

有机无机肥料配施对春玉米农田 N_2O 排放及净温室效应的影响

翟 振^{1,2}, 王立刚^{1,2*}, 李 虎^{1,2}, 邱建军^{1,2}, 杨 军³, 董小雨⁴

(1. 中国农业科学院农业资源与农业区划研究所/农业部面源污染控制重点实验室, 北京 100081; 2. 中国农业科学院与美国新罕布什尔大学可持续农业生态系统研究联合实验室, 北京 100081; 3. 迁西县科学技术局, 河北 唐山 064300; 4. 迁西县气象局, 河北 唐山 064300)

摘 要: 为了明确有机无机肥料配施条件下华北旱地春玉米农田 N_2O 周年排放规律、影响因素及其净温室效应, 采用静态箱-气相色谱法和生物地球化学模型(DNDC)相结合的方法, 对单施化肥(NPK)、有机无机肥料配施(50%M+50%U)、单施有机肥(M)、对照(CK)等处理的春玉米农田 N_2O 排放情况进行了周年监测, 并对 DNDC 模型进行验证, 利用验证后的模型定量评价了不同施肥处理的净温室效应。结果表明: 不同有机无机肥料配施处理 N_2O 排放通量具有明显的季节变化规律, 通量变化范围是 $-17.56 \sim 157.25 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$, 在非生长季观测到明显的 N_2O 排放峰, 最大排放通量为 $83.85 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ 。NPK、50%M+50%U、M、CK 处理周年累计排放量分别为 1.49、1.20、0.82、0.61 $\text{kgN} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$, 非生长季排放总量分别占全年总排放量的 40.6%、59.2%、61.7% 和 60.7%, 非生长季 N_2O 排放不容忽视; 在整个周年观测期内, 当土壤水分含量介于 19%~37% 之间时, 各处理下的 N_2O 通量同土壤含水量呈极显著正相关关系。综合考虑整个农田生态系统碳收支平衡和温室气体排放, 经过 DNDC 模型模拟表明有机无机肥料配施同单施化肥处理相比净温室效应减少 33.5%, 可以达到在保持产量的基础上“减排”和“固碳”的协同效果。上述研究结果为有机无机肥料合理使用以及旱地农田“稳产、减排、固碳”相协调施肥技术的筛选提供了科学依据。

关键词: 春玉米; 有机无机肥料配施; N_2O ; 生物地球化学模型(DNDC); 净温室效应

中图分类号: S143.6 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-2043(2013)12-2502-09 **doi:** 10.11654/jaes.2013.12.025

Nitrous Oxide Emissions and Net Greenhouse Effect from Spring-maize Field as Influenced by Combined Application of Manure and Inorganic Fertilizer

ZHAI Zhen^{1,2}, WANG Li-gang^{1,2*}, LI Hu^{1,2}, QIU Jian-jun^{1,2}, YANG Jun³, DONG Xiao-yu⁴

(1. Key Laboratory of Nonpoint Source Pollution Control, Ministry of Agriculture/Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China; 2. Chinese Academy of Agricultural Sciences—University of New Hampshire Joint Laboratory for Sustainable Agro-Ecosystems Research, Beijing 100081, China; 3. Qianxi Science and Technology Bureau, Tangshan 064300, China; 4. Qianxi Meteorological Bureau, Tangshan 064300, China)

Abstract: Nitrous oxide (N_2O) is one of atmospheric greenhouse gases generated from dryland agro-ecosystems. Seeking its mitigation measures is a hot topic in global climate change studies. We investigated how the fertilizer application strategies could affect N_2O emissions from the agricultural soils in the North China. The field experiment was conducted in Qianxi County, Hebei Province. Nitrous oxide fluxes were measured using static chamber-gas chromatography from November 2011 to November 2012 at the spring maize fields with four different treatments, i.e., chemical fertilizer (NPK), manure fertilizer (M), combined manure and chemical fertilizer (50% M+50% U), and Control (CK). The DNDC model, which was validated against data sets of N_2O fluxes observed in the experiment, was used to estimate the net greenhouse effects of different management practices and their long term impacts on soil organic carbon (SOC) dynamics. Nitrous oxide emissions from the spring maize fields under different treatments had similar seasonal patterns, varying from $-17.56 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ to $157.25 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$. Obvious N_2O emission peaks were observed during the freeze-thaw period, with a maximum flux of $83.85 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$. The annual cumulative N_2O emissions were 1.49, 1.20, 0.82 $\text{kgN} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ and 0.61 $\text{kgN} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$, and the N_2O emitted during non-growing seasons was 40.6%, 59.2%, 61.7% and 60.7% of the annual N_2O emissions, for treatments NPK, 50% M+50% U, M and CK, respectively. Nitrous oxide

收稿日期: 2013-03-19

基金项目: 国家自然科学基金(31270486); 公益性行业(农业)科研专项(201103039)

作者简介: 翟 振(1988—), 男, 山东菏泽人, 硕士研究生, 主要从事旱地农田温室气体排放与减排技术研究。E-mail: zhaizhentab@163.com

* 通信作者: 王立刚 E-mail: wangligang@caas.cn

fluxes had a significant positive correlation with soil moisture(WFPS) when WFPS ranged from 19% to 37%. However, there was no significant correlation between them when WFPS was from 37% to 70%. A significant positive correlation was found between N₂O fluxes and soil temperature(5 cm) under the conditions of suitable soil moisture and abundant substrate. Combined application of synthetic fertilizer and manure could reduce the net greenhouse effect by 33.5%, without decreasing crop yields. In addition, this treatment had positive effects on long-term SOC dynamics(50 years). It is concluded that implementation of manure amendments would effectively mitigate greenhouse gas emissions and increase the SOC in agro-ecosystem.

