

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2020.06.032

水氮耦合对黑土稻田土壤呼吸与碳平衡的影响

张忠学^{1,2} 李铁成^{1,2} 齐智娟^{1,2} 陈鹏^{1,2} 聂堂哲³ 张作合^{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; 3. 黑龙江大学水利电力学院, 哈尔滨 150080)

摘要: 为探明不同水氮耦合方式对东北黑土区稻田碳循环的影响,以黑龙江省黑土稻田为研究对象,于2018年进行大田试验,试验设置常规灌溉(F)与控制灌溉(C)两种灌水方式,全生育期施氮量设置0、85、110、135 kg/hm² 4个水平(N0、N1、N2、N3),测定了8种不同水氮耦合方式下水稻不同生育期平均土壤呼吸速率、微生物呼吸速率和根呼吸速率的变化以及水稻收获后各器官的固碳量。结果表明,水稻植株总固碳量为446.49~716.92 g/m²,各处理水稻收获后各器官固碳量从大到小依次为穗、茎、叶、根,分别占植株总固碳量的53.69%~59.44%、27.42%~30.12%、7.24%~8.96%、4.71%~8.35%。控制灌溉模式能提高水稻植株固碳量,其中CN2处理的总固碳量最大。相同施氮量、控制灌溉模式下,茎、叶、根固碳量均大于常规灌溉模式,除CN0处理穗固碳量低于FN0处理外,其余相同施氮量、控制灌溉模式下的穗固碳量均大于常规灌溉模式。不同水氮耦合方式下,水稻从返青期至乳熟期各生育期平均土壤呼吸速率、微生物呼吸速率、根呼吸速率均呈先升高、后降低的趋势,且均在分蘖期达到峰值。除返青期外,与不施肥处理相比,施肥后各生育期平均土壤呼吸速率、微生物呼吸速率和根呼吸速率均增大,且随着施氮量的增加而增大。控制灌溉模式下各施氮量处理水稻各生育期(除返青期外)平均土壤呼吸速率、微生物呼吸速率和根呼吸速率均高于常规灌溉模式下相同施氮量处理。8种不同水氮耦合方式下黑土稻田均表现为较强的碳“汇”,控制灌溉模式能够增加碳“汇”强度,其中CN2处理碳“汇”强度最大。本研究结果可为提高黑土稻田固碳减排潜力提供理论基础,为估算区域乃至全球碳平衡提供数据支撑。

关键词: 黑土稻田; 水氮耦合; 土壤呼吸; 固碳量; 碳排放量; 碳平衡

中图分类号: S511.4⁺1; S365 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2020)06-0301-08

OSID:



Effects of Water and Nitrogen Coupling on Soil Respiration and Carbon Balance in Black Soil Paddy Field

ZHANG Zhongxue^{1,2} LI Tiecheng^{1,2} QI Zhijuan^{1,2} CHEN Peng^{1,2} NIE Tangzhe³ ZHANG Zuohe^{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

3. School of Water Conservancy and Electric Power, Heilongjiang University, Harbin 150080, China)

Abstract: In order to find out the effect of different water and nitrogen coupling methods on the carbon cycle of paddy fields in the black soil area of Northeast China, the field experiment was conducted in the black soil paddy field in Heilongjiang Province. Field irrigation experiments were conducted in 2018. The conventional irrigation (F) and controlled irrigation (C) were used as two irrigation methods. Four N application rates: N0 (0 kg/hm²), N1 (85 kg/hm²), N2 (110 kg/hm²) and N3 (135 kg/hm²) were set in the whole growth period. Average soil respiration, microbial respiration and root respiration rates of rice under eight different water-nitrogen coupling modes were measured during the period from re-greening stage to milky stage and carbon sequestration of rice organ were measured after harvesting. The results showed that the total carbon sequestration of rice plants was 446.49~716.92 g/m², of which the total carbon sequestration of CN2 treatment was the largest. At the same time, the carbon sequestration of rice

收稿日期: 2019-10-10 修回日期: 2019-11-16

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFC0400108)和国家自然科学基金面上项目(51779046)

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,讲师,博士后,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

organs after harvest from large to small was in the order of panicle, stem, leaf and root. The average carbon sequestration of four organs accounted for 53.69% ~ 59.44%, 27.42% ~ 30.12%, 7.24% ~ 8.96% and 4.71% ~ 8.35% of the total carbon sequestration of rice plants, respectively. Controlled irrigation mode could increase carbon sequestration of rice. Under the same nitrogen application rate, carbon sequestration of stem, leaf and root organs under controlled irrigation mode was higher than that under conventional irrigation mode. Carbon sequestration of panicles under controlled irrigation was higher than that under conventional irrigation except that of C_{N0} treatment, which was lower than that of F_{N0} treatment. The average soil respiration rate, microbial respiration rate and root respiration rate of rice were increased first and then decreased under all water-nitrogen coupling modes, and reached the peak at tillering stage. Compared with non-fertilization, the average soil respiration, microbial respiration and root respiration were increased after applying fertilization, and increased with the increase of nitrogen application, except the period of seeding. The average soil respiration rate, microbial respiration rate and root respiration rate of rice under controlled irrigation mode were higher than those under conventional irrigation mode at all growth stages, except the period of seeding. The carbon sink intensity of black soil paddy field was stronger under different nitrogen application coupling modes, but the carbon sink intensity was different among different treatments, and the carbon sink intensity of C_{N2} treatment was the largest. The research results can provide the necessary theoretical basis for improving carbon sequestration and emission reduction potential of black soil paddy field, and provide data support for estimating regional and global carbon balance.

