

轮作制度对农田氧化亚氮排放的影响及驱动因子

陈书涛¹, 黄耀^{1,2}, 郑循华², 陈玉泉³

(¹南京农业大学资源与环境科学学院, 南京 210095; ²中国科学院大气物理研究所大气边界层物理和大气化学国家重点实验室, 北京 100029;

³江苏省农业科学院农业资源与环境研究中心, 南京 210014)

摘要: 于 2003 年 6 月至 2004 年 5 月进行田间试验, 2003 年夏种植大豆、玉米和水稻, 后季种植冬小麦。观测项目包括农田 N₂O 排放、土壤温度、湿度及生物学因子。观测结果表明, 在不同的轮作方式中, 玉米(施氮)-小麦(施氮)轮作农田的 N₂O 年度排放量最高, 为 (18.5 ± 0.7) kgN·ha⁻¹; 大豆(不施氮)-小麦(施氮)处理次之, 为 (13.2 ± 0.4) kgN·ha⁻¹; 水稻(施氮)-小麦(施氮)轮作最低, 为 (11.7 ± 0.7) kgN·ha⁻¹, 三者之间存在极显著差异 ($P=0.001$)。相对于耕翻处理, 稻茬麦田播前免耕在冬前促进了 N₂O 排放 ($P<0.001$), 但并未增加季节性排放总量 ($P>0.1$)。大豆、玉米、水稻、小麦田 N₂O 通量的自然对数值 (y) 与土壤温度 (T)、湿度 (W) 和叶面积指数 (L) 的关系可用逐步回归方程 $y=a \cdot W+b \cdot T+c \cdot L+d$ 表示 (a 、 b 、 c 、 d 为回归系数), 其中玉米田 y 与 L 关系不明显, c 值为 0; 大豆田 y 与 W 、 T 关系不显著, $a=0$, $b=0$; 灌溉稻田 a 值为 0, 且 y 与 L 关系不明显。大豆、水稻、小麦田 N₂O 通量均与生态系统呼吸速率呈极显著正相关关系 ($P<0.0001$), 而玉米田不存在类似关系。

关键词: 氧化亚氮; 轮作制度; 土壤温度; 土壤湿度; 叶面积指数

Nitrous Oxide Emission from Cropland and Its Driving Factors Under Different Crop Rotations

CHEN Shu-tao¹, HUANG Yao^{1,2}, ZHENG Xun-hua², CHEN Yu-quan³

(¹College of Resources and Environmental Sciences, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095; ²State Key Laboratory of

Atmospheric Boundary Layer Physics and Atmospheric Chemistry Institute of Atmospheric Physics,

Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029; ³Agricultural Resource and Environmental Research Center,

Jiangsu Academy of Agricultural Sciences, Nanjing 210014)

Abstract: Field experiments were carried out from June 2003 to May 2004. Three crops of maize, soybean and rice were planted in summer season of 2003 followed by winter wheat. A static opaque chamber-GC technique was used to detect the emissions of N₂O and CO₂ *in situ*. Soil temperature, moisture and relevant crop parameters were measured. Results showed that there was a significant difference in the annual N₂O emissions from different rotation plots. Higher N₂O emission was observed in the plot of maize-wheat rotation with an annual amount of (18.5 ± 0.7) kgN·ha⁻¹. Lower N₂O emissions were found in the plots of rice-wheat and soybean-wheat rotation with the annual amounts of (11.7 ± 0.7) kgN·ha⁻¹ and (13.2 ± 0.4) kgN·ha⁻¹, respectively. The soybean-growing season did not receive any additional fertilizer in the soybean-wheat rotation. In the rice-wheat plot, no-plowing practice before wheat sowing enhanced N₂O emission significantly ($P<0.001$) in wheat-growing season from sowing to the winter as compared with that from the plowing plot, while no significant increase was observed over the wheat-growing season. A further investigation suggests that a stepwise regression function of $y=a \cdot W+b \cdot T+c \cdot L+d$ can be employed to quantify the influence of soil moisture (W), temperature (T) and leave area index (L) on N₂O emission. The y is expressed as $\ln(\text{FLUX}_{\text{N}_2\text{O}})$. The function did not show significant correlation between y and L for the maize plot, and thus $c=0$. The y did not correlate with W and T for the soybean plot, and thus $a=0$ and $b=0$. In the irrigated rice paddy, the y did not correlate with L . In addition, N₂O emission was generally

收稿日期: 2005-04-22

基金项目: 中国科学院知识创新工程重大项目 (KZCX1-SW-01-13)

作者简介: 陈书涛 (1978-), 男, 山东章丘人, 博士研究生, 主要从事温室气体研究。Tel: 025-84396406; E-mail: chenstyf@yahoo.com.cn。黄耀为通讯作者, Tel: 010-82074294; E-mail: huangy@mail.iap.ac.cn

correlated to ecosystem respiratory rate for the plots of soybean, rice and wheat, while no significant correlation was found for the maize plot.

