

甘蔗/大豆间作减量施氮对甘蔗产量、品质及经济效益的影响*

李志贤^{1,2,3} 王建武^{1,2,3**} 杨文亭^{1,2,3} 舒迎花^{1,2,3} 杜清^{1,2,3} 刘丽玲^{1,2,3} 舒磊^{1,2,3}

(¹ 华南农业大学热带亚热带生态研究所, 广州 510642; ² 华南农业大学农业部生态农业重点开放实验室, 广州 510642; ³ 华南农业大学广东省高等学校农业生态与农村环境重点实验室, 广州 510642)

摘要 在大田栽培条件下,研究了减量施氮对广州地区不同甘蔗/大豆间作模式下甘蔗产量、品质、生物量动态变化及甘蔗群体经济效益的影响.结果表明:氮肥和种植模式对甘蔗产量、品质均无显著影响,各处理甘蔗产量、品质均无显著差异.不同施氮水平的甘蔗/大豆间作系统较单作甘蔗提高了土地利用效率,其土地当量比(LER)为1.36~2.12.各处理甘蔗总生物量的动态积累随生育期的推进均符合“S”型生长曲线,低氮水平下间作甘蔗的生物量动态积累特征参数最协调,高氮水平下,甘蔗生长高峰期提前,快速生长最大持续期缩短,甘蔗产量下降,因此,可以通过调整氮素的投入量来改善生物量的增长参数,从而获得高产.低氮处理甘蔗/大豆间作系统经济效益比高氮处理高3.2%~26.3%,说明减量施氮可有效提高群体经济效益.甘蔗/大豆1:2间作模式的经济效益最好.

关键词 甘蔗/大豆间作 减量施氮 产量 品质 经济效益 广州

文章编号 1001-9332(2011)03-0713-07 **中图分类号** S344.2 **文献标识码** A

Effects of reduced nitrogen application on the yield, quality, and economic benefit of sugarcane intercropped with soybean. LI Zhi-xian^{1,2,3}, WANG Jian-wu^{1,2,3}, YANG Wen-ting^{1,2,3}, SHU Ying-hua^{1,2,3}, DU Qing^{1,2,3}, LIU Li-ling^{1,2,3}, SHU Lei^{1,2,3} (¹*Institute of Tropical and Subtropical Ecology, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China*; ²*Ministry of Agriculture Key Laboratory of Ecological Agriculture, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China*; ³*Key Laboratory of Agroecology and Rural Environment of Guangdong Regular Higher Education Institutions, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China*). -*Chin. J. Appl. Ecol.*, 2011, 22(3): 713-719.

Abstract: A two-factor field experiment of randomized block design was conducted in Guangzhou to investigate the effects of reduced nitrogen application on the yield, quality, and total biomass dynamic of sugarcane as well as the economic benefit of the sugarcane population under different sugarcane/soybean intercropping patterns. Neither N application nor intercropping pattern had significant effects on the yield and quality of sugarcane, and no significant differences were observed in the yield and quality of sugarcane among all treatments. The land equivalent ratio (LER) of sugarcane/soybean intercropping at different N application levels was from 1.36 to 2.12, suggesting that sugarcane/soybean intercropping had higher LER than monoculture sugarcane. The total dry matter (except root) of sugarcane in all treatments increased with plant growth, and the growth pattern fitted sigmoid function. At lower nitrogen application level, the eigenvalues of the dynamic dry matter accumulation model were more coordinative, compared with those at higher nitrogen application level, which meant that in the later case, sugarcane had an advanced peak growth time and shortened fast-growth duration, and thereby, its yield decreased. Therefore, it was possible to reasonably adjust nitrogen application level to improve the eigenvalues of the sugarcane dynamic dry matter accumulation model, and accordingly, to achieve high yield. The population economic benefit under sugarcane/soybean intercropping was 3.2%–26.3% higher at lower than at higher nitrogen

* 国家重点基础研究发展计划项目(2011CB100400)、国家科技支撑计划项目(2007BAD89B14)和广东省科技计划项目(2008A020100011)资助.

** 通讯作者. E-mail: wangjw@scau.edu.cn

2010-08-25 收稿, 2010-12-31 接受.

application level, suggesting the increase of the economic benefit of sugarcane population under reduced nitrogen application. Among the treatments, 1:2 sugarcane/soybean intercropping had the best economic benefit.

Key words: sugarcane/soybean intercropping; reduced nitrogen application; yield; quality; economic benefit; Guangzhou.

