

DOI: 10.3724/SP.J.1011.2011.01122

施氮水平对太行山前平原冬小麦–夏玉米轮作 体系土壤温室气体通量的影响*

王玉英 胡春胜**

(中国科学院遗传与发育生物学研究所农业资源研究中心 石家庄 050022)

摘 要 应用静态明箱–气相色谱法对 4 个施氮肥水平 N0 [0 kg(N)·hm⁻²]、N200 [200 kg(N)·hm⁻²]、N400 [400 kg(N)·hm⁻²]、N600 [600 kg(N)·hm⁻²] 的夏玉米–冬小麦季轮作体系 2008~2010 年的土壤温室气体(CH₄、CO₂ 和 N₂O)排放通量进行研究,同时观测 5 cm 土层土壤温度并记录降水量。结果表明:太行山前平原冬小麦–夏玉米轮作农田生态系统为 CH₄ 吸收汇,CO₂ 和 N₂O 排放源。随着氮肥施入量的增加土壤对 CH₄ 的吸收速率降低,而 CO₂ 和 N₂O 的排放速率增加。冬小麦季施氮处理土壤对 CH₄ 的吸收速率显著低于无氮肥的 N0 处理,而 N600 处理土壤 CO₂ 和 N₂O 排放速率显著高于 N0 处理($P<0.05$)。施肥和灌溉会直接导致土壤 CO₂ 和 N₂O 的排放通量增加,同时土壤对 CH₄ 的吸收峰值减小。土壤温度升高和降水量增加以及干湿交替加剧均会造成 N₂O 和 CO₂ 排放速率增加。同时在持续干燥和低温条件的冬季不施氮处理观测到土壤对 N₂O 的吸收现象。N0、N200、N400 和 N600 处理土壤 CH₄ 年排放总量(kg·hm⁻²·a⁻¹)分别为-1.42、-0.75、-0.82、-0.92(2008~2009 年)和-2.60、-1.47、-1.35、-1.76(2009~2010 年),N0、N200、N400 和 N600 处理土壤 CO₂ 年排放总量(kg·hm⁻²·a⁻¹)分别为 15 597.6、19 345.6、21 455.9、29 012.5(2008~2009 年)和 10 317.7、11 474.0、13 983.5、20 639.3(2009~2010 年),N0、N200、N400 和 N600 处理土壤 N₂O 年排放总量(kg·hm⁻²·a⁻¹)分别为 1.05、2.16、5.27、6.98(2008~2009 年)和 1.49、2.31、4.42、5.81(2009~2010 年)。

关键词 太行山前平原 农田土壤 温室气体排放 氮肥施用 冬小麦–夏玉米轮作体系

中图分类号: S-19 **文献标识码:** A **文章编号:** 1671-3990(2011)05-1122-07

Soil greenhouse gas emission in winter wheat/summer maize rotation ecosystem as affected by nitrogen fertilization in the Piedmont Plain of Mount Taihang, China

WANG Yu-Ying, HU Chun-Sheng

(Center for Agricultural Resources Research, Institute of Genetics and Developmental Biology, Chinese Academy of Sciences, Shijiazhuang 050022, China)

Abstract The effect of soil nutrient augmentation via nitrogen deposition or fertilization on the processes of storing, releasing and re-absorbing of methane (CH₄) carbon dioxide (CO₂) and nitrous oxide (N₂O) greenhouse gases (GHG) in soil ecosystems are poorly understood. This study described an original field experiment for measuring soil GHG flux at nitrogen application rates of N0 [0 kg(N)·hm⁻²], N200 [200 kg(N)·hm⁻²], N400 [400 kg(N)·hm⁻²] and N600 [600 kg(N)·hm⁻²] in winter wheat/summer maize double cropping system in the Piedmont Plains of Mount Taihang. CH₄, CO₂ and N₂O emissions from soils under the winter wheat/summer maize rotation system were measured from July 2008 through June 2010 using the static transparent chamber and gas chromatography technique. The results showed that soils under winter wheat/summer maize ecosystems served as CH₄ sink, and CO₂ and N₂O sources. With increasing nitrogen application, CH₄ absorption rate decreased and CO₂ and N₂O flux rates increased. In winter wheat season, CH₄ absorption rate under N0 treatment was significantly higher than under other nitrogen treatments. Both CO₂ and N₂O emission flux rates under N600 treatment were significantly higher ($P<0.05$) than under N0 treatment. Nitrogen fertilization and

* 国家重点基础研究发展计划(973 计划)项目(2010CB833501-01-19)及国家自然科学基金项目(40805058)资助

** 通讯作者: 胡春胜(1965~), 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事农田生态领域的研究。E-mail: cshu@sjziam.ac.cn

王玉英(1977~), 女, 博士, 副研究员, 主要从事农田生态系统碳循环研究。E-mail: wangyuying@sjziam.ac.cn

收稿日期: 2011-03-31 接受日期: 2011-06-13

irrigation sharply induced CO_2 and N_2O peak flux emissions and decreased CH_4 peak absorption. Rising soil temperature, precipitation or alternating wet/dry weather increased soil N_2O and CO_2 emission flux rates. Negative N_2O flux rates were observed under low temperature and high evaporation conditions in N_0 application treatments in winter. CH_4 emission accumulation for 2008~2009 under N_0 , N_{200} , N_{400} and N_{600} treatments was -1.42 , -0.75 , -0.82 and $-0.92 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$, respectively. For 2009~2010, it was -2.60 , -1.47 , -1.35 and $-1.76 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$, respectively. CO_2 emission accumulation for 2008~2009 under N_0 , N_{200} , N_{400} and N_{600} treatments was $15\ 598$, $19\ 346$, $21\ 456$ and $29\ 013 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$, respectively. For 2009~2010, it was $10\ 318$, $11\ 474$, $13\ 984$ and $20\ 639 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$, respectively. Then N_2O emission accumulation for 2008~2009 under N_0 , N_{200} , N_{400} and N_{600} treatments was 1.05 , 2.16 , 5.27 and $6.98 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$, respectively. Also for 2009~2010, it was 1.49 , 2.31 , 4.42 and $5.81 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$, respectively.

