

水氮耦合下黑土区稻田生态系统碳源汇效应分析

张忠学^{1,2} 薛里^{1,2} 李铁成^{1,2} 齐智娟^{1,2} 王忠波^{1,2} 周欣^{1,2}

(1. 东北农业大学水利与土木工程学院, 哈尔滨 150030;

2. 东北农业大学农业农村部农业水资源高效利用重点实验室, 哈尔滨 150030)

摘要: 为探寻不同水氮耦合方式对黑土区稻田生态系统碳平衡的影响,于2022年开展田间试验,试验设置常规淹灌(F)和稻作控制灌溉(C)两种灌溉模式,同时设置常规施氮水平(N, 110 kg/hm²)、减氮10%水平(N1, 99 kg/hm²)、减氮20%水平(N2, 88 kg/hm²)3种施氮水平,分析不同水氮耦合方式对水稻各器官干物质、碳含量、稻田土壤呼吸CO₂排放通量和CH₄排放通量及两者排放总量的影响,并采用净生态系统碳收支(NECB)评价体系对黑土区稻田生态系统碳源汇效应进行分析。结果表明:不同水氮耦合方式下,各处理水稻穗固碳量与根固碳量分别占其总固碳量的26.61%~40.92%、24.63%~31.95%。相同施氮量下,稻作控制灌溉相较于常规灌溉能提高水稻各器官碳含量、干物质质量。在水稻全生育期内,各处理CH₄排放通量呈现先增加后减小再增加的变化趋势,均在分蘖期与拔节孕穗期出现峰值;各处理土壤呼吸CO₂排放通量呈现单峰变化,在分蘖期出现峰值。相同灌溉模式下,除返青期外,各处理CH₄排放通量与土壤呼吸CO₂排放通量均随施氮量的减少而降低。相同施氮量下,稻作控制灌溉与常规灌溉相比降低了土壤呼吸CO₂排放通量及排放总量,但提高了CH₄排放通量及排放总量。不同水氮耦合方式下,水稻净初级生产力为4 245.82~6 958.19 kg/hm²,穗净初级生产力最高、凋落物净初级生产力最低,分别占其水稻净初级生产力的42.88%~51.82%、3.19%~3.90%。相同施氮量下,稻作控制灌溉模式各处理水稻净初级生产力均大于常规灌溉模式,其中CN、CN1、CN2各处理净初级生产力较FN、FN1、FN2各处理分别增加11.17%、31.92%、2.98%。此外,不同水氮耦合方式下NECB均为正值,表示该黑土区稻田生态系统为净碳“汇”,其中CN1处理净碳收支(1 082.87 kg/hm²)显著高于其他各处理($P < 0.05$),这说明稻作控制灌溉模式下减氮10%处理的稻田生态系统碳“汇”强度最大。

关键词: 黑土区稻田; 水氮耦合; 净生态系统碳收支; 净初级生产力

中图分类号: S511.4⁺1; S365

文献标识码: A

文章编号: 1000-1298(2023)08-0330-09

OSID:



Effect of Water and Nitrogen Coupling on Carbon Source and Sink of Paddy Ecosystem in Black Soil Area

ZHANG Zhongxue^{1,2} XUE Li^{1,2} LI Tiecheng^{1,2} QI Zhijuan^{1,2} WANG Zhongbo^{1,2} ZHOU Xin^{1,2}

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

2. Key Laboratory of Efficient Utilization of Agricultural Water Resources, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China)

Abstract: A field experiment was conducted to explore the effects of different water and nitrogen coupling methods on the carbon balance of paddy ecosystem in 2022. Two irrigation modes (conventional flooding irrigation (F) and rice-controlled irrigation (C)) and three nitrogen application levels (conventional nitrogen application-level (N, 110 kg/hm²), 10% nitrogen reduction-level (N1, 99 kg/hm²) and 20% nitrogen reduction-level (N2, 88 kg/hm²)) were set up in the experiment. The effects of different water and nitrogen coupling on dry matter weight, carbon content, soil respiration CO₂ emission flux, CH₄ emission flux, and total emissions of both were analyzed. The net ecosystem carbon budget (NECB) evaluation system was used to analyze the carbon source and sink effect of ecosystem in black soil paddy fields. The results showed that under different water and nitrogen coupling modes, the carbon

收稿日期: 2023-05-24 修回日期: 2023-06-27

基金项目: 国家重点研发计划项目(2022YFD2300303)

作者简介: 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

通信作者: 齐智娟(1987—),女,副教授,博士生导师,主要从事土壤水热运移和节水灌溉理论与技术研究,E-mail: zhijuan.qi@neau.edu.cn

sequestration of rice panicles and roots accounted for 26.61% ~40.92% and 24.63% ~31.95% of the total carbon sequestration, respectively. Under the same nitrogen application rate, C can improve the carbon content and dry matter weight of rice organs compared with F. During the whole growth period of rice, the CH₄ emission flux of each treatment showed a trend of increasing first, then decreasing before increasing, and peaked at tillering stage and jointing-booting stage. The soil respiration CO₂ emission flux of each treatment showed a single peak variation, and the peak appeared at the tillering stage. Under the same irrigation mode, except for the regreening period, the CH₄ emission flux and soil respiration CO₂ emission flux of each treatment was decreased with the decrease of nitrogen application rate. Under the same nitrogen application rate, compared with rice control irrigation, F reduced soil respiration CO₂ emission flux and total emission, but increased CH₄ emission flux and total emission. Under different water and nitrogen coupling modes, the net primary productivity of rice was 4 245.82 ~6 958.19 kg/m², the net primary productivity of panicle was the highest, and the net primary productivity of litter was the lowest, accounting for 42.88% ~51.82% and 3.19% ~3.90% in the net primary productivity of rice, respectively. Under the same nitrogen application rate, the net primary productivity of rice in each treatment of C mode was higher than that of conventional irrigation mode. Compared with FN, FN1 and FN2 treatments, the net primary productivity of CN, CN1 and CN2 treatments was increased by 11.17%, 31.92% and 2.98%, respectively. In addition, the NECB of different water and nitrogen coupling modes was positive, which indicated that the paddy ecosystem in the black soil area was a net carbon “sink”. The net carbon budget of CN1 treatment (1 082.87 kg/hm²) was significantly higher than that of other treatments (*P* < 0.05), which indicated that the carbon “sink” intensity of paddy ecosystem with 10% nitrogen reduction under controlled irrigation mode was the largest.

