

引用格式:耿爱欣,潘文琦,杨红强.中国林木生物质能源替代煤炭的减排效益评估[J].资源科学,2020,42(3):536-547.[Geng A X, Pan W Q, Yang H Q. Quantifying the mitigating effects and benefits from substituting wood biomass for coal in energy production in China[J]. Resources Science, 2020, 42(3): 536-547.] DOI: 10.18402/resci.2020.03.12

# 中国林木生物质能源替代煤炭的减排效益评估

耿爱欣<sup>1,2</sup>,潘文琦<sup>1,2</sup>,杨红强<sup>1,2,3</sup>

(1.南京林业大学经济管理学院,南京210037;2.国家林业和草原局林产品经济贸易研究中心,南京210037;3.南京大学长江三角洲经济社会发展研究中心,南京210093)

**摘要:**应对全球气候变化的能源转型方案中,生物质能源替代化石燃料是重要的选项,中国资源丰富的林木生物质在替代化石燃料的能源转型中具有重要价值。本文以木质颗粒燃料及传统的化石燃料(煤炭)为研究对象,基于生命周期思想梳理不同能源系统的温室效应排放指标与经济评价指标边界,从传统的生命周期分析与经济指标分析两方面,探讨中国木质颗粒燃料替代煤炭的减排效益和经济效益。结果表明:①木质颗粒燃料替代煤炭供热或供电时,单位能量的供应能耗降低0.01~0.176 MJ,在碳中性假设下,木质颗粒燃料具有显著的碳减排效益;②平均市场价格下,木质颗粒的单位热能成本高于煤炭,即用木质颗粒燃料替代煤炭供能时,单位热能或电能的使用需要付出较高的燃料成本,约为16.06~34.16元;③敏感性分析表明,能量转换率、燃料热值和燃料的价格对替代效益的影响最为显著,提高能源使用效率、降低燃料价格等措施可以大幅度降低燃料替代使用成本,实现环境与经济双赢。生物质能源的开发及利用在未来中国能源结构转型中具有重要地位,本文从碳中性下的净减排、生物质原料问题、提高减排效率和财政补贴等方面提出了针对性建议。

**关键词:**林木生物质;木质颗粒燃料;化石燃料;碳中性;能源替代减排效益;经济效益

DOI: 10.18402/resci.2020.03.12

## 1 引言

气候变化的主要原因是化石燃料燃烧引起的温室气体排放,其中最为显著的是CO<sub>2</sub><sup>[1]</sup>。就中国当前经济发展情势而言,一次能源消费总量由1978年的5.7亿t标准煤增加至2018年的46.4亿t标准煤,化石能源占比一直维持在85%以上<sup>[2-4]</sup>。2015年11月,中国提交了应对气候变化国家自主贡献文件《强化应对气候变化行动——中国国家自主贡献》,提出2030年国家单位国内生产总值CO<sub>2</sub>排放比2005年下降60%~65%,非化石能源占一次能源消费比重达到20%左右的目标<sup>[5]</sup>。中国能源转型是实现社会经济高质量发展目标的重要选择<sup>[3,5]</sup>。

基于对能源安全和气候变化的担忧,开发利用以生物质能源为主的可再生能源,实现能源可持续

发展,已成为国际社会能源战略的发展共识<sup>[6]</sup>。在林木生物质储存、运输和转化为能源的过程中,木质颗粒形式的效率较高,具有重大减排潜力<sup>[7]</sup>。在欧美国家,木质颗粒燃料已实现大规模产业化,其优越的燃烧特性适用于所有类型的燃烧系统<sup>[7,8]</sup>。生物质能源替代减排有多种形式,选择不同的可替代能源系统以及能源转换技术,其实际替代减排效率会有所不同。在国际研究中,可替代能源系统主要有天然气、石油、煤炭和其他可再生能源等,生物质能源转换技术范围集中在供电、小型供热、区域供热、小型电热联产和大型电热联产<sup>[9]</sup>(图1)。考虑到煤炭能源系统的替代减排效率最高,本文将煤炭作为可替代能源,探讨在供电、供热2种能源技术下,木质颗粒燃料替代煤炭能源系统的减排效益。

收稿日期:2019-05-14;修订日期:2019-09-17

基金项目:江苏省“333高层次人才培养工程”科研项目(BRA2018070);国家社会科学基金重点项目(14AJY014);江苏省研究生科研与实践创新计划项目(SJKY19\_0902)。

作者简介:耿爱欣,女,山东诸城人,助理研究员,博士研究生,主要研究方向为气候变化与林产品替代减排。E-mail: gaxnjfu@163.com

通讯作者:杨红强,男,陕西渭南人,教授,博士生导师,研究员,主要研究方向为林产品贸易与环境。E-mail: yhqnfu@aliyun.com

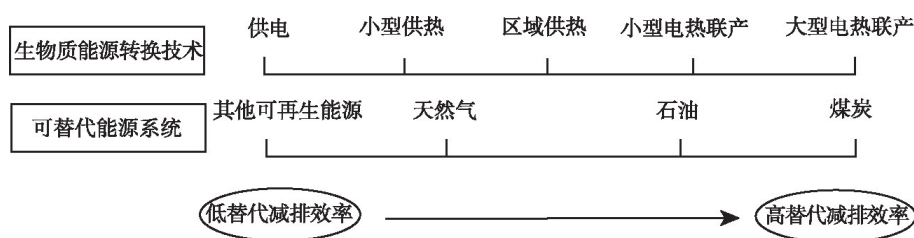


图1 生物质能源转换技术与能源减排效率的国际研究趋势

Figure 1 Trends of international research on biomass energy conversion technology and energy emission reduction efficiency

木质颗粒作为可再生能源在环境政策中起到关键作用,其日益增长的需求对环境产生的影响得到了广泛研究<sup>[10]</sup>。表1为木质颗粒燃料替代使用的国内外研究进展,已有成果主要集中在两方面:一是木质颗粒燃料替代化石燃料的减排效益评估;二是使用木质颗粒燃料的经济效益分析。迄今为止,从化石能源转向林木生物质能源的温室效应影响研究大多集中于电力部门——将木质颗粒作为主要燃料用于改造燃煤发电站,是减少与发电相关温室气体排放的有效选择;同时,木质颗粒还可以作为补充燃料(“与煤共燃”等)用于供热<sup>[11-14]</sup>、国际贸易和长途运输<sup>[15,16]</sup>。能源替代减排效益评估最常用的方法为生命周期评价(Life Cycle Assessment, LCA),这里涉及生物质燃料的碳中性争议。碳中

性观点认为生物质能源燃烧过程中释放的CO<sub>2</sub>可被作物再生吸收,实现碳均衡<sup>[17]</sup>,因此在最终使用阶段木质颗粒燃烧产生的CO<sub>2</sub>不计入温室气体排放总量(其他温室气体如甲烷(CH<sub>4</sub>)、氧化亚氮(N<sub>2</sub>O)等需要计入);非碳中性观点则认为生物质能源不会立即实现碳中性,这一目标的实现是生物质能源生命周期分析加上砍伐后作物再生碳汇量累积的结果,可能需要几十年甚至上百年,只有在长期合理的森林管理下才能实现温室气体净减排,不能将这部分CO<sub>2</sub>排除分析<sup>[1,18-20]</sup>。因此若不把木质颗粒视作碳中性产品,最终使用阶段木质颗粒燃烧产生的CO<sub>2</sub>和其他温室气体均需要计入排放总量。综合可知当木质颗粒燃料替代煤炭、石油和天然气用于供电或供热时,在碳中性的假设下,可替代的能源系统温

