



环境工程

Environmental Engineering

ISSN 1000-8942, CN 11-2097/X

## 《环境工程》网络首发论文

题目： 秸秆能源化利用技术评价方法探究与优化  
作者： 刘桐利，赵立欣，孟海波，姚宗路，张喜瑞，霍丽丽  
网络首发日期： 2020-06-05  
引用格式： 刘桐利，赵立欣，孟海波，姚宗路，张喜瑞，霍丽丽. 秸秆能源化利用技术评价方法探究与优化. 环境工程.  
<http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2097.X.20200605.1204.002.html>



**网络首发：**在编辑部工作流程中，稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定，且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式（包括网络呈现版式）排版后的稿件，可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定；学术研究成果具有创新性、科学性和先进性，符合编辑部对刊文的录用要求，不存在学术不端行为及其他侵权行为；稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准，正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性，录用定稿一经发布，不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容，只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

**出版确认：**纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊（光盘版）》电子杂志社有限公司签约，在《中国学术期刊（网络版）》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版，以单篇或整期出版形式，在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊（网络版）》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物（ISSN 2096-4188，CN 11-6037/Z），所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

# 秸秆能源化利用技术评价方法探究与优化

刘桐利<sup>1</sup> 赵立欣<sup>2</sup> 孟海波<sup>2</sup> 姚宗路<sup>3</sup> 张喜瑞<sup>1</sup> 霍丽丽<sup>2\*</sup>

(1.海南大学机电工程学院,海口 570228; 2.农业农村部规划设计研究院,农业农村部农业废弃物资源化利用重点实验室,北京 100125; 3.中国农业科学院,环境与可持续发展研究所,北京 100084)

**摘要:** 生物质能源是未来能源结构的重要组成部分,而农作物秸秆作为生物质能资源的主要来源之一,其能源化利用技术更应被探索并加以利用。为科学评价秸秆能源化利用技术的资源利用、技术适用性、经济效益、环境效益和社会效益,本文以现有文献为基础,对常用于秸秆能源化利用技术的评价方法的研究现状进行了综述,分析各种技术评价方法的优缺点、总结比较了不同方法的评价范围,提出适合秸秆能源化利用技术的评价方法,即全生命周期评价法与层次分析法相结合的综合评价方法。根据现有文献建立了评价指标体系,为后续秸秆能源化技术利用模式的科学评价奠定基础。

**关键词:** 秸秆; 能源化利用; 评价方法; 全生命周期评价法; 层次分析法; 评价指标; 指标体系

## RESEARCH AND OPTIMIZATION OF EVALUATION METHODS FOR STRAW ENERGY UTILIZATION TECHNOLOGY

Liu Tongli<sup>1</sup> Zhao Lixin<sup>2</sup> Meng Haibo<sup>2</sup> Yao Zonglu<sup>3</sup> Zhang Xirui<sup>1</sup> Huo Lili<sup>2\*</sup>

(1. College of Electrical and Mechanical Engineering, Hainan University, Haikou 570228, China; 2. Key Laboratory of Energy Resource Utilization from Agricultural Residues, Ministry of Agriculture, Chinese Academy of Agricultural Engineering, Beijing 100125, China; 3. Institute of Environment and Sustainable Development in Agriculture, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100084, China)

**Abstract:** Biomass energy is an important part of energy structure in the future, and crop straw is one of the main sources of biomass energy resources, thus its energy utilization technology should be explored and utilized. In order to evaluate the resource utilization, application benefits, economic benefits, environmental benefits and social benefits of straw energy utilization technology. Based on the existing literature, this paper reviews the research status of evaluation methods commonly used in straw energy utilization technology, and analyzes the advantages and disadvantages of various technical evaluation methods, summarizes the evaluation scope of different methods, and proposes the method suitable for straw energy utilization technology, that is, the comprehensive evaluation method combining life cycle assessment and analytic hierarchy process. According to the existing literature reference, the evaluation index system is established, which lays a foundation for the evaluation of the utilization model of straw energy utilization technology.

