

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.12.027

旱区覆膜滴灌棉田 N₂O 排放对化肥减量有机替代的响应^{*}

陶瑞¹ 张前前¹ 李锐¹ 刘涛² 褚贵新¹

(1. 石河子大学农学院, 石河子 832003; 2. 石河子大学新疆生产建设兵团绿洲生态农业重点实验室, 石河子 832003)

摘要: 覆膜滴灌条件下,采用静态箱-气相色谱法研究了不同施肥策略:CK (不施肥)、CF (N 300 kg/hm²; P₂O₅ 90 kg/hm²; K₂O 60 kg/hm²)、60% CF + OF (普通有机肥 6 000 kg/hm²)、60% CF + BF (生物有机肥 6 000 kg/hm²)对棉田土壤 N₂O 排放的影响,旨在明确滴灌棉田连续不同施肥策略下土壤 N₂O 的排放特征。结果表明,棉花生育期 N₂O 排放通量表现为施肥处理大于不施肥处理,滴灌施肥后第 3/4 天 N₂O 排放通量顺序为 CF > 60% CF + OF > 60% CF + BF > CK,而滴灌后第 7/8 天 N₂O 排放通量则表现为有机肥处理高于化肥处理,滴灌施肥结束后表现与之相同;生育期的 N₂O 排放总量以 100% 化肥处理(CF)最高,与其相比,60% CF + OF 和 60% CF + BF 处理分别降低 3.75% 和 8.37%, N₂O 排放系数则分别降低 1.39% 和 73.8%;相关及通径分析均表明,与土壤 NH₄⁺-N 相比, NO₃⁻-N 与 N₂O 排放的关系更密切。

关键词: 滴灌棉田 铵态氮 硝态氮 N₂O 排放通量 通径分析

中图分类号: S147.3; X511 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2015)12-0204-08

Response of Soil N₂O Emission to Partial Chemical Fertilizer Substituted by Organic Fertilizer in Mulch-drip Irrigated Cotton Field

Tao Rui¹ Zhang Qianqian¹ Li Rui¹ Liu Tao² Chu Guixin¹

(1. College of Agriculture, Shihezi University, Shihezi 832003, China

2. Key Laboratory of Oasis Eco-agriculture of the Xinjiang Production and Construction Corps, Shihezi University, Shihezi 832003, China)

Abstract: The effects of combining organic fertilizer with chemical fertilizer on cotton field N₂O emission flux, emission characteristic and total amount of N₂O emission were investigated by using the static chamber-gas chromatograph method under plastic-mulched drip irrigation. The four-year field experiment consisted of four treatments, including CK, CF, 60% CF + OF and 60% CF + BF (without fertilization as CK, total chemical fertilizer as CF, organic fertilizer as OF and bio-organic fertilizer as BF). The results showed that N₂O emissions with fertilizer supply were significantly higher than that without fertilizer treatment during the growing season of cotton. The order of N₂O emission on the third or fourth days after fertilization was: CF > 60% CF + OF > 60% CF + BF > CK, and a significant difference existed between treatments (*P* < 0.01) during each fertigation schedule with drip irrigation system. However, treatments with organic fertilizer combined with chemical fertilizer increased N₂O emission compared with chemical fertilizer treatments on the seven or eighth days after fertigation. In addition, when all irrigation and fertilization schedules were finished, higher N₂O emission flux was always observed with treatments supplied with organic fertilizer in contrast to that with chemical fertilizer application. The highest amount of total N₂O emission in the cotton growing season was found in CF treatment. Compared with CF, the treatments of 60% CF + OF and 60% CF + BF decreased N₂O emission by 3.75% and 8.37%,

收稿日期: 2015-03-08 修回日期: 2015-06-19

^{*} 农业部公益性行业科研专项资助项目(201103004)和“十二五”国家科技支撑计划资助项目(2012BAD42B02)

作者简介: 陶瑞, 博士生, 主要从事温室气体排放与耕地质量提升技术研究, E-mail: taorui15001619715@163.com

通讯作者: 褚贵新, 教授, 博士生导师, 主要从事作物营养与分子生态研究, E-mail: chuguixinshzu@163.com

respectively. It was found that N₂O emission factor (EF) was also decreased by 1.39% with 60% CF + OF treatment and by 73.8% with 60% CF + BF treatment. Meanwhile, path analysis showed that N₂O emission was more closely related to soil NO₃⁻-N content than to NH₄⁺-N content.

Key words: Drip irrigated cotton field Ammonium nitrogen Nitrite nitrogen N₂O emission flux
Path analysis

引言

作为一种重要的温室气体,氧化亚氮(N₂O)不仅会产生温室效应而且会破坏臭氧层。研究表明,大气中 N₂O 浓度正以每年 0.2% ~ 0.3% 的速度递增^[1]。农业土壤是全球最主要的 N₂O 释放源^[2],据联合国环境规划署报道,全球农业每年 N₂O-N 排放量估计可达到 3.8 ~ 6.8 Tg/a,占全球 N₂O 排放总量的 25% ~ 39%^[3]。土壤硝化-反硝化反应过程均可产生 N₂O^[4],其受一系列综合因素影响,而因不同施肥策略所导致的土壤有机氮与无机氮变化是影响农田土壤 N₂O 排放的最重要因素^[5],据 Bouwman 等^[6]2010 年报道,全球耕地土壤每年因施用氮肥(包含有机氮)所造成的直接或间接 N₂O-N 排放约为 4 Tg,因此,优化氮肥管理实现温室气体 N₂O 减排与氮素养分高效利用备受各国政府及科学界的关注。

