



农业资源与环境学报

CSCD 核心期刊
中文核心期刊
中国科技核心期刊

JOURNAL OF AGRICULTURAL RESOURCES AND ENVIRONMENT

欢迎投稿 <http://www.aed.org.cn>

北方农村清洁供暖先行区农业废弃物的生物质能潜力及减排效应评估

赵晴云, 马若婧, 周璐芸, 朱钰铭, 尧可, 李晓婕, 张雪靓

引用本文:

赵晴云, 马若婧, 周璐芸, 朱钰铭, 尧可, 李晓婕, 张雪靓. 北方农村清洁供暖先行区农业废弃物的生物质能潜力及减排效应评估[J]. 农业资源与环境学报, 2023, 40(3): 667–679.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13254/j.jare.2022.0297>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

山西省种养废弃物构成及资源化利用潜力研究

杜艳玲, 周怀平, 程曼, 解文艳, 杨振兴, 郭晋, 吕倩倩, 王志伟

农业资源与环境学报. 2019, 36(3): 329–336 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2018.0161>

黄淮海地区蔬菜废弃物污染风险及资源化潜力分析

徐子云, 李永强, 李洁, 王哲, 贾森

农业资源与环境学报. 2020, 37(6): 904–913 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2019.0638>

人居环境改善与乡村振兴相向而行的资源清洁利用技术发展模式——以华北、东北村镇有机废弃物利用为例

陈冠益, 孙志利, 程占军, 史奕, 刘长青, 张忠伦, 李鸣晓, 张春雪, 赵可, 王易安

农业资源与环境学报. 2022, 39(6): 1079–1088 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2022.0466>

安徽省畜禽养殖粪尿及养分含量时空分布特征

张靖雨, 汪邦稳, 袁先江, 龙昶宇

农业资源与环境学报. 2021, 38(2): 295–304 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2020.0374>

城乡有机废弃物资源化利用现状及展望

李龙涛, 李万明, 孙继民, 褚飞, 饶中秀, 黄凤球

农业资源与环境学报. 2019, 36(3): 264–271 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2018.0150>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

赵晴云, 马若婧, 周璐芸, 等. 北方农村清洁供暖先行区农业废弃物的生物质能潜力及减排效应评估[J]. 农业资源与环境学报, 2023, 40(3): 667–679.

ZHAO Q Y, MA R J, ZHOU L Y, et al. Evaluation of energy potential and emission reduction of agricultural waste biomass utilization for clean heating in rural areas of northern China[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2023, 40(3): 667–679.

北方农村清洁供暖先行区农业废弃物的生物质能潜力及减排效应评估

赵晴云, 马若婧, 周璐芸, 朱钰铭, 尧可, 李晓婕, 张雪靓*

(中国农业大学土地科学与技术学院, 北京 100193)

摘要:农村供暖是北方地区碳排放的主要来源之一,本研究以《北方地区冬季清洁取暖规划(2017—2021年)》划定的“26+2”京津冀大气污染传输通道城市群农村地区为研究区,对利用农业废弃物进行生物质能清洁供暖的模式进行评估分析。基于“生物质能潜力核算—替代传统燃料资源量折算—污染物及碳减排效应估算”的研究框架,分别量化研究区内农作物秸秆和畜禽排泄物的生物质能潜力及减排效应。基于2019年统计面板数据,研究区农业废弃物的生物质能潜力较大,若合理充分开发利用,可替代约666万t标准煤或55亿m³天然气,实现减少污染物(SO₂、NO_x)排放量约21万t、降低CO₂排放量约1701万t的减排效应。本研究给出了研究区内28个地级市(直辖市)各类农作物秸秆及畜禽粪污生物质能利用潜力的空间分布及各省的清洁供暖减排效果,结果表明小麦和玉米资源化利用潜力最高;养殖业的生物质能利用潜力高于种植业,且以家禽养殖业为最高。该研究结果可为推动农村地区绿色低碳转型、探索从“农业废弃物”转为“农村供暖源”的发展路径提供有益参考。

关键词:生物质能;清洁能源;农业废弃物;资源化利用;碳减排

中图分类号:X71;TK6

文献标志码:A

文章编号:2095-6819(2023)03-0667-13

doi: 10.13254/j.jare.2022.0297

Evaluation of energy potential and emission reduction of agricultural waste biomass utilization for clean heating in rural areas of northern China

ZHAO Qingyun, MA Ruojing, ZHOU Luyun, ZHU Yuming, YAO Ke, LI Xiaojie, ZHANG Xueliang*

(College of Land Science and Technology, China Agricultural University, Beijing 100193, China)

Abstract: Rural heating is one of the main sources of carbon emissions in northern China. In this study, the “26+2” Beijing–Tianjin–Hebei air pollution transmission corridor urban agglomeration designated by the *Winter Clean Heating Plan in the Northern Region* (2017–2021) was used as the study area. Based on the framework of “estimating potential biomass energy–calculating alternative traditional fuel resources conversion–evaluating pollutant and carbon emission reduction effect”, the potential of biomass energy conversion and clean heating of crop straw and livestock and poultry excrement were quantitatively analyzed. Based on the panel data in 2019, the biomass energy potentials of crop straws and livestock and poultry emissions were considered. The biomass potential of these wastes indicate a reduction compared to the 6.66 million tons of standard coal or 5.5 billion m³ of natural gas, with emission reductions of approximately 0.21 million tons of pollutants (SO₂, NO_x) and 17.01 million tons of CO₂ when fully exploited. In this study, the spatial distribution of biomass energy utilization potential of various crop straw and livestock manure in 28 prefecture-level cities (municipalities) in the study area and the effects of clean heating and emission reduction in each province were analyzed. Studies have shown that wheat and maize have the

收稿日期:2022-05-16 录用日期:2022-07-18

作者简介:赵晴云(2001—),女,内蒙古通辽人,从事农业资源可持续利用研究。E-mail:zhaopingyun@cau.edu.cn

*通信作者:张雪靓 E-mail:zhangxueliang@cau.edu.cn

基金项目:国家自然科学基金项目(51861125101)

Project supported: The National Natural Science Foundation of China(51861125101)

<http://www.aed.org.cn>

highest potential for resource utilization. The biomass energy utilization potential of the breeding industry was higher than that of planting industry, and the poultry breeding industry was the highest. The quantitative results could provide a useful reference for promoting the use of biomass energy to replace traditional fuels such as coal for clean heating in rural areas of “26+2” typical areas and exploring the development path from “agricultural waste” to “rural heating source”.

Keywords: biomass energy; clean energy; agricultural waste; resource utilization; carbon emission reduction

二氧化碳浓度增加导致的气候变化是当今和未来人类面临的最复杂的环境问题之一,而能源消耗是影响全球温室气体排放的主要因素^[1]。在我国广袤的农村地区,以炊事与供暖为核心的农村生活是最主要的排放源头,约占农业农村温室气体排放总量的78%^[2]。目前,我国北方农村取暖仍以燃烧煤炭为主,特别是农村地区普遍存在散烧煤(含低效小锅炉用煤)的利用方式,其大气污染物排放量通常是燃煤电厂的10倍以上^[3]。相关研究表明,在冬季采暖期,北方大部分地区温室气体排放量急剧增加,空气污染风险升高^[4]。因此,通过清洁取暖方式全面替代散烧煤,对于降低碳排放、减排污染物具有积极作用,同时也是能源生产和消费革命、农村生活方式革命的重要内容。

生物质能又被称为“绿色能源”,指的是由生物质产生的固体、液体以及气体转化而来的能源^[5-6]。它是一种化学态的能源,其稳定性和储能性比风能、太阳能等物理态的能量好^[7-8]。值得注意的是,利用农业生产中的废弃物作为生物质能源,不仅不会因种植能源作物而导致耕地“非粮化”,还能将原本可能造成环境污染的物质(秸秆焚烧、畜禽粪污源污染等)“变废为宝”,实现资源循环利用^[9]。我国北方农村地区具有巨大的农作物秸秆(玉米、小麦)可利用量和畜禽(生猪、肉牛、奶牛、鸡)养殖规模,因此,将农业废弃生物质转化为农村生活能源,是全面实现乡村振兴的必然要求,也是落实我国“双碳”目标的重要抓手^[10-11]。

为解决农村供暖高排放问题,国家发改委等十部委联合印发了《北方地区冬季清洁取暖规划(2017—2021年)》(后文简称《规划》),旨在让北京、天津及河北、河南、山西、山东的“26+2”城市及其农村地区(后文简称“26+2”地区)使用电力和管道天然气作为能源进行取暖。《规划》中指出:北方地区冬季大气污染以京津冀及周边地区最为严重,“26+2”重点城市作为京津冀大气污染传输通道城市,且所在省份经济实力相对较强,有必要、有能力率先实现清洁取暖。Nie等^[12]集成了作物生长模型、土地适宜性评估和地理信

