



秸秆成型燃料集中供暖工程温室气体减排效应

冯新新, 左涛, 孙宁, 谢杰, 高春雨, 毕于运, 王亚静

Greenhouse gas emission reduction effect of a straw briquette central heating system

FENG Xinxin, ZUO Tao, SUN Ning, XIE Jie, GAO Chunyu, BI Yuyun, and WANG Yajing

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.12357/cjea.20210679>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

秸秆热解气化工程生态价值量估算方法研究

Ecological value estimation method of the straw pyrolysis engineering

中国生态农业学报(中英文). 2020, 28(6): 920–930

华北平原农田温室气体排放与减排综述

Review on greenhouse gas emission and reduction in wheat–maize double cropping system in the North China Plain

中国生态农业学报(中英文). 2018, 26(2): 167–174

中国畜牧业温室气体排放的脱钩与预测分析

Decoupling and predictive analysis of greenhouse gas emission from animal husbandry in China

中国生态农业学报(中英文). 2019, 27(5): 793–802

稻虾共作对秸秆还田后稻田温室气体排放的影响

Effect of rice–crayfish co–culture on greenhouse gases emission in straw–puddled paddy fields

中国生态农业学报(中英文). 2017, 25(11): 1591–1603

耕作方式转变对冬小麦季农田温室气体排放和产量的影响

Effect of tillage method change on soil greenhouse gas emission and yield during winter–wheat growing season

中国生态农业学报(中英文). 2018, 26(11): 1613–1623

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

Effects of biochar and straw on greenhouse gas fluxes of corn fields in arid regions

中国生态农业学报(中英文). 2019, 27(7): 1004–1014



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.12357/cjea.20210679

冯新新, 左涛, 孙宁, 谢杰, 高春雨, 毕于运, 王亚静. 秸秆成型燃料集中供暖工程温室气体减排效应[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2022, 30(4): 702-712

FENG X X, ZUO T, SUN N, XIE J, GAO C Y, BI Y Y, WANG Y J. Greenhouse gas emission reduction effect of a straw briquette central heating system[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2022, 30(4): 702-712

# 秸秆成型燃料集中供暖工程温室气体减排效应\*

冯新新<sup>1,2</sup>, 左涛<sup>3</sup>, 孙宁<sup>1</sup>, 谢杰<sup>1</sup>, 高春雨<sup>1</sup>, 毕于运<sup>1</sup>, 王亚静<sup>1\*\*</sup>

(1. 中国农业科学院农业资源与农业区划研究所 北京 100081; 2. 北京市农林科学院信息技术研究中心/农芯科技(北京)有限责任公司 北京 100097; 3. 临洮县新源环保科技有限公司 临洮 730500)

**摘要:** 探究我国秸秆成型燃料集中供暖工程温室气体减排量计算方法, 定量估算典型工程温室气体减排量, 可为我国秸秆成型燃料集中供暖工程减排量估算提供理论依据与方法支撑。参考 IPCC(政府间气候变化专门委员会)《国家温室气体清单指南》、UNFCCC(《联合国气候变化框架公约》)方法学、CDM(清洁发展机制)方法学, 以秸秆自然腐解为基准线, 建立了秸秆成型燃料集中供暖工程温室气体减排量计量方法。该计量方法包括项目边界、基准线排放、项目排放等方面。结果表明, 2019—2020 年一个供暖季甘肃省临洮县 5 个秸秆成型燃料集中供暖示范工程基准线排放量为 1610.08 t CO<sub>2</sub>, 项目排放量为 104.67 t CO<sub>2</sub>, 净减排量为 1505.41 t CO<sub>2</sub>, 约相当于减少了 529.45 t 标准煤的 CO<sub>2</sub> 排放量。临洮县秸秆成型燃料集中供暖工程每消耗 1 t 玉米秸秆原料, 可减少 1.17 t CO<sub>2</sub> 排放。本研究系统构建了基于秸秆自然腐解基准线的秸秆成型燃料集中供暖温室气体减排量计量方法, 完善了秸秆成型燃料集中供暖工程温室气体减排估算方法学体系, 证明了秸秆成型燃料集中供暖工程具有明显的减排效果。

**关键词:** 秸秆成型燃料; 集中供暖工程; 温室气体减排; 基准线排放; 估算方法; 参数体系

中图分类号: S216.2

开放科学码(资源服务)标识码(OSID): 

## Greenhouse gas emission reduction effect of a straw briquette central heating system\*

FENG Xinxin<sup>1,2</sup>, ZUO Tao<sup>3</sup>, SUN Ning<sup>1</sup>, XIE Jie<sup>1</sup>, GAO Chunyu<sup>1</sup>, BI Yuyun<sup>1</sup>, WANG Yajing<sup>1\*\*</sup>

(1. Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China; 2. Research Center of Information Technology, Beijing Academy of Agriculture and Forestry Sciences / AgChip Science and Technology (Beijing) Co., Ltd., Beijing 100097, China; 3. Lintao Xinyuan Environmental Protection Technology Co., Ltd, Lintao 730500, China)

**Abstract:** The long-term dependence on coal for heating during winter in northern China has caused serious environmental pollution. In addition, the limitations and non-renewability of fossil fuels have prompted the development of new energy sources for clean heating. Biomass energy resources are a good option because they are abundant, clean, and sustainable. Crop straw is an important agricultural biomass energy resource in China because of its' high yield, wide distribution, and variety. Extruding straw into briquette fuel can significantly improve its combustion performance. Referring to the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), the United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC), and the Clean Development Mechanism (CDM) methodology, and through literature research and field surveys, this study constructed a calculation method for greenhouse gas emission reduc-

\* 国家自然科学基金项目(41771569, 41301626)资助

\*\* 通信作者: 王亚静, 主要研究方向为农业资源与利用。E-mail: wangyajing@caas.cn

冯新新, 主要研究方向为农业资源与利用。E-mail: fengxinxin9376@163.com

收稿日期: 2021-10-11 接受日期: 2022-01-15

\* This study was supported by the National Natural Science Foundation of China (41771569, 41301626).

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

Received Oct. 11, 2021; accepted Jan. 15, 2022

tion in a straw briquette fuel central heating system, with the natural decomposition of straw as the baseline. The calculation method involves four parts: the system boundary, baseline emissions, project emissions, and leakage. The system boundary includes the disposal of waste straw in the absence of the system, the route of transporting waste straw to the straw molding processing plant, the briquetting machine used in the molding process, the boiler used in the central heating process, the route to transport the straw briquette to the heating point, and the place where the straw briquette is used for heating. Baseline emissions are the sum of greenhouse gas emissions from the natural decomposition of straw, emissions from alternative coal heating, and energy consumption emissions from chemical fertilizer production replaced by returning ash generated by straw to the field. Total emissions of the system are the sum of fossil fuel consumption emissions from engineering transportation activities, power consumption emissions from straw molding, and emissions from utilizing straw molding fuel combustion and heating. The system leakage rate is zero. Finally, the total calculation formula is as follows: net greenhouse gas emission reduction of straw briquette fuel central heating system = baseline emission - energy consumption emission in straw utilization process - project leakage. Using the above methods, a case study was conducted on a straw briquette central heating project in Lintao County, Gansu Province, China. The results showed that in the heating season from 2019 to 2020, the baseline emission of the Lintao straw briquette central heating project was 1610.08 t CO<sub>2</sub>, the project emission was 104.67 t CO<sub>2</sub>, and the net emission reduction was 1505.41 t CO<sub>2</sub>, which is equivalent to reducing the CO<sub>2</sub> emission of 529.45 t of standard coal. For every 1 t of corn straw raw material consumed by the Lintao straw briquette central heating system, the CO<sub>2</sub> emissions are reduced by 1.17 t. Therefore, it can be concluded that the straw briquette central heating system has an obvious emission reduction effect. This study established a quantitative calculation method for greenhouse gas emission reduction for a straw-briquette-based central heating system based on the background of natural straw decomposition, which enriches the estimation methodology for greenhouse gas emission reduction evaluations. This quantitative study demonstrated that large-scale straw briquette-based central heating projects have a significant emission reduction effect.

