

DOI: 10.13671/j.hjkxxb.2017.0491

孙海妮, 岳善超, 王仕稳, 等. 2018. 有机肥及补充灌溉对旱地农田温室气体排放的影响 [J]. 环境科学学报, 38(5): 2055–2065

Sun H N, Yue S C, Wang S W, et al. 2018. Effects of manure and supplementary irrigation on greenhouse gas emission in dryland fields [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 38(5): 2055–2065

有机肥及补充灌溉对旱地农田温室气体排放的影响

孙海妮^{1,2}, 岳善超^{2,3}, 王仕稳^{1,2,3,*}, 牛宗成^{1,2}, 殷俐娜^{1,2,3}, 邓西平^{2,3}

1. 西北农林科技大学资源环境学院, 杨凌 712100

2. 西北农林科技大学水土保持研究所, 杨凌 712100

3. 中国科学院水利部水土保持研究所黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 杨凌 712100

收稿日期: 2017-10-31

修回日期: 2017-12-12

录用日期: 2017-12-12

摘要: 在农业生产中, 提高作物产量减少农田温室气体排放具有重要意义. 本文采用静态箱-气相色谱法, 在黄土高原半干旱半湿润区, 以单施氮肥 180 kg·hm⁻² (以 N 计) 为对照, 研究了氮肥 180 kg·hm⁻² + 有机肥 45×10³ kg·hm⁻² (NM)、氮肥 180 kg·hm⁻² + 有机肥 45×10³ kg·hm⁻² + 拔节期灌水 (NMW) 处理在冬小麦生育期温室气体的变化规律及其综合增温潜势 (Global warming potential, GWP), 并计算温室气体排放强度 (Greenhouse gas intensity, GHGI), 以明确有机肥及补充灌溉的增产潜力及对温室气体的减排效果. 结果表明: ① 整个生育期 CO₂ 排放速率随作物生长发育的加速而逐渐加快, 接近成熟期其排放速率降低; N₂O 排放峰均出现在施肥、降雨及灌水后. NM、NMW 处理的 CO₂ 累积排放量 (以 C 计, 下同) 分别为 14933.35 kg·hm⁻²、15929.74 kg·hm⁻², 比对照分别增加了 22.8%、31.0%; N₂O 累积排放量 (以 N 计, 下同) 分别为 0.48 kg·hm⁻²、0.52 kg·hm⁻², 比对照分别降低了 23.8%、17.5%; CH₄ 累积吸收量分别为 1.73 kg·hm⁻²、1.87 kg·hm⁻², 比对照分别降低了 18.4%、11.8%. ② CH₄ 吸收速率与土壤温度呈显著性正相关, 而与土壤含水量呈显著性负相关; CO₂ 排放速率与土壤温度及含水量均呈显著性正相关; N₂O 排放速率与土壤温度、含水量及硝态氮含量均呈显著性正相关, 与铵态氮含量呈负相关. ③ NM、NMW 处理的 GWP 比对照分别降低了 27.8%、21.2%; NM、NMW 均显著增加了小麦产量, 增产率分别为 24.6%、36.7%. NM、NMW 的 GHGI 比对照分别降低了 41.9%、42.4%. 说明在施用有机肥及有机肥加补充灌溉在增加作物产量的同时, 达到了温室气体减排的作用.

关键词: 有机肥; 灌溉; 冬小麦; 温室气体; 综合增温潜势; 温室气体强度

文章编号: 0253-2468(2018)05-2055-11

中图分类号: X171

文献标识码: A

Effects of manure and supplementary irrigation on greenhouse gas emission in dryland fields

SUN Haini^{1,2}, YUE Shanchao^{2,3}, WANG Shiwen^{1,2,3,*}, NIU Zongcheng^{1,2}, YIN Lina^{1,2,3}, DENG Xiping^{2,3}

1. College of Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling 712100

2. Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling 712100

3. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling 712100

Received 31 October 2017;

received in revised form 12 December 2017;

accepted 12 December 2017

Abstract: Manure and supplementary irrigation application are proposed to increase the crop yield in semi-arid and semi-humid region of Loess Plateau, but the effects of manure and supplementary irrigation application on the greenhouse gas emission are not clear. In this study, CO₂, N₂O and CH₄ emissions were monitored by static-chamber gas chromatography technique and global warming potential (GWP) and greenhouse gas intensity (GHGI) were then calculated. The experiment included three treatments (N: urea nitrogen fertilizer 180 kg·hm⁻², NM: urea nitrogen fertilizer 180 kg·hm⁻² + manure 45×10³ kg·hm⁻², NMW: urea nitrogen fertilizer 180 kg·hm⁻² + manure 45×10³ kg·hm⁻² + supplementary irrigation in wheat jointing stage). The results showed that: ① The fluxes of CO₂ emission increased with the growth process and decreased at the beginning of maturity. Compared with the N treatment, the cumulative CO₂ emissions of NM and NMW treatments were increased by 22.8% and 31.0%, arrived at 14933.35 kg·hm⁻² and 15929.74

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973)项目(No.2015CB150402); 国家科技支撑计划(No.2015BAD22B01)

Supported by the National Key Basic Research and Development Program of China(No.2015CB150402) and the National Science and Technology Support Program of China(No.2015BAD22B01)

作者简介: 孙海妮(1992—)女, E-mail: 1471086139@qq.com; * 责任作者, E-mail: shiwenwang@nwsuaf.edu.cn

Biography: SUN Haini(1992—) female, E-mail: 1471086139@qq.com; * Corresponding author, E-mail: shiwenwang@nwsuaf.edu.cn

$\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, respectively. The fluxes of N_2O emission were suddenly increased after fertilization, rainfall and irrigation during winter wheat growing season. Compared with the N treatment, the cumulative N_2O emissions of NM and NMW were decreased by 23.8% and 17.5%, arrived at $0.48 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ and $0.52 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, respectively. The cumulative CH_4 absorption were $1.73 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ in NM treatment and $1.87 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ in NMW treatment, and decreased by 18.4% and 11.8% compared with N treatment, respectively. ② The CH_4 absorption rate was positive correlation with soil temperature and negative correlation with soil moisture content. The CO_2 and N_2O emission rate were positive correlation with soil temperature and soil moisture content. N_2O emission rate was positive correlation with NO_3^--N , and negative correlation with NH_4^+-N . ③ Both the GWP and GHGI in NM and NMW treatments were significant lower than that of N treatment. However, the crop yields of NM and MMW treatments were significantly increased by 24.6%, 36.7% than that of N treatment, respectively. Therefore, the result of this study showed that the application of manure and supplementary irrigation increased crop yields and mitigated greenhouse gas simultaneously.

Keywords: manure; irrigation; winter wheat; greenhouse gases; global warming potential; greenhouse gas intensity

1 引言 (Introduction)

气候变暖已成为当今全球性的环境问题. 据估计, 1880—2012 年全球平均温度已上升 $0.85 \text{ }^\circ\text{C}$, 预计到 2025 年全球气温将比 100 年前上升 $2 \text{ }^\circ\text{C}$, 到 2100 年将上升 $4 \text{ }^\circ\text{C}$ (曹志洪, 2003; 沈永平等, 2013). 气候变暖的主要原因被认为是由于人类活动导致大气中温室气体的不断增加 (IPCC, 2014). 二氧化碳 (CO_2)、甲烷 (CH_4) 和氧化亚氮 (N_2O) 被认为是对全球气候变化影响最大的 3 种温室气体, 其对温室效应的贡献率分别为 76.7%、14.3%、7.9% (Kuppusamy *et al.*, 2016; Awasthi *et al.*, 2016; Ameloot *et al.*, 2016). 农业活动是温室气体的主要来源之一, 占人类活动排放总量的 10%~20%, 且在不断增加 (Smith *et al.*, 2007; 李露等, 2015; 谭月臣等, 2016). 但现有研究也表明, 农田温室气体减排的潜力是巨大的 (Li *et al.*, 2006; Ussiri *et al.*, 2017).