Key words: paddy fields in black soil area; water and nitrogen coupling; net ecosystem carbon budget; net primary productivity

0 引言

农田生态系统作为陆地生态系统的重要组成部分,在全球碳收支中占有重要地位。一方面,区域内植物通过光合作用固定大气中的 CO₂;另一方面,农田生态系统向空气中释放一定量的 CO₂和 CH₄,是农田生态系统碳输入和碳排放的主要过程^[1]。与此同时,受到自然因素和人类活动的影响^[2],农田生态系统将朝着碳“源”或“汇”的方向发展。因此,在倡导低碳农业的环境下,深入探究黑土区农田生态系统碳源汇问题具有重要意义。

据统计,每年植物通过光合作用固定的 CO₂约占大气 CO₂总量的 10%^[3],而土壤通过呼吸作用向大气中排放的 CO₂占全球温室气体排放总量的 10% ~12%^[4]。已有研究表明,土壤水分条件与肥料供应状况是影响植物固碳量与农田碳排放量的重要因素^[5],适宜的水肥管理模式有利于提升农田固碳减排的能力。陈绍民等^[6]指出,在不同施肥水平下,增加灌水量使植物周年总固碳量增加 2.48% ~5.96%。郑恩楠等^[7]研究表明,不同水分管理模式会影响水稻干物质质量积累和转运,进而影响水稻的固碳能力。孙潇等^[8]研究表明,相较于控制灌溉,常规灌溉降低了土壤呼吸速率。但王建林等^[9]研究表明,在水分亏缺的情况下,随着灌溉量的增加,会使土壤呼吸速率增强,但灌溉量达到临界值后继

续增加反而会抑制土壤呼吸。江原等^[10]研究表明氮肥的施入会抑制土壤呼吸。而张超等^[11]认为随着施氮量的增加,土壤呼吸速率会呈现先增加后减小的变化趋势。综上所述,不同的水氮管理方式对农田碳排放与碳固定的影响结论不一致。

近年来,学者多采用净土壤碳收支 (NSCB)、净生态系统生产力 (NEP) 和净生态系统碳收支 (NECB) 3 种评价体系对生态系统碳固定量与碳排放量进行估算与分析。其中 NSCB 评价体系是以土壤系统为边界,相较于 NECB 未考虑地上部植株固碳量;而 NEP 评价体系虽然是以整个生态系统为边界,但该体系相较于 NECB 未将农田土壤的 CH₄排放造成的碳损失考虑在内。NECB 作为一种更加准确评价短时间内生态系统碳固定量与碳排放量的评价体系被研究者采纳。目前,NECB 研究主要集中在森林^[12]、草地^[13]等,对东北黑土区稻田生态系统研究鲜有报道,而东北黑土区在保障我国粮食安全及实现区域“碳中和”具有重要地位。因此,使用 NECB 评价体系对东北黑土区稻田生态系统进行研究具有重要意义。

本文通过 2022 年田间试验,对比不同水氮耦合方式下水稻收获后各器官干物质质量、碳含量,分析生育期内土壤呼吸 CO₂ 排放通量、CH₄ 排放通量及两者排放总量,计算不同水氮耦合方式下水稻各器官净初级生产力、凋落物及根际沉积物净初级生产力,

采用 NECB 对黑土区稻田生态系统固碳减排能力进行评价,以期为探寻节水减排固碳的水肥管理模式提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验于 2022 年 5—9 月在黑龙江省水稻灌溉试验站进行,该试验站位于黑龙江省绥化市庆安县平安镇(46°57'28"N,127°40'45"E),是典型的寒地黑土分布区。试验地多年平均降雨量为 550 mm,多年平均水面蒸发量 750 mm,无霜期 128 d,有效积温 2 532℃,作物水热生长期为 156 ~ 171 d。气候特征属寒温带大陆性季风气候,水稻生育期内空气温度和降雨量变化如图 1 所示。土壤 pH 值为 6.44,耕层土壤(0 ~ 20 cm)基础肥力为:有机质质量比 44.9 g/kg、全氮质量比 1.52 g/kg、全磷质量比 147.26 g/kg、全钾质量比 18.86 g/kg。

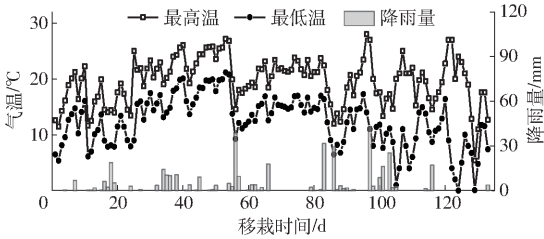


图 1 水稻生育期内空气温度和降雨量的日变化曲线
Fig.1 Daily variation curves of air temperature and rainfall during rice growth period

1.2 试验设计

试验施氮量设置 3 个水平:常规施氮水平(N, 110 kg/hm²)、减氮 10% 水平(N1,99 kg/hm²)、减氮 20% 水平(N2,88 kg/hm²);两种灌溉模式分别为稻作控制灌溉(C)和常规灌溉模式(F),水分管理标准见表 1。当田面无水层后,稻作控制灌溉模式各小区采用土壤水分测定仪(TPIME-PICO64/32 型)测定土壤含水率,若土壤含水率低于灌水下限,开始

表 1 不同灌水模式水分管理标准

Tab.1 Water management of different irrigation modes

灌溉方式	返青期	分蘖初期	分蘖中期	分蘖末期	拔节孕穗期	抽开期	乳熟期	黄熟期
稻作控制灌溉	0 ~ 30 mm	0 ~ 30 mm	0.7θ _s ~ 30 mm	晒田	0.8θ _s ~ 30 mm	0.8θ _s ~ 30 mm	0.7θ _s ~ 30 mm	落干
常规淹灌	0 ~ 30 mm	10 ~ 50 mm	10 ~ 50 mm	晒田	10 ~ 50 mm	10 ~ 50 mm	10 ~ 50 mm	落干

