

冬小麦/大葱轮作体系 N_2O 排放特征及影响因素研究

张 静, 李 虎, 王立刚*, 邱建军

(中国农业科学院农业资源与农业区划研究所, 北京 100081)

摘 要:采用静态暗箱-气相色谱法研究了冬小麦/大葱轮作体系不同施肥处理下农田 N_2O 排放特征及排放系数, 分析了土壤湿度和土壤温度等环境因子对 N_2O 排放的影响。结果表明, 农田 N_2O 排放高峰值主要出现在每次施肥+灌溉或强降雨之后的一段时间, 大葱生长季排放峰值高且出现的频率比小麦生长季密集; N_2O 排放通量变化范围为 $-3.85 \sim 507.11 \mu\text{g N} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$, 平均值为 $251.63 \mu\text{g N} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$, 对于不同施肥处理, 其年度 N_2O 排放总量介于 $1.71 \text{ kg N} \cdot \text{hm}^{-2}$ 到 $4.60 \text{ kg N} \cdot \text{hm}^{-2}$ 之间。整个轮作体系不同处理 N_2O 排放系数介于 0.31% 到 0.48% 之间, 均值为 0.43%; 相对比农民习惯(FP)处理, 优化施肥(OPT)、优化减氮(OPT-N)以及秸秆还田(C/N)处理均能显著减少 N_2O 的排放, 秸秆还田处理和优化减氮处理 N_2O 排放总量比优化处理分别减少了 17% 和 10%。在 $10^\circ\text{C} < \text{土壤温度}(T_s) < 20^\circ\text{C}$ 时, N_2O 排放随温度的升高而增加; 整个小麦生长季 N_2O 排放随土壤湿度的增加而增加, 且达到 0.05 的显著水平; 大葱生长季在 $20^\circ\text{C} < T_s < 30^\circ\text{C}$ 时, 土壤水分含量成为主要限制因素, N_2O 排放与土壤孔隙含水量(WFPS)呈显著指数正相关关系。秸秆还田处理作物产量高于其他处理, 是具有减排增产“双赢”效果的农田管理措施。

关键词: N_2O 排放; 冬小麦/大葱轮作; 影响因素

中图分类号: X511 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-2043(2012)08-1639-08

Analysis of the Characteristics of Nitrous Oxide Emissions from a Winter Wheat–Green Onion Rotation System and the Influencing Factors

ZHANG Jing, LI Hu, WANG Li-gang*, QIU Jian-jun

(Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China)

Abstract: Quantifying greenhouse gas (GHG) emissions and searching for appropriate mitigation measures have become a relatively hot issue in international global climate change studies. Therefore, understanding the impacts of human activities on greenhouse gas emissions from productive soils is vital for mitigating negative effects on climate change. In this paper, N_2O emissions in winter wheat–green onion rotation system were observed using static opaque chamber/gas chromatography (GC) method. The effects of relative environmental factors such as soil moisture and temperature etc. on N_2O emissions were also discussed. The results indicated that the observed N_2O emissions peaks followed each time of fertilizer application and irrigation or heavy rainfall. The frequency of the peaks in green onion growing season was higher than that in winter wheat. The highest N_2O emission flux was observed in green onion growing season with $507.11 \mu\text{g N} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$. Annual cumulative N_2O emissions in the 5 treatments of Control (CK), farmer's practice (FP), optimized fertilization (OPT), optimized fertilization + reducing fertilizer (OPT-N), and straw returned (C/N) were 1.71, 4.6, 3.62, 3.24 $\text{kg N} \cdot \text{hm}^{-2}$ and 3.02 $\text{kg N} \cdot \text{hm}^{-2}$, respectively. The annual emission factor (EF) of N fertilizer ranged from 0.31% to 0.48%, with an average of 0.43%. The OPT-N and C/N treatments could reduce N_2O emissions by 10% and 17%, respectively, comparing with OPT treatment. But the C/N treatment was regarded as the best management practice because it not only had significantly effect on reducing N_2O emissions, but also maintaining crop yield. Multiple regression analysis revealed that soil temperature and soil moisture (WFPS) were also the factors affecting N_2O emissions besides nitrogen fertilizer. When soil temperature changed in the range of $10 \sim 20^\circ\text{C}$, N_2O emissions increased greatly with temperature rise, but soil temperature changed in the

收稿日期: 2012-02-17

基金项目: 公益性行业(农业)科研专项经费项目“农业源温室气体监测与控制技术研究”(201103039)

作者简介: 张 静(1986—), 女, 山东人, 硕士, 主要研究方向为全球变化与农业温室气体排放。E-mail: zhangjing3729@163.com

* 通讯作者: 王立刚 E-mail: wlga@caas.net.cn

range of 20~30 °C, soil moisture (WFPS) became a limiting factor and there was a significant positive correlation between N_2O emissions and soil moisture (WFPS). We expect these efforts will provide basic data for accurately predicting N_2O emissions at regional scales that are attracting more attention across China.