**Keywords:** straw; energy utilization; evaluation method; life cycle assessment; analytic hierarchy process; evaluation index; indicator system

## 0 引言

我国秸秆资源丰富,2017年可收集资源量约8.4亿吨,综合利用率超过83%,其中能源化占13%<sup>[1]</sup>。目前,秸秆能源化技术主要有直燃发电、成型燃料、热解气化和秸秆沼气等。

规模化秸秆能源化利用技术,只依靠单一产品或单一应用模式难以获得良好的效益,因其转化效率低、成本高,难以维持工程的稳定运行。秸秆直燃发电技术效率不高,如山东单县生物质发电工程项目造价高,能源利用效率低<sup>[2]</sup>;成型燃料企业多以中小企业为主,其规模化利用和市场认可程度有待提升<sup>[3]</sup>;秸秆热解气化燃气品质不高,稳定运行工程少;秸秆沼气稳定运营的工程数量较少<sup>[4]</sup>。秸秆能源化利用途径多种,相关研究大多选取单一评价方法评价单项技术,少有以科学计量过程中的能耗<sup>[5]</sup>和环境排放<sup>[6]</sup>以及评估产生的能源产品<sup>[7]</sup>,或选取综合方法科学评价2项及以上多种技术,优选出最佳方案。由于不同秸秆能源化利用技术重要指标不同<sup>[8]</sup>,缺乏统一的结构优化、层次清晰、数量合理的包含各类技术重要指标的评价体系。缺乏从原料收集到能源使用全过程的投入、损耗和排放等的科学评价和比选,以达到针对不同地域气候条件、农业资源现状、当地经济状况的适宜性,提出最佳能源化应用模式目的。

本文通过综述秸秆能源化利用技术评价方法及系统评价指标,研究提出适宜直燃发电、成型燃料、热解气化和秸秆沼气多种秸秆能源化利用通用性评价方法,从技术、资源、经济、社会、环境等方面,研究建立秸秆能源化利用综合评价指标体系,为秸秆能源化利用技术的应用提供科学评价方法。

## 1 典型技术评价方法

相关文献调研,秸秆能源化利用技术的现有技术评价方法种类繁多,根据技术的不同评价方法的选取也不同,常用的评价方法有层次分析法、模糊评价法、全生命周期评价法、能值分析法等。本文综述了几种主要的评价方法,分析评价原理、秸秆能源化利用评价过程及效果,并对不同评价方法进行比较和分析。

### 1.1 单一评价方法

#### 1.1.1 层次分析法

层次分析法通过将评价系统问题划分为多个层次,运用线性代数的方法,建立层次结构模型,

构造判断矩阵,对其进行矩阵计算,得到不同指标的权重分配,从而得出不同层次的排序结果,适用于难以完全定量分析的问题。

该方法通常是对不同方案或同一方案中不同层次重要次序进行遴选。覃静<sup>[9]</sup>选取3个层次15个指标综合评价农村沼气新技术,通过指标权重和指标分值计算出农村沼气新技术的综合评分为3.42;李伟<sup>[10]</sup>建立了4个层次8个指标评价研究河南省10种玉米秸秆气化集中供气模式,得出优先考虑使用的技术模式是以热解气化为核心的分段—秸秆机械收获—投料式固定床气化炉模式和以生物气化为核心的分段秸秆—机械收获—一体化两相式发酵模式。

#### 1.1.2 能值分析法

能值分析法是以美国生态学家Odum为首的科学家所创立,该方法采用一致的能值标准,以统一的能值标准为量纲,把系统中不同种类、不可比较的能量转化成同一标准的能值来衡量和分析系统的功能特征和生态、经济效益。

该方法侧重于分析工程系统的生态经济性、环境影响和可持续性等,Ciotola等<sup>[11]</sup>对台湾小型塞流式厌氧沼气池处理畜禽粪便的可持续性和环境影响进行评价研究,并分别与沼气生产、沼气发电进行了对比,分析结果表明沼气用于发电会降低系统可持续性;王红彦等<sup>[12]</sup>研究河北省沧州市青县耿官屯秸秆沼气集中供气工程3种沼肥不同利用方式的生态经济、可持续发展和环境相关9个指标,发现随着沼肥加工利用水平的提高,沼肥的能值转化率随之下降。刘华财等<sup>[13]</sup>分析计算了1MW气化发电、5.5MW气化发电和25MW直燃发电技术的能值收益率和能值净收益,得出5.5MW气化发电可持续性最好。

#### 1.1.3 全生命周期评价法

全生命周期评价的理论基础是能量守恒原理和物质不灭定律,对一个产品系统的生命周期中输入、输出及其潜在环境影响的汇编和评价。其研究的目的在于评估产品对能源和物质利用以及排放的废弃物对环境造成的现实影响和潜在影响,评估产品生产和资源消耗、环境质量保护的协调性。

