引用格式: 赵苗苗, 邵蕊, 李仁强, 等. 中国南方旱田转水田后温室气体减排年限预测[J]. 资源科学, 2019, 41(7): 1286-1294.
[Zhao M M, Shao R, Li R Q, et al. Simulation of greenhouse gas emission reduction years after the conversion of cropland into paddy field in southern China[J]. Resources Science, 2019, 41(7): 1286-1294.] DOI: 10.18402/resci.2019.07.09

中国南方旱田转水田后温室气体减排年限预测

赵苗苗^{1,3}, 邵蕊¹, 李仁强¹, 杨吉林^{2,3}, 徐明^{1,3}

(1. 中国科学院地理科学与资源研究所 生态系统网络观测与模拟重点实验室, 北京 100101;

2. 中国科学院地理科学与资源研究所 陆地表层格局与模拟重点实验室, 北京 100101;

3. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要:农业生产活动是大气温室气体的主要来源之一,不同作物栽培体系和管理方式都会影响农田温室气体的排放。国内外已有大量关于农业温室气体排放规律和控制机理的研究,但关于土地利用方式转变对温室气体排放规律和影响机制的研究相对较少。本文以中科院千烟洲红壤丘陵综合开发试验站为研究平台,通过对新(刚从旱田转为稻田)老(过去20余年一直为稻田)稻田进行连续4年(2013—2016)观测,分析稻田温室气体排放规律及影响因子。在此基础上预测稻田温室气体排放量的动态变化。研究表明,旱田转变为稻田后,前4年新稻田CH₄排放通量显著低于老稻田,但随着耕作年限的延长新稻田的CH₄排放速率呈增加趋势,而老稻田的CH₄排放速率没有明显变化趋势;耕作年限对CO₂和N₂O的排放速率影响不显著;新稻田的pH值和土壤有机碳含量低于老稻田。模型模拟结果表明缩短稻田轮作(水-旱轮作)期(小于7年)能够有效降低稻田CH₄和总温室气体排放量。该结果表明利用老稻田的CH₄排放系数可能会显著高估新稻田的CH₄排放量。研究结论可为准确评估土地利用方式变化对农业温室气体排放的影响提供新的视角,同时为区域农业温室气体管理和减排政策的制定提供科学依据。

关键词:土地利用方式转变;温室气体;稻田;年限;轮作;排放通量;千烟洲

DOI: 10.18402/resci.2019.07.09

1 引言

自工业革命以来,大气中温室气体浓度急剧增加导致的全球气候变暖、海平面上升、生物多样性锐减等一系列生态环境问题已成为当今人类社会关注的焦点,而土地利用方式改变是温室气体浓度急剧增加的重要原因之一^[1]。据估计,大气中的温室气体每年有15%~30%的CH₄、5%~20%的CO₂和高达80%~90%的N₂O来源于土壤。因此,地表覆被类型的变化对温室气体通量有重要影响。

土地利用方式转变通过改变地表覆被类型,致使土壤的理化性质和微生物活性发生变化,以及土壤中关键过程——碳氮循环发生改变,并最终导致温室气体排放通量发生变化^[2-4]。20世纪70年代,开

始有学者关注土地利用方式改变对气候的影响机制^[5]。80年代以后,人们逐渐认识到不仅可通过改变地表覆被类型来影响气候^[6],还可通过改变温室气体的排放影响气候,后来涌现出许多以改变土地利用方式来观测土壤碳氮循环影响的研究^[7,8]。如森林转为农田、森林转为牧场、湿地开垦为农田、草地开垦为农田等通常会显著影响温室气体通量,不同的土地利用方式下,土壤温度、水分、植被、微生物底物质量等要素差异显著^[9,10]。不同的转变方式对温室气体排放的影响不同,从三大温室气体的总排放(CO₂-eq, GWP₁₀₀)来看,土地利用方式改变既能增加总温室气体排放(森林转化为农田等)^[11],也能减缓温室气体排放(农田转化为旱地等)^[12,13]。但因土壤中温

收稿日期: 2017-11-07, 修订日期: 2019-03-06

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFA0604302)。

作者简介: 赵苗苗,女,山东鄄城人,博士研究生,研究方向为资源环境与生态系统模拟。E-mail: zhaomm@reis.ac.cn

通讯作者: 徐明,男,河南平顶山人,博士,研究员,研究方向为资源环境与生态系统模拟。E-mail: mingxu@igsrr.ac.cn

2019年7月

室气体观测技术非常复杂,研究十分有限,且主要集中在热带和温带地区^[14-16],对亚热带地区的研究不足。中国由于缺少连续时间段的土地利用资料,土地利用方式改变对温室气体排放通量影响的研究还存在一定的缺陷^[15]。目前大多数的研究观测时间较短,侧重于比较同一时期不同土地利用方式下土壤温室气体排放通量的差异。土地利用方式转变对土壤温室气体排放机理尚有待进一步的深入研究。

