



沈峥,宋远博,高玉磊,姜继康,顾敏燕,司慧萍. 生物质热解液化技术的生命周期评价[J]. 中国农业大学学报,2023,28(05):200-206.  
SHEN Zheng, SONG Yuanbo, GAO Yulei, JIANG Jikang, GU Minyan, SI Huiping. Life cycle assessment of a biomass pyrolysis and liquefaction technology[J].  
Journal of China Agricultural University, 2023, 28(05): 200-206.  
DOI: 10.11841/j.issn.1007-4333.2023.05.18

## 生物质热解液化技术的生命周期评价

沈 峥<sup>1</sup> 宋远博<sup>1</sup> 高玉磊<sup>2</sup> 姜继康<sup>1</sup> 顾敏燕<sup>1</sup> 司慧萍<sup>1\*</sup>

(1. 同济大学 新农村发展研究院, 上海 201804;  
2. 同济大学 机械与能源工程学院, 上海 201804)

**摘 要** 为探究生物质热解液化技术能源转化过程的效率、经济性及温室气体排放,依据全生命周期评价分析原理,建立废弃秸秆热解制备液体燃料技术全生命周期模型,对该过程进行全生命周期分析,评价范围包括秸秆的收集和运输、干燥和粉碎、生物质热解、木炭加工和余热利用。结果表明:生物质热解液化技术的能量产出投入比为20.43;处理湿秸秆的纯利润约为289.38元/t,销售利润率达52.11%;CO<sub>2</sub>当量排放为34.10 g/MJ。生物质热解液化是一种兼具能量效益、经济效益和环境效益等极具潜力的生物质利用技术。

**关键词** 生物质秸秆; 生物质热解液化; 生命周期评价; 碳排放

中图分类号 TK6

文章编号 1007-4333(2023)05-0200-07

文献标志码 A

## Life cycle assessment of a biomass pyrolysis and liquefaction technology

SHEN Zheng<sup>1</sup>, SONG Yuanbo<sup>1</sup>, GAO Yulei<sup>2</sup>, JIANG Jikang<sup>1</sup>, GU Minyan<sup>1</sup>, SI Huiping<sup>1\*</sup>

(1. New Rural Development Research Institute, Tongji University, Shanghai 201804, China;  
2. College of Mechanical Engineering, Tongji University, Shanghai 201804, China)

**Abstract** In order to explore the efficiency, economy and greenhouse gas emissions of the energy conversion process of biomass pyrolysis and liquefaction technology, based on the analysis principle of full life cycle assessment, a full life cycle model of waste straw pyrolysis to prepare liquid fuel technology was established, and the full life cycle analysis of the process was carried out. The assessment scope included straw collection and transportation, drying and crushing, biomass pyrolysis, charcoal processing and waste heat utilization. The results show that: The energy output-input ratio of biomass pyrolysis liquefaction conversion process is 20.43; The net profit of wet straw treatment is about 289.38 yuan/t, and the sales profit margin is 52.11%; CO<sub>2</sub> equivalent emission is 34.10 g/MJ. In conclusion, biomass pyrolysis and liquefaction is a potential biomass utilization technology with energy, economic and environmental benefits.

**Keywords** biomass straw; biomass pyrolysis and liquefaction; life cycle assessment; carbon emission

近年来,我国正在诸如气候变化等世界性议题中扮演愈发重要的参与者、贡献者和引领者的角色<sup>[1-2]</sup>。中华人民共和国财政部在2020年两会提交的报告<sup>[3]</sup>中指出,未来我国将持续推动做好

“碳达峰”和“碳中和”工作,继续支持全面乡村振兴战略,提升秸秆综合利用水平。开发秸秆类生物质能利用技术正逐渐成为我国清洁能源的主要发展方向之一<sup>[4]</sup>。

收稿日期: 2022-06-29

基金项目: 国家重点研发计划(2019YFC1906700)

第一作者: 沈峥(ORCID:0000-0003-3668-7820),研究员,主要从事农村水污染控制和废弃物资源化研究,E-mail:shenzheng@tongji.edu.cn

通讯作者: 司慧萍(ORCID:0000-0002-3167-0854),副教授,主要从事设施农业机械研究,E-mail:sihuiping@tongji.edu.cn