**Keywords:** Straw briquette; Central heating; Greenhouse gas emission reduction; Baseline emission; Estimation method; Parameter system

碳达峰碳中和是新时期我国重要的发展战略,从日本、美国等发达国家的经验来看,控制能源消费总量、优化消费结构是实现碳减排的最主要途径<sup>[1]</sup>。我国北方地区冬季取暖长期以煤炭为主,大量化石能源的燃烧造成了严重的环境污染,加之化石能源的有限性和不可再生性,促使人们发展新型清洁能源,加快能源结构转型升级,逐步推进清洁取暖。生物质能资源丰富、清洁、可持续,其总量占可再生能源供应总量的75%<sup>[2-3]</sup>。我国农作物秸秆种类多、分布广、产量大,是农业生物质资源的重要组成部分。2018年我国秸秆量约9.8亿t(折合约4亿t标准煤),但秸秆原料松散、体积大、运输不便、燃烧特性差等缺点,导致约2亿t秸秆得不到有效利用,被焚烧或废弃在田间地头<sup>[4]</sup>,造成了极大的资源浪费,同时污染了环境。秸秆固化成型燃料将秸秆进行粉碎干燥、挤压成型,具有体积小、贮存运输方便、能量密度和热效率高等特性<sup>[5-6]</sup>,可显著提升秸秆的燃烧性能。秸秆成型燃料集中供暖工程可消纳大量秸秆资源,既解决了困扰农民的秸秆处理问题,避免秸秆废弃造成的环境污染,同时又充分利用了生物质资源,实现了能源结构优化。《“十四五”全国农业绿色发展规划》指出,要促进秸秆燃料化,有序发展以秸秆为原料的生物质能,因地制宜发展秸秆固化、生物炭等燃料化产业,逐步改善农村能源结构。

目前,我国对秸秆成型燃料温室气体减排的研究侧重于秸秆成型燃料在中小型锅炉中的燃烧特性和能源环境效益分析<sup>[7-11]</sup>。张双奇等<sup>[8]</sup>基于北方地区农村采暖散煤消耗量及秸秆露天焚烧比例的实地调研结果,从资源数量的角度验证了将露天焚烧的秸秆加工为秸秆成型燃料并用于替代北方农村地区采暖散煤使用的可行性,并定量计算了替代后产生的能源环境影响,得出了散煤消耗的减少量和污染物减排量。张爱祥等<sup>[9]</sup>从清洁能源替代原煤作为小型锅炉燃料的角度,研究了小型燃生物质锅炉的节能减排效果,测试结果表明燃生物质锅炉的SO<sub>2</sub>、NO<sub>x</sub>排放浓度明显较低,可以实现从源头上减少锅炉污染物的排放。赵航<sup>[10]</sup>对中小燃煤工业锅炉的节能减排途径进行了细致研究和讨论,得出用清洁燃料替代、先进的锅炉使用技术、改善煤炭质量及集中供暖4种方式都可实现减排的结论。谢小天<sup>[11]</sup>用生命周期评价法研究了生物质成型燃料不同技术路线的环境效益,得到了生物质成型燃料生命周期总环境影响指数以及不同技术选择对其的影响,为生物质成型燃料生产技术路线选择与优化提供了参考。总体来看,目前关于秸秆成型燃料温室气体减排研究还比较少,且以简单的参数估算为主,定量估算方法体系鲜见涉及。此外,过去公开发表的文献主要以秸秆露天焚烧而非自然腐解为基准线计算温室气体

减排量。本文重点基于秸秆自然腐解基准线,构建秸秆成型燃料集中供暖工程温室气体减排量计量方法,并采用该方法定量估算典型工程温室气体减排量,为我国秸秆成型燃料集中供暖工程减排量估算提供理论依据与方法支撑。

## 1 秸秆成型燃料集中供暖工程温室气体减排量估算方法

秸秆成型燃料集中供暖工程是通过废弃秸秆进行收集打包运输到秸秆成型加工点进行粉碎干燥、挤压成型,然后将加工后的秸秆成型燃料运输到项目发生现场(供暖点)投放到锅炉中进行燃烧供暖,最终将燃烧产物灰渣作为钾肥用于还田的过程。本研究计算方法参考和借鉴《联合国气候变化框架公约》(UNFCCC)方法学、政府间气候变化专门委员

会(IPCC)《国家温室气体清单编制指南》、清洁发展机制(CDM)方法学以及生命周期评价(LCA)法,在明确秸秆成型燃料集中供暖工程项目边界的前提下,以废弃秸秆自然腐解为基准线,依次计算无项目实施背景下的基准线排放量、因项目运行导致的排放量以及工程泄漏排放量,最终得到秸秆成型燃料集中供暖工程的温室气体净减排量。

### 1.1 项目边界

该工程项目边界主要包括:本工程不存在时废弃秸秆的弃置点;将废弃秸秆运输到秸秆成型加工厂的路径;成型过程所用的粉碎机、压块机以及集中供暖过程所用的锅炉等产生化石燃料消耗和电力消耗的设施;将成型燃料运输到供暖点的路径;成型燃料用于供暖的地点。项目边界范围内的主要温室气体排放源和排放气体如表1所示。

表1 秸秆成型燃料集中供暖工程项目边界内主要温室气体排放源

Table 1 Major greenhouse gas emission sources within the straw briquette central heating project boundary

情景 Scene	排放源 Source of emission	温室气体 Greenhouse gas	计入/排除 Included / excluded
基准线 Baseline	秸秆自然腐解 Natural decomposition of straw	CO <sub>2</sub>	排除 Excluded
		CH <sub>4</sub>	计入 Included
		N <sub>2</sub> O	计入 Included
	替代化石燃料供暖 Replace fossil fuels for heating	CO <sub>2</sub>	计入 Included
		CH <sub>4</sub>	计入 Included
		N <sub>2</sub> O	计入 Included
	钾肥生产 Potash fertilizer	CO <sub>2</sub>	计入 Included
		CH <sub>4</sub>	计入 Included
		N <sub>2</sub> O	计入 Included
	项目排放 Project emission	将秸秆原料运输到项目现场点的化石燃料消耗 Fossil fuel consumption for transporting straw raw materials to the project site	CO <sub>2</sub>
CH <sub>4</sub>			计入 Included
N <sub>2</sub> O			计入 Included
秸秆固化成型加工过程(电力消耗) Straw solidification molding process (electricity consuming)		CO <sub>2</sub>	计入 Included
		CH <sub>4</sub>	计入 Included
		N <sub>2</sub> O	计入 Included
秸秆成型燃料燃烧供暖 Straw briquette combustion heating		CO <sub>2</sub>	排除 Excluded
		CH <sub>4</sub>	计入 Included
		N <sub>2</sub> O	计入 Included

表中“排除”原因是:秸秆成型燃料无论以何种方式利用,其产生的CO<sub>2</sub>都不会引起碳库的变化。The reason of “Excluded” in table is that the CO<sub>2</sub> produced by straw briquette will not cause the change of carbon pool, no matter how straw briquette is used.

