

DOI: 10.11931/guihaia.gxzw202101059

赵国胜, 李伏生, 农梦玲. 等氮滴灌对宿根蔗产量及土壤氧化亚氮排放的影响 [J]. 广西植物, 2022, 42(3): 413–421.

ZHAO GS, LI FS, NONG ML. Effects of fertigation under equal nitrogen on ratoon yield and nitrous oxide emissions in soil [J].

Guihaia, 2022, 42(3): 413–421.

等氮滴灌对宿根蔗产量及土壤氧化亚氮排放的影响

赵国胜, 李伏生, 农梦玲*

(广西大学 农学院, 南宁 530004)

摘要: 为得到合理的水肥管理措施, 研究等氮量下不同滴灌施肥比例对宿根蔗产量以及不同生育期蔗田土壤氧化亚氮(N_2O)通量和无机氮含量的影响, 并分析蔗田土壤 N_2O 通量与无机氮含量之间的关系。该文以自然降雨 W_0 为对照, 设置2种滴灌灌水量水平 W_1 (田间持水量的75%)和 W_2 (田间持水量的85%), 等量氮肥(N 300 kg·hm⁻²)下设4种滴灌施肥比例 F_{10} (100%基肥)、 F_{55} (50%基肥, 50%滴灌追肥)、 F_{37} (30%基肥, 70%滴灌追肥)、 F_{19} (10%基肥, 90%滴灌追肥), 测定不同处理宿根蔗产量、农艺性状(单茎重、株高、蔗茎直径、公顷有效茎数)、3个生育期蔗田土壤 N_2O 通量以及土壤硝态氮、亚硝态氮和铵态氮的含量。结果表明:(1) W_1F_{55} 和 W_2F_{55} 处理甘蔗产量较高, 分别为102.4 t·hm⁻²和97.8 t·hm⁻²; 相同灌水量下 F_{55} 处理土壤 N_2O 排放通量较低。(2)蔗田土壤 N_2O 通量与土壤铵态氮含量之间呈显著负相关, 相关系数为-0.497($P < 0.05$, $n = 24$); 合理的滴灌施肥比例能有效提高甘蔗产量并减少土壤 N_2O 的排放。因此认为, 等氮条件下滴灌施肥比例为5:5的处理, 不仅宿根蔗相对高产, 而且能减少蔗田土壤 N_2O 的排放。

关键词: 氧化亚氮, 甘蔗生产, 无机氮, 灌溉施肥, N_2O 排放

中图分类号: Q948.113 文献标识码: A 文章编号: 1000-3142(2022)03-0413-09

Effects of fertigation under equal nitrogen on ratoon yield and nitrous oxide emissions in soil

ZHAO Guosheng, LI Fusheng, NONG Mengling*

(College of Agriculture, Guangxi University, Nanning 530004, China)

Abstract: In order to get reasonable water and fertilizer management measures, the effects of different fertigation proportions under the same nitrogen (N) rate on the yield of ratoon and nitrous oxide (N_2O) flux and inorganic N content in soil at the different growth stages were studied, the relationships between soil N_2O flux and inorganic N content were analyzed. Taking natural rainfall (W_0) as the control, two drip irrigation levels, W_1 (75% of field water capacity) and W_2 (85% of field water capacity) and four fertigation proportions at the same N rate (N 300 kg·hm⁻²), F_{10} (100% basal fertilizer), F_{55} (50% basal fertilizer, 50% fertigation topdressing), F_{37} (30% basal fertilizer, 70% fertigation topdressing) and F_{19} (10% basal fertilizer, 90% fertigation topdressing) were designed. Agronomic traits (stalk weight, plant height, stalk diameter and effective stalks per hectare) and yield of sugarcane, the N_2O flux and the contents of nitrate, nitrite and ammonium nitrogen in soils at the three growth stages were determined. The results

收稿日期: 2021-07-20

基金项目: 国家自然科学基金(31760603); 广西科技计划-基地和人才专项(AD17195060) [Supported by National Natural Science Foundation of China (31760603); Guangxi Science and Technology Plan-Base and Talent Special Project(AD17195060)].

第一作者: 赵国胜(1995-), 硕士, 主要从事水肥资源利用与环境方面的研究, (E-mail) 1966446028@qq.com。

*通信作者: 农梦玲, 博士, 高级实验师, 主要从事水肥资源利用方面的研究, (E-mail) mengling189@126.com。

were as follows: (1) The ratoon yields in W_1F_{55} and W_2F_{55} were higher, i.e. $102.4 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ and $97.8 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$, respectively; Soil N_2O emission flux in F_{55} was lower under the same irrigation amount. (2) There was a significant negative correlation between soil N_2O flux and ammonium nitrogen content, with a correlation coefficient of -0.497 ($P < 0.05$, $n = 24$); A reasonable fertilization proportion with drip irrigation can effectively increase sugarcane yield and reduce soil N_2O emission. Therefore, the treatment with a fertigation proportion of 5 : 5 under the same N rate can not only have a relatively high yield of ratoon, but also reduce the N_2O emission from the sugarcane soil.

Key words: nitrous oxide, sugarcane yield, inorganic nitrogen, fertigation and fertilizer, N_2O emission