近年来,秸秆类生物质能开发技术快速发展,开发了生物质发电<sup>[5]</sup>、制备生物柴油<sup>[6]</sup>、制备生物质燃料<sup>[7]</sup>、生物质产沼气<sup>[8]</sup>和生物质制氢<sup>[9]</sup>等多种工艺,在替代化石能源、防止环境污染和增加经济效益等方面发挥了积极作用<sup>[10]</sup>。生物质热解加氢精制汽油和柴油是生物质制烃类燃料技术的一种,被认为是最具发展潜力的生物质可再生工艺之一<sup>[11]</sup>。生物原油组分复杂,难以直接利用,因此需要分质转化或者提炼加工后才能实际使用,其中生物油加氢精制是最普遍的使用方法<sup>[12-14]</sup>。目前国内已经有1种生物质热解液化技术路线,能够将废弃秸秆等生物质高效、分质转化为高附加值的生物汽、柴油,极具工业化潜力。因此,需对该技术的经济性、能源消耗进行科学的定量评价,并明确产品利用及副产物对环境的影响<sup>[15]</sup>。

全生命周期评价是一种评估产品全生命周期中能耗、经济和环境影响的综合评价方法,自20世纪50年代产生后逐渐运用到环境、经济和技术等领域<sup>[16]</sup>。相比欧美国家,我国关于生命周期理论研究

起步较晚,进度相对滞后<sup>[17]</sup>。在可再生能源领域,我国已有研究对生物质产沼气<sup>[18]</sup>、产燃料乙醇<sup>[19]</sup>和制取航空煤油<sup>[20]</sup>等技术进行了不同维度的生命周期评价,但总体上还未形成一套统一、高效的评价框架,不同评价结果间难以进行技术比对<sup>[15,21]</sup>。本研究拟采用全生命周期评价分析原理,对生物质热解液化技术的生产成本、能源转化及温室气体排放等方面进行评价,为正确评价我国秸秆类生物质转化技术可持续发展提供参考依据。

## 1 生物质热解液化技术简介

生物质热解液化技术是生物质制烃类燃料技术的一种,是生物质在无氧或缺氧条件下高温分解生成焦炭、生物油和不凝性气体的过程<sup>[22]</sup>。生物质热解液化技术能够将秸秆等低品位的生物质(热值约为12.00~15.00 MJ/kg)转化成大量高品位的生物油(热值约为15.00~18.00 MJ/kg),是一种极具发展前景的生物质综合利用工艺<sup>[23-24]</sup>。生物质热解液化技术流程见图1。

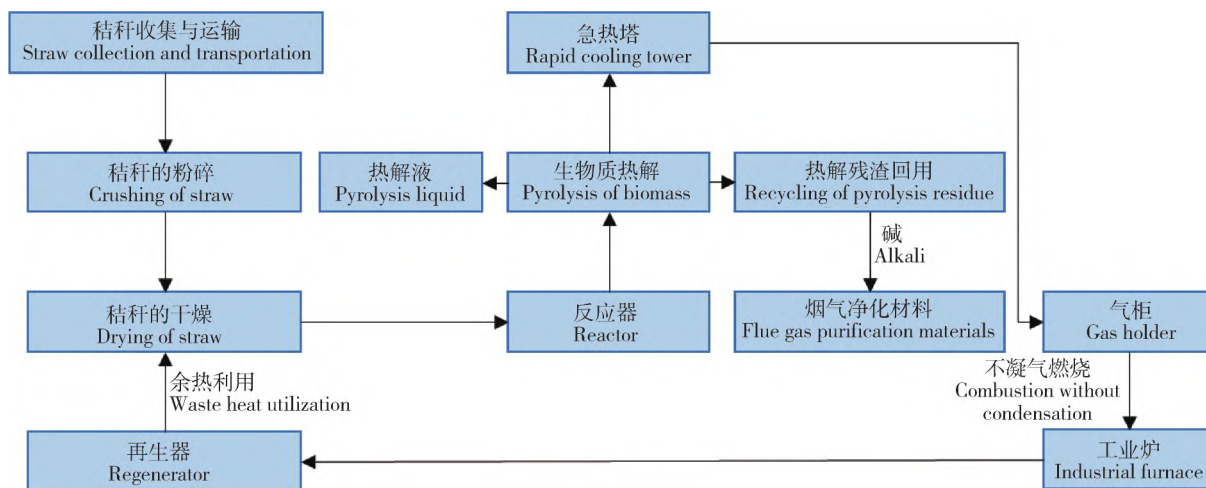


图1 生物质热解液化技术工艺流程

Fig. 1 Biomass pyrolysis and liquefaction technology process

## 2 生命周期评价过程

生物质热解液化技术全生命周期评价过程为:首先建立生物质热解液化技术全生命周期评价体系模型,明确本模型内的评价指标;其次明确各阶段需要统计的能量、经济和环境数据,建立评价清单;然后采用指标计算、评价生物质热解液化全生命周期过程的能源效益、经济效益和环境效益,指出本工艺