### 1.2 基准线排放量计算方法

基准线代表在没有拟议的项目活动发生时的背景情况。本文中基准线排放指的是不实施秸秆成型燃料集中供暖工程项目情景下的背景排放,计算公式为:

$$GE_{be} = GE_{be, straw} + GE_{be, fossil} + GE_{be, fertilizer} \quad (1)$$

式中:GE<sub>be</sub>为秸秆成型燃料集中供暖工程基准线排放量;GE<sub>be, straw</sub>为农作物秸秆自然腐解产生的温室气体排放;GE<sub>be, fossil</sub>为秸秆成型燃料集中供暖工程提供

的净热量等值消耗的煤炭产生的温室气体排放;GE<sub>be, fertilizer</sub>为秸秆成型燃料供暖燃烧产生的灰渣还田替代的钾肥生产耗能产生的温室气体排放。以上均以CO<sub>2</sub>当量计,t。

#### 1.2.1 秸秆自然腐解基准线排放

本文将农作物秸秆自然腐解情景下的温室气体排放量作为秸秆成型燃料集中供暖工程的原料基准线排放量,计算公式为:

$$GE_{be, straw} = EF_{straw} \times (1 - W_R) \times N_{straw} \quad (2)$$

$$EF_{straw} = GWP_{CH_4} \times EF_{straw, CH_4} + GWP_{N_2O} \times EF_{straw, N_2O} \quad (3)$$

式中:  $EF_{straw}$  为秸秆自然腐解时的温室气体排放系数 ( $t \cdot t^{-1}$ );  $W_R$  为秸秆原料含水率 (%);  $N_{straw}$  为秸秆原料数量 (t);  $GWP_{CH_4}$  为  $CH_4$  的全球增温潜势值;  $EF_{straw, CH_4}$  为秸秆自然腐解产生的  $CH_4$  排放因子 ( $t \cdot t^{-1}$ );  $GWP_{N_2O}$  为  $N_2O$  的全球增温潜势值;  $EF_{straw, N_2O}$  为秸秆自然腐解产生的  $N_2O$  排放因子 ( $t \cdot t^{-1}$ )。

全球增温潜势 (GWP) 是指在一定时间尺度上, 将  $CO_2$ 、 $CH_4$  和  $N_2O$  3 种温室气体排放对全球形成的温室效应折算为  $CO_2$  当量进行统一计量<sup>[12-13]</sup>。根据 IPCC 第五次最新报告<sup>[14]</sup>, 在过去的 100 年增温尺度上,  $CH_4$  与  $N_2O$  的增温系数分别为  $CO_2$  的 28 倍和 265 倍。

### 1.2.2 秸秆成型燃料替代排放

秸秆成型燃料替代排放量是指假设未实施秸秆成型燃料集中供暖工程时, 与秸秆成型燃料燃烧供暖提供同等热量所耗化石燃料产生的温室气体排放。计算公式为:

$$GE_{be, fossil} = \frac{HG \times EF_{fossil}}{\eta_{fossil}} \quad (4)$$

$$HG = FB_{straw} \times NCV_{straw} \times \eta_{straw} \quad (5)$$

式中:  $HG$  为工程实施过程中秸秆成型燃料燃烧产生的供热量 (GJ);  $EF_{fossil}$  为替代的煤炭 (以标煤计) 的  $CO_2$  当量排放因子 ( $t \cdot GJ^{-1}$ );  $\eta_{fossil}$  为燃煤锅炉的平均净供热效率 (%);  $FB_{straw}$  为消耗的秸秆成型燃料数量 (t);  $NCV_{straw}$  为消耗的秸秆成型燃料的平均净热值 ( $GJ \cdot t^{-1}$ );  $\eta_{straw}$  为燃烧秸秆成型燃料的锅炉平均净供热效率 (%)。

### 1.2.3 灰渣替代化肥生产耗能排放

化肥生产需要消耗化石能源。秸秆成型燃料燃烧供暖后的产物灰渣可用于还田替代钾肥, 因此减少了化肥生产耗能产生的温室气体排放<sup>[15]</sup>。工程产物灰渣的替代排放量是指生产等量的钾肥需要消耗的化石能源的温室气体排放量, 计算公式为:

$$GE_{be, fertilizer} = FB_K \times EF_{K, CO_2} \quad (6)$$

式中:  $FB_K$  为工程产物灰渣中钾肥 ( $K_2O$ ) 总质量 (t),  $EF_{K, CO_2}$  为钾肥生产耗能的  $CO_2$  当量排放因子 ( $t \cdot t^{-1}$ )。

## 1.3 项目排放量计算方法

秸秆成型燃料集中供暖工程的项目排放量是指将秸秆原料运输到项目现场点的运输环节所耗化石燃料、秸秆成型燃料生产环节所耗电能以及燃料利用环节燃烧供暖产生的温室气体排放。计算公式为:

$$PE = GE_{tr} + GE_e + GE_{BF} \quad (7)$$

式中:  $PE$  为秸秆成型燃料集中供暖工程项目排放总量,  $GE_{tr}$  为从场外运输秸秆到项目现场供暖燃烧的运输过程消耗的化石燃料产生的温室气体排放,  $GE_e$  为项目实施导致的电力消耗产生的温室气体排放,  $GE_{BF}$  为利用秸秆成型燃料燃烧供暖产生的温室气体排放。以上均以  $CO_2$  当量计, t。

### 1.3.1 运输过程消耗化石燃料产生温室气体排放

参考 CDM 方法学中的国家温室气体自愿减排方法学《CM-073-V01 供热锅炉使用生物质成型燃料替代化石燃料》<sup>[16]</sup>, 该项目运输过程的排放量 ( $GE_{tr}$ ) 主要包括: 将废弃的秸秆原料运输至秸秆成型加工点以及将加工完的秸秆成型燃料运输至供暖点两个阶段消耗的化石燃料产生的温室气体排放。计算公式如下:

$$GE_{tr} = \left( \frac{N_{straw}}{AT_1} \right) \times D_1 \times EF_{tr,1} + \left( \frac{FB_{straw}}{AT_2} \right) \times D_2 \times EF_{tr,2} \quad (8)$$

式中:  $AT_1$  为将秸秆原料由田间地头运输至成型加工点的农用车辆的平均载荷 (t);  $D_1$  为将秸秆原料由田间地头运输至成型加工点的平均往返距离 (km);  $EF_{tr,1}$  为运输秸秆原料的农用车辆的  $CO_2$  排放因子, 以  $CO_2$  当量计,  $t \cdot km^{-1}$ ;  $AT_2$  为将成型燃料由成型加工点运输至供暖点的中重型货车的平均载荷 (t);  $D_2$  为将成型燃料由成型加工点运输至供暖点的平均往返距离 (km);  $EF_{tr,2}$  为运输成型燃料的中重型货车的  $CO_2$  排放因子, 以  $CO_2$  当量计,  $t \cdot km^{-1}$ 。

### 1.3.2 工程运行消耗电能温室气体排放

秸秆成型燃料加工成型需要消耗一定的电能 (主要为秸秆压缩成型过程使用的破碎机和压块机的耗电)。工程运行消耗电能温室气体排放 ( $GE_e$ ) 是指该区域所在电网生产同等电能产生的温室气体排放。借鉴 CDM 方法学<sup>[16]</sup> 可知, 该值即为该工程消耗的电量乘以所在区域相应的电网排放因子。计算公式为:

$$GE_e = N_e \times EF_{e, CO_2} \quad (9)$$

式中:  $N_e$  为工程运行消耗的电量总量 (MWh),  $EF_{e, CO_2}$  为工程运行所在区域电网的  $CO_2$  排放因子 ( $t \cdot MWh^{-1}$ )。