息系统,绘制了全国范围内11种可用生物质燃料和3种技术生物能源潜力的分布图,发现“26+2”城市所在的华北地区具有突出的旱地农业残留可用生物质原料量,其中京津两市还具有明显的畜禽粪便可利用潜力。聚焦于生物质资源能源化潜力的评估,已有研究针对全国不同区域,如福建^[13]、新疆^[14]、甘肃^[15]、重庆^[16]、北京^[17]等,进行了量化研究。然而,上述研究中专门以农业废弃物为对象开展的针对性评估略显不足,且未见将《规划》划定的“26+2”地区作为研究案例开展生物质能潜力与碳减排、污染物减排效应的系统研究。而这些量化的估算结果可为政策制定者推进能源转型与农村绿色发展工作提供具有参考价值的宏观数据。

因此,本研究以《规划》划定的“26+2”地区为研究对象,利用地市级面板数据与经典的计算方法框架^[12],在区域尺度上全面地评估农业废弃物的生物质能潜力及其减排效应。本研究具体包括以下三部分内容:①核算农作物秸秆与畜禽排泄物的生物质资源能源化潜力;②折算上述两种废弃生物质能发电可替代的传统燃料资源量;③估算利用农村废弃生物质能进行清洁供暖带来的污染物及二氧化碳减排量。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区包括河北省、山西省、山东省和河南省的26个城市和北京市、天津市(图1),总面积约27.5万km²,占我国国土总面积的2.87%。该区域属于华北地区,北部为燕山、西部为太行山,中部以平原区为主,非常适宜农业发展^[18],是我国重要的粮食主产区之一。平原区以冬小麦-夏玉米一年两熟制为最主要的种植制度,山区多为春玉米一年一熟制,农作物秸秆利用潜力巨大^[19-23]。统计数据表明,研究区农业总产值约占全国的1/4,且猪、牛、羊等家禽出栏总量约占全国的30%,无论是种植还是养殖规模均居全国前列^[24]。

研究区位于温带大陆性季风气候区,四季分明,

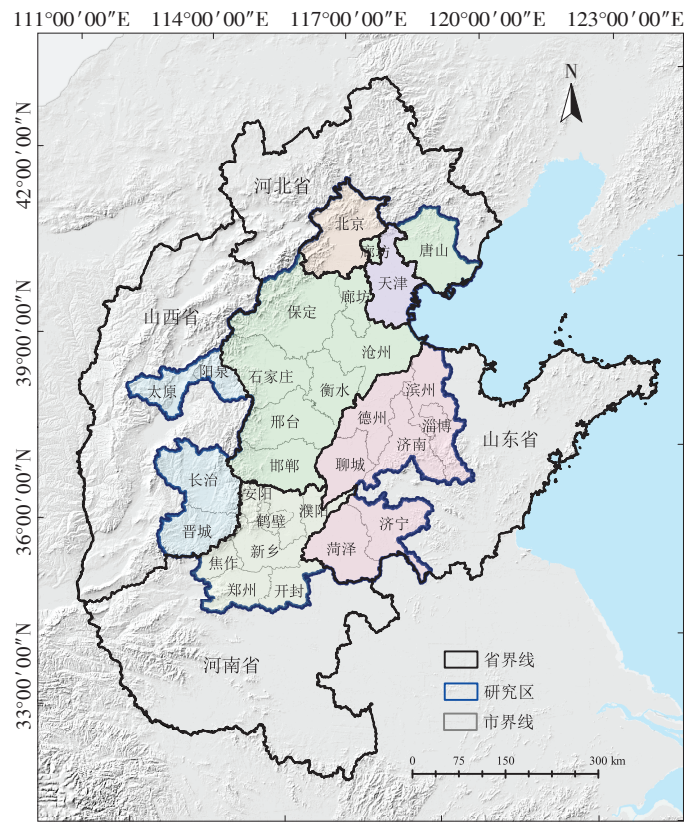


图1 研究区地理位置及行政区划图

Figure 1 Geographical location and administrative division map of the study area

冬季寒冷,年均最低气温约为-12.41℃^[25],平均供暖时长约为4个月,占全年的1/3。截至2016年底,我国北方城乡建设取暖面积206亿m²,其中“26+2”城市所在区域的城乡取暖面积高达50亿m²^[26]。然而,当前该区域仍以燃煤作为主要取暖能源。农村地区具有丰富的农作物秸秆与畜禽粪便等农业废弃物,应充分利用这些潜在的生物质能进行清洁供暖,减少燃煤带来的空气污染和温室气体排放^[27]。

1.2 研究方法与技术路线

本研究按照“种植与养殖业废弃生物质能潜力估算-清洁能源替代传统燃料量折算-碳减排量与污染物减排量估算”的思路开展计算评估,具体技术路线如图2所示。

1.2.1 农作物秸秆生物质能潜力核算

由于统计及监测资料中往往缺乏直接的秸秆废弃物数据,故引入净生物量的计算方式,使用农作物产量估算秸秆净生物量,继而折算为秸秆可利用生物量,并最终计算其可转换的相应生物质能。遵循上述步骤,首先对各类农作物秸秆的净生物量进行估算:

$$N_i=M_i\times r_i$$
(1)

式中: N_i 为第*i*类农作物的秸秆净生物量,kg; M_i 为第*i*类农作物的总经济产量,kg; r_i 为第*i*类农作物的草谷比。

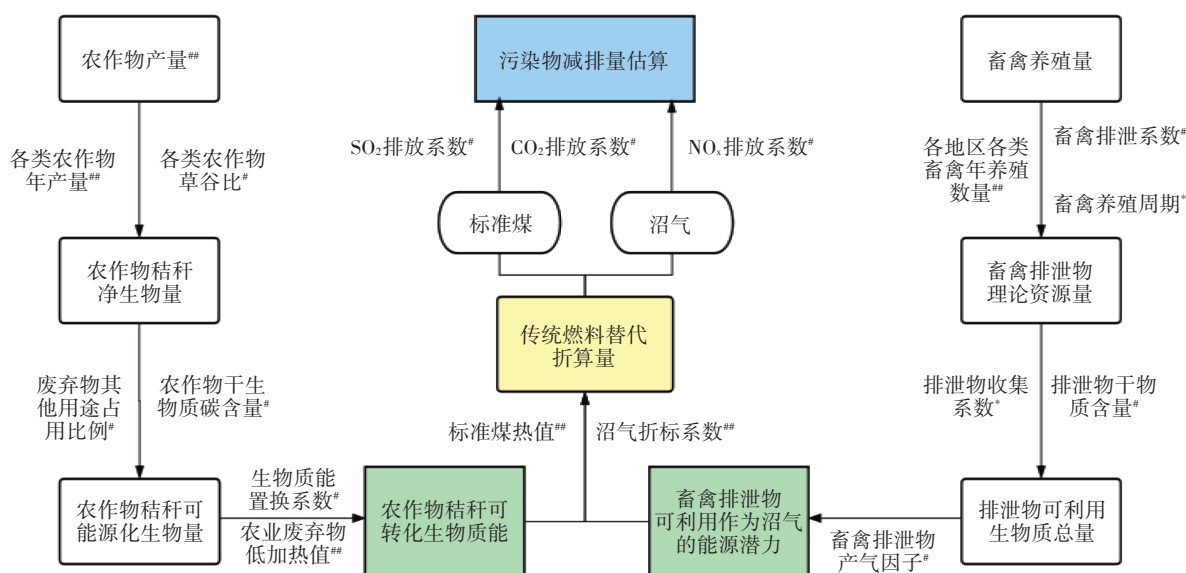
受到土壤有机碳保护计划、秸秆经济利用等条件的限制,通常并非所有的秸秆生物量都能作为生物质能的供能物质^[12]。参阅已有研究^[12],本研究采用以下通用计算模型进一步量化农作物秸秆可利用的生物量及其能源化潜力:

$$B_i=N_i\times\frac{\alpha}{\beta}$$
(2)

式中: B_i 为第*i*类农作物秸秆可利用的生物量,kg; α 为农作物秸秆可利用生物质量占总生物量的比例; β 为农作物的干生物质碳含量。

$$P_i=B_i\times(1-c-e-l)$$
(3)

式中: P_i 为第*i*类农作物秸秆可能源化的生物量,kg; c 为农作物秸秆为保持土壤碳库而应还田的生物量比例; e 为农作物秸秆用于动物饲料、工业材料和有机肥生产等经济活动的生物质比例; l 为农作物秸秆在能



*表示数据来源于实地调研,#表示数据来源于文献资料,##表示数据来源于统计年鉴及相关国家标准。具体取值详见1.3。

* represents that data from field survey, # indicates that data from the literature, and ## indicates that data from statistical yearbooks and relevant national standards, and the detailed values are presented in section 1.3.