在能源、经济和环境方面的主要影响因素;最终评价秸秆类生物质热解液化转化技术应用的综合效益。

### 2.1 模型建立

本研究的目的是分析生物质热解液化技术在处理废弃秸秆过程中的经济效益、能源效益和环境效益,故生物质热解液化技术生命周期体系包括秸秆的收集和运输、干燥和粉碎、生物质热解、热解残渣回用和余热利用。生物质热解液化技术生命周期模型见图2。

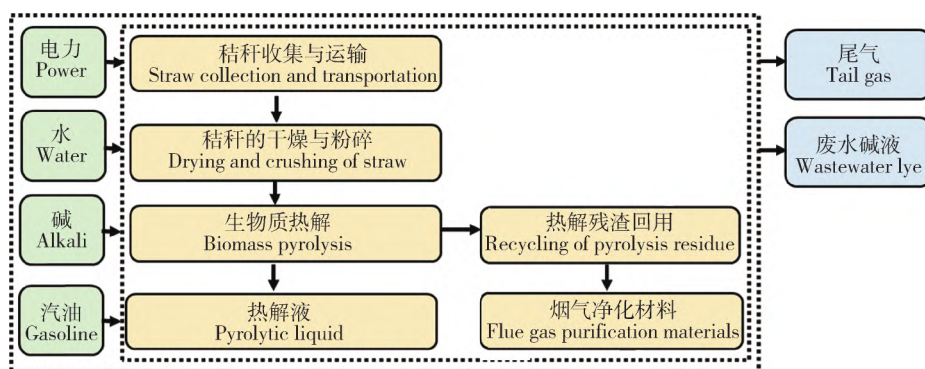


图2 生物质热解液化技术生命周期模型

Fig. 2 Life cycle model of biomass pyrolysis and liquefaction technology

由于本技术较为复杂,为便于研究分析,本研究提出以下假设:

1) 不计生产过程中影响较小的间接效应,如厂房建设、设备制造与回收、设备效率和人工等对环境的影响;由于本技术目的是处理农业生产中多余的废弃秸秆,故不考虑农作物种植等过程;

2) 秸秆考虑收集半径为 10.00 km;

3) 生产原料为湿秸秆,含水率 35.00%,经烘干后含水率下降为约 10.00%,称为“干燥秸秆”;

4) 生物质干燥和热解所需热量由热解过程中产生的不凝气再燃烧提供,不凝气燃烧后的尾气直接排放到环境中;

5) 本技术涉及到的装置是秸秆热解液化加氢装置,处理秸秆 3 万 t/a,由合作企业河南百优福生物能源有限公司提供。为了方便统计实际收益,后续计算均以 1.00 t 秸秆为单位;

6) 本技术最终产物为生物质热解后得到的热解液和热解残渣回用后生产的烟气净化材料,不再考虑后续的热解液加氢等工艺流程。

## 2.2 评价指标

1) 净能量与能量产出投入比。净能量为生物质热解液化产出的产品应用过程所释放的能量与生物质热解液化的生命周期过程消耗的总能量之差。能量产出投入比为热解分质转化产出的产品应用过程所释放的能量与生物质热解液化所消耗的总能量之比:

$$NE = BE - \sum HE_i \quad (1)$$

$$\eta = \frac{BE}{\sum HE_i} \quad (2)$$

式中:NE 为净能量, MJ/t; BE 为生物质热解液热

值, MJ/t;  $HE_i$  为生物质热解分质转化的生命周期过程中,第  $i$  种物质的能耗, MJ/t;  $\eta$  为能量产投比。

2) 全生命周期成本。生物质热解分质转化系统的生命周期成本(LCC)包括人力成本、维护成本和生产成本等:

$$LCC = \sum C_j - S_i \quad (3)$$

式中: LCC 为生物质热解分质转化总成本, 万元;  $C_j$  为生物质热解分质转化的生命周期过程中第  $j$  项目的成本, 万元;  $S_i$  为经热解分质转化后所得的各种产品销售的收入, 万元。

