

华北平原典型农田土壤氧化亚氮的排放特征

叶 欣^{1,2}, 李 俊¹, 王迎红³, 刘恩民¹, 李瑞雪⁴, 于 强¹, 陈炳新⁵

(1.中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100100; 2. 福建农业大学资源与环境学院, 福建 福州 350002; 3.中国科学院大气物理研究所大气边界层物理与大气化学国家重点实验室(LAPC), 北京 100029; 4.西南农业大学资源环境学院, 重庆 400716; 5. 山东省禹城市水务局, 山东 德州 251200)

摘 要:采用静态箱法研究了华北平原典型农田土壤 N₂O 通量的日变化、季节变化特征,并分析土壤温度、水分对土壤 N₂O 通量的影响。结果表明,在作物生长季节内,华北平原玉米田、大豆田、棉花田土壤的 N₂O 平均通量分别为 244.3±27.9、177.8±27.1 和 88.2±8.1 mg·m⁻²·h⁻¹。玉米田、大豆田和棉花田土壤 N₂O 排放均呈明显的季节变化,苗期玉米田和大豆田、抽雄吐丝期玉米田及始花期棉花田土壤 N₂O 的释放峰均由施肥所致,始花期大豆田土壤 N₂O 的释放峰主要与大豆自身生理代谢活动及降水有关。玉米田土壤 N₂O 通量的日过程为午后-凌晨双峰型,棉花田土壤 N₂O 通量的日过程变化多样:有白天-夜间双峰型、白天或夜间单峰型、平缓型 4 种。观测到的土壤 N₂O 排放的日变化类型主要受土壤湿度影响,随着土壤湿度降低,土壤 N₂O 排放的日最高值从夜间转至白天,其日较差变小。玉米田、大豆田、棉花田土壤 N₂O 排放通量均随地温增加呈指数增长,并都达到 0.01 显著水平。观测期间玉米田、大豆田、棉花田土壤 N₂O 排放通量与土壤水分相关性均不显著。

关键词:土壤 N₂O 排放; 华北平原; 棉花田; 玉米田; 大豆田; 土壤温度

中图分类号:S152.6 **文献标识码:**A **文章编号:**1672-2043(2005)06-1186-06

Characterization of Emissions of Nitrous Oxide from Soils of Typical Crop Fields in North China Plain

YE Xin^{1,2}, LI Jun¹, WANG Ying-hong³, LIU En-min¹, LI Rui-xue⁴, YU Qiang¹, CHEN Bin-xin⁵

(1. Institute of Geographical Sciences and Natural Resources, Chinese Academy of sciences, Beijing 100100, China; 2. School of Natural Resources and Environmental study, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, China; 3. Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of sciences, Beijing 100029, China; 4. School of Natural Resources and Environmental study, Southwest Chinese Agricultural University, Chongqing 400716, China; 5. Water Bureau of Yucheng City in Shandong Province, Dezhou 251200, China)

Abstract: Diurnal and seasonal variation of soil N₂O fluxes were measured using close chamber method in typical crop fields in North China Plain. The influence of soil temperature and moisture on soil N₂O flux was also discussed. The results showed that soil N₂O fluxes in maize, soybean and cotton fields were 244.3±27.9, 177.8±27.1 and 88.2±8.1 mg·m⁻²·h⁻¹ respectively during growing season. Seasonal variation of soil N₂O flux was obviously in maize, soybean and cotton field. The peaks of soil N₂O emission in maize and soybean field at seedling stage, maize field at blooming stage, and cotton filed at early blooming stage all resulted in fertilization. The peak of soil N₂O emission in soybean field at early blooming stage was mainly related to soybean metabolism and precipitation. Double-peak shaped diurnal soil N₂O flux was shown in the maize field. One peak appeared in daybreak and another in afternoon. Four kinds of diurnal variation of soil N₂O flux were found in the cotton field: double-peaks (daytime and nighttime), single-peak (daytime or nighttime) and no peak shaped diurnal variations. Moisture is the main factor controlling observed diurnal variation of soil N₂O emission. While soil moisture decreased, the appearance of peak of diurnal soil N₂O flux changed from nighttime to daytime and the diurnal range of soil N₂O flux was small. In maize, soybean and cotton fields, soil N₂O emissions increased exponentially with soil temperature. But no correlation was found between N₂O fluxes and soil moisture during the observation period.