表1 木质颗粒燃料替代化石燃料的减排效益与减排成本研究

Table 1 Greenhouse gas reduction and cost efficiency of substituting wood pellet for fossil fuel

生物质能源用途及假设				减排效益评估			经济效益评估				
可替代燃料			用途		碳中性	非碳中性	评估方法	减排效果	评估方法	经济效果	
煤炭	石油	天然气	供热	供电						替代供能成本	替代减排成本
化石燃料平均值			√	√			LCA <sup>[15]</sup>	减排50%~68%	-	-	-
√				√		√	LCA+市场效应+土地利用效应 <sup>[16]</sup>	减排74%~85%	-	-	-
√	√	√	√	√	√		LCA <sup>[12]</sup>	减排81%~97%	LCC	油价较高时可行	
√		√		√	√		LCA <sup>[8]</sup>	减排83%~92%	LCC+非燃料可变成本	木质剩余物: 30~65 \$/t CO <sub>2</sub> e 圆木制粒: 100~170 \$/t CO <sub>2</sub> e	
√				√		√	LCA <sup>[13]</sup>	碳中性:减排63%~94% 非碳中性:减排40%~62%	市场价格	67.55~78.8 \$/t CO <sub>2</sub> e	
√				√		√	LCA <sup>[21]</sup>	减排>93%	LCC+碳价	与煤价、运距及产量相关	
√			√		√		LCA <sup>[22]</sup>	减排94%	市场价格	5.03~6.58 \$/GJ	
	√	√	√			√	使用排放 <sup>[14]</sup>	每t木粒减排1.37万t CO <sub>2</sub> e	运行成本	成本降低32.59%~67.05%	

室气体排放量可降低50%~97%<sup>[12,13,15,16,21]</sup>。

能源替代经济成本的研究相对较少,且由于各国实际情况存在差异,经济上的可行性也各不相同。能源替代的经济效益具有多种评估方式,有的研究从生命周期成本(Life Cycle Costing Analysis, LCC)的角度出发<sup>[12]</sup>,分析不同能源系统的供应成本、投资成本、运行维护成本等生命周期过程中各阶段的成本组成;有的研究则选择运行成本或市场价格进行评估<sup>[13,14,22]</sup>。衡量经济效益的单位选择也具有多样性,最为常见的是比较能源替代后的单位供能成本与单位减排量成本。如表1所示,由于不同国家的能源价格以及燃料工厂运作成本存在差异,经济效益的波动范围较大,但研究结果具有共性:即木质颗粒燃料用于燃料替代时具有显著的碳减排功效,但整体减排成本较高,政策制定者需要在单位温室气体减排量最大化和单位成本最小化之间进行权衡<sup>[12]</sup>。也有研究认为木质颗粒燃料替代不仅在技术上是可行的,同时还是实现碳减排目标最具成本吸引力的方式之一<sup>[23]</sup>,甚至会促进经济产出,如Joshi等<sup>[24]</sup>认为一个年生产能力为7.5万t的木质颗粒工厂的运营能够贡献1200万美元的经济产出,木质颗粒燃料将是一种具有竞争力的燃料来源。

中国林木生物质资源丰富,拥有种类繁多的能源树种、尚未充分利用的能源林以及大量林业生产剩余物。为促进能源和林业可持续发展,原国家林业局制定《全国林业生物质能源发展规划(2011—2020年)》,固体生物质成型燃料已具备较大规模产业化发展的条件<sup>[25]</sup>。但中国木质颗粒工业发展还处于相对初级阶段,针对木质颗粒燃料替代的实际应用效益评估很少,且现有的研究主要集中在碳储价值<sup>[26-28]</sup>和减排潜力等生态领域的问题上。然而,生物质燃料替代使用不仅具有生态意义,还具有经济意义,同时考虑传统的生命周期碳足迹分析与经济指标分析,对中国能源转型及燃料替代政策的制定至关重要<sup>[22,29]</sup>。因此,本文的主要目的在于从环境和经济两方面探讨木质颗粒在中国广泛使用的可行性。首先,在生命周期评价的基础上,分析比较不同能源系统的环境影响,评估木质颗粒燃料替代煤炭供热、供电的减排潜力;然后,纳入经济指标分析,在确定的系统边界内探讨2种能源系统下的单位供能成本;最后,对影响木质颗粒燃料温室气体

减排效率和能源供能成本的因素进行敏感性分析。

## 2 数据和方法

LCA可用来辨识和量化产品在整个生命周期过程中的资源、能源消耗和环境污染排放,进而评价其影响,已被广泛应用于能源的环境影响相关研究<sup>[22,30]</sup>。本文基于生命周期思想,在提供相同热量的基准下,分析木质颗粒燃料和煤炭在生命周期中各重要流程的能耗、排放足迹,对木质颗粒燃料主要替代方式的环境经济效益进行评估分析。

### 2.1 系统边界和功能单位

本文研究的系统边界为“从摇篮到坟墓”,涉及原料获取、燃料生产、运输和使用等完整生命周期过程。考虑在提供相同热量的基准下将不同能源系统进行比较,这里将功能单元定义为在中国生产1千瓦时(kW·h)电力和1兆焦(MJ)热能。

减排效益方面,图2的系统边界确定了本文LCA研究中包含的单元过程。木质颗粒燃料系统和化石能源系统分析均涵盖了以下步骤:①原材料获取,②燃料生产,③原材料和燃料运输,④燃料供热或供电。边界范围内仅考虑不同能源系统主要过程的影响,一些辅助工序(例如清洁和维护)以及废弃物处置等被排除在外。经济效益方面,本文将不同系统供能的燃料成本作为评价指标,即每生产1 kW·h电力或1 MJ热能所需付出的成本。

### 2.2 减排效益与经济效益评价指标

#### 2.2.1 减排效益指标

不同能源系统生命周期过程中会消耗大量的煤炭、石油、电力等能源,释放温室气体。本文在LCA方法的指导下,从生命周期能耗和生命周期温室气体排放量2个方面来评价木质颗粒燃料替代使用的减排效益。

(1)生命周期能耗。根据本文系统边界确定的单元过程,将煤炭和木质颗粒的生命周期分为原料获取、燃料生产、燃料运输以及燃料使用4个阶段,则生命周期总能耗如公式(1)所示:

$$EU = EU_E + EU_P + EU_T + EU_C \quad (1)$$

式中:EU为目标燃料系统生命周期中的总能耗(MJ), $EU_E$ 、 $EU_P$ 、 $EU_T$ 和 $EU_C$ 分别为原料获取、燃料生产、运输和使用环节中产生的能耗(MJ)。

不同环节消耗不同的原料与能源。原料获取、燃料生产和使用这3个阶段的能源消耗( $EU_i$ )可用公式(2)来表示:



