

甘蔗及其近缘种质斑茅和割手密不同生长角度根系分布及宿根性分析

匡自有³, 刀静梅^{1,2}, 杨绍林^{1,2*}, 艾 静^{1,2}, 王禹童^{1,2}, 张仲富^{1,2}, 李如丹^{1,2}, 邓 军^{1,2}, 赵 勇^{1,2}

1. 热带作物生物育种全国重点实验室, 云南昆明 650205; 2. 云南省农业科学院甘蔗研究所/云南省甘蔗遗传改良重点实验室, 云南开远 661699; 3. 云南农业大学热带作物学院, 云南普洱 665099

摘 要: 为探究甘蔗不同生长角度根系分布与甘蔗宿根性的关系, 筛选出强宿根甘蔗根系的标志性指标。本研究以宿根性有差异的 3 个甘蔗品种云蔗 08-1609 (A)、云蔗 05-51 (B)、粤糖 93-159 (C) 及强宿根性甘蔗近缘种质斑茅 (D)、割手密 (E) 为材料, 大田常规种植, 连续测定一新一宿的根系形态。结果表明: 强宿根性甘蔗品种新植伸长期根生物量和数量持续增加, 在与竖直方向夹角 0°~30°范围内最高, 其次是 30°~45°; 宿根蔗的根生物量和数量较新植蔗明显增加, 品种 A 和 B 根生物量和数量分布在 30°~45°范围内最高, 品种 C 则在 45°~65°范围内最高。强宿根性近缘种斑茅、割手密根生物量不论新植还是宿根均远高于甘蔗品种, 而根数量则是割手密最多, 斑茅根数量与甘蔗品种接近, 二者新植在 0°~30°范围内根生物量最大; 斑茅宿根在 3 个角度的根数量分布相近, 割手密宿根则在 30°~45°和 45°~65°范围内分布相近。品种 A 在 0°~30°范围内新植伸长期根数量占比最高 (46.43%), 其次是在 30°~45°范围内宿根伸长期 (42.74%)。割手密和斑茅根数量占比在 0°~30°范围内新植伸长期最高, 其次是 45°~65°宿根伸长期。与宿根能力相关排名前 5 的指标分别是新植与竖直方向呈 0°~30°夹角范围内的根系表面积、根系体积、根长、根鲜质量以及总根数量。在研究甘蔗宿根能力时可参考新植材料与竖直方向夹角 0°~30°范围内的根系指标, 该角度根鲜质量可作为初步筛选宿根性的关键指标。另外, 若无横走茎则可通过宿根与新植的平均单条根鲜质量比值进行宿根性判定。

关键词: 甘蔗; 宿根性; 生长角度; 根鲜质量; 根系生物量; 根数量

中图分类号: S566.1 文献标志码: A

Analysis of Root Distribution at Different Growth Angles and Ratooning Characteristic in Sugarcane and Its Related Germplasms *Erianthus arundinaceus* and *Saccharum spontaneum*

KUANG Ziyou³, DAO Jingmei^{1,2}, YANG Shaolin^{1,2*}, AI Jing^{1,2}, WANG Yutong^{1,2}, ZHANG Zhongfu^{1,2}, LI Rudan^{1,2}, DENG Jun^{1,2}, ZHAO Yong^{1,2}

1. National Key Laboratory of Tropical Crops Biological Breeding, Kunming, Yunnan 650205, China; 2. Sugarcane Research Institute, Yunnan Academy of Agricultural Sciences / Yunnan Key Laboratory of Sugarcane Genetic Improvement, Kaiyuan, Yunnan 661699, China; 3 College of Tropical Crops, Yunnan Agricultural University, Pu'er, Yunnan 665099, China

Abstract: The study was aimed to explore the relationship between the root distribution at different growth angles and the ratooning ability in sugarcane, and to screen the iconic root indexes of strong ratooning in sugarcane. Three sugarcane varieties with different ratooning ability, Yunzhe 08-1609 (A), Yunzhe 05-51 (B), Yuetang 93-159 (C) and strong

收稿日期 2024-09-11; 接受日期 2024-09-23

基金项目 云南省基础研究专项面上项目 (No. 202201AT070285); 中央引导地方科技发展项目 (No. 202307AD110002); 国家糖料产业技术体系岗位科学家项目 (No. CARS-170205)。

作者简介 匡自有 (2002—), 男, 学士, 研究方向: 甘蔗农艺。*通信作者 (Corresponding author): 杨绍林 (YANG Shaolin), E-mail: cbttxsysl@foxmail.com。

ratooning sugarcane germplasm *Erianthus arundinaceus* (D) and *Saccharum spontaneum* (E), were used as the materials. The root morphology of plant and ratoon crops was continuously measured under the conditions of conventional planting in field. The root biomass and quantity of sugarcane varieties with strong ratoon ability increased continuously during elongation stage of plant crop, and the highest was in the angle range 0° – 30° from the vertical direction, followed by that of 30° – 45° . The root biomass and numbers in ratoon crop were significantly higher than those in plant crop. The root biomass and numbers in varieties A and B were the highest in the angle range 30° – 45° , and that in variety C was the highest in 45° – 65° . The root biomass in *E. arundinaceus* and *S. spontaneum* was much higher than that in sugarcane varieties in both plant and ratoon crops, the root number in *S. spontaneum* was the largest while that in *E. arundinaceus* was close to that in sugarcane varieties. The root biomass of the two wild germplasm materials in plant crop was the highest in the angle range of 0° – 30° , while in ratoon crop, the root number distribution in *E. arundinaceus* was similar at three angle ranges, and of which in *S. spontaneum* was similar in the ranges of 30° – 45° and 45° – 65° . The root number in variety A was the highest (46.43%) in the angle range of 0° – 30° at late elongation stage of plant crop, followed by the range of 30° – 45° (42.74%) at late elongation stage of ratoon crop. The root number proportion of *S. spontaneum* and *E. arundinaceus* was the highest in the range of 0° – 30° at elongation stage of plant crop, followed by the range 45° – 65° at elongation stage of ratoon crop. The top five indicators correlated with the ratooning ability were the root surface area, root volume, root length, root fresh weight, and root number within the angle range of 0° – 30° to the vertical direction. For evaluating the ratooning ability of sugarcane, it is suggested to refer to the root index in the angle range of 0° – 30° from the vertical direction in plant crop, and the root fresh weight could be used as a key index for preliminary screening of the ratooning ability. In addition, if there was no rhizomes, the ratooning ability can be predicted by the ratio of average single root weight in ratoon to that in plant crop.

Keywords: sugarcane; ratooning ability; angle of root growth; root fresh weight; root biomass; roots number

DOI: 10.3969/j.issn.1000-2561.2025.03.013

甘蔗是我国重要的糖料作物,在我国有近90%的蔗糖产自甘蔗^[1]。在甘蔗收获后,地下蔗莖茎节上的芽萌发,再次生长发育而成的甘蔗称为宿根蔗。宿根蔗具有节省种茎材料、种植工作量和成本,及早发、早熟、糖分高等优点^[2-4],在原料蔗生产中占有重要地位。在我国甘蔗宿根年限一般较短,广西、云南蔗区宿根年限一般为2~3年,宿根蔗产量降低导致的宿根面积少和年限短是导致我国甘蔗生产成本高的主要因素之一^[4-6]。因此,研究宿根材料的关键性状、选育宿根性强的甘蔗品种、研发延长甘蔗宿根年限的栽培技术对我国甘蔗产业具有重要意义。

根系作为养分吸收器官^[7],主要分布在0~60 cm土层^[8],是水分和营养物质吸收、储存、转化的重要场所,在作物结构支撑、抗逆和产量形成等方面有着重要作用^[9]。同时,甘蔗根系与其宿根能力密切相关,甘蔗大量的根系形成被认为是宿根能力好的性状之一^[10],甘蔗根系在前一季地上部分收获后的1~7个月内^[11]保持着一定的活性以维持蔗莖活力并促进地下芽萌发和地上部分的再生生长,直至被新根系取代后才死亡和分解。因此,在干旱的春季,上一季所留的甘蔗根

系具有吸收深层土壤水分的能力,是宿根蔗苗早发及快速生长的保障。

甘蔗根系类型分为高度分枝的浅根系、斜向下的支撑根和向下深入可穿透犁底层的深根系,甘蔗深根系最深可达到超过6 m的土壤深度^[12],因此,深根系赋予了甘蔗植株对较深层土壤水分的利用能力;深根系是作物抗旱的重要特征,可以维持根系细胞水势,增强细胞对干旱的耐受性,提高作物抗旱能力^[13]。前人通过对冬小麦根系氮素吸收对抗旱性的影响研究发现,深根系和作物抗旱性强弱有关^[14],深根系可以增加根系对深层土壤中氮的吸收,有利于提高氮利用率^[15];而浅根系可以从表层土壤中吸收水分和养分^[12],增加作物对浅层土壤中磷的吸收利用^[16];支撑根和深根系是支撑地上部分的重要器官,通过吸收水分和增加作物抗倒伏能力参与作物的生长发育^[17-19]。相关研究表明,根系越长、数量越多,根鲜质量越大,根系对水分和养分的吸收能力越强,更有利于甘蔗增产^[20-21]。ZHAO等^[22]研究表明根系的根长、根表面积、根体积与宿根蔗株高、产量呈显著正相关^[9]。相对于甘蔗来说,其深根系、支撑根和浅根系的生物量、数量分布以及根长、表面积等

形态数据较为缺乏,另外新植和宿根的根系性状及其与宿根能力强弱的关系值得进一步研究。

通过根系测算分析不同角度的根系分布,可以估算作物根系分布模式^[23]。根系生长角度决定了根系类型和根系在垂直方向上的分布,并且决定了作物水分和养分的获取特性^[24],较浅的根系类型可以促进植物对表层土壤中养分的吸收利用^[25]。ZHU 等^[25]研究表明,玉米浅根系的分布对磷的吸收利用十分重要。ARULMOZH 等^[26]对干旱胁迫下水稻深根系和根系生长角的研究发现,与竖直方向 0°~65°夹角范围内深根系和产量显著相关。前人研究结果表明,水稻的深根特性主要取决于根系生长角度、深层土壤中根系的分布、根系穿透紧实土壤层或犁底层的能力^[27]。魏淑丽^[28]通过对玉米根系研究发现,田间条件下根系与水平面夹角在 10°~80°范围内,耕层根系生长角度对玉米深层根数量有重要影响。增加深层土壤中根数量可以提高作物对深层土壤中水分和养分的吸收和利用^[29-30]。因此,研究甘蔗不同生长角度根系形态及其与宿根性之间的关系有一定意义。

