

秸秆还田下“麦-稻”轮作生产生命周期能耗及温室气体排放

杨娟, 王昌全*, 白根川, 游来勇, 易云亮, 黄帆, 李喜喜

(四川农业大学资源环境学院, 成都 611130)

摘要:应用生命周期评价方法, 将“小麦-水稻”轮作生产体系生命周期划分为原料开采、农资生产和农田种植三个阶段, 对秸秆不还田、全量还田、半量还田3种还田量下, 生命周期各阶段的能源消耗与温室气体排放进行了清单分析, 并进行了温室气体增温潜势评价。结果表明: 以氮肥生产为主的农资生产阶段与原料开采阶段是能源消耗的主要阶段, 占作物生产全生命周期能耗的70%左右; 温室气体排放则以农田种植阶段为主。相较秸秆不还田处理, 秸秆全量还田和半量还田增加了作物产量, 降低了单位产品(分别为1 t小麦和1 t水稻)生产的 CO_2 、 N_2O 排放量, 分别减排 CO_2 27.05%、31.23%, 减排 N_2O 17.74%、14.51%, 而 CH_4 排放分别增加39.56%、12.38%; 但在20 a、100 a时间尺度上, 农田综合增温潜势GWP均显著降低。秸秆还田配合氮肥减施能有效降低农田生产系统生命周期能耗及温室气体增温潜势。

关键词: 秸秆; 温室气体; 生命周期评价

中图分类号: X712 文献标志码: A 文章编号: 1672-2043(2015)01-0196-09 doi:10.11654/jaes.2015.01.028

Life Cycle Energy Consumption and Greenhouse Gas Emissions of Wheat-Rice Rotation System with Straw Returning

YANG Juan, WANG Chang-quan*, BAI Gen-chuan, YOU Lai-yong, YI Yun-liang, HUANG Fan, LI Xi-xi

(College of Resources and Environment, Sichuan Agricultural University, Chengdu 611130, China)

Abstract: In this study, we used life cycle inventory (LCI) to analyze the energy consumption and greenhouse gas emissions of wheat-rice rotation system with straw returning at each phase of the life cycle. Global warming potential (GWP) of this system was also evaluated. The life cycle of the wheat-rice rotation system was divided into three phases—raw material mining, agricultural supply production and crop growing. Three straw returning rates were designed: chemical fertilizer only (N1), chemical fertilizer plus whole rice straw returning (N1+S), and chemical fertilizer plus half rice straw returning (N1+0.5S). We found that agricultural supply production (nitrogen fertilizer production) and raw material mining accounted for nearly 70% of energy consumption of the whole life cycle, while cropland was the main source of GHG emissions. In N1+S and N1+0.5S treatments, crop yields increased by 14.31% and 15.46%, while CO_2 emission per tonne of yields decreased by 27.05% and 31.23%, and N_2O emission by 17.74% and 14.51%, but CH_4 emissions increased by 39.56% and 12.38%, respectively, compared with no straw returning. However, straw returning significantly decreased GWP on 20- and 100-year time scales. Our findings indicate that applications of straw and nitrogen fertilizer could help to reduce energy consumption and GWP in wheat-rice systems.

Keywords: straw; greenhouse gases; life cycle assessment

现阶段, 我国粮食作物种植正在实现从传统产业模式向集约化、高效化现代产业模式的转变。在此过

程中, 种植废弃物产出量大幅增加, 并越来越呈现集中化的态势。据估算, 全国每年产生农作物秸秆达7.0亿t, 加上蔬菜废弃物、林业废弃物、畜禽粪便及肉类加工厂废弃物等, 中国已成为世界上农业废弃物产出量最大的国家^[1]。种植业废弃物是农业生产的潜在养分资源库, 合理应用可一定程度改善农田土壤理化性质, 提高土地生产能力^[2], 但因缺少资源化利用的政策

收稿日期: 2014-06-25

基金项目: 国家“十二五”科技支撑计划(2012BAD14B18-02)

作者简介: 杨娟(1980—), 女, 四川泸州人, 博士研究生, 副教授, 从事农业废弃物循环利用研究。E-mail: 465948121@qq.com

* 通信作者: 王昌全 E-mail: w.changquan@163.com

引导、资金投入,故进行处理时常常采取在田间直接堆积焚烧的方式^[3],往往又成为生态环境的主要污染源之一。目前对于种植废弃物的循环再利用方式主要是作为生物质能材料,用作沼气、发电、压缩燃料等^[4],但受生产运输成本高、投入产出效益不显著等影响,技术推广受限。因此,将其作为农田有机物料就近消纳,将农田生态系统作为种养废弃物消纳及资源化利用的场所,仍然是当前种植废弃物的主要处理方式之一。

农田生态系统是一种典型的半自然、半人工复合生态系统,其同时具有两种与人类活动密切相关的功能:产品生产及环境负载。将农田生态系统作为种植废弃物消纳载体,虽符合废弃物“在系统内循环、不带出系统外”的循环生态经济理念,但由于农田生态系统对种植废弃物消纳能力有限,并且农田种植阶段消耗的资源本身会带动上游的原料开采、农资生产等阶段,以及下游的运输、废弃物处理等阶段的资源能源消耗与污染物排放。因此,从满足作物生产所需的养分载荷与资源能源消耗引起的环境负荷相结合的角度,探究农田生态系统对种植废弃物的消纳能力十分必要。生命周期评价(Life Cycle Assessment, LCA)作为产业生态学的新兴评估工具,是一种“生态全产业链”式的整体性评价方法,能有效评估产品完整生命周期上、中、下游的资源、能源耗费及其环境响应。相关研究评价了水稻、小麦、玉米等典型农作物生产过程的资源能源消耗和环境排放^[5-8],也有部分学者对作物生产过程中化肥施用、测土配方施肥等肥料施用所引起的资源能源消耗与环境影响进行了研究^[9-10]。鉴于农业废弃物农田消纳下作物生产的生命周期过程研究还较为缺乏,本文研究农田生态系统不同秸秆还田量下,“麦-稻”生产过程中的资源、能源消耗与污染物排放,以探讨产量保证条件下的种植废弃物消纳环境影响,为保障现代粮食产业发展与维护环境安全提供支持。