甘蔗为热带、亚热带的主要经济作物和糖料作物。广东是我国蔗糖主产区,粤西和珠江三角洲地区甘蔗种植面积 $1.4 \times 10^5 \text{ hm}^2$ ^[1]。广东省甘蔗种植行距较宽(1.2 m),苗期甘蔗生长缓慢,从下种至封行期,蔗行裸露长达 90~120 d,此期间蔗苗对光照、水分、养分需求量不高,土地资源利用不充分^[2]。根据互利共生原则和作物间生物学特性,建立合理的甘蔗间作模式,将有利于充分利用时间生态位和空间生态位,达到增产增收、用地与养地相结合的目的^[3-4]。关于甘蔗间作效益,国内外已有一些报道^[5-6],多集中在间作的产量和经济效益的研究方面。生产实践证明,只要间作作物、间作方法适宜,甘蔗间作可改善生态环境,有利于甘蔗对养分的积累和品质的改善^[7]。甘蔗植株高大,对氮素需求量大,充足的施氮量是甘蔗获得高产的基础,但过多施肥将造成资源浪费和环境污染^[8-9],因此,合理施氮既可使作物的氮素供应与需求达到平衡,又能降低生产成本和对环境的污染程度^[10]。甘蔗间作模式中,由于甘蔗与间作作物扎根深度和根系分布的不同,使两种作物竞争养分的能力、吸收养分峰值的时间不同,降低了种间的营养竞争,促进了间作作物养分利用优势的形成。甘蔗生长期长达 12 个月,有足够的时间分解作物秸秆,实现养分循环利用,保持土壤养分和微生物生物量^[11],所以,间作作物收获后,秸秆还田能促进土壤团粒结构的形成,有利于甘蔗均衡利用养分及培肥地力^[12]。可见,通过减少甘蔗间作体系氮肥的投入,实现高产、稳产、高效、可持续的甘蔗种植体系具有一定的可行性。目前,有关甘蔗间作体系高产、优质、节肥三者之间的关系研究报道较少,为此,本文以甘蔗/大豆间作体系为对象,研究不同施氮水平、不同间作模式对甘蔗产量、品质及经济效益的影响,筛选高产、高效、优质的间作模式,旨在为甘蔗间作系统养分资源的合理利用与优化管理提供依据。

1 研究地区与研究方法

1.1 研究区概况

试验于 2009 年 2 月-2010 年 1 月在广州华南

农业大学试验农场(23°8' N, 113°15' E)进行。该区地处南亚热带,属南亚热带典型的季风海洋气候,光热资源充足,年日照时数 1289~1780 h,太阳辐射总量 506.9~528.6 kJ·cm⁻²,年均气温 21.9℃~22.8℃,极端最高气温 38.6℃~39.3℃,极端最低气温 0℃~2.3℃。年均降水量 1384~2278 mm,约 85%的降水集中在 4-9 月。甘蔗生育期间(2009 年 2 月至 2010 年 1 月)平均气温 22.2℃,日照时数 1698 h,降水量 1402 mm。试验地土壤为赤红壤,耕层有机质含量 22.83 g·kg⁻¹,碱解氮 113.32 mg·kg⁻¹,速效磷 75.98 mg·kg⁻¹,速效钾 114.16 mg·kg⁻¹。

1.2 试验材料与试验设计

供试甘蔗品种为由华南农业大学农场提供的“糖蔗 00-236”,该品种特点为高糖、高产、萌芽快而整齐、分蘖力强、成茎率高;供试大豆为早熟品种“毛豆 3”,由华南农业大学农学院提供。

试验施氮水平参考当地甘蔗施肥量设计,在 525 kg·hm⁻²基础施肥水平上减量施氮。本试验采用施氮水平、间作模式二因素设计,共设 7 个处理:SSN₁,施氮 300 kg·hm⁻²,甘蔗单作;SBN₁,施氮 300 kg·hm⁻²,蔗行间作 1 行毛豆(1:1);SB₂N₁,施氮 300 kg·hm⁻²,蔗行间作 2 行毛豆(1:2);SSN₂,施氮 525 kg·hm⁻²,甘蔗单作;SBN₂,施氮 525 kg·hm⁻²,蔗行间作 1 行毛豆(1:1);SB₂N₂,施氮 525 kg·hm⁻²,蔗行间作 2 行毛豆(1:2);BB,毛豆单作。其中,S 表示甘蔗,B 表示大豆,N₁ 和 N₂ 分别表示 300 kg·hm⁻²和 525 kg·hm⁻²两个施氮水平,大豆整个生育期不施肥。试验随机区组设计,3 次重复,小区面积 4.8 m×5.5 m (26.4 m²),甘蔗行距 120 cm,小区间筑埂,埂宽 50 cm。

试验于 2009 年 2 月 20 日播种甘蔗,2 月 21 日播种大豆,当年 5 月 21 日大豆收获,次年 1 月 10 日甘蔗收获。大豆收获后将叶和茎秆还田于蔗行边。单作、间作甘蔗田间管理一致,按当地大田管理方法。播前 2009 年 2 月 18 日施基肥,施肥量为:氯化钾 150 kg·hm⁻²,过磷酸钙 1050 kg·hm⁻²,复合肥(N、P、K各占 15%)750 kg·hm⁻²;4 月 23 日追施攻

藜肥, 追施氯化钾 $300 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 高氮、低氮处理分别追施尿素 225 和 $113 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$; 6 月 10 日施攻茎肥, 高氮、低氮处理分别追施尿素 672 和 $295 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$.

