

徐祥玉, 张敏敏, 彭成林, 等. 稻草还田下非稻季持续淹水对稻季 CH_4 和 CO_2 排放的影响[J]. 农业资源与环境学报, 2017, 34(2): 145–152.

XU Xiang-yu, ZHANG Min-min, PENG Cheng-lin, et al. Effects of Continuous Flooding in No-rice Growing Season on CH_4 and CO_2 Emissions of Rice Growing Season with Straw Returning[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2017, 34(2): 145–152.

稻草还田下非稻季持续淹水对稻季 CH_4 和 CO_2 排放的影响

徐祥玉^{1,2}, 张敏敏^{1,2}, 彭成林^{1,2}, 侶国涵^{1,2}, 徐大兵^{1,2}, 袁家富^{1,2*}

(1. 湖北省农业科学院植保土肥研究所, 湖北 武汉 430064; 2. 农业部潜江农业环境与耕地保育科学观测实验站, 湖北 潜江 433100)

摘要: 稻草还田和非稻季持续淹水是我国最重要的稻田管理方式之一, 此种管理方式下稻田碳排放并不清楚。本研究以江汉平原中稻-冬闲制度为对象, 探讨稻草还田耦合非稻季持续淹水对稻季碳排放的影响, 为准确评估稻田温室气体排放提供数据支撑和理论支持。结果表明, 在稻草秸秆全量覆盖还田下, 非稻季自然排水比持续淹水显著降低稻季 CH_4 累积排放量, 稻季第一次排水晒田之前 CH_4 排放占总排放量的 80%以上; 非稻季持续淹水使稻季 CO_2 累积排放量比自然排水稍有降低, CO_2 排放主要集中在第一次排水晒田之后, 占总排放量的 60%左右。非稻季淹水降低稻季土壤 NO_3^- -N、 NH_4^+ -N 和 DOC 浓度以及 10 cm 土层土壤 Eh 值, 但使乙酸浓度升高, 这可能是稻草还田耦合非稻季淹水导致 CH_4 排放量增加的主要原因。

关键词: 稻草还田; 持续淹水; 甲烷; 二氧化碳

中图分类号:X511 文献标志码:A 文章编号:2095-6819(2017)02-0145-08 doi: 10.13254/j.jare.2016.0236

Effects of Continuous Flooding in No-rice Growing Season on CH_4 and CO_2 Emissions of Rice Growing Season with Straw Returning

XU Xiang-yu^{1,2}, ZHANG Min-min^{1,2}, PENG Cheng-lin^{1,2}, SI Guo-han^{1,2}, XU Da-bing^{1,2}, YUAN Jia-fu^{1,2*}

(1.Institute of Plant Protection and Soil Fertilizer, Hubei Academy of Agricultural Sciences, Wuhan 430064, China; 2.Qianjiang Scientific Observing and Experimental Station of Agro-Environment and Arable Land Conservation, Ministry of Agriculture, Qianjiang 433100, China)

Abstract: Straw returning is a straw utilization pattern which is widely promoted in China. It can increase the soil organic carbon and fertility, but straw returning also increase the CH_4 and CO_2 emissions. The effects of continuous flooding in no rice growing season on CH_4 and CO_2 emission in rice season with straw returning is not clear. This study was conducted with two different water managements in no rice growing season, one was the middle rice – natural drainage(RD) and another was the middle rice – continuous flooding(RW). The aim was to investigate the characteristic of CH_4 and CO_2 emission flux in rice season under different water management with straw returning, and to provide data support for accurate assessment of paddy greenhouse gas emissions. The results showed that RD significantly reduced the CH_4 accumulation emission flux in rice growing season compared with the RW, and 80% total CH_4 emission flux in rice growing season was emission before the first drainage whether RD or RW. RW could cutdown the CO_2 accumulation emission flux in rice growing season compared with RD, and about 60% total CO_2 emission flux in rice growing season was emission after the first drainage whether RD or RW. RW reduced the soil NO_3^- -N, NH_4^+ -N and DOC concentration in rice growing season, and decreased the Eh value at 10 cm soil layer, but increased the acetic acid concentration. This might be the main reason of increasing the CH_4 accumulation emission flux from RD.

Keywords: straw returning; continuous flooding; methane; carbon dioxide

收稿日期:2016-10-08

基金项目:国家自然科学基金项目(41301306);湖北省农业科学院竞争性项目(2016jzxjh008);湖北省农业科技创新项目(2016-620-000-001-020);国家科技支撑计划课题(2013BAD07B10)

作者简介:徐祥玉,副研究员,主要研究方向为土壤环境过程及碳氮循环。E-mail:xuxiangyu2004@sina.com

*通信作者:袁家富 E-mail:fu1682@sina.com

碳在大气圈中主要以 CO_2 和 CH_4 的形式存在, 作为主要温室气体, CO_2 和 CH_4 对温室效应的贡献率分别为 60% 和 15%^[1]。大气中的 CH_4 含量已从工业革命前(1750 年)的 $0.72 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 上升到了 2012 年的 $1.82 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 提高到约 2.5 倍^[2]。 CO_2 浓度从工业革命前的 $0.280 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 增加到现在的 $0.393 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ^[2]。稻田是重要的温室气体排放源, 全球稻田 CH_4 年排放量为 $31\sim112 \text{ Tg}$, 占全球总排放量的 5%~19%, 中国稻田 CH_4 排放量为 $7.2\sim9.5 \text{ Tg}$ ^[3]。