1 材料与方法

1.1 田间试验设计与温室气体采集

田间试验区域位于成都平原都江堰市天马镇(N30°57′0.99″;E103°44′3.69″),该区属中亚热带湿润季风气候区,年均温 15.2℃,年降水量 1200 mm,年均无霜期 280 d。区域地形平坦,土壤为灰色冲积物发育的淹育型水稻土,多年来以“稻-麦”轮作为主。“小麦-水稻”轮作田间试验于 2012 年 10 月至 2013 年 9

月进行。本研究在常规施用化肥的基础上,设置秸秆不还田(N1)、秸秆全量还田(N1+S)、秸秆半量还田(N1+0.5S)共 3 个处理。根据前作产量,按照谷草比 1:1 计算,全量稻草为 7500 kg·hm⁻²、全量麦秸为 5250 kg·hm⁻²,播种后出苗前在各小区均匀撒施。化肥施用量根据当地传统习惯施肥量确定,小麦季施肥量为 180 kg·hm⁻² N、75 kg·hm⁻² P₂O₅、75 kg·hm⁻² K₂O,水稻季为 180 kg·hm⁻² N、90 kg·hm⁻² P₂O₅、90 kg·hm⁻² K₂O。常规氮肥为尿素(46.4%),磷肥为过磷酸钙(P₂O₅, 12%),钾肥为氧化钾(K₂O, 60%)。

在轮作周期中,采用静态箱-气相色谱法对土壤 CO₂、CH₄、N₂O 排放通量进行测量。将静态密闭箱(50 cm×50 cm×100 cm)放置在作物播种前埋设在各试验区土壤中的不锈钢底座(50 cm×50 cm×15 cm)上,底座埋入土壤 15 cm 左右以防止底座外的水稻根系进入采样箱。静态箱示意图见图 1。温室气体采样从播种施肥后第 2 d 开始,施肥后连续一周每天采集气样,之后在各生育期内每 7 d 采集一次。选择晴天上午采样,时间为每日 9:00 至 11:00。4 个气体样品分别在 0、10、20、30 min 收集,用 50 mL 的气密注射器收集到采气袋,24 h 内送至中国科学院盐亭紫色土农业生态试验站进行分析测定。

1.2 目标定义与范围界定

以一个“麦-稻”轮作季生产 1 t 小麦、1 t 水稻为评价功能单元,分析在作物生产过程中,将前茬作物秸秆进行不同量还田后,其资源与能源消耗及其环境

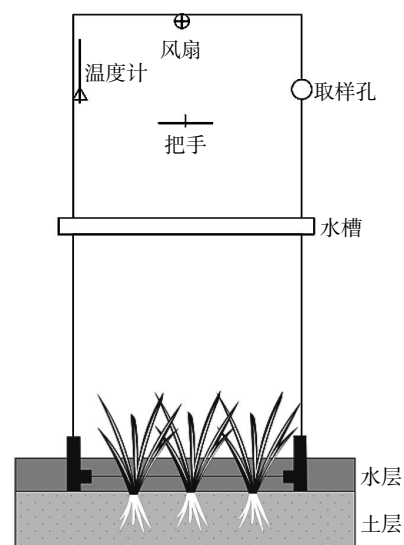


图 1 温室气体采样静态箱示意图

Figure 1 Schematic diagram of sampling chambers for greenhouse gases

影响,探讨种植业废弃物的农田适宜消纳量。研究的起始边界从与麦稻生命周期有关的初级能源原料开采开始,终止边界为作物种植管理输出农作物产品及污染物。研究考察原料开采、农资生产和作物种植三个阶段的物质投入所引起的能源消耗与环境排放。原料开采阶段主要考虑化石能源(煤、石油、天然气)等初级能源开采,以及柴油、电力等次级能源生产的能量耗费及温室气体排放;农资生产阶段主要考虑氮肥(尿素)在生产过程中的能耗与温室气体排放;农田种植阶段考虑整地、播种、施肥、除草除虫、作物收获等引起的能耗与温室气体排放。研究系统边界示意图2。

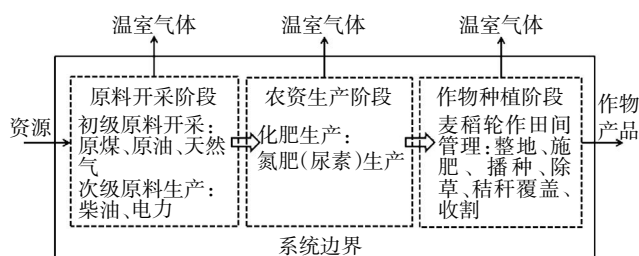


图2 研究系统边界示意图

Figure 2 LCA system boundary of wheat-rice system

1.3 生命周期阶段分析参数确定

1.3.1 各阶段参数确定

三个阶段的能量耗费根据各阶段物质投入量与相应折能系数确定(公式1)。对于温室气体排放量的确定,原料开采、农资生产两个阶段根据各阶段物质投入量与温室气体排放因子进行计算(公式2);农田种植阶段的温室气体排放量则根据田间试验气样采集和分析测定的结果数据进行计算。

$$E_r = \sum_{i=1}^n Q_i \times S_i \quad (1)$$

式中: E_r 为 r 阶段单位作物产量能耗, $\text{MJ} \cdot \text{t}^{-1}$, $r=1,2,3$; Q_i 为各项物质投入量; S_i 为各项物质折能系数。

$$F_r = \sum_{i=1}^n Q_i \times (A_i + B_i + C_i) \quad (2)$$

式中: F_r 为 r 阶段单位作物产量的温室气体排放量($\text{kg} \cdot \text{t}^{-1}$), $r=1,2$; Q_i 为各项物质投入量; A_i 、 B_i 、 C_i 分别为各项物质的 CO_2 、 N_2O 、 CH_4 排放因子。