Keywords: soil N₂O emission; North China Plain; cotton field; maize field; soybean field; soil temperature

收稿日期: 2005-02-21

基金项目: 国家 973 计划(2002CB412501); 中国科学院知识创新工程重大项目(KZ-CX-SW-01-01B)

作者简介: 叶 欣(1977—), 女, 新疆昌吉市人, 讲师, 主要从事土壤生态方面研究。E-mail: yexin1000@163.com 或 yexin1000@sina.com

联系人: 李 俊 E-mail: lijun@igsnr.ac.cn

氧化亚氮(N_2O)是重要的温室气体之一,其百年增温潜势(GWP)为 CO_2 的 296 倍,在大气中的寿命达 120 a。在平流层中 N_2O 经一系列光化学反应生成 NO_x ,最终导致臭氧层的破坏。对极地冰芯的研究表明,大气中 N_2O 浓度已由工业革命前的 $280 \text{ nL}\cdot\text{L}^{-1}$ 上升至目前的 $314 \text{ nL}\cdot\text{L}^{-1}$,并以每年大约 0.2%~0.3% 的速率增长。大气中的 N_2O 主要来自土壤中微生物的硝化、反硝化作用,海洋、工业生产、生物质燃烧和反刍动物也是 N_2O 的源。 N_2O 的汇主要是平流层的光解作用^[1]。

农田土壤是大气 N_2O 重要的源。许多研究表明,农田土壤 N_2O 排放有明显的日变化和季节变化规律^[2-5],土壤温度、水分和养分的变化是造成上述变化的重要原因。此外,作物类型和生长状况也可能对土壤 N_2O 排放量及其季节分布产生影响。华北平原是我国主要粮食的产区,为获得高产而大量施用氮肥带来一系列环境影响。本研究的目的是通过对华北平原典型农田土壤 N_2O 通量的系统观测,揭示其源的大小及变化规律,并探讨土壤温度、水分和作物对土壤 N_2O 排放的影响,为寻找农田温室气体减排技术提供科学依据。

1 试验条件与方法

1.1 试验地点概况

试验在中国科学院禹城综合实验站 ($36^\circ 57' \text{N}$, $116^\circ 38' \text{E}$,海拔 50.1 m)进行。该站位于山东省禹城市,属于暖温带半湿润半干旱季风气候,年平均气温 13.1°C ,年平均降水量 550 mm,降水季节分配不均匀,多集中于夏季。土壤质地以粉砂和轻壤为主;pH 值较高为 7.9~8;土壤有机质含量较低,为 1.12%;全 N 含量为 0.089%。从自然条件看该站所在地在华北平原具有典型性。

试验于 2003 年在棉花田、玉米田、大豆田进行。棉花地播种前为休闲地。4 月 18 日施复合肥 $150 \text{ kgN}\cdot\text{hm}^{-2}$,随后旋耕并灌水 180 mm。4 月 27 日棉花播种,品种为冀 668,并覆盖地膜,7 月 18 日追施复合肥 $75 \text{ kgN}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。夏玉米、大豆的前茬作物均为冬小麦,冬小麦收获后秸秆直接还田,玉米 6 月 10 日播种,品种为鲁单 981,6 月底和 7 月底分别追施硫酸钾复合肥 33.75 和 $78.75 \text{ kgN}\cdot\text{hm}^{-2}$,8 月 16 日灌水 150 mm;大豆 6 月 30 日播种,品种为齐黄 6 号,苗期追施硫酸钾复合肥 $52.5 \text{ kgN}\cdot\text{hm}^{-2}$,7 月下旬中耕除草,8 月 16 日灌水 150 mm。

1.2 试验方法

采用静态箱/气相色谱(GC)法测定棉花、玉米、大豆田土壤 N_2O 的排放,每块地各 3 个重复。不锈钢观测箱尺寸为 $50 \text{ cm}\times 50 \text{ cm}\times 50 \text{ cm}$,外罩隔热棉被。箱内装有采样管、测温探头和 2 个轴流风扇。不锈钢底座尺寸为 $50 \text{ cm}\times 50 \text{ cm}$,埋入土壤 20 cm。观测时将箱体扣在底座上,用水密封。分别在扣箱后 0、10、20、30 min 用 100 mL 注射器抽取箱内空气,同步测定箱内气温、冠层气温、地温、土壤水分(测墒仪测定)。平时通量观测每周 1~2 次,均在 9:00~10:00 进行。棉花田和玉米田每月进行 1 次日变化观测,白天每隔 2 h 观测 1 次,夜间每隔 3 h 观测 1 次。选择作物主要生育期在底座附近取 0~20 和 20~40 cm 土壤样品,分 5 点取样混合。

