



不同类型氮肥对东北春玉米土壤 N₂O 和 CO₂ 昼夜排放的影响

姚凡云¹, 刘志铭¹, 曹玉军¹, 吕艳杰¹, 魏雯雯¹, 吴兴宏¹, 王永军^{1,2✉}, 谢瑞芝^{3✉}

¹ 吉林省农业科学院农业资源与环境研究所/玉米国家工程实验室, 长春 130033; ² 吉林农业大学农学院, 长春 130118; ³ 中国农业科学院作物科学研究所, 北京 100081

摘要:【目的】探明不同类型氮肥对高纬度春玉米土壤 N₂O 和 CO₂ 昼夜排放的影响, 以期为高纬度地区农田氮肥高效利用管理和温室气体减排提供参考依据。【方法】通过田间微区施用缓释肥(SLN)、尿素添加硝化抑制剂+脲酶抑制剂(NIUI)和普通尿素(OU)试验, 采用静态箱-气相色谱法, 分别在苗前(S1)、苗期(S2)、拔节期(S3)、灌浆期(S4)、蜡熟期(S5)和休闲期(S6)6个时期取样测定, 比较分析农田 N₂O 和 CO₂ 的昼夜排放特性。【结果】施用不同类型氮肥, 田间 N₂O 和 CO₂ 昼夜排放均呈单峰变化趋势, S1—S6 时期, 土壤 N₂O 排放高峰出现在 12:00—19:00, 排放低谷出现在下半夜(0:00—6:00), 而 S2—S5 同一时期白天或夜晚各观测时段之间 CO₂ 排放通量差异不显著。S1 和 S2 时期, N₂O 和 CO₂ 白天排放量分别占全天总排放量的 56.2%—82.3% 和 53.6%—66.5%, 而 S3—S6 时期, 白天排放比例分别为 40.6%—59.6% 和 43.7%—55.4%。SLN 处理减少了 S1 时期土壤 N₂O 的全天总排放量, 而 NIUI 处理减少了 S1、S2 和 S5 时期土壤 N₂O 的全天总排放量, 其主要减排时段为 S1 时期的 4:00—16:00 和 S2 时期的 12:00—22:00, 其中 S2 时期 18:00—19:00 减排量占有所有减排时段总量的 57.3%, S5 时期昼夜各时段均表现为减排作用, 且昼夜减排比例相当; SLN 对土壤 CO₂ 的主要减排时段为 S1 时期的全天和 S3 时期的 15:00—4:00, 其中 S1 时期 12:00—23:00 减排比例高达 76.8%, S3 时期夜晚减排比例占有所有减排时段总量的 68.1%; NIUI 处理在玉米生长季 5 个测定日均表现出对 CO₂ 的减排作用, 但昼夜减排比例存在差异, 白天平均减排 46.9%, 最高减排达 73.2%。同时发现, N₂O 和 CO₂ 排放通量日均值与 9:00—10:00 观测值存在极显著正相关关系($r_{N_2O}=0.938^{**}$, $r_{CO_2}=0.977^{**}$), 9:00—10:00 可作为东北春玉米农田 N₂O 和 CO₂ 昼夜排放研究的代表性取样时段。【结论】不同类型氮肥对土壤 N₂O 和 CO₂ 昼夜排放通量的影响在不同时期表现各异。与常规施氮相比, 缓释氮肥抑制了玉米苗前期土壤 N₂O 昼夜排放, 减排时段主要在 9:00—22:00, 而在其他测定日均促进了土壤 N₂O 昼夜排放; 尿素添加硝化抑制剂和脲酶抑制剂抑制了玉米苗前白天、苗期夜晚以及收获期白天和夜晚的土壤 N₂O 排放, 对拔节期至灌浆期土壤 N₂O 的昼夜排放均表现为促进作用。在苗前测定日全天和拔节期测定日的夜晚, 缓释肥对土壤 CO₂ 表现出减排作用; 尿素添加硝化抑制剂和脲酶抑制剂降低了 6 个测定日土壤 CO₂ 的排放。

关键词: 不同氮肥; 春玉米农田; N₂O 和 CO₂ 排放通量; 昼夜变化

Diurnal Variation of N₂O and CO₂ Emissions in Spring Maize Fields in Northeast China Under Different Nitrogen Fertilizers

YAO FanYun¹, LIU ZhiMing¹, CAO YuJun¹, LÜ YanJie¹, WEI WenWen¹, WU XingHong¹, WANG YongJun^{1,2✉}, XIE RuiZhi^{3✉}

收稿日期: 2020-09-03; 接受日期: 2020-10-30

基金项目: 国家重点研发计划(2017YFD0300303)

联系方式: 姚凡云, E-mail: yaofanyun@163.com. 通信作者王永军, E-mail: yjwang2004@126.com. 通信作者谢瑞芝, E-mail: xieruizhi@caas.cn

¹Institute of Agricultural Resources and Environment, Jilin Academy of Agricultural Sciences/State Engineering Laboratory of Maize, Changchun 130033; ²College of Agronomy, Jilin Agricultural University, Changchun 130118; ³Institute of Crop Sciences, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081

Abstract: 【Objective】 The effects of different types of nitrogen fertilizers on the diurnal variation of N₂O and CO₂ fluxes from spring maize soil at high latitude were explored, in order to provide a reference for nitrogen fertilizer efficient utilization management and greenhouse gas emission reduction in farmland at high latitude. **【Method】** Field micro-plot trials and the static chamber-gas chromatography method were used to investigate the effects of slow release fertilizer (SLN), urea plus nitrification inhibitor and urease inhibitor (NIUI) and ordinary urea application (OU) on the diurnal variation of N₂O and CO₂ emissions from spring maize fields at high latitudes. The day-night emission characteristics of soil N₂O and CO₂ were compared and analyzed in 6 periods, including pre-emergence stage (S1), seedling stage (S2), jointing stage (S3), filling stage (S4), dough stage (S5), and fallow period (S6). **【Result】** The diurnal variation of N₂O and CO₂ emissions under different nitrogen fertilizers showed a single peak trend. From stage S1 to S6, the peak of N₂O emissions appeared in 13:00-19:00, and the peak valley occurred after midnight (0:00-6:00). However, there was no significant difference in CO₂ fluxes between observation periods during day or night at the same stage from S2 to S5. In stage S1 and S2, the daytime emissions of N₂O and CO₂ accounted for 56.2%-82.3% and 53.6%-66.5% of the total emissions of the whole day, respectively. From stage S3 to S5, the ratio of N₂O and CO₂ emission in the daytime was 40.6%-59.6% and 43.7%-55.4%, respectively. SLN treatment reduced the soil N₂O cumulative emission in stage S1, while NIUI treatment reduced the soil N₂O cumulative emission at stages S1, S2 and S5, and the emission reduction period was mainly from 4:00-16:00 in the daytime of stage S1 and 12:00 to 22:00 of stage S2, among which the emission reduction from 18:00-19:00 during stage S2 accounts for 57.3% of the total emission reduction period. All time periods of day and night showed the effect of emission reduction in stage S5, and the ratio of emission reduction during day and night was almost the same. The main emission reduction periods of SLN for soil CO₂ were the whole day in S1 stage and 15:00-4:00 in S3 stage, among which the emission reduction ratio of 12:00-23:00 during the S1 stage was as high as 76.8%, and the reduction ratio at night during S3 accounted for 68.1% of all emission reduction periods. NIUI treatment showed a reduction effect on CO₂ emission in five monitoring days of growing season of maize, but the ratio of day-night emission reduction was different, with an average reduction of 46.9% during the day and a maximum reduction of 73.2%. It was also found that there was an extremely significant positive correlation between the daily mean of N₂O and CO₂ fluxes, and the observed values of 9:00-10:00 ($r_{\text{N}_2\text{O}}=0.938^{**}$, $r_{\text{CO}_2}=0.977^{**}$). Therefore, 9:00-10:00 could be used as the representative sampling period when conducting long-term greenhouse gas emission research in spring maize fields in Northeast China. **【Conclusion】** The diurnal emission fluxes of soil N₂O and CO₂ responded differently to various nitrogen fertilizations at different maize growing stages. Compared with conventional nitrogen application, SLN inhibited the soil N₂O emission before maize seedling in day and night, and the emission reduction period was mainly between 9:00-22:00. SLN promoted the emission of N₂O in day and night in other monitoring days. NIUI inhibited the soil N₂O emission during the daytime before maize seedling, the night at the seedling stage, and the harvest stage day and night, while NIUI promoted the soil N₂O emission from jointing stage to filling stage. In the whole monitoring day before seedling and the night of the monitoring day at jointing stage, SLN had a reduction effect on soil CO₂. NIUI reduced soil CO₂ emissions in six monitoring days.

