

DOI: 10.13930/j.cnki.cjea.190563

王莹, 王亚静, 王红彦, 王环, 毕于运. 秸秆热解气化工程生态价值量估算方法研究[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2020, 28(6): 920-930

WANG Y, WANG Y J, WANG H Y, WANG H, BI Y Y. Ecological value estimation method of the straw pyrolysis engineering[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2020, 28(6): 920-930

秸秆热解气化工程生态价值量估算方法研究*

王莹¹, 王亚静¹, 王红彦², 王环¹, 毕于运^{1**}

(1. 中国农业科学院农业资源与农业区划研究所 北京 100081; 2. 中国农业科学院农业信息研究所 北京 100081)

摘要: 秸秆热解气化工程是一项高质消纳秸秆资源的生态生产工程, 工程项目将秸秆资源转换产出“气、炭、油、液”, 实现了秸秆资源的生态价值, 对我国农业领域落实国家节能减排任务具有重要实践意义。准确估算秸秆热解气化工程的生态价值量, 提供系统全面的定量评价指标体系与计算方法, 是有效推动农业绿色发展的重要科学依据。本研究基于生态价值理论中的二分法理论, 对秸秆热解气化工程生态价值量的构成进行分析, 得出秸秆热解气化利用项目主要产生的生态效益资产由减排效益资产与废弃资源商品化资产共同构成。据此, 建立了秸秆热解气化工程生态价值量估算总公式, 即: 秸秆热解气化工程生态价值量(V_{PE})=秸秆热解气化工程减排效益货币价值(V_{EB})+秸秆资源产品经济价值(V_{RC})。在计算过程中, 选取生命周期分析(LCA)法计量秸秆热解气化工程项目的净减排量, 并借助二氧化碳影子价格将净减排量进行货币化, 得到工程减排效益资产(V_{EB}); 而后, 计算出通过生态生产项目实现的秸秆资源产品经济价值(V_{RC}); 最终, 将 V_{EB} 与 V_{RC} 加总, 得到秸秆热解气化工程生态价值量(V_{PE})。本研究在方法构建的同时, 采用文献调研法对各个计算环节所需参数的选取进行了分析与对比, 提供了计算过程所需的参数体系。本研究在方法研究与参数研究一体化研究过程中, 力图在以下 3 个方面取得实质性的突破和创新: 一是不仅局限于从减排效益视角进行分析与研究, 系统全面构建秸秆热解气化工程项目生态价值量估算模型。二是明确将项目生态“潜在价值”合理转化为市场“真实价值”, 以货币价值形式对秸秆热解气化项目生态效益进行计价衡量。三是本研究在终端能源产品替代减排量估算研究过程中, 考量了不同技术工艺水平和产品的能源转换率对温室气体排放的影响。

关键词: 秸秆; 热解气化工程; 能源替代; 生态价值量; 估算方法; 参数体系

中图分类号: S38

开放科学码(资源服务)标识码(OSID):



Ecological value estimation method of the straw pyrolysis engineering*

WANG Ying¹, WANG Yajing¹, WANG Hongyan², WANG Huan¹, BI Yuyun^{1**}

(1. Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China;

2. Agricultural Information Institute, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China)

Abstract: The straw pyrolysis project is an ecological production project designed to convert high quality agricultural straw waste into gas, carbon, oil, and liquid. It has an important practical significance for conserving national energy and reducing emissions in the China's agricultural fields. It has been an important scientific basis to accurately estimate the ecological value of the straw pyrolysis project and provides a systematic and comprehensive quantitative evaluation index system and calculation method to

* 国家自然科学基金面上项目(41771569)资助

** 通信作者: 毕于运, 主要研究方向为资源环境经济与政策。E-mail: biyuyun@caas.cn

王莹, 主要研究方向为资源环境经济与政策。E-mail: caaswy@163.com

收稿日期: 2019-07-29 接受日期: 2020-02-23

* This study was supported by the National Natural Science Foundation of China (41771569).

** Corresponding author, E-mail: biyuyun@caas.cn

Received Jul. 29, 2019; accepted Feb. 23, 2020

effectively promote green development in agriculture. This paper analyzed the ecological value composition of straw pyrolysis engineering based on the dichotomy theory of ecological value theory. It was concluded that the main ecological beneficial assets generated by the project of straw pyrolysis project were emission reduction and waste resource commercialization. The general formula for estimating the ecological value of straw pyrolysis project established was the ecological value of straw pyrolysis and the gasification project (V_{PE}) = the monetary value of straw pyrolysis project emission reduction (V_{EB}) + the economic value of straw resource products (V_{RC}). In the calculation process, the life cycle analysis (LCA) method was selected to measure the net emission reduction of the straw pyrolysis project, and then the net emission reduction was valued with the help of carbon dioxide shadow prices to obtain the project's emission reduction (V_{EB}). Furthermore, the economic value of straw resource products achieved by the ecological production project (V_{RC}) was calculated. Finally, V_{EB} and V_{RC} were included to obtain the ecological value of straw pyrolysis and gasification engineering (V_{PE}). The method was designed using the literature research method to analyze the parameter selection required by each calculation link, and the parameter system required for the calculation process was provided. This study attempted to achieve substantial breakthroughs and innovations during the integration of both method and parameter research in the following three aspects: firstly, the ecological value estimation model of straw pyrolysis project was constructed; not limited to analysis and research from the emission reduction benefits perspective, with a more systematic and comprehensive ecological value estimation method and its required parameter system was established. Secondly, the potential value of the project should be reasonably converted into the "real market value"; in this study, the ecological benefits of the straw pyrolysis project were monetarily priced and measured. Thirdly, this study considered the impact of different technological levels and product energy conversion rates on greenhouse gas emissions during the process of estimating the displacement reduction of end-use energy products. Throughout the study, the general idea of "scientific modelling, reasonable pricing, and accurate estimation" was followed to provide a reliable foundation and support the decision to formulate the national energy saving and emission reduction plans.

Keywords: Straw; Pyrolysis engineering; Energy substitution; Ecological value; Estimation method; Parameter system

秸秆热解气化技术高质消纳秸秆资源转换产出“气、炭、油、液”，工程项目既实现了生物质秸秆的资源价值，产物“气、炭、油、液”在生态效益方面的能源替代效用也得到充分实现。在当代全球生态环境问题日益突出、环境质量普遍下降的背景下，生态供给极度匮乏，生态生产逐渐占据了与生活资料生产及人类自身的生产同等重要的地位^[1]。秸秆热解气化工程作为一项实现秸秆生态价值量的资源利用工程，对我国农业领域落实国家节能减排任务具有重要意义。秸秆热解气化工程生态价值指在一定的时间和空间内，以货币价值形式进行计价，核算工程项目的生态生产活动所产出的生态环境福利与生态产品经济。准确估算秸秆热解气化工程的生态价值量，建立系统全面的计算方法、计算参数与定量评价指标体系，不仅是为自主碳交易提供必备的技术依据，更是有效推动农业资源高质利用与农业绿色发展的重要科学依据。

目前有关生态价值的研究多集中于运用市场类估算法、能值估算法、软件模型法对森林、湿地、草地、农田、海洋等^[2-6]自然生态系统资源的价值进行分析计算，研究方法较为成熟完善、系统全面。农作物秸秆资源有别于森林、湿地、草地等一般生态系统自然资源，在不加以人工利用的条件下不具备生态系统服务功能(如涵养水源功能、固碳释氧功能、景观功能等)。秸秆热解气化工程作为一项高质

