

氮肥施用方式对油菜生长季氧化亚氮排放的影响

张岳芳^{1,2}, 周 炜^{1,2}, 王子臣^{1,2}, 陈留根^{1,2*}, 朱普平^{1,2}, 盛 婧^{1,2}, 郑建初²

(1.江苏省农业科学院农业资源与环境研究所, 南京 210014; 2.江苏省农业科学院循环农业研究中心, 南京 210014)

摘 要:氮肥深施(条施、穴施)有利于提高肥料利用率和作物产量,但其对农田氧化亚氮排放的影响尚不明确。以不施氮肥为对照,研究了氮肥撒施、条施和穴施对水稻-油菜轮作系统油菜生长季氧化亚氮排放、氮肥利用率和产量的影响。结果表明:氮肥的施用改变了油菜生长期间 N_2O 排放通量的季节变化规律,不施氮对照除在油菜移栽后第 10 d N_2O 排放通量较大外,其余时间排放均较为微弱。氮肥撒施、氮肥条施和氮肥穴施均在油菜移栽后第 10 d 和第 117 d 出现 N_2O 排放小高峰,排放最大高峰出现在移栽后第 100 d。氮肥深施显著提高油菜生长季 N_2O 总排放量、氮肥利用率和产量。与氮肥撒施相比,氮肥条施和氮肥穴施分别增加 N_2O 总排放量 37.2% 和 19.3%,提高氮肥利用率 72.3% 和 59.3%,增产 28.8% 和 25.8%,而单位产量 N_2O 排放量与氮肥撒施无显著差异;氮肥条施的单位产量 N_2O 排放量显著低于氮肥穴施。研究表明,在获得相同产量的前提下氮肥撒施并无减排 N_2O 的优势,水稻-油菜轮作系统油菜生长过程中在氮肥深施时采用条施有利于 N_2O 减排。

关键词: N_2O 排放; 施氮方式; 氮肥利用率; 产量; 单位产量 N_2O 排放; 油菜

中图分类号: S143.1 文献标志码: A 文章编号: 1672-2043(2013)08-1690-07 doi:10.11654/jaes.2013.08.029

Effects of Nitrogen Fertilizer Application Modes on Nitrous Oxide Emissions During Growing Season of Oilseed Rape (*Brassica napus*)

ZHANG Yue-fang^{1,2}, ZHOU Wei^{1,2}, WANG Zi-chen^{1,2}, CHEN Liu-gen^{1,2*}, ZHU Pu-ping^{1,2}, SHENG Jing^{1,2}, ZHENG Jian-chu²

(1. Institute of Agricultural Resources and Environments, Jiangsu Academy of Agricultural Sciences, Nanjing 210014, China; 2. Circular Agriculture Research Center, Jiangsu Academy of Agricultural Sciences, Nanjing 210014, China)

Abstract: Deep point placement of nitrogen fertilizer has been shown to increase nitrogen use efficiency and grain yield, but its affect on N_2O emissions is currently not well documented. This paper studied the effects of nitrogen fertilizer application modes, including surface broadcast placement (SN), band placement (BN), and hole placement (HN) of urea, plus an unfertilized control (CK), on soil nitrous oxide (N_2O) emissions during the oilseed rape-growing season from a rice-oilseed rape rotation field in the lower reaches of the Yangtze River. The results showed that the seasonal variation characteristic of N_2O emission was significantly influenced by nitrogen fertilizer application. During the oilseed rape-growing season, CK had only one peak of N_2O flux at 10 days after oilseed rape transplanting. However, SN, BN and HN had three peaks of N_2O flux, and the largest peak was observed at 100 days after oilseed rape transplanting. Compared with SN, BN significantly increased seasonal N_2O total emissions, nitrogen use efficiency and grain yield by 37.2%, 72.3% and 28.8%, while HN increased by 19.3%, 59.3% and 25.8%, respectively. The SN practice did not decrease specific N_2O emission as compared with BN and HN, respectively. Relative to HN, BN significantly decreased specific N_2O emission. Considering N_2O emission and grain yield, the results of this preliminary study suggest that deep point placement of nitrogen fertilizer would not increase seasonal N_2O total emissions; band placement of nitrogen fertilizer can effectively decrease N_2O total emissions during the oilseed rape-growing season from the rice-oilseed rape rotation system as compared to hole placement.