硝态氮分析方法:氯化钾提取-紫外光度法;氨态氮分析方法。氯化钾浸提-靛酚蓝比色法。

田间采集的气体样品被很快送到实验室,在 24 h 内由 Agilent 4890D 型气相色谱仪测定气样中的 N_2O 浓度。气相色谱分析方法见文献[6]、[7]。标准气体 N_2O 浓度为 $10 \text{ L}\cdot\text{L}^{-1}$,由国家标准物质研究中心提供。通量计算公式如下:

$$F = \frac{M}{V_0} \times \frac{P}{P_0} \times \frac{T_0}{T} \times \frac{dC_t}{dt} \times h \quad (1)$$

式中: F 为土壤 N_2O 通量 (正值代表排放); M 为 N_2O 的摩尔质量; T_0 、 P_0 和 V_0 分别为标准状态下的空气绝对温度、气压和气体摩尔体积; P 为气压; T 为箱内气温; C_t 为 t 时刻箱内 N_2O 的体积混和比浓度; h 为箱高。

2 结果与讨论

2.1 农田土壤 N_2O 排放日变化

如图 1 所示,在玉米田观测到的 3 次土壤 N_2O 通量日变化均为双峰曲线,午后和凌晨各有 1 次排放高峰。午后的排放峰值与地温最高值出现时间较吻合,但凌晨的排放峰则出现在地温最低的时候。9 月 20 至 21 日棉田土壤 N_2O 通量的日变化也呈双峰曲线, N_2O 排放峰分别出现在午后和子夜前后。6 月 27 至 28 日棉田土壤 N_2O 通量日变化虽隐约呈现双峰曲线,但变化较为平缓。5 月 30 至 31 日和 8 月 20 至 21 日棉田土壤 N_2O 通量日变化均呈单峰曲线,最高值在中午前后,最低值则出现在凌晨, N_2O 排放与地温的昼夜变化较吻合。8 月 4 至 5 日棉田土壤 N_2O 通量的日变化也为单峰曲线,但 N_2O 排放的高峰则出现在

