

膜下滴灌减量施肥对甘蔗脱毒原种苗田间繁育效率和养分利用率的影响

彭李顺^{1,2,3}, 曹峥英^{2,3}, 蔡文伟^{2,3}, 杨本鹏^{2,3}, 杨 学⁴

1. 广西热带农业科学研究院, 广西崇左 532199; 2. 中国热带农业科学院热带生物技术研究所/热带作物生物育种全国重点实验室, 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; 4. 广西久洋禾农业科技有限公司, 广西崇左 532199

摘 要: 本研究探讨不同膜下滴灌减量施肥模式对甘蔗脱毒原种苗生长、繁育效率及肥料利用率的影响, 并分析最佳减量施肥模式, 旨在为科学指导甘蔗脱毒原种苗田间繁育过程中滴灌施肥技术的应用提供理论依据。在所有对照和处理均配备膜下滴灌系统并进行水分管理的条件下, 以空白对照 (CK₀)、常规施肥 (CK₁) 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 (减量施肥 20%、30% 和 40%), 对甘蔗脱毒原种苗繁育过程中主要农艺性状、种茎产量、总芽数、繁育效率及养分利用率等指标进行比较分析。研究结果表明: 在各项农艺指标中, 2022、2023 年 T₁₀₀ 和 T₈₀ 的平均分蘖率略低于 CK₁, 但在成茎率、单株芽数、有效茎数方面较 CK₁ 均有显著提升。在繁育总种芽数上, T₁₀₀ 和 T₈₀ 最高, 年平均分别达到 $(1480.87 \times 10^3)/\text{hm}^2$ 和 $(1477.87 \times 10^3)/\text{hm}^2$, 显著高于 CK₁ 的 $(1302.50 \times 10^3)/\text{hm}^2$; T₇₀ 与 CK₁ 间差异不显著; T₆₀ 最低仅为 $(1170.53 \times 10^3)/\text{hm}^2$ 。在繁育效率方面, 原种苗田间繁育倍数 T₁₀₀ 和 T₈₀ 最高, 分别达到 66.64 倍和 66.50 倍; 其次为 T₇₀ 和 CK₁, 繁育倍数为 59.61 倍和 58.61 倍; T₆₀ 繁育倍数最低, 为 52.67。在繁育收益方面, 相较于 CK₀, T₁₀₀ 和 T₈₀ 收益增幅最高, 分别达到 5.82 和 5.87 万元/hm²; 其次为 T₇₀, 收益增幅为 4.19 万元/hm², 略高于 CK₁ (3.84 万元/hm²); T₆₀ 最低, 仅为 2.51 万元/hm²。在肥料投入产出比方面, T₈₀ 最高, 达到 1:21.89, 明显高于 T₁₀₀ (1:17.36); CK₁ 最低, 为 1:11.45。在肥料利用率方面, 所有施肥处理中, 氮、磷、钾肥的利用率均为 CK₁ 最低。而 T₈₀ 最高, 试验平均氮、磷、钾肥利用率分别达到 51.57%、27.37% 和 67.45%, 分别较 CK₁ 提高了 21.21、10.37 和 23.13 个百分点。综上所述, 在中等肥力红壤蔗区, 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脱毒原种苗繁育效率和收益。

关键词: 甘蔗脱毒种苗; 膜下滴灌施肥; 化肥减施; 繁育效率; 养分利用率

中图分类号: S566.1 文献标志码: A

Effects of Reduced Fertilization on Field Propagation Efficiency and Fertilizer Utilization Rate of Disease-free Sugarcane Original Seedlings under Mulched Drip Fertigation System

PENG Lishun^{1,2,3}, CAO Zhengying^{2,3}, CAI Wenwei^{2,3}, YANG Benpeng^{2,3}, YANG Xue⁴

1. Guangxi Academy of Tropical Agricultural Sciences, Chongzuo, Guangxi 532199, China; 2. Institute of Tropical Bioscience and Biotechnology, Chinese Academy of Tropical Agricultural Sciences / National Key Laboratory for Tropical Crop Breeding, Haikou, Hainan 571101, China; 3. Sanya Research Institute, Chinese Academy of Tropical Agricultural Sciences, Sanya, Hainan 572024, China; 4. Guangxi Jiuyanghe Agricultural Science and Technology Co., Chongzuo, Guangxi 532199, China

Abstract: The present study investigated the effects of chemical fertilizer reduction patterns on the growth, field propagation efficiency, and fertilizer utilization rate of disease-free sugarcane original seedlings to provide a theoretical basis

