

DOI: 10.5846/stxb201808021647

姜振辉, 杨旭, 刘益珍, 林景东, 吴杨潇影, 杨京平. 春玉米-晚稻与早稻-晚稻种植模式碳足迹的比较. 生态学报, 2019, 39(21): - .

Jiang Z H, Yang X, Liu Y Z, Lin J D, Wu Y X Y, Yang J P. Comparison of carbon footprint between spring maize-late rice and early rice-late rice cropping system. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(21): - .

春玉米-晚稻与早稻-晚稻种植模式碳足迹的比较

姜振辉, 杨旭, 刘益珍, 林景东, 吴杨潇影, 杨京平*

浙江大学环境与资源学院环境污染防治所, 杭州 310058

摘要:量作物生产的碳足迹有助于为农业生态系统温室气体减排提供理论依据。本研究利用生命周期法研究了我国南方地区稻田春玉米-晚稻水旱轮作种植模式和早稻-晚稻连作种植模式下粮食生产的碳足迹, 并定量分析粮食生产过程中各种碳排放源的相对贡献。结果表明, 与早稻-晚稻的连作模式相比, 春玉米-晚稻轮作模式的单位面积碳排放降低了 6724 kg CO₂-eq/hm², 单位产量的碳足迹降低了 0.56 kg CO₂-eq/kg。春玉米比早稻少排放 6228 kg CO₂-eq/hm²; 与早稻-晚稻模式中晚稻碳排放相比, 春玉米-晚稻轮作模式晚稻碳排放降低了 497 kg CO₂-eq/hm²。早稻-晚稻种植模式的碳足迹主要来源于甲烷(CH₄), 其碳排放为 9776 kg CO₂-eq/hm² (54.8%), 氮肥生产和施用的碳排放为 2871 kg CO₂-eq/hm² (16.1%), 灌溉电力消耗的碳排放 2849 kg CO₂-eq/hm² (16.0%)。春玉米-晚稻轮作模式的碳足迹主要来源于 CH₄ 的碳排放 4442 kg CO₂-eq/hm² (39.9%), 氮肥生产和施用的碳排放 2871 kg CO₂-eq/hm² (25.8%), 灌溉电力消耗的碳排放 1508 kg CO₂-eq/hm² (13.6%)。该模式中晚稻的碳足迹组成情况与春玉米-晚稻模式的碳足迹相似。但是, 对于春玉米而言, 其碳足迹主要来源氮肥生产和施用的碳排放 1436 kg CO₂-eq/hm² (50.1%), 氧化亚氮(N₂O)的碳排放为 579 kg CO₂-eq/hm² (20.2%), CH₄ 的碳排放为 378 kg CO₂-eq/hm² (13.2%)。同时, 相比于早稻-晚稻中晚稻的产量(6333 kg/hm²), 春玉米-晚稻轮作模式下的晚稻产量(7270 kg/hm²)提高了 14.8%。因此, 引入春玉米-晚稻轮作模式有利于提升稻田生产力, 降低稻田连作系统碳排放和碳足迹。

关键词:早稻-晚稻; 春玉米-晚稻; 碳足迹; 甲烷; 氮肥

Comparison of carbon footprint between spring maize-late rice and early rice-late rice cropping system

JIANG Zhenhui, YANG Xu, LIU Yizhen, LIN Jingdong, WU Yangxiaoying, YANG Jingping*

Institute of Environment Pollution Control and Treatment, College of Environment and Resource Science, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China

Abstract: Quantifying the carbon footprint of crop production can help provide a theoretical basis to mitigate greenhouse gas emissions in agro-ecosystem. In this study, the life cycle assessment was used to assess the carbon footprint of two cropping systems (early rice-late rice continuous cropping system and spring maize-late rice rotation systems) and quantitatively analyze the relative contribution of various carbon sources in grain production in paddy field of Southern China. The results showed that the spring maize-late rice rotation reduced the carbon emissions per unit area by 6724 kg CO₂-eq/hm² and the carbon footprint per unit yield by 0.56 kg CO₂-eq/kg compared with the continuous cropping of early rice-late rice. The carbon emissions from the production of spring maize were less 6228 kg CO₂-eq/hm² than in early rice. The carbon emissions of late rice in spring maize-late rice rotation system were decreased by 497 kg CO₂-eq/hm², when compared with that in early rice-late rice system. The main components of carbon footprint in the early rice-late rice planting system were derived from the carbon emission of methane (CH₄) from paddy field (9776 kg CO₂-eq/hm², 54.8%), nitrogen fertilizer

基金项目: 国家重大研发计划(2016YFD0300203-4)

收稿日期: 2018-08-02; 网络出版日期: 2019-00-00

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: jpyang@zju.edu.cn

production and application ($2871 \text{ kg CO}_2\text{-eq/hm}^2$, 16.1%), and electricity consumption ($2849 \text{ kg CO}_2\text{-eq/hm}^2$, 16.0%). While the main part of carbon footprint came from the carbon emission of CH_4 ($4442 \text{ kg CO}_2\text{-eq/hm}^2$, 40.0%), nitrogen fertilizer production and application ($2871 \text{ kg CO}_2\text{-eq/hm}^2$, 25.8%), and electricity consumption ($1508 \text{ kg CO}_2\text{-eq/hm}^2$, 13.6%) in the spring maize-late rice rotation system. The composition of carbon footprint of late rice in this system were similar to that in the spring maize-late rice system. However, the main part of carbon footprints of spring maize were mainly derived from the carbon emission of nitrogen fertilizer production and application ($1435 \text{ CO}_2\text{-eq/hm}^2$, 50.1%), nitrous oxide ($579 \text{ kg CO}_2\text{-eq/hm}^2$, 20.2%), and CH_4 ($378 \text{ CO}_2\text{-eq/hm}^2$, 13.2%). Meanwhile, compared with the yield of late rice (6333 kg/hm^2) in early rice - late rice cropping system, the yield of late rice (7271 kg/hm^2) was increased in the spring maize-late rice rotation system. Accordingly, introducing spring maize-late rice rotation system is conducive to improving rice paddy productivity and mitigating carbon emission and carbon footprint in continuous rice systems.