有机肥可培肥土壤地力,提高粮食安全保障水平^[7],其对作物产量效应、土壤碳氮转化过程及地力提升等方面已有大量研究^[8-9],近年来,有机肥对环境效应尤其是对 N₂O 排放的影响逐渐成为研究热点。如 Alluvione 等^[10]研究发现,施用有机肥相比尿素减少了灌溉农田 N₂O 排放,认为其原因是有机肥矿化的氮较低;邹建文等在水稻田研究也表明,与施用化肥相比,牛廐肥 + 化肥和猪廐肥 + 化肥明显减少了稻田 N₂O 排放,降幅分别为 21% 和 18%^[11]。但也有研究表明,与无机肥相比,施用有机肥可促进 N₂O 排放^[12]。不同的研究结论各异,其原因与有机肥类型、施用量及其与化肥配施比例紧密相关^[13]。随着膜下滴灌水肥一体化技术在新疆的不断推广,化肥尤其是水溶性肥料用量大幅度增加。有机肥由于其费时、费工及不可溶的特点导致其施用量急剧缩减,这种施肥方式所引发的负效应愈发严峻。建立有机肥无机肥相结合的高效施肥技术是实现土壤增碳、地力提升及 N₂O 减排的基

础。目前,关于干旱区绿洲滴灌农田 N₂O 排放规律以及排放量的报道相对较少。因此,本文基于连续 4 年的定位施肥试验,研究化肥减量有机替代对滴灌棉田 N₂O 排放的影响,旨在揭示覆膜滴灌农田土壤 N₂O 排放规律及其对不同施肥方式的响应,以期建立兼顾滴灌农田地力提升与 N₂O 减排的环境友好型施肥模式。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验田位于石河子大学试验场(东经 84°58' ~ 86°24',北纬 43°26' ~ 45°20')。供试土壤属灌耕灰漠土(灌淤旱耕人为土, *Calcaric fluvisals*),施肥处理前 0 ~ 20 cm 土壤基础有机质含量 13.5 g/kg;全氮 0.95 g/kg;全磷 0.30 g/kg;碱解氮 88.6 mg/kg;速效磷 23.4 mg/kg;速效钾 136.0 mg/kg;pH 值 8.1。

1.2 试验材料

种植棉花品种为新陆早 46 号 (*Gossypium*, cv Xinluzao46),供试肥料种类:尿素(含 N 质量分数 46%)、磷酸钾铵(含 N 质量分数 18%、含 P₂O₅ 质量分数 24%)、磷酸二氢钾(含 P₂O₅ 质量分数 52%、含 K₂O 质量分数 31.8%);普通精制有机肥含有机质为 45%,氮、磷、钾总养分含量大于等于 4.5%,含水率为 30%;生物有机肥为南京农业大学研制的“爸爱我(BIO)”,有效活菌数大于等于 0.5 亿个/g,有机质含量为 29.7%,氮、磷、钾总养分含量大于等于 6%,游离氨基酸 + 活性小肽大于等于 4%,pH 值 7.16,含水率 28.3%。普通有机肥和生物有机肥做基肥在棉花播前一次性施入 0 ~ 20 cm 土层,化学肥料是在棉花生育期根据其需肥特性按比例分为 8 次随水滴施,具体施肥时期见表 1。

1.3 试验设计

试验开展于 2014 年,为连续 5 年定位试验的第 4 年。试验设置 4 个处理,各处理 3 次重复,分别为 CK(不施肥)、CF(N 300 kg/hm²、P₂O₅ 90 kg/hm²、

表 1 棉花生育期化肥随水滴施分配情况

Tab.1 Distribution scheme of NPK chemical fertilizers during cotton growth period								
日期	06-16	06-26	07-05	07-15	07-23	08-01	08-11	08-21
施用比例(占总施肥量百分数)/%	7	10	10	20	20	15	10	8

K₂O 60 kg/hm²)、60% CF + OF (普通有机肥 6 000 kg/hm²)、60% CF + BF(生物有机肥 6 000 kg/hm²), 共计 12 个小区,小区面积为 90 m² (4.5 m × 20 m), 播幅内宽、窄行距为 (30 + 60 + 30) cm,1 膜 4 行,共计 10 行,每小区设置同化箱一个。随机排列分布, 小区之间设 1 m 保护行。

1.4 取样及样品处理

N₂O 气体采集:于一次灌水施肥周期的第 3 天 (或第 4 天,主要受降雨和灌溉时间影响)和第 7 (或 8)天进行 N₂O 气体采集,在化肥追施结束后(8 月 21 日)再采集 5 次(其中 9 月份 3 次,10 月份 2 次), 直至棉花收获停止采气,在此期间,N₂O 取样时间间隔增长。土壤 N₂O 排放采用静态箱法测定,其尺寸为 0.6 m × 0.5 m × 1 m,每小区放置 1 个静态箱,将箱子的底座密封槽埋在土壤中,在密封槽中加入水,防止箱内气体外溢。小孔中塞入密封橡胶塞,箱子置于密封槽中,其内放一温度计,用以指示密闭箱中的温度。取样时用三通阀进气,一头通过橡胶塞插到箱子中,另一头用一次性注射器将气样抽到真空中。采样时间为 09:00—11:00,各采样点每次采 4 个样,间隔 10 min 采一个样,同时测定气温、箱温和 5 cm 深度土温。采集的 N₂O 气体在实验室用 Agilent 7890A 型气相色谱仪进行测定。

土壤样品采集:取 N₂O 的同时,采集土壤用于测定铵态氮、硝态氮。具体方法为:在各试验小区选 5 个样点,采样深度为 0 ~ 20 cm 耕层土壤,剔除砾石和植物残根,过 2 mm 筛后储存于 -20℃ 冰箱待测。

1.5 测定项目与方法

土壤矿质态氮含量测定方法:称取 5 g 新鲜土样加 2 mol/L KCl 溶液 50 mL,25℃ 恒温振荡 1 h 后过滤,滤液采用流动分析仪测定铵态氮和硝态氮,同时测定样品含水率,以干燥土质量计算样品中铵态氮和硝态氮含量。