Keywords: spring maize; combined application of manure and inorganic fertilizer; N₂O; DNDC; net greenhouse effect

人类活动向大气中排放的二氧化碳(CO₂)、甲烷(CH₄)和氧化亚氮(N₂O)等温室气体浓度的增加是导致全球气候变化的重要原因之一。政府间气候变化专业委员会(IPCC)第4次评估报告表明^[1],农业源是温室气体重要排放源,其中 N₂O 是旱地农田温室气体的重要组成部分,100 年时间尺度上的单位重量全球增温潜势(Global warming potential,GWP)是 CO₂ 的 298 倍,以往研究主要关注生长季 N₂O 的排放规律及其环境因子的影响,对整个生育期的研究并不多,已有研究指出非生长季 N₂O 排放可以占全年总排放量的 30%~70%^[2-3],不同种植模式各不相同。因此,对全年(包括生长季和非生长季)N₂O 排放的研究亟待加强。

在影响农田 N₂O 温室气体排放的诸多因素中,肥料施用是最重要的一个技术措施^[4],在当前一味追求高产的现实情况下,农民越来越依靠更多的化肥投入来提高产量,只注重用地,而不注重用地和养地的结合。施用有机肥是中国传统的耕作方式,经大量试验证明具有保持土壤肥力和增加产量的双重效果,能够有效改善土壤物理、化学和生物学特性,提高土壤固 C 能力^[5],但对 N₂O 排放及其净温室效应影响的研究^[6]并不多见,而净温室效应的确定是农业应对全球变化和正确评估农业减排技术的实际需求。

基于以上背景,本研究采取田间试验和机理模型相结合的方法,以华北旱地春玉米为研究对象,对不同有机无机肥料配合施用下,春玉米农田土壤 N₂O 通量进行周年监测,分析不同处理下的土壤 N₂O 通量周年变化规律和减排效果,并利用农田实测数据对生物地球化学模型(DNDC 模型)进行验证,利用验证后的模型定量评价不同处理产生的净温室效应,为有机无机肥料合理使用以及旱地农田“稳产、减排、固碳”相协调的施肥技术的筛选提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验点概况

监测地点位于农业部迁西燕山生态环境重点野

外科学观测试验站(东经 118°18'03",北纬 40°12'07"),处于燕山东麓,属暖温带大陆性半湿润季风气候,2008—2011 年平均气温 10.1 ℃,年平均降水量为 804.2 mm,种植模式为春玉米一年一熟制。本研究试验在土壤肥力与生态环境效应长期定位试验基础上进行(2008 年开始),温室气体的监测开始于 2011 年。试验地土壤 pH 值为 7.03,有机质含量为 14.1 g·kg⁻¹,全氮含量为 0.9 g·kg⁻¹,碱解氮含量为 81.84 mg·kg⁻¹。

1.2 试验设计

本试验共设置对照(CK)、单施有机肥(M)、单施化肥(NPK)、有机无机肥料配施(50%M+50%U)4 个处理,每个处理 3 个重复,随机区组排列,每小区 48 m²,各处理具体施肥方法见表 1。试验地 2011 年 9 月玉米收获,秸秆不还田,并于 2012 年 4 月 16 进行旋耕(深度 20 cm),5 月 14 日一次性均匀撒施有机肥(鸡粪,全氮含量 0.837%),5 月 15 日播种,化肥氮的 40%作底肥施入,肥种间隔以防止烧苗,施肥深度 20 cm 左右;7 月 1 日(玉米大喇叭口期)追肥,施肥量为化肥 N 的 60%,施肥方式为表施,全年无灌溉;2012 年 9 月玉米收获,秸秆不还田。试验观测期为 2011 年 11 月至 2012 年 11 月。

1.3 测定项目

N₂O、CO₂ 通量的测定采用静态箱-气相色谱法。本研究使用的不锈钢采样箱(50 cm×50 cm×50 cm)外覆绝热材料,气温变化最剧烈时能够保证观测过程中

表 1 施肥种类和施肥量

Table 1 Type and rate of fertilizers used in the experiment

处理 Treatment	基肥 Basal fertilization		追肥 Topdressing
	鸡粪 N Chicken manure N/ kg·hm ⁻²	40%化肥 N 40% chemical fertilizer N/kg·hm ⁻²	60%化肥 N 60% chemical fertilizer N/ kg·hm ⁻²
CK	0	0	0
NPK	0	72	108
M	180	0	0
50%M+50%U	90	36	54

箱内温度变化小于 2℃。每个采样箱均配有不锈钢底座,座壁深入土壤 20 cm,距离地表 10 cm 以下的每个侧壁上开有 9 个直径 2 cm 的圆孔,底座顶端有深、宽均为 3 cm 的水槽,注水后可保证底座与箱体密封,观测期底座一直埋设在田间固定位置。箱体内置有混合气体用的小电风扇、采气管及温度传感器。采样开始时,将采样箱放置在底座上,准确记录罩箱的时间,并用 100 mL 针筒,在静态暗箱采样口高度抽取一个本底样品,随后每间隔 10 min 用针筒从采样箱内抽取 100 mL 气体样品,共采集 5 次,并贮存于大连普莱特气体公司生产的铝膜气袋(1 L)中,准确记录每次从箱内取样时间和取样时箱内气温。同步观测 5 cm 深度土壤温度(JM624)和 5 cm 深度土壤含水量(ML2x 型探头),将取得的气体样品用气相色谱(Agilent 7890A)分析 N₂O、CO₂ 浓度。

采样时间一般为每日的 8:00—11:00,施肥后连续取样 8 d,降雨后连续取样 3 d,其他时间根据作物生长以及季节变化适当调整取样频率,一般为一周一次。气体通量计算公式为:

$$F = \rho H \frac{dc}{dt} \cdot \frac{273}{273+T} \cdot \frac{P}{P_0}$$

式中: F 为目标气体排放通量, $\text{mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$; ρ 为标准大气状态下的气体密度, $\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$; H 为采样箱气室高度, cm; dc/dt 为采样箱内气体浓度的变化速率; P 和 T 分别为采样时箱内气体的实际压力和温度; P_0 为标准大气压。

数据分析用 Microsoft Excel、SPSS 19.0 统计分析软件进行。

1.4 DNDC 模型简介

DNDC 模型(Denitrification-Decomposition“脱氮-

分解”)是目前国际上公认的模拟生物地球化学循环的过程机理模型之一^[7-9],经世界上许多国家研究者的研究和应用,均认为能够较好地模拟土壤中碳、氮的循环过程和温室气体 CO₂、N₂O、CH₄ 等的释放规律^[10]。DNDC 模型从机理过程上模拟土壤向大气释放 CO₂、N₂O、CH₄ 的过程,为本研究测算春玉米农田净温室效应提供了可能。

