应 用 生 态 学 报 2015 年 3 月 第 26 卷 第 3 期
Chinese Journal of Applied Ecology, Mar. 2015, **26**(3): 817-825

减量施氮与大豆间作对蔗田氮平衡的影响*

刘 宇[1,2,3] 章 莹[1,2,3] 杨文亭[1,2,3] 李志贤[1,2,3] 管奥湄[1,2,3] 王建武[1,2,3]**
([1]华南农业大学热带亚热带生态研究所, 广州 510642; [2]农业部华南热带农业环境重点实验室, 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 通过2010—2013年的大田试验,探讨了2个施氮水平(300和525 kg·hm^{-2})和3种种植模式(甘蔗、大豆单作及甘蔗-大豆1∶2间作)对蔗田大豆固氮、甘蔗和大豆氮素累积及氨挥发和氮淋溶的影响.结果表明:与大豆单作相比,甘蔗-大豆间作的大豆固氮效率下降,但不同施氮水平间作模式之间无显著差异.不同施氮水平和种植模式对甘蔗、大豆氮素累积无显著影响.减量施氮水平下氨挥发量低于常规施氮处理,不同施氮水平和种植模式对氮淋溶量无显著影响.除2011年甘蔗单作减量施氮水平下出现蔗田氮素亏缺(-66.22 kg·hm^{-2})外,其余不同年份不同种植模式下氮素都处于盈余状态(73.10~400.03 kg·hm^{-2}),施氮水平显著影响了蔗田的氮素盈亏,且常规施氮水平下氮素盈余量显著高于减量施氮处理,过高的氮素盈余增加了氮素污染农田环境的风险.从培肥地力、降低氮素污染环境的风险和节约生产成本等方面考虑,减量施氮水平下甘蔗-大豆间作模式具有一定的生态合理性.

关键词 甘蔗-大豆间作; 减量施氮; 氮平衡; 氨挥发; 氮淋溶
文章编号 1001-9332(2015)03-0817-09 **中图分类号** S344.2 **文献标识码** A

Effects of reduced nitrogen application and soybean intercropping on nitrogen balance of sugarcane field.

LIU Yu[1,2,3], ZHANG Ying[1,2,3], YANG Wen-ting[1,2,3], LI Zhi-xian[1,2,3], GUAN Ao-mei[1,2,3], WANG Jian-wu[1,2,3] ([1]*Institute of Tropical and Subtropical Ecology, South China Agricultural University, Guangzhou* 510642, *China*; [2]*Ministry of Agriculture Key Laboratory of Agro-Environment in the Tropics, 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.*, 2015, **26**(3): 817-825.

Abstract: A four-year (2010-2013) field experiment was carried out to explore the effects of three planting patterns (sugarcane, soybean monoculture and sugarcane-soybean 1∶2 intercropping) with two nitrogen input levels (300 and 525 kg·hm^{-2}) on soybean nitrogen fixation, sugarcane and soybean nitrogen accumulation, and ammonia volatilization and nitrogen leaching in sugarcane field. The results showed that the soybean nitrogen fixation efficiency (NFE) of sugarcane-soybean intercropping was lower than that of soybean monoculture. There was no significant difference in NFE among the treatments with the two nitrogen application rates. The nitrogen application rate and intercropping did not remarkably affect nitrogen accumulation of sugarcane and soybean. The ammonia volatilization of the reduced nitrogen input treatment was significantly lower than that of the conventional nitrogen input treatment. Furthermore, there was no significant difference in nitrogen leaching at different nitrogen input levels and among different planting patterns. The sugarcane field nitrogen balance analysis indicated that the nitrogen application rate dominated the nitrogen budget of sugarcane field. During the four-year experiment, all treatments leaved a nitrogen surplus (from 73.10 to 400.03 kg·hm^{-2}), except a nitrogen deficit of 66.22 kg·hm^{-2} in 2011 in the treatment of sugarcane monoculture with the reduced nitrogen application. The excessive nitrogen surplus might increase the risk of nitrogen pollution in the field. In conclusion, sugarcane-soybean intercropping with reduced nitrogen application is feasible to practice in consideration of enriching the soil fertility, reducing nitrogen pollution and saving production cost in sugarcane field.

Key words: sugarcane-soybean intercropping; reduced nitrogen rate; nitrogen balance; ammonia volatilization; nitrogen leaching.

* 国家重大基础研究计划项目(2011CB100400)、国家科技支撑计划项目(2012BAD14B16-04)和广东省科技计划项目(2012A020100003)资助.
** 通讯作者. E-mail: wangjw@scau.edu.cn
2014-08-01 收稿,2014-10-25 接受.

施用氮肥是作物获得高产的重要措施之一,但是,过量施用氮肥带来的利用率下降、氮肥损失严重等问题日益突出[1].有研究表明,高施氮明显增加表层土壤(0~20 cm)碱解氮含量、硝态氮含量和氮素残留量,并显著增加肥料氮素总残留量和残留率[2];麦田中高浓度氮肥处理下孕穗期和灌浆期的渗漏水硝态氮和铵态氮质量浓度超过我国生活饮用水卫生标准(GB 5749—06)[3]规定的 20 mg · L^{-1},对地表水和地下水水质构成了潜在威胁[4].目前,过量施氮造成的环境风险以及土壤硝态氮的残留引起了广泛关注[5-6].

甘蔗是我国主要糖料作物,生育期内对肥水需求量较大,其中氮是限制其生长和产量形成的首要因素[7-8].长期以来,由于蔗区生产缺乏科学指导,偏施和过量施用氮肥,使甘蔗施肥成本居高不下,严重影响施肥的增产效果.鲁如坤等[9]研究发现,20 世纪 90 年代广东省的氮素盈余达到 185%.甘蔗前期生长缓慢,种植行距较宽(120 cm),苗期土地裸露期,光照和土地资源利用不充分[10].研究表明,间作能提高水分[11]、养分[12]和光能[13]的利用效率,还可以减少杂草和病虫害的发生[14-15],提高土地利用效率[16].豆科-禾本科间作体系中存在种间氮素互补利用机制,即禾本科作物通过竞争吸收土壤氮素,减少土壤氮素对固氮酶活性的抑制,进而促进豆科作物的生物固定[17-19].由于豆科作物吸收土壤氮素减少,节约的土壤氮可用来供禾本科作物吸收利用,对减少氮肥用量和维持土壤肥力的可持续性具有重要的现实意义.

