

王艳群, 彭正萍, 马 阳, 等. 减氮配施氮转化调控剂对麦田 CO₂ 和 CH₄ 排放的影响[J]. 农业环境科学学报, 2019, 38(7): 1657–1664.

WANG Yan-qun, PENG Zheng-ping, MA Yang, et al. Reduction of nitrogen fertilizers combined with N conversion control additives influences CO₂ and CH₄ emissions in winter wheat field[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2019, 38(7): 1657–1664.

减氮配施氮转化调控剂对麦田 CO₂ 和 CH₄ 排放的影响

王艳群¹, 彭正萍^{1*}, 马 阳¹, 吴 敏¹, 王 洋¹, 宋学利², 王会贤³

(1. 河北农业大学资源与环境科学学院/河北省农田生态环境重点实验室, 河北 保定 071000; 2. 肃宁县农业局, 河北 肃宁 062350; 3. 容城县农业局, 河北 容城 071700)

摘 要:为解决小麦生产中增施氮肥导致温室气体 CO₂ 和 CH₄ 排放增加、增温潜势较大等问题,采用田间试验法,研究减氮并配施不同氮转化调控剂等条件下的麦田土壤 CO₂ 和 CH₄ 排放规律、排放总量和二者的增温潜势。结果表明:麦田土壤是 CO₂ 排放源,其排放通量在夏季较高,春、秋季次之,冬季最低;麦田土壤是 CH₄ 弱吸收汇,季节性变化不明显;土壤温度、湿度、施肥等显著影响温室气体排放;与农民习惯施氮肥比,减氮处理的 CO₂ 平均排放通量和排放总量分别显著降低 8.3%~32.6% 和 7.8%~31.6%,减氮处理的 CH₄ 平均吸收通量和吸收总量分别增加 43.0%~130.8% 和 49.4%~138.5%,减氮处理的总 GWP 和净 GWP 分别降低 7.9%~31.6% 和 14.5%~55.5%;与等氮量处理相比,配施氮转化调控剂处理的 CO₂ 排放通量、排放总量分别降低 5.9%~26.5% 和 6.6%~25.8%,CH₄ 平均吸收通量和吸收总量分别增加 19.7%~61.3% 和 20.2%~59.7%,总 GWP 和净 GWP 降低 6.6%~25.8% 和 12.6%~47.9%。结果表明,在农民习惯施氮肥基础上减氮和氮肥配施氮转化调控剂均显著减少麦田土壤 CO₂ 排放、促进 CH₄ 吸收、降低增温潜势。

关键词: 冬小麦; 减氮; 氮转化调控剂; CO₂ 排放; CH₄ 排放

中图分类号: X511 文献标志码: A 文章编号: 1672-2043(2019)07-1657-08 doi:10.11654/jaes.2018-1350

Reduction of nitrogen fertilizers combined with N conversion control additives influences CO₂ and CH₄ emissions in winter wheat field

WANG Yan-qun¹, PENG Zheng-ping^{1*}, MA Yang¹, WU Min¹, WANG Yang¹, SONG Xue-li², WANG Hui-xian³

(1. College of Resources and Environmental Science/Hebei Province Key Laboratory for Farmland Eco-Environment, Hebei Agricultural University, Baoding 071001, China; 2. Agriculture Bureau of Suning County, Cangzhou 062350, China; 3. Agriculture Bureau of Rongcheng County, Rongcheng 071700, China)

Abstract: In order to address the problem of increasing CO₂ and CH₄ emissions and potential greenhouse gas warming (GWP) caused by excessive application of N fertilizer in wheat production, a field experiment was conducted to study the emissions of CO₂, CH₄ and GWP from wheat field soil under the conditions of reducing N, combined with N conversion control additives. Soil temperature, moisture and fertilization significantly affected greenhouse gas emissions. Compared with farmers' conventional nitrogen model, the average CO₂ emission flux and total CO₂ emission from the N reduction models decreased by 8.3%~32.6% and 7.8%~31.6%, but the average CH₄ absorption flux and total absorption increases by 43.0%~130.8% and 49.4%~138.5%, respectively, with the total GWP and net GWP decreasing by 7.9%~31.6% and 14.5%~55.5%, respectively. Compared with the N reduction model, CO₂ emission flux and total emission from models of the N reduction model, combined with N conversion control additives decreased by 5.9%~26.5% and 6.6%~25.8% respectively. Average absorp-

收稿日期: 2018-10-27 录用日期: 2019-02-22

作者简介: 王艳群(1979—),男,河北献县人,博士,高级实验师,主要从事植物营养与生态环境研究。E-mail: wang001265@hebau.edu.cn

*通信作者: 彭正萍 E-mail: pengzhengping@sina.com

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFD0201707); 河北省自然科学基金项目(C2016204078); 河北省教育厅百名优秀创新人才项目

Project supported: The National Key Research and Development Program (2017YFD0201707); The Natural Science Foundation of Hebei Province (C2016204078); Hundred Outstanding Innovative Talents Project of Hebei Provincial Education Department

tion flux and total absorption of CH_4 increased by 19.7%~61.3% and 20.2%~59.7% and total GWP and net GWP decreased by 6.6%~25.8% and 12.6%~47.9%, respectively. In summary, N reduction on the basis of farmers' N fertilizer rate and N fertilizer combined with N conversion control additives can significantly reduce soil CO_2 emissions, promote CH_4 uptake, and reduce GWP in the wheat season. Wheat fields are the source of CO_2 emissions, and their emission flux has clear seasonal variations that are higher in summer, lower in spring and autumn, and lowest in winter. Under the experimental conditions, the soil shows weak absorption of CH_4 .

