

降雨和施肥对上海崇明岛小麦田 N₂O 排放的影响^① ——基于涡度协方差法的研究

张梦珊¹, 郭海强¹, 马俊¹, 李红¹, 戴圣骐¹, 顾凯华^{2*}, 高伟³, 赵斌¹

(1 复旦大学生物多样性与生态工程教育部重点实验室, 上海崇明东滩湿地生态系统国家定位观测研究站, 崇明生态研究院, 复旦大学, 上海 200438; 2 上海市崇明区气象局, 上海 202150; 3 长三角环境气象预报预警中心, 上海 200030)

摘要: 在基于涡度协方差技术的小麦田 N₂O 通量观测基础上, 分析了小麦田 N₂O 的排放动态以及不同时间尺度上降雨和施肥对小麦田 N₂O 排放的影响, 同时以增强回归树的方法定量分析了降雨和施肥相关因子对小麦田 N₂O 通量的贡献率。结果表明: 小麦田 N₂O 通量没有明显的昼夜和季节变化模式, 研究期内 N₂O 平均日排放量为 666.5 μg/(m²·d) ± 669.4 μg/(m²·d)(以 N₂O-N 量计); N₂O 主要以脉冲的形式释放, 其中降雨和施肥引发的脉冲占小麦田 N₂O 总排放量的比例分别为 29.4%、19.2%; 降雨促进小麦田 N₂O 排放, 且 N₂O 通量对降雨事件的响应比较迅速(主要集中在雨后的几小时内), 同时降雨的影响能持续 1~2 d; 相比降雨, 施肥对小麦田 N₂O 排放的促进作用存在一周左右的时滞; 综合考虑施肥和降雨的交互影响, 在施肥后 1~8 d 内发生的降水事件对 N₂O 的排放有明显的促进作用。因此, 二者的交互影响不容忽视。

关键词: N₂O 通量; 降雨; 施肥; 涡度协方差

中图分类号: Q14 **文献标识码:** A

氧化亚氮(N₂O)是重要的温室气体之一, 也是破坏臭氧层的主要物质之一。据估计, 自工业化以来, 人为活动已经导致大气 N₂O 浓度增加了 20%^[1]。从全球来看, 土壤是 N₂O 排放的最大来源(估计为 6.8 Tg/a, 以 N₂O-N 量计, 下同), 占排放到大气中的 N₂O 总量的 65% 左右, 其中 4.2 Tg/a 直接或间接来自于氮肥, 2.1 Tg/a 来自于粪肥以及 0.5 Tg/a 来自于生物质的燃烧。因此, 农田土壤被认为是大气 N₂O 的最大人为排放源^[2]。针对农田 N₂O 排放量, 已有研究显示出巨大的差异, 从 0.7 mg/(m²·d) 到 51.8 mg/(m²·d)^[3-6]; 并且, 不同农田类型之间也存在较大差异, 其中菜田 N₂O 排放量远高于邻近的水稻、小麦、玉米等大田作物^[7-10]。同时, 较多研究发现, 农田 N₂O 排放不存在明显的季节变化模式, 多以脉冲的形式释放^[10-12]。Parkin 和 Kaspar^[13]在两年玉米田 N₂O 排放的研究中发现, 脉冲事件占累计年排放量的比例高达 49%。

微生物的硝化和反硝化作用是调节和控制土壤 N₂O 排放的关键过程, 而这一过程会受到自然环境条

件和农业管理措施直接或间接的影响。许多文献^[14-16]综述了影响 N₂O 排放的因素, 普遍认为农田 N₂O 排放主要与农业管理措施(氮肥施用量、水分管理、作物种类、肥料种类)和土壤条件(有机碳含量、pH、质地)等有关, 其中氮肥施用是导致 N₂O 排放差异的主要因素。Hoben 等^[17]发现, 玉米-大豆轮作系统施氮量的 N₂O 响应呈非线性指数增长。而在全球范围内, Stehfest 和 Bouwman^[16]发现 N₂O 排放量和氮肥施用量之间存在线性关系。研究表明, 氮素的转化率直接影响硝化反硝化作用或两个过程的耦合^[18], 从而影响 N₂O 的排放。除了肥料施用, 灌溉或降雨对农田 N₂O 排放也会产生重要影响^[12, 19]。这可能是由于水分增加后, 氮肥的水解速率以及硝化速率较快, 同时高土壤孔隙水(WFPS)加速了反硝化过程^[20]。许多研究都观测到, 干旱土壤润湿后产生的代谢活动会刺激 N₂O 排放, 降雨会导致 N₂O 脉冲峰出现^[21-23]。因此降雨对农田(尤其对于降水为主要水分输入来源的农田系统)N₂O 排放的影响不容忽视。

基金项目: 上海市科委科研项目(16ZR1431700)、国家自然科学基金项目(91637101)、中国气象局大气探测重点开放实验室开放课题(KLAS201406)和上海市科委崇明专项(15dz1208105)资助。

* 通讯作者(309177874@qq.com)

作者简介: 张梦珊(1993—), 女, 江苏徐州人, 硕士研究生, 主要研究方向为全球变化生态学。E-mail: mszhang0120@163.com

由于农田 N_2O 排放多以脉冲形式释放,因此需要使用连续的、长期的、高频率和高精度的通量监测方法来捕捉短时间的偶发 N_2O 脉冲峰^[24]。然而目前许多研究基于静态箱-气相色谱法(简称“箱式法”)开展,这种方法需要较高的人工投入,并且观测频率较低可能导致季节或年总排放量估算存在偏差^[25];同时由于农业土壤的空间变异性大,使用箱式法观测可能造成通量的低估或高估,例如有研究发现,在中国山西棉花田,箱式法比涡度法低估了 17% ~ 20% 的 N_2O 排放^[25]。涡度协方差技术是基于微气象学的测量温室气体通量的技术,可以在不干扰环境条件的情况下观测生态系统尺度上的平均通量^[26-28]。近年来随着快速响应探测器如可调谐二极管激光器(TDL)和量子级联激光器(QCL)等的发展,基于涡度协方差法的 N_2O 通量观测逐渐得到开展^[15],相关研究在国际上日益增加,但目前还未见国内文献报道。

到目前为止,大多数关于 N_2O 排放的研究主要关注单一因素的影响,特别是施肥的影响^[29-33],在很大程度上忽视了其他农业措施包括水分管理等综合效应。然而,在实践中农民更倾向于采取综合管理的措施来提高生产力,因此更详细的综合研究是十分必要的。小麦是世界主要粮食作物之一,在我国的种植面积和产量仅次于水稻。虽然目前有研究报道了施肥和降雨(或灌溉)配合会发生强烈促进 N_2O 排放^[28, 34],但对于降雨和施肥事件的发生顺序可能带来的不同交互影响以及如何量化“水肥”组合对小麦

田 N_2O 排放的贡献却未见文献探讨。在基于涡度协方差技术的小麦田 N_2O 通量观测基础上,本文探讨了小麦田生长季内 N_2O 的排放动态,研究了不同时间尺度上小麦田 N_2O 排放对降雨和施肥的响应,同时定量分析了降雨和施肥相关因子对小麦田 N_2O 排放的贡献率,探讨了 N_2O 通量对于降雨和施肥事件发生的先后顺序(“水肥”组合)是否有不同的响应,从而为实施低碳农业提供一些科学指导。

1 研究区概况与研究方法

1.1 研究区概况

研究区位于上海崇明岛,崇明岛地处长江口,属于典型的北亚热带季风气候区。降雨充沛,四季分明,年平均气温 15.8℃,年日照时数 1 973.9 h,年平均降雨量 1 128.9 mm,主要集中在 4—9 月。原位观测实验站位于崇明岛中部(121°29'38" E, 31°39'59" N),耕层土壤为粉壤土,偏碱性。研究区多年稻麦两熟轮作,每年 5—10 月种植水稻,而从每年 10 月至次年 5 月种植小麦。

在崇明岛,小麦主要采用撒播方式种植。本研究供试小麦为扬麦 11 号,于 2014 年 10 月 22 日播种,次年 5 月 20 日收获,成熟小麦平均株高约 1 m。由于崇明岛雨水充足,因此小麦生长季内无灌溉管理。该观测塔周边农田由当地农场实行统一管理,其中,在 2014 年 10 月 20 日施加复合肥(N₂₇ kg/hm²)做基肥。不同生长阶段肥料施加信息见表 1。

表 1 肥料施加信息表
Table 1 Information of fertilizer application

日期	生育期	施肥方法	施肥种类	施氮量(N, kg/hm ²)
2014-10-20	种植前耕作	翻入土壤	复混肥料	27
2014-10-25	出苗期	表施	复混肥料	18
2014-11-26	出苗期	表施	尿素	52
2014-12-13	出苗期	表施	复混肥料	23
2015-01-18	分蘖/越冬期	表施	尿素	52
2015-02-19	幼苗期	表施	复混肥料	23
2015-03-15	拔节期	表施	尿素	42
2015-03-29	孕穗期	表施	尿素	42

1.2 N_2O 通量数据的获取和处理

本研究采用涡度协方差方法(eddy covariance method)进行观测。该通量塔位于崇明岛中部,考虑到周边农田较为均一,且存在防护林(防护林高度在 12 m 左右),将通量观测高度设置在 20 m。该通量观测点配置了 CR3000 数据采集器(美国 Campbell 公

