

不同氮磷肥施用对春玉米农田 N₂O 排放的影响

刘运通^{1,2}, 李玉娥^{1,2*}, 万运帆^{1,2}, 高清竹^{1,2}, 秦晓波^{1,2}, 陈德立³

(1.中国农业科学院农业环境与可持续发展研究所, 北京 100081; 2.农业部农业环境与气候变化重点开放实验室, 北京 100081; 3.Department of Resource Management and Geography, Melbourne School of Land and Environment, the University of Melbourne, Victoria 3010, Australia)

摘要:农田过量施肥会增加 N₂O 排放,使农田土壤成为重要的温室气体排放源。为减少农田 N₂O 排放,利用自动观测系统研究了春玉米农田中不同肥料对 N₂O 排放的影响,并结合作物产量及 N₂O 的排放量探索减少温室气体排放的施肥措施。采用田间试验方法设定了不施肥(CK)、尿素(U)、尿素加磷肥(NP)和硝酸磷肥(NOP)4个处理进行研究。结果表明,各处理下 N₂O 排放总量分别为:CK 0.21 kg N·hm⁻²、U 1.19 kg N·hm⁻²、NP 0.93 kg N·hm⁻²、NOP 0.69 kg N·hm⁻²;N₂O 排放主要受施肥、灌溉,降雨和土壤温度的影响;在作物生长后期土壤含氮量小于 7 mg N·kg⁻¹ 的情况下,观测到土壤吸收 N₂O 的情况;各处理下排放因子均小于政府间气候变化委员会(IPCC)的缺省值 1%,表明 IPCC 推荐的排放因子不适用于估算中国北方的春玉米农田 N₂O 排放。施加磷肥有助于减少农田 N₂O 排放并提高产量,硝态磷肥较尿素可以显著减少 N₂O 排放。综合考虑产量和 N₂O 排放,相对于施用尿素和尿素加磷肥处理,硝酸磷肥处理不仅可节约 15%和 30%的肥料投入,而且分别减少 42%和 26%的 N₂O 排放,具有减排不减产的良好效果。

关键词:春玉米;氮磷肥;N₂O 排放

中图分类号:X511 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2011)07-1468-08

Nitrous Oxide Emissions from Spring-maize Field Under the Application of Different Nitrogen and Phosphorus Fertilizers

LIU Yun-tong^{1,2}, LI Yu-e^{1,2*}, WAN Yun-fan^{1,2}, GAO Qing-zhu^{1,2}, QIN Xiao-bo^{1,2}, CHEN De-li³

(1.Institute of Environment and Sustainable Development in Agriculture, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China; 2.The Key Laboratory for Agro-Environment & Climate Change, Ministry of Agriculture, Beijing 100081, China; 3.Department of Resource Management and Geography, Melbourne School of Land and Environment, the University of Melbourne, Victoria 3010, Australia)

Abstract: Excessive fertilizer application to cropland results in high N₂O emissions, cropland becomes an important source of greenhouse gas (GHG) emission. In order to reduce N₂O emissions, this study investigated the effects of fertilizer types on N₂O emissions in spring maize field in northern China, which was monitored continuously by automatic measurement system. The responses of grain yield, in addition to N₂O emissions, were examined to explore feasible strategies to reduce N₂O emission. Four fertilization management practices were selected, viz. (1) zero fertilizer as control treatment (CK), (2) urea treatment (U), (3) urea and phosphorus treatment (NP) and (4) nitric phosphate treatment (NOP). The results indicated that the total N₂O fluxes under each treatment were CK: 0.21 kg N·hm⁻², U: 1.19 kg N·hm⁻², NP: 0.93 kg N·hm⁻², NOP: 0.69 kg N·hm⁻² respectively. The N₂O emissions were mainly influenced by fertilization, irrigation, precipitation and soil temperature. Soil N₂O uptake was observed during the later growth stage of spring maize when the soil mineral N was lower than 7 mg N·kg⁻¹. The N₂O emission factor (EF) of every fertilizer treatment was lower than 1% which was suggested by the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). This meant the default EF of IPCC should not be used for estimation of the regional N₂O fluxes in spring maize field in northern China. Phosphorus fertilizer not only could reduce the N₂O emissions but also increase maize grain yield, whereas nitric phosphate was significantly more effective than urea in reducing the N₂O emissions. Evaluation based on crop yield and N₂O emissions showed that NOP treatment was a better management practice in the sense that, when compared to U and NP treatments, it reduced not only N₂O emission by 42% and 26% separately, but also farmers' expenditure on fertilizers by 15% and 30%, while maintaining crop yield.

Keywords: spring maize; nitrogen and phosphorus fertilizer; N₂O emission

收稿日期: 2010-12-31

基金项目: 国家“973”项目(2010CB833504); 国家“十一五”科技支撑计划(2008BAD95B13)

作者简介: 刘运通(1980—), 男, 博士研究生, 研究方向为气候变化。E-mail: liuyuntong282988@163.com

* 通讯作者: 李玉娥 E-mail: yueli@ami.ac.cn

全球变暖已经成为不争的事实,农业温室气体排放占全球人为温室气体排放量的 10%~12%,其中农业每年排放 N₂O 占人为源的 58%,并且正以较快的速率增长^[1]。目前我国存在过量施肥且肥料利用率低的现象,2007 年较 1961 年我国氮肥用量增加了 58.5 倍,是世界肥料用量第一大国^[2]。我国因施肥造成的 N₂O 排放量为 63 万 t,农业生产过程中排放的 N₂O 占全国 N₂O 排放总量的 92%^[3]。因此,如何在保证产量的情况下科学施肥,减少 N₂O 排放是急待解决的问题。