Key words Piedmont Plain of Mount Taihang, Farmland soil, Greenhouse gas emission, Nitrogen application, Winter wheat/summer maize rotation system

(Received Mar. 31, 2011; accepted Jun. 13, 2011)

CH_4 和 N_2O 是仅次于 CO_2 的重要温室气体, 每分子 CH_4 和 N_2O 的全球增温潜势分别为 CO_2 的 21 倍和 296 倍(以 100 年为参照), 因其自工业化以来在大气中的浓度迅速增加而倍受关注^[1]。 CO_2 和 CH_4 是大气中最重要的两种温室气体, 对地球系统的能量收支以及地球气候的形成有重要影响。其浓度分别从工业革命前的 $280 \mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$ 和 $0.7 \mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$ 增加到现在的 $355 \mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$ 和 $1.7 \mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$, 仍以每年 0.4% 和 0.7% 的速率增加^[2], 二者的辐射增温效应占温室气体总效应的 71%^[3]。在当今气候变暖已成为备受瞩目的全球性问题的严峻背景下, 土壤含碳温室气体的排放也越来越受到人们的关注。农田作为陆地的主要组成部分, 农田生态系统温室气体排放动态对于理解和阐明其在全球气候变化中的贡献具有重要作用。近年来由于化学肥料施入和人工灌溉等管理措施, 使农田温室气体排放动态具有很大的不确定性。

农田土壤是温室气体排放的一个重要源, 农业管理措施, 包括耕作、灌溉以及施肥等, 通过影响土壤理化性状而影响着温室气体的排放^[4-11]。农业管理措施中, 肥料施用的影响对温室气体排放的影响最大, 对于不同肥料种类的肥料效应已经有很多研究^[6,12-15], 而对于长期不同施肥措施下肥料管理措施对农田土壤温室气体排放的影响还比较少^[8]。本研究通过静态箱-气相色谱法原位观测长期不同施氮水平下的农田土壤温室气体排放通量, 研究不同施肥条件下农田土壤温室气体排放的动态变化规律, 为农田土壤温室气体排放量的准确估算和模型模拟提供数据支持。通过对太行山前平原夏玉米-冬小麦轮作农田生态系统的土壤温室气体排放通量的观测, 结合环境因素, 探讨不同施氮量对农田生态系统温室气体排放的影响, 以期为全球农业宏观尺度气候变化研究和国家环境外交提供基础数据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况与试验设计

试验于2008年7月到2010年6月在中国科学院栾城农业生态系统试验站(以下简称栾城试验站)进行。栾城试验站位于北纬 $37^{\circ}53'$, 东经 $114^{\circ}41'$, 海拔高度50.1 m。属中国东部暖温带半湿润季风气候, 年平均气温 12.2°C , 降雨量536.8 mm, 无霜期200 d左右。该区供试土壤为潮褐土, 0~20 cm土层为中性壤土, 含有机质 $1.51 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、全氮 $0.10 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、有效磷 $9.33 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、有效钾 $95.60 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。

试验在夏玉米-冬小麦轮作长期定位试验地进行, 分为4个施氮肥水平: N_0 [$0 \text{ kg}(\text{N})\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$]、 N_{200} [$200 \text{ kg}(\text{N})\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$]、 N_{400} [$400 \text{ kg}(\text{N})\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$]、 N_{600} [$600 \text{ kg}(\text{N})\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$]、 $1/4$ 氮肥和全部磷肥[$65 \text{ kg}(\text{P}_2\text{O}_5)\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$]在小麦季作为底肥, $1/4$ 氮肥在小麦季作为追肥施入, $1/2$ 氮肥在玉米季追肥施入。每个处理3个重复, 每个重复的试验小区面积为 $5 \text{ m}\times 6 \text{ m}$ 。

1.2 气体的采集与分析

采用静态箱-气相色谱法(static chamber/gas chromatography techniques)观测夏玉米-冬小麦农田生态系统土壤温室气体排放通量。采样箱由顶箱和底座(地箱)组成, 所有采样箱均用透明的有机玻璃制成, 底座用聚乙烯塑料制成。在小区中央埋设采样箱底座, 底座为四面体, 面积 $200 \text{ mm}\times 600 \text{ mm}$, 高度200 mm, 上端有密封水槽。采样箱几何尺寸为 $200 \text{ mm}\times 600 \text{ mm}\times 400 \text{ mm}$ 。采样时地箱水槽内加水密封, 顶箱上端装有空气搅拌小风扇和取气体样品接口。采样箱置于小麦和玉米行间, 观测频率为小麦、玉米生长期每周1次, 时间均为上午9:00~11:00, 每处理3个重复。气温、土壤温度等环境要素与温室气体排放同期观测。其中, 气温、地表温度、箱内温度和5 cm地温由温度表测定。扣箱后立刻采集样品, 用60 mL注射器采集第1次样品, 每隔