Keywords: N_2O emission; nitrogen application modes; nitrogen use efficiency; grain yield; specific N_2O emission; oilseed rape (*Brassica napus*)

收稿日期: 2013-04-20

基金项目: 国家科技支撑计划课题(2012BAD14B12); 公益性行业(农业)科研专项经费课题(201103001)

作者简介: 张岳芳(1978—), 男, 江苏常熟人, 博士, 副研究员, 主要从事农业生态环境研究。

* 通信作者: 陈留根 E-mail: chenliugen@china.com.cn

氧化亚氮(N_2O)是与全球气候变化关系密切的痕量温室气体,其单位质量的全球增温潜势(GWP)为二氧化碳(CO_2)的 298 倍^[1],并以每年 0.2%~0.3% 的速率增长^[2]。农田是大气 N_2O 的重要来源,施用氮肥是影响农田 N_2O 排放的主要因素之一,全球每年因施用化学氮肥产生 N_2O 约 $1.5 \times 10^6 \text{ t}$,占人类活动向大气输入 N_2O -N 量的 44%和每年向大气输入 N_2O -N 总量的 13%^[3]。资料显示,绝大部分农田 N_2O -N 排放系数介于 0.1%~2.0%之间,化学氮肥施用量的逐年增加已成为中国农田 N_2O 排放量逐年上升的主要因素^[4-6]。因此,减少因氮肥施用而产生的 N_2O 对于控制农田温室气体排放起着重要作用。施用化学氮肥引起的农田 N_2O 排放分为直接排放和间接排放两大类^[1,3]。Venterea 等^[7]认为,通过减少农田氮肥施用后 N_2O 的直接转化可以达到减少 N_2O 直接排放的目的,间接减排则主要通过提高氮肥利用率的手段来实现,即提高作物对当季氮肥的吸收利用,从而减少氮肥施用后引起的 N_2O 间接排放。黄耀^[5]估算:当前我国的氮肥利用率在 20%~50%之间,若将氮肥利用率从 20%~30% 提高到 30%~40%,可相应降低 10% 的 N_2O 排放。

以往有关氮肥施用对农田土壤 N_2O 排放影响的研究多集中于氮肥的类型和施用量、施肥时间等^[3,7-12],而对施肥方式影响 N_2O 排放的研究报道较少^[13-16]。Hultgreen 等^[13]认为,条带状施用尿素较表面撒施尿素有利于降低农田 N_2O 排放。Chu 等^[14]则发现,尿素深施处理的 N_2O 排放量是尿素浅施的 5~8 倍,Engel 等^[15]、Fujinuma 等^[16]的研究也表明尿素撒施减少了 N_2O 排放。油菜是我国长江流域稻田冬季主栽作物,施用氮肥是增产的关键因素^[17-18]。由于农村劳动力不足,生产上往往采用轻简省力的免耕移栽方式种植,氮肥表土撒施现象普遍存在。为此,笔者于 2010—2011 年在江苏省苏州市现代农业(水稻)示范园农田($31^\circ 33' \text{N}$, $120^\circ 37' \text{E}$),于油菜生长季设计氮肥撒施、氮肥条施、氮肥穴施和不施氮肥对照 4 个处理,研究氮肥施用方式对油菜生长季 N_2O 排放、氮肥利用率及产量的影响,以为农田氮肥合理施用和生态环境安全提供试验依据。

1 材料与方法

1.1 试验地的自然条件

2010 年 11 月—2011 年 5 月在江苏省常熟市辛庄镇($31^\circ 33' \text{N}$, $120^\circ 37' \text{E}$)进行大田试验,该区属亚热带湿润性季风气候,常年平均气温为 15.5°C ,降水量

为 1042 mm,日照 2130 h,太阳辐射 $4.94 \times 10^5 \text{ J} \cdot \text{cm}^{-2}$,无霜期 242 d,试验期间的降水量及日均温见图 1。试验地土壤类型属乌栅土,0~20 cm 耕层土壤有机质含量 3.3%,全氮 $2.0 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,有效氮 $117.4 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,速效磷 $7.3 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,速效钾 $100.2 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,pH 6.3,土壤容重 $1.2 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 。

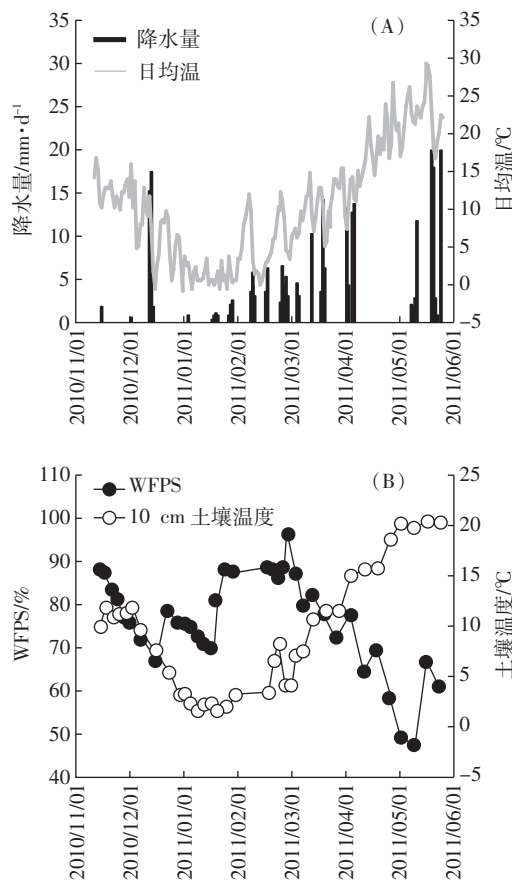


图 1 试验期间的降水量、日均温(A)及土壤充水孔隙率和 10 cm 土壤温度(B)

