中国生态农业学报 2018 年 9 月 第 26 卷 第 9 期
Chinese Journal of Eco-Agriculture, Sep. 2018, 26(9): 1291−1301

DOI: 10.13930/j.cnki.cjea.180634

邹凤亮, 曹凑贵, 马建勇, 李成芳, 蔡明历, 汪金平, 孙自川, 江洋. 基于DNDC模型模拟江汉平原稻田不同种植模式条件下温室气体排放[J]. 中国生态农业学报, 2018, 26(9): 1291−1301

ZOU F L, CAO C G, MA J Y, LI C F, CAI M L, WANG J P, SUN Z C, JIANG Y. Greenhouse gases emission under different cropping systems in the Jianghan Plain based on DNDC model[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2018, 26(9): 1291−1301

基于 DNDC 模型模拟江汉平原稻田不同种植模式条件下温室气体排放*

邹凤亮, 曹凑贵, 马建勇, 李成芳, 蔡明历, 汪金平, 孙自川, 江 洋**

(华中农业大学植物科学技术学院 武汉 430070)

摘 要: 稻田被认为是温室气体 CH_4 和 N_2O 的主要排放源之一。湖北省江汉平原地区水稻常年种植面积约 8×10^5 hm^2, 占湖北省水稻种植面积的 40%左右。研究江汉平原地区稻田温室气体排放特征, 对于评估区域稻田温室气体排放以及稻田温室气体减排具有重要意义。目前, DNDC 模型已被广泛应用于模拟和估算田间尺度的温室气体排放, DNDC 模型与地理信息系统(ArcGIS)结合, 可进行区域尺度的温室气体排放模拟与估算。本研究以湖北省典型稻作区江汉平原为研究区域, 运用 DNDC 模型模拟和估算江汉平原稻田区域尺度的温室气体排放。设置大田定点观测试验, 监测中稻-小麦(RW)、中稻-油菜(RR)、中稻-冬闲(RF)3 种种植模式下稻田温室气体 CH_4 和 N_2O 的周年排放特征。通过田间观测值与 DNDC 模拟值的比较进行模型验证, 并利用获取 DNDC 模型所需的气象、土壤、作物及田间管理等区域数据, 模拟江汉平原稻田不同种植模式下温室气体 CH_4 和 N_2O 的排放量。田间试验表明, 江汉平原稻田 RW、RR 和 RF 模型的 CH_4 排放通量为−2.80~39.78 $mg\cdot m^{-2}\cdot h^{-1}$、−1.74~42.51 $mg\cdot m^{-2}\cdot h^{-1}$ 和−1.57~55.64 $mg\cdot m^{-2}\cdot h^{-1}$, N_2O 周年排放通量范围分别为 0~1.90 $mg\cdot m^{-2}\cdot h^{-1}$、0~1.76 $mg\cdot m^{-2}\cdot h^{-1}$ 和 0~1.49 $mg\cdot m^{-2}\cdot h^{-1}$; CH_4 排放量 RW 和 RR 模式显著高于 RF 模式, N_2O 排放量为 RF 显著低于 RW 和 RR 模式。模型验证结果表明, 不同种植模式温室气体排放实测值与模拟值比较的决定系数(R^2)为 0.85~0.98, 相对误差绝对值(RAE)为 8.29%~16.42%。根据 DNDC 模型模拟和估算的结果, 江汉平原区域稻田 CH_4 周年的排放量为 0.292 9 Tg C, N_2O 周年的排放量为 0.009 2 Tg N, 不同种植模式稻田 CH_4 排放量表现为 RW>RR>RF, N_2O 排放量表现为 RW>RF>RR, 增温潜势(GWP)表现为 RW>RR>RF。不同地区稻田 CH_4 排放量表现为监利县>荆门市>公安县>天门市>仙桃市>洪湖市>松滋市>汉川市>潜江市>石首市>荆州市>江陵县>赤壁市>嘉鱼县, N_2O 排放量表现为监利县>荆门市>公安县>洪湖市>仙桃市>天门市>汉川市>潜江市>松滋市>荆州市>江陵县>赤壁市>石首市>嘉鱼县。本研究结果表明 DNDC 模型能较好地应用于模拟江汉平原稻田温室气体排放, RR 和 RF 模式相比 RW 模式可有效减少温室气体 CH_4 和 N_2O 的排放。

关键词: 稻田; 种植模式; 甲烷; 氧化亚氮; DNDC 模型; 增温潜势

中图分类号: X511 **文献标识码:** A **文章编号:** 1671-3990(2018)09-1291-11

Greenhouse gases emission under different cropping systems in the Jianghan Plain based on DNDC model*

ZOU Fengliang, CAO Cougui, MA Jianyong, LI Chengfang, CAI Mingli, WANG Jinping,

* 国家重点研发计划专项(2017YFD0301400)资助

** 通信作者: 江洋, 主要研究方向为稻田生态。E-mail: jiangyang@mail.hzau.edu.cn
邹凤亮, 主要研究方向为稻田温室气体排放。E-mail: 1359793413@qq.com

收稿日期: 2018-07-05 接受日期: 2018-07-20

* This study was supported by the National Key Research and Development Project of China (2017YFD0301400).

** Corresponding author, E-mail: jiangyang@mail.hzau.edu.cn

Received Jul. 5, 2018; accepted Jul. 20, 2018

SUN Zichuan, JIANG Yang**

(College of Plant Science and Technology, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China)

Abstract: Increased greenhouse gases emission contributes to global warming. Paddy field is considered to be one of the main sources of greenhouse gas CH_4 and N_2O emissions. The rice planting area in the Jianghan Plain is about 8×10^5 hm^2, accounting for about 40% of the total rice planting area in Hubei Province. Studies on characteristics of greenhouse gases emission in the Jianghan Plain are important for evaluation and reduction of regional greenhouse gases emission. So far, several models, such as DNDC model, have been used for simulating the greenhouse gases emission, which in conjunction with ArcGIS may be used for simulating the regional greenhouse gas emission. In this study, we used DNDC model to simulate the greenhouse gases emission in the Jianghan Plain. The field experiment was carried out for investigating the characteristics of CH_4 and N_2O emissions under rice-wheat (RW), rice-rape (RR) and rice-fallow (RF) cropping systems. Meteorologic, soil, crop and field management data were obtained for DNDC-stimulating CH_4 and N_2O emissions under different cropping systems in the Jianghan Plain. The results of field experiment showed that the CH_4 fluxes were from -2.80 $mg\cdot m^{-2}\cdot h^{-1}$ to 55.64 $mg\cdot m^{-2}\cdot h^{-1}$, and the N_2O fluxes were from 0 to 1.90 $mg\cdot m^{-2}\cdot h^{-1}$ in the Jianghan Plain. CH_4 emission was mainly concentrated in rice season, and the peaks occurred at rice heading and tillering stages. N_2O emission in rice season was higher than in non-rice season. And the peaks occurred after wheat or rape sowing in non-rice season and during field drying period in rice season. CH_4 emission under RW and RR systems were significantly higher than that under RF system, while N_2O emission was significantly higher under RF system than under RW and RR systems. The DNDC model stimulating results were verified by comparing the observed values with the stimulated values. The R^2 and RAE between the observed and the stimulated values under different cropping systems were form 0.85 to 0.98 and from 8.29% to 16.42%, respectively. The high R^2 and the low RAE suggested that the stimulated values of CH_4 and N_2O emissions with DNDC model were in good agreement with the observed values. According to the simulation results, the annual emissions of CH_4 and N_2O were 0.292 9 Tg C and 0.009 2 Tg N in the Jianghan Plain from 2010 to 2016, respectively. For different crop systems, CH_4 and N_2O emissions were presented as RW > RR > RF and RW > RF > RR, respectively, and the global warming potential (GWP) was RW > RR > RF. The CH_4 and N_2O emissions were also different for different regions. The annual average CH_4 emission from 2010 to 2016 was in the order of Jianli > Jingmen > Gong'an > Tianmen > Xiantao > Honghu > Songzi > Hanchuan > Qianjiang > Shishou > Jingzhou > Jiangling > Chibi > Jiayu. And the annual average N_2O emission from 2010 to 2016 was in the order of Jianli > Jingmen > Gong'an > Honghu > Xiantao > Tianmen > Hanchuan > Qianjiang > Songzi > Jingzhou > Jiangling > Chibi > Shishou > Jiayu. The results of our study indicated that the DNDC model could preferably stimulate the greenhouse gases emissions in the Jianghan Plain. And RR and RF could reduce CH_4 and N_2O emissions compared with RW.