Keywords: nitrous oxide emissions; winter wheat-green onion rotation; influencing factors

随着全球温室效应的不断增强,气候变化成为 21 世纪人类面临的主要问题之一^[1]。 N_2O 是主要的温室气体之一,能破坏大气平流层中的臭氧层,对人类生存环境产生重要影响。农业是 N_2O 的一个重要排放源,我国作为世界上主要的农业大国,由农作物耕种和施肥而产生的 N_2O 排放问题正在引起人们的广泛关注^[2-6]。

目前,有关农业 N_2O 排放的研究很多,测定结果也存在较大差异^[7-9],并且这些研究主要针对大宗粮食作物(如水稻、小麦、玉米等),而有关蔬菜地 N_2O 排放研究则比较薄弱^[10]。郑循华等^[11]对 20 世纪 90 年代我国农田 N_2O 排放量进行了估算,其中菜地排放量占总排放量($275 \times 10^9 \text{ g N}_2\text{O-N} \cdot \text{a}^{-1}$)的 20%。截止到 2010 年,我国蔬菜总种植面积已达 19 000 千公顷,占农作物总播种面积的 11.8%^[12],氮肥施用量约占全国施氮总量的 17%,且呈现逐年增加的趋势^[13]。大田作物和蔬菜作物轮作是我国北方地区广泛种植类型,主要种植模式有冬小麦-白菜、冬小麦-大葱、冬小麦-甘蓝、春小麦-白菜等,这种种植类型由于蔬菜季过多的施肥和频繁灌溉引发的温室气体排放较多,也会对后季作物温室气体排放产生不同的影响,但目前有关该种植类型温室气体尤其是 N_2O 排放的研究鲜有报道。因此,本文以冬小麦/大葱轮作体系为例,通过对不同施肥处理下农田 N_2O 排放进行周年监测,明确其排放特征以及和温度、湿度等环境因子之间的关系,一方面为准确估算我国农业温室气体排放提供数据支持,另一方面为探讨该种植模式下农田温室气体减排技术提供依据。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

本试验点位于山东省中部的章丘市宁家埠镇,地处东经 117°27',北纬 36°49'。该地区属暖温带季风区的大陆性气候,四季分明、雨热同期,夏季雨量集中;年平均气温 12.8 °C,年平均降水量 600.8 mm,相对湿度 65%,无霜期 192 d,年均日照时数 2 647.6 h,地下水埋深 1.5~2 m。土壤质地以中壤和重壤为主,黏粒、粉粒和砂粒含量分别为 25%、54%和 21%,土壤容重

为 $1.38 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$,土壤基本理化性状如表 1 所示。该地区典型的种植模式为冬小麦/大葱轮作,冬小麦自每年 10 月上旬种植,至次年 6 月中下旬收获;大葱自 6 月底开始定植至 11 月底收获。从 10 月初到 11 月中旬,冬小麦与大葱大约有 45 d 的共生期。

表 1 供试土壤基本理化性状

Table 1 The soil basic agro-chemical properties for this study

深度/cm	有机质/ $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$	全氮/ $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$	速效磷/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	速效钾/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	pH
0~20	21.7	0.40	7.5	133.49	8.37
20~40	18.4	0.64	3.6	99.54	8.77
40~60	14.3	0.53	3.2	100.27	8.61
60~80	12.1	0.48	3.2	112.32	8.51

1.2 试验设计

本试验安排在已进行了 2 a (2008 年 6 月开始)的定位试验中进行,小区面积为 27 m^2 ($3 \text{ m} \times 9 \text{ m}$),本文为 2010 年 10 月至 2011 年 11 月的监测结果。试验设置 1 个空白对照和 4 个施肥处理:CK 处理不施氮肥,无秸秆还田;FP 处理为农民习惯施肥,氮肥施用量是 $600 \text{ kg N} \cdot \text{hm}^{-2}$;OPT 处理为优化施肥,氮肥施用量是 $430 \text{ kg N} \cdot \text{hm}^{-2}$;OPT-N 处理为优化减氮施肥,氮肥施用量是 $330 \text{ kg N} \cdot \text{hm}^{-2}$;C/N 处理是在 OPT 处理的基础上小麦秸秆还田 $2.25 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ (含氮量 $9 \text{ kg N} \cdot \text{hm}^{-2}$,不包含在总施氮量中)。其中 FP、OPT 与 OPT-N 处理的磷、钾肥用量和秸秆管理与 CK 处理相同。大葱生长季除 CK 处理外,其他 4 个处理各施有机肥 (含水量为 52%的湿鸡粪) $6 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ (含氮量 $57 \text{ kg N} \cdot \text{hm}^{-2}$)。每个处理设置 3 次重复,采用随机区组设计。氮肥为尿素和磷酸二铵 ($\text{N}46\%$ 和 $\text{P}_2\text{O}_5 18\%$),钾肥为氯化钾 ($\text{K}_2\text{O} 60\%$),这两种肥料分基肥和追肥施用,其中化肥氮素在各时期的施入量如表 2。

1.3 气体采集与分析

田间气体取样采用静态暗箱-气相色谱法测定温室气体排放通量。箱体由不锈钢材料制成,箱体尺寸为 $75 \text{ cm} \times 75 \text{ cm} \times 50 \text{ cm}$,这主要是根据大葱行间距为 75 cm 而设计的,以保证箱法取样测定气体通量具有代表性,尽量减小空间变异所带来的误差。播种后将不锈钢底座固定于土壤中,整个生长季节不再移动。

