

## 基于采伐剩余物的生物质固体燃料生态效益分析

周媛<sup>1,2</sup>, 郑丽凤<sup>1</sup>, 周新年<sup>1</sup>, 巫志龙<sup>1</sup>, 周成军<sup>1</sup>, 罗伟<sup>3</sup>, 林玥霏<sup>1</sup>

(1.福建农林大学交通与土木工程学院,福州350002;2.福建一建集团有限公司,福建三明365000;3.福建省邵武市经济开发区管委会,福建邵武354000)

摘要:以采伐剩余物为原料发展生物质固体燃料技术,能有效缓解我国林木资源浪费和能源匮乏现象。采用简化LCA法和IPCC法,对以采伐剩余物为原料的生物质固体燃料技术应用,从收集直至转化为可利用能源的全过程生态效益进行评价。结果表明:采伐剩余物在生物质发电过程产生的总碳排放为0.82t/hm<sup>2</sup>,碳汇为17.55t/hm<sup>2</sup>,净碳为16.73t/hm<sup>2</sup>,净固定CO<sub>2</sub>为61.38t/hm<sup>2</sup>

,表现出“碳汇功能”;产生碳排放最多的是加工成型阶段,占总碳排放的68.97%;其次是燃料使用阶段,占14.94%;运输阶段受运距影响,在原材料运距20km产生的碳排放占5.57%;成品运距30km,产生的碳排放占7.21%;人工收集阶段产生的碳排放最少,占3.31%。能量效率为0.032,转化效率较高。从生态效益角度来看,生物质固体成型燃料技术具有较大的优势。

### 0引言

在环境污染和能源需

求的双重驱动下,我国林木生物质能源利用已初具存在条件和发展空间<sup>[1]</sup>

,林木生物质能的利用,不仅可以有效缓解能源压力,还可有效减少资源浪费与环境污染等问题。国际上对林木生物质能的

利用主要是将

其转化为电能、液体燃料和

固体成型燃料,以期在一定范围内减少或替代矿物燃料的使用<sup>[2-3]</sup>

。我国林木生物质能的利用方式和转化技术相对落后,农村大部分地区仍将农林废弃物直接燃烧利用,转化率低且利用不便。因此,从我国林业发展现状出发,发展林木生物质能源产业显得尤为重要<sup>[4]</sup>。

生物质固体燃

料便于运输和存储,节能环保,

燃烧效率高,是生物质能源开发利用的主要方向之一<sup>[5-6]</sup>

。国外生物质固体燃料技术始于20世纪初,德国、丹麦、芬兰等欧盟国家十分重视林木生物质能源的转化利用,将各类林业废弃物加工成生物质固

体燃料,用作能源,广泛应用于供电、供热及热电联产等<sup>[1,7-9]</sup>

。近年来,越来越多的学者展开了对其环境减

排效应的研究。Madlener<sup>[10]</sup>、Asep<sup>[11]</sup>、Guest<sup>[12]</sup>、Jäppinen<sup>[13]</sup>、Gustavsson<sup>[14]</sup>

等对国

外生物质固体

燃料利用及碳减排能力进行

探讨,指出了生物质固体燃料利用具有很大的发展潜力

。李平<sup>[15]</sup>、刘媛<sup>[16]</sup>、魏文<sup>[17]</sup>、张宝心<sup>[18]</sup>、李运泉<sup>[19]</sup>

等从环境效益等方面分析了生物质固体燃料利用的可行性和风险性,结果表明:生物质固体燃料技术具有一定的节能减排、优化环境和提高生态效益等优势。但这些研究主要以秸秆、果壳及甘蔗渣为对象,以采伐剩余物为对象进行生物质固体燃料的环境效益评价的研究较少。

采伐剩余物作为林木生物质能源资源之一,资源丰富、分布广阔、能源化利用潜力大。根据各大林区采伐数据和样地数据,采伐剩余物约占林木生物量30%<sup>[20]</sup>

。若能实现对其的高效利用,不仅有利于缓解能源短缺及木材供需矛盾,还能减少对环境的污染,使经济与环境和諧统一发展。基于采伐剩余物的生物质固体燃料技术尚处于示范阶段,其利用过程不可避免产生油耗、电耗等碳排放,而采伐剩余物作为林木生物质能源资源之一,储存着树木生长过程从大气中吸收的二氧化碳量,这二者相抵能否实现利用过程的碳循环零排放值得研究。采用简化生命周期评价(Life Cycle Assessment,即LCA)法和政府间气候变化委员

