

卢 闯, 王永生, 胡海棠, 等. 精准农业对华北平原冬小麦温室气体排放和产量的短期影响[J]. 农业环境科学学报, 2019, 38(7): 1641-1648.

LU Chuang, WANG Yong-sheng, HU Hai-tang, et al. Short-term effect of precision agriculture on winter wheat yield and greenhouse gas emissions in the North China Plain[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2019, 38(7): 1641-1648.

精准农业对华北平原冬小麦温室气体排放和产量的短期影响

卢 闯¹, 王永生², 胡海棠¹, 董 熙¹, 李存军^{1*}

(1. 北京农业信息技术研究中心, 北京 100097; 2. 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101)

摘 要: 本试验以京郊冬小麦田为研究对象, 采用大田试验设置4个处理: CTF(常规整地+常规施肥)、PF(精准施肥)、LL(激光平地)、PF+LL(精准施肥+激光平地), 采用静态箱-气相色谱法分析了不同农业措施下的土壤温室气体(CO₂、N₂O、CH₄)排放特征。结果表明: 和CTF相比, LL冬小麦产量显著提高7.10%; 降雨、灌溉后表层土壤含水率显著提高, 冬小麦季土壤CH₄吸收量显著增加22%, 土壤CO₂、N₂O累计排放量分别显著增加27.20%、8.81%。PF产量与CTF无显著差异; 土壤N₂O排放峰出现在追肥后, PF排放峰值显著较CTF低15.41%, 精准施肥至收获期间PF土壤N₂O显著减排15.05%, 但整个冬小麦生长季PF土壤CO₂、N₂O累计排放量和CH₄累计吸收量与CTF均无显著差异。和CTF相比, PF+LL小麦产量显著提高8.2%, 同时PF+LL土壤具备较好的持水性, 雨季及灌溉后表层土壤含水率分别显著提高8.81%、7.63%, 冬小麦生长季土壤CO₂累计排放量显著增加33.53%, CH₄吸收量显著增加31.5%, N₂O累计排放量无显著差异, 但在精准施肥至收获期间土壤N₂O显著减排10.22%。综上, 激光平地技术可显著增产但综合增温潜势较强, 精准施肥技术对产量无显著影响, 但降低了N₂O排放峰值, 减少了精准施肥后的N₂O累计排放量, 表现出一定的N₂O减排潜力。

关键词: 精准施肥; 激光平地; 冬小麦; 温室气体

中图分类号: X511 文献标志码: A 文章编号: 1672-2043(2019)07-1641-08 doi:10.11654/jaes.2018-1381

Short-term effect of precision agriculture on winter wheat yield and greenhouse gas emissions in the North China Plain

LU Chuang¹, WANG Yong-sheng², HU Hai-tang¹, DONG Xi¹, LI Cun-jun^{1*}

(1. Beijing Research Center for Information Technology in Agriculture, Beijing 100097, China; 2. Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China)

Abstract: A field experiment was conducted in suburban areas of Beijing. The effect of four treatments, namely conventional tillage and fertilization (CTF), precision fertilization (PF) alone at the topdressing stage, laser land leveling (LL) alone prior to sowing, and a combination of PF+LL, on CO₂, N₂O, and CH₄ emissions were examined. The results showed that LL significantly increased the wheat yield by 7.10% compared with CTF, and surface soil moisture content was significantly improved. Regarding greenhouse gas emissions, the amount of CH₄ absorbed by soil was significantly increased by 22.00%, but CO₂ and N₂O emission fluxes were increased by 27.20% and 8.81%, respectively. Compared with CTF, PF had no effect on wheat yield. The peak value of N₂O emissions emerged after topdressing and significantly decreased by 15.41%. The emission fluxes of N₂O between the topdressing stage and harvest stage were significantly decreased by 15.05%. However, in the entire season of winter wheat, there were no differences in emissions of CO₂, N₂O, and CH₄ found between PF and CTF. PF+

收稿日期: 2018-11-05 录用日期: 2019-02-27

作者简介: 卢 闯(1991—), 男, 河南新乡人, 工程师, 主要从事精准农业环境效益评价研究。E-mail: lupeichuang@163.com

*通信作者: 李存军 E-mail: licj@nercita.org.cn

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFD0700303)

Project supported: The National Key Research and Development Program(2016YFD0700303)

LL significantly increased the wheat yield by 8.20% compared with CTF, and the water holding capacity of soil was enhanced, as the water content was significantly increased by 8.81% and 7.63% in the rainy season and irrigation season, respectively. The cumulative emissions of CO₂ were significantly decreased by 33.53%. The absorbed amount of CH₄ was significantly decreased by 31.50%. PF+LL also had no effect on the cumulative emissions of N₂O in the entire season of winter wheat, but it significantly decreased the N₂O emissions between the topdressing stage and harvest stage. In summary, LL could significantly increase the winter wheat yield, but it also increased the global warming potential. PF had no significant effect on wheat yield, but it decreased the peak value of N₂O emissions, thereby showing the potential to reduce N₂O emissions. In conclusion, the prospects of precision agriculture technology in increasing production and reducing emissions need to be further studied.