Figure 1 Seasonal patterns of (A) daily precipitation and mean air temperature, (B) water-filled pore space (WFPS) and soil temperature at 10 cm depth during the oilseed rape-growing season

1.2 试验设计

试验共设 4 个处理:氮肥撒施、条施、穴施和不施氮肥(CK),撒施是将肥料均匀地撒在小区土壤表面,条施是在距离每行油菜 15 cm 处开条沟(沟深约 8 cm)施肥并覆土,穴施是在同行相邻的两棵油菜中间挖穴(穴深约 8 cm)施肥并覆土。同一氮肥施用方式下,基肥与之后的各次追肥的施肥方式均相同。试验重复 4 次,小区面积为 12 m^2 。选用当地主推品种苏油 4 号为供试材料,2010 年 10 月 5 日播期,11 月 12 日移栽,采用生产上普遍使用的稻田板茬免耕方式移

栽,行、株距分别为 50、16.5 cm,移栽当天浇足活棵水(约每株油菜 0.3 kg),油菜于 2011 年的 5 月 24 日割倒,5 月 27 日脱粒收获,全生育期(大田生长期)197 d。各处理的施肥量和施肥时间均相同,氮肥(尿素,含 N 46.4%)、磷肥(过磷酸钙,含 P_2O_5 12%)和钾肥(氯化钾,含 K_2O 60%)用量每公顷分别为 N 210 kg、 P_2O_5 90 kg、 K_2O 90 kg。磷肥全部作基肥(11 月 12 日)施用,50%氮肥和 50%钾肥作基肥,越冬期间追施氮肥的 20%(越冬肥,12 月 30 日),剩余的 30%氮肥和 50%钾肥在抽薹前期作第 2 次追肥施用(薹肥,2011 年 2 月 14 日)。适时进行病虫草害防治,油菜正常生长。

1.3 氧化亚氮采集与分析

采用静态箱-气相色谱法对油菜地 N_2O 排放采样测定。PVC 采样箱(购自中国科学院南京土壤研究所)由底座和顶箱两部分组成,底座(横截为 50 cm × 50 cm)长期固定于田间小区,底壁插入土中约 15 cm,每个底座中种植 3 棵油菜,底座上部有 5 cm 深的凹槽,采样前往槽内注水以防底座与顶箱结合处漏气。顶箱高度随油菜高度而增加(开花前 50 cm、开花后 120 cm),顶箱外部包有薄海绵和铝箔胶带以防止太阳照射导致箱内温度变化过大影响测定结果。顶箱内顶部装有 12 V 小风扇以充分混匀箱内气体,并留有一孔插温度计,用于观测箱内温度变化,箱体中部安装抽气孔,采样时按 0、10、20、30 min 的时间间隔用 50 mL 注射器抽取箱内气体,来回抽动 3 次以完全混匀气体,抽出 50 mL 保存于气体采样袋后迅速带回实验室分析。油菜生长季一般每周采气 1 次,施肥后 3 周每周采气 2 次,采样时间在上午 8:00—10:00,每次采集气样时测定 10 cm 的土壤温度和耕层土壤含水量,并计算土壤充水孔隙率(WFPS)^[19]。 N_2O 气体浓度由带有 ^{63}Ni 电子捕获检测器的 Agilent 7890A 气相色谱测定,分离柱为 Porapak Q 填充柱(80/100 目),柱温 60 °C,检测温度为 300 °C,载气为 99.999%高纯氩甲烷气(95%氩气+5%甲烷),流速 40 mL·min⁻¹。 N_2O 排放通量计算公式^[20-21]如下:

$$F = \rho \times h \times dc/dt \times 273 / (273 + T) \quad (1)$$

式中: F 为气体排放通量, $\mu g \cdot m^{-2} \cdot h^{-1}$; ρ 为标准状态下气体的密度, $kg \cdot m^{-3}$; h 是采样箱的净高度, m; dc/dt 为单位时间内采样箱内气体的浓度变化率; 273 为气态方程常数; T 为采样过程中采样箱内的平均温度, °C。

N_2O-N 排放系数(以 N_2O-N 形式排放的氮素占施入氮肥的百分率)按下式^[22]计算:

$$N_2O-N \text{ 排放系数} = (T_n - T_0) / \text{施氮量} \times 100\% \quad (2)$$

式中: T_n 为施氮处理 N_2O-N 排放总量; T_0 为不施氮处理 N_2O-N 排放总量。

1.4 油菜氮素测定及氮肥利用率计算

成熟期各小区取样 5 株,从子叶节处将根系剪掉,将整株油菜分为籽粒、角壳和茎秆 3 部分,80 °C 恒温烘干后分别测定干物重,并采用半微量凯氏定氮法测定各部分氮素含量。氮肥利用率、氮肥贡献率计算公式如下:

$$\text{氮肥利用率}(\%) = (\text{施氮区植株总吸氮量} - \text{不施氮区植株总吸氮量}) / \text{氮肥用量} \times 100^{[23]} \quad (3)$$

$$\text{氮肥贡献率}(\%) = (\text{施氮区籽粒产量} - \text{不施氮区籽粒产量}) / \text{施氮区籽粒产量} \quad (4)$$