图2 本研究技术路线图

Figure 2 Technical roadmap of the study

源生产全过程中的损失系数。

生物质原料转化为电能的过程会受到生物质能量势和转化系数这两个关键因素的影响^[12]。其中,低位发热量(Lower heating value, LHV)是计算生物质能源化潜力最常用的指标之一。基于上述参数,本研究所用农作物秸秆生物质能源化利用潜力的计算公式如下:

$$E = \sum P_i \times LHV \times C \quad (4)$$

式中: E 为农作物秸秆可转换的生物质能,MJ; LHV 为农业废弃物的低位发热量, $\text{MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$; C 为生物质能源转换系数。

1.2.2 畜禽排泄物生物质能潜力核算

本研究纳入核算的畜禽排泄物包括畜禽排出的粪便、尿及其与垫草的混合物。在作为生物质能进行供能时,一般处理方式是将畜禽的粪便转化为沼气进行使用,而沼气也是农村清洁供暖可利用的方式之一。本研究所用畜禽排泄物可用生物质量及其能源化潜力核算模型如下:

$$Q_i = N_i \times T_i \times EP_i \quad (5)$$

$$G_i = \sum_{j=1}^n Q_i \times H_{ij} \times W_{ij} \quad (6)$$

$$A_i = G_i \times P_i \quad (7)$$

式(5)中: Q_i 为第*i*类畜禽的排泄物理论资源量,kg; N_i 为第*i*类畜禽的年养殖数量,头; T_i 为第*i*类畜禽的养殖周期,d; EP_i 为第*i*类畜禽的排泄系数, $\text{kg} \cdot \text{头}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ 。式(6)中: G_i 为第*i*类畜禽的排泄物可利用生物质总量,kg; H_{ij} 为第*i*类畜禽的第*j*种排泄物的收集系数; W_{ij} 为第*i*类畜禽的第*j*种排泄物的干物质含量,%。式(7)中: A_i 为第*i*类畜禽排泄物可用作沼气的能源化潜力, m^3 ; P_i 为第*i*类畜禽排泄物的产气因子, $\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

1.2.3 生物质能替代传统燃料资源量折算

根据上述核算的农作物秸秆与畜禽排泄物生物质能源化潜力,折算可替代传统燃料(标准煤或天然气)的资源量,具体计算方式如下:

$$SCN_i = E_i / U \quad (8)$$

$$SCF_i = A_i \times Z \quad (9)$$

$$TN_i = SCN_i / Y \quad (10)$$

$$TF_i = SCF_i / Y \quad (11)$$

式中: SCN_i 为第*i*类农作物秸秆生物质能源化折合的标准煤资源量,kg; E_i 为第*i*类农作物秸秆可转换的生物质能,MJ; U 为标准煤热值系数, $\text{MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$; SCF_i 为第*i*类畜禽排泄物沼气能源化折合的标准煤资源量,kg; A_i 为第*i*类畜禽排泄物可用作沼气的能源化潜力, m^3 ; Z 为沼气折标准煤系数, $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$; TN_i 为第*i*类农作物秸

秆生物质能源化折合的天然气资源量, m^3 ; Y 为天然气折标准煤系数, $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$; TF_i 为第 i 类畜禽排泄物沼气能源化折合的天然气资源量, m^3 。

1.2.4 生物质能源清洁供暖污染物及碳减排效应估算

利用农业废弃物的生物质能进行清洁供暖可带来的污染物及碳的减排效应按照其替代煤燃烧所减少的排放量来估算,即生物质能折合标准煤燃烧的排放量与生物质能利用过程中的排放量的差值^[28-30]。本研究所用农村生物质能大气污染物(包括 SO_2 和 NO_x)及 CO_2 减排效应计算模型如下:

$$EEA_p = \sum_{i=1} FRT_i \times (F_{\text{SO}_2} \times F_{\text{NO}_x}) - \sum_{i=1} FR_i \times (F_{\text{SO}_2'} \times F_{\text{NO}_x'}) \quad (12)$$

$$EEA_c = \sum_{i=1} FRT_i \times F_{\text{CO}_2} - \sum_{i=1} FR_i \times F_{\text{CO}_2'} \quad (13)$$

式中: EEA_p 为大气污染物减排效应; FRT_i 为第 i 种生物质能折合的标准煤量, t ; F_{SO_2} 和 F_{NO_x} 为标准煤燃烧的 SO_2 和 NO_x 排放系数, $\text{kg} \cdot \text{t}^{-1}$; FR_i 为第 i 种生物质能的资源量, t ; $F_{\text{SO}_2'}$ 和 $F_{\text{NO}_x'}$ 为生物质能利用过程中产生 SO_2 和 NO_x 的排放系数, $\text{kg} \cdot \text{t}^{-1}$; EEA_c 为 CO_2 减排效应; F_{CO_2} 为标准煤燃烧的 CO_2 排放系数, $\text{kg} \cdot \text{t}^{-1}$; $F_{\text{CO}_2'}$ 为生物质能利用过程中的 CO_2 排放系数, $\text{kg} \cdot \text{t}^{-1}$ 。

1.3 关键参数与数据来源

1.3.1 农作物秸秆生物质能源化潜力核算关键参数

本研究区内最主要的农作物为小麦和玉米,其他主要农作物包括水稻、豆类、薯类、油料作物、棉花、蔬菜、糖类和麻类等。结合对研究区内部分农作物种植地区的实地调研与统计资料^[31],蔬菜类种植过程中几乎不产生可回收利用的秸秆,而糖类作物和麻类作物种植面积极少,因此蔬菜、糖类和麻类作物未归入计算范围内。参阅相关研究^[31-32],纳入本研究核算范围的

8类农作物及其草谷比如表1所示。

参阅相关研究^[12,15],由农作物秸秆可利用的生物质转化为可能源化的生物量计算过程中所用参数 α 取值为0.5, β 为0.5, c 为0.313, e 为0.499, l 为0.005。

由农作物秸秆可能源化的生物量转化为生物质能量的计算过程中,所用参数 LHV 的值根据《中国能源统计年鉴》和相关文献资料^[33]综合确定,取值为 $17.3 \text{ MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。转化系数 C 通常受到多重因素的影响,考虑到目前全国没有成熟的、固定的生物能源利用模式,实际的生物能源技术潜力会随着转换技术的不同而有所不同^[29-30,34]。因此本研究中更偏重于生物质能的可用性,而相对忽略转化的技术问题,参考相关研究^[12],能量转化系数 C 取值为0.21。

1.3.2 畜禽排泄物生物质能潜力核算关键参数

本研究区涵盖的区域划分跨度较大,涉及华北、华东和中南三个畜禽养殖区。由于地理位置与农业资源条件不同,畜禽类型、养殖周期^[35-36]、排泄物比例系数、收集系数等参数值也会存在空间异质性,参阅相关研究^[29-30,37-38]并综合对研究区部分畜禽养殖场及菜肉零售市场的实地调研情况,本研究中畜禽排泄物生物质能潜力核算过程中所涉及关键参数取值如表2所示。

1.3.3 生物质能替代传统燃料资源量折算过程相关参数

本研究将农作物秸秆生物质能源化潜力及畜禽排泄物转化为沼气能源的潜力,折算为可替代传统燃料(标准煤、天然气)的资源量。这一折算过程所涉及的关键参数中,标准煤热值系数 U 参考国家标准《综合能耗计算通则》(GB/T 2589—2020),取值为 $29.307 \text{ MJ} \cdot \text{kg}^{-1}$;沼气折标准煤系数 Z 和天然气折标准煤系数 Y 参考《中国能源统计年鉴2020》,取值分别为 $0.714 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ (以标准煤计)和 $1.215 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ (以标准煤计)。

1.3.4 生物质能源清洁供暖污染物和碳减排量估算相关参数

本研究所用农村生物质能大气污染物(包括 SO_2 和 NO_x)及 CO_2 减排量估算中排放系数的确定参阅相关研究^[34],具体取值情况如表3所示。

表1 农作物秸秆生物质能核算过程所涉及农作物及其草谷比
Table 1 Crops and grass-grain ratio involved in estimation of biomass energy of crop straw

农作物类别 Category of crops	草谷比 Grass-grain ratio(r)
水稻 Paddy rice	1.00
小麦 Wheat	1.17
玉米 Maize	1.04
豆类 Beans	1.60
薯类 Manioc	0.57
油料作物 Oilseeds	1.84
棉花 Cotton	3.00
烟类作物 Tobacco	0.71

