生长产生一定的负面影响。但新植甘蔗经过深松、深翻, 甘蔗留宿根开垄松兜和中耕培土以后, 碾压所带来的负面影响是可以消除的。机械化收获的土壤紧实度显著高于人工收获, 甘蔗的宿根发株率与土壤的紧实度呈显著的负相关^[2]。已有的研究证明, 深松不仅可有效打破犁底层降低其密度, 还能增加作物根深、根长及根重, 进而提高作物产量和水分利用效率^[11]。深耕深松栽培比常规耕作栽培的甘蔗出苗率高、分蘖率高, 疏松土质对于尽早形成基本苗群体有促进作用, 甘蔗生长速度加快、根系发达, 甘蔗成熟期的株高、茎径、甘蔗蔗糖分、青叶数均提高^[5,8-10]。

本研究表明, 生产全程机械化模式下机收后耕整地作业的土壤紧实度表现为旋耕 25 cm 最大、深翻 50 cm+旋耕 25 cm 次之、深松 35 cm+旋耕 25 cm 最小, 可见深松作业更有利于改善耕层土壤的紧实程度, 而深翻作业必须与深层土壤改良、高质量碎土作业结合才能起到替代深松作业的效果。因此通过合理深耕与深层土壤的改良措施, 进一步加深利用 20 cm 以下土层对蔗地合理耕层的构建以及提升

甘蔗产量与宿根性可望产生积极显著的效果。

深翻 50 cm+旋耕 25 cm 和深松 35 cm+旋耕 25 cm 两种耕整地作业方式下甘蔗有效茎数、甘蔗锤度和甘蔗蔗茎产量均显著高于仅旋耕 25 cm 的传统旋耕作业。深翻 50 cm+旋耕 25 cm 和深松 35 cm+旋耕 25 cm 可以改善 0~10 cm 和 10~20 cm 土层的土壤容重、土壤紧实度、总孔隙度、毛管孔隙度、空气孔隙度、固相容积率、液相容积率、气相容积率,但蔗茎深层的土壤紧实现象尚未得到明显缓解。对 3 种耕作措施下 30~40 cm 土层土壤的固相容积率、液相容积率、气相容积率的分析结果显示,蔗茎深层的通气孔隙度急剧减少,气相容积率显著下降。

土壤的通气性和透水性下降,可导致土壤的氧化还原状态、酸碱度和金属毒害、微生物生态、养分的转化和利用等受到影响,从而影响到甘蔗根系的生长及其对养分、水分的吸收功能,加剧甘蔗根系的老化死亡,并严重影响地下芽,尤其是低位芽的萌发出苗,从而对宿根蔗发株生长和产量造成显著不利影响^[7]。研究表明^[4],柳城 05-136'等甘蔗品种对宽行距种植具有良好适应性,当种植行距增大到适宜大中型机械收获的 1.3~1.4 m 时,甘蔗产量比行距 1.1 m 略有提高。而机械收割增加了蔗蔸的开裂程度和上位芽的损伤程度,但对蔗蔸开裂程度的影响随行距加大逐渐变弱,0~20 cm 土层的土壤容重有随行距增加而降低的趋势^[3],因此行距增加有利于机械收割后减少对宿根甘蔗的影响。本研究结果表明,行距 1.6 m 甘蔗蔗茎产量比 1.4 m 行距甘蔗蔗茎产量明显减产的主要原因是 1.6 m 行距甘蔗有效茎数不足,而 1.6 m 行距机具的匹配性和作业顺畅程度显著高于 1.4 m 行距,1.6 m 行距植蔗土壤的紧实度显著小于 1.4 m 行距,容重显著高于后者,1.6 m 植蔗行距下的机械作业顺畅,减少了对土壤的压实,能显著改善土壤贯入阻力和抗剪强度。采用大中型机械收获,当因机具作业要求需要将行距增大到 1.6 m 以上时,应选择分蘖性能强、宿根性好的甘蔗品种采用宽窄行种植,种植时适当增加甘蔗种植密度,提高甘蔗有效茎数,从而降低甘蔗的产量损失。