本研究以 3 个不同宿根性的甘蔗品种和 2 个强宿根近缘种为材料,通过分析其新植和宿根伸长前期、伸长中期、伸长后期的根系在不同角度范围内的生物量、数量及形态差异,以期筛选强宿根甘蔗标志性根系指标及强宿根甘蔗品种的选育提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料

供试材料为云南蔗区推广种植面积较大且宿根性有差异的 3 个甘蔗品种云蔗 08-1609、云蔗 05-51 和粤糖 93-159,其中云蔗 08-1609^[31-32]和云蔗 05-51^[33-34]宿根性较强,粤糖 93-159 宿根性稍弱^[35]。此外,选择了强宿根甘蔗野生近缘种斑茅^[36-37]和割手密^[38-39]材料各 1 个。并初步将上述材料的宿根能力分级为:斑茅、割手密(4 级)>云蔗 08-1609(3 级)>云蔗 05-51(2 级)>粤糖 93-159(1 级)。

1.2 方法

1.2.1 试验设计 本研究在云南省农业科学院甘蔗研究所第一实验基地进行,设置强宿根品种云蔗 08-1609(A)和云蔗 05-51(B),强宿根近缘种斑茅(D)、割手密(E)为处理,宿根性一般的粤糖 93-159(C)为对照。使用随机区组试验设计,大田试验每个处理设置 4 个重复,小区面

积为 36 m²(行距 1 m,行长 6 m),每个小区设置 2 行保护行。开沟深度 30 cm,沟底宽 15 cm,甘蔗品种双芽种茎均匀摆放在沟底,下芽量为 72 芽/行,下芽后一次性施入氮磷钾含量为 15:15:15 的复合肥 1200 kg/hm²+3%噻虫嗪 30 kg/hm²,覆土后覆透明全膜,分蘖完成后揭膜培土。斑茅和割手密为种茎育苗移栽,移栽后不覆膜,行距 1 m,株距 1 m。新植成熟期收获后的第一季宿根苗期施入同样的肥料和农药后进行松蔸培土,不覆地膜。材料种植以及管理方法与常规大田甘蔗种植一致。

1.2.2 取样 种植的 5 个处理材料在新植和宿根伸长期以丛为单位对地上部和根系进行取样。新植蔗为春植,在伸长前期(NE)即 2022 年 8 月(种植后 110 d)、伸长中期(NM)10 月(种植后 170 d)、伸长后期(NL)12 月(种植后 235 d)取样,每个处理分别选取长势均匀、无病虫害的植株,挖取根系(长 50 cm×宽 50 cm×深 60 cm),尽量保持根系的完整性,同时将对应的地上部分取回实验室待测,每个处理 3 次重复。新植材料于 2023 年 4 月砍收后对其进行常规宿根管理,并于 2023 年伸长前期(RE)7 月(砍收后 145 d)、伸长中期(RM)9 月(砍收后 200 d)及伸长后期(RL)11 月(砍收后 255 d)进行取样,取样方法同新植材料。

1.2.3 根系形态测定 将根系连同蔗蔸清洗干净后,按照根系生长方向与竖直方向的夹角分为 0°~30°、30°~45°、45°~65° 3 个角度。将根系分别按上述 3 个角度剪下并记录各个角度根的数量,然后再次清洗晾干表面水分称取鲜质量,进而使用 WinRHIZO 根系分析系统对根系形态进行扫描分析,得到根长、根表面积、根体积、根尖数、分叉数、交叉数。将扫描分析后的根系放入 105 ℃恒温箱烘至恒重并称重。

1.2.4 地上部分生物量测定 地上部分和根系同时取样,根系与地上部分分离后,记录每丛株数,将地上部分茎叶分离分别称重,计算鲜质量,然后将茎叶放入恒温箱 105 ℃杀青 15 min,80 ℃烘至恒重,并分别称取干质量。

1.3 数据处理

使用 Excel 2007 软件和 SPSS 19.0 软件,采用单因素方差分析(S-N-K 事后检验)和相关性分析(双变量相关性-皮尔逊-双尾)对甘蔗生物量及根系形态数据进行统计分析,采用 GraphPad Prism 9、Excel 软件制图。

2 结果与分析

2.1 伸长期植株数量

3 个甘蔗品种在新植和宿根的伸长前期株数均高于其他伸长时期（表 1）。甘蔗完成分蘖后进入伸长期，随着生长，无效分蘖消亡，到伸长中期，植株数量趋于稳定；宿根蔗的无效分蘖减少量高于新植蔗，这种无效分蘖消亡造成的植株数量减少的现象在宿根蔗上表现得更为明显。强宿根性近缘种 D、E 每丛的株数均高于 3 个甘蔗品种，且每丛株数至少是甘蔗品种的 6 倍以上。另外值得注意的是斑茅、割手密从伸长前期至伸长后期，并无明显的植株数量减少的现象。

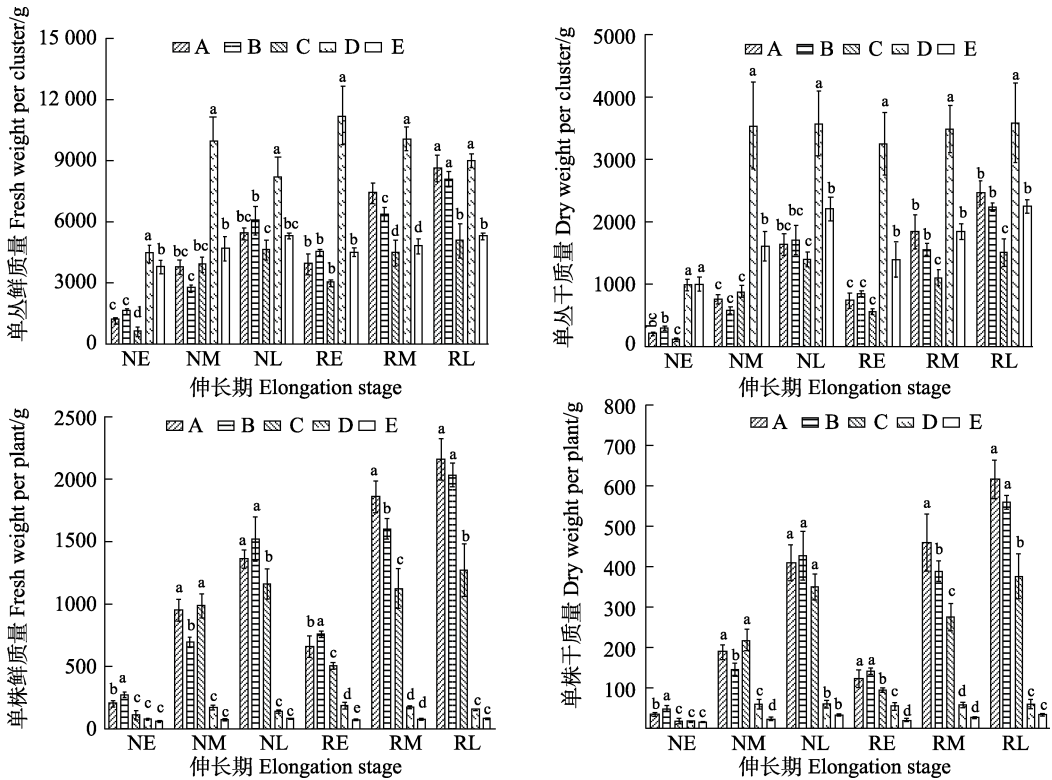
表 1 不同生长时期 5 个材料株数
Tab. 1 Number of plants in five materials at different growth stage 株/丛

作物类型 Crop type	生长时期 Growth stage	品种 Variety				
		A	B	C	D	E
新植	NE	8	6	7	68	69
	NM	7	5	6	52	73
	NL	5	6	4	44	81
宿根	RE	8	8	8	68	55
	RM	3	4	4	159	55
	RL	5	5	5	64	81

2.2 不同宿根性甘蔗地上部分生物量

3 个甘蔗品种每丛甘蔗生物量除新植伸长中期外，在其余 5 个生长时期强宿根性品种 A、B 地上部分生物量整体上高于宿根性一般的甘蔗品种 C，在宿根伸长中期和伸长后期达到显著差异水平（ $P<0.05$ ）。3 个甘蔗品种单株生物量与一丛的生物量变化趋势相似（图 1），与对照品种 C 相比，宿根性较强的品种 A 和 B 地上部分生物量在新植伸长前期和宿根的 3 个伸长期均显著高于品种 C（ $P<0.05$ ）。

斑茅和割手密在新植伸长前期地上部生物量显著高于甘蔗品种，而斑茅从新植的伸长前期到宿根的伸长中期，生物量均显著高于 3 个甘蔗品种及割手密（ $P<0.05$ ）；到宿根伸长后期，斑茅鲜重与甘蔗品种 A 和 B 之间无差异，其干质量除新植伸长前期外均显著高于其他材料；割手密地上部分生物量在伸长中期及伸长后期与甘蔗品种地上部分生物量趋于无差异，甚至到宿根伸长后期割手密地上部分鲜质量低于甘蔗品种 A 和 B；斑茅和割手密单株地上部生物量在 6 个伸长期均显著低于甘蔗品种地上部生物量，整体上斑茅生物量高于割手密（图 1）。



不同小写字母表示差异显著 ($P<0.05$)。
Different lowercase letters indicate significant difference ($P<0.05$).

