

不同麦秸还田方式对周年稻麦轮作农田碳足迹的影响¹

胡乃娟^{1,2,3}, 史航^{1,3}, 朱利群^{1,3}

(1. 南京农业大学人文与社会发展学院, 江苏南京 210095; 2. 南京农业大学 公共管理博士后流动站, 江苏南京 210095; 3. 南京农业大学区域农业研究院, 江苏南京 210095)

【摘要】 为明确麦秸不同还田方式对稻麦轮作农田碳足迹的影响, 该研究通过开展两年的大田试验, 设计了3种麦秸还田方式(麦秸旋耕还田、麦秸翻耕还田和麦秸沟埋还田), 并以麦秸不还田为对照, 采用静态箱-气相色谱法连续两年对农田温室气体排放进行监测, 并对不同麦秸还田方式的生产资料投入和生产过程碳排放及温室气体排放进行全面分析。结果表明: (1) 与不还田相比, 麦秸还田显著增加了稻季日均 CH_4 排放, 稻麦周年全球增温潜势95%来自稻田 CH_4 排放; (2) 在水稻季, 农田 CH_4 排放占碳足迹总量比例最大, 3种麦秸还田方式中, 麦秸沟埋还田处理下碳足迹最小, 且能比麦秸旋耕还田处理减少4.9%; (3) 在小麦季, 化肥投入造成的碳足迹所占比例最大, 为64.5%~77.4%, 其次是土壤 N_2O 的排放; (4) 从整个稻麦周年轮作系统来看, 与麦秸旋耕还田和麦秸翻耕还田处理相比, 麦秸沟埋还田处理能分别减少4.6%和3.6%的周年碳足迹及8.7%和4.9%的周年单位产量的碳足迹。因此, 对于稻麦轮作地区, 采用麦秸沟埋还田能在一定程度上降低农业生产过程中的碳足迹。

【关键词】 稻麦轮作 麦秸还田方式 CH_4 N_2O 碳足迹

【中图分类号】 S341 **【文献标识码】** A **【文章编号】** 1004-8227 (2018) 12-2775-09

DOI: 10.11870/cjlyzyyhj201812014

自工业革命以来, 人类活动引起大气中的 CO_2 浓度不断升高, 由此引发的全球气候变暖和极端天气频发逐渐受到人们的高度关注。碳足迹是从生命周期角度出发, 对某种活动引起的直接或间接的 CO_2 排放量的度量^[1~3]。农业碳足迹能够系统定量地计算农业生产活动中由人为因素引起的直接和间接碳排放的总和, 能有效评价农业生产活动对温室效应的影响^[4,5], 并指导农业减排。近年来, 国外学者从不同角度对农业碳足迹进行了研究, 包括不同农场类型^[6]、农业管理模式^[7~9]、以及经营规模大小^[10]。我国农业碳足迹起步稍晚, Cheng 等^[11] 率先采用国家统计局数据分析了我国农作物生产碳足迹及其构成; 段华平等^[12] 对我国农田生态系统的碳排放强度、碳吸收量和碳足迹进行了估算。目前国内农业碳足迹研究取得了一些成果, 但同时也存在问题和误区, 刘巽浩等^[13,14] 在前人研究基础上对农田生态系统碳足迹计算中存在的误区及改进方法进行了研究, 制定出了更加适合中国的指标体系, 并对其赋值。

¹收稿日期: 2018-04-08; 修回日期: 2018-04-17

基金项目: 国家科技支撑计划项目(2012BAD14B12); 教育部人文社会科学研究青年基金(15YJCZH246)

作者简介: 胡乃娟(1991~), 女, 博士, 主要从事耕作制度与农业生态研究. E-mail: hunaijuan@njau.edu.cn

通讯作者 E-mail: zhulq@njau.edu.cn

我国是农业大国，作物秸秆量巨大，秸秆还田作为解决秸秆问题最主要方式，不仅能改善土壤的理化性状，提高土壤固碳潜力，而且能增加作物产量，因而受到大面积的推广，但同时秸秆还田也能促进了土壤的碳、氮循环，导致了农田温室气体的排放大大增加^[15~17]，只是不同的秸秆还田方式下土壤的固碳潜力和温室气体排放有差异。闫翠萍等^[18]研究不同秸秆还田方式下小麦-玉米农田温室气体交换认为，对于华北麦玉轮作体系，秸秆粉碎旋耕还田不仅温室效应相对较低而且能保证较高的经济产量。当前常规的秸秆还田方式有秸秆旋耕还田和秸秆翻耕还田，秸秆沟埋还田是一种新的秸秆还田方式^[19]，即作物收获后，在小区内挖两条平行沟，然后将本季作物秸秆全部埋入沟内覆土掩盖，免耕，动土面积占整个小区面积的 1/10。通过研究发现，与常规秸秆

还田方式相比，秸秆沟埋还田不仅能解决常规秸秆还田中秸秆量大、不利于作物出苗等缺点^[20]，而且具有更大固碳潜力^[21]，同时与常规旋耕和翻耕还田相比能分别减少 10.6%和 3.8%周年 CH₄排放^[22]。因此，本文在先前温室气体排放研究的基础上，系统地估算了秸秆沟埋还田和常规秸秆旋耕还田及翻耕还田方式对稻麦轮作农田碳足迹的影响，既包括农业生产中整地、播种和收获过程中机械油耗产生的直接温室气体排放，又包括生产和运输化肥和农药过程产生的间接排放及灌溉中电能引起的温室气体排放，同时也包括由秸秆还田引起的农田直接温室气体排放。通过对比分析，定量地评价稻麦轮作系统不同麦秸还田方式的农田碳足迹，旨在为稻麦轮作区探寻农业温室气体减排途径提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