华南地区属于亚热带气候区域,降水较多,且大多是红壤,容易发生硝态氮的淋溶作用[20].因此,甘蔗-大豆间作的种植模式引起了广泛关注,其在甘蔗经济效率和土地利用率上的优势均得到体现[21-22].

研究甘蔗不同种植制度下氮素的平衡状况,对氮素的输入、输出等过程进行系统分析,明确典型种植制度下蔗田生态系统中氮素的来源和去向并对其进行定量化,对于了解华南地区蔗田土壤肥力和氮素平衡状况,科学施肥,合理调控农田氮素循环与平衡,保护和改善农田生态环境,促进农业持续健康发展具有重要意义[23].本文通过 4 年的定位试验,研究了减量施氮和甘蔗-大豆间作对蔗田氮平衡与氮循环特征的影响,以期为华南地区甘蔗种植的氮素优化管理提供科学参考.

1 研究地区与研究方法

1.1 研究区概况

试验于 2010 年 3 月—2013 年 12 月在华南农业大学教学试验农场(23°08′ N, 113°15′ E)进行.该区地处亚热带,气候属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 105.3 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 ℃,年降雨量 1384~2278 mm,约 85%的降水集中在 4—9 月.试验地土壤为赤红壤,耕层有机质 21.08 g · kg^{-1},碱解氮 75.38 mg · kg^{-1},速效磷 75.04 mg · kg^{-1},速效钾 61.71 mg · kg^{-1}.

1.2 试验设计

供试甘蔗品种为粤糖 00-236(*Saccharum sinensis* Roxb. cv. Yuetang 00-236),其特点是特早熟高糖、高产,萌芽快而整齐,萌芽率高,分蘖力强,成茎率高,由华南农业大学农场提供.供试大豆品种为毛豆 3(*Glycine max* cv. Maodou No.3),为早熟品种,生育期约为 100 d,由华南农业大学农学院提供.

采用施氮水平、种植模式二因素设计.2 种施氮水平:常规施氮水平参考当地甘蔗施氮量:525 kg · hm^{-2},减量施氮 300 kg · hm^{-2};2 种甘蔗种植模式:甘蔗单作,甘蔗-大豆 1 ∶ 2 间作;一个不施肥的大豆单作为对照;共计 5 个处理(表 1).试验采取随机区组设计,3 次重复,小区长 5.5 m、宽 4.8 m,小区面积为 26.4 m^2.甘蔗行距 120 cm,每小区均种植 4 行,每行 38 段双芽苗,大豆行距 30 cm,株距 20 cm,大豆单作 16 行,甘蔗-大豆(1 ∶ 2)间作种植 8 行,每行种 25 穴,每穴在苗期定植 2 株.

2010年田间试验于3月15日播种甘蔗,3月

表 1 甘蔗-大豆间作田间试验设计
Table 1 Field experiment design of sugarcane-soybean intercropping

处理 Treatment	施氮水平 Nitrogen rate (kg · hm^{-2})	种植方式 Cropping pattern
MB	0	单作大豆 Soybean monoculture
MS-N_1	300	单作甘蔗 Sugarcane monoculture
SB_2-N_1	300	甘蔗-大豆(1 ∶ 2)间作 Sugarcane-soybean 1:2 intercropping
MS-N_2	525	单作甘蔗 Sugarcane monoculture
SB_2-N_2	525	甘蔗-大豆(1∶2)间作 Sugarcane-soybean 1:2 intercropping

16 日播种大豆,6 月 20 日大豆收获,12 月 26 日甘蔗收获.2010 年 3 月 13 日施基肥[氯化钾 150 kg·hm^{-2}, 过磷酸钙 1050 kg·hm^{-2}, 复合肥(N∶P∶K=15∶15∶15)750 kg·hm^{-2}],5 月 8 日追施攻蘖肥,追施氯化钾 300 kg·hm^{-2},常规施氮处理追施尿素 225 kg·hm^{-2},减量施氮处理追施尿素 113 kg·hm^{-2};7 月 1 日施攻茎肥,常规施氮处理追施尿素 672 kg·hm^{-2},减量施氮处理追施尿素 295 kg·hm^{-2}.甘蔗-大豆间作种植采取畦沟模式,大豆种植在畦上,畦宽 90 cm,甘蔗种植在沟里,沟宽 30 cm.基肥施在种植甘蔗的沟里,然后盖层细土(5 cm),以后追肥全部施在种植甘蔗的沟里,再培土,大豆整个生育期不施肥、大豆收获后将叶和茎秆还田于蔗行,覆土,最后畦成为沟,有利于排水.其他田间管理与当地甘蔗种植一致.

2011 年 2 月 26 日播种甘蔗,3 月 6 日播种大豆,6 月 2 日大豆收获,12 月 18 日甘蔗收获.2011 年 2 月 26 日施基肥,5 月 7 日追施攻蘖肥,6 月 25 日追施攻茎肥,其他田间管理与 2010 年一致.

2012 年 2 月 25 日播种甘蔗,3 月 10 日播种大豆,6 月 3 日大豆收获,12 月 16 日甘蔗收获.2012 年 2 月 24 日施基肥,5 月 3 日追施攻蘖肥,6 月 27 日追施攻茎肥,其他田间管理与 2010 年一致.

2013 年 3 月 9 日播种甘蔗,3 月 16 日播种大豆,6 月 3 日大豆收获,12 月 8 日甘蔗收获.2013 年 3 月 8 日施基肥,5 月 5 日追施攻蘖肥,6 月 30 日追施攻茎肥,其他田间管理与 2010 年一致.

