

林成先, 杨尚宝, 陈景文, 等. 2009 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, 29(11): 2451-2457

Lin C X, Yang S B, Chen J W, *et al.* 2009. Hybrid life cycle analysis for coal versus straw briquettes[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 29(11): 2451-2457

煤与秸秆成型燃料的复合生命周期对比评价

林成先¹, 杨尚宝^{1, 2}, 陈景文^{1, *}, 王莹¹, 郑洪波¹, 杨凤林¹

1 大连理工大学环境与生命学院, 工业生态与环境工程教育部重点实验室, 大连 116024

2 中华人民共和国国家发展和改革委员会环境与资源司, 北京 100824

收稿日期: 2009-03-09 修回日期: 2009-06-05 录用日期: 2009-09-09

摘要: 利用复合生命周期对比评价方法, 引入能量返还率、资源耗竭系数、环境影响负荷和生命周期成本 4 个参数, 对煤和秸秆成型燃料在整个生命周期内的能源消耗、环境影响和经济性做了对比分析。同时, 为了平衡能源、环境与经济三者之间的关系, 建立 EEE (Energy, Environment, Economic) 综合指标进行整体评价。结果表明, 在整个生命周期内, 与煤相比, 秸秆成型燃料的能量返还率低、资源耗竭系数小。秸秆成型燃料的全球变暖潜值、酸化潜值、富营养化潜值、工业烟尘、粉尘潜值及固体废弃物潜值均比煤小, 因此, 秸秆成型燃料的环境影响负荷比煤小。秸秆成型燃料的 EEE 指标值比煤小 79.8%, 所以, 从平衡生命周期能源消耗、环境排放和经济性角度出发, 秸秆成型燃料具有替代煤的潜力。但是, 秸秆成型燃料的生命周期成本比煤高, 其大力推广需要政府的财政补贴。

关键词: 生命周期评价; EEE 指标; 煤; 秸秆成型燃料

文章编号: 0253-2468(2009)11-2451-07 中图分类号: X32 文献标识码: A

Hybrid life cycle analysis for coal versus straw briquettes

LIN Chengxian¹, YANG Shangbao^{1, 2}, CHEN Jingwen^{1, *}, WANG Ying¹, ZHENG Hongbo¹, YANG Fenglin¹

1 Key Laboratory of Industrial Ecology and Environmental Engineering MOE, School of Environmental Science and Technology, Dalian University of Technology, Dalian 116024

2 Department of Resource Conservation and Environmental Protection, National Development and Reform Commission People's Republic of China Beijing 100824

Received 9 March 2009; received in revised form 5 June 2009; accepted 9 September 2009

Abstract Life cycle energy consumption, environmental impacts and economics of coal and straw briquettes were studied using hybrid life cycle analysis (LCA). Energy return ratio, resource depletion index, environment impact load and life cycle cost were considered in the analysis. To balance energy, environmental and economic indicators, EEE (Energy, Environment, and Economics) indicators were adopted as a combined indicator to evaluate coal and straw briquettes. For the whole life cycle, the energy return ratio and resource depletion index of straw briquettes were lower than coal. Straw briquettes also had lower potential for global warming, acidification, eutrophication, smoke and dust, and solid waste production. The EEE indicator of straw briquettes was 79.8% lower than coal. Thus, the environment impact load for straw briquettes is low, and straw briquettes have the potential to displace coal, taking the energy, environmental and economic aspects into consideration. However, the life cycle cost of straw briquettes is slightly higher than coal, so the extended application of straw briquettes needs the financial support of the government.

Keywords hybrid life cycle analysis (LCA); EEE indicator; coal; straw briquette

1 引言 (Introduction)

化石燃料与日俱增的消耗量与有限储量之间的矛盾, 及其使用过程中所引起的严重环境问题, 推动了寻找可再生替代能源研究的快速发展。而在各种可再生能源中, 以“绿色煤炭”著称的生物质能

源作为唯一可以以固、液、气 3 种形态进行储存和运输的能源 (Hall *et al.*, 1998), 在世界各国已得到了广泛应用 (钱伯章, 2007)。中国是一个农业大国, 秸秆资源丰富, 年产量在 7×10^9 t 以上, 但大部分秸秆在田间地头被焚烧, 既污染环境, 又造成可再生资源的浪费 (张廷荣, 2005; Zeng *et al.*, 2007)。如果

基金项目: 长江学者和创新团队发展计划资助项目 (No. RT0813)

Supported by the Program for Changjiang Scholars and Innovative Research Team in University (No. IRT0813)

作者简介: 林成先 (1984-), 男, E-mail: lincx@163.com; * 通讯作者 (责任作者), E-mail: jwchen@dlut.edu.cn

Biography: LIN Chengxian (1984-), male, E-mail: lincx@163.com; * Corresponding author, E-mail: jwchen@dlut.edu.cn

将秸秆作为生物质能源加以合理利用,则既可满足日益增长的能耗需求,又能减轻当地环境负担,进而促进社会的可持续发展.秸秆成型燃料技术就是一种新兴的将秸秆由农田废弃物转化为生物质能源的技术,它是将秸秆粉碎,放入挤压成型设备,控制一定的水分比例,高压压制成棒状、块状、饼状等各种形状的燃料.

