

膜下滴灌减量施肥对甘蔗农艺性状、产量和养分利用率的影响

彭李顺^{1,2,3}, 曹峥英^{1,2,3}, 蔡文伟^{1,2,3}, 甘仪梅^{1,2,3}, 杨本鹏^{1,2,3*}

1. 中国热带农业科学院热带生物技术研究所, 海南海口 571101; 2. 中国热带农业科学院海南热带农业资源研究院, 海南海口 571101; 3. 中国热带农业科学院三亚研究院, 海南三亚 572024

摘要: 探讨不同膜下滴灌减量施肥模式对甘蔗生长、产量和肥料利用率的影响, 分析最佳减肥模式, 为科学指导甘蔗膜下滴灌施肥技术应用提供理论依据。以空白对照 (CK₀)、常规施肥 (CK₁) 和滴灌+常规施肥 (CK₂) 为对照, 设置 1 个膜下滴灌施肥处理 T₁₀₀ (施肥量同 CK₁) 以及 3 个膜下滴灌减量施肥处理 T₈₀、T₇₀ 和 T₆₀ (减量 20%、30% 和 40%), 对甘蔗主要农艺性状、产量、蔗糖分、产糖量、经济效益及养分利用率等生产指标进行比较分析。结果表明: 相较于 CK₁, 增加滴灌的 CK₂ 有效茎数明显提高, 而 T₁₀₀ 在分蘖率、株高、有效茎数、成茎率方面均显著提升, T₈₀ 和 T₇₀ 则主要对有效茎数和成茎率促进明显。在产量方面, 相对 CK₁, CK₂ 及 T₁₀₀、T₈₀、T₇₀ 均显著增加, 2 年平均产量分别提升了 13.64%、32.20%、27.00% 和 20.18%。在各滴灌施肥处理间, 相对于 T₁₀₀, T₈₀ 产量并无显著变化, 而 T₇₀ 和 T₆₀ 产量显著减少。在蔗糖分和产糖量方面, 各滴灌施肥处理间蔗糖分并无显著差异, 而产糖量与产量变化趋势基本一致, T₁₀₀ 和 T₈₀ 产糖量最高, 且二者间无显著差异。在纯收益方面, 仅有 T₁₀₀ 和 T₈₀ 较 CK₁ 获得显著增加, 2 年平均收益分别增加 4534.4 元/hm² 和 3953.8 元/hm²。T₇₀ 和 T₆₀ 纯收益相较于 T₁₀₀ 则呈现显著下降, 其中 T₆₀ 纯收益甚至比 CK₁ 还低 2350 元/hm²。在肥料利用率方面, 所有滴灌施肥处理氮、磷、钾肥利用率均显著高于 CK₁, 其中 T₈₀ 肥料利用率最高, 2 年试验平均氮、磷、钾肥利用率分别达到 48.36%、27.70% 和 68.95%, 分别较 CK₁ 提高了 28.42、17.95 和 30.71 个百分点。综合来看, 在中等肥力砖红壤蔗区, 采用 T₈₀ 膜下滴灌减量施肥模式, 可以同时获得较理想的甘蔗产量和收益。

关键词: 甘蔗; 膜下滴灌施肥; 化肥减施; 产量; 养分利用率

中图分类号: S566.1 文献标识码: A

Effects of Reduced Fertilization on Main Agronomic Traits, Yield and Fertilizer Utilization Rate of Sugarcane under Mulched Drip Fertigation System

PENG Lishun^{1,2,3}, CAO Zhengying^{1,2,3}, CAI Wenwei^{1,2,3}, GAN Yimei^{1,2,3}, YANG Benpeng^{1,2,3*}

1. Institute of Tropical Bioscience and Biotechnology, Chinese Academy of Tropical Agricultural Sciences, Haikou, Hainan 571101, China; 2. Hainan Institute of Tropical Agricultural Resources, Chinese Academy of Tropical Agricultural Sciences, Haikou, Hainan 571101, China; 3. Sanya Research Institute, Chinese Academy of Tropical Agricultural Sciences, Sanya, Hainan, 572024, China.

Abstract: The present study revealed the effects of chemical fertilizer reduction patterns on growth, cane yield and fertilizer utilization rate of sugarcane, in order to provide a theoretical basis for the application of mulched drip fertigation and find out the best pattern to reduce fertilizer in sugarcane. Seven different treatments were conducted: no fertilization (CK₀), conventional fertilization (CK₁), mulched drip irrigation + conventional fertilization (CK₂), mulched drip fertigation T₁₀₀ (fertilizer amount equated with CK₁) and T₈₀, T₇₀, T₆₀ (20%, 30% and 40% reduction of fertilizer amount of T₁₀₀). Main agronomic characters, cane yield, sucrose content, sugar yield, economic benefit and nutrient utilization rate

收稿日期 2022-09-27; 修回日期 2022-10-28

基金项目 国家重点研发计划项目 (No. 2020YFD1000600); 现代农业产业技术体系 (糖料) 建设专项资金项目 (No. CARS-170716)。

作者简介 彭李顺 (1980—), 男, 博士, 助理研究员, 研究方向: 植物营养与甘蔗高产栽培。*通信作者 (Corresponding author): 杨本鹏 (YANG Benpeng), E-mail: y-bp@163.com。