Keywords: winter wheat; N reduction; conversion control additives; CO_2 emission; CH_4 emission

CO_2 对全球温室效应贡献达63%, CH_4 增温潜势是 CO_2 的23倍^[1]。土壤-大气界面上 CO_2 的交换受多种生物作用影响,并由此决定农业土壤既是 CO_2 的源又是汇。因此,凡是影响这些生物过程的因素都会对温室气体收支造成干扰。 CH_4 排放源主要有湿地、反刍动物、废弃物、天然气及煤矿开采泄漏等,而旱地土壤相对于湿地来说是 CH_4 的吸收库。各种农田管理措施如施肥、耕作方式、灌溉等均影响温室气体排放^[2]。农业生产中氮肥施用影响作物生长、土壤有机质和微生物数量及活性等,最终影响土壤呼吸^[3]。从全球生态系统看,施用氮肥增加97%的 CH_4 排放量、缩减38%的 CH_4 吸收量^[4]。Chu等^[5]研究表明,施用氮肥直接促进土壤中 CO_2 排放。

华北平原是我国冬小麦主要产区。为确保粮食安全,满足人口增长对粮食的需求,往往靠增加氮肥提高小麦产量。陈新平等^[6]报道,华北小麦高产区平均纯N用量为500~600 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,远超出作物需求。河北省高产区小麦平均施纯N为301.5 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ^[7],而限量灌溉条件下合理施纯N用量为240 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ^[8]。过量氮肥投入不但没有提高作物产量,反而减低肥料利用率。华北地区冬小麦-夏玉米体系小麦氮肥利用率仅为10%~20%^[9]。土壤中过量氮肥通过氨挥发和反硝化作用等影响大气中 CO_2 、 CH_4 和 N_2O 等温室气体。

为提高氮肥的利用效率,降低氮肥施用对大气中 CO_2 、 CH_4 温室气体排放的影响,众多学者采用了如合理的施氮量和基追比、恰当的作物施肥时期、养分平衡施用^[10]、用包膜材料制成缓控释氮肥^[11]、配施硝化抑制剂^[12]和生物质炭等^[13],但多局限于单项措施的研究,而根据目标产量、土壤养分供应能力和作物养分需求规律,推荐合理施用氮肥并与多种氮转化调控剂融合,既减少土壤温室气体排放、氮素表观损失,又稳定或者提高作物产量,促进农业增产增收,目前报道尚少。因此,本文采用田间试验法,以冬小麦为对象,研究在农民习惯施氮肥基础上减少氮肥用量并配施不同类型氮转换剂下麦田温室气体 CO_2 和 CH_4 排放规

律和增温潜势特征等,以期为实现土壤可持续发展、减排农业生产温室气体及保证国家粮食安全提供理论支撑。

1 材料与方法

1.1 试验地点

试验设在河北省保定市河北农业大学科技园区(38°48'N, 115°24'E),温带湿润季风气候区,四季分明,年降水550 mm,年平均气温12℃,年日照2660 h,无霜期210 d。试验期间地表以下5 cm处土壤温度和湿度见图1。供试土壤为潮褐土,中壤质。试验地0~20 cm土层基础土壤性状为容重1.4 $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$, pH 8.3, 有机质13.5 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$,全氮0.87 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$,有效磷9.6 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,速效钾69.1 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

1.2 试验处理及方法

从2013年6月夏玉米季开始,在同一地块同一小区进行夏玉米-冬小麦轮作。玉米和小麦季均在同一小区设相同7个处理,玉米收获后安排冬小麦试验。小麦试验方案为:处理1-对照不施氮肥(CK);处理2-农民习惯施氮肥(FN),处理3-根据供试土壤氮素供应和作物需氮设置的减氮量(RN),处理2和3所施氮肥种类均为尿素;处理4、5和7分别是在处理2减氮量基础上配施双氰胺(DCD)、吡啶(CP)和纳米碳(NC),计作RN+DCD、RN+CP、RN+NC;处理6为与处理3等氮量的包膜控释氮肥(RN+CR)。处理2纯N用量285 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,处理3~7纯N用量为225 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,所有处理 P_2O_5 和 K_2O 用量分别为120 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 和150 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。每个处理重复3次,随机区组排列,小区面积51 m^2 。

供试肥料:尿素(含N 46%)、氯化钾(含 K_2O 57%)、过磷酸钙(含 P_2O_5 16%)、玉米控释肥(含N 38%)、小麦控释肥(含N 43%)、双氰胺(DCD, 含N 66.5%)、2-氯-6-三氯甲基吡啶(CP)、纳米碳(NC)。DCD用量为纯N用量的5.0%,计算该处理氮肥总量时将DCD含氮量计入;NC为总肥料用量的0.3%;CP用量按照每1 kg尿素喷涂吡啶1.1 g,吡啶氮含量忽略

不计。各处理的磷、钾肥及控释肥做基肥一次性施用。氮肥处理总氮量的50%作基肥,50%在返青期随灌水追施,DCD及NC基追比均为5:5。

田间管理:小麦前茬为玉米,玉米收获后,秸秆粉碎还田,施肥后旋耕2遍,旋耕后播种冬小麦。小麦于2013年10月9日施肥播种,次日浇蒙头水。2014年3月26日灌溉并追施尿素,6月12日收获小麦。各处理除肥料用量、品种不同外,其田间管理方式完全一致,均按当地高产水平方式进行。