本研究利用试验监测的 2012 年数据对模型进行验证,验证过程中将试验点当地的每日气象资料、土壤性状和实际管理措施输入 DNDC 模型,以驱动模型对目标农田生态系统的作物生长、凋落物的分配、土壤有机碳的转化、温室气体排放等过程进行模拟,通过将模型产量和农田 N₂O、CO₂ 排放通量模拟值同实测数据进行比较,来检验 DNDC 模型对北方旱作春玉米生态系统的适用性。

2 结果与分析

2.1 各处理土壤 N₂O 周年排放特征

本研究从 2011 年 11 月至 2012 年 11 月对北方旱作春玉米农田 N₂O 排放进行了周年监测,结果显示各处理 N₂O 通量均有明显的季节变化规律,且变化规律基本一致,排放峰主要集中在生长季,并发生在施肥和降水事件之后(图 1)。与一般监测结果不同的是,由于当地底肥施用深度较深(20 cm 以下),而且施肥后立即进行覆土,因此 5 月 15 日施底肥之后 10 d 内,并没有发现明显的排放峰,随着 6 月 11 日、16 日两次较大的降水(22.2、58.3 mm),加上底肥无机氮素的释放,迅速形成一个较大的 N₂O 排放峰,持续 10 d 左右。7 月 1 日进行追肥,伴随着持续降水,形成两

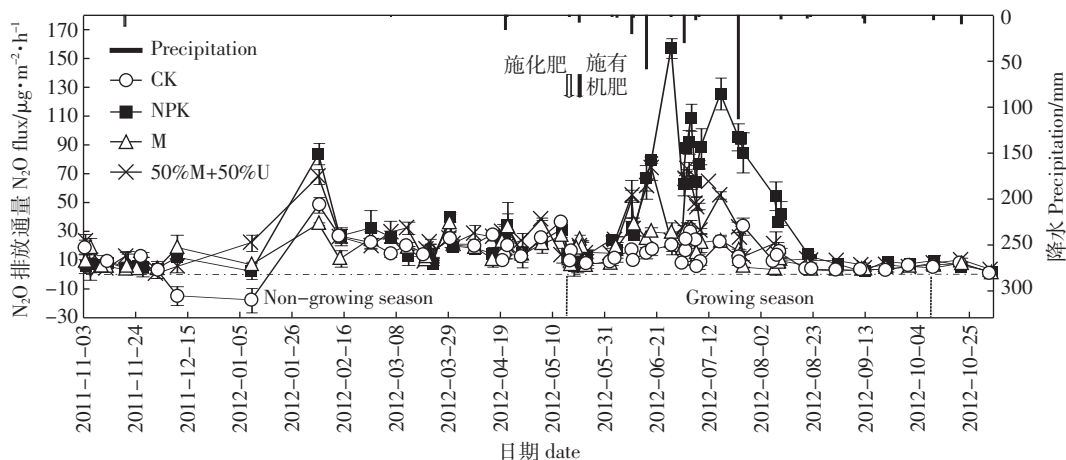


图 1 不同处理 N₂O 周年排放特征

Figure 1 Dynamic of N₂O fluxes of different fertilization treatments

个连续的排放峰,持续 30 d 左右。

在非生长季观测到明显的 N₂O 排放峰,排放峰出现的时间在 1 月底至 2 月初,此时正是该地区冻融交替的时期(图 2),最大排放通量为 83.85 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$,远远低于生长季 N₂O 排放高峰。这与梁东丽^[11]研究结果一致。

各处理 N₂O 通量变化范围是-17.56~157.25 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$,在整个观测期内偶尔会观测到 N₂O 的吸收现象;对照、化肥、有机肥和有机无机配施处理非生长季 N₂O 平均排放通量分别为 14.25、17.38、14.49、19.45 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$,且各处理之间差异不显著;生长季各处理平均排放通量分别为 13.31、46.52、18.64、29.02 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ 。可以看出,有机无机配施处理生长季 N₂O 平均排放通量较化肥处理低了 37.6%,有机肥处理相较化肥处理降低了 59.9%,因此各处理 N₂O 排放通量的差异主要产生于生长季,施用有机肥能够降低生长季 N₂O 的排放。

2.2 环境因子对 N₂O 排放通量的影响

水分通过影响土壤通气状况、微生物活性,进而影响 N₂O 的产生、消耗及传输过程^[12],在整个周年观测期内,土壤含水量 WFPS 介于 19.1%~69.4%之间,平均湿度为 40.7%。分析表明(表 2),在整个周年观测期内,当土壤水分含量介于 19%~37%之间时,各处理下的 N₂O 通量同土壤含水量呈极显著的正相关关系,但是当土壤水分介于 37%~70%之间时,各处理 N₂O 通量同土壤水分之间均没有显著的相关关系。这可能是由于随着土壤含水量的增加,同时土壤中的氧气逐渐消耗,土壤逐渐由好氧环境向厌氧环境转变, N₂O 的产生机制由硝化反应占主导转变为以反硝化

表 2 各处理 N₂O 通量同土壤温度、土壤水分的相关关系

Table 2 Correlation coefficients of N₂O flux with soil temperature, soil water content under different treatments

处理 Treatment	5 cm 深度土温 5 cm soil temperature	土壤水分含量 WFPS	
		19%~37%	37%~70%
NPK	0.480**	0.749**	0.261
50%M+50%U	0.302*	0.602**	-0.044
M	0.171	0.504**	-0.278
CK	0.127	0.515**	-0.181

注:*代表 0.05 显著性水平上显著相关;**代表 0.01 显著性水平上极显著相关。

Note:*,** indicate significant at 0.05 and 0.01 levels.

