

# 秸秆还田的小麦–玉米农田 N<sub>2</sub>O 周年排放的量化分析

叶桂香<sup>1</sup>, 史永晖<sup>2</sup>, 王良<sup>1</sup>, 陈玉洁<sup>1</sup>, 辛延斌<sup>1</sup>, 刘文茹<sup>1</sup>, 陈国庆<sup>1\*</sup>

(1 作物生物学国家重点实验室/山东农业大学农学院, 山东泰安 271018; 2 济南市土壤肥料站, 山东济南 250021)

**摘要:**【目的】N<sub>2</sub>O 是重要的温室气体之一, 主要来源于农田土壤。华北平原是我国的粮食主产区, 秸秆还田是该地区主要的农田管理措施, 明确不同秸秆还田量对小麦玉米农田周年土壤温度和含水量的影响以及与 N<sub>2</sub>O 排放之间的量化关系, 对发挥秸秆还田的生态效应, 明确硝化和反硝化作用机制具有重要意义。【方法】以冬小麦、夏玉米为研究对象, 设置 5 种不同秸秆还田量处理: 小麦、玉米秸秆均不还田 (T0); 小麦秸秆 1875 kg/hm<sup>2</sup> + 玉米秸秆 2000 kg/hm<sup>2</sup> 还田 (T1); 小麦秸秆 3750 kg/hm<sup>2</sup> + 玉米秸秆 4000 kg/hm<sup>2</sup> 还田 (T2); 小麦秸秆 5625 kg/hm<sup>2</sup> + 玉米秸秆 6000 kg/hm<sup>2</sup> 还田 (T3); 小麦秸秆 7500 kg/hm<sup>2</sup> + 玉米秸秆 8000 kg/hm<sup>2</sup> 还田 (T4)。于 2014 年 10 月~2015 年 10 月, 采用静态箱–气相色谱法对农田 N<sub>2</sub>O 排放进行测定, 探究不同秸秆还田量下小麦玉米农田 N<sub>2</sub>O 排放的周年变化, 并量化分析土壤温度、含水量与 N<sub>2</sub>O 排放的关系。【结果】秸秆还田量显著影响 N<sub>2</sub>O 的排放, 随着秸秆还田量的增加, 周年内 N<sub>2</sub>O 排放总量呈增加的趋势, 增加量为 1.33~3.50 kg/hm<sup>2</sup>, 增加率为 32.3%~85.0%; 通量增加量为 15.52~40.87 μg/(m<sup>2</sup>·h), 增加率为 32.3%~85.1%。玉米季 N<sub>2</sub>O 排放通量和总量分别是小麦季的 2.42~2.62 和 1.05~1.14 倍。秸秆还田可提高 0—10 cm 土壤温度和 0—20 cm 土壤含水量, 增加范围分别为 0.63~2.14℃ 和 0.6%~1.8%。相关性分析表明, 各处理土壤温度和 N<sub>2</sub>O 排放通量无相关关系 ( $P > 0.05$ )。T0、T1、T2 处理土壤含水量与 N<sub>2</sub>O 排放通量呈显著正相关 ( $P < 0.05$ ), 而 T3、T4 处理与 N<sub>2</sub>O 排放通量之间不相关 ( $P > 0.05$ )。【结论】随着秸秆还田量的增加, N<sub>2</sub>O 排放通量和总量均呈现增加趋势, 且玉米季高于小麦季。秸秆还田显著促进 N<sub>2</sub>O 排放并可提高 0—20 cm 土壤含水量和 0—10 cm 土壤温度, 周年秸秆还田量在 7750 kg/hm<sup>2</sup> 及以下时, N<sub>2</sub>O 排放通量与土壤含水量之间呈显著正相关, 而与土壤温度之间不相关。

**关键词:** 秸秆还田; 氧化亚氮; 土壤含水量; 土壤温度

## Quantitative analysis of straw returning on annual soil N<sub>2</sub>O emission in the wheat–maize rotation system

YE Gui-xiang<sup>1</sup>, SHI Yong-hui<sup>2</sup>, WANG Liang<sup>1</sup>, CHEN Yu-jie<sup>1</sup>, XIN Yan-bin<sup>1</sup>, LIU Wen-ru<sup>1</sup>, CHEN Guo-qing<sup>1\*</sup>

(1 State Laboratory of Crop Biology/College of Agronomy of Shandong Agricultural University, Tai'an, Shandong 271018, China; 2 Jinan Soil and Fertilizer Station, Jinan, Shandong 250021, China)

**Abstract:** 【Objectives】Nitrous oxide (N<sub>2</sub>O) is one of the important greenhouse gases that mainly come from farmland soils. Straw returning is an effective ecological management in North China. Quantitative analysis of the N<sub>2</sub>O emission and the affecting factors is of great significance for deep understanding of nitrification and denitrification mechanism in the wheat-maize system. 【Methods】A field experiment with five different amounts of straw incorporation was carried out in the winter wheat and summer maize, including without straw returning (T0), returning 1875 kg/hm<sup>2</sup> wheat straw and 2000 kg/hm<sup>2</sup> maize straw (T1), returning 3750 kg/hm<sup>2</sup> wheat straw and 4000 kg/hm<sup>2</sup> maize straw (T2), returning 5625 kg/hm<sup>2</sup> wheat straw and 6000 kg/hm<sup>2</sup> maize straw (T3), and returning 7500 kg/hm<sup>2</sup> wheat straw and 8000 kg/hm<sup>2</sup> maize straw (T4). From October 2014 to October 2015, the N<sub>2</sub>O flux was determined using static chamber technology combined with gas chromatography, the annual variation of N<sub>2</sub>O flux and their relationships with soil temperature and moisture were analyzed.

