

苏利荣, 何铁光, 苏天明, 等. 甘蔗-绿豆间作压青还田和施氮水平对甘蔗性状的影响 [J]. 华南农业大学学报, 2019, 40(3): 20-28.
SU Lirong, HE Tieguang, SU Tianming, et al. Effects of sugarcane-mungbean intercropping, bean straw returning and nitrogen application level on sugarcane traits[J]. Journal of South China Agricultural University, 2019, 40(3): 20-28.

甘蔗-绿豆间作压青还田和施氮水平 对甘蔗性状的影响

苏利荣^{1,2}, 何铁光², 苏天明², 李 琴², 秦 芳², 李杨瑞^{1,3}

(1 广西大学 农学院/亚热带农业生物资源保护与利用国家重点实验室, 广西 南宁 530004; 2 广西农业科学院
农业资源与环境研究所, 广西 南宁 530007; 3 广西农业科学院 甘蔗研究所/中国农业科学院 甘蔗研究中心/
农业部广西甘蔗生物技术与遗传改良重点实验室/广西甘蔗遗传改良重点实验室, 广西 南宁 530007)

摘要:【目的】探讨甘蔗 *Saccharum officinarum*-绿豆 *Vigna radiata* 间作和不同施氮水平对甘蔗生长、产量及氮素营养的影响, 为甘蔗合理间作提供参考依据。【方法】试验设计 3 种植方式 (绿豆单作、甘蔗单作、甘蔗-绿豆间作压青还田) 和 3 个施氮水平 (不施氮、减量施氮、常规施氮), 测定甘蔗不同时期的生长性状。【结果】种植方式和施氮水平都显著影响甘蔗的分蘖数、干物质量、氮素吸收量、有效茎数和蔗茎产量; 种植方式显著影响甘蔗的出苗数; 施氮水平×种植方式显著影响甘蔗的有效茎数、成茎率、收获期干物质量和氮素吸收量。与甘蔗单作处理相比, 间作处理使甘蔗出苗数和分蘖数分别降低了 9.61%~10.52% 和 10.30%~11.05%, 使有效茎数、干物质量、氮素吸收量和蔗茎产量分别提高了 0.15%~14.28%、14.28%~34.76%、24.00%~29.58% 和 15.88%~20.16%。对于间作处理, 甘蔗生长 80 d 的土地当量比为 1.47~1.53, 甘蔗收获期的土地当量比为 1.76~1.94, 甘蔗的竞争能力大于绿豆。与常规施氮的单作甘蔗相比, 减量施氮的间作处理不会降低甘蔗的蔗茎产量和土壤氮素营养。【结论】甘蔗-绿豆间作处理能提高土地当量比和土壤氮含量, 促进甘蔗生长, 提高甘蔗产量和氮素吸收。

关键词: 甘蔗; 绿豆; 间作; 施氮水平; 生长; 产量; 氮素营养
中图分类号: S359.9 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-411X(2019)03-0020-09

Effects of sugarcane-mungbean intercropping, bean straw returning and nitrogen application level on sugarcane traits

SU Lirong^{1,2}, HE Tieguang², SU Tianming², LI Qin², QIN Fang², LI Yangrui^{1,3}

(1 College of Agriculture, Guangxi University/State Key Laboratory for Subtropical Agri-Bioresources Conservation and Utilization, Nanning 530004, China; 2 Agricultural Resources and Environmental Research Institute, Guangxi Academy of Agricultural Sciences, Nanning 530007, China; 3 Sugarcane Research Institute of Guangxi Academy of Agricultural Sciences/Sugarcane Research Center of Chinese Academy of Agricultural Sciences/Key Laboratory of Sugarcane Biotechnology and Genetic Improvement (Guangxi), Ministry of Agriculture/Guangxi Key Laboratory of Sugarcane Genetic Improvement, Nanning 530007, China)

Abstract: 【Objective】To explore the effect of sugarcane (*Saccharum officinarum*)-mungbean(*Vigna radiata*) intercropping and different nitrogen application levels on sugarcane growth, yield and nitrogen nutrition, and

收稿日期: 2018-07-17 网络首发时间: 2019-04-16 09:12:00
网络首发地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/44.1110.S.20190412.1740.022.html>
作者简介: 苏利荣 (1977—), 女, 博士研究生, E-mail: lirongsu126@126.com; 通信作者: 李杨瑞 (1957—), 男, 教授, 博士, E-mail: liyr@gxaas.net
基金项目: 国家重点研发计划项目 (2018YFD0201100); 广西自然科学基金重点项目 (2014GXNSFDA118015); 广西科学研究与技术开发计划项目 (桂科攻 1598016-13); 国家绿肥产业技术体系 (CARS-22); 国家现代农业产业技术体系广西甘蔗创新团队项目 (gjnytxgxcxt-d-03-01); 广西科技基地和人才专项 (桂科 AD17195100)

provide a reference for rational sugarcane intercropping. 【Method】 Three cropping patterns (monocropping of mungbean, monocropping of sugarcane, intercropping of sugarcane and mungbean with mungbean straw returning), and three nitrogen treatments (no N application, reduced N application, conventional N application) were used in the experiments. Sugarcane traits during different growth period were measured. 【Result】 Tiller number, dry biomass, nitrogen uptake, number of millable stalks and cane yield of sugarcane were significantly affected by nitrogen level and cropping pattern. Sugarcane emergency number was also significantly affected by cropping pattern. Number and percentage of millable stalks, dry biomass and nitrogen uptake of sugarcane were significantly affected by nitrogen level×cropping pattern. Compared with monocropping of sugarcane, intercropping treatment reduced emergency number and tiller nubmer by 9.61%–10.52% and 10.30%–11.05% respectively, while increased number of millable stalks, dry biomass, nitrogen uptake and cane yield of sugarcane by 0.15%–14.28%, 14.28%–34.76%, 24.00%–29.58% and 15.88%–20.16%, respectively. For the intercropping treatment, the land equivalent ratio was 1.47–1.53 after sugarcane grew for 80 days, and the land equivalent ratio at sugarcane harvest was 1.76–1.94. The competition ability of sugarcane was greater than that of mungbean. Compared with monocropping of sugarcane with conventional N application, intercropping treatment with reduced N application did not decrease cane yield and soil nitrogen level. 【Conclusion】 Intercropping of sugarcane and mungbean can increase the land equivalent ratio and soil nitrogen level, promote sugarcane growth and increase cane yield and nitrogen uptake.