有机肥因能够改善土壤理化性质、保持土壤肥力和增加作物产量的双重效果而被广泛应用 (王立刚等, 2004). 而同时, 由于其带入土壤大量的碳和氮, 因而有机肥的施用可能会对农田温室气体排放产生较大的影响. 关于有机肥施用对温室气体排放的研究有很多, 大多集中于南方水稻土、华北潮土、东北黑土等 (Zhu *et al.*, 2013; 郭腾飞等, 2016; 李燕青等, 2015; 陈哲等, 2016), 而在黄土高原旱作农田, 对温室气体排放的研究相对较少, 且研究结果存在不一致性 (阎佩云, 2013; 翟洋洋等, 2015). 中国旱地农业面积占耕地总面积的 50%, 有机肥由于其在旱地农田中显著地增产作用而被广泛应用. 作为旱地的主要胁迫因子, 水分供应不足是小麦产量的主要限制因子 (王彩绒等, 2004). 土壤含水量显著影响多种温室气体的排放, 而农田水分管理被认为是减缓农田 N_2O 与 CH_4 排放的重要措施 (Minamikawa *et al.*, 2005; Tyagi *et al.*, 2010). 补充灌溉可以协调土

壤中的水肥关系, 是旱区一种有效增产的水分管理措施 (程宪国等, 1996; 高亚军等, 2008; 刘文国等, 2006), 而拔节期是生物学产量的水分高效补偿期及经济产量的补充期 (王俊儒等, 2000), 因此, 确保该时期的水肥供应对小麦高产具有重要意义. 有机肥配合补充灌溉是已经获得证实的旱区高产模式 (王明英等, 2013), 但是关于在半干旱半湿润区有机肥及补充灌溉在增产的同时对农田温室气体的影响还并不清楚.

本研究以冬小麦“长旱 58”为研究对象, 研究在黄土高原旱作区施用有机肥及补充灌溉对农田 CO_2 、 CH_4 、 N_2O 排放规律及综合增温潜势 (Global warming potential, GWP) 的影响, 并计算其温室气体排放强度 (Greenhouse gas intensity, GHGI), 明确施用有机肥及补充灌溉对冬小麦的增产潜力及对温室气体排放的影响, 以期在高产稳产的基础上实现经济效益与环境效益协调发展.

2 材料与方法 (Materials and methods)

2.1 试验区概况

田间试验于 2016-09—2017-06 在黄土高原中南部的陕西省中科院水利部水土保持研究所武试验站 ($107^\circ44.70' \text{ E}$, $35^\circ12.79' \text{ N}$) 进行, 该地海拔高 1220 m, 属暖温带大陆性季风气候, 年均降雨 581 mm, 主要集中于夏季. 年日照时长 2226.5 h, 年均气温 $9.2 \text{ }^\circ\text{C}$, 无霜期 171 d, 地下水埋深 50~80 m, 属典型旱作雨养农业区. 土壤类型为黄盖黏黑垆土, 质地中壤, 土层均匀疏松, 土壤肥力中等. 供试土壤 (0~20 cm) 基本理化性质为: 有机质 (9.92 ± 0.75) $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$, 硝态氮 (4.49 ± 0.24) $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 铵态氮 (1.22 ± 0.16) $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 速效磷 (9.54 ± 1.06) $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 速效钾 (127.02 ± 8.42) $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 容重 (1.30 ± 0.11) $\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$, pH (8.4 ± 0.06) ($n=6$). 试验期间大气温度及降雨如图 1 所示.

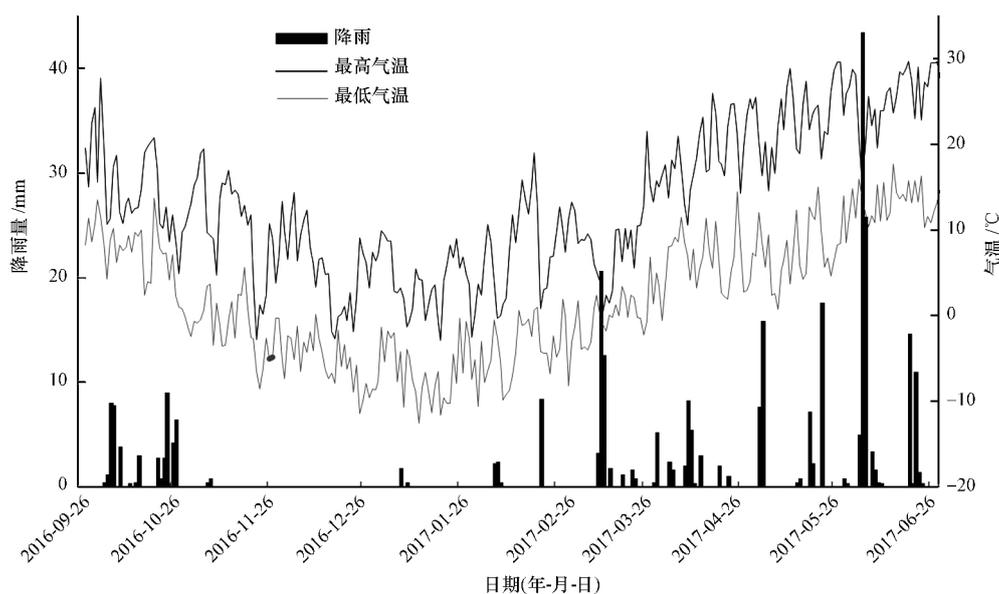


图1 冬小麦生育期大气温度及降雨

Fig.1 Air temperature and precipitation during the growth period of winter wheat

2.2 试验设计

试验共设置3个处理,分别为N:单施氮肥(对照);NM:氮肥+有机肥(施用量为 $45 \times 10^3 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$);NMW:氮肥+有机肥(施用量为 $45 \times 10^3 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)+拔节期灌水 30 m^3 .采用随机区组设计,试验重复3次.小区面积 $4 \times 10 \text{ m}^2$,冬小麦品种为“长旱58”播量为 $150 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$.各处理在播前施N(尿素)量均为 $120 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,施P(过磷酸钙)量 $90 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,拔节期追施N(尿素)量 $60 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$.所施有机肥为农家羊粪(有机质含量为 $168.6 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,全氮含量为 $18.3 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,C/N为15.9).于小麦成熟收获期,各小区取 5 m^2 地上植物样,风干脱粒测定籽粒产量.

