

不同水氮管理模式下黑土稻田碳固定与碳减排效应分析

张忠学^{1,2} 余佩哲^{1,2} 杜思澄^{1,2} 李铁成^{1,2} 齐智娟^{1,2} 王 柏³

(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;
3. 黑龙江省水利科学研究院, 哈尔滨 150080)

摘要: 为探寻不同水氮管理模式对黑土稻田碳固定与碳减排效应的影响,进行了田间试验研究。设置常规淹灌(F)与控制灌溉(C)两种灌溉模式,选用 110 kg/hm² (N)、99 kg/hm² (N1,减氮 10%)、88 kg/hm² (N2,减氮 20%) 3 种施氮量,测定了 6 种水氮管理模式下的水稻土壤呼吸 CO₂ 排放强度和 CH₄ 排放强度,水稻收获后各器官干物质质量、碳含量及固碳量,并计算了净土壤碳收支情况。结果表明,不同水氮管理模式,各处理土壤呼吸 CO₂ 排放量呈现单峰值变化,并在分蘖期达到峰值;各处理甲烷排放量呈现双峰值变化且在分蘖期与穗肥施入后达到峰值。相同灌溉方式下,随着施氮量的减少,土壤呼吸 CO₂ 排放强度与甲烷排放强度也显著减少 ($P < 0.05$)。相同施氮量下,控制灌溉相比常规淹灌有效地降低了甲烷排放强度,但提高了土壤呼吸 CO₂ 排放强度。不同水氮管理模式,水稻收获后总固碳量为 319.37 ~ 489.00 g/m²,水稻收获后各器官固碳量由小到大依次为叶、根、茎、穗,分别为植株总固碳量的 5.16% ~ 6.72%、5.71% ~ 10.78%、28.62% ~ 36.66%、49.53% ~ 58.70%。控制灌溉相较于常规淹灌有效提高了植株固碳能力。在不同水氮管理模式,水稻的净初级生产力(NPP)与总初级生产力(GPP)均在减氮量 10% 处理达到最高,相同灌溉方式下,随着施氮量的增大均呈现先增大后减小的变化趋势;相同施氮量下,控制灌溉下 NPP、GPP 均高于常规淹灌。控制灌溉相比常规淹灌具有更高的生产潜力。除 CN 处理净土壤碳收支数值呈负值外其余处理均为正值,即除 CN 处理外其余处理均为土壤净碳增益效果,相同施氮量常规淹灌下土壤净碳增益高于控制灌溉,但差异不显著 ($P > 0.05$);随着施氮量的减少相同灌溉制度下各处理土壤碳收支呈先增大后减小的变化趋势。综合考虑,CN1 处理可以在保证较高生产能力下提高土壤固碳能力,减少土壤碳损失与稻田温室气体排放。

关键词: 黑土稻田; 净土壤碳收支; 净初级生产量; 总初级生产力; 土壤碳库; 水氮管理模式

中图分类号: S511.4⁺1; S365 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2023)04-0366-10 OSID: 

Carbon Fixation and Carbon Emission Reduction Effects of Different Water and Nitrogen Management Modes in Black Soil Paddy Fields

ZHANG Zhongxue^{1,2} YU Peizhe^{1,2} DU Sicheng^{1,2} LI Tiecheng^{1,2} QI Zhijuan^{1,2} WANG Bai³

(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
3. Heilongjiang Water Conservancy Research Institute, Harbin 150080, China)

Abstract: In order to explore the effects of different water and nitrogen management modes on carbon fixation and carbon emission reduction in black soil paddy fields, a field experiment was conducted. Two irrigation modes of conventional flooding irrigation (F) and controlled irrigation (C) were set up, and three nitrogen application rates of 110 kg/hm² (N), 99 kg/hm² (N1, 10% nitrogen reduction) and 88 kg/hm² (N₂, 20% nitrogen reduction) were selected. The CO₂ emission intensity and CH₄ emission intensity of rice soil respiration under six water and nitrogen management modes were measured, and the dry matter quality, carbon content and carbon sequestration of each organ after rice harvest were calculated. The

results showed that under different water and nitrogen management modes, the soil respiration CO_2 emission intensity of each treatment showed a single peak change, and reached the peak at the tillering stage. The methane emission of each treatment showed a double peak change and reached the peak at the tillering stage and the two time periods after the application of panicle fertilizer. Under the same irrigation method, with the decrease of nitrogen application rate, soil respiration CO_2 emission intensity and methane emission intensity were also decreased significantly ($P < 0.05$). Under the same nitrogen application rate, compared with conventional flooding irrigation, controlled irrigation effectively reduced methane emission intensity, but increased soil respiration CO_2 emission intensity. Under different water and nitrogen management modes, the total carbon sequestration after rice harvest was $319.37 \sim 489.00 \text{ g/m}^2$. The carbon sequestration of each organ after rice harvest from small to large was leaf, root, stem and spike, which were $5.16\% \sim 6.72\%$, $5.71\% \sim 10.78\%$, $28.62\% \sim 36.66\%$ and $49.53\% \sim 58.70\%$ of the total carbon sequestration of the plant, respectively. Compared with conventional flooding irrigation, controlled irrigation effectively improved the carbon sequestration capacity of plants. Under different water and nitrogen management modes, the net primary productivity (NPP) and gross primary productivity (GPP) of rice reached the highest in the treatment of 10% nitrogen reduction. Under the same irrigation method, with the increase of nitrogen application rate, the trend showed increase first and then decrease; at the same nitrogen application rate, NPP and GPP under controlled irrigation were higher than those under conventional flooding irrigation. Controlled irrigation had higher production potential than conventional flooding irrigation. Except that the net soil carbon budget of CN treatment was negative, the other treatments were positive, that was, except for CN treatment, the other treatments showed the effect of net soil carbon gain. At the same nitrogen application rate, the net soil carbon gain under conventional flooding irrigation was higher than that under controlled irrigation, but the difference was not significant ($P > 0.05$). With the decrease of nitrogen application rate, the soil carbon budget of each treatment was increased first and then decreased under the same irrigation system. Considering comprehensively, CN1 treatment can improve soil carbon sequestration capacity and reduce soil carbon loss and greenhouse gas emissions from paddy fields under high production capacity.

