

不同灌溉模式对寒地水稻田碳排放、耗水量及产量的影响

张忠明^{1,2}, 王忠波^{1,2*}, 张忠学^{1,2}, 王欣亮^{1,2}

(1. 东北农业大学 水利与土木工程学院, 哈尔滨 150030;

2. 农业部农业水资源高效利用重点实验室, 哈尔滨 150030)

摘要:【目的】优选适宜当地水稻种植的节水灌溉模式。【方法】采用田间小区试验,设置5种水稻灌溉模式:控制灌溉(C)、“薄、浅、湿、晒”灌溉(T)、叶龄模式灌溉(B)、“浅、湿”灌溉(I)、干湿交替灌溉(D),以当地常规灌溉(CK)作为对照,采用静态暗箱-气相色谱法观测不同处理水稻全生育期内稻田CH₄及CO₂排放通量变化,并测定了水稻全生育期耗水量及产量。【结果】在节水、减排效果方面,C处理最明显,较CK平均节水1 794.3~2 012.3 m³/hm²,增温潜势为10 654.13 kg/hm²,但产量相对较低,为8 822.59 kg/hm²;在增产方面I处理效果最明显,为9 611.27 kg/hm²,但减排效果不理想,增温潜势为12 128 kg/hm²。综合来看干湿交替灌溉(D)在减排、节水及增产方面较其余处理相比较为均衡,其增温潜势为10 700.29 kg/hm²,较CK平均节水1 449.2~1 618.5 m³/hm²,产量为9 078.99 kg/hm²。【结论】干湿交替灌溉(D)在减排、节水及增产方面较为均衡,为试验条件下的最优处理。

关键词:水稻;节水灌溉;产量;甲烷;二氧化碳

中图分类号:S274

文献标志码:A

doi:10.13522/j.cnki.ggps.20180099

张忠明,王忠波,张忠学,等.不同灌溉模式对寒地水稻田碳排放、耗水量及产量的影响[J].灌溉排水学报,2018,37(11):1-7.

0 引言

土壤中的碳主要以CH₄和CO₂的形式排放到大气中,与大气进行气体交换。同时CH₄和CO₂也参与碳循环^[1]。众所周知,CH₄和CO₂是影响全球气候变暖的重要温室气体^[2],对全球温室效应的贡献率分别达到了15%和60%^[3]。而稻田是CO₂与CH₄的重要排放源^[4-5],CO₂是土壤呼吸的主要排放气体^[6],稻田CH₄排放量约占全球总排放量的20%^[7]。我国是水稻种植大国,截至2015年,我国水稻种植面积3 021.6万hm²,我国的碳排放量占世界总排放量的比重较大,是碳排放量最高的国家之一^[8]。研究表明,不同的稻田管理措施不仅影响水稻的产量,也会影响稻田生态系统的碳排放^[9-14],稻田生态系统的碳排放除了受气候因素,当地的天气情况及土壤环境的影响外,还受各种田间管理措施等影响,如耕作措施、施肥管理、秸秆还田管理、水分管理措施等以及其他各种物理化学因素等^[15]。

研究指出,不同的水分管理措施是稻田碳排放的重要影响因素之一^[16-19],灌溉制度影响农田CH₄与CO₂排放^[20]。稻田水分管理分为灌溉、排水、晒田等,不同的灌溉模式影响土壤的微生物生存环境和氧化还原电位等,从而对CH₄和CO₂排放产生重要影响^[21]。目前我国农业用水量达3 851.5亿m³,而稻田用水量占整个农业用水量的65%以上^[22]。因此,我国各地均推行节水灌溉技术,自20世纪70年代末我国推出了浅湿晒灌溉、“薄、浅、湿、晒”灌溉、控制灌溉、间歇灌溉等技术,对我国水稻的节水增产效果显著^[23]。除注重水稻的产量用水量等的经济因素外,也应注重不同灌溉模式对环境的影响,诸如温室气体排放、面源污染等。已有研究表

收稿日期:2018-02-06

基金项目:国家重点研发计划项目(2016YFC0400108)

作者简介:张忠明(1992-),男。硕士研究生,主要从事节水灌溉理论与技术方面研究。E-mail: 1018757163@qq.com

通信作者:王忠波(1971-),男。副教授,硕士生导师,主要从事节水灌溉理论与技术方面研究。E-mail: wangzhongbo71@163.com

明,节水灌溉模式均能在不同程度上改善土壤通气环境,增加土壤微生物活性,进而减少稻田的温室效应^[24]。已往对节水灌溉的研究只是单独探究温室气体排放情况或增产情况,对节水灌溉在温室气体减排、增产、节水等方面综合评价的报道较少。兹探究典型节水灌溉模式对寒地水稻碳排放、增产效果及节水效果的影响,为当地节水灌溉技术的推广提供一定理论支撑。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验在黑龙江省庆安县国家重点灌溉试验站进行,即黑龙江省水稻灌溉试验中心(原庆安县和平灌区水稻试验站),地理坐标为东经125°44′,北纬45°63′。试验区土质肥沃,土壤为黑黏土,黑土层较厚,土壤有机质量达3.9%,pH值为6.5。多年平均气温为2~3℃,有效积温为2300~2600℃。多年平均年降水量为500~600mm,年均水面蒸发量为750mm。

