

# 黄土旱塬旱作覆膜春玉米农田 N<sub>2</sub>O 排放通量及影响因素研究

阎佩云<sup>1,2</sup>, 刘建亮<sup>1,2</sup>, 沈玉芳<sup>1</sup>, 李世清<sup>2\*</sup>

(1.西北农林科技大学 黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 陕西 杨凌 712100; 2.西北农林科技大学资源环境学院, 陕西 杨凌 712100)

**摘要:**采用密闭式静态箱法研究黄土高原旱作玉米不同栽培模式下氧化亚氮(N<sub>2</sub>O)的排放通量及主要影响因素。结果表明,施氮是影响 N<sub>2</sub>O 排放的主要因素,高氮处理>中氮+有机肥处理>不施氮肥处理,且排放高峰出现在施肥后的 4~10 d,施氮处理 N<sub>2</sub>O 排放通量呈季节动态变化,共出现 3 次排放高峰,均出现在施氮及降雨后。等量施肥条件下,覆膜处理并没有显著影响 N<sub>2</sub>O 排放量,N<sub>2</sub>O 排放通量与硝态氮含量呈极显著正相关( $P<0.01$ )。在黄土高原旱作玉米农田,土壤硝化过程是导致 N<sub>2</sub>O 排放的主要因素,反硝化作用对 N<sub>2</sub>O 排放的贡献相对较低。

**关键词:**氧化亚氮;旱作玉米;氮肥;覆膜;影响因素

中图分类号:S153.6 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2013)11-2278-08 doi:10.11654/jaes.2013.11.025

## Nitrous Oxide Emissions and Its Influencing Factors in Spring Corn Fields Mulched with Plastic Film on the Loess Plateau

YAN Pei-yun<sup>1,2</sup>, LIU Jian-liang<sup>1,2</sup>, SHEN Yu-fang<sup>1</sup>, LI Shi-qing<sup>2\*</sup>

(1.State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on Loess Plateau, Northwest A&F University, Yangling 712100, China; 2.College of Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling 712100, China)

**Abstract:** The static gas chamber technique was used to investigate nitrous oxide(N<sub>2</sub>O) emission fluxes and its main influencing factors in a spring corn field under different cultivation methods on the Loess Plateau, Northwestern China. The experiment treatments included two plastic film mulch(no mulch, T1 and mulch, T2) under the same fertilization and three fertilization(high inorganic nitrogen, T3; inorganic nitrogen+organic fertilizer, T4; and no fertilizer, T5) under the same mulch conditions. Results showed that nitrogen application was the main factor affecting the N<sub>2</sub>O emissions, where T3>T4>T5. The peak emissions occurred 4~10 d after fertilization. In nitrogen treatments, N<sub>2</sub>O fluxes showed three emission peaks in the season, all occurring after nitrogen application and rainfall. Film mulching did not significantly affect N<sub>2</sub>O emissions. The N<sub>2</sub>O emission fluxes were significantly positively correlated with soil NO<sub>3</sub><sup>-</sup>( $P<0.01$ ). In the dryland corn field on the Loess Plateau, soil nitrification was a main contributor to N<sub>2</sub>O emissions but denitrification played a relatively small role in the N<sub>2</sub>O emissions.

**Keywords:** nitrous oxide; dryland corn; nitrogen fertilizer; plastic film mulching; influencing factors

过量施氮所引起的环境问题已成为当今社会关注的重要课题<sup>[1]</sup>。土壤是全球最主要的氧化亚氮(N<sub>2</sub>O)排放源,农田土壤对大气中 N<sub>2</sub>O 的贡献率高达

70%~90%<sup>[2]</sup>。N<sub>2</sub>O 是除二氧化碳(CO<sub>2</sub>)和甲烷(CH<sub>4</sub>)之外的重要温室气体。有研究表明,单位质量 N<sub>2</sub>O 的增温潜能约是 CO<sub>2</sub> 的 159~296 倍,是 CH<sub>4</sub> 的 4~21 倍, N<sub>2</sub>O 已经成为人类排放的首要消耗臭氧层物质。随着农业生产中氮肥用量逐年增加,N<sub>2</sub>O 排放量也大幅上升<sup>[3-4]</sup>。据报道,1980—2005 年大气中 N<sub>2</sub>O 浓度从 270 μg·L<sup>-1</sup> 增加到 319 μg·L<sup>-1</sup>,每年以 0.25% 速率增长,如果大气中 N<sub>2</sub>O 以目前排放速率持续增加,预计在 2050 年将达到 350~400 μL·L<sup>-1</sup><sup>[5-6]</sup>。研究分析旱作农

收稿日期:2013-04-10

基金项目:国家自然科学基金(31270553);陕西省自然科学基金(2012JM3010);甘肃省农业科学院农业科技创新专项(2012GAAS15-22-4)

作者简介:阎佩云(1986—),女,陕西西安人,硕士研究生,主要从事植物营养方面的研究。E-mail:yanpeiyun2008@163.com

\*通信作者:李世清 E-mail:sqli@ms.iswc.ac.cn

田土壤 N<sub>2</sub>O 排放通量及影响因素,对调控农田 N<sub>2</sub>O 排放具有一定指导价值<sup>[7]</sup>。

国内对于 N<sub>2</sub>O 排放的研究很多,南方水稻土、东北黑土及北方小麦农田等均有报道<sup>[8-10]</sup>,但在黄土高原旱作农田,对温室气体排放的研究较少。地膜覆盖对农田土壤水分利用效率、作物产量、土壤生物性质等的影响已有大量研究报道,该技术在我国干旱半干旱地区广泛应用,为保持农作物生产持续发展,提高农作物产量发挥了重要作用<sup>[11-13]</sup>。但地膜覆盖对旱作农田土壤 N<sub>2</sub>O 排放有何影响?地膜覆盖在实现高产栽培的同时,是否会增加 N<sub>2</sub>O 的排放?报道非常有限<sup>[14]</sup>。针对以上问题,本研究于 2012 年在西北农林科技大学长武农业生态试验站安排田间试验,采用密闭式静态暗箱法,开展覆膜、施氮对旱作春玉米农田 N<sub>2</sub>O 排放规律及其影响因子的研究,以期为提高农田氮肥利用率及减少 N<sub>2</sub>O 排放提供一定参考依据。

