

土壤压实对宿根甘蔗出苗及根系形成的影响

李毅杰¹, 梁强^{1*}, 董文斌¹, 陈泉^{2,3}, 刘晓燕¹, 谢金兰¹, 李长宁¹, 王维赞¹, 李杨瑞¹

(1. 广西农业科学院甘蔗研究所/中国农业科学院甘蔗研究中心/农业部广西甘蔗生物技术与遗传改良重点实验室/广西甘蔗遗传改良重点实验室, 广西南宁 530007; 2. 中国科学院西双版纳热带植物园, 云南昆明 650223; 3. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要:【目的】探明机械操作引起的土壤压实对宿根甘蔗出苗及根系形成的影响, 为优化甘蔗机械化栽培方法和评价适宜机械化栽培的甘蔗品种提供理论参考。【方法】试验采用双因素随机区组设计, 其中一个因子为碾压(机械碾压处理; 对照), 另外一个因子为甘蔗品种(ROC22、GT42、GT43、GT30、GT03-2287和GT98-296)。收获后调查农艺性状及根系的功能属性参数。【结果】机械碾压后, 10~20 cm土层容重增幅最大, 土壤紧实度随土层加深而增加, 在40 cm时处理和对照的土层压强趋于一致; GT42、GT43和GT98-296等品种の出苗数和株高均高于其它品种; 根系干重、根系长度、根系表面积和根系平均直径均不同程度下降, 根系干重变化幅度与其数值大小呈负相关; 所有参试品种一级根系比例增加, 二级、三级和四级根系的比例均不同程度下降。【结论】机械碾压增加蔗地土壤紧实度, 限制了宿根甘蔗的根系生长, 进而影响植株的生长。不同品种适应紧实胁迫的能力存在差异, 在使用大型收获机械进行甘蔗生产时应选用宿根出苗能力强且根系发达的品种。

关键词: 机械碾压; 土壤紧实胁迫; 宿根甘蔗; 出苗; 根系

中图分类号: S566.1 文献标识码: A

Effect of Mechanical Compaction on Seedling Emergence and Roots Formation of Ratoon Sugarcane

LI Yi-jie¹, LIANG Qiang^{1*}, DONG Wen-bin¹, CHEN Quan^{2,3}, LIU Xiao-yan¹, XIE Jin-lan¹, LI Chang-ning¹, WANG Wei-zan¹, LI Yang-rui¹

(1. Sugarcane Research Institute, Guangxi Academy of Agricultural Sciences/Sugarcane Research Center, Chinese Academy of Agricultural Science/Key Laboratory of Sugarcane Biotechnology and Genetic Improvement (Guangxi), Ministry of Agriculture, P. R. China/Guangxi Key Laboratory of Sugarcane Genetic Improvement, Guangxi Nanning 530007, China; 2. Xishuangbanna Tropical Botanical Garden, Chinese Academy of Sciences, Yunnan Kunming 650223, China; 3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract 【Objective】In order to provide theoretical reference for optimizing methods of sugarcane mechanized cultivation and suitable varieties evaluation, the experiment was conducted to study the effect of mechanical compaction on seedling emergence and roots formation of ratoon sugarcane. 【Method】The randomized block designed with two factors, one factor contained the mechanical compaction treatments and the control, and the other factor was consist of different varieties, which were ROC22, GT42, GT43, GT30, GT03-2287 and GT98-296. Agonomic characters and functional properties parameters of roots were investigated at post-harvest. 【Result】After mechanical roller compaction, the increase amplitude in soil bulk density was the highest at 10-20 cm depth, and soil compaction augmented with the increase of soil depth. The soil pressure of the treatment and the control tended to be consistent when the soil depth reached 40 cm. The number of seedling emergence and the plant height in GT42, GT43 and GT98-296 were higher than the other tested varieties. The dry weight, the length, the superficial area and the mean diameter of roots decreased in different degrees, respectively. The change range of the dry weight of roots was negative correlation with its numerical value. Though the proportion of the second order roots, the third order roots and the fourth order roots decreased in different degrees, respectively, the proportion of the first order roots increased in all tested varieties. 【Conclusion】The soil compaction increased after mechanical roller compaction, which limited the growth of roots and affected the growth of ratoon sugarcane. The ability of different varieties to adapt soil compaction stress was different. The varieties with strong ratoon seedling emergence ability and developed roots system should be selected when large harvest machines were used in sugarcane production.

compaction increased after mechanical roller compaction, which limited the growth of roots and affected the growth of ratoon sugarcane. The ability of different varieties to adapt soil compaction stress was different. The varieties with strong ratoon seedling emergence ability and developed roots system should be selected when large harvest machines were used in sugarcane production.