1.2 试验方法

试验拟选取生产实践中5种典型的节水灌溉技术模式,包括控制灌溉(C)、“薄、浅、湿、晒”灌溉(T)、叶龄模式灌溉(B)、“浅、湿”灌溉(I)和干湿交替灌溉(D),以当地常规灌溉(CK)作为对照,开展田间小区对比试验,共6个试验处理,每个处理3次重复,共计18个小区,采用随机区组分布。选用当地农户主栽水稻品种,龙庆3号。每个小区面积为100m²(10m×10m),小区四周的田埂宽30cm,高50cm,并包覆尼龙膜,以减少相邻小区串流和侧渗。供试的化肥分别为尿素(含N量46%)、过磷酸钙(含P₂O₅量12%)、氯化钾(含K₂O量60%)。供试水稻品种为当地主栽品种龙庆稻3号,种植密度为30cm×15cm,每穴5株。各处理施氮用量为110kg/hm²,氮肥施用采用前氮后移施肥技术,即施氮比例为基肥、蘖肥、促花肥、保花肥质量比为4.5:2.0:1.5:2.0;各处理P₂O₅、K₂O施用量分别为45、80kg/hm²,钾肥分基肥和8.5叶龄(幼穗分化期)2次施用,前后比例为1:1,磷肥作基肥1次施入。各小区单独灌排,进水管接装小型计量水表。所有小区排水口高度保持一致,均高于稻田表土8cm。所有小区在2017年5月10日泡田,5月15日施基肥,5月19日插秧,6月10日施蘖肥,7月9日施8.5叶龄钾肥,7月17日施促花肥,7月27日施保花肥。全生育期127d,分为:返青期(5月19日—6月5日)、分蘖期(6月6日—7月12日)、拔节孕穗期(7月13—22日)、抽穗开花期(7月23日—8月3日)、乳熟期(8月4—23日)和黄熟期(8月24日—9月22日)。不同灌溉模式的水分处理方案见表1。

表1 试验处理

试验处理	返青期	分蘖前期	分蘖盛期	分蘖末期	拔节期	抽穗期	乳熟期	黄熟期
控灌(C)	0~30	70%~0	70%~0	60%~0	85%~0	80%~0	70%~0	自然落干
叶龄模式灌溉(B)	0~30	10~30	0~20	晒田	80%~10	10~20	0~20	自然落干
“浅、湿”灌溉(I)	0~30	0~30	0~20	晒田	0~10	0~20	0~20	自然落干
“薄、浅、湿、晒”灌溉(T)	5~30	0~10	90%~10	晒田	10~20	5~15	0~10	自然落干
干湿交替灌溉(D)	0~30	80%~10	80%~10	晒田	80%~20	80%~20	80%~10	自然落干
常规淹灌(CK)	0~30	10~40	10~40	晒田	10~40	10~40	10~40	自然落干

注 表中“%”为占土壤饱和含水率的比例,其余为田间水层深度(mm);只有当试验观测的水分达到下限水分时,才灌水至上限;遇降大雨,田面可蓄存雨水(分蘖末期除外),但蓄雨水不超过50mm,蓄水历时不超过5d。

1.3 试验指标的采集观测与分析

采用静态暗箱法采集气体,采样箱构造规格及采样规律按王孟雪等^[21]的标准。CH₄和CO₂均用GC-17A岛津气相色谱仪进行分析。2种气体排放通量计算式^[25]为:

$$F = \rho h \cdot \frac{dc}{dt} \cdot \frac{273}{273 + t}, \quad (1)$$

式中: F 是CH₄和CO₂排放通量(mg/(m²·h)); ρ 是CH₄和CO₂在标准状况下的密度(kg/m³):分别为0.714、1.977kg/m³; h 为采样时箱体内有效高度,即箱内水层或土层到箱顶高度(m); dc/dt 是采样时箱内的气体排放通量变化率(mL/(m³·h)); t 是采样箱内的平均温度(℃)。