收稿日期: 2016–08–24 接受日期: 2016–12–13

基金项目: 国家自然科学基金 (31101083, 31471414) 资助。

作者简介: 叶桂香 (1990—), 女, 汉族, 山东泰安人, 硕士研究生, 主要从事农业信息化方面的研究。

E-mail: yeguixiang2014@163.com. \*通信作者 E-mail: gqchen@sdau.edu.cn

**【 Results 】** The straw returning amounts affected the  $N_2O$  flux significantly, which was increased with the increase of straw returning amounts. The seasonal  $N_2O$  emission was increased by 1.33–3.50  $kg/hm^2$  in amount, or 32.3%–85.1% in rates. The average  $N_2O$  flux were increased by 15.52–40.87  $\mu g/(m^2 \cdot h)$  in amount, or 32.3%–85.1% in rates. The average  $N_2O$  flux and total emission during the maize season were respectively 2.42–2.62 times and 1.05–1.14 times of those in the wheat season. The straw returning increased the temperature in 0–10 cm layer of soil by 0.63–2.14  $^{\circ}C$  and moisture in 0–20 cm layer of soil by 0.6%–1.8%, respectively. The correlation analysis showed that the  $N_2O$  flux had no correlation with soil temperature, had an exponential correlation with soil moisture in treatment T0, T1 and T2 ( $P < 0.05$ ), but not with those in treatment T3 or T4. **【 Conclusions 】** With the increase of straw returning amounts, the average  $N_2O$  flux and seasonal emission will be increased, which are higher in the maize season than in the wheat season. The straw returning could increase soil temperature in 0–10 cm layer and soil moisture in 0–20 cm layer significantly. The  $N_2O$  flux has an exponential correlation with soil moisture when the annual straw returning amounts are less than 7500  $kg/hm^2$ , while had no correlation with soil temperature.

**Key words:** straw returning; nitrous oxide; soil moisture; soil temperature

$N_2O$  是重要的温室气体之一, 能够破坏大气平流层, 引发温室效应<sup>[1]</sup>。其单分子百年尺度增温潜势 (GWP, global warming potential) 是  $CO_2$  的 265 倍, 对全球温室效应的贡献率为 6%<sup>[2]</sup>。农田土壤是  $N_2O$  的重要排放源, 每年向大气排放的  $N_2O$  总量约为  $N$   $3.5 \times 10^6$  t, 占人为源排放量的 61.4% 和全球总排放量的 23.8%<sup>[3]</sup>。土壤  $N_2O$  排放是一个复杂的生物化学过程, 受气象因素、土壤理化性质和农田管理措施等因素的综合影响<sup>[4]</sup>。中国秸秆产量非常丰富<sup>[5]</sup>, 秸秆还田是重要的农田管理措施。华北平原是我国的粮食主产区, 冬小麦–夏玉米一年两熟轮作为主体种植制度, 秸秆还田是该地区主要的农田管理措施<sup>[27]</sup>。在气候变暖背景下, 明确秸秆还田对  $N_2O$  排放的影响及量化关系具有重要意义<sup>[6–7]</sup>。

国内外关于秸秆还田对  $N_2O$  排放的影响持有不同观点, 有学者研究发现, 秸秆还田促进  $N_2O$  排放<sup>[8–9]</sup>, 同时也有学者认为秸秆还田降低  $N_2O$  排放<sup>[10–11]</sup>。秸秆既可作为基质直接参与土壤硝化与反硝化过程, 又可通过改变土壤理化性质来影响土壤硝化与反硝化过程来影响  $N_2O$  排放<sup>[12–13]</sup>。秸秆还田对土壤温度和含水量变化具有不同程度的影响<sup>[14–15]</sup>。秸秆具有增温保墒的作用, 可与地表形成一层与大气热交换的障碍层, 减少土壤热量向大气中散发, 并阻止热量向土壤更深层次运输<sup>[16]</sup>。秸秆的保墒作用主要体现在秸秆可以减少土壤水分蒸发并阻止水分下渗<sup>[17–20]</sup>, 与不还田相比, 秸秆全量还田使春玉米生育期 0–10 cm 和 11–20 cm 土层平均温度分别增加 0.5  $^{\circ}C$  左右<sup>[21]</sup>; 秸秆还田显著提高水旱轮作制度下 0–5 cm 和 5–15 cm 土层的土壤含水量, 半量还田和全量还田比不还田

分别增加 3.2%~19.5% 和 4.5%~19.1%<sup>[22–23]</sup>。在一定的含水量条件下, 土壤  $N_2O$  排放通量随着土壤温度的增加呈指数增加<sup>[24–25]</sup>, 与土壤含水量呈线性相关, 灌溉和降水是造成  $N_2O$  排放通量变化的主要原因<sup>[26]</sup>。

秸秆还田影响着土壤含水量和温度, 进而也影响着土壤  $N_2O$  的排放<sup>[28]</sup>, 但不同秸秆还田量对小麦玉米农田周年  $N_2O$  排放的量化影响关系少有研究。本研究通过对农田土壤  $N_2O$  排放通量进行周年观测, 量化不同秸秆还田量对土壤温度和含水量的影响, 以期为农田温室气体减排、合理进行秸秆还田提供数据支持和科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验地概况

大田试验位于山东省泰安市岱岳区大汶口镇 (117 $^{\circ}3'57''E$ 、35 $^{\circ}58'8''N$ ), 属于温带大陆性季风气候, 四季分明, 光照充足。该地区年平均气温 13.0  $^{\circ}C$ , 年均日照时数 2627.1 h, 年均降雨量 786.3 mm, 具有华北平原的典型气候特点。供试土壤为棕壤, 土层深厚, 地下水在 5 m 以下。试验地 0–20 cm 土层土壤含有机质 13.30 g/kg、全氮 0.82 g/kg、水解氮 85.87 mg/kg、有效磷 27.48 mg/kg、速效钾 129.70 mg/kg、有效硫 43.35 mg/kg。

### 1.2 试验设计与田间管理

试验采用小麦–玉米一年两熟种植模式。小麦供试品种为‘济麦 22’, 2014 年 10 月 3 日播种, 播种量 90  $kg/hm^2$ , 行距 20 cm, 2015 年 6 月 9 日收获; 玉米供试品种为‘郑单 958’, 2015 年 6 月 16