Key words: sugarcane; mungbean; intercropping; N application level; growth; yield; nitrogen nutrition

中国是世界第 3 大甘蔗 *Saccharum officinarum* 生产国^[1], 广西是中国最大的糖蔗生产区, 每年的糖蔗产量占全国的 70% 以上^[2]。为了追求更高的产量, 农民大量施用化学肥料, 目前广西甘蔗氮肥施肥量为 400~800 kg/hm², 用量是巴西和澳大利亚的 6~10 倍^[3-4], 这不仅增加了甘蔗的生产成本, 降低了我国蔗糖生产的国际竞争力, 同时还加剧了能源紧缺和对生态环境的破坏。广西甘蔗主要种植在丘陵赤红壤旱坡地上, 土壤具有酸性大、黏重、贫瘠等特点, 而且广西的甘蔗 80% 以上都是单一长年连作种植^[5-6], 很少施用有机肥。近年来, 甘蔗连作障碍日益凸出, 表现为土壤养分不平衡、有机质下降、酸化严重等^[7-8]。因此甘蔗产业的可持续和高效种植受到了广泛关注。甘蔗是种植行距比较宽的作物, 行距一般为 120 cm, 不同季节种植的甘蔗封行需要 3 个月 (春植) 至 8 个月 (秋植), 封行前蔗行裸露, 蔗苗对光照、水分、养分需求量不高, 造成资源的浪费。甘蔗与各类生长快速、生长期短的作物进行合理间作, 既可充分利用资源, 又能增加农民收入。

国内外已有很多关于甘蔗间作模式的研究, 主要模式有甘蔗-禾本科植物^[9-10]、甘蔗-蔬菜^[11-12]、甘蔗-豆科植物^[13-14] 等。以往的经验表明, 甘蔗与其他作物合理间作都能获得一定的经济和生态效益^[15-16]; 翻压绿肥可以提高耕地土壤的养分含量, 改善土壤的物理性状^[17-18], 最终促进作物的生长。但到目前

为止, 大多数报道都集中在间作套种对甘蔗生长的影响, 或者绿肥还田对甘蔗生长的影响。如张旭升^[19]的研究发现, 与甘蔗单作相比, 在甘蔗品种‘桂糖 29 号’行间间作不同品种菜用大豆可以使甘蔗产量提高 2.40%~13.48%; 而相同间种处理却使甘蔗品种‘新台糖 22 号’的产量降低了 0.20%~7.28%。张丽琼等^[20] 和刘鹏飞等^[21] 的研究表明, 通过轮作绿肥压青还田可以提高蔗地土壤的养分含量和甘蔗的抗旱性, 从而提高甘蔗的产量和品质。关于在甘蔗行间间种绿肥并压青还田对甘蔗生长的影响鲜有报道。苏利荣等^[22] 研究甘蔗-绿肥不同间作期和还田期对甘蔗生长的影响, 发现不同时期间作绿肥降低甘蔗出苗率 1.61%~9.77%, 间作绿肥压青还田提高甘蔗产量, 提高幅度为 1.67%~22.20%。为了明确甘蔗间作绿肥压青还田对甘蔗生长的影响及对甘蔗氮肥的替代作用, 本文以粮肥兼用绿豆 *Vigna radiata* 作为绿肥材料, 研究不同施氮水平下甘蔗-绿豆间作体系中的甘蔗生长、产量和氮素营养情况, 旨在为甘蔗-绿肥间作压青还田模式下氮素施肥技术的优化和高产高效的形成奠定理论基础。

1 材料与方法

1.1 试验地点及供试品种

试验在广西武鸣县仙湖镇苏梁村常年种植甘蔗的地块中进行, 具体位置为 3°17.043'N, 108°8.891'E,

海拔 109 m, 坡度 5°, 年平均气温 21.7 °C, 最热月份 7 月, 平均气温 28.6 °C, 极端最高气温 40.7 °C; 最冷月份为 1 月, 平均气温 12.8 °C; 极端最低气温 -0.8 °C。年降雨量 1 100~1 700 mm, 雨季集中在 5—8 月份。试验地土壤为赤红壤, 其基本理化性状为: 全氮 1.080 g/kg, 全磷 1.110 g/kg, 全钾 2.170 g/kg, 有机质 29.98 g/kg, pH 5.19, 速效氮 108.6 mg/kg, 速效磷 15.5 mg/kg, 速效钾 125.6 mg/kg。供试甘蔗品种为‘粤糖 93-159’, 该品种为高糖品种。供试绿豆为广西农业科学院农业资源与环境研究所选育的粮肥兼用绿豆品种‘桂绿豆 3 号’。

1.2 试验设计

采用二因素随机区组设计。种植模式分别为: 甘蔗单作、绿豆单作、甘蔗-绿豆间作; 甘蔗 3 种施氮水平分别为: 不施氮 (对照), 减量施氮 (施氮量为 231 kg/hm², 为当地常规施氮量的 70%), 常规施氮 (施氮量为 330 kg/hm², 根据当地甘蔗施氮量确定); 绿豆不施用任何肥料。共 7 个处理 (表 1), 重复 3

次。试验处理随机区组排列, 每个处理为 1 个小区, 每个小区种植 5 行甘蔗, 行长 7 m, 行宽 6 m, 甘蔗行距 120 cm, 小区面积 42 m²。甘蔗种植沟宽 50 cm, 深 30 cm, 种植前在沟内施用基肥, 与土壤混合均匀后, 按品字形摆上蔗种, 甘蔗下种量为饱满嫩茎每公顷 50 000 双芽段, 盖 5 cm 厚的土层。绿豆单作采用等行距种植, 绿豆行距 40 cm, 绿豆穴距 20 cm, 一穴双株。甘蔗-绿豆间作处理是在种植甘蔗后, 在甘蔗行间间作 2 行绿豆, 绿豆与甘蔗行距 40 cm, 绿豆行距 40 cm, 绿豆穴距 20 cm, 绿豆一穴双株。

2015 年 3 月 1 日播种甘蔗, 3 月 17 日甘蔗露尖, 6 月 5 日甘蔗追施氮磷钾肥料并进行大培土, 2016 年 1 月 12 日收获甘蔗, 绿豆茎秆于 2015 年 6 月 5 结合甘蔗追肥及大培土压青还田。绿豆压青还田的方法为: 先把追施的甘蔗肥料施于离甘蔗根部 5 cm 的地方, 再把绿豆秸秆均匀覆盖在甘蔗行上, 然后盖上 10 cm 厚的土壤。各处理甘蔗施肥情况见表 1。