of sugarcane were measured in the seven different treatments. The results showed that compared with CK₁, the millable stalk number in CK₂ increased significantly, the tillering rate, plant height, millable stalk number and stalk formation rate in T₁₀₀ were all improved significantly, the effective stalk number and stalk formation rate in T₈₀ and T₇₀ were improved significantly. Compared with CK₁, the cane yield in CK₂, T₁₀₀, T₈₀ and T₇₀ increased significantly by 13.64%, 32.20%, 27.00% and 20.18%, respectively. In the different drip fertigation treatments, there was no significant differences for cane yield between T₁₀₀ and T₈₀, but the cane yield for T₇₀ and T₆₀ decreased significantly in contrast to T₁₀₀. There was no significant difference in sugar content among the different drip fertigation treatments. The change trend of sugar yield and cane yield among the treatments was consistent. Sugar yield in T₁₀₀ and T₈₀ was higher than that in other treatments, and there was no significant difference between that in T₁₀₀ and T₈₀. Compared with CK₁, the net benefit in T₁₀₀ and T₈₀ increased significantly by 4534.4 yuan/hm² and 3953.8 yuan/hm², respectively. The net benefit in T₇₀ and T₆₀ decreased significantly compared with T₁₀₀, and the net benefit in T₆₀ was even 2350 yuan/hm² lower than that in CK₁. The fertilizer utilization rate of all drip fertigation treatments was significantly higher than that of CK₁, and the average utilization rates of nitrogen, phosphorus and potassium fertilizers in T₈₀ were the highest in all the treatments, reached 48.36%, 27.70% and 68.95%, respectively, which was 28.42, 17.95 and 30.71 percentage points higher than that of CK₁, respectively. Overall, in the middle fertility of laterite soil, the application of mulched drip fertigation pattern for T₈₀ could obtain ideal cane yield and benefit.

Keywords: sugarcane; mulched drip fertigation; reduction fertilization; yield; fertilizer use efficiency

DOI: 10.3969/j.issn.1000-2561.2023.11.021

甘蔗是我国最为重要的食糖原料作物,也是我国热带、亚热带地区第一大经济作物。尽管我国蔗区水热资源普遍较为丰富,具备较好的生产潜力,但由于各季降雨不均,春、秋季节性干旱频繁发生,每年均会出现不同程度的旱害,限制甘蔗产量的提升^[1-2]。此外,甘蔗作为高光效 C₄ 植物,具有生长周期长、生物量大的特点,对养分需求量较大,蔗农为了获得高产,通常会过量施用化肥。据统计,我国甘蔗生产上化肥平均施用量是世界平均施肥量的 3 倍,是发达国家的 5~10 倍,化肥平均利用率普遍偏低,其中氮肥利用率仅为 14.5%~24.7%,磷肥利用率为 6.7%~13.4%,钾肥利用率为 15.6%~26.9%,与澳大利亚、美国等甘蔗生产发达国家有着较大差距^[3-5]。春、秋季节性干旱频发加上长期过量不合理的化肥施用量,不仅导致甘蔗生产化肥利用率低,肥料浪费现象严重,还极大制约甘蔗产量的提升,导致甘蔗种植效益不高,甚至出现亏损现象,甘蔗产业的可持续健康发展已受到挑战^[6-8]。

滴灌施肥技术是一项可实现水肥同步管理和高效利用的现代化农业技术。该技术根据作物对水分、养分需求通过滴灌系统将肥料定时定量均匀地输送到作物根部,不仅具有节水、节肥、省工的特点,还可以明显促进作物产量和品质提升、节省灌溉和施肥时间、改善土壤环境^[9-10]。近年来,在甘蔗生产上滴灌施肥技术也逐渐开始被广泛研究和应用。多项相关研究表明,通过滴灌施

肥可以明显增加甘蔗在不同生长阶段的主要养分吸收^[11-13]、促进甘蔗产量与蔗糖分提升^[14-17],同时对土壤生态和理化性状也有一定改善作用^[18],可以有效解决甘蔗生产上长期存在的化肥施用量大、利用率低、浪费严重、单产和经济效益低等问题。

此外,在滴灌施肥的基础上,通过覆盖地膜进行膜下滴灌施肥,可集成覆膜和滴灌施肥技术的优点,在积温保墒、节水节肥的同时,进一步减少施用肥料的挥发和淋失,提升肥料利用率,减少化肥施用量,目前该项技术已在蔬菜、玉米、小麦、棉花等作物中广泛应用^[19]。然而,膜下滴灌施肥技术在甘蔗生产上的应用仍处于起步阶段,目前鲜有关于该技术应用对甘蔗生长、产量、蔗糖分、化肥利用率、经济效益等指标影响的研究报道。因此,本研究以不施肥、常规施肥以及滴灌清水+常规施肥 3 个处理为对照,同时设置 4 个不同施肥量的膜下滴灌施肥处理,分析膜下滴灌减量施肥对甘蔗主要农艺性状、产量、蔗糖分、产糖量、经济效益及养分利用率等指标的影响,研究膜下滴灌条件下适宜甘蔗生产的最佳施肥模式,以期为甘蔗膜下滴灌施肥技术高效应用和化肥减肥增效提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 材料

1.1.1 供试品种 供试甘蔗品种为中糖 3 号,田

间试验种植采用该品种脱毒种茎（由中国热带农业科学院热带生物技术研究所繁育）。

1.1.2 试验地点 试验于 2019 年和 2020 年在位于海南省临高县皇桐镇文贤村的中国热带农业科学院热带生物技术研究所海南甘蔗试验基地进行。试验地土壤为粘质砖红壤，pH 4.6，有机质 10.5 g/kg，碱解氮 101.3 mg/kg，有效磷 18.5 mg/kg，速效钾 126.8 mg/kg。

1.2 方法

1.2.1 试验设计 田间试验分 2 年开展，第一年试验于 2019 年 2 月 25 日种植，2020 年 1 月 7 日收获；第二年试验于 2020 年 2 月 18 日种植，2021 年 1 月 12 日收获。2 年试验甘蔗均采用大小行种植模式，大行距为 1.4 m，小行距为 0.4 m，每公顷种植 67 500 芽（33 750 双芽段）。试验设置 7 个处理：（1）处理 CK₀，不施肥；（2）处理 CK₁，常规施肥；（3）处理 CK₂，膜下滴灌+常规施肥；（4）处理 T₁₀₀，膜下滴灌施肥；（5）处理 T₈₀，膜下滴灌施肥减量 20%；（6）处理 T₇₀，膜下滴灌施肥减量 30%；（7）处理 T₆₀，膜下滴灌施肥减量 40%。各处理施肥量见表 1。每个处理设置 3 个重复小区，每个小区宽 9 m（包含 1.4 m 大行和 0.4 m 小行，各 5 行，共 10 行甘蔗），行长 50 m，小区面积为 450 m²，后续试验数据从各小区中间 6 行采集。甘蔗种植均使用配套大小行种植机完成，需要膜下滴灌处理使用配套的联合种植机一次性完成开沟、下种、覆土、铺设滴灌带和覆盖地膜等工序。