Key Words: paddy-upland rotation; rice continuous cropping; carbon footprint; methane; nitrogen fertilizer

碳足迹是指某项活动或某个产品在其整个生命周期内直接或间接产生的二氧化碳(CO_2)排放总量,以二氧化碳当量表示($\text{CO}_2\text{-eq}$)^[1-2]。它是一种用来评估某生产过程或活动在整个生命周期内的温室气体排放的工具。农业中的碳足迹能够系统地评价农作物在生产过程农资投入(柴油、电力、化肥、农药、农膜)引起的间接碳排放和农田直接碳排放总量^[3-4],对实现农业的清洁生产具有重要理论指导意义。

众所周知稻田生态系统是大气中 CH_4 和 N_2O 的主要排放源。我国作为主要水稻种植区,每年稻田 CH_4 和 N_2O 总排放量的大约分别为 7.7—8.0 Tg CH_4 和 88.0—98.1 Gg N_2O ^[5-6]。在未来十年,随着人口的增加,对粮食作物水稻的产量需求必然增加,因此,将消耗更多的能源、化学肥料、杀虫剂和塑料薄膜^[7],这将直接和间接地促进农田温室气体排放。如何实现稻田生态系统的粮食作物生产低碳耗,成为科研工作者所努力的方向。近年来,水资源短缺,灌溉能源成本高,稻米价格波动,以及对玉米等牲畜饲料需求的增加,促使农民从水稻连作种植转向春玉米-晚稻水旱轮作种植^[8-9]。在亚洲地区玉米—水稻轮作系统种植面积超过了 3 Ma hm^2 ^[9]。联合国粮农组织把春玉米-晚稻模式作为一种对农业集约化生产具有可持续性和战略意义的模式^[10]。随着春玉米在我国南方双季稻区大面积推广,春玉米-晚稻模式必将成为稻田种植业战略性调整的重心。相比于小麦—晚稻、早稻-晚稻和双季玉米,春玉米-晚稻具有增产潜力大,自然资源利用率高和经济效益高等优势^[9, 11-12]。在全球气候变暖的背景下,有必要探讨春玉米-晚稻模式对农田碳足迹的影响。目前众多学者对稻田系统碳足迹的研究主要集中于水稻连作系统及轮作模式的研究集中在冬小麦—夏玉米。Xue 等^[13]评价了我国南方地区双季稻的碳足迹,并对不同农业管理措施下双季稻的碳足迹及优化进行了评估。Zhang 等^[14]研究了耕作方式对华北平原冬小麦-夏玉米碳足迹的影响。但是,目前对春玉米-晚稻轮作模式的碳足迹研究较少。研究表明我国水稻生产过程的温室气体排放和碳足迹高于玉米和小麦^[15]。基于此,本研究提出以下假设,相对于早稻-晚稻连作模式,春玉米-晚稻轮作模式不仅可以降低农田温室气体排放而且可以降低产量尺度的碳足迹。因此,本研究利用生命周期法,以早稻-晚稻连作模式作为对照,研究春玉米-晚稻轮作模式对稻田系统碳足迹的影响,以期获得春玉米-晚稻轮作的农田生态系统的碳排放清单,为稻田生产系统的低碳清洁化生产以及减缓气候变化提供有效的科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验地点

本试验 2017 年在浙江省杭州市农业科学研究院试验田 (120.16°E , 30.13°N) 实施。试验田土壤类型属于粉粘壤土,土壤全氮含量为 2.32 g/kg , pH 值为 5.52, 总有机碳含量为 22.2 g/kg 。试验开始前试验田主要种植模式是水稻连作(>20 年)。

1.2 试验方案设计

本试验方案设置了两个作物种植模式处理:早稻-晚稻,春玉米-晚稻,每个处理重复三次,每一个试验小区的大小为 $8 \times 8 \text{ m}^2$,完全随机区组排列。春玉米品种为美玉(加甜糯)7号,早稻和晚稻的品种分别为甬粒115及秀水134。

1.2.1 早稻-晚稻模式

早稻采用直播方式,从2017年4月11日播种,2017年7月20日收获;第二季晚稻采用移栽方式,移栽时间为2017年7月22日,2017年11月19日收割。早、晚稻磷肥(过磷酸钙, $41 \text{ kg P}_2\text{O}_5/\text{hm}^2$)和钾肥(氯化钾, $47 \text{ kg K}_2\text{O}/\text{hm}^2$)全部基施,氮肥(尿素, $225 \text{ kg N}/\text{hm}^2$)分为三个阶段早晚稻季将氮肥按3:4:3(基肥,一次追肥和二次追肥)的比例施到试验组中,分别是分蘖肥(占总量的30%)、孕穗肥(占总量的40%)以及抽穗肥(占总量的30%)。为防止小区之间水肥串流,小区之间采用PVC管和薄膜隔离。灌溉方式采用连续灌溉方式。早稻和晚稻收获时每个小区各选取3个 1 m^2 测产。