Key words: Mechanical compaction; Soil compaction stress; Ratoon sugarcane; Seedling emergence; Roots

收稿日期: 2017-05-19

基金项目: 广西农业科学院基本科研业务专项(桂农科2013Y M49); 广西农业科学院科技发展基金项目(2015JZ09); 广西农业科学院基本科研业务专项-团队项目(桂农科2015YT02); 广西农业科技重点项目(201419); 广西自然科学基金项目(2016GXNSFBA380206)

作者简介: 李毅杰(1984-), 男, 广西柳州人, 硕士, 助理研究员, 主要从事甘蔗农艺研究工作, E-mail: 18076561526@163.com, * 为通讯作者, E-mail: liangqiangde@163.com。

【研究意义】甘蔗是我国重要的糖料作物,也是广西的主要经济作物。多年来,广西甘蔗种植面积、产量一直居于全国首位,蔗糖业已成为广西支柱产业。随着农业机械化的迅速发展,尤其近年来大型、超大型拖拉机及配套机具在甘蔗生产中大范围推广使用,使甘蔗从种植到收获的整个生产过程的作业效率得到大幅度提升。然而,大型机械在田间作业时对土壤进行频繁负重碾压,势必对水、肥、气、热等环境因素造成严重破坏,给作物生长带来不利影响,从而导致作物减产。据前期调研结果,目前广西大部分采用机械收获的蔗地都是来年需要翻兜新种的地块,新植蔗采用机械收获的地块很少。机械收获时对蔗地进行碾压而造成的土壤紧实胁迫是限制宿根甘蔗出苗的重要因素,也是我国甘蔗机械化生产推广应用急需解决的问题。【前人研究进展】为探明土壤紧实胁迫对植物根系生长产生的影响,国内外学者进行了大量相关研究。在紧实的土壤中,植物根系生长速度变慢,根变短变粗,根量减少,空间分布以横向分布的增加为主,不仅根系伸展受到影响,而且根的生长速度和重量也受到显著影响^[1-8]。吴亚维等^[9]研究发现,随着土壤紧实度增加,根系的根系生长速度减慢,根系长度下降,而且生长根、吸收根以及总根量均减少。张玉屏等^[10]研究发现,土壤容重增加,抑制了水稻根系的生长,使根长度降低,根生长量和干重减少,且深层根系的数量和比例严重下降。李潮海等^[11]研究表明,当土壤容重超过 1.4 g/cm^3 时,会严重限制玉米根系的伸展,玉米的根系不能穿过容重 1.6 g/cm^3 的土壤,适宜玉米根系生长的土壤容重范围为 $1.2\sim 1.3\text{ g/cm}^3$ 。同一作物不同品种的根系对土壤紧实胁迫的反应也存在差异,Yu等^[12]研究发现,不同水稻品种之间根系穿透土壤的能力不同,当土壤压强超过 3447.5 Pa 时会抑制幼苗出土,在容重超过 $1.7\sim 1.8\text{ g/cm}^3$ 的轻质土壤或大于 $1.5\sim 1.6\text{ g/cm}^3$ 的粘质土壤上扎根困难。甘蔗不同品种的耐机械碾压能力不同,机械化收获对翌年宿根蔗发株力的影响因品种宿根性不同而存在显著差异,宿根性强的品种受影响小,宿根性差的品种受影响较大^[13],本研究前期开展的相关研究结果也表明不同收获方式对蔗田土壤容重及甘蔗宿根出苗具有不同的影响^[14]。【本研究切入点】已有的研究结果对进一步推动机械化收获的实施以及采取适宜的农艺管理技术措施具有重要作用,然而目前有关机械碾压引起的土壤压实对甘蔗根系参数、比例及其与品种相关性的研究鲜见报道。【拟解决的关键问题】通过对运输车碾压蔗地里的根系进行采集、测定相关参数和指标,初步

探明机械碾压下不同土层中土壤紧实度变化的特点,并对比分析不同甘蔗品种在碾压条件下宿根出苗及根系形成的差异,为优化甘蔗机械化栽培方法以及科学评价适宜机械化栽培的甘蔗品种提供理论参考。

1 材料与方法

1.1 试验材料

6个参试甘蔗品种分别为新台糖22号(ROC22)、桂糖42号(GT42)、桂糖43号(GT43)、桂糖30号(GT30)、桂糖03-2287(GT03-2287)和桂糖98-296(GT98-296)。

甘蔗田间运输车型号:乘龙中卡LZ3050RAH(4×2);参数:轴距3800mm;车厢长宽高4500mm×2300mm×800mm;车身长宽高6975mm×2490mm×2860mm;前轮距1940mm,后轮距1860mm;整车重量10t;轮胎数6个,轮胎9.00~20.00N。

1.2 试验地点概况

试验在南宁市隆安县丁当镇的广西农业科学院甘蔗研究所科研基地进行。隆安县位于广西西南部、右江下游两岸,地处东经 $107^{\circ}21'\sim 108^{\circ}6'$,北纬 $22^{\circ}51'\sim 23^{\circ}21'$,属亚热带季风气候,平均温度 $21.7\text{ }^{\circ}\text{C}$,年均无霜期361d,年均降雨量1227~1691mm,雨量多集中在6~8月,土壤类型以沙页岩赤红壤为主。