试验数据处理和作图采用 Microsoft Excel for Windows 2007 完成, N_2O 排放通量用每次观测 4 个重复的平均值及标准偏差来表示,平均排放通量是将 4 个重复的观测值按时间间隔加权平均后再平均, N_2O 累积排放量是平均排放通量乘以相应的观测时间天数。数据用 SPSS 11.5 软件进行方差分析和多重比较(Duncan's),统计性显著性假设为 $P < 0.05$ 。

2 结果与分析

2.1 氮肥施用方式对油菜产量和氮肥利用率的影响

从表 1 可以看出,氮肥施用后油菜籽粒产量显著提高,3 个施氮处理的平均籽粒产量是不施氮处理的 2.2 倍(增产幅度为 87.0%~140.8%),且氮肥对产量的贡献率随籽粒产量的提高呈上升趋势,说明施用氮肥是提高油菜产量的重要途径。就不同氮肥施用方式下油菜产量的差异来看,以氮肥条施处理的产量水平最高,达 3285 $kg \cdot hm^{-2}$,与氮肥穴施(3208 $kg \cdot hm^{-2}$)的差异不大,但均显著高于氮肥撒施(2551 $kg \cdot hm^{-2}$)处理,分别比氮肥撒施提高 28.8%和 25.8%。氮肥利用率的表现趋势与产量相同:氮肥条施>氮肥穴施>氮肥撒施(表 1),各处理的氮肥利用率分别为 61.0%、56.4%和 35.4%,氮肥条施和氮肥穴施分别较氮肥撒施处理提高氮肥利用率 72.3%和 59.3%。氮肥利用率较高的原因主要是增加成熟期植株总吸氮量所致,氮肥条施和氮肥穴施处理的植株总吸氮量分别比氮肥撒施增加 32%和 25%。以上结果表明,采用氮肥深施方式(条施和穴施)较氮肥表施(撒施)有利于提高油菜产量和氮肥利用率。

2.2 氮肥施用方式对油菜生长季 N_2O 排放的影响

2.2.1 N_2O 排放通量的季节变化

在油菜生长期,氮肥的施用改变了农田土壤

表 1 氮肥施用方式对油菜产量及氮肥利用率的影响

Table 1 Effects of nitrogen fertilizer application modes on yield and nitrogen use efficiency in oilseed rape

处理	籽粒产量/ kg·hm ⁻²	氮肥 贡献率/%	植株总吸氮 量/kg N·hm ⁻²	氮肥 利用率/%
氮肥撒施	2551±142b	46.5b	141.9±7.34b	35.4b
氮肥条施	3285±156a	56.4a	195.8±10.98a	61.0a
氮肥穴施	3208±162a	55.2a	186.1±11.54a	56.4a
CK	1364±70c		67.6±3.93c	

注: 同列数值间不同小写字母表示 Duncan's 多重比较差异显著 ($P<0.05$), 下同。

N₂O 排放的季节变化规律,但不同氮肥施用方式下农田 N₂O 排放通量的变化趋势较为相似(图 2)。各处理均在油菜移栽后第 10 d(11 月 22 日)出现一个 N₂O 排放小高峰,施氮处理的排放通量(179.4~237.9 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$)显著大于不施氮肥的 CK 处理(113.5 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$),CK 在其余时间 N₂O 排放的波动都较小,排放通量在-38.5~76.4 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ 之间。各施氮处理在移栽后第 48 d 施用第 1 次追肥(12 月 30 日)后 N₂O 排放通量虽略有上升,但未出现明显排放高峰;在油菜移栽后第 97 d(自第 2 次追肥后第 3 d)起排放通量急速上升,移栽后第 100 d(2011 年 2 月 20 日)时达到排放最大高峰,这可能是油菜施用基肥的结果;排放高峰过后各施氮处理的 N₂O 排放通量逐渐下降,在移栽后第 117 d(2011 年 3 月 9 日)又出现一个 N₂O 排放小高峰,可能与前期残留在土壤中的氮素有关,此后各施氮处理在低排放通量下小幅波动。在整个油菜生长期间,氮肥撒施、条施和穴施处理的 N₂O 排放峰值分别为 308.1、373.4、670.4 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$,氮肥穴施处理明显提高了 N₂O 排放峰值。油菜生长期间 N₂O 平均排放通量顺序是氮肥穴施>氮肥条施>氮肥撒施>CK,