秸秆还田是增加土壤碳库、提高土壤有机质的有效方式, 但其同时也增加了稻田 CH_4 排放^[4-5]。秸秆还田能极大地促进红壤稻田 CO_2 排放^[6]。秸秆不同的还田方式对农田系统温室气体排放的影响也多有研究, 双季稻早稻免耕比翻耕和旋耕 CH_4 排放量低^[7], 翻耕高茬还田明显大于免耕高茬还田^[8]。

非水稻生长季节持续淹水和自然排干是 2 种不同的管理方式^[9-11], 持续淹水使稻季 CH_4 排放量远高于排水稻田^[12-13]。秸秆不还田条件下, 非水稻生长季节持续淹水使稻季 CH_4 排放量显著高于休闲和种植小麦处理^[14], 秸秆还田下持续淹水稻田 CH_4 排放量远高于间歇灌溉^[15], 冬季秸秆翻耕还田后持续淹水比不还田稻季 CH_4 排放量显著提高^[16]。土壤水分状况含量过大或淹水时, 都会抑制土壤 CO_2 的排放^[17-18]。秸秆高留茬及稻草覆盖还田是江汉平原常见的秸秆利用方式, 在非稻季不同水分管理方式下其对稻季碳排放的影响目前尚不清楚, 本研究以江汉平原典型中稻-休闲模式为对象, 研究秸秆还田后非水稻生长季节淹水和排水对水稻生长季节稻田 CH_4 和 CO_2 的影响, 为准确评估该模式下稻田温室效应提供数据支撑和理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

研究区域选在湖北省潜江市后湖农场, 属江汉平原低湖区, 冬季静态地下水位 $40\sim60 \text{ cm}$, 北亚热带季风湿润气候, 年均气温 16.1°C , 无霜期 246 d, 年均降雨量 1100 mm , 土壤类型为湖积物发育而成的潮土

性水稻土, 试验设计中稻-冬干(RD)和中稻-冬泡(RW)两种管理方式。试验于 2014 年实施, 温室气体排放监测时间为 2015 年水稻大田生长季节。试验田土壤基本肥力性质见表 1。

1.2 试验设计及田间管理

试验田总面积 600 m^2 , 其中中稻-淹水(RW)田面积 300 m^2 , 中稻-排水(RD)田面积 300 m^2 , 共分为 6 个小区, 每小区 100 m^2 , 田间布置示意图见图 1。水稻高茬收割, 稻草还田方式为高留茬及覆盖还田, 稻草还田量为 $3750 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 施肥量 $\text{N} \cdot \text{P}_2\text{O}_5 \cdot \text{K}_2\text{O}$ 分别为 $180, 90, 144 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 氮肥施用比例为基肥:分蘖肥:穗肥 = 5.8:1.8:2.4, 磷肥一次性基肥施入, 钾肥施用比例为:基肥:穗肥 = 5:5。基肥组成为复合肥($\text{N:P}_2\text{O}_5:\text{K}_2\text{O}=25:10:16$)加过磷酸钙($\text{P}_2\text{O}_5 \geq 12\%$), 追肥为尿素($\text{N} \geq 46\%$)和氯化钾($\text{K}_2\text{O} \geq 60\%$), 插秧前施入基肥, 插秧后 15 d 施入分蘖肥, 插秧后 50 d 施入穗肥。每公顷补充 6 kg 大粒锌($\text{Zn} \geq 25\%$)和 60 kg 大粒硅($\text{SiO}_2 \geq 20\%$)。非水稻季节持续淹水田块, 淹水时间为 2014 年 10 月 5 日—2015 年 6 月 15 日, 非水稻季节排水稻田水分管理为:2014 年 10 月—2015 年 6 月 10 日自然排水, 2015 年 6 月 8 日覆水。水稻生长季节, 田间水分管理一致, 2015 年插秧后至 7 月 22 日淹水, 7 月 23 日晒田, 8 月 3 日淹水, 收获前 1 周排水晒田。

供试水稻品种为鉴真 2 号, 2014 年 6 月 15 日手插秧, 后期因天气原因倒伏严重, 未计产。2015 年水稻于 6 月 17 日手插秧, 10 月 3 日收获。

1.3 气体样品采集与测定

CO_2 和 CH_4 气体采用静态箱采集, Agilent 7890A 气相色谱仪分析测定, 静态采样箱分为底座、中段箱

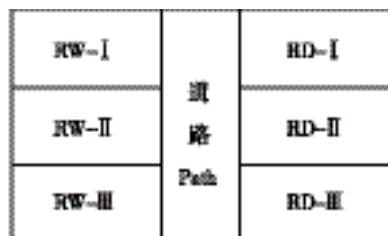


图 1 田间试验布置图

Figure 1 The sketch of field experiment

表 1 试验区土壤肥力状况

Table 1 Basic properties of experimental topsoil

处理 Treatments	全氮 TN/%	全磷 TP/%	全钾 TK/%	有机质 $\text{OM/g} \cdot \text{kg}^{-1}$	碱解氮 $\text{AN/mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	速效磷 $\text{AP/g} \cdot \text{kg}^{-1}$	速效钾 $\text{AK/g} \cdot \text{kg}^{-1}$	pH 值
RD	0.21 ± 0.01	0.045 ± 0.001	2.02 ± 0.03	26.38 ± 0.73	132.74 ± 12.18	8.99 ± 6.00	191.85 ± 6.92	7.48 ± 0.04
RW	0.21 ± 0.04	0.045 ± 0.001	1.95 ± 0.03	26.43 ± 3.47	129.50 ± 33.01	9.13 ± 1.90	178.67 ± 9.02	7.12 ± 0.10

