

不同耕作方式下冬小麦田 N₂O 排放特征的差异性研究

陈晓龙^{1,2}, 杨威^{1,2}, 江波³, 殷寒旭^{1,2}, 杨小兵¹, 杨书运¹, 马友华¹

(1. 安徽农业大学资源与环境学院, 安徽 合肥 230036; 2. 农业部合肥农业环境科学观测试验站, 安徽 合肥 230036;
3. 安徽省发展和改革委员会经济研究院, 安徽 合肥 230001)

摘要: 采用静态箱—气相色谱法对空白对照(CK)、常规施肥(CG)、免耕(CB)、秸秆还田(CJ)4种处理小麦田的 N₂O 排放通量进行原位监测,同时测量土壤温度、水分及 NH₄⁺ 等相关影响因子的变化情况。研究表明:(1) 4种处理方式下麦田 N₂O 排放通量具有明显的季节性变化规律,N₂O 排放通量变化趋势基本一致,其中空白对照各处理 N₂O 的排放通量受季节性影响变化较小。(2) 在小麦生长季,4种处理方式下的农田均表现为 N₂O 的排放源。与空白对照相比,常规耕作、免耕和秸秆还田处理下 N₂O 的排放总量分别增加了 0.89 kg·hm⁻²、0.41 kg·hm⁻²和 1.02 kg·hm⁻²。(3) 气温和土壤 5 cm、10 cm 温度与 N₂O 排放通量不存在显著的相关性,因而温度不是影响麦田 N₂O 排放的限制性因素。各处理 N₂O 排放通量与土壤水分均呈现正相关($P < 0.05$)。通过对比几次降水与施肥前后 N₂O 排放通量的关系,发现降水后施肥能显著减少 N₂O 排放。降水引起的土壤水分增加是影响 N₂O 排放通量剧烈变化的因素。(4) 免耕和秸秆还田分别在 N₂O 减排与小麦增产方面效果最好。N₂O 减排与小麦增产作为农业可持续发展的基本要求,秸秆还田处理效果最优。

关键词: N₂O 排放; 冬小麦田; 耕作方式; 土壤水分; 温室气体; 减排

中图分类号: S181.3 **文献标志码:** A

Characteristic variations of N₂O flux in winter wheat field under different tillage methods

CHEN Xiao-long^{1,2}, YANG Wei^{1,2}, JIANG Bo³, YIN Han-xu^{1,2},
YANG Xiao-bing¹, YANG Shu-yun¹, MA You-hua¹

(1. School of Resources and Environment, Anhui Agricultural University, Hefei, Anhui 230036, China;
2. Hefei Scientific Observing and Experimental Station of Agro-Environment, Ministry of Agriculture, Hefei, Anhui 230036, China;
3. Institute of Economic Research, Anhui Development and Reform Commission, Hefei, Anhui 230001, China)

Abstract: The N₂O emission fluxes and seasonal variations by four treatments including blank control (CK), conventional tillage (CG), no tillage (CB), and straw application tillage (CJ) were sampled and measured by static chamber-gas chromatographic. The soil temperature, water content, NH₄⁺, Eh and other related factors were monitored at the same time. The results indicated that N₂O emission flux by four treatments showed significantly seasonal variations and each treatment displayed a consistent trend. However, emission flux of the blank control were less subjective to seasonal changes in volatility than others. In addition, during wheat growing season, all farmland treatments were N₂O emission sources. Compared with the blank control, the N₂O total emission fluxes by conventional tillage, no tillage and straw application tillage were increased by 0.89 kg·hm⁻², 0.41 kg·hm⁻² and 1.02 kg·hm⁻², respectively. Moreover, air temperature and soil temperature at 5 cm and 10 cm layers were not related to N₂O emission flux, indicating that these were not the significant limiting factors as the wheat field N₂O emissions flux. N₂O emission fluxes by all treatments and soil moisture showed a positive correlation ($P < 0.05$). By comparing the relationship between precipitation and pre and post

收稿日期: 2015-05-27
基金项目: 公益性行业(农业)科研专项(201103039)
作者简介: 陈晓龙(1989—), 男, 安徽寿县人, 硕士, 研究方向为农田温室气体。E-mail: xiaolong5130@126.com。
通信作者: 杨书运(1972—), 男, 博士, 副教授, 主要从事应用气象学研究。E-mail: yangshy@ahau.edu.cn。
马友华(1962—), 男, 博士。E-mail: yhma@ahau.edu.cn。

fertilization, it was found that N_2O emissions flux could be significantly reduced by fertilization after rains. The increase of water content caused by precipitation was the factor that affected the dramatic change of N_2O emissions flux. Furthermore, no tillage and straw application tillage had the best effects on N_2O emissions and wheat production among the four treatments. For N_2O abatement and wheat yield, straw application tillage is the most appropriate approach.

Keywords: N_2O emission; winter wheat field; tillage methods; soil moisture; greenhouse gases; emissions reduction

N_2O 是仅次于 CO_2 和 CH_4 的第三大温室气体,虽然在大气层中的浓度很低,但其周期 100 a 的温室潜能是 CO_2 的 298 倍。不仅如此,随着大气中 N_2O 浓度的不断上升, N_2O 正成为破坏平流层臭氧的主要因素,在全球变暖中的影响日益显著^[1]。根据世界气象组织(WMO)2014 年 9 月最新发布的《温室气体公报》表明,大气中 N_2O 的体积分数已从工业革命前 270×10^{-9} 激增至 2013 年 325.9×10^{-9} ^[2]。土壤微生物的积极活动和土壤呼吸系统脱氧被认为是土壤排放 N_2O 的主要因素。硝化反应是土壤 N 转化中不可缺少的环节,由于硝化过程伴有相关微生物和酶参与,连同微生物过程的反硝化反应一起产生土壤物质循环的动力^[3]。土壤排放的 N_2O 作为硝化作用的产物,其中一个重要过程是 NH_4^+ 转变为 NO_2^- 和 NO_3^- ^[4]。农业土壤被认为是人类活动带来的主要排放源,大约占到 60% 的贡献比例^[5]。在土壤与大气之间的近地表土壤, N_2O 净排放是产生和消耗相互平衡后的结果。在 N_2O 的产生过程中, O_2 、C、N 扮演着重要角色。除了微生物过程、分子扩散、对流以及蒸腾等影响因素外,土壤温度、土壤湿度、降水量和其它气象因素对土壤 N_2O 的排放也起到了至关重要的作用^[6]。