在甘蔗生产全程机械化的土壤耕作技术方面,前期深耕整地促进群体茎蘖数的增长,中期进行兼具深松功能的中耕培土,可望对甘蔗群体和个体生长能力产生积极的效果^[6]。本研究结果显示,无论是深松还是深翻,在不破心土层、不造成水肥渗漏的前提下,增加土壤耕作深度对甘蔗生长群体的有效茎数和蔗茎产量具有显著的促进效应,其原因主要在于改善了耕层的整体疏松程度,包括减小了土壤

紧实度和土壤贯入阻力^[5]。而深松作业除上述效应外,显著提高了耕层土壤总孔隙度,尤其显著增加了 30~40 cm 土层的毛管孔隙度,显著提高深层土壤的保水能力,并通过水肥持续供给能力的改善对甘蔗中后期伸长增粗产生显著的促进效果^[7]。此外,本研究中,各处理下蔗地耕层 20~40 cm 各土层土壤容重、紧实度、孔隙度、固相容积率、气相容积率、田间持水量和饱和含水量均无显著差异,反映出土面以下 20~40 cm,甚至连同更深土层可能形成了一个整体的结构,据此推测试验蔗地犁底层可能在 20~30 cm。但是,对于甘蔗来说,亟待进一步增加深松作业深度,同时配合进行深层土壤的外施物料改良措施,进一步加深利用 20~30 cm 土层,对蔗地合理耕层的构建以及提升甘蔗蔗茎产量和宿根性可望产生积极显著的效果。

本研究结果表明,深翻和深松均对土壤物理结构的改善具有积极作用,能显著提高甘蔗蔗茎产量,在具有大马力拖拉机和高质量深松器的蔗区建议采用深松 35 cm+旋耕 25 cm 的耕整地方式,在缺乏大马力拖拉机和高质量深松器的蔗区,可以采用铧式犁深翻 50 cm+旋耕 25 cm 的耕整地方式,以达到增厚土壤耕层、提高甘蔗产量的目的。

参考文献 References

- [1] 廖平伟,张华,罗俊,等.我国甘蔗机械化收获现状的研究[J].农机化研究,2011,33(3):26-29
LIAO P W, ZHANG H, LUO J, et al. Study on the status of sugarcane harvest mechanization in China[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2011, 33(3): 26-29
- [2] 苏俊波,孔冉,罗炼芳,等.甘蔗机械化收获后的宿根性能分析[J].甘蔗糖业,2016,(6):22-28
SU J B, KONG R, LUO L F, et al. Analysis of sugarcane ratooning performance after mechanized harvest[J]. Sugarcane and Cane-sugar, 2016, (6): 22-28
- [3] 秦培钊,罗艺,米超,等.机械收割对不同种植行距宿根蔗苗期生长的影响[J].南方农业学报,2012,43(2):236-240
QIN P Z, LUO Y, MI C, et al. Effect of mechanical harvesting on shoot growth of ratoon cane with different row spacing[J]. Journal of Southern Agriculture, 2012, 43(2): 236-240
- [4] 陈桂芳,谭裕模,邢颖,等.适应甘蔗机械收获的不同种植行距和品种试验[J].甘蔗糖业,2014,(4):11-15
CHEN G F, TAN Y M, XING Y, et al. Study on different planting row spacing and sugarcane varieties adjusting to sugarcane mechanization harvesting[J]. Sugarcane and Cane-sugar, 2014, (4): 11-15
- [5] 李就好,谭中文,罗锡文,等.耕作和覆盖方式对旱地甘蔗生产的影响[J].农业机械学报,2004,35(5):70-73
LI J H, TAN Z W, LUO X W, et al. Effects of tillage and mulch methods on sugarcane production[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2004, 35(5):