国外相关研究多聚焦在秸秆能源化利用技术带来的环境影响,如Hijazi等<sup>[14]</sup>对欧洲的15个沼气工程系统进行了全生命周期评估研究,结果表明各沼气工程的温室气体排放都比常规化石或畜禽养殖系统低;Soam等<sup>[15]</sup>对印度秸秆还田、秸秆饲料、秸秆沼气和秸秆发电4种利用方式进行全生命

周期评价,结果表明秸秆沼气和秸秆发电在全球变暖潜力、光化学烟雾潜力和酸化潜力方面具有更高的环境效益。

国内研究重点侧重于秸秆能源化利用技术与常规火电相比的节能减排等环境影响研究,冯超等<sup>[16]</sup>和王明新等<sup>[17]</sup>分别对 6 MW 秸秆直燃发电项目、户用沼气系统进行评价研究,结果均表明各技术与常规火电相比极大改善了环境影响。此外,一些学者建立模型对技术评价进行验证分析和比较,刘黎娜<sup>[18]</sup>建立了可再生能源建设项目生命周期评价方法模型,验证分析生物质直燃发电系统的可行性;霍丽丽等<sup>[19]</sup>建立秸秆类生物质气炭联产全生命周期 3E 模型,研究得出横流移动床生物质气炭联产的净能量为 6542.2MJ/t,能量产出投入比为 4.5,而竖流移动床生物质热解多联产技术经济效益较高,其纯利润为 229.8 元/t。

#### 1.1.4 其它分析法

粗糙集理论法运用集合论中的等价关系对不确定的问题进行划分。孟海波等<sup>[20]</sup>基于粗糙集理论提出了综合评价模型,综合评价了生物质固体成型燃料技术,得到燃料耐久性是最为重要的评价指标,并且机械活塞成型燃料技术是最优选的技术。

技术经济性评价研究方面,田宜水<sup>[21]</sup>等提出了户均用能成本的概念和计算方法进行农村生物质能不同技术经济评价,农村户用沼气技术的经济性最好,随着农村社会经济的发展,认为固体成型燃料技术将逐渐占主导地位。王志伟<sup>[22]</sup>等通过净现值、内部收益率和投资回收期三个技术经济性评价指标进行了农作物秸秆成型系统的经济效益分析和其敏感性分析,得出影响系统经济性的最主要因素为秸秆成型燃料价格。

### 1.2 综合评价

#### 1.2.1 全生命周期评价法和能值分析相结合

全生命周期评价法和能值分析法相结合主要用于生物质能源生产系统能量投入产出分析、能源

经济效益分析、生物质能节能减排研究等。王红彦<sup>[23]</sup>提出基于生命周期评价的能值分析方法,评价研究了河南省安阳县秸秆沼气集中供气工程的环境影响,结果表明主要的环境影响因素是温室气体排放。李欣等<sup>[24]</sup>对比分析了秸秆直燃发电与秸秆燃料乙醇的能值消耗、环境影响和经济效益,发现秸秆直燃发电系统的综合效益优于秸秆燃料乙醇。

#### 1.2.2 全生命周期评价法和层次分析法相结合

全生命周期评价法和层次分析法相结合是从全生命周期评价的角度将定性和定量指标与多个计量单位相结合进行评价研究,相关研究较少,且聚焦于多种技术的全生命周期综合评价和优选排序。Lijó等<sup>[25]</sup>研究分析了塞浦路斯三种牲畜粪便管理方案的可持续性,得出了最佳方案以及不同维度指标下的可代替选择的方案。Wang 等<sup>[26]</sup>研究分析了七种生物质能源技术,并进行了基于环境、技术、经济和社会不同方面的优选排序。

### 1.3 评价方法对比分析

根据文献调研总结了评价方法优缺点、评价范围和评价指标等,详见表 1。

各评价方法大多将研究对象数字化,根据矩阵等处理得出定量的数值,通过数值比较确定具体评价指标的权重,或者根据调研的具体数值进行分析对比。其中层次分析法的相关理论较为成熟,能够多层次、多指标加权定量分析,可与其他评价方法结合进行综合评价。全生命周期评价法理论成熟,侧重于技术整个过程的评价,可对其能量投入产出、成本与效益、环境影响等指标进行定量数据分析。

