

DOI: 10.13930/j.cnki.cjea.171209

李发东, 杜锟, 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  $N_2O$  排放通量的高频动态观测[J]. 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  $N_2O$  emission flux from cropland in the North China Plain[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2018, 26(2): 195–202

## 华北平原农田 $N_2O$ 排放通量的高频动态观测\*

李发东<sup>1,2,3</sup>, 杜 锟<sup>1,2,3</sup>, 张秋英<sup>4</sup>, 古丛珂<sup>1,2,3</sup>, 冷佩芳<sup>1,2,3</sup>, 乔云峰<sup>1,2,3</sup>,  
朱 农<sup>1,2,3</sup>, 郝 帅<sup>1,2,3</sup>, 黄勇彬<sup>4</sup>, 施生锦<sup>4</sup>

(1. 中国科学院地理科学与资源研究所生态系统网络观测与模拟重点实验室 北京 100101; 2. 中国科学院禹城综合试验站 禹城 251200; 3. 中国科学院大学资源与环境学院 北京 100190; 4. 北京雨根科技有限公司 北京 100094)

**摘 要:**  $N_2O$  是主要源自农田的重要温室气体之一, 可破坏臭氧层而导致全球增温。目前对  $N_2O$  的原位高频观测尚不多。为完善  $N_2O$  的观测方法, 为华北地区  $N_2O$  变化研究提供参考, 本研究以华北平原典型农田为研究对象, 利用新型的  $N_2O$  测定仪器 TGA200A, 进行实时、自动、昼夜连续地观测中国科学院禹城综合试验站农田大气  $N_2O$  的日动态变化。本次观测自 2017 年 6 月中旬玉米播种后开始, 持续至 2017 年 9 月(8 月份仪器调试)。结果显示: 1) 晴朗天气下, 农田大气  $N_2O$  呈现出夜晚(0:00—6:00, 18:00—24:00)高(0.618~1.171  $mg \cdot m^{-3}$ )、白天(6:00—18:00)低(0.526~1.145  $mg \cdot m^{-3}$ )的趋势, 而白天高温又促进农田  $N_2O$  排放, 在午后 15:00—17:00 大多出现 1 次峰值, 表明温度的促进作用存在滞后性。2) 降雨天气下, 农田  $N_2O$  在适当的雨量下逐渐增加(3 h 内增加 0.033  $mg \cdot m^{-3}$ ), 且存在累积效应, 但过度淹水后  $N_2O$  表现出逐渐降低的趋势。3) 大风天气下,  $N_2O$  的浓度产生变化, 但规律并不明显。研究结果表明, 利用 TGA200A 可以实现对温室气体  $N_2O$  的实时、连续、动态的自动观测, 观测结果具有较高可信度, 可以反映出当前华北地区农田  $N_2O$  在不同环境要素(温度、降水及大风)下的动态变化趋势。

**关键词:** 华北平原; 农田生态系统;  $N_2O$  排放; 通量监测; 高频监测

**中图分类号:** X51; S-3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1671-3990(2018)02-0195-08

## High-frequency dynamic observation of $N_2O$ emission flux from cropland in the North China Plain\*

LI Fadong<sup>1,2,3</sup>, DU Kun<sup>1,2,3</sup>, ZHANG Qiuying<sup>4</sup>, GU Congke<sup>1,2,3</sup>, LENG Peifang<sup>1,2,3</sup>, QIAO Yunfeng<sup>1,2,3</sup>,  
ZHU Nong<sup>1,2,3</sup>, HAO Shuai<sup>1,2,3</sup>, HUANG Yongbin<sup>4</sup>, SHI Shengjin<sup>4</sup>

(1. Key Laboratory of Ecosystem Network Observation and Modeling, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China; 2. Yucheng Comprehensive Experiment Station, Chinese Academy of Sciences, Yucheng 251200, China; 3. College of Resources and Environment, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China; 4. Rainroot Scientific Limited, Beijing 100094, China)

**Abstract:** Nitrous oxide ( $N_2O$ ) is one of the primary greenhouse gases, which depletes ozone sphere and results in strong

\* 国家自然科学基金项目(41771292, 31170414)和国家重点研发计划项目(2016YFD0800301)资助

李发东, 主要从事生态水文与水环境研究。E-mail: lifadong@igsrr.ac.cn

收稿日期: 2017-12-19 接受日期: 2017-12-25

\* This study was supported by the National Natural Science Foundation of China (41771292, 31170414), and the National Key Research and Development Project of China (2016YFD0800301).