常规施肥分 2 次施用，基肥在种植时施用肥料总量的 40%，追肥在拔节初期结合中耕培土施用剩余 60% 肥料。滴灌处理采用膜下滴灌方式施肥，使用滴孔间距为 20 cm 的贴片式滴灌带，铺设在相距 0.4 m 的小行中间，同时使用厚度为 0.01 mm、宽度为 80 cm 的透明地膜完全覆盖相距 0.4 m 的 2 个小行甘蔗，每条滴灌带负责 2 行甘蔗水肥膜下滴灌供给。滴灌施肥时将肥料放入罐装容器中溶解，再随水滴灌施用。滴灌施肥各处理水肥分 5 次施用，分别在苗期出苗完成 80% 时施用肥料总量的 10%，分蘖期完成 50% 时再施用 15%，然后在拔节期分 3 次施用，每次施用 25%。

不施肥 CK₀ 和常规施肥 CK₁ 处理种植时根据土壤墒情进行适当灌水确保出苗，其余时间不再进行灌溉。其他安装滴灌设施的处理在种植完成后滴灌一次确保出苗用水，然后根据土壤墒情在

干旱时进行补充灌溉，包含 5 次滴灌施肥，一个甘蔗生长期总计进行 10 次灌溉，共灌水约 900 m³/hm²。其余同常规农田管理。

表 1 各处理的肥料施用量
Tab. 1 Fertilizer amount of each treatment

处理 Treatment	养分施用量 Fertilizer amount/(kg·hm ⁻²)		
	N	P ₂ O ₅	K ₂ O
CK ₀	0	0	0
CK ₁	375	180	270
CK ₂	375	180	270
T ₁₀₀	375	180	270
T ₈₀	300	144	216
T ₇₀	263	126	189
T ₆₀	225	108	162

1.2.2 项目测定 在甘蔗的苗期、分蘖期分别调查各处理小区甘蔗的出苗率及分蘖率。甘蔗收获时，在各处理小区连续测定 10 株甘蔗株高、茎径及田间锤度，并通过田间锤度计算蔗糖分。蔗糖分计算公式：蔗糖分=(锤度×1.0825-7.703)×100%。调查和砍收每个小区中间 6 行，统计和测定 30 m 区域内的甘蔗株数和重量，并计算公顷有效茎数和产量。

在每个小区随机取 5 株生长正常的甘蔗，用自来水洗净，并用蒸馏水冲洗后，分成青叶+蔗尾、枯叶、蔗茎 3 个部位，于 105 °C 杀青 30 min，然后 70 °C 烘干称重，粉碎过筛，用于后续氮、磷、钾元素含量的测定。全氮含量用凯氏定氮法，全磷用钼锑抗比色法，全钾用火焰光度计法测定。

肥料利用效率参照下列公式计算：肥料利用率=(施肥处理甘蔗吸收养分量-不施肥处理甘蔗吸收养分量)/施肥量×100%。其中：养分吸收量=蔗茎干物质重×蔗茎养分含量+(青叶+蔗尾)干物质重×(青叶+蔗尾)养分含量+枯叶干重×枯叶养分含量。

1.3 数据处理

采用 Excel 2007 等软件对数据进行处理，采用 DPS 7.05 软件进行单因素方差分析。

2 结果与分析

2.1 不同处理对甘蔗主要农艺性状的影响

由表 2 可知，各处理出苗率均无显著差异，这主要由于为保证各处理出苗相对一致，各处理在种植过程中或完成后均及时进行水分灌溉促进

出苗。在分蘖率方面, 2 年试验除 CK₀ 分蘖率较低(不到 70%)外, 其他施肥处理的分蘖率均在 110%以上。T₁₀₀ 和 T₈₀ 相较于 CK₁, 2 年分蘖率平均值分别提高了 22.86 和 15.18 个百分点, 但 T₈₀ 与 CK₁ 间差异不显著。随着滴灌施肥量减少, T₇₀ 和 T₆₀ 的 2 年平均分蘖率逐步减少至与 CK₁ 相当。滴灌施肥各处理分蘖率相较于 CK₂, 均无显著差异, 其中减肥量最大的 T₆₀ 分蘖率均值较 CK₂ 减少了 9.19 个百分点。这表明在甘蔗分蘖期需要同时保证水分灌溉和施肥量才能获得较高的分蘖率。

在株高方面, CK₀ 处理显著低于其他施肥处理 10 cm 以上。在各施肥处理间, 2 年滴灌施肥 T₁₀₀ 及 2020 年滴灌减量施肥 T₈₀ 均较常规施肥

CK₁ 显著提高, 其余滴灌施肥减量处理与 CK₁ 和 CK₂ 的株高均较为接近。在蔗株茎径方面, CK₀ 显著低于其他处理外, 其余各施肥处理对茎径影响较小, 均无显著变化。

在有效茎数方面, 与其他农艺性状不同, CK₂ 的有效茎数较 CK₁ 显著增加, 而 T₁₀₀ 和 T₈₀ 的有效茎数较 CK₂ 表现出显著增长, 而随着施肥量减少, T₇₀ 和 T₆₀ 的有效茎数呈现逐步减少的趋势, 其中 T₆₀ 有效茎数与 CK₁ 间无显著差异。