## 1 材料与方 法

### 1.1 试验区概况

田间试验安排在西北农林科技大学水土保持研究所长武农业生态试验站,该试验站位于黄土高原中南部的陕西省长武县洪家镇王东村,北纬 35°,东经 107°,海拔 1200 m。属暖温带半湿润大陆性季风气候,年均降水 584 mm,年均气温 9.1 °C,无霜期 171 d,地下水埋深 50~80 m,属典型旱作农业区;地带性土壤为黑垆土,土壤质地为壤土,土层均匀疏松。试验于 2012 年 4—9 月进行,玉米生育期间降雨及气温状况见图 1。

### 1.2 试验设计

为了比较不同栽培模式与管理体系下 N<sub>2</sub>O 排放特征,试验设 5 个处理(3 次重复):处理 1(T1),不覆

膜平作条件下施中量氮肥(不覆膜处理);处理 2(T2),覆膜条件下施用中量氮肥(覆膜处理);处理 3(T3),覆膜条件下施用高量氮肥(高氮处理);处理 4(T4),覆膜条件下施用中量氮肥及有机肥(高产高效处理);处理 5(T5),覆膜条件下不施氮肥(不施氮处理)。处理 1、处理 2 分别代表当地两种农户栽培模式,处理 3、处理 4 分别代表高产及高产高效栽培模式。处理 1、2、4 施氮量均为 225 kg N·hm<sup>-2</sup>,处理 3 施氮量为 380 kg N·hm<sup>-2</sup>,以含氮量 46%的尿素为氮源;分 3 次施用,基肥与种肥占 40%,拔节期追肥占 30%,抽雄期追肥占 30%。有机肥为牛粪,施用量 30 t·hm<sup>-2</sup>,相当于 85 kg N·hm<sup>-2</sup>,折合当季作物可吸收利用纯氮,约为 25 kg N·hm<sup>-2</sup>。各处理施磷肥 40 kg P·hm<sup>-2</sup>,钾肥 80 kg K·hm<sup>-2</sup>,分别以含 P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 12%的过磷酸钙和含 K<sub>2</sub>O 45%的硫酸钾为肥源。基施氮肥、有机肥、磷肥和钾肥均在播前撒于地表后翻耕,追施氮肥用点种器施入。

处理 1、2 玉米种植密度为 65 000 株·hm<sup>-2</sup>,处理 3、4、5 种植密度为 85 000 株·hm<sup>-2</sup>。各处理均为宽窄行种植,宽行 60 cm、窄行 40 cm;覆膜处理采用目前应用较为广泛的全膜双垄沟种植方式:大垄高 10 cm、小垄高 15 cm(图 2)。

### 1.3 监测指标与监测方法

#### 1.3.1 N<sub>2</sub>O 排放通量测定

采用密闭式静态箱法测定 N<sub>2</sub>O 排放。箱体包括顶箱和底座两部分,均由不锈钢制成。顶箱长、宽、高均为 50 cm,内安装风扇以将箱内气体混匀,箱外层加包泡沫以保温。底座长、宽、高为 50 cm×50 cm×15 cm,底座安置在小区中央,插入土壤 15 cm 深处,整个生长季不再移动,框内种植两棵玉米,玉米长高后折断,只留 45 cm 高度。覆膜处理底座内用膜覆盖。观测时

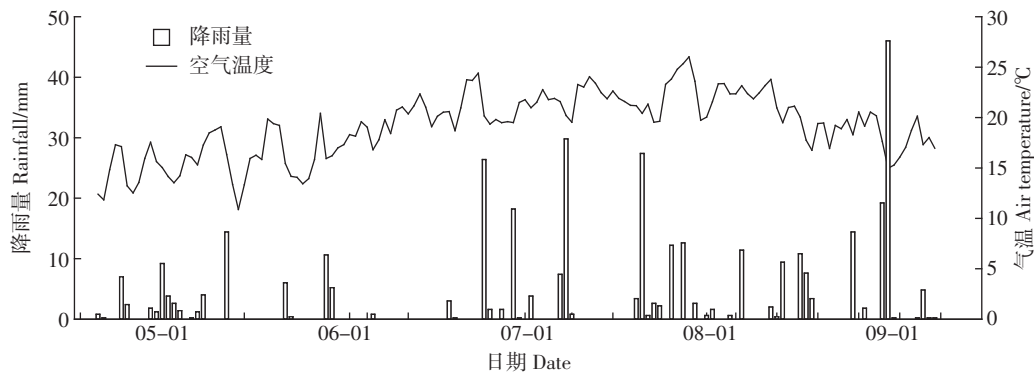


图 1 玉米生育期间降雨分布及气温状况

Figure 1 Distribution of rainfall and temperature during the corn growing season

将顶箱放置在底座顶端的凹槽中,并用水密封。盖箱后分别在 0、10、20、30 min 用 50 mL 塑料注射器收集箱内气体。采集时间为上午 8:30—11:30,采气频率平时为 1 次·4 d<sup>-1</sup>;施氮后 1 次·d<sup>-1</sup>(施氮肥选择在傍晚,施肥后从第 2 d 开始每天监测 1 次,连续监测 10 d 后恢复为 1 次·4 d<sup>-1</sup>);降雨之后从第 2 d 开始每天监测 1 次,如此连续监测 5 d 之后恢复为 1 次·4 d<sup>-1</sup>。所采气体于当天用 Agilent 7890A (美国 Agilent 公司生产)测定。N<sub>2</sub>O 通量计算公式为:

$$F=273/(273+T)\times 28/22.4\times 60\times 10^{-3}\times H\times dc/dt$$

式中: $F$ 为 N<sub>2</sub>O 排放通量,mg N<sub>2</sub>O-N·m<sup>-2</sup>·h<sup>-1</sup>; $T$ 为箱内温度;28 为每摩尔 N<sub>2</sub>O 分子中 N 的质量数;22.4 为温度 273 K 时的 N<sub>2</sub>O 摩尔体积; $H$ 为采样箱高度,cm; $c$ 为 N<sub>2</sub>O 气体体积分数,μL·L<sup>-1</sup>; $t$ 为关箱时间,min; $dc/dt$ 为采样箱内 N<sub>2</sub>O 气体浓度的变化率,μL·L<sup>-1</sup>·min<sup>-1</sup>。