Keywords: Rice field; Cropping system; CH_4; N_2O; DNDC model; Global warming potential

20 世纪后半叶以来 50 年内全球气候变暖主要与人类活动引起的温室气体浓度增加有关，由农业活动排放的 CH_4 和 N_2O 分别占全球 CH_4 和 N_2O 年排放量的 43%和 82%，其中水稻(*Oryza sativa*)种植过程中产生的 CH_4 排放占农业活动总排放的 17%[1]。全球水稻常年种植面积约 1.5×10^9 hm^2[2]，90%的水稻产于亚洲[3]。由于全球水稻种植面积广阔以及稻田长期淹水为温室气体产生提供了条件，目前认为稻田是大气 CH_4 和 N_2O 主要的人为排放源。中国是世界农业大国，水稻种植面积 30.31×10^6 hm^2，南方水稻面积占全国水稻面积的 90%以上。其中湖北省水稻种植面积约为 2×10^6 hm^2[4]，江汉平原稻区作为湖北省典型稻作区，水稻种植面积占全省水稻总种植面积的 40%左右[5]，种植面积广阔，对稻田温室气体排放贡献较大。

近年来，通过模型法估算农田温室气体的排放成为研究热点。目前用于研究稻田温室气体排放的过程模型有 CENTURY、CANDY、Roth-C、DAISY、DNDC 等，DNDC 模型已被国际生态学界认为是当前最好的生物地球化学过程模型，广泛应用于农田、草地、森林、湿地等多种类型的生态系统，模拟 CH_4、N_2O、CO_2 等温室气体排放[2,6-7]。然而 DNDC 模型在我国应用尚存在一些问题，一方面 DNDC 模型提供的作物生理及物候学参数主要来自北美的观测，不完全适用于世界其他地区，模型应用时需对模型进行验证，确认 DNDC 模型适用于模拟区域；另一方面由于国内外种植模式和耕作措施的差异，DNDC 模型缺乏一些中国特有而复杂的农业耕作特征，包括水稻移栽、复杂多种作物系统以及农田管理过程中不断出现的新技术[8]。但随着 DNDC 模型在国内的广泛应用，研究者逐步对模型进行了改进，使 DNDC 模型更适用于中国农业生态系统[9]。研究者对作物参数进行了修正，同时 DNDC 模型新版本增加了适合中国水稻种植特点的移栽日期设置[8,10]。另外 DNDC 模型还可以与地理信息系统(ArcGIS)结

合, 进行区域尺度的温室气体排放模拟研究。

目前, 江汉平原稻田温室气体排放研究主要以大田定位观测为主, 对部分地区田间尺度的温室气体排放进行了估算[11-12], 但区域尺度上的研究较少。研究江汉平原地区区域尺度的稻田温室气体排放特征, 对于评估区域稻田温室气体排放以及稻田温室气体减排具有重要意义, 可为区域生产实践与布局提供理论参考。因此, 本试验以湖北省典型稻作区江汉平原为研究区域, 运用 DNDC 模型, 结合 ArcGIS, 模拟江汉平原多年区域尺度温室气体排放, 定量评价不同种植模式对稻田温室气体排放的影响, 对于区域种植模式优化和布局以及减少稻田温室气体排放具有重要意义。

1　材料与方法

1.1　研究区域概况

江汉平原地处 111°45′~114°16′E、29°26′~31°10′N, 由长江与汉江冲积而成, 位于湖北省中南部。在行政区划上, 包括荆州市、江陵县、公安县、监利县、石首市、洪湖市、松滋市、仙桃市、潜江市、天门市、荆门市、赤壁市、汉川市、嘉鱼县 14 个县市区。江汉平原气候属于亚热带季风气候。该区域土壤以水稻土和潮土为主, 水稻土以潴育型水稻土为主, 各地区与温室气体排放相关的主要土壤因子(DNDC 模型所需的土壤因子[6-7])值见表 1。该地区水稻种植以一季中稻为主, 每年 5 月中下旬播种, 10 月中上旬收割[10]。

表 1　江汉平原各地区土壤属性表

Table 1　Soil properties of various areas in the Jianghan Plain

地区 Region	有机质含量 Organic matter content ($g\cdot kg^{-1}$)	黏粒含量 Clay content (%)	pH	容重 Bulk density ($g\cdot cm^{-3}$)
荆门市 Jingmen	10.2	22	7.2	1.38
汉川市 Hanchuan	8.9	20	7.7	1.39
荆州市 Jingzhou	8.8	20	7.5	1.38
公安县 Gong'an	9.4	20	7.7	1.39
监利县 Jianli	9.3	22	7.7	1.38
江陵县 Jiangling	9.7	20	7.7	1.40
石首市 Shishou	9.3	20	7.8	1.40
洪湖市 Honghu	9.4	21	7.4	1.38
松滋市 Songzi	9.2	25	6.8	1.35
嘉鱼县 Jiayu	9.1	22	6.9	1.36
赤壁市 Chibi	11.6	29	6.2	1.33
仙桃市 Xiantao	9.1	21	7.7	1.39
潜江市 Qianjiang	8.9	21	7.7	1.39
天门市 Tianmen	8.2	18	7.7	1.38

表中所列数值为相应地区的平均值。The values in the table are the averages of the region.

1.2　大田观测试验

1.2.1　试验地点

本试验位于湖北省潜江市后湖农场(112°69′E, 30°38′N), 地处江汉平原腹地。属亚热带大陆季风气候, 年平均气温为 17.4 ℃, 平均降水量 1 100 mm。土壤质地为粉砂黏壤土, 起始土壤的容重为 1.05 $g\cdot cm^{-3}$, 硝态氮 4.2 $mg(N)\cdot kg^{-1}$, 铵态氮 21.1 $mg(N)\cdot kg^{-1}$, 有机质 18.87 $g\cdot kg^{-1}$, pH 为 7.85。试验田试验前一年为中稻-冬闲(RF)模式, 试验时间为 2016 年 10 月—2017 年 10 月。

1.2.2　试验设计

田间试验设置 3 种种植模式, 分别为中稻-小麦(*Triticum aestivum*)(RW)、中稻-油菜(*Brassica campestris*)(RR)、中稻-冬闲(RF)模式, 每种模式设 3 个重复, 共 9 个小区, 小区面积为 135 m^2。水稻品种为'泰优 390', 小麦品种为'郑麦 9023', 油菜品种为'华油杂 62'。小麦、油菜采取直播, 播种日期为 2016 年 10 月 20 日, 收获日期为 2017 年 5 月 15 日。水稻移栽采用人工插秧, 移栽日期为 2017 年 6 月 24 日, 收获日期为 2017 年 10 月 23 日。其他田间管理与江汉平原稻田常规管理一致, 并进行水肥管理相关数据的记载。

1.2.3　样品采集与测定

CH_4 和 N_2O 通量采用静态箱-气象色谱法测定。稻季水稻移栽后, CH_4 和 N_2O 每 7 d 采集一次, 非稻季每 10 d 采集一次。气体采集时, 分别在 0 min、10 min、20 min、30 min 用 20 mL 注射器将箱内气体抽入真空瓶, 同时记录此时的箱内温度。实验室气体检测使用 Shimadzu GG-14B 型气象色谱仪。CH_4 和 N_2O 的通量计算公式如下:

$$F=\rho\times h\times dc/dt\times 273/(273+T) \quad (1)$$

式中: F 为 CH_4 或 N_2O 的排放通量($mg\cdot m^{-2}\cdot h^{-1}$), ρ 为标准状态下 CH_4 或 N_2O 密度($mg\cdot m^{-3}$), h 为采样箱的有效高度(cm), dc/dt 表示 CH_4 或 N_2O 浓度的变化率, T 为采样过程中箱内平均温度(℃)。

