

种植不同作物对农田 N_2O 和 CH_4 排放的影响及其驱动因子

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, 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 以种植玉米 (*Zea mays*)、大豆 (*Glycine max*) 和水稻 (*Oryza sativa*) 的农田生态系统为研究对象, 于 2003 年 6~10 月系统观测了 N_2O 和 CH_4 的排放、土壤温度和湿度以及相关的生物学因子。玉米和水稻分别施化肥氮 $300 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 大豆未施氮肥。研究表明, 作物类型对农田 N_2O 和 CH_4 排放具有显著的影响。土壤-玉米系统、土壤-大豆系统和土壤-水稻系统的 N_2O 季节性平均排放通量分别为 620.5 ± 57.6 、 338.0 ± 7.5 和 $238.8 \pm 13.6 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ (N_2O)。种植作物促进了农田生态系统的 N_2O 排放, 玉米地土壤和裸地土壤的 N_2O 平均排放通量分别为 364.2 ± 11.7 和 $163.7 \pm 10.5 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ (N_2O)。土壤-玉米系统、土壤-水稻系统、玉米地土壤和裸地土壤 N_2O 排放受土壤温度的影响, 与土壤湿度无显著统计相关, 但受土壤温度和水分的综合影响。土壤-大豆系统 N_2O 排放随作物绿叶干重的增加而指数增加, 与土壤温度和水分条件无统计相关, 由大豆作物自身氮代谢所产生的 $\text{N}_2\text{O}-\text{N}$ 季节总量约为 $6.2 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ (N)。土壤-水稻系统 CH_4 平均排放通量为 $1.7 \pm 0.1 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ (CH_4), 烤田抑制了稻田 CH_4 的排放。烤田前影响稻田 CH_4 排放的主要因素是水稻生物量, 烤田后的浅水灌溉及湿润灌溉阶段的 CH_4 排放与土壤温度和水稻生物量无关。本研究未观测到旱作农田有吸收 CH_4 的现象。

关键词 农田生态系统 N_2O 和 CH_4 排放 土壤温度 土壤湿度 绿叶干重

文章编号 1006-9585 (2007) 02-0147-09 **中图分类号** S161 **文献标识码** A

Nitrous Oxide and Methane Emissions from Croplands with Different Crops and Driving Factors

CHEN Shu-Tao¹, HUANG Yao^{1,2}, ZHENG Xun-Hua², and CHEN Yu-Quan³

1 College of Resources and Environmental Sciences, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095

2 Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

3 Agricultural Resource and Environmental Research Center, Jiangsu Academy of Agricultural Sciences, Nanjing 210014

Abstract To evaluate the effect of cropping system on N_2O and CH_4 emissions and to identify the key factors controlling the emissions, a field experiment was carried out in 2003 at Jiangsu Academy of Agricultural Sciences. Three crops of maize (*Glycine max*), soybean (*Zea mays*) and rice (*Oryza sativa*) were planted during the period

收稿日期 2005-11-21 收到, 2006-12-10 收到修定稿

资助项目 国家自然科学基金资助项目 40431001

作者简介 陈书涛, 男, 1978 年出生, 博士研究生, 主要从事陆地生态系统碳氮循环与温室气体排放研究。
E-mail: chenstyf@yahoo.com.cn

通讯作者 黄耀, E-mail: huangy@mail.iap.ac.cn

from June to October. In addition, a bare soil plot was set up near the soybean-planted plot. Plots planted maize and rice received same amount of $300 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ (N), and the plots of the soybean-planted and the bare soil did not receive nitrogen fertilizer. When taking gas samples, soil moisture, temperature and dry mass of green leaves and plants were also measured. Results showed that there was a significant difference ($p < 0.001$) in the N_2O and CH_4 emissions from different plots. Seasonal N_2O flux averaged $620.5 \pm 57.6 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ (N_2O) for the maize-planted plot, $338.0 \pm 7.5 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ (N_2O) for the soybean-planted plot, and $238.8 \pm 13.6 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ (N_2O) for the rice-planted plot, respectively. Crop cultivation enhanced N_2O emission from the soil. The maize-planted soil emitted N_2O with an average rate of $364.2 \pm 11.7 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ (N_2O), while the average rate was $163.7 \pm 10.5 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ (N_2O) in the bare soil. Seasonal average of CH_4 flux was $1.7 \pm 0.1 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ (CH_4) in the rice-planted plot. No CH_4 emission or uptake was found in the plots of maize-planted and soybean-planted. A further investigation suggests that soil temperature determine the seasonal variation of N_2O emissions from the plots of maize-planted, rice-planted and bare soil, as well as from the maize-planted soil. This determination can be well described by an exponential function. Though there was no significant correlation between N_2O emission from the uplands and soil moisture, the N_2O emission can be mathematically expressed by an exponential function that integrates soil temperature and moisture. We found that N_2O emission from the soybean-planted plot was exponentially correlated to the dry mass of green leaves of the soybean. Subtracting the N_2O emission from the soil-soybean system by that from the bare soil, we estimate that the seasonal total N_2O -N emission induced by the nitrogen metabolism might be $6.2 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ (N). CH_4 emission from the rice-planted plot correlated rice biomass during the flooding period and was not affected by soil temperature and the biomass after field drainage. No CH_4 emission or uptake was found in the plots of maize-planted and soybean-planted.