大量研究发现,不同施肥措施、水分管理措施、土壤质地和土壤含水率对麦田 N_2O 排放通量有着重要的影响,如增施氮肥能显著增加麦田 N_2O 的排放^[7-11]。据宋利娜等^[12]报道,施肥和灌溉能显著提高麦田 N_2O 的排放通量,灌溉以及强降水为反硝化微生物营造了良好的厌氧环境,提高了反硝化过程中 N_2O 的生成和排放。Lan 等^[13]研究发现,冬小麦田含水率较高的粘土比含水率较低的砂质土壤 N_2O 排放通量更高。庞军柱等^[14]认为黄土高原冬小麦田 N_2O 的排放量与土壤含水率 ($P < 0.05$) 呈显著相关性。在不同耕作方式对麦田 N_2O 排放通量影响的报道中,大多数研究认为合理选择耕作方式能有效促进麦田 N_2O 减排^[15-19]。据赵建波等^[20]报道,免耕已成为我国实现农业可持续发展的主要措施,特别是在华北地区已初具规模。但也有研究者^[21]认为麦田免耕会增加农田 N_2O 排放。关于麦田秸秆还田的报道很多,主要集中于不同秸秆还田

方式对麦田 N_2O 排放特征的影响^[22-23]。但这些报道的试验地较多集中于北方非稻麦轮作区,而有关耕作方式对南方稻麦轮作系统下冬小麦田 N_2O 排放特征的研究则鲜有报道。因此,本研究设置了 4 种耕作处理方式,对稻麦轮作种植制度下不同耕作处理方式冬小麦田 N_2O 排放特征进行研究,寻求稻麦轮作制度下不同耕作方式与土壤温室气体排放之间的联系,以探讨不同耕作方式对冬麦田 N_2O 排放影响。这对于精确计算稻麦轮作种植制度下不同耕作方式的冬小麦 N_2O 排放量和温室气体的科学减排有一定参考价值。

1 材料与方法

1.1 试验点概况

监测点位于安徽省巢湖市烔炀镇安徽农业大学巢湖农业环境试验站,农田温室气体监测始于 2011 年的长期定位观测。该监测点属于北亚热带湿润季风气候,年均气温约 16°C , 年均降水量 996 mm,四季分明,气候温和,光照充足,无霜期长,地势平坦,土质肥沃。土壤有机质含量 $23.64 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, pH 值 6.18,全氮含量 $1.30 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。当地的耕作制度是单季稻和旱作作物(通常是冬小麦)轮作,本文主要研究巢湖流域冬小麦田 N_2O 的排放特征。

1.2 试验设计

试验小麦于 2013 年 10 月 28 日播种,2014 年 5 月 26 日收获,生育期共计 211 d。供试小麦品种是扬麦 16,播撒量为 $120 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。试验田设置了 4 种处理,每种处理采用随机 3 次重复,各小区面积均为 $4 \text{ m} \times 7.5 \text{ m}$ 。4 种处理分别为:(1) 空白对照(CK),常规翻耕,全生育期不施肥;(2) 常规耕作(CG),常规翻耕;(3) 免耕(CB),实行免耕;(4) 秸秆还田(CJ),常规翻耕,经粉碎后的秸秆长度为 3~5 cm,秸秆均匀撒施,翻埋入土,秸秆全量还田,还田量为 $7500 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,之后进行撒播种子。前季水稻 2013 年 6 月 13 日移栽,9 月 27 日收获。按照巢湖市当地施肥标准,前季水稻田施 N $180 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, P_2O_5 $67.5 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, K_2O $67.5 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,本季冬小麦田施 N $210 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, P_2O_5 $72 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, K_2O $72 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,常规耕作、免耕处理和秸秆还田具体施肥管理情况见表 1。

小麦生长季无灌水,依靠地下水和降水补给。

表 1 施肥管理情况
Table 1 Fertilization management

管理时间 (年-月-日) Management time (y-m-d)	施肥情况 Fertilization	肥料施用量/(kg·hm ⁻²) Fertilizer application amount		
		N	P ₂ O ₅	K ₂ O
2013-10-28	基肥 Basal dressing	72	72	72
2014-01-09	腊肥 Winter dressing	69	—	—
2014-03-05	返青肥 Jointing-top dressing	69	—	—

1.3 N₂O 的采集与测定

气体的采集采用静态箱法,2014 年 4 月 1 日前,气样采集使用的暗箱规格为 50 cm×50 cm×60 cm,为适应小麦植株的增高,4 月 1 日后,规格变为 50 cm×50 cm×120 cm。采气中使用 60 mL 塑料注射器连接箱内。常规采气时间为当日 9:00—11:00,在此时间段内完成 3 个重复。9:00 开始采样,每 10 min 完成一组,每组分别在第 0 min、第 10 min、第 20 min 和第 30 min 进行。每次采样平均间隔为 1—2 周,随小麦不同生长期和外部环境而调整,在施肥之后加密采样。每次采气的同时测定对应处理的土壤水分和 5 cm、10 cm 地温。采用气相色谱法,利用气相色谱仪(Bruker450-GC)对气体测定 N₂O 的浓度。色谱柱温度为 50℃,检测器 ECD 为 300℃,载气 N₂ 流量为 300 ml·min⁻¹。

