

机收压实对宿根蔗产量及根系生长和内源激素含量的影响

刘晓燕, 梁强*, 李毅杰, 庞天, 宋修鹏, 李杨瑞, 王维赞**

广西农业科学院甘蔗研究所/农业农村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

摘要: 为探明甘蔗机械收获后的土壤压实效应对宿根蔗生长的影响以及根系中内源激素的动态变化规律, 以广西蔗区糖料蔗主栽品种桂糖 42 号作为研究对象, 设计了机收时运输车碾压植蔗行和碾压行间 2 种处理方式, 以人工砍收作为对照。结果表明: 在宿根蔗苗期阶段, 碾压处理后植蔗行和行间土表以下 0~50 cm 的土壤紧实度均大幅升高, 其中 0~10 cm 区域增幅最大, 随着土层加深, 土壤紧实度增幅逐渐减小; 至伸长期后, 植蔗行中土壤 0~30 cm 纵向区域的紧实度与对照无显著差异, 但 30~50 cm 及行间 0~50 cm 纵向区域的紧实度仍显著高于对照。在农艺及产量性状方面, 碾压植蔗行使宿根蔗发株率显著减少 42.0%, 12 月株高降低 19.4%, 有效茎数减少 26.1%, 蔗茎产量减产 36.9%, 而 11 月、12 月和 1 月蔗糖分含量分别比对照提高 1.40、0.75 和 0.58 个百分点, 碾压行间处理的株高、茎径、有效茎数和产量与对照相比均无显著差异。在根系形态及内源激素水平上, 机收碾压植蔗行处理的根系干重和根长分别减少 9.12% 和 10.72%, 根总表面积和总体积也显著下降, 而机收碾压行间的根系形态指标与对照相比无显著差异。压实处理后甘蔗根系中的 IAA、GA₃、ZR 含量均不同程度降低, IAA/ABA、GA₃/ABA、ZR/ABA 也有同样表现, 而 ABA 含量则显著升高; 根系的内源激素含量、比值、根系形态及蔗茎产量之间存在一定相关性, IAA、GA₃、IAA/ABA、GA₃/ABA 与根系干重、根长、株高、有效茎数呈正相关, ZR 和 ABA 则呈负相关。综上, 机收碾压可使蔗田土壤紧实度显著增加, 使根系内源激素水平发生改变, 进而影响甘蔗根系生长和产量, 不同处理的减产效应差异显著, 即压实植蔗行与压实行间相比, 后者可显著降低压实对宿根蔗生长的影响。

关键词: 宿根蔗; 机械压实; 产量; 根系; 内源激素

中图分类号: S566.1 文献标识码: A

Effect of Machincal Harvesting on Soil Compaction, Crop Root Growth, Hormone Content and Yield of Sugarcane

LIU Xiaoyan, LIANG Qiang*, LI Yijie, PANG Tian, SONG Xiupeng, LI Yangrui, WANG Weizan**

Sugarcane Research Institute, Guangxi Academy of Agricultural Sciences / Key Laboratory of Sugarcane Biotechnology and Genetic Improvement (Guangxi), Ministry of Agriculture and Rural Affairs / Guangxi Key Laboratory of Sugarcane Genetic Improvement, Nanning, Guangxi 530007, China

Abstract: The effects of soil compaction caused by the mechanical harvesting of sugarcane variety Guitang 42 on growth and the content of endogenous hormones of roots were studied. The results showed that at the seedling stage, the compaction of 0–50 cm soil layer in the planting row and in the inter-row space increased greatly in mechanically harvested plots compared to the manual harvesting (control), with the highest compaction occurring in the top 0–10 cm layer. There was no significant difference in the compactness of 0–30 cm soil layer in the planting row between mechanically and manually harvested plots, but the compactness of 30–50 cm layer in the inter-row space was significantly higher in the mechanically harvested plots than that in the control. Mechanical harvesting significantly reduced the plant

收稿日期 2022-08-02; 修回日期 2022-10-11

基金项目 国家自然科学基金项目 (No. 32201910); 广西农业科学院基本科研业务专项 (桂农科 2021YT002); 来宾市科学研究与技术开发项目 (来科转 211824)。

作者简介 刘晓燕 (1982—), 女, 硕士, 助理研究员, 研究方向: 甘蔗栽培; *同等贡献作者: 梁强 (1981—), 男, 硕士, 副研究员, 研究方向: 甘蔗栽培。**通信作者 (Corresponding author): 王维赞 (WANG Weizan), E-mail: wwz003411@126.com。

growth rate, plant height, millable stalk number and cane yield by 42.0%, 19.4%, 26.1% and 36.9%, respectively, compared to the control. However, sucrose content in the mechanised crop increased by 1.40, 0.75 and 0.58 % compared with the control. There was no significant difference in plant height, stem diameter, millable stalk number and yield between RCC and control. Root morphology, root dry weight and root length decreased by 9.12% and 10.72%, respectively, and total root surface area and total root volume significantly decreased, while there was no significant difference between mechanized compaction and control. The endogenous content of hormone IAA, GA₃ and ZR and the levels in relation to that of ABA (IAA/ABA, GA₃/ABA and ZR/ABA) in sugarcane roots grown in compacted soil decreased to varying degrees, compared to that of the control. The root ABA content significantly increased in compacted soil. IAA, GA₃, IAA/ABA and GA₃/ABA were positively correlated with root dry weight, root length, plant height and millable stalk number, while ZR and ABA were negatively correlated. In conclusion, mechanical compaction significantly increased soil compactness of sugarcane field, and greatly decreased the growth and yield composition of sugarcane root system.