1.2.2 春玉米-晚稻

春玉米采用厢作,厢宽和沟宽分别为1.3 m和0.3 m,每个小区6厢,每厢播种两行春玉米。春玉米采用移栽方式,三叶期(2017年4月13日)开始移栽,每行移栽23株。玉米季磷肥(过磷酸钙, $75 \text{ kg P}_2\text{O}_5/\text{hm}^2$)和钾肥(氯化钾, $47 \text{ kg K}_2\text{O}/\text{hm}^2$)全部基施,氮肥(尿素, $225 \text{ kg N}/\text{hm}^2$)分为两次施肥,分别是苗期肥(4月23日施,占总量40%),喇叭口肥(6月3日追肥,占总量60%);2017年7月9日作为鲜食玉米收获。每个小区分别选取3和4厢中的两个连续20株玉米果穗,烘干脱粒称重,并计算含水量。晚稻种植同1.2.1之晚稻。

两种模式的农资投入数据通过实地调研和本研究投入数据的平均值获得,共调研当地农户37户。调研内容包括水稻或春玉米生产过程中农资投入情况:肥料和农药的投入、农业机械油耗(播种、耕作和粮食运输)和灌溉的电力消耗。玉米、早稻和晚稻的农资投入如表1。

1.3 边界确定及农业投入碳足迹计算

根据PAS2050^[16]的定义,农业生产碳足迹计算为基于生命周期评价的产品体系中的所有直接和间接温室气体排放量总和,以 CO_2 当量($\text{CO}_2\text{-eq}$)表示。因此,在本研究中,玉米和水稻生产的碳足迹是通过农业投入物原材料的初始生产到农场大门的最终产品(如肥料、农药、机械、电力灌溉及收获的稻米和玉米)的间接温室气体排放及稻田直接温室气体排放来确定的。温室气体排放量包括农资投入,稻田非 CO_2 即 CH_4 和 N_2O 排放量。由于种子在生产过程中产生的碳足迹相对较小,往往不足农作物生命周期中整体碳足迹的千分之一,故在此不将其纳入计算范围;因此,本研究将水稻或玉米生产的温室气体排放量包括如下:(1)化肥(N、P和K)和农药的生产,加工和运输及其施用引起的碳排放;(2)耕种和收获机械作业的柴油燃料消耗的碳排放;(3)用于灌溉的电力消耗的碳排放;(4)水稻或春玉米整个生育期稻田 CH_4 和 N_2O 排放。

农资投入(如农药、化肥、电力、柴油等消耗)的温室气体排放量使用下列公式估算。

$$CF_{\text{input}} = \sum (A_i \times \delta_i) \quad (1)$$

式中, CF_{input} 是指相关农资投入品所导致的温室气体排放总和($\text{kg CO}_2\text{-eq}/\text{hm}^2$); i 是指某一种农资投入品; A_i 是指第 i 个单个农业投入的强度或数量(农药化肥, kg/hm^2 ; 电力, kwh/hm^2 ; 柴油, L/hm^2); δ_i 是指制造或应用投入时第 i 个单个农资投入的温室气体排放系数。排放系数通过数据开放性软件 eBalance v3.0 (IKE Environmental Technology CO., Ltd., China) 获得,包括 Chinese Life Cycle Database 0.7 (CLCD 0.7) 和 Ecoinvent 2.2,各农资生产投入的温室气体排放因子见表1。

1.4 田间温室气体的采集和测定

1.4.1 气体采集

使用密闭箱气体收集法进行温室气体的采集,密闭箱的制作材料为PVC板,分为底座和主箱体两部分,主箱体外部铺一层铝箔纸进行反光,以防止夏秋季节采样时主箱体长时间暴露在太阳光中而造成了采样箱内部的气体温度发生较大波动,从而影响采样结果的有效性。静态箱的尺寸大小(长×宽×高)为 $50 \times 50 \times$

90 cm³, 以确保水稻完全成熟以后还能将其全部装在静态箱中进行温室气体采集; 底座的尺寸大小(长×宽×高)为 50 × 50 × 30 cm³, 底座安装时要埋入地下 10 cm 深, 且在水稻生产的过程中一直保留, 内部种植 9 株水稻或 4 株玉米。采样时把静态箱体盖在每一个试验小区的固定底座上, 同时采用水封的方法来确保箱子内部处于完全密闭状态, 不与外界的进行气体交换。为防止测定区域和非测定区域水肥串流, 用塑料薄膜隔开。从播种或移栽后第 5 天开始持续到收获前一周每周采集测定一次温室气体(CH₄和 N₂O)通量^[17], 采样时间在早上 9:00—11:00 之间, 在 40 分钟里每间隔 10 分钟采集一次气体样本, 使用容量为 60 mL 的注射器从三通口管道中抽取气体, 并立即将其注射到 100 mL 的铝膜采气袋中, 完成收集样本后需在一周内进行样本的测量。

表 1 各项农资投入温室气体排放因子及投入量

Table 1 GHG emission factors and applicate rate of various agricultural inputs

温室气体排放来源 Emission gas source	排放系数 Emission factor	系数来源 Factor source	农资投入 Agricultural inputs			
			单位 Unit	投入量 Application rate		
				玉米 Maize	早稻 Early rice	晚稻 Late rice
氮肥 N	6.38 kg CO ₂ -eq/kg	CLCD v0.7	kg/hm ²	225	225	225
磷肥 P ₂ O ₅	0.44 kg CO ₂ -eq/kg	CLCD v0.7	kg/hm ²	47	41	41
钾肥 K ₂ O	0.61 kg CO ₂ -eq/kg	CLCD v0.7	kg/hm ²	75	47	47
柴油 Diesel oil	2.63 kg CO ₂ -eq/L	CLCD v0.7	L/hm ²	106	178	178
电力 Electricity	1.12 kg CO ₂ -eq/kwh	CLCD v0.7	kwh/hm ²	0	1198	1346
农药 Pesticide	18.00 kg CO ₂ -eq/kg	Ecoinvent 2.2	kg/hm ²	7	13	15

