

## 秸秆热解多联产模式环境影响评价

王红彦<sup>1</sup> 王亚静<sup>2</sup> 毕于运<sup>2</sup> 莫际仙<sup>2</sup> 高春雨<sup>2\*</sup>

(1. 中国农业科学院 农业信息研究所, 北京 100081;

2. 中国农业科学院 农业资源与农业区划研究所, 北京 100081)

**摘 要** 为定量评价秸秆热解多联产工程的环境影响, 借鉴生命周期评价方法, 将秸秆热解多联产系统工程建设单元的物质和能量投入及其环境排放纳入系统边界, 对年秸秆处理能力  $1.0 \times 10^4$  t 的秸秆热解多联产系统的环境影响进行分析评价。结果表明, 不考虑产出品替代减排, 该系统生命周期的环境影响综合指数为 175.53。其中, 工程建设单元、运行单元和产物利用单元的环境影响潜值分别占 18.10%、78.75% 和 3.15%。钢材和 PVC 管等物料的环境排放合计占建设单元环境排放综合潜值的 93.49%, 电力消耗排放占运行单元环境排放综合潜值的 93.86%。从资源替代角度看, 秸秆燃气替代煤炭、秸秆炭和木醋液分别减施化肥和农药情景下, 该项目功能单位的环境影响综合指数为 -496.86。秸秆热解多联产系统通过资源替代可有效减少环境排放, 具有良好的环境减排效应。在未来秸秆热解多联产系统建设过程中, 应选择低碳环保的建筑材料, 降低运行电耗。

**关键词** 秸秆; 热解多联产; 生命周期; 环境影响; 替代减排

中图分类号 X712; S216.2

文章编号 1007-4333(2019)10-0136-13

文献标志码 A

## Environmental impact evaluation of straw pyrolytic poly-generation system

WANG Hongyan<sup>1</sup>, WANG Yajing<sup>2</sup>, BI Yuyun<sup>2</sup>, MO Jixian<sup>2</sup>, GAO Chunyu<sup>2\*</sup>

(1. Institute of Agricultural Information, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China;

2. Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China)

**Abstract** In order to quantitatively evaluate the environmental impact of straw pyrolytic poly-generation project, life cycle assessment (LCA) is referenced to build an integrated LCA framework. The material and energy inputs of construction unit and their environmental emissions are included in the system boundary. The environment performance of straw pyrolytic poly-generation system with annual straw processing capacity of  $1.0 \times 10^4$  tons is calculated in this study. The results show that the total global environmental impact load of processing  $1.0 \times 10^4$  tons of crop straw by straw pyrolytic poly-generation system is 175.53 PE (person equivalent). The environmental impacts of construction unit, operation unit and product utilization unit account for 18.10%, 78.75% and 3.15%, respectively. The environmental impact of steel and PVC pipe accounts for 93.49% of the construction unit. The environmental impact of electricity consumption accounts for 93.86% of the operation unit. From the perspective of resource substitution for coal, pesticide and fertilizer, the system environmental impact load is -496.86 PE. The straw pyrolytic poly-generation project decreases the environment emission and shows good environment impact. It is necessary to reduce electricity consumption and use low-carbon and environmentally-friendly building materials in straw pyrolytic poly-generation system in the future.

**Keywords** straw; pyrolytic poly-generation; life cycle; environment impact; emission reduction caused by resource substitution

收稿日期: 2018-11-27

基金项目: 国家自然科学基金(41771569); 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项(1610132017020; JBYW-AII-2019-20)

第一作者: 王红彦, 助理研究员, 主要从事生物质资源利用与评价研究, E-mail: wanghongyan01@caas.cn

通讯作者: 高春雨, 副研究员, 主要从事农业碳贸易与农业生态研究, E-mail: gaochunyu@caas.cn

中国农作物秸秆资源数量居世界第一,2015 年达 10.4 亿 t,比 2005 年的 8.4 亿 t<sup>[1]</sup>增长 21.4%,秸秆综合利用量和利用率分别达 7.2 亿 t 和 80.1%<sup>[2-3]</sup>。国家发改委、能源局印发《关于开展秸秆气化清洁能源利用工程建设的指导意见》<sup>[4]</sup>明确指出,实施秸秆气化清洁能源利用工程是农村清洁能源供给的重要方式。秸秆热解多联产技术以生物质热裂解技术为核心,可产出高热值秸秆燃气、秸秆炭、木醋液和木焦油等产品。秸秆燃气可为农户供气、供热或发电;秸秆炭可用作炭基肥、缓释肥料载体、活性炭和土壤改良剂,在农业、环境和土壤修复<sup>[5-6]</sup>等多个领域的应用前景广阔,可还田固碳有效减排温室气体<sup>[7]</sup>;裂解液是用途广泛的工业原料<sup>[8-9]</sup>。秸秆热解多联产技术符合秸秆资源化、能源化利用战略需求,发展前景良好。

生命周期评价方法已经广泛用于生物质成型燃料<sup>[10]</sup>、秸秆直燃发电<sup>[11]</sup>和秸秆沼气<sup>[12]</sup>等工程的环境影响评价。霍丽丽等<sup>[13]</sup>建立生命周期 3E 模型,比较了 2 种生物质气炭联产工艺从玉米种植到产品应用边界内的能耗、经济成本和温室气体排放,结果表明,横流移动床和竖流移动床 2 种气炭联产技术在 3E 方面具有一定的效益。部分研究者认为秸秆是作物种植过程的附属物,作物种植的目的在于粮食而不是秸秆,因此不将作物种植过程的物质和能量消耗及环境排放纳入秸秆资源利用系统(LCA)的边界<sup>[12,14-16]</sup>。如姜志翔<sup>[7]</sup>未将农作物生长过程中环境排放考虑在其边界内,而是从原料收集开始核算生物炭的固碳减排潜力。

生物质能源系统工程建设过程中的物料、能耗及其环境排放是否应当纳入生物质能源化利用系统 LCA 边界,目前研究存在两种不同观点。部分学者认为工程基础设施建设单元的物质能量消耗与环境排放不能忽视<sup>[17]</sup>;另一部分学者认为该部分数据获取难度大,对评价结果影响小,不将生物质能源系统的厂房建设、设备等的能耗和环境排放计入生命周期边界<sup>[10,13,18]</sup>。针对秸秆热解多联产工程生命周期内资源消耗和系统环境排放定量评价的研究鲜有报道。本研究将从秸秆原料的收集开始,将工程建设过程的物料投入及其环境排放纳入秸秆热解多联产系统环境影响范围,构建生命周期框架模型,分析年消耗秸秆能力  $1.0 \times 10^4$  t 的秸秆热解多联产系统,核算系统建设单元投入物质和能量的环境排放,综合评估秸秆热解多联产工程项目生命周期不同单元的环境排放,以期构建合理的评价模型以及秸秆热解多联产系统环境排放核算提供参考依据。

## 1 研究对象与研究范围

以典型秸秆热解多联产工程为研究对象。工艺流程主要包括秸秆收集运输、预处理、移动床干馏热解、冷凝净化、燃气贮存和输送以及秸秆炭等产品的储存等环节。秸秆经粉碎烘干等预处理后,进入移动床热解炉热解,秸秆燃气冷却净化后,输送到气柜加压,通过管网输送到农户;木醋液和木焦油在冷却过程中分离,分别进入木醋液池和焦油池沉淀;秸秆炭由热解炉下部排出。具体工艺流程见图 1。

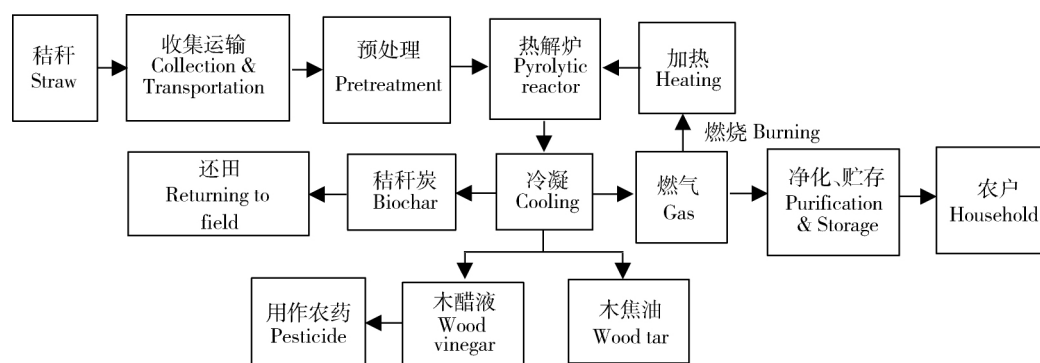


图 1 秸秆热解多联产系统工艺流程

Fig. 1 Process of straw pyrolytic poly-generation system

秸秆热解多联产工程生命周期评价的功能单位设定为系统处理  $1.0 \times 10^4$  t 农作物秸秆。秸秆热解多联产系统生命周期框架包括“建设单元”、“运行单