Keywords: precision fertilization; laser land leveling; winter wheat; greenhouse gas emissions

温室气体排放引起的全球气候变化已成为当今社会普遍关注的全球性问题。农田土壤是温室气体重要排放源,施肥、耕作等农业措施是影响农田温室气体排放的重要因素,然而,当代农业为了满足社会对农产品的需要,从外部向农业生态系统中输入了大量的化肥、农药、灌溉等化石能源和物质,并投入使用各种农业机械装备,以高投入换取高产量。不合理的投入不仅造成资源浪费,而且破坏了生态环境,给全球气候变化带来不利影响^[1]。如何在减少外源投入、保证粮食产量、控制温室气体排放问题上找到平衡点,成为当前农业发展必须面对的问题。

精准农业技术是以3S系统为纽带,将耕作、播种、施肥、灌溉等各种农事操作与农田变异精确匹配的现代化农业生产技术,它在兼顾作物产量和农业环境方面具有巨大潜力,是实现农业可持续发展的重要途径^[2]。其中激光平地 and 精准施肥是应用较为广泛的现代农业技术,近年来随科学技术的发展相关应用设备日趋成熟,激光平地系统的作业效率和地面平整精度得到不断提高^[3],精准施肥系统的导航精度和排肥控制稳定性也有效提升^[4],针对其田间应用效果也有学者开展了研究评价:白岗栓春小麦田试验结果表明,激光平地改善了畦田土壤水盐分布,促进畦田中后段春小麦生长及水分利用率^[5];Jat等^[6]两年稻麦轮作结果表明,应用激光平地 and 双免耕技术后作物增产7%,水稻季和小麦季水分利用效率分别提高12%~14%和10%~13%;还有研究表明激光平地技术提高了作物群体密度并减少了除草等劳动力投入^[7-8];精准施肥技术因地制宜地根据田间每一操作单元的具体情况准确调整肥料投入量,可减少肥料损失^[9-10],张书慧等^[11]研究表明精准施肥技术可在控制化肥用量的同时提高玉米产量;王熙等^[12]研究表明精准施肥下大豆增产7.5%。以上相关研究主要集中在经济效益分析上,关于环境效应的判断多出于理论推测,主要

指通过减少化学用品而减少其淋溶和径流量^[13-14],对于温室气体排放的研究涉及较少。从理论上讲,精准施肥和激光平地技术改变了施肥和耕作方式,可能会对温室气体排放产生影响,然而该猜想尚缺乏基于相关试验研究的验证。

本试验以华北地区冬小麦为研究对象,通过田间实验重点探讨激光平地 and 精准施肥单项及组合技术对CO₂、N₂O、CH₄温室气体排放的影响,以期探寻环境效益高的精准农业应用模式提供数据支持和理论基础。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验于2016年9月至2017年7月在北京小汤山国家精准农业示范基地进行(40.10°N, 116.26°E, 海拔39 m),该地属北温带季风性气候区,全年平均日照时数2 506.5 h,年均气温13.3℃,年均降雨量563.8 mm,年蒸发量1 357.3 mm,≥0℃有效积温4 598.5℃。试验区0~20 cm土壤质地为粉黏壤土,土壤容重1.52 g·cm⁻³,土壤pH值为7.88,土壤有机质20.1 g·kg⁻¹,全氮1.24 g·kg⁻¹,碱解氮、速效磷、速效钾含量分别为76.1、13.58、116.8 mg·kg⁻¹。

1.2 试验设计与精准施肥

1.2.1 试验设计

试验设置CTF(常规整地+常规施肥)、PF(精准施肥)、LL(激光平地)、PF+LL(精准施肥+激光平地)4个处理,每个处理3次重复,共12个小区,随机分布,小区长48 m,宽18 m,面积864 m²,小区之间设5 m保护行。

试验田间管理如表1所示,LL和PF+LL处理于2016年9月18—20日采用国家农业信息化工程技术研究中心的1PJ-2500激光平地机实施无纵横坡激光平地作业,平地精度2 cm,其他处理采用常规机械进

行平地。各处理均于2016年9月23日施用 $525 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 磷酸二铵作基肥(合纯N $84 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, P_2O_5 $231 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$),施肥后播种,供试冬小麦品种为京冬17,播种量 $150 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。2017年3月25日追肥,精准施肥处理平均追肥量为 $256 \text{ kg} \text{ 尿素} \cdot \text{hm}^{-2}$ (合纯N $118 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$),为保证试验的一致性,常规施肥处理追肥量亦采用尿素 $256 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 均匀施用。2017年3月26日灌溉 100 mm ,2017年6月16日收获测产。冬小麦生育期内其他管理措施与当地农户一致。

1.2.2 精准施肥单元及施肥量计算

将每个小区划分为6个 $16 \text{ m} \times 9 \text{ m}$ 的网格单元,施基肥前在每个网格取 $0 \sim 20 \text{ cm}$ 土层5点混合样测定土壤碱解氮,基于目标产量法^[15]计算氮肥追肥量:

$$\text{追肥量} = (\text{目标籽粒产量} \times 3\% - \text{基肥施氮量} \times 50\% - \text{土壤供氮量}) \div 50\% \quad (1)$$

$$\text{土壤供氮量} = (\text{施肥前碱解氮浓度} - 50) \times \text{耕层质量} \quad (2)$$

式中:小麦目标籽粒产量设为 $6000 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,3%为每生产 1 kg 小麦籽粒所需要的纯N量,氮肥当季利用率取 50% , $50 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 是土壤碱解氮浓度下限,耕层厚度按 20 cm 计算。

根据施基肥前的土壤碱解氮数据计算追肥量,将计算结果调入 ArcGIS,采用克里金法插值后生成以 2 m 为网格间距的空间分布数据,按照处方图精准施肥(图1)。

1.3 温室气体样品采集与测定

采用静态箱-气相色谱法测定温室气体 CO_2 、 N_2O 、 CH_4 排放通量。不锈钢采样箱长、宽、高分别为 50 、 40 、 50 cm ,外覆绝热材料。箱内顶部固定一个电池供电的 12 V 风扇用于混合箱中气体。每个采样箱均配有不锈钢底座,底座深入土壤 20 cm ,底座内留有3行小麦。

