

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

蒋淑婷^{1,4}, 彭李顺^{1,2,4}, 杨本鹏^{1,2,4*}, 曹峥英^{1,4}, 杨 学³

1. 中国热带农业科学院热带生物技术研究所/农业农村部热带作物生物学与遗传资源利用重点实验室/热带作物生物育种全国重点实验室, 海南海口 571101; 2. 广西热带农业科学研究院, 广西崇左 532199; 3. 广西久洋禾农业科技有限公司, 广西崇左 532199; 4. 中国热带农业科学院三亚研究院, 海南三亚 572024

摘 要: 探讨甘蔗脱毒原种苗不同生长时期氮、磷、钾营养元素的累积需求状况, 为甘蔗脱毒原种苗田间繁育栽培过程中养分管理提供参考。试验分别在 2020、2021 年进行, 调查中糖 1 号甘蔗脱毒原种苗全生育期生长情况, 测定其生物量及其在各生育阶段根、茎、叶中氮、磷、钾各营养元素的含量, 并分析氮、磷、钾的累积量、阶段吸收量、日吸收速率。结果表明: 甘蔗脱毒原种苗从种苗假植到种茎最佳收获时需 6—7 个月可达 15 茎节, 在 7、8 月至 9 月下旬(茎 1 期至茎 2 期)蔗茎生长速度最快, 以茎 4 期(10 月下旬至 11 月下旬)干物质质量累积增加最快, 此阶段为生物量累积的关键阶段。在甘蔗脱毒原种苗全生育期中各元素含量及累积量从高到低依次为钾>氮>磷, 在根茎叶各器官中蔗叶、蔗茎始终为氮、磷、钾含量相对较高的器官, 氮、磷、钾累积量在茎伸长生长 1 期前主要贮存于蔗叶中, 而后以蔗茎为新的主要贮存器官。甘蔗对氮、磷、钾的吸收比例在苗期和分蘖期分别为 24.84%、26.18%、27.74%, 在茎 1~3 期(7 月下旬至 10 月下旬)分别为 55.54%、58.61%、52.30%, 茎 4、5 期(10 月下旬至 12 月下旬)分别为 19.62%、15.20%、19.96%。因此, 可根据各元素的阶段吸收量进行合理施肥, 进而提高甘蔗脱毒健康种苗的品质和经济效益。试验明确了甘蔗脱毒原种苗生长过程中对氮、磷、钾的需求状况, 可为今后甘蔗脱毒健康种苗田间规模化繁育生产的科学合理施肥提供依据, 提高脱毒原种苗田间繁育效率和养分资源利用效率。

关键词: 甘蔗; 脱毒健康原种苗; 氮、磷、钾养分; 大量元素; 养分需求状况

中图分类号: S566.1

文献标识码: A

Absorption and Accumulation Characteristics of Nitrogen, Phosphorus and Potassium in Field Propagation of Disease-free Sugarcane Original Seedlings

JIANG Shuting^{1,4}, PENG Lishun^{1,2,4}, YANG Benpeng^{1,2,4*}, CAO Zhengying^{1,4}, YANG Xue³

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

Abstract: This study was conducted to explore the cumulative demand of nitrogen, phosphorus and potassium in disease-free sugarcane original seedlings, and provide reference for the nutrient management in the process of field propagation of disease-free sugarcane original seedlings. The growth of the disease-free sugarcane original seedlings of Zhongtang No. 1 in 2020 and 2021 was investigated, and the biomass and contents of nitrogen, phosphorus and potassium were determined. The results showed that the sugarcane original seedlings reached 15 nodes in 6–7 months from seedling establishment to the best harvest stage of the culm, and the culm growth rate was fastest in the 7th, 8th and 9th months (culm 1 stage to culm 2 stage). The culm 4 stage (October to November) had the fastest accumulation of dry matter mass, which was the key stage for biomass accumulation. During the whole growth period of the sugarcane original seedlings, the contents and accumulation of elements were ranked as K>N>P. In the roots, culms and leaves, the culm leaves and culms were always the organs with the highest contents of N, P and K. Before the 1st stage of culm elongation, the accumulation of N, P and K was mainly stored in the culm leaves, and then the culm was the new main storage organ. The absorption ratio of N, P and K by sugarcane in the seedling and tillering stages was 24.84%, 26.18% and 27.74%, respectively. In the culm 1–3 stages (July to October), the absorption ratios were 55.54%, 58.61% and 52.30%, respectively. In the culm 4 and 5 stages (October to December), the absorption ratios were 19.62%, 15.20% and 19.96%, respectively. Therefore, reasonable fertilization can be carried out according to the stage absorption of elements, so as to improve the quality and economic benefit of sugarcane original seedlings. This study clarified the nutrient demand status of sugarcane original seedlings during growth, which can provide scientific and reasonable fertilization basis for the large-scale propagation and production of sugarcane original seedlings, improve the propagation efficiency and nutrient resource utilization efficiency of sugarcane original seedlings.

收稿日期 2022-10-31; 修回日期 2022-11-16

基金项目 广西科技重大专项(桂科 AA22117003); 国家重点研发计划项目(No. 2020YFD1000600)。

作者简介 蒋淑婷(1993—), 女, 硕士研究生, 研究方向: 甘蔗栽培生理。*通信作者(Corresponding author): 杨本鹏(YANG Benpeng), E-mail: y-bp@163.com。

sium in roots, stems and leaves at various growth stages were determined for further analysis of the accumulation, phase absorption and daily absorption rate of nitrogen, phosphorus and potassium. It took 6 to 7 months for disease-free sugarcane original seedlings to reach 15 stem nodes from temporary planting of seedlings to the best harvest of seed canes. From July, August to late September (stem 1 to 2), the growth of sugarcane stems was the fastest. The cumulative increase of dry matter was the fastest in stem 4 (late October to late November), and this is the key stage of biomass accumulation. During the whole growth period of the disease-free sugarcane original seedlings, the content and accumulation of each element from high to low were potassium > nitrogen > phosphorus. Among the organs of roots, stems and leaves, leaves and stems always had higher nitrogen, phosphorus and potassium contents. The accumulation of nitrogen, phosphorus and potassium was mainly stored in the leaves before the stem elongation stage 1, and then mainly stored in the stems. The nutrient uptake rates of nitrogen, phosphorus and potassium at the seedling stage and tillering stage was 24.84%, 26.18% and 27.74%, respectively, and it was 55.54%, 58.61% and 52.30% at the stem 1 to 3 (late July to late October), while 19.62%, 15.20% and 19.96% during stem 4 and 5 (late October to late December). Reasonable fertilization can be carried out according to the phase absorption of each element, thereby improving the quality and economic benefits of disease-free sugarcane seedlings production. The demands of nitrogen, phosphorus and potassium in the breeding process of disease-free sugarcane original seedlings were clarified, which would provide a reference for the scientific and reasonable fertilization in large-scale field propagation of disease-free sugarcane original seedlings in the future, and improving the efficiency of the propagation and nutrient utilization of disease-free original seedlings.