Key words: Nitrous oxide; Rotation method; Soil temperature; Soil moisture; LAI

温室气体所导致的全球变暖已引起国际社会的广泛关注。 N_2O 是重要的温室气体之一, 农田生态系统是重要的 N_2O 排放源^[1]。IPCC(intergovernmental panel on climate change) 推荐将化肥 N 乘以系数(1.25±1)% 以估算农田 N_2O 的直接排放^[2], 并未将灌溉方式、作物类型、耕作措施和气候等因素考虑在内。事实上, 这些因素是导致 N_2O 排放巨大变异的重要来源^[3]。不同植物种类(如 C4 作物、豆科作物、水田作物)的生理特性、营养和水分利用率不同, 这些差异造成的土壤有机质积累、分解速率以及土壤-作物系统氮营养循环规律多样性^[4-6], 是影响 N_2O 排放的重要因素, 种植这些作物的农田土壤 N_2O 产生/排放可能存在不同的规律。同时, 作物本身产生和传输 N_2O 的能力也因植物类型而异^[7]。在施用化肥以及选择不同耕作措施(如免耕、翻耕)的情况下, 作物类型与这两因素的交互影响可能会使其关系更为复杂。玉米、大豆和水稻为华东地区的主要秋熟作物, 尽管人们对该区农田 N_2O 的排放进行了一定的研究^[8], 但关于此地区不同作物轮作对农田 N_2O 排放影响的研究尚未见之, 其它地区关于这方面的研究也较为鲜见^[9]。本研究针对大豆-小麦、玉米-小麦和水稻-小麦 3 种轮作制度, 选择不同的氮肥施用和耕作方式, 试图研究不同轮作方式下农田 N_2O 排放的差异; 前茬作物类型和施肥对后季农田 N_2O 排放是否有影响; 耕作措施对 N_2O 排放是否有影响; 土壤水、热等因子的变异与 N_2O 排放的关系。以求更准确的估算农田 N_2O 排放量。

1 材料与方法

1.1 试验点概况

大田试验在南京近郊江苏省农业科学院(32.0°N, 118.8°E)进行。该地区属典型的长江中下游亚热带季风气候, 年平均降水量 1 107 mm, 平均气温 15.6℃。试验地土壤基本理化性质为: >0.02 mm 砂粒含量 29.1%、容重 1.27 g·cm⁻³、pH(H₂O) 6.1, 有机质含量为 16.7 g·kg⁻¹、全氮 1.1 g·kg⁻¹, 速效磷 12.0 mg·kg⁻¹, 速效钾 116.4 mg·kg⁻¹。

1.2 试验设计

大田试验于 2003 年 6 月至 2004 年 5 月进行。秋熟作物为大豆、玉米和水稻, 生长季为 2003 年 6 月至

10 月。收获后种植小麦, 至次年 5 月底收获。试验设计及处理见表 1。各处理小区面积为 10 m×20 m, 在小区内设置 3 个采样重复^[8]。翻耕处理在耕翻后进行人工整平, 保持土壤均一性, 免耕处理用一薄层土覆种以保证出苗, 用除草剂控制杂草。

大豆品种为南农 88-31。播种、出苗、开花和成熟日期分别为 2003 年 6/9、6/16、7/14 和 10/21。玉米品种为苏玉(糯)一号。播种、出苗、抽雄和成熟日期分别为 6/9、6/16、7/31 和 9/10。水稻品种为武运粳 7 号。播种、移栽、抽穗、成熟日期和烤田期分别为 5/20、6/20、9/3、10/20 和 7/26~8/1。水稻烤田期后以浅水灌溉和湿润灌溉为主。大豆地未施氮肥。玉米地氮肥(尿素)分苗肥和穗肥 2 次施入, 比例为 0.4 : 0.6。水稻田氮肥(尿素)分基肥、分蘖肥和穗肥 3 次施入, 比例为 0.4 : 0.4 : 0.2。过磷酸钙和氯化钾作为基肥于旱地作物播种及水稻移栽前一次性施入。

供试小麦品种为扬麦 158。播种、出苗、越冬、返青、拔节、孕穗、成熟日期分别为 2003/11/4、11/19、12/20、2004/2/10、3/10、4/8、5/29。在前茬作物为大豆和玉米的麦田均分别设置无氮和施氮处理小区; 前茬作物为水稻的田块于小麦播种前划分为常规旋耕(深度 15 cm 左右)和免耕处理(表 1)。氮肥(尿素)分基肥、返青肥和拔节孕穗肥 3 次施入, 比例为 0.30 : 0.45 : 0.25。过磷酸钙和氯化钾作为基肥于播种前一次性施入。

1.3 气体样品采集与分析

气体样品的采集使用不锈钢静态箱。采样箱横截面积为 0.5 m×0.5 m, 箱体外侧包有海绵和锡箔纸以隔热, 箱体高度随作物高度而增加。分别于大豆、玉米、小麦播种期和水稻移栽期在各试验小区放置并固定不锈钢底座。采样时将采样箱罩在该底座上并注水密封, 箱内装有微型风扇以保持气体均匀混合^[10]。

在玉米、大豆、小麦播种和水稻移栽后直到作物成熟每周采集气样 1 次。水稻烤田期隔天采样 1 次, 小麦翻耕后 10 d 内每天采样 1 次, 以观测这些阶段的脉冲排放。各采样点每次采样 5 个, 每个间隔 5 min, 样品量为 60 ml。采集的气样当天在实验室用 Agilent 4890D 气相色谱仪分析 N_2O 浓度, 同时分析 CO_2 浓度, 以研究 N_2O 排放与生态系统呼吸的关系。载气为