采样时间一般为上午 $9:00 \sim 11:00$ ^[16]。采样开始前打开风扇,将采样箱放置在底座上,每间隔 10 min 用 50 mL 针筒从箱内抽取气体样品并贮存于 12 mL 真空玻璃瓶中,共采集4次,准确记录每次采样时间。

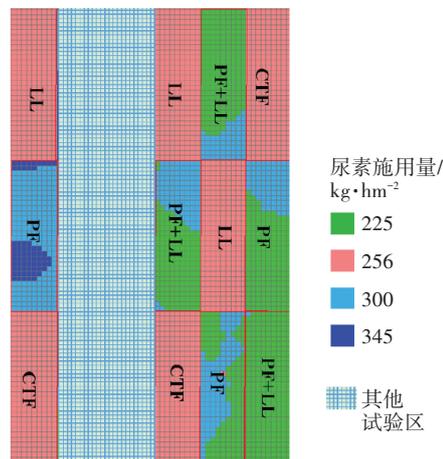


图1 精准施肥空间分布图

Figure 1 Spatial map of fertilization rates

常规施肥小区测定两次重复,精准施肥小区在每个变量单元测定一次。采气时同步利用 JM624 温度计观测箱外表层土壤温度,并采集箱外 $0 \sim 20 \text{ cm}$ 混合土壤样品用烘干法测定土壤含水率。用气相色谱(Agilent7890A,美国)分析三种气体浓度,温室气体排放通量根据下式计算:

$$F = \rho \times H \times dc/dt \times 273 / (273 + T) \times P / P_0 \quad (3)$$

式中: F 为目标气体排放通量, $\text{mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$; ρ 为标准大气压状态下的气体密度, $\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$; H 为采样箱高度, cm ; dc/dt 为采样箱内气体浓度的变化速率; T 为采样时大气温度, K ; P 和 P_0 分别为实际气压与标准气压, Pa 。

GWP是各种温室气体总的温室效应对应于相同效应的 CO_2 的质量,计算方法采用 IPCC 公式^[17]:

$$\text{GWP} = f_{\text{CO}_2} \times 44/12 + f_{\text{N}_2\text{O}} \times 44/28 \times 298 + f_{\text{CH}_4} \times 16/12 \times 25 \quad (4)$$

式中:GWP为温室气体增温潜势(以 eqCO_2 计), $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$; f_{CO_2} 为 CO_2 土壤净排放量(以 $\text{CO}_2\text{-C}$ 计), $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$; $f_{\text{N}_2\text{O}}$ 为 N_2O 土壤净排放量(以 $\text{N}_2\text{O-N}$ 计), $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$; f_{CH_4} 为 CH_4 土壤净排放量(以 $\text{CH}_4\text{-C}$ 计), $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$; $44/12$ 、 $44/28$ 、 $16/12$ 分别为将净排放量换算为 CO_2 、 N_2O 、 CH_4 排放量的系数; 298 和 25 分别为 1 kg N_2O 和 1 kg CH_4 的增温效应相对于 1 kg CO_2 的倍数。

表1 2016年冬小麦田间管理时间表

Table 1 The time schedules of field management in 2016 winter wheat

处理 Treatments	2016.09.18	2016.09.23	2017.03.25	2017.03.26	2017.06.16
CTF	常规整地	施肥播种	常规施肥 $\text{N}118 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$	灌溉 100 mm	收获
PF	常规整地	施肥播种	精准施肥 $\text{N}118 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$	灌溉 100 mm	收获
LL	激光平地	施肥播种	常规施肥 $\text{N}118 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$	灌溉 100 mm	收获
PF+LL	激光平地	施肥播种	精准施肥 $\text{N}118 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$	灌溉 100 mm	收获

GHGI为每生产1 kg小麦所产生的温室气体碳当量,计算公式:

$$\text{GHGI} = \text{GWP} / \text{单位面积小麦产量} (\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}) \quad (5)$$

1.4 冬小麦产量测定

小麦成熟时进行16 m×9 m网格采样,在每个网格单元取土位置收获1 m×0.4 m范围内小麦,脱粒干燥后考种测定小区理论产量。

1.5 数据处理方法

数据在Office Excel 2013中进行基本处理并作图,并用SPSS 18.0软件做方差分析和相关性分析,显著性检验采用LSD ($P < 0.05$),相关性分析采用Pearson法。

2 结果与讨论

2.1 激光平地及精准施肥对土壤温湿度的影响

激光平地过程中机械对土壤的反复添切压实作业会改变其理化性质^[18-19],从而对表层土壤的保水保墒性产生影响。本研究中冬小麦生育期内共降水161 mm,其中85.5 mm集中在播种后30 d内。如图2所示,在冬小麦出苗期和分蘖期(10月13日,10月31日),激光平地处理(LL, PF+LL)表层土壤含水率较常规整地处理(CTF, PF)分别显著提高9.25%、8.71% ($P < 0.05$),说明激光平地后土壤的持水能力显著提高,这和Darve等^[20]研究结果一致,此时期良好的土壤水分条件对小麦保苗壮苗,促根增蘖具有积极意义。进入越冬期后,由于降雨量小,作物生长缓慢,土壤含水量相对稳定,处理间差异不显著($P > 0.05$)。

为提高分蘖成穗率,在3月25日追肥并于次日灌溉,灌溉后第3 d激光平地处理表层土壤含水率较常规平地处理显著提高7.97% ($P < 0.05$),灌溉后第10 d

