

DOI: 10.13930/j.cnki.cjea.180913

李春喜, 李斯斯, 邵云, 马守臣, 刘晴, 翁正鹏, 李晓波. 有机物料还田对冬小麦农田土壤温室气体排放影响的研究[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2019, 27(6): 815-824

LI C X, LI S S, SHAO Y, MA S C, LIU Q, WENG Z P, LI X B. Effects of organic waste application on soil greenhouse gas emissions of a winter wheat field[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2019, 27(6): 815-824

## 有机物料还田对冬小麦农田土壤温室气体排放影响的研究\*

李春喜<sup>1</sup>, 李斯斯<sup>1</sup>, 邵云<sup>1</sup>, 马守臣<sup>2</sup>, 刘晴<sup>1</sup>, 翁正鹏<sup>1</sup>, 李晓波<sup>1</sup>

(1. 河南师范大学生命科学学院 新乡 453007; 2. 河南理工大学测绘与国土信息工程学院 焦作 454000)

**摘要:** 探讨有机物料还田对冬小麦田温室气体排放特性的影响, 对提高经济效应和环境效应具有积极意义。本研究应用静态箱-气相色谱法对秸秆还田(J)、秸秆还田+牛粪(JF)和秸秆还田+菌渣(JZ)3种有机物料还田下分别施氮肥 243 kg(N)·hm<sup>-2</sup>(减氮 10%, N1)、216 kg(N)·hm<sup>-2</sup>(减氮 20%, N2)对冬小麦农田 N<sub>2</sub>O、CO<sub>2</sub> 和 CH<sub>4</sub> 的排放通量进行监测, 探讨了不同施肥措施对麦田温室气体累积排放量、增温潜势的影响。试验期间同步记录每项农事活动机械燃油量、施肥量和灌溉量, 测定产量, 地上部生物量, 估算农田碳截留。结果表明, 冬小麦农田土壤 N<sub>2</sub>O 和 CO<sub>2</sub> 是排放源, 是 CH<sub>4</sub> 的吸收汇, 氮肥施入、灌溉以及强降水促进了土壤 N<sub>2</sub>O 和 CO<sub>2</sub> 的生成, 却弱化了 CH<sub>4</sub> 作为大气吸收汇的特征。牛粪+秸秆(JF)处理 N<sub>2</sub>O 和 CO<sub>2</sub> 排放总量最高, 分别为 3.5 kg(N<sub>2</sub>O-N)·hm<sup>-2</sup> 和 19 689.67 kg(CO<sub>2</sub>-C)·hm<sup>-2</sup>, 但 CH<sub>4</sub> 的吸收值最大, 为 5.33 kg(CH<sub>4</sub>-C)·hm<sup>-2</sup>, 均显著高于菌渣+秸秆(JZ)和秸秆(J)处理(P<0.05); 各处理 N<sub>2</sub>O 和 CO<sub>2</sub> 的总量随施氮量的增加呈升高趋势, CH<sub>4</sub> 的总量随施氮量的增加而呈降低趋势。JFN2、JN2 和 JZN2 处理农田综合增温潜势(GWP)均为负值, 表明有机物料还田且减氮 20%条件下农田生态系统为大气碳汇, 麦季净截留碳 1 038~2 024 kg·hm<sup>-2</sup>, 其他处理 GWP 值均为正。JZN2 处理小麦产量为 8 061 kg·hm<sup>-2</sup>, 显著高于 JFN2 处理(P<0.05)。综上所述, JZN2 处理不仅能够保证小麦产量, 且对环境效应最有利, 为本区域冬小麦较优的施肥管理模式。

**关键词:** 秸秆还田; 菌渣; 牛粪; 减氮; 冬小麦田; 温室气体; 产量; 全球增温潜势

中图分类号: S512.1 文献标识码: A 文章编号: 2096-6237(2019)06-0815-10

## Effects of organic waste application on soil greenhouse gas emissions of a winter wheat field\*

LI Chunxi<sup>1</sup>, LI Sisi<sup>1</sup>, SHAO Yun<sup>1</sup>, MA Shouchen<sup>2</sup>, LIU Qing<sup>1</sup>, WENG Zhengpeng<sup>1</sup>, LI Xiaobo<sup>1</sup>

(1. College of Life Sciences, Henan Normal University, Xinxiang 453007, China; 2. School of Surveying and Land Information Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454000, China)

**Abstract:** Exploring the impact of returning organic materials to the soil on greenhouse gas emission characteristics of winter wheat fields can help to improve economic and environmental consequences. Based on 3 modes of organic material return (JF: straw return and cow dung; J: straw return; JZ: straw return and mushroom dregs) and 2 nitrogen levels (N1: 243 kg·hm<sup>-2</sup>; N2: 216 kg·hm<sup>-2</sup>), the fluxes of N<sub>2</sub>O, CO<sub>2</sub> and CH<sub>4</sub> in winter wheat fields were monitored using the static chamber method and gas chromatography, and

\* 国家重点研发计划重点专项(2016YFD0300203-3, 2018YFD0300708-4)资助

李春喜, 主要从事小麦栽培及生理研究。E-mail: 496513087@qq.com

收稿日期: 2018-10-25 接受日期: 2019-01-07

\* This study was supported by the National Key Research and Development Project of China (2016YFD0300203-3, 2018YFD0300708-4).

Corresponding author, LI Chunxi, E-mail: 496513087@qq.com

Received Oct. 25, 2018; accepted Jan. 7, 2019

the effects of the different fertilization measures on cumulative greenhouse gas emissions and warming potential of wheat fields were studied. During the experimental period, the amount of fuel consumed by farm machines and the power consumed during irrigation and fertilizer application were recorded and transformed to their carbon equivalents using a transformation coefficient. In addition, crop yield and aboveground biomasses were measured and carbon sequestration calculated. The total GWP under each of the 6 treatments were estimated based on the identified parameters of the greenhouse effect. The results indicated that wheat fields served as sources of  $\text{N}_2\text{O}$  and  $\text{CO}_2$  and sinks of  $\text{CH}_4$ . Nitrogen application and adequate irrigation increased  $\text{CO}_2$  and  $\text{N}_2\text{O}$  in the soil, but weakened the characteristics of  $\text{CH}_4$  as an atmospheric absorption sink. The total amounts of  $\text{N}_2\text{O}$  and  $\text{CO}_2$  emitted were highest in the JF treatment, at  $3.5 \text{ kg } (\text{N}_2\text{O}-\text{N})\cdot\text{hm}^{-2}$  and  $19\ 689.67 \text{ kg } (\text{CO}_2-\text{C}) \text{ hm}^{-2}$  respectively, and the absorption value of  $\text{CH}_4$  in this treatment was  $5.33 \text{ kg } (\text{CH}_4-\text{C}) \text{ hm}^{-2}$ , significantly higher than in both of the JZ and J treatments. The total amounts of  $\text{N}_2\text{O}$  and  $\text{CO}_2$  in each treatment increased, and the total amount of  $\text{CH}_4$  decreased, with an increase in the nitrogen application rate. The GWP of JFN2, JN2, and JZN2 treatments were all negative, which indicated that the farmland ecosystem is an atmospheric carbon sink when organic materials were returned to the field; nitrogen was reduced by 20%, and the carbon interception by wheat was  $1\ 038-2\ 024 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ . The GWP values were positive and the JZN2 treatment-treated wheat yield was  $8\ 061 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ , significantly higher than that of the JFN2 treatment. In summary, JZN2 treatment could ensure wheat yield and had the most favorable environmental effects, and thus was the best fertilization management model for winter wheat in this region

**Keywords:** Straw returning; Mushroom dregs; Cow dung; Nitrogen reduction; Winter wheat field; Greenhouse gas; Yield; Global warming potential

自 20 世纪 70 年代以来, 区域气候变暖已成为全世界各领域学者关注的焦点, 而全球变暖则由温室气体引起。农田土壤是重要的温室气体  $\text{N}_2\text{O}$ 、 $\text{CO}_2$  和  $\text{CH}_4$  的排放源, 其排放分别占全球  $\text{N}_2\text{O}$ 、 $\text{CO}_2$  和  $\text{CH}_4$  总排放的 10%、60%和 50%<sup>[1-2]</sup>。农业活动如耕作、施肥以及灌溉等, 造成的温室气体排放量为 8.20 亿 t  $\text{CO}_2$  当量, 研究表明农田 65%以上的温室气体排放来自氮肥的施用<sup>[3-4]</sup>。氮素是影响作物产量的主要因素之一, 但在实际生产中, 农民为了追求高产, 普遍过量施用氮肥, 不仅影响了农产品品质、降低氮肥利用率, 而且引起了土壤酸化、板结以及温室气体排放等一系列环境问题<sup>[5-6]</sup>。秸秆、牛粪和菌渣等有机物料不仅可以增加土壤碳储量, 提高土壤肥力, 而且可以减少废弃物对环境造成的污染, 对温室气体减排具有重要意义。

