

温度对旱田土壤 N₂O 排放的影响研究*

徐文彬^{1,2} 刘维屏¹ 刘广深¹

(1 浙江大学(玉泉校区)环境科学研究所,杭州 310027; 2 中国科学院地球化学研究所
环境地球化学国家重点实验室,贵阳 550002)

摘 要 以南方亚热带代表性旱田土壤—贵州玉米—油菜轮作田、大豆—冬小麦轮作田和休耕地为研究对象,同步观测了整个轮作期土壤 N₂O 排放通量和温度的季节变化。同时,采用 DNDC 模型定量探讨了未来气温变化对土壤 N₂O 排放的潜在影响。结果表明,温度是土壤 N₂O 排放通量规律性日变化的最主要控制因素;除大豆地外,其他作物生长季节和休耕地的 N₂O 排放通量季节变化与温度之间均存在一定程度的正相关性,其中冬春季休耕地的 N₂O 排放通量与温度间存在弱指数函数关系。模型检验结果表明,除大豆地外,其余试验地的 N₂O 排放通量均随年均气温升高而升高,在冬春季,土壤 N₂O 排放通量对气温变化的敏感性强于夏秋季,尤其以冬春季休耕地受气温变化的影响最为显著。

关键词 N₂O 排放,温度,旱田土壤, DNDC 模型

中图分类号 X16, X142

N₂O 是对全球温室效应和平流层 O₃ 层破坏负有重要责任的大气痕量气体,农业土壤尤其是旱田土壤是全球重要的 N₂O 排放源。温度是影响土壤 N₂O 产生和排放的重要且不易受控制的环境因素,了解 N₂O 排放通量与温度间的关系是建立估算区域农田生态系统 N₂O 排放量的各种模型的基础。目前关于 N₂O 排放与温度间关系的研究已有不少报道,但大多是对温带地区农田土壤所作的研究^[1,2]。南方亚热带农田是我国重要的 N₂O 排放源区,温度对该地区夏季和越冬作物土壤 N₂O 排放通量日变化和季节变化的影响,至今尚未见报道。

同时,由温室效应和全球气候自然振荡引起的未来全球气温的任何变化均会在不同程度上影响土壤中许多微生物过程的速率,从而影响 N₂O 等温室气体的排放。未来全球气温变化对区域或全球土壤 N₂O 排放量的反馈作用究竟有多大,目前还难以通过田间实验和简单的经验模式作出准确回答。最近 Li 等采用 DNDC(反硝化作用—分解作用)模型^[3-5],以依阿华州玉米地为例探索性地检验了未来气温变化对温带地区旱作土壤 N₂O 排放的潜在影响^[6]。

本文以我国南方亚热带代表性旱田土壤—贵州玉米—油菜轮作田、大豆—冬小麦轮作田和休耕地为研究对象,对整个轮作期的 N₂O 排放通量和温度变化进行了同步观测,

* 国家自然科学基金资助项目(批准号 49873034, 40073034)和中国博士后基金资助项目

收稿日期: 2000- 03- 13; 收到修改稿日期: 2000- 09- 15

以研究亚热带旱田土壤 N_2O 排放过程中的温度效应。同时,采用 DNDC 模型定量探讨了未来气温变化对土壤 N_2O 排放的潜在影响。

1 试验方法

选贵州省农科院土肥所试验站(106°66'E, 26°50'N, 海拔 1 140m) 的玉米-油菜轮作田、大豆-冬小麦轮作田和休耕地为试验地, 试验小区面积 40m × 50m, 3 试验地地形部位相同。玉米-油菜轮作田和休耕地测量时间从 1995-05-28(玉米播前整地) ~ 1996-05-27(油菜收割), 大豆-冬小麦轮作田测量时间从 1995-03-20(大豆播前整地) ~ 1996-05-15(小麦收割), 观察期包括了上述 4 种旱作的生长期。越冬期土壤未上冻。休耕地的前季作物为油菜。试验地土壤均为黄壤, pH7.5, 全氮 0.71%, 玉米-油菜田和休耕地土壤有机质含量 1.20%, 容重 1.14g cm⁻³, 物理性粘粒(< 2 μ m) 25.6%; 大豆-冬小麦田土壤有机质含量 1.06%, 容重 1.24g cm⁻³, 物理性粘粒(< 2 μ m) 30.0%。