Keywords: ratoon sugarcane; mechanical compaction; yield; roots; endogenous hormone

DOI: 10.3969/j.issn.1000-2561.2023.10.013

甘蔗机械化收获能够大幅提高工作效率、减轻劳动强度、降低生产成本,是提升蔗糖产业竞争力的一个关键措施。然而我国的甘蔗机械化收获程度仍比较低,2020/2021年榨季机收率仅为5.29%,成为甘蔗全程机械化的薄弱环节^[1]。目前影响机械化收获普及的因素主要有地形环境、雨水天气、农机投入、种植模式、糖厂扣杂和田间损失等,其中机收机械对蔗地的碾压从而影响宿根甘蔗的生长和产量也是重要因素之一^[2]。因此,研究机收压实对宿根蔗生长的影响及甘蔗对压实胁迫的生理响应机制,可为甘蔗机械收获提供农艺及生理代谢的理论基础,对机械收获的应用推广具有重要意义。

关于土壤压实,国内外学者已从土壤理化性质、土壤微生物、作物根系和产量等进行了多方面研究,研究结果显示,土壤压实程度与农业机械使用存在显著相关关系,土壤压实程度随着农业机械重量、作业次数的增加而增加^[3-4]。田间作业时机械轮胎对土壤的压实,会导致土壤物理结构发生改变,造成土壤贯穿阻力和容重增大,土壤通气性和水渗透能力下降^[5-6],影响养分在土壤中的移动及有机碳、氮的矿化等^[7-8],改变土壤生物的生存环境,导致土壤微生物群落和数量发生变化^[9];土壤的理化性状和微生态环境的改变,直接影响植物的根系形态、分布和生理代谢,进而影响地上部的生长^[10-12]。杨荣仲等^[13]研究发现,在甘蔗机械化收获过程中,收割机和收集车碾压对宿根蔗发株造成明显不良影响,不仅发株数量减少,而且生长势变差。梁强等^[14]和李毅杰等^[15]的研究结果显示,甘蔗机械收获碾压行间使

土壤容重明显增加,对甘蔗根系的生长产生限制作用,不同甘蔗品种耐机械碾压能力不同。目前关于甘蔗机收压实的研究大多集中在其对宿根蔗发株、根系形态、产量和品质的影响上,对生理代谢影响的研究比较少。本研究以广西主栽品种桂糖 42 号为研究对象,通过大田机收压实处理,明确机收碾压对宿根蔗生长的影响,探讨甘蔗对土壤压实胁迫的生理响应,以期为我国蔗田土壤机械压实研究和甘蔗机械化收获的应用推广提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料

试验地点位于广西隆安县丁当镇,土壤类型为砂质壤土。试验地块土壤 pH 5.5、有机质含量为 22.7 g/kg、全氮含量为 0.126%、全磷含量为 0.080%、全钾含量为 0.74%、水解性氮含量为 97.0。供试材料为广西蔗区糖料蔗主栽品种桂糖 42 号 (GT42)。试验采用区组排列设计,5 行区,行长 10 m,行距 1.2 m,小区面积 60 m²,3 次重复。

1.2 方法

1.2.1 试验设计 新植蔗于 2020 年 3 月种植,2021 年 3 月收获时采用凯斯 4000 型切段式收割机收获甘蔗,然后用乘龙中卡用运输车 (总重 10 t) 沿着种植行方向将部分小区的蔗行和行间均匀碾压 1 遍,碾压蔗行为处理 A,碾压行间为处理 B,以人工收获的小区作为对照 (蔗行 CK₁、行间 CK₂)。

1.2.2 项目测定 (1) 土壤紧实度。分别在宿根蔗苗期 (2021 年 4 月)、伸长期 (2021 年 8 月)

和成熟期（2021 年 12 月）用 TJSD-750-IV 数显型土壤紧实度仪测定不同小区蔗行和行间的土壤紧实度，测定土层范围 0~50 cm，每 10 cm 记录一次数据，每个小区测定 5 个点，取平均值。（2）甘蔗产量性状及蔗糖分。在甘蔗的苗期调查发株率，伸长期调查株高，成熟期调查株高、茎径、有效茎数，收获时采用人工砍收试验小区，并称量蔗茎产量。于 2021 年 11、12 月和 2022 年 1 月采集样品测定甘蔗蔗糖分含量。（3）甘蔗根系形态及生理指标。在宿根蔗成熟期分别在不同小区选取植株分布均匀的蔗行，挖取垄行和两边行间的根系，挖掘槽规格，垄行：长 120 cm、宽 40 cm、深 40 cm，行间：长 120 cm、宽 40 cm、深 20 cm，每个小区采集 3 个点。应用根系扫描仪（Canon SCAN 9000F MARK II）和图像分析软件（WinRHIZO Pro 2009b）扫描分析根系的根长、直径、体积和根表面积，并称量根系干重。在甘蔗苗期、伸长期和成熟期分别采集根系根尖部 5 cm 的根段，采用酶联免疫吸附法测定内源激素（ABA、IAA、GA₃、ZR）含量。

1.3 数据处理

采用 Excel 2007 和 DPS v18.10 软件进行统计分析，用 Duncan's 法进行多重比较。

2 结果与分析

2.1 机收压实对土壤紧实度的影响

由图 1 可知，甘蔗机收压实后苗期蔗行和行间的土壤紧实度均显著增加，土壤紧实度随着土层的深度逐渐增大，机收压实的土壤紧实度与人工收获（CK）相比，蔗行 0~10、10~20、20~30、