Keywords: sugarcane; disease-free healthy original seedlings; N, P, K nutrients; macroelements; nutrient requirements

DOI: 10.3969/j.issn.1000-2561.2024.01.008

甘蔗 (*Saccharum* spp. hybrid) 是最重要的糖料作物, 也是我国热带、亚热带地区第一大经济作物。由于甘蔗以无性繁殖进行生产, 长期无性繁殖和宿根栽培易被多种病原物反复侵染和累积, 导致品种退化, 蔗糖分及产量等性状指标下降。甘蔗脱毒健康种苗不仅可以有效抑制病原物的累积, 而且较常规种苗分蘖率高、生长快、产量高等^[1-2]。因此, 甘蔗脱毒健康种苗的推广种植是减少甘蔗病害、提高产量及蔗农收益的重要途径之一, 而甘蔗脱毒健康种苗的推广离不开种苗繁育, 其中由脱毒原种苗到健康种茎的生产种植管理是最重要的环节之一。目前, 采用恒温热处理结合腋芽分生组织培养方法可有效地脱去蔗种中携带的病原, 同时很好地实现脱毒与快繁, 且脱毒效率高。此法中甘蔗脱毒原种苗是经过脱毒培育的原原种苗经增殖快繁、诱导生根后形成。由于甘蔗脱毒原种苗具有前期生长速度快、分蘖率高的特点, 且从大田移栽至达到最佳全茎做种要求 (12~15 茎节) 时收获仅有 6 个月生长期, 其对养分的吸收累积与原料蔗对养分的吸收累积存在明显差异。在甘蔗脱毒原种苗繁育过程中养分管理影响甘蔗脱毒原种苗的农艺性状及经济效益, 因此, 了解甘蔗脱毒原种苗对养分的吸收累积规律, 对科学合理施肥, 提高甘蔗脱毒原种苗的质量具有至关重要的作用。

目前, 对甘蔗养分累积及分布的研究主要集

中在甘蔗原料蔗, 其各生育阶段的生长速率不同, 对养分的需求比例和数量也有很大差异, 总的来说是“两头少, 中间多”, 即苗期和成熟期养分需求少, 伸长期需求多^[3-6]。王继华等^[7]研究表明原料蔗苗期对 N 的需求量较大, 其次为 K、P; 分蘖期 N、P、K 的吸收量占全生育期的 10%~20%; 进入伸长期后, 原料蔗对养分的需求大大增加, 占 50%以上; 进入工艺成熟期, 对养分需求逐渐减少, 仅对 K 的需求量最大。谭宏伟等^[8]对甘蔗原料蔗 N、P、K 养分管理研究表明, 甘蔗苗期对养分的吸收较少, 苗期对 N、P、K 的吸收比例分别为 7.9%、7.1%、4.2%; 分蘖期对 N、P、K 的吸收比例分别为 16.1%、18.5%、13.7%; 随着甘蔗生物量的增加至伸长期对 N、P、K 吸收强度达吸收高峰, 分别占 66.3%、68.3%、74.0%; 成熟期吸收强度逐渐降低, 分别占 9.7%、6.0%、8.1%。从上述研究中发现甘蔗脱毒健康原种苗养分管理方面相关的技术及经验仍缺少相关报道, 尤其是在甘蔗脱毒原种苗养分管理方面并未针对各蔗区土壤养分状况及甘蔗品种特性进行合理施肥, 进而影响甘蔗脱毒原种苗的生长, 造成全茎收获时种茎质量不佳, 不利于其推广种植。

甘蔗脱毒原种苗在种植目的、生长周期、养分管理等方面与原料蔗不同, 所以原料蔗的研究结果不适用于甘蔗脱毒原种苗生产, 又因养分管理在甘蔗脱毒原种苗田间繁育过程中至关重要,

而目前对甘蔗脱毒原种苗养分的累积及分配特征鲜有研究。因此,探讨甘蔗脱毒原种苗繁育过程中各生育阶段对养分的吸收累积特征,可为培育健康的原料蔗种茎奠定基础。本研究通过对甘蔗脱毒原种苗生长的调查、生物量和氮、磷、钾元素的测定,分析比较甘蔗脱毒原种苗不同生育期生物量累积变化及根、茎、叶各部位养分的吸收累积特征,为推行科学合理配方施肥、降低生产成本、提高甘蔗脱毒原种苗田间繁育效率提供参考依据。

1 材料与方法

1.1 材料

供试甘蔗脱毒原种苗品种为中糖 1 号,该品种为大中茎、中晚熟品种,具有产量较高、宿根性较好的特点,由中国热带农业科学院热带生物技术研究所于 2018 年育成登记,目前该品种正在广西扶绥、海南等蔗区推广种植。

试验分别于 2020 年 6—12 月、2021 年 6—12 月在广西壮族自治区崇左市扶绥县昌平乡广西久洋禾农业科技有限公司良种繁育基地(22°42'34.934"N; 107°54'28.422"E)进行。该试验地土壤类型为赤红壤土,土壤基础养分状况为:土壤 pH 5.0,有机质 11.38 g/kg,全氮 0.71 g/kg,碱解氮 121.70 mg/kg,有效磷 29.60 mg/kg,速效钾 157.20 mg/kg。

本试验的甘蔗脱毒原种苗分别于 2020 年 6 月 15 日、2021 年 6 月 3 日移栽至穴盘假植培养 25 d,分别于 2020 年 7 月 10 日、2021 年 6 月 28 日苗 1 心 6~8 叶、高 15~20 cm 时再移栽至田间种植,最后分别于 2020 年 12 月 31 日、2021 年 12 月 19 日采收健康种茎,甘蔗脱毒原种苗的田间管理参照杨本鹏等^[9-10]的方法执行。