### 1.3.2 温度

顶箱内安装 1 个温度探头,同时在箱内 0、10 cm 土壤深处放置温度探头,开始采气时记下起始温度,采气结束后记下终止温度,用起始温度和终止温度的算术平均值分别代表盖箱时间段内对应的箱内、0、10

cm 土壤平均温度。

### 1.3.3 土壤水分

在施氮后 10 d 内每 2 d 采集 0~20 cm 土层土样,其余时间每 1 周采集一次,土壤样品采集与气体样品采集在同一时间段内进行,用烘干法测定土壤含水量。

### 1.3.4 无机氮(NO<sub>3</sub>-N 和 NH<sub>4</sub>-N)

对上述测定土壤水分的样品,同时采用 KCl 溶液提取-流动分析仪测定 NO<sub>3</sub>-N 和 NH<sub>4</sub>-N 含量。

### 1.3.5 降雨量和大气温度

降雨量及大气温度来自长武试验区自动气象站。

## 1.4 数据处理

分别采用 SPSS 13.0 和 SigmaPlot 12.0 软件对数据进行  $t$  检验、方差分析、多重比较和相关性分析及作图,多重比较采用 Duncan 法。

## 2 结果与分析

### 2.1 等量施氮条件下覆膜对 N<sub>2</sub>O 排放的影响

玉米生长期不覆膜处理(T1)和覆膜处理(T2)土壤 N<sub>2</sub>O 排放动态见图 3。N<sub>2</sub>O 排放与施氮密切相关,在整个生育期表现出 3 次明显排放高峰:第一次高峰出现在基施氮肥后,该高峰为全生育期最大;T1 和 T2

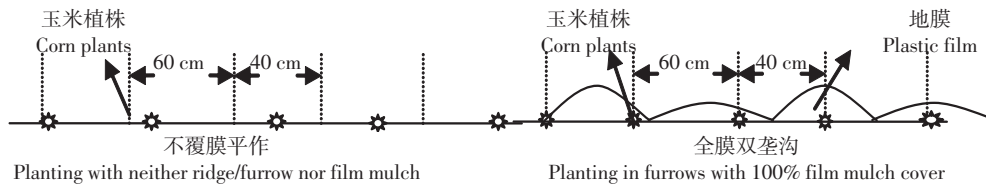
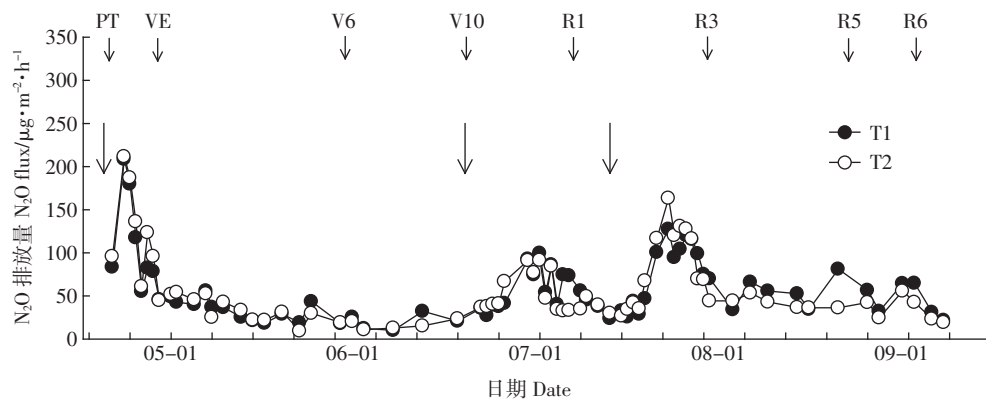


图 2 玉米栽培模式

Figure 2 Corn cultivation methods



PT:播种期;VE:出苗期;V6:六叶期;V10:十叶期;R1:吐丝期;R3:乳熟期;R5:蜡熟期;R6:完熟期。下同  
PT: Pre-sowing; VE: Emergence stage; V6: 6 Leaves stage; V10: 10 Leaves stage; R1: Silking; R3: Milk stage; R5: Dough stage;  
R6: Physiological maturity. The same below

图 3 春玉米生育期覆膜与不覆膜处理 N<sub>2</sub>O 排放

Figure 3 N<sub>2</sub>O emission under film mulching and no film mulching treatment during the spring corn growing season

在基施氮肥后的第4 d 出现峰值,分别为 208.7、211.7  $\mu\text{g N}_2\text{O-N}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ ; 拔节期第一次追施氮肥(6月21日)后,T1和T2处理于7月2日出现峰值,分别为 99.7、91.5  $\mu\text{g N}_2\text{O-N}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ ;抽雄期第二次追施氮肥(7月13日)后,7月24日出现峰值,T1和T2处理排放量分别为 127.5、163.5  $\mu\text{g N}_2\text{O-N}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ 。对T1和T2处理 N<sub>2</sub>O 排放量进行的 *t* 检验表明,二者没有显著性差异,说明覆膜对 N<sub>2</sub>O 排放没有显著影响,而施氮后会出现 N<sub>2</sub>O 排放高峰。