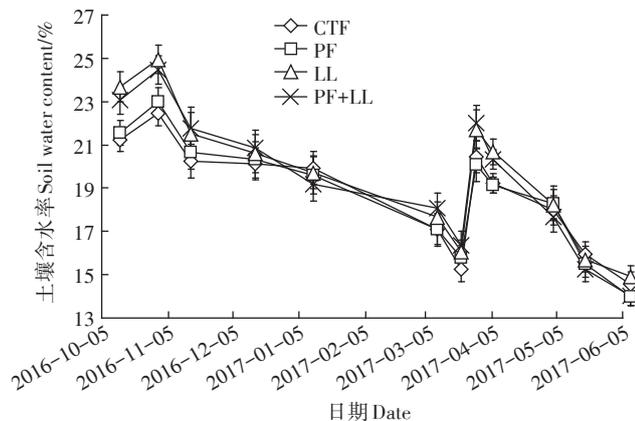


图2 不同作业方式下0~20 cm土壤含水率动态变化

Figure 2 Continuous change of soil water contents of 0~20 cm under different treatments

仍显著提高6.91%,这是因为农田经过激光平地后土地平整程度和灌水质量得到有效提高,水分田间分布均匀,无效流失减少^[21]。进入拔节期后冬小麦生长迅速,耗水量较大,表层土壤含水率逐渐降低,处理间未达到显著水平。

对0~20 cm表层土壤温度的监测显示(图3),各处理表层土壤温度在生育期内变化趋势一致,但差异并不显著($P > 0.05$)。

2.2 激光平地及精准施肥对土壤CO₂排放的影响

土壤温湿度、底物供应、土壤氮是影响土壤CO₂排放的主要因子,而这些因子会对耕作、播种、灌溉、施肥等各种措施产生响应^[22-23],激光平地与精准施肥等农艺措施势必也会对土壤CO₂排放产生一定的影响。

本试验中,冬小麦生育期内各处理土壤CO₂排放通量季节变化基本相同(图4),呈现先下降后升高再下降的趋势。相关性分析(表2)表明CO₂排放通量与

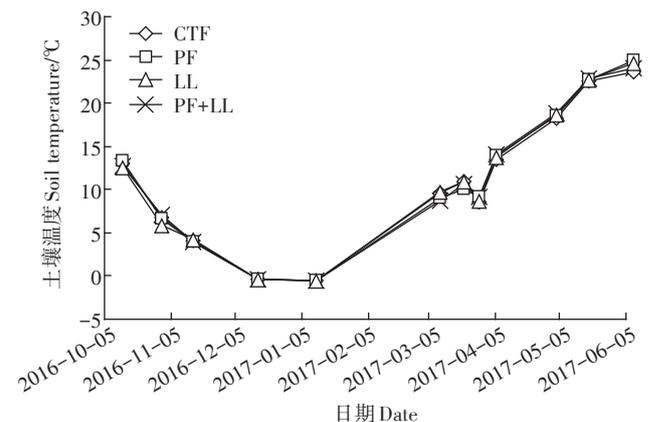


图3 不同作业方式下0~20 cm土壤温度变化

Figure 3 Continuous change of soil temperature of 0~20 cm under different treatments

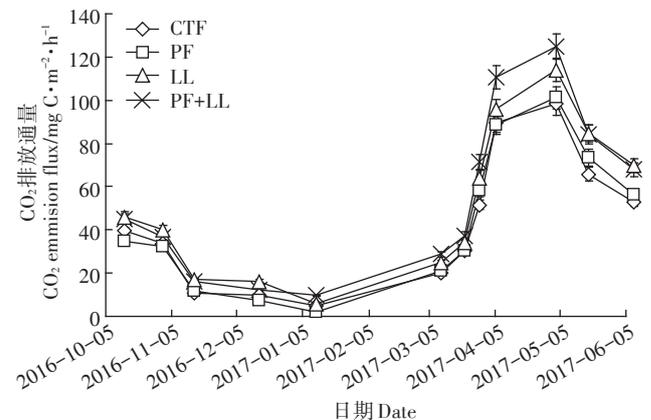


图4 不同作业方式对土壤CO₂排放的影响

Figure 4 CO₂ emission fluxes in wheat soil under different treatments

表2 不同作业方式下温室气体与0~20 cm土壤温度和湿度相关性分析

Table 2 Correlations of greenhouse emissions with soil temperature and moisture under different treatments

处理 Treatments	土壤温度 Soil temperature			土壤湿度 Soil water contents		
	CO ₂	N ₂ O	CH ₄	CO ₂	N ₂ O	CH ₄
CTF	0.476**	0.031	0.222	-0.274	0.192	0.226
PF	0.468**	-0.195	0.131	-0.310	0.347*	0.231
LL	0.481**	-0.043	0.316	-0.247	0.395*	0.148
PF+LL	0.451**	-0.182	0.271	-0.294	0.370*	0.157

注:*和**分别表示在0.05和0.01水平上的相关性显著。

Note: * and ** means the correlation is significant at the 0.05 and 0.01 level respectively.