1.2 方法

1.2.1 试验设计 甘蔗脱毒原种苗种植采用大小行距模式,总行距为 1.80 m,大小行距分别为 1.40 m 和 0.40 m,株距为 0.50 m,即每公顷种植 22222 株。种植管理过程中按照常规施肥管理分 2 次施用化肥:(1)基肥按 46%尿素 450 kg/hm²、16%普通过磷酸钙 600 kg/hm²、60%氯化钾 300 kg/hm²混匀后撒施于沟底,同时拌入 75 kg/hm² 3%辛硫磷、45 kg/hm² 杀虫双或度锐(按使用说明用量),拌匀后一起沟施。(2)待主茎拔节 1~2 节后中耕管理时进行追肥,按尿素 450 kg/hm²、过磷酸钙 450 kg/hm²、氯化钾 450 kg/hm² 配制,同时拌入

45 kg/hm² 3%辛硫磷、30 kg/hm² 杀虫双或度锐(按使用说明用量),肥药配制好通过中耕机施用和覆土。甘蔗脱毒原种苗生育期期间根据生长情况进行常规灌溉、病虫害防治等。

1.2.2 取样与测定 选择移栽大田后长势基本一致的甘蔗脱毒原种苗,在其不同生育阶段分别调查株高、茎节数,并分别于苗期(2020 年 7 月 20 日、2021 年 7 月 8 日)、分蘖期(2020 年 7 月 31 日、2021 年 7 月 19 日)、茎伸长生长 1 期(茎 1 期,2020 年 8 月 31 日、2021 年 8 月 19 日)、茎伸长生长 2 期(茎 2 期,2020 年 9 月 30 日、2021 年 9 月 18 日)、茎伸长生长 3 期(茎 3 期,2020 年 10 月 31 日、2021 年 10 月 19 日)、茎伸长生长 4 期(茎 4 期,2020 年 11 月 30 日、2021 年 11 月 18 日)、茎伸长生长 5 期(茎 5 期,2020 年 12 月 31 日、2021 年 12 月 19 日)进行采样,每次采样设置 5 个生物学重复。每次取样后烘干,称取整株干重,粉碎后用于养分含量测定。植株全氮采用 H₂SO₄-H₂O₂ 消煮-蒸馏法,全磷采用 H₂SO₄-H₂O₂ 消煮-钼锑抗比色法,全钾采用 H₂SO₄-H₂O₂ 消煮-火焰光度计法^[11]。

1.3 数据处理

每株甘蔗养分累积量=单株干物质质量×养分含量。采用 Excel 2010 软件进行数据整理分析,采用 IBM SPSS Statistics 22 软件进行数据统计。

2 结果与分析

2.1 甘蔗脱毒原种苗的生长规律

2.1.1 甘蔗脱毒原种苗的生长期 由表 1 可知,甘蔗脱毒原种苗全生育期从种苗假植到种茎最佳收获(茎 4~5 期)时需 6~7 个月,各生育阶段甘蔗脱毒原种苗生长差异较大。在苗期和分蘖期时,蔗茎还未形成,但至分蘖期甘蔗脱毒原种苗生物量逐渐增大,在 2020、2021 年内蔗株株高分别增长了 28.33、30.34 cm,日均增高达 2.58、2.76 cm;分蘖期后,甘蔗脱毒原种苗进入茎伸长生长阶段,蔗茎也逐渐形成,至 9 月下旬蔗株已有 7~8 茎节,此阶段平均每月增长 4 茎节,较茎伸长期其他阶段,此阶段为茎节形成最快的时期;随后至种茎最佳采收时,随着生物量增加减小,每阶段蔗茎仅增加 2~3 茎节,且株高每月分别仅增高 16.77、21.11 cm。

2.1.2 甘蔗脱毒原种苗生物量累积变化 甘蔗脱毒原种苗的干物质质量累积整体表现为苗期和分蘖

表 1 甘蔗脱毒原种苗不同时期生长状况
Tab. 1 Growth status of disease-free sugarcane original seedlings at different stages

生长发育阶段 Growth stage	日期 Date		茎节数 Stem node number		株高 Plant height/cm	
	2020	2021	2020	2021	2020	2021
假植	06-15~07-10	06-03~06-28	/	/	/	/
苗期	07-10~07-20	06-28~07-08	/	/	19.40 ^e	19.33 ^e
分蘖期	07-20~07-31	07-08~07-19	/	/	47.73 ^f	49.67 ^f
茎 1 期	07-31~08-31	07-19~08-19	4	3	88.77 ^e	96.00 ^e
茎 2 期	08-31~09-30	08-19~09-18	8	7	119.33 ^d	111.33 ^d
茎 3 期	09-30~10-31	09-18~10-19	11	10	128.54 ^c	149.33 ^c
茎 4 期	10-31~11-30	10-19~11-18	13	13	153.00 ^b	161.00 ^b
茎 5 期	11-30~12-31	11-18~12-19	15	15	169.63 ^a	174.67 ^a

注：同列数据后不同小写字母表示不同生育时期差异显著（ $P<0.05$ ）。/表示茎节数、株高不做测量。
Note: Different lowercase letters in the same column indicated significant difference at different growth stages ($P<0.05$). / means number of stem nodes, plant height not measured.

期干物质质量累积增长较缓慢,而茎伸长生长期干物质累积增长较快,为干物质质量主要累积阶段(表 2)。当甘蔗脱毒原种苗正处于苗期和分蘖期,蔗株生物累积量相对较少,主要由蔗叶和蔗根累积,2 a 内此生育期生物量分别仅占全生育期的 3.89%和 5.58%。随后甘蔗脱毒原种苗开始拔节进入茎伸长生长期,此生育期干物质质量 2 a 内累积分别达 446.13、464.30 g/株,其中以茎 4 期干物质质量累积增加最快,分别增加了 143.49、134.82 g/株,相应占比分别增加 9.78%、8.56%。

表 2 甘蔗脱毒原种苗不同生长期干物质质量及比例
Tab. 2 Dry matter weight and proportion of disease-free sugarcane original seedlings at different growth stages

生长期 Growth stage	干物质质量 Dry matter mass/(g·plant ⁻¹)		占比 Proportion/%	
	2020	2021	2020	2021
苗期	6.08 ^e	8.60 ^e	0.41 ^e	0.55 ^e
分蘖期	51.03 ^f	79.26 ^f	3.48 ^f	5.03 ^f
茎 1 期	107.09 ^e	122.18 ^e	7.30 ^e	7.76 ^e
茎 2 期	196.23 ^d	219.14 ^d	13.37 ^d	13.92 ^d
茎 3 期	255.78 ^c	268.82 ^c	17.43 ^c	17.07 ^c
茎 4 期	399.28 ^b	403.64 ^b	27.20 ^b	25.64 ^b
茎 5 期	452.21 ^a	472.90 ^a	30.81 ^a	30.03 ^a

注：同列数据后不同小写字母表示不同生育时期差异显著（ $P<0.05$ ）。
Note: Different lowercase letters in the same column indicated significant difference at different growth stages ($P<0.05$).