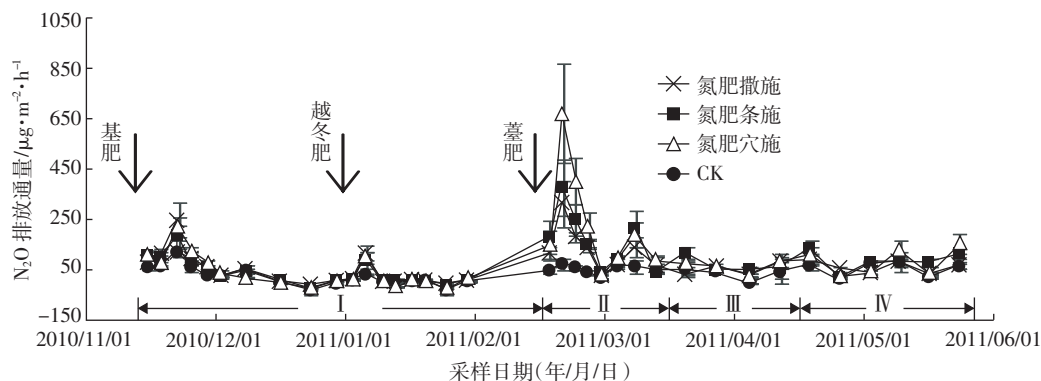
依次为 66.1、57.6、48.2、25.2 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ 。

2.2.2 不同生育阶段 N₂O 累积排放量

为进一步分析比较不同氮肥施用方式下油菜生长季 N₂O 排放的差异,将油菜全生育期分为苗期(移栽至现蕾)、蕾薹期(现蕾至初花期)、开花期(初花期至终花期)和角果发育成熟期(终花期至成熟期)4 个阶段。表 2 显示,与 CK 相比,施氮处理显著增加了苗期、蕾薹期和开花期的 N₂O 累积排放量,在角果发育成熟期,氮肥条施和氮肥穴施处理较 CK 显著增加 N₂O 累积排放量,而氮肥撒施与 CK 无显著差异。不同氮肥施用方式下各阶段 N₂O 累积排放量均以蕾薹期最大,开花期最小。与氮肥撒施相比,氮肥条施处理减少了苗期 23%的 N₂O 累积排放量,增加了开花期 43%和角果发育成熟期 50%的 N₂O 累积排放量。氮肥穴施较氮肥撒施提高了蕾薹期、开花期和角果发育成熟期的 N₂O 累积排放量,提高幅度为 76%、35%和 47%。由于氮肥均在前期施用(图 2),氮肥的施用也改变了不同生育阶段 N₂O 累积排放量占全生育期总排放量百分比,施氮处理主要增加了苗期和蕾薹期所占百分比。3 个施氮处理均以蕾薹期 N₂O 累积排放量占全生育期总排放量百分比为最高,氮肥撒施、氮肥条施和氮肥穴施处理分别为 31.8%、33.4%和 40.7%,比 CK 分别增加 7.6%、8.2%和 15.5%。

2.2.3 氮肥施用方式对 N₂O 总排放量的影响

由表 3 可见,整个油菜生育期施氮处理的 N₂O 总排放量范围为 2.28~3.12 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,不施氮 CK 为 1.19 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,肥料氮通过 N₂O 直接排放的损失率为 0.33%~0.59%。种植油菜过程中施用氮肥增加 N₂O 总排放量是显而易见的,施氮处理油菜季 N₂O 总排放量是 CK 的 1.9~2.6 倍,平均增加 N₂O 总排放量 127.2%。



I、II、III、IV 分别表示苗期、蕾薹期、开花期和角果发育成熟期 4 个阶段

I, II, III and IV indicate seedling period, budding period, flowering period and podding to mature period, respectively

图 2 不同氮肥施用方式处理 N₂O 排放通量的季节变化Figure 2 The seasonal variation of N₂O fluxes under different nitrogen fertilizer application modes

表 2 油菜不同生育阶段 N₂O 累积排放量及其占全生育期总排放量百分比Table 2 N₂O accumulation emissions of different the oilseed rape-growing period under different nitrogen fertilizer application modes

处理	苗期		薹期		开花期		角果发育成熟期	
	累积排放量/ kg·hm ⁻²	占全生育期百 分比/%	累积排放量/ kg·hm ⁻²	占全生育期百 分比/%	累积排放量/ kg·hm ⁻²	占全生育期百 分比/%	累积排放量/ kg·hm ⁻²	占全生育期百 分比/%
氮肥撒施	0.68±0.17a	30.0	0.72±0.13b	31.8	0.36±0.03b	15.9	0.51±0.06b	22.3
氮肥条施	0.54±0.08b	19.9	0.91±0.20b	33.4	0.51±0.06a	18.8	0.76±0.19a	27.9
氮肥穴施	0.63±0.11a	20.2	1.21±0.34a	40.7	0.48±0.08a	15.4	0.74±0.15a	23.7
CK	0.20±0.02c	17.2	0.30±0.04c	25.2	0.23±0.02c	19.7	0.45±0.08b	37.9

表 3 各处理 N₂O 季节总排放量及排放系数Table 3 N₂O total emissions and emission coefficient during oilseed rape season in each treatment

处理	N ₂ O 总排放量/ kg·hm ⁻²	单位产量 N ₂ O 排放量/ g N ₂ O·kg ⁻¹ grain yield	排放系数/%
氮肥撒施	2.28±0.30b	0.90ab	0.33c
氮肥条施	2.72±0.34a	0.83b	0.46b
氮肥穴施	3.12±0.58a	0.97a	0.59a
CK	1.19±0.09c	0.88ab	

