

水氮运筹影响高留茬黑土稻田碳收支机理分析

张作合^{1,2} 张忠学³ 龚振平^{1,4} 薛里³ 周利军² 吕项龙²

(1. 东北农业大学作物学博士后科研流动站, 哈尔滨 150030; 2. 绥化学院农业与水利工程学院, 绥化 152061;
3. 东北农业大学水利与土木工程学院, 哈尔滨 150030; 4. 东北农业大学农学院, 哈尔滨 150030)

摘要: 为探明水氮运筹对稻田生态系统碳收支的影响, 开展大田试验, 设置浅湿干灌溉(D)和淹水灌溉(F)两种灌溉模式, 及 110 kg/hm² (当地施肥标准, N1)、99 kg/hm² (减氮 10%, N2) 和 88 kg/hm² (减氮 20%, N3) 3 个施肥水平, 观测高留茬稻田水稻收获后不同器官的干物质量及碳含量, 同时监测稻田 CO₂ 和 CH₄ 排放通量, 计算水稻净初级生产力(NPP)和稻田净生态系统初级生产力(NECB)。结果表明: 水氮运筹会影响稻株各器官干物质及碳含量, 所有处理中 DN2 处理 NPP 最大(8 918.02 kg/hm²), 浅湿干灌溉模式各处理 NPP 均大于淹水灌溉模式, 分别增加 12.13%、36.73%、8.01%; 浅湿干灌溉模式增加了稻田土壤呼吸的 CO₂ 排放通量, 减施氮肥则降低了 CO₂ 排放通量, 浅湿干灌溉减施氮肥降低了 CH₄ 排放通量; 两种灌溉模式下各处理 CO₂ 和 CH₄ 排放总量均随氮肥施用量减少而降低, 淹水灌溉模式下各处理 CH₄ 排放总量均显著高于浅湿干灌溉模式 ($P < 0.05$); 各处理稻田生态系碳净收支均为正值, 黑土区高留茬稻田生态系统表现为碳“汇”, 其中 DN2 处理 NECB 最高, 为 1 950.96 kg/hm²。综合来看, 浅湿干灌溉模式 + 减氮 10% 处理的稻田生态系统碳“汇”最强。研究可为寒地黑土保护提供理论参考和技术支撑。

关键词: 稻田; 水氮运筹; 净初级生产力; 净生态系统初级生产力; 碳收支

中图分类号: S511; S365

文献标识码: A

文章编号: 1000-1298(2024)06-0294-09

OSID:



Effect of Water and Nitrogen Management on Carbon Budget in Black Soil Rice Fields with High Residual Stubble

ZHANG Zuohe^{1,2} ZHANG Zhongxue³ GONG Zhenping^{1,4} XUE Li³ ZHOU Lijun² LÜ Xianglong²

(1. Post-doctoral Scientific Research Station of Crop Science, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China
2. College of Agriculture and Hydraulic Engineering, Suihua University, Suihua 152061, China
3. School of Water Conservancy and Civil Engineering, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China
4. College of Agriculture, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China)

Abstract: To investigate the impact of water and nitrogen management on the carbon budget of rice field ecosystems, field experiments were conducted, with two irrigation modes: dry-wet-shallow irrigation (D) and flooded irrigation (F), as well as three fertilization levels: 110 kg/hm² (local fertilization standard, N1), 99 kg/hm² (nitrogen reduction of 10%, N2), and 88 kg/hm² (nitrogen reduction of 20%, N3). The dry matter quality and carbon content of different organs of rice harvested in residual rice fields were observed, the CO₂ and CH₄ emissions fluxes from rice fields were simultaneously monitored, and the net primary productivity (NPP) of rice and the net ecosystem primary productivity (NECB) of rice fields were calculated. The results showed that water and nitrogen management would affect the dry matter and carbon content of various organs in rice plants. Among all treatments, the NPP of DN2 treatment was the highest (8 918.02 kg/hm²), and the NPP of dry-wet-shallow irrigation mode was greater than that of flooded irrigation mode, increasing by 12.13%, 36.73%, and 8.01%, respectively. The dry-wet-shallow irrigation mode increased the CO₂ emission flux of rice field soil respiration, reduced the application of nitrogen fertilizer reduced the CO₂ emission flux, and reduced the application of nitrogen

收稿日期: 2023-10-23 修回日期: 2023-11-24

基金项目: 国家重点研发计划项目(2022YFD2300303)、绥化学院 2021 年科研启动基金项目(SQ21009)、黑龙江省省属高等学校基本科研业务费一般项目(YWF10236230215)和黑龙江省大学生创新创业训练计划项目(202310236041)

作者简介: 张作合(1988—),男,博士后,绥化学院副教授,主要从事农业节水理论与技术研究, E-mail: zhangzuohe@126.com

通信作者: 张忠学(1967—),男,教授,博士生导师,主要从事节水灌溉理论与技术研究, E-mail: zhangzhongxue@163.com

fertilizer in dry-wet-shallow irrigation reduced the CH_4 emission flux. The total emissions of CO_2 and CH_4 from each treatment under both irrigation modes were increased with the decrease of nitrogen fertilizer application. The total emissions of CH_4 from each treatment under flooded irrigation mode were significantly higher than those under dry-wet-shallow irrigation mode ($P < 0.05$). The net carbon budget of the rice field ecosystem under each treatment was positive, and the rice field ecosystem with high residual stubble in the black soil area showed a carbon "sink", with the highest NECB of $1\,950.96 \text{ kg/hm}^2$ in the DN2 treatment. Overall, the carbon sink of the rice field ecosystem treated with dry-wet-shallow irrigation mode and 10% nitrogen reduction treatment was the strongest, and the research results can provide theoretical reference and technical support for the protection of black soil in cold regions.