1.4 计算方法

(1) N₂O 排放通量用下式计算:

$$F = \rho \times \frac{dc}{dt} \times H \times \frac{273}{273 + T} \tag{1}$$

式中, F 为排放通量($\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$); ρ 为 N₂O 标准状态下密度 $1.25 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$; H 为静态采样箱高(m); $\frac{dc}{dt}$ 为单位时间箱内气体浓度的变化($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$); T 为箱内温度(K)。

(2) 利用加权法计算 N₂O 排放量的公式:

$$Sum(N_2O) = \sum_k^n (E_k \times D_k) \tag{2}$$

式中, $Sum(N_2O)$ 为排放量($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$); E_k 为第 k 次采样时 N₂O 的排放量($\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$); D_k 为第 k 次与第 $k+1$ 次采样间隔天数(d)。

采集气体的同时,使用标准土钻采样法采集 0~20 cm 的土样,在实验室采用靛酚蓝比色法测定土壤中 NH₄⁺ 含量。土壤 NH₄⁺ 含量公式:

$$W(N) = \rho \times V \times ts \times 10^{-3} \times 1000/m \tag{3}$$

式中, $W(N)$ 为土壤中 NH₄⁺ 的含量($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$); ρ 为

从工作曲线中查到的显色液中 N 的浓度($\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$); V 为浸提体积(mL); ts 为分取倍数; m 为土壤干土重(g)。

采用 Origin8.5 作图,利用 SPSS18.0 进行 N₂O 排放通量与气温、土壤温度、土壤水分双变量相关分析,使用 Matlab 进行数据曲线方程的拟合。不同处理之间 N₂O 的排放通量采用 ANOVA 分析和 LSD($P < 0.05$)。

2 结果与分析

2.1 气温和降水的逐日变化

监测点的气温和降水等气象数据由自动气象站获取。图 1 是 2013 年 10 月 25 日至 2014 年 5 月 31 日试验期间逐日平均气温与降水量变化图。采样期间,当地逐日平均气温基本呈现先降后升的季节性变化趋势,气温最低值(0.4℃)、最高值(24.3℃)分别出现在 12 月和 5 月。在整个小麦生育期,当地总降水量为 285.2 mm,2、3、4 月降水量之和占总降水量的 72.1%,小麦生育期中后期降水量较大。

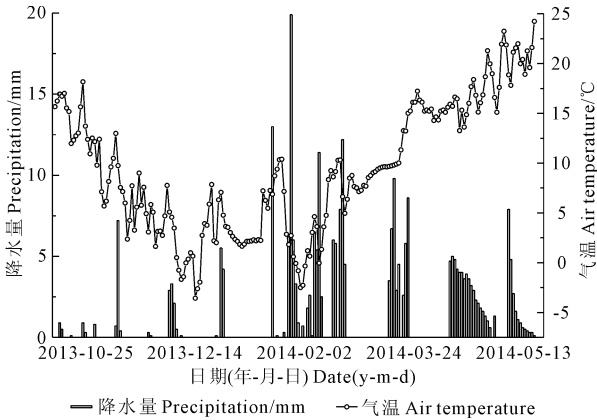


图 1 试验期间逐日平均气温和降水量

Fig.1 Seasonal patterns in daily mean air temperature and precipitation during the wheat season

2.2 不同耕作方式下麦田土壤 N₂O 排放通量存在显著的季节性变化

根据图 2 可知,常规耕作(CG)、免耕(CB)与秸秆还田(CJ)分别出现了 5 次明显的 N₂O 排放通量峰值且时间基本重合,日期分别为 2013-10-28、2013-12-19、2014-01-14、2014-02-16 和 2014-03-11。第 1 次、第 3 次和第 5 次均与施肥有关。第 1 次排放峰是在小麦播种后不久、施肥后第 3 天出现的,峰值为 $26.1 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ (秸秆还田处理),时间持续近一周。受施基肥影响,且土壤中水分适宜、无机肥含量高,植株吸收氮素多,因此麦田呈现 N₂O

较大排放峰。这与熊正琴等^[26]的研究结果相吻合。值得注意的是,免耕的 N₂O 排放通量在小麦播种后不久出现较高值,这与前人^[20,27]的研究成果一致。肥料播撒在土壤表面,短时间内加速了其分解释放,这为 N₂O 的形成奠定了氮素基础。麦田从前季水稻田的淹水环境变成旱作环境,土壤氮素的转化给麦田土壤 N₂O 的排放创造了条件^[28]。第二次排放峰出现在 12 月中旬的一次规模较大的降水之后,这是因为土壤水分含量的增加促进了肥料释放和反硝化的速率加快。

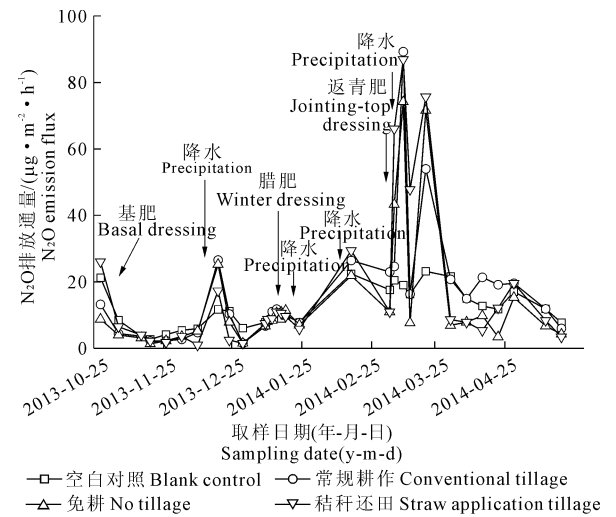


图2 不同耕作方式下冬小麦 N₂O 排放通量的季节性变化
Fig.2 Seasonal variation of N₂O emission flux in winter wheat under different tillage measures over three cropping seasons