10 min 取 60 mL 气体保存, 并准确记录每次采样时间。采样结束后, 立即移开采样箱。

采样后立即将样品带回实验室分析。样品采用 CA-5 气体样品进样仪进样, 利用 Agilent 6820 型气相色谱仪进行分析。CO₂ 和 CH₄ 检测器为 FID (氢火焰离子检测器), 载气为氮气, 流速为 30 mL·min⁻¹, 氢气为燃气, 流速为 30 mL·min⁻¹, 空气为助燃气, 流速为 400 mL·min⁻¹。检测器温度为 200 °C, 分离柱温度为 55 °C。N₂O 检测器为电子检测器 (ECD) (电子捕获检测器), 分离柱内填充料为 80~100 目 Porapak Q, 载气为氮气, 流量为 30 mL·min⁻¹, 检测器温度为 330 °C, 分离柱温度为 55 °C。

1.3 气体通量的计算

气体通量表示单位时间面积观测箱内该气体质量的变化。气体通量利用式(1)求得:

$$F = \frac{MPT_0}{V_0P_0T} H \frac{dc}{dt} \quad (1)$$

式中, F 为排放通量或土壤呼吸速率; M 为气体的摩尔质量; P_0 和 T_0 为理想气体标准状态下的空气压力和气温, 分别为 1 103.25 hPa 和 273.15 K; V_0 为目标化合物在标准状态下的摩尔体积, 即 22.41 L·mol⁻¹; H 为采样箱内气室高度; P 和 T 分别为采样时箱内的实际气压和气温; dc/dt 为箱内目标气体浓度随时间变化的回归曲线斜率。

通过夏玉米-冬小麦生育期内温室气体排放的田间原位观测数据, 采用内插法, 在实际观测值的基础上计算出不同施氮量各处理其余未观测天数当天同时刻的温室气体排放通量。其计算公式为:

$$Y = \sum_{i=1}^n X_i \times 24 \quad (n=1,2,3,\dots,i) \quad (2)$$

式中, Y 为温室气体排放总量 (kg·hm⁻²), X_i 为温室气体排放速率 (kg·hm⁻²·h⁻¹), i 为夏玉米-冬小麦生育期总天数。

1.4 数据处理

应用方差分析 (ANOVA)、回归分析 (regression analysis) 相关分析对数据进行处理, 处理间差异的多重比较采用 LSD 法完成。所有数据分析均在 Microsoft Excel 2003 和 SPSS 13.0 环境下进行。

2 结果与分析

2.1 冬小麦-夏玉米轮作农田生态系统土壤 CH₄ 季节排放特征

冬小麦-夏玉米轮作农田生态系统土壤 CH₄ 季节排放特征见图 1。由图 1 可见, 冬小麦-夏玉米轮作农田土壤生态系统为 CH₄ 吸收汇, 这与前人研究结果相吻合^[16-17]。2008 年和 2009 年玉米季土壤对 CH₄ 的最大吸收值均出现在 N600 处理, 其数值分别为 -0.042 mg·m⁻²·h⁻¹ (2008 年 8 月 2 日) 和 -0.131 mg·m⁻²·h⁻¹ (2008 年 8 月 5 日)。冬小麦季随着氮肥施用量的增加, 土壤对 CH₄ 的吸收速率降低。2009 年小麦季土壤对 CH₄ 的最大吸收值出现在越冬前期的 N0 处理, 其数值为 -0.057 mg·m⁻²·h⁻¹。2010 年小麦季土壤对 CH₄ 的最大吸收值出现在拔节期的 N0 处理, 其数值为 -0.076 mg·m⁻²·h⁻¹。可见, 从冬小麦越冬期到返青期存在着一个明显的土壤对 CH₄ 的吸收峰值; 这主要是由于这段时期无明显降水 (见图 4),

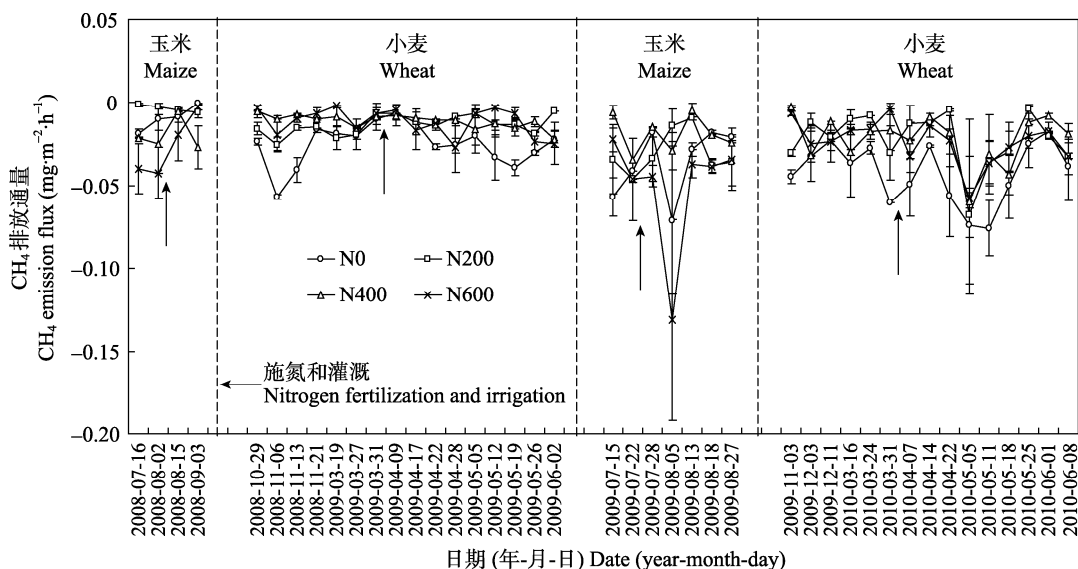


图 1 冬小麦-夏玉米轮作农田生态系统土壤 CH₄ 季节排放特征

Fig. 1 Seasonal CH₄ flux from a rotation soil ecosystem of summer-maize and winter-wheat