Key words agroecosystem, N_2O and CH_4 emissions, soil temperature, soil moisture, dry mass of green leaves

1 引言

大气中温室气体浓度不断增加导致的全球变暖是人类共同面临的问题, 农田温室气体 N_2O 和 CH_4 的排放一直受到国际社会的普遍关注。以往的研究指出: C_4 作物 (玉米) 比 C_3 作物 (如豆科作物) 能向土壤输送更多的碳源^[1], 因而促进 N_2O 的排放^[2,3]。豆科作物通过根瘤菌固氮向土壤提供氮源, 且植株本身能产生并释放 N_2O ^[4]。在相同的气候和土壤条件下, 大豆地 N_2O -N 排放量占施氮量的比例高于春小麦地^[5] 和玉米地^[6]。淹水稻田排放 CH_4 , 烤田在抑制 CH_4 排放的同时亦促进了 N_2O 排放^[7,8]。有研究表明: 东北玉米地^[9]、华北农田^[10] 和内蒙古草地^[11] 对大气 CH_4 有吸收功能。水稻、玉米和大豆为华东地区的主要秋熟作物, 生长季为 6~10 月。以往的研究主要集中在该区稻田 N_2O 和 CH_4 的排放^[12,13], 而对于与水稻同一生长季的玉米和大豆田的研究不多。本文试图通过对种植水稻、玉米和大豆作物小区的系统观测, 研究玉米、大豆和水稻田 N_2O 和

CH_4 排放及其环境影响因素, 为客观评价不同作物生态系统的 N_2O 和 CH_4 排放提供依据。

2 材料与方法

2.1 试验地点概况

田间试验于 2003 年 6~10 月在南京近郊江苏省农科院 (32.0°N , 118.8°E) 进行。该地区属于典型的长江中下游亚热带季风气候, 年平均降水量 1107 mm , 平均气温 15.6°C 。试验地土壤为黄棕壤, 耕作层土壤 ($0\sim 20 \text{ cm}$) 基本理化性质为: $>0.02 \text{ mm}$ 砂粒含量 29.1% , 容重 $1.3 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$, pH 6.1, 有机质含量为 $16.7 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 全氮 $1.1 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 速效磷 $12.0 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 速效钾 $116.4 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

2.2 试验设计

设置 3 个试验小区, 各小区面积为 $10 \text{ m} \times 20 \text{ m}$, 分别种植玉米 (*Zea mays*)、大豆 (*Glycine max*) 和水稻 (*Oryza sativa*), 并在大豆试验小区设置裸地处理, 面积为 $3 \text{ m} \times 3 \text{ m}$ 。大豆播种、出苗、开花和成熟日期分别为 2003 年 6 月 9 日、

6月16日、7月14日和10月21日。玉米播种、出苗、抽雄和成熟日期分别为2003年6月9日、6月16日、7月31日和9月10日。水稻播种、移栽、抽穗和成熟日期分别为2003年5月20日、6月20日、9月3日和10月20日,烤田期为7月26日~8月1日,烤田期后以浅水灌溉和湿润灌溉为主。按照当地常规施肥习惯,采用平施复土(大豆、玉米)和撒施(水稻)方式,施肥时尽量保证试验区肥料分布均匀。过磷酸钙和氯化钾作为基肥按当地常规于旱地作物播种及水稻移栽前一次性施入。玉米地施N量(尿素)为 $300 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,分苗肥(6月28日)和穗肥(7月19日)两次施入,比例为0.4:0.6;水稻田施N量(尿素)为 $300 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$,分基肥(6月18日)、分蘖肥(6月30日)和穗肥(8月10日)3次施入,比例为0.4:0.4:0.2。大豆和裸地处理均未施用氮肥。

2.3 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 $0.5 \text{ m} \times 0.5 \text{ m}$,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,玉米生长后期可达1.5~2.0 m。分别于大豆、玉米出苗期和水稻移栽期在各试验小区放置并固定不锈钢底座,底座内作物密度与大田一致,以测定土壤-作物系统的 N_2O 、 CH_4 排放。在裸地及玉米植株之间放置并固定同样的底座,以测定裸地和玉米田土壤的 N_2O 排放。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。各采样处理均设置3重复,以减小土壤不均匀性造成的误差。

大田采样于2003年6月23日开始,至同年10月20日全部作物收获。每周采集气样一次,水稻烤田期隔天采样一次,全生育期采样21次。每次采样时间为北京时间上午8~10点,各采样点每次采样5个,每个间隔5 min,样品量为60 ml。采集的气样于当天在实验室用Agilent 4890D气相色谱仪分析 N_2O 和 CH_4 浓度,载气为99.999%高纯氮,柱温 55°C , N_2O 检测器为ECD,检测温度 330°C , CH_4 检测器为FID,检测温度 200°C ,以HP软件分析求得气体的浓度^[14]。通过对每组5个样品的 N_2O 和 CH_4 混合比与相对应的采样间隔时间(0、5、10、15、20 min)进行直线回归,