1.3　研究方法

依据输入、输出平衡法计算氮素平衡.主要从蔗田氮输入(种子氮、肥料氮、大豆固氮、大豆秸秆还田氮)和氮输出(收获甘蔗氮、豆荚氮、氨挥发、淋溶氮)两个方面分析减量施氮和甘蔗-大豆间作对蔗田氮平衡的影响.

1.3.1 种子氮的计算　根据种植要求,甘蔗每小区需要 16 株蔗种,每公顷需要 6000 株,根据收获的甘蔗氮含量平均为每株 3.45 g,每公顷蔗种含有氮素 20.7 kg.甘蔗-大豆间作模式下,每公顷需要大豆种子 3.03×10^{5}粒,大豆单作需要 6.06×10^{5}粒.根据文献[24],大豆种子中蛋白质含量为 45%,氮素含量为 0.072%,大豆的百粒重为 0.018 kg,甘蔗-大豆间作模式下,豆种含氮量为 3.93 kg·hm^{-2},大豆单作模式下豆种含氮量为 7.86 kg·hm^{-2}.

1.3.2 肥料氮　常规施氮水平下蔗田施氮量为 525 kg·hm^{-2};减量施氮水平下蔗田施氮量为 300 kg·hm^{-2}.

1.3.3 大豆固氮的测定　植株样品烘干磨碎后,利用 Delta PLUS XP 同位素比值质谱仪(Thermo Finnigan, USA)测定植株$\delta^{15}N$ 丰度.植物体中来自固氮作用固定的氮,其^{15}N 丰度与大气的^{15}N 丰度接近,而土壤通常有比较高的$\delta^{15}N$ 值.因此,按照下式计算固氮植物的固氮率($\%N_{fix}$)[25]:

$$\%N_{fix}=(\delta^{15}N_{ref}-\delta^{15}N_{sam})/(\delta^{15}N_{ref}-\delta^{15}N)$$

大豆总固氮量=$\%N_{fix}$×大豆植株全氮含量×大豆植株干质量

式中:$\delta^{15}N_{ref}$为甘蔗的^{15}N 丰度;$\delta^{15}N_{sam}$为大豆的^{15}N 丰度;$\delta^{15}N$ 为无氮条件下沙培大豆植株的^{15}N 丰度.

1.3.4 作物收获时的氮素　甘蔗、大豆收获时,分别在各小区取有代表性的甘蔗 3 株、大豆 5 株,105 ℃下杀青 30 min,80 ℃烘干至恒量.测定干物质量.其中,大豆豆荚和茎叶分开测定.植株样品烘干后,用高速万用粉碎机(天津泰斯特仪器有限公司)磨碎,植株氮素含量分析用 H_2SO_4-H_2O_2 湿灰化法消煮,凯氏定氮仪测定[26].把大豆秸秆氮累积计入氮输入,大豆豆荚氮累积计入氮输出,甘蔗氮累积计入氮输出.

1.3.5 施肥后氨气挥发的收集　采用王朝辉等[27]的通气装置原位测定施肥后氨气挥发量(图 1).该装置用聚氯乙烯硬质塑料管制成,内径 15 cm、高 10 cm.分别将 2 块厚 2 cm、直径 16 cm 的海绵均匀浸以 15 mL 的磷酸甘油溶液(50 mL 磷酸+40 mL 丙三醇,定容至 1000 mL)后,置于硬质塑料管中,下层的海绵距管底 5 cm,上层的海绵与管顶部相平.

土壤挥发氨的捕获于施肥后的当天开始,在各小区的不同位置,分别放置 2 个通气装置,次日早晨 7:00 取样.取样时,将通气装置下层的海绵取出,迅速按小区分别装入塑料袋中,密封,同时换上另一块涂过磷酸甘油的海绵.上层的海绵视其干湿情况

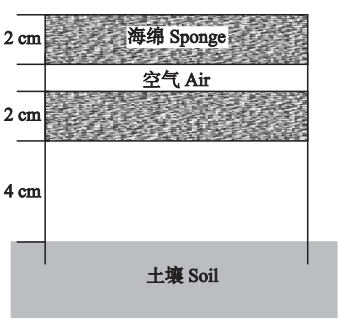


图 1　测定田间氨挥发的通气装置[27]

Fig.1　Venting equipment to determinate the ammonia volatilization from soil in field[27].

3~7 d更换 1 次.把取下的下层海绵带回试验室,用 KCl 浸提-靛酚蓝比色法[28]测定其中吸收的氨.

氨挥发($W_{NH_3\text{-}N}$, kg·hm^{-2}·d^{-1})计算公式[29]:$W_{NH_3\text{-}N}=[M/(A\times D)]\times10^{-2}$.其中:$M$ 为单个通气装置平均每次测的氨量(NH_3-N, mg);A 为捕获装置的截面积(m^2);D 为每次连续捕获的时间,试验中以 1 d 为 1 个测定循环单位.田间氨挥发量为各个施氮时期测定的总和.

1.3.6 硝酸盐淋溶的收集 甘蔗根系都在 60 cm 以上的土层,60 cm 以下几乎没有甘蔗根系的存在,60 cm 以下的养分甘蔗无法吸收,导致养分的浪费,特别是硝态氮,过高的浓度很可能污染地下水.硝酸盐淋溶的收集采用离子交换树脂袋法[30].准备 48 个树脂袋,由尼龙针织品改制而成,尼龙袋大小为 5 cm×5 cm,每袋苯乙烯系阴阳离子交换树脂(杭州争光树脂有限公司)约为 10 g,密封后在甘蔗种植前一天埋在 60 cm 土壤深处,每小区埋 2 个,共 24 个.树脂袋在大豆收获期取出,去除泥土后用密封袋装好,放入冰盒内带回实验室分析.树脂袋中的树脂放入锥形瓶中加 100 mL 1 mol·L^{-1}的氯化钾溶液,摇床振荡(250 r·min^{-1}, 60 min),用定量滤纸过滤,硝态氮含量用紫外分光光度法测定[31].在大豆收获期,把之前埋入的树脂袋取出后,每小区再在 60 cm 土壤深处放入 2 个树脂袋,共 24 个,在甘蔗收获期取出,按之前的方法测定硝态氮含量.