土壤温度呈现极显著正相关关系($P<0.01$),但和土壤含水率无显著相关性($P>0.05$),土壤水分状况不是影响土壤CO₂排放的直接因素。在越冬期的1月11日,各处理排放通量生育期内最低,均小于10 mgC·m⁻²·h⁻¹,这与当日地温较低(图3),土壤微生物代谢缓慢有关。排放峰值出现在5月3日抽穗期,CTF、PF、LL、PF+LL排放通量分别为88.65、99.63、113.95、124.89 mgC·m⁻²·h⁻¹。

分阶段来看(表3),从冬小麦播种至翌年精准施肥前,此期间未设置精准施肥处理,激光平地处理(LL,LL+PF)平均累计排放量为1 066.72 kg·hm⁻²,较常规整地(CTF,PF)平均累计排放量813.02 kg·hm⁻²显著提高了31.20%($P<0.05$),这与Sharifi等^[24]在稻田上的研究结果不一致,可能与土地利用方式和土壤质地不同有关,本试验区表层土壤较黏重,激光平地促进土层转换,暴露表层和亚表层土壤中的有机质,增

加了土壤呼吸的底物供应^[25],进而显著增强了土壤CO₂排放。

有研究表明施入土壤的氮通过影响有机质分解、地上地下碳分配、土壤酶活性^[26-27]等多种方式影响土壤CO₂排放。本试验中,精准施肥至收获期间,CTF、PF、LL、PF+LL处理CO₂累计排放量分别为1 339.12、1 485.65、1 713.99、1 816.63 kg·hm⁻²(表3),处理间差异与产量(表4)具有一致性,这可能是因为小麦在追肥后进入迅速生长时期,地上地下生物量成为土壤CO₂排放的重要影响因素,而精准施氮提高了小麦产量(表4)和生物量,不同程度增强了土壤CO₂排放:常规整地措施下PF较CTF显著提高10.94%($P<0.05$),激光平地措施下LL+PF较LL提高5.99%。

从整个冬小麦生育期内的排放量来看(表3),激光平地措施对CO₂排放起到主要作用,与CTF相比,LL和PF+LL总排放量分别显著提高27.20%、33.53%($P<0.05$),PF处理总排放量增加但未达显著水平($P>0.05$)。

2.3 激光平地及精准施肥对土壤N₂O排放的影响

土壤N₂O排放受土壤温湿度、土壤耕作、氮肥种类数量以及有机质含量等众多因素的影响。从图5可以看出,冬小麦生育期内N₂O排放通量并没有呈现较强的季节性变化,而是受施肥与灌溉影响,在追肥灌溉后出现N₂O排放峰。旱地土壤含水率与土壤中的硝化作用和反硝化作用具有重要相关性^[28],本研究相关分析(表2)表明,除CTF处理外,PF、LL、PF+LL的N₂O排放通量与土壤含水率均达到显著相关水平

表3 不同作业方式下温室气体累计排放量(kg·hm⁻²)Table 3 Total CO₂, N₂O and CH₄ emissions under different treatments(kg·hm⁻²)

时期 Period	处理 Treatments	CO ₂ -C	N ₂ O-N	CH ₄ -C
精准施肥前 Before precision fertilization	CTF	833.31±34.43b	0.359±0.015b	-1.57±0.097b
	PF	792.73±46.07b	0.361±0.014b	-1.51±0.063b
	LL	1 049.32±62.05a	0.399±0.019a	-1.90±0.10a
	PF+LL	1 084.13±52.97a	0.404±0.021a	-1.94±0.086a
精准施肥后 After precision fertilization	CTF	1 339.12±62.64c	0.186±0.007 3a	-0.43±0.028c
	PF	1 485.65±86.74b	0.158±0.007 2b	-0.56±0.021b
	LL	1 713.99±92.34a	0.194±0.012a	-0.54±0.020b
	PF+LL	1 816.63±77.54a	0.167±0.007 9b	-0.69±0.028a
总排放量 Total emissions	CTF	2 172.43±55.62b	0.545±0.024bc	-2.00±0.075b
	PF	2 278.38±100.79b	0.519±0.021c	-2.07±0.098b
	LL	2 763.31±164.76a	0.593±0.029a	-2.44±0.16a
	PF+LL	2 900.76±177.27a	0.571±0.025ab	-2.63±0.12a

注:不同小写字母表示处理间在0.05水平上差异显著,下同。

Notes: Different small letters mean significant difference at 0.05 level. The same below.

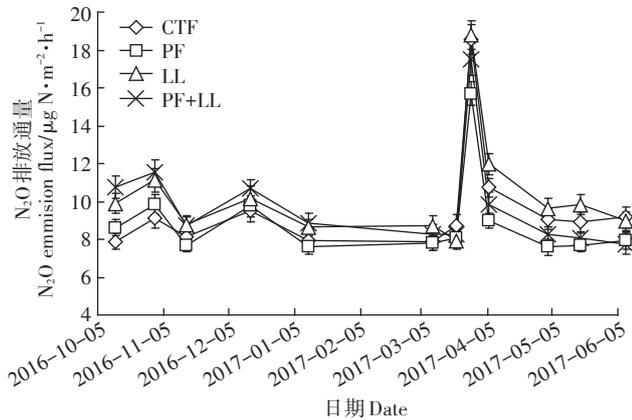


图5 不同作业方式对土壤N₂O排放的影响
Figure 5 N₂O emission fluxes in wheat soil under different treatments

($P < 0.05$), 说明在激光平地 and 精准施肥条件下土壤N₂O排放更易受土壤含水率的影响。

从不同时期来看,播种后40 d内处理间差异显著,10月13日监测结果,激光平地土壤N₂O排放通量显著较常规整地措施提高24.97% ($P < 0.05$),10月31日结果显著提高19.57%,这是因为10月份降雨量较大,LL、PF+LL处理土壤含水率明显较高(图2),导致较多的N₂O排放与产生;另一方面,激光平地对土壤的强烈扰动可能会促进有机质分解进而提升产N₂O微生物的基质供应^[29];小麦进入越冬期后降雨量较少,田间未进行农事操作,N₂O排放通量逐渐趋于稳定,处理间差异逐渐减小。在精准施肥前的生育期内,CTF、PF、LL、PF+LL各处理N₂O累计排放量分别为0.359、0.361、0.399、0.404 kg·hm⁻²(表3),激光平地措施(LL, LL+PF)累计排放量显著较常规整地提高11.58% ($P < 0.05$)。