注:θ_s为根层土壤饱和含水率;“~”前数据为水分控制下限,“~”后数据为水分控制上限。

灌水至水量上限,同时记录灌水量。试验共设置 6 个处理,每个处理 3 次重复,共计 18 个试验小区,每个小区随机排列,每个小区面积为 100 m² (10 m × 10 m)。各小区之间田埂向地下内嵌深 40 cm 的塑料板,以防止各小区的水肥交换。供试水稻品种为当地主栽品种“龙庆稻 8”,种植密度为 24 穴/m²。氮肥按照基肥、蘖肥、穗肥比例为 4.5:2:3.5 施用;钾肥(K₂O)施入量 80 kg/hm²,在水稻移栽前与水稻 8.5 叶龄分两次施入,前后比例为 1:1;磷肥(P₂O₅)施入量 45 kg/hm²,作为基肥一次性施入。

1.3 水稻收获后各器官干物质量、碳含量、净初级生产力测定

在水稻成熟期于各小区随机选取具有代表性的 3 穴水稻,将水稻叶、茎鞘、穗、根分开后,用去离子水冲洗干净,放入 105℃干燥箱中、鼓风条件下杀青 30 min,随后 85℃干燥 48 h 至恒定质量,并称量。干燥后的样品使用球磨机粉碎处理,过 80 目筛后混匀,于东北农业大学农业农村部水资源高效利用重点实验室使用总有机碳分析仪(Elementar vario TOC)测定水稻各器官碳含量。

水稻净初级生产力计算公式为^[14]

$$NPP = NPP_{grain} + NPP_{stem} + NPP_{leaf} + NPP_{root} + NPP_{litter} + NPP_{rhizodeposit}$$
 (1)

式中 NPP——水稻净初级生产力,kg/hm²
NPP_{grain}——水稻穗净初级生产力,kg/hm²
NPP_{stem}——水稻茎初净级生产力,kg/hm²
NPP_{leaf}——水稻叶鞘净初级生产力,kg/hm²
NPP_{root}——水稻根净初级生产力,kg/hm²
NPP_{litter}——水稻生育期内凋落物净初级生产力,kg/hm²
NPP_{rhizodeposit}——水稻根际沉积物净初级生产力,kg/hm²

其中 NPP_{litter} 依据水稻干物质量 5% 乘以水稻叶的碳含量进行估算^[15],NPP_{rhizodeposit} 按照作物总固碳量的 11% 进行估算^[16]。

1.4 排放量测定方法

采用人工静态暗箱法原位采集气样,观测不同处理下各生育期内 CH₄ 与 CO₂ 的排放量。静态室由有机玻璃制成的密闭性无底箱体和不锈钢底座组成,透明有机玻璃箱体外包裹一层铝箔,以减小太阳照射引起箱内温度变化,箱体内配备空气温度计和电风扇。在水稻移植前,将不锈钢基座嵌入每个地块中,顶部留有密封槽。在进行测量时,注入水以密封凹槽,以

避免箱体内的气体和外部空气交换,每隔 10 min(0、10、20、30 min)抽取箱内气体进行浓度测量,并使用 50mL E-Switch 气袋通过橡胶管收集 4 个气体样品,用于每次 CH₄ 浓度测量,并且记录箱内温度变化。依据水稻实际生长情况,将采样箱设计成分节组合式标准箱,由顶箱、中段箱和地箱组成。中段箱和顶箱容积相同,几何尺寸为 25 cm×25 cm×50 cm,当水稻植株生长较高时可适时加中段箱。水稻自移栽后第 1 天起每 7 d 采气 1 次,气体采集时间为 10:00—12:00,如遇降雨天气延后进行样本采集,随后带回实验室用气相色谱仪(GC-2010PLUS 型,日本岛津)进行检测分析 CH₄ 浓度。土壤呼吸速率的测定同样采用上述方法,在每个小区内嵌入不锈钢底座,且底座周围是无植株生长的裸地,并且在试验期间不定期清理底座内的活体植物,以保证测定的准确。

CH₄与 CO₂的排放通量计算公式为

$$F = (273\rho hdc/dt)/(273 + T) \tag{2}$$

式中 F ——CH₄、CO₂排放通量,mg/(m²·h)
 ρ ——标准状态 CH₄、CO₂的密度,其中 CH₄为 0.717 kg/m³,CO₂为 1.997 kg/m³
 h ——静态箱内有效高度,m
 dc/dt ——气体浓度差值,mL/(m³·h)
 T ——采样时静态箱内平均空气温度,℃

CH₄与 CO₂的排放总量计算公式为

$$E = \sum_{i=1}^n 24[(F_{i+1} + F_i)/2](D_{i+1} - D_i)/100 \tag{3}$$

式中 E ——CH₄、CO₂排放总量,kg/hm²
 F_i ——第 i 次采样时 CH₄、CO₂ 排放通量,mg/(m²·h)
 F_{i+1} ——第 $i+1$ 次采样时 CH₄、CO₂ 排放通量,mg/(m²·h)
 D_i ——第 i 次采样时间,d
 D_{i+1} ——第 $i+1$ 次采样时间,d

1.5 稻田生态系统碳平衡估算

采用净生态系统碳收支(NECB)对短时间内农业生态系统碳平衡进行估算,计算公式为^[17]

$$NECB = NPP - R_{H-c} - Harvest_{-c} - CH_{4-c} \tag{4}$$

式中 NPP ——净初级生产力,kg/hm²
 R_{H-c} ——土壤呼吸碳排放量,kg/hm²
 CH_{4-c} ——甲烷碳排放量,kg/hm²
 $Harvest_{-c}$ ——水稻成熟期收获后离田碳量,kg/hm²

其中 R_{H-c} 按照 CO₂排放总量的 12/44 进行计算,CH_{4-c}按照 CH₄排放总量的 12/16 进行计算。

NECB 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。

1.6 数据分析

采用 Excel 2016 进行数据处理,Origin 9.0 软件进行作图,并利用 SPSS 17.0 进行统计分析,采用 Duncan 法进行多组样本间差异显著性分析,统计显著性假设为 $P=0.05$ 。