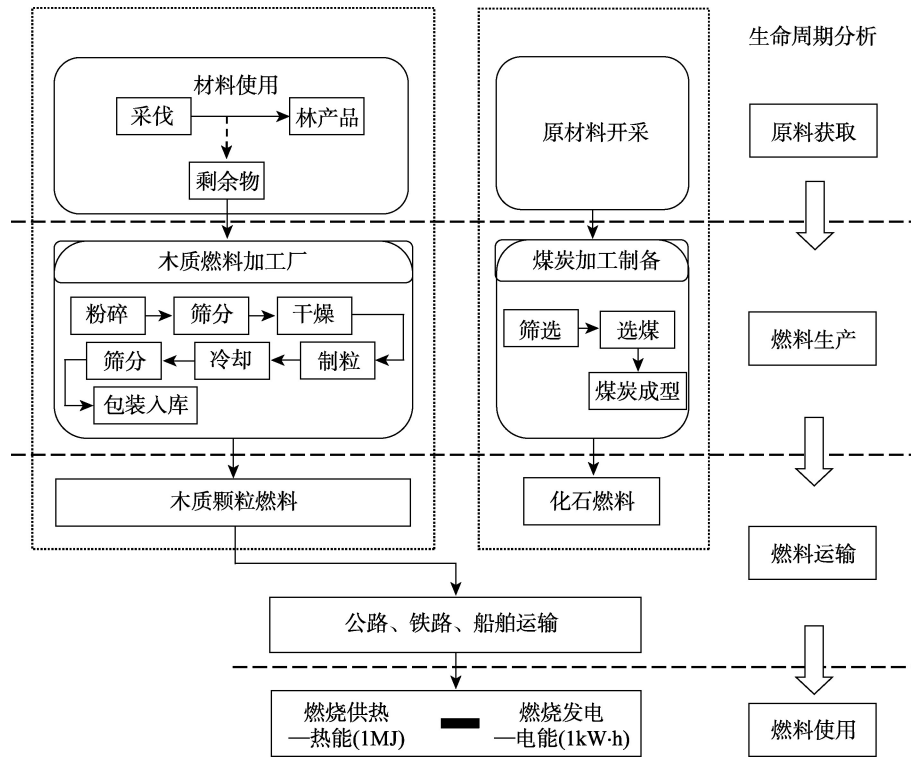


图2 生命周期分析系统边界和功能单元

Figure 2 System boundary and functional unit for life cycle assessment

$$EU_i = \sum N_j \times \varnothing_j \quad (2)$$

式中:  $N_j$ 表示第  $j$  种能源的消耗量(L或  $m^3$  或 kg),  $\varnothing_j$  表示第  $j$  种能源的热值(MJ/L 或 MJ/ $m^3$  或 MJ/kg)。

运输阶段的能耗则使用国家平均数据进行评估,Chang 等<sup>[31]</sup>采用运输模式比例、运输模式的能源强度、运输模式的距离这 3 个参数进行核算,欧训民等<sup>[32]</sup>还提供了能源使用的比例这一要素,因此本文结合 Chang 等<sup>[31]</sup>与欧训民等<sup>[32]</sup>的核算思路,改进分析方法,从 4 个要素着手,建立公式(3):

$$EU_T = \sum_a \sum_j b \times \varphi_a \times F_a \times D_a \times \varphi_{aj} \quad (3)$$

式中:  $b$ 为运输的燃料重量(t),  $\varphi_a$ 为第  $\alpha$  种运输模式的比例(%),  $F_a$ 为第  $\alpha$  种运输模式的能源强度(MJ/t km),  $D_a$ 为第  $\alpha$  种运输模式的距离(km),  $\varphi_{aj}$ 为第  $\alpha$  种运输模式中第  $j$  种能源使用的比例(%)。

(2)生命周期温室气体排放。生命周期总排放( $GE$ )同样由 4 个阶段构成,如公式(4)所示:

$$GE = GE_E + GE_P + GE_T + GE_C \quad (4)$$

式中: $GE_E$ 、 $GE_P$ 、 $GE_T$ 和  $GE_C$ 分别为原料获取、燃料生产、运输和使用环节中产生的排放(g  $CO_2e$ )。

不同阶段能源使用产生的温室气体排放量

( $GE$ )可根据燃烧燃料的数量以及其相应的排放因子进行估算<sup>[33]</sup>,如公式(5)所示:

$$GE_i = \sum N_j \times GWI_j \quad (5)$$

式中: $GWI_j$ 表示第  $j$  种能源的温室气体排放系数(g  $CO_2e/L$  或 g  $CO_2e/m^3$  或 g  $CO_2e/kg$ ),由不同温室气体及其各自温室效应当量因子决定,公式如下:

$$GWI_j = \sum PGHG_{jk} \times GWP_k \quad (6)$$

式中: $PGHG_{jk}$ 表示第  $j$  种能源的第  $k$  种温室气体的排放量(kg GHG/L 或 kg GHG/ $m^3$  或 kg GHG/kg),  $GWP_k$ 表示第  $k$  种温室气体的温室效应潜值。鉴于  $CO_2$ 、 $CH_4$ 和  $N_2O$ 占能源温室气体排放的大部分,能源排放系数主要针对上述 3 种温室气体。IPCC 第 5 次评估报告提供了 100 年时间尺度的温室气体 GWP 值<sup>[34]</sup>,其中  $CO_2=1$ ,  $CH_4=28$ ,  $N_2O=265$ 。

在最终使用阶段,燃料自身的燃烧会产生温室气体。木质颗粒燃烧过程中排放的  $CO_2$ 可由林木光合作用下固定在木材中的碳量进行推算,若将木质颗粒视为碳中性产品,在最终使用阶段木质颗粒燃烧产生的  $CO_2$ 不计入温室气体排放总量;若不把木质颗粒视作碳中性产品,则需考虑这部分  $CO_2$ 排放。

### 2.2.2 经济效益指标

供热、供电的燃料成本决定了能源使用的价格,并影响了消费者对不同能源的选择<sup>[10]</sup>。本文将不同燃料的单位热能使用成本作为经济评价指标,估计木质颗粒燃料与煤炭的燃料成本。

不同能源系统供热的燃料成本  $C_x$  参考 Wang 等<sup>[22]</sup>的方法,由公式(7)来表示:

$$C_x = P_x / (\varnothing_x \times \beta_x) \quad (7)$$

式中:  $C_x$  表示能源系统  $x$  供电或供热的燃料成本,即单位热能的使用成本(RMB/MJ或RMB/kW·h),  $P_x$  是能源系统  $x$  中能源的市场价格(RMB/t),  $\varnothing_x$  表示能源系统  $x$  中能源的热值(MJ/L或MJ/m<sup>3</sup>或MJ/kg),  $\beta_x$  是能源系统  $x$  的能源效率(%)。

## 2.3 减排效益与经济效益数据清单

### 2.3.1 环境生命周期清单

根据系统边界的界定,本文将对不同能源系统从原料获取、燃料生产、运输到使用的全过程进行温室气体排放评估分析。生命周期清单分析(Life Cycle Inventory, LCI)是产品系统LCA过程中相关输入和输出的量化过程<sup>[35]</sup>,本文的目标产品系统是木质颗粒燃料和煤炭,因此环境输入量是各系统为获得最终的热能或电能而在生命周期各阶段消耗的能源,包括煤炭、天然气、汽油、柴油、电力等;环境输出量则为各阶段能源排放的温室气体,主要针对CO<sub>2</sub>、CH<sub>4</sub>、N<sub>2</sub>O这3种温室气体进行量化评价。不同能源系统的LCI数据主要源自国家统计数据 and 公开发表的文献,参数及数据来源详见表2。

(1)原料获取阶段。该阶段为原材料的开采收集过程,木材进行采伐时每t木材消耗8.5L柴油<sup>[22]</sup>,本文木质颗粒燃料的原料源自森林采伐剩余物,因此清单分析中原料获取环节的能耗按森林采伐残