施氮处理中以氮肥穴施和氮肥条施的 N₂O 总排放量较高,分别比氮肥撒施增加 37.2%和 19.3%,排放系数分别增加 0.26%和 0.13%,但单位产量 N₂O 排放量与氮肥撒施均无显著差异,表明在相同产量条件下氮肥撒施并无减排 N₂O 的优势。氮肥条施与氮肥穴施的油菜季 N₂O 总排放量差异不大,而单位产量 N₂O 排放量以及排放系数均显著低于后者,说明在氮肥深施条件下,综合产量因素,条施有利于 N₂O 减排。

2.2.4 不同氮肥施用方式下 N₂O 排放的环境影响因素

除施肥外,土壤水分、土壤温度的季节变化也是影响 N₂O 排放的重要因素。本研究相关分析结果表明,各处理油菜全生育期的 N₂O 排放通量与相应的土壤充水孔隙率(WFPS)的相关性不显著($R^2=0.005\sim 0.068, n=36, P>0.05$)。由于氮肥均在开花期前(苗期和薹期)施用,并且施氮处理主要是增加了开花期前的 N₂O 累积排放量(图 2、表 2),本文分析了各施氮处理开花期前的 N₂O 排放通量与相应的 WFPS 的关系。结果表明,氮肥撒施、条施和穴施在开花期前的 N₂O 排放通量与相应的 WFPS 均呈现显著线性相关($P<0.05$),其回归方程分别为:

$$y=0.035x+78.34(R^2=0.151, n=26)$$

$$y=0.033x+78.14(R^2=0.193, n=26)$$

$$y=0.019x+78.72(R^2=0.161, n=26)$$

表明提高开花期前的 WFPS 会促进此阶段 N₂O 的排放。CK 处理全生育期 N₂O 排放通量与相应的农

田 10 cm 土壤温度呈极显著线性相关($P<0.01$),回归方程为:

$$y=0.084x+6.678(R^2=0.221, n=36)$$

表明不施氮肥条件下较高的土壤温度有利于 N₂O 排放。而施氮处理全生育期 N₂O 排放通量与 10 cm 土壤温度均无显著的相关性($R^2=0.003\sim 0.020, n=36, P>0.05$),说明肥料效应可能掩盖了土壤温度的作用。

3 讨论

氮肥撒施、条施和穴施处理油菜生长季 N₂O 排放通量的季节变化与不施氮对照不尽相同(图 2),表明氮肥施用显著影响农田土壤 N₂O 的排放过程,主要是施氮后形成 N₂O 排放高峰所致。本试验中各处理均在油菜移栽后第 10 d 出现一个 N₂O 排放小高峰,由于油菜是稻茬免耕移栽,不施氮肥处理 N₂O 排放小高峰出现的原因可能是:当水稻-油菜轮作系统由水稻季转向油菜季,土壤处于淹水到落干的转变过程中,淹水时土壤中积累的铵态氮为落干后进行硝化作用提供了丰富的底物。而不施氮肥处理排放通量明显低于施氮处理则说明油菜基肥的施用提高了 N₂O 排放峰值。施氮处理油菜生长期间 N₂O 排放最高峰出现在栽后第 100 d,主要是施用油菜薹肥的结果,另外,油菜冬季较高的氮投入、植株苗期对氮的吸收利用较低等原因也可能导致土壤中有盈余的有效氮成为生成 N₂O 的物质来源,产生大量的 N₂O。研究表明,长江下游水旱轮作系统旱作季只有在施肥后伴随降水后才会出现明显的峰值排放^[20,24],降水条件是影响该区域 N₂O 排放季节性波动的重要因子^[25]。本研究中油菜施用越冬肥后未观测到明显的 N₂O 排放高峰,可能与施肥后缺少有效的降水有关(图 1、图 2)。相关分析显示,施氮处理开花期前的 N₂O 排放通量与相应的 WFPS 均呈显著线性相关($R^2=0.151\sim 0.193, n=26$),由于氮肥均在开花期前施用,暗示施肥后较高的土壤含水量有利于 N₂O 排放。