Key words: paddy fields; water and nitrogen management; net primary productivity; net ecosystem primary productivity; carbon budget

0 引言

东北黑土区是世界四大黑土区之一,总面积 $1.09 \times 10^6 \text{ km}^2$,其中耕地面积约占总面积的 33%,是我国重要的商品粮生产基地,粮食产量约占全国总产量的 25%^[1-2]。虽然开垦初期黑土比较肥沃,但由于长期不合理的耕作和用养失调导致黑土肥力逐年下降,黑土发生退化,有机质锐减、耕作层变薄^[3-4],影响了东北黑土区农业的可持续发展,严重威胁了国家粮食安全。因而,开展黑土保护刻不容缓。长期秸秆焚烧和离田是引起农田生态系统碳排放和碳损失的主要原因之一^[5]。要想维持或增加黑土层厚度,关键是增加土壤有机碳含量,将农田生态系统由碳“源”向碳“汇”转变。因此,研究黑土区农田生态系统碳平衡问题具有重要意义。

近年来,水氮管理对稻株固碳及稻田碳排放的影响已成为研究热点^[6-11]。郑恩楠等^[7]研究发现,水分管理会对稻株干物质质量积累和转运产生影响,改变了植株的固碳量。类似地,邹桂花等^[8]研究也表明,应用节水灌溉增加了稻株干物质质量,使稻田有机碳的输入量增加,提升固碳能力。另外,通过氮肥管理也可以增加碳输入,从而提升土壤有机碳含量^[9]。曹晓强等^[10]研究东北黑土区不同灌溉模式下稻田温室气体排放,发现控制灌溉、间歇灌溉和湿润灌溉处理 CH_4 总排放量分别较淹灌处理降低 28.33%、25.91%、29.70%。此外,通过适量减施氮肥也能减少稻田 CH_4 排放量,同时保证水稻产量不降低^[11]。由此可见,通过合理的水氮管理可以提升农田固碳减排的能力,实现农田土壤碳平衡或碳“汇”。但上述研究仅单独研究水稻植株固碳和温室气体减排,并未系统地进行农田生态系统碳平衡问题研究。因此,为厘清黑土区农田生态系统碳收支状况,引入适当的农田生态系统固碳量和碳排放量评价方法与体系是非常必要的。

本文通过大田试验,观测高留残茬(33 cm)稻

田水稻收获后不同器官的干物质量及碳含量,同时考虑水稻本田生长期内凋落物和根际沉积物,计算水稻的净初级生产力(NPP);同步监测高留残茬稻田 CO_2 和 CH_4 排放通量,并计算二者排放总量和离田碳量(部分秸秆和籽粒),以及稻田土壤碳储量增量,得出净生态系统初级生产力(NECB),综合分析水氮运筹对高留残茬稻田土壤碳收支的影响,以期对寒地黑土保护提供理论参考和技术支撑。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验于 2021 年在黑龙江省庆安国家灌溉试验重点站($46^\circ 57' 28'' \text{N}$, $127^\circ 40' 45'' \text{E}$)进行,试验站位于绥化市庆安县平安镇赵富有村,是寒地黑土区典型的水稻种植区。地处第三积温带,有效积温 $2\,500^\circ\text{C}$ 左右,年平均降雨量 560 mm 以下,年平均蒸发量超过 750 mm,每年 5—9 月是水稻本田生长期,全年有 128 d 左右为无霜期。试验区耕层土壤基本理化性质:pH 值 6.42、有机质质量比 42.30 g/kg 、全氮质量比 1.52 g/kg 、全磷质量比 15.78 g/kg 、全钾质量比 19.92 g/kg 。

1.2 试验设计

开展氮肥施用量和灌水模式两因素全面试验,氮肥设置 110 kg/hm^2 (当地施肥标准,N1)、 99 kg/hm^2 (减氮 10%,N2)和 88 kg/hm^2 (减氮 20%,N3)3 个施用水平,并设置浅湿干灌溉(D)和淹水灌溉(F)两种灌溉模式,具体水分管理见表 1。共计 6 个处理,每个处理 3 次重复,布置的 18 个试验小区随机进行排列,试区面积为 25 m^2 。为防止各小区之间产生水肥交换,田埂嵌入深 40 cm 的隔水板。供试品种为已在当地推广种植的“龙庆稻 34”,插秧密度为 25 穴/m^2 。氮肥分 3 次施用,其中 50% 为基肥、20% 为蘖肥、30% 为穗肥; K_2O 施用量为 80 kg/hm^2 ,50% 为基肥、50% 为穗肥; P_2O_5 施用量为 45 kg/hm^2 ,作为基肥一次性施入。氮肥、磷肥、钾肥分别选用尿素(含 46.4% 的纯 N)、过磷酸钙(含 12% 的 P_2O_5)和

硫酸钾(含52%的 K_2O),并按实际用量进行换算。5月15日施基肥,5月25日进行水稻秧苗移栽(每

穴插秧4~5株),6月8日施蘖肥,7月6日施穗肥,9月26日进行考种测产。

表1 稻田各生育期水分管理

Tab.1 Water management during each growth period of rice field

灌溉模式	控制指标	返青期	分蘖期			拔节期	抽穗期	灌浆期	成熟期
			前期	中期	后期				
浅湿干灌溉(D)	蓄雨上限	50 mm	50 mm	50 mm	晒田	50 mm	50 mm	50 mm	落干
	灌水上限	30 mm	30 mm	30 mm	晒田	30 mm	30 mm	30 mm	落干
	灌水下限	θ_s	$0.7\theta_s$	$0.7\theta_s$	晒田	$0.8\theta_s$	$0.8\theta_s$	$0.7\theta_s$	落干
淹水灌溉(F)	蓄雨上限	50 mm	100 mm	100 mm	晒田	100 mm	100 mm	100 mm	落干
	灌水上限	30 mm	50 mm	50 mm	晒田	50 mm	50 mm	50 mm	落干
	灌水下限	0	0	0	晒田	0	0	0	落干

注: θ_s 为根层土壤饱和含水率,分蘖后期晒田10 d左右,稻田土壤含水率不低于 $0.6\theta_s$ 。

1.3 水稻净初级生产力计算

按照文献[12]的方法测定水稻植株根、茎鞘、叶、穗等部位的干物质量,并用总有机碳分析仪测定稻株各部位碳含量。

水稻本田生长期净初级生产力(NPP)参照文献[13]方法计算,计算式为

$$NPP = NPP_r + NPP_s + NPP_l + NPP_g + NPP_{lf} + NPP_{rd} \quad (1)$$

式中 NPP ——水稻本田生长期净初级生产力, kg/hm^2

NPP_r ——水稻本田生长期根的 NPP, kg/hm^2

NPP_s ——水稻本田生长期茎鞘的 NPP, kg/hm^2

NPP_l ——水稻本田生长期叶的 NPP, kg/hm^2

NPP_g ——水稻本田生长期穗的 NPP, kg/hm^2

NPP_{lf} ——水稻本田生长期内凋落物的 NPP (按水稻总干物质量的5%乘以叶碳含量进行估算^[14]), kg/hm^2

NPP_{rd} ——水稻本田生长期内根际沉积物的 NPP(按水稻总固碳量的11%进行估算^[15]), kg/hm^2

1.4 CO_2 、 CH_4 排放通量和总量

CO_2 和 CH_4 排放通量采用人工静态暗箱-气象色谱法定位观测。图1为静态箱结构图,静态箱由底座和箱体(前期用高60 cm箱体,后期用高120 cm箱体)构成,使用时按照图示结构安装。水稻本田生长期每隔5~7 d采样一次,在当天10:00—14:00之间进行,如遇强降雨推迟采样时间,而异常气温(极低温或极高温)则增加采样次数。每个处理在0~10 min、10~20 min、20~30 min分别采集一个样品,并记录静态箱箱内温度、地温和气温。气体样品12 h内送回实验室,用气相色谱检测 CO_2 和 CH_4 浓度。