Key words: different nitrogen fertilizers; spring maize field; N₂O and CO₂ fluxes; day and night emission dynamics

0 引言

【研究意义】 农业生产管理对农田土壤温室气体的排放起着十分重要作用, 对全球温室效应的影响不容忽视^[1-3]。据统计, 全球农业温室气体排放约占人类活动产生温室气体排放总量的 10%—12%, 而且随着农作物产量的增加, 温室气体排放也在不断增加^[4]。氮肥不合理施用是造成我国农田温室气体尤其是 N₂O 排放上升的主要因素^[5], 玉米生产中, 通过施用缓释

肥或添加抑制剂来调控氮素形态转化已被认为是实现温室气体减排的有效措施之一^[6-8]。在陆地温室气体排放的研究中, 温室气体的昼夜变化观测数据对于校正机理模型参数, 提高模型模拟效果具有重要作用^[9]; 同时, 土壤温室气体排放通量的计算通常基于单个日测量进行, 以表示 1 d 的平均排放通量^[10]。由于野外工作条件的限制, 全自动观测系统在温室气体排放中的应用较少^[11], 而静态箱制作成本较低, 现场使用简单, 易于推广, 在农田温室气体监测中得到了广泛应

用^[12]。对昼夜变化的观测可为确定代表性的观测时段提供参考,提高常规观测的准确性和代表性。【前人研究进展】由于土壤和大气间的水热交换需要一定的传导平衡时间^[13],因此,在不同时间尺度上土壤温室气体排放与环境因素的关系可能会有不同的表现形式^[14]。为了获得温室气体的代表性采样时间,前人开展了较多温室气体昼夜排放特性的研究^[15],但受环境、地域等因素影响,土壤温室气体排放通量的昼夜变化规律并不一致^[16]。LIVESLEY 等^[17]以长白山阔叶林红松林地为研究对象,测定了土壤释放的 CO₂ 通量,研究发现,CO₂ 排放通量昼夜变化和空气温度及土壤温度关系密切。AKIYAMA 等^[18]对 3 种氮肥(控释尿素、硫酸铵与尿素、硫酸铵与尿素掺加硝化抑制剂)条件下土壤 N₂O 昼夜排放通量的研究发现,N₂O 排放通量白天较高,夜晚较低。然而,周存宇等^[19]对鼎湖山针阔叶混交林地表温室气体排放的日变化研究结果并不支持这一结论,有的研究还发现温度和通量最大值之间存在很大的滞后性^[20]。【本研究切入点】近年来,有关添加硝化抑制剂或脲酶抑制剂下农田温室气体排放规律及环境影响因素的报道逐渐增多,但前人的大多数研究是在季节等较大时间尺度上进行,针对昼夜变化规律的研究相对较少,且集中于作物生育后期。目前关于东北春玉米不同生育阶段农田土壤温室气体昼夜排放的研究鲜见报道,这不利于玉米生产过程温室气体排放规律的理解和减排技术的研发。

【拟解决的关键问题】本研究通过田间微区施用缓释肥、尿素添加硝化抑制剂+脲酶抑制剂和普通尿素试验,采用静态箱-气相色谱法,研究了东北春玉米农田不同时期土壤 CO₂ 和 N₂O 的昼夜排放规律,探明温室气体排放与空气温度、土壤温度及土壤水热间的关系,以确定最佳采样时间,以期为东北农田氮肥高效利用管理和温室气体减排提供参考依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验于 2018 年 5 月至 11 月在吉林省农业科学院长春院区进行(43°50' N, 125°23' E),该区年平均气温 4.6℃,年平均日照时数 2712 h,无霜期 140—150 d,年均降水量为 600—700 mm。土壤类型为黑土,土壤质地为壤土,容重 1.4 g·cm⁻³,0—20 cm 耕层土壤有机质 25.2 g·kg⁻¹、碱解氮 184.27 mg·kg⁻¹、土壤速效磷 17.54 mg·kg⁻¹、速效钾 137.6 mg·kg⁻¹,pH 7.6。

1.2 试验设计

试验设置 3 个处理,处理间氮素养分含量一致,每个处理重复 3 次,随机区组排列。每个小区 6 行,每行 5 m,小区面积 19.5 m²。3 个处理分别为:

(1) 普通尿素(OU)处理。氮、磷、钾肥用量分别为 180、90、90 kg·hm⁻²(以 N、P₂O₅、K₂O 计),所用氮肥为尿素(含 N 45%),磷肥为重过磷酸钙(含 P₂O₅ 46%),钾肥为氯化钾(含 K₂O 60%),磷钾肥作为底肥在春玉米播种前一次性施入,氮肥基追比为 1:1,拔节期(7 月 11 日)追肥。

(2) 缓释肥(SLN)处理。金正大树脂包膜缓释肥(含 N 45%),释放期为 60 d,施用时期及方式与 OU 处理一致,磷钾养分与 OU 处理相同。

(3) 尿素+硝化抑制剂(双氰胺)+脲酶抑制剂(氢醌)(NIUI)处理。双氰胺用量为尿素用量的 6%,脲酶抑制剂用量为纯 N 的 0.5%左右,尿素、硝化抑制剂和脲酶抑制剂中纯氮含量与普通尿素处理纯氮量相同,氮肥施用时期及方式与 OU 处理一致,磷钾养分与 OU 处理相同。

试验用品种为先玉 335,种植密度为 60 000 株/hm²,于 2018 年 5 月 23 日播种,9 月 26 日收获,玉米生育期间不进行灌溉。

1.3 气体的采集与样品分析

采用静态箱法取样,取样箱为不透明 PVC 材料制作的长方体箱,长 60 cm,宽 25 cm,高 30 cm,箱体顶部装有三通阀用于取气,箱内顶部有一小风扇,用于混匀箱内气体。取样箱底座插入土壤中 10 cm,箱体扣于底座凹槽上,并在凹槽中用水密封,且水不溢出。采样期间箱内不含作物和杂草,取样箱扣在 2 株玉米间的畦上且两边各覆盖半个行距,可以代表整行玉米田间的土面状况。分别在 6 月 1 日(苗前, S1)、6 月 29 日(苗期, S2)、7 月 17 日(拔节期, S3)、8 月 2 日(灌浆期, S4)、9 月 11 日(蜡熟期, S5)以及 11 月 13 日(休闲期, S6)观测土壤 N₂O 和 CO₂ 昼夜变化动态。于每个采样日的 6:00 至次日 5:00 进行取样,分别在扣箱后的 0、15、30 min 打开取样箱顶部的开关阀,用注射器抽取 30 mL 气体于预抽为真空的 12 mL 血清瓶中;每 3 h 取一次,每次取样在 1 h 内完成。每次取气样的同时,用热敏电阻测定土壤 5 cm 处温度和箱内温度,用便携式土壤水分测定仪测定土壤水分体积含量。

样品分析采用岛津 GC2010-plus 气相色谱仪(岛津公司,日本),气相色谱仪配有电子捕获检测器

(ECD)、火焰离子检测器(FID)以及精阳流体 GAS-300A 型气体进样器, 仪器分析条件参考文献[21]。

1.4 温室气体排放通量

温室气体排放通量计算公式为:

$$F = \rho \times V / A \times \Delta c / \Delta t \times 273 / (273 + \theta) \times 60 \quad (1)$$