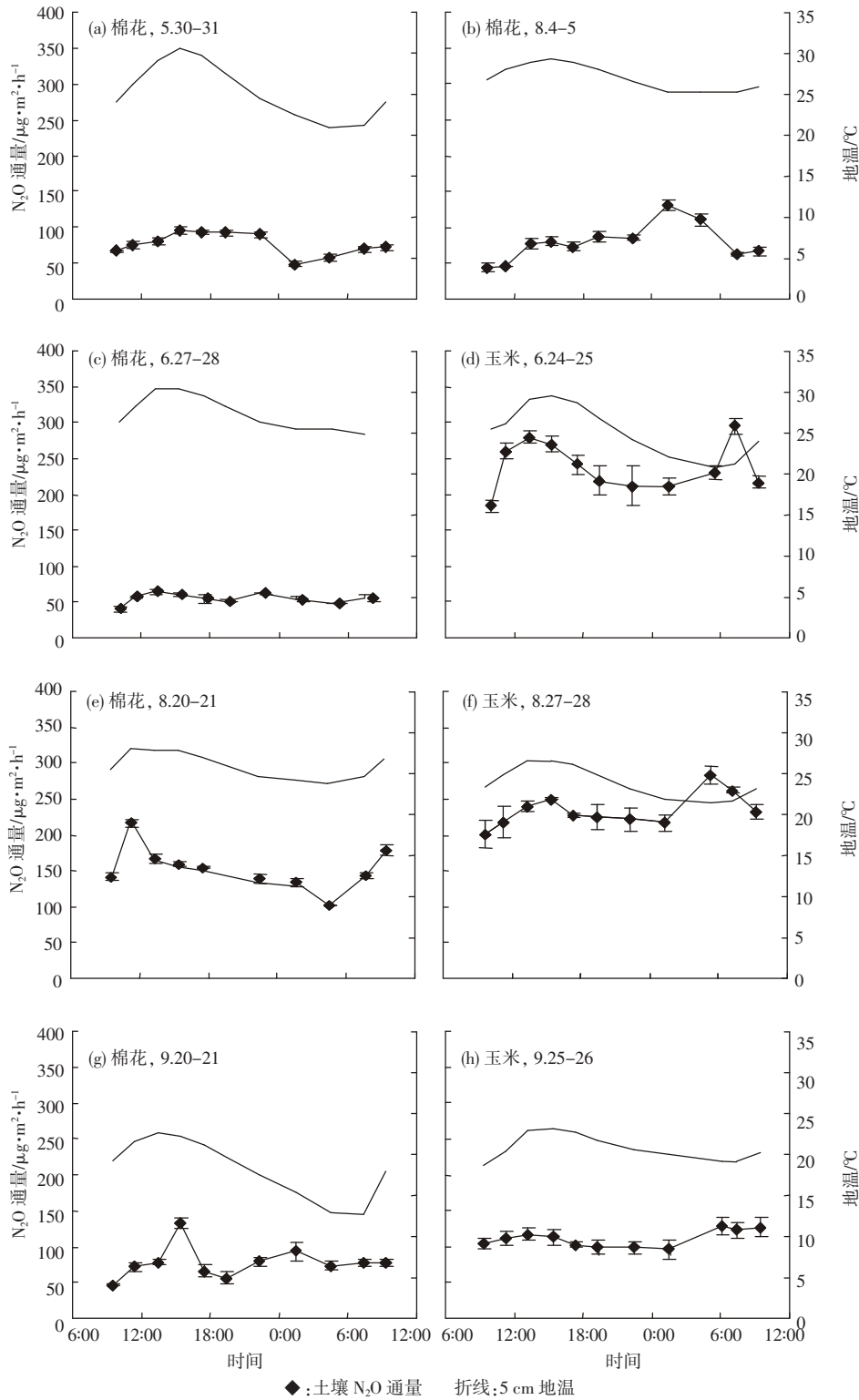


图 1 棉田土壤、玉米土壤 N₂O 通量和地温日变化

Figure 1 Diurnal variation of soil N₂O flux and soil temperature in cotton or maize field

(a, b, c, e and g: cotton field; d, f and h: maize field; ◆: soil N₂O flux; line: soil temperature at depth of 5cm)

半夜。黄国宏等^[3]和宋文质等^[8]在农田也发现过与上述土壤 N₂O 通量日变化类似的峰型，但峰值出现的时间有所不同。

由表 1 可知,棉花田和玉米田除 9 月份日变化观测时的土壤温度较低外,其他各次日变化观测时的日平均土壤温度相差不大。除土壤养分外,土壤 N₂O 排

放的日变型主要受土壤湿度影响在棉花田,土壤湿度由高到低,土壤 N₂O 排放的日变型依次为:夜间单峰型、白天-夜间双峰型、白天单峰型、平缓型。随着土壤湿度的降低,土壤 N₂O 排放的日最高值从夜间转至白天以至最后消失(图 1,表 1)。玉米田的结果与棉花田类似。虽然土壤 N₂O 通量的日变型均为午后-凌晨双峰型(白天-夜间双峰型的变种),但随着土壤湿度降低,通量的峰值变小,通量日较差变小,日变化趋于平缓。

表 1 棉田和玉米田土壤 N₂O 通量日变化类型、日较差及日平均土壤温度、湿度

Table 1 Daily soil N₂O flux, soil temperature and soil moisture in cotton and maize fields

观测地点	日期	N ₂ O 通量日变型	N ₂ O 通量日较差	土壤温度	土壤湿度
			/μg·m ⁻² ·h ⁻¹	/℃	/%
棉花田	5.30-31	白天单峰型	47.1	25.4	23.7
	6.27-28	平缓型	15.6	27.5	18.6
	8.4-5	夜间单峰型	85.5	27.1	32.4
	8.20-21	白天单峰型	127.5	26.0	25.0
	9.20-21	白天-夜间双峰型	86.7	18.4	29.0
玉米田	6.24-25	午后-凌晨双峰型	84.4	25.3	31.3
	8.27-28	午后-凌晨双峰型	80.2	24.0	34.2
	9.25-26	午后-凌晨双峰型	32.8	20.7	28.6

注:土壤温度为日平均 5 cm 地温(℃);土壤湿度为日平均 0~5 cm 土壤体积含水量(%).