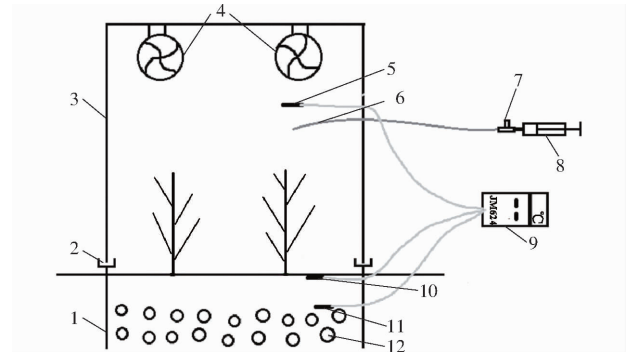


图1 静态箱结构示意图

Fig.1 Static box structure diagram

1. 底座 2. 密封水槽 3. 顶箱 4. 风扇 5. 箱内温度传感器
6. 采气管 7. 三通阀 8. 注射器 9. 测温表 10. 地表温度传感器
11. 10 cm 土壤温度传感器 12. 通水通气孔

CO_2 或 CH_4 排放通量计算公式为

$$F = \rho h \frac{dc}{dt} \frac{273}{273 + T} \frac{P}{P_0} \quad (2)$$

式中 F —— CO_2 或 CH_4 排放通量, $mg/(m^2 \cdot h)$

ρ ——标准状态下 CO_2 、 CH_4 密度,分别为 1.997、0.717 kg/m^3

h ——静态箱箱体有效高度, m

dc/dt ——静态箱箱内 CO_2 或 CH_4 浓度前后差值, $mL/(m^3 \cdot h)$

T ——静态箱箱内平均温度, $^{\circ}C$

P_0 ——标准大气压

P ——静态箱箱内气压,取 $P = P_0$

CO_2 或 CH_4 排放总量计算公式为

$$E_c = 0.01 \times 24 \times$$

$$\left[\frac{F_1 + F_n}{2} + \sum_{i=1}^n \frac{F_i + F_{i+1}}{2} (t_{i+1} - t_i) \right] \quad (3)$$

式中 E_c —— CO_2 或 CH_4 排放总量, kg/hm^2

n ——生育期观测次数

F_i ——第 i 次采样时 CO_2 或 CH_4 排放通量, $mg/(m^2 \cdot h)$

F_{i+1} ——第 $i+1$ 次采样时 CO_2 或 CH_4 排放通量, $\text{mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$

$t_{i+1} - t_i$ ——第 i 次到 $i+1$ 次采样的时间间隔, d

1.5 稻田土壤碳储量增量

插秧前及收获后采用“S”形取样法采集 0 ~ 20 cm 耕层土壤样品。自然风干后过 100 目筛, 采用土壤总有机碳分析仪测定土壤有机碳含量。

稻田土壤碳储量增量计算公式^[16]为

$$\Delta\text{SOC} = 100HB_D(\text{SOC}_h - \text{SOC}_0) \quad (4)$$

式中 ΔSOC ——稻田土壤碳增量, kg/hm^2

H ——土层厚度, 取 20 cm

B_D ——土层土壤容重, g/cm^3

SOC_h ——水稻收获时土壤有机碳质量比, g/kg

SOC_0 ——水稻插秧前土壤有机碳质量比, g/kg

1.6 稻田生态系统碳平衡估算

为估算短时间内农田生态系统碳平衡, 引入净生态系统初级生产力, 按照文献^[17]公式计算, 即

$$\text{NECB} = \text{NPP} + \Delta\text{SOC} - C_{sr} - C_{\text{CH}_4} - C_{lf} \quad (5)$$

式中 NECB ——净生态系统初级生产力(正值表示稻田生态系统净碳吸收, 负值表示稻田生态系统净碳损失), kg/hm^2

C_{sr} ——稻田土壤呼吸的碳排放量(包括微生物呼吸和根呼吸, 按 CO_2 排放总量的 12/44 计算), kg/hm^2

C_{CH_4} ——甲烷的碳排放量(按 CH_4 排放总量的 12/16 计算), kg/hm^2

C_{lf} ——水稻收获后离田碳量(包括 1/2 的茎鞘、全部的叶和穗所含碳量), kg/hm^2

1.7 测产

水稻成熟期进行产量 Y 测算, 各处理随机选 10 穴水稻用于考种, 干燥后用手持水分测试仪(John Deere, Moline IL, 美国)测定谷物水分, 计算含水率为 14.5% 时的经济产量。

2 结果与分析

2.1 水氮运筹下水稻成熟期各器官的干物质量及碳含量

水氮运筹下水稻成熟期不同器官的干物质量及碳含量(质量分数)见图 2(图中不同小写字母表示处理间差异显著($P < 0.05$))。相同施氮水平下, 浅湿干灌溉模式所有处理根系和叶片干物质量均大于淹水灌溉。浅湿干灌溉模式下, DN2 处理根系、茎鞘、叶片干物质量均大于 DN1 和 DN3 处理, 而穗的

干物质量 DN1 处理最大; 淹水灌溉模式下, 稻作不同器官干物质量均随着氮肥施用量的减少而降低。相同施氮水平下, 除 DN1 处理茎鞘外, 浅湿干灌溉模式下稻株不同器官碳含量均高于淹水灌溉。浅湿干灌溉模式下, DN2 处理根系、茎鞘、叶片的碳含量均高于 DN1 和 DN3 处理, 而穗碳含量 DN1 处理最大; 淹水灌溉模式下, 稻株不同器官碳含量均随着氮肥施用量的减少而降低。

