

高洪军,张卫建,彭 畅,等.长期施肥下黑土玉米田土壤温室气体的排放特征[J].农业资源与环境学报,2017,34(5):422-430.

GAO Hong-jun, ZHANG Wei-jian, PENG Chang, et al. Emission Characteristics of Greenhouse Gas from Maize Field of Black Soil Region Under Long-term Fertilization[J]. Journal of Agricultural Resources and Environment, 2017, 34(5): 422-430.

# 长期施肥下黑土玉米田土壤温室气体的排放特征

高洪军<sup>1</sup>,张卫建<sup>2</sup>,彭 畅<sup>1</sup>,张秀芝<sup>1</sup>,李 强<sup>1</sup>,朱 平<sup>1\*</sup>

(1.吉林省农业科学院农业资源与环境研究所,吉林 长春 130033;2.中国农业科学院作物科学研究所/农业部作物生理生态重点实验室,北京 100081)

**摘 要:** 研究不同施肥措施下东北黑土区玉米农田温室气体(CO<sub>2</sub>、N<sub>2</sub>O 和 CH<sub>4</sub>)的排放量及其增温潜势,将为制定农业温室气体减排措施提供理论依据。本研究以国家(公主岭)黑土长期定位试验为平台,采用静态箱-气相色谱法对不同施肥措施下玉米农田土壤温室气体排放通量进行了监测,并分析了不同施肥处理间玉米田的综合温室效应差异。结果表明:各施肥处理土壤温室气体 CO<sub>2</sub> 和 N<sub>2</sub>O 的排放高峰均出现在玉米拔节期。农家肥和化肥配施(M<sub>2</sub>NPK)处理土壤 CO<sub>2</sub>、N<sub>2</sub>O 排放通量和 CH<sub>4</sub> 吸收量均显著高于施化肥处理(P<0.05),施用化肥处理土壤 CO<sub>2</sub>、N<sub>2</sub>O 排放通量高于不施肥处理,撂荒区土壤 CO<sub>2</sub> 排放通量最高,而土壤 N<sub>2</sub>O 排放通量显著低于施肥处理,等施氮量条件下,化肥(NPK)处理土壤 N<sub>2</sub>O 排放通量明显高于秸秆还田(SNPK)处理,而土壤 CH<sub>4</sub> 净吸收量结果则截然相反。从土壤综合温室效应和温室气体强度可分析出,与不施肥(CK)比较,偏施化肥 N 和 NPK 处理的综合温室效应(GWP)分别增加了 142%和 32%,SNPK 综合温室效应降低了 38%;尤其是有机无机配施(M<sub>2</sub>NPK)处理的综合温室效应为负值,为净碳汇。平衡施肥 NPK 和有机无机配施(SNPK 和 M<sub>2</sub>NPK)温室气体排放强度(GHGI)较弱,显著低于不施肥(CK)和偏施化肥(N)处理,其中 M<sub>2</sub>NPK 为-222 kg CO<sub>2</sub>-eq·t<sup>-1</sup>。因此,为同步实现较高的玉米产量和较低的温室气体排放强度,有机无机肥配施是东北黑土区较为理想的土壤培肥方式。

**关键词:** 长期施肥 温室气体 排放强度 春玉米 黑土

中图分类号: X511

文献标志码: A

文章编号: 2095-6819(2017)05-0422-09

doi: 10.13254/j.jare.2017.0103

## Emission Characteristics of Greenhouse Gas from Maize Field of Black Soil Region Under Long-term Fertilization

GAO Hong-jun<sup>1</sup>, ZHANG Wei-jian<sup>2</sup>, PENG Chang<sup>1</sup>, ZHANG Xiu-zhi<sup>1</sup>, LI Qiang<sup>1</sup>, ZHU Ping<sup>1\*</sup>

(1. Institute of Agricultural Resource and Environment, Jilin Academy of Agricultural Sciences, Changchun 130033, China; 2. Institute of Crop Sciences, Chinese Academy of Agricultural Sciences/Key Laboratory of Crop Physiology and Ecology, Ministry of Agriculture, Beijing 100081, China)

**Abstract** Study on greenhouse gases emission and their global warming potential under different fertilizations would be the theoretical basis for establishing measurements to reduce greenhouses gas emissions. Based on a long-term fertilization experiment, greenhouses gas (GHG) emissions from black soil of summer maize were measured by using a static chamber-gas chromatograph technique, and global warming potential (GWP) effect was also estimated. The results showed the peaks of CO<sub>2</sub> and N<sub>2</sub>O emissions occurred at maize jointing period. The CO<sub>2</sub> and N<sub>2</sub>O emission flux and CH<sub>4</sub> uptake flux in the M<sub>2</sub>NPK treatment (mixed application of organic fertilizer and chemical fertilizer) were significantly higher than those of the chemical fertilizer treatments (P<0.05), but the CO<sub>2</sub> and N<sub>2</sub>O emission flux in the chemical

收稿日期: 2017-04-20

基金项目: 公益性行业(农业)科研专项(201503136-6); 粮食丰产增效科技创新项目课题(2016YFD03008); 吉林省科技支撑重大专项(20140203002NY)

作者简介: 高洪军(1975—)男,吉林公主岭人,博士,研究员,主要从事土壤肥力与农田生态研究。E-mail: ghj-1975@163.com

\*通信作者: 朱 平 E-mail: zhuping1962@163.com

fertilizer treatments were higher than that of the no fertilizer treatment. The  $\text{CO}_2$  emission flux of the fallow treatment was the highest among all the treatments, but its  $\text{N}_2\text{O}$  emission flux was significantly lower than that of the chemical fertilizer treatment. Under equal N rates, the  $\text{N}_2\text{O}$  emission flux of the NPK treatment was significantly higher than that of the SNPK treatment (straw returning), but  $\text{CH}_4$  uptake flux was the opposite result. Compared with no fertilizer treatment (CK), *GWP* of the N and NPK treatments increased by 142% and 32% respectively, *GWP* of SNPK treatment decreased by 38%, and *GWP* in the  $\text{M}_2\text{NPK}$  treatment was negative value. Greenhouse gas emission intensity (*GHGI*) of the NPK, SNPK and  $\text{M}_2\text{NPK}$  treatments were significantly lower than that of the CK and the N treatments, *GHGI* of the  $\text{M}_2\text{NPK}$  treatment was  $-222 \text{ kg CO}_2\text{-eq} \cdot \text{t}^{-1}$ . Therefore, in order to implement the higher maize yield with lower *GHGI* synchronously, mixed application of organic fertilizer and chemical fertilizer would be the optimal fertilization measurement in black soil region of Northeast China.

