

农田 NO 排放的时间变异性*

郑循华 王明星 王跃思

(中国科学院大气物理研究所, 北京 100029)

摘要 在采用基于箱法的自动观测技术对苏州地区一个完整的冬小麦生育期的麦田 NO 排放进行全天候连续观测的基础上, 讨论了 NO 排放的季节变化和日变化特征及其温度和植物生长的影响. 观测实验研究发现, 苏州地区冬小麦田的 NO 排放具有极其显著的季节变化规律性, 冬季以前的小麦苗期和返青至淹水种稻之前的春季, NO 排放量分别为 $0.156\text{--}0.758\text{mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ 和 $1.229\text{--}10.802\text{mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$, 前者是全生育期排放总量的 1.5%—10.5%, 后者为 83.0%—93.8%. 温度是决定其季节变化格局的首要因素, 虽然施氮肥可以使 NO 排放增大 5—7 倍, 但却不能改变其季节变化格局. 在植物生长活动较弱的阶段, NO 排放的日变化格局与温度一致, 即日排放极大值发生在午时左右. 但是, 在植物旺盛生长的季节, 由于根系与土壤微生物竞争土壤 $\text{NH}_4^+\text{-N}$, 导致与温度完全相反的 NO 排放日变化格局, 即日排放极大值发生在夜间 18—24 时, 午时左右出现的却是日排放极小值.

关键词 NO 排放, 季节变化, 日变化, 自动观测, 农田, 温室气体, 大气环境

Temporal Variability of NO Emission from Croplands*

Zheng Xunhua Wang Mingxing Wang Yuesi

(Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China)

Abstract No emission from the croplands of Suzhou suburban, in which winter wheat following rice was planted, was continuously measured with an automated system based on static chamber techniques. The discussion of this paper focuses on the seasonal and diurnal variation of NO emission and the influences of temperature, fertilization and plant activity. The NO emission from the wheat fields shows high seasonal variability. Amounts of released NO in the seedling stage and during the period from wheat reviving in spring till flooding fields for rice-planting was observed to be $0.156\text{--}0.758$ and $1.229\text{--}10.802\text{mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$, respectively. The former only accounts for 1.5%—10.5% of the seasonal total, and the later 83.0%—93.8%. It is temperature that determines the seasonal variation pattern of NO emission. Even though N fertilization may significantly intensify the seasonal NO emission by 5—7 times, it is not able to modify the seasonal variation pattern. Under suitable temperature, the diurnal variation pattern of NO emission from crop fields depends on the activities of plants. When wheat growth activity is relatively lower, the diurnal pattern of NO emission is very similar with that of temperature, with the maximum appears at about 12 00. When wheat in the fields luxuriates, the competition of NH_4^+ up-take by wheat roots and NH_4^+ oxidation by nitrifiers leads to a night-peak pattern of diurnal variation, with the maximum emission occurring at 18 00—24 00 and the minimum at about 12 00.

Keywords NO emission, seasonal variation, diurnal variation, croplands, greenhouse gas, atmospheric environment.

* 国家自然科学基金资助项目(Project Supported by National Natural Science Foundation of China): 4965270 及“九五”攀登预选项目 PD952Z 的研究内容. 参加人员还有沈任兴、李晶、刘广仁、张文等

郑循华: 女, 34 岁, 理学博士, 副研究员

收稿日期: 1998-09-02

NO 是大气中生成 O₃ 和酸雨成分 HNO₃ 的前体物质, 又作为烃类、CO 等大气污染成分的氧化剂而参与复杂的大气化学反应过程, 从而直接或间接地破坏地球生态环境. 生物源的 NO 排放强度仅次于化石燃料燃烧过程^[1], 其中大量施用化学氮肥的农田生态系统又是全球 NO 生物源的重要组成部分. 燃烧过程排放 NO 的问题, 目前已受到一定程度的人为控制^[2], 但生态系统排放 NO 的问题直至最近 10 来年才引起人们的警觉^[1,3,4,5]. 土壤排放的 NO 约占全球 NO 排放总量的 8%—32%^[6], 且随化学氮肥用量增加而呈上升趋势. 但目前对土壤排放 NO 的过程和规律性仍缺乏足够的认识. 在我国, 至今鲜见有关 NO 生物源排放研究报道. 本文旨在用 NO 生物源排放自动测量设备^[7], 通过对华东地区农田一个完整的冬小麦生长季进行全天候自动连续观测实验研究, 揭示农田生态系统 NO 排放的客观规律, 为准确估计生态系统 NO 排放强度并探索切实可行的农田 NO 限排对策提供科学依据.