2.3 温室气体采集与监测

采用静态箱-气相色谱法进行监测.静态箱由密闭顶箱($70 \text{ cm} \times 50 \text{ cm} \times 30 \text{ cm}$)和底座($50 \text{ cm} \times 30 \text{ cm} \times 15 \text{ cm}$)组成.顶箱与底座均用不锈钢材料制成,顶箱内装小风扇以便混匀箱内气体,外覆保温材料,箱体有采样口和温度探头.小麦播种后根据小区规划,安装采样箱底座,整个生育期不再移动,同时,地表(0 cm)及地下(10 cm)埋上温度传感器,用于测定地温.采样时,将顶箱安装固定在底座上,用50 mL注射器分别在0、10、20、30 min抽取箱内气体,同时记录箱内温度、地表(0 cm)及地下(10 cm)温度;采样结束后,带回实验室用气相色谱仪分析.施肥以后连续监测1周,之后每周监测1次,期间遇

10 mm以上降雨,再加测1次;拔节期追肥及灌水以后再连续监测1周,直至小麦收获.采样时间固定在上午8:30—11:30之间.气体样品当天用气相色谱仪(Agilent 7890A)测定.仪器装有电子捕获检测器ECD和FID检测器,高纯氮气(99.9999%)为载气,气流量为 $21 \text{ mL} \cdot \text{min}^{-1}$.样品中的 N_2O 在 $60 \text{ }^\circ\text{C}$ 的填充柱中分离进而在 $300 \text{ }^\circ\text{C}$ 条件下的ECD测定.样品中 CO_2 通入 H_2 先经Ni催化转化为 CH_4 后再进入FID检测器分析.检测器工作温度为 $200 \text{ }^\circ\text{C}$,柱温为 $80 \text{ }^\circ\text{C}$,燃气为高纯氢和空气(李晓莎,2016). CO_2 、 N_2O 、 CH_4 气体排放速率计算公式为(蔡祖聪等,2009):

$$F = k_1 \times P_0 / P \times 273 / (273 + T) \times M / V \times H \times dc / dt$$

式中: F 为 CO_2 、 N_2O 、 CH_4 的排放或吸收速率(N_2O 单位为 $\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$, CO_2 及 CH_4 单位为 $\text{mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$); k_1 为单位量纲之间的转换系数; P_0 为箱内大气压(hPa); P 为试验地标准大气压(1013 hPa); T 为采样箱内平均温度($^\circ\text{C}$); M 为 CO_2 、 N_2O 、 CH_4 的分子量($\text{g} \cdot \text{mol}^{-1}$); V 为273 K和1013 hPa标准状态下气体的摩尔体积($22.4 \text{ L} \cdot \text{mol}^{-1}$); H 为采样箱高度(m); dc/dt 为单位时间内采样箱内气体浓度变化速率($\mu\text{L} \cdot \text{L}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$).

基础指标按照土壤农化分析中的方法测定(鲍士旦,2000).土壤含水量采用烘干法测定;土壤硝、铵态氮采用 $1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ KCl浸提-AA3型连续流动分析仪测定;土壤有机质采用重铬酸钾容量-外加热

法;土壤速效磷采用 $0.5 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1} \text{ NaHCO}_3$ 浸提-钼锑抗比色法;土壤速效钾采用 $1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1} \text{ NH}_4\text{OAc}$ 浸提-火焰光度法.

2.4 数据处理

季节累积排放总量计算公式 (Mosier *et al.*, 2006; 肇思迪等 2017) 为:

$$M = \sum (F_{i+1} + F_i) / 2 \times (t_{i+1} - t_i) \times 24 \quad (1)$$

式中: M 为 CO_2 、 N_2O 、 CH_4 排放或吸收总量 ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$); F 为 CO_2 、 N_2O 、 CH_4 排放或吸收速率 ($\text{mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$); i 代表采样次数; t 为采样时间.

综合增温潜势 (GWP): 100 年时间尺度上 CH_4 的 GWP 为 CO_2 的 28 倍, N_2O 的 GWP 为 CO_2 的 265 倍, 计算二氧化碳当量 (IPCC 2013; Hu *et al.* 2016).

$$\text{GWP} (\text{kg CO}_2\text{-eq} \cdot \text{hm}^{-2}) = f_{\text{N}_2\text{O}} \times 44 / 28 \times 265 + f_{\text{CH}_4} \times 16 / 12 \times 28 \quad (2)$$

式中: $f_{\text{N}_2\text{O}}$ 为 N_2O 累积排放总量 ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$); f_{CH_4} 为 CH_4 累积排放总量 ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$).

温室气体排放强度 (GHGI) ($\text{g CO}_2\text{-eq} \cdot \text{kg}^{-1}$) (Shang *et al.* 2011; Zhang *et al.* 2012) 计算公式为:

$$\text{GHGI} = \text{GWP} / Y \quad (3)$$

式中: GWP 为综合增温潜势 ($\text{kg CO}_2\text{-eq} \cdot \text{hm}^{-2}$); Y 为单位面积平均产量 ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$).

土壤空隙含水量 (WFPS) 计算公式为:

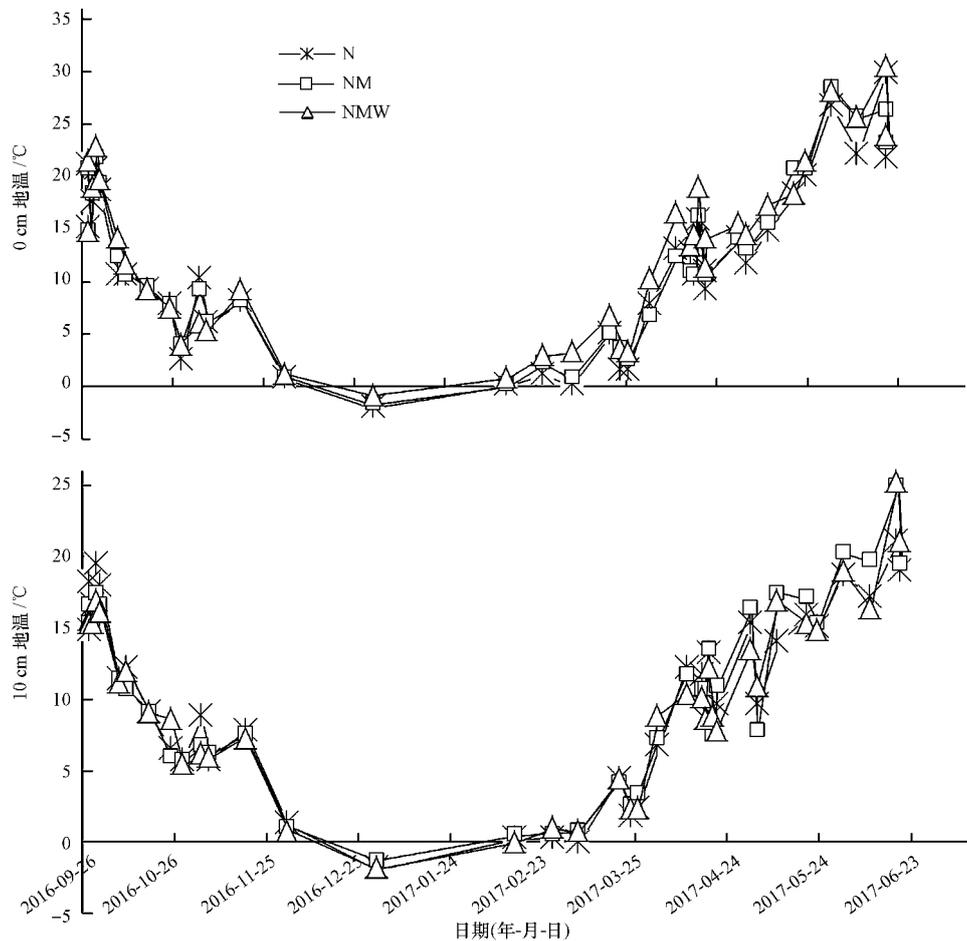
$$\text{WFPS} = \text{土壤含水量} \times \text{土壤容重} / (1 - \text{土壤容重} / 2.65) \times 100\% \quad (4)$$

采用 Microsoft Excel 2007 进行数据整理和绘制图表, SPSS18.0 统计软件进行方差分析及温室气体与各影响因素之间的相关性分析, 用最小显著差异法 (LSD) 进行差异显著比较.