1.3.1.1 原料开采阶段

该阶段主要考虑农资生产阶段、农田种植阶段所需原料在开采过程中的能耗及其温室气体排放。根据各阶段原料需求量及单位原料开采的能耗与温室气体排放因子,可计算出原料开采阶段的能耗与温室气体排放量。农资生产阶段氮肥(尿素)生产所消耗原料主要为煤(由于计算参数缺乏,煤当作原煤计算)、电力,农田种植阶段各项田间管理活动所消耗原料主要为柴油。煤、柴油、电力属于次级能源,需由初级能源原煤、原油和天然气生产得到;而初级能源开采也需消耗一定量的原煤、原油和天然气能源。初级原料开采、次级能源生产的单位资源消耗量、折能系数及温室气体排放因子采用袁宝荣^[11]、狄向华^[12]等的研究结果(表1)。将农资生产阶段和农田种植阶段的次级能源需求量进行汇总,计算出初级能源需求量(即原料开采量),如表2所示。

1.3.1.2 农资生产阶段

农资生产阶段主要计算尿素(纯N)生产过程中的能耗及温室气体排放。作物单位产量的尿素(纯N)消耗量见表3。参考文献[14]的煤基尿素耗煤系数及耗电系数,按照1 t尿素(纯N)生产耗煤3.44 t(含原料煤与燃料煤)、耗电1873 $\text{kW} \cdot \text{h}$,可计算出生产1 t尿素(纯N)的耗能情况。该过程释放的气体主要为 CO_2 、 SO_2 等,均按照 CO_2 当量计算;气体排放因子根

表1 单位原料开采(生产)资源消耗与温室气体排放

Table 1 Energy consumption and greenhouse gas emissions for mining and producing one unit of raw materials

原料类型 Raw material		单位原料开采(生产)能源消耗量 Energy consumption per unit material mining(production)			折能系数 Energy coefficient/ MJ·kg ⁻¹ 、MJ·(kW·h) ⁻¹ 、 MJ·m ⁻³	温室气体排放因子 Greenhouse gas emission factors	
		原煤	原油	天然气		CO ₂ /kg	CH ₄ /kg
		Raw coal/kg	Crude oil/kg	Natural gas/m ³			
初级能源 Primary energy	原煤 Raw coal/kg	1.00	8.59×10 ⁻⁴	5.13×10 ⁻⁸	20.91	0.062 0	9.32×10 ⁻³
	原油 Crude oil/kg	1.27×10 ⁻³	1.30	2.11×10 ⁻⁶	41.82	0.080 0	7.86×10 ⁻⁶
	天然气 Natural gas/m ³	1.18×10 ⁻³	3.27×10 ⁻²	1.32	38.93	0.074 8	7.32×10 ⁻⁶
次级能源	柴油 Diesel fuel/kg	4.73×10 ⁻²	1.31	7.87×10 ⁻⁵	42.55	0.220 0	2.15×10 ⁻⁴
Secondary energy	电力 Electricity/kW·h	0.58	1.44×10 ⁻²	9.69×10 ⁻⁴	3.60	1.070 0	2.60×10 ⁻³

表 2 各处理单位产量原料需求量

Table 2 Demands for raw materials for per tonne of crop yields in different treatments

处理 Treatment	次级能源消耗量 Secondary energy consumption			初级能源需求量 Primary energy demand		
	农资生产阶段 Agricultural supply		农田种植阶段 Crop growing			
	煤 Coal/t·t ⁻¹	电力 Electricity/kW·h·t ⁻¹	柴油 Diesel fuel/t·t ⁻¹	原煤 Raw coal/kg·t ⁻¹	原油 Crude oil/kg·t ⁻¹	天然气 Natural gas/m ³ ·t ⁻¹
N1	0.19	103.02	0.060	59.94	0.079	0.000 079
N1+S	0.16	89.90	0.053	52.30	0.069	0.000 069
N1+0.5S	0.16	89.90	0.052	52.30	0.069	0.000 069

表 3 作物单位产量的尿素(纯 N)消耗量

Table 3 Consumption of urea(pure nitrogen)
per tonne of crop yield

处理 Treatment	尿素(纯 N)消耗量 Consumption of urea(pure nitrogen)/t·t ⁻¹	
	麦季 Wheat	稻季 Rice
N1	0.033	0.022
N1+S	0.031	0.017
N1+0.5S	0.030	0.018

据文献[13]的研究结果计算。生产 1 t 尿素耗能及其温室气体排放因子如表 4 所示。

1.3.1.3 农田种植阶段

农田种植阶段是“麦-稻”生命周期的重要阶段,该部分主要计算小麦、水稻种植农田种植过程中,秸秆、农药、机械、劳动力投入等产生的能耗,以及主要由氮肥与不同量秸秆配合施用导致的温室气体排放。

该阶段物质投入产出情况如表 5 所示,其中 N1 处理的秸秆还田量为 0(假设该处理的秸秆无其他使用途径,全部用于露天焚烧);机械投入部分包含了切茬、翻耕、播种、收割等环节的柴油消耗;劳动力投入部分包含了整地、播种、施肥、除草、秸秆覆盖、收割(机械人工)等劳动力消耗。