表 1 不同处理甘蔗施肥情况和种植模式
Table 1 Fertilization and cropping patterns for sugarcane with different treatments

种植模式 Cropping pattern	施氮水平/(kg·hm ⁻²) N application level	施肥量/(kg·hm ⁻²) Fertilization dosage					
		基肥 Basic fertilizer			追肥 Topdressing		
		N	P ₂ O	K ₂ O	N	P ₂ O	K ₂ O
甘蔗 Sugarcane	0	0	112.5	112.5	0	112.5	262.5
	231	112.5	112.5	112.5	118.5	112.5	262.5
	330	112.5	112.5	112.5	217.5	112.5	262.5
绿豆 Mungbean	0	0	0	0	0	0	0
甘蔗-绿豆 Sugarcane-mungbean	0	0	112.5	112.5	0	112.5	262.5
	231	112.5	112.5	112.5	118.5	112.5	262.5
	330	112.5	112.5	112.5	217.5	112.5	262.5

1.3 测定项目及方法

在甘蔗幼苗期和分蘖期每 15 d 调查 1 次甘蔗的出苗数和分蘖数。在甘蔗收获期 (甘蔗生长 300 d) 调查甘蔗的有效茎数、总苗成茎率和蔗茎产量。同时分别于甘蔗幼苗期 (甘蔗生长 30 d, 绿豆分枝期)、甘蔗分蘖期 (甘蔗生长 50 d, 绿豆盛花初荚期)、甘蔗分蘖中期 (甘蔗生长 65 d, 绿豆花荚期)、甘蔗分蘖末期 (甘蔗生长 80 d, 绿豆压青还田期)、甘蔗伸长期 (甘蔗生长 180 d)、甘蔗收获期测定甘蔗的干物质质量和氮素吸收量及土壤速效氮含量。在甘蔗分蘖末期测定土地当量比和作物种间相对竞争能力, 甘蔗收获期测定土地当量比。所有间作与单作处理的甘蔗的调查和采样均在同一日进行。绿豆压青还

田期测定绿豆的干物质量。
1.3.1 干物质量及氮素吸收量测定 每个小区连续选取有代表性的甘蔗 3 株于 105 °C 下分茎、叶杀青 30 min, 60 °C 烘至恒质量, 测定甘蔗干物质量——*m*(甘蔗)。每个小区的所有绿豆植株全部拔起并称鲜质量, 再随机取约 2 kg 样品于 105 °C 杀青 30 min, 60 °C 烘至恒质量, 测定其干物质量, 以此换算试验小区的绿豆干物质量——*m*(绿豆)。
甘蔗样品粉碎后用 H₂SO₄-H₂O₂ 消煮, 采用凯氏定氮法测定甘蔗氮含量^[23]。单株氮素吸收量=单株干物质量×单株氮含量。
1.3.2 土地当量比和种间相对竞争能力的计算 土地当量比 (Land equivalent ratio, LER): LER=

L_s+L_m ^[24], 式中, L_s 为甘蔗土地当量比, L_s =间作处理的甘蔗干物质质量/甘蔗单作处理的甘蔗干物质质量; L_m 为绿豆土地当量比, L_m =间作处理的绿豆干物质质量/绿豆单作处理的绿豆干物质质量。

种间相对竞争能力^[25]: $A_{sm}=(m_{is}/m_s)-(m_{im}/m_m)$, 式中, A_{sm} 为甘蔗相对于绿豆的竞争能力, m_{is} 、 m_{im} 分别为间作处理甘蔗、绿豆的干物质质量, m_s 、 m_m 分别为单作处理甘蔗、绿豆的干物质质量。

1.3.3 土壤速效氮测定 土壤取样与甘蔗植株取样同步进行, 在小区内采用“S”形取样法, 避开施肥点用土钻 ($d=5\text{ cm}$) 取 0~30 cm 的土壤, 每行取 2 个点样, 混合均匀, 风干后研磨过 1 mm 筛, 用碱解扩散法^[20] 测定土壤速效氮含量。

1.4 数据处理

利用 Excel 2007 软件进行数据计算, 利用 SPSS 19.0 统计软件进行显著性分析, 采用 Duncan’s 法进行处理间的多重比较, 取平均值±标准误用于分析和作图。

2 结果与分析

2.1 不同种植模式及施氮水平下甘蔗的生长性状

甘蔗的出苗数和分蘖数能够反映甘蔗-绿豆间作及绿豆压青还田对甘蔗生长的影响。由表 2 可以看出, 相同种植模式下, 不同施氮水平对甘蔗出苗数没有显著影响, 但甘蔗分蘖数随着施氮量的增加而增加。同一施氮条件下, 甘蔗的出苗数和分蘖数均以间作处理低于甘蔗单作处理。不施氮、减量施

氮和常规施氮条件下, 甘蔗-绿豆间作的出苗数较甘蔗单作分别降低 11.05%、10.90% 和 10.30%, 差异显著; 甘蔗的分蘖数较甘蔗单作分别降低 11.05%、10.90% 和 10.30%, 差异显著。

甘蔗的有效茎数、成茎率、氮素吸收量和蔗茎产量也能够反映甘蔗-绿豆间作及绿豆压青还田对甘蔗生长的影响。由表 2 可知, 甘蔗单作模式下, 甘蔗的有效茎数随着施氮量的增加而增加, 而该模式下不施氮和减量施氮处理的甘蔗成茎率差异不显著。甘蔗-绿豆间作模式下, 减量施氮处理和常规施氮处理的甘蔗的有效茎数、成茎率差异不显著。2 种模式下, 甘蔗的氮素吸收量和蔗茎产量都随着施氮量的增加而增加。同一施氮条件下, 甘蔗的有效茎数、成茎率、氮素吸收量和蔗茎产量均以甘蔗-绿豆间作处理高于甘蔗单作处理, 不施氮、减量施氮和常规施氮条件下, 与单作处理相比, 间作处理的甘蔗有效茎数分别提高 10.31%、14.28% 和 0.15%, 其中不施氮、减量施氮水平的差异显著; 甘蔗成茎率分别提高 20.09%、23.14% 和 10.02%, 差异均显著; 甘蔗氮素吸收量分别提高 24.00%、29.58% 和 24.19%, 差异均显著; 蔗茎产量分别提高 20.16%、15.88% 和 16.98%, 差异均显著。同时, 常规施氮的 2 个处理与减量施氮的甘蔗-绿豆间作处理的甘蔗有效茎数没有差异, 减量施氮的甘蔗-绿豆间作处理与常规施氮的甘蔗单作处理的甘蔗氮素吸收量和蔗茎产量也没有显著差异, 说明间作绿豆及压青还田在减施 30% 氮的