能值分析法多注重于能值产出率和综合可持续性指标,缺少对社会效益、适宜性等指标的评价,并且在应用范围内计算量普遍较大;粗糙集理论对数据量没有太高的要求,但缺少对比分析的准确度;技术经济性的相关研究多注重成本与投资回收期,评价结果较为单一。

表 1 评价方法比较

Table 1 Comparison of evaluation methods

方法	优点	缺点	应用领域	评价指标
层次分析法	①将研究对象数字化、模型化,进行多层次、多指标进行定性和定量分析;②不需要大量的定量数据信息。	①样本数量大时易产生误差;②计算量大。	安全科学和环境科学等领域	经济效益、社会效益、生态效益、技术适宜性
能值分析法	太阳能值是统一的衡量标准,系统和全面地分析输入系统的物质等。	不能衡量未进入的太阳能等自然资源能。	自然资源、农业系统领域	能值产出率、能值投资率、环境负载率等



全生命周期评价	①全过程系统评价；②结果量化，评价结果一般用数值表示；③方法标准化；④可重复性强。	①时间、人力、物力、经费消耗高；②对于数据的要求较高。	工业产品、农业系统、能源系统、环境政策等领域	环境效益、能量投入产出
粗糙集理论	①数据的处理较为简单；②基于数据驱动，可将冗余的指标进行剔除，评价较为客观。		工业控制、农业科学、环境科学、社会科学等领域	评价对象的重要指标

## 2 秸秆能源化利用综合评价方法

秸秆能源化利用技术产业链条长，从秸秆收储运开始，到秸秆在工作车间进行能源转化，以及最后能源产品的应用。不同的技术原理得出的能源产品差别较大，直燃发电、成型燃料、热解气化和沼气工程的能源产品包括电、成型燃料、热解气、生物炭、沼气、沼液和沼渣等，可用于供电、供气、炊事、供暖等。因此评价方法的选择应既能监测秸秆能源化技术产业链条的各项投入和产出，也能建立涵括各项技术特点的资源、技术、经济、环境和社会等方面的指标体系以遴选技术优劣。

本研究选用全生命周期评价和层次分析法相结合的综合评价方法，能够实现科学评估秸秆能源化利用技术全过程的资源、能量、经济性和社会性的投入和产出以及环境污染物的排放，建立适用于直燃发电、成型燃料、热解气化和秸秆沼气等4种

秸秆能源化利用较为成熟、可规模化应用的技术的指标体系，以对适宜不同区域的可持续性较好的秸秆能源化利用技术进行优选排序。

### 2.1 评价方法模型建立

全生命周期评价法和层次分析法相结合的评价方法模型示意图如图1所示，其中包含七个步骤。

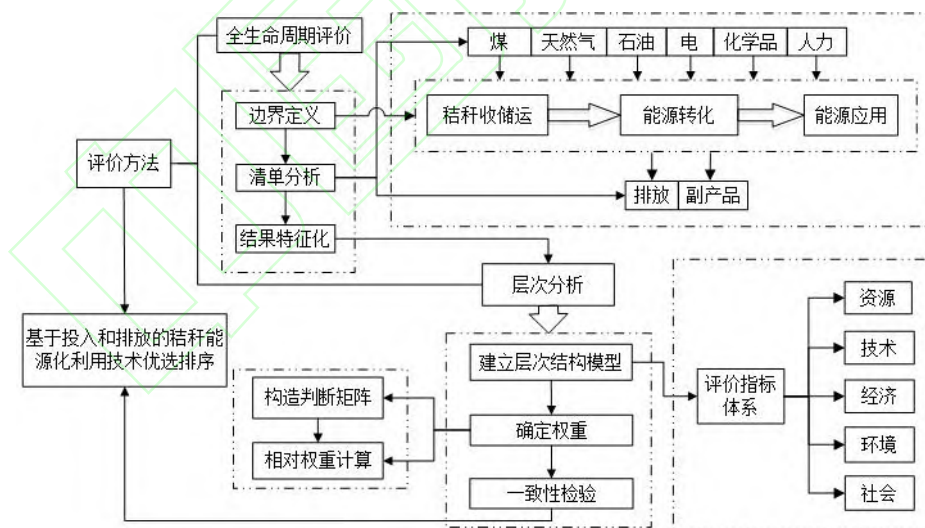


图1 评价方法模型示意图

Fig.1 The evaluation method model diagram

第一步是边界定义，即是确定评价目标和范围，确定要纳入到评价系统的单元过程，包括秸秆收储运、能源转化、能源应用等全过程输入的物质和能源，以及输出的能源产品、排放物和副产品。