3 结果与分析 (Results and analysis)

3.1 有机肥及补充灌溉对土壤温度、水分及无机氮含量的影响

由图 2 可知, 整个生育期各处理的土壤温度变化趋势基本一致, 地表 (0 cm) 温度的范围是 $-2.1 \sim 30.4 \text{ }^\circ\text{C}$, 10 cm 土壤温度范围是 $-1.9 \sim 25.3 \text{ }^\circ\text{C}$. N、NM、NMW 处理的地表 (0 cm) 平均温度分别为 11.5 、 12.0 、 $13.0 \text{ }^\circ\text{C}$, 10 cm 土壤温度分别为 10.2 、 10.4 、 $10.1 \text{ }^\circ\text{C}$. 土壤充水孔隙度 (WFPS) 主要受降雨及灌



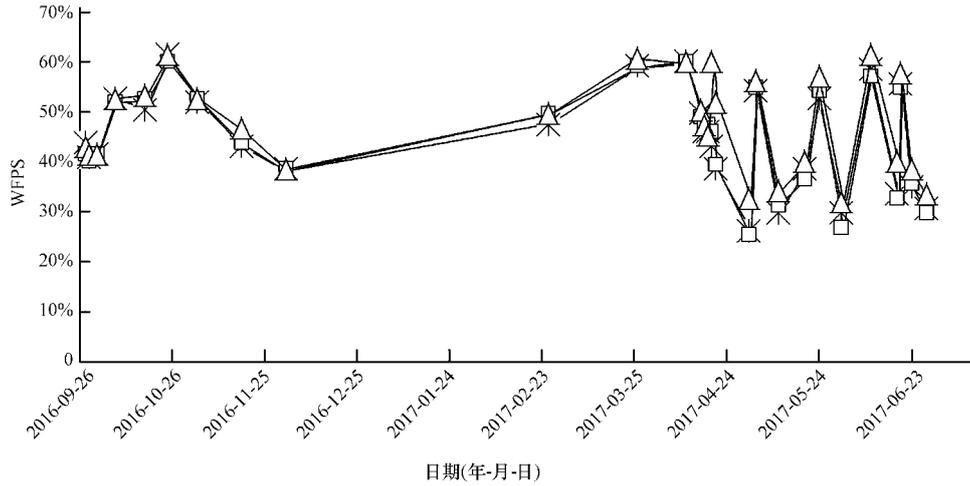


图 2 不同处理土壤温度及土壤充水孔隙度的变化规律

Fig.2 Variation of soil temperature and water-filled pore space in different treatments

水的影响,生育期变化范围为 25.0%~61.5%,各处理平均 WFPS 分别为:44.7%、44.8%、47.7%。对各处理土壤温度及 WFPS 进行差异显著性分析,NM、NMW 处理显著增加了地表土壤温度,而对 10 cm 地

温影响不显著,NMW 处理显著增加了土壤含水量 ($p < 0.05$)。

图 3 中 N、NM、NMW 处理的土壤 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 含量变化范围分别为 4.4~50.6、2.3~45.8、2.6~45.5 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,

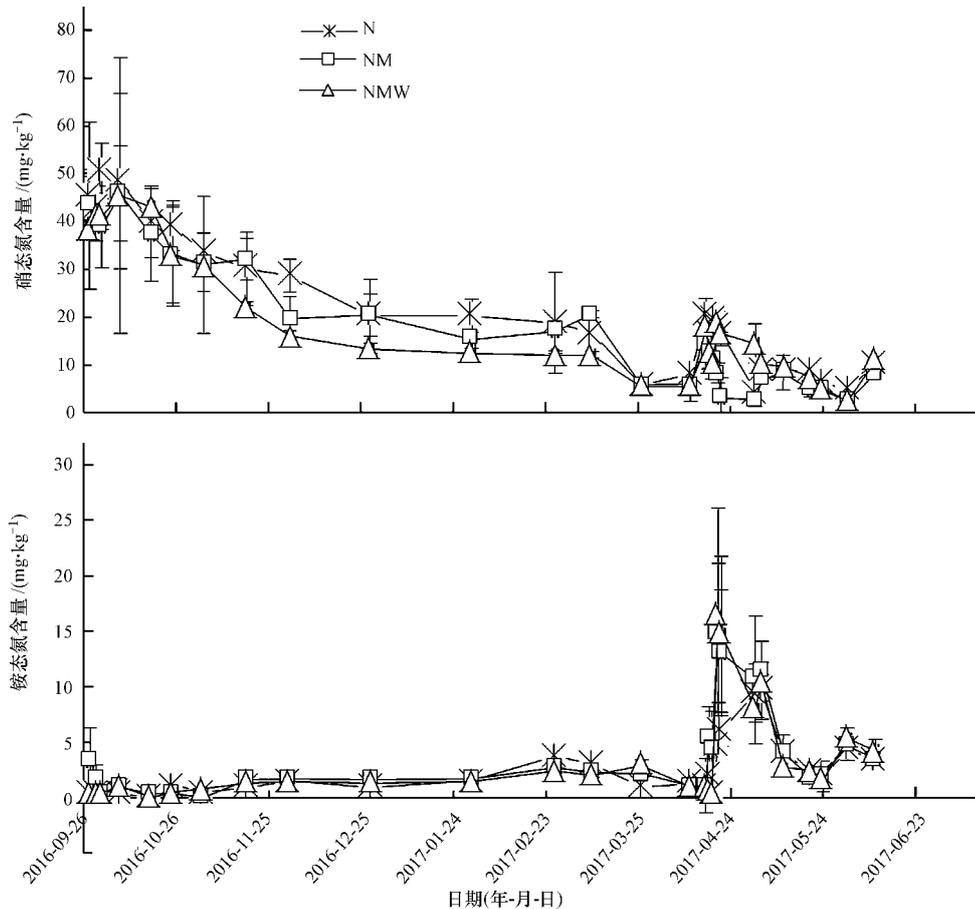


图 3 不同处理土壤硝态氮及铵态氮含量的变化规律

Fig.3 Variation of soil $\text{NO}_3^- \text{-N}$ and $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ contents in different treatments

生育期平均 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 含量分别为 21.9、18.2、18.8 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$; $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 含量在整个生育期变幅不大(除拔节期追肥以后显著增加),各处理的变化范围分别为 0.1~9.4、0.1~14.8、0.4~16.4 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 生育期平均 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 含量分别为 2.4、3.7、3.2 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$. 增施有机肥以后土壤 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 含量显著降低, $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 含量各

处理之间差异不显著 ($p < 0.05$).

3.2 有机肥及补充灌溉对 CO_2 、 N_2O 、 CH_4 排放速率的影响

CO_2 排放速率随作物生长发育的加速而逐渐加快, 接近成熟期其排放速率降低(图 4a). 小麦播种期到 11 月底, N、NM、NMW 处理的 CO_2 平均排放速