会(IPCC)排放因子法，对采伐剩余物压缩成型固体燃料进行全生命周期碳足迹分析，进而对其生态效益进行评价。

## 1 研究边界与方法

### 1.1 研究边界

林木在生长过程中，通过光合作用将大气的二氧化碳，转变为植物所需的有机物，为生物提供最基本的物质和能量来源，此过程形成了森林的固碳效果，表现出“碳汇功能”。森林的作业措施会产生一定的碳排放，如造林、抚育、伐木，但由于本研究对象是采伐剩余物，因此研究边界从剩余物出现阶段开始。为此，将剩余物利用的生命周期分为剩余物收集阶段、原料从林间到加工厂的运输阶段、加工成生物质固体燃料阶段、成品的运输阶段以及产品的使用5个阶段<sup>[21-23]</sup>。这5个阶段包括采伐剩余物从收集直至转化为可利用能源的全过程。系统边界划分如图1所示。

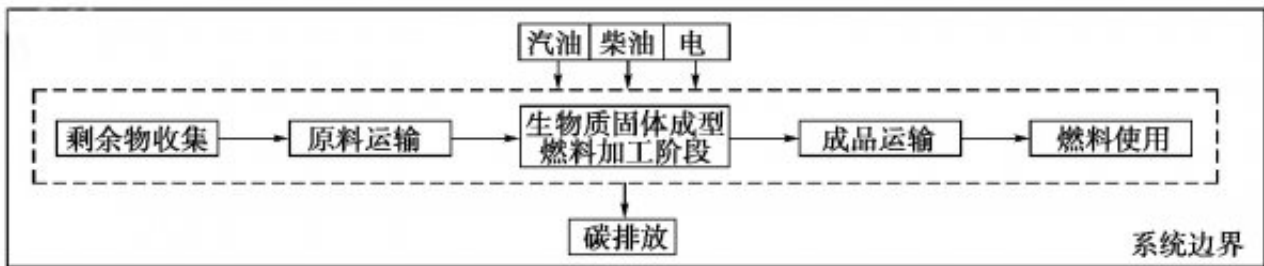


图1 系统边界

Fig. 1 System boundary

### 1.2 研究方法

生态效益评价主要从碳汇、碳排放和能量效率进行说明。

### (1) 总碳汇计算。

采伐剩余物总碳汇量  $I$ ：

$$I = NPP = BI + L。 \quad (1)$$

式中： $NPP$  为采伐剩余物的总碳汇量， $\text{kg}/\text{hm}^2$ ； $BI$  为年生物采伐剩余物增量中的碳量， $\text{kg}/\text{hm}^2$ ； $L$  为林下植被通过枯落物（包括凋落物和枯死细根）归还的碳量，本计算忽略此项。

### (2) 碳排放计算。

木材生产作业过程会产生二氧化碳 ( $\text{CO}_2$ )、甲烷 ( $\text{CH}_4$ )、氧化亚氮 ( $\text{N}_2\text{O}$ ) 等温室气体，其中  $\text{CO}_2$  在大气中含量最大，影响最大。《国家温室气体 IPCC 指南》中指出“碳排放量 = 活动数据排放因子”，将其通过燃料热值转换，得到二氧化碳排放当量  $M$  计算式<sup>[21-22]</sup>：

$$M = \sum E_i \times A_i \times B。 \quad (2)$$

式中： $E_i$  为标准煤能源消耗量， $\text{kg}/\text{m}^3$ ； $A_i$  为碳排放因子； $B$  为标煤热值， $29\,307\text{ kJ}/\text{kg}$ <sup>[24]</sup>。

其他温室气体排放可通过温室效应潜能值 (GWP 值) 转化为二氧化碳当量 (参见《PAS 2050 规范》)。

$$M' = \sum_{ij} E_{ij} \times A_{ij} \times GWP_{Tj} \quad (3)$$

$$GWP_{Tj} = \frac{\int_0^T a_i c_i(t) dt}{\int_0^T a_{CO_2} a_{CO_2}(t) dt} \quad (4)$$