司),以三维超声风速仪(CSAT3,美国 Campbell 公司)观测三维风速,以快速响应 N_2O 气体分析仪(913-0014,美国 Los Gatos Research 公司)观测 N_2O 浓度。 N_2O 气体分析仪被安置在一个环境稳定的工作室,距离三维超声风速仪大约 20 m。参考 Eugster 等^[35]的实验,该观测系统使用长 21.6 m,内径为 10 mm

的聚四氟乙烯管,连接气体分析仪和位于试验地中央的三维风速仪。空气通过真空泵进入气体分析仪,首先经过干燥剂过滤多余的水蒸气。样气的管道流速为 21 L/min。该分析仪可以提供 N₂O 气体含量的 10 Hz 连续数据,并实时进行水汽校正^[36]。Campbell 公司的 CR3000 数据采集器用于记录所有 10 Hz 数据。观测阶段为 2014 年 10 月至 2015 年 5 月,包含整个小麦生长季。环境因子观测包括降雨、空气温度、土壤温度等。

本研究采用 Eddy Pro 软件(version 6.1.0)进行通量计算和数据质量控制。主要过程包括:去除了超出仪器测量范围和超过 4 倍标准差的异常值^[37];运用坐标轴二次旋转法使垂直风速均值为零^[38];超声虚温校准(SND correction)^[39];频率损失校准;WPL 校准^[40]等。本研究所使用的闭路涡度协方差系统,抽气系统中安装质量流量控制器,延迟时间由 N₂O 浓度和垂直风速的最大协方差出现的时间来决定^[28]。参考 Foken 等^[41]的方法进行稳态测试(stationarity test),采用“0-1-2”系统对通量数据进行质量标签,其中“2”表示由于质量差而应从所得数据集中丢弃的通量。主要通过以下方式对 N₂O 通量数据进行数据质量控制:异常数据的剔除。删除仪器处于非正常工作状态的瞬时值,如气压不稳定、以及根据诊断文件剔除闭路系统进行标定时观测的数据等;删除稳态测试质量标签为 2 的数据^[41];去除夜间摩擦风速<0.2 m/s 时的数据^[28]。最终 2014 年 10 月 21 日至 2015 年 5 月 20 日的的数据保存率为 51.2%。参考 Molodovskaya 等^[24]的方法,本研究将质量控制后日保存率 25%(12 个半小时数据点)的半小时数据的平均值作为 N₂O 日平均通量($\mu\text{g}/(\text{m}^2\cdot\text{h})$),而 N₂O 日排放量($\mu\text{g}/(\text{m}^2\cdot\text{d})$)为日平均通量乘以 24。月尺度的 N₂O 通量通过积分计算,其中 2014 年 10 月因为监测日期较少,因此未列入月尺度的分析。

1.3 统计分析

本文采用 SPSS 22.0 和 R 软件对数据进行处理和分析。为探究降雨对 N₂O 通量的影响,采用线性回归方法分析月尺度以及小时尺度上土壤 N₂O 通量与降雨量的相关性;以单因素方差分析检验施肥前后日平均通量的差异以及降雨前、雨中、雨后天通量变化的差异;以增强回归树模型(boosted regression trees, BRT)分析施肥和降雨的交互影响。

增强回归树(BRT)是一种用于非线性关系分析的机器学习方法,它结合了 Regression trees 和 Boosting 两种算法的优势。在该回归模型中,响应变量为土壤 N₂O 排放量,解释变量包括降雨量、距上

次降雨日差、施肥量、距上次施肥日差以及降雨施肥的日差。BRT 可以计算在其他自变量取均值或不变的情况下,某一自变量与因变量的相互关系,从而得出自变量对因变量的影响大小以及各个解释因子的相对重要性排序。BRT 提高了计算结果的稳定性和精度,同时可以适用于不同的数据格式。本研究使用 R 软件来运行 BRT(“gbm”软件包),模型的参数设置参考 Ma 等^[42]。

为判断土壤 N₂O 的脉冲峰并计算其对日排放的贡献,本文采用箱线图分析小时通量并设置脉冲峰的阈值。箱线图的优点在于它将统计数据的大小与中值而不是平均值相联系。因此即使当通量数据不呈正态分布时也可以使用^[43]。箱线图最重要的是对相关统计点的计算,例如下四分位数 Q1、上四分位数 Q3 以及中位数 Q2。上边缘(UF, upper fence)和下边缘(LF, lower fence)通常设置在四分位距(IQR, IQR=Q3-Q1)的固定距离处(n 倍),计算公式为:

$$UF=Q3+n(Q3-Q1) \quad (1)$$

$$LF=Q1-n(Q3-Q1) \quad (2)$$

参照 Molodovskaya 等^[24],本研究对脉冲峰的定义:($n=0.5$)UF 作为小麦田 N₂O 脉冲检测的最低边界,阈值以上的所有 N₂O 通量定义为脉冲峰。本文对降雨前、降雨中及降雨后的日平均通量的定义为:在日尺度上,若某一日发生降雨,且前后两天无降雨,则这 3 d 的通量分别代表降雨前、降雨中、降雨后的通量;若连续数日发生降雨,取平均值代表降雨中的日平均通量,则降雨前后取相同天数日通量的平均值分别为降雨前及降雨后的平均日通量,最后计算所有降雨前、雨中以及雨后的日通量的平均值,即分别为相应的 N₂O 平均日排放量。根据小时降雨数据,本文对“降雨中 24 h”通量的定义:与降雨前、降雨中及降雨后的定义相对应,若降雨集中在一天,则当日的 N₂O 通量即为降雨中 24 h 的排放量;若连续若干天都有降雨,则将其对应时刻的通量取平均值即为降雨中的 24 h 的通量变化情况,同时相应的以相同天数求得降雨前和降雨后的 24 h 通量。

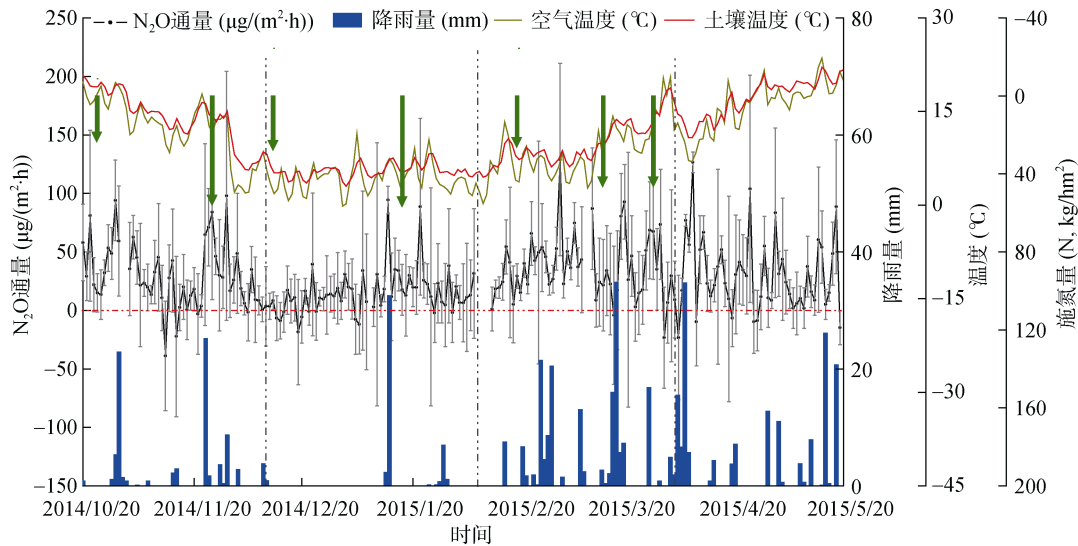
2 结果与分析

2.1 小麦田 N₂O 排放动态及环境因子变化

本研究的观测期为 2014 年 10 月至 2015 年 5 月,包含了完整的小麦生长季。经过数据的质量控制,观测阶段总共收集 5 208 个半小时数据,数据保存率为 51.2%。观测阶段共 212 d,其中数据保存率 25% 的天数为 203 d,占全部观测时间的 95.8%。

在研究阶段内,土壤和空气温度都呈现先下降再上升的趋势,在 12 月份土壤和空气平均温度均达到最低,分别为 4.8℃和 4.2℃,在 5 月 14 日空气和土壤温度达到最高,均为 23.6℃,而 1 月初最低温度分别为-0.1℃和 1.6℃;同时 12 月份的降雨量最少,为 7.5 mm,降雨在 3、4 月份较为集中,分别达到 103.5 mm 和 98 mm(图 1)。整个研究阶段内累计降雨 475.2 mm。根据小麦生育期特点,同时结合不同时期温度和降雨

的分布情况,将本研究划分为 4 个阶段(图 1、表 2)。第 1 阶段主要对应小麦的出苗期,主要特点是降雨量较少,但平均温度较高;第 2 阶段主要对应小麦的幼苗、越冬期,该阶段温度低且降雨最少;第 3 阶段包括小麦的返青、拔节期,这个阶段有最大的施氮量和降雨量;第 4 阶段从 2015 年 4 月 5 日至 5 月 20 日小麦收获,该阶段降雨量为 146.9 mm,但没有进行施肥。