利用秸秆资源的生态生产项目，其实现秸秆资源生态价值的核算与研究具有一定的独特性。目前，关于秸秆综合利用生态价值量估算方面的研究还比较少见。据文献检索，在国内，陈冬冬等^[7]对秸秆燃料、秸秆肥料、秸秆饲料、秸秆沼气的生态效用(资源替代效用和环境效用)进行了定性和定量分析，并给出了各项资源替代和部分环境效用的定量计算结果，但没有给出具体的计算方法；陈洪章^[8]论述了秸秆资源的高效利用问题，尚未系统分析秸秆资源综合利用的生态效用，也未涉及秸秆资源利用的生态价值量估算问题。国内秸秆能源利用工程项目生态效益所展开的研究中，主流采用的 CDM 法、生命周期评价法、能值分析法等^[9-12]主要从计量项目净减排量进行生态效益评估分析，均未进一步对秸秆生态价值进行货币价值量化估算。事实上，生态价值货币化是将项目生态“潜在价值”合理转化为市场“真实价值”的重要途径，以货币价值形式对秸秆热解气化项目生态效益进行计价衡量是进一步建立健全秸秆综合利用生态价值评估方法的重要内容。在国外相关研究领域，秸秆综合利用生态效用的研究主要集中于运用生命周期评价(LCA)法、碳足迹法等对秸秆沼气工程项目、秸秆发电项目以及秸秆乙醇生产项目进行减排效益分析评价。其中，Poeschl 等^[13]、Berglund 等^[14]、Garfi 等^[15]对秸秆沼气利用工程项目进行了环境效益分析评价；Lijó 等^[16]、Sastre 等^[17]

对秸秆发电利用工程项目进行了环境效益分析评价; Caldeira-Pires 等^[18]、Zucaro 等^[19]对生产秸秆生物乙醇工程项目进行了环境效益分析评价。在现有文献中, 研究内容主要是对秸秆综合利用典型工程案例的减排效益进行探讨与分析, 均未对工程项目的综合生态价值量核算方法进行研究。当前国内外现有研究的主要薄弱环节: 一是对秸秆资源综合利用项目的生态价值量估算研究开展甚少, 主要集中于对项目净减排效益进行计量研究; 二是现有减排效益研究中所使用的计算参数存在一定的主观性; 三是缺乏对项目减排效益进行货币化研究过程。

当前, 秸秆热解气化工程生态价值量估算分析研究为起步阶段, 尚未建立秸秆热解气化工程的生态价值量定量分析方法与计算指标体系。本研究基于二分法理论构建秸秆热解气化工程生态价值量估算总公式, 进而在运用 LCA 法的基础上, 结合二氧化碳影子价格, 按照“项目温室气体净减排量→生态效益货币价值化→生态价值量”3 个步骤, 依次系统地进行秸秆热解气化工程生态价值量估算方法研究。在计算项目温室气体净减排量过程, 利用“秸秆热解气化工程项目净减排 = 基准线排放量[秸秆露天焚烧排放+秸秆燃气利用替代减排(供暖/发电)+秸秆生物炭利用替代减排]-秸秆热解气化过程能耗增量排放-项目产品使用排放”的总公式, 构建起秸秆热解气化项目温室气体净减排量的系统估算方法、计算公式与计算所需参数。而后, 在生态效益货币价值化计算过程中, 借助二氧化碳影子价格对工程项目净减排效益进行货币化, 得到工程减排效益市场价值。最后利用公式“秸秆热解气化工程生态价值量 = 工程减排效益货币价值 + 资源产品经济价值”, 实现对秸秆热解气化工程生态价值量定量估算方法与指标体系的系统建立。

1 构建估算方法

生态价值估算是秸秆热解气化生态效益研究中理论性、方法性、系统性和定量化程度较强的基础性研究工作。秸秆热解气化项目作为一项生产活动, 其整体(资源与环境效益)作用服务于生态系统的综合影响关系, 构成了项目的生态效益, 进一步对其生态效益进行价值量化估算, 即为项目的生态价值。

1.1 方法理论基础

环境与资产经济学奠基人 John V. Krutilla 与 Anthony C. Fisher 合著的《自然环境经济学: 商品型和舒适型资产价值研究》中, 将自然资产按功能分为舒适性资产和商品性资产^[20]。此分类法为二分

法, 即将资源资产价值分为无形的舒适性服务价值和有形的物质性商品价值。按照客观现实而言, 若不施以人工项目利用秸秆农作物资源, 一般会选择将其进行焚烧处理, 焚烧产生的气体排放对环境造成负面的外部影响。即使不焚烧, 仅将秸秆堆置于田边路边, 秸秆资源也不会产生其他的生态系统服务价值(如固碳释氧价值、景观价值等)。基于二分法理论, 秸秆热解气化利用项目主要产生的生态效益资产即为减排效益资产与废弃资源商品化资产。秸秆热解气化工程生态价值量 = 工程减排效益市场价值 + 资源产品经济价值。就减排效益评估而言, 评价方法多样, 如 CDM 方法、碳足迹法、LCA 法等。当前, 在科学界已达成广泛共识: LCA 法是最佳的工程项目生态效益评价方法之一^[21]。在国外, Caldeira-Pires 等^[18]、Zucaro 等^[19]运用 LCA 法对生物秸秆生产乙醇的工程项目进行环境影响评估与评价; Sastre 等^[17]运用 LCA 法评估了西班牙地区小麦秸秆发电项目的温室气体减排效益。此外, Soam 等^[22]运用 LCA 法对印度水稻秸秆肥料化、饲料化、发电与气化利用 4 个项目的温室气体减排量进行了定量估算与比较分析。不难看出, LCA 法对工程项目减排计量研究具有极强的实用性与适用性。因此, 本研究选取 LCA 法对秸秆热解气化工程净减排量进行估算; 而后, 基于成本法理论, 运用“二氧化碳影子价格”对秸秆热解气化工程减排效益进行货币化价值量估算; 进而, 计算出秸秆热解气化项目产品的经济价值; 最终, 将“工程项目减排效益市场价值”与“资源产品经济价值”加总, 完成对秸秆热解气化工程生态价值量估算方法的研究与建立, 如图 1 所示。

1.2 具体计算过程

首先, 在计量工程项目净减排量时, 主要分成两个步骤完成: 一是计量项目基准线排放量(A_{BE}); 二是应用 LCA 法对工程项目生产过程能耗排放(A_{PE})与产品使用排放(A_{UE})进行计量。通过公式 $A_{ER} = A_{BE} - (A_{PE} + A_{UE})$ 计算得出工程项目净减排量(A_{ER})。

进而, 借助二氧化碳影子价格(P_{CO_2})对 A_{ER} 进行进一步货币化计算, 将项目生态“潜在价值”合理转化为市场“真实价值”, 得到工程减排效益市场价值(V_{EB})。