2 结果与分析

2.1 农业废弃物的生物质能潜力

2.1.1 农作物秸秆的生物质能潜力

“26+2”研究区内8种农作物的生物质能潜力空间分布如图3所示。从研究区整体来看,“26+2”城市群内农村地区纳入计算的主要农作物秸秆的生物质能潜力总和为 $5.35 \times 10^{16} \text{ J}$,由此可见该区域内废弃生

表2 研究区涉及的畜禽类型、养殖周期、排泄物比例系数、收集系数等关键参数取值

Table 2 Values of key parameters such as livestock and poultry types, culture cycle, excretion specificity coefficient, and collection coefficient in the study area

禽畜类型 Livestock and poultry types	猪 Pig		牛 Cattle		家禽 Poultry
养殖周期 Breeding cycle/d	199		365		210
排泄类型 Excretion type	粪便	尿液	粪便	尿液	粪便
尿比例 Urine specific gravity	1.02		1.037 5		
排泄系数 Excretion coefficient/(kg·头 ⁻¹ ·d ⁻¹)	华北 1.925	华北 2.92	华北 23.935	华北 10.520	华北 0.145
	华东 1.35	华东 3.881	华东 23.2	华东 12.528	华东 0.185
	中南 1.43	中南 4.503	中南 23.44	中南 3.699	中南 0.09
收集系数 Collection coefficient	0.9	0.9	0.6	0.6	0.6
产气因子 Gas production factor/(m ³ ·kg ⁻¹)	0.42		0.30		0.49
干物质含量 Dry matter content/%	19	0.5	20	0.4	27.5

注:表中尿比例为该类禽畜尿液与水的密度(1 kg·L⁻¹)的比值,用于将尿液排泄系数的单位由 L·头⁻¹·d⁻¹换算为 kg·头⁻¹·d⁻¹。家禽的养殖周期、排泄系数、收集系数、产气因子及干物质含量5个常数参数均参照鸡的相关数值进行取值。

Note: The specific gravity of urine is the ratio of the density of urine and water (1 kg·L⁻¹) of such livestock, and it is used to convert the unit of urinary excretion coefficient from L·head⁻¹·d⁻¹ to kg·head⁻¹·d⁻¹. The five constant parameters of breeding cycle, excretion coefficient, collection coefficient, gas production factor, and dry matter content of poultry were calculated according to the relevant values of chicken.

表3 农作物秸秆和畜禽排泄物生物质折合标煤燃烧及其能源化利用的排放系数

Table 3 Emission coefficient of biomass of crop straw and livestock excreta converted to standard coal combustion and its energy utilization

废弃物种类 Waste type	利用方式 Utilization mode	SO ₂ /(kg·t ⁻¹)	NO _x /(kg·t ⁻¹)	CO ₂ /(kg·t ⁻¹)
农作物秸秆 Crop straw	折合成标准煤	28.5	7.04	2 554.31
	生物质能利用	5.74×10 ⁻²	1.95	0
畜禽排泄物 Livestock and poultry excreta	折合成标准煤	28.5	7.04	2 554.31
	生物质(沼气)利用	0	0	0

注:假设生物质能的CO₂净排放为0(直接作为燃料燃烧,不考虑进一步转换为其他生物质能源)。

Note: The net CO₂ emission of biomass energy is assumed to be zero (direct combustion as fuel, without further conversion to other biomass energy).

物质的资源化利用是大有可为的。其中,小麦、玉米和油料作物秸秆及其加工剩余物是研究区内农业生物质资源的三大主要来源,分别占农作物秸秆的生物质能潜力总量的46.7%、42.5%和5.2%,累计占比高达94.4%。小麦和玉米是研究区内最主要的粮食作物,播种面积较大,因此具有最高的生物质能潜力;而油料作物的播种面积虽然较少,但其草谷比较高,因此表现出较棉花、水稻、豆类等更大的生物质能潜力。此外,通过查阅统计资料发现,上述3种作物,特别是小麦和玉米的播种面积和产量在年际间的波动都很小,这说明研究区内农作物秸秆的生物质资源量具有一定的稳定性。

从空间分布格局(图3)来看,研究区内农作物生物质能潜力在山区较低而在平原区较高,整体呈现从西北向东南逐渐增大的趋势。除水稻生物质能以外,其他农作物的生物质高能区主要分布在鲁西北和冀东南地区(如德州、聊城、邯郸等地)及山东菏泽、河北

保定等典型区域,其生物质能潜力值总和普遍大于30亿MJ;而北京、山西两地的农作物的生物质潜力相对较低,大部分城市生物质能潜力值总和低于10亿MJ,这主要与北京市耕地面积较少而山西省涉及的城市主要分布于山区有关。按不同农作物进一步具体分析发现:①小麦和玉米的生物能势空间分布呈现出较高的相似度,其中小麦生物能势最高的三个城市分别为山东菏泽、德州和河南新乡,数值在16亿~23亿MJ之间,玉米生物能势最高的三个城市分别为山东菏泽、德州和河北保定,数值在15亿~20亿MJ之间,这两种作物生物能势较高的其他城市也大多分布于河北省与山东省的交界处;②豆类、棉花、薯类和油料这4种农作物的生物能势空间分布在整体上与小麦、玉米比较类似,但最高能势所在城市略有不同,其中豆类在山东济宁、棉花在河北邢台、薯类在河北保定、油料作物在河南开封分别呈现出最高的生物能势;③水稻的生物能势空间分布集中于山东及河南省

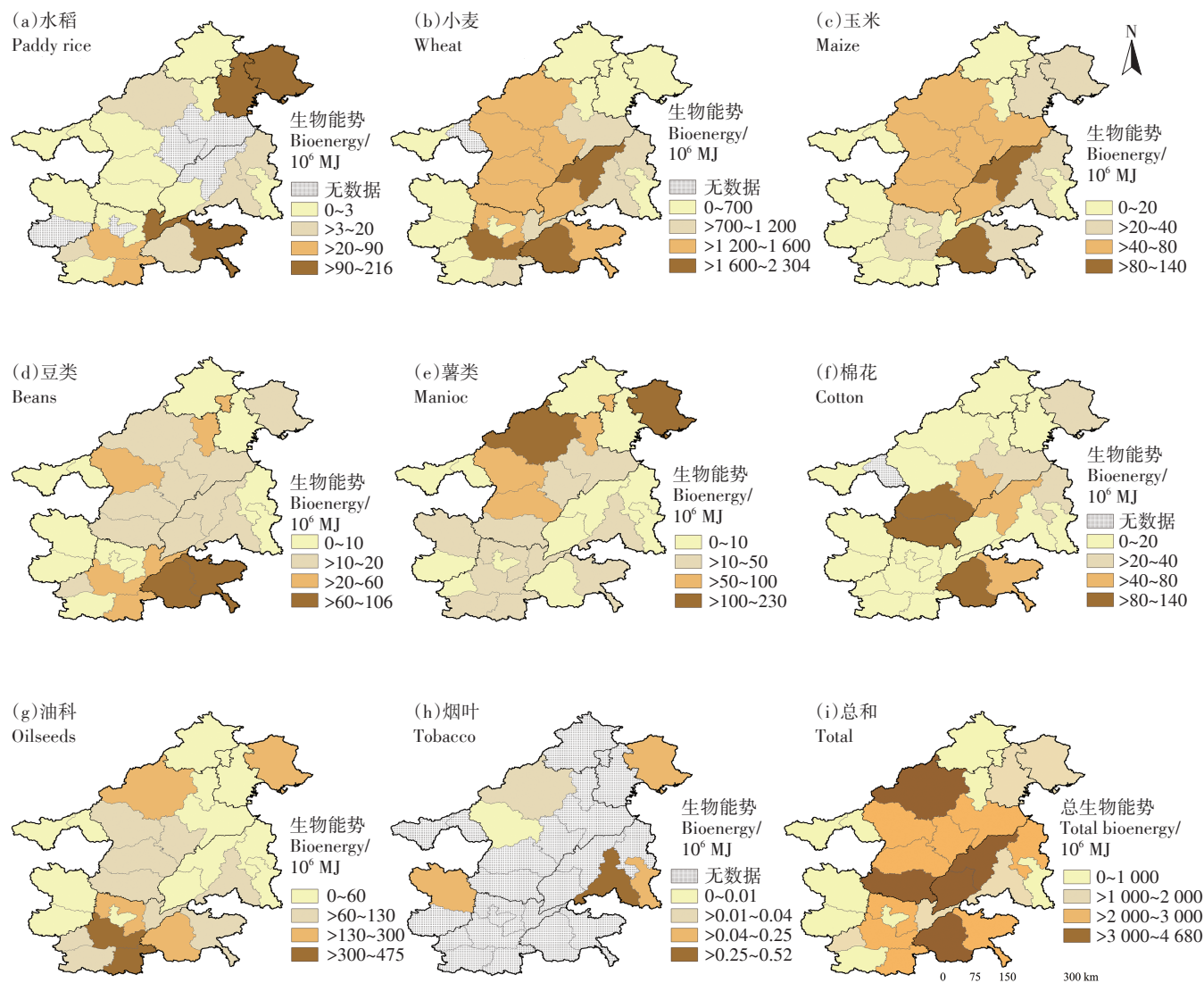


图3 研究区内8种农作物的生物质能潜力空间分布

Figure 3 Spatial distribution of biomass energy potential of eight crops in the study area