Key words: black soil paddy field; water and nitrogen coupling; soil respiration; carbon sequestration; carbon emissions; carbon balance

0 引言

地球表层土壤以有机质形式存在的碳约有 1.5×10^{12} t, 约是大气碳库的 3 倍^[1]。每年以土壤呼吸的形式向大气排放 CO₂ 约 1.5×10^{10} t, 为化石燃料燃烧释放量的 10 倍, 因此, 土壤呼吸在陆地生态系统碳收支中发挥着重要作用^[2]。农田生态系统碳库是陆地生态系统碳库的重要组成部分, 占全球陆地面积的 17%^[3], 而且是其中最活跃的部分, 其土壤呼吸释放到大气中的 CO₂ 对陆地生态系统碳平衡及全球气候变化均产生重要影响^[4]。农田土壤呼吸对不同田间管理措施的响应十分敏感, 灌溉方式和施氮量是对其影响较大的两项农田管理措施。王建林等^[5]指出, 水分亏缺下, 土壤呼吸随着灌溉量的增大而增强, 但过量灌溉会抑制土壤呼吸。杨士红等^[6]也得出相似结论, 在分蘖前期、拔节孕穗期和乳熟期, 控制灌溉稻田的土壤呼吸速率日均值分别为常规灌溉稻田的 3.85、1.42、3.74 倍。程万莉等^[7]研究表明, 农家肥配施磷钾肥能显著提高土壤呼吸速率, 这与寇志奎^[8]研究结果类似。不同的水氮耦合会对土壤呼吸产生影响, 但由于土壤具有一定的空间异质性, 相同田间管理模式对不同土壤类型农田生态系统碳循环的作用可能不同, 综合研究土壤类型的影响因素, 将有助于准确评估不同水氮耦合对土壤碳库的影响。

黑土是全球最肥沃的土壤类别之一, 具有构造性能良好、土壤质地松散、天然肥力高、有机碳

含量高等特点, 对作物的生长十分有利^[9]。由于多年来不合理的开垦方式和耕种模式、粗放式经营和自然环境的变化, 东北黑土区土壤中有机碳大量减少, 土壤肥力呈现整体退化的趋势, 对我国粮食安全产生一定威胁。因此, 在实现水稻持续增产或稳产、确保粮食安全的同时, 维持土壤碳库的稳定及增长是建立可持续稻田生态系统的关键。本文通过 2018 年田间试验, 分析不同水氮耦合方式对水稻收获后各器官固碳量及水稻不同生育期平均土壤总呼吸、微生物呼吸、根呼吸速率的影响, 研究不同水氮耦合方式下黑土稻田植株总固碳量和碳排放量, 计算黑土稻田生态系统碳平衡, 以期为提高东北黑土区稻田土壤固碳减排潜力提供科学指导, 为科学估算区域乃至全球碳平衡提供关键数据支撑。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验于 2018 年 5—9 月在黑龙江省水稻灌溉试验站进行, 该站地处 $127^{\circ}40'45''E$ 、 $46^{\circ}57'28''N$, 位于庆安县和平镇, 属于寒温带大陆性季风气候。从水稻移栽到成熟, 水稻生长期日气温和降雨量变化如图 1 所示, 多年平均降雨量 577 mm, 作物水热生长期为 156 ~ 171 d, 全年无霜期 128 d。供试土壤为黑土型水稻土, 种植水稻 20 a 以上, 土壤耕层厚度 11.3 cm, 犁底层厚度 10.5 cm, 土壤容重 1.01 g/cm^3 , 孔隙度 61.8%。土壤基本理化性质为: pH 值 6.45,

耕层土壤(0~20 cm)基础肥力(均为质量比)为:有机质 42.9 g/kg、全氮 1.72 g/kg、全磷 15.25 g/kg、全钾 20.22 g/kg、碱解氮 198.29 mg/kg、有效磷 37.43 mg/kg 和速效钾 112.13 mg/kg。