试验地耕种和施肥措施与当地农民大地相同, 玉米、油菜、大豆和冬小麦 4 种旱作的施 N 量(均为尿素)分别为 138kg hm⁻² (1995-05-29 基肥, N 60kg hm⁻²; 1995-07-24 追肥, N 78kg hm⁻²)、104kg hm⁻² (1995-10-09 基肥, N 45kg hm⁻²; 1995-11-28 追肥, N 59kg hm⁻²)、31kg hm⁻² (无基肥, 1995-06-01 追肥) 和 123kg hm⁻² (1995-11-19 基肥, N 45kg hm⁻²; 1995-12-28 追肥, N 52kg hm⁻²; 1996-03-03 追肥, N 26kg hm⁻²)。同时, 油菜、大豆和冬小麦有机肥(高温堆肥, 作基肥, C/N 比为 10.2)施用量(C)分别为 2 470kg hm⁻²、1 240kg hm⁻² 和 2 500kg hm⁻², 玉米地由于同时有其他试验任务未施有机肥。

采用密闭箱-气相色谱法测量地间土壤 N_2O 排放通量。每一排放通量均采用 4 个气样浓度值由线性回归计算, 气样取样时间确定为关箱后的 0、5、10、20min。每块试验地采用两箱体平行采样。夏秋季每隔 3~4d 测量 1 次 N_2O 排放通量, 遇强降雨、施肥和翻耕, 均增加通量观察密度。冬春季视温度适当减少通量观测次数。3 实验地 N_2O 排放通量观测样本数在 66~79 个之间。气样的 N_2O 浓度用 GC-ECD 法测量(岛津 GC-16A, ECD-⁶³Ni, 80~100 目 Porapak Q 色谱柱, 5.5ml 进样管, 高纯氮气为载气)。 N_2O 气样在取样后的 3d 内完成浓度测量, 条件实验得出在该贮存期内, 气样中的 N_2O 浓度无任何变化^[7]。

有关 DNDC 模型对土壤 N_2O 排放的模拟过程和模型计算与地间测量在 3 试验地 N_2O 排放通量及其影响因子季节变化上的拟合分析结果已有另文说明^[8]。

2 结果与讨论

2.1 N_2O 排放通量日变化与温度的关系

观测结果表明, N_2O 排放通量规律性日变化表现为 N_2O 排放通量基本上与温度呈同步变化关系, 下午出现极大值(图 1)。排放通量规律性日变化通常发生在当土壤水分、养分等状况都相对稳定, 且天气情况比较正常, 气温日差较大时; 当上述影响因子日变化较显著时, 通量表现为无规律性日变化。这是由于在较短的时间尺度内, 当土壤条件、气候因素和植物体维持相对稳定时, 土壤中 N_2O 的产生速率在土壤环境温度范围内与土壤温度有正相关性。因此, 只有在其他因素相对稳定的条件下, 温度才成为试验地 N_2O 排放通量规律性日变化的最主要影响因素。