收稿日期 2024-08-06; 修回日期 2024-09-04

基金项目 广西科技重大专项 (桂科 AA22117003); 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, 副研究员, 研究方向: 植物营养与甘蔗高产栽培; E-mail: penglishun@itbb.org.cn。

for the application of mulched drip fertigation, and to identify the optimal pattern for reducing fertilizer in the field propagation of disease-free sugarcane original seedlings. Under the condition of drip irrigation management, six different treatments were set: no fertilization (CK_0), conventional fertilization (CK_1), mulched drip fertigation T_{100} (fertilizer amount equated with CK_1) and T_{80} , T_{70} , T_{60} (20%, 30% and 40% reduction of the fertilization rate in T_{100}). A comparative analysis was done on the main agronomic traits, total bud count per unit area, propagation efficiency, economic benefit, and nutrient utilization rate during the field propagation of disease-free sugarcane original seedlings. The results showed that the two-year average tillering rate in the treatment T_{100} and T_{80} was slightly lower than that in CK_1 . However, significant improvement was observed in the stalk formation rate, the number of buds per plant, and the number of millable stalks compared to CK_1 . Notably, T_{100} and T_{80} exhibited the highest values for the total number of propagation buds, with averages 1.4809 million buds/hm² and 1.4779 million buds/hm², respectively in two years, both significantly exceeding the 1.3025 million buds/hm² in CK_1 . In contrast, there was no significant difference between T_{70} and CK_1 , while T_{60} had the lowest value of only 1.1705 million buds/hm². T_{100} and T_{80} showed the highest field propagation multiples of original seedlings, reaching 66.64 and 66.50 times, respectively, followed by T_{70} and CK_1 with propagation multiples of 59.61 and 58.61 times, respectively, and T_{60} had the lowest propagation multiple of 52.67. Compared to CK_0 without fertilization, T_{100} and T_{80} achieved the highest income increase, reaching 58 200 and 58 700 Yuan/hm², respectively, followed by T_{70} with an income increase of 41 900 Yuan/hm² which was slightly higher than CK_1 's 38 400 yuan/hm²; T_{60} had the lowest income increase of only 25 100 Yuan/hm². Regarding the fertilizer input-output ratio, T_{80} had the highest ratio of 1 : 21.89, significantly exceeding that of 1 : 17.36, while CK_1 had the lowest ratio of 1 : 11.45. Among all the fertilization treatments, CK_1 had the lowest utilization rates of nitrogen, phosphorus, and potassium fertilizers. Furthermore, T_{80} boasted the highest fertilizer utilization rates, with 51.57% for nitrogen, 27.37% for phosphorus, and 67.45% for potassium in two-year averages, which was 21.21%, 10.37%, and 23.13% higher than those in CK_1 , respectively. In conclusion, for laterite soil with medium fertility, the mulched drip fertigation pattern T_{80} performed the best in field propagation efficiency and economic benefits for disease-free sugarcane seedlings.

Keywords: disease-free sugarcane original seedlings; mulched drip fertigation; reduction fertilization; propagation efficiency; fertilizer utilization rate

DOI: 10.3969/j.issn.1000-2561.2025.01.012

甘蔗是我国最重要的糖料作物，种植面积常年在 120 万 hm² 以上，也是我国热带、亚热带地区第一大经济作物^[1-2]。作为使用蔗茎腋芽进行无性繁殖的作物，长期使用自留种或常规繁育种苗种植，极易通过种苗传播导致宿根矮化病、甘蔗花叶病等多种病原物积累，反复侵染蔗株，造成产量、蔗糖分下降，宿根年限缩短以及种性退化^[3-4]。通过恒温热处理结合腋芽分生组织培养方法培育的甘蔗脱毒健康种苗可有效抑制这些病害发生^[5-7]，同时较常规种苗具有分蘖率高、产量高、宿根性好、用种量少等特点^[8-10]。因此，推广种植甘蔗脱毒健康种苗是目前防止种苗带病传播和优良品种种性退化，以及促进甘蔗生产提质增效最为经济有效的措施。

甘蔗脱毒健康种苗推广种植离不开种苗高效经济田间繁育技术，其中由脱毒原种苗到脱毒健康种茎的田间繁育过程是最重要的环节之一^[11]。甘蔗脱毒原种苗具有生长速度快、分蘖率高的特点，在近 6 个月的田间繁育生物量高速累积过程中，水肥及时合理供给至关重要，其与种苗成活

率、种苗质量、繁育效率和经济性密切相关^[12-13]，是甘蔗脱毒健康种苗规模化繁育技术关键环节。目前，在水分管理环节，由于甘蔗脱毒原种苗移栽大田后，存在根系生长和植株扩展适应期，在规模化繁育过程中普遍均会配备膜下滴灌系统进行水分补给以保证种苗移栽后成活率^[11, 13]。同时，近期针对甘蔗脱毒原种苗繁育过程中各时期水分需求规律的研究，也可为生产上合理的水分滴灌供给提供参考^[14]。然而，在原种苗田间规模化繁育的养分管理方面，尽管普遍配备了滴灌设施，但目前仍然主要参照原料蔗常规施肥方法，即在移栽种植前沟施基肥，然后在拔节初期结合中耕培土追肥。相对滴灌施肥，常规施肥普遍存在肥料供给与植株养分需求不匹配、肥料利用率低、浪费严重以及产量品质提升困难等诸多问题。

目前，在原料蔗生产上，滴灌施肥技术已被广泛研究和应用，多项研究表明，滴灌施肥可以明显提高肥料利用率、促进产量与蔗糖分提升^[15-18]。然而，关于甘蔗脱毒原种苗繁育过程中滴灌施肥技术研究与应用仍鲜有报道。同时，与原料蔗强