3) 温室气体  $CO_2$  当量排放。温室气体包含  $CO_2$ 、 $CH_4$  和  $N_2O$ , 3 种温室气体的全球增温潜力系数分别为 1.00、23.00 和 296.00<sup>[25]</sup>,  $CO_2$  当量为 3 种温室气体与增温潜力系数的乘积:

$$HF_i = \sum (HE_i \cdot \lambda) \quad (4)$$

式中:  $HF_i$  为第  $i$  种物质  $CO_2$  当量排放, g/MJ;  $\lambda$  为各类能源消耗占总能源能耗的比例。

## 3 结果与分析

### 3.1 能量投入及产出

为方便统计生物质热解液化技术各过程的能量投入和产出,特列出各过程的物质和能量清单。其中涉及电力、水、碱和汽油的投入,同时伴随尾气、废水碱液、热解液和烟气净化材料的产出(表 1)。

经计算,生物质热解液化技术能耗总量为 2 304.67 MJ,热能能耗占总能耗的 85.93%(图 3)。其中,秸秆干燥和生物质热解是主要耗能过程,其汽油、电能和热能能耗之和分别占总能耗的 31.52% 和 62.26%,原因在于这 2 个过程对热量的需求量较高。

表 1 生物质热解液化技术各过程输入和输出的物质及能量清单

Table 1 List of materials and energy input and output of biomass pyrolysis and liquefaction technology

过程 Process	输入 Input	输出 Output
秸秆收集与运输 Straw collection and transportation	湿秸秆 1.00 t;汽油 1.00 kg	湿秸秆 1.00 t
秸秆干燥 Straw drying	湿秸秆 1.00 t;热能 726.51 MJ	干燥秸秆 0.72 t;水汽 0.28 t
秸秆粉碎 Straw crushing	干燥秸秆 0.72 t;电能 43.37 MJ	秸秆颗粒 0.72 t
生物质热解 Biomass pyrolysis	秸秆颗粒 0.72 t;热能 1 254.10 MJ;电能 180.72 MJ	热解液 0.43 t;不凝气 0.14 t;热解残渣 0.14 t
热解残渣回用 Recycling of pyrolysis residue	不凝气 144.58 kg;空气 924.10 kg;热解残渣 0.14 t;电能 53.98 MJ;碱 0.07 t;水 0.72 t	尾气 1 068.68 kg;热能 1 980.72 MJ;净化材料 0.09 t;废水碱液 0.79 t

注：数据由合作企业河南百优福生物能源有限公司提供。表 2 同。

Note: The data are provided by the cooperative enterprise Henan Baiyoufu Bioenergy Co., Ltd.. Table 2 is the same.

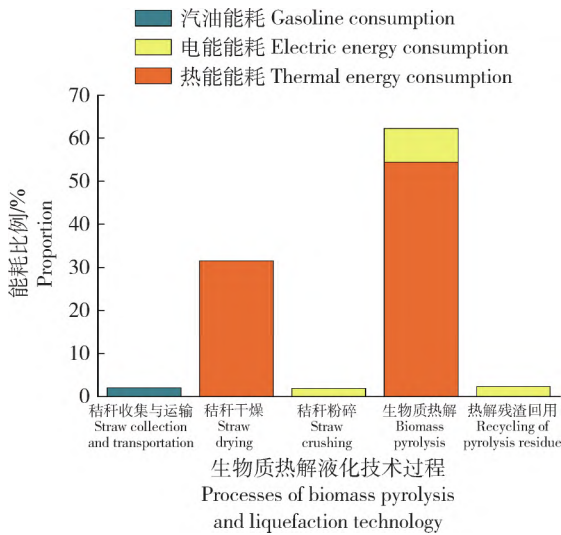


图 3 生物质热解液化技术各过程汽油、电能和热能消耗占总能耗的比例

Fig. 3 Proportion of gasoline, electric energy and thermal energy consumption in the total energy consumption of each process of biomass pyrolysis and liquefaction technology

为使能量效益最大化,本技术将热解过程中的不凝气燃烧,利用其燃烧产生的热能进行余热利用,剩余的能耗缺口由电能加热补充。这样既避免热解过程中副产物的资源浪费,又节省电能和工艺运行成本。使用余热供能的方式,整个技术运行仅需外加能耗 324.07 MJ,极大的节省了能源消耗。

由合作企业河南百优福生物能源有限公司实际

测量,本技术生产的热解液高位热值(HHV)为 15.00~18.00 MJ/kg,典型值为 16.00 MJ/kg。经计算,生物质热解液化技术的净能量为 6 619.93 MJ/t,能量产出投入比为 20.43,产出远大于投入能量,能源效益较高。

3.2 经济成本

生物质热解液化技术的总成本为 555.36 元/t,收入为 844.74 元/t,利润为 289.38 元/t(表 2)。

表 2 生物质热解液化技术各过程的成本及收入

Table 2 Cost and income of each process of biomass pyrolysis and liquefaction technology