农田种植阶段温室气体排放数据来源于田间试验气样采集与室内分析测定。温室气体(CO₂、CH₄、N₂O)排放通量及年度累积排放量分别根据公式(3)、(4)计算:

$$F=273/(273+T) \times dC/dt \times \rho \times h \quad (3)$$

表 4 1 t 尿素(纯 N)生产耗能及温室气体排放

Table 4 Energy consumption and greenhouse gas emissions for
producing 1 tonne of urea(pure nitrogen)

资源类型 Resource	尿素生产消耗能量 Energy Consumption of urea production/MJ·t ⁻¹	尿素生产排放 CO ₂ 当量 Equivalent CO ₂ of urea production/kg·t ⁻¹
煤 Coal	71 923.52	4 360.23
电力 Electricity	6 743.88	

$$Y=\sum_{i=1}^n F_i \times 24 (n=1,2,3,\cdots,365) \quad (4)$$

式中: F 为温室气体排放通量, $\text{mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$; ρ 为气体标准状态下的密度; h 为采样箱高度; dC/dt 为采样箱内被测气体的浓度变化率; T 为采样过程中静态箱内的平均温度, $^{\circ}\text{C}$; Y 为年排放总量, $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$; F_i 为排放通量, $\text{mg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1}$; i 为作物生长天数。

对于秸秆不还田处理 N1 和秸秆半量还田处理 N1+0.5S,假定将未还田的秸秆全部露天焚烧,根据秸秆燃烧气体排放系数^[15-16],计算其温室气体排放量。

1.3.2 生命周期阶段汇总

将各阶段能耗及温室气体排放量进行汇总,即得到“麦-稻”生产生命周期能源消耗及环境排放情况。见公式(5)、(6):

$$E_{\text{总}}=E_1+E_2+E_3 \quad (5)$$

式中: $E_{\text{总}}$ 为单位作物产量生命周期总能耗, $\text{MJ} \cdot \text{t}^{-1}$; E_1 、 E_2 、 E_3 分别为单位作物产量原料开采阶段、农资生产阶段、农田种植阶段能耗, $\text{MJ} \cdot \text{t}^{-1}$ 。

$$F_{\text{总}}=F_1+F_2+F_3 \quad (6)$$

式中: $F_{\text{总}}$ 为单位作物产量生命周期温室气体排放总量, $\text{kg} \cdot \text{t}^{-1}$; F_1 、 F_2 、 F_3 分别为单位作物产量原料开采阶段、农资生产阶段、农田种植阶段温室气体排放量, $\text{kg} \cdot \text{t}^{-1}$ 。

1.4 温室气体全球增温潜势

全球增温潜势(Global Warming Potential, GWP)被定义为瞬态释放 1 kg 某种温室气体所产生的时间积分的辐射强迫与对应的 1 kg 参照气体(CO₂)的辐射强迫的比值。将 CO₂ 作为参考气体,CH₄、N₂O 排放量通过 GWP 值转换成 CO₂ 的等效量,可以评估不同温室气体对气候变暖的潜在效应。在 20 a 时间尺度上,单位质量 CH₄ 和 N₂O 的增温潜势分别为 CO₂ 的 72 倍和 289 倍;100 a 尺度上,分别为 CO₂ 的 25 倍和 298 倍^[7]。CO₂ 以 1 $\text{kg} \cdot \text{t}^{-1}$ 的 GWP 为 1,则可求得各处理排放的综合 GWP 值。GHG 排放因子 EF 由 3 种温

表5 农田种植阶段物质投入产出表
Table 5 Material inputs and outputs during plant growing

项目 Item	处理 Treatment	物质投入 Material inputs		折能系数 Energy coefficient/ MJ·kg ⁻¹ 、MJ·(kW·h) ⁻¹ 、MJ·m ⁻³
		麦季 Wheat	稻季 Rice	
化学氮肥 Chemical nitrogen fertilizer/kg·hm ⁻²	N1	180.00	180.00	64.11
	N1+S			
	N1+0.5S			
秸秆 Straw/kg·hm ⁻²	N1	0.00	0.00	14.05(稻草)16.38(麦秸)
	N1+S	5 250.00	7 500.00	
	N1+0.5S	2 625.00	3 750.00	
农药 Pesticides/kg·hm ⁻²	N1	1.98	1.98	100.50
	N1+S			
	N1+0.5S			
柴油 Diesel fuel(machinery)(机械)/kg·hm ⁻²	N1	186.95	208.59	42.55
	N1+S	210.64	230.36	
	N1+0.5S	183.75	211.25	
劳动力 Labor/人·h ⁻¹ ·hm ⁻²	N1	150.00	345.00	21.12
	N1+S	210.00	405.00	
	N1+0.5S	180.00	375.00	
产量 Yield/kg·hm ⁻²	N1	5 803.00	8 184.00	—
	N1+S	5 917.00	10 405.00	
	N1+0.5S	6 459.00	10 086.00	

室气体排放量 E 计算得出, 单位为 CO₂ 当量, 如式(7)所示; 原料开采、农资生产和作物种植三个生命周期阶段的 GHG 排放因子之和为总增温潜势, 如式(8)所示。

$$EF = E_{\text{CO}_2} + n_1 \times E_{\text{CH}_4} + n_2 \times E_{\text{N}_2\text{O}} \quad (7)$$

$$EFF = EF_1 + EF_2 + EF_3 \quad (8)$$

式中: EF 为综合 GWP 值; n_1 为 CH₄ 对应于 CO₂ 的当量倍数; n_2 为 N₂O 对应于 CO₂ 的当量倍数; EFF 为全生命周期总 GWP 值; EF_1 为原料开采阶段的综合 GWP 值; EF_2 为农资生产阶段的综合 GWP 值; EF_3 为农田种植阶段的综合 GWP 值。