2.2 甘蔗脱毒原种苗氮、磷、钾含量的变化

如表 3 所示,在甘蔗脱毒原种苗全生育期内,2021 年氮、磷、钾的含量整体较 2020 年的氮、

磷、钾含量偏高,且 2 a 内氮、磷、钾含量的高低均依次为:钾>氮>磷。在 2020、2021 年甘蔗脱毒原种苗全生育期中,首先对于植株氮含量,除苗期至分蘖期分别显著增加 11.94、18.88 g/kg 外,氮含量整体随着生育期的推移而呈现逐渐降低的变化趋势,分别由分蘖期的 41.48、52.33 g/kg 下降至茎 5 期的 23.74、29.11 g/kg。对于甘蔗脱毒原种苗磷含量,2 a 内同生育期的含量相差不显著,由苗期至分蘖期达最高值 11.15、12.48 g/kg,随后逐渐降低至 6.40、7.09 g/kg;与氮、钾含量不同,当茎 3、4 期时,2021 年的磷含量较 2020 年略低,分别仅低 0.70、0.16 g/kg。甘蔗脱毒原种苗钾含量整体与氮、磷含量变化趋势一致,均呈先增加再降低的变化趋势,且在分蘖期达最高值,分别为 48.19、49.85 g/kg,虽至茎 1、2 期仍保持较高含量,但仍有显著降低的变化,平均每阶段分别以 5.42、3.98 g/kg 的速度降低至茎 5 期。

在甘蔗脱毒原种苗根茎叶中氮、磷、钾含量分布各有特点,总体而言,在蔗叶中氮、磷、钾含量最高(图 1)。氮、磷、钾含量的分布特点均是蔗叶>蔗茎>蔗根,且在 2 a 内氮、磷、钾含量的分布以蔗叶和蔗根变化显著,其特点为蔗叶 2020 年<2021 年,蔗根 2020 年>2021 年,2021 年蔗叶中氮、磷、钾含量较 2020 年分别增高 8.97%、6.53%、11.52%,相对应蔗根则分别降低 9.25%、4.78%、6.61%。在蔗茎中氮、磷、钾含量分布则不一致,蔗茎的氮含量 2020 年<2021 年,较 2020 年增高 0.47%,而磷、钾含量以 2020 年占比较高,分别较 2021 年增高 2.38%、4.91%。

表 3 甘蔗脱毒原种苗不同生育期氮、磷、钾含量变化
Tab. 3 Changes in nitrogen, phosphorus and potassium content in disease-free sugarcane original seedlings at different growth stages

生长发育阶段 Growth stage	氮含量 Nitrogen content		磷含量 Phosphorus content		钾含量 Potassium content	
	2020	2021	2020	2021	2020	2021
苗期	29.53 ^e	33.46 ^e	6.52 ^f	7.18 ^e	29.46 ^d	27.27 ^f
分蘖期	41.48 ^a	52.33 ^a	11.15 ^a	12.48 ^a	48.19 ^a	49.85 ^a
茎 1 期	37.75 ^b	46.98 ^b	10.43 ^b	10.51 ^b	43.68 ^b	48.97 ^a
茎 2 期	35.51 ^c	42.82 ^c	9.64 ^c	9.31 ^c	36.03 ^c	42.61 ^b
茎 3 期	31.85 ^d	38.11 ^d	9.16 ^d	8.46 ^d	30.45 ^d	38.07 ^c
茎 4 期	23.82 ^f	28.44 ^f	7.28 ^e	7.12 ^e	23.64 ^e	34.28 ^d
茎 5 期	23.74 ^f	29.11 ^f	6.40 ^f	7.09 ^e	21.11 ^f	29.97 ^e

注：同列数据后不同小写字母表示不同生育时期差异显著 ($P<0.05$)。
Note: Different lowercase letters in the same column indicated significant difference at different growth stages ($P<0.05$).

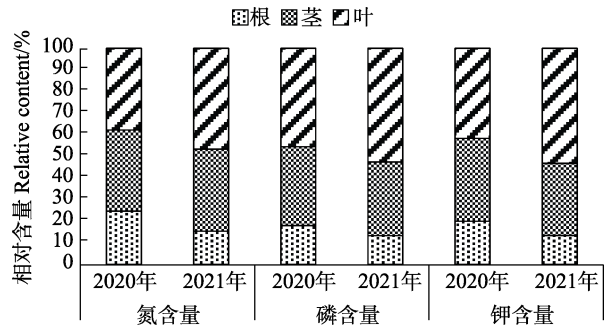
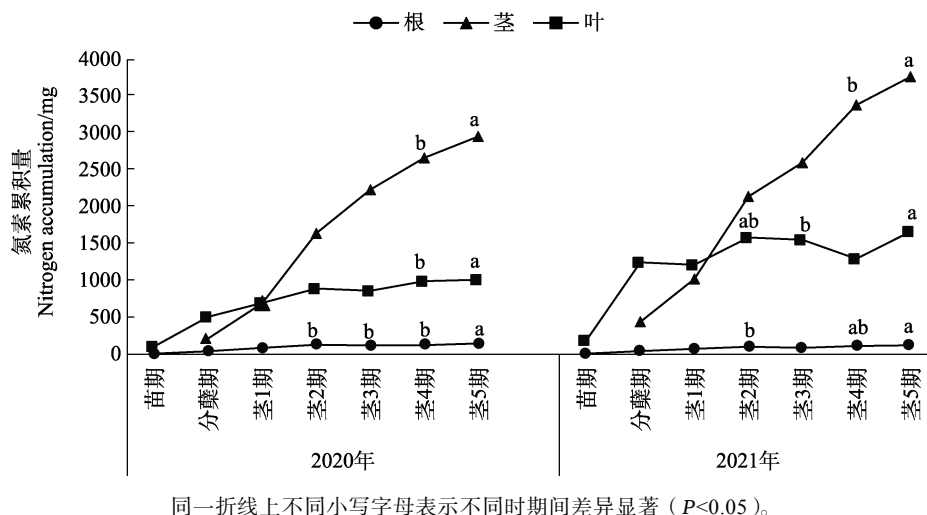


