

玉米秸秆还田和施氮方式对麦田 N₂O 排放的影响

徐 钰¹, 江丽华¹, 孙 哲², 石 璟¹, 魏建林¹, 王 梅¹, 李国生¹, 刘兆辉^{1*}

(1.山东省农业科学院农业资源与环境研究所,农业部黄淮海平原农业环境重点实验室,山东省农业面源污染防治重点实验室,山东 济南 250100; 2.泰安市农业科学研究院,山东 泰安 271000)

摘 要:通过田间试验,采用静态暗箱-气相色谱法研究了秸秆不还田(SN)、秸秆还田(SR)、施用缓控释氮肥(SRC)和氮肥条施(SRR)4种处理对小麦季 N₂O 排放的影响。结果表明,麦季农田土壤是 N₂O 的排放源,施肥+灌溉会引起 N₂O 的排放高峰,一般会持续 1~2 周,N₂O 排放量占总排放量的 40%以上。麦季 3 个生育期中,越冬前 N₂O 的排放量最高,占整个生育期的 50%,其次是越冬后,而越冬期排放量最低,约占 20%。秸秆还田促进了土壤 N₂O 的排放,SR 比 SN 处理增加 48.6%的排放量。施用新型肥料或采用氮肥条施可以降低 N₂O 的排放,并提高小麦产量及经济效益,尤其是后者效果最佳,能够起到增产减排的作用。

关键词:玉米秸秆还田;施氮方式;N₂O 排放;环境因素;小麦产量

中图分类号:S181

文献标志码:A

文章编号:2095-6819(2015)06-0552-07

doi: 10.13254/j.jare.2015.0088

Effects of Corn Straw Returning and Nitrogen Fertilizer Application Methods on N₂O Emission from Wheat Growing Season

XU Yu¹, JIANG Li-hua¹, SUN Zhe², SHI Jing¹, WEI Jian-lin¹, WANG Mei¹, LI Guo-sheng¹, LIU Zhao-hui^{1*}

(1.Institute of Resource and Environment, Shandong Academy of Agricultural Sciences, Key Laboratory of Agro-Environment of Huang-Huai-Hai Plain, Ministry of Agriculture, Shandong Provincial Key Laboratory of Agricultural Non-Point Source Pollution Control and Prevention, Jinan 250100, China; 2.Taian Academy of Agricultural Sciences, Taian 271000, China)

Abstract: Based on a wheat field experiment, the effect of four treatments such as no-straw returning (SN), straw returning (SR), control release fertilizer application (SRC) and nitrogen drilling (SRR) on N₂O emission was studied using the static chamber method and the gas chromatographic technique. The results indicated that the wheat field was the sources of N₂O emission. The N₂O emission peaks followed each time of fertilizer application and irrigation, and usually continued for 1~2 weeks. N₂O emissions accounted for more than 40% of total emissions during the N₂O emission peak. The amount of N₂O emission during three growing stage of wheat from high to low was arranged in turn pre-wintering period, post-wintering period and wintering period. N₂O emission could be increased by straw returning. Compared with SN, N₂O emission could be enhanced by 48.6% under SR. Both SRC and SRR could decrease the N₂O emission, increase wheat yield and economic benefit, especially the latter. Nitrogen drilling is a good method for yield increment and N₂O abatement.

Keywords: corn straw returning; nitrogen fertilizer application method; N₂O emission; environmental factors; wheat yield

温室气体引起的全球气候变暖和平流层臭氧耗损是全球性的环境问题。氧化亚氮(N₂O)被认为是除二氧化碳(CO₂)和甲烷(CH₄)外,最重要的温室气体

之一,对温室效应的贡献为 5%,且其大气浓度仍以年均 0.3%的速率增长^[1]。在已知的 N₂O 全球排放源中,农业排放占 84%,其中农田土壤 N₂O 的排放约占人为排放源的 45%^[2]。

除了土壤特性和气候因素外,施肥、灌溉、耕作等农业活动是影响农田 N₂O 排放的重要因素。秸秆还田能够培肥地力,增产增效^[3-4],同时也在一定程度上改变了土壤中的 C、N 循环,影响土壤微生物活性,从而对 N₂O 的产生和排放带来影响。我国在这方面已有大量研究,但多集于秸秆还田^[5-8],加之我国玉米秸秆还田率(约 60%)不高,因此玉米秸秆对麦田 N₂O 排放