农田土壤是温室气体排放的重要源头之一, 农事活动, 例如耕作、灌溉及施肥等, 改变了土壤物理性状, 影响了温室气体排放<sup>[7]</sup>。肥料施用与作物产量、土壤质量和温室气体排放等问题息息相关, 关于施肥量对温室气体的影响已有较多研究<sup>[8]</sup>, 却未有一致的结论。研究表明, 随着施用量的增加,  $\text{CO}_2$ 和 $\text{N}_2\text{O}$ 排放量随之增加; 也有研究表明, 施氮量在一定范围内 $[50\sim 120 \text{ kg}(\text{N})\cdot\text{hm}^{-2}]$   $\text{N}_2\text{O}$ 排放量较少, 超过阈值会随着施用量的增加而增加<sup>[9]</sup>。近几年, 随着构建循环农业体系的提出, 学者重视农业废弃物的再利用, 单一关注作物秸秆和畜禽粪便对农田生态系统的影响<sup>[10-11]</sup>, 而对有机无机配施对土壤温室气体排放的研究较少<sup>[12-13]</sup>。本研究通过观测不同有机物料还田下的农田土壤温室气体的排放通量, 研究土壤温室

气体的动态变化规律, 同时探讨有机物料还田和适量减氮对农田温室气体排放及增温潜力的影响, 并估算华北平原麦区综合增温潜势, 为指导合理施肥以及制定温室气体的减排措施提供参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验区概况

试验开展于 2017—2018 年河南省新乡市获嘉县照镜镇前李村小麦(*Triticum aestivum*)高产田。该地区位于  $35^{\circ}9'\text{N}$ 、 $113^{\circ}39'\text{E}$ , 海拔 120 m, 年平均气温  $15.7$ 、年日照时数 2 206 h、年均蒸发量 1 748 mm、年均降水量 447 mm、无霜期 219 d。试验地前茬作物为玉米(*Zea mays*)。试验田土壤为黏壤土, 耕层土壤全氮、全磷和有机质含量分别为  $1.36 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、 $0.55 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$  和  $33.8 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。

图 1 显示了试验观测期间小麦季 2017 年 10 月—2018 年 6 月采集气体期间大气温度、5 cm 土壤温度和降水量的变化趋势。5 cm 土壤温度的变化趋势与气温的变化趋势基本一致。整个试验期间气温和 5 cm 土壤温度的变化范围分别为  $-4.9\sim 27.8$  和  $-2.1\sim 20.8$ , 最高温度出现在 5 月中旬, 最低温度出现在 1 月初, 气温和 5 cm 土壤温度均值分别为 10.5 和 9.3。试验期间小麦季降水总量为 194.6 mm, 期间共出现 2 次日降水量超过 20 mm 的降水, 分别于 4 月 12 日和 4 月 13 日。

### 1.2 试验设计与田间管理

本试验为长期定位试验, 开始于 2008 年, 供试小麦品种始终为‘百农矮抗 58’(河南科技学院提供)。各处理均为玉米秸秆全量还田, 并依据当地常规施

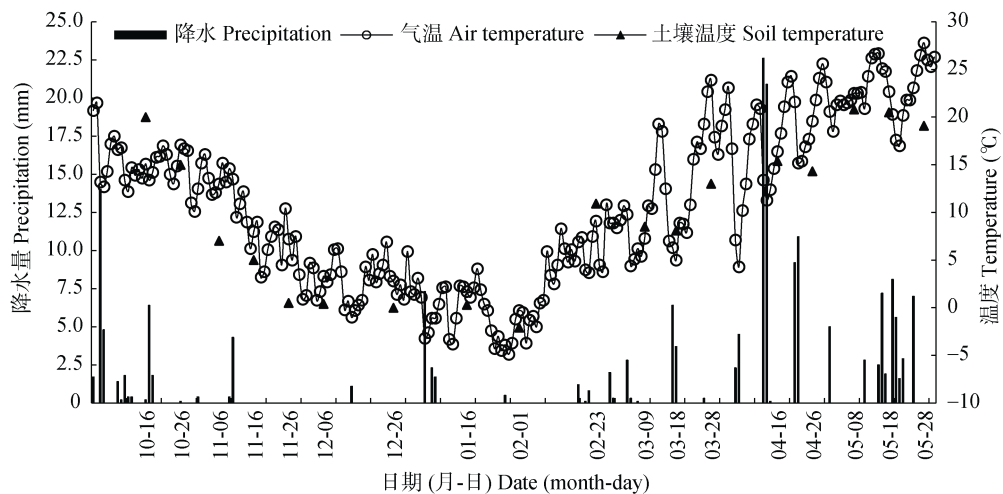


图 1 冬小麦生长期间农田生态系统气温、5 cm 土层土壤温度及降水量的变化

Fig. 1 Air temperature, precipitation and soil temperature at 5 cm depth of a farmland ecosystem during winter wheat growing season

氮量 $[270 \text{ kg(N)}\cdot\text{hm}^{-2}]$ 减施一定比例氮肥, 减施氮肥量根据前两年本课题组试验结果得出。试验采用裂区设计, 以有机肥为主区, 设玉米秸秆全量还田(J)、玉米秸秆全量还田+ $45 \text{ m}^3\cdot\text{hm}^{-2}$ 牛粪(JF)、玉米秸秆全量还田+ $60 \text{ m}^3\cdot\text{hm}^{-2}$ 菌渣(JZ)3 个水平; 施氮量为副区, 设减氮量 10% $[\text{N}_1]$ , 底施  $135 \text{ kg(N)}\cdot\text{hm}^{-2}$ +拔节期追施  $108 \text{ kg(N)}\cdot\text{hm}^{-2}$ 、减氮量 20% $[\text{N}_2]$ , 底施  $108 \text{ kg(N)}\cdot\text{hm}^{-2}$ +拔节期追施  $108 \text{ kg(N)}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。各处理氮肥为尿素。各处理同时底施  $\text{P}_2\text{O}_5$   $120 \text{ kg(P)}\cdot\text{hm}^{-2}$ 、KCl  $180 \text{ kg(K)}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。试验小区面积  $30 \text{ m}^2$ ( $5 \text{ m}\times 6 \text{ m}$ ), 每个处理 3 次重复。

冬小麦于 2017 年 10 月 4 日播种, 2018 年 6 月 1 日收获; 小麦季施两次肥, 播种前施一次底肥, 撒施后深耕, 追肥于拔节期(2018 年 3 月 25 日)进行; 灌水两次, 冬灌于 2017 年 12 月 5 日进行, 拔节期灌溉与施肥同日进行。

### 1.3 测定指标

#### 1.3.1 土壤温室气体采集

采用静态箱-气相色谱法观测冬小麦农田生态系统土壤温室气体排放通量。静态箱体积  $50 \text{ cm}\times 30 \text{ cm}\times 50 \text{ cm}$ , 并配有固定于大田的金属底座。小麦出苗后, 在每个处理各安装 3 个金属底座代表 3 次重复, 取气体时往底座注水保证密封, 箱内上端装有小风扇和取气接口。将采样箱盖上后, 第 0 min、10 min、20 min、30 min 分别用 50 mL 注射针头抽取箱内的气体, 及时关上注射器上的三通阀, 通过旋转三通阀将气体转移至采样袋中, 备测。采用安捷伦 7890A 气相色谱仪进行分析。色谱柱为 HP-PLOTQ 毛细管色谱柱, 检测器含有  $^{63}\text{Ni}$  电子捕捉检测器, 载体为