第二步是清单分析，即基于全过程能量、经济投入产出，以及环境污染物减排的清单分析，通过

收集的数据建立相关数据库，量化系统各个过程单元的输入和输出。

第三步是得出清单分析的计算结果，通过对清单分析的项目分类、特征化和加权赋值，对各项指标进行定性定量的评价分析。各项指标类型标准化计算公式为：

$$NEI_j = \frac{EI_j}{NR_j} \quad (1)$$

式中： $NR_j$ 为第  $j$  中指标类型的标准化基准； $NEI_j$ 为第  $j$  中指标类型指数的标准化结果； $EI_j$ 为第  $j$  中指标类型指数。

第四步是建立层次结构模型。把秸秆能源化利用技术研究的评价系统从宏观上划分为多个一级指标，即  $U = \{U_1, U_2, \dots, U_n\}$ ；按照相同的原则，分别将若干个一级指标细分为若干个二级指标  $u_1, u_2, \dots, u_m$ 。

第五步是构造判断矩阵。根据层次结构所确定的上下层因素之间的隶属关系，用专家调查法将下一层制约因素对上一层准则因素的重要程度进行两两比较<sup>[27]</sup>，并且研究发现引用数字 1~9 及其倒数作为重要度  $a_{ij}$  的取值较为合理。判断矩阵  $A$  为：

$$A = \begin{pmatrix} a_{11} & \dots & a_{1j} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{i1} & \dots & a_{ij} \end{pmatrix}$$

第六步是基于同一准则下确定元素的相对权重。计算判断矩阵  $A$  最大特征根值  $\lambda_{\max}$  并求出其对应的特征向量，即

$$AW = \lambda_{\max} W \quad (2)$$

$$a_i = \sqrt[i]{\prod_j^n a_{ij}} \quad (3)$$

$$\omega_i = \frac{a_i}{\sum_{i=1}^n a_i} \quad (4)$$

$$\lambda_{\max} = \sum_{i=1}^n \frac{(A\omega)_i}{n\omega_i} \quad (5)$$

其中， $a_{ij}$ 为判断矩阵元素， $\omega_i$ 为相对权重。特征向量  $W$  即为相应的  $n$  个制约因素的相对权重。

第七步是一致性检验。计算判断矩阵的权重时需要确保判断矩阵的偏差在允许的范围，就需要检验判断矩阵的一致性。引入度量判断矩阵偏离程度的一致性指标  $CI$ ，计算一致性比例  $CR$ 。

$$CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} \quad (6)$$

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad (7)$$

当矩阵的阶数大于 2 时，只要  $CR \leq 0.10$ ，则认为这个判断矩阵的一致性是可以接受的。

从上述七个步骤可以看出，第一步到第三步采用全生命周期评价原理，分别将 4 项秸秆能源化利用技术作为研究对象，从资源、技术、经济、环境和社会层面考虑秸秆从收集到应用全过程中系统的投入和排放，通过数学化方法得出清单分析结果；第四步到第七步则采用层次分析法的原理，基于 4 项秸秆能源化利用技术建立通用的层次结构模型，根据清单分析结果对秸秆能源化利用技术进行优选排序，并对评价结果进行一致性检测，验证评价结果的可行性。

## 2.2 评价指标体系建立

表 2 秸秆能源化利用技术评价指标体系

Table 2 Straw energy technology evaluation index system

目标层 A	准则层 B	指标层 C	正负向	单位	
秸秆能源化利用技术评价(A)	资源 B1	10km 运输半径内秸秆收集便捷程度	C1	+	%
		10km 运输半径内秸秆可利用量	C2	+	吨
	技术 B2	每吨秸秆能源转化率	C3	+	%
		每吨秸秆能量产投比	C4	+	%
		单位投资	C5	-	万元
	经济 B3	投资回收期	C6	-	年
		每吨秸秆能源转化与利用总成本	C7	-	元/吨
		每吨秸秆能源转化与利用总收益	C8	+	元/吨
	环境 B4	每吨秸秆转化能源价格与标准煤单价比	C9	-	
		每吨秸秆温室气体的减排量	C10	+	kg
		每吨秸秆氮氧化物的减排量	C11	+	kg
		每吨秸秆二氧化硫的减排量	C12	+	kg
			每吨秸秆颗粒物的减排量	C13	+