在成茎率方面, 增加滴灌的 CK₂ 与 CK₁ 之间无显著差异, 而应用滴灌施肥及减量施肥处理中, 除 2020 年减量施肥 T₆₀ 与 CK₁ 和 CK₂ 无显著差异外, 其余滴灌处理成茎率均显著高于 CK₁ 和 CK₂ 处理。

表 2 不同施肥处理下甘蔗主要农艺性状
Tab. 2 Main agronomic traits of sugarcane in different fertilization treatments

年度 Year	处理 Treatment	出苗率 Emergence rate/%	分蘖率 Tillering rate/%	株高 Plant height/cm	茎径 Stalk diameter/mm	有效茎数 Millable stalk number/(10 ³ plant·hm ⁻²)	成茎率 Stalk formation rate/%
2019	CK ₀	77.21±4.02 ^a	69.80±4.34 ^c	275.73±7.28 ^c	21.88±1.19 ^b	50.60±0.87 ^c	57.90±0.60 ^c
	CK ₁	78.60±2.92 ^a	113.51±1.21 ^b	289.35±3.76 ^b	25.43±1.25 ^a	64.59±2.28 ^d	57.69±1.03 ^c
	CK ₂	81.25±4.15 ^a	123.92±2.46 ^{ab}	290.85±4.20 ^{ab}	25.52±1.52 ^a	71.71±2.33 ^c	59.10±0.46 ^c
	T ₁₀₀	78.79±2.50 ^a	137.47±4.48 ^a	294.01±7.79 ^a	24.73±1.24 ^a	79.79±1.28 ^a	63.94±0.31 ^a
	T ₈₀	80.97±2.14 ^a	125.04±2.61 ^{ab}	289.66±3.15 ^{ab}	24.60±1.53 ^a	77.69±1.62 ^{ab}	63.91±1.13 ^{ab}
	T ₇₀	79.16±1.48 ^a	115.49±1.24 ^b	289.75±4.72 ^{ab}	25.19±1.04 ^a	73.09±1.66 ^{bc}	64.21±0.35 ^a
	T ₆₀	78.69±4.47 ^a	115.92±9.63 ^b	286.65±7.15 ^b	24.51±1.41 ^a	69.69±2.09 ^{cd}	61.56±1.11 ^b
2020	CK ₀	75.58±3.24 ^a	64.57±0.91 ^d	271.17±6.75 ^c	21.72±1.08 ^b	45.16±1.11 ^d	54.45±0.96 ^c
	CK ₁	77.71±2.19 ^a	113.89±6.69 ^{bc}	284.70±3.81 ^b	24.33±1.38 ^a	62.14±1.38 ^c	56.06±0.69 ^{bc}
	CK ₂	80.42±5.81 ^a	121.32±8.81 ^{abc}	288.11±4.93 ^{ab}	24.55±1.17 ^a	70.91±1.51 ^b	59.87±2.82 ^b
	T ₁₀₀	79.31±2.01 ^a	135.66±5.73 ^a	289.91±6.02 ^a	25.09±1.23 ^a	80.72±0.80 ^a	64.75±0.88 ^a
	T ₈₀	79.16±2.15 ^a	132.72±6.59 ^{ab}	290.34±6.26 ^a	25.15±1.34 ^a	79.20±2.45 ^a	64.47±2.37 ^a
	T ₇₀	80.36±3.71 ^a	119.41±10.40 ^{abc}	285.50±3.39 ^b	24.75±1.13 ^a	76.81±2.80 ^a	65.36±0.86 ^a
	T ₆₀	81.19±2.72 ^a	110.94±6.14 ^c	284.53±5.40 ^b	24.80±1.16 ^a	67.22±3.21 ^{bc}	58.82±0.22 ^b

注: 同列数据后不同小写字母表示处理间差异显著 ($P<0.05$)。

Note: Different lowercase letters after the same column of data indicate significant difference ($P<0.05$).

2.2 不同施肥处理对甘蔗产量、蔗糖分及产糖量的影响

由表 3 可知, 除 2019 年蔗糖分外, 其余各处理中 CK₀ 的产量、蔗糖分和产糖量均显著低于其他施肥处理。在各施肥处理中, 产量与有效茎数变化趋势较为相似, CK₂ 产量比 CK₁ 显著提升 13.64%, 而滴灌施肥 T₁₀₀ 和 T₈₀ 的产量显著增长, 2 年试验平均产量相较于 CK₁ 分别提升了 32.20% 和 27.00%,

相对于 CK₂ 也分别提升了 16.34% 和 11.76%, 但 T₁₀₀ 与 T₈₀ 的产量间无显著差异。随着滴灌施肥量减少 30%~40% (T₇₀ 和 T₆₀) 时, 甘蔗产量有所下降, 2019 年, T₇₀ 和 T₆₀ 产量与 CK₂ 间无显著差异, 但仍显著高于 CK₁。2020 年, T₇₀ 产量仍显著高于 CK₂ 和 CK₁, 仅有 T₆₀ 产量与 CK₁ 接近, 无显著差异。

在蔗糖分方面, 可能由于 2020 年甘蔗生产后期降雨较少, 蔗糖分整体上高于 2019 年对应各处

表 3 不同施肥处理下甘蔗产量、蔗糖分和产糖量
Tab. 3 Cane yield, sucrose content and sugar yield in different fertilization treatments