反应为主,当土壤含水量进一步增加时,水分开始充满土壤孔隙,阻滞了土壤产生的 N₂O 向大气扩散,同时生成的 N₂O 被进一步还原为 N₂^[13-14]。

土壤温度通过影响生成 N₂O 的硝化反硝化反应速率来影响 N₂O 的排放,有研究发现^[15],土壤温度在 15~25 °C 内适宜产生 N₂O,本研究绝大多数观测数据处于这一温度范围内。通过对 N₂O 通量和 5 cm 深度土温的进一步相关分析发现,化肥处理 N₂O 通量同土温达到了 0.01 水平上的极显著正相关关系,有机无机配施 N₂O 通量同土温呈 0.05 水平上的显著相关关系,单施有机肥和对照处理 N₂O 通量与土壤温度并未发现显著相关关系。这说明低的氮底物浓度下即使有适宜的温度,N₂O 也不会呈现随着温度升高而排放增加的趋势,只有在满足硝化反硝化所需要的氮素底物浓度下,N₂O 才会与 5 cm 深度土温呈现显著的正相关关系。

2.3 累积排放量、直接排放系数和排放强度

有研究表明^[16],施入有机肥会增加土壤有机质含

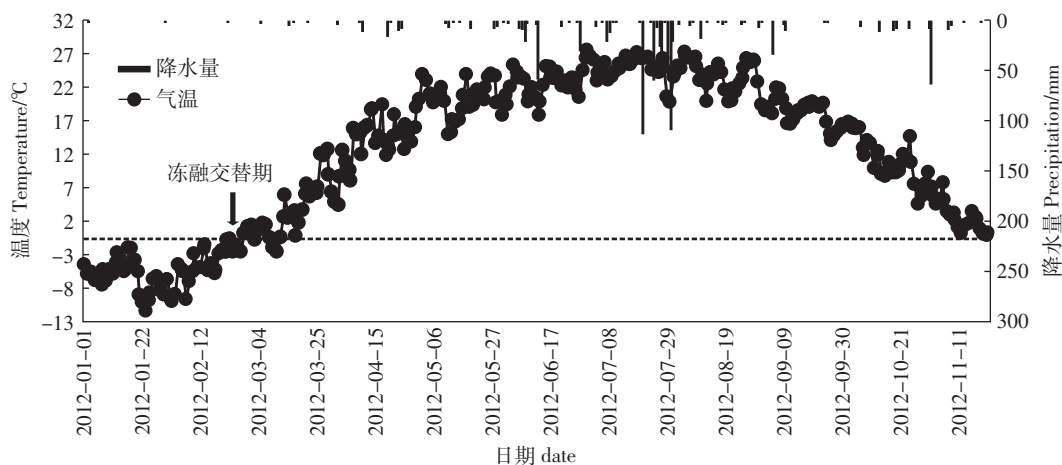


图 2 试验地日平均气温和全年降水量

Figure 2 Daily mean air temperature and precipitation at the experimental site

量,促进微生物活动,从而增大 N₂O 排放。但本研究发现,在等氮条件下,施用有机肥,反而减少 N₂O 排放。一方面是土壤有机质的大量分解会消耗土壤中的 O₂,从而抑制了硝化作用,减少了 N₂O 的硝化作用排放量^[17];另一方面有机肥还为反硝化细菌提供能量,促使 N₂O 进一步还原为 N₂,进而减少了 N₂O 排放^[18]。另外,有机肥具有肥效缓长的特点,前期氮素供应能力不及单施化肥^[19]。

从图 3 可以看出,化肥和有机肥的施入均较对照处理明显增加了 N₂O 的排放,分别增加 0.21、0.59、0.88 kgN·hm⁻²·a⁻¹。但在非生长季,各施肥处理累积速率差异不明显,累积曲线比较平缓;5 月底至 8 月中旬,由于受降水和施肥等环境因素的驱动,各处理累积速率明显增加,其中化肥养分释放较快,硝化反硝化作用底物浓度也增加较快,因此这段时间内,化肥处理 N₂O 累积曲线斜率较大,累积速率最快,其次是有机无机配施和有机肥处理;8 月中下旬,由于底物消耗,浓度降低,各处理累积曲线又趋于平缓。NPK、50%M+50%U、M 处理的最终累积排放量分别为 1.49、1.20、0.82 kgN·hm⁻²·a⁻¹。非生长季 N₂O 排放量不应被忽视,NPK、50%M+50%U、M、CK 非生长季排放总量分别占总排放量的 40.6%、59.2%、61.7%和 60.7%。

由表 3 可见,有机肥和有机无机配施能够减少 N₂O 的排放,降低 N₂O 的排放强度,有机肥处理和有机无机配施处理排放强度分别较化肥处理降低了 33.3%和 13.3%,同时有机无机配施处理产量同化肥处理无显著差异,但单施有机肥,产量会较化肥处理有显著下降。应该在统筹考虑产量的前提下,评价施用有机肥的减排效果。本研究各处理 N₂O 直接排放

表 3 不同处理 N₂O 累积排放量、产量、直接排放系数和排放强度
Table 3 Cumulative N₂O emissions, corn yield, emission factor and emission intensity under different treatments

处理 Treatment	N ₂ O 累积排放量 Cumulative N ₂ O emissions/ kgN·hm ⁻² ·a ⁻¹	产量 Corn yield/ t·hm ⁻²	排放系数 Emission factor/%	排放强度 Emission intensity/ kgN·t ⁻¹
NPK	1.49a	10.12±0.26a	0.49	0.15
50%M+50%U	1.20b	9.33±0.07ab	0.33	0.13
M	0.82c	8.61±0.36b	0.12	0.10
CK	0.61c	5.62±0.66c	—	0.11

注:不同小写字母代表 0.05 水平上差异显著。
Note: Different small letters means significant difference at 0.05 level.

系数介于 0.12%~0.49%之间,平均值为 0.31%,远低于 IPCC 推荐值 1%^[20]。因此,如果按照 IPCC 的推荐排放系数来计算,将明显高估中国北方旱作春玉米农田的 N₂O 排放量。

2.4 DNDC 模型验证及不同处理净温室效应的定量评价

2.4.1 DNDC 模型的验证

模型的验证是模型应用研究的必备环节。为定量分析模拟结果与观测结果的吻合度和拟合度,本研究通过计算模拟值与实测值之间的均方根误差 R(RMSE)以及相关系数 r(Correlation coefficient),来考察二者之间的吻合度和拟合度,其表达式分别为:

$$R = \frac{100}{\delta} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (S_i - O_i)^2}{n}}$$
$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (S_i - \bar{S}) \times (O_i - \bar{O})}{\sum_{i=1}^n \sqrt{(S_i - \bar{S})^2} \times \sum_{i=1}^n \sqrt{(O_i - \bar{O})^2}}$$