2 结果与分析

2.1 不同水氮耦合方式对收获后水稻各器官干物质量、碳含量的影响

不同水氮耦合方式下水稻收获后各器官干物质量、碳含量如图 2(图中不同小写字母表示同种器官不同处理间差异显著($P<0.05$))所示。试验结果表明,常规灌溉模式下,水稻各器官干物质量均随施氮量的减少而减少;稻作控制灌溉模式下,CN 处理各器官干物质量均大于 CN2 处理;CN1 处理叶、茎、根的干物质量均大于其他施氮处理。当施氮量相同时,除 CN1 处理穗干物质量低于 FN1 处理外,稻作控制灌溉模式下各处理不同器官干物质量均大于常规灌溉模式。稻作控制灌溉模式下,各处理水稻各器官碳含量均随氮量的减小呈现先增加后减小的变化趋势,其中 CN1 处理叶、茎、根、穗碳含量较 CN2 处理分别增加 15.83%、4.8%、12.46%、39.94%;常规灌溉模式下,各处理水稻各器官碳含量均随施氮量的减小而减小,除 FN 处理穗碳含量显著高于 FN2 处理外($P<0.05$),其余处理各器官含碳量不存

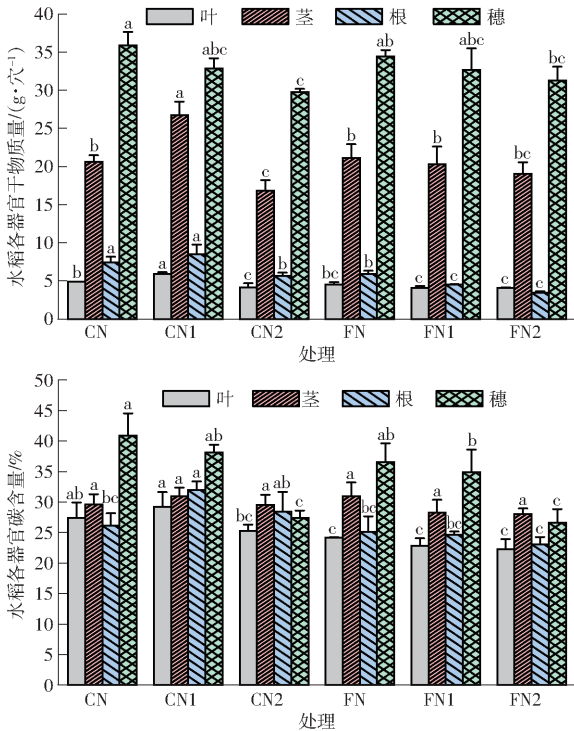


图2 不同水氮耦合方式下水稻各器官干物质量和碳含量
Fig. 2 Dry matter mass and carbon content of rice organs under different water and nitrogen coupling modes

在显著性差异 ($P > 0.05$)。相同施氮量下,除 CN 处理茎碳含量低于 FN 处理外,稻作控制灌溉模式下各器官碳含量均高于常规灌溉模式,其中 CN、CN1 处理叶碳含量显著高于 FN、FN1 处理 ($P < 0.05$)。

2.2 不同水氮耦合方式对稻田土壤呼吸 CO₂ 排放通量及排放总量的影响

不同水氮耦合方式下稻田土壤呼吸 CO₂ 排放通量如图 3 所示。试验结果表明,不同水氮耦合方式对土壤呼吸 CO₂ 排放通量及排放总量均有影响。两种灌溉模式下,水稻各生育期土壤呼吸 CO₂ 排放通量呈先增大后减小的趋势。自返青期开始,由于水稻根系不发达,导致土壤呼吸速率较弱,随着肥料的施入与土壤温度的升高的影响,各处理土壤 CO₂ 排放通量速率逐渐增加。到分蘖期,各处理土壤呼吸 CO₂ 排放通量均达到最大值,其中 CN 处理较 CN1、CN2 处理分别增加 44.13%、100.01%;FN 处理较 FN1、FN2 处理分别增加 15.95%、43.45%。相同灌溉模式下,随着施氮量的减少,微生物活性降低,进而导致土壤呼吸 CO₂ 排放通量随施氮量的减少而降低;相同施氮量下,因稻作控制灌溉模式为土壤微生物提供了良好的氧气环境,微生物代谢较快,使得稻作控制灌溉模式下各处理土壤呼吸 CO₂ 排放通量均大于常规灌溉模式。

不同水稻耦合方式下稻田土壤呼吸 CO₂ 排放总量见表 2。结果表明,稻作控制灌溉模式下 CN 处理土壤呼吸 CO₂ 排放总量显著高于其他各处理

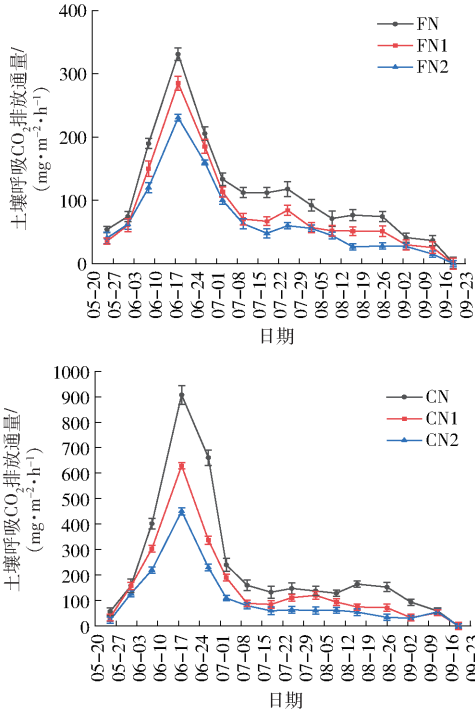


图 3 不同水氮耦合方式下土壤呼吸 CO₂ 排放通量
Fig.3 Soil respiration CO₂ fluxes under different water and nitrogen coupling modes

($P < 0.05$);当施氮量相同时,稻作控制灌溉模式下各处理土壤呼吸 CO₂ 排放总量均大于常规灌溉模式;相同灌溉模式下,各处理土壤呼吸 CO₂ 排放总量均随施氮量的减少而降低,其中 CN 处理较 CN1、CN2 处理分别增加 51.00%、116.36%,FN 处理较 FN1、FN2 处理分别增加 30.24%、59.55%。