余率(25%)进行比重推算(表2)。煤炭开采阶段的开采效率为97%,相关能耗参考Chang等<sup>[31]</sup>。

(2)燃料生产阶段。该阶段为燃料的加工生产过程,伐木过程收集的木材剩余物被运送到木质颗粒加工厂后进行颗粒燃料生产,包括粉碎、筛分、干燥、制粒、冷却、包装入库等环节<sup>[21]</sup>,此过程消耗大量的电能和柴油。Wang等<sup>[22]</sup>对中国木质颗粒的生产工艺进行了调查研究,本文清单分析中生产环节的能源投入消耗量参考其数据结果,但不考虑机械设备的额外损耗,得出木质颗粒的制粒过程耗电92.8kW·h、消耗柴油0.87L。Chang等<sup>[31]</sup>对中国煤炭供电、供热系统的生命周期能源投入及温室气体排放进行了量化研究,本文清单分析中煤炭生产阶段能耗参考其相关数据。

(3)燃料运输阶段。根据Wang等<sup>[22]</sup>的研究统计,木质颗粒燃料的运输能耗远小于煤炭的运输,其中木质颗粒燃料采用公路运输方式,运距180km,柴油和汽油为主要的能源投入。煤炭的运输距离较远,本文参考中国原煤运输模式和比例,即考虑铁路运输、水路运输和公路运输3种方式,同时将中国交通能源强度及燃料结构纳入分析<sup>[32]</sup>。

(4)燃料使用阶段。使用阶段的温室气体排放主要包括发电、燃烧带来的排放。按照2015年中国电力年鉴的统计数据,中国煤炭供电每生产1kW·h电力的标准煤耗为319g,标准煤的热值为29.307MJ/kg<sup>[38]</sup>,木质颗粒燃料的供电效率为4.4kW·h/kg,每产生1MJ热能消耗热值为18.84MJ/kg的木质颗粒燃料66g<sup>[40]</sup>。

### 2.3.2 经济成本数据清单

经济效益指标评价需要木质颗粒燃料与煤炭的中国市场价格数据。煤炭作为常规的化石燃料,

表2 不同能源系统生命周期中的能源投入参数

Table 2 Energy input parameters in the life cycle of different energy systems

原料获取与燃料生产阶段	运输阶段				使用阶段
	运输模式及比例 <sup>[31]</sup> /%	能源强度/(KJ/tkm)	运输距离/km	能源种类及比例/%	
煤炭 开采效率97% <sup>[31]</sup> 洗选效率95% <sup>[31]</sup>	铁路(75)	120 <sup>[37]</sup>	651 <sup>[36]</sup>	柴油(30 <sup>[37]</sup> ) 电力(70 <sup>[37]</sup> )	供电标准煤耗3.125kW·h/kg <sup>[38]</sup> 标准煤热值29.307MJ/kg <sup>[38]</sup>
	水路(17)	498 <sup>[39]</sup>	1477 <sup>[36]</sup>	燃料油(100 <sup>[32]</sup> )	
	公路运输(8)	98 <sup>[39]</sup>	181 <sup>[36]</sup>	柴油(68 <sup>[32]</sup> ) 汽油(32 <sup>[32]</sup> )	
木质颗粒燃料 采伐残余率25% <sup>[22]</sup> 成粒率75.8% <sup>[22]</sup>	公路运输(100)	98 <sup>[39]</sup>	180 <sup>[22]</sup>	柴油(68 <sup>[32]</sup> )	供电消耗4.4kW·h/kg <sup>[40]</sup> 木质颗粒热值18.84MJ/kg <sup>[40]</sup>

2020年3月

其终端消费价格受国际市场能源供应的影响<sup>[14]</sup>,中国商务部对煤炭行业的商品价格进行了年度统计,表3选取2019年以来国内煤炭交易价格进行探讨<sup>[41]</sup>。

而中国木质颗粒作为能源尚处于开发阶段,国家商务数据中心尚未确定木质颗粒燃料的价格<sup>[22]</sup>,本文选择中国生物质颗粒在线交易平台显示的价格作为参考<sup>[42]</sup>。对木质生物质颗粒燃料的全国供求状况进行分析可知,山东、江苏和河南3省的供应量居全国前三,需求量最多的3个省份则分别为河北、山东和广东。根据以上几个省份的木质颗粒燃料市场价格(500~1300 RMB/t)进行能价评估。

### 3 结果与分析

#### 3.1 减排效益

表4为木质颗粒燃料和煤炭在原料获取和燃料生产过程中的能耗与温室气体排放量,表5则为燃料运输过程中的能耗与排放结果。结合表4、表5中的第3列(能源消耗)可得,木质颗粒在原料获取、燃料生产和燃料运输阶段的能耗为776.83 MJ/t,其中原料获取与燃料生产阶段的能耗高达759.19 MJ/t,占这3个阶段总能耗的98%。基于表2中木质颗粒供电效率(4.4 kW·h/kg)和供热效率(18.84 MJ/kg),木质颗粒燃料供应单位电力与热力所需要的能耗有所差异,分别为0.174 MJ/kW·h和0.041 MJ/MJ。

煤炭的生命周期能耗较高,每t煤炭在原料获取、燃料生产和燃料运输阶段的能耗为1129.71 MJ,其中原料获取与燃料生产阶段的能耗为1020 MJ/t,占3个阶段总能耗的90%。与木质颗粒燃料相比,煤炭在运输阶段的能耗比重较高,这是由于2种燃料的运输方式与运输距离不同,煤炭的运输距离较远,且需要铁路、水路和长途运输等多种运输途径。表2中煤炭的供电和供热效率分别为3.125 kW·h/kg和29.307 MJ/kg,则煤炭供能的单位能耗还可以表示为0.35 MJ/kW·h和0.046 MJ/MJ。就这3个阶段而言,木质颗粒燃料替代煤炭用于供电供热时,每供应1 kW·h电力或1 MJ热能可分别节约能耗0.176 MJ与0.005 MJ。

结合表4与表5的第4列(温室气体排放)可得,每t木质颗粒在原料获取、燃料生产和运输阶段的温室气体排放量约为32.91 kg CO<sub>2</sub>e,其中原料获取与燃料生产阶段的排放量占96%,单位供能的温室气体排放量可以表示为1.745 g CO<sub>2</sub>e/MJ和7.478 g CO<sub>2</sub>e/kW·h。煤炭在这3个阶段的温室气体排放量明显高于木质颗粒,每t煤炭的排放量约为136.271 kg CO<sub>2</sub>e,其中原料获取与燃料生产阶段占96%,结合表2和表3可得,当木质颗粒燃料替代煤炭时,每供应1 kW·h电力或1 MJ热能可以分别减

表3 不同能源系统经济效益指标投入参数与数值

Table 3 Economic benefit input parameters and values of different energy systems

	市场价格/(RMB/t)			能源热值	能源效率/%
煤炭	2019年1月	559.4~589	供热	29.31 MJ/kg	80
	2019年2月	587.4~607	供电	3.125 kW·h/kg	
	2019年3月	586~631.8			
木质颗粒燃料	500~1300		供热	18.84 MJ/kg	80
			供电	4.4 kW·h/kg	

表4 木质颗粒燃料和煤炭原料获取与燃料生产过程中的能耗与温室气体排放清单

Table 4 Energy consumption and greenhouse gas emissions inventory of coal and wood pellet production