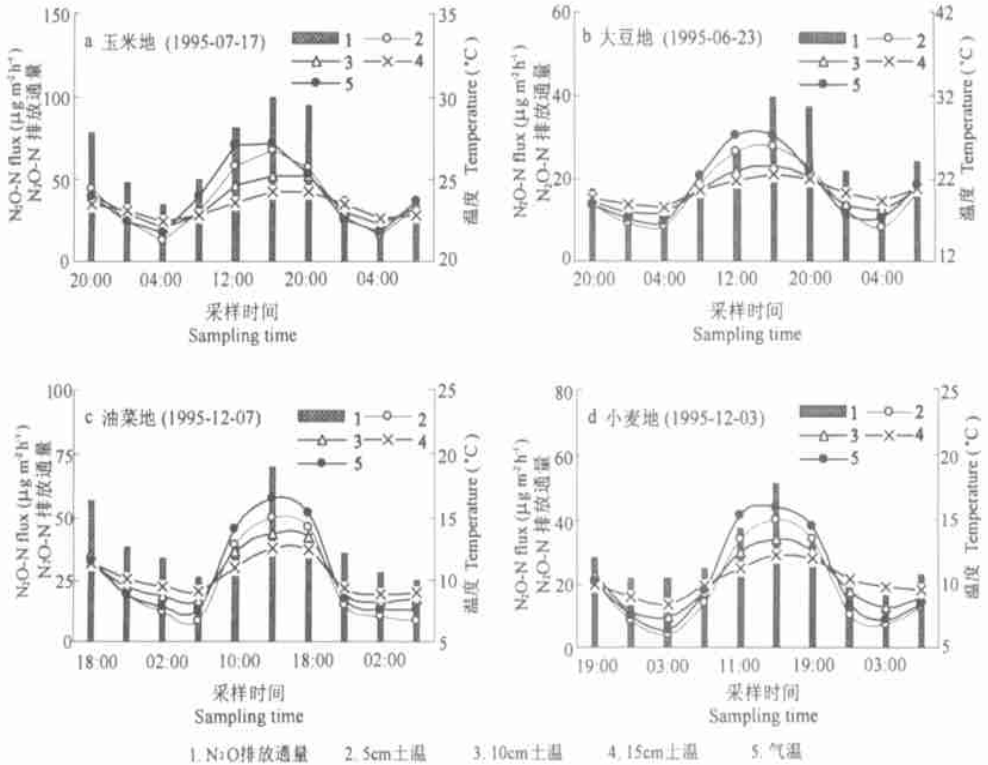


图 1 N_2O 排放通量和温度的规律性日变化

Fig. 1 Regular diurnal variation in N_2O flux and temperature

进一步分析显示, 夏季作物(玉米、大豆)和越冬作物(油菜和冬小麦)土壤 N_2O 排放通量出现极大值的时间分别比气温和表层土温滞后 2~3h 和 1~2h, 夏季作物存在的时间相位差大于越冬作物(图 1)。前人在我国其他地区的旱作也曾观察到类似的玉米地和大豆地存在傍晚通量极大值及越冬作物通量极大值比气温和表层土温延后 1~2h 的现象^[2,9,10]。同时, 研究结果还表明对越冬作物, 在气温最低的 1 月和 2 月中, N_2O 排放通量日变化幅度十分微弱。

在校正了上述各作物 N_2O 日通量极大值与气温峰值间存在的时间位差后, 得到试验地土壤 N_2O 排放通量日变化与气温和表层土温间的相关系数 R 达 0.80~0.95 ($n=10$)。

2.2 N_2O 排放通量季节变化与温度的关系

3 试验地 N_2O 排放通量季节变化由一系列明显的 N_2O 排放峰组成, 这些排放峰均出现在降雨量大于 10mm 的降雨事件和施肥及翻耕后^[11], 与温度的季节性渐变关系不明显(图 2)。但进一步分析表明, 对休耕地和玉米-油菜轮作田, 其排放通量季节变化模式(通量数据经 3 阶多项式拟合后得出的曲线)与温度的渐变趋势相似(图 2), 上述 2 试验地 N_2O 排放通量季节变化与温度的相关系数 R 分别达 0.45 ($n=66$) 和 0.36 ($n=68$), 经 t 检验, 相关性显著, 表明其 N_2O 排放通量季节变化受温度季节性渐变的控制。对大豆-冬小麦田, R 仅 0.16 ($n=79$), 这主要是由于大豆地在 4 月 8 日施有机肥后引发了一系列的

N₂O 排放峰, 造成大豆地 N₂O 排放通量季节变化趋势与温度变化存在一定的偏差所至。

由于试验小区的气温和土温会随降雨迅速下降, 存在“下雨如过冬”的现象, 而 N₂O 排放峰紧接在降雨事件后出现, 因此, 3 试验地均出现主要 N₂O 排放峰峰值位置与温度谷值位置相对应的“表观”现象(图 2)。