表 2 各时期氮肥施入量(kg N·hm⁻²)Table 2 The rates of nitrogen fertilizer for each time(kg N·hm⁻²)

处理	小麦		大葱				总量
	基肥	追肥	2011/6/24	2011/8/9	2011/8/29	2011/9/21	
CK	0	0	0	0	0	0	0
FP	60	120	59	29	121	211	600
OPT	50	100	23	23	37	197	430
OPT-N	40	80	23	23	37	127	330
C/N	50	100	23	23	37	197	430

采样时间一般在上午 9:00—11:00 进行,这一时段的排放通量与日平均通量相当并且操作性强。采样时将采样箱放在底座边缘四周的凹槽中,加水密封,扣箱后用 100 mL 塑料注射器于 0、8、16、24、32 min 抽取箱内气体,同步观测 15 cm 深度的体积含水量(TRIME-PICO 64)和 5 cm 深度的土壤温度。采集来的气样用改进的气相色谱仪(美国安捷伦公司研制的 7890A)测定 N₂O 浓度。采样频率为:平常取样为 1 周 1 次,施肥后连续取样 1 周,灌溉或降雨后连续取样 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。

气体通量计算公式为:

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

式中: F 为目标气体(N₂O)排放通量(mg N₂O·m⁻²·h⁻¹); ρ 为标准大气状态下的气体密度(g·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。

气体排放总量计算是将观测值和未观测日内插法计算值逐日累加得到,使用 SPSS16.0 统计软件进行不同处理间的差异显著性检验,N₂O 交换通量与影响因素之间的关系采用线性和非线性回归分析。

2 结果与分析

2.1 N₂O 周年排放特征

从冬小麦/大葱轮作体系整年监测结果来看,N₂O 排放呈现明显的季节动态变化规律,且排放高峰主要出现在每次施肥+灌溉、灌溉或者强降雨之后的一段时间(图 1)。

N₂O 排放通量变化范围为-385~507.11 μg N·m⁻²·h⁻¹,平均排放通量为 251.63 μg N·m⁻²·h⁻¹。在大葱生长季,由于施肥和灌溉频率较高,同时该生长时期温度高,出现了比较密集的 N₂O 排放高峰,最高排放通量出现在

9 月 26 日左右,其中以农民习惯施肥处理 N₂O 排放通量最高,达到 507.11 μg N·m⁻²·h⁻¹。相对于大葱生长季,冬小麦生长季 N₂O 排放波动较少,N₂O 排放通量峰值出现在秋季播种和春季追肥两个时期,且排放高峰值明显低于大葱生长季。Ding 等^[14]在华北平原小麦/玉米轮作田观测的数据显示,每次施肥引起的 N₂O 排放峰持续时间约为 1~2 周,在本研究中,大葱生长季每次施肥后的土壤耕翻和灌溉导致 N₂O 持续排放时间相对较长,约为 10~15 d。

2.2 N₂O 排放总量和排放系数

从 N₂O 排放总量来看,大葱生长季各个处理 N₂O 排放总量要显著高于冬小麦生长季($P<0.01$)。本试验各个处理中,冬小麦整个生长季不同处理 N₂O 排放量介于 0.64~1.23 kg N·hm⁻²之间,显著低于孙艳丽等^[15]在华北平原冬小麦/夏玉米轮作(施氮量为 600 kg N·hm⁻²)中观测到的 2.67 kg N·hm⁻²;大葱生长季不同处理 N₂O 排放总量介于 1.06~3.34 kg N·hm⁻²之间。

不同施肥处理中,N₂O 年排放总量最低值为 CK 处理 1.71 kg N·hm⁻²,显著低于其他 4 个处理($P<0.01$);最高值为农民习惯处理(FP),年排放达到 4.60 kg N·hm⁻²,显著高于其他 3 个处理($P<0.01$)(表 3)。优化减氮(OPT-N)处理是在优化(OPT)的基础上将化肥氮减少 23%,N₂O 排放总量减少了 10%,秸秆还田处理(C/N)N₂O 排放总量比优化处理减少了 17%,比农民习惯处理减少了 34%,但优化施肥、优化减氮和秸秆还田 3 个处理间 N₂O 排放总量并无显著性差异($P>0.05$)。

在本轮作体系下,随着施氮量的增加 N₂O 排放量也逐渐增加,两者之间呈现较好的线性相关关系(图 2)。IPCC(2006)将同期内由化肥氮施用引起的 N₂O-N 排放量占总施氮量的百分比定义为 N₂O 排放系数(Emission Factor, EF),并建议化肥氮的 N₂O-N 排放系数为 1.0%^[16]。本研究中冬小麦/大葱轮作 N₂O 排放系数介于 0.31%~0.48%之间(表 3),平均为 0.43%,与