求得采样箱内目标气体浓度的变化速率。数据分析结果表明,即便在玉米生长后期采用200 cm高度的采样箱,在20 min采样时间内箱中 N_2O 浓度仍随时间线性增加,相关系数 $r > 0.9$,满足通量计算要求^[15]。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^[15]。

2.4 土壤温度、湿度及生物学指标测定

于玉米、大豆播种前和水稻移栽前分别将测定温度的Temp Log温度探头埋入约10 cm土壤深处,每隔1 h自动记录试验地土壤温度至作物收获。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。定期测定作物绿色叶片质量和植株生物量等生物学指标。

3 结果

3.1 N_2O 和 CH_4 排放通量

自出苗后,土壤-玉米系统 N_2O 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1a),其可能原因是肥料的施用与同期土壤温度相对较高(图1d)。在9月中旬玉米收获后,由于植物的根茬可作为硝化和反硝化微生物的营养^[3],故而 N_2O 排放通量仍较高。与土壤-玉米系统 N_2O 排放的季节性变化相比,土壤-大豆系统的排放较低,除8月下旬有一个较高的排放峰值外,整个生长季内的排放较为平缓,且生长中后期的排放亦较高(图1a)。此阶段作物的生理活性较强,固氮作用旺盛,可能是 N_2O 排放较高的主要原因。土壤-水稻系统 N_2O 排放总体低于土壤-玉米系统和土壤-大豆系统,但在7月中旬田间排水及7月26日至8月1日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 N_2O 排放也较高(图1a)。这与以往的研究^[16]相一致。

玉米田土壤的 N_2O 排放(图1b)低于土壤-玉米系统(图1a),但两者的季节性变化规律较为一致。在无植物参与和无氮肥施用的裸地, N_2O 的排放明显低于玉米田土壤和处于同一试验小区的土壤-大豆系统的排放($p < 0.001$)。这些结果说明玉米作物的参与(玉米田土壤)促进了 N_2O 的排放;在无外源N肥施用的情况下,大豆作物