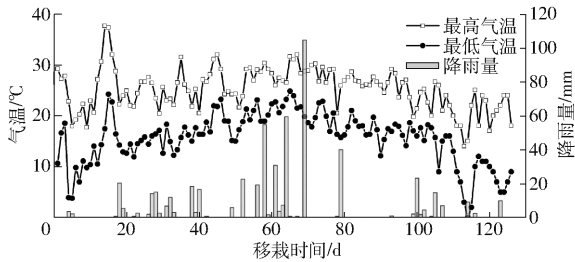


图1 水稻生长期中空气温度和降雨量的日变化曲线

Fig. 1 Changes in daily air temperature and rainfall during rice growth period

1.2 试验设计

试验采用灌水模式和施氮量2因素试验,试验处理方案见表1。灌水模式设置2种:控制灌溉(C)、常规灌溉(F)。控制灌溉模式除水稻返青期田面保持5~25 mm浅薄水层外,其余各生育阶段均不建立水层,以根层的土壤含水率为控制指标确定灌水时间和灌水定额,灌水上限为土壤饱和含水率,分蘖前期、分蘖中期、分蘖末期、拔节孕穗期、抽穗开花期及乳熟期土壤含水率下限分别为饱和含水率的85%、85%、60%、85%、85%、70%,常规灌溉除分蘖后期为控制无效分蘖适当排水晒田和黄熟期自然落干以外,其余水稻生育期田面均保持3~5 cm水层。全生育期施氮量设置4个水平(纯氮),即N0(0 kg/hm²)、N1(85 kg/hm²)、N2(110 kg/hm²)、N3(135 kg/hm²)。试验共8个处理,每个处理设3次重复,共24个试验小区,每个小区面积100 m²(10 m×10 m),各小区之间田埂向地下内嵌40 cm深的塑料板,防止各小区间的水氮交换。氮肥按照基肥、蘖肥、穗肥比例为4.5:2:3.5分施,基肥于水稻移栽前1 d施入,蘖肥于移栽后24 d施入,穗肥于移栽后72 d施入,各处理磷、钾肥用量(P₂O₅ 45 kg/hm²、K₂O 80 kg/hm²)均一致,磷肥在移栽前一次性施用,钾肥于移栽前和水稻8.5叶龄分2次施用,前后比例为1:1。试验选用当地的水稻品种“龙庆稻3号”,5月18日选取长势相同的水稻幼苗进行移栽,株距16.67 cm、行距30 cm,每穴定3株,并于9月22日收割,其他大田管理措施如病虫害防治等均与当地高产田保持一致。根据水稻当年生长情况,将各生育期划分为返青期(5月18日—6月3日)、分蘖期(6月4—29日)、拔节期(6月30日—7月17日)、抽穗期(7月18日—8月3日)、乳熟期(8月4—12日)。

表1 试验处理设计

Tab. 1 Design of experimental treatments kg/hm²

试验处理	灌水模式	施氮量
C0	控制灌溉	0
C85	控制灌溉	85
C110	控制灌溉	110
C135	控制灌溉	135
F0	常规灌溉	0
F85	常规灌溉	85
F110	常规灌溉	110
F135	常规灌溉	135

1.3 测定项目与方法

本试验于2018年5月18日实施。在每个试验小区内放置2根直径20 cm的PVC管,一根PVC管布置于株间,另一根布置于无植株生长的裸地,裸地选择为直径35 cm的圆形区域,且布置前取尽其中可见根系,分别用于测量土壤总呼吸速率(R_s)和土壤微生物呼吸速率(R_h)。测定土壤总呼吸速率的PVC管高度为10 cm,嵌入土壤7 cm;测定土壤微生物呼吸速率的PVC管高50 cm,嵌入土壤45 cm。为准确测定土壤微生物呼吸速率,将PVC管沿周长4等分,在管壁四周5~50 cm处钻孔,钻孔由距管口5 cm处开始,沿管壁从上到下每隔10 cm钻孔,便于PVC管内外土壤水分和养分交换且隔绝根系进入。试验期间不定期清理PVC管内活体植物。于水稻各生育期内,每隔7 d使用LI-8100型开路式土壤呼吸测量系统(LI-COR,美国)进行田间土壤呼吸总速率测定,测定时间为09:00—11:00,如遇强降雨天气则推迟测定时间。

水稻各生育期微生物呼吸碳排放量计算公式^[10]为

$$C_E = \sum_{i=1}^{n-1} \frac{(R_i + R_{i+1})(t_{i+1} - t_i)}{2} \times 3600 \times 24 \times 12 \times 10^{-6} \quad (1)$$

式中 C_E ——水稻各生育期微生物呼吸碳排放量, g/m²

R_i, R_{i+1} ——水稻各生育期测量第*i*、*i*+1次微生物呼吸速率, $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$

t_i, t_{i+1} ——水稻各生育期第*i*、*i*+1次测量时间, d

n ——水稻各生育期测量次数

各生育期平均微生物呼吸速率计算公式为

$$\bar{R}_h = \frac{C_E}{12 \times 24 \times 3600 \times 10^{-6} t} \quad (2)$$

式中 \bar{R}_h ——水稻各生育期平均微生物呼吸速率, $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$

t ——水稻各生育期时间, d

各生育期平均根呼吸速率计算公式为^[11]

$$\bar{R}_r = \bar{R}_s - \bar{R}_h \quad (3)$$

$$\bar{R}_s = \frac{\sum_{i=1}^{n-1} \frac{(B_i + B_{i+1})(t_{i+1} - t_i)}{2}}{t} \quad (4)$$

其中 \bar{R}_s ——各生育期平均土壤总呼吸速率, $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$

\bar{R}_r ——各生育期平均根呼吸速率, $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$

B_i, B_{i+1} ——水稻各生育期测量第 $i, i+1$ 次土壤总呼吸速率, $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$

于水稻成熟期在各小区分别随机选取具有代表性的水稻 3 株, 将植株叶、茎鞘、穗和根分开后, 用去离子水冲洗干净, 放入干燥箱 105°C 、鼓风条件下杀青 30 min, 然后 70°C 干燥至恒定质量, 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) 测定水稻各器官含碳量, 固碳量通过生物量和碳含量的乘积获得^[12], 剩余样品粉碎过筛后放入样品袋中密封保存。