式中： $E_{ij}$  为第  $j$  种气体在第  $i$  种活动中的标准煤能源消耗量， $kg/m^3$ ； $A_{ij}$  为第  $j$  种气体在第  $i$  种活动中的排放因子； $GWP_{Tj}$  为  $T$  时间内第  $j$  种气体的增温潜势； $a_i$  为第  $i$  种气体单位浓度的热辐射值； $c_i(t)$  为第  $i$  种气体释放  $t$  的浓度值； $T$  为总计算时间。

可以看出，各温室气体的辐射强度不仅随自身的热辐射值变化，还随时间的变化而变化，因此，不同时间  $T$  作用下的 GWP 值将会有所不同，采用 100 年值作为 GWP 的特征值。见表 1<sup>[25]</sup>。

表 1 能源的排放系数及 GWP 值

Tab. 1 Energy's discharge coefficient and GWP value

能源种类	温室气体	排放因子 / ( $kg \cdot TJ^{-1}$ )	GWP
汽油、柴油	CO <sub>2</sub>	74 100	1
	CH <sub>4</sub>	3.0	25
	N <sub>2</sub> O	0.6	298

上式计算为二氧化碳排放量，换算为碳排放  $M_c$  为：

$$M_c = \frac{44}{12} M_i \quad (5)$$

式中：44 为二氧化碳相对分子质量；12 为碳的相对原子质量； $M_i$  为二氧化碳排放当量。

### (3) 碳平衡计算。

森林的净碳收支是一个碳获得过程与碳释放过程之间的平衡，计算方法如下：

$$\Delta C = NEP = I - M_c = BI + L - M_c \quad (6)$$

式中： $\Delta C$  为年碳增量； $NEP$  为净生产量中的碳量。当  $\Delta C > 0$  时，为净碳汇；当  $\Delta C < 0$  时，为净碳排放；当  $\Delta C = 0$  时，说明碳的收支平衡，生态系统达到碳平衡。

### (4) 能量效率。

能量效率 ( $\eta$ ) 指的是能源投入与产出比，是用来表示输入的生物质能源与输出的能源之间的关系，是反映能源利用的有效性指标<sup>[26]</sup>。

$$\eta = \frac{\sum HE_i}{BE} \quad (7)$$

式中： $BE$  为生物质固体成型燃料燃烧所释放的能量； $HE_i$  为第  $i$  种物质消耗的能量。

## 2结果分析

### 2.1碳汇计算

由于采伐剩余物中根和叶的收集成本较高，根的收集会严重影响水土，且剩余物需要部分留在林地滋养土壤[27]，本研究只考虑枝、干和皮各组分的生物量与含碳量，见表2。表中数值源于文献收集<sup>[28-31]</sup>。

表2 不同林型碳含量与碳汇

Tab. 2 Different forest carbon content and carbon sink

树种	生物量 / (t · hm <sup>-2</sup> )	含碳量 / %	碳汇 / (t · hm <sup>-2</sup> )	权重
杉	83.38	54.73	45.63	0.296
松	150.02	52.06	78.10	0.381
阔	90.63	52.10	47.22	0.323

由表2可知，对各林型生物量与碳汇

进行加权平均，则总生物量为111.11t/hm<sup>2</sup>，总碳汇58.52t/hm<sup>2</sup>

。根据已有文献分析[20]，剩余物约占林木生物量的30%，则剩余物总碳汇 $I=58.52 \times 30\%=17.55\text{t/hm}^2$ 。

### 2.2碳排放计算

在进行生态效益评估时，主要针对整个过程中的油耗、电力消耗量进行统计。其中燃油消耗作为一次能源，碳排放按其实际消耗量进行计算；而电力作为二次能源，需考虑能量转换过程中的损失，根据实际消耗量乘以相应的系数后，再计入碳排放中(计算中碳排放均为CO<sub>2</sub>

排放量)。计算碳排放来自两个方面，分别是：直接碳排放，即作业过程中机械设备的燃料消耗所产生的碳排放；

电力消耗碳排放，即作业过程中机械设备的电能消耗及生产工人的生活耗电所产生的碳排放<sup>[21]</sup>。

碳排放计算数据源于《IPCC国家温室气体清单指南》《林区木材生产能耗》和文献整理[21]所得，为方便计算，计算碳排放均为二氧化碳排放当量，碳平衡分析时，再转换为碳排放量进行比较。

