

陈思静, 李伏生, 农梦玲. 滴灌追氮管理对宿根蔗田土壤氮组分及 N_2O 排放的影响 [J]. 华南农业大学学报, 2023, 44(2): 230-238.
CHEN Sijing, LI Fusheng, NONG Mengling. Effect of nitrogen fertigation management on soil nitrogen fractions and N_2O emissions from ratoon sugarcane fields[J]. Journal of South China Agricultural University, 2023, 44(2): 230-238.

滴灌追氮管理对宿根蔗田土壤氮组分及 N_2O 排放的影响

陈思静✉, 李伏生, 农梦玲✉
(广西大学 农学院, 广西 南宁 530005)

摘要:【目的】研究滴灌追氮管理对宿根蔗田土壤氮组分和 N_2O 排放的影响, 揭示影响土壤 N_2O 通量的土壤因子。【方法】以二代宿根蔗 *Saccharum officinarum* 为研究对象, 在移动防雨棚内进行 2 个滴灌灌水量 [田间持水量的 70%~80%(W0.8) 和田间持水量的 80%~90%(W0.9)] 及 3 种滴灌追氮比例 (等氮量 $250\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, 其中, N0 为用作追肥的氮肥全部施用到土壤中, N5 为 50% 土施追氮、50% 用滴灌系统施用, N7 为 30% 土施追氮、70% 滴灌追氮) 的田间试验。在甘蔗生长的各个时期测定蔗田土壤 N_2O 通量、pH 和氮组分含量, 并分析土壤 N_2O 通量与土壤 pH 和氮组分含量的关系。【结果】土壤 N_2O 通量在施用氮肥和灌水后 2 d 较高, 其中, 分蘖后期和成熟期 W0.9N5 处理的土壤 N_2O 通量显著低于其他处理。W0.9 条件下, 分蘖后期 N5 处理的土壤 N_2O 累积排放量分别比 N0 和 N7 低 47.3% 和 11.8%, 伸长后期 N5 处理的土壤 N_2O 累积排放量比 N7 低 21.5%。相同滴灌追氮比例下, 土壤硝态氮含量表现为 W0.9>W0.8, 随着灌水量的增加, 土壤硝态氮含量有所增加。在伸长初期和成熟期, W0.8 N5 处理的土壤铵态氮含量比 W0.8 N0 高 56.4% 和 71.8%、比 W0.8 N7 高 68.5% 和 160.3%。在分蘖后期, 相同滴灌灌水量下, 土壤微生物量氮含量表现为 N5>N7>N0, W0.8 和 W0.9 两种灌水量下, N5 处理的土壤微生物量氮含量分别较 N0 处理高 120.0% 和 100%。土壤 N_2O 通量与铵态氮含量之间呈正相关关系 ($r=0.313$), 与硝态氮含量之间呈负相关关系 ($r=-0.391$)。【结论】W0.9N5 处理可以降低土壤 N_2O 排放, 且土壤铵态氮和硝态氮含量影响土壤 N_2O 通量, 即土壤铵态氮含量越高, 土壤 N_2O 通量越高, 而土壤硝态氮含量越高, 土壤 N_2O 通量却越低。

关键词: 宿根蔗; 滴灌施肥; 蔗田土壤; 无机氮; N_2O 排放

中图分类号: S275.6; S143.1

文献标志码: A

文章编号: 1001-411X(2023)02-0230-09

Effect of nitrogen fertigation management on soil nitrogen fractions and N_2O emissions from ratoon sugarcane fields

CHEN Sijing✉, LI Fusheng, NONG Mengling✉
(College of Agriculture, Guangxi University, Nanning 530005, China)

Abstract: 【Objective】To study the effects of drip irrigation nitrogen (N) chasing management on soil N fraction and N_2O emission in host cane fields, and reveal the soil factors affecting soil N_2O fluxes. 【Method】Two water drip irrigation levels of W0.8 (70%–80% of field water holding capacity) and W0.9 (80%–90% of

收稿日期: 2021-12-17 网络首发时间: 2022-12-26 16:43:11

首发网址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail//44.1110.S.20221226.0923.003.html>

作者简介: 陈思静, 硕士研究生, 主要从事水肥资源利用研究, E-mail: 3294992091@qq.com; 通信作者: 农梦玲, 高级实验师, 博士, 主要从事水肥利用理论与技术研究, E-mail: mengling189@126.com

基金项目: 国家自然科学基金 (31760603)

field water holding capacity) and three drip irrigation N chasing ratios (250 kg·hm⁻² of equal N) were carried out in a mobile rain-proof shelter with the second generation host cane (*Saccharum officinarum*) as the research object. N0 was all the N fertilizer applied to the soil (referred to as soil-applied N); N5 was 50% soil-applied N and 50% applied by drip irrigation system (referred to as drip-applied N); N7 was 30% soil-applied N and 70% drip-applied N in the field trials. Soil N₂O flux, pH and nitrogen fraction content were measured at each period of sugarcane growth, and the relationship between soil N₂O flux and soil pH/nitrogen fraction content was analyzed. 【Result】 Soil N₂O flux was higher after two days of applying N fertilizer and water irrigation, and the soil N₂O flux of W0.9N5 was significantly lower than other treatments at the late tillering stage and maturity stage. Under W0.9, the cumulative soil N₂O emissions in N5 at the late tillering stage were 47.3% and 11.8% lower than those of N0 and N7, and 21.5% lower than those of N7 at the late elongation stage. Soil nitrate N content showed W0.9 > W0.8 for the same drip irrigation N rate, and increased with the increase of water irrigation. At the early elongation and maturity stage, the soil ammonium N content of N5 under W0.8 was 56.4% and 71.8% higher than those of N0, was 68.5% and 160.3% higher than those of N7. At the late tillering stage, soil microbial biomass nitrogen showed N5 > N7 > N0 under the same water drip irrigation level, and soil microbial biomass nitrogen of N5 was 120.0% and 100% higher than N0 under both water irrigation rates, respectively. There was a positive correlation between soil N₂O flux and ammonium N content ($r=0.313$) and a negative correlation with nitrate N ($r=-0.391$). 【Conclusion】 W0.9N5 treatment can reduce soil N₂O emissions, and soil ammonium N content and nitrate N content affect soil N₂O flux, i.e., higher soil ammonium N content is associated with higher soil N₂O flux, while higher soil nitrate N content is associated with lower soil N₂O flux.