经过分析发现,第 3 次和第 5 次 N₂O 的排放峰不是在施肥之后立即出现,而是在降水 2~3 d 后出现,这与马二登等^[23]的报道结果相一致。两次排放峰值分别是 11.78 μg·m⁻²·h⁻¹ (常规耕作 CG)、89.27 μg·m⁻²·h⁻¹ (常规耕作 CG)。施用氮肥能够为土壤提供充足的底物,为 N₂O 的排放提供大量的基质。硝化和反硝化作为土壤中 N₂O 产生的两个最重要的生物过程,是在微生物参与下历经复杂物理、化学、生物等过程完成的。土壤水分不仅会影响土壤中硝化及反硝化微生物的活性,还会影响反硝化产物的气体组成和传输,这大大地影响了 N₂O 的产生与排放。封克等^[25]报道指出,N₂O 的最大排放峰出现在土壤含水率 45%~75% 时。因而,土壤缺少适宜的水分,就很难排放 N₂O。

图 3 是施基肥后 4 次采样,常规耕作、免耕和秸秆还田处理的 N₂O 排放通量变化情况,拟合的曲线方程为 $y = -0.472x^2 + 4.4046x + 2.811$ ($R^2 = 0.9001, P = 0.015$)。可见,随着土壤中 N 的增加和

流失,N₂O 排放通量呈现先增加后减少的特征。

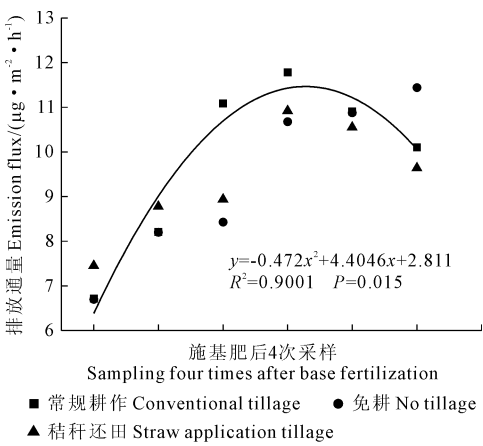


图3 排放通量与施肥后 4 次采样的关系
Fig.3 The relation between N₂O emission flux and sampling four times after fertilization

在小麦全生育期,4 种处理下 N₂O 排放通量存在着明显的季节性变化。4 种处理下 N₂O 的排放通量均为正值,即冬小麦田表现为 N₂O 的排放源。N₂O 排放通量在小麦越冬前随气温的降低而减少,在春季随温度的升高而增加。值得注意的是,除空白对照处理 N₂O 的排放通量季节性变化幅度相对较小外,常规耕作处理、免耕处理和秸秆还田处理 N₂O 的排放通量季节性变化幅度都较大。

2.3 影响麦田 N₂O 排放的环境因素

由图 4 可知,4 种处理下土壤 5 cm 温度范围是 0.2℃~25.3℃,空白对照、常规耕作、免耕和秸秆还田土壤 5 cm 平均温度分别为 9.6℃、9.4℃、9.2℃和 9.7℃。各处理间 5 cm 和 10 cm 地温相关性显著 ($P < 0.01$)。由表 2 看出,各处理 N₂O 排放与 5 cm、10 cm、气温的相关性均未达到显著水平 ($P < 0.05$)。土壤温度主要是通过土壤有机质的分解和微生物分解代谢过程中相关酶的活性来调节土壤 N₂O 的排放^[29]。有前人研究结果^[10,23]表明土壤 5 cm、10 cm 在 0℃~20℃ 的温度范围内,冬小麦 N₂O 的排放通量与土壤温度不呈线性关系。

图 5 表明了不同耕作方式下土壤含水率的季节变化情况,冬麦田各处理间土壤含水率达到了显著水平 ($P < 0.05$),说明耕作方式影响土壤含水率。4 种处理 N₂O 的排放通量与土壤水分均呈现正相关 ($P < 0.05$)。通过相关分析可以看出:土壤 N₂O 排放通量与 NH₄⁺ 中 N 的含量变化呈现正相关趋势,拟合曲线方程 $y = -0.238x^2 + 0.565x - 13.638$ ($R^2 = 0.928, P = 0.0013$) (见图 6),这与前人研究结果一致^[30]。

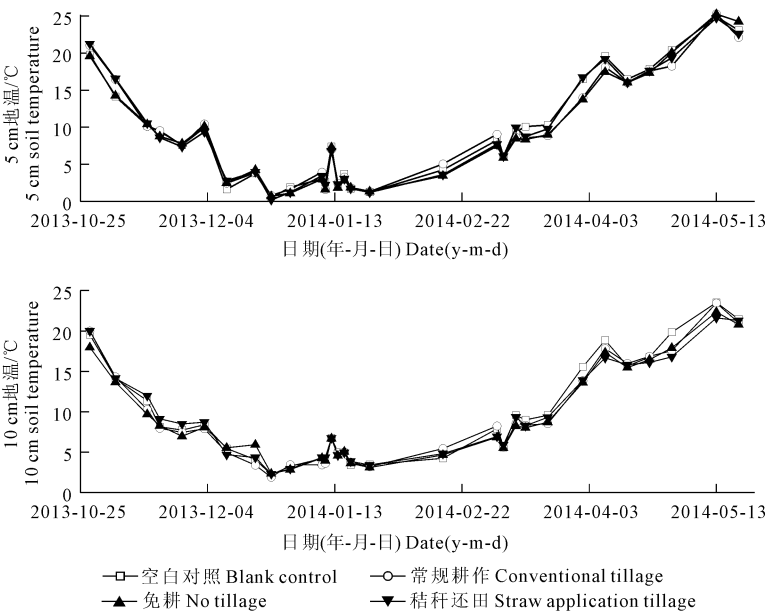


图 4 不同耕作方式下土壤 5 cm 和 10 cm 温度的季节性变化

Fig.4 The seasonal variation of 5 cm and 10 cm temperatures under different tillage measures over three cropping seasons