稻田的综合温室效应主要受CH₄排放的影响,CH₄对稻田综合增温效应贡献率为87.9%~95.8%。中国CH₄温室气体排放50%以上来源于农业,而农业CH₄温室气体排放的1/3由稻田产生^[17]。中国水稻种植面积约占世界的1/6,水稻产量占世界水稻总产量的27.5%^[18],因此对中国水稻田温室气体排放机理的研究具有非常重大的现实意义。土地利用方式的改变会影响稻田生态系统的碳氮循环,如改变稻田土壤养分含量^[19,20],影响稻田土壤微生物群落^[21,22]和温室气体排放等^[23,24]。研究表明,从种植大豆作物的旱地转变成种植水稻田的地块,CH₄排放通量显著低于长期种植水稻(19年)的老稻田^[23]。另外,将旱地作物引入双季稻种植中,即水-旱轮作可显著降低水稻的CH₄排放^[24]。旱地转化的新稻田CH₄排放较低可能与其Eh(氧化还原电位)较高、土壤有机质含量较低有关^[25]。研究表明,不同土壤质地的土壤类型,在长期种植水稻之后,都会朝着水稻土特有的状态剖面和理化性质方向发生改变,稻田耕种时长会直接或间接地影响水稻土的发育情况^[26],主要体现在土壤有机质的积累和各剖面之间的分化^[27,28]。作为农业CH₄的合成底物,土壤有机碳(Soil Organic Carbon, SOC)在0~20 cm的累积随水稻种植时间的延长而逐渐增加^[29]。

当前,对土地利用方式改变之后农业生态系统温室气体排放的规律性认识不足,应加强对温室气体排放机理的研究,进行多点长时间、空间性测量。因此,本文以中国科学院千烟洲红壤丘陵综合开发试验站为研究平台,通过获取新稻田(旱田转稻田)与老稻田(长期种植水稻)的温室气体排放通量、土壤微气象因子和土壤理化性质等数据,分析稻田温室气体排放规律及影响因子,预测稻田最佳土地利用转换年限。本文可为准确评估土地利用

方式变化对稻田温室气体排放的影响提供新的视角,同时为中国南方区域农业温室气体排放的准确估算提供研究基础,为制定应对气候变化的措施提供依据。

2 研究区概况与实验设计

2.1 研究区概况

本文野外实验在千烟洲站(26°44'48"N, 115°04'13"E)开展。千烟洲站位于江西省泰和县境内赣江中游,占地2.04 km²,海拔在60~115 m之间,地貌主要为红壤丘陵景观。研究区属于典型的亚热带季风气候,温暖湿润,四季分明。年均温为17.9℃,多年平均降水量约为1490 mm,雨量丰富,季节分布差异大,水热不同步,3—6月降水占全年降水量的一半以上;7—10月降水量稀少,不足全年的1/3,蒸发远远超过降水,较易出现伏旱^[30]。千烟洲站以柑橘和油茶为主要经济作物,以水稻为主要粮食作物。

2.2 实验设计

结合千烟洲站实际土地利用类型,并考虑到转换的可行性,旱地转稻田后对温室气体排放的影响研究选取旱作油菜园进行土地利用转换。试验样地布设于2013年1月开始施行,经过3年的野外观测与数据分析,发现土地利用方式转变后的新稻田温室气体综合增温效应(稻田3种主要温室气体CH₄、CO₂、N₂O排放按相对分子质量换算成CO₂之后的总增温效应)^[31,32]显著低于同地区的老稻田^[31-33]。为了排除土壤类型、气候、人为管理措施等其他因素对稻田温室气体排放的影响,从2016年1月开始,对实验样地附近一块13年的老稻田布设实验,进行温室气体排放通量观测,两者采用相同的水肥管理模式。稻田样方大小10 m×10 m,从移栽到收获,早稻生长期约85天左右,晚稻约96天左右。在水稻移栽前2~3天对实验样地进行蓄水、翻耕,然后施入底肥(复合肥72 kg N/hm²);水稻移栽10天左右施追肥(化肥108 kg N/hm²)。水稻淹水期持续约30天,包括整个幼苗及分蘖期,随后进入烤田期持续约20天,最后间歇灌溉持续到水稻收获。水稻收获采取人工收割的方式,除根部之外,粮食和秸秆均移出稻田生态系统。