收稿日期:2014-05-29

基金项目:农业公益性行业科研专项经费项目(201103039);山东省科技发展计划项目(2013GNC11204);中国清洁发展机制基金赠款项目(1214012);山东省自然科学基金(ZR2013DQ023);山东省自主创新专项项目(2012CX90202);山东省科技发展计划项目(2014GNC112003)

作者简介:徐 钰(1981—),女,山东济南人,博士,主要从事施肥技术与农业环境研究。E-mail: yuxu0221@163.com

*通信作者:刘兆辉 E-mail: liuzhaohui@saas.ac.cn

影响的研究较少。再者,由于秸秆施用量、施用方式及秸秆 C/N 比不同,秸秆还田对土壤 N₂O 排放的影响有不同的结论^[9-10]。秸秆还田是我国大力推广应用的一项保护性耕作措施,为更准确评估秸秆还田对 N₂O 排放的贡献,仍需要大量野外观测研究。气候变暖也使温室气体减排技术的研究备受关注,其中缓控释氮肥因其肥料利用率高、节省劳动力和环境友好等优点,是国家重点推广的肥料之一,具有广阔的应用前景;氮肥条施是我国一直倡导的提高肥料利用率的施肥方式。相关研究表明,2种施肥方式均能有效降低农田 N₂O 的排放^[11-12],但哪种施肥在玉米秸秆还田条件下更具减排优势,对小麦产量影响如何,国内还少见报道。

为此,本研究选取小麦农田为研究对象,一方面研究现有化肥施用及秸秆还田管理措施下对 N₂O 排放的影响,为麦田 N₂O 排放规律的研究提供科学依据;另一方面研究秸秆还田条件下不同施氮方式对 N₂O 排放的影响,为农田 N₂O 减排技术的制定提供参考。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验在泰安市泰山区邱家店镇综合试验农场进行(36°09'N,117°15'E),试验点地势平坦,处于暖温带半湿润大陆性季风气候区,多年平均气温 13.2℃,多年平均降水量 803.7 mm,年平均日照时数 2 655 h,无霜期 187 d。该地区农田常年实行冬小麦-夏玉米轮作。土壤为棕壤,质地为轻壤土,0~20 cm 表土有机质为 14.0 g·kg⁻¹,速效磷 22.8 mg·kg⁻¹,速效钾 78.0 mg·kg⁻¹,硝态氮 19.4 mg·kg⁻¹,铵态氮 3.3 mg·kg⁻¹,pH 值 7.8。

1.2 试验设计

作物为冬小麦,试验设 4 个处理,分别为(1)秸秆不还田(SN):前茬玉米收获后将秸秆及根茬运到试验区外,将 1/2 氮肥与全部磷钾肥掺混后撒施旋耕,1/2 氮肥在小麦返青-拔节期撒施,氮肥为尿素;(2)秸秆还田(SR):前茬玉米收获后秸秆及根茬粉碎还田,将 1/2 氮肥与全部磷钾肥掺混后撒施旋耕,1/2 氮肥在小麦拔节-返青期撒施,氮肥为尿素;(3)缓控释氮肥(SRC):秸秆处理同处理(2),全部氮肥与磷钾肥掺混后一次性撒施旋耕,氮肥为缓控释氮肥;(4)氮肥条施(SRR):秸秆处理同处理(2),全部磷钾肥撒施旋耕后,每畦开出 3 条深 10~15 cm 施肥沟,将 1/2 氮肥施入后覆土,小麦返青-拔节期用同样方法施入 1/2 氮肥,氮肥为尿素。

各处理施肥量相等,N、P₂O₅、K₂O 分别为 210、105 kg·hm⁻² 和 75 kg·hm⁻²,磷肥为过磷酸钙(P₂O₅=12%),钾肥为氯化钾(K₂O=60%),缓控释氮肥为树脂包膜,氮素释放曲线为陡峭的“S”型曲线,由山东省农业科学院农业资源与环境研究所提供。玉米秸秆还田量为 9 000 kg·hm⁻²,含 C 量 40%,含 N 量为 0.65%。

试验采取 3 次重复,小区面积为 60 m²,试验地四周设置 3 m 宽保护行。畦宽 1.5 m,每畦等距播种 6 行小麦,小麦品种为济麦 22,于 2012 年 10 月 12 日播种,2013 年 6 月 14 日收获,分别在小麦播种、返青和扬花时灌溉,每次灌溉量为 750 m³·hm⁻²。