以 100 年时间尺度, CH_4 和 N_2O 的增温潜势分别为 CO_2 的 30 倍和 268 倍[13], 全球增温潜势 GWP [$t(CO_2\ eq)\cdot hm^{-2}$]按以下公式计算:

$$GWP=(CH_4\times 30)+(N_2O\times 268) \quad (2)$$

式中: CH_4 和 N_2O 分别指 CH_4 和 N_2O 的总排放量。

在小麦、油菜和水稻翻耕播种前进行土壤样品采集, 测定有机质含量、黏粒含量、pH、容重。作物成熟期, 每个小区五点法采集与大田平均穗数相当的植株, 剪去根部, 按茎、叶、穗分样, 放入烘箱 105 ℃杀青 0.5 h, 之后 80 ℃烘干至恒重, 称重计算地上部分干物质量。水稻、小麦和油菜成熟后, 每小区选

取长势均匀的地块，取 5 m^2 样方。晾晒、烘干、脱干，测定含水率，计算产量。作物产量除以 0.4 换算为 DNDC 模型需要的最高生物质量[kg(C)·hm^{-2}][7]。

1.3 DNDC 模型验证

运用 DNDC(9.5 版)分别模拟潜江试验点 RW、RR、RF 种植模式条件下 CH_4 和 N_2O 的排放，通过计算决定系数(R^2)和相对误差绝对值(RAE)进行模型模拟值与田间观测值比较，来验证模型模拟效果。R^2 和 RAE 的计算公式分别如下：

$$R^2=\frac{\sum_{i=1}^{n}\left(Q_i-\bar{O}\right)\left(P_i-\bar{P}\right)}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n}\left(Q_i-\bar{O}\right)^2\sum_{i=1}^{n}\left(P_i-\bar{P}\right)^2}} \tag{3}$$

式中：Q_i 为第 i 个观测值，P_i 为第 i 个模拟值，$\bar{O}$ 为所有观测值的平均值，$\bar{P}$ 为所有模拟值的平均值，n 为观测或模拟的次数。

$$\mathrm{RAE}=\frac{\left|O_{\mathrm{o}}-O_{\mathrm{s}}\right|}{O_{\mathrm{o}}}\times 100\% \tag{4}$$

式中：O_{o} 为观测值，O_{s} 为模拟值。

1.4 DNDC 模型区域数据收集

1.4.1 气象数据

气象数据来源于湖北省气象局，包含湖北省 1987—2016 年各气象站点逐日数据资料。DNDC 区域上模拟需要的日最高温、日最低温、日降水量，利用 FORTRAN 将数据处理成 DNDC 模型所需要的格式建立气象数据库，并按地理位置就近分配。

1.4.2 土壤数据

土壤数据来源于全球土壤数据库(HWSD, http://westdc.westgis.ac.cn)，数据分辨率为 0.008 3×0.008 3，约为 1 km×1 km。本试验使用 0~30 cm 的土壤耕作层数据，利用 ArcGIS 提取江汉平原土壤有机质含量、黏粒含量、pH、容重数据，建立 DNDC 模型土壤数据库。县域土壤数据库，单位格点的属性为该县域行政区划内的土壤属性平均值。栅格土壤数据库运用 ArcGIS 提取，获取对应水稻格点的土壤属性。

1.4.3 作物数据

江汉平原县域作物数据来源于 2010—2016 年《湖北省农村统计年鉴》，以江汉平原县市为单位构建 DNDC 作物数据库。

1.4.4 管理数据

管理数据根据田间观测获得，水稻种植模式统一设定为中稻，秸秆还田量查阅文献获得，统一设置为 50%[6-8,11]。淹灌类型设置为干湿交替，有一次晒田处理，将水稻田水分晒干后恢复。施肥按农民施肥习惯设置，模型默认肥料类型为尿素，作物生长期均施肥 2 次。水稻 6 月 12 日施入复合肥，氮含量为 105 kg(N)·hm^{-2}，6 月 29 日施入尿素 107 kg(N)·hm^{-2}；小麦 11 月 9 日施入复合肥，氮含量 120 kg(N)·hm^{-2}，12 月 9 日施入尿素 52 kg(N)·hm^{-2}；油菜 11 月 1 日施入复合肥，氮含量 120 kg(N)·hm^{-2}，12 月 9 日施入尿素 52 kg(N)·hm^{-2}，闲田不施肥。水稻播种时间为 5 月 12 日，收获时间为 9 月 25 日。小麦播种时间 11 月 19 日，收获时间为 5 月 10 日。油菜播种时间为 11 月 2 日，收获时间为 5 月 10 日。

1.4.5 基本参数

江汉平原大气 CO_2 浓度设置为 390 mg·L^{-1}，氮沉降指数为 2.16 mg·L^{-1}[6-8]。通过计算获得 2010—2016 年江汉平原水稻最大生物量平均值为 3 180 kg(C)·hm^{-2}，小麦最大生物量平均值为 1 346 kg(C)·hm^{-2}，油菜最大生物量平均值为 949 kg(C)·hm^{-2}。通过查阅资料，获得江汉平原作物最适温度，最适温度水稻为 30 ℃，小麦为 22 ℃，油菜为 20 ℃[14]；生长季需水量水稻为 500~800 mL·g^{-1}(DM)，冬小麦为 350~500 mL·g^{-1}(DM)，冬油菜为 450~500 mL·g^{-1}(DM)；生长积温水稻为 3 200 ℃，小麦为 2 000 ℃，油菜为 2 400 ℃[15]。其他参数均为模型默认值。

1.5 数据统计与分析

以江汉平原 14 个县市为单位进行区域尺度模拟，DNDC 模型模拟获得 2010—2016 年各地区单位面积稻田温室气体 CH_4 和 N_2O 的排放量。结合统计年鉴数据中各地区不同种植模式稻田面积，获得各地区不同种植模式温室气体排放量。通过汉平原各地区不同模式温室气体排放量相加，获得江汉平原温室气体排放总量。

采用 Microsoft Excel 2016 软件对数据进行处理和绘图，采用 SPSS 12.0 统计分析软件对数据进行方差分析，利用 LSD 法进行平均的差异显著性检验，采用 ArcGIS 10.2 地理信息系统和 FORTRAN 编程软件对数据进行提取分析及批量处理。

2 结果与分析

2.1 田间观测试验温室气体排放变化

如图 1 所示，潜江试验点田间观测结果表明，不同种植模式稻田 CH_4 排放季节性变化规律基本一致，CH_4 主要在稻季排放，非稻季排放通量基本处于 0 mg·m^{-2}·h^{-1} 左右。稻季 CH_4 排放峰值分别出现在水稻分蘖期和抽穗期，CH_4 排放通量在分蘖末期晒田后迅速下降。RW 模式 CH_4 周年排放通量范围为–2.80~39.78 mg·m^{-2}·h^{-1}，RR 模式 CH_4 周年排放通量范围为–1.74~42.51 mg·m^{-2}·h^{-1}，RF 模式 CH_4 周年排放通量范围为–1.57~55.64 mg·m^{-2}·h^{-1}。RW、RR、RF 模式的 CH_4

周年累积排放量分别为 324.0 kg(C)·hm^{-2}、455.2 kg(C)·hm^{-2}、379.6 kg(C)·hm^{-2}。RR 模式的 CH_4 周年累积排放量显著高于 RW 和 RF 模式。RW、RR、RF 模式的 CH_4 非稻季的排放量分别为–14.94 kg(C)·hm^{-2}、1.32 kg(C)·hm^{-2}、–14.48 kg(C)·hm^{-2}, 稻季的排放量分别为 339.0 kg(C)·hm^{-2}、454.0 kg(C)·hm^{-2}、394.0 kg(C)·hm^{-2}。