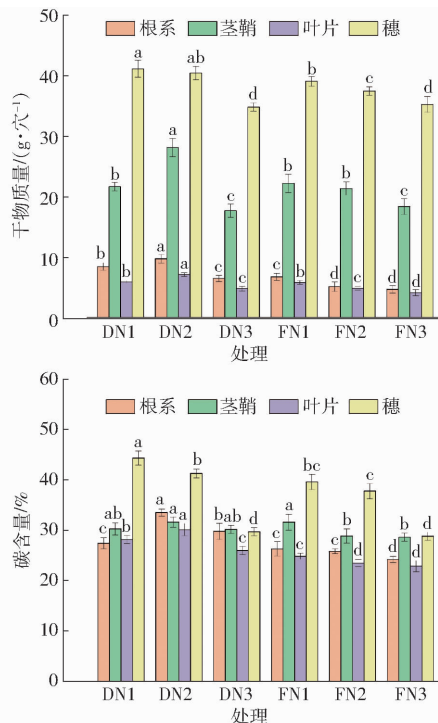


图2 水氮运筹下水稻不同器官干物质量及碳含量
Fig. 2 Dry matter mass and carbon content of different organs in rice under water and nitrogen management

2.2 水氮运筹下水稻净初级生产力

水氮运筹下水稻本田生长期的 NPP_r 、 NPP_s 、 NPP_l 、 NPP_g 、 NPP_{lf} 和 NPP_{rd} 见表 2。随着施氮量的减小, 淹水灌溉模式水稻本田生长期的 NPP_r 、 NPP_s 、 NPP_l 、 NPP_g 、 NPP_{lf} 和 NPP_{rd} 逐渐减小, 其中 FN1、FN2 处理的 NPP_g 较 FN3 处理显著增加 ($P < 0.05$); 随着施氮量的减小, 浅湿干灌溉模式的 NPP_g 逐渐降低, 而 NPP_r 、 NPP_s 、 NPP_l 、 NPP_{lf} 和 NPP_{rd} 都随施氮量减小呈先增大后减小的变化趋势, 其中 DN2 处理的 NPP_r 、 NPP_s 、 NPP_l 较其他处理显著增加 ($P < 0.05$)。各处理水稻的 NPP 在 5 035.82 ~ 8 918.02 kg/hm^2 范围内变化, NPP_g 占 NPP 的比例最高 (46.79% ~ 55.24%), NPP_{lf} 占 NPP 的比例最低 (3.10% ~ 3.81%)。相同施氮水平下, 浅湿干灌溉模式下各处理的 NPP 均大于淹水灌溉模式, 其中 DN1、DN2、DN3 各处理的 NPP 较 FN1、FN2、FN3 各处理分别增加 12.13%、36.73%、8.01%。

表2 水氮运筹下各处理的水稻净初级生产力

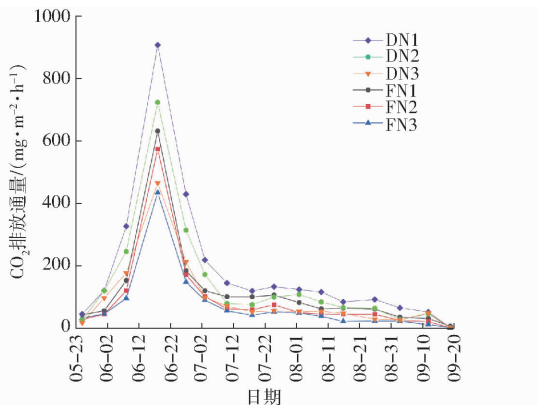
Tab.2 Net primary productivity of rice for different treatments under water and nitrogen management

处理	NPP_r	NPP_s	NPP_l	NPP_g	NPP_{lf}	NPP_{rd}	NPP
DN1	578.51 ^b	1 638.15 ^b	415.95 ^b	4 560.21 ^a	271.74 ^a	791.21 ^a	8 255.77 ^{ab}
DN2	814.18 ^a	2 223.23 ^a	534.99 ^a	4 172.33 ^{ab}	321.37 ^a	851.92 ^a	8 918.02 ^a
DN3	482.50 ^{bc}	1 334.09 ^c	310.94 ^c	2 585.77 ^c	207.22 ^b	518.46 ^{bc}	5 438.97 ^d
FN1	443.83 ^{bc}	1 754.44 ^b	361.38 ^{bc}	3 866.93 ^b	229.46 ^b	706.92 ^{ab}	7 362.95 ^b
FN2	331.01 ^c	1 540.03 ^{bc}	285.65 ^c	3 537.14 ^b	202.01 ^b	626.32 ^b	6 522.14 ^c
FN3	281.79 ^c	1 316.41 ^c	235.97 ^c	2 541.69 ^c	178.61 ^b	481.34 ^c	5 035.82 ^d

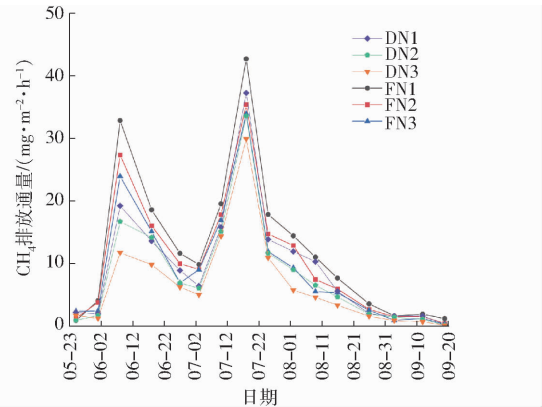
注:同列不同小写字母表示处理间差异显著($P < 0.05$),下同。

2.3 水氮运筹下稻田 CO_2 、 CH_4 排放通量及排放总量

水氮运筹下稻田土壤呼吸的 CO_2 排放通量见图3。水稻本田生长期两种灌溉模式的稻田土壤呼吸速率同一天达到最大值,整体上呈先增大后减小的趋势;所有处理各次观测的 CO_2 排放通量均为DN1处理最大。在水稻移栽后第25天(6月19日),稻田土壤呼吸产生的 CO_2 排放出现峰值,其中DN1处理 CO_2 排放通量最大(910.82 $mg/(m^2 \cdot h)$),较DN2、DN3处理分别增加25.27%、94.43%;DN1、DN2、DN3处理土壤呼吸的 CO_2 排放通量较FN1、FN2、FN3处理分别增加43.41%、25.95%、7.12%。研究表明,与淹水灌溉相比,应用节水灌溉技术可以增加水稻本田生长期稻田土壤呼吸的 CO_2 排放通量,减施氮肥则会降低 CO_2 排放通量。

图3 水氮运筹下稻田土壤呼吸的 CO_2 排放通量变化曲线Fig.3 CO_2 emission flux of paddy soil respiration under water and nitrogen management