高纯氮气, 柱箱温度  $50^\circ\text{C}$ , 前检测器  $250^\circ\text{C}$ , 后检测器  $350^\circ\text{C}$ , 进样口温度  $150^\circ\text{C}$ , 尾吹为  $30 \text{ mL}\cdot\text{min}^{-1}$ , 采取不分流的进样方式。从 2017 年 10 月 26 日出苗开始采样, 越冬期 15 d 采样一次, 其余生长期每 10 d 采样一次, 遇施肥、灌溉或强降雨(降水量大于 20 mm)连续观测 3 d, 时间均为 9:00—11:00。箱内外气温、土壤温度(5 cm)等环境因素与温室气体采样同时观测。

#### 1.3.2 小麦植株样品采集与测定

干物质量: 在小麦成熟期选取长势一致的小麦, 每个小区取 30 株, 放入纸袋, 然后将其放入 105 烘箱中杀青 30 min, 再将温度调整至  $80^\circ\text{C}$  烘干, 直至样品质量恒定后进行称重。

测产: 小麦成熟期每处理随机选取  $1 \text{ m}^2$  典型样点, 3 组重复, 单独收割, 晾晒, 脱粒测产。

#### 1.3.3 土壤温室气体排放通量与总量

气体通量为单位时间单位面积气体质量的变化。气体排放通量利用式如下:

$$F = 273 / (273 + T) \times M / 22.4 \times 60 \times H \times dc / dt \quad (1)$$

式中:  $F$  为排放通量( $\text{mg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ ),  $T$  为测定箱内温度( $^\circ\text{C}$ ),  $M$  为气体的摩尔质量, 22.4 为在 101.325 kPa、273 K 时气体的摩尔体积( $\text{L}\cdot\text{mol}^{-1}$ ), 60 为 1 h 有 60 min,  $H$  为采样箱的高度(cm),  $dc/dt$  为采样箱内气体浓度的变化。

监测当天气体排放通量的计算<sup>[9]</sup>:

$$F_d = \sum_{i=1}^3 \frac{F_i}{3 \times 24} \quad (2)$$

式中:  $F_d$  为监测当天气体的排放量( $\text{mg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ ),  $F_i$  为监测当天所测得的第  $i$  个重复的排放量( $\text{mg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ )。

利用线性内插法计算逐日温室气体排放通量, 每

天排放通量相加即得到作物生长季的累积排放通量。

### 1.3.4 土壤排放温室气体增温潜势

根据 IPCC 的报告,以 100 年影响尺度为计,1 kg CH<sub>4</sub> 的增温效应是 1 kg CO<sub>2</sub> 的 25 倍,1 kg N<sub>2</sub>O 的增温效应是 1 kg CO<sub>2</sub> 的 298 倍,用增温潜势(GWP)来表示 3 种温室气体的联合作用<sup>[14]</sup>。土壤直接排放温室气体增温潜势(GWP<sub>soil</sub>)的计算公式如下:

$$GWP_{soil} = fCO_2 + fCH_4 \times \frac{16}{12} \times \frac{44}{12} \times 25 + fN_2O \times \frac{44}{28} \times \frac{44}{12} \times 298 \quad (3)$$

式中:GWP<sub>soil</sub> 为土壤直接排放的温室气体增温潜势(kg·hm<sup>-2</sup>),fCO<sub>2</sub> 为土壤排放 CO<sub>2</sub> 的净排放量(kg·hm<sup>-2</sup>),fCH<sub>4</sub> 为土壤排放 CH<sub>4</sub> 的净排放量,fN<sub>2</sub>O 为土壤排放 N<sub>2</sub>O 的净排放量。

### 1.3.5 农事活动投入引起的间接增温潜势

试验期间记录农事活动的物资投入种类和用量,计算农田温室气体间接排放量。各农事活动的温室气体排放系数参考刘巽浩等<sup>[15]</sup>,具体见表 1。

农事活动间接引起温室气体排放增温潜势计算公式:

$$GWP_{indirect} = \sum I_n \times C_n \quad (4)$$

式中: I<sub>n</sub> 和 C<sub>n</sub> 分别为第 n 种物资用量和温室气体排放系数。

表 1 农事活动的耗能及其温室气体排放系数  
Table 1 Agricultural inputs, outputs and greenhouse gas emission factors

项目 Item	物资用量 Material usage	排放系数 Emission factor
N	243/216 <sup>1)</sup> kg·hm <sup>-2</sup>	4.96 kg(CO <sub>2</sub> -eq)·kg <sup>-1</sup>
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	120 kg·hm <sup>-2</sup>	1.14 kg(CO <sub>2</sub> -eq)·kg <sup>-1</sup>
K <sub>2</sub> O	180 kg·hm <sup>-2</sup>	0.66 kg(CO <sub>2</sub> -eq)·kg <sup>-1</sup>
机械燃油 Fuel	78 kg·hm <sup>-2</sup>	3.32 kg(CO <sub>2</sub> -eq)·kg <sup>-1</sup>
电力 Electric power	1 275 kWh·hm <sup>-2</sup>	0.92 kg(CO <sub>2</sub> -eq)·kWh <sup>-1</sup>
种子 Seed	187.5 kg·hm <sup>-2</sup>	1.16 kg(CO <sub>2</sub> -eq)·kg <sup>-1</sup>
除草剂 Herbicide	1.5 kg·hm <sup>-2</sup>	6.58 kg(CO <sub>2</sub> -eq)·kg <sup>-1</sup>
劳力 Labor	15 cap·d <sup>-1</sup> ·hm <sup>-2</sup>	0.86 kg(CO <sub>2</sub> -eq)·cap <sup>-1</sup>

1) 减氮量 10% 处理取值 243 kg(N)·hm<sup>-2</sup>, 减氮量 20% 处理取值 216 kg(N)·hm<sup>-2</sup>。1) The treatments of 10%- and 20%-reduction of nitrogen are assigned 243 kg(N)·hm<sup>-2</sup> and 216 kg(N)·hm<sup>-2</sup>, respectively.

### 1.3.6 净初级生产力增温潜势

冬小麦收获时测定作物产量和地上部生物量,计算植株地上部和地下部分转化为净初级生产力(NPP)的增温潜势(GWP<sub>NPP</sub>)。公式为:

$$GWP_{NPP} = NPP / (0.68 \times 0.85) \quad (5)$$

$$NPP = 1.15 \times TAGB \quad (6)$$

式中: 0.68 是碳水化合物对 CO<sub>2</sub> 的转化比率; 0.85 是生物量对碳水化合物的转化比率,即光合产物对干物质的转化比率为 0.6; TAGB(total above ground biomass)为地上部总生物量(kg·hm<sup>-2</sup>); 1.15 为地上部生物量转换为植株总生物量的系数<sup>[16]</sup>。

### 1.3.7 小麦季综合增温潜势

农田生态系统中植物碳流的特点是固碳与耗碳共存,借鉴全环式考虑农田生态系统碳流路径的学术思想<sup>[12,17]</sup>,计算综合增温潜势:

$$GWP = GWP_{soil} + GWP_{indirect} - GWP_{NPP} - GWP_{\Delta SOC} \quad (7)$$

式中: GWP 为全球增温潜势,当其为正值时,表示系统为温室气体的源,反之则为汇; GWP<sub>ΔSOC</sub> 为土壤有机碳量的增温潜势(此项短期试验可忽略)。

## 1.4 数据处理

利用 Microsoft Excel 2010 作图,计算标准差; SPSS 21.0 软件进行数据统计分析,采用邓肯法(Duncan)进行处理间差异的显著性检验,且在 P<0.05 水平下进行。

## 2 结果与分析

### 2.1 添加不同有机物料和减氮条件下冬小麦田土壤 N<sub>2</sub>O 排放特征

冬小麦季华北平原农田土壤是 N<sub>2</sub>O 的排放源,施肥和灌溉可以显著提高 N<sub>2</sub>O 排放通量。施肥不仅为作物提供了生长所需的养分,同时提高了微生物和酶的活性从而促进土壤有机氮的矿化,增加土壤中无机氮含量,为硝化和反硝化作用的进行提供底物;灌溉或强降雨改变了土壤水分含量,大量雨水或灌溉水排走了土壤中的空气,从而形成厌氧环境,加速了土壤反硝化速率,提高了 N<sub>2</sub>O 的生成与排放<sup>[9]</sup>。