图 1 伸长期地上部分生物量
Fig. 1 Fresh and dry weight of aboveground part

2.3 不同角度不同生长期根系生物量

从伸长期总根系生物量来看,新植伸长期,3个甘蔗品种间根总鲜质量无显著性差异,与割手密相比斑茅的略高;宿根伸长期,强宿根性品种A的根总生物量显著高于另外2个甘蔗品种,品种B、C间根系生物量无显著性差异,仍以斑茅的略高(表2、表3)。在与竖直方向夹角0°~30°范围内,新植伸长前期、后期,强宿根性品种A、B的根鲜质量显著高于宿根性一般的品种C;从新植伸长前期到伸长后期品种A、C根鲜质量呈现先增加后减少的趋势,品种B呈现先减少后增加的趋势。强宿根性品种A、B根干质量由新植伸长前期到伸长后期表现为增加的趋势,宿根性一般的品种C表现为先增加后减少的趋势,生物

量最高是B,其次是A;宿根伸长期3个甘蔗品种在0°~30°范围内的根系生物量较新植伸长期有明显增加,3个甘蔗品种宿根从伸长前期到后期根鲜质量均表现出先增加后减少的趋势,其中强宿根性品种A在宿根伸长中期根鲜质量显著高于其他2个品种,是品种B宿根伸长中期的2.09倍、品种C宿根伸长中期的2.10倍;宿根伸长期品种A、B根干质量和根鲜质量呈现同样的先增后减趋势,而宿根性一般的品种C根干质量在宿根伸长前期达到最大值,随后至宿根伸长后期持续减小。

在与竖直方向夹角30°~45°范围内,新植伸长前期强宿根性品种A、B根鲜质量高于品种C,干质量差异不显著;从新植伸长前期到新植伸长后期,品种A、C根系生物量呈现先增加后

表 2 不同角度不同生长时期的单株根鲜质量
Tab. 2 Root fresh weight per plant in different root growth angles g

根系生长角度 Root growth angle	作物类型 Crop type	生长时期 Growth stage	单株根鲜质量 Root fresh weight per plant				
			A	B	C	D	E
0°~30°	新植	NE	3.98±0.62 ^a	4.31±0.42 ^a	2.37±0.28 ^b	1.00±0.18 ^b	1.85±0.35 ^b
		NM	4.71±0.85 ^b	4.02±0.29 ^b	7.00±0.14 ^a	1.77±0.08 ^c	2.00±0.14 ^c
		NL	4.68±0.37 ^b	6.77±0.87 ^a	3.02±0.31 ^c	1.56±0.21 ^c	1.59±0.28 ^c
		平均值	4.46±0.24 ^a	5.03±0.87 ^a	4.13±1.45 ^a	1.44±0.23 ^a	1.81±0.12 ^a
	宿根	RE	3.59±0.67 ^{ab}	6.36±1.75 ^a	7.10±1.45 ^a	1.77±0.09 ^b	1.45±0.28 ^b
		RM	15.70±1.40 ^a	7.51±1.47 ^b	7.46±0.48 ^b	1.29±0.15 ^c	1.57±0.23 ^c
		RL	11.64±3.16 ^a	5.83±1.84 ^{ab}	7.28±0.75 ^{ab}	1.37±0.35 ^b	1.03±0.15 ^b
		平均值	10.31±3.56 ^a	6.57±0.50 ^{ab}	7.28±0.10 ^{ab}	1.48±0.15 ^b	1.35±0.16 ^b
	新植	NE	3.85±0.66 ^a	4.20±0.77 ^a	1.95±0.43 ^b	0.94±0.08 ^b	1.19±0.07 ^b
		NM	5.09±0.69 ^a	3.74±0.51 ^b	5.64±0.27 ^a	1.83±0.14 ^c	1.37±0.14 ^c
		NL	2.86±0.35 ^b	4.43±0.78 ^a	1.78±0.20 ^{bc}	1.10±0.15 ^c	0.73±0.12 ^c
		平均值	3.93±0.65 ^a	4.12±0.20 ^a	3.12±1.26 ^a	1.29±0.27 ^a	1.10±0.19 ^a
30°~45°	宿根	RE	8.35±1.57 ^a	7.57±1.12 ^a	7.88±0.43 ^a	2.42±0.29 ^b	1.16±0.12 ^b
		RM	13.65±1.69 ^a	5.95±1.05 ^b	7.41±0.28 ^b	1.14±0.16 ^c	1.65±0.19 ^c
		RL	16.23±1.72 ^a	8.88±1.06 ^b	9.60±2.34 ^b	1.62±0.34 ^c	1.15±0.23 ^c
		平均值	12.74±2.32 ^a	7.47±0.85 ^b	8.30±0.67 ^b	1.73±0.37 ^c	1.32±0.17 ^c
	新植	NE	3.18±0.25 ^a	4.05±0.55 ^a	2.66±0.59 ^a	1.11±0.11 ^b	1.18±0.06 ^b
		NM	4.50±0.46 ^a	3.88±0.08 ^a	5.13±1.01 ^a	1.42±0.18 ^b	0.66±0.09 ^b
		NL	2.45±0.47 ^b	3.71±0.32 ^a	1.88±0.29 ^b	1.40±0.21 ^{bc}	0.47±0.07 ^c
		平均值	3.38±0.60 ^a	3.88±0.10 ^a	3.22±0.98 ^a	1.31±0.10 ^b	0.77±0.21 ^b
	宿根	RE	5.43±0.42 ^b	5.58±0.67 ^b	10.45±0.22 ^a	2.82±0.08 ^c	1.18±0.03 ^d
		RM	15.74±0.37 ^a	6.10±1.08 ^b	8.05±2.25 ^b	1.22±0.09 ^c	1.97±0.10 ^c
		RL	11.21±1.73 ^a	8.52±0.93 ^{ab}	6.73±0.80 ^b	2.59±0.49 ^c	1.03±0.14 ^c
		平均值	10.79±2.98 ^a	6.73±0.91 ^{ab}	8.41±1.09 ^a	2.21±0.50 ^b	1.39±0.29 ^b
45°~65°	新植根总鲜质量		11.77±0.94 ^a	13.04±1.05 ^a	10.48±0.96 ^a	4.04±0.14 ^b	3.68±0.92 ^b
	宿根根总鲜质量		33.85±2.23 ^a	20.77±0.83 ^b	23.99±1.08 ^b	5.41±0.65 ^c	4.06±0.06 ^c

注：同行不同小写字母表示差异显著(P<0.05)。
Note: Different lowercase letters in the same row indicate significant difference (P<0.05).

表 3 不同角度不同生长时期的单株根干质量
Tab. 3 Root dry weight per plant in different angles

根系生长角度 Root growth angle	作物类型 Crop type	生长时期 Growth stage	单株根干质量 Root dry weight per plant				
			A	B	C	D	E
0°~30°	新植	NE	0.58±0.11 ^a	0.62±0.10 ^a	0.30±0.03 ^{ab}	0.18±0.03 ^b	0.34±0.05 ^{ab}
		NM	0.82±0.13 ^b	0.72±0.10 ^b	1.27±0.10 ^a	0.52±0.02 ^b	0.45±0.03 ^b
		NL	0.96±0.07 ^b	1.29±0.15 ^a	0.68±0.07 ^{bc}	0.69±0.07 ^{bc}	0.54±0.03 ^c
		平均值	0.79±0.11 ^a	0.88±0.21 ^a	0.75±0.28 ^a	0.46±0.15 ^a	0.44±0.06 ^a
	宿根	RE	1.13±0.09 ^b	1.97±0.39 ^a	1.87±0.25 ^a	0.73±0.02 ^b	0.41±0.06 ^b
		RM	3.52±0.28 ^a	2.22±0.07 ^b	1.78±0.16 ^b	0.45±0.05 ^c	0.51±0.11 ^c
		RL	2.56±0.51 ^a	1.06±0.29 ^{bc}	1.72±0.12 ^{ab}	0.53±0.10 ^c	0.27±0.04 ^c
		平均值	2.40±0.69 ^a	1.75±0.35 ^{ab}	1.79±0.04 ^{ab}	0.57±0.08 ^c	0.40±0.07 ^c
30°~45°	新植	NE	0.47±0.08 ^{ab}	0.60±0.13 ^a	0.25±0.06 ^{bc}	0.15±0.01 ^c	0.20±0.01 ^{bc}
		NM	0.71±0.08 ^b	0.55±0.04 ^{bc}	1.02±0.11 ^a	0.48±0.05 ^{bc}	0.33±0.04 ^c
		NL	0.61±0.06 ^{ab}	0.80±0.13 ^a	0.42±0.03 ^{bc}	0.47±0.10 ^{bc}	0.22±0.03 ^c
		平均值	0.60±0.07 ^a	0.65±0.08 ^a	0.56±0.23 ^a	0.37±0.11 ^a	0.25±0.04 ^a
	宿根	RE	2.00±0.24 ^a	2.28±0.40 ^a	1.92±0.16 ^a	0.68±0.06 ^b	0.31±0.03 ^b
		RM	2.86±0.29 ^a	1.61±0.06 ^b	1.64±0.07 ^b	0.33±0.03 ^c	0.52±0.11 ^c
		RL	3.61±0.48 ^a	1.54±0.10 ^{bc}	2.13±0.53 ^b	0.53±0.12 ^c	0.28±0.06 ^c
		平均值	2.82±0.47 ^a	1.81±0.24 ^b	1.90±0.14 ^b	0.51±0.10 ^c	0.37±0.08 ^c
45°~65°	新植	NE	0.37±0.05 ^{ab}	0.50±0.06 ^a	0.32±0.07 ^{abc}	0.16±0.02 ^c	0.21±0.02 ^{bc}
		NM	0.68±0.09 ^a	0.63±0.04 ^a	0.88±0.10 ^a	0.34±0.04 ^b	0.17±0.02 ^b
		NL	0.53±0.09 ^a	0.73±0.07 ^a	0.43±0.09 ^a	0.54±0.10 ^a	0.14±0.02 ^b
		平均值	0.53±0.09 ^a	0.62±0.07 ^a	0.54±0.17 ^a	0.35±0.11 ^a	0.17±0.02 ^a
	宿根	RE	1.28±0.10 ^b	1.30±0.25 ^b	2.25±0.06 ^a	0.69±0.02 ^c	0.32±0.01 ^c
		RM	3.33±0.13 ^a	1.64±0.31 ^b	1.74±0.50 ^b	0.34±0.03 ^c	0.58±0.06 ^c
		RL	3.36±0.10 ^a	1.50±0.25 ^b	1.49±0.23 ^b	0.72±0.12 ^c	0.25±0.06 ^c
		平均值	2.66±0.69 ^a	1.48±0.10 ^{ab}	1.83±0.22 ^{ab}	0.58±0.12 ^c	0.38±0.10 ^c
新植根总干质量		1.91±0.23 ^{ab}	2.15±0.24 ^a	1.86±0.20 ^{ab}	1.18±0.11 ^{bc}	0.87±0.24 ^c	
宿根根总干质量		7.88±0.37 ^a	5.04±0.30 ^b	5.51±0.09 ^b	1.67±0.06 ^c	1.15±0.02 ^c	

注：同行不同小写字母表示差异显著 ($P<0.05$)。
Note: Different lowercase letters in the same row indicate significant difference ($P<0.05$).