表 2 N₂O 排放通量与地温、气温、WFPS 的相关分析
Table 2 Correlation analyses between N₂O emission flux and soil temperature, air temperature and WFPS

处理 Treatment	$T_{5\text{cm}}$	$T_{10\text{cm}}$	T	WFPS
CK	0.026	0.237	0.296	0.375**
CG	0.034	0.023	0.089	0.361**
CB	0.097	0.117	0.048	0.354**
CJ	0.012	0.032	0.045	0.355**

注: * 和 ** 分别表示在 0.10 和 0.05 水平上显著相关。 $T_{5\text{cm}}$: 5 cm 地温; $T_{10\text{cm}}$: 10 cm 地温; T : 气温; WFPS: 土壤空隙含水率。

Note: * Correlation is significant at the 0.10 level; ** Correlation is significant at the 0.05 level. $T_{5\text{cm}}$: 5 cm temperature; $T_{10\text{cm}}$: 10 cm temperature; T : Air temperature; WFPS: Soil moisture rate.

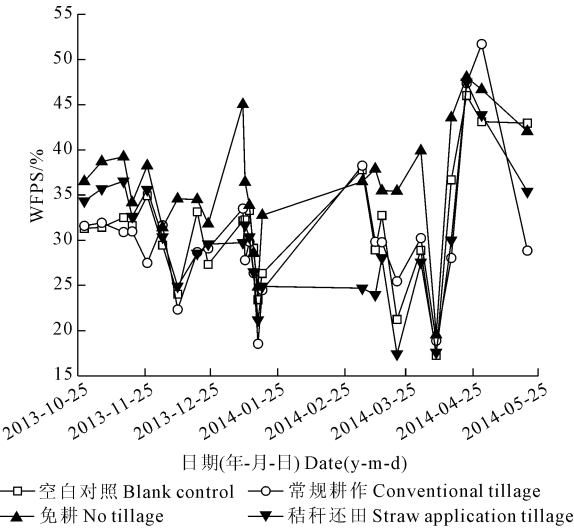


图 5 不同耕作方式下土壤 WFPS 的季节性变化

Fig.5 The seasonal variation of WFPS under different tillage measures over three cropping seasons

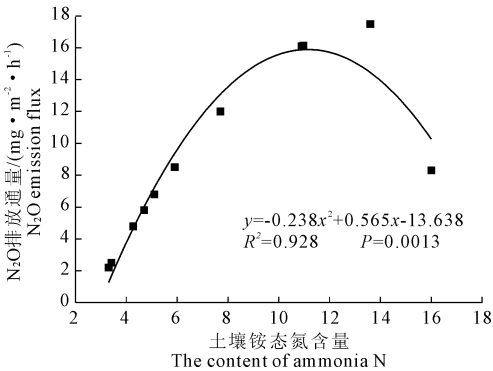


图 6 土壤铵态氮与 N₂O 排放通量的关系

Fig.6 The relation between NH₄⁺ and N₂O emission flux

从表 3 可以看出, 播种 ~ 返青期和返青 ~ 成熟期占全生育期 N₂O 排放总量的比重分别是 16.56% ~ 43.24%、56.76% ~ 83.44%, 而返青 ~ 成熟期 N₂O 的排放总量明显多于播种 ~ 返青期。3 月 5 日施返青肥, 6 天后出现了 N₂O 排放通量的最高峰, 3 月 21 日出现了次排放峰, 后者峰值为前者峰值的 60% ~ 87%。值得注意的是施用返青肥后, 排放量一直处于高位。3 月 5 日 ~ 4 月 22 日共 49 d 的排放量占全生育期 210 d 排放量的比例分别为 33.11% (空白对照)、47.75% (常规耕作)、40.81% (免耕) 和 54.22% (秸秆还田)。这说明施肥, 尤其是施用返青肥对 N₂O 的排放影响巨大, 显著地增加了全生育期 N₂O 排放。相比常规耕作管理, 免耕使土壤 N₂O 排放量降低了 29.45%。长期耕作土壤比未耕作土壤肥沃, 土壤 N 有效性高, 因此排放更多 N₂O。免耕土壤作为压实土壤, 其空气中 N₂O 浓度比其它处理高 7

倍,但土壤压实对土壤中 N_2O 向大气排放有一定的阻隔作用,使得土壤 N_2O 的排放通量降低^[31]。从图 7 可以看出,虽然空白处理未施肥,但返青~成熟期

的排放总量仍然大于播种~返青期。这可能与本小麦季后期,在降水较多和温度适宜条件下土壤硝化反硝化作用显著增强有关。

表 3 不同耕作方式下不同生育阶段冬小麦 N_2O 排放的相关分析

Table 3 Analyses on winter wheat N_2O emission during different periods under different tillage measures

处理 Treatments	全生育期 Whole growth period		播种~返青期 Sowing period to returning green period		返青~成熟期 Returning green period to mature period	
	平均排放通量 Average emission flux	排放总量 Total emission	平均排放通量 Average emission flux	排放总量 Total emission	平均排放通量 Average emission flux	排放总量 Total emission
	$/(\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1})$	$/(\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2})$	$/(\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1})$	$/(\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2})$	$/(\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1})$	$/(\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2})$
CK	$7.76 \pm 3.04\text{b}$	0.74	7.33	0.32	9.55	0.42
CG	$16.18 \pm 17.50\text{a}$	1.63	11.35	0.27	26.12	1.36
CB	$11.24 \pm 10.83\text{a}$	1.15	9.40	0.42	16.51	0.73
CJ	$17.03 \pm 22.46\text{a}$	1.76	10.28	0.45	29.68	1.31

注:同一列中 a,b 不同字母分别表示处理间方差分析达显著水平 ($P < 0.05$)。
Note: Within a column a and b indicate significant difference at $P < 0.05$ level.