1.3 温室气体排放监测

小麦生长过程中采用密闭式静态箱监测各处理CO₂和CH₄排放^[14]。采样箱由PVC材料制成,箱体有筒体和底座两部分组成,桶体直径25 cm,高35 cm,顶部取样口用胶塞密封,内置温度传感器;底座埋入土壤,上部有水槽,注水后可保证底座与箱体密封。上午9:00—10:00采样,用注射器分别在0、10、20 min抽取各小区采样箱内气体,每次取样30 mL,并将采集到的气体注入真空瓶。同时,用置于箱体温度探头测定箱内温度;用TK3-BASIC水分测定仪测定土壤5 cm处的湿度;用干湿球温度表测定距地面1.5 m处的气温。收集到的气体样品采用高效气相色谱仪(美国Agilent7890)测定。气体采集从10月9日开始,12月8日到来年3月10日期间,土壤温度较低,排放较少,暂停取样;3月11日恢复采样直至6月12日收获。一般每7 d采1次,如遇降水、灌溉、施肥连续采3 d。气体排放通量计算公式:

$$F = \rho \times H \times T_0 \frac{(c_2/T_2 - c_1/T_1)}{\Delta t}$$

式中: F 为温室气体排放通量, $\text{mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$; ρ 为箱体内气体浓度, $\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$; H 是箱体高度, m ; $T_0=273 \text{ K}$; c_1 和 c_2 是采样时箱内气体浓度, $\text{mL} \cdot \text{m}^{-3}$; T_1 和 T_2 是采样时箱体

内的平均温度, K ; Δt 为两次采样的时间差。

1.4 温室气体排放总量与增温潜势计算

温室气体排放总量采用内插法^[15]计算未观测日排放通量,然后将测定值和计算值逐日累加得到。

增温潜势(GWP)是以CO₂为基准,在一定时间积分范围内,对某一给定物质的相对辐射影响值。本文以冬小麦CO₂和CH₄增温潜势定量评估两种气体对大气温室效应的相对影响,以100为时间积分范围对观测期内冬小麦土壤两种温室气体的GWP进行计算^[16]:

$$\text{CO}_2 \text{ GWP} (\text{kg C} \cdot \text{hm}^{-2}) = \text{CO}_2 \text{ 累积排放量} (\text{kg C} \cdot \text{hm}^{-2})$$

$$\text{CH}_4 \text{ GWP} (\text{kg C} \cdot \text{hm}^{-2}) = \text{CH}_4 \text{ 累积排放量} (\text{kg C} \cdot \text{hm}^{-2}) \times 16/12 \times 12/44 \times 25$$

$$\text{总 GWP} (\text{kg C} \cdot \text{hm}^{-2}) = \text{CO}_2 \text{ GWP} + \text{CH}_4 \text{ GWP}$$

$$\text{净 GWP} (\text{kg C} \cdot \text{hm}^{-2}) = \text{总 GWP} - \text{作物固定的C量}$$

$$\text{作物固定的C量} (\text{kg C} \cdot \text{hm}^{-2}) = 0.45 \times Y_w / H_i^{[17]}$$

式中:0.45为作物光合作用过程吸收0.45 g碳可以合成1 g有机质, Y_w 为经济产量, H_i 为经济系数(也叫收获指数),即粮食产量与作物地上部分生物量的比值(其中小麦经济系数采用全国平均值0.46)^[18]。

1.5 数据处理

用Microsoft Excel 2003进行数据处理和图表绘制,用ANOVA进行统计分析并用SPSS 17.0软件进行各处理间差异显著性检验,显著性水平为0.05。

2 结果与分析

2.1 CO₂排放通量动态变化特征

图2表明,CO₂排放通量在夏季较高,春、秋季次之,冬季最低。10月9日施肥播种,第二日灌溉后

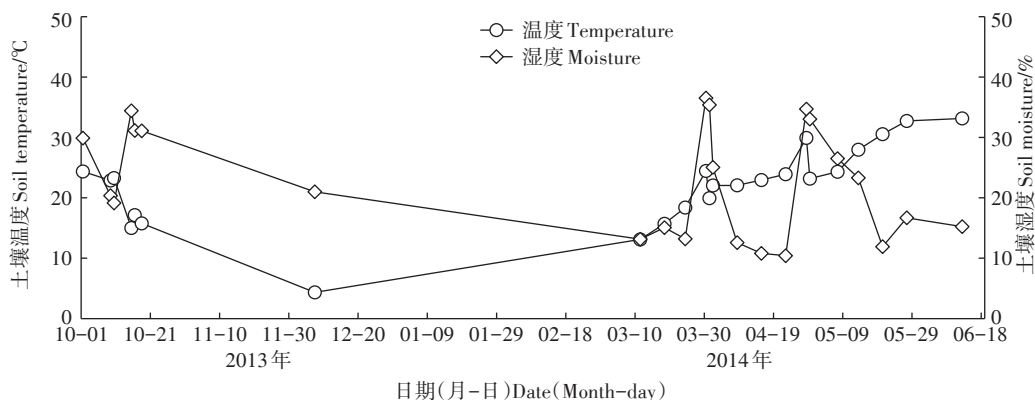


图1 小麦季土壤温度和湿度动态变化

Figure 1 Soil temperature and moisture in the wheat season

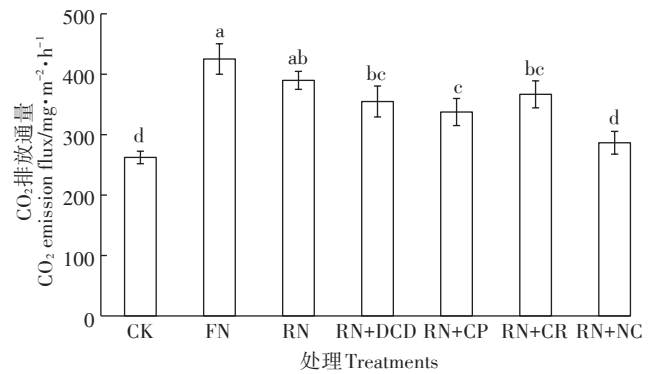
CO₂排放明显升高,播种6 d(10月15日)后CO₂排放通量出现第一个峰值,而后呈下降趋势;进入11月后,CO₂排放通量迅速下降,于12月7日降到最低;12月8日到来年3月10日暂停取样。图2表明,各处理CO₂排放通量在施肥和灌水后明显升高,排放峰值约在施肥灌溉后6 d出现;结合图1和图2可知,12月8日前,各处理CO₂排放通量变幅在40.9~629.9 mg·m⁻²·h⁻¹,且总体随着土壤温度下降呈下降趋势。