表 1 2003~2004 轮作周期田间试验及处理

Table 1 Field experiments and treatments over 2003-2004 cropping rotation

秋熟作物 (生长季 2003.6~2003.10)			夏熟作物 (生长季 2003.11~2004.5)			
Autumn harvest crops (June to Oct. 2003)			Summer harvest crop (Nov. 2003 to May 2004)			
作物 Crop	代码 Code	氮肥施用量 Fertilizer (kg·ha ⁻¹)	作物 Crop	代码 Code	氮肥施用量 Fertilizer (kg·ha ⁻¹)	播前耕作 Plowing
大豆 Soybean	S0	0	冬小麦 Winter wheat	S0t	0	翻耕 Plowing
玉米 Maize	MN	300	冬小麦 Winter wheat	SNt	200	翻耕 Plowing
水稻 Rice	RN	300	冬小麦 Winter wheat	M0t	0	翻耕 Plowing
			冬小麦 Winter wheat	MNt	200	翻耕 Plowing
			冬小麦 Winter wheat	RNt	200	翻耕 Plowing
			冬小麦 Winter wheat	RNn	200	免耕 Non-plowing

99.999%高纯氮,柱温 55℃,N₂O 检测器为 ECD,检测温度 330℃,CO₂ 在镍触媒催化下转化为 CH₄,继而以 FID 检测器测定,检测温度 200℃,用 HP 软件分析求得气体的浓度^[11]。通过对每组 5 个样品的 N₂O 和 CO₂ 混合浓度与相对应的采样间隔时间(0、5、10、15、20 min)进行直线回归,可求得该采样点目标气体的排放速率。继而根据大气压力、气温、普适气体常数、采样箱的有效高度、目标气体分子量等,求得单位面积的排放量^[10]。

1.4 土壤温度、湿度及生物学指标测定

整个轮作季节采用 Temp Log 每隔 1 h 自动记录试验地土壤(约 10 cm)温度,每次气体样品采集的同时,采用 MPM-160 水分计测定旱地土壤湿度。定期测定作物叶面积指数(LAI)、绿叶干重等生物学指标。

2 结果与分析

2.1 N₂O 排放季节动态

在整个轮作周期内,土壤温度的动态变化与当地气温的变化趋势一致,不同种植制度下的土壤温度差异较小(图 1-d)。大豆田和玉米田土壤湿度(WFPS)的季节变化趋势基本一致,6 月下旬至 7 月下旬、8 月下旬、9 月下旬湿度较高,8 月中旬、9 月中旬较低(图 1-a、1-b)。后茬麦田在越冬期、2 月上旬和 4 月中旬土壤湿度较低,其余大部分采样日均较高(图 1-a、1-b、1-c)。施肥与否对麦田湿度无影响。但前茬为水稻的麦田土壤湿度(图 1-c)明显高于前茬为旱地作物的麦田(图 1-a、1-b),免耕麦田的土壤湿度大于翻耕的麦田(图 1-c)。

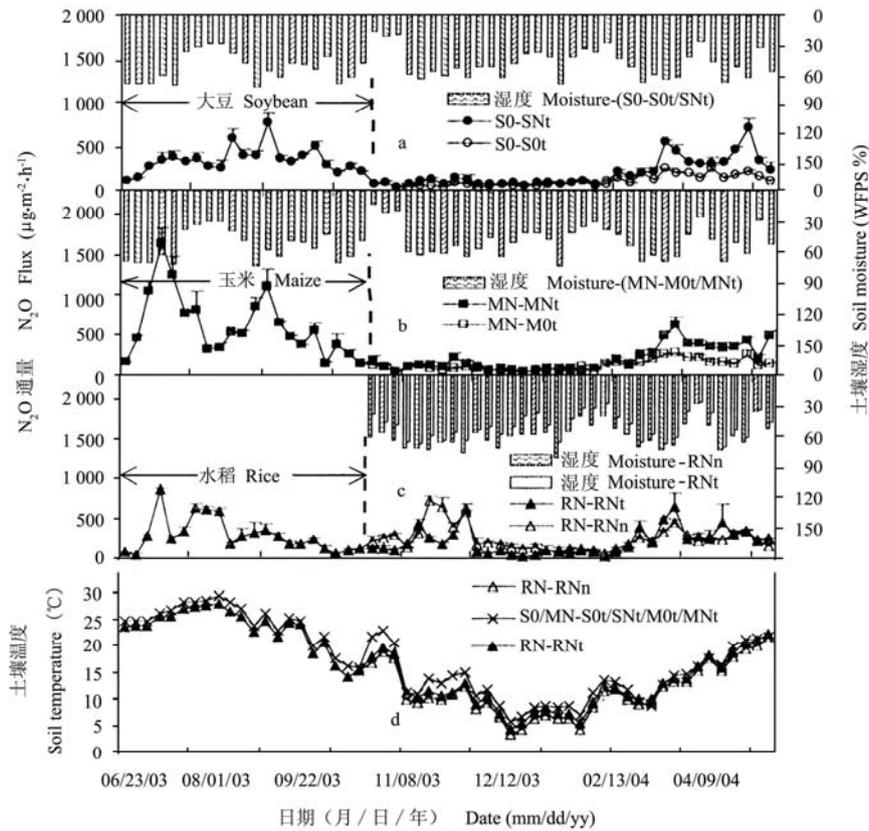
大豆和玉米田的 N₂O 排放通量普遍高于其后茬麦田的排放量(图 1-a、1-b)。大豆田 N₂O 排放在整个生长季内的变异较小,仅生长中期的排放较高(图 1-a),此阶段作物的生理活性较强,固氮作用旺盛,