1.3 测定项目与方法

1.3.1 测产及经济效益计算 甘蔗、大豆产量的测定: 成熟期分别取每小区第 3 行实收、测产. 每小区随机取连续 5 株甘蔗进行常规考种. 甘蔗和大豆的价格按当季市场价格计算, 其中大豆(鲜荚带秆)价格为 $2.0 \text{ 元} \cdot \text{kg}^{-1}$, 甘蔗价格为 $340 \text{ 元} \cdot \text{t}^{-1}$. 化肥、农药按实际购买价格计算, 人工费用按甘蔗地 $120 \text{ 元} \cdot \text{t}^{-1}$ 、大豆地 $750 \text{ 元} \cdot \text{hm}^{-2}$ 计算, 经济效益为总收入扣除生产成本.

1.3.2 甘蔗生物量积累测定 分别在甘蔗生长 50 d(甘蔗幼苗期, 大豆开花)、68 d(甘蔗幼苗期, 大豆结荚)、83 d(甘蔗分蘖期, 大豆成熟)、143 d(甘蔗伸长拔节期)、203 d(甘蔗伸长旺盛期) 和 335 d(甘蔗成熟期) 取植株样品, 每小区连续选取有代表性的甘蔗 3 株, 分茎、叶于 $105 \text{ }^\circ\text{C}$ 下杀青 30 min, $80 \text{ }^\circ\text{C}$ 烘至恒量, 测定其干物质量.

1.3.3 甘蔗品质的测定 于每小区第 2 行取样带随机连续取 6 株甘蔗, 甘蔗样品用 TJ-305 甘蔗压榨机压榨取蔗汁. 甘蔗样品的预处理按照甘蔗制糖化学管理分析方法^[13] 进行, 蔗汁转光度、蔗糖分指标采用 WZZ-ZSS 自动旋光仪(上海精密科学仪器厂)测定, 糖锤度采用日本 ATAGO 公司的数显锤度计测定, 蔗汁视纯度、重力纯度、甘蔗纤维分和蔗糖分等用广州甘蔗糖业研究所开发的 Sugar 2000 软件计算.

1.4 计算方法

1.4.1 土地当量比的测算^[14] 土地当量比(land equivalent ratio, LER)常被用于衡量间作优势, 计算公式如下:

$$LER = Y_{ib}/Y_{sb} + Y_{is}/Y_{ss} \quad (1)$$

式中: Y_{ib} 、 Y_{is} 分别为间作大豆和甘蔗产量 ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$); Y_{sb} 、 Y_{ss} 分别为单作大豆和单作甘蔗产量 ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$). 若 $LER > 1$, 表明有间作优势; 若 $LER < 1$, 为间作劣势.

1.4.2 生物量累积特征值的计算^[15] 甘蔗生物量增长规律的拟合采用 Logistic 模型, 其基本形式为:

$$w = \frac{w_m}{1 + ae^{bt}} \quad (2)$$

式中: w 为甘蔗生物量; w_m 为生物量的理论最大值; t 为甘蔗生长天数; a 、 b 为生长参数.

Logistic 模型蕴藏着很多生物生态学特性信息, 利用这些信息参数能较好地解析甘蔗生物量的增长特点, 并使之定量化. 分别对式(2)求 1 阶、2 阶和 3 阶导数, 可以得到相应生长曲线最快生长时段的起始时间(t_1)、终止时间(t_2)、最大相对生长速率(v_m)及其出现时间(t_m):

$$t_1 = \frac{1}{b} \ln \frac{2 + \sqrt{3}}{a} \quad (3)$$

$$t_2 = \frac{1}{b} \ln \frac{2 - \sqrt{3}}{a} \quad (4)$$

$$t_m = -(\ln a)/b \quad (5)$$

$$v_m = -bw_m/4 \quad (6)$$

1.5 数据处理

采用 Excel 2003 软件进行数据处理和绘图, 采用 SPSS 13.0、DPS 9.01 统计分析软件进行方差分析和相关分析.

2 结果与分析

2.1 不同甘蔗/大豆间作模式中甘蔗产量及产量构成因子的差异

2.1.1 间作系统土地当量比和甘蔗产量 由表 1 可以看出, 甘蔗/大豆间作系统的 LER 在 $1.36 \sim 2.12$, 均大于 1, 说明甘蔗/大豆间作能提高单位面积的土地利用效率, 间作优势较明显. 甘蔗/大豆间作系统中, 同一间作模式低氮处理(N_1) LER 均高于高氮处理(N_2), 其中, SBN_1 、 SB_2N_1 的 LER 分别比 SBN_2 、 SB_2N_2 高 11.0% 和 31.7% . SB_2 间作模式的间作优势尤为显著, 其 LER 平均比 SB 高 29.4% .