**Keywords** long-term fertilization; greenhouse gas; emission intensity; spring maize; black soil

随着国际社会对气候变化、温室气体减排和粮食安全的日趋重视,粮食增产和农田温室气体减排研究得到了科学界的空前关注<sup>[1]</sup>。大气中  $\text{CO}_2$ 、 $\text{N}_2\text{O}$  和  $\text{CH}_4$  是最重要的温室气体,对温室效应的贡献近 80%<sup>[2]</sup>。农业生产是温室气体排放的重要来源,据估计,每年仅土壤就贡献了大气中 5%~20% 的  $\text{CO}_2$ 、15%~30% 的  $\text{CH}_4$  和 80%~90% 的  $\text{N}_2\text{O}$ <sup>[3]</sup>,其中农业源温室气体排放约占人类活动温室气体总排放的 14%,并呈逐年增加趋势<sup>[4]</sup>。因此,关注农田温室气体的排放对于全球气候变化和实现农业的可持续发展具有重要的意义。

不同种植模式、耕作、灌溉以及施肥等农业管理措施主要影响着温室气体的排放<sup>[5-6]</sup>。在农业管理措施中,施肥对温室气体排放的影响最大<sup>[7]</sup>。长期不同施肥可导致土壤碳、氮和 pH 值等发生较大变异<sup>[8]</sup>,进而影响到碳的转化、以及氮的硝化和反硝化过程的微生物数量和活性。关于不同肥料种类、不同施肥量、不同施肥方式等对温室气体排放的影响研究已有很多<sup>[9-11]</sup>,尤其在南方地区稻田生态系统和红壤丘陵地区研究较多,而对于长期不同施肥措施对东北黑土区玉米农田温室气体排放的研究鲜有报道。目前,施用有机肥对土壤  $\text{CH}_4$  和  $\text{N}_2\text{O}$  的排放影响不尽相同<sup>[12]</sup>,并且等施氮量条件下有机无机肥配施对东北黑土农田温室气体的研究未见报道。因此,有必要借助国家黑土肥力与肥料效益长期定位试验基地,研究不同施肥措施下玉米农田土壤温室气体  $\text{CO}_2$  和  $\text{N}_2\text{O}$  的排放特征,阐明不同施肥措施的温室气体的排放强度和综合温室效应,以期为东北黑土区玉米农田生态系统温室气体减排,综合温室效应和气体排放强度准确评估提供科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验地概况

国家黑土肥力与肥料效益长期定位监测基地坐

落于吉林省公主岭市吉林省农科院试验区内(东经  $124^\circ 48' 33.9''$ , 北纬  $43^\circ 30' 23''$ )。试验区地势平坦,海拔 220 m,年平均气温  $4\sim 5^\circ\text{C}$ ,年最高气温  $34^\circ\text{C}$ ,最低气温  $-35^\circ\text{C}$ ,无霜期 110~140 d,有效积温  $2\ 600\sim 3\ 000^\circ\text{C}$ ,年降水量 450~650 mm,年蒸发量  $1\ 200\sim 1\ 600\text{ mm}$ ,年日照时间  $2\ 500\sim 2\ 700\text{ h}$ 。土壤为中层典型黑土,成土母质为第四纪黄土状沉积物,试验开始时耕层(0~20 cm)土壤化学性质:土壤有机质  $22.8\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,土壤全氮  $1.40\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,土壤全磷  $1.39\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,土壤全钾  $22.1\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,土壤碱解氮  $114\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,土壤有效磷  $27.0\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,土壤速效钾  $190\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,pH 值为 7.6。

### 1.2 试验设计和管理

黑土长期定位试验始于 1990 年,于 2012 年选择其中 5 个处理进行气体取样和测定,即:(1)撂荒区(Fallow,不耕作,不种植),(2)CK(不施肥),(3)氮肥(N),(4)氮磷钾化肥(NPK),(5)农家肥加化肥( $\text{M}_2\text{NPK}$ ),(6)秸秆加化肥(SNPK)。各处理施肥情况见表 1。试验不设重复,小区面积  $400\text{ m}^2$ ,为了减少无重复的缺陷,在每个小区选取 3 个有代表性的点进行调查和采样,区间由 2 m 宽过道相连。玉米各生育期时间:出苗期为 5 月 22 日,拔节期 6 月 19 日,抽丝期为 7 月 20 日,乳熟期为 8 月 19 日,成熟期为 9 月 22 日。

有机肥作底肥,1/3 氮肥和磷钾肥作口肥,其余 2/3 氮肥于拔节前追施表土下 10 cm 处,化肥种类:氮肥为尿素、磷肥为磷酸二铵、钾肥为氯化钾,拔节追肥后人工将  $7\ 500\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$  玉米秸秆撒施土壤表面。有机肥(干基)养分含量:0.5% N,0.4%  $\text{P}_2\text{O}_5$ ,0.49%  $\text{K}_2\text{O}$ 。秸秆:0.7% N,0.16%  $\text{P}_2\text{O}_5$ ,0.75%  $\text{K}_2\text{O}$ 。

供试作物为玉米,种植玉米品种:1990—1993 年为丹育 13,1994—1996 年为吉单 222,1997—2005 年为吉单 209,2006—2012 年为郑单 958。于 4 月末播种,按常规进行统一田间管理,9 月末收获,玉米收获面积为  $15\text{ m}^2$ ,3 次重复,玉米产量按 14%水分计算,

表 1 不同处理的施肥量

Table 1 Amount of fertilizer application in the different treatments

处理 Treatment	氮肥 N/kg·hm <sup>-2</sup>		磷肥 P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> / kg·hm <sup>-2</sup>	钾肥 K <sub>2</sub> O/ kg·hm <sup>-2</sup>
	化肥 N Chemical fertilizer N	有机肥 N Organic fertilizers N		
CK	0	0	0	0
N	165	0	0	0
NPK	165	0	82.5	82.5
SNPK	112	53	82.5	82.5
M <sub>2</sub> NPK	165	150	82.5	82.5

注 M<sub>2</sub>——猪粪 pig manure S——玉米秸秆 maize straw。

10 月份对土壤进行取样分析测定。

### 1.3 取样及测定方法

#### 1.3.1 田间气样采集

2012 年 5 月份播种后,采用静态箱-气相色谱法监测了田间各处理玉米行间土壤的 N<sub>2</sub>O、CO<sub>2</sub> 和 CH<sub>4</sub> 的排放。采样箱由箱体和箱盖组成,均为方形。采样箱由不锈钢材料制成,箱子周围及箱盖用白色泡沫板包裹以保持箱内温度相对恒定,箱体为 60 cm×50 cm×40 cm,采样箱一侧中间有温度计插孔。箱体上端有密封水槽。箱盖上端装有 1 个气体采集接口和 1 个风扇电线入口,并在箱盖里边安装 1 个 12 V 小风扇,外接蓄电池供电,用以充分混匀箱内气体。箱体靠近下半部分开有 2 排圆孔,箱外植物的根系可以穿过。底座埋入作物行间,入土 10 cm,整个生长季箱体不再移动。

玉米生育期每隔 7 d 采样 1 次,追肥 15 d 内每 2 d 测定 1 次。每次气样采集时间固定在上午 9:00—11:00,采样按区组进行,以减少土壤呼吸的日变化影响。采样时底座水槽中需注满水加以封闭,盖上箱盖,打开风扇电源,按 0、10、20、30 min 的时间间隔用 50 mL 注射器从气体采集接口插入,每次来回抽动 2 次,以便箱内气体混和均匀,抽出 40 mL 气体注入到真空瓶保存。采样后立即将样品带回实验室分析。每次采集气体同时同步记录地表温度、5 cm 处地温、10 cm 处地温、箱内温度。