日播种, 种植密度为  $7.5 \times 10^4$  株/hm<sup>2</sup>, 行距 60 cm, 2015 年 10 月 1 日玉米收获。各处理统一施肥模式, 小麦季和玉米季分别施入纯氮 225 kg/hm<sup>2</sup>, 基追比为 4:6, 基肥于小麦播种前 (2014 年 10 月 2 日) 和玉米播种前 (2015 年 6 月 15 日) 撒施, 于小麦拔节期 (2015 年 3 月 29 日) 和玉米大口期 (2015 年 8 月 7 日) 沟施追肥, 氮肥类型为尿素。小麦季和玉米季施磷肥 (P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>) 147 kg/hm<sup>2</sup>、钾肥 (K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) 450 kg/hm<sup>2</sup>、作为基肥随氮肥一次性施入。试验采用单因素随机区组排列, 设置 5 种不同秸秆还田量处理, 3 次重复。分别为 T0, 小麦玉米均不还田; T1, 小麦 1875 kg/hm<sup>2</sup> + 玉米 2000 kg/hm<sup>2</sup>; T2, 小麦 3750 kg/hm<sup>2</sup> + 玉米 4000 kg/hm<sup>2</sup>; T3, 小麦 5625 kg/hm<sup>2</sup> + 玉米 6000 kg/hm<sup>2</sup>; T4, 小麦 7500 kg/hm<sup>2</sup> + 玉米 8000 kg/hm<sup>2</sup> (表 1)。秸秆还田于冬小麦、夏玉米收获后进行, 将上一季作物收割, 留茬约 10 cm, 通过收割机粉碎秸秆, 粉碎后长度为 5~10 cm。按照不同还田量将秸秆常规旋耕还田, 还田深度约 15 cm, 各处理于小麦

拔节期 (2015 年 3 月 24 日) 浇水 75 mm。试验期间每日平均气温和降雨量变化如图 1。

### 1.3 测定项目与方法

1.3.1 气体采集与测定 采用静态箱-气相色谱法测定<sup>[11]</sup>。不锈钢采样箱 (规格为 50 cm × 50 cm × 50 cm) 外覆绝热材料, 气温变化剧烈时保证观测过程中箱内温度变化小于 2℃。采样箱配带有底槽的不锈钢底座, 座壁插入土壤 20 cm 深, 观测期底座一直埋在田间固定位置, 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。采样箱一个侧壁上有两个圆孔, 一个用于插温度计测量箱内温度, 另一个用于连接平衡管 (内径 7 mm、长度 12 cm), 取样时将平衡管打开, 其余罩箱时间关闭平衡管。采样时间在上午 9:00~11:00 之间, 采样开始前, 将采样箱放置在底座上。采样开始时记录罩箱时间, 随后每间隔 15 min 用针筒从采样箱内抽取 50 mL 样品, 连续采集四次, 准确记录每次从箱内取样时间和取样时箱内温度。观测频率平时 7 天 1 次, 追肥后 2 天 1 次, 连测 3 次, 小麦季测定 16 次, 玉米季测定 17 次, 其中小麦越冬期共取样 2 次, 雨天推迟取样。箱内没有作物, 因此所测得的 N<sub>2</sub>O 为土壤中的 N<sub>2</sub>O 排放量, 而没有考虑植物生长的影响。所采气样及时用气相色谱岛津 (GC2010) 进行测定, 气相色谱采用 4 m 长的 Poropak Q 填充柱, 以 N<sub>2</sub> 做载气, 检测器为电子捕获检测器 (ECD), 设 ECD 检测温度 300℃, 逐项温度为 45℃, 载气总流量 40 mL/min, 尾吹流量 40 mL/min。

表 1 试验各处理秸秆还田量 (kg/hm<sup>2</sup>)

Table 1 Amounts of straw returning in every experimental treatment

处理 Treatment	小麦秸秆 Wheat straw	玉米秸秆 Maize straw
T0	0	0
T1	1875	2000
T2	3750	4000
T3	5625	6000
T4	7500	8000

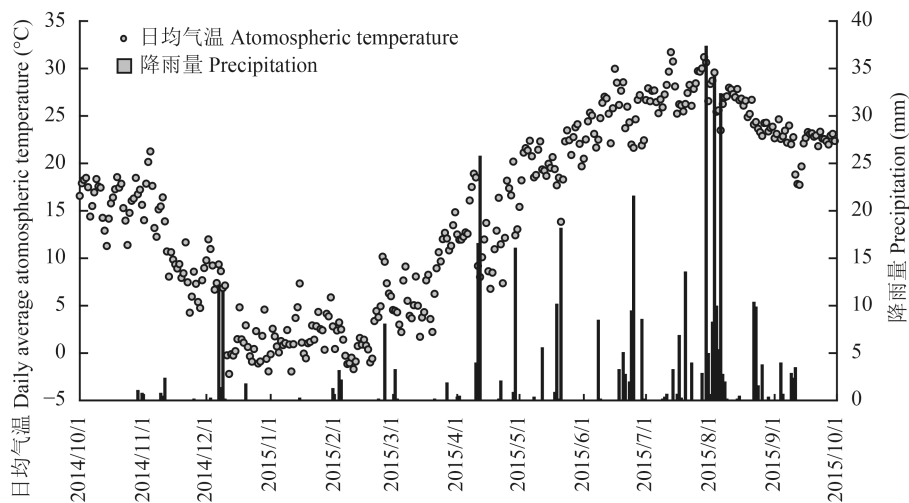


图 1 2014~2015 年小麦玉米生育期内气温和降雨量

Fig. 1 Daily average atmospheric temperature and precipitation in wheat-maize growth periods during 2014-2015

$\text{N}_2\text{O}$ -N 通量计算公式为:

$$F = \frac{273}{273 + T} \times \frac{28}{22.4} \times 60 \times 10^{-3} \times H \times \frac{dc}{dt}$$

式中:  $F$  为  $\text{N}_2\text{O}$  排放通量 [ $\text{mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ ],  $T$  为箱内温度 ( $^{\circ}\text{C}$ ), 28 为每摩尔  $\text{N}_2\text{O}$  分子中 N 的质量数, 22.4 为温度 273 K 时的  $\text{N}_2\text{O}$  摩尔体积,  $H$  为采样箱高度 (cm),  $c$  为  $\text{N}_2\text{O}$  气体浓度 ( $\mu\text{L}/\text{L}$ ),  $t$  为关箱时间 (min),  $dc/dt$  为采样箱内  $\text{N}_2\text{O}$  气体浓度的变化率 [ $\mu\text{L}/(\text{L} \cdot \text{min})$ ].

