

肖未, 吴庆峰, 李伏生. 滴灌水氮管理对玉米种植土壤无机氮含量和氧化亚氮排放的影响 [J]. 华南农业大学学报, 2023, 44(3): 410-419.
XIAO Wei, WU Qingfeng, LI Fusheng. Effect of drip irrigation and nitrogen management on inorganic nitrogen content and nitrous oxide emission in maize-planting soil[J]. Journal of South China Agricultural University, 2023, 44(3): 410-419.

滴灌水氮管理对玉米种植土壤无机氮含量和氧化亚氮排放的影响

肖 未✉, 吴庆峰, 李伏生✉

(广西大学 农学院, 广西 南宁 530005)

摘要:【目的】获得玉米种植土壤氧化亚氮 (N_2O) 减排的滴灌施肥模式, 揭示不同滴灌灌水量和施氮比例下土壤无机氮含量对土壤 N_2O 排放的影响。【方法】在移动防雨棚内开展 2 季玉米 3 种滴灌灌水量 (W_{60} 、 W_{80} 和 W_{100} 分别为田间持水量的 50%~60%、70%~80% 和 90%~100%) 和 2 种滴灌施氮比例 (等 N 量为 $180\text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 其中, F_{55} 为 50% 氮肥作基肥土施、50% 氮肥作滴灌施肥, F_{37} 为 30% 氮肥作基肥土施、70% 氮肥作滴灌施肥) 的田间试验, 测定生育期内土壤 N_2O 通量和不同生育时期土壤无机氮含量, 计算不同生育时期和全生育期土壤 N_2O 排放量, 分析土壤 N_2O 通量与土壤无机氮含量之间的关系。【结果】2 季玉米土壤的 N_2O 排放规律相似; 相同施氮比例下, W_{100} 水分处理下土壤 N_2O 排放通量在多数玉米生育时期高于 W_{60} 和 W_{80} , 表明高水分处理下土壤 N_2O 排放通量高于中、低水分处理; 相同水分处理下, 除夏季玉米苗期外, 土壤 N_2O 排放通量施氮比例 F_{55} 比 F_{37} 更低。从整个生育时期土壤 N_2O 累积排放量来看, 春季玉米种植土壤 $W_{60}F_{55}$ 处理 N_2O 累积排放量低于其他处理, $W_{80}F_{55}$ 次之, 夏季玉米种植土壤则是 $W_{60}F_{37}$ 和 $W_{80}F_{55}$ 处理的 N_2O 累积排放量均较低。另外, 2 季玉米的土壤 N_2O 通量与硝态氮和亚硝态氮含量之间显著相关, 相关系数分别为 0.433~0.579 和 0.396~0.532。【结论】 $W_{80}F_{55}$ 处理 (田间持水量的 70%~80%, 以及 50% 氮肥作基肥土施, 50% 氮肥作滴灌施肥) 降低种植玉米的土壤 N_2O 排放。此外, 土壤硝态氮和亚硝态氮含量显著影响土壤 N_2O 排放。

关键词: 滴灌施肥; 硝态氮; 亚硝态氮; N_2O 累积排放量

中图分类号: S154;S143.1

文献标志码: A

文章编号: 1001-411X(2023)03-0410-10

Effect of drip irrigation and nitrogen management on inorganic nitrogen content and nitrous oxide emission in maize-planting soil

XIAO Wei✉, WU Qingfeng, LI Fusheng✉

(College of Agriculture, Guangxi University, Nanning 530005, China)

Abstract: 【Objective】The objectives of this study were to obtain a rational drip fertigation mode for reducing nitrous oxide (N_2O) emission in maize-planting soil, and reveal the effects of soil inorganic nitrogen content on N_2O emission under different drip irrigation amount and nitrogen fertigation ratios. 【Method】In the mobile rainproof shelter, two-season maize experiments with three drip irrigation amount (W_{60} , W_{80} and W_{100} were 50%~60%, 70%~80% and 90%~100% of field water holding capacity, respectively) and two nitrogen fertigation

收稿日期: 2022-04-06 网络首发时间: 2023-02-16 09:19:07

首发网址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/44.1110.S.20230215.1219.002.html>

作者简介: 肖 未, 硕士研究生, 主要从事水土资源利用与环境方面的研究, E-mail: 925407809@qq.com;

通信作者: 李伏生, 教授, 博士, 主要从事水肥资源利用与环境方面的研究, E-mail: 19880066@gxu.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金 (42167035)

proportions (F₅₅: 50% nitrogen fertilizer applied to soil as basal fertilizer, and 50% nitrogen fertilizer as fertigation, F₃₇: 30% nitrogen fertilizer applied to soil as basal fertilizer, and 70% nitrogen fertilizer as fertigation; Both of F₅₅ and F₃₇ had the equal nitrogen rate of 180 kg·hm⁻²) were carried out. The soil N₂O flux over the whole growth stage and soil inorganic nitrogen content at different growth stages were measured. Soil N₂O emissions at the different growth stages and over the whole growth stage were calculated and the relationships between soil N₂O flux and soil inorganic nitrogen content were analyzed. 【Result】The N₂O emission fluxes of corn soil in two seasons were similar. Under the same nitrogen application ratio, soil N₂O emission fluxes under W₁₀₀ water treatment were higher than those under W₆₀ and W₈₀ in most maize growth periods, indicating that soil N₂O emission fluxes under high water treatment were higher than those under medium and low water treatment. Under the same water treatment, soil N₂O emission flux ratio of F₅₅ was lower than that of F₃₇ except in summer maize seedling stage. During the whole growth period, the cumulative emission of soil N₂O under W₆₀F₅₅ treatment in spring was lower than that under other treatments, followed by W₈₀F₅₅, while those under W₆₀F₃₇ and W₈₀F₅₅ treatments in summer were lower. In addition, in two seasons, soil N₂O flux was significantly correlated with nitrate nitrogen and nitrite nitrogen contents, with correlation coefficients ranging from 0.433 to 0.579 and 0.396 to 0.532, respectively. 【Conclusion】W₈₀F₅₅ treatment (70%–80% field water holding capacity, 50% nitrogen fertilizer as basal fertilizer and 50% nitrogen fertilizer as fertigation) reduces N₂O emission from maize-planting soil. In addition, soil nitrate nitrogen and nitrite nitrogen contents significantly affect soil N₂O emission.