由图 2 可知,在观测期间 N<sub>2</sub>O 出现了 3 次排放峰,而且 6 个处理的排放峰一致。第 1 次排放峰出现在 12 月 7 日,而后排放通量逐渐下降,直到 3 月 17 日出现第 2 次排放峰,3 月 27 日又出现第 3 次排放峰。从图 1 可以看出,第 1 次的高峰期出现在灌溉后 1~2 d,峰值范围为 0.07~0.17 mg·m<sup>-2</sup>·h<sup>-1</sup>,JZN1 处理下 N<sub>2</sub>O 排放速率高于其他 5 个处理;进入 12 月中旬后,随着土壤温度下降,土壤 N<sub>2</sub>O 排放通量逐渐下降,越冬期至返青期土壤 N<sub>2</sub>O 排放通量一直维持在一个相对较低的水平。进入小麦拔节期,气温回升,雨后出现第 2 次高峰期,峰值为 0.04~0.08 mg·m<sup>-2</sup>·h<sup>-1</sup>,表现为 JFN2>JZN1>JN1>JN2>JZN2>JFN1;施肥和灌溉后出现第 3 次排放高峰,其中 JN1 处理的排放峰值最高,为 0.16 mg·m<sup>-2</sup>·h<sup>-1</sup>,JZN2 处理最小。

### 2.2 添加不同有机物料和减氮下冬小麦田土壤 CO<sub>2</sub> 排放特征

冬小麦季华北平原农田土壤是 CO<sub>2</sub> 的排放源,

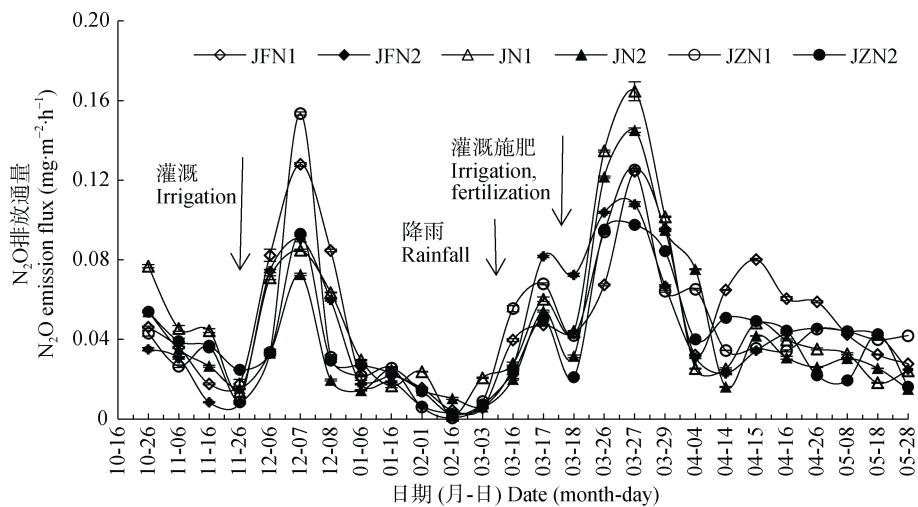


图 2 不同有机物料还田和减氮下冬小麦土壤  $N_2O$  排放特征

Fig. 2 Soil  $N_2O$  emission in winter wheat field under different treatments of organic materials application and nitrogen reduction

JF: 玉米秸秆全量还田+牛粪  $45 \text{ m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$ ; JZ: 玉米秸秆全量还田+ $60 \text{ m}^3 \cdot \text{hm}^{-2}$  菌渣; J: 玉米秸秆全量还田; N1: 减氮 10%, 施氮量为  $243 \text{ kg(N)} \cdot \text{hm}^{-2}$ ; N2: 减氮 20%, 施氮量为  $216 \text{ kg(N)} \cdot \text{hm}^{-2}$ . JF: maize straw and cattle manure application; JZ: maize straw and mushroom residue application; J: maize straw application; N1: 10%-reduction of nitrogen with N application rate of  $243 \text{ kg(N)} \cdot \text{hm}^{-2}$ ; N2: 20%-reduction of nitrogen with N application rate of  $216 \text{ kg(N)} \cdot \text{hm}^{-2}$ .

农田  $CO_2$  主要来自于作物根系、土壤动物和土壤微生物的呼吸作用, 其中土壤动物和微生物活动产生的  $CO_2$  占农田  $CO_2$  的 85%~90%, 植物根系的呼吸则占 15%<sup>[17]</sup>。同时, 农事活动, 譬如施肥、灌溉、耕作等, 以及气候变化共同影响土壤  $CO_2$  的排放。

由图 3 可知, 冬小麦整个生育期各处理冬小麦土壤  $CO_2$  排放均表现为先缓慢升高后下降至最低, 再波动性上升至最高值时下降的趋势。在 12 月 7 日冬小麦灌溉后, 各处理均出现排放小高峰, 整体表现为  $JZN1 > JFN2 > JFN1 > JZN2 > JN1 > JN2$ , 峰值范围  $52.34 \sim 133.11 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ 。冬灌结束后, 气温降低, 土壤呼吸速率减小, 导致  $CO_2$  排放通量逐渐下降, 越冬期各处理排放通量均处于最低值。小麦拔节期, 气温回升, 雨后出现  $CO_2$  的第 2 个排放峰, 峰值范围为  $82.18 \sim 404.71 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ , 其中 JFN2 峰值最高。第 3 次的高峰期出现在施肥和灌溉的后 1~3 d, 其中 JFN1 处理下的排放峰最高, 峰值为  $523.80 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ , JZN2 峰值最小为  $271.41 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ 。4 月中旬强降水后, 出现第 4 个排放高峰, 峰值范围为  $269.99 \sim 657.79 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ , 表现为  $JFN1 > JZN1 > JFN2 > JZN2 > JN1 > JN2$ 。

### 2.3 添加不同有机物料和减氮下冬小麦田土壤 $CH_4$ 排放特征

微生物活动是影响土壤中  $CH_4$  排放与吸收的因素之一, 甲烷菌在厌氧条件下分解土壤中的有机质, 产生  $CH_4$ , 促进排放; 在好气环境中,  $CH_4$  被氧化菌氧化成  $CO_2$ , 削弱  $CH_4$  的排放, 当土壤中  $CH_4$  浓度

低于大气中  $CH_4$  时, 引起  $CH_4$  负排放。 $CH_4$  的吸收和排放同时受到施肥、灌溉、耕作等农业措施的影响。

由图 4 可知, 冬小麦季华北平原农田土壤是  $CH_4$  的吸收汇。在冬小麦整个生育时期各处理表现了相同的趋势。小麦苗期至越冬期, 土壤  $CH_4$  吸收速率一直维持在较低且稳定的状态, 可能是由于土壤温度较低, 微生物的活性降低,  $CH_4$  的吸收速率在一个较低的水平浮动。进入返青期后, 土壤  $CH_4$  吸收出现 1 个高峰, 排放峰值范围是  $-0.077 \sim -0.036 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ , 原因是少量降水后气温迅速上升, 地表土壤的湿度仍相对较低, 有利于  $O_2$  进入土壤孔隙中, 促进了土壤对  $CH_4$  的氧化。在小麦开花期, 由于拔节期进行的灌溉与施肥, 使土壤处于厌氧的环境, 促进了  $CH_4$  的排放, 而在这期间一直降水(图 4), 导致土壤含水量增加, 甲烷菌活性提高, 出现了  $CH_4$  的第 1 个排放高峰, 峰值范围为  $0.006 \sim 0.025 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ , 其中 JFN2 峰值最高。

### 2.4 添加不同有机物料和减氮下冬小麦田土壤温室气体排放总量

利用数值积分法分别对  $N_2O$ 、 $CO_2$ 、 $CH_4$  排放通量进行积分, 获得冬小麦生长期各温室气体排放总量。由表 2 可知, 华北平原麦田土壤是  $N_2O$  和  $CO_2$  的排放“源”, 是  $CH_4$  的吸收“汇”。不同有机物料处理下冬小麦生长期  $N_2O$  排放总量整体表现为  $JF > J > JZ$ 。J 处理下, JN2 的  $N_2O$  排放总量显著低于 JN1, 说明 JN2 处理可以降低土壤  $N_2O$  排放; JZ 处理