1.3 测定项目与方法

1.3.1 温室气体采集与测定

温室气体排放通量采用静态暗箱-气相色谱法观测。本试验中箱体尺寸规格定为 50 cm×50 cm×50 cm,由不锈钢材料制成,四面和顶部封闭,外覆绝热材料(泡沫聚苯乙烯),底部开口以罩在底座上,底座用不锈钢材料制成,周围有水槽,插入地下 20 cm,测量时凹槽内用水密封,使箱内空气不与外界空气交换。箱体采气管线一端通过箱体侧面取气接头深入箱内 10 cm 左右,另一端用三通阀密封,采样时与采样注射器相连。为了避免采样操作过程中局部踩实土壤而导致气体横向流动受到干扰,同时也避免采样操作过程对箱内及其周围植物的机械性破坏,在采样点周围搭设了木桥。

底座于播种期埋在小区中,整个生长季不再移动,每底座内有 2 行小麦,中后期小麦高于 50 cm 后,采样时增加 1 个中段箱(50 cm×50 cm×50 cm),使采样箱高于小麦。采样时间一般在早上 9:00—11:00 进行,平常取样为 3~7 d 1 次,施肥后连续取样 1 周,灌溉或降雨后连续取样 2 d,冬季为两周 1 次。采样时将采样箱扣在底座凹槽内并加水密封,扣箱后用 100 mL 塑料注射器于 0、8、16、24、32 min 时抽取箱内气体,并准确记录采样时的具体时间和箱内温度。

采集的 N₂O 气样用改进的 Agilent 7890A 气相色谱仪测定。

(1)N₂O 排放通量采用线性回归法进行计算^[13],公式为:

$$F=(M/V_0) \times H \times (dc/dt) \times (273/(273+T)) \times (P/P_0) \times k$$

式中, F 为目标气体的排放通量(mg N₂O·m⁻²·h⁻¹); M 为气体的摩尔质量(g·mol⁻¹); V_0 为标准状态下(温度 273 K,气压 1 013 hPa)气体的摩尔体积(22.41×10⁻³ m³); 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(Pa)和温度(°C); P_0 为标准大气压(Pa); k 为量纲转换系数。 F 为负值时表示土壤从大气吸收该气体,为正值时表示土壤向大气排放该气体。

(2) N_2O 交换总量利用内插法计算相邻两次监测之间未监测日期的排放通量,然后将每日的交换通量累加即可。

1.3.2 土壤水分、温度测定

每次采集气体的同时,测定土壤 0~6 cm 土壤体含水量(TZS-1)和 3 cm 深度的土壤温度(JM624)。土壤孔隙含水量(WFPS)根据土壤容重和土壤比重($2.65 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$)计算。

1.3.3 产量测定

各区选择长势均匀的 5.25 m^2 样方麦穗,脱粒、晒干、去杂、称重,计算产量。

1.4 数据处理

所得数据使用 Microsoft Excel 2007 进行处理和作图,采用 SAS 软件进行处理间显著性差异分析。

2 结果与讨论

2.1 不同处理下麦田 N_2O 的排放特征

小麦生长季内有明显的 N_2O 排放,排放通量在 $3.0\sim 450.4 \mu\text{g N}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ 之间(图 1)。各处理下 N_2O 的排放通量动态变化趋势一致,只在秋季基肥和春季追肥两个时期出现较强 N_2O 排放,其他时间 N_2O 排放波动较少,一般在 $10 \mu\text{g N}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ 左右。施肥为土壤微生物提供充足的底物,促进硝化和反硝化过程中 N_2O 的生成与排放;而灌溉则为反硝化微生物营造了厌氧环境,提高了反硝化过程中 N_2O 的生成与排放^[14-15]。秋季基肥的 N_2O 排放峰值最高,平均高达 $389.1 \mu\text{g N}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ 。