1.3 试验方法

于2014年4月16日使用甘蔗种植机进行播种,新植蔗于2015年3月9日人工砍收。试验采用双因素随机区组设计,其中一个因子为碾压(机械碾压处理;对照),人工砍收后用田间运输车对蔗垄和行沟进行碾压,车速和行走路线与常规机械收获相同,处理与对照的相邻区域设置10m的隔离区;另外一个因子为甘蔗品种(ROC22,GT42,GT43,GT30,GT03-2287和GT98-296),各品种重复3次,试验设5行区,行长10m,行距1.2m,小区面积 60 m^2 ,采用常规田间管理,各处理的管理水平相同。

1.4 测定项目及方法

1.4.1 土壤容重及土壤紧实度测定 2015年4月16日同时对土壤容重和土壤紧实度进行测定。

土壤容重采用环刀法进行测定:试验小区内按5点采样法,在土壤剖面0~10,10~20,20~30cm土层用容积为 100 cm^3 的环刀取土样带回室内烘干测定土壤容重。

容重计算公式: $d = [(W_1 - W_0) \times (1 - W\%)] / V$

式中: d 为土壤容重(g/cm^3), W_0 为环刀重量(g), W_1 为环刀与自然结构土壤总重量(g), $W\%$ 为以新鲜土样为基础的土壤含水量, V 为环刀容积(cm^3)。

土壤紧实度采用 TJSJ-750-IV 土壤紧实度测定仪进行测定。在试验小区随机选取 10 个点,测定位置距离蔗蔸 10~15 cm 处,测量深度分别为 10、15、20、25、30 和 35 cm。

1.4.2 出苗数、株高调查 于 2015 年 4 月 30 日对试验小区进行出苗数调查,同年 7 月 20 日进行株高调查,每小区随机选择 20 株,使用塔尺测量。

1.4.3 根系采样 ①田间采集根系样本。2015 年 10 月 12 日采用挖掘法进行根系样本采集。选择蔗茎分布较为均匀的行沟中部进行挖掘,挖掘槽的规格为:长 60 cm,宽 40 cm,高 20 cm,每个小区重复 3 次。根系样本用封口薄膜袋保存带回实验室清洗,同时对在槽与蔗行两侧对应的 60 cm 区域的甘蔗条数、株高以及茎径进行观测记录。②根系杂质分离及扫描成像。冲洗根系时把杂草根系及变黑根系残枝清除,吸水纸吸干水分后用 Canon SCAN 9000F MARK II 扫描仪进行扫描成像,分辨率为 600 dpi,数据格式为 TIFF。③数据获取。应用 WinRHIZO Pro 2009b 根系图像分析系统对所采集样本的根长 (Length)、表面积 (Superficial Area)、平均直径 (Mean Diameter) 等指标进行分析并获取数据。使用清除工具对杂质进行清除,而无法辨认的白根则用填充工具进行强化。

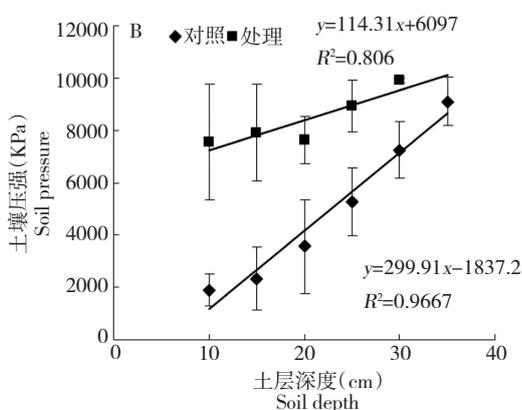
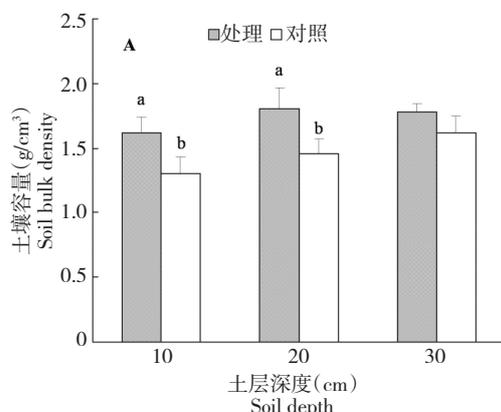
1.5 数据统计及分析

试验数据采用 Microsoft Office Excel 2003 和 DPS v14.10 软件进行统计分析,采用 Duncan's 新复极差法进行多重比较。