#### 1.3.2 气体测定与通量计算

气体样品分析采用 HP7890A 气相色谱仪,分析柱为 Porpak.Q 填充柱,柱箱温度为 50 °C,载气为高纯 N<sub>2</sub>,N<sub>2</sub>O 测定用电子捕获检测器(ECD),工作温度 300 °C。CO<sub>2</sub> 和 CH<sub>4</sub> 测定采用氢火焰(FID)检测器,工作温度 300 °C。气相色谱仪在每次测试时使用国家标准计量中心的标准气体进行标定,温室气体测定的相对误差在 2%以内。

温室气体排放通量计算公式为:

$$F = \rho \times H \times (\Delta c / \Delta t) \times 273 / (273 + T) \quad (1)$$

式中<sup>[13]</sup>:F 为温室气体排放通量,CO<sub>2</sub> 排放通量单位为 mg·(m<sup>2</sup>·h)<sup>-1</sup>,N<sub>2</sub>O 和 CH<sub>4</sub> 排放通量单位为 μg·(m<sup>2</sup>·h)<sup>-1</sup>;ρ 为某温室气体标准状态下的密度,kg·m<sup>-3</sup>;H 为采样箱的箱罩的净高度,m;Δc/Δt 为采样箱内温室气体浓度的变化率,μL·(L·h)<sup>-1</sup>;T 为采样过程中采样箱内的平均温度,°C。

#### 1.3.3 综合温室效应(GWP)和温室气体排放强度(GHGI)的计算

$$GWP = 298 \times N_2O + 25 \times CH_4 - SOCSR \times 44 / 12 \quad (\text{kg CO}_2\text{-eq} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}) \quad (2)$$

$$SOCSR = \delta SOC \times BD \times H \times 100 \quad (\text{kg C} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}) \quad (3)$$

式中:SOCSR(soil organic carbon sequestration rate)土壤有机碳固定速率,BD 和 H 为土壤容重和土层深度,δSOC 是土壤有机碳年增加率,用直线回归计算公主岭黑土长期试验 25 年有机碳数据的变化趋势所得<sup>[14-16]</sup>。

$$GHGI = GWP / Y \quad (4)$$

依据 Timothy 等<sup>[17]</sup>的研究,公式(4)中 GHGI 为温室气体排放强度,kg·t<sup>-1</sup>;Y 为作物产量,t·hm<sup>-2</sup>。

### 1.4 数据处理与分析

试验中所获得的数据采用 Microsoft Excel 2007 和 SPSS 18.0 等统计分析软件进行数据处理与统计分析,用 LSD 法进行差异显著性检验。

## 2 结果与分析

### 2.1 农田 CO<sub>2</sub> 排放通量特征

由图 1 可见,不同施肥处理农田土壤 CO<sub>2</sub> 排放通量均呈现明显的季节变化规律,总体变化趋势相似。各施肥处理土壤 CO<sub>2</sub> 排放在拔节期追肥后第 7 d(6 月 27 日)出现第 1 次排放高峰,其中,有机无机肥配施 M<sub>2</sub>NPK 和 SNPK 处理土壤 CO<sub>2</sub> 排放通量分别达到 549.2 mg·(m<sup>2</sup>·h)<sup>-1</sup> 和 492.3 mg·(m<sup>2</sup>·h)<sup>-1</sup>,而后土壤 CO<sub>2</sub> 排放逐渐降低,到玉米灌浆期(8 月 9 日)出现第 2 次排放高峰,随后各处理又降低到同一水平。

在拔节期追肥前,撂荒区(Fallow)土壤 CO<sub>2</sub> 排放通量显著高于其他处理(P<0.05);从拔节期排放高峰后,Fallow 处理土壤 CO<sub>2</sub> 排放通量低于秸秆还田(SNPK)处理,但与 M<sub>2</sub>NPK 处理土壤 CO<sub>2</sub> 排放通量类似,并显著高于 NPK、N 和 CK 处理(P<0.05)。在玉米整个生育期,有机肥无机肥配施 SNPK 和 M<sub>2</sub>NPK 处理土壤 CO<sub>2</sub> 排放通量显著高于施化肥处理,不施肥



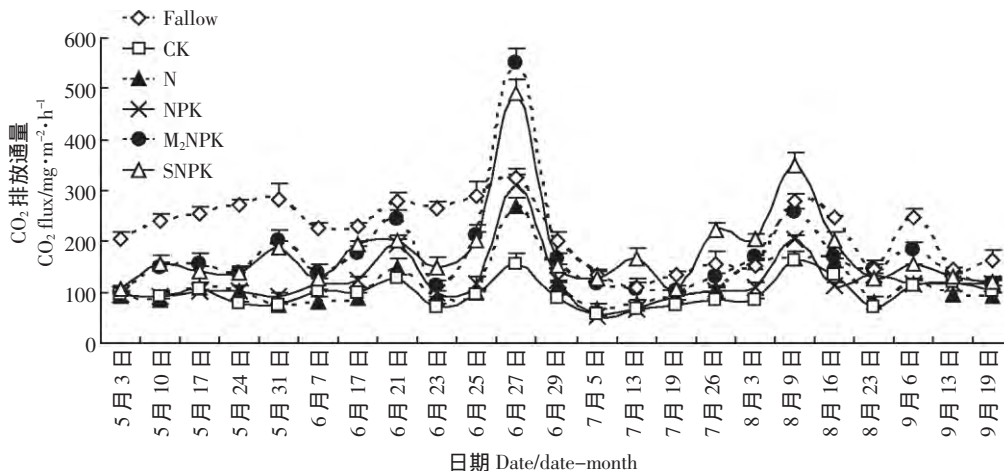


图1 不同处理下 CO<sub>2</sub> 排放通量(Means ± SE n=3)的季节变化  
Figure 1 CO<sub>2</sub> fluxes(Means ± SE n=3) in different treatments

(CK)处理土壤 CO<sub>2</sub> 排放通量最低。在玉米整个生育期,土壤 CO<sub>2</sub> 排放通量的大小顺序为:Fallow>SNPK, M<sub>2</sub>NPK>NPK>N>CK。

### 2.2 农田 N<sub>2</sub>O 排放通量特征

土壤 N<sub>2</sub>O 的产生主要是在微生物的参与下,通过硝化和反硝化作用完成的。这些过程受土壤通气状况、土壤水分、温度和土壤氮含量等的影响。从图2可以看出,不同处理土壤 N<sub>2</sub>O 排放通量有一定的差异;N<sub>2</sub>O 排放通量随不同生长季节的变化而变化,播种后 N<sub>2</sub>O 的排放通量长时间处于较低的水平,但随着时间的增加,到拔节期追肥后7d(6月27日)时,达到最高峰值,最大为 M<sub>2</sub>NPK 处理,达到 636.6 μg·(m<sup>2</sup>·h)<sup>-1</sup>,随后土壤 N<sub>2</sub>O 排放通量迅速下降,到成熟期,不同处理土壤 N<sub>2</sub>O 排放量均最低,各处理间无差异(P<0.05)。总体上,土壤 N<sub>2</sub>O 排放量主要集中在玉米拔节期-抽丝期。