氧化亚氮(N_2O)是对全球气候变化有重要影响的温室气体(Ghosh et al., 2003),大气中 N_2O 浓度的增加使得气候变暖等环境问题日益严峻(Signor & Cerri, 2013)。IPCC(2007)指出,农田土壤作为农业 N_2O 的最大排放源,占农业 N_2O 排放总量的80%左右。在进行作物生产时,部分地区为了追求高产,盲目进行高肥高水的管理方式,不仅造成水肥资源的浪费而且会增加农田 N_2O 排放,从而对环境造成污染。因此,研究合理的水肥管理措施对降低农田 N_2O 排放和缓解全球变暖问题具有重要意义。氮进入土壤后经硝化反应被氧化成亚硝酸盐和硝酸盐,硝酸盐经反硝化过程还原为氮气($\text{NO}_3^- \rightarrow \text{NO}_2^- \rightarrow \text{NO} \rightarrow \text{N}_2\text{O} \rightarrow \text{N}_2$)的过程中产生 N_2O ,此外部分硝化微生物在低氧环境也能够将亚硝酸盐还原为 N_2O 。 N_2O 是硝化与反硝化过程的中间产物和副产物(Xu et al., 2016),无机氮作为硝化和反硝化作用的底物,其含量显著影响该过程中 N_2O 的排放。实际耕作中,施肥量、追肥比例、灌水量和灌水方式等都可能对农田 N_2O 排放产生影响。前人研究表明, N_2O 排放量随氮肥用量的增加而增加(Snyder et al., 2009)。调整基追肥比例可使施肥与作物需肥规律相符合,在获得最大产量的同时农田 N_2O 的排放也在改变,如夏季玉米等氮量追肥,多次追肥的 N_2O 排放量可能高于一次或两次施肥(Gao et al., 2014)。灌溉量和灌溉方式均对土壤有效氮形态、理化性状以及微生物活性有一定影响,进而对土壤 N_2O 排放产生影响。有研究显示,与沟灌相比,滴灌可减少大约50%的 N_2O 排放量(Kallenbach et al., 2010)。灌溉量主要通过改变土壤湿度,进而影响土壤中 N_2O 的生成和气体向大气扩散的过程(吕晓东和王婷,2018)。

滴灌施肥作为新型的低压节水灌溉技术,节水、节肥和节省劳动力的优点使得滴灌大量投入甘蔗生产。由于广西是全国最大的甘蔗产地,甘蔗常

年种植面积占80万 hm^2 ,占全国的60%以上,因此蔗田 N_2O 排放问题对广西来说尤为关键。虽然前人在施肥量、肥料种类以及施肥深度等方面对农田氧化亚氮排放的影响有较多研究,但有关等氮滴灌施肥条件下蔗田 N_2O 排放特征以及 N_2O 排放通量与土壤无机氮含量的关系尚未有定论。因此,本文通过滴灌施肥试验,研究等氮量下不同滴灌施肥比例对宿根蔗农艺性状(单茎重、株高、蔗茎直径、公顷有效茎数)、产量和含糖量以及不同生育期蔗田土壤 N_2O 排放通量和无机氮含量的影响,并探讨蔗田土壤 N_2O 排放通量和无机氮含量的关系,为蔗田土壤 N_2O 减排和甘蔗生产提供合理的水氮管理依据。

1 材料与方 法

1.1 材料和试验地概况

供试甘蔗为“桂糖42号”第一年宿根蔗。

不同滴灌灌水量和施肥比例试验在广西大学移动干旱棚中进行。该移动棚可以通过电控传感器控制移动棚移动,达到遮蔽或露天的效果。降雨时根据试验方案选择避雨或接受雨水(对照处理),天气晴朗时移动棚移开使作物更好接受阳光。供试土壤为赤红壤,试验前0~20 cm耕层土壤的主要理化性质如下:容重 $1.42 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$,田间持水量24.9%,pH 6.62,全氮 $1.3 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,有机质 $17.39 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,碱解氮 $94.52 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,速效磷 $99.78 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,速效钾 $85.6 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。试验期间日降雨量和日均温见图1,甘蔗分蘖期、伸长期和成熟期降雨量分别为183.8、662.0、64.6 mm,试验期间总降雨量为910.4 mm。

1.2 试验方 法和管 理

以自然降雨处理 W_0 为对照,设立2种滴灌灌水量水平,即 W_1 和 W_2 ,分别使土壤含水量保持在田间持水量的75%和85%。在各处理施用沤熟牛粪($22500 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)、磷肥(P_2O_5 $180 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)和