2 结果与分析

2.1 土壤容重和土壤紧实度的变化

由图 1-A 可知,在未碾压情况下,土壤容重随深



A. 土壤容重; B. 土壤紧实度; 不同小写字母表示相同土层深度的处理和对照的差异达显著水平 ($P < 0.05$)

A: Soil bulk density; B: Soil compaction; Bars with different superscript letters indicate significant differences at the $P < 0.05$ probability at the same soil depth

图 1 不同土层深度中土壤容重和土壤紧实度的变化

Fig. 1 The change of soil bulk density and soil compaction in different soil depth

度加深而增大 20~30 cm 土层的容重最大,平均值为 1.62 g/cm^3 。碾压处理后 0~20 cm 土层的容重与对照相比显著 ($P < 0.05$, 下同) 增大,平均值分别比对照增加 24.62% 和 24.14%,其中 10~20 cm 土层的容重最大,平均值为 1.80 g/cm^3 。说明机械碾压对 0~20 cm 土层产生的影响较大。

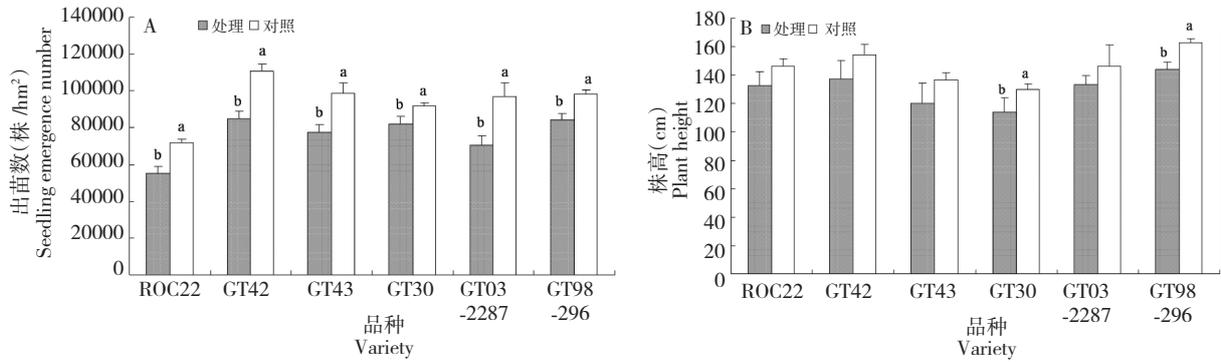
由图 1-B 可知,对照和处理的土壤压强与土层深度的相关系数较高,其中对照的 R^2 值高达 0.9667,说明机械碾压显著可增加蔗田的土壤紧实度。当土层垂直深度至 10 cm 时,对照的土壤压强平均为 1907 KPa,碾压处理的压强平均达到 7549 KPa,约为对照的 4 倍,说明机械碾压使土壤表层的紧实度急剧上升。在 30 cm 处,对照的土壤压强平均为 7255 KPa,碾压处理平均为 9895 KPa,处理比对照平均增加了 36.39%,说明随着土层的加深,处理与对照之间的差距逐渐减小,在 40 cm 处趋于一致,土壤紧实胁迫逐渐减弱。

2.2 机械碾压对宿根甘蔗出苗和株高的影响

由图 2 可知,碾压处理对宿根甘蔗的出苗和株高生长均产生了一定的抑制作用,不同品种受到的影响程度不同。碾压处理后各品种的出苗数量与对照相比均显著降低,差异均达到显著水平,下降幅度为 10.54%~27.55%;碾压处理后各品种的株高与对照相比均不同程度下降,下降幅度为 9.10%~12.19%。其中 GT30 和 GT98-296 的处理和对照差异达到显著水平。参试品种中,GT03-2287 和 ROC22 出苗受影响程度最大,它们的株高受影响却最小;GT30 出苗受影响程度最小,但其株高受影响最大。

2.3 机械碾压对甘蔗根系功能参数的影响

2.3.1 不同品种的根系功能参数 从不同处理后甘蔗根系功能参数表征可以看出(图 3)经碾压处



A. 出苗数; B. 株高

不同小写字母表示同一品种处理和对照之间的差异达显著水平 ($P < 0.05$)。下同

Bars with different superscript letters indicate significant differences at the $P < 0.05$ probability at the same variety. The same was applied in the subsequent figures