土壤底墒低, 干燥透气的土壤环境有利于 CH_4 氧化菌发挥活性, 土壤表现出吸收 CH_4 的特性^[17]。冬小麦季在4月中旬追肥灌溉以后, 土壤对 CH_4 的吸收速率明显降低。这主要是由于施肥会抑制土壤对 CH_4 的吸收作用^[18]。

2.2 冬小麦-夏玉米轮作农田生态系统土壤 CO_2 季节排放特征

冬小麦-夏玉米轮作农田生态系统土壤 CO_2 季节排放特征见图2。由图2可见, 冬小麦-夏玉米轮作农田土壤生态系统为 CO_2 的排放源。且随着氮肥施入量的增加, 土壤 CO_2 的排放速率增加。施肥和灌溉后会造成土壤 CO_2 的排放高峰。其中2008年和2009年玉米季土壤 CO_2 排放速率最高值均出现在 N600 处理, 其数值分别为 $857.41 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ (2008年8月15日) 和 $999.71 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ (2009年7月28日)。2009年小麦季和2010年小麦季 CO_2 的最高排放速率均出现在 N600 处理, 其出现日期分别为2009年4月9日和2010年5月5日, 其数值分别为 $696.13 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ 和 $576.23 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ 。土壤向大气排放 CO_2 的过程, 也就是土壤呼吸的过程, 主要是由微生物氧化有机物和根系呼吸产生。研究表明, 从土壤中释放的 CO_2 85%~90%来源于土壤微生物的生命活动, 约15%来源于植物根的呼吸^[19]。由于返青期作物根系较少, 施用拔节肥和灌水以后, 根系迅速生长并吸收大量的矿质营养, 因此需要更多能量用于对养分的吸收, 从而加大了根系呼吸强度, 促进了土壤 CO_2 的排放。灌浆期作物生长及生理代谢活动均达到最旺盛时期, 此时土壤 CO_2 释放量达到高

峰。成熟期小麦根系逐渐衰老, 再加上土壤水分的减少, 根系活力降低, 呼吸速率降低, 出现 CO_2 释放量迅速下降的趋势。

2.3 冬小麦-夏玉米轮作农田生态系统土壤 N_2O 季节排放特征

冬小麦-夏玉米轮作农田生态系统土壤 N_2O 季节排放特征见图3。由图3可见, 冬小麦-夏玉米轮作农田土壤生态系统为 N_2O 的排放源。且随着氮肥施入量的增加, 土壤 N_2O 的排放速率增加。施肥和灌溉后会造成土壤 N_2O 的排放高峰, 随着氮肥施入量的增加, 土壤 N_2O 的排放速率呈上升趋势。2008年和2009年玉米季土壤 N_2O 排放速率最高值均出现在 N600 处理, 其数值分别为 $0.983 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ (2008年8月2日) 和 $1.044 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ (2009年7月28日)。2009年小麦季和2010年小麦季 N_2O 的最高排放速率均出现在 N600 处理, 其出现日期分别为2009年4月9日和2010年5月5日, 其数值分别为 $0.526 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ 和 $0.591 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ 。施入氮肥会促进土壤 N_2O 向大气中的排放, 这与其他人的研究成果相吻合^[20-21]。同时气温和降雨也是引起农田土壤 N_2O 排放季节变化的重要因子, 而土壤温度和土壤水分则直接影响着硝化和反硝化作用^[22-26]。小麦进入返青期以后, 施肥为植株提供了生长所需养分, 同时也为微生物提供了充足的底物; 此时5 cm土层土壤温度在 10°C 以上, 降水量明显增加(见图4), 同时由于降雨量增加土壤干湿交替状态使土壤硝化和反硝化过程增强, 导致土壤生成及排放的 N_2O 增多^[21]。其中2010年小麦季 N0 处理土壤 N_2O 排放观