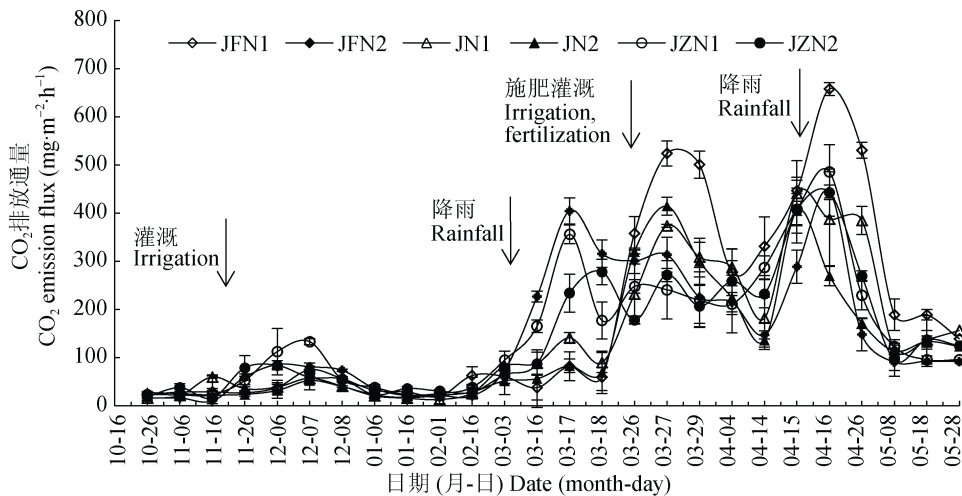


图 3 不同有机物料还田和减氮下冬小麦土壤 CO<sub>2</sub> 排放特征

Fig. 3 Soil CO<sub>2</sub> emission in winter wheat field under different treatments of organic materials application and nitrogen reduction  
 JF: 玉米秸秆全量还田+牛粪 45 m<sup>3</sup>·hm<sup>-2</sup>; JZ: 玉米秸秆全量还田+60 m<sup>3</sup>·hm<sup>-2</sup> 菌渣; J: 玉米秸秆全量还田; N1: 减氮 10%, 施氮量为 243 kg(N)·hm<sup>-2</sup>; N2: 减氮 20%, 施氮量为 216 kg(N)·hm<sup>-2</sup>. JF: maize straw and cattle manure application; JZ: maize straw and mushroom residue application; J: maize straw application; N1: 10%-reduction of nitrogen with N application rate of 243 kg(N)·hm<sup>-2</sup>; N2: 20%-reduction of nitrogen with N application rate of 216 kg(N)·hm<sup>-2</sup>.

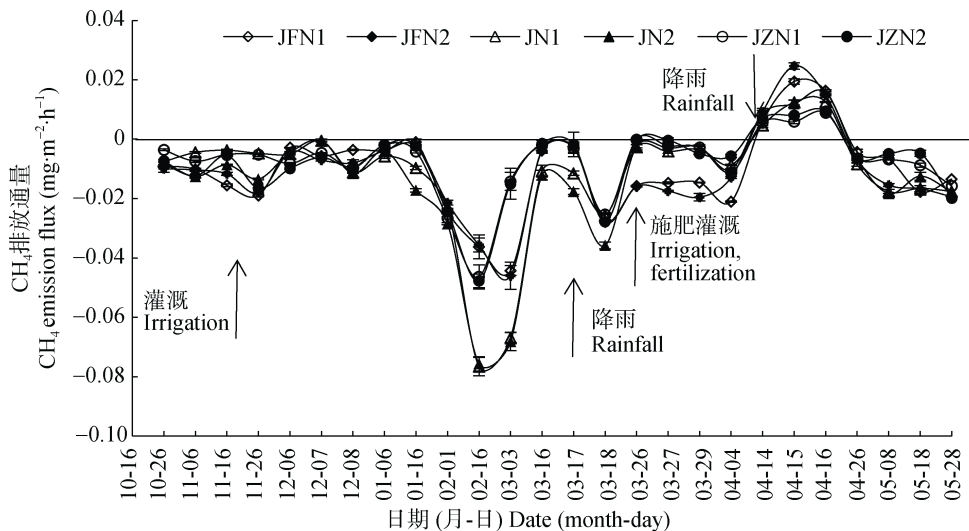


图 4 不同有机物料还田和减氮下冬小麦土壤 CH<sub>4</sub> 排放特征

Fig. 4 Soil CH<sub>4</sub> emission in winter wheat field under different treatments of organic materials application and nitrogen reduction  
 JF: 玉米秸秆全量还田+牛粪 45 m<sup>3</sup>·hm<sup>-2</sup>; JZ: 玉米秸秆全量还田+60 m<sup>3</sup>·hm<sup>-2</sup> 菌渣; J: 玉米秸秆全量还田; N1: 减氮 10%, 施氮量为 243 kg(N)·hm<sup>-2</sup>; N2: 减氮 20%, 施氮量为 216 kg(N)·hm<sup>-2</sup>. JF: maize straw and cattle manure application; JZ: maize straw and mushroom residue application; J: maize straw application; N1: 10%-reduction of nitrogen with N application rate of 243 kg(N)·hm<sup>-2</sup>; N2: 20%-reduction of nitrogen with N application rate of 216 kg(N)·hm<sup>-2</sup>.

下, JZN2 的 N<sub>2</sub>O 排放总量低于 JZN1, 且处理之间差异显著; JF 处理下, JFN1 的 N<sub>2</sub>O 排放总量显著高于 JFN2, 说明减施氮肥能够降低土壤 N<sub>2</sub>O 排放总量。冬小麦生长期间 CO<sub>2</sub> 排放总量整体表现为 JF>JZ>J, 说明 CO<sub>2</sub> 排放总量随着有机肥的施入而增加, 因为有机肥的施用促进根系的生长, 提高微生物的活性, 使土壤呼吸速率增强。CO<sub>2</sub> 排放总量的范围为

11 832~6 402 kg·hm<sup>-2</sup>, JFN1 处理 CO<sub>2</sub> 排放总量显著高于其他处理; 而除 JN2 之外, 其他处理之间并无显著差异。不同有机物料还田下 CH<sub>4</sub> 吸收强度不同, 整体表现为 JF>J>JZ, 说明牛粪+秸秆还田能够使土壤保持较高的通气性, 增加甲烷氧化菌的活性, 从而有利于 CH<sub>4</sub> 的氧化, 提高 CH<sub>4</sub> 的吸收。



表 2 不同有机物料还田和减氮下冬小麦土壤  $N_2O$ 、 $CO_2$ 、 $CH_4$  的排放总量Table 2 Accumulated emissions of  $N_2O$ ,  $CO_2$  and  $CH_4$  of winter wheat field under different organic materials application and nitrogen reduction

处理 Treatment	$N_2O$		$CO_2$		$CH_4$	
	排放速率 Emission rate ( $mg \cdot m^{-2} \cdot h^{-1}$ )	排放总量 Accumulated emission [ $kg(N_2O-N) \cdot hm^{-2}$ ]	排放速率 Emission rate ( $mg \cdot m^{-2} \cdot h^{-1}$ )	排放总量 Accumulated emission [ $kg(CO_2-C) \cdot hm^{-2}$ ]	排放速率 Emission rate ( $mg \cdot m^{-2} \cdot h^{-1}$ )	排放总量 Accumulated emission [ $kg(CH_4-C) \cdot hm^{-2}$ ]
JFN1	1.197a	1.91±0.01a	8 835.67a	11 823.34±353a	-0.585 4c	-2.46±0.14c
JFN2	1.021d	1.59±0.01c	7 054.31b	7 866.32±167b	-0.656 4d	-2.87±0.08d
JN1	1.176b	1.90±0.01a	6 932.66b	8 609.47±314b	-0.509 6b	-2.04±0.64b
JN2	0.974e	1.49±0.01e	5 881.25c	6 402.07±259c	-0.533 4b	-2.16±0.51b
JZN1	1.093c	1.64±0.00b	7 353.03b	8 515.27±229b	-0.370 6a	-1.68±0.96a
JZN2	0.961f	1.53±0.02d	6 928.11b	8 330.12±513b	-0.391 1a	-1.73±0.32a

JF: 玉米秸秆全量还田+牛粪  $45 m^3 \cdot hm^{-2}$ ; JZ: 玉米秸秆全量还田+60  $m^3 \cdot hm^{-2}$  菌渣; J: 玉米秸秆全量还田; N1: 减氮 10%, 施氮量为  $243 kg(N) \cdot hm^{-2}$ ; N2: 减氮 20%, 施氮量为  $216 kg(N) \cdot hm^{-2}$ 。表中数据均为 3 次重复平均值±标准差, 同列数据后不同字母表示不同处理间差异显著 ( $P < 0.05$ ) (邓肯法)。JF: maize straw and cattle manure application; JZ: maize straw and mushroom residue application; J: maize straw application; N1: 10%-reduction of nitrogen with N application rate of  $243 kg(N) \cdot hm^{-2}$ ; N2: 20%-reduction of nitrogen with N application rate of  $216 kg(N) \cdot hm^{-2}$ 。Each value in the table is mean ± SE of 3 replicates. Values followed by different letters within a column are significantly different at  $P < 0.05$  according to Duncan test.