和顶箱3部分。底座(长42 cm、宽42 cm、高20 cm)用不锈钢制成,上端有深3 cm、宽2 cm的密封水槽,底座四壁距上部10 cm处打两排直径为2 cm的孔,以利于水分和肥料的流动,底座于水稻移栽前埋入土壤10 cm。中段箱和顶箱(长42 cm、宽42 cm、高50 cm)均由不锈钢制作,中段箱顶部有深3 cm、宽2 cm的密封水槽。箱体外包一层保温隔热层。在距离底座20 cm处理设氧化还原单位参比电极,埋设深度为10、20、30、40、50 cm各1支。每7~10 d采样1次,采样时间为每日上午8:00—10:00。采气时,预先在底座水槽中注入水,然后盖上采气箱,在盖箱后0、5、10、15、20 min用30 mL医用注射器采集1个气体样品,24 h内带回实验室进行分析测定完毕。采气时不定期记录土壤氧化还原状况。

CO₂和CH₄气体通量计算公式为:

$$F = \rho \times \frac{V}{S} \times \frac{dC}{dt} \times \frac{273}{273+T}$$

式中: F 为气体通量,即 F_{CH_4} (以CH₄计, $\text{mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$), F_{CO_2} (以CO₂计, $\text{mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$); ρ 为标准状态下CO₂和CH₄的密度($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$); V 为密闭箱有效体积(m^3); S 为底座面积(m^2); dC/dt 表示单位时间内密闭箱内CO₂和CH₄的浓度变化量; T 为密闭箱内平均气温。

增温潜势计算按照商庆银等方法^[15],CH₄综合增温潜势(GWP)是CO₂的25倍,单位面积GWP($GWP_{\text{area-scaled}}$ (CO₂ kg·hm⁻²))计算公式为:

$$GWP_{\text{area-scaled}} = 25 \times \text{CH}_4 \text{ 累积排放量} + \text{CO}_2 \text{ 累积排放量}.$$

单位产量GWP($GWP_{\text{yield-scaled}}$ (CO₂ kg·kg⁻¹))计算公式为:

$$GWP_{\text{yield-scaled}} = GWP_{\text{area-scaled}} / Y.$$

式中, Y 为水稻产量(kg·hm⁻²)。

1.4 土壤样品采集与测定

在采集气体的同时,用不锈钢土壤采集器采集0~20 cm土层土样,剔除可见根系和石块,4℃带回实验室,鲜样分析土壤可溶性土壤有机碳(DOC)、NO₃⁻-N、NH₄⁺-N、乙酸含量。DOC测定过程:首先以烘干法测定土壤水分,称取相当于烘干土10 g的新鲜土样,以土:水=1:5的比例加入去离子水,加入时扣除鲜土携带的水分。25℃恒温震荡30 min,4℃下8 000 r·min⁻¹离心10 min,上清液过0.45 μm滤膜,-18℃保存。一份在Elementar总有机碳分析仪测定DOC,另一份以Waters高效液相色谱仪测定乙酸。乙酸测定参考孙孙宝利等的方法^[19]:C18反向色谱柱,4.6

mm×250 mm,5 μm,0.1%磷酸和乙腈(98:2),检测波长210 nm,流速1.0 ml·L⁻¹,进样体积20 μL,柱温35℃。高效液相所用试剂均为色谱纯。

1.5 数据分析

数据归纳和计算通过EXCEL进行,显著性检验采用SPSS 17.0软件进行。

2 结果与分析

2.1 CO₂和CH₄排放通量

非稻季持续淹水显著提高了稻季CH₄排放。图2A显示,在稻季期间,RD处理CH₄排放变化范围是1.41~16.63 mg·m⁻²·h⁻¹,RW处理CH₄排放变化范围是0.06~19.48 mg·m⁻²·h⁻¹,持续淹水使稻季稻田CH₄平均排放量从6.37±0.9 mg·m⁻²·h⁻¹(RD)升至7.96±2.4 mg·m⁻²·h⁻¹(RW)(图3A),CH₄累积排放量显著提高,从10.42±1.39 g·m⁻²(RD)提高到12.66±1.20 g·m⁻²(RW),增加21.5%(图4A)。从变化趋势看,CH₄排放主要集中在第一次排水晒田之前(7月31号之前),RW和RD分别占总排放量的97.2%和86.1%。