图 1 甘蔗脱毒原种苗根茎叶中氮、磷、钾相对含量比较
Fig. 1 Comparison of the relative contents of nitrogen, phosphorus and potassium in roots, stems and leaves of disease-free sugarcane original seedlings

2.3 甘蔗脱毒原种苗氮、磷、钾元素的累积特性

2.3.1 甘蔗脱毒原种苗根、茎、叶中氮的累积量变化 甘蔗脱毒原种苗根茎叶不同器官对氮累积不同。如图 2 所示，甘蔗植株体内氮累积量随着植株的生长表现出不断地增加，特别是在分蘖期后，且到生育后期氮累积量并没有减少，主要是由于氮累积量随着分蘖期后生物量的增大而进一步增加。在不同年份中，2021 年的氮累积量明显高于 2020 年，尤其以蔗茎中氮累积量表现最为突出，在茎 5 期时较 2020 年氮累积量增高 808.17 mg/株。除相同器官不同年份氮累积量存在差异外，不同器官中氮累积量也各不相同。在苗期和分蘖期时，氮累积主要分布在蔗叶中，2 a 内平均各阶段累积量分别为 307.23、718.31 mg/株，随后蔗叶中氮累积量仍呈持续增加的趋势，但自分蘖期后至茎 5 期，随着蔗茎的加速生长，氮累积量主要集中于蔗茎中，2 a 内平均各阶段累积量分别为 2038.68、2583.34 mg/株，而根系由于其生物量相对较小，因此在蔗根中氮累积始终较少，

2 a 内平均每阶段分别为 93.26 和 78.17 mg/株。
2.3.2 甘蔗脱毒原种苗根、茎、叶中磷的累积量变化 由图 3 可知，甘蔗脱毒原种苗磷累积量随着生育期的推迟而增加。在不同年份内磷累积量变化相差不大，2021 年磷累积量总体略高于 2020 年。在甘蔗脱毒原种苗根茎叶各器官中，苗期和分蘖期磷累积量集中于蔗叶中，而茎 1 期后随着蔗茎的生长，蔗株生物量逐渐增加，蔗茎开始成为磷素主要累积器官，且其累积量显著增加；至茎 4 期时 2020 年蔗茎中的磷累积增长较为显著，平均每阶段累积量为 492.12 mg/株，而 2021 年此阶段的磷累积量增加较缓，平均每阶段累积量为 443.00 mg/株；随后至茎 5 期，2020 年累积量增加减缓，仅增加了 22.31 mg/株，而 2021 年累积量显著增加了 207.59 mg/株。蔗根中磷累积量变化较平稳，2 a 全生育期内分别维持在 1.97~22.58 mg/株和 0.84~30.95 mg/株。
2.3.3 甘蔗脱毒原种苗根茎叶及整株中钾的累积量变化 如图 4 所示，在甘蔗脱毒原种苗生育期内钾累积量变化趋势与氮、磷累积量变化基本一致。在各器官中，蔗茎为钾素主要累积器官，全生育期表现为持续上升，在分蘖期至茎 2 期时钾累积量增加最为显著，第一年从 249.83 mg/株迅速增加至 1697.67 mg/株，第二年从 383.18 mg/株迅速增加至 1944.24 mg/株，平均累积量分别高达 920.35、1092.96 mg/株；随后至茎 5 期钾素持续累积增加，但累积量增加减缓，2 a 内平均每阶段累积量分别增加 371.08、291.40 mg/株。相对于 2020 年蔗叶的钾累积量，2021 年蔗叶中钾累积量变化显著，在苗期至分蘖期，由于生物量的增大钾累积量也迅速增加，此阶段钾累积迅速增加了

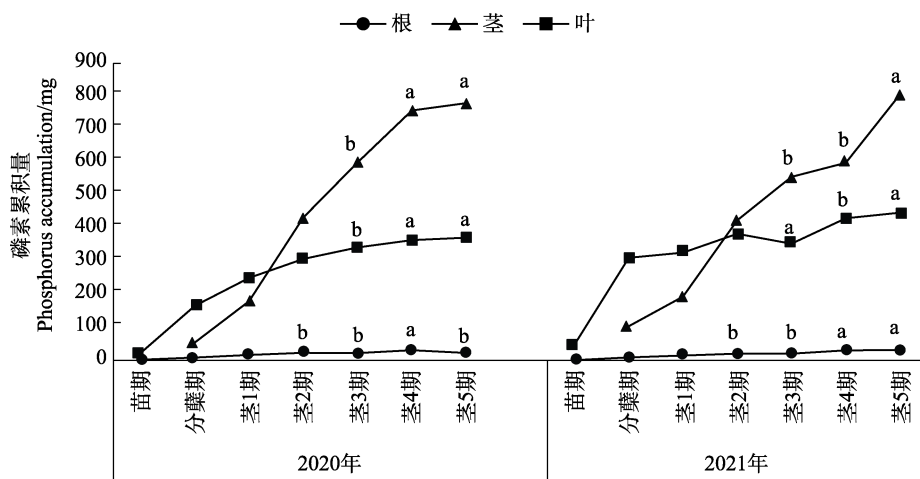


同一折线上不同小写字母表示不同时期差异显著 ($P < 0.05$)。

Different lowercase letters on the same broken line indicate significant difference in different periods ($P < 0.05$).

图 2 甘蔗脱毒原种苗根、茎、叶中氮累积量变化

Fig. 2 Changes of nitrogen accumulation in roots, stems and leaves of disease-free sugarcane original seedlings



同一折线上不同小写字母表示不同时期差异显著 ($P < 0.05$)。

Different lowercase letters on the same broken line indicate significant difference in different periods ($P < 0.05$).