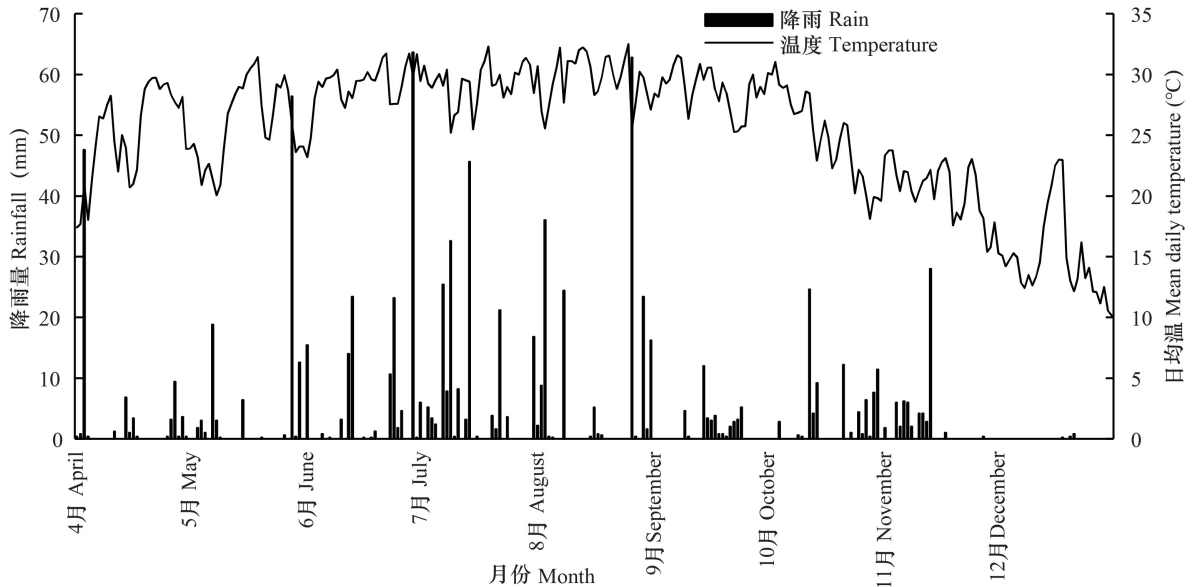


图 1 试验期间日降雨量和日均温

Fig. 1 Daily rainfall and mean daily temperature during experimental period

钾肥(K_2O 240 $kg \cdot hm^{-2}$)作基肥基础上,等量氮肥(N 300 $kg \cdot hm^{-2}$)下,设 4 种滴灌施肥比例,即 F_{10} (100%基肥)、 F_{55} (50%基肥,50%滴灌追肥)、 F_{37} (30%基肥,70%滴灌追肥)、 F_{19} (10%基肥,90%滴灌追肥)。基肥部分,施肥方式为土壤施肥;追肥部分,施肥方式为滴灌施肥,追施氮肥分别在幼苗期施 10%、分蘖期 20%、伸长期 60%(分 2 次施入,每次 30%),成熟前期 10%,随滴灌施入。本试验为不完全随机区组,共 8 个处理,处理代号分别为 W_0F_{10} 、 W_1F_{10} 、 W_1F_{55} 、 W_1F_{37} 、 W_2F_{10} 、 W_2F_{55} 、 W_2F_{37} 和 W_2F_{19} ,其中 W_0F_{10} 为对照处理。每个处理设立 3 个小区,共 24 个小区,小区面积为 8.64 m^2 (3.6 $m \times 2.4$ m)。小区之间用水泥砖墙(厚 25 cm ,深 80 cm)隔开,做到各处理间水分相互不渗漏。

滴灌施肥时,将事先溶于水中的肥料通过比例施肥器加入到滴灌带,随水分进入土壤。滴灌带均匀摆放在甘蔗两侧,以保证水分和肥料均匀分布在甘蔗植株两侧。各生育期利用便携式土壤水分测量仪 TRIME-PICO-IPHTDRAZS-100(德国 IMKO)观测土壤含水量,用水表控制灌水量,不同灌水水平各生育期灌水时间和灌水量见表 1。

试验用牛粪(有机质 14.3%、 N 0.76%、 P_2O_5 0.85%、 K_2O 0.59%),氮肥为尿素(N 质量分数为 46%,陕西陕化煤化工集团有限公司产品),磷肥

为钙镁磷肥(P_2O_5 质量分数为 18%,云南昆阳磷肥厂有限公司产品),钾肥为硫酸钾(K_2O 质量分数为 52%,广东米高化工有限公司产品)。

试验于 2019 年 3 月 16 日补苗,3 月 31 日施基肥,4 月 10 日追施苗期肥,4 月 24 日追施分蘖期肥,6 月 22 日追施伸长前期肥,8 月 25 日追施伸长中期肥,11 月 11 日追施成熟前期肥,12 月 1 日试验小区收获所有甘蔗,测定实际甘蔗产量。

1.3 样品采集和测定

1.3.1 植物样品采集和测定 甘蔗定苗后,每个小区随机选取 10 株甘蔗用红色塑料绳标记(不影响甘蔗正常生长)。在甘蔗成熟后将每个小区预先标记的 10 株甘蔗样品采收,测定甘蔗的单茎重、株高、蔗茎直径以及蔗糖含量。

甘蔗成熟后对小区全部甘蔗进行砍收,测定小区实际蔗茎产量为甘蔗产量。单茎重是将甘蔗茎切长 50 cm 左右小段,用电子秤称量的质量。株高:用卷尺测量甘蔗基部至蔗茎顶端的高度。蔗茎直径:用游标卡尺测量甘蔗植株上部、中部和基部,取平均值。蔗糖分:取甘蔗蔗茎上中下三个部位的蔗汁,置于糖度计(WZB 35,上海仪电物理光学仪器有限公司)上进行糖锤度的测定。

甘蔗糖分计算公式:蔗糖分(%) = 糖锤度 \times 1.025-7.703(杨雪艳等,2018)。

表 1 不同滴灌灌水量水平和氮肥施用比例试验各生育期灌水量 (单位: mm)

Table 1 Irrigation amount at each growth stage under different drip irrigation levels and N fertilization proportions (Unit: mm)

滴灌灌水量 Drip irrigation amount	生育期和日期 Growth stage and date						全生育期 Whole growth stage
	分蘖期 TS		伸长期 ES		成熟期 RS		
	4月24日 24th April	6月15日 15th June	7月15日 15th July	8月18日 18th August	9月24日 24th September	10月29日 29th October	
W ₀	—	—	—	—	—	—	—
W ₁	114.8	121.0	106.3	107.5	118.1	115.3	682.9
W ₂	147.0	137.7	131.6	140.5	138.2	137.2	832.2

注: W₀. 自然降雨; W₁. 滴灌灌水量 1; W₂. 滴灌灌水量 2。下同。

Notes: W₀. Natural rainfall; W₁. Drip irrigation level 1; W₂. Drip irrigation level 2. The same below.

1.3.2 土壤 N₂O 采集与测定 试验于 5 月 1 日和 5 月 2 日(分蘖期)、9 月 4 日和 9 月 5 日(伸长期)、11 月 26 日和 11 月 27 日(成熟期),在各生育期采土前一天以及当天利用静态箱法采集蔗田土壤 N₂O 气体 2 次,生育期共采集 6 次 N₂O 气体。

静态箱用不锈钢制成,包括底座和箱盖两部分,底座和箱盖之间用橡胶垫圈密封。底座为正方形,高度 30 cm,边长 37 cm,带有凹槽,在甘蔗播种前一周埋入地下 30 cm,压实底座周围土壤,保证其密封状态,播种时底座中间不播蔗种。箱盖为顶部密封的正方形柱体,高度 25 cm,边长 35 cm,每个静态箱装有取样端口、温度探头和小风扇。采样时间为上午 9:00 开始,采样时将箱盖放至凹槽处灌满水的底座上,分别于 0、10、20、30 min 用注射器取样后注入预先抽真空的采样瓶中保存,带回实验室后进行测定。

N₂O 采用 Agilent 7890A 气相色谱仪(美国安捷伦科技公司)中 ECD 检测器测定,检测温度为 350 ℃,柱温 60 ℃,氢气流速为 40 mL min⁻¹,载气为 99.99% 高纯氩/甲烷气(95% 氩气+5% 甲烷)。用 50 mL 医用注射器(成都市新津事丰医疗器械有限公司)抽取待测气样 20 mL,手动打入至 ECD 检测器中,每组气体样品进样时间为 4.45 min。

N₂O 通量是指单位时间内通过单位面积的 N₂O 质量,可根据箱内气体浓度的变化和培养时间计算得出。

$$F = \frac{P \times M}{(273 + T) \times R} \times H \times \frac{dc}{dt} \quad (1)$$

式中: F 是土壤 N₂O 排放通量($\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \text{h}^{-1}$);