30~40、40~50 cm 土层的紧实度分别是 CK 的 4.02、2.95、2.76、1.99 和 1.60 倍；行间各土层的紧实度分别是 CK 的 2.83、2.32、1.26、1.22、1.20 倍，可见机收压实对 0~50 cm 深度的土壤紧实度均有影响，其中 0~10 cm 深度土壤的紧实度增幅最大，随着土层加深，土壤紧实度增幅逐渐减小。甘蔗伸长期，蔗行 0~20 cm 深度的土壤紧实度与对照无显著差异，30~50 cm 深度的土壤紧实度比对照增加 10.0%~13.4%，行间各土层的紧实度分别比对照增加 5.6%~45.4%，差异均达到显著水平；甘蔗收获期，蔗行 0~30 cm 深度的土壤紧实度与对照无显著差异，30~50 cm 深度的土壤紧实度分别比对照增加 12.5%~16.9%，行间各土层的紧实度分别比对照增加 9.24%~29.3%，差异均达到显著水平。说明在甘蔗生长中后期，压实蔗行 0~30 cm 深度的土壤紧实度胁迫得到一定修复，而 30 cm 以下深度及行间的土壤紧实胁迫持续存在。

2.2 机收压实对宿根蔗农艺性状及产量和蔗糖分的影响

由表 1 可知，与人工收获相比，机收压实蔗行后宿根蔗的发株率减少 42.0%，6 月、12 月甘蔗株高分别降低 28.9%、19.4%，茎径增大 6.1%，有效茎数减少 26.1%，蔗茎产量减产 36.9%，差异均达到显著水平；而机收压实行间处理的宿根蔗，发株率增加 28.0%，显著高于对照，而株高、茎径、有效茎数和产量均与对照无显著差异。蔗糖分含量分析结果表明，机收压实蔗行处理的甘蔗蔗糖分含量在 11 月、12 月和 1 月分别比对照提高 1.40、0.80 和 0.62 个百分点；机收压实行间

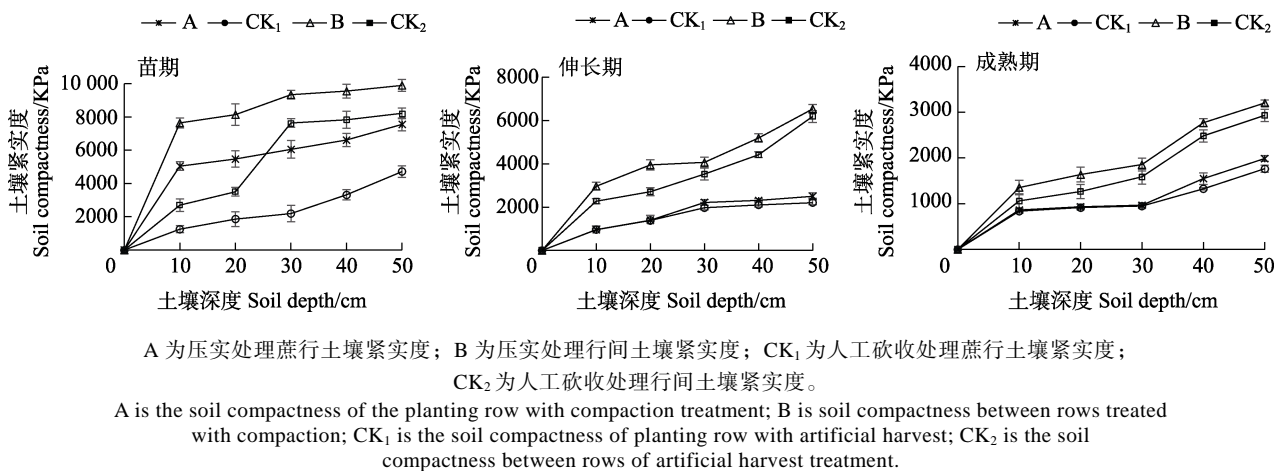


图 1 不同生育期土壤紧实度的变化

Fig. 1 Changes of soil compactness at different growth stages

表 1 机收压实下宿根蔗的农艺性状、产量和蔗糖分

Tab. 1 Agronomic characters, yield and sucrose content of ratoon sugarcane under mechanical compaction

处理 Treatment	苗期 Seedling stage	伸长期 Jointing stage	成熟期 Mature stage			蔗糖分含量 Sucrose content/%			
	发株率 Seedling rate/%	6 月株高 Plant height/cm	12 月株高 Plant height/cm	茎径 Stalk diameter/cm	有效茎数 Number of canes	产量 yield/(t·hm ⁻²)	11 月 November	12 月 December	1 月 January
A	39.5±4.5 ^c	27±4.0 ^b	249±6.2 ^b	3.12±0.02 ^a	37416±2057.8 ^b	39.5±4.5 ^c	16.15±0.06 ^a	16.74±0.13 ^a	17.04±0.07 ^a
B	87.2±4.1 ^a	43±3.1 ^a	304±8.5 ^a	3.02±0.06 ^b	51195±4027.5 ^a	87.2±4.1 ^a	15.06±0.01 ^b	15.99±0.12 ^b	16.46±0.04 ^b
CK	68.1±4.5 ^b	38±5.8 ^a	309±1.1 ^a	2.94±0.03 ^b	50663±1188.1 ^a	68.1±4.5 ^b	14.75±0.04 ^c	15.94±0.03 ^b	16.42±0.03 ^b

注：不同小写字母表示处理间差异显著 ($P<0.05$)。

Note: Different lowercase letters indicate significant difference among treatments ($P<0.05$).