Corresponding author, LI Fadong, E-mail: lifadong@igsrr.ac.cn

Received Dec. 19, 2017; accepted Dec. 25, 2017

greenhouse effects. Nowadays, a series of studies on greenhouse gases emissions of vegetation-soil-atmosphere system has been carried out domestic and overseas with the measurement method of static chamber/gas chromatograph, in which gas sampling time is concentrated in a fixed period during daytime rather than around the clock. Moreover, its' sampling frequency is usually longer than one minute inducing difficulty to implement a real-time, high-frequency and continuous determination of greenhouse gas emissions *in situ* for a long time. As an important source of  $N_2O$  emission, farmland ecosystem is a human-disturbed system with fast N recycle and large  $N_2O$  emission. To improve  $N_2O$  emission observation methods and provide a reference for  $N_2O$  change study in the North China Plain, we chose a typical farmland ecosystem, a maize field at the Yucheng Comprehensive Experiment Station, Chinese Academy of Sciences, and monitored  $N_2O$  concentration change with a new monitor instrument TGA200A (Trace Gas Analyzer 200A) to achieve a automatically real-time monitoring of  $N_2O$  emission for day and night. The TGA200A was equipped with a laser launch tube simultaneously controlled by current and temperature and some related measuring devices. When sample and reference gases (with a known concentration) entered the analyzer synchronously, the target gas concentration was determined by through scanning and comparing the linear absorption wavelengths of laser energy between sample and reference gases. The monitoring was from the middle of June 2017 to September 2017. The results showed, firstly, the  $N_2O$  emission was higher in night from 0:00 to 6:00 and 18:00 to 24:00 ( $0.618\text{--}1.171\text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ ) than in daytime from 6:00 to 18:00 ( $0.526\text{--}1.145\text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ ) in fine weather.  $N_2O$  emission was facilitated under higher atmospheric temperature in daytime, but the emission peak appeared in 15:00 to 17:00 indicating a significant hysteresis of temperature effect. Secondly, in rainy day, maize field  $N_2O$  emissions were increased by  $0.033\text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$  in 3 hours with a proper rainfall and presented an accumulative effect. But if the rain was too heavy for a long time, the  $N_2O$  emission would be reduced. Thirdly,  $N_2O$  emission was affected by strong wind, but this conclusion needed more verification because such result was not regular. This study demonstrated the data determined by the TGA200A was useful and reliable for study on dynamic change of  $N_2O$  emission in different weathers. TGA200A was available in an automatically and real-time monitor of  $N_2O$  emission for day and night with different environment elements (temperature, rain, wind) and made it possible to reduce human costs and errors in greenhouse gas flux observation.

**Keywords:** North China Plain; Farmland ecosystem; Nitrous oxide emission; Flux observation; High-frequency observation

现今全球气候变暖已成为主要的气候变化趋势,由此引发的温室效应等问题已日益成为当前研究热点之一。公认的产生温室效应气体主要包括 $CO_2$ 、 $CH_4$ 、 $N_2O$ ,其对温室效应的贡献率分别为60%、15%、5%,综合贡献率高达80%<sup>[1]</sup>,又以 $N_2O$ 的温室效应最大,其增温效应最高可达 $CO_2$ 的270倍<sup>[2]</sup>。空气中的 $N_2O$ 与其他物质反应,对臭氧层产生危害,可增强地球表面的紫外线辐射,进一步对地球表面增温产生影响。因此,对于 $N_2O$ 的观测和研究对于摸清当前植被-土壤-大气系统中的 $N_2O$ 浓度,解释当前大气中 $N_2O$ 的变化机制并以此促进 $N_2O$ 的减排具有重要意义。目前,前人关于 $N_2O$ 排放研究表明,土壤对大气 $N_2O$ 的贡献为80%~90%,是重要的 $N_2O$ 排放源<sup>[3]</sup>。对于不同生态系统的研究表明,植被究竟是源还是汇与植被类型和地区有关<sup>[4]</sup>,且不同生态系统排放的 $N_2O$ 量存在差异<sup>[5-7]</sup>。目前,生态系统中 $N_2O$ 的观测主要以静态箱-气相色谱法较为常见<sup>[5,8-9]</sup>,但该方法的测定时间间隔相对较长,实现实时连续测定的难度较大,且难以捕捉到降雨、风等异常天气下的排放情况。

农田生态系统受人类影响,土壤中氮元素循环较快, $N_2O$ 排放较大,是公认的重要的 $N_2O$ 排放源<sup>[10]</sup>。华北平原地区是我国重要的粮食产地,耕地面积广,耕

作强度大,属于典型的具有代表性的农田生态系统。闫翠萍等<sup>[11]</sup>研究表明,华北平原小麦玉米轮作农田是 $N_2O$ 的排放源,小麦季土壤排放 $N_2O$ 总量为 $0.83\text{--}1.80\text{ kg}(N_2O-N)\cdot\text{hm}^{-2}$ ,玉米季土壤排放 $N_2O$ 总量 $1.21\text{--}2.07\text{ kg}(N_2O-N)\cdot\text{hm}^{-2}$ ,土壤温度升高和降水量增加以及干湿交替加剧均会造成 $N_2O$ 排放速率增加。同时在持续干燥和低温的冬季不施氮处理观测到土壤对 $N_2O$ 的吸收现象<sup>[12]</sup>。然而,这些研究多是利用静态箱-气相色谱法测定,测定频度多为每周1次,每次测定2~3 h,总排放量通常采用插值法计算。这可能导致总排放量的计算误差,且由于需人工测定,异常天气下测定难度较大,进一步影响了测定精度。

TGA200A(Trace Gas Analyzer, Campbell Scientific Ltd., USA)仪器是一种新型的TGA系列的温室气体观测仪器,具有响应时间短、测定迅速的特点,可以每秒10 Hz的速度对大气中的 $N_2O$ 进行实时分析测定,该类仪器目前在国内应用尚未见报道。因此,本研究采用TGA200A仪器,配以涡度相关仪器和技术,以位于华北平原的中国科学院禹城综合试验站农田为研究对象,观测农田 $N_2O$ 排放的日变化特征,并利用相关环境要素如温度、风速、湿度等,对华北农田玉米季 $N_2O$ 变化及其影响要素进行研究,以

期完善 N<sub>2</sub>O 的观测方法, 并为华北地区 N<sub>2</sub>O 变化研究提供参考。

## 1 材料和方法

### 1.1 试验地概况

试验地位于中国科学院禹城综合试验站 (36°40′~37°12′N, 116°22′~116°45′E), 地处山东省西北部、黄河下游。该地土壤为黄河冲积物母质发育, 土壤类型主要为潮土和盐化潮土, 是华北平原地区的典型农田生态系统。试验地属温带半干旱季风气候区, 年均气温 13.4 °C, 年均降水量 567 mm, 夏季为主要降雨期; 多年无霜期 220 d, 大于 0 °C 积温为 4 951 °C, 日照时间超过 2 600 h<sup>[13]</sup>, 水热条件优良, 利于作物种植和生长。

该地农田采用冬小麦-夏玉米轮作的种植方式, 小麦收获后于 6 月 10—15 日使用机器播种玉米, 不作翻耕处理, 生长期使用地下水适度灌溉 1~2 次, 仅 7 月底施肥 1 次。