非稻季持续淹水抑制了稻季CO₂排放。图2B显示,在稻季期间,RD处理CO₂排放变化范围是

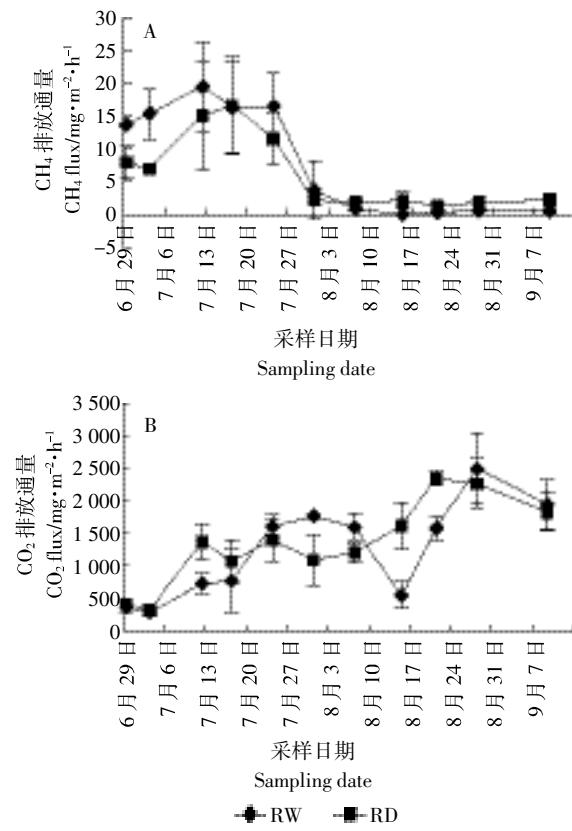


图2 CH₄和CO₂排放动态

Figure 2 The seasonal variation fluxes of CH₄ and CO₂ emission

322.1~2 348.1 $\text{mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$, RW 处理 CO_2 排放变化范围是 289.2~2 495.4 $\text{mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$, 持续淹水使稻季稻田 CO_2 平均排放量从 $1\ 357.2 \pm 106.2 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ (RD)降低至 $1\ 246.0 \pm 25.6 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$ (RW)(图 3B), CO_2 累积排放量稍有降低, 从 $2\ 435.57 \pm 191.7 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ (RD)降低到 $2\ 260.7 \pm 22.7 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ (RW)(图 4B)。从变化趋势看, CO_2 排放主要集中在第一次排水晒田之后(7月 31 号之后), RW 和 RD 分别占总排放量的 59.6% 和 62.0%。

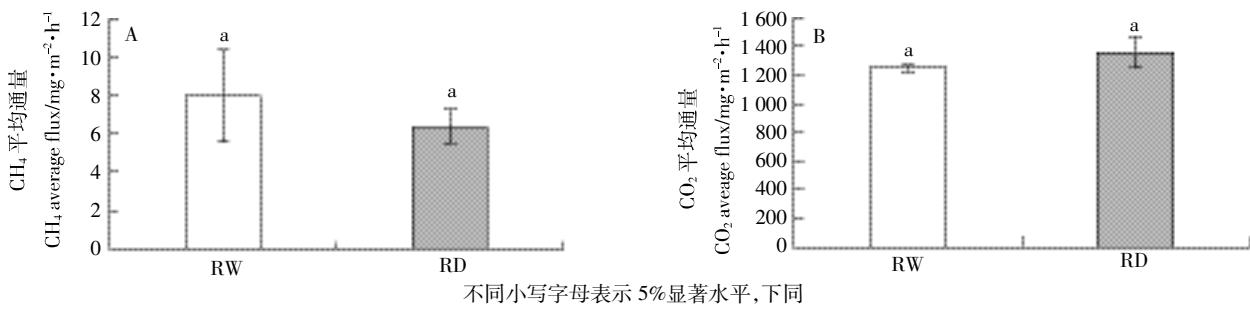
2.2 NO_3^- -N 和 NH_4^+ -N 动态变化

相比 RD, RW 降低稻季土壤 NO_3^- -N 和 NH_4^+ -N 浓

度(图 5), 使 NH_4^+ -N 浓度从 $3.81 \sim 20.67 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ (RD)降低至 $3.68 \sim 16.32 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ (RW), 平均浓度降低 22.9%; NO_3^- -N 浓度则从 $0.83 \sim 2.64 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ (RD)降低为 $0.20 \sim 3.32 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ (RW), 平均浓度降低 22.2%。从浓度值考虑, NH_4^+ -N 远远高于 NO_3^- -N。从变化趋势看, NO_3^- -N 和 NH_4^+ -N 均存在随水稻生长浓度降低的趋势。

2.3 DOC、Eh 和乙酸动态变化

RW 显著降低稻季土壤 DOC 浓度(图 6)。图 6 显示, DOC 浓度从 $34.42 \sim 467.43 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ (RD)降低至 $7.15 \sim 341.11 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ (RW), 平均浓度降低 45.9%($P <$



The different small letters indicate significant differences at the 5% level. The same below