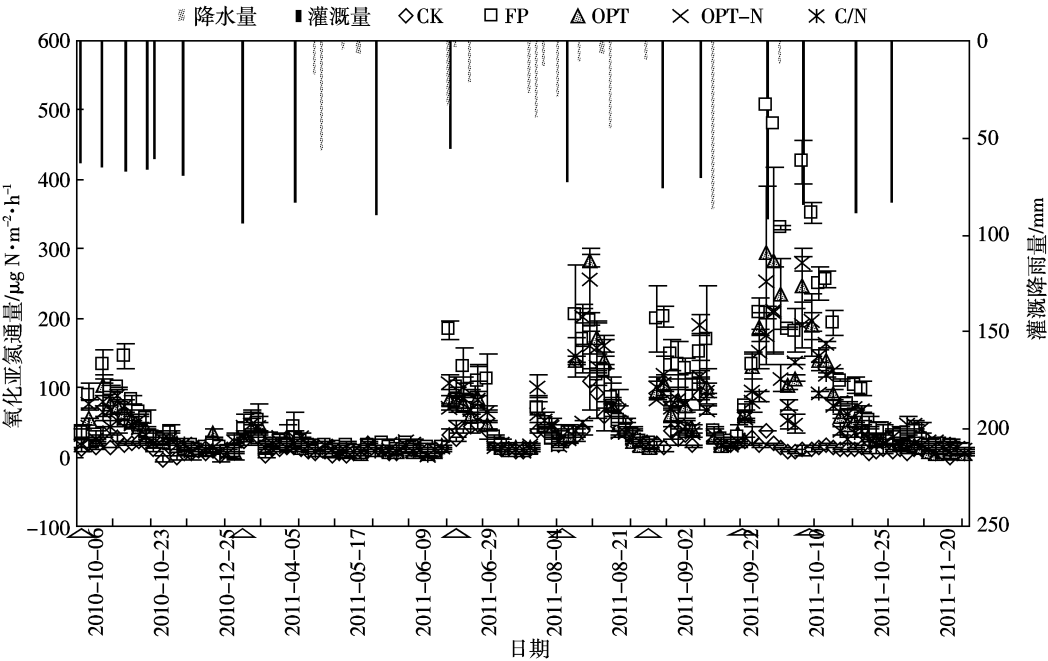


图 1 冬小麦/大葱轮作 N₂O 排放通量动态及降水/灌溉量(△表示施肥时间)
Figure 1 N₂O emissions from winter wheat–green onion rotation field and daily precipitation and irrigation
(△represents the application date of fertilizers)

表 3 不同施肥处理 N₂O 排放总量和排放系数
Table 3 Cumulative N₂O emissions and emission factors
for each treatment

处理	施氮量/ kg N·hm ⁻² ·a ⁻¹	N ₂ O/kg N·hm ⁻²		排放系数/%	
		均值	SE	均值	SE
CK	0	1.71c	0.16		
FP	600	4.60a	0.31	0.48	0.06
OPT	430	3.62b	0.14	0.45	0.06
OPT-N	330	3.24b	0.14	0.47	0.05
C/N	430	3.02b	0.19	0.31	0.03

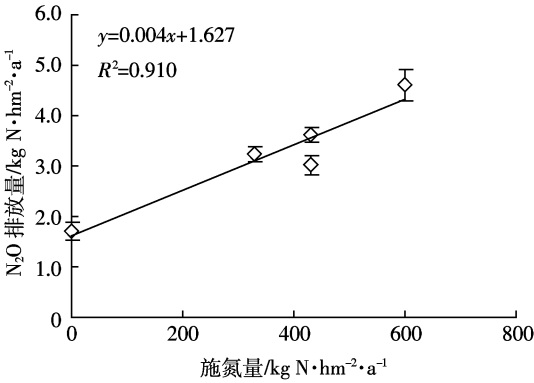


图 2 冬小麦/大葱轮作 N₂O 排放总量与施氮量的关系
Figure 2 Correlation between the total N₂O emissions and the rate
of nitrogen fertilizer

图 2 中由一元一次方程拟合得到的 0.4% 比较接近, 但显著低于 IPCC 默认的 1.0%。

2.3 N₂O 排放的影响因素

2.3.1 土壤温度的影响

分析冬小麦生长季和大葱生长季土壤温度对 N₂O 排放的影响,结果表明,从 10 月初小麦播种至越冬前(图 3, I),N₂O 排放与 5 cm 土温存在显著的指数正相关(表 4);大葱生长季从 9 月中旬(葱白形成初期)至收获(图 3, III),N₂O 排放与 5 cm 土温(10 ℃ < T_s < 20 ℃)存在显著的指数正相关(表 4)。

在 2010 年底到 2011 年 9 月这一时期的 N₂O 排放与土壤温度的关系不明显,分析其原因可能是由于随着温度的升高(图 3),温度不是限制 N₂O 产生排放的主要原因。另外,土壤微生物活性除受温度影响外同时还受其他因素(土壤湿度或氮素等)的影响,可能掩盖了温度的影响效应。

2.3.2 土壤湿度(WFPS)的影响

土壤湿度变化直接影响到土壤通气状况、土壤微生物活性和 N₂O 的产生、消耗及传输过程^[7]。试验观测期间,小麦生长季 0~15 cm 土壤 WFPS 变化范围为 44%~80%(图 3),平均土壤湿度为 68.3%,整个小麦生长季 N₂O 排放随土壤湿度的增加而增加,且达到 0.05 的显著水平。对整个大葱生长季 N₂O 通量与土壤含水