可能是 N₂O 排放较高的主要原因。与大豆田 N₂O 排放的季节性变化相比,玉米田 N₂O 排放相对更高,自出苗后,玉米田 N₂O 排放逐渐增加,至 7 月中旬出现排放高峰,其后总体呈下降趋势,但在 8 月下旬出现较高的排放峰值(图 1-b),其可能原因是穗肥的施用及同期土壤温、湿度相对较高(图 1-d)。在 9 月中旬玉米收获后,植物的根茬可作为硝化和反硝化微生物的营养^[12],故而 N₂O 排放通量仍较高。从这两种作物收获后到小麦返青阶段,田间 N₂O 排放量相对较低,基肥的施用并未导致 SNt 和 MNt 两处理 N₂O 排放的明显增加。在小麦拔节(3/10)至成熟期(5/29),S0t、SNt、M0t 和 MNt 处理的 N₂O 排放均有所增加,其中又以 SNt 和 MNt 两处理尤为明显(图 1-a、1-b),拔节后,土壤温度持续上升(图 1-d),小麦生长速度加快,这说明温度和作物生长对麦田 N₂O 排放的季节性变化有重要影响。

水稻田在 7 月中旬田间排水及 7/26~8/1 脱水烤田期间出现两次排放高峰,8 月下旬及其后的干湿交替期间 N₂O 排放也较高(图 1-c),在后季小麦播种至其后 40 d 左右 N₂O 有很明显的排放峰值,这可能是由于其土壤湿度显著高于前茬为旱地的麦田(图 1-a、1-b、1-c)所致,特别是免耕麦田土壤湿度更高,且土壤透气性大大低于翻耕麦田,土壤厌氧性增强,故而 N₂O 通量相对更大^[13,14]。与前茬为旱地作物的麦田类似,在小麦拔节至成熟阶段 N₂O 排放较高。

2.2 轮作方式、施肥和免耕对 N₂O 排放的影响

大豆-小麦、玉米-小麦和水稻-小麦为华东地区常见的轮作方式。方差分析结果表明,这 3 种轮作方式的 N₂O 排放总量存在极显著差异($P=0.001$),S0-SNt、MN-MNt 和 RN-RNt 轮作方式的年排放总量分别为(13.2±0.4) kgN·ha⁻¹、(18.5±0.7) kgN·ha⁻¹和(11.7±0.7) kgN·ha⁻¹。排放总量的不同主要来自秋熟作物生长季排放量的差异($P<0.001$)。大豆、玉米和水稻田的 N₂O



a. “湿度-(S0-S0t/SNt)”: 夏季 S0 的湿度, 麦季 S0t 及 SNt 两处理平均湿度。b. “MN-M0t/MNt” 示例方式同图 1-a。d. “S0/MN-S0t/SNt/M0t/MNt”: 夏季 S0 及 MN 平均温度, 麦季 S0t/SNt/M0t/MNt 平均温度
 “Moisture-(S0-S0t/SNt)” in Fig. 1-a: moisture of S0; mean moisture of S0t and SNt. “MN-M0t/MNt” in Fig. 1-b: similar to Fig. 1-a. “S0/MN-S0t/SNt/M0t/MNt” in Fig. 1-d: mean temperature of S0/MN, mean temperature of S0t/SNt/M0t/MNt

图 1 N₂O 排放通量、土壤温度和土壤湿度的季节动态

Fig. 1 Seasonal dynamics of N₂O flux, soil temperature and moisture

排放量分别为(6.4±0.1)kgN·ha⁻¹、(11.6±1.1)kgN·ha⁻¹和(4.8±0.3) kgN·ha⁻¹, 而后茬麦田 (SNt、MNt、RNt) 的 N₂O 排放无显著差异 (P>0.1) (表 2)。这说明秋熟作物的类型和水分条件 (旱地和灌溉稻田) 并不影响后季施氮肥麦田的 N₂O 排放。值得注意的是

C4 作物 (玉米) 的 N₂O 排放较高, 这或许与 C4 作物的光合效率高, 通过根系分泌物提供给土壤微生物的营养亦较多有关^[4,5,12]。

由表 2 可见, 秋熟作物为大豆 (不施氮) 和玉米 (施氮) 时, 后季不施氮肥麦田的 N₂O 排放分别为(4.0

表 2 不同处理下 N₂O 季节排放总量

Table 2 Seasonal amount of N₂O emission in different treatments (kgN·ha⁻¹)

秋熟作物 (生长季 2003.6~2003.10)				夏熟作物 (生长季 2003.11~2004.5)				轮作周期	
Autumn harvest crops (June to Oct. 2003)				Summer harvest crops (Nov. 2003 to May 2004)				Rotation period	
作物	代码	平均值	标准误	作物	代码	平均值	标准误	平均值	标准误
Crop	Code	Average	SE	Crop	Code	Average	SE	Average	SE
大豆	S0	6.4	0.1	冬小麦	S0t	4.0	0.1	10.4	0.1
Soybean				Winter wheat	SNt	6.8	0.4	13.2	0.4
玉米	MN	11.6	1.1	冬小麦	M0t	4.2	0.1	15.8	1.1
Maize				Winter wheat	MNt	6.9	0.4	18.5	0.7
水稻	RN	4.8	0.3	冬小麦	RNt	6.9	0.4	11.7	0.7
Rice				Winter wheat	RNn	7.3	0.1	12.1	0.2