- 70-73
- [6] 梁强, 谢金兰, 李毅杰, 等. 不同收获方式对蔗田土壤容重及甘蔗宿根出苗的影响[J]. 南方农业学报, 2014, 45(7): 1221-1224
LIANG Q, XIE J L, LI Y J, et al. Effects of different harvesting methods on soil bulk density and seedling roots of ratoon sugarcane[J]. Journal of Southern Agriculture, 2014, 45(7): 1221-1224
- [7] 郑超, 廖宗文, 谭中文, 等. 深松对雷州半岛甘蔗产量的影响及其作用机理研究[J]. 土壤通报, 2004, 35(6): 809-811
ZHENG C, LIAO Z W, TAN Z W, et al. Effect of deep ploughing on the yield of sugarcane in the Leizhou Peninsula[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2004, 35(6): 809-811
- [8] 廖青, 韦广泼, 刘斌, 等. 机械化深耕深松栽培对甘蔗生长及产量的影响[J]. 广西农业学报, 2010, 41(6): 542-544
LIAO Q, WEI G P, LIU B, et al. Effects of mechanized deep ploughing and scarification cultivation technology on growth and yield of sugarcane[J]. Guangxi Agricultural Sciences, 2010, 41(6): 542-544
- [9] 刀静梅, 樊仙, 赵俊, 等. 旱地甘蔗不同类型土壤各耕层水分特征常数分析——以开远、元江为例[J]. 西南农业学报, 2017, 30(2): 389-393
DAO J M, FAN X, ZHAO J, et al. Analysis of topsoil moisture feature of different soils on dry land sugarcane: Taken Kaiyuan and Yuanjiang as example[J]. Southwest China Journal of Agricultural Sciences, 2017, 30(2): 389-393
- [10] 吴晓莲, 林兆里, 张华. 不同土壤紧实度对甘蔗品种福农 39 号苗期生长的影响[J]. 广东农业科学, 2014, 41(19): 43-46
WU X L, LIN Z L, ZHANG H. Influence of soil density on seedling growth of sugarcane variety Funong 39[J]. Guangdong Agricultural Sciences, 2014, 41(19): 43-46
- [11] 丁昆仑, HANN M J. 耕作措施对土壤特性及作物产量的影响[J]. 农业工程学报, 2000, 16(3): 28
DING K L, HANN M J. Effects of soil management on soil properties and crop yield[J]. Transactions of the CSAE, 2000, 16(3): 28
- [12] 王小彬, 蔡典雄, 金轲, 等. 旱坡地麦田夏闲期耕作措施对土壤水分有效性的影响[J]. 中国农业科学, 2003, 36(9): 1044-1049
WANG X B, CAI D X, JIN K, et al. Water availability for winter wheat affected by summer fallow tillage practices in sloping dryland[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2003, 36(9): 1044-1049
- [13] 刘爽, 何文清, 严昌荣, 等. 不同耕作措施对旱地农田土壤物理特性的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2010, 28(2): 65-70
LIU S, HE W Q, YAN C R, et al. Effects of different tillage managements on soil physical properties in dryland[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2010, 28(2): 65-70
- [14] 张海林, 秦耀东, 朱文珊. 耕作措施对土壤物理性状的影响[J]. 土壤, 2003, 35(2): 140-144
ZHANG H L, QIN Y D, ZHU W S. Effects of tillage on soil physical properties[J]. Soils, 2003, 35(2): 140-144
- [15] 许淑青, 张仁陟, 董博, 等. 耕作方式对耕层土壤结构性能及有机碳含量的影响[J]. 中国生态农业学报, 2009, 17(2): 203-208
XU S Q, ZHANG R Z, DONG B, et al. Effect of tillage practices on structural properties and content of organic carbon in tilled soil[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2009, 17(2): 203-208
- [16] 汪洲涛, 苏炜华, 阙友雄, 等. 应用 AMMI 和 HA-GGE 双标图分析甘蔗品种产量稳定性和试点代表性[J]. 中国生态农业学报, 2016, 24(6): 790-800
WANG Z T, SU W H, QUE Y X, et al. Analysis of yield stability and test site representativeness of sugarcane trials using combined AMMI and HA-GGE biplot models[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2016, 24(6): 790-800
- [17] 陈宁宁, 李军, 吕薇, 等. 不同轮耕方式对渭北旱塬麦玉轮作田土壤物理性状与产量的影响[J]. 中国生态农业学报, 2015, 23(9): 1102-1111
CHEN N N, LI J, LYU W, et al. Effects of different rotational tillage patterns on soil physical properties and yield of winter wheat-spring maize rotation field in Weibei highland[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2015, 23(9): 1102-1111