1.4.2 CH₄和 N₂O 温室气体测定

温室气体(CH₄和 N₂O)采用气相色谱仪(Agilent 7890A, 中国上海)检测。然后根据采集得到的四个气体样本(0、10、20、30 min)的浓度进行线性回归模型测算得到气体样本的浓度增长速率, 在经过温室气体释放速率公式^[18]计算得到温室气体释放速率。

$$F = \frac{dC}{dt} \times \frac{mPV}{dt} = H \times \frac{dC}{dt} \times \frac{mP}{R(T + 273.15)} \quad (2)$$

其中, F 是 CH₄或 N₂O 的排放速率(mg/m²/min), dC/dt 是 40 分钟内温室气体浓度的变化速率, m 是气体的分子量(g/mol), P 是大气压强(Pa), H 是静态箱体的高度(m), T 是静态箱内温度(℃), R 是气体常数(为 8.134 g/mol/k), 273.15 是绝对温度(K)。

稻田中累积的温室气体(CH₄和 N₂O)碳足迹由公式(3)计算得到。

$$E_c = \alpha \times \sum_i^n \left(\frac{F_i \times 1440 \times D_i}{100} \right) \quad (3)$$

式中 E_c 是春玉米或晚稻积累 CH₄和 N₂O 的 CO₂排放当量(kg CO₂-eq/hm²); α 代表潜在影响全球变暖的系数: CH₄(34)和 N₂O(298)^[19]。 F_i 是 CH₄或 N₂O 第 i 次取样时间段排放速率(mg/m²/h); D_i 是第 i 次和第 $i-1$ 次采样之间的时间间隔(day); 1440 是分钟(min)转换为天(day)的系数; 1/100 是 mg/m²转换为 kg/hm²的系数。

1.5 农作物碳足迹评估方法

采用单位作物产量碳足迹(kg CO₂-eq/kg)评价法, 即稻田系统生产每千克玉米或水稻所导致的碳排放总和, 计算公式如下。

$$CF_a = \frac{E_{input} + E_{N_2O} + E_{CH_4}}{Y} \quad (4)$$

$$CF_b = \frac{\sum E_i}{\sum Y_i} \quad (5)$$

式中, CF_a 指单季作物(春玉米或水稻)在生长期的碳足迹($\text{kg CO}_2\text{-eq/kg}$ 籽粒产量); $E_{\text{N}_2\text{O}}$ 和 E_{CH_4} 是指将 CH_4 和 N_2O 累积排放量转换成的 $\text{CO}_2\text{-eq}$ ($\text{kg CO}_2\text{-eq/hm}^2$); Y 指当年玉米或水稻的籽粒产量 (kg/hm^2); CF_b 是指玉米—晚稻或早晚—晚稻模式的碳足迹 ($\text{kg CO}_2\text{-eq/kg}$ 籽粒产量), $\sum E_i$ 指春玉米-晚稻或早晚—晚稻模式所有温室气体排放量和 ($\text{kg CO}_2\text{-eq/hm}^2$); $\sum Y_i$ 春玉米-晚稻或早稻-晚稻模式所有籽粒产量和 (kg/hm^2)。

1.6 数据分析

采用 Excel 2013 软件对数据进行处理,应用 OriginPro 9.4 软件对数据进行绘图。

2 结果与分析

2.1 两种模式的碳排放

与早稻-晚稻模式碳排放 ($17848 \text{ kg CO}_2\text{-eq/hm}^2$) 相比,春玉米-晚稻轮作模式降低碳排放 $6724 \text{ kg CO}_2\text{-eq/hm}^2$; 春玉米比早稻少排放 $6229 \text{ kg CO}_2\text{-eq/hm}^2$; 与早稻-晚稻模式中晚稻碳排放相比,春玉米-晚稻轮作模式降低了晚稻碳排放 $497 \text{ kg CO}_2\text{-eq/hm}^2$ (表 2)。

表 2 早稻-晚稻连作系统和玉米-水稻轮作系统的温室气体排放构成成分/ ($\text{kg CO}_2\text{-eq/hm}^2$)

Table 2 Composition of greenhouse gas emissions from early rice-late rice continuous cropping mode and maize-rice rotation system

种植系统 Cropping system	作物类型 Crop type	总排放 Total emission	直接排放 Direct emission		间接排放 Indirect emission					
			CH_4	N_2O	N	P_2O_5	K_2O	柴油	电力	农药
早稻-晚稻	早稻	9091	5186	379	1436	18.0	28.7	468	1342	234
Early rice-late rice	晚稻	8756	4590	438	1436	18.0	28.7	468	1508	270
	早稻-晚稻	17848	9776	818	2871	36.1	57.3	936	2849	504
春玉米-晚稻	春玉米	2868	378	579	1435	20.7	45.8	279	0	126
Spring maize-late rice	晚稻	8260	4064	467	1435	18.0	28.7	468	1507	270
	春玉米-晚稻	11123	4442	1047	2871	38.7	74.4	747	1507	396

2.2 两种种植模式碳足迹

早稻-晚稻连作模式的碳足迹为 $1.32 \text{ kg CO}_2\text{-eq/kg}$ 籽粒产量,比春玉米-晚稻轮作模式 ($0.86 \text{ kg CO}_2\text{-eq/kg}$) 高 $0.56 \text{ kg CO}_2\text{-eq/kg}$ 籽粒产量。春玉米的碳足迹 ($0.50 \text{ kg CO}_2\text{-eq/kg}$ 籽粒产量) 较早稻的碳足迹 ($1.27 \text{ kg CO}_2\text{-eq/kg}$ 籽粒产量) 降低 $0.77 \text{ kg CO}_2\text{-eq/kg}$ 籽粒产量。对于两种模式晚稻碳足迹而言,春玉米-晚稻模式降低了晚稻碳足迹 $0.24 \text{ kg CO}_2\text{-eq/kg}$ 籽粒产量 (表 3), 同时该模式提高了晚稻的产量 (14.8%)。