我国玉米 2008 年播种面积为 29.8×10⁶ hm²^[4],是我国第二重要的农作物^[2],其中春玉米主要分布在我国北方,约占全国玉米面积的 36%^[5]。目前研究多集中在夏玉米农田 N₂O 排放规律影响因素研究^[6-7],对春玉米研究较少,主要集中在施氮肥量多少对 N₂O 的影响^[8],应用先进的自动采样观测系统研究不同氮磷肥对春玉米农田 N₂O 排放的影响未见报道。因此,本研究的主要目的为:应用自动静态箱法研究不同氮磷肥处理下北方春玉米田 N₂O 排放与环境因素的关系;研究不同氮磷肥处理对 N₂O 排放及产量的影响,探索适当的温室气体减排措施。

1 材料与方法

1.1 试验点基本情况

试验在山西省晋中市榆次区张庆乡演武村进行,位于东经 112°51′北纬 37°38′,海拔高程为 789 m,属洪积和冲积平原地貌,温带大陆性半干旱气候,多年平均气温 9.3℃,多年平均降水量 430 mm,多年平均蒸发量 2 068.5 mm(1951—2008 年)。耕作制度为一年一熟春玉米。试验点土壤理化性质如表 1 所示,速效氮、磷、钾的测定方法分别为:碱解扩散法、碳酸氢钠浸提钼锑抗比色法和乙酸铵浸提火焰光度法^[9]。

1.2 试验设计

作物为春玉米,设不施肥处理(CK)、尿素处理(U)、尿素与磷肥混合处理(NP)和硝酸磷肥处理(NOP),施肥具体情况见表 2。硝酸磷肥(N=26.5%;其中硝态氮含量为 75%,铵态氮含量为 25%;P₂O₅=11.5%),尿素(N=46.4%);过磷酸钙(P₂O₅=11.5%),追肥方式均为沟施覆盖,在玉米抽雄期(7 月 14 日)进行。每处理设 3 个重复,小区面积为 60 m² (6 m×10 m),小区间隔离带为 1 m,小区在各方向上无差别。两次灌溉分别在春玉米播种前(5 月 15 日)及追肥后抽雄期(7 月 16 日)进行,每次灌溉量为 70 mm。

1.3 测定项目与方法

于 2009 年 5 月 22 日播种,9 月 21 日收获,所有测定项目均在玉米生育期内进行,气象数据由当地实验中的自动气象站提供。

1.3.1 N₂O 通量测定方法

N₂O 通量的测定采用自动静态箱法,每个处理都放置 3 个自动开启的静态观测箱,箱子摆放在两行玉米中间(覆盖追肥沟),箱中无玉米。万运帆等^[10]对该系统进行了详尽的介绍,箱体以角钢作为支架,四面及顶盖由透明 PC 板制成,箱体内有混合气体用的小电风扇、采气管及温度传感器。温度传感器用于测定箱内空气和土壤温度,其中空气温度用于通量的计算。箱体长宽均为 70 cm,高 140 cm,无底座,底部有四脚直接插入土中并以土密封。每个静态箱通过 Teflon 采气管道和采气泵、气相色谱进样口相连,静态箱的罩箱时间为 30 min,气体经过滤干燥后自动送入气相色谱中进行自动分析,分析后数据自动保存到电脑中。N₂O 浓度测定采用 HP5890II 气相色谱仪,检测器为 Electron Capture Detector(ECD),其工作温度为 330 ℃,柱型为 P.Q 填充柱,柱温为 70 ℃,载气为

表 1 供试土壤基本理化性状
Table 1 Physical and chemical properties of the experiment field soil

pH	容重/g·cm ⁻³	有机质/g·kg ⁻¹	全氮/g·kg ⁻¹	速效氮/mg·kg ⁻¹	全磷/g·kg ⁻¹	速效磷/mg·kg ⁻¹	速效钾/mg·kg ⁻¹
7.5	1.33	16.9	1.79	80.2	1.58	15.1	90.6

表 2 试验处理与投入
Table 2 Experiment treatment and cost of fertilization

处理	肥料种类	底肥/kg·hm ⁻² 5 月 24 日		追肥/kg·hm ⁻² 7 月 14 日		投入/RMB·hm ⁻²
		N	P ₂ O ₅	N	P ₂ O ₅	
CK	—	—	—	—	—	0
U	尿素	146	—	34	—	1 000
NP	尿素+磷肥	146	63	34	15	1 210
NOP	硝酸磷肥	146	63	34	15	850

氮气(纯度为 99.999%),流量为 $25 \text{ mL} \cdot \text{min}^{-1}$ 。观测频率为每隔 3 h 自动测定 1 次,每日共测定 8 次,根据盖箱前后 N_2O 浓度的不同和盖箱前后采样箱内空气温度计算 N_2O 排放通量^[1]。该自动系统 N_2O 通量检测限为 $4.5 \times 10^{-9} \text{ kg N} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$, N_2O 浓度检测精度 $\pm 5.5 \mu\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

1.3.2 土壤水分、温度测定

采样箱配有湿度传感器 EC-5(EM-50, Decagon Device, 美国),测定 0~10 cm 土壤体积含水量,且根据土壤容重和土壤比重($2.65 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$)计算土壤孔隙含水量(WFPS);箱内气温与土壤 5 cm 深度的土温采用 18B20 系列传感器自动测定,校准后 0~50 $^{\circ}\text{C}$ 最大误差 $\pm 0.3 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 。温度湿度测定频率为:采样箱开启和关闭各测定 1 次,每日测定 16 次,数据自动保存到电脑中。

1.3.3 土壤养分测定

播种至收获期间,采样频率为 $1 \text{ 次} \cdot 10 \text{ d}^{-1}$,采取“S”形取样法取各小区 0~20 cm 土样,逢降雨、灌溉和施肥要加测,土样混匀后取 10 g 土,用 $2 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 的