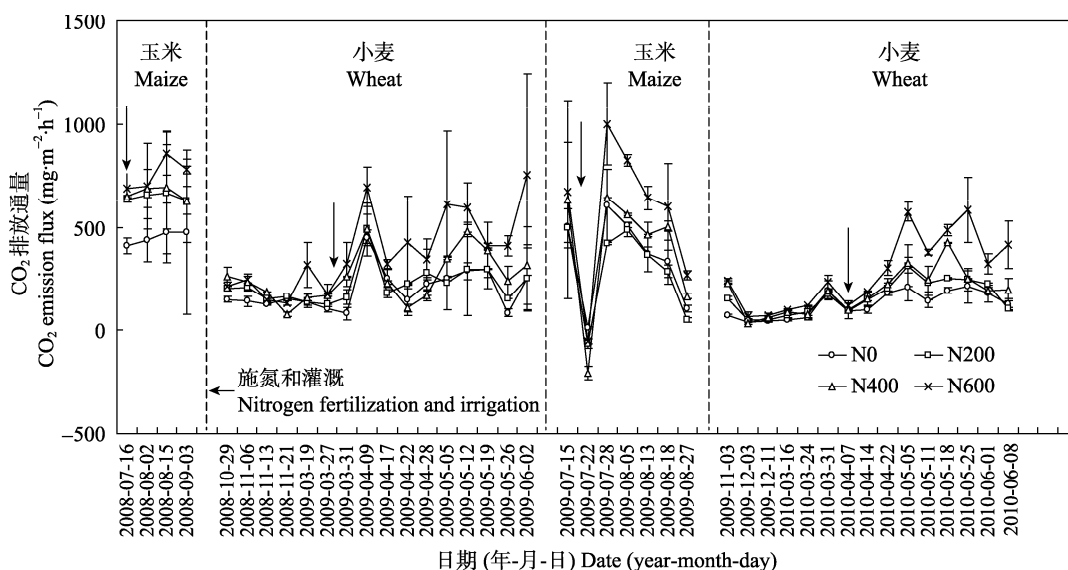


图2 冬小麦-夏玉米轮作农田生态系统土壤 CO_2 季节排放特征

Fig. 2 Seasonal CO_2 flux from a rotation soil ecosystem of summer-maize and winter-wheat

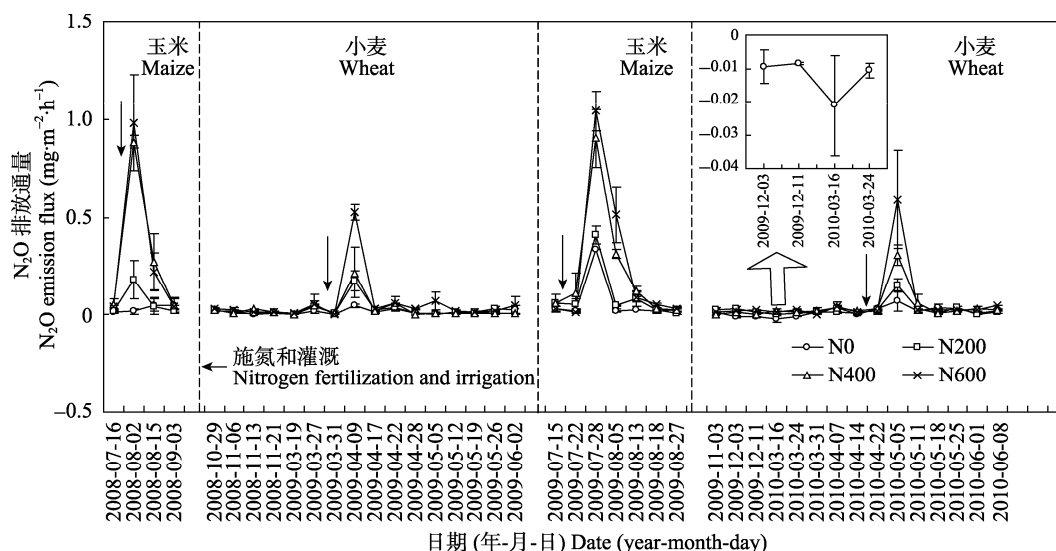


图 3 冬小麦-夏玉米轮作农田生态系统土壤 N_2O 季节排放特征

Fig. 3 Seasonal N_2O flux from a rotation soil ecosystem of summer-maize and winter-wheat

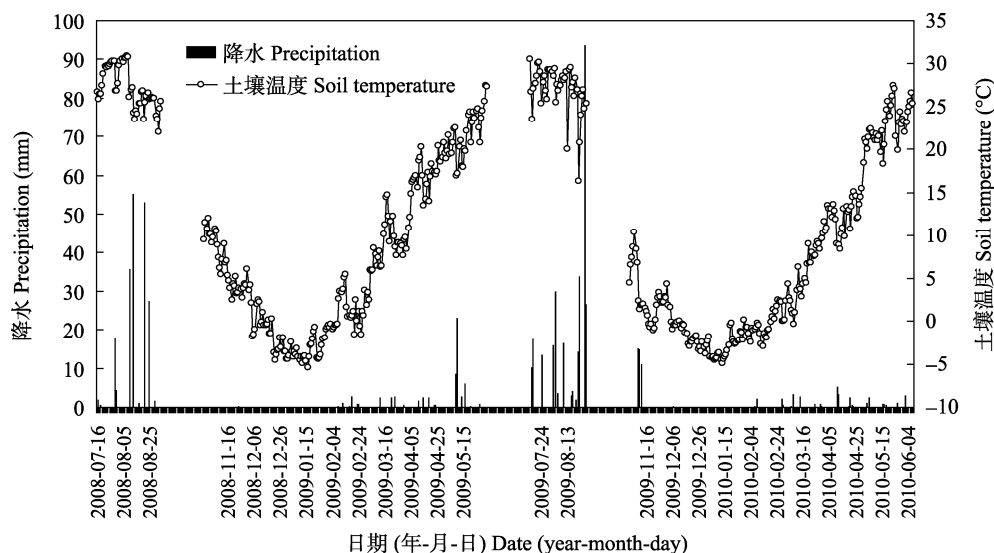


图 4 夏玉米-冬小麦轮作农田生态系统 5 cm 土层土壤温度及降水量季节变化

Fig. 4 Precipitation and soil temperature at 5 cm depth of a rotation ecosystem of summer-maize and winter-wheat