减少，而品种 B 表现为先减少后增加；宿根伸长期强宿根性品种 A 的根系生物量平均值显著高于另外 2 个品种，3 个甘蔗品种根系生物量较新植伸长期明显增加；宿根伸长后期，强宿根性品种 A 的增加量较为明显，根鲜质量是品种 B 宿根伸长后期的 1.83 倍、品种 C 宿根伸长后期的 1.69 倍，根干质量是品种 B 宿根伸长后期的 2.34 倍、品种 C 宿根伸长后期的 1.69 倍。总体看，强宿根性品种 A 根鲜质量表现为由宿根伸长前期至宿根伸长后期持续增加，品种 B、C 均表现为由宿根伸长前期至宿根伸长后期先减少后增加；强宿根性品种 A 根干质量变化趋势和鲜质量类似，品种 B 根干质量在宿根伸长前期达到最大值，随后至宿根伸长后期持续减少，宿根性一般的品种 C 根

干质量由宿根伸长前期到后期呈现先减少后增加的趋势。

在与竖直方向夹角 45°~65°范围内，宿根伸长期的根系生物量同样高于新植伸长期，强宿根性品种 A、B 根鲜质量分别在宿根伸长中期、后期达到最大值，根干质量则是分别在宿根伸长后期、中期达到最大值，而宿根性一般的品种 C 根系生物量则是在宿根伸长前期达到最大值，随后至宿根伸长后期一直减少。

3 个甘蔗品种新植伸长期平均根系生物量在与竖直方向夹角 0°~30°范围内最高，其次是 30°~45°。第一年宿根品种 A 和 B 的根系生物量分布在 30°~45°范围内最高，而品种 C 的根系生物量则在 45°~65°范围内最高。强宿根性近缘种斑

茅、割手密的单株根系生物量低于甘蔗品种，在 3 个生长角度中，新植在 0°~30°范围内根系生物量最大，宿根则在 45°~65°范围内最大。

2.4 不同角度不同伸长期根数量

新植伸长期，强宿根性品种 A、B 的根总数显著高于宿根性一般的甘蔗品种 C，割手密根总数高于斑茅但未达到显著水平；而宿根伸长期，品种 A 的根总数显著高于另外 2 个品种，品种 C 的根数量显著高于品种 B；割手密根总数高于斑茅，并在宿根伸长期达到显著水平（表 4）。在与竖直方向夹角 0°~30°范围内，新植的 3 个伸长期，强宿根性品种 A 的根数量均显著高于宿根性一般的品种 C，新植伸长中期和后期显著高于品种 B，强宿根性品种 B 在新植伸长后期根数量也

显著高于品种 C；新植伸长期，3 个甘蔗品种根数量均表现为从伸长前期到伸长后期逐渐增加的趋势；宿根伸长期 3 个品种根数量较新植伸长期有明显增加，从宿根伸长前期到宿根伸长后期均表现为先增加后减少的趋势，而强宿根性品种 A 在宿根伸长中期根数量增加较为明显，且数量显著高于另外 2 个品种，是品种 B 宿根伸长中期的 1.53 倍、品种 C 宿根伸长中期的 1.56 倍、品种 A 新植伸长后期的 3.26 倍、品种 A 宿根伸长前期的 3.64 倍。强宿根性近缘种斑茅、割手密也呈现出宿根伸长期根数量比新植伸长期增多，且在宿根伸长期斑茅根数量呈现先减少后增加的趋势，割手密根数量呈先增加后减少的趋势。

在与竖直方向夹角 30°~45°范围内，强宿根性

表 4 不同角度各生长时期单株根数量
Tab. 4 Root number per plant in different angle

根系生长角度 Root growth angle	作物类型 Crop type	生长时期 Growth stage	单株根数量 Root number per plant				
			A	B	C	D	E
0°~30°	新植	NE	22±6 ^a	17±6 ^{ab}	9±1 ^{bc}	2±0 ^c	6±0 ^{bc}
		NM	28±2 ^a	18±4 ^b	17±2 ^b	4±0 ^c	6±1 ^c
		NL	47±3 ^a	35±5 ^b	18±2 ^c	4±1 ^d	5±0 ^d
		平均值	32±8 ^a	23±6 ^{ab}	15±3 ^{bc}	3±1 ^c	6±0 ^c
	宿根	RE	42±10 ^a	35±6 ^a	53±14 ^a	4±1 ^b	8±1 ^b
		RM	153±21 ^a	100±6 ^b	98±15 ^b	3±1 ^c	11±0 ^c
		RL	63±4 ^a	27±3 ^b	50±10 ^a	5±2 ^c	9±3 ^c
		平均值	86±34 ^a	54±23 ^{ab}	67±16 ^{ab}	4±1 ^c	9±1 ^c
	新植	NE	22±2 ^a	17±2 ^a	8±1 ^b	2±0 ^c	3±0 ^{bc}
		NM	25±4 ^a	19±2 ^{ab}	15±3 ^b	3±0 ^c	5±1 ^c
		NL	28±3 ^a	28±4 ^a	11±1 ^b	2±1 ^c	3±1 ^{bc}
		平均值	25±2 ^a	21±3 ^a	11±2 ^b	2±0 ^c	4±1 ^c
30°~45°	宿根	RE	66±7 ^a	54±11 ^a	61±3 ^a	5±0 ^b	6±1 ^b
		RM	123±19 ^a	83±10 ^b	74±2 ^b	3±0 ^c	10±1 ^c
		RL	91±37 ^a	44±5 ^{ab}	65±11 ^{ab}	4±1 ^c	13±4 ^c
		平均值	93±16 ^a	60±12 ^b	67±4 ^{ab}	4±1 ^c	10±2 ^c
	新植	NE	18±2 ^a	21±3 ^a	10±2 ^b	2±1 ^c	5±1 ^{bc}
		NM	28±2 ^a	18±4 ^b	17±2 ^b	4±0 ^c	6±1 ^c
		NL	27±6 ^a	18±6 ^{ab}	12±2 ^{bc}	3±0 ^c	3±1 ^c
		平均值	24±3 ^a	19±1 ^a	13±2 ^b	3±1 ^c	5±1 ^c
	宿根	RE	49±3 ^b	36±4 ^c	61±4 ^a	5±0 ^d	7±0 ^d
		RM	128±19 ^a	96±20 ^a	88±13 ^a	3±1 ^b	13±2 ^b
		RL	88±13 ^a	46±10 ^b	42±9 ^b	5±1 ^c	10±2 ^c
		平均值	88±23 ^a	59±19 ^a	64±13 ^a	4±1 ^b	10±2 ^b
45°~65°	新植根总数		82±8 ^a	64±4 ^b	39±3 ^c	9±1 ^d	14±2 ^d
	宿根根总数		268±6 ^a	174±6 ^c	197±3 ^b	12±0 ^e	29±1 ^d

注：同行不同小写字母表示差异显著 (P<0.05)。
Note: Different lowercase letters in the same row indicate significant difference (P<0.05).

品种 A 新植和宿根 3 个伸长期根数量平均值均显著高于宿根性一般的品种 C; 由新植伸长前期至新植伸长后期, 强宿根性品种 A、B 的根数量呈逐渐增加的趋势, 宿根性一般的品种 C 呈先增加后减少的趋势; 宿根伸长期 3 个甘蔗品种根数量较新植伸长期明显增加, 均呈先增加后减少的趋势。宿根伸长中期, 强宿根性品种 A 的增加量较为明显, 是品种 B 宿根伸长中期的 1.48 倍、品种 C 宿根伸长中期的 1.66 倍。强宿根性近缘种斑茅、割手密在新植伸长期呈先增后减的趋势, 斑茅在宿根伸长期呈先减少后增多的趋势, 而割手密根数量随生长时期的变化持续增加。

在 45°~65°范围内, 新植伸长期品种 A 和 B 根数量平均值显著高于品种 C, 品种 A 和 C 的根数量呈先增后减的趋势, 品种 B 的根数量在伸长初期最高, 随后减少; 宿根伸长期根数量同样高于新植伸长期, 3 个甘蔗品种根数量均在宿根伸长中期达到最大值。强宿根近缘种斑茅、割手密在宿根伸长期的根数量较新植有所增加, 割手密根数量略高于斑茅。

在上述 3 个角度范围内, 新植伸长期 3 个甘蔗品种根数量均值在与竖直方向夹角 0°~30°范围内最高, 其次是 30°~45°; 在宿根伸长期, 品种 A 和 B 根数量均值在 30°~45°范围内最高, 在其余 2 个角度相当, 品种 C 的根数量在 3 个角度分配相当。斑茅、割手密新植的 3 个伸长期根数量均值在 0°~30°范围内最高, 斑茅宿根 3 个伸长期根数量均值在 3 个角度分布一致, 割手密宿根 3 个伸长期根数量均值在 30°~45°和 45°~65°范围内分布一致。

2.5 不同宿根性甘蔗品种的根数量、鲜质量、干质量占比

在与竖直方向夹角 0°~30°范围内的根数量占比如表 5 所示, 新植伸长期根数量平均占比为 35.43%~40.77%, 最高出现在品种 A 伸长后期 (46.43%); 宿根伸长期根数量平均占比为 30.02%~33.46%, 最高出现为割手密伸长前期 (38.69%); 宿根伸长期根数量平均占比较新植减少。在 30°~45°范围内, 新植伸长期根数量平均占比为 26.92%~32.82%, 最高为品种 A 伸长前期 (35.87%); 宿根伸长期根数量平均占比为 32.33%~38.40%, 品种 A 伸长后期最高 (42.47%), 同时该角度范围内甘蔗品种和斑茅、割手密根数量平均占比总体上在宿根伸长期均明显增加。在

45°~65°范围内, 新植伸长期根数量平均占比为 30.34%~36.04%, 最高为品种 B 伸长前期 (38.90%); 宿根伸长期根数量平均占比为 30.28%~34.62%, 割手密伸长中期最高 (38.20%), 根数量平均占比品种 A、C 和斑茅在宿根伸长期略有降低, 其余 2 个材料有所升高。