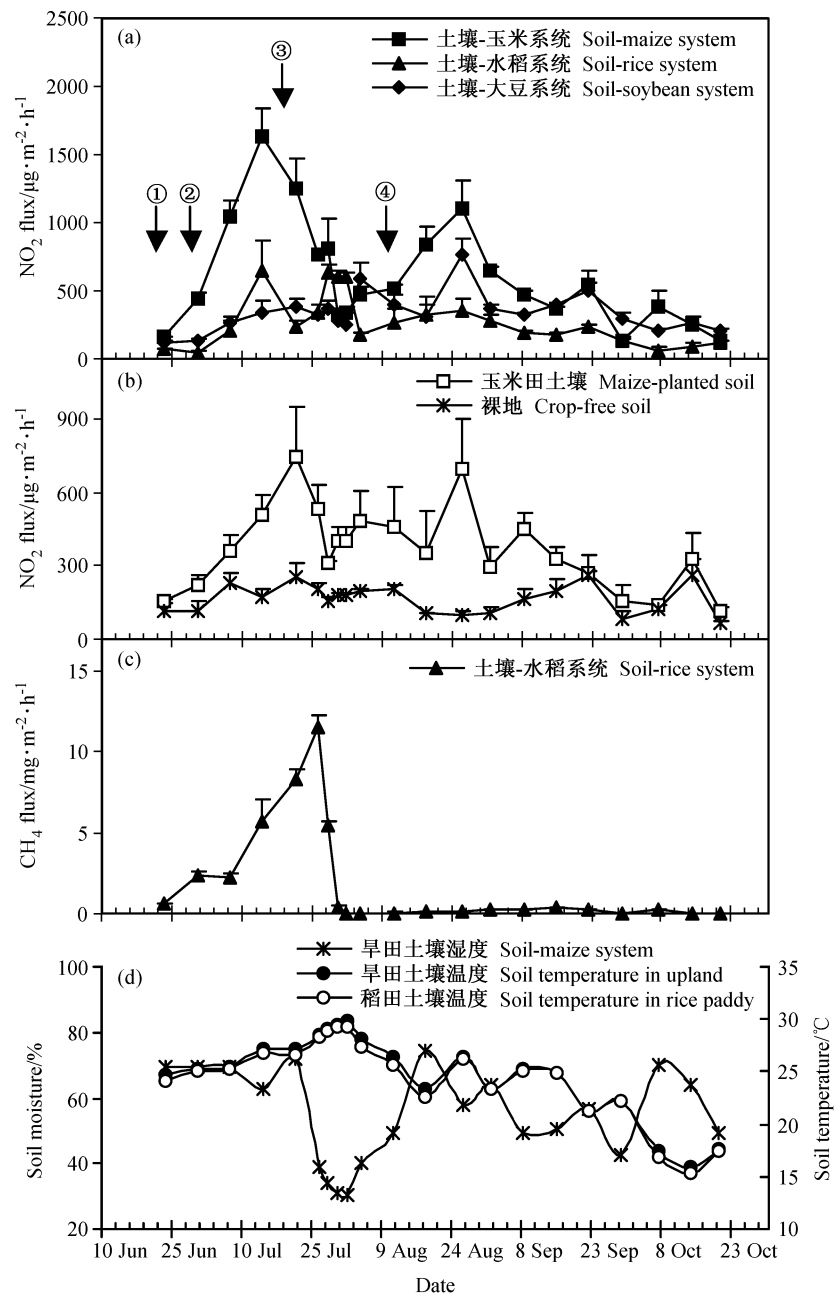


图1 不同方法处理的 (a) N_2O 、(b) N_2O 、(c) CH_4 和 (d) 土壤温度、湿度 (water filled pore space, WFPS) 的季节变化 (排放通量为平均值 $\pm$ 标准误差, $n=3$; ①基肥, ②玉米苗肥, 水稻分蘖肥, ③玉米穗肥, ④水稻穗肥)

Fig. 1 Seasonal variation of (a) N_2O , (b) N_2O , (c) CH_4 , (d) soil temperature and moisture (water filled pore space, WFPS) in different treatments (Fluxes are average $\pm$ standard error, $n=3$; ① Basal fertilization, ② Topdressing for maize and rice, ③ Topdressing for maize, and ④ Topdressing for rice)

的固氮作用和作物体氮素的转化对土壤-大豆系统 N_2O 排放起着重要的作用。

水稻移栽后稻田 CH_4 排放随作物的生长和土壤温度的升高 (图 1d) 逐步增加, 至排水烤田达最大值 (图 1c)。烤田大大抑制了烤田期后稻田

CH_4 的排放, 即使在烤田后的浅水灌溉及湿润灌溉阶段, 稻田 CH_4 排放仍处于极低的水平 (图 1c)。其原因在于烤田增加了土壤氧化性, 破坏了土壤产生 CH_4 的条件^[17]。全生育期稻田平均 CH_4 排放通量为 $1.7 \pm 0.1 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ (CH_4)。本

研究未观测到玉米地和大豆地有吸收 CH₄ 的现象。

方差分析表明, 土壤-玉米、土壤-大豆和土壤-水稻系统平均 N₂O 通量之间存在极显著差异 ($p < 0.001$), 分别为: 620.5 ± 57.6 、 338.0 ± 7.5 和 $238.8 \pm 13.6 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ (N₂O)。土壤-玉米系统 N₂O 排放量高源于氮肥施用和玉米植株活动的综合作用, 氮肥施用为微生物提供了丰富的碳氮营养。同时, 作为 C₄ 作物, 玉米光合作用效率高, 大量的光合产物可通过根系输送到土壤中成为微生物营养, 这两因素的交互作用大大促进了 N₂O 产生^[18,19]。稻田 N₂O 排放量相对较低的主要原因在于土壤长期处于淹水或饱和状态, 抑制了土壤中 N₂O 的产生及土壤和大气之间的气体交换^[20]。大豆田没有施用氮肥, 除土壤氮矿化外, 土壤微生物的氮源供应主要依赖于大豆本身的固氮作用, 故其 N₂O 排放量低于施用化肥的玉米田。

玉米田土壤 (施氮肥) 和裸地土壤 (未施氮肥) 的平均 N₂O 通量分别为 364.2 ± 11.7 和 $163.7 \pm 10.5 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ (N₂O), 两者的差值为 $200.5 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ (N₂O)。将此差值折算成季节总量, 约占玉米地化肥氮的 1.25 %。换言之, 土壤-玉米系统中约有 1.25 % 的化肥氮以 N₂O 的形式通过土壤排放。

3.2 N₂O 和 CH₄ 排放的影响因素

利用 EXCEL 工作表和 SYSTAT10 统计软件分别对不同处理的 N₂O 排放通量与同期土壤温度

和水分进行线性和非线性分析。结果表明: 裸地、玉米田土壤、土壤-玉米系统和土壤-水稻系统的 N₂O 排放均依赖于土壤温度, 并可用指数方程拟合 (表 1)。本研究未发现旱地 N₂O 排放与土壤水分条件有显著统计相关。主要原因可能是: 1) 统计样本较少, 不足以反映两者的依赖关系; 2) 温度的影响在某种程度上屏蔽了水分效应。若考虑土壤温度和水分条件的综合效应, 裸地、玉米田土壤及土壤-玉米系统的 N₂O 排放可通过这两个因素的综合指数方程得以描述 (表 1)。

土壤-大豆系统的 N₂O 排放与土壤温度及水分条件均无统计相关, 而与同期绿叶重量 (干重) 呈显著指数相关, 且大豆植株的 N₂O 排放 (土壤-大豆系统 N₂O 通量减去裸地 N₂O 通量) 与同期绿叶重量也呈显著指数相关, 但与同期植株重量无关 (表 1)。假定大豆植株的 N₂O 排放主要由作物自身氮代谢 (叶片氮代谢和根瘤菌固氮代谢) 所引起, 将土壤-大豆系统的季节性 N₂O 排放总量减去裸地的 N₂O 排放总量, 则全生长季由于作物自身氮代谢所产生的 N₂O-N 总量约为 $6.2 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ (N)。