CH₄和CO₂的增温效果采用增温潜势GWP和温室气体排放强度GHGI衡量,即:

$$GWP = 34R_{CH_4} + R_{CO_2}, \quad (2)$$

$$GHGI = GWP/Y, \quad (3)$$

式中: R_{CH_4} 为水稻全生育期CH₄累计排放量(kg/hm²); R_{CO_2} 为水稻全生育期CO₂累计排放量(kg/hm²)。按100a

尺度计,CH₄的增温潜势为CO₂的34倍^[26]。Y为单位面积平均产量(kg/hm²)。

每个小区预先插入地温计观测土壤温度,采用水表计量各小区灌溉水量,利用雨量筒计量降雨量;收获前每个小区进行考种测产。

1.4 数据的整理与分析

所有试验数据采用 Excel 进行预处理,SPSS24 软件进行统计分析。

2 结果与分析

2.1 不同处理CH₄季节排放变化及全生育期累计排放规律

不同灌溉处理CH₄排放通量的变化见图1。从图1可以看出,各处理CH₄排放通量在整个生育期变化趋势相似,最高值均出现在分蘖中期。各处理在泡田期至返青期排放量均较低,在晒田期排放量呈下降趋势,均处在较低水平。T、C、D、B处理排放通量变化趋势为:从返青期进入分蘖期后达到排放高峰,之后下降,在拔节期又出现第2次排放高峰,之后逐渐下降,乳熟期出现排放小高峰后逐渐下降;I处理在分蘖期和拔节期出现2次排放高峰,抽穗期至黄熟期逐渐下降;CK的2个排放高峰期也出现在分蘖期和拔节期。不同灌溉处理CH₄季节排放量的变化见表2。由表2可知,各处理全生育期CH₄累计排放总量均值表现为CK>I处理>B处理>T处理>D处理>C处理。常规灌溉的CH₄排放总量最大,T、I、C、D、B处理全生育期CH₄累计排放总量分别比CK降低了46.6%~47.5%、28%~35.7%、47.8~51.2%、43.3%~51.9%、40.1%~43.3%。CH₄排放与水层和土层温度的关系见表3。由表3可知,CH₄排放与水层深度呈显著正相关关系($P<0.05$),与5 cm及10 cm土层温度极显著正相关($P<0.01$),说明水层的增加会在一定程度上增加稻田CH₄的排放,并且土层温度的升高会促进CH₄排放。