硝酸盐淋溶氮($W_{NO_3\text{-}N}$,kg·hm^{-2})的计算公式:$W_{NO_3\text{-}N}=(M_1+M_2)/A\times10^2$.其中:$M_1$为大豆收获后单个树脂袋收集的硝态氮(mg);$M_2$为甘蔗收获后单个树脂袋收集的硝态氮(mg);$A$ 为捕获面积(cm^2).

1.4 数据处理

采用 Excel 2003 和 SPSS 17.0 软件进行数据统计分析,利用 Duncan 多重比较方法检验差异显著性($\alpha=0.05$).图表中数据为平均值±标准误.

2 结果与分析

2.1 减量施氮与甘蔗-大豆间作对大豆固氮的影响

由表 2 可知,2012 和 2013 年单作大豆固氮效率显著高于甘蔗-大豆间作,而 2010 和 2011 年则无显著差异.甘蔗-大豆间作模式下,不同施氮水平处理大豆固氮效率无显著差异.从年际间来看,2010 年不同处理下大豆固氮效率显著高于其他 3 年,2012 和 2013 年单作大豆固氮效率显著高于 2011 年;2011 和 2012 年间作大豆固氮效率显著高于 2013 年.4 年中,单作大豆固氮量显著高于间作,间作下不同施氮量之间大豆固氮量无显著差异.从年际间来看,2010 年单作大豆固氮量最高并显著高于 2012 和 2013 年,2012 和 2013 年之间无显著差异.减量施氮水平下,2010 和 2011 年大豆固氮量显著高于 2012 和 2013 年.常规施氮水平下,2010 年大豆固氮量显著高于其他年份,比 2011、2012 和 2013 年分别提高 26.1%、40.0%和 257.4%.

2.2 减量施氮与甘蔗-大豆间作对甘蔗、大豆氮素累积量的影响

由表 3 可知,2013 年常规施氮水平下甘蔗氮素累积量显著高于减量施氮水平下甘蔗氮素累积量,特别是常规施氮间作处理下,而其他年份各处理间甘蔗氮素累积量无显著差异.从年际间来看,减量施氮条件下,甘蔗单作中,2011 和 2012 年甘蔗氮素累积量显著高于 2010 和 2013 年,甘蔗-大豆间作中,2011 年甘蔗氮素累积量显著高于 2010 年,提高 80.7%,2012 和 2013 年间无显著差异.常规施氮水平下,甘蔗单作中 2011 年甘蔗氮素累积量显著高于 2010 年,提高了 52.3%,2012 和 2013 年间无显著差异;甘蔗-大豆间作中,2010 年甘蔗累积量显著低于其他 3 年,其他 3 年之间无显著差异.

由于大豆叶和茎秆还田,所以大豆的氮素累积

表 2 减量施氮和甘蔗-大豆间作条件下大豆的固氮效率和固氮量

Table 2 Soybean nitrogen fixation efficiency and fixed nitrogen under reduced nitrogen rate and sugarcane-soybean intercropping treatments

处理 Treatment	固氮效率 Nitrogen fixation efficiency (%)				固氮量 Fixed nitrogen (kg·hm^{-2})			
	2010	2011	2012	2013	2010	2011	2012	2013
MB	87.4±2.7Aa	57.3±1.8Ca	71.1±1.2Ba	67.9±2.1BCa	150.49±1.59Aa	115.35±10.30ABa	60.34±3.73Ba	78.45±2.18Ba
MS-N_1	–	–	–	–	–	–	–	–
SB_2-N_1	79.4±6.6Aa	55.6±3.0Ba	60.1±0.7Bb	34.9±7.80Cb	76.69±7.23Ab	74.87±6.89Ab	30.24±3.27Bb	30.98±9.31Bb
MS-N_2	–	–	–	–	–	–	–	–
SB_2-N_2	78.4±3.9Aa	50.3±9.2BCa	63.5±2.5Bb	26.4±4.8Cb	74.34±4.63Ab	58.96±3.49Bb	30.97±4.95Bb	20.80±2.67Bb

同行不同大写字母表示不同年份间差异显著,同列不同小写字母表示同一年份不同种植模式间差异显著($P<0.05$) Different capital letters in the same row meant significant difference among years, and different small letters in the same column meant significant difference among planting patterns in the same year at 0.05 level. 下同 The same below.

表 3　减量施氮和甘蔗-大豆间作对甘蔗氮素累积量的影响

Table 3　Effects of reduced nitrogen rate and sugarcane－soybean intercropping on sugarcane nitrogen accumulation (kg · hm^{-2})

处理 Treatment	2010	2011	2012	2013
MB	–	–	–	–
MS-N_1	86.75±5.02Ba	206.80±23.21Aa	176.81±16.21Aa	116.33±6.93Bb
SB_2-N_1	95.91±18.07Ba	173.35±29.85Aa	154.62±12.27ABa	117.93±20.70ABb
MS-N_2	124.73±6.31Ba	190.36±22.04Aa	162.47±14.11ABa	140.81±15.79ABab
SB_2-N_2	124.83±10.15Ba	185.68±20.48Aa	184.25±23.86Aa	195.29±27.13Aa

分为大豆秸秆氮素和大豆豆荚氮素.由表 4 可知,4 年中,大豆单作豆荚氮素积累量均高于间作豆荚氮素累积量,且除 2011 年外,其余 3 年均达到显著水平.2010 年,各处理间豆荚氮累积量从高到低依次为:单作、常规施氮间作、减量施氮间作,且各处理间差异达到显著水平;2011 年,不同处理下大豆豆荚氮累积量无显著差异;2012 和 2013 年,单作大豆豆荚氮累积量显著高于间作,间作不同施氮水平下无显著差异.从年际间来看,2011 年大豆豆荚氮累积量除常规施氮间作下与 2010 年无显著差异外,其余各处理都显著高于其他年份;2010 年各处理大豆豆荚氮累积量都显著高于 2012 和 2013 年,2012 和 2013 年各处理大豆豆荚氮累积量无显著差异.