处理 Treatment	甘蔗产量 Cane yield/(t·hm ⁻²)		蔗糖分 Sucrose content/%		产糖量 Sugar yield/(t·hm ⁻²)	
	2019	2020	2019	2020	2019	2020
CK ₀	57.75±1.19 ^d	53.24±1.31 ^c	12.24±0.57 ^c	13.14±0.72 ^b	7.07±0.11 ^d	6.99±0.13 ^f
CK ₁	81.45±1.25 ^c	85.80±1.90 ^d	12.73±0.51 ^{bc}	14.33±0.93 ^a	10.37±0.36 ^c	12.30±0.50 ^c
CK ₂	93.75±1.52 ^b	96.30±2.05 ^c	13.68±0.74 ^a	14.56±0.79 ^a	12.34±0.68 ^b	14.02±0.42 ^{cd}
T ₁₀₀	108.30±1.24 ^a	112.80±1.11 ^a	13.57±0.81 ^a	14.48±0.65 ^a	14.29±0.39 ^a	16.33±0.17 ^a
T ₈₀	104.11±1.53 ^a	108.30±3.35 ^{ab}	13.35±0.73 ^a	14.35±0.65 ^a	14.25±0.52 ^a	15.54±0.44 ^{ab}
T ₇₀	96.75±1.04 ^b	104.25±3.79 ^b	13.16±0.67 ^{ab}	14.29±0.70 ^a	13.13±0.51 ^{ab}	14.89±0.41 ^{bc}
T ₆₀	90.75±1.41 ^b	89.40±4.27 ^{cd}	13.19±0.63 ^{ab}	14.58±0.72 ^a	12.11±0.54 ^b	13.04±0.59 ^{de}

注：同列数据后不同小写字母表示处理间差异显著 ($P<0.05$)。

Note: Different lowercase letters after the same column of data indicate significant difference ($P<0.05$).

理 0.9~1.6 个百分点。各施肥处理间，蔗糖分仅 2019 年 CK₂、T₁₀₀ 和 T₈₀ 相对于 CK₁ 显著提升，而 2020 年各施肥处理间并无显著差异。各施肥处理间产糖量和产量变化趋势较为相近，CK₂ 产糖量较 CK₁ 显著提升了 16.30%，而 T₁₀₀ 和 T₈₀ 的产糖量均显著高于 CK₁ 和 CK₂，分别较 CK₁ 提高 35.08% 和 31.39%，分别较 CK₂ 提高 16.14% 和 12.97%，同样 T₁₀₀ 和 T₈₀ 的产糖量间无显著差异。随着滴灌施肥量减少至 T₇₀ 和 T₆₀ 时，其产糖量与同样具备水分滴灌条件的 CK₂ 无显著差异，但除了 2020 年 T₆₀ 外，其余处理产糖量仍显著高于 CK₁。

2.3 不同施肥处理对甘蔗经济效益的影响

由表 4 可以看出，CK₂ 的甘蔗收益显著高于 CK₁，但去除肥料及滴灌投入成本后，其纯收益 2 个处理间无显著差异，CK₂ 的 2 年收益平均值甚至比 CK₁ 少了 3446 元/hm²。T₁₀₀ 和 T₈₀ 去除成本后的纯收益仍然显著高于 CK₁ 处理，2 年平均收益相对于 CK₁ 分别提高 4534.4、3953.8 元/hm²，而 T₈₀ 与 T₁₀₀ 纯收益间无显著差异。滴灌减量施肥 30% 和 40% 时纯收益开始减少，T₇₀ 和 T₆₀ 与 CK₁ 之间纯收益无显著差异，其中 T₆₀ 两年平均纯收益较 CK₁ 减少 2350 元/hm²。

表 4 不同施肥处理下甘蔗经济效益
Tab. 4 Economic benefits of sugarcane production in different fertilization treatments 元/hm²

处理 Treatment	甘蔗收益 Sugarcane income		肥料成本 Fertilizer cost		滴灌成本 Drip irrigation cost		纯收益 Net benefit		相对 CK ₁ 增加收益 Increased benefit compared with CK ₁ 均值 Mean
	2019	2020	2019	2020	2019	2020	2019	2020	
CK ₁	28 508.4±1007.1 ^c	30 028.5±664.6 ^d	4725	4725			23 783.4±1007.1 ^c	25 303.5±664.6 ^{bc}	
CK ₂	32 813.2±1066.4 ^b	33 704.5±718.9 ^c	4725	4725	5530	5530	22 558.2±1066.4 ^c	23 449.5±718.9 ^c	-3446.0
T ₁₀₀	37 905.6±608.3 ^a	39 480.3±389.4 ^a	4725	4725	5530	5530	27 650.6±608.3 ^a	29 225.3±389.4 ^a	4534.4
T ₈₀	36 436.2±761.7 ^a	37 905.6±1174.0 ^{ab}	3780	3780	5530	5530	27 126.2±761.7 ^{ab}	28 595.6±1174.0 ^a	3953.8
T ₇₀	33 862.5±771.1 ^b	36 486.5±1327.7 ^b	3308	3308	5530	5530	25 025.0±771.1 ^{bc}	27 648.9±1327.7 ^{ab}	1508.7
T ₆₀	31 763.3±950.3 ^b	31 291.2±1495.0 ^{cd}	2835	2835	5530	5530	23 398.3±950.3 ^c	22 926.2±1495.0 ^c	-2350.0

注：同列数据后不同小写字母表示处理间差异显著 ($P<0.05$)。

Note: Different lowercase letters after the same column of data indicate significant difference ($P<0.05$).

2.4 不同施肥处理对甘蔗养分利用率的影响

由表 5 可知，CK₂ 的氮、磷、钾肥利用率较 CK₁ 均显著上升，2 年平均分别提高了 8.22、6.36 和 11.87 个百分点。滴灌施肥 T₁₀₀、T₈₀ 和 T₇₀ 的氮、磷、钾肥利用率均较 CK₂ 显著提高，其中均以 T₈₀ 的养分利用率最高，2 年氮、磷、钾肥平均利用率

较 CK₁ 分别提高了 28.42、17.95 和 30.71 个百分点，较 CK₂ 也分别提高了 20.2、11.59 和 11.87 个百分点。随着滴灌施肥减量至 40%，T₆₀ 的氮、磷、钾肥利用率均有所下降，但氮肥利用率仍然较 CK₂ 提高 10.24 个百分点，而磷、钾肥利用率则与 CK₂ 无显著差异。