± 0.1) $\text{kgN}\cdot\text{ha}^{-1}$ (S0t) 和 $(4.2\pm 0.1) \text{kgN}\cdot\text{ha}^{-1}$ (M0t), 无显著差异 ($P > 0.1$); 施氮肥麦田的 N_2O 排放分别为 $(6.8\pm 0.4) \text{kgN}\cdot\text{ha}^{-1}$ (SNt) 和 $(6.9\pm 0.4) \text{kgN}\cdot\text{ha}^{-1}$ (MNt), 亦无显著差异 ($P > 0.1$)。与常规翻耕相比, 冬小麦播前免耕在越冬前促进 N_2O 排放 ($P < 0.001$) (图 1-c), 就整个小麦生长季而言, 免耕处理的 N_2O 排放量略高于翻耕处理 (表 2), 但二者间并无显著差异 ($P > 0.1$)。

2.3 土壤水热条件和作物生长对 N_2O 排放的影响

为消除影响因子间的相互作用, 采用偏相关分析方法对 N_2O 排放通量与土壤温度和湿度分别进行相关分析。结果表明, 大部分处理的排放通量与同期土壤温度和土壤湿度显著相关 (表 3)。

以 15°C 时各个旱地农田 N_2O 通量为基准, 将其它温度下的通量与之相比, 可得标准化 N_2O 通量^[15]。总体而言, 除玉米田外, 种植不同作物的旱地农田标准化 N_2O 排放量与土壤温度呈极显著的指数关系, 其温度系数 Q_{10} 值为 2.5, 即温度每升高 10°C , N_2O 通量将变为原来的 2.5 倍; 玉米田 N_2O 通量虽然与温度之间亦存在类似关系, 但标准化通量普遍较大 (图 2-b), 考虑到玉米为 C4 作物, 同样温度下的光合利用效率高, 生理活性强^[4,5], 通量对温度的响应可能存在不同的规律。在整个轮作期内, 农田 N_2O 排放与土壤湿度之间不存在显著的关系, 但小麦生长季的 N_2O 排放与湿度存在直接相关关系 (表 3), 前茬种植方式可能会改变土壤湿度的作用规律。

表 3 不同处理下 N_2O 排放通量与土壤温、湿度的偏相关分析

Table 3 Partial correlation between N_2O emission and soil temperature, moisture under different treatments

处理 Treatments	土壤温度 Soil temperature ($^\circ\text{C}$)		土壤湿度 Soil moisture (WFPS %)	
	<i>r</i>	<i>P</i>	<i>r</i>	<i>P</i>
S0	0.223	0.344	-0.035	0.883
MN	0.598	0.005	0.563	0.010
RN	0.587	0.005	-	-
S0t	0.425	0.012	0.360	0.036
SNt	0.566	0.000	0.467	0.005
M0t	0.454	0.007	0.388	0.023
MNt	0.611	0.000	0.489	0.003
RNn	0.349	0.043	0.458	0.006
RNt	0.485	0.004	0.618	0.000

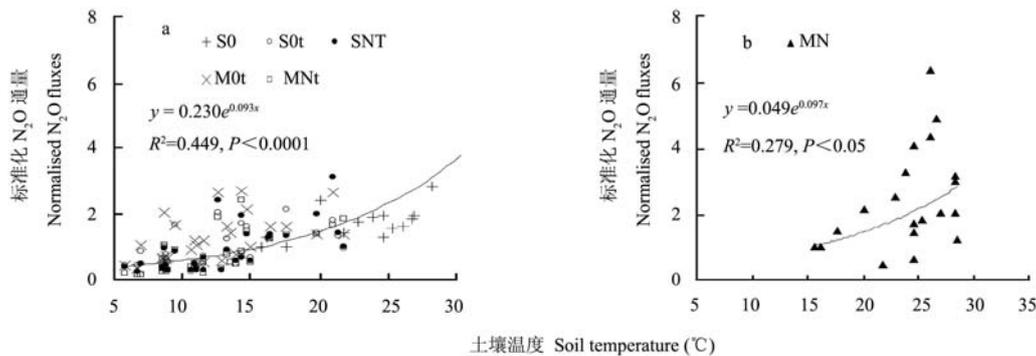


图 2 旱地 N_2O 排放与土壤温度的关系

Fig. 2 Relationship between N_2O emission and soil temperature in upland

除土壤温度、湿度外, 植物生长对 N_2O 排放有重要影响^[16]。令 $y = \ln(\text{FLUX}_{\text{N}_2\text{O}})$, 其与 W (土壤充水孔隙度, WFPS, %)、 T (土壤温度, $^\circ\text{C}$)、 L (作物叶面积指数 LAI) 的相关方程为 $y = a \cdot W + b \cdot T + c \cdot L + d$ 。为剔除对 N_2O 排放影响不显著的因子, 采用软件

SYSTAT10 进行逐步回归拟合, 各参数及方程的统计检验结果见表 4。

由表 4 可见, 麦田 N_2O 排放受土壤温度、湿度和 LAI 的影响均比较大; 玉米田 N_2O 排放受土壤水热因子的影响较大, 而与 LAI 无显著相关; LAI 的变化对

大豆田 N_2O 排放有重要影响, 而土壤温度、湿度则不是主控因子; 稻田 N_2O 排放则主要与温度有关, 与 LAI 关系不显著。对麦田 N_2O 排放与温度、湿度和 LAI 三因子作进一步标准化回归以确定各因子对 N_2O 影响的大小, 可得标准化回归系数 $a=0.35$ 、 $b=0.59$ 、