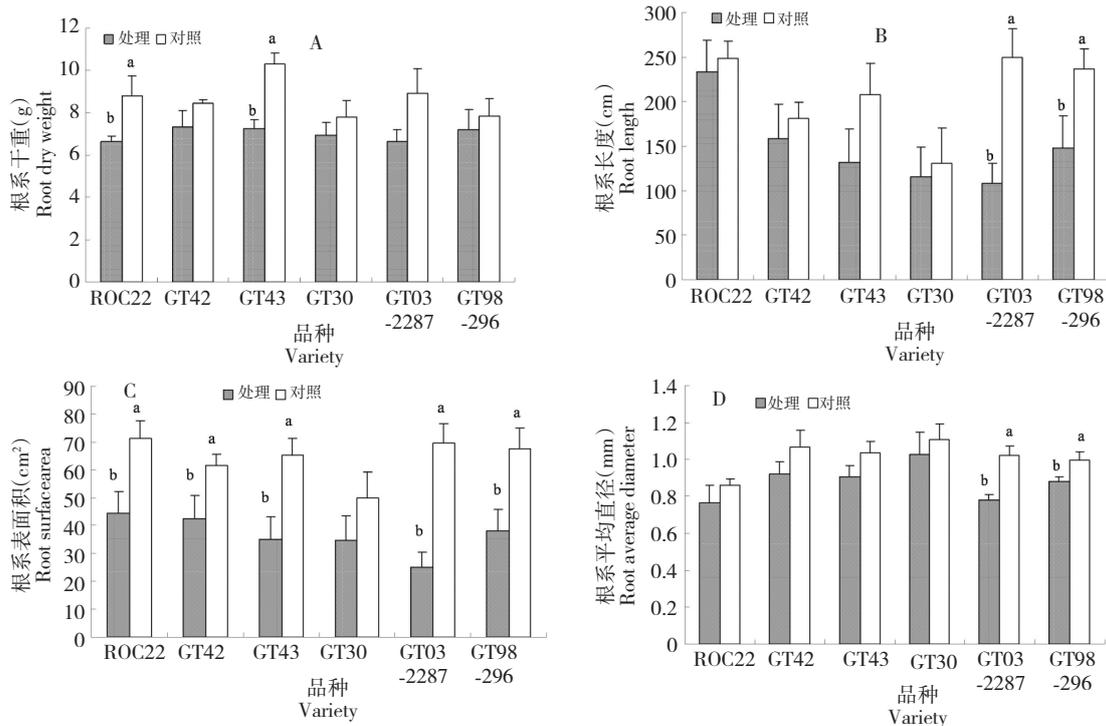
图2 机械碾压对宿根甘蔗出苗和株高的影响

Fig. 2 The effect of mechanical roller compaction on ratoon sugarcane seedling emergence and plant height

理后,ROC22 和 GT43 品种的根系干重均显著低于对照处理,其他品种的根系干重均少于对照处理,但差异均未达到显著水平;GT03-2287、GT98-296 品种的根系长度均显著短于对照处理,其他品种的根系长度均比对照处理呈下降状态,但差异均未达到显著水平;除 GT30 外,所有品种的根系表面积均显著少于对照处理,下降幅度(绝对值)由大至小为:GT03-2287 > GT43 > GT98-296 > ROC22 > GT42 > GT30;GT03-2287、GT98-296 品种的根系平

均直径均显著少于对照处理,其他品种的根系平均直径均少于对照处理,但差异均未达到显著水平。

2.3.2 相关性分析 对碾压处理后不同甘蔗品种根系功能参数变化关系进行分析比较。图4显示,在4个根系功能参数中,只有根系干重的变化与甘蔗品种本身参数大小相关度较高,两者呈负相关关系 $R^2 = 0.8061$ 。说明干重越大的甘蔗品种在碾压处理之后根系生长受到的抑制效应越大,而干重小的则受影响较小。根系长度、根系表面积和根系平