式中:S_i和 O_i分别是模拟值和实测值; $\bar{S}$ 和 $\bar{O}$ 分别代表

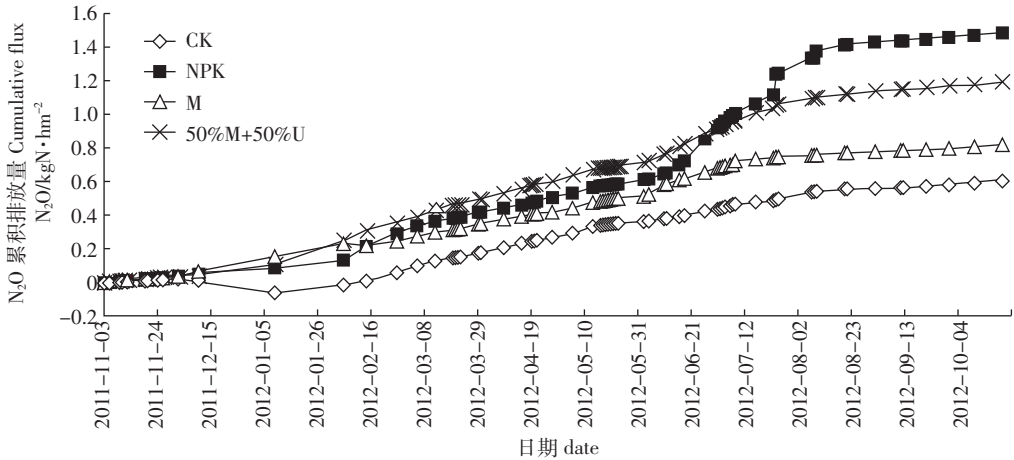


图 3 不同处理 N₂O 累积排放量
Figure 3 Cumulative N₂O flux of soils under different treatments

实测值和模拟值的平均值; n 是实测值个数。

图 4(A)和图 4(B)分别为本试验 NPK 和 50%M+50%U 处理 N_2O 排放通量模拟值和实测值的比较图。从图中可以看到, N_2O 排放通量模拟值和实测值之间显示出明显的一致性,表现出相同的季节变化规律,模型基本上捕获了由施肥和降水等事件造成的 N_2O 排放峰,NPK 处理和 50%M+50%U 模型模拟值与田间实测值相关系数分别为 $r_1=0.744^{**}$ 和 $r_2=0.708^{**}$,两处理实测值与模拟值之间的 RMSE 分别为 $R_1=3\%$ 和 $R_2=4\%$ 。图 5(C)和图 5(D)分别为本试验 NPK 和 50%M+50%U 处理 CO_2 排放通量模拟值和实测值的比较图。模拟值和实测值之间显示出高度的一致性,二者之间相关系数分别达到了 $r_3=0.756^{**}$ 和 $r_4=0.650^{**}$,两处理实测值与模拟值之间的 RMSE 分别为 $R_3=2\%$ 和 $R_4=5\%$ 。

考虑到农田土壤排放 N_2O 和 CO_2 所涉及的硝化反硝化及分解作用等一系列复杂机理过程,模型的模拟结果是可以接受的,表明模型可以用来进行本试验不同处理温室气体的定量评价。

2.4.2 不同处理净温室效应的定量评估

农田产生的主要温室气体有 3 种即 CO_2 、 N_2O 和

CH_4 , 本研究中农田净温室效应是指农田生态系统对全球气温升高的贡献,对于净温室效应的评价方法目前普遍采用全球增温潜势来计算^[20],农田净温室效应为 3 种温室气体净交换量的 CO_2 当量的代数。由于土壤-作物系统对 CO_2 具有排放和吸收的双重效应,对 CO_2 的净效应的研究,不能简单地用土壤呼吸来进行表征,目前普遍认为土壤 SOC 的年度变化量(dSOC)可用来表征 CO_2 的净效应。

$$\text{农田净温室效应} = \text{dSOC} + \text{N}_2\text{O} \times 298 + \text{CH}_4 \times 25$$

单位重量 CH_4 和 N_2O 在 100 年时间尺度全球增温潜势分别是 25 和 298。鉴于目前 CO_2 监测与评价的不确定性,本研究采用 DNDC 模型进行净温室效应的定量分析,DNDC 模型把土壤有机碳(SOC)变化量(dSOC)作为土壤 CO_2 净交换量,模型中 dSOC 是指系统碳投入(秸秆碳、有机肥碳、凋落物等)和碳输出(主要是土壤异养呼吸)之间的平衡。通过对全年 CO_2 、 CH_4 和 N_2O 净交换量的模拟分析,本试验不同处理的净温室效应如图 6 所示,各施肥处理净温室效应均较对照有所降低,其中有机无机配施同单施化肥处理相比减少温室效应 33.5%,相比单一的 N_2O 减排,在等氮的条件下,增施有机肥不仅能够减少 N_2O 的排放,