表 2 不同种植模式及施氮水平下的甘蔗农艺性状^{a)}
Table 2 Agronomic traits of sugarcane under different cropping patterns and nitrogen application levels

种植模式 Cropping pattern(C)	施氮水平/ (kg·hm ⁻²) Nitrogen level(N)	出苗数/ (×10 ⁴ hm ⁻²) Emergency number	分蘖数/ (×10 ⁴ hm ⁻²) Tiller number	有效茎数/ (×10 ⁴ hm ⁻²) Number of millable stalks	成茎率/% Percentage of millable stalks	氮素吸收量/ (kg·hm ⁻²) Nitrogen uptake	蔗茎产量/ (t·hm ⁻²) Cane yield
甘蔗 Sugarcane	0	9.70±0.12a	8.87±0.13c	4.87±0.05c	26.21±0.37c	64.06±1.61e	55.98±2.18e
	231	9.63±0.17a	12.11±0.13a	5.76±0.08b	26.51±0.58c	100.83±3.44c	83.28±2.34c
	330	9.68±0.10a	12.13±0.12a	6.83±0.09a	31.32±0.44b	143.03±3.76b	101.65±3.32b
甘蔗-绿豆 Sugarcane- mungbean	0	8.68±0.11b	7.89±0.15d	5.43±0.04b	32.80±0.67ab	84.29±5.74d	70.12±1.84d
	231	8.70±0.18b	10.79±0.10b	6.72±0.12a	34.49±0.44a	143.18±2.36b	99.00±1.94b
	330	8.75±0.22b	10.88±0.09b	6.84±0.26a	34.81±1.16a	188.61±5.07a	122.44±3.64a
F	C	55.51**	139.31**	23.41*	123.65**	125.89**	61.62**
	N	0.04	425.98**	86.50**	15.30**	271.26**	174.21**
	C×N	0.06	1.12	6.85*	5.98*	6.14*	0.87

1) 同列数据后的不同小写字母差异显著 ($P<0.05$, Duncan’s 法); “*” 和 “**” 分别表示影响达到 0.05 和 0.01 的显著水平
1) Different lowercase letters in the same column indicate significant difference ($P<0.05$, Duncan’s method); “*” and “**” indicate that the effect reaches 0.05 and 0.01 significance levels respectively

条件下并不会导致甘蔗减产。综合甘蔗的有效茎数、成茎率、氮素吸收量和蔗茎产量 4 个指标,可以看出常规施氮的甘蔗-绿豆间作处理是所有处理中最优的处理。

从方差分析 (表 2) 可以看出, 种植模式对甘蔗出苗数、分蘖数、有效茎数、成茎率、氮素吸收量和蔗茎产量均有显著或极显著影响。施氮水平除了对甘蔗出苗数没有显著影响外, 对甘蔗的分蘖数、有效茎数、氮素吸收量和成茎率都有极显著影响。种植方式与施氮水平的互作对甘蔗有效茎数、氮素吸收量和成茎率均有显著影响。

2.2 不同种植模式及施氮水平下的作物竞争能力和土地当量比

表 3 的数据表明, 单作绿豆处理的绿豆干物质质量最高, 是间作处理的 1.5 倍左右, 这是由于相同种植面积内单作绿豆的种植量是间作处理的 1.5 倍。间作模式中, 不同施氮水平间差异不显著, 这可能与绿豆本身的生物学特性有关。

甘蔗 2 个生育期的甘蔗干物质质量都随着施氮量的增加而增加 (表 3)。在甘蔗分蘖末期, 不施氮、减量施氮和常规施氮条件下, 甘蔗的干物质质量表现为甘蔗-绿豆间作的较甘蔗单作分别降低 12.06%、8.63% 和 7.77%, 但差异均不显著。在甘蔗收获期, 甘蔗的干物质质量表现为甘蔗-绿豆间作较甘蔗单作

分别提高 14.28%、34.76% 和 21.54%, 差异均显著, 说明甘蔗-绿豆间作及压青还田可以提高甘蔗的干物质量。

甘蔗分蘖末期的土地当量比 (LER), 可以反映出甘蔗和绿豆间作的优势; 甘蔗分蘖末期的作物种间相对竞争能力, 可以反映出甘蔗和绿豆间作的种间优势; 甘蔗收获期的 LER, 可以反映出甘蔗和绿豆间作及压青还田的优势。从表 3 可以看出, 3 种施氮水平下甘蔗分蘖末期的 LER>1, 显示出间作优势, 表明甘蔗-绿豆间作能显著提高作物干物质量, 提高幅度在 47%~53% 之间。基于甘蔗收获期的 LER, 甘蔗-绿豆间作及压青还田能显著提高作物干物质量, 提高幅度在 76%~94% 之间, 而且以减量施氮处理的提高幅度最大。对间作的组分分析可以看出 $L_s>L_m$, 表明间作系统中作物干物质量的增加主要是甘蔗, 绿豆对间作系统干物质量的影响较小。从作物竞争能力看, 3 种施氮水平下的作物竞争能力都大于 0, 说明在甘蔗-绿豆间作系统中, 甘蔗的竞争能力大于绿豆。

从方差分析 (表 3) 可以看出, 种植模式对绿豆和甘蔗的干物质量均有显著影响, 施氮水平对甘蔗的干物质量有显著影响, 种植模式与施氮水平的互作只对收获期甘蔗的干物质量有显著影响。

表 3 不同种植模式及施氮水平下的作物竞争能力和土地当量比¹⁾

Table 3 Crop competitiveness and land equivalent ratio under different cropping patterns and nitrogen application levels											
种植模式 Cropping pattern(C)	施氮水平/ (kg·hm ⁻²) Nitrogen level(N)	甘蔗分蘖末期 Sugarcane late tillering stage						甘蔗收获期 Sugarcane harvest stage			
		$m(\text{绿豆})/(\text{t}\cdot\text{hm}^{-2})$		$m(\text{甘蔗})/(\text{t}\cdot\text{hm}^{-2})$				$m(\text{甘蔗})/(\text{t}\cdot\text{hm}^{-2})$			
		Biomass of mungbean	Biomass of sugarcane	A_{sm}	L_s	L_m	LER	Biomass of sugarcane	L_s	L_m	LER
甘蔗 Sugarcane	0		8.09±0.08c					17.46±0.31e			
	231		12.89±0.49ab					24.43±0.57c			
	330		13.02±0.77a					31.51±0.71b			
绿豆 Mungbean	0	9.18±0.38a									
甘蔗-绿豆 Sugarcane- mungbean	0	5.40±0.12b	7.11±0.19c	0.29	0.88	0.59	1.47	20.37±0.87d	1.17	0.59	1.76
	231	5.50±0.06b	11.78±0.93b	0.31	0.91	0.60	1.51	32.85±0.62b	1.34	0.60	1.94
	330	5.63±0.21b	12.00±0.44ab	0.31	0.92	0.61	1.53	40.16±1.41a	1.27	0.61	1.88
F	C	140.55**	12.09**					108.30**			
	N	0.27	116.39**					234.35**			
	C×N		0.13					8.57*			