Key words: black soil paddy field; net soil carbon budget; net primary production; gross primary productivity; soil carbon pool; water and nitrogen management mode

0 引言

东北黑土区作为世界三大黑土区之一,粮食年产量约占全国的1/5,是保证我国粮食安全的重要基石。东北黑土区在开垦初期有机碳含量丰富,近50年来由于用养失调与不当耕作,导致东北黑土区土壤肥力逐渐下降,有机碳含量迅速降低,较开垦初期减少约50%^[1],黑土地变“薄”变“瘦”^[2],已严重威胁到东北黑土区的粮食安全,黑土保护逐渐成为我国生态环境保护的重要议题之一。

中国陆地生态系统土壤有机碳含量约 $1.0018 \times 10^{11} \text{ t}$,平均碳密度为 10.83 kg/m^2 ,是一个巨大的碳库^[3]。稻田土壤碳库作为土壤碳库中最重要的的一部分,对全球温室效应的影响不可忽视。土壤固碳是一种减少温室气体排放的有效措施,减排潜力高达89%^[4]。直接测量土壤中有有机碳含量是体现土壤固碳水平最重要的方法^[5],但该方法存在一定缺陷,在季节变化与年际变化中无法较为准确地表现出土壤固碳水平^[6]。近年来,土壤碳排放效率(CEE)与净生态系统生产力(NEP)^[7]被一些研究者用于对不同种植模式下土壤固碳效果进行评价,

但这两种评价体系均存在一定缺陷,CEE评价指标会造成对土壤固碳效果估算的不足^[8],而NEP评价体系中缺少对温室气体中甲烷排放及根呼吸排放的 CO_2 所造成的土壤碳损失的评价,无法明确表明土壤的固碳水平。因此,净土壤碳收支(NSCB)分析作为一种间接估算土壤固碳水平的方法就显得尤为重要^[9]。净土壤碳收支(NSCB)分析是基于土壤有机碳(SOC)储量变化,确定短时间内土壤碳收支情况的有效方法^[10]。通过对土壤中碳交换的测量对NSCB进行计算,可以很直观地观察出该农田土壤的碳交换季节或年际变化^[11]。近年来,有关稻田土壤碳库的研究日益增多,针对稻田土壤碳库进行全面的评价已成为当前的研究热点。邹桂花等^[12]、程建平等^[13]研究认为节水灌溉可以提高水稻干物质产量,增加土壤有机碳输入,提高稻田固碳能力;宁皎莹等^[14]、黄耀等^[15]认为施入氮肥可以通过增加碳输入的方法达到固碳效果,使农田土壤有机碳含量上升;逯非等^[16]认为在保证产量的前提下,适量减少氮肥可以有效减少双季稻田温室气体排放,提高了稻田减排能力;张昆等^[17]、周文涛等^[18]研究认为,减施氮肥可以减少双季稻田温室气体排放,提高

稻田减排能力;由此可见,合理的灌溉模式与氮肥施入有利于稻田土壤碳库的固碳减排,因此,对不同水氮管理模式东北黑土区稻田土壤碳库进行综合评价很有意义。

本文基于 2021 年田间试验,探究不同水氮管理模式对稻田土壤 CO₂ 排放强度、稻田 CH₄ 排放通量的影响,对比分析不同水氮管理模式下水稻收获后各器官干物质量、碳含量及固碳量与水稻净初级生产力(NPP)及总初级生产力(GPP)的变化,计算稻田净土壤碳收支,以期在保证稻米产量的同时,为降低稻田温室气体排放,提高稻田土壤固碳水平,缓解土壤肥力下降等提供关键理论支持,为实现碳达峰目标提供有效的农田治理方案。

1 材料与方法

1.1 试验地点

试验地点为黑龙江水稻灌溉试验站,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。多年平均降水量为 550 mm,多年平均水面蒸发量 750 mm。无霜期 128 d,有效积温 2 532℃。气候特征属寒温带大陆性季风气候。土壤基本理化性质为:pH 值 6.45,有机质质量比 41.8 g/kg,碱解氮质量比 198.29 mg/kg,速效磷质量比 36.22 mg/kg,速效钾质量比 112.06 mg/kg。

1.2 试验设计

田间小区试验设计:供试水稻的品种、育秧、移栽、密度及用药等技术相同的条件下,试验采用两种节水灌溉技术模式,即:控制灌溉(C)、常规淹灌(F)。不同灌溉模式在水稻不同生育期的水分管理标准见表 1。

施氮水平分别为常规施氮水平(110 kg/hm²),减氮量 10% 水平(99 kg/hm²),减氮量 20% 水平(88 kg/hm²)。采用全面试验设计方法,共 6 个处理,

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	分蘖盛期	分蘖末期	拔孕期	抽开期	乳熟期	黄熟期
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。

每个处理 3 次重复,共 18 个试验小区,随机排列,每个小区面积为 100 m²(10 m × 10 m)。田间小区处理设置见表 2。

表 2 田间小区处理设置

Tab.2 Field plot processing settings

处理名称	施氮量/(kg·hm ⁻²)
控制灌溉,常规施氮水平(CN)	110
控制灌溉,减氮量 10% 水平(CN1)	99
控制灌溉,减氮量 20% 水平(CN2)	88
常规淹灌,常规施氮水平(FN)	110
常规淹灌,减氮量 10% 水平(FN1)	99
常规淹灌,减氮量 20% 水平(FN2)	88

供试水稻品种为当地主栽品种龙庆稻 8,种植密度约为 24 株/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 CH₄ 与土壤呼吸 CO₂ 排放的采集与测定

采用“静态箱-气相色谱法”观测不同水氮管理模式下水稻生育期内 CH₄ 与土壤 CO₂ 的排放量。静态箱采样系统内采用有机玻璃制成的密闭性无底箱体,用遮光布进行覆盖;测量时,用箱子将要测量

的地表罩起来,每隔 10 min(0、10、20、30 min)抽取箱内气体进行浓度测量。依据试验经验和水稻田的试验情况,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,尺寸为 25 cm × 50 cm × 50 cm,当水稻植株生长较高时可适时加中段箱。地箱入土深约 15 cm,底座上部带有深 5 cm 的水槽,箱内含有两株水稻,气样采集前加水密封。水稻自移栽后第 2 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,取气前启动微型电风扇,使箱内气体均匀,之后在 0、10、20、30 min 用 50 mL 注射器抽取箱内气体样品注入气袋,随后带回实验室用气相色谱仪(岛津 GC-2010PLUS 型,日本)检测分析 CH₄ 浓度。根据已测得的 CH₄ 浓度,并估算浓度与时间线性回归的斜率,计算排放通量与全生育期内排放总量。土壤呼吸 CO₂ 排放的测定方法同样采用“静态箱-气相色谱法”,在棵间设立一个空的地箱(地箱尺寸与 CH₄ 测定所用地箱相同),在试验期间定期清理地箱内活体植物,按上述 CH₄ 测定方法进行土壤呼吸 CO₂ 的排放通量与全生育期内排放总量的测定。