P 为标准大气压($1.013 \times 10^5 \text{ Pa}$); M 是 N₂O 气体的摩尔质量分数($44.0 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}$); H 是箱体高度(25 cm); T 是采气时箱体內的平均温度(℃); R 为气体常数($8.314 \text{ J} \cdot \text{mol}^{-1} \text{ kg}^{-1}$); dc/dt 为土壤 N₂O 排放速率($\mu\text{L} \cdot \text{m}^{-2} \text{h}^{-1}$) (龙鹏宇等, 2020)

1.3.3 土壤样品采集和测定 试验于 5 月 2 日(分蘖期)、9 月 5 日(伸长期)、11 月 27 日(成熟期),在各试验小区用不锈钢土钻(直径 6 cm)按照 S 形多点采样法采集蔗田 0~20 cm 耕层土壤,土壤带回实验室过 18 目(2 mm)筛网剔除杂草、碎石和根系后放入密封袋,保存于 4 ℃ 冰箱。

土壤经 $0.01 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1} \text{ CaCl}_2$ 浸提后,通过连续流动化学分析仪 AA3(德国 Bran + Luebbe 公司)测定浸提液中铵态氮、硝态氮、亚硝态氮含量(杨靖民等, 2014)。

1.4 统计分析

试验数据通过 Excel 2019 和 SPSS 23.0 软件进行分析,用 Duncan 法对处理进行多重比较,差异显著性水平 $P < 0.05$ 。用 Spearman(斯皮尔曼)相关性系数表示土壤 N₂O 排放通量与无机氮含量之间的相关性。

2 结果与分析

2.1 不同处理对宿根蔗产量和含糖量的影响

由表 2 可知,在相同灌水量下, F₅₅ 处理宿根蔗产量最高, W₁ 下 F₅₅ 处理产量较 F₁₀ 和 F₃₇ 增长了 2.71% 和 5.03%; W₂ 下 F₅₅ 处理产量较 F₁₀、F₃₇ 和 F₁₉ 分别增长了 3.93%、1.35% 和 10.88%。相同施肥

表 2 不同滴灌灌水量水平和滴灌施肥比例下甘蔗产量和蔗糖分

Table 2 Yield and sucrose content in sugarcane under different drip irrigation levels and fertigation proportions

滴灌灌水量水平 Drip irrigation level	滴灌施肥比例 Fertigation proportion	产量 Yield (t · hm ⁻²)	蔗糖分 Sucrose (%)
W ₀	F ₁₀	87.2±1.86d	14.42±0.37a
W ₁	F ₁₀	99.7±0.58ab	13.15±0.17b
	F ₅₅	102.4±1.69a	12.15±0.11b
	F ₃₇	97.5±2.32bc	12.48±0.12b
W ₂	F ₁₀	94.1±0.57c	12.24±0.60b
	F ₅₅	97.8±0.52abc	12.67±0.39b
	F ₃₇	96.5±2.03bc	12.87±0.22b
	F ₁₉	88.2±0.74d	13.02±0.50b

注: F₁₀. 100%基肥; F₅₅. 50%基肥, 50%追肥; F₃₇. 30%基肥, 70%追肥; F₁₉. 10%基肥, 90%追肥。表中数值为平均值±标准误, 同列数据后的不同小写字母表示差异显著 ($P < 0.05$, Duncan's 法), 相同小写字母表示差异不显著 ($P > 0.05$)。下同。

Notes: F₁₀. 100% basal fertilizer; F₅₅. 50% basal fertilizer, 50% topdressing; F₃₇. 30% basal fertilizer, 70% topdressing; F₁₉. 10% basal fertilizer, 90% topdressing. The values in the table were $\bar{x} \pm s_x$, different lowercase letters in the same column indicate significant differences ($P < 0.05$, Duncan's method), the same lowercase letters indicate that no significant differences ($P > 0.05$). The same below.

比例下, 宿根蔗产量均表现为 $W_1 > W_2$, 说明滴灌灌水条件下土壤含水量保持在田间持水量的 75% 有助于甘蔗增产。滴灌灌水所有处理宿根蔗产量均高于自然降雨处理。各处理蔗糖分均在 12% ~ 15% 之间, W_0 F₁₀ 处理蔗糖分含量最高, 但其他处理蔗糖分之间差异不显著。

2.2 不同处理对宿根甘蔗农艺性状的影响

由表 3 可知, 在单茎重指标方面, 在相同灌水水平下, F₅₅ 处理均为最高。在 W_1 水平下, F₅₅ 处理单茎重较 F₁₀ 和 F₃₇ 增加了 2.55% 和 4.69%; 在 W_2 水平下, F₅₅ 处理单茎重较 F₁₀、F₃₇ 和 F₁₉ 分别增加了 3.78%、1.05% 和 10.98%。相同施肥比例下, 单茎重表现为 $W_1 > W_2$, 说明滴灌灌水条件下土壤含水量保持在田间持水量的 75% 有助于提高单茎重。

在株高指标方面, 在 W_1 灌水水平下, F₅₅ 处理株高最高, 较 F₁₀ 和 F₃₇ 处理增高了 13.33% 和 3.33%。在蔗茎直径指标方面, 在 W_1 灌水水平下, F₅₅ 处理蔗茎直径最大, 较 F₁₀ 和 F₃₇ 处理增高了

7.48% 和 5.02%; 在 W_2 下, F₅₅ 处理蔗茎直径处于较高水平。有效茎数方面, F₅₅ 处理表现规律与蔗茎直径上一致。

所有滴灌灌水处理单茎重、茎高和蔗茎直径均大于自然降雨处理, 说明滴灌有助于提高甘蔗单茎重、株高和蔗茎直径。

2.3 不同处理对蔗田土壤氧化亚氮排放通量的影响

由图 2 可知, 甘蔗分蘖期在相同灌水量下, F₅₅ 处理土壤 N₂O 排放通量均为最低, 在 W_1 灌水量下, F₅₅ 处理较 F₁₀ 处理土壤 N₂O 排放通量降低了 373.7%; 在 W_2 灌水量下, F₅₅ 处理较 F₁₀、F₃₇ 和 F₁₀ 处理土壤 N₂O 排放通量分别降低了 78.4%、80.4% 和 200.6%。在 W_1 灌水量下, 除 F₅₅ 处理, 其他处理土壤 N₂O 排放通量均随生育期逐渐减小, 以 F₁₀ 处理减少幅度最大。F₁₀ 处理下, W_0 、 W_1 、 W_2 处理土壤 N₂O 排放通量均随生育期逐渐减小, 相比 W_0 处理, W_1 与 W_2 滴灌处理土壤 N₂O 排放通量均是在分蘖期至伸长期的过程中快速下降。