每平方米种植水稻约 20 株。净初级生产力 (NPP) 计算公式为^[13]

$$N_{PP} = 20(m_l\omega_l + m_q\omega_q + m_s\omega_s + m_r\omega_r) \quad (5)$$

式中 N_{PP} ——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

$\omega_l, \omega_q, \omega_s, \omega_r$ ——水稻叶、茎鞘、穗、根碳含量, %

净生态系统生产力 (NEP) 计算公式为^[11, 14]

$$N_{EP} = N_{PP} - C_{\text{total}} \quad (6)$$

$$C_{\text{total}} = \sum_{j=1}^m C_{Ej} \quad (7)$$

其中 N_{EP} ——净生态系统生产力, g/m^2

C_{total} ——水稻全生育期微生物呼吸碳排放总量, g/m^2

m ——水稻生育期个数

C_{Ej} ——水稻第 j 个生育期微生物呼吸碳排放量, g/m^2

当 $N_{EP} > 0$ 时, 表示该农田生态系统为 CO_2 的吸收“汇”; 反之, 则为 CO_2 的排放“源”。

1.4 数据分析

采用 Excel 进行固碳量、碳排放量及碳平衡的相关计算, SPSS 19.0 进行差异显著性分析, 并采用 Origin 9.0 软件进行作图。

2 结果与分析

2.1 不同水氮耦合方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处理间差异显著 ($P < 0.05$)) 所示。试验结果表明, 不同水氮耦合方式对各器官干物质量、含碳量均有影响。常规灌溉模式下, 水稻各器官干物质量均随施氮量的增加而增大; 控制灌溉模式下, 施入氮肥后各器官干物质量均高于不施肥处理, 其中 CN2 处理叶、茎、穗 3 器官的干物质量均高于其他施氮量处理; 除 CN0 处理叶、茎干物质量低于 FN0 处理外, 控制灌溉模式下其他施氮量处理各器官干物质量均高于常规灌溉模式下相同施氮量处理。相同施氮量下, 控制灌溉模式下水稻各器官碳含量均高于常规灌溉; 两种灌溉模式下, 施入氮肥处理根、茎、叶 3 器官的碳含量均显著高于不施氮肥处理 ($P < 0.05$); 除 FN0、FN1 处理穗的碳含量显著低于其他各处理外 ($P < 0.05$), 其他处理穗的碳含量不存在显著性差异 ($P > 0.05$); 随着施氮量的增大, 各处理水稻收获后各器官的碳含量均逐渐增大。综合来看, 穗的含碳量最高, 根的含碳量最低, 各处理穗和根的含碳量平均为 40.25%、30.30%, 其中 CN3 处理最高, 为 41.69%、31.64%, FN0 处理最低, 为 37.91%、28.02%。

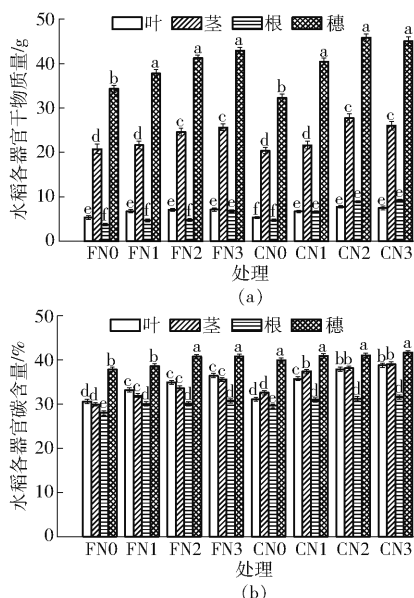


图 2 水稻收获后各器官干物质量、碳含量

Fig. 2 Dry matter weight and carbon content in organs of rice after harvesting

不同水氮耦合方式下, 水稻收获后植株固碳量如表 2 所示。结果表明, 水稻植株总固碳量为 $446.49 \sim 716.92 \text{ g}/\text{m}^2$ 。常规灌溉模式下, 植株总固

碳量随着施氮量的增加而逐渐增大;控制灌溉模式下各处理植株总固碳量高于常规灌溉模式相同施氮量处理,其中CN2处理总固碳量最大,为716.92 g/m²。水稻收获后各器官固碳量从大到小依次为穗、茎、叶、根,4器官固碳量分别占植株总固碳量的53.69%~59.44%、27.42%~30.12%、7.24%~8.96%、4.71%~8.35%。相同施氮量下,控制灌溉模式下茎、叶、根固碳量均大于常规灌溉模式;两种灌溉模式下3器官的固碳量均随着施氮量的增加而增大,除CN0处理的穗固碳量低于FN0外,其余相同施氮量、控制灌溉模式下穗固碳量均大于常规灌溉模式,且穗固碳量随着施氮量的增加而逐渐增大。

