

有机无机肥配施对苹果园温室气体排放的影响

马艳婷, 赵志远, 冯天宇, SOMPOUVISSET Thongsouk, 孔旭, 翟丙年, 赵政阳

引用本文:

马艳婷, 赵志远, 冯天宇, 等. 有机无机肥配施对苹果园温室气体排放的影响[J]. 农业环境科学学报, 2021, 40(9): 2039–2048.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-1477>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

巢湖圩区再生稻田甲烷及氧化亚氮的排放规律研究

王天宇, 樊迪, 宋开付, 张广斌, 徐华, 马静

农业环境科学学报. 2021, 40(8): 1829–1838 <https://doi.org/10.11654/jaes.2021-0181>

不同遮阴处理下施肥对稻田CH₄和N₂O排放的影响

王坤, 娄运生, 邢钰媛, 刘健

农业环境科学学报. 2021, 40(2): 464–472 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0953>

厢作免耕下生态种养对稻田CH₄和N₂O排放的影响

陈璐, 陈灿, 黄璜, 任勃, 王忍, 梁玉刚, 周晶

农业环境科学学报. 2021, 40(6): 1354–1365 <https://doi.org/10.11654/jaes.2021-0015>

水氮耦合对设施土壤N₂O和NO排放的影响

吕金东, 张丽媛, 虞娜, 邹洪涛, 张玉玲, 张玉龙

农业环境科学学报. 2021, 40(6): 1366–1376 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-1217>

生物基包膜抑制型尿素对土壤温室气体排放及小青菜产量的影响

刘楚桐, 陈松岭, 邹洪涛, 叶旭红, 陈春羽, 雷洋, 张玉龙

农业环境科学学报. 2021, 40(3): 677–684 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0658>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

马艳婷, 赵志远, 冯天宇, 等. 有机无机肥配施对苹果园温室气体排放的影响[J]. 农业环境科学学报, 2021, 40(9): 2039–2048.
MA Y T, ZHAO Z Y, FENG T Y, et al. Greenhouse gas emissions from an apple orchard with the mixed application of organic and chemical fertilizers[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2021, 40(9) 2039–2048.



开放科学 OSID

有机无机肥配施对苹果园温室气体排放的影响

马艳婷^{1,2}, 赵志远^{1,2}, 冯天宇^{1,2}, SOMPOUVESET Thongsouk^{1,2}, 孔旭^{1,2}, 翟丙年^{1,2,3*}, 赵政阳³

(1. 西北农林科技大学资源环境学院, 陕西 杨凌 712100; 2. 农业部西北植物营养与农业环境重点实验室, 陕西 杨凌 712100; 3. 西北农林科技大学苹果试验站, 陕西 白水 715600)

摘要:为研究有机肥代替化肥对苹果园温室气体排放的影响,本研究基于12 a的长期定位试验,采用静态暗箱-气象色谱法监测了果园温室气体(CH₄和N₂O)排放的动态变化。试验共设置4个处理:对照(CK)、有机肥(M)、化肥(NPK)、有机无机肥配施(MNPK)。结果表明:果园年生活周期内CH₄以吸收为主;N₂O排放的高峰均出现在施肥后。各处理温室气体累积排放量差异显著($P < 0.05$),其中M处理的CH₄累积吸收量最高,为9.95 kg·hm⁻²;MNPK处理的N₂O累积排放量显著高于NPK处理。相关性分析结果显示,土壤含水量、气温及硝态氮、铵态氮均为影响温室气体排放的因素。与NPK处理相比,MNPK处理可显著增加苹果产量,提高氮肥农学利用效率,增加CH₄吸收量、N₂O排放量和N₂O排放系数,降低综合温室气体排放强度。MNPK处理与NPK处理下单位产量CH₄的累积吸收量分别为0.04 kg·t⁻¹和0.06 kg·t⁻¹,单位产量N₂O累积排放量分别为0.05 kg·t⁻¹和0.07 kg·t⁻¹,两处理间差异不显著。研究表明,有机无机肥配施在保证产量的前提下更有利于苹果园的可持续发展。

关键词:有机肥;甲烷;氧化亚氮;温室气体排放强度;旱地

中图分类号:S661.1 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2021)09-2039-10 doi:10.11654/jaes.2020-1477

Greenhouse gas emissions from an apple orchard with the mixed application of organic and chemical fertilizers

MA Yanting^{1,2}, ZHAO Zhiyuan^{1,2}, FENG Tianyu^{1,2}, SOMPOUVESET Thongsouk^{1,2}, KONG Xu^{1,2}, ZHAI Bingnian^{1,2,3*}, ZHAO Zhengyang³

(1. College of Natural Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling 712100, China; 2. Key Laboratory of Plant Nutrition and the Agro-Environment in Northwest China, Ministry of Agriculture, Yangling 712100, China; 3. Apple Experiment Station, Northwest A&F University, Baishui 715600, China)

Abstract: The combination of organic and inorganic fertilizers plays a key role in reducing the use of chemical fertilizers and increasing soil fertility. However, the effect of organic fertilizers relative to those of chemical fertilizers on greenhouse gas emissions in apple orchards remains unclear. Hence, an experiment was conducted to explore the temporal change in greenhouse gas emissions using a static-chamber gas chromatography technique during a long-term experiment. Four treatments were applied as follows: no fertilizer (CK), organic fertilizer only (M), chemical fertilizer only (NPK), and organic fertilizer plus inorganic fertilizer (MNPK). The principal findings were that CH₄ was mainly absorbed by the soil, and the peak of N₂O emission fluxes always appeared after fertilization. There were significant differences in

收稿日期:2020-12-22 录用日期:2021-05-10

作者简介:马艳婷(1994—),女,甘肃平凉人,硕士研究生,主要从事旱地果园温室气体排放研究。E-mail:2501733790@qq.com

*通信作者:翟丙年 E-mail:bingnianzhaitg@126.com

基金项目:陕西省科技重大专项(2020zdzx03-02-01);国家现代农业产业技术体系项目(CARS-27);陕西省农业科技创新转化项目(NYKJ-2015-17);公益性行业(农业)科研专项(201303104);西北农林科技大学试验示范基地科技成果转化项目(TGZX2014-16)

Project supported: The National Science and Technology Major Project of the Ministry of Science and Technology of Shaanxi Province, China(2020zdzx03-02-01); The Earmarked Fund for Nation Agriculture Research System (CARS-27); The Agriculture Science Technology Achievement Transformation Fund of Shaanxi Province, China(NYKJ-2015-17); The Special Scientific Research Fund of Agricultural Public Welfare Profession of China(201303104); The Scientific and Technological Achievements Promotion Project of Northwest A&F University(TGZX2014-16)

the cumulative emissions of greenhouse gases among all treatments ($P < 0.05$). The highest cumulative absorption of CH_4 was observed in the M treatment ($9.95 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$). Additionally, the cumulative N_2O emissions in MNPK were significantly higher than those in NPK. Correlation analysis results indicated that greenhouse gas emissions were primarily driven by soil water content, air temperature, nitrate nitrogen, and ammonium nitrogen. Yield, nitrogen agronomic efficiency, the absorption of CH_4 and the emissions of N_2O , and the N_2O emission factor were significantly enhanced, whereas greenhouse gas intensity was decreased under the MNPK treatment compared to that of NPK treatment. However, there was a non-significant difference between MNPK treatment ($0.04 \text{ kg} \cdot \text{t}^{-1}$) and NPK treatment ($0.06 \text{ kg} \cdot \text{t}^{-1}$) in yield-scaled CH_4 absorption. Moreover, yield-scaled N_2O emissions for MNPK treatment and NPK treatment were not significantly different and were $0.05 \text{ kg} \cdot \text{t}^{-1}$ and $0.07 \text{ kg} \cdot \text{t}^{-1}$, respectively. In summary, organic fertilizer combined with chemical fertilizer is conducive to the sustainable development of apple orchards while ensuring production.