(1)剩余物收集阶段。从总体上看，目前我国林区作业的机械化使用程度不高，剩余物的收集大多采用人工作业。因此，本阶段的碳排放主要为人工作业过程中的生活耗电，根据用工数量来估计耗电量。据统计，采伐剩余物收集阶段人工需求量为5.4工日/t，全国人均生活用电量0.8kWh/d<sup>[32]</sup>

，故该阶段的耗

电量可估算为0.8 × 工日kWh，即

4.32kWh/t。全球电力平均碳排放系数为0.754kg/kWh<sup>[33-34]</sup>。因此，该过程的碳排放当量为3.26kg/t。

(2)原料运输阶段。原料运输是生物质固体压缩成型燃料的重要环节之一，剩余物从林区运输到生物质加工厂的加工损耗率为16.67%<sup>[26]</sup>

。原料运输距离的长短直接影响生物质固体成型燃料的生产成本，较短的运输距离才能占据市场优势，否则会因为高成本而使生物质固体压缩成型燃料难以推广，因此选择合理的厂址尤为重要。本研究运输距离采用平均收集半径模型计算：

$$R_H \leq \frac{3}{2t_0} \left\{ \frac{1-\lambda}{\alpha\beta} \left[ \frac{B_0}{B} (P + P_0) - C_B \right] - c \right\} \quad (8)$$

式中： $R_H$  为剩余物收集的平均半径； $\alpha$  为林地占用该土地比例； $\beta$  为剩余物可移出比例； $t_0$  为运输费率，取 0.4 元/kg·km<sup>[35]</sup>； $\lambda$  为折算系数； $B$  为标煤热值，29 307 kJ/kg<sup>[24]</sup>； $B_0$  为林木生物质能源热值； $P$  为煤炭价格； $P_0$  为国家补贴； $C_B$  为可变成本； $c$  为收购单价。

结合已有文献研究[24, 35]，计算可确定剩余物平均收集半径约为20km。原料运输段的能源消耗见表3。

表3 原料运输阶段一次能源消耗<sup>[36]</sup>

Tab. 3 Primary energy consumption of raw material transportation

能源类型	运输强度 L/(t·km)	燃料能源强度 /(MJ·L <sup>-1</sup> )	运输距离 /km	能耗 /(MJ·t <sup>-1</sup> )
柴油	0.056	38.72	20	43.37

运输过程还有电力消耗产生的碳排放，1kWh电能产生3.6MJ能耗，因此可进一步得到原料运输阶段的总碳排放。

表4 原料运输阶段的碳排放

Tab. 4 Carbon emissions of raw material transportation

	能耗/(MJ·t <sup>-1</sup> )	碳排放因子	碳排放/(kg·t <sup>-1</sup> )
柴油	43.37	74 100 kg/TJ	3.21
电力	10.80	0.754 kg/kWh	2.26

由表4计算出，每吨剩余物在运输过程中产生的碳排放约为5.48kg。从对固体成型燃料生命周期中的原料运输过程的能源消耗和碳排放的研究和分析看出，在采用柴油车运输的情况下，燃油能源消耗43.37MJ/t，电力能源消耗10.80MJ/t。

J/t，由此二者能源消耗造成了5.48kg/t碳排放。

(3)加工成型阶段。林木生物质压缩成型设备主要有螺旋挤压成型、活塞冲压成型和压辊式成型机(根据压模形状的不同，又可分为平模成型机和环模成型机)三种，其中环模式成型机具有生产效率高、成型好等优点，是生产生物质固体燃料企业的优先设备<sup>[37]</sup>

。因此，以生产率较高的环模式成型机为加工设备，工艺路线包括原料粉碎、细粉、输送、除尘、成型、冷却和包装等工序，分为压块和制粒两条，其中压块省略了细粉工序，只进行一次粉碎即可成型<sup>[26]</sup>。

生物质固体燃料加工成型阶段主要产生电力能源消耗。根据拟建的加工厂规模，假设制粒和压块各产生5000t固体成型燃料，其中制粒消耗电能93.38kWh/t，压块消耗电能86kWh/t<sup>[26]</sup>