最南的城市和河北唐山地区,部分地区的水稻生物势能超过2亿MJ,前者受气候影响相对适宜种植水稻,后者因地理区位(靠近东北地区)和农民历史种植习惯而有种植水稻的传统;④烟叶类作物仅分布于7个城市,其中山东省济宁市和济南市具有较高的生物质能势,其数值达到51万MJ。

2.1.2 畜禽排泄物的生物质能潜力

本研究以猪、牛、家禽的粪便作为畜禽排泄物生物质能潜力资源量核算的主要对象,计算获得不同畜禽排泄物生物质能,并通过沼气潜力这一概念表现生物质能潜力的资源量大小。研究区内3种畜禽排泄物的生物质能潜力空间分布如图4所示。从研究区整体来看,“26+2”城市群农村地区的主要畜禽排泄

物沼气潜力的理论可获得量约为 $6.77 \times 10^9 \text{ m}^3$ 。其中,家禽排泄物的沼气潜力占总量的一半以上(52%),远超牛(34%)和猪(14%)的排泄物沼气潜力占比,因此,以家禽养殖业为核心的沼气潜力开发将是该区域农业废弃物资源化利用未来发展的重要方向。

从各类畜禽排泄物的生物质能总潜力看,其空间分布表现为在山东省、河北省和天津市相对较高(大部分城市畜禽排泄物的沼气潜力超过1亿 m^3),而在河南省、山西省及北京市相对较低(在2000万~1亿 m^3 之间)。从地级市的空间尺度分析,畜禽排泄物的生物质能潜力分布与农作物秸秆生物能势分布格局具有一定的相似性,但也略有差别,如河北石家庄的农作物秸秆生物能势处于中等水平,但其畜禽排泄物

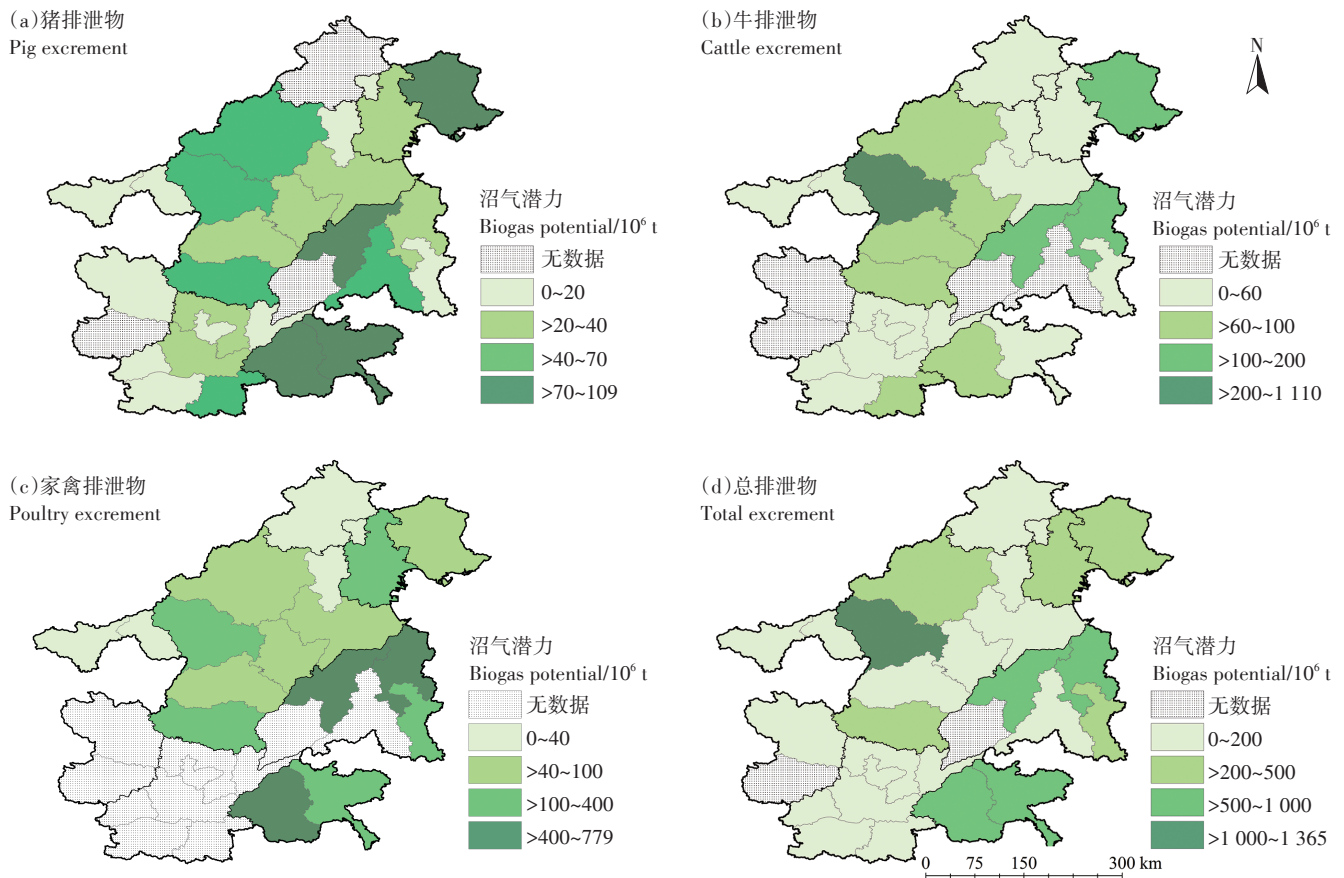


图4 研究区内3种畜禽排泄物的生物质能潜力空间分布

Figure 4 Spatial distribution of biomass energy potential of three kinds of livestock and poultry excreta in the study area

的生物质能潜力却远高于其他城市。这主要是由于石家庄的牛养殖业具有相当突出的生物质能开发利用潜力,石家庄的牛排泄物生物质能非常高,是排在第二的河北唐山的6倍以上。按不同养殖类型进一步分析得到:①猪养殖业的生物质能潜力表现为在山东省相对最高,菏泽市、德州市和济宁市排在研究区所有城市的前3名,在8 000万~1亿 m^3 之间;其次是

河北省的唐山市、石家庄市和保定市,分别排在第4至第6名,在5 000万~7 000万 m^3 之间。②牛养殖业的生物质能潜力高值多集中于河北省,除廊坊市外均处于相对较高水平,除此以外,与河北接壤的山东省滨州市和德州市也具有较高潜力。③家禽养殖业的生物质能潜力高值明显集中于山东地区,此外河北省石家庄市、邯郸市以及天津市也略高于周围区域。

表4 研究区农作物和畜禽排泄物的生物质能可替代的传统燃料资源量

Table 4 Comparison between bioenergy alternatives and traditional fuel resources for crops and livestock and poultry excreta in the study area

地区 Region	标准煤 Standard coal/ 10^3 t		天然气 Natural gas/ 10^6 m^3	
	农作物秸秆 Crop straw	畜禽排泄物 Livestock and poultry	农作物秸秆 Crop straw	畜禽排泄物 Livestock and poultry
北京市 Beijing City	5	23	4	19
天津市 Tianjin City	41	181	34	149
河北省 Hebei Province	675	2 029	556	1 670
河南省 Henan Province	413	216	340	178
山东省 Shandong Province	656	2 359	540	1 941
山西省 Shanxi Province	36	23	30	19
总计 Total	1 826	4 831	1 504	3 976