### 1.3.3 产品利用排放

产品利用排放量 ( $GE_{BF}$ ) 指秸秆成型燃料燃烧供暖产生的温室气体排放。计算公式为:

$$GE_{BF} = EF_{BF} \times FB_{straw} \quad (10)$$

$$EF_{BF} = GWP_{CH_4} \times EF_{BF, CH_4} + GWP_{N_2O} \times EF_{BF, N_2O} \quad (11)$$

式中:  $EF_{BF}$  为锅炉燃烧秸秆成型燃料的  $CO_2$  当量排放因子 ( $t \cdot t^{-1}$ );  $EF_{BF, CH_4}$  为锅炉燃烧秸秆成型燃料的

CH<sub>4</sub> 排放因子 (t·t<sup>-1</sup>); EF<sub>BF,N<sub>2</sub>O</sub>为锅炉燃烧秸秆成型燃料的 N<sub>2</sub>O 排放因子 (t·t<sup>-1</sup>)。

1.4 工程泄漏排放量计算方法

根据 CDM 方法学<sup>[16]</sup>可知,工程泄漏排放量指因工程活动实施导致的化石燃料额外消耗的排放,或生物质废弃物从其他用途转为工程活动所用而产生的排放。本研究在项目活动中已考虑过锅炉的热效率,不考虑供暖管道的热量损失情况,因此泄漏量 LE 为 0。

1.5 工程温室气体净减排量计算方法

根据上文构建的估算方法,秸秆成型燃料集中供暖工程温室气体净减排量等于工程基准线排放量减去项目排放量及泄漏量。计算公式为:

$$GE_N = GE_{be} - PE - LE \quad (12)$$

2 甘肃临洮县秸秆成型燃料集中供暖工程简介及数据获取

2.1 研究对象简介

临洮县新源环保科技有限公司先后投资建设生物质清洁集中供暖示范点 5 处,分别位于甘肃省临洮县新添镇、八里铺镇、峡口镇、漫湾乡、康家集乡政府办公楼。项目总投资 160 余万元,5 个供暖示范点均采用玉米秸秆成型燃料替代燃煤进行集中供暖,从 2019 年 10 月 7 日到 2020 年 4 月 20 日一个供暖季期间大约消耗玉米秸秆成型燃料 1130 t,可解决 5 处政府办公楼共 2.17 万 m<sup>2</sup> 的供暖问题,具体如表 2 所示。

表 2 甘肃省临洮县 5 个秸秆成型燃料集中供暖试点具体情况

Table 2 Specific situation of five straw briquette fuel based central heating pilot projects in Lintao County, Gansu Province

地点 Location	锅炉容量 Boiler capacity (MW)	玉米秸秆成型燃料 消耗量 Fuel consumption of corn straw briquette (t)	原料从收集点运输至供暖点的总距离 Total distance of raw materials transported from collection site to heating site (km)	供暖时间 (月-日) Heating period (month-day)	供暖面积 Heating area (m <sup>2</sup> )
八里铺镇政府办公楼 Government building of Balipu Town	0.56	140	11	11-01—03-30	2600
新添镇政府办公楼 Government building of Xintian Town	0.84	360	17	11-01—03-30	7000
峡口镇政府办公楼 Government building of Xiakou Town	0.7	260	40	10-15—04-10	4800
漫湾乡政府办公楼 Government building of Manwan Town	0.56	190	65	10-07—04-20	3700
康家集乡政府办公楼 Government building of Kangjiayi Town	0.56	180	40	10-20—04-10	3600
合计 Total	/	1130	/	/	21 700

整个工艺流程包括秸秆原料获取阶段、压缩加工成型阶段和燃料燃烧利用 3 个阶段,项目针对生物质锅炉配有专门除尘脱硝系统。具体技术利用过程如图 1 所示。

2.2 工程数据获取

计算过程中所需的参数和数据主要通过试验测定、项目实测、文献总结与公式计算等途径获取。

具体数据来源如表 3 所示。

3 计算结果与分析

以临洮县的秸秆成型燃料集中供暖工程为例,对该工程 2019 年 10 月 7 日到 2020 年 4 月 20 日供暖期间的温室气体减排量进行分析,分别计算该工程的基准线排放量、项目排放量,最终得到该工程温室气体的净减排量。

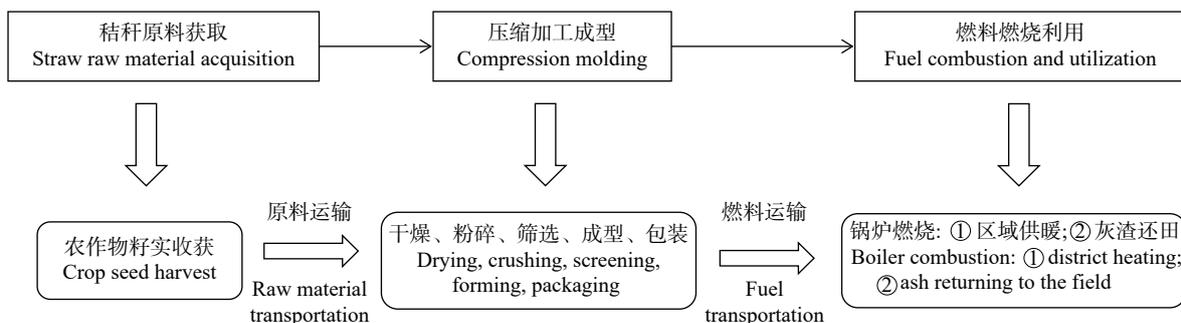


图 1 临洮县秸秆成型燃料集中供暖工程工艺流程

Fig. 1 Process flow of Lintao straw briquette fuel central heating project

表3 秸秆成型燃料集中供暖工程温室气体减排量估算涉及参数及说明

Table 3 Parameters and description of greenhouse gas emission reduction of straw briquette fuel central heating project