Key words: Ratoon sugarcane; Fertigation; Sugarcane field soil; Inorganic nitrogen; N₂O emission

氧化亚氮 (N₂O) 作为主要温室气体之一, 以 100 年时间尺度为计, 1 kg N₂O 的增温潜势是 1 kg CO₂ 的 265 倍^[1]。农田作为产生 N₂O 的重要场所, 每年全球农田产生的 N₂O(以 N 计) 达到了 3.3 Tg, 占全球 N₂O 总排放量的 43% 以上^[2], 而我国农业活动产生的 N₂O 更是占到全国总排放量的 65.4%^[3]。同时, 我国农业生产也面临水资源短缺, 农业面源污染日趋严重的矛盾和巨大挑战, 滴灌施肥技术可减少肥料用量和灌水量, 降低土壤硝态氮的累积和 N₂O 的排放^[4]。因此, 研究合理的滴灌施肥管理措施对于降低农田 N₂O 排放和缓解全球变暖有重要意义。

N₂O 排放过程是 N₂O 的产生、转化和传输过程的综合表现, 受到灌溉方式、氮肥施用和 pH 等的影响^[5]。如: 滴灌棉田 N₂O 排放量比沟灌棉田降低 70%^[5]; 随着土壤水分含量的增加, 土壤 N₂O 排放有显著的增加^[6]; 陈津赛等^[7]发现, 土壤 N₂O 平均通量和累计排放量都受到追氮量的显著影响, 且 N₂O 排放量随着追氮量的增加而增加。氮肥的施入不仅改变了硝化和反硝化进程的底物浓度, 还通过改变土壤厌氧程度和反硝化速率影响 N₂O 的排放^[8]。以往关于土壤 pH 对 N₂O 排放的影响, 研究结果不

一。Shaaban 等^[9]发现, 在酸性土壤中添加白云石粉使土壤 pH 增加, N₂O 排放量减少, 而 Baggs 等^[10]证明, 在酸性土壤中 pH 的增加会导致土壤矿质 N 含量增加, 间接增加 N₂O 排放。

广西蔗区宿根蔗 *Saccharum officinarum* 的种植面积约达到了甘蔗种植面积的 50% 以上, 降低蔗区农田 N₂O 排放技术研究具有重要意义。以往研究主要围绕施肥量、有机无机肥配施以及灌溉方式等对农田 N₂O 排放的影响开展试验, 但随着水肥一体化技术推广应用, 有关滴灌施肥条件下宿根蔗田土壤 N₂O 排放特征以及土壤 N₂O 通量与土壤因子关系的研究报道较少。本研究目的是通过开展滴灌灌水量和滴灌追氮比例的田间试验, 测定在甘蔗生长时期的蔗田土壤 N₂O 通量、pH 和氮组分, 分析土壤 N₂O 通量与土壤 pH 和氮组分的关系, 揭示影响土壤 N₂O 通量的土壤因子。

1 材料与方法

1.1 试验地点与材料

于 2020 年 5—12 月在广西大学试验区移动防雨棚中开展了不同滴灌灌水量和滴灌追氮比例的田间试验。该移动防雨棚通过电控传感器控制棚在

降雨时选择避雨,天气晴朗时使作物接受阳光。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 1.40 g·cm⁻³,田间持水量 30.3%,pH 6.73,主要营养成分的质量分数为有机质 14.33 g·kg⁻¹、碱解氮 87.29 mg·kg⁻¹、速效磷 98.52 mg·kg⁻¹、速效钾 192.10 mg·kg⁻¹,供试甘蔗为‘桂糖 42 号’二代宿根蔗。

1.2 试验方法

试验设 2 种滴灌灌水量 [田间持水量的 70%~80%(W0.8) 和 80%~90%(W0.9)] 及 3 种滴灌追氮比例 [即: N0 为用作追肥的氮肥全部施用到土壤中 (简称土施追氮); N5 为 50% 土施追氮, 50% 滴灌系统追施氮肥 (简称滴灌追氮); N7 为 30% 土施追氮, 70% 滴灌追氮]。试验共 6 个处理, 每个处理 3 个重复, 共 18 个小区, 随机区组排列, 各小区面积 8.64 m²。各处理纯 N 施用量均为 50 kg·hm⁻², 以尿素 (N 质量分数为 46%) 供应; P₂O₅ 150 kg·hm⁻², 以钙镁磷肥 (P₂O₅ 质量分数为 18%) 供应; K₂O 200 kg·hm⁻², 以硫酸钾 (K₂O 质量分数为 52%) 供应。钙镁磷肥和硫酸钾均在 5 月 19 日全部施入土壤中。土施追氮部分的氮肥按照相应的比例在 5 月 19 日施用到土壤中, 滴灌追氮部分的氮肥在分蘖后期 (5 月 24 日)、伸长初期 (7 月 19 日)、伸长后期 (9 月 11 日) 和成熟前期 (11 月 4 日) 分别以 30%、30%、30% 和 10% 的比例以滴灌施肥的方式施入。滴灌带放置在甘蔗植株一侧, 试验期间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, 同时每个小区配有水表, 用来记录和控制灌溉水量, 在成熟期减少灌水次数。