Key words: Drip fertigation; Nitrate nitrogen; Nitrite nitrogen; Cumulative N₂O emission

氧化亚氮 (N₂O) 是重要的温室气体之一, 其单位质量的增温潜能是二氧化碳的 265 倍^[1]。农田土壤是 N₂O 的主要排放源, 农田排放量约占全球 N₂O 排放总量的 25%^[2]。农田施用氮肥引起的 N₂O 排放占土壤总 N₂O 排放增量的 70%^[3]。与此同时, 农田施肥通常伴随着灌溉, 灌溉改变了土壤水分状况, 灌水量、灌水方式和灌水频率等措施均会对土壤 N₂O 的排放产生影响^[4]。因此, 研究合理的水肥管理对降低农田 N₂O 排放有重要意义。

土壤 N₂O 是硝化与反硝化过程的中间产物^[5], 无机氮作为硝化和反硝化作用的底物, 其含量高低能影响土壤 N₂O 的排放, 而土壤无机氮含量则会随施氮水平的提高而提高^[6-7]。相对于传统的大水漫灌、沟灌等, 滴灌施肥技术能将水肥均匀、适量、精确地输送到作物根部土壤, 不仅能有效提高氮肥利用率, 还能通过改变土壤通气性、水分运移及有效氮分布情况等, 从而影响土壤硝化和反硝化作用^[8-9]。前人研究表明, 滴灌施肥技术将养分施到作物根层, 减少土壤 NO₃⁻-N 的累积, 改变 NH₄⁺和 NO₃⁻浓度和分布, 影响土壤酶活性, 从而影响土壤 N₂O 的排放^[10]。谢海宽等^[11]发现相同氮肥施用量下, 滴灌相比常规漫灌在提高作物产量的同时, N₂O 排放总量减少 29.4%~35.1%, 而且没有显著的年际差异。于亚泽等^[12]研究也发现, N₂O 排放量随施氮量的增

加而增加, 滴灌与沟灌相比可有效降低 N₂O 排放。大量研究还表明, 滴灌施肥技术下的土壤水分及养分条件与常规漫灌或沟灌的有显著差异^[13], 影响了土壤氮素转化过程^[14]及 N₂O 排放。

玉米是我国第一大粮食作物, 对我国粮食安全有重大意义^[15], 且广西是全国玉米生产一年两熟或者三熟的地区之一^[16], 因此对种植玉米土壤 N₂O 排放研究有重要意义。当前滴灌施肥的研究主要集中在与传统施肥的比较和不同施氮量等方面, 而关于等氮肥用量下滴灌施氮对玉米土壤无机氮含量变化及土壤 N₂O 排放的影响报道较少。因此, 本文通过田间试验, 研究不同滴灌灌水量和施氮比例对玉米生育时期土壤 N₂O 排放通量和土壤无机氮含量的影响, 并分析玉米土壤 N₂O 排放通量和土壤无机氮含量的关系, 以获得玉米种植土壤 N₂O 减排的滴灌施肥模式, 并揭示不同滴灌灌水量和施氮比例下土壤无机氮含量对土壤 N₂O 排放的影响。

1 材料与方法

1.1 试验地点及材料

田间试验在广西大学试验基地 (N 22°51'12", E 108°17'26") 移动防雨棚内进行。该移动棚通风、透光, 可以保障作物生长期间自然光照和温度, 可通过电控传感器调节移动棚的遮蔽或移开, 雨天时根

据试验处理选择避雨，非降雨时将移动棚移开。

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 g·cm⁻³(环刀法)，田间持水量 24.9%(质量含水量，环刀法)，pH 6.7(水土质量比 2.5:1.0, pH 计法)，有机质 17.39 g·kg⁻¹(重铬酸钾容量法-外加加热法)，全氮 1.3 g·kg⁻¹(半微量开氏法)，碱解氮 94.52 mg·kg⁻¹(NaOH 碱解扩散法)，速效磷 99.78 mg·kg⁻¹[0.05 mol·L⁻¹ HCl-0.025 mol·L⁻¹ (1/2 H₂SO₄) 浸提，比色法]，速效钾 85.6 mg·kg⁻¹ (1 mol·L⁻¹ 中性 NH₄OAc 浸提，火焰光度法)。

供试作物为春季玉米和夏季玉米 (生食水果玉米)，品种均为农友利-美珍。

1.2 试验方法与管理

试验设 3 种滴灌灌水量 (以下简称灌水量)，W₆₀、W₈₀ 和 W₁₀₀ 分别为田间持水量的 50%~60%、70%~80% 和 90%~100%；设 2 种滴灌施氮比例 (以下简称施氮比例)，F₅₅ 为 50% 氮肥作基肥土施，50% 氮肥作滴灌施肥 (苗期 30%，拔节期 40%，孕穗期 30%)，F₃₇ 为 30% 氮肥作基肥土施，70% 氮肥作滴灌施肥 (苗期 30%，拔节期 40%，孕穗期 30%)，试验为完全方案设计，共 6 个处理，每个处理重复

3 次，共 18 个小区，每小区面积 8.64 m²。小区之间用水泥砖墙 (厚 25 cm，深 120 cm) 隔开，做到各处理水分养分不相互渗透。每个小区种植 4 行玉米，行距 60 cm，株距 30 cm，靠近各小区边缘的两行，距离小区边缘 30 cm。穴播方式进行播种，每穴留苗 1 株，每行种植 12 株。本研究共进行 2 次试验，试验 1 为春季玉米，试验 2 为夏季玉米。

各处理肥料施用量一致，N、P₂O₅ 和 K₂O 总施用量分别为 180、90 和 180 kg·hm⁻²。氮肥为尿素 (N 质量分数为 46.2%，重庆建峰化工股份有限公司产品)，磷肥为钙镁磷肥 (P₂O₅ 质量分数为 17%，广西鹿寨万强化肥有限责任公司产品)，钾肥为氯化钾 (K₂O 质量分数为 60%，中化化肥有限公司产品)。所有处理磷钾肥均作为基肥，氮肥按照试验设计比例施入基肥和追肥。基肥按穴施方式施入土壤，追肥采用滴灌施肥方式，先将尿素溶入一定量水中，将尿素溶液通过滴灌系统施入土壤。定苗后采用便携式土壤水分测量仪 (TRIME-PICO-IPH TDR) 观测土壤含水量，确保各处理土壤水分在试验设定范围内。每行玉米摆放一条滴灌带，用水表控制灌水量，不同处理各生育期灌水量见表 1。

表 1 玉米各生育期不同水肥处理的灌水量¹⁾

Table 1 Irrigation amount at each growth stage of maize in different water and fertilizer treatments							mm
季节 Season	生育期 Growth stage	W ₆₀ F ₃₇	W ₆₀ F ₅₅	W ₈₀ F ₃₇	W ₈₀ F ₅₅	W ₁₀₀ F ₃₇	W ₁₀₀ F ₅₅
春季 Spring	苗期 Seedling stage	57.9	57.9	90.0	91.3	114.6	115.3
	拔节期 Jointing stage	103.1	108.2	142.2	156.6	216.6	214.2
	抽穗期 Heading stage	95.1	70.9	117.4	96.0	153.9	153.5
	成熟期 Maturing stage	36.3	52.5	84.9	89.2	119.2	119.7
	合计 Total	292.3	289.5	434.5	433.1	604.3	602.7
夏季 Summer	苗期 Seedling stage	57.9	57.9	69.4	69.4	81.0	81.0
	拔节期 Jointing stage	147.3	139.8	215.3	232.7	283.5	286.9
	抽穗期 Heading stage	93.8	105.6	143.2	119.1	199.5	190.3
	成熟期 Maturing stage	19.1	11.7	47.7	56.5	70.2	74.4
	合计 Total	318.0	314.9	475.6	477.7	634.2	632.7

1) W₆₀、W₈₀和W₁₀₀分别为田间持水量的50%~60%、70%~80%和90%~100%；F₅₅：50%氮肥作基肥土施、50%氮肥作滴灌施肥；F₃₇：30%氮肥作基肥土施、70%氮肥作滴灌施肥