## 2.5 添加不同有机物料和减氮下冬小麦田土壤综合增温潜势

农田生态系统对大气  $CO_2$  固定通常用作物净初级生产力(NPP)表示, 是判定生态系统碳汇和调节生态系统过程的主要因子。试验期间小麦收获时测定作物产量和地上部生物量, 根据公式(5)和(6)计算了植株地上和地下部分转化为 NPP 的碳总量(表 3)。结果表明, JZN1 处理下的经济产量最高, 且显著高于其他处理, 具体表现为  $JZN1 > JZN2 > JN2 > JFN2 > JFN1 > JN1$ , 植株转化为 NPP 的碳量具体表现为  $JZN2 > JFN2 > JFN1 > JZN1 > JN1 > JN2$ 。由此表明, JZN2 处理无论是在作物产量还是碳的截获能力方面均较高, 说明在经过减氮处理后, 增施有机肥能够代替一部分化肥从而保持作物的产量, 在增施有机物料还田的同时能够稳定甚至增加土壤有机碳的储量, 提高土壤 C/N 比值, 提高微生物活性, 改善养分循环。

农田生态系统综合温室效应评价不仅要考虑土壤排放温室气体所相当的  $CO_2$  的量, 还应该包含机械、灌溉和施肥等农事活动所造成的气体排放, 以及作物转化为 NPP 的碳量。本文所有处理均在秸秆还田的条件下进行, 故 NPP 包含了作物地下部根系和地上部植株(秸秆)所转化的 NPP 碳量。计算土壤增温潜势时, 因  $N_2O$ 、 $CO_2$ 、 $CH_4$  3 种温室气体效应不同, 故将其统一转换为  $CO_2$  的当量便于对农田增温潜势的评价。结果表明 JFN2、JZN2、JN2 处理均为负值, 表明农田生态系统向大气环境输出碳量小于截存的碳量, 是大气的碳汇。再去掉直接和间接排放的  $CO_2$  当量, 小麦季农田生态系统净截留  $1 038 \sim 2 024 kg \cdot hm^{-2}$ , 其他处理均为正值, 说明农田

生态系统向大气排放, 是大气的碳源, 具体表现为  $JFN1 > JN1 > JZN1 > JN2 > JZN2 > JFN2$ 。

由表 3 可知, 若单一评价农田生态系统的综合增温效应, JFN2 的温室效应最低, 对环境最有益, 但其经济产量较低, 因而不能满足农业高效生产和可持续发展。现代农业生产目标是在提升经济产量的同时, 推进循环农业的发展以期来实现农业的可持续发展, 故在进行综合增温潜势评价时要兼顾经济与环境效应。华北平原麦区, JZN2(秸秆+菌渣+减氮 20%)施肥管理措施下温室效应相对较低, 且能保证较高的经济产量。

## 3 讨论与结论

### 3.1 不同有机物料还田对农田土壤温室气体排放的影响

施肥、灌溉以及耕作等农事活动和土壤理化性能能够直接影响土壤硝化与反硝化过程从而影响农田  $N_2O$  的季节排放<sup>[18]</sup>。在本研究中, 冬小麦季农田  $N_2O$  的排放高峰主要发生在施肥、灌水或者强降雨之后, 这与叶欣等<sup>[19]</sup>的研究相吻合, 可能是因为拔节期追肥, 土壤无机氮含量增加, 加之土壤温度上升, 植株进入旺盛营养生长阶段, 根系活动随之加强, 使铵氧化细菌活性增强, 其硝化及反硝化作用产生的  $N_2O$  增加, 进而表现为土壤向大气排放  $N_2O$ 。目前关于有机肥对  $N_2O$  排放影响的报道有很多, 但结论不一。部分研究表明<sup>[20]</sup>, 化肥配合有机肥施用, 土壤  $N_2O$  通量大于单纯施化肥处理, 秸秆还田降低了土壤  $N_2O$  的排放。本研究表明, 秸秆+菌渣(JZ)处理下  $N_2O$  的排放总量最小, 较秸秆(J)处理  $N_2O$  排放减少了 18%且差异显著, 原因是菌渣的 C/N 比较高,

表 3 不同有机物料还田和减氮对冬小麦土壤温室气体的增温潜势(GWP)的影响

Table 3 Global warming potential (GWP) of winter wheat filed under different organic materials application and nitrogen reduction  $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 

处理 Treatment	产量 Yield	GWP <sub>NPP</sub>	GWP <sub>soil export</sub>			GWP <sub>indirect</sub>	GWP
			GWP <sub>N<sub>2</sub>O</sub>	GWP <sub>CO<sub>2</sub></sub>	GWP <sub>CH<sub>4</sub></sub>		
JFN1	7 401±70c	11 403±131ab	244±3.08a	11 823±353.91a	-22±0.68c	2 091.08	2 732
JFN2	7 504±67c	12 025±553ab	204±1.83c	7 866±167.71c	-26±0.59d	1 957.16	-2 024
JN1	7 225±88c	10 625±628bc	243±1.27a	8 609±314.67b	-18±0.50b	2 091.08	299
JN2	7 899±67b	9 568±595c	191±0.74e	6 402±259.34d	-19±0.85b	1 957.16	-1 038
JZN1	10 502±412a	10 711±205bc	210±1.29b	8 515±229.41b	-15±0.75a	2 091.08	90
JZN2	8 061±236b	12 448±1486a	196±0.83d	8 330±513.97bc	-15±0.39a	1 957.16	-1 980

JF: 玉米秸秆全量还田+牛粪  $45 \text{ m}^3\cdot\text{hm}^{-2}$ ; JZ: 玉米秸秆全量还田+60  $\text{m}^3\cdot\text{hm}^{-2}$  菌渣; J: 玉米秸秆全量还田; N1: 减氮 10%, 施氮量为  $243 \text{ kg(N)}\cdot\text{hm}^{-2}$ ; N2: 减氮 20%, 施氮量为  $216 \text{ kg(N)}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。表中数据均为 3 次重复平均值±标准差, 同列数据后不同字母表示不同处理间差异显著 ( $P<0.05$ ) (邓肯法)。JF: maize straw and cattle manure application; JZ: maize straw and mushroom residue application; J: maize straw application; N1: 10%-reduction of nitrogen with N application rate of  $243 \text{ kg(N)}\cdot\text{hm}^{-2}$ ; N2: 20%-reduction of nitrogen with N application rate of  $216 \text{ kg(N)}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。Each value in the table is mean ± SE of 3 replicates. Values followed by different letters within a column are significantly different at  $P < 0.05$  according to Duncan test.

一方面菌渣在分解过程中微生物利用土壤中的氮素; 另一方面, 大量氮素以有机氮形式存在, 减少了硝化与反硝化作用, 导致土壤  $\text{N}_2\text{O}$  排放量的减少<sup>[21]</sup>, 这与黄小林<sup>[22]</sup>的研究相似。但也有研究报道称, 施用有机肥并没有减少  $\text{N}_2\text{O}$  的排放, 甚至超过了施用化肥的处理<sup>[10,23]</sup>。可能是因为不同形态的有机物料因其 C/N 比值不同, 氮形态以及速效氮的含量不同,  $\text{N}_2\text{O}$  的排放也不同。