## 2.2 覆膜条件下施氮量对 N<sub>2</sub>O 排放的影响

图4是覆膜条件下施氮对 N<sub>2</sub>O 排放量影响的测定结果。T3和T4处理 N<sub>2</sub>O 排放通量随时间变化差异显著,在整个生育期表现出3次明显的排放高峰,且均在施氮后出现高峰,其中第一次基施氮肥后峰值最高。N<sub>2</sub>O 排放峰值以高氮处理(T3)最大,且在大部分时间排放量保持较高水平。T3和T4处理均基施氮肥后第4 d 出现峰值,分别为 298.1、239.6  $\mu\text{g N}_2\text{O-N}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ ;拔节期第一次追施氮肥(6月21日)后,T3处理于7月1日(10叶后期)出现峰值,排放量为 184.0  $\mu\text{g N}_2\text{O-N}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ ,T4处理于7月2日出现峰值,排放量为 119.3  $\mu\text{g N}_2\text{O-N}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ ;抽雄期第二次追施氮肥(7月13日)后,7月24日出现峰值,T3和T4处理排放量分别为 285.8、175.6  $\mu\text{g N}_2\text{O-N}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ 。从图4还可看出,T5处理由于不施氮肥,在整个生育期 N<sub>2</sub>O 排放一直维持在较低水平,并伴有两个非常平缓的排放峰,排放量范围为 13.01~25.73  $\mu\text{g N}_2\text{O-N}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ 。

综上所述,施氮处理 N<sub>2</sub>O 排放通量在整个玉米生长季均高于不施氮处理,排放量随施氮量增加而增加,表明施用氮肥对玉米体系 N<sub>2</sub>O 排放有显著影响。在等量施氮条件下,氮肥配施有机肥处理 N<sub>2</sub>O 排放量高于不施肥处理而低于高氮处理,并没有因为配施有

机肥而导致 N<sub>2</sub>O 排放量显著增加。

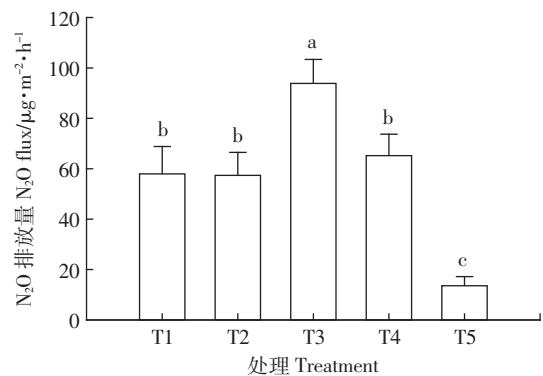
将每次独立观测 N<sub>2</sub>O 排放通量作为隐性重复对不同处理进行方差分析及显著性检验,结果表明(图5),在整个生育期,高氮处理 T3 N<sub>2</sub>O 排放量极显著高于不覆膜中氮处理 T1、覆膜中氮处理 T2、中氮+有机肥处理 T4 和不施氮肥处理 T5 ( $P<0.01$ )。不覆膜处理 T1、全膜处理 T2、中氮+有机肥处理 T4 之间差异不显著,但均极显著高于不施氮处理 T5 ( $P<0.01$ )。总体看,施氮处理 N<sub>2</sub>O 排放量是不施肥的 4~6 倍,表明施氮会显著促进土壤 N<sub>2</sub>O 排放。

## 2.3 影响玉米生长期农田 N<sub>2</sub>O 排放的主要因子

玉米整个生长期的 N<sub>2</sub>O 排放通量与土壤水分、土壤硝态氮、铵态氮、0 cm 土壤温度及 10 cm 深土壤温度的相关性分析结果见表 1。

### 2.3.1 降雨与土壤含水量对 N<sub>2</sub>O 排放的影响

比较图3与图4发现,降雨会明显促进 N<sub>2</sub>O 排放。在玉米整个生育期内,3次排放高峰时间段内均



Different lowercase letters indicate significant differences at  $P<0.01$

图5 玉米整个生育期不同处理 N<sub>2</sub>O 平均排放量差异  
Figure 5 Differences in mean N<sub>2</sub>O emissions under different cultivation treatments during the corn growth season

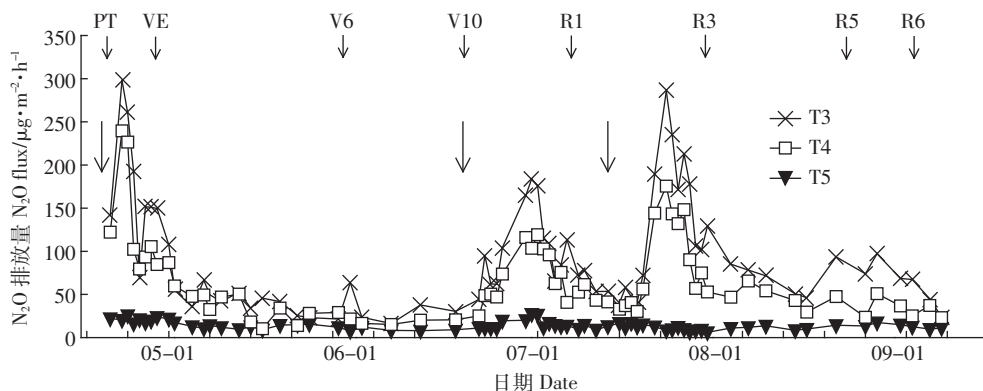


图4 春玉米生育期不同施氮量对 N<sub>2</sub>O 排放的影响

Figure 4 N<sub>2</sub>O emissions for different nitrogen fertilizer amounts during the spring corn growing season



表 1 玉米整个生育期农田土壤  $N_2O$  排放通量与各因素的相关性Table 1 Correlation coefficients between soil  $N_2O$  emission and different factors during the corn growing season

		水分	硝态氮	铵态氮	气温	0 cm 地温	10 cm 地温
氧化亚氮 $N_2O$	相关系数 $R$	-0.15*	0.346**	0.059	0.027	-0.11*	-0.12*
	Sig.	0.02	0.00	0.335	0.828	0.04	0.03