2 结果分析

2.1 清单分析

2.1.1 原料开采阶段清单

生产 1 t 小麦和 1 t 水稻所需原料开采耗能以秸秆不还田处理(N1)最高, 为 6 832.72 MJ·t⁻¹, 比还田处理分别高 14%左右, 而秸秆全量还田处理 N1+S 与半量还田处理 N1+0.5S 无明显差异, 如表 6 所示。各处理农资生产阶段所需原料耗能均比农田种植阶段高 8%左右, 小麦季比水稻季高 42.19%~70.06%。原料系统的温室气体排放主要是初级能源开采和次级能

源生产过程中燃料燃烧释放的 CO₂、CH₄ 气体, 秸秆还田处理比不还田处理减排 CO₂ 约 14%、减排 CH₄ 约 13%。

2.1.2 农资生产阶段清单

秸秆不还田处理 N1 的尿素生产耗能比秸秆全量还田 N1+S、秸秆半量还田处理 N1+0.5S 分别高 13.78%、14.02%, CO₂ 当量排放也呈现相同趋势, 见表 7。

2.1.3 农田种植阶段清单

农田种植阶段能耗主要包括在生产 1 t 小麦、1 t 水稻的过程中, 农业机械耗柴油、劳动力投入、农药投入所引起的能量耗费, 如表 8 所示。秸秆全量还田处理、半量还田处理较秸秆不还田处理能耗分别降低 5.15%、9.03%。

农田种植过程中, 单位作物产量温室气体 CO₂、N₂O、CH₄ 的累积排放量见表 9。相比秸秆不还田处理, 秸秆还田使得每生产单位重量作物释放的农田 CO₂ 降低了 12.90%~26.33%。N₂O 排放主要发生在小麦季, CH₄ 排放主要在水稻季。秸秆全量还田处理与半量还田处理 N₂O 排放总量分别降低 21.57% 和 16.98%, 说明秸秆覆盖配合氮肥施用可有效地降低农田 N₂O 的排放通量, 这一结果与邹建文^[8]、潘志勇等^[9]的结论一致。与秸秆不还田处理相比, 秸秆全量

表 6 原料开采能耗及温室气体排放

Table 6 Energy consumption and greenhouse gas emissions during mining and transportation of raw materials

处理 Treatment	生命周期阶段 Life cycle stage	生产 1 t 作物所需原料开采耗能 Energy consumption of raw material mining scaled for per tonne of crop yield/MJ·t ⁻¹		生产 1 t 作物所需原料开采温室气体排放 Greenhouse gas emissions of raw material mining scaled for per tonne of crop yield/kg·t ⁻¹			
				CO ₂		CH ₄	
		麦季 Wheat	稻季 Rice	麦季 Wheat	稻季 Rice	麦季 Wheat	稻季 Rice
N1	农资阶段 Agricultural supplies	2 130.36	1 421.10	74.93	49.99	0.730 0	0.490 0
	种植阶段 crop growing	1 881.19	1 400.07	7.534	5.61	0.007 4	0.005 0
	合计 Sum	4 011.55	2 821.17	82.46	55.60	0.740 0	0.495 0
N1+S	农资阶段 Agricultural supplies	2 003.75	1 117.51	70.48	39.31	0.690 0	0.390 0
	种植阶段 crop growing	1 769.35	1 101.22	7.09	4.41	0.006 9	0.004 1
	合计 Sum	3 773.10	2 218.72	77.57	43.72	0.700 0	0.394 0
N1+0.5S	农资阶段 Agricultural supplies	1 965.00	1 149.80	69.12	40.44	0.680 0	0.400 0
	种植阶段 crop growing	1 735.26	1 136.05	6.95	4.55	0.006 8	0.004 0
	合计 Sum	3 700.26	2 285.85	76.07	44.99	0.690 0	0.400 0

表 7 农资生产阶段能耗及温室气体排放

Table 7 Energy consumption and greenhouse gas emissions during urea(pure nitrogen) production

处理 Treatment	尿素(纯 N)生产耗能 Energy consumption of urea production/MJ·t ⁻¹			尿素(纯 N)生产过程当量 CO ₂ 排放 Equivalent CO ₂ of urea production/kg·t ⁻¹		
	麦季 Wheat	稻季 Rice	合计 Sum	麦季 Wheat	稻季 Rice	合计 Sum
N1	2 594.45	1 730.68	4 325.13	143.79	95.92	239.71
N1+S	2 440.26	1 360.95	3 801.21	135.25	75.43	210.68
N1+0.5S	2 393.06	1 400.28	3 793.34	132.63	77.61	210.24

表 8 农田种植阶段能耗(MJ·t⁻¹)Table 8 Energy consumption during crop growing(MJ·t⁻¹)

处理 Treatment	机械(耗柴油)Machinery(Diesel fuel)		农药 Pesticides		劳动力 Labors		合计 Sum
	麦季 Wheat	稻季 Rice	麦季 Wheat	稻季 Rice	麦季 Wheat	稻季 Rice	
N1	1 457.17	1 084.49	36.46	24.31	580.43	890.32	4 073.18
N1+S	1 370.54	853.00	34.29	19.12	764.29	822.07	3 863.31
N1+0.5S	1 344.13	879.98	33.63	19.73	642.49	785.25	3 705.21

表 9 农田种植阶段温室气体排放(kg·t⁻¹)Table 9 Greenhouse gas emissions during crop growing(kg·t⁻¹)

处理 Treatment	CO ₂			N ₂ O			CH ₄		
	麦季 Wheat	稻季 Rice	合计 Sum	麦季 Wheat	稻季 Rice	合计 Sum	麦季 Wheat	稻季 Rice	合计 Sum
N1	4 149.06	4 477.76	9 577.89	0.491	0.132	0.62	0.176	18.91	19.09
N1+S	3 619.28	3 915.18	8 341.76	0.472	0.042	0.51	0.835	37.82	38.66
N1+0.5S	3 142.67	3 912.82	7 055.49	0.469	0.065	0.53	0.094	37.10	22.35