处理的甘蔗蔗糖分含量分别比对照提高 0.31、0.05 和 0.04 个百分点。说明机收碾压蔗行时对宿根蔗农艺性状、产量和蔗糖分的影响较大，碾压行间时对宿根蔗的生长影响较小。压实蔗行处理的甘蔗有效茎数显著减少，在同等的单位面积上，有利于植株获得充足的光照和养分，因此蔗糖分含量较高。

2.3 机收压实对宿根蔗根系生长的影响

由表 2 可知，蔗行根系的干重、根长、总表面积、总体积和直径显著高于行间根系，根系干重占根系总重量的 90% 以上，行间的根系干重占

根系总重量不到 10%。机收压实蔗行的根系干重和根长分别减少 9.12% 和 10.72%，根总表面积和总体积显著下降，而根系平均直径小于对照处理，但差异未达到显著水平。机收压实行间的宿根蔗根系，蔗行和行间的根系干重、根长、总表面积、总体积和平均直径均小于对照，但差异未达到显著水平。可见，宿根蔗的根系主要分布在蔗行，行间的根系分布较少，机收压实产生的土壤紧实度胁迫可对蔗行根系的伸长产生限制作用，导致根系量减少。

表 2 机收压实下甘蔗的根系形态

Tab. 2 Root morphology of sugarcane under mechanical compaction

处理 Treatment	采样部位 Sampling site	干重 Dry weight/g	根长 Root length/cm	表面积 Surface area/cm ²	体积 Volume/cm ³	直径 Diameter/mm
A	蔗行	7.67±0.72 ^b	4344±106.2 ^b	1144±87.3 ^b	24.23±1.20 ^b	0.85±0.15 ^a
B		8.70±0.07 ^a	4918±96.6 ^a	1306±69.9 ^a	27.84±1.14 ^a	0.87±0.05 ^a
CK		8.44±0.74 ^a	4866±88.3 ^a	1299±100.1 ^a	29.64±2.19 ^a	0.89±0.12 ^a
A	行间	0.60±0.10 ^c	240±18.5 ^c	54±1.8 ^c	0.93±0.11 ^c	0.63±0.09 ^b
B		0.65±0.13 ^c	247±11.9 ^c	62±2.1 ^c	1.01±0.10 ^c	0.60±0.17 ^b
CK		0.73±0.14 ^c	274±16.5 ^c	74±1.4 ^c	1.08±0.14 ^c	0.69±0.13 ^b

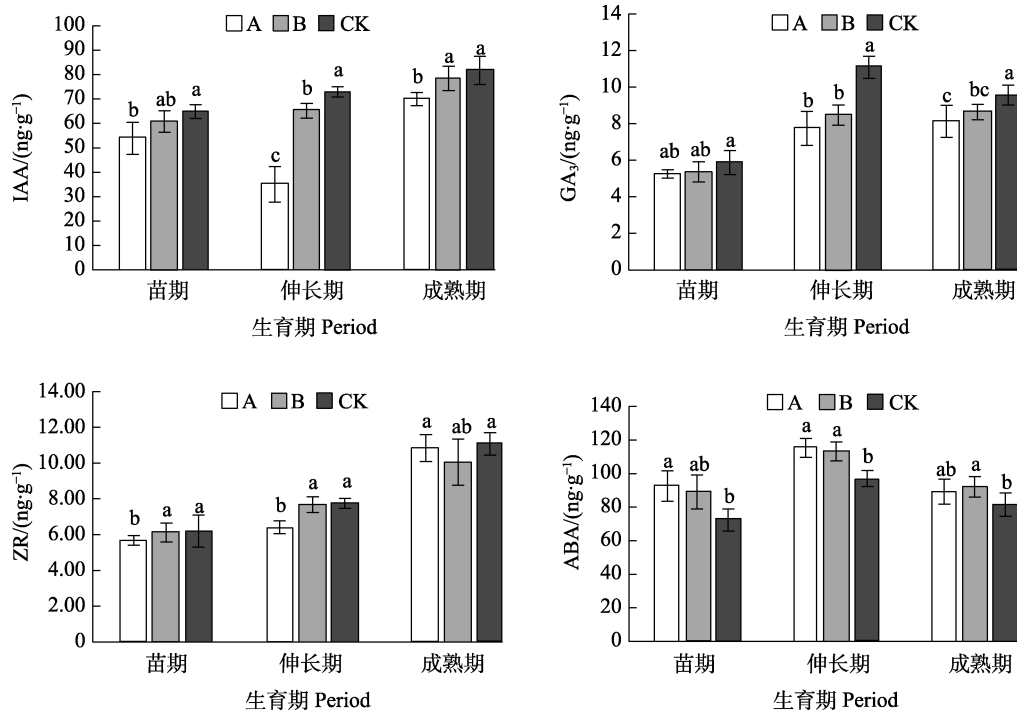
注：不同小写字母表示处理间差异显著 ($P<0.05$)。

Note: Different lowercase letters indicate significant difference among treatments ($P<0.05$).