表2 水稻收获后植株固碳量

Tab.2 Carbon sequestration of rice plants after harvesting

处理	植株各器官固碳量				植株总固碳量
	叶	茎	根	穗	
FN0	32.99 ^c	127.07 ^c	21.03 ^c	265.40 ^c	446.49 ^c
FN1	46.05 ^b	140.97 ^c	28.58 ^c	298.46 ^c	514.06 ^c
FN2	49.86 ^b	168.86 ^b	28.84 ^c	343.37 ^b	590.93 ^b
FN3	52.68 ^b	186.60 ^b	42.17 ^b	358.14 ^b	639.59 ^b
CN0	33.33 ^c	135.63 ^c	27.71 ^c	263.84 ^c	460.51 ^c
CN1	48.68 ^b	165.19 ^b	40.97 ^b	339.19 ^b	594.03 ^b
CN2	59.67 ^a	215.92 ^a	56.39 ^a	384.94 ^a	716.92 ^a
CN3	58.76 ^a	207.61 ^a	59.25 ^a	383.60 ^a	709.22 ^a

注:同列不同小写字母表示处理间差异显著(P<0.05),下同。

2.2 不同水氮耦合方式对稻田土壤、微生物、根呼吸速率的影响

不同水氮耦合方式下,水稻各生育期平均土壤总呼吸速率如图3所示。试验结果表明,各处理平均土壤总呼吸速率在水稻生长期内变化规律相同,各生育期平均土壤总呼吸速率从返青期到乳熟期整体呈先升高后降低的趋势。从返青期开始,由于受不同施肥量和地温升高的影响,平均土壤总呼吸速率呈逐渐增大的趋势。到分蘖期,不同处理各生育期平均土壤总呼吸速率均达到最大值,其中CN3处理分蘖期平均土壤总呼吸速率达到7.07 μmol/(m²·s),且高于其他各处理。除返青期外,相同施氮量下,控制灌溉模式下的水稻各生育期平均土壤总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。

不同水氮耦合方式下,水稻各生育期平均微生物呼吸速率及根呼吸速率如图4所示。试验结果表明,各生育期平均微生物呼吸速率及根呼吸速率均与各生育期平均土壤总呼吸速率整体变化趋势相同,从返青期到乳熟期整体呈先升高后降低的趋势,

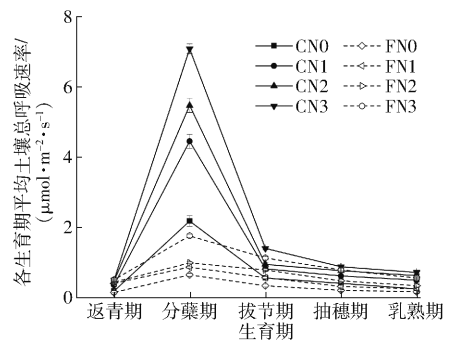
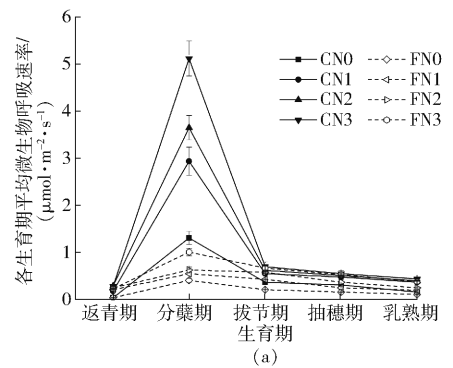
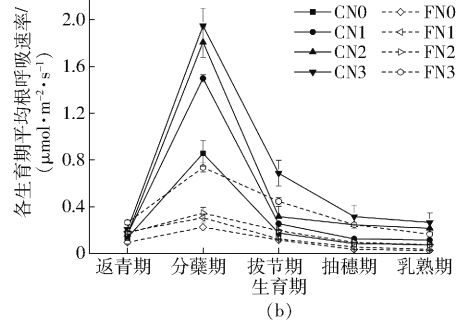


图3 水稻各生育期平均土壤总呼吸速率

Fig.3 Average total soil respiration rate at different growth stages of rice



(a)



(b)

图4 水稻各生育期平均微生物和根的呼吸速率
Fig.4 Average root respiration and microbial respiration rate of rice at different growth stages

且均在分蘖期达到峰值,其中CN3处理在分蘖期平均微生物呼吸速率及根呼吸速率最大,分别为5.12、1.95 μmol/(m²·s)。在返青期,由于水稻根系并不发达,且低温导致土壤微生物活动较弱,导致稻田根呼吸及微生物呼吸对不同水氮耦合方式的响应较弱,变化规律并不明显;在水稻其他各生育期,两种灌溉模式下的平均微生物呼吸速率及根呼吸速率均随施氮量的增加而增大,且控制灌溉模式下各施氮量处理平均微生物呼吸速率及根呼吸速率均大于常规灌溉模式下相同施氮量处理。

2.3 不同水氮耦合方式对稻田碳排放量的影响

不同处理水稻全生育期碳排放量如表3所示。结果表明,施氮量相同时,控制灌溉模式下各处理碳排放量均大于常规灌溉模式下各处理碳排放量,控

制灌溉模式下 CN0 处理碳排放量显著高于常规灌溉模式下 FN0、FN1、FN2 处理碳排放量 ($P < 0.05$), 与 FN3 处理碳排放量不存在显著性差异 ($P > 0.05$); 常规灌溉模式下, 碳排放量随着施氮量的增加而逐渐增大, 其中 FN3 处理碳排放量分别显著高于 FN0、FN1、FN2 处理 ($P < 0.05$), FN3 处理碳排放量是 FN0、FN1、FN2 处理的 1.38 ~ 2.88 倍, 但 FN0、FN1、FN2 处理间碳排放量不存在显著性差异 ($P > 0.05$); 控制灌溉模式下, 碳排放量随着施氮量的增加而增大, 其中 CN3 处理显著高于各处理碳排放量 ($P < 0.05$), 为 169.66 g/m², CN2 处理碳排放量显著高于 CN0、CN1 处理, CN1 处理碳排放量显著高于 CN0 处理 ($P < 0.05$)。