N₂O 气体排放通量计算式^[14]为

$$F = \rho h \frac{dc}{dt} \frac{273}{273 + T} \tag{1}$$

式中 F ——气体排放通量,μg/(m²·h)
 ρ ——标准状态下气体密度,取值 1.25 kg/m³
 h ——采样箱的净高度,m
 $\frac{dc}{dt}$ ——单位时间采样箱内气体的浓度变化量
 T ——采样时箱内的平均摄氏温度,℃

273 为气体方程常数。同时使用便携式数字温度计测定 5 cm 土壤温度,N₂O 排放通量用每次观测 3 个重复的平均值及标准偏差表示。

N₂O 排放总量计算式^[14]为

$$F_t = \sum \frac{F_{i+1} + F_i}{2} (D_{i+1} - D_i) \times 24 \times 10^{-3} \tag{2}$$

式中 F_t ——N₂O 季节排放总量,mg/m²
 $F_i、F_{i+1}$ ——第 $i、i + 1$ 次采样时 N₂O 平均排放通量,μg/(m²·h)
 $D_i、D_{i+1}$ ——第 $i、i + 1$ 次采样时间,d

N₂O 平均排放量是将 3 个重复的每次观测值按时间间隔加权平均后再平均。

$$f = \frac{F_N - F_{CK}}{N} \times 100\% \tag{3}$$

式中 f ——N₂O 排放系数
 F_N ——施氮处理 N₂O 排放量
 F_{CK} ——不施氮处理 N₂O 排放量
 N ——施氮量

1.6 数据分析

数据处理以 3 个重复的平均值进行方差分析及多重比较。相关性分析用全部观测值进行。数据处理与分析采用 Excel 2003、SPSS 17.0 (SPSS Inc., Chicago) 和 Graphpad prism 5.0 (Graphpad Inc., USA) 完成。

2 结果与分析

2.1 覆膜滴灌棉田灌水施肥周期内 N₂O 排放通量

图 1 表示棉花生长季不同处理土壤 N₂O 排放通量的变化。其中 05-30 和 06-13 表示未灌水施肥前 N₂O 排放通量,在此期间,N₂O 排放通量的大小顺序为:60% CF + OF > 60% CF + BF > CF > CK。从 06-19 开始为棉花生长季灌水施肥周期内的 N₂O 排放通量,图 1 中 8 个向下箭头为 8 次灌水施肥时间,2 次灌水施肥间隔进行 2 次气体取样。从图中看出,在 1 次灌水施肥周期的第 3/4 天出现 N₂O 排放高峰,之后开始下降,在第 7/8 天降到最低。CK 处理的 N₂O 排放通量始终处于较低水平,滴灌施肥各处理与之相比可显著促进土壤 N₂O 的排放($P < 0.05$),CF、60% CF + OF 和 60% CF + BF 处理土壤 N₂O 排放通量变化范围为 146.5 ~ 552.2 μg/(m²·h)、218.8 ~ 423.3 μg/(m²·h) 和 225.9 ~ 443.4 μg/(m²·h),其中在每次灌水施肥后的第 3/4 天均表现为化肥单施处理(CF) N₂O 的排放通量最高,如在第 2 次灌水后的第 3 天(06-29),CF 处理的 N₂O 排放通量为 367.0 μg/(m²·h),较 60% CF + OF 和 60% CF + BF 处理分别增加 33.9% 和 56.2%;而在第 7/8 天,CF 处理 N₂O 的排放则相对小于有机替代处理,如在第 3 次灌水施肥的第 7 天(07-12)为 273.1 μg/(m²·h),较 60% CF + OF

和 60% CF + BF 处理分别降低了 30.5% 和 38.3%。在 8 月份(棉花铃期),CK、CF、60% CF + OF 和 60% CF + BF 处理 N₂O 的排放通量计算平均值(加权平均,共 6 次采样)分别为 170.5、363.1、345.8、327.1 $\mu\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$,CF 处理较 CK、60% CF + OF 和 60% CF + BF 处理分别增加 112.9%、5.0% 和 11.1%。对于 2 个有机无机肥配施处理而言,6 月份 N₂O 排放通量表现为 60% CF + OF > 60% CF + BF,而 7、8 月份与之相反。由此可知,在有机肥做基肥施用过后至化肥随水滴施之前,N₂O 排放通量表现为有机替代处理大于化肥处理,在整个施肥周期内,一次施肥后的第 3/4 天的 N₂O 排放通量表现为化肥处理大于 2 种化肥减量配施有机肥处理,而第 7/8 天表现与之相反。

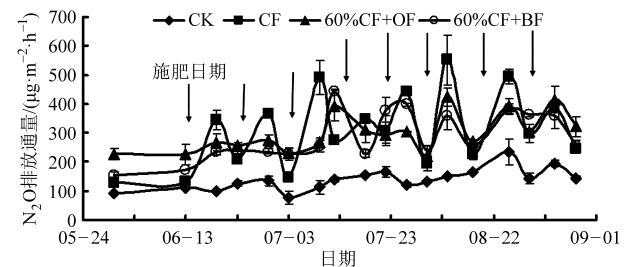


图 1 棉花生长季土壤 N₂O 排放的季节变化
(每次灌水施肥后第 3/4 天)

Fig.1 Seasonal changes of soil N₂O emissions during growth stage of cotton (on the third or fourth days after fertigation)