类别 Category	项目 Project	金额/(元/t) Amount of money
成本 Cost	秸秆收集	250.00
	秸秆运输	50.00
	电耗成本	65.16
	循环水	0.36
	净化风	0.29
	设备维修费	8.75
	人工费用	43.38
	设备折旧费	18.22
	碱	113.40
	水	5.80
收入 Income	热解液	454.86
	烟气净化材料	389.88
利润 Profit		289.38



进一步分析生物质热解液化技术的经济成本结果见图4。其中碱的投入成本占总成本的比例为20.42%，主要用来处理生物质热解过程中产生的热解残渣。处理后得到的热解液和烟气净化材料可作营收。经计算并结合表2数据，销售利润率高达52.11%，碱的较高成本投入带来较高的收益。

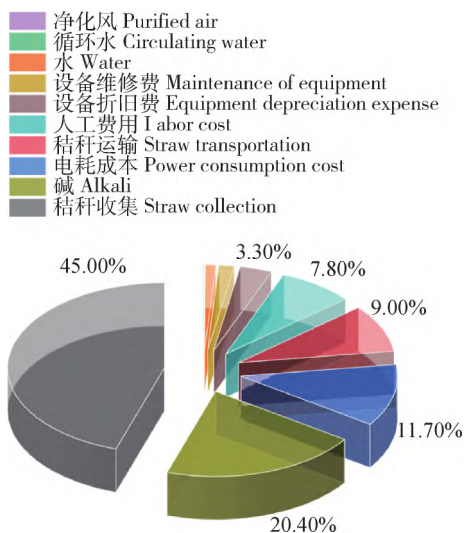


图4 生物质热解液化技术各过程不同种类成本占总成本的比例

Fig. 4 Proportion of different kinds of cost in the total cost of biomass pyrolysis and liquefaction technology

### 3.3 温室气体排放

生物质热解液化技术温室气体排放主要有3种途径(图5)。其中:汽油消耗的气体和电能消耗的气体排放信息源于CLCD数据库<sup>[26]</sup>;不凝气燃烧的气体组分包括CO<sub>2</sub>、H<sub>2</sub>O和空气,源于实际测量。生物质热解液化技术CO<sub>2</sub>当量排放为34.10 g/MJ,其中不凝气燃烧的CO<sub>2</sub>当量排放为26.00 g/MJ,占总CO<sub>2</sub>当量排放比例的76.25%;其次是电能消耗,CO<sub>2</sub>当量排放为8.00 g/MJ;汽油消耗造成的CO<sub>2</sub>当量排放仅为0.10 g/MJ。

进一步分析生物质热解液化技术的温室气体排放,其中秸秆干燥和生物质热解是部分或全部使用不凝气燃烧产生的热能(图6),因此这2个过程的CO<sub>2</sub>当量排放根据使用热能比例分配。可见生物质热解的温室气体排放量最高,为21.66 g/MJ;其次是秸秆干燥,CO<sub>2</sub>当量排放是9.54 g/MJ。

为探究生物质热解液化技术在减少温室气体排放方面的表现,可将其与其他技术的CO<sub>2</sub>当量排放作比较。有研究表明<sup>[27]</sup>,燃料乙醇带来的碳排放量

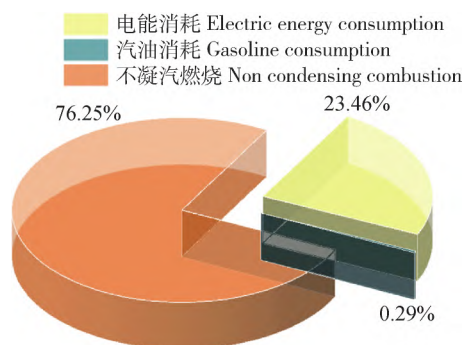


图5 电能、汽油和不凝气消耗CO<sub>2</sub>当量排放占总CO<sub>2</sub>当量排放的比例

Fig. 5 Proportion of CO<sub>2</sub> equivalent emissions of electric energy, gasoline and non condensing steam consumption in total CO<sub>2</sub> equivalent emissions