1 实验研究方法

本研究以苏州地区的冬小麦田为例, 采用一套自行研制的自动采样分析系统对 NO 排放进行全天候连续观测^[7]. 自动系统中用于测定 NO 浓度的检测仪器是北京分析仪器厂引进美国 MONITOR LABS 技术而生产的 8840 型化学发光式氮氧化物分析仪. 在连续观测过程中, 每间隔一段时间使用 MONITOR LABS 生产的标定器对氮氧化物分析仪进行 1 次标定, 以确保观测浓度值的精度. 方法的基本原理是, 从安装在田间的 70cm × 70cm × 90cm 密闭箱中定时自动抽取空气样品, 经除水干燥后由内径 2mm 的管道输送到相距约 50m 的实验室内, 测定气体样品的 NO 浓度, 然后由式(1)计算 NO 排放通量, 即单位时间单位面积上排放的 NO 质量数.

$$F = 273 / (273 + t) \times 60 \times 10^{-5} H \rho dc / dt \quad (1)$$

式(1)中, F 为 NO 排放通量 ($\text{mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$,

以 NO 计), t 为采样时的箱内平均气温 ($^{\circ}\text{C}$), H 为采样箱内的气室高度 (cm), ρ 为标准状况下的空气密度 ($\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$), c 为 NO 体积混合比浓度 ($\text{nl} \cdot \text{L}^{-1}$), t 为关箱时间 (min), dc/dt 为密闭箱内 NO 气体浓度变化率 ($\text{nl} \cdot \text{L}^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$).

观测系统共设计有 9 个采样箱, 以观测 9 个点位的 NO 排放. 实验过程中, 每 3 个 1 组依次进行观测, 每组每次观测 80min, 每个点位 1d 共观测 6 次, 以 6 个通量观测值的平均值代表每个点位的日平均排放通量. 自动观测系统中还设计有 8 个温度探测通道, 安装有 8 个温度探头, 同步测定箱内外气温和不同深度的土壤温度, 系统每 10min 记录一次 8 个通道的温度, 并定时地存储在中心控制计算机的硬盘上.

实验田分为 3 个 8m × 12m 的实验小区, 每个小区设 1 种田间处理, 3 种处理分别为化肥、有机肥+ 化肥和对照 (不施肥), 其中 2 种施肥处理均代表当地常规施肥方式, 施纯氮总量均为 190kg · hm². 每个小区随机地布置 3 个采样箱, 以 3 个点位共 18 个通量数据的平均值代表该处理的日平均排放通量.

实验田设在江苏吴县市农科所实验场 (31° 16' N, 120° 38' E) 内, 土壤为太湖地区的典型水稻土, 即潴育型黄泥土, 耕层土壤为粘壤质, 粘粒含量为 47%. 有机质、全氮 (N)、全磷 (P₂O₅) 和全钾 (K₂O) 含量分别为 34.93g · kg⁻¹、1.88g · kg⁻¹、1.15g · kg⁻¹ 和 13.4g · kg⁻¹, pH 值为 6.5. 年降雨量 1080mm, 无霜期 240d 左右, 1 月份和 7 月份平均气温分别为 2.9 和 28.5 . 太湖地区大约 75% 的稻田实行水稻—冬小麦轮作.

2 结果与讨论

2.1 季节变化

图 1 显示了整个冬小麦生长季内施肥与对照处理的 NO 日平均排放通量以及箱内表层土壤日平均温度的分布状况. 从图 1 可见, 苏州地区麦田的 NO 排放具有非常明显的季节变化, 冬季以前的小麦苗期和春季小麦返青至淹水种

稻之前, NO 排放量分别为 $0.156\text{—}0.758\text{mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ 和 $1.229\text{—}10.802\text{mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$, 前者仅占全生育期排放总量的 $1.5\%\text{—}10.5\%$, 后者占 $83.0\%\text{—}93.8\%$. NO 排放表现为与表层土壤温度一致的季节变化节律, 这表明温度是引起冬小麦田 NO 排放季节变化的主导因子. 尽管施肥麦田的 NO 排放比对照麦田高 $5\text{—}7$ 倍, 但二者的季节变化格局却不因施肥处理的差异而发生明显变化. 就冬小麦生长季而言, NO 排放对表层土壤温度的依赖性可用指数函数 $F = 0.00657e^{0.207t}$ ($n = 199, R^2 = 0.72$) 来描述(如图 2 所示). 式中的 F 表示排放通量 ($\text{mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$), t 表示表层土壤日平均温度 ($^{\circ}\text{C}$). 该指数曲线拟合实际观测结果的 $R^2 = 0.72$, 说明温度对 NO 排放变化的贡献占 72% . 从图 1 可见, 尽管 5 月中下旬的温度较高, 其 NO 排放通量却相对较低, 这表明还有除温度之外的因素在对 NO 排放起重要作用. 但是什么因素以及作用的机制都有待研究.