社会	B5	每吨秸秆投资额增加就业岗位数	C14	+	人/吨
		农民年均收入增长	C15	+	元/人

注：正负向中正向表示指标越大越好，负向表示指标越小越好。

建立科学客观的秸秆能源化利用评价指标体系，可以保证评价结果的正确性和具有应用意义<sup>[28]</sup>。基于简约性、独立性、代表性、可比性、可行性、系统性和规范性等评价指标选取原则，应当选取主要影响秸秆能源化利用技术发展的因素作为评价指标，即分析秸秆能源转化各种技术途径的何种因素会对秸秆能源化利用技术的发展产生影响。采用专家调研法来确定指标，根据评价目标及评价对象特征，列出一系列评价指标，分别征询专家的评价意见，然后进行统计处理，确定最终的评价指标体系。

众多学者根据层次分析建立了相关指标体系，多在经济、社会、技术适宜性等方面进行相关研究。此外，在可持续发展方面，有资源<sup>[29]</sup>和生态健康<sup>[30]</sup>等研究；在方案优选方面，聚焦在功能性<sup>[31]</sup>；在区域适宜性方面，有气候温度<sup>[32]</sup>、原料<sup>[33]</sup>和能源状况<sup>[34]</sup>等研究。而聚焦在环境影响和生态环境时，指标涵盖卫生环境<sup>[35]</sup>和大气环境<sup>[36]</sup>等。全生命周期评价方法的评价指标多聚焦在清单分析的内容和环境影响的评价，诸如排放物 CO<sub>2</sub>、SO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub>、NO<sub>x</sub>、CO 等。

秸秆能源化技术评价指标体系如表 2 所示，一共分为三个层次：第一层（A）反应秸秆能源化利用技术评价指标总体情况；第二层（B）从资源（B1）、技术（B2）、经济（B3）、环境（B4）、社会（B5）

5 个层面分析秸秆能源化利用技术；第三层为具体评价指标内容。

### 3 结论

1) 通过文献调研综述了秸秆能源化利用技术评价方法，并分析和总结了评价方法的优缺点和适用情况，提出采用全生命周期评价法和层次分析法结合的综合评价方法。用全生命周期的概念对秸秆能源化利用技术进行边界定义和清单分析，基于层次分析法构建指标体系对清单分析结果进行权重排序，得出适宜不同区域的技术优选排序，为未来相关技术评价发展与科学决策研究提供参考依据。

2) 研究建立了秸秆能源化利用技术综合评价指标体系，包括资源、技术、经济、环境和社会等 5 层准则 15 个评价指标，为后续的秸秆能源化技术科学客观评价提供依据。

3) 本文仅提出了秸秆能源化利用适宜的综合评价方法和评价指标体系，后续还需要对各指标赋予权重，并选取具体实施案例进行分析评价和验证，为秸秆能源化利用技术的选取提供决策依据。