测到 1 个负排放峰值, 从 2009 年 12 月 3 日到次年 3 月 24 日 N_0 处理土壤吸收 N_2O , 其数值范围为 $-0.021 \sim -0.008 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ 。从 2009 年 12 月 3 日到 2010 年 3 月 24 日共 112 d 期间总降水量为 11.8 mm, 日平均气温为 -0.45°C ; 其降水量和日平均土壤温度均低于同期 2008 年 12 月 3 日到 2009 年 3 月 24 日的 13.6 mm 和 0.74°C (图 4)。研究表明, 在土壤氮素含量较低的干燥环境中, 会出现土壤对 N_2O 的吸收现象, 其中有文献报道的 N_2O 负排放值范围为 $-0.0014 \sim -484 \text{ } \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ [27]。本试验结果支持上述结论。

2.4 冬小麦-夏玉米轮作农田生态系统土壤 CH_4 、 CO_2 及 N_2O 排放速率及季节排放总量

冬小麦-夏玉米轮作农田生态系统土壤 CH_4 、

CO_2 及 N_2O 排放速率及季节排放总量见表 1。由表 1 可见, 2009 年和 2010 年冬小麦季土壤对 CH_4 的吸收速率和季节吸收总量随着氮肥施用量的增加而减少, 其中 N_{600} 处理土壤对 CH_4 的吸收速率显著低于其他处理 ($P < 0.05$)。施氮量增加降低冬小麦季对 CH_4 的吸收主要是因为 NH_4^+ 对土壤 CH_4 的氧化有很强的抑制作用 [28-29], 施入氮肥的土壤中 NH_4^+ 富集程度高 [30-31], 且在相同施氮水平下冬小麦季氮挥发量明显低于玉米季, 说明冬小麦季耕层土壤 NH_4^+-N 在施肥后深翻等措施下很快被转化为 NO_3^--N 。土壤中 NO_3^--N 聚集会影响甲烷氧化菌的渗透势 [31], 进而抑制土壤对甲烷氧化, 造成其对 CH_4 吸收量的降低。玉米季土壤对 CH_4 的吸收速率两年结果趋势一

表1 不同施氮水平下夏玉米-冬小麦轮作农田生态系统土壤 CH₄、CO₂ 及 N₂O 排放速率及季节排放总量
Table 1 CH₄, CO₂ and N₂O flux rates and accumulated emission quantities of a rotation ecosystem of summer-maize and winter-wheat under different nitrogen application rates

处理 Treatment		CH ₄		CO ₂		N ₂ O	
		排放速率 Flux rate (mg·m ⁻² ·h ⁻¹)	排放总量 Accumulated emission (kg·hm ⁻²)	排放速率 Flux rate (mg·m ⁻² ·h ⁻¹)	排放总量 Accumulated emission (kg·hm ⁻²)	排放速率 Flux rate (mg·m ⁻² ·h ⁻¹)	排放总量 Accumulated emission (kg·hm ⁻²)
2008	N0	-0.012 1(0.004 7)ab	-0.113 7	442.98(76.90)b	5 394.59	0.030 5(0.012 6)b	0.366 1
玉米	N200	-0.003 1(0.001 0)a	-0.040 2	647.30(63.44)a	7 759.40	0.076 4(0.028 5)b	0.782 0
Maize	N400	-0.016 5(0.006 4)ab	-0.234 0	666.38(34.08)a	7 993.69	0.307 9(0.016 5)a	3.774 3
	N600	-0.026 2(0.004 2)b	-0.312 1	757.81(41.39)a	9 073.65	0.365 6(0.103 8)ab	3.847 7
2009	N0	-0.024 2(0.002 1)b	-1.306 3	190.65(38.12)b	10 203.00	0.013 2(0.001 1)c	0.682 1
小麦	N200	-0.014 4(0.001 2)a	-0.706 7	227.45(19.85)b	11 586.20	0.030 3(0.003 1)b	1.378 1
Wheat	N400	-0.011 0(0.000 7)a	-0.588 5	264.31(18.35)ab	13 462.24	0.035 8(0.007 5)b	1.491 6
	N600	-0.012 0(0.002 7)a	-0.611 4	374.33(49.41)a	19 938.86	0.067 6(0.006 0)a	3.136 8
2009	N0	-0.035 7(0.007 8)a	-0.384 6	297.86(43.28)a	3 689.53	0.041 2(0.015 8)c	0.723 3
玉米	N200	-0.029 9(0.003 1)a	-0.319 5	266.09(10.41)a	3 081.03	0.091 4(0.022 1)bc	1.032 4
Maize	N400	-0.018 1(0.001 6)a	-0.200 3	394.13(135.90)a	4 181.62	0.233 9(0.037 9)a	2.356 1
	N600	-0.054 7(0.014 2)a	-0.534 5	536.61(37.70)a	5 960.19	0.211 2(0.060 6)ab	2.679 5
2010	N0	-0.043 3(0.006 9)b	-2.218 0	117.01(6.93)c	6 628.17	0.014 2(0.004 1)b	0.771 2
小麦	N200	-0.020 7(0.002 9)a	-1.115 4	155.39(11.44)bc	8 392.99	0.025 8(0.005 4)b	1.275 3
Wheat	N400	-0.022 7(0.002 7)a	-1.154 7	172.13(13.98)b	9 801.87	0.035 5(0.007 5)ab	2.070 4
	N600	-0.024 1(0.002 5)a	-1.226 1	286.76(19.56)a	14 679.16	0.070 7(0.024 0)a	3.140 4

括号内为标准误差, 相同字母表示差异不显著($P<0.05$)。Values (means with SE in the brackets) followed by the same letter are not significantly different within columns ($P<0.05$).