$\text{N}_2\text{O}$ -N 季节排放总量计算公式为:

$$E = \frac{F \times 24 \times n}{10000}$$

式中:  $E$  生育期累积排放量 ( $\text{kg}/\text{hm}^2$ ),  $F$  为  $\text{N}_2\text{O}$  平均排放通量 [ $\text{mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ ],  $n$  是生育期总天数, 24 是每日的小时数, 100000 为单位转换系数<sup>[29]</sup>.

$\text{N}_2\text{O}$  平均排放通量为小麦季或玉米季通量之和与取样次数的商。

1.3.2 箱内温度测定 采用 JM222 数字温度计随气体进行测定。

1.3.3 (0—20 cm) 土壤含水量和 (0—10 cm) 土壤温度测定 土壤含水量和温度在作物生长的主要生育时期随气体同步测定, 小麦季和玉米季各测定 6 次, 土壤含水量采用烘干法测定, 土壤温度采用 FOM/mts (TDR) 测定。

## 1.4 数据处理

试验数据用 Excel 软件对数据进行处理, 采用 DPS 7.05 数据分析系统进行方差和相关性分析, 用 Sigma plot 10.0 软件作图。

## 2 结果与分析

### 2.1 土壤 $\text{N}_2\text{O}$ 排放季节性变化

周年内  $\text{N}_2\text{O}$  排放通量变化范围为 0.12~206.55  $\mu\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ , 施肥 + 灌溉或降雨事件后出现高峰, 持续时间为 7~10 d, 小麦季在灌溉和施肥后达到两次高峰, 灌溉后 T1、T2、T3、T4 处理通量分别比 T0 增加 27.5%、34.5%、48.9%、54.0%, 追肥后分别增加 29.4%、36.9%、51.2%、57.3%; 玉米季在追肥后第 2 天即达到高峰, 分别增加 9.8%、24.5%、33.3%、37.0% (图 2)。随着秸秆还田量的增加, 周年内  $\text{N}_2\text{O}$  排放总量增加量为 1.33~3.50  $\text{kg}/\text{hm}^2$ , 增加率为 32.3%~85.0%; 排放通量增加量为 15.52~40.87  $\mu\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ , 增加率为 32.3%~85.1%。小麦季排放总量增加量为 0.52~1.48  $\text{kg}/\text{hm}^2$ , 增加率为 32.7%~93.1%; 玉米季排放总量增加量为 0.61~1.49  $\text{kg}/\text{hm}^2$ , 增加率为 35.3%~86.1%。秸秆还田量对  $\text{N}_2\text{O}$  排放量的影响显著 ( $P < 0.05$ ), 周年内还田量每增加 3875  $\text{kg}/\text{hm}^2$ ,  $\text{N}_2\text{O}$  排放通量分别增加 32.3%、16.4%、11.3% 和 8.0%。玉米季排放通量是小麦季的 2.42~2.62 倍, 而季节排放总量是小麦季的 1.05~1.14 倍 (表 2)。

### 2.2 土壤温度和含水量的季节性变化

观测期内不同秸秆还田量处理 0—10 cm 土层平均温度表现为相似的变化趋势, 即先下降后逐渐上升。随着秸秆还田量的增加, 土壤温度呈增加的趋势, 覆盖量越大, 对温度的影响越明显。周年内土壤温度增加量为 0.63~2.14  $^{\circ}\text{C}$ , 增加率为 2.7%~

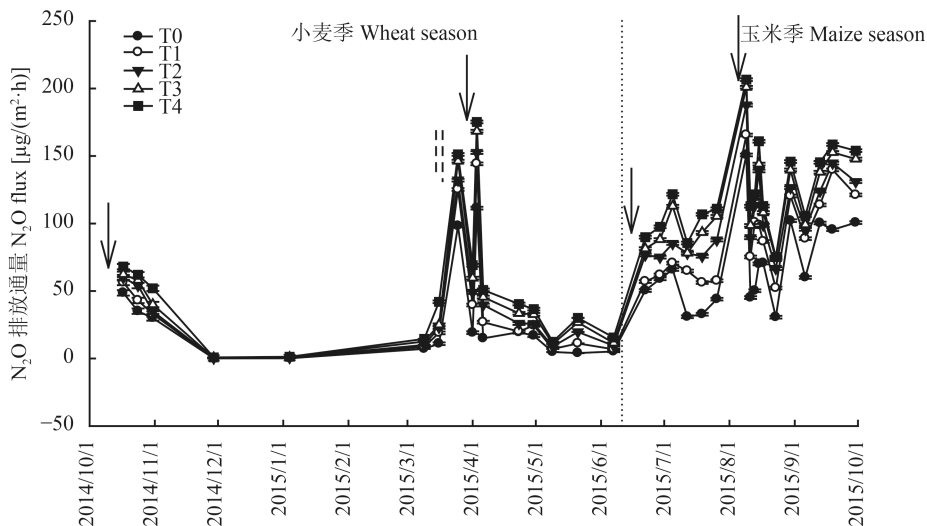


图 2 不同秸秆还田量下小麦玉米周年  $\text{N}_2\text{O}$  排放季节性变化

Fig. 2 Annual variation of  $\text{N}_2\text{O}$  flux under different treatments in wheat-maize system

[注 (Note): “↓”表示施肥 Fertilization; “||”表示灌溉 Irrigation.]