调产量和蔗糖分不同，甘蔗脱毒原种苗繁育更注重种苗质量、种芽数量及繁育效率，必然导致二者在养分管理方面存在较大差异。因此，本研究在前期对甘蔗脱毒原种苗繁育过程中不同生长时期氮、磷、钾元素的养分吸收累积规律系统分析的基础上^[19]，以不施肥、常规施肥处理为对照，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脱毒原种苗在田间繁育过程中主要农艺性状、种茎产量、种芽数量、繁育效率、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脱毒原种苗田间繁育最佳施肥模式，以期对甘蔗脱毒原种苗高效繁育和化肥减施增效提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 材料

供试甘蔗品种为中糖 3 号，由中国热带农业科学院热带生物技术研究所选育，并培育其相应脱毒原种苗用于本试验。试验分别于 2022—2023 年在广西壮族自治区崇左市扶绥县昌平乡国家甘蔗脱毒健康种苗繁育基地（22°42′34.934″N；107°54′28.422″E）进行。试验地块土壤类型为赤红壤，pH 4.9，有机质为 12.5 g/kg，碱解氮为 111.5 mg/kg、有效磷为 26.8 mg/kg、速效钾为 105.2 mg/kg。

1.2 方法

1.2.1 试验设计 田间试验分 2022、2023 年开展，第 1 年试验于 2022 年 6 月 10 日将在温室大棚炼苗后的甘蔗脱毒原种苗先移栽至苗圃地进行穴盘假植，待 80%以上种苗生长至 1 心 6~8 叶时，于 2022 年 7 月 5 日再移栽种植至大田，最后于 2023 年 1 月 10 日收获；第 2 年试验于 2023 年 6 月 15 日进行甘蔗脱毒种苗穴盘移栽假植，2023 年 7 月 10 日移栽至大田，2024 年 1 月 15 日收获。

2022、2023 年试验均配备膜下滴灌设施，并采用大小行种植，大行距为 1.4 m，小行距为 0.4 m，株距为 0.5 m，每公顷移栽种植甘蔗脱毒原种苗 22 222 株。试验共设置 6 个处理：（1）CK₀，膜下滴灌清水+不施肥；（2）CK₁，膜下滴灌清水+常规施肥；（3）T₁₀₀，膜下滴灌施肥；（4）T₈₀，膜下滴灌施肥减量 20%；（5）T₇₀，膜下滴灌施肥减量 30%；（6）T₆₀，膜下滴灌施肥减量 40%。各处理施肥量见表 1。每个处理均设置 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，单个小区面积为 450 m²。

CK₁ 常规施肥分 2 次施用，基肥在移栽种植前在种植沟施用肥料总量的 40%，追肥在拔节初期结合中耕培土施用剩余 60% 肥料。其余膜下滴灌施肥各处理采用膜下滴灌方式施肥，使用滴孔间距为 0.2 m 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 0.8 m 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 行甘蔗种苗的水肥膜下滴灌供给。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，分别在移栽种植完成后 10 d 施用肥料总量 10%，分蘖完成 50% 时再施用 15%，然后在拔节期至收获期分 3 次施用，每次施用 25%。所有处理水分管理均根据土壤墒情进行同步水分膜下滴灌补水，其余病虫害均同常规管理。

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 滴灌清水+不施肥	0	0	0
CK ₁ 滴灌清水+常规施肥	270	135	180
T ₁₀₀ 滴灌施肥不减量	270	135	180
T ₈₀ 滴灌施肥减量 20%	216	108	144
T ₇₀ 滴灌施肥减量 30%	189	94.5	126
T ₆₀ 滴灌施肥减量 40%	162	81	108

1.2.2 指标测定 在甘蔗脱毒原种苗移栽种植 10 d 后和分蘖后期分别调查各处理小区种苗的成活率和分蘖率。甘蔗种苗收获时，在各处理小区连续调查 20 株甘蔗种苗株高、茎径、单株芽数。然后，调查和砍收每个小区中间 6 行，30 m 区域内的甘蔗株数和重量，并计算公顷有效茎数、总芽数、种茎产量及繁育倍数。

同时，在每个处理小区随机取 5 株生长正常的甘蔗种苗，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 ℃ 杀青 30 min，然后 70 ℃ 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测定，全磷含量用钼锑抗比色法测定，全钾含量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=(施肥处理种苗吸收养分量-不施肥处理种苗吸收养分量)/施肥量×100%。其中：养分吸收量=种茎干物质重×种茎养分含量+（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。肥料成本中，纯 N 5.4 元/kg，P₂O₅ 6.3 元/kg，K₂O 5.8 元/kg；蔗种收益为蔗种产值减去采收成本，其中蔗种产值按照蔗芽数量计算，后续甘蔗脱毒种茎种植按照 67 500 芽/hm²，种茎价格为 9000 元/hm²，即单芽产值 1333.3 元/万芽，采收成本（田间采收后砍成双芽段）约为 222.2 元/万芽，蔗种收益约为 1111.1 元/万芽。

1.3 数据处理

采用 Excel 2019 等软件对数据进行处理，采用 DPS 15.1 软件进行单因素方差分析。

2 结果与分析

2.1 不同处理对甘蔗脱毒原种苗主要农艺性状的影响

由表 2 可知，2022、2023 年，各处理下的原种苗移栽至大田的成活率均在 97.5%以上，且无显著差异。由于所有处理均安装滴灌设施并及时进行了水分滴灌管理，因此确保了各处理移栽后原种苗的高成活率。在分蘖率方面，CK₁ 分蘖率最高，2022、2023 年分蘖率分别达到 582.54%和 601.59%，但与 T₁₀₀ 和 T₈₀ 无显著差异。随着施肥量进一步减少，分蘖率开始呈现下降趋势，2022、2023 年 T₇₀ 和 T₆₀ 处理分蘖率已显著低于 CK₁，且 2023 年 T₆₀ 处理分蘖率相对于 T₇₀ 进一步显著下降。这表明在分蘖期肥料充分供给对于原种苗维持较高分蘖率至关重要。