元”和“产物利用”3 个单元组成。系统生命周期边界从秸秆收集开始到秸秆气炭产物的利用,主要考虑工程建设中建筑材料、秸秆运输和预处理、干馏热

解、燃气利用、秸秆炭和木醋液利用等环节的污染物排放及其环境影响(图2)。

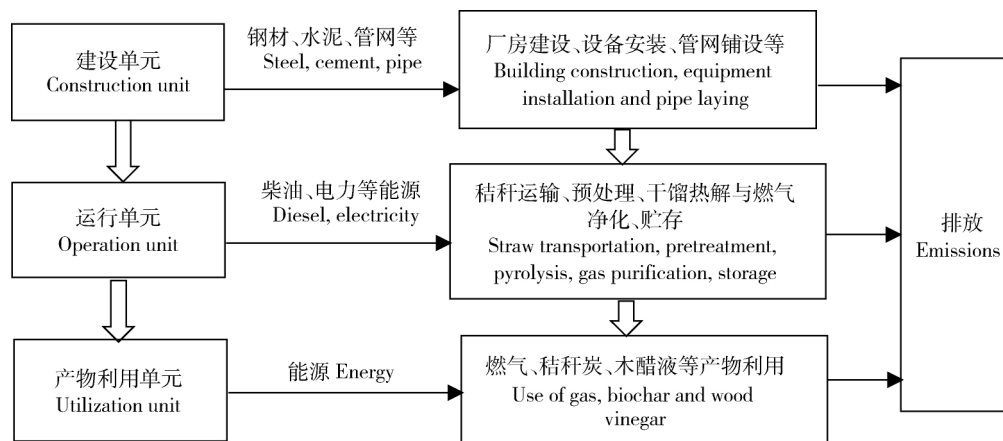


图2 秸秆热解多联产系统生命周期框架

Fig. 2 LCA framework of straw pyrolytic poly-generation system

本研究系统边界设定条件:1)系统边界从秸秆原料收集开始;2)工程土建和设备分别按20和15年计算折旧,不考虑工程拆除的环境影响;3)工程建设过程建筑材料运输的能耗数据难以获取,暂不计算其环境排放;4)基于典型工程产物利用模式,在产物利用单元仅考虑秸秆燃气替代煤炭、秸秆炭减施化肥,木醋液减施农药的替代减排作用;5)木焦油直接出售,暂不考虑其环境排放。

## 2 数据来源

本研究所涉及工艺参数及物料、能量投入产出等技术经济参数来自湖北省鄂州市峒山村秸秆热解多联产工程的调研,工程基础数据参照《生物质热解炭油气联产工程技术规范 第2部分:施工及验收》(Q/WGLY 010—2016)<sup>[19]</sup>,根据本研究设计工程规模测算。能量折算系数、污染物排放系数、环境影响类型标准化基准值、权重因子和草谷比等参数主要来源于权威部门发布的年鉴<sup>[20]</sup>、标准<sup>[21-22]</sup>和公开出版物<sup>[23-25]</sup>等。

## 3 清单分析与参数选择

### 3.1 清单分析

年处理秸秆  $1.0 \times 10^4$  t,热解温度为  $650 \sim 700$  °C,年产出热值为  $13 \text{ MJ/m}^3$  的秸秆燃气  $280 \text{ 万 m}^3$ ,其中约30%用于原料烘干,其余燃气以  $1.3 \text{ 元/m}^3$  的价格为农户供气;年产出秸秆炭  $3\,000 \text{ t}$ ,固定碳含量约60%,热值约  $28 \text{ MJ/kg}$ ;木醋液  $3\,200 \text{ t}$ ,木焦油  $500 \text{ t}$ 。

#### 3.1.1 工程建设单元

工程建设单元建设内容具体为:①干馏热解车间  $1\,000 \text{ m}^2$ ,库房  $1\,000 \text{ m}^2$ ,原料棚  $1\,500 \text{ m}^2$ ,办公用房  $400 \text{ m}^2$ ,用钢约  $178 \text{ t}$ 。②晒场  $1\,000 \text{ m}^2$ ,地面硬化  $1\,500 \text{ m}^2$ ,厂区道路  $500 \text{ m}^2$ ,木醋液池  $400 \text{ m}^3$ ,围墙  $460 \text{ m}$ 。③供气管网  $50 \text{ km}$ ,其中,主管网公称直径(Nominal diameter)  $\text{DN}200$ ,  $16.5 \text{ km}$ ,支管网  $\text{DN}110$ ,  $14.7 \text{ km}$ ,入村管网  $\text{DN}60$ ,  $4.75 \text{ km}$ ,入户管网  $\text{DN}30$ ,  $12 \text{ km}$ 。④生产线设备1套(热解设备、空冷塔、水冷塔、净化塔、喷淋塔、吸附塔、烘干机、提升机和  $2\,000 \text{ m}^3$  气柜)用钢量约  $248 \text{ t}$ 。物料消耗,见表1。

表1 生命周期内秸秆热解多联产工程建设主要物料\*

Table 1 Main construction materials of straw pyrolytic poly-generation system for life time

| 项目<br>Item | 钢材/t<br>Steel | 聚氯乙烯/t<br>PVC | 水泥/t<br>Cement | 砖/万块<br>Brick | 石子/t<br>Pebble | 沙子/t<br>Sand |
|------------|---------------|---------------|----------------|---------------|----------------|--------------|
| 数值 Value   | 426           | 124           | 415            | 19.48         | 853            | 674          |

\*注:数据根据调研参照《生物质热解炭油气联产工程技术规范 第2部分:施工及验收》(Q/WGLY 010—2016)<sup>[19]</sup>测算。

Note: Data is calculated based on investigation and *Technical Code of Biomass Pyrolytic for Carbon Oil and Gas Polygeneration Part 2: Construction and Acceptance* (Q/WGLY 010—2016)<sup>[19]</sup>.

### 3.1.2 工程运行单元

该部分主要考虑秸秆运输用柴油、秸秆粉碎和热解生产线运行用电及其环境排放。

#### 1) 原料收集运输。

小麦、玉米和水稻三大粮食作物和棉花、油菜两大经济作物的秸秆产量占全国的比重接近 90%，因

此以上述五大作物秸秆的可收集利用量为代表来计算秸秆收集半径。

表 2 可知，播种面积、粮食产量、草谷比和秸秆不同收获方式的可收集系数，计算出该 5 大类秸秆的可收集系数为 0.73、单位耕地面积秸秆产量为 471.27 t/hm<sup>2</sup>。

表 2 主要作物收获方式及其秸秆可收集利用量参数

Table 2 The harvest patterns of crop and the parameters for straw collection

| 指标<br>Item                                     | 小麦 Wheat                |                      | 玉米 Corn                 |                      | 水稻 Rice                 |                      | 油菜<br>Rape | 棉花<br>Cotton | 文献<br>Reference |
|--|-------------------------|----------------------|-------------------------|----------------------|-------------------------|----------------------|------------|--------------|-----------------|
|  | 机收                      | 人工                   | 机收                      | 人工                   | 机收                      | 人工                   |            |              |                 |
|  | Harvested<br>by machine | Harvested<br>by hand | Harvested<br>by machine | Harvested<br>by hand | Harvested<br>by machine | Harvested<br>by hand |            |              |                 |
| 面积 / × 10 <sup>7</sup> hm <sup>2</sup><br>Area | 2.27                    | 0.15                 | 2.45                    | 1.23                 | 2.63                    | 0.39                 | 0.15       | 0.33         | [20]            |
| 草谷比<br>Straw-grain ratio                       | 1.30                    |                      | 1.10                    |                      | 早稻 0.68<br>中晚稻 1.00     |                      | 2.70       | 5.00         | [23]            |
| 收集系数<br>Collective coefficient                 | 0.61                    | 0.83                 | 0.86                    | 0.90                 | 0.74                    | 0.88                 | 0.64       | 0.86         | [23]            |