2.3 野外数据采集与测定

截至2016年12月底,已积累了2013—2016年4

年新稻田和2016年老稻田的 CH_4 、 N_2O 、 CO_2 温室气体排放通量、土壤微气象因子和理化性质等数据。

(1)温室气体采集与测定。利用静态箱-气相色谱分析法进行稻田土壤温室气体的采样和分析^[33]。静态箱为直径50 cm、高69 cm的圆柱形暗箱,箱内有5株水稻,箱内外的作物密度一致。从移栽开始一直到水稻收获,一般每3天采集1次,强降雨或施肥后1天采集1次,冬闲阶段则每10天采集1次。采样方式选用半自动人工采样取代传统的气袋采样,在盖箱之后每10分钟采集1次,每次采5针,并用气相色谱仪进行分析。利用公式(1)计算通量。

$$F = \rho \cdot \frac{V}{A} \cdot \frac{P}{P_0} \cdot \frac{T_0}{T} \cdot \frac{dC}{dt} \quad (1)$$

式中: F 为3种温室气体净交换通量($\text{mg}/(\text{m}^2 \cdot \text{h})$); ρ 为标准状态下温室气体密度; A 为静态箱覆盖的土壤面积(m^2); V 是静态箱的有效体积(m^3); P_0 和 P 分别为标准和观测状态的大气压(kpa); T_0 和 T 是分别为标准和观测状态箱内温度($^{\circ}\text{C}$); dC/dt 是静态箱内温室气体浓度随时间变化的斜率($\mu\text{L}/\text{L}$)。

温室气体年累积排放通量的估算采用平均值内插法。对于未观测日期的通量采用相近两天有效观测的平均值进行插补,对于数据质量不符合要求的,用其余3个重复处理的平均值进行填补。公式如下:

$$E|_{X_{n+1}} = k \times \sum_{i=2}^{n+1} [X_{i-1} + (t_i - t_{i-1} - 1) \times (X_{i-1} + X_i)/2] \quad (2)$$

式中: E 代表季节/年排放量($\text{kg C}/\text{hm}^2$ 或 $\text{kg N}/\text{hm}^2$); k 为单位换算系数; n 为每季/每年拥有有效日通量观测值的天数; X_i 为第 i 天基于小时通量观测结果估计的日通量值($\text{kg C}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ 或 $\text{kg N}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$); t_i 为对

应于 X_i 的日期。

(2)微气象因子观测。在每个实验样方中分别安装1个土壤湿度传感器和2个温度传感器,温度传感器用于监测地表以下5 cm和10 cm处温度,湿度传感器用于监测土壤表层以下10 cm处土壤湿度(体积含水量 mm^3/mm^3)。每个区组安装1个数据采集子系统,自动采集各样方温湿度数据并每10分钟将所采集数据通过无线信号传输到数据采集主机。降水量数据由千烟洲站的气象站获得。

(3)土壤理化性质分析。主要包括:土壤重量、含水量、pH值、电导率(Electric Conductivity, EC)、土壤 NO_3^- 浓度和土壤 NH_4^+ 浓度、SOC含量等。

(4)水稻生物量观测。按五点取样法(5个样方,每个样方取 4×4 株植株)取样,分别称取根、茎、叶、谷粒鲜重,混匀后各取约200 g样品,先 90°C 杀青30分钟,再 65°C 烘干48小时,称烘干重。

3 研究结果

3.1 稻田温室气体排放通量及影响因素

3.1.1 稻田温室气体排放通量

如图1、图2所示,研究期间,随水稻植株的生

图1 老稻田 CH_4 通量与土壤湿度

Figure 1 CH_4 fluxes and soil moisture of old paddy during the study period

图2 新稻田 CH_4 通量与土壤湿度

Figure 2 CH_4 fluxes and soil moisture of new paddy during the study period

2019年7月

长,稻田 CH_4 温室气体排放通量呈现出明显的年际和季节变化,主要排放集中在淹水期即每年早稻季4月30日—5月30日、晚稻季7月30日—8月30日,非淹水期和冬闲季 CH_4 通量较低。水稻移栽后, CH_4 排放通量逐渐增加,在移栽10~25天时达到最大值;晒田及成熟期,水稻土壤含水量下降,新老稻田 CH_4 排放通量均急剧下降。老稻田2016年 CH_4 排放通量为 $1.01 \pm 0.07 \text{ kg C}/(\text{hm}^2 \cdot \text{d})$,年累积排放量为 $368.78 \text{ kg C}/\text{hm}^2$ (图1)。新稻田 CH_4 排放通量变化范围为 $-0.04 \sim 7.13 \text{ kg C}/(\text{hm}^2 \cdot \text{d})$,新稻田多年平均累积排放量为 $204.11 \text{ kg C}/\text{hm}^2$ 。2013—2016年新稻田 CH_4 年平均排放通量随耕作年限延长逐年增加,依次为 0.24 ± 0.01 、 0.48 ± 0.03 、 0.63 ± 0.01 和 $0.87 \pm 0.03 \text{ kg C}/(\text{hm}^2 \cdot \text{d})$ (图2)。