能源系统	单位	能源消耗/MJ	温室气体排放/g CO <sub>2</sub> e	温室气体细分		
				CO <sub>2</sub>	N <sub>2</sub> O	CH <sub>4</sub>
木质颗粒	t	425.11(柴油)	31.61×10 <sup>3</sup>	31.51×10 <sup>3</sup>	67.28	35.88
		334.08(电能)				
	MJ	0.04	1.676	1.670	0.004	0.002
	kW·h	0.17	7.183	7.160	0.015	0.008
煤炭	t	1020	131.00×10 <sup>3</sup>	121.00×10 <sup>3</sup>		10.00×10 <sup>3</sup>
	MJ	0.04	4.47	4.13		0.34
	kW·h	0.33	41.92	38.72		3.20

少排放 36.127 g CO<sub>2</sub>e 与 2.905 g CO<sub>2</sub>e。

表6为木质颗粒燃料和煤炭最终使用阶段的排放结果,这里假设2种能源系统的供能效率为80%<sup>[22]</sup>,参考表1中煤炭与木质颗粒燃料的供热效率,煤炭在最终使用阶段的排放量为 118.782 g CO<sub>2</sub>e/MJ,占完整生命周期供热温室气体总排放的96%;若考虑碳中性假设,木质颗粒燃料在最终使用阶段的碳足迹为 2.375 g CO<sub>2</sub>e/MJ,远远小于煤炭的使用排放,但将木材燃烧释放的CO<sub>2</sub>考虑在内时,木质颗粒燃料的使用排放量达到 124.015 g CO<sub>2</sub>e,超过了煤炭燃料的碳足迹;当木质颗粒替代煤炭用于供电时,不论是否考虑碳中性假设,木质颗粒最终使用的排放量(10.169 g CO<sub>2</sub>e或 531.999 g CO<sub>2</sub>e)均远远小于煤炭(1018.54 g CO<sub>2</sub>e)。

图3为木质颗粒燃料与煤炭用于供热、供电时,各自的生命周期能耗与温室气体排放结果,可以看出,木质颗粒燃料的单位供热能耗与单位供电能耗均小于煤炭。图中虚线表示的部分为木质颗粒燃

料自身燃烧产生的CO<sub>2</sub>排放量,考虑碳中性假设时,木质颗粒燃料生命周期的排放为 4.120 g CO<sub>2</sub>e/MJ,远小于煤炭温室气体排放量(123.432 g CO<sub>2</sub>e/MJ),具有显著的减排作用;但将木材燃烧释放的CO<sub>2</sub>考虑在内时,木质颗粒燃料的生命周期温室气体排放总量为 125.760 g CO<sub>2</sub>e,略高于煤炭燃料的排放总量。当木质颗粒替代煤炭用于供电时,不论是否考虑碳中性假设,木质颗粒生命周期排放量(17.647 g CO<sub>2</sub>e或 538.477 g CO<sub>2</sub>e)均远小于煤炭(1062.145 g CO<sub>2</sub>e),表现出显著的减排效果。

### 3.2 经济效益

木质颗粒燃料的平均价格为 900 RMB/t(最低 500 RMB/t,最高 1300 RMB/t),煤炭的平均市场交易价格为 599.05 RMB/t,显然中国煤炭燃料的单位市场价格低于木质颗粒燃料。将表3中的经济评价指标参数及其数值代入公式(7),可以得到煤炭与木质颗粒燃料供热、供电的燃料使用成本。

计算得,平均市场价格下,木质颗粒燃料生产

表5 木质颗粒燃料和煤炭运输过程中的能耗与温室气体排放清单

Table 5 Energy consumption and greenhouse gas emissions inventory of coal and wood pellet transportation

能源系统	单位	能源消耗/MJ	温室气体排放/g CO <sub>2</sub> e	温室气体细分		
				CO <sub>2</sub>	N <sub>2</sub> O	CH <sub>4</sub>
木质颗粒	t	12.00(柴油)	1296.82	1280.00	11.06	5.76
		5.64(汽油)				
	MJ	0.001	0.069	0.068	0.001	0.000
	kW·h	0.004	0.295	0.291	0.003	0.001
煤炭	t	18.54(柴油)	5271.68	5254.00	10.88	5.80
		49.72(燃料油)				
		0.45(汽油)				
	MJ	0.006	0.180	0.180	0.000	0.000
	kW·h	0.020	1.685	1.680	0.003	0.002

表6 木质颗粒燃料和煤炭最终使用阶段的温室气体排放清单

Table 6 Greenhouse gas emissions inventory of coal and wood pellet for heat and power generation

能源系统	单位	假设	温室气体排放/g CO <sub>2</sub> e	温室气体细分		
				CO <sub>2</sub>	N <sub>2</sub> O	CH <sub>4</sub>
木质颗粒	MJ	碳中性	2.375	0.000	1.325	1.050
		非碳中性	124.015	121.640	1.325	1.050
	kW·h	碳中性	10.169	0.000	5.673	4.496
		非碳中性	531.999	520.830	5.673	4.496
煤炭	MJ		118.782	118.250	0.497	0.035
	kW·h		1018.54	1014.00	4.24	0.30



2020年3月

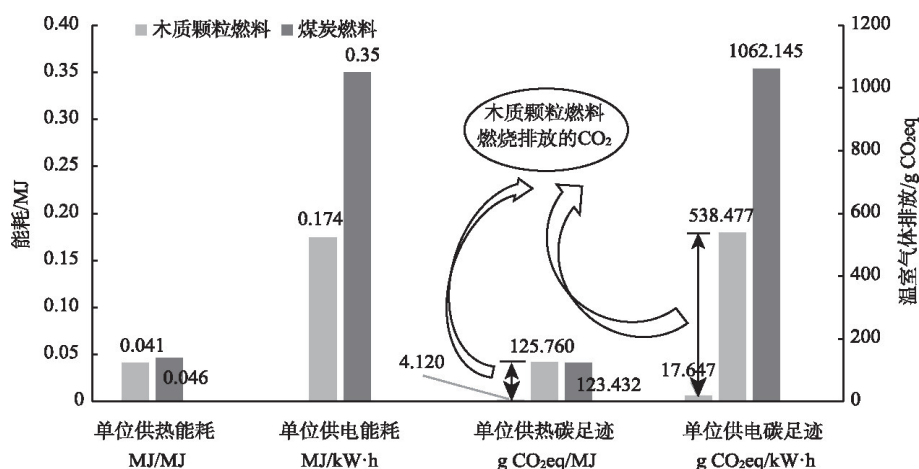


图3 木质颗粒和煤炭的生命周期能耗与温室气体排放

Figure 3 Energy consumption and greenhouse gas emissions of coal and wood pellet heating systems

单位热力与电力所需成本分别为 59.71 RMB/GJ 和 255.68 RMB/MW·h, 而煤炭的燃料成本分别可以表示为 25.55 RMB/GJ 和 239.62 RMB/MW·h。即用木质颗粒燃料替代煤炭供热时, 每使用 1 GJ 热能将多付出 34.16 元的燃料成本; 当木质颗粒燃料替代煤炭供电时, 每 MW·h 的供能成本将增加 16.06 元。木质颗粒供能系统的单位能源使用成本  $C_w$  高于煤炭的  $C_c$ , 说明中国木质颗粒在经济上对煤炭不具有竞争力。木质颗粒替代使用的成本相对较高, 这与 Sikkema 等<sup>[12]</sup>的研究结论一致。