(绿色箭头表示施氮,其长度代表施氮量;灰色线表示误差线,即每天收集数据的标准差(12个半小时数据点);灰色虚线表示将研究期划分为4个阶段)

图 1 N_2O 日平均通量及环境因子(降雨量、空气温度、土壤温度、施氮量)的变化

Fig. 1 Daily average N_2O flux with precipitation, air temperature, soil temperature and N fertilizer

表 2 4 个观测阶段对应的小麦生育期及降雨量、施氮量和 N_2O 通量

Table 2 Corresponding wheat growth periods, precipitation, fertilization rates and N_2O fluxes during the four measurement phases

研究阶段	日期	生育期	降雨量(mm)	施氮量(N, kg/hm ²)	N_2O 平均日排放量(µg/(m ² ·d))
第 1 阶段	2014-10-21—2014-12-12	播种、出苗期	85.4	70	728.4 ± 642.8
第 2 阶段	2014-12-13—2015-02-08	幼苗、越冬期	44.0	75	375.3 ± 473.4
第 3 阶段	2015-02-09—2015-04-04	返青、拔节期	198.9	107	891.4 ± 665.5
第 4 阶段	2015-04-05—2015-05-20	孕穗、收获期	146.9	0	709.3 ± 792.3

具有不同降雨和施肥组合情况的 4 个阶段对应的 N_2O 平均日排放量如表 2 所示。其中研究阶段内 N_2O 平均日排放量为 $666.5 \mu\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{d}) \pm 669.4 \mu\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 。降雨量、施氮量最高的第 3 阶段, N_2O 平均日排放量最高。第 2 阶段与第 1 阶段施氮量相当,平均日排放量比第 1 阶段少 48.5%,这可能是由于基肥和不同降雨量引起。第 4 阶段虽然没有施氮, N_2O 平均日排放量比第 2 阶段高 89.0%,可能是受到降雨的刺激。整个小麦生长季内,小麦田生态系统以 N_2O 形式的氮损失量约为 $1355.8 \text{ g}/\text{hm}^2$,其中脉冲占总排放量的比例高达 38.5%。在观测阶段共记录了 26 次脉冲事件

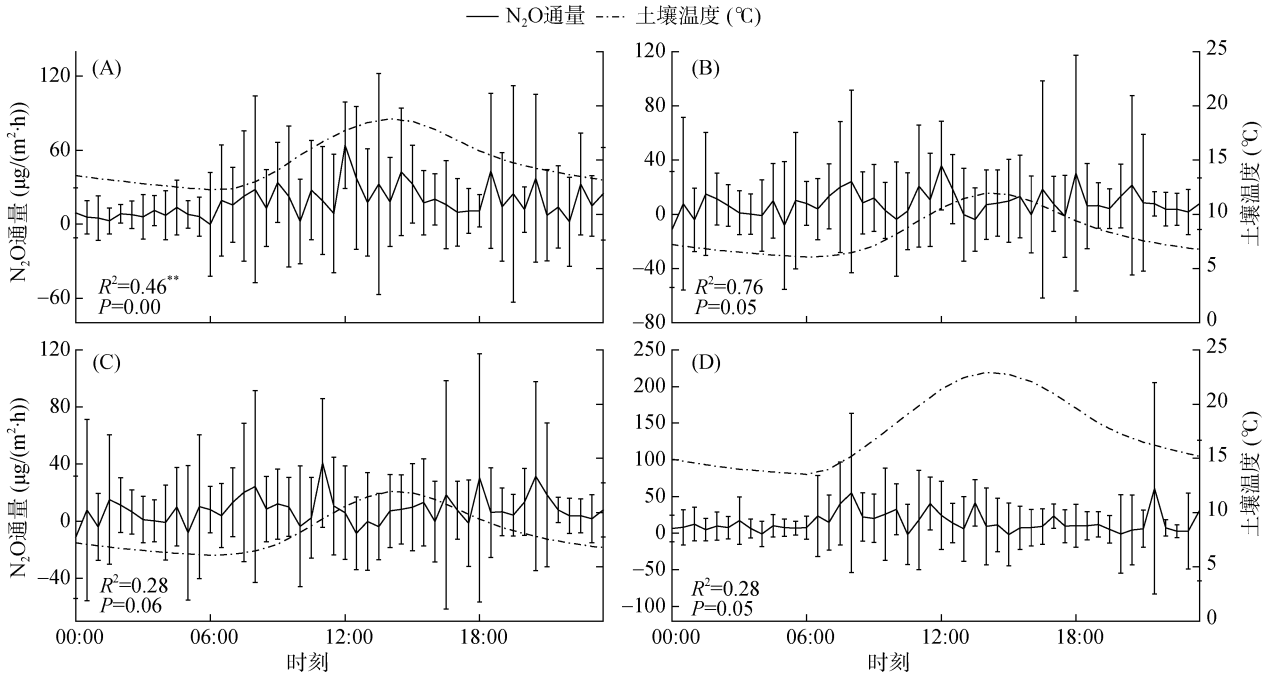
(表 3),其中由“水肥”组合引发的脉冲次数占 42.3%,而由单独的降雨或施肥事件引发的脉冲分别为 9 次和 3 次,排放量共占小麦田 N_2O 总排放量的 18.2%,与“水肥”组合触发的脉冲占比相当。因此,降雨事件造成的脉冲对总排放量的贡献高达 29.4%,而施肥带来的贡献达 19.2%。

从 4 个阶段 N_2O 的日变化来看(图 2),小麦田 N_2O 排放没有明显的昼夜变化模式。通常排放峰出现在白天,除了图 2 中的第 3 阶段可能因为频繁降雨的影响,其他 3 个阶段中均表现为白天的排放量高于夜间。尽管季节尺度上,土壤温度与小麦田 N_2O 通量

表 3 生长季内降雨、施肥、“水肥”组合等引发的脉冲及其对 N₂O 总排放量的贡献

Table 3 Pulses caused by precipitation, fertilization and combination of ‘Precipitation and Fertilizer’ in the whole season and their percentages of total accumulated N₂O Emissions

统计值	降雨	施肥	“水肥”组合	其他	所有脉冲
脉冲次数	9	3	11	3	26
平均日排放量(μg/(m ² ·d))	2 131.1 ± 629.1	1 808.0 ± 313.3	1 864.3 ± 335.1	2 282.5 ± 204.6	1 998.4 ± 459.4
排放量占比(%)	14.2	4.0	15.2	5.1	38.5



(A、B、C、D 分别代表研究的第 1~4 阶段)

图 2 四个阶段 N₂O 日平均通量及土壤温度的变化

Fig. 2 Diurnal variation of N₂O flux and the soil temperature for the four sub-periods defined in Table 2

的季节动态相关性不显著,但在图 2 第 1 阶段中土壤温度与 N₂O 排放量的日变化(小时尺度)呈线性相关,相关系数($R^2 = 0.76, P < 0.05$)。然而其他 3 个阶段中并未观测到温度与 N₂O 通量的明显相关性,在降雨量最多的第 3 阶段,夜间通量出现排放峰可能是受到夜间降水的影响。

总的来说, N₂O 排放没有明显的昼夜和季节变化,主要以脉冲的形式释放。相比于温度,降雨和施肥是引发通量脉冲的主要因子。通常,在施肥后 N₂O 排放呈现先增加再减少的趋势,当施肥后发生降雨事件,可能激发 N₂O 的脉冲峰。单独的降雨事件也会引发脉冲。

2.2 降雨对 N₂O 通量的影响

由于在小麦生长季内无人工灌溉,降雨是小麦田最主要的水分来源,其能改变土壤含水量和通气状况,从而直接影响微生物生命活动的微环境。小麦田 N₂O 月通量与月降雨量呈显著正相关关系

($R^2=0.56, P < 0.05$)(图 3)。这可能是由于降雨量高导致土壤含水量高,土壤内部通气性差,从而提供了 N₂O 产生所需的厌氧条件。

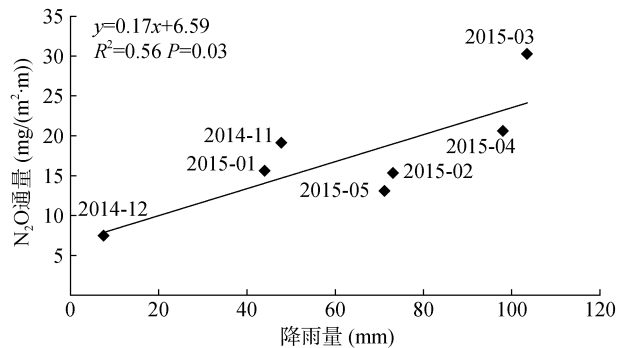
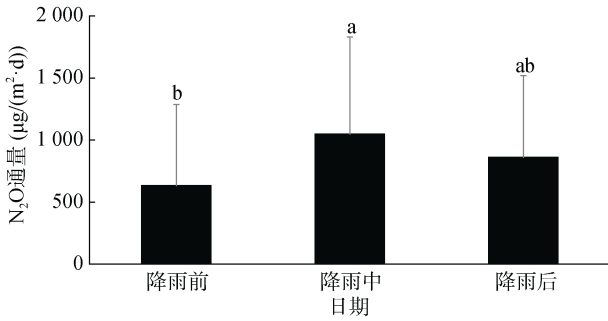