2.4 不同处理对土壤无机氮含量的影响

2.4.1 硝态氮

表 4 为不同滴灌灌水量水平和滴灌施肥比例下各生育期土壤硝态氮含量的变化情况。分蘖期, 在 W_1 灌水量下, F₃₇ 处理土壤硝态氮含量最高, 较 F₁₀ 和 F₅₅ 处理土壤硝态氮含量升高了 2.31% 和 48.42%; 在 W_2 灌水量下, F₁₀ 处理土壤硝态氮含量最高, 较 F₅₅、F₃₇ 和 F₁₉ 处理土壤硝态氮含量分别升高了 6.36%、37.26% 和 25.6%。在伸长期, 土壤硝态氮含量规律与分蘖期一致。

在整个生育期, W_1 灌水量下, F₃₇ 处理土壤硝态氮含量一直处于最高水平, 说明 W_1 灌水量下 F₃₇ 处理可以提高土壤硝态氮含量。在 F₁₀ 处理下, 各生育期滴灌灌水处理的土壤硝态氮含量均大于自然降雨处理, 说明滴灌处理可以增加土壤硝态氮含量。在整个生育期, 除 W_2 F₅₅ 和 W_2 F₁₉ 处理, 其他处理土壤硝态氮含量呈逐渐下降的趋势。

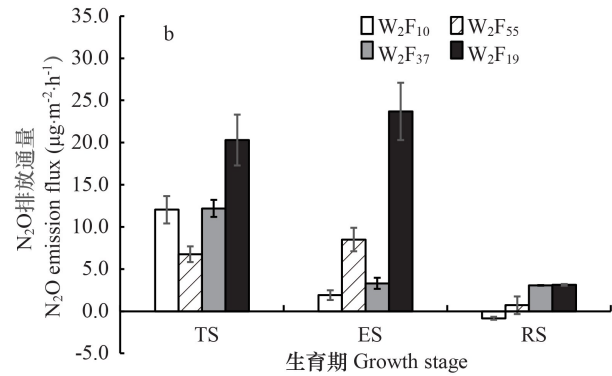
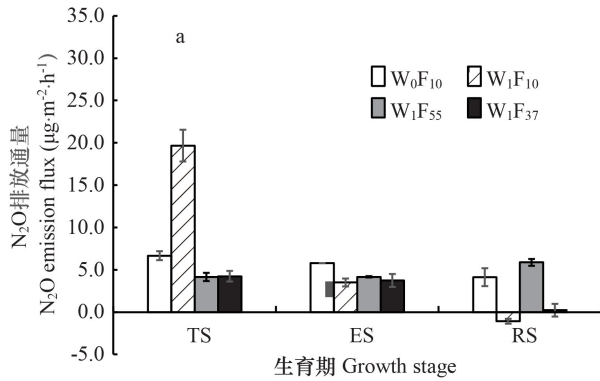
2.4.2 亚硝态氮

表 5 为不同滴灌灌水量水平和滴灌施肥比例下各生育期土壤亚硝态氮含量的变化情况。在分蘖期, 相同灌水水平下 F₅₅ 处理土壤亚硝态氮含量均处于较高水平。在伸长期, 土壤亚硝态氮含量表现与分蘖期一致, 在 W_1 灌水量下, F₅₅ 处理土壤亚硝态氮含量较 F₁₀ 和 F₃₇ 处理升高了 38.46% 和 5.89%; W_2 灌水量下, F₅₅ 处理土壤亚硝态氮含量较 F₁₀、F₃₇ 和 F₁₉ 处理分别升高了 60%、71.43% 和 65.51%。除伸长期的 F₃₇ 处理, 在整个

表 3 不同滴灌灌水量水平和滴灌施肥比例下甘蔗农艺性状

Table 3 Agronomic characters in sugarcane under different drip irrigation levels and fertigation proportions

滴灌灌水量水平 Drip irrigation level	滴灌施肥比例 Fertigation proportion	单茎重 Stalk weight (kg)	株高 Plant height (cm)	蔗茎直径 Stalk diameter (mm)	公顷有效茎数 Effective stalks per hectare
W ₀	F ₁₀	1.71±0.04d	240.7±10.18c	30.40±0.57d	48997±1681cd
W ₁	F ₁₀	1.96±0.01ab	265.5±10.94bc	31.16±0.28cd	56134±1670ab
	F ₅₅	2.01±0.03a	300.9±6.22a	33.49±0.68a	60185±2004a
	F ₃₇	1.92±0.05abc	291.2±2.77ab	31.89±0.13abcd	56713±1767ab
W ₂	F ₁₀	1.85±0.01c	287.9±10.03ab	31.58±0.61bcd	55556±1204ab
	F ₅₅	1.92±0.01abc	286.8±3.64ab	32.25±0.52abc	52662±334bc
	F ₃₇	1.90±0.04bc	291.3±5.49ab	33.15±0.65ab	45139±2673d
	F ₁₉	1.73±0.01d	252.5±16.20c	31.57±0.27bcd	49190±3007cd



W₀. 自然降雨; W₁. 滴灌灌水量 1; W₂. 滴灌灌水量 2; F₁₀. 100% 基肥; F₅₅. 50% 基肥, 50% 追肥; F₃₇. 30% 基肥, 70% 追肥; F₁₉. 10% 基肥, 90% 追肥。图中数值为平均值±标准误 ($n=3$)。TS. 分蘖期; ES. 伸长期; RS. 成熟期。

W₀. Natural rainfall; W₁. Drip irrigation level 1; W₂. Drip irrigation level 2; F₁₀. 100% basal fertilizer; F₅₅. 50% basal fertilizer, 50% topdressing; F₃₇. 30% basal fertilizer, 70% topdressing; F₁₉. 10% basal fertilizer, 90% topdressing. The values in the figure are $\bar{x} \pm s_x$ ($n=3$). TS. Tillering stage; ES. Elongation stage; RS. Ripening stage.