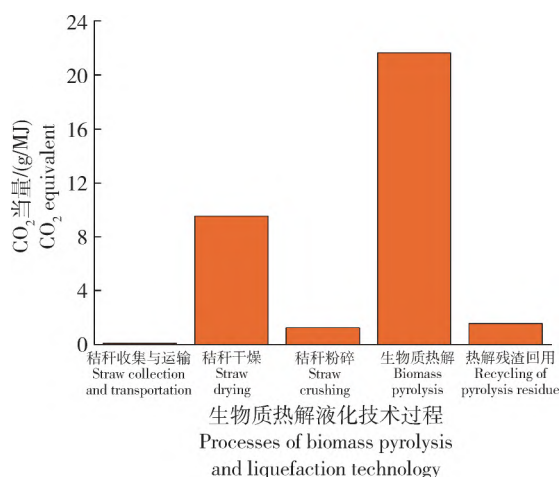


图6 生物质热解液化技术各过程的CO<sub>2</sub>当量排放

Fig. 6 CO<sub>2</sub> equivalent emissions from various processes of biomass pyrolysis and liquefaction technology

为34.00~56.00 g/MJ,生物柴油碳排放量为39.00~76.00 g/MJ。因此,生物质热解液化技术在本生命周期内的环境效益较高。

## 4 结论

本研究建立了秸秆类生物质生命周期模型,定量分析了生物质热解液化技术运行过程中能源投入、经济成本和温室气体排放情况,得出如下结论:

1) 生物质热解液化技术处理湿秸秆的净能量为6 619.93 MJ/t,能量产出投入比为20.43;各类能耗中循环余热占比为85.93%,体现了本技术绿色、可循环的可持续发展理念。