图 3 小麦田 N₂O 月通量与降雨量的关系

Fig. 3 Relationship between monthly N₂O flux from wheat soils and precipitation

图 4 显示了降雨前、降雨中及降雨后的 N₂O 日平均通量的变化。显然,土壤 N₂O 在降雨事件发生



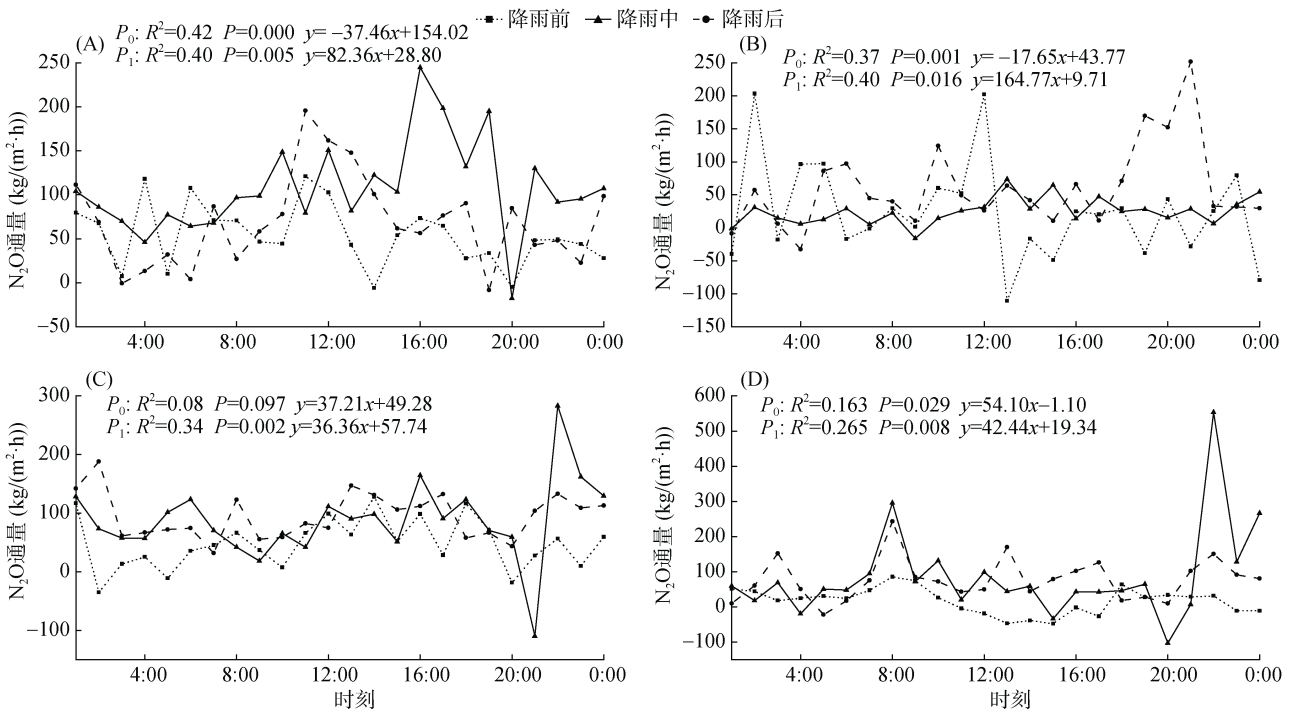
(图中不同小写字母表示各时期差异在 $P < 0.05$ 水平显著)

图 4 N_2O 日排放通量
Fig. 4 Daily N_2O flux

的当天相比前一天排放量显著增加,降雨中的平均日排放量为 $1\,049.3\ \mu\text{g}/(\text{m}^2\cdot\text{d})$,比降雨前增加了 65.6%。而降雨后一天的平均日通量为 $860.9\ \mu\text{g}/(\text{m}^2\cdot\text{d})$,相比降雨前增加 35.9%,相比降雨中日平均排放量减少 18.0%,但差异均不显著。

为了更好地探讨降雨量对小麦田 N_2O 通量的影

响,本文按照前文所分的 4 个阶段,分别将降雨前、降雨中、降雨后的 24 h N_2O 通量变化显示在图 5 中。可见,降雨前的小麦田 N_2O 通量在 4 个阶段中并没有表现出明显的昼夜变化模式;除了第 2 阶段中降雨当日通量没有明显的波动,其他 3 个阶段均有明显的排放峰,其中第 1、3、4 阶段的脉冲分别占一天释放量的 24.8%、28.9% 和 54.1%;而受降雨的影响,4 个阶段中雨后一天的 N_2O 排放相比降雨前一天显著增加($P < 0.05$),然而雨后 24 h 中,仅在第 1 和第 2 阶段时出现通量脉冲峰,分别占一天释放量的 30.5% 和 48.8%。这可能是由于第 1 和第 2 阶段时降雨量较少,土壤相对干燥,当发生降雨事件后极大提高了底物可利用性从而促进微生物生命活动产生代谢产物 N_2O 。由此可见,降雨会促进土壤 N_2O 的脉冲峰,并且由于降雨对土壤湿度、通气性等性质的改变,在雨后 24 h 内降雨对土壤 N_2O 释放仍有促进作用。



(A、B、C、D 分别代表研究的第 1~4 阶段; P_0 表示降雨当日 N_2O 通量与降雨量的关系; P_1 表示降雨后一日 N_2O 通量与降雨量的关系)

图 5 表 2 中定义的 4 个阶段降雨前后 N_2O 通量的日变化
Fig. 5 Diurnal variation of N_2O flux for the four sub-periods defined in Table 2

不同阶段因为温度和降雨量不同,土壤 N_2O 通量对降雨量有不同的响应。在第 1 和第 2 阶段中(图 5A 和图 5B) 随着降雨量的增加降雨当日的土壤 N_2O 通量呈现递减趋势,相关关系分别可以表示为: $Y = -37.46X + 154.02 (R^2 = 0.42, P < 0.001)$ 、 $Y = -17.65X + 43.77 (R^2 = 0.37, P < 0.001)$ 。而第 3、4 阶段(图 5C 和图 5D),土壤 N_2O 的排放随着降雨量的增加而增加,但趋势

并不显著。对于雨后 24 h 内的通量,4 个阶段均表现出随降雨量的增加而增加的趋势。在第 1 和第 2 阶段中,当降雨量 $< 1.5\ \text{mm}$ 和降雨量 $< 1\ \text{mm}$ 时,降雨量和 N_2O 通量呈现线性相关关系,决定系数分别为 0.40 ($P < 0.05$) 和 0.40 ($P < 0.05$)。在第 3 个阶段中,土壤 N_2O 通量与降雨量呈线性相关,决定系数为 0.34 ($P < 0.05$)。而在第 4 个阶段中,当降雨量 $< 4\ \text{mm}$ 时,

土壤 N₂O 通量与前一日降雨量呈现一定的线性相关性。

2.3 施肥对 N₂O 通量的影响

由表 4 施肥前后日平均通量的对比可以看出,施肥后 1~4 d 中,小麦田 N₂O 日平均通量相比施肥前均有增加但并不显著($P>0.05$);而施肥后 5、6 d 相比施肥前呈现显著差异,日平均排放量分别为 $1\ 444.6\ \mu\text{g}/(\text{m}^2\cdot\text{d})\pm 749.2\ \mu\text{g}/(\text{m}^2\cdot\text{d})$ 、 $1\ 413.8\ \mu\text{g}/(\text{m}^2\cdot\text{d})\pm 711.7\ \mu\text{g}/(\text{m}^2\cdot\text{d})$,相应地相比施肥前的日均排放量增加 35.2%($P<0.05$)和 41.3%($P<0.05$)。

表 4 施肥前后 N₂O 日平均通量($\mu\text{g}/(\text{m}^2\cdot\text{d})$)
Table 4 Daily N₂O flux before and after fertilization

时间 (d)	N ₂ O 日平均通量		P 值 (双尾)
	施肥前	施肥后	
1	1 308.1 ± 843.4	1 343.2 ± 1 002.1	0.89
2	1 329.0 ± 726.7	1 412.1 ± 954.3	0.77
3	1 280.4 ± 547.6	1 362.8 ± 896.1	0.66
4	1 151.8 ± 490.0	1 464.7 ± 829.5	0.09
5	1 068.5 ± 427.0	1 444.6 ± 749.2	0.04
6	1 000.6 ± 406.0	1 413.8 ± 711.7	0.03

注：“时间”是指 6 次施肥事件取相应天数计算 N₂O 日平均通量；“施肥前/后”是指 6 次施肥事件相应天数 N₂O 日均通量的平均值；“P 值”是指单因素方差分析检验 6 次施肥前后相应 N₂O 日平均通量的差异性。6 次施肥事件指表 1 中除基肥和第 8 次施肥以外的其他施肥事件。由于基肥前小麦尚未种植而第 8 次施肥事件前后数据缺失量较大,因此这两次施肥事件未列入分析。