Keywords: organic fertilizer; methane; nitrous oxide; greenhouse gas intensity; dry land

气候变暖及其影响是国际社会共同关注和广泛研究的焦点性问题。近年来,全球气温不断上升,政府间气候变化委员会(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)第五次评估报告^[1]指出,2011年全球大气中二氧化碳(CO_2)当量浓度为 $430 \mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$,若不加大减排力度,未来人为温室气体浓度将会继续升高,预计到2030年, CO_2 当量浓度将超过 $450 \mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$,到本世纪末将超过 $750 \mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$,使全球地表平均温度比工业化前(1750年)高 $3.7 \sim 4.8 \text{ }^\circ\text{C}$ 。甲烷(CH_4)和氧化亚氮(N_2O)是目前对全球气候变化影响较大的气体,其对温室效应的贡献率分别达到了14.3%和7.9%^[2-3]。在100 a尺度上 CH_4 和 N_2O 的增温潜势分别是 CO_2 的25倍和298倍^[4]。农业向大气中排放的 CH_4 和 N_2O 是温室气体排放的主要来源之一,世界粮食与农业组织(FAO)的《2016年粮食及农业状况》报告指出,截止到2016年,农业温室气体排放达到了全球排放总量的20%^[5]。我国作为农业大国,农业活动产生的温室气体排放量在我国排放总量中所占比例为6.7%,其中 N_2O 和 CH_4 排放分别高达59.5%和40.2%^[6],可以看出我国以农业为源头的非 CO_2 类温室气体排放量较高。因此,农用土壤 CH_4 和 N_2O 的减排对减缓气候变暖具有重要意义。我国西北地区农业用地中旱地面积占比较大,是农业 N_2O 排放的主要区域,其 N_2O 排放特征及影响因素更加不容忽视。

在我国西北旱地农业生产中,多数地区全年无灌溉条件,年内降雨不均;由于耕作、土地利用方式和施肥不当所引起的土壤有机质含量偏低^[7],使土壤生产力严重下降,为了提高土壤肥力并满足日益增长的人口对食物的需求,该地区以肥促产现象严重^[8];随着氮肥用量的增加,氮氧化物的排放问题日益突出,此外,过量施氮会对旱地土壤氧化 CH_4 的能力产生负面

影响,导致土壤对 CH_4 的吸收量降低^[9],这与可持续农业的发展理念背道而驰。有机肥因能够提高土壤固碳能力、增加土壤有机碳含量^[10]、改善土壤理化性质、增加作物产量而被广泛应用^[11];但有研究指出,施用有机肥会在增加土壤固碳的同时增加 N_2O 的排放量^[12]。 CH_4 排放的有关研究主要集中于稻田,在旱地中的相关研究还鲜见报道,因此研究旱地有机肥的施用对温室气体减排的影响显得尤为重要。

渭北旱塬是西北地区乃至全国的苹果主产区之一,苹果园种植面积逐年扩增^[13],种植生产的过程中产生了一系列环境问题,这与缺乏合理的施肥管理措施有直接关系。由于不同年龄阶段果树的需肥规律和需肥量差异较大,并且成熟果树施氮量高达 $1100 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ^[14],从而增加了氮肥的损失几率;因此,与粮食作物相比,苹果园土壤 CH_4 和 N_2O 的单位面积排放量较高,排放系数较大。有机无机肥配施技术作为农业可持续发展的首选措施,其产生的环境效益尚存分歧,有研究认为在施氮量相等的前提下,有机无机肥配施会显著增加 N_2O 的排放^[15];也有研究指出,有机无机肥配施和单施化肥处理的 N_2O 排放没有显著差异^[16]。此外,在等氮量施肥条件下,当有机肥代替化肥比例大于50%时,可以有效降低 N_2O 的排放强度^[17],这说明有机肥代替化学肥料施用,既能减少化肥用量,还能让有机废弃物变“废”为“宝”,对其进行综合利用,有利于全面推进农业绿色发展和可持续发展。还有研究表明有机肥配施化肥会加速 CH_4 的排放速率^[18],因此,有机无机肥配施对温室气体排放的影响还存在争议。目前在西北地区大部分关于温室效应的研究以旱地农田为主,国内外有关苹果园土壤温室气体排放的研究鲜见报道,对苹果园土壤 CH_4 和 N_2O 排放的原位观测研究更少,这限制了对果园土壤 CH_4 和 N_2O 排放特征及其影响因子的认识。为了果园

的可持续发展,维持果园生态系统的平衡,研究苹果园温室气体的排放情况成为当前的迫切需要。

本研究以位于陕西省渭南市白水县的西北农林科技大学苹果试验示范站的12 a长期定位试验果园土壤为研究对象,通过对渭北旱地苹果园4种施肥处理下年生活周期内土壤温室气体的变化特征及其影响因子进行监测,全面分析单施有机肥、有机肥代替化肥及单施化肥3种施肥模式下的温室气体排放规律,以期在旱地苹果园合理施肥和有效减排方面有所突破,为旱地果园科学施肥提供理论依据,也为农业温室气体排放量的估算提供更充分的数据支持。

1 材料与方法

1.1 试验地点概况

试验地位于陕西省白水县西北农林科技大学苹果试验站,该地区平均海拔为850 m,属于暖温带大陆性季风气候,夏季降雨较为集中,其他季节降雨稀少,尤其在春季表现为干旱多风,年内降雨主要集中在7、8、9月,年均气温为11.4℃,年均降水量为550 mm,无霜期为207 d。供试品种为“长富2号”,树龄为15 a,株高3 m左右,种植间距为2 m×4 m。试验地土壤类型为黄壤土,土壤质地为中壤;基础地力水平下有机质含量13.0 g·kg⁻¹,全氮1.0 g·kg⁻¹,硝态氮22.7 mg·kg⁻¹,有效磷15.9 mg·kg⁻¹,速效钾151.3 mg·kg⁻¹,pH 8.3。试验期间大气温度和降雨量如图1所示。