表 3 早稻-晚稻连作系统和玉米-水稻轮作系统的碳足迹

Table 3 Carbon footprint of early rice-late rice continuous cropping and spring maize-late rice rotation system

种植系统 Cropping system	作物类型 Crop type	产量 Yield/ (kg/hm^2)	温室气体排放	碳足迹
			Greenhouse gas emission/ ($\text{kg CO}_2\text{-eq/hm}^2$)	Carbon footprint/ ($\text{kg CO}_2\text{-eq/kg}$)
早稻-晚稻	早稻	7140	9091	1.27
Early rice-late rice	晚稻	6333	8756	1.38
	早稻-晚稻	13479	17848	1.32
春玉米-晚稻	春玉米	5694	2864	0.50
Spring maize-late rice	晚稻	7271	8260	1.14
	春玉米-晚稻	12965	11123	0.86

2.3 两种种植模式的碳足迹构成成分

早稻-晚稻种植模式的碳足迹主要来源于 CH_4 、氮肥使用及灌溉电力消耗的碳排放。在早稻-晚稻种植系统中, CH_4 的碳排放为 $9776 \text{ kg CO}_2\text{-eq/hm}^2$ (54.8%), 氮肥的碳排放为 $2871 \text{ kg CO}_2\text{-eq/hm}^2$ (16.1%), 灌溉电力

消耗的碳排放为 2849 kg CO₂-eq/hm²(16.0%)。早稻和晚稻的碳足迹组成情况与早稻-晚稻模式碳足迹相似(图 1)。

春玉米-晚稻轮作模式的碳足迹主要来源 CH₄、氮肥和灌溉电力消耗的碳排放。在该模式中,CH₄的碳排放为 4442 kg CO₂-eq/hm²(39.9%),氮肥的碳排放为 2871 kg CO₂-eq/hm²(25.81%),灌溉电力消耗的碳排放为 1508 kg CO₂-eq/hm²(13.6%)。晚稻的碳足迹组成情况与春玉米-晚稻模式的碳足迹相似。但是,对于春玉米而言,其碳足迹主要来源为氮肥,N₂O 和 CH₄。春玉米的氮肥碳排放为 1435 CO₂-eq/hm²(50.1%),N₂O 的碳排放为 579 kg CO₂-eq/hm²(20.2%),CH₄的碳排放为 378 CO₂-eq/hm²(13.2%)(图 1)。

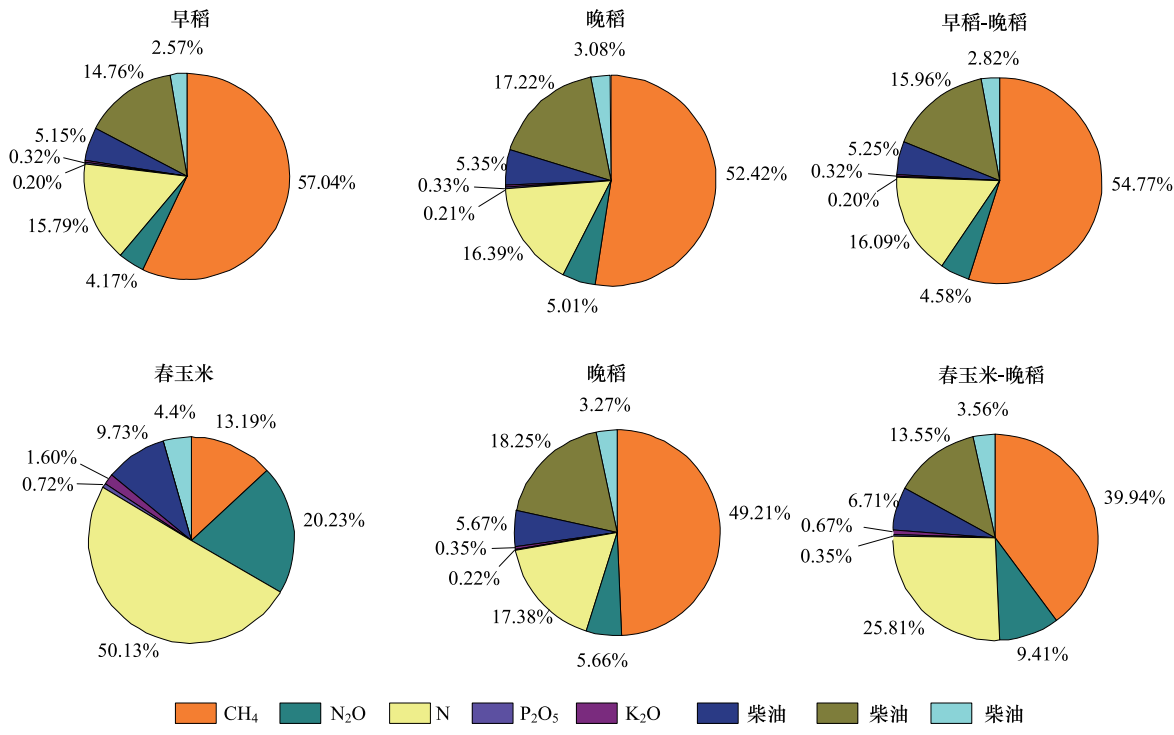


图 1 早稻-晚稻连作和春玉米-晚稻轮作模式的碳足迹来源

Fig.1 Source of carbon footprint of early rice-late rice continuous cropping and spring maize-late rice rotation system