表 2 不同水氮耦合方式下 CH₄排放总量和 CO₂排放总量

Tab.2 Total CH ₄ and CO ₂ emissions under different water and nitrogen coupling modes						kg/hm ²
处理	FN	FN1	FN2	CN	CN1	CN2
CH ₄	399.81 ^a	341.24 ^b	301.52 ^d	309.12 ^c	257.30 ^e	210.87 ^f
CO ₂	2 444.48 ^c	1 876.87 ^e	1 532.07 ^f	5 147.86 ^a	3 409.06 ^b	2 379.29 ^d

注:同行数字后不同小写字母表示不同处理间差异显著 ($P < 0.05$)。

2.3 不同水氮耦合方式对稻田 CH₄排放通量及排放总量的影响

不同水氮耦合方式下稻田 CH₄排放通量如图 4 所示。试验结果表明,不同水氮耦合下各处理 CH₄排放通量变化规律相似,在整个生育期呈现两个峰值,且在晒田期出现最低值。在返青期由于两种灌溉模式都处于淹水状态,且土壤温度较低,各处理 CH₄排放通量都处于较低水平,随着蘖肥施入,稻田土壤温度逐渐升高,水稻根系迅速生长且释放出大量根系分泌物,进而为产甲烷菌提供丰富的底物,在分蘖期出现第 1 个峰值,其中 FN 处理较 FN1、FN2 处理分别增加 20.13%、37.12%;CN、CN1、CN2 各处理较 FN 处理分别减

少 70.87%、140.33%、242.51%。由于晒田期改变了稻田土壤的水分含量与氧气环境,进而为甲烷氧化菌提供较好的条件,各处理 CH₄排放通量又降至同一较低水平。晒田期结束后,复水施入穗肥,进而使得各处理 CH₄排放通量再次达到峰值,其中 FN 处理较 FN1、FN2 处理分别增加 20.66%、25.82%;CN、CN1、CN2 各处理较 FN 处理分别减少 14.59%、23.32%、37.93%。相同施氮量下,除返青期外,稻作控制灌溉模式下各处理 CH₄排放通量均小于常规灌溉;相同灌溉模式下,随着施氮量的减少,各处理稻田 CH₄排放通量逐渐降低。

不同水氮耦合方式下稻田 CH₄排放总量如表 2 所示。结果表明,常规灌溉模式中 FN 处理 CH₄

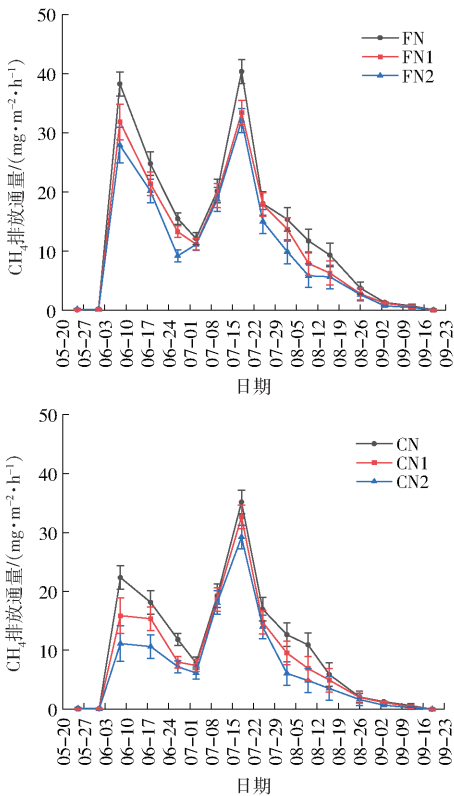


图 4 不同水氮耦合方式下 CH₄排放通量

Fig.4 CH₄ emission fluxes under different water and nitrogen coupling modes

排放总量显著高于其他各处理 ($P < 0.05$) ; 相同施氮量下, 常规灌溉模式各处理 CH₄排放总量均显著高于稻作控制灌溉模式 ($P < 0.05$) ; 相同灌溉模式

下, 各处理 CH₄排放总量均随施氮量的减少而降低, 其中 CN 处理较 CN1、CN2 处理分别增加 20.14%、46.59%, FN 处理较 FN1、FN2 处理分别增加 17.16%、32.59%。

2.4 不同水氮耦合方式对收获后水稻净初级生产力的影响

不同水稻耦合方式下水稻收获后不同器官、凋落物、根际沉积物净初级生产力如表 3 所示。试验结果表明, 各处理水稻净初级生产力范围为 4 245.82 ~ 6 958.19 kg/hm²。常规灌溉模式下, 水稻收获后不同器官、凋落物、根际沉积物净初级生产力均随施氮量的减小而减小, 其中 FN、FN1 处理穗的净初级生产力显著大于 FN2 处理 ($P < 0.05$) ; 稻作控制灌溉模式下, 除穗的净初级生产力随施氮量的减少而降低外, 水稻收获后不同器官、凋落物、根际沉积物净初级生产力均随施氮量的减小呈先增大后减小变化, 其中 CN1 处理茎、叶、根、凋落物净初级生产力均显著大于其他各处理 ($P < 0.05$)。相同施氮量下, 稻作控制灌溉模式下各处理净初级生产力均大于常规灌溉模式, 其中 CN、CN1、CN2 各处理净初级生产力较 FN、FN1、FN2 各处理分别增加 11.17%、31.92%、2.98%。综合来看, 穗净初级生产力最高、凋落物净初级生产力最低, 分别占其水稻净初级生产力的 42.88% ~ 51.82%、3.19% ~ 3.90%。

表 3 不同水氮耦合方式下收获后水稻净初级生产力

Tab.3 Net primary productivity of rice after harvest under different water and nitrogen coupling modes							kg/hm ²
处理	<i>NPP</i> _{grain}	<i>NPP</i> _{stem}	<i>NPP</i> _{leaf}	<i>NPP</i> _{root}	<i>NPP</i> _{litter}	<i>NPP</i> _{rhizodeposit}	<i>NPP</i>
FN	3 017.28 ^b	1 568.11 ^b	261.64 ^c	355.76 ^{cd}	191.16 ^c	572.30 ^{bc}	5 966.27 ^b
FN1	2 733.12 ^b	1 376.48 ^{bc}	224.42 ^c	265.55 ^{de}	168.62 ^{cd}	505.95 ^c	5 274.16 ^c
FN2	1 998.08 ^c	1 279.36 ^{bc}	216.69 ^c	191.92 ^e	154.29 ^d	405.46 ^d	4 245.82 ^d
CN	3 523.78 ^a	1 464.18 ^{bc}	320.43 ^b	463.95 ^b	225.91 ^b	634.95 ^{ab}	6 633.23 ^{ab}
CN1	2 984.12 ^b	1 986.52 ^a	412.96 ^a	652.72 ^a	258.95 ^a	663.88 ^a	6 958.19 ^a
CN2	1 957.03 ^c	1 192.15 ^c	249.36 ^c	386.82 ^{bc}	170.80 ^{cd}	416.39 ^d	4 372.58 ^d