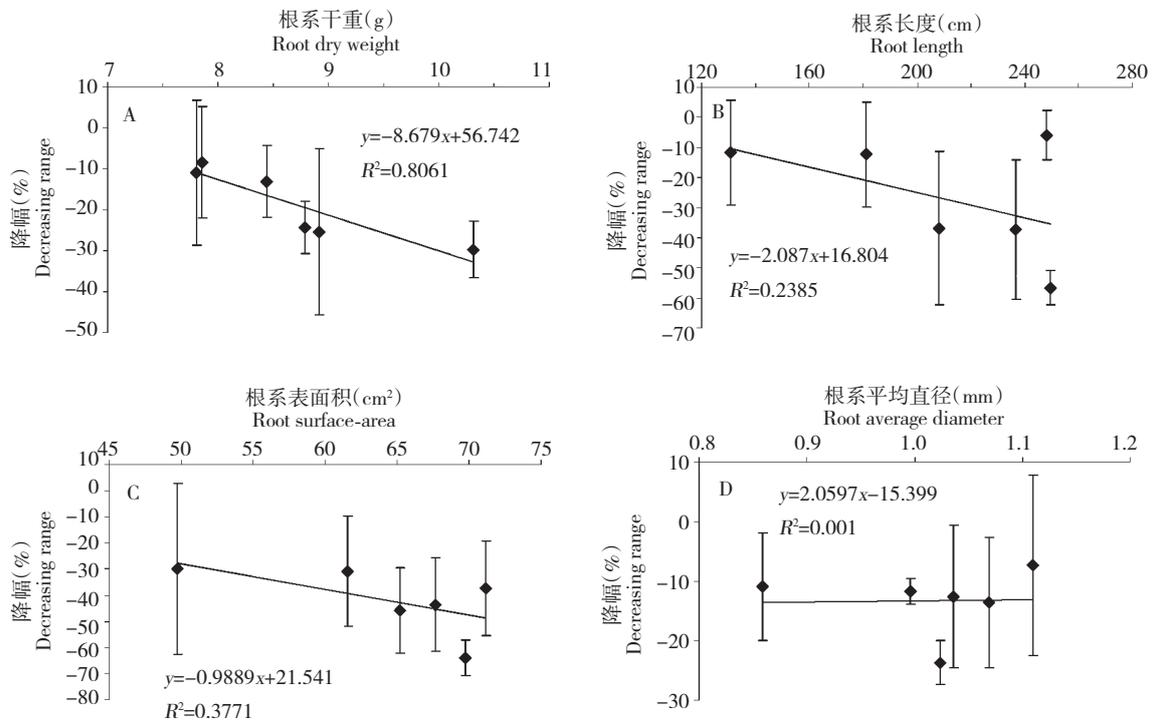


A. 根系干重; B. 根系长度; C. 根系表面积; D. 根系平均直径

(A) Root dry weight; (B) Root length; (C) Root surface-area; (D) Root average diameter

图3 机械碾压对甘蔗根系功能参数的影响

Fig. 3 The effect of mechanical roller compaction on root functional parameter of sugarcane



A. 根系干重; B. 根系长度; C. 根系表面积; D. 根系平均直径
(A) Root dry weight; (B) Root length; (C) Root surface-area; (D) Root average diameter

图4 机械碾压后不同甘蔗品种间根系功能参数的相关性

Fig. 4 The correlation of root functional parameters in different sugarcane varieties after mechanical rolling