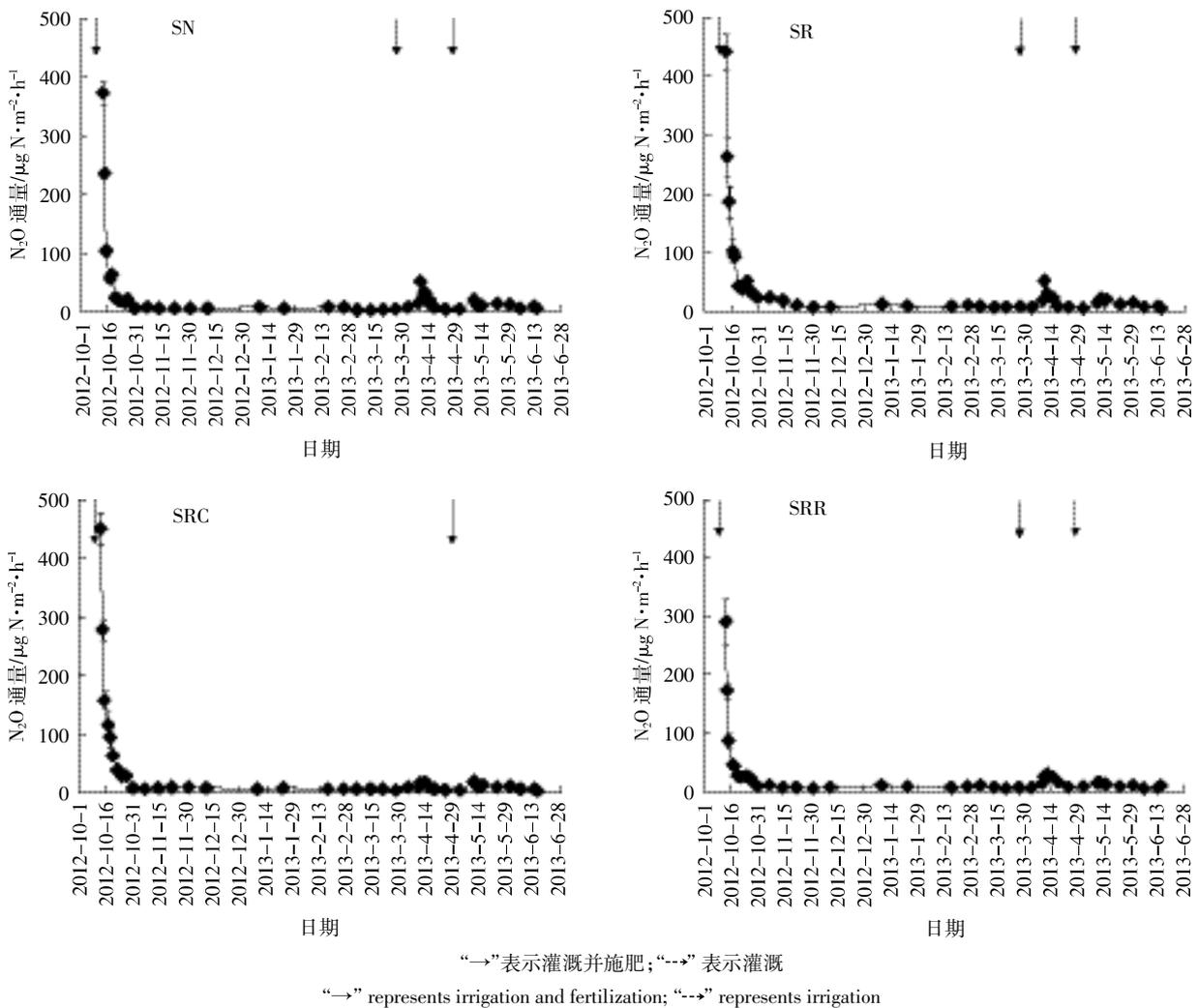


图 1 不同处理下土壤 N_2O 排放特征

Figure 1 N_2O emission features under different treatments

m²·h⁻¹,持续时间为 2 周;而春季追肥后的 N₂O 排放峰值较低,平均为 37.2 μg N·m⁻²·h⁻¹,持续时间约为 1 周。这主要与秋季基肥施入时,一方面进行了土壤翻耕,土壤透气性增加,促进 N₂O 排放^[16];另一方面,播种后 2 周内,小麦主要靠籽粒营养供应,对 N 的吸收利用较低,导致前期 N 的大量损失,引起 N₂O 排放峰值较高^[17]。统计表明,两次排放峰值持续的时间约占整季的 8.6%,但 N 排放量却占总排放量的 40%以上,说明施肥和灌溉是影响 N₂O 排放的重要因素。

各处理在排放通量上有明显差异,尤其是两次排放峰值。秋季播种时,秸秆还田的 SR 和 SRC 处理下 N₂O 平均排放峰值较不还田 SN 处理增加近 37.9%,达显著性差异。这可能与秸秆在高温和肥水环境下,加速分解,为土壤微生物提供了充足的碳源和氮源,促进 N₂O 的排放有关^[18];而 SRR 与 SN 处理下的 N₂O 平均排放峰值相当,氮肥深施,减少了表层土壤的氮肥浓度,从而降低了 N₂O 排放。返青追肥时,4 个处理下 N₂O 的平均排放峰值顺序为:SR>SN>SRR>SRC, SRC 较 SN 平均排放峰值降低近 50%,这可能与 SRC 处理缓控释氮肥一次性基施,养分缓慢释放与作物需求相匹配,肥料利用率提高,所以 N₂O 排放减少有关。