。本过程还包含燃料厂到生产车间转运过程的能量，此过程采用叉车运输，设平均运距为1km。能源消耗与碳排放结果见表5和表6。

**表 5 加工成型阶段一次能源消耗**

Tab. 5 Primary energy consumption of processing stage

能源类型	运输强度 L/(t·km)	燃料能源强度 /(MJ·L <sup>-1</sup> )	运输距离 /km	能耗 /(MJ·t <sup>-1</sup> )
叉车运输	0.056	38.72	1	2.17

**表 6 加工成型阶段的碳排放**

Tab. 6 Carbon emissions of processing stage

	能耗/(MJ·t <sup>-1</sup> )	碳排放因子	碳排放/(kg·t <sup>-1</sup> )
叉车	2.17	74 100 kg/TJ	0.16
制粒	168.08	0.754 kg/kWh	35.20
压块	154.80	0.754 kg/kWh	32.42

生物质固体成型加工阶段，生物质投入的一次能源为2.17MJ/t，电力能源为322.88MJ/t，产生的总碳排放约为67.79kg/t。

(4)成品运输阶段。成品燃料的运输一般采用柴油货车，在运输过程中能源强度与原材料基本相同(表7)，假设平均运距为30km<sup>[26]</sup>，计算成品运输过程的碳排放，见表8。

**表 7 成品运输阶段一次能源消耗**

Tab. 7 Primary energy consumption of product transportation

能源类型	运输强度 L/(t·km)	燃料能源强度 (MJ·L <sup>-1</sup> )	运输距离 /km	能耗 /(MJ·t <sup>-1</sup> )
柴油	0.056	38.72	30	65.05

**表 8 成品运输阶段的碳排放**

Tab. 8 Carbon emissions of product transportation

	能耗/(MJ·t <sup>-1</sup> )	碳排放因子	碳排放/(kg·t <sup>-1</sup> )
柴油	65.05	74 100 kg/TJ	4.82
电力	10.8	0.754 kg/kWh	2.26

从对固体成型燃料生命周期中的成品运输过程中，能源消耗和碳排放的研究和分析可以看出，在采用柴油货运车运输的情况下，一次能源消耗65.05MJ/t，电力能源消耗10.80MJ/t，共计造成7.08kg/t碳排放。

(5)燃料使用阶段。我国生物质固体成型燃料的应用主要在工农业用能和生活用能两方面。生活用能主要是取暖和炊事，工农业用能目前主要应用在设施农业生产供热、利用生物质锅炉对办公区域供热和工业发电[15, 38]。我国南方地区生物质燃料主要用于工农业用能，由于生物质发电已具有一定规模，故以生物质固体成型燃料发电为例，计算燃料使用过程投入的能量量和产生的碳排放见表9和表10。



表9 生物质固体燃料发电电力资源消耗量 [39-40]

Tab. 9 Biomass solid fuel electricity consumption

资源	原铁矿	原煤	石灰石	原铜矿
消耗量 / (g · kWh <sup>-1</sup> )	2.491	1.295	0.142	2.125

表10 生物质固体燃料发电排放污染物 [40]

Tab. 10 Biomass and solid fuel emission pollutants

污染物	CO <sub>2</sub>	SO <sub>2</sub>	NO <sub>x</sub>	CO
排放量 / (g · kWh <sup>-1</sup> )	17.07	0.09	0.13	0.01

在生物质固体燃料发电阶段，能源的总消耗量为6.053g/kWh，产生的污染气体排放量为17.3g/kWh，其中碳排放量高达17.08g/kWh，占总污染气体排放的98.7%。据现有研究分析<sup>[39-41]</sup>，每吨固体燃料可发电860kWh，因此，生物质固体燃料使用阶段产生的碳排放为14.68kg/t。