编号 No.	参数 Parameter	参数描述 Description	单位 Unit	数据来源 Data source	参数取值 Parameter value
1	EF <sub>straw</sub>	秸秆自然腐解的温室气体排放系数 Greenhouse gas emission factor of natural decomposition of straw	t·t <sup>-1</sup>	[17]	4.25×10 <sup>-2</sup>
2	W <sub>R</sub>	秸秆含水率 Moisture content of straw	%	根据具体项目确定 Determined according to specific project	30%
3	N <sub>straw</sub>	工程所消耗的秸秆原料量 Straw raw materials consumed by the project	t	根据具体项目确定 Determined according to specific project	1291
4	GWP <sub>CH<sub>4</sub></sub>	CH <sub>4</sub> 的全球增温潜势值 Global warming potential of CH <sub>4</sub>	t·t <sup>-1</sup>	[14]	28
5	GWP <sub>N<sub>2</sub>O</sub>	N <sub>2</sub> O的全球增温潜势值 Global warming potential of N <sub>2</sub> O	t·t <sup>-1</sup>	[14]	265
6	EF <sub>straw,CH<sub>4</sub></sub>	秸秆自然腐解CH <sub>4</sub> 排放因子 CH <sub>4</sub> emission factor of straw natural decomposition	t·t <sup>-1</sup>	[17]	2.32×10 <sup>-4</sup>
7	EF <sub>straw,N<sub>2</sub>O</sub>	秸秆自然腐解N <sub>2</sub> O排放因子 N <sub>2</sub> O emission factor of straw natural decomposition	t·t <sup>-1</sup>	[17]	1.36×10 <sup>-4</sup>
8	HG	因工程实施而消耗的秸秆成型燃料产生的供热量 Heat supply generated by straw briquette fuel consumed due to project implementation	GJ	根据具体项目确定 Determined according to specific project	1.93×10 <sup>4</sup>
9	EF <sub>fossil</sub>	替代的煤炭的CO <sub>2</sub> 当量排放因子 CO <sub>2</sub> equivalent emission factor of alternative coal	t·GJ <sup>-1</sup>	[18]	0.0970
10	η <sub>fossil</sub>	燃煤锅炉的平均净供热效率 Average net heating efficiency of coal-fired boilers	%	根据具体项目确定 Determined according to specific project	72%
11	FB <sub>straw</sub>	工程所消耗的成型燃料数量 Quantity of straw briquette fuel consumed by the project	t	根据具体项目确定 Determined according to specific project	1130
12	NCV <sub>straw</sub>	秸秆成型燃料的净热值 Net calorific value of straw briquette fuel	GJ·t <sup>-1</sup>	根据具体项目确定 Determined according to specific project	13.746
13	η <sub>straw</sub>	燃烧秸秆成型燃料的锅炉的平均净供热效率 Average net heating efficiency of boilers burning straw briquette fuel	%	根据具体项目确定 Determined according to specific project	75%
14	FB <sub>K</sub>	灰渣中钾肥(K <sub>2</sub> O)总质量 Total mass of potash fertilizer (K <sub>2</sub> O) in ash	t	根据具体项目确定 Determined according to specific project	4.57
15	EF <sub>K,CO<sub>2</sub></sub>	替代的钾肥生产耗能的CO <sub>2</sub> 当量排放因子 CO <sub>2</sub> equivalent emission factor of energy consumption in alternative potassium fertilizer production	t·t <sup>-1</sup>	[19]	0.4094
16	AT <sub>1</sub>	将秸秆原料从田间运输至成型加工点的 农用运输车平均载荷 Average load of agricultural vehicles transporting straw raw materials from the field to the briquette processing site	t	[20]	2
17	EF <sub>tr,1</sub>	运输秸秆原料的农用车辆的CO <sub>2</sub> 当量排放因子 CO <sub>2</sub> equivalent emission factors of agricultural vehicles transporting straw raw materials	t·km <sup>-1</sup>	[21-22]	0.2415
18	AT <sub>2</sub>	将成型燃料从加工点运输至供暖点的 中重型货车平均载荷 Average load of medium and heavy trucks transporting straw briquette fuel from processing site to the heating site	t	[20]	5
19	EF <sub>tr,2</sub>	运输成型燃料的中重型货车的CO <sub>2</sub> 当量排放因子 CO <sub>2</sub> equivalent emission factor of medium and heavy trucks transporting formed fuel	t·km <sup>-1</sup>	[21]	0.6082
20	N <sub>e</sub>	工程运行消耗的电量总量 Total electricity consuming for project operation	MWh	根据具体项目确定 Determined according to specific project	67.8
21	EF <sub>e,CO<sub>2</sub></sub>	项目运行所在区域电网的CO <sub>2</sub> 排放因子 CO <sub>2</sub> emission factor of the power grid in the area where the project operates	t·MWh <sup>-1</sup>	《2016年中国区域电网基准线排放因子》 《Baseline Emission Factors of China's Regional Power Grid in 2016》	0.9316
22	EF <sub>BF</sub>	燃烧秸秆成型燃料的CO <sub>2</sub> 当量排放因子 CO <sub>2</sub> equivalent emission factor of burning straw briquette	t·t <sup>-1</sup>	[18]	0.027 87
23	EF <sub>BF,CH<sub>4</sub></sub>	燃烧秸秆成型燃料的CH <sub>4</sub> 排放因子 CH <sub>4</sub> emission factor of straw briquette fuel combustion	t·t <sup>-1</sup>	[18]	6.41×10 <sup>-4</sup>
24	EF <sub>BF,N<sub>2</sub>O</sub>	燃烧秸秆成型燃料的N <sub>2</sub> O排放因子 N <sub>2</sub> O emission factor of straw briquette fuel combustion	t·t <sup>-1</sup>	[18]	3.74×10 <sup>-5</sup>

### 3.1 工程基准线排放量

#### 1) 秸秆自然腐解基准线排放量

该基准线数据是由作者课题组模拟玉米秸秆堆

放在田间空地情景的周年试验,对露天堆放的玉米秸秆发生自然腐解产生的主要温室气体进行周年排放量的测定,并进行计算分析得到的。玉米(干基)

秸秆自然腐解产生的  $\text{CH}_4$  和  $\text{N}_2\text{O}$  排放因子分别为  $2.32 \times 10^{-4} \text{ t t}^{-1}$  和  $1.36 \times 10^{-4} \text{ t t}^{-1}$  [17]。根据实地调研, 本文研究的废弃在地头、沟渠、路边的玉米秸秆含水率 ( $W_R$ ) 在 30% 左右, 因此消耗 1130 t 玉米秸秆成型燃料 (包含水分及其他杂质合计约 20%) 相当于消耗了秸秆原料 1291 t。根据式 (2) 可计算得到, 5 个秸秆成型燃料集中供暖试点自然腐解基准线的温室气体排放总量为 38.45 t  $\text{CO}_2$  (表 4)。

## 2) 秸秆成型燃料替代排放量

根据实地调研可得, 燃烧秸秆成型燃料的供热设备的净供热效率 ( $\eta_{\text{straw}}$ ) 约为 75%。经查阅文献可得, 替代的燃烧煤炭的供热设备的平均净供热效率 ( $\eta_{\text{fossil}}$ ) 为 72%。由库丽霞等 [23] 可知, 风干后的玉米秸秆的热值为  $17183 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 即  $17.183 \text{ GJ} \cdot \text{t}^{-1}$ 。结合实地调研, 该项目所用秸秆成型燃料大约含杂质 (水分、土分等) 约 20%, 可得该项目玉米秸秆成型燃料热值实际约为  $13.746 \text{ GJ} \cdot \text{t}^{-1}$ 。结合玉米秸秆成型燃料热值以及《综合能耗计算通则》GB/T 2589—2020 中标煤的热值  $29.3076 \text{ GJ} \cdot \text{t}^{-1}$ , 根据式 (4) 可计算得到, 5 个秸秆成型燃料集中供暖试点玉米秸秆成型燃料替代煤炭的总数量为 552.08 t, 替代煤炭所减少的排放量为 1569.76 t  $\text{CO}_2$  (表 4)。

## 3) 灰渣替代化肥生产耗能排放量

通过调研和查阅文献可知, 玉米秸秆成型燃料燃燃率通常在 96% 左右 [24-25], 则其燃烧产生的草木灰

大约为总质量的 4%。生物质锅炉灰渣中  $\text{K}_2\text{O}$  含量为 10% 左右 [26]。根据式 (6) 可计算得到, 5 个试点供暖季产生的灰渣替代钾肥数量为 4.57 t  $\text{K}_2\text{O}$ , 替代钾肥所减少的化肥生产耗能排放量为 1.87 t  $\text{CO}_2$ 。具体如表 4 所示。

## 4) 基准线排放量计算结果汇总

根据式 (1) 计算可知, 临洮县玉米秸秆成型燃料集中供暖工程的基准线排放总量为 1610.08 t  $\text{CO}_2$  (表 4)。其中, 秸秆自然腐解基准线排放量为 38.45 t  $\text{CO}_2$ , 占基准线排放的 2.39%; 秸秆成型燃料替代排放量为 1569.76 t  $\text{CO}_2$ , 占基准线排放的 97.50%; 钾肥替代排放量为 1.87 t  $\text{CO}_2$ , 占基准线排放的 0.11%。