注: \* $P < 0.05$ , \*\* $P < 0.01$ 。

有较大降雨量, 但  $N_2O$  却在之后几天里出现排放峰值, 存在明显滞后现象<sup>[15]</sup>, 可能与施肥与降雨时段相吻合有关。众多研究发现,  $N_2O$  排放量与土壤水分含量呈正相关<sup>[16-17]</sup>。本研究由于覆膜, T1 与 T2 处理间土壤水分有显著差异, T2 处理水分条件优于 T1 处理(图 6), 但两处理间  $N_2O$  排放却没有显著差异。T2 处理虽然含水量较高, 但由于土壤质地较粗, 仍然处于良好通气状态, 同时覆盖在一定程度上会抑制  $N_2O$  向环境扩散, 导致  $N_2O$  在土壤溶液中发生部分积累, 向土壤外排放量相对减少<sup>[18]</sup>。这些结果初步说明在旱作条件下, 反硝化过程并不是  $N_2O$  产生的主要过程。

### 2.3.2 温度对 $N_2O$ 排放的影响

有研究表明, 土壤微生物活性、反硝化及硝化速率都随土壤温度升高而增加, 但  $N_2O$  产生过程复杂, 它与温度的关系有可能并不是简单的线性相关<sup>[19]</sup>, 可能呈指数型相关<sup>[20]</sup>, 而本试验结果中  $N_2O$  的排放与地表 0 cm 和 10 cm 土壤深度的温度呈负相关( $P < 0.05$ , 表 1), 可能与降雨导致农田土壤温度下降有关(图 7)。但总体看, 玉米进入+叶期(V10)后, 7 月份的  $N_2O$  排放整体高于其他月份, 可能与 7 月份平均气温最高, 土壤微生物活性强, 有利于硝化作用和反硝化作用进行, 从而促进  $N_2O$  排放有关。

### 2.3.3 无机氮对 $N_2O$ 排放的影响

比较不同处理  $N_2O$  排放与硝态氮含量动态变化发现(图 8), 二者之间呈相似变化趋势, 相关性分析

(表 1) 进一步表明,  $N_2O$  排放通量与土壤硝态氮含量呈极显著正相关关系( $P < 0.01$ ), 当硝态氮含量高时, 产生的  $N_2O$  量也越多, 说明在形成硝态氮的过程中同时产生  $N_2O$  排放。这一结果进一步支持了旱地土壤硝化过程是导致  $N_2O$  排放的主要因素, 与保琼莉等<sup>[21]</sup>研究结论一致。

## 3 讨论

本研究结果表明, 玉米整个生长期, 在施肥、覆膜等耕作措施影响下, 黄土旱塬旱作春玉米农田  $N_2O$  排放表现出 3 个高峰, 与王秀斌、丁洪等研究结果基本一致<sup>[22-23]</sup>。在施肥后,  $N_2O$  排放出现高峰, 这可能与肥料促进铵态氮硝化过程, 从而增加  $N_2O$  排放有关<sup>[15]</sup>; 在等量施肥条件下, 通过比较覆膜与不覆膜处理发现, 尽管覆膜处理 0~20 cm 土层土壤水分状况优于不覆膜处理, 但  $N_2O$  排放并没有显著差异, 与李西祥、朱咏莉等结论并不一致<sup>[14, 24]</sup>, 主要原因可能在于覆膜虽然明显增加了土壤水分含量, 但在施肥量相等的情况下, 两者的硝化底物没有明显差异,  $N_2O$  排放主要受施氮影响, 硝化底物效应掩盖了水分效应<sup>[25]</sup>, 因此  $N_2O$  排放量相差不大; 白红英等对陕西冬小麦农田  $N_2O$  排放的研究表明, 覆膜会增加  $N_2O$  的排放通量, 本研究结果与此并不一致, 其原因可能是二者研究区域土壤本身差异及种植作物不同所致<sup>[26]</sup>, 具体原因还有待进一步研究。

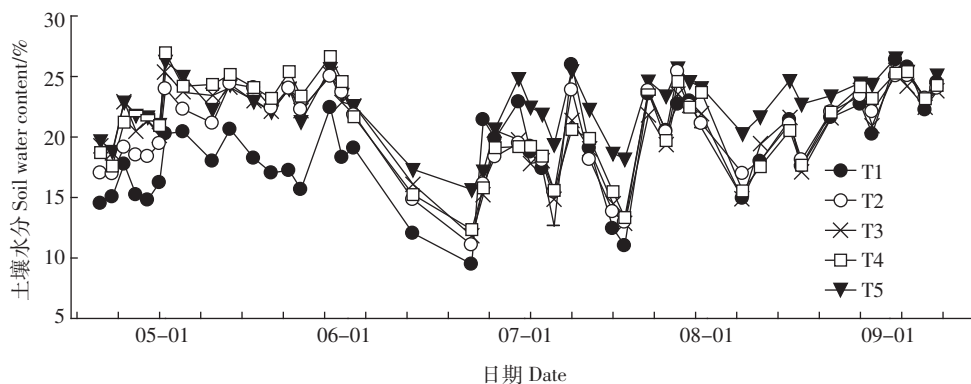


图 6 玉米整个生育期不同处理土壤含水量变化趋势

Figure 6 Dynamics of soil water contents under different cultivation treatments during the corn growing season