1) W₆₀, W₈₀ and W₁₀₀ are 50%–60%, 70%–80% and 90%–100% of field water holding capacity, respectively; F₅₅: 50% nitrogen fertilizer applied to soil as basal fertilizer and 50% nitrogen fertilizer as fertigation; F₃₇: 30% nitrogen fertilizer applied to soil as basal fertilizer and 70% nitrogen fertilizer as fertigation

1.2.1 春季玉米管理 于 2021 年 4 月 9 日将作为基肥部分的尿素、钙镁磷肥以及氯化钾施入各试验小区。4 月 10 日播种，每穴播已催芽露白的玉米种子 5 粒，4 月 17 日出苗，4 月 20 日定苗，每穴留

1 株。4 月 23 日苗期用滴灌系统施用尿素，5 月 1 日进行第 1 次培土，5 月 4 日拔节期用滴灌系统施用尿素，5 月 20 日进行第 2 次中耕培土，5 月 22 日孕穗期用滴灌系统施用尿素，于 6 月 24 日收

获鲜食玉米。春季玉米生育时期为:苗期4月10—28日;拔节期4月29日—5月19日;抽穗期5月20日—6月8日;成熟期6月9—24日,共76 d。

1.2.2 夏季玉米管理 于2021年8月9日将作为基肥部分的尿素、钙镁磷肥以及氯化钾施入各试验小区。8月10日播种,每穴播已催芽露白的玉米种子5粒,8月16日出苗,8月19日定苗,每穴留1株。8月21日苗期用滴灌系统施用尿素,8月28日进行第1次培土,9月1日拔节期用滴灌系统施用尿素,9月18日进行第2次中耕培土,9月19日孕穗期用滴灌系统施用尿素,于10月20日收获鲜食玉米。夏季玉米生育时期为:苗期8月10—26日;拔节期8月27日—9月17日;抽穗期9月18日—10月7日;成熟期10月8—20日,共71 d。

1.3 样品采集和测定

1.3.1 N₂O 气体收集及测定 用静态箱法收集 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,在播种前一周埋入地下30 cm,置于玉米行间,压实底座周围土壤,保证其密封状态。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的端口、温度探头和小风扇。每个小区放置1个静态箱(玉米行之间中部),施肥后1、3、5 d 采样,不施肥时,间隔7 d 采样。采样时间为上午09:00 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和30 min 用50 mL 医用注射器(成都市新津事丰医疗器械有限公司)取样。用 Agilent 7890A 气相色谱仪(美国安捷伦科技公司)中 ECD 检测器测定样品中的 N₂O 浓度,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,体积分数)。手动打入气样20 mL 至 ECD 检测器中,每组气体样品进样时间为4.45 min。

土壤 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计算得出。计算公式如下^[17]:

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

式中: F 为土壤 N₂O 通量, $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$; P 为标准大气压 ($1.013\times10^5\text{ Pa}$); M 为 N₂O 气体的摩尔质量分数 ($44.0\text{ g}\cdot\text{mol}^{-1}$); H 为箱体高度 (25 cm); T 为采气时箱体内部的平均温度, $^{\circ}\text{C}$; R 为气体常数 ($8.314\text{ J}\cdot\text{mol}^{-1}\cdot\text{kg}^{-1}$); dc/dt 为土壤 N₂O 排放速率, $\mu\text{L}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{h}^{-1}$ 。

不同生育期 N₂O 排放量 (f) 是相邻两次气体通量平均值乘以间隔时间,再累加而得。

$$f=\sum_i^n\left[\frac{(F_i+F_{i-1})}{2}\times t\times24\times10^{-2}\right],\tag{2}$$

式中: F_i 为第 i 次所测土壤 N₂O 通量; F_{i-1} 为第 $i-1$ 次所测土壤 N₂O 通量; t 为相邻两次采集气体间隔时间, d; n 为同一生育期 N₂O 测定次数。全生育期 N₂O 总排放量为不同生育期 N₂O 排放量之和。

1.3.2 土壤采集及测定 每次在滴灌系统施用氮肥第2天(苗期在出苗日采土),使用不锈钢土钻(直径6 cm)按照5点采样法采集各试验小区0~20 cm 耕层土壤,剔除杂草、碎石和根系后,放入对应编号密封袋,带回实验室置于4 ℃ 冰箱保存,用于铵态氮、硝态氮和亚硝态氮含量的测定。

土壤无机氮(铵态氮、硝态氮、亚硝态氮)含量用0.01 mol·L⁻¹ 的 CaCl₂ 浸提后,采用连续流动化学分析仪 AA3(德国 Bran + Luebbe 公司)测定^[18]。

1.4 统计分析

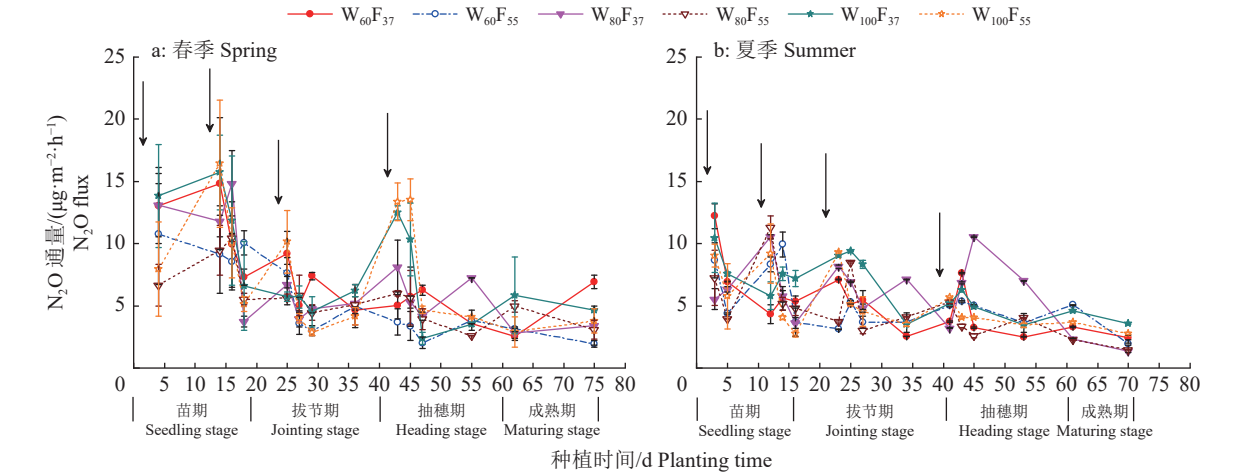
采用 Microsoft Excel 2019 和 SPSS 26.0 软件对试验数据进行统计分析。显著性检验用方差分析方法,多重比较用 Duncan’s 法,用 Pearson 法分析土壤 N₂O 通量和土壤无机氮含量之间的相关性。

2 结果与分析

2.1 土壤 N₂O 排放

2.1.1 土壤 N₂O 通量 不同处理下春季和夏季玉米生育期内土壤 N₂O 通量的变化见图1。2次试验土壤 N₂O 通量排放高峰均出现在每次灌溉及施肥之后。春季玉米试验中(图1a),在 W₆₀ 和 W₈₀ 处理下,施肥后 N₂O 通量均表现为施氮比例 F₃₇ > F₅₅,而在 W₁₀₀ 处理下,则表现为 F₃₇ < F₅₅。在 F₃₇ 处理下,施肥后 N₂O 通量除拔节期以外,其余时期均表现为 W₆₀ < W₈₀ < W₁₀₀。在 F₅₅ 处理下,施肥后 N₂O 通量拔节期表现为 W₈₀ < W₆₀ < W₁₀₀,其余时期均表现为 W₆₀ < W₈₀ < W₁₀₀。W₁₀₀ 处理下,施肥后 N₂O 通量高于 W₆₀ 和 W₈₀,说明高水分处理下土壤 N₂O 排放相较于中、低水分处理更多。在相同水分、不同施氮比例处理下,施肥后 N₂O 通量表现为 F₅₅ < F₃₇,说明施肥比例 F₅₅ 土壤 N₂O 排放相较于 F₃₇ 更低。