本试验于 2013 年 6 月至 2015 年 6 月在江苏省南京市江宁区淳化现代农业示范园区（32° 56' N, 118° 59' E）开展。该地区属于典型的亚热带季风气候，日照充足，雨量充沛，年均温度为 15. IX.，年均降雨量为 1072.9mm，夏季降雨主要集中在 7、8 月份。稻麦两熟制是该区域主要的种植制度，土壤类型为湖积物发育的水稻土。2013 年稻季试验开始前 0~20cm 耕作层土壤理化性状见表 1。

表 1 试验开始前耕层 0~20 cm 土壤理化性状

Tab. 1 Soil physical and chemical properties in 0-20 cm soil layer before the field experiment

有机质 (g - kg ⁻¹)	全氮 (g - kg ⁻¹)	碱解氮 (mg - kg ⁻¹)	速效磷 (mg - kg ⁻¹)	速效钾 (mg - kg ⁻¹)	pH 值	容重
17.25	0.87	120.96	5.44	58.17	7.47	1.44

1.2 试验设计和田间管理

本试验采用单因素随机设计，在水稻季共设置 4 个处理，每个处理 3 次重复，共 12 个小区，小区面积 30m²（长 6m，宽 5m）。4 个处理分别为：（1）小麦秸秆不还田；（2）麦秸旋耕还田：小麦秸秆施入小区后，用旋耕机将秸秆和上层 10cm 的土壤均匀混合；（3）麦秸翻耕还田：麦秸均匀铺在小区土面后，人工将秸秆与 20cm 深度的土壤混合；（4）麦秸沟埋还田：在小区内挖两条平行的沟，间距为 1m，沟深 20cm，长 5m，宽 30cm，将小麦秸秆均匀铺在沟内然后覆土，覆土深度约 10cm，然后免耕。所有需要的秸秆均来自该稻麦轮作系统内，在作物收获的同时将秸秆粉碎至 5~10cm 的长度，然后秸秆在小区内自然风干后，装袋称重，按照麦秸全量为 5000kg•hm⁻²的还田量在水稻季按照不同的方式进行还田。将水稻收获后的秸秆全部移除小区，小麦季采用常规旋耕耕作整地。

本试验中，两年大田试验所用水稻品种的试验材料均为武育粳 23 号，在秧苗 5 叶期时采用人工移植的栽培方式。移栽日期

分别为 2013 年 7 月 3 日和 2014 年 6 月 29 日，收获时间分别为 2013 年 11 月 5 日和 2014 年 11 月 3 日。小麦品种的试验材料为扬麦 6 号，采用人工撒播的方式进行播种，播种量约为 150kg•h²，播种日期分别为 2013 年 11 月 18 日和 2014 年 11 月 19 日，收获时间分别为 2014 年 6 月 8 日和 2015 年 6 月 5 日。在该稻麦轮作试验周期内水稻季施肥量分别为 300kgN•hm⁻², 120kgK₂O•hm⁻² 和 120kgP₂O₅•h²，小麦季施肥量分别为 270kgN•hm⁻²，67.5kgK₂O•hm⁻² 和 67.5kgP₂O₅•hm⁻²，具体见表 2。

水稻季水分管理与当地常规水分管理一致，即水稻移栽后持续淹水一个月，然后进行一周左右的干湿交替管理，最后采用间隔灌溉直到水稻准备收获。麦季田间水分仅来源于降雨。水稻季和小麦季的除草、喷洒农药等农艺管理与当地常规管理一样，并且不同的麦秸还田处理除了还田方式不同外，其他的农业管理措施尽可能保持一致。

表 2 两个轮作周期内化肥的施用量和施用时间

Tab. 2 Chemical fertilizer rate and timing over two annual cycles from 2013 to 2015

作物	化肥施用量 N:P ₂ O ₅ : K ₂ O, kg - hm ⁻²)	施用时间（年-月-日）	
		2013-2014	2014-2015
水稻	120 : 120 : 120	2013-07-03	2014-06-28
	135 : 0 : 0	2013-07-10	2014-07-11
	45 : 0 : 0	2013-08-17	2014-08-13
小麦	135 : 67.5 : 67.5	2013- 11-18	2014- 11-19
	135 : 0 : 0	2014- 03-14	2015- 03-15

1.3 测定项目与方法

1.3.1 农田温室气体的采集和测定

农田温室气体排放的监测采用静态暗箱一气相色谱法^[23]。水稻生长季每隔 6d 采样一次，烤田期每 3d 采 1 次样，每次采样时间为上午 8:00~10:00，每隔 5min 采样一次，分别在 0, 5, 10, 15, 20min 时收集，每次取样 50ml。小麦季每隔 7d 采集一次，每次采样时间为下午 13:00~16:00，每隔 5min 采样一次，分别在 0, 5, 10, 15, 20min 时采集，每次取样 50ml。

为了计算麦秸沟埋还田处理的温室气体排放，在该处理小区的沟上和沟外分别放置两个气体采集箱，即为 A、B。其中气体箱 A 位于沟上，用于监测麦秸沟埋区域的温室气体排放通量（F_A），气体箱 B 位于两沟之间，用于监测无桔秆区域的温室气体排放通量（F_B）。因为气体箱 A 监测的包含沟上和非沟的平均通量，并且沟占采集箱内总面积的 3/5, 因此沟埋区排放通量 F_c=(F_A-0.4*F_B)/0.6, 沟埋还田处理的平均气体排放通量为 F=0.9*F_c+0.1*F_B。

气体样品于采样一周内用气相色谱仪（Agil-net7890A, 上海）同时分析 CH₄和 N₂O 排放通量。CH₄和 CO₂的检测器为 FID，柱温是 80℃，检测器的温度为 200℃：，氮气作为载气，流速 40ml.min⁻¹；氢气为燃气，流速 35ml•min⁻¹；空气为助燃气，流速为 350ml•min⁻¹。N₂O 的检测器是 ECD，柱温是 65℃，检测器温度是 320℃，载气为氩；甲烷作为载气，流速为 30ml•min⁻¹。气体排放速率由 4 个气样浓度值经线性回归分析得出，如果 4 次浓度线性拟合决定系数 R² 小于 0.9 则舍弃这次取样数据。水稻和小麦生长期 CH₄和 N₂O 的日均排放用季节累积排放量与作物生育期总天数计算^[23]。