式中, F 为 CO₂ 或 N₂O 排放通量 (mg·m⁻²·h⁻¹); ρ 为箱内气体密度 (g·cm⁻³); V 为采样箱内有效空间体积 (L); A 为采样箱覆盖的土壤面积 (m²); $\Delta c / \Delta t$ 为取样箱内温室气体浓度随时间的变化率 ($\times 10^{-9}$ cm³·cm⁻³·min⁻¹); θ 为扣箱测定期间取样箱内的平均温度 (°C) [22]。

昼(夜)排放比例=昼(夜)累积排放量/全天总排放量×100% (2)

排放通量差 (ΔF) 为某时间段 SLN 处理 (F_{SLN}) 或 NIUI 处理 (F_{NIUI}) 与常规施肥处理 (F_{OU}) CO₂ 或 N₂O 排放通量的差值。 $\Delta F < 0$ 时表现为减排作用, 反

之为增排。

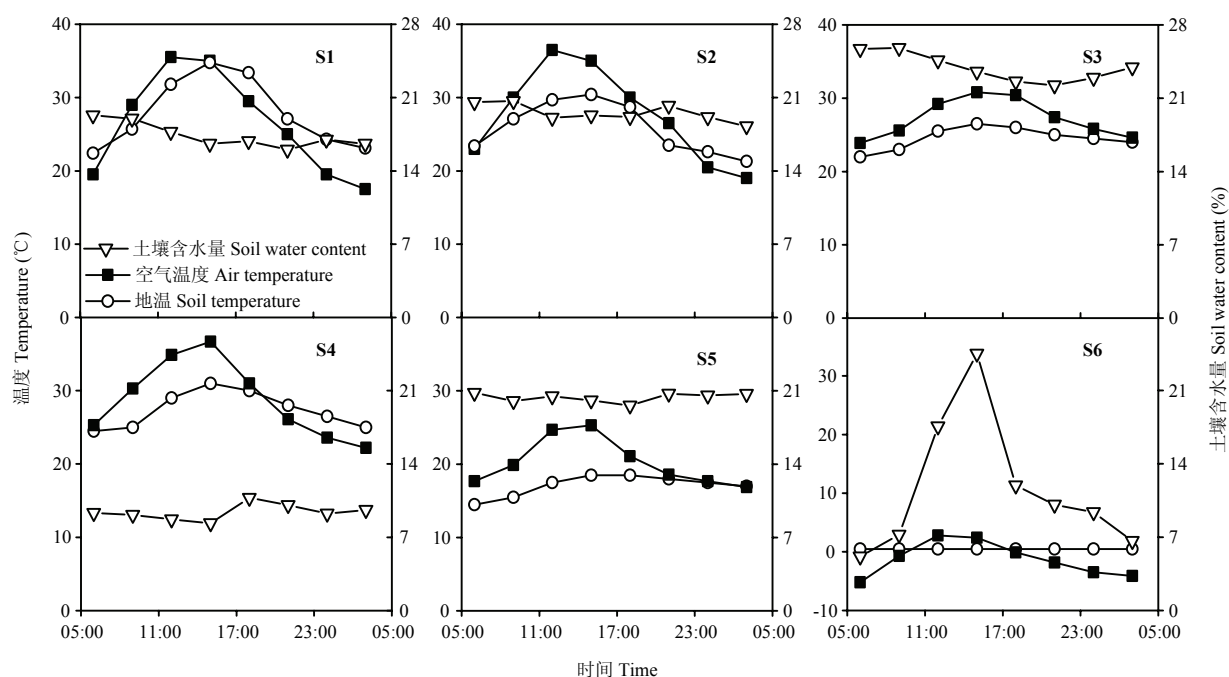
1.5 数据处理

试验中所获得的数据采用 Excel 2007 进行初步整理, 用 SPSS 18 进行描述性统计分析, 运用 Duncan 法进行方差分析中的多重比较, 利用 Origin 2016 软件作图和进行回归分析。

2 结果

2.1 不同类型氮肥对土壤 N₂O 和 CO₂ 昼夜排放的影响

如图 1 所示, 气温和 0—5 cm 地温均为单峰变化趋势(休闲期除外, 因休闲期地温变化较小, 地温计精度为 0.5°C, 所测地温无法显示出温度的变化), 苗前至拔节期(S1—S3), 0—10 cm 土壤含水量呈昼高夜低趋势, 但夜间变化不显著, 灌浆期(S4)则呈昼低夜高的趋势, 蜡熟期(S5) 0—10 cm 土壤含水量昼夜变化不大, 休闲期(S6)呈单峰变化趋势, 中午前后达到峰值。



图中 S1—S6 分别代表苗前、苗期、拔节期、灌浆期、蜡熟期和休闲期。下同

S1 to S6 in the figure represent pre-emergence stage, seedling stage, jointing stage, filling stage, dough stage and fallow period, respectively. The same as below

图 1 不同时期气温、地温和土壤含水量的昼夜变化

Fig. 1 Diurnal variation of air temperature, soil temperature and soil water content in different periods

不同时期土壤 N₂O 排放通量差异较大(图 2)。从全天平均排放通量来看, 各处理均表现为拔节期(S3) > 苗期(S2) > 苗前(S1) > 灌浆期(S4) >

蜡熟期(S5) > 休闲期(S6)。S1 时期, 缓释肥(SLN)、尿素添加硝化抑制剂和脲酶抑制剂(NIUI)和普通尿素(OU)处理土壤 N₂O 全天平均排放通量分别为

42.8、47.8 和 52.5 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$, S2 时期分别为 152.3、94.8 和 106.7 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$, S3 时期分别为 219.1、135.5 和 107.7 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$, S4 时期分别为 30.2、40.2 和 19.3 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$, S5 时期分别为 13.7、8.4 和 12.7 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$, S6 时期分别为 4.6、4.0 和 3.0 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ 。从昼夜变化趋势来看,整体呈单峰曲线,与 5 cm 地温昼夜变化趋势基本一致。S1 时期,各处理平均排放高峰出现在 12: 00—13: 00; S2—S4 时期,各处理平均排放峰值出现在 15: 00—16: 00; S5—S6 时期,各处理平均排放高峰出现在 18: 00—19: 00; 不同时期土壤 N_2O 最低排放通量通常出现在下半夜(0: 00—6: 00)。从昼夜排放比例来看,苗期至蜡熟期,各处理白天累积排放量逐渐降低,休闲期与蜡熟期无显著差异。具体表现为,苗前土壤 N_2O 白天排放比例为 69.9%—82.3%,苗期为 56.2%—70.0%,拔节期为 50.2%—52.5%,灌浆期为 48.2%—52.5%,蜡熟期为 44.5%—46.7%,休闲期为 40.6%—50.4%。

不同时期土壤 CO_2 排放通量也表现出较大差异性

(图 3)。从全天平均排放通量来看,SLN 处理表现为 $\text{S3} > \text{S5} > \text{S2} > \text{S4} > \text{S1} > \text{S6}$, NIUI 处理和 OU 处理表现为 $\text{S3} > \text{S5} > \text{S2} > \text{S1} > \text{S4} > \text{S6}$ 。S1 时期,SLN、NIUI 和 OU 处理土壤 CO_2 全天平均排放通量分别为 248.2、330.9 和 344.8 $\text{mg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$, S2 时期分别为 486.5、349.5 和 453.2 $\text{mg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$, S3 时期分别为 684.0、565.7 和 731.7 $\text{mg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$, S4 时期分别为 450.1、269.3 和 333.2 $\text{mg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$, S5 时期分别为 572.6、441.7 和 482.2 $\text{mg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$, S6 时期 CO_2 排放通量显著低于其他时期,分别为 65.9、54.8 和 50.9 $\text{mg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ 。从昼夜变化趋势来看,昼夜变化动态整体表现为单峰曲线,但苗期至成熟期同一时期白天或夜晚各观测时段 CO_2 排放通量间差异并不显著(图 3)。从昼夜排放比例来看, S1—S4, 各处理白天累积排放量整体表现为降低趋势, S5 与 S6 无显著差异。具体表现为, S1—S6 土壤 CO_2 白天排放比例分别为 62.4%—65.7%、53.6%—54.7%、49.8%—54.7%、49.3%—53.9%、52.2%—53.6% 和 43.7%—52.2%。