4 年中,单作大豆秸秆氮累积量均显著高于间作大豆.间作条件下,2010 年大豆秸秆氮累积量在不同施氮水平间达到显著水平,而 2011、2012 和 2013 年在不同施氮水平间无显著差异.从年际间来看,大豆单作和减量施氮条件下甘蔗-大豆间作的大豆秸秆氮累积量均为 2010 和 2011 年显著高于 2012 和 2013 年,常规施氮甘蔗-大豆间作下大豆秸秆氮累积量为 2011 年显著高于 2010、2012 和 2013 年.

2.3　减量施氮与甘蔗-大豆间作对蔗田氨挥发和淋溶氮的影响

由表 5 可知,4 年中常规施氮单作条件下,蔗田氨挥发量均高于其他处理,且在 2011、2012 和 2013 年均达到显著水平;另外,在 2010、2011 和 2012 年,常规施氮水平下氨挥发量均高于减量施氮水平,且在 2011 年差异显著.从年际间来看,2011 年各处理下蔗田氨挥发量均显著高于其他 3 年;减量施氮水平下,2012 和 2013 年蔗田氨挥发量无论单作或是间作均显著高于 2010 年;常规施氮水平下,2012 和 2013 年甘蔗单作蔗田氨挥发量显著高于 2010 年,甘蔗-大豆间作蔗田氨挥发量在 3 年间无显著差异.4 年来,各处理下蔗田氮淋溶量均无显著差异.从年

表 4　减量施氮和甘蔗-大豆间作对大豆豆荚和秸秆氮累积量的影响

Table 4　Effects of reduced nitrogen rates and sugarcane−soybean intercropping on soybean pod and stalks nitrogen accumulation (kg · hm^{-2})

处理 Treatment	豆荚 Pod				秸秆 Stalk			
	2010	2011	2012	2013	2010	2011	2012	2013
MB	66.29±1.70Ba	87.31±6.44Aa	40.28±4.64Ca	45.02±4.55Ca	97.84±2.55Aa	113.93±11.19Aa	43.53±1.79Ba	50.39±3.13Ba
MS-N_1	–	–	–	–	–	–	–	–
SB_2-N_1	41.25±4.05Bc	67.83±4.38Aa	27.11±1.75Cb	30.53±1.33Cb	61.49±4.52Ab	66.61±2.78Ab	25.02±6.24Bb	25.92±5.83Bb
MS-N_2	–	–	–	–	–	–	–	–
SB_2-N_2	53.44±3.31Ab	62.19±4.81Aa	20.28±1.18Bb	22.53±0.72Bb	39.66±3.23Bc	64.76±11.54Ab	27.09±3.89Bb	29.49±3.93Bb

表 5　减量施氮和甘蔗-大豆间作对氨挥发和氮淋溶的影响

Table 5　Effects of reduced nitrogen rate and sugarcane−soybean intercropping on ammonia volatilization and leaching nitrogen (kg · hm^{-2})

处理 Treatment	氨挥发量 Ammonia volatilization				淋溶氮量 Leaching nitrogen			
	2010	2011	2012	2013	2010	2011	2012	2013
MB	–	–	–	–	–	–	–	–
MS-N_1	0.31±0.06Ca	8.04±0.29Ac	0.57±0.02BCb	0.96±0.05Ba	68.44±6.22Ba	172.07±27.58Aa	60.71±2.89Ba	90.04±1.06Ba
SB_2-N_1	0.33±0.14Ca	6.99±0.08Abc	0.56±0.01BCb	0.74±0.03Bb	44.44±16.60Ba	101.04±14.13Aa	60.81±2.92Ba	83.25±7.51ABa
MS-N_2	0.59±0.15Ca	10.30±0.24Aa	1.11±0.13Ba	0.97±0.02BCa	63.99±8.87Ba	165.87±40.28Aa	60.24±2.23Ba	78.20±1.15Ba
SB_2-N_2	0.52±0.18Ba	8.99±0.52Ab	0.60±0.03Bb	0.83±0.03Bb	84.81±19.71Ba	139.63±20.12Aa	59.46±3.01Ba	78.92±2.95Ba

表 6 甘蔗-大豆间作系统中的氮素平衡

Table 6 Nitrogen balance in sugarcane-soybean intercropping systems (kg · hm^{-2})

年 Year	处 理 Treatment	氮输入 N input				氮输出 N output				氮素盈亏 Profit and loss N
		化肥氮 Fertilizer N	大豆固氮 Fixed N	种子氮 Seed N	大豆秸秆氮 Straw N	甘蔗氮 Sugarcane N	豆荚氮 Bean pod N	氨挥发 Ammonium volatilization	淋溶氮 Leaching N	
2010	MB	–	150.49	7.86	97.84	–	66.29	–	–	189.90c
	$MS\text{-}N_1$	300	–	20.70	–	86.75	–	0.31	68.44	165.20c
	$SB_2\text{-}N_1$	300	76.69	24.63	61.49	95.91	41.25	0.33	44.45	280.87b
	$MS\text{-}N_2$	525	–	20.70	–	124.73	–	0.59	63.99	356.39a
	$SB_2\text{-}N_2$	525	74.34	24.63	39.66	124.83	53.44	0.52	84.81	400.03a
2011	MB	–	115.35	7.86	113.93	–	87.31	–	–	149.83ab
	$MS\text{-}N_1$	300	–	20.70	–	206.80	–	8.04	172.07	−66.22c
	$SB_2\text{-}N_1$	300	74.87	24.63	66.61	173.34	67.83	6.99	101.04	116.91b
	$MS\text{-}N_2$	525	–	20.70	–	190.36	–	10.30	165.87	179.17ab
	$SB_2\text{-}N_2$	525	58.96	24.63	64.76	185.68	62.19	8.99	139.63	276.86a
2012	MB	–	60.34	7.86	45.18	–	40.28	–	–	73.10c
	$MS\text{-}N_1$	300	–	20.70	–	176.81	–	0.57	60.71	82.61c
	$SB_2\text{-}N_1$	300	30.24	24.63	26.33	154.65	27.10	1.12	60.81	137.52b
	$MS\text{-}N_2$	525	–	20.70	–	162.47	–	0.56	60.24	322.43a
	$SB_2\text{-}N_2$	525	30.97	24.63	28.31	184.20	20.28	0.60	59.46	344.37a
2013	MB	–	78.45	7.86	50.39	–	45.02	–	–	91.68c
	$MS\text{-}N_1$	300	–	20.70	–	116.33	–	0.96	90.04	113.37c
	$SB_2\text{-}N_1$	300	30.98	24.63	25.92	117.93	30.53	0.74	83.25	149.08bc
	$MS\text{-}N_2$	525	–	20.70	–	140.81	–	0.97	78.20	325.72a
	$SB_2\text{-}N_2$	525	20.80	24.63	29.49	195.29	22.53	0.83	78.92	302.35a