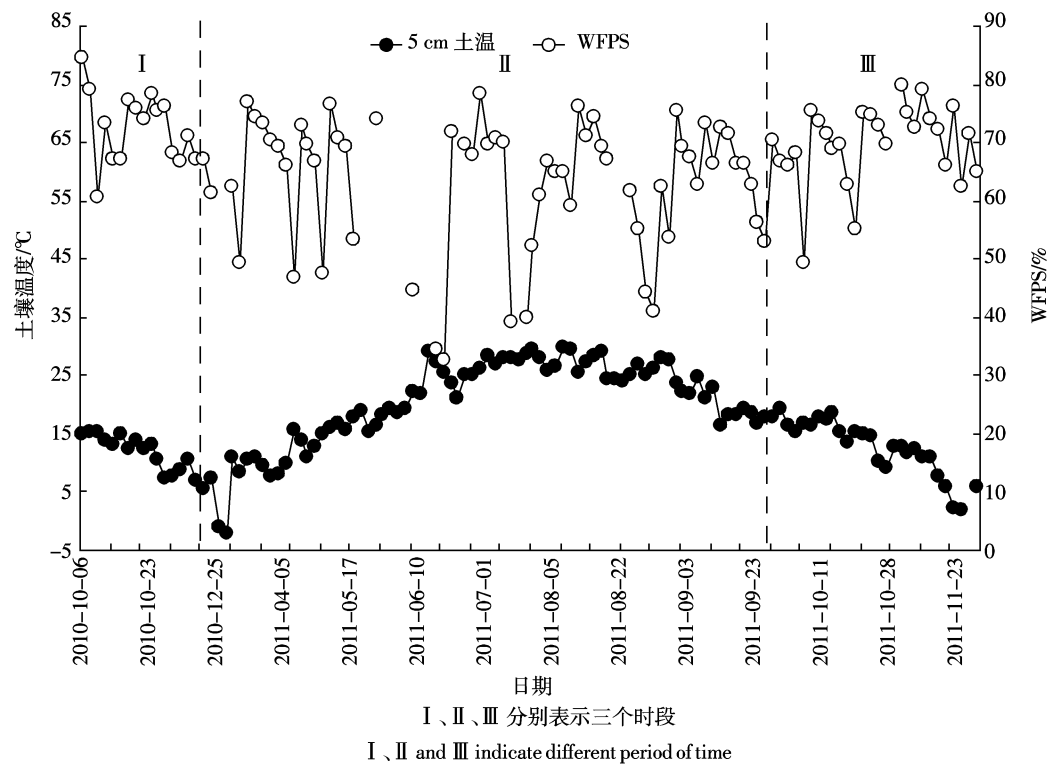


图 3 冬小麦/大葱轮作土壤温度和土壤湿度(WFPS)季节动态
Figure 3 Seasonal variation in soil temperature and soil moisture(WFPS) from experimental plots

表 4 不同处理 N₂O 排放通量(*F*)与土壤温度(*T_s*)回归关系
Table 4 Correlation between N₂O flux(*F*) and soil temperature(*T_s*)
in the different treatments

时段	处理	<i>n</i>	<i>P</i>	<i>R</i>	方程
I	CK	18	<0.01	0.61	$F=1.85e^{0.16T_s}$
	FP	18	<0.01	0.62	$F=4.68e^{0.19T_s}$
	OPT	18	<0.01	0.65	$F=4.88e^{0.16T_s}$
	OPT-N	18	<0.01	0.72	$F=4.38e^{0.16T_s}$
	C/N	18	<0.01	0.65	$F=4.95e^{0.16T_s}$
III	CK	31	<0.01	0.55	$F=3.06e^{0.17T_s}$
	FP	31	<0.01	0.53	$F=2.44e^{0.25T_s}$
	OPT	31	<0.01	0.57	$F=0.90e^{0.29T_s}$
	OPT-N	31	<0.01	0.54	$F=4.60e^{0.27T_s}$
	C/N	31	<0.01	0.51	$F=1.16e^{0.25T_s}$

注:*n* 为观测次数,*P* 为相关概率,*R* 为皮尔森相关系数,10 ℃<*T_s*<20 ℃。
Note:*n* is the number of observations,*P* is correlation probabilities,*R* is the Pearson coefficients,10 ℃<*T_s*<20 ℃.

量做回归分析发现,两者关系并不显著(*P*>0.05),但是从大葱移栽定植(6月下旬)至葱白形成初期(9月中旬),这段时间(20 ℃<*T_s*<30 ℃)的 N₂O 排放与土壤湿度之间达到显著的指数正相关关系(*P*<0.01)。

3 讨论

本研究结果基于不同施肥量处理下冬小麦/大葱轮作体系全年 N₂O 排放特征,观测数据显示除施肥后 10~15 d 内 N₂O 出现较明显的排放峰外,其他时期都处于较低的排放水平。农民习惯施肥处理 N₂O 排放总量为 4.60 kg N·hm⁻²,相比于冬小麦/夏玉米轮作模式,这一结果与孙艳丽等监测的 4.4 kg N·hm⁻² 则较为接近^[15]。与冬小麦生长季相比,虽然大葱的生育期短(约为 150 d),但是大葱生长期施肥量大,施肥频率高,且大葱生长季土壤温度、水分含量高(图 3),因此大葱生长季 N₂O 排放强度和排放量都比冬小麦生长季大。这与孙艳丽等和李俊等关于冬小麦/玉米轮作模式得出的麦季 N₂O 排放总量较玉米季大的结论有所差异^[15,18]。