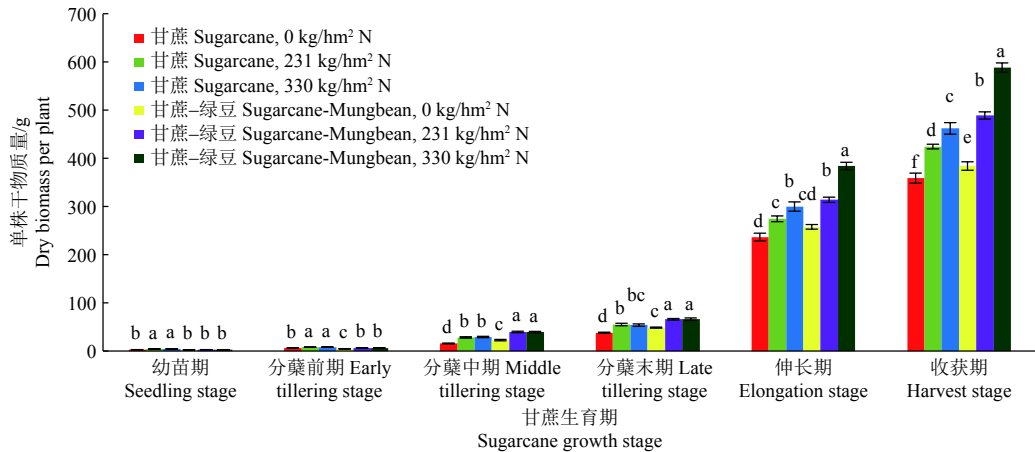
1) A_{sm} : 作物竞争能力; L_s : 甘蔗土地当量比; L_m : 绿豆土地当量比; LER: 土地当量比; 同列数据后的不同小写字母差异显著 ($P<0.05$, Duncan's 法); “*” 和 “**” 分别表示影响达到 0.05 和 0.01 的显著水平

1) A_{sm} : Crop aggressivity; L_s : Land equivalent ratio of sugarcane; L_m : Land equivalent ratio of mungbean; LER: Land equivalent ratio; Different lowercase letters in the same column indicate significant difference ($P<0.05$, Duncan's method); “*” and “**” indicate that the effect reaches 0.05 and 0.01 significance levels respectively

2.3 不同种植模式及施氮水平下甘蔗单株干物质质量累积动态

从图 1 可以看出, 在甘蔗幼苗期和分蘖前期, 甘蔗单株干物质质量以减量施氮和常规施氮的甘蔗单作最高, 与其他处理的差异显著。进入分蘖中期, 间作处理的甘蔗的干物质质量显著高于同一施氮水平的甘蔗单作。甘蔗伸长期和收获期, 施氮水平和种植模式对甘蔗干物质质量的影响较大, 2 个时期甘蔗干物质质量均以常规施氮的间作处理最大。在甘蔗伸长期, 同一施氮条件下, 与甘蔗单作相比, 甘蔗-绿豆间作处理的甘蔗单株干物质质量分别提高 8.22%、

12.58% 和 21.87%。而且这一时期减量施氮的间作处理与常规施氮的单作处理、不施氮的间作处理与减量施氮和常规施氮的单作处理的甘蔗单株干物质质量差异均不显著。甘蔗收获期, 同一施氮水平下, 与甘蔗单作相比, 甘蔗-绿豆间作处理的甘蔗单株干物质质量分别提高 6.41%、13.19% 和 21.46%。从图 1 还可以看出, 甘蔗分蘖末期减量施氮和常规施氮水平下, 相同种植模式的甘蔗干物质质量都没有显著差异, 这主要是因为这 2 个施氮水平的基肥使用量是一样的。



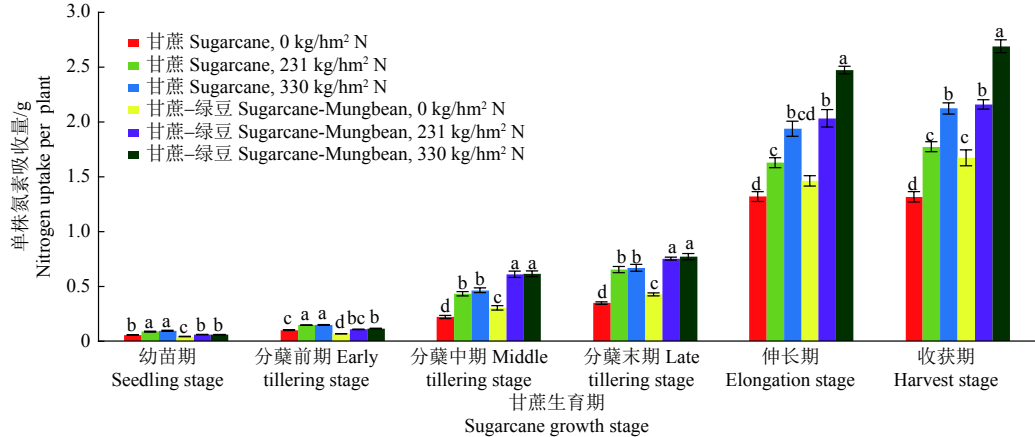
相同甘蔗生育期柱子上的不同小写字母表示差异显著 ($P<0.05$, Duncan's 法)
Different lowercase letters on bars of the same sugarcane growth stage indicate significant difference ($P<0.05$, Duncan's method)

图 1 不同种植模式及施氮水平下单株甘蔗干物质质量动态变化
Fig. 1 Dynamic change in dry biomass of single sugarcane plant under different cropping patterns and nitrogen application levels