移栽至烤田期稻田 CH₄ 排放通量 (y , 单位: $\text{mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ (CH₄)) 与同期水稻植株干重 (x , 单位: $\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$) 呈线性正相关, $y = 0.028x + 0.4$ ($R^2 = 0.99$, $n = 6$, $p < 0.001$), 这与以往的研究^[21]一致。烤田后浅水灌溉及湿润灌溉阶段内 CH₄ 排放与植物生长无关。

表 1 N₂O 通量与土壤温度、湿度 (WFPS) 及作物绿叶干重之关系的最佳拟合方程

Table 1 The simulating functions between N₂O flux and soil temperature, moisture (WFPS) and dry weight of green leaves

N ₂ O 通量 (y) / $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$	影响因子及数量关系		
	土壤温度 (X_1) / °C	土壤温度 (X_1) / °C, 湿度 (X_2) / %	作物绿叶干重 (X_3) / $\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$
裸地	$y = 30.44e^{0.061X_1}$ ($R_2 = 0.36$, $p < 0.01$)	$y = 10.24e^{(0.085X_1 + 0.0092X_2)}$ ($R_2 = 0.38$, $p < 0.05$)	—
玉米田土壤	$y = 42.51e^{0.083X_1}$ ($R_2 = 0.45$, $p < 0.01$)	$y = 8.23e^{(0.122X_1 + 0.013X_2)}$ ($R_2 = 0.48$, $p < 0.01$)	—
土壤-玉米系统	$y = 63.53e^{0.082X_1}$ ($R_2 = 0.21$, $p < 0.05$)	$y = 1.35e^{(0.174X_1 + 0.030X_2)}$ ($R_2 = 0.51$, $p < 0.01$)	ns
土壤-水稻系统	$y = 9.04e^{0.131X_1}$ ($R_2 = 0.43$, $p < 0.01$)	—	ns
土壤-大豆系统	ns	ns	$y = 157.62e^{0.005X_3}$ ($R_2 = 0.60$, $p < 0.01$)
大豆植株	ns	ns	$y = 44.98e^{0.009X_3}$ ($R_2 = 0.49$, $p < 0.01$)

注: ns 为无显著统计相关

3.3 N₂O 和 CH₄ 综合全球增温潜势

在 20 年时间尺度上, 单位质量 CH₄ 和 N₂O 的全球增温潜势 (GWP, Global Warming Potential) 分别为 CO₂ 的 62 倍和 275 倍; 500 年时间尺度上分别为 CO₂ 的 7 倍和 156 倍^[22]。若以单位质量 CO₂ 的 GWP 为 1, 求得 3 种农田 N₂O 和 CH₄ 排放的综合 GWP (G_{WP}), 即: $G_{WP} = 62 \times F_c + 275 \times F_n$ (20 年时间尺度) 及 $G_{WP} = 7 \times F_c + 156 \times F_n$ (500 年时间尺度), 其中, F_c 为 CH₄ 排放量, F_n 为 N₂O 排放量。计算结果表明: 在 20 年时间尺度上, 玉米田和水稻田的综合 GWP 非常接近, 分别为 4 996.4 和 4 977.4, 高于大豆田的 2 721.7; 在 500 年时间尺度上, 玉米田、大豆田和水稻田的综合 GWP 分别为 2 834.3、1 544.0 和 1 435.7, 玉米田的综合 GWP 最高。就综合全球增温潜势而言, 该地区秋熟作物种植玉米导致的长期温室效应要远远大于种植水稻和大豆。

4 讨论

梁巍等^[9]的田间观测结果表明, 东北黑土玉米地有吸收大气 CH₄ 的功能。齐玉春等^[10]和王跃思等^[11]也分别报道华北麦地、玉米地和内蒙古草地对大气 CH₄ 的吸收。一般认为, 土壤水分条件是 CH₄ 氧化的主要控制因子^[23]。含水量过高的土壤氧气供应受到限制, 大大影响了嗜氧性甲烷氧化菌的代谢活动^[24]。王跃思等^[25,26]对内蒙古草地的观测研究表明, CH₄ 吸收与土壤水分含量呈显著负相关, 当土壤水分含量高于 30% 时, 几乎观测不到 CH₄ 的吸收。本研究区域降水较多, 地下水位高, 整个观测期内土壤水分含量高于 30%, 这是未观测到 CH₄ 吸收的主要原因。

Xing^[27] 基于 1994~1997 年中国部分农田 N₂O 排放的观测结果认为水稻田 N₂O 平均排放通量约为 $39.5 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ (N₂O), 而旱田土壤 N₂O 平均排放通量为 $58 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ (N₂O); 卢燕宇等^[28]对文献报道的数据分析结果表明, 全球大部分旱作农田的 N₂O-N 年排放量在 $0.3 \sim 19.2 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ (即 $5.4 \sim 344.4 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ (N₂O)) 之间, 且夏季作物的 N₂O 排放通量高于