图 3 CO_2 和 CH_4 日平均通量

Figure 3 The average fluxes of CO_2 and CH_4 emission

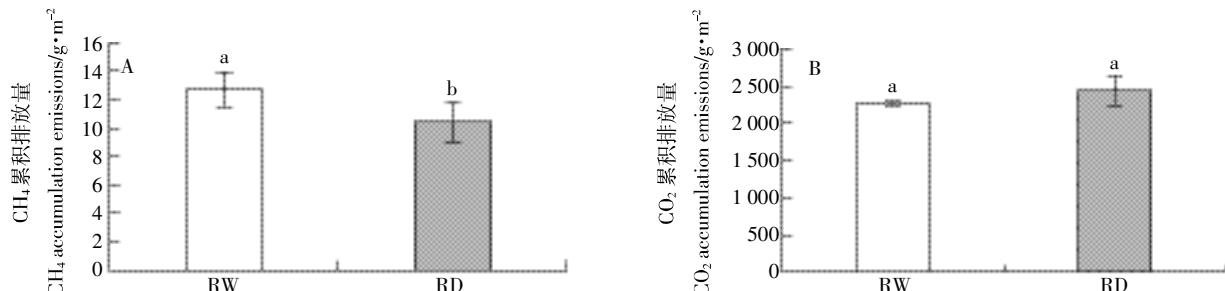


图 4 CO_2 和 CH_4 累积排放量

Figure 4 The accumulation emissions of CO_2 and CH_4 emission

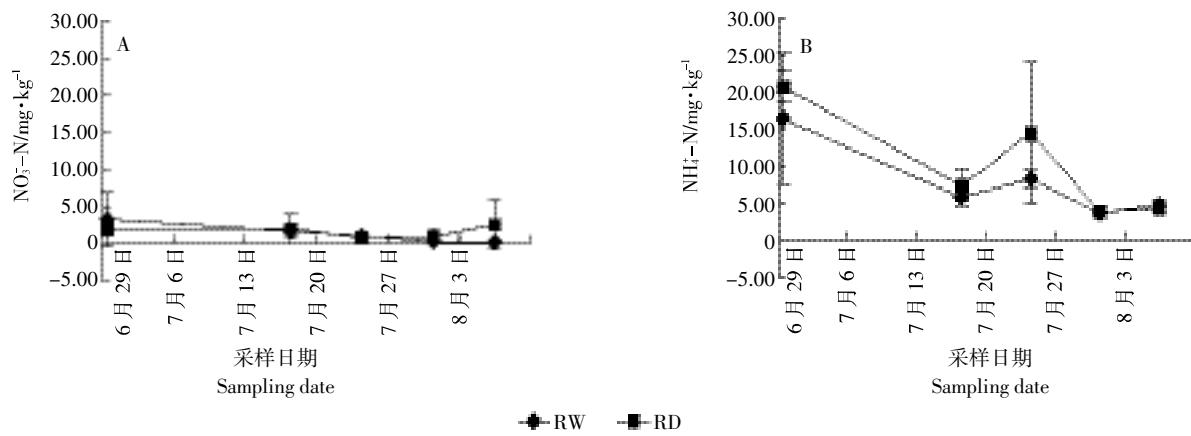


图 5 土壤 NO_3^- -N 和 NH_4^+ -N 含量

Figure 5 The contents of soil NO_3^- -N and NH_4^+ -N in rice growing season

0.05)。RW使稻季土壤乙酸浓度从0.62~2.12 mg·kg⁻¹(RD)提高到0.39~2.29 mg·kg⁻¹,平均浓度提高14.5%(图7)。非稻季RW使稻季稻田土壤氧化还原电位值降低(图8),在10 cm土层上氧化还原电位均值从-19.78 mV降低至-34.63 mV,降幅为75%,在20 cm土层上则从-31.86 mV降低至-39.81 mV,降幅为24.95%。

2.4 水稻产量及温室效应

从水稻产量及构成因素看(表2),RD处理水稻产量显著低于RW处理($P<0.05$),主要是由于有效穗

数差异造成的。从温室效应看(表3),RD和RW在单位面积温室效应方面没有差异,但在单位产量温室效应RD显著高于RW($P<0.05$),主要原因是RD产量偏低造成的。同时还可以看出,CO₂温室效应占RW总碳温室效应82.6%,RD总碳温室效应的79.4%。

3 讨论

3.1 非稻季持续淹水对稻季CH₄排放的影响

现有资料表明,与持续淹水相比,干湿交替可以降低CH₄总排放量的33%~93%;中期烤田能减少稻田CH₄排放36%~65%^[20~21]。秸秆还田会增强土壤固碳潜力,同时也会增加CH₄排放^[4,22],同时,还田方式^[9]以