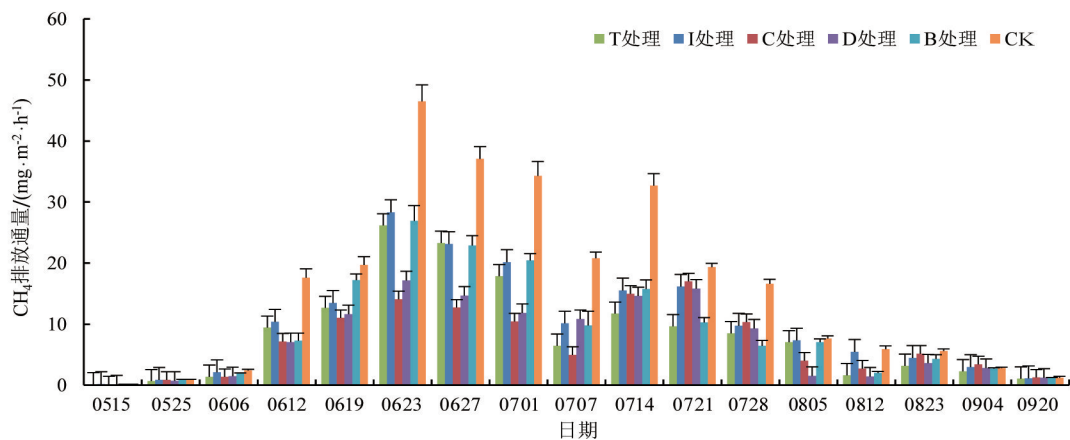


图1 不同灌溉处理CH₄排放通量

表2 不同灌溉处理CH₄和CO₂各生育期排放总量 kg/hm²

处理	碳排放	返青期	分蘖期	拔节期	抽穗期	乳熟期	黄熟期	全生育期
T	CH ₄	2.65±0.14b	129.50±2.47c	23.76±4.10c	24.50±1.80b	13.43±1.99d	11.28±1.25b	200.26±14.96cd
	CO ₂	130.55±9.57a	1921.46±22.81b	518.14±29.03d	603.39±26.19bc	433.71±39.72a	343.19±28.54cd	3950.4±64.75cd
I	CH ₄	3.58±0.32a	143.06±1.95b	38.57±4.72b	28.10±4.02b	23.86±2.11b	13.47±2.98ab	243.47±14.83b
	CO ₂	147.23±15.74a	1652.13±45.15d	542.58±17.55cd	637.73±33.84bc	407.30±28.12ab	462.98±26.73b	3849.95±43.80d
C	CH ₄	3.59±0.15a	85.50±2.87e	40.17±6.07b	29.74±2.47b	20.14±1.74c	15.29±1.25a	187.20±8.11d
	CO ₂	144.29±22.46a	1895.39±28.06b	577.70±10.63b	797.79±34.55a	371.21±26.63b	502.98±26.10b	4289.36±33.72a
D	CH ₄	2.88±0.43b	104.01±2.57d	37.62±3.06b	26.79±3.38b	12.85±1.44d	13.39±1.14ab	192.74±1.31cd
	CO ₂	136.31±17.30a	1972.20±17.85a	565.82±14.52bc	649.29±24.38b	442.98±40.77a	380.52±37.35c	4147.13±82.57b
B	CH ₄	3.64±0.36a	144.16±3.57b	26.33±2.63c	18.61±3.12c	17.25±2.04c	12.83±1.22ab	217.78±11.02bc
	CO ₂	140.50±14.58a	1597.96±25.85e	644.90±20.09a	593.73±35.98c	458.32±35.22a	554.02±27.38a	3989.43±81.19c
CK	CH ₄	3.76±0.25a	240.16±7.62a	50.42±2.23a	47.84±2.68a	27.94±1.60a	13.56±1.76ab	374.53±29.14a
	CO ₂	140.39±16.01a	1805.36±18.53c	464.28±15.52e	518.06±25.71d	414.10±24.16ab	318.48±14.84d	3660.66±34.61e

注 同行不同字母用LSD法表示差异显著($P<0.05$),数值为排放通量±标准差(下同)。

2.2 不同处理CO₂季节排放变化及全生育期累计排放规律

各处理CO₂在观测期内的变化见图2。由图2可知,全生育期不同处理CO₂排放规律基本一致。返青

期,各处理排放通量均较低,进入分蘖期后各处理排放通量逐渐增大,在分蘖前期和分蘖盛期出现排放小高峰,在分蘖末期出现排放最高峰。T、I、C、D、B处理、CK峰值分别为465.39、446.48、437.20、465.96、411.35、362.57 mg/(m²·h)。至分蘖末期各处理排放通量逐渐下降,在拔节期各处理又出现排放高峰,之后逐渐下降,至收获前出现排放小高峰。各处理CO₂在观测期内的季节变化见表2。由表2可知,各处理全生育期处理CO₂累计排放量均值表现为:C处理>D处理>B处理>C处理>I处理>CK。可见全生育期5种节水灌溉CO₂累计排放量显著高于CK($P<0.05$),其中C处理排放量最大,平均高于F处理14%~19.7%,其余D、B、T、I处理分别平均高于CK 12.8%~14.1%、7.8%~10.9%、6.4%~9.1%、3.7%~6.2%。CO₂排放与水层和土层温度的关系见表3。由表3可知,CO₂排放与水层深度呈一定负相关关系,但相关性不显著($P>0.05$),而与5 cm及10 cm土层温度极显著正相关($P<0.01$),说明土层温度的升高会促进CO₂排放。

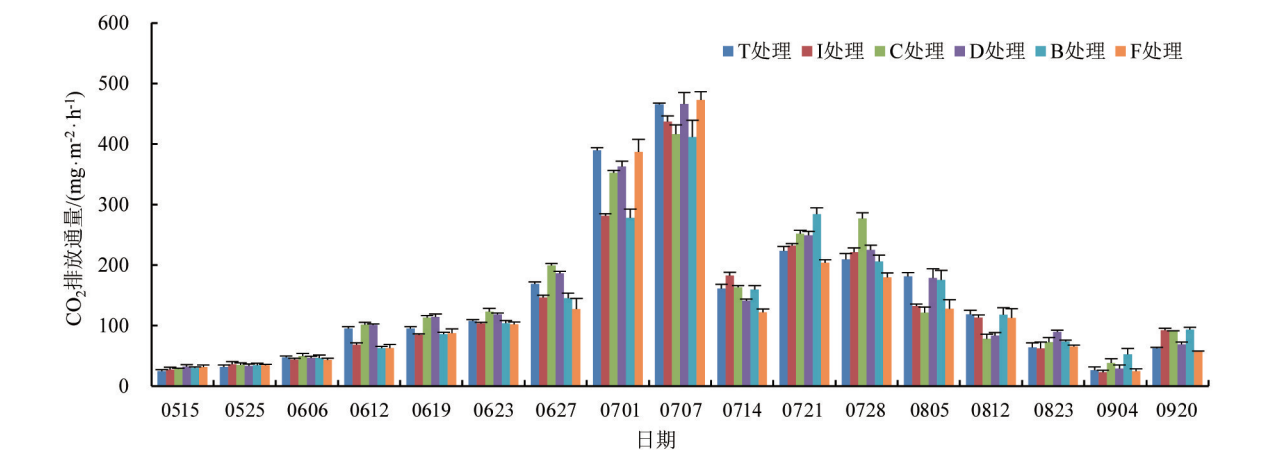


图2 不同处理CO₂排放通量

表3 CH₄排放通量与水层深度及土层温度的关系

碳排放	水层深度	5 cm 土层温度	10 cm 土层温度
CH ₄	0.278*	0.626**	0.684**
CO ₂	-0.188	0.573**	0.727**