其他季节的作物; Zou 等^[29]在南京连续 3 年观测了稻田温室气体排放, 结果表明稻田 N₂O 排放通量的季节性平均值在 $1.3 \sim 373.7 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ (N₂O), 与本研究结果 ($58.8 \sim 373.7 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ (N₂O)) 相仿。本研究获得的 N₂O 排放通量与卢燕宇等和邹建文等的结果基本一致, 但高于邢光熹的报道。高于邢光熹报道的可能原因是: 1) 本研究中氮肥的施用量较高, 玉米和水稻田施纯 N 量为 $300 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 从而导致较高的 N₂O 排放。2) 农田 N₂O 排放的区域性变异与降水和气温有很大关系^[28], 本研究地区年降水量较大, 温度较高, 客观上有利于 N₂O 排放。3) N₂O 排放与土壤因素有很大关系, 土壤质地、pH、通气状况、土壤微生物种群等^[30]均影响 N₂O 排放, 而这些土壤因素又具有很大的变异性和不确定性, 因此 N₂O 的排放在不同的研究地区存在较大差异, 其内在机理有必要进一步研究。

本研究中土壤-水稻系统 N₂O 平均通量为 $238.8 \pm 13.6 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ (N₂O), 土壤-玉米系统和玉米地土壤的 N₂O 平均通量分别为 $620.5 \pm 57.6 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ (N₂O) 和 $364.2 \pm 11.7 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ (N₂O)。土壤-大豆系统和裸地土壤的 N₂O 平均通量分别为 $338.0 \pm 7.5 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ (N₂O) 和 $163.7 \pm 10.57 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ (N₂O), 植株参与的 N₂O 排放约占总排放量的一半, 高于玉米植株排放的比例。本研究组最近的研究结果表明, 冬小麦植株对土壤-冬小麦系统 N₂O 排放的贡献为 10%~62%, 全生育期平均为 25%^[31]。Smart 等^[32]的研究则表明, 小麦苗期植株对 N₂O 排放的贡献约为 8%。Chen 等^[33]对土壤-黑麦草系统的研究表明, 黑麦草植株参与 N₂O 排放, 排放量与植株 NO₃⁻-N 含量呈显著正相关。这些结果充分说明植物本身在 N₂O 的产生与排放过程中起着重要的作用, 至于产生不同植物间差异的原因尚缺乏足够的研究。

于克伟等^[5]发现大豆植株排放 N₂O, 并推测其主要途径为: 1) 植株自身代谢产生 N₂O, 并依浓度梯度向大气排放; 2) 植物将土壤中产生的 N₂O 传导到大气。Chang 等^[34]和 Chen 等^[33]的研究表明, 土壤中产生的 N₂O 可通过浓度梯度传输到植物, 进而通过蒸腾作用从叶片气孔释放到大

气。Dean 等^[35]及 Smart 等^[32]的研究还表明,在麦类作物和豆科作物绿色叶片中,不仅植株体氮素转化为 NO_3^- 时可释放 N_2O ,而且叶片对 NO_3^- 营养的吸收过程也产生 N_2O 。若大豆植株自身代谢产生 N_2O ,其主要功能部位应该是绿色叶片,土壤-大豆系统及大豆植株 N_2O 排放对绿叶重量的依赖关系(表 1)可间接地支持这个推论。进一步的研究需关注植株氮素代谢产生并释放 N_2O 以及作为通道将 N_2O 从土壤传输到植物,进而释放到大气的过程和机理。

在施用等量氮肥的情况下,土壤-玉米系统、土壤-水稻系统的平均 N_2O 排放量不同,由于作物种植于同一种土壤,因此,不同的作物及作物对应的水分管理方式造成了 N_2O 排放量的差异,其原因可能是由于种植玉米或水稻的条件下田间背景 N_2O 排放的不同造成,也可能是由于 N_2O 的氮肥转化系数的不同使然。

5 结论

在相同的土壤和气候条件下,种植不同作物对农田 N_2O 和 CH_4 的排放具有显著的影响,且其影响因素不同。土壤-玉米系统 N_2O 排放最高,其次为土壤-大豆系统,而土壤-水稻系统的排放最低。种植作物促进了农田生态系统的 N_2O 排放。土壤-玉米系统、土壤-水稻系统、玉米地土壤和裸地土壤 N_2O 排放受土壤温度的影响,与土壤湿度无直接统计相关,但受土壤温度和水分的综合影响。土壤-大豆系统及大豆植株 N_2O 排放明显受制于作物的生长,其排放通量随绿叶干重的增加而增加,与土壤温度和水分的变化无统计相关。烤田前稻田 CH_4 排放与水稻生物量呈极显著正相关,烤田大大抑制了 CH_4 排放。本研究未观测到旱地有吸收大气 CH_4 的现象。

参考文献 (References)

[1] Diels J, Vanlauwe B, Van der Meersch M K, et al. Long-term soil organic carbon dynamics in a subhumid tropical climate: ^{13}C data in mixed C_3/C_4 cropping and modeling with RothC. *Soil Biology and Biochemistry*, 2004, **36**: 1739~1750