如图3、图4所示,稻田生态系统总呼吸能够表征水稻的生长状况, CO_2 排放呈现出明显的季节变化规律,与温度变化趋势基本一致,表现为生长季(4—10月)高于非生长季(11月—次年4月)。老稻田2016年 CO_2 排放通量为 $39.19 \pm 2.07 \text{ kg C}/(\text{hm}^2 \cdot \text{d})$ 。

图3 老稻田 CO_2 通量与温度Figure 3 CO_2 fluxes of old paddy during the study period 图4 新稻田 CO_2 通量与温度Figure 4 CO_2 fluxes of new paddy during the study period

d),年累积排放量为 $14306.01 \text{ kg C}/\text{hm}^2$ (图3)。新稻田 CO_2 排放通量变化范围为 $2.55 \sim 129.81 \text{ kg C}/(\text{hm}^2 \cdot \text{d})$,新水稻田多年平均累积排放量为 $11563.20 \text{ kg C}/\text{hm}^2$ 。2013—2016年新稻田 CO_2 年平均排放通量依次为 34.50 ± 3.41 、 36.00 ± 5.43 、 28.26 ± 2.51 和 $27.96 \pm 3.79 \text{ kg C}/(\text{hm}^2 \cdot \text{d})$ (图4)。新稻田与老稻田生态系统总呼吸差异不显著。

稻田 N_2O 的排放通量较低, N_2O 排放峰值通常出现在施肥后1周内(即每年4月30号、5月10号、7月30号和8月10号左右),同时突发性强降水对 N_2O 排放有激发作用,水稻生长季 N_2O 排放明显高于非生长季。老稻田2016年 N_2O 排放通量为 $0.0064 \text{ kg N}/(\text{hm}^2 \cdot \text{d})$,年累积排放量为 $2.34 \text{ kg N}/\text{hm}^2$ (图5)。新稻田 N_2O 排放通量变化范围为 $-0.0062 \sim 0.0493 \text{ kg N}/(\text{hm}^2 \cdot \text{d})$,新水稻田多年平均累积排放量为 $2.37 \text{ kg N}/\text{hm}^2$ 。2013—2016年新稻田 N_2O 年平均排放通量依次为 0.0073 、 0.0036 、 0.0086 和 $0.0065 \text{ kg N}/(\text{hm}^2 \cdot \text{d})$ (图6)。新稻田与老稻田 N_2O 排放通量差异不显著。

3.1.2 稻田温室气体排放影响因素

稻田土壤温室气体排放的变异与温度、水分条件、SOC和人为管理措施等有关。本研究中测定的新老稻田温室气体排放影响因素主要包括:年平均土壤温度、年平均土壤湿度、土壤pH、SOC含量和水稻生物量等(表1)。

其中,新老稻田的年平均土壤温度、年平均土壤湿度及水稻生物量相差不大。新稻田的土壤pH(均值为 5.07 ± 0.03)略低于老稻田,SOC含量(均值为 $6.01 \pm 0.03 \text{ g C}/\text{kg}$ 土壤)明显低于老稻田,且随土地利

用方式转变后的耕作年限延长逐渐增加。

3.2 水稻温室气体减排轮作年限预测

研究表明,常年种植的老稻田其CH₄排放量几乎不随种植年限的变化而变化^[31,32],土地利用变化能有效地降低水稻田土壤温室气体的排放,因此本文认为土地利用方式转变之后的新水稻增温效应达到与老水稻增温效应一致的水平需要一定的转换时间。为预测转换时间,本文对新老稻田CH₄的年总排放量曲线采用线性、多项式、对数和米氏方程4种方式进行拟合,如图7所示。

4种拟合方程的R²均较高,此时考虑稻田温室

气体初始时增加,然后趋于稳定的排放规律,且本着方程尽可能简单化的原则,选择米氏方程(图7d)来模拟新稻田CH₄的排放。公式为:

$$y = \frac{ax}{k+x} \quad (3)$$

式中: x 为转换年数; y 为新稻田CH₄排放通量; a 为老稻田CH₄排放通量; k 为半饱和常数,即CH₄排放通量新稻田与老稻田一致需要的年数的一半。

结合CH₄排放数据,从公式可以得到 $a=368.78$ kg C/hm²时, $k=3.2$ 。所以土地利用转换后的新稻田大约需要7年的时间才能达到老稻田温室气体排放通量的水平。