而后, 计算出通过社会生产实践活动即热解气化工程项目实现的秸秆资源商品价值(V_{RC})。

最终, 将 V_{EB} 与 V_{RC} 进行加总得到秸秆热解气化工程的生态价值量(V_{PE})。

在研究过程中, 主要按照“项目温室气体净减排

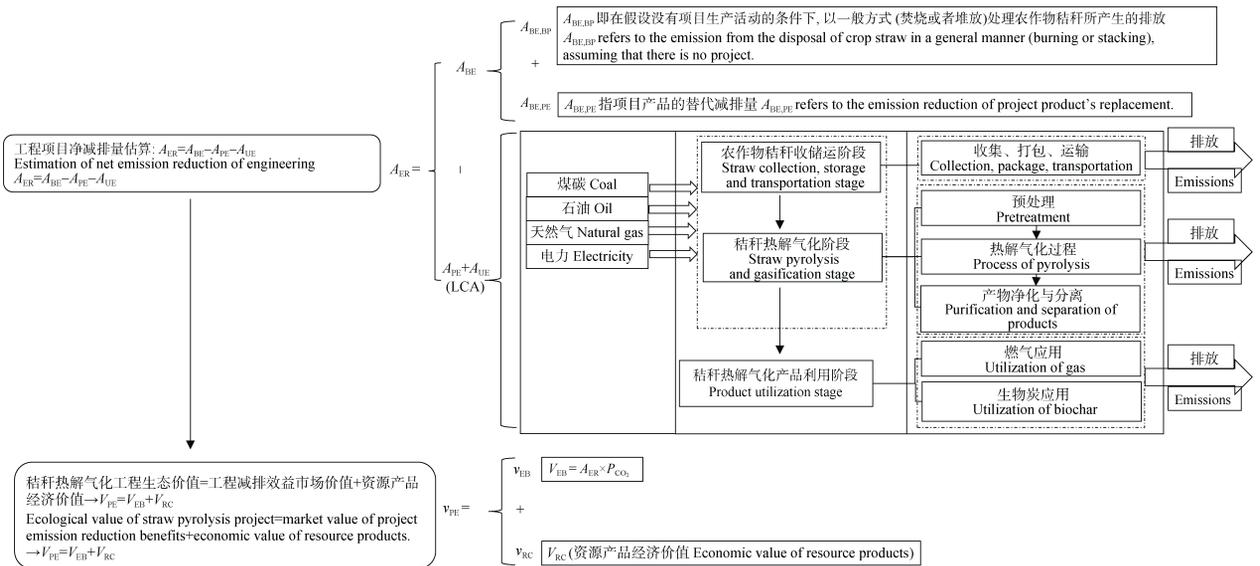


图 1 秸秆热解气化工程生态价值量估算方法构建技术流程图

Fig. 1 Construction of ecological value estimation method for straw pyrolysis project

$A_{BE,BP}$ 主要由两个内容构成: 1) 秸秆以焚烧方式处理产生的气体排放; 2) 秸秆露天有氧堆放自然腐解所产生的气体排放。 $A_{BE,PE}$ 指项目产品秸秆燃气、秸秆生物炭、木醋液和木焦油在不替代煤炭、化肥、农药的情景下, 利用石油煤炭、化肥、农药等所生产的温室气体排放。 $A_{PE}+A_{UE}$ 采用生命周期评价法计算。 $A_{BE,BP}$ is mainly composed of two parts: 1) gas emission from burning straw; 2) gas emissions from the decomposition of straw stacked in the open. $A_{BE,PE}$ refers to the greenhouse gas emissions produced by the use of petroleum coal, chemical fertilizers, pesticides, etc. under the scenario that the project products straw gas, straw biochar, wood vinegar, and wood tar do not replace coal, fertilizers, and pesticides. $A_{PE}+A_{UE}$ is calculated by the method of life cycle assessment analysis (LCA).

量→生态效益货币价值化→生态价值量”3个步骤进行全过程定量计算。为进一步提高秸秆热解气化工程生态效用评价研究水平, 需要对其进行以下 2 个方面的定量研究: 一是建立秸秆热解气化工程生态价值量计算公式, 同时提供计算公式中所需要的计算参数; 二是将项目生态减排效益的“潜在价值”合理转化为市场“真实价值”。

2 基于 LCA 法的项目净减排计量过程

在进行秸秆热解气化工程生态价值量估算方法的建立过程中, 首要工作是对工程的整体生态减排效用进行评估。按公式(1)计算项目净减排:

$$A_{ER} = A_{BE} - (A_{PE} + A_{UE}) \quad (1)$$

式中: A_{ER} 为秸秆热解气化工程项目温室气体净减排量, kg; A_{BE} 为秸秆热解气化工程基准线排放量, kg; A_{PE} 为秸秆热解气化工程生产过程能耗增量排放, kg; A_{UE} 为秸秆热解气化工程产品使用温室气体排放量, kg。

2.1 基准线排放量(A_{BE})

基准线实际上是在用作辨析项目产生效果的一种背景, 即不实施项目时的背景水平^[15]。秸秆原料基准线排放可以理解为不实施秸秆热解气化利用项目的背景排放, 主要包含两方面内容: 一是在没有项目生产活动时农作物秸秆处理方式产生的排放, 记为 $A_{BE,BP}$ (本研究中指秸秆以焚烧方式处理产生的气

体排放); 二是假设没有秸秆热解气化项目, 项目产品秸秆燃气无法替代石油煤炭用于取暖或者发电从而对应生产所消耗燃煤所产生的排放, 以及在项目产品秸秆生物炭不施用情景下农田所产生的温室气体排放, 记为 $A_{BE,PE}$ 。 A_{BE} 按公式(2)进行计算:

$$A_{BE} = T \times (A_{BE,BP} + A_{BE,PE}) \quad (2)$$

式中: $A_{BE,BP}$ 即 1 kg 秸秆无控焚烧所产生的 CO_2 排放总当量, kg; $A_{BE,PE}$ 为 1 kg 秸秆原料所生产的项目产品未替代化石能源等从而产生的 CO_2 排放总量, kg; T 为工程项目使用的秸秆原料重量, kg。

首先, 按公式(3)计算秸秆以焚烧方式处理产生的气体排放($A_{BE,BP}$):

$$A_{BE,BP} = (k_{CO_2} + 25k_{CH_4} + 298k_{N_2O}) / 1000 \quad (3)$$

式中: P_{CO_2} 为秸秆焚烧二氧化碳排放因子, $g \cdot kg^{-1}$; k_{CH_4} 为秸秆焚烧甲烷排放因子, $g \cdot kg^{-1}$; k_{CO_2} 为秸秆焚烧氧化亚氮排放因子, $g \cdot kg^{-1}$ 。根据 IPCC 第 5 次报告, 在过去的 100 a 增温尺度, CH_4 与 N_2O 的增温系数分别为 CO_2 的 25 倍和 298 倍。

依据对近年秸秆焚烧排放因子研究文献检索与综合分析, 对三大作物小麦(*Triticum aestivum* L.)、玉米(*Zea mays* L.)、水稻(*Oryza sativa* L.)秸秆露天焚烧排放因子 k_{CO_2} 、 k_{CH_4} 、 k_{N_2O} 进行整理如表 1 所示。通过比对与综合考虑, 本文建议选取排放因子如表 2 所表示。

表 1 小麦、玉米和水稻秸秆露天焚烧排放因子
Table 1 Emission factors from open burning of wheat, corn and rice straws

作物 Crop	文献来源 Reference	秸秆含水率 Moisture content of straw (%)	排放因子 Emission factor (g·kg ⁻¹)		
			CO ₂	CH ₄	N ₂ O
小麦 Wheat	[23]	10.69		4.22±0.51	
	[23]	31.30		4.71±1.37	
	[24]	10.76	1 339.11	3.30	
	[24]	16.25	1 176.31	4.11	
	[25]		1 235.81±45.38		
	[26]		1 557.90±85.8		
	[27]		586.39±20.25	2.22±0.12	0.05±0.002
玉米 Maize	[23]	10.44		2.41±0.46	
	[23]	27.77			
	[24]	7.92	1 294.23	5.40±0.01	
	[24]	11.91	1 210.14		
	[25]		1 330.96±58.25	3.31	
	[26]		1 261.50±59.90	4.20	
	[27]		620.72	2.95	0.12
水稻 Rice	[24]	9.52	1 287.63	4.09	
	[24]	12.97	1 098.79	5.41	
	[25]		1 248.10±42.88		
	[26]		791.30		
	[27]		656.27	2.19	0.11

表 2 小麦、玉米和水稻秸秆露天焚烧建议排放因子
Table 2 Suggested emission factors for open burning of wheat, corn and rice straw