甘蔗/大豆间作系统的产量结果表明(表 1), 低氮(N_1)水平下, 间作甘蔗产量平均比单作甘蔗产量高 8.7% ; 高氮(N_2)水平下, 间作甘蔗产量平均比单作甘蔗产量低 18.9% , 可见, 甘蔗间作的产量优势在低氮水平下表现更明显. 但不同施氮水平、不同种植模式间的甘蔗产量均无显著差异, 所以施氮、间作对甘蔗产量的影响不显著. 除 SBN_2 间作大豆产量显著高于单作大豆(BB) 33.9% 外, 其他高、低氮处理间作大豆产量与单作大豆产量均无显著差异. 说明低氮、间作对甘蔗、大豆产量无显著负效应, 因此, 在低氮条件下实施甘蔗间作是可行的.

2.1.2 甘蔗产量构成因子 从表 2 可以看出, 间作模式对甘蔗产量构成因素的影响显著, 但施氮水平对甘蔗产量构成因素无显著影响. 同一施氮水平下, 间作与单作甘蔗间的有效茎数、株高、茎径的最大百分数分别相差 24.4% 、 12.3% 和 8.4% , 且差异显

表 1 甘蔗/大豆间作及单作系统的产量与土地当量比

Table 1 Yields of intercroops and land equivalent ratio (LER) in sugarcane/soybean intercropping and monoculture systems

施氮水平 N application rate	间作模式 Intercropping pattern	甘蔗产量 Sugarcane yield (kg · hm ⁻²)		大豆产量 Soybean yield (kg · hm ⁻²)		土地当量比 LER
		间作 Intercropped	单作 Monoculture	间作 Intercropped	单作 Monoculture	
		N ₁	SB(1:1)	131740a	125175a	
	SB ₂ (1:2)	140365a		11399.6(9119.7)ab [△]		2.12
N ₂	SB(1:1)	119155a	148090a	12434.4(4973.8)a [△]		1.36
	SB ₂ (1:2)	121170a		8571.0(6856.8)b [△]		1.61
区组 Block			ns		*	
施氮水平 N application			ns		*	
间作 Intercropping			ns		*	
N×间作 N×intercropping			ns		-	
种植 Cropping			ns		-	
N×种植 N×cropping			ns		-	
间作×种植 Intercropping×cropping			ns		-	
N×种植×间作 N×cropping×intercropping			ns		-	

△:括号中的值为间作总面积上的大豆籽粒产量,括号外的值为净占面积上的大豆籽粒产量 Values in the parentheses were grain yields of soybean in total intercropping area, values out the parentheses were grain yields of soybean in net area. ns:差异不显著 Not significant; * $P < 0.05$; ** $P < 0.01$. 同列不同字母表示差异显著 ($P < 0.05$) Different small letters in the same column meant significant difference at 0.05 level among treatments. 下同 The same below.

著.高、低氮处理间的甘蔗有效茎数、株高、茎粗的最大百分数分别相差 8.7%、7.0% 和 3.9%,且均无显著差异.表明不同种植模式间甘蔗产量构成因素差异显著,且大于不同氮肥处理间的差异,可见,间作是影响甘蔗产量的主要因素,其中,间作对甘蔗有效茎数的影响尤为显著,因此,甘蔗/大豆间作主要通过有效茎数的调控来影响间作甘蔗产量.

2.2 不同甘蔗/大豆间作模式中甘蔗生物量累积的动态

2.2.1 甘蔗生物量累积动态

甘蔗生长前期生物量增长缓慢,蔗苗下种到 6 月 18 日(143 d)生物量积累 13.8% ~ 16.5%;甘蔗生长中期生物量迅速增长,6 月 18 日到 8 月 28 日(60 d)生物量积累 29.8% ~ 53.0%;生长中期以后(132 d),甘蔗干物质积累又趋于缓慢,积累量为 33.2% ~ 54.5%(图 1).方差分析结果表明,收获时单、间作甘蔗各处理间生物量积累量的差异均不显著(表 2),表明施氮

表 2 不同种植模式甘蔗产量构成因子

Table 2 Yield components of sugarcane under different cropping patterns

处理 Treat- ment	有效茎数 Effective stem number (ind · hm ⁻²)	株高 Plant height (cm)	茎径 Stem diameter (cm)	单株生物量 Biomass per plant (kg)
SBN ₁	65500c	277.3ab	2.80ab	0.78a
SB ₂ N ₁	69000bc	253.2b	2.78ab	0.80a
SBN ₂	66500c	281.0ab	2.91a	0.69a
SB ₂ N ₂	63500c	270.8ab	2.81ab	0.67a
SSN ₁	74500ab	284.3ab	2.79ab	0.68a
SSN ₂	79000a	297.3a	2.69b	0.75a

水平、间作模式对甘蔗生物量积累均无显著影响.