夏季玉米试验中(图1b),在3个水平的灌水量处理下,施肥后 N₂O 通量除苗期表现为施氮比例 F₃₇ < F₅₅ 以外,其他时期均表现为 F₃₇ > F₅₅。F₃₇ 处理下,施肥后 N₂O 通量在拔节期和成熟期为 W₆₀ < W₈₀ < W₁₀₀,苗期为 W₆₀ < W₁₀₀ < W₈₀,抽穗期为



图中向下箭头所指为施肥时间; W₆₀、W₈₀ 和 W₁₀₀ 分别为田间持水量的 50%~60%、70%~80% 和 90%~100%; F₅₅: 50% 氮肥作基肥土施、50% 氮肥作滴灌施肥; F₃₇: 30% 氮肥作基肥土施、70% 氮肥作滴灌施肥

The downward arrow in the figure represents each fertilization time; W₆₀, W₈₀ and W₁₀₀ were 50%~60%, 70%~80% and 90%~100% of field water holding capacity, respectively; F₅₅: 50% nitrogen fertilizer applied to soil as basal fertilizer and 50% nitrogen fertilizer as fertigation; F₃₇: 30% nitrogen fertilizer applied to soil as basal fertilizer and 70% nitrogen fertilizer as fertigation

图 1 不同处理下春季和夏季玉米土壤 N₂O 通量的变化

Fig. 1 Changes of N₂O fluxes in spring and summer maize soil under different treatments

W₁₀₀ < W₆₀ < W₈₀。F₅₅ 处理下, 施肥后拔节期和抽穗期的 N₂O 通量为 W₆₀ < W₈₀ < W₁₀₀, 苗期为 W₁₀₀ < W₆₀ < W₈₀, 成熟期为 W₈₀ < W₁₀₀ < W₆₀。总的来看, W₁₀₀ 处理下施肥后 N₂O 通量除抽穗期外均高于 W₆₀ 和 W₈₀, 相同灌水量下, 施肥后除苗期外, N₂O 通量表现为施氮比例 F₅₅ < F₃₇。

2.1.2 土壤 N₂O 累积排放量 不同处理对春季和夏季玉米土壤 N₂O 累积排放量的影响见表 2。春季玉米试验中, W₆₀ 处理下除成熟期外, 其余时期 F₃₇ 处理的土壤 N₂O 累积排放量显著高于 F₅₅; W₈₀ 处理下, 抽穗期 F₃₇ 处理的土壤 N₂O 累积排放量较 F₅₅ 显著高 48.3%。施氮比例 F₃₇ 处理下, 拔节期 W₆₀ 的土壤 N₂O 累积排放量显著高于 W₈₀ 和 W₁₀₀, 分别高 48.4% 和 31.6%; 施氮比例 F₅₅ 处理下苗期和抽穗期各水分处理土壤 N₂O 累积排放量均表现为 W₁₀₀ > W₈₀ > W₆₀。从整个生育期土壤 N₂O 累积排放总量来看, W₆₀F₅₅ 处理显著低于其他处理, W₈₀F₅₅ 次之。

夏季玉米试验中, W₆₀ 处理下, 拔节期 F₃₇ 土壤 N₂O 累积排放量较 F₅₅ 显著高 41.2%, 而抽穗期和成熟期则显著低 21.6% 和 25.7%; W₈₀ 处理下除苗期外, F₃₇ 土壤 N₂O 累积排放量均显著高于 F₅₅; W₁₀₀ 处理下, 拔节期和成熟期 F₃₇ 土壤 N₂O 累积排放量较 F₅₅ 分别高 42.2% 和 20.1%。施氮比例 F₃₇ 处理下, 苗期 W₈₀ 土壤 N₂O 累积排放量较 W₆₀ 显著高 21.6%, 成熟期 W₁₀₀ 土壤 N₂O 累积排放量显著高于 W₆₀ 和 W₈₀。施氮比例 F₅₅ 处理下, 拔节期 W₁₀₀ 土壤 N₂O 累积排放量显著高于

W₆₀ 和 W₈₀, 成熟期 W₈₀ 土壤 N₂O 累积排放量显著低于 W₆₀ 和 W₁₀₀。从整个生育期土壤 N₂O 累积排放总量来看, W₆₀F₃₇ 和 W₈₀F₅₅ 处理的土壤 N₂O 累积排放量均较低。

2.2 土壤无机氮含量

2.2.1 铵态氮含量 不同处理对春季玉米和夏季玉米不同生育时期土壤铵态氮含量的影响见表 3。总的来看, 2 季玉米种植土壤铵态氮含量随着玉米生长都表现为先增加再减少, 成熟期土壤铵态氮含量相对于苗期有增加。春季玉米试验中, 施氮比例 F₃₇ 处理下, 4 个时期各水分处理的土壤铵态氮含量之间差异显著, 均表现为 W₁₀₀ > W₈₀ > W₆₀; 施氮比例 F₅₅ 处理下, 除苗期外土壤铵态氮含量与 F₃₇ 规律一致。从水分处理来看, 除苗期外, 其余时期土壤铵态氮含量均为 W₁₀₀ > W₈₀ > W₆₀。

夏季玉米试验中, W₆₀ 处理下, 拔节期和抽穗期 F₅₅ 土壤铵态氮含量较 F₃₇ 分别提高 16.9% 和 6.0%; W₈₀ 处理下, 苗期和拔节期 F₅₅ 土壤铵态氮含量较 F₃₇ 分别提高 7.6% 和 4.9%, 而抽穗期则相反, F₅₅ 土壤铵态氮含量较 F₃₇ 低 5.2%; W₁₀₀ 处理下, 拔节期、抽穗期和成熟期 F₅₅ 土壤铵态氮含量较 F₃₇ 分别提高 19.7%、8.6% 和 8.6%, 且差异显著。施氮比例 F₅₅ 处理下, 各生长期土壤铵态氮含量均表现为 W₁₀₀ > W₈₀ > W₆₀, 且除拔节期 F₃₇W₈₀ 与 F₃₇W₁₀₀ 以外, 差异均显著。施氮比例 F₃₇ 处理下, 土壤铵态氮含量变化与 F₅₅ 规律一致, 且除拔节期 W₈₀ 与 W₁₀₀ 以外, 差异均显著。