表 3 水稻全生育期微生物呼吸通量及碳排放量

Tab. 3 Total respiratory flux and carbon emissions of paddy field in whole growth period

处理	呼吸通量/(mol·m ⁻²)	碳排放量/(g·m ⁻²)
FN0	1.64 ^e	19.66 ^e
FN1	2.72 ^e	32.64 ^e
FN2	3.40 ^e	40.85 ^e
FN3	4.71 ^d	56.53 ^d
CN0	4.15 ^d	49.82 ^d
CN1	8.71 ^c	104.53 ^c
CN2	10.64 ^b	127.68 ^b
CN3	14.14 ^a	169.66 ^a

2.4 不同水氮耦合方式对稻田碳平衡的影响

不同水氮耦合方式下稻田净生态系统生产力如表 4 所示。试验结果表明, 该区域不同水氮耦合方式下稻田生态系统均表现为大气 CO₂ 的碳“汇”。与不施氮肥相比, 施肥能增强根系生长活力, 促进地上部分生长, 因此呈现出较强的碳“汇”, 同时控制灌溉模式下 CN0、CN3 处理的净生态系统生产力分别低于常规灌溉下 FN0、FN3 处理的净生态系统生产力, 控制灌溉模式下其他施氮量处理的净生态系统生产力高于常规灌溉下相同施氮量处理。常规灌

表 4 稻田净生态系统生产力

Tab. 4 Net ecosystem productivity of paddy fields

处理	NPP	NEP
FN0	446.49 ^c	426.83 ^d
FN1	514.07 ^c	481.43 ^c
FN2	590.93 ^b	550.08 ^b
FN3	639.60 ^b	583.07 ^a
CN0	460.52 ^c	410.70 ^d
CN1	594.03 ^b	489.50 ^c
CN2	716.92 ^a	589.24 ^a
CN3	709.23 ^a	539.57 ^b

溉模式下, 稻田净生态系统生产力随着施氮量的增加而增大, 意味着碳“汇”强度逐渐增强; 而控制灌溉模式下, CN2 处理净生态系统生产力显著高于其他施氮量处理 ($P < 0.05$), 为 589.24 g/m²。

3 讨论

农田生态系统碳库是陆地生态系统碳库的重要组成部分, 且是其中最活跃的部分。农田碳循环的途径主要包括两种, 一是大气中的 CO₂ 被农作物吸收、固定, 二是由于生物及人类活动干预, 以 CO₂ 和 CH₄ 的形式返回到大气中^[8], 因此欲达到农田固碳减排的最终目的, 应从进一步增强农田的固碳能力和减少碳排放两方面来实现。本研究表明, 水稻碳储量大部分积累在植株的地上部分, 其中穗的固碳量最高, 不同水氮耦合方式下穗的固碳量占植株总固碳量的 53.69% ~ 59.44%, 而对于水稻地下部固碳量, 由于根生物量的限制, 导致根的固碳量最低, 仅占植株总固碳量的 4.71% ~ 8.35%。CN0 处理穗的固碳量低于 FN0 处理, 这可能是因为控制灌溉模式下水稻对基肥的利用率低于常规灌溉, 在无氮素施入时, 无法为水稻生长提供充足的养分, 会对植株生长具有一定的抑制作用^[15]。控制灌溉模式下其他施氮量处理水稻各器官的固碳量均高于常规灌溉下相同施氮量处理水稻各器官的固碳量, 这与曹凑贵等^[16]得出的结论一致。这可能是因为控制灌溉改善了根系生长的土壤环境, 可为稻田植物根系提供适宜的水分条件, 不仅能够促进根系生长, 而且有利于延缓后期根系衰老, 水稻根系在水稻生长后期能够更好地吸收深层土壤水分及养分。田莉^[17]研究表明, 相同磷钾肥处理条件下, 施氮处理水稻秸秆、稻壳、瘪粒、糙米和总的碳累积量均显著高于不施氮处理, 本研究也得出相同的结论。两种灌水模式下, 各施氮处理固碳量均高于不施氮处理固碳量, 这可能是因为氮输入后, 一方面土壤中可利用氮的数量增加, 会使植物的碳同化作用增强, 加快地上部分生长; 另一方面, 由于更多的氮素容易被植株吸收利用, 从而使通过根系分配到地下部分的碳含量减少^[18]。

土壤呼吸是农田碳循环中将植物光合作用固定的 CO₂ 分解后又释放返回大气的主要途径, 包括微生物呼吸与根呼吸两部分。本研究表明, 各处理平均土壤总呼吸速率、平均微生物呼吸速率和平均根呼吸速率在水稻生育期内呈单峰型变化, 均在水稻分蘖期达到最大值, 这可能是因为分蘖期为水稻生长旺季, 地下部分生长出大量根系, 根呼吸速率增大, 从而导致土壤总呼吸速率也增大^[19]。周俊杰