表 2 不同施肥处理甘蔗脱毒原种苗田间繁育主要农艺性状
Tab. 2 Main agronomic traits in different fertilization treatments of disease-free sugarcane original seedlings for field propagation

年度 Year	处理 Treatment	成活率 Survival rate/%	分蘖率 Tillering rate/%	株高 Plant height/m	茎径 Stalk diameter/mm	有效茎数 Millable stalk number/(10 ³ ·hm ⁻²)	成茎率 Stalk formation rate/%
2022	CK ₀	98.17±1.61 ^a	411.11±21.47 ^c	1.63±0.02 ^d	20.48±0.21 ^b	69.63±1.63 ^d	63.24±1.84 ^{bc}
	CK ₁	97.67±0.76 ^a	582.54±7.27 ^a	1.78±0.04 ^{ab}	21.55±0.72 ^a	91.48±2.25 ^b	62.17±0.86 ^c
	T ₁₀₀	98.50±0.50 ^a	538.10±21.82 ^{ab}	1.84±0.07 ^a	21.22±0.63 ^{ab}	96.85±2.97 ^a	70.52±4.56 ^{ab}
	T ₈₀	98.33±1.04 ^a	534.92±59.54 ^{ab}	1.82±0.04 ^{ab}	21.23±0.17 ^{ab}	96.30±1.81 ^a	70.87±8.15 ^a
	T ₇₀	97.83±0.29 ^a	522.22±26.23 ^b	1.75±0.07 ^{bc}	21.30±0.98 ^{ab}	90.37±0.85 ^b	67.47±3.38 ^{abc}
	T ₆₀	98.83±0.76 ^a	487.30±15.31 ^b	1.67±0.01 ^{cd}	21.02±0.38 ^{ab}	84.91±1.40 ^c	67.11±2.30 ^{abc}
2023	CK ₀	97.83±0.29 ^a	430.16±24.44 ^d	1.59±0.05 ^d	20.99±0.11 ^a	73.15±3.31 ^d	64.01±0.51 ^b
	CK ₁	98.67±0.76 ^a	601.59±33.78 ^a	1.80±0.02 ^{ab}	21.34±0.29 ^a	94.91±0.89 ^b	62.81±1.72 ^b
	T ₁₀₀	99.17±0.29 ^a	571.43±23.81 ^{ab}	1.84±0.05 ^a	21.19±0.45 ^a	99.07±1.40 ^a	68.50±2.04 ^a
	T ₈₀	98.00±0.50 ^a	568.25±26.23 ^{ab}	1.81±0.06 ^{ab}	21.22±1.09 ^a	98.52±0.98 ^a	68.16±3.38 ^a
	T ₇₀	97.83±1.04 ^a	542.86±14.29 ^b	1.76±0.06 ^{bc}	21.17±0.99 ^a	91.94±2.00 ^b	66.36±1.15 ^{ab}
	T ₆₀	98.50±0.87 ^a	493.65±13.75 ^c	1.71±0.02 ^c	21.31±0.25 ^a	84.26±2.36 ^c	65.89±3.04 ^{ab}

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).

在株高方面，CK₀ 与 2022 年的 T₆₀ 之间差异不显著，其余均显著低于其他施肥处理。在各施肥处理之间，T₁₀₀、T₈₀ 处理与 CK₁ 之间差异不显著，但随着施肥量减少，T₇₀ 和 T₆₀ 处理的株高呈现下降趋势。其中，T₇₀ 处理株高显著低于 T₁₀₀，T₆₀ 处理株高相较于 CK₁ 和 T₁₀₀、T₈₀ 处理均出现显著下降。在蔗株茎径方面，各处理间相对差异较小，且均能满足茎径不小于 20 mm 的种茎质量要求。2022 年，仅 CK₀ 与 CK₁ 在茎径上差异显著，

其他施肥处理之间差异不显著。2023 年，所有处理之间茎径差异均不显著。

在有效茎数方面，2022、2023 年变化趋势基本一致，均为 CK₀ 最低，显著低于其他施肥处理。与 CK₁ 相比，T₁₀₀ 和 T₈₀ 处理有效茎数均显著增加，但二者之间差异不显著。随着施肥量逐步减少，T₇₀ 处理的有效茎数与 CK₁ 之间差异不显著，T₆₀ 处理则表现为显著下降。

在成茎率方面，2022、2023 年均显示分蘖率

最高的 CK₁ 的成茎率却最低，分别为 62.17%和 62.81%，与分蘖率最低的 CK₀ 的成茎率相当。进一步比较发现，2022、2023 年均为 T₁₀₀ 和 T₈₀ 处理的成茎率最高，且显著高于 CK₁，分别提高了 8.50 和 5.52 个百分点。相比之下，T₇₀ 和 T₆₀ 处理的成茎率略高于 CK₁，差异不显著。