### 1.2 TGA200A 测定系统

于 2016 年 5 月初安装 TGA200A 系统, 主要组成部分包括支架、TGA 分析测定主机箱 (Campbell Scientific Ltd., USA, 体积约 0.5 m<sup>3</sup>), CR6 datalogger 数采器 (Campbell Scientific Ltd., USA)、抽真空高压

泵、电脑、N<sub>2</sub>O 标气瓶。此外, 配以涡度相关技术 (eddy covariance technique) 的 CAST-3 (Campbell Scientific Ltd., USA)、Li-7500 (Li-COR Ltd., USA), 为防止相互干扰, 两者中轴线不在同一水平面上, 存在一定夹角。在 CAST-3 超声装置外侧架设 N<sub>2</sub>O 的进样口, 高 2.5 m (图 1)。

TGA 主机箱内配置以电流和温度控制的激光发射管及其相关测定装置, 通过扫描和分析痕量气体 (trace gas) 对激光能量的线性吸收波长, 实现对痕量气体的监测<sup>[14]</sup>。当真空泵抽低压后, 待测气体从进样口进入管道, 经过过滤和干燥后, 进入主机箱待测。与此同时, 标气瓶的 N<sub>2</sub>O 标准气体进入主机箱 (浓度已知), 利用激光技术同时测定样品和标准气体的 N<sub>2</sub>O 的吸光值, 以此测定样品的 N<sub>2</sub>O 浓度值。设定测定频次为 10 Hz, 每秒内各次 N<sub>2</sub>O 均值即为大气实时 N<sub>2</sub>O 浓度。

涡度相关技术通过测定和分析温度、H<sub>2</sub>O、CO<sub>2</sub> 等的脉动与垂直风速脉动协方差, 对生物圈 (森林、农田等) 与大气间湍流通量进行非破坏性的标准测定方法, 具有适用范围广、可信度高等特点<sup>[15-16]</sup>。利用涡度相关技术中的 CAST-3、Li-7500 设备测定大气风速、温度、湿度, 相关测定和分析方法见文献<sup>[17-18]</sup>。

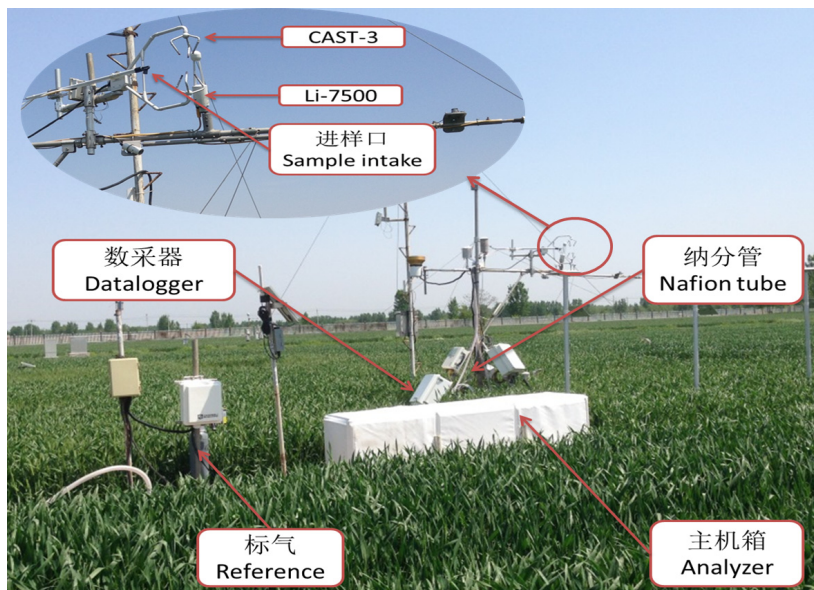


图 1 测定农田生态系统 N<sub>2</sub>O 浓度的 TGA200A 测定系统示意图

Fig. 1 Sketch map of measuring system of TGA200A for N<sub>2</sub>O concentration measurement of farmland system

### 1.3 数据处理

对半小时内 N<sub>2</sub>O 浓度取算术平均值, 得每半小时的大气 N<sub>2</sub>O 浓度, 利用 Microsoft Excel 软件对数据进行计算和作图。

## 2 结果与分析

### 2.1 晴朗天气下农田 N<sub>2</sub>O 日动态变化

#### 2.1.1 玉米出苗期 N<sub>2</sub>O 日动态变化

6 月 10—15 日玉米播种后 1 周内属于出苗期,

选择 6 月 18 日(晴朗天气)的数据进行分析(图 2)发现,  $N_2O$  浓度在  $0.611\sim 0.669\text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$  范围内, 整体上呈现出白天(6:00—18:00, 下同)低(多数低于  $0.630\text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ ), 夜晚(0:00—6:00、18:00—24:00, 下同)高(多数高于  $0.630\text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ )的特征。自凌晨开始至日出阶段, 农田  $N_2O$  随大气温度降低而逐渐降低, 仅在日出前后短暂升高。 $N_2O$  在 8:30—18:00 整体上表现出先升后降的趋势, 即高温时段 15:30 出现一

次峰值  $0.627\text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$ ; 在 18:00 前后逐渐升高, 至 23:00 保持平稳。结果表明, 温度对农田  $N_2O$  排放产生重要影响, 白天高温可提高  $N_2O$  浓度, 但这种作用存在一定的滞后性。大气湿度和风速对大气温度的变化表现出相应的变化, 即温度逐渐升高, 湿度随后逐渐降低, 风速在白天表现出升高的趋势, 进一步佐证了环境要素对  $N_2O$  排放的协同作用及其相互影响。