等^[20]研究指出,与不施肥处理相比,施氮处理下土壤呼吸速率及异养呼吸速率均显著增大。本文也得出相同的结论,施氮处理下各生育期平均土壤总呼吸速率、微生物呼吸速率、根呼吸速率均大于不施氮处理,这可能是由于氮添加促进了植物根系的生长,根系生物量的增加也导致根系分泌物增加,这为微生物提供更多的底物供应;凋落物量的增加也为根系和土壤微生物活性提供更多的碳底物供应;氮肥输入同样会促进矿质土壤有机碳的氧化分解;同时促进异养呼吸和根呼吸,从而提高了土壤总呼吸速率^[21]。YANG等^[22]指出黄泥土稻田控制灌溉模式下平均土壤呼吸速率高于常规灌溉模式31.76%,这与本文的结论相似但不相同。本研究指出控制灌溉模式下各施氮量处理3种呼吸速率均大于常规灌溉下的各施氮量处理,增加幅度大于黄泥土稻田。一是因为土壤呼吸速率随着土壤含水率的升高而逐渐增大,当土壤含水率超过一定数值时,则降低;另一方面是因为频繁的干湿交替促进了土壤呼吸的进行^[6]。

研究者采用不同方法对土壤碳排放量及碳平衡进行了估算和研究。近年来,用净生态系统生产力(NEP)作为评价农田生态系统碳平衡的方法被大量研究者所采用,一定程度上弥补了用土壤碳排放效率(CEE)估算的不足^[23]。黄土稻田CO₂排放速率最高为2.21 μmol/(m²·s)^[3],本研究结果显示黑土稻田CO₂排放速率最高为7.07 μmol/(m²·s),高于黄土稻田,这与米亮等^[24]研究结果一致,这可能是与黑土的有机质含量高,土壤微生物数量大有关。本研究还采用净生态系统生产力对黑土稻田碳平衡进行了评价,表明不同水氮耦合方式下,各处理稻田净生态系统生产力均为正值,意味着黑土稻田生态

系统碳输入明显高出碳输出,黑土稻田生态系统为碳净输入,黑土稻田表现为较强的碳“汇”。这与大部分的研究结论一致,即稻田具有碳“汇”功能。

4 结论

(1)不同水氮耦合方式下,水稻收获后穗碳含量最高,根碳含量最低。当施氮量相同时,控制灌溉模式下水稻收获后各器官碳含量均高于常规灌溉模式。两种灌溉模式下,施氮处理水稻收获后各器官碳含量均高于不施氮处理。控制灌溉模式能提高水稻植株固碳量,其中CN2处理总固碳量最大。水稻各器官固碳量从大到小依次为穗、茎、叶、根;除CN0处理穗固碳量低于FNO外,当施氮量相同时,控制灌溉模式下茎、叶、根固碳量均高于常规灌溉模式。

(2)不同水氮耦合方式下,各施氮处理水稻生育期平均土壤总呼吸速率、微生物呼吸速率、根呼吸速率均呈单峰型变化,且在分蘖期达到最大值。不同灌溉模式下,施氮处理的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高于不施氮处理。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。

(3)不同水氮耦合方式下,控制灌溉模式提高了黑土稻田碳排放量,其中CN3处理水稻生育期碳排放量均显著高于其他各处理($P < 0.05$)。当施氮量相同时,控制灌溉模式下各处理碳排放量均大于常规灌溉模式,且均随着施氮量的增加而增大。各施氮处理稻田生态系统碳输入明显高于碳输出,稻田净生态系统生产力均为正值,因此黑土稻田表现为较强的碳“汇”,其中CN2处理碳“汇”强度最大。

参 考 文 献

- [1] 贺美,王立刚,王迎春,等.长期定位施肥下黑土呼吸的变化特征及其影响因素[J].农业工程学报,2018,34(4):151-161. HE Mei, WANG Ligang, WANG Yingchun, et al. Characteristic of black soil respiration and its influencing factors under long-term fertilization regimes[J]. Transactions of the CASE, 2018, 34(4): 151-161. (in Chinese)
- [2] IQBAL J, HU Ronggui, LIN Shan, et al. CO₂ emission in a subtropical red paddy soil (Ultisol) as affected by straw and N-fertilizer applications: a case study in Southern China[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2009, 131(3-4): 292-302.
- [3] 展茗.不同稻作模式稻田碳固定、碳排放和土壤有机碳变化机制研究[D].武汉:华中农业大学,2009. ZHAN Ming. Studies on mechanisms of carbon sequestration, carbon emissions and soil organic dynamics in different framing paddy fields[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2009. (in Chinese)
- [4] 金峰,杨浩,赵其国.土壤有机碳储量及影响因素研究进展[J].土壤,2000,32(1):12-18. JIN Feng, YANG Hao, ZHAO Qiguo. Advances in researches on soil organic carbon storages and affecting factors[J]. Soils, 2000, 32(1): 12-18. (in Chinese)
- [5] 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. Effects of the irrigation quantity on soil respiration in wheat field in filling stage[J]. Acta Agriculturae Boreali-Sinica, 2010, 25(3): 186-189. (in Chinese)
- [6] 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. Changes of soil respiration of paddy fields with water-saving irrigation and its influencing factors analysis[J]. Transactions of the CASE, 2015, 31(8): 140-146. (in Chinese)
- [7] 程万莉,雷康宁,王淑英,等.长期施肥对春玉米田土壤呼吸及碳平衡的影响研究[J].干旱地区农业研究,2019,37(2):

108 - 113.