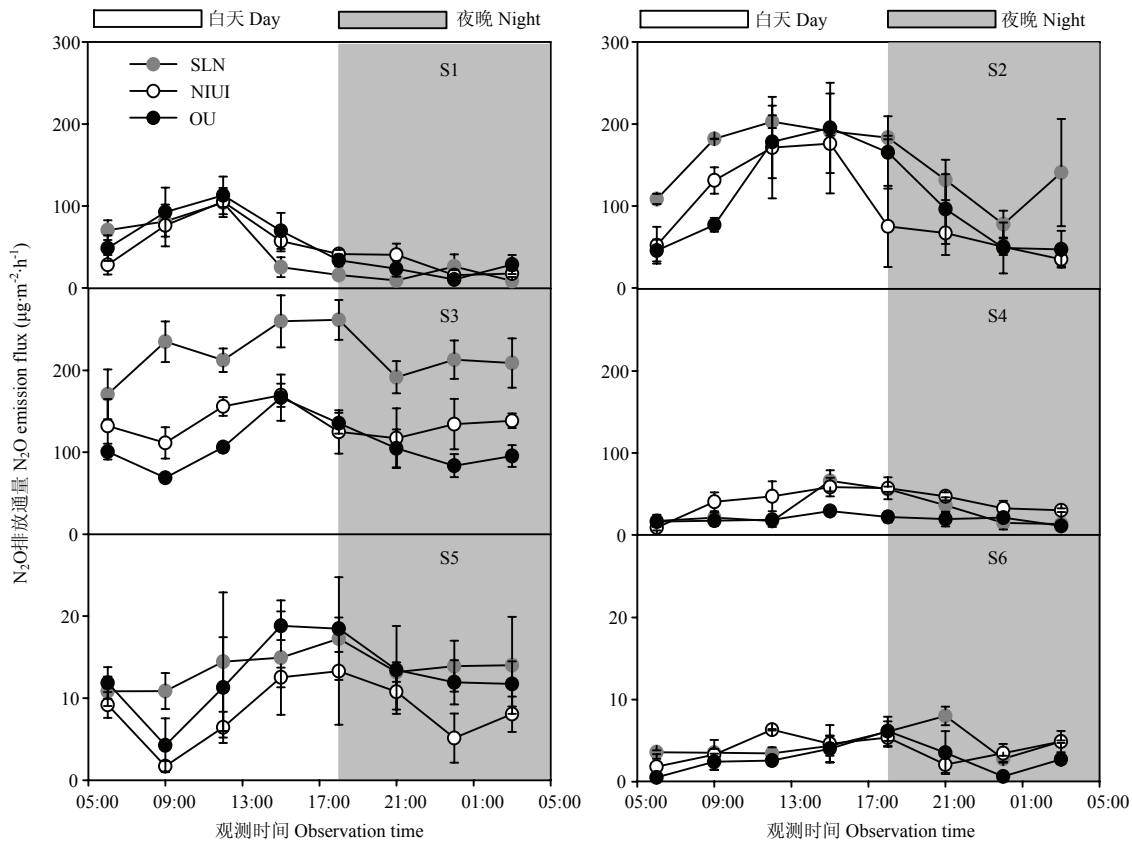
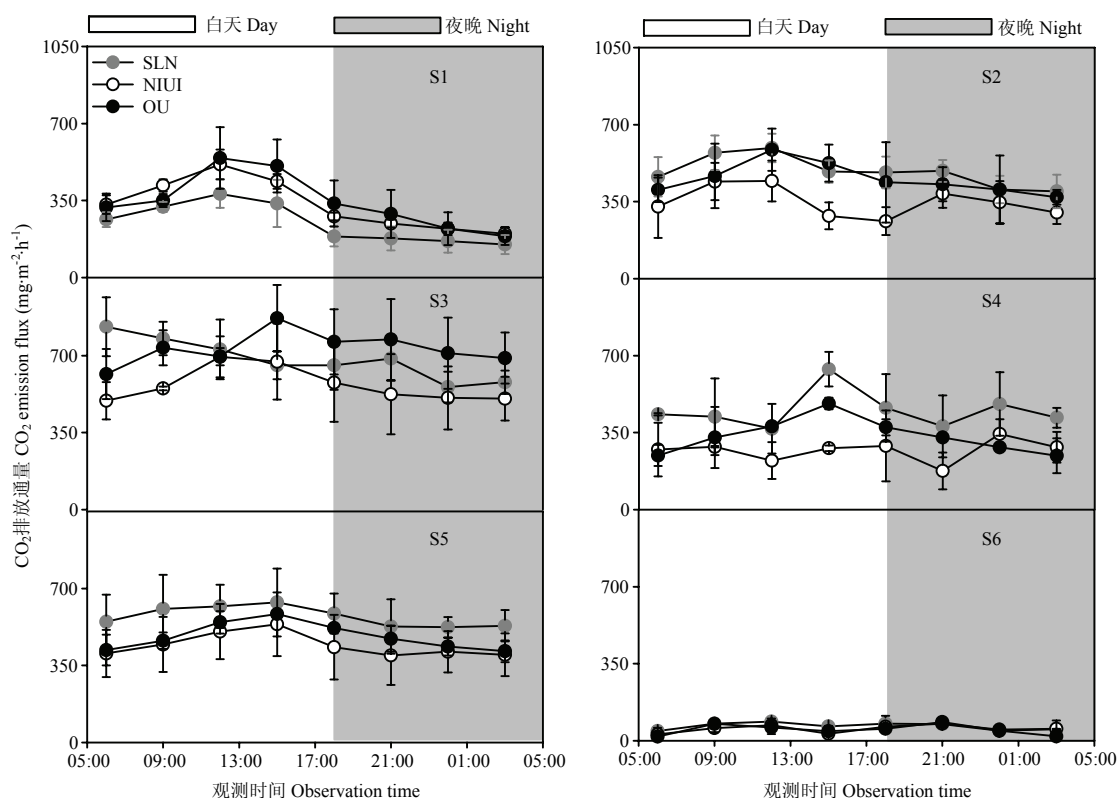