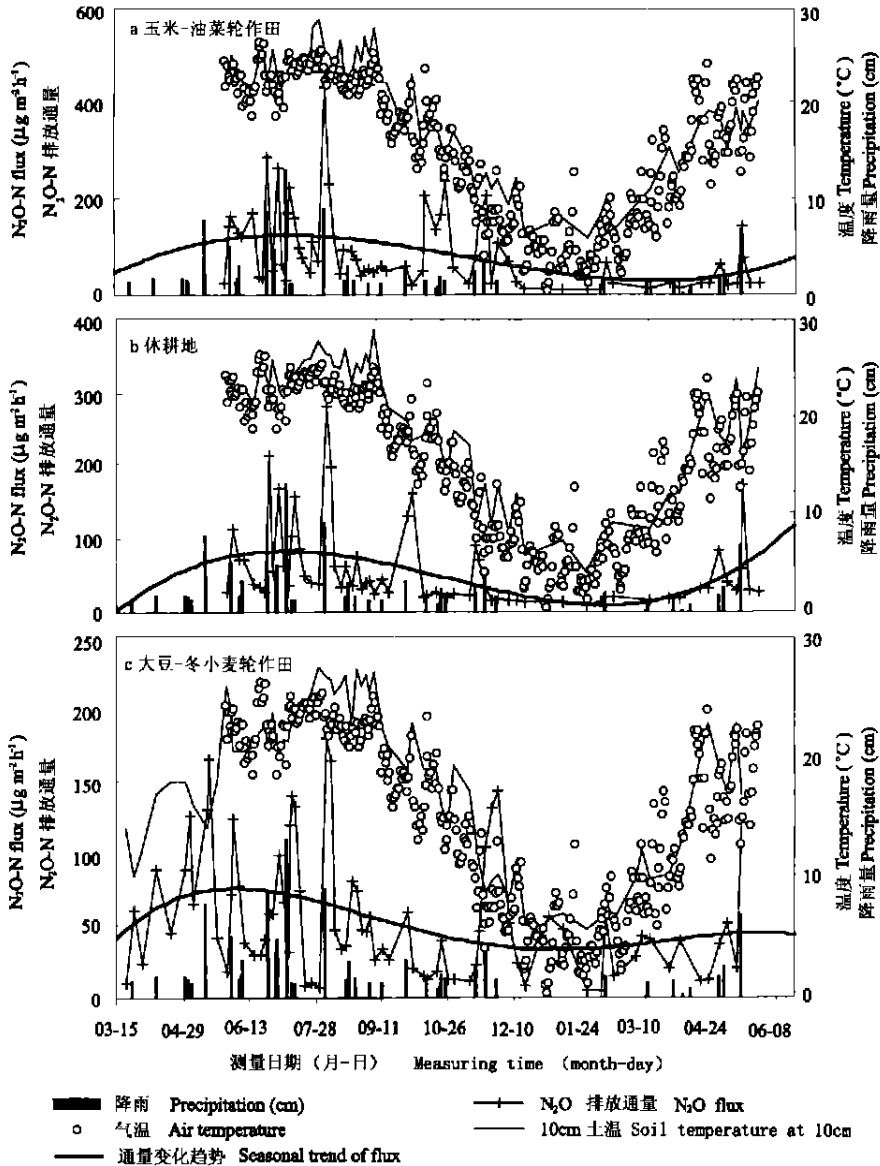


图 2 N₂O 排放通量、温度和降雨的季节变化

Fig.2 Seasonal variation in N₂O fluxes, temperature and precipitation

11 月中旬以后, 3 试验地 N₂O 排放通量均随温度的下降而逐渐减弱。在 12 月中旬至翌年 3 月中旬, 试验地 N₂O 排放通量仅随降雨、翻耕和施肥略呈起伏变化, 这一阶段 10cm

处土温仅维持在 5℃ 以上,而日均气温基本上在 10℃ 以下,因此,存在低排放通量平台。3月中旬至5月底, N₂O 排放通量随温度的回升而逐渐提高。排放通量季节变化趋势线表明,这一阶段休耕地 N₂O 通量对温度回升的响应程度强于油菜地和冬小麦地。3月初以后,油菜地和冬小麦地已无施肥和翻耕,随着作物进入成熟期,土壤中的有效 N(NO₃⁻ 和 NH₄⁺) 被油菜和冬小麦大量吸收,而休耕地由于不存在