在本试验中,多数土壤 N₂O 通量的日过程为白天-夜间双峰型(图 1,表 1),由此推测土壤中可能存在两类产 N₂O 微生物:一类微生物最适温度较高,其最大活性出现在白天;另一类微生物最适温度较低,夏季白天气温较高抑制了微生物的活动,其活性在夜间反而较高。土壤中两类微生物共存可能就是形成土壤在白天、夜间 2 次 N₂O 排放高峰的原因。土壤 N₂O 通量的白天-夜间双峰型日变化是在一定环境条件下形成的。当环境条件如土壤湿度不适宜第 1 类或第 2 类产 N₂O 微生物时,就形成了土壤 N₂O 通量的夜间或白天单峰型日过程。

2.2 农田土壤 N₂O 排放季节变化

玉米田、大豆田和棉花田土壤 N₂O 排放均呈明显的季节变化。玉米苗期追肥大大提高了土壤氮含量,但此时玉米幼苗根系尚未发育成熟,对土壤氮素吸收利用能力低,土壤中多余的有效氮素被微生物利用,产生大量 N₂O,形成玉米田土壤 N₂O 排放的第 1 个高峰。随着玉米生长,对土壤养分的吸收加大,土壤中的有效氮含量降低,土壤 N₂O 排放下降。拔节期追

肥为玉米植株提供了生长所需的养分,同时也为微生物提供了充足的底物,土壤生成、排放的 N₂O 增多。由于仪器原因,未观测到 N₂O 第 2 个排放峰出现的具体时间,估计应在 8 月初。8 月中旬以后,随着地温逐渐降低和土壤中有效氮素的日益消耗,土壤 N₂O 排放呈下降趋势,见图 2a、图 2b。

与玉米田相似:大豆田在苗期(7 月初)和始花期(8 月初)各有一个土壤 N₂O 释放高峰(图 2c)。苗期追肥形成了大豆田土壤 N₂O 的第一个释放峰;第二个释放峰与大豆自身的生理代谢过程有关。开花结荚期大豆生长发育旺盛,固氮能力强,根系向土壤分泌较多 C、N 物质,促进土壤微生物的硝化和反硝化作用,有利于土壤 N₂O 的生成和排放^[3]。此外,除草减少了杂草对土壤有效氮素的吸收;地温增加及降雨带来适宜的土壤水分都有利于土壤反硝化作用的顺利进行,使土壤 N₂O 排放 在 8 月初达到第二个峰值。8 月中旬以后地温逐渐降低,大豆田土壤 N₂O 排放也随之减少,见图 2c。

棉花田土壤 N₂O 排放季节变化规律与玉米田和大豆田明显不同。在棉花生长初期,土壤湿度较低,此时土壤以发生硝化作用为主,N₂O 生成量微弱,呈现低排放平台。进入雨季,土壤湿度增大,嫌气条件下,土壤中的 N₂O 主要由反硝化细菌产生^[9],生成 N₂O 的量增多,间或形成小的 N₂O 的释放峰。7 月 18 日棉田土壤有一次剧烈释放 N₂O 的过程,其通量达到了 638.8 μg·m⁻²·h⁻¹,是整个棉花生长季土壤 N₂O 排放量最大的一次。究其原因,可能是施于地表的肥料直接排放所致。除始花期这次释放峰外,其他时间棉田土壤 N₂O 通量都在较低水平波动,并与地温变化有类似的趋势。

2.3 土壤温度、湿度对 N₂O 排放的影响

温度是影响土壤 N₂O 排放的主要因子之一。土壤 N₂O 排放通常随温度增加呈指数增长^[10]。本试验在玉米、大豆和棉花田也发现了类似的指数关系。3 块农田土壤的 N₂O 通量均与 5 cm 地温呈正相关,并都达到 0.01 显著水平。由于棉田 7 月 18 日的排放高峰可能来自地表肥料的直接排放,对土壤 N₂O 通量与土壤温度和水分进行相关分析时未采用这一天的数据。在一定范围内,升温提高了土壤中硝化细菌和反硝化细菌的活性,促进了硝化、反硝化作用,土壤生成、排放的 N₂O 也随之增多。大豆田土壤 N₂O 排放量随温度升高增长的幅度大于棉田和玉米田土壤,可能与大豆是固氮植物有关。