## 3.2 工程运行排放量

### 1) 运输过程消耗化石燃料温室气体排放量

玉米秸秆原料运输阶段采用的是农用运输车, 平均载荷 ( $\text{AT}_1$ ) 约为 2 t, 秸秆加工后成型燃料运输阶段, 采用中重型货车, 平均载荷 ( $\text{AT}_2$ ) 约为 5 t, 根据式 (8) 计算可以得到, 运输环节的温室气体总排放量为 10.01 t  $\text{CO}_2$ , 具体如表 5 所示。

### 2) 工程运行消耗电力温室气体排放量

通过实地调研可知, 生产 1 t 秸秆成型燃料大约需耗电 60 kWh, 因此工程运行过程总的耗电量 ( $N_e$ ) 为 67.8 MWh。根据式 (9) 计算可以得到项目运行消耗电力的温室气体排放总量为 63.16 t  $\text{CO}_2$ , 具体如表 5 所示。

表 4 甘肃临洮县 5 个秸秆成型燃料集中供暖试点基准线温室气体排放量汇总

Table 4 Summary of baseline greenhouse gas emissions of 5 straw briquette fuel central heating pilot projects in Lintao County, Gansu Province

排放源 Source of emission	八里铺镇政府办公楼 Government building of Balipu Town	新添镇政府办公楼 Government building of Xintian Town	峡口镇镇政府办公楼 Government building of Xiakou Town	漫湾乡政府办公楼 Government building of Manwan Town	康家集乡政府办公楼 Government building of Kangjiayi Town	合计 Total
自然腐解排放量 Emission of natural decomposition [t( $\text{CO}_2$ )]	4.76	12.25	8.85	6.47	6.13	38.45
替代煤炭数量 Quantity of replaced coal (t)	68.40	175.88	127.03	92.83	87.94	552.08
替代煤炭排放量 Emission of replaced coal [t( $\text{CO}_2$ )]	194.48	500.10	361.18	263.94	250.05	1569.76
替代钾肥数量 Quantity of replacing potash fertilizer [t( $\text{K}_2\text{O}$ )]	0.57	1.46	1.05	0.77	0.73	4.57
替代钾肥排放量 Emission of replacing potash fertilizer [t( $\text{CO}_2$ )]	0.23	0.60	0.43	0.31	0.30	1.87
基准线排放量 Emission of baseline [t( $\text{CO}_2$ )]	199.47	512.95	370.46	270.72	256.48	1610.08

### 3) 产品利用排放量

经文献数据库查找和检索, 未能找到利用锅炉燃烧秸秆成型燃料产生  $\text{CH}_4$  的排放因子 ( $\text{EF}_{\text{BF,CH}_4}$ ) 和  $\text{N}_2\text{O}$  的排放因子 ( $\text{EF}_{\text{BF,N}_2\text{O}}$ ), 故采用 IPCC<sup>[18]</sup> 中固体生物质燃料的  $\text{CH}_4$  排放因子和  $\text{N}_2\text{O}$  排放因子结合其热值进行估算。针对  $\text{EF}_{\text{BF,CH}_4}$ , 为保守估计减排量, 根据《CM-073-V01 供热锅炉使用生物质废弃物替代化石燃料》方法学, 在上述基础上还需乘以  $\text{CH}_4$  排放因子的保守系数 1.37, 因此得到  $\text{EF}_{\text{BF,CH}_4}$  为  $6.41 \times 10^{-4} \text{ t t}^{-1}$ ; 针对  $\text{EF}_{\text{BF,N}_2\text{O}}$ , 供暖点为使生物质锅炉的烟气排放达标, 会采用“脱硝除尘”方式进行烟气除尘<sup>[27]</sup>, 因此本文在 IPCC 给出的值的基础上排除生物质锅炉脱硝部分。现阶段, 我国主要采用低氮燃烧方式降低生物质锅炉  $\text{NO}_x$  排放<sup>[28]</sup>。通过实地调研与文献分析可知,  $\text{NO}_x$  控制效率一般在 40% 左右<sup>[29-34]</sup>, 则最终可得  $\text{EF}_{\text{BF,N}_2\text{O}}$  为  $3.74 \times 10^{-5} \text{ t t}^{-1}$ 。结合  $\text{CH}_4$  和  $\text{N}_2\text{O}$  的增温潜势, 根据式 (11) 计算可以得到, 锅炉燃烧秸秆成型

燃料的  $\text{CO}_2$  当量排放因子  $\text{EF}_{\text{BF}}$  为  $0.02787 \text{ t t}^{-1}$ 。

结合式 (10) 和 (11) 计算可以得到, 5 个项目点的产品利用排放总量为  $31.50 \text{ t CO}_2$ , 具体如表 5 所示。

### 4) 项目总排放量

综上, 根据式 (7) 计算可以得到, 临洮县 5 个秸秆成型燃料集中供暖试点项目过程能耗的总排放量约为  $104.67 \text{ t CO}_2$ , 5 个供暖项目点的具体情况可见表 5。其中, 项目运输过程消耗化石燃料的排放量为  $10.01 \text{ t CO}_2$ , 占项目排放量的 9.56%; 项目运行耗电力的排放量为  $63.16 \text{ t CO}_2$ , 占项目排放量的 60.34%; 产品利用排放量为  $31.50 \text{ t CO}_2$ , 占项目排放量的 30.10%。

### 3.3 工程温室气体净减排量

根据式 (12), 可得 2019 年 10 月到 2020 年 4 月一个供暖季, 临洮县 5 个秸秆成型燃料集中供暖试点的净减排总量为  $1505.41 \text{ t CO}_2$ , 其中新添镇政府办公楼净减排量最高, 为  $481.23 \text{ t CO}_2$ , 八里铺镇政府办公楼净减排量最低, 为  $187.36 \text{ t CO}_2$  (表 6)。

表 5 甘肃省临洮县 5 个秸秆成型燃料集中供暖试点项目温室气体排放量汇总

Table 5 Summary of project greenhouse gas emissions of five straw briquette central heating pilot projects in Lintao County, Gansu Province

排放源 Source of emission	八里铺镇政府办公楼 Government building of Balipu Town	新添镇政府办公楼 Government building of Xintian Town	峡口镇镇政府办公楼 Government building of Xiakou Town	漫湾乡政府办公楼 Government building of Manwan Town	康家集乡政府办公楼 Government building of Kangjiaji Town	合计 Total
项目运输过程排放量 Emission of transportation	0.38	1.57	2.79	3.34	1.93	10.01
消耗电力排放量 Emission of electricity consuming	7.83	20.12	14.53	10.62	10.06	63.16
产品利用排放量 Emission of straw briquette fuel utilization	3.90	10.03	7.25	5.30	5.02	31.50
总排放量 Total emission	12.11	31.72	24.57	19.26	17.01	104.67

表 6 甘肃省临洮县 5 个秸秆成型燃料集中供暖试点净温室气体减排量

Table 6 Net greenhouse gas emissions reduction of five straw briquette central heating pilot projects in Lintao County, Gansu Province

排放源 Source of emission	八里铺镇政府办公楼 Government building of Balipu Town	新添镇政府办公楼 Government building of Xintian Town	峡口镇镇政府办公楼 Government building of Xiakou Town	漫湾乡政府办公楼 Government building of Manwan Town	康家集乡政府办公楼 Government building of Kangjiaji Town	合计 Total
净减排量 Net emissions reduction	187.36	481.23	345.89	251.46	239.47	1505.41