2.2.2 硝态氮含量 不同处理对春季玉米和夏季

表2 不同处理下玉米各生育期土壤 N₂O 累积排放量及方差分析¹⁾

Table 2 Cumulative emissions of N ₂ O at each growth stage of maize under different treatments							g·hm ⁻²
季节 Season	水分处理(W) Water treatment	施氮比例(F) Fertigation proportion	苗期 Seedling stage	拔节期 Jointing stage	抽穗期 Heading stage	成熟期 Maturing stage	总计 Total
春季 Spring	W ₆₀	F ₃₇	45.20±2.94a	32.36±0.60a	23.02±1.17bc	15.01±1.14a	115.59±3.25a
		F ₅₅	22.30±1.66c	24.54±1.22b	14.59±1.96d	11.51±0.86a	72.94±3.91c
	W ₈₀	F ₃₇	37.72±2.29ab	21.80±1.90b	27.62±3.24ab	15.59±1.83a	102.74±8.19ab
		F ₅₅	25.18±1.37bc	20.89±1.90b	18.63±0.73cd	14.98±0.23a	79.68±3.46bc
	W ₁₀₀	F ₃₇	50.81±7.95a	24.59±1.99b	29.90±2.20ab	19.02±5.95a	124.31±16.48a
		F ₅₅	42.41±6.53a	23.81±2.82b	34.00±2.60a	13.16±1.52a	113.38±3.37a
夏季 Summer	W ₆₀	F ₃₇	19.09±0.99b	22.66±1.24c	16.14±0.13d	11.80±0.25c	69.69±2.55c
		F ₅₅	21.47±0.33ab	16.05±0.63d	20.59±1.54b	15.89±0.89a	74.01±2.46bc
	W ₈₀	F ₃₇	23.21±0.17a	26.34±0.34b	32.11±0.13a	13.00±0.18bc	94.66±0.67a
		F ₅₅	21.38±1.64ab	18.87±0.76d	17.83±0.24cd	10.08±0.06d	68.60±0.89c
	W ₁₀₀	F ₃₇	22.31±1.41ab	32.24±0.58a	20.77±0.03b	16.56±0.23a	91.88±2.01a
		F ₅₅	20.95±0.42ab	22.67±1.55c	19.21±0.38bc	13.79±0.41bc	76.62±1.50b
春季 Spring	P	W	<0.05	<0.01	<0.01	0.569	<0.01
		F	<0.01	0.060	<0.05	0.155	<0.01
		W×F	0.297	0.141	<0.05	0.631	0.181
夏季 Summer		W	0.120	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01
		F	0.883	<0.01	<0.01	0.156	<0.01
		W×F	0.136	0.309	<0.01	<0.01	<0.01

1)表中数据为平均值±标准误;相同玉米季的同列数据后,不同小写字母表示处理间差异显著($P<0.05$, Duncan's法);W₆₀、W₈₀和W₁₀₀分别为田间持水量的50%~60%、70%~80%和90%~100%;F₅₅: 50%氮肥作基肥土施、50%氮肥作滴灌施肥;F₃₇: 30%氮肥作基肥土施、70%氮肥作滴灌施肥

1)The values in the table are means ± standard errors; Different lowercase letters in the same column of the same maize-season indicate significant difference among treatments ($P<0.05$, Duncan's test); W₆₀, W₈₀ and W₁₀₀ were 50%~60%, 70%~80% and 90%~100% of field water holding capacity, respectively; F₅₅: 50% nitrogen fertilizer applied to soil as basal fertilizer and 50% nitrogen fertilizer as fertigation; F₃₇: 30% nitrogen fertilizer applied to soil as basal fertilizer and 70% nitrogen fertilizer as fertigation

表3 不同处理下玉米各生育期土壤铵态氮含量¹⁾

Table 3 Soil ammonium nitrogen content at each growth stage of maize under different treatments							g·hm ⁻²
季节 Season	水分处理 Water treatment	施氮比例 Fertigation proportion	苗期 Seedling stage	拔节期 Jointing stage	抽穗期 Heading stage	成熟期 Maturing stage	
春季 Spring	W ₆₀	F ₃₇	12.38±0.64c	20.76±0.60c	25.05±0.66d	18.03±0.40c	
		F ₅₅	13.43±0.91bc	21.02±0.67c	25.72±0.76d	18.13±0.68c	
	W ₈₀	F ₃₇	15.11±0.48b	26.86±0.30b	30.12±0.23c	20.87±0.66b	
		F ₅₅	14.98±0.86b	27.22±0.63b	33.77±0.25b	20.48±0.79b	
	W ₁₀₀	F ₃₇	21.02±0.78a	28.81±1.08a	39.68±0.70a	26.74±0.73a	
		F ₅₅	20.11±0.73a	28.46±0.14a	39.70±0.49a	26.92±0.76a	
夏季 Summer	W ₆₀	F ₃₇	21.57±0.01d	27.22±0.06d	29.19±0.05f	25.62±0.33d	
		F ₅₅	20.40±0.65d	31.82±0.22c	30.95±0.05e	25.72±0.51d	
	W ₈₀	F ₃₇	23.27±0.37c	32.47±0.32c	39.71±0.46c	37.96±0.58c	
		F ₅₅	25.04±0.05b	34.06±0.03b	37.66±0.68d	37.06±1.02c	
	W ₁₀₀	F ₃₇	27.60±0.78a	32.74±0.71c	46.59±0.12b	40.87±0.38b	
		F ₅₅	27.50±0.77a	39.20±0.44a	50.58±0.21a	44.40±0.31a	

1)表中数据为平均值±标准误;相同玉米季的同列数据后,不同小写字母表示处理间差异显著($P<0.05$, Duncan's法);W₆₀、W₈₀和W₁₀₀分别为田间持水量的50%~60%、70%~80%和90%~100%;F₅₅: 50%氮肥作基肥土施、50%氮肥作滴灌施肥;F₃₇: 30%氮肥作基肥土施、70%氮肥作滴灌施肥

1)The values in the table are means ± standard errors; Different lowercase letters in the same column of the same maize-season indicate significant difference among treatments ($P<0.05$, Duncan's test); W₆₀, W₈₀ and W₁₀₀ were 50%~60%, 70%~80% and 90%~100% of field water holding capacity, respectively; F₅₅: 50% nitrogen fertilizer applied to soil as basal fertilizer and 50% nitrogen fertilizer as fertigation; F₃₇: 30% nitrogen fertilizer applied to soil as basal fertilizer and 70% nitrogen fertilizer as fertigation

玉米不同生育时期土壤硝态氮含量的影响见表 4。春季玉米试验中, W_{60} 处理下, 抽穗期 F_{55} 土壤硝态氮含量较 F_{37} 提高 19.1%; W_{80} 处理下, 苗期和抽穗期 F_{55} 土壤硝态氮含量较 F_{37} 分别提高 7.0% 和 52.8%; W_{100} 处理下, 拔节期和成熟期 F_{37} 土壤硝态氮含量较 F_{55} 分别提高 37.1% 和 7.2%。施氮比例 F_{37} 处理下, 不同水分处理土壤硝态氮含量表现为:

苗期和拔节期 $W_{100} > W_{80} > W_{60}$, 抽穗期 W_{60} 低于 W_{80} 和 W_{100} , 成熟期 $W_{100} > W_{60} > W_{80}$; 施氮比例 F_{55} 处理下, 不同水分处理土壤硝态氮含量表现为: 苗期 W_{60} 显著低于 W_{80} 和 W_{100} , 拔节期和抽穗期 W_{80} 高于 W_{100} 和 W_{60} , 成熟期 W_{100} 显著高于 W_{60} 和 W_{80} 。