(6)总碳排放。经计算，生物质固体成型燃料在整个生命周期内产生的总碳排放为98.29kg/t，各阶段产生的碳排放如图2所示。

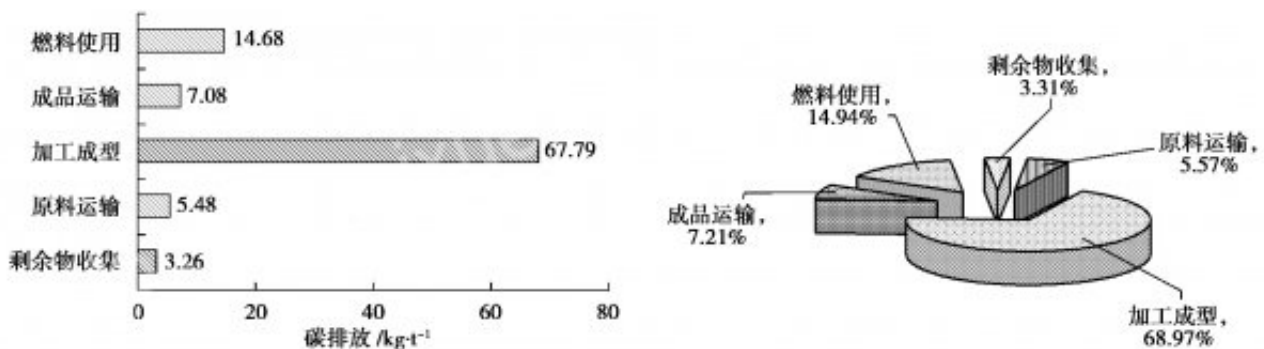


图2 总碳排放

Fig. 2 Total carbon emissions

由图2可知，在整个生命周期中，加工成型阶段产生的碳排放最多，为67.79kg/t，约占总碳排放的68.97%；其次是燃料使用阶段，占14.94%；在剩余物收集阶段，由于是人工收集作业，未直接消耗一次能源，产生的碳排放最少，约占总碳排放的3.31%。

### 2.3碳平衡分析

据公式(6)计算碳平衡结果，见表11。

表 11 碳平衡估算  $t \cdot hm^{-2}$   
Tab. 11 Carbon balance estimation

项目	C	CO <sub>2</sub>
碳排放	0.82	2.99
碳汇	17.55	64.37
净碳量	16.73	61.38

由表11可知，剩余物压缩成固体燃料过程产生的净碳汇为16.73t/hm<sup>2</sup>，可净固定CO<sub>2</sub>为61.38t/hm<sup>2</sup>，表现出“碳汇功能”。

#### 2.4 能量效率

能量效率比是用来表示输出的生物质能源与输入能源之间的关系，是反映能源利用的有效性指标。能量效率比值越小，则能源的转化效率越高。根据公式(7)计算可得，生物质固体成型燃料的燃料热值为14600MJ/t，总能量投入为475.85MJ/t，能量效率为0.032。燃煤发电能量总投入为1149.94MJ/t，总产出为20908MJ/t，能量效率为0.055<sup>[26]</sup>。可见，相比与燃煤发电(生物质固体成型燃料的能量效率0.032低于燃煤发电0.055，能量效率比值越小，能源的转化效率越高)，生物质固体燃料发电的能源转化效率较高。

#### 3 结论与讨论

从整个生命周期入手，对基于采伐剩余物的林木生物质固体燃料压缩成型工艺的生态效益评估，结果表明以采伐剩余物为原料的生物质固体燃料若发电利用，产生的总碳排放为0.82t/hm<sup>2</sup>，碳汇为17.55t/hm<sup>2</sup>，净碳为16.73t/hm<sup>2</sup>，净固定CO<sub>2</sub>为61.38t/hm<sup>2</sup>，表现出“碳汇功能”。其中，加工成型阶段(使用环模式成型机进行压块和制粒)，产生的碳排放最多，占总碳排放的68.97%；其次是燃料使用阶段(即发电阶段)，占总碳排放的14.94%；原材料运输阶段(运距20km)产生的碳排放占总碳排放的5.57%；成品运输阶段(运距30km)，产生的碳排放占总碳排放的7.21%；人工收集阶段产生的碳排放最少，占3.31%。与燃煤发电(0.055)相比，该种利用方式的能量效率为0.032，能量效率比值越小，能源的转化效率越高越表现出较高的能量转化率。相关研究表明<sup>[15, 26]</sup>，不仅仅是生物质发电，生物质固体燃料在取暖、炊事及供热等方面也能表现出一定的生态效益。