3 讨论

本研究早稻和晚稻的碳足迹为 1.14—1.38 kg CO₂-eq/kg 籽粒产量(表 3),这与前人研究结果相似^[15,20-21]。Xu 等^[17]研究表明我国长江下游地区水稻的碳足迹为 1.34 kg CO₂-eq/kg 籽粒产量;Cheng 等^[11]利用国家统计数据发现我国水稻的平均碳足迹为 1.36 kg CO₂-eq/kg 籽粒产量。但是,本研究春玉米的碳足迹低于 Cheng 等^[15]的研究结果,可能主要归因于数据的来源,系统边界的定义,农业投入的排放因子以及碳足迹计算方法的差异。春玉米-晚稻水旱轮作模式较早稻-晚稻连作模式降低了 0.56 kg CO₂-eq/kg,这也印证本研究的假设。主要归因于较早稻而言春玉米的温室气体排放较低,其中包括 CH₄低排放和灌溉电力的零消耗(在春玉米种植期间充足的雨水使得春玉米无需灌溉)。Cheng 等^[15]结果也表明玉米生产的碳足迹低于水稻,其认为推广玉米种植将有利于我国农业的低碳发展,若玉米替代水稻将每年减少 100 Mt CO₂-eq 排放。此外,春玉米-晚稻模式提高了晚稻产量,比早稻-晚稻连作模式中晚稻的产量高 14.8%。可能的原因是种植春玉米期间土壤好氧的条件加速了土壤碳氮循环,导致微生物对土壤有机质分解的速度加快,这有助于促进土壤养分的释放,提高了后季稻养分利用率^[22]。钾素在土壤中活性和流动性较大,是影响晚稻产量的一个重要因素^[23]。尽管春玉米季施钾量高于早稻季,但是两者收获后土壤的全钾和速效钾含量没有显著性差异($P>$

0.05,数据没有在文中展示),因为钾素主要是当季利用为主^[23]。然而增产的原因是否是干湿交替引起的稻田土壤物理化学性质或者生物学特性的交替变化引起的,还需进一步研究。本研究结果表明早稻-晚稻模式高碳排放,比春玉米-晚稻模式高 60.5%,同时早稻-晚稻模式产量潜力(13473 kg/hm^2)比春玉米-晚稻模式(12965 kg/hm^2)高 4.00%。主要归因于本研究的春玉米产量较低(5694 kg/hm^2),原因有 2 个方面:1)试验地地处南方地区,玉米生长期降雨量大,土壤中的氮素容易流失,导致土壤中的氮素损失,从而造成产量低;2)本研究的玉米品种为甜糯型,在没有完全成熟时作为鲜食玉米收获,相对于饲料型玉米^[12],春玉米果穗偏小,产量偏低。不过通过更换春玉米品种为饲料型和加强春玉米季排水都可以解决春玉米-晚稻产量潜力相对于低的问题。另外,研究显示相对于双季稻,春玉米-晚稻可以提高光温资源利用率和产量潜力,还可以提高经济效益^[11-12]。因此,综上所述我们认为相对于水稻连作模式春玉米-晚稻轮作模式具有低碳排放、高资源利用率和高效生产效益的优势。

与早稻-晚稻中的晚稻相比,春玉米-晚稻模式降低了晚稻 CH_4 的排放,可能是因为春玉米的种植加速了土壤有机碳的矿化^[24],导致了晚稻季土壤氨氮含量较高,土壤铵态氮含量过高会加速 CH_4 的氧化^[25],进而降低了稻田 CH_4 的排放。此外,对于两种种植模式中的水稻而言, CH_4 是水稻生长期间碳排放的主要成分,对总温室气体的贡献率为 49.2%—57.0%(图 1),这与 Xue 等^[21]研究类似。本研究结果表明减少稻田的 CH_4 排放对于减少水稻生产的碳足迹至关重要。研究表明干湿交替灌溉可以有效减少稻田 CH_4 排放,同时也可以减少灌溉次数和灌溉用水量^[26],从而减少灌溉的电力能源消耗和 CH_4 排放。另外,与传统耕作相比,免耕是可以显著降低稻田 CH_4 的排放^[27-28],同时也可减少机械柴油的能源消耗。

春玉米-晚稻轮作模式的春玉米碳足迹清单中,氮肥引起的碳足迹所占的比重最大,超过了 50%(图 1)。Cheng 等^[29]通过国家统计局数据报道了氮肥施用产生的碳足迹占我国农作物生产的碳足迹 53.1%—57.3%。基于田间调研数据,Yan 等^[30]发现我国氮肥引起的温室气体排放占作物生产的碳足迹 44.2%—79.6%。主要归因于氮肥生产和运输过程中需要大量消耗的能源,另外,为保证作物的生产力往往施用大量的氮肥,从而造成氮肥引起温室气体排放相对量高。众多研究^[15,18,31]表明减少氮肥的施用量和提高氮肥的利用率是降低作物生产的碳足迹关键所在。然而,在我国目前家庭农场式农业经营模式背景下,通过降低氮肥的施用和提高氮肥利用率来实现农田系统的低碳足迹是一项缓慢艰巨的任务^[32]。目前我国正处于工业供给侧改革去产能的时期,而通过政府驱动政策改善氮肥的生产工艺,降低氮肥引起的温室气体排放是一项行之有效的措施。Zhang 等^[32]通过模拟发现如果氮肥生产采用新的工艺技术将每年减少氮肥引起的温室气体排放的 20.0%—63.7%,相当于 102—357 Tg $\text{CO}_2\text{-eq}$ 。如果我国氮肥的碳排放系数($6.38 \text{ kg CO}_2\text{-eq/kg N}$)降到美国的水平($3.87 \text{ kg CO}_2\text{-eq/kg N}$),两种种植模式的碳排放均将降低 $1130 \text{ kg CO}_2\text{-eq/hm}^2$,碳足迹降低 8.38%(早稻-晚稻模式)和 8.71%(春玉米-晚稻模式)。