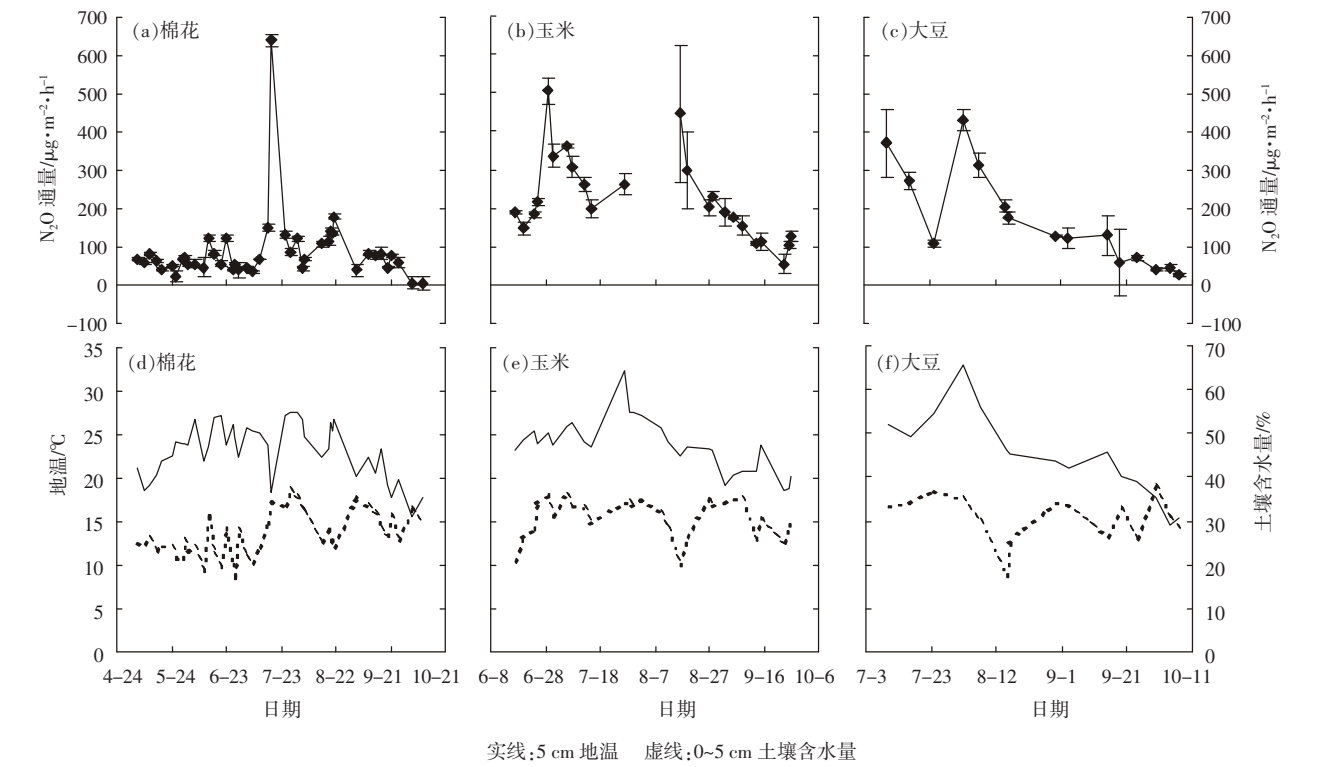


图 2 玉米、大豆和棉花田土壤 N₂O 通量与土壤温度、湿度季节变化

Figure 2 Seasonal variation of soil N₂O flux, soil temperature and soil moisture in cotton, maize or soybean fields

(a, c and e: soil N₂O flux in cotton , maize or soybean fields; b, d and f: soil temperature and moisture in cotton , maize or soybean fields; solid line: soil temperature at depth of 5 cm; broken line: soil moisture at depth of 0~5 cm)

研究表明,土壤 N₂O 排放与土壤水分间也有类似于温度的指数增长关系^[11,12]。本试验中,玉米、大豆和棉花田土壤 N₂O 排放通量随土壤水分增加都有上升趋势,但两者间相关性均不显著(表 2)。除个别时间外,玉米、大豆整个生长季和棉花生长后期土壤水分较充足,对土壤中的反硝化作用和 N₂O 生成均不构成限制因素(图 2d, e 和 f)。

2.4 玉米、大豆和棉花田土壤 N₂O 排放比较

表 2 土壤 N₂O 通量与土壤温度、土壤水分的关系

Table 2 Correlation between soil N₂O fluxes, soil temperature and soil moisture in the crop fields