均直径的变化幅度与其参数大小相关度较小, R^2 值分别为 0.2385、0.3771 和 0.001。

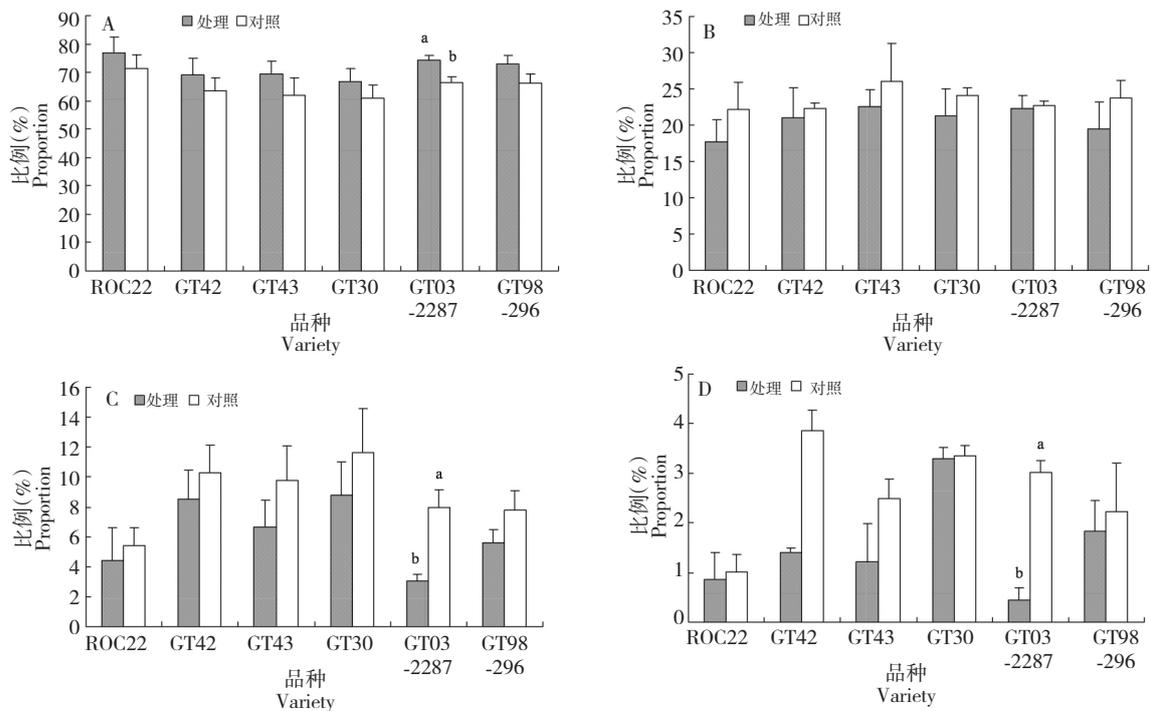
2.4 机械碾压对不同甘蔗品种根系直径及比例的影响

根据直径大小可以把根系分成 4 类: 一级: $0 \text{ mm} < \text{直径} \leq 1.00 \text{ mm}$; 二级: $1.00 \text{ mm} < \text{直径} \leq 2.00 \text{ mm}$; 三级: $2.00 \text{ mm} < \text{直径} \leq 3.00 \text{ mm}$, 四级: 直径 $> 3.00 \text{ mm}$ 。图 5 显示, ROC22 在未碾压对照中的一级根系比例最高, 达到 77.03%, 而其四级根系所占比例最低, 仅为 1.02%。碾压处理后所有品种的一级根系比例明显上升, 上升幅度由大至小为: $\text{GT43} > \text{GT03-2287} > \text{GT98-296} > \text{GT30} > \text{GT42} > \text{ROC22}$, 平均分别比对照增加 12.54%、11.94%、10.27%、9.41%、8.50% 和 7.91%, 其中 GT03-2287 品种一级根系比例显著高于对照处理。所有参试品种的二级、三级、四级根系比例均不同程度减少, 品种间存在差异; 所有品种二级根系比例与对照处理相比, 差异均不显著; GT03-2287 三级根系比例显著低于对照处理, 减少了 61.99%, 其余品种与对照处理相比差异均不显著; 四级根系比例, GT03-2287 的处理与对照相比显著降低, 平均减少了 85.43%, GT42 和 GT43 与对照相比也分别减少了 63.56% 和 51.09%, 但差异并未达到显著水平。

3 讨论

甘蔗根系较发达, 主要集中在 30 ~ 40 cm 的土层, 土壤深层的根系生长由较强的遗传性状控制^[15]。本研究结果表明, 机械碾压对蔗地 0 ~ 40 cm 土层土壤容重和紧实度的影响最大, 且对甘蔗根系生长产生了显著影响, 这也直接体现在甘蔗根系功能参数的变化方面。碾压处理后, 根系干重下降, 根系长度缩短, 根系表面积减小, 根系平均直径减小, 整个根系生长受到明显抑制。这与前人研究基本一致, 但在根系平均直径变化上却不同, 前人认为在土壤紧实胁迫条件下, 玉米和黄瓜的根系平均直径均显著增加, 加粗生长得到激发, 这与本研究结果不同^[3, 16-17]。本研究还发现, 机械碾压后根系干重的变化与甘蔗品种本身参数大小相关度较高, 两者呈负相关关系。本研究根据根系直径大小将根系分成了 4 类, 从不同类别根系所占的比例分布来看, 机械碾压后只有一级根系的比例比对照增加, 而二、三、四级根系比例均不同程度下降, 体现为细根增多, 粗根减少。说明甘蔗根系在机械碾压后可以通过减小自身直径大小及调节根系比例从而适应土壤紧实环境条件下的逆境胁迫。

土壤紧实胁迫不但与作物类型有关, 也与品种的基因型有关^[18-19]。不同甘蔗品种对环境的适应



A. 一级根系; B. 二级根系; C. 三级根系; D. 四级根系

(A) Level I; (B) Level II; (C) Level III; (D) Level IV

图5 机械碾压后不同甘蔗品种根系直径的变化

Fig. 5 The change of root diameter in different sugarcane varieties after mechanical rolling

能力是存在一定的差异的,前人在耐旱、耐寒、耐涝等方面已经做了较为全面的研究,然而,由于在甘蔗根系样品采集方法和过程中存在一定困难,导致紧实逆境胁迫下根系生长的相关研究进展比较缓慢。据本研究团队前期研究结果表明,品种、时间以及碾压之间都存在互作效应^[20]。本试验结果表明,机械碾压造成的土壤紧实胁迫通过对甘蔗地下部根系产生影响,进而影响植株的宿根出苗和地上部的生长,且不同品种之间有差异。碾压处理前,对照 ROC22 的宿根出苗数仅为 71 958 株/hm²,与其它品种进行碾压处理后的出苗数相当甚至略低。机械碾压后,GT03-2287、ROC22、GT42 和 GT43 的宿根出苗数受影响程度较大,与对照相比均降低了 20% 以上,GT42 处理的出苗数与对照相比虽然减少,但仍然是所有品种中出苗最多的。出苗数量受到影响较小的是 GT98-296 和 GT30,这 2 个品种在处理后的宿根出苗能力较强。碾压处理后各品种的株高与对照相比均不同程度下降,其中 GT30 和 GT98-296 的处理和对照差异达到显著水平。分析根系功能属性参数可知,GT03-2287 的处理与对照相比所有参数均显著降低,根系生长受机械碾压的影响最大。综合考虑,ROC22 和 GT03-2287 的宿根性和耐机械碾压能力较其它参试品种差。