综上,与水稻连作相比,春玉米-晚稻轮作模式可降低农田系统的碳足迹,同时可提高晚稻的产量,是一种具有推广潜力的种植模式。另外,减少氮肥生产过程的能源消耗和在晚稻种植过程中采用间歇灌溉是降低春玉米-晚稻模式的碳足迹的关键策略。

本研究碳足迹评价参照 PAS2050 标准^[16],该标准并不包括由土壤有机碳变化引起的碳排放。然而,农田系统既是温室气体排放的源也是库。Lu 等^[33]报道了我国农田土壤碳固持量为 101 Tg/a ,相当于化石燃料碳排放的 13.3%。考虑到土壤碳固存可抵消部分温室气体排放并减少碳足迹^[34],土壤碳变化是否应该包括在粮食产品碳足迹的计算中需要进一步研究。研究表明相对于早晚—晚稻连作,春玉米-晚稻模式可以加速土壤碳矿化,增加碳排放^[24]。如果考虑到土壤碳变化,本研究春玉米-晚稻模式的碳排放可能会升高,这或许会增加本研究的不确定性。尽管如此,本研究为稻田系统温室气体减排提供了有效的措施,为南方稻田地区推广春玉米-晚稻模式提供了理论依据。

4 结论

(1)早稻-晚稻连作系统单位面积碳排放为 $17848 \text{ kg CO}_2\text{-eq/hm}^2$,单位产量的碳足迹为 $1.32 \text{ kg CO}_2\text{-eq/}$

kg;春玉米-晚稻轮作系统单位面积碳排放为 11123 kg CO₂-eq/hm²,单位产量的碳足迹为 0.86 kg CO₂-eq/kg。尽管春玉米-晚稻轮作模式的产量潜力比早稻-晚稻连作模式低 3.84%,但是早稻-晚稻连作模式碳排放却比春玉米-晚稻轮作模式高 60.5%。

(2)早稻-晚稻连作系统粮食生产的碳足迹主要来自于稻田 CH₄的排放(54.8%);春玉米-晚稻轮作系统粮食生产的碳足迹主要来自于 CH₄的碳排放(39.9%)。但是,春玉米生产的碳足迹主要来自氮肥的生产和施用(50.1%)。

(3)春玉米-晚稻轮作模式是降低连作稻田高碳排放的一种农田管理方式。

参考文献(References):

- [1] Wiedmann T, Minx J. A definition of carbon footprint. In: Pertsova, C.C. (Ed.), *Ecological Economics Research Trends*. New York: Nova Science Publishers, 2008: 1-11.
- [2] World Resources Institute. Product Accounting and Reporting Standard. Draft for Stakeholder Review. New Standards for Tracking GHG Emissions from Policies and Goals. [2010-10-21]. <https://www.wri.org/blog/2012/12/released-review-new-standards-tracking-ghg-emissions-policies-and-goals>.
- [3] Lal R. Carbon emissions from farm operations. *Environment International*, 2004, 30: 981-990.
- [4] Hillier J, Hawes C, Squire G, Hilton A, Wale S, Smith P. The carbon footprints of food crop production. *International Journal of Agricultural Sustainability*, 2009, 7(2): 107-118.
- [5] Yan X, Akimoto H, Ohara T. Estimation of nitrous oxide, nitric oxide and ammonia emissions from croplands in East, Southeast and South Asia. *Global Change Biology*, 2003, 9: 1080-1096.
- [6] Zheng X, Han S, Huang Y, Wang Y, Wang M. Re-quantifying the emission factors based on field measurements and estimating the direct N₂O emission from Chinese croplands. *Global Biogeochemical Cycles*, 2004, 18: 1-19.
- [7] Dong G, Mao X, Zhou J, Zeng A. Carbon footprint accounting and dynamics and the driving forces of agricultural production in Zhejiang Province, China. *Ecological Economics*, 2013, 91(91): 38-47.
- [8] Witt C, Cassman K G, Olk D C, Biker U, Liboon S P, Samson M I, Ottow J C G. Crop rotation and residue management effects on carbon sequestration, nitrogen cycling and productivity of irrigated rice systems. *Plant and Soil*, 2000, 225: 263-278.
- [9] Timsina J, Jat M L, Majumdar K. Rice-maize systems of South Asia: current status, future prospects and research priorities for nutrient management. *Plant and Soil*, 2010, 335: 65-82.
- [10] Food and Agriculture Organization of the United Nations. Save and Grow in Practice: Maize, Rice, Wheat: a Guide to Sustainable Cereal Production. [2016-01-18]. <http://www.fao.org/publications/save-and-grow/maize-rice-wheat/en/>
- [11] 赵强基, 郑建初, 袁从, 卞新民, 李萍萍, 章熙谷. 中国南方稻区玉米-稻种植模式的建立和实践. *江苏农业学报*, 1997, 13: 215-219
- [12] 李淑娅, 田少阳, 袁国印, 葛均筑, 徐莹, 王梦影, 曹凑贵, 翟中兵, 凌霄霞, 展茗, 赵明. 长江中游不同玉稻种植模式产量及资源利用效率的比较研究. *作物学报*, 2015, 41(10): 1537-1547.
- [13] Xue J F, Liu S L, Chen Z D, Chen F, Lal R, Tang H M, Zhang H L. Assessment of carbon sustainability under different tillage systems in a double rice cropping system in southern China. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 2014, 19(9): 1581-1592.
- [14] Zhang X Q, Pu C, Zhao X, Xue J F, Zhang R, Nie Z J, Chen F, Lal R, Zhang H L. Tillage effects on carbon footprint and ecosystem services of climate regulation in a winter wheat—summer maize cropping system of the North China Plain. *Ecological Indicators*, 2016, 67: 821-829.
- [15] Cheng K, Yan M, Nayak D, Pan G X, Smith P, Zheng J F, Zheng J W. Carbon footprint of crop production in China: an analysis of National Statistics data. *The Journal of Agricultural Science*, 2015, 153(3): 422-431.
- [16] British Standard Institution. Assessment of life cycle greenhouse gas emissions from horticultural products. [2013-03-20]. <http://www.bsigroup.sg/fr-pas2050-2-2012>.
- [17] Zheng X, Mei B, Wang Y H, Xie B, Wang Y S., Dong H., Xu H, Chen G, Cai Z C, Yue J, Gu J, Su F, Zou J, Zhu J. Quantification of N₂O fluxes from soil-plant systems may be biased by the applied gas chromatograph methodology. *Plant and Soil*, 2008, 311: 211-234.
- [18] Davidson E A, Belk E, Boone R D. Soil water content and temperature as independent or confounded factors controlling soil respiration in a temperate mixed hardwood forest. *Global Change Biology*, 1998, 4: 217-22.
- [19] 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. Cambridge University Press, 2013.
- [20] Xu X, Zhang B, Liu Y, Xue Y, Di B. Carbon footprints of rice production in five typical rice districts in China. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, 22