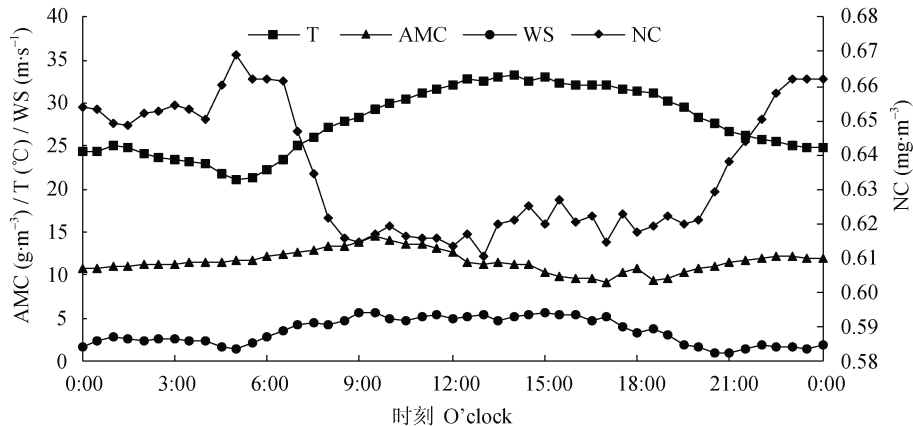


图 2 玉米出苗期农田  $N_2O$  浓度及环境要素的日动态变化

Fig. 2 Dynamic changes of  $N_2O$  emission and environment elements of farmland system at maize seeding stage

NC:  $N_2O$  浓度; AMC: 大气含水量; T: 温度; WS: 风速。NC: nitrous oxide concentration; AMC: atmospheric water content; T: temperature; WS: wind speed.

### 2.1.2 玉米三叶期 $N_2O$ 日动态变化

选择玉米三叶期晴朗天气的 7 月 8 日数据进行分析。从图 3 可知, 气温在日出前后最低, 下午 14:00—15:00 高温, 甚至在 17:00 之前大气温度仍高于  $36\text{ }^\circ\text{C}$ ; 湿度则随温度变化表现出相反的变化, 风速在白天温度较高时段达到较大水平。在该种温度主导的环境要素下,  $N_2O$  浓度呈现出夜晚高白天低的特征, 即在凌晨至 8:00 表现出降低趋势, 之后随温度升高  $N_2O$  浓度

逐渐升高, 但其降低的时间晚于苗期的 6 月 18 日, 这是因为在 7 月份白天积温较高, 相对高温时段较长, 延迟了  $N_2O$  降低的时间节点。

综合分析以上 6 月 18 日和 7 月 8 日的数据可以发现, 两个时间的  $N_2O$  浓度变化特点进一步验证了温度对植被-土壤系统  $N_2O$  浓度存在重要影响, 且  $N_2O$  浓度和温度变化的节点不同, 温度对  $N_2O$  的作用存在滞后作用, 该种作用随季节(高温时长)而存在差异。

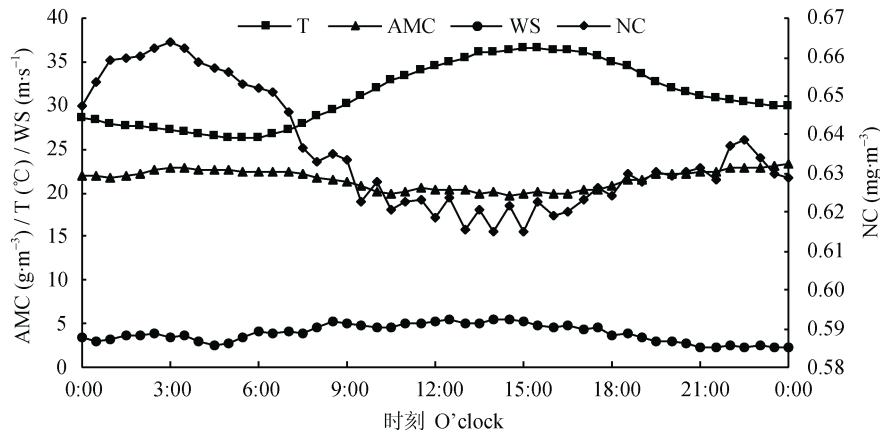


图 3 玉米三叶期农田  $N_2O$  浓度及环境要素日动态变化

Fig. 3 Dynamic changes of  $N_2O$  concentration and environment elements of farmland system at maize trefoil stage

NC:  $N_2O$  浓度; AMC: 大气含水量; T: 温度; WS: 风速。NC: nitrous oxide concentration; AMC: atmospheric water content; T: temperature "WS: wind speed".

### 2.1.3 玉米花粒期 N<sub>2</sub>O 日动态变化

选择玉米花粒期 9 月 9 日的数据进行分析发现(图 4), 温度、湿度、风速均表现出白天高、夜晚低的特征。湿度在温度最高的阶段呈降低的趋势, 而

风速与温度的变化存在相似趋势。N<sub>2</sub>O 在日出前后达到 1.171 mg·m<sup>-3</sup>, 远高于玉米生长前期平均水平, 而白天的 N<sub>2</sub>O 浓度较低, 其均值低于 0.600 mg·m<sup>-3</sup>, 远低于相对应的其他月份的浓度。