致, 但差异显著性不同。2009 年冬小麦季土壤 N0、N200、N400 和 N600 处理的 CH₄ 季节排放总量(kg·hm⁻²)分别为-1.306 3、-0.706 7、-0.588 5 和 -0.611 4, 2010 年冬小麦季土壤 N0、N200、N400 和 N600 处理的 CH₄ 季节排放总量分别为-2.218 0、-1.115 4、-1.154 7 和-1.226 1。2009 年和 2010 年冬小麦季土壤 CO₂ 的排放速率和季节排放总量随着氮肥施用量的增加而增加, 这主要是由于施肥促进根系的生长发育, 进而使土壤呼吸速率增加。2009 年小麦季 N600 处理土壤 CO₂ 排放速率显著高于 N0 和 N200 处理; 2010 年小麦季 N600 处理土壤 CO₂ 排放速率显著高于其他处理($P<0.05$)。2009 年冬小麦季土壤 N0、N200、N400 和 N600 处理的 CO₂ 季节排放总量(kg·hm⁻²)分别为 10 203.00、11 586.20、13 462.24 和 19 938.86, 2010 年冬小麦季土壤 N0、N200、N400 和 N600 处理的 CO₂ 季节排放总量分别为 6 628.17、8 392.99、9 801.87 和 14 679.16。

夏玉米和冬小麦季土壤 N₂O 的排放速率和季节排放总量均随着氮肥施用量的增加而增加。在无外源氮施入情况下, 土壤中的有效氮被植物利用后, 使硝化或者反硝化作用失去有效氮源, 从而减少 N₂O 的产生机会^[32]。因此, 氮源成为 N₂O 排放的主要限制因子, 土壤中存在多余的有效氮是土壤 N₂O 产生的前提条件^[33], 使得在 N200、N400 和 N600 水平下土壤 N₂O 排放出现差异。2009 年小麦季土壤

N₂O 排放速率施氮肥处理显著高于 N0 处理; 2010 年小麦季 N600 处理土壤 N₂O 排放速率显著高于 N0 和 N200 处理($P<0.05$)。2009 年冬小麦季土壤 N0、N200、N400 和 N600 处理的 N₂O 季节排放总量(kg·hm⁻²)分别为 0.682 1、1.378 1、1.491 6 和 3.136 8, 2010 年冬小麦季土壤 N0、N200、N400 和 N600 处理的 N₂O 季节排放总量分别为 0.771 2、1.275 3、2.070 4 和 3.140 4。2009 年和 2010 年玉米季 N400 处理土壤 N₂O 排放速率均显著高于 N0 和 N200 处理($P<0.05$)。2009 年夏玉米季土壤 N0、N200、N400 和 N600 处理的 N₂O 季节排放总量(kg·hm⁻²)分别为 0.366 1、0.782 0、3.774 3 和 3.847 7, 2010 年夏玉米季土壤 N0、N200、N400 和 N600 处理的 N₂O 季节排放总量分别为 0.723 3、1.032 4、2.356 1 和 2.679 5。

3 结论

太行山前平原冬小麦-夏玉米轮作农田生态系统为 CH₄ 吸收汇、CO₂ 和 N₂O 排放源。随着氮肥施入量的增加, 土壤对 CH₄ 的吸收速率降低, 而 CO₂ 和 N₂O 的排放速率增加。冬小麦季施氮处理土壤对 CH₄ 的吸收速率显著低于 N0 处理, 而 N600 处理土壤 CO₂ 和 N₂O 排放速率显著高于 N0 处理($P<0.05$)。

施肥和灌溉会直接导致土壤 CO₂ 和 N₂O 排放通量增加, 同时土壤对 CH₄ 的吸收峰值减小。土壤温度升高、降水量增加和干湿交替加剧均会造成 N₂O

和 CO_2 排放速率增加,这主要是由于土壤微生物和硝化反硝化细菌活动加剧所致。同时在持续干燥和低温条件的冬季不施氮处理观测到土壤对 N_2O 的吸收现象。

N_0 、 N_{200} 、 N_{400} 和 N_{600} 处理土壤 CH_4 年排放总量($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$)分别为-1.42、-0.75、-0.82、-0.92(2008~2009 年)和-2.60、-1.47、-1.35、-1.76(2009~2010 年),土壤 CO_2 年排放总量($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$)分别为 15 597.6、19 345.6、21 455.9、29 012.5(2008~2009 年)和 10 317.7、11 474.0、13 983.5、20 639.3(2009~2010 年),土壤 N_2O 年排放总量($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$)分别为 1.05、2.16、5.27、6.98(2008~2009 年)和 1.49、2.31、4.42、5.81(2009~2010 年)。