2.2 不同施肥处理对甘蔗原种苗繁育种茎产量和有效芽数的影响

由表 3 可知，在脱毒种茎产量方面，2022、2023 年均为 CK₀ 最低，显著低于其他施肥处理。T₁₀₀ 处理脱毒种茎产量最高，分别达到 79.43、

80.57 t/hm²，显著高于 T₇₀ 和 T₆₀ 处理，但与 CK₁ 及 T₈₀ 间无显著差异。

在单株芽数方面，2023 年 CK₁ 的单株芽数比 2022 年多 1.21，且显著大于 T₆₀ 和 CK₀，2022 年 CK₁ 单株芽数则与 T₆₀ 和 CK₀ 之间均差异不显著。而在各滴灌施肥处理中，2022、2023 年均为 T₁₀₀ 和 T₈₀ 处理单株芽数最高。除 2022 年 T₁₀₀ 处理单株芽数达到 14.93 以外，其余均在 15 以上。随着滴灌施肥量继续减少，单株芽数也呈现持续减少的趋势。其中，2023 年的 T₇₀ 处理以及 2022、2023 年的 T₆₀ 处理单株芽数均显著低于 T₁₀₀ 和 T₈₀ 处理。

表 3 不同施肥处理甘蔗脱毒原种苗田间繁育的种茎产量和芽数
Tab. 3 Seedcane yield and bud number in different fertilization treatments of disease-free sugarcane original seedlings for field propagation

处理 Treatment	种茎产量 Seedcane yield/t/hm ²		单株芽数 Number of buds per plant		总芽数 Number of buds/(10 ³ ·hm ⁻²)		繁育倍数 Expand Propagation multiples
	2022	2023	2022	2023	2022	2023	平均 Mean
CK ₀	48.27±1.33 ^d	51.91±3.37 ^d	12.76±0.27 ^d	13.19±0.17 ^d	888.53±39.24 ^d	964.44±40.90 ^d	41.69
CK ₁	74.27±5.52 ^{ab}	74.26±2.04 ^{ab}	13.36±0.26 ^{cd}	14.57±0.13 ^b	1221.74±30.49 ^{bc}	1383.26±25.47 ^b	58.61
T ₁₀₀	79.43±8.03 ^a	80.57±4.27 ^a	14.93±0.34 ^a	15.30±0.14 ^a	1446.25±74.51 ^a	1515.49±24.52 ^a	66.64
T ₈₀	78.70±1.13 ^{ab}	79.18±5.88 ^{ab}	15.12±0.61 ^a	15.21±0.38 ^a	1456.73±86.30 ^a	1499.01±51.23 ^a	66.50
T ₇₀	71.06±4.60 ^b	71.86±6.08 ^{bc}	14.56±0.54 ^{ab}	14.50±0.34 ^b	1315.58±41.00 ^b	1333.68±50.65 ^b	59.61
T ₆₀	62.35±2.71 ^c	64.65±2.81 ^c	13.96±0.29 ^{bc}	13.72±0.20 ^c	1185.45±38.34 ^c	1155.60±28.32 ^c	52.67

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).

在总芽数方面，2022、2023 年均为 T₁₀₀ 和 T₈₀ 处理总芽数最多，均达到(1400×10³)/hm² 以上，且显著高于其他处理。随着施肥量减少，T₇₀ 和 T₆₀ 处理总芽数呈现显著下降趋势，CK₁ 总芽数与 T₇₀ 较为接近，但显著高于 T₆₀ 处理。CK₀ 总芽数最少，均在(1000×10³)/hm² 以下，且显著低于其他处理。

在繁育效率方面，对 2022、2023 年单位面积内原种苗繁育种芽倍数进行计算。结果显示，原种苗田间繁育倍数 T₁₀₀ 和 T₈₀ 表现最为突出，分别达到 66.64 倍和 66.50 倍。其次为 T₇₀ 和 CK₁，繁育倍数分别为 59.61 倍和 58.61 倍。当减量施肥 40% 时，T₆₀ 繁育倍数下降至 52.67 倍。相比之下，CK₀ 繁育倍数最低，仅为 41.69 倍。

2.3 不同施肥处理对甘蔗脱毒原种苗田间繁育效益的影响

由表 4 可以看出，在去除脱毒种茎采收和双芽段种茎制作等成本后，T₁₀₀ 和 T₈₀ 处理的种茎收

益最高，均超过 16 万元/hm²，显著高于其他处理。在去除肥料成本之后，与 CK₀ 相比，各施肥处理收益均显著增加。其中，T₈₀ 处理的收益增幅最大，达到 5.87 万元/hm²；T₁₀₀ 处理收益增幅略低于 T₈₀ 处理，为 5.82 万元/hm²；其次为 T₇₀、CK₁ 处理，分别达到 4.19、3.84 万元/hm²；T₆₀ 处理最低，为 2.51 万元/hm²。在投入产出比方面，T₈₀ 处理的比例最高，达到 1：21.89，CK₁ 的比例最低，为 1：11.45。