根据相关研究结果表明,机械化收获对甘蔗宿

根发株的不良影响主要是机械对蔗行碾压带来的,尤其是收集运输车对蔗行的碾压^[14-20]。因此,本试验以常规生产为对照,只针对运输收集车对蔗地碾压后的情况进行研究,统一采取人工收获的方式,结果可能与收割机收获有所区别。此外,甘蔗生长期较长,根系的生长和发育特征与其它作物及盆栽试验不同,机械碾压对宿根甘蔗出苗及根系形成的影响有待多年多点试验的进一步论证。机械碾压除了造成蔗田土壤物理结构发生变化之外,化学和生物性状如何发生变化还需要进一步研究探讨,如碳氮比、根区速效 N、K、土壤动物、土壤微生物活动和根瘤菌固氮活性等。减少机械化收获过程中对蔗行的碾压有利于宿根蔗的生长,不仅要求种植行距与收获机相匹配,也要求运输车轮距与种植行距相匹配^[20]。宿根蔗应及早破垄松蔸,改善土壤通透性,使根系尽早获取生长的空间,促进根系生长^[14]。此外,机械收获配套碎叶还田技术,也能减小机械收获对宿根蔗发株的影响,有利于提高单茎重和增加有效茎数^[13]。

4 结论

机械碾压处理之后,蔗田耕作层土壤紧实度显著增加,并随土层的加深作用效果逐渐减小;甘蔗宿根出苗数量减少,根系干重、长度、表面积、平均直径

等参数均不同程度降低;宿根能力强的甘蔗品种受土壤紧实胁迫的影响小于宿根能力弱的甘蔗品种。

参考文献:

- [1]王 群,李潮海,李全忠,等. 紧实胁迫对不同土壤玉米根系时空分布及活力的影响[J]. 中国农业科学,2011,44(10): 2039-2050.
- [2]刘晚苟,山 仑,邓西平. 植物对土壤紧实度的反应[J]. 植物生理学通讯,2001,37(3): 254-260.
- [3]刘晚苟,山 仑,邓西平. 不同土壤水分条件下土壤容重对玉米根系生长的影响[J]. 西北植物学报,2002,22(4): 831-838.
- [4]郭俊伟. 土壤容重对玉米生长的影响[J]. 陕西农业科学,1996(4): 25-26.
- [5]李潮海,周顺利. 土壤容重对玉米苗期生长的影响[J]. 华北农学报,1994,9(2): 49-54.
- [6]Hamza M A, Anderson W K. Soil compaction in cropping systems: a review of the nature, causes and possible solutions[J]. Soil & Tillage Research, 2005, 82(2): 121-145.
- [7]Paul W U, Thomas C K. Soil compaction and root growth: A review [J]. Agronomy Journal, 1994, 86(5): 759-766.
- [8]Oussible M, Crookston R K, Larson W E. Subsurface compaction reduces the root and shoot growth and grain yield of wheat[J]. Agronomy Journal, 1992, 84(1): 34-38.
- [9]吴亚维,马锋旺,邵养军. 土壤紧实度对楸子幼苗根系生长及活力的影响[J]. 贵州农业科学,2009,37(3): 118-120.
- [10]张玉屏,朱德峰,林贤青,等. 田间条件下水稻根系分布及其与土壤容重的关系[J]. 中国水稻科学,2003,17(2): 141-144.
- [11]李潮海,李胜利,王 群,等. 下层土壤容重对玉米根系生长及吸收活力的影响[J]. 中国农业科学,2005,38(8): 1706-1711.
- [12]Yu L X, Ray J D, O'Toole J C, et al. Use of wax-petrolatum layers for screening rice root penetration[J]. Crop Science, 1995, 35(3): 684-687.
- [13]陈超君,梁 和,何章飞,等. 甘蔗机械收获对蔗菹质量和宿根蔗生长影响初探[J]. 广东农业科学,2011,38(23): 26-30.
- [14]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.
- [15]Laclau P B, Laclau J P. Growth of the whole root system for a plant crop of sugarcane under rainfed and irrigated environments in Brazil [J]. Field Crops Research, 2009, 114(3): 351-360.
- [16]王 群. 土壤紧实胁迫对玉米根土系统及其生长发育的影响[D]. 河南农业大学博士学位论文,2015: 7-8.
- [17]王德玉,孙 艳,郑俊鸾,等. 土壤紧实胁迫对黄瓜根系生长及氮代谢的影响[J]. 应用生态学报,2013,24(5): 1394-1400.
- [18]Gemtos T A, Goulas C, Lellis T. Sugar beet genotype response to soil compaction stress[J]. European Journal of Agronomy, 2000, 12(3-4): 201-209.
- [19]Arvidsson J, Håkansson I. Response of different crops to soil compaction-Short-term effects in Swedish field experiments [J]. Soil & Tillage Research, 2014, 138: 56-63.
- [20]杨荣仲,梁 强,桂意云,等. 机械化收获对甘蔗宿根发株的影响[J]. 西南农业学报,2014,27(5): 2195-2202.

(责任编辑 陈 格)