1.2 试验设计

试验于2008年设立,共设置4个处理:对照不施肥(CK)、单施有机肥(M)、单施化肥(NPK)、有机无机肥配施(MNPK),每个处理设置4个重复,每个小区面

积约为40 m²。有机肥于秋季一次性施入,氮肥分3次施入(秋季65%、坐果期15%、膨果期20%),钾肥分3次施入(秋季40%、坐果期20%、膨果期40%),磷肥分3次施入(秋季70%、坐果期20%、膨果期10%)。施用肥料种类为尿素(N 46%)、过磷酸钙(P₂O₅ 16%)和硫酸钾(K₂O 50%),有机肥为羊粪(有机碳35.02 g·kg⁻¹、全氮6.01 g·kg⁻¹、有效磷P₂O₅ 39 mg·kg⁻¹、速效钾K₂O 41 mg·kg⁻¹)。施肥方式:基肥为开沟施入,沟深为40 cm;追肥为穴状施肥。近3 a施肥情况见表1,其中NPK处理和MNPK处理为等氮量投入处理(有机肥中的氮替代了部分化学氮肥),M处理的氮投入量为68 kg·hm⁻²,MNPK处理中有机肥提供的氮量为34 kg·hm⁻²。

1.3 温室气体的采集与测定

采用静态暗箱-气相色谱法^[11]对气体进行监测,静态暗箱由密闭顶箱(41.5 cm×21.5 cm×15 cm)和底座(40 cm×20 cm×20 cm)两部分组成,材质为不锈钢。气体样品的采集频率为2周一次,采样时间为上午8:00—11:30,分别在扣好箱子0、10、20、40 min后用注射器抽取60 mL气样于真空气袋中,带回实验室分析,并使用温度计记录箱内温度。

采集的样品在24 h内用气相色谱仪(安捷伦

表1 不同处理的施肥方案(kg·hm⁻²)

Table 1 Fertilization schemes under different treatments(kg·hm⁻²)

处理 Treatment	有机肥 Manure	化肥 Chemical fertilizer			总施氮量 Total nitrogen input
		N	P ₂ O ₅	K ₂ O	
CK	0	0	0	0	0
M	45 000	0	0	0	68
NPK	0	675	405	405	675
MNPK	22 500	641	405	405	675

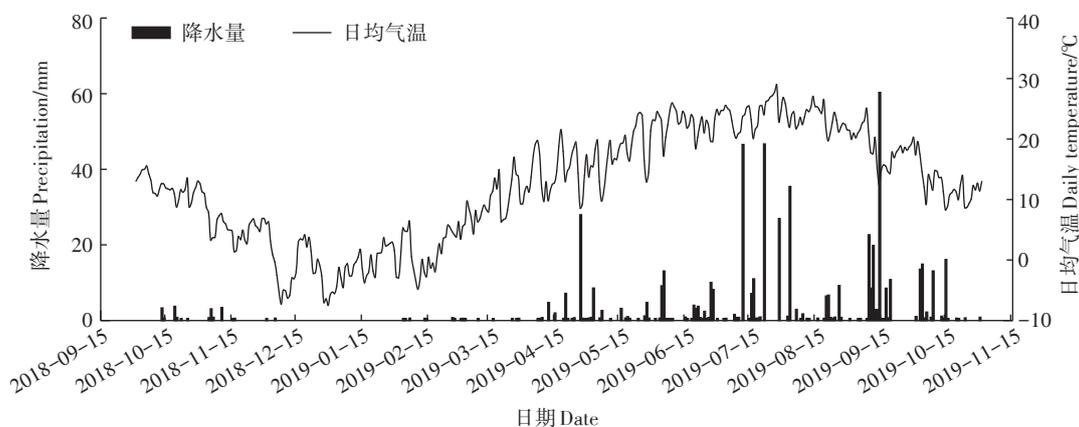


图1 生育期内气温和降雨量变化

Figure 1 Changes of temperature and precipitation across the whole growth period

7890B)测定CH₄和N₂O的气体浓度。CH₄使用FID检测器(氢火焰检测器),温度为250℃,N₂O使用ECD检测器(电子捕获检测器),载气为高纯氮气,尾吹气流量为2 mL·min⁻¹,温度为300℃,色谱柱为80/100目的PorapakQ填充柱。气体排放通量由4个连续采集气体样品的浓度值与采样时间经过线性回归方程的斜率得出。

1.4 土壤样品的采集与分析

采集气体样品的同时,采集底座周围0~20 cm土层土壤,带回实验室测定基础指标,基础指标测定参考文献[19]。土壤样品的含水量利用烘干法测定;硝态氮(NO₃-N)和铵态氮(NH₄⁺-N)采用1 mol·L⁻¹的KCl溶液浸提,利用全自动流动分析仪(型号为AA3)测定;土壤有机质采用重铬酸钾容量-外加热法测定;土壤有效磷采用0.5 mol·L⁻¹ NaHCO₃浸提-钼锑抗比色法测定;土壤速效钾采用1 mol·L⁻¹ NH₄OAc浸提-火焰光度法测定。

1.5 数据处理与分析

CH₄和N₂O的气体排放计算公式为^[20]:

$$F=H \times (\mu \times P) / (T+273.2) \times (1/R) \times (dc/dt) \quad (1)$$

式中: F 为CH₄的吸收通量或N₂O的排放通量,mg·m⁻²·h⁻¹; H 为采样箱的高度,cm; μ 为CH₄或N₂O气体的摩尔质量,g·mol⁻¹; P 为标准大气压,1.013×10⁵ Pa; R 为普适气体常数,8.314 J·mol⁻¹·kg⁻¹; T 为采样时静态箱内平均温度,℃; dc/dt 为单位时间内密闭箱中N₂O或CH₄气体浓度变化速率,mL·m⁻³·h⁻¹。

累积排放量的公式为^[8]:

$$M = \sum_{i=1}^n (F_{i+1} + F_i) / 2 \times (t_{i+1} - t_i) \times 24 \times 10^{-2} \quad (2)$$

式中: M 为N₂O、CH₄的排放或吸收总量,kg·hm⁻²; F 为N₂O、CH₄的排放通量或吸收通量,mg·m⁻²·h⁻¹; i 为气体采样次数; $t_{i+1}-t_i$ 表示两个相邻测定日期的间隔,d; n 为累积排放量观测时间内总的测定次数;24×10⁻²用于单位换算。

根据年生育周期内CH₄累积吸收量和N₂O的累积排放量,计算CH₄和N₂O排放总CO₂当量(Carbon dioxide equivalent, CDE)。100 a时间尺度下CH₄和N₂O的增温潜势分别是CO₂的25倍和298倍^[21]。

$$E_T = f_{CH_4} \times 25 + f_{N_2O} \times 298 \quad (3)$$

式中: f_{CH_4} 为CH₄的累积吸收量,kg·hm⁻²; f_{N_2O} 为N₂O的累积排放量,kg·hm⁻²; E_T 为CH₄累积吸收量和N₂O累积排放量的总CO₂当量,kg CO₂e·hm⁻²。