强宿根品种 A 在 0°~30°范围内新植伸长后期根数量占比最高 (46.43%), 其次是在 30°~45°范围内宿根伸长后期 (42.74%)。割手密和斑茅根数量占比在 0°~30°范围内新植伸长期最高, 其次是 45°~65°宿根伸长期, 而 30°~45°范围内占比较低。综合分析, 新植伸长期强宿根材料 A 和 B 以及强宿根近缘种斑茅和割手密根数量平均占比在 0°~30°范围内较高; 而宿根伸长期 3 个甘蔗品种根数量占比在 30°~45°范围内最高, 斑茅、割手密根数量平均占比在 45°~65°范围内最高, 在另外 2 个角度范围内相当。

根系生物量方面, 在与竖直方向夹角 0°~30°范围内, 新植伸长期根鲜质量平均占比为 35.45%~49.76%、干质量平均占比为 38.77%~50.64%, 割手密在伸长后期根系生物量占比最高, 其次是同时期的品种 A; 宿根伸长期根鲜质量平均占比为 28.07%~33.22%、干质量平均占比为 29.56%~35.03%, 根系生物量占比较新植伸长期减少。在 30°~45°范围内, 新植伸长期根鲜重平均占比为 28.72%~32.78%、干质量平均占比为 28.67%~31.31%, 低于 0°~30°范围的生物量; 宿根伸长期根鲜质量平均占比为 31.36%~40.11%、干质量平均占比为 30.24%~37.51%, 根系生物量占比在宿根伸长期除斑茅略微减少外较新植伸长期均增加。在 45°~65°范围内, 新植伸长期根鲜质量平均占比为 20.57%~33.13%、干质量平均占比为 20.69%~30.68%, 宿根伸长期根鲜质量占比为 31.83%~40.23%、干质量平均占比为 29.62%~34.73%, 根系生物量平均占比在宿根伸长期较新植伸长期均增加。总体来看, 5 个试验材料新植伸长期根系生物量平均占比在 0°~30°范围内最高; 宿根伸长期 3 个甘蔗品种根系生物量平均占比在 30°~45°范围内最高, 斑茅、割手密宿根伸长期根鲜质量平均占比在 45°~65°范围内最高、干质量在 0°~30°范围内最高。

2.6 根系和地上部分各指标与宿根性的相关性分析

本研究分析了 5 个材料的地上部分及根系生

表 5 不同根生长角度根数量、鲜质量、干质量的占比
Tab. 5 Root number, root fresh weight and dry weight proportion in different root growth angles

根系生长角度 Root growth angle	作物类型 Crop type	生长期 Growth stage	根数量占比 Root number proportion/%					根鲜质量占比 Root fresh weight proportion/%					根干质量占比 Root dry weight proportion/%						
			根数量占比 Root number proportion/%					根鲜质量占比 Root fresh weight proportion/%					根干质量占比 Root dry weight proportion/%						
			A	B	C	D	E	A	B	C	D	E	A	B	C	D	E		
0°~30°	新植	NE	34.10 ^a	29.63 ^a	31.93 ^a	34.40 ^a	41.29 ^a	35.81 ^a	34.85 ^a	34.92 ^a	32.30 ^a	42.93 ^a	39.82 ^a	36.28 ^a	35.51 ^a	36.30 ^a	44.53 ^a		
		NM	34.76 ^a	32.32 ^a	30.93 ^a	37.09 ^a	39.01 ^a	32.38 ^b	34.64 ^b	39.76 ^b	35.43 ^b	49.72 ^a	36.53 ^a	37.42 ^a	40.09 ^a	39.04 ^a	47.24 ^a		
		NL	46.43 ^a	44.34 ^a	44.24 ^a	39.60 ^a	42.01 ^a	46.72 ^{ab}	45.33 ^{ab}	45.04 ^{ab}	38.61 ^b	56.63 ^a	45.87 ^b	45.82 ^b	44.56 ^b	40.98 ^b	60.15 ^a		
		AVG	38.43 ^a	35.43 ^a	35.70 ^a	37.03 ^a	40.77 ^a	38.30 ^{ab}	38.27 ^{ab}	39.90 ^{ab}	35.45 ^b	49.76 ^a	40.74 ^b	39.84 ^b	40.05 ^b	38.77 ^b	50.64 ^a		
		RE	25.89 ^a	29.49 ^a	30.01 ^a	29.48 ^a	38.69 ^a	20.56 ^b	32.29 ^{ab}	27.55 ^{ab}	25.36 ^{ab}	37.70 ^a	25.79 ^a	36.49 ^a	30.80 ^a	34.92 ^a	38.87 ^a		
	宿根	RM	38.06 ^a	35.96 ^a	37.43 ^a	36.85 ^a	31.36 ^a	34.81 ^a	37.83 ^a	33.39 ^a	35.26 ^a	29.90 ^a	36.19 ^a	40.77 ^a	35.40 ^a	40.39 ^a	31.17 ^a		
		RL	29.99 ^a	24.63 ^a	32.93 ^a	32.78 ^a	26.63 ^a	28.84 ^a	24.65 ^a	31.89 ^a	24.64 ^a	32.05 ^a	26.70 ^a	25.73 ^a	33.72 ^a	29.78 ^a	33.16 ^a		
		AVG	31.32 ^a	30.02 ^a	33.46 ^a	33.04 ^a	32.30 ^a	28.07 ^a	31.59 ^a	30.94 ^a	28.42 ^a	33.22 ^a	29.56 ^a	34.33 ^a	33.31 ^a	35.03 ^a	34.40 ^a		
		30°~45°	新植	NE	35.87 ^a	31.47 ^{ab}	31.04 ^{ab}	27.25 ^{ab}	25.53 ^b	34.49 ^a	32.95 ^a	27.62 ^a	30.88 ^a	28.66 ^a	32.84 ^{ab}	34.44 ^a	28.40 ^{ab}	30.38 ^{ab}	26.98 ^b
				NM	30.86 ^a	33.08 ^a	27.93 ^a	30.76 ^a	30.06 ^a	35.33 ^a	32.03 ^a	31.92 ^a	36.43 ^a	34.08 ^a	32.13 ^a	29.34 ^a	31.92 ^a	35.62 ^a	34.48 ^a
NL	26.95 ^{ab}			33.92 ^a	25.90 ^{ab}	22.76 ^b	28.53 ^{ab}	28.51 ^a	29.36 ^a	26.61 ^a	26.94 ^a	26.28 ^a	28.94 ^a	27.97 ^a	27.49 ^a	27.38 ^a	24.56 ^a		
AVG	31.22 ^a			32.82 ^a	28.28 ^a	26.92 ^a	28.04 ^a	32.78 ^a	31.44 ^a	28.72 ^a	31.42 ^a	29.67 ^a	31.31 ^a	30.58 ^a	29.27 ^a	31.12 ^a	28.67 ^a		
RE	42.33 ^a			42.29 ^a	34.98 ^{ab}	35.29 ^{ab}	28.07 ^b	47.42 ^a	38.96 ^{ab}	31.25 ^b	34.29 ^b	30.80 ^b	45.06 ^a	40.47 ^{ab}	31.88 ^b	32.06 ^b	30.50 ^b		
宿根	RM		30.40 ^a	30.07 ^a	28.82 ^a	30.19 ^a	30.43 ^a	30.14 ^a	30.08 ^a	32.97 ^a	30.91 ^a	31.71 ^a	29.45 ^a	29.63 ^a	32.32 ^a	29.19 ^a	32.00 ^a		
	RL		42.47 ^a	37.20 ^a	40.81 ^a	31.53 ^a	41.32 ^a	42.75 ^a	38.67 ^a	39.54 ^a	28.86 ^a	36.01 ^a	38.00 ^a	38.03 ^a	38.59 ^a	29.47 ^a	35.54 ^a		
	AVG		38.40 ^a	36.52 ^a	34.87 ^a	32.33 ^a	33.27 ^a	40.11 ^a	35.90 ^a	34.59 ^a	31.36 ^a	32.84 ^a	37.51 ^a	36.05 ^a	34.26 ^a	30.24 ^a	32.68 ^a		
	45°~65°		新植	NE	30.03 ^a	38.90 ^a	37.04 ^a	38.35 ^a	33.18 ^a	29.70 ^a	32.21 ^a	37.46 ^a	36.82 ^a	28.41 ^a	27.33 ^a	29.28 ^a	36.10 ^a	33.32 ^a	28.49 ^a
				NM	34.38 ^a	34.60 ^a	41.14 ^a	32.15 ^a	30.93 ^a	32.29 ^a	33.33 ^a	28.32 ^{ab}	28.13 ^{ab}	16.20 ^b	31.34 ^{ab}	33.25 ^a	27.98 ^{ab}	25.33 ^{ab}	18.28 ^b
NL		26.63 ^a		21.74 ^a	29.86 ^a	37.63 ^a	29.46 ^a	24.76 ^{ab}	25.31 ^{ab}	28.35 ^{ab}	34.44 ^a	17.10 ^b	25.19 ^{ab}	26.21 ^{ab}	27.96 ^{ab}	31.64 ^a	15.29 ^b		
AVG		30.34 ^a		31.75 ^a	36.01 ^a	36.04 ^a	31.19 ^a	28.92 ^{ab}	30.28 ^a	31.38 ^a	33.13 ^a	20.57 ^b	27.95 ^{ab}	29.58 ^{ab}	30.68 ^a	30.10 ^a	20.69 ^b		
RE		31.76 ^a		28.22 ^a	35.01 ^a	35.23 ^a	33.23 ^a	32.02 ^{ab}	28.75 ^b	41.20 ^a	40.35 ^a	31.50 ^{ab}	29.15 ^{bc}	23.03 ^c	37.32 ^a	33.02 ^{ab}	30.63 ^{ab}		
宿根		RM	31.54 ^a	33.97 ^a	33.75 ^a	32.95 ^a	38.20 ^a	35.05 ^a	32.09 ^a	33.64 ^a	33.83 ^a	38.38 ^a	34.35 ^a	29.60 ^a	32.28 ^a	30.42 ^a	36.83 ^a		
		RL	27.53 ^a	38.17 ^a	26.26 ^a	35.69 ^a	31.84 ^a	28.42 ^b	36.67 ^{ab}	28.57 ^b	46.50 ^a	31.93 ^{ab}	35.30 ^a	36.24 ^a	27.69 ^a	40.75 ^a	31.29 ^a		
		AVG	30.28 ^a	33.45 ^a	31.67 ^a	34.62 ^a	34.42 ^a	31.83 ^a	32.50 ^a	34.47 ^a	40.23 ^a	33.94 ^a	32.94 ^a	29.62 ^a	32.43 ^a	34.73 ^a	32.91 ^a		