注: 同列数字后不同小写字母表示不同处理间差异显著 ($P < 0.05$), 下同。

2.5 不同水氮耦合方式对稻田净生态系统碳收支的影响

不同水氮耦合方式下稻田生态系统净碳收支如表 4 所示。试验结果表明, 各处理稻田净生态系统碳收支均为正值, 表示该黑土区稻田生态系统为净碳汇, 其中 CN1 处理净碳收支显著高于其他各处理 ($P < 0.05$)。常规灌溉模式下, NECB 均随施氮量减小而降低, 其中 FN1、FN2 处理较 FN 处理分别降低 23.97%、6.28%; 稻作控制灌溉模式下, NECB 随着施氮量的减小呈现先增加后减小的变化趋势。各处

表 4 不同水氮耦合方式下稻田净生态系统碳收支

Tab.4 Net ecosystem carbon budget of paddy field under different water and nitrogen coupling modes						kg/hm ²
处理	<i>NPP</i>	<i>R_{H-c}</i>	<i>Harvest_{-c}</i>	<i>CH_{4-c}</i>	<i>NECB</i>	
FN	5 966.27 ^b	666.68 ^c	4 324.33 ^{ab}	349.83 ^a	625.43 ^b	
FN1	5 274.16 ^c	511.90 ^d	3 875.20 ^b	298.58 ^b	588.47 ^{bc}	
FN2	4 245.82 ^d	417.84 ^d	3 067.68 ^c	263.83 ^c	496.47 ^d	
CN	6 633.23 ^{ab}	1 403.96 ^a	4 820.34 ^a	270.47 ^c	138.46 ^e	
CN1	6 958.19 ^a	929.74 ^b	4 720.44 ^a	225.13 ^d	1082.87 ^a	
CN2	4 372.58 ^d	648.90 ^c	3 001.17 ^c	184.51 ^e	538.00 ^{cd}	

理土壤呼吸排放的碳占碳排放总量的 63.16% ~ 83.84%, 这表明在稻田生态系统中土壤呼吸是碳损失的主导因素。综合来看, 不同水氮耦合方式下该黑土区稻田生态系统均表现出较强的碳“汇”能力, 其中 CN1 处理最高, 为 1 082.87 kg/hm²。

3 讨论

农田生态系统碳库是受人类活动干扰最频繁的碳库, 对维持全球碳平衡具有重要作用^[18]。稻田生态系统碳平衡包括碳输入和碳输出两个过程, 增强水稻固碳能力与减少温室气体碳排放, 是实现稻田固碳减排的重要途径。本研究结果表明, 相同施氮量下, 稻作控制灌溉模式下各处理不同器官干物质质量和碳含量均大于常规灌溉模式, 原因可能是稻作控制灌溉模式相比于常规灌溉模式而言, 稻田土壤含水率较低且通气性较好, 氧气含量高, 进而促进了水稻根系呼吸, 改善了水稻根际环境^[19], 有利于延缓水稻后期根系衰老, 促进水稻后期生长。稻作控制灌溉模式下各施氮处理土壤呼吸 CO₂ 排放通量与 CH₄ 排放通量均大于常规灌溉模式, 一方面, 稻作控制灌溉频繁的复水和退水过程会促进土壤进行呼吸作用^[20], 与此同时, 稻作控制灌溉可以增加土壤通气性, 提高土壤氧化还原电位, 减少还原性物质的积累, 从而减少 CH₄ 排放^[21], 另一方面, 也可能是稻作控制灌溉模式下水稻将部分气孔关闭以保持水分减少蒸腾, 减少稻田植株 CH₄ 气体排放^[22]。同时, 本研究还表明, 相同灌溉模式下, 土壤呼吸 CO₂ 排放通量与 CH₄ 排放通量均随施氮量的增加而增大, 原因可能是一方面由于增加氮肥输入会促进有土壤有机质的氧化分解^[23], 另一方面氮肥输入量增加也会提高土壤微生物活性与产甲烷菌群丰度, 促进二者的活动和生长, 从而提高土壤呼吸 CO₂ 排放通量与 CH₄ 排放通量^[24-25]。但王毅勇等^[26]认为, 氮肥施用会使土壤呼吸作用增强, 改善了根系的氧气供应, 进而使产甲烷菌活性减弱, 从而降低 CH₄ 排放, 这可能与稻田理化性质有关, 高氮的输入增加了土壤酸度进而抑制了微生物活性, 从而减小 CH₄ 的排放^[27]。

不同水氮耦合方式下各处理 NECB 均为正值, 表明东北黑土区稻田生态系统为净碳吸收, 表现出较强的碳“汇”功能。而 KIM 等^[28]在温带稻田研究表明该地区稻田生态系统呈现出弱碳“汇”, 这可能是由于黑土区土地肥沃, 天然有机质含量高, 微生物种类多及活性高^[29], 促进作物生长, 进而提高稻田生态系统的碳输入量, 且本研究将水稻留田残茬净