撂荒区(Fallow)和不施肥(CK)处理土壤 N<sub>2</sub>O 排放量一致处于较低的水平,两个处理土壤 N<sub>2</sub>O 排放量没有随生长季节的变化而变化;与施用化肥 NPK 处理比较,农家肥和化肥配施(M<sub>2</sub>NPK)显著增加了土壤 N<sub>2</sub>O 的排放(P<0.05),表明过量施氮会导致土壤 N<sub>2</sub>O 的大量排放,应适当调整有机肥和化肥的适宜比例。

### 2.3 农田 CH<sub>4</sub> 吸收/排放通量特征

不同施肥模式 CH<sub>4</sub> 排放通量(图3)均随时间表现出明显的变化,通量值有正有负,表明土壤既有 CH<sub>4</sub> 的排放,也有对 CH<sub>4</sub> 的吸收,但在玉米田以吸收为主。在苗期,CH<sub>4</sub> 的净吸收量处于较低的水平,在拔节期,CH<sub>4</sub> 的净吸收量达到最高峰值,其中秸秆还田(SNPK)处理达到-84.3 μg·m<sup>-2</sup>·h<sup>-1</sup>。拔节期后各施肥处理 CH<sub>4</sub> 排放通量基本稳定。不同施肥处理对 CH<sub>4</sub> 累积排放的影响有差异(P<0.05)。有机无机肥配施(M<sub>2</sub>NPK 和 SNPK)处理的土壤 CH<sub>4</sub> 净吸收量较高,不

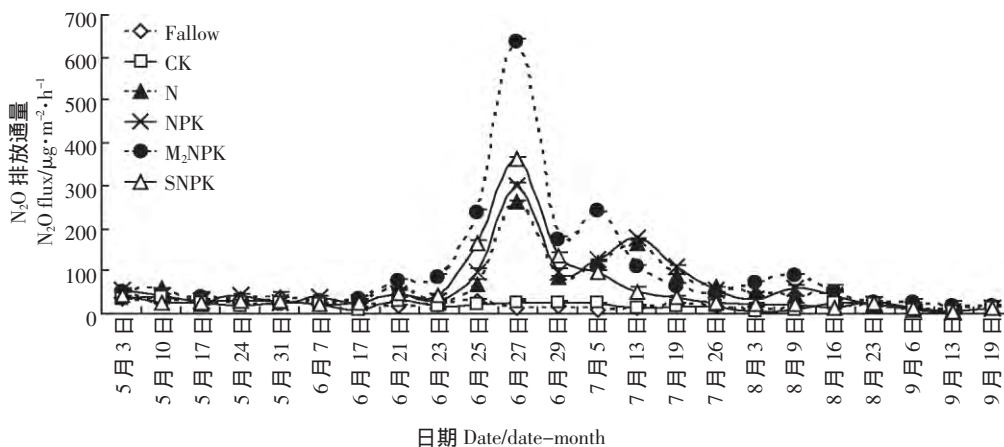


图2 不同处理下 N<sub>2</sub>O 排放通量(Means ± SE n=3)的季节变化  
Figure 2 N<sub>2</sub>O fluxes(Means ± SE n=3) in different treatments

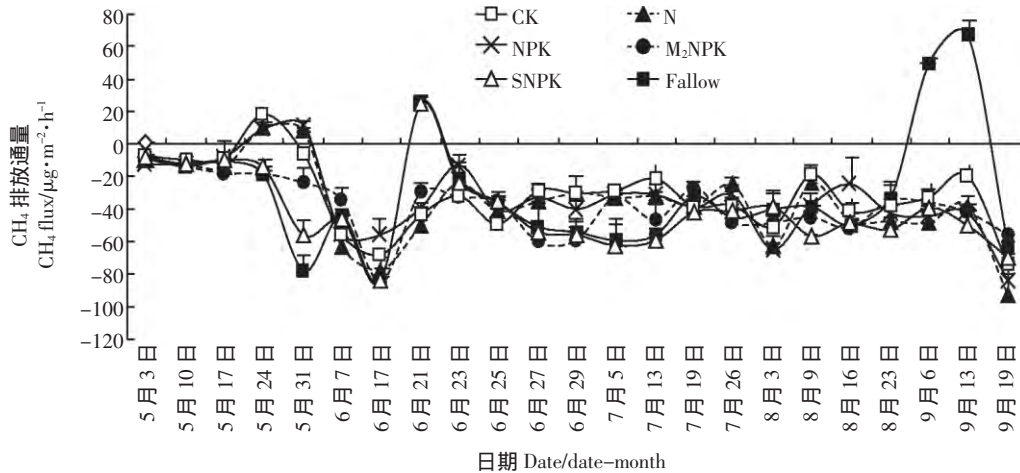


图 3 不同处理下 CH<sub>4</sub> 排放通量(Means ± SE n=3)的季节变化  
Figure 3 CH<sub>4</sub> fluxes(Means ± SE n=3) in different treatments

施肥(CK)和 Fallow 处理土壤 CH<sub>4</sub> 净吸收量最低。表明黑土玉米田是大气中 CH<sub>4</sub> 的一个微弱汇。

#### 2.4 农田温室气体累积排放量

由表 2 可知,在玉米整个生育期,土壤 CO<sub>2</sub> 累积排放量以撂荒区(Fallow)最高,达到 6 855 kg·hm<sup>-2</sup>;以 CK 处理最低,仅为 3 147 kg·hm<sup>-2</sup>。农家肥和无机肥配施(M<sub>2</sub>NPK)处理土壤 CO<sub>2</sub> 累积排放量与秸秆还田(SNPK)处理差异不显著,但显著高于施化肥处理(P<0.05),化肥 NPK 处理土壤 CO<sub>2</sub> 累积排放量高于单施 N 处理,但差异不显著。

与不施肥(CK)相比,N、NPK、SNPK 和 M<sub>2</sub>NPK 处理整个生育期土壤 N<sub>2</sub>O 累积排放量分别增加了 213.3%、224.5%、195.6%和 413.2%,以 M<sub>2</sub>NPK 处理最高,达到 3.618 kg·hm<sup>-2</sup>,氮肥的施用显著增加了 N<sub>2</sub>O 的排放量(P<0.05)。撂荒区(Fallow)土壤 N<sub>2</sub>O 累积排放量仅为 0.716 kg·hm<sup>-2</sup>,与 CK 处理差异不显著,在

等施氮量条件下,秸秆还田(SNPK)与 NPK 相比较,N<sub>2</sub>O 排放减少了 14.2%。秸秆还田显著降低了土壤 N<sub>2</sub>O 的累积排放量。有机无机肥配施(M<sub>2</sub>NPK 和 SNPK)处理土壤 CH<sub>4</sub> 吸收量显著高于施化肥处理(P<0.05)。