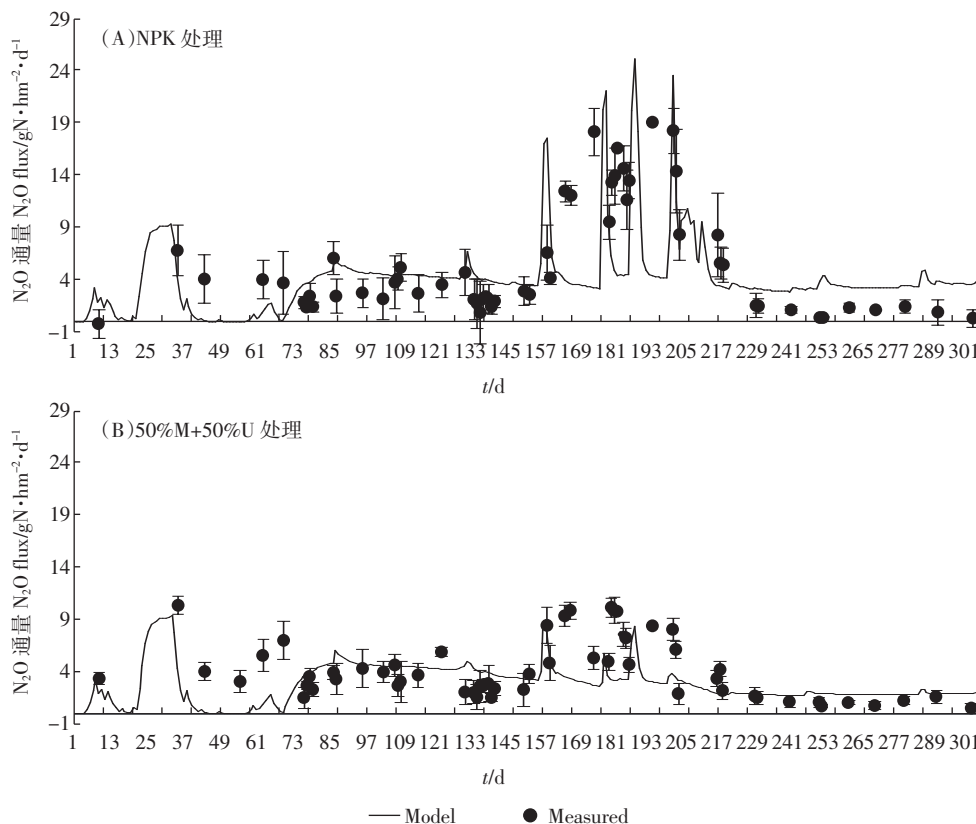


图 4 春玉米农田 N_2O 通量观测值和 DNDC 模拟值的对比

Figure 4 Comparison of observed (filled circles) and simulated (solid line) of N_2O emissions in spring maize field

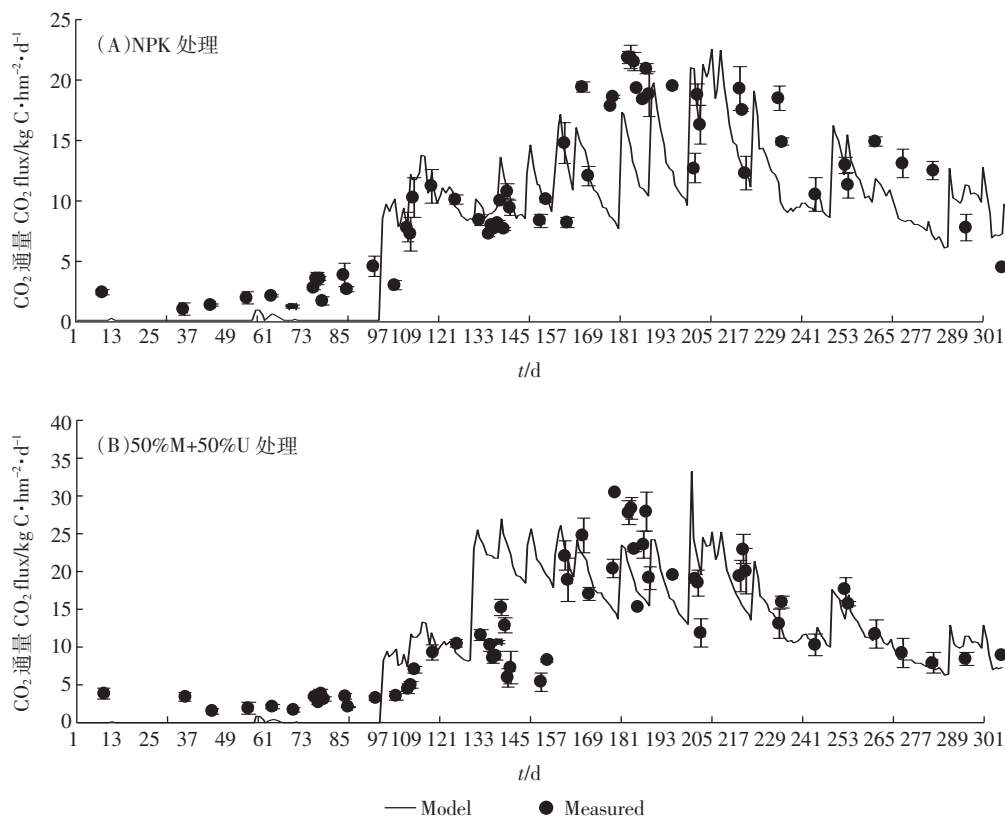
图 5 春玉米农田 CO₂ 通量观测值和 DNDC 模拟值的对比

Figure 5 Comparison of observed (filled circles) and simulated (solid line) of CO₂ emissions in spring maize field

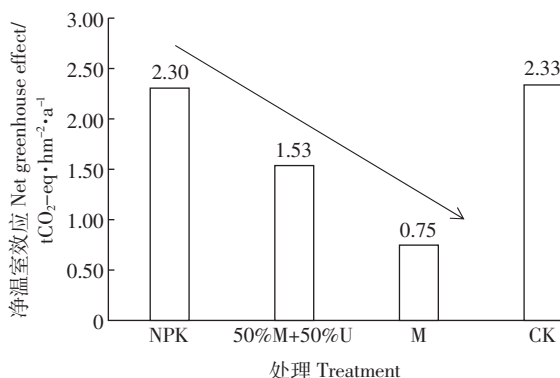


图 6 不同处理净温室效应

Figure 6 Net greenhouse effect of different treatments

还能够起到农田土壤固碳的效应,达到“固碳”和“减排”同步的效果。单施有机肥虽然比施用化肥温室效应降低了 67%,也使产量下降了 14.9%,不能保持产量和减排的协调。施用有机肥对固碳减排的长期效应还需要长时间尺度的监测和研究。

3 讨论

(1) 本试验测得数据与其他研究者测得数据基本相当,如刘运通等^[22]在华北平原测定的春玉米地 N₂O

生长季排放总量为 0.21~1.19 kgN·hm⁻²,周鹏等^[6]在华北平原测定的春玉米地 N₂O 生长季排放总量为 0.18~1.17 kgN·hm⁻²,但二者均未考虑非生长季 N₂O 排放量,在本研究中,生长季 N₂O 排放总量为 0.24~0.90 kgN·hm⁻²,各处理非生长季排放占周年排放总量的 40.6%~61.7%,因此非生长季 N₂O 排放量不应忽视。非生长季 N₂O 排放峰主要出现在冻融交替期,其最大排放峰值为 83.85 μg·m⁻²·h⁻¹,究其原因可能是在冰冻时期土壤颗粒表面被冰膜,使土粒处于缺氧环境,利于土壤微生物进行反硝化作用产生 N₂O,但同时冰膜也阻碍 N₂O 的释放^[23-24],在土壤融冻后 N₂O 得以充分排放^[25-27]。Van Bochove 等^[28]认为冻融过程对土壤结构的破坏可能使土壤中有有效的碳氮基质增加,从而使微生物活性增强,促进 N₂O 的排放。值得注意的是,本试验底肥施入后 10 d 内并没有观测到 N₂O 排放峰。这主要是受土壤含水量限制,由于播种后土壤含水量较低,使得施入土壤的尿素没能迅速溶解,土壤中硝化反硝化底物浓度升高缓慢,低水分含量也限制了硝化反应的速率^[29]。在本试验非生长季也观测到了 N₂O 吸收现象,Bremner 等^[30]和 Barton 等^[31]研究