2.4 不同施肥处理对甘蔗脱毒种苗养分利用率的影响

由表 5 可知，2022、2023 年 T₁₀₀、T₈₀、T₇₀ 处理的氮、磷、钾肥利用率均显著高于 CK₁，T₆₀ 除磷肥利用率仍显著高于 CK₁，氮、钾肥利用率与 CK₁ 无显著差异。总体而言，在滴灌施肥各处理中，T₈₀ 处理的氮、磷、钾肥的 2022、2023 年平均利用率均为最高，分别达到 51.57%、27.37%、67.45%，相较于 CK₁，分别提高了 21.21、10.37、23.13 个百分点。

表 4 不同施肥处理甘蔗脱毒原种苗田间繁育效益

Tab. 4 Benefits from field propagation of disease-free sugarcane original seedlings with different fertilization treatments

处理 Treatment	种茎收益 Seedcane income/(万元·hm ⁻²)		肥料成本 Fertilizer cost/(元·hm ⁻²)		相对 CK ₀ 增加收益 Increased benefit compared with CK ₀ /(万元·hm ⁻²)	肥料投入产出比 Ratio of input to output of fertilizer
	2022	2023	2022	2023	平均 Mean	平均 Mean
CK ₀	9.87±0.44 ^d	10.72±0.45 ^d				
CK ₁	13.57±0.34 ^{bc}	15.37±0.44 ^b	3352.50	3352.50	3.84	1 : 11.45
T ₁₀₀	16.07±0.83 ^a	16.84±0.27 ^a	3352.50	3352.50	5.82	1 : 17.36
T ₈₀	16.19±0.96 ^a	16.66±0.57 ^a	2682.00	2682.00	5.87	1 : 21.89
T ₇₀	14.62±0.46 ^b	14.82±0.56 ^b	2346.75	2346.75	4.19	1 : 17.86
T ₆₀	13.17±0.43 ^c	12.84±0.31 ^c	2011.50	2011.50	2.51	1 : 12.48

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 ($P<0.05$).

表 5 不同施肥处理甘蔗脱毒种苗田间繁育的主要养分利用率

Tab. 5 Utilization rate of main nutrients in field propagation of disease-free sugarcane original seedlings with different fertilization treatments

处理 Treatment	氮肥 Nitrogen fertilizer		磷肥 Phosphorus fertilizer		钾肥 Potassium fertilizer	
	2022	2023	2022	2023	2022	2023
CK ₁	29.18±4.08 ^c	31.54±3.32 ^d	17.46±1.23 ^c	16.53±0.94 ^d	43.21±5.42 ^c	45.42±2.78 ^c
T ₁₀₀	44.71±6.75 ^{ab}	49.17±0.98 ^{ab}	24.64±1.94 ^{ab}	25.44±2.24 ^{ab}	62.91±6.54 ^{ab}	66.39±2.57 ^a
T ₈₀	49.70±0.33 ^a	53.43±5.89 ^a	27.21±2.30 ^a	27.52±2.14 ^a	66.78±6.61 ^a	68.11±8.98 ^a
T ₇₀	43.95±5.94 ^{ab}	44.13±5.07 ^{bc}	25.80±2.50 ^a	23.69±2.71 ^{bc}	53.99±9.84 ^{bc}	60.56±10.98 ^{ab}
T ₆₀	36.94±3.19 ^{bc}	38.74±4.38 ^{cd}	22.12±1.17 ^b	21.03±1.50 ^c	45.63±5.00 ^c	50.19±1.82 ^{bc}

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

与原料蔗生产周期长达 1 a，收获时对单位面积蔗茎产量和蔗糖分含量有着更高要求不同，甘蔗脱毒原种苗繁育生产周期通常为 6~7 个月，在种茎采收时，需要更多地对侧芽活力、单位面积种芽数量、繁育效率等指标进行综合考虑。对于种茎侧芽活力，通常要求采收时单株种茎侧芽数量不超过 15，以确保基部芽眼保持饱满、新鲜状态，并具有较强的萌发能力^[11]。在本研究中，采收时，各处理单株种茎平均侧芽数量介于 12.76~15.30 之间，这意味着收获的种芽活力基本都能够得到保证。同时，T₁₀₀ 和 T₈₀ 单株芽数均显著高于 CK₁，T₇₀ 和 T₆₀ 的单株芽数较 CK₁ 无显著差异、甚至显著减少。这表明，在保证充足肥料供给条件下，相较于常规施肥，采用少量多次的滴灌施肥方式可以有效促进种苗拔节后的快速生长，从而获得更多茎节和种芽。

除单株芽数外，有效茎数是决定单位面积总

芽数和繁育效率的另一关键指标。单位面积有效茎数由各处理种苗成活率、分蘖率和成茎率共同决定。由于配套水分滴灌系统，所有处理移栽种苗均保持了 97.5% 以上的高成活率。同时，原种苗具有分蘖快和分蘖率高的特性，移栽后通常在 30 d 内即可完成分蘖并进入拔节期，前期养分供给量较多（占总施肥量 40% 的基肥）的 CK₁ 平均分蘖率达到 592.05%。除 T₆₀ 外，其余滴灌施肥处理的分蘖率也均在 520% 以上，已可为后期拔节生长提供足够分蘖苗。因此，成茎率成为决定有效茎数、总芽数和繁育效率的关键。本研究中，T₁₀₀ 和 T₈₀ 的平均成茎率最高，达到 69.5%，高 CK₁ 近 7 个百分点，最终在有效茎数、总芽数和繁育效率上均显著高于 CK₁。这可能是由于滴灌施肥将 75% 的肥料在分蘖完成后分多次施用，同时通过水肥融合作用，促进拔节期养分吸收量增加，进而提升成茎率和有效茎数。多个在原料蔗中研究也证实，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主要养分吸收和累积量,进而促进蔗茎单位面积数量和产量提升^[20-22]。