际间来看,2011 年各处理蔗田氮淋溶量显著高于其他 3 年,其他 3 年各处理间均无显著差异.这可能是由于 2011 年降雨量较其他 3 年大,导致蔗田氮素大量淋溶损失.

2.4 减量施氮与甘蔗-大豆间作对蔗田氮素盈亏的影响

由表 6 可知,从氮素盈亏来看,除 2011 年甘蔗单作减量施氮水平下出现氮素亏缺外,其余不同年份、不同种植模式下的氮素都处于盈余状态,但是施氮水平显著影响了种植系统中氮素的盈亏.常规施氮水平下氮素盈余量显著高于减量施氮处理,过高的氮素盈余增加了氮素污染农田环境的风险.大豆单作由于自身的生物固氮作用和秸秆还田,氮素也有一定的盈余.减量施氮水平下,4 年来甘蔗-大豆间作氮素盈余显著高于甘蔗单作,特别是 2011 年甘蔗单作出现了氮素亏损,间作下则盈余,表明减量施氮下间作有利于降低氮素亏缺的风险.综合来看,常规施氮水平下,无论甘蔗单作还是甘蔗-大豆间作,除 2011 年外,其余 3 年蔗田氮素盈余都高于 300 kg · hm^{-2},处于高盈余水平,增加了氮素污染农田环境的风险.而减量施氮水平下,蔗田氮素盈余则约为 100 kg · hm^{-2}.另外,甘蔗单作减量施氮处理可能造成蔗田氮素亏缺(2011 年),甘蔗-大豆间作减量施氮处理则不会出现亏缺.这表明甘蔗-大豆间作与减量施氮既保证了蔗田氮素有一定盈余,又避免了盈余过高而污染农田生态环境.

3 讨 论

从氮素输入来看,在间作体系中,由于豆科作物对土壤无机氮的竞争能力弱于禾本科作物[32],其固氮效率往往高于单作.在本研究中,4 年来大豆单作固氮效率均高于间作,且在 2012 和 2013 年达到显著水平.有研究表明,蚕豆在较高氮水平下倾向于从土壤中吸收氮素,而不是共生固氮[33].本研究中,单作大豆中没有施氮,而间作条件下施了大量的氮肥,可能是导致间作大豆固氮效率下降的原因.另外,4 年的单作固氮量均显著高于间作固氮量,这主要是因为单作条件下每公顷大豆的生物量是间作的 2 倍.本研究中,甘蔗生长期长达 12 个月,有足够的时间分解作物秸秆;大豆秸秆采取还田处理,实现养分循环利用,保持土壤养分和微生物生物量[34],在一定程度上增加了蔗田氮素盈余,且大豆单作显著高于甘蔗-大豆间作,主要原因还是单作条件下每公顷大豆的生物量是间作的 2 倍.综合来看,甘蔗-大豆

间作由于大豆固氮作用和大豆秸秆还田能在一定程度上增加蔗田氮素盈余.

从氮素输出来看,4 年来甘蔗收获时的氮素累积量除 2013 年各处理间存在显著差异外,其余 3 年各处理间均无显著差异,说明减量施氮没有显著影响甘蔗氮素累积.单作大豆豆荚氮累积量均高于间作,主要是因为单作条件下每公顷大豆的生物量是间作的 2 倍.影响农田氨挥发损失的因素主要包括:土壤因素(土壤质地、通气状况、pH、土壤含水量和温度等)、农业措施(氮肥品种、施肥量、施肥和灌溉方式)和气候因素(温度、降水和光照)等[35].本研究中,4 年来常规施氮的氨挥发量均高于减量施氮水平,并且在 2011 和 2012 年达到显著水平,说明当氮肥施用量提高, 氮的损失量也会相应提高.这与乔峻等[36]的研究结果一致.在常规施氮水平下,间作下氨挥发量均比单作低,说明高施氮量下间作具有降低蔗田氨挥发的作用.但是从整个氮平衡看,氨挥发只占蔗田氮输出的很小一部分,这与王肖娟等[37]认为氨挥发不是氮素损失的主要途径相一致.施肥量是影响农田土壤 NO_3^--N 淋失的重要因素之一,过量或不当施肥会导致硝酸盐在土壤中大量积累,进而出现淋溶现象[38].本研究中,4 年来不同处理下蔗田氮淋溶量均未产生显著差异,可能是由于在甘蔗的种植过程中不断培土,甘蔗垄高于田平面达 30 cm,而华南地区降雨较多,大量的氮素经过表层冲洗流失掉了.具体原因还有待进一步研究.但是在蔗田氮平衡中,氮淋溶是氮素损失的重要途径,特别是在 2011 年减量施氮甘蔗单作处理下,由于氮淋溶损失过多而导致土壤氮库出现了亏损.