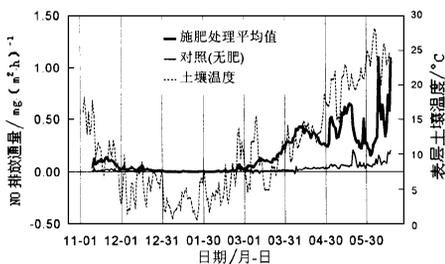


图 1 苏州地区冬小麦田的 NO 排放通量及表层土壤温度的季节分布

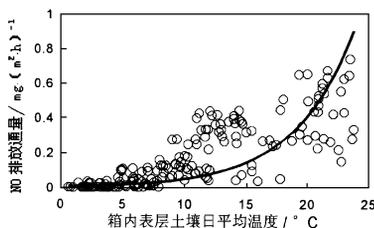


图 2 温度对苏州地区冬小麦田 NO 排放的影响

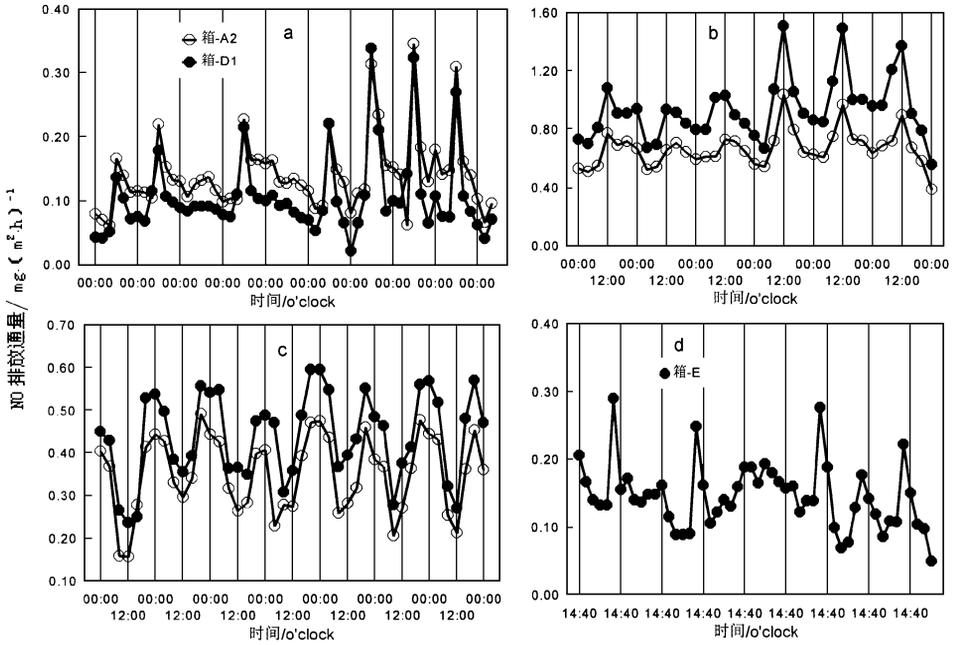
2.2 日变化

图 3 的 (a)、(b) 和 (c) 分别显示了冬小麦苗期、成熟期及旺盛生长期的麦田 NO 排放日变

化. 从图 3(a) 和 (b) 可见, 前 2 个阶段的 NO 日排放极大值均发生在中午 12 时左右, 夜间的排放较弱, 且相对稳定. 相反, 如图 3(c), 在小麦旺盛生长期, 极大值却发生在夜间 18—24 时, 而极小值通常发生在中午 12 时左右. 然而, 如图 3(d) 显示, 对于同样处于小麦旺盛生长期的箱 E 而言, 虽然施肥处理完全与箱 D1 相同, 但由于地面植物较少, 小麦生物量仅为箱 D1 的 25% , 其 NO 排放表现为与小麦苗期和成熟期相同的日变化格局.