表 4 不同处理下玉米各生育期土壤硝态氮含量¹⁾

Table 4 Soil nitrate nitrogen content at each growth stage of maize under different treatments							g·hm ⁻²
季节	水分处理	施氮比例	苗期	拔节期	抽穗期	成熟期	
Season	Water treatment	Fertigation proportion	Seedling stage	Jointing stage	Heading stage	Maturing stage	
春季 Spring	W_{60}	F_{37}	4.39±0.21c	4.18±0.07b	2.77±0.03d	2.88±0.08c	
		F_{55}	4.17±0.25c	4.72±0.27b	3.30±0.13c	2.46±0.04d	
	W_{80}	F_{37}	7.69±0.16b	5.70±0.15a	3.90±0.20b	2.35±0.03d	
		F_{55}	8.23±0.16a	6.27±0.08a	5.96±0.01a	2.46±0.06d	
	W_{100}	F_{37}	8.37±0.09a	6.17±0.32a	3.76±0.12b	3.42±0.12a	
		F_{55}	8.33±0.06a	4.50±0.12b	3.95±0.05b	3.19±0.03b	
夏季 Summer	W_{60}	F_{37}	4.07±0.01c	3.46±0.47d	2.72±0.02c	1.77±0.02e	
		F_{55}	4.31±0.02c	4.06±0.02b	3.00±0.02b	3.09±0.10b	
	W_{80}	F_{37}	4.73±0.10b	4.03±0.02bc	3.24±0.02a	2.89±0.05c	
		F_{55}	6.65±0.12a	3.55±0.01bc	3.27±0.01a	3.37±0.03a	
	W_{100}	F_{37}	6.59±0.12a	4.66±0.02a	2.99±0.03b	2.54±0.02d	
		F_{55}	4.32±0.08c	4.14±0.08ab	2.40±0.08d	2.57±0.05d	

1)表中数据为平均值±标准误;相同玉米季的同列数据后,不同小写字母表示处理间差异显著($P<0.05$, Duncan's法); W_{60} 、 W_{80} 和 W_{100} 分别为田间持水量的50%~60%、70%~80%和90%~100%; F_{55} : 50%氮肥作基肥土施、50%氮肥作滴灌施肥; F_{37} : 30%氮肥作基肥土施、70%氮肥作滴灌施肥

1)The values in the table are means ± standard errors; Different lowercase letters in the same column of the same maize-season indicate significant difference among treatments ($P<0.05$, Duncan's test); W_{60} , W_{80} and W_{100} were 50%–60%, 70%–80% and 90%–100% of field water holding capacity, respectively; F_{55} : 50% nitrogen fertilizer applied to soil as basal fertilizer and 50% nitrogen fertilizer as fertigation; F_{37} : 30% nitrogen fertilizer applied to soil as basal fertilizer and 70% nitrogen fertilizer as fertigation

夏季玉米试验中, W_{60} 处理下, 拔节期、抽穗期和成熟期 F_{55} 土壤硝态氮含量较 F_{37} 分别提高 17.3%、10.3% 和 74.6%; W_{80} 处理下, 苗期和成熟期 F_{55} 土壤硝态氮含量较 F_{37} 分别增加 40.6% 和 16.6%; W_{100} 处理下, 苗期和抽穗期 F_{37} 土壤硝态氮含量较 F_{55} 分别提高 52.5% 和 24.6%。施氮比例 F_{37} 处理下, 不同水分处理土壤硝态氮含量表现为: 苗期和拔节期 $W_{100} > W_{80} > W_{60}$, 抽穗期和成熟期 $W_{80} > W_{100} > W_{60}$ 。施氮比例 F_{55} 处理下, 不同水分处理土壤硝态氮含量表现为: 苗期 W_{80} 显著高于 W_{60} 和 W_{100} , 抽穗期和成熟期 $W_{80} > W_{60} > W_{100}$ 。

2.2.3 亚硝态氮 不同处理对春季和夏季玉米不同生育时期土壤亚硝态氮含量的影响见表 5。春季玉米试验中, W_{60} 处理下, 苗期和拔节期 F_{55} 土壤亚硝态氮含量较 F_{37} 分别提高 160.6% 和 107.6%;

W_{80} 处理下, 拔节期 F_{55} 土壤亚硝态氮含量也显著高于 F_{37} ; W_{100} 处理下, 苗期 F_{37} 土壤亚硝态氮含量较 F_{55} 增加 75.9%。施氮比例 F_{37} 处理下, 苗期 W_{60} 土壤亚硝态氮含量较 W_{80} 和 W_{100} 分别低 88.0% 和 89.3%, 拔节期 W_{100} 土壤亚硝态氮含量较 W_{60} 和 W_{80} 分别高 284.5% 和 290.8%; F_{55} 处理下, 土壤亚硝态氮含量表现为: 苗期 $W_{80} > W_{100} > W_{60}$, 且差异显著, 拔节期 W_{100} 显著高于 W_{60} 和 W_{80} , 抽穗期 $W_{100} > W_{60} > W_{80}$, 且差异显著, 成熟期 W_{100} 显著高于 W_{80} 。

夏季玉米试验中, W_{60} 处理下苗期 W_{37} 土壤亚硝态氮含量显著高于 W_{55} , W_{100} 处理下成熟期 F_{55} 土壤亚硝态氮含量较 F_{37} 高 33.1%。施氮比例 F_{37} 处理下, 不同水分处理土壤亚硝态氮含量表现为: 苗期 $W_{100} > W_{60} > W_{80}$, 拔节期 $W_{100} > W_{80} >$

表 5 不同处理下玉米各生育期土壤亚硝态氮含量¹⁾

Table 5 Soil nitrite nitrogen content at each growth stage of maize under different treatments						μg·hm ⁻²
季节	水分处理	施氮比例	苗期	拔节期	抽穗期	成熟期
Season	Water treatment	Fertigation proportion	Seedling stage	Jointing stage	Heading stage	Maturing stage
春季 Spring	W ₆₀	F ₃₇	13.57±3.83d	22.44±2.39c	18.72±3.48b	4.24±0.51ab
		F ₅₅	35.36±2.41c	46.58±7.07b	14.60±4.68b	3.38±0.08ab
	W ₈₀	F ₃₇	113.26±8.24a	22.08±4.26c	24.29±4.95ab	0.00±0.00b
		F ₅₅	114.43±7.68a	47.37±10.22b	2.90±2.50c	0.00±0.00b
	W ₁₀₀	F ₃₇	127.11±7.38a	86.28±4.89a	24.12±2.75ab	5.91±4.9ab
		F ₅₅	72.25±7.70b	98.23±4.15a	34.70±1.23a	9.04±0.88a
夏季 Summer	W ₆₀	F ₃₇	3.03±1.92b	0.00±0.00c	1.74±1.74b	0.00±0.00c
		F ₅₅	0.00±0.00c	72.38±9.67c	1.53±1.53b	0.00±0.00c
	W ₈₀	F ₃₇	0.00±0.00c	42.10±16.94b	3.57±1.41b	0.00±0.00c
		F ₅₅	0.00±0.00c	37.97±12.75b	0.00±0.00b	0.00±0.00c
	W ₁₀₀	F ₃₇	15.86±0.22a	83.16±9.73a	21.99±4.22a	27.99±6.69b
		F ₅₅	16.88±0.89a	87.64±0.23a	20.17±7.73a	37.25±0.32a