2.4 “水肥”的不同组合对 N₂O 通量的影响

本文采用了增强回归树(BRT)法分析施肥和降雨的交互影响,发现 5 个降雨和施肥相关因子与 N₂O 通量的关系以及各个解释变量的贡献率排序为(图 6A):距上次降雨日差>降雨施肥日差>距上次施肥日差>降雨量>施氮量。由此可见,降雨和施肥事件对土壤 N₂O 排放有不同程度的影响,同时降雨和施肥的不同组合形式对小麦田 N₂O 通量的影响不容忽视。

从小麦的整个生长季来看,降雨和施肥事件对 N₂O 排放的影响都呈现随日差增大而减小直至平稳的趋势(图 6B 和 6D),且这两个解释因子的贡献率达 51.2%。在降雨当日以及降雨后 3 d 内(图 6B),小麦田 N₂O 日排放量维持在较高的水平,而雨后第 5 天后释放量明显下降。相比降雨,在施肥后 6 d 时间内,N₂O 排放通量呈现增加的趋势(图 6D),这与前文 2.3 的结论一致,之后施肥事件对 N₂O 通量的影响随着日差增大而减弱,N₂O 排放量降低趋于平稳。

降雨量也是影响小麦田 N₂O 排放的重要因子之一,对通量排放的贡献率约为 21%。随着降雨量增加(图 6E),N₂O 通量整体呈现波动式的上升,少量降雨(<4 mm)就会刺激 N₂O 日排放量,这种增加趋势明显高于日降雨量较高(>10 mm)的时期。而施氮量对 N₂O 排放的贡献率最小可能是由于本研究中仅有 3 个施氮量水平所造成的数据的限制(图 6F)。

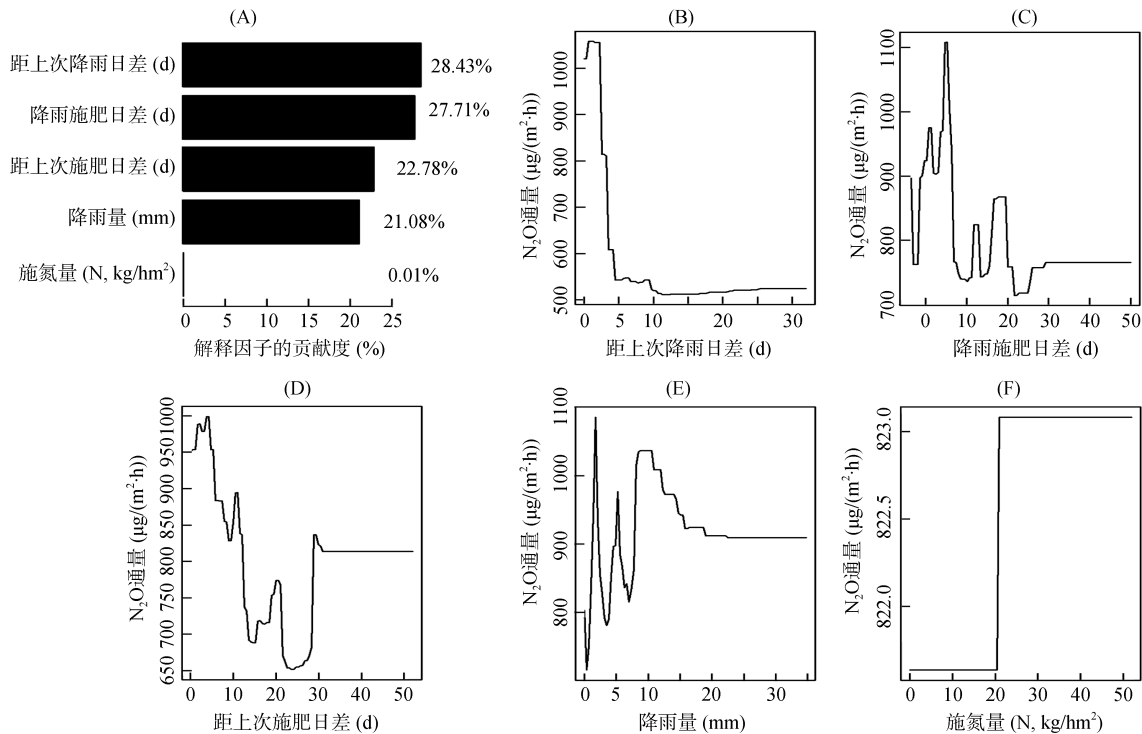


图 6 不同的解释因子(降雨量、距上次降雨日差、施肥量、距上次施肥日差、降雨施肥日差)与小麦田 N₂O 排放的关系及其重要程度排序

Fig. 6 Relationship between different explanatory factors with N₂O emission from wheat soils and the order of their importance

综合考虑降雨和施肥的交互影响,两个事件发生的先后顺序通过相差的天数来描述(图 6C),横坐标为负值表示降雨在前施肥在后,可能是受到降雨的刺激,这种情况下通量的变化呈现无规律波动;而当先施肥后降雨时(横坐标为正值),随着日差的增加,土壤 N_2O 通量呈现先增加后降低直至趋于平稳的波动趋势。即在日差 8 d 的阶段内,施肥以后降雨发生的越晚,小麦田 N_2O 释放量越大;在日差超过 8 d 后,随着施肥和降雨相差的时间越长,观测到的 N_2O 通量越低。降雨施肥日差这一因子的贡献率仅次于距上一次降雨的日差。

3 讨论

3.1 小麦田 N_2O 排放特征

本文研究了 2014—2015 年上海市崇明岛冬小麦完整生长季 N_2O 排放情况,研究期内 N_2O 日平均通量为 $27.6 \mu\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h}) \pm 28.2 \mu\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ 。这低于 Cui 等^[12]报道的位于中国山东的冬小麦实验田平均通量 ($49 \mu\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$),而高于 Shi 等^[34]报道的小麦田的平均通量 ($7.5 \mu\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$)。这可能是受到施肥种类以及施肥量的影响。本研究小麦田的 N_2O 通量远低于邻近地区的菜园^[10]以及玉米田^[28]。有研究显示 N_2O 的排放主要取决于以下因子:降雨、施肥、耕作、作物种类以及土壤因子,同时不同观测仪器也显示出明显差异^[26,28]。大部分观测发现农田 N_2O 的排放没有明显的季节变化^[24, 28, 44],主要以脉冲的形式释放,这与本研究结果一致。本研究中降雨触发的脉冲占 N_2O 总排放量的比例高达 29.4%,施肥的贡献达 19.2%,其中由“水肥”组合带来的排放占比为 15.2%,同时“水肥”组合引发的脉冲次数占所有脉冲事件的 42.3%。有报道称在荷兰泥炭地奶牛场连续 3 个月的测量中,降雨触发的脉冲占总排放量的 40%^[45]。Scanlon 和 Kiely^[46]在连续 8 个月的涡度协方差方法的通量监测试验中,记录了 3 个主要的脉冲峰,这 3 个事件的发生时间总和共 16 d(占总监测时间的 6.6%),但是其对累计通量的贡献高达 51%,高于本研究脉冲的贡献 38.5%。一些研究报道 N_2O 通量随着温度的升高而增加,通常遵循 Arrhenius 函数^[47-48]。然而在本研究中温度和 N_2O 排放不存在非线性关系。

3.2 降雨与小麦田 N_2O 排放

土壤水分是影响温室气体产生与排放的重要因素之一,它不仅是土壤中营养物质的运输载体,而且可以通过改变土壤通气性等因素影响土壤生物地球化学过程^[44]。本研究发现在月尺度上,降雨量与 N_2O

通量呈线性相关;在日尺度上,降雨当日小麦田 N_2O 通量的增幅最大,而随着时间增加,降雨的促进作用快速减弱;小时尺度上的分析发现,降雨事件发生后(包括降雨当日以及雨后 1 d),在 4 个阶段都观察到了 N_2O 脉冲峰。由此可见,降雨对 N_2O 排放有明显的促进作用,且土壤释放的 N_2O 对降雨事件的响应比较迅速(主要集中在雨后的几小时内),同时降雨的影响能持续 1 ~ 2 d。许多研究都发现,降雨后 N_2O 排放量增加。徐文彬等^[49]针对贵州省旱田的研究表明,降雨量 > 5 mm 的降雨事件与土壤出现 N_2O 脉冲峰间的耦合关系达 100%,因此降雨事件与 N_2O 排放峰间存在明显的驱动-响应关系,这可以解释本研究中距上次降雨日差这一解释因子对小麦田 N_2O 排放贡献率最大的原因。Vidon 等^[50]用箱式法在模拟降雨的试验中观测到,雨后 5 ~ 24 h 内土壤 N_2O 排放明显增加,但随着土壤湿度恢复到降雨前的水平,土壤 N_2O 排放降低甚至变为负值。由于小麦田生长季中无灌溉,降雨直接改变小麦田土壤的水分状况,从而直接或间接地影响微生物的硝化反硝化过程。