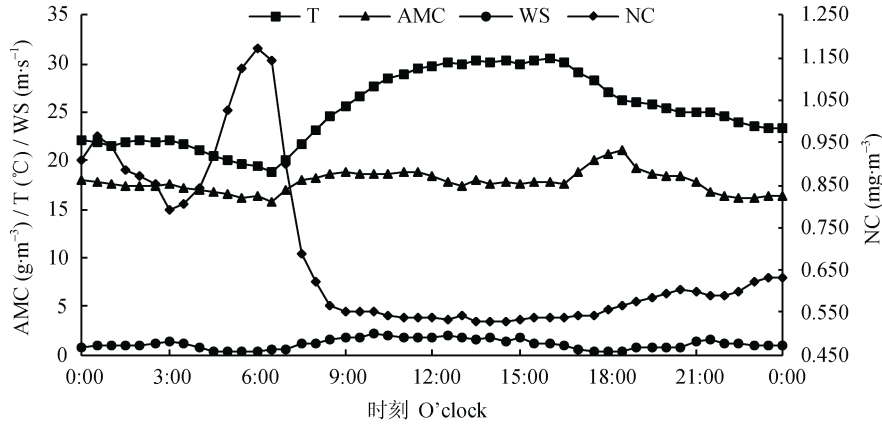


图 4 玉米花粒期农田 N<sub>2</sub>O 浓度及环境要素日动态变化

Fig. 4 Dynamic changes of N<sub>2</sub>O concentration and environment elements of farmland system at maize anthesis and kernel stage  
NC: N<sub>2</sub>O 浓度; AMC: 大气含水量; T: 温度; WS: 风速. NC: nitrous oxide concentration; AMC: atmospheric water content; T: temperature; WS: wind speed.

### 2.2 降雨天气下农田 N<sub>2</sub>O 日动态变化

选择降雨天气(6 月 22 日)的数据进行分析发现(图 5), 降雨天气下, 大气温度的全天变化较小, 为 20~25 °C, 显著低于晴天(6 月 18 日)的温度(图 2); 湿度随降雨时长累积逐渐增大, 风速在白天时段基本保持平稳, 夜间风速逐渐降低。该种环境下, 农田 N<sub>2</sub>O 表现出随降雨累积逐渐增大的趋势(9:00—

12:30), 但在 12:30 过后表现出短时间降低的趋势, 之后急剧上升至夜间最高值 0.762 mg·m<sup>-3</sup>。降雨(6 月 22 日)与晴天(6 月 18 日)的 N<sub>2</sub>O 浓度比较, 凌晨至日出阶段以晴天较高, 而白天至深夜均以降雨天气较高, 且受降雨影响, 夜晚阶段的最高值远高于晴朗天气, 表明降雨可促进植被-土壤系统释放 N<sub>2</sub>O, 增加大气 N<sub>2</sub>O 浓度, 但过度降雨抑制 N<sub>2</sub>O 排放。

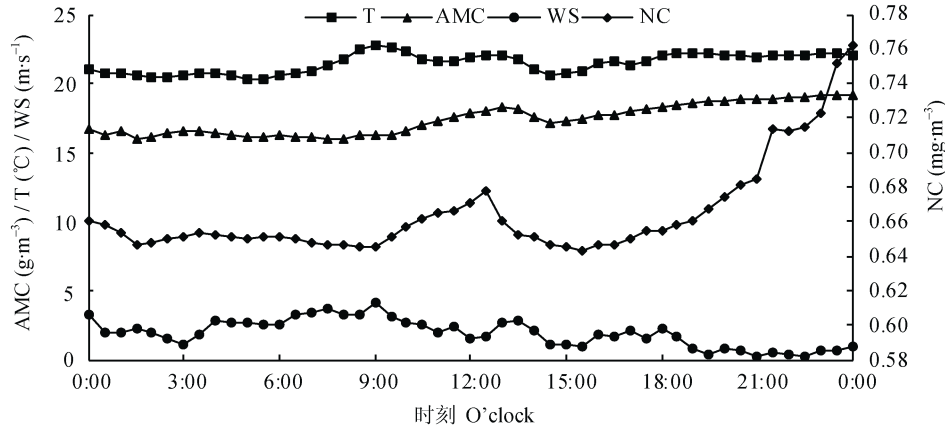


图 5 雨天玉米农田 N<sub>2</sub>O 浓度及环境要素日动态变化

Fig. 5 Dynamic changes of N<sub>2</sub>O concentration and environment elements of maize field in rainy day  
NC: N<sub>2</sub>O 浓度; AMC: 大气含水量; T: 温度; WS: 风速. NC: nitrous oxide concentration; AMC: atmospheric water content; T: temperature; WS: wind speed.

### 2.3 大风天气下农田 N<sub>2</sub>O 日动态变化

晴朗强风天气 7 月 8 日(图 3)和晴朗弱风 7 月 3 日(图 6)数据进行分析比较发现, 两者的温度范围为相近, 湿度差距较小, 但风速前者是后者 3~20 倍。对比 N<sub>2</sub>O 数据发现, 风速较低的 7 月 3 日的 N<sub>2</sub>O

浓度显著高于风速较高的 7 月 8 日。7 月 3 日的 N<sub>2</sub>O 浓度随时间呈先升后降趋势, 最高点出现在 6:00 前后; 而 7 月 8 日则表现出随时间逐渐降低趋势。凌晨至日出前后的温度和风速均以 7 月 3 日较低, 但其 N<sub>2</sub>O 浓度反而相对较高。8:00—12:00, 两者温度

极度相近,但湿度以 7 月 3 日相对较低,  $N_2O$  反而较为相近。推测风速对  $N_2O$  的影响可能不是主导因

素,是否有其他因素的交互作用影响,还需要进一步研究。

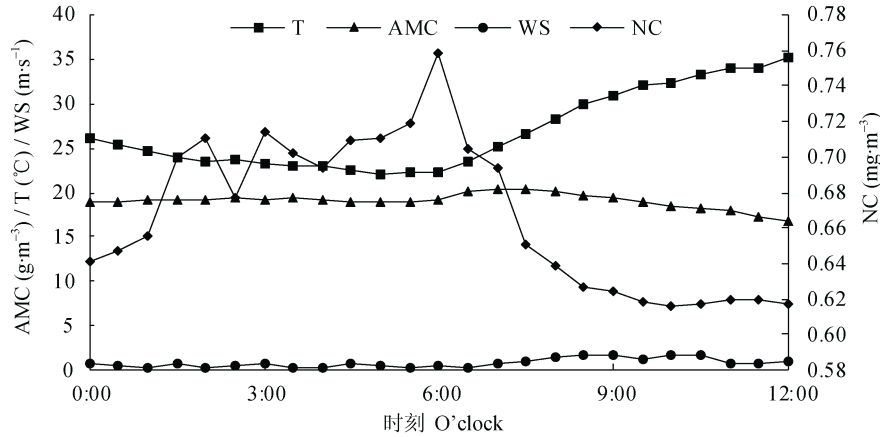


图 6 晴朗弱风天气玉米农田  $N_2O$  浓度及其环境要素日动态变化

Fig. 6 Dynamic changes of  $N_2O$  concentration and environment elements of maize field in weak-wind sunny days