氮肥施用是促进农田 N₂O 排放的最主要原因,N₂O 排放量与氮肥施用量呈现极显著相关关系^[19],氮肥的 N₂O 排放系数被广泛用于区域和全球农田 N₂O 排放清单的编制^[20]。从整个轮作周期来看,本研究中 N₂O 排放系数平均值为 0.43%,其中在冬小麦生长季的 N₂O 排放系数为 0.3%,在大葱生长季的 N₂O 排放系数为 0.4%,远低于目前国际上普遍认可的 1%~1.25%^[16,19]。

因此,若采用 IPCC 默认值将会显著高估该种植模式下由于氮肥施用引起的 N_2O 排放量。此外,与华北平原冬小麦/夏玉米轮作体系的研究结果相比^[14,21],本研究中冬小麦生长季的 N_2O 排放系数偏大,其原因可能是粮食作物和蔬菜轮作有关。

除氮肥的影响外,决定农田土壤 N_2O 排放的另外两个限制因子是环境温度和土壤含水量,目前有关这方面的研究报道也比较多^[5,14,22-23]。郑循华等研究发现在温度适宜的旱地阶段, N_2O 排放通量与降雨量和土壤湿度均呈显著正相关;在土壤湿度适宜的一定温度范围内, N_2O 排放通量对温度的依赖性可用指数函数 $F=A e^{\alpha}$ 来描述^[23-24]。本研究结果基本符合以上结论。大葱生长前期(6月底至9月中旬),这一时期的土壤温度介于 20~30℃之间,是微生物活性的最适宜范围,水分含量成为限制因子,因此 N_2O 排放通量与 WFPS 呈显著指数正相关;在 10℃ $<T_s$ <20 ℃的土壤温度范围内,土壤水分含量波动较小(图 3),因此温度成为主要的影响因子,随着土壤温度的升高,土壤 N_2O 排放通量也显著增加。

相比于农民习惯(FP)处理,优化施肥(OPT)和优化减氮(OPT-N)处理化肥氮施用量分别减少了 28% 和 45%(图 4),但是并未显著影响到作物产量(小麦

产量为籽粒,大葱为鲜重),3 种施肥措施下的作物产量无显著差异($P>0.05$),而农民习惯施肥 N_2O 排放总量显著高于优化施肥和优化减氮处理,因此在现行的农民习惯处理下,还是有一定减氮潜力的^[25-26]。

秸秆还田对农田土壤 N_2O 排放的影响与秸秆施用量、秸秆施用方式以及秸秆 C/N 比有关^[27-30]。Zhang 等^[31]在华北平原的研究结果是小麦秸秆还田使夏玉米生长季增加了 16.6% 的 N_2O 排放,但亦有研究表明高 C/N 比的小麦秸秆对土壤 N_2O 的直接促进作用很小甚至会降低 N_2O 的排放^[32]。在本研究中,相对于优化处理而言,小麦秸秆还田处理 N_2O 排放总量减少了 17%,而大葱产量(鲜重)增加了 13%,且秸秆还田处理小麦和大葱产量均显著高于其他 3 个处理($P<0.05$),表现为最优的农田管理措施。目前调查表明蔬菜地的施氮量要远高于农作物平均施氮水平^[33-34],而高 C/N 比的秸秆能够提高土壤微生物对氮素的利用,降低氮源对硝化和反硝化过程的有效性,从而减少 N_2O 的排放^[35]。因此,深入研究粮食作物和蔬菜轮作模式下秸秆还田影响温室气体排放的过程和机制,对有效减少 N_2O 排放以及提高氮肥利用率均具有重要意义。

在本研究中,大葱生长季土壤 N_2O 排放总量约为小麦季的 2 倍,该结论是把冬小麦和大葱这两种作物单独分开得到的。事实上大葱生长后期与冬小麦约有 45 d 的共生期,因此严格来讲冬小麦和大葱的种植模式属于套作。相对于整个生长季而言,葱麦共生期虽然时间较短,但 N_2O 排放总量却占到全年排放总量的 25%。套作模式在黄淮海平原比较常见,主要方式为小麦套玉米、小麦套棉花等,但是目前国内有关套作模式下温室气体排放的研究还很少。此外,由于温室气体排放具有较大的年际差异,以上结论还需要年度重复的试验数据来进一步验证。

4 结论

(1) 冬小麦/大葱轮作体系 N_2O 全年季节排放出现多峰动态变化规律,大葱生长季 N_2O 排放峰较为密集,一般持续时间为 10~15 d,最高排放峰为 507.11 $\mu\text{g N}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$;而小麦生长季 N_2O 排放波动较少,且排放峰值相对较低,只出现在播种施肥和追肥两个时期。

(2) 冬小麦/大葱轮作体系 N_2O 直接排放系数介于 0.31%~0.48%之间,平均值为 0.43%,远低于 IPCC 默认的 1.0%。从排放总量来看,不同施肥处理年度 N_2O 排放总量介于 3.02~4.6 $\text{kg N}\cdot\text{hm}^{-2}$ 之间,与农民