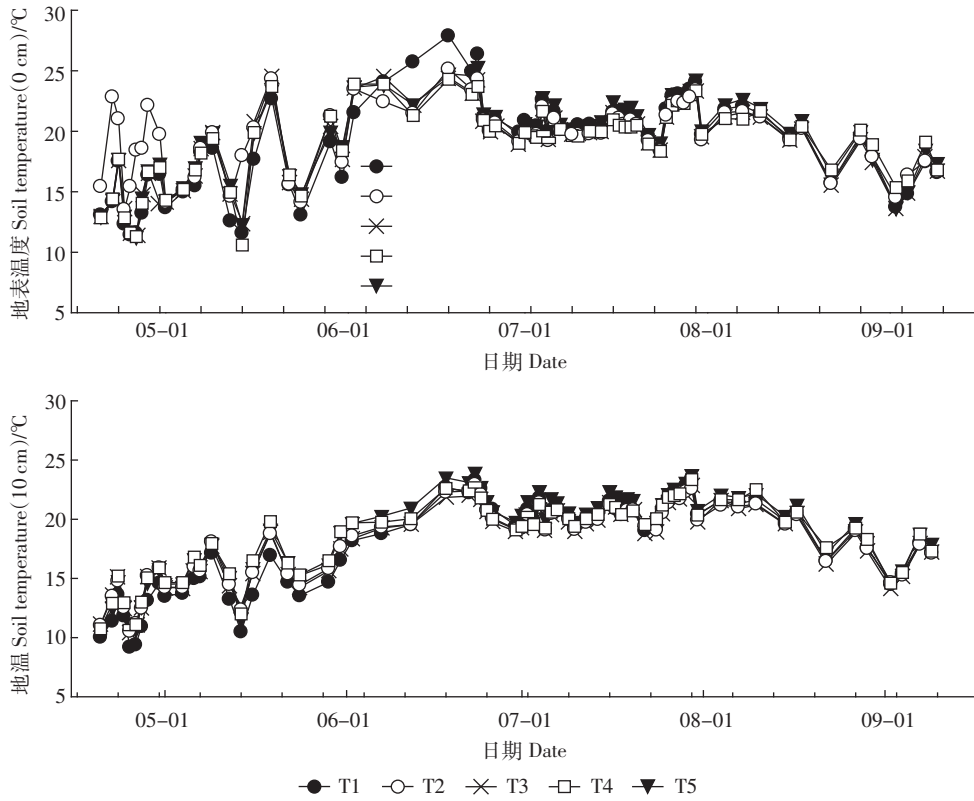


图 7 不同处理的地表(0 cm)温度和 10 cm 地温

Figure 7 Soil temperature(0 cm and 10 cm) under different cultivation treatments

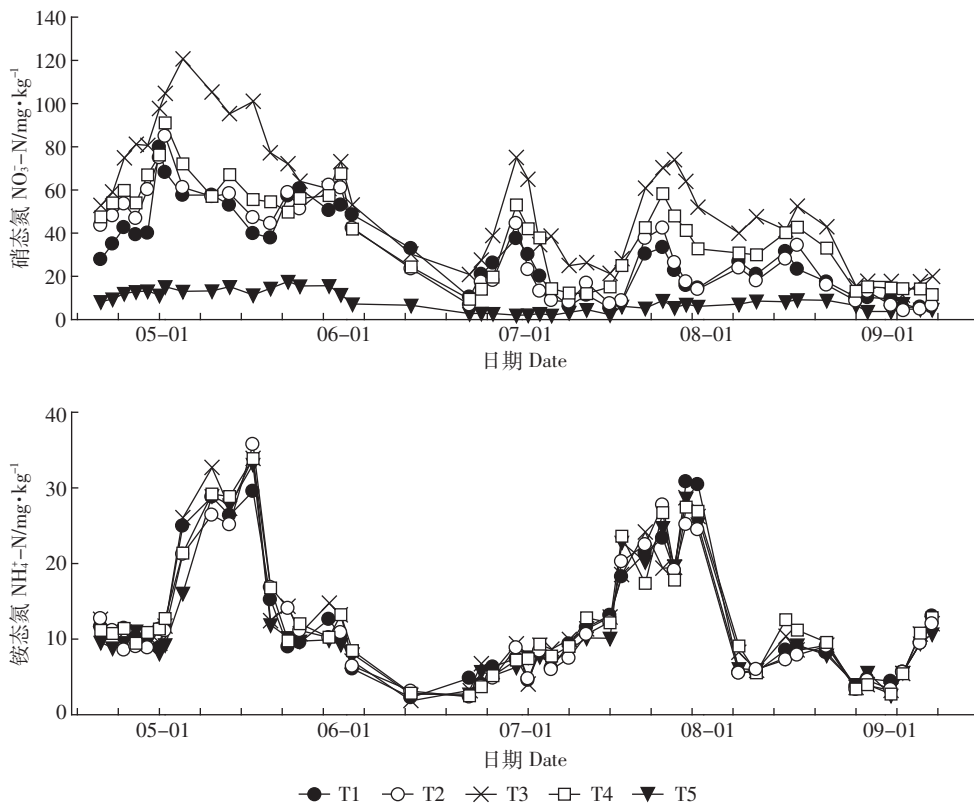


图 8 不同处理 0~20 cm 土层硝态氮和铵态氮动态变化

Figure 8 The dynamics of soil NO<sub>3</sub><sup>-</sup> and NH<sub>4</sub><sup>+</sup> under different cultivation treatments

$N_2O$  排放受多种因素影响,但施氮是影响  $N_2O$  排放的主要因素,施氮明显促进了  $N_2O$  的排放。不同施氮处理的  $N_2O$  排放量大小依次为  $T3>T4>T5$ , 高氮处理 T3 极显著高于其他处理,而处理 T1、T2 和 T4 之间没有显著性差异,所有施氮处理均极显著高于不施氮处理 T5。排放峰值出现在施肥后 4~10 d,一般在尿素施入土壤后,绝大部分经过 4~7 d 会转化为铵态氮,从而为硝化过程提供了丰富底物,有利于硝化过程中  $N_2O$  的排放。相关性分析进一步表明, $N_2O$  排放通量与土壤硝态氮含量呈极显著正相关关系。另外,供试土壤质地为壤土,土层均匀疏松,通气性能良好,不利于生物反硝化发生。