2.2.2 甘蔗生物量累积动态模型的特征值

用式(2)对甘蔗生物量累积进行拟合,得到不同施氮水平下甘蔗/大豆不同间作模式的甘蔗生物量动态模型.从表 3 可以看出,氮素水平对甘蔗/大豆不同间作模式的甘蔗生物量理论最大值的影响表现不同,低氮水平的间作甘蔗生物量理论最大值高于高氮水平,但低氮水平的单作甘蔗生物量理论最大值低于高氮水平,不同处理甘蔗生物量理论最大值依次为:SB₂N₁ > SBN₁ > SSN₂ > SBN₂ > SSN₁ > SB₂N₂.

由表 4 可知,高、低氮水平下,不同种植模式的甘蔗生物量快速积累期持续时间为:SB₂N₁(99 d) > SB₂N₁(75 d) > SSN₂(70 d) > SBN₂(62 d) > SB₂N₂(50 d) > SSN₁(46 d),快速生长起始期在甘蔗生长的第 175 ~ 192 天,高氮条件下间作甘蔗比单作早 6 ~

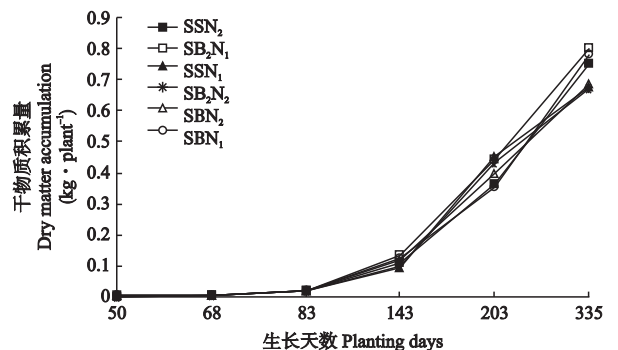


图 1 不同种植模式下甘蔗干物质积累动态

Fig. 1 Dynamics of sugarcane dry matter accumulation under different cropping patterns.

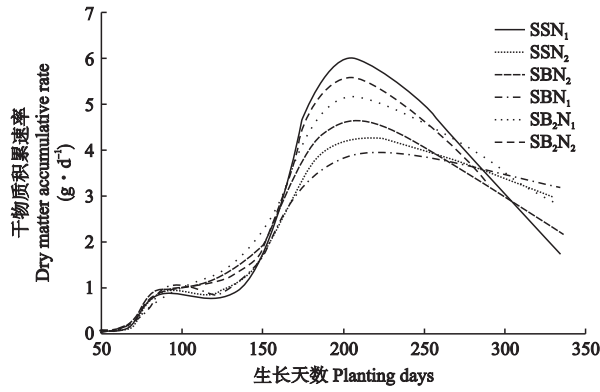


图2 不同种植模式下甘蔗干物质积累速率动态

Fig. 2 Dynamics of sugarcane dry matter accumulative rate under different cropping patterns.

8 d, 低氮条件下间作甘蔗比单作晚 10 ~ 14 d. 甘蔗生物量快速增长期内最大相对生长速率表现为: 低氮水平下间作低于单作, 高氮水平下间作高于单作, 其中, 处理 SBN_1 、 SB_2N_1 的最大相对生长速率分别比 SSN_1 低 43.6% 和 22.4%, 处理 SBN_2 、 SB_2N_2 分别比 SSN_2 高 3.9% 和 22.0%. 以日为时间步长的干物质积累速率随着生育进程的推进呈单峰曲线(图 2), 最大速率出现在甘蔗生长的第 201 ~ 242 天, SSN_1 处理最大速率出现最早, 但其增长速率下降最快.

干物质积累是经济产量形成的基础, 甘蔗生物

表4 不同种植模式下甘蔗生物量积累模型参数特征值

Table 4 Parameters characteristic values of dynamic models of sugarcane biomass accumulation under different cropping patterns

处理 Treatment	理论最大干物质质量 (W_m) Estimated maximum dry matter ($kg \cdot plant^{-1}$)	快速生长起始日 (t_1) Beginning day of rapid growth (d)	快速生长终止日 (t_2) Ending day of rapid growth (d)	最快生长日 (t_m) Maximum dry matter accumulation day (d)	最大生长速率 (v_m) Maximum rate of dry matter accumulation ($g \cdot plant^{-1} \cdot d^{-1}$)
SBN_1	0.81	192	292	242	5.35
SB_2N_1	0.84	188	263	225	7.36
SBN_2	0.69	175	238	207	7.19
SB_2N_2	0.67	177	227	202	8.65
SSN_1	0.68	178	225	201	9.48
SSN_2	0.76	183	253	218	7.09