图 2 不同滴灌灌水量水平和滴灌施肥比例下蔗田土壤 N₂O 排放通量Fig. 2 Soil N₂O emission flux under different drip irrigation levels and fertigation proportions

生育期相同施肥处理下, 土壤亚硝态氮含量均表现为 W₂>W₁, 说明灌水量的增加可以提高土壤亚硝态氮含量。

2.4.3 铵态氮 表 6 为不同滴灌灌水量水平和滴灌施肥比例下各生育期土壤铵态氮含量的变化情况。分蘖期, 在 W₁ 灌水量下, 土壤铵态氮含量有 F₁₀>F₅₅>F₃₇ 的规律, F₁₀ 处理较 F₅₅ 和 F₃₇ 处理土壤铵态氮含量分别升高了 62.67% 和 85.36%。伸长期, 在 W₁ 灌水量下土壤铵态氮含量表现为 F₃₇>F₅₅>F₁₀; 在 W₂ 下各处理土壤铵态氮含量差异不显著。在成熟期, 相同灌水量下土壤铵态氮含量都有 F₁₀>F₅₅>F₃₇ 的规律, 在 W₁ 下 F₃₇ 处理土壤铵态氮含量

较 F₁₀ 和 F₅₅ 处理分别升高了 14.44% 和 2.31%, 在 W₂ 下 F₁₉ 处理土壤铵态氮含量最高, 较 F₁₀、F₅₅ 和 F₃₇ 处理升高了 7.55%、5.11% 和 3.12%。在伸长期和成熟期, 相同施肥处理下土壤铵态氮含量表现为 W₂>W₁, 说明灌水量的增加可以提高土壤铵态氮含量。F₁₀ 处理下, 各个生育期滴灌灌水处理土壤铵态氮含量均大于自然降雨处理, 说明滴灌处理可以增加土壤铵态氮含量。

2.5 不同处理下蔗田土壤氧化亚氮排放通量与无机氮含量的相关性

将不同处理甘蔗 3 次生育期采集土样当天的蔗田土壤 N₂O 排放通量和对应生育期土壤硝态氮、

表 4 不同滴灌灌水量水平和滴灌施肥比例下土壤硝态氮含量 (单位: $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)Table 4 Soil nitrate contents under different drip irrigation levels and fertigation proportions (Unit: $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)

滴灌灌水量水平 Drip irrigation level	滴灌施肥比例 Fertigation proportion	分蘖期 Tillering stage	伸长期 Elongation stage	成熟期 Ripening stage
W ₀	F ₁₀	72.17±7.21c	81.03±8.86bc	28.47±0.36d
W ₁	F ₁₀	168.53±53.41ab	94.45±26.57bc	80.70±5.85abc
	F ₅₅	116.18±2.31abc	92.03±0.75bc	80.38±16.07abc
	F ₃₇	172.43±4.00a	131.50±0.85a	111.41±15.04ab
W ₂	F ₁₀	134.47±19.68abc	113.47±10.29ab	73.18±2.32bc
	F ₅₅	126.43±17.67abc	86.57±9.50bc	119.34±14.89a
	F ₃₇	97.97±2.55bc	71.10±8.95c	55.51±12.22c
	F ₁₉	107.06±1.58abc	56.00±2.42c	100.59±15.57ab

表 5 不同滴灌灌水量水平和滴灌施肥比例下土壤亚硝态氮含量 (单位: $\mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)Table 5 Soil nitrite contents under different drip irrigation levels and fertigation proportions (Unit: $\mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)

滴灌灌水量水平 Drip irrigation level	滴灌施肥比例 Fertigation proportion	分蘖期 Tillering stage	伸长期 Elongation stage	成熟期 Ripening stage
W ₀	F ₁₀	176.67±31.80a	143.33±13.33ab	110.00±11.55cd
W ₁	F ₁₀	86.67±3.33b	86.67±3.33c	103.33±3.33cd
	F ₅₅	103.33±18.56b	120.00±17.32abc	90.00±17.32d
	F ₃₇	106.67±3.33b	113.33±14.53abc	120.00±5.77bcd
W ₂	F ₁₀	113.33±14.53b	100.00±20.00bc	196.67±26.67a
	F ₅₅	130.00±5.77ab	160.00±23.09a	150.00±17.32abc
	F ₃₇	120.00±17.32b	93.33±8.82c	160.00±17.32ab
	F ₁₉	106.67±14.53b	96.67±3.33bc	123.33±3.33bcd

亚硝态氮和铵态氮含量进行相关性分析(表 7)。由表 7 可知,蔗田 N_2O 排放通量与土壤 NH_4^+ 含量之间呈显著负相关,相关系数为 -0.497 ,而与土壤 NO_3^- 和 NO_2^- 含量之间相关不显著。

3 讨论与结论

甘蔗产量高低主要由单位面积的有效茎数和单茎重决定,而蔗茎直径、株高又是单茎重的决定因素,蔗茎直径、株高和公顷有效茎数是甘蔗产量的基础,对甘蔗产量起决定性作用(陆章流, 2006)。合理施用氮肥是实现作物高产的重要措施之一。施用氮肥可以提高作物产量,氮肥的施用比例对作物生产有着重要影响(龙鹏宇等, 2020)。本研究结果表明,在等氮量为 $300 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 的条件下,分次施用氮肥较一次性基施能提高

甘蔗产量,氮肥基追比相同时,较氮肥一次性基施平均增产甘蔗 3.32%,提高氮肥利用效率。由此可见,合理的氮肥施用比例是甘蔗高产稳产的关键。陈桂芬等(2010)研究表明,滴灌能促进甘蔗茎伸长、增粗,从而提高产量。本研究发现,滴灌处理甘蔗产量均大于自然降雨处理。自然降雨存在降雨时空分布不均的情况,虽然试验期间总降雨量为 910.4 mm,但分蘖期降雨仅 183.8 mm,使甘蔗分蘖数减少,从而导致有效茎数减少和产量下降,滴灌处理则根据甘蔗需水规律灌溉。