NC:  $N_2O$  浓度; AMC: 大气含水量; T: 温度; WS: 风速. NC: nitrous oxide concentration; AMC: atmospheric water content; T: temperature; WS: wind speed.

### 3 讨论

#### 3.1 温度对农田 $N_2O$ 排放的影响

6月中旬玉米播种后, TGA 对农田大气 6—9 月份(8月中下旬进行了相关调试)  $N_2O$  浓度进行了实时连续的观测, TGA 监测功能基本保持稳定。分析晴朗天气下玉米生长期的  $N_2O$  浓度及其环境要素发现, 白天农田  $N_2O$  变化具有一定的规律性, 与叶欣等<sup>[19]</sup>和郑循华等<sup>[20]</sup>研究结论相近。日出之后, 日照增强导致大气温度和植被-土壤系统温度升高, 植物产生更多  $O_2$  进入到土壤中, 土壤参与 N 循环的相关微生物活性提高, 氮元素有机物的矿化作用增强, 土壤排放到大气中的  $N_2O$  增多。中午过后, 温度到达峰值后逐渐下降, 植物产生  $O_2$  降低, 土壤含氧量减少, 土壤氮循环相关微生物活性降低, 土壤向大气中排放  $N_2O$  也随之降低<sup>[20]</sup>。杜睿等<sup>[21]</sup>利用原状土开展相关增温试验, 得出了温度显著影响土壤  $N_2O$  释放的结论; 自然环境下进行的农田增温试验同样得出温度升高可促进土壤  $N_2O$  的结论<sup>[13,22]</sup>。同时, 对比不同月份发现, 下午高温时长增加(高于  $30\text{ }^\circ\text{C}$ )进一步促进农田  $N_2O$  的释放, 这有可能是高温累积效应导致的。

日落之后, 温度逐渐降低, 农田  $N_2O$  则呈现出增加的趋势, 这与胡立峰<sup>[23]</sup>的研究结论类似, 推测可能是农田作物光合作用停止, 土壤中  $O_2$  浓度减少, 造成土壤的反硝化作用增强, 导致其排放到大气中的  $N_2O$  增多。目前, 大多数温室气体试验的采样时间集中在早晨 9:00—11:00, 对于夜间温室气体  $N_2O$  的释放特征的研究相对较少。夜间测定所需人力较大,

对人的作息产生影响, 相对不便。加之, 夜间测量照明和人类呼吸等极易对土壤和植被的温室气体排放和监测产生影响, 造成人为误差, 因此利用 TGA 系统进行监测可以降低对测定人员的时间要求, 并减小测量误差, 具有明显的科研优势。

#### 3.2 降雨天气对农田大气 $N_2O$ 排放的影响

降雨引起农田土壤含水量加大, 提高了土壤氮循环相关微生物活性, 同时土壤湿度的增大导致进入土壤中的  $O_2$  降低, 氮循环过程产生的  $N_2O$  作为替代  $O_2$  进行还原作用, 因此硝化过程产  $N_2O$  增多, 排放到大气中的  $N_2O$  进而增大<sup>[24]</sup>。随着降雨的进行, 土壤含水量逐渐增大, 形成一定的厌氧环境, 促进反硝化作用<sup>[25]</sup>, 表现出  $N_2O$  在降雨发生后一定时间持续增长, 因此适当的降雨可促进土壤  $N_2O$  排放<sup>[26]</sup>, 这也与灌溉促进  $N_2O$  释放具有相似的机制<sup>[27-28]</sup>。但白天过量的降水和灌溉导致土壤过度淹水, 影响土壤  $O_2$  进入和  $N_2O$  排放, 导致  $N_2O$  随降水的过量累积表现出降低趋势<sup>[5]</sup>。因此, 在降水和灌溉影响下土壤含水量增大的快慢和变化梯度对土壤  $N_2O$  排放存在影响。

#### 3.3 大风天气对农田 $N_2O$ 排放的影响

大气的水热条件与农田风力存在较为密切的相互影响, 难以在野外单独控制温度和含水量(降水)条件以此研究风力对农田产生  $N_2O$  的影响。本文仅选择不同风力下一定时段的  $N_2O$  进行对比分析, 发现大风天气可能降低  $N_2O$  排放。相同温度下, 一方面, 农田风速较大可促进地表水分蒸发, 降低表土含水量, 改变土壤与大气的气体(如  $O_2$ 、 $N_2O$ )交换速

率; 另一方面, 强风导致植株叶片翻动, 叶片正面接受光照面积降低, 降低光合作用<sup>[29]</sup>, 对温室气体产量造成影响, 而强风甚至可引起植株受损, 导致农田排放的温室气体产生变化。