1.3 样品采集与测定

1.3.1 气体采集与测定 分别在灌水和施用氮肥后第 2、7 和 14 天用静态箱法采集土壤中排放的 N₂O 气体。静态箱由不锈钢制成, 包括底座和盖箱两部分。底座顶部设置凹形水槽, 其边长 37 cm, 高 30 cm, 甘蔗行距为 90 cm, 株距为 12.5 cm, 种植前做垄作处理, 在距离甘蔗植株 10 cm 处, 将底座埋入地下 30 cm, 保证水槽露出地面, 盖箱为顶部密封的正方形柱体, 箱体体积为 35 cm×35 cm×25 cm, 每个静态箱装有温度探头、小风扇 (用于气体混合均匀) 和取样端口。采样时间为 09:00—11:00, 采样时将箱体放至底座上并将底座的凹槽灌水以保证其密封状态, 分别于 0、10、20 和 30 min 时, 用注射器取样, 将气体样品注入预先抽真空的采样瓶中保存, 带回实验室进行测定。

N₂O 浓度用 Agilent 7890A 气相色谱仪分析, 检测器采用电子捕获检测器 (ECD)。每次测定时用国家标准计量中心的标准气体标定, N₂O 测定的相对误差控制在 2% 以内, N₂O 通量的计算公式为:

$$N = \rho H \times \frac{\Delta c}{\Delta t} \times \frac{273}{273 + T}, \tag{1}$$

式中: N 为 N₂O 通量, μg·m⁻²·h⁻¹; ρ 为 N₂O 标准状态下的密度 1.964 kg·m⁻³; H 为取样箱高度, m; $\Delta c/\Delta t$ 为单位时间静态箱内的 N₂O 气体浓度; T 为采样箱内温度, °C^[11]。

N₂O 累计排放量计算公式如下:

$$S = \frac{\Sigma(N_{i+1} + N_i)}{2(t_{i+1} - t_i) \times 24 \times 10^{-3}}, \tag{2}$$

式中: S 为 N₂O 累计排放量, mg·m⁻²; N_i 和 N_{i+1} 分别为第 i 和 $i+1$ 次采样时的 N₂O 通量, μg·m⁻²·h⁻¹; t_i 和 t_{i+1} 分别为第 i 和 $i+1$ 次采样时间, d^[12]。

1.3.2 土壤采集与测定 分别在分蘖后期 (6 月 6 日)、伸长初期 (7 月 26 日)、伸长后期 (9 月 25 日) 和成熟期 (11 月 18 日) 用不锈钢土钻按 5 点法采集 0~20 cm 深的耕作层土壤, 采集的土壤鲜样去除作物根系、杂草和小石子等, 装入低温贮藏箱并迅速运回实验室。部分新鲜土壤样品过 1 mm 筛后, 用于测定土壤氮组分, 剩下土样风干、过筛后, 用于土壤 pH 的测定。

土壤无机氮 (铵态氮、硝态氮) 用氯化钾溶液提取-分光光度法测定^[13], 微生物量氮用氯仿熏蒸法提取-分光光度法测定, 土壤 pH 用电极法测定 (水土质量比为 2.5:1.0)^[14]。

1.4 数据处理与分析

试验数据用 Excel 2016 和 SPSS 23.0 软件进行分析。方差分析包括滴灌灌水量和滴灌追氮比例主效应, 以及它们之间的交互效应。用 Duncan's 法对不同处理的平均值进行多重比较。用 Spearman 相关性系数 (r) 表示土壤 N₂O 通量与土壤 pH 和氮组分之间的相关性。

2 结果与分析

2.1 不同滴灌灌水量和滴灌追氮比例对土壤 N₂O 通量的影响

图 1 为不同滴灌灌水量和滴灌追氮比例下土壤 N₂O 通量的变化情况。各处理宿根蔗田土壤 N₂O 通量的变化规律基本一致, 从分蘖后期到成熟期, 土壤 N₂O 通量总体上逐渐减少。各处理土壤 N₂O 通量在施用氮肥后第 2 天较高, 随着时间延长呈下降趋势。土壤 N₂O 通量在分蘖后期灌水后 2 d