在甘蔗脱毒原种苗的田间繁育效益方面,由于前期原种苗的培育成本和后期田间移栽种植的管理成本均显著高于常规种苗的繁育成本,同时繁育出的脱毒种茎具有更强的侧芽萌发和分蘖能力,使得种植时可以大幅减少用种量。因此,采用计算单位面积内种植种芽数量的方式替代单纯使用种茎重量的方式会更为合理。目前,在普遍采用大小行机械化种植的条件下,如大行距为 1.4 m,小行距为 0.4 m 时,每公顷种植 33 750 双芽段(即 67 500 芽)即可满足种植需要。每公顷所需脱毒种苗的销售价格约为 9000 元,这与目前广西区政府对于甘蔗脱毒种苗种植补贴的标准基本一致。在本研究中,去除脱毒种苗采收和肥料成本后,相较于 CK₀, T₈₀ 的种茎收益增幅最高,达到 5.87 万元/hm², T₁₀₀ 的收益增幅与之接近,为 5.82 万元/hm²。在肥料投入产出比方面, T₈₀ 依然表现最佳,达到 1:21.89,这一比例明显高于 T₁₀₀ 的 1:17.36。同时,所有采用滴灌施肥处理的肥料投入产出比均高于 CK₁。这些结果充分表明,在种苗繁育过程中,采用滴灌施肥方法相较于常规施肥方法能够显著提高肥料的生产效益。其中,减量 20%的 T₈₀ 施肥模式在当前条件下是相对效率最高的施用模式。

同样,在肥料利用率的分析中也得到了验证。在所有施肥处理中,CK₁ 的氮、磷、钾肥平均利用率均最低,而 T₈₀ 肥料利用率最高,较 CK₁ 分别提高了 21.21、10.37 和 23.13 个百分点。究其原因,膜下滴灌施肥技术除了通过地膜覆盖和少量多次施肥方式,有效减少了肥料的挥发和淋失,同时提高了成茎率并减少无效分蘖,从而避免了无效分蘖苗对养分的过度消耗,进而提升肥料利用率。相比之下,CK₁ 由于具有最高的分蘖率和最低的成茎率,导致其肥料利用率偏低。而 T₈₀ 则具有相对均衡的分蘖率和最高的成茎率,这是其实现高肥料利用率的关键因素。此外,由于原种苗本身具有高分蘖的特性,其后期成茎率普遍不高,即便是 T₈₀ 的平均成茎率也仅在 70%左右。今后,可进一步利用膜下滴灌系统对甘蔗脱毒原种苗在不同阶段的施肥量进行精准调控,以平衡繁育过程中的分蘖和成茎关系,提高最终成茎率,进而提升肥料利用率和最终种苗繁育效率。

参考文献

- [1] 刘晓雪,田冰,白晨.我国糖料产业发展特点、问题与趋势[J].中国糖料,2019,41(2):47-51,2.
LIU X X, TIAN B, BAI C. Characteristics, problems and development trends of sugar crop industry in China[J]. Sugar Crops of China, 2019, 41(2): 47-51, 2. (in Chinese)
- [2] 张跃彬,邓军,胡朝晖.“十三五”我国蔗糖产业现状及“十四五”发展趋势[J].中国糖料,2022,44(1):71-76.
ZHANG Y B, DENG J, HU Z H. The 13th Five-Year Plan of cane sugar industry in China and development trend of the 14th Five-Year Plan[J]. Sugar Crops of China, 2022, 44(1): 71-76. (in Chinese)
- [3] VISWANATHAN R. Varietal degeneration in sugarcane and its management in India[J]. Sugar Tech, 2016, 18(1): 1-7.
- [4] BAGYALAKSHMI K, VISWANATHAN R, RAVICHANDRAN V. Impact of the viruses associated with mosaic and yellow leaf disease on varietal degeneration in sugarcane[J]. Phytoparasitica, 2019, 47: 591-604.
- [5] 许莉萍,陈如凯,李跃平.利用愈伤组织培养和茎尖培养去除甘蔗花叶病毒[J].福建农业大学学报,1994,23(3):253-256.
XU L P, CHEN R K, LI Y P. Elimination of sugarcane mosaic virus by callus tissue culture and apical culture[J]. Journal of Fujian Agriculture and Forestry University (Natural Science Edition), 1994, 23(3): 253-256. (in Chinese)
- [6] 杨本鹏,张树珍,杨学,王业桥,顾丽红,冯翠莲,蔡文伟,张显勇.甘蔗健康种苗培育体系的建立[J].热带作物学报,2006,27(4):74-77.
YANG B P, ZHANG S Z, YANG X, WANG Y Q, GU L H, FENG C L, CAI W W, ZHANG X Y. Establishment of a disease-free seed canes propagation system for sugarcane[J]. Chinese Journal of Tropical Crops, 2006, 27(4): 74-77. (in Chinese)
- [7] 唐红琴,方锋学,韦金菊,李松,淡明,谭芳,刘惜辉.甘蔗茎尖脱毒组织培养技术研究进展[J].南方农业学报,2011,42(8):860-865.
TANG H Q, FANG F X, WEI J J, LI S, TAN M, TAN F, LIU X H. Advances in research on virus-free meristem tip tissue culture technology for sugarcane[J]. Journal of Southern Agriculture, 2011, 42(8): 860-865. (in Chinese)
- [8] 沈万宽,郑学文,陈仲华,龙超文,黄国庆,邓海华.甘蔗健康种苗田间评价试验结果分析[J].西南农业学报,2009,22(4):913-915.
SHEN W K, ZHENG X W, CHEN Z H, LONG C W, HUANG G Q, DENG H H. Analysis of results from sugarcane healthy seedcanetrial in field[J]. Southwest China Journal of Agricultural Sciences, 2009, 22(4): 913-915. (in Chinese)