表 2 不同秸秆还田量下 N<sub>2</sub>O 的平均通量、季节排放量  
Table 2 Average flux and seasonal emission of N<sub>2</sub>O under different treatments

处理 Treatment	平均通量 Average flux [ $\mu\text{g}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$ ]			季节排放总量 Seasonal emission ( $\text{kg}/\text{hm}^2$ )		
	小麦季 Wheat season	玉米季 Maize season	周年 Annual	小麦季 Wheat season	玉米季 Maize season	周年 Annual
T0	26.64 e	68.17 e	48.04 e	1.59 e	1.73 e	4.12 e
T1	35.38 d	90.09 d	63.56 d	2.11 d	2.34 d	5.45 d
T2	40.35 c	105.56 c	73.95 c	2.41 c	2.74 c	6.34 c
T3	45.88 b	116.57 b	82.30 b	2.74 b	3.02 b	7.05 b
T4	51.39 a	124.22 a	88.91 a	3.07 a	3.22 a	7.62 a

注 (Note): 同列数据后不同字母表示处理间差异达 5% 显著水平 Values followed by different letters are significant among the treatments at the 5% level.

9.1%。其中小麦季土壤温度变化范围是 7.73~31.89℃, 增加量为 0.80~2.53℃, 增加率为 4.2%~13.2%; 玉米季土壤温度变化范围是 22.30~33.42℃, 增加量为 0.46~1.76℃, 增加率为 1.6%~6.3%。观测期内小麦返青期土壤温度最低, 各处理土壤温度增加率为 4.7%~21.2%; 玉米拔节期土壤温度最高, 各处理土壤温度增加率为 0.2%~6.9% (图 3)。

秸秆还田量处理的 0—20 cm 土壤含水量高于不还田处理, 还田量越大, 对含水量的影响越明显, 周年内含水量增加量为 0.6%~1.8%, 增加 3.6~11.2 个百分点。其中小麦季土壤含水量变化范围是 12.9%~18.3%, 增加量为 0.6%~2.1%; 玉米季土壤含水量变化范围是 13.1%~25.4%, 增加量为 0.6%~1.4%。土壤含水量的变化受降雨与灌溉影响较大, 小麦拔节期降雨 46.1 mm, 4 月 23 日含水量达到观测期内高峰, 玉米大口期之后由于降雨较多土壤含水量一直处于较高状态 (图 1、图 3)。与不还田相比, 玉米季秸秆还田量处理与不还田处理间的差异较小麦季较小, T1、T2、T3、T4 处理小麦季含水量分别增加 3.8、7.3、10.2、14.2 个百分点, 玉米季分别增加 3.5、5.8、8.1、8.5 个百分点。

### 2.3 土壤温度、含水量和 N<sub>2</sub>O 排放的关系

利用 DPS 软件将土壤 N<sub>2</sub>O 排放通量对温度的敏感性采用指数函数 ( $y = ae^{bx}$ ) 进行非线性回归分析, 对含水量的敏感性采用一次函数 ( $y = ax + b$ ) 进行线性回归分析 (表 3)。对各处理土壤温度、含水量与 N<sub>2</sub>O 排放通量进行双变量相关性分析发现, 各处理土壤温度和 N<sub>2</sub>O 排放通量之间无相关关系 ( $P > 0.05$ )。T0、T1、T2 处理土壤含水量与 N<sub>2</sub>O 排放通量呈显著正相关 ( $P < 0.05$ ), 而 T3 和 T4 处理土壤含水量与

N<sub>2</sub>O 排放通量之间不相关 ( $P > 0.05$ ) (表 3)。

## 3 讨论

### 3.1 不同秸秆还田量下土壤温度和含水量变化特征

秸秆覆盖既能影响土壤温度又能影响土壤水分的变化, 覆盖量越大对土壤温度的影响越明显, 秸秆通过影响土壤对光的吸收转化及热量的传输过程从而影响土壤温度变化, 对土壤具有“增温”和“降温”的双重作用<sup>[30]</sup>, 主要影响 10 cm 以内土壤温度, 增温范围为 0.2~9.3℃, 对 10 cm 以下土壤温度的调控作用不显著<sup>[31]</sup>。本研究发现随着秸秆还田量的增加, 土壤温度呈增加的趋势, 观测期内土壤温度增加量分别为 0.63~2.14℃, 增加率为 2.7%~9.1% (图 3), 可能是高还田量会减少土壤热量向大气中散发, 与常晓慧等<sup>[32]</sup>的研究结果一致。王维钰等<sup>[33]</sup>研究结果表明, 秸秆覆盖减少地表径流和地表水分蒸发, 并提高土壤导水率从而增加水分入渗, 这种扩蓄增容的效应随着还田量增加而增强。本试验发现土壤含水量受降雨与灌溉影响较大, 且随还田量的增加而增大, 周年内增加量为 0.6%~1.8%, 增加 3.6 个百分点~11.2 个百分点 (图 3), 玉米季土壤含水量 (13.1%~25.4%) 高于小麦季 (12.9%~18.3%), 且玉米季含水量增加率小于小麦季, 可能是因为玉米季降水量 (268.7 mm) 高于小麦季 (152.6 mm) (图 1), 减弱了秸秆还田量处理与不还田处理间的差异。不同生育时期秸秆对土壤的增温保墒作用效果不同, 可能与秸秆的腐解速度、降雨及植株的遮蔽效应有关<sup>[6, 13]</sup>。