KCl 溶液振荡提取,提取液过滤后迅速冷冻,以备日后分析土壤中铵态氮、硝态氮的变化,土壤有效磷采用 $0.5 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1} \text{ NaHCO}_3$ 提取,用钼锑抗比色法测定,具体方法采用中国土壤学会的方法^[9]。

1.3.4 产量测定

9 月 21 日收获时,在各试验小区内随机选取 3 个 4 m^2 的区域,人工收获脱粒后,烘干、称重并计算产量。

1.3.5 数据分析方法

由于实验条件的限制造成数据的缺失,在进行数据统计时,对于每日测定次数少于 4 次和日通量小于系统检测限的予以剔除,观测期内共剔除 11 d。采用 R(<http://www.R-project.org>)数据分析软件进行数据分析和 Excel 进行作图。

2 结果与分析

2.1 N_2O 通量

2.1.1 N_2O 通量季节变化

各处理下 N_2O 通量在 2009 年观测期内总体表现

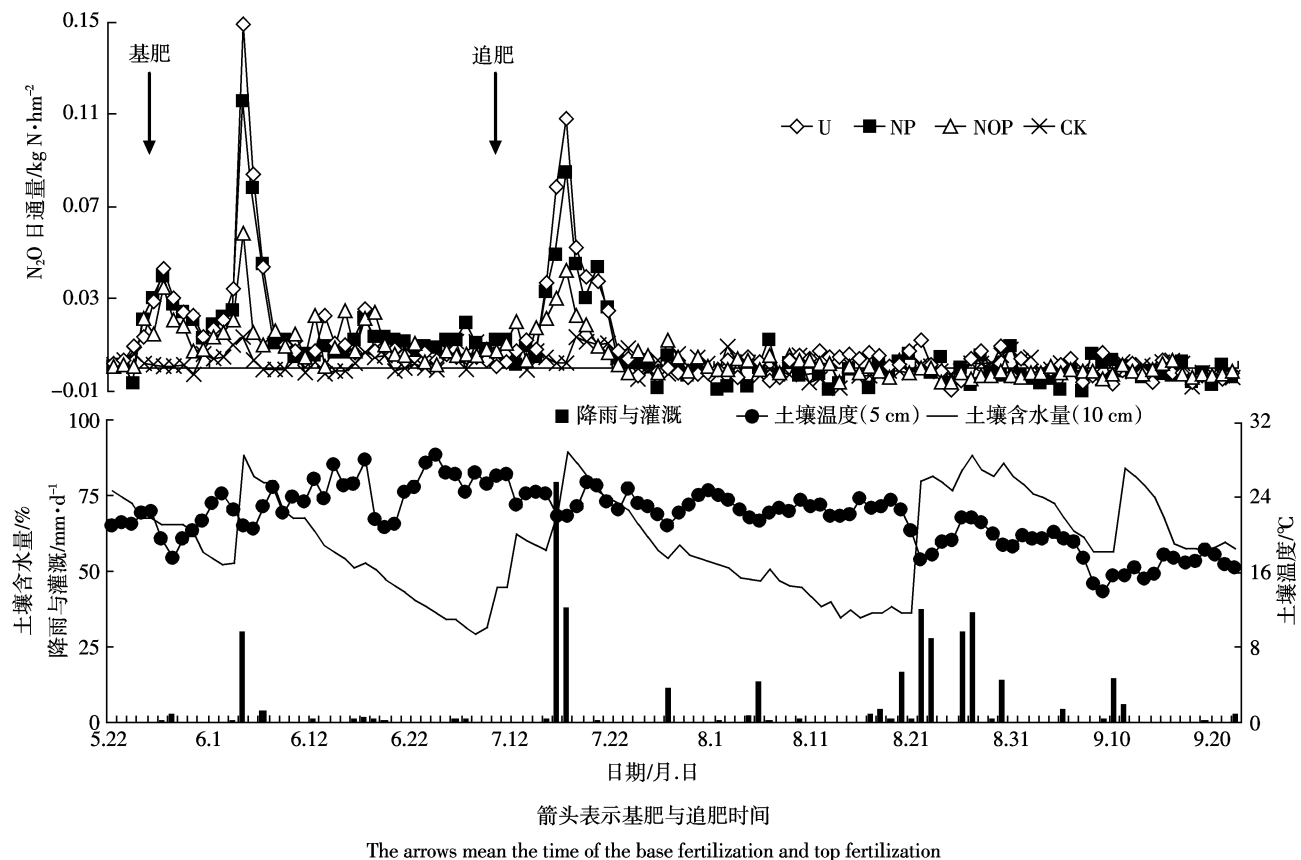


图 1 N_2O 通量与环境条件季节变化

Figure 1 Seasonal variation of N_2O flux and environment conditions

表3 各处理下 N_2O 日排放通量与排放系数
Table 3 Daily N_2O fluxes and emission factor under different treatments