来年3月11日恢复取样,CO₂排放通量随土壤温度回升呈升高趋势;3月26日追肥灌溉后,3月30日出现第2个CO₂排放峰;4月份后,地表温度一直在22℃以上,小麦生长迅速,4月15日出现第3个CO₂排放峰,而后CO₂排放量维持在较高水平;进入5月份后,土壤温度迅速升高,降雨量增加,5月10日、11日两次中雨导致5月13日出现第4个CO₂排放峰,之后CO₂排放通量缓慢下降并趋于稳定直至收获。结合图1和图2可知,小麦季CO₂排放通量变化规律与土壤温度和湿度趋势基本一致。

在小麦生育期内4个CO₂排放峰值,各施氮处理CO₂平均排放通量较CK增加46.0%;与FN相比,减氮处理CO₂平均排放通量平均降低19.2%;等氮条件下,氮素转化调控剂处理CO₂平均排放通量平均降低15.2%。说明小麦季CO₂排放通量动态变化除受土壤温度和湿度影响外,还受施肥时期、施肥量和肥料类型的影响。

2.2 CO₂平均排放通量

图3表明,施氮肥处理除RN+NC外,CO₂排放通量均显著高于CK,说明施用氮肥明显增加土壤CO₂排放通量。与FN相比,各减氮的CO₂排放通量降低8.3%~32.6%,其中RN+NC的平均排放通量最低,其



不同小写字母表示处理间差异显著($P < 0.05$)。下同
The different lowercase letters indicates significant differences among different treatments ($P < 0.05$). The same below

图3 小麦季CO₂平均排放通量

Figure 3 Average CO₂ emission flux in the wheat season

次为RN+CP和RN+DCD。等氮量条件下,与RN相比,RN+CP和RN+NC的CO₂排放通量显著下降13.4%和26.5%,RN+DCD和RN+CR则分别下降9.0%和5.9%。说明氮肥用量相同时,氮肥配施氮素转化调控剂明显降低小麦季CO₂排放,其中NC处理效果较好,其次是CP处理。

2.3 CH₄排放通量动态变化特征

图4表明,土壤CH₄通量以吸收为主,仅出现几次较小的排放高峰,总体表现为吸收,即麦田为CH₄汇。各处理CH₄平均吸收速率为8.9~23.0 μg·m⁻²·h⁻¹,整个生育期未出现明显的季节变化。仅小麦苗期和越冬初期出现两个较小的排放峰,其他生育时期均以吸收为主。10月9日施肥和灌溉后的第3 d出现CH₄排放峰,此时期施氮肥处理CH₄排放通量较CK增加4.1%~725.4%,各减氮处理较FN处理CH₄排放通量降低了29.2%~87.4%,而氮肥调控剂处理较RN处理

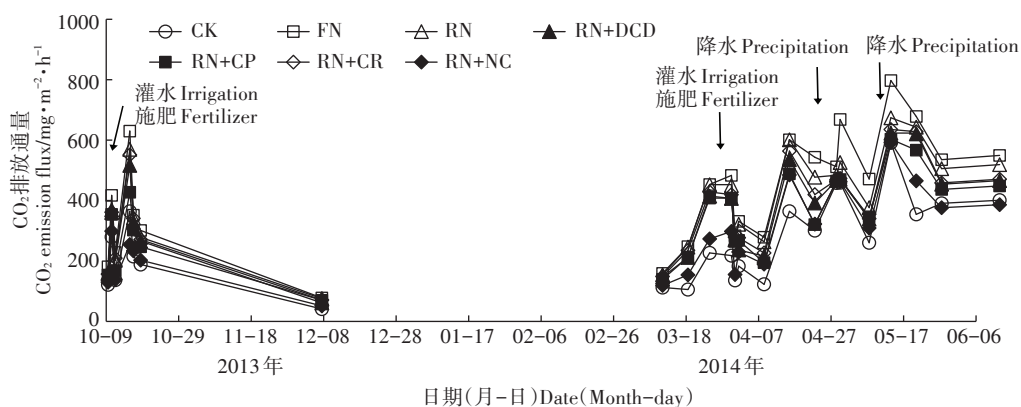


图2 小麦季CO₂排放通量季节变化

Figure 2 Seasonal variation of CO₂ emission flux in the wheat

CH₄排放通量降低21.0%~52.2%,可能是肥料施用、土壤湿度和温度等综合因素促进CH₄排放。一般认为,土壤吸收CH₄的最佳湿度为15%~20%,土壤CH₄氧化菌活性最强,土壤湿度在28%~35%减弱CH₄的氧化,间接促进CH₄排放。12月7日平均温度4.3℃,11月26日灌冻水使土壤湿度迅速增加,水分和温度导致12月7日出现排放峰。

12月8日到来年3月10日暂停取样,3月11日恢复取样。追肥、灌溉和降水虽然导致CH₄通量出现小幅波动,但总体仍以CH₄吸收为主。这主要是由小麦返青后土壤温度的迅速回升以及平均土壤湿度接近土壤吸收CH₄的最佳湿度(平均湿度为20.9%)等环境条件造成的,因此导致小麦返青后到成熟均以吸收CH₄为主。