2.2 生物质能替代的传统燃料资源量

研究区农作物及畜禽排泄物生物质能可替代的传统资源量见表4。总体上看,研究区内可用于能源化的农作物秸秆生物质资源量折合标准煤约182.6万t,折合天然气量约15.0亿m³;畜禽排泄物的生物质资源量折合标准煤约483.1万t,折合天然气量约39.8亿m³。显然,养殖业的废弃物若作为生物质能利用,可替代的传统燃料资源量明显高于种植业。种植业与养殖业废弃物循环利用后,可替代的传统燃料资源总量相当可观,合计相当于减少约666万t标准煤或55亿m³天然气的燃烧排放。

从种植业废弃物(农作物秸秆)的生物质能替代效应看,在省域尺度上整体分为3个梯队。以折合标准煤为参比量,河北、山东、河南三省为第一梯队,替代标准煤资源量为40万~70万t;天津市和山西省为第二梯队,替代标准煤资源量为3万~4万t;北京

市为第三梯队,替代标准煤资源量为0.5万t(图5)。从养殖业废弃物(畜禽排泄物)的生物质能替代效应看,在省域尺度上也可整体划分为3个梯队,但分组结果与种植业略有不同。河北和山东两省为第一梯队,畜禽排泄物生物质能可替代标准煤资源量为200万t以上;河南省与天津市为第二梯队,可替代的标准煤资源量为20万t左右;山西省和北京市为第三梯队,可替代标准煤资源量为2万t左右,三个梯队形成明显的数量级差异(图6)。

2.3 生物质能清洁供暖的污染物和碳减排量

研究区农作物和畜禽排泄物的生物质能清洁供暖可减少的污染物及CO₂排放量见表5。研究结果表明,研究区内总体可利用生物质潜力折合标准煤资源量约666万t,通过利用农作物秸秆及畜禽排泄物进行清洁供暖,相较于标准煤可减少污染物(SO₂、NO_x)排放量约21万t,可降低CO₂排放量约1 701万t。其中,

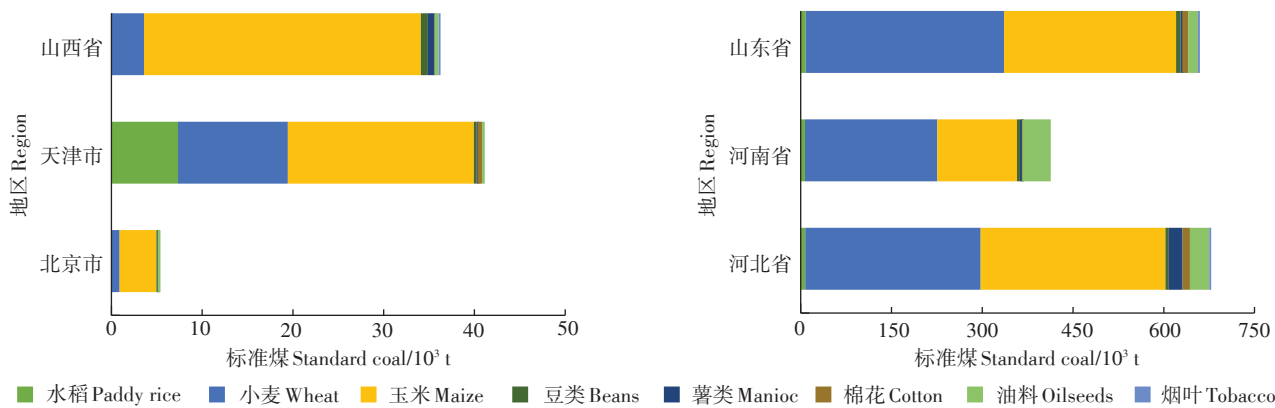


图5 研究区农作物生物质能折算标准煤资源量

Figure 5 Standard coal resource conversion from crop biomass energy in the study area

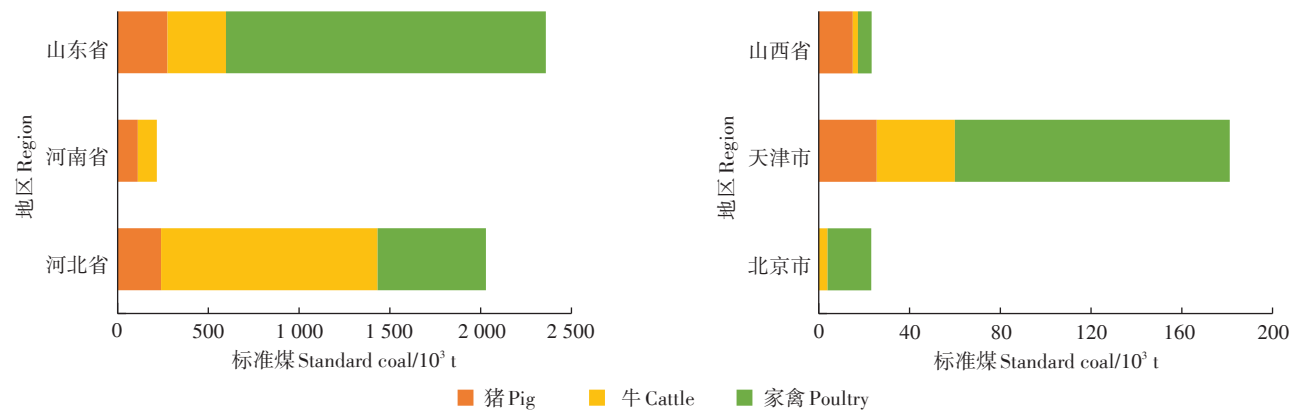


图6 研究区畜禽排泄物生物质能折算标准煤资源量

Figure 6 Standard coal resources conversion from livestock excreta biomass energy in the study area

表5 研究区农作物和畜禽排泄物的生物质能清洁供暖可减少的污染物及CO₂排放量(万t)Table 5 Bioenergy clean heating for reduced pollutants and carbon dioxide emissions from crops and livestock excreta in the study area(10⁴ t)

地区 Region	类型 Type	农作物秸秆干物质 Dry matter of crop straw	畜禽排泄物干物质 Dry matter of livestock and poultry excrement	总量 Total amount
北京市 Beijing City	污染物	0.01	0.08	0.09
	CO ₂	1.33	5.91	7.24
天津市 Tianjin City	污染物	0.08	0.64	0.16
	CO ₂	10.46	46.27	56.73
河北省 Hebei Province	污染物	1.31	7.21	8.52
	CO ₂	172.47	518.31	690.78
河南省 Henan Province	污染物	0.80	0.77	1.57
	CO ₂	105.54	55.14	160.68
山东省 Shandong Province	污染物	1.27	8.38	9.65
	CO ₂	167.67	602.62	770.29
山西省 Shanxi Province	污染物	0.07	0.08	0.15
	CO ₂	9.21	5.95	15.16
总计 Total	污染物	3.54	17.16	20.71
	CO ₂	466.68	1 234.20	1 700.88

将农作物秸秆生物质能用于清洁供暖,可减少污染物(SO₂、NO_x)排放量约3.5万t,可减少CO₂排放量约466.7万t;将畜禽排泄物转化为沼气进行清洁供暖,可减少污染物(SO₂、NO_x)排放量约为17.2万t,减少CO₂排放量约1 234.2万t。总体上,“26+2”城市可利用生物质潜力较大,特别是在山东省和河北省,若将生物质能充分利用于清洁供暖,将达到相当显著的减排效果,不仅能有效降低空气污染物排放,还能为实现“双碳”目标作出贡献。

综上,北方农村清洁供暖先行区(“26+2”城市)废弃生物质(农作物秸秆和畜禽排泄物)能源化利用潜力巨大,加之该区域的种植业与养殖业规模在年际间的变化趋于稳定,理论上可资源化利用的生物质能供应潜力具有内在稳定性。同时,由于生物质能清洁供暖对污染物(SO₂、NO_x)及CO₂减排具有一定的积极作用,且有良好的生态效应,建议将生物质能广泛利用到清洁供暖中,并不断提高技术水平,降低发展成本,最大程度地减少利用过程中的环境污染和碳排放。

3 讨论

3.1 农业废弃物生物质能潜力空间分布

研究区内农作物秸秆资源种类丰富,以小麦和玉米为主,生物质能潜力的高值区集中于山东、河北和河南三省。张蓓蓓^[39]对全国各省份主要农作物秸秆

能源潜力进行评估的结果显示,这三个省份在全国属于排名前五的水平,且在生态区的统计结果中,华北地区也是潜力最高的区域;张晓庆等^[31]的研究也表明这三省是秸秆资源量的中高产区。这两项研究都佐证了本研究得出的空间分布结果。对于畜禽排泄物的生物质能潜力,朱建春等^[40]在全国省域尺度的评估结果显示,“26+2”地区所在的省份能源潜力较大,特别是山东省;张蓓蓓^[39]评估的主要畜禽粪便的沼气生产潜力结果显示,排在全国前两名的分别是山东和河北,这与本研究的结果也一致。上述比较说明本研究得出的农业废弃物生物质能源潜力空间分布在整体上符合已有研究揭示的特征,但本研究进一步在更精细的空间尺度(地级市)给出了细化的评估结果和分布格局,且首次以“26+2”京津冀大气污染传输通道的城市群农村地区作为评估对象,可为该区域的农业低碳转型发展提供针对性的定量参考。