[2] 黄国宏,陈冠雄,黄斌,等. 玉米植株对大田温室气体

N_2O 排放的影响. 应用生态学报, 1998, **9**: 261~264

Huang Guohong, Chen Guanxiong, Huang Bin, et al. Effect of maize plant on N_2O emission from field. *Chinese Journal of Applied Ecology* (in Chinese), 1998, **9**: 261~264

[3] 黄国宏,陈冠雄,张志明,等. 玉米田 N_2O 排放及减排措施研究. 环境科学学报, 1998, **18** (4): 344~349

Huang Guohong, Chen Guanxiong, Zhang Zhiming, et al. N_2O emission in maize field and its mitigation. *Acta Scientiae Circumstantiae* (in Chinese), 1998, **18**: 344~349

[4] 陈冠雄,徐慧,张颖,等. 植物——大气 N_2O 的一个潜在排放源. 第四纪研究, 2003, **23** (5): 504~511

Chen Guanxiong, Xu Hui, Zhang Ying, et al. Plant: A potential source of the atmospheric N_2O . *Quaternary Sciences* (in Chinese), 2003, **23** (5): 504~511

[5] 于克伟,陈冠雄,杨思河,等. 几种旱地农作物在农田 N_2O 释放中的作用及环境因素的影响. 应用生态学报, 1995, **6** (4): 387~391

Yu Kewei, Chen Guanxiong, Yang Sihe, et al. Role of several upland crops in N_2O emission from farmland and its response to environmental factors. *Chinese Journal of Applied Ecology* (in Chinese), 1995, **6** (4): 387~391

[6] 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. 应用生态学报, 1995, **6** (4): 383~386

Huang Guohong, Chen Guanxiong, Wu J, et al. N_2O and CH_4 fluxes from typical upland fields in northeast China. *Chinese Journal of Applied Ecology* (in Chinese), 1995, **6** (4): 383~386

[7] 侯爱新,陈冠雄,吴杰,等. 稻田 CH_4 和 N_2O 排放关系及其微生物学机理和一些影响因子. 应用生态学报, 1997, **8** (3): 270~274

Hou Aixin, Chen Guanxiong, Wu Jie, et al. Relationship between CH_4 and N_2O emission from rice field and its microbiological mechanism and impacting factors. *Chinese Journal of Applied Ecology* (in Chinese), 1997, **8**: 270~274

[8] 蔡祖聪. 水分类型对土壤排放的温室气体组成和综合温室效应的影响. 土壤学报, 1999, **36** (4): 484~491

Cai Zucong. Effects of water regime on CO_2 , CH_4 and N_2O emissions and overall potential for greenhouse effect caused by emitted gases. *Acta Pedologica Sinica* (in Chinese), 1999, **36** (4): 484~491

[9] 梁巍,张颖,岳进,等. 长效氮肥施用对黑土旱田 CH_4 和 N_2O 排放的影响. 生态学杂志, 2004, **23** (3): 44~48

Liang Wei, Zhang Ying, Yue Jin, et al. Effects of slow releasing nitrogen fertilizers on CH_4 and N_2O emission in maize and rice fields in black earth soil. *Chinese Journal of Applied Ecology* (in Chinese), 2004, **23** (3): 44~48