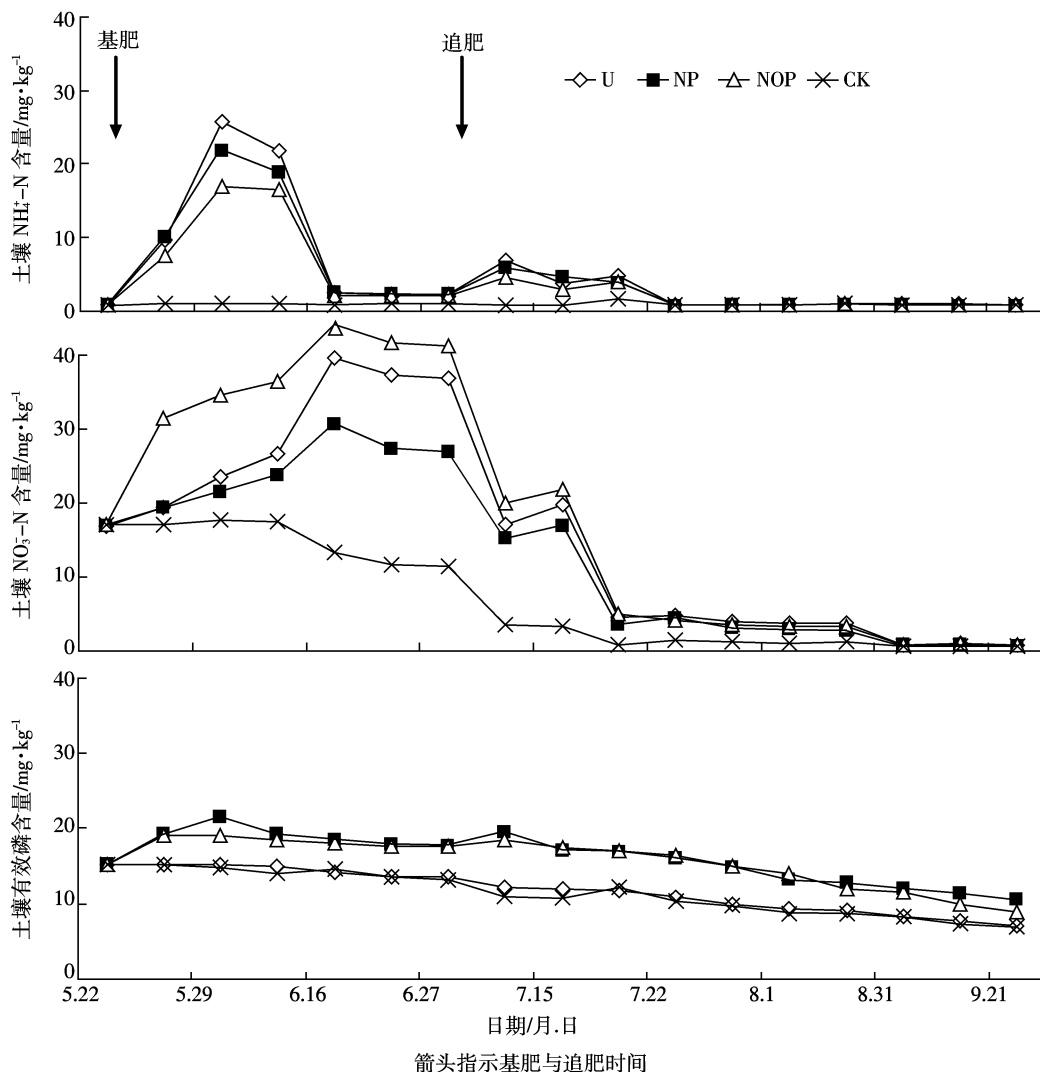
处理	最小值 $\pm$ s.e./ $g\ N\cdot hm^{-2}\cdot d^{-1}$	最大值 $\pm$ s.e./ $g\ N\cdot hm^{-2}\cdot d^{-1}$	总量 $\pm$ s.e./ $kg\ N\cdot hm^{-2}\cdot d^{-1}$	排放系数/ %
U	-9.32 ± 2.34	149.57 ± 9.96	$1.19\pm0.07aA$	0.55
NP	-16.87 ± 1.93	115.85 ± 13.47	$0.93\pm0.053bA$	0.4
NOP	-5.74 ± 1.95	58.74 ± 8	$0.69\pm0.08cB$	0.27
CK	-8.72 ± 2.19	13.84 ± 8.6	$0.21\pm0.011dC$	

注:小写字母的不同表示 0.05 水平差异显著,大写字母不同表示 0.01 水平差异显著

Note: The different of lowercase means significant difference at 0.05 level and the capital at 0.01 level.

为排放,主要受施肥与土壤水分含量的控制。各处理下 N_2O 日通量见表 3。除播种期外,另有两个最为明

显的排放峰,6月4日和7月17日(图1,表3),两次排放高峰释放的 N_2O 分别占各施肥处理下总排放的 40%~60%。根据试验记录,6月4日降水为 30 mm,因此这次排放峰与降雨有关,7月17日的排放峰是由于7月14日追肥后16日进行灌溉所致。主要原因是大量的水分溶解了施入的肥料,使得土壤中的 NO_3^- 、 NH_4^+ 等硝化和反硝化过程反应底物的浓度迅速升高(图2),经分析除空白外土壤铵态氮变化与各施肥处理下 N_2O 通量变化均达到了极显著正相关水平 ($P<0.01$),表明土壤 NH_4^+ 浓度的增加促进了土壤硝化作用的进行(表4)。同时每次降雨与灌溉前土壤比较干燥,降雨或灌溉后土壤含水量迅速增加,干燥时部分微生物死亡,增加了土壤中可降解有机碳量,氧的存在又促进了硝化过程^[12-13]。



The arrows mean the time of the base fertilization and top fertilization

图2 各处理下土壤养分变化

Figure 2 The variation of soil nutrients under every treatment

表 4 各处理下 N_2O 与温度和土壤水分的相关关系(r)Table 4 The correlation coefficient of N_2O flux with temperature and soil water content under different treatments

处理	土温(5 cm) $n=110$	降雨量(每日) $n=110$	土壤湿度(10 cm) $n=110$	土壤 NH_4^+-N (0~20 cm) $n=16$	土壤 NO_3^--N (0~20 cm) $n=16$	土壤有效磷(0~20 cm) $n=16$
U	0.197*	0.354**	0.192*	0.608**	0.166	0.357
NP	0.189*	0.246**	0.237**	0.630**	0.398	0.513*
NOP	0.206*	0.198*	0.176*	0.717**	0.374	0.510*
CK	0.246**	0.189*	0.252**	0.163	0.414	0.426