图 3 甘蔗脱毒原种苗根、茎、叶中磷累积量变化

Fig. 3 Changes of phosphorus accumulation in roots, stems and leaves of disease-free sugarcane original seedlings

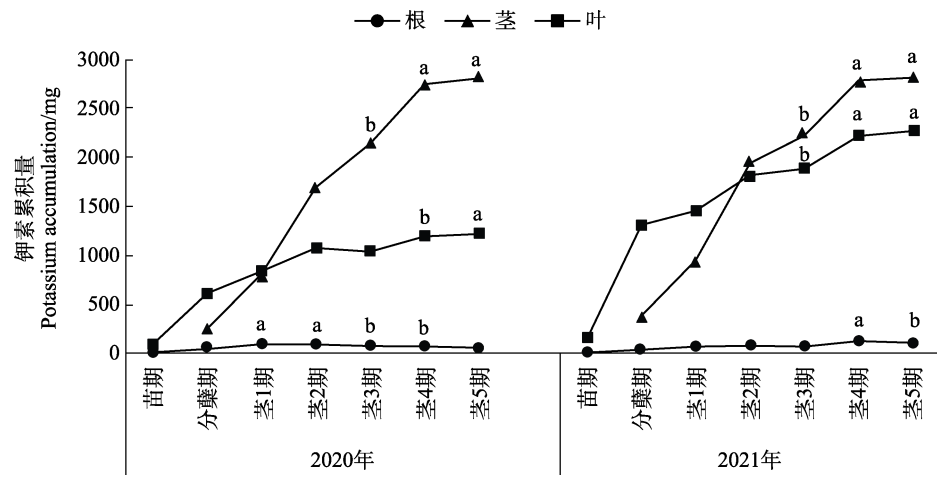
1159.12 mg/株；至茎 5 期蔗叶中钾累积量增长减缓，平均每阶段累积量增加了 192.29 mg/株。

整个生育阶段蔗根中生物量较小，钾累积量也相对较小，2 a 内累积量分别维持在 10.12~55.87、7.40~107.29 mg/株，保持较低水平。

2.4 甘蔗脱毒原种苗氮、磷、钾元素的阶段吸收量和日吸收速率的动态变化

甘蔗脱毒原种苗在不同生育期内的氮、磷、钾阶段吸收量与日吸收速率的变化趋势相似。由表 4 可知，氮、磷、钾在甘蔗脱毒原种苗整个生育期内的阶段吸收量整体呈现先上升后下降的变化趋势，且在甘蔗脱毒原种苗全生育期各阶段中对氮和钾的阶段吸收量较大。在甘蔗脱毒原种苗

苗期，氮、磷、钾在总氮、总磷、总钾的分配比例中占比相差不大，且在整个生育阶段内占比最低，2 a 内氮、磷、钾吸收量分别仅为 2.78%、2.56%及 3.56%、3.81%、3.07%。进入分蘖期，蔗茎逐渐形成，蔗株生物量逐渐增大，氮、磷、钾阶段吸收量也逐渐增加，其中此阶段内 2021 年的氮、磷、钾素吸收量均最显著，达当年吸收量的峰值，分别高达 1531.31、374.09、1571.52 mg/kg，分别占当年总吸收量的 27.58%、29.13%、30.23%，日吸收效率分别为 139.21、34.01、142.87 [mg/(plant·d)]。随着蔗株拔节进入茎伸长期，此阶段是甘蔗脱毒健康种苗快速生长、生物量大量累积的阶段，其氮、磷、钾的阶段吸收量随



同一折线上不同小写字母表示不同时期差异显著 ($P<0.05$)。
Different lowercase letters on the same broken line indicate significant difference in different periods ($P < 0.05$).
图 4 甘蔗脱毒原种苗根、茎、叶中钾积累量变化
Fig.4 Changes of potassium accumulation in roots, stems and leaves of disease-free sugarcane original seedlings

表 4 甘蔗脱毒原种苗不同生育时期氮、磷、钾的阶段吸收量和日吸收速率
Tab. 4 Phase absorption amount and daily absorption rate of nitrogen, phosphorus and potassium at different growth stages of disease-free sugarcane original seedlings

生长发育阶段 Growth stage	阶段吸收量 Phase absorption amount/(mg·kg ⁻¹)						日吸收速率 Daily absorption rate/[mg·(plant·d) ⁻¹]					
	N		P ₂ O ₅		K ₂ O		N		P ₂ O ₅		K ₂ O	
	2020	2021	2020	2021	2020	2021	2020	2021	2020	2021	2020	2021
苗期	114.62 ^d	197.69 ^d	24.46 ^c	48.99 ^d	104.69 ^d	159.76 ^f	11.46 ^e	19.77 ^{cd}	2.45 ^d	4.90 ^{cd}	10.47 ^d	15.98 ^e
分蘖期	648.96 ^{bc}	1531.31 ^a	203.45 ^b	374.09 ^a	801.70 ^b	1571.52 ^a	59.00 ^a	139.21 ^a	18.50 ^a	34.01 ^a	72.88 ^a	142.87 ^a
茎 1 期	712.15 ^b	581.90 ^{bc}	217.55 ^b	111.16 ^{cd}	838.03 ^b	745.32 ^d	22.97 ^c	18.77 ^{cd}	7.02 ^c	3.59 ^d	27.03 ^c	24.04 ^d
茎 2 期	1187.88 ^a	1518.42 ^a	317.59 ^a	364.31 ^b	1117.94 ^a	1366.23 ^b	39.60 ^b	50.61 ^b	10.59 ^b	9.79 ^b	37.26 ^b	45.54 ^b
茎 3 期	552.11 ^b	759.81 ^b	200.16 ^b	225.27 ^b	394.13 ^c	336.18 ^e	17.81 ^d	24.51 ^c	6.46 ^c	7.27 ^{bc}	12.71 ^d	10.84 ^f
茎 4 期	565.15 ^{bc}	549.83 ^c	188.68 ^b	129.66 ^c	759.55 ^b	957.67 ^c	18.84 ^{cd}	18.33 ^{cd}	6.29 ^c	4.32 ^d	25.32 ^c	31.92 ^c
茎 5 期	335.37 ^c	414.22 ^c	21.50 ^c	30.80 ^d	70.57 ^d	61.97 ^f	10.82 ^e	13.36 ^d	0.69 ^d	3.27 ^d	2.28 ^e	2.00 ^g

注：同列数据后不同小写字母表示不同生育时期差异显著 ($P<0.05$)。
Note: Different lowercase letters in the same column indicated significant difference at different growth stages ($P<0.05$).