表5 不同种植模式下甘蔗的品质差异

Table 5 Difference of sugarcane quality under different cropping patterns (%)

处理 Treatment	甘蔗 Plant of sugarcane				蔗汁 Sugarcane juice			
	蔗糖分 Sucrose content	纤维分 Fiber content	糖锤度 Sugar brix	转光度 Sugar pol	蔗糖分 Sucrose content	还原糖分 Reducing sugar content	视纯度 Apparent purity	重力纯度 Gravity purity
SBN_1	15.50a	9.44a	19.57a	17.55a	17.81a	0.47a	89.69a	91.01a
SB_2N_1	15.63a	9.10a	19.40a	17.58a	17.84a	0.40a	90.65a	91.97a
SBN_2	15.54a	9.41a	19.43a	17.56a	17.82a	0.42a	90.33a	91.66a
SB_2N_2	14.99a	9.46a	19.07a	16.98a	17.26a	0.51a	89.06a	90.51a
SSN_1	15.63a	9.53a	19.83a	17.73a	17.98a	0.49a	89.40a	90.67a
SSN_2	15.33a	9.37a	19.40a	17.35a	17.61a	0.49a	89.36a	90.73a

表3 不同种植模式下甘蔗生物量累积的动态模型

Table 3 Dynamic models of sugarcane biomass accumulation under different cropping patterns

处理 Treatment	干物质累积动态方程 Dynamic models of dry matter accumulation	R^2
SBN_1	$W=0.8082/[1+\exp(5.6102-0.0265t)]$	1.000**
SB_2N_1	$W=0.8397/[1+\exp(6.9263-0.0351t)]$	1.000**
SBN_2	$W=0.6867/[1+\exp(7.5793-0.0419t)]$	1.000**
SB_2N_2	$W=0.6694/[1+\exp(9.1454-0.0517t)]$	1.000**
SSN_1	$W=0.6760/[1+\exp(9.8886-0.0561t)]$	0.999**
SSN_2	$W=0.7553/[1+\exp(7.1553-0.0375t)]$	1.000**

W: 干物质质量 Dry matter; t: 生长天数 Growth days.

量积累动态模型分析表明, 低氮水平下甘蔗/大豆间作模式(SBN_1 、 SB_2N_1)的甘蔗生物量动态累积特征参数的协调性优于单作模式(SSN_1), 有利于甘蔗生物量的累积与产量形成.

2.3 不同甘蔗/大豆间作模式中甘蔗的品质差异

不同施氮水平下间作甘蔗与单作甘蔗各品质指标间差异均不显著(表 5), 表明施氮水平及间作模式对甘蔗品质影响不显著, 即低氮水平下采用甘蔗/大豆间作种植模式能保证甘蔗的优质高产.

2.4 不同甘蔗/大豆间作系统的经济效益

从表 6 可以看出, 甘蔗/大豆间作系统的经济效益均高于单作. 其中, 低氮水平下, 处理 SBN_1 、 SB_2N_1 间作系统的经济效益分别比单作甘蔗 SSN_1 高

表 6 不同种植模式经济效益差异

Table 6 Difference of economic benefit under different planting patterns (yuan · hm⁻²)

处理 Treatment	产出 Output cost		投入 Input cost			经济效益 Economic benefit
	甘蔗 Sugarcane	大豆 Soybean	农药 Pesticide	肥料 Fertilizer	人工 Labor	
SBN ₁	44792	11883	2256	4695	15974	33750
SB ₂ N ₁	47726	25547	2280	4695	17174	49124
SBN ₂	40514	14334	2256	5415	14464	32714
SB ₂ N ₂	41198	20248	2280	5415	14870	38881
SSN ₁	42561	-	2267	4695	15021	20578
SSN ₂	50351	-	2267	5415	17771	24898

64.0% 和 138.7% ;高氮水平下,处理 SBN₂、SB₂N₂ 间作系统的经济效益分别比单作甘蔗 SSN₂ 高 31.4% 和 56.2% .可见,减量施氮可有效提高群体经济效益,不同施氮水平下甘蔗/大豆 1 : 2 间作模式的经济效益尤为显著.甘蔗间作种植条件下,土地复种指数增加,产投比增大,作物产量和经济收入提高,因此,甘蔗间作不仅提高了土地利用效率,也提高了间作群体的经济效益.

3 讨 论

3.1 甘蔗/大豆间作优势

本研究得出,甘蔗间作存在间作优势.甘蔗/大豆间作的 LER 大于 1,经济效益高于单作 31.4% ~ 138.7% ,因此,间作不仅能提高土地利用效率,还能提高群体的经济效益,不同施氮水平下甘蔗/大豆 1 : 2 间作模式经济效益尤为显著.