由表 6 和表 7 可知, 临洮县秸秆成型燃料集中供暖工程基准线排放量为  $1610.08 \text{ t CO}_2$ , 项目排放量为  $104.67 \text{ t CO}_2$ , 净减排量为  $1505.41 \text{ t CO}_2$ , 约相当于  $529.45 \text{ t}$  标准煤的  $\text{CO}_2$  排放量, 是项目运行排放量的 14.4 倍。计算表明, 每消耗  $1 \text{ t}$  秸秆原料, 将会减少  $1.17 \text{ t CO}_2$  排放, 每生产利用  $1 \text{ t}$  秸秆成型燃料, 将会减少  $1.33 \text{ t CO}_2$  排放。

## 4 结论与讨论

本研究参考 UNFCCC 方法学、IPCC 清单法和 CDM 方法学, 以农作物秸秆自然腐解为基准线, 建立了秸秆成型燃料集中供暖工程温室气体减排量计量方法。该计量方法包括项目边界、基准线排放、项目排放、泄漏排放等方面。基准线排放包括秸秆自然腐解、替代化石燃料供暖产生的排放以及燃烧

表 7 临洮县秸秆成型燃料集中供暖工程温室气体减排量  
Table 7 Greenhouse gas emission reduction of central heating project with straw briquette fuel in Lintao County

t(CO<sub>2</sub>)

情景 Scene	排放源 Source of emission	排放量 Emission	总排放量 Net emissions reduction
基准线 Baseline	秸秆自然腐解 Natural decomposition of straw	38.45	1610.08
	秸秆成型燃料替代化石燃料 Straw briquette fuel replacing fossil fuel	1569.76	
项目排放 Project emission	灰渣替代钾肥 Ash replacing potash fertilizer	1.87	104.67
	运输过程化石燃料消耗 Fossil fuel consumption for transporting	10.01	
	电力消耗 Electricity consuming	63.16	
	产品利用(秸秆成型燃料燃烧) Straw briquette fuel utilization (straw briquette combustion)	31.50	
泄漏排放 Leakage emission	工程泄漏 Project leakage	0	0

产物灰渣还田替代的钾肥生产耗能排放;项目排放包括工程运输活动、秸秆加工成型电力能耗和成型燃料供暖产生的排放。该方法丰富了秸秆成型燃料集中供暖工程温室气体减排估算方法学体系,对其他秸秆综合利用方式的温室气体减排估算具有一定参考价值,对推广生物质清洁取暖、推动秸秆资源的综合利用以及响应国家节能减排政策号召等意义重大。

以甘肃省临洮县新源环保科技有限公司秸秆成型燃料集中供暖工程案例为对象,利用构建的方法学体系,计算得出基准线排放量为 1610.08 t CO<sub>2</sub>,其中秸秆成型燃料替代化石燃料排放占 97.50%;项目排放量为 104.67 t CO<sub>2</sub>,其中秸秆加工成型的电力能耗排放最多,占项目排放的 60.34% 以上。工程净减排量为 1505.41 t CO<sub>2</sub>,约相当于 529.45 t 标煤的 CO<sub>2</sub> 排放量,表明实施秸秆成型燃料集中供暖工程具有明显减排效果。这也与已有的研究结果<sup>[8-11]</sup>基本相符,充分说明了利用秸秆成型燃料等生物质能源替代燃煤用于清洁供暖、减少温室气体排放的可行性。

在我国秸秆禁烧力度不断加强的政策背景下,秸秆露天焚烧现象已显著减少,但秸秆被随意废弃于道路两侧、晒场等场所的现象却相对较为严重。相比于现有以秸秆无控焚烧为基准线的研究,本文以秸秆露天堆放自然腐解为基准线更能够对实际情境下秸秆成型燃料利用的减排效果进行准确评估。同时,集中供暖是我国北方地区冬季采暖的主要方式,以秸秆成型燃料为代表的生物质能源集中供暖已成为北方地区清洁供暖的重要途径之一。本文构建了以废弃秸秆为原料的秸秆成型燃料集中供暖温室气体减排潜力估算方法体系,并通过典型案例开展了定量评估,为以秸秆为主要原料的生物质清洁

供暖技术的推广及其政策制定和产业发展提供了理论依据和方法支撑。此外,通过专家咨询和相关文献查阅,本文对甘肃省临洮县秸秆成型燃料集中供暖工程案例的部分参数进行了适当的优化调整,力求估算过程尽可能反映实际情况。

秸秆成型燃料集中供暖温室气体减排量估算涉及参数众多,个别参数取值缺少标准数据来源。本文在构建减排量估算方法学体系时,相关的温室气体排放因子等关键参数通过试验或权威文献数据考证获取。后续需要进一步对相关参数开展更深入和系统的研究。此外,在我国承诺实现碳达峰、碳中和的背景下,未来还应加强在秸秆综合利用碳减排政策及其制度体系等方面的研究。

## 参考文献 References

- [1] 贾智彬,孙德强,张映红,等.美国能源战略发展史对中国能源战略发展的启示[J].中外能源,2016,21(2):1-7  
JIA Z B, SUN D Q, ZHANG Y H, et al. What China can learn from the US history of energy strategy development[J]. Sino-Global Energy, 2016, 21(2): 1-7
- [2] MCKENDRY P. Energy production from biomass (part 1): overview of biomass[J]. *Bioresource Technology*, 2002, 83(1): 37-46
- [3] 石元春.我国生物质能源发展综述[J].智慧电力,2017,45(7):1-5,42  
SHI Y C. Overview of biomass energy development in China[J]. *Smart Power*, 2017, 45(7): 1-5, 42
- [4] 田文善,李赤明.中国北方地区“生物质+”农村清洁取暖模式[J].农业工程技术,2020,40(14):47-48  
TIAN W S, LI C M. “Biomass +” rural clean heating model in northern China[J]. *Agricultural Engineering Technology*, 2020, 40(14): 47-48
- [5] ZHANG Q L, JI Y Y, JIN L W. Technical economy feasibility analysis of biomass stove heating system[J]. *Energy Procedia*, 2017, 143: 144-149