#### 2.5 农田综合增温潜势

玉米田 GWP(Global Warming Potential)主要来源于 N<sub>2</sub>O 的排放,是全球增温潜势占主导地位的温室气体,而 CH<sub>4</sub> 对玉米田 GWP 的抵消仅占很小比例,此试验中土壤固定的碳对玉米田 GWP 的抵消占了较大的比例。比较不同施肥方式的综合温室效应(100 年尺度上)发现(表 3),在各处理中,单施氮肥(N)对农田综合温室效应贡献最大;与不施肥(CK)比较,单施化肥 N 和 NPK 处理综合温室效应分别增加了 142%和 32%,SNPK 综合温室效应降低了 38%,M<sub>2</sub>NPK 和撂荒区(Fallow)两个处理土壤固碳效率显著增加,综合温室效应均为负值,为净碳汇,其中,撂荒区生长着大量茂盛的杂草,促进了表层土壤有机碳显著增加。

在产量差异明显的情况下,GHGI(Greenhouse Gas Intensity)呈现出和 GWP 不一样的变化趋势。比较不同施肥处理下温室气体排放强度(GHGI)可以发现,不同处理的排放强度为 N>CK>NPK>SNPK>M<sub>2</sub>NPK,单施氮肥处理 GHGI 值最高,是 NPK 处理的 3.22 倍,而有机无机配施(M<sub>2</sub>NPK)处理的 GHGI 值最低,仅为 -222 kg CO<sub>2</sub>-eq·t<sup>-1</sup>,显著低于其他处理(P<0.05),而且产量处于较高水平。

### 3 讨论

本研究表明,各施肥处理农田土壤 CO<sub>2</sub> 排放最高峰出现在拔节期追肥后第 7 d。主要是由于追施氮肥、

表 2 不同处理下温室气体的累积排放量(kg·hm<sup>-2</sup>)

Table 2 Accumulative emission amounts of greenhouse gas under different treatments(kg·hm<sup>-2</sup>)

处理 Treatment	CO <sub>2</sub> 排放总量 Total emission	N <sub>2</sub> O 排放总量 Total emission	CH <sub>4</sub> 排放总量 Total emission
Fallow	6 855±186a	0.716±0.04d	-1.105±0.01a
CK	3 147±117d	0.705±0.02d	-1.143±0.02a
N	3 460±101cd	2.209±0.01c	-1.304±0.03b
NPK	3 751±179c	2.429±0.06b	-1.199±0.02ab
M <sub>2</sub> NPK	5 278±228b	3.618±0.17a	-1.438±0.09c
SNPK	5 595±88b	2.084±0.10c	-1.507±0.12c

注:同一列不同字母表示处理间差异达到显著水平(P<0.05)。下同。

Note: Different lowercase and capital characters in a single column indicate difference(P<0.05) between the treatments. The same below.

表3 不同处理下玉米田净综合温室效应(*GWP*)及气体排放强度(*GHGI*)(*Mean*±*SE n*=3)  
Table 3 Changes of *GWP* and *GHGI*(*Mean*±*SE n*=3) from the maize field under different treatments

处理 Treatment	玉米产量 Maize yield/t·hm <sup>-2</sup>	CH <sub>4</sub> 排放总量/ kg CO <sub>2</sub> -eq·hm <sup>-2</sup>	N <sub>2</sub> O 排放总量/ kg CO <sub>2</sub> -eq·hm <sup>-2</sup>	土壤有机碳固定速率 SOC <sub>SR</sub> /kg C·hm <sup>-2</sup> ·a <sup>-1</sup>	综合温室效应 <i>GWP</i> / kg CO <sub>2</sub> -eq·hm <sup>-2</sup>	温室气体排放强度 <i>GHGI</i> /kg CO <sub>2</sub> -eq·t <sup>-1</sup>
Fallow		-27.6±0.3a	213.4±12.8d	328.2	-1 017±12.5e	
CK	3.44±0.08d	-28.6±0.5a	210.0±6.7d	-101.4	553±7.2c	161±4.2b
N	6.03±0.37c	-32.6±0.8b	658.3±4.1c	-194.1	1 337±3.4a	222±13.8a
NPK	10.52±0.18b	-30±0.4ab	723.8±18.5b	-9.3	728±18.2b	69±2.7c
M <sub>2</sub> NPK	10.95±0.14a	-35.9±2.2c	1 078±51a	947.8	-2 433±51.4f	-222±4.4e
SNPK	10.19±0.09b	-37.7±3.1c	621.1±30.9c	65.0	345±29d	34±2.7d

追肥后降雨量较多和气温较高共同影响的结果。李晓密等<sup>[18]</sup>研究也发现,玉米季每次追肥后土壤 CO<sub>2</sub> 均出现排放峰,这是因为氮肥的施用为玉米及微生物提供了生长所需氮素,玉米根系呼吸增强,同时土壤温度升高,促进了土壤微生物的剧烈活动,导致了土壤 CO<sub>2</sub> 排放通量迅速升高<sup>[19-20]</sup>。本研究中,土壤 CO<sub>2</sub> 排放通量的大小顺序为:Fallow>SNPK>M<sub>2</sub>NPK>NPK>N>CK,撂荒区(Fallow)CO<sub>2</sub> 排放通量高,主要是缘于土壤表层覆盖着大量的枯草,同时生长着茂盛的杂草造成了较高的土壤 CO<sub>2</sub> 排放通量。有机肥无机肥配施 SNPK 和 M<sub>2</sub>NPK 处理土壤 CO<sub>2</sub> 排放通量显著高于施化肥处理,不施肥(CK)处理土壤 CO<sub>2</sub> 排放通量最低,这与前人的研究结果一致<sup>[21-23]</sup>。一方面原因,平衡施肥(NPK)较 N 和 CK 处理提高了玉米产量,增加了根茬还田量,增加了土壤微生物碳氮数量<sup>[24-25]</sup>;另一方面,施用有机肥能显著增加土壤有机碳数量,增强土壤微生物的活性,提高土壤的呼吸强度,促进了土壤有机碳的矿化分解<sup>[26]</sup>。

本研究表明,各施肥处理农田土壤 N<sub>2</sub>O 排放最高峰出现时间与土壤 CO<sub>2</sub> 排放高峰一致,都出现在拔节期追肥后第 7 d,这可能是由于刚追施氮肥造成土壤含氮量迅速升高,同时拔节期间降雨量较大和温度较高共同影响的结果。施用氮肥处理土壤 N<sub>2</sub>O 排放量明显高于 CK 和 Fallow 处理,平衡施肥 NPK 土壤 N<sub>2</sub>O 排放量显著高于单施 N 处理,这与许多学者研究结果一致<sup>[22, 27]</sup>。一般而言,氮肥施用对农业土壤 N<sub>2</sub>O 排放具有显著的贡献<sup>[23, 28]</sup>,平衡施肥可以增加作物生物量,进而通过稻秆、根系残叶等生物量输入土壤中促进土壤微生物氮的活性,进而会增加 N<sub>2</sub>O 的排放。在这个试验点,佟帆<sup>[29]</sup>通过室内培养试验分析黑土温室气体 N<sub>2</sub>O 的排放特征,施用化肥能显著提高黑土 N<sub>2</sub>O 排放量,且 NPK>NP>N>CK,与本试验结果一致。等氮量条件下,秸秆还田(SNPK)处理土壤 N<sub>2</sub>O 排放