2.4 机收压实对宿根蔗根系内源激素含量的影响

植物内源激素 IAA、GA₃、ZR 和 ABA 对植物的生长发育具有重要的调控作用，可调节细胞的分裂、伸长和分化从而影响植物的生根、发芽和脱落等。从图 2 可以看出，机收压实后根系的 IAA、GA₃、ZR 和 ABA 含量在不同生育期均呈现出相似的变化趋势，与对照相比，压实处理根系的 IAA、GA₃、ZR 含量不同程度降低，ABA 含量则升高。其中 A 处理的 IAA 含量分别降低 16.34%、51.74% 和 14.27%，差异显著，B 处理的 IAA 含量分别降低 6.30%、10.33% 和 4.07%，差

异不显著；A 处理的 GA₃ 含量分别降低 10.10%、30.11% 和 14.72%，B 处理的 GA₃ 含量分别降低 8.69%、23.51% 和 9.75%，差异均达到显著水平；A 处理的 ZR 含量分别降低 8.24%、17.61% 和 2.22%，B 处理的 ZR 含量分别降低 0.81%、1.10% 和 9.10%，但除伸长期以外，其他时期的差异均不显著；A 处理不同时期的 ABA 含量分别比对照提高 27.01%、19.06% 和 9.52%，B 处理的 ABA 含量分别比对照提高 22.25%、16.47% 和 13.18%，差异均达到显著水平。说明机收压实对甘蔗根系的 IAA、GA₃ 和 ABA 的影响较大，特别在压实蔗行时，这几种内源激素的变化幅度更大。



不同小写字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$)。

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

图 2 机收压实下根系的内源激素含量

Fig. 2 Endogenous hormone content in roots under mechanical compaction

IAA、GA₃、ZR 和 ABA 在植物生长发育的不同时期均有其独特的作用，此外，还能互相促进或抑制，相互协调地调控植物的生长发育。从图 3 可以看出，在甘蔗的不同生育期，根系 IAA/ABA、GA₃/ABA、ZR/ABA 的比值表现为在紧实度高的土壤中要显著小于紧实低的土壤，其中 A 处理根系 IAA/ABA 比值分别比对照低 34.13%、59.46%和 21.72%，GA₃/ABA 比值分别比对照低 29.21%、41.30%和 22.13%，ZR/ABA 比值分别比对照低 27.75%、30.80%和 10.72%；IAA/ZR 比值在苗期与对照无显著差异，在伸长期和成熟期则显著低于对照，分别低 41.43%和 12.33%。B 处理根系 IAA/ABA、GA₃/ABA、ZR/ABA 比值均低于对照，其中 IAA/ABA 比值在苗期，GA₃/ABA 比值在 3 个生育期与对照的差异均达到显著水平；而 IAA/ZR 比值在苗期和伸长期低于对照，成熟期则高于对照，但差异均未达到显著水平。说明 IAA/ABA、GA₃/ABA、ZR/ABA 比值升高，IAA/ZR 比值降低不利于根系的生长。

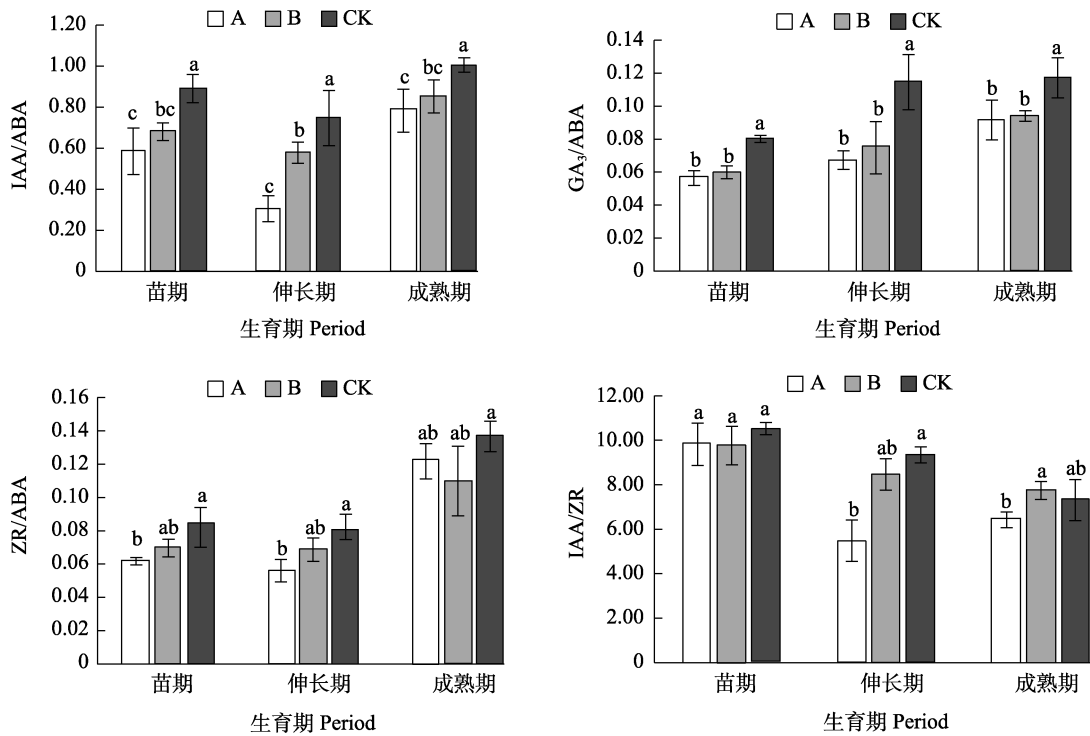
2.5 甘蔗生长指标与内源激素相关性

由表 3 可知，IAA 含量与根长、株高和有效茎数呈显著正相关，与茎径呈显著负相关；GA₃ 株高呈显著正相关，与茎径呈极显著负相关，与

根系干重、根长和有效茎数正相关，但差异未达到显著水平；ZR 与根系干重、根长、株高、茎径和有效茎数呈负相关，ABA 与根系干重、根长、株高、和有效茎数呈负相关，与茎径呈正相关，但差异均未达到显著水平；各激素比值中，IAA/ABA、GA/ABA 比值与茎径呈显著负相关，与其他形状指标呈正相关，但差异均未达到显著水平；IAA/ZR 比值与根长和株高呈显著正相关。