2.2 停止灌水施肥后 N₂O 排放通量的变化

图 2 表示棉花生长后期灌水施肥停止后各处理 N₂O 排放通量的变化。N₂O 排放通量变化随着时间的推移逐渐趋于平缓,各处理间也由显著性差异水平(09-04)转变为无明显差异(10-27)。在此期间,各处理的 N₂O 排放通量变化幅度分别为 45.6 ~ 85.9 $\mu\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ (CK)、54.7 ~ 128.3 $\mu\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ (CF)、58.9 ~ 155.6 $\mu\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ (60% CF + OF) 和 61.0 ~ 184.2 $\mu\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ (60% CF + BF);与 CK 和 CF 相比,60% CF + OF 和 60% CF + BF 的 N₂O 平均排放通量分别增加 56.7%、20.1% 和 83.2%、40.3%,其大小顺序为:60% CF + BF > 60% CF + OF > CF > CK。可知,在棉花生长后期,停止灌水施肥后的初期,各施肥处理 N₂O 排放通量仍显著高于不施肥处理,有机肥处理高于化肥处理,随着时间的推移,各处理 N₂O 排放通量逐渐减小并趋于平衡。

2.3 棉花生长季 N₂O 排放总量

棉花生长季各月份 N₂O 排放总量如图 3 所示(不同小写字母表示差异达 $P < 0.05$ 显著水平,下同)。由图 3a 可以看出,6 月份各处理的 N₂O 排放

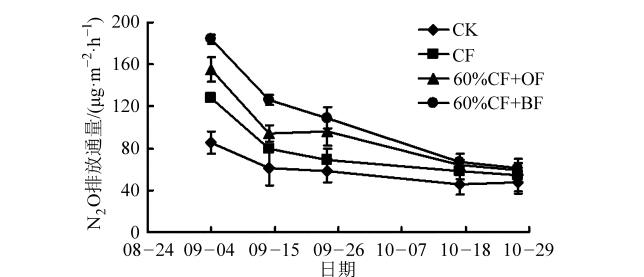


图 2 滴灌棉田土壤 N₂O 排放通量的变化
(停止灌水施肥后)

Fig.2 Variations of soil N₂O emission flux after fertigation during later growth stage of cotton

总量存在显著差异 ($P < 0.05$),大小顺序为:60% CF + OF > CF > 60% CF + BF > CK,CF、60% CF + OF 和 60% CF + BF 处理的 N₂O 排放总量较 CK 相比分别增加 110.0%、125.1% 和 88.8%;7 月份(图 3b),CF 较 60% CF + OF 和 60% CF + BF 处理显著增加了 N₂O 排放总量,但 60% CF + OF 和 60% CF + BF 处理间无显著差异。与 60% CF + OF 和 60% CF + BF 处理相比,CF 处理 N₂O 排放总量分别增加 24.3% 和 17.0%;各处理 8 月份(图 3c)的 N₂O 排放总量仍以 CF 处理最大(2.67 kg/hm^2),CK 最小(1.23 kg/hm^2),各施肥处理 N₂O 排放总量与 CK 相比均达到显著性差异,CF 处理较 60% CF + BF 处理可显著增加 N₂O 排放,而与 60% CF + OF 处理相比差异不明显。在灌水施肥停止后(9、10 月份),各处理 N₂O 排放量大小顺序为:60% CF + BF ≥ 60% CF + OF > CF > CK,有机肥处理 60% CF + OF、60% CF + BF 较 CF 提高 19.5% 和 34.6%。说明,在棉花生长季灌水施肥期间(7、8 月份),化肥处理的 N₂O 排放总量大于 2 种有机肥配施处理,而灌水施肥停止后,有机肥处理增加了 N₂O 排放总量。

2.4 N₂O 生育期排放总量及排放系数

棉花生育期土壤 N₂O 排放总量和排放系数见表 2,不同施肥处理土壤 N₂O 排放总量为 3.92 ~ 8.29 kg/hm^2 ,其中以 CF 处理的 N₂O 排放总量最大,与 CK 相比,CF、60% CF + OF 和 60% CF + BF 处理 N₂O 排放总量分别增加了 111.5%、103.8% 和 95.1%,CF 处理 N₂O 排放总量较 60% CF + OF 和 60% CF + BF 分别提高了 3.75% 和 8.37%,且与 60% CF + BF 处理达到显著性差异 ($P < 0.05$),各施肥处理的 N₂O 排放总量占施氮量的 0.84% ~ 1.46%,以 CF 最大,60% CF + BF 处理最小;其中与 60% CF + OF、60% CF + BF 处理相比,CF 处理的排放系数提高了 1.39%、73.8%,说明减量化肥配施有机肥或生物有机肥较 100% 化肥处理可降低肥料

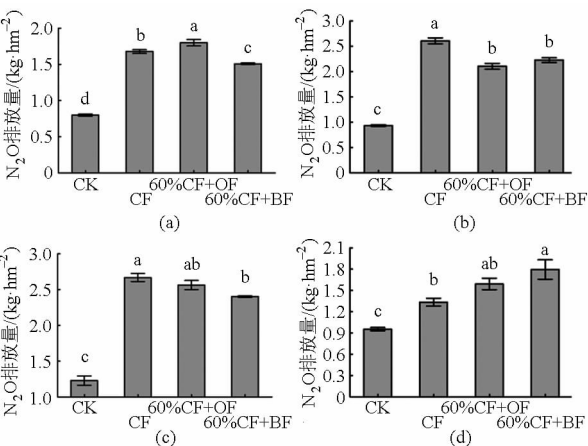


图3 施肥对棉花生长季灌水施肥期间土壤 N₂O 排放总量的影响

Fig. 3 Effect of fertilization on soil N₂O emission during fertigation

(a) 6 月份 N₂O 排放总量 (b) 7 月份 N₂O 排放总量
(c) 8 月份 N₂O 排放总量 (d) 9、10 月份 N₂O 排放量之和

中的 N 以 N₂O 形式损失,尤以化肥配施生物有机肥处理降低更明显。

表2 各处理 N₂O 排放总量和氮肥 N₂O 排放系数
Tab. 2 Cumulative N₂O emission and N₂O emission factor under different treatments