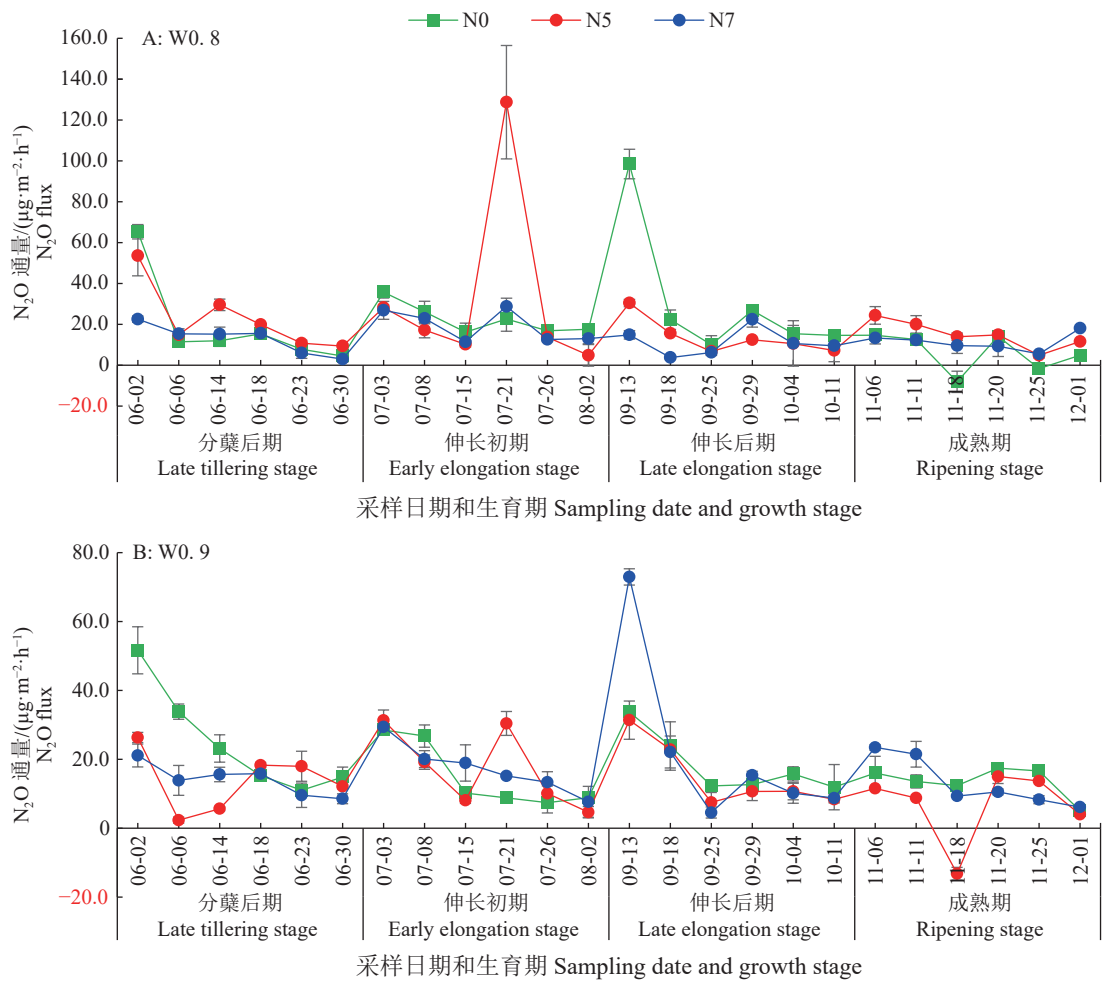


图 1 不同滴灌灌水量 (W) 和滴灌追氮比例 (N) 下土壤 N₂O 通量的变化

Fig. 1 Changes of cumulative N₂O emission in soil under different water drip irrigation amounts (W) and N fertigation proportions (N)

(6 月 2 日)、在伸长期灌水后 2 d (7 月 3 日) 和追施氮肥后 2 d (9 月 13 日) 较高。说明蔗田土壤 N₂O 前期以排放为主, 后期 N₂O 以消耗为主。7 月 21 日 N5 的土壤 N₂O 通量最高, 一方面可能是灌溉水的摄入, 干湿交替作用明显导致 N₂O 的明显排放; 另一方面可能是前期氮肥施入土壤后会迅速释放出无机氮 (主要是铵态氮), 而铵态氮是硝化作用的底物, 其浓度上升会促进硝化作用, 并影响到中

间产物 N₂O 的排放。

2.2 不同滴灌灌水量和滴灌追氮比例对土壤 N₂O 累积排放量的影响

由表 1 可知, 滴灌灌水量仅显著影响伸长期初期蔗田土壤 N₂O 累积排放量, 而滴灌追氮比例对除成熟期外的其余 3 个时期土壤 N₂O 累积排放量的影响均显著, 除伸长期初期外其余 3 个时期土壤 N₂O 累积排放量受到滴灌灌水量和滴灌追氮比例之间交

表 1 滴灌灌水量 (W) 和滴灌追氮比例 (N) 对土壤 N₂O 累积排放量影响的方差分析

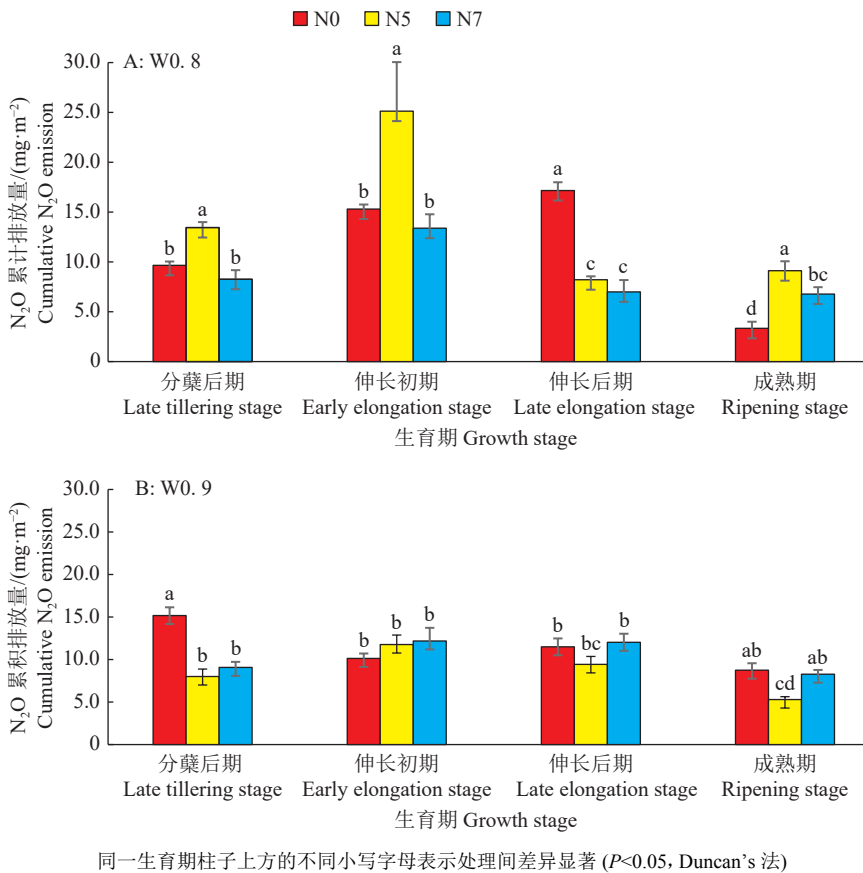
Table 1 ANOVA of the effects of different drip irrigation amounts (W) and N fertigation proportions (N) on cumulative soil N₂O emission

参数 Parameter	P			
	分蘖后期 Late tillering stage	伸长期初期 Early elongation stage	伸长期后期 Late elongation stage	成熟期 Ripening stage
W	0.641	0.004	0.800	0.092
N	0.001	0.040	0.000	0.118
W×N	0.000	0.053	0.000	0.000