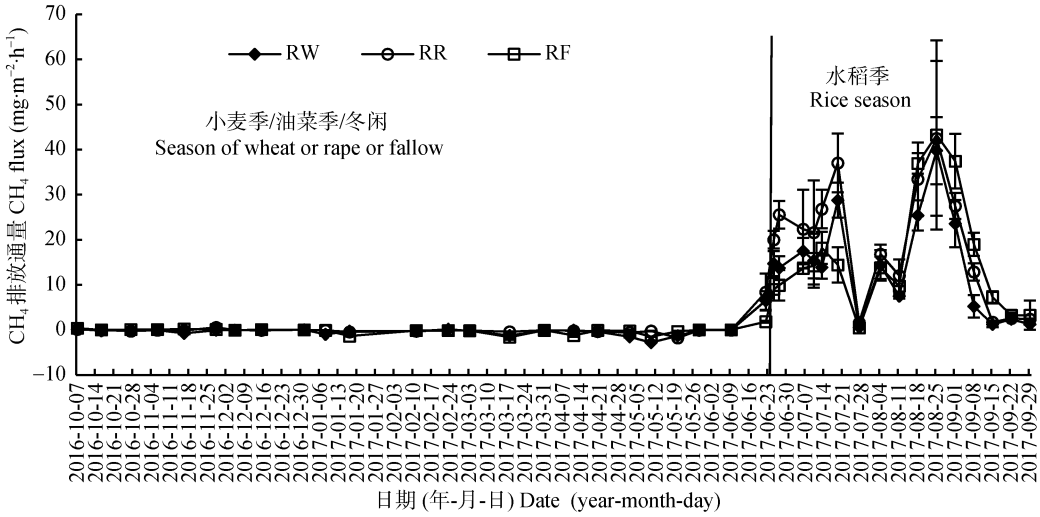

图 1　不同种植模式下水稻田 CH_4 排放通量的季节性变化

Fig. 1　Seasonal changes in CH_4 fluxes of paddy fields under different cropping systems

RW: 水稻-小麦模式; RR: 水稻-油菜模式; RF: 水稻-冬闲模式。RW: rice-wheat cropping system; RR: rice-rape cropping system; RF: rice-fallow cropping system.

N_2O 非稻季排放通量的峰值出现在小麦、油菜播种后(图 2), RW、RR 和 RF 模式的排放通量峰值分别为 1.22 mg·m^{-2}·h^{-1}、0.93 mg·m^{-2}·h^{-1} 和 0.17 mg·m^{-2}·h^{-1}。非稻季 N_2O 的排放通量峰值明显低于稻季, 稻季在晒田后期出现最大峰值。RW、RR 和 RF 模式的 N_2O 周年排放通量范围分别为 0~1.90 mg·m^{-2}·h^{-1}、0~1.76 mg·m^{-2}·h^{-1} 和 0~1.49 mg·m^{-2}·h^{-1}。RW 和 RR 模式 N_2O 排放通量显著高于 RF 模式。RW、RR、RF 模式的 N_2O 周年累积排放量分别为 14.94 kg(N)·hm^{-2}、15.10 kg(N)·hm^{-2}、10.96 kg(N)·hm^{-2}。RW 和 RR 模式的 N_2O 周年累积排放量显著高于 RF 模式。RW、RR、RF 模式的 N_2O 非稻季的排放量分别为 9.93 kg(N)·hm^{-2}、10.15 kg(N)·hm^{-2}、4.96 kg(N)·hm^{-2}, 稻季的排放量分别为 5.00 kg(N)·hm^{-2}、4.95 kg(N)·hm^{-2}、4.47 kg(N)·hm^{-2}。

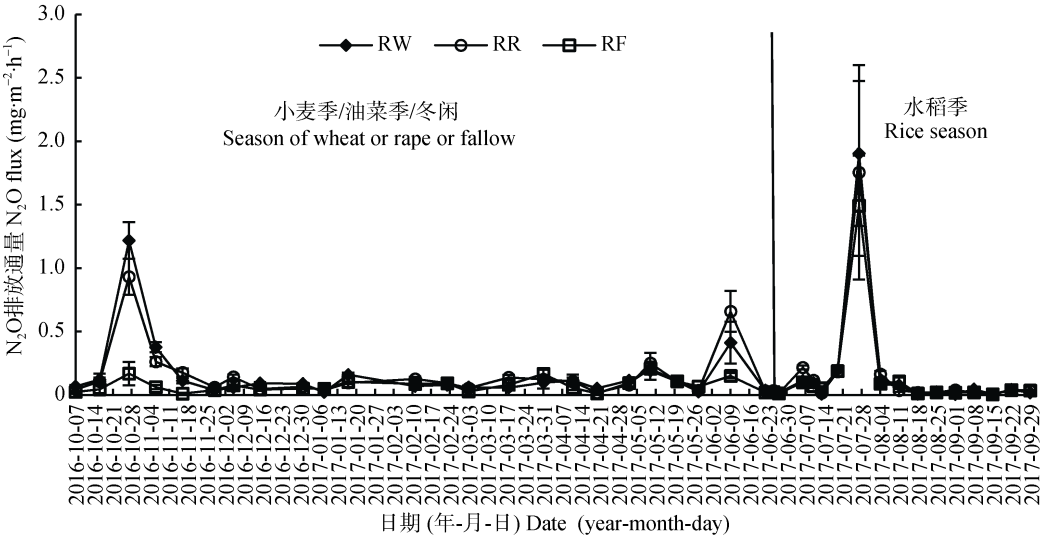

图 2　不同种植模式下水稻田 N_2O 排放通量的季节性变化

Fig. 2　Seasonal changes in N_2O fluxes of paddy fields under different cropping systems

RW: 水稻-小麦模式; RR: 水稻-油菜模式; RF: 水稻-冬闲模式。RW: rice-wheat cropping system; RR: rice-rape cropping system; RF: rice-fallow cropping system.

2.2 DNDC 模型的验证

分别运用 R^2 与 RAE 对田间观测值与模拟值进行比较(图 3)。结果表明, 在 RW、RR、RF 模式条件下稻田 CH_4 排放的田间观测值与模拟值比较的决定系数 R^2 分别为 0.922 4、0.915 3、0.928 0, RAE 分别为 15.31%、8.29%、14.97%。RW、RR、RF 模式下稻田 N_2O 排放的田间观测值与模拟值比较的 R^2 分别为 0.983 9、0.975 7、0.849 7, RAE 分别为 12.13%、13.87%、16.42%。验证结果表明, DNDC 能较好地模拟江汉平原不同种植模式条件下的稻田温室气体 CH_4 和 N_2O 的排放。