在小麦生长季的不同阶段, N_2O 脉冲峰对降雨有不同的响应,同时脉冲峰的大小和持续的时间还受到温度、土壤养分供应等其他因子的交互影响。本研究在降雨当日以及降雨后 1 d 都观测到了脉冲峰。土壤的干湿交替为硝化反硝化作用的交替进行创造了环境,许多文献也报道了干旱土壤润湿后触发 N_2O 脉冲的现象^[51-53]。而本研究在第 3、第 4 阶段降雨后 1 d N_2O 通量变化中没有观测到脉冲峰,这可能和底物的消耗有关。类似的现象在土壤 CO_2 通量观测中被报道,连续的干湿交替常常表现出减少 CO_2 排放的脉冲幅度^[54]。欧阳扬和李叙勇^[55]等也报道,随着干湿交替频率降低,再湿润阶段的通量释放速率增大,多次的干湿交替后,最后一次再润湿阶段 N_2O 通量的激发强度明显减弱。降雨量大、频率高有利于土壤严格厌氧条件的迅速形成,这可能是第 3、4 阶段未观测到明显脉冲的原因。降雨当日的 N_2O 排放(图 4)在第 1、3、4 阶段均出现明显的脉冲峰,峰值占一天释放量的比例高达 54.1%(第 4 阶段)。Wu 等^[44]的研究发现,冻融事件带来的脉冲甚至占据全年排放量的 73.3%。Molodovskaya 等^[24]观测了 2006—2009 年的苜蓿-玉米轮作田 N_2O 排放,发现 N_2O 背景通量普遍低于 $6.5 \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$,但降雨、冻融等触发的脉冲达 $39.7 \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$,对 N_2O 总净排放量贡献了 71% ~ 102%。由此可见,脉冲是 N_2O 主要的排放形式,对通量日排放甚至年总排放量的贡献不容忽视。虽然本

研究第 3 阶段时降雨量和施肥量最大,但最高的脉冲峰出现在第 4 阶段,达 553.49 kg/(m²·h),这可能与温度有关。

3.3 施肥与小麦田 N₂O 排放

大量研究表明,施用氮肥增加土壤氮素含量,为微生物的硝化、反硝化过程提供丰富的 NO₃⁻、NH₄⁺,从而明显促进土壤 N₂O 排放^[29,56]。Zhang 等^[31]在对菜地基肥或追肥后一周内观察到强烈的 N₂O 排放峰,而在本研究中施肥的影响也存在时滞,氮肥的添加对小麦田 N₂O 排放的促进作用在施肥后一周左右表现出来,且距上次施肥日差是影响小麦田 N₂O 排放的重要因子之一。许多研究者在农田中的研究发现,施肥会增加硝化和反硝化作用速率,从而促进土壤 N₂O 排放;施氮的影响可以持续几天至几周不等,当反应底物逐渐消耗,N₂O 排放恢复^[28,57]。关于施肥量与 N₂O 排放的关系,一些文献综述了近年来在不同地区的野外研究,得出较为一致的结论^[15,58],即随着施氮量的增加,土壤 N₂O 排放呈线性增加的趋势。本研究中,由于施肥次数有限且连续两次施肥活动间隔短,为避免多次施肥的叠加影响,本文未能对施肥的持续影响时间做进一步分析。同时可能由于数据量的限制,本研究中施氮量这一 N₂O 通量变化的解释因子的贡献率最低(图 6F)。

本研究在小麦的不同生长阶段施用尿素或者复混肥。作为硝化和反硝化作用的底物,可利用性无机氮素是刺激土壤 N₂O 排放的关键因素。无机氮的添加对 N₂O 通量的影响已经被广泛的研究和综述^[2,29,59]。尿素为硝化作用提供底物,并且硝化产物 NO₃⁻又可以作为反硝化作用的底物。因此,小麦田 N₂O 可以通过硝化过程或随后的反硝化过程从尿素中产生。本研究施用的复混肥中含有一定量的有机氮。考虑到有机氮肥的成分组成,向土壤中添加有机氮肥可以通过提供必要的碳底物来驱动微生物硝化和反硝化过程,从而增加 N₂O 的排放^[60]。事实上,关于施用无机氮肥或有机氮肥对 N₂O 排放的影响目前还没有统一的结论。目前一篇综述分析发现两种土壤管理方法下的 N₂O 排放没有显著的差异^[57]。但针对美国中西部玉米田的分析发现,施用粪肥比施用有机氮肥的土壤释放出更多的 N₂O^[61]。然而,这些作者也指出,一些研究中有有机氮肥的施用速率比无机氮肥高,可能因此导致施用有机氮肥的土壤中 N₂O 释放量更大。

3.4 降雨和施肥的交互影响

施用有机和无机氮肥主要影响如下因素:土壤有

机碳、结构、水分、pH、氮素水平,而降雨会在短期内显著改变土壤孔隙水、pH、无机氮浓度等。N₂O 排放的微生物过程会受到多个因子的交互作用影响^[62],对于旱作农田,降雨和施肥活动是影响 N₂O 排放的两个关键因素。氮素添加为土壤提供丰富的硝化反硝化作用底物,施肥后降雨事件的发生很有可能触发小麦田 N₂O 排放的脉冲,并且二者的叠加影响激发更大的排放。类似的现象在玉米田的研究中被报道:该研究中,第 1 次施肥后没有降雨,土壤 N₂O 通量未检测到明显变化,而第 2 次施肥后立刻发生 3.02 mm 的降水事件,明显的通量脉冲被观测到,且这种较高的排放降雨后持续了 3~4 d^[28]。这与本研究的结论一致。氮素添加通过刺激微生物的硝化和反硝化过程,增加土壤中的无机氮含量,可能导致大量的 NO₃⁻ 积累在土壤中。通过反硝化产生的 N₂O/N₂ 比例随土壤 NO₃⁻ 含量的增加而增加^[63],从而促进 N₂O 排放。因此前期的施肥为微生物提供了丰富的底物,随后降水事件引发的水分条件的瞬时改变可能会持续短期(或几天),在这个阶段中土壤厌氧条件占主导地位,反硝化速率显著增加从而促进 N₂O 排放^[64]。其他研究指出,也可能是降雨后土壤孔隙中充满水而排出高浓度气体,N₂O 排放量增大^[65],本研究可能发生了相同的机制。在本研究中,施肥事件对小麦田 N₂O 释放的促进作用在施肥后第 5 天表现出来,而降雨事件对通量排放的影响通常是短时的(1~2 d),但综合考虑施肥和降雨的组合,在施肥后 1~8 d 内降雨,对通量排放均有明显的促进作用,可见这两个因素对土壤 N₂O 排放的叠加影响会增强降雨和施肥事件对农田 N₂O 排放的贡献。这可能是降雨施肥日差这一解释因子的重要性仅次于距上次降雨日差的原因。而随着施肥和降雨事件的间隔越久,超过 8 d 后施肥和降雨的叠加影响减弱,这可能是由于底物的消耗。因此,施肥和降雨事件的日差作为一个影响农田 N₂O 排放的因子不应该被忽视。

土壤系统中各个因子交互作用,控制着氮循环过程。土壤质地、冻融、降水事件和温度均显著影响 N₂O 的排放,但这些因素很难轻易地通过人工管理来控制^[30]。其他影响 N₂O 排放并且可以通过田间管理控制的因子包括:土壤有机碳含量、硝酸盐及铵盐的含量、氮肥施用量及种类和施用方式、土壤氧气含量、微生物丰度和活性、土壤 pH、土壤水分以及作物种类。氮肥的应用以及降雨事件会影响到上述许多因素^[60],各因子的交互作用影响 N₂O 排放的相对变化(例如,土壤水分的变化会影响微生物活性,

同时无机氮含量也会受到影响)^[66-67]。土壤水分能够直接调节土壤微生物的氧气可利用性,是 N_2O 排放的主要驱动力^[15]。排水受限的土壤,即使土壤水分不完全饱和,也更容易排放较多 N_2O 。例如,细纹理土壤通常含水量较大同时排放较多的 N_2O ^[57],因此可以通过修复或改变土壤的结构,增加土壤通气性从而降低 N_2O 排放。已有研究证明增加土壤团聚体的稳定性可以在细纹理土壤团聚体之间产生较大的土壤孔隙,从而增加土壤的氧气含量减少 N_2O 排放^[68-69]。相比施用无机肥,施用有机肥的土壤倾向于具有更大的团聚体稳定性^[70],因此有机肥一定程度上可以减少 N_2O 排放,尤其对于细纹理土壤。但同时土壤孔隙中的氧气含量是由土壤水分以及微生物活性决定的,所以施加微生物呼吸较高的有机氮肥可能会降低土壤氧气含量并增加 N_2O 排放量。这些物理和生物过程相互作用影响土壤水分和氮素含量。考虑到施肥和降雨对 N_2O 排放的综合影响较为复杂且往往触发的脉冲较大,在许多野外研究中可能会被错失^[28],因此针对不同生态系统还需要进一步探索。