3 讨论

近年来，我国农业机械化发展较快，作业效率得到大幅度提升，但机械化水平提高的同时也带来了一系列的土壤质量问题。有研究显示，农业机械长期在田间作业时轮胎及器械会持续对土壤表面施加压力，造成土壤的机械压实，土壤容重和紧实度大幅上升^[4, 16]。土壤压实可以影响到耕作层以下较深的范围，是土壤退化的一个主要因素^[17]。本研究结果表明，机收可使地表以下 0~50 cm 纵向区域蔗田土壤的紧实度显著增加，这与前人研究结果一致。研究还发现，在甘蔗生长中后期，蔗行压实处理表层土壤的紧实度逐渐与对照趋于一致，但深层土壤的紧实度仍显著高于对照，这可能是蔗田经过破垄松兜和中耕培土



不同小写字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$)。

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

图 3 机收压实下根系的内源激素比值

Fig. 3 Ratio of endogenous hormones in roots under mechanical compaction

表 3 甘蔗生长性状指标与内源激素的相关系数

Tab. 3 Correlation coefficients between sugarcane growth traits and endogenous hormones

相关系数 Correlation coefficients	IAA	GA ₃	ZR	ABA	IAA/ABA	GA/ABA	ZR/ABA	IAA/ZR
根干重	0.389	0.181	-0.197	-0.281	0.308	0.233	0.015	0.393
根长	0.820*	0.608	-0.368	-0.306	0.581	0.557	-0.122	0.815*
株高	0.777*	0.673*	-0.212	-0.315	0.584	0.622	-0.029	0.709*
茎径	-0.689*	-0.840**	-0.348	0.514	-0.782*	-0.823*	-0.544	-0.249
有效茎数	0.690*	0.596	-0.085	-0.251	0.521	0.523	0.016	0.554

注: *表示显著相关 ($P < 0.05$), **表示极显著相关 ($P < 0.01$)。

Note: * indicates significant correlation ($P < 0.05$), ** indicates extremely significant correlation ($P < 0.01$).

等常规田间管理措施后, 表层压实土壤得到了疏松和修复, 而深层土壤可能因田间管理机械的深松作业深度不够乃至未得到有效改善。

根系是作物吸收养分和水分的重要器官, 土壤压实的影响首先体现在对根系的生长发育上。前人研究显示, 土壤紧实度胁迫可使玉米、黄瓜、马铃薯等作物根系的数量、干重、长度、体积和表面积下降, 蔗径增粗、直径增大^[18-20]。张方博等^[21]认为只有在适合的土壤容重条件下才有利于作物根系的生长发育, 一旦土壤容重超过适宜作物生长范围后, 即使是很微小的增加都会对植物根系生长产生较大的抑制作用。本研究结果表明, 机收压实蔗行后宿根蔗的根系干重、长度、

体积和表面积显著下降, 直径无显著变化, 与前人的研究结果基本一致。在根系直径的变化上, 李毅杰等^[15]研究发现, 不同甘蔗品种的根系在机收压实后直径显著变小或无显著变化, 本研究结果与之一致, 说明根系形态对土壤紧实度的适应性可能因作物种类或品种不同而存在一定差异。本研究还发现, 甘蔗 90% 以上的根系主要分布在植蔗行地表以下 0~40 cm 区域的土层, 机收压实种植行时可显著降低宿根蔗的发株率、株高、有效茎数和产量, 而压实行间时对宿根蔗的影响不大, 这可能是由于土壤压实胁迫限制了种植行根系的生长或蔗芽的萌发, 进而影响后期的产量性状。因此甘蔗机收时应避免机具对种植行的碾压,

可通过科学规划机收路线、增强农机农艺的融合以及加强对机具驾驶人员的培训等措施, 减小机收对宿根蔗的影响。

作物的生长与内源激素的调控密切相关, 通常认为 IAA、GA₃、ZR 可促进细胞分裂, 是有利于作物生长的正向激素, 而 ABA 是促进作物衰老和死亡的信号物质, 作物可通过调控自身的内源激素水平来适应各种逆境胁迫^[22-23]。前人研究报告, 在干旱条件下, 土壤容重越大, 玉米木质部汁液中的 ABA 含量越高^[24]; 土壤紧实胁迫下玉米根系的内源激素 IAA、GA、ZR 含量下降, ABA 含量显著增加, 且 IAA/ABA、GA/ABA、ZR/ABA 比值降低^[25]; 花生根系的 IAA、GA₃、ZR 在较低的土壤容重中含量较高, IAA/ABA、ZR/ABA、GA₃/ABA 比值与根系干重、总长度、体积和表面积均呈显著正相关, 而 ABA 则相反^[26]。本研究结果表明, 机收压实处理甘蔗根系的 IAA、GA₃、ZR 含量不同程度降低, ABA 含量则升高, IAA/ABA、GA₃/ABA、ZR/ABA 的比值在紧实度高的土壤中显著小于紧实度低的土壤, IAA、GA₃、IAA/ABA、GA₃/ABA 与根系干重、根长、株高、有效茎数呈正相关, ZR、ABA 含量则相反, 这与前人的研究结果基本一致。IAA 和 GA₃ 能够促进细胞的生长以及维持顶端优势, ZR 可促进根和芽的细胞分裂^[27], 本研究中, 压实土壤 IAA、GA₃ 和 ZR 含量降低, 不利于根系的生长发育和蔗芽的萌发, 根系生长量不足, 养分和水分吸收的能力下降, 进而导致地上部发株数减少、株高和产量降低; ABA 被认为是根源信号物质参与调节地下根系和地上部的信息交换, 与叶片气孔导度、光合作用等密切相关^[24, 28]。本研究发现, 压实土壤中的 ABA 含量升高, IAA/ABA、GA₃/ABA、ZR/ABA 比值降低, 说明土壤压实胁迫可能打破了根系激素间的平衡, 根系 ABA 的比重增加一方面抑制根系的生长, 另一方面可能通过向地上部传输, 调控地上部茎叶的生理生化活动来适应压实胁迫。本研究只针对土壤机械压实条件下甘蔗根系的内源激素变化进行了研究, 而紧实胁迫下地上部的生理响应以及相互的作用机制有待进一步研究。