$N_2O$  排放呈现季节性规律可能是因为夏季雨热同季,玉米生长代谢旺盛,加上土壤微生物处于适宜温度,有利于硝化作用及  $N_2O$  排放。不施氮处理 T5 有两个平缓排放峰,一个出现在播种之后,可能由于土壤的扰动,增加了土壤有机氮矿化,从而增加了铵态氮向硝态氮转化过程中的  $N_2O$  排放;另一个峰值出现在十叶期(V10)以后,可能与玉米根系生长代谢及生长旺盛、向土壤中分泌更多有机氮有关,从而促进了氮素转化过程中  $N_2O$  的排放<sup>[27-28]</sup>。

综合以上结果,我们认为在黄土旱塬旱作农田施氮与  $N_2O$  排放直接相关,土壤硝化过程是导致  $N_2O$  排放的主要因素,反硝化作用对  $N_2O$  排放的贡献相对较低。

## 4 结论

(1)施氮是影响  $N_2O$  排放的主要因素。高氮处理>中氮+有机肥处理>不施氮肥处理,且排放高峰出现在施肥后的 4~10 d,施氮处理  $N_2O$  排放通量呈季节动态变化,总共出现 3 次排放高峰,且均在施氮后。等量施氮条件下,覆膜处理并没有显著影响  $N_2O$  排放量, $N_2O$  排放通量与  $NO_3^-$  呈极显著正相关( $P<0.01$ )。

(2)综合分析认为,在黄土高原旱作玉米农田,土壤硝化过程是导致  $N_2O$  排放的主要因素,反硝化作用对  $N_2O$  排放的贡献相对较低。

### 参考文献:

- [1] 王艳群, 彭正萍, 薛世川, 等. 过量施肥对设施农田土壤生态环境的影响[J]. 农业环境科学学报, 2005, 24(增刊 1): 81-84.  
WANG Yan-qun, PENG Zheng-ping, XUE Shi-chuan, et al. Effect of excessive fertilization on soil ecological environment in the facility farmland[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2005, 24(Suppl1): 81-84.
- [2] Bouwman A F. The role of soils and land use in the greenhouse effect[J]. *Netherlands Journal of Agricultural Science*, 1989, 37: 13-19.
- [3] 王 艳, 米国华, 陈范骏, 等. 玉米氮素吸收的基因型差异及其与根系形态的相关性[J]. 生态学报, 2003, 23(2): 297-302.  
WANG Yan, MI Guo-hua, CHEN Fan-jun, et al. Genotypic differences in nitrogen uptake by maize inbred lines its relation to root morphology[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2003, 23(2): 297-302.
- [4] 巨晓棠, 张福锁. 关于氮肥利用率的思考[J]. 生态环境, 2003, 12(2): 192-197.  
JU Xiao-tang, ZHANG Fu-suo. Thoughts on nitrogen use efficiency[J]. *Ecology and Environment*, 2003, 12(2): 192-197.
- [5] Byrnes B H. Environmental effects of N fertilizer use: An overview[J]. *Fertilizer Research*, 1990, 26(1-3): 209-215.
- [6] Jenkinson D S. An introduction to the global nitrogen cycle[J]. *Soil Use and Management*, 1990, 6(2): 56-61.
- [7] Allen M R, Stott P A, Mitchell J F B, et al. Quantifying the uncertainty in forecasts of anthropogenic climate change[J]. *Nature*, 2000, 407(6804): 617-620.
- [8] 邹建文, 黄 耀, 宗良纲, 等. 稻田  $CO_2$ ,  $CH_4$  和  $N_2O$  排放及其影响因素[J]. 环境科学学报, 2003, 23(6): 758-764.  
ZOU Jian-wen, HUANG Yao, ZONG Liang-gang, et al. A field study on  $CO_2$ ,  $CH_4$  and  $N_2O$  emissions from rice paddy and impact factors[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2003, 23(6): 758-764.
- [9] 丁 洪, 王跃思. 东北黑土区不同作物系统氮肥反硝化损失与  $N_2O$  排放量[J]. 农业环境科学学报, 2004, 23(2): 323-326.  
DING Hong, WANG Yue-si. Denitrification losses of nitrogen fertilizer and  $N_2O$  emission from different crop-black soil systems in North-east China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2004, 23(2): 323-326.
- [10] 白红英, 孙 华, 李世清, 等. 地膜的水热效应与麦田土壤  $N_2O$  排放[J]. 农业环境科学学报, 2009, 28(10): 2111-2118.  
BAI Hong-ying, SUN Hua, LI Shi-qing, et al. Effects of film mulching on soil water and temperature and  $N_2O$  emissions in wheat fields[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2009, 28(10): 2111-2118.
- [11] 夏自强, 蒋洪庚, 李琼芳, 等. 地膜覆盖对土壤温度、水分的影响及节水效益[J]. 河海大学学报, 1997, 25(2): 39-45.  
XIA Zi-qing, JIANG Hong-geng, LI Qiong-fang, et al. Effect of mulch on soil temperature and moisture and analysis of water saving benefit[J]. *Journal of Hohai University*, 1997, 25(2): 39-45.
- [12] 李建奇. 地膜覆盖对春玉米产量、品质的影响机理研究[J]. 玉米科学, 2008, 16(5): 87-92.  
LI Jian-qi. The mechanism study of the influences of plastics film mulch on grain yield and seed quality of spring maize[J]. *Journal of Hohai University*, 2008, 16(5): 87-92.
- [13] 王有宁, 王荣堂, 董秀荣, 等. 地膜覆盖作物农田光温效应研究[J]. 中国生态农业学报, 2004, 12(3): 139-141.  
WANG You-ning, WANG Rong-tang, DONG Xiu-rong, et al. Light temperature effect of farm land covering with film[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2004, 12(3): 139-141.
- [14] 朱咏莉, 吴金水, 韩建刚, 等. 地膜覆盖对土壤中  $N_2O$  释放的影响[J]. 农业工程学报, 2004, 20(3): 222-225.  
ZHU Yong-li, WU Jin-shui, HAN Jian-gang, et al. Effects of clear