温室气体排放通量计算公式为：

$$F=\rho \cdot h \cdot (dC/dt) \cdot 273/(273+T)$$

式中：F 是温室气体排放通量 [以 CH₄ 计时，为 mg/ (m²·h)，以 N₂O 计时为 μg/ (m²·h)] ;p 是被测气体标准状况下的密度，kg/m³；T 是采样过程中密闭箱内的平均温度，℃；h 是采样箱的高度，m；C 是温室气体的体积混合比；t 是采样箱的密闭时间，h；dC/dt 是采样过程中密闭箱内温室气体浓度变化率。

1.3.2 农田全球增温潜势的计算

全球增温潜势（GWP）是用于定量衡量不同温室气体对全球变暖的相对影响，本研究中，农田水稻季、小麦季以及稻-麦周年全球增温潜势来自农田排放 CH₄ 和 N₂O 的综合增温潜势。在 100 年时间尺度上，单位质量 CH₄ 和 N₂O 的 GWP 分别为 CO₂ 的 30 倍和 268 倍^[1]。

1.3.3 水稻和小麦产量收集与的测定

在水稻或小麦的成熟期，按照小区单收，风干脱粒后，在 65℃烘箱中烘干 48h，然后称重，计作物的实际产量。

周年稻麦产量=水稻实际产量+小麦实际产量。

1.3.4 碳足迹的计算方法

本研究中碳足迹的边界为开始种植水稻到小麦收获结束（2013 年 6 月～2015 年 6 月），包括水稻和小麦从整地到收获的整个过程各项农资投入造成的直接或间接的温室气体排放。直接排放包括整地、播种和收获过程中机械柴油消耗、农田灌溉中电能产生的碳排放，以及秸秆还田产生的温室气体排放；间接排放包括生产和运输各项农资投入产生的碳排放。

水稻-小麦轮作生长过程中碳足迹 E（kg·CO₂-Ce·hm⁻²）的计算公式为^[24]：

$$E = \sum_{i=1}^n E_i = \sum_{i=1}^n (m C_e)_i$$

式中：n 表示 1 农业生产过程中消耗了 n 种能源（柴油和电能）、农业生产资料（农药、化肥和除草剂等）或土壤直接碳排放；E_i 表示第 i 种能源或农资的碳排放；m 为消耗第 i 种能源或农资的量；C_e 表示第 i 种能源或农资的碳排放系数。

作物生产单位产量碳足迹 CF（kg·CO₂-Ce·kg⁻¹），即生态系统生产每千克水稻或小麦所产生的碳排放，计算公式为^[25]：

$$CF=E/Y$$

式中：Y 为水稻、小麦或稻麦周年产量。

1.3.5 碳排放系数的选择

为方便计算和比较，需要将碳的主要来源、排放和系数按照一定标准折算成同一单位，即碳当量（Carbon equivalent，简称为“Ce”）表示。目前国内外碳排放系数没有统一赋值，本研究中所涉及的农资或活动排放系数首先采用刘巽浩等^[13]制定出的更加符合中国指标体系中的赋值，其余从中国本土化生命周期数据库（CLCD）获得^[26]，具体见表 3。

1.4 数据处理

采用 MicrosoftExcel2007 进行数据整理，用 SPSS16.0 进行数据统计分析（ $P<0.05$ ），并用 GraphPadPrism6.0 进行图表的绘制。

表 3 不同农业资料的碳排放系数

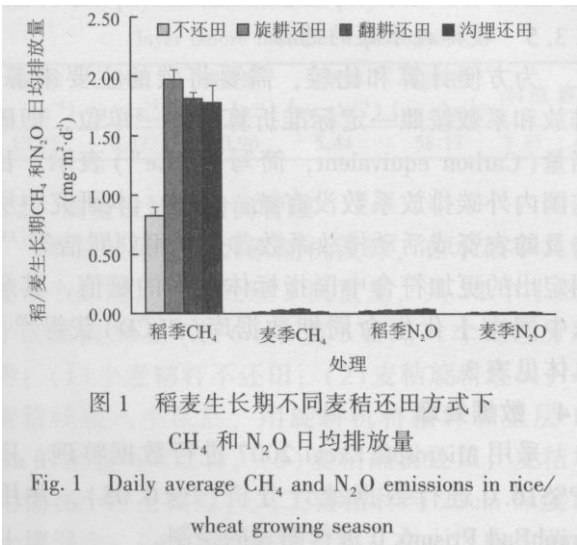
Tab. 3 Coefficient of carbon emission of different material for agricultural production

排放项目	碳排放系数	数据来源
柴油	3.32 kg CO ₂ -eq/kg	文献[13]
氮肥 N	4.96 kg CO ₂ -eq/kg	文献[13]
磷肥 P ₂ O ₅	1.14 kg CO ₂ -eq/kg	文献[13]
钾肥 K ₂ O	0.66 kg CO ₂ -eq/kg	文献[13]
除草剂	10.15 kg CO ₂ -eq/kg	文献[26]
杀虫剂	16.61 kg CO ₂ -eq/kg	文献[26]
灭菌剂	10.57 kg CO ₂ -eq/kg	文献[26]
电能	0.81 kg CO ₂ -eq/kW·h	2012~2014 年区域电网
CH ₄	30	文献[1]
N ₂ O	268	文献[1]