从对生物质固体燃料压缩成型整个生命周期的能量与碳排放研究分析来看，产生碳排放最多的是加工成型阶段，其次是燃料使用阶段，这两阶段产生的碳排放主要是电力消耗产生的。因此，如何有效降低生产设备的能耗，是控制加工过程能量投入的关键。若要降低整个过程的碳排放，最主要的是控制这两个阶段的能量投入，优化生产过程。在运输阶段，运距对碳排放密切相关。文中通过建立相关模型(公式(8))，借鉴已有研究的参数设定[24, 35]，确定原料的运输距离为20km，并假定成品的运输距离为30km，若运输距离增加，此过程的碳排放随之增加，反之，则减少。运输阶段碳排放还受剩余物可移出比例、运输费率及原料价格、国家补贴等影响<sup>[21-22]</sup>。剩余物可移出比、运输费率及成本的减少都会使原料运输距离的增加，从而增加此过程的碳排放。

在我国利用采伐剩余物为原料发展生物质固体燃料技术，可以解决长期火烧迹地引起的环境污染，减少化石燃料的排放量，有利于节能减排和遏制气候环境恶变，具有一定的环境可行性。但目前，生物质固体燃料仍处示范阶段，缺少具体的数据资料和实践经验的支撑，文中更多的是进行理论性探讨，评价数据只是表示全国平均水平，希望后期随着项目实践经验的积累以及人们对生物质能源的认识程度的增强，能够更加完善和充实研究内容。为了更全面分析利用的可行性，进一步扩展利用方式，进行全面的生物质固体燃料综合评价。

#### 参考文献

- [1]张兰, 张彩虹.林木生物质能源发展研究综述[J].经济问题探索, 2012(10): 186 - 190 .
- [2]Berg S , Lindholm E.Energy use and environmental impacts of forest operations in Sweden[J].Journal of Cleaner Production , 2005 , 13(1) : 33 - 42 .
- [3]蒋剑春, 应浩, 孙云娟.德国、瑞典林业生物质能源产业发展现状[J].生物质化学工程, 2006(5) : 31 - 36 .
- [4]赵丹, 龙勤.云南省林木生物质能源产业发展潜力研究[J].全国商情(经济理论研究), 2009(11) : 9 - 10 .
- [5]梁守伦, 田野.固体成型燃料生产的资源承载力分析[J].山西林业科技, 2014 , 43(1) : 19 - 21 .
- [6]霍丽丽, 侯书林, 赵立欣, 等.生物质固体成型燃料技术及设备研究进展[J].安全与环境学报, 2009(6) : 27 - 31 .
- [7]王杨.国内外林木生物质能源化利用状况比较研究[J].防护林科技, 2015(1) : 79 - 80 .
- [8]俞国胜, 肖江, 袁湘月, 等.发展中国林木生物质成型燃料[J]生物质化学工程, 2006(S1) : 45 - 50 .
- [9]孙凤莲, 王忠吉, 叶慧.林木生物质能源产业发展现状、可能影响与对策分析[J].经济问题探索, 2012(3) : 149 - 153 .
- [10]Madlener R , V Gtli S.Diffusion of bioenergy in urban areas : a socio-economic analysis of the Swiss wood-fired cogeneration plant in Basel[J].Biomass and Bioenergy , 2008 , 32(9) : 815 - 828 .
- [11]Suntana A S , Vogt K A , Turnblom E C , et al.Bio-methanol potential in Indonesia : forest biomass as a source of bio-energy that reduces carbon emissions[J].Applied Energy , 2009 , 86(11) : 215 - 221 .
- [12]Guest G , Cherubini F , Str mman A H.Climate impact potential of utilizing forest residues for bioenergy in Norway[J].Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change , 2013 , 18 (8) : 1089 - 1108 .
- [13]J ppinen E , Korpinen O , Laitila J , et al.Greenhouse gas emissions of forest bioenergy supply and utilization in Finland[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews , 2014 , 29 : 369 - 382 .
- [14]Gustavsson L , Haus S , Ortiz C A , et al.Climate effects of bioenergy from forest residues in comparison to fossil energy[J].Applied Energy , 2015 , 138(1) : 36 - 50 .
- [15]李平, 蔡鸣, 陈正明, 等.生物质固体成型燃料技术研究进展及应用效益分析[J].安徽农业科学, 2012 , 40(14) : 8284 - 8286 .
- [16]刘媛.生物质发电环境成本核算及效益评估[D].北京: 华北电力大学, 2014 .
- [17]魏文, 陈怡, 吴官胜, 等.生物质成型燃料工业项目环境影响评价实例分析[J].环境与可持续发展, 2015 , 40(1) : 118 - 120 .
- [18]张宝心, 姜月, 温懋.生物质成型燃料产业研究现状及发展分析[J].能源与节能, 2015(2) : 67 - 69 .
- [19]李运泉.生物质成型燃料燃烧特性及烟气排放规律研究[D] . 广州: 华南理工大学, 2015 .
- [20]潘小苏.林木生物质能源资源潜力评估研究[D].北京: 北京林业大学, 2014 .
- [21]周媛, 李丹, 巫志龙, 等.森林采运作业过程碳排放分析[J].森林工程, 2014 , 30(3) : 1 - 5 .
- [22]周媛, 郑丽凤, 周新年, 等.基于行业标准的木材生产作业系统碳排放[J].北华大学学报(自然科学版), 2014 , 15 (6) : 815 - 820 .
- [23]Zhou Y , Zheng L F , Zhou X N , et al.Greenhouse gas(GHG)emissions and the optimum operation model of timber