物量、根长、根表面积、根体积、根尖数、分叉数、交叉数与甘蔗宿根性之间的相关性（表 6）。分析结果显示，与宿根性相关性最高的是新植的与竖直方向呈 0°~30°范围内的根表面积、根体积、根长，其次是根总数、0°~30°范围内的根鲜质量和

和分叉数，以及根总鲜质量。从宿根和综合分析整体上看，与竖直方向呈 0°~30°夹角范围内的根鲜质量与宿根性的相关性最高，其次是 0°~30°范围内的根系形态，而新植伸长期 0°~30°范围内的根表面积与宿根性相关性最高（0.894）。新植和

表 6 根系和地上部分各指标与宿根性的相关性
Tab. 6 Correlation between ratooning ability and indexes of root system and above ground part

作物类型 Crop type	指标 Index	相关性系数 Correlation coefficient	指标 Index	相关性系数 Correlation coefficient	指标 Index	相关性系数 Correlation coefficient
新植	0°~30°根表面积	0.894**	0°~30°根尖数	0.829**	30°~45°根鲜质量	0.791**
	0°~30°根体积	0.891**	30°~45°根长	0.827**	根干质量	0.754**
	0°~30°根长	0.880**	30°~45°根数量	0.827**	45°~65°根体积	0.732**
	根总数	0.879**	45°~65°根数量	0.826**	30°~45°根干质量	0.698**
	0°~30°根鲜质量	0.876**	45°~65°根长	0.824**	45°~65°根鲜质量	0.671**
	0°~30°分叉数	0.873**	30°~45°分叉数	0.818**	45°~65°根干质量	0.589**
	根总鲜质量	0.853**	45°~65°交叉数	0.812**	地上部分干质量	0.443**
	30°~45°根表面积	0.851**	45°~65°根表面积	0.804**	地上部分鲜质量	0.390**
	0°~30°根数量	0.850**	45°~65°根尖数	0.803**	0°~30°平均直径	0.251
	30°~45°根体积	0.847**	0°~30°根干质量	0.801**	30°~45°平均直径	0.100
	30°~45°分叉数	0.844**	0°~30°交叉数	0.795**	45°~65°平均直径	0.025
	30°~45°交叉数	0.838**	30°~45°根尖数	0.794**		
宿根	0°~30°根鲜质量	0.734**	30°~45°根干质量	0.653**	30°~45°交叉数	0.579**
	0°~30°根表面积	0.718**	30°~45°根鲜质量	0.651**	30°~45°根尖数	0.577**
	根总鲜质量	0.714**	30°~45°根鲜质量	0.651**	根总数	0.558**
	根干质量	0.697**	45°~65°根长	0.640**	45°~65°根数量	0.545**
	0°~30°根干质量	0.695**	45°~65°根干质量	0.639**	0°~30°根数量	0.458**
	0°~30°分叉数	0.691**	45°~65°根体积	0.635**	地上部分干质量	0.452**
	0°~30°根体积	0.682**	30°~45°根体积	0.635**	45°~65°根数量	0.440**
	0°~30°根长	0.678**	30°~45°分叉数	0.619**	地上部分鲜质量	0.227
	45°~65°根表面积	0.675**	30°~45°根长	0.616**	45°~65°平均直径	0.193
	0°~30°交叉数	0.671**	45°~65°交叉数	0.615**	30°~45°平均直径	0.159
	30°~45°根表面积	0.671**	45°~65°根尖数	0.610**	0°~30°平均直径	0.059
	45°~65°分叉数	0.655**	45°~65°根鲜质量	0.604**		
综合	0°~30°根鲜质量	0.805**	30°~45°根表面积	0.650**	45°~65°根干质量	0.558**
	0°~30°根表面积	0.793**	30°~45°根干质量	0.632**	30°~45°根尖数	0.556**
	0°~30°根体积	0.788**	30°~45°分叉数	0.605**	0°~30°根数量	0.511**
	0°~30°分叉数	0.763**	45°~65°分叉数	0.604**	根总数	0.511**
	根总鲜质量	0.751**	45°~65°根表面积	0.604**	45°~65°根数量	0.498**
	0°~30°根干质量	0.742**	45°~65°交叉数	0.594**	地上部分干质量	0.430**
	0°~30°根长	0.742**	45°~65°根体积	0.588**	30°~45°根数量	0.394**
	0°~30°交叉数	0.726**	30°~45°交叉数	0.582**	0°~30°平均直径	0.139
	0°~30°根尖数	0.705**	30°~45°根长	0.578**	地上部分鲜质量	0.285**
	根干质量	0.688**	45°~65°根尖数	0.569**	45°~65°平均直径	0.096
	30°~45°根鲜质量	0.679**	45°~65°根长	0.568**	30°~45°平均直径	0.113
	30°~45°根体积	0.666**	45°~65°根鲜质量	0.563**		

注：**表示极显著相关（ $P<0.01$ ）。
Note: ** indicates extremely significant correlation ($P<0.01$).

宿根伸长期 3 个角度范围内根系和宿根性的相关性大小为 $0^{\circ}\sim 30^{\circ}>30^{\circ}\sim 45^{\circ}>45^{\circ}\sim 65^{\circ}$ 。

3 讨论

甘蔗宿根性是新植甘蔗砍收后维持连续多次收获产量的稳定性的能力, 也称宿根能力。宿根性强则很大程度上表示除严重自然灾害以外, 从宿根第一季后的宿根蔗较新植至少无明显减产或产量持平。甘蔗宿根年限是甘蔗宿根性的体现形式, 宿根性强则宿根产量维持稳定, 宿根年限长^[40]。甘蔗宿根年限受到品种特性、土壤条件、种植管理方式、气候等因素的影响^[41]。随着宿根年限的增加, 蔗蔸的位置会升高, 根系变浅, 宿根蔗抗倒伏能力减弱, 同时加上病虫害和冬春少雨干旱, 地下芽活性降低, 极有可能导致地下芽萌发率降低^[1, 41]。宿根萌发期主要在春季, 降雨少, 而新根系较少且主要分布在表层土壤中, 对深层土壤中的水分吸收只能靠上季留下的深根系^[42]。在本研究中, 宿根性强的材料在与竖直方向夹角 $0^{\circ}\sim 30^{\circ}$ 范围内根系生物量和数量分布较高, 甘蔗品种的深根系对来年地下芽萌发起关键作用, 因此深根系很有可能促进了宿根蔗活力的保持。

甘蔗的强宿根性状主要来自野生种质, 目前主要来自割手密, 在育种技术成熟后, 甘蔗野生种质的许多强宿根优良性状可以整合到现有优良亲本中, 使我国甘蔗宿根年限短的问题得以解决。而在本研究中, 甘蔗品种、斑茅、割手密的根系在数量和密集程度上有较大差别: 斑茅和割手密的单丛根系生物量和数量均远高于甘蔗品种, 但单株较低。值得注意的是, 斑茅的根系相对于另外 2 个材料是最密集的, 由于斑茅的丛生性较好, 植株在每丛中生长较为紧密, 因此其根系也较其余 2 个材料更显密集。另外, 根据 2 a 的试验观察, 斑茅根系有一个极为明显的特征: 其根系能够长期保持活力, 无明显的褐化死亡的现象, 其根系近植株茎秆端表皮、皮层细胞死亡后裂解为灰白色薄片紧贴于内皮层, 而割手密和甘蔗根系上述部位根系表皮、皮层死亡后则有明显的变黑褐化, 同时并非紧贴于有活性的内皮层而是留有较大空隙, 且相对于另外 2 个材料斑茅根系皮层包裹部分木质化程度较高, 表现为强度较大、弯曲度较小且直径较大, 这很可能是其地上部生物量较高的原因之一。本研究中割手密根系相对于甘蔗和斑茅最大的特点是有较大部分根系着生于

地下横走茎的节上, 其分布以地下茎的生长方向为主导, 致使割手密根系分布相对较广, 便于吸收远端和更深土层的水分和矿质养分, 但现有甘蔗品种在筛选过程中似乎未获得地下横走茎性状。甘蔗根系则以向上生长的节为主导, 每个节上着生的根形呈伞状分布, 越接近于茎的初始萌发基部, 其根越密集, 且同斑茅和割手密的共同点则是在地上部分收获后, 根系能保持活力, 直至新根系替代其功能。上述斑茅、割手密和甘蔗根系的特点及相关性状有待后续进一步研究, 以期培育出宿根能力更强的甘蔗品种。

高茎率可以成为筛选甘蔗宿根性的指标, 宿根分蘖数常被作为评价相关材料宿根性的指标, 分蘖力强的材料, 可以促进分蘖成茎, 获得更多的有效茎数量^[2, 43-44]。在本研究中, 新植和宿根 2 季的割手密和斑茅表现为分蘖多且成茎率高, 其株数从伸长初期到伸长后期无明显变化, 而相比之下甘蔗品种的株数在伸长初期较多, 但到伸长后期会有明显减少, 显然有许多无效分蘖消亡, 成茎率较低。因此, 在评价甘蔗品种宿根性时, 需要考虑宿根与新植相比的发株率和生物量外^[3], 成茎率高也是强宿根甘蔗品种的表现之一。同时, 宿根性好的品种, 其在宿根季表现出较高的生物量^[45], 本研究的 3 个甘蔗品种中, 宿根性较强的甘蔗品种 A、B 地上部分生物量也证实了这一点。而割手密的地上部分生物量则有所不同, 表现出其强宿根的主要性状则是其充满活力的地下横走茎和宿根季分布较为均匀的根系。