- [6] 毕于运, 寇建平, 王道龙. 中国秸秆资源综合利用技术[M]. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2008  
BI Y Y, KOU J P, WANG D L. Comprehensive Utilization Technology of Straw Resources in China[M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2008
- [7] 林成先, 杨尚宝, 陈景文, 等. 煤与秸秆成型燃料的复合生命周期对比评价[J]. 环境科学学报, 2009, 29(11): 2451-2457  
LIN C X, YANG S B, CHEN J W, et al. Hybrid life cycle analysis for coal versus straw briquettes[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2009, 29(11): 2451-2457
- [8] 张双奇, 邓梦思, 单明, 等. 基于秸秆露天焚烧量的北方农村地区秸秆成型燃料替代采暖散煤节能减排研究[J]. 农业环境科学学报, 2017, 36(12): 2506-2514  
ZHANG S Q, DENG M S, SHAN M, et al. Study on the energy and environmental impacts of substituting molded straw fuels for heating coal in rural areas of northern China based on the amount of straw open burning[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2017, 36(12): 2506-2514
- [9] 张爱祥, 赵国凌, 毛军, 等. 燃生物质小型锅炉凸显节能减排优势[J]. 中国特种设备安全, 2014, 30(1): 49-53  
ZHANG A X, ZHAO G L, MAO J, et al. Small biomass fired boilers highlight the advantages of energy conservation and emission reduction[J]. China Special Equipment Safety, 2014, 30(1): 49-53
- [10] 赵航. 浅析中小燃煤工业锅炉节能减排途径及情景[J]. 中国设备工程, 2018(21): 68-69  
ZHAO H. Analysis on energy saving and emission reduction ways and scenarios of small and medium-sized coal-fired industrial boilers[J]. China Plant Engineering, 2018(21): 68-69
- [11] 谢小天. 生物质固体成型燃料技术路线生命周期环境影响评价[D]. 青岛: 青岛科技大学, 2016  
XIE X T. Comparative life cycle assessment of pellet production and utilization with different technical scenarios[D]. Qingdao: Qingdao University of Science & Technology, 2016
- [12] KIM S, DALE B E. Global potential bioethanol production from wasted crops and crop residues[J]. Biomass and Bioenergy, 2004, 26(4): 361-375
- [13] 闫翠萍, 张玉铭, 胡春胜, 等. 不同耕作措施下小麦-玉米轮作农田温室气体交换及其综合增温潜势[J]. 中国生态农业学报, 2016, 24(6): 704-715  
YAN C P, ZHANG Y M, HU C S, et al. Greenhouse gas exchange and comprehensive global warming potential under different wheat-maize rotation patterns[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2016, 24(6): 704-715
- [14] IPCC. Climate Change 2013: The Physical Science Basis. [EB/OL]. GlobalChange, [2021-6-30]. <https://www.globalchange.gov/browse/reports/ipcc-climate-change-2013-physical-science-basis>
- [15] 高春雨, 王立刚, 李虎, 等. 区域尺度农田N<sub>2</sub>O排放量估算研究进展[J]. 中国农业科学, 2011, 44(2): 316-324  
GAO C Y, WANG L G, LI H, et al. Advances and prospects of N<sub>2</sub>O emission from cropland at regional scale[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2011, 44(2): 316-324
- [16] 国家发展和改革委员会应对气候变化司. CM-073-V01 供热锅炉使用生物质废弃物替代化石燃料[EB/OL]. 中国清洁能源机网. [2021-06-30]. <http://cdm.ccchina.org.cn/archiver/cdmcn/UpFile/Files/Default/20140123143321982033.pdf>  
Climate change Department of National Development and Reform Commission. CM-073-V01 heating boiler uses biomass waste instead of fossil fuel [EB/OL]. Clean Development Mechanism Network in China. [2021-06-30]. <http://cdm.ccchina.org.cn/archiver/cdmcn/UpFile/Files/Default/20140123143321982033.pdf>
- [17] 冯新新. 秸秆成型燃料集中供暖温室气体减排研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2021  
FENG X X. Study on greenhouse gas emission reduction of straw briquette fuel for central heating[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2021
- [18] IPCC. 2006 IPCC Guidelines for national greenhouse gas inventories[EB/OL]. IPCC Web Sites. [2021-06-30]. <https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/vol2.html>
- [19] 刘万秋. 山东省昌邑市主要农作物能源消耗调查与评价[D]. 北京: 中国农业科学院, 2010  
LIU W Q. Investigation and assessment on major crops' energy consumption of Changyi City in Shandong[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2010
- [20] 彭美春, 李嘉如, 胡红斐. 营运货车道路运行油耗及碳排放因子研究[J]. 汽车技术, 2015(4): 37-40  
PENG M C, LI J R, HU H F. Research on fuel consumption & carbon emission factor of road freight trucks[J]. Automobile Technology, 2015(4): 37-40
- [21] 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
- [22] 王莹, 王亚静, 王红彦, 等. 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, et al. Ecological value estimation method of the straw pyrolysis engineering[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2020, 28(6): 920-930
- [23] 库丽霞, 陈彦惠, 岳建芝, 等. 玉米秸秆能量指标的测定和利用研究[J]. 玉米科学, 2004, 12(1): 114-118  
KU L X, CHEN Y H, YUE J Z, et al. Analysis on energy index of the maize stem and its utilization[J]. Journal of Maize Sciences, 2004, 12(1): 114-118
- [24] 刘圣勇, 张百良, 张全国, 等. 玉米秸秆成型燃料锅炉的设计与试验研究[J]. 热科学与技术, 2003, 2(2): 173-177  
LIU S Y, ZHANG B L, ZHANG Q G, et al. Design and study of cornstalk briquette boiler[J]. Journal of Thermal Science and Technology, 2003, 2(2): 173-177
- [25] 帖青敏. 秸秆成型燃料燃烧动力学分析及燃烧过程数值模拟[D]. 天津: 河北工业大学, 2012  
TIE Q M. Straw briquette combustion dynamics analysis and numerical simulation on combustion process[D]. Tianjin: Hebei University of Technology, 2012
- [26] 梁星星, 张永旺, 王斌, 等. 生物质电厂废弃物草木灰成分

- 分析及成形[J]. 化工进展, 2020, 39(6): 2487-2494
- LIANG X X, ZHANG Y W, WANG B, et al. Component analysis and forming of waste-plant ash from biomass power plant[J]. *Chemical Industry and Engineering Progress*, 2020, 39(6): 2487-2494
- [27] 张润锴. 生物质秸秆收储运与成型燃料生产及供热运营模式研究[D]. 郑州: 河南农业大学, 2019
- ZHANG R K. Study on biomass straw storage and transportation, molding fuel production and heating operation mode[D]. Zhengzhou: Henan Agricultural University, 2019
- [28] 周建强, 高攀, 董长青, 等. 生物质锅炉脱硝技术及工程应用[J]. 热力发电, 2018, 47(10): 1-5
- ZHOU J Q, GAO P, DONG C Q, et al. Denitrification technology of biomass boilers and its engineering application[J]. *Thermal Power Generation*, 2018, 47(10): 1-5
- [29] 毛洪钧, 李悦宁, 林应超, 等. 生物质锅炉氮氧化物排放控制技术研究进展[J]. 工程科学学报, 2019, 41(1): 1-11
- MAO H J, LI Y N, LIN Y C, et al. Overview of advances in emission control technologies for nitric oxides from biomass boilers[J]. *Chinese Journal of Engineering*, 2019, 41(1): 1-11
- [30] 王献民. 生物质锅炉脱硝技术发展现状分析[J]. 节能与环保, 2020(5): 54-55
- WANG X M. Analysis on the development of denitration technology of biomass boiler[J]. *Energy Saving and Environmental Protection*, 2020(5): 54-55
- [31] 喻兵. 生物质锅炉尾气超低排放技术[J]. 价值工程, 2019, 38(10): 105-108
- YU B. Biomass boiler exhaust ultra-low emission technology[J]. *Value Engineering*, 2019, 38(10): 105-108
- [32] 薛玉宝, 郜光伟, 武新虎, 等. 生物质直燃锅炉超低排放脱硝技术研究[J]. 河北电力技术, 2020, 39(2): 29-32
- XUE Y B, GAO G W, WU X H, et al. Research on ultra-low emissions denitrification technology for biomass direct-fired boiler[J]. *Hebei Electric Power*, 2020, 39(2): 29-32
- [33] 高劲豪, 张幼安, 高原. 生物质锅炉烟气脱硫脱硝技术方案选择[J]. 硫酸工业, 2017(8): 52-54, 58
- GAO J H, ZHANG Y A, GAO Y. Choice of technical options about biomass boiler flue gas desulphurization and denitrification[J]. *Sulphuric Acid Industry*, 2017(8): 52-54, 58
- [34] 史俊高, 安晓熙, 房有为. 生物质锅炉脱硝技术现状及研究进展[J]. 化学工业, 2019, 37(3): 52-58
- SHI J G, AN X X, FANG Y W. Status and research progress of denitrification technology in biomass boilers[J]. *Chemical Industry*, 2019, 37(3): 52-58