参考文献

- [1] IPCC. Climate change[C]//Houghton J T, Ding Y, Griggs D J, et al. The scientific basis. Contribution of Working Group to the Third Assessment Report of the International Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press, 2001: 87-98
- [2] Castro M S, Steudler P A, Melillo J M, et al. Factors controlling atmospheric methane consumption by temperate forest soils[J]. Global Biogeochemical Cycles, 1995, 9(1): 1-10
- [3] Raich J W, Potter C S. Global patterns of carbon dioxide emissions from soils[J]. Global Biogeochemical Cycles, 1995, 9(1): 23-36
- [4] Ball B C, Scott A, Parker J P. Field N_2O , CO_2 and CH_4 fluxes in relation to tillage, compaction and soil quality in Scotland [J]. Soil & Tillage Research, 1999, 53: 29-39
- [5] Li Y, Lin E, Rao M. The effect of agricultural practices on methane and nitrous oxide emissions from rice field and pot experiments[J]. Nutrient Cycling in Agroecosystems 1997, 49: 47-50
- [6] Ruser R, Flessa H, Schilling R, et al. Effect of crop type-specific soil management and N fertilization on N_2O emissions from a fine-loamy soil[J]. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 2001, 59: 177-191
- [7] Chu H, Hosen Y, Yagi K. Nitrogen oxide emissions and soil microbial properties as affected by N-fertilizer management in a Japanese Andisol[J]. Soil Science and Plant Nutrition, 2004, 50: 287-292
- [8] Scheer C, Wassmann R, Klenzler K, et al. Nitrous oxide emissions from fertilized irrigated cotton (*Gossypium hirsutum* L.) in the Aral Sea Basin, Uzbekistan: Influence of nitrogen applications and irrigation practices[J]. Soil Biology & Biochemistry, 2008, 40: 290-301
- [9] Ruser R, Flessa H, Schilling R, et al. Soil compaction and fertilization effects on nitrous oxide and methane fluxes in potato fields[J]. Soil Science Society of America Journal, 1998, 62: 1587-1595
- [10] Ruser R, Flessa H, Schilling F, et al. Effect of crop-specific field management and N-fertilization on N_2O emissions from a fine loamy soil[J]. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 2001, 59: 177-191
- [11] Ruser R, Flessa H, Russow R, et al. Emission of N_2O , N_2 and CO_2 from soil fertilized with nitrate: Effect of compaction, soil moisture and rewetting[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2006, 38: 263-274
- [12] 曾江海, 王智平, 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, 67
- [13] 王立刚, 邱建军, 李维炯. 黄淮海平原地区夏玉米农田土壤呼吸的动态研究[J]. 土壤肥料, 2002(6): 13-17
- [14] 戴万宏, 刘军, 王益权, 等. 不同培肥措施下土壤 CO_2 释放及其动力学研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2002, 8(3): 292-297
- [15] 戴万宏, 王益权, 黄耀, 等. 农田生态系统土壤 CO_2 释放研究[J]. 西北农林科技大学学报: 自然科学版, 2004, 32(12): 1-7
- [16] 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[J]. 农村生态环境, 2002, 18(3): 56-58, 60
- [17] 张雪松, 申双和, 李俊, 等. 华北平原冬麦田土壤 CH_4 的吸收特征研究[J]. 南京气象学院学报, 2006, 29(2): 181-188
- [18] 王玉英, 胡春胜, 程一松, 等. 太行山前平原夏玉米-冬小麦轮作生态系统碳截存及其气体调节价值[J]. 农业环境科学学报, 2009, 28(7): 1508-1515
- [19] Davidson E A, Belk E, Boone R D. Soil water content and temperature as independent of confounded factors controlling soil respiration in a temperate mixed hard forest[J]. Global Change Biology, 1998, 4: 217-227
- [20] 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
- [21] 叶欣, 李俊, 王迎红, 等. 华北平原典型农田土壤氧化亚氮的排放特征[J]. 农业环境科学学报, 2005, 24(6): 1186-1191
- [22] 史弈, 黄国宏. 土壤中反硝化酶活性变化与 N_2O 排放的关系[J]. 应用生态学报, 1999, 10(3): 329-331
- [23] 谢建治, 尹君, 王殿武, 等. 田间土壤反硝化作用动态初探[J]. 农业环境保护, 1999, 18(6): 272-274
- [24] 袁力云. 反硝化作用在土壤氮素平衡中的作用[J]. 土壤学进展, 1988(5): 8-13
- [25] 邹国元, 张福锁. 根际反硝化作用与 N_2O 释放[J]. 中国农业大学学报, 2002, 7(1): 77-82
- [26] 杜建军, 田霄鸿, 王朝辉, 等. 根系吸收水分和养分的作用以及以肥促根的效应[M]//汪德水. 农田水肥关系原理与调控技术. 北京: 中国农业科技出版社, 1995: 106-107
- [27] Chapuis-Lardy L, Wrage N, Metay A, et al. Soils, a sink for N_2O ? A review[J]. Global Change Biology, 2007, 13(1): 1-17
- [28] Bender M, Conrad R. Microbial oxidation of methane, ammonium and carbon monoxide, and turnover of nitrous oxide and nitric oxide in soils[J]. Biogeochemistry, 1994, 27(2): 97-112
- [29] Flessa H, Dörsch P, Beese F, et al. Influence of cattle wastes on nitrous oxide and methane fluxes in pasture land[J]. J Environ Qual, 1996, 25(6): 1366-1370
- [30] Hütsch B W, Webster C P, Powelson D S. Methane oxidation as affected by land use, soil pH and nitrogen fertilization[J]. Soil Biol Biochem, 1994, 26(12): 1613-1622
- [31] Dunfield P, Knowles R. Kinetics of inhibition of methane oxidation by nitrate, nitrite, and ammonium in a humisol[J]. Appl Environ Microbiol, 1995, 61(8): 3129-3135
- [32] 焦燕, 黄耀, 宗良纲, 等. 氮肥水平对不同土壤 N_2O 排放的影响[J]. 环境科学, 2008, 29(8): 2094-2098
- [33] Maag M, Vinther F P. Effect of temperature and water on gaseous emissions from soils treated with animal slurry[J]. Soil Sci Soc Amer J, 1999, 63(4): 858-865