图 2 不同时期 N_2O 排放通量的昼夜变化

Fig. 2 Diurnal variation of N_2O flux in different stages

图3 不同时期 CO_2 排放通量昼夜变化Fig. 3 Diurnal variation of CO_2 flux in different stages

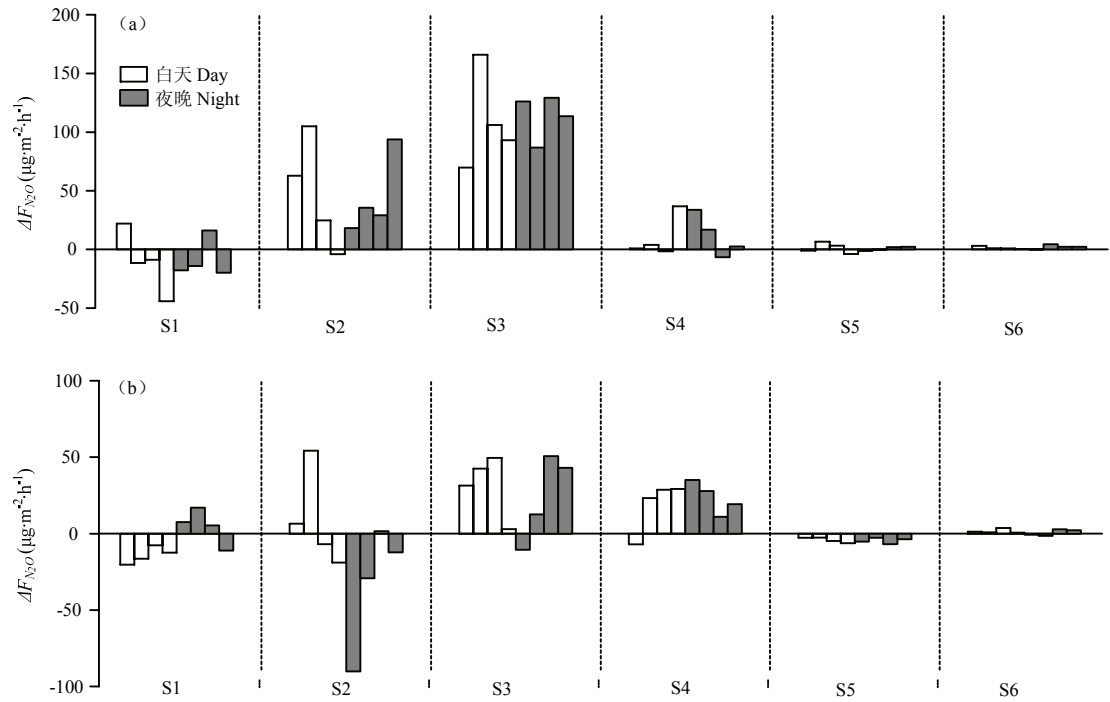
2.2 不同类型氮肥对土壤 N_2O 和 CO_2 昼夜减排的影响

从减排情况来看,不同时期 N_2O 的排放通量差 ($\Delta F_{\text{N}_2\text{O}}$) 昼夜变化动态各异。如图 4-a 所示,与 OU 处理相比,苗前 (S1) SLN 处理整体表现为减排,减排时段主要在 9:00—22:00,其中 15:00—16:00 减排量占全天减排时段总减排量的 38.8%;苗期和拔节期 (S2—S3) 为 N_2O 增排的主要时期,且昼夜均表现为增排,S2 时期 3:00—10:00 增排比例较高,占全天增排时段总增排量的 70.9%,S3 时期昼夜增排比例相当,分别为 48.8%和 51.2%;灌浆期至休闲期 (S4—S6),SLN 处理整体表现为增排,但增排量较低。如图 4-b 所示,与 OU 处理相比,NIUI 处理的减排作用主要发生在 S1、S2 和 S5,且 S1 时期 NIUI 处理的减排主要发生在 3:00—16:00,而 S2 时期的减排作用发生在 12:00—22:00,其中 18:00—19:00 减排量占 57.3%,S5 时期昼夜均表现为减排作用,且昼夜减排比例相当;增排作用主要发生在 S3 和 S4,且昼夜均表现为增排,S6 时期增排量较小,可忽略不计。

不同时期 ΔF_{CO_2} 昼夜变化动态各异。如图 5-a 所示,与 OU 处理相比,SLN 处理的 CO_2 减排作用主要发生在 S1 和 S3 时期,在 S1 时期昼夜均表现为减排,其中白天减排比例占全天减排量的 54.0%,S3 时期 CO_2 减排主要发生在 15:00—4:00,夜间减排比例占 68.1%;S2、S4—S6 时期 SLN 处理较 OU 处理增加了土壤 CO_2 的排放,S2 时期昼夜增排比例相当,S4—S6 时期昼夜均表现为增排。如图 5-b 所示,与 OU 处理相比,NIUI 处理在各时期均降低了土壤 CO_2 的排放,白天平均减排 46.9%,最高减排 73.2%。S1 时期减排主要发生在 12:00—1:00,S2 时期减排主要发生在 12:00—16:00,减排比例占 67.2%,S3 时期白天减排比例为 73.2%,S4 和 S5 时期减排主要发生在 12:00—22:00,减排比例分别为 93.4%和 77.8%,S6 时期整体表现为增排。

2.3 不同取样时间排放通量与全天平均排放通量的相关性分析

为确定东北地区土壤 N_2O 和 CO_2 排放量的代表性取样时间,对各处理不同取样时间的温室气体排放通



图中每个时期从左到右 8 个长条分别代表从早 6:00 至次日 3:00 的 8 个观测时间。下同
The eight bars from left to right in each period represent the eight sampling times from 6:00 am to 3:00 am the next day. The same as below

图 4 不同时期 (S1—S6) SLN (a)、NIUI (b) 与 OU 处理 N_2O 排放通量差值的昼夜变化
Fig. 4 Daily variation of N_2O flux difference between SLN and OU (a), or NIUI and OU (b) treatments in different periods (S1 to S6)

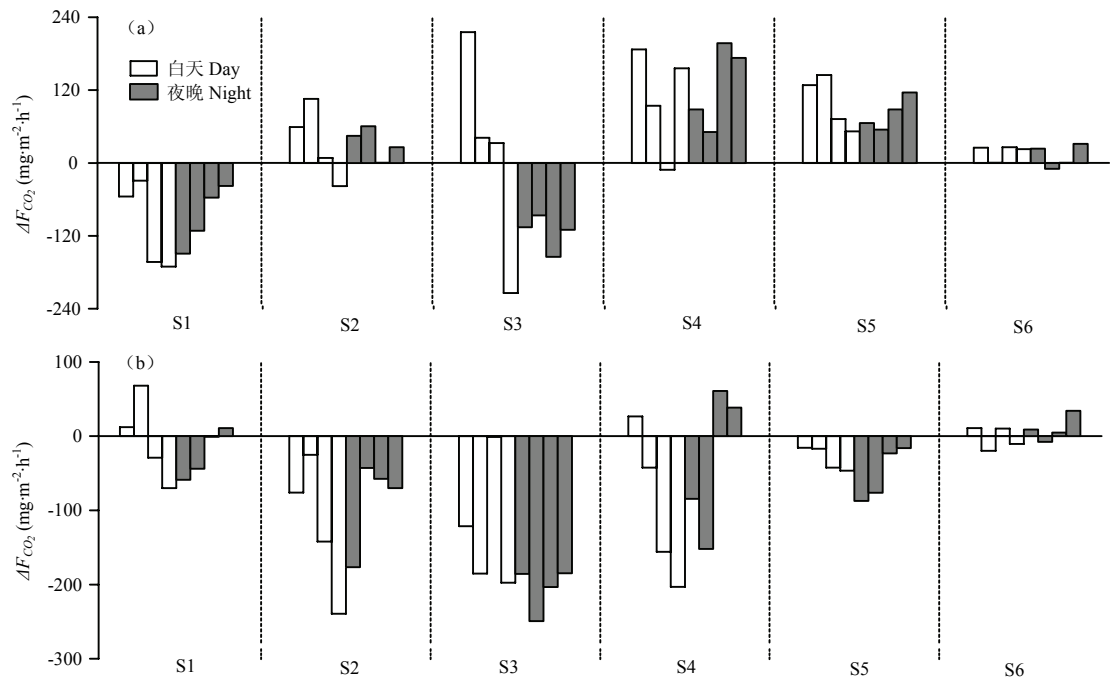


图 5 不同时期 SLN (a)、NIUI (b) 与 OU 处理 CO_2 排放通量差值昼夜变化
Fig. 5 Daily variation of CO_2 flux difference between SLN and OU (a); or NIUI and OU (b) treatments in different periods

量与全天平均排放通量进行了相关性分析（图 6—7），结果表明，各时间段土壤 N₂O 和 CO₂ 排放通量与日均排放通量均存在显著相关关系，若同时对土壤 N₂O 和 CO₂ 排放通量进行观测，9：00—10：00、18：00—19：00 和 3：00—4：00 的平均相关系数 r 分别为 0.959、0.972 和 0.958，而 9：00—10：00 和 3：00—4：00 的相关方程斜率（ S ）最接近于 1。本研究 9：00—10：00 土