在本研究中,土壤 N_2O 排放通量在甘蔗分蘖期有较高排放峰,这主要是因为基肥施入后,分蘖期植株对氮素利用较少,土壤中大量无机氮累积导致 N_2O 大量排放,并且基肥中施有牛粪,田间施用有机肥后显著增加了土壤异养微生物的呼吸,同时有机肥中有效性碳为反硝化微生物提供了电

表 6 不同滴灌灌水量水平和滴灌施肥比例下土壤铵态氮含量 (单位: $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)Table 6 Soil ammonium contents under different drip irrigation levels and fertigation proportions (Unit: $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)

滴灌灌水量水平 Drip irrigation level	滴灌施肥比例 Fertigation proportion	分蘖期 Tillering stage	伸长期 Elongation stage	成熟期 Ripening stage
W_0	F_{10}	$7.92 \pm 1.29\text{b}$	$7.65 \pm 0.38\text{c}$	$13.79 \pm 0.09\text{d}$
W_1	F_{10}	$13.29 \pm 2.53\text{a}$	$8.71 \pm 0.16\text{bc}$	$13.92 \pm 0.44\text{d}$
	F_{55}	$8.17 \pm 0.47\text{b}$	$8.76 \pm 0.16\text{bc}$	$15.57 \pm 0.08\text{c}$
	F_{37}	$7.17 \pm 0.95\text{b}$	$9.59 \pm 0.24\text{b}$	$15.93 \pm 0.55\text{c}$
W_2	F_{10}	$9.84 \pm 0.85\text{ab}$	$12.00 \pm 0.80\text{a}$	$17.21 \pm 0.28\text{b}$
	F_{55}	$10.73 \pm 1.43\text{ab}$	$12.33 \pm 1.32\text{a}$	$17.61 \pm 0.26\text{ab}$
	F_{37}	$6.98 \pm 0.76\text{b}$	$11.73 \pm 0.38\text{a}$	$17.95 \pm 0.67\text{ab}$
	F_{19}	$8.78 \pm 0.48\text{b}$	$12.07 \pm 0.11\text{a}$	$18.51 \pm 0.29\text{a}$

表 7 蔗田土壤 N_2O 排放通量与无机氮含量的相关性分析Table 7 Correlation analysis of soil N_2O emission flux and inorganic nitrogen content

指标 Index	$\text{NO}_3^- - \text{N}$	$\text{NO}_2^- - \text{N}$	$\text{NH}_4^+ - \text{N}$
N_2O 排放通量 N_2O emission flux	0.142	-0.165	-0.497 *

注: * 表示显著相关 ($P < 0.05$, $n = 24$); $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 表示铵态氮; $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 表示硝态氮; $\text{NO}_2^- - \text{N}$ 表示亚硝态氮。

Note: * indicates significant correlation ($P < 0.05$, $n = 24$); $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ indicates ammonium nitrogen; $\text{NO}_3^- - \text{N}$ indicates nitrate nitrogen; $\text{NO}_2^- - \text{N}$ indicates nitrite nitrogen.

子供体,进而促进了反硝化作用的发生,导致 N_2O 排放增加(曹文超等,2019)。前人研究表明通常 N_2O 产生随着土壤温度升高而增加(郎漫等,2012),而本研究发现在甘蔗成熟前期, N_2O 排放通量明显减少,可能是由于气温降低影响了土壤微生物代谢强度从而改变硝化反硝化过程。硝酸盐异化还原成铵(DNRA)作用是指 NO_3^- 在厌氧条件下被微生物异化还原为 NH_4^+ 的过程(Baggs, 2008)。DNRA 过程除产生 NH_4^+ 外,还经常伴有 NO_2^- 的短暂积累和 N_2O 排放。本研究得到,在等氮肥条件下,蔗田土壤 N_2O 排放通量与土壤铵态氮含量之间呈显著负相关,可能是由于试验中施有大量牛粪,土壤有机质含量丰富,易发生 DNRA (Morley & Baggs, 2010),导致硝酸还原酶活性上升,铵态氮含量增加, N_2O 排放通量却下降,故 N_2O 排放通量与土壤铵态氮含量之间为负相关关系。

土壤水分及温度影响微生物活性和通气状

况,进而影响土壤 N_2O 的排放过程(于亚军等,2008)。一般来说,土壤温度 $15 \sim 35 \text{ }^\circ\text{C}$ 是硝化作用微生物活动的适宜温度范围(巨晓棠和张福锁,2003),而本研究作物生育期大多时间土壤温度处于这一区间,且采用滴灌灌水的方式增加了土壤孔隙度和通气性(杨久廷等,2008),利于土壤硝化作用的进行,同时氮素的淋溶损失减少,导致土壤硝态氮大量累积。本研究发现,土壤硝态氮含量在成熟期有一定程度的下降,亚硝态氮含量与伸长期相差不大,而铵态氮含量有所上升,究其原因,可能是由于成熟前期甘蔗对氮素的吸收利用下降,追肥后导致铵态氮的累积,同时酸性土壤中易发生硝态氮异化还原成铵的反应,使硝态氮和亚硝态氮向铵态氮转化(杨杉等,2016)。

合理的滴灌施肥比例能有效提高甘蔗产量并减少土壤 N_2O 的排放。本研究在等氮条件下,施氮基追比相同处理宿根甘蔗在灌水水平为 75% 和 85% 下宿根蔗产量分别为 $102.4 \cdot \text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 和 $97.8 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$,不仅相对高产,而且在土壤 N_2O 排放通量较高的分蘖期减小土壤 N_2O 的排放通量。

蔗田土壤 N_2O 排放通量 and 对应生育期土壤硝态氮、亚硝态氮、铵态氮含量相关性分析结果表明,蔗田土壤铵态氮含量显著影响 N_2O 排放通量。

参考文献:

- BAGGS EM, 2008. A review of stable isotope techniques for N_2O source partitioning in soils: recent progress, remaining challenges and future considerations [J]. Rapid Commun Mass Sp, 22(11): 1664-1672.