$c=0.62$ 。这表明三因子对麦田 N_2O 排放季节变异的影响程度为 $LAI > 温度 > 湿度$ 。同样, 对玉米田 N_2O 排放与湿度、温度进行标准化回归, 可得标准化回归系数 $a=0.60$ 、 $b=0.74$ 。这表明在回归方程中温度的影响大于湿度。

表 4 y 与土壤湿度、土壤温度及 LAI 的逐步回归方程参数

Table 4 Parameters in stepwise regression function of y against soil temperature, moisture and LAI

作物类型 Crop types	方程参数 Parameters for functions				统计参数 Parameters for statistics				
	a	b	c	d	n	R^2	F	P	
大豆 Soybean	NS	NS	0.072	2.242	21	0.552	25.63	<0.001	
玉米 Maize	0.013	0.058	NS	0.552	21	0.428	8.47	=0.003	
水稻 Rice	0	0.057	NS	0.956	21	0.401	14.37	=0.001	
小麦 Wheat	0.006	0.042	0.126	1.034	90	0.704	71.65	<0.0001	

稻田由于淹水, a 值取 0。某因子进入逐步回归方程的标准为 $P < 0.05$, NS 表示此参数对应的因子在逐步回归方程中对因变量的影响不显著 ($P > 0.05$), 其余参数对因变量的影响均达显著水平 ($P < 0.05$)

The value of a is zero as the rice paddy was flooded. The criterion that a certain factor is accepted in the stepwise regression is $P < 0.05$, NS means the corresponding factor of the parameter has no significant effect on the dependent variable in the stepwise function ($P > 0.05$), and other corresponding factors of the parameters are significant ($P < 0.05$)

以往的农田 N_2O 模型大多针对土壤过程而未考虑作物因素^[2,17,18]。本研究表明除土壤因素外, 作物的作用不可忽视。已有研究指出, 植物可作为 N_2O 的排放通道并且植物自身能释放 N_2O ^[7,19~22], 且植物的这种作用与作物的生理活性有密切关系^[7,20]。LAI 是表征作物生长状况的重要指标, 可由作物绿叶干重求得, 而单位面积上作物绿叶重量的大小则反映了氮含量的高低和生理活性的强弱^[23]。由于小麦、大豆 LAI 对 N_2O 的排放有重要影响 (表 4), 因此, 在模拟麦田、大豆田 N_2O 排放时 LAI 是一个需要考虑的因子。

由表 4 可见, 3 种秋熟作物回归方程的决定系数 (R^2) 在 0.4~0.6 之间, 小麦的 R^2 为 0.7, 且 P 值达极显著水平, 这意味着 N_2O 排放的 40%~60% 和 70%

的变异与上述因素有关, 其余的变异很可能由其它因素如土壤中铵态氮、硝态氮的含量所决定^[18,24], 值得进一步深入研究。

2.4 生态系统呼吸作用与 N_2O 排放

生态系统呼吸包括土壤呼吸和地上部植株呼吸, 能反映植物的生理活性以及土壤微生物的活性和数量, 它们的大小和强弱与土壤温度、湿度和作物生长有关。本研究表明, 除玉米田外, 不同种植制度下的农田 N_2O 通量与生态系统呼吸速率呈显著线性正相关 (图 3-a)。而玉米田 N_2O 排放与呼吸作用的关系不符合线性规律 (图 3-b), 当呼吸速率小于 $400 \text{ mg CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ 时, N_2O 排放随呼吸作用增加而增加, 超过 $400 \text{ mg CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ 时, N_2O 排放随呼吸作用

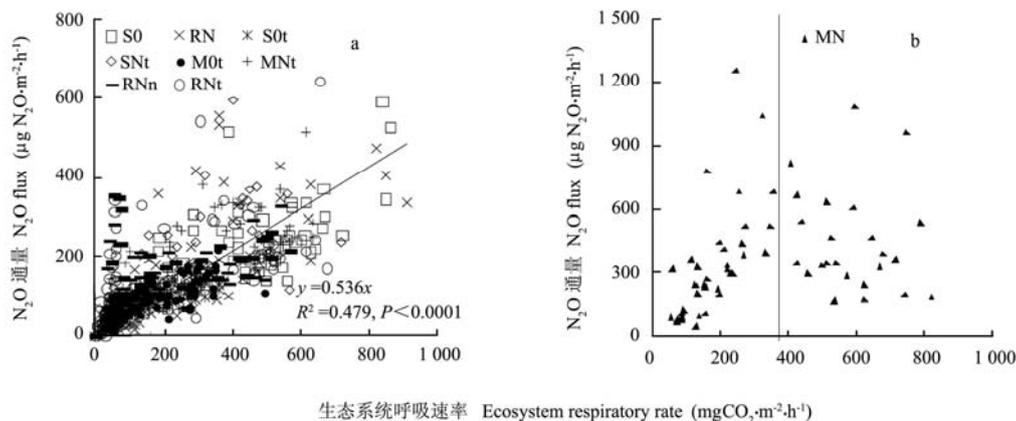


图 3 N_2O 排放与生态系统呼吸的关系

Fig. 3 Relationship between N_2O emission and ecosystem respiration

的增加呈下降趋势。

可见, 在种植大多数种类作物的农田中, N_2O 释放随着生态系统呼吸的增加而增加, 亦即农田生态系统向大气中每输出 $1 \text{ mgCO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$, 同时将释放 $0.536 \text{ } \mu\text{gN}_2\text{O} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ (图 3-a)。这从另一方面反映了植物生长状况是影响 N_2O 排放的重要因素, 同时也表明, 可通过监测农田的生态系统呼吸作用以了解 N_2O 的排放。