参考文献

- [1] 蒋姣丽, 杨瑶, 吴传云, 刘庆庭, 区颖刚, 莫清贵, 夏明, 武涛, 梁生. 我国甘蔗机收发展缓慢原因分析[J]. 甘蔗糖业, 2022, 51(1): 1-5.
- [2] 钮公藩. 如何破解广西甘蔗机械收获的难点[J]. 广西糖业, 2020(3): 42-45.
- [3] SEEHUSEN T, RIGGERT R, FLEIGE H, HORN R, RILEY H. Soil compaction and stress propagation after different wheeling intensities on a silt soil in Southeast Norway[J]. Acta Agriculturae Scandinavica Section B Soil and Plant Science, 2019, 69(4): 343-355.
- [4] 乔金友, 霍东旭, 张险峰, 刘立意, 孙健, 陈海涛. 中型拖拉机压实对测试截面土壤坚实度和含水率的影响[J]. 东北农业学报, 2021, 52(6): 87-96.
- [5] QIAO J Y, HUO D X, ZHANG X F, LIU L Y, SUN J, CHEN H T. Effects of medium tractor compaction on soil penetration resistance and moisture content of testing cross section[J]. Journal of Northeast Agricultural University, 2021, 52(6): 87-96. (in Chinese)
- [6] SALEM H M, VALERO C, ANGEL MUNOZ M, RODRIGUEZ M G, SILVA L L. Shortterm effects of four tillage practices on soil physical properties, soil water potential, and maize yield[J]. Geoderma, 2015, 237: 60-70.
- [7] 罗友进, 王武, 余端, 胡佳羽, 程玥晴, 陈霞, 谢永红. 土壤压实对土壤生化循环和生态效应的影响[J]. 江苏农业科学, 2014, 42(2): 317-319.
- [8] LUO Y J, WANG W, YU R, HU J Y, CHENG Y Q, CHEN X, XIE Y H. Effects of soil compaction on soil biochemical cycle and ecological effects[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2014, 42(2): 317-319. (in Chinese)
- [9] 王恩姮, 陈祥伟. 大机械作业对黑土区耕地土壤三相与速效养分的影响[J]. 水土保持学报, 2007(4): 98-102.
- [10] WANG E H, CHEN X W. Effect of heavy machinery operation on soil three phases and available nutrient in phaeozem region[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2007(4): 98-102. (in Chinese)
- [11] LIPIEC J, HORN R, PIETRUSIEWICZ J, SICZEK A. Effects of soil compaction on root elongation and anatomy of different cereal plant species[J]. Soil & Tillage Research, 2012, 121: 74-81.
- [12] BEYLICH A, OBERHOLZER H, SCHRADER S, HÖPER H, WILKE B M. Evaluation of soil compaction effects on soil biota and soil biological processes in soils[J]. Soil &