3.2 评估结果的不确定性

本研究对农业废弃物的生物质能潜力及其减排效应的估算过程中,涉及到草谷比、低位发热量、标准煤热值系数、标准煤燃烧的大气污染物排放系数等参数,笔者有针对性地收集了已发表的有关文献和统计资料,并进行了比较与整理,力求对每个参数都赋予合理的取值,尽可能地提高估算结果的精度。在这些经验参数的取值过程中,本研究考虑了多源信息的对比验证和地理空间的异质性(如畜禽排泄系数),但囿

于目前生物质能有关技术仍在发展阶段,全国尚未形成统一且成熟的开发利用模式,也未出台相关系数的标准文件,本研究采用这种整合已有研究和多源资料的方式确定关键参数,可能使得估算结果存在偏差。例如,山西省主产玉米品种主要为“太玉339”,其玉米株高较高,玉米整体的谷草比略高于文中取值1.04,因此对山西省玉米而言,其计算值略低于实际值;而河南省小麦种植面积较广,其优势品种主要为“济麦22”,秸秆矮,草谷比略低于文中取值1.17,则其计算值将高于实际值;河北的家禽排泄系数平均值为0.125^[41],略低于本研究取值0.145,则其计算值将高于实际值。当然,这种偏差带来的评估结果之不确定性也普遍存在于类似研究中^[40],未来若能收集到各地区更详细的参数值,将进一步提高本研究估算结果的准确性。

3.3 农村地区生物质能清洁供暖模式的推广

基于“生物质能潜力核算-替代传统燃料资源量折算-污染物及碳减排效应估算”的研究框架,本研究以农村供暖高排放和低碳转型发展的重点区域“26+2”地区为研究对象,利用农作物秸秆和畜禽排泄物这两种农业废弃物进行能源结构转型的路径探讨。空间分析结果表明,受播种面积与种植结构、养殖规模与畜禽种类、地形、城镇化发展等多重因素影响,农村生物质能潜力及其减排效果在不同地区之间存在差异。要增强农业废弃物生物质能的可持续发展能力,应充分发挥各地区的农业资源优势,结合不同省市内部的资源禀赋与实际发展条件,科学合理地布局农业废弃生物质能源化利用产业。如北京市受耕地数量和经济发展的影响,无论是种植业还是养殖业都欠发达,但其毗邻的保定市可为北京南部地区(如房山、大兴等)提供一定的生物质能支持,天津市和唐山市可以为北京北部地区(如平谷、密云)提供支持。与之类似,山西省阳泉市与太原市可考虑与之毗邻的河北省石家庄市的清洁能源补给,山西省长治市和晋城市可考虑与之毗邻的河北省邯郸市的清洁能源补给。河南省虽然在养殖业废弃物生物质能利用方面的潜力不高,但可充分挖掘农作物秸秆的利用潜力,为农村地区提供清洁能源。

4 结论

(1)“26+2”京津冀大气污染传输通道城市群农村地区8种主要农作物秸秆的生物质能潜力总和为 5.35×10^{16} J,其中小麦和玉米秸秆资源化利用潜力最

高,特别是在河北、山东和河南等产粮大省,可有效替代大量煤炭或天然气的使用。

(2)“26+2”京津冀大气污染传输通道城市群农村地区的畜禽排泄物转化为沼气的潜力资源量为 6.77×10^9 m³,其生物质能利用潜力明显高于种植业,且家禽养殖业占比最高。空间格局整体呈现为三个梯队:山东和河北最高,其次为河南和天津,山西和北京最低。

(3)种植业和养殖业废弃物的农村生物质能若用于清洁供暖,相较于标准煤可减少污染物(SO₂、NO_x)排放量约21万t,降低CO₂排放量约1701万t。

(4)从区域协同发展和减排同责的角度看,应统筹考虑生物质资源空间分布特征,明确生物质能在清洁取暖用能中的地位,推动农村地区散煤替代,实现从“农业废弃物”到“农村供暖源”的绿色低碳转型发展。

参考文献:

- [1] LIU L C, WU G, WANG J N, et al. China's carbon emissions from urban and rural households during 1992—2007[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2011, 19(15):1754—1762.
- [2] 金书秦, 林煜, 牛坤. 以低碳带动农业绿色转型:中国农业碳排放特征及其减排路径[J]. *改革*, 2021(5):29—37. JIN S Q, LIN Y, NIU K. Driving green transformation of agriculture with low carbon: Characteristics of agricultural carbon emissions and its emission reduction path in China[J]. *Reform*, 2021(5):29—37.
- [3] 国家能源局. 北方地区冬季清洁取暖规划(2017—2021)解读[EB/OL]. (2018—01—24)[2022—02—10]. http://www.nea.gov.cn/2018-01/24/c_136921343.htm. National Energy Administration of the PRC. Interpretation of winter clean heating plan in northern China[EB/OL] (2017—2021). (2018—01—24)[2022—02—10]. http://www.nea.gov.cn/2018-01/24/c_136921343.htm.
- [4] 支国瑞, 杨俊超, 张涛, 等. 我国北方农村生活燃煤情况调查、排放估算及政策启示[J]. *环境科学研究*, 2015, 28(8):1179—1185. ZHI G R, YANG J C, ZHANG T, et al. Rural household coal use survey, emission estimation and policy implications[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2015, 28(8):1179—1185.
- [5] AIE. Delivering sustainable bioenergy[N]. International Energy Agency, 2017—12—07.
- [6] 谢光辉. 非粮生物质原料体系研发进展及方向[J]. *中国农业大学学报*, 2012, 17(6):1—19. XIE G H. Progress and direction of non-food biomass feedstock supply research and development in China[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2012, 17(6):1—19.
- [7] 孙培勤, 孙绍晖, 常春, 等. 我国生物质能源现代化应用前景展望(一)——生物质资源和供给[J]. *中外能源*, 2014, 19(6):21—28. SUN P Q, SUN S H, CHANG C, et al. The prospects for modern application of biomass energy in China(I): Biomass resources and supply [J]. *Sino-Global Energy*, 2014, 19(6):21—28.