[10] 齐玉春,董云社,章申. 华北平原典型农业区土壤甲烷通

- 量研究. 农村生态环境, 2002, **18** (3): 56~58, 60
- Qi Yuchun, Dong Yunshe, Zhang Shen. Methane fluxes of typical agricultural soil in the north China plain. *Rural Eco-Environment* (in Chinese), 2002, **18** (3): 56~58, 60
- [11] 王跃思, 纪宝明, 黄耀, 等. 农垦与放牧对内蒙古草原 N_2O 、 CO_2 排放和 CH_4 吸收的影响. 环境科学, 2001, **22** (6): 7~13
- Wang Yuesi, Ji Baoming, Huang Yao, et al. Effects of grazing and cultivating on emission of nitrous oxide, carbon dioxide and uptake of methane from grasslands. *Environmental Science* (in Chinese), 2001, **22** (6): 7~13
- [12] 郑循华, 王明星, 王跃思, 等. 华东稻田 CH_4 和 N_2O 排放. 大气科学, 1997, **8** (2): 495~499
- Zheng Xunhua, Wang Mingxing, Wang Yuesi, et al. CH_4 and N_2O emissions from rice paddy fields in southeast China. *Scientia Atmospherica Sinica* (in Chinese), 1997, **8** (2): 495~499
- [13] Xiong Z Q, Xing G X, Tsuruta H, et al. Measurement of nitrous oxide emissions from two rice-based cropping systems in China. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2002, **64**: 125~133
- [14] Wang Y S, Wang Y H. Quick measurement of CH_4 , CO_2 and N_2O emissions from a short-plant ecosystem. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2003, **20**: 842~844
- [15] 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 Yao. *Exchange of Carbon and Nitrogen Between Land and Atmosphere: from Experiment to Model* (in Chinese). Beijing: China Meteorological Press, 2003. 81~83.
- [16] 徐华, 邢光熹, 蔡祖聪, 等. 土壤水分状况和氮肥施用及品种对稻田 N_2O 排放的影响. 应用生态学报, 1999, **10** (2): 186~188
- Xu Hua, Xing Guangxi, Cai Zucong, et al. Effect of soil water regime and chemical N fertilizer application on N_2O emission from paddy field. *Chinese Journal of Applied Ecology* (in Chinese), 1999, **10** (2): 186~188
- [17] Cai Z C, Tsuruta H R, Rong X M, et al. CH_4 emissions from rice paddies managed according to farmer's practice in Hunan, China. *Biogeochemistry*, 2001, **56**: 75~91
- [18] Hao X, Chang C, Carefoot J M, et al. Nitrous oxide emissions from irrigated soil as affected by fertilizer and straw management. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2001, **60**: 1~8
- [19] Sehy U, Ruser R, Munch J C. Nitrous oxide fluxes from maize fields: Relationship to yield, site-specific fertilization, and soil conditions. *Agriculture Ecosystems and Environment*, 2003, **99**: 97~111
- [20] 徐华, 蔡祖聪, 李小平. 烤田对种稻土壤甲烷排放的影响. 土壤学报, 2000, **37** (1): 69~76
- Xu Hua, Cai Zucong, Li Xiaoping. Effect of soil drying on CH_4 flux from rice paddy soil. *Acta Pedologica Sinica* (in Chinese), 2000, **37** (1): 69~76
- [21] 黄耀, Sass R L, Fisher F M. 水稻物质生产对稻田甲烷排放的影响. 农业环境保护, 1999, **18** (4): 150~154
- Huang Yao, Sass R L, Fisher F M. Contribution of rice biomass production to CH_4 emission from irrigated paddy soils. *Agro-environmental Protection* (in Chinese), 1999, **18** (4): 150~154
- [22] IPCC. Atmospheric chemistry and greenhouse gases. In: *Climate Change 2001: The Scientific Basis*, Houghton et al. Eds. Cambridge: Cambridge University Press. 251~253
- [23] Klemetsson A K, Klemetsson L. Methane uptake in Swedish forest soil in relation to liming and extra N-deposition. *Biology and Fertility of Soils*, 1997, **25**: 296~301
- [24] 杜睿, 陈冠雄, 吕达仁, 等. 土壤含水量与温度对羊草、大针茅典型草原土壤-植物系统温室气体收支影响的初步研究. 气候与环境研究, 1997, **2** (3): 273~279
- Du Rui, Chen Guangxiong, Lü Daren, et al. The primary study on the effect of soil moisture and temperature on greenhouse gases fluxes from *Aneurolepidium Chinense* and *Stipa Grandis* typical prairie soil-plant system. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 1997, **2** (3): 273~279
- [25] Wang Y S, Xue M, Zheng X H, et al. Effects of environmental factors on N_2O emission from and CH_4 uptake by the typical grasslands in the Inner Mongolia. *Chemosphere*, 2005, **58**: 205~215
- [26] 王跃思, 王明星, 胡玉琼, 等. 半干旱草原温室气体排放/吸收与环境因子的关系研究. 气候与环境研究, 2002, **7** (3): 295~310
- Wang Yuesi, Wang Mingxing, Hu Yuqiong, et al. Study on relationship between the variations of greenhouse gases efflux/uptake and the key environmental factors in Mongolia semi-arid grasslands. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 2002, **7** (3): 295~310
- [27] Xing G X. N_2O emission from cropland in China. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 1998, **52**: 249~254
- [28] 卢燕宇, 黄耀, 郑循华. 农田氧化亚氮排放系数的研究. 应用生态学报, 2005, **16** (7): 1299~1302
- Lu Yanyu, Huang Yao, Zheng Xunhua. N_2O emission factor for agricultural soils. *Chinese Journal of Applied Ecology* (in Chinese), 2005, **16** (7): 1299~1302
- [29] Zou J W, Huang Y, Jiang J Y. 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**, doi: 10.1029/2004GB002401

- [30] 焦燕, 黄耀. 影响农田氧化亚氮排放过程的土壤因素. 气候与环境研究, 2003, **8** (4): 457~466
Jiao Yan, Huang Yao. Influence of soil properties on N_2O emissions from farmland. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 2003, **8** (4): 457~466
- [31] Zou J W, Huang Y, Sun W J, et al. Contribution of plants to N_2O emissions in soil-winter wheat ecosystem: Pot and field experiments. *Plant and Soil*, 2005, **269**: 205~211
- [32] 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**: 7875~7878
- [33] Chen G X, Boeckx P, Shen S, et al. Emission of N_2O from rye grass (*Lolium perenne* L.) . *Biology and Fertility of Soils*, 1999, **28**: 393~396
- [34] Chang C, Janzen H H, Cho C M, et al. Nitrous oxide emission through plants. *Soil Science Society of America Journal*, 1998, **62**: 35~38
- [35] Dean J, Harper J. Nitric oxide and nitrous-oxide production by soybean and winged bean during the in vivo nitrate reductase assay. *Plant Physiology*, 1986, **82**: 718~723