在氮平衡的估算方面,从施氮水平看,4 年来在减量施氮处理下,除 2011 年单作下蔗田氮素出现亏损外,其余处理下均表现出一定的氮盈余,特别是间作条件下盈余更多.本课题组经过 3 年的试验研究表明,减量施氮处理对甘蔗产量、品质均未产生显著影响[39-40],说明减量施氮下能够满足蔗田氮素供应.这与本研究中施氮水平对甘蔗氮累积量未产生显著影响相一致.而在常规施氮下,蔗田氮素盈余过高,加之华南地区常年降水量多,容易造成农田氮素流入附近水域而造成水体污染.从种植模式看,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[41-43].本研究期间,不管常规施氮还是减量施氮,甘蔗-大豆间作处理下蔗田氮盈余均高于甘蔗单作,而且在减量施氮水平下达到显著差异,特别是 2011 年甘蔗单作减量施氮水平下蔗田氮素出现亏缺,而甘蔗-大豆间作仍有一定盈余,说明减量施氮水平下甘蔗-大豆间作既保证了蔗田一定的氮素盈余,又避免了盈余过高造成农田生态环境污染.此外,在蔗田氮平衡的估算中,不同处理下蔗田氮素基本处于盈余状态,但是土壤氮素在每季甘蔗收获后是否也有盈余还有待研究.

4　结　　论

通过 4 年的大田试验可知,相比常规施氮,减量施氮未对甘蔗氮素累积产生显著影响,在间作条件下减量施氮未对大豆氮豆荚素、秸秆氮素累积产生显著影响;减量施氮水平下氨挥发量比常规施氮少,有益于减少氮素损失.甘蔗-大豆间作种植模式下,大豆的固氮效率较大豆单作低,蔗田氮盈余高于甘蔗单作,且在减量施氮下达到显著水平.通过对氮平衡的估算可知,常规施氮下蔗田氮素盈余过多,过多氮素的施入会降低氮肥的利用效率,增加氮素污染农田环境的风险;减量施氮水平下,蔗田氮素盈余适中,且甘蔗-大豆间作有益于避免因减量施氮而造成的蔗田氮素亏缺.综合来看,减量施氮能够降低氮素污染农田环境的风险,节约生产成本,甘蔗-大豆间作有益于培肥地力,增加蔗田氮盈余,而避免蔗田减量施氮出现氮素亏缺.因此,减量施氮水平下甘蔗-大豆间作种植模式具有一定的生态合理性.

参考文献

[1] Zhu ZL, Chen DL. Nitrogen fertilizer use in China: Contributions to food production, impacts on the environment and best management strategies. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2002, **63**: 117-127

[2] Wei J-F (韦剑锋), Wei D-P (韦冬萍), Chen C-J (陈超君), *et al*. Effects of different nitrogen levels on sugarcane nitrogen utilization and soil nitrogen residue. *Chinese Journal of Soil Science* (土壤通报), 2013, **44** (1): 168-171 (in Chinese)

[3] Jin Y-L (金银龙). Hygiene Standards of Domestic and Drinking Water. Beijing: China Standards Press, 2007 (in Chinese)

[4] Wu D-M (吴殿鸣), Xue J-H (薛建辉), Luo Y (罗英), *et al*. Study on nitrate nitrogen leaching in poplar-wheat intercropping ecosystem by in situ analysis. *Journal of Nanjing Forestry University* (南京林业大学学报), 2012, **36**(2): 111-116 (in Chinese)

[5] Liu X-J (刘学军), Ju X-T (巨晓棠), Zhang F-S (张福锁). Effect of reduced N application on N utilization and balance in winter wheat summer maize cropping system. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2004, **15**(3): 458-462 (in Chinese)