- plastic film mulching on soil N<sub>2</sub>O discharge flux[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2004, 20(3):222-225.
- [15] 刘广深, 徐文彬, 洪业汤, 等. 土壤 N<sub>2</sub>O 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.
- LIU Guang-shen, XU Wen-bin, HONG Ye-tang, et al. A Study of main environmental factors controlling seasonal variation of N<sub>2</sub>O flux from soil[J]. *Acta Mineralogica Sinica*, 2002, 22(3):229-234.
- [16] 郑循华, 王明星, 王跃思, 等. 华东稻麦轮作生态系统的 N<sub>2</sub>O 排放研究[J]. *应用生态学报*, 1997, 8(5):495-499.
- ZHENG Xun-hua, WANG Ming-xing, WANG Yue-si, et al. N<sub>2</sub>O emission from rice wheat ecosystem in Southeast China[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 1997, 8(5):495-499.
- [17] 白红英, 韩建刚, 张一平, 等. 农田温室气体 N<sub>2</sub>O 释放的水热效应机理初探[J]. *农业环境科学学报*, 2003, 22(6):724-726.
- BAI Hong-ying, HAN Jian-gang, ZHANG Yi-ping, et al. Mechanism of N<sub>2</sub>O emission relying on humidity and temperature from soil[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2003, 22(6):724-726.
- [18] Heincke M, Kaupenjohann M. Effects of soil solution on the dynamics of N<sub>2</sub>O emissions: A review[J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 1999, 55(2):133-157.
- [19] 郑磊, 江长胜, 孙丽娟, 等. 地膜覆盖对菜园紫色土壤环境因子及 N<sub>2</sub>O 排放的影响[J]. *中国农学通报*, 2011, 27(30):82-87.
- ZHENG Lei, JIANG Chang-sheng, SUN Li-juan, et al. Effects of plastic film mulching on the environmental factors and nitrous oxide emissions in purple soil of vegetable fields[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2011, 27(30):82-87.
- [20] 叶欣, 李俊, 王迎红, 等. 华北平原典型农田土壤氧化亚氮的排放特征[J]. *农业环境科学学报*, 2005, 24(6):1186-1191.
- YE Xin, LI Jun, WANG Ying-hong, et al. Characterization of emissions of nitrous oxide from soils of typical crop fields in North China Plain[J]. *Journal of Agro-Environmental Science*, 2005, 24(6):1186-1191.
- [21] 保琼莉, 巨晓棠. 夏玉米根系密集区与行间 N<sub>2</sub>O 浓度及与氨氧化细菌和反硝化细菌数量的关系[J]. *植物营养与肥料学报*, 2011, 17(5):1156-1165.
- BAO Qiong-li, JU Xiao-tang. The N<sub>2</sub>O concentration and the relationships with ammonia-oxidizing bacteria and denitrifiers abundance in root zone and row of summer maize[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2011, 17(5):1156-1165.
- [22] 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<sub>2</sub>O 排放特征[J]. *植物营养与肥料学报*, 2009, 15(1):48-54.
- WANG Xiu-bin, LIANG Guo-qing, ZHOU Wei, et al. Effect of optimized nitrogen application on denitrification losses and N<sub>2</sub>O emissions from soil in winter wheat/summer corn rotation system in North China[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2009, 15(1):48-54.
- [23] 丁洪, 王跃思, 李卫华. 玉米-潮土系统中不同氮肥品种的反硝化损失与 N<sub>2</sub>O 排放量[J]. *中国农业科学*, 2004, 37(12):1886-1891.
- DING Hong, WANG Yue-si, LI Wei-hua. Denitrification losses and N<sub>2</sub>O emission from different nitrogen fertilizers applied to maize-fluoro-aquic soil system[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2004, 37(12):1886-1891.
- [24] 李西祥, 白红英, 丁琦, 等. 黄土地区冬小麦田土壤理化性状、磷酸酶活性与氧化亚氮的排放[J]. *生态学杂志*, 2007, 26(8):1187-1192.
- LI Xi-xiang, BAI Hong-ying, DING Qi, et al. Soil physical and chemical properties, phosphatase activity, and N<sub>2</sub>O emission in winter wheat field on Loess Plateau[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2007, 26(8):1187-1192.
- [25] 董玉红, 欧阳竹, 李运生, 等. 肥料施用及环境因子对农田土壤 CO<sub>2</sub> 和 N<sub>2</sub>O 排放的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2005, 24(5):913-918.
- DONG Yu-hong, OUYANG Zhu, LI Yun-sheng, et al. Influence of fertilization and environmental factors on CO<sub>2</sub> and N<sub>2</sub>O fluxes from agricultural soil[J]. *Journal of Agro-Environmental Science*, 2005, 24(5):913-918.
- [26] 白红英, 张一平. 西北地区旱田耕层土壤 N<sub>2</sub>O 排放特征的研究[J]. *农业环境科学学报*, 2003, 22(5):561-564.
- BAI Hong-ying, ZHANG Yi-ping. Emission characteristic in field soil of Northwest Region[J]. *Journal of Agro-Environmental Science*, 2003, 22(5):561-564.
- [27] 张海楼, 安景文, 刘慧颖, 等. 玉米施用氮肥和有机物 N<sub>2</sub>O 释放研究[J]. *玉米科学*, 2012, 20(2):134-137.
- ZHANG Hai-lou, AN Jing-wen, LIU Hui-ying, et al. Study on the release mechanism of N<sub>2</sub>O in corn field applied nitrogen fertilizer and organic matter[J]. *Journal of Maize Sciences*, 2012, 20(2):134-137.
- [28] 杨兰芳, 蔡祖聪. 施氮和玉米生长对土壤氧化亚氮排放的影响[J]. *应用生态学报*, 2005, 16(1):100-104.
- YANG Lan-fang, CAI Zu-cong. Effects of N application and maize growth on N<sub>2</sub>O emission from soil[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2005, 16(1):100-104.