2.4 CH₄平均吸收通量

由图5可知,麦田土壤是CH₄的净吸收库。与CK相比,施氮肥的CH₄平均吸收通量降低14.3%~62.8%,除RN+CR外,其余施氮处理与CK差异均达显

著水平。与FN比,减氮处理CH₄平均吸收通量增加43.0%~130.8%,除RN外的其他减氮处理与FN比差异显著,各处理表现为:RN+CR>RN+CP>RN+DCD>RN+NC>RN。氮素转化调控剂处理CH₄平均吸收通量较RN增加19.7%~61.3%,且RN+CR与RN差异显著。说明增施氮肥显著抑制土壤对CH₄吸收,促进排放;减少氮肥用量,CH₄吸收增加;氮素转化调控剂CR、DCD、CP和NC均明显促进土壤吸收CH₄。

2.5 CO₂和CH₄排放/吸收总量与增温潜势

由表1可知,与FN相比,减氮处理土壤CO₂排放总量显著降低7.8%~31.6%,减氮处理CH₄吸收总量增加49.4%~138.5%。与RN相比,氮转化调控剂处理CO₂排放总量明显下降6.6%~25.8%;RN+NC土壤排放CO₂最少,其次为RN+CP和RN+DCD;氮素调控剂处理CH₄吸收总量增加20.2%~59.7%,且RN+CP、RN+CR与RN间差异显著。说明氮素调控剂减少土壤CO₂排放,促进CH₄吸收。

土壤CO₂和CH₄的总GWP随氮肥用量增加呈增

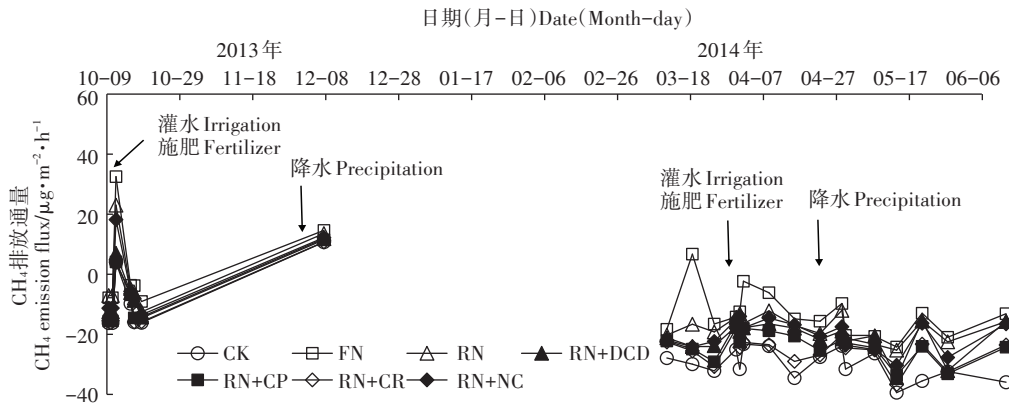


图4 小麦季CH₄排放通量季节变化

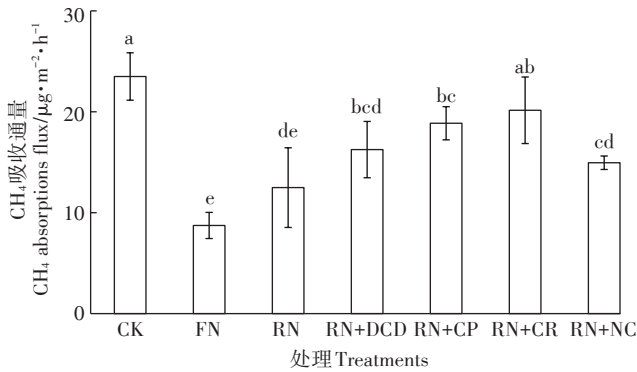
Figure 4 Seasonal variation of CH₄ emission flux in the wheat season

表1 小麦季CO₂、CH₄的排放总量和增温潜势

Table 1 Emission of CO₂, CH₄ and warming potential in the wheat season

处理 Treatments	CO ₂ 排放量 Emission of CO ₂ / kg·hm ⁻²	CH ₄ 吸收量 Absorption of CH ₄ / g·hm ⁻²	CO ₂ GWP/ kg C·hm ⁻²	CH ₄ GWP/ kg C·hm ⁻²	总GWP Total GWP/ kg C·hm ⁻²	作物固定C量 Fixed amount of C/ kg C·hm ⁻²	净GWP Net GWP/ kg C·hm ⁻²
CK	9 047.0±189.0d	760.0±62.5a	9 047.0	-6.9	9 040.1	1 757.3	7 282.8
FN	14 590.3±1039.8a	276.7±32.2e	14 590.3	-2.5	14 587.8	5 878.5	8 709.3
RN	13 446.2±574.4ab	413.3±101.2de	13 446.2	-3.8	13 442.5	5 993.5	7 449.0
RN+DCD	12 156.0±512.0bc	526.7±77.7bcd	12 156.0	-4.8	12 151.2	6 208.3	5 942.9
RN+CP	11 587.1±532.9c	610.0±26.5abc	11 587.1	-5.5	11 581.6	6 141.7	5 439.9
RN+CR	12 559.9±1 226.4bc	660.0±170.0ab	12 559.9	-6.0	12 553.9	6 045.2	6 508.7
RN+NC	9 982.8±722.6d	496.7±15.3cd	9 982.8	-4.5	9 978.2	6 099.8	3 878.4

注:同列不同小写字母表示处理间差异显著(P<0.05)。
Note: The different lowercase letters in a column indicate significant differences among different treatments at P<0.05.