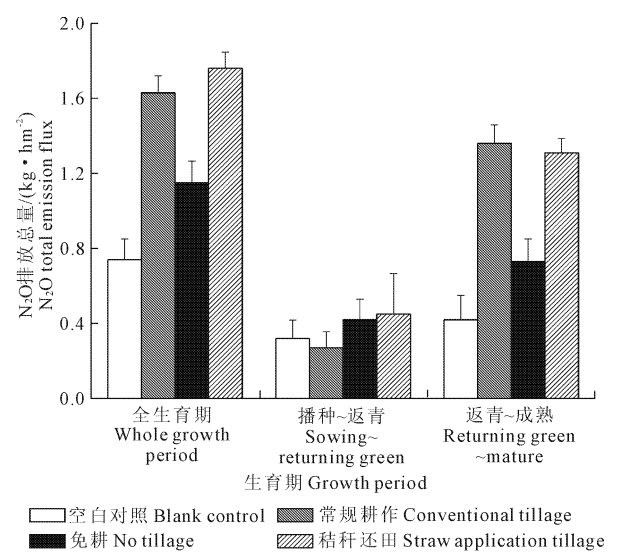


图 7 冬小麦田在不同生育阶段 N_2O 的排放量

Fig. 7 N_2O emission from winter wheat field during different periods

2.4 作物单位产量 N_2O 排放量和 N_2O 的温室效应

CO_2 当量关注的是排放,而等效 CO_2 则关系到所有温室气体在大气中的浓度水平。根据 IPCC 的统计, N_2O 的温室效应系数是 298^[2],可计算出不同处理排放的 N_2O 的温室效应(100 年)。换算成 CO_2 当量后,表 4 中空白对照、常规耕作、免耕和秸秆还田处理的温室效应分别为 $220.52 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 、 $485.74 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 、 $342.70 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 和 $524.48 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。

由表 4 知,空白对照、常规耕作、免耕和秸秆还田处理的经济产量分别为 $1\,439$ 、 $3\,139$ 、 $3\,194 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 和 $3\,917 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。不同耕作方式对小麦产量的影响较大,与常规耕作相比,免耕的经济产量几乎持平,秸秆还田处理的经济产量增加了 24.78%,胡腾等^[9]的研究结果为 15.2%。秸秆还田处理的经

济产量比免耕处理增加了 22.6%,但是单位面积粮食产量的减排并不是最优的。因为粮食增产和减排是农业可持续发展的基本要求,合理的减排措施应该是使作物单位产量的温室气体排放量处于较低水平^[32]。全生育期 4 种处理小麦单位产量 N_2O 排放量(排放总量/经济产量)从小到大的关系依次为 CB ($0.36 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$) < CJ ($0.45 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$) < CK ($0.51 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$) < CG ($0.52 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$)。与常规耕作对比,空白对照基本持平,而免耕和秸秆还田分别减少了 30.8%、13.5%。免耕处理和秸秆还田处理较大幅度地降低了小麦 N_2O 单位产量的排放量,特别是秸秆还田处理在小麦增产和 N_2O 减排两个方面都实现了较好的效果,因此就该研究区而言,秸秆还田是值得推广的耕作方式。

3 结论与讨论

在小麦生育期,空白对照、常规耕作、免耕和秸秆还田处理均表现为 N_2O 的排放源。常规耕作、免耕和秸秆还田处理的 N_2O 排放通量具有明显的季节性变化趋势,空白对照排放通量随季节性变化较小。4 种处理排放通量大小:秸秆还田 ($17.03 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$) > 常规管理 ($16.18 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$) > 免耕 ($11.24 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$) > 空白对照 ($7.76 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$)。

气温和土壤 5 cm、10 cm 温度与冬小麦田 N_2O 的排放通量不存在显著相关性,温度不是麦田排放 N_2O 的限制性因素。4 种处理 N_2O 排放通量与土壤水分均呈现正相关 ($P < 0.05$),通过对比几次降水与施肥前后 N_2O 排放通量的关系,发现降水后施肥能显著减少 N_2O 排放。

表 4 不同耕作方式下冬小麦产量及 N₂O 的温室效应

Table 4 Winter wheat yield under different tillage methods and greenhouse effect of N₂O

处理 Treatment	生物产量 ¹⁾ Biological outputs /(kg·hm ⁻²)	变异系数 ²⁾ Variable coefficient /%	经济产量 Economic outputs /(kg·hm ⁻²)	变异系数 ²⁾ Variable coefficient /%	经济系数 ³⁾ Economic coefficient	单位产量排放量 Emission intensity /(g·kg ⁻¹)	温室效应 N ₂ O /(kg·hm ⁻²)
CK	3889B	8.0	1439	8.2	0.37	0.51	220.52 ^b
CG	8719A	1.6	3139	1.5	0.36	0.52	485.74 ^a
CB	8873A	5.1	3194	6.6	0.36	0.36	342.70 ^a
CJ	10880A	12.2	3917	13.9	0.36	0.45	524.48 ^a

注:1)不同大写字母代表处理间差异极显著($P < 0.01$);2)标准差与平均值之比;3)经济产量与生物产量之比。

Note: 1) Different capital letters within a column indicate significant difference at $P < 0.01$ level; 2) The ratio of the standard deviation and average; 3) The ratio of the economic yield and biological yield.