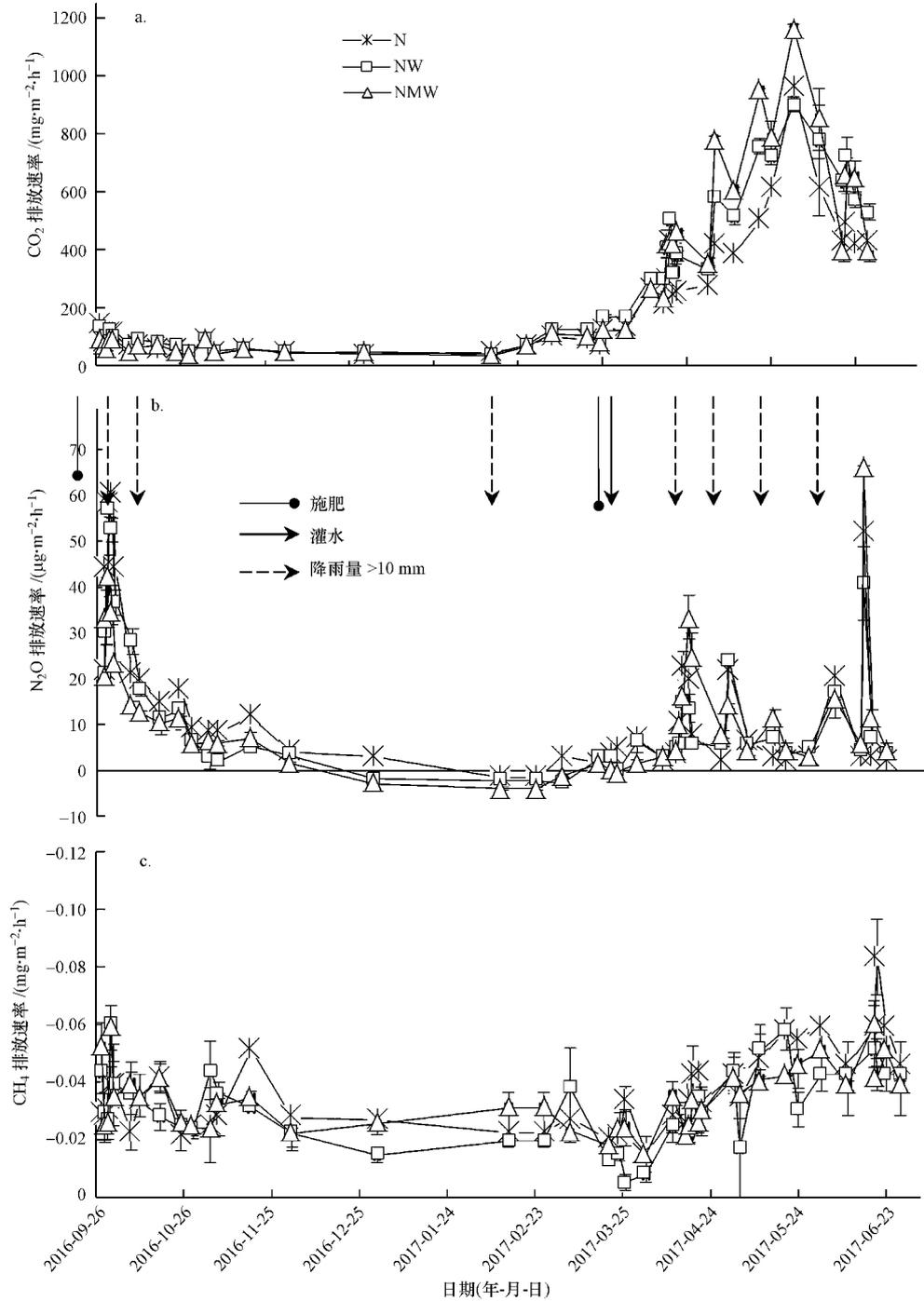


图 4 有机肥及补充灌溉对麦田 CO_2 、 N_2O 、 CH_4 排放速率的影响

Fig.4 Flux rules of CO_2 , N_2O and CH_4 on manure and supplementary irrigation

率分别为 64.1、72.3、59.4 $\text{mg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$, 处理间差异不显著; 进入越冬期(12月—2月底), 各处理的 CO_2 平均排放速率维持在 46.5~48.4 $\text{mg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ 之间; 返青期-拔节期追肥之前(3月—4月中旬), 温度逐渐回升, CO_2 排放速率加快, N、NM、NMW 处理的 CO_2 平均排放速率分别为 130.1、165.7、134.1 $\text{mg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$; 从拔节期追肥及灌水一直到6月初, CO_2 排放速率达到生育期最高峰, N、NM、NMW 处理的 CO_2 排放速率显著上升, 分别为 494.9、595.2、718.6 $\text{mg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$, 其中, NMW 处理的 CO_2 平均排放速率比 N 处理显著增加了 45.2%。

N_2O 排放峰均出现在施肥、降雨或灌水后(图 4b)。施肥播种以后, 出现了 N_2O 第一个排放高峰, 其中, N、NM、NMW 处理的 N_2O 平均排放速率分别为 17.4、13.3、11.3 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$; 进入越冬期(12月—2月底), N_2O 平均排放速率分别为 1.4、0.3、-1.2 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$, 各处理之间差异不显著; 返青期到拔节期追肥及灌水之前(3月—4月中旬), 气温逐渐回升, N_2O 排放速率略有增加, 分别为 3.7、1.4、0.5 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$; 拔节期追施氮肥以后, 出现了 N_2O 的第 2 个排放峰, N、NM、NMW 处理的 N_2O 平均排放速率分别为 8.0、8.1、11.2 $\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ 。之后由于降雨(5月 2—3 日(23.4 mm)、5月 18—19 日(10.6 mm)、6月 4—10 日(74.8 mm)、6月 19 日(14.8 mm)), 产生了 N_2O 的 4 个排放峰。

整个生育期 CH_4 排放量均为负值(图 4c)。从播种期到 12 月份, CH_4 吸收速率出现波动, 各处理范围为 0.02~0.06 $\text{mg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$ 。进入越冬期(12月—2月初), 土壤温度显著降低, CH_4 吸收速率处在一个较低的范围(0.02~0.04 $\text{mg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$), 各处理间差异不显著。拔节期灌水以后, NMW 处理的 CH_4 吸收量减少, 但与 NM 处理之间差异并不显著。

3.3 温室气体排放与各影响因子之间的相关性分析

表 1 Pearson 相关性分析结果表明, CO_2 排放量与土壤温度、含水量呈显著正相关($p<0.01$), 而与土壤 NO_3^--N 及 NH_4^+-N 含量之间无相关性; N_2O 排放量与土壤温度、含水量及土壤 NO_3^--N 含量之间呈显著正相关, 与土壤 NH_4^+-N 含量呈负相关; CH_4 吸收量与土壤温度呈显著性正相关, 与土壤含水量呈显著负相关, 而与 NO_3^--N 、 NH_4^+-N 含量之间无显著相关性。由此可见, 温度、水分及施肥是造成 CO_2 、 N_2O 、 CH_4 排放量差异的主要原因。

表 1 温室气体排放与各影响因素的 Pearson 相关性分析

Table 1 Pearson correlation analysis of greenhouse gas emission and various influencing factors

	含水量	0 cm 地温	10 cm 地温	NO_3^--N 含量	NH_4^+-N 含量
CO_2	0.303**	0.632**	0.510**	-0.019	0.016
N_2O	0.119*	0.384**	0.476**	0.386**	-0.119*
CH_4	-0.294**	0.589**	0.571**	-0.081	-0.011

注: * $p<0.05$, ** $p<0.01$ $n=170$ 。

3.4 有机肥及补充灌溉对麦田温室气体累积排放量的影响

整个生育期各处理 CO_2 累积排放量变化范围为 12160.20~15929.74 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, 大小顺序为: 有机肥+灌溉(NMW)>有机肥(NM)>对照(N)(表 2)。与对照相比, NM、NMW 处理的 CO_2 累积排放量分别增加了 22.8%、31.0%, NM 与 NMW 之间差异不显著。 N_2O 累积排放量为 0.48~0.63 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, 大小表现为: 对照(N)>有机肥+灌溉(NMW)>有机肥(NM)。与对照相比, NM、NMW 处理的 N_2O 累积排放量分别降低了 23.8%、17.5%, NM 与 NMW 之间差异不显著。 CH_4 累积吸收量为 1.73~2.12 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, 大小顺序为: 对照(N)>有机肥+灌溉(NMW)>有机肥(NM)。与对照相比, NM、NMW 处理的 CH_4 累积吸收量分别降低了 18.4%、11.8%。

表 2 有机肥及补充灌溉对小麦生育期温室气体累积排放总量的影响

Table 2 Effects of different tillage measures on cumulative emission of greenhouse gases