2 结果与分析

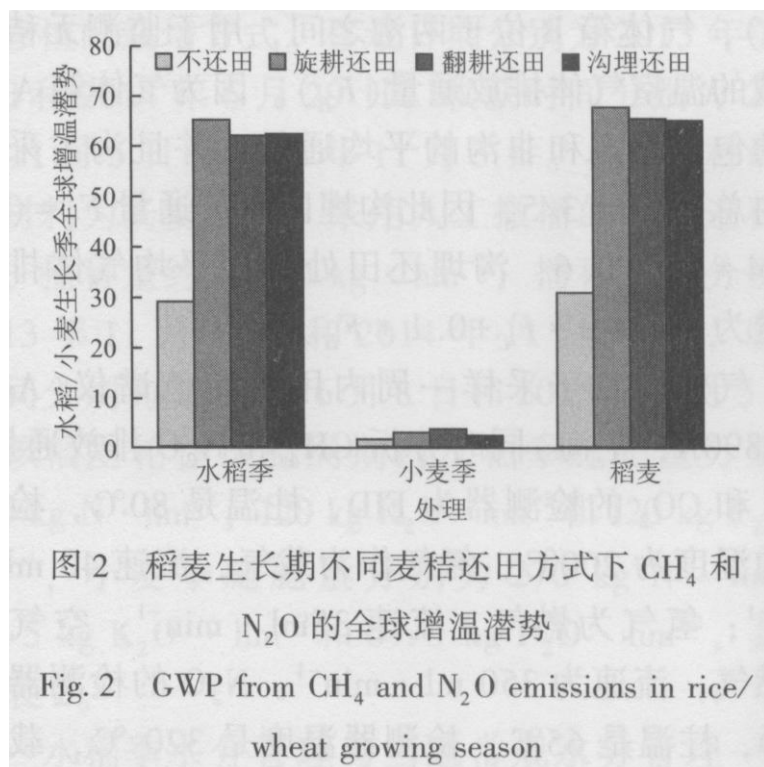
2.1 不同麦秸还田方式对稻麦生长期 CH₄和 N₂O 日均排放量的影响

由图 1 可以看出，在稻季，CH₄日均排放量在麦秸还田处理下均显著高于不还田处理，3 种麦秸还田方式中 CH₄日均排放量在麦秸旋耕处理下最大（1.97mg·m²d⁻¹），麦秸沟埋还田最小（1.78mg·m²d⁻¹）。而在麦季，CH₄日均排放量在不同处理下均较低。从%0 日均排放量来看，稻季高于麦季。在稻季，麦秸还田处理下 N₂O 日均排放量均显著高于不还田处理，3 种麦秸还田处理中，N₂O 日均排放量在麦秸沟埋还田下显著最大，为 0.03mg·m²d⁻¹，而麦秸旋耕还田最小，为 0.02mg·m²d⁻¹。不同处理下麦季 N₂O 日均排放量均明显较低，平均日均排放为 0.01mg·m²d⁻¹。



2.2 不同麦秸还田方式对稻季和麦季全球增温潜势的影响

由图 2 可知,不论在水稻季还是小麦季,麦秸还田处理的全球增温潜势均显著高于不还田。在水稻季,3 种麦秸还田处理中,麦秸旋耕还田高于沟埋还田,高于翻耕还田;在小麦季,3 种麦秸还田处理为麦秸翻耕还田>旋耕还田>沟埋还田;周年全球增温潜势为旋耕还田>翻耕还田>沟埋还田>不还田。从稻-麦轮作周年来看,整个稻麦周年全球增温潜势的 95%来自水稻季全球增温潜势,而小麦季全球增温潜势仅占很小比例。



2.3 水稻季不同麦秸还田方式下碳足迹分析

由表 4 水稻生长过程中碳足迹清单可以看出,在水稻季,麦秸不还田、旋耕还田、翻耕还田和沟埋还田产生的总碳排放分别为 5777、9632、9403、9164 kgCe/hm^2 。各部分碳足迹占总碳足迹比例的排序各处理均表现为:农田 CH_4 排放(平均 66.0%)>化肥生产(平均 20.1%)>农田 N_2O 排放(平均 9.7%)>机械柴油消耗(平均 2.6%)>农药(平均 1.0%)>灌溉(平均 0.7%)。农田 CH_4 排放、化肥生产和农田 N_2O 排放造成的碳排放占总排放的 90%左右,而机械消耗柴油、农药和灌溉消耗电能所产生的碳排放所占比例很小。在四种不同的麦秸还田方式处理下,机械柴油消耗、化肥投入、农药和灌溉消耗电能所造成的碳足迹基本相同,而由土壤直接产生的 CH_4 和 N_2O 排放有较大差异。相较于对照,麦秸还田处理下的碳排放明显较高,而在 3 种麦秸还田方式处理中,麦秸旋耕还田处理下总的碳足迹最大,麦秸沟埋还田处理最低,并且能比麦秸旋耕还田减少 4.9%。

2.4 小麦季不同麦秸还田方式下碳足迹分析

由表 5 小麦生长过程中碳足迹清单可以看出,在小麦生长季,化肥投入造成的碳足迹所占比例最大,占 64.5%~77.4%,而 3 种肥料中氮肥的施用占比例最大,占总碳足迹的 59.1%~71.0%,其次是由秸秆还田引起的农田 N_2O 的排放,约占总碳足迹的 11.3%~20.6%,而播种、收获等消耗柴油引起的碳足迹、农药以及农田 CH_4 排放产生的碳足迹所占比例较小。由于麦季不进行人工灌溉,田间含水量仅来自降雨,因此所消耗的电能为 0。虽然麦季所有的处理操作均相同,但由于在水稻季小麦秸秆进行了不同的

还田方式处理，未腐解的秸秆导致了后季麦季土壤温室气体排放有明显差异，因此导致不同还田方式下土壤直接碳排放有差异。与不还田相比，麦秸还田处理下的碳足迹明显较高；在 3 种麦秸还田方式中，麦秸翻耕还田下的碳足迹最高，与之相比，麦秸沟埋还田能减少 8.1%的碳足迹。

表 4 水稻生长季不同麦秸还田方式下碳足迹构成
Tab. 4 Carbon footprint under different treatments in rice-growing season