1)表中数据为平均值±标准误;相同玉米季的同列数据后,不同小写字母表示处理间差异显著($P<0.05$, Duncan's法);W₆₀、W₈₀和W₁₀₀分别为田间持水量的50%~60%、70%~80%和90%~100%;F₅₅: 50%氮肥作基肥土施、50%氮肥作滴灌施肥;F₃₇: 30%氮肥作基肥土施、70%氮肥作滴灌施肥

1)The values in the table are means ± standard errors; Different lowercase letters in the same column of the same maize-season indicate significant difference among treatments ($P<0.05$, Duncan's test); W₆₀, W₈₀ and W₁₀₀ were 50%–60%, 70%–80% and 90%–100% of field water holding capacity, respectively; F₅₅: 50% nitrogen fertilizer applied to soil as basal fertilizer and 50% nitrogen fertilizer as fertigation; F₃₇: 30% nitrogen fertilizer applied to soil as basal fertilizer and 70% nitrogen fertilizer as fertigation

W₆₀, 抽穗期和成熟期 W₁₀₀ 显著高于 W₆₀ 和 W₈₀; F₅₅ 处理下, 不同水分处理土壤亚硝态氮含量表现为: 苗期、抽穗期和成熟期 W₁₀₀ 显著高于 W₆₀ 和 W₈₀, 拔节期 W₁₀₀ > W₈₀ > W₆₀。

2.3 土壤氧化亚氮通量与无机氮含量的关系

将土壤 N₂O 通量与采集气样当天的土壤无机氮含量进行相关性分析, 结果见表 6。由表 6 可以

看出, 春夏两季玉米土壤 N₂O 通量与土壤硝态氮和亚硝态氮含量之间呈极显著正相关, 相关系数分别为 0.433~0.579 和 0.396~0.532, 与土壤铵态氮含量之间呈负相关, 但相关性不显著。因此, 土壤硝态氮和亚硝态氮含量显著影响土壤 N₂O 通量, 而土壤铵态氮含量不显著影响土壤 N₂O 通量。

表 6 土壤 N₂O 通量与无机氮含量的相关性分析¹⁾

Table 6 Correlation analysis of soil N ₂ O flux and inorganic nitrogen content				
季节	指标	铵态氮	硝态氮	亚硝态氮
Season	Index	Ammonium nitrogen	Nitrate nitrogen	Nitrite nitrogen
春季 Spring	N ₂ O通量 N ₂ O flux	-0.107	0.579**	0.532**
夏季 Summer	N ₂ O通量 N ₂ O flux	-0.075	0.433**	0.396**

1) “**”: $P<0.01$, $r_{0.01}=0.300$, $n=72$

3 讨论与结论

3.1 土壤 N₂O 排放

土壤 N₂O 的产生是由硝化和反硝化过程共同作用的结果^[19]。土壤硝化作用是指在好氧条件下, 土壤硝化微生物将铵 (NH₄⁺)、氨 (NH₃) 等转化为亚

硝酸根 (NO₂⁻) 或硝酸根 (NO₃⁻) 等的过程^[20]。土壤反硝化作用则是在缺氧条件下, 土壤反硝化微生物将 NO₃⁻还原为一氧化氮 (NO)、N₂O 与氮气 (N₂) 的过程^[21]。本研究中土壤 N₂O 排放高峰均出现在每次滴灌施用氮肥之后, 这与土壤硝化和反硝化过程

主要依赖于土壤水分以及底物的规律一致^[19]。

本研究中,土壤 N₂O 通量在玉米苗期较高,可能原因是氮肥作基肥土施和苗期追肥后,苗期时玉米对氮素利用较少,土壤中无机氮累积,而灌水促进硝化和反硝化作用,从而导致土壤 N₂O 通量增加。土壤 N₂O 通量高峰主要集中在拔节期和抽穗期滴灌施肥后 1 周内,可能原因是尿素施入土壤后,在 1 周内会转化为铵态氮,为硝化作用提供了底物,从而有利于硝化过程中 N₂O 的排放,这与刘广深等^[22]施肥后土壤 N₂O 排放增加的规律一致。杜娅丹等^[23]发现,施氮后土壤中氮浓度增加,从而增强土壤硝化和反硝化作用。从水分处理来看,施用氮肥后 W₁₀₀ 土壤 N₂O 通量高峰显著高于 W₆₀ 和 W₈₀,说明高土壤含水量促进土壤 N₂O 的排放^[24]。王艳丽等^[25]也发现,土壤水分饱和和有利于嫌气环境,而嫌气环境增加反硝化潜势和 N₂O 排放。从施氮比例来看,相同水分处理下,施肥后 F₅₅ 土壤 N₂O 通量高峰低于 F₃₇,这可能是不同施氮比例影响了氮肥在不同生育期的分布所致。

从不同施氮比例来看,在相同水分处理下,施氮比例 F₃₇ 与 F₅₅ 处理的土壤 N₂O 累计排放量主要区别在于抽穗期,对于春季玉米试验, W₆₀ 和 W₈₀ 处理下土壤 N₂O 累计排放量均表现为 F₃₇ 显著高于 F₅₅,对夏季玉米试验, W₈₀ 处理下土壤 N₂O 累计排放量规律一致。此外, W₈₀F₅₅ 处理 2 季玉米全生育期土壤 N₂O 总排放量较低,且该处理春季玉米的鲜穗产量为 1 407.4 kg·hm⁻²,夏季玉米为 2 185.2 kg·hm⁻²,显著高于其他处理(结果未列示)。

3.2 土壤无机氮

本研究中,相同水分处理下,在抽穗期,施氮比例 F₅₅ 土壤铵态氮和硝态氮含量大多显著高于 F₃₇,而 W₈₀ 处理下 F₃₇ 土壤亚硝态氮含量显著高于 F₅₅。其可能原因是不同施氮比例下,促进作物地下部根系生长程度不同,使氮素吸收效率不同,使土壤细菌繁殖活性不同等,同时,土壤细菌的生长和繁殖也会引起土壤无机氮动态变化^[26]。

从不同水分处理来看,成熟期土壤铵态氮含量较苗期高,可能是由于成熟期追肥后导致土壤铵态氮增加,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^[27]。土壤铵态氮含量均表现为 W₆₀ < W₈₀ < W₁₀₀,说明土壤水分含量高可使土壤铵态氮含量提高。土壤硝态氮含量在整个玉米生育时期呈下降趋势,土壤硝态氮含量大多表现为 W₈₀ 高于 W₆₀ 和 W₁₀₀,说明土壤水分过高或过低都会降低土壤硝态氮含量。土

壤亚硝态氮含量大多在苗期和拔节期较高,而在抽穗期和成熟期较低,这与土壤 N₂O 通量在苗期和拔节期较高一致。抽穗期和成熟期土壤亚硝态氮含量较低的可能原因是由于参与硝化反应的 NH₄⁺-N 减少,致使产生的 NO₂⁻-N 减少^[28]。试验还发现,土壤亚硝态氮含量大多表现为 W₁₀₀ 高于 W₆₀ 和 W₈₀,这说明在高水分处理下,土壤反硝化作用显著。