4 结论

本研究使用涡度协方差方法观测了 2014—2015 年冬小麦 N_2O 通量,发现小麦田 N_2O 排放没有明显的季节变化模式,主要以脉冲的形式释放。相比于温度,降雨和施肥是引发小麦田 N_2O 脉冲的主要因子。降雨触发的脉冲占 N_2O 总排放量的比例高达 29.4%,施肥的贡献比例达 19.2%,其中由“水肥”组合带来的排放占比为 15.2%,同时“水肥”组合引发的脉冲次数占所有脉冲事件的 42.3%。施肥对小麦田 N_2O 排放的促进作用在施肥后一周左右表现出来,虽然通量对施肥活动的响应存在时滞,但是距离上次施肥日差这一解释因子的贡献率为 24.8%,是影响小麦田 N_2O 排放的重要因子。降雨对小麦田 N_2O 排放有明显的促进作用,且 N_2O 排放对降雨事件的响应比较迅速(主要集中在雨后的几小时内),同时降雨的影响能持续 1~2 d。对于小麦田来说,降雨触发的 N_2O 脉冲对日通量排放的贡献高达 54.1%。因此,距离上一次降雨日差这一因子的贡献率最大。综合考虑施肥和降雨的交互影响,在施肥后 1~8 d 内发生的降水事件,对于小麦田 N_2O 的释放都有明显的促进作用,因此施肥降雨日差这一解释因子的重要程度不容忽视。对于小麦田等旱田来说,降雨是影响大而又无法人为控制的要素。因此为减少 N_2O 排放同时保证肥

料施用的效果,更重要的途径在于控制施肥的时机和种类等。雨后施用尿素更容易促进水解,从而促进 N_2O 产生,因此可以考虑降雨前有机和无机肥的综合施用,保障农作物产量的同时降低农田 N_2O 的排放。

致谢:感谢复旦大学肖向明教授、李香萍老师等的指导,感谢复旦大学王莹冰、辛凤飞的帮助。

参考文献:

- [1] Davidson E A. The contribution of manure and fertilizer nitrogen to atmospheric nitrous oxide since 1860[J]. *Nature Geoscience*, 2009, 2(9): 659-662
- [2] Bouwman A F, Boumans L J M, Batjes N H. Emissions of N_2O and NO from fertilized fields: Summary of available measurement data[J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2002, 16(4): 1058
- [3] Drury C F, Reynolds W D, Tan C S, et al. Emissions of nitrous oxide and carbon dioxide: Influence of tillage type and nitrogen placement depth[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2006, 70(2): 570-581
- [4] Goodroad L L, Keeney D R, Peterson L A. Nitrous Oxide Emissions from Agricultural Soils in Wisconsin[J]. *Journal of Environmental Quality*, 1984, 13(4): 557-561
- [5] Khalil M I, Rosenani A B, Van Cleemput O, et al. Nitrous oxide emissions from an ultisol of the humid tropics under maize-groundnut rotation[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2002, 31(4): 1071-1078
- [6] Venterea R T, Burger M, Spokas K A. Nitrogen oxide and methane emissions under varying tillage and fertilizer management[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2005, 34(5): 1467-1477
- [7] Deng J, Zhou Z, Zheng X, et al. Annual emissions of nitrous oxide and nitric oxide from rice-wheat rotation and vegetable fields: a case study in the Tai-Lake region, China[J]. *Plant and Soil*, 2012, 360: 37-53
- [8] Zhang J, Li H, Wang Y, et al. Multiple-year nitrous oxide emissions from a greenhouse vegetable field in China: Effects of nitrogen management[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 616: 1139-1148
- [9] Yan H, Liyong X, Liping G, et al. Characteristics of nitrous oxide emissions and the affecting factors from vegetable fields on the North China Plain[J]. *Journal of Environmental Management*, 2014, 114: 316-321
- [10] Min J, Shi W, Xing G, et al. Nitrous oxide emissions from vegetables grown in a polytunnel treated with high rates of applied nitrogen fertilizers in Southern China[J]. *Soil Use and Management*, 2012, 28(1): 70-77
- [11] Chen Z, Yang S Q, Zhang A P, et al. Nitrous oxide emissions following seasonal freeze-thaw events from arable soils in Northeast China[J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2018, 17(1): 231-246
- [12] Cui F, Yan G, Zhou Z, et al. Annual emissions of nitrous oxide and nitric oxide from a wheat-maize cropping system on a silt loam calcareous soil in the North China Plain[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2012, 48: 10-19

- [13] Parkin T B, Kaspar T C. Nitrous oxide emissions from corn-soybean systems in the Midwest[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2006, 35(4): 1496–1506
- [14] 赵苗苗, 张文忠, 裴瑶, 等. 农田温室气体 N₂O 排放研究进展[J]. *作物杂志*, 2013, (4): 25–31
- [15] Butterbach-Bahl K, Baggs E M, Dannenmann M, et al. Nitrous oxide emissions from soils: How well do we understand the processes and their controls?[J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society B-Biological Sciences*, 2013, 368(1621): 20130122
- [16] Stehfest E, Bouwman L. N₂O and NO emission from agricultural fields and soils under natural vegetation: summarizing available measurement data and modeling of global annual emissions[J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2006, 74(3): 207–228
- [17] Hoben J P, Gehl R J, Millar N, et al. Nonlinear nitrous oxide (N₂O) response to nitrogen fertilizer in on-farm corn crops of the US Midwest[J]. *Global Change Biology*, 2011, 17(2): 1140–1152
- [18] Kremen A, Bear J, Shavit U, et al. Model demonstrating the potential for coupled nitrification denitrification in soil aggregates[J]. *Environmental Science & Technology*, 2005, 39(11): 4180–4188
- [19] Scheer C, Grace P R, Rowlings D W, et al. Nitrous oxide emissions from irrigated wheat in Australia: impact of irrigation management[J]. *Plant and Soil*, 2012, 359(1-2): 351–362
- [20] Ju X, Lu X, Gao Z, et al. Processes and factors controlling N₂O production in an intensively managed low carbon calcareous soil under sub-humid monsoon conditions[J]. *Environmental Pollution*, 2011, 159(4): 1007–1016
- [21] Liang L L, Grantz D A, Jenerette G D. Multivariate regulation of soil CO₂ and N₂O pulse emissions from agricultural soils[J]. *Global Change Biology*, 2016, 22(3): 1286–1298
- [22] Rafique R, Kumar S, Luo Y Q, et al. Estimation of greenhouse gases (N₂O, CH₄ and CO₂) from no-till cropland under increased temperature and altered precipitation regime: a DAYCENT model approach[J]. *Global and Planetary Change*, 2014, 118: 106–114
- [23] 梁东丽, 同延安, Emyteryd O, 等. 干湿交替对旱地土壤 N₂O 气态损失的影响[J]. *干旱地区农业研究*, 2002, 20(2): 28–31
- [24] Molodovskaya M, Singurindy O, Richards B K, et al. Temporal Variability of Nitrous Oxide from Fertilized Croplands: Hot Moment Analysis[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2012, 76(5): 1728–1740
- [25] Zheng X H, Han S H, Huang Y, et al. Re-quantifying the emission factors based on field measurements and estimating the direct N₂O emission from Chinese croplands[J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2004, 18(2): GB2018
- [26] Wang K, Zheng X, Pihlatie M, et al. Comparison between static chamber and tunable diode laser-based eddy covariance techniques for measuring nitrous oxide fluxes from a cotton field[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2013, 171: 9–19
- [27] Jones S K, Famulari D, Di Marco C F, et al. Nitrous oxide emissions from managed grassland: a comparison of eddy covariance and static chamber measurements[J]. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2011, 4(10): 2179–2194
- [28] Huang H, Wang J, Hui D, et al. Nitrous oxide emissions from a commercial cornfield (*Zea mays*) measured using the eddy covariance technique[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2014, 14(23): 12839–12854
- [29] Mondal S, Mallikarjun M, Ghosh M, et al. Influence of integrated nutrient management (INM) on nutrient use efficiency, soil fertility and productivity of hybrid rice[J]. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 2016, 62(11): 1521–1529
- [30] Hatfield J L. Soil and nitrogen management to reduce nitrous oxide emissions[M]. Madison WI, USA: American Society of Agronomy, Crop Science Society of America, and Soil Science Society of America, Inc., 2016: 90–109
- [31] Zhang Y J, Lin F, Jin Y G, et al. Response of nitric and nitrous oxide fluxes to N fertilizer application in greenhouse vegetable cropping systems in southeast China[J]. *Scientific Reports*, 2016, 6: 20700
- [32] Yan G, Zheng X, Cui F, et al. Two-year simultaneous records of N₂O and NO fluxes from a farmed cropland in the northern China plain with a reduced nitrogen addition rate by one-third[J]. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 2013, 178: 39–50
- [33] 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 N₂O 排放的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2012, 18(5): 1073–1085
- [34] Shi Y, Wu W, Meng F, et al. Integrated management practices significantly affect N₂O emissions and wheat-maize production at field scale in the North China Plain[J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2013, 95(2): 203–218
- [35] Eugster W, Zeyer K, Zeeman M, et al. Methodical study of nitrous oxide eddy covariance measurements using quantum cascade laser spectrometry over a Swiss forest[J]. *Biogeosciences*, 2007, 4(5): 927–939
- [36] Nelson D. TDLWintel User's Manual[M]. Billerica, MA, USA: Aerodyne Research, 2002
- [37] Vickers D, Mahrt L. Quality control and flux sampling problems for tower and aircraft data[J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 1997, 14(31): 512–526
- [38] Rebmann C, Kolle O, Heinesch B, et al. Data acquisition and flux calculations[M]//Aubinet M, Vesala T, Papale D. *Eddy Covariance*. Dordrecht: Springer, 2012
- [39] Schotanus P, Nieuwstadt F T M, Debruin H A R. Temperature-Measurement with a Sonic Anemometer and its Application to Heat and Moisture Fluxes[J]. *Boundary-Layer Meteorology*, 1983, 26(1): 81–93
- [40] Webb E K, Pearman G I, Leuning R. Correction of flux measurements for density effects due to heat and