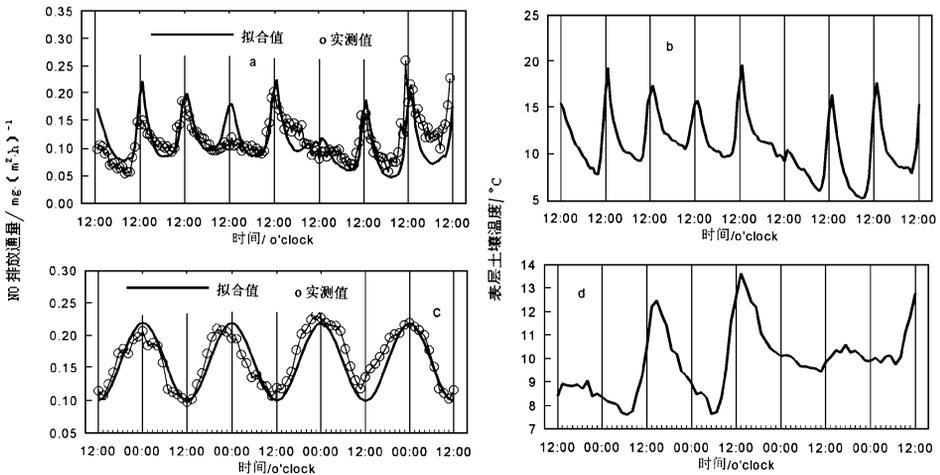
在植物生理活动较弱情况下, 如小麦苗期和成熟期或地面植物较少时, NO 排放的日变化格局主要取决于温度日变化(图 4a 和 b). 如图 4a 和 b 所示, 1 日内 NO 排放通量的变化轨迹可以用含时间(t, h)和温度($t, ^{\circ}\text{C}$) 2 个自变量的正弦曲线 $F = 0.0016t \times \sin(0.2618t - 1.57) + 0.01t$ 来拟合. 相反, 如图 4c 和 d 所示, 当植物生理活动旺盛时, NO 排放的日变化不再依赖于温度的日变化, 连续几天的 NO 排放 (F) 轨迹可用仅含一个自变量时间(t)的正弦曲线 $F = 0.06 \times \sin(0.2618(t - 12) - 1.57) + 0.16$ 来拟合.

NO 排放在不同小麦生育期或不同地面植物覆盖率条件下表现为完全不同的日变化格局, 这是土壤中微生物硝化作用产生 NO 的过程和植物吸收土壤 $\text{NO}_4^- \text{--N}$ 2 个过程共同作用的结果. 麦田土壤排放的 NO 主要产生于土壤微生物硝化过程. 直接影响硝化过程的环境因素主要包括反应底物的有效性(即土壤 $\text{NH}_4^+ \text{--N}$ 含量)、依赖于温度的硝化微生物活性、土壤有机 N 的矿化速率以及粘土矿物吸附的 NH_4^+ 解吸速率. 在植物生理活动较弱的小麦苗期(如图 3a)、成熟期(如图 3b)以及植株密度很低的拔节抽穗期(如图 3d), 植物根系对土壤 NH_4^+ 的吸收能力较弱, 通过肥料施入土壤中的 NH_4^+ , 通过矿化过程产生或解吸过程释放的 NH_4^+ , 其主要去向是通过微生物硝化作用被氧化成 NO 、 NO_2^- 和 NO_3^- . 一般地, 土壤中 NH_4^+ 的有效浓度、矿化补给速率、解吸速率以及微生物硝化氧化速率均与温度呈正相关, 因此, 这些情况



a. 1996-11-13 ~ 22(小麦抽穗苗期) b. 1997-05-14 ~ 19(小麦成熟期)
c. 1997-04-07 ~ 14(小麦开花期) d. 1997-04-07 ~ 14(小麦抽穗开花期)

图3 不同阶段的麦田 NO 排放日变化

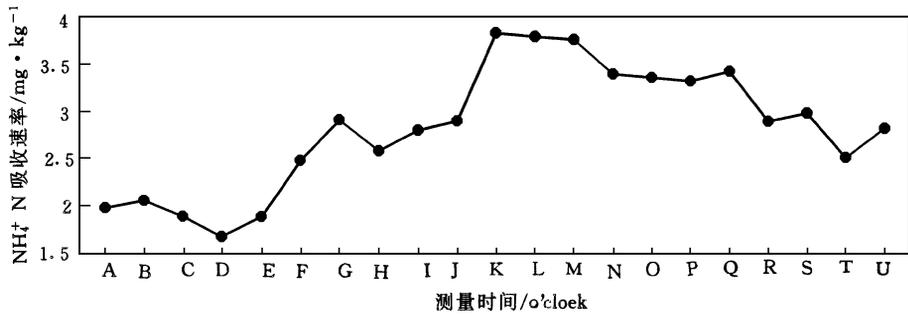


a, b. 1996-11-16 ~ 20(小麦苗期) c, d. 1997-03-25 ~ 29(小麦拔节期)