处理	N 施用量/ (kg·hm ⁻²)	N ₂ O 排放总量/ (kg·hm ⁻²)	排放系数/ %
CK	0	3.92 ± 0.06 ^c	
CF	300	8.29 ± 0.21 ^a	1.46
60% CF + OF	282	7.99 ± 0.34 ^{ab}	1.44
60% CF + BF	444	7.65 ± 0.28 ^b	0.84

2.5 N₂O 排放通量与土壤矿质氮、土温以及土壤含水率的通径分析及相关性分析

表3为N₂O排放通量与土壤硝态氮、铵态氮、5 cm深度土温及土壤含水率的相关性分析及其与硝态氮、铵态氮的通径分析。由相关性分析可得,土壤N₂O排放与NH₄⁺-N、NO₃⁻-N含量及土壤5 cm深度温度在P<0.001水平上显著正相关,而与土壤含水率在P<0.01水平显著正相关,其紧密关系表现为:NO₃⁻-N(0.841)>NH₄⁺-N(0.712)>5 cm深度土温(0.508)>土壤含水率(0.297)。由通径分析可得,矿质氮对N₂O排放的直接重要性(通径系数)表现为:NO₃⁻-N(0.698)>NH₄⁺-N(0.192),但从间接影响上看,NH₄⁺-N通过NO₃⁻-N产生的间接系数达到0.521,是直接通径系数的3倍。通过2种分析方法得出,土壤NO₃⁻-N含量与N₂O浓度关系最紧密,在干旱区绿洲滴灌农田,土温对N₂O排放的影响大于土壤含水率。

表3 土壤 N₂O 排放通量与铵态氮、硝态氮、土温及土壤含水率的通径分析及相关性分析
Tab.3 Correlation and path analyses between N₂O emission and soil NH₄⁺-N, NO₃⁻-N, soil temperature and water content in top surface soil

因子	r(N ₂ O) (n = 104)	通径系数 (N ₂ O)	间接通径系数	
			NO ₃ ⁻ -N	NH ₄ ⁺ -N
NO ₃ ⁻ -N	0.841 ***	0.698		0.430
NH ₄ ⁺ -N	0.712 ***	0.192	0.521	
5 cm 深度土温	0.508 ***			
土壤含水率	0.297 **			

注:r为Pearson相关系数;**、***分别表示P<0.01和P<0.001水平(双侧)显著相关。

3 讨论

3.1 施肥对滴灌农田 N₂O 排放的影响

在本研究中,灌水施肥的第3/4天N₂O排放量表现为100%化肥处理大于有机与无机肥配施处理,而第7/8天N₂O排放量则与之相反,其原因可能是,100%化肥处理的无机氮施用量在各次施用均均大于有机肥处理,施入土壤的氮可在较短时间内(2~3 d)形成大量的NH₄⁺-N和NO₃⁻-N,从而增加硝化与反硝化的底物促进N₂O的生成,到了施肥后第7/8天,有机无机肥配施处理由于有机肥仍在持续矿化出无机氮,而化肥处理的矿质氮含量已降为较低水平,此外,长期施用有机肥增强了土壤的硝化-反硝化微生物活动,促进了土壤硝化-反硝化作用释放N₂O^[15]。在本试验中,滴灌棉花生长季N₂O排放总量表现为有机肥处理小于单施化肥处理,这是由于60%CF+OF和60%CF+BF处理中仅施用了60%的化肥,这种配施模式可有效地调节土壤C/N,提高土壤生物、植物的吸氮能力和微生物的固氮能力;另一方面,本试验田间管理采用“十水八肥”灌水施肥策略,100%化肥处理在各次施肥时施用量均均大于有机肥处理,导致肥料随水滴施后的第3/4天出现明显的N₂O释放高峰,而减量化肥配施有机肥处理则明显减弱了N₂O排放峰值,虽然在施肥第7/8天的排放通量大于化肥处理,但此时期内N₂O排放通量已明显小于施肥后第3/4天。因此,在干旱区滴灌施肥模式下,有机肥部分替代化肥较全量化肥单施可实现温室气体N₂O减排,增加氮的可利用性。李梦雅等^[16]研究认为,与施用尿素处理相比,施用等量有机态氮肥的处理N₂O释放量显著降低;Gregorich等^[17]研究也发现施固体有机肥处理的N₂O释放量(0.99 kg/(hm²·a))显著低于施用化肥的处理(2.82 kg/(hm²·a)),这与本研究结论相似。但也有学者持有相反观点,董玉红等^[18]研究表明,

在等施氮量的情况下,化肥配合有机肥施用的土壤 N_2O 排放通量大于单纯的化肥处理;李晓等^[19]的研究结果表明,在施氮量相同的情况下,人粪处理的旱作小米生长季 N_2O 排放总量大于尿素处理,而牛粪处理最低。可见,因试验地区的环境、耕作制度及肥料投入比例和类型等因素的不同,有机肥对土壤 N_2O 排放的影响也不同。