众多报道证实,氮肥施用对农业土壤 N_2O 排放有明显的促进作用^[2,7,20], N_2O 总排放量随着施氮量的增加而增加^[5-6]。本试验中施氮处理油菜生长期 N_2O 总排放量是对照不施氮肥的 1.9~2.6 倍, 平均增排 127.2%, 这也证明氮肥的施用使得农田 N_2O 总排放量显著增加。前人研究表明, 选用合适的氮肥类型^[3,7,10-12] 或采取科学的氮肥农田管理措施等^[2,7,5-9,12] 均可达到减少农田 N_2O 排放的目的, 但到目前为止, 氮肥施用方式是否可以作为减少农田生态系统 N_2O 排放的措施还有待进一步研究。从本研究结果来看, 氮肥撒施的 N_2O 总排放量显著低于氮肥条施和氮肥穴施, 说明氮肥深施较氮肥土表撒施增加了 N_2O 总排放量。这与 Hultgreen 等^[13] 的报道不同, 而与多数人^[14-16] 的研究结论一致, 原因可能是氮肥深施处土壤水分含量大于表层土壤而氧气浓度小于后者, 利于反硝化反应的进行^[26], 同时, 氮肥深施后肥料的相对集中使施肥处的土壤养分含量较高促进 N_2O 产生^[15]。Fujinuma 等^[16] 研究同时显示, 尿素撒施在减少农田土壤 N_2O 排放的同时增加了 NO 排放。氮肥深施可显著减少氨挥发^[27] 和氮素地表径流流失^[28], 有利于降低农田中化肥氮损失、提高氮肥利用率^[27]。由此推测, 氮肥表土撒施在减少 N_2O 直接排放的同时可能会增加 N_2O 的间接排放, 氮肥撒施只是降低了 N_2O 直接排放损失的氮素占氮肥总损失量的比例而已。

本研究中氮肥撒施处理的产量水平显著低于两个氮肥深施处理, 单位产量 N_2O 排放量也与氮肥深施无明显差异, 也说明了在获得相同产量的前提下氮肥撒施并无减排优势。本研究还表明, 氮肥条施的 N_2O 总排放量低于氮肥穴施且产量水平较高, 虽然差异未达显著水平, 但其单位产量 N_2O 排放量显著低于后者, 因此油菜生长过程中氮肥深施时选择条施较为有利。由于本文只比较了一种施氮深度(约 8 cm)下氮肥条施和穴施与表土撒施的差异, 未涉及不同施氮深度的影响, 据此推断氮肥深施肯定会增加水稻-油菜轮作系统油菜生长季 N_2O 总排放量还有一定的不确定性, 有待通过试验来进一步验证。另外, 在减少农田 N_2O 排放的同时, 如何协调作物产量与氮肥利用率值得深入探讨。

4 结论

氮肥施用后形成的 N_2O 排放高峰改变了油菜生长季 N_2O 排放通量的季节变化规律, 但不同氮肥施用方式下农田 N_2O 排放通量的变化趋势较为相似, 施氮后 N_2O 最大排放高峰均出现在移栽后第 100 d。氮肥

的施用主要是增加了开花期前(苗期和薹期) N_2O 累积排放量, 相关分析显示施氮处理开花期前的 N_2O 排放通量与相应的 WFPS 均呈现显著线性相关。氮肥撒施的 N_2O 总排放量、油菜产量及氮肥利用率均显著低于氮肥深施处理(氮肥条施和氮肥穴施)。氮肥条施的单位产量 N_2O 排放量显著低于氮肥穴施, 综合考虑产量及氮肥利用率, 水稻-油菜轮作系统油菜生长过程中氮肥深施时选择条施对 N_2O 减排较为有利。如何协调农田 N_2O 排放、作物产量与氮肥利用率需进一步研究。

致谢: 本研究野外试验采样过程中得到常杰、李逸聪、朱怀荣等同学的帮助, 在此表示衷心的感谢!

参考文献:

- [1] Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Climate change 2007: The physical science basis contribution of working group I to the fourth assessment report of the IPCC[M]. New York: Cambridge University Press, 2007.
- [2] Smith P, Martino D, Cai Z, et al. Greenhouse gas mitigation in agriculture[J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society B*, 2008, 363: 789-813.
- [3] 邹建文, 黄耀. 农业管理措施对 N_2O 排放的影响[J]. 农村生态环境, 2002, 18(1): 46-49.
ZOU Jian-wen, HUANG Yao. Effect of agricultural management practices on N_2O emission of farmlands[J]. *Rural Eco-Environment*, 2002, 18(1): 46-49.
- [4] 邢光熹, 颜晓元. 中国农田 N_2O 排放的分析估算与减缓对策[J]. 农村生态环境, 2000, 16(4): 1-6.
XING Guang-xi, YAN Xiao-yuan. Analysis and estimation of N_2O emissions from croplands in China and its mitigation options[J]. *Rural Eco-Environment*, 2000, 16(4): 1-6.
- [5] 黄耀. 中国的温室气体排放、减排措施与对策[J]. 第四纪研究, 2006, 26(5): 722-732.
HUANG Yao. Emissions of greenhouse gases in China and its reduction strategy[J]. *Quaternary Sciences*, 2006, 26(5): 722-732.
- [6] Zou J, Lu Y, Huang Y. Estimates of synthetic fertilizer N-induced direct nitrous oxide emission from Chinese croplands during 1980-2000[J]. *Environmental Pollution*, 2010, 158: 631-635.
- [7] Venterea R T, Halvorson A D, Kitchen N, et al. Challenges and opportunities for mitigating nitrous oxide emissions from fertilized cropping systems[J]. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 2012, 10(10): 562-570.
- [8] Xing G, Zhu Z. Preliminary studies on N_2O emission fluxes from upland soils and paddy soils in China[J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 1997, 49: 17-22.
- [9] Zou J, Huang Y, Jiang J, et al. A 3-year field measurement of methane and nitrous oxide emissions from rice paddies in China: Effects of water regime, crop residue, and fertilizer application[J]. *Global Biogeochemi-*