2.2 环境因子对 N₂O 排放的影响

从整个生育期来看,N₂O 排放通量与土壤温度和土壤孔隙含水量呈正相关关系(表 1),并与后者达 0.01 显著水平,说明两者是影响 N₂O 排放的主要环境因素,土壤孔隙含水量对 N₂O 排放通量的影响更为明显,这与邹建文等^[10]的研究结果相似。但不同生育期

影响 N₂O 排放通量的环境因素略有差异。小麦越冬前,各处理下 N₂O 排放通量与气温、土壤温度和土壤孔隙含水量呈正相关关系,均为影响小麦越冬前 N₂O 排放的主要环境因子,尤其是土壤温度和土壤孔隙含水量。这主要与越冬前,各处理的温度和土壤湿度都在硝化反硝化作用微生物活动的最适宜范围有关^[19-20]。小麦越冬期,各处理下 3 个环境因子与 N₂O 排放通量均无相关关系,这主要与越冬期气温低,硝化反硝化作用受抑制,N₂O 排放通量很小且稳定,不受外界环境变化的影响。小麦越冬后,仅有土壤孔隙含水量是影响 N₂O 排放的环境因素,这主要受越冬后降水和灌溉,土壤干湿交替,促进 N₂O 排放,而掩盖了温度对 N₂O 排放通量的影响^[19]。

2.3 不同处理下麦田 N₂O 的排放量

从表 2 可以看出,3 个生育期中,各处理均以越冬前 N₂O 排放量最高,虽然这一时期仅占小麦生育期的 20%,但 N₂O 排放量却占 40.6%~55.4%。由于越冬期平均土温低于 5℃,抑制了硝化反硝化微生物活

表 2 不同处理下 N₂O 排放总量(kg N·hm⁻²)

Table 2 N₂O emission quantities under different treatments (kg N·hm⁻²)

处理	越冬前	越冬期	越冬后	排放总量
SN	0.32±0.01c	0.16±0.01a	0.24±0.02ab	0.72±0.04bc
SR	0.54±0.03a	0.23±0.03a	0.30±0.03a	1.07±0.02a
SRC	0.46±0.01b	0.16±0.04a	0.21±0.00b	0.83±0.04b
SRR	0.28±0.02c	0.17±0.01a	0.23±0.02ab	0.69±0.01c

注:同列不同字母表示各处理间差异显著(P<0.05),下同。

表 1 不同处理下 N₂O 排放通量与环境因子相关性分析

Table 1 Correlations of N₂O emissions with environmental factors under different treatments

生育期	环境因子	SN	SR	SRC	SRR
越冬前	气温/℃	0.433**	0.454**	0.487**	0.462**
	土壤温度/℃	0.505**	0.565**	0.585**	0.562**
	土壤孔隙含水量/%	0.516**	0.328*	0.576**	0.607**
越冬期	气温/℃	0.078	0.057	-0.112	-0.010
	土壤温度/℃	0.127	-0.004	0.004	-0.105
	土壤孔隙含水量/%	0.190	-0.027	-0.023	-0.055
越冬后	气温/℃	0.137	0.099	0.174	0.034
	土壤温度/℃	-0.240	-0.223	-0.110	-0.216
	土壤孔隙含水量/%	0.518**	0.530**	0.460**	0.488**
整个生育期	气温/℃	0.103	0.085	0.079	0.103
	土壤温度/℃	0.197*	0.193*	0.201*	0.197*
	土壤孔隙含水量/%	0.435**	0.434**	0.471**	0.437**

注:“**”表示 0.01 水平上显著相关,“*”表示 0.05 水平上显著相关。

性, N₂O 排放量最少, 仅占总排放量的 19.3%~24.6%。不同处理对麦田 N₂O 的总排放量有影响, 与 SN 相比, 秸秆还田的 SR 和 SRC 处理下 N₂O 的排放量分别增加 48.6% 和 15.3%, 尤其是前者, 差异达到显著性, 表明秸秆还田对 N₂O 的排放具有促进作用, 与裴淑玮等^[21]的研究结果一致。这可能与秸秆还田能够改变土壤性质, 刺激微生物活性, 促进微生物反硝化作用, 从而促进了 N₂O 的排放^[22-23]。而且这种促进作用在越冬前最明显, SR 较 SN 处理下 N₂O 排放量增加 40.7%, 达显著性差异, 而在其他 2 个时期差异不显著。这可能与越冬前气温较高, 一方面还田秸秆在充足的水肥条件下快速腐解, 提高土壤含 N 量, 促进 N₂O 排放^[24-25]; 另一方面秸秆还田会显著提高土壤活性有机碳含量及酶活性, 利于土壤中硝化反硝化作用, 从而增加 N₂O 的排放^[26]。改变施肥方式, 可以降低 N₂O 排放, SRC 和 SRR 分别较 SR 减排 22.4% 和 35.5%, 达显著性差异。