3月25日精准施肥并灌溉后,较高的土壤含水率及底物浓度为N₂O释放提供了条件,因此在灌溉后第3 d测定时出现排放峰,CTF、PF、LL、PF+LL排放峰值(以N计)分别为18.56、15.70、18.79、17.51 µg·m⁻²·h⁻¹,其中PF处理显著较低($P < 0.05$),说明精准施肥有效降低了N₂O排放峰值。精准施肥至收获期间N₂O累计排放量排序为LL、CTF>PF+LL、PF,与CTF相比,PF显著减排15.05%,可能是因为精准施肥提高了氮素利用效率,减少了土壤硝态氮和铵态氮残留量^[15],使硝化作用和反硝化作用底物减少,从而降低了N₂O排放;LL处理累计排放量最高,可能是因为激光平地后水分下渗速度减慢^[5],地表径流量减少,致使容易随水移动的硝态氮更多地保留在表层土壤中,增加了底物浓度。

从整个生育期排放总量来看,PF处理减排效果最好,较CTF减排4.77%,LL和PF+LL没有表现出良好的减排效应,激光平地不利于减少N₂O排放。

2.4 激光平地及精准施肥对土壤CH₄吸收的影响

从图6可见,土壤CH₄在4种处理下均表现为吸收汇,季节内吸收强度呈现先增加后降低趋势,CTF、PF、LL、PF+LL处理冬小麦生育期内平均吸收量(以C计)分别为28.19、31.55、35.01、40.05 µg·m⁻²·h⁻¹。旱地CH₄吸收受多重因素的影响,相关性分析结果表明,CH₄吸收通量与土壤温度和湿度呈正相关但均不显著($P > 0.05$),说明CH₄吸收通量可能还受其他因素的共同影响。

播种后至精准施肥前时间段内,CTF、PF、LL、PF+LL累计吸收量分别为1.57、1.51、1.90、1.94 kg·hm⁻²(表3),激光平地措施(LL, PF+LL)吸收量较常规整地措施(CTF, PF)显著提高24.35%,原因可能是激光平地后土壤水气状况和理化性质得以改善,增强了甲烷氧化细菌活性^[30],从而提高了土壤对CH₄的氧化能力。

有研究表明,施用无机氮肥会使旱地甲烷吸收汇强度降低^[31]。实施精准施肥后,CTF、PF、LL、PF+LL

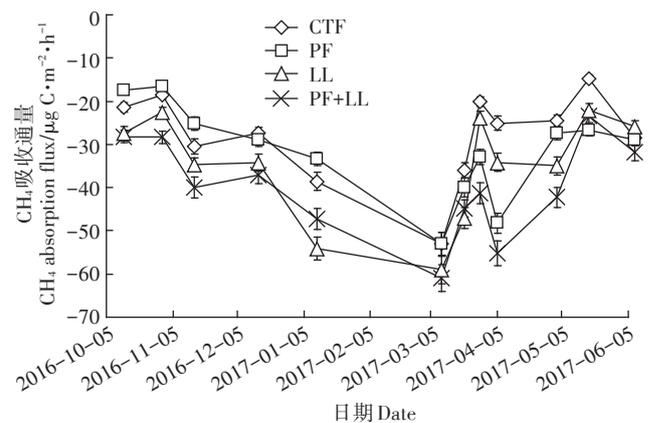


图6 不同作业方式对土壤CH₄排放的影响

Figure 6 CH₄ emission fluxes in wheat soil under different treatments

表4 不同作业方式增温潜势及温室气体排放强度

Table 4 Comparison of GWP and GHGI under different treatments

处理	平均产量/ kg·hm ⁻²	GWP/ kg eqCO ₂ ·hm ⁻²	GHGI/kg eqCO ₂ ·kg ⁻¹ grain yield
CTF	5 510.66±157.66b	8 458.08±326.83b	1.53±0.059b
PF	5 695.79±208.50ab	8 564.66±570.63b	1.50±0.062b
LL	5 901.54±163.85a	10 328.64±533.50a	1.75±0.081a
PF+LL	5 962.59±195.38a	10 815.65±665.73a	1.81±0.099a

累计吸收量分别为0.43、0.56、0.54、0.69 kg·hm⁻²(表3),精准施肥PF减少了土壤中残留氮素^[15],因此氮对土壤CH₄氧化的抑制作用减弱,累计吸收量较常规措施CTF提高30.23%;在激光平地处理下,PF+LL累计吸收量亦显著较LL提高27.78%。

从整个生育期来看,激光平地措施对CH₄吸收起到主要作用,激光平地结合精准施肥综合措施下土壤对CH₄的吸收能力最强,吸收汇较CTF显著增强31.5%($P<0.05$)。

2.5 不同处理产量及增温潜势

由于CO₂、N₂O和CH₄的增温效应不同,它们对全球变暖的影响亦不相同。当这3种气体从一个系统同时排放时,需要计算它们作用的综合效果才能了解该系统及农业管理措施对综合增温潜势(GWP)的贡献。小麦生产的排放强度(GHGI)指形成单位经济产量的综合温室气体排放量。