### 3.3 敏感性分析

木质颗粒燃料表现出显著的替代减排效益, 基于研究结果, 本文对影响木质颗粒燃料温室气体减排效率和能源供能成本的关键因素进行敏感性分

析, 以检验效益评估中所涉及到的影响因素的重要性。影响减排效益的关键因素包括燃料能源结构比例、燃料运输距离、最终燃料的供能效率、燃料热值以及燃料市场价格等 5 个方面。

本文中的敏感性分析是通过每次将其中一个参数原值增加 10%, 同时保持所有其他参数不变, 进而比较因增加参数值而导致的温室气体减排变化和供能成本变化, 以确定每个参数对木质颗粒燃料替代减排效益的重要性(表 7)。

首先, 根据 5 个影响因素的数据假设进行参数设置。如在燃料能源结构比例方面, 文中木质颗粒燃料的生命周期能耗中电能占了 43%, 其余的能源需求由柴油和汽油等燃料燃烧产热来满足, 参数假设木质颗粒燃料的生命周期能耗中耗电量 and 耗热

表 7 木质颗粒燃料替代煤炭供能的温室气体减排与供能成本的敏感性分析

Table 7 Sensitivity analysis of contribution to variance in greenhouse gas reduction and cost efficiency of substituting wood pellet for fossil fuel

影响因素	参数假设	敏感性分析				
		供热减排效率	供电减排效率	供热成本变化	供电成本变化	
能源结构	木质颗粒燃料生命周期耗电+10%	+0.12%	+0.05%			
	木质颗粒燃料生命周期耗能+10%	-0.14%	-0.07%			
运输距离	木质颗粒燃料运输距离+10%	-0.03%	-0.01%			
燃料使用效率	木质颗粒燃料最终使用效率+10%	碳中性假设	+0.18%	+0.09%	-15.90%	由正转负
		非碳中性假设	由负转正	+9.25%	-15.90%	由正转负
燃料热值	木质颗粒燃料热值+10%	碳中性假设	+0.32%		-15.90%	
		非碳中性假设	由负转正		-15.90%	
燃料价格	木质颗粒燃料价格+10%	碳中性假设		+0.15%		由正转负
		非碳中性假设		+8.88%		由正转负
				+17.49%	+159%	



量分别增加10%,以检验能源结构变化对结果的影响。其中最终燃料的供能效率和燃料热值这2个因素还影响了最终使用阶段的燃料实际消耗量,在碳中性和非碳中性假设下会产生不同结果,因此对这2个因素的参数假设分别设置了碳中性和非碳中性2个假设情景。

然后,针对不同的参数假设重新估算木质颗粒燃料的生命周期数据。以非碳中性假设下的木质颗粒燃料最终使用效率为例,本文木质颗粒燃料在80%的使用效率下,温室气体排放量为538.477 g CO<sub>2</sub>e/kW·h。当使用效率增加10%时,每生产1 kW·h电力的实际电力需求由1.25 kW·h减少至1.136 kW·h,木质颗粒燃料的温室气体排放量降低至482.58 g CO<sub>2</sub>e/kW·h。

最后,评估减排效率变化率以检验减排效益中所涉及到的影响因素的重要性。以非碳中性假设下的木质颗粒燃料最终使用效率为例,本文木质颗粒燃料的减排效率为523.668 g CO<sub>2</sub>e/kW·h,当燃料的最终使用效率增加到88%时,木质颗粒燃料的减排效率增加至572.10 g CO<sub>2</sub>e/kW·h,变化率为+9.25%,影响作用较大。

敏感性分析下的木质颗粒燃料的温室气体减排变化不大,这是由于煤炭最终使用阶段的碳足迹高于排放总量的96%,燃料自身燃烧释放的温室气体是LCA碳足迹分析中主要部分。表7中的结果表明,在所研究的影响因素中,木质颗粒燃料的最终能量转换率是影响温室气体排放减排变化的最大因素;当不考虑碳中性假设时,木质颗粒燃料热值极大的影响温室气体排放变化;经济成本的变化主要受能量转换率、燃料热值和燃料价格的影响,其中燃料价格的影响较大;当木质颗粒燃料使用效率或热值增加10%时,供能成本由正转负,实现减排效益与经济效益双赢。

## 4 结论和讨论

### 4.1 结论

生物质能源对传统化石燃料的实际替代效用具有生态意义和经济意义,国家能源转型政策致力于减少对煤炭等化石能源的依赖。本文以木质颗粒燃料与煤炭2个能源系统为研究对象,分析木质颗粒燃料替代煤炭供电、供热的单位能耗与温室气体排放量,并纳入经济要素指标,探讨不同系统供

能的燃料成本。2个指标的研究对中国高耗能部门的能源替代减排应用以及林木资源的合理利用具有参考价值。本文主要结论如下:

(1)木质颗粒燃料替代煤炭用于供电时,每提供1 kW·h电力可以减少能耗0.176 MJ;木质颗粒燃料替代煤炭用于供热时,每供应1 MJ热能可使能耗降低约0.01 MJ。

(2)碳中性假设下,木质颗粒燃料具有显著的减排效益;当将木质颗粒燃烧释放的CO<sub>2</sub>计入排放时,木质颗粒燃料每提供1 MJ热能排放的温室气体总量稍高于煤炭,而用于替代煤炭供电时仍表现出显著的减排作用。

(3)木质颗粒的单位热能使用成本高于煤炭。用木质颗粒燃料替代煤炭供热时,每使用1 GJ热能将多付出34.16元的燃料成本;当木质颗粒燃料替代煤炭供电时,每kW·h的供能成本将增加16.06元。

(4)木质颗粒燃料的最终能量转换率和燃料热值对温室气体排放的影响较敏感;燃料的价格对减排成本影响最大;提高能源使用效率、降低燃料价格等措施可以大幅度降低燃料替代使用成本,甚至实现环境与经济双赢。

### 4.2 讨论

探讨木质颗粒燃料在中国的替代有效性和可持续性,能为国家能源转型道路提供参考,推动国家在实现减排的同时促进经济的健康发展。进一步的研究重点与相关建议如下:

(1)碳中性问题。不考虑碳中性时,本文结果显示木质颗粒燃料提供单位热量排放的温室气体总量稍高于煤炭的排放,这并不代表木质颗粒燃料不具备碳减排价值,而是随着能源林、再造林森林的生长,林木碳储能够逐渐恢复,用木质颗粒取代煤炭能源造成的碳排放会逐步减少直至实现碳中和,可实现净减排<sup>[1]</sup>。本文LCA系统边界不考虑森林的生长、管理等环节,对完整碳循环而言是不全面的,结合森林碳库与木材资源的使用进行分析将更有利于能源替代的可持续推进。后续研究将注重生物质能源替代实现净减排的周期问题。

(2)木质颗粒的原料来源问题。本文将森林采伐剩余物作为木质颗粒的原料进行分析,除了采伐剩余物,木材加工剩余、木质林产品废弃等木材资源同样可以进行资源化使用。如学者对中国人造

2020年3月

板产业发展建立了定量回归模型并推测得,2015年循环利用木材废弃物可直接替代936.66万t化石燃料(标准煤),减少的CO<sub>2</sub>排放量相当于辽宁省1年的森林固碳量<sup>[43]</sup>。应在原料林培育、产品设计、产品使用和废弃物处置全过程中最大限度地提高木材的资源利用率,缓解国家资源匮乏和消耗日益增长的矛盾<sup>[44]</sup>。

(3)减排效率问题。为提高木质颗粒燃料的替代减排潜力,可采取增加木质颗粒燃料生命周期中电力能耗的比重、科学选址和规划以缩减运输距离,采用先进能源转换技术提升能源使用效率,以及提高能源热值等措施。

(4)财政补贴。中国可再生能源发展的主要支持机制是固定电价政策,该机制政策并不利于可再生能源市场化<sup>[5]</sup>。木质颗粒燃料的单位热能成本高于煤炭,当替代煤炭供能时,应由政府补贴机制予以支持保障,为木质颗粒燃料生产行业提供税收优惠、政府补贴等措施,同时确保技术平稳发展,利用竞争性推动价格下降。以上举措有利于提高木质颗粒燃料能源系统在经济上的可行性,继而可推动林木生物质能源在中国广泛使用。

### 参考文献(References):

[1] 陈家新,杨红强.全球森林及林产品碳科学研究进展与前瞻[J].南京林业大学学报:自然科学版,2018,42(4):1-8. [Chen J X, Yang H Q. Advances and frontiers in global forest and harvested wood products carbon science[J]. Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition), 2018, 42(4): 1-8.]