注:* 代表 5%显著相关;** 代表 1%极显著相关

Note: *means significant correlation at 0.05 level; **means significant correlation at 0.01 level

2.1.2 各处理下 N_2O 总量与排放系数

观测期内, 各处理下 N_2O 排放通量分别为 U 处理 $1.19 \text{ kg N} \cdot \text{hm}^{-2}$, NP 处理 $0.93 \text{ kg N} \cdot \text{hm}^{-2}$, NOP 处理 $0.69 \text{ kg N} \cdot \text{hm}^{-2}$, CK 处理 $0.21 \text{ kg N} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。施肥处理下 N_2O 通量均极显著高于空白处理($P<0.01$), NOP 处理下 N_2O 通量极显著低于 NP 和 U($P<0.01$), 表明硝酸磷肥对 N_2O 减排效果显著, NP 处理显著低于 U ($P<0.05$), 表明磷肥对减少 N_2O 排放有显著效果(图 3)。根据 IPCC^[14]的计算方法得出各处理下 N_2O 的排放系数分别为 U:0.55%, NP:0.4%, NOP:0.27%(表 3), 均小于 IPCC 推荐的 1%^[15]。

2.1.3 N_2O 吸收

在 112 d 的观测期内, 各处理下均有 N_2O 通量负值出现, 剔除小于自动系统检测限的数据后, 各处理下出现负值的天数分别为 N:29 d($-9.32 \sim -0.43 \text{ g N} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$), NP:39 d($-16.87 \sim -0.42 \text{ g N} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$), NOP:38 d($-5.74 \sim -0.37 \text{ g N} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$), CK:47 d($-8.72 \sim -0.092 \text{ g N} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$), 主要发生在作物生长后期土壤中铵态氮与硝态氮含量较低(小于 $7 \text{ mg N} \cdot \text{kg}^{-1}$)的情况下(图 2)。该结果说明自动观测系统是手动无法比拟的, 不仅节约了劳动力而且可以捕捉到 N_2O 通量的多种变化。

2.2 肥料对 N_2O 排放的影响

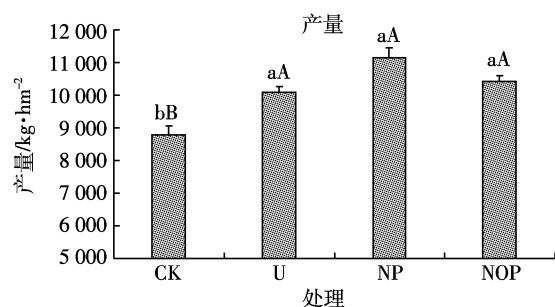
与空白相比, 各施肥处理均可以显著增加土壤养分含量和 N_2O 排放($P<0.01$), 说明肥料是 N_2O 排放的关键因子。通过相关性分析发现, 除空白外, 其他 3 个施肥处理下 N_2O 通量与土壤 NH_4^+-N 含量均正显著相关($P<0.01$), 而与土壤 NO_3^--N 相关关系不显著(表 4), 说明本研究中各处理下 N_2O 排放主要来自土壤硝化作用。本研究中两个加入磷肥的处理(NOP 与 NP), 土壤 N_2O 排放均与土壤有效磷含量显著正相关($P<0.05$), 但是这两个处理下 N_2O 通量均小于尿素处理, 说明磷肥对 N_2O 排放有一定的影响^[16-20]。

硝酸磷肥处理 NOP 与氮磷混合处理 NP 处理相比, 减少 N_2O 排放 35%($P<0.01$), 原因是硝酸磷肥中的氮由 75%的铵态氮与 25%的硝态氮组成, 因此土壤铵态氮含量 $\text{NP}>\text{NOP}$, 土壤硝态氮含量 $\text{NOP}>\text{NP}$ (图 2)。通过相关分析已经证明本试验中 N_2O 主要来自硝化反应, 所以含硝态氮肥较多的硝酸磷肥处理下 N_2O 排放小于氮磷肥处理 NP。与尿素处理 U 比较, 氮肥、磷肥混施 NP 处理可以显著降低 N_2O 排放 22.5%($P<0.05$), 显著增加土壤有效磷含量降低土壤中的铵态氮与硝态氮含量(图 2)。说明磷肥对提高肥料利用效率, 降低土壤铵态氮硝态氮含量, 减少 N_2O 排放有一定的作用。

2.3 环境条件对 N_2O 排放的影响

土壤含水量的变化范围(图 2)是 29%(6 月 28 日)~89%(7 月 17 日), 施底肥或追肥后 1 个月内, 除空白处理外, 灌溉或较小的降雨量均能引起较高的 N_2O 排放峰, 在刚施肥后其表现最为明显, 分析表明降雨和灌溉事件与 N_2O 排放之间呈正相关关系^[21-25]($P<0.05$), 分析其原因主要是降雨与灌溉共同影响土壤含水量的变化, 土壤水是土壤发生硝化与反硝化作用的必要条件, 水分状况不仅影响土壤中 N_2O 的生成量, 也极大地影响着土体的通气状况及向外传输。如表 4 所示, 相关分析表明在全生育期内土壤 10 cm 含水量与各处理下 N_2O 通量达到了显著($P<0.05$)或极显著的正相关关系($P<0.01$)。

土壤温度与 N_2O 排放密切相关, 通过相关性分析, 各处理下 N_2O 通量与土壤温度均显著相关(表 4), 郑循华等^[26]得出土壤温度在 $15 \sim 25^\circ\text{C}$ 范围内适宜产生 N_2O , 本研究土壤温度变化范围 $13.9 \sim 28.5^\circ\text{C}$, 其中 84%在 $15 \sim 25^\circ\text{C}$ 内。空白处理 5 cm 深处土壤温度均达到极显著正相关关系($P<0.01$), 其余各处理只达到了 0.05 水平的显著相关, 说明施肥在一定程度上掩盖了 N_2O 排放与温度的关系^[7, 25]。通过线性回归分



小写字母的不同表示差异达到 0.05 显著水平,大写字母的不同表示差异达到 0.01 显著水平

The different of lowercase means significant difference at 0.05 level and the capital at 0.01 level.