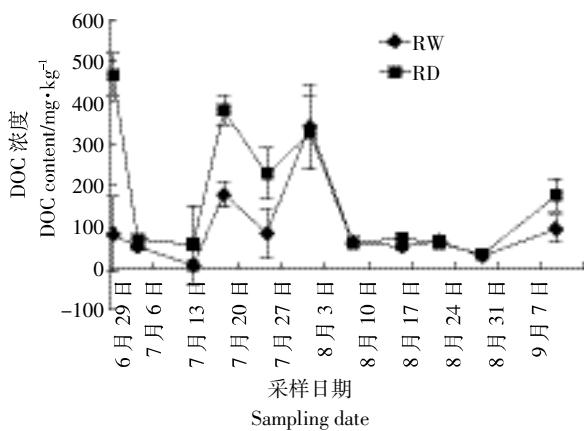


图6 水稻大田生长期土壤DOC变化状况

Figure 6 The seasonal variation of soil DOC in rice growing season

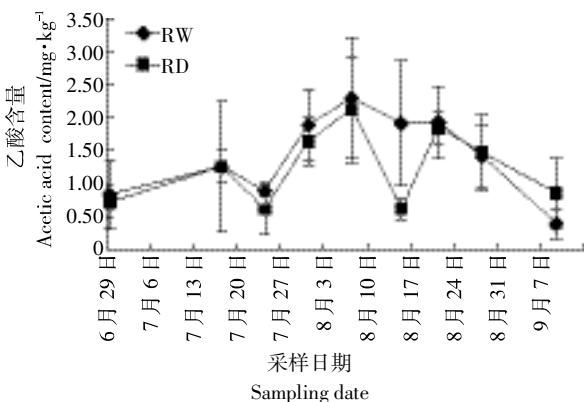


图7 水稻大田生长期土壤乙酸变化状况

Figure 7 The seasonal variation of soil acetic acid in rice growing season

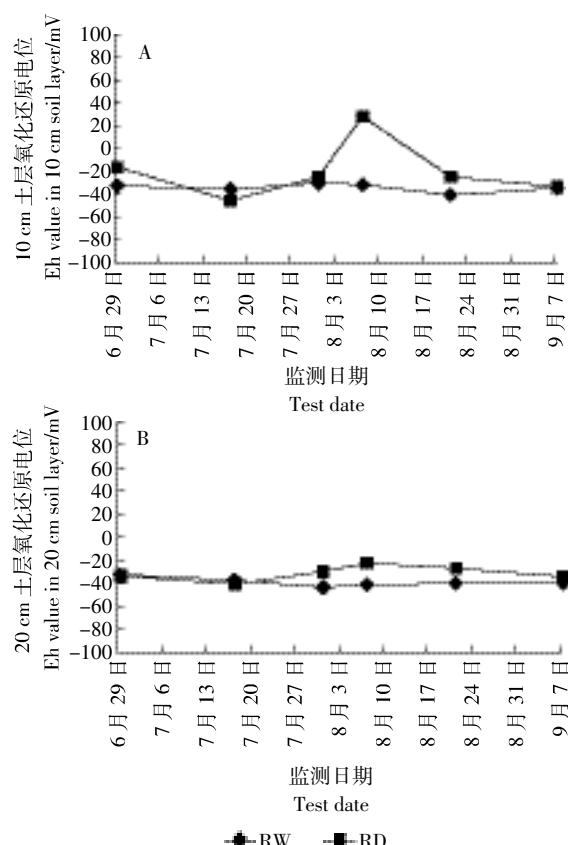


图8 水稻大田生长期土壤氧化还原电位状况

Figure 8 The seasonal variation of soil Eh value in rice growing season

表2 各处理水稻产量及其构成因素

Table 2 Grain yield and its components under each treatment

处理 Treatment	有效穗数 Number of effective tillers/ $\times 10^4 \cdot \text{hm}^{-2}$	每穗粒数 Grain number per panicle	结实率 Seed setting rate/%	千粒重 1 000-grain weight/g	产量 Grain yield/t·hm ⁻²
RD	264.79±23.5b	132.48±6.67a	86.66±5.61a	24.29±0.29a	7.16±0.23b
RW	312.17±19.8a	120.26±5.55a	82.45±0.85a	25.62±0.38a	8.27±0.59a

注:同一列不同小写字母表示5%显著水平。下同。

Note: The different small letters in a column indicate significant differences at the 5% level. The same below.

表3 各处理温室气体排放状况

Table 3 The characteristic of CH₄ and CO₂ emission under each treatment

处理 Treatment	GWP _{CH₄} /CO ₂ kg·hm ⁻²	GWP _{CO₂} /CO ₂ kg·hm ⁻²	GWP _{CO₂} /GWP _{CH₄} +GWP _{CO₂} /%	GWP _{area-scaled} /CO ₂ kg·hm ⁻²	GWP _{yield-scaled} /CO ₂ kg·kg ⁻¹
RD	2 605.13±347.10b	24 355.71±1917.26a	79.4	26 960.8±2 139.8a	3.77±0.44a
RW	3 164.62±299.86a	22 607.02±227.23a	82.6	25 771.6±134.5a	3.12±0.22b

及稻草还田耦合淹水^[23]对CH₄排放也有影响,稻季秸秆还田与持续淹水对稻田CH₄排放具有强烈的激发作用。上述研究均为水稻种植季节,本研究表明,与RD相比,RW处理稻季CH₄累积排放量显著升高(图4A),其主要原因是非稻季持续淹水情况下稻田产甲烷潜力远高于自然排水^[14],但因RW水稻产量显著高于RD,导致其产量温室效应显著低于RW(表2和表3)。

3.2 非稻季持续淹水对稻季CO₂排放的影响

大多数研究结果显示,秸秆还田会促进土壤CO₂排放^[24-26],也有研究表明秸秆还田会降低CO₂排放而提高CH₄排放^[27-28],这种不一致的结果,主要是由于还田方式和耕作制度不同而造成的^[25]。上述研究中秸秆还田与后季作物衔接紧密,不存在冬闲管理方式,同时也没有研究冬闲排水与持续淹水方面的差异。本研究表明,非稻季秸秆还田后稻田水分管理对稻季CO₂排放通量影响不大,RW处理CO₂累积排放量比RD处理稍有降低(图4B),这主要是由于持续淹水情况下,土壤微生物好氧呼吸受到抑制,即使在稻季有干湿交替措施,但微生物好氧呼吸恢复的滞后效应使CO₂排放很难在短时间内迅速增加。本研究同时表明,CO₂所导致的温室效应远高于CH₄(表3)。

3.3 非稻季持续淹水对稻季土壤性质的影响

本研究结果表明,非稻季RW显著降低稻季土壤DOC浓度、提高了乙酸浓度、降低了还原电位值,同时RW降低稻季土壤NO₃⁻-N和NH₄⁺-N浓度。冬季作物残茬秸秆还田可提高土壤活性碳(333 mmol KMnO₄氧化)^[29-30],稻季秸秆还田后持续淹水土壤DOC、NH₄⁺-N浓度明显高于间歇灌溉^[23],相对于干湿交替,持续淹水以及持续淹水且稻草还田可显著提高土壤有机酸浓度^[31],主要原因是秸秆还田增加土壤活性有机碳,在淹水条件下活性有机碳厌氧将降解为有机酸,在产CH₄菌作用下产生CH₄。这是导致CH₄排放量高的一个重要原因,另一个原因可能是持续淹水情况下,丙酸和丁酸等低分子脂肪酸累积量比较高^[32],它们在土壤中可能存在互营氧化产乙酸的过程^[33],这个过程可能导致RW处理下乙酸浓度持续偏高,从而

导致CH₄排放量高。

4 结论

在稻草秸秆还田情况下,非稻季自然排水(RD)比持续淹水(RW)显著降低稻季CH₄排放量,CH₄排放主要集中在第1次排水晒田之前;RW使稻季CO₂累积排放量比RD稍有降低,CO₂排放主要集中在第1次排水晒田之后。RW降低稻季土壤NO₃⁻-N、NH₄⁺-N和DOC浓度,同时降低了10 cm土层土壤Eh值,但使乙酸浓度升高,这可能是CH₄排放量增加的主要原因。从田间管理角度出发,RW在一定程度上抑制杂草生长,增加甲烷增温潜势,但对总增温潜势无显著影响。

参考文献:

- [1] IPCC. Technical summary[R]//Climate change 2007: The physical science basis contribution of working group I to the fourth assessment report of the IPCC, New York: Cambridge University Press, 2007.
- [2] IPCC. Climate change 2014: The physical science basis. contribution of working group to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change[R]//Solomon S, Qin D, Manning M, et al. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2014.
- [3] 张广斌,马静,徐华,等.中国稻田CH₄排放量估算研究综述[J].土壤学报,2009,46(5):907-916.
ZHANG Guang-bin, MA Jing, XU Hua, et al. Literature review on estimation of methane emission from paddy fields in China [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2009, 46(5): 907-916. (in Chinese)
- [4] 遂非,王效科,韩冰,等.稻田秸秆还田:土壤固碳与CH₄增排[J].应用生态学报,2010,21(1):99-108.
LU Fei, WANG Xiao-ke, HAN Bing, et al. Straw return to rice paddy: Soil carbon sequestration and increased methane emission[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2010, 21(1): 99-108. (in Chinese)
- [5] Bossio D A, Horwath W R, Mutters R G, et al. Methane pool and flux dynamics in a rice field following straw incorporation [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1999, 31(9):1313-1322.
- [6] Javed Iqbal, Ronggui H, Shan L, 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 and Environment*, 2009, 131:292-302.
- [7] 肖小平,伍芬琳,黄凤球,等.不同稻草还田方式对稻田温室气体

- 排放影响研究[J].农业现代化研究,2007,28(5):629–632.
- XIAO Xiao-ping, WU Fen-lin, HUANG Feng-qiu, et al. Greenhouse air emission under different pattern of rice-straw returned to field in double rice area[J]. *Research of Agricultural Modernization*, 2007, 28 (5): 629–632. (in Chinese)
- [8] 秦晓波, 李玉娥, 万运帆, 等. 耕作方式和稻草还田对双季稻田CH₄和N₂O排放的影响[J]. 农业工程学报, 2014, 30(11):216–224.
- QIN Xiao-bo, LI Yu-e, WAN Yun-fan, et al. Effect of tillage and rice residue return on CH₄ and N₂O emissions from double rice field [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2014, 30(11): 216–224. (in Chinese)
- [9] 蔡祖聪, 谢德体, 徐华, 等. 冬灌田影响水稻生长期甲烷排放量的因素分析[J]. 应用生态学报, 2003, 14(5): 705–709.
- CAI Zu-cong, XIE De-ti, XU Hua, et al. Factors influencing CH₄ emissions from a permanently flooded rice field during rice growing period [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2003, 14 (5): 705–709. (in Chinese)
- [10] Yan X Y, Cai Z C, Ohara T, et al. Methane emission from rice fields in mainland China: Amount and seasonal spatial distribution[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2003, 108(D16): 4505.
- [11] 李香兰, 徐华, 曹金留, 等. 水分管理对水稻生长期CH₄排放的影响[J]. 土壤, 2007, 39(2): 238–242.
- LI Xiang-lan, XU Hua, CAO Jin-liu, et al. Effect of water management on CH₄ emission during rice-growing season[J]. *Soils*, 2007, 39(2): 238–242. (in Chinese)
- [12] 蔡祖聪. 中国稻田甲烷排放研究进展[J]. 土壤, 1999(5): 266–269.
- CAI Zu-cong. Advances on methane emission from paddy fields in China[J]. *Soils*, 1999(5): 266–269. (in Chinese)
- [13] 徐华, 蔡祖聪, 李小平. 冬作季节土壤水分状况对稻田甲烷排放的影响[J]. 农村生态环境, 1999, 15(4): 20–23.
- XU Hua, CAI Zu-cong, LI Xiao-ping. Effect of soil water regime in winter cropping on CH₄ fluxes from rice field [J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 1999, 15(4): 20–23. (in Chinese)
- [14] 张广斌, 张晓艳, 马二登, 等. 冬季土地管理对稻季CH₄产生、氧化和排放的影响[J]. 生态与农村环境学报 2010, 26(2): 97–102.
- ZHANG Guang-bin, ZHANG Xiao-yan, MA Er-deng, et al. Effects of land management in winter on production, oxidation and emission of CH₄ during the rice-growing season [J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2010, 26(2): 97–102. (in Chinese)
- [15] 商庆银, 杨秀霞, 成臣, 等. 稻秆还田条件下不同水分管理对双季稻田综合温室效应的影响[J]. 中国水稻科学, 2015, 29 (2): 181–190.
- SHANG Qing-yin, YANG Xiu-xia, CHENG Chen, et al. Effects of water regime on yield-scaled global warming potential under double rice-cropping system with straw returning[J]. *Chinese Journal of Rice Science*, 2015, 29 (2): 181–190. (in Chinese)
- [16] 张广斌, 张晓艳, 纪洋, 等. 冬季秸秆还田对冬灌田水稻生长期CH₄产生、氧化和排放的影响[J]. 土壤, 2010, 42 (6): 895–900.
- ZHANG Guang-bin, ZHANG Xiao-yan, JI Yang, et al. Effects of rice straw application in winter on CH₄ production, oxidation, and emission from continuously flooded rice field during the rice-growing season[J]. *Soils*, 2010, 42 (6): 895–900. (in Chinese)
- [17] Linn D M, Doran J W. Effects of water-filled pore space on carbon dioxide and nitrous oxide production in tilled and nontilled soils[J]. *Soil Society of America Journal*, 1984, 48(6): 1267–1272.
- [18] Edwards N T. Effects of temperature and moisture on carbon dioxide evolution in a mixed deciduous forest floor[J]. *Soil Society of America Journal*, 1975, 39(2): 361–365.
- [19] 孙宝利, 黄金丽, 贺小蔚, 等. 高效液相色谱法测定土壤中有机酸[J]. 分析试验室, 2010, 29(增): 51–54.
- SUN Bao-li, HUANG Jin-li, HE Xiao-wei, et al. High performance liquid chromatography determination of organic acids in soil[J]. *Journal of Analysis Laboratory*, 2010, 29 (S): 51–54. (in Chinese)
- [20] 邹建文, 黄耀, 宗良纲, 等. 稻田CO₂、CH₄和N₂O排放及其影响因素[J]. 环境科学学报, 2003, 23(6): 758–764.
- ZOU Jian-wen, HUANG Yao, ZONG Liang-gang, et al. A field study on CO₂, CH₄ and N₂O emissions from rice paddy and impact factors[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2003, 23(6): 758–764. (in Chinese)
- [21] 邹霞凌, 李玉娥, 高清竹, 等. 中国农业领域温室气体主要减排措施研究分析[J]. 生态环境学报, 2011, 20(8): 1348–1358.
- ZOU Xiao-xia, LI Yu-e, GAO Qing-zhu, et al. How to reduce greenhouse gas(GHG) emissions in agriculture: An analysis of measures and actions taken in China [J]. *Ecology and Environment*, 2011, 20 (8): 1348–1358. (in Chinese)
- [22] 张岳芳, 郑建初, 陈留根, 等. 麦秸还田与土壤耕作对稻季CH₄和N₂O排放的影响[J]. 生态环境学报, 2009, 18(6):2334–2338.
- ZHANG Yue-fang, ZHENG Jian-chu, CHEN Liu-gen, et al. Effects of wheat straw returning and soil tillage on CH₄ and N₂O missions in paddy season[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2009, 18(6): 2334–2338. (in Chinese)
- [23] 汤宏. 稻秆还田下稻田温室气体排放及其对水分管理的响应[D]. 长沙: 湖南农业大学, 2013.
- TANG Hong. Greenhouse gases emission from paddy field as affected by rice straw incorporation and its response to water regime[D]. Changsha: Hunan Agricultural University, 2013. (in Chinese)
- [24] 强学彩, 袁红莉, 高旺盛. 稻秆还田量对土壤CO₂释放和土壤微生物量的影响[J]. 应用生态学报, 2004, 15(3): 469–472.
- QIANG Xue-cai, YUAN Hong-li, GAO Wang-sheng. Effect of crop-residue incorporation on soil CO₂ emission and soil microbial biomass [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2004, 15 (3):469–472. (in Chinese)
- [25] 李成芳, 寇志奎, 张枝盛, 等. 稻秆还田对免耕稻田温室气体排放及土壤有机碳固定的影响[J]. 农业环境科学学报, 2011, 30(11): 2362–2367.
- LI Cheng-fang, KOU Zhi-kui, ZHANG Zhi-sheng, et al. Effects of rape residue mulch on greenhouse gas emissions and carbon sequestration from no-tillage rice fields[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2011, 30(11): 2362–2367. (in Chinese)
- [26] Zou J W, Huang Y, Zong L L, et al. Carbon dioxide, methane, and nitrous oxide emissions from a rice-wheat rotation as affected by crop residue incorporation and temperature[J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2004, 21: 691–698.