温室气体排放强度(GHGI)的计算公式^[22]为:

$$I = E_T / Y \quad (4)$$

式中: I 为温室气体排放强度,g·kg⁻¹; Y 为单位面积苹果的平均产量,t·hm⁻²。

采用公式(5)计算N₂O排放系数(EF_d)^[8]:

$$EF_d = (F_N - F_{CK}) / N \times 100\% \quad (5)$$

式中: F_N 和 F_{CK} 分别为施肥和不施肥处理N₂O年排放总量,kg·hm⁻²; N 为化学氮肥投入量,kg·hm⁻²。另外,施肥处理与不施肥处理苹果产量之差除以化学氮肥投入量,计算出氮肥农学效率(NAE)。

单位产量N₂O排放系数^[8](kg·t⁻¹)等于N₂O累积排放量(kg·hm⁻²)除以苹果产量(t·hm⁻²);单位产量CH₄吸收系数(kg·t⁻¹)等于CH₄累积吸收量(kg·hm⁻²)除以苹果产量(t·hm⁻²)。

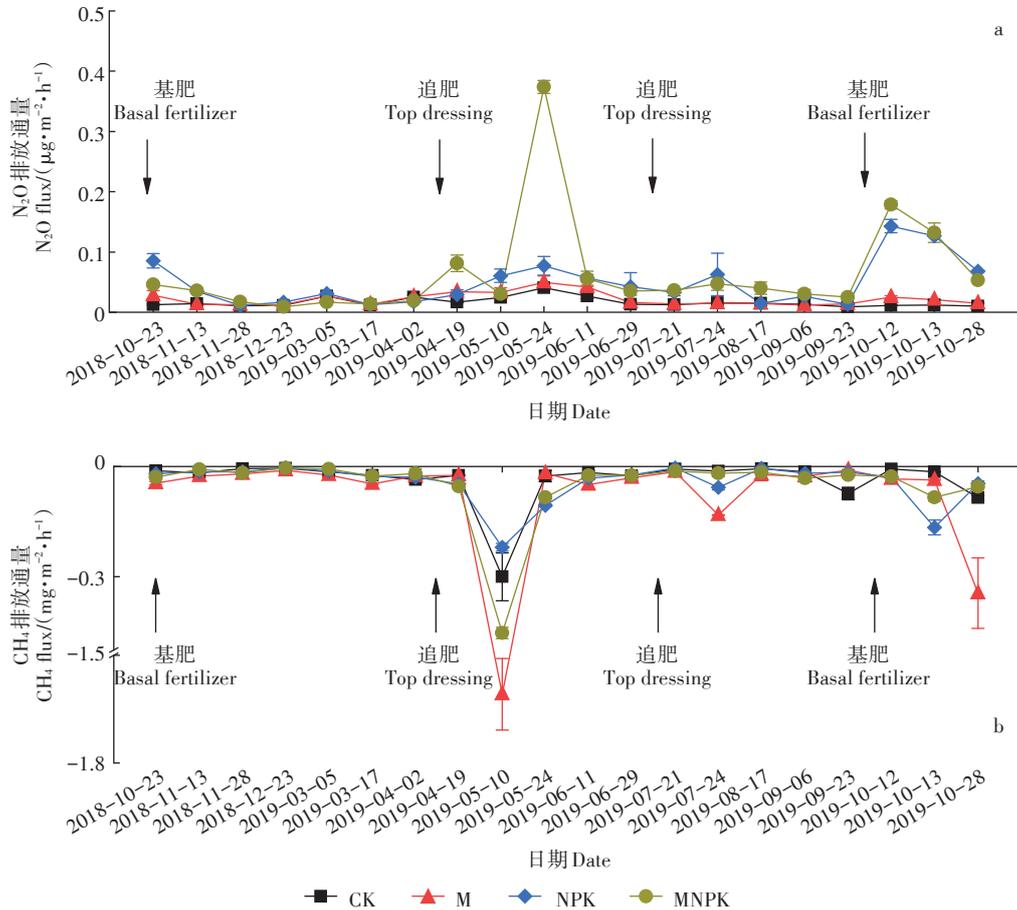
试验数据经过Excel 2013整理,用SPSS 22.0进行方差齐性检验,若结果呈齐性(Sig>0.05),则采用LSD(Least significant difference)法对各处理进行多重比较, $P<0.05$ 为差异显著;若呈非齐性(Sig<0.05),则采用SPSS 22.0中的Kruskal-Wallis法进行非参数检验。

2 结果与分析

2.1 不同处理下CH₄吸收和N₂O排放的动态变化

N₂O排放的高峰在施肥和降雨后出现(图2a),各处理N₂O排放通量在施肥后大幅提升,且不同处理间差异显著。监测周期内,CK、M、NPK和MNPK处理的N₂O平均排放通量分别为0.017、0.022、0.048 mg·m⁻²·h⁻¹和0.064 mg·m⁻²·h⁻¹。由图2a可知,基肥施入后,各处理N₂O的排放通量出现峰值,其中排放量最高的处理为NPK,与MNPK相比提高了85.9%,且显著高于M和CK处理。进入休眠期后各处理N₂O排放通量基本一致并且保持在较低水平,随着春季回暖并伴随一定量的追肥,在4月19日再一次出现排放峰值,其中MNPK处理的排放通量最高,为0.081 mg·m⁻²·h⁻¹,且显著高于其他处理($P<0.05$);5月24日MNPK处理的N₂O排放通量出现全年排放的最高峰值,远高于其他处理。6—9月各处理N₂O排放通量处于较低水平,在第二年施入基肥后MNPK和NPK处理N₂O排放通量迅速增加,在10月12日再次出现峰值,且与CK和M相比提升幅度较大。由此可以看出,施肥是影响N₂O排放通量的主要因素。

在年生育周期内CH₄的排放通量均为负值(图2b),这说明旱地对CH₄以吸收为主。年生育周期内各处理CH₄平均吸收通量维持在0.004~1.61 mg·m⁻²·h⁻¹之间。总体而言,年生育周期内各处理的CH₄吸收

图2 不同施肥处理下CH₄和N₂O排放通量的变化规律Figure 2 Variation of CH₄ and N₂O emission fluxes under different treatments

通量基本一致,春夏季吸收通量较高,冬季吸收通量较低,其中CK、M、NPK和MNPK的CH₄平均吸收通量分别为:0.036、0.128、0.045 mg·m⁻²·h⁻¹和0.051 mg·m⁻²·h⁻¹。5月10日各处理CH₄吸收通量均达到最高值,其中吸收通量最高的是M处理,最低的为NPK处理。从各处理的CH₄吸收通量来看,旱地苹果园是CH₄一个较弱的汇,因此研究渭北旱地果园温室气体排放时可以不考虑CH₄的源和汇。