注 “*”表示在 $P=0.05$ 水平上相关,“**”表示在 $P=0.01$ 水平上相关。

2.3 不同处理生育期耗水量和产量变化及增温效果

不同处理水稻生育期日均耗水强度见图3。由图3可知,各生育期不同灌溉模式下耗水强度较大时期分别为分蘖期、拔节期与抽穗期。而CK受灌水上限影响,与其余处理相比灌水量较大。黄熟期田面落干,主要受降雨影响。全生育期累计耗水量由低到高排序为C、D、T、I、B处理,分别较CK平均节水1 794.3~2 012.3、1 449.2~1 618.5,1 107.01~1 378.2、947.8~1 076.9、928.6~1 068.8 m³/hm²。

不同处理水稻产量见表4。由表4可知,各节水灌溉处理产量均高于CK,不同灌溉处理产量从高到低依次为I处理>B处理>D处理>C处理>T处理>CK,分别较CK平均增产761.94~3 712.04、490.41~2 859.71、1 724.25~2 957.72、949.25~1 923.54、79.86~1 687.95 kg/hm²。

表4 不同处理CH₄与CO₂增温潜势、产量及温室气体排放强度

处理	CH ₄ 排放量/(kg·hm ⁻²)	CO ₂ 排放量/(kg·hm ⁻²)	GWP/(kg·hm ⁻²)	产量/(kg·hm ⁻²)	GHGI/(kg·kg ⁻¹)
T	6 808.81±508.8cd	3 950.44±64.75cd	10 759.25±525.14c	8 200.53±423.25bc	1.31±0.05b
I	8 278.05±184.41b	3 849.95±43.8d	12 128.00±193.27b	9 611.27±1069.62a	1.30±0.14b
C	6 364.77±275.74d	4 289.36±33.72a	10 654.13±355.28c	8 822.59±84.38ab	1.21±0.04b
D	6 553.16±44.63cd	4 147.13±82.57b	10 700.29±109.38c	9 078.99±1166.25ab	1.19±0.18b
B	7 404.49±374.63c	3 989.43±81.19c	11 393.92±356.51c	9 302.96±872.42ab	1.23±0.08b
CK	12 734.16±990.65a	3 660.66±34.61e	16 394.82±964.85a	7 389.59±406.8c	2.22±0.21a

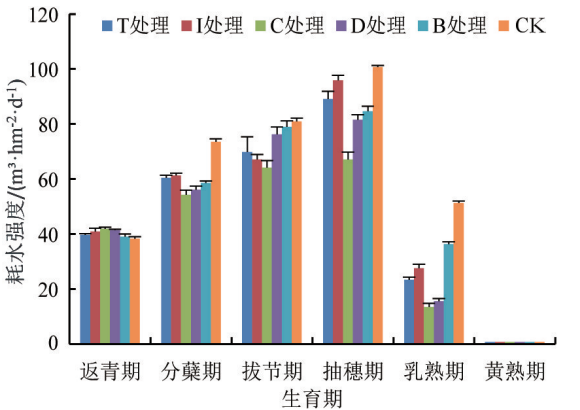


图3 不同处理各生育期日均耗水强度

不同灌溉处理稻田碳排放增温潜势(*GWP*)变化见表4。由表4可知,CK碳排放增温潜势与节水灌溉各处理存在一定的差异($P<0.05$)。增温潜势由高到低的排序为CK>I处理>B处理>T处理>D处理>C处理,5种节水灌溉增温潜势均低于CK。稻田*GHGI*由高到低的排序为CK>T处理>I处理>B处理>D处理>C处理,各节水灌溉处理间无显著差异,但与CK相比差异显著($P<0.05$)。且CK的*GHGI*显著高于节水灌溉。