CHENG Wanli, LEI Kangning, WANG Shuying, et al. Effects of long-term fertilization on soil respiration and carbon balance in spring corn fields[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2019, 37(2):108 - 113. (in Chinese)

- [8] 寇志奎. 耕作和施肥对稻田生态系统土壤碳排放及碳收支影响的研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2011.
KOU Zhikui. Effects of tillage and application of fertilizer on paddy soil carbon emission and carbon balance[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2011. (in Chinese)
- [9] 孟繁华, 李桂花, 卢昌艾, 等. 长期不同施肥黑土碳氮库的组分特征[J]. *中国土壤与肥料*, 2015(2):12 - 16.
MENG Fanhua, LI Guihua, LÜ Chang'ai, et al. Component characteristics of carbon and nitrogen pools in black soil under long term fertilization[J]. *Soils and Fertilizers Sciences in China*, 2015(2):12 - 16. (in Chinese)
- [10] 蔡艳, 丁维新, 蔡祖聪. 土壤-玉米系统中土壤呼吸强度及各组分贡献[J]. *生态学报*, 2006, 26(12):4273 - 4280.
CAI Yan, DING Weixin, CAI Zucong. Soil respiration in a maize - soil ecosystem and contribution of rhizosphere respiration [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26(12):4273 - 4280. (in Chinese)
- [11] GAO Xiang, GU Fengxue, HAO Weiping, et al. Carbon budget of a rainfed spring maize cropland with straw returning on the Loess Plateau, China[J]. *Science of the Total Environment*, 2017, 586:1193 - 1203.
- [12] 杨永辉, 武继承, 赵世伟, 等. 保水剂用量对农田生态系统碳足迹的影响[J/OL]. *农业机械学报*, 2015, 46(4):126 - 131, 125.
YANG Yonghui, WU Jicheng, ZHAO Shiwei, et al. Impact of super absorbent polymers dosage on carbon footprint of farmland ecological system[J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2015, 46(4):126 - 131, 125. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20150419&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.04.019. (in Chinese)
- [13] 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)
- [14] 冯浩, 刘晶晶, 张阿凤, 等. 覆膜方式对小麦-玉米轮作农田生态系统净碳汇的影响[J/OL]. *农业机械学报*, 2017, 48(4):180 - 189.
FENG Hao, LIU Jingjing, ZHANG Afeng, et al. Effect of film mulching patterns on carbon sequestration in wheat - maize rotation system[J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2017, 48(4):180 - 189. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20170424&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.04.024. (in Chinese)
- [15] 张忠学, 陈鹏, 陈帅宏, 等. ¹⁵N 示踪分析节水灌溉下水稻对不同时期氮肥的吸收分配[J/OL]. *农业机械学报*, 2018, 49(6):309 - 317, 346.
ZHANG Zhongxue, CHEN Peng, CHEN Shuaihong, et al. ¹⁵N tracer-based analysis of water and nitrogen management differences in uptake and partitioning of N applied at different growth stages in transplanted rice[J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2018, 49(6):309 - 317, 346. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20180636&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.06.036. (in Chinese)
- [16] 曹凑贵, 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.
CAO Cougui, LI Chengfang, ZHAN Ming, et al. Effects of agricultural management practices on carbon emissions in paddy fields [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2011, 44(1):93 - 98. (in Chinese)
- [17] 田莉. 施肥对水稻碳积累的影响研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2013.
TIAN Li. Studies on carbon phyto-fixation in rice as affected by different fertilization[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2013. (in Chinese)
- [18] 冯蕾. 施肥对水稻植株碳氮分配与积累的影响[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2011.
FENG Lei. The effect fertilization on the absorption, partition and accumulation of carbon and nitrogen in rice plants[D]. Xi'an: Xi'an University of Architectural Science and Technology, 2011. (in Chinese)
- [19] 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]. *Rural Water Conservancy and Hydropower in China*, 2019(4):42 - 46. (in Chinese)
- [20] 周俊杰, 陈志飞, 杨全, 等. 黄土丘陵区退耕草地土壤呼吸及其组分对氮磷添加的响应[J]. *环境科学*, 2020, 41(1):479 - 488.
ZHOU Junjie, CHEN Zhifei, YANG Quan, et al. Response of soil respiration and its components to nitrogen phosphorus addition in farming withdrawn grassland at the semiarid loess hilly-gully region[J]. *Environmental Science*, 2020, 41(1):479 - 488. (in Chinese)
- [21] 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 *Pleioblastus amarus* plantation in Rainy Area of West China[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2012, 23(2):293 - 300. (in Chinese)
- [22] 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.
- [23] 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)
- [24] 米亮, 王光华, 金剑, 等. 黑土微生物呼吸及群落功能多样性对温度的响应[J]. *应用生态学报*, 2010, 21(6):1485 - 1491.
MI Liang, WANG Guanghua, JIN Jian, et al. Responses of black soil's microbial respiration and community functional diversity to temperature[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2010, 21(6):1485 - 1491. (in Chinese)