### 3.2 不同秸秆还田量下土壤 N<sub>2</sub>O 排放特征

秸秆通过影响农田土壤物理化学性质、微生物

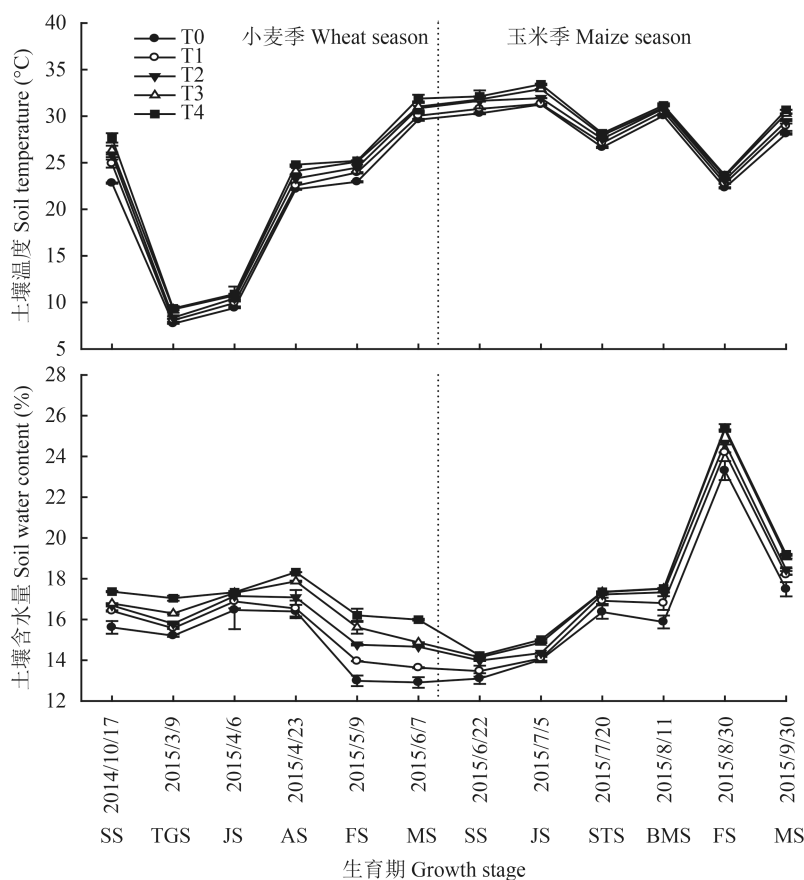


图 3 0—10 cm 土层土壤温度和 0—20 cm 土层土壤含水量变化

Fig. 3 Variation of soil temperature at 0–10 cm layer and moisture at 0–20 cm layer

[注 (Note) : SS—苗期 Seedling stage; TGS—返青期 Turning green stage; JS—拔节期 Jointing stage; AS—开花期 Anthesis stage; FS—灌浆期 Filling stage; MS—成熟期 Maturity stage; STS—小喇叭口期 Small trumpet stage; BMS—大喇叭口期 Bell-mouthed stage.]

表 3 土壤温度、含水量与  $N_2O$  排放的相关性分析

Table 3 Correlation between soil temperature, moisture and  $N_2O$  flux

因素 Factor	处理 Treatment	拟合方程 Fitted equation	$r$
温度 (°C) Temperature	T0	$y = 6.54e^{0.06x}$	0.40
	T1	$y = 9.11e^{0.06x}$	0.41
	T2	$y = 11.64e^{0.05x}$	0.43
	T3	$y = 13.68e^{0.05x}$	0.45
	T4	$y = 15.85e^{0.05x}$	0.45
含水量 (%) Moisture	T0	$y = 7.77x - 81.49$	0.64*
	T1	$y = 9.31x - 100.32$	0.67*
	T2	$y = 8.99x - 84.9$	0.59*
	T3	$y = 9.03x - 84.9$	0.54
	T4	$y = 8.0x - 63.07$	0.44

注 (Note) : “\*” 代表在  $P < 0.05$  水平显著相关 Indicates significant correlation at  $P < 0.05$ .

活性等影响农田土壤  $N_2O$  排放<sup>[34]</sup>。关于秸秆还田对  $N_2O$  排放的影响具有两种截然不同的观点, 增加或减少  $N_2O$  排放<sup>[8-11]</sup>。短期内秸秆还田通过影响易分解有机碳、土壤无机氮含量、土壤含水量和土壤温度等来影响硝化和反硝化作用; 长期内秸秆还田通过改变土壤 C/N 从而影响微生物对氮源的吸收利用进而影响  $N_2O$  排放<sup>[10]</sup>。本试验发现随着秸秆还田量的增加, 周年内  $N_2O$  的排放总量呈增加的趋势 (表 2), 周年内还田量每增加 3875 kg/hm<sup>2</sup>,  $N_2O$  排放通量增加范围是 8.0%~32.3%, 这可能与短期内秸秆还田对土壤温度和含水量的影响有关<sup>[13]</sup>。裴淑玮等<sup>[35]</sup>研究发现, 玉米季  $N_2O$  排放强度和总量均高于小麦季, 原因是玉米季高温多雨适合硝化和反硝化作用的进行, 这与本试验研究结果相同 (图 1、图 2、表 2)。

### 3.3 土壤温度和含水量对 $N_2O$ 排放的影响

研究发现, 硝化作用的最适温度范围是 15~35°C, 低于 5°C 或大于 40°C 抑制硝化作用的发生, 反硝化作用的最适土壤温度范围是 5~75°C<sup>[36]</sup>。本试

观测期内土壤温度最低为 7.73℃, 最高为 33.42℃, 说明试验条件下温度对硝化和反硝化过程均有影响。多数研究发现, N<sub>2</sub>O 排放通量随着土壤温度的升高具有不同程度的增加, 通常呈指数增长<sup>[37]</sup>, 本试验发现各处理土壤温度与 N<sub>2</sub>O 排放之间相关性不显著 ( $P > 0.05$ )。含水量较低时 N<sub>2</sub>O 主要由硝化过程产生, 此时 N<sub>2</sub>O 排放与含水量变化趋势相同; 含水量较高时 N<sub>2</sub>O 主要由反硝化过程产生, 此时两者之间无相关性<sup>[38]</sup>, 本试验发现 T0、T1、T2 处理土壤含水量与 N<sub>2</sub>O 排放通量呈现显著正相关 ( $P < 0.05$ ), 而 T3 和 T4 处理土壤含水量与 N<sub>2</sub>O 排放通量之间不相关 ( $P > 0.05$ ), 可能是周年秸秆还田量在 7750 kg/hm<sup>2</sup> 及以下时, 土壤含水量显著影响 N<sub>2</sub>O 排放, 当还田量再增加时对土壤含水量的影响越明显, 因此改变了土壤含水量对 N<sub>2</sub>O 排放的影响 (图 3、表 3)。N<sub>2</sub>O 排放峰值出现在小麦季灌溉 (3 月 24 日) 后第 2 天, 之后逐渐降低到降雨前的水平, 玉米季 N<sub>2</sub>O 排放通量较高的原因之一为降雨较多导致土壤含水量较高 (图 1、图 2)。但土壤 N<sub>2</sub>O 排放是土壤温度、含水量、施氮量、作物生长等因素综合作用的结果, 因此探究 N<sub>2</sub>O 排放影响因素时, 不可分裂开来<sup>[25]</sup>。观测期内小麦越冬期土壤含水量较高, 但温度较低, N<sub>2</sub>O 排放较低, 说明此时温度是限制 N<sub>2</sub>O 排放的主要因素; 之后土壤温度逐渐升高适合硝化和反硝化作用的进行从而导致 N<sub>2</sub>O 排放通量增加; N<sub>2</sub>O 排放峰值出现在灌溉和施肥之后, 此时施肥和灌溉共同影响 N<sub>2</sub>O 排放; 作物生长后期由于土壤中氮素含量减少, 导致硝化和反硝化作用的底物减少因而 N<sub>2</sub>O 排放减少; 而玉米生长季 (7 月~10 月) 由于持续性高温多雨从而适宜微生物活动导致 N<sub>2</sub>O 排放量较大 (图 1、图 2)。