- [8] 石元春. 决胜生物质[M]. 北京: 中国农业大学出版社, 2011.
SHI Y C. Biomass: To win the future[M]. Beijing: China Agricultural University Press, 2011.
- [9] 石元春. 谈发展生物质产业中的几个问题[J]. 中国基础科学, 2005(6): 3-6. SHI Y C. Issues problems on developing biomass industry[J]. *China Basic Science*, 2005(6): 3-6.
- [10] 张祎旋. 中国秸秆等废弃生物质能源化利用的碳减排和经济效益评价[D]. 北京: 中国农业大学, 2019: 1-5, 30-41. ZHANG Y X. Assessment of carbon mitigation rates and economic benefits of crop residue and biowaste utilization for energy in China[D]. Beijing: China Agricultural University, 2019: 1-5, 30-41.
- [11] 周中仁. 中国北方农村家庭生物质能可持续利用研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2008: 14-29. ZHOU Z R. Study on sustainable utilization of rural household biomass energy in northern China[D]. Beijing: China Agricultural University, 2008: 14-29.
- [12] NIE Y Y, CHANG S Y, CAI W J, et al. Spatial distribution of usable biomass feedstock and technical bioenergy potential in China[J]. *GCB Bioenergy*, 2020, 12(1): 54-70.
- [13] 赵胜男, 崔胜辉, 齐涛, 等. 福建省有机废弃物资源化利用碳减排潜力研究[J]. 中国人口·资源与环境, 2010, 20(9): 30-35. ZHAO S N, CUI S H, LIN T, et al. Research on carbon mitigation potential of organic waste reutilization in Fujian Province[J]. *China Population, Resources and Environment*, 2010, 20(9): 30-35.
- [14] 谭祖琴, 徐文修. 新疆农村有机废弃物资源量概算及沼气潜力分析[J]. 可再生能源, 2008(2): 104-106. TAN Z Q, XU W X. The estimation on resource and its biogas potentiality of rural organic wastes in Xinjiang[J]. *Renewable Energy Resources*, 2008(2): 104-106.
- [15] 郑健, 李红博, 李金平, 等. 生物质能源区域分布与能源化利用现状调查——基于甘肃全省的调研[J]. 中国农业资源与区划, 2019, 40(3): 53-60. ZHENG J, LI H B, LI J P, et al. Investigation on regional distribution and utilization of biomass energy in Gansu Province: Based on the investigation of Gansu Province[J]. *Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning*, 2019, 40(3): 53-60.
- [16] WANG L, HU G, XUN G, et al. Emission reductions potential for energy from municipal solid waste incineration in Chongqing[J]. *Renewable Energy*, 2009, 34(9): 2074-2079.
- [17] 穆献中, 余漱石, 徐鹏. 北京市生物质废弃物资源化利用潜力评估[J]. 可再生能源, 2017, 35(3): 323-328. MU X Z, YU S S, XU P. Potential evaluation of biomass waste utilization in Beijing[J]. *Renewable Energy Resources*, 2017, 35(3): 323-328.
- [18] 国家测绘地理信息局. 全国第一次地理国情普查公报[R]. 北京: 国家测绘地理信息局, 2017. State Bureau of Surveying and Mapping of the PRC. First national geographic conditions census of China [R]. Beijing: State Bureau of Surveying and Mapping of the PRC, 2017.
- [19] 霍丽丽, 姚宗路, 赵立欣, 等. 秸秆综合利用减排固碳贡献及潜力研究[J]. 农业机械学报, 2022, 53(1): 349-359. HUO L L, YAO Z L, ZHAO L X, et al. Contribution and potential of comprehensive utilization of straw in GHG emission reduction and carbon sequestration [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2022, 53(1): 349-359.
- [20] MEHMET A D, SAMUEL A S, ERNEST F A. Does biomass energy drive environmental sustainability? An SDG perspective for top five biomass consuming countries[J]. *Biomass and Bioenergy*, 2021, 149: 106076.
- [21] SUN H, WANG E Z, LI X, et al. Potential biomethane production from crop residues in China: Contributions to carbon neutrality[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2021, 148: 111360.
- [22] KUNWA R P, MONIKA Y, NUPUR K, et al. Strategies to improve solid state anaerobic bioconversion of lignocellulosic biomass: An overview[J]. *Bioresource Technology*, 2021, 331: 125036.
- [23] LI Y Y, QI C R, ZHANG Y R, et al. Anaerobic digestion of agricultural wastes from liquid to solid state: Performance and environmental-economic comparison[J]. *Bioresource Technology*, 2021, 332: 125080.
- [24] 农业农村部. 中国农业年鉴(2018)[M]. 北京: 中国农业出版社, 2018. Ministry of Agriculture and Rural Affairs of the PRC. China agriculture yearbook (2018) [M]. Beijing: China Agriculture Press, 2018.
- [25] 中国气象局. 历史天气查询[DB/OL].[2022-02-20]. <https://lishi.tianqi.com/>. China Meteorological Administration. Historical weather query[DB/OL].[2022-02-20]. <https://lishi.tianqi.com/>.
- [26] 中国电力新闻网. 推动我国能源结构调整实现节能减排[EB/OL]. (2021-02-09)[2022-02-26]. http://www.cpnw.com.cn/shouye/yaowen/202102/t20210209_1344257_wap.html. China Power News Network. Promote the adjustment of China's energy structure to achieve energy conservation and emission reduction[EB/OL]. (2021-02-09)[2022-02-26]. http://www.cpnw.com.cn/shouye/yaowen/202102/t20210209_1344257_wap.html.
- [27] 国家发展和改革委员会, 国家能源局, 财政部, 等. 关于印发北方地区冬季清洁取暖规划(2017—2021年)的通知[EB/OL]. (2017-12-20)[2022-02-20]. http://www.gov.cn/xinwen/2017-12/20/content_5248855.htm. National Development and Reform Commission, National Energy Administration, Ministry of Finance of the PRC, et al. Notice on printing and distributing the plan for clean heating in winter in northern China (2017—2021)[EB/OL]. (2017-12-20)[2022-02-20]. http://www.gov.cn/xinwen/2017-12/20/content_5248855.htm.
- [28] 邓良伟, 吴有林, 丁能水, 等. 畜禽粪污资源化利用研究进展[J]. 中国沼气, 2019, 37(5): 3-14. DENG L W, WU Y L, DING N S, et al. A review of energy utilization of animal manure[J]. *China Biogas*, 2019, 37(5): 3-14.
- [29] 陈利洪, 舒帮荣, 李鑫. 基于排泄系数区域差异的中国畜禽粪便沼气潜力及其影响因素评价[J]. 中国沼气, 2019, 37(2): 7-11. CHEN L H, SHU B R, LI X. Evaluation of biogas potential of China's livestock and poultry manure and its influencing factors based on regional differences in excretion coefficient[J]. *China Biogas*, 2019, 37(2): 7-11.
- [30] YANG H N, DENG L W, WANG L, et al. Comparison of three biomass-retaining reactors of the ASBR, the UBF and the USR treating swine wastewater of biogas production[J]. *Renewable Energy*, 2019, 138: 521-530.
- [31] 张晓庆, 王梓凡, 参木友, 等. 中国农作物秸秆产量及综合利用现

- 状分析[J]. 中国农业大学学报, 2021, 26(9):30-41. ZHANG X Q, WANG Z F, CAN M Y, et al. Analysis of yield and current comprehensive utilization of crop straws in China[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2021, 26(9):30-41.
- [32] 高利伟, 马林, 张卫峰, 等. 中国作物秸秆养分资源数量估算及其利用状况[J]. 农业工程学报, 2009, 25(7):173-179. GAO L W, MA L, ZHANG W F, et al. Estimation of nutrient resource quantity of crop straw and its utilization situation in China[J]. *Transactions of the CSAE*, 2009, 25(7):173-179.
- [33] 胡润青. 中国生物质能技术路线图研究[M]. 北京:中国环境科学出版社, 2011:64-68. HU R Q. Research on China biomass energy technology roadmap[M]. Beijing: China Environmental Science Press, 2011:64-68.
- [34] 张亚平, 孙克勤, 左玉辉. 中国发展能源农业的环境效益的定量评价和地理分布格局分析[J]. 农业环境科学学报, 2010, 29(5):826-832. ZHANG Y P, SUN K Q, ZUO Y H. Quantitative appraisal of potential environmental benefits from the development of energy agriculture and its geographical distribution in China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2010, 29(5):826-832.
- [35] 王立刚, 李虎, 王迎春, 等. 小清河流域畜禽养殖结构变化及其粪便氮素污染负荷特征分析[J]. 农业环境科学学报, 2011, 30(5):986-992. WANG L G, LI H, WANG Y C, et al. Changes in livestock operation systems and their contributions to manure nitrogen pollution loading in Xiaoqinghe watershed, China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2011, 30(5):986-992.
- [36] 王方浩, 马文奇, 窦争霞, 等. 中国畜禽粪便产生量估算及环境效应[J]. 中国环境科学, 2006, 26(5):614-617. WANG F H, MA W Q, DOU Z X, et al. The estimation of the production amount of animal manure and its environmental effect in China[J]. *China Environmental Science*, 2006, 26(5):614-617.
- [37] 张敏, 刘庆玉, 李金洋, 等. 沈阳地区畜禽粪便资源量估算及沼气潜力分析[J]. 中国沼气, 2012, 30(5):55-57. ZHANG M, LIU Q Y, LI J Y, et al. Resource estimation of livestock and poultry manure and its biogas potentiality in Shenyang[J]. *China Biogas*, 2012, 30(5):55-57.
- [38] 田宜水. 中国规模化养殖场畜禽粪便资源沼气生产潜力评价[J]. 农业工程学报, 2012, 28(8):230-234. TIAN Y S. Potential assessment on biogas production by using livestock manure of large-scale farm in China[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2012, 28(8):230-234.
- [39] 张蓓蓓. 我国生物质原料资源及能源潜力评估[D]. 北京:中国农业大学, 2018:20-22, 33-34. ZHANG B B. Assessment of raw material supply capability and energy potential of biomass resources in China[D]. Beijing: China Agricultural University, 2018:20-22, 33-34.
- [40] 朱建春, 张增强, 樊志民, 等. 中国畜禽粪便的能源潜力与氮磷耕地负荷及总量控制[J]. 农业环境科学学报, 2014, 33(3):435-445. ZHU J C, ZHANG Z Q, FAN Z M, et al. Biogas potential, cropland load and total amount control of animal manure in China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2014, 33(3):435-445.
- [41] 白明刚. 河北畜禽养殖污染评价及对策研究[D]. 保定:河北农业大学, 2010. BAI M G. Research on the evaluation and countermeasures of the pollution from livestock and poultry breeding in Hebei[D]. Baoding: Hebei Agricultural University, 2010.