秸秆种类 Straw type	排放因子 Emission factor (g·kg ⁻¹)		
	CO ₂	CH ₄	N ₂ O
小麦 Wheat	1 328	4.0	0.05
玉米 Maize	1 274	3.8	0.12
水稻 Rice	1 211	4.8	0.11

其次,按照式(4)计算假设在无秸秆热解气化工程项目情景下,秸秆燃气无法替代石油煤炭用于取暖或者发电对应生产消耗燃煤所产生的排放,以及项目产品秸秆生物炭在不施用情景下农田所产生的温室气体排放(本研究暂不将木焦油与木醋液计入替代减排计算考虑范围),记为 $A_{BE,PE}$:

$$A_{BE,PE} = g_c / g_e + g_f \quad (4)$$

式中: g_c 为利用 1 kg 秸秆原料所产生的秸秆燃气热值用煤炭替代制取从而所产生的 CO₂ 排放量, kg; g_e 为利用 1 kg 秸秆原料所产生的秸秆燃气发电量用煤炭发电替代所产生的 CO₂ 排放量, kg; g_f 为利用 1 kg 秸秆原料所生产的秸秆生物炭在不施用情景下土壤所产生的 CO₂ 排放量, kg。

基于现有工程及技术水平^[11],利用 1 kg 秸秆原料生产的热解多联产技术工艺参数如表 3 所示。1 kg

秸秆原料通过 3 种工艺(内加热连续式热解炭气联产技术工艺、外加热连续式热解炭气联产技术工艺、外加热连续式热解炭气油多联产技术工艺)生产秸秆可燃气体的可利用热量分别为 1.2~2.4 MJ、3.5~4.2 MJ、2.4~3 MJ。根据 1 kg 标准煤的热值为 29.31 MJ 计算得出:产生这些热量需要消耗标准煤 0.04~0.08 kg、0.12~0.14 kg、0.08~0.10 kg。根据标准烟煤的数值 3.8 kg(CO₂)·kg⁻¹ 标煤^[28]进行再计算,结果为利用煤炭产生这些热量将会产生的二氧化碳排放量分别为:0.15~0.30 kg、0.46~0.53 kg 和 0.30~0.38 kg。即内加热连续式热解炭气联产技术工艺、外加热连续式热解炭气联产技术工艺、外加热连续式热解炭气油多联产技术工艺的 g_c 分别为 0.15~0.30 kg、0.46~0.53 kg 和 0.30~0.38 kg。

如表 3 所示,内加热连续式热解炭气联产技术工艺、外加热连续式热解炭气联产技术工艺、外加热连续式热解炭气油多联产技术工艺以 1 kg 秸秆为原料平均可产生 0.40 m³、0.35 m³、0.30 m³ 的秸秆气,可用于发电。基于气化发电设备不同,每立方米燃气可供电量具有不同的量值,应依据具体典型工程发电效率进行计算,本研究暂记为 I_g ,单位 (kW·h)·m⁻³。基于当前生产水平,生产 1 kW·h 电耗煤量大约为 0.4 kg 左右,具体依据发电设备大小、

表 3 作物秸秆热解多联产技术工艺参数
Table 3 Process parameters of three straw carbonization polygeneration technologies

参数 Parameter	A	B	C
产气量 Gas production ($\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$)	0.40	0.35	0.30
气体热量 Gas calorific ($\text{MJ} \cdot \text{m}^{-3}$)	3~6	10~12	8~10
生物炭产量 Biochar production ($\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	0.26~0.30	0.28~0.32	0.28~0.32

A: 内加热连续式热解炭气联产技术工艺; B: 外加热连续式热解炭气联产技术工艺; C: 外加热连续式热解炭气油多联产技术工艺。A: internal heating type moving bed of biomass carbon gas cogeneration technology; B: external heating type moving bed pyrolysis carbon gas cogeneration technology; C: external heating type moving bed pyrolysis carbon gas generation technology.

发电机组效率不同会有所偏差。依据国家能源局给出的数据, 燃烧 1 kg 煤将向大气中排放温室气体 CO_2 2.62 kg。通过计算得出, 利用燃煤发电 1 kW·h 所产生的 CO_2 排放量约为 1.048 kg。因此, 内加热连续式热解炭气联产技术工艺的 $g_c=0.4 \text{ kg}$, I_g 为 $1.048 (\text{kW} \cdot \text{h}) \cdot \text{m}^{-3}$; 外加热连续式热解炭气联产技术工艺的 $g_c=0.35 \text{ kg}$, I_g 为 $1.048 (\text{kW} \cdot \text{h}) \cdot \text{m}^{-3}$; 外加热连续式热解炭气油多联产技术工艺的 $g_c=0.3 \text{ kg}$, I_g 为 $1.048 (\text{kW} \cdot \text{h}) \cdot \text{m}^{-3}$ 。

基于现有工程及技术水平^[11], 1 kg 秸秆原料通过内加热连续式热解炭气联产技术工艺、外加热连续式热解炭气联产技术工艺、外加热连续式热解炭

气油多联产技术工艺进行作业生产可得秸秆生物炭产量分别为 0.26~0.30 kg、0.28~0.32 kg、0.28~0.32 kg。施用秸秆生物炭会对土壤中硝化菌和反硝化菌的生命活动产生影响, 从而发挥减排 N_2O 的作用。同时, 施用秸秆生物炭还影响产甲烷菌和甲烷氧化菌平衡, 进而起到减排 CH_4 的作用^[29]。秸秆炭一般施用量有 $10 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 、 $15 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 、 $30 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 、 $40 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 、 $45 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 等。秸秆生物炭对土壤 CH_4 和 N_2O 的排放影响效果与多种综合因素密切相关, 例如土壤种类、秸秆炭空隙质地等, 不同施用条件下所产生的 CH_4 、 N_2O 排放数值见表 4。本文选取较小数值 $10 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 与较大数值 $40 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 作为分析讨论条件。在 $10 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 条件下, 以 1 kg 秸秆为原料进行生产所得秸秆炭施用面积分别为 $2.6 \times 10^{-5} \sim 3.0 \times 10^{-5} \text{ hm}^2$ 、 $2.8 \times 10^{-5} \sim 3.2 \times 10^{-5} \text{ hm}^2$ 、 $2.8 \times 10^{-5} \sim 3.2 \times 10^{-5} \text{ hm}^2$; 在 $40 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 条件下, 施用面积分别为: $6.5 \times 10^{-6} \sim 7.5 \times 10^{-6} \text{ hm}^2$ 、 $7.0 \times 10^{-6} \sim 8.0 \times 10^{-6} \text{ hm}^2$ 、 $7.0 \times 10^{-6} \sim 8.0 \times 10^{-6} \text{ hm}^2$ 。本文主要根据 Zhang 等^[30]关于秸秆生物炭改良土壤试验结果: 在不使用秸秆生物炭的条件下, 基于 100 a 增温尺度, CH_4 与 N_2O 的增温系数分别为 CO_2 的 25 倍和 298 倍计算得出未施用秸秆炭的农田 CO_2 排放当量为 $208 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。通过计算得出: 在没有施用 1 kg 秸秆为原料所生产的秸秆炭(内加热连续式热解炭气联产技术工艺、外加热连续式热解炭气联产技

表 4 不同生物炭处理条件下 CH_4 与 N_2O 累积排放量
Table 4 Cumulative emissions of CH_4 and N_2O under different treatments of biochar application