排放通量计算式为

$$F = 273phdc/dt/(273 + T_1) \tag{1}$$

式中 F —— CH_4 、 CO_2 排放通量, $\text{mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$
 ρ ——标准状态 CH_4 、 CO_2 密度(其中 CH_4 为 $0.717 \text{ kg}/\text{m}^3$, CO_2 为 $1.997 \text{ kg}/\text{m}^3$)
 h ——静态箱内有效高度, m
 dc/dt ——气体浓度差值, $\text{mL}/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$
 T_1 ——采样时静态箱内平均空气温度, $^\circ\text{C}$
排放总量计算式为

$$T = \sum_{i=1}^n [(F_{i+1} + F_i)/2] (D_{i+1} - D_i) \times 24/1\,000 \tag{2}$$

式中 T ——排放总量, kg/hm^2
 F_i ——第 i 次采样时的 CH_4 、 CO_2 排放通量, $\text{mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$
 F_{i+1} ——第 $i+1$ 次采样时的 CH_4 、 CO_2 排放通量, $\text{mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$
 D_i ——第 i 次采样时间, d
 D_{i+1} ——第 $i+1$ 次采样时间, d

1.4 水稻收获后各器官干物质质量、碳含量、NPP 与 GPP 测定

在水稻成熟期于各个小区中随机选出具有代表性的 3 株水稻,将水稻的茎鞘、叶、穗、根分开后用去离子水洗净,放入干燥箱 105°C 、鼓风条件下杀青 30 min,随后 85°C 干燥 48 h 至恒定质量,并称量。干燥后的样品通过球磨机粉碎后过 100 目筛混匀,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元素分析仪(Flash 2000 HT 型,美国)测定水稻各器官含碳量。每平方米种植水稻约 24 株,净初级生产力(NPP)按照每平方米 24 株计算^[19],计算式为

$$NPP = 24(m_l\omega_l + m_q\omega_q + m_s\omega_s + m_r\omega_r) \tag{3}$$

式中 NPP ——净初级生产力, g/m^2
 m_l 、 m_q 、 m_s 、 m_r ——水稻叶、茎鞘、穗、根干物质量, g
 ω_l 、 ω_q 、 ω_s 、 ω_r ——水稻叶、茎鞘、穗、根的碳含量, %

GPP 依据 NPP 进行测定,按照 $NPP/GPP = 0.52$ 的比值对 GPP 进行估算^[20]。

1.5 净土壤碳收支计算

碳进出土壤边界的差值称为净土壤碳收支(NSCB),可以相对反映土壤种植系统中有机碳的损益率^[21],在田间清除作物残留物后,根据类似的生态系统碳平衡分析进行修改,NSCB 计算式为^[22]

$$NSCB = (NPP_{litter-C} + GPP_{underground-C} + Seed_{-C} + I_{fertiliser-C}) - (Re_{-C} + CH_{4-C} + D_{-C}) \tag{4}$$

式中 $I_{fertiliser-C}$ ——有机肥的碳输入量,本试验未使用有机肥料,可忽略不计, kg/hm^2

D_{-C} ——碳通过径流和淋溶的流失量,由于其含量较少,通常在计算中排除^[23], kg/hm^2

$NPP_{litter-C}$ ——作物生长期枯叶脱落的碳输入量,据估计水稻总生物质量的 5% 被划为 $NPP_{litter-C}$, kg/hm^2

$GPP_{underground-C}$ ——作物根和根分泌物的碳输入量, kg/hm^2

$Seed_{-C}$ ——种子的碳含量, kg/hm^2

Re_{-C} ——土壤呼吸 CO_2 排放造成的碳损失量, kg/hm^2

CH_{4-C} ——甲烷排放导致的碳损失量, kg/hm^2

因此,对于 NSCB 的计算公式可以简化为^[24-25]

$$NSCB = (NPP_{litter-C} + GPP_{underground-C} + Seed_{-C}) - (Re_{-C} + CH_{4-C}) \tag{5}$$

NSCB 计算所得出的数值中,正值表示土壤中的净碳增益,负值表示土壤中的净碳损失。

1.6 数据分析

本试验采用 WPS 2021 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 不同水氮管理模式对稻田土壤呼吸 CO_2 排放的影响

在不同水氮管理模式下,水稻全生育期内土壤呼吸 CO_2 排放通量如图 1 所示。试验结果表明,两种灌溉模式(控制灌溉 C 与常规淹灌 F)各处理土壤呼吸 CO_2 排放通量变化趋势相似,在整个生育期内呈先增长后降低的总体趋势。自返青期开始,由于地温升高与肥料施入的影响,土壤呼吸 CO_2 排放通量开始升高,并在分蘖期达到土壤呼吸 CO_2 排放通量最高点,其中 CN 处理土壤呼吸 CO_2 排放通量为 $1\,160.35 \text{ mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$,CN1、CN2 处理相较 CN 处理分别减小 58.2% 和 71.6% ($P < 0.05$),FN、FN1、FN2 处理相较 CN 处理分别减小 84.8%、88.4%、92.2% ($P < 0.05$)。相同氮肥施入量下,由于控制灌溉在全生育期内水层较薄或无水层,土壤更易于与空气接触,为土壤中的微生物提供了足够的氧气,进而导致控制灌溉土壤呼吸 CO_2 排放通量高于常规淹灌;在相同灌水模式下,由于氮素施入增强了土壤中微生物的活性,加快了微生物呼吸速率,最终导致两种灌水模式的土壤呼吸 CO_2 排放通量均随着氮肥施入量的增加而增加。

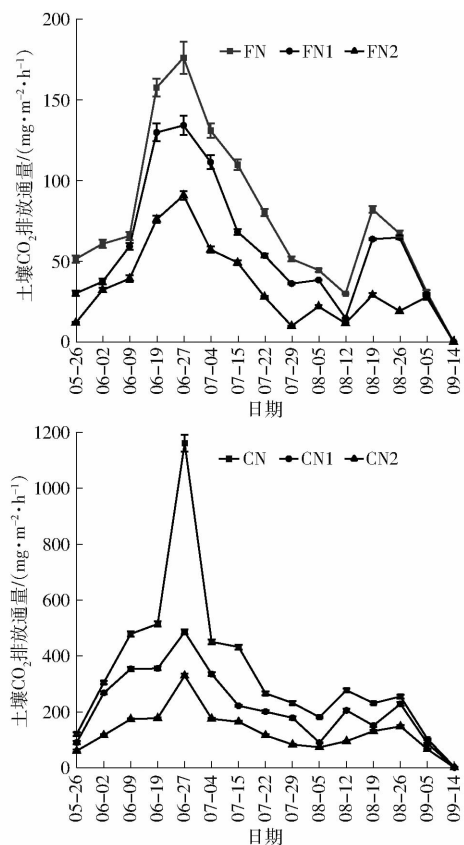


图1 不同水氮管理模式下各处理土壤呼吸CO₂排放
通量变化曲线

Fig.1 Change curves of CO₂ emission flux of soil respiration
under different water and nitrogen management modes