量显著小于化肥 NPK 和 N 处理,一方面可能是秸秆的添加使土壤生态系统表现为碳源过剩而氮源不足,微生物为满足自身生物物质的合成而被迫利用土壤其他可利用氮源,减少了硝化与反硝化作用所需底物,从而对 N<sub>2</sub>O 形成具有抑制作用<sup>[30]</sup>,另一方面可能是有机物质在腐解过程中能产生化感物质,可明显抑制土壤 N<sub>2</sub>O 的释放<sup>[31]</sup>。李燕青等<sup>[32]</sup>研究也证明,等氮量条件下,化肥处理的 N<sub>2</sub>O 排放总量显著高于有机肥。

本研究中,不同施肥处理土壤中观察到的 CH<sub>4</sub> 排放通量既有正值也有负值,与来自耕地<sup>[33]</sup>或草地<sup>[34]</sup>土壤的其他一些研究结果一致。整个生育期的累积排放量为负值,表明黑土玉米田是大气中 CH<sub>4</sub> 的净吸收汇,这与其他旱地农田土壤 CH<sub>4</sub> 通量研究结果一致<sup>[10, 35-36]</sup>。究其原因,旱地农田土壤相对干燥,通气状况良好,氧气易于扩散到土壤中,促进土壤中中介甲烷氧化微生物(如甲烷氧化菌)和甲烷氧化酶(如甲烷单加氧酶)的活性,增强了土壤吸收氧化 CH<sub>4</sub> 的能力<sup>[37]</sup>。

本研究也发现,有机无机肥配施处理土壤对 CH<sub>4</sub> 吸收量大于施化肥处理,而施肥处理土壤对 CH<sub>4</sub> 吸收量大于不施肥处理。这可能是由于施肥改善了土壤理化性质为甲烷氧化菌的生长提供了适宜环境条件,更有利于 CH<sub>4</sub> 的氧化。李晓密等<sup>[38]</sup>研究表明,小麦田施肥土壤对 CH<sub>4</sub> 吸收通量大于不施肥,Seghers 等<sup>[39]</sup>研究发现施用堆肥使玉米田甲烷氧化菌群落丰度和氧化速率增加,许多学者研究发现<sup>[40-42]</sup> 秸秆还田可增加旱地土壤对 CH<sub>4</sub> 的氧化吸收,提高土壤作为大气 CH<sub>4</sub> 吸收汇的特征。但有些研究者持相反结论,施用有机肥或有机无机肥配合施用抑制了旱田土壤对 CH<sub>4</sub> 的吸收<sup>[43-44]</sup>。在旱地上,有关施化肥和有机肥土壤对 CH<sub>4</sub> 吸收量影响结果不尽一致,还有待进一步研究。

综合温室效应(*GWP*)作为一种相对指标,常用来评估不同温室气体对气候系统的潜在效应<sup>[45]</sup>。本研究



发现,不平衡施肥(N)对农田综合温室效应贡献最大,撂荒区(Fallow)对农田的温室效应贡献较低,这是由于休闲区土壤固定了大量有机碳缘故。本研究中,与不施肥(CK)比较,单施化肥N和NPK处理综合温室效应(GWP)分别增加了142%和32%,SNPK综合温室效应降低了38%,但秸秆还田固碳效率较低,一方面可能是秸秆覆盖还田造成了有机碳的大量矿化,另一方面可能是施氮量不足使根系分泌物激发了土壤有机碳的矿化来汲取养分,但具体机理还值得进一步深入研究;有机无机配施(M<sub>2</sub>NPK)处理综合温室效应为负值,为净碳汇,表明施用有机肥可降低全球增温潜势。温室气体排放强度(GHGI)是把全球增温潜势与作物产量相结合的综合温室效应评价指标。平衡施肥NPK和有机无机肥配施(SNPK和M<sub>2</sub>NPK)温室气体排放强度很弱,显著低于不施肥(CK)和偏施化肥(N)处理,这是由于玉米产量和累积排放量共同影响的结果,这与许多学者研究结果一致<sup>[46-47]</sup>。说明平衡施肥和有机无机肥配施不仅能降低温室气体排放强度,还能增加土壤有机碳,是较为理想的固碳减排培肥措施。因此,从农田温室气体减排角度出发,有机无机肥配施的施肥模式在东北黑土区的推广应用是可行的。

#### 4 结论

本试验研究表明,土壤温室气体CO<sub>2</sub>和N<sub>2</sub>O的排放高峰均出现在拔节期,其中撂荒区(Fallow)土壤CO<sub>2</sub>排放通量最高,不施肥(CK)处理土壤CO<sub>2</sub>和N<sub>2</sub>O排放通量最低;有机无机肥配施(M<sub>2</sub>NPK)处理土壤CO<sub>2</sub>和N<sub>2</sub>O排放通量显著高于施化肥处理,秸秆还田(SNPK)处理土壤CO<sub>2</sub>排放通量显著高于施化肥处理,而土壤N<sub>2</sub>O排放量明显低于化肥NPK处理。有机无机肥配施(M<sub>2</sub>NPK和SNPK)处理土壤CH<sub>4</sub>吸收量显著高于CK、Fallow和N处理( $P < 0.05$ )。从土壤综合温室效应和总温室气体排放强度可分析出,与施化肥(N、NPK)处理比较,有机无机肥配施(M<sub>2</sub>NPK和SNPK)处理不但减少了土壤的综合温室效应(GWP),而且也降低了土壤的温室气体排放强度(GHGI)。因此,为同步实现较高的玉米产量和较低的温室气体强度,有机无机肥配施是东北黑土区较为理想的土壤培肥方式。

#### 参考文献:

[1] FAO(Food and Agriculture Organization of the United Nations). FAO

statistical yearbook 2013 :World food and agriculture[R/OL]. Rome, Italy: <http://www.fao.org/docrep/013/yb2013/yb2013issu.htm>.