图5 小麦季CH₄平均吸收通量Figure 5 Average CH₄ absorption flux in the wheat season

加趋势。与CK相比,施氮肥增加总GWP 10.4%~61.4%;减氮处理总GWP较FN降低7.9%~31.6%;等氮量条件下,与RN比,氮素调控剂处理的总GWP降低6.6%~25.8%,其中,RN+NC降低幅度最大,RN+CP次之。与FN比,减氮处理固C量增加2.0%~5.6%。与RN比,氮素调控剂处理固C量增加0.9%~3.6%。减少氮肥施用可以明显降低净GWP(表2)。减氮处理净GWP较FN降低14.5%~55.5%。与RN比,氮素调控剂的净GWP降低12.6%~47.9%。说明减氮肥明显降低温室气体净GWP排放,而氮素调控剂DCD、CP、NC和缓控释肥降低小麦季净GWP排放效果明显,主要是氮素调控剂处理增加作物固定C量和降低总GWP所致。

3 讨论

CO₂排放通量呈明显的季节变化规律,在夏季较高,春季和秋季较低,冬季最低,麦田土壤是CO₂排放源,而对于CH₄以吸收为主,季节变化规律不明显,麦田土壤是CH₄的汇(图2、图4),这与闫翠萍等^[19]研究报道基本一致。麦田土壤CO₂和CH₄的这种排放规律与小麦播种时伴随的施肥与灌溉、生育关键期追肥以及土壤温度变化等有关^[20]。本文小麦季土壤温度变幅为4.3~33.2℃,平均21.9℃(图1)。据韩广轩等^[21]报道,CO₂排放通量与气温和地温之间有极显著指数相关关系,主要是因为温度影响植物和根系呼吸及微生物活性。因此,CO₂排放通量呈现出明显的季节变化规律。虽然土壤CH₄产生潜力随温度升高也呈显著指数增长趋势^[22],但由于土壤对CH₄的氧化最适温度为5~15℃和25~35℃^[23],而本季小麦土壤平均温度比较接近CH₄的最适氧化温度,因此导致土壤CH₄以吸收为主。小麦季土壤湿度变幅为10.4%~36.5%,平

均22.3%,远低于田间持水量(图1)。土壤湿度是通过影响土壤通透性来间接影响CO₂排放,CO₂排放通量与土水势呈指数相关^[24],在田间持水量范围内土壤含水量与草地土壤CO₂排放量间呈显著正相关关系^[25]。并且,土壤水分低于田间持水量条件下,CH₄氧化菌占优势,表现为CH₄吸收^[26]。因此,麦田土壤CO₂排放灌水和降水后呈明显增加趋势,而CH₄则以吸收为主,排放峰值较少。小麦季4个CO₂排放峰值,各施氮处理CO₂平均排放通量较CK增加46.0%(图2);而整个生育期施氮肥处理CO₂平均排放通量较CK提高9.3%~62.1%、排放总量增加10.3%~61.3%(图3、表1)。施肥后出现的CH₄排放峰值,各施氮处理CH₄排放通量较CK增加4.1%~725.4%(图4);而整个生育期施氮肥处理CH₄吸收通量较CK降低14.3%~62.8%,吸收总量减少13.2%~63.6%(图5、表1)。这是因为氮肥施用直接促进土壤中CO₂排放,抑制土壤对CH₄的吸收而间接促其排放,三者间存在正相关^[5],并且施用氮肥可降低土壤pH值,提高土壤碳累积释放量,促进CO₂排放^[27]。说明小麦季CO₂和CH₄排放除受土壤温度和湿度影响外,还受肥料施用的影响。

减少氮肥用量可降低CO₂排放,氮肥配施氮转化调控剂明显减少CO₂排放。减氮肥处理CO₂平均排放通量和排放总量较FN分别降低8.3%~32.6%和7.8%~31.6%(图3、表1);等氮肥用量条件下,氮转化调控剂处理较RN处理的CO₂排放通量和排放总量分别降低5.9%~26.5%和6.6%~25.8%(图3、表1)。据孟延等^[28]报道在石灰性土壤上,CO₂释放量随氮肥用量增加显著增加,一方面是因为施氮促进有机质矿化,另一方面则是氮肥的硝化作用降低土壤pH值,促进碳酸盐分解。等氮量条件下,氮肥配施硝化抑制剂明显降低土壤CO₂排放,因为DCD等硝化抑制剂延缓NH₄⁺-N的硝化,降低土壤pH^[27];而RN+NC处理CO₂排放通量较低可能是因为有机物质影响了土壤微生物量、活度和土壤呼吸强度,进而导致了排放通量降低^[29]。

小麦季减氮肥处理CH₄平均吸收通量和吸收总量较FN分别增加43.0%~130.8%和49.4%~138.5%(图5、表1);等氮肥用量条件下,氮转化调控剂处理CH₄吸收量均明显增加(图5、表1)。减少氮肥施用,土壤CH₄吸收呈增加趋势。一方面,NH₄⁺抑制土壤中CH₄的氧化,减少氮肥增加土壤中CH₄的氧化,减少排放;另一方面,CH₄氧化细菌活性在土壤渗透压较低时较强,减少氮肥导致渗透压下降,增加CH₄氧化细

菌活性,增加CH₄的氧化数量,减少其排放量^[4]。

在所有温室气体中,CO₂对温室效应的贡献达60%,N₂O和CH₄二者的贡献之和约为20%^[30]。本研究中,与FN比,小麦季减氮处理两种气体总GWP和净GWP平均降低18.1%和32.9%,主要因为农田生态系统温室气体的GWP随氮肥用量增加而增加^[31],且CO₂GWP对小麦/玉米轮作系统总GWP贡献较大,CH₄GWP贡献较小^[29]。与RN比,小麦季氮转化调控剂处理总GWP和净GWP平均降低14.0%和26.9%(表1)。主要是因为CP和DCD等减少CO₂排放导致,而RN+NC较低可能是因为有机物质影响土壤微生物量、活度和土壤呼吸强度,进而导致排放通量降低^[29]。

4 结论

(1)麦田土壤是CO₂排放源,CH₄弱吸收汇。CO₂排放通量具有明显季节变化规律,夏季较高,春、秋季次之,冬季最低。土壤温度、湿度、施肥等显著影响CO₂排放和CH₄吸收。