处理	累积排放总量/($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)		
	CO_2-C	$\text{N}_2\text{O}-\text{N}$	CH_4-C
N	12160.20±286.18 ^b	0.63±0.01 ^a	-2.12±0.13 ^a
NM	14933.35±663.74 ^a	0.48±0.03 ^b	-1.73±0.02 ^b
NMW	15929.74±415.31 ^a	0.52±0.02 ^b	-1.87±0.11 ^{ab}

注: 同列数值后不同小写字母表示处理间差异达到显著性水平($P<0.05$), 表中数据均为平均值±标准误。下同。

3.5 有机肥及补充灌溉对温室气体排放强度的影响

由表 3 可以看出, 在 100 a 尺度下 N、NM、NMW 处理的综合增温潜势分别为 184.51 $\text{kg CO}_2\text{-eq}\cdot\text{hm}^{-2}$ 、133.52 $\text{kg CO}_2\text{-eq}\cdot\text{hm}^{-2}$ 、145.34 $\text{kg CO}_2\text{-eq}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。与对照相比, NM、NMW 处理的 GWP 分别降低了 27.8%、21.2%, NM 与 NMW 之间差异不显著。对产量进行分析, 与对照相比, NM、NMW 处理均显著增加了小麦产量, 增产率分别为 24.6%、36.7%。温室气

体排放强度大小为: N > NM > NMW, NM、NMW 的 GHGI 比 N 处理分别显著降低了 41.9%、42.4%。

表 3 有机肥及补充灌溉对综合增温潜势及温室气体排放强度的影响

Table 3 Effects of manure and supplementary irrigation on global warming potential and greenhouse gas intensity

处理	GWP _{N₂O} / (kg CO ₂ -eq·hm ⁻²)	GWP _{CH₄} / (kg CO ₂ -eq·hm ⁻²)	GWP _{N₂O+CH₄} / (kg CO ₂ -eq·hm ⁻²)	产量 / (kg·hm ⁻²)	GHGI / (g CO ₂ -eq·kg ⁻¹)
N	263.81±2.06 ^a	-79.30±4.99 ^a	184.51±6.09 ^a	4398.75±252.69 ^c	41.95±1.38 ^a
NM	198.18±13.64 ^b	-64.66±0.67 ^b	133.52±14.31 ^b	5482.04±158.29 ^b	24.36±2.61 ^b
NMW	215.03±6.39 ^b	-69.69±3.90 ^{ab}	145.34±4.13 ^b	6011.30±173.56 ^a	24.18±0.69 ^b

4 讨论 (Discussion)

农田生态系统中 CO₂ 的排放实际是土壤中生物代谢和生物化学过程等所有因素的综合产物 (Singh *et al.*, 1997). 施肥、灌溉、耕作以及气候变化等共同影响农田土壤生物化学特性, 从而对土壤 CO₂ 排放量产生影响 (宋丽娜等 2013). 前人研究普遍表明有机肥会增加 CO₂ 排放 (李燕青等, 2015; 韩继明等, 2016). 本研究结果表明, 有机肥及补充灌溉均可显著增加农田 CO₂ 排放量 (图 4a, 表 2). 表 1 相关性分析表明, CO₂ 的排放量与土壤温度及含水量均呈显著性正相关 ($p < 0.01$), 说明土壤温度及含水量是影响 CO₂ 排放的主要因素. 一方面有机肥颜色较深, 吸热能力强, 增加了地表土壤温度 (图 2), 能够改善土壤理化性质, 直接或间接影响微生物活性, 土壤有机质分解加快, 从而增加了 CO₂ 排放速率 (朱小红等 2011; 武玉等 2014); 另一方面施用有机肥增加了作物地上部生物量, 植物地上部及根系呼吸作用加强. 从拔节期追肥及灌水一直到 6 月初, 土壤温度升高, 此时小麦生长速度加快, 地上生物量增大, 同时, 有机肥+灌溉 (NMW) 处理的土壤含水量增加 (图 2) 促进了根系呼吸以及微生物群落的活性, 增加了土壤呼吸强度, 显著提高了 CO₂ 排放量 (齐玉春等 2014; 闫翠萍等 2016). 6 月下旬, 根系活动及植物呼吸作用减弱, CO₂ 排放速率开始下降.

农田土壤 N₂O 的产生是在微生物的参与下, 通过硝化和反硝化作用完成的 (Meng *et al.*, 2005). 这些过程受施肥、灌溉、土壤理化性质及气候等的影响. 有机肥能改变土壤的 C/N 比, 增加土壤孔隙度及导水率, 调节农田土壤生物及非生物学过程中 N₂O 的产生与排放 (Heil *et al.*, 2016; Zhou *et al.*, 2017). N₂O 排放峰均出现在施肥、降雨或灌水后, 这与宋丽娜等 (2013) 的研究相吻合. 其原因是灌水以后土壤由干变湿含水量增加, 土壤进行干湿交替, 促进硝化与反硝化作用释放更多的 N₂O. 由于播前

及拔节期施肥, 土壤无机氮含量增加, 因此产生了小麦生育期的两个排放峰值; 越冬期 (12 月—2 月底) N₂O 排放出现了负值 (图 4b), 这可能是由于土壤温度过低 (-2.1~6.8 °C), 会引起铵氧化细菌活性减弱, 其硝化及反硝化作用产生的 N₂O 不足以维持其生存, 其结果就表现为从环境中吸收 N₂O 以供其生存 (刘晔等, 1997). 目前关于有机肥对旱地 N₂O 排放影响的报道有很多, 但结论不一. 张贺等 (2013) 表明, 增施有机肥显著降低了冬小麦生育期 N₂O 排放量; 刘韵等 (2016) 表明, 与单施氮肥相比, 有机肥与无机肥配施降低了小麦季及玉米季的 N₂O 累积排放量; Yang 等 (2015) 表明, 有机肥施用对麦田 N₂O 排放量增加并不显著; 王耀聪等 (2016) 表明, 增施有机肥显著增加了番茄地 N₂O 排放. 这些不可能与作物类型、有机肥类型及土壤 C/N 比不同有关, 从而影响微生物活动, 影响硝化及反硝化过程, 最终影响 N₂O 的生成与排放. 本研究发现, 施用有机肥处理的 N₂O 累积排放量显著降低 (表 2), 这一结果与张贺等 (2013) 的研究一致. 其原因可能是有机肥施入土壤需要经过养分的矿质化过程, 在此过程中微生物对有机碳进行分解, 需要固定土壤中的氮素, 使得微生物可以直接利用的无机氮减少, 从而降低了 N₂O 排放 (毕智超等 2017; 沈仕洲等 2015); 还可能是因为有机肥较单施化肥增加了土壤 C/N 比, 在一定程度上抑制了硝化作用, 降低了土壤中硝态氮含量 (图 3), 由此可能减少了硝化作用产生的 N₂O (勾继等 2000). 另外, N₂O 排放量与土壤温度、含水量及 NO₃⁻-N 含量呈显著性正相关 (表 1), 充分显示了降雨、灌溉以及施肥对 N₂O 排放的影响.