图4 温度对农田 NO 排放日变化的影响

下的 NO 排放表现出与表层土壤温度几乎同步的日变化形式。相反,在植物生理活动十分旺盛的情况下,土壤中的 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 一部分参与硝化作用,另一部分则被植物吸收到体内并同化为细胞组成成分。正如图 5 所示,抽穗期小麦吸收

土壤 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的速率的日变化几乎与温度一致,正午左右小麦通过蒸腾作用吸收土壤 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的速率最大,致使留在土壤中参与硝化氧化过程的 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 最少,从而导致中午左右的 NO 产生和排放速率最低。而在夜间,随着



A. 00 00~03 00 B. 01 00~06 00 C. 02 00~06 00 D. 04 00~07 00 E. 05 00~08 00 F. 06 00~09 00 G. 07 00~10 00 H. 09 00~12 00 I. 10 00~14 00 J. 12 00~15 00 K. 13 00~16 00 L. 14 00~17 00 M. 15 00~18 00 N. 16 00~19 00 O. 17 00~20 00 P. 18 00~21 00 Q. 19 00~22 00 R. 20 00~23 00 S. 21 00~00 00 T. 22 00~01 00 U. 23 00~02 00

图5 小麦 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 吸收率的日变化(正抽穗的小麦植株; 培养液的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 初始浓度为 $13.9 \text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)

植物吸收 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 速率在午夜前后达到最小, 参与硝化作用的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 增至最大, 因而 NO 产生速率也到极大值。

参 考 文 献

- 1 Robertson G Philip. Fluxes of nitrous oxide and other nitrogen trace gases from intensively managed landscapes: a global perspective. In: L A Harper et al (ed). Agricultural ecosystem effects on trace gases and global climate change. ASA Spec. Publ. No. 55. ASA, CSSA, SSSA, Madison, WI, 1993, 95—108
- 2 Crutzen P J. On the role of CH_4 in atmospheric chemistry: Sources, sinks and possible reductions in anthropogenic sources. *Ambio*, 1995, **24**(1): 52_ 55
- 3 Skiba U, Fowler D and Smith K. Emission of NO and

N_2O from soils. *Environmental Monitoring and Assessment*, 1994, **31**: 153_ 158

- 4 Davidson E A, Herman D J, Schuster A and Firestone M K. Cattle grazing and oak trees as factors affecting soil emissions of nitric oxide from an annual grasslands. In: Harper L A et al (ed). Agricultural ecosystem effects on trace gases and global climate change. ASA Spec. Publ. 55. ASA, CSSA, and SSSA, Madison, WI, 1993, 109_ 119
- 5 William E I, Hultchinson G L and Fehsenfeld F C. NO_x and N_2O emissions from soil. *Global Biogeochemical Cycles*, 1992, **6**(4): 351_ 388
- 6 Bouwman A F (ed). Soils and the greenhouse effect. Chichester: John Wiley & Sons, 1990. 32
- 7 郑循华, 王明星, 王跃思等. 农田 NO 排放自动观测. *环境科学*, 1998, **19**(2): 1—5

• 环境信息 •

生态中心 LC/MS 组测试费用下调

中国科学院生态环境研究中心引进的 HPLC/MS 仪器是国内最早开展 LC/MS 联用的机组之一, 它是环境卫生, 药物医学, 化学化工, 生物化学及商检等领域不可缺少的新型有机分析仪器。该仪器目前运行状态优良, 由经验丰富的高级资深研究人员操作, 在北京科学仪器装备协作机组中, 完成电喷雾(ESI)、大气压化学电离(APCI)及 LC/MS 联用测试的样品最多。近 2 年来为外单位测试超过 1000 h/a, 良好的服务已受到用户好评。

为进一步提高进口仪器利用率, 支持外单位研究

生课题和基础科研, 在国家科委资助下, 1999 年将试行经济价, 大幅下调测试收费, 暂定对外测试价格为:

ESI 及 APCIMS(直接进样): 40~180 元/个样品
HPLC/MS(联机): 300~1600 元/个样品
欢迎函电索要详细资料。

联系地址: 1000085 北京市 2871 信箱 海淀区双清路 18 号(北京林业大学北边)

联系人: 蒋可(研究员) 赵国栋(高工)

Tel: (010) 62925511-3013 Fax: (010) 62923563

E-mail: lcms@mail.rcees.ac.cn