水氮运筹下水稻本田生长期稻田 CH_4 排放通量见图4。水稻本田生长期两种灌溉模式的 CH_4 排放均出现两次峰值,晒田期 CH_4 排放通量降低。在水稻移栽后第15天(6月9日),稻田 CH_4 排放出现第1个峰值,其中FN1处理 CH_4 排放通量最大(32.85 $mg/(m^2 \cdot h)$),较FN2、FN3处理分别增加20.15%、37.16%;FN1、FN2、FN3处理 CH_4 排放通量较DN1、DN2、DN3处理分别增加70.92%、63.81%、104.53%;在水稻移栽后第55天(7月19

图4 水氮运筹下 CH_4 排放通量变化曲线Fig.4 CH_4 emission flux under different water and nitrogen management

日),稻田 CH_4 排放出现第2个峰值,其中FN1处理 CH_4 排放通量最大(42.71 $mg/(m^2 \cdot h)$),较FN2、FN3处理分别增加20.65%、25.84%;FN1、FN2、FN3处理 CH_4 排放通量较DN1、DN2、DN3处理分别增加28.74%、26.35%、9.09%。研究表明,应用节水灌溉技术或减施氮肥可以降低水稻本田生长期的 CH_4 排放通量。

水氮运筹下水稻本田生长期稻田 CO_2 排放总量和 CH_4 排放总量见表3。随着氮肥施用量的减少,两种灌溉模式下各处理土壤呼吸产生的 CO_2 排放总量逐渐降低,其中DN1处理 CO_2 排放总量较DN2、DN3处理分别增加31.31%、94.89%,FN1处理较FN2、FN3处理分别增加22.91%、56.18%;浅湿干灌溉模式下DN1、DN2处理土壤呼吸产生的 CO_2 排放总量显著高于其他处理($P < 0.05$),DN1、DN2、DN3处理 CO_2 排放总量较FN1、FN2、FN3处理分别增加60.39%、50.13%、28.54%。随着氮肥施用量的减少,两种灌溉模式下各处理 CH_4 排放总量逐渐降低,其中DN1处理 CH_4 排放总量较DN2、DN3处理分别增加14.81%、41.79%,FN1处理较FN2、FN3处理分别增加18.84%、35.43%;相同施氮水平下,淹水灌溉模式下各处理 CH_4 排放总量均显著高于浅湿干灌溉模式($P < 0.05$),FN1、FN2、FN3处理 CH_4 排放总量较DN1、DN2、DN3处理分别

表 3 水氮运筹下 CO₂ 排放总量和 CH₄ 排放总量Tab.3 Total CO₂ and CH₄ emissions under different water and nitrogen managementkg/hm²

参数	DN1	DN2	DN3	FN1	FN2	FN3
CO ₂ 排放总量	5 908.00 ^a	4 499.38 ^b	3 031.52 ^{cd}	3 683.62 ^e	2 996.96 ^{cd}	2 358.50 ^d
CH ₄ 排放总量	282.51 ^b	246.06 ^{bc}	199.24 ^c	372.79 ^a	313.69 ^{ab}	275.27 ^b

注:同行不同小写字母表示处理间差异显著($P < 0.05$)。

增加 31.96%、27.49%、38.16%。

2.4 水氮运筹下稻田生态系统碳净收支及产量

水氮运筹下水稻本田生长期稻田生态系统碳净收支见表 4, 其中气态碳损失仅占总碳损失的 18.65% ~ 23.93%, 而离田碳量占 76.07% ~ 81.35%, 这表明水稻收获后秸秆和籽粒的离田是碳损失的主要原因。所有处理的稻田生态系统碳净收支均为正值, 其中 DN2 处理稻田生态系统碳净收支显著高于其他处理 ($P < 0.05$)。随着施氮用量的减少, 浅湿干灌溉模式 NECB 呈现先增加后减小的趋势, 淹水灌溉模式 NECB 则逐渐降低, 其中 FN2、FN3 处理较 FN1 处理分别降低 11.76%、35.91%。随着施氮用量的减少, 水稻产量逐渐降低, 其中 DN1、DN2 处理产量显著高于其他处理 ($P < 0.05$)。综上所述, 水氮运筹下黑土区高留残茬稻田生态系统表现为碳“汇”, 其中 DN2 处理 NECB 最高, 为 1 950.96 kg/hm²。

表 4 水氮运筹下稻田生态系统碳净收支及产量

Tab.4 Net carbon budget of paddy ecosystem and yield under different water and nitrogen management

kg/hm²

处理	ΔSOC	C_{sr}	C_{CH_4}	C_{lf}	NECB	Y
DN1	287.92 ^a	1 611.27 ^a	211.88 ^b	5 795.23 ^a	925.30 ^b	9 922.62 ^a
DN2	263.52 ^a	1 227.10 ^b	184.55 ^{bc}	5 818.93 ^a	1 950.96 ^a	9 871.29 ^a
DN3	-39.04 ^c	826.78 ^c	149.43 ^c	3 563.75 ^c	859.97 ^b	8 395.13 ^d
FN1	129.32 ^b	1 004.62 ^{bc}	279.59 ^a	5 105.53 ^b	1 102.53 ^b	9 423.11 ^b
FN2	109.80 ^b	817.35 ^c	235.27 ^{ab}	4 592.79 ^{bc}	986.53 ^b	9 032.19 ^c
FN3	-24.40 ^c	643.23 ^d	206.45 ^b	3 435.86 ^c	725.87 ^c	8 503.72 ^d

3 讨论

农田生态系统是陆地生态系统的重要组成部分, 对维持全球碳平衡具有重要作用^[18]。稻田生态系统碳平衡是由碳输入和输出来决定的, 极易受人类活动和自然因素的影响^[19]。一方面, 可以通过增加稻田生态系统土壤有机碳的输入实现碳“汇”^[20]。稻田土壤有机碳的主要来源包括植物体(秸秆、根系及分泌物、凋落物)和施用有机肥(生物炭)等^[21]。由于农作物收获期短, 通常情况下籽粒和大部分秸秆会离田, 仅有根系及分泌物、凋落物以及残茬(秸秆)所含的碳留在土壤中^[22], 对提升土壤有机