文献来源 Reference	试验地区 Region	观测时期(年-月) Observation period (year-month)	施肥条件 Fertilization condition	生物炭施用量 Biochar application rate ($\text{t} \cdot \text{hm}^{-2}$)	CH_4 排放量 CH_4 emission ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)	N_2O 排放量 N_2O emission ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)	综合温室效应 Comprehensive greenhouse effect [$\text{kg}(\text{CO}_2\text{-e}) \cdot \text{hm}^{-2}$]
[31]	干旱区玉米农田 Corn fields in arid area	2018-05—2018-10	常规施肥 Conventional fertilization	0	1.905	0.397	165.931
				15	2.999	0.296	163.183
				30	2.529	0.169	113.587
				45	0.323	0.054	24.167
[30]	太湖平原地区稻田 Rice fields in the Taihu Plain	2010-06—2010-10	不施肥 No fertilization	0			208.000
				10			285.000
				40			286.000
[32]	关中地区玉米农田 Corn fields in Guanzhong area	2015-06—2016-05	常规施肥 Conventional fertilization	4	-0.300	1.040	302.420
				8	-0.340	0.910	262.680
[33]	成都平原稻田 Rice field in Chengdu Plain	2010-05—2011	不施肥 No fertilization	0			540.400
				20			964.510
				40			326.170
[34]	河套灌区玉米农田 Corn fields in Hetao Irrigation Area	2015-05—2015-10	常规施肥 Conventional fertilization	0	-0.195	0.336	95.253
				15	-0.702	0.097	11.356
				30	-0.028	-0.028	-9.044
				45	-0.039	-0.035	-11.405

术工艺、外加热连续式热解炭气油多联产技术工艺)的情景下,以秸秆炭 10 t·hm⁻² 为基线背景条件,土壤的 CO₂ 排放总当量为 5.4×10⁻³~6.2×10⁻³ kg、5.8×10⁻³~6.7×10⁻³ kg、5.8×10⁻³~6.7×10⁻³ kg;以秸秆炭 40 t·hm⁻² 为基线背景条件,土壤的 CO₂ 排放总当量为 1.35×10⁻³~1.56×10⁻³ kg、1.46×10⁻³~1.67×10⁻³ kg、1.46×10⁻³~1.67×10⁻³ kg;即内加热连续式热解炭气联产技术工艺、外加热连续式热解炭气油多联产技术工艺、外加热连续式热解炭气油多联产技术工艺的秸秆生物炭基线排放系数(g_f),在施以秸秆炭 10 t·hm⁻² 为基线背景条件下土壤的 CO₂ 排放总当量分别为 5.4×10⁻³~6.2×10⁻³ kg、5.8×10⁻³~6.7×10⁻³ kg 和 5.8×10⁻³~6.7×10⁻³ kg,在施以秸秆炭 40 t·hm⁻² 为基线背景条件下分别为 1.35×10⁻³~1.56×10⁻³ kg、1.46×10⁻³~1.67×10⁻³ kg 和 1.46×10⁻³~1.67×10⁻³ kg。

综上所述,不实施秸秆热解气化利用项目的背景排放为 A_{BE} :

$$A_{BE}=T \times \left[(k_{CO_2} + 25k_{CH_4} + 296k_{N_2O}) / 1000 + (g_c/g_e + g_f) \right] \quad (5)$$

2.2 秸秆热解气化过程能耗(A_{PE})与项目产品使用排放增量(A_{UE})

根据国际标准化组织(ISO)的定义:LCA指的是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,其核算阶段包括完全生命周期(从摇篮到坟墓, business to consumer, B2C),即原材料生产、制造、配送销售、使用、废弃等 5 个阶段。在本研究中,采用 LCA 法对秸秆热解气化工程过程能耗(A_{PE})与项目产品使用排放增量(A_{UE})进行评估测算,以期过程更具系统性与完整性,测算结果更加科学合理。

2.2.1 评价体系框架与边界

首先,建立秸秆气炭联产 LCA 评价体系框架,明确划分各阶段的输入输出参数与评价指标。在建立框架范围时,考虑到种植作物的目标产物是粮食而非秸秆^[35],本研究暂不将作物种植阶段计入秸秆热解气化工程系统生命周期范围。秸秆热解气化全生命周期范围从秸秆离田到秸秆热解气化产物的利用,系统分为秸秆收储运阶段、秸秆热解气化转化阶段、秸秆燃气与秸秆生物炭应用阶段等 3 个阶段(图 1)。在本研究中,忽略在秸秆热解气化 LCA 评价过程中占比小且数据难以获取的非关键因素,如工程建设单元、生物炭应用人工投入、家用秸秆燃气炉设备效率等。

2.2.2 评价指标

1) 秸秆收储运阶段所产生的温室气体排放(A_{PE1})

计算公式为:

$$A_{PE1}=T \times Q_f \times K_Q + (T/a) \times D_d \times Q_d \quad (6)$$

式中: T 为工程项目使用的秸秆原料重量,kg; Q_f 为移动式打捆机打捆 1 kg 秸秆所需的柴油消耗量,一般取值为 0.003 kg^[36]; K_Q 为消耗 1 L 柴油所产生的温室气体排放量,根据 IPCC(联合国政府间气候变化专门委员会)排放清单,计算得出柴油排放系数值约为 3.2 kg; a 为农用运车每次可以满载秸秆的重量,kg; D_d 为将秸秆由打包地运送至工程项目地点的距离,km; Q_d 为农用运车的 CO₂ 排放总当量因子,一般取值为 0.24 kg·km⁻¹^[37]。

2) 秸秆热解气化阶段所产生的温室气体排放(A_{PE2})计算方法为:

$$A_{PE2}=(T_{coal} \times 30.36) / 10^6 \times (I_{CO_2} + 25I_{CH_4} + 296I_{N_2O}) + (T_{oil} \times 38.44) / 10^6 \times (L_{CO_2} + 25L_{CH_4} + 296L_{N_2O}) + (T_{gas} \times 38.7) / 10^6 \times (J_{CO_2} + 25J_{CH_4} + 296J_{N_2O}) + T_{Electricity} \times T_e \quad (7)$$

式中: T_{coal} 为气化生产过程中项目投入的燃煤总量,kg;1 kg 燃料煤的燃烧热值为 30.36 MJ^[38]; I_{CO_2} 、 I_{CH_4} 、 I_{N_2O} 分别为燃料煤中 CO₂、CH₄和 N₂O 的排放因子,kg(CO₂)·TJ⁻¹,如表 5 所示; T_{oil} 为气化生产过程中项目投入的柴油总量,L;0#柴油低热值为 38.44 MJ·L⁻¹; L_{CO_2} 、 L_{CH_4} 、 L_{N_2O} 分别为柴油中 CO₂、CH₄和 N₂O 的排放因子,kg(CO₂)·TJ⁻¹,如表 5 所示; T_{gas} 为气化生产过程中项目投入的天然气总量(若无天然气投入则 $T_{gas}=0$),m³;每立方米天然气热值为 38.7 MJ^[39]; J_{CO_2} 、 J_{CH_4} 、 J_{N_2O} 分别为天然气中 CO₂、CH₄和 N₂O 的排放因子,kg(CO₂)·TJ⁻¹,如表 5 所示; $T_{Electricity}$ 为气化生产过程中项目投入的总耗电量,kW·h; T_e 为耗电排放系数,中国火电行业运行温室气体综合排放系数为 1.04 kg·(kW·h)⁻¹,变化区间为

表 5 燃料煤、柴油、天然气的 IPCC(2006)国家温室气体排放系数清单

Table 5 IPCC (2006) greenhouse gas emission coefficient list of fuel coal, diesel and natural gas