互作用的影响。

由图 2 可知, 在分蘖后期, 滴灌灌水量为田间持水量的 70%~80% (W0.8) 时, 追氮处理 N7 的 N₂O 累积排放量较 N5 低 38.5%, 滴灌灌水量为田间持水量的 80%~90% (W0.9) 时, 追氮处理 N5 的土壤 N₂O 累积排放量分别较 N0 和 N7 低 47.3% 和 11.8%。在伸长初期, 处理 W0.8N5 的土壤 N₂O 累计排放量显著高于其余处理, 相同滴灌追氮

比例下, 土壤 N₂O 累积排放量表现为滴灌灌水处理 W0.8> W0.9。在伸长后期, 滴灌灌水处理 W0.8 条件下, 处理 N7 的土壤 N₂O 累积排放量分别较 N0 和 N5 低 59.3% 和 14.8%; W0.9 条件下, 处理 N5 的土壤 N₂O 累积排放量较 N7 低 21.5%。成熟期时, W0.9 条件下, 处理 N5 的土壤 N₂O 累积排放量分别较 N0 和 N7 低 39.5% 和 36.0%。



同一生育期柱子上的不同小写字母表示处理间差异显著 ($P<0.05$, Duncan's 法)

Different lowercase letters above the columns at the same growth stage show significant difference among treatments ($P<0.05$, Duncan's method)

图 2 不同滴灌灌水量 (W) 和滴灌追氮比例 (N) 下土壤 N₂O 累积排放量的变化

Fig. 2 Changes of cumulative N₂O emission in soil under different water drip irrigation amounts (W) and N fertigation proportions (N)

2.3 不同滴灌灌水量和滴灌追氮比例对土壤氮组分和 pH 的影响

由表 2 可知, 滴灌灌水量对各时期土壤硝态氮含量的影响均显著, 滴灌追氮比例对分蘖后期和伸长初期土壤硝态氮含量的影响显著。伸长期土壤硝态氮含量还受到滴灌灌水量和滴灌追氮比例之间交互作用的影响。

相同滴灌追氮比例下, 土壤硝态氮含量表现为 W0.9>W0.8, 随着灌水量的增加, 土壤硝态氮含量有所增加。相同滴灌灌水量下, 分蘖后期土壤硝态氮含量均表现为 N5>N7>N0, 其中 W0.8 条件下, N5 和 N7 的土壤硝态氮含量分别较 N0 提高

163.9% 和 108.3%。在伸长初期, W0.8 条件下的土壤硝态氮含量表现为 N7>N5>N0, N7 和 N5 的土壤硝态氮含量分别较 N0 高 362.2% 和 59.8%; W0.9 条件下, N7 土壤硝态氮含量较 N0 高 86.7%。在伸长后期, N0 条件下土壤硝态氮含量表现为 W0.9>W0.8。在成熟期, 土壤硝态氮含量较伸长后期有所提高 (W0.9N0 除外), 但在相同滴灌灌水量下, 不同滴灌追氮比例土壤硝态氮含量之间的差异不显著。

由表 3 可知, 滴灌灌水量及其和滴灌追氮比例之间的交互作用对各时期土壤铵态氮含量的影响均显著, 滴灌追氮比例对除分蘖后期外的各时期土

表 2 滴灌灌水量 (W) 和滴灌追氮比例 (N) 对土壤硝态氮含量的影响及方差分析

Table 2 Effects and ANOVA of water drip irrigation amounts (W) and N fertigation proportions (N) on soil nitrate nitrogen content

灌水量 Irrigation amount	追氮比例 N fertigation proportion	w(硝态氮) ¹⁾ /(mg·kg ⁻¹) Nitrate nitrogen content			
		分蘖后期 Late tillering stage	伸长初期 Early elongation stage	伸长后期 Late elongation stage	成熟期 Ripening stage
W0.8	N0	7.2±1.6d	8.2±4.1c	18.2±0.8c	39.5±3.5b
	N5	19.0±1.2bc	13.1±3.1c	43.9±7.1ab	46.7±6.9ab
	N7	15.0±0.4c	37.9±3.3a	34.9±2.1b	43.7±3.4b
W0.9	N0	16.9±2.1c	21.8±4.3b	55.0±2.6a	50.4±15.6ab
	N5	26.8±1.3a	36.2±3.9a	33.4±4.2b	49.2±2.1ab
	N7	22.4±0.9b	40.7±5.2a	40.2±5.5b	71.2±6.3a
<i>P</i>	W	<0.01	<0.01	<0.01	<0.05
	N	<0.01	<0.01	0.872	0.270
	W×N	0.657	<0.01	<0.01	0.284

1) 表中数据为平均值±标准误差; 同列数据后的不同小写字母表示处理间差异显著 ($P<0.05$, Duncan's法)

1) Values in table are means ± standard errors; Different lowercase letters in the same column indicate significant differences among treatments ($P<0.05$, Duncan's test)

表 3 滴灌灌水量 (W) 和滴灌追氮比例 (N) 对土壤铵态氮含量的影响及方差分析

Table 3 Effects and ANOVA of water drip irrigation amounts (W) and N fertigation proportions (N) on soil ammonium nitrogen content

灌水量 Irrigation amount	追氮比例 N fertigation proportion	w(铵态氮) ¹⁾ /(mg·kg ⁻¹) Ammonium nitrogen content			
		分蘖后期 Late tillering stage	伸长初期 Early elongation stage	伸长后期 Late elongation stage	成熟期 Ripening stage
W0.8	N0	20.6±1.8c	14.0±0.4b	7.0±0.30c	10.3±1.6b
	N5	18.1±3.7c	21.9±0.6a	13.4±1.5b	17.7±3.5a
	N7	22.0±0.8c	13.0±0.3c	19.3±3.8a	6.8±1.9b
W0.9	N0	26.5±0.6b	13.5±0.3c	6.9±0.7c	6.9±0.6b
	N5	32.2±3.1a	9.1±0.3c	7.7±0.8c	5.1±0.9b
	N7	21.2±0.4c	13.0±0.6c	8.4±1.0bc	5.8±0.8b
<i>P</i>	W	<0.01	<0.01	<0.05	<0.01
	N	0.089	<0.01	<0.05	<0.05
	W×N	<0.01	<0.01	<0.05	<0.05