农业生产投入		投入量 (kg/ hm ²)				碳足迹(kg CO ₂ -Ce / hm ²)			
		不还田	旋耕还田	翻耕还田	沟埋还田	不还田	旋耕还田	翻耕还田	沟埋还田
机械柴油消耗	旋地	27.8	27.8	—	—	92.4	92.4	—	—
	翻地			29.7	32.3			98.5	107.3
	开埋草沟	4.2	4.3	4.4	4.1	13.8	14.2	14.4	13.7
	整								
化肥	收获	32.2	33.1	33.9	33.0	106.7	110.0	112.4	109.4
	氮肥 (N)	300.0	300.0	300.0	300.0	1 488.0	1 488.0	14 88.0	1 488.0
	磷肥 (P ₂ O ₅)	120.0	120.0	120.0	120.0	136.8	136.8	136.8	136.8
	钾肥 (K ₂ O)	120.0	120.0	120.0	120.0	79.2	79.2	79.2	79.2
农药	除草剂	2.0	2.0	2.0	2.0	20.4	20.4	20.4	20.4
	杀虫剂	3.9	3.9	3.9	3.9	64.1	64.1	64.1	64.1
	灭菌剂	0.1	0.1	0.1	0.1	1.0	1.0	1.0	1.0
灌溉	电能	73.1	73.1	73.1	73.1	59.4	59.4	59.4	59.4
温室气体排放	CH ₄	95.5	231.0	212.2	208.3	2 865.6	6 931.2	6 366.6	6 248.4
	N ₂ O	3.2	2.4	3.6	3.1	849.6	635.2	962.1	836.2
合计		—	—	—	—	5 777	9 632	9 403	9 164

表 5 小麦生长季不同麦秸还田方式下碳足迹构成
Tab. 5 Carbon footprint under different treatments in wheat-growing season

农业生产投入		投入量(kg/hm ²)				碳足迹(kg CO ₂ -Ce / hm ²)			
		不还田	旋耕还田	翻耕还田	沟埋还田	不还田	旋耕还田	翻耕还田	沟埋还田
机械柴油消耗	旋地	17.5	17.5	17.5	17.5	58.1	58.1	58.1	58.1
	播种	4.3	4.3	4.3	4.3	14.2	14.2	14.2	14.2
	收获	23.5	18.8	19.2	19.3	77.9	62.3	63.7	64.2
化肥	氮肥 (N)	270.0	270.0	270.0	270.0	1 339.2	1 339.2	1 339.2	1 339.2
	磷肥 (P ₂ O ₅)	67.5	67.5	67.5	67.5	77.0	77.0	77.0	77.0
	钾肥 (K ₂ O)	67.5	67.5	67.5	67.5	44.6	44.6	44.6	44.6
农药	灭菌剂	3.7	3.7	3.7	3.7	14.6	14.6	14.6	14.6
温室气体排放	CH ₄	1.6	3.6	6.5	1.4	46.5	108.3	193.8	42.0
	N ₂ O	0.8	1.6	1.7	1.6	214.4	436.8	461.0	428.8
合计		—	—	—	—	1 886.4	2 155.1	2 266.1	2 082.6

2.5 不同麦秸还田方式下稻麦周年碳足迹的构成

从图 3 水稻-小麦周年生长季的碳足迹构成分析可知，不同处理下 CH_4 排放是总碳足迹的最主要来源，约占 38.0%~59.7%，其次是化肥施用和 N_2O 排放，分别占 26.8%~41.3%和 9.1%~13.9%，而灌溉消耗电能、农药生产以及机械柴油消耗所产生的碳足迹占总碳足迹的比例均较小。3 种麦秸还田方式中，麦秸旋耕还田产生的碳足迹最大，麦秸沟埋还田处理产生的碳足迹最小，且分别能比旋耕还田和翻耕还田减少了 4.6%和 3.6%。

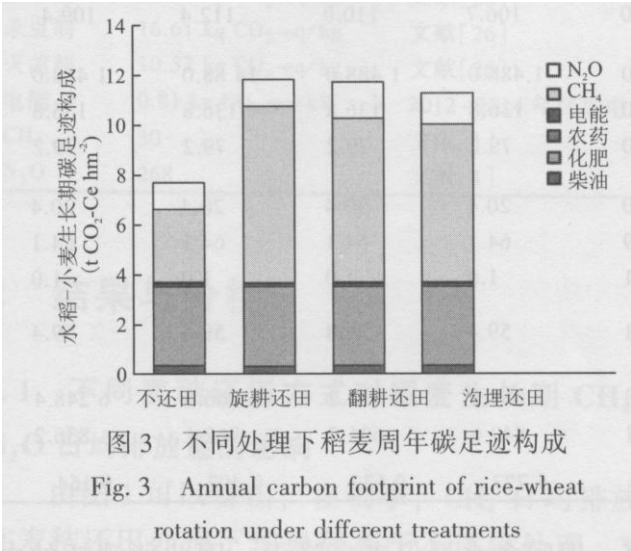


图 3 不同处理下稻麦周年碳足迹构成

Fig. 3 Annual carbon footprint of rice-wheat rotation under different treatments

2.6 不同麦秸还田方式下单位稻麦产量的碳足迹分析

由图 4 可以看出，在整个稻麦轮作周期内，麦秸还田处理下的单位作物产量的碳排放均比不还田明显要高，并且水稻季的单位产量碳足迹明显高于小麦季。在水稻季，不同处理下单位水稻产量的碳足迹从高到低表现为：旋耕还田>翻耕还田>沟埋还田>不还田，在小麦季也有类似的影响规律。对稻-麦轮作系统来说，与旋耕还田和翻耕还田处理相比，沟埋还田处理下稻麦周年单位产量的碳足迹能分别减少 8.7%和 4.9%。