气体 Gas	排放源 Emission source	排放系数 Emission factor	单位 Unit
CO ₂	燃料煤 Coal	94.6 (I_{CO_2})	kg(CO ₂)·TJ ⁻¹
	柴油 Diesel	74.1 (L_{CO_2})	
	天然气 Natural gas	56.1 (J_{CO_2})	
CH ₄	燃料煤 Coal	1.0 (I_{CH_4})	kg(CH ₄)·TJ ⁻¹
	柴油 Diesel	3.0 (L_{CH_4})	
	天然气 Natural gas	1.0 (J_{CH_4})	
N ₂ O	燃料煤 Coal	1.5 (I_{N_2O})	kg(N ₂ O)·TJ ⁻¹
	柴油 Diesel	0.6 (L_{N_2O})	
	天然气 Natural gas	0.1 (J_{N_2O})	

0.93~1.2 kg·(kW·h)⁻¹[40]。

3) 秸秆热解气化产品利用阶段所产生的温室气体排放(A_{UE})计算公式如下:

$$A_{UE}=T \times (A_{UE1}+A_{UE2}) \quad (8)$$

式中: A_{UE} 为秸秆热解气化产品利用阶段的温室气体排放; A_{UE1} 为以 1 kg 秸秆为原料进行生产所得秸秆燃气燃烧温室气体排放总当量, kg; A_{UE2} 为以 1 kg 秸秆原料进行生产所得秸秆生物炭应用过程中温室气体排放总当量, kg; T 为工程项目使用的秸秆原料重量, kg。

内加热连续式热解炭气联产技术工艺、外加热连续式热解炭气联产技术工艺、外加热连续式热解炭气油多联产技术工艺以 1 kg 秸秆为原料平均可产生 0.4 m³、0.35 m³、0.30 m³ 的秸秆气。1 m³ 秸秆燃气燃烧温室气体排放记为 P_{E1} , kg。 P_{E1} 应根据具体项目工程所产秸秆燃气的燃烧排放数据为准。因此, 内加热连续式热解炭气联产技术工艺的 $A_{UE1}=0.4P_{E1}$; 外加热连续式热解炭气联产技术工艺的 $A_{UE1}=0.35P_{E1}$; 外加热连续式热解炭气油多联产技术工艺的 $A_{UE1}=0.3P_{E1}$ 。

内加热连续式热解炭气联产技术工艺、外加热连续式热解炭气联产技术工艺、外加热连续式热解炭气油多联产技术工艺以 1 kg 秸秆为原料平均可产生秸秆炭 0.26~0.30 kg、0.28~0.32 kg、0.28~0.32 kg。在秸秆生物炭施用量为 10 t·hm⁻² 条件下, 内加热连续式热解炭气联产技术工艺、外加热连续式热解炭气联产技术工艺、外加热连续式热解炭气油多联产技术工艺的 A_{UE2} 分别为 $7.41 \times 10^{-3} \sim 8.55 \text{ kg} \times 10^{-3} \text{ kg}$ 、 $7.98 \times 10^{-3} \sim 8.55 \times 10^{-3} \text{ kg}$; 在秸秆生物炭施用量为 40 t·hm⁻² 条件下, 内加热连续式热解炭气联产技术工艺、外加热连续式热解炭气联产技术工艺、外加热连续式热解炭气油多联产技术工艺的 A_{UE2} 分别为 $1.86 \times 10^{-3} \sim 2.15 \times 10^{-3} \text{ kg}$ 、 $2.00 \times 10^{-3} \sim 2.29 \times 10^{-3} \text{ kg}$ 、 $2.00 \times 10^{-3} \sim 2.29 \times 10^{-3} \text{ kg}$ 。

3 基于成本法的项目生态价值量

进行生态价值量估算方法研究的进一步工作是将其生态效用即“潜在价值”顺利货币化。目前对秸秆的生态效益进行价值估算还没有统一的货币量化评价体系与方法。本研究借助二氧化碳影子价格进行工程项目环境效益市场价值货币化探索, 计算得到秸秆热解气化工程生态效益所对应的货币价值 V_{EB} ; 而后, 计算秸秆资源产品经济价值 V_{RC} ; 最终, 将 V_{EB} 与 V_{RC} 进行加总得到秸秆热解气化工程生态价值量 V_{PE} 。

$$V_{PE}=V_{EB}+V_{RC} \quad (9)$$

3.1 工程项目环境效益市场价值

本研究力图在计算出秸秆热解气化工程二氧化碳减排效益的基础上, 基于成本法, 借助二氧化碳影子价格量化秸秆热解气化工程生态效益所对应的货币价值(V_{EB})。二氧化碳影子价格, 即碳排放权交易的理论均衡价格, 是企业二氧化碳边际减排成本, 能为碳交易一级市场定价提供参考, 并指导市场交易价格[41]。中国第 1 批 7 个碳交易试点(北京、上海、深圳、广东、湖北、重庆、成都)在运行过程中交易价格各异, 且与现有研究结果中的理论价格相差甚远。由于计算方法各异, 所引用参考文献中得出二氧化碳影子价格估算结果相差较大, 影子价格计算结果为 0.2~120.3 ¥·kg⁻¹ 不等[42-45]。在实际贸易中, 7 个试点逐步启动碳交易程序, 其初始价格设定为 20.1~60.2 ¥·t⁻¹。基于综合考虑, 本研究将 Wei 等[42]使用数据包络分析中的扩展至最远前沿距离模型(SBM), 对 1995—2007 年 29 个省份的二氧化碳边际减排成本进行测算所得的 CO₂ 价格 $P_{CO_2}=2.0598 \text{ ¥} \cdot \text{kg}^{-1}$ 作为计算秸秆热解气化工程减排效益货币量化参数数值。

$$V_{EB}=A_{ER} \times P_{CO_2} \quad (10)$$

3.2 资源产品经济价值

在资源价值方面, 秸秆资源未被焚烧或丢弃进而得到充分利用所产生的商品经济价值, 即为资源产品经济价值(V_{RC})。

$$V_{RC}=T \times (h_1 \times P_g + h_2 \times P_C) \quad (11)$$

式中: h_1 为 1 kg 秸秆原料进行生产得到的燃气体积, m³; P_g 为每立方米秸秆燃气的市场价格, ¥·m⁻³; h_2 为 1 kg 秸秆原料进行生产得到的秸秆生物炭量, kg; P_C 为每千克秸秆生物炭的市场价格, ¥·kg⁻¹; T 为工程项目使用的秸秆原料重量, kg。其中, 不同工程所产秸秆燃气与秸秆生物炭品质不同, 产品价格依据具体情况可再做调整。

4 讨论与结论

在过去, 秸秆综合利用项目的生态效益研究主要从减排效益角度进行分析探讨, 视角单一。并且, 在现有的相关研究文献中, 减排效益分析过程所使用的具体计算参数大多未说明或未给出, 通常直接依据减排效益估算步骤进行分析便得出计算结果, 计算参数的使用存在一定的主观性。此外, 在国内外现有研究中, 缺乏对工程项目生态效益货币化的关键过程。早期, 学术界与政府机构便深刻认识到

森林、湿地、草地、农田、海洋等自然生态系统资源的重要性,并将生态环境问题作为一门科学进行研究,还将环境纳入会计研究对象。而后,学术界出现了大量的森林、湿地、草地等一般自然资源的综合生态经济价值研究,政府部门也相继出台了一系列相关的生态系统服务功能评估规范文件,极大推动了生态环境保护事业的发展。秸秆作为一项特殊的生物质资源,“用则利,弃则害”,其有别于森林、湿地、草地、农田、海洋等一般的生态系统自然资源,如何计量并以货币价值形式核算其生态生产工程的生态价值,有一定的独特性与复杂性。当前,亟需在现有的减排效益研究基础上,进一步拓开秸秆综合利用项目的综合生态效益研究分析视角,构建系统的生态经济价值量估算方法,以科学的计算参数作为研究内容的技术支撑,全面提升秸秆综合利用项目生态效益估算水平,实现在农业生态生产领域助力国家生态文明体制机制创新与发展。