## 4 结论

秸秆还田显著促进 N<sub>2</sub>O 排放并可提高 0~20 cm 土壤含水量和 0—10 cm 土壤温度, 周年秸秆还田量在 7750 kg/hm<sup>2</sup> 及以下时, 秸秆还田通过提高土壤含水量促进 N<sub>2</sub>O 排放。由于 N<sub>2</sub>O 排放具有典型的时空差异性, 且是多种影响因素的综合结果, 而本试验只是短期的研究结果, 因此关于长期秸秆还田下 N<sub>2</sub>O 的排放特征及影响因素仍需进一步研究。

## 参 考 文 献:

- [1] Barker T, Bashmakov I, Bernstein L, *et al.* Contribution of working group I to the fourth assessment report of the IPCC [R]. 2007.
- [2] Flato G, Marotzke J, Abiodun B, *et al.* Contribution of working group

I to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change of the IPCC [R]. 2013.

- [3] Melillo J M, Steudler P A, Aber J D, *et al.* Soil warming and carbon-cycle feedbacks to the climate system[J]. *Science*, 2002, 298(5601): 2173–2176.
- [4] 徐玉秀, 郭李萍, 谢立勇, 等. 中国主要旱地农田 N<sub>2</sub>O 背景排放量及排放系数特点[J]. *中国农业科学*, 2016, 9(9): 1729–1743.
- Xu Y X, Guo L P, Xie L Y, *et al.* Characteristics of background emissions and emission factors of N<sub>2</sub>O from major upland fields in China[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2016, 9(9): 1729–1743.
- [5] 毕于运, 高春雨, 王亚静, 等. 中国秸秆资源数量估算[J]. *农业工程学报*, 2009, 25(12): 211–217.
- Bi Y Y, Gao C Y, Wang Y J, *et al.* Estimation of straw resources in China[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2009, 25(12): 211–217.
- [6] Xia L, Wang S, Yan X. 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 and Environment*, 2014, 197: 118–127.
- [7] Ma E, Zhang G, Jing M, *et al.* Effects of rice straw returning methods on N<sub>2</sub>O emission during wheat-growing season[J]. *Nutrient Cycling in Agro-ecosystems*, 2010, 88(3): 463–469.
- [8] Yao H, Zou J, Zheng X, *et al.* Nitrous oxide emissions as influenced by amendment of plant residues with different C : N ratios[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2004, 36(6): 973–981.
- [9] Zhu T, Zhang J, Yang W, *et al.* Effects of organic material amendment and water content on NO, N<sub>2</sub>O, and N<sub>2</sub> emissions in a nitrate-rich vegetable soil[J]. *Biology & Fertility of Soils*, 2013, 49(49): 153–163.
- [10] Yao Z, Zhou Z, Zheng X, *et al.* Effects of organic matter incorporation on nitrous oxide emissions from rice-wheat rotation ecosystems in China[J]. *Plant & Soil*, 2010, 327(1): 315–330.
- [11] Zou J, Huang Y, Jiang J, *et al.* 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[J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2005, 19(2): 153–174.
- [12] Robertson G P, Paul E A, Harwood R R. Greenhouse gases in intensive agriculture: contributions of individual gases to the radiative forcing of the atmosphere[J]. *Science*, 2000, 289(5486): 1922–1925.
- [13] Kurgan ova I N, Gerenyu V O L D. Effect of the temperature and moisture on the N<sub>2</sub>O emission from some arable soils[J]. *Eurasian Soil Science*, 2010, 43(8): 919–928.
- [14] 马永良, 师宏奎, 张书奎, 等. 玉米秸秆整株全量还田土壤理化性状的变化及其对后茬小麦生长的影响[J]. *中国农业大学学报*, 2003, (S1): 42–46.
- Ma Y L, Shi H K, Zhang S K, *et al.* Whole maize straw addition: the changes of soil physical and chemical properties and the effect on winter wheat[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2003, (S1): 42–46.
- [15] 蒋向, 任洪志, 贺德先. 玉米秸秆还田对土壤理化性状与小麦生长发育和产量的影响研究进展[J]. *麦类作物学报*, 2011, (3): 569–574.
- Jiang X, Ren H Z, He D X. Research progress on effects of return maize straws into soil on soil physical and chemical characters and on development and yield of wheat as succeeding crop[J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2011, (3): 569–574.
- [16] Ramakrishna A, Tam H M, Wani S P, *et al.* Effect of mulch on soil temperature, moisture, weed infestation and yield of groundnut in