土壤  $\text{CO}_2$  排放受到非生物因素、生物因素以及人为因素 3 方面的影响, 其中施肥是影响  $\text{CO}_2$  排放主要因素之一。本研究表明, 华北平原冬小麦区不同有机物料还田处理下  $\text{CO}_2$  排放的季节变化规律相同。3 次  $\text{CO}_2$  排放高峰均出现在灌溉、施肥和强降雨后, 因为追肥、灌溉和强降水, 使根系迅速生长并吸收大量的营养, 加大了根系呼吸强度, 提高了土壤微生物的活性, 促进土壤  $\text{CO}_2$  排放, 这与王建林等<sup>[24]</sup>的研究相似。而 Peng 等<sup>[25]</sup>的研究表明, 施肥对  $\text{CO}_2$  排放并无显著影响可能是因为氮肥施用量不同, 氮肥的施用增加了根系生物量, 却降低了微生物的生物量。本研究表明, 有机肥的施入会显著提高农田土壤  $\text{CO}_2$  排放量, 一方面有机肥的施入会增加有机质含量, 激发微生物活性的同时改变群落组成; 另一方面有机肥的施入促进植株根系的生长, 使根系生物量增加从而促进根系分泌物的增加<sup>[26]</sup>, 进而影响土壤  $\text{CO}_2$  通量。在研究中发现, N1(减氮 10%) 处理的  $\text{CO}_2$  通量显著高于 N2(减氮 20%) 处理, 说明土壤  $\text{CO}_2$  通量随着施氮量增加而增加, 主要因为氮肥施用增加了根部活力, 提高土壤养分, 促进土壤有机质矿化, 增加土壤呼吸<sup>[8]</sup>。

不同有机物料还田条件下, 各处理  $\text{CH}_4$  排放的季节变化规律相同, 除 4 月份的强降水呈排放外, 其余均表现为吸收状态, 因为干燥的土壤环境, 使甲烷氧化菌占主导作用, 土壤会消耗和吸收地面大气的  $\text{CH}_4$ , 是一个弱的  $\text{CH}_4$  汇<sup>[27]</sup>。有研究表明, 腐熟后的菌渣代替新鲜的稻草和牛粪还田可以使稻田  $\text{CH}_4$  排放量降低约 60%, 且随着菌渣还田量的增多,  $\text{CH}_4$  排放量逐渐减少; 牛粪+化肥的施入则明显增加  $\text{CH}_4$  排放<sup>[28-29]</sup>。而本研究结果表明, 牛粪+秸秆(JF) 处理下  $\text{CH}_4$  排放总量最小, 一方面, 菌渣能显著提高土壤微生物碳氮量, 为产甲烷菌提供极为丰富的产  $\text{CH}_4$  基质, 导致土壤产生较多的  $\text{CH}_4$ , 增加其排放量<sup>[30]</sup>; 另一方面, 牛粪自身有机碳大部分以大分子复杂有机物存在, 分解的中间产物和小分子有机物较少, 且牛粪自身有机碳含量较低, 故可利用的产  $\text{CH}_4$  基质较少,  $\text{CH}_4$  排放较少<sup>[11]</sup>。

### 3.2 不同有机物料还田对农田增温潜势的影响

综合考虑不同有机物料还田和减氮对 3 种温室气体排放与吸收的影响, JZN2 处理不仅对温室气体的排放和吸收影响相对较大, 而且作物截获 NPP 碳量相对较大, 弱化了土壤作为  $\text{CO}_2$  和  $\text{N}_2\text{O}$  的排放源特征, 也强化了土壤作为  $\text{CH}_4$  吸收汇的特征, 主要是因为秸秆和菌渣的施入为微生物的活动提供了底物, 营造了良好的土壤环境, 有利于提高微生物的活性, 同时保证了较高产量, 在农田综合增温潜势估算中, JZN2 处理增温效应为负值。有研究显示, 长期施用有机肥比施用化肥固定了更多土壤有机碳, 从而抵消了更多的  $\text{CH}_4$  和  $\text{N}_2\text{O}$  的增温效应, 长期秸秆还田虽增加了土壤  $\text{CH}_4$  的排放, 但土壤固定碳量



是土壤 CH<sub>4</sub> 排放的 3.21~3.92 倍<sup>[11,31]</sup>。

#### 4 结论

华北平原冬小麦农田土壤是 CO<sub>2</sub> 和 N<sub>2</sub>O 的排放源, CH<sub>4</sub> 的吸收汇。施肥、灌溉以及降水直接影响土壤 CO<sub>2</sub> 和 N<sub>2</sub>O 的排放速率, 同时土壤对 CH<sub>4</sub> 的吸收速率降低。干湿交替使土壤 CO<sub>2</sub> 和 N<sub>2</sub>O 的排放速率增加, 是因为硝化反硝化速率加剧以及土壤微生物活性增强所致。施肥是影响农田温室气体排放的重要农业生产方式, 随着氮肥施用量的增加, CH<sub>4</sub> 的吸收量降低, CO<sub>2</sub> 和 N<sub>2</sub>O 的排放量增加。不同有机物料还田对不同温室气体的排放源和吸收汇强度影响不同, 牛粪的施用显著提高了 CO<sub>2</sub> 和 N<sub>2</sub>O 的排放量, 但 CH<sub>4</sub> 的吸收量最大。

综合增温潜势是土壤直接排放温室气体、农事活动所引起的 CO<sub>2</sub> 直接或者间接排放以及作物转化为 NPP 的碳量(GWP<sub>NPP</sub>)的综合作用结果。评价一种施肥模式的优劣需兼顾经济效应和环境效应两方面, 本研究表明 JZN2 处理综合增温潜势相对较低, 产量相对较高, 为该地区冬小麦较优施肥管理模式。

#### 参考文献 References

- [1] REAY D S, DAVIDSON E A, SMITH K A, et al. Global agriculture and nitrous oxide emissions[J]. *Nature Climate Change*, 2012, 2(6): 410-416
- [2] 张玉铭, 胡春胜, 张佳宝, 等. 农田土壤主要温室气体(CO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub>、N<sub>2</sub>O)的源/汇强度及其温室效应研究进展[J]. *中国生态农业学报*, 2011, 19(4): 966-975  
ZHANG Y M, HU C S, ZHANG J B, et al. Research advances on source/sink intensities and greenhouse effects of CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> and N<sub>2</sub>O in agricultural soils[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2011, 19(4): 966-975
- [3] 苏伟. 中华人民共和国气候变化第二次国家信息通报[M]. 北京: 中国经济出版社, 2013  
SU W. The People's Republic of China Second National Communication on Climate Change[M]. Beijing: China Economic Publishing House, 2013
- [4] 刘彦随, 刘玉, 郭丽英. 气候变化对中国农业生产的影响及应对策略[J]. *中国生态农业学报*, 2010, 18(4): 905-910  
LIU Y S, LIU Y, GUO L Y. Impact of climatic change on agricultural production and response strategies in China[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2010, 18(4): 905-910
- [5] 李子涵. 我国粮食生产中的化肥过量施用研究[J]. *安徽农业科学*, 2016, 44(16): 245-247  
LI Z H. Analysis of fertilizer overuse during crop production in China[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2016, 44(16): 245-247
- [6] 房丽萍, 孟军. 化肥施用对中国粮食产量的贡献率分析——基于主成分回归 C-D 生产函数模型的实证研究[J]. *中国农学通报*, 2013, 29(17): 156-160  
FANG L P, MENG J. Application of chemical fertilizer on grain yield in China analysis of contribution rate: Based on principal component regression C-D production function model and its empirical study[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2013, 29(17): 156-160
- [7] 秦晓波, 李玉娥, 万云帆, 等. 耕作方式和稻草还田对双季稻田 CH<sub>4</sub> 和 N<sub>2</sub>O 排放的影响[J]. *农业工程学报*, 2014, 30(11): 216-224  
QIN X B, LI Y E, WAN Y F, et al. Effect of tillage and rice residue return on CH<sub>4</sub> and N<sub>2</sub>O emission from double rice field[J]. *Transactions of the CSAE*, 2014, 30(11): 216-224
- [8] 王玉英, 胡春胜. 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[J]. *中国生态农业学报*, 2011, 19(5): 1122-1128  
WANG Y Y, HU C S. Soil greenhouse gas emission in winter wheat/summer maize rotation ecosystem as affected by nitrogen fertilization in the Piedmont Plain of Mount Taihang, China[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2011, 19(5): 1122-1128
- [9] 姜继韶. 施氮和轮作对黄土高原旱塬区土壤温室气体排放的影响[D]. 北京: 中国科学院研究生院(教育部水土保持与生态环境研究中心), 2015  
JIANG J S. Effect of nitrogen fertilization and rotation on greenhouse gases emissions on arid-highland of the Loess Plateau[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences (Research Center of Soil and Water Conservation and Ecological Environment, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Education), 2015
- [10] 郝耀旭, 刘继璇, 袁梦轩, 等. 长期定位有机物料还田对关中平原冬小麦-玉米轮作土壤 N<sub>2</sub>O 排放的影响[J]. *环境科学*, 2017, 38(6): 2586-2593  
HAO Y X, LIU J X, YUAN M X, et al. Effects of long-term organic amendments on soil N<sub>2</sub>O emissions from winter wheat-maize cropping systems in the Guanzhong Plain[J]. *Environmental Science*, 2017, 38(6): 2586-2593
- [11] 全孝飞, 颜晓元, 王书伟, 等. 长期施用有机物料对稻田生态系统服务功能的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2017, 36(7): 1406-1415  
QUAN X F, YAN X Y, WANG S W, et al. Effects of long-term application of organic materials on the ecosystem services of paddy fields[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2017, 36(7): 1406-1415
- [12] 张贺, 郭李萍, 谢立勇, 等. 不同管理措施对华北平原冬小麦土壤 CO<sub>2</sub> 和 N<sub>2</sub>O 排放的影响研究[J]. *土壤通报*, 2013, 44(3): 653-659  
ZHANG H, GUO L P, XIE L Y, et al. The effect of management practices on the emission of CO<sub>2</sub> and N<sub>2</sub>O from the winter wheat field in north China Plain[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2013, 44(3): 653-659
- [13] 马义虎, 顾道健, 刘立军, 等. 玉米秸秆源有机肥对水稻产量与温室气体排放的影响[J]. *中国水稻科学*, 2013, 27(5): 520-528  
MA Y H, GU D J, LIU L J, et al. Effects of the organic fertilizers made from maize straw on grain yield of rice and emission of greenhouse gases from paddy fields[J]. *Chinese*