为进一步提高秸秆综合利用生态效用评价研究水平,本研究在现有的工程减排效益研究基础上,以生态价值理论为指导,构建了秸秆热解气化工程生态价值量估算方法,对工程项目的生态价值估算研究从以下几个方面进行:一是基于生态价值理论构建生态价值量估算模型;二是按照“替代量→温室气体减排量→生态价值量”的步骤进行全程定量计算,并对公式或模型中所需要的参数进行测算与研究;三是将生态效益进行合理地货币化。目前,本研究所构建的秸秆热解气化工程生态价值量估算方法尚处于理论阶段,稳健性有待进一步结合实证案例研究进行验证。本研究在方法构建与参数分析的一体化探索过程中,主要在如下 3 个方面取得实质性的突破和创新:一是构建秸秆热解气化工程项目生态价值量估算模型,不仅局限于从减排效益视角进行分析与研究,还提供了较为系统全面的生态价值评估核算方法;二是在终端能源产品替代减排量估算研究过程中,考量了不同技术工艺水平和产品的能源转换率对温室气体排放的影响;三是明确将项目生态“潜在价值”合理转化为市场“真实价值”,以货币价值形式对秸秆热解气化项目生态效益进行计价衡量,进一步建立健全秸秆综合利用生态价值评估方法内容。在整个研究过程中,遵循“科学建模、合理计价、准确估量”的总体思路,以期为国家节能减排方案的制定提供可靠的数据基础与决策支持。

参考文献 References

[1] 崔永和. 生态价值: 深化价值论研究的前沿视域[J]. 河南师范大学学报: 哲学社会科学版, 2008, 35(4): 1-6

- CUI Y H. Ecological value: The frontier visual threshold of deepening the axiology study[J]. Journal of Henan Normal University, 2008, 35(4): 1-6
- [2] 董敏, 陈平留, 张国防. 基于资本资产定价模型的森林资源资产评估基准折现率测算[J]. 资源科学, 2019, 41(3): 572-581
DONG M, CHEN P L, ZHANG G F. Benchmark discount rate calculation for forest resource asset valuation via capital asset pricing model[J]. Resources Science, 2019, 41(3): 572-581
- [3] 单晟烨, 李佳珊, 张冬有. 哈尔滨城市公园湿地环境空气负离子浓度及其生态价值估算[J]. 湿地科学, 2015, 13(4): 478-482
SHAN S Y, LI J S, ZHANG D Y. Concentrations of negative air ion and their ecological values of wetland environment in city parks in Harbin City[J]. Wetland Science, 2015, 13(4): 478-482
- [4] 阿布都热合曼·哈力克, 杨金龙. 新疆草地生态价值及其可持续开发利用的研究[J]. 干旱区资源与环境, 2006, 20(5): 197-200
ABDIRAHMAN·HALIK, YANG J L. Study of the ecological value and sustainable exploitation and utilization of Xinjiang grass[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2006, 20(5): 197-200
- [5] 谢高地, 肖玉. 农田生态系统服务及其价值的研究进展[J]. 中国生态农业学报, 2013, 21(6): 645-651
XIE G D, XIAO Y. Review of agro-ecosystem services and their values[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2013, 21(6): 645-651
- [6] 吴丹, 刘书俊. CVM 法对长江口海洋生态价值的评价应用[J]. 环境保护科学, 2009, 35(4): 85-88
WU D, LIU S J. Application of CVM in evaluating value of marine ecosystem in Yangtze River estuary[J]. Environmental Protection Science, 2009, 35(4): 85-88
- [7] 陈冬冬, 高旺盛, 陈源泉. 中国农作物秸秆资源化利用的生态效应和技术选择分析[J]. 中国农学通报, 2007, 23(10): 143-149
CHEN D D, GAO W S, CHEN Y Q. Analysis on the ecological effect and technological selection of straw resources utilization in China[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2007, 23(10): 143-149
- [8] 陈洪章. 秸秆资源生态高值化理论与应用[M]. 北京: 化学工业出版社, 2006
CHEN H Z. Theory and Application of Straw Resource Ecological Value[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2006
- [9] 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
- [10] 王磊, 高春雨, 毕于运, 等. 大型秸秆沼气集中供气工程温室气体减排估算[J]. 农业工程学报, 2017, 33(14): 223-228
WANG L, GAO C Y, BI Y Y, et al. Greenhouse gas emission mitigation calculation of large scale straw biogas centralized supply project[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2017, 33(14): 223-228
- [11] 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
HUO L L, ZHAO L X, MENG H B, et al. Life cycle assess-