(3): 227-232.

- [21] Xue J F, Pu C, Liu S L, Zhao X, Zhang R, Chen F, Xiao X P, Zhang H L. Carbon and nitrogen footprint of double rice production in Southern China. *Ecological Indicators*, 2016, 64: 249-257.
- [22] Yao H, Lehdorff E, Amelung W, Wassmann R, Ma C A, Unold G V, Siemens J. Drainage and leaching losses of nitrogen and dissolved organic carbon after introducing maize into a continuous paddy-rice crop rotation. *Agriculture Ecosystems and Environment*, 2017, 249: 91-100.
- [23] 袁国印, 何俊欧, 陈文, 王丹, 葛均筑, 李萍等, 展茗, 赵明. 前季施肥对玉-稻轮作养分吸收及土壤养分表观平衡的影响. *中国农学通报*, 2018, 34(7): 1-7.
- [24] He Y, Siemens J, Amelung W, Goldbach H, Wassmann R, Alberto M C R, Lücke A, Lehdorff E. Carbon release from rice roots under paddy rice and maize—paddy rice cropping. *Agriculture Ecosystems and Environment*, 2015, 210: 15-24.
- [25] Bodelier P L E, Laanbroek H J. Nitrogen as a regulatory factor of methane oxidation in soils and sediments. *FEMS Microbiology Ecology*, 2004, 47: 265-277.
- [26] Hou H J, Peng S Z, Xu J Z, Yang S, Mao Z. Seasonal variations of CH₄ and N₂O emissions in response to water management of paddy fields located in Southeast China. *Chemosphere*, 2012, 89(7): 884-892.
- [27] Zhang H L, Bai X L, Xue J F, Chen Z D, Tang H M, Chen F. Emissions of CH₄ and N₂O under different tillage systems from double-cropped paddy fields in Southern China. *PLoS One*, 2013, 8(6): e65277.
- [28] Li C F, Zhou D N, Kou Z K, Zhang Z S, Wang J P, Cai M L, Cao C G. Effects of tillage and nitrogen fertilizers on CH₄ and CO₂ emissions and soil organic carbon in paddy fields of central China. *PLoS One*, 2012, 7(5): e34642.
- [29] Cheng K, Pan G X, Smith P, Luo T, Li L Q, Zheng J W, Zhang X H, Han X J, Yan M. Carbon footprint of China's crop production—an estimation using agro-statistics data over 1993—2007. *Agriculture Ecosystems and Environment*, 2011, 142(3—4), 231-237.
- [30] Yan M, Cheng K, Luo T, Yan Y, Pan G X, Rees R M. Carbon footprint of grain crop production in China—based on farm survey data. *Journal of Cleaner Production*, 2015, 104: 130—138.
- [31] Gan Y T, Liang C, Chai Q, Lemke R L, Campbell C A, Zentner R P. Improving farming practices reduces the carbon footprint of spring wheat production. *Nature Communications*, 2014, 18: 1-13.
- [32] Zhang W F, Dou Z X, He P, Ju X T, Powlson D, Chadwick D, Chadwick D, Norse D, Lu Y L, Zhang Y, Wu L, Chen X P, Cassman K G, Zhang F S. New technologies reduce greenhouse gas emissions from nitrogenous fertilizer in China. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2013, 110(21): 8375-8380.
- [33] Lu F, Wang X K, Han B, Ouyang Z Y, Duan X N, Zheng H, Miao H. Soil carbon sequestration by nitrogen fertilizer application, straw return and no-tillage in China's cropland. *Global Change Biology*, 2009, 15(2): 281-305.
- [34] Gan Y T, Liang C, Campbell C A, Zentner R P, Lemke R L, Wang H, Yang C. Carbon footprint of spring wheat in response to fallow frequency and soil carbon changes over 25 years on the semiarid Canadian prairie. *European Journal of Agronomy*, 2012, 43, 175-184.