- northern Vietnam[J]. *Field Crops Research*, 2006, 95(2-3): 115-125.
- [17] Qiao H L, Liu X J, Li W Q, *et al.* Effects of straw deep mulching on soil moisture infiltration and evaporation[J]. *Science of Soil & Water Conservation*, 2006, 4(2): 34-38.
- [18] Yang H, Xu M, Koide R T, *et al.* Effects of ditch-buried straw return on water percolation, nitrogen leaching and crop yields in a rice-wheat rotation system[J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2015, 96(4): 1141-1149.
- [19] Zhao X, Wang S, Xing G. Nitrification, acidification, and nitrogen leaching from subtropical cropland soils as affected by rice straw-based biochar: laboratory incubation and column leaching studies[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2014, 14(3): 471-482.
- [20] Zhao Y G, Pang H C, Wang J, *et al.* Effects of straw mulch and buried straw on soil moisture and salinity in relation to sunflower growth and yield[J]. *Field Crops Research*, 2014, 161(1385): 16-25.
- [21] 白伟, 逢焕成, 牛世伟, 等. 秸秆还田与施氮量对春玉米产量及土壤理化性状的影响[J]. *玉米科学*, 2015, 3(3): 99-106.
- Bai W, Pang H C, Niu S W, *et al.* Effects of straw incorporation and nitrogen rate on spring maize yield and soil physicochemical property[J]. *Journal of Maize Sciences*, 2015, 3(3): 99-106.
- [22] 武际, 郭熙盛, 鲁剑巍, 等. 水旱轮作制下连续秸秆覆盖对土壤理化性质和作物产量的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2012, 18(3): 587-594.
- Wu J, Guo X S, Lu J W, *et al.* Effects of continuous straw mulching on soil physical and chemical properties and crop yields in paddy-upland rotation system[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2012, 18(3): 587-594.
- [23] 陈雨海, 李全起, 于舜章, 等. 灌溉与秸秆覆盖条件下冬小麦农田小气候特征[J]. *作物学报*, 2006, 32(2): 306-309.
- Chen Y H, Li Q Q, Yu S Z, *et al.* Micro-climate of winter wheat field under the conditions of irrigation and straw mulching[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2006, 32(2): 306-309.
- [24] Baggs E M, Rees R M, Castle K, *et al.* Nitrous oxide release from soils receiving N-rich crop residues and paper mill sludge in eastern Scotland[J]. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 2002, 90(2): 109-123.
- [25] 陈书涛, 黄耀, 郑循华, 等. 轮作制度对农田氧化亚氮排放的影响及驱动因子[J]. *中国农业科学*, 2005, 38(10): 2053-2060.
- Chen S T, Huang Y, Zheng X H, *et al.* Nitrous oxide emission from cropland and its driving factors under different crop rotations[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2005, 38(10): 2053-2060.
- [26] 黄国宏, 陈冠雄, 韩冰, 等. 土壤含水量与 N<sub>2</sub>O 产生途径研究[J]. *应用生态学报*, 1999, 10(1): 53-56.
- Huang G H, Chen G X, Han B, *et al.* Relationships between soil water content and N<sub>2</sub>O production[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 1999, 10(1): 53-56.
- [27] Potter P, Ramankutty N, Bennett E M, *et al.* Characterizing the spatial patterns of global fertilizer application and manure production[J]. *Earth Interactions*, 2010, 14(1): 1-22.
- [28] Li L J, Han X Z, You M Y, *et al.* Nitrous oxide emissions from Mollisols as affected by long-term applications of organic amendments and chemical fertilizers[J]. *Science of the Total Environment*, 2013, S452-453(5): 302-308.
- [29] 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.
- [30] 杨滨娟, 黄国勤, 钱海燕. 秸秆还田配施化肥对土壤温度根际微生物及酶活性的影响[J]. *土壤学报*, 2014, 51(1): 150-157.
- Yang B J, Huang G Q, Qian H Y. Effect of straw incorporation plus chemical fertilizer on soil temperature, root micro-organisms and enzyme activities[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2014, 51(1): 150-157.
- [31] Agehara S, Warncke D D. Soil moisture and temperature effects on nitrogen release from organic nitrogen sources[J]. *Soil Society of America Journal*, 2005, 69(6): 1844-1855.
- [32] 常晓慧, 孔德刚, 井上光弘, 等. 秸秆还田方式对春播期土壤温度的影响[J]. *东北农业大学学报*, 2011, 42(5): 117-120.
- Chang X H, Kong D G, Inoue M, *et al.* Effect of different straw returning methods on soil temperature in spring sowing period[J]. *Journal of the Northeast Agricultural University*, 2011, 42(5): 117-120.
- [33] 王维钰, 乔博, Akhtar K, 等. 免耕条件下秸秆还田对冬小麦-夏玉米轮作系统土壤呼吸及土壤水热状况的影响[J]. *中国农业科学*, 2016, 49(11): 2136-2152.
- Wang W Y, Qiao B, Akhtar K, *et al.* Effects of straw returning to field on soil respiration and soil water heat in winter wheat-summer maize rotation system under no tillage[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2016, 49(11): 2136-2152.
- [34] Jing M, Ma E, Hua X, *et al.* Wheat straw management affects CH<sub>4</sub> and N<sub>2</sub>O emissions from rice fields[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2009, 41(5): 1022-1028.
- [35] 裴淑玮, 张圆圆, 刘俊锋, 等. 华北平原玉米-小麦轮作农田 N<sub>2</sub>O 交换通量的研究[J]. *环境科学*, 2012, 33(10): 3641-3646.
- Pie S W, Zhang Y Y, Liu J F, *et al.* N<sub>2</sub>O exchange fluxes from wheat-maize crop rotation system in the north China plain[J]. *Environmental Science*, 2012, 33(10): 3641-3646.
- [36] 谢军飞, 李玉娥. 土壤温度对北京旱地农田 N<sub>2</sub>O 排放的影响[J]. *中国农业气象*, 2005, 26(1): 7-10.
- Xie J F, Li Y E. Effect of soil temperature on N<sub>2</sub>O emission in upland farm of Beijing[J]. *Chinese Journal of Agro-meteorology*, 2005, 26(1): 7-10.
- [37] 郑循华, 王明星, 王跃思, 等. 温度对农田 N<sub>2</sub>O 产生与排放的影响[J]. *环境科学*, 1997, 18(5): 1-5.
- Zheng X H, Wang M X, Wang Y S, *et al.* Impacts of temperature on N<sub>2</sub>O production and emission[J]. *Environmental Science*, 1997, 18(5): 1-5.
- [38] Sanchez M L, Mejjide A, Garcia T A, *et al.* Combination of drip irrigation and organic fertilizer for mitigating emissions of nitrogen oxides in semiarid climate[J]. *Agriculture Ecosystems and Environment*, 2010, 137: 99-107.