碳含量的作用非常有限。为此需寻求其他方法如水氮管理等, 提高土壤有机碳含量, 从而使碳“汇”水平得到提升。另外, 可以通过人工输入碳的方法, 如施用有机肥、秸秆直接(炭化)还田、高留残茬等固碳技术^[23], 增加稻田土壤有机碳含量。另一方面, 也可以通过减少碳排放及损失实现稻田生态系统的碳“汇”。稻田生态系统中稻株固碳是通过光合作用将空气中的 CO₂ 固定^[24], 同样土壤中的碳也会以 CO₂、CH₄ 的形式排放, 或以径流等其他形式损失。本研究中, 水稻本田生长期土壤呼吸产生的 CO₂ 排放通量呈单峰变化, 且在水稻移栽后第 25 天出现, 这可能是由于此时期水稻处于快速生长期, 加之白天平均气温增加至 20℃ 以上, 造成土壤呼吸强度骤增。水稻本田生长期 CO₂ 排放总量随着氮肥减施而降低, 这可能是由于氮肥施用量的减少抑制了水稻植株根系的生长, 减少了根系分泌物和凋落物量, 使微生物反应底物减少, 同时氮肥减施也降低了矿质土壤有机碳的氧化分解速度, 从而抑制根呼吸和异养呼吸, 使得土壤总呼吸速率降低^[25-26]。另外, 在相同氮肥施用水平下, 浅湿干灌溉模式土壤呼吸产生的 CO₂ 排放通量高于淹水灌溉, 这与前人研究结果一致^[27]。CH₄ 排放出现两次峰值, 第 1 个峰值出现的主要原因可能是土壤呼吸产生大量 CO₂, 创造了厌氧环境, 加之产生 CH₄ 菌活性增强, 同时根系分泌物为 CH₄ 产生提供充足的反应底物, 导致 CH₄ 排放出现峰值^[28-29]; 而施加穗肥引起 CH₄ 第 2 个排放峰值的出现。淹水灌溉模式下各处理 CH₄ 排放总量均显著高于浅湿干灌溉模式 ($P < 0.05$), 主要原因是由于浅湿干灌溉模式增加了土壤通气性, 使土壤的氧化还原电位(Eh)提高, 导致 CH₄ 排放减少^[30-31]。随着施氮量的增加, 同一灌水模式下 CH₄ 排放总量随之增加, 原因可能是增加氮肥施入量提高了产甲烷菌的活性及丰度, 促进了 CH₄ 排放^[32]。从上面研究结果来看, 节水灌溉减施氮肥是 CH₄ 有效的减排手段。

近年来, 在森林、草地生态系统中人们利用总初级生产力(GPP)、净初级生产力(NPP)、净生态系统生产力(NEP)、净土壤碳收支(NSCB)和净生态系统碳收支(NECB)等方法对生态系统碳收支情况进行评价^[22], 其中一些方法也被引入稻田生态系统。

NEP是在一定时间内稻田生态系统生产的全部有机物总量减去稻田生态系统呼吸(含自养呼吸和异养呼吸)碳排放量,计算NPP时往往未考虑根际沉积物和凋落物所含的有机碳,造成NPP偏低;与NECB评价方法相比,计算NEP时未将稻田 CH_4 排放和离田碳量考虑进去^[33],总体来看利用NEP计算出的稻田生态系统碳收支值偏高,往往会表现为碳“汇”。NSCB是碳进出稻田土壤边界的差值,可以在一定程度上反映稻田土壤中有机碳的增减情况^[34],相对于NEP这种方法考虑的更全面,但与NECB评价方法相比,未考虑植株根系和残茬(秸秆)所含有有机碳的输入,可能会导致稻田生态系统碳收支被低估。与上述两种方法相比,NECB因考虑更全面所以更可靠,可以被作为一种评价短时间内生态系统碳收支的方法。本文主要研究稻田高留残茬情况下水氮运筹对稻田土壤碳收支的影响。研究结果发现,水氮运筹下各处理NECB均为正值,其中DN2处理表现出强碳“汇”,在计算总NPP时将稻田秸秆残茬所含碳量考虑在内,秸秆残茬NPP占总NPP的20%以上,若未将秸秆残茬所含碳量考虑在内,则NECB的计算结果将会出现负值,黑土稻田生态系统由碳“汇”向碳“源”转变,可见,秸秆残茬NPP会显著影响稻田生态系统碳平衡。由于固碳边界界定、管理措施、研究方法和数据的复杂性,对碳“汇”估算仍存在较大的不确定性^[35]。另外,通过碳“汇”被固定在农田土壤中的有机碳持续时间及稳定性尚存争议,加之种植结构的差异、研究区域以及农田管理措施的不同,进一步增大了农田土壤碳“汇”估算的不确定性。且NECB也只能用来评估短时间内农田生态系统碳收支情况,因此,农田生态系

统碳平衡评价方法需要进一步研究和深入探讨。

4 结论

(1)相同施氮水平下,浅湿干灌溉模式所有处理根系和叶片的干物质质量均大于淹水灌溉,稻株不同器官的碳含量均高于淹水灌溉(除DN1处理茎鞘外);淹水灌溉模式下,稻株不同器官的干物质质量和碳含量均随着氮肥施用量的减少而降低。各处理水稻的NPP在5 035.82~8 918.02 kg/hm²范围内变化,其中DN2处理最大。相同施氮水平下,浅湿干灌溉模式下各处理NPP均大于淹水灌溉模式,其中DN1、DN2、DN3各处理NPP较FN1、FN2、FN3各处理分别增加12.13%、36.73%、8.01%。

(2)水稻移栽后第25天,稻田土壤呼吸产生的 CO_2 排放出现峰值,其中DN1处理 CO_2 排放通量最大(910.82 mg/(m²·h));与淹水灌溉相比,浅湿干灌溉模式增加了稻田土壤呼吸的 CO_2 排放通量,减施氮肥则会降低 CO_2 排放通量。稻田 CH_4 排放出现两次峰值,分别在水稻移栽后第15天和第55天;应用节水灌溉技术或减施氮肥可以降低水稻本田生长期的 CH_4 排放通量。随着氮肥施用量的减少,两种灌溉模式下各处理土壤呼吸产生的 CO_2 和 CH_4 排放总量均逐渐降低;浅湿干灌溉模式的DN1、DN2处理土壤呼吸产生的 CO_2 排放总量显著高于其他处理($P < 0.05$),淹水灌溉模式下各处理 CH_4 排放总量均显著高于浅湿干灌溉模式($P < 0.05$)。

(3)水稻收获后秸秆和籽粒离田是碳损失的主要原因。所有处理的稻田生态系统碳净收支均为正值,黑土区高留残茬稻田生态系统表现为碳“汇”,其中DN2处理NECB最高,为1 950.96 kg/hm²。