图3 各处理下产量

Figure 3 The yield under every treatment

析得出在不施肥处理下土壤水分($WFPS$)和 5 cm 土壤温度(T_{soil})与 N_2O 通量的指数方程,该方程可以解释 22% 的 N_2O 排放变化。

$$F=0.65e^{(0.078T_{soil}+0.016WFPS)}-8.8 \quad (1)$$

$$n=112, r^2=0.22, P<0.001$$

其中 F 为 N_2O 日通量($g\ N\cdot hm^{-2}$)。

2.4 各措施对产量与投入的影响

如图 3 所示,各施肥处理下玉米产量没有差异,但是与空白差异显著($P<0.01$)。氮磷混施处理 NP 和 NOP 均较尿素处理 U 高,说明氮磷混施既有利于提高作物产量又可以减少温室气体 N_2O 的排放。各处理下肥料的投入见表 2,硝酸磷肥的投入最低,较处理 U 与 NP 分别减少投入 15% 和 30%,产量与其他施肥处理没有差异,而 N_2O 排放较处理 U 和 NP 分别减少 42% 和 26%,因此硝酸磷肥处理达到了本实验减排不减产的目的。

3 讨论

3.1 管理措施

本研究中各施肥处理下两次排放峰占各处理观测期 N_2O 排放的 40%~60%,且排放时间不超过 15 d,因此如何降低施肥后 N_2O 的高排放是研究的重点之一。施用底肥后各处理下土壤 N_2O 并没有迅速排放,而是在 11 d 后的 6 月 4 日遇到强降雨后才出现较高排放,追肥后 2 d 开始灌溉,则迅速引起了 N_2O 的高排放(图 1)。施肥后土壤含水量迅速增加,土壤铵态氮、硝态氮随之迅速增加(图 2),从而促进了土壤硝化作用或反硝化作用,是土壤 N_2O 的迅速升高的主要原因,如果施肥后未立即遭遇强降雨较立即遇到强降雨,其 N_2O 排放减少约 50%^[27]。因此,在春玉米土地上

施肥期应选择合适的时间,尽量避免遭遇强降雨或施肥后立即灌溉,达到优化水肥管理与减排的目的。

3.2 磷肥与肥料类型

与单施氮肥相比,氮、磷肥混施可以显著减少 N_2O 排放,分析其原因是磷肥提高了土壤有效磷含量,使得肥料间的协同作用加强,提高了作物对肥料的利用率,同时降低了土壤 NO_3^-N 与 NH_4^+-N 含量(图 2),减少了养分损失,可以从其减少了土壤 N_2O 的排放得到验证(图 1)。其他学者认为氮磷配合施用能增加土壤微生物量氮含量^[18],提高磷酸酶活性^[19],降低作物体内 NO_3^- 含量^[20]达到减少 N_2O 排放的效果。但是并非在所有情况下氮磷混施都可以达到减少 N_2O 排放的目的,蔡延江等得出在中量有机肥的水平下,氮磷配施处理土壤的 N_2O 排放量较氮肥处理高^[17],黄树辉等研究得出在施氮量小于等于 $270\ kg\cdot hm^{-2}$ 时 N、P 配施可以减少 N_2O 排放,施氮量等于 $360\ kg\cdot hm^{-2}$ 时没差异^[16],说明氮磷混施还与土壤有机质和施氮量等因素有关。本研究中并未考虑这些因素,也未测定土壤磷酸酶活性,因此本研究只能得出在不考虑其他因素的情况下,氮磷混施在春玉米地上有助于减少 N_2O 排放。通过处理 NOP 与 NP 的比较,可以得出硝态氮肥在榆次春玉米地上对 N_2O 的贡献小于铵态氮肥,与 Eichner 等^[28]得出各类氮肥释放 N_2O 的顺序为:无水 $NH_3>NH_4^+>NO_3^-$ 的研究结果一致。

3.3 排放因子

本研究得出的排放因子在郑循华等^[29]总结的中国旱地农田排放因子 0.22%~1.53% 范围内,说明 IPCC 的缺省排放因子在中国北方的春玉米生态系统中不适用,其原因可能是该区域属于半干旱区域,加拿大环境网(Environment Canada)^[30]发现在干旱区适用的排放因子为 0.16%~0.8%,而湿润地区适用的排放因子为 1.18%,Barton 等通过对西澳半干旱区的研究发现排放因子为 0.1%^[31]。

3.4 土壤对 N_2O 的吸收

在数据处理中已经把小于系统误差的通量剔除,因此我们认为测量得到的 N_2O 负值是可信的。反硝化^[32]与硝化作用^[33-34]均被认为可以消耗 N_2O 。本研究得出的在土壤矿态氮小于 $7\ mg\ N\cdot kg^{-1}$ 时发生土壤吸收 N_2O 现象小于 Ma 等得出的土壤矿态氮小于 $20\ mg\ N\cdot kg^{-1}$ 时容易发生 N_2O 吸收的结论^[35]。说明在土壤含氮量较低的情况下易发生吸收^[36],主要原因是当土壤中氮含量较低的情况下,反硝化作用有可能利用空气或土壤中的 N_2O 作为反硝化作用的电子受

体^[37-38]。本研究中,在各处理发生 N_2O 吸收时土壤含水量多在 50%左右(图 2),因为土壤对 N_2O 吸收不只发生在高水分条件下的反硝化作用阶段,还有中等水分条件下的硝化作用反硝化^[33-34]。