- Tillage Research, 2010, 109(2): 133-143.
- [10] 吴亚维, 马锋旺, 邹养军. 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: 118-120.
WU Y W, MA F W, ZHOU Y J. The effect of soil compaction on root growth and root activity of *malus prunifolia* seedlings[J]. Guizhou Agricultural Sciences, 2009, 37: 118-120. (in Chinese)
- [11] KHAN S R, ABBASI M K, HUSSAN A U. Effect of induced soil compaction on changes in soil properties and wheat productivity under sandy loam and sandy clay loam soils: a greenhouse experiment[J]. Communications in Soil Science and Plant Analysis, 2013, 43: 2550-2563.
- [12] 王宪良, 王庆杰, 李洪文, 李问盈, 牛琪, 陈婉芝. 免耕条件下轮胎压实对土壤物理特性和作物根系的影响[J]. 农业机械学报, 2017, 48(6): 168-175.
WANG X L, WANG Q J, LI H W, LI W Y, NIU Q, CHEN W Z. Effect of tyre induced soil compaction on soil properties and crop root growth under no-tillage system[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(6): 168-175. (in Chinese)
- [13] 杨荣仲, 梁强, 桂意云, 周会, 陈家慧, 王伦旺, 贤武, 邓宇驰. 机械化收获对甘蔗宿根发株的影响[J]. 西南农业学报, 2014, 27: 2195-2201.
YANG R Z, LIANG Q, GUI Y Y, ZHOU H, CHEN J H, WANG L W, XIAN W, DENG Y C. Impact on stubble seedling of mechanical harvesting and crosses screening for rolling resistance[J]. Southwest China Journal of Agricultural Sciences, 2014, 27: 2195-2201. (in Chinese)
- [14] 梁强, 谢金兰, 李毅杰, 罗亚伟, 李长宁, 刘晓燕, 朱秋珍, 董文斌, 周会, 王维赞. 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, LUO Y W, LI C N, LIU X Y, ZHU Q Z, DONG W B, ZHOU H, WANG W Z. 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. (in Chinese)
- [15] 李毅杰, 梁强, 董文斌, 陈泉, 刘晓燕, 谢金兰, 李长宁, 王维赞, 李杨瑞. 土壤压实对宿根甘蔗出苗及根系形成的影响[J]. 西南农业学报, 2017, 30(9): 2041-2047.
LI Y J, LIANG Q, DONG W B, CHEN Q, LIU X Y, XIE J L, LI C N, WANG W Z, LI Y R. Effect of mechanical compaction on seedling emergence and roots formation of ratoon sugarcane[J]. Southwest China Journal of Agricultural Sciences, 2017, 30(9): 2041-2047. (in Chinese)
- [16] 王宪良, 王庆杰, 张祥彩, 郑智旗, 郑侃, 胡红. 田间土壤压实研究现状[J]. 农机化研究, 2016, 38(9): 264-268.
WANG X L, WANG Q J, ZHANG X C, ZENG Z Q, ZENG K, HU H. Research status of field soil compaction[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2016, 38(9): 264-268. (in Chinese)
- [17] BATEY T. Soil compaction and soil management a review[J]. Soil Use and Management, 2009, 25: 335-345.
- [18] 郑存德, 依艳丽, 张大庚, 徐龙超. 土壤容重对高产玉米根系生长的影响及调控研究[J]. 华北农学报, 2012, 27(3): 142-149.
ZENG C D, YI Y L, ZHANG D G, XU L C. Effects of bulk density on root growth of high yield maize and their regulation[J]. Acta Agriculturae Boreali-Sinica, 2012, 27(3): 142-149. (in Chinese)
- [19] 王德玉, 孙艳, 郑俊鸾, 赵娜, 王丽英. 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.
WANG D Y, SUN Y, ZENG J Q, ZHAO N, WANG L Y. Effects of soil compaction stress on the growth and nitrogen metabolism of cucumber roots[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2013, 24(5): 1394-1400. (in Chinese)
- [20] 王玉萍, 周晓洁, 卢潇, 梁延超, 张小微, 王润润. 土壤紧实度对马铃薯根系、匍匐茎、产量和品质的影响[J]. 中国沙漠, 2016, 36(6): 1590-1596.
WANG Y P, ZHOU X J, LU X, LIANG Y C, ZHANG X W, WANG R R. Effects of soil compaction on root, stolon, yield and quality of potato[J]. Journal of Desert Research, 2016, 36(6): 1590-1596. (in Chinese)
- [21] 张方博, 侯玉雪, 敖园园, 申建波, 金可默. 土壤紧实胁迫下根系-土壤的相互作用[J]. 植物营养与肥料学报, 2021, 27(3): 531-543.
ZHANG F B, HOU Y X, AO Y Y, SHEN J B, JIN K M. Root-soil interaction under soil compaction[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2021, 27(3): 531-543. (in Chinese)
- [22] MASIA A, PITACCO A, BRACCIO A, GUILIVO C. Hormonal responses to partial drying of the root system of *Helianthus annuus*[J]. Journal of Experimental Botany, 1994, 45(270): 69-76.
- [23] 武维华. 植物生理学[M]. 北京: 中国科学出版社, 2006.
WU W H. Plant physiology[M]. Beijing: Science of China Press, 2006. (in Chinese)
- [24] 刘晚苟, 陈燕, 山仑. 不同土壤水分条件下土壤容重对玉米木质部汁液中 ABA 浓度和气孔导度的影响[J]. 植物生理学通讯, 2006(5): 831-834.
LIU W G, CHEN Y, SHAN L. Effects of soil bulk density on aba concentration in xylem sap and stomatal conductance of maize (*Zea mays* L.) plant under different soil water conditions[J]. Plant Physiology Journal, 2006(5): 831-834. (in Chinese)

- [25] 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]. 郑州: 河南农业大学, 2010.
WANG Q. Effects of soil compaction on root-soil system and development in Maize[D]. Zhengzhou: Henan Agricultural University, 2010. (in Chinese)
- [26] 邹晓霞, 张晓军, 王铭伦, 王月福. 土壤容重对花生根系生长性状和内源激素含量的影响[J]. 植物生理学报, 2018, 54(6): 1130-1136.
ZHOU X X, ZHANG X J, WANG M L, WANG Y F. Effects of soil bulk density on root growth traits and endogenous hormones contents in peanut[J]. Chinese Journal of Plant Physiology, 2018, 54(6): 1130-1136. (in Chinese)
- [27] 陈洁, 张永中, 张谦, 沈亚欧, 高世斌, 唐海涛, 何文铸, 谭君, 张彪, 潘光堂. 低磷胁迫下不同基因型玉米内源激素的动态变化[J]. 玉米科学, 2013, 21(5): 6-12.
CHEN J, ZHANG Y Z, ZHANG Q, SHEN Y O, GAO S B, TANG H T, HE W Z, TAN J, ZHANG B, PAN G T. Dynamic change of endogenous hormones in different maize genotypes under low-phosphorus stress[J]. Journal of Maize Sciences, 2013, 21(5): 6-12. (in Chinese)
- [28] DAVIES W J, ZHANG J. Root signals and the regulation of growth and development of plants in drying soil[J]. Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology, 1991, 42: 55-76.