表 5 不同施肥处理下甘蔗养分利用率
Tab. 5 Nutrient use efficiencies of sugarcane in different fertilization treatments %

处理 Treatment	氮肥 Nitrogen fertilizer		磷肥 Phosphorus fertilizer		钾肥 Potassium fertilizer	
	2019	2020	2019	2020	2019	2020
CK ₁	18.29±1.12 ^c	21.58±1.07 ^d	9.35±0.51 ^d	10.14±0.75 ^c	35.49±3.11 ^d	40.99±0.99 ^c
CK ₂	26.98±1.79 ^d	29.33±3.38 ^c	15.62±1.56 ^c	16.60±0.84 ^b	48.14±3.32 ^c	52.07±3.33 ^b
T ₁₀₀	43.42±1.85 ^{ab}	47.05±3.65 ^a	23.67±1.91 ^{ab}	24.66±0.99 ^a	65.75±2.51 ^a	67.33±2.12 ^a
T ₈₀	46.43±0.60 ^a	50.28±4.59 ^a	27.45±0.34 ^a	27.94±1.75 ^a	67.21±3.86 ^a	70.69±2.75 ^a
T ₇₀	40.81±2.52 ^{bc}	47.51±5.22 ^a	24.01±2.15 ^{ab}	26.92±2.00 ^a	63.00±1.31 ^{ab}	67.41±0.84 ^a
T ₆₀	37.69±1.79 ^c	39.09±6.60 ^b	18.96±3.23 ^{bc}	19.56±2.28 ^b	54.26±4.28 ^{bc}	55.29±5.37 ^b

注：同列数据后不同小写字母表示处理间差异显著 ($P<0.05$)。

Note: Different lowercase letters after the same column of data indicate significant difference ($P<0.05$).

3 讨论

滴灌施肥是一项将灌溉和施肥融为一体的高效施肥技术，在甘蔗生产上多个试验已经证实滴灌施肥技术对于分蘖率、株高、有效茎数等产量相关因素及产量提升均有较好促进作用^[11,15-17]。本研究中膜下滴灌施肥 T₁₀₀ 相对于 CK₁ 的分蘖率、株高、成茎率和有效茎数等农艺性状均得到增加，产量增幅能够达到 32.20%。当滴灌施肥量减少 20% 时，T₈₀ 各项农艺性状相对 T₁₀₀ 无显著变化，仍保持 27.00% 的增产效果。当滴灌施肥量减少 30% 和 40% 时，各农艺性状和甘蔗产量相较于 T₁₀₀ 处理开始出现明显减少，但相对于 CK₁ 各项指标并未出现显著减少。通过将滴灌施肥各处理与另一个增加了水分滴灌的常规施肥 CK₂ 进行比较时，可以发现 T₁₀₀ 和 T₈₀ 较 CK₂ 增产效果大幅下降，分别降至 16.3% 和 11.8%。上述结果表明，滴灌施肥相对常规施肥对甘蔗生长有促进和增产作用，有相当一部分是由增加的水分滴灌贡献，另一部分通过少量多次的滴灌施肥模式贡献。赵海雄^[20] 和杨雪等^[21] 的研究也证实仅通过增加膜下滴灌可以显著促进甘蔗有效茎数增加，蔗茎产量提升达到 10% 以上。而滴灌施肥模式的加入，可以根据甘蔗生长养分需求，将 70% 以上的养分安排在对养分需求量更多的茎伸长期分多次施用，同时通过水肥融合作用，以促进这个阶段养分吸收量增加，去提升甘蔗成茎率和有效茎数，进而增加甘蔗产量。谭宏伟等^[11] 和彭明戈^[13] 研究证实滴灌施肥少量多次的施肥方式可显著增加在甘蔗茎伸长期氮、磷、钾元素吸收量。本研究也证实，滴灌施肥 T₁₀₀ 和 T₈₀ 相对于 CK₂ 前期分蘖率并无显著差异，其增产作用主要通过成茎率和有效茎数增加来实现。

与滴灌施肥显著促进甘蔗产量提升不同，其对甘蔗蔗糖分影响相对较小，仅在 2019 年试验中，滴灌施肥 T₁₀₀ 和 T₈₀ 蔗糖分显著高于 CK₁。在 2020 年试验中，各滴灌施肥处理与 CK₁ 和 CK₂ 均无显著差异。由于甘蔗蔗糖分累积是一个由多因素控制的复杂性状，特别在甘蔗生长中后期会受到水分供给、不同营养元素配比以及水肥耦合效应等多因素的正向或负向调控^[22-23]，因此后期可开展针对性的研究，在甘蔗糖分累积关键时期通过对不同配比营养元素的科学合理供给和水肥耦合调控来提升蔗糖分累积。

经济效益是滴灌施肥技术能否可持续发展的重要指标。本研究中，甘蔗收益在扣除肥料和滴灌成本后，仅滴灌施肥 T₁₀₀ 和 T₈₀ 纯收益显著高于 CK₁。CK₂ 和 T₆₀ 处理相对 CK₁ 均出现增产不增收的现象，2 年平均收益分别减少 3446、2350 元/hm²。成本较高的滴灌设施投入一直是阻碍滴灌施肥技术在甘蔗生产应用的主要限制因子，但供水管道和水泵等滴灌设施均可通过扩大种植规模和多年重复利用来摊低前期投入成本，逐步提高植蔗整体收益。因此，通过利用滴灌施肥技术设置适宜施肥量，加上规模化和持续性经营，可极大降低甘蔗滴灌施肥技术的应用成本。

滴灌施肥除了能够促进作物生长、提升产量和效益外，还能够大幅提升肥料的利用率^[9]。在本研究中，所有滴灌施肥处理及 CK₂ 的肥料利用率均较 CK₁ 显著提高，特别是 T₈₀ 的养分利用率提升最高，2 年平均氮肥利用率从 19.94% 增长至 48.36%、磷肥从 9.75% 增长至 27.70%，钾肥从 38.24% 增长至 68.95%。这表明常规施肥的大量养分未被甘蔗吸收利用而进入了环境，给环境带来了巨大潜在风险。膜下滴灌减量施肥技术的应用，