旱地土壤为大气 CH₄ 的“汇”. 本试验结果表明, 有机肥及补充灌溉均可降低土壤对 CH₄ 的吸收 (表 2). 这与谢立勇等 (2011) 得到的结果一致, 在维持土壤氮、磷、钾含量基本不变时, 旱地施有机肥会降低 CH₄ 吸收. 这可能与有机肥增加了土壤中 NH₄⁺-N 含量有关 (图 3), 原因是 NH₄⁺-N 与 CH₄ 的氧化相互

排斥, NH_4^+-N 能够抑制土壤对 CH_4 的吸收; 还可能是因为外加碳源改变了土壤微生物活性, 降低了 CH_4 的氧化速率, 因此 CH_4 吸收减少(胡荣桂等, 2004)。另外, 表 1 相关性分析表明, CH_4 吸收量与土壤温度呈正相关, 而与土壤含水量呈负相关, 这与阎佩云(2013)的研究结果一致。小麦越冬期(12月—2月初), 由于土壤温度显著降低, 微生物活性较低, CH_4 吸收速率处在一个较低的范围($0.02 \sim 0.04 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$); 返青期开始以后温度逐渐回升, CH_4 吸收量逐渐增加(图 4c), 在一定范围($20 \sim 30 \text{ }^\circ\text{C}$) 温度的升高能增加 CH_4 的氧化率(周叶锋等, 2008), 因此 CH_4 吸收量升高。拔节期灌水以后, 有机肥+灌水(NMW)处理的 CH_4 吸收量减少, 相对于其他处理来说, 土壤含水量增加一方面降低了土壤的通气性, 另一方面还抑制了大气中 CH_4 向土壤中扩散, 从而降低了土壤对 CH_4 的吸收氧化速率(田慎重等, 2012; 裴淑玮等, 2012)。

农田水肥管理的目的是提高作物产量, 在分析温室气体减排的同时, 应将作物产量考虑在内(邬刚等, 2013)。本研究结果表明, 施用有机肥及补充灌溉均显著增加了小麦产量, 这与已有研究结果一致(韩晓增等, 2010; 刘韵等, 2016; 翟丙年等, 2005; 王明英等, 2013)。养分及水分供应是作物生长的基础, 有机肥能增加土壤有机质和各种养分, 它不仅是作物养分的直接供给源, 又可活化土壤中潜在养分和增强生物学活性, 因而增加了作物产量(韩晓增等, 2010)。充足的水分促进了作物对养分的吸收利用, 拔节期是生物学产量的水分高效补偿期及经济学产量的补偿有效期(王明英等, 2013), 因此, 在该时期进行补充灌溉可以协调土壤中的水肥关系, 达到增产的作用。全球增温潜势(GWP)主要由 N_2O 贡献, 其在 100 年尺度上的值远远大于 CH_4 (周凤等, 2017), 且 CH_4 在旱地土壤中被吸收对环境是有利的, 而温室气体排放强度(GHGI)其优势在于将温室效应与作物经济产量相结合。本研究中, 与单施氮肥(N)相比, 有机肥处理显著增加了小麦产量, 而降低了 GWP, 因而使得 GHGI 显著降低(表 3)。与有机肥处理(NM)相比, 有机肥+灌溉处理(NMW)显著增加了小麦产量, 而对 GWP 影响并不显著。由此可见, 在施用有机肥的基础上配合灌溉能够实现作物高产与环境效益的统一, 可作为旱地农田推荐的一种管理措施。

5 结论(Conclusions)

有机肥(NM)、有机肥+拔节期补充灌溉(NMW)均能在增加作物产量的同时, 降低综合增温潜势(GWP)及温室气体排放强度(GHGI)。与单施氮肥(N)相比, NM 及 MMW 处理产量分别增加了 24.6%、36.7%, 而 GHGI 分别降低了 41.9%、42.4%。说明在施用有机肥的同时进行补充灌溉, 能进一步提高作物增产潜力, 降低温室效应。

责任作者简介: 王仕稳(1978—), 男, 研究员, 主要从事旱地农业高产高效研究, 作物抗旱生理与分子生物学, 植物生理生态和植物营养等方面的研究。

参考文献(References):

- Ameloot N, Maenhout P, Neve S D, et al. 2016. Biochar-induced N_2O emission reductions after field incorporation in a loam soil [J]. *Geoderma*, 267:10-16
- Awasthi M K, Wang Q, Ren X, et al. 2016. Role of biochar amendment in mitigation of nitrogen loss and greenhouse gas emission during sewage sludge composting [J]. *Bioresource Technology*, 219: 270-280
- 鲍士旦. 2000. 土壤农化分析(第三版) [M]. 北京: 中国农业出版社
- 毕智超, 张浩轩, 房歌, 等. 2017. 不同配比有机无机肥料对菜地 N_2O 排放的影响 [J]. *植物营养与肥料学报*, 23(1): 154-161
- 蔡祖聪, 徐华, 马静. 2009. 稻田生态系统 CH_4 和 N_2O 排放 [M]. 安徽: 中国科学技术大学出版社
- 曹志洪. 2003. 施肥与大气环境质量—论施肥对环境的影响(1) [J]. *土壤*, 35(4): 265-270
- 陈哲, 韩瑞芸, 杨世琦, 等. 2016. 东北季节性冻融农田土壤 CO_2 、 CH_4 、 N_2O 通量特征研究 [J]. *农业环境科学学报*, 35(2): 387-395
- 程宪国, 汪德水, 张美荣, 等. 1996. 不同土壤水分条件对冬小麦生长及养分吸收的影响 [J]. *中国农业科学*, 29(4): 67-74
- 高亚军, 郑险峰, 李世清, 等. 2008. 农田秸秆覆盖条件下冬小麦增产的水氮条件 [J]. *农业工程学报*, 24(1): 55-59
- 勾继, 郑循华, 王明星, 等. 2000. 华东地区稻麦轮作农田生态系统 N_2O 排放的模拟研究 [J]. *大气科学*, 24(6): 835-842
- 郭腾飞, 梁国庆, 周卫, 等. 2016. 施肥对稻田温室气体排放及土壤养分的影响 [J]. *植物营养与肥料学报*, 22(2): 337-345
- 韩继明, 潘根兴, 刘志伟, 等. 2016. 减氮条件下秸秆炭化与直接还田对旱地作物产量及综合温室效应的影响 [J]. *南京农业大学学报*, 39(6): 986-995
- Heil J, Vereecken H, Brüggemann N. 2016. A review of chemical reactions of nitrification intermediates and their role in nitrogen cycling and nitrogen trace gas formation in soil [J]. *European Journal of Soil Science*, 67(1): 23-39
- 胡荣桂. 2004. 氮肥对旱地土壤甲烷氧化能力的影响 [J]. *生态环境学报*, 13(1): 74-77