初级生产力考虑在内, 残茬净初级生产力占总初级生产力的 26.52% ~ 32.16%, 如果未将水稻残茬净初级生产力考虑在内, 本研究各处理 NECB 将呈现负值, 黑土区稻田生态系统将会由碳“汇”变成碳“源”, 由此可见, 水稻残茬净初级生产力对稻田生态系统碳平衡具有重要作用。常规灌溉模式下, NECB 随着施氮量的减小而减小, 而稻作控制灌溉模式下, 随着施氮量的减小 NECB 则呈现先增大后减小的变化趋势, 并在减氮 10% 时达到最大值, 原因在于, 在稻田生态系统碳输入上, 在一定范围内减施氮肥会提高作物的固碳能力, 过度减氮会抑制植株光合, 并且地上部各器官有机质积累量下降, 进而影响干物质质量与碳含量^[30], 同时, 稻作控制灌溉模式相较于常规灌溉模式, 其能够节水保肥, 提高水稻各器官的氮素积累量与氮肥利用效率^[31], 且降低氮素淋溶量^[32], 所以稻作控制灌溉模式下相较于常规施氮量减少 10% 仍能满足水稻生长需求, 在稻田生态系统碳输出上, 相同灌水模式下, 各处理的碳排放量损失均随施氮量的减小而减小, 且 CN 处理的碳排放量损失较 CN1、CN2 处理分别高 44.99%、100.91%, 因此, 在常规淹灌和稻作控制灌溉两种不同灌溉制度下 NECB 随着施氮量的减小呈现不同的变化规律。此外, NECB 作为生态系统碳平衡的评价体系也存在一些不足, 该体系只准确评估短时间内生态系统碳收支, 对于长期观测生态系统碳收支时往往会忽视土壤碳库的变化, 因此还需进一步完善 NECB 评价体系, 提出能够长期观测农田生态系统碳收支的计算方法。

4 结论

(1) 稻作控制灌溉模式下水稻根、茎、叶碳含量均随施氮量的减小而呈现先增加后减小的变化趋势; 常规灌溉模式下, 不同处理水稻根、茎、叶、穗碳含量均随施氮量的减小而减小。相同施氮量下, 稻作控制灌溉模式下各处理不同器官干物质质量和碳含量均大于常规灌溉模式。

(2) 从返青期开始, 不同处理土壤呼吸 CO₂ 排放通量呈现先增加后减小的趋势; 各处理 CH₄ 排放通量在整个生育期内呈现两个峰值, 并在晒田期出现最低值。相同灌溉模式下, 土壤呼吸 CO₂ 排放总量与 CH₄ 排放总量均随着施氮量的减小而降低。相同施氮量下, 稻作控制灌溉下各处理土壤呼吸 CO₂ 排放总量均大于常规灌溉模式, 而 CH₄ 排放总量小于常规灌溉模式。

(3) 不同处理下黑土区稻田 NECB 均为正值, 表示该黑土区稻田生态系统为净碳“汇”, 其中 CN1 处

理最高,为 1 082.87 kg/hm²。常规灌溉模式下,NECB 和 NPP 均随着施氮量的减小而减小,而稻作控制灌溉模式下,随着施氮量的减小二者则呈现先增大后减小的变化趋势,并均在减氮 10% 时达到最大值。

参 考 文 献

[1] 梁尧,韩晓增,乔云发,等. 小麦-玉米-大豆轮作下黑土农田土壤呼吸与碳平衡[J]. 中国生态农业学报,2012,20(4):395-401.
LIANG Yao,HAN Xiaozeng,QIAO Yunfa,et al. Soil respiration and carbon budget in black soil of wheat - maize - soybean rotation system[J]. Chinese Journal of Ecological Agriculture,2012,20(4):395-401. (in Chinese)

[2] 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)

[3] RAICHW W, SCHLESINGERW H. The global carbon dioxide flux in soil respiration and its relationship to vegetation and climate[J]. Tellus B,1992,44(2):19.

[4] 张玉铭,胡春胜,张佳宝,等. 农田土壤主要温室气体(CO₂、CH₄、N₂O)的源/汇强度及其温室效应研究进展[J]. 中国生态农业学报,2011,19(4):966-975.
ZHANG Yuming, HU Chunsheng, ZHANG Jiabao, et al. Research advances on source/sink intensities and greenhouse effects of CO₂, CH₄ and N₂O in agricultural soils[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2011, 19(4): 966-975. (in Chinese)

[5] 夏桂敏,王瑞敏,黄旭,等. 调亏灌溉下施氮量对农田 CO₂ 固定排放和花生产量的影响[J]. 农业机械学报,2022,53(6):349-358.
XIA Guimin,WANG Ruimin,HUANG Xu,et al. Effects of nitrogen application rates on CO₂ sequestration and emissions, and yield in peanut field under regulated deficit irrigation[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2022,53(6):349-358. (in Chinese)

[6] 陈绍民,杨硕欢,张保成,等. 不同水肥条件下夏玉米/冬小麦农田生态系统碳平衡研究[J]. 农业机械学报,2021,52(5):229-238.
CHEN Shaomin,YANG Shuohuan,ZHANG Baocheng,et al. Carbon balance in summer maize /winter wheat farmland ecosystem under different water and fertilizer conditions[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2021,52(5):229-238. (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] 孙潇,郑一丹,王鑫程,等. 生物炭施用和灌溉模式对稻田土壤呼吸日变化的影响[J]. 中国农村水利水电,2019(10):127-131.
SUN Xiao,ZHENG Yidan,WANG Xincheng,et al. The effects of biochar addition and irrigation mode on diurnal variation of soil respiration rate of paddy fields[J]. China's Rural Water Conservancy and Hydropower,2019(10):127-131. (in Chinese)

[9] 王建林,赵风华,欧阳竹. 灌溉量对灌浆期麦田土壤呼吸的影响[J]. 华北农学报,2010,25(3):186-189.
WANG Jianlin,ZHAO Fenghua,OUYANG Zhu,et al. Effects of the irrigation quantity on soil respiration in wheat field in filling stage[J]. Acta Agriculturae Boreal-Sinica,2010,25(3):186-189. (in Chinese)

[10] 江原,甘小玲,曹丰丰,等. 短期氮磷添加对祁连山亚高山草地土壤呼吸组分的影响[J]. 环境科学,2023,44(4):2283-2292.
JIANG Yuan,GAN Xiaoling,CAO Fengfeng,et al. Effects of short-term nitrogen and phosphorus addition on soil respiration components in a subalpine grassland of Qilian mountains[J]. Environmental Science,2023,44(4):2283-2292. (in Chinese)

[11] 张超,刘志凯. 稻田不同施氮量对土壤呼吸的效应分析及施氮量方案寻优[J]. 水利科学与寒区工程,2019,2(3):33-38.
ZHANG Chao,LIU Zhikai. Effect analysis of different nitrogen fertilizer on soil respiration and optimization of nitrogen fertilizer scheme in rice field[J]. Water Conservancy Science and Cold Region Engineering,2019,2(3):33-38. (in Chinese)

[12] CAMERON C, HUTLEY L B, FRIESS D A. Estimating the full greenhouse gas emissions offset potential and profile between rehabilitating and established mangroves[J]. Global Warming Focus,2019,665:419-431.