如表4所示,LL和PF+LL产量分别较CTF显著提高7.08%、8.17%($P<0.05$),这是因为激光平地技术为冬小麦前期生长提供了良好的水分环境,提高了小麦分蘖数^[32],有效促进了产量形成;在两种整地措施下,精准施肥处理产量较常规施肥略有提高,但并未达到显著水平($P>0.05$)。激光平地利于产量形成,但同时,由于试验第一年设置,激光平地过程对土壤扰动较大,增大了前期土壤CO₂排放通量,本试验中CO₂温室气体贡献率97.78%~98.34%,因此激光平地很大程度影响了综合增温潜势,LL和PF+LL分别比CTF提高了1 843.56、2 357.57 kg·hm⁻²(以eqCO₂计)。精准施肥措施并未对GWP有显著影响。从综合产量和增温潜势来看,小麦生产的排放强度(GHGI)排序为PF+LL、LL>CTF、PF,激光平地技术在提高产量的同时也增加了单位产量碳排放;PF处理的产量、GHGI与CTF均无显著差异。

短期来看,激光平地、精准施肥单项技术及其综合应用技术并没有明显降低温室气体综合增温潜势,但是,本研究为各处理设置了相同施氮量,还不能确定精准施肥技术下的优化施氮量及其对温室气体排放的影响;另一方面,经过激光平地后,土地平整程度持续性如何,平地作业后不同年限对土壤理化性质和温室气体排放有何影响,都需要进一步试验的验证。因此,在下一步研究中,首先应加强精准农业对温室气体排放的长期研究,其次建立土壤理化性质与温室气体通量的关系,充分挖掘精准农业的增产减排潜力,为精准化作业改进完善提供依据。

3 结论

(1)和常规整地措施相比,单一应用激光平地技术能够显著提高降雨、灌溉后表层土壤含水率;冬小麦生长季内土壤CO₂、N₂O累计排放量分别显著增加27.20%、8.81%,土壤CH₄吸收量增加22%;激光平地技术具有较高经济效益,显著提高冬小麦产量7.10%,但小麦生产的碳排放强度达到1.75,受扰动影响,环境效益较差。

(2)和常规施肥措施相比,单一精准施肥技术对小麦产量、冬小麦生长季土壤CO₂和N₂O累计排放量、CH₄累计吸收量和温室气体增温潜势均无显著影响,但土壤N₂O排放峰值较常规施肥显著降低15.41%。

(3)将激光平地技术与精准施肥技术综合应用后,冬小麦产量显著较常规措施提高8.2%,土壤具备较好的持水性,雨季及灌溉后表层土壤含水率分别较常规措施显著提高8.81%、7.63%,冬小麦生长季土壤CO₂累计排放量显著增加33.53%,CH₄吸收量显著增加31.5%,N₂O累计排放量无显著差异,但在精准施肥至收获期间土壤N₂O显著减排10.22%。

参考文献:

- [1] 白由路. 高效施肥技术研究的现状与展望[J]. 中国农业科学, 2018, 51(11):2116-2125.
BAI You-lu. The situation and prospect of research on efficient fertilization[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2018, 51(11):2116-2125.
- [2] Pierce F J, Nowak P. Aspects of precision agriculture[J]. *Adv Agron*, 1999, 67:1-85.
- [3] 刘 刚, 林建涵, 司永胜, 等. 激光控制平地系统设计与试验分析[J]. 农业机械学报, 2006, 37(1):71-74.
LIU Gang, LIN Jian-han, SI Yong-sheng, et al. Development and experiment on laser controlled leveling system[J]. *Transactions of the CSAM*, 2006, 37(1):71-74.
- [4] 赵春江. 精准农业研究与实践[M]. 北京:科学出版社, 2009.
ZHAO Chun-jiang. Research and practice of precision agriculture[M]. Beijing:Science Press, 2009.
- [5] 白岗栓, 杜社妮, 于 健, 等. 激光平地改善土壤水盐分布并提高小麦产量[J]. 农业工程学报, 2013, 29(8):125-134.
BAI Gang-shuan, DU She-ni, YU Jian, et al. Laser land leveling improve distribution of soil moisture and soil salinity and enhance spring wheat yield[J]. *Transactions of the CSAE*, 2013, 29(8):125-134.
- [6] Jat M L, Gathala M K, Ladha J K, et al. Evaluation of precision land leveling and double zero-till systems in the rice-wheat rotation: Water use, productivity, profitability and soil physical properties[J]. *Soil & Tillage Research*, 2009, 105(1):112-121.
- [7] Jat M L, Chandana P, Sharma S K, et al. Laser land leveling: A precur-