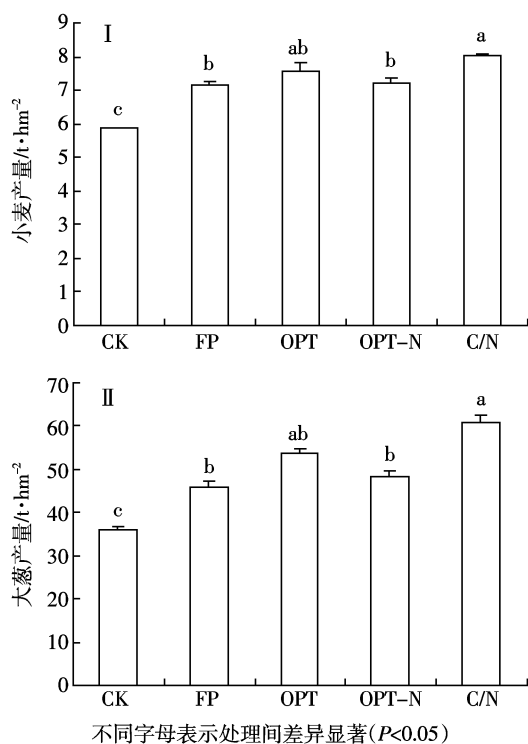


图 4 不同施肥处理小麦和大葱产量

Figure 4 Yield of wheat (I) and green onion yield (II) for each treatment

习惯相比,优化施肥、优化减氮以及秸秆还田处理均能显著降低农田 N_2O 排放,其中秸秆还田处理小麦和大葱产量均显著高于其他处理,表现为增产减排“双赢”的农田管理措施。

(3)土壤温度和土壤湿度均能显著影响农田土壤 N_2O 的排放,只是在作物生长的不同时期,影响 N_2O 排放的主要控制因子也不同。在本研究的轮作体系中,当 $10\text{ }^\circ\text{C} < T_s < 20\text{ }^\circ\text{C}$ 时,温度是主要的影响因素;当 $20\text{ }^\circ\text{C} < T_s < 30\text{ }^\circ\text{C}$ 时,土壤含水量则成为了主要的控制因子, N_2O 排放通量随湿度增加而呈指数增长。

参考文献:

- [1] Crowley T J. Causes of climate change over the past 1000 years[J]. *Science*, 2000, 289:270-277.
- [2] Mosier A R, Mohandas K, Bhadrachalam A, et al. Evolution of dinitrogen and nitrous oxide from the soil to the atmosphere through rice plants[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 1990, 9:61-67.
- [3] Lal R. Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security[J]. *Science*, 2004, 304:35-39.
- [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 and Environment*, 2009, 133:247-266.
- [5] 姚志生, 郑循华, 周再兴, 等. 太湖地区冬小麦田与蔬菜地 N_2O 排放对比观测研究[J]. 气候与环境研究, 2006, 11(6):691-701.
YAO Zhi-sheng, ZHENG Xun-hua, ZHOU Zai-xing, et al. Nitrous oxide emission from winter wheat and vegetable fields in the Taihu region: A comparison case study[J]. *Climatic and Environmental Research*, 2006, 11(6):691-701.
- [6] 王立刚, 李 虎, 邱建军. 黄淮海平原典型农田土壤 N_2O 的排放特征[J]. 中国农业科学, 2008, 41(4):1248-1254.
WANG Li-gang, LI Hu, QIU Jian-jun. Characterization of emissions of nitrous oxide from soils of typical crop field in Huang-Huai-Hai Plain[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2008, 41(4):1248-1254.
- [7] Meng L, Ding W X, Cai Z C. Long-term application of organic manure and nitrogen fertilizer on N_2O emissions, soil quality and crop production in a sandy loam soil [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2005, 37(11):2037-2045.
- [8] Li H, Qiu J J, Wang L G, et al. Modelling impacts of alternative farming management practices on greenhouse gas emissions from a winter-maize rotation system in China[J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2010, 135:24-33.
- [9] Ding W X, YU H Y, CAI Z C. Impact of urease and nitrification inhibitors on nitrous oxide emissions from fluvo-aquic soil in the North China Plain[J]. *Biol Fertil Soils*, 2011, 47:91-99.
- [10] 秦艳梅, 过燕琴, 高志亮, 等. 中国农田 N_2O 排放通量原位观测研究的汇总分析[J]. 农业环境科学学报, 2009, 28(12):2608-2613.
QIN Yan-mei, GUO Yan-qin, GAO Zhi-lang, et al. A summary of field on N_2O measurements in Chinese croplands during 1990-2008[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2009, 28(12):2608-2613.
- [11] Zheng X X, Han S H, Huang Y, et al. Requantifying the emission factors based on field measurements and estimating the direct N_2O emission from Chinese croplands[J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2004, 18:2018.
- [12] 中国统计局. 中国统计年鉴[M]. 北京:中国统计出版社, 2011.
China Statistical Bureau. China statistical yearbook[M]. Beijing:China Statistical Press, 2011.
- [13] FAO. FAOSTAT[M/OL]. <http://www.fao.org/crop/statistics/en/>, 2006.
- [14] Ding W X, Cai Y, Cai Z C, et al. Nitrous oxide emissions from an intensively cultivated maize-wheat rotation soil in the North China Plain[J]. *Science of the Total Environment*, 2007, 373:501-511.
- [15] 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 Agro-meteorology*, 2008, 29(1):1-5.
- [16] IPCC. IPCC guidelines for national gas inventories[R]//Eggleston HS, Buendia L, Miwa K, Ngara T, Tanabe K (eds) Prepared by the national greenhouse gas inventories programme. IGES, Japan, 2006.
- [17] 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 Ya-jun, ZHU Bo, JING Guang-jun. N_2O emission from soil-vegetable system and impact factors in Chengdu Plain of Sichuan Basin[J]. *China Environment Science*, 2008, 28(4):313-318.
- [18] 李 俊, 于沪宁, 于 强, 等. 农田 N_2O 通量测定方法分析[J]. 地学前缘, 2002, 9(4):377-385.
LI Jun, YU Hu-ning, YU Qiang, et al. Analysis on methods of flux measurement of nitrous oxide from a crop field[J]. *Earth Science Frontiers*, 2002, 9(4):377-385.
- [19] Bouwman A F. Direct emission of nitrous oxide from agricultural soils[J]. *Nutrient Cycling Agroecosystems*, 1996, 46(1):53-70.
- [20] IPCC. Revised 1996 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories; Reference Manual[R]. Paris, France, 1997:OECD. 1-140.
- [21] Zhang Y M, Chen D L, Zhang J B, et al. Ammonia volatilization and denitrification losses from an irrigated maize-wheat rotation field in the North China Plain[J]. *Pedosphere*, 2004, 14(4):533-540.
- [22] Laville P, Lehuger S, Loubet B, et al. Effect of management, climate and soil conditions on N_2O and NO emissions from an arable crop rotation using high temporal resolution measurements [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2011, 151(2):228-240.
- [23] 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. Impact of temperature on N_2O production and emission[J]. *Environmental Science*, 1997, 18(5):1-5.
- [24] 郑循华, 王明星, 王跃思, 等. 稻麦轮作生态系统中土壤湿度对 N_2O 产生与排放的影响[J]. 应用生态学报, 1996, 7(3):213-219.
ZHENG Xun-hua, WANG Ming-xing, WANG Yue-si, et al. Impact of soil humidity on N_2O production and emission from a rice-wheat rotation ecosystem[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 1996, 7(3):213-