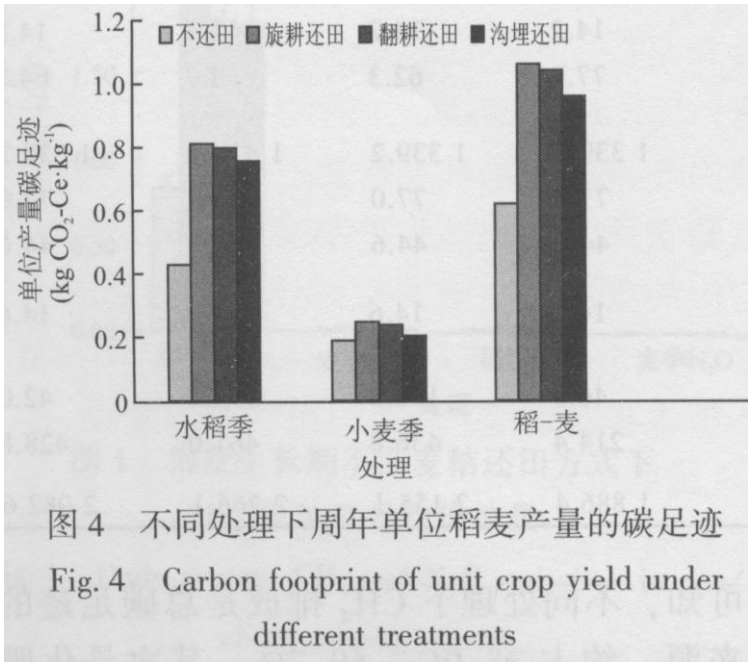


图 4 不同处理下周年单位稻麦产量的碳足迹

Fig. 4 Carbon footprint of unit crop yield under different treatments

3 讨论

本研究中,相较于麦秸不还田,麦秸还田显著增加了稻季日均 CH_4 排放,该结果与前人研究结果一致^[27,28]。3种麦秸还田方式中,沟埋还田处理下日均 CH_4 排放相对较低,主要原因可能与秸秆腐解率有关,麦秸旋耕还田处理下秸秆与土壤在 0~10cm 土层充分混合,腐解速率较快,能为土壤微生物提供充裕的碳源,从而大大促进 CH_4 产生,而麦秸沟埋还田处理下麦秸在 10~20cm 土层的埋草沟中堆积,秸秆腐解速率较小^[29];另一方面, CH_4 产生主要在秸秆丰富的厌氧土层,无秸秆的土壤排放较小,虽然埋草沟内 CH_4 排放较高,但埋草沟面积仅占整个小区面积的 1/10,因此,沟埋还田处理下 CH_4 日均排放相对较低^[22]。周年全球增温潜势中,由稻季占整个稻麦轮作周年增温潜势的 95%可以得出,减少稻季温室气体排放是降低稻麦轮作系统碳排放的重要途径,而减少稻季 CH_4 排放仍是稻季减排的关键,蒋静艳等^[30]也有类似的研究结果。稻田生态:系统是重要的 CH_4 排放源,研究发现合理控制水稻生长季水分能够有效降低 CH_4 排放^[30~32]。

本研究发现,水稻季碳足迹构成中由麦秸还田造成的直接 CH_4 排放所占比例最大,也表明研究减少农田生态系统中稻季 CH_4 排放仍是今后碳减排的重点。成功等^[33]认为添加生物质炭能在一定程度上降低小麦生产过程中的碳足迹。本试验中,麦季化肥投入产生的碳足迹占农田系统总投入的 64.5%~77.4%,主要是由于化肥作为农业生产必不可少的投入品,不仅在生产和运输的过程中会消耗大量的化石燃料,同时由于作物产量的需要,在农业生产上化肥施用相对较多,尤其是氮肥投入,而过量的氮肥施用也会增加农田 N_2O 排放^[34],从而引起化肥投入的碳排放所占比例较大。该结果与张恒恒等^[35]在北方旱区研究免耕对农田生态系统固碳与碳平衡的影响的结果表一致。王钰乔等^[36]和张婷等^[37]也均表明化肥的使用量和利用效率是农田碳排放高的最主要原因之一。

稻麦周年碳足迹组成中,机械消耗柴油、农药等产生的碳足迹比例较小,该研究结果与查良玉等^[38]研究结果类似,而史磊刚等^[39]研究华北地区麦玉模式碳足迹发现华北地区由于缺少,灌溉用水大部分来自深层地下水,灌溉消耗电能造成的碳足迹高于其他地区。而 CH_4 排放和化肥投入分别占总碳足迹的 38.0%~59.7%和 26.8%~41.3%,表明在稻麦轮作区域,探索低碳秸秆还田方式、提高氮肥的利用效率是实现该区节能减排的重要途径。对 3 种不同的麦秸还田方式处理来说,相较于麦秸旋耕还田和麦秸翻耕还田处理,麦秸沟埋还田处理能分别减少了 4.6%和 3.6%的农业碳足迹以及 9.4%和 8.3%的稻麦周年单位产量的碳足迹,表明相对常规秸秆还田方式来说,麦秸沟埋还田是一种低碳的秸秆还田方式。

然而,由于当前研究的角度不同,并且对稻麦轮作区域的研究报道也较少,本试验种子的碳排放、植株吸收量,以及土壤的异氧呼吸产生的碳排放没有计算在内。另外,在不影响作物产量的基础上,探索长期秸秆不同还田方式对土壤养分的增加进而减少化肥的使用量,还有待开展长期定位试验进一步研究。

4 结论

本研究中,与麦秸不还田相比,麦秸还田显著增加了稻麦轮作农田 CH_4 排放,并且稻麦周年全球增温潜势 95%来自稻季 CH_4 排放,降低稻田 CH_4 排放仍是稻田生态系统减排的关键。在水稻季,农田碳足迹主要来自稻田 CH_4 排放,而在小麦季,农田碳足迹主要来自于化肥投入。在稻麦周年碳足迹组成中, CH_4 排放贡献最大,其次是化肥的投入。在三种不同的麦秸还田方式中,与麦秸旋耕还田和麦秸翻耕还田相比,麦秸沟埋还田处理下的农田 CH_4 排放、碳足迹和周年单位作物产量的碳足迹均较低,表明在相同的农资投入情况下,麦秸沟埋还田方式是一种不仅能增加作物产量,并且能减少农田碳排放的秸秆还田方式。

参考文献:

[1] IPCC. Summary for policymakers[M]//Stocker T F, Qin D H, Plattner G K, et al. 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, United Kingdom/New York, USA:

Cambridge University Press, 2013.