根据式(2)进行计算,各个处理土壤呼吸CO₂排放总量见图2(图中不同小写字母表示处理间差异显著($P < 0.05$),下同)。由图2可知,在相同灌溉模式下由于氮素的添加,促进了根系发育,使根系分泌的营养物质增多,进而为土壤中各类微生物活动提供了充足的底物,导致土壤微生物呼吸强度迅速增加,最终导致土壤呼吸CO₂排放总量随施氮量增加而增加;在相同氮肥施入量情况下,由于长期淹水导致常规淹灌处理土壤中氧气含量相较于控制灌溉处理较低,土壤微生物呼吸强度大大减小,最终导致控制灌溉的土壤呼吸CO₂排放总量显著高于常规淹灌($P < 0.05$)。

2.2 不同水氮管理模式对稻田CH₄排放的影响

稻田CH₄排放通量的季节性变化如图3所示,两种灌溉模式(控制灌溉C与常规淹灌F)各处理CH₄排放通量在全生育期内变化趋势相似,返青期两种灌溉方式同为淹水情况,因此各处理的CH₄排放通量均处于较低水平,由于分蘖期肥料的施加,导致各个处理的CH₄排放通量明显上升,并在分蘖期达到峰值,其中FN1、FN2处理CH₄排放通量较FN处理分别减小16.28% ($P > 0.05$)和34.09% ($P < 0.05$),CN、CN1、CN2处理分别较FN处理减小

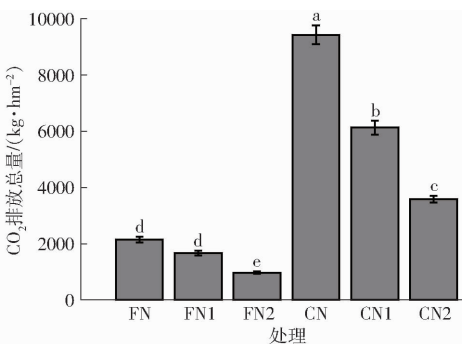


图2 土壤呼吸CO₂排放总量

Fig.2 Total emissions of CO₂ from soil respiration

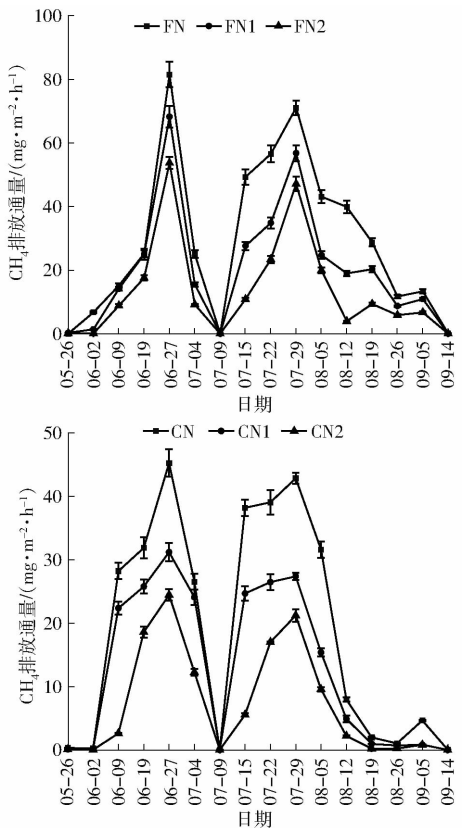


图3 不同水氮管理模式下各处理CH₄排放通量变化曲线

Fig.3 Variation curves of CH₄ emission flux of each
treatment under different water and nitrogen management modes

44.48%、61.73%、70.01% ($P < 0.05$),由于晒田期土壤通气及水分等条件发生变化,导致各个处理CH₄排放通量重新回落到相近较低水平。晒田结束后,由于重新进行控水导致各个处理CH₄排放通量再次迅速升高,并达到高峰,其中FN1、FN2处理的CH₄排放通量较FN处理分别减小20.1% ($P > 0.05$)和33.69% ($P < 0.05$),CN、CN1、CN2处理分别较FN处理减小39.72%、61.49%、70.17% ($P < 0.05$),除返青期与晒田期外,控制灌溉的CH₄排放通量明显低于淹水灌溉,因此,控制灌溉与减施氮肥对CH₄减排效果显著。

根据式(2)进行计算,各个处理CH₄排放总量见图4。由试验结果可知,同一灌溉模式,减施氮肥

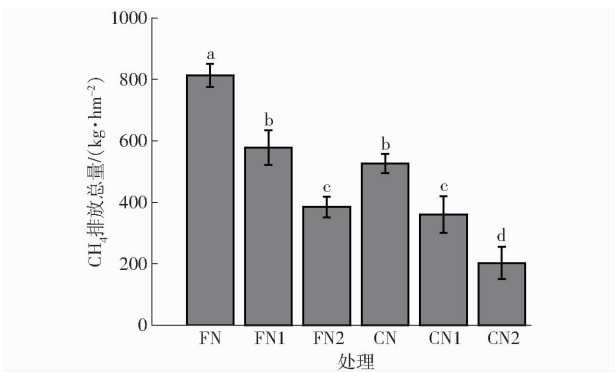


图 4 CH₄ 排放总量
Fig. 4 Total emissions of CH₄

会降低稻田 CH₄ 排放且效果显著 ($P < 0.05$), 这是由于氮肥的减少导致作物根系发育减缓, 并减少土壤有机质分解, 减少了产甲烷菌的主要反应底物, 降低了产甲烷菌活性, 有效抑制了甲烷排放; 同一施氮水平下, 由于控制灌溉改变了稻田的水分状况, 使得土壤通气性改变, 提高了土壤中的氧气含量, 抑制了产甲烷菌活性, 因此减少了 CH₄ 排放, 最终导致控制灌溉稻田 CH₄ 排放显著低于常规淹灌 ($P < 0.05$)。