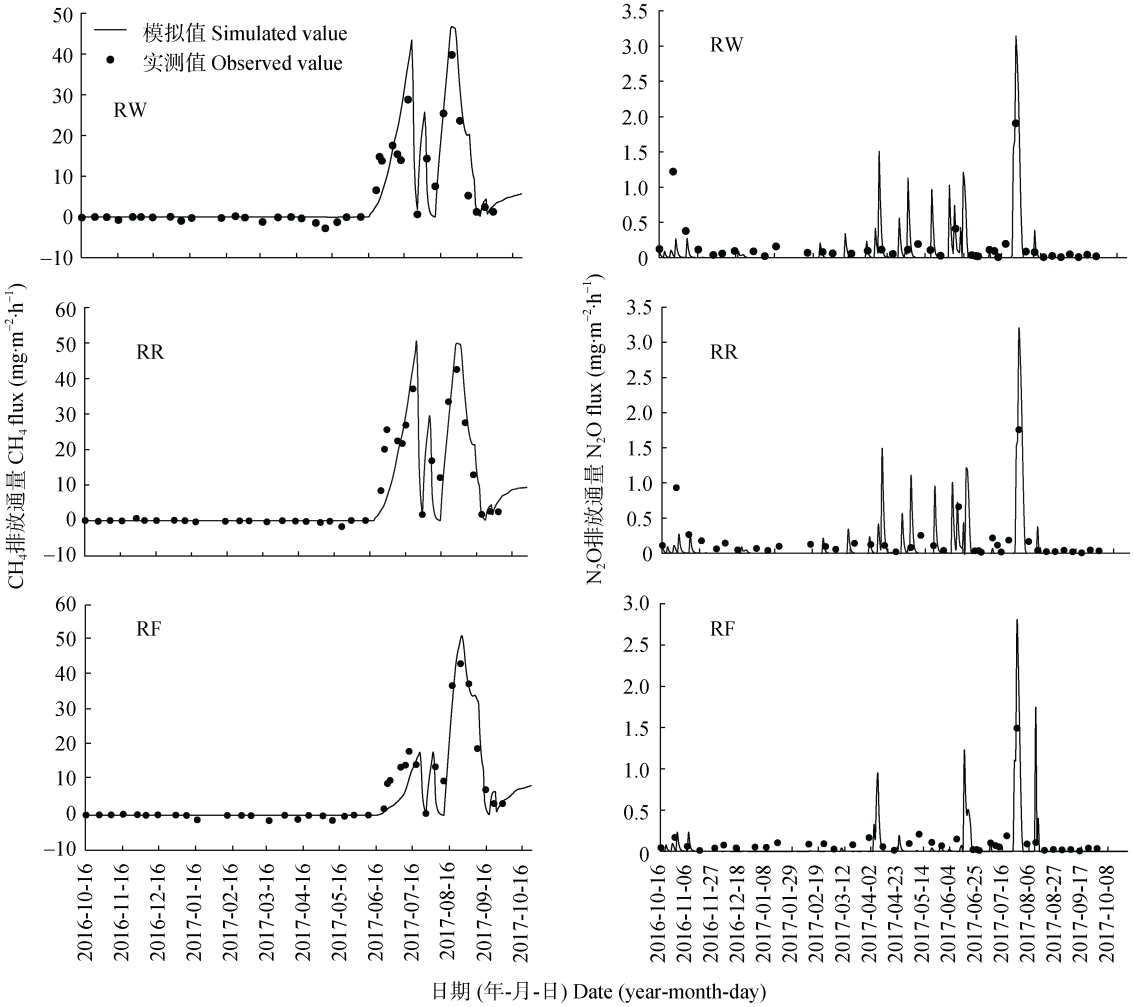

图 3 不同种植模式稻田 CH_4 和 N_2O 实测值与 DNDC 模型模拟值的比较

Fig. 3 Comparison of DNDC simulated and observed CH_4 and N_2O fluxes of paddy fields under different cropping systems

RW: 水稻-小麦模式; RR: 水稻-油菜模式; RF: 水稻-冬闲模式。RW: rice-wheat cropping system; RR: rice-rape cropping system; RF: rice-fallow cropping system.

2.3 DNDC 模型模拟区域尺度温室气体排放

2.3.1 不同区域稻田温室气体单位面积排放量与增温潜势

如表 2 所示, 江汉平原不同地区 2010—2016 年单位面积稻田温室气体排放量结果表明, 各地区稻田不同种植模式 CH_4 年均单位面积排放量总体表现为 RW>RR>RF, 各地区稻田不同种植模式 N_2O 年均单位面积排放量总体表现为 RW>RF>RR。不同种植模式的 GWP 总体表现为 RW>RR>RF。RW 模式条件下不同地区 GWP 大小表现为: 监利县>天门市>嘉鱼县>石首市>汉川市>洪湖市>公安县>潜江市>松滋市>仙桃市>江陵县>荆州市>荆门市>赤壁市; RR 模式条件下不同地区的 GWP 大小表现为: 监利县>天门市>汉川市>石首市>洪湖市>嘉鱼县>松滋市>公安县>仙桃市>潜江市>江陵县>荆州市>荆门市>赤壁市; RF 模式下不同地区的 GWP 大小表现为: 天门市>监利县>汉川市>石首市>松滋市>洪湖市>公安县>嘉鱼县>潜江市>仙桃市>江陵县>荆州市>荆门市>赤壁市。

2.3.2 不同区域不同模式稻田温室气体排放量

如表 3 所示, 江汉平原 2010—2016 年 RW 模式稻田 CH_4 年平均排放量监利县最大, 赤壁市最小; 其他地区 CH_4 年平均排放量为 1 400~12 000 t(C), 按大

表 2　2010—2016 年江汉平原不同种植模式下不同地区稻田年均温室气体排放量和增温潜势

Table 2　Annual emissions of greenhouse gases and GWP of paddy fields in different regions under different cropping systems in the Jianghan Plain from 2010 to 2016

地区 Region	CH_4 排放量 CH_4 emission [kg(C)·hm^{-2}]			N_2O 排放量 N_2O emission [kg(N)·hm^{-2}]			GWP [t(CO_2 eq)·hm^{-2}]		
	RW	RR	RF	RW	RR	RF	RW	RR	RF
荆门市 Jingmen	315.5	307.4	281.4	9.70	2.56	3.05	16.71	13.38	12.54
汉川市 Hanchuan	398.3	392.6	348.5	7.58	1.77	2.35	19.12	16.45	14.93
荆州市 Jingzhou	374.0	362.5	325.8	7.48	1.62	2.21	18.11	15.18	13.97
公安县 Gong'an	382.6	375.7	338.1	8.24	1.77	2.37	18.78	15.77	14.52
监利县 Jianli	399.0	396.0	353.0	9.07	1.68	2.22	19.78	16.55	15.06
江陵县 Jiangling	376.6	366.5	330.1	8.12	1.65	2.27	18.48	15.35	14.16
石首市 Shishou	389.6	386.5	344.2	8.44	1.70	2.20	19.14	16.18	14.69
洪湖市 Honghu	387.5	384.9	341.2	8.03	1.81	2.26	18.88	16.16	14.60
松滋市 Songzi	381.9	374.1	339.6	7.75	1.94	2.52	18.54	15.78	14.65
嘉鱼县 Jiayu	380.8	379.5	336.9	9.47	2.09	2.45	19.22	16.06	14.51
赤壁市 Chibi	287.8	289.1	249.2	7.05	2.51	3.40	14.48	12.62	11.40
仙桃市 Xiantao	382.6	376.9	336.7	7.57	1.64	2.13	18.49	15.76	14.37
潜江市 Qianjiang	382.4	375.2	335.6	8.18	1.69	2.32	18.74	15.72	14.40
天门市 Tianmen	413.8	402.7	368.7	6.83	0.89	0.94	19.43	16.48	15.15

RW: 水稻-小麦模式; RR: 水稻-油菜模式; RF: 水稻-冬闲模式。RW: rice-wheat cropping system; RR: rice-rape cropping system; RF: rice-fallow cropping system.

表 3　2010—2016 年江汉平原不同地区不同种植模式稻田年均温室气体排放量

Table 3　Average annual emissions of CH_4 and N_2O of paddy fields under different cropping systems in different regions of the Jianghan Plain from 2010 to 2016

地区 Region	CH_4 年均排放量 Annual average CH_4 emission [t(C)]			N_2O 年均排放量 Annual average N_2O emission [t(N)]		
	RW	RR	RF	RW	RR	RF
荆门市 Jingmen	10 491	16 907	—	325	141	—
汉川市 Hanchuan	10 371	5 715	—	196	26	—
荆州市 Jingzhou	5 907	5 661	—	117	25	—
公安县 Gong'an	9 088	14 170	1 486	195	66	10
监利县 Jianli	15 734	29 933	20 209	365	127	127
江陵县 Jiangling	4 570	6 633	—	98	30	—
石首市 Shishou	1 415	10 824	538	31	47	4
洪湖市 Honghu	9 155	11 688	1 766	189	55	11
松滋市 Songzi	4 951	11 776	—	100	61	—
嘉鱼县 Jiayu	1 709	2 416	3 117	43	13	23
赤壁市 Chibi	149	5 001	3 841	4	43	53
仙桃市 Xiantao	8 097	15 642	—	163	68	—
潜江市 Qianjiang	6 489	7 006	—	139	31	—
天门市 Tianmen	11 975	12 455	—	198	27	—

RW: 水稻-小麦模式; RR: 水稻-油菜模式; RF: 水稻-冬闲模式。RF 模式在"—"相应的区域面积很小, 忽略不计。RW: rice-wheat cropping system; RR: rice-rape cropping system; RF: rice-fallow cropping system. Areas of RF systems in the regions marked with — is very small, the greenhouse gases emissions are negligible.