[2] LINQUIST B, VAN GROENIGEN K J, ADVIENTO-BORBE M A, et al. An agronomic assessment of greenhouse gas emissions from major cereal crops[J] . Global Change Biology, 2012, 18(1) : 194-209.

[3] PIELKE R J, WIGLEY T, GREEN C. Dangerous assumptions [J]. Nature, 2008, 452(3) : 531-532.

[4] LAL R. Carbon emission from farm operations[J] • Environment International, 2004, 30: 981-990.

[5] HILLIER J, HAWES C, SQUIRE G, et al. The carbon footprints of food crop production [J]. International Journal of Agricultural Sustainability, 2009, 7: 107-118.

[6] DUBEY A, LAI R. Carbon footprint and sustainability of agricultural production systems in Punjab, india and ohio, USA [J]. Journal Crop Improvement, 2009, 23: 332-350.

[7] SCHAFER F, BLANKE M. Fanning and marketing system affects carbon and water footprint: a case study using Hokaido pumpkin [J]. Journal of Cleaner Production, 2012, 28: 113 - 119.

[8] GAN Y, LIANG C, CHAI Q, et al. Improving farming practices reduces the carbon footprint of spring wheat production [J] • Nature Communications, 2014, doi: 10. 1038/ncomms6012.

[9] SEFEEDPARI R, GHAHDERIJANI M, PISHGAR-KOMLEH S H. Assessment the effect of wheat farm sizes on energy consumption and CO₂ emission [J]. Journal of Renewable Sustainable Ener¬gy, 2013, 5: 347-355.

[10] CHENG K, PAN G, SMITH P, et al. Carbon footprint of China * s crop production — an estimation using agro-statistics data over 1993-2007 [J] . Agriculture, Ecosystems and Envi¬ronment, 2011, 142: 231-237.

[11] 段华平, 张悦, 赵建波, 等. 中国农田生态系统的碳足迹 分析[J]. 水土保持学报, 2011, 25(5): 203-208.

DUAN H P, ZHANG Y, ZHAO J B, et al. Carbon footprint a¬ nalysis of farmland ecosystem in China [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2011, 25(5) : 203-208.

[12] 刘巽浩, 徐文修, 李增嘉, 等. 农田生态系统碳足迹法: 误区、改进与应用——兼析中国集约农作碳效率[J]. 中国 农业资源与区划, 2013a, 34(6) : 1-11.

LIU X H, XU W X, LI Z J, et al. The missteps, improvement and application of carbon footprint methodology in farmland ecosystems with the case study of analyzing the carbon efficiency of China’ s intensive farming[J]. Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning, 2013a, 34(6) : 1-11.

[13] •刘巽浩, 徐文修, 李增嘉, 等. 农田生态系统碳足迹法: 误区、改进与应用——兼析中国集约农作碳效率(续)[J]. 中国农业资源与区划, 2013b, 34(6) : 1-7.

LIU X H, XU W X, LI Z J, et al. The missteps, improvement and application of carbon footprint methodology in farmland

ecosystems with the case study of analyzing the carbon efficiency of China' s intensive farming[J]. Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning, 2013b, 34(6) : 1-11.

[14] 刘世平, 聂新涛, 张洪程, 等. 稻麦两熟条件下不同土壤耕作方式与秸秆还田效用分析[J]. 农业工程学报, 2006, 22 (7) : 48-51.

LIU S P, NIE X T, ZHANG H C, et al. Effects of tillage and straw returning on soil fertility and grain yield in a wheat-rice double cropping system [J]. Transactions of CSAE, 2006, 22 (7) : 48-51.

[15] TURMEL M S, SPERATTI A, BAUDRON F, et al. Crop residue management and soil health: a systems analysis [J]. Agric. Syst., 2014, 134, 6-16.

[16] LI C F, YUE L X, KOU Z K, et al. Short-term effects of conservation management practices on soil labile organic carbon fractions under a rape-rice rotation in central China [J]. Soil Tillage. Res. 2012, 119: 31-37.

[17] 闫翠萍, 张玉铭, 胡春胜, 等. 不同耕作措施下小麦-玉米 轮作农田温室气体交换及其综合增温潜势[J]. 中国生态 农业学报, 2016, 24(6) : 704-715.

YAN C P, ZHANG Y M, HU C S, et al. Greenhouse gas exchange and comprehensive global warming potential under different wheat-maize rotation patterns [J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2016, 24(6) : 704-715.

[18] 朱利群, 卞新民. 秸秆全量还田的方法[P]. 中国, ZL201010221843. 6.

[19] 朱琳, 刘春晓, 王小华, 等. 水稻秸秆沟埋还田对麦田土 壤环境的影响 U]. 生态与农村环境学报, 2012, 28(4): 399-403.

ZHU L, LIU C X, WANG X H, et al. Effects of burial rice straw in furrows on soil environment of wheat field[J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2012, 28(4) : 399-403.

[20] WANG X H, YANG H S, LIU J, et al. Effects of ditch-buried straw return on soil organic carbon and rice yields in a rice- wheat rotation system[J]. Catena, 2015 , 127 , 56-63.

[21] HU N J, WANG B J, GU Z H, et al. Effects of different straw returning modes on greenhouse gas emissions and crop yields in a rice-wheat rotation system [J]. Agric. Ecosyst. Environ., 2016(223) : 115-122.

[22] 邹建文. 稻麦轮作生态系统温室气体(CO₂、CH₄和 N₂O) 排放研究[D]. 南京: 南京农业大学博士毕业论文, 2005.