3.2 施肥对土壤 N_2O 排放系数的影响

关于 N_2O 排放系数,不同学者持有不同的结论。武其甫等^[20]在保护地研究得到的 N_2O 排放系数为 0.46% 左右;王秀斌等^[21]测得华北平原玉米季 N_2O 排放损失率为 0.68% ~ 1.04%;丁洪等^[22]测定的河南封丘玉米季氮肥的 N_2O 排放损失率为 0.76% ~ 0.93%;也有研究报道指出种植大白菜的土壤 N_2O 排放系数仅为 0.10% ~ 0.25%^[23];这些研究结果中 N_2O 排放损失率均较小,并认为土壤反硝化作用不是这些地区肥料损失的主要途径。而本研究表明,在 180 ~ 300 kg/hm² 的氮肥施用量下,滴灌棉田土壤 N_2O 排放总量为 3.92 ~ 8.25 kg/hm²,分别占当季氮肥用量的 0.84% ~ 1.46%,造成这种差异的原因可能是,一方面本试验区为滴灌施肥制度,灌水施肥周期短,加上新疆夏季炎热高温天气,致使土壤经常处于干湿交替状态,为硝化-反硝化作用提供了充足的底物和有利的环境因子,导致每次施肥后均出现较大的 N_2O 排放高峰,另一方面本试验已连续开展 4 年,CK 处理已长时间不施肥,致使可供的硝化-反硝化作用的底物明显减少, N_2O 排放量相较其他处理显著降低,致使计算 N_2O 排放系数的本底值较小。Cao 等^[24]在白菜地研究得到的 N_2O 排放系数为 1.09% ~ 1.63%,这与本试验结果相近;曾泽彬等^[25]在旱地玉米田地研究得到 N_2O 排放量占施氮肥量的 0.88% ~ 1.63%,给出的解释为试验地区降雨多且频繁,与本试验膜下滴灌形成的高频灌水条件相类似;有学者进一步研究表明,滴灌条件下施用铵态氮肥,更能促进土壤 N_2O 的排放^[26],这也验证了本试验的结论。

3.3 N_2O 排放量与影响因子的相关性和通径分析

本研究表明, N_2O 排放通量与土壤硝态氮、铵态氮以及土壤 5 cm 深度温度均呈现极显著的正相关关系,与土壤含水率呈现显著关系,但与 5 cm 深度土温和含水率相比,土壤矿质氮与 N_2O 排放通量关系更为显著,由此说明,土壤矿质氮是影响滴灌棉田 N_2O 季节排放的重要因子,而通径分析表明,相比土壤 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 含量对 N_2O 排放起主导作

用,这可能是因为有机肥矿化分解需要氧气,导致土壤微环境呈现缺氧状态,有利于反硝化微生物繁殖,促进反硝化过程进行,武其甫等^[20]在保护地研究中也得出,各施肥处理土壤 N_2O 通量与当日所取表层土壤硝态氮含量之间有极显著正相关关系,这与本研究结果相似;阎佩云等^[27]研究也认为, N_2O 排放通量与土壤硝态氮含量呈极显著正相关($P < 0.01$),当硝态氮含量高时,产生的 N_2O 也越多,而与铵态氮相关性不显著,但也有研究指出,硝态氮与 N_2O 累积释放量的直接通径系数为 -7.562,并认为反硝化作用产生的 N_2O 较少。而关于土温对 N_2O 影响的研究也持有不同观点,如阎佩云等^[27]在研究春玉米农田 N_2O 排放时表明, N_2O 的排放通量与地表 0 cm 和 10 cm 土层的温度呈负相关($P < 0.05$);但董玉红等^[28]研究认为,地下 5 cm 温度与 N_2O 排放呈显著正相关,但在施用氮肥后, N_2O 排放主要受施氮影响,此时硝化-反硝化底物可能会掩盖其他因子的效应,这与本试验结果相似。综上所述,石灰性土壤上 N_2O 排放受一系列环境因子的影响,但土壤矿质氮与 N_2O 排放更为紧密,对照 2 种无机氮发现,干旱区滴灌棉田反硝化过程可能对土壤 N_2O 排放起主导作用。

4 结论

(1)有机肥做基肥施用后,明显促进 N_2O 的排放。在一次灌水施肥周期内的第 3/4 天,有机肥替代处理的 N_2O 的排放通量低于 100% 化肥处理,而在第 7/8 天,表现为有机肥替代处理高于 100% 化肥处理。灌水施肥停止后,施肥处理 N_2O 排放通量显著高于不施肥处理,有机肥替代处理高于 100% 化肥处理,随着时间的推移,各处理 N_2O 排放通量趋于平衡。

(2)在棉花生育期灌水施肥期间,100% 化肥处理的 N_2O 排放量大于 2 种有机肥配施处理,而灌水施肥停止后,有机肥处理的 N_2O 排放通量均高于 100% 化肥处理,生物有机肥配施化肥处理排放通量最大。综合整个生育期进行评价,减量化肥配施有机肥降低了 N_2O 排放,尤以配施生物有机肥降低更明显,这一施肥策略可实现温室气体 N_2O 减排。

(3)由相关分析和通径分析得出,在干旱区绿洲滴灌农田,土壤 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 含量与 N_2O 浓度关系最紧密,而 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 对 N_2O 的排放主要通过间接影响作用,土温对 N_2O 排放的影响大于土壤含水率。