2.4 不同种植模式及施氮水平甘蔗单株氮素吸收动态

由图 2 可以看出, 甘蔗在早期单株氮素吸收量较少, 随着生育进程的推进, 单株氮素吸收量不断

增加。相同种植模式下, 不施氮处理的甘蔗单株氮素吸收量显著低于减量施氮和常规施氮的处理。在甘蔗幼苗期和分蘖前期, 同一施氮水平下甘蔗单作处理的甘蔗单株氮素吸收量显著高于间作处理, 而



相同甘蔗生育期柱子上的不同小写字母表示差异显著 ($P<0.05$, Duncan's 法)
Different lowercase letters on bars of the same sugarcane growth stage indicate significant difference ($P<0.05$, Duncan's method)

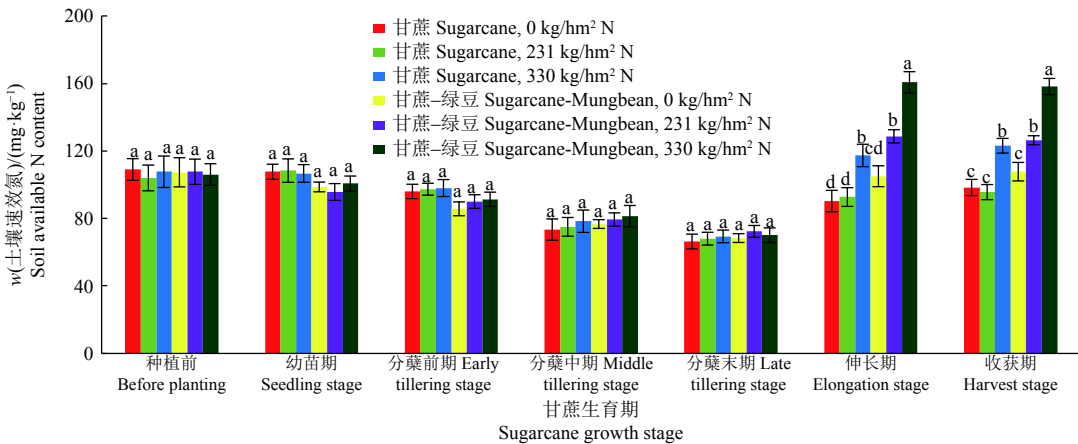
图 2 不同种植模式及施氮水平下单株甘蔗氮素吸收动态变化
Fig. 2 Dynamic change in nitrogen absorption of single sugarcane plant under different cropping patterns and nitrogen application levels

进入分蘖中期以后, 间作处理的甘蔗氮素吸收量又显著高于同一施氮水平的甘蔗单作处理。在甘蔗伸长期和收获期, 施氮水平和种植模式对甘蔗单株氮素吸收量的影响较大, 2 个生长期都以常规施氮的间作处理的甘蔗氮吸收量最大。减量施氮的间作处理与常规施氮的单作处理、不施氮的间作处理与减量施氮的单作处理的甘蔗单株氮素吸收量在这 2 个时期的差异均不显著。不施氮的单作处理的甘蔗单株氮素吸收量在伸长期达到最大, 而其他处理的甘蔗单株氮素吸收量在整个生育期内都一直在增加。由于 2 个施氮水平的基肥施用量是一样的, 甘蔗分蘖末期, 减量施氮和常规施氮水平下相同种植模式的甘蔗单株氮素吸收量都没有显著差异。

2.5 不同种植模式及施氮水平下土壤速效氮变化动态

土壤速效氮是作物有效的氮素。如图 3 所示, 在甘蔗种植前, 土壤速效氮平均质量分数为 106.9 mg/kg,

其含量在甘蔗分蘖末期达到最低, 甘蔗伸长期和收获期含量比较相近。土壤速效氮含量除了在甘蔗伸长期和收获期表现出显著差异外, 其他生长期各个处理间的差异都不显著, 但在甘蔗幼苗期和分蘖前期, 土壤速效氮含量表现为间作低于甘蔗单作, 而进入甘蔗分蘖中期以后, 均表现为间作高于甘蔗单作的趋势。在甘蔗伸长期和收获期, 减量施氮和常规施氮水平下, 甘蔗-绿豆间作还田模式的土壤速效氮含量显著高于甘蔗单作模式, 减量施氮水平下分别提高 27.97% 和 24.31%; 常规施氮水平下分别提高 27.01% 和 22.19%, 差异均显著。而在伸长期和收获期, 不施氮的 2 个处理与减量施氮的甘蔗单作处理的土壤速效氮含量显著低于其他处理, 且这 3 个处理间的差异不显著, 减量施氮的间作处理与常规施氮的甘蔗单作处理的土壤速效氮含量差异也不显著。



相同甘蔗生育期柱子上的不同小写字母表示差异显著 ($P<0.05$, Duncan's t 法)

Different lowercase letters on bars of the same sugarcane growth stage indicate significant difference ($P<0.05$, Duncan's method)

图 3 不同种植模式及施氮水平下蔗地土壤速效氮含量动态变化

Fig. 3 Dynamic change in the content of soil available nitrogen in sugarcane field under different cropping patterns and nitrogen application levels

3 讨论与结论

在本研究中, 影响甘蔗生长和氮素营养的主要有 2 个因素, 一个是甘蔗与绿豆间作期对甘蔗生长的影响, 另一个是绿豆茎秆还田对甘蔗生长的影响。首先, 间作系统同时存在种间促进作用和种间竞争作用, 种间竞争包括地上部竞争和地下部的竞争^[26]。本试验结果表明, 甘蔗间种绿豆降低了甘蔗的出苗率和分蘖率, 在甘蔗分蘖末期, 甘蔗的干物质量也较单作甘蔗的低, 主要原因是间作前期绿豆出苗及生长快于甘蔗, 与蔗苗发生了光、温、水、肥、气、热等资源的竞争, 影响了间作甘蔗的出苗和分

蘖。同样的现象也发生在甘蔗与其他作物的间作系统中。李纪潮^[27]的研究表明, 在机械种植下不同行距甘蔗间作春大豆降低甘蔗的出苗率 6.90%~25.50% 和分蘖率 10.48%~30.97%。吴建明等^[28]和谢金兰等^[29]的研究发现, 在甘蔗行间间种大豆都降低甘蔗的分蘖率。在本试验中, 减量施氮和常规施氮条件下间作甘蔗的分蘖数显著高于不施氮的间作甘蔗, 可能是因为施氮处理的氮素供应量相对充足, 绿豆生长对甘蔗吸收养分影响相对较少。总的来说, 3 种施氮水平下, 甘蔗-绿豆间作的土地当量比>1, 显示出间作优势, 说明甘蔗-绿豆间作可以提高土地单位面积的生产力。从甘蔗与绿豆的竞争能