作物吸收,经约半年的越冬后,土壤中积累了相对丰富的 C、N 基质,因此,随着温度回升和降雨量增加,其排放 N₂O 的自然响应程度比油菜地和麦地明显。分析表明,油菜地和麦地 N₂O 通量季节变化与 10cm 处土温的相关系数分别为 0.30 和 0.28,不存在指数函数关系。而冬春季休耕地的 N₂O 排放通量对土温的依赖性可用指数函数 $F = Ae^{at}$ 来表示,式中 F 为 N₂O 日排放通量, t 为 10cm 处土温, A 和 a 为常数。如图 3 所示,温度 5℃ < t < 25℃ 时,系数 A 和 a 分别为 8.4083 和 0.0792, N₂O 通量经对数变换后与温度呈显著正相关。图 3 中 18℃ 左右的实际观测值出现了 1 个偏离拟合曲线的较大排放通量奇异点(1996-05-15),这是休耕地经半年越冬后土壤中积累了丰富 C、N 基质,遇 5 月 14 日雨量为 7cm 的降雨后引发的 N₂O 爆发排放^[11]。

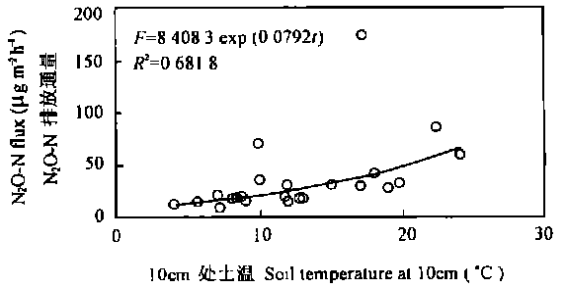


图 3 休耕地 N₂O 排放的土壤温度效应

Fig. 3 Effect of temperature on N₂O flux at fallow land

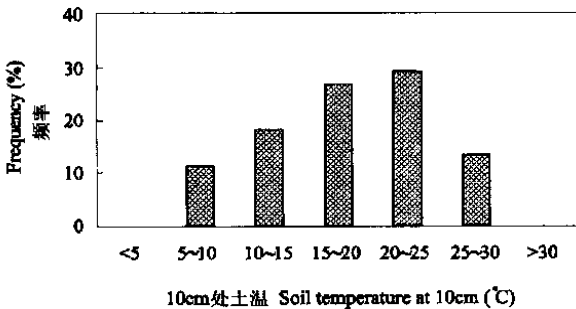


图 4 N₂O 排放峰出现频率随土温的分布

Fig. 4 The frequency distribution of N₂O flux peaks in different soil temperature ranges

上述研究结果表明,温度对亚热带旱作土壤 N₂O 排放的影响效应会随作物种植引起的在施肥和翻耕上的不同而存在一些差异。

2.3 N₂O 排放峰的温度分布

统计表明,3 试验地全部 N₂O 排放峰出现的频率随 10cm 处土温变化呈偏正态分布,57% 的 N₂O 排放峰集中在 15 ~ 25℃ 的温度范围内, > 25℃ 和 < 15℃ 时的频率仅分别为 14% 和 29% (图 4),这分别与实验期内的高温低湿和土温

过低限制了 N₂O 的产生有关。

2.4 气温变化对土壤 N₂O 排放的潜在影响

采用 Li 等建立的 DNDC 模型^[3-5]来评估未来气温变化对试验地 N₂O 排放的潜在影响。DNDC 模型是反映农业土壤生态系统中 C、N 生物地球化学过程的模型,模型以常规的气候、土壤理化性状、施肥和耕作方式等为参数输入项,计算以天为时间步长的农业土壤 N₂O 排放过程和农业土壤季或年的 N₂O 排放量。有关该模型的详细结构、方程、输入参数项见文献[3~5]。

前期研究表明^[8], DNDC 模型能较好地拟合上述 3 试验地的 N_2O 排放通量、0~15cm 土层土壤平均湿度、10cm 处土温、及 NO_3^- 和 NH_4^+ 含量的季节变化, 这为采用 DNDC 模型检验未来气温变化对以 3 试验地为代表的亚热带旱作土壤 N_2O 排放的潜在影响提供了依据。

模型检验的基线参照条件采用实验小区 1995 年的气候、土壤理化性状和各作物生长季节的施肥、翻耕方式等方面的数据。在检验年均气温变化对 N_2O 排放的影响时, 模型其他参数输入项均采用参照条件的数据。考虑到为满足作物的正常生长需要和未来气温变化可能的幅度, 年均气温限制在参照条件的 $\pm 20\%$ 范围内。实验小区 1995 年年均气温 14.7°C , 因此, 模型检验年均气温在 $12.7\sim 16.7^\circ\text{C}$ 的范围内, 气温变化对土壤 N_2O 排放的潜在影响。