2.2 不同处理下土壤NO₃-N和NH₄⁺-N的变化

土壤NH₄⁺-N含量和NO₃-N含量在年生活周期内变化见图3,在施肥之后,NPK和MNPK处理的土壤中NH₄⁺-N含量和NO₃-N含量出现不同程度的峰值,而CK和M处理土壤中NH₄⁺-N含量和NO₃-N含量基本保持不变。土壤NH₄⁺-N含量在第一次施入基肥和第一次追肥后有所升高,其中NPK处理的土壤NH₄⁺-N含量最高(图3a),在5月10日出现峰值。从图3b中可以看出,施肥以后,MNPK处理与NPK处理下土壤NO₃-N含量显著增加,年生育周期内NPK处理与

MNPK处理土壤NO₃-N含量的变化范围分别为4.83~590.65 mg·kg⁻¹和12.98~652.48 mg·kg⁻¹,在5月24日土壤NO₃-N含量出现峰值,并且在第二次基肥施入后,再一次出现峰值,其中MNPK和NPK处理土壤NO₃-N含量显著高于CK和M处理。说明施用化学氮肥对土壤NH₄⁺-N和NO₃-N含量影响较大。

2.3 N₂O和CH₄累积排放量和温室气体排放强度

在一个年生活周期内N₂O累积排放量的范围为1.58~4.78 kg·hm⁻²(表2),M、NPK和MNPK处理的N₂O累积排放量与CK处理相比分别增加了27.2%、139.9%和202.5%,各处理之间差异均达到显著水平($P<0.05$)。M处理的CH₄累积吸收量显著高于其他处理($P<0.05$)。CK、M、NPK和MNPK处理的温室气体排放总CO₂当量分别为398.51、321.56、1 038.49、1 311.69 kg CO₂e·hm⁻²,不同处理间差异。MNPK处理的温室气体排放强度相比CK和NPK处理分别显著降低了20.5%和22.8%,CK和NPK处理之间差异不显著。

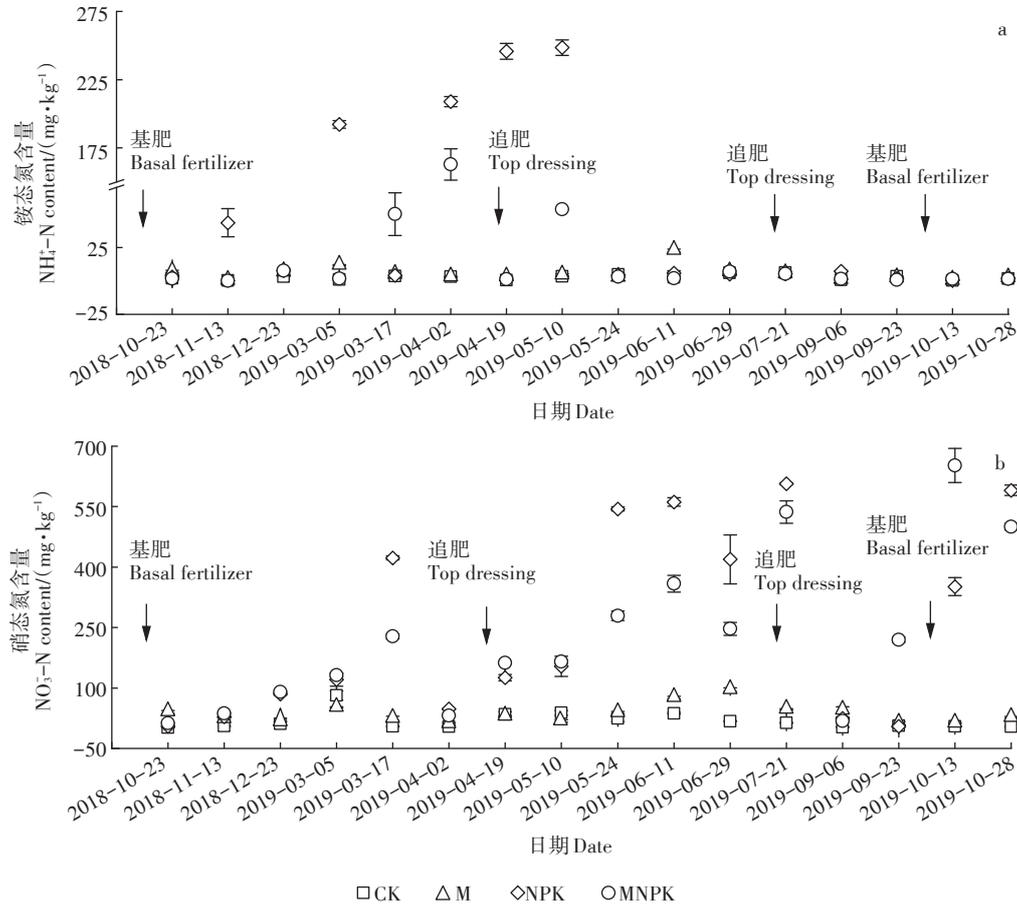


图3 不同施肥处理土壤硝态氮和铵态氮含量的动态变化

Figure 3 Dynamic changes of $\text{NH}_4^+\text{-N}$ and $\text{NO}_3^-\text{-N}$ content in soil under different treatments

2.4 产量、氮肥农学效率、 N_2O 排放系数和单位产量温室气体排放系数

年生活周期内苹果园各处理的产量差异显著(表3),其中MNPK处理的产量最高,与NPK处理和M处理相比分别提高了63.6%和45.7%,NPK处理产量较M处理减少了10.9%,但二者间差异不显著。与NPK处理相比,MNPK处理的氮肥农学效率增加了114.3%, N_2O 排放系数增加了0.17个百分点;MNPK处理和NPK处理下单位产量 N_2O 累积排放量分别为

0.05、0.07 $\text{kg}\cdot\text{t}^{-1}$,单位产量 CH_4 累积吸收量分别为0.04、0.06 $\text{kg}\cdot\text{t}^{-1}$,两处理间差异均不显著。

2.5 温室气体排放通量与各影响因子之间的相关性分析

相关性分析表明(表4), CH_4 吸收通量与土壤含水量、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、气温均呈显著负相关关系($P<0.05$); N_2O 排放通量与土壤 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 和温度呈显著正相关,而与土壤 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量和含水量无显著相关性。由此可见,土壤水分、气温、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 是影

表2 不同施肥处理下温室气体(N_2O 和 CH_4)排放总量与温室气体排放强度

Table 2 Total emission of greenhouse gases (N_2O and CH_4) and greenhouse gas intensity under different fertilization treatments

处理 Treatment	N_2O 排放量 N_2O emission/($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)	CH_4 吸收量 CH_4 absorption/($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)	温室气体排放总 CO_2 当量CDE/ ($\text{kg}\text{CO}_2\text{e}\cdot\text{hm}^{-2}$)	温室气体排放强度 Greenhouse gas intensity/($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)
CK	1.58±0.01d	2.94±0.25d	398.51±5.67c	17.29±0.25a
M	2.01±0.06c	9.95±0.29a	321.56±26.01d	4.91±0.40c
NPK	3.79±0.32b	3.27±0.12c	1 038.49±92.30b	17.80±1.58a
MNPK	4.78±0.07a	4.03±0.06b	1 311.69±20.79a	13.74±0.22b

注:同列不同小写字母表示处理间差异显著($P<0.05$)。下同。

Note: Different lowercase letters in the same column indicate significant differences among treatments ($P<0.05$). The same below.