- Journal of Rice, 2013, 27(5): 520–528
- [14] KUMAR P, MARTINO D, SMITH P, et al. Agriculture (Chapter 8) in IPCC, 2007: Climate Change 2007: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group to the Fourth assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change[M]. New York: IPCC, 2007
- [15] 刘巽浩, 徐文修, 李增嘉, 等. 农田生态系统碳足迹法: 误区、改进与应用——兼析中国集约农作碳效率[J]. 中国农业资源与区划, 2013, 34(6): 1–11  
LIU X H, XU W X, LI Z J, et al. The missteps, Improvement and application of carbon footprint methodology in farmland ecosystems with the case study of analyzing the carbon efficiency of China's intensive farming[J]. Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning, 2013, 34(6): 1–11
- [16] 闫翠萍, 张玉铭, 胡春胜, 等. 不同耕作措施下小麦-玉米轮作农田温室气体交换及其综合增温潜势[J]. 中国生态农业学报, 2016, 24(6): 704–715  
YAN C P, ZHANG Y M, HU C S, et al. Greenhouse gas exchange and comprehensive global warming potential under different wheat-maize rotation patterns[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2016, 24(6): 704–715
- [17] 宋利娜, 张玉铭, 胡春胜, 等. 华北平原高产农区冬小麦农田土壤温室气体排放及其综合温室效应[J]. 中国生态农业学报, 2013, 21(3): 297–307  
SONG L N, ZHANG Y M, HU C S, et al. Comprehensive analysis of emissions and global warming effects of greenhouse gases in winter-wheat fields in the high-yield agro-region of North China Plain[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2013, 21(3): 297–307
- [18] 侯苗苗, 吕凤莲, 张弘弢, 等. 有机氮替代比例对冬小麦/夏玉米轮作体系作物产量及 N<sub>2</sub>O 排放的影响[J]. 环境科学, 2018, 39(1): 321–330  
HOU M M, LYU F L, ZHANG H T, et al. Effect of organic manure substitution of synthetic nitrogen on crop yield and N<sub>2</sub>O emission in the winter wheat-summer maize rotation system[J]. Environmental Science, 2018, 39(1): 321–330
- [19] 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  
YE X, LI J, WANG Y H, et al. Characterization of emissions of nitrous oxide from soils of typical crop fields in North China Plain[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2005, 24(6): 1186–1191
- [20] 董玉红, 欧阳竹, 李运生, 等. 不同施肥方式对农田土壤 CO<sub>2</sub> 和 N<sub>2</sub>O 排放的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2007, (4): 34–39  
DONG Y H, OUYANG Z, LI Y S, et al. Influence of different fertilization on CO<sub>2</sub> and N<sub>2</sub>O fluxes from agricultural soil[J]. Soil and Fertilizer Sciences in China, 2007, (4): 34–39
- [21] 邹建文. 稻麦轮作生态系统温室气体(CO<sub>2</sub>、N<sub>2</sub>O 和 CH<sub>4</sub>)排放研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2005  
ZOU J W. A study on greenhouse gases (CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> and N<sub>2</sub>O) emissions from rice-winter wheat rotations in southeast China[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2005
- [22] 黄小林. 菌渣还田对农田温室气体排放的影响研究[D]. 雅安: 四川农业大学, 2012  
HUANG X L. Effects of mushroom residues on GHS emissions from soils under rice-wheat rotation[D]. Ya'an: Sichuan Agricultural University, 2012
- [23] FERNÁNDEZ-LUQUEÑO F, REYES-VARELA V, MARTÍNEZ-SUÁREZ C, et al. Emission of CO<sub>2</sub> and N<sub>2</sub>O from soil cultivated with common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) fertilized with different N sources[J]. Science of the Total Environment, 2009, 407(14): 4289–4296
- [24] 王建林, 赵风华, 欧阳竹. 灌溉量对灌溉期麦田土壤呼吸的影响[J]. 华北农学报, 2010, 25(3): 186–189  
WANG J L, ZHAO F H, OUYANG Z. Effects of the irrigation quantity on soil respiration in wheat field in filling stage[J]. Acta Agriculturae Boreali-Sinica, 2010, 25(3): 186–189
- [25] PENG Q, DONG Y S, QI Y C, et al. Effects of nitrogen fertilization on soil respiration in temperate grassland in Inner Mongolia, China[J]. Environmental Earth Sciences, 2011, 62(6): 1163–1171
- [26] 陈义, 吴春艳, 水建国, 等. 长期施用有机肥对水稻土 CO<sub>2</sub> 释放与固定的影响[J]. 中国农业科学, 2005, 38(12): 2468–2473  
CHEN Y, WU C Y, SHUI J G, et al. Emission and Fixation of CO<sub>2</sub> from soil system as influenced by long-term application of organic manure in paddy soils[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2005, 38(12): 2468–2473
- [27] 田慎重, 宁堂原, 李增嘉, 等. 不同耕作措施对华北地区麦田 CH<sub>4</sub> 吸收通量的影响[J]. 生态学报, 2010, 30(2): 541–548  
TIAN S Z, NING T Y, LI Z J, et al. Effect of CH<sub>4</sub> uptake flux under different tillage systems in wheat field in the North China Plain[J]. Acta Ecologica Sinica, 2010, 30(2): 541–548
- [28] 石生伟, 李玉娥, 李明德, 等. 不同施肥处理下双季稻田 CH<sub>4</sub> 和 N<sub>2</sub>O 排放的全年观测研究[J]. 大气科学, 2011, 35(4): 707–720  
SHI S W, LI Y E, LI M D, et al. Annual CH<sub>4</sub> and N<sub>2</sub>O emissions from double rice cropping systems under various fertilizer regimes in Hunan Province, China[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2011, 35(4): 707–720
- [29] 祁乐, 高明, 周鹏, 等. 菌渣还田量对紫色水稻土净温室气体排放的影响[J]. 环境科学, 2018, 39(6): 2827–2836  
QI L, GAO M, ZHOU P, et al. Effects of mushroom residue application rates on net greenhouse gas emissions in the purple paddy soil[J]. Environmental Science, 2018, 39(6): 2827–2836
- [30] 万运帆, 李玉娥, 高清竹, 等. 田间管理对华北平原冬小麦产量土壤碳及温室气体排放的影响[J]. 农业环境科学学报, 2009, 28(12): 2495–2500  
WAN Y F, LI Y E, GAO Q Z, et al. Field managements affect yield, soil carbon, and greenhouse gases emission of winter wheat in North China Plain[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2009, 28(12): 2495–2500
- [31] XIA L L, WANG S W, YAN X Y. Effects of long-term straw incorporation on the net global warming potential and the net economic benefit in a rice-wheat cropping system in China[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2014, 197: 118–127