影响因子	观测地点	关系式	<i>r</i>	<i>n</i>
土壤温度	玉米田	$F=20.596e^{0.0977Ts}$	0.574**	23
	大豆田	$F=3.965e^{0.1528Ts}$	0.881**	15
	棉花田	$F=4.456e^{0.1127Ts}$	0.509**	42
土壤水分	玉米田	$F=99.936+4.077Ws$	0.176	23
	大豆田	$F=123.741+1.407Ws$	0.060	15
	棉花田	$F=27.507+1.743Ws$	0.221	42

注: *F* 为 N₂O 通量 (μg·m⁻²·h⁻¹); *Ts* 为 5 cm 地温, °C; *Ws* 为 0~5 cm 土壤体积含水量, %; *r* 为相关系数; *n* 为样本数。* 表示达到 0.05 显著水平; ** 表示达到 0.01 显著水平。

在作物生长季,玉米田、大豆田、棉花田土壤的 N₂O 平均通量分别为 244.3±27.9、177.8±27.1 和 88.2±8.1 mg·m⁻²·h⁻¹。与其他同类农田的试验结果^[3,13-17]相比,本试验测定的玉米田和大豆田土壤 N₂O 通量偏高,棉花田土壤 N₂O 通量偏低。其原因一方面是由于施肥等农田管理措施不同,另一方面也是不同地区间气候、土壤的差异所致。

从 7 至 9 月平均值看,土壤 N₂O 平均排放量:玉米田>大豆田>棉花田,与它们全生育期内的 N₂O 平均排放量大小顺序相同。3 类农田土壤平均 NH₄⁺-N 含量相差不大,但都远低于其土壤 NO₃⁻-N 含量。这表明土壤 N₂O 的生成主要取决于反硝化作用。从土壤平均 NO₃⁻-N 含量来看,玉米田>棉花田>大豆田,与其土壤 N₂O 排放的顺序有所不同(表 3)。本试验中,玉米田平均土壤 NO₃⁻-N 含量最高,在适宜的土壤水分条件下,反硝化作用较强,土壤 N₂O 排放自然较高。大豆生长期所需 N 量比禾谷类作物高出 4~5 倍,其所需的氮素除了来自根瘤菌固氮外,还来自对土壤中速效 N 的大量吸收。由于土壤中有效氮特别

是硝态氮含量降低,反硝化细菌缺少反硝化作用所需底物,其生成的 N_2O 也较低。棉田土壤 $\text{NO}_3^- \text{--N}$ 含量高 出大豆田近 2 倍,而棉田土壤 N_2O 排放量只有大豆田的 2/3。究其原因,可能是棉田平均土壤水分含量较低,土壤透气性较好,不利于反硝化作用的缘故。

表 3 7 至 9 月玉米、大豆和棉花田土壤 N_2O 通量、土壤水分和土壤有效氮含量比较

Table 3 Comparison of soil N_2O fluxes, soil moisture and soil available nitrogen contents in cotton, soybean and maize fields from July to September

地块	N_2O 通量 / $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$	土壤湿度 /%	土壤 $\text{NH}_4^+ \text{--N}$ 含量/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	土壤 $\text{NO}_3^- \text{--N}$ 含量/ $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$
棉花田	112.5±7.9	26.6	2.3	35.4
大豆田	189.5±30.2	30.8	2.0	13.8
玉米田	242.6±30.7	30.5	2.3	43.0

注:土壤 $\text{NH}_4^+ \text{--N}$ 和 $\text{NO}_3^- \text{--N}$ 含量为 0~40 cm 平均值。

本试验中大豆田和玉米田前茬作物均为小麦。小麦收割后秸秆翻入土壤增加了土壤有机质含量,为土壤中微生物的繁殖与活动提供了有效碳源,从而大大促进了土壤中的硝化及反硝化作用,使土壤 N_2O 排放量增加。而棉田土壤在播种棉花前为休闲地,有效碳源较少可能会影响棉田土壤 N_2O 的排放。此外,玉米、大豆和棉花的根系分泌物不同、光合特性不同以及生育进程的差异都会影响到土壤硝化和反硝化作用的强度,进而影响到土壤生成、排放 N_2O 的量。

3 结论

(1)在作物生长季节内,华北平原玉米田、大豆田、棉花田土壤的 N_2O 平均通量分别为 244.3 ± 27.9 、 177.8 ± 27.1 和 $88.2\pm8.1 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ 。同期比较土壤 N_2O 的平均排放量:玉米田>大豆田>棉花田。