2.4 不同处理对小麦产量及经济效益的影响

从表 3 可以看出, 4 种处理下小麦产量介于 7 321.0~7 988.3 kg·hm⁻²。与 SN 相比, 秸秆还田的 SR 措施下小麦增产 2.9%, 但未达显著性差异。造成这种情况的原因可能与化肥的施用方式有关, 尽管秸秆还田能够促进土壤养分周转, 改善土壤生态环境, 有利于作物生长, 但化肥撒施却增加了 N 素的损失, 肥料利用率降低, 从而使增产效果不明显^[27]。在秸秆还田基础上, 施用新型肥料或改变施肥方式能够显著增加小麦产量, SRC 和 SRR 分别较 SN 小麦增产 7.8% 和 9.1%, 均达显著性差异。这与两种措施的应用, 一定程度上减少了 N 素损失, 并提高了肥料利用率^[12, 28], 从而促进小麦生长发育有关。

从经济效益来看, 4 种处理的相对净收入顺序为: SRR>SRC>SR>SN。SN 较其他处理每公顷约减少 1 300~2 500 元, 主要因其产量最少, 从而产值小; 另一方面由于需要人工清除秸秆, 劳动力投入成本大大

增加。秸秆还田条件下, 氮肥条施可以获得最高收益, 与 SR 相比, SRR 处理下相对净收入显著增加 6.8%。尽管控释氮肥的价格较高, 但一次性施用, 降低了 SRC 处理的劳动力投入成本, 相对净收入仅次于 SRR 处理。

3 结论

(1) 小麦季农田土壤 N₂O 表现为明显的季节性净排放, 整个生育期 N₂O 有 2 次排放峰, 均由施肥+灌溉引起, 且秋季基肥引起的排放峰高于拔节期的追肥。2 次排放峰值持续时间约占整季的 8.6%, N₂O 排放量却占总排放量的 40% 以上。不同生育期的环境影响因素有一定差别, 越冬前受气温、土壤温度和土壤孔隙含水量的影响, 越冬期则不受外界环境影响, 越冬后主要受土壤孔隙含水量的影响, 其次是土壤温度。

(2) 小麦季 3 个生育期的 N₂O 排放顺序为: 越冬前>越冬后>越冬期, 前者 N₂O 的排放量约占整个生育期的 50%。秸秆还田显著增加土壤 N₂O 的排放, 与 SN 相比, SR 处理下增加 48.6%。施用缓控释氮肥 (SRC) 或采用氮肥条施 (SRR) 能够降低 N₂O 排放, 并提高小麦产量及经济效益, 尤其是后者的效果最佳, 可较 SN 措施减排 4.2%, 增产 9.1%, 增效 15.6%。

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] Mosier A R, Kroeze C. Contribution of agroecosystems to the global atmospheric N₂O budget. Proceedings of international workshop on reducing N₂O emission from agroecosystems[C]. Banff, Canada: 1999.
 [3] 劳秀荣, 吴子一, 高燕春. 长期秸秆还田改土培肥效应的研究[J]. 农业工程学报, 2003, 18(2): 49-52.
 LAO Xiu-rong, WU Zi-yi, GAO Yan-chun. Effect of long-term returning straw to soil on soil fertility[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2003, 18(2): 49-52. (in Chinese)
 [4] 江永红, 宇振荣, 马永良. 秸秆还田对农田生态系统及作物生长的影

表 3 不同处理对小麦产量及经济效益的影响

Table 3 Effect of different treatments on wheat yield and economic benefit

处理	产量/kg·hm ⁻²	产值/元·hm ⁻²	氮肥成本/元·hm ⁻²	劳动力投入/元·hm ⁻²	相对净收入/元·hm ⁻²
SN	7 321.0e	18 302.5c	867.4	1 950	15 485.1c
SR	7 533.7bc	18 834.3bc	867.4	1 200	16 766.9b
SRC	7 891.8ab	19 729.6ab	1 288.6	750	17 690.9ab
SRR	7 988.3a	19 970.8a	867.4	1 200	17 903.4a