壤 N₂O 和 CO₂ 排放量与全天平均排放量的相关系数 r 分别为 0.939 和 0.977，达到极显著水平（ $P<0.01$ ）。因此，在东北春玉米田进行长时间尺度温室气体排放研究时，9：00—10：00 可以作为代表性取样时段。

3 讨论

树脂包膜缓释肥通过减缓养分释放速率，可避免

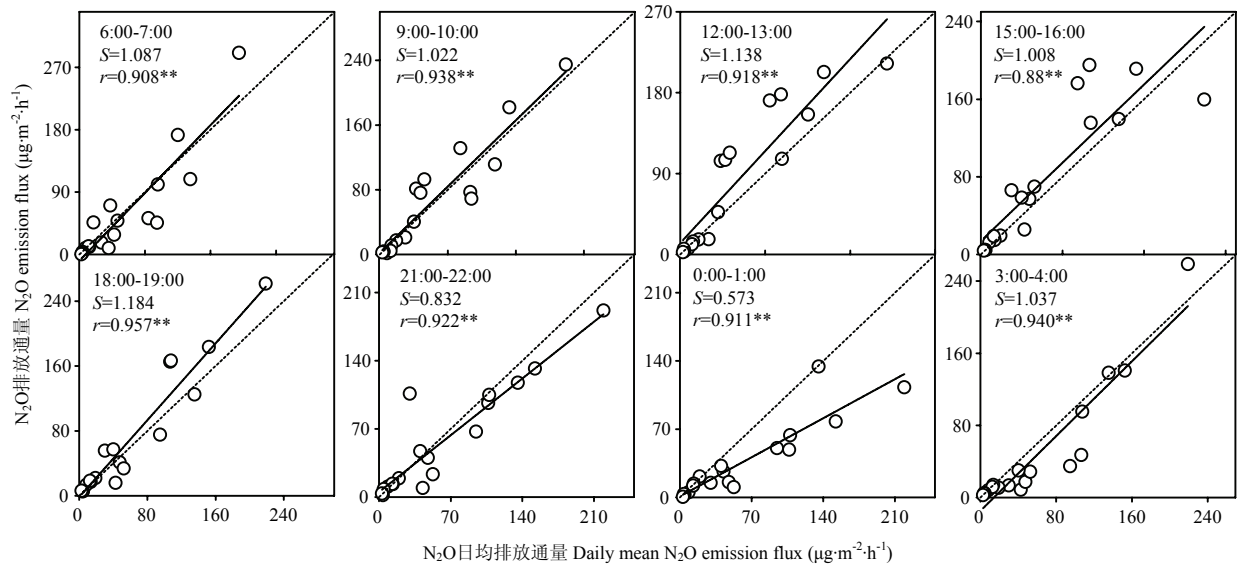


图 6 不同取样时间 N₂O 排放通量与全天平均排放通量的相关分析

Fig. 6 Correlation analysis between daily mean N₂O flux and N₂O flux in different sampling periods

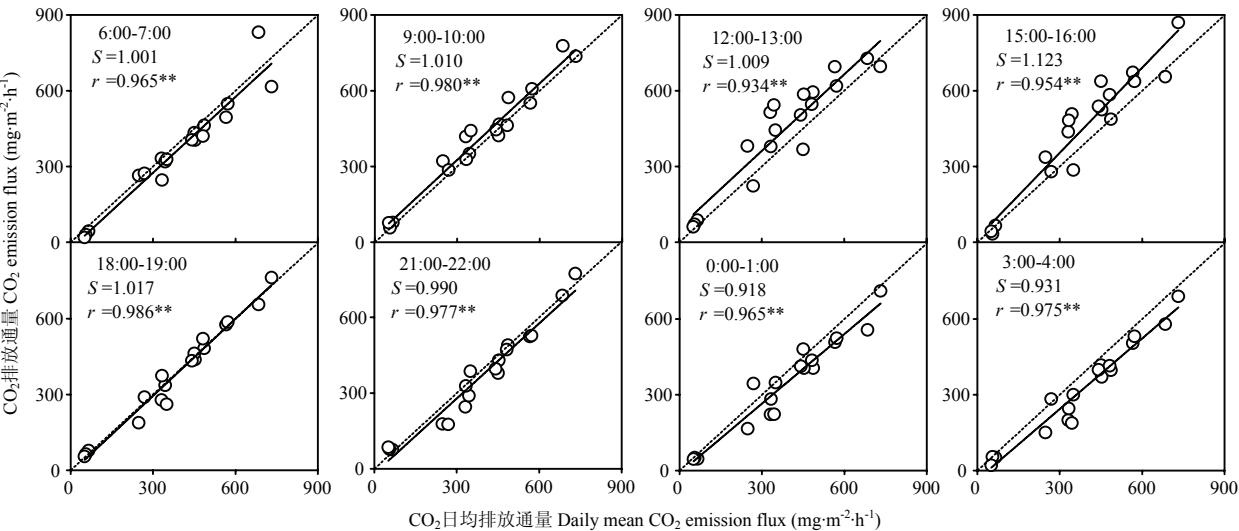


图 7 不同取样时间 CO₂ 排放通量与全天平均排放通量的相关分析

Fig. 7 Correlation analysis between daily mean CO₂ and CO₂ fluxes in different sampling periods

施肥后土壤中无机氮过高或因氮素淋溶造成的 N_2O 排放; 尿素配合氢醌和双氰胺施用能延缓土壤中尿素的水解, 抑制土壤中铵态氮的硝化作用^[23]。缓释肥和抑制剂对土壤 CO_2 排放的影响结果不一致, 且机理尚不明确^[21]。缓释肥和抑制剂对土壤温室气体的作用效果受温度、水分、通气条件以及尿素浓度等因素影响^[24]。在短时间尺度内, 土壤养分、湿度及植物等状况相对稳定, 温度是影响土壤温室气体排放的主要因素^[14, 25]。本研究表明, 从整体来看, 苗前至蜡熟期 N_2O 和 CO_2 排放通量变化几乎与5 cm处土壤温度变化一致, N_2O 和 CO_2 昼夜排放均表现为单峰变化趋势, 排放高峰出现在12:00—19:00, 而排放低谷出现在0:00—6:00。BREMNER等^[26]和宋敏等^[27]研究也认为由于温室气体产生和扩散传输过程的综合作用, 其排放通量变化几乎与表层土壤温度变化同步。而李发东等^[11]研究得出, 白天高温对 N_2O 排放的促进作用存在滞后性, 且该作用随季节而存在差异。出现这一现象的原因可能是大气温度向土壤下层传递需要一定的时间^[28]。

随着玉米生育期的进行, 各处理土壤 N_2O 白天排放比例逐渐降低。施用基肥后土壤氮素含量较高, 玉米对土壤氮素的需求很少, 土壤中的微生物活性和温度的变化动态决定了土壤 N_2O 排放的大小; 此时期较大的昼夜温差是造成土壤 N_2O 排放昼夜差异较大的原因^[16]。拔节期的采样在追肥后第6天, 土壤排放通量达到最高。这可能是因为土壤氮素含量和温度较高所致; 另外, 此时期温度较高但日夜温差较小, 土壤微生物活性可以一直维持较高的水平, 故昼夜排放比例相当。而在玉米休闲期, 土壤 N_2O 排放量低且昼夜差异较小, 这可能与土壤氮残留较低和气温日较差较小有关。本研究得出, 不同时期 CO_2 排放通量整体表现为白天大于夜晚, 但苗期至休闲期昼夜排放差异相对较小。土壤 CO_2 的排放主要来源于土壤微生物呼吸、根呼吸和土壤动物呼吸, 而这些呼吸强度在一定范围内都随温度升高而增强, 因此不同时期土壤 CO_2 排放通量的昼夜变化随昼夜温差的增大而增大^[15]。

玉米出苗前, 常规施肥处理(OU)土壤 N_2O 全天平均排放通量高于其他处理, 缓释肥(SLN)和尿素添加硝化抑制剂和脲酶抑制剂(NIUI)处理对土壤 N_2O 的减排作用主要发生在白天。与OU处理相比, SLN处理促进了玉米苗期至休闲期5个测定日土壤 N_2O 的全天平均排放, 昼夜减排比例在不同时期差异较大; 而NIUI处理在拔节期、灌浆期和休闲期的3个测定日促进了土壤 N_2O 的排放, 其他时期则对土壤