3 讨论

3.1 估算化肥氮的 N_2O 转化系数的时间尺度

Bouwman^[2]认为前茬作物施氮肥会增加后季的 N_2O 排放, 延长观测时间尺度, 可测得更高的排放量。本研究中, 在前季施氮(玉米)和不施氮(大豆)情况下, 后季施氮的两块麦田(SNt、MNt) N_2O 排放无显著差异, 不施氮的两块麦田(S0t、M0t) N_2O 排放亦无显著差异(表 2)。可能的原因为: (1) 大豆为固氮作物, 前茬大豆根瘤固定的氮在后季转化为 N_2O ; 同时, 前茬玉米田施用的氮肥在后季也转化为 N_2O , 且二者量值相近。(2) 玉米氮肥需求量大, 前茬施用的氮肥几乎被玉米完全吸收, 在后季已不能转化为 N_2O 或者量极小; 大豆固定的氮也不能在后季转化为 N_2O 或者量极小。根据 Bouwman 的化肥氮排放系数计算方法^[2], 可求得在生长季尺度内 SNt 和 MNt 处理化肥氮的 N_2O -N 排放系数分别为 1.33%和 1.54%, 与 IPCC 推荐的缺省值(1.25 ± 1)%^[2]基本一致。

3.2 植物与 N_2O 排放

以往在森林以及冠层较高的生态系统(如玉米)中的 N_2O 观测研究, 大多仅以土壤通量代表这些生态系统的总通量来估算 N_2O 排放量^[25,26]。越来越多的研究表明, 植物很可能是一个潜在的 N_2O 排放源^[7], 多种植物均能排放一定量的 N_2O , 其排放量的大小与植物硝酸还原酶、亚硝酸还原酶、氮营养状况、碳源、生长阶段等多种因素有关^[7,20]。本研究亦发现, 种植大豆、小麦两种作物的农田的 N_2O 排放与表征作物生长状况的指标 LAI 密切相关。这提示我们, 建立农田 N_2O 产生、排放的机理模型不仅仅要考虑土壤过程, 亦需考虑植物的作用。

3.3 玉米田生态系统呼吸与 N_2O 排放

玉米为 C4 作物, 光合效率高于 C3 作物(图 3-a), 玉米田呼吸作用有很大一部分来自于植株的自养呼吸, 而 N_2O 的排放则主要受土壤因素的控制, 与植株的关系相对较小(表 4)。玉米田氮肥施用量较高,

在水分条件适宜时会导致 N_2O 的大量排放, 而这些条件并非是影响生态系统呼吸的主要因素, 温度是生态系统呼吸的主控因子^[27], 玉米田两种气体排放的控制因素的不同可能造成了二者关系为非线性相关(图 3-b)。

4 结论

4.1 几种常规耕翻农作制度中, 玉米(施氮)-小麦(施氮)轮作农田 N_2O 年度排放量最高, 大豆(不施氮)-小麦(施氮)处理次之, 水稻(施氮)-小麦(施氮)轮作最低。

4.2 相对于耕翻而言, 稻茬麦田播前免耕在越冬前促进 N_2O 排放, 但并未明显增加季节性排放总量。

4.3 小麦田 N_2O 排放随土壤温度、湿度及作物 LAI 的增大而增加; 水稻田 N_2O 排放随土壤温度的增大而增加; 大豆田 N_2O 排放随 LAI 增大而增加, 与土壤温度、湿度无显著关系; 而玉米田 N_2O 排放则不随作物 LAI 变化发生明显变化, 仅随土壤温度、湿度的增加而增加。

4.4 大豆、水稻、小麦田 N_2O 通量与生态系统呼吸速率呈极显著线性正相关关系, 而玉米田不存在类似关系。

References

- [1] Kroeze C, Mosier A, Bouwman L. Closing the global N_2O budget: A retrospective analysis 1500-1994. *Global Biogeochemistry Cycles*, 1999, 13(1): 1-8.
- [2] Bouwman A F. Direct emissions of nitrous oxide from agricultural soils. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 1996, 46(1): 53-70.
- [3] Smith W N, Grant B, Desjardins R L, Lemke R, Li C. Estimates of the interannual variations of N_2O emissions from agricultural soils in Canada. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2004, 68(1): 37-45.
- [4] Monson R K, Sackschewsky M R, Williams III G J. Field measurements of photosynthesis, water-use efficiency, and growth in *Agropyron smithii* (C3) and *Bouteloua gracilis* (C4) in the Colorado shortgrass steppe. *Oecologia*, 1986, 68(3): 400-409.
- [5] Hunt H W, Elliott E T, Detling J K, Morgan J A, Chen D X. Response of a C3 and a C4 perennial grass to elevated CO_2 and temperature under different water regimes. *Global Change Biology*, 1996, 2: 35-47.
- [6] Singh M, Kundu S, Biswas A K, Saha J K, Tripathi A K, Acharya C L. Quantification of N_2 fixation and annual N benefit from N_2 fixation in soybean accrued to the soil under soybean-wheat continuous rotation. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*,