- sor technology for resource conservation rice-wheat consortium technical bulletin series, rice-wheat consortium for the Indo-Gangetic plains [M]. New Delhi, India, 2006:48.
- [8] Rickman J F, Bunna S, Sinath P. Agricultural engineering: Program Report for 1998[M]. International Rice Research Institute, Manila, Philippines, 1998:142.
- [9] 陈文辉, 谢高地, 卓庆卿. 农田基础环境信息空间变异性分析[J]. 生态学报, 2004, 24(2):347-352.
CHEN Wen-hui, XIE Gao-di, ZHUO Qing-qing. The analysis of the spatial variability of farmland basic environment information[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2004, 24(2):347-352.
- [10] 张亦涛, 刘宏斌, 王洪媛, 等. 农田施氮对水质和氮素流失的影响[J]. 生态学报, 2016, 36(20):6664-6676.
ZHANG Yi-tao, LIU Hong-bin, WANG Hong-yuan, et al. A bibliometric analysis of status and trend of international research on field nitrogen application effects on nitrogen losses and water quality[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2016, 36(20):6664-6676.
- [11] 张书慧, 马成林, 李伟, 等. 变量施肥对玉米产量及土壤养分影响的试验[J]. 农业工程学报, 2006, 22(8):64-67.
ZHANG Shu-hui, MA Cheng-lin, LI Wei, et al. Experimental study on the influence of variable rate fertilization on maize yield and soil nutrients[J]. *Transactions of the CSAE*, 2006, 22(8):64-67.
- [12] 王熙, 王新忠, 王智敏, 等. 基于DGPS定位的大豆变量施肥播种应用试验[J]. 黑龙江八一农垦大学学报, 2004, 4:32-35.
WANG Xi, WANG Xin-zhong, WANG Zhi-min, et al. Experiment on the variable rate fertilization in soybean based on the DGPS[J]. *Journal of Heilongjiang Reclamation University*, 2004, 4:32-35.
- [13] 薛正平. 精准农业变量施肥技术及其环境经济效益[D]. 南京: 南京农业大学, 2007.
XUE Zheng-ping. Variable-rate fertilization and its environmental and economic benefit in precision agriculture[D]. Nanjing: Nanjing Agriculture University, 2007.
- [14] Jon T, Biermacher B, Wade B, et al. The economic potential of precision nitrogen application with wheat based on plant sensing[J]. *Agriculture Economics*, 2009, 40:397-407.
- [15] 薛绪掌, 陈立平, 孙治贵, 等. 基于土壤肥力与目标产量的冬小麦变量施氮及其效果[J]. 农业工程学报, 2004, 20(3):59-62.
XUE Xu-zhang, CHEN Li-ping, SUN Zhi-gui, et al. Results of variable-rate nitrogen fertilization of winter wheat based on soil fertility and yield map[J]. *Transactions of the CSAE*, 2004, 20(3):59-62.
- [16] 田慎重, 宁堂原, 迟淑筠, 等. 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, 2012, 32(3):879-888.
TIAN Shen-zhong, NING Tang-yuan, CHI Shu-yun, et al. Diurnal variations of the greenhouse gases emission and their optimal observation duration under different tillage systems[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2012, 32(3):879-888.
- [17] IPCC. Climate change the physical science basis: Working group I contribution to the fourth assessment report of the IPCC[R]. 2007.
- [18] Aquino L S, Timm L C, Reichardt K, et al. State-space approach to evaluate effects of land levelling on the spatial relationships of soil properties of a lowland area[J]. *Soil & Tillage Research*, 2015, 145:135-147.
- [19] Brye K R, Slaton. Soil physical and biological properties as affected by land leveling in a clayey aquert[J]. *Soil Science Society of America*, 2006, 70:631-642.
- [20] Darve F, Freitas H, Moldes A, et al. Short-term effects of land leveling on irrigation-related some soil properties in a clay loam soil[J]. *Hindawi Publishing Corporation*, 2013, 1-16.
- [21] Jat M L, Gupta R, Saharawat Y S, et al. Layering precision land leveling and furrow irrigated raised bed planting: Productivity and input use efficiency of irrigated bread wheat in Indo-Gangetic plains[J]. *American Journal of Plant Sciences*, 2011, 2(4):578-588.
- [22] 张东秋, 石培礼, 张宪洲. 土壤呼吸主要影响因素的研究进展[J]. 地球科学进展, 2005, 20(7):778-785.
ZHANG Dong-qiu, SHI Pei-li, ZHANG Xian-zhou. Some advance in the main factors controlling soil respiration[J]. *Advances in Earth Science*, 2005, 20(7):778-785.
- [23] Luo Y L, Zhou X H. Soil respiration and the environment[R]. Beijing: Higher Education Press, 2006.
- [24] Sharifi A, Gorji M, Asadi H, et al. Land leveling and changes in soil properties in paddy fields of Guilan province, Iran[J]. *Paddy and Water Environment*, 2014, 12(1):139-145.
- [25] 徐文彬, 刘维屏, 刘广深. 应用DNDC模型分析施肥和翻耕方式变化对旱田土壤N₂O释放的潜在影响[J]. 应用生态学报, 2001, 12(6):917-922.
XU Wen-bin, LIU Wei-ping, LIU Guang-shen. Potential effect of fertilizing and tilling on N₂O emission from upland soils analyzed by DNDC model[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2001, 12(6):917-922.
- [26] Liang G P, Houssou A A, Wu H J, et al. Seasonal patterns of soil respiration and related soil biochemical properties under nitrogen addition in winter wheat field[J]. *PLoS One*, 2015, 10(12):e0144115.
- [27] Saiya C, Sinsabaugh R L, Zak D R. The effects of long-term nitrogen deposition on extracellular enzyme activity in an *Acer saccharum* forest soil[J]. *Soil Biology Biochemistry*, 2002, 34:1309-1315.
- [28] 刘运通, 万运帆, 林而达, 等. 施肥与灌溉对春玉米土壤N₂O排放通量的影响[J]. 农业环境科学学报, 2008, 27(3):997-1002.
LIU Yun-tong, WAN Yun-fan, LIN Er-da, et al. N₂O flux variations from spring maize soil under fertilization and irrigation[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2008, 27(3):997-1002.
- [29] 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.
ZHENG Jian-chu, ZHANG Yue-fang, CHEN Liu-gen, et al. Nitrous oxide emissions affect by tillage measures in winter wheat under a rice wheat rotation system[J]. *Acta Ecology Sinica*, 2012, 32(19):6138-6146.
- [30] 张雪松. 华北平原麦田土壤CH₄吸收[D]. 南京: 南京气象学院, 2003.
ZHANG Xue-song. Soil CH₄ uptake in winter wheat field in the North China Plain[D]. Nanjing: Nanjing Institute of Meteorology, 2003.
- [31] Goulding K W T, Willison T W, Webster C P, et al. Methane fluxes in aerobic soils[J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 1996, 42(1/2):175-187.
- [32] Muhammad A, Manzoor A, Abdul G, et al. Wheat productivity, land and water use efficiency by traditional and laser land-leveling techniques[J]. *Online Journal of Biological Sciences*, 2003, 3(2):141-146.