(2)玉米田土壤 N_2O 通量的日变化为午后~凌晨双峰型;棉花田土壤 N_2O 通量的日变化有白天夜间双峰型、白天单峰型、夜间单峰型、平缓型四种类型。观测期间土壤 N_2O 排放的日变型主要受土壤湿度影响。随着土壤湿度降低,土壤 N_2O 排放的日最高值从夜间转至白天,其日较差变小。

(3)玉米田、大豆田和棉花田土壤 N_2O 排放均呈明显的季节变化。苗期玉米田和大豆田、抽雄吐丝期玉米田及始花期棉花田土壤 N_2O 的释放峰均由施肥所致。始花期大豆田土壤 N_2O 的释放峰主要与大豆自身生理代谢活动及降水有关。

(4)玉米田、大豆田和棉花田土壤 N_2O 排放通量

均随地温增加呈指数增长,并都达到 0.01 显著水平。观测期间玉米田、大豆田和棉花田土壤 N_2O 排放通量与土壤水分相关性均不显著。

参考文献:

[1] IPCC. Climate change, The Scientific Bases. Cambridge University Press, UK, 2001.

[2] 曾江海,王志平,张玉铭,等.小麦-玉米轮作期土壤排放 N_2O 通量及总量估算[J].环境科学,1995,16(1):32-35.

[3] 黄国宏,陈冠雄,吴杰,等.东北典型旱作农田 N_2O 和 CH_4 排放通量研究[J].应用生态学报,1995,6(4):383-386.

[4] Zheng, X, Wang M, Wang Y, et al. Impacts of soil moisture on nitrous oxide emission from croplands: a case study on the rice-based agro-ecosystem in southeast china[J]. *Chemosphere-Global Change Science*, 2000, 2(2):207-224.

[5] 刘广深,徐文彬,洪业汤,等.土壤 N_2O 释放通量季节变化的主要环境驱动因素研究[J].矿业学报,2002,22(3):229-234.

[6] Wang Y S, Wang Y H. Quick measurement of CO_2 , CH_4 and N_2O emission from agricultural ecosystem[J]. *Advances In Atmospheric Sciences*, 2003, 20(5): 842-844.

[7] 王跃思,刘广仁,王迎红,等.一台气相色谱仪同时测定陆地生态系统 CO_2 、 CH_4 和 N_2O 排放[J].环境污染治理技术与设备,2003,4(10):84-90.

[8] 宋文质,王少彬,曾江海,等.华北地区旱田土壤氧化亚氮的排放[J].环境科学进展,1997,5(4):49-55.

[9] Bremner J M. Source of nitrous oxide in soils[J]. *Nutrient Cycling in Agro-ecosystems*, 1997, 49:7-16.

[10] 郑循华,王明星,王跃思,等.温度对农田 N_2O 产生与排放的影响[J].环境科学,1997,18(5):1-5.

[11] 郑循华,王明星,王跃思,等.稻麦轮作生态系统中土壤湿度对 N_2O 产生与排放的影响[J].应用生态学报,1996,7(3):273-279.

[12] Dobble K E, Smith K A. Nitrous emission factors for agricultural soils in Great Britain: the impact of soil water-filled pore space and other controlling variables[J]. *Global Change Biology*, 2003, 9:204-218.

[13] 王少彬,宋文质,苏维瀚,等.玉米地氮肥释放 N_2O 的研究[J].农村生态环境,1994,10(4):12-14.

[14] 徐华,邢光熹,蔡祖聪,等.土壤质地对小麦和棉花田 N_2O 排放的影响[J].农业环境保护,2000,19(1):1-3.

[15] Ruser R, Flessa H, Schilling R. Effect of crop-specific field management and N fertilization on N_2O emission from a fine-loamy soil [J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2001, 59:177-191.

[16] 李俊,于沪宁,于强,等.农田 N_2O 通量测定方法分析[J].地学前沿,2002,9(2):377-385.

[17] 熊正琴,邢光熹,鹤田治雄,等.种植夏季豆科作物对旱地氧化亚氮排放贡献的研究[J].中国农业科学,2002,35(9):1104-1108.

致谢:中国科学院大气物理研究所刘广仁高工、博士生孙扬在野外观测仪器安装与维护方面给予很大帮助,王跃思研究员在本文修改过程中提出宝贵意见,中国科学院禹城综合实验站对本研究给予大力支持,特此致谢。