1) 表中数据为平均值±标准误差; 同列数据后的不同小写字母表示处理间差异显著 ($P<0.05$, Duncan's法)

1) Values in table are means ± standard errors; Different lowercase letters in the same column indicate significant differences among treatments ($P<0.05$, Duncan's test)

壤铵态氮含量的影响显著。

土壤铵态氮含量随着生育期的变化呈现逐渐下降的趋势。在分蘖后期, W0.9 条件下 N5 的土壤铵态氮含量较 N0 和 N7 高 21.5% 和 51.9%。在伸长初期, W0.8 条件下 N5 的土壤铵态氮含量比 N0 和 N7 高 56.4% 和 68.5%, 但是 W0.9 条件下各滴灌追氮比例的土壤铵态氮含量之间的差异不显著。伸长后期, 各处理的土壤铵态氮含量较分蘖后期和伸长初期有所下降, 且在相同滴灌灌水量下, 随着施

N 比例的增加, 土壤铵态氮含量逐渐增加; 相同滴灌追氮比例下, 土壤铵态氮含量表现为 W0.8>W0.9。在成熟期, 相同滴灌追氮比例下, 土壤铵态氮含量表现为 W0.8>W0.9; W0.8 条件下, N5 的土壤铵态氮含量分别较 N0 和 N7 高 71.8%和 160.3%。

由表 4 可知, 滴灌灌水量对伸长初期和成熟期土壤微生物量氮含量的影响显著, 而滴灌追氮比例对各时期土壤微生物量氮含量的影响均显著, 滴灌灌水量和滴灌追氮比例之间的交互作用对除分蘖

表 4 滴灌灌水量 (W) 和滴灌追氮比例 (N) 对土壤微生物量氮的影响及方差分析

Table 4 Effects and ANOVA of water drip irrigation amounts (W) and N fertigation proportions (N) on soil microbial biomass nitrogen

灌水量 Irrigation amount	追氮比例 N fertigation proportion	w(微生物量氮) ¹⁾ /(mg·kg ⁻¹) Microbial biomass nitrogen content			
		分蘖后期	伸长初期	伸长后期	成熟期
		Late tillering stage	Early elongation stage	Late elongation stage	Ripening stage
W0.8	N0	21.9±0.3e	9.0±0.4d	29.2±1.4ab	83.3±1.9a
	N5	48.2±1.7a	31.4±2.5b	21.8±2.5b	54.3±5.2b
	N7	32.5±1.2d	55.4±2.4a	37.0±4.9a	30.6±4.0cd
W0.9	N0	21.9±1.9e	17.0±0.7c	30.9±3.9ab	46.0±0.2bc
	N5	43.8±1.4b	14.4±3.3c	26.4±3.6ab	30.4±9.5cd
	N7	37.9±1.1c	13.3±2.7c	37.1±1.5a	27.6±2.9d
P	W	0.77	<0.01	0.44	<0.01
	N	<0.01	<0.01	<0.05	<0.01
	W×N	<0.05	<0.01	0.788	<0.05

1) 表中数据为平均值±标准误差; 同列数据后的不同小写字母表示处理间差异显著 ($P<0.05$, Duncan's法)

1)Values in table are means ± standard errors; Different lowercase letters in the same column indicate significant differences among treatments ($P<0.05$, Duncan's test)

后期外的其余时期土壤微生物量氮含量的影响均显著。

在分蘖后期, 相同滴灌灌水量下, 土壤微生物量氮含量表现为 N5>N7>N0, W0.8 条件下, N5 处理的土壤微生物量氮含量分别较 N0 和 N7 高 120.1% 和 48.3%; W0.9 条件下, N5 处理的土壤微生物量氮含量较 N0 高 100%。在伸长初期, W0.8 条件下, N5 的土壤微生物量氮含量较 N0 高 248.9%。在伸长后期, 在相同滴灌灌水量下, 土壤微生物量氮含量均表现为 N7>N0>N5; 相同滴灌追

氮比例下, 土壤微生物量氮含量整体表现为 W0.9>W0.8。在成熟期, 土壤微生物量氮含量较其他时期高, 相同滴灌追氮比例下, 土壤微生物量氮含量整体表现为 W0.8>W0.9; 在相同滴灌灌水量下, 土壤微生物量氮含量整体表现为 N0>N5>N7。

由表 5 可知, 从分蘖后期至成熟期, pH 在 6.0~7.2 范围内波动。氮肥施入使 pH 有不同程度的变化。在成熟期, W0.8 条件下, 随着滴灌追氮比例的增加, 土壤 pH 增加的趋势更明显, 说明滴灌施用氮肥可以减缓土壤酸化。

表 5 不同滴灌灌水量 (W) 和滴灌施氮比例 (N) 下的土壤 pH
Table 5 Soil pH under different water drip irrigation amounts (W) and N fertigation proportions (N)

灌水量 Irrigation amount	追氮比例 N fertigation proportion	分蘖后期 Late tillering stage	伸长初期 Early elongation stage	伸长后期 Late elongation stage	成熟期 Ripening stage
W0.8	N0	6.7	6.4	6.3	6.7
	N5	6.9	6.9	6.7	7.0
	N7	6.7	7.1	7.0	7.1
W0.9	N0	6.5	6.5	6.6	6.9
	N5	6.8	6.0	6.6	7.2
	N7	7.2	7.1	6.7	6.9