[2] Su X, Zhang X. A detailed analysis of the embodied energy and carbon emissions of steel-construction residential buildings in China[J]. Energy and Buildings, 2016, 119: 323-330.

[3] 中国国家可再生能源中心.中国可再生能源展望2017[EB/OL].(2017-10-18) [2019-04-05]. <http://www.cnrec.org.cn/cbw/zh/2017-10-18-531.html>. [China National Renewable Energy Centre. China Renewable Energy Outlook 2017[EB/OL]. (2017-10-18) [2019-04-05]. <http://www.cnrec.org.cn/cbw/zh/2017-10-18-531.html>.]

[4] 国家统计局.中华人民共和国2018年国民经济和社会发展统计公报[J].中国统计,2019,(3):8-22. [National Bureau of Statistics. 1998 statistics bulletin of the national economic and social development of the People's Republic of China[J]. China Statistics, 2019, (3): 8-22.]

[5] 姜克隽.一个强有力的2050碳减排目标将非常有利于中国的社会经济发展[J].气候变化研究进展,2019,15(1):103-106.

[Jiang K J. An ambitious CO<sub>2</sub> mitigation target will bring much benefit to China's social economy development[J]. Climate Change Research, 2019, 15(1): 103-106.]

[6] Barrette J, Thiffault E, Achim A, et al. A financial analysis of the potential of dead trees from the boreal forest of eastern Canada to serve as feedstock for wood pellet export[J]. Applied Energy, 2017, 198: 410-425.

[7] Food and Agriculture Organization of the United Nations. Forestry for a Low Carbon Future: Integrating Forests and Wood Products in Climate Change Strategies[R]. Rome: FAO Forestry Paper, 2016.

[8] Mckechnie J, Saville B, Maclean H L. Steam-treated wood pellets: Environmental and financial implications relative to fossil fuels and conventional pellets for electricity generation[J]. Applied Energy, 2016, 180: 637-649.

[9] Mathews R, Sokka L, Soimakallio S, et al. Review of Literature on Biogenic Carbon and Life Cycle Assessment of Forest Bioenergy [R]. Farnham: The Research Agency of the Forestry Commission (EU DG ENER Project ENER/C1/427), 2014.

[10] Laschi A, Marchi E, González-García S. Environmental performance of wood pellets' production through life cycle analysis[J]. Energy, 2016, 103: 469-480.

[11] Buchholz T, Gunn J S, Saah D S. Greenhouse gas emissions of local wood pellet heat from northeastern US forests[J]. Energy, 2017, 141: 483-491.

[12] Sikkema R, Junginger M, Pichler W, et al. The international logistics of wood pellets for heating and power production in Europe: Costs, energy-input and greenhouse gas balances of pellet consumption in Italy, Sweden and the Netherlands[J]. Biofuels, Bioproducts and Biorefining, 2010, 4(2): 132-153.

[13] Sjølie H K, Solberg B. Greenhouse gas emission impacts of use of Norwegian wood pellets: A sensitivity analysis[J]. Environmental Science & Policy, 2011, 14(8): 1028-1040.

[14] 陈喜龙,李际平,王义强,等.木质颗粒燃料锅炉替代燃油燃气锅炉效益分析[J].农业工程学报,2011,(2):131-134. [Chen X L, Li J P, Wang Y Q, et al. Efficiency analysis of oil or gas boiler with wood-pellet fuel substitution[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2011, (2): 131-134.]

[15] Dwivedi P, Khanna M, Bailis R, et al. Potential greenhouse gas benefits of transatlantic wood pellet trade[J]. Environmental Research Letters, 2014, DOI: 10.1088/1748-9326/9/2/024007.

[16] Wang W, Dwivedi P, Abt R, et al. Carbon savings with transatlantic trade in pellets: Accounting for market-driven effects[J]. Environmental Research Letters, 2015, DOI: 10.1088/1748-9326/10/11/114019.

[17] Micha T M, Jon M K, Stephen C. The carbon neutrality assumption for forest bioenergy: A case study for northwestern Ontario[J]. The Forestry Chronicle, 2011, 87(5): 644-652.

[18] Geng A X, Yang H Q, Chen J X. Review of carbon storage function of harvested wood products and the potential of wood substitution