[6] Liu X-M (刘小明), Yong T-W (雍太文), Liu W-Y (刘文钰), *et al*. Effect of reduced N application on soil N residue and N loss in maize-soybean relay strip intercropping system. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2014, **25**(8): 1-8 (in Chinese)
[7] Lu J-L (陆景陵). Plant Nutrition. Beijing: China Agricultural University Press, 2003 (in Chinese)
[8] Yang Y-S (杨永胜). Effects of nitrogen supply on the growth traits and yield of maize. *Journal of Hebei Agricultural Sciences* (河北农业科学), 2009, **13**(6): 42-43 (in Chinese)
[9] Lu R-K (鲁如坤), Shi Z-Y (时正元), Shi J-P (施建平). Southern China six province farmland nutrient balance status evaluation and dynamic change research. *Scientia Agricultura Sinica* (中国农业科学), 2000, **33**(2): 63-67 (in Chinese)
[10] Lu L-S (卢良恕). Introduction to China's agriculture. Chengdu: Sichuan Science and Technology Press, 1999: 98-106 (in Chinese)
[11] Xu BC, Li FM, Shan L. Switchgrass and milkvetch intercropping under 2:1 row-replacement in semiarid region, northwest China: Aboveground biomass and water use efficiency. *European Journal of Agronomy*, 2008, **28**: 485-492
[12] Zhang FS, Li L. Using competitive and facilitative interactions in intercropping systems enhances crop productivity and nutrien-use efficiency. *Plant and Soil*, 2003, **248**: 305-312
[13] Harris D, Natarajan M, Willey RW. Physiological basis for yield advantage in a sorghum/groundnut intercrop exposed to drought. Dry-matter production, yield, and light interception. *Field Crops Research*, 1987, **17**: 259-272
[14] Zhu YY, Chen HR, Fan JH, *et al*. Genetic diversity and disease control in rice. *Nature*, 2000, **406**: 718-722
[15] Chen B, Wang JJ, Zhang LM, *et al*. Effect of intercropping pepper with sugarcane on populations of *Liriomyza huidobrensis* (Diptera: Agromyzidae) and its parasitoids. *Crop Protection*, 2011, **30**: 253-258
[16] Ghosh PK. Growth, yield, competition and economics of groundnut/cereal fodder intercropping systems in the semi-arid tropics of India. *Field Crops Research*, 2004, **88**: 227-237
[17] Xiao Y-B (肖焱波), Li L (李 隆), Zhang F-S (张福锁). The interspecific nitrogen facilitation and the subsequent nitrogen transfer between the intercropped wheat and fababean. *Scientia Agricultura Sinica* (中国农业科学), 2005, **38**(5): 965-973 (in Chinese)
[18] Li L, Zhang FS, Li XL, *et al*. Interspecific facilitation of nutrient uptake by intercropped maize and faba bean. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2003, **65**: 61-71
[19] Rochester I, Peoples M, Constable G, *et al*. Faba beans and other legumes add nitrogen to irrigated cotton cropping systems. *Australian Journal of Experimental Agriculture*, 1998, **38**: 253-260
[20] Shen R-F (沈仁芳), Zhao Q-G (赵其国). Nutrient elements in the red loam column leaching. *Soils* (土壤), 1995, **8**(4): 178-181 (in Chinese)
[21] Manimaran S, Kalyanasundaram D. Influence of planting techniques, intercropping and nutrient management practices on the yield and quality of sugarcane. *Plant Archives*, 2007, **7**: 247-249
[22] Li Z-X (李志贤), Wang J-W (王建武), Yang W-T (杨文亭), *et al*. Effects of reduced nitrogen application on the yield, quality, and economic benefit of sugarcane intercropped with soybean. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2011, **22**(3): 713-719 (in Chinese)
[23] Chen X-P (陈新平), Zhang F-S (张福锁). The nitrogen cycle and balance of winter wheat-summer maize rotation system in north China and. *Acta Pedologica Sinica* (土壤学报), 2009, **46**(4): 684-697 (in Chinese)
[24] Cheng Y-B (程艳波), Jiang B-Z (江炳志), Cai S-X (蔡史欣), *et al*. Effects of sowing date on yield and quality of summer-sown soybean in South China. *Soybean Science* (大豆科学), 2010, **29**(1): 37-41 (in Chinese)
[25] Houngnandan P, Yemadje RGH, Oikeh S, *et al*. Improved estimation of biological nitrogen fixation of soybean cultivars (*Glycine max* L. Merril) using ^{15}N natural abundance technique. *Biology and Fertility of Soils*, 2008, **45**: 175-183
[26] Bao S-D (鲍士旦). Soil and Agricultural Chemistry Analysis. Beijing: China Agriculture Press, 2000 (in Chinese)
[27] Wang Z-H (王朝辉), Liu X-J (刘学军), Ju X-T (巨晓棠), *et al*. Field *in situ* determination of ammonia volatilization from soil: Venting method. *Plant Nutrition and Fertilizer Science* (植物营养与肥料学报), 2002, **8**(2): 205-209 (in Chinese)
[28] Li Y-K (李酉开). Routine Analysis Method of Soil and Agricultural Chemistry. Beijing: Science Press, 1984 (in Chinese)
[29] Li Z-X (李宗新), Wang Q-C (王庆成), Liu K-C (刘开昌), *et al*. Law of field soil ammonia volatilization in summer maize under different fertilizer patterns. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2009, **29**(1): 307-314 (in Chinese)
[30] Fang Y-T (方运霆), Mo J-M (莫江明), Zhou G-Y (周国逸). Ion-exchange resin bags method research of forest soil NO_3-N and its response to nitrogen deposition. *Ecology and Environment* (生态环境), 2005, **14**(4): 483-487 (in Chinese)
[31] Yi X-L (易小林), Li Y-K (李酉开), Han L-F (韩琅丰). The ultraviolet spectrophotometric method determination of soil NO_3-N. *Chinese Journal of Soil Science* (土壤通报), 1983(6): 35-40 (in Chinese)
[32] Li L (李 隆). The Ecological Principles and Applications of Biological N_2 Fixation in Legumes-based Intercropping Systems. Beijing: China Agriculture Press, 2013 (in Chinese)
[33] Fan FL, Zhang FS, Song YN, *et al*. Nitrogen fixation of faba bean (*Vicia faba* L.) interacting with a non-legume

in two contrasting intercropping systems. *Plant and Soil*, 2006, **283**: 275-286

[34] 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

[35] Wang T (汪　涛), Zhu B (朱　波), Zhu F-H (祝福虹), *et al*. Effects of a combination of organic and inorganic fertilizer on nitrogen leaching in purple soil with sloping cropland. *Acta Scientiae Circumstantiae* (环境科学学报), 2010, **30**(4): 781-788 (in Chinese)

[36] Qiao J (乔　峻), Li Y (李　勇), Li W-Y (李文耀). Nitrogen loss causes and the effective use. *Inner Mongolia Agricultural Science and Technology* (内蒙古农业科技), 2004(5): 38-39 (in Chinese)

[37] Wang X-J (王肖娟), Wei C-Z (危常州), Zhang J (张　军), *et al*. Effects of irrigation mode and N application rate on cotton field fertilizer N use efficiency and N losses. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2012, **23**(10): 2751-2758 (in Chinese)

[38] Olesen JE, Rubk GH, Heidmann T, *et al*. Effect of climate change on greenhouse gas emissions from arable crop rotations. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2004, **70**: 147-160

[39] Yang W-T (杨文亭), Li Z-X (李志贤), Lai J-N (赖健宁), *et al*. Effects of sugarcane-soybean intercropping and reduced nitrogen application on yield and major agronomic traits of sugarcane. *Acta Agronomica Sinica* (作物学报), 2014, **40**(3): 556-562 (in Chinese)

[40] Li Z-X (李志贤), Wang J-W (王建武), Yang W-T (杨文亭), *et al*. Effects of reduced nitrogen application on the yield, quality, and economic benefit of sugarcane intercropped with soybean. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2011, **22**(3): 713-719 (in Chinese)

[41] 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

[42] Gana AK, Busari LD. Intercropping study in sugarcane. *Sugar Technology*, 2003, **5**: 193-196

[43] Feng Y-X (冯奕玺). Effect of sugracane/peanut, soybean intercropping on yields of intercrops. *Guangxi Sugarcane & Canesugar* (广西蔗糖), 2006(1): 46-47 (in Chinese)

作者简介　刘　宇,男,1989 年生,硕士研究生.主要从事循环农业间套作研究. E-mail: 827415712@qq.com

责任编辑　孙　菊