参照公式(1)给出的秸秆收集运输模型<sup>[24]</sup>，计算出本研究秸秆运输半径为 13.68 km。

$$R = \sqrt{\frac{M}{\rho f_1 f_2 f_3 \pi}} \quad (1)$$

式中： $R$ ，秸秆运输半径，km； $\rho$ ，单位耕地面积秸秆产量，471.27 t/hm<sup>2</sup>； $f_1$ ，耕地面积占国土面积比例，14.2%； $f_2$ ，秸秆收集系数，0.73； $f_3$ ，秸秆收集强度，0.35<sup>[25]</sup>； $M$ ，秸秆资源量，10 000 t。

柴油拖拉机运输的油耗为 0.05 L/(t·km)<sup>[13]</sup>。根据秸秆利用量、运输距离和原料运输油耗计算出原料运输油耗为 2.48×10<sup>5</sup> MJ/年。

2) 秸秆热解转化阶段。主要考虑原料粉碎以及设备运行所消耗电力。根据调研获得秸秆热解多联产工程年耗电量为 2.50×10<sup>5</sup> kWh/年。

### 3.1.3 产物利用单元

秸秆热解多联产工程产出物为秸秆燃气、秸秆炭和木醋液。秸秆燃气在利用过程基本不产生污染物，产物利用单元主要考虑秸秆炭和木醋液运输和与秸秆炭施用过程的油耗排放。秸秆炭和木醋液的运输油耗为 0.05 L/(t·km)，运输半径 15 km。秸秆炭施肥过程的油耗为 16.5 L/hm<sup>2</sup><sup>[13]</sup>。

### 3.1.4 产物利用替代减排

本研究在产物利用替代减排中重点考虑：

1) 秸秆燃气替代燃煤减排量。秸秆燃气灶和家用燃煤灶的热效率分别取 60%<sup>[21]</sup>和 45%<sup>[22]</sup>，根据秸秆燃气与煤炭的热值和其热效率，计算出年产秸秆燃气 2.80×10<sup>6</sup> m<sup>3</sup>，可替代 2 360 t 煤炭(包括燃气回烧加热替代煤炭数量)。

2) 秸秆炭的施用减少化肥施用量。研究表明，生物质炭与化肥混合制成生物质炭基肥料，总养分含量比普通复合肥减施 18%，小白菜产量提高 45.03%<sup>[26]</sup>。已有研究表明，生物质炭具有降低有效成分损失提高利用效率、减施化肥从而减少环境排放的作用<sup>[27-29]</sup>。由于秸秆炭对土壤 N<sub>2</sub>O 和 CH<sub>4</sub> 排放受到诸多因素的影响，关于生物炭的温室气体减排效果的研究结论差别较大<sup>[30-32]</sup>。因此，本研究仅从秸秆炭减施化肥的角度分析其环境减排效果。我国单位面积化肥使用量分别为氮肥 191.7 kg/hm<sup>2</sup>、磷肥 51.9 kg/hm<sup>2</sup> 和钾肥 21.8 kg/hm<sup>2</sup>。本研究参照已有研究，按施用 10 t/hm<sup>2</sup> 秸秆炭减施化肥 10% 计算<sup>[7]</sup>，则该工程秸秆炭可用于 300 hm<sup>2</sup> 耕地，减施氮肥 5 751 kg、磷肥 1 557 kg 和钾肥 654 kg。

3)木醋液的施用减少农药施用量。我国耕地使用农药  $10.92 \text{ kg/hm}^2$ <sup>[33]</sup>。木醋液具有广谱抑菌等优点,能有效减施农药<sup>[34]</sup>,将农药与稀释 400~1 000 倍的木醋液混合,可减少农药用量的 40%~50%<sup>[35]</sup>。将木醋液稀释 10~20 倍后,以  $5 \text{ L/m}^2$  的用量喷洒土壤能有效防治病虫害和连作影响<sup>[36]</sup>。用稀释 200 倍的木醋液可防治西瓜(香瓜)枯萎病,  $400 \text{ kg/hm}^2$  喷雾的防治效果优于甲基托布津<sup>[37]</sup>。本研究按木醋液稀释 200 倍、喷雾量  $450 \text{ kg/hm}^2$ ,减施农药量设定为 50%,则年产木醋液 3 200 t 可覆盖耕地  $1\,420 \text{ hm}^2$ ,减少农药使用量 7 765 kg。

### 3.2 排放系数

污染物排放系数指消耗单位质量的能量或原材料所产生的污染物质量,表 3。

### 3.3 环境排放与替代减排清单

根据工程清单数据和污染物排放系数,计算出秸秆热解多联产系统各单元以及产物利用替代减排的环境排放,表 4。

## 4 生命周期影响评价

按照国际环境毒理学和化学学会(SETAC)和国际标准化组织(ISO)关于生命周期影响评价分类、特征化和量化的操作步骤,对秸秆热解多联产系统进行分析。

### 4.1 分类

参照已有生物质能源利用系统 LCA 相关研究,本研究重点分析秸秆热解多联产模式全球变暖、人体毒性、酸化、光化学烟雾和气溶胶 5 类环境影响(图 3)。

### 4.2 特征化与量化

可通过公式(2)计算秸秆热解多联产工程全球变暖和酸化等各类环境影响标准化潜值,环境影响基准值采用中国 1990 年的数据<sup>[42]</sup>,缺失数据采用全球 2000 年环境影响基准。

$$NEP = EP/ER \quad (2)$$

式中:NEP,标准化后的第  $m$  种环境影响潜值;EP,秸秆热解多联产系统中第  $m$  种环境影响;ER,第  $m$  种环境影响潜值基准值<sup>[43]</sup>。

鉴于秸秆热解多联产工程属于生物质能源化利用工程,与生物质燃料乙醇工程类型相近,本研究采用夏训峰等<sup>[44]</sup>的权重因子,表 5。

### 4.3 环境影响潜力分析

由表 6 可见,不考虑秸秆热解多联产系统产品

的替代减排作用时,1 个功能单位,即处理  $1.0 \times 10^4 \text{ t}$  秸秆的环境影响综合指数为 175.53,采用秸秆热解多联产工艺处理 1 t 秸秆的环境影响指数为  $1.76 \times 10^{-2}$ 。分阶段看,建设单元的环境影响占秸秆热解多联产系统的 18.10%,运行单元占 78.75%,产物利用单元占 3.15%。钢材和 PVC 管道等物料的环境排放是建设单元环境影响的主要来源,两者分别占建设单元环境排放综合值的 74.23%和 19.26%。工程运行单元环境影响的主要来源是工程运行电耗和秸秆运输油耗,分别占运行单元环境影响的 93.86%和 6.14%。该结果与已有研究<sup>[45-46]</sup>中,电力消耗量大是造成环境负荷重主要因素的研究结论一致。

从资源替代减排的角度看,秸秆热解多联产系统处理  $1.0 \times 10^4 \text{ t}$  秸秆,所产秸秆燃气、秸秆炭和木醋液分别替代煤炭、减施化肥和减施农药情景下的环境影响潜值为 -496.86,即处理 1 t 秸秆的环境影响综合指数为  $-4.96 \times 10^{-2}$ ,其中减排效果主要来自于秸秆燃气对煤炭的替代作用。

## 5 讨论

### 5.1 系统边界选择

在实际研究中,由于边界的模糊性和不完整性,很难将所有因素考虑周全实现真正意义上的生命周期全过程。本研究按照技术工艺流程,从秸秆原料收集到联产产品应用,确定秸秆热解多联产系统生命周期边界,是基于社会经济快速发展,较为普遍的存在秸秆废弃和焚烧现象。如果把作物种植过程的物质和量能消耗及其环境排放也考虑在系统评价范围内,则应当赋予其相应的分配系数,而不能将作物种植阶段的环境排放全部分配给秸秆。