力看, 间作系统中甘蔗的竞争能力大于绿豆。

虽然甘蔗-绿豆间作影响了甘蔗的出苗、分蘖和前期干物质质量, 但绿豆茎秆压青还田后, 一方面可以减少土壤养分的流失, 另一方面绿豆茎秆养分含量高, 翻压后氮、磷、钾养分释放快, He 等^[30]的研究结果表明, 绿豆茎秆的 N、P₂O₅ 和 K₂O 在甘蔗生育期内的腐解率分别达到 63.02%、53.78% 和 91.40%, 腐解释放的养分可以供甘蔗利用, 同时绿豆茎秆还田改善了蔗地土壤环境^[31-33], 从而促进了甘蔗的生长。在本试验中表现为甘蔗-绿豆间作较同一施氮水平的单作甘蔗提高了甘蔗的有效茎数、成茎率、干物质质量、氮素吸收量和蔗茎产量。Ambrosano 等^[34-35]的研究也发现, 绿肥腐解可以直接为甘蔗提供氮素营养, 提高了甘蔗的蔗茎产量。本试验结果表明, 间作绿豆压青还田可以替代部分氮肥, 在减氮 30% 的条件下, 并未降低甘蔗产量和土壤速效氮含量。而在常规施氮下, 间作绿豆压青还田可以提高甘蔗产量和增加蔗地土壤速效氮含量。

从甘蔗干物质质量和氮素吸收量来看, 在甘蔗幼苗期和分蘖前期, 单作甘蔗的单株干物质质量和氮素吸收量高于间作, 这可能是由于试验间作体系是增加型间作, 即在保持甘蔗单作密度不变的情况下, 在甘蔗行间加种了 2 行绿豆, 而没有额外施肥的情况下, 间作绿豆加剧了植株对光照、氮素等资源的竞争所致。而在甘蔗分蘖中期和末期, 甘蔗株型较绿豆高, 对光照的竞争能力增强, 而且这时期绿豆也已经能固氮, 其固定的氮素可以部分转移给甘蔗利用^[36-37], 从而促进甘蔗干物质的累积和氮素的吸收, 使间作处理的甘蔗单株干物质质量和氮素吸收量显著高于甘蔗单作。绿豆压青还田能够提供一定量的氮素, 本研究发现, 在甘蔗伸长期, 间作处理的甘蔗单株氮素吸收量超过甘蔗单作, 这与大豆-玉米替代型间作体系中的结果类似^[31]。而在收获期, 甘蔗单株干物质质量较伸长期的高, 但单株氮素吸收量和伸长期相差不大, 这与前人的研究结果相同^[38], 可能是由于植株成熟以后对外界氮素的吸收减少所致。收获期不施氮的间作、减量施氮和常规施氮处理的甘蔗单株氮素吸收量都较伸长期有所增长, 可能与土壤氮素供应较充足有关。不施氮的甘蔗单作处理的单株氮素吸收量较伸长期的低, 可能是因为不施用氮肥引起了甘蔗的早衰。杨文亭等^[39]的研究也发现, 减量施氮使收获期的甘蔗单株氮素吸收量低于伸长期。

土壤速效氮是作物直接吸收的氮素形式^[40]。土壤速效氮含量随着作物生育期而变化, 在甘蔗分蘖

末期(绿豆还田期)达到最低值, 而在伸长期和收获期逐渐上升, 这可能与作物的生理特性和土壤肥力有关^[39]。在前期甘蔗和绿豆都处于旺盛的生长期, 对氮的需求量较大, 此时进行了追肥, 同时绿豆压青还田解释放出一部分氮素, 加上后期作物的需氮量下降, 使土壤中速效氮含量上升。虽然土壤中速效氮的含量随甘蔗生育期呈现一定的变化规律, 但同一生育期不同的种植模式存在一定的差异, 在幼苗期和分蘖前期, 同一施氮水平下以间作含量低于单作, 可能主要是这时期绿豆植株生长吸收了土壤的部分氮素所致。在甘蔗分蘖中期和末期, 同一施氮水平下以间作含量高于单作, 表明甘蔗-绿豆间作有利于土壤保持氮素水平, 可为甘蔗后续生长提供更多的养分。到了甘蔗伸长期, 压青还田的绿豆腐解释放的养分及 6 月份的追肥, 给土壤提供了大量的氮源, 所以土壤速效氮含量显著增加。

总之, 间作绿豆降低甘蔗的出苗数和分蘖数, 但可提高土地当量比。间作绿豆压青还田可以提高土壤的速效氮含量, 改善蔗地土壤环境, 促进甘蔗生长, 提高甘蔗的有效茎数、成茎率、干物质质量和氮素吸收量, 从而提高甘蔗的蔗茎产量。间作绿豆压青还田在减施 30% 氮的条件下并不会导致甘蔗减产和降低土壤速效氮含量, 在常规施氮条件下间作绿豆压青还田可以提高甘蔗的蔗茎产量和增加蔗地土壤的速效氮含量。

参考文献:

[1] LI Y R, YANG L T. Sugarcane agriculture and sugar industry in China[J]. Sugar Tech, 2015, 17(1): 1-8.

[2] LIAO Q, WEI G P, CHEN G F, et al. Effect of trash addition to the soil on microbial communities and physico-chemical properties of soils and growth of sugarcane plants[J]. Sugar Tech, 2014, 16(4): 400-404.

[3] SOLANKI M K, WANG Z, WANG F Y, et al. Intercropping in sugarcane cultivation influenced the soil properties and enhanced the diversity of vital diazotrophic bacteria[J]. Sugar Tech, 2017, 19(2): 1-12.

[4] 杨丽涛, 胡春锦, 林丽, 等. 广西甘蔗内生固氮菌资源及其应用的相关基础研究 [C]//中国作物学会, 2014 年中国作物学会学术年会论文集. 南京: 南京农业大学, 2014.

[5] 朱秋珍, 李杨瑞, 刘晓燕. 广西发展农作物间套种技术的意义与建议 [J]. 现代农业科技, 2012(1): 119-120.

[6] 邓宇驰, 王维赞, 张荣华, 等. 2016 年广西蔗区甘蔗生产情况调研报告 [J]. 热带农业科学, 2016, 36(12): 105-110.

[7] 曾艳, 黄金生, 周柳强, 等. 广西桂南蔗区土壤养分状况调查分析 [J]. 南方农业学报, 2014, 45(12): 2198-2202.