根系在作物的整个生长发育过程中起着关键作用^[46], MILLIGAN 等^[44]研究表明, 旺盛的根系是甘蔗宿根性强的标志之一, 可以增强对土壤中养分的吸收利用, 除此之外, 蔗蔸形态^[43]、宿根季甘蔗有效茎数量、宿根季产量等也被认为是评定宿根性的主要指标。本研究中, 相关性分析发现, 在整体上, 与竖直方向呈 $0^{\circ}\sim 30^{\circ}$ 夹角范围内的根鲜质量与宿根性的相关性最高 ($r=0.805^{**}$), 其次是 $0^{\circ}\sim 30^{\circ}$ 范围内的根系形态。说明甘蔗强宿根性与 $0^{\circ}\sim 30^{\circ}$ 范围内根系的各项指标有着极大的关系。新植蔗是宿根的基础, 有趣的是新植的 $0^{\circ}\sim 30^{\circ}$ 范围内的根系形态指标与宿根能力的相关性接近于 0.900, 明显高于宿根季也高于综合相关性, 表明该指标可作为强宿根性的代表性指标, 可以通过评价新植蔗与竖直方向呈 $0^{\circ}\sim 30^{\circ}$ 夹角范围内的根系相关性指标得出宿根能力的评价,

比如与竖直方向呈 $0^{\circ}\sim 30^{\circ}$ 夹角范围内的根鲜质量指标。另外,通过分析发现,伸长期斑茅宿根与新植的平均单条根鲜质量比值非常接近于 1,同时强宿根品种 A 的比值为 0.13/0.14,品种 B 的为 0.12/0.20,品种 C 的为 0.12/0.27,强宿根割手密为 0.14/0.26,不同于强宿根甘蔗和斑茅接近于 1,很可能是因为它有地下横走茎的生长模式。因此,甘蔗品种宿根与新植的平均单条根鲜质量比值若接近于 1 或是出现横走茎则极有可能是强宿根种。

4 结论

保持活力的深根群可能是甘蔗宿根季前期甘蔗萌发早、生长快的重要因素之一,不同宿根性甘蔗品种之间,以及斑茅和割手密之间的根系,在不同生长角度范围内的生物量、数量以及占比分布存在差异。综合分析可得,不同甘蔗品种、斑茅和割手密的根系生长分布和生长模式存在差异和共同点,宿根能力与根系分布及生长模式密切相关,割手密与斑茅、甘蔗品种的差异在于割手密特有的地下横走茎;斑茅与割手密、甘蔗品种之间的差异在于斑茅根系密集度高、强度大及活力的长期保持;甘蔗材料间宿根性的差异在于伸长中后期根系生物量、根数量以及宿根蔗与新植蔗的平均单条根鲜质量比值。上述指标可为筛选强宿根材料提供一定依据,同时与竖直方向呈 $0^{\circ}\sim 30^{\circ}$ 夹角范围内的根鲜质量等性状,以及地下横走茎的有无,在新植蔗阶段评价宿根能力方面可能有一定的应用前景,并需要进一步研究和验证。

参考文献

- [1] 胡水凤. 宿根蔗生育特性与高产栽培技术探析[J]. 园艺与种苗, 2015(2): 19-20, 48.
HU S F. Discussion on characterisitic of growth and high-yield cultivation techniques of ratoon cane[J]. Horticulture & Seed, 2015(2): 19-20, 48. (in Chinese)
- [2] 丁雪儿, 林萍萍, 余凡, 邓祖湖. 甘蔗宿根性研究进展[J]. 中国糖料, 2020, 42(2): 12-18.
DING X E, LIN P P, YU F, DENG Z H. Research progress of sugarcane ratooning ability[J]. Sugar Crops of China, 2020, 42(2): 12-18. (in Chinese)
- [3] 覃伟, 张保青, 黄玉新, 周珊, 赵丽萍, 李纯佳, 李旭娟, 张静, 李傲梅, 任生林, 黄东亮, 刘新龙. 甘蔗宿根关键性状及其在宿根性快速评价中的应用[J]. 植物遗传资源学报, 2024, 25(3): 399-412.
QIN W, ZHANG B Q, HUANG Y X, ZHOU S, ZHAO L P, LI C J, LI X J, ZHANG J, LI A M, REN S L, HUANG D L, LIU X L. Identification of key factors applicable in rapid evaluation of sugarcane ratooning ability[J]. Journal of Plant Genetic Resources, 2024, 25(3): 399-412. (in Chinese)
- [4] 张静, 杨昆, 吴才文, 赵培方, 夏红明, 咎逢刚, 姚丽, 覃伟, 赵丽萍, 陈学宽, 刘家勇, 赵俊. 强宿根高产高糖甘蔗新品种云蔗 101666 的选育与评价[J]. 中国糖料, 2024, 46(1): 13-22.
ZHANG J, YANG K, WU C W, ZHAO P F, XIA H M, ZAN F G, YAO L, QIN W, ZHAO L P, CHEN X K, LIU J Y, ZHAO J. Breeding and evaluation of new sugarcane variety yunzhe 101666 with good ratooning, high yield and high sugar content[J]. Sugar Crops of China, 2024, 46(1): 13-22. (in Chinese)
- [5] XU F, WANG Z T, LU G L, ZENG R S, QUE Y X. Sugarcane ratooning ability: research status, shortcomings, and prospects[J]. Biology, 2021, 10(10): 1052.
- [6] 杨荣仲, 周会, 梁强, 唐仕云, 王伦旺, 桂意云, 黄海荣, 黄赞斌, 贤武, 雷敬超. 甘蔗家系宿根性分析[J]. 热带作物学报, 2021, 42(7): 1932-1940.
YANG R Z, ZHOU H, LIANG Q, TANG S Y, WANG L W, GUI Y Y, HUANG H R, HUANG Z B, XIAN W, LEI J C. Analysis of ratooning ability for sugarcane families[J]. Chinese Journal of Tropical Crops, 2021, 42(7): 1932-1940. (in Chinese)
- [7] 王法宏, 王旭清, 刘素英, 王晓理. 根系分布与作物产量的关系研究进展[J]. 山东农业科学, 1997, 19(4): 47-50.
WANG F H, WANG X Q, LIU S Y, WANG X L. Research progress on the relationship between root distribution and crop yield[J]. Journal of Shandong Agricultural Science, 1997, 19(4): 47-50. (in Chinese)
- [8] 赵引, 李国安, 夏江宝, 薄丽媛, 毛晓敏. 覆膜和灌水量对制种玉米根系分布及产量的影响[J]. 农业工程学报, 2022, 38(15): 104-114.
ZHAO Y, LI G A, XIA J B, BO L Y, MAO X M. Effects of film mulching and irrigation amount on the root distribution and yield of seed-maize[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2022, 38(15): 104-114. (in Chinese)
- [9] 林兆里, 罗方喻, 林承宥, 张培睿, 阙友雄, 罗俊, 张华. 应用甘蔗蔗蔸形态特征评价甘蔗宿根性研究[J]. 南方农业学报, 2022, 53(5): 1325-1336.
LIN Z L, LUO F Y, LIN C Y, ZHANG K R, QUE Y X, LUO J, ZHANG H. Study on the sugarcane ratooning ability evaluation by the morphological characteristics of sugarcane stubble[J]. Journal of Southern Agriculture, 2022, 53(5): 1325-1336. (in Chinese)
- [10] JAGANUR S. Evaluation of elite clones of sugarcane (Sac-