### 5.2 不确定性分析

随着生命周期评价方法应用的增多,相应的参数数据库不断完善,对评价结果可靠性的要求也随之增高。有些参数数据难以收集(如建筑材料运输能耗)或者影响较小被排除在外,同时,受制于技术发展水平,我国标准化的秸秆热解多联产工程运行案例难以获得,相应的工艺技术标准等尚未完善,导致结果会存在一定偏差。建议国家尽快出台相应的技术标准和规范,指导该类工程规范化建设和运行,为进一步的数据获取和评价研究奠定基础。此外,工程建设计算折旧时,未考虑钢材等回收率,也会导致计算结果偏高。

表 3 污染物排放系数  
Table 3 Pollutant emission factors

| 排放<br>Emissions               | CO <sub>2</sub>      | SO <sub>2</sub>       | CH <sub>4</sub>       | NO <sub>x</sub>       | CO                    | HC                    | VOC                   | PM <sub>10</sub>      | N <sub>2</sub> O      | SO <sub>x</sub>      | H <sub>2</sub> S      | 文献<br>Reference |
|-------------------------------|----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|----------------------|-----------------------|-----------------|
| 钢/(g/kg)                      | 8.20×10 <sup>3</sup> |                       | 1.80×10 <sup>1</sup>  | 1.60×10 <sup>1</sup>  | 1.10×10 <sup>2</sup>  | 1.90                  |                       |                       |                       | 5.10×10 <sup>1</sup> | 8.70×10 <sup>-2</sup> | [38]            |
| Steel                         |                      |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                      |                       |                 |
| 水泥/(g/kg)                     | 5.74×10 <sup>2</sup> | 9.16×10 <sup>-1</sup> | 2.10                  | 6.65×10 <sup>-1</sup> | 6.66                  | 4.52×10 <sup>-3</sup> |                       | 6.65                  | 3.30×10 <sup>-3</sup> | 2.61                 |                       | [38]            |
| Cement                        |                      |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                      |                       |                 |
| 聚氯乙烯/(g/kg)                   | 8.69×10 <sup>3</sup> | 7.42×10 <sup>1</sup>  | 1.32×10 <sup>1</sup>  | 1.71×10 <sup>-3</sup> | 1.03                  |                       |                       |                       |                       |                      | 1.32×10 <sup>-2</sup> | [38]            |
| PVC                           |                      |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                      |                       |                 |
| 砖/(g/块)                       | 5.04×10 <sup>2</sup> | 4.50×10 <sup>-1</sup> | 2.01                  | 7.27×10 <sup>-1</sup> | 2.1                   | 4.34×10 <sup>-3</sup> |                       | 2.84                  | 3.17×10 <sup>-3</sup> | 2.51                 |                       | [38]            |
| Brick                         |                      |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                      |                       |                 |
| 石子/(mg/kg)                    | 1.60×10 <sup>3</sup> | 7.80×10 <sup>-1</sup> | 1.70                  | 1.40×10 <sup>1</sup>  | 8.10×10 <sup>-1</sup> | 9.00×10 <sup>-1</sup> |                       |                       |                       |                      |                       | [39]            |
| Pebble                        |                      |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                      |                       |                 |
| 沙子/(mg/kg)                    | 7.00×10 <sup>1</sup> | 5.00×10 <sup>-2</sup> | 3.80×10 <sup>-4</sup> | 6.00×10 <sup>-1</sup> | 7.00×10 <sup>-2</sup> | 4.00×10 <sup>-2</sup> |                       |                       |                       |                      |                       | [39]            |
| Sand                          |                      |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                      |                       |                 |
| 煤炭/(g/MJ)                     | 4.72                 | 2.34                  | 2.39×10 <sup>-1</sup> | 8.38×10 <sup>-2</sup> | 1.05×10 <sup>-2</sup> |                       |                       | 6.44×10 <sup>-3</sup> | 3.96×10 <sup>-4</sup> |                      |                       | [40]            |
| Coal                          |                      |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                      |                       |                 |
| 电力/(g/kWh)                    | 1.07×10 <sup>3</sup> | 9.93                  | 2.60                  | 6.46                  | 1.55                  |                       | 4.87×10 <sup>-1</sup> | 2.02×10 <sup>1</sup>  |                       |                      |                       | [41]            |
| Electricity                   |                      |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                      |                       |                 |
| 柴油/(g/MJ)                     | 7.40×10 <sup>1</sup> | 1.60×10 <sup>-2</sup> | 4.18×10 <sup>-3</sup> | 2.84×10 <sup>-1</sup> | 4.74×10 <sup>-1</sup> |                       | 8.53×10 <sup>-2</sup> | 4.13×10 <sup>-2</sup> | 1.90×10 <sup>-3</sup> |                      |                       | [39]            |
| Diesel                        |                      |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                      |                       |                 |
| 氮肥/(g/kg)                     | 6.51×10 <sup>3</sup> | 2.11×10 <sup>1</sup>  | 1.61×10 <sup>1</sup>  | 2.79×10 <sup>1</sup>  | 7.59                  |                       | 9.40×10 <sup>-1</sup> |                       |                       |                      |                       | [40]            |
| N                             |                      |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                      |                       |                 |
| 磷肥/(g/kg)                     | 1.12×10 <sup>3</sup> |                       | 1.86                  | 8.54                  | 1.44                  |                       | 6.00×10 <sup>-1</sup> |                       |                       |                      |                       | [40]            |
| P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> |                      |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                      |                       |                 |
| 钾肥/(g/kg)                     | 6.25×10 <sup>2</sup> | 4.60×10 <sup>-1</sup> | 1.56                  | 1.27                  | 4.30×10 <sup>-1</sup> |                       | 3.00×10 <sup>-1</sup> |                       |                       |                      |                       | [40]            |
| K <sub>2</sub> O              |                      |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                      |                       |                 |
| 农药/(g/kg)                     | 7.08×10 <sup>3</sup> | 1.43×10 <sup>1</sup>  | 3.99×10 <sup>1</sup>  | 1.45×10 <sup>1</sup>  | 3.16                  |                       | 3.65                  | 9.90×10 <sup>-1</sup> | 3.00×10 <sup>-1</sup> |                      |                       | [40]            |
| Pesticide                     |                      |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                       |                      |                       |                 |

注:HC—碳氢化合物。VOC—挥发性有机化合物。下同。

Note: HC, hydrocarbon; VOC, volatile organic compounds. The same below.