4 结论

各处理下 N_2O 排放总量大小顺序为:U(1.19 kg $\text{N}\cdot\text{hm}^{-2}$)>NP(0.93 kg $\text{N}\cdot\text{hm}^{-2}$)>NOP(0.69 kg $\text{N}\cdot\text{hm}^{-2}$)>CK(0.21 kg $\text{N}\cdot\text{hm}^{-2}$);各处理下 N_2O 排放系数在 0.27%~0.55%之间,小于 IPCC 推荐的 1%;当土壤含氮量小于 7 mg $\text{N}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时易发生土壤吸收 N_2O 的情况; N_2O 通量在各处理下主要受肥料、灌溉、降雨和温度的影响,施肥期应尽量避免遭遇强降雨或施肥后立即灌溉。

本试验研究结果表明磷肥与硝态氮肥有助于减少 N_2O 排放,相对与其他处理,施用硝酸磷肥不仅没有减产,而且较处理 U 与 NP 分别减少投入 15%和 30%, N_2O 排放分别减少 42%和 26%,因此该处理达到了不减产前提下减排温室气体排放和减小投入的良好效果。

参考文献:

- [1] IPCC. Agriculture[R]/Climate Change 2007: Mitigation, Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge: Cambridge University Press, 2007: 499-532.
- [2] FAO (Food and Agriculture Organization). FAOSTAT database collections[EB/OL]/http://faostat.fao.org/site/422/Desktop_D default.aspx?PageID=422#ancor, 2010.
- [3] 国家发展和改革委员会. 中华人民共和国气候变化初始国家信息通报[M]. 北京: 中国计划出版社, 2004.
National Development and Reform Commission. The People's Republic of China initial national communications on climate change[M]. Beijing: China Planning Press, 2004.
- [4] 中华人民共和国国家统计局. 中国统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2009.
National Bureau of Statistics of China. China statistical yearbook[M]. Beijing: China Statistics Press, 2009.
- [5] 肖俊夫, 刘战东, 刘小飞, 等. 中国春玉米主产区灌溉问题分析与研究[J]. 节水灌溉, 2010, 4: 1-3.
XIAO Jun-fu, LIU Zhan-dong, LIU Xiao-fei, et al. Analysis and study on irrigation problem of spring maize in main area of China[J]. *Water Saving Irrigation*, 2010, 4: 1-3.
- [6] 高志岭, 陈新平, 张福锁, 等. 农田土壤 N_2O 排放的连续自动测定方法[J]. 植物营养与肥料学报, 2005, 64(1): 64-70.
GAO Zhi-ling, CHEN Xin-ping, ZHANG Fu-suo, et al. Continuous-automatic method for measuring N_2O emission from agricultural soil[J]. *Plant Nutrition and Fertilizing Science*, 2005, 64(1): 64-70.
- [7] 孙艳丽, 陆佩玲, 李俊, 等. 华北平原冬小麦/夏玉米轮作田土壤 N_2O 通量特征及影响因素[J]. 中国农业气象, 2008, 29(1): 1-5.
SUN Yan-li, LU Pei-ling, LI Jun, et al. Characteristics of soil N_2O flux in a winter wheat-summer maize rotation system in North China plain and analysis of influencing factors [J]. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2008, 29(1): 1-5.
- [8] 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 Yun-tong, WAN Yun-fan, LIN Er-da, 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.
- [9] 中国土壤学会. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000.
Soil Science Society of China. Analysis methods of soil and agricultural chemistry[M]. Beijing: China Agricultural Scientific Press, 2000.
- [10] 万运帆, 李玉娥, 林而达, 等. 静态箱法测定旱地农田温室气体时密闭时间的研究[J]. 中国农业气象, 2006, 27(2): 122-124.
WAN Yun-fan, LI Yu-e, LIN Er-da, et al. Studies on closing time in measuring greenhouse gas emission from dry cropland by static chamber method[J]. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2006, 27(2): 122-124.
- [11] 谢军飞, 李玉娥. 土壤温度对北京旱地农田 N_2O 排放的影响 [J]. 中国农业气象, 2005, 26(1): 7-10.
XIE Jun-fei, LI Yu-e. Effect of soil temperature on N_2O emission in upland farm of Beijing[J]. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2005, 26(1): 7-10.
- [12] 王智平, 曾江海, 张玉铭. 农田土壤 N_2O 排放的影响因素[J]. 农业环境保护, 1994, 13(1): 40-42.
WANG Zhi-ping, ZENG Jiang-hai, ZHANG Yu-ming. Influence factors on N_2O emission in farmland soil[J]. *Agro-Environmental Protection*, 1994, 13(1): 40-42.
- [13] 梁东丽, 同延安, Ove E T, 等. 干湿交替对旱地土壤 N_2O 气态损失的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2002, 20(2): 28-31, 48.
LIANG Dong-li, TONG Yan-an, Ove E T, et al. The effects of wetting and drying cycles on N_2O emission in dryland[J]. *Agricultural Research in The Arid Areas*, 2002, 20(2): 28-31, 48.
- [14] IPCC. Greenhouse gas emissions from agricultural soils[R]/Greenhouse gas inventory reference manual revised 1996, IPCC Guidelines for national greenhouse gas inventories, Bracknell: IPCC/OECD/IGES, UK, 1997.
- [15] IPCC. IPCC Guidelines for national greenhouse gas inventories[R]. Kanagawa: IGES, Japan, 2006.
- [16] 黄树辉, 蒋文伟, 吕军, 等. 氮肥和磷肥对稻田 N_2O 排放的影响[J]. 中国环境科学, 2005, 25(5): 540-543.
HUANG Shu-hui, JIANG Wen-wei, LV Jun, et al. Influence of nitrogen and phosphorus fertilizers on N_2O emissions in rice fields[J]. *China Environmental Science*, 2005, 25(5): 540-543.
- [17] 蔡延江, 王连峰, 温丽燕, 等. 培养实验研究长期不同施肥制度下中层黑土氧化亚氮的排放特征[J]. 农业环境科学学报, 2008, 27(2): 617-621.