2) 生物质热解液化技术处理湿秸秆的总成本约

为 555.36 元/t, 总收入 844.74 元/t, 纯利润约为 289.38 元/t, 销售利润率达 52.11%, 经济效益较好。

3) 生物质热解液化技术的温室气体 CO<sub>2</sub> 当量排放为 34.10 g/MJ, 略低于其他技术, 具备较好的温室气体减排潜力。

生物质热解液化技术具备一定的能源、经济和环境效益, 是一种可行的废弃生物质再生技术, 适宜推广应用。

## 参考文献 References

- [1] 徐秀军. 中国将为世界经济注入更强劲动力[J]. 中国中小企业, 2021(3): 5  
Xu X J. China will inject more powerful power into the world economy [J]. *China Small & Medium Enterprises*, 2021(3): 5 (in Chinese)
- [2] 解振华. 坚持积极应对气候变化战略定力继续做全球生态文明建设的重要参与者、贡献者和引领者: 纪念《巴黎协定》达成五周年[J]. 环境与可持续发展, 2021, 46(1): 3-10  
Xie Z H. Adhere to the strategic determination to actively respond to climate change and continue to be an important participant, contributor and leader in the construction of global ecological civilization; Commemorating the fifth anniversary of The Paris Agreement [J]. *Environment and Sustainable Development*, 2021, 46(1): 3-10 (in Chinese)
- [3] 中华人民共和国财政部. 关于 2020 年中央和地方预算执行情况与 2021 年中央和地方预算草案的报告; 2021 年 3 月 5 日在第十三届全国人民代表大会第四次会议上[N]. 人民日报, 2021-03-14(2)  
Ministry of Finance of the People's Republic of China. Report on the implementation of the central and local budgets in 2020 and the draft central and local budgets in 2021 [N]. *People's Daily*, 2021-03-14(2) (in Chinese)
- [4] 刘军会, 李虎军, 邓方钊, 于秉艺. 为实现“碳达峰、碳中和”贡献力量在服务乡村振兴中体现担当: 访国网河南经研院能源互联网经济研究中心团队[J]. 河南电力, 2021(3): 14-17, 5  
Liu J H, Li H J, Deng F Z, Yu B Y. To achieve “carbon peak, carbon neutral” contribution, embody the responsibility in serving rural revitalization; Interview with the team of Energy Internet Economy Research Center of Henan Economic Research Institute of state grid[J]. *Henan Electric Power*, 2021(3): 14-17, 5 (in Chinese)
- [5] 曹磊. 秸秆转化为生物质能源的利用策略研究[J]. 农业技术与装备, 2020(11): 91-92  
Cao L. Study on utilization strategy of straw transforming into biomass energy[J]. *Agricultural Technology & Equipment*, 2020(11): 91-92 (in Chinese)
- [6] Dhawane S H, Al-Sakkari E G, Kumar T, Halder G. Comprehensive elucidation of the apparent kinetics and mass transfer resistances for biodiesel production via in-house developed carbonaceous catalyst[J]. *Chemical Engineering Research and Design*, 2021, 165: 192-206
- [7] 戴晓虎, 陈淑娴, 蔡辰, 戴翎翎, 华煜. 秸秆主流能源化技术研究与经济性分析[J]. 环境工程, 2021, 39(1): 1-17  
Dai X H, Chen S X, Cai C, Dai L L, Hua Y. Research and economic analysis of mainstream energy technologies for straw[J]. *Environmental Engineering*, 2021, 39(1): 1-17 (in Chinese)
- [8] 高婷婷. 生物质沼气发电预制舱式变电站设计方案与应用[J]. 科技经济导刊, 2020, 28(17): 77, 37  
Gao T T. Design scheme and application of prefabricated cabin type substation for biomass biogas power generation[J]. *Technology and Economic Guide*, 2020, 28(17): 77, 37 (in Chinese)
- [9] 马国杰, 郭鹏坤, 常春. 生物质厌氧发酵制氢技术研究进展[J]. 现代化工, 2020, 40(7): 45-49, 54  
Ma G J, Guo P K, Chang C. Research progress on hydrogen production by anaerobic fermentation of biomass[J]. *Modern Chemical Industry*, 2020, 40(7): 45-49, 54 (in Chinese)
- [10] 张甲, 席静, 胡久平. 新能源技术的研究综述[J]. 山东化工, 2018, 47(19): 75, 83  
Zhang J, Xi J, Hu J P. Research summary on new energy technology [J]. *Shandong Chemical Industry*, 2018, 47(19): 75, 83 (in Chinese)
- [11] Applied pyrolysis; researchers from national renewable energy laboratory describe findings in applied pyrolysis (chemical and physical characterization of aerosols from fast pyrolysis of biomass)[J]. *Science Letter*, 2019
- [12] 杨绍旗. 离子液体中秸秆预处理及木质素衍生物加氢脱氧研究[D]. 北京: 中国科学院过程工程研究所, 2019  
Yang S Q. Corn straw pretreatment and hydrodeoxygenation of lignin-derived compounds in ionic liquids system [D]. Beijing: Institute of Process Engineering, Chinese Academy of Sciences, 2019 (in Chinese)
- [13] 向梅. 多级孔 ETS-10 沸石的合成及其在生物质加氢反应中的催化性能研究[D]. 南京: 东南大学, 2019  
Xiang M. Synthesis of hierarchical zeolite ETS-10 and its catalytic performance in the biomass hydrogenation reactions [D]. Nanjing: Southeast University, 2019 (in Chinese)
- [14] Tran Q K, Han S J, Ly H V, Kim S S, Kim J. Hydrodeoxygenation of a bio-oil model compound derived from woody biomass using spray-pyrolysis-derived spherical  $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub> catalysts [J]. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 2020, 92: 243-251
- [15] 刘蔚, 毛开伟, 张廷军, 马宗虎, 傅国志, 王雯. 生命周期评价体系的开发及其在生物质资源化领域的应用进展[C]//《环境工程》2019 年全国学术年会论文集(中册). 北京: 环境工程编辑部, 2019: 384-388  
LIU W, MAO K W, ZHANG T J, MA Z H, FU G Z, WANG W. Development of life cycle assessment and application in biomass resource recovery[C] // In: *Proceedings of 2019 National Academic Annual Conference of Environmental Engineering (Volume II)*. Beijing: Editorial Department of Environmental Engineering, 2019: 384-388 (in Chinese)
- [16] 魏丽丝. 生命周期理论文献综述[J]. 合作经济与科技, 2014, (24): 155-156  
Wei L S. Literature review of life cycle theory [J]. *CO-Operative Economy & Science*, 2014(24): 155-156 (in Chinese)
- [17] 周祖鹏, 林永发, 唐玉华. 生命周期评价方法研究的最新进展及其分析[J]. 制造业自动化, 2014, 36(23): 8-9, 16  
Zhou Z P, Lin Y F, Tang Y H. New research developments and their analysis of life cycle assessment research [J]. *Manufacturing Automation*, 2014, 36(23): 8-9, 16 (in Chinese)
- [18] 王红彦. 基于 LCA 的秸秆沼气和秸秆热解气化工程环境影响评价[D]. 北京: 中国农业科学院, 2018  
Wang H Y. Environmental impact evaluation of straw biogas and straw gasification projects based on LCA [D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2018 (in Chinese)
- [19] 张艳丽, 高新星, 王爱华, 赵立欣. 我国生物质燃料乙醇示范工程的全生命周期评价[J]. 可再生能源, 2009, 27(6): 63-68  
Zhang Y L, Gao X X, Wang A H, Zhao L X. Life-cycle assessment for Chinese fuel ethanol demonstration projects [J]. *Renewable Energy Resources*, 2009, 27(6): 63-68 (in Chinese)
- [20] 郭金凤, 王树荣, 尹倩倩, 朱玲君, 骆仲决. 生物质经甲醇法和费托法制取汽油的生命周期评价[J]. 太阳能学报, 2015, 36(9): 2052-2058  
Guo J F, Wang S R, Yin Q Q, Zhu L J, Luo Z Y. Life cycle assessment comparison of biomass to gasoline through MTG and STG methods[J]. *Acta Energiae Solaris Sinica*, 2015, 36(9): 2052-2058 (in Chinese)
- [21] 王长波, 张力小, 庞明月. 生命周期评价方法研究综述: 兼论混合生命周期评价的发展与应用[J]. 自然资源学报, 2015, 30(7): 1232-1242  
Wang C B, Zhang L X, Pang M Y. A review on hybrid life cycle