- [27] Naser H M, Nagate O, Tamura S, et al. Methane emissions from five paddy fields with different amounts of rice straw application in central Hokkaido, Japan[J]. *Soil Science and Plant Nutrient*, 2007, 53:95–101.
- [28] Curtin D, Wang H, Selles F, et al. Tillage effects on carbon fluxes in continuous wheat and fallow – wheat rotations[J]. *Soil Society of America Journal*, 2000, 64(6): 2080–2086.
- [29] 肖小平, 唐海明, 聂泽民, 等. 冬季覆盖作物残茬还田对双季稻田土壤有机碳和碳库管理指数的影响[J]. 中国生态农业学报, 2013, 21(10): 1202–1208.
XIAO Xiao-ping, TANG Hai-ming, NIE Ze-min, et al. Effects of winter cover crop straw recycling on soil organic carbon and soil carbon pool management index in paddy fields[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2013, 21(10): 1202–1208. (in Chinese)
- [30] 彭华, 纪雄辉, 吴家梅, 等. 不同稻草还田模式下双季稻土壤有机碳及碳库管理指数研究[J]. 生态环境学报 2016, 25(4): 563–568.
PENG Hua, JI Xiong-hui, WU Jia-mei, et al. Organic carbon and carbon pool management index in soil under different rice straw returning way in double-cropping paddy fields[J]. *Ecology and Environment-*
tal Sciences, 2016, 25(4): 563–568. (in Chinese)
- [31] 彭娜, 王开峰, 王凯荣, 等. 不同水分管理下施用稻草对土壤有机酸和养分有效性的影响[J]. 土壤通报, 2007, 38(5):857–862.
PENG Na, WANG Kai-feng, WANG Kai-rong, et al. Effects of rice straw incorporation on accumulation of organic acids and nutrients availability under different water regimes [J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2007, 38(5): 857–862. (in Chinese)
- [32] 单玉华, 蔡祖聪, 韩勇, 等. 淹水土壤有机酸积累与秸秆碳氮比及氮供应的关系[J]. 土壤学报, 2006, 43(6): 941–947.
SHAN Yu-hua, CAI Zu-cong, HAN Yong, et al. Accumulation of organic acids in relation to C:N ratios of straws and N application in flooded soil[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2006, 43(6):941–947. (in Chinese)
- [33] 刘鹏飞, 陆雅海. 水稻土中脂肪酸互营氧化的研究进展[J]. 微生物学通报, 2013, 40(1): 109–122.
LIU Peng-fei, LU Ya-hai. A review of syntrophic fatty acids oxidation in anoxic paddy soil[J]. *Microbiology China*, 2013, 40(1): 109–122. (in Chinese)