4 讨论

本研究中,稻田温室气体排放的季节变异规律与已有研究保持一致^[31,32,34],稻田温室气体排放主要与土壤微气候、水稻生长发育阶段及水肥管理措施等有关^[4]。由旱地转换的新稻田CH₄排放显著低于相似水肥管理措施下常年种植水稻的中国南方及其他地区的老稻田^[24,32,35],并随着耕作年限的延长呈增加趋势,可能与土地使用历史导致的有机质缺乏及微生物群落的稳定性等因素相关。研究表明,稻

图5 老稻田N₂O通量与降水量

Figure 5 N₂O fluxes of old paddy during the study period

图6 新稻田N₂O通量与降水量

Figure 6 N₂O fluxes of new paddy during the study period

表1 研究期间土壤温湿度、pH、SOC以及生物量参数

Table 1 Climatic factors, soil properties, and rice biomass during the study period

稻田	年份	年平均土壤温度/℃	年平均土壤湿度/%	土壤pH	SOC/(g C/kg 土壤)	水稻生物量/(t干物质/年)
新稻田	2013	19.7±0.2	34.26±0.15	4.93±0.01	5.77±0.01	22.61±2.29
	2014	19.9±0.1	33.26±0.34	5.01±0.02	5.99±0.02	20.53±1.38
	2015	19.9±0.1	33.08±0.45	5.11±0.03	6.03±0.03	21.97±2.08
	2016	20.0±0.2	34.01±0.16	5.22±0.03	6.24±0.04	20.81±1.01
老稻田	2016	19.8±0.2	34.52±0.21	5.32±0.23	9.56±0.31	20.45±1.09

2019年7月

图7 不同方法预测水稻温室气体减排年限

Figure 7 Greenhouse gas emission reduction years of rice simulated by different methods

田 CH_4 排放通量主要受 SOC 含量的影响,有机质可以为 CH_4 产生提供更多底物^[36-38],而有实验研究表明土地利用方式转换后的新转稻田土壤中的有机质含量较低^[24];与此同时, CH_4 氧化菌更适应较酸性条件^[39,40],在一定范围内,土壤 pH 的降低会对 CH_4 排放通量起到抑制作用,与老稻田相比,新稻田的 pH 偏低。

研究表明,土地利用方式转变影响现有土地利用方式下的生物地球化学循环过程^[41],从而影响碳氮气体地气交换通量。中国南方常年种植的稻田 SOC 含量高于旱作园地,其值分别为 11.97~14.90 g/kg 和 8.80~10.58 g/kg^[42-44]。因此,由旱作园地转变而来的新稻田 SOC 含量可能低于同区域老稻田^[24],由此造成新稻田 CH_4 排放低于老稻田。本研究中,土地利用方式转变后新稻田 SOC 含量为 5.77 g/kg,而老稻田为 9.56 g/kg;随着转换后水稻种植年限的增长,新稻田 SOC 得到积累, CH_4 排放量逐年增加。根据稻田 CH_4 排放规律和新老稻田 CH_4 排放通量值,采用数学模型对新转稻田 CH_4 排放量进行预测,得到土地利用方式转变的合理年限,最大限度地降低温室气体的排放。

土地利用方式转变是导致全球气候变化的重要驱动因子,其对温室气体排放的影响越来越受到广大学者的关注^[11-13]。土地利用方式转变引起土壤

生物和非生物过程的变化,使转变后的生态系统结构和功能在转变初期处于不平衡状态,从而对稻田温室气体排放的影响可能持续很长时间^[45,46]。考虑到稻田是目前以及未来很长一段时间内重要的粮食来源,在未来气候变化反馈中,对土地利用方式转变后稻田温室气体的减排年限进行预测,采取合理的稻旱轮作可有效地减少温室气体的排放^[23],为农业温室气体排放通量的估算和减排政策的制定提供科学基础。

由于不同土地利用方式本身植被、环境要素等的差异,区域气候差异以及温室气体产生与排放的复杂性,使得人们在理解土地利用方式转变对温室气体排放的影响机理,以及估算土地利用方式转变产生的温室气体变化量时仍存在很大的不确定性。未来的研究应着重分析土地利用变化对产生土壤温室气体的微生物及群落结构的影响,深入理解土地利用方式转变及施氮对主要温室气体产生与排放的影响机理。

5 结论

本文以中科院千烟洲红壤丘陵综合开发试验站为研究平台,通过分析新稻田(旱田转水稻田)2013—2016年与老稻田2016年 CH_4 、 CO_2 和 N_2O 等3种温室气体的排放规律,对比新稻田与老稻田微气象因子和土壤理化性质等差异,结合有关研究预测

最佳稻田温室气体减排的水旱轮作年限。主要结论如下:

(1)土地利用方式转变后的前4年,新转稻田CH₄排放通量显著低于常年种植水稻的老稻田,并随耕作年限的延长呈增加趋势;耕作年限对CO₂和N₂O温室气体排放通量影响不显著。

(2)新老稻田的年平均土壤温度、年平均土壤湿度及水稻生物量无明显差异。新稻田的土壤pH略低于老稻田,SOC含量明显低于老稻田,且两者随土地利用方式转变后的耕作年限延长逐渐增加。

(3)根据新老稻田CH₄年总排放数据,通过米氏方程模拟得出,土地利用方式转换后的新稻田大约需要7年的时间才能达到老稻田温室气体排放。因此进行到旱轮作,缩短稻田耕作年限至7年以内能有效地降低稻田温室气体的排放。

参考文献(References):

- [1] IPCC. Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2013.
- [2] Ball B C, McTaggart I P, Watson C A. Influence of organic ley-arable management and afforestation in sandy loam to clay loam soils on fluxes of N₂O and CH₄ in Scotland[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2002, 90(3): 305–317.
- [3] 陈广生, 田汉勤. 土地利用/覆盖变化对陆地生态系统碳循环的影响[J]. 植物生态学报, 2007, 31(2): 189–204. [Chen G S, Tian H Q. Land use/cover change effects on carbon cycling in terrestrial ecosystems[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2007, 31(2): 189–204.]
- [4] de Godoi S G, Neufeld A D, Ibarr M A, et al. The conversion of grassland to acacia forest as an effective option for net reduction in greenhouse gas emissions[J]. Journal of Environmental Management, 2016, 169: 91–102.
- [5] Clarke J F, Peterson J T. Effect of regional climate and land use on nocturnal heat island[J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 1972, 53(7): 714–721.
- [6] Houghton R A, Hobbie J E, Melillo J M, et al. Changes in the carbon content of terrestrial biota and soils between 1860 and 1980: A net release of CO₂ to the atmosphere[J]. Ecological Monographs, 1983, 53(3): 235–262.
- [7] 张容娟, 布乃顺, 崔军, 等. 土地利用对崇明岛围垦区土壤有机碳库和土壤呼吸的影响[J]. 生态学报, 2010, 30(24): 6698–6706. [Zhang R J, Bu N S, Cui J, et al. Effects of land use on soil organic carbon and soil respiration in soils reclaimed from wetland in the Chongming Island[J]. Acta Ecologica Sinica, 2010, 30(24): 6698–6706.]
- [8] Guo J F, Yang Y S, Chen G S, et al. Effects of clear-cutting and slash burning on soil respiration in Chinese fir and evergreen broadleaved forests in mid-subtropical China[J]. Plant and Soil, 2010, 333(1–2): 249–261.
- [9] Jiang C S, Wang Y S, Hao Q J, et al. Effect of land-use change on CH₄ and N₂O emissions from freshwater marsh in Northeast China [J]. Atmospheric Environment, 2009, 43(21): 3305–3309.
- [10] Galbally I, Meyer C P, Wang Y P, et al. Soil-atmosphere exchange of CH₄, CO, N₂O and NO_x and the effects of land-use change in the semiarid Mallee system in Southeastern Australia[J]. Global Change Biology, 2010, 16(9): 2407–2419.
- [11] Kim D G, Kirschbaum M U F. The effect of land-use change on the net exchange rates of greenhouse gases: A compilation of estimates[J]. Agriculture, Ecosystems and Environment, 2015, 208: 114–126.
- [12] Livesley S J, Kiese R, Miehle P, et al. Soil-atmosphere exchange of greenhouse gases in a Eucalyptus marginata woodland, a clover-grass pasture, and Pinus radiata and Eucalyptus globulus plantations[J]. Global Change Biology, 2009, 15(2): 425–440.
- [13] Weller S, Janz B, Jörg L, et al. Greenhouse gas emissions and global warming potential of traditional and diversified tropical rice rotation systems[J]. Global Change Biology, 2016, 22(1): 432–448.
- [14] Salimon C, Davidson E A, Victoria R L, et al. CO₂ flux from soil in pastures and forests in southwestern Amazonia[J]. Global Change Biology, 2004, 10(5): 833–843.
- [15] 宋长春, 王毅勇, 王跃, 等. 人类活动影响下淡水沼泽湿地温室气体排放变化[J]. 地理科学, 2006, 26(1): 82–86. [Song C C, Wang Y Y, Wang Y, et al. Character of the greenhouse gas emission in the freshwater mire under human activities[J]. Scientia Geographica Sinica, 2006, 26(1): 82–86.]
- [16] Carlisle E A, Steenwerth K L, Smart D R. Effects of land use on soil respiration: Conversion of oak woodlands to vineyards[J]. Journal of Environmental Quality, 2006, 35(4): 1396–1404.
- [17] 王兴, 赵鑫, 王钰乔, 等. 中国水稻生产的碳足迹分析[J]. 资源科学, 2017, 39(4): 713–722. [Wang X, Zhao X, Wang Y Q, et al. Assessment of the carbon footprint of rice production in China[J]. Resources Science, 2017, 39(4): 713–722.]
- [18] FAO. FAO Statistical Databases[EB/OL]. (2014–06–08) [2017–11–07]. <http://faostat.fao.org/>.
- [19] McGrath D A, Smith C K, Gholz H L, et al. Effects of land-use change on soil nutrient dynamics in Amazonia[J]. Ecosystems, 2001, 4(7): 625–645.
- [20] Deng L, Liu G B, Shangguan Z P. Land-use conversion and chang-