- ment analysis for cogeneration of fuel gas and biochar[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2016, 32(S1): 261–266
- [12] 张阿凤, 程琨, 潘根兴, 等. 秸秆生物黑炭农业应用的固碳减排计量方法学探讨[J]. 农业环境科学学报, 2011, 30(9): 1811–1815
ZHANG A F, CHENG K, PAN G X, et al. An approach for measurement the carbon sequestration and mitigation of straw biochar amendment[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2011, 30(9): 1811–1815
- [13] POESCHL M, WARD S, OWENDE P. Environmental impacts of biogas deployment — Part 1: Life cycle assessment of multiple production and utilization pathways[J]. Journal of Cleaner Production, 2012, 24: 184–201
- [14] BERGLUND M, BÖRJESSON P. Assessment of energy performance in the life-cycle of biogas production[J]. Biomass and Bioenergy, 2006, 30(3): 254–266
- [15] GARFÍ M, CASTRO L, MONTERO N, et al. Evaluating environmental benefits of low-cost biogas digesters in small-scale farms in Colombia: A life cycle assessment[J]. Bioresource Technology, 2019, 274: 541–548
- [16] LIJÓ L, GONZÁLEZ-GARCÍA S, BACENETTI J, et al. Life cycle assessment of electricity production in Italy from anaerobic co-digestion of pig slurry and energy crops[J]. Renewable Energy, 2014, 68: 625–635
- [17] SASTRE C M, GONZÁLEZ-ARECHAVALA Y, SANTOS A M. Global warming and energy yield evaluation of Spanish wheat straw electricity generation — A LCA that takes into account parameter uncertainty and variability[J]. Applied Energy, 2015, 154: 900–911
- [18] CALDEIRA-PIRES A, BENOIST A, DA LUZ S M, et al. Implications of removing straw from soil for bioenergy: An LCA of ethanol production using total sugarcane biomass[J]. Journal of Cleaner Production, 2018, 181: 249–259
- [19] ZUCARO A, FORTE A, FIERRO A. Life cycle assessment of wheat straw lignocellulosic bio-ethanol fuel in a local biorefinery prospective[J]. Journal of Cleaner Production, 2018, 194: 138–149
- [20] 罗华伟, 姜雅勤. 自然资源资产生态价值计量: 理论与案例[J]. 会计之友, 2019, (22): 104–110
LUO H W, JIANG Y Q. Measurement of ecological value of natural resource assets: Theory and case[J]. Friends of Accounting, 2019, (22): 104–110
- [21] CHERUBINI F, BIRD N D, COWIE A, et al. Energy-and greenhouse gas-based LCA of biofuel and bioenergy systems: Key issues, ranges and recommendations[J]. Resources, Conservation and Recycling, 2009, 53(8): 434–447
- [22] SOAM S, BORJESSON P, SHARMA P K, et al. Life cycle assessment of rice straw utilization practices in India[J]. Bioresource Technology, 2017, 228: 89–98
- [23] 王艳, 郝伟伟, 程轲, 等. 秸秆露天焚烧典型大气污染物排放因子[J]. 中国环境科学, 2018, 38(6): 2055–2061
WANG Y, HAO W W, CHENG K, et al. Emission factors of typical air pollutants from open burning of crop straws[J]. China Environmental Science, 2018, 38(6): 2055–2061
- [24] 王俊芳, 骆仲泱, 华晓宇, 等. 农作物秸秆露天焚烧污染物排放特性研究[J]. 热力发电, 2017, 46(6): 14–20
WANG J F, LUO Z Y, HUA X Y, et al. Pollutant emission characteristics of crop straws during opening burning[J]. Thermal Power Generation, 2017, 46(6): 14–20
- [25] 杨夏捷, 鞠园华, 郭福涛, 等. 中国亚热带地区农作物秸秆露天燃烧污染物排放清单[C]//2017 中国环境科学学会科学与技术年会论文集. 厦门: 中国环境科学学会, 2017
YANG X J, JU Y H, GUO F T, et al. Pollutant emission list for open burning of crop straws in subtropical regions of China[C]//2017 Annual Meeting of Science and Technology of Chinese Environmental Science Society. Xiamen: Chinese Society of Environmental Sciences, 2017
- [26] 孙剑峰. 中国农作物秸秆露天燃烧排放大气污染物的实验室模拟[D]. 济南: 山东大学, 2016
SUN J F. A laboratory study on emission characteristics of gaseous and particulate pollutants emitted from agricultural crop residue open burning in China[D]. Jinan: Shandong University, 2016
- [27] 刘丽华, 蒋静艳, 宗良纲. 农业残留物燃烧温室气体排放清单研究: 以江苏省为例[J]. 环境科学, 2011, 32(5): 1242–1248
LIU L H, JIANG J Y, ZONG L G. Emission inventory of greenhouse gases from agricultural residues combustion: A case study of Jiangsu Province[J]. Environmental Science, 2011, 32(5): 1242–1248
- [28] 陈俊武, 陈香生. 中国中长期碳减排战略目标初探()——中国煤炭消费过程的碳排放及减排措施[J]. 中外能源, 2011, 16(6): 1–11
CHEN J W, CHEN X S. A preliminary study on China's long and medium-term strategic goals for reducing carbon emissions () — Carbon emissions during coal consumption in China and solutions[J]. Sino-Global Energy, 2011, 16(6): 1–11
- [29] 颜永毫, 王丹丹, 郑纪勇. 生物炭对土壤 N₂O 和 CH₄ 排放影响的研究进展[J]. 中国农学通报, 2013, 29(8): 140–146
YAN Y H, WANG D D, ZHENG J Y. Advances in effects of biochar on the soil N₂O and CH₄ emissions[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2013, 29(8): 140–146
- [30] ZHANG A F, CUI L Q, PAN G X, et al. Effect of biochar amendment on yield and methane and nitrous oxide emissions from a rice paddy from Tai Lake Plain, China[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2010, 139(4): 469–475
- [31] 程功, 刘廷玺, 李东方, 等. 生物炭和秸秆还田对干旱区玉米农田土壤温室气体通量的影响[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2019, 27(7): 1004–1014
CHENG G, LIU T X, LI D F, et al. Effects of biochar and straw on greenhouse gas fluxes of corn fields in arid regions[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2019, 27(7): 1004–1014
- [32] 陈静, 张建国, 赵英, 等. 秸秆和生物炭添加对关中地区玉米-小麦轮作农田温室气体排放的影响[J]. 水土保持研究, 2018, 25(5): 170–178
CHEN J, ZHANG J G, ZHAO Y, et al. Effects of straw and biochar amendment on greenhouse gases emission in wheat-maize rotation cropland in Guanzhong Area[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2018, 25(5): 170–178
- [33] 张斌, 刘晓雨, 潘根兴, 等. 施用生物炭后稻田土壤性质、水稻产量和痕量温室气体排放的变化[J]. 中国农业科学, 2012, 45(23): 4844–4853
ZHANG B, LIU X Y, PAN G X, et al. Changes in soil properties, yield and trace gas emission from a paddy after biochar

- amendment in two consecutive rice growing cycles[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2012, 45(23): 4844–4853
- [34] 屈忠义, 高利华, 李昌见, 等. 秸秆生物炭对玉米农田温室气体排放的影响[J]. *农业机械学报*, 2016, 47(12): 111–118
QU Z Y, GAO L H, LI C J, et al. Impacts of straw biochar on emission of greenhouse gas in maize field[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2016, 47(12): 111–118
- [35] 王红彦, 王亚静, 高春雨, 等. 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, et al. 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
- [36] 孙宁, 王亚静, 高春雨, 等. 秸秆收储运成本分析——以河南省为例[J]. *中国农业资源与区划*, 2018, 39(5): 91–96
SUN N, WANG Y J, GAO C Y, et al. Cost analysis of straw collection, storage and transportation — A case study of Henan Province[J]. *Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning*, 2018, 39(5): 91–96
- [37] 唐伟, 何平, 杨强, 等. 基于 IVE 模型和大数据分析的杭州市道路移动源主要温室气体排放清单研究[J]. *环境科学学报*, 2018, 38(4): 1368–1376
TANG W, HE P, YANG Q, et al. Study on greenhouse gas emission inventory of road source in Hangzhou based on IVE model and large data analysis[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2018, 38(4): 1368–1376
- [38] 李越胜, 卢伟业, 赵静波, 等. 基于 BP 神经网络和激光诱导击穿光谱的燃煤热值快速测量方法研究[J]. *光谱学与光谱分析*, 2017, 37(8): 2575–2579
LI Y S, LU W Y, ZHAO J B, et al. Detection of caloric value of coal using laser-induced breakdown spectroscopy combined with BP neural networks[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2017, 37(8): 2575–2579
- [39] 吴谋远, 殷冬青, 何春蕾, 等. 我国需加快推行天然气热值计量计价改革[J]. *国际石油经济*, 2018, 26(4): 38–41
WU M Y, YIN D Q, HE C L, et al. Accelerating the reform of the measurement and pricing of natural gas calorific value in China[J]. *International Petroleum Economics*, 2018, 26(4): 38–41
- [40] 刘胜强, 毛显强, 邢有凯. 中国新能源发电生命周期温室气体减排潜力比较和分析[J]. *气候变化研究进展*, 2012, 8(1): 48–53
LIU S Q, MAO X Q, XING Y K. Estimation and comparison of greenhouse gas mitigation potential of new energy by life cycle assessment in China[J]. *Progressus Inquisitiones de Mutatione Climatis*, 2012, 8(1): 48–53
- [41] 陈欣, 刘延. 中国二氧化碳影子价格估算及与交易价格差异分析——基于二次型方向性距离产出函数[J]. *生态经济*, 2018, 34(6): 14–20
CHEN X, LIU Y. Estimation of China's carbon dioxide shadow price and analysis of the difference in transaction price: Output function based on quadratic directional distance[J]. *Ecological Economy*, 2018, 34(6): 14–20
- [42] WEI C, NI J L, DU L M. Regional allocation of carbon dioxide abatement in China[J]. *China Economic Review*, 2012, 23(3): 552–565
- [43] 陈诗一. 工业二氧化碳的影子价格: 参数化和非参数化方法[J]. *世界经济*, 2010, 33(8): 93–111
CHEN S Y. Shadow price of industrial carbon dioxide: Parametric and nonparametric approach[J]. *The Journal of World Economy*, 2010, 33(8): 93–111
- [44] YUAN P, LIANG W B, CHENG S. The margin abatement costs of CO₂ in Chinese industrial sectors[J]. *Energy Procedia*, 2012, 14: 1792–1797
- [45] WU L P, CHEN Y, FEYLIZADEH M R. Study on the estimation, decomposition and application of China's provincial carbon marginal abatement costs[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 207: 1007–1022