2.4 不同处理下土壤 N₂O 通量与土壤氮组分和 pH 的相关性

通过 Spearman 相关分析发现, 土壤 N₂O 排放通量与土壤铵态氮含量之间呈正相关关系 ($r=0.313$),

而与土壤硝态氮含量之间呈负相关关系 ($r=-0.391$), 说明土壤铵态氮和硝态氮含量显著影响土壤 N₂O 排放。土壤 N₂O 排放通量与土壤微生物量氮含量和 pH 之间的相关性不显著。

3 讨论与结论

3.1 宿根蔗田土壤 N₂O 排放特征

宿根蔗田土壤 N₂O 通量在分蘖后期最大, 随着生育时期的推进, N₂O 通量逐渐减少, 土壤 N₂O 在分蘖后期、伸长初期和伸长后期以排放为主, 成熟期以消耗为主, 这主要是因为分蘖后期施用较多的氮肥能保证土壤养分的供应充足; 其次, 滴灌施用氮肥可将肥料施在根部, 减少氮素损失, 故分蘖后期土壤 N₂O 大量排放。还有研究表明, 表层土壤温度一旦降到 15 ℃ 以下, N₂O 通量迅速下降, 甚至出现土壤 N₂O 消耗现象^[15]。反硝化微生物适宜活动温度范围为 5~75 ℃, 其活性随着土壤温度的降低而减弱, 从而改变硝化反硝化过程, 使得成熟期土壤 N₂O 通量明显减少。N₂O 通量在灌水和施用氮肥后 2 d 较高, 随着时间的推移, N₂O 通量逐渐减少是因为灌水后造成土壤湿润, 反硝化作用强于硝化作用, 促进土壤 N₂O 排放; 而且干湿交替的过程打乱了土壤环境和有机物之间的相互作用, 从而使得土壤有效碳和氮的矿化量增加, 增加了土壤 N₂O 的排放^[16]。施用氮肥后 N₂O 通量增加是因为添加尿素后, 氨氧化细菌立即开始生长, 氨氧化细菌和氨氧化古菌可以将氨气氧化, 并产生 N₂O^[17]。伸长后期土壤 N₂O 累积排放量以及排放通量基本为 W0.8>W0.9, 其原因是土壤含水量较低时, 土壤孔隙较大, 氧气含量的增加加速了硝化作用^[18], 促进了 N₂O 排放。也有相关的研究证实, 当土壤含水率达到 70%~80% 时, N₂O 排放量最大, 此时硝化与反硝化作用均为 N₂O 产生的重要途径^[19]。

3.2 不同滴灌灌水量和滴灌追氮比例对土壤氮组分的影响

在宿根蔗各个生长时期, 土壤硝态氮含量受灌水的影响显著, 表现为 W0.9>W0.8。在土壤水分较高时硝态氮含量较高的原因可能是南宁地处南亚热带地区, 在滴灌之后土壤水分蒸发较快, 土壤通气性依然较好, 导致土壤硝态氮含量增加。张忠学等^[20] 研究结果显示, 0~60 cm 土层铵态氮含量随灌水量的增加而减小, 本研究也发现, 在宿根蔗伸长后期和成熟期相同滴灌追氮比例下, 土壤铵态氮含量表现为 W0.8>W0.9, 其原因可能是伸长期和成熟期灌水量在 W0.9 条件下更能满足甘蔗对水分的需求, 在此灌水量下铵态氮被植物直接吸收利用较多。

土壤无机氮含量的变化因追氮量和追氮时期的不同而异, 有研究表明, 增加氮肥追施次数可使耕层土壤维持较高的供氮能力, 并可减少氮素淋

失^[21]。本研究中, 分蘖后期土壤硝态氮含量表现为 N5>N7>N0; 伸长初期灌水量 W0.8 条件下土壤硝态氮含量表现为 N7>N5>N0, N7 的土壤硝态氮含量分别较 N0 和 N5 高 362.2% 和 189.3%。在铵态氮上也得出类似的结果, 伸长后期随着滴灌追氮比例的增加, 土壤铵态氮含量逐渐增加, 这是因为铵态氮易被土壤胶体吸附, 从而大部分铵态氮保留在表层土壤^[22]。此外, 滴灌可以减少氮素的渗漏, 且有利于土壤有机氮的矿化, 增加土壤无机氮含量^[23]。说明滴灌多次追施氮肥有利于铵态氮和硝态氮的累积。此外, 成熟期土壤微生物量氮含量除 N7 外较伸长后期明显提高, 这可能是成熟期根系腐解为土壤微生物提供了丰富的养料, 从而提高了土壤微生物量氮含量。

3.3 土壤 N₂O 通量与土壤无机氮的关系

本试验发现, 土壤 N₂O 通量与土壤铵态氮含量之间的关系呈显著正相关, 这与尤昆明等^[24] 和 Li 等^[25] 的研究结论一致。但赵国胜等^[26] 却发现, 土壤 N₂O 通量与土壤铵态氮含量之间的关系呈极显著负相关, 与本研究结果不同。以往研究表明, 土壤 N₂O 通量与土壤硝态氮含量之间的关系呈极显著正相关^[27-28], 本文的结果与此相悖, 其原因可能是作物种类和试验条件不同造成的。

3.4 结论

宿根蔗田土壤 N₂O 的排放趋势是随着生育期的发展逐渐减少, 土壤 N₂O 通量一般在施用氮肥和灌水后 2 d 较高。滴灌灌水量、滴灌追氮比例、滴灌灌水量和滴灌追氮比例之间的交互作用在不同时期影响着土壤硝态氮、铵态氮和微生物量氮含量。合理的滴灌灌水量和滴灌追氮比例可降低土壤 N₂O 的排放, 以灌水量 W0.9(田间持水量的 80%~90%) 和滴灌追氮比例 N5(50% 土施追氮, 50% 滴灌追氮) 处理分蘖后期、伸长后期和成熟期的土壤 N₂O 排放量较低。此外, 土壤铵态氮和硝态氮含量显著影响宿根蔗土壤 N₂O 通量。

参考文献:

[1] PACHAURI K, MEYER A. Climate change 2014: Synthesis report[J]. Environmental Policy Collection, 2014, 27(2): 408.