不仅可以大幅提升肥料利用率,降低肥料成本,还可以有效减缓农业面源的污染问题。

本研究通过 2 年田间试验表明,在中等肥力砖红壤蔗区,应用膜下滴灌施肥系统,采用较常规施肥减量 20%处理 T_{80} 的施肥模式,化肥利用率最高,同时增产效果显著,在甘蔗生产中具有较好的应用前景。同时,在本研究中也还存在着滴灌施肥对蔗糖分的提升并不明显,以及试验仅针对蔗区砖红壤开展,不同生态蔗区土壤质地差异也会对滴灌施肥效果产生影响。因此,在今后的研究中,一方面可进一步针对甘蔗不同发育时期对氮、磷、钾及各种中微量元素的差异化需求,研发适宜各生长阶段的水溶性肥料套餐,配合滴灌施肥技术,促进甘蔗产量、蔗糖分、肥料利用率继续提升;另一方面,还需要针对不同蔗区生态环境和土壤质地差异,对甘蔗滴灌施肥频次、浓度等关键参数进行研究和优化,完善甘蔗滴灌施肥技术体系,以促进滴灌施肥技术在我国甘蔗生产上规模化应用。

参考文献

- [1] 谭宏伟,周柳强,谢如林,黄美福.蔗区降雨分布与甘蔗需水及加肥灌溉效应[J].西南农业学报,2008,21(5):1381-1384.
TAN H W, ZHOU L Q, XIE R L, HUANG M F. Sugarcane requirement of water and effect of application fertigation on sugarcane[J]. Southwest China Journal of Agricultural Sciences, 2008, 21(5): 1381-1384. (in Chinese)
- [2] 黄维,姚裕群,段居琦,刘永裕,吴炫柯,韦剑锋.1961—2020 年广西甘蔗干旱的时空变化特征分析[J].西南农业学报,2022,35(5):1193-1201.
HUANG W, YAO Y Q, DUAN J Q, LIU Y Y, WU X K, WEI J F. Temporal and spatial characteristic of sugarcane drought in Guangxi during 1961—2020[J]. Southwest China Journal of Agricultural Sciences, 2022, 35(5): 1193-1201. (in Chinese)
- [3] 谭宏伟,周柳强,谢如林,黄美福,黄金生.甘蔗实现减量施肥的理论与实践[J].广西糖业,2014(6):9-11.
TAN H W, ZHOU L Q, XIE R L, HUANG M F, HUANG J S. The theory and practice of reducing sugarcane implement fertilization[J]. Guangxi Sugar Industry, 2014(6): 9-11. (in Chinese)
- [4] 朱宁,曹博.甘蔗种植的化肥利用率及碳减排潜力分析[J].资源开发与市场,2018,34(10):1397-1399.
ZHU N, CAO B. Analysis of chemical fertilizer utilization ratio and carbon emission reduction potential of sugarcane cultivating[J]. Resource Development and Market, 2018, 34(10): 1397-1399. (in Chinese)
- [5] 谢金兰,李长宁,何为中,梁强,李毅杰,刘晓燕,梁圃,罗亚伟,谭宏伟,王维赞.甘蔗化肥减量增效的栽培技术[J].中国糖料,2017,39(1):38-41.
XIE J L, LI C N, HE W Z, LIANG Q, LI Y J, LIU X Y, LIANG T, LUO Y W, TAN H W, WANG W Z. Cultivation techniques of reducing fertilizer and increasing efficiency on sugarcane[J]. Sugar Crops of China, 2017, 39(1): 38-41. (in Chinese)
- [6] TAN H W, ZHOU L Q, XIE R L, HUANG M F. Effect of fertilizer application and the main nutrient limiting factors for yield and quality of sugarcane production in Guangxi red soil[J]. Tropics, 2005, 14(4): 383-392.
- [7] 黄振瑞,周文灵,江永,李奇伟,陈清,张福锁.优化施肥对甘蔗产量、养分吸收及肥料利用率的影响[J].热带作物学报,2015,36(9):1568-1573.
HUANG Z R, ZHOU W L, JIANG Y, LI Q W, CHEN Q, ZHANG F S. Effect of optimum fertilization on sugarcane yield, nutrient uptake and fertilizer use efficiency[J]. Chinese Journal of Tropical Crops, 2015, 36(9): 1568-1573. (in Chinese)
- [8] 李传哲,许仙菊,马洪波,安霞,盛金元,张永春.水肥一体化技术提高水肥利用效率研究进展[J].江苏农业学报,2017,33(2):469-475.
LI C Z, XU X J, MA H B, AN X, SHENG J Y, ZHANG Y C. Research advances in fertigation technology improving water and fertilizer use efficiency[J]. Jiangsu Journal of Agricultural Sciences, 2017, 33(2): 469-475. (in Chinese)
- [9] 区惠平,周柳强,黄金生,曾艳,朱晓晖,谢如林,谭宏伟,黄碧燕.长期不同施肥对甘蔗产量稳定性、肥料贡献率及养分流失的影响[J].中国农业科学,2018,51(10):1931-1939.
OU H P, ZHOU L Q, HUANG J S, ZENG Y, ZHU X H, XIE R L, TAN H W, HUANG B Y. Effects of long-term different fertilization on sugarcane yield stability, fertilizer contribution rate and nutrition loss[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2018, 51(10): 1931-1939. (in Chinese)
- [10] 许文其,宋时雨,杨昊霖,余杨.滴灌水肥一体化技术研究进展[J].现代农业科技,2018(3):196-197.
XU W Q, SONG S Y, YANG H L, YU Y. Research progress of drip fertigation technology[J]. Modern Agricultural Science and Technology, 2018(3): 196-197. (in Chinese)
- [11] 谭宏伟,刘永贤,周柳强,谢如林,杨尚东,黄金生,黄美福.基于滴灌条件下的甘蔗施肥减量技术研究[J].热带作物学报,2013,34(1):24-28.
TAN H W, LIU Y X, ZHOU L Q, XIE R L, YANG S D, HUANG J S, HUANG M F. Reduction fertilization tech-