检验结果显示, 玉米-油菜轮作田, 休耕地和冬小麦生长季节的日均 N_2O 排放通量均随年均气温升高而升高, 除冬春季休耕地的 N_2O 排放通量对气温变化的响应为随气温升高呈加速增长外, 其余对年均气温变化的响应均接近于线性(图 5)。这与地间观测结果是一致的。对大豆地, 当年均气温升至超过 14.7°C (参照条件) 时, 其生长期日均 N_2O 排放通量反而略微下降。虽然在地间观测到大豆 N_2O 排放通量季节变化与温度间关系不明显, 但对其 N_2O 通量随年均气温升高反而下降的原因尚待进一步研究。

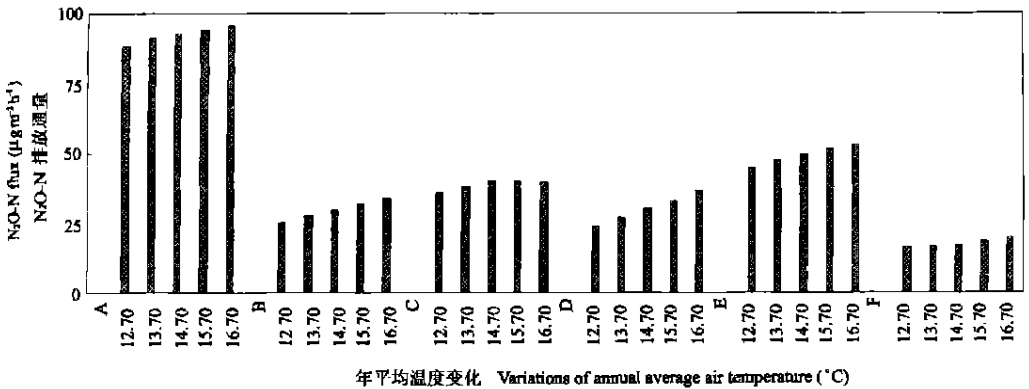


图 5 年均气温变化对试验地日均 N_2O 排放通量的潜在影响

Fig. 5 Potential effect of the change in annual average air temperature on N_2O flux at three experimental lands

图 5 还表明, 油菜地、冬小麦地及冬春季休耕地的 N_2O 排放通量对气温变化的敏感性要强于玉米地和夏秋季休耕地, 尤其是冬春季休耕地受气温变化的影响最为显著。当年均气温从 14.7°C 升至 16.7°C 时, 油菜地、冬小麦地和冬春季休耕地的日均 N_2O 排放通量分别增长了 13.45%、20.99% 和 48.49%, 而玉米和夏秋季休耕地的 N_2O 排放通量仅分别增长了 3.34% 和 9.49%。若年均气温从 14.7°C 降至 12.7°C 时, 仍以冬春季休耕地的 N_2O 排放通量下降幅度最大。在试验小区, 玉米生长期和夏秋季休耕地的平均气温分别在 22.3°C 和 20.2°C , 而油菜和冬小麦生长期及冬春季休耕地的平均气温分别在 10.5°C 、 9.1°C 和 9.8°C , 当温度低于 15°C 时, 单位温度变化对土壤中产生 N_2O 的微生物过程的影

响效应要强于温度高于 15 °C 时的影响^[12]。对南方亚热带旱作生态系统, 由于夏季作物和越冬作物生长季节的平均气温一般分别在 20 °C 以上和 15 °C 以下, 因此, 未来气温变化对越冬作物土壤 N₂O 排放的影响效应要大于夏季作物。而对温带旱作生态系统, Li 等的检验研究表明未来气温变化对夏季和越冬作物土壤的 N₂O 排放均具有重要影响^[9]。

3 结 语

1. 温度是土壤 N₂O 排放通量规律性日变化的最主要控制因素。夏季和越冬作物土壤 N₂O 排放通量规律性日变化中极大值的出现时间分别比温度滞后 2~ 3 小时和 1~ 2 小时。

2. 除大豆地外, 其他作物生长季节和休耕地的 N₂O 排放通量季节变化与温度间均存在一定程度的正相关性, 其中冬春季休耕地的 N₂O 排放通量与温度间存在弱指数函数关系。