着蔗株的生长逐渐增加,从茎 1 期至茎 2 期,2020 年内氮、磷、钾阶段吸收量增长最为显著,均于茎 2 期时达到最高峰,分别为 1187.88、317.59、1117.94 mg/株,此阶段的阶段吸收量分别占总吸收量的 28.86%、27.07%、27.36%。此后随着蔗株生物量的减小,对氮、磷、钾的吸收总量有所下降,至茎 5 期时,2 a 内对氮、磷、钾的阶段吸收量分别仅占总量的 8.15%、1.85%、1.73%及 7.46%、2.40%、1.19%,日吸收效率也分别仅为 10.82、0.69、2.28 [mg/(plant·d)]和 13.36、3.27、2.00 [mg/(plant·d)]。

3 讨论

本研究中,甘蔗脱毒原种苗在分蘖期后进入茎伸长生长期 7、8 月至 9 月下旬(茎 1、2 期)

蔗茎生长速度最快,生物量保持快速增长,以每月 4 茎节左右的增长速度生长,2 a 内均以茎 4 期干物质质量累积增加最快,分别占当年生物量累积的 27.20%及 25.64%;11 月后随着温度的降低,甘蔗脱毒原种苗的生物量累积减缓,其茎节生长速度减缓为每月仅 2 茎节左右;至 12 月下旬脱毒健康种茎收获时其全生长周期为 6~7 个月、株高约为 170~175 cm、茎节数可达 15 茎节。

本研究发现,在甘蔗脱毒原种苗田间生长进程中,甘蔗植株氮、磷、钾含量整体表现为随生育进程逐渐下降的变化趋势,且在相同生长发育阶段中蔗叶、蔗茎始终为氮磷钾含量相对较高的器官,蔗根的氮、磷、钾含量则始终较低。在甘蔗脱毒原种苗全生长期中甘蔗植株氮、磷、钾的

累积量由高到低依次为：钾>氮>磷，在茎 5 期时 2 a 内氮、磷、钾累积量分别为 4116.24、1173.40、4086.61 mg/株及 5553.17、1284.29、5198.64 mg/株。据报道，成熟期甘蔗氮、磷、钾的累积量分别介于 1952.06~5442.70、474.10~1410.15、2301.72~11105.00 mg/株，具体因甘蔗品种、土壤肥力及施肥水平等氮、磷、钾的吸收累积而存在差异，且所有参试基因型甘蔗体内养分累积量表现为：钾>氮>磷^[12-15]，本研究结果与此相似。

有研究表明，在甘蔗拔节前氮、磷、钾主要累积在蔗叶中，以供蔗株的生长和分蘖；进入拔节后蔗叶中的养分快速转移至蔗茎中，以促进蔗茎的快速生长^[16-18]。本研究结果表明，甘蔗脱毒原种苗在不同器官中的氮、磷、钾素累积存在明显差异，且其根茎叶器官中氮、磷、钾累积量高低依次为：蔗茎>蔗叶>蔗根。茎中氮、磷、钾素的累积从拔节开始不断上升，但叶片中氮、磷、钾素的累积表现出分蘖期前累积增长迅速、分蘖期后累积增长减缓。由此可见，蔗叶是甘蔗脱毒原种苗茎伸长生长 1 期前最主要的氮、磷、钾贮存器官，平均 2 a 内分别约有 59.11%、65.40%、61.50%的氮磷钾素分配到蔗叶中，而后生物量逐渐增大，蔗叶中的氮、磷、钾素逐渐转移至蔗茎中，平均两年内蔗茎中的氮、磷、钾素分别逐渐上升至约 66.77%、60.78%、59.69%，则蔗茎成为新的最主要的氮、磷、钾贮存器官。

不同生长时期甘蔗脱毒原种苗对氮、磷、钾的吸收量有所差异，苗期和茎 5 期 2 个阶段对氮、磷、钾的吸收量较少，平均每年 2 个阶段内的氮、磷、钾吸收量分别仅为 10.98%、5.06%、4.28%；蘖期至茎 2 期时吸收量增大，分别占总氮、总磷、总钾吸收量的 63.66%、64.55%、69.16%，并且伸长期是吸收养分最多、对产量的形成和影响最大的时期，总体呈现“两头小、中间大”的特点，与以往对原料蔗报道的研究结果相似^[3,7]。在各生长期中，分蘖期的氮、磷、钾素日吸收速率最高，平均每年分别为 99.10、26.25、107.87 mg/(plant·d)，为养分吸收最大效率期，需保证充足的养分供应，为有效茎的形成打下基础。因此，在甘蔗脱毒健康种苗实际生产中，应根据甘蔗脱毒健康种苗养分的需求及累积分配特点，适时合理施肥，以达到养分资源高效利用、获得甘蔗脱毒健康种茎的目的。然而，本研究仅针对甘蔗脱毒原种苗中糖

1 号单个品种的初步分析，甘蔗品种、土壤肥力状况、施肥方式及施肥量等方面的差异对甘蔗脱毒原种苗氮、磷、钾元素的吸收利用过程的影响仍有待于进一步研究。

4 结论

本研究结果表明，甘蔗脱毒原种苗从种苗假植到种茎最佳收获时需 6~7 个月可达 15 茎节，在 7、8 月至 9 月下旬（茎 1 期、2 期）蔗茎生长速度最快，以茎 4 期干物质质量累积增加最快，此阶段为生物量累积的关键阶段。在甘蔗脱毒原种苗全生长期中 3 元素含量及累积量从高到低依次为：钾>氮>磷，在根茎叶各器官中，蔗叶、蔗茎始终为氮、磷、钾含量相对较高的器官，氮、磷、钾累积量在茎 1 期前主要贮存于蔗叶中，而后以蔗茎为新的主要贮存器官。氮、磷、钾各元素的养分吸收比例，在苗期和分蘖期分别为 24.84%、26.18%、27.74%，茎 1~3 期（7 月下旬至 10 月下旬）分别为 55.54%、58.61%、52.30%，茎 4、5 期（10 月下旬至 12 月下旬）分别为 19.62%、15.20%、19.96%，可根据各元素的阶段吸收量进行合理施肥，进而提高甘蔗脱毒健康种苗的品质和经济效益。

参考文献

- [1] 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)
- [2] 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)
- [3] 王秀林, 阳代天. 甘蔗不同生育期对氮磷钾的吸收与分配[J]. 土壤通报, 1994(5): 224-226.
WANG X L, YANG D T. Absorption and distribution of nitrogen, phosphorus and potassium in sugarcane in different growth stages[J]. Soil Bulletin, 1994(5): 224-226. (in Chinese)