[8] 谢如林, 谭宏伟, 周柳强, 等. 广西兴宾蔗区土壤养分状

- 况分析[J]. 中国糖料, 2004, 26(1): 22-25.
- [9] SINGH A, KANG J S, KAUR C. Effect of ryegrass intercropping on the yield and net profit of autumn planted sugarcane[J]. Sugar Tech, 2004, 6(1/2): 99-100.
- [10] KF N K K, UMRIT G, DEVILLE J. Nitrogen fertilization of sugarcane in an intercropping system with maize and potato in the humid tropical climate of Mauritius[J]. Exp Agr, 1996, 32(2): 213-218.
- [11] GANA A K, BUSARI L D. Intercropping study in sugarcane[J]. Sugar Tech, 2003, 5(3): 193-196.
- [12] CHEN B, WANG J, ZHANG L, et al. Effect of intercropping pepper with sugarcane on populations of *Liriomyza huidobrensis* (Diptera: Agromyzidae) and its parasitoids[J]. Crop Prot, 2011, 30(3): 253-258.
- [13] SINGH A K, LAL M, SUMAN A. Effect of intercropping in sugarcane (*Saccharum* complex hybrid) on productivity of plant cane-ratoon system[J]. Indian J Agr Sci, 2008, 53(2): 140-144.
- [14] LI X, MU Y, CHENG Y, et al. Effects of intercropping sugarcane and soybean on growth, rhizosphere soil microbes, nitrogen and phosphorus availability[J]. Acta Physiol Plant, 2013, 35(4): 1113-1119.
- [15] SUMAN A, LAL M, SINGH A K, et al. Microbial biomass turnover in Indian subtropical soils under different sugarcane intercropping systems[J]. Agron J, 2006, 98(3): 698-704.
- [16] KAUR N, BHULLAR M S, GILL G. Weed management in sugarcane-canola intercropping systems in northern India[J]. Field Crop Res, 2016, 188: 1-9.
- [17] 李宏图, 罗建新, 彭德元, 等. 绿肥翻压还土的生态效应及其对土壤主要物理性状的影响[J]. 中国农学通报, 2013, 29(5): 172-175.
- [18] 潘福霞, 鲁剑巍, 刘威, 等. 不同种类绿肥翻压对土壤肥力的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2011, 17(6): 1359-1364.
- [19] 张旭升. 甘蔗间种菜用大豆对其产量品质及土壤理化性状的影响[D]. 南宁: 广西大学, 2013.
- [20] 张丽琼, 陈超君, 欧丽萍, 等. 绿肥对甘蔗产量及品质的效应[J]. 亚热带农业研究, 2007, 3(2): 91-93.
- [21] 刘鹏飞, 李向勇, 张正学, 等. 绿肥压青对甘蔗产量及抗旱性的影响[J]. 贵州农业科学, 2015, 43(9): 35-37.
- [22] 苏利荣, 何铁光, 苏天明, 等. 不同时期绿豆与甘蔗套种及秸秆还田模式研究[J]. 西南农业学报, 2017, 30(11): 2461-2467.
- [23] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 1999.
- [24] 肖焱波, 段宗颜, 金航, 等. 小麦-蚕豆间作体系中的氮节约效应及产量优势[J]. 植物营养与肥料学报, 2007, 13(2): 267-271.
- [25] 李隆, 杨思存, 孙建好, 等. 小麦-大豆间作中作物种间的竞争作用和促进作用[J]. 应用生态学报, 1999, 10(2): 197-200.
- [26] 余常兵, 孙建好, 李隆. 种间相互作用对作物生长及养分吸收的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2009, 15(1): 1-8.
- [27] 李纪潮. 机械种植下不同行距间作春大豆对甘蔗的生长效应研究[D]. 南宁: 广西大学, 2017.
- [28] 吴建明, 李杨瑞, 杨丽涛, 等. 甘蔗间种大豆的试验[J]. 作物杂志, 2011(5): 103-105.
- [29] 谢金兰, 王维赞, 李长宁, 等. 甘蔗与豆科作物不同间种模式研究[J]. 中国糖料, 2015, 37(3): 12-14.
- [30] HE T G, SU L R, LI Y R, et al. Nutrient decomposition rate and sugarcane yield as influenced by mung bean intercropping and crop residue recycling[J]. Sugar Tech, 2018, 20(2): 154-162.
- [31] AMBROSANO E J, CANTARELLA H, AMBROSANO G M B, et al. The role of green manure nitrogen use by corn and sugarcane crops in Brazil[J]. Agr Sci, 2013, 4(12): 89-108.
- [32] BOKHTIAR S M, SAKURAI K. Effects of organic manure and chemical fertilizer on soil fertility and productivity of plant and ratoon crops of sugarcane[J]. Arch Agron Soil Sci, 2005, 51(3): 325-334.
- [33] CHANDRA R, RANA N S, KUMAR S, et al. Effects of sugarcane residue and green manure practices in sugarcane-ratoon-wheat sequence on productivity, soil fertility and soil biological properties[J]. Arch Agron Soil Sci, 2008, 54(6): 651-664.
- [34] AMBROSANO E J, TRIVELIN P C O, CANTARELLA H, et al. ^{15}N -labeled nitrogen from green manure and ammonium sulfate utilization by the sugarcane ratoon[J]. Sci Agr, 2011, 68(3): 361-368.
- [35] AMBROSANO E J, TRIVELIN P C O, CANTARELLA H, et al. Utilization of nitrogen from green manure and mineral fertilizer by sugarcane[J]. Sci Agr, 2005, 62(6): 534-542.
- [36] 褚贵新, 沈其荣, 张娟, 等. 用 ^{15}N 富集标记和稀释法研究旱作水稻-花生间作系统中氮素固定和转移[J]. 植物营养与肥料学报, 2003, 9(4): 385-389.
- [37] 雍太文, 杨文钰, 向达兵, 等. 小麦-玉米-大豆和小麦-玉米-甘薯套作对土壤氮素含量及氮素转移的影响[J]. 作物学报, 2012, 38(1): 148-158.
- [38] 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.
- [39] 杨文亭, 李志贤, 舒磊, 等. 甘蔗-大豆间作和减量施氮对甘蔗产量、植株及土壤氮素的影响[J]. 生态学报, 2011, 31(20): 6108-6115.
- [40] 宋为超, 刘春雨, 徐娇, 等. 初花后土壤碱解氮浓度对棉花生物量和氮素累积特征的影响[J]. 作物学报, 2013, 39(7): 1257-1265.