甘蔗间作系统中,甘蔗与间作物的空间分布、根系深浅和生育期不同.甘蔗种植行距宽,苗期生长缓慢,叶面积系数小,对生长条件的要求不高,所以依据甘蔗、间作物的生物学特性和互利共生的原则,甘蔗间作能够整合利用土地资源和光热资源,集约利用时间和空间,提高单位面积产量,从而获得较好的经济效益和生态效益^[4,6].但并不是甘蔗间作组合都能体现间作优势,据 Gana 和 Busari^[5] 研究表明,西瓜移栽 4 个月后,与西瓜间作的甘蔗受到极大影响,间作甘蔗较单作分蘖数减少 200% ,产量减少 36.2% ,说明地表覆盖度较大的西瓜植株使甘蔗幼苗受光减少,从而减少了间作甘蔗的有效分蘖数.因此,合理的甘蔗间作作为一种高产高效的种植方式,应符合如下基本原则^[16]: 1) 作物安排主、次分明,互相兼顾;2) 根据间作物生育期的长短,确定最适宜的主、间作物种植期;3) 根据间作物株型、熟期、劳力及田间管理的实际情况,确定间作方式,以建立通风透光条件良好的间作群体;4) 根据主、间

作物不同生育阶段的生长特点,采取相应的管理措施.

3.2 减量施氮对甘蔗/大豆间作效应的影响

本研究表明,低氮(N₁)水平下间作甘蔗产量比单作高 5.2% ~ 12.1% ;高氮(N₂)水平下间作甘蔗产量比单作低 18.2% ~ 19.5% ,所以,甘蔗/大豆间作优势在低氮水平下更明显.

Marchal 和 Vanderleyden^[17] 和左元梅等^[18] 认为,根际土壤环境中硝态氮含量较低更有利于刺激豆科作物通过共生固氮固定更多的大气氮,但硝态氮浓度过高,既影响根瘤皮层内 O₂ 的扩散,导致根瘤呼吸速率和固氮酶活性下降,又会抑制豆科作物体内信号物质类黄酮的合成和累积,从而抑制根瘤菌与豆科作物间的识别和侵染,使豆科作物的根瘤数和根瘤干质量降低.本试验在甘蔗/大豆共生期,甘蔗竞争能力强于大豆,在氮肥相对亏缺的条件下,甘蔗通过种间竞争吸收大豆固定的大气氮来补偿生长所需,而且较低硝态氮含量更有利于刺激豆科作物通过共生固氮作用固定更多的大气氮,因此,低氮(N₁)水平下,甘蔗/大豆间作系统能充分发挥种间竞争互补优势,使间作甘蔗产量高于单作甘蔗;在高氮(N₂)水平下,氮肥盈余会抑制甘蔗对大豆的种间竞争,而且硝态氮浓度过高将减弱大豆固氮作用,使甘蔗/大豆间作系统的种间竞争互补作用发挥不充分,甘蔗生长与单作相比表现为劣势.

3.3 减量施氮对不同间作模式甘蔗干物质积累动态的影响

通过研究得出,不同氮素水平及间作模式的甘蔗总生物量动态积累随生育期的推进符合 Logistic 生长曲线,施肥量、种植模式及气候因子等只影响模型的特征参数,并不改变其生长模型.

薛晓萍等^[19] 对棉花的研究表明,初花后棉花生物量积累的动态也符合 Logistic 生长曲线,而 Koutroubas 等^[20] 对红花的研究表明,花期地上干物

质与后期干物质向籽粒转移量呈线性相关,且年度间转移系数稳定性较好;杨志彬等^[21]定量分析了不同施氮量对棉花生物量累积特征的影响,结果表明,施氮量过多或不足均不利于棉株生物量的累积,适量施氮处理具有快速增长期起始时间早、持续时间短、最大速率高等特征,有利于棉株生物量的累积。本研究结果表明,甘蔗生长后期生物量累积对最终产量影响较大,生产中提高甘蔗生长后期干物质的积累有利于甘蔗产量的提高,同时也可以通过调整氮素的投入量来提高干物质生产,从而获得高产。本试验中,以低氮(N₁)水平下甘蔗不同间作模式的生物量动态累积特征参数最为协调,利于甘蔗生长后期生物量积累,使间作甘蔗产量高于单作;而高氮(N₂)水平下,甘蔗生长高峰期提前,间作甘蔗由于前期生长过快,快速生长最大持续期缩短,减缓了后期干物质的积累,使间作甘蔗产量低于单作。