3 讨 论

稻田 CH_4 主要是由厌氧性产 CH_4 微生物逐步分解土壤有机质而形成^[22],而 CH_4 的排放主要由液相扩散、气泡传输及植株体通气组织传输,其中通气组织传输所占比重最大^[27]。 CH_4 的排放及季节变化规律主要受稻田水分状况,土壤温度变化及植株生长过程影响。本研究中 CH_4 的排放通量与田间水层变化呈显著正相关关系($P<0.05$),说明长期淹水处理会促进稻田 CH_4 的排放,这与王孟雪等^[21]和岳进等^[28]的研究结果一致。并且 CH_4 的排放通量与5 cm土层及10 cm土层温度均极显著正相关($P<0.01$),说明随着土壤温度的升高,稻田 CH_4 排放量逐渐增大。水稻移栽后进入返青期,此时田间存在水层,土壤处于淹水状态,土壤温度较低且植株幼小通气组织不发达,故 CH_4 排放量较少。进入分蘖期后,气温逐渐升高,土壤温度也逐渐升高,为产 CH_4 微生物的生长提供了适宜的温度环境, CH_4 排放逐渐增大。至晒田期大量氧气进入,破坏了产 CH_4 微生物的生长环境并促进了 CH_4 的氧化,排放量减少。拔节期复水后产 CH_4 微生物再次活跃,土壤温度继续升高且水稻植株通气组织发育,为 CH_4 排放提供通道,排放量继续增大。至收获期随着反应底物的减少及黄熟期田面水层落干, CH_4 排放逐渐减少。本研究中节水灌溉处理全生育期 CH_4 排放量均低于CK,这与王楷等^[29]研究结果相似。可能是由于CK的水分管理相较于节水灌溉处理会显著降低土壤的氧化还原电位并使土壤中形成厌氧环境,为产 CH_4 微生物提供适宜的生存环境,且稻田在长期水分充足的情况下植株气孔开度增大,导致该处理下 CH_4 排放量显著高于其他处理。而节水灌溉处理田间处于干湿交替状态,通气状况良好,相较于CK田间土壤环境不利于产 CH_4 微生物生长。其中C处理田间水层干湿变化最频繁,田间土壤中氧气充足,抑制了产 CH_4 微生物的活性,且有利于 CH_4 的氧化,显著减少了 CH_4 排放。

本次试验观测的稻田 CO_2 的产生主要是由田间土壤呼吸与植株呼吸组成。各处理 CO_2 季节排放规律受土壤温度、水分及植株生长影响较大^[30]。本研究中观测的田间 CO_2 的排放与田间水层呈一定的负相关关系,但相关性不显著($P>0.05$)。且 CO_2 排放与5 cm土层及10 cm土层温度均存在极显著正相关($P<0.01$),这与邹建文等^[6]的研究结果一致。说明随着土壤温度的升高,稻田 CO_2 排放量逐渐增大。水稻移栽后的返青期,田面存在浅水层,抑制了氧气的进入,且土层温度较低,同时水稻植株幼小呼吸作用较弱,则 CO_2 排放量较小。分蘖期后随着土壤温度的升高稻田土壤呼吸逐渐增大,至分蘖末期,稻田土壤通气性最好,氧气供应充足,促进稻田土壤呼吸, CO_2 排放量也达到峰值,拔节期复水后气体交换受到抑制,排放量下降,但植株生长旺盛,植株呼吸排放的 CO_2 较多,至水稻收获前,田面落干,土壤呼吸作用小幅增大使得出现排放小高峰。本研究中各处理 CO_2 累计排放量存在差异($P<0.05$),CK田面长期处于有水层状态,不利于气体交换,抑制了土壤呼吸作用,且土壤通气状况较差,不利于 CO_2 向大气的扩散。杨士红等^[30]通过分析节水灌溉下水稻田土壤呼吸日变化得出,控灌稻田土壤呼吸速率大于CK,且稻田干湿交替有利于土壤呼吸进行,这与本研究结果一致。本研究中节水灌溉处理不同程度、不同频率下稻田处于干湿交替状态,其中,C处理自返青期后,田面土壤基本处于饱和含水率之下,气体交换量最大,促进了土壤呼吸,增大了土壤的通气性,从而增加了稻田 CO_2 的排放。I处理水稻全生育期 CO_2 的累计排放量最低,仅次于CK,可能是由于田面落干次数较其余节水灌溉处理少,产生气体交换相对较少,因此不利于土壤呼吸。

本研究中耗水量较大的时期为返青期、分蘖期、拔节期与抽穗期。返青期耗水量较大可能是由于棵间蒸发与渗漏,分蘖期后植株生长旺盛,叶面积增大,根系发达,且生育期历时较长,故耗水较大。拔节期与抽穗期虽历时较短,但水稻生理需水较大,故耗水量较大。乳熟—黄熟期蒸发量较少,故耗水量逐渐减少。此规律与于靖^[31]研究结果相似。不同处理间耗水量存在较大差异,可能与灌水上下限有关,如CK全生育期上限最大,田间蓄水量也最大,导致棵间蒸发与渗漏量较多。其中C处理灌水上下限为土壤饱和含水率及以下,显著减少了田面蒸发及渗漏量。其余处理也分别在不同程度较CK减少了水分的蒸发与渗漏。水稻节水灌溉技术有利于水稻的增产,不同的水分管理会对田间土壤环境产生影响,进而影响水稻最终产量^[23]。本研究中不同节水灌溉模式较CK均不同程度提高了产量,这与朱士江等^[32]研究结果相似。I处理与B处理产