小排序为: 天门市>荆门市>汉川市>洪湖市>公安县>仙桃市>潜江市>荆州市>松滋市>荆州市>嘉鱼县>石首市。N_2O 的年平均排放量监利县最大, 其次是荆门市, 江陵县、嘉鱼县、石首市、赤壁市排放值较小, 为 4~100 t(N); 其他地区排放值范围为 100~200 t(N), 排放大小排序为: 天门市>汉川市>公安县>洪湖市>仙桃市>潜江市>荆州市>松滋市。RR 模式不同区域 2010—2016 年 CH_4 年平均排放量监利县最大, 嘉鱼县最小, 其他各区域 CH_4 排放值为 5 000~20 000 t(C), 按大小排序为: 荆门市>仙桃市>公安县>天门市>松滋市>洪

湖市>石首市>潜江市>江陵县>汉川市>荆州市>赤壁市。N_2O 的年平均排放量荆门市最大，其次是监利县，嘉鱼县排放值最小，其他地区排放值范围为 25~70 t(N)，按大小排序为：仙桃市>公安县>松滋市>洪湖市>石首市>赤壁市>潜江市>江陵县>天门市>汉川市>荆州市。RF 模式 2010—2016 年 CH_4 的年平均排放量监利县>赤壁市>嘉鱼县>洪湖市>公安县>石首市，其他地区因该模式面积很小或没有，CH_4 的年平均排放量未计算。RF 模式 2010—2016 年的 N_2O 年平均排放量监利县>赤壁市>嘉鱼县>洪湖市>公安县>石首市，其他地区因该模式面积很小或没有，N_2O 的年平均排放量未计算。

2.3.3 不同区域稻田温室气体排放总量

如图 4 所示，江汉平原稻田 CH_4 2010—2016 年的年平均排放量监利县最大，为 658 76 t C，赤壁市排放量为 8 991 t C，仅大于嘉鱼县(7 242 t C)；平均排放总量为 20 000~30 000 t C 的各地区排放量大小为：荆门市>公安县>天门市>仙桃市>洪湖市，其他地区的总排放量为 10 000~20 000 t C，排序为：松滋市>汉川市>潜江市>石首市>荆州市>江陵县。江汉平原稻田 N_2O 年平均排放量监利县最大，为 619 t N，其次是荆门市，为 466 t N，嘉鱼县排放量为最小，为 78.84 t N，石首市排放量略高于嘉鱼县，为 82.85 t N；年平均排放量在 200~300 t N 的各地区排放量大小为：公安县>洪湖市>仙桃市>天门市>汉川市，其他地区年平均排放量为 100~200 t N，排放量大小：潜江市>松滋市>荆州市>江陵县>赤壁市。

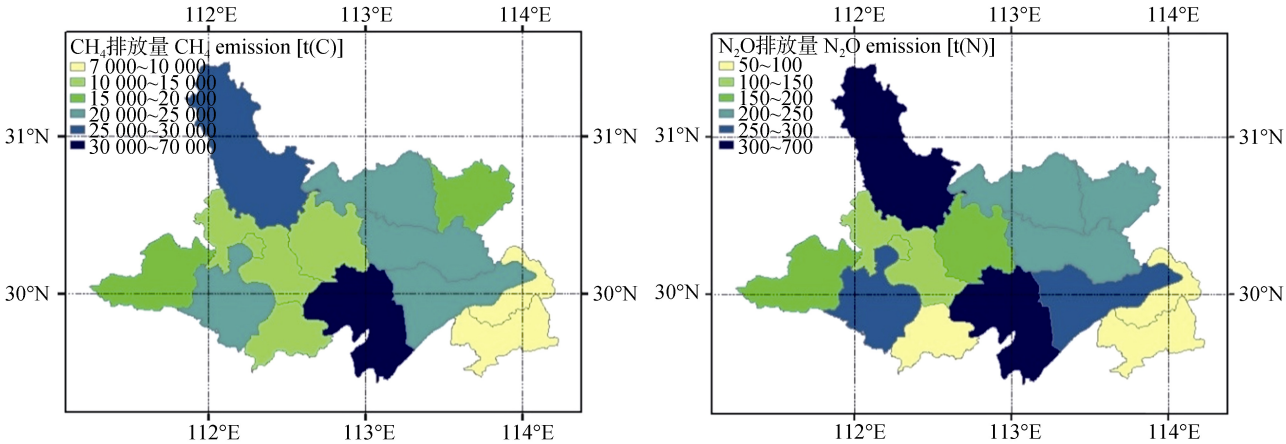

图 4 2010—2016 年江汉平原稻田温室气体排放量区域分布图

Fig. 4 Distribution of greenhouse gases emissions in paddy fields of the Jianghan Plain

如图 5a 所示，2010—2016 年江汉平原稻田 CH_4 年均排放总量为 0.292 9 Tg C，RW 模式 CH_4 年均排放总量为 0.102 1 Tg C，RR 模式为 0.157 8 Tg C，RF 模式为 0.033 0 Tg C。2012 年稻田 CH_4 年均排放总量最高，为 0.360 0 Tg C，2010 年稻田 CH_4 排放总量最低，为 0.230 0 Tg C。如图 5b 所示，2010—2016 年江汉平原稻田 N_2O 年均排放总量为 0.009 2 Tg N，RW 模式年均排放总量为 0.004 2 Tg N，RR 模式年均排放总量为 0.002 8 Tg N，RF 模式年均排放总量为 0.022 0 Tg N。2012 年稻田 N_2O 排放量最高，为 0.010 5 Tg N，2014 年稻田 N_2O 排放总量最低，为 0.008 6 Tg N。

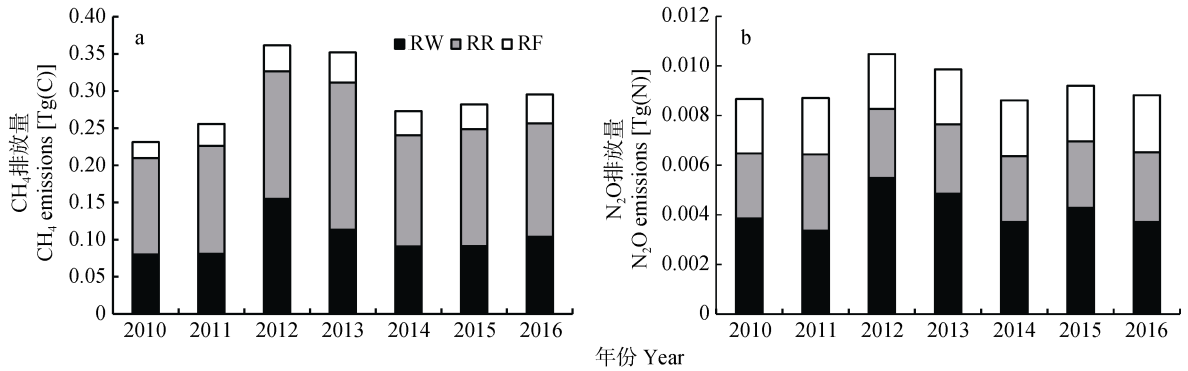

图 5 江汉平原不同种植模式下稻田 CH_4(a)和 N_2O(b)年均排放总量

Fig. 5 Annual total CH_4 (a) and N_2O (b) emissions of paddy fields under different cropping systems in the Jianghan Plain

RW：水稻-小麦模式；RR：水稻-油菜模式；RF：水稻-冬闲模式。RW: rice-wheat cropping system; RR: rice-rape cropping system; RF: rice-fallow cropping system.