在 N₂O 排放减排和小麦产量上,免耕和秸秆还田处理效果较好。与常规耕作对比,在小麦单位产量 N₂O 排放通量指标上,秸秆还田减少了 13.5%,免耕增加了 30.8%。秸秆还田处理在小麦增产和 N₂O 减排两个方面都实现了较好的效果,因此就该研究区而言,秸秆还田是值得推广的耕作方式。

冬小麦土壤 N₂O 排放需要经过复杂的生物、化学过程完成,影响排放环境的因素有土壤气温、水分、肥料、土壤微生物、农业管理措施等,而不只是受单一因素的影响。冬小麦田 N₂O 的产生主要来源于土壤水分的控制和调节,除了灌溉外,降水是麦田水分增加的主要原因。当土壤湿度适宜时,土壤温度一定程度上调节了土壤 N₂O 的排放。研究温室气体减排,对农田主要温室气体 N₂O 的监测及其排放规律的探讨显得极为重要。

免耕和秸秆覆盖正被农业部门大力号召和大面积推广,但目前对保护性耕作条件下农田主要温室气体的综合研究评价不多见。冬小麦麦田主要表现为 N₂O 的排放源,因此本文较详细地探讨了耕作方式对南方稻麦轮作系统下冬小麦田 N₂O 排放特征的研究,不过本文并未对麦田另外两种温室气体(CH₄、CO₂)的排放特征以及冬麦田温室气体的全球增温潜势(GWP)进行综合估算。因此不同土地类型、不同气象条件下三种主要温室气体的综合评价以及计算增温潜势是以后研究的方向。秸秆还田利于改良农田土壤环境和提高作物质量,加强秸秆还田方式对温室气体排放的影响研究,运用同位素示踪等技术明确秸秆对温室气体排放的直接和间接影响,以实现粮食增产同时减少 N₂O 的排放是仍将是以后研究的重点。

致谢:感谢安徽农业大学资源与环境学院硕士研究生汪海欧和张彩林在采样时的辛勤工作,傅阳和吴文春在文章写作中给予的帮助!

参 考 文 献:

[1] Rashad R, Deirdre H. Nitrous oxide emission from grazed grassland under different management systems[J]. *Ecosystems*, 2011, (14): 563-582.

[2] 世界气象组织(WMO). Record greenhouse gas levels impact atmosphere and oceans [EB/OL]. https://www.wmo.int/pages/media-centre/press-releases/pr_1002_en.html. 2014-09-09.

[3] Li X, Inubushi K, Sakamoto K. Nitrous oxide concentrations in an Andisol profile and emissions to the atmosphere as influenced by the application of nitrogen fertilizers and manure[J]. *Biol Fert Soil*, 2011, 35(2):108-113.

[4] Barton L, Kiese R, Gatter D. Nitrous oxide emissions from a cropped soil in a semi-arid climate[J]. *Glob Change Biology*, 2008, 14(1): 177-192.

[5] Clough T J, Scerlock R R, Rolston D E. A review of the movement and fate of N₂O in the subsoil[J]. *Nutr Cycl Agroecosyst*, 2005, 72(1):3-11.

[6] 江 波,杨书运,马友华,等.耕作方式对圩区冬小麦温室气体排放通量的影响[J]. *安徽农业大学学报*, 2014, 41(2): 241-247.

[7] Ji Y, Liu G, Xu H, et al. Effect of controlled-release fertilizer on nitrous oxide emission from a winter wheat field[J]. *Nutr Cycl Agroecosyst*, 2012, 94(1):111-122.

[8] Zhou M H, Zhu B, Klaus Butterbach-bahl, et al. Nitrous oxide emissions and nitrate leaching from a rain-fed wheat-maize rotation in the Sichuan Basin, China[J]. *Plant Soil*, 2013, 362(1):149-159.

[9] 胡 腾,同延安,高鹏程,等.黄土高原南部旱地冬小麦长期 N₂O 排放特征与基于优化施氮的减排方法研究[J]. *中国生态农业学报*, 2014, 22(9):1038-1046.

[10] 谢军飞,李玉娥.土壤温度对北京旱地农田 N₂O 的影响[J]. *中国农业气象*, 2005, 26(1):7-10.

[11] 马 静,徐 华,蔡祖聪,等.稻季施肥管理措施对后续春季 N₂O 排放的影响[J]. *土壤*, 2006, 38(6):672-691.

[12] 宋利娜,张玉铭,胡春胜,等.华北平原高产农区冬小麦农田土壤温室气体排放及其综合温室效应[J]. *中国生态农业学报*, 2013, 21(3):297-307.

[13] Lan T, Han Y, Marco R, et al. Processes leading to N₂O and NO emissions from two different Chinese soils under different soil moisture contents[J]. *Plant and Soil*, 2013, 37(1):611-627.

[14] 庞军柱,王效科,牟玉静,等.黄土高原冬小麦地 N₂O 排放[J]. *生态学报*, 2011, 31(7):1896-1903.

总体来说,由于盐池县 85% 的耕地为旱地,以降水量为主要控制因子的粮食产量波动将长期存在。因此,一是要通过节水灌溉、集雨农业、覆膜、作物结构调整等,将气候依赖型农业向水文依赖型农业转变;二是要因地制宜发展高产农田,将部分低产田退耕,特别是将持水能力弱的沙土地退耕。加强对中高产田的投入,保证粮食生产面积的稳定。三是加强防风固沙以减少蒸发和水分无效消耗。加强农田防护林建设,并且利用景观技术,在农田集中区的周边,特别是上风方向建立固沙防风系统。

参 考 文 献:

[1] 孙 武,侯 玉,张 勃.生态脆弱带波动性、人口压力、脆弱度之间的关系[J].生态学报,2000,20(3):369-373.
[2] 赵松乔.察北、察盟及锡盟——一个农牧过渡带地区的经济地理调查[J].地理学报,1953,19(1):43-60.
[3] Viglizzo E F. Agroecosystems stability in the Argentine Pampas[J]. Agriculture Ecosystems & Environment, 1986,16(1):1-12.
[4] 高旺盛.北方农牧交错带农业系统生产力研究方法分析[J].农业系统科学与综合研究,2002,18(4):279-282.
[5] 张新时.我国必须走发展人工草地和草地农业的道路[J].科学对社会的影响,2010,(3):18-21.
[6] 刘会玉,林振山,张明阳.基于 EMD 的我国粮食产量波动及其成因多尺度分析[J].自然资源学报,2005,20(5):745-751.
[7] 王树涛,李新旺,门明新,等.基于改进灰色关联度法的河北省粮食波动影响因素研究[J].中国农业科学,2011,44(1):176-184.