量高于T、C、D处理产量,可能是由于分蘖前期I处理与B处理保留浅水层保温,有利于水稻幼苗生长,至抽穗期,充足水分有利于水稻生殖生长,提高产量^[33]。

4 结 论

1)水稻全生育期CH₄与CO₂排放呈现一定的季节变化规律,5种节水灌溉全生育期CH₄排放量均低于CK,5种节水灌溉中C处理最低,为187.2 kg/hm²;CO₂排放量则是CK低于5种节水灌溉处理,5种节水灌溉中I处理最低,为3 849.95 kg/hm²。

2)不同节水灌溉处理全生育期累计耗水量均低于CK,其中C处理耗水量最低,较CK平均节水1 794.3~2 012.3 m³/hm²。不同处理经济产量则为I处理最高,较CK平均增产761.94~3 712.04 kg/hm²。

3)CH₄的GWP高于CO₂的,综合二者的GWP,5种节水灌溉均低于CK,其中控制灌溉(C)处理二者GWP最低。而5种节水灌溉各处理的GHGI均低于CK,GHGI也以C处理最低。说明5种节水灌溉均有助于减少二者产生的温室效应,且控制灌溉(C)处理减排效果最明显。

4)T处理减排效果较好,但产量偏低;C处理节水效果最好,减排效果最明显,但产量相对较低;I处理增产效果最明显,但减排效果不理想;B处理在增产与减排方面介于二者之间,但耗水量较大。而D处理比较均衡,为试验条件下的最优处理。建议在今后的研究中明确减排、节水与增产的优先顺序,并对不同处理在水稻各生育期水分管理对3种指标的影响做进一步研究,以期使三者达到最优。

参考文献:

- [1] 李成芳,曹贵,汪金平,等.不同耕作方式下稻田土壤CH₄和CO₂的排放及碳收支估算[J].农业环境科学学报,2009,28(12):2 482-2 488.
- [2] 曹贵,李成芳,展茗,等.稻田管理措施对土壤碳排放的影响[J].中国农业科学,2011,44(1):93-98.
- [3] MENON S, DENMAN K L, BRASSEUR G, et al. Couplings between changes in the climate system and biogeochemistry[J]. Lawrn Brly Naonal Laboraory, 2008, 2007:499-587.
- [4] 王润莲,张志栋,刘景辉,等.施肥对免耕旱作燕麦田土壤温室气体排放的影响[J].灌溉排水学报,2016,35(12):55-59.
- [5] 马艳芹,钱晨晨,孙丹平,等.施氮水平对稻田土壤温室气体排放的影响[J].农业工程学报,2016,32(s2):128-134.
- [6] HANSEN J E, LACIS A A. Sun and dust versus greenhouse gases: an assessment of their relative roles in global climate change[J]. Nature, 1990, 346(6286):713-719.
- [7] MINAMIKAWA K, SAKAI N. The practical use of water management based on soil redox potential for decreasing methane emission from a paddy field[J]. Japan Agriculture Ecosystems & Environment, 2006, 116(3/4):181-188.
- [8] PIAO S, FANG J, CIAIS P, et al. The carbon balance of terrestrial ecosystems in China[J]. China Basic Science, 2009, 458(7241):1 009-1 013.
- [9] LAL R. Soil Carbon Sequestration Impacts on Global Climate Change and Food Security[J]. Science, 2004, 304(5677):1 623-1 627.
- [10] 郑洁敏,钟一铭,戈长水,等.不同施氮水平下水稻田温室气体排放影响研究[J].核农学报,2016,30(10):2 020-2 025.
- [11] 尹春梅,谢小立,王凯荣.稻草覆盖对冬闲稻田二氧化碳通量的影响[J].应用生态学报,2008,19(1):115-119.
- [12] 马煜春,周伟,刘翠英,等.秸秆腐熟剂对秸秆还田稻田CH₄和N₂O排放的影响[J].生态与农村环境学报,2017,33(2):159-165.
- [13] 胡志华,李大明,徐小林,等.不同有机培肥模式下双季稻田碳汇效应与收益评估[J].中国生态农业学报,2017,25(2):157-165.
- [14] 成臣,曾勇军,杨秀霞,等.不同耕作方式对稻田净增温潜势和温室气体强度的影响[J].环境科学学报,2015,35(6):1 887-1 895.
- [15] WISE M, CALVIN K, THOMSON A, et al. Implications of limiting CO₂ concentrations for land use and energy[J]. Science, 2009, 324(5931):1 183-1 186.
- [16] 邹建文,黄耀,宗良刚,等.稻田CO₂、CH₄和N₂O排放及其影响因素[J].环境科学学报,2003,23(6):758-764.
- [17] 李香兰,马静,徐华水,等.水分管理对水稻生长期CH₄和N₂O排放季节变化的影响[J].农业环境科学学报,2008,27(2):535-541.
- [18] 邹其会,任树梅,杨培岭,等.再生水与微咸水灌溉对土壤温室气体排放的影响研究[J].灌溉排水学报,2014,33(2):80-82.
- [19] 肖万川,贾宏伟,邱昕恺,等.水稻适雨灌溉对稻田CH₄和N₂O排放的影响[J].灌溉排水学报,2017,36(11):36-40.
- [20] 张亚捷,牛海山,汪诗平,等.不同灌溉方法对宁夏葡萄园土壤二氧化碳和甲烷排放的影响[J].灌溉排水学报,2016,35(1):17-21.
- [21] 王孟雪,张忠学,吕纯波,等.不同灌溉模式下寒地稻田CH₄和N₂O排放及温室效应研究[J].水土保持研究,2016,23(2):95-100.
- [22] 李茂柏,曹黎明,程灿,等.水稻节水灌溉技术对甲烷排放影响的研究进展[J].作物杂志,2010(6):98-102.
- [23] 姚林,郑华斌,刘建霞,等.中国水稻节水灌溉技术的现状及发展趋势[J].生态学报,2014,33(5):1 381-1 387.
- [24] 李道西,彭世彰,徐俊增,等.节水灌溉条件下稻田生态与环境效应[J].河海大学学报(自然科学版),2005,33(6):27-31.
- [25] 吴讷,侯海军,汤亚芳,等.稻田水分管理和秸秆还田对甲烷排放的微生物影响[J].农业工程学报,2016,32(s2):69-76.
- [26] 武岩,红梅,林立龙,等.3种土壤改良剂对河套灌区玉米田温室气体排放的影响[J].环境科学,2018(1):1-13.
- [27] 尉海东.稻田甲烷排放研究进展[J].中国农学通报,2013,29(18):6-10.
- [28] 岳进,黄国宏,梁巍,等.不同水分管理下稻田土壤CH₄和N₂O排放与微生物菌群的关系[J].应用生态学报,2003,14(2):2 273-2 277.
- [29] 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):1 012-1 020.