发现较低的矿质氮及较高的土壤水分含量条件下,硝化反硝化作用过程中产生的 N_2O 会进一步被还原为 N_2 ,因而会出现 N_2O 吸收现象。

(2)有机无机配施和单施有机肥较单施化肥均能减少 N_2O 的排放,但单施有机肥产量会较化肥处理有显著下降,而有机无机配施处理产量同化肥处理无显著差异,因此应该在统筹考虑产量的前提下,评价施用有机肥的减排效果。现利用 DNDC 模型对有机无机配施、单施化肥和对照处理进行了 50 年尺度的情景分析(图 7)表明,随着耕作年限的增加,土壤肥力会不断消耗,土壤有机碳(SOC)含量逐年降低,作物残茬和有机肥的投入是土壤有机碳的主要来源,有机无机配施处理中有机肥的投入,增加了土壤中的碳固存,使 SOC 含量下降趋势减缓,50 年以后有机无机配施处理中 SOC 含量较化肥和对照处理分别高 1.0% 和 5.0%。因此,有机无机配施处理能够在稳产减排的基础上起到固碳作用。

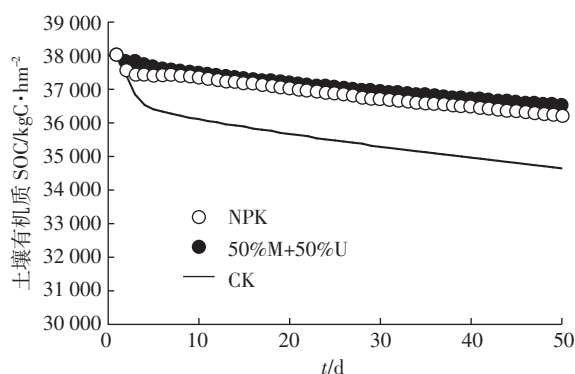


图 7 不同处理对土壤有机碳变化的长期影响

Figure 7 Long term dynamics of SOC under different treatments

(3)DNDC 模型对整个生长季后期从 2012 年 8 月底到 12 月的 N_2O 通量的模拟高于观测值,造成这种差异的原因可能是 DNDC 低估了生长季前期肥效的释放速率,导致模型在后期模拟硝化反硝化反应过程时的底物浓度较高;由田间实测数据得出处理 NPK 和 50%M+50%U 全年 N_2O 的累积排放量分别为 1.49、1.20 $\text{kgN}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$,由模型模拟得出的总排放量为 1.50、1.00 $\text{kgN}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$,分别较实测值相差了 0.7% 和 16.7%。造成这种差异的原因除了模型本身的不确定性因素之外,还可能是田间观测取样误差及利用实测数据计算累积排放量所采用的插值法所造成的。

能否在稳产减排的基础上,通过增加有机肥配施比例来提高固碳效果,还需要进一步深入研究。

4 结论

(1)通过对 N_2O 排放的周年监测,各处理 N_2O 通量具有明显的季节变化规律,通量变化范围是 $-17.56 \sim 125.45 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$,在非生长季冻融交替时期观测到明显的 N_2O 排放峰,最大排放通量为 $83.85 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ 。NPK、50%M+50%U、M、CK 处理周年累计排放量分别为 1.49、1.20、0.82、0.61 $\text{kgN}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$,非生长季排放总量分别占总排放量的 40.6%、59.2%、61.7% 和 60.7%。

(2)在整个周年观测期内,当土壤水分含量介于 19%~37%之间时,各处理下的 N_2O 通量同土壤含水量呈极显著的正相关关系,但是当土壤水分介于 37%~70%之间时,各处理 N_2O 通量同土壤水分之间没有显著的相关关系。另外,在适宜的土壤湿度和养分条件下, N_2O 排放同 5 cm 深度土温存在显著或极显著相关关系。

(3)利用 DNDC 模型进行净温室效应的定量评价,有机无机配施同单施化肥处理相比能够减少温室效应 33.5%,产生明显的环境效益;单施有机肥较单施化肥温室效应降低 67%,但对最终产量有较大影响;情景模拟结果显示,50 年后有机无机配施处理中 SOC 含量较化肥和对照处理分别高 1.0% 和 5.0%。因此,有机无机肥料相配合可以达到在保持产量的基础上“减排”和“固碳”的协同效果。

参考文献:

- [1] IPCC. Climate Change 2007—Impacts, Adaptation and Vulnerability[M]. Cambridge, UK and New York: Cambridge University Press, 2007:750–752.
- [2] 陈卫卫. 三江平原稻田生态系统 N_2O 排放研究[D]. 吉林:吉林农业大学, 2007.
Chen W W. Studies on N_2O emissions from paddy field ecosystem in Sanjiang Plain[D]. Jilin: Jilin Agricultural University, 2007.
- [3] Röver M, Heinemeyer O, Kaiser E A. Microbial induced nitrous oxide emissions from an arable soil during winter[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1998, 30(14): 1859–1865.
- [4] 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 & Environment*, 2009, 133(3): 247–266.
- [5] 王立刚, 李维炯, 邱建军, 等. 生物有机肥对作物生长、土壤肥力及产量的效应研究[J]. *土壤肥料*, 2004, 5:12–16.
Wang L G, Li W J, Qiu J J, et al. Modelling soil organic carbon dynamics in the major agricultural regions of China[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2010, 6: 29–37.