表4 秸秆热解多联产系统生命周期环境排放与替代减排清单

| Table 4 Inventory of emission and substitution emission reduction of straw pyrolytic poly-generation system |   | g/年                          |                      |                       |                      |                      |                      |                      |                      |                      |   |
|---|---|------------------------------|----------------------|-----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|---|
| 生命周期阶段<br>Stages of LCA   |   | 环境排放 Environmental emissions |                      |                       |                      |                      |                      |                      |                      |                      |   |
|   |   | CO <sub>2</sub>              | SO <sub>2</sub>      | CH <sub>4</sub>       | NO <sub>x</sub>      | CO                   | HC                   | VOC                  | PM <sub>10</sub>     | N <sub>2</sub> O     | H <sub>2</sub> S                          |
| 工程<br>建设<br>单元  | 钢材 Steel  | 1.99×10 <sup>6</sup>         |                      | 4.37×10 <sup>5</sup>  | 3.88×10 <sup>5</sup> | 2.67×10 <sup>6</sup> | 4.61×10 <sup>4</sup> |                      |                      |                      | 1.24×10 <sup>6</sup> 2.11×10 <sup>3</sup> |
|   | 水泥 Cement   | 1.19×10 <sup>7</sup>         | 1.90×10 <sup>4</sup> | 4.36×10 <sup>4</sup>  | 1.38×10 <sup>4</sup> | 1.38×10 <sup>5</sup> | 9.38×10 <sup>1</sup> |                      | 1.38×10 <sup>5</sup> | 6.85×10 <sup>1</sup> | 5.42×10 <sup>4</sup>                      |
|   | 聚氯乙烯 PVC  | 5.39×10 <sup>7</sup>         | 4.60×10 <sup>5</sup> | 8.19×10 <sup>4</sup>  | 1.06×10 <sup>1</sup> | 6.39×10 <sup>3</sup> |                      |                      |                      |                      | 8.18×10 <sup>1</sup>                      |
|   | 砖 Brick   | 4.91×10 <sup>6</sup>         | 4.38×10 <sup>3</sup> | 1.96×10 <sup>4</sup>  | 7.08×10 <sup>3</sup> | 2.05×10 <sup>4</sup> | 4.23×10 <sup>1</sup> |                      | 2.77×10 <sup>4</sup> | 3.09×10 <sup>1</sup> | 2.44×10 <sup>4</sup>                      |
|   | 石子 Pebble   | 6.82×10 <sup>4</sup>         | 3.33×10 <sup>1</sup> | 7.25×10 <sup>1</sup>  | 5.97×10 <sup>2</sup> | 3.45×10 <sup>1</sup> | 3.84×10 <sup>1</sup> |                      |                      |                      |   |
|   | 沙子 Sand   | 2.36×10 <sup>3</sup>         | 1.68                 | 1.28×10 <sup>-2</sup> | 2.02×10 <sup>1</sup> | 2.36                 | 1.35                 |                      |                      |                      |   |
|   | 小计 Subtotal   | 2.70×10 <sup>6</sup>         | 4.83×10 <sup>5</sup> | 5.82×10 <sup>5</sup>  | 4.01×10 <sup>5</sup> | 2.83×10 <sup>6</sup> | 4.06×10 <sup>4</sup> |                      | 1.56×10 <sup>5</sup> | 9.93×10 <sup>1</sup> | 1.32×10 <sup>6</sup> 2.19×10 <sup>3</sup> |
|   | 秸秆运输<br>Straw transportation                        | 1.84×10 <sup>7</sup>         | 3.97×10 <sup>3</sup> | 1.04×10 <sup>3</sup>  | 7.05×10 <sup>4</sup> | 1.18×10 <sup>5</sup> |                      | 2.12×10 <sup>4</sup> | 1.02×10 <sup>4</sup> | 4.71×10 <sup>2</sup> |   |
| 运行<br>单元  | 电力消耗<br>Electricity                                 | 2.68×10 <sup>8</sup>         | 2.48×10 <sup>6</sup> | 6.50×10 <sup>5</sup>  | 1.62×10 <sup>6</sup> | 3.88×10 <sup>5</sup> |                      | 1.22×10 <sup>5</sup> | 5.05×10 <sup>6</sup> |                      |   |
|   | 小计 Subtotal   | 2.86×10 <sup>8</sup>         | 2.49×10 <sup>6</sup> | 6.51×10 <sup>5</sup>  | 1.69×10 <sup>6</sup> | 5.05×10 <sup>5</sup> |                      | 1.43×10 <sup>5</sup> | 5.06×10 <sup>6</sup> | 4.71×10 <sup>2</sup> |   |
|   | 秸秆炭运输与施肥<br>Biochar transportation<br>and spreading | 1.93×10 <sup>7</sup>         | 4.18×10 <sup>3</sup> | 1.09×10 <sup>3</sup>  | 7.42×10 <sup>4</sup> | 1.24×10 <sup>5</sup> |                      | 2.23×10 <sup>4</sup> | 1.08×10 <sup>4</sup> | 4.96×10 <sup>2</sup> |   |
| 产物<br>利用  | 木醋液运输<br>Wood vinegar<br>transportation             | 6.44×10 <sup>6</sup>         | 1.39×10 <sup>3</sup> | 3.64×10 <sup>2</sup>  | 2.47×10 <sup>4</sup> | 4.12×10 <sup>4</sup> |                      | 7.42×10 <sup>3</sup> | 3.59×10 <sup>3</sup> | 1.65×10 <sup>2</sup> |   |
|   | 小计 Subtotal   | 2.58×10 <sup>7</sup>         | 5.57×10 <sup>3</sup> | 1.45×10 <sup>3</sup>  | 9.90×10 <sup>4</sup> | 1.65×10 <sup>5</sup> |                      | 2.97×10 <sup>4</sup> | 1.44×10 <sup>4</sup> | 6.61×10 <sup>2</sup> |   |
|   | 系统 LCA 排放<br>System LCA emission                    | 5.81×10 <sup>8</sup>         | 2.98×10 <sup>6</sup> | 1.23×10 <sup>6</sup>  | 2.19×10 <sup>6</sup> | 3.50×10 <sup>6</sup> | 4.63×10 <sup>4</sup> | 1.73×10 <sup>5</sup> | 5.24×10 <sup>6</sup> | 1.23×10 <sup>3</sup> | 1.32×10 <sup>6</sup> 2.19×10 <sup>3</sup> |

表 4(续)

| 生命周期阶段<br>Stages of LCA                         | 环境排放 Environmental emissions |                       |                       |                       |                       |                      |                       |                       |                       |                      |                      |
|---|------------------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|----------------------|----------------------|
|   | CO <sub>2</sub>              | SO <sub>2</sub>       | CH <sub>4</sub>       | NO <sub>x</sub>       | CO                    | HC                   | VOC                   | PM <sub>10</sub>      | N <sub>2</sub> O      | SO <sub>x</sub>      | H <sub>2</sub> S     |
| 节约燃煤<br>Coal reduction                          | -2.33×10 <sup>8</sup>        | -1.16×10 <sup>8</sup> | -1.18×10 <sup>7</sup> | -4.13×10 <sup>6</sup> | -5.16×10 <sup>5</sup> |                      |                       | -3.17×10 <sup>5</sup> | -1.95×10 <sup>4</sup> |                      |                      |
| 减施氮肥<br>N reduction                             | -3.75×10 <sup>7</sup>        | -1.22×10 <sup>5</sup> | -9.28×10 <sup>4</sup> | -1.61×10 <sup>5</sup> | -4.37×10 <sup>4</sup> |                      | -5.41×10 <sup>3</sup> | -2.17×10 <sup>4</sup> | -8.99×10 <sup>4</sup> |                      |                      |
| 减施磷肥<br>P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> reduction | -1.74×10 <sup>6</sup>        |                       | -2.90×10 <sup>3</sup> | -1.33×10 <sup>4</sup> | -2.24×10 <sup>3</sup> |                      | -9.34×10 <sup>2</sup> | -2.49×10 <sup>3</sup> | -7.79×10 <sup>1</sup> |                      |                      |
| 产物替代<br>减施钾肥<br>K <sub>2</sub> O reduction      | -4.09×10 <sup>5</sup>        | -3.01×10 <sup>2</sup> | -1.02×10 <sup>3</sup> | -8.31×10 <sup>2</sup> | -2.81×10 <sup>2</sup> |                      | -1.96×10 <sup>2</sup> | -5.95×10 <sup>2</sup> | -3.27×10 <sup>1</sup> |                      |                      |
| 减施农药<br>Pesticide reduction                     | -5.50×10 <sup>7</sup>        | -1.11×10 <sup>5</sup> | -3.10×10 <sup>5</sup> | -1.13×10 <sup>5</sup> | -2.45×10 <sup>4</sup> |                      | -2.83×10 <sup>4</sup> | -7.69×10 <sup>3</sup> | -2.33×10 <sup>3</sup> |                      |                      |
| 小计<br>Subtotal                                  | -3.27×10 <sup>8</sup>        | -1.16×10 <sup>8</sup> | -1.22×10 <sup>7</sup> | -4.42×10 <sup>6</sup> | -5.87×10 <sup>5</sup> |                      | -3.49×10 <sup>4</sup> | -3.50×10 <sup>5</sup> | -1.12×10 <sup>5</sup> |                      |                      |
| 替代减排情景<br>Reduction emission scenario           | 2.54×10 <sup>8</sup>         | -1.13×10 <sup>8</sup> | -1.09×10 <sup>7</sup> | -2.22×10 <sup>6</sup> | 2.92×10 <sup>6</sup>  | 4.63×10 <sup>4</sup> | 1.38×10 <sup>5</sup>  | 4.89×10 <sup>6</sup>  | -1.11×10 <sup>5</sup> | 1.32×10 <sup>6</sup> | 2.19×10 <sup>3</sup> |