致谢 华南农业大学农学院农场陈益培、陈培寿老师在大田试验布置及试验地管理中给予支持,广州甘蔗糖业研究所李奇伟所长在甘蔗品质分析方面提供帮助,在此一并感谢。

参考文献

- [1] Zhang Q (张 琼). Replacement of sugarcane cultivars in Guangdong, Guangxi and Yunnan areas. *Sugarcane and Canesugar* (甘蔗糖业), 2007(6): 8-13 (in Chinese)
- [2] Lu L-S (卢良恕). Introduction to Chinese Stereoscopic Agriculture. Chengdu: Sichuan Science and Technology Press, 1999 (in Chinese)
- [3] Malézieux E, Crozat Y, Dupraz C. Mixing plant species in cropping systems: Concepts, tools and models: A review. *Sustainable Agriculture*, 2009, **5**: 329-353
- [4] Kamruzzaman M, Hasanuzzama M. Factors affecting profitability of sugarcane production as monoculture and as intercrop in selected areas of Bangladesh. *Bangladesh Journal of Agricultural Research*, 2007, **32**: 433-444
- [5] Gana AK, Busari LD. Intercropping study in sugarcane. *Sugar Technology*, 2003, **5**: 193-196
- [6] Feng Y-X (冯奕玺). Effect of sugarcane/peanut, soybean intercropping on yields of intercrops. *Guangxi Sugarcane & Canesugar* (广西蔗糖), 2006(1): 46-47 (in Chinese)
- [7] Bokhtiar SM, Hossain MS, Mahmud K, et al. Site specific nutrient management for sugarcane potato and sugarcane onion in intercropping systems. *Asian Journal of Plant Sciences*, 2003, **2**: 1205-1208
- [8] Cheng X (程 序), Qiu H-J (邱化蛟), Zhu W-B (朱万斌). Chinese Agriculture and Sustainable Development. Beijing: Science Press, 2007 (in Chinese)
- [9] Huang J-B (黄进宝), Fan X-H (范晓晖), Zhang S-L (张绍林), et al. Investigation on the economically-ecologically appropriate amount of nitrogen fertilizer ap-

- plied in rice production in Fe-leaching-stagnic anthrosols of the Taihu Lake region. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2007, **27**(2): 588-595 (in Chinese)
- [10] Jaynes DB, Colvin TS, Karlen DL, et al. Nitrate loss in subsurface drainage as affected by nitrogen fertilizer rate. *Journal of Environmental Quality*, 2001, **30**: 1305-1314
- [11] Hemwong S, Toomsan B, Cadisch G, et al. Sugarcane residue management and grain legume crop effects on N dynamics, N losses and growth of sugarcane. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2009, **83**: 135-151
- [12] Suman A, Lal M, Singh AK, et al. Microbial biomass turnover in Indian subtropical soils under different sugarcane intercropping systems. *Agronomy Journal*, 2006, **98**: 698-704
- [13] Li Y (李 壖). Chemical Management Analysis Method of Sugarcane Refining. Guangzhou: The Sugarcane Quality Supervision Center of General Association of Light Industry in China, 1995: 5 (in Chinese)
- [14] Willey RW. Intercropping—its importance and research needs. part I: Competition and yield advantages. *Field Crops Research*, 1979, **32**: 1-10
- [15] Zhang W-F (张旺峰), Li M-C (李蒙春), Yang X-J (杨新军). Study of the simulation of cotton dry matter accumulation. *Journal of Shihezi University*(Natural Science) (石河子大学学报·自然科学版), 1998, **2**(2): 87-92 (in Chinese)
- [16] Yang X-L (杨晓丽). Cultivation techniques of sugarcane intercropping spring peanut. *Sugar Crops of China* (中国糖料), 2006(4): 46-47 (in Chinese)
- [17] Marchal K, Vanderleyden J. The “oxygen paradox” of dinitrogen-fixing bacteria. *Biology and Fertility of Soils*, 2000, **30**: 363-373
- [18] Zuo Y-M (左元梅), Liu Y-X (刘永秀), Zhang F-S (张福锁). Effects of the NO₃⁻-N on nodule formation and nitrogen fixing of peanut. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2003, **23**(4): 758-764 (in Chinese)
- [19] Xue X-P (薛晓萍), Chen B-L (陈兵林), Guo W-Q (郭文琦), et al. Dynamic quantitative model of critical nitrogen demand of cotton. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2006, **17**(12): 2367-2380 (in Chinese)
- [20] Koutroubas SD, Papakosta DK, Doitsinis A. Cultivar and seasonal effects on the contribution of pre-anthesis assimilates to safflower yield. *Field Crops Research*, 2004, **90**: 263-274
- [21] Yang Z-B (杨志彬), Chen B-L (陈兵林), Zhou Z-G (周治国). Effects of nitrogen application rate on spatiotemporal variability of biomass accumulation of cotton's fruiting branch at flower and boll stage. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2008, **19**(10): 2215-2220 (in Chinese)

作者简介 李志贤,女,1979年生,博士。主要从事循环农业研究,发表论文4篇。E-mail: zhixianlimao@163.com

责任编辑 张凤丽