2.3 不同水氮管理模式对水稻收获后各器官干物质量、碳含量及固碳量的影响

不同水氮管理模式下水稻收获后各器官的干物质量、碳含量如图 5 所示。试验结果表明, 相同施氮量下, 水稻收获后叶干物质量除 CN 处理显著高于 FN 处理外 ($P < 0.05$), 其余处理之间差异并不显著 ($P > 0.05$); CN/FN2 处理水稻收获后茎干物质量显著高于 FN/CN2 处理 ($P < 0.05$), CN1/FN1 处理水稻收获后茎干物质量差异不显著 ($P > 0.05$); 常规淹灌下水稻收获后根干物质量显著高于控制灌溉 ($P < 0.05$); 控制灌溉下水稻收获后穗干物质量显著高于常规淹灌 ($P < 0.05$)。同种灌水制度下, 常规淹灌各处理水稻各器官干物质量随着施氮量的降低, 呈现先增大后减小的变化趋势, 在减氮 10% 处理达到峰值且常规淹灌下 FN1 处理茎、穗干物质量显著高于其余处理 ($P < 0.05$); 控制灌溉各处理水稻各器官干物质量随着施氮量的降低, 呈现下降趋势, CN2 处理各器官干物质量显著低于 CN/CN1 处理 ($P < 0.05$)。相同施氮量下, 控制灌溉模式下水稻收获后叶、穗含碳量均显著高于常规淹灌 ($P < 0.05$); 除 CN1 处理茎含碳量显著高于 FN1 外, 其余处理间差异并不显著 ($P > 0.05$); 控制灌溉模式下水稻收获后根含碳量各处理间差异均不显著 ($P > 0.05$)。在相同灌水模式下, 控制灌溉水稻收获后各器官含碳量在减氮 10% 处理达到最高值, 但除穗含碳量外其余器官碳含量差异并不显著 ($P >$

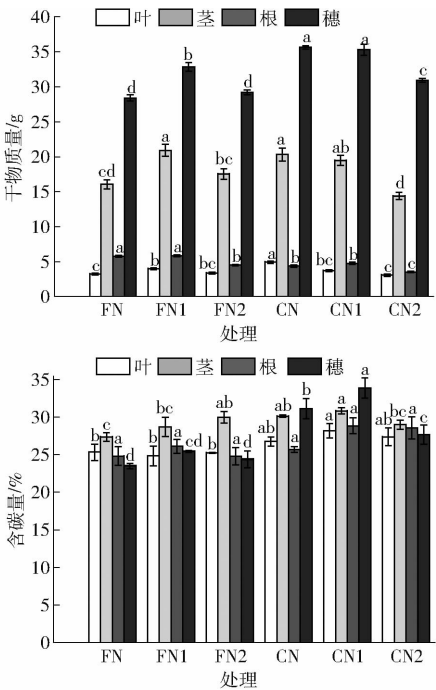


图 5 不同水氮管理模式下水稻收获后各器官的干物质量及含碳量
Fig. 5 Dry matter mass and carbon content of each organ after rice harvest under different water and

nitrogen management modes

0.05); 常规淹灌水稻收获后各器官含碳量差异均不显著 ($P > 0.05$)。

不同水氮管理模式下水稻收获后各器官的固碳量见表 3。试验结果表明, 水稻收获后总固碳量为 319.37 ~ 489.00 g/m²。两种灌溉制度下, 水稻收获后总固碳量随施氮量的降低在减氮 10% 处理达到峰值, 其中 CN1 处理总固碳量最大, 为 489.00 g/m²。相同施氮量下, 控制灌溉下水稻收获后各器官固碳量均高于常规淹灌; 相同灌水模式下, CN 处理叶固碳量显著高于控制灌溉下其余处理 ($P < 0.05$), FN1 处理叶固碳量显著高于常规淹灌下其余处理 ($P < 0.05$); CN2 处理茎固碳量显著低于控制灌溉下其余处理 ($P < 0.05$), FN 处理茎固碳量显著低于常规淹灌下其余处理 ($P < 0.05$); CN1 处理根固碳量显著高于控制灌溉下其余处理 ($P < 0.05$), FN2 处理根固碳量显著低于常规淹灌下其余处理 ($P < 0.05$); CN1/FN1 处理穗含碳量均显著高于相同灌水模式下其余处理 ($P < 0.05$); FN1 处理总固碳量显著高于常规淹灌下其余处理 ($P < 0.05$), CN2 处理总固碳量显著低于控制灌溉下其余处理 ($P < 0.05$)。水稻收获后各器官固碳量由小到大依次为叶、根、茎、穗, 分别占水稻收获后总固碳量的 5.16% ~ 6.72%、5.71% ~ 10.78%、28.62% ~ 36.66%、49.53% ~ 58.70%。

表 3 不同水氮管理模式下水稻收获后各器官固碳量
Tab.3 Carbon sequestration of rice organs after harvest
under different water and nitrogen management modes

处理	植株各器官固碳量				总固碳量 g/m ²
	叶	茎	根	穗	
FN	19.48 ^c	105.39 ^c	34.42 ^a	160.08 ^d	319.37 ^d
FN1	23.61 ^b	143.88 ^a	36.69 ^a	200.40 ^c	404.58 ^b
FN2	20.40 ^c	126.11 ^b	26.77 ^b	170.72 ^d	344.00 ^c
CN	31.67 ^a	146.94 ^a	26.92 ^b	265.99 ^b	471.52 ^a
CN1	25.26 ^b	144.08 ^a	32.84 ^a	286.82 ^a	489.00 ^a
CN2	20.14 ^c	99.99 ^c	24.15 ^b	205.08 ^c	349.36 ^c

注:数字后不同小写字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$),下同。

2.4 不同水氮管理模式对水稻 NPP 及 GPP 的影响

在不同水氮管理模式下,水稻的净初级生产量与总初级生产力如图 6 所示,试验结果表明,相同灌溉方式下,随着施氮量的减小,NPP、GPP 呈现先增大后减小的变化趋势,并在减氮量 10% 处理达到峰值,其中 FN1 处理显著高于 FN、FN2 处理,CN2 显著低于 CN、CN1 处理。在相同施氮量下,除 CN2 处理外,控制灌溉处理的水稻净初级生产力与总初级生产力均显著高于常规淹灌处理 ($P < 0.05$)。由本试验结果可知,减氮量 10% 应为该试验最优施氮量,控制灌溉相比常规淹灌的水稻生产潜力更高。

表 4 不同水氮管理模式下稻田净土壤碳收支

处理	FN	FN1	FN2	CN	CN1	CN2
土壤碳收支/(kg·hm ⁻²)	508.74 ^b	1 365.90 ^a	1 280.39 ^a	-383.72 ^c	1 033.79 ^a	983.98 ^a

理均为土壤净碳增益,CN 处理则为土壤净碳损失。同一灌溉制度下,随着施氮量的减少,净土壤碳收支均在减氮 10% 处理达到最大值,CN 与 FN 处理净土壤碳收支显著低于其余处理 ($P < 0.05$),其余各处理间没有显著性差异 ($P > 0.05$);在相同施氮量下,常规淹灌的净土壤净碳增益均高于控制灌溉下各处理,但无显著差异 ($P > 0.05$)。