[13] CHEN Si,YUE Ping,HAO Tianxiang,et al. Responses of net ecosystem carbon budget and net global warming potential to long-term nitrogen deposition in a temperate grassland[J]. Catena,2023,225:107015.

[14] 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.

[15] 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 (CO₂ and CH₄)[J]. Soil Biology and Biochemistry,2004,36(9):1399-1466.

[16] 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.

[17] LI Tiecheng,NIE Tangzhe,CHEN Peng,et al. Carbon budget of paddy fields after implementing water-saving irrigation in Northeast China[J]. Agronomy,2022,12(6):1481.

[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] 陈松文,刘天奇,曹凑贵,等. 水稻生产碳中和现状及低碳稻作技术策略[J]. 华中农业大学学报,2021,40(3):3-12.
CHEN Songwen,LIU Tianqi,CAO Cougui,et al. Carbon neutrality status of rice production and low carbon rice cultivation technology strategy[J]. Journal of Huazhong Agricultural University,2021,40(3):3-12. (in Chinese)

[20] 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)

[21] 张忠学,韩羽,齐智娟,等. 秸秆还田下水氮耦合对黑土稻田 CH₄ 排放与产量的影响[J]. 农业机械学报,2020,51(7):254-262.
ZHANG Zhongxue,HAN Yu,QI Zhijuan,et al. Effect of water and nitrogen coupling on CH₄ emission and rice yield in black soil paddy fields with straw returned to field[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2020,51(7):254-262. (in Chinese)

[22] 李晶,王明星,王跃思,等. 农田生态系统温室气体排放研究进展[J]. 大气学,2003(4):740-749.
LI Jing,WANG Mingxing,WANG Yuesi,et al. Research progress on greenhouse gas emissions from farmland ecosystem[J]. Aerology,2003(4):740-749. (in Chinese)

[23] 马晨蕾,裴自伟,李伏生. 灌溉方式及施氮对双季稻田甲烷排放及有机碳组分的影响[J]. 华南农业大学学报,2021,42(5):41-49.
MA Chenlei,PEI Ziwei,LI Fusheng. Effects of irrigation methods and nitrogen application on methane emission and organic carbon fractions in double cropping paddy fields[J]. Journal of South China Agricultural University,2021,42(5):41-49. (in Chinese)

[24] 田祥宇,涂利华,胡庭兴,等. 华西雨屏区苦竹人工林土壤呼吸各组分特征及其温度敏感性[J]. 应用生态学报,2012,23(2):293-300.
TIAN Xiangyu,TU Lihua,HU Tingxing,et al. Characteristics of soil respiration components and their temperature sensitivity in *Pleiblastus amarus* plantation in Rainy Area of West China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology,2012,23(2):293-300. (in Chinese)

[25] 王秋彬,于卫昕,王年一,等. 吉林省主要旱田土壤有机碳氮和碳氮比的空间分布特征[J]. 安徽农业科学,2022,50(23):40-42.
WANG Qiushan,YU Weixi,WANG Nianyi,et al. Spatial distribution characteristics of soil organic carbon and nitrogen and carbon-nitrogen ratio in main drylands of Jilin Province[J]. Anhui Agricultural Sciences,2022,50(23):40-42. (in Chinese)

[26] 王毅勇,陈卫卫,赵志春,等. 三江平原寒地稻田 CH₄、N₂O 排放特征及排放量估算[J]. 农业工程学报,2008,24(10):170-176.
WANG Yiyong,CHEN Weiwei,ZHAO Zhichun,et al. Emission characteristics and emission estimation of CH₄ and N₂O in paddy fields in Sanjiang Plain[J]. Transactions of the CSAE,2008,24(10):170-176. (in Chinese)

[27] 胡敏杰,全川,邹芳芳. 氮输入对土壤甲烷产生、氧化和传输过程的影响及其机制[J]. 草业学报,2015,24(6):204-212.
HU Minjie,TONG Chuan,ZOU Fangfang. Effects of nitrogen input on soil methane production, oxidation and transport and its mechanism[J]. Acta Prataculturae Sinica,2015,24(6):204-212. (in Chinese)

[28] KIM G W,JEONG S T,KIM P J,et al. Influence of nitrogen fertilization on the net ecosystem carbon budget in a temperate mono-rice paddy[J]. Geoderma,2017,306:58-66.

[29] 张孝存. 东北典型黑土区流域侵蚀-沉积对土壤质量的影响[D]. 西安:陕西师范大学,2013.
ZHANG Xiaocun. Effects of erosion-deposition on soil quality in typical black soil region of Northeast China[D]. Xi'an: Shaanxi Normal University,2013. (in Chinese)

[30] 秦子元,张忠学,孙迪,等. 水氮耦合对黑土稻作产量与氮素吸收利用的影响[J]. 农业机械学报,2021,52(12):324-335,357.
QIN Ziyuan,ZHANG Zhongxue,SUN Di,et al. Effects of water and nitrogen coupling on rice yield and nitrogen absorption and utilization in black soil[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2021,52(12):324-335,357. (in Chinese)

[31] 马丙菊,常雨晴,景文疆,等. 水稻水分高效利用的机理研究进展[J]. 中国稻米,2019,25(3):15-20.
MA Bingju, CHANG Yuqing, JING Wenjiang,et al. Research progress on the mechanism of efficient water use in rice[J]. China Rice,2019,25(3):15-20. (in Chinese)

[32] 韩焕豪,刘鑫焱,高蓉,等. 水稻再生水灌溉下的节水减排效果[J]. 节水灌溉,2021(12):43-49.
HAN Huanhao,LIU Xinyan,GAO Rong,et al. Effect of water saving and emission reduction under reclaimed water irrigation of rice[J]. Water Saving Irrigation,2021(12):43-49. (in Chinese)