3 讨论与结论

本研究田间观测试验结果表明, 不同种植模式下稻田 CH_4 和 N_2O 的排放存在明显的季节性变化。非稻季稻田 CH_4 的排放通量接近于零, 稻季 CH_4 的排放通量较高; N_2O 排放通量的峰值也出现在稻季。稻季温室气体排放量较高, 主要由于稻季温度升高, 加速了氧化还原反应; 同时温度升高会增强土壤微生物活性, 加速复杂有机物的降解[16], 从而促进稻田 CH_4 和 N_2O 的排放[17]。稻田温室气体排放的季节性变化, 除与温度有关, 也受到稻田水肥管理方式的影响[18]。晒田期间 CH_4 排放量降低, N_2O 排放量增加, 主要是与晒田改善了土壤含氧量有关[19-20]。一方面, 土壤含氧量增加会提高 CH_4 氧化菌的活性, 促进 CH_4 的氧化, 从而降低 CH_4 的排放; 另一方面土壤含氧量增加会促进硝化作用, 从而增加 N_2O 的排放。另外, 本研究发现在稻田施肥后 N_2O 的排放量也明显增加, 这主要是施肥增加了硝化与反硝化作用的底物所致[21-22]。

本研究发现江汉平原稻田 CH_4 和 N_2O 的排放存在明显的地区差异。这种差异, 一方面是由于江汉平原各地区影响温室气体排放的主要土壤因子存在一定的差异(表 1)。相关研究表明土壤有机质含量、黏粒含量、pH、容重等均是影响稻田 CH_4 和 N_2O 排放的重要因素。前人研究发现土壤有机质含量与 CH_4 排放呈正相关关系[23-24]。N_2O 排放与土壤有机质含量也呈现正相关关系, 随着土壤有机质含量的增加, 微生物活性增强, 氮被矿化并产生 N_2O, 促进 N_2O 的排放[25]。前人研究结果表明黏粒含量低的稻田土壤 CH_4 排放往往比黏粒含量高的土壤高[26], 主要是因为黏粒含量越高, 土壤对有机质的固定能力越强, 从而影响了有机质的分解速率和 CH_4 生成[27]。土壤 pH 在一定范围内的增加会对 CH_4 排放起到促进作用, 而与 N_2O 排放则呈负相关关系[28]。土壤 pH 主要通过影响土壤微生物来影响 CH_4 与 N_2O 的排放, CH_4 氧化菌更适应酸性条件, 产 CH_4 菌则更喜欢中性或弱碱性的环境, 反硝化细菌的最适宜 pH 为 7.0~8.0, 酸性条件对 N_2O 还原的抑制比对硝酸还原的抑制更强[29]。所以随着 pH 向中性和弱碱性增加时, 稻田 CH_4 的排放通量会增加, 稻田 N_2O 排放通量则会降低。另外一方面, CH_4 和 N_2O 排放的地区性差异, 也受到各地区稻田面积和种植模式的影响。

本研究的结果表明不同种植模式 CH_4 和 N_2O 排放存在明显的差异。CH_4 排放量 RR 模式显著高于 RF 模式, 可能是由于 RR 模式相对于 RF 模式非稻季作物残茬及根系分泌物较多, 导致土壤有机质等反应底物增加[30]。RF 模式非稻季 N_2O 排放量较低, 主要是由于 RW、RR 模式稻田非稻季施肥, 而 RF 模式非稻季稻田未施肥, 导致反应底物含量低, 因此 N_2O 的排放量显著低于 RW 和 RR 模式。区域温室气体模拟结果中 CH_4 和 N_2O 排放量 RW 模式要显著高于 RR 和 RF 模式, 主要与冬季作物秸秆分解速率有关。研究表明作物秸秆的碳氮比(C/N)会影响秸秆的分解速率[31], DNDC 模型默认的小麦籽粒的 C/N 比为 40, 茎叶的 C/N 为 95, 根系的 C/N 为 95, 油菜籽粒的 C/N 为 20, 茎叶的 C/N 为 75, 根系的 C/N 为 95, 油菜与小麦作物 C/N 的差异也是导致不同种植模式 CH_4 和 N_2O 排放差异的原因之一。

本研究估算的江汉平原稻田 CH_4 年平均排放量为 0.29 Tg C。李长生等[32]估算的 1990 年湖北省 CH_4 的年排放量约为 0.77 Tg C。吴兑[33]采用排放清单法估算的湖北省 CH_4 的年平均排放量为 0.59 Tg C。王平[34]估算的 1995—2000 年湖北省 CH_4 年平均排放量约为 0.57 Tg C。本研究估算的江汉平原稻田 CH_4 年排放量是前人估算的湖北省稻田 CH_4 年排放量的 37.7%~50.9%, 与江汉平原稻田占湖北省稻田总面积的比重(40%左右)相吻合。本研究估算的江汉平原稻田 N_2O 的年平均排放量为 0.009 2 Tg N, 占李长生等[32]估算的 1990 年湖北省 N_2O 年排放量(0.024 0 Tg N)的 38.3%, 占吴兑[33]采用排放清单法估算的湖北省 N_2O 的年平均排放量(0.010 0 Tg)的 92%, 大于杨俊[35]估算的湖北省 N_2O 年平均排放量(0.001 4 Tg N)。杨俊[35]估算的排放量较低的原因可能是只考虑了单季稻旱休闲田的排放量。

本研究的结果表明不同种植模式下稻田 CH_4 和 N_2O 的排放存在明显的季节性变化, 但 CH_4 和 N_2O 的排放通量峰值均出现在稻季。不同种植模式 CH_4 和 N_2O 排放存在明显的差异, RW 和 RR 模式的稻田 CH_4 和 N_2O 排放通量和增温潜势显著高于 RF 模式。如果仅考虑 CH_4 和 N_2O 的减排, RF 模式是最佳的种植模式, 但是种植冬季作物会提高农田利用率和经济效益, 因此需要综合考虑各种模式的减排效应与经济效应, 进行种植模式的优化与布局。本研究采用决定系数法和相对误差绝对值法对田间观测值与 DNDC 模型模拟值进行了比较, 均得出 DNDC 具有良好的模拟效果, 说明 DNDC 模型适用于江汉平原温室气体排放的模拟与估算。运用 DNDC 模型进行区域温室气体排放模拟的结果表明, 江汉平原

2010—2016 年稻田 CH_4 的年平均排放量为 0.292 9 Tg C，稻田 N_2O 的年平均排放量为 0.009 2 Tg N。不同地区 CH_4 和 N_2O 的排放也存在明显的差异，CH_4 和 N_2O 排放量较大地区是监利县、天门市、汉川市等，CH_4 和 N_2O 排放量较小的地区是嘉鱼县、赤壁市、江陵县等，造成地区温室气体排放量差异的主要原因是各地区种植模式、稻田面积、土壤条件等因素的差异。

参考文献 References

[1] US Environmental Protection Agency. Global anthropogenic non-CO_2 greenhouse gas emissions: 1990–2030[M]. Washington, U. S.: Environmental Protection Agency Press, 2012: 56–57

[2] 邵美红，孙加焱，阮关海. 稻田温室气体排放与减排研究综述[J]. 浙江农业学报, 2011, 23(1): 181–187
SHAO M H, SUN J Y, RUAN G H. Review on greenhouse gases emission and the reduction technology in rice fields[J]. Acta Agriculturae Zhejiangensis, 2011, 23(1): 181–187

[3] 朱德峰，程式华，张玉屏，等. 全球水稻生产现状与制约因素分析[J]. 中国农业科学, 2010, 43(3): 474–479
ZHU D F, CHENG S H, ZHANG Y P, et al. Analysis of status and constraints of rice production in the world[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2010, 43(3): 474–479

[4] 中稻宣. 2015 年全国及各省(市、区)粮食及水稻播种面积和产量[J]. 中国稻米, 2017, 23(6): 110
Zhong Dao Xuan. Cereals and rice sowing area and yield in different regions of China in 2015[J]. China Rice, 2017, 23(6): 110

[5] 陈柏槐. 湖北省优质水稻现状与发展思路[J].中国稻米, 2004, 10(5): 12–15
CHEN B H. Status and development of high-quality rice in Hubei Province[J]. China Rice, 2004, 10(5): 12–15

[6] 谢海宽，江雨倩，李虎，等. DNDC 模型在中国的改进及其应用进展[J]. 应用生态学报, 2017, 28(8): 2760–2770
XIE H K, JIANG Y Q, LI H, et al. Modification and application of the DNDC model in China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2017, 28(8): 2760–2770

[7] ZHANG Y, NIU H. The development of the DNDC plant growth sub-model and the application of DNDC in agriculture: A review[J]. Agriculture Ecosystems & Environment, 2016, 230: 271–282

[8] LI H, WANG L, LI J, et al. The development of China-DNDC and review of its applications for sustaining Chinese agriculture[J]. Ecological Modelling, 2017, 348: 1–13