3. 试验地全部 N₂O 排放峰出现的频率随 10cm 处土温变化呈偏正态分布, 50% 以上的 N₂O 排放峰集中在 15~ 25 °C 的温度范围内。

4. 除大豆地外, 其余作物生长季节和休耕地的 N₂O 排放通量均随未来年均气温升高而升高, 越冬作物土壤 N₂O 排放通量对气温变化的敏感性要强于夏季作物, 尤以冬春季休耕地受气温变化的影响最为显著。

参 考 文 献

1. 曾江海, 王智平, 张玉铭等. 小麦- 玉米轮作期土壤排放 N₂O 通量及其总量估算. 环境科学, 1995, 16: 32~ 35
2. 郑循华, 王明星, 王跃思等. 温度对农田 N₂O 产生与排放的影响. 环境科学, 1997, 18(5): 1~ 5
3. Li C S, Frolking S, Frolking T A. A model of nitrous oxide evolution from soil driven by rainfall events: I. Model structure and sensitivity. Journal of Geophysical Research, 1992, 97(D9): 9 759~ 9 776
4. Li C S, Frolking S, Frolking T A. A model of nitrous oxide evolution from soil driven by rainfall events: II. Model application. Journal of Geophysical Research, 1992, 97(D9): 9 777~ 9 783
5. Li C S, Frolking S E, Harriss R C, *et al.* Modeling nitrous oxide emissions from agriculture: A Florida case study. Chemosphere, 1994, 28(7): 1 401~ 1 415
6. Li C S, Narayanan V, Harris R C. Model estimates of nitrous oxide emissions from agricultural lands in the United States. Global Biogeochemical Cycles, 1996, 10(2): 297~ 306
7. 徐文彬. 箱技术测量土壤痕量气体排放通量中的误差因素——以 N₂O 为例. 地质地球化学, 1999, 27(3): 111~ 117
8. 徐文彬, 洪业汤, 陈旭晖等. 应用 DNDC 模型估算区域农业土壤 N₂O 排放通量和排放量——以贵州省为例. 环境科学, 2000, 21(2): 11~ 15
9. 王少彬, 宋文质, 苏维瀚. 中国大气中氧化亚氮浓度及土壤排放通量的测定. 见: 王庚辰, 温玉璞编. 温室气体浓度和排放监测及相关过程. 北京: 环境科学出版社, 1996. 327~ 332
10. 黄国宏, 陈冠雄, 黄斌等. 东北旱作生态系统 N₂O 排放通量测定及总量估算. 见: 王庚辰, 温玉璞编. 温室气体浓度和排放监测及相关过程. 北京: 环境科学出版社, 1996. 351~ 357
11. 徐文彬, 洪业汤, 陈旭晖. 贵州省旱田土壤 N₂O 排放及其环境影响因素. 环境科学, 2000, 21(1): 7~ 11
12. Williams E J, Hutchinson G L, Felsenfeld F C. NO_x and N₂O emissions from soil. Global Biogeochemical Cycles, 1992, 6(4): 351~ 388

EFFECT OF TEMPERATURE ON N₂O EMISSIONS FROM SUB-TROPICAL UPLAND SOILS

Xu Wenbin^{1,2} Liu Weiping¹ Liu Guangshen¹

(1 *Institute of Environmental Science, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China*; 2 *State Key Laboratory of Environmental Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550002, China*)

Summary

Fields under corn rape rotation, soybean/winter wheat rotation, and fallow in Guizhou were selected as representative subtropical upland soils for studying seasonal variations in N₂O flux and temperature synchronously. Furthermore, DNDC model was used to assess potential effect of the variation in air temperature in future on N₂O emissions from the fields. The results indicated that temperature was the key factor controlling the diurnal regular variation in N₂O flux. Apart from that from the soybean field, N₂O fluxes from the crop fields and fallow land were positively related with the temperature, and N₂O fluxes from the fallow land in spring and winter were in exponential function with the temperature. DNDC modeling results showed, except from soybean field, N₂O fluxes from all the fields would increase with annual average temperature. The effect of temperature on N₂O fluxes would be greater in spring and winter than in summer and autumn, and from the fallow land than from the others in spring and autumn.

Key words N₂O emission, Temperature, Upland lands, DNDC model