2019年7月

- ing soil carbon stocks in China's 'Grain-for-Green' Program: A synthesis[J]. *Global Change Biology*, 2014, 20(11): 3544–3556.
- [21] Sheng R, Meng D, Wu M, et al. Effect of agricultural land use change on community composition of bacteria and ammonia oxidizers[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2013, 13(7): 1246–1256.
- [22] Chu H, Morimoto S, Fujii T, et al. Soil ammonia-oxidizing bacterial communities in paddy rice fields as affected by upland conversion history[J]. *Science Society of America Journal*, 2009, 73(6): 1–6.
- [23] Eusufzai M K, Tokida T, Okada M, et al. Methane emission from rice fields as affected by land use change[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2010, 139(4): 742–748.
- [24] Nishimura S, Akiyama H, Sudo S, et al. Combined emission of CH₄ and N₂O from a paddy field was reduced by preceding upland crop cultivation[J]. *Soil Science and Plant Nutrition*, 2011, 57(1): 167–178.
- [25] Hatala J A, Detto M, Sonnentag O, et al. Greenhouse gas (CO₂, CH₄, H₂O) fluxes from drained and flooded agricultural peatlands in the Sacramento–San Joaquin Delta[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2012, 150: 1–18.
- [26] Kogel-Knabner I, Amelung W, Cao Z, et al. Biogeochemistry of paddy soils[J]. *Ceoderma*, 2010, 157(1–2): 1–14.
- [27] 常佳丽. 不同种植年限水稻土中甲烷及氮循环相关微生物群落的研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2014. [Chang J L. CH₄- and N-cycling Related Microbial Communities in Paddy Soils with Different Paddy Ages[D]. Beijing: China Agricultural University, 2014.]
- [28] Roth P J, Lehnndorff E, Cao Z H, et al. Accumulation of nitrogen and microbial residues during 2000 years of rice and paddy and non-paddy soil development in the Yangtze River Delta, China[J]. *Global Change Biology*, 2011, 17(11): 3405–3417.
- [29] Wissing L, Kblbl A, Hausler W, et al. Management-induced organic carbon accumulation in paddy soils: The role of organo-mineral associations[J]. *Soil and Tillage Research*, 2013, 126: 60–71.
- [30] 刘允芬, 于贵瑞, 李家永, 等. 红壤丘陵地区双季稻光合特性初步研究[J]. *资源科学*, 2001, 23(6): 49–53. [Liu Y F, Yu G R, Li J Y, et al. Characteristics of photosynthesis for double-cropping rice in the red soil hilly area[J]. *Resources Science*, 2001, 23(6): 49–53.]
- [31] Yuan Y, Dai X, Wang H, et al. Effects of land-use conversion from double rice cropping to vegetables on methane and nitrous oxide fluxes in southern China[J]. *Plos One*, 2016, 11(5): e0155926.
- [32] Shao R, Xu M, Li R, et al. Effect of land-use legacies and nitrogen fertilization on methane emissions in rice fields in subtropical region[J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2017, 107(10): 369–380.
- [33] Zheng X H, Mei B, Wang Y H, et al. Quantification of N₂O fluxes from soil-plant systems may be biased by the applied gas chromatograph methodology[J]. *Plant and Soil*, 2008, 311(1–2): 211–234.
- [34] Cai Z C, Xing G X, Yan X Y, et al. Methane and nitrous oxide emissions from rice paddy fields as affected by nitrogen fertilizers and water management[J]. *Plant and Soil*, 1997, 196(1): 7–14.
- [35] Xie B, Zheng X, Zhou Z, et al. Effects of nitrogen fertilizer on CH₄ emission from rice fields: Multi-site field observations[J]. *Plant and Soil*, 2010, 326(1–2): 393–401.
- [36] Yagi K, Minami K. Effect of organic matter application on methane emission from some Japanese paddy fields[J]. *Soil Science and Plant Nutrition*, 1990, 36(4): 599–610.
- [37] Watanabe A, Kimura M. Effect of rice straw application on CH₄ emission from paddy fields[J]. *Soil Science and Plant Nutrition*, 1998, 44(4): 507–512.
- [38] Zhu Z K, Ge T, Liu S L, et al. Rice rhizodeposits affect organic matter priming in paddy soil: The role of N fertilization and plant growth for enzyme activities, CO₂ and CH₄ emissions[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2018, 116: 369–377.
- [39] Jia Z, Cai Z, Xu H, et al. Effect of rice plants on CH₄ production, transport oxidation and emission in rice paddy soil[J]. *Plant and Soil*, 2001, 230(2): 211–221.
- [40] Zheng X, Zhou Z, Wang Y, et al. Nitrogen-regulated effects of free-air CO₂ enrichment on methane emissions from paddy rice field[J]. *Global Change Biology*, 2006, 12(9): 1717–1732.
- [41] Perring M P, De Frenne P, Baeten L, et al. Global environmental change effects on ecosystems: The importance of land-use legacies [J]. *Global Change Biology*, 2016, 22(4): 1361–1371.
- [42] Dong W, Zhang X, Wang H, et al. Effect of different fertilizer application on the soil fertility of paddy soils in red soil region of southern China[J]. *Plos One*, 2012, 7(9): e44504.
- [43] Dong W Y, Zhang X Y, Dai X Q, et al. Changes in soil microbial community composition in response to fertilization of paddy soils in subtropical China[J]. *Applied Soil Ecology*, 2014, 84(3): 140–147.
- [44] Yu Y, Shen W, Yin Y, et al. Response of soil microbial diversity to land-use conversion of natural forests to plantations in a subtropical mountainous area of southern China[J]. *Soil Science and Plant Nutrition*, 2012, 58(4): 450–461.
- [45] Herbst M, Friberg T, Schelde K. Climate an site management as driving factors for the atmospheric greenhouse gas exchange of a restored wetland[J]. *Biogeosciences*, 2013, 10(1): 39–52.
- [46] Knox S H, Sturtevant C, Matthes J H, et al. Agricultural peatland restoration: Effects of land-use change on greenhouse gas (CO₂ and CH₄) fluxes in the Sacramento–San Joaquin Delta[J]. *Global Change Biology*, 2015, 21(2): 750–765.