参 考 文 献

- 1 Ghosh S, Majumdar D, Jain M C. Methane and nitrous oxide emissions from irrigated rice of North India [R]. *Chemosphere*, 2003, 51(3): 181 – 195.
- 2 IPCC. Climate change 2007: synthesis report [R]. Cambridge: Cambridge University Press, 2007.
- 3 United Nations Environment Programme (UNEP). Drawing down N_2O to protect climate and the ozone layer [R]. A UNEP synthesis report, United Nations Environment Programme (UNEP), 2013.
- 4 Klotz M G, Stein L Y. Nitrifier genomics and evolution of the nitrogen cycle [J]. *FEMS Microbiology Letters*, 2008, 278(2): 146 – 156.
- 5 Davidson E A. The contribution of manure and fertilizer nitrogen to atmospheric nitrous oxide since 1860 [J]. *Nature Geoscience*, 2009, 2(9): 659 – 662.
- 6 Bouwman A F, Stehfest E, Vankessel C. Nitrous oxide emissions from the nitrogen cycle in arable agriculture: estimation and mitigation [M] // Smith K A. Nitrous oxide and climate change, London: Earthscan Ltd., 2010: 85 – 106.
- 7 Lal R. Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security [J]. *Science*, 2004, 304(5677): 1623 – 1627.
- 8 孙瑞莲, 赵秉强, 朱鲁生, 等. 长期定位施肥对土壤酶活性的影响及其调控土壤肥力的作用 [J]. *植物营养与肥料学报*, 2003, 9(4): 406 – 410.
Sun Ruilian, Zhao Bingqiang, Zhu Lusheng, et al. Effects of long-term fertilization on soil enzyme activities and its role in adjusting-controlling soil fertility [J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2003, 9(4): 406 – 410. (in Chinese)
- 9 孟琳, 张小莉, 蒋小芳, 等. 有机肥料氮替代部分无机氮对水稻产量的影响及替代率研究 [J]. *植物营养与肥料学报*, 2009, 15(2): 290 – 296.
Meng Lin, Zhang Xiaoli, Jiang Xiaofang, et al. Effects of partial mineral nitrogen substitution by organic fertilizer nitrogen on the yields of rice grains and its proper substitution rate [J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2009, 15(2): 290 – 296. (in Chinese)
- 10 Alluvione F C, Bertora L, Zavattaro, et al. Nitrous oxide and carbon dioxide emissions following green manure and compost fertilization in corn [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2010, 74(2): 384 – 395.
- 11 邹建文, 黄耀, 宗良纲, 等. 不同种类有机肥施用对稻田 CH_4 和 N_2O 排放的综合影响 [J]. *环境科学*, 2003, 24(4): 7 – 12.
Zou Jianwen, Huang Yao, Zong Lianggang, et al. Integrated effect of incorporation with different organic manures on CH_4 and N_2O emissions from rice paddy [J]. *Environmental Science*, 2003, 24(4): 7 – 12. (in Chinese)
- 12 Mori A, Hojito M. Effect of combined application of manure and fertilizer on N_2O fluxes from a grassland soil in Nasu, Japan [J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2012, 160(1): 40 – 50.
- 13 Chen Zengming, Ding Weixin, Luo Yiqi, et al. Nitrous oxide emissions from cultivated black soil: a case study in northeast China and global estimates using empirical model [J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2014, 28(11): 1311 – 1326.
- 14 纪洋, 余佳, 马静, 等. DCD 不同施用时间对小麦生长期 N_2O 排放的影响 [J]. *生态学报*, 2011, 31(23): 7152 – 7160.
Ji Yang, Yu Jia, Ma Jing, et al. Effect of timing of DCD application on nitrous oxide emission during wheat growing period [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, 31(23): 7152 – 7160. (in Chinese)
- 15 郝小雨, 高伟, 王玉军, 等. 有机无机肥料配合施用对设施菜田土壤 N_2O 排放的影响 [J]. *植物营养与肥料学报*, 2012, 18(5): 1073 – 1085.
Hao Xiaoyu, Gao Wei, Wang Yujun, et al. Effects of combined application of organic manure and chemical fertilizers on N_2O emission from greenhouse vegetable soil [J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2012, 18(5): 1073 – 1085. (in Chinese)
- 16 李梦雅, 徐明岗, 王伯仁, 等. 长期不同施肥下我国旱地红壤 N_2O 释放特征及其对土壤性质的响应 [J]. *农业环境科学学报*, 2009, 28(12): 2645 – 2650.
Li Mengya, Xu Minggang, Wang Boren, et al. Effect of long-term fertilization on N_2O emission and its relationship with soil properties in red soil of southern China [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2009, 28(12): 2645 – 2650. (in Chinese)
- 17 Gregorich E G, Rochette P, Vanden Bygaart A J, et al. Greenhouse gas contributions of agricultural soils and potential mitigation practices in Eastern Canada [J]. *Soil and Tillage Research*, 2007, 94(1): 262 – 263.
- 18 董玉红, 欧阳竹, 李运生, 等. 不同施肥方式对农田土壤 CO_2 和 N_2O 排放的影响 [J]. *中国土壤与肥料*, 2007(4): 34 – 39.
Dong Yuhong, Ouyang Zhu, Li Yunsheng, et al. Influence of different fertilization on CO_2 and N_2O fluxes from agricultural soil [J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2007(4): 34 – 39. (in Chinese)
- 19 李晓, 颜晓元, 邢光熹, 等. 不同动物排泄物氮的作物利用及对 N_2O 排放的贡献 [J]. *土壤*, 2008, 40(4): 548 – 553.
Li Xiao, Yan Xiaoyuan, Xing Guangxi, et al. Nitrogen utilization ratio and N_2O emission from different animal manures [J]. *Soils*, 2008, 40(4): 548 – 553. (in Chinese)
- 20 武其甫, 武雪萍, 李银坤, 等. 保护地土壤 N_2O 排放通量特征研究 [J]. *植物营养与肥料学报*, 2011, 17(4): 942 – 948.
Wu Qifu, Wu Xueping, Li Yinkun, et al. Studies on the fluxes of nitrous oxide from greenhouse vegetable soil [J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2011, 17(4): 942 – 948. (in Chinese)
- 21 王秀斌, 梁国庆, 周卫, 等. 优化施肥下华北冬小麦/夏玉米轮作体系农田反硝化损失与 N_2O 排放特征 [J]. *植物营养与肥料学报*, 2009, 15(1): 48 – 54.
Wang Xiubin, Liang Guoqing, Zhou Wei, et al. Effect of optimized nitrogen application on denitrification losses and N_2O emissions from soil in winter wheat/summer corn rotation system in north China [J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*,

2009, 15(1): 48–54. (in Chinese)

22 丁洪, 蔡贵信, 王跃思, 等. 玉米-小麦轮作系统中氮肥反硝化损失与 N₂O 排放量 [J]. 农业环境科学学报, 2003, 22(5): 557–560.
Ding Hong, Cai Guixin, Wang Yuesi, et al. Nitrification-denitrification loss and N₂O emission from maize-wheat rotation on system in north China [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2003, 22(5): 557–560. (in Chinese)

23 Hou A X, Tsuruta H. Nitrous oxide and nitric oxide fluxes from an upland field in Japan: effect of urea type, placement, and crop residues [J]. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 2003, 65(2): 191–200.