- [4] CAKMAK I. The role of potassium in alleviating detrimental effects of abiotic stresses in plants[J]. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 2005, 168(4): 521-530.
- [5] PETTIGREW W T. Potassium influences on yield and quality production for maize, wheat, soybean and cotton[J]. *Physiol Plant*, 2008, 133(4): 670-681.
- [6] 何铁光, 秦芳, 苏天明, 苏利荣, 张野, 何永群, 李忠义, 胡钧铭, 谢丽萍. 不同栽培模式对氮磷钾养分径流流失的影响[J]. *水土保持研究*, 2014, 21(1): 95-99, 103.
HE T G, QIN F, SU T M, SU L R, ZHANG Y, HE Y Q, LI Z Y, HU J M, XIE L P. Effect of different cultivation methods on nitrogen and phosphorus losses along with runoff[J]. *Research on Soil and Water Conservation*, 2014, 21(1): 95-99, 103. (in Chinese)
- [7] 王继华, 商贺阳, 杨少海. 我国甘蔗养分高效利用的研究进展[J]. *中国糖料*, 2018, 40(6): 66-68, 72.
WANG J H, SHANG H Y, YANG S H. Research progress on efficient utilization of sugarcane nutrients in my country[J]. *China Sugar*, 2018, 40(6): 66-68, 72. (in Chinese)
- [8] 谭宏伟, 周柳强, 谭俊杰, 杨尚东. 甘蔗节水灌溉及高效施肥关键技术参数研究[J]. *南方农业学报*, 2016, 47(5): 638-643.
TAN H W, ZHOU L Q, TAN J J, YANG S D. Key technical parameters of water-saving irrigation and high-efficiency fertilization for sugarcane[J]. *Southern Agricultural Journal*, 2016, 47(5): 638-643. (in Chinese)
- [9] 杨本鹏. 甘蔗脱毒种苗田间繁育技术[M]. 海口: 南方音像出版社, 2013.
YANG B P. Field breeding technology of disease-free sugarcane seedlings[M]. Haikou: Southern Audio and Video Publishing House, 2013. (in Chinese)
- [10] 杨本鹏. 甘蔗脱毒种苗栽培技术[M]. 海口: 南方音像出版社, 2012.
YANG B P. Cultivation technology of disease-free sugarcane seedlings[M]. Haikou: Southern Audio and Video Publishing House, 2012. (in Chinese)
- [11] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000: 264-267.
BAO S D. Soil and agricultural chemistry analysis[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2000: 264-267. (in Chinese)
- [12] 魏丽娜, 陈迪文, 周文灵, 黄莹, 卢颖林, 敖俊华, 黄振瑞, 李奇伟, 江永. 不同基因型甘蔗地上部氮磷钾养分特征分析[J]. *甘蔗糖业*, 2015(4): 10-15.
WEI L N, CHEN D W, ZHOU W L, HUANG Y, LU Y L, AO J H, HUANG Z R, LI Q W, JIANG Y. Analysis on NPK-Nutrient characteristics in shoot of different sugarcane genotypes[J]. *Sugar Cane Industry*, 2015(4): 10-15. (in Chinese)
- [13] 邢颖, 江泽普, 谭裕模, 廖青, 陈桂芬, 汪羽宁, 熊柳梅. 不同基因型甘蔗氮磷钾积累与利用研究[J]. *甘蔗糖业*, 2013(1): 10-13.
XING Y, JIANG Z P, TAN Y M, LIAO Q, CHEN G F, WANG Y N, XIONG L M. Study on nitrogen, phosphorous and potassium accumulation and utilization for three sugarcane genotypes[J]. *Sugarcane Industry*, 2013(1): 10-13. (in Chinese)
- [14] 韦冬萍, 韦剑锋, 梁振华, 韦巧云, 胡桂娟. 机械化生产下不同品种甘蔗养分吸收与利用效率分析[J]. *热带作物学报*, 2020, 41(5): 845-850.
WEI D P, WEI J F, LIANG Z H, WEI Q Y, HU G J. Variation among sugarcane varieties in nutrient uptake and utilization under mechanized production[J]. *Journal of Tropical Crops*, 2020, 41(5): 845-850. (in Chinese)
- [15] 程小燕. 两个甘蔗品种对氮、磷、钾的吸收与累积特征[D]. 南宁: 广西大学, 2013.
CHENG X Y. Features of absorption and accumulation on nitrogen, phosphorus and potassium of two sugarcane varieties[D]. Nanning: Guangxi University, 2013. (in Chinese)
- [16] 甘仪梅, 杨本鹏, 曾军, 彭李顺, 冯信平, 张树珍, 王秀兰, 蔡文伟, 武媛丽. 甘蔗新台糖 22 号的干物质及氮素积累与分配特征[J]. *热带作物学报*, 2013, 34(9): 1742-1746.
GAN Y M, YANG B P, ZENG J, PENG L S, FENG X P, ZHANG S Z, WANG X L, CAI W W, WU Y L. The accumulation and partitioning of dry matter and nitrogen in sugarcane (*Saccharum officinarum*)[J]. *Journal of Tropical Crops*, 2013, 34(9): 1742-1746. (in Chinese)
- [17] 李进, 段婷婷, 邓凯, 景占鑫, 蔺中, 梁燕秋, 邓焯楠, 高宇, 郑超. 不同品种甘蔗生长对氮肥的响应与利用[J]. *热带作物学报*, 2019, 40(4): 649-656.
LI J, DUAN T T, DENG K, JING Z X, LIN Z, LIANG Y Q, DENG Z N, GAO Y, ZHENG C. Responses of sugarcane varieties growth to nitrogen fertilizer application and related use efficiency[J]. *Journal of Tropical Crops*, 2019, 40(4): 649-656. (in Chinese)
- [18] 彭李顺, 杨本鹏, 曹峥英, 曾军, 冯信平, 蔡文伟, 张树珍, 甘仪梅. 甘蔗钾素吸收、累积和分配的动态变化特征[J]. *热带作物学报*, 2016, 37(10): 1872-1876.
PENG L S, YANG B P, CAO Z Y, ZENG J, FENG X P, CAI W W, ZHANG S Z, GAN Y M. Dynamic characteristics of potassium absorption, accumulation and distribution in sugarcane[J]. *Journal of Tropical Crops*, 2016, 37(10): 1872-1876. (in Chinese)