还田处理和半量还田处理稻季 CH₄ 排放总量分别增加 89.33%、56.41%。这是由于在稻田淹水条件下,秸秆给土壤微生物活动提供了丰富的碳源,为产甲烷菌活动创造了适宜的环境条件,导致 CH₄ 的大量产生和排放^[20]。

对于秸秆不还田处理 N1、秸秆半量还田处理 N1+0.5S,秸秆燃烧产生温室气体排放见表 10,其中

麦季燃烧的是稻秆,稻季燃烧的是麦秆。对于秸秆不还田和半量还田处理,每生产 1 t 小麦和 1 t 水稻,轮作季秸秆燃烧排放 CO₂ 分别为 1 564.84、1 394.37 kg·t⁻¹,排放 CH₄ 分别为 1.96、1.71 kg·t⁻¹。

2.1.4 生命周期清单汇总

将各处理“小麦-水稻”轮作季全生命周期的能耗、温室气体排放清单进行汇总,如表 11 所示。可以

表 10 秸秆燃烧温室气体排放(kg·t⁻¹)
Table 10 Greenhouse gas emissions from straw burning(kg·t⁻¹)

处理 Treatment	CO ₂			CH ₄		
	麦季 Wheat	稻季 Rice	合计 Sum	麦季 Wheat	稻季 Rice	合计 Sum
N1	1 001.93	562.91	1 564.84	0.824	1.134	1.96
N1+S	—	—	—	—	—	—
N1+0.5S	925.28	469.09	1 394.37	0.761	0.945	1.71

看出,能源消耗主要发生在原料开采和农资(氮肥)生产阶段,分别高达 11 157.85、9 793.03、9 779.45 MJ·t⁻¹,占生命周期总能耗的 71.71%~73.26%,主要是由于氮肥生产对能源的依赖性很强,属于能源密集型产业,生产过程中消耗大量煤炭、汽油、柴油和天然气等一次能源,因此在生命周期中能耗贡献突出。秸秆还田处理 N1+S、N1+0.5S 比不还田处理 N1 能耗降低 11.53%、12.95%,说明将秸秆还田后,能有效降低作物的生命周期能耗。温室气体排放主要集中在农田种植阶段,其中 N1+S、N1+0.5S 比 N1 分别减排 CO₂ 27.05%、31.23%,减排 N₂O 17.74%、14.51%,但 CH₄ 排放分别增加 39.56%、12.38%。

2.2 温室气体增温潜势

将各处理排放的温室气体量换算为 CO₂ 量,各处理在两种时间尺度下的温室气体全球增温潜势(GWP)如表 12。结果表明,在 20 年、100 年两个时间尺度上,各处理 GWP 量均为 N1>N1+S>N1+0.5S。在两个时间尺度上,秸秆全量还田和半量还田处理的农田温室气体全球增温潜势均较不还田处理 N1 显著降低,其中 20 年尺度上分别降低 12.60%、23.98%,100 年尺度上分别降低 21.37%、28.26%。

表 12 各处理农田温室气体增温潜势(t·t⁻¹)

Table 12 Global warming potential of each treatment(t·t⁻¹)

处理 Treatment	温室气体增温潜势 Greenhouse gas warming potential	
	20 年	100 年
N1	6.58a	5.92a
N1+S	5.75b	4.65b
N1+0.5S	5.00b	4.25b

注:同列不同小写字母表示处理间差异显著, $P<0.05$ 。

3 讨论

本研究运用生命周期评价方法对秸秆还田下的“麦-稻”轮作农田生态系统生命周期能耗及温室气体排放进行了分析。相关研究表明^[21],秸秆还田能改善土壤物理性状,增加土壤有机质及养分含量,增加微生物活动强度,且与化肥配施能实现较好的增产效果。本研究中秸秆还田处理比不还田处理增产 14%~15%,产量的增加使得麦、稻产品生产的投入产出效率增高,相应降低了单位产品(1 t 小麦和 1 t 水稻)的能耗及温室气体排放量。

在“麦-稻”轮作季 1 t 小麦和 1 t 水稻生产的生命周期过程中,各处理能耗均主要发生在原料开采阶

表 11 “麦-稻”轮作季全生命周期清单汇总(kg·t⁻¹)

Table 11 Life cycle inventory of energy consumption and greenhouse gas emissions in a functional unit crop production system(kg·t⁻¹)

处理 Treatment	生命周期阶段 Life cycle stage	能耗 Energy consumption/MJ·t ⁻¹	温室气体排放 Greenhouse gas emissions/kg·t ⁻¹		
			CO ₂	N ₂ O	CH ₄
N1	原料阶段 Raw material mining	6 832.72	138.06	—	1.23
	农资阶段 Agricultural supply production	4 325.13	239.71	—	—
	种植阶段 Crop growing	4 073.18	10 569.42	0.62	27.08
	合计 Sum	15 231.03	10 947.19	0.62	28.31
N1+S	原料阶段 Raw material mining	5 991.82	121.29	—	1.09
	农资阶段 Agricultural supply production	3 801.21	210.68	—	—
	种植阶段 Crop growing	3 863.31	7 653.61	0.51	45.75
	合计 Sum	13 656.34	7 985.58	0.51	46.84
N1+0.5S	原料阶段 Raw material mining	5 986.11	121.06	—	1.09
	农资阶段 Agricultural supply production	3 793.34	210.24	—	—
	种植阶段 Crop growing	3 705.21	7 196.23	0.53	31.22
	合计 Sum	13 484.66	7 527.53	0.53	32.31

段和农资(氮肥)生产阶段,占全生命周期能耗的70%左右,而原料开采阶段的原料开采量也以农资生产阶段需要的原料为主,说明工业氮肥生产是生命周期能源消耗的主要环节。研究表明^[13],采用氮肥工业新技术能降低氮肥生产过程的能耗10.11%~21.34%,降低当量CO₂排放量37.25%~52.94%。氮肥工业先进技术的应用和推广是降低氮肥制造能耗及温室气体排放的有效途径。