注: 小麦 2.5 元·kg⁻¹, 普通尿素 1.9 元·kg⁻¹, 控释尿素 2.7 元·kg⁻¹; 劳动力投入仅包括人工秸秆清除(1 500 元·hm⁻²)、秸秆还田机械(750 元·hm⁻²)和追肥(450 元·hm⁻²)。由于各处理投入的种子、灌水、农药、收获等管理措施相同, 相对净收入仅是籽粒产出效益减去肥料成本及劳动力投入。

- 响[J]. 土壤通报, 2001, 32(5): 209–213.
- JIANG Yong-hong, YU Zhen-rong, MA Yong-liang. The effect of stubble return on agro-ecological system and crop growth[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2001, 32(5): 209–213.(in Chinese)
- [5] 马二登, 马 静, 徐 华, 等. 稻秆还田方式对麦田 N₂O 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 N₂O emission from wheat-growing season[J]. *Soil*, 2007, 39(6): 870–873.(in Chinese)
- [6] 焦 燕, 黄 耀, 宗良纲, 等. 不同水稻土水稻生长季施用秸秆对后季麦田 N₂O 排放的影响[J]. 南京农业大学学报, 2004, 27(1): 36–40.
- JIAO Yan, HUANG Yao, ZONG Liang-gang, et al. Effect of straw incorporation to different soils in rice-growing season on N₂O emission in following wheat-growing season[J]. *Journal of Nanjing Agricultural University*, 2004, 27(1): 36–40.(in Chinese)
- [7] 秦晓波, 李玉娥, 万云帆, 等. 免耕条件下稻草还田方式对温室气体排放强度的影响[J]. 农业工程学报, 2012, 28(6): 210–215.
- QIN Xiao-bo, LI Yu-e, WAN Yun-fan, et al. Effects of straw mulching on greenhouse gas intensity under no-tillage conditions[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2012, 28(6): 210–215.(in Chinese)
- [8] Chu H, Hosen Y, Yagi K. NO, N₂O, CH₄ and CO₂ fluxes in winter barley field of Japanese andisol as affected by N fertilizer management[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2007, 39(1): 330–339.
- [9] 赵建波, 迟淑筠, 宁堂原, 等. 保护性耕作条件下小麦田 N₂O 排放及影响因素研究[J]. 水土保持学报, 2008, 22(3): 196–200.
- ZHAO Jian-bo, CHI Shu-jun, NING Tang-yuan, et al. Study of N₂O emission and its affecting factors in wheat fields of conservation tillage[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2008, 22(3): 196–200.(in Chinese)
- [10] 邹建文, 黄 耀, 宗良纲, 等. 稻田灌溉和秸秆施用对后季麦田 N₂O 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 N₂O emission from following wheat growing season[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2003, 36(4): 409–414.(in Chinese)
- [11] 杜亚琴, 郑丽行, 樊小林. 三种控释肥在赤红壤中的氧化亚氮排放[J]. 应用生态学报, 2011, 22(9): 2370–2376.
- DU Ya-qin, ZHENG Li-hang, FAN Xiao-lin. Effects of applying controlled release fertilizers on N₂O emission from a lateritic red soil[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2011, 22(9): 2370–2376.(in Chinese)
- [12] 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)
- [13] 王玉英, 胡春胜. 施氮水平对太行山前平原冬小麦-夏玉米轮作体系土壤温室气体通量的影响[J]. 中国生态农业学报, 2011, 19(5): 1122–1128.
- WANG Yu-ying, HU Chun-sheng. Soil greenhouse gas emission in winter wheat/summer maize rotation ecosystem as affected by nitrogen fertilization in the piedmont plain of Mount Taihang, China[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2011, 19(5): 1122–1128.(in Chinese)
- [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] 叶 欣, 李 俊, 王迎红, 等. 华北平原典型农田土壤氧化亚氮的排放特征[J]. 农业环境科学学报, 2005, 24(6): 1186–1191.
- YE Xin, LI Jun, WANG Ying-hong, et al. Characterization of emission of nitrous oxide from soils of typical crop fields in North China plain[J]. *Journal of Agro-environment Science*, 2005, 24(6): 1186–1191.(in Chinese)
- [16] Dmitri C, Jorgen O. Soil tillage enhanced CO₂ and N₂O emissions from loamy sand soil under spring barley[J]. *Soil and Tillage Research*, 2007, 97: 5–18.
- [17] 董玉红, 欧阳竹, 李运生, 等. 肥料施用及环境因子对农田土壤 CO₂ 和 N₂O 排放的影响[J]. 农业环境科学学报, 2005, 24(5): 913–918.
- DONG Yu-hong, OUYANG Zhu, LI Yun-sheng, et al. Influence of fertilization and environmental factors on CO₂ and N₂O fluxes from agricultural soil[J]. *Journal of Agro-environment Science*, 2005, 24(5): 913–918.(in Chinese)
- [18] 潘志勇, 吴文良, 刘光栋, 等. 不同秸秆还田模式与氮肥施用量对土壤 N₂O 排放的影响[J]. 土壤肥料, 2004(5): 6–8.
- PAN Zhi-yong, WU Wen-liang, LIU Guang-dong, et al. Effect of straw return and nitrogen fertilizer application on the N₂O emission of soil[J]. *Soil and Fertilizers*, 2004(5): 6–8.(in Chinese)
- [19] 黄国宏, 陈冠雄, 韩 冰. 土壤含水量与 N₂O 产生途径研究[J]. 应用生态学报, 1999, 10(1): 53–56.
- HUANG Guo-hong, CHEN Guan-xiong, HAN Bing. Relationships between soil water content and N₂O production[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 1999, 10(1): 53–56.(in Chinese)
- [20] 郑循华, 王明星, 王跃思, 等. 温度对农田 N₂O 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. Effect of temperature on production and flux of N₂O from crop soil[J]. *Environmental Science*, 1997, 18(5): 1–5.(in Chinese)
- [21] 裴淑玮, 张园园, 刘俊峰, 等. 施肥及秸秆还田处理下玉米季温室气体的排放[J]. 环境化学, 2012, 31(4): 407–414.
- PEI Shu-wei, ZHANG Yuan-yuan, LIU Jun-feng, et al. Greenhouse gas emission under the treatments of fertilization and wheat straw returning during the maize growing seasons[J]. *Environmental Chemistry*, 2012, 31(4): 407–414.(in Chinese)
- [22] 王改玲, 郝明德, 陈德立. 秸秆还田对灌溉玉米田土壤反硝化及 N₂O 排放的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2006, 12(6): 840–844.
- WANG Gai-ling, HAO Ming-de, CHEN De-li. Effect of stubble incorporation and nitrogen fertilization of denitrification and nitrous oxide emission in an irrigated maize soil[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2006, 12(6): 840–844.(in Chinese)
- [23] 叶丽丽, 王翠红, 彭新华, 等. 秸秆还田对土壤质量影响研究进展[J]. 湖南农业科学, 2010, 19: 52–55.