- [30] 杨士红, 王乙江, 徐俊增, 等. 节水灌溉稻田土壤呼吸变化及其影响因素分析[J]. 农业工程学报, 2015, 31(8):140-146.
- [31] 于靖. 寒区水稻需水规律及水分胁迫影响研究[D]. 哈尔滨:东北农业大学, 2013.
- [32] 朱士江, 孙爱华, 张忠学, 等. 不同节水灌溉模式对水稻分蘖、株高及产量的影响[J]. 节水灌溉, 2013(12):16-19.
- [33] 彭世彰, 蔡敏, 孔伟丽, 等. 不同生育阶段水分亏缺对水稻干物质与产量的影响[J]. 水资源与水工程学报, 2012, 23(1):10-13.

Effects of Different Irrigations on Carbon Emission, Water Consumption and Yield of Paddy Field in Cold Regions

ZHANG Zhongming^{1,2}, WANG Zhongbo^{1,2*}, ZHANG Zhongxue^{1,2}, WANG Xinliang^{1,2}

(1. School of Water Conservancy & Civil Engineering, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China;

2. Key Laboratory of Effective Utilization of Agricultural Water Resources, Ministry of Agriculture, Harbin 150030, China)

Abstract: 【Objective】 Soil water modulates all soil biochemical processes and plant growth. The objective of this paper is to investigate how different irrigations affect carbon emission, water consumption and the ultimate yield of paddy field in cold regions. 【Method】 Field experiments were conducted considering five irrigation methods: controlled irrigation (C), thin-shallow-wet-sunny irrigation (T), leaf-age mode irrigation (B), shallow-wet irrigation (I), alternate wet and dry irrigation (D), and the conventional irrigation used by local farmers (CK). During the growth season of the rice under each irrigation, the emissive fluxes of CH₄ and CO₂ from the paddy field were measured using the static trap-gas chromatography, in addition to water consumption and ultimate yield of the rice. 【Result】 In terms of saving water and reducing greenhouse emissions, The Treatment C appeared to be most efficient, saving water by 1 794.3~2 012.3 m³/hm² and increasing temperature potential by 10 654.13 kg/hm². But its associated yield was low, 8 822.59 kg/hm² only. In contrast, the Treatment I achieved a yield of 9 611.27 kg/hm², but at prices of increasing the temperature potential to 12 128 kg/hm². Taking all aspects into consideration, the alternate dry and wet irrigation appeared to be most efficient for reducing emission and saving water, without scarifying yield (9 077.99 kg/hm²); it also gave a temperature potential of 10 700.29 kg/hm², which was 1 449.2~1 618.5 m³/hm² lower than that in CK. 【Conclusion】 Our experimental results showed that in all irrigation methods we examined, alternate dry-wet irrigation is most suitable for reducing greenhouse gas emission and saving water while in the meantime maintaining a good yield.

Key words: rice; water-saving irrigation; yield; methane; carbon dioxide

责任编辑:陆红飞