参 考 文 献

- [1] 辛景树,汪景宽,薛彦东.东北黑土区耕地质量评价[M].北京:中国农业出版社,2017.
- [2] 敖曼,张旭东,关义新.东北黑土保护性耕作技术的研究与实践[J].中国科学院院刊,2021,36(10):1203-1215.
AO Man,ZHANG Xudong,GUAN Yixin. Research and practice of conservation tillage in black soil region of Northeast China [J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences,2021,36(10):1203-1215. (in Chinese)
- [3] 邹文秀,韩晓增,陆欣春,等.肥沃耕层构建对东北黑土区旱地土壤肥力和玉米产量的影响[J].应用生态学报,2020,31(12):4134-4146.
ZOU Wenxiu,HAN Xiaozeng,LU Xinchun,et al. Effects of the construction of fertile and cultivated upland soil layer on soil fertility and maize yield in black soil region in Northeast China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology,2020,31(12):4134-4146. (in Chinese)
- [4] 东北地理所在黑土耕层厚度影响作物养分吸收和产量研究中获进展[J].粮油与饲料科技,2021(6):50-51.
- [5] 韩晓增,王守宇,宋春雨,等.土地利用/覆盖变化对黑土生态环境的影响[J].地理科学,2005,25(2):203-208.
HAN Xiaozeng,WANG Shouyu,SONG Chunyu,et al. Effects of land use and cover change on ecological environment in black soil region [J]. Scientia Geographica Sinica,2005,25(2):203-208. (in Chinese)
- [6] 李道西.农田水管理下的稻田甲烷排放研究进展[J].灌溉排水学报,2010,29(1):133-135.
LI Daoxi. Variations of methane emission of padday fields under farmland water management [J]. Journal of Irrigation and Drainage,2010,29(1):133-135. (in Chinese)
- [7] 郑恩楠,朱银浩,胡建宇,等.水肥耦合对水稻生长土壤呼吸与无机氮的影响[J].农业机械学报,2021,52(9):272-279.

- ZHENG Ennan, ZHU Yin hao, HU Jianyu, et al. Coupling of water and fertilizer methods on growth of rice, soil respiration and inorganic nitrogen[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(9): 272–279. (in Chinese)
- [8] 邹桂花, 梅捍卫, 余新桥, 等. 不同灌水量对水、旱稻营养生长和光合特性及其产量的影响[J]. 作物学报, 2006, 32(8): 1179–1183.
- ZOU Guihua, MEI Hanwei, YU Xinqiao, et al. Effects of different water supply treatment on vegetative growth photosynthetic characteristics and grain yield in paddy and upland rice[J]. Acta Agronomica Sinica, 2006, 32(8): 1179–1183. (in Chinese)
- [9] 马子钰, 马文林. 施肥对中国农田土壤固碳影响效应研究[J]. 土壤, 2022, 54(5): 905–911.
- MA Ziyu, MA Wenlin. Effects of fertilization on soil organic carbon in cropland of China[J]. Soils, 2022, 54(5): 905–911. (in Chinese)
- [10] 曹晓强, 魏永霞, 吴昱, 等. 不同灌溉模式寒区稻田温室气体排放与土壤矿质氮特征[J]. 农业机械学报, 2022, 53(9): 305–313, 333.
- CAO Xiaoqiang, WEI Yongxia, WU Yu, et al. Effects of different irrigation methods on greenhouse gas emission and mineral nitrogen characteristics of paddy field in cold region[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(9): 305–313, 333. (in Chinese)
- [11] 周文涛, 龙文飞, 毛燕, 等. 节水轻简栽培模式下增密减氮对双季稻田温室气体排放的影响[J]. 应用生态学报, 2020, 31(8): 2604–2612.
- ZHOU Wentao, LONG Wenfei, MAO Yan, et al. Effects of increased planting density with reduced nitrogen fertilizer application on greenhouse gas emission in double-season rice fields under water saving and simple cultivation mode[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2020, 31(8): 2604–2612. (in Chinese)
- [12] 秦子元, 张忠学, 杜思澄, 等. 水氮耦合下黑土稻作碳氮磷累积分配和化学计量特征[J]. 农业机械学报, 2022, 53(10): 326–339.
- QIN Ziyuan, ZHANG Zhongxue, DU Sicheng, et al. Carbon, nitrogen and phosphorus accumulation and distribution and stoichiometric characteristics of rice in black soil under coupling of water and nitrogen[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(10): 326–339. (in Chinese)
- [13] HAQUE M M, KIM G W, KIM P J, et al. Comparison of net global warming potential between continuous flooding and midseason drainage in monsoon region paddy during rice cropping[J]. Field Crop Research, 2016, 193: 133–142.
- [14] MAKOTO K, JUN M, LU Yahai. Carbon cycling in rice field ecosystems in the context of input, decomposition and translocation of organic materials and the fates of their end products (CO_2 and CH_4) [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2004, 36(9): 1399–1466.
- [15] JONES D L, NGUYEN C, FINLAY R D. Carbon flow in the rhizosphere: carbon trading at the soil-root interface[J]. Plant and Soil, 2009, 321(1/2): 5–33.
- [16] 李娇, 田冬, 黄容, 等. 秸秆及生物炭还田对油菜/玉米轮作系统碳平衡和生态效益的影响[J]. 环境科学, 2018, 39(9): 4338–4347.
- LI Jiao, TIAN Dong, HUANG Rong, et al. Effects of straw and biochar addition on soil carbon balance and ecological benefits in a rape-maize rotation planting system[J]. Environmental Science, 2018, 39(9): 4338–4347. (in Chinese)
- [17] 张忠学, 薛里, 李铁成, 等. 水氮耦合下黑土区稻田生态系统碳源汇效应分析[J]. 农业机械学报, 2023, 54(8): 330–338.
- ZHANG Zhongxue, XUE Li, LI Tiecheng, et al. Effect of water and nitrogen coupling on carbon source and sink of paddy ecosystem in black soil area[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(8): 330–338. (in Chinese)
- [18] 崔凤娟. 免耕秸秆覆盖对旱作农田土壤呼吸和碳平衡的影响[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2011.
- CUI Fengjuan. Effects of no-tillage with straw mulching on soil respiration and carbon balance in dry farmland[D]. Huhhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2011. (in Chinese)
- [19] 张平平, 李艳红, 殷浩然, 等. 中国南北过渡带生态系统碳储量时空变化及动态模拟[J]. 自然资源学报, 2022, 37(5): 1183–1197.
- ZHANG Pingping, LI Yanhong, YIN Haoran, et al. Spatio-temporal variation and dynamic simulation of ecosystem carbon storage in the north-south transitional zone of China[J]. Journal of Natural Resources, 2022, 37(5): 1183–1197. (in Chinese)
- [20] 张作合. 黑土稻田施加生物炭对水氮利用及温室气体排放的影响[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2021.
- ZHANG Zuohe. Effects of biochar application on water and nitrogen utilization and greenhouse gas emissions in black soil paddy fields[D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2021. (in Chinese)
- [21] 唐海明, 李超, 肖小平, 等. 不同耕作模式对双季稻田生态系统净碳汇效应及收益的影响[J]. 生态环境学报, 2020, 29(2): 215–222.
- TANG Haiming, LI Chao, XIAO Xiaoping, et al. Influences of different tillage on net carbon sink and economic benefit of paddy ecosystem under double-cropping rice field[J]. Ecology and Environmental Science, 2020, 29(2): 215–222. (in Chinese)
- [22] 赵明月, 刘源鑫, 张雪艳. 农田生态系统碳汇研究进展[J]. 生态学报, 2022, 42(23): 9405–9416.
- ZHAO Mingyue, LIU Yuanxin, ZHANG Xueyan. A review of research advances on carbon sinks in farmland ecosystems[J].