- nologies under drip for sugarcane irrigation[J]. *Chinese Journal of Tropical Crops*, 2013, 34(1): 24-28. (in Chinese)
- [12] 邢颖, 谭裕模, 梁潘霞, 廖青, 潘丽萍, 黄太庆, 江泽普, 杨绍镔, 陈桂芬, 谢如林. 不同滴灌用肥配方对甘蔗苗期生长及养分积累的影响[J]. *江苏农业科学*, 2018, 46(15): 97-99.
- XING Y, TAN Y M, LIANG P X, LIAO Q, PAN L P, HUANG T Q, JIANG Z P, YANG S E, CHEN G F, XIE R L. Influences of different drip irrigation fertilization formula on seedling growth and nutrient accumulation of sugarcane[J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2018, 46(15): 97-99. (in Chinese)
- [13] 彭明戈. 滴灌条件下甘蔗减量施肥对甘蔗养分吸收特性产量及品质的影响[J]. *农业与技术*, 2019, 39(3): 33-34.
- PENG M G. Effects of reduced fertilization on characteristics of nutrient uptake, yield and quality of sugarcane under drip irrigation[J]. *Agriculture and Technology*, 2019, 39(3): 33-34. (in Chinese)
- [14] 陆树华, 张承林, 邓兰生, 黄小婷, 李先琨. 滴灌施肥条件下氮钾分配时期对甘蔗产量和品质的影响[J]. *节水灌溉*, 2009(4): 22-25.
- LU S H, ZHANG C L, DENG L S, HUANG X T, LI X K. Influence of time distribution of N and K fertilizer on yield and quality of sugarcane under drip fertilization[J]. *Water Saving Irrigation*, 2009(4): 22-25. (in Chinese)
- [15] 邓兰生, 陆树华, 沈宏, 涂攀峰, 张承林, 陈康. 滴灌施氮肥对甘蔗产量与品质的影响[J]. *灌溉排水学报*, 2010, 29(2): 119-123.
- DENG L S, LU S H, SHEN H, TU P F, ZHANG C L, CHEN K. Effects of N application rate on growth of sugarcane under drip fertigation[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2010, 29(2): 119-123. (in Chinese)
- [16] 黄好运, 李武, 谢立华, 向立华, 蒙秀娟, 谢爱玲, 韦丽蕊, 陈钦, 农天石. 滴灌技术对甘蔗农艺性状及产量的影响[J]. *现代农业科技*, 2010(19): 107-108.
- HUANG H Y, LI W, XIE L H, XIANG L H, MENG X J, XIE A L, WEI L R, CHEN Q, NONG T S. Effect of drip irrigation on sugarcane agronomic characters and yield[J]. *Modern Agricultural Sciences and Technology*, 2010(19): 107-108. (in Chinese)
- [17] SINGH K, BRAR A S, MISHRA S K. Improvement in productivity and profitability of sugarcane through drip fertigation in North Indian conditions[J]. *Sugar Tech*, 2020(23): 536-545.
- [18] 杨雪艳, 蒋代华, 杨钙仁, 黄智刚, 黄凯. 甘蔗水肥一体化种植对土壤微生物量碳氮和酶活性的影响[J]. *土壤通报*, 2018, 49(4): 889-896.
- YANG X Y, JIANG D H, YANG G R, HUANG Z G, HUANG K. Effects of water and fertilizer integration on soil microbial biomass carbon, nitrogen and enzyme activities in sugarcane[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2018, 49(4): 889-896. (in Chinese)
- [19] 王永, 张恒嘉, 李福强. 膜下滴灌水肥一体化研究进展[J]. *农业工程*, 2022, 12(4): 78-82.
- WANG Y, ZHANG H J, LI F Q. Research advances on integration of water and fertilizer under mulched drip irrigation[J]. *Agricultural Engineering*, 2022, 12(4): 78-82. (in Chinese)
- [20] 赵海雄. 糖料蔗膜下滴灌效应研究[J]. *中国农村水利水电*, 2015(9): 95-102.
- ZHAO H X. Research on the effects of sugarcane under film drip irrigation[J]. *China Rural Water and Hydropower*, 2015(9): 95-102. (in Chinese)
- [21] 杨雪, 陈砣. 广西地区甘蔗膜下滴灌技术的应用及增产潜力分析[J]. *现代农业科技*, 2015(20): 75, 77.
- YANG X, CHEN T. Application and analysis of production potential of drip irrigation technologies under film for sugarcane in Guangxi area[J]. *Modern Agricultural Science and Technology*, 2015(20): 75, 77. (in Chinese)
- [22] 陆树华, 邓兰生, 张承林, 涂攀峰, 许锐能, 李先琨. 钾肥施用分配比例对甘蔗生长的影响[J]. *灌溉排水学报*, 2010, 29(1): 60-63.
- LU S H, DENG L S, ZHANG C L, TU P F, XU R N, LI X K. Effects of potassium distribution on the growth of sugarcane under drip fertigation[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2010, 29(1): 60-63. (in Chinese)
- [23] 陈迪文, 吴庚福, 周文灵, 敖俊华, 江永, 李奇伟. 甘蔗糖分调控因素与增糖应用研究现状[J]. *甘蔗糖业*, 2020(3): 43-51.
- CHEN D W, WU G F, ZHOU W L, AO J H, JIANG Y, LI Q W. Research progresses of sugar regulation factors and sugar-increasing application in sugarcane[J]. *Sugarcane and Canesugar*, 2020(3): 43-51. (in Chinese)