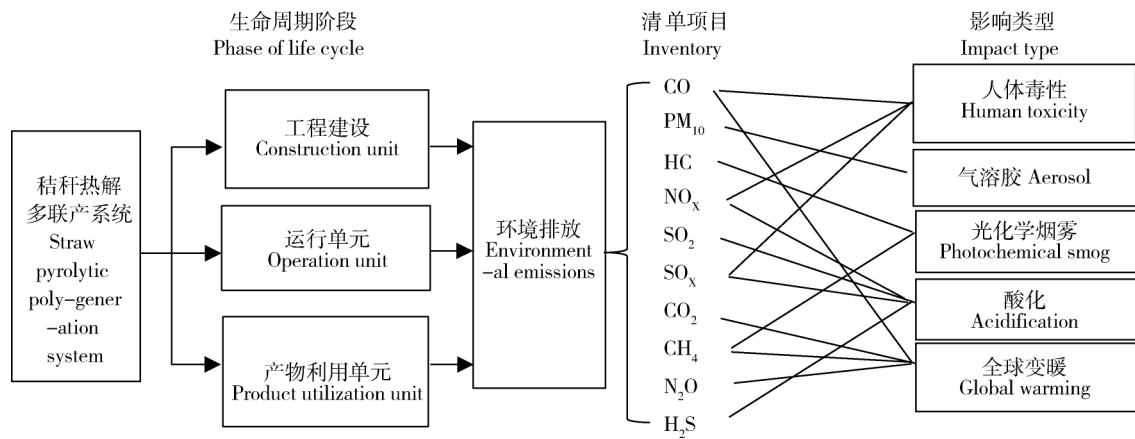


图3 秸秆热解多联产工程清单数据分类

Fig. 3 Inventory classification of straw pyrolytic poly-generation system

表5 环境影响类型标准化基准值与权重因子

Table 5 Standardization criteria and weight factor of environmental impact

| 影响类型<br>Impact classification | 影响因子<br>Effect factor         | 当量值<br>Equivalent value | 标准化基准值 <sup>①</sup><br>Standardization criteria | 权重因子 <sup>②</sup><br>Weight factor |
|-------------------------------|-------------------------------|-------------------------|---|------------------------------------|
| 全球变暖<br>Global warming        | CO <sub>2</sub>               | 1                       | 8 700 kg<br>以 CO <sub>2</sub> 排放量计              | 0.208                              |
|                               | CH <sub>4</sub>               | 28                      |   |                                    |
|                               | N <sub>2</sub> O              | 265                     |   |                                    |
| 酸化影响<br>Acidification         | CO                            | 2                       | 36 kg<br>以 SO <sub>2</sub> 排放量计                 | 0.138                              |
|                               | SO <sub>2</sub>               | 1.00                    |   |                                    |
|                               | SO <sub>x</sub>               | 2.00                    |   |                                    |
|                               | NO <sub>x</sub>               | 0.70                    |   |                                    |
| 光化学烟雾<br>Photochemical smog   | H <sub>2</sub> S              | 1.88                    | 25 kg<br>以 C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> 排放量计   | 0.158                              |
|                               | C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> | 1.000                   |   |                                    |
|                               | HC                            | 0.416                   |   |                                    |
| 气溶胶影响<br>Aerosol              | CH <sub>4</sub>               | 0.007                   | 18 kg   | 0.148                              |
|                               | PM <sub>10</sub>              | 1                       |   |                                    |
| 人体毒性<br>Human toxicity        | CO                            | 0.012                   | 6.11 kg<br>以 1,4-二氯苯排放量计                        | 0.348                              |
|                               | NO <sub>x</sub>               | 0.780                   |   |                                    |
|                               | SO <sub>x</sub>               | 1.200                   |   |                                    |

注:①数据来源于文献[39]和[42]。②数据来源于文献[44]。

Note:①Data were adapted from literature [39] and [42]. ②Data were adapted from literature [44].

表 6 秸秆热解多联产系统功能单位环境影响负荷

Table 6 Life cycle environmental impact of straw pyrolysis system for one functional unit

当量/(人·年)

| 环境影响<br>Environmental<br>impact  | 项目<br>Item                       | 全球变暖<br>Global<br>warming | 酸化影响<br>Acidification | 光化学烟雾<br>Photochemical<br>smog | 气溶胶影响<br>Aerosol | 人体毒性<br>Human<br>toxicity | 合计<br>Total |
|--|----------------------------------|---------------------------|-----------------------|--------------------------------|------------------|---------------------------|-------------|
| 系统环境影响<br>System<br>environmental<br>impact                                | 建设单元<br>Construction unit        | 6.97                      | 2.99                  | 0.15                           | 1.36             | 20.29                     | 31.76       |
|  | 运行单元<br>Operation unit           | 7.30                      | 14.05                 | 0.03                           | 41.61            | 75.23                     | 138.22      |
|  | 产物利用<br>Product utilization unit | 0.63                      | 0.29                  | 0.00                           | 0.12             | 4.51                      | 5.55        |
|  | 小计<br>Subtotal                   | 14.90                     | 17.33                 | 0.18                           | 43.09            | 100.03                    | 175.53      |
|  | 节约煤炭<br>Coal reduction           | -13.59                    | -453.88               | -0.52                          | -2.61            | -183.90                   | -654.50     |
| 资源替代<br>环境影响<br>Environmental<br>impact caused<br>by resource<br>reduction | 减施肥料<br>Fertilizer reduction     | -1.58                     | -0.94                 | 0.00                           | -0.20            | -7.80                     | -10.52      |
|  | 减施农药<br>Pesticide reduction      | -1.54                     | -0.73                 | -0.01                          | -0.06            | -5.03                     | -7.37       |
|  | 小计<br>Subtotal                   | -16.71                    | -455.55               | -0.53                          | -2.87            | -196.73                   | -672.39     |
| 综合环境影响<br>Comprehensive environmental impact                               |                                  | -1.82                     | -438.22               | -0.35                          | 40.22            | -96.70                    | -496.86     |

### 5.3 秸秆炭减排机理

对于秸秆炭施用的环境排放,本研究主要考虑秸秆炭施用替代化肥的环境减排,而实际上,秸秆炭的固碳、减排还需要考虑生物炭对土壤主要温室气体的单独效应及综合排放效应、生物炭增加植物生物量对大气 CO<sub>2</sub> 的吸收和封存、生物炭通过抑制土壤有机碳分解而减少 CO<sub>2</sub> 排放等等<sup>[7]</sup>。但是由于目前秸秆炭对农田温室气体排放影响受到生物炭自身物化性质、添加时机、施用量和土壤类型等因素的影响,尚未形成一致的研究结论<sup>[47]</sup>,仍需进一步深入讨论与研究。

## 6 结 论

1)考虑秸秆热解多联产系统产生的秸秆燃气、秸秆炭和木醋液分别对煤炭、化肥和农药的替代减排作用,采用热解多联产工艺处理 1 t 秸秆的环境影响综合指数为  $-4.96 \times 10^{-2}$ 。通过产物的合理利用,秸秆热解多联产系统可通过资源替代更加有效

地发挥减排作用从而降低工程对环境影响的负荷。

2)工程建设单元影响生物质热解多联产环境排放的主要环节为钢材和 PVC 等物料的环境排放,两者合计占工程建设单元环境排放综合潜值的 93.49%,可通过增加环保材料的使用减少工程基础设施建设阶段的环境排放。

3)工程运行过程电耗过高是导致工程运行阶段环境排放高的主要因素,与秸秆沼气工程 LCA 环境评价结果一致<sup>[48]</sup>,下一步研究应明确高能耗环节,优化设备性能,实现秸秆热解多联产系统设备运行节能降耗。

## 参考文献 References

- [1] 毕于运,王亚静,高春雨. 中国秸秆资源综合利用的系统构成及总体趋势[J]. 中国农业资源与区划,2010,31(4):35-38  
Bi Y Y, Wang Y J, Gao C Y. System construction and general trend of straw resource comprehensive utilization in China[J]. *Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional*