- water-vapor transfer[J]. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 1980, 106(447): 85–100
- [41] Foken T, Gockede M, Mauder M, et al. Post-field data quality control. Handbook of micrometeorology: A guide for surface flux measurement and analysis[M]. Dordrecht: Springer, 2004, 181–208
- [42] Ma J, Xiao X, Qin Y, et al. Estimating aboveground biomass of broadleaf, needleleaf, and mixed forests in Northeastern China through analysis of 25-m ALOS/PALSAR mosaic data[J]. Forest Ecology and Management, 2017, 389: 199–210
- [43] Walfish S. A Review of Statistical Outlier Methods[J]. Pharmaceutical Technology, 2006, 30(11): 82–86
- [44] Wu X, Brueggemann N, Gasche R, et al. Environmental controls over soil-atmosphere exchange of N₂O, NO, and CO₂ in a temperate Norway spruce forest[J]. Global Biogeochemical Cycles, 2010, 24(2). DOI:10.1029/2009GB003616
- [45] Kroon P S, Hensen A, Jonker H J J, et al. Suitability of quantum cascade laser spectroscopy for CH₄ and N₂O eddy covariance flux measurements[J]. Biogeosciences, 2007, 4(5): 715–728
- [46] Scanlon T M, Kiely G. Ecosystem-scale measurements of nitrous oxide fluxes for an intensely grazed, fertilized grassland[J]. Geophysical Research Letters, 2003, 30(16): 337–356
- [47] Bateman E J, Baggs E M. Contributions of nitrification and denitrification to N₂O emissions from soils at different water-filled pore space[J]. Biology and Fertility of Soils, 2005, 41(6): 379–388
- [48] Smith K A, Ball T, Conen F, et al. Exchange of greenhouse gases between soil and atmosphere: interactions of soil physical factors and biological processes[J]. European Journal of Soil Science, 2003, 54(4): 779–791
- [49] 徐文彬, 洪业汤, 陈旭晖, 等. 贵州省旱田土壤 N₂O 释放及其环境影响因素[J]. 环境科学, 2000, 21(1): 7–11
- [50] Vidon P, Marchese S, Welsh M, et al. Impact of precipitation intensity and riparian geomorphic characteristics on greenhouse gas emissions at the soil-atmosphere interface in a water-limited riparian zone[J]. Water Air and Soil Pollution, 2016, 227(1): 8
- [51] Manalil S, Riethmuller G, Flower K. Rapid emission of nitrous oxide from fallow over summer following wetting in a Mediterranean-type environment[J]. Soil & Tillage Research, 2014, 143: 130–136
- [52] Guo X, Drury C F, Yang X, et al. The extent of soil drying and rewetting affects nitrous oxide emissions, denitrification, and nitrogen mineralization[J]. Soil Science Society of America Journal, 2014, 78(1): 194–204
- [53] Harrison-Kirk T, Beare M H, Meenken E D, et al. Soil organic matter and texture affect responses to dry/wet cycles: Effects on carbon dioxide and nitrous oxide emissions[J]. Soil Biology & Biochemistry, 2013, 57: 43–55
- [54] Chatterjee A, Jenerette G D. Changes in soil respiration Q(10) during drying-rewetting along a semi-arid elevation gradient[J]. Geoderma, 2011, 163(3/4): 171–177
- [55] 欧阳扬, 李叙勇. 干湿交替频率对不同土壤 CO₂ 和 N₂O 释放的影响[J]. 生态学报, 2013, 33(4): 1251–1259
- [56] 方雅各, 解钰, 王丽华, 等. 等氮量下不同分施次数对燥红壤 N₂O 排放的影响[J]. 土壤, 2018, 50(2): 347–352
- [57] Abalos D, Jeffery S, Drury C F, et al. Improving fertilizer management in the US and Canada for N₂O mitigation: Understanding potential positive and negative side-effects on corn yields[J]. Agriculture Ecosystems & Environment, 2016, 221: 214–221
- [58] Gregorich E G, Rochette P, Vandenbygaart A J, et al. Greenhouse gas contributions of agricultural soils and potential mitigation practices in Eastern Canada[J]. Soil & Tillage Research, 2005, 83(1): 53–72
- [59] Shi Y, Wu W, Meng F, et al. Integrated management practices significantly affect N₂O emissions and wheat-maize production at field scale in the North China Plain[J]. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 2013, 95(2): 203–218
- [60] Thangarajan R, Bolan N S, Tian G, et al. Role of organic amendment application on greenhouse gas emission from soil[J]. Science of the Total Environment, 2013, 465: 72–96
- [61] Decock C. Mitigating nitrous oxide emissions from corn cropping systems in the midwestern US: Potential and data gaps[J]. Environmental Science & Technology, 2014, 48(8): 4247–4256
- [62] Venterea R T, Coulter J A, Dolan M S. Evaluation of intensive “4R” strategies for decreasing nitrous oxide emissions and nitrogen surplus in rainfed corn[J]. Journal of Environmental Quality, 2016, 45(4): 1186–1195
- [63] Weier K L, Doran J W, Power J F, et al. Denitrification and the dinitrogen/nitrous oxide ratio as affected by soil water, available carbon, and nitrate[J]. Soil Science Society of America Journal, 1993, 57(1): 66–72
- [64] Jacinthe P A, Bills J S, Tedesco L P, et al. Nitrous oxide emission from riparian buffers in relation to vegetation and flood frequency[J]. Journal of Environmental Quality, 2012, 41(1): 95–105
- [65] Aguilera E, Lassaletta L, Sanz-Cobena A, et al. The potential of organic fertilizers and water management to reduce N₂O emissions in Mediterranean climate cropping systems. A review[J]. Agriculture Ecosystems & Environment, 2013, 164: 32–52
- [66] 吕金岭, 刘骅, 王西和, 等. 施肥处理对春季冻融期灰漠土农田温室气体排放的影响[J]. 土壤学报, 2018, 55(1): 159–173
- [67] 田路路, 隗英华, 刘艳, 等. 冻融作用对农田土壤可溶性氮组分的影响[J]. 土壤, 2017, 49(3): 512–518
- [68] Hu H, Chen D, He J. Microbial regulation of terrestrial nitrous oxide formation: understanding the biological pathways for prediction of emission rates[J]. FEMS Microbiology Reviews, 2015, 39(5): 729–749

[69] 毛霞丽, 陆扣萍, 何丽芝, 等. 长期施肥对浙江稻田土壤团聚体及其有机碳分布的影响[J]. 土壤学报, 2015, 52(4): 828–838

[70] Mader P, Fliessbach A, Dubois D, et al. Soil fertility and biodiversity in organic farming[J]. Science, 2002, 296: 1694–1697

Effects of Precipitation and Fertilization on N₂O Discharge from Wheat Field in Chongming Island, Shanghai Estimated by Eddy Covariance Technology

ZHANG Mengshan¹, GUO Haiqiang¹, MA Jun¹, LI Hong¹, DAI Shengqi¹,
GU Kaihua^{2*}, GAO Wei³, ZHAO Bin¹

(1 Ministry of Education Key Laboratory for Biodiversity Science and Ecological Engineering, Institute of Biodiversity Science, Fudan University, Shanghai Chongming Dongtan Wetland Ecosystem Research Station, Shanghai 200438, China; 2 Shanghai Meteorological Service, Shanghai 202150, China; 3 Yangtze River Delta Center for Environmental Meteorology Prediction and Warning, Shanghai 200030, China)

Abstract: As a major source of N₂O emissions, cropland has been researched more, with precipitation and fertilization being considered as the natural and anthropogenic key factors that affecting N₂O emissions in wheat fields, respectively. Given the low sampling frequency, most previous studies using the static chamber method may underestimate N₂O emissions. Meanwhile, the potential interaction effect of precipitation and fertilization on cropland N₂O emissions have been neglected. In this study, we reported the dynamics of N₂O emissions and investigated the effects of precipitation and fertilization on N₂O emission from wheat fields at different time scales based on the eddy covariance observation. Meanwhile, the Boosted Regression Trees method was adopted to quantify the precipitation and fertilization-related factors. The results showed that there were no obvious seasonal and diurnal variation patterns of N₂O flux in wheat fields. The average daily N₂O emission was N₂O-N 666.5 ± 669.4 μg/(m²·d) in this study, which was mainly released as a pulse. The ratios of precipitation and fertilization-induced pulses to total N₂O emissions in wheat fields were 29.4% and 19.2%, respectively. Precipitation increased N₂O emissions, and which responded rapidly to the precipitation events (mainly within a few hours after the precipitation). Meanwhile, the precipitation promotion could last 1–2 days. Fertilization also increased N₂O emissions, but existed a one-week lag. Considering the interactive effects of precipitation and fertilization, precipitation events occurring within 1–8 days after fertilization significantly promoted the emission of N₂O. Therefore, the interaction of precipitation and fertilization should not be neglected.

Key words: N₂O emission; Precipitation; Fertilization; Eddy covariance