响温室气体排放的主要因素。

3 讨论

3.1 不同处理对CH₄吸收量的影响

土壤CH₄的平衡受产CH₄菌的产生和CH₄氧化菌的消耗所控制,在旱地土壤中,CH₄氧化菌的活性较强,CH₄的通量均为负值,这说明旱地土壤对CH₄以吸收为主^[11]。本研究的结果表明,旱地果园施用有机肥增加了土壤CH₄的吸收通量(图2b),其中M处理CH₄累积吸收量显著高于其他处理,而MNPK处理相比于M处理CH₄累积吸收量减少近一半。长期施用有机肥可以改善土壤结构、增加土壤孔隙度、提高土壤透气性^[23],使土壤中的氧气含量增加。CH₄氧化菌是以CH₄作为唯一碳源和能源,将CH₄氧化为CO₂和水的好氧型细菌,有机肥的施用会提高CH₄氧化菌的数量^[24],在好氧条件下,CH₄容易被CH₄氧化菌氧化而增加其吸收通量^[25]。苹果园年生育周期内施用有机肥一方面可以降低化学肥料的用量,有效减缓旱地果园CH₄的排放,另一方面可以解决有机废弃物所产生的环境污染,提高有机废弃物的资源利用率,并且施用粪肥类有机肥的生产成本低,与化肥相比可以减轻农民的经济负担。另外,CH₄吸收通量与土壤NH₄⁺-N的含量呈显著负相关(表4)。孙海妮等^[11]的研究结果表明土壤NH₄⁺-N含量与CH₄的氧化量相互排斥,当土壤NH₄⁺-N含量降低时,其CH₄的吸收量反而增加。这一方面是因为施肥以后土壤中高浓度的NH₄⁺-N与CH₄

氧化菌存在竞争关系,限制了CH₄氧化菌的生长和活性,导致CH₄氧化吸收量降低,从而增加了CH₄的排放通量,降低其吸收通量^[26];另一方面,有机肥作为外加碳源投入土壤中后,为土壤微生物的活动提供了碳源,进一步提高了土壤微生物的活性,促进了土壤中的氨氧化过程,降低了土壤NH₄⁺-N的含量,从而增加了CH₄的吸收通量^[11]。此外,土壤CH₄吸收通量与土壤含水量呈线性负相关的关系(表4)。含水量的增加使土壤空气中的氧气含量和气体扩散系数降低,使土壤形成厌氧状态,不利于土壤CH₄氧化菌的生长,从而使土壤CH₄吸收通量降低^[11]。这说明含水量和施用有机肥对土壤CH₄吸收通量产生了一定的影响。本研究显示施用有机肥会显著增加CH₄累积吸收量,其中M处理的吸收效果最好。但从研究结果来看,CH₄在旱地苹果园中的吸收量较低,基本可以忽略不计。

3.2 不同处理对N₂O排放量的影响

农业土壤中N₂O的产生主要是在一些微生物的参与下通过硝化和反硝化两种途径完成。土壤中N₂O的产生主要受底物碳、氮含量的影响,底物碳充足时,N₂O的排放主要受氮供应水平的制约;底物氮充足时,N₂O的排放主要受碳供应水平的制约^[27]。有机无机肥配施是目前比较理想的施肥制度,不但可以减少化学肥料施用,还可以推动畜禽粪污、沼渣沼液和农作物秸秆等有机废弃物综合利用,从而使农村生态环境得到有效治理,在增产的同时减少对环境的负

表3 产量、N₂O排放系数和单位产量温室气体排放系数

Table 3 Yield, N₂O emission factor and the yield-scaled greenhouse gas emissions

处理 Treatment	产量 Yield/(t·hm ⁻²)	氮肥农学效率 NAE/(kg·kg ⁻¹)	N ₂ O排放系数 N ₂ O emission factor/%	单位产量CH ₄ 累积吸收量 Yield-scaled CH ₄ absorption/(kg·t ⁻¹)	单位产量N ₂ O累积排放量 Yield-scaled N ₂ O emission/(kg·t ⁻¹)
CK	22.53±5.18c	—	—	0.13±0.02a	0.07±0.02a
M	65.52±13.98b	—	—	0.16±0.04a	0.03±0.01b
NPK	58.35±15.50b	53.1±16.6b	0.33±0.05b	0.06±0.02b	0.07±0.02a
MNPK	95.45±5.33a	113.8±7.94a	0.50±0.01a	0.04±0.01b	0.05±0.01ab

表4 各影响因子与气体排放/吸收通量之间的相关性

Table 4 Correlation between each impact factor and greenhouse gas emission/absorption flux

温室气体 Greenhouse gas	土壤含水量 Soil water content	硝态氮含量 NO ₃ -N content	铵态氮含量 NH ₄ ⁺ -N Content	气温 Air temperature
CH ₄ 吸收通量	-0.221*	-0.292**	-0.266**	-0.163*
N ₂ O排放通量	0.136	0.413**	0.138	0.359**

注:*表示在0.05显著性水平下显著相关,**表示在0.01显著性水平下显著相关,n=160。

Note:*indicates extremely significant difference at the level of 0.05,** indicates extremely significant difference at the 0.01 level,n=160.

面影响。在本研究中,施肥可显著增加年生育周期内 N_2O 累积排放量(表2),其中MNPK处理的 N_2O 排放量显著高于NPK处理。董玉红等^[28]的研究表明,在等氮量的情况下,有机无机肥配施处理的 N_2O 排放通量高于单施化肥处理,这与本研究的结果一致。这可能是因为NPK处理为土壤微生物提供了足够多的底物氮,使 N_2O 的排放受碳供应水平的制约^[29],也可能是配施的有机肥为参与氮循环的相关微生物提供了充足的碳源,增加了土壤微生物的活性,从而促进了土壤 N_2O 的排放^[30]。另有研究表明,化肥合理配施有机肥可以有效降低 N_2O 排放量^[31]。其主要原因是施入有机肥后,粪肥有机肥矿化速率较缓慢,而土壤微生物在参与养分矿质化的过程中会固定土壤的氮素,从而降低了土壤微生物可直接利用的无机氮含量^[30]。目前关于有机无机肥配施对土壤 N_2O 的排放起促进作用还是抑制作用尚无定论,有机无机肥配施对 N_2O 排放的影响还有待于进一步研究。此外,在本研究中 N_2O 排放与 NO_3^- -N含量和温度呈正相关,而与土壤含水量无显著相关性。这可能是由于旱地果园降雨稀少,土壤水分大部分被果树根系吸收利用,参与硝化和反硝化过程的水分较少,而施肥和气温对 N_2O 排放所产生的影响掩盖了含水量在 N_2O 产生过程中的作用。除施肥以外,温度也是影响 N_2O 排放通量的因子之一。