- Hu N, Wang B, Gu Z, *et al.* 2016. Effects of different straw returning modes on greenhouse gas emissions and crop yields in a rice-wheat rotation system [J]. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 223: 115-122
- IPCC. 2013. Contribution of working group I to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change. *Climate Change 2013: The Physical Science Basis* [R]. Cambridge University Press Cambridge, United Kingdom and New York NY, USA
- IPCC. *Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [R]. Geneva, Switzerland, 151
- Kuppusamy S, Thavamani P, Megharaj M, *et al.* 2016. Agronomic and remedial benefits and risks of applying biochar to soil: Current knowledge and future research directions [J]. *Environment International*, 87: 1-12
- Li C, Salas W, Deangelo B, *et al.* 2006. Assessing alternatives for mitigating net greenhouse gas emissions and increasing yields from rice production in China over the next twenty years [J]. *Journal of Environmental Quality*, 35(4): 1554
- 李露, 周自强, 潘晓健, 等. 2015. 不同时期施用生物炭对稻田 N_2O 和 CH_4 排放的影响[J]. *土壤学报*, 52(4): 839-848
- 李晓莎. 2016. 覆膜与施肥对旱作春玉米农田温室气体排放的影响[D]. 杨凌: 西北农林科技大学
- 李燕青, 唐继伟, 车升国, 等. 2015. 长期施用有机肥与化肥氮对华北夏玉米 N_2O 和 CO_2 排放的影响[J]. *中国农业科学*, 48(21): 4381-4389
- 刘文国, 张建昌, 曹贤贤, 等. 2006. 旱地小麦不同栽培条件对土壤水分利用效率的影响[J]. *西北农业学报*, 15(5): 47-51
- 刘晔, 牟玉静, 钟晋贤, 等. 1997. 氧化亚氮在森林和草原中的地-气交换[J]. *环境科学*, 18(5): 14-18
- Meng L, Ding W, Cai Z, *et al.* 2005. 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 & Biochemistry*, 37(11): 2037-2045
- Minamikawa K, Sakai N. 2005. The effect of water management based on soil redox potential on methane emission from two kinds of paddy soils in Japan [J]. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 107(4): 397-407
- Mosier A R, Halvorson A D, Reule C A, *et al.* 2006. Net global warming potential and greenhouse gas intensity in irrigated cropping systems in northeastern Colorado [J]. *Journal of Environmental Quality*, 35(4): 1584
- 裴淑玮, 张圆圆, 刘俊锋, 等. 2012. 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*, 31(4): 407-414
- 齐玉春, 郭树芳, 董云社, 等. 2014. 灌溉对农田温室效应贡献及土壤碳储量影响研究进展[J]. *中国农业科学*, 47(9): 1764-1773
- Shang Q, Yang X, Gao C, *et al.* 2011. 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*, 17(6): 2196-2210
- 沈仕洲, 王凤, 薛长亮, 等. 2015. 施用有机肥对农田温室气体排放影响研究进展[J]. *中国土壤与肥料*, (6): 1-8
- 沈永平, 王国亚. 2013. IPCC 第一工作组第五次评估报告对全球气候变化认知的最新科学要点[J]. *冰川冻土*, 35(5): 1068-1076
- Singh J S, Singh S, Raghubanshi A S, *et al.* 1997. Effect of soil nitrogen, carbon and moisture on methane uptake by dry tropical forest soils [J]. *Plant & Soil*, 196(1): 115-121
- Smith P, Martino D, Cai Z, *et al.* 2007. *Climate Change 2007: Mitigation. Contribution of working group III for the fourth assessment report of the intergovernmental panel on climate change* [J]. *Neuropsychologia*, 22(6): 697
- 宋利娜, 张玉铭, 胡春胜, 等. 2013. 华北平原高产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*, 21(3): 297-307
- 谭月臣, 诸葛玉平, 刘东雪, 等. 2016. 华北平原农田管理措施对冬小麦-夏玉米轮作系统 N_2O 和 CH_4 排放的影响[J]. *环境科学学报*, 36(7): 2638-2649
- Tyagi L, Kumari B, Singh S N. 2010. Water management - a tool for methane mitigation from irrigated paddy fields [J]. *Science of the Total Environment*, 408(5): 1085
- 田慎重, 宁堂原, 迟淑筠, 等. 2012. 不同耕作措施的温室气体排放日变化及最佳观测时间[J]. *生态学报*, 32(3): 879-888
- Ussiri D A N, Lal R. 2017. *Carbon Sequestration for Climate Change Mitigation and Adaptation* [M]. Springer International Publishing
- 王俊儒, 李生秀. 2000. 不同生育时期水分有限亏缺对冬小麦产量及其构成因素的影响[J]. *西北植物学报*, 20(2): 193-200
- 王立刚, 李维炯, 邱建军, 等. 2004. 生物有机肥对作物生长、土壤肥力及产量的效应研究[J]. *中国土壤与肥料*, (5): 12-16
- 王明英, 翟丙年, 金忠宇, 等. 2013. 水肥优化管理对渭北旱塬冬小麦生长发育及产量的影响[J]. *麦类作物学报*, 33(4): 705-710
- 王耀聪, 王利英, 高志岭, 等. 2016. 施用有机肥、化肥对设施番茄土壤 N_2O 排放的影响[J]. *河北农业大学学报*, 39(3): 1-6
- 郭刚, 潘根兴, 郑聚锋, 等. 2013. 施肥模式对雨旱地温室气体排放的影响[J]. *土壤*, 45(3): 459-463
- 武玉, 徐刚, 吕迎春, 等. 2014. 生物炭对土壤理化性质影响的研究进展[J]. *地球科学进展*, 29(1): 68-79
- 谢立勇, 叶丹丹, 张贺, 等. 2011. 旱地土壤温室气体排放影响因子及减排增汇措施分析[J]. *中国农业气象*, 32(4): 481-487
- 闫翠萍, 张玉铭, 胡春胜, 等. 2016. 不同耕作措施下小麦-玉米轮作农田温室气体交换及其综合增温潜势[J]. *中国生态农业学报*, 24(6): 704-715
- 阎佩云. 2013. 黄土旱塬旱作玉米农田不同栽培模式温室气体排放特征及影响因素[D]. 杨凌: 西北农林科技大学
- Yang B, Xiong Z, Wang J, *et al.* 2015. Mitigating net global warming potential and greenhouse gas intensities by substituting chemical nitrogen fertilizers with organic fertilization strategies in rice-wheat annual rotation systems in China: A 3-year field experiment [J]. *Ecological Engineering*, 81: 289-297
- Zhang A, Bian R, Pan G, *et al.* 2012. Effects of biochar amendment on soil quality, crop yield and greenhouse gas emission in a Chinese rice paddy: A field study of 2 consecutive rice growing cycles [J]. *Field Crops Research*, 127(127): 153-160
- 翟洋洋. 2015. 陇东黄土高原农田土壤的温室气体排放特征[D]. 兰

州: 兰州大学

- 肇思迪, 姜运生, 张祎玮, 等. 2017. UV-B 增强下施硅对稻田 CH_4 和 N_2O 排放及其增温潜势的影响 [J]. 生态学报, 37 (14): 4715-4724
- 周凤, 许晨阳, 王月玲, 等. 2017. 生物炭对(萎)土 CH_4 、 N_2O 排放的影响 [J]. 环境科学, 38 (9): 3831-3839
- 周叶锋, 廖晓兰, 黄璜, 等. 2008. 甲烷氧化细菌氧化活性影响因素的研究 [J]. 微生物学杂志, 28 (3): 77-80
- Zhou M, Butterbach-Bahl K, Vereecken H, *et al.* 2017. A meta-analysis of soil salinization effects on nitrogen pools, cycles and fluxes in coastal ecosystems [J]. *Global Change Biology*, 23 (3): 1338-1352
- Zhu T, Zhang J, Yang W, *et al.* 2013. Effects of organic material amendment and water content on NO , N_2O , and N_2 emissions in a nitrate-rich vegetable soil [J]. *Biology & Fertility of Soils*, 49 (2): 153-163
- 朱小红, 马友华, 杨书运, 等. 2011. 施肥对农田温室气体排放的影响研究 [J]. 农业资源与环境学报, 28 (5): 42-46
- 王彩绒, 田霄鸿, 李生秀. 2004. 沟垄覆膜集雨栽培对冬小麦水分利用效率及产量的影响 [J]. 中国农业科学, 37 (2): 208-214
- 韩晓增, 王凤仙, 王凤菊, 等. 2010. 长期施用有机肥对黑土肥力及作物产量的影响 [J]. 干旱地区农业研究, 28 (1): 66-71
- 翟丙年, 李生秀. 2005. 冬小麦水氮配合关键期和亏缺敏感期的确定 [J]. 中国农业科学, 38 (6): 1188-1195
- 刘韵, 柳文丽, 朱波, 等. 2016. 施肥方式对冬小麦-夏玉米轮作土壤 N_2O 排放的影响 [J]. 土壤学报: 53 (3), 735-745
- 张贺, 郭李萍, 谢立勇, 等. 2013. 不同管理措施对华北平原冬小麦田土壤 CO_2 和 N_2O 排放的影响研究 [J]. 土壤通报, 44 (3): 653-659