ZOU J W. A study on greenhouse gases (CO₂, CH₄ and N₂O) emissions from rice-winter wheat rotations in Southeast China [D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2005.

[23] LIU Q, LIU B, AMBUS P, et al. Carbon footprint of rice production under biochar amendment: A case study in a Chinese rice cropping system [J]. GCB Bioenergy, 2016, 8 : 148-159.

[24] 王占彪, 王猛, 陈阜. 华北平原作物生产碳足迹分析 [J]. 中国农业科学, 2015, 48(1): 83-92.

WANG Z B, WANG M, CHEN F. Carbon footprint analysis of crop production in north China plain [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2015, 45(1) : 83-92.

[25] 黄晓敏,陈长青,陈铭洲,等. 2004-2013年东北三省主要粮食作物生产碳足迹[J]. *应用生态学报*, 2016, 27(10): 3307-3315.

HUANG X M, CHEN C Q, CHEN M Z, et al. Carbon footprints of major staple grain crops production in three provinces of northeast China during 2004- 2013 [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2016, 27(10) : 3307-3315.

[26] MA J, MA E D, XU H, et al. Wheat straw management affects CH₄ and N₂O emissions from rice fields [J]. *Soil Biol. Biochem.*, 2009(41), 1022-1028.

[27] XIA L L, WANG S W, YAN X Y. Effects of long-term straw incorporation on the net global warming potential and the net economic benefit in a rice-wheat cropping system in China[J]. *Agric. Ecosyst. Environ.*, 2014(197), 118-127

[28] 李新举, 张志国, 李贻学. 土壤深度对还田秸秆腐解速度的影响[J]. *土壤学报*, 2001, 38(1) : 135-138.

LI X J, ZHANG Z G, LI Y X. Effects of soil depth on decay speed of straw [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2001, 38(1): 135-138.

[29] HOU H J, PENG S Z, XU J Z, et al. Seasonal variations of CH₄ and N₂O emissions in response to water management of paddy fields located in Southeast China [J]. *Chemosphere*, 2012(89) : 884-892.

[30] 蒋静艳, 黄耀, 宗良纲. 水分管理与秸秆施用对稻田 CH₄和 N₂O 排放的影响[J]. *中国环境科学*, 2003, 23 (5) : 552-556.

JIANG J Y, HUANG Y, ZONG L G. Influence of water controlling and straw application on CH₄ and N₂O from rice field [J]. *China Environmental Science*, 2003 , 23 (5): 552 - 556.

[31] ZOU J W, HUANG Y, ZHENG X H, et al. A 3-year field measurement of methane and nitrous oxide emission from rice paddies in China: effects of water regime, crop residue, and fertilizer application[J]. *Global Biogeochem. Cy.*, 2005(19): 1-9.

[32] ZOU J W, LIU S W, QIN Y M, et al. Sewage irrigation increased methane and nitrous oxide emission from rice paddies in southeast China[J]. *Agric. Ecosyst. Environ.*, 2009(129): 516-522.

[33] 成功, 张阿凤, 王旭东, 等. 运用“碳足迹”的方法评估小麦秸秆及其生物质炭添加对农田生态系统净碳汇的影响 [J]. *农业环境科学学报*, 2016, 35(3) : 604-612.

CHENG G, ZHANG A F, WANG X D, et al. Assessment of wheat straw and its biochar effects on carbon sink in agricultural ecosystems using “ carbon footprint ” method [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2016, 35(3) : 604-612.

[34] 李燕青, 唐继伟, 车升国, 等. 长期施用有机肥与化肥氮对华北夏玉米 N₂O 和 CO₂排放的影响[J]. *中国农业科学*, 2015, 48(21) : 4381-4389.

LI Y Q, TANG J W, CHE S G, et al. Effect of organic and inorganic fertilizer on the emission of CO₂ and N₂O from the summer maize field in the north China plain [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2015, 48(21) : 4381-4389.

[35] 张恒恒, 严昌荣, 张燕卿, 等. 北方旱区免耕对农田生态系统固碳与碳平衡的影响[J]. 农业工程学报, 2015, 31(4): 240-247.

ZHANG H H, YAN C R, ZHANG Y Q, et al. Effect of no tillage on carbon sequestration and carbon balance in farming ecosystem in dryland area of northern China[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2015, 31(4): 240-247.

[36] 王钰乔, 赵鑫, 李可嘉, 等. 华北平原小麦生产的碳足迹变化动态的研究[J]. 中国人口·资源与环境, 2015, 25 (11) : 258-261.

WANG Y Q, ZHAO X, LI K J, et al. Dynamics of carbon footprint for wheat production in the north China plain [J] • China Population, Resources and Environment, 2015, 25 (11) : 258-261.

[37] 张婷, 蔡海生, 张学玲. 基于碳足迹的江西省农田生态系统碳源/汇时空差异 [J]. 长江流域资源与环境, 2014, 23(6) : 767-773.

ZHANG T, CAI H S, ZHANG X L. Spatial-temporal dynamics of farmland ecosystem carbon sources/ sink based on carbon footprint in jiangxi province [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2014, 23(6) : 767-773.

[38] 查良玉, 吴洁, 仇忠启, 等. 秸秆机械集中沟埋还田对农田净碳排放的影响[J]. 水土保持学报, 2013, 27(3): 229-241.

CHA L Y, WU J, QIU Z Q, et al. Effects of straw concentrated ditch buried returning field using machine on net carbon emission from farmland[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2013, 27(3) : 229-241.

[39] 史磊刚, 陈阜, 孔凡磊, 等. 华北平原冬小麦-夏玉米种植模式碳足迹研究[J]. 中国人口·资源与环境, 2011, 21(9) : 93-98.

SHI L G, CHEN F, KONG F L, et al. The carbon footprint of winter wheat-summer maize cropping pattern on north China plain [J] • China Population, Resources and Environment, 2011, 21(9): 93-98.