- production system in Southern China[J].Fresenius Environmental Bulletin , 2015 , 24(11a) : 3743 - 3753 .
- [24]中国国家标准管理委员会.GB2589—81《综合能耗计算通则》[S].北京：中国标准出版社，1986 .
- [25]王微，林剑艺，崔胜辉，等.碳足迹分析方法研究综述[J].环境科学与技术，2010，33(7)：71 - 78 .
- [26]霍丽丽，田宜水，孟海波，等.生物质固体成型燃料全生命周期评价[J].太阳能学报，2011，32(12)：1875 - 1880 .
- [27]Zhou X N , Zhou Y , Zhou C J , et al.Effects of cutting intensity on soil physical and chemical properties in a mixed natural forest in southeastern China[J].Forests , 2015 , 6(12) : 4495 - 4509 .
- [28]杨智杰.杉木、木荷人工林碳吸存与碳平衡研究[D].福州：福建农林大学，2007 .
- [29]张林，黄永，罗天祥，等.林分各器官生物量随林龄的变化规律——以杉木、马尾松人工林为例[J].中国科学院研究生院学报，2005，22(2)：170 - 178 .
- [30]沈燕，田大伦，项文化，等.天然次生檫木枫香混交林生物量及生产力研究[J].中南林业科技大学学报，2011，31(5)：26 - 30 .
- [31]郑丽凤，周新年，李丹，等.森林采伐对闽北天然次生林碳储量及其动态的影响[J].安全与环境学报，2013，13(6)：162 - 167 .
- [32]陈俊松.基于生命周期评价理论的人工林作业资源—环境—经济影响研究[D].南京：南京林业大学，2011 .
- [33]张斌.2020年我国能源电力消费及碳排放强度情景分析[J].中国能源，2009，31(3)：28 - 31 .
- [34]方恺，朱晓娟，高凯，等.全球电力碳足迹及其当量因子测算[J].生态学杂志，2012，31(12)：3160 - 3166 .
- [35]徐剑琦.林木生物质能资源量及资源收集半径的计量研究[D].北京：北京林业大学，2006 .
- [36]伍英武.轮胎碳足迹分析与研究[D].上海：上海师范大学，2012 .
- [37]霍丽丽，侯书林，田宜水，等.生物质固体燃料成型机压辊磨损失效分析[J].农业工程学报，2010，26(7)：102 - 106 .
- [38]孔雪辉，王述洋，黎粤华.生物质燃料固化成型设备发展现状及趋势[J].机电产品开发与创新，2010，23(2)：12 - 13 .
- [39]陈建华，郭菊娥，席西民，等.秸秆替代煤发电的外部效应测算分析[J].中国人口.资源与环境，2009，19(4)：161 - 167 .
- [40]林琳，赵黛青，魏国平，等.生物质直燃发电系统的生命周期评价[J].水利电力机械，2006，28(12)：18 - 23 .
- [41]蒋冬梅，诸培新.江苏盐城市农村秸秆资源综合利用——基于生物质发电的经济分析[J].中国生态农业学报，2008，16(5)：1208 - 1212 .

原文地址：<http://www.china-nengyuan.com/tech/135060.html>