3 讨论

土壤碳库是陆地生态系统中最大的碳库,占全球陆地生态系统碳储量的 2/3 ~ 3/4^[26],对全球气候变化以及全球碳中和计划具有极大影响。CH₄、CO₂ 作为温室气体的重要组成部分,对温室效应的贡献率分别高达 5% 与 9%^[27]。稻田作为农业生态系统中重要的一部分,是 CH₄ 主要的排放源,占 CH₄ 大气总排放量的 8% ~ 13%^[28]。稻田的碳循环过程

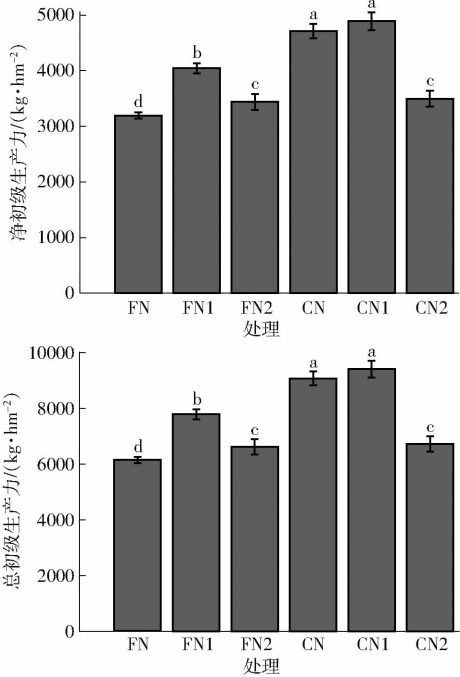


图 6 不同水氮管理模式下水稻净初级生产力及总初级生产力

Fig.6 Net primary productivity and gross primary production of rice under different water and nitrogen management modes

2.5 不同水氮管理模式对稻田净土壤碳收支的影响

不同水氮管理模式下,各处理净土壤碳收支见表 4。试验结果表明,本试验 6 个处理其净土壤碳收支除 CN 处理外均为正值,即除 CN 处理外其余处

主要包括作物对 CO₂ 的吸收以及固定和稻田土壤中微生物及作物本身的呼吸作用所产生的 CO₂ 与 CH₄ 的排放。因此想要达到碳中和的预期目标,对于稻田而言,应进一步加强其自身的固碳能力并减少碳排放。本试验基于对土壤呼吸、甲烷排放、土壤固碳量等方面的研究,结合净土壤碳收支 (NSCB) 的计算方法,对稻田土壤碳平衡进行评价。

稻田土壤呼吸作为稻田碳循环的主要途径之一,是通过植物光合作用固定大气中的 CO₂ 并通过土壤中的微生物及植株根系的呼吸作用再次排放到大气的过程。试验结果表明,土壤 CO₂ 排放强度在生育期内呈现单峰值变化,在水稻分蘖期达到峰值,这可能是由于水稻分蘖期植株根系生长迅速,使得植株根呼吸强度突然增大而造成土壤呼吸强度骤增。张忠学等^[29] 研究指出,除返青期外,当施氮量相同时,控制灌溉模式下各施氮处理水稻各生育期平均土壤总呼吸速率、微生物呼吸速率及根呼吸速

率均大于常规灌溉模式,且均随着施氮量的增加而增大。本试验与其得出相同结论,即同一施氮水平下,控制灌溉下的土壤呼吸强度高于常规淹灌,并在同一灌水方式下土壤呼吸强度随着施氮量的增加而增加。这可能是由于枯落叶等凋落物的增加同样会为土壤提供一定数量的碳素输入,加强了土壤中的微生物活性^[30]。因此,在以上多方作用下土壤 CO₂ 排放强度得到了迅速提升。

稻田作为 CH₄ 的主要排放源,对全球气候变化产生较大影响。CH₄ 在稻田形成的途径主要是通过产甲烷菌群的厌氧反应所生成的。本试验表明,CH₄ 的排放强度在生育期内呈现双峰值变化,在分蘖期与穗肥施入后产生峰值,并在晒田期达到最低点,这可能是由于分蘖期根系发育迅速,根呼吸强度增加所产生的 CO₂^[31] 为产甲烷菌提供了更为充分的厌氧环境与反应底物,并随着根系发育所导致的根系分泌物的增多^[27],进一步加强了产甲烷菌群的活性进而导致 CH₄ 达到峰值;而晒田期 CH₄ 排放达到最低点可能由于晒田期土壤落干与持续的高温使得土壤含水率降低,改变了土壤通气性,从而导致产甲烷菌活性降低,水稻植株等受到不同程度影响,进而减少了甲烷的排放^[32];穗肥施入后所产生的二次峰值可能是由于在分蘖期结束后,水稻的部分根系开始老化腐烂,为水稻土提供了更多的基质^[33],而晒田期土壤通气性的改变导致产甲烷菌活性降低,使得这些底物留存下来,而晒田结束后,穗肥的施入与土壤含水率的增加导致产甲烷菌的活性升高,前期所留下的反应底物得到充分利用,进而达到第2个峰值。

本试验结果表明,不同水氮管理模式下,水稻收获后各器官固碳量由大到小依次为穗、茎、根、叶。水稻收获后穗固碳量最大,占总固碳量的 49.53% ~ 58.70%,而水稻收获后叶固碳量最小,仅占总固碳量的 5.16% ~ 6.72%。相同施氮量下,控制灌溉下各处理水稻各器官固碳量均高于常规淹灌下各处理,这可能是由于控制灌溉在返青期后所采用的无水层灌溉模式改变了作物根系的通气条件,改善了作物根系发育的土壤环境,加强了根系对土壤水分及养分的吸收。相同灌水方式下,随施氮量的减少,水稻收获后各器官固碳量及总固碳量呈先增大后减小的变化趋势,且在减氮 10% 处理达到峰值,这可能是由于适当的减施氮肥会提高作物干物质量积累与含碳量,而过度减氮抑制了叶面积扩展,降低了植株的光合作用强度^[34],进而影响植株生长,降低植株固碳量。