[2] CARLSON K M, GERBER J S, MUELLER N D, et al. Greenhouse gas emissions intensity of global croplands[J]. Nature Climate Change, 2017, 7(1): 63-68.

[3] 雷豪杰, 李贵春, 柯华东, 等. 滴灌施肥对两种典型作物系统土壤 N₂O 排放的影响及其调控差异[J]. 中国农业科学, 2021, 54(4): 768-779.

[4] 李若楠, 武雪萍, 张彦才, 等. 滴灌氮肥用量对设施菜地

- 硝态氮含量及环境质量的影响[J]. *植物营养与肥科学报*, 2015, 21(6): 1642-1651.
- [5] LI Z, ZHANG R, WANG X, et al. Effects of plastic film mulching with drip irrigation on N_2O and CH_4 emissions from cotton fields in arid land[J]. *The Journal of Agricultural Science*, 2014, 152(4): 534-542.
- [6] 李平, 魏玮, 郎漫. 不同水分对半干旱地区砂壤土温室气体排放的短期影响[J]. *农业环境科学学报*, 2021, 40(5): 1124-1132.
- [7] 陈津赛, 孙玮皓, 王广帅, 等. 不同施氮量对麦田土壤水稳性团聚体和 N_2O 排放的影响[J]. *应用生态学报*, 2021, 32(11): 3961-3968.
- [8] 王敬, 程谊, 蔡祖聪, 等. 长期施肥对农田土壤氮素关键转化过程的影响[J]. *土壤学报*, 2016, 53(2): 292-304.
- [9] SHAABAN M, WU Y, KHALID M S, et al. Reduction in soil N_2O emissions by pH manipulation and enhanced *nosZ* gene transcription under different water regimes[J]. *Environmental Pollution*, 2018, 235: 625-631.
- [10] BAGGS E M, SMALES C L, BATEMAN E J. Changing pH shifts the microbial source as well as the magnitude of N_2O emission from soil[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2010, 46(8): 793-805.
- [11] BASALIRWA D, SUDO S, WACAL C, et al. Assessment of crop residue and palm shell biochar incorporation on greenhouse gas emissions during the fallow and crop growing seasons of broccoli (*Brassica oleracea* var. *italica*)[J]. *Soil and Tillage Research*, 2020, 196: 104435. doi: 10.1016/j.still.2019.104435.
- [12] SHAO Y, CHEN J, WANG L, et al. Effects of fermented organic fertilizer application on soil N_2O emission under the vegetable rotation in polyhouse[J]. *Environmental Research*, 2021, 200: 111491. doi: 10.1016/j.envres.2021.111491.
- [13] 赵岩. 土壤氨氮、亚硝酸盐氮、硝酸盐氮的测定试剂保存实验[J]. *干旱环境监测*, 2014, 28(4): 182-186.
- [14] 李振高, 骆永明, 滕应. 土壤与环境微生物研究法[M]. 北京: 科学出版社, 2008.
- [15] 赵苗苗, 张文忠, 裴瑶, 等. 农田温室气体 N_2O 排放研究进展[J]. *作物杂志*, 2013(4): 25-31.
- [16] 梁东丽, 同延安, OVE E, 等. 灌溉和降水对旱地土壤 N_2O 气态损失的影响[J]. *植物营养与肥科学报*, 2002, 8(3): 298-302.
- [17] GIGUERE A T, TAYLOR A E, SUWA Y, et al. Uncoupling of ammonia oxidation from nitrite oxidation: Impact upon nitrous oxide production in non-cropped Oregon soils[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2017, 104: 30-38.
- [18] 冯洁, 张克强, 陈思, 等. 土壤 N_2O 吸收和消耗机制及研究进展[J]. *农业环境科学学报*, 2014, 33(11): 2084-2089.
- [19] STEVENS R J, LAUGHLIN R J, MALONE J P. Soil pH affects the processes reducing nitrate to nitrous oxide and di-nitrogen[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1998, 30(8/9): 1119-1126.
- [20] 张忠学, 陈鹏, 聂堂哲, 等. 不同水氮调控模式对稻田土壤氮素分布与有效性的影响[J]. *农业机械学报*, 2018, 49(11): 210-219.
- [21] 武际, 郭熙盛, 王允青, 等. 氮肥基追比例对烟农 19 小麦氮素吸收利用及产量和品质的影响[J]. *麦类作物学报*, 2008, 28(6): 1021-1027.
- [22] 陈静, 王迎春, 李虎, 等. 滴灌施肥对免耕冬小麦水分利用及产量的影响[J]. *中国农业科学*, 2014, 47(10): 1966-1975.
- [23] 党建友, 裴雪霞, 张定一, 等. 灌溉方法与施氮对土壤水分、硝态氮和小麦生长发育的调控效应[J]. *应用生态学报*, 2019, 30(4): 1161-1169.
- [24] 尤昆明, 刘士余, 聂小飞, 等. 基于增强回归树的红壤旱坡花生地气态氮损失影响因素分析[J]. *生态与农村环境学报*, 2021, 37(5): 651-660.
- [25] LI Y, ZHENG Q, YANG R, et al. Evaluating microbial role in reducing N_2O emission by dual isotopocule mapping following substitution of inorganic fertilizer for organic fertilizer[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2021, 326: 129442. doi: 10.1016/j.jclepro.2021.129442.
- [26] 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.
- [27] 吕金东, 张丽媛, 虞娜, 等. 水氮耦合对设施土壤 N_2O 和 NO 排放的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2021, 40(6): 1366-1376.
- [28] 叶丹丹, 谢立勇, 郭李萍, 等. 华北平原典型农田 CO_2 和 N_2O 排放通量及其与土壤养分动态和施肥的关系[J]. *中国土壤与肥料*, 2011(3): 15-20.

【责任编辑 李晓卉】