- [2] IPCC. Climate change 2007—impacts, adaptation and vulnerability[M]. Cambridge, UK and New York, USA :Cambridge University Press, 2007: 750-752.
- [3] Metz B, Davidson O R, Bosch P R, et al. Climate Change 2007 :Mitigation contribution of working group two to the fourth assessment report of the intergovernmental panel on climate change [M]. United Kingdom and New York :Cambridge University Press, 2007.
- [4] Bouwman A. Global estimates of gaseous emissions from agricultural land[M]. Rome :FAO, 2001.
- [5] Ball B C, Scott A, Parker J P. Field N<sub>2</sub>O, CO<sub>2</sub> and CH<sub>4</sub> fluxes in relation to tillage, compaction and soil quality in Scotland[J]. *Soil and Tillage Research*, 1999, 53 :29-39.
- [6] 翟胜,高宝玉,王巨媛,等. 农田土壤温室气体产生机制及影响因素研究进展[J]. 生态环境, 2008, 17(6) :2488-2493. ZHAI Sheng, GAO Bao-yu, WANG Ju-yuan, et al. Mechanism and impact factors of greenhouse gases generation from farmland[J]. *Ecology and Environment*, 2008, 17(6) :2488-2493. (in Chinese)
- [7] Wagai R, Brye K R, Gower S T, et al. Land use and environmental factors influencing soil surface CO<sub>2</sub> flux and microbial biomass in natural and managed ecosystems in southern Wisconsin[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1998, 30 :1501-1509.
- [8] 王伯仁,徐明岗,文石林. 长期不同施肥对旱地红壤性质和作物生长的影响[J]. 水土保持学报, 2005, 19(1) :97-100, 144. WANG Bo-ren, XU Ming-gang, WEN Shi-lin. Effect of long time fertilizers application on soil characteristics and crop growth in red soil upland[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2005, 19(1) :97-100, 144. (in Chinese)
- [9] 王旭燕,张仁陟,蔡立群,等. 不同施氮处理下旱作农田土壤CH<sub>4</sub>、N<sub>2</sub>O气体排放特征研究[J]. 环境科学学报, 2015, 35(11) :3655-3661. WANG Xu-yan, ZHANG Ren-zhi, CAI Li-qun, et al. Emission characteristics of CH<sub>4</sub> and N<sub>2</sub>O fluxes from dry-land field under different nitrogen treatments[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2015, 35(11) :3655-3661. (in Chinese)
- [10] 邬刚,潘根兴,郑聚锋,等. 施肥模式对雨养旱地温室气体排放的影响[J]. 土壤, 2013, 45(3) :459-463. WU Gang, PAN Gen-xing, ZHENG Ju-feng, et al. Effect of different fertilization mode on greenhouse gas emissions from rain-fed dry land [J]. *Soils*, 2013, 45(3) :459-463. (in Chinese)
- [11] 吴家梅,纪雄辉,彭华,等. 不同种类有机肥施用对一季稻田CH<sub>4</sub>排放的影响[J]. 农业环境科学学报, 2011, 30(8) :1688-1694. WU Jia-mei, JI Xiong-hui, PENG Hua, et al. The effect of different organic manures treatments on methane emission from single-cropping paddy fields[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2011, 30(8) :1688-1694. (in Chinese)
- [12] 沈仕洲,王风,薛长亮,等. 施用有机肥对农田温室气体排放影响研究进展[J]. 中国土壤与肥料, 2015(6) :1-8. SHEN Shi-zhou, WANG Feng, XUE Chang-liang, et al. Research advances on effect of organic fertilizer on farmland greenhouse gas emissions[J]. *Soil and Fertilizer Sciences*, 2015(6) :1-8. (in Chinese)