- Planning, 2010, 31(4): 35-38 (in Chinese)
- [2] 朱颢, 胡启春, 汤晓玉, 李谦. 我国农作物秸秆资源燃料化利用开发进展[J]. 中国沼气, 2017, 35(2): 115-120  
Zhu H, Hu Q C, Tang X Y, Li Q. Current development and progress of fuelization of agricultural straw in China[J]. *China Biogas*, 2017, 35(2): 115-120 (in Chinese)
- [3] 王亚静, 王飞, 石祖梁, 高春雨, 王红彦, 毕于运. 基于农业供给侧结构性改革背景的秸秆资源与利用研究[J]. 中国农业资源与区划, 2017, 38(6): 13-20  
Wang Y J, Wang F, Shi Z L, Gao C Y, Wang H Y, Bi Y Y. Straw resources and its utilization in China from the perspective of agricultural supply-side structural reform[J]. *Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning*, 2017, 38(6): 13-20 (in Chinese)
- [4] 中华人民共和国国家发展和改革委员会. 国家发展改革委办公厅 农业部办公厅 国家能源局综合司关于开展秸秆气化清洁能源利用工程建设的指导意见[EB/OL]. (2018-05-12), [http://www.ndrc.gov.cn/zcfb/zcfbtz/201801/t20180102\\_872937.html](http://www.ndrc.gov.cn/zcfb/zcfbtz/201801/t20180102_872937.html)  
National Development and Reform Commission. Guidance on the implementation of straw gasification clean energy utilization project construction[EB/OL]. (2018-05-12), [http://www.ndrc.gov.cn/zcfb/zcfbtz/201801/t20180102\\_872937.html](http://www.ndrc.gov.cn/zcfb/zcfbtz/201801/t20180102_872937.html) (in Chinese)
- [5] 周建斌, 邓丛静, 陈金林, 张齐生. 玉米秸秆炭化产物的性能及应用[J]. 东北林业大学学报, 2008, 36(12): 59-61  
Zhou J B, Deng C J, Chen J L, Zhang Q S. Property and application of corn straw carbonized products[J]. *Journal of Northeast Forestry University*, 2008, 36(12): 59-61 (in Chinese)
- [6] Dhyani V, Bhaskar T. A comprehensive review on the pyrolysis of lignocellulosic biomass[J]. *Renewable Energy*, 2018, (129): 695-716
- [7] 姜志翔. 生物炭技术缓解温室气体排放的潜力评估[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2013  
Jiang Z X. Assessment of the mitigation potential of greenhouse gas emissions for biochar technology[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2013 (in Chinese)
- [8] 卢辛成, 蒋剑春, 孙康, 孙云娟. 木醋液的制备、精制与应用研究进展[J]. 林产化学与工业, 2017, 37(3): 21-30  
Lu X C, Jiang J C, Sun K, Sun Y J. Review on preparation and application of wood vinegar[J]. *Chemistry and Industry of Forest Products*, 2017, 37(3): 21-30 (in Chinese)
- [9] 丛宏斌, 赵立欣, 姚宗路, 孟海波, 贾吉秀, 李贤斌, 王雅君. 玉米秸秆连续干馏条件下能量平衡分析[J]. 农业工程学报, 2017, 33(7): 206-212  
Cong H B, Zhao L X, Yao Z L, Meng H B, Jia J X, Li X B, Wang Y J. Energy balance analysis of corn straw continuous distillation[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2017, 33(7): 206-212 (in Chinese)
- [10] 霍丽丽, 田宜水, 孟海波, 赵立欣, 姚宗路. 生物质固体成型燃料全生命周期评价[J]. 太阳能学报, 2011, 32(12): 1875-1880  
Huo L L, Tian Y S, Meng H B, Zhao L X, Yao Z L. Life cycle assessment analysis for densified biofuel[J]. *ACTA Energiae Solar Sinica*, 2011, 32(12): 1875-1880 (in Chinese)
- [11] 刘俊伟, 田秉晖, 张培栋, 李秀金. 秸秆直燃发电系统的生命周期评价[J]. 可再生能源, 2009, 27(5): 102-106  
Liu J W, Tian B H, Zhang P D, Li X J. Life cycle assessment on straw directly combustion for power generation system[J]. *Renewable Energy Resources*, 2009, 27(5): 102-106 (in Chinese)
- [12] 王俏丽. 秸秆制沼气过程生命周期评价及其敏感性分析[D]. 杭州: 浙江大学, 2015  
Wang Q L. Life cycle assessment on straw biogas project and its sensitivity analysis[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2015 (in Chinese)
- [13] 霍丽丽, 赵立欣, 孟海波, 姚宗路, 丛宏斌, 王冠. 秸秆类生物质气炭联产全生命周期评价[J]. 农业工程学报, 2016, 32(S1): 261-266  
Huo L L, Zhao L X, Meng H B, Yao Z L, Cong H B, Wang G. Life cycle assessment analysis for cogeneration of fuel gas and biochar[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2016, 32(S1): 261-266 (in Chinese)
- [14] 毛燎原, 李爱民. 基于生命周期评价的糠醛生产污染综合治理问题[J]. 化工进展, 2010, 29(S1): 226-231  
Mao L Y, Li A M. Comprehensive treatment issues of furfural production pollution based on life cycle assessment[J]. *Chemical Industry and Engineering Progress*, 2010, 29(S1): 226-231 (in Chinese)
- [15] 赵兰, 冷云伟, 任恒星, 李浩. 大型秸秆沼气集中供气工程生命周期评价[J]. 安徽农业科学, 2010, 38(34): 19462-19464  
Zhao L, Leng Y W, Ren H X, Li H. Life cycle assessment for large-scale centralized straw gas supply project[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2010, 38(34): 19462-19464 (in Chinese)
- [16] 林琳, 赵黛青, 李莉. 基于生命周期评价的生物质发电系统环境影响分析[J]. 太阳能学报, 2008, 29(5): 618-623  
Lin L, Zhao D Q, Li L. Environment impact analysis of biomass power generation system based on life cycle assessment[J]. *Acta Energiae Solaris Sinica*, 2008, 29(5): 618-623 (in Chinese)
- [17] 刘黎娜, 王效华. 沼气生态农业模式的生命周期评价[J]. 中国沼气, 2008, 26(2): 17-20  
Liu L N, Wang X H. Life cycle assessment of biogas eco-agricultural mode[J]. *China Biogas*, 2008, 26(2): 17-20 (in Chinese)
- [18] 戴杜, 刘荣厚, 浦耿强, 王成焘. 中国生物质燃料乙醇项目能量生产效率评估[J]. 农业工程学报, 2005, 21(11): 129-131  
Dai D, Liu R H, Pu G Q, Wang C T. Evaluation of energy production efficiency of biomass based fuel ethanol program[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2005, 21(11): 129-131 (in Chinese)