- 219.
- [25] Ju X T, Xing G X, Chen X P, et al. Reducing environment risk by improving N management in intensive Chinese agricultural systems[J]. *Proceeding of the National Academy of Sciences*, 2009, 106(9):3041–3046.
- [26] Chen X P, Cui Z L, Vitousek P M, et al. Integrated soil–crop system management for food security[J]. *Proceeding of the National Academy of Sciences*, 2011, 108(16):6399–6404.
- [27] 邹建文, 黄 耀, 宗良纲, 等. 稻田灌溉和秸秆施用对后季麦田 N_2O 排放的影响[J]. 中国农业科学, 2003, 36(4):409–414.
- ZOU Jian-wen, HUANG Yao, ZONG Liang-gang, et al. Effects of water regime and straw application in paddy rice season on N_2O emission from following wheat growing season[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2003, 36(4):409–414.
- [28] 马二登, 马 静, 徐 华, 等. 稻秆还田方式对麦田 N_2O 排放的影响[J]. 土壤, 2007, 39(6):870–873.
- MA Er-deng, MA Jing, XU Hua, et al. Effects of rice straw returning methods on N_2O emissions from wheat–growing season[J]. *Soils*, 2007, 39(6):870–873.
- [29] 贺 京, 李涵茂, 方 丽, 等. 秸秆还田对中国农田土壤温室气体排放的影响[J]. 中国农学通报, 2011, 27(20):246–250.
- HE Jing, LI Han-mao, FANG Li, et al. Influence of straw application on agricultural greenhouse gas emissions in China[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2011, 27(20):246–250.
- [30] Huang Y, Zou J W, Zheng X H, et al. Nitrous oxide emissions as influenced by amendment of plant residues with different C:N ratios[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2004, 36:973–981.
- [31] ZHANG Y Y, LIU J F, MU Y J, et al. Emissions of nitrous oxide, nitrogen oxide and ammonia from a maize field in the North China Plain[J]. *Atmospheric Environment*, 2011, 45:2956–2961.
- [32] Toma Y, Hatano R. Effect of crop residue C:N ratio on N_2O emissions from gray lowland soil in Mikasa, Hokkaido, Japan[J]. *Soil Science and Plant Nutrition*, 2007, 53(2):198–205.
- [33] Zhu Z L, Chen D L. Nitrogen fertilizer use in China: Contributions to food production, impacts on the environment and best management strategies[J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2002, 63:117–127.
- [34] Ju X T, Liu X J, Zhang F S, et al. Nitrogen fertilization, soil nitrate accumulation, and policy recommendations in several agricultural regions of China[J]. *Ambio: A Journal of the Human Environment*, 2004, 33(6):300–305.
- [35] Farquharson R, Baldock J. Concepts in modeling N_2O emissions from land use[J]. *Plant and Soil*, 2008, 309(1–2):147–167.