[8] 蒋尚明,金菊良,许 浒,等.基于经验模态分解和集对分析的粮食单产波动影响分析[J].农业工程学报,2013,29(4):213-221.
[9] 孙 武,吴 薇.内蒙古高原东南部降水驱动的农业系统波动性分析[J].植物生态学报,2002,26(1):23-28.
[10] 宋乃平,张凤荣.鄂尔多斯农牧交错土地利用格局的演变与机理[J].地理学报,2007,62(12):1299-1307.
[11] 李 亚,何彤慧,璩向宁.盐池县气候要素对农牧业的影响评价及产业调适研究[J].干旱区资源与环境,2009,23(12):82-86.
[12] 孙特生,李 波,张新时.北方农牧交错区农业生态系统生产力对气候波动的响应——以准格尔旗为例[J].生态学报,2012,32(19):6156-6167.
[13] 刘会玉,林振山,张阳明.基于 EMD 的我国粮食产量波动及其成因多尺度分析[J].自然资源学报,2005,20(5):745-751.
[14] 鲁 欣,秦大庸,刘 俊,等.宁夏粮食产量主要影响因素分析[J].灌溉排水学报,2006,25(6):65-70.
[15] 牛创民,温学飞,王 峰.基于因子分析法的盐池县粮食生产影响因素分析[J].水土保持研究,2010,17(6):278-282.
[16] Huang N E, Shen Z, Long S R, et al. The empirical mode decomposition and the Hibert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis[J]. Proceedings of the Royal Society of London, 1998,454:903-955.
[17] 张明阳,王克林,刘会玉,等.基于 EMD 的洪涝灾害成灾面积波动的多时间尺度分析[J].中国农业气象,2005,26(4):220-224.
[18] 蒋尚明,金菊良,许 浒,等.基于经验模态分解和集对分析的粮食单产波动影响分析[J].农业工程学报,2013,29(4):213-221.

(上接第 227 页)

[15] Farquharson R, Baldock J. Concepts in modeling N₂O emissions from land use[J]. Plant and Soil, 2008,309(1):147-167.
[16] 郑建初,张岳芳,陈留根,等.稻麦轮作系统冬小麦农田耕作措施对氧化亚氮排放的影响[J].生态学报,2012,32(19):6138-6146.
[17] 张 贺,郭李萍,谢立勇,等.不同管理措施对华北平原冬小麦田土壤 CO₂ 和 N₂O 排放的影响研究[J].土壤通报,2013,44(3):653-659.
[18] 王海飞,贾兴永,高 兵,等.不同土地利用方式土壤温室气体排放对碳氮添加的相应[J].土壤学报,2013,50(6):1172-1182.
[19] 黄光辉,张明园,陈 阜,等.耕作措施对华北地区冬小麦田 N₂O 排放的影响[J].农业工程学报,2011,27(2):167-173.
[20] 赵建波,迟淑筠,宁堂原,等.免耕条件下小麦田 N₂O 排放及影响因素研究[J].水土保持学报,2008,22(3):196-200.
[21] Shelp M L, Beauchamp E G, Thurtell G W. Nitrous oxide emissions from soil amended with glucose alfalfa or corn residues[J]. Communications in Soil Science and Plant Analysis, 2000,41(4):310-317.
[22] 李英臣,候翠翠,李 勇,等.免耕和秸秆覆盖对农田土壤温室气体排放的影响[J].生态环境学报,2014,23(6):1076-1083.
[23] 马二登,马 静,徐 华,等.稻田还田方式对麦田 N₂O 排放的影响[J].土壤,2007,39(6):870-873.

[24] 蔡祖聪,徐 华,马 静.稻田生态系统 CH₄ 和 N₂O 排放[M].合肥:中国科学技术大学出版社,2009:67-115.
[25] 封 克,殷士学.影响氧化亚氮形成与排放的土壤因素[J].土壤学进展,1995,23(6):35-40.
[26] 熊正琴,邢光熹,鹤田治雄,等.冬季耕作制度对农田氧化亚氮排放的贡献[J].南京农业大学学报,2002,25(4):21-25.
[27] Hansen S, Mahlum J E, Bakken L R. N₂O and CH₄ fluxes in soil influenced by fertilization and tractor traffic[J]. Soil Biology and Biochemistry, 1993,25(5):621-630.
[28] 郑循华,王明星,王跃思.华东稻麦轮作生态系统的 N₂O 的排放研究[J].应用生态学报,1997,8(5):495-496.
[29] 朱永官,王晓辉,杨小茹,等.农田土壤 N₂O 产生的关键生物过程及减排措施[J].环境科学,2014,35(2):792-800.
[30] 石洪艾,李伟军,尤孟阳,等.不同土地利用方式下土壤温度与土壤水分对黑土 N₂O 排放的影响[J].农业环境科学学报,2013,32(11):2286-2292.
[31] 齐玉春,董云社.土壤氧化亚氮产生排放及其影响因素[J].地理学报,1999,11(6):534-541.
[32] 贺 非,马友华,杨书运,等.不同施肥技术对单季稻田 CH₄ 和 N₂O 排放的影响研究[J].农业环境科学学报,2013,32(10):2093-2098.