N_2O 的排放表现为抑制作用。同一时期不同处理间土壤 N_2O 排放的差异主要受所施氮肥的影响, 在施氮量相等的条件下, 不同氮肥氮素的释放速率和作物生长状况差异是造成不同处理土壤 N_2O 排放差异的主要因素, 因而其减排效果在各时期的表现也存在显著差异。与OU处理相比, SLN处理对 CO_2 的减排作用发生苗前和拔节期, 出苗前白天减排效果优于夜晚, 而拔节期夜晚减排效果较好, 其他时期则促进了土壤 CO_2 的排放。在玉米生长季的5个测定日, NIUI处理都表现出对 CO_2 的减排作用, 休闲期则无减排效果。这可能是因为抑制剂使氮肥释放缓慢且多被作物利用, 造成土壤中微生物活动受限, 进而造成 CO_2 排放减少^[29], 休闲期无减排效果可能与取样当日地温较低有关。而我们在前期研究中发现, SLN和NIUI处理对土壤 CO_2 周年累积排放通量无显著影响^[6], 因此, 研究时间尺度不同其减排效果也存在差异。

由于野外工作条件的限制, 静态箱法取样通常是在上午9:00—11:00进行^[8, 10, 30-31]。众多研究表明, 土壤温室气体排放的昼夜动态随季节的变化和植物的生长状况而异, 代表性取样时间也会随之变化^[9, 11, 32]。徐钰等^[33]研究也表明, 若不进行有效的矫正处理, 会导致对北方设施菜地土壤典型日 N_2O 排放的估计偏高13.4%—240%或偏低13.1%—64.5%。本研究发现, 尽管 N_2O 和 CO_2 排放峰值与低谷在不同时期出现的时间段有所不同, 但是这对全天平均排放通量发生的时间影响并不大, 9:00—10:00观测值 N_2O 和 CO_2 排放通量与全天平均排放量的相关系数显著相关, 说明该时段可以作为东北春玉米田不同时期温室气体研究的代表性取样时段。

4 结 论

在不同氮肥施用下春玉米田 N_2O 和 CO_2 昼夜排放趋势与5 cm处土壤温度变化一致。玉米生育期内的5个测定日, N_2O 和 CO_2 排放高峰一般出现在午后, 排放低谷一般出现在下半夜。苗前和苗期的2次 N_2O 和 CO_2 昼夜变化动态均呈昼高夜低的特征, 拔节期和休闲期的2次昼夜排放比例相当。与常规施氮相比, 缓释氮肥抑制了玉米苗前土壤 N_2O 昼夜排放, 而在其他时期的测定日均促进了土壤 N_2O 昼夜排放; 尿素添加硝化抑制剂和脲酶抑制剂抑制了玉米苗前白天、苗期夜晚以及收获期白天和夜晚的土壤 N_2O 排放, 对玉米生长旺季土壤 N_2O 的昼夜排放均表现为促进作用。在苗前测定日全天和拔节期测定日的夜晚, 缓释肥对土

壤 CO₂ 表现出减排作用; 尿素添加硝化抑制剂和脲酶抑制剂降低了 6 个测定日土壤 CO₂ 的排放。

参考文献 References

- [1] WHITE D. Expert Review of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) 2019 Special Report Global Warming of 1.5°C, 2019.
- [2] LI L, XU J H, HU J X, HAN J R. Reducing nitrous oxide emissions to mitigate climate change and protect the ozone layer. *Environmental Science and Technology*, 2014, 48(9): 5290-5297.
- [3] THOMPSON R L, LASSALETTA L, PATRA P K, WILSON C, WELLS K C, GRESSENT A, KOFFI E N, CHIPPERDIELD M, WINIWARTER W, DAVIDSON E A, TIAN H, CANADELL J G. Acceleration of global N₂O emissions seen from two decades of atmospheric inversion. *Nature Climate Change*, 2019, 9(2): 1-6.
- [4] GUDAPATY P, SRINIVAS I, RAO K V, SHANKER A K, RAJU B M K, CHOUDHARY D, RAO K S, SRINIVASRAO C, MANDAPAKA M. Net global warming potential and greenhouse gas intensity of conventional and conservation agriculture system in rainfed semi arid tropics of India. *Atmospheric Environment*, 2016, 145: 239-250.
- [5] ZHANG J T, TIAN H Q, SHI H, ZHANG J F, WANG X K, PAN S F, YANG J. Increased greenhouse gas emission intensity of major croplands in China: Implications for food security and climate change mitigation. *Global Change Biology*, 2020, 26(11): 6116-6133.
- [6] KANTER D R, SEARCHINGER T D. A technology-forcing approach to reduce nitrogen pollution. *Nature Sustainability*, 2018, 1(10): 544-552.
- [7] MCGEOUGH K L, WATSON C J, MÜLLER C, LAUGHLIN R. Evidence that the efficacy of the nitrification inhibitor dicyandiamide (DCD) is affected by soil properties in UK soils. *Soil Biology and Biochemistry*, 2016, 94: 222-232.
- [8] 赵迅, 郭李萍, 谢立勇, 孙雪, 赵洪亮, 许婧. 不同农作措施对棕壤玉米田 N₂O 排放及碳足迹的影响. *中国农业气象*, 2016, 37(3): 270-280.
ZHAO X, GUO L P, XIE L Y, SUN X, ZHAO H L, XU J. Impacts of different farming managements on N₂O emission and carbon footprint for maize from brown soil. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2016, 37(3): 270-280. (in Chinese)
- [9] 李梓铭, 杜睿, 王亚玲, 梁宗敏, 钟磊, 吴红军. 中国草地 N₂O 通量日变化观测对比研究. *中国环境科学*, 2012, 32(12): 2128-2133.
LI Z M, DU R, WANG Y L, LIANG Z M, ZHONG L, WU H J. Comparison of diurnal variation of nitrous oxide fluxes from grassland of China. *China Environmental Science*, 2012, 32(12): 2128-2133. (in Chinese)
- [10] ALVES B J R, SMITH K A, FLORES R A, CARDOSO A S, OLIVEIRA W R D, JANTALIA C P, URQUIAGA S, BODDEY R. Selection of the most suitable sampling time for static chambers for the estimation of daily mean N₂O flux from soils. *Soil Biology and Biochemistry*, 2012, 46(46): 129-135.
- [11] 李发东, 杜锐, 张秋英, 古丛珂, 冷佩芳, 乔云峰, 朱农, 郝帅, 黄勇彬, 施生锦. 华北平原农田 N₂O 排放通量的高频动态观测. *中国生态农业学报*, 2018, 26(2): 195-202.
LI F D, DU K, ZHANG Q Y, GU C K, LENG P F, QIAO Y F, ZHU N, HAO S, HUANG Y B, SHI S J. High-frequency dynamic observation of N₂O emission flux from cropland in the North China Plain. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2018, 26(2): 195-202. (in Chinese)
- [12] 刘羽, 周婧, 李珂萍, 李欣瑜, 王朝元, 施正香, 李保明. 影响静态箱检测开放式气体排放源 N₂O 排放通量的关键因子. *农业工程学报*, 2020, 36(8): 182-187.
LIU Y, ZHOU J, LI K P, LI X Y, WANG C Y, SHI Z X, LI B M. Key factors affecting the measurement of N₂O emission from dairy farm using static-chamber method. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2020, 36(8): 182-187. (in Chinese)
- [13] HILLEL D. *Environmental Soil Physics*. San Diego: Academic Press, 1998: 291-293.
- [14] 秦小光, 蔡炳贵, 吴金水, 王国安, 刘东生. 土壤温室气体昼夜变化及其环境影响因素研究. *第四纪研究*, 2005, 25(3): 376-388.
QIN X G, CAI B G, WU J S, WANG G A, LIU D S. Diurnal variations of soil trace gases and related impacting factors. *Quaternary Sciences*, 2005, 25(3): 376-388. (in Chinese)
- [15] YANG H, LIU S R, LI Y D, XU H. Diurnal variations and gap effects of soil CO₂, N₂O and CH₄ fluxes in a typical tropical montane rainforest in Hainan Island, China. *Ecological Research*, 2018, 33(2): 379-392.
- [16] 田慎重, 宁堂原, 迟淑筠, 王瑜, 王丙文, 韩惠芳. 不同耕作措施的温室气体排放日变化及最佳观测时间. *生态学报*, 2012, 32(3): 879-888.
TIAN S Z, NING T Y, CHI S Y, WANG Y, WANG B W, HAN H F. Diurnal variations of the greenhouse gases emission and their optimal observation duration under different tillage systems. *Acta Ecologica Sinica*, 2012, 32(3): 879-888. (in Chinese)
- [17] LIVESLEY S J, KIESE R, GRAHAM J, WESTON C J, BUTTERBACH-BAHL K, ARNDT S K. Trace gas flux and the influence of short-term soil water and temperature dynamics in Australian sheep grazed pastures of differing productivity. *Plant and Soil*, 2008, 309(1/2): 89-103.
- [18] AKIYAMA H, TSURUTA H, WATANABE T. N₂O and NO emissions from soils after the application of different chemical fertilizers.