[9] CHENG H, YU C, LI C, et al. Modeling the impacts of water and fertilizer management on the ecosystem service of rice rotated cropping systems in China[J]. Agriculture Ecosystems & Environment, 2016, 219(2): 49–57

[10] 陆俊，黄进良，王立辉，等. 基于时空数据融合的江汉平原水稻种植信息提取[J]. 长江流域资源与环境, 2017, 26(6): 874–881
LU J, HUANG J L, WANG L H, et al. Paddy rice planting information extraction based on spatial and temporal data fusion approach in Jianghan Plain[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2017, 26(6): 874–881

[11] 李成芳，寇志奎，张枝盛，等. 秸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 C F, KOU Z K, ZHANG Z S, 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

[12] 夏文建，周卫，梁国庆，等. 稻麦轮作农田氮素循环的 DNDC 模型分析[J]. 植物营养与肥料学报, 2012, 20(1): 77–88
XIA W J, ZHOU W, LIANG G Q, et al. Evaluating the validity and sensitivity of the DNDC model to estimate nitrogen cycling in rice-wheat rotation system[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2012, 20(1): 77–88

[13] IPCC. Climate Change 2007[C]/The physical science basis contribution of working group Ⅰ to the fourth assessment report of the intergovernmental panel on climate change. Cambridge: Cambridge University Press, 2014: 750–752

[14] 曹卫星. 作物学通论[M]. 北京：高等教育出版社, 2001: 168–169
CAO W X. General Crop Theory[M]. Beijing: Higher Education Press, 2001: 168–169

[15] 刘巽浩. 耕作学[M]. 北京：中国农业出版社, 1994: 53–55
LIU X H. Cultivation Science[M]. Beijing: China Agriculture Press, 1994: 53–55

[16] YANG S S, CHANG H L. Effect of environmental conditions on methane production and emission from paddy soil[J]. Agriculture Ecosystems & Environment, 1998, 69(1): 69–80

[17] 齐玉春，董云社，章申. 农业微环境对土壤温室气体排放的影响[J]. 中国生态农业学报, 2000, 8(1): 45–48
QI Y C, DONG Y S, ZHANG S. Influence of agricultural micro-environment factors on greenhouse gases emission from the soil[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2000, 8(1): 45–48

[18] ZOU J, LIU S, QIN Y, et al. Sewage irrigation increased methane and nitrous oxide emissions from rice paddies in southeast China[J]. Agriculture Ecosystems & Environment, 2009, 129(4): 516–522

[19] 蔡祖聪，沈光裕，颜晓元，等. 土壤质地、温度和 Eh 对稻田甲烷排放的影响[J]. 土壤学报, 1998, 35(2): 145–154
CAI Z C, SHENG G Y, YAN X Y, et al. Effects of soil texture, soil temperature and Eh on methane emissions from rice paddy fields[J]. Acta Pedologica Sinica, 1998, 35(2): 145–154

[20] 田光明，何云峰，李勇先. 水肥管理对稻田土壤甲烷和氧化亚氮排放的影响[J]. 生态环境学报, 2002, 11(3): 294–298
TIAN G M, HE Y F, LI Y X. Effect of water and fertilization management on emission of CH_4 and N_2O in paddy soil[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2002, 11(3): 294–298

[21] LENSI R. Absorption of nitrous oxide by shoots of maize[J]. Plant & Soil, 1981, 12(3): 58–67

[22] DAVIDSON E A. Nitrous oxide emission controls and

inorganic nitrogen dynamics in fertilized tropical agricultural soils[J]. Soil Science Society of America Journal, 1996, 60(4): 1145–1152

[23] YAO H, CONRAD R, WASSMANN R, et al. Effect of soil characteristics on sequential reduction and methane production in sixteen rice paddy soils from China, the Philippines, and Italy[J]. Biogeochemistry, 1999, 47(3): 269–295

[24] 张庆国, 李鹏飞, 徐丽,等. 皖中沿江平原水稻田 CH_4 和 N_2O 排放估算及其影响因素分析[J]. 土壤通报, 2012, 43(1): 212–218
ZHANG Q G, LI P F, XU L, et al. Estimation of CH_4 and N_2O emissions from the paddy fields in Wanzhong-Yanjiang Plain and analysis of their influence factors[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2012, 43(1): 212–218

[25] 谢军飞, 李玉娥. 农田土壤温室气体排放机理与影响因素研究进展[J]. 中国农业气象, 2002, 23(4): 47–52
XIE J F, LI Y E. A review of studies on mechanism of greenhouse gas (GHG) emission and its affecting factors in arable soils[J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2002, 23(4): 47–52

[26] SASS R L, FISHER F M, LEWIS S T, et al. Methane emissions from rice fields: Effect of soil properties[J]. Global Biogeochemical Cycles, 1994, 8(2): 135–140

[27] NEUE H U, ROGER P A. Rice Agriculture: Factors controlling emissions[R]. Berlin: Springer-Verlag, 2000

[28] 黄国宏, 韩冰. 土壤含水量与 N_2O 产生途径研究[J]. 应用生态学报, 1999, 10(1): 53–56
HUANG G H, HAN B. Relationships between soil water content and N_2O production[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 1999, 10(1): 53–56

[29] 李海防, 夏汉平, 熊燕梅, 等. 土壤温室气体产生与排放影响因素研究进展[J]. 生态环境, 2007, 16(6): 1781–1788
LI H F, XIA H P, XIONG Y M, et al. Mechanism of greenhouse gases fluxes from soil and its controlling factors: A review[J]. Ecology and Environment, 2007, 16(6): 1781–1788

[30] 胡安永, 孙星, 刘勤. 太湖地区不同轮作模式对稻田温室气体(CH_4 和 N_2O)排放的影响[J]. 应用生态学报, 2016, 27(1): 99–106
HU A Y, SUN X, LIU Q. Effects of different rotation systems on greenhouse gases (CH_4 and N_2O) emissions in the Taihu Lake Region, China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2016, 27(1): 99–106

[31] 申源源, 陈宏. 秸秆还田对土壤改良的研究进展[J]. 中国农学通报, 2009, 25(19): 291–294
SHEN Y Y, CHEN H. Effect of straw returning on soil improvement and crop growth: Research progress[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2009, 25(19): 291–294

[32] 李长生, 肖向明, Frolking S, 等. 中国农田的温室气体排放[J]. 第四纪研究, 2003, 23(5): 493–503
LI C S, XIAO X M, FROLKING S, et al. Greenhouse gas emissions from croplands of China[J]. Quaternary Sciences, 2003, 23(5): 493–503

[33] 吴兑. 温室气体与温室效应[M]. 北京: 气象出版社, 2003: 231–233
WU D. Greenhouse Gases and Greenhouse Effects[M]. Beijing: China Meteorological Press, 2003: 231–233

[34] 王平. 基于模型和 GIS 技术估算 1955—2005 年中国稻田甲烷排放[D]. 南京: 南京农业大学, 2009: 58–62
WANG P. Estimates of CH_4 emission from Chinese rice fields during 1955–2005 based on model and GIS technology[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2009: 58–62

[35] 杨俊. 长江中下游地区农田生态系统 N_2O 排放[D]. 重庆: 西南大学, 2009: 32–33
YANG J. N_2O emission from agricultural ecosystem in middle-lower reaches of the Yangtze River Region[D]. Chongqing: Southwest University, 2009: 32–33

欢迎订阅 2019 年《烟台果树》

《烟台果树》是烟台市农业科学研究院主办的果树专业性季刊。立足北方水果的主产区山东省烟台市, 面向全国。经过 30 多年的发展, 《烟台果树》已成为我国广大果树业者新观点、新品种、新技术的交流平台, 也是苗木、农药、肥料及各种生产机具等信息发布的平台。期刊发行量大、覆盖面广。每期定价 4 元, 全年仅需 16 元。每季度首月 15 日发行。若挂号, 全年 28 元。全国各地邮局均可订阅, 邮发代号为 24-107; 也可随时直接汇款至编辑部订阅。

汇款地址: 山东省烟台市芝罘区环山路 145 号　邮编: 264008

单位名称: 《烟台果树》编辑部　电话: 0535-6236524　6615052(传真)

E-mail: ytgsbjb@163.com　ytgsgg@163.com