- assessment: Development and application [J]. *Journal of Natural Resources*, 2015, 30(07): 1232-1242 (in Chinese)
- [22] 徐国锋. 生物质热解技术制备生物油研究现状及展望[J]. 云南化工, 2019, 46(4): 148-149
- Xu G F. Research review and future on biomass pyrolysis for bio-oil[J]. *Yunnan Chemical Technology*, 2019, 46(4): 148-149 (in Chinese)
- [23] 孟光范, 孙来芝, 陈雷, 赵保峰, 张晓东. 生物质催化热解技术研究进展[J]. 山东科学, 2016, 29(4): 50-54, 67
- Meng G F, Sun L Z, Chen L, Zhao B F, Zhang X D. Research advances of biomass catalytic pyrolysis[J]. *Shandong Science*, 2016, 29(4): 50-54, 67 (in Chinese)
- [24] 李海燕. 基于理论的生物质热解制取高品位液体燃料综合性能评价[D]. 南京: 东南大学, 2015
- Li H Y. Integrated performance evaluation of liquid fuel production from biomass pyrolysis based on exergy theory [D]. Nanjing: Southeast University, 2015 (in Chinese)
- [25] 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)
- [26] 亿科环境科技. 中国生命周期评价基础数据库 CLCD[EB/OL]. <https://www.ike-global.com/#/products-2/chinese-lca-database-clcd>
- Integrated Knowledge for our Enviroment. Chinese Life Cycle Database [EB/OL]. <https://www.ike-global.com/#/products-2/chinese-lca-database-clcd> (in Chinese)
- [27] Searchinger T D, Hamburg S P, Melillo J, Chameides W, Havlik P, Kammen D M, Likens G E, Lubowski R N, Obersteiner M, Oppenheimer M, Philip Robertson G, Schlesinger W H, Tilman D G. Fixing a critical climate accounting error[J]. *Science*, 2009, 326(5952): 527-528

责任编辑: 刘迎春



第一作者简介: 沈峥,男,同济大学新农村发展研究院研究员,博士生导师,现任同济大学农业环境和生态研究所所长。主要从事农业废弃物资源化研究及其相关设备开发。先后承担多项国家重点研发子课题、国家自然科学基金、省部级及企业合作等项目,主持上海市科委崇明生态岛建设科技专项课题“设施农业生产水资源和废弃物资源化利用技术研究”和国家重点研发计划项目子课题“粪便快速处理与资源化关键技术研发”。相关研究成果在 *Chemsuschem*, *Sustainable Energy & Fuels*, *Applied Catalysis A: General*, *Green Chemistry* 等学术期刊上发表;授权中国发明专利 11 项和美国发明专利 3 项;2019 年获上海市技术发明一等奖;2020 年获上海市科技进步一等奖和中国环境保护产业协会环境技术进步一等奖。



通讯作者简介: 司慧萍,女,工学博士,同济大学副教授。主要研究方向为设施农业及农业环境工程装备。主持上海市科委“极端环境湿温控制系统能力提升与示范项目”课题和“瀛东生态村特色经济水生动物繁殖设施化工程设计”;主要参与国家科技支撑项目“优质种苗工厂化生产关键技术与示范”中穴盘育苗精密播种机设计及研制;国家科技支撑项目“低碳农业园区建设关键技术集成应用示范研究”中立体栽培装置设计;上海市科委项目“省力化温室苗床内部物流系统及其控制技术研究”中苗床机械系统设计及研制;上海市科委项目“可再生能源在温室上的应用优化研究与示范”中能源优化配置设计。以第一或通讯作者发表论文 9 篇,其中 EI 收录 6 篇,SCI 收录 1 篇,其他论文 28 篇;申请发明专利 22 项,其中第一负责人申请发明专利 9 项,授权 6 项。