温室气体排放的主要环节则在于农田种植阶段。研究表明^[22],秸秆还田配合氮肥施用能增加农田土壤CO₂和CH₄的排放通量,但在本研究中,由于秸秆还田的增产效应,使得单位作物产量的温室气体排放量及农田增温潜势显著降低。有研究提出“最佳施氮量近似于作物地面部分吸氮量”的氮平衡概念^[23],在作物产量不降低的前提下,施氮量可减少30%~60%,由此可相应减少氮肥生产过程中施用造成的温室气体排放。因此,在农田种植阶段采用秸秆还田配合氮肥减施,应能实现更低能耗及最少环境污染。

在农业废弃物农田消纳过程对环境形成的诸多影响中,本研究主要考虑温室气体排放影响,而在生命周期评价方法中,除温室效应外,还包括环境酸化、富营养化、人类和水体毒性等多项环境影响潜力,综合评价更能全面揭示其环境效应。相关研究结果显示^[7,24],在水稻生长系统的生命周期中,环境影响潜力最大的是富营养化效应,而冬小麦生长生命周期环境影响最大的是环境酸化^[25]。因此,秸秆还田条件下“麦-稻”生产完整的生命周期环境影响评价有待开展。

另外,采用生命周期方法评价农业生态系统过程的能耗及环境影响,既要考虑原料开采、农资生产等技术相对稳定、过程容易控制的工业过程,又要考虑受自然环境和人为因素影响较大的农业过程。因此,生命周期方法的系统边界及研究对象的确定非常重要,应更多地依据研究目标进行设置。

4 结论

秸秆还田对“麦-稻”轮作生产系统增产具有一定促进作用,在秸秆全量、半量还田条件下,轮作周期作物产量比不还田处理分别增加14.31%、15.46%。在系统全生命周期中,能耗主要发生在原料开采和农资(氮肥)生产阶段,占全生命周期的71.71%~73.26%,而温室气体排放则主要发生在农田种植阶段。秸秆还田还可降低单位作物产量的农田温室气体排放及其

20年、100年尺度上的全球增温潜势,一定程度减轻单位作物生产的环境排放压力。从作物生产全生命周期的角度看,秸秆还田作为有效处理种植废弃物的方法有其积极意义。

参考文献:

- [1] 孙永明,李国学,张夫道,等. 中国农业废弃物资源化现状与发展战略[J]. 农业工程学报, 2005, 25(8): 169-173.
SUN Yong-ming, LI Guo-xue, ZHANG Fu-dao, et al. Status quo and developmental strategy of agricultural residues resources in China[J]. *Transactions of the CSAE*, 2005, 25(8): 169-173.
- [2] 蔡太义,黄会娟,黄耀威,等. 不同量秸秆还田覆盖对土壤活性有机碳及碳库管理指数的影响[J]. 自然资源学报, 2012, 27(6): 964-974.
CAI Tai-yi, HUANG Hui-juan, HUANG Yao-wei, et al. Effects of different rates of straw mulching and returning to field on soil labile organic carbon and carbon pool management index[J]. *Journal of Natural Resources*, 2012, 27(6): 964-974.
- [3] 苏继峰,朱彬,康汉青,等. 长江三角洲地区秸秆露天焚烧大气污染物排放清单及其在空气质量模式中的应用[J]. 环境科学, 2012, 33(5): 1418-1424.
SU Ji-feng, ZHU Bin, KANG Han-qing, et al. Applications of pollutants released from crop residues at open burning in Yangtze River delta region in air quality model[J]. *Environmental Science*, 2012, 33(5): 1418-1424.
- [4] 田宜水,赵立欣,孟海波,等. 中国农村生物质能利用技术和经济评价[J]. 农业工程学报, 2011, 27(增刊1): 1-5.
TIAN Yi-shui, ZHAO Li-xin, MENG Hai-bo, et al. Technical-economic assessment on rural bio-energy utilization technologies in China[J]. *Transactions of the CSAE*, 2011, 27(Suppl1): 1-5.
- [5] Meisterling K, Samaras C, Schweizer V. Decisions to reduce greenhouse gases from agriculture and product transport: LCA case study of organic and conventional wheat[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2009, 17(2): 222-230.
- [6] 梁龙,陈源泉,高旺盛,等. 华北平原冬小麦-夏玉米种植系统生命周期环境影响评价[J]. 农业环境科学学报, 2009, 28(8): 1773-1776.
LIANG Long, CHEN Yuan-quan, GAO Wang-sheng, et al. Life cycle environmental impact assessment in winter wheat-summer maize system in North China Plain[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2009, 28(8): 1773-1776.
- [7] 梁龙,陈源泉,高旺盛. 两种水稻生产方式的生命周期环境影响评价[J]. 农业环境科学学报, 2009, 28(9): 1992-1996.
LIANG Long, CHEN Yuan-quan, GAO Wang-sheng. Assessment of the environmental impacts of two rice production patterns using life cycle assessment[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2009, 28(9): 1992-1996.
- [8] 王明新,吴文良,夏训峰. 华北高产粮区夏玉米生命周期环境影响评价[J]. 环境科学学报, 2010, 30(6): 1339-1344.
WANG Ming-xin, WU Wen-liang, XIA Xun-feng. Life cycle environmental assessment of summer maize in a North China high-yield region