研究结果表明NPK处理和M处理的增产效果差异不显著,而MNPK处理的产量最高(表3)。直接原因是化肥和有机肥所提供养分的植物有效性不同,化肥提供的养分为大量矿质养分,而有机肥所提供的可供作物直接吸收利用的矿质养分仅占一小部分,绝大部分养分需要随着有机肥的矿质化过程缓慢释放^[29],所以长期单施有机肥和长期单施化肥的产量差异不显著;而长期有机无机肥配施可以增加氮素底物的有效性,进而提高氮素利用率,增加作物产量^[32]。本研究中,MNPK处理的氮肥农学效率高于NPK处理,且有机无机肥配施会增加 N_2O 的排放系数(表3),这可能与长期有机无机肥配施条件下土壤中不同年限有机肥的矿化量有关。此外,本研究发现MNPK处理与NPK处理的单位产量 N_2O 累积排放量无显著差异,这与配施有机肥会增加 N_2O 的排放和 CH_4 的吸收及其增产效果有关,虽然MNPK处理会增加 N_2O 的排放量,但增产效果相比NPK处理更好,所以两种施肥处理单位产量的 N_2O 累积排放量无显著差异。在果园生态系统中,影响 N_2O 排放的因素较多,如施肥刺激、氮挥发、淋溶径流等都会影响果园生态系统中 N_2O 的

排放,仅用箱体法测定无法代表经挥发和淋溶两种途径间接排放到大气中的 N_2O 气体排放量。因此,本研究探究的单位产量 N_2O 累积排放量仅考虑果园施肥所引起的 N_2O 排放,不考虑其他因素。 N_2O 的排放量对综合温室效应的贡献要远大于 CH_4 ,因此,在研究渭北旱地苹果园年生活周期内的温室气体排放时可以不考虑 CH_4 的排放量,而应将研究重点放在 N_2O 的排放上。

温室气体排放强度是衡量农田温室效应和经济效益的一项综合指标。本研究中,与NPK处理相比,MNPK处理的温室气体排放总 CO_2 当量虽然较高,但增产效果更加明显,因此温室气体排放强度显著低于NPK处理。由此可知,果园合理的有机无机肥配施是保证果树产量提升、缓解周年温室气体排放的有效措施,也是有效提高农业废弃物利用的重要途径。在当前的农业发展中,有机无机肥配施不但可以降低农业生产的成本,还可以增加产量、提高收益,是目前旱地果园值得推荐的一种施肥模式。另外,本研究监测的温室气体排放是苹果生命周期中的一个年生育周期,为使试验年生命周期内数据所得结论更具说服力,未来会延长监测周期,为旱地果园温室气体排放量的准确估算提供更充分的依据。

4 结论

(1)有机无机肥配施可有效增加果实产量,提高氮肥农学效率,其中有机无机肥配施处理的产量较单施化肥和单施有机肥分别增加了63.6%、45.7%;与单施化肥处理相比,有机无机肥配施处理的氮肥农学效率提高了114.3%。

(2)苹果园 CH_4 吸收通量与土壤含水量呈显著负相关; N_2O 排放通量与土壤硝态氮含量和气温呈显著正相关($P < 0.01$)。说明除施肥外,气温和含水量是影响温室气体排放的关键因素。

(3)苹果园年生活周期内有机无机肥配施的综合温室气体排放量比单施化肥处理升高了26.3%, N_2O 的排放系数增加了0.17个百分点;而温室气体排放强度降低了22.8%。有机无机肥配施处理单位产量 N_2O 的排放系数为 $0.05 \text{ kg} \cdot \text{t}^{-1}$,与单施化肥处理相比差异不显著。渭北旱地苹果园是 CH_4 较弱的汇,其排放可忽略不计,旱地果园应侧重于 N_2O 的监测。从经济效应和环境效应相结合的层面来看,苹果园年生活周期内有机无机肥配施是较为理想的施肥管理模式。

参考文献:

- [1] EDENHOFER, PICHADRUGA R, SOKONA Y, et al. Mitigation of climate change contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change[R]. Cambridge: Cambridge University Press, 2014.
- [2] KUPPUSAMY S, THAVAMANI P, MEGHARAJ M, et al. Agronomic and remedial benefits and risks of applying biochar to soil: Current knowledge and future research directions[J]. *Environment International*, 2016, 87: 1-12.
- [3] AMELOOT N, MAENHOUT P, DE Neve S, et al. Biochar-induced N₂O emission reduction after field incorporation in loam soil[J]. *Geoderma*, 2016, 267: 10-16.
- [4] SOLOMON S, QIN D, MAMMING M, et al. Physical science basis contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change[R]. Cambridge: Cambridge University Press, 2007.
- [5] 周喜君, 张萌, 尚丹茹. 中国农业二氧化碳排放演变趋势及关键因素识别研究[J]. 忻州师范学院学报, 2018, 34(5): 42-45. ZHOU X J, ZHANG M, SHANG D R. Study on the evolution trend and identification of key factors of China's agricultural carbon dioxide emissions [J]. *Journal of Xinzhou Teachers University*, 2018, 34(5): 42-45.
- [6] 中华人民共和国环境生态部. 中华人民共和国气候变化第二次两年更新报告[R]. 北京: 中华人民共和国环境生态部, 2018. Ministry of Ecology and Environment of the People's Republic of China. The People's Republic of China's second biennial update report on climate change[R]. Beijing: Ministry of Ecology and Environment of the People's Republic of China, 2018.
- [7] ZHAO Z Y, ZHENG W, MA Y T, et al. Responses of soil water, nitrate and yield of apple orchard to integrated soil management in Loess Plateau, China[J]. *Agricultural Water Management*, 2020, 240: 106325.
- [8] 孙赫阳, 万忠梅, 刘德燕, 等. 有机肥与无机肥配施对潮土 N₂O 排放的影响[J]. 环境科学, 2020, 41(3): 1474-1481. SUN H Y, WAN Z M, LIU D Y, et al. Effect of organic fertilizer and inorganic fertilizer application on n₂o emissions from fluvo-aquic soil in the North China Plain[J]. *Environmental Science*, 2020, 41(3): 1474-1481.
- [9] PILECCO G E, CHANTIGNY M H, WEILER D A, et al. Greenhouse gas emissions and global warming potential from biofuel cropping systems fertilized with mineral and organic nitrogen sources[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 729: 138767.
- [10] MAILLARD E, ANGERS D A. Animal manure application and soil organic carbon stocks: A meta-analysis[J]. *Global Change Biology*, 2014, 20(2): 666-679.
- [11] 孙海妮, 岳善超, 王仕稳, 等. 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, 2018, 38(5): 2055-2065. SUN H N, YUE S C, WANG S W, et al. Effects of manure and supplementary irrigation on greenhouse gas emission in dryland fields[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2018, 38(5): 2055-2065.
- [12] XIA F, MEI K, XU Y, et al. Response of N₂O emission to manure application in field trials of agricultural soils across the globe[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 733: 139390.
- [13] 赵志远. 二元覆盖下合理施肥对旱地苹果园水肥高效利用的影响[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2018: 1-2. ZHAO Z Y. Effects of rational fertilization under dual mulching on effective utilization of water and fertilizer in dryland apple orchard[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2018: 1-2.
- [14] 顾江新, 郭艳杰, 张丽娟, 等. 果树种植土壤 N₂O 排放研究: 认识与挑战[J]. 农业环境科学学报, 2020, 39(4): 726-731. GU J X, GUO Y J, ZHANG L J, et al. Soil N₂O emissions from orchards: Current status and challenges[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2020, 39(4): 726-731.
- [15] 刘韵, 柳文丽, 朱波. 施肥方式对冬小麦-夏玉米轮作土壤 N₂O 排放的影响[J]. 土壤学报, 2016, 53(3): 735-745. LIU Y, LIU W L, ZHU B. Effect of fertilization regime on soil N₂O emission from upland field under wheat-maize rotation system[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2016, 53(3): 735-745.
- [16] 孟磊, 蔡祖聪, 丁维新. 长期施肥对华北典型潮土 N 分配和 N₂O 排放的影响[J]. 生态学报, 2008, 28(12): 6197-6203. MENG L, CAI Z C, DING W X. Effects of long-term fertilization on N distribution and N₂O emission in fluvo-aquic soil in north China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28(12): 6197-6203.
- [17] 侯苗苗, 吕凤莲, 张弘毅, 等. 有机氮替代比例对冬小麦/夏玉米轮作体系作物产量及 N₂O 排放的影响[J]. 环境科学, 2018, 39(1): 321-330. HOU M M, LÜ F L, ZHANG H T, et al. Effect of organic manure substitution of synthetic nitrogen on crop yield and N₂O emission in the winter wheat-summer maize rotation system[J]. *Environmental Science*, 2018, 39(1): 321-330.
- [18] 潘媛晴, 吕景智. 大气中甲烷和氧化亚氮排放量与有机成分和无机成分的关系[J]. 辽宁大学学报(自然科学版), 2016, 43(3): 272-276. PAN Y Q, LÜ J Z. The effect of organic and inorganic fertilizers on emissions of methane and nitrous oxide[J]. *Journal of Liaoning University(Natural Sciences Edition)*, 2016, 43(3): 272-276.
- [19] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 三版. 北京: 中国农业出版社, 2010. BAO S D. Analysis of agrochemical soil[M]. 3rd Edition. Beijing: China Agriculture Press, 2010.
- [20] 王楷, 李伏生, 方泽涛, 等. 不同灌溉模式和施氮量条件下稻田甲烷排放及其与有机碳组分关系[J]. 农业环境科学学报, 2017, 36(5): 1012-1020. WANG K, LI F S, FANG Z T, et al. Soil CH₄ emission and its relationship with organic carbon fraction under different irrigation methods and nitrogen rates[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2017, 36(5): 1012-1020.
- [21] 董艳芳, 黄景, 李伏生, 等. 不同灌溉模式和施氮处理下稻田 CH₄ 和 N₂O 排放[J]. 植物营养与肥料学报, 2017, 23(3): 578-588. DONG Y F, HUANG J, LI F S, et al. Emissions of CH₄ and N₂O under different irrigation methods and nitrogen treatments[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2017, 23(3): 578-588.
- [22] ZHANG A, LIU Y, PAN G, et al. Effect of biochar amendment on maize yield and greenhouse gas emissions from a soil organic carbon poor calcareous loamy soil from Central China Plain[J]. *Plant and Soil*, 2012, 351(1/2): 263-275.
- [23] 汤桂容, 周旋, 田昌, 等. 有机无机氮肥配施对菜地土壤二氧化碳和甲烷排放的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2019(3): 29-35. TANG

- G R, ZHOU X, TIAN C, et al. Effects of organic and inorganic nitrogen fertilizer on soil carbon dioxide and methane emissions of lettuce [J]. *Soils and Fertilizers Sciences in China*, 2019(3): 29–35.
- [24] 邹文秀, 邱琛, 韩晓增, 等. 长期施用有机肥对黑土土壤肥力和玉米产量的影响[J]. *土壤与作物*, 2020, 9(4): 407–418. ZOU W X, QIU C, HAN X Z, et al. Effects of long-term manure application on black soil fertility and maize yield[J]. *Soils and Crops*, 2020, 9(4): 407–418.
- [25] 胡荣桂. 氮肥对旱地土壤甲烷氧化能力的影响[J]. *生态环境*, 2004(1): 74–77. HU R G. Effects of fertilization on the potential of methane oxidation in upland soil[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2004(1): 74–77.
- [26] YANG W, FENG G, MILES D, et al. Impact of biochar on greenhouse gas emissions and soil carbon sequestration in corn grown under drip irrigation with mulching[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 729: 138752.
- [27] 郝小雨, 高伟, 王玉军, 等. 有机无机肥料配合施用对设施菜田土壤 N₂O 排放的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2012, 18(5): 1073–1085. HAO X Y, GAO W, WANG Y J, et al. Effects of combined application of organic manure and chemical fertilizers on N₂O emission from greenhouse vegetable soil[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2012, 18(5): 1073–1085.
- [28] 董玉红, 欧阳竹, 李运生, 等. 不同施肥方式对农田土壤 CO₂ 和 N₂O 排放的影响[J]. *中国土壤与肥料*, 2007(4): 34–39. DONG Y H, OUYANG Z, LI Y S, et al. Influence of different fertilization on CO₂ and N₂O fluxes from agricultural soil[J]. *Soils and Fertilizers Sciences in China*, 2007(4): 34–39.
- [29] 李燕青, 唐继伟, 车升国, 等. 长期施用有机肥与化肥氮对华北夏玉米 N₂O 和 CO₂ 排放的影响[J]. *中国农业科学*, 2015, 48(21): 4381–4389. LI Y Q, TANG J W, CHE S G, et al. Effect of organic and inorganic fertilizer on the emission of CO₂ and N₂O from the summer maize field in the North China Plain[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2015, 48(21): 4381–4389.
- [30] 毕智超, 张浩轩, 房歌, 等. 不同配比有机无机肥料对菜地 N₂O 排放的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2017, 23(1): 154–161. BI Z C, ZHANG H X, FANG G, et al. Effects of combined organic and inorganic fertilizers on N₂O emissions in intensified vegetable field[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2017, 23(1): 154–161.
- [31] 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. ZHANG H, GUO L P, XIE L Y, et al. The effect of management practices on the emission of CO₂ and N₂O from the winter wheat field in North China Plain[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2013, 44(3): 653–659.
- [32] LV F L, YANG X Y, XU H H, et al. Effect of organic amendments on yield-scaled N₂O emissions from winter wheat–summer maize cropping systems in northwest China[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2020, 27(25): 31933–31945.