- CAO WC, SONG H, WANG YJ, et al., 2019. Key production processes and influencing factors of nitrous oxide emissions from agricultural soils [J]. *J Plant Nutr Fert*, 25 (10): 1781-1798. [曹文超, 宋贺, 王娅静, 等, 2019. 农田土壤 N_2O 排放的关键过程及影响因素 [J]. *植物营养与肥料学报*, 25(10): 1781-1798.]
- CHEN GF, HUANG YY, LIU B, et al., 2010. Effects of sub-soil drip fertigation on sugarcane in field conditions [J]. *J S Agric*, 41(6): 573-576. [陈桂芬, 黄玉溢, 刘斌, 等, 2010. 甘蔗地理式滴灌施肥效应 [J]. *南方农业学报*, 41(6): 573-576.]
- GAO B, JU XT, SU F, et al., 2014. Nitrous oxide and methane emissions from optimized and alternative cereal cropping systems on the North China Plain: A two-year field study [J]. *Sci Total Environ*, 472: 112-124.
- GHOSH S, MAJUMDAR D, JAIN MC, 2003. Methane and nitrous oxide emissions from an irrigated rice of North India [J]. *Chemosphere*, 51(3): 181-195.
- IPCC, 2008. *Climate change 2007: impacts, adaptation and vulnerability* [M]. Cambridge: Cambridge University Press: 7-22.
- JU XT, ZHANG FS, 2003. Thinking about nitrogen recovery rate [J]. *Ecol Environ Sci*, (2): 192-197. [巨晓棠, 张福锁, 2003. 关于氮肥利用率的思考 [J]. *生态环境*, (2): 192-197.]
- KALLENBACH CM, ROLSTON DE, HORWATH WR, 2010. Cover cropping affects soil N_2O and CO_2 emissions differently depending on type of irrigation [J]. *Agric Ecosyst Environ*, 137 (3/4): 251-260.
- LANG M, LI P, ZHANG XC, 2012. Effects of land use type and incubation temperature on soil nitrogen transformation and greenhouse gas emission [J]. *Chin J Appl Ecol*, 23(10): 2670-2676. [郎漫, 李平, 张小川, 2012. 土地利用方式和培养温度对土壤氮转化及温室气体排放的影响 [J]. *应用生态学报*, 23(10): 2670-2676.]
- LONG PY, NONG ML, LI FS, et al., 2020. Relationship between nitrous oxide emission and denitrifying enzyme activities in sugarcane field soil under drip fertigation [J]. *Chin J Soil Sci*, 51(1): 122-129. [龙鹏宇, 农梦玲, 李伏生, 等, 2020. 滴灌施肥蔗田土壤氧化亚氮排放与反硝化酶活性的关系 [J]. *土壤通报*, 51(1): 122-129.]
- LU ZL, 2006. Preliminary study on the relationship between sugarcane yield per unit area and effective stem number [J]. *Guangxi Sugar Ind*, (3): 19-21. [陆章流, 2006. 单位面积甘蔗产量与有效茎数的关系初探 [J]. *广西蔗糖*, (3): 19-21.]
- LÜ XD, WANG T, 2018. Research progress on nitrous oxide emissions from greenhouses in dryland [J]. *Gansu Agric Sci Technol*, (10): 67-73. [吕晓东, 王婷, 2018. 旱地农田氧化亚氮排放研究进展 [J]. *甘肃农业科技*, (10): 67-73.]
- MOLEY N, BAGGS EM, 2010. Carbon and oxygen controls on N_2O and N_2 production during nitrate reduction [J]. *Soil Biol & Biochem*, 42(10): 1864-1871.
- SIGNOR D, CERRI CEP, 2013. Nitrous oxide emissions in agricultural soils: A review [J]. *Pesquisa Agropecuaria Trop*, 43(3): 322-338.
- SNYDER CS, BRUULSEMA TW, JENSEN TL, et al., 2009. Review of greenhouse gas emissions from crop production systems and fertilizer management effects [J]. *Agric Ecosyst Environ*, 133: 247-266.
- XU X, SHI Z, LI DJ, et al., 2016. Soil properties control decomposition of soil organic carbon: Results from data-assimilation analysis [J]. *Geoderma*, 262: 235-242.
- YANG JM, ZHANG ZQ, CAO GJ, 2014. Soil nitrate and nitrite content determined by Skalar SAN [J]. *Soil Fert Sci Chin*, (2): 101-105. [杨靖民, 张忠庆, 曹国军, 2014. 应用间隔流动分析仪测定土壤硝态氮和亚硝态氮含量 [J]. *中国土壤与肥料*, (2): 101-105.]
- YANG JT, XIAO JB, XIN ZX, et al., 2008. Effects of drip irrigation and flood irrigation on soil physicochemical properties in solar greenhouse [J]. *Liaoning Agric Sci*, (3): 77-78. [杨久廷, 肖继兵, 辛宗绪, 等, 2008. 日光温室番茄滴灌与漫灌对土壤理化性质的影响 [J]. *辽宁农业科学*, (3): 77-78.]
- YANG S, WU SJ, CAI YJ, et al., 2016. The synergetic and competitive mechanism and the dominant factors of dissimilatory nitrate reduction processes: A review [J]. *Acta Ecol Sin*, 36(5): 1224-1232. [杨杉, 吴胜军, 蔡延江, 等, 2016. 硝态氮异化还原机制及其主导因素研究进展 [J]. *生态学报*, 36(5): 1224-1232.]
- YANG XY, JIANG DH, YANG GR, et al., 2018. Effects of water and fertilizer integration on soil microbial biomass carbon, nitrogen and enzyme activities in sugarcane [J]. *Chin J Soil Sci*, 49(4): 889-896. [杨雪艳, 蒋代华, 杨钙仁, 等, 2018. 甘蔗水肥一体化种植对土壤微生物量碳氮和酶活性的影响 [J]. *土壤通报*, 49(4): 889-896.]
- YU YJ, ZHU B, JING GJ, 2008. N_2O emission from soil-vegetable system and impact factors in Chengdu Plain of Sichuan Basin [J]. *Chin Environ Sci*, (4): 313-318. [于亚军, 朱波, 荆光军, 2008. 成都平原土壤—蔬菜系统 N_2O 排放特征 [J]. *中国环境科学*, (4): 313-318.]

(责任编辑 蒋巧媛)