- [9] 杨本鹏, 张树珍, 蔡文伟, 张洪溢, 龚康达, 王永壮, 冯翠莲, 王俊刚, 杨学. 甘蔗健康种苗田间栽培主要农艺性状比较[J]. 热带作物学报, 2010, 31(2): 171-175.
YANG B P, ZHANG S Z, CAI W W, ZHANG H Y, GONG K D, WANG Y Z, FENG C L, WANG J G, YANG X. Comparison of main agronomic characters of sugarcane healthy seedlings cultivated in field[J]. Chinese Journal of Tropical Crops, 2010, 31(2): 171-175. (in Chinese)
- [10] 何为中, 范业赓, 刘红坚, 翁梦苓, 许树宁. 甘蔗健康组培苗后代主要农艺性状的田间表现研究[J]. 广东农业科学, 2013, 40(14): 30-32.
HE W Z, FAN Y G, LIU H J, WENG M L, XU S N. Study on agronomic performance of offspring derived from regenerated sugarcane virus-free plantlets in field[J]. Guangdong Agricultural Sciences, 2013, 40(14): 30-32. (in Chinese)
- [11] 杨本鹏, 张树珍. 甘蔗良种繁育与脱毒种苗技术[M]. 北京: 中国农业出版社, 2019.
YANG B P, ZHANG S Z. Sugarcane improved breeding and virus-free seedling technology[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2019. (in Chinese)
- [12] 梁永检, 张小秋, 杨柳, 杨丽涛, 李杨瑞. 甘蔗健康种苗繁育技术研究进展[J]. 生物技术通报, 2014(11): 91-96.
LIANG Y J, ZHANG X Q, YANG L, YANG L T, LI Y R. Research progress in breeding technique of sugarcane healthy seedlings or seedcane[J]. Biotechnology Bulletin, 2014(11): 91-96. (in Chinese)
- [13] 蔡文伟, 杨本鹏, 武媛丽, 张树珍, 杨学, 王俊刚, 曾军, 伍苏然, 彭李顺. 甘蔗脱毒健康种苗田间繁育技术研究[J]. 热带作物学报, 2016, 37(4): 653-659.
CAI W W, YANG B P, WU Y L, ZHANG S Z, YANG X, WANG J G, ZENG J, WU S R, PENG L S. Study on field propagation techniques for disease-free sugarcane seedlings[J]. Chinese Journal of Tropical Crops, 2016, 37(4): 653-659. (in Chinese)
- [14] 蒋淑婷, 彭李顺, 曹峥英, 杨本鹏, 杨学. 甘蔗脱毒原种苗生物量累积特征及水分需求研究[J]. 广东农业科学, 2021, 48(1): 72-78.
JIANG S T, PENG L S, CAO Z Y, YANG B P, YANG X. Study on the characteristics of biomass accumulation and water requirements of disease-free sugarcane original seedlings[J]. Guangdong Agricultural Sciences, 2021, 48(1): 72-78. (in Chinese)
- [15] 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)
- [16] 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)
- [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] 彭李顺, 曹峥英, 蔡文伟, 甘仪梅, 杨本鹏. 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[J]. 热带作物学报, 2023, 44(11): 2322-2329.
PENG L S, CAO Z Y, CAI W W, GAN Y M, YANG B P. Effects of reduced fertilization on main agronomic traits, yield and fertilizer utilization rate of sugarcane under mulched drip fertigation system[J]. Chinese Journal of Tropical Crops, 2023, 44(11): 2322-2329. (in Chinese)
- [19] 蒋淑婷, 彭李顺, 杨本鹏, 曹峥英, 杨学. 甘蔗脱毒原种苗田间繁育过程中氮、磷、钾营养元素的吸收及累积特征[J]. 热带作物学报, 2024, 45(1): 68-76.
JIANG S T, PENG L S, YANG B P, CAO Z Y, YANG X. Absorption and accumulation characteristics of nitrogen, phosphorus and potassium in field propagation of disease-free sugarcane original seedlings[J]. Chinese Journal of Tropical Crops, 2024, 45(1): 68-76. (in Chinese)
- [20] 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 technologies under drip for sugarcane irrigation[J]. Chinese Journal of Tropical Crops, 2013, 34(1): 24-28. (in Chinese)
- [21] 邢颖, 谭裕模, 梁潘霞, 廖青, 潘丽萍, 黄太庆, 江泽普, 杨绍锬, 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)
- [22] 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)