近年来,NSCB 作为一种可以更加准确观测土

壤碳库的研究方法被广泛使用,相比直接测量土壤有机碳含量可以更加直观地观察到该土壤的碳交换年际变化与季节性变化^[4],同时 NSCB 还可以为短期土壤碳收支提供科学依据^[5]。水稻土壤通常被认为是净碳库^[35],存在较强的碳封存潜力^[36]。在本试验中,通过对 NSCB 的计算可知,除 CN 处理外其余处理均呈现较强的土壤净碳增益,而 CN 处理呈现出一定的土壤净碳损失,这可能是由于控制灌溉下对稻田长期的水分管理,使其土壤呼吸强度提高,同时氮素的增加会促进根系发育旺盛,根系分泌的营养物质增多,进而为土壤中各类微生物活动提供了充足的底物,进一步提高了 CO₂ 排放强度,通过 CO₂ 排放造成的土壤碳输出量较高,产生了负值的 NSCB,呈现出一定的土壤净碳损失。NSCB 作为对土壤碳平衡进行评价的重要指标同样存在一些不足,近年来,大多数农田会采用秸秆还田的耕作方式以加强土壤肥力,本研究对 NSCB 计算时未考虑到秸秆所造成的碳输入,可能会低估秸秆还田土壤的净土壤碳收支;同时,在对 NSCB 进行计算时往往会因为试验区域较小以及耕地、作物类型不同而忽略径流所造成的土壤碳损失,事实上,坡耕地为东北黑土区的主要耕地类型,而坡耕地径流所造成的土壤碳损失较为严重,因此在对东北黑土区进行土壤碳库评价时应注意耕地类型,同时,还需对东北黑土区坡耕地径流碳损失进行进一步研究,以确定径流碳损失在 NSCB 中的占比,并提供径流碳损失经验系数以便于今后对土壤碳库的评价进行研究。由此可见,现有 NSCB 评价体系尚未完善,还需进行进一步深入研究,以提出更加完善的土壤碳库评价体系。

4 结论

(1) 不同水氮管理模式下,各处理土壤呼吸 CO₂ 排放强度呈现单峰值变化,并在分蘖期达到峰值;各处理甲烷排放量呈现双峰值变化且在分蘖期与穗肥施入后达到峰值。相同灌溉方式下,除返青期与晒田期外,随着施氮量的减少土壤呼吸强度与甲烷排放强度也显著减少;相同施氮量下,控制灌溉相比常规淹灌有效地降低了甲烷排放强度,这说明减施氮肥可以有效减少稻田碳排放,控制灌溉可以有效控制稻田的甲烷排放。

(2) 不同水氮管理模式下,水稻收获后总固碳量为 319.37 ~ 489.00 g/m²,其中穗占比最大,且穗的含碳量最高。相同灌溉方式下,随着施氮量的减少水稻收获后各器官固碳量先增大后减少,在 FN1、CN1 处理达到最大,其中 CN1 的固碳量最高,为 489.00 g/m²。相同施氮量下,控制灌溉各处理相比

常规淹灌固碳量均有提高。同一施氮水平下,控制灌溉各处理的水稻净初级生产力与总初级生产力均高于常规淹灌各处理;在同一灌溉方式下,随着施氮量的增加,水稻净初级生产力与总初级生产力均先增加后减少并在减氮 10% 处理达到最高,说明控制灌溉相比常规淹灌具有更高的生产潜力。

(3) 不同水氮管理模式下,净土壤碳收支除 CN 处理外均为正值,FN1 达到最大(1 365.90 kg/hm²)。在相同施氮水平下,常规淹灌净土壤碳收支均高于控

制灌溉,但差异并不显著;相同灌溉方式下,随着施氮量的减少,净土壤碳收支呈现先增大后减小的变化趋势,在减氮 10% 处理达到最大值,这说明施氮量为减氮 10% 水平时可以有效提高稻田土壤碳输入,减少土壤碳损失。

(4) 根据净初级生产力与土壤碳收支结果表明,控制灌溉减施氮肥 10% 处理可以在保证较高生产能力的情况下提高土壤固碳能力,减少土壤碳损失并降低稻田 CH₄ 及土壤呼吸 CO₂ 的排放。

参 考 文 献

[1] 张兴义,隋跃宇,宋春雨. 农田黑土退化过程[J]. 土壤与作物,2013,2(1):1-6.
ZHANG Xingyi,SUI Yueyu,SONG Chunyu. Degradation process of arable mollosols[J]. Soil and Crop,2013,2(1):1-6. (in Chinese)

[2] 东北地理与农业生态研究所. 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.

[3] 王绍强,周成虎. 中国陆地土壤有机碳库的估算[J]. 地理研究,1999(4):349-356.
WANG Shaoqiang,ZHOU Chenghu. Estimating soil carbon reservoir of terrestrial ecosystem in China[J]. Geographical Research,1999(4):349-356. (in Chinese)

[4] SAMANT P. Climate change 2007: mitigation of climate change: contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change[J]. Choice Reviews Online,2008,45(9):45-50.

[5] PAN Genxing,LI Lianqing,WU Laosheng,et al. Storage and sequestration potential of topsoil organic carbon in China's paddy soils[J]. Global Change Biology,2004,10(1):79-92.

[6] ZHENG Xunhua,XIE Baohua,LIU Chunyan,et al. Quantifying net ecosystem carbon dioxide exchange of a short-plant cropland with intermittent chamber measurements[J]. Global Biogeochemical Cycles,2008,22(3):1-13.

[7] 李银坤,陈敏鹏,夏旭,等. 不同氮水平下夏玉米农田土壤呼吸动态变化及碳平衡研究[J]. 生态环境学报,2013,22(1):18-24.
LI Yinkun,CHEN Minpeng,XIA Xu,et al. Dynamics of soil respiration and carbon balance of summer-maize field under different nitrogen addition[J]. Ecology and Environmental Sciences,2013,22(1):18-24. (in Chinese)

[8] 于爱忠,柴强,殷文,等. 玉米农田土壤碳排放及碳平衡对地膜覆盖方式及种植行距的响应[J]. 中国农业科学,2018,51(19):3726-3735.
YU Aizhong,CHAI Qiang,YIN Wen,et al. Responses of soil carbon emission and carbon balance of maize field to plastic film mulching pattern and row space[J]. Scientia Agricultura Sinica,2018,51(19):3726-3735. (in Chinese)

[9] SUN M,ZHAN M,ZHAO M,et al. Maize and rice double cropping benefits carbon footprint and soil carbon budget in paddy field[J]. Field Crops Research,2019,243:107620.

[10] PETE S,GARY L,WERNER L,et al. Measurements necessary for assessing the net ecosystem carbon budget of croplands[J]. Agriculture, Ecosystems and Environment,2010,139(3):302-315.

[11] ZHANG Xiaoxu,FAN Changhua,MA Yuchun,et al. Two approaches for net ecosystem carbon budgets and soil carbon sequestration in a rice-wheat rotation system in China[J]. Nutrient Cycling in Agroecosystems,2014,100(3):301-313.