3.3 土壤 N₂O 通量和土壤无机氮含量的关系

本试验中,土壤 N₂O 通量与土壤硝态氮和亚硝态氮含量之间呈极显著正相关,说明土壤硝态氮和亚硝态氮含量的变化显著影响土壤 N₂O 的排放,这与马兰等^[28]和张艺磊等^[29]的研究结果一致。他们也发现,土壤 N₂O 通量与土壤硝态氮和亚硝态氮含量之间呈显著正相关。

3.4 结论

相同施氮比例下,施肥后 W₁₀₀ 土壤 N₂O 通量高于 W₆₀ 和 W₈₀。相同水分处理下,施肥后 F₅₅ 土壤 N₂O 通量高峰低于 F₃₇。W₈₀F₅₅ 处理 2 季玉米全生育期土壤 N₂O 总排放量较低,且该处理 2 季玉米鲜穗产量高于其他处理。此外,土壤硝态氮和亚硝态氮含量显著影响土壤 N₂O 通量。特别是在 2 季玉米苗期和拔节期,土壤硝态氮和亚硝态氮含量越高,土壤进行的硝化与反硝化作用越强烈,导致中间产物土壤 N₂O 排放越多。

参考文献:

[1] PACHAURI R K, MEYER L, PLATTNER G K, et al. Contribution of working groups I, II and III to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change [R/OL]// IPCC. Climate change 2014: Synthesis report. Geneva, Switzerland: IPCC, 2014: 87. [2022-03-20]. <https://boris.unibe.ch/id/eprint/71642>.

[2] DAVIDSON E A, KANTER D. Inventories and scenarios of nitrous oxide emissions[J]. *Environmental Research Letters*, 2014, 9(10): 105012. doi: 10.1088/1748-9326/9/10/105012.

[3] TIAN H Q, YANG J, XU R T, et al. Global soil nitrous oxide emissions since the preindustrial era estimated by an ensemble of terrestrial biosphere models: Magnitude, attribution, and uncertainty[J]. *Global Change Biology*, 2019, 25(2): 640-659.

[4] GOMEZ-CASANOVAS N, MATAMALA R, COOK D R, et al. Net ecosystem exchange modifies the relationship between the autotrophic and heterotrophic components of soil respiration with abiotic factors in prairie grasslands[J]. *Global Change Biology*, 2012, 18(8): 2532-2545.

[5] XU X, SHI Z, LI D J, et al. , Soil properties control decomposition of soil organic carbon: Results from data-as-

simulation analysis[J]. *Geoderma*, 2016, 262: 235-242.

[6] 隗英华, 孙文涛, 韩晓日, 等. 春玉米土壤矿质氮累积及酶活性对施氮的响应[J]. *植物营养与肥料学报*, 2014, 20(6): 1368-1377.

[7] 侯云鹏, 尹彩侠, 孔丽丽, 等. 氮肥对吉林春玉米产量、农学效率和氮养分平衡的影响[J]. *中国土壤与肥料*, 2016(6): 93-98.

[8] 朱艳, 蔡焕杰, 宋利兵, 等. 加气灌溉改善温室番茄根区土壤通气性[J]. *农业工程学报*, 2017, 33(21): 163-172.

[9] 黎会仙, 王文娥, 胡笑涛, 等. 水肥一体化膜下滴灌水肥及速效氮分布特征研究[J]. *灌溉排水学报*, 2018, 37(3): 51-57.

[10] 奚雅静, 汪俊玉, 李银坤, 等. 滴灌水肥一体化配施有机肥对土壤 N_2O 排放与酶活性的影响[J]. *中国农业科学*, 2019, 52(20): 3611-3624.

[11] 谢海宽, 李贵春, 徐驰, 等. 不同灌溉方式对设施菜地 N_2O 排放的影响及其年际差异[J]. *农业环境科学学报*, 2018, 37(4): 825-832.

[12] 于亚泽, 焦燕, 杨文柱, 等. 不同灌溉方式旱田土壤 N_2O 排放和氮素淋溶特征[J]. *中国环境科学*, 2021, 41(2): 813-825.

[13] 李银坤, 郭文忠, 薛绪掌, 等. 不同灌溉施肥模式对温室番茄产量、品质及水肥利用的影响[J]. *中国农业科学*, 2017, 50(19): 3757-3765.

[14] 强浩然, 张国斌, 郁继华, 等. 不同水分和氮素供应对日光温室辣椒栽培基质氮转化细菌和酶活性的影响[J]. *园艺学报*, 2018, 45(5): 943-958.

[15] 廖桂堂, 崔阔澍, 乔善宝, 等. 四川省玉米生产发展的现状、问题及对策研究[J]. *四川农业科技*, 2021(2): 57-60.

[16] 史亚兴, 张保民. 鲜食玉米的发展与前景: 探索我国甜玉米的北方市场[J]. *蔬菜*, 2016(12): 1-6.

[17] 龙鹏宇, 农梦玲, 白雪, 等. 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*, 2020, 51(1): 122-129.

[18] 杨靖民, 张忠庆, 曹国军. 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*, 2014(2): 101-105.

[19] 马智勇, 贾俊香, 熊正琴, 等. 典型菜地土壤剖面 N_2O 浓度、扩散通量与净周转率变化[J]. *应用与环境生物学报*, 2019, 25(3): 611-616.

[20] 张珂彬, 王毅, 刘新亮, 等. 茶园氧化亚氮排放机制及减排措施研究进展[J]. *生态与农村环境学报*, 2020, 36(4): 413-424.

[21] GELFAND I, YAKIR D. Influence of nitrite accumulation in association with seasonal patterns and mineralization of soil nitrogen in a semi-arid pine forest[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2008, 40(2): 415-424.

[22] 刘广深, 徐文彬, 洪业汤, 等. 土壤 N_2O 释放通量季节变化的主要环境驱动因素研究[J]. *矿物学报*, 2002, 22(3): 229-234.

[23] 杜娅丹, 张倩, 崔冰晶, 等. 加气灌溉水氮互作对温室芹菜地 N_2O 排放的影响[J]. *农业工程学报*, 2017, 33(16): 127-134.

[24] DI H J, CAMERON K C, PODOLYAN A, et al. Effect of soil moisture status and a nitrification inhibitor, dicyandiamide, on ammonia oxidizer and denitrifier growth and nitrous oxide emissions in a grassland soil[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2014, 73: 59-68.

[25] 王艳丽, 李虎, 孙媛, 等. 水肥一体化条件下设施菜地的 N_2O 排放[J]. *生态学报*, 2016, 36(7): 2005-2014.

[26] HE L, SONG X, FENG W, et al. Improved remote sensing of leaf nitrogen concentration in winter wheat using multi-angular hyperspectral data[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2016, 174: 122-133.

[27] 杨杉, 吴胜军, 蔡延江, 等. 硝态氮异化还原机制及其主导因素研究进展[J]. *生态学报*, 2016, 36(5): 1224-1232.

[28] 马兰, 李晓波, 马舒坦. 双氰胺减少铵态氮肥施用后潮土 N_2O 排放的机制[J]. *农业环境科学学报*, 2021, 40(12): 2801-2808.

[29] 张艺磊, 韩建, 张丽娟, 等. 新型尿素对农田土壤 N_2O 排放、氨挥发及土壤氮素转化的影响[J]. *江苏农业科学*, 2019, 47(11): 313-316.

【责任编辑 李晓卉】