- Chemosphere - Global Change Science, 2000, 2(3/4): 313-320.
- [19] 周存宇, 张德强, 王跃思, 周国逸, 刘世忠, 唐旭利. 鼎湖山针阔叶混交林地表温室气体排放的日变化. 生态学报, 2004, 24(8): 1738-1741.
- ZHOU C Y, ZHANG D Q, WANG Y S, ZHOU G Y, LIU S Z, TANG X L. Diurnal variations of fluxes of the greenhouse gases from a coniferous and broad-leaved mixed forests oil in Dinghushan. Acta Ecologica Sinica, 2004, 24(8): 1738-1741. (in Chinese)
- [20] THOMSON P E, PARKER J P, ARAH J R M, CLAYTON H, SMITH K A. Automated soil monolith-flux chamber system for the study of trace gas fluxes. Soil Science Society of America Journal, 1997, 61(5): 1323-1330.
- [21] 姚凡云, 王立春, 多馨曲, 刘志铭, 吕艳杰, 曹玉军, 魏雯雯, 王永军. 不同氮肥对东北春玉米农田温室气体周年排放的影响. 应用生态学报, 2019, 30(4): 1303-1311.
- YAO F Y, WANG L C, DUO X Q, LIU Z M, LÜ Y J, CAO Y J, WEI W W, WANG Y J. Effects of different nitrogen fertilizers on annual emissions of greenhouse gas from maize field in Northeast China. Chinese Journal of Applied Ecology, 2019, 30(4): 1303-1311. (in Chinese)
- [22] LIU Y N, LI Y C, PENG Z P, WANG Y Q, MA S Y, GUO L P, LIN E D, HAN X. Effects of different nitrogen fertilizer management practices on wheat yields and N₂O emissions from wheat fields in North China. Journal of Integrative Agriculture, 2015, 14(6): 1184-1191.
- [23] 孙磊, 王丽华, 高中超, 佟玉欣, 张磊, 常本超, 王爽, 郝小雨. 减氮配合增效剂和缓释肥对玉米田土壤温室气体排放和产量的影响. 土壤通报, 2020, 51(1): 185-194.
- SUN L, WANG L H, GAO Z C, TONG Y X, ZHANG L, CHANG B C, WANG S, HAO X Y. Effects of reduction of nitrogen fertilizer combined with synergist and slow release fertilizer on greenhouse gas emissions and yield in corn field. Chinese Journal of Soil Science, 2020, 51(1): 185-194. (in Chinese)
- [24] 马芬, 杨荣全, 郭李萍. 控制氮肥施用引起的活性氮气体排放: 脲酶/硝化抑制剂研究进展与展望. 农业环境科学学报, 2020, 39(4): 908-922.
- MA F, YANG R Q, GUO L P. Decrease the emission of active nitrogen gases in nitrogen fertilizer application: Research progresses and perspectives of urease/nitrification inhibitors. Journal of Agro-Environment Science, 2020, 39(4): 908-922. (in Chinese)
- [25] LI J, WANG M X, WANG Y S, HUANG Y, ZHENG X H, XU X. Advance of researches on greenhouse gases emission from Chinese agricultural ecosystem. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2003, 27(4): 740-749.
- [26] BREMNER J M, ROBBINS S G, BLACKMER A M. Seasonal variability in emission of nitrous oxide from soil. Geophysical Research Letters, 2013, 7(9): 641-644.
- [27] 宋敏, 齐鹏, 蔡立群, STEPHEN Y, 张军, 张仁陟, 武均, 谢军红. 不同生物质炭输入水平下旱作农田温室气体排放研究. 2016, 24(10): 1185-1195.
- SONG M, QI P, CAI L Q, STEPHEN Y, ZHANG J, ZHANG R Z, WU J, XIE J H. Diurnal variations of greenhouse gases emissions under different biochar applications. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2016, 24(10): 1185-1195. (in Chinese)
- [28] 张仲新, 李玉娥, 华路, 万运帆, 姜宁宁. 不同施肥量对设施菜地 N₂O 排放通量的影响. 农业工程学报, 2010, 26(5): 269-275.
- ZHANG Z X, LI Y E, HUA L, WAN Y F, JIANG N N. Effects of different fertilizer levels on N₂O flux from protected vegetable land. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2010, 26(5): 269-275. (in Chinese)
- [29] 朱龙飞, 徐越, 张志勇, 于旭昊, 马新明, 闫广轩, 孔玉华. 不同施氮措施对冬小麦农田土壤温室气体通量的影响. 生态环境学报, 2019, 28(1): 143-151.
- ZHU L F, XU Y, ZHANG Z Y, YU X H, MA X M, YAN G X, KONG Y H. Effect of different nitrogen application measures on soil greenhouse gases fluxes in winter wheat cropland. Ecology and Environmental Sciences, 2019, 28(1): 143-151. (in Chinese)
- [30] 李燕青, 唐继伟, 车升国, 温延臣, 孙文彦, 赵秉强. 长期施用有机肥与化肥氮对华北夏玉米 N₂O 和 CO₂ 排放的影响. 中国农业科学, 2015, 48(21): 4381-4389.
- LI Y Q, TANG J W, CHE S G, WEN Y C, SUN W Y, ZHAO B Q. Effect of organic and inorganic fertilizer on the emission of CO₂ and N₂O from the summer maize field in the North China Plain. Scientia Agricultura Sinica, 2015, 48(21): 4381-4389. (in Chinese)
- [31] WANG C, LIU J Y, SHEN J L, CHEN D, LI Y, JIANG B S, WU J S. Effects of biochar amendment on net greenhouse gas emissions and soil fertility in a double rice cropping system: A 4-year field experiment. Agriculture Ecosystems and Environment, 2018, 262: 83-96.
- [32] REEVES S, WANG W J. Optimum sampling time and frequency for measuring N₂O emissions from a rain-fed cereal cropping system. Science of the Total Environment, 2015, 530/531: 219-226.
- [33] 徐钰, 刘兆辉, 石璟, 魏建林, 李国生, 王梅, 江丽华. 北方设施菜地土壤 N₂O 排放通量日变化及最佳观测时间确定. 中国农业气象, 2016, 37(5): 505-512.
- XU Y, LIU Z H, SHI J, WEI J L, LI G S, WANG M, JIANG L H. Diurnal variation characteristic of nitrous oxide from greenhouse vegetable soil during emission peak and its optimal observation duration. Chinese Journal of Agrometeorology, 2016, 37(5): 505-512. (in Chinese)

(责任编辑 杨鑫浩)