24 Cao B, He F Y, Xu Q M, et al. Denitrification losses and N₂O emissions from nitrogen fertilizer applied to a vegetable field [J]. Pedosphere, 2006, 16(3): 390–397.

25 曾泽彬, 朱波, 朱雪梅, 等. 施肥对夏玉米季紫色土 N₂O 排放及反硝化作用的影响 [J]. 土壤学报, 2013, 50(1): 130–137.
Zeng Zebin, Zhu Bo, Zhu Xuemei, et al. Effects of fertilization on N₂O emission and denitrification in purple soil during summer maize season in the Sichuan basin [J]. Acta Pedologica Sinica, 2013, 50(1): 130–137. (in Chinese)

26 高大伟, 任树梅, 杨培岭, 等. 再生水滴灌夏玉米配施不同氮肥对 CO₂ 和 N₂O 排放的影响 [J]. 农业机械学报, 2014, 45(增刊): 169–174.
Gao Dawei, Ren Shumei, Yang Peiling, et al. Impact of reclaimed water drip irrigation with different nitrogen fertilizers on CO₂ and N₂O emissions in summer maize field [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(Supp.): 169–174. (in Chinese)

27 阎佩云, 刘建亮, 沈玉芳, 等. 黄土旱塬旱作覆膜春玉米农田 N₂O 排放通量及影响因素研究 [J]. 农业环境科学学报, 2013, 32(11): 2278–2285.
Yan Peiyun, Liu Jianliang, Shen Yufang, et al. Nitrous oxide emissions and its influencing factors in spring corn fields mulched with plastic film on the Loess Plateau [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2013, 32(11): 2278–2285. (in Chinese)

28 董玉红, 欧阳竹, 李运生, 等. 肥料施用及环境因子对农田土壤 CO₂ 和 N₂O 排放的影响 [J]. 农业环境科学学报, 2005, 24(5): 913–918.
Dong Yuhong, Ouyang Zhu, Li Yunsheng, et al. Influence of fertilization and environmental factors on CO₂ and N₂O fluxes from agriculture soil [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2005, 24(5): 913–918. (in Chinese)

~~~~~

(上接第 203 页)

24 李荣, 张睿, 贾志宽. 不同覆盖材料对耕层土壤温度及玉米出苗的影响 [J]. 干旱地区农业研究, 2009, 27(3): 13–16.  
Li Rong, Zhang Rui, Jia Zhikuan. Effects of different covering materials on tilth soil temperature and maize emergence [J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2009, 27(3): 13–16. (in Chinese)

25 员学锋, 汪有科. 不同保墒条件下土壤温度日变化效应研究 [J]. 灌溉排水学报, 2008, 27(3): 82–84.  
Yuan Xuefeng, Wang Youke. Daily changing of soil temperature under different soil water conservation treatment [J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2008, 27(3): 82–84. (in Chinese)

26 陈素英, 张喜英, 裴冬, 等. 玉米秸秆覆盖对麦田土壤温度和土壤蒸发的影响 [J]. 农业工程学报, 2005, 21(10): 171–173.  
Chen Suying, Zhang Xiyang, Pei Dong, et al. Effects of corn straw mulching on soil temperature and soil evaporation of winter wheat field [J]. Transactions of the CSAE, 2005, 21(10): 171–173. (in Chinese)

27 李荣, 王敏, 贾志宽, 等. 渭北旱塬区不同沟垄覆盖模式对春玉米土壤温度、水分及产量的影响 [J]. 农业工程学报, 2012, 28(2): 106–113.  
Li Rong, Wang Min, Jia Zhikuan, et al. Effects of different mulching patterns on soil temperature, moisture water and yield of spring maize in Weibei Highland [J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(2): 106–113. (in Chinese)

28 Liu W Z, Hu M J, Li F M, et al. Ecological characteristics of soil water and its relations to landform and vegetation in a small semiarid watershed in a loess hilly area of China [J]. International Journal of Sustainable Development and World Ecology, 2005, 12(3): 326–333.

29 马育军, 李小雁, 伊万娟, 等. 沟垄集雨结合砾石覆盖对沙棘生长的影响 [J]. 农业工程学报, 2010, 26(增刊 2): 188–194.  
Ma Yujun, Li Xiaoyan, Yi Wanjuan, et al. Effects of ridge and furrow rainwater harvesting system with gravel mulch on growth of sea buckthorn [J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26(Supp. 2): 188–194. (in Chinese)

30 李小雁, 张瑞玲. 旱作农田沟垄微型集雨结合覆盖玉米种植试验研究 [J]. 水土保持学报, 2005, 19(2): 45–49.  
Li Xiaoyan, Zhang Ruiling. On-field ridge and furrow rainwater harvesting and mulching combination for corn production in dry areas of Northwest China [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2005, 19(2): 45–49. (in Chinese)

31 任小龙, 贾志宽, 韩清芳, 等. 半干旱区模拟降雨下沟垄集雨种植对夏玉米生产影响 [J]. 农业工程学报, 2007, 23(10): 45–50.  
Ren Xiaolong, Jia Zhikuan, Han Qingfang, et al. Effect of ridge and furrow rainfall harvesting planting system on production of summer corn (*Zea mays* L.) under simulated rainfall conditions in semi-arid areas [J]. Transactions of the CSAE, 2007, 23(10): 45–50. (in Chinese)