- CAI Yan-jiang, WANG Lian-feng, WEN Li-yan, et al. Nitrous oxide emission from long-term fertilized black soil by laboratory incubation[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2008, 27(2): 617-621.
- [18] 王继红, 刘景双, 于君宝, 等. 氮磷肥对黑土玉米农田生态系统土壤微生物量碳、氮的影响[J]. 水土保持学报, 2004, 18(1): 35-38.
- WANG Ji-hong, LIU Jing-shuang, YU Jun-bao, et al. Effect of fertilizing N and P on soil microbial biomass carbon and nitrogen of black soil corn agroecosystem[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2004, 18(1): 35-38.
- [19] 李春越, 白红英, 党廷辉, 等. 农田土壤磷酸酶活性与土壤 N_2O 排放通量的相关性[J]. 中国环境科学, 2007, 27(2): 231-234.
- LI Chun-yue, BAI Hong-ying, DANG Ting-hui, et al. Relationship of field soil phosphatase activity and soil N_2O emission flux[J]. *China Environmental Science*, 2007, 27(2): 231-234.
- [20] 陈欣, 沈善敏, 张璐, 等. N、P 供给对作物排放 N_2O 的影响研究初报[J]. 应用生态学报, 1995, 6(1): 104-105.
- CHEN Xin, SHEN Shan-min, ZHANG Lu, et al. A preliminary research on the effect of nitrogen and phosphorus supply on N_2O emission by crops[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 1995, 6(1): 104-105.
- [21] 徐文彬, 洪业汤, 陈旭晖, 等. 贵州省旱田土壤 N_2O 释放及其环境影响因素[J]. 环境科学, 2000, 21(1): 7-11.
- XU Wen-bin, HONG Ye-tang, CHEN Xu-hui, et al. N_2O emission from upland soils in Guizhou and its environmental controlling factors[J]. *Environmental Science*, 2000, 21(1): 7-11.
- [22] 黄耀, 蒋静艳, 宗良纲, 等. 种植密度和降水对冬小麦田 N_2O 排放的影响[J]. 环境科学, 2001, 22(6): 20-23.
- HUANG Yao, JIANG Jing-yan, ZONG Liang-gang, et al. Influence of planting density and precipitation on N_2O emission from a winter wheat field[J]. *Environmental Science*, 2001, 22(6): 20-23.
- [23] Ruser R, Flessa H, Russow R. Emission of N_2O , N_2 and CO_2 from soil fertilized with nitrate: Effect of compaction, soil moisture and rewetting[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2006, 38(2): 263-274.
- [24] Mosier A, Guenzi W, Schweizer E. Soil losses of dinitrogen and nitrous oxide from irrigated crops in northeastern Colorado[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1986, 50: 344-348.
- [25] 郑循华, 王明星, 王跃思, 等. 华东稻麦轮作生态系统的 N_2O 排放研究[J]. 应用生态学报, 1997, 8(5): 495-496.
- ZHENG Xun-hua, WANG Ming-xing, WANG Yue-si, et al. N_2O emission from rice wheat ecosystem in Southeast China [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 1997, 8(5): 495-499.
- [26] 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 Xun-hua, WANG Ming-xing, WANG Yue-si, et al. The effective of temperature on N_2O production and emission from agricultural field[J]. *Environmental Science*, 1997, 18(5): 1-5.
- [27] Parkin T, Kaspar T. Nitrous oxide emissions from corn-soybean systems in the Midwest[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2006, 35: 1496-1506.
- [28] Eichner M J. Nitrous oxide emissions from fertilized soil: Summary of available data[J]. *Journal of Environmental Quality*, 1990, 19(4): 272-280.
- [29] ZHENG Xun-hua, HAN Sheng-hui, HUANG Yao, et al. Re-quantifying the emission factors based on field measurements and estimating the direct N_2O emission from Chinese croplands[J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2004 18: GB2018. doi: 10. 1029/2003GB002167.
- [30] Environment Canada. National inventory report, greenhouse gas sources and Sinks in Canada[R/OL]/http://www.ec.gc.ca, 2007.
- [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: 177-192.
- [32] Bremner J M. Sources of nitrous oxide in soils[J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 1997, 49: 7-16.
- [33] Poth M. Dinitrogen production from nitrite by a nitrosomonas isolate[J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 1986, 52: 957-959.
- [34] Schmidt I, van Spanning R J M, Jetten M S M. Denitrification and ammonia oxidation by nitrosomonas europaea wild-type, and nirK- and norB-deficient mutants[J]. *Microbiology*, 2004, 150: 4107-4114.
- [35] Ma B, Wu T, Tremblay N, et al. Nitrous oxide fluxes from corn fields: On-farm assessment of the amount and timing of nitrogen fertilizer[J]. *Global Change Biology*, 2010, 16: 156-170.
- [36] Chapuis-Lardy L, Wrage N, Metay A, et al. Soils, a sink for N_2O ? A review[J]. *Global Change Biology*, 2007, 13: 1-17.
- [37] Butterbach-Bahl K, Gasche R, Huber C, et al. Impact of N-input by wet deposition on N-trace gas fluxes and CH_4 -oxidation in spruce forest ecosystems of the temperate zone in Europe [J]. *Atmospheric Environment*, 1998, 32: 559-564.
- [38] Rosenkranz P, Brüggemann N, Papen H, et al. N_2O , NO and CH_4 exchange, and microbial N turnover over a Mediterranean pine forest soil [J]. *Biogeosciences Discussions*, 2005, 2: 673-702.