## 参考文献

- [1] 石祖梁. 中国秸秆资源化利用现状及对策建议[J]. 世界环境, 2018 (5): 16—18.
- [2] 李廉明, 余春江, 柏继松. 中国秸秆直燃发电技术现状[J]. 化工进展, 2010, 29 (S1): 84—90.
- [3] 郭凯, 王秦. 江苏省生物质成型燃料发展现状概述[J]. 科技经济导刊, 2017 (6): 60—62.
- [4] 陈羚, 赵立欣, 董保成, 等. 我国秸秆沼气工程发展现状与趋势[J]. 可再生能源, 2010, 28 (3): 145—148.
- [5] 梁伟, 许金花. 木质成型颗粒的能量和能值分析[J]. 可再生能源, 2012, 30 (2): 115—119.
- [6] 霍丽丽, 田宜水, 孟海波, 等. 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.
- [7] 朱文. 江苏省秸秆能源化利用潜力和利用方式评价研究[D]. 南京林业大学, 2016.
- [8] 李可心. 生物质发电产业的区域适宜性评价及能源环境经济效益实证研究[D]. 吉林大学, 2019.
- [9] 覃静. 农村沼气新技术研究及综合评价[D]. 南宁: 广西大学, 2012.
- [10] 李伟. 玉米秸秆气化集中供气技术分析 with 集成模式研究[D]. 郑州: 河南农业大学, 2015.
- [11] Richard J. Ciotola, Stephanie Lansing, Jay F. Martin. Emergy analysis of biogas production and electricity generation from small-scale agricultural digesters[J]. Ecological Engineering, 2011, 37: 1681—1691.
- [12] 王红彦, 王亚静, 王道龙, 等. 基于沼肥不同利用情景的秸秆沼气工程能值分析——以河北省青县耿官屯为例[J]. 生态学杂志, 2016, 35 (10): 2814—2823.
- [13] 刘华财, 阴秀丽, 吴创之. 秸秆发电系统能值分析[J]. 农业机械学报, 2011, 42 (11): 93—98+123.
- [14] Hijazi O, Munro S, Zerhusen B, et al. Review of life cycle assessment for biogas production in Europe[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2016, (54): 1291—1300.
- [15] Soam S, Kapoor M, Kumar R, et al. Life cycle assessment and life cycle costing of conventional and modified dilute acid pretreatment for fuel ethanol production from rice straw in India[J]. Journal of Cleaner Production, 2018, (197): 732—741.
- [16] 冯超, 马晓茜. 秸秆直燃发电的生命周期评价[J]. 太阳能学报, 2008 (6): 711—715.
- [17] 王明新, 夏训峰, 柴育红, 等. 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.
- [18] 刘黎娜. 可再生能源建设项目生命周期评价方法及其案例研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2008.
- [19] 霍丽丽, 赵立欣, 孟海波, 等. 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.
- [20] 孟海波, 赵立欣, 徐义田, 等. 用粗糙集理论评价生物质固体成型燃料技术的研究[J]. 农业工程学报, 2008 (3): 198—202.
- [21] 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.
- [22] 王志伟, 雷廷宙, 岳峰, 等. 秸秆成型燃料系统经济性分析[J]. 农机化研究, 2012, 34 (2): 203—206.
- [23] 王红彦. 基于生命周期评价的秸秆沼气集中供气工程能值分析[D]. 北京: 中国农业科学院, 2016.
- [24] 李欣, 娄世玲, 杨麒, 等. 基于生命周期能值分析的秸秆能源化利用方式的对比评价[J]. 环境工程学报, 2016, 10 (8): 4607—4614.
- [25] Lijó L, Frison N, Fatone F, et al. Environmental and sustainability evaluation of livestock waste management practices in Cyprus[J]. Science of The Total Environment, 2018, 634, 127—140.
- [26] Wang Bo, Song Junnian, Ren Jingzheng, et al. Selecting sustainable energy conversion technologies for agricultural residues: A fuzzy AHP—VIKOR based prioritization from life cycle perspective[J]. Resources, Conservation and Recycling, 2019, 142, 78—87.
- [27] 张震, 刘铭, 沈圆顺. 沼气对盾构施工影响的风险评估[J]. 低温建筑技术, 2011, 33 (11): 117—120.
- [28] 郝海, 踪家峰. 系统分析与评价方法[M]. 经济科学出版社, 2007.
- [29] 朱春阳. 户用沼气新技术及区域适应性评价[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2014.
- [30] 邱化蛟, 常欣, 程序, 等. 农业可持续性评价指标体系的现状分析与构建[J]. 中国农业科学, 2005 (4): 736—745.
- [31] 杨增玲, 楚天舒, 韩鲁佳, 等. 灰色关联理想解法在秸秆综合利用方案优选中的应用[J]. 农业工程技术(新能源产业), 2013, 29 (20): 179—191.
- [32] 侯刚, 李轶冰, 杨改河. 基于秸秆生物质资源的户用沼气区域风险研究[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2009, 37 (9): 139—148.
- [33] 包风霞. 农村户用沼气区域适宜性评价指标体系与应用研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2008.
- [34] 陈豫, 杨改河, 冯永忠, 等. “三位一体”沼气生态模式区域适宜性评价指标体系[J]. 农业工程学报, 2009, 25 (3): 174—178.
- [35] 刘萧凌. 辉县市农村户用沼气池利用效益评价研究[D]. 成都: 四川农业大学, 2012.
- [36] 李萍. 农村户用沼气池建设的能源、经济、环境效益研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2007.

第一作者: 刘桐利(1995—), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为秸秆能源化利用技术。515855002@qq.com

通信作者: 霍丽丽(1985—), 女, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为生物质能源利用技术。huolili666@126.com