- 2004, 167(5): 577-583.
- [7] 陈冠雄, 徐慧, 张颖. 植物—大气 N₂O 的一个潜在排放源. 第四纪研究, 2003, 23(5): 504-511.
Chen G X, Xu H, Zhang Y. Plant — a potential source of the atmospheric N₂O. *Quaternary Sciences*, 2003, 23(5): 504-511. (in Chinese)
- [8] Zou J W, Huang Y, Jiang J Y, Zheng X H, Sass R L. A 3-year field measurement of methane and nitrous oxide emissions from rice paddies in China: Effects of water regime, crop residue and fertilizer application, *Global Biogeochemical Cycles*, 2005, 19, GB2021, doi:10.1029/2004GB002401.
- [9] Kaiser E A, Kohrs K, Kücke M, Schnug E, Heinemeyer O, Munch J C. Nitrous oxide release from arable soil: importance of N fertilization, crops and temporary variation. *Soil Biology and Biochemistry*, 1998, 30(12): 1 553-1563.
- [10] 黄耀. 地气系统碳氮交换—从实验到模型. 北京: 气象出版社, 2003: 81-83.
Huang Y. *Exchange of Carbon and Nitrogen Between Land and Atmosphere: from Experiment to Model*. Beijing: China Meteorological Press, 2003: 81-83. (in Chinese)
- [11] Wang Y S, Wang Y H. Quick measurement of CH₄, CO₂ and N₂O emissions from a short-plant ecosystem. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2003, 20(5): 842-844.
- [12] 黄国宏, 陈冠雄, 张志明. 玉米田 N₂O 排放及减排措施研究. 环境科学学报, 1998, 18(4): 344-349.
Huang G H, Chen G X, Zhang Z M. N₂O emission in maize field and its mitigation. *Acta Scientiae Circumstantia*, 1998, 18(4): 344-349. (in Chinese)
- [13] Ball B C, Scott A, Parker J P. Field N₂O, CO₂ and CH₄ fluxes in relation to tillage, compaction and soil quality in Scotland. *Soil and Tillage Research*, 1999, 53(1): 29-39.
- [14] Arah J R M, Smith K A, Crichton I J, Li H S. Nitrous oxide production and denitrification in Scottish arable soils. *Journal of Soil Science*, 1991, 42(3): 351-367.
- [15] Zou J, Huang Y, Zong L, Zheng X, Wang Y. Carbon dioxide, methane, and nitrous oxide emissions from a rice-wheat rotation as affected by crop residue incorporation and temperature. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2004, 21(5): 691-698.
- [16] Müller C. Plant affect the *in situ* N₂O emissions of a temperate grassland ecosystem. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 2003, 166: 771-773.
- [17] Aulakh M S, Khera T S, Doran J W, Bronson K F. Denitrification, N₂O and CO₂ fluxes in rice-wheat cropping system as affected by crop residues, fertilizer N and legume green manure. *Biology and Fertility of Soils*, 2001, 34(6): 375-389.
- [18] Conen F, Dobbie K E, Smith K A. Predicting N₂O emissions from agricultural land through related soil parameters. *Global Change Biology*, 2000, 6(4): 417-426.
- [19] 黄国宏, 陈冠雄, 黄斌. 玉米植株对大田温室气体 N₂O 排放的影响. 应用生态学报, 1998, 9(3): 261-264.
Huang G H, Chen G X, Huang B. Effect of maize plant on N₂O emission from field. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 1998, 9(3): 261-264. (in Chinese)
- [20] Smart D R, Bloom A J. Wheat leaves emit nitrous oxide during nitrate assimilation. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2001, 98(14): 7 875-7 878.
- [21] Chang C, Janzen H H, Cho C M, Nakonechny E M. Nitrous oxide emission through plants. *Soil Science Society of America Journal*, 1998, 62(1): 35-38.
- [22] Chen X, Boeckx P, Shen S, van Cleemput O. Emission of N₂O from rye grass (*Lolium perenne* L.). *Biology and Fertility of Soils*, 1999, 28(4): 393-396.
- [23] 田纪春, 陈建省, 王延训, 张永祥. 氮素追肥后移对小麦籽粒产量和旗叶光合特性的影响. 中国农业科学, 2001, 34(1): 1-4.
Tian J C, Chen J S, Wang Y X, Zhang Y X. Effects of delayed-nitrogen application on grain yield and photosynthetic characteristics in flag leaves of wheat cultivars. *Scientia Agricultura Sinica*, 2001, 34(1): 1-4. (in Chinese)
- [24] 蔡祖聪. 尿素和 KNO₃ 对水稻土无机氮转化过程和产物的影响 I 无机氮转化过程. 土壤学报, 2003, 40(3): 414-419.
Cai Z C. Effects of urea and KNO₃ on processes and products of inorganic nitrogen transformation in paddy soils I. Processes for N₂O production. *Acta Pedologica Sinica*, 2003, 40(3): 414-419. (in Chinese)
- [25] Chikowo R, Mapfumo P, Nyamugafata P, Giller K E. Mineral N dynamics, leaching and nitrous oxide losses under maize following two-year improved fallows on a sandy loam soil in Zimbabwe. *Plant and Soil*, 2004, 259(2): 315-330.
- [26] Rochette P, Angers D A, Bélanger G, Chantigny M H, Prévost D, Lévesque G. Emissions of N₂O from alfalfa and soybean crops in eastern Canada. *Soil Science of America Journal*, 2004, 68(2): 493-506.
- [27] Franzluebbers K, Franzluebbers A J, Jawson M D. Environmental controls on soil and whole-ecosystem respiration from a tallgrass prairie. *Soil Science of American Journal*, 2002, 66(1): 254-262.

(责任编辑 李云霞)