[12] 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)

[13] 程建平,曹贵贵,蔡明历,等. 不同灌溉方式对水稻生物学特性与水分利用效率的影响[J]. 应用生态学报,2006,17(10):1859-1865.
CHENG Jianping,CAO Cougui,CAI Mingli,et al. Effects of different irrigation methods on biological characteristics and water use efficiency of rice[J]. Chinese Journal of Applied Ecology,2006,17(10):1859-1865. (in Chinese)

[14] 宁皎莹,和苗苗,周根娣. 农田土壤固碳及其影响因子研究进展[J]. 杭州师范大学学报(自然科学版),2014,13(2):168-174.
NING Jiaoying,HE Miaomiao,ZHOU Gendi. Carbon sequestration and its influencing factors in agricultural soils[J]. Journal of Hangzhou Normal University(Natural Science Edition),2014,13(2):168-174. (in Chinese)

[15] 黄耀,孙文娟. 近 20 年来中国大陆农田表土有机碳含量的变化趋势[J]. 科学通报,2006(7):750-763.

[16] 逯非,王效科,韩冰,等. 农田土壤固碳措施的温室气体泄漏和净减排潜力[J]. 生态学报,2009,29(9):4993-5006.
LU Fei,WANG Xiaoke,HAN Bing,et al. Researches on the greenhouse gas leakage and net mitigation potentials of soil carbon sequestration measures in croplands[J]. Acta Ecologica Sinica,2009,29(9):4993-5006. (in Chinese)

[17] 张昆,陈忠平,温伟平,等. 减氮增密对江西双季稻温室气体排放的影响[J]. 江西农业学报,2021,33(5):17-23.

- ZHANG Kun, CHEN Zhongping, WEN Weiping, et al. Effects of less basal nitrogen and dense planting on greenhouse gas emission of double cropping rice in Jiangxi Province[J]. *Acta Agriculturae Jiangxi*, 2021, 33(5): 17–23. (in Chinese)
- [18] 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 green-house 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)
- [19] 刘巽浩, 徐文修, 李增嘉, 等. 农田生态系统碳足迹法: 误区、改进与应用——兼析中国集约农作碳效率[J]. *中国农业资源与区划*, 2013, 34(6): 1–11.
- LIU Xunhao, XU Wenxiu, LI Zengjia, et al. The missteps, improvement and application of carbon footprint methodology in farmland ecosystems with the case study of analyzing the carbon efficiency of China's intensive farming[J]. *Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning*, 2013, 34(6): 1–11. (in Chinese)
- [20] ZHANG Liming, YU Dongsheng, SHI Xuezheng, et al. Simulation of global warming potential (GWP) from rice fields in the Tai-Lake region, China by coupling 1:50,000 soil database with DNDC model[J]. *Atmospheric Environment*, 2009, 43(17): 2737–2746.
- [21] SEIICHI N, SEIICHIRO Y, TAKUJI S, et al. Effect of land use change from paddy rice cultivation to upland crop cultivation on soil carbon budget of a cropland in Japan[J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2007, 125(1): 9–20.
- [22] MA Y C, KONG X W, YANG B, et al. Net global warming potential and greenhouse gas intensity of annual rice-wheat rotations with integrated soil-crop system management[J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2013, 164: 209–219.
- [23] KPADE O L H, GERHARD W, IRÉNIKATCHÉ A P B, et al. Carbon losses from prolonged arable cropping of Plinthosols in Southwest Burkina Faso[J]. *Soil & Tillage Research*, 2018, 175: 51–61.
- [24] MAKOTO K, 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): 1399–1416.
- [25] YANG B, XIONG Zhengqin, WANG Jinyang, et al. Mitigating net global warming potential and greenhouse gas intensities by substituting chemical nitrogen fertilizers with organic fertilization strategies in rice-wheat annual rotation systems in China: a 3-year field experiment[J]. *Ecological Engineering*, 2015, 81: 289–297.
- [26] BLYTH E M, OLIVER R, GEDNEY N. A study of the role of wetlands in defining spatial patterns of near-surface (top 1 m) soil carbon in the Northern Latitudes[J]. *Biogeosciences Discussions*, 2014, 11(12): 17967–18002.
- [27] 王娟, 熊又升, 徐祥玉, 等. 土壤温度和氧化还原特性对冷浸田 CH_4 排放的影响[J]. *湖北农业科学*, 2014, 53(14): 3260–3264.
- WANG Juan, XIONG Yousheng, XU Xiangyu, et al. Effects of temperature and soil reducing matter on CH_4 flux from cold waterlogged paddy field[J]. *Hubei Agricultural Sciences*, 2014, 53(14): 3260–3264. (in Chinese)
- [28] 王明星. 中国稻田甲烷排放[M]. 北京: 科学出版社, 2001: 83–172.
- [29] 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.
- ZHANG 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)
- [30] 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 a *Pleuroblastus amarus* plantation in Rainy Area of West China[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2012, 23(2): 293–300. (in Chinese)
- [31] 毛一男, 胡振华, 彭致功, 等. 不同施肥水平对夏玉米土壤呼吸的影响研究[J]. *中国农村水利水电*, 2019(4): 42–46.
- MAO Yi'nan, HU Zhenhua, PENG Zhigong, et al. Effects of different nitrogen levels on soil respiration of summer maize[J]. *China Rural Water and Hydropower*, 2019(4): 42–46. (in Chinese)
- [32] ZHANG G B, JI Y, MA J, et al. Intermittent irrigation changes production, oxidation, and emission of CH_4 in paddy fields determined with stable carbon isotope technique[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2012, 52: 108–116.
- [33] 姜运生, 李忠佩, 犬伏和之. 大气二氧化碳升高对水稻土甲烷排放的影响[C] // *Proceedings of Conference on Environmental Pollution and Public Health (CEPPH2011)*, 2011: 402–406.
- [34] 朱勇勇, 宋秉羲, 杨王敏, 等. 旱作条件下氮肥减施对水稻生长、产量与经济收益的影响[J]. *生态环境学报*, 2021, 30(11): 2150–2156.
- ZHU Yongyong, SONG Bingxi, YANG Wangmin, et al. Effects of reduced nitrogen application on rice growth, yield and economy profits under dry farming conditions[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2021, 30(11): 2150–2156. (in Chinese)
- [35] BHATTACHARYYA P, NEOGI S, ROY K S, et al. Tropical low land rice ecosystem is a net carbon sink[J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2014, 189: 127–135.
- [36] WU Lei, WU Xian, LIN Shan, et al. Carbon budget and greenhouse gas balance during the initial years after rice paddy conversion to vegetable cultivation[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 627: 46–56.