- [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2010, 30(6): 1339–1344.
- [9] 李贞宇, 王旭, 魏静, 等. 我国不同区域玉米施肥的生命周期评价[J]. *环境科学学报*, 2010, 30(9): 1912–1920.
- LI Zheng-yu, WANG Xu, WEI Jing, et al. Life cycle assessment of fertilization in corn production in different regions of China[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2010, 30(9): 1912–1920.
- [10] 周冉, 班红勤, 侯勇, 等. 京郊典型作物生产体系施肥环境影响的寿命周期评价[J]. *农业环境科学学报*, 2012, 31(5): 1042–1051.
- ZHOU Ran, BAN Hong-qin, HOU Yong, et al. Life cycle assessment of environmental impacts by fertilization in major cropping systems of a peri-urban area of Beijing, China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2012, 31(5): 1042–1051.
- [11] 袁宝荣, 聂祚仁, 狄向华, 等. 中国化石能源生产的生命周期清单(II): 周期清单的编制结果[J]. *现代化工*, 2006, 26(4): 59–61.
- YUAN Bao-rong, NIE Zuo-ren, DI Xiang-hua, et al. Life cycle inventories of fossil fuels in China(II): Final life cycle inventories[J]. *Modern Chemical Industry*, 2006, 26(4): 59–61.
- [12] 狄向华, 聂祚仁, 左铁镭. 中国火力发电燃料消耗的生命周期排放清单[J]. *中国环境科学*, 2005, 25(5): 632–635.
- DI Xiang-hua, NIE Zuo-ren, ZUO Tie-yong. Life cycle emission inventories for the fuels consumed by thermal power in China[J]. *China Environmental Science*, 2005, 25(5): 632–635.
- [13] Zhang W F, Dou Z X, He P, et al. Technologies reduce greenhouse gas emissions from nitrogenous fertilizer in China[J]. *PNAS*, 2013, 110(21): 8375–8380.
- [14] 刘洪涛, 陈同斌, 郑国砥, 等. 有机肥与化肥的生产能耗、投入成本和环境效益比较分析: 以污泥堆肥生产有机肥为例[J]. *生态环境学报*, 2010(4): 1000–1003.
- LIU Hong-tao, CHEN Tong-bin, ZHENG Guo-di, et al. Comparative analysis of organic and chemical fertilizer production energy consumption, input cost and environmental benefit: Sewage sludge composting as example[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2010(4): 1000–1003.
- [15] 王书肖, 张楚莹. 中国秸秆露天焚烧大气污染物排放时空分布[J]. 北京: 中国科技论文在线, 2008, 3(5): 329–333.
- WANG Shu-xiao, ZHANG Chu-ying. Spatial and temporal distribution of air pollutant emissions from open burning of crop residues in China[J]. *Beijing: Sciencepaper Online*, 2008, 3(5): 329–333.
- [16] 刘丽华. 农业残留物燃烧的温室气体排放: 以江苏省为例[D]. 南京: 南京农业大学, 2011: 8–9.
- LIU Li-hua. Greenhouse gases emissions from agriculture residues burning: A case study of Jiangsu Province[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2011: 8–9.
- [17] Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Climate change 2007: the physical science basis contribution of working group I to the fourth assessment report of the IPCC[R]. New York: Cambridge University Press, 2007: 5–15.
- [18] 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, 2005: 38–41.
- ZOU Jian-wen. A study on greenhouse gases(CO₂, CH₄ and N₂O) emissions from rice-winter wheat rotations Southeast China[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2005: 38–41.
- [19] 潘志勇, 吴文良, 刘光栋, 等. 不同秸秆还田模式与氮肥施用量对土壤N₂O排放的影响[J]. *土壤肥料*, 2004(5): 6–8.
- PAN Zhi-yong, WU Wen-liang, LIU Guang-dong, et al. Effect of straw return and nitrogen fertilizer application on the N₂O emission of soil[J]. *Soil Fertilizer*, 2004(5): 6–8.
- [20] 张岳芳, 陈留根, 朱普平, 等. 秸秆还田对稻麦两熟高产农田净增温潜势影响的初步研究[J]. *农业环境科学学报*, 2012, 31(8): 1647–1653.
- ZHANG Yue-fang, CHEN Liu-gen, ZHU Pu-ping, et al. Preliminary study on effect of straw incorporation on net global warming potential in high production rice-wheat double cropping systems[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2012, 31(8): 1647–1653.
- [21] 陈春梅, 谢祖彬, 朱建国, 等. FACE处理的小麦秸秆还田对稻田CH₄排放的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2007, 26(4): 1550–1555.
- CHEN Chun-mei, XIE Zu-bin, ZHU Jian-guo, et al. Effects of amendment of wheat straw produced under FACE condition on soft CH₄ emission in paddy field[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2007, 26(4): 1550–1555.
- [22] 贺京, 李涵茂, 方丽, 等. 秸秆还田对中国农田土壤温室气体排放的影响[J]. *中国农学通报*, 2011, 27(20): 246–250.
- HE Jing, LI Han-mao, FANG Li, et al. Influence of straw application on agricultural greenhouse gas emissions in China[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2011, 27(20): 246–250.
- [23] Ju X T. Calculation of theoretical nitrogen rate for simple nitrogen recommendations in intensive cropping systems: A case study on the North China Plain[J]. *Field Crops Research*, 2011, 124(3): 450–458.
- [24] 王明新, 夏训峰, 刘建国, 等. 太湖地区高产水稻生命周期评价[J]. *农业环境科学学报*, 2009, 28(2): 420–424.
- WANG Ming-xin, XIA Xun-feng, LIU Jian-guo, et al. Life cycle assessment of high-yielding rice in Taihu Region[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2009, 28(2): 420–424.
- [25] 王明新, 包永红, 吴文良, 等. 华北平原冬小麦生命周期环境影响评价[J]. *农业环境科学学报*, 2006, 25(5): 1127–1132.
- WANG Ming-xin, BAO Yong-hong, WU Wen-liang, et al. Life cycle environmental impact assessment of winter wheat in North China Plain[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2006, 25(5): 1127–1132.