- Acta Ecologica Sinica,2022,42(23):9405-9416. (in Chinese)
- [23] 高洪军,彭畅,张秀芝,等. 秸秆还田量对黑土区土壤及团聚体有机碳变化特征和固碳效率的影响[J]. 中国农业科学,2020,53(22):4613-4622.
GAO Hongjun, PENG Chang, ZHANG Xiuzhi, et al. Effects of corn straw returning amounts on carbon sequestration efficiency and organic carbon change of soil and aggregate in the black soil area[J]. Scientia Agricultura Sinica,2020,53(22):4613-4622. (in Chinese)
- [24] 韩羽,张忠学,杨桦,等. 水分胁迫对寒地水稻光合速率、气孔限制值及 WUE 的影响[J]. 灌溉排水学报,2019,38(增刊1):13-18.
HAN Yu, ZHANG Zhongxue, YANG Hua, et al. Effects of water stress on photosynthetic rate and stomatal restriction value of rice in cold region[J]. Journal of Irrigation and Drainage,2019,38(Supp. 1):13-18. (in Chinese)
- [25] 徐国伟,陆大克,孙会忠,等. 干湿交替灌溉与施氮耦合对水稻根际环境的影响[J]. 农业工程学报,2017,33(4):186-194.
XU Guowei, LU Dake, SUN Huizhong, et al. Effect of alternative wetting and drying irrigation and nitrogen coupling on rhizosphere environment of rice[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(4):186-194. (in Chinese)
- [26] 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.
YANG Shihong, WANG Yijiang, XU Junzeng, et al. Analysis of soil respiration change and its influencing factors in paddy field under water-saving irrigation[J]. Transactions of the CSAE,2015,31(8):140-146. (in Chinese)
- [27] YANG Shihong, LIU Xiaojing, LIU Xiaoyin, et al. Effect of water management on soil respiration and NEE of paddy fields in southeast China[J]. Plos One,2018,13(10):e0204597.
- [28] 丁维新,蔡祖聪. 土壤有机质和外源有机物对甲烷产生的影响[J]. 生态学报,2002,22(10):1672-1679.
DING Weixin, CAI Zucong. Effects of soil organic matter and exogenous organic materialson methane production in and emission from wetlands[J]. Acta Ecologica Sinica,2002,22(10):1672-1679. (in Chinese)
- [29] 吴家梅,纪雄辉,彭华,等. 不同有机肥对稻田温室气体排放及产量的影响[J]. 农业工程学报,2018,34(4):162-169.
WU Jiamei, JI Xionghui, PENG Hua, et al. Effects of different organic fertilizers on greenhouse gas emissions and yield in paddy soils[J]. Transactions of the CSAE, 2018,34(4):162-169. (in Chinese)
- [30] 肖亚楠,杨士红,刘晓静,等. 生物炭施用对节水灌溉稻田甲烷排放的影响[J]. 节水灌溉,2017(10):52-55,60.
XIAO Ya'nan, YANG Shihong, LIU Xiaojing, et al. Effect of biochar application on CH₄ emission from paddy field under water saving irrigation[J]. Water Saving Irrigation, 2017(10):52-55,60. (in Chinese)
- [31] 王孟雪,张忠学. 适宜节水灌溉模式抑制寒地稻田 N₂O 排放增加水稻产量[J]. 农业工程学报,2015,31(15):72-79.
WANG Mengxue, ZHANG Zhongxue. Optimal water-saving irrigation mode reducing N₂O emission from rice paddy field in cold region and increasing rice yield[J]. Transactions of the CSAE, 2015,31(15):72-79. (in Chinese)
- [32] 张作合,李铁成,张忠学,等. 水炭运筹下稻田痕量温室气体排放与水氮利用关系研究[J]. 农业机械学报,2022,53(8):379-387.
ZHNG Zuohe, LI Tiecheng, ZHANG Zhongxue, et al. Relationship between trace greenhouse gas emission and water and nitrogen utilization under water biochar management in paddy fields[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2022,53(8):379-387. (in Chinese)
- [33] 张忠学,李铁成,齐智娟,等. 水氮耦合对黑土稻田土壤呼吸与碳平衡的影响[J]. 农业机械学报,2020,51(6):301-308.
ZHNG Zhongxue, LI Tiecheng, QI Zhijuan, et al. Effects of water and nitrogen coupling on soil respiration and carbon balance in black soil paddy field[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(6):301-308. (in Chinese)
- [34] 张忠学,余佩哲,杜思澄,等. 不同水氮管理模式下黑土稻田碳固定与碳减排效应分析[J]. 农业机械学报,2023,54(4):366-375.
ZHANG Zhongxue, YU Peizhe, DU Sicheng, et al. Carbon fixation and carbon emission reduction effects of different water and nitrogen management modes in black soil paddy fields[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023,54(4):366-375. (in Chinese)
- [35] 程琨,潘根兴,田有国,等. 中国农田表土有机碳含量变化特征——基于国家耕地土壤监测数据[J]. 农业环境科学学报,2009,28(12):2476-2481.
CHENG Kun, PAN Genxing, TIAN Youguo, et al. Changes in topsoil organic carbon of China's cropland evidenced from the national soil monitoring network[J]. Journal of Agro-Environment Science,2009, 28(12):2476-2481. (in Chinese)