- [6] 周 鹏, 李玉娥, 刘利民, 等. 施肥处理和环境因素对华北平原春玉米田 N_2O 排放的影响: 以山西晋中为例[J]. 中国农业气象, 2011, 32(2): 179–184.
- Zhou P, Li Y E, Liu L M, et al. Effects of fertilization and environment factors on N_2O emission in spring corn field in North China Plain[J]. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2011, 32(2): 179–184.
- [7] Li C, Frolking S, Frolking T A. A model of nitrous oxide evolution from soil driven by rainfall events: I. Model structure and sensitivity[J]. *Geophysical Research*, 1992, 97: 9759–9776.
- [8] Li C S. Modeling trace gas emissions from agricultural ecosystems[J]. *Nutrient Cycling in Agro-Ecosystems*, 2000, 58(1–3): 259–276.
- [9] 邱建军, 王立刚, 唐华俊, 等. 东北三省耕地土壤有机碳储量变化的模拟研究[J]. 中国农业科学, 2005, 4(8): 594–600.
- Qiu J J, Wang L G, Tang H J, et al. Study on the situation of soil organic carbon storage in arable lands in Northeast China[J]. *Agricultural Sciences in China*, 2005, 4(8): 594–600.
- [10] Li H, Qiu J, Wang L G, et al. Modelling impacts of alternative farming management practices on greenhouse gas emissions from a winter wheat–maize rotation system in China[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2010, 135(1): 24–33.
- [11] 梁东丽. 黄土性土壤氮素氧化亚氮气态损失及其影响因素的研究[D]. 西安: 西北农林科技大学, 2003.
- Liang D L. Nitrous oxide losses of nitrogen fertilizer and influential factors on loess soil[D]. Xi'an: Northwest Sci-Tech University of Agriculture and Forestry, 2003.
- [12] 于亚军, 朱 波, 荆光军. 成都平原土壤–蔬菜系统 N_2O 排放特征[J]. 中国环境科学, 2008, 28(4): 313–318.
- Yu Y J, Zhu B, Jing G J. N_2O emission from soil–vegetable system and impact factors in Chengdu Plain of Sichuan Basin[J]. *China Environmental Science*, 2008, 28(4): 313–318.
- [13] Wolf I, Russow R. Different pathways of formation of N_2O , N_2 and NO in black earth soil[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2000, 32(2): 229–239.
- [14] 孙志强, 郝庆菊, 江长胜, 等. 农田土壤 N_2O 的产生机制及其影响因素研究进展[J]. 土壤通报, 2010(6): 1524–1530.
- Sun Z Q, Hao Q J, Jiang C S, et al. Advances in the study of nitrous oxide production mechanism and its influencing factors in agricultural soils[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2010(6): 1524–1530.
- [15] 郑循华, 王明星, 王跃思, 等. 温度对农田 N_2O 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_2O production and emission[J]. *Environmental Science*, 1997, 18(5): 1–5.
- [16] Li C, Frolking S, Butterbach–Bahl K. Carbon sequestration in arable soils is likely to increase nitrous oxide emissions, offsetting reductions in climate radiative forcing[J]. *Climatic Change*, 2005, 72(3): 321–338.
- [17] 勾 继, 郑循华. 华东地区稻麦轮作农田生态系统 N_2O 排放的模拟研究[J]. 大气科学, 2000, 24(6): 835–842.
- Gou J, Zheng X H. A simulating study of N_2O emission from a rice–wheat rotation ecosystem in Southeast China[J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2000, 24(6): 835–842.
- [18] Azam F, Müller C, Weiske A, et al. Nitrification and denitrification as sources of atmospheric nitrous oxide–role of oxidizable carbon and applied nitrogen[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2002, 35(1): 54–61.
- [19] 欧杨虹, 徐阳春, 沈其荣. 有机氮部分替代无机氮对水稻产量和氮素利用率的影响[J]. 江苏农业学报, 2009, 25(1): 106–111.
- Ou Y H, Xu Y C, Shen Q R. Effect of combined use of organic and inorganic nitrogen fertilizer on rice yield and nitrogen use efficiency[J]. *Jiangsu Journal of Agricultural Sciences*, 2009, 25(1): 106–111.
- [20] IPCC. IPCC guidelines for national gas inventories[R]. Japan: Institute for Global Environmental Strategies, 2006.
- [21] Qiu J, Li C, Wang L, et al. Modeling impacts of carbon sequestration on net greenhouse gas emissions from agricultural soils in China[J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2009, 23(1): 1–11.
- [22] 刘运通, 李玉娥, 万运帆, 等. 不同氮磷钾施用对春玉米农田 N_2O 排放的影响[J]. 农业环境科学学报, 2011, 30(7): 1468–1475.
- Liu Y T, Li Y E, Wan Y F, et al. Nitrous oxide emissions from spring–maize field under the application of different nitrogen and phosphorus fertilizers[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2011, 30(7): 1468–1475.
- [23] Wang L F, Cai Z C, Yan H. Nitrous oxide emission and reduction in a laboratory–incubated paddy soil response to pretreatment of water regime[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2004, 16(3): 353–357.
- [24] Teepe R, Brumme R, Beese F. Nitrous oxide emissions from soil during freezing and thawing periods[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2001, 33(9): 1269–1275.
- [25] Müller C, Martin M, Stevens R J, et al. Processes leading to N_2O emissions in grassland soil during freezing and thawing[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2002, 34(9): 1325–1331.
- [26] Priem A, Christensen S. Natural perturbations, drying–wetting and freezing–thawing cycles, and the emission of nitrous oxide, carbon dioxide and methane from farmed organic soils[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2001, 33(15): 2083–2091.
- [27] Zhu R B, Liu Y S, Ma E D, et al. Greenhouse gas emissions from penguin guanos and ornithogenic soils in coastal Antarctica: Effects of freezing thawing cycles[J]. *Atmospheric Environment*, 2009, 43(14): 2336–2347.
- [28] Van Bochove E, Prévost D, Pelletier F. Effects of freeze–thaw and soil structure on nitrous oxide produced in a clay soil[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2000, 64(5): 1638–1643.
- [29] 刘运通, 万运帆, 林而达, 等. 施肥与灌溉对春玉米土壤 N_2O 排放通量的影响[J]. 农业环境科学学报, 2008, 27(3): 997–1002.
- Liu Y T, Wan Y F, Lin E D, et al. N_2O flux variations from spring maize soil under fertilization and Irrigation[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2008, 27(3): 997–1002.
- [30] Bremner J M. Sources of nitrous oxide in soils[J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 1997, 49(1–3): 7–16.
- [31] Barton L, Kiese R, Gatter D, et al. Nitrous oxide emissions from a cropped soil in a semi–arid climate[J]. *Global Change Biology*, 2008, 14(1): 177–192.