- [19] Q/WGLY 010—2016 生物质热解炭气油联产工程技术规范 第 2 部分: 施工及验收[DB/OL]. (2018-05-18) <http://www.cpbz.gov.cn/sdownload?innerCode=Q-914201000744696025-201608011708-0001&token=adf4ab62-10a1-4fb4-9fee-df2b318f4798>
- Q/WGLY 010—2016 Technical Code of Biomass Pyrolytic for Carbon Oil and Gas Polygeneration Part 2: Construction and Acceptance[DB/OL]. (2018-05-18) <http://www.cpbz.gov.cn/sdownload?innerCode=Q-914201000744696025-201608011708-0001&token=adf4ab62-10a1-4fb4-9fee-df2b318f4798> (in Chinese)
- [20] 中华人民共和国农业部. 中国农业统计资料 2016[M]. 北京: 中国农业出版社, 2016
- Ministry of Agriculture of the People's Republic of China. *China Agricultural Statistical Report 2016*[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2016 (in Chinese)
- [21] NY/T 1561-2007 秸秆燃气灶[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008
- NY/T 1561-2007 Straw gasifier appliances[S]. Beijing: China Quality and Standards Publishing & Media Co., Ltd. 2008 (in Chinese)
- [22] NY/T1001-2006 民用省柴节煤灶、炉、炕技术条件[S]. 北京: 中国农业出版社, 2006
- NY/T1001-2006 Technical specification of domestic improved stoves and kang for firewood and coal [S]. Beijing: China Agriculture Press, 2006 (in Chinese)
- [23] 毕于运. 秸秆资源评价与利用研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2010
- Bi Y Y. Study on straw resources evaluation and utilization in China[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2010 (in Chinese)
- [24] 赵浩亮, 张旭, 翟明岭. 生物质电厂秸秆燃料收集范围优化分析[J]. 太阳能学报, 2016, 37(4): 997-1001
- Zhao H L, Zhang X, Zhai M L. Optimization and analysis of collection scale of straw fuel for biomass power plant[J]. *Acta Energaie Solaris Sinica*, 2016, 37(4): 997-1001 (in Chinese)
- [25] 左旭. 我国农业废弃物新型能源化开发利用研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2015
- Zuo X. A research on the development and utilization of the agricultural residues as new sources energy in China[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2015 (in Chinese)
- [26] 付嘉英. 生物质炭基肥料的试制及其在蔬菜地的应用探讨[D]. 南京: 南京农业大学, 2013
- Fu J Y. Trials of biochar-based fertilizer production and its application on vegetable field [D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2013 (in Chinese)
- [27] 韩继明, 潘根兴, 刘志伟, 张硕硕, 熊旭东, 吕振, 郑聚锋, 张旭辉, 刘晓雨. 减氮条件下秸秆炭化与直接还田对旱地作物产量及综合温室效应的影响[J]. 南京农业大学学报, 2016, 39(6): 986-995
- Han J, Pan G, Liu Z, Zhang S, Xiong X, Lv Z, Zheng J, Zhang X, Liu X. Contrasting effect of straw return and its biochar on changes in crop yield and integrated global warming effects under different nitrogen levels[J]. *Journal of Nanjing Agricultural University*, 2016, 39(6): 986-995 (in Chinese)
- [28] 花莉, 唐志刚, 解井坤, 范洋. 生物质炭对农田温室气体排放的作用效应及其影响因素探讨[J]. 生态环境学报, 2013, 22(6): 1068-1073
- Hua L, Tang Z G, Xie J K, Fan Y. Effect and its influencing factors of biochar on agricultural greenhouse gases emissions [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2013, 22(6): 1068-1073 (in Chinese)
- [29] Hammond J, Shackley S, Sohi S, Brownsort P. Prospective life cycle carbon abatement for pyrolysis biochar systems in the UK[J]. *Energy Policy*, 2011, 39(4): 2646-2655
- [30] 陈红卫, 黄玲, 冯露, 李晓庆, 孟雨田, 代琳. 生物质炭基肥对农田土壤温室气体排放年际变化的影响[J]. 浙江农业学报, 2017, 29(6): 977-981
- Chen H W, Huang L, Feng L, Li X Q, Meng Y T, Dai L. Effects of biochar based fertilizer on seasonal variation of greenhouse gas emissions [J]. *Acta Agriculturae Zhejiangensis*, 2017, 29(6): 977-981 (in Chinese)
- [31] 季雅岚, 索龙, 解钰, 王小淇, 田伟, 赖倩倩, 孟磊. 3 种豆科植物生物质炭对海南砖红壤性质及  $N_2O$  排放的影响[J]. 南方农业学报, 2017, 48(8): 1381-1387
- Ji Y L, Suo L, Xie Y, Wang X Q, Lai Q Q, Tian W, Meng L. Influence of three biochars produced by three leguminosae plants on Hainan latosol properties and  $N_2O$  emission [J]. *Journal of Southern Agricultural*, 2017, 48(8): 1381-1387 (in Chinese)
- [32] Mohammadi A, Cowie A, Mai T, Rosa R A, Brandão M, Kristiansen P, Joseph S. Quantifying the greenhouse gas reduction benefits of utilising straw biochar and enriched biochar[J]. *Energy Procedia*, 2016, (97): 254-261
- [33] 孙致陆, 贾娟琪, 李先德. 我国农药使用强度的演进特征与省际收敛——基于 1991-2014 年省级面板数据的分析[J]. 农业现代化研究, 2017, 38(5): 792-800
- Sun Z L, Jia J Q, Li X D. Evolution Characteristics and provincial convergence of pesticide application density in China: An empirical study based on the provincial data from 1991 to 2014 [J]. *Research of Agricultural Modernization*, 2017, 38(5): 792-800 (in Chinese)
- [34] 杨选民, 薛少平. 木醋液在农业生产中的综合应用研究[J]. 科技视界, 2014(12): 306
- Yang X M, Xue S P. Comprehensive application research of wood vinegar in agricultural production [J]. *Science and Technology Vision*, 2014(12): 306 (in Chinese)
- [35] 潘洋. 木醋液在农业生产中的应用研究进展[J]. 现代园艺, 2017(21): 34
- Pan Y. Research progress of wood vinegar application in agricultural production [J]. *Xiandai Horticulture*, 2017(21): 34 (in Chinese)

- [36] 潘永亮,杜金芳,孙鑫河.木醋液在农业生产上的应用与发展[J].现代化农业,1999(2):8-9  
Pan Y L, Du J F, Sun X H. Application and development of wood vinegar in agricultural production[J]. *Modernizing Agriculture*, 1999(2):8-9 (in Chinese)
- [37] 史咏竹,杜相革.木醋液在农业生产上的研究新进展[J].中国农学通报,2003,19(3):108-109,114  
Shi Y Z, Du X G. New research progress on wood vinegar in agricultural production[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2003, 19(3):108-109, 114 (in Chinese)
- [38] 杨倩苗.建筑产品的全生命周期环境影响定量评价[D].天津:天津大学,2009  
Yang Q M. Quantificational life cycle assessment of environmental impact of construction productions[D]. Tianjin: Tianjin University, 2009 (in Chinese)
- [39] 衣瑞建,张万钦,周捷,李伟,吴树彪,陈理,董仁杰.基于LCA方法沼渣沼液生产利用过程的环境影响分析[J].可再生能源,2015,33(2):301-307  
Yi R J, Zhang W Q, Zhou J, Li W, Wu S B, Chen L, Dong R J. Environmental impact analysis on the production and utilization of digestate based on LCA method[J]. *Renewable Energy Resources*, 2015, 33(2):301-307 (in Chinese)
- [40] 苏洁.中国生物质乙醇燃料生命周期分析[D].上海:上海交通大学,2005  
Su J. Life cycle assessment on biomass-based ethanol fuel in China[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2005 (in Chinese)
- [41] 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 X H, Nie Z R, Zuo T Y. Life cycle emission inventories for the fuels consumed by thermal power in China[J]. *China Environmental Science*, 2005, 25(5):632-635 (in Chinese)
- [42] 杨建新,徐成,王如松.产品生命周期评价方法与应用[M].北京:气象出版社,2002  
Yang J X, Xu C, Wang R S. *Product Life Cycle Assessment Methods and Applications* [M]. Beijing: China Meteorological Press, 2002 (in Chinese)
- [43] 王明新,夏训峰,柴育红,刘建国.农村户用沼气工程生命周期节能减排效益[J].农业工程学报,2010,26(11):245-250  
Wang M X, Xia X F, Chai Y H, Liu J G. Life cycle energy conservation and emissions reduction benefits of rural household biogas project[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2010, 26(11):245-250 (in Chinese)
- [44] 夏训峰,张军,席北斗.基于生命周期的燃料乙醇评价及政策研究[M].北京:中国环境科学出版社,2012  
Xia X F, Zhang J, Xi B D. *Fuel Ethanol Evaluation and Policy Research Based on Life Cycle* [M]. Beijing: China Environmental Science Press, 2012 (in Chinese)
- [45] Parascanu M M, Puig Gamero M, Sánchez P, Soreanu G, Valverde J L, Sanchez-Silva L. Life cycle assessment of olive pomace valorisation through pyrolysis[J]. *Renewable Energy*, 2018, (122):589-601
- [46] Peters J F, Iribarren D, Dufour J. Life cycle assessment of pyrolysis oil applications[J]. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 2015, (5):1-19
- [47] 孔丝纺,姚兴成,张江勇,姚晓东,曾辉.生物质炭的特性及其应用的研究进展[J].生态环境学报,2015,24(4):716-723  
Kong S F, Yao X C, Zhang J Y, Yao X D, Zeng H. Review of characteristics of biochar and research progress of its applications[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2015, 24(4):716-723 (in Chinese)
- [48] 王红彦,王亚静,高春雨,王道龙,覃诚,毕于运.基于LCA的秸秆沼气集中供气工程环境影响评价[J].农业工程学报,2017,33(21):237-243  
Wang H Y, Wang Y J, Gao C Y, Wang D L, Qin C, Bi Y Y. Environment impact evaluation of straw biogas project for central gas supply based on LCA[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2017, 33(21):237-243 (in Chinese)

责任编辑:吕晓梅