### 3.4 TGA 监测系统的可利用性

目前, 国外少数学者利用 TGA 对生物圈与大气间温室气体的 CO<sub>2</sub> 中 <sup>13</sup>C 同位素<sup>[30]</sup>、CH<sub>4</sub><sup>[31]</sup>、NO<sub>2</sub><sup>[32]</sup> 进行了一定的研究, 得出了 TGA 的应用具有可行性的结论。本研究所采用的 TGA 为最新一代的系列产品, 不再使用液氮进行主机箱降温, 操作更加方便简单。本研究中晴朗天气下, 白天时间 TGA 测定的晴朗天气下农田 N<sub>2</sub>O 排放量多数在 0.60 mg·m<sup>-3</sup> 左右, 与相关研究结果相近<sup>[1-2]</sup>; 且本研究中晴朗天气下, 大气 N<sub>2</sub>O 变化趋势与温度变化趋势相似, 在一定程度上可以相互印证, 表明应用 TGA 系统监测华北地区 N<sub>2</sub>O 浓度变化具有可行性。当前, 农田生态系统的温室气体排放监测多是单一土壤或植被系统的研究, 直接在植被-土壤系统冠层高度观测大气 N<sub>2</sub>O 的研究极少, 本研究提供了一种在华北农田观测温室气体的新方法。由于人类活动影响, 农田的下垫面相对单一, TGA 系统可以和涡度相关技术集合利用, 但 TGA 系统技术在国内森林、草原和山地等复杂状况下的研究是否可行, 目前尚不明了。

TGA 系统主机箱内部更换相关配件后, 可用于测定农田 CO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub>。同时, 对于进样口的改造, 可以对土壤或植被释放的温室气体进行自动采集和测定, 具有较高的科研利用价值。但 TGA 造价高昂, 在全国乃至全世界的推广具有一定难度。本文利用 TGA 观测农田大气 N<sub>2</sub>O 仅仅是初步研究, 测定周期较短, 对于农田 N<sub>2</sub>O 在长期气候变化下的响应还不明了, 尚需开展长期观测。

## 4 结论

1) 晴朗天气下, 温度是影响玉米农田 N<sub>2</sub>O 排放的主要环境因素, N<sub>2</sub>O 排放呈现出夜晚高、白天低的特征, 温度对 N<sub>2</sub>O 的影响存在滞后性。

2) 适量的降雨可促进农田 N<sub>2</sub>O 排放, 但过度降水抑制农田 N<sub>2</sub>O 排放。

3) 大风天气影响下, 农田 N<sub>2</sub>O 排放发生变化, 但该种变化不具有明显规律性, 大风天气的作用机制尚需进一步探究。

4) 本研究为国内首次利用 TGA 系统对温室气体通量进行原位高频监测, 证实 TGA 系统测定华北农田的 N<sub>2</sub>O 具有可行性, 可实现实时、动态、昼夜连

续监测。

## 参考文献 References

- [1] Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of working groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change[R]. Geneva, Switzerland: IPCC, 2014
- [2] IPCC. Climate Change 2007: The Physical Science Basis[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2007
- [3] MELILLO J M, STEUDLER P A, ABER J D, et al. Soil warming and carbon-cycle feedbacks to the climate system[J]. Science, 2002, 298(5601): 2173-2176
- [4] GIL J, PÉREZ T, BOERING K, et al. Mechanisms responsible for high N<sub>2</sub>O emissions from subarctic permafrost peatlands studied via stable isotope techniques[J]. Global Biogeochemical Cycles, 2017, 31(1): 172-189
- [5] 赵光影, 刘景双, 王洋. 陆地生态系统 N<sub>2</sub>O 排放源研究进展[J]. 土壤通报, 2008, 39(5): 1192-1197  
ZHAO G Y, LIU J S, WANG Y. Research progresses on nitrous oxide emission in terrestrial ecosystem[J]. Journal of Soil Science, 2008, 39(5): 1192-1197
- [6] 韩琳, 王鸽, 王伟, 等. 全球森林土壤 N<sub>2</sub>O 排放通量的影响因子[J]. 生态学杂志, 2012, 31(2): 446-452  
HAN L, WANG G, WANG W, et al. Factors affecting global forest soil N<sub>2</sub>O emission flux[J]. Chinese Journal of Ecology, 2012, 31(2): 446-452
- [7] LENKA N K, LAL R. Soil aggregation and greenhouse gas flux after 15 years of wheat straw and fertilizer management in a no-till system[J]. Soil and Tillage Research, 2013, 126: 78-89
- [8] 阎佩云, 刘建亮, 沈玉芳, 等. 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[J]. 农业环境科学学报, 2013, 32(11): 2278-2285  
YAN P Y, LIU J L, SHEN Y F, et al. Nitrous oxide emissions and its influencing factors in spring corn fields mulched with plastic film on the Loess Plateau[J]. Journal of Agriculture Environment Science, 2013, 32(11): 2278-2285
- [9] 花莉, 唐志刚, 解井坤, 等. 生物质炭对农田温室气体排放的作用效应及其影响因素探讨[J]. 生态环境学报, 2013, 22(6): 1068-1073  
HUA L, TANG Z G, XIE J K, et al. Effect and its influencing factors of biochar on agricultural greenhouse gases emissions[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2013, 22(6): 1068-1073
- [10] KROEZE C, MOSIER A, BOUWMAN L. Closing the global N<sub>2</sub>O budget: a retrospective analysis 1500-1994[J]. Global Biogeochemical Cycles, 1999, 13(1): 1-8
- [11] 闫翠萍, 张玉铭, 胡春胜, 等. 不同耕作措施下小麦-玉米轮作农田温室气体交换及其综合增温潜势[J]. 中国生态农业学报, 2016, 24(6): 704-715  
YAN C P, ZHANG Y M, HU C S, et al. Greenhouse gas exchange and comprehensive global warming potential under different wheat-maize rotation patterns[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2016, 24(6): 704-715