- in greenhouse gas mitigation[J]. *Forest Policy and Economics*, 2017, 85: 192–200.
- [19] McKechnie J, Colombo S, Chen J, et al. Forest bioenergy or forest carbon? Assessing trade-offs in greenhouse gas mitigation with wood-based fuels[J]. *Environmental Science & Technology*, 2011, 45(2): 789–795.
- [20] Ter-Mikaelian M T, Colombo S J, Lovekin D, et al. Carbon debt repayment or carbon sequestration parity? Lessons from a forest bioenergy case study in Ontario, Canada[J]. *Global Change Biology Bioenergy*, 2015, 7(4): 704–716.
- [21] Qin X Y, Mohan T, El-halwagi M, et al. Switchgrass as an alternate feedstock for power generation: An integrated environmental, energy and economic life-cycle assessment[J]. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 2006, 8(4): 233–249.
- [22] Wang C B, Chang Y, Zhang L X, et al. A life-cycle comparison of the energy, environmental and economic impacts of coal versus wood pellets for generating heat in China[J]. *Energy*, 2016, 120: 374–384.
- [23] Ehrig R, Behrendt F. Co-firing of imported wood pellets: An option to efficiently save CO<sub>2</sub> emissions in Europe?[J]. *Energy Policy*, 2013, 59: 283–300.
- [24] Joshi O, Grebner D, Henderson J, et al. Input-output modeling of wood-based bioenergy industries in Mississippi[J]. *Forest Products Journal*, 2012, 62: 528–537.
- [25] 国家林业局. 全国林业生物质能源发展规划(2011–2020年)[EB/OL]. (2013–05–28) [2019–05–14]. <http://www.forestry.gov.cn/main/4818/content-797364.html>. [State Forestry Administration. National Forestry Biomass Energy Development Plan (2011–2010) [EB/OL]. (2013–05–28) [2019–05–14]. <http://www.forestry.gov.cn/main/4818/content-797364.html>.]
- [26] 许恩银, 陶韵, 杨红强. LULUCF 关联林业碳问题研究进展[J]. *资源科学*, 2019, 41(9): 1641–1654. [Xu E Y, Tao Y, Yang H Q. Research progress of forestry carbon issues related to land use, land-use change and forestry[J]. *Resources Science*, 2019, 41(9): 1641–1654.]
- [27] 张旭芳, 杨红强, 张小标. 1993–2033年中国林业碳库水平及发展态势[J]. *资源科学*, 2016, 38(2): 108–117. [Zhang X F, Yang H Q, Zhang X B. Development level and trend in Chinese forestry carbon pools from 1989 to 2033[J]. *Resources Science*, 2016, 38(2): 108–117.]
- [28] 张小标, 杨红强. 基于 GFPM 的中国林产品碳储效能及碳库结构动态预测[J]. *资源科学*, 2015, 37(7): 101–111. [Zhang X B, Yang H Q. Dynamic projection of storage efficiency and carbon pool structure of China's harvested wood products based on GFPM [J]. *Resources Science*, 2015, 37(7): 101–111.]
- [29] 耿爱欣, 杨红强. 生物质能源替代化石能源的成本有效性拓展模型: 基于时间价值视角[J]. *资源开发与市场*, 2017, 33(5): 533–539. [Geng A X, Yang H Q. Construction of cost-effectiveness model of greenhouse gas mitigation by replacing fossil fuels with bioenergy: From the perspective of time-value[J]. *Resource Development & Market*, 2017, 33(5): 533–539.]
- [30] 王珊珊, 张寒, 杨红强. 中国人造板行业的生命周期碳足迹和能源耗用评估[J]. *资源科学*, 2019, 41(3): 521–531. [Wang S S, Zhang H, Yang H Q. Carbon footprint and energy consumption based on life cycle assessment of wood-based panel industry in China[J]. *Resources Science*, 2019, 41(3): 521–531.]
- [31] Chang Y, Huang R, Ries R J, et al. Life-cycle comparison of greenhouse gas emissions and water consumption for coal and shale gas fired power generation in China[J]. *Energy*, 2015, 86: 335–343.
- [32] 欧训民, 张希良. 中国终端能源的全生命周期化石能耗及碳强度分析[J]. *中国软科学*, 2009, (S2): 208–214. [Ou X M, Zhang X L. Fossil energy consumption and GHG emissions of final energy by LCA in China[J]. *China Soft Science*, 2009, (S2): 208–214.]
- [33] Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories[R]. Hayama: Institute for Global Environmental Strategies, 2006.
- [34] Intergovernmental Panel on Climate Change. Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change[R]. Cambridge: IPCC, 2013.
- [35] International Organization for Standardization. Environmental Management: Life Cycle Assessment: Principles and Framework [S]. Geneva: IOS, 2006.
- [36] 国家统计局. 中国统计年鉴 2018[M]. 北京: 中国统计出版社, 2018. [National Bureau of Statistics of China. China Statistical Yearbook 2018[M]. Beijing: China Statistics Press, 2018.]
- [37] 中华人民共和国交通运输部. 2018年铁道统计公报[EB/OL]. (2019–04–26) [2019–06–05]. <http://www.mot.gov.cn/tongjishuju/tielu/201905/P020190530365089148979.pdf>. [Ministry of Transport of the People's Republic of China. Bulletin of Statistics for the Chinese Railways in 2018[EB/OL]. (2019–04–26) [2019–06–05]. <http://www.mot.gov.cn/tongjishuju/tielu/201905/P020190530365089148979.pdf>.]
- [38] 国家能源局. 中国电力年鉴 2015[M]. 北京: 中国电力出版社, 2015. [National Energy Administration. China Electric Power Yearbook 2015[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2015.]
- [39] 中华人民共和国交通运输部. 2012年中国公路水路交通运输行业发展统计公报[EB/OL]. (2013–04–25) [2019–06–05]. [http://www.mot.gov.cn/fenxigongbao/hangyegongbao/201510/t20151013\\_1894759.html](http://www.mot.gov.cn/fenxigongbao/hangyegongbao/201510/t20151013_1894759.html). [Ministry of Transport. Bulletin on the Development of China's Highway and Waterway Transportation Industry in 2012 [EB/OL]. (2013–04–25) [2019–06–05]. [http://www.mot.gov.cn/fenxigongbao/hangyegongbao/201510/t20151013\\_1894759.html](http://www.mot.gov.cn/fenxigongbao/hangyegongbao/201510/t20151013_1894759.html).]
- [40] Ruiz D, San Miguel G, Corona B, et al. LCA of a multifunctional bioenergy chain based on pellet production[J]. *Fuel*, 2018, 215: 601–611.
- [41] 商品价格网. 价格行情[EB/OL]. (2019–03–29) [2019–05–25].



- <http://price.mofcom.gov.cn/pricequotation/pricequotation.shtml>. [Price.mofcom.gov.cn. Commodity Price Net[EB/OL] (2019-03-29) [2019-05-25]. <http://price.mofcom.gov.cn/pricequotation/pricequotation.shtml>.]
- [42] 生物质颗粒交易网. 供应[EB/OL]. (2019-05-27) [2019-06-05]. <http://www.51keli.com/supply/>. [Biomass Pellet Trading. Supply [EB/OL]. (2019-05-27) [2019-06-05]. <http://www.51keli.com/supply/>.]
- [43] Geng A X, Zhang H, Yang H Q. Greenhouse gas reduction and cost efficiency of using wood flooring as an alternative to ceramic tile: A case study in China[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2017, 166: 438-448.
- [44] Geng A X, Chen J X, Yang H Q. Assessing the greenhouse gas mitigation potential of harvested wood products substitution in China [J]. *Environmental Science & Technology*, 2019, 53(3): 1732-1740.

## Quantifying the mitigating effects and benefits from substituting wood biomass for coal in energy production in China

GENG Aixin<sup>1,2</sup>, PAN Wenqi<sup>1,2</sup>, YANG Hongqiang<sup>1,2,3</sup>

(1. College of Economics and Management, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, China;

2. Research Center for Economics and Trade in Forest Products, NFGA, Nanjing 210037, China;

3. Center for the Yangtze River Delta's Socioeconomic Development, Nanjing University, Nanjing 210093, China)

**Abstract:** Substituting fossil fuels with bioenergy is one of the most promising options for energy transition in China, and abundant forest biomass plays an important role in this process. In this study, the mitigation effects and economic benefits from substituting wood pellets for coal in heat and power generation in China were investigated, based on a life-cycle assessment and economic contribution analysis using the system boundaries defined for the two energy systems in terms of greenhouse gas emissions and economic cost. The results suggest that: (1) When wood-based pellet replaces coal in heat and power generation, the life cycle energy consumption per unit of energy produced decreases (0.01-0.176 MJ), and the greenhouse gas emissions are significantly reduced if wood pellets are assumed to be carbon neutral; (2) Based on the average market prices of wood pellets and coal, the cost per unit heat or electricity generation by burning wood pellets is higher than that of coal (16.06-34.16 Yuan), because the energy used in wood pellets production is more costly; (3) The sensitivity analysis suggests that energy conversion efficiency, fuel energy content, and fuel price are the most important factors that affect the effectiveness of energy substitution; and reducing energy consumption and the overall cost for producing wood pellets is most effective for reducing the substitution cost and creating a win-win situation for both climate mitigation and economic development. The development and utilization of forest biomass play an important role in China's energy structure transformation. This study can inform policy development from the aspects of emission reduction under carbon neutrality assumption, source of biomass, emission reduction efficiency, and financial subsidies.

**Key words:** wood biomass; wood pellet; fossil fuel; carbon neutrality; reduced emissions from energy substitution; economic benefit