- cal Cycles*, 2005, 19: 1-9.
- [10] 赵 维, 蔡祖聪. 氮肥品种对亚热带土壤 N_2O 排放的影响[J]. 土壤学报, 2009, 46(2): 248-253.
ZHAO Wei, CAI Zu-cong. Effects of N fertilizers on N_2O emissions from subtropical soils in China[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2009, 46(2): 248-253.
- [11] Jiang J, Hu Z, Sun W, et al. Nitrous oxide emissions from Chinese cropland fertilized with a range of slow-release nitrogen compounds[J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2010, 135: 216-225.
- [12] 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.
- [13] Hultgreen G, Leduc P. The effect of nitrogen fertilizers placement, formulation, timing and rate on greenhouse gas emission and agronomic performance [R]. Saskatchewan Department of Agriculture and Food. Final Report Project No. 5300G, ADF#19990028. Regina, Saskatchewan, Canada.
- [14] Chu H Y, Hosen Y, Yagi K. Nitrogen oxide emissions and soil microbial activities in a Japanese andisol as affected by N-fertilizer management[J]. *Soil Science and Plant Nutrition*, 2004, 50(2): 287-292.
- [15] Engel R, Liang D L, Wallander R, et al. Influence of urea fertilizer placement on nitrous oxide production from a silt loam[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2010, 39: 115-125.
- [16] Fujinuma R, Venterea R T, Rosen C. Broadcast urea reduces N_2O but increases NO emissions compared with conventional and shallow-applied anhydrous ammonia in a coarse-textured soil[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2011, 40: 1806-1815.
- [17] 冷锁虎, 单玉华, 周宝梅. 氮素营养对油菜成熟期生物产量的调控[J]. 中国油料作物学报, 2000, 22(2): 53-56.
LENG Suo-hu, SHAN Yu-hua, ZHOU Bao-mei. Regulation of N nutrition to biomass of oilseed in ripening stage[J]. *Chinese Journal of Oil Crop Sciences*, 2000, 22(2): 53-56.
- [18] 左青松, 葛云龙, 刘 荣, 等. 油菜不同氮素籽粒生产效率品种氮素积累与分配特征[J]. 作物学报, 2011, 37(10): 1852-1859.
ZUO Qing-song, GE Yun-long, LIU Rong, et al. Nitrogen accumulation and distribution in rapeseed (*Brassica napus* L.) with different nitrogen utilization efficiencies for grain production[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2011, 37(10): 1852-1859.
- [19] Franzluebbers A J. Microbial activity in response to water-filled pore space of variably eroded southern Piedmont soils[J]. *Applied Soil Ecology*, 1999, 11: 91-101.
- [20] 蔡祖聪, 徐 华, 马 静. 稻田生态系统 CH_4 和 N_2O 排放[M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2009.
CAI Zu-cong, XU Hua, MA Jing. Methane and nitrous oxide emissions from rice-based ecosystems[M]. Hefei: University of Science and Technology of China Press, 2009.
- [21] 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(6): 2196-2210.
- [22] Bouwman A F. Direct emissions of nitrous oxide from agricultural soils [J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 1996, 46(1): 53-70.
- [23] 张福锁, 王激清, 张卫峰, 等. 中国主要粮食作物肥料利用率现状与提高途径[J]. 土壤学报, 2008, 45(5): 915-924.
ZHANG Fu-suo, WANG Ji-qing, ZHANG Wei-feng, et al. Nutrient efficiencies of major cereal crops in China and measures for improvement[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2008, 45(5): 915-924.
- [24] 张岳芳, 郑建初, 陈留根, 等. 水旱轮作稻田旱作季种植不同作物对 CH_4 和 N_2O 排放的影响[J]. 生态环境学报, 2012, 21(9): 1521-1526.
ZHANG Yue-fang, ZHENG Jian-chu, CHEN Liu-gen, et al. Effects of different upland crops cultivation on CH_4 and N_2O emissions during upland-growing season from paddy rice-upland crop rotation field[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2012, 21(9): 1521-1526.
- [25] 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.
- [26] Hou A, Akiyama H, Nakajima Y, et al. Effects of urea form and soil moisture on N_2O and NO emissions from Japanese Andosols[J]. *Chemosphere-Globel Change Science*, 2000(2): 321-327.
- [27] 朱兆良. 中国土壤氮素研究[J]. 土壤学报, 2008, 45(4): 778-783.
ZHU Zhao-liang. Research on soil nitrogen in China[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2008, 45(4): 778-783.
- [28] 段 亮, 段增强, 常 江. 地表管理与施肥方式对太湖流域旱地氮素流失的影响[J]. 农业环境科学学报, 2007, 26(3): 813-818.
DUAN Liang, DUAN Zeng-qiang, CHANG Jiang. Effect of surface management and fertilization mode on nitrogen runoff from upland in Taihu Lake region[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2007, 26(3): 813-818.