- [12] 王玉英, 胡春胜. 施氮水平对太行山前平原冬小麦-夏玉米轮作体系土壤温室气体通量的影响[J]. 中国生态农业学报, 2011, 19(5): 1122-1128  
WANG Y Y, HU C S. Soil greenhouse gas emission in winter wheat/summer maize rotation ecosystem as affected by nitrogen fertilization in the Piedmont Plain of Mount Taihang, China[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2011, 19(5): 1122-1128
- [13] TU C, LI F D. Responses of greenhouse gas fluxes to experimental warming in wheat season under conventional tillage and no-tillage fields[J]. Journal of Environmental Sciences, 2017, 54(4): 314-327
- [14] BOWLING D R, SARGENT S D, TANNER B D, et al. Tunable diode laser absorption spectroscopy for stable isotope studies of ecosystem-atmosphere CO<sub>2</sub> exchange[J]. Agricultural & Forest Meteorology, 2003, 118(1/2): 1-19
- [15] 于贵瑞, 孙晓敏. 陆地生态系统通量观测的原理与方法[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006: 205-206  
YU G R, SUN X M. Principle of Flux Measurement in Terrestrial Ecosystem[M]. Beijing: Higher Education Press, 2014, 119: 205-206
- [16] CAMPBELL Scientific, Inc. Open Path Eddy Covariance System Operator's Manual Csat, Li7500, and KH20[G]. Campbell Scientific, Inc, 2009
- [17] BURBA G G, MCDERMITT D K, GRELE A, et al. Addressing the influence of instrument surface heat exchange on the measurements of CO<sub>2</sub> flux from open-path gas analyzers[J]. Global Change Biology, 2010, 14(8): 1854-1876
- [18] OECHEL W C, LLAKOWSKI C A, BURBA G, et al. Annual patterns and budget of CO<sub>2</sub> flux in an arctic tussock tundra ecosystem[J]. Journal of Geophysical Research: Biogeosciences, 2014, 119: 323-339
- [19] 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 X, LI J, WANG Y H. Characterization of emissions of nitrous oxide from soils of typical crop fields in North China Plain[J]. Journal of Agriculture Environment Science, 2005, 24(6): 1186-1191
- [20] 郑循华, 王明星, 王跃思, 等. 温度对农田 N<sub>2</sub>O 产生与排放的影响[J]. 环境科学, 1997, 18(5): 1-6  
ZHENG X H, WANG M X, WANG Y S, et al. Impacts of temperature on N<sub>2</sub>O production and emission[J]. Environmental Science, 1997, 18(5): 1-6
- [21] 杜睿, 吕达仁, 王庚辰, 等. 内蒙古典型草原土壤 N<sub>2</sub>O 排放的影响[J]. 自然科学进展, 2003, 13(1): 64-68  
DU R, LYU D R, WANG G C. Study on the mechanism of N<sub>2</sub>O production in typical grassland soils of Inner Mongolia[J]. Progress in Natural Science, 2003, 13(1): 64-68
- [22] 刘艳. 模拟增温对农田土壤呼吸、硝化及反硝化作用的影响[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2013  
LIU Y. Effects of simulated warming on soil nitrification and denitrification in a farmland[D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science and Technology, 2013
- [23] 胡立峰. 不同耕法对麦玉两熟及双季稻农田温室气体排放的影响[D]. 北京: 中国农业大学, 2006  
HU L F. Effects of different tillage on greenhouse gas emissions of wheat-maize double cropping and double rice cropping system[D]. Beijing: China Agricultural University, 2006
- [24] AZAM F, MÜLLER C, WEISKE A, et al. Nitrification and denitrification as sources of atmospheric nitrous oxide — Role of oxidizable carbon and applied nitrogen[J]. Biology & Fertility of Soils, 2002, 35(1): 54-61
- [25] 孙志强, 郝庆菊, 江长胜, 等. 农田土壤 N<sub>2</sub>O 的产生机制及其影响因素研究进展[J]. 土壤通报, 2010, 41(6): 1524-1530  
SUN Z Q, HAO Q J, JIANG C S. Advances in the study of nitrous oxide production mechanism and its influencing factors in agricultural soils[J]. Journal of Soil Science, 2010, 41(6): 1524-1530
- [26] LAURA S M, ANA M, LOURDES G T, et al. Combination of drip irrigation and organic fertilizer for mitigating emissions of nitrogen oxides in semiarid climate[J]. Agriculture Ecosystems & Environment, 2010, 137(1): 99-107
- [27] 裴淑玮, 张圆圆, 刘俊锋, 等. 华北平原玉米-小麦轮作农田 N<sub>2</sub>O 交换通量的研究[J]. 环境科学, 2012, 33(10): 3641-3646  
PEI S W, ZHANG Y Y, LIU J F. N<sub>2</sub>O exchange fluxes from wheat-maize crop rotation system in the North China Plain[J]. Environmental Science, 2012, 33(10): 3641-3646
- [28] FIERER N, SCHIMEL J P. Effects of drying-rewetting frequency on soil carbon and nitrogen transformations[J]. Soil Biology & Biochemistry, 2002, 34(6): 777-787
- [29] 郝再彬. 植物生理生化[M]. 哈尔滨: 哈尔滨出版社, 2002: 207-208  
HAO Z B. Plant Physiology and Biochemistry[M]. Harbin: Harbin Press, 2002: 207-208
- [30] BARBOUR M M, EVANS J R, SIMONIN K A, et al. Online CO<sub>2</sub> and H<sub>2</sub>O oxygen isotope fractionation allows estimation of mesophyll conductance in C<sub>4</sub> plants, and reveals that mesophyll conductance decreases as leaves age in both C<sub>4</sub> and C<sub>3</sub> plants[J]. New Phytologist, 2016, 210(3): 875-889
- [31] LAURILA T, TUOVINEN J P, LOHILA A, et al. Measuring methane emissions from a landfill using a cost-effective micrometeorological method[J]. Geophysical Research Letters, 2005, 32(19): 312-321
- [32] RINNE J, PIHLATIE M, LOHILA A, et al. Nitrous oxide emissions from a municipal landfill[J]. Environmental Science & Technology, 2005, 39(20): 7790-7793