Simulation of greenhouse gas emission reduction years after the conversion of cropland into paddy field in southern China

ZHAO Miaomiao^{1,3}, SHAO Rui¹, LI Renqiang¹, YANG Jilin^{2,3}, XU Ming^{1,3}

(1. Key Laboratory of Ecosystem Network Observation and Modeling, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China; 2. State Key Laboratory of Resources and Environmental Information System, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China; 3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Agricultural production activities are one of the main sources of atmospheric greenhouse gases. Different crop cultivation systems and management methods will affect greenhouse gas emissions. There have been a lot of researches on the laws and control mechanisms of agricultural greenhouse gas emissions at home and abroad, but there are relatively few studies on the laws and influence mechanisms of greenhouse gas emissions. In this study, greenhouse gas fluxes new paddy fields (just converted from paddy fields to rice fields) in 2013-2016 and old paddy(which have been rice fields for the past 20 years) fields in 2016 as well as soil micro-meteorological and other physical and chemical properties were observed using a field plot experiment at the Qianyanzhou Ecological Station of the Chinese Academy Sciences in southern China. Then, seasonal and annual variation of greenhouse gas fluxes and the main factors that impacting greenhouse gas fluxes were analyzed. Based on the analysis, the dynamic changes of greenhouse gas emissions in rice fields are predicted. The results show that in the first four years after land-use conversion, CH₄ emission fluxes in the new paddy fields were significantly lower than that in the old paddy fields, and annual emission increased with the extension of farming period, while the CH₄ emission rate of old rice fields is not obvious, whereas the difference in emission of the greenhouse gases CO₂ and N₂O were not significant. Moreover, soil pH and the soil organic carbon content of new rice fields were lower than that of old paddy fields. The model simulation results show that shortening paddy field rotation (water- dry rotation) period (less than 7 years) can effectively reduce CH₄ and total greenhouse gas emissions in paddy fields. The results suggest that using the CH₄ emission coefficient of old rice fields may significantly overestimate CH₄ emissions from new rice fields. This study may provide new insights for understanding the impact of land- use change on greenhouse gas emissions, and provide a basis for accurate estimation of regional agricultural greenhouse gas emissions and the development of emission reduction policies.

Key words: land-use conversion; greenhouse gases; paddy; land-use years; rotation; flux; Qianyanzhou