- [13] 邹建文. 稻麦轮作生态系统温室气体(CO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub>和N<sub>2</sub>O)排放研究[D]. 南京:南京农业大学, 2005.  
ZOU Jian-wen. 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. (in Chinese)
- [14] IPCC. Climate change: The physical science basis[M]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2007.
- [15] Shang Q, Yang X, Gao C, et al. Net annual global warming potential and greenhouse gas intensity in Chinese double rice-cropping systems: A 3-year field measurement in long-term fertilizer experiments[J]. *Global Change Biology*, 2011, 17: 2196-2210.
- [16] Pan G, Xu X, Smith P, et al. An increase in topsoil SOC stock of China's croplands between 1985 and 2006 revealed by soil monitoring[J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2010, 136: 133-138.
- [17] Timothy H, Jonathan P, Kevin B. Target-intensity: An analysis of greenhouse gas intensity targets[M]. World Resources Institute, Washington D. C., USA, 2006: 37.
- [18] 李晓密, 伦小秀, 陈琪, 等. 不同施肥处理下冬小麦-夏玉米轮作农田温室气体的排放[J]. 环境化学, 2014, 33(4): 591-596.  
LI Xiao-mi, LUN Xiao-xiu, CHEN Qi, et al. Greenhouse gas emission from a winter wheat-summer maize crop rotation farmland under different fertilization treatments[J]. *Environmental Chemistry*, 2014, 33(4): 591-596. (in Chinese)
- [19] Chu H, Hosen Y, Yagi K. NO, N<sub>2</sub>O, CH<sub>4</sub> and CO<sub>2</sub> fluxes in winter barley field of Japanese Andisol as affected by N fertilizer management[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2007, 39(1): 330-339.
- [20] Snyder C S, Bruulsema T W, Jensen T L, et al. Review of greenhouse gas emissions from crop production systems and fertilizer management effects[J]. *Agriculture Ecosystems and Environment*, 2009, 133(3): 247-266.
- [21] Zhai L M, Liu H B, Zhang J Z, et al. Long-term application of organic manure and mineral fertilizer on N<sub>2</sub>O and CO<sub>2</sub> emissions in a red soil from cultivated maize-wheat rotation in China[J]. *Agricultural Sciences in China*, 2011, 10(11): 1748-1757.
- [22] 黄晶, 刘宏斌, 王伯仁. 长期施肥下红壤旱地CO<sub>2</sub>、N<sub>2</sub>O排放特征[J]. 中国农学通报, 2009, 25(24): 428-433.  
HUANG Jing, LIU Hong-bin, WANG Bo-ren. CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>O emission from red soil dry-land under long-term fertilization[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2009, 25(24): 428-433. (in Chinese)
- [23] 董玉红, 欧阳竹, 李鹏, 等. 长期定位施肥对农田土壤温室气体排放的影响[J]. 土壤通报, 2007, 38(1): 97-100.  
DONG Yu-hong, OUYANG Zhu, LI Peng, et al. Influence of long-term fertilization on greenhouse gas fluxes from agricultural soil[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2007, 38(1): 97-100. (in Chinese)
- [24] 乔云发, 苗淑杰, 韩晓增, 等. 不同施肥处理对黑土土壤呼吸的影响[J]. 土壤学报, 2007, 44(6): 1028-1035.  
QIAO Yun-fa, MIAO Shu-jie, HAN Xiao-zeng, et al. Soil respiration affected by fertilization in black soil[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2007, 44(6): 1028-1035. (in Chinese)
- [25] 张景源. 长期不同施肥措施下红壤旱地土壤微生物的生物量和多样性[D]. 武汉:华中农业大学, 2008.  
ZHANG Jing-yuan. Soil microbial biomass and diversity under long-term different fertilization utilizations[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2008. (in Chinese)
- [26] 戴万宏, 王益权, 黄耀, 等. 农田生态系统土壤CO<sub>2</sub>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.  
DAI Wan-hong, WANG Yi-quan, HUANG Yao, et al. Study on soil CO<sub>2</sub> emission in agri-ecosystems[J]. *Journal of Northwest A&F University(Natural Science Edition)*, 2004, 32(12): 1-7. (in Chinese)
- [27] Meng L, Ding W X, Cai Z C. Long-term application of organic manure and nitrogen fertilizer on N<sub>2</sub>O emissions, soil quality and crop production in a sandy loam soil[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2005, 37: 2037-2045.
- [28] 李鑫, 巨晓棠, 张丽娟, 等. 不同施肥方式对土壤氨挥发和氧化亚氮排放的影响[J]. 应用生态学报, 2008, 19(1): 99-104.  
LI Xin, JU Xiao-tang, ZHANG Li-juan, et al. Effects of different fertilization modes on soil ammonia volatilization and nitrous oxide emission[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2008, 19(1): 99-104. (in Chinese)
- [29] 佟帆. 长期施肥下黑土氮素组分含量及N<sub>2</sub>O排放特征[D]. 南昌:江西农业大学, 2011.  
TONG Fan. The feature of nitrogen component content and emission of N<sub>2</sub>O on the black soil under long-term fertilization [D]. Nanchang: Jiangxi Agricultural University, 2011. (in Chinese)
- [30] 冯晓赟, 万鹏, 李洁, 等. 秸秆还田与氮肥配施对中南地区稻田土壤固碳和温室气体排放的影响[J]. 农业资源与环境学报, 2016, 33(6): 508-517.  
FENG Xiao-yun, WAN Peng, LI Jie, et al. Effects of straw returning combined with nitrogen fertilizer on Paddy soil carbon sequestration and greenhouse-gas emission in central south region of China[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2016, 33(6): 508-517. (in Chinese)
- [31] 黄益宗, 张福珠, 刘淑琴, 等. 化感物质对土壤N<sub>2</sub>O释放影响的研究[J]. 环境科学学报, 1999, 19(5): 478-482.  
HUANG Yi-zong, ZHANG Fu-zhu, LIU Shu-qin, et al. Effect of allelochemicals on N<sub>2</sub>O emission from soil[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 1999, 19(5): 478-482. (in Chinese)
- [32] 李燕青, 唐继伟, 车升国, 等. 长期施用有机肥与化肥氮对华北夏玉米N<sub>2</sub>O和CO<sub>2</sub>排放的影响[J]. 中国农业科学, 2015, 48(21): 4381-4389.  
LI Yan-qing, TANG Ji-wei, CHE Sheng-guo, et al. Effect of organic and inorganic fertilizer on the emission of CO<sub>2</sub> and N<sub>2</sub>O from the summer maize field in the North China Plain[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2015, 48(21): 4381-4389. (in Chinese)
- [33] Omonode R A, Vyn T J, Smith D R H, et al. Soil carbon dioxide and methane fluxes from long-term tillage systems in continuous corn and corn-soybean rotations[J]. *Soil & Tillage Research*, 2007, 95: 182-195.
- [34] Shimizu M, Hatano R, Arita T, et al. The effect of fertilizer and manure application on CH<sub>4</sub> and N<sub>2</sub>O emissions from managed grasslands in Japan[J]. *Soil Science and Plant Nutrition*, 2013, 59: 69-86.
- [35] 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 Li-na, ZHANG Yu-ming, HU Chun-sheng, 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. (in Chinese)
- [36] 郝小雨, 周宝库, 马星竹, 等. 氮肥管理措施对黑土玉米田温室气体排放的影响[J]. 中国环境科学, 2015, 35(11): 3227-3238.
- HAO Xiao-yu, ZHOU Bao-ku, MA Xing-zhu, et al. Effects of nitrogen fertilizer management on greenhouse gas emissions from maize field in black soil [J]. *China Environmental Science*, 2015, 35(11): 3227-3238. (in Chinese)
- [37] 李志国, 张润花, 赖冬梅, 等. 西北干旱区两种不同栽培管理措施下棉田  $\text{CH}_4$  和  $\text{N}_2\text{O}$  排放通量研究[J]. 土壤学报, 2012, 49(5): 924-934.
- LI Zhi-guo, ZHANG Run-hua, LAI Dong-mei, et al.  $\text{CH}_4$  and  $\text{N}_2\text{O}$  fluxes from cotton fields different in farming practicing northwestern China[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2012, 49(5): 924-934. (in Chinese)
- [38] 李晓密, 伦小秀. 施肥与不施肥措施下小麦田的  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{N}_2\text{O}$  排放日变化特征[J]. 生态环境学报, 2014, 23(1): 178-182.
- LI Xiao-mi, LUN Xiao-xiu. Diurnal variations of  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$  and  $\text{N}_2\text{O}$  fluxes from wheat land under the treatments of fertilization and no-fertilization[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2014, 23(1): 178-182. (in Chinese)
- [39] Seghers D, Siciliano S D, Top E M, et al. Combined effect of fertilizer and herbicide applications on the abundance, community structure and performance of the soil methanotrophic community[J]. *Soil Biol Biochem*, 2005, 37(2): 187-193.
- [40] 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 Yun-fan, LI Yu-e, GAO Qing-zhu, 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. (in Chinese)
- [41] 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 Cui-ping, ZHANG Yu-ming, HU Chun-sheng, 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. (in Chinese)
- [42] 杨书运, 严平, 马友华, 等. 施肥对冬小麦土壤温室气体排放的影响[J]. 生态环境学报, 2010, 19(7): 1642-1645.
- YANG Shu-yun, YAN Ping, MA You-hua, et al. Effects on emissions of soil greenhouse gas by fertilizing to winter wheat[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2010, 19(7): 1642-1645. (in Chinese)
- [43] 董玉红, 欧阳竹. 有机肥对农田土壤二氧化碳和甲烷通量的影响[J]. 应用生态学报, 2005, 16(7): 1303-1307.
- DONG Yu-hong, OUYANG Zhu. Effects of organic manures on  $\text{CO}_2$  and  $\text{CH}_4$  fluxes of farmland[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2005, 16(7): 1303-1307. (in Chinese)
- [44] 杨芋葆, 范分良, 王万雄, 等. 长期不同施肥对暗棕壤甲烷氧化菌群落特征与功能的影响[J]. 环境科学, 2010, 31(11): 2756-2762.
- YANG Qian-bao, FAN Fen-liang, WANG Wan-xiong, et al. Effects of different long-term fertilizations on community properties and functions of methanotrophs in dark brown soil[J]. *Environmental Science*, 2010, 31(11): 2756-2762. (in Chinese)
- [45] Lashof D A, Ahuja D R. Relative contributions of greenhouse gas emissions to global warming[J]. *Nature*, 1990, 344: 529-531.
- [46] Shang Q, Yang X, Gao C, et al. Net annual global warming potential and greenhouse gas intensity in Chinese double rice-cropping systems: A 3-year field measurement in long-term fertilizer experiments[J]. *Global Change Biology*, 2011, 17: 2196-2210.
- [47] 刘晓雨. 施用有机物料对农田固碳减排及生产力的影响: 田间试验及整合研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2013.
- LIU Xiao-yu. Effects of soil organic amendment on productivity and greenhouse gas mitigation of croplands: Field studies and synthetic analysis[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2013. (in Chinese)