- charum officinarum* L.) for cane yield, quality traits and ratooning ability[D]. Bengaluru: University of Agricultural Sciences, 2013.
- [11] 苏广达, 吴伯焯. 宿根甘蔗生物学特性的综述[J]. 甘蔗糖业, 1980(12): 10-13.
- SU G D, WU B Q. A review of biological characteristics of ratooning sugarcane[J]. Sugarcane and Canesugar, 1980(12): 10-13. (in Chinese)
- [12] SMITH D M, INMAN-BAMBER N G, THORBURN P J. Growth and function of the sugarcane root system[J]. Field Crops Research, 2005, 92(2): 169-183.
- [13] TERAJIMA Y, SUGIMOTO A, TIPPAYAWAT A, IREI S, HAYASHI H. Root distribution and fibre composition of intergeneric F₁ hybrid between sugarcane and *E. arundinaceus*[J]. Field Crops Research, 2023, 297: 108920.
- [14] ODOE A, POPOVIC O, THORUP-KRISTENSEN K. Deep roots: implications for nitrogen uptake and drought tolerance among winter wheat cultivars[J]. Plant and Soil, 2024, 500(1/2): 13-32.
- [15] THORUP-KRISTENSEN K, SALMERÓN CORTASA M, LOGES R. Winter wheat roots grow twice as deep as spring wheat roots, is this important for N uptake and N leaching losses[J]. Plant and Soil, 2009, 322(1/2): 101-114.
- [16] LYNCH J P. Root phenes for enhanced soil exploration and phosphorus acquisition: tools for future crops[J]. Plant Physiology, 2011, 156(3): 1041-1049.
- [17] LIU S, FENGBIN S, FULAI L, XIANCAN Z, XU H. Effect of planting density on root lodging resistance and its relationship to nodal root growth characteristics in maize (*Zea mays* L.)[J]. Journal of Agricultural Science, 2012, 4(12): 182-189.
- [18] SUN D, CHEN S, CUI Z, LIN J, LIU M, JIN Y, ZHANG A, GAO Y, CAO H, RUAN Y. Genome-wide association study reveals the genetic basis of brace root angle and diameter in maize[J]. Frontiers in Genetics, 2022, 13: 963852.
- [19] ZHENG Z, WANG B, ZHUO C, XIE Y, ZHANG X, LIU Y, ZHANG G, DING H, ZHAO B, TIAN M, XU M, KONG D, SHEN R, LIU Q, WU G, HUANG J, WANG H. Local auxin biosynthesis regulates brace root angle and lodging resistance in maize[J]. New Phytologist, 2023, 238(1): 142-154.
- [20] ZHAI L C, XU P, ZHANG Z B, WEI B H, JIA X L, ZHANG L H. Improvements in grain yield and nitrogen use efficiency of summer maize by optimizing tillage practice and nitrogen application rate[J]. Agronomy, 2019, 11(2): 666-676.
- [21] 赵钧洋, 覃树涛. 粉垄耕作促进甘蔗根系生长、养分吸收及增产[J]. 热带作物学报, 2022, 43(3): 529-538.
- ZHAO J Y, QIN S T. Fenlong tillage promotes sugarcane root growth, nutrient absorption and yield increase[J]. Chinese Journal of Tropical Crops, 2022, 43(3): 529-538. (in Chinese)
- [22] ZHAO L, YANG K. Sugarcane root distribution and growth as affected by genotype and crop cycle[J]. Bragantia, 2020, 79(2): 192-202.
- [23] NAKANO Y, JUNPEI K, HIROTAKE I, TSUYOSHI T, MASAKO S, AOKI H, NAGAMINE A T. Polymorphism of *Hvdro1* and *Hvqsr1* associated with root growth angle in barley accessions[J]. Plant Root, 2021, 16: 1-10.
- [24] DATHE A, POSTMA J A, POSTMA-BLAAUW M B, LYNCH J P. Impact of axial root growth angles on nitrogen acquisition in maize depends on environmental conditions[J]. Annals of Botany, 2016, 118(3): 401-414.
- [25] ZHU J M, KAEPLER S, LYNCH J. Topsoil foraging and phosphorus acquisition efficiency in maize (*Zea mays*)[J]. Functional Plant Biology, 2005, 32(8): 749-762.
- [26] ARULMOZHI R, JOEL A J, BAMA K S, BOOMINATHAN P, SURESH R. Genetic relationship and structural variation of root growth angle for deep rooting in rice (*Oryza sativa* L.)[J]. Current Journal of Applied Science and Technology, 2020, 39(29): 79-90.
- [27] 陈亮, 楼巧君, 李铁梅, 梅捍卫, 冯芳君, 严明, 徐小艳, 范佩清, 罗利军. 栽培稻深根性的遗传研究进展[J]. 上海农业学报, 2022, 38(4): 26-35.
- CHEN L, LOU Q J, LI T M, MEI H W, FENG F J, YAN M, XU X Y, FAN P Q, LUO L J. Genetic research progress on deep rooting of cultivated rice[J]. Acta Agriculturae Shanghai, 2022, 38(4): 26-35. (in Chinese)
- [28] 魏淑丽. 玉米根系构型及其杂种优势与氮肥利用效率关系的生理基础[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2018.
- WEI S L. Physiological basis of the relationship of maize roots architecture and its heterosis to nitrogen use efficiency[D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2018. (in Chinese)
- [29] KING J, GAY A, SYLVESTER-BRADLEY R, BINGHAM I, FOULKES J, GREGORY P, ROBINSON D. Modelling cereal root systems for water and nitrogen capture: towards an economic optimum[J]. Annals of Botany, 2003, 91(3): 383-390.
- [30] 王先, 李翠英, 李媛甜, 肖培先, 张永港, 钱文英, 兰凤, 赵兴笔, 黄滔, 杨光琴, 赵红梅, 康宁. 2016~2018年云南省甘蔗新品种生产示范德宏点评价[J]. 甘蔗糖业, 2019(5): 8-12.
- WANG X, LI C Y, LI A T, XIAO P X, ZHANG Y G, QIAN W Y, LAN F, ZHAO X B, HUANG T, YANG G Q, ZHAO H M, KANG N. Demonstration evaluation of new sugarcane variety production in Dehong in 2016~2018[J]. Sugarcane and Canesugar, 2019(5): 8-12. (in Chinese)
- [31] 夏红明, 赵培方, 刘家勇, 赵俊, 笱逢刚, 陈学宽, 杨昆, 杨洪昌, 姚丽, 赵丽萍, 吴转娣, 覃伟, 吴才文. 早熟高糖甘蔗新品种云蔗081609的选育[J]. 中国糖料, 2018, 40(5):

- 6-9.
- XIA H M, ZHAO P F, LIU J Y, ZHAO J, ZAN F G, CHEN X K, YANG K, YANG H C, YAO L, ZHAO L P, WU Z D, QIN W, WU C W. Breeding of a new early-maturing high-sugar sugarcane variety Yunzhe 081609[J]. Sugar Crops of China, 2018, 40(5): 6-9. (in Chinese)
- [32] 李群芳, 兰军群, 覃耀慕, 连文俊. 第8轮国家甘蔗新品种比较试验[J]. 甘蔗糖业, 2013(5): 1-6.
- LI Q F, LAN J Q, QIN Y M, LIAN W J. Eighth round of national new sugarcane variety tests[J]. Sugarcane and Canesugar, 2013(5): 1-6. (in Chinese)
- [33] 刘家勇, 赵培方, 杨昆, 夏红明, 吴才文, 陈学宽, 赵俊, 杨洪昌, 咎逢刚, 姚丽, 吴转娣, 赵丽萍, 覃伟. 甘蔗新品种云蔗05-51的选育[J]. 中国糖料, 2016, 38(1): 8-10.
- LIU J Y, ZHAO P F, YANG K, XIA H M, WU C W, CHEN X K, ZHAO J, YANG H C, ZAN F G, YAO L, WU Z D, ZHAO L P, QIN W. Breeding of new sugarcane variety Yunzhe 05-51[J]. Sugar Crops of China, 2016, 38(1): 8-10. (in Chinese)
- [34] 宁发洲, 劳创禹, 罗成武, 梁明场. 甘蔗品种对比试验初报[J]. 广西蔗糖, 2013(3): 9-14.
- NING F Z, LAO C Y, LUO C W, LIANG M C. Preliminary report of sugarcane varieties comparative test[J]. Guangxi Sugarcane & Canesugar, 2013(3): 9-14. (in Chinese)
- [35] 潘方胤, 杨俊贤, 文明富, 吴文龙, 陈月桂, 谭嘉娜, 官锦燕, 彭冬永, 陈顺, 梁启如, 彭立冲. 高糖高产抗逆甘蔗种质创新与新品种选育[Z]. 广州甘蔗糖业研究所湛江甘蔗研究中心-科技成果, 2020.
- PAN F Y, YANG J X, WEN M F, WU W L, CHEN Y G, TAN J N, GUAN J Y, PENG D Y, CHEN S, LIANG Q R, PENG L C. Germplasm innovation and new varieties breeding of sugarcane with high sugar yield and resistance[Z]. Scientific and Technological Achievements, 2020. (in Chinese)
- [36] 文明富, 杨俊贤, 潘方胤, 吴文龙, 陈月桂, 官锦燕, 谭嘉娜, 彭冬永, 梁启如, 陈聪, 陈康武. 强宿根性机械化甘蔗种质创新与新品种培育[Z]. 广州甘蔗糖业研究所湛江甘蔗研究中心-科技成果, 2020.
- WEN M F, YANG J X, PAN F Y, WU W L, CHEN Y G, GUAN J Y, TAN J N, PENG D Y, LIANG Q R, CHEN C, CHEN K W. Germplasm innovation and new variety breeding of strong ratooning ability under mechanized sugarcane[Z]. Zhanjiang Sugarcane Research Center, Guangzhou Sugarcane Research Institute-Scientific and Technological Achievements, 2020. (in Chinese)
- [37] 沈万宽, 邓海华, 符城, 胡后详, 杨业后. 甘蔗创新亲本崖城82-96、崖城84-153和崖城90-3[J]. 甘蔗糖业, 2001(2): 1-6.
- SHEN W K, DENG H H, FU C, HU H X, YANG Y H. Sugarcane innovative parents Yacheng 82-96, Yacheng 84-153 and Yacheng 90-3[J]. Sugarcane and Canesugar, 2001(2): 1-6. (in Chinese)
- [38] 杨荣仲. 甘蔗宿根性与抗寒性初探[J]. 甘蔗糖业, 1996(6): 13-17.
- YANG R Z. Preliminary study on ratooning ability and cold resistance of sugarcane[J]. Sugarcane and Canesugar, 1996(6): 13-17. (in Chinese)
- [39] 李杨瑞. 广西甘蔗生产中的主要问题及几点建议[J]. 广西糖业, 2020(4): 3-7.
- LI Y R. The main problems in sugarcane production in Guangxi and some suggestions[J]. Guanxi Sugar Industry, 2020(4): 3-7. (in Chinese)
- [40] 杜奕莹. 甘蔗品种宿根性的早期评价体系建设研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2023.
- DU Y X. Research of establishment of early evaluation system for ratooning of sugarcane varieties[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2023. (in Chinese)
- [41] 陆章流. 提高宿根蔗低产低糖的技术措施[J]. 广西蔗糖, 2005(1): 3-5.
- LU Z L. Analysis and counter-measures for the reasons of low production and low sugar content with ratoon cane[J]. Guanxi Sugarcane & Canesugar, 2005(1): 3-5. (in Chinese)
- [42] 覃伟, 吴才文, 赵俊, 赵培方, 杨昆, 陈学宽, 姚丽, 曾千春. 甘蔗宿根性研究 I. 甘蔗宿根蔗莖形态特征与其宿根性的关系[J]. 西南农业学报, 2017, 30(5): 989-993.
- QIN W, WU C W, ZHAO J, ZHAO P F, YANG K, CHEN X K, YAO L, ZENG Q C. Research on ratoon ability of sugarcane I. relationship between ratooning ability and morphological characteristics of ratoon stools [J]. Southwest China Journal of Agricultural Sciences, 2017, 30(5): 989-993. (in Chinese)
- [43] 周慧文, 梁容真, 邓宇驰. 强弱分蘖特性甘蔗品种的分蘖期光合产物分配差异[J]. 核农学报, 2023, 37(8): 1660-1667.
- ZHOU H W, LIANG R Z, DENG Y C. Difference in photosynthate distribution of sugarcane varieties with strong and weak tillering characteristics[J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 2023, 37(8): 1660-1667. (in Chinese)
- [44] MILLIGAN B S, GRAVOIS A K. Inheritance of sugarcane ratooning ability and the relationship of younger crop traits to older crop traits[J]. Crop Science, 1996, 36(1): 45-50.
- [45] KAYSAR M S, SARKER U K, MONIRA S, HOSSAIN M A, HAQUE M S, SOMADDAR U, SAHA G, CHAKI A K, UDDIN M R. Dissecting the relationship between root morphological traits and yield attributes in diverse rice cultivars under subtropical condition[J]. Life (Basel), 2022, 12(10): 1519.
- [46] 程琴, 谭秦亮, 李佳慧. 不同宿根年限甘蔗品种内源激素及酶活性分析[J]. 作物杂志, 2022(3): 181-186.
- CHENG Q, TAN Q L, LI J H. Endogenous hormones and enzyme activity analysis in sugarcane varieties with different ratooning ages[J]. Crops, 2022(3): 181-186. (in Chinese)