- YE Li-li, WANG Cui-hong, PENG Xin-hua, et al. Effect of straw re-turning on soil quality[J]. *Hunan Agricultural Science*, 2010, 19: 52-55. (in Chinese)
- [24] 钟 杭, 黄锦法. 稻麦秸秆全量还田对作物产量和土壤的影响[J]. 浙江农业学报, 2002, 14(6): 344-347.
- ZHONG Hang, HUANG Jin-fa. Effects of total wheat and rice straw application on the crop yield and the soil properties[J]. *Acta Agriculturae Zhejiangensis*, 2002, 14(6): 344-347. (in Chinese)
- [25] Dong Y, Scharffe D, Qi Y C, et al. Nitrous oxide emissions from cultivated soils in the North China plain[J]. *Tellus*, 2001, 53(1): 1-9.
- [26] 路文涛, 贾志宽, 张 鹏, 等. 秸秆还田对宁南旱作农田土壤活性有机碳及酶活性的影响[J]. 农业环境科学学报, 2011, 30(3): 522-528.
- LU Wen-tao, JIA Zhi-kuan, ZHANG Peng, et al. Effects of straw re-turning on soil labile organic carbon and enzyme activity in semi-arid areas of southern Ningxia, China[J]. *Journal of Agro-environment Science*, 2011, 30(3): 522-528. (in Chinese)
- [27] Cai G X, Chen D L, Ding H, et al. Nitrogen losses from fertilizers applied to maize, wheat and rice in the North China plain[J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2002, 63: 187-195.
- [28] 纪 洋, 刘 刚, 马 静, 等. 控释肥施用对小麦生长期 N_2O 排放的影响[J]. 土壤学报, 2012, 49(3): 526-534.
- JI Yang, LIU Gang, MA Jing, et al. Effect of controlled-release fertilizer (CRF) on nitrous oxide emission during the wheat growing period[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2012, 49(3): 526-534. (in Chinese)