(2)在农民习惯施氮肥基础上减少氮肥用量可降低CO₂排放、促进CH₄吸收、降低温室气体增温潜势。

(3)氮肥用量相同条件下,氮肥配施氮转化调控剂可以明显降低CO₂排放通量、排放总量,增加CH₄平均吸收通量和吸收总量,降低两种温室气体总GWP和净GWP。

参考文献:

- [1] IPCC. Climate Change 2001: The science basis. Contribution of working group to the assessment report of the IPCC[R]. Cambridge: Cambridge University Press, 2001.
- [2] 王秀斌,梁国庆,周卫,等. 优化施肥下华北冬小麦/夏玉米轮作体系农田反硝化损失与N₂O排放特征[J]. 植物营养与肥料学报, 2009, 15(1): 48-54.
WANG Xiu-bin, LIANG Guo-qing, ZHOU Wei, et al. Effect of optimized nitrogen application on denitrification losses and N₂O emissions from soil in winter wheat/summer corn rotation system in North China[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2009, 15(1): 48-54.
- [3] 梁昊. 不同施肥对紫色水稻土水旱轮作田麦季土壤CO₂排放的影响[D]. 重庆: 西南大学, 2008.
LIANG Hao. Effect of different fertilization on CO₂ emission for a paddy-upland rotation purple soil under wheat[D]. Chongqing: Southwest University, 2008.
- [4] Liu L L, Greaver T L. A review of nitrogen enrichment effects on three biogenic GHGs: The CO₂ sink may be largely offset by stimulated N₂O and CH₄ emission[J]. *Ecology Letters*, 2009, 12(10): 1103-1117.
- [5] Chu H Y, Hosen Y, Yagi K, et al. NO, N₂O, CH₄ and CO₂ fluxes in winter barley field of Japanese andisol as affected by N fertilizer management[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2007, 39: 330-339.
- [6] 陈新平, 张福锁. 小麦-玉米轮作体系养分资源综合管理理论与实践[M]. 北京: 中国农业大学出版社, 2006.
CHEN Xin-ping, ZHANG Fu-suo. Theory and practice of integrated management of nutrient resources in wheat maize rotation system[M]. Beijing: China Agricultural University Press, 2006.
- [7] 马少云. 黄淮海北部高产粮田系统养分特征及土壤养分限制谱序研究[D]. 保定: 河北农业大学, 2015.
MA Shao-yun. Study on the characters of high-production grain yield-system and the limiting sequence of soil nutrient in the North Huang-huai-hai China[D]. Baoding: Hebei Agricultural University, 2015.
- [8] 李瑞奇, 李雁鸣, 何建兴, 等. 施氮量对冬小麦氮素利用和产量的影响[J]. 麦类作物学报, 2011, 31(2): 270-275.
LI Rui-qi, LI Yan-ming, HE Jian-xing, et al. Effect of nitrogen application rate on nitrogen utilization and grain yield of winter wheat[J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2011, 31(2): 270-275.
- [9] Ju X T, Kou C L, Zhang F S, et al. Nitrogen balance and groundwater nitrate contamination: Comparison among three intensive cropping systems on the North China Plain[J]. *Environmental Pollution*, 2006, 143(1): 117-125.
- [10] 马银丽, 吉艳芝, 李鑫, 等. 施氮水平对小麦-玉米轮作体系氮挥发与氧化亚氮排放的影响[J]. 生态环境学报, 2012, 212: 225-230.
MA Yin-li, JI Yan-zhi, LI Xin, et al. Effects of N fertilization rates on the NH₃ volatilization and N₂O emissions from the wheat-maize rotation system in North China Plain[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2012, 212: 225-230.
- [11] 张婧, 李虎, 朱国梁, 等. 控释肥施用对土壤N₂O排放的影响——以华北平原冬小麦/夏玉米轮作系统为例[J]. 生态学报, 2017, 37(22): 7624-7635.
ZHANG Jing, LI Hu, ZHU Guo-liang, et al. Effect of controlled-release fertilization on nitrous oxide emission: A case study of a wheat-maize rotation system in the North China Plain[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, 37(22): 7624-7635.
- [12] 刘建涛, 张会永, 王雪, 等. 氮肥调控剂施用对小麦生长、氮素利用及氮素表现平衡的影响[J]. 水土保持学报, 2014, 28(1): 209-214.
LIU Jian-tao, ZHANG Hui-yong, WANG Xue, et al. Effects of nitrogen regulator on wheat growth, nitrogen use efficiency and apparent nitrogen balance[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2014, 28(1): 209-214.
- [13] 康熙龙, 张旭辉, 张硕硕. 旱地土壤施用生物质炭的后效应——水分条件对土壤有机碳矿化的影响[J]. 土壤, 2016, 48(1): 152-158.
KANG Xi-long, ZHANG Xu-hui, ZHANG Shuo-shuo. Effects of bio-char application history on soil: Effect of moisture regime on dynamics of soil organic carbon mineralization[J]. *Soil*, 2016, 48(1): 152-158.
- [14] 叶欣, 李俊, 王迎红, 等. 华北平原典型农田土壤氧化亚氮的排放特征[J]. 农业环境科学学报, 2005, 24(6): 1186-1191.
YE Xin, LI Jun, WANG Ying-hong, et al. Characterization of emissions of nitrous oxide from soils of typical crop fields in North China plain[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2005, 24(6): 1186-

- 1191.
- [15] 于亚军, 朱 波, 王小国, 等. 成都平原水稻-油菜轮作系统氧化亚氮排放[J]. 应用生态学报, 2008, 19(6): 1277-1282.
- YU Ya-jun, ZHU Bo, WANG Xiao-guo, et al. N_2O emission from rice-rapeseed rotation system in Chengdu Plain of Sichuan Basin[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2008, 19(6): 1277-1282.
- [16] IPCC. "Changes in atmospheric constituents and in radiative forcing" in climate change 2007: The physical science basis contribution of working group I to the fourth assessment report of the intergovernmental panel on climate change[R]. Cambridge, UK and New York: Cambridge University Press, 2007: 212.
- [17] 王修兰. 全球农作物对大气 CO_2 及其倍增的吸收量估算[J]. 气象学报, 1996, 54(4): 466-473.
- WANG Xiu-lan. The estimation on crop absorbing CO_2 under current and double CO_2 conditions in the world[J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 1996, 54(4): 466-473.
- [18] 谢光辉, 韩东倩, 王晓玉, 等. 中国禾谷类大田作物收获指数和秸秆系数[J]. 中国农业大学学报, 2011, 16(1): 1-8.
- XIE Guang-hui, HAN Dong-qian, WANG Xiao-yu, et al. Harvest index and residue factor of cereal crops in China[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2011, 16(1): 1-8.
- [19] 闫翠萍, 张玉铭, 胡春胜, 等. 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, 2016, 24(6): 704-715.
- YAN Cui-ping, ZHANG Yu-ming, HU Chun-sheng, et al. Greenhouse gas exchange and comprehensive global warming potential under different wheat-maize rotation patterns[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2016, 24(6): 704-715.
- [20] 王艳群, 李迎春, 彭正萍, 等. 氮素配施双氰胺对冬小麦-夏玉米轮作系统 N_2O 排放的影响及效益分析[J]. 应用生态学报, 2015, 26(7): 1999-2006.
- WANG Yan-qun, LI Ying-chun, PENG Zheng-ping, et al. Effects of dicyandiamide combined with nitrogen fertilizer on N_2O emission and economic benefit in winter wheat and summer maize rotation system[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2015, 26(7): 1999-2006.
- [21] 韩广轩, 朱 波, 张中杰, 等. 水旱轮作土壤-小麦系统 CO_2 排放及其影响因素[J]. 生态环境, 2004, 13(2): 182-185.
- HAN Guang-xuan, ZHU Bo, ZHANG Zhong-jie, et al. CO_2 emission from soil-wheat system in a paddy-dryland rotation area in purple soil and its influence factors[J]. *Ecology and Environment*, 2004, 13(2): 182-185.
- [22] 杨 平, 何清华, 全 川. 闽江口潮汐沼泽湿地土壤甲烷产生对温度变化的响应[J]. 环境科学学报, 2015, 35(9): 2957-2963.
- YANG Ping, HE Qing-hua, QUAN Chuan. Responses of methane production to temperature in tidal marshes soil of the Min River Estuary[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2015, 35(9): 2957-2963.
- [23] 江丽珍, 冯海艳, 蒋宏忱, 等. 水田和旱地土壤氧化甲烷的温度响应[J]. 地学前缘, 2011, 18(6): 79-84.
- JIANG Li-zhen, FENG Hai-yan, JIANG Hong-chen, et al. Effect of temperature on methane oxidation in rice field and irrigative agriculture soil[J]. *Earth Science Frontiers*, 2011, 18(6): 79-84.
- [24] 贾宏涛, 蒋平安, 胡玉昆, 等. 土壤湿度对亚高山草地土壤夏季 CO_2 排放日变化的影响[J]. 新疆农业大学学报, 2009, 32(2): 19-22.
- JIA Hong-tao, JIANG Ping-an, HU Yu-kun, et al. Effects of soil moisture on CO_2 emissions in subalpine meadow soil[J]. *Journal of Xinjiang Agricultural University*, 2009, 32(2): 19-22.
- [25] Conant R T, Klopatek J M, Malin R C, et al. Carbon pools and fluxes along an environmental gradient in northern Arizona[J]. *Biogeochemistry*, 1998, 43(1): 43-61.
- [26] 胡启武, 吴 琴, 李 东, 等. 不同土壤水分含量下高寒草地 CH_4 释放的比较研究[J]. 生态学杂志, 2005, 24(2): 118-122.
- HU Qi-wu, WU Qin, LI Dong, et al. Comparative study on methane emissions from alpine grasslands with different soil water content[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2005, 24(2): 118-122.
- [27] 于伟家, 李雪松, 陈竹君, 等. 氮肥对不同无机碳含量土壤二氧化碳释放的影响[J]. 应用生态学报, 2018, 29(8): 2493-2500.
- YU Wei-jia, LI Xue-song, CHEN Zhu-jun, et al. Effects of nitrogen fertilizer application on carbon dioxide emissions from soils with different carbon contents[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2018, 29(8): 2493-2500.
- [28] 孟 延, 蔡 苗, 师倩云, 等. 氮肥用量对石灰性土壤二氧化碳释放的影响[J]. 土壤通报, 2015, 46(4): 948-954.
- MENG Yan, CAI Miao, SHI Qian-yun, et al. Effects of nitrogen fertilizer application on carbon dioxide emission from calcareous soil[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2015, 46(4): 948-954.
- [29] 舒晓晓. 有机物质调控下的粮田温室气体排放特征及氮素利用研究[D]. 保定: 河北农业大学, 2017.
- SHU Xiao-xiao. Study on the characters of greenhouse gas emissions and nitrogen utilization in the grainfield under the organic matter regulation[D]. Baoding: Hebei Agricultural University, 2017.
- [30] IPCC. Special report on emissions scenarios: A special report of working group III of the intergovernmental panel on climate change[R]. Cambridge: Cambridge University Press, 2000.
- [31] 李小礼, 韦灵林, 李秀明, 等. 施氮对稻麦轮作系统综合增温潜势的影响[J]. 长江流域资源与环境, 2012, 21(5): 578-564.
- LI Xiao-li, WEI Ling-lin, LI Xiu-ming, et al. Effects of nitrogen application on global warming potentials in rice wheat rotation system[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2012, 21(5): 578-564.