作为化石燃料的替代品,替代能源不仅要求环境友好、经济可行,还必须做到有净能量产出.生命周期评价(LCA)就是用来辨识和量化产品在其整个生命周期过程中的资源、能源消耗和环境污染排放,进而评价其影响的工具.尽管已经有很多关于LCA方法应用案例的研究报道(Kaltschmitt *et al.*, 1997; 郑元等, 2000; Kim *et al.*, 2004; Kalogirou, 2004; 易红宏等, 2005; Dinca *et al.*, 2007; Reinders *et al.*, 2007),但这些研究均采用单一指标或者是能源消耗和环境排放(2E)标准作为评判基准,没有考虑经济因素.而对于选定的产品,经济因素会成为影响其可实施性的决定性因素.目前,国内外学者在LCA和生命周期成本(LCC)集成方面做了大量研究,形成了生命周期的3E(Economics Energy and Environment)评估模型(Sonnemann *et al.*, 2003; 吴锐等, 2004; 胡志远等, 2004; Bergerson *et al.*, 2005; Hill *et al.*, 2006; Jaramillo *et al.*, 2008).此外,为平衡能量、环境和经济3个指标,Hu等(2004)建立了EEE指标作为评价研究对象的综合指标.

本研究基于Hu等(2004)的理论基础,通过引入能量返还率(r_E)、资源耗竭系数(r_{RD1})、环境影响负荷(r_{EL})和生命周期成本(r_{LCC})4个参数对其模型指标加以改进.从能源、环境和经济3个角度将传统能源煤与其替代能源秸秆成型燃料进行复合生命周期对比评价,以此来揭示二者的优劣,进而以EEE指标作为综合指标对二者进行整体评判,以期对秸秆成型燃料替代传统能源煤提供理论依据和决策支持.

2 研究方法 (Methodology)

在对煤和秸秆成型燃料进行比较评价的过程中,将生命周期评价(LCA)方法和生命周期成本(LCC)相结合,在考虑产品整个生命周期过程中资源、能源消耗和环境影响的同时,也将经济指标纳入评价体系.此外,为平衡能源、环境与经济三者之

间的关系,建立EEE综合指标对煤和秸秆成型燃料进行整体评价.

2.1 研究对象

研究的具体对象为原煤(热值 20.91 MJ kg^{-1})和玉米秸秆成型燃料(大连鑫宝生物质能有限公司大连分公司生产,热值 $16.73 \sim 17.56 \text{ MJ kg}^{-1}$).

2.2 系统边界的确定

煤的整个生命周期主要包括煤炭采选、运输和使用(燃烧)3个阶段.秸秆成型燃料的生命周期始于秸秆的收集和储运,经由燃料的加工生产和运输阶段,一直到燃料使用阶段.

2.3 基本假设与功能单位

燃料需求地A每年采暖的能耗为 $5.44 \times 10^9 \text{ MJ}$ 约折合 $2.60 \times 10^6 \text{ t}$ 煤炭,或 $3.20 \times 10^6 \text{ t}$ 秸秆成型燃料.为统一评价基准,本研究做了如下假设:
①燃料需求地A与煤炭供给地B和秸秆成型燃料生产基地C的距离均为400 km,煤炭采用铁路运输,秸秆成型燃料采用公路运输.需求地A与燃料供给地B和C之间均无交通基础设施,所以,无论是铁路还是公路都需要新建.
②所有的用电都是火力发电,每生产 $1 \text{ kW} \cdot \text{h}$ 电耗煤 400 g .
③煤厂和秸秆成型燃料厂均达标排放,而且厂址的选择不会影响其经济成本和污染物排放.本研究将功能单位定义为将 $5.44 \times 10^9 \text{ MJ}$ 能量运输400 km的周转量.以下对煤和秸秆成型燃料的对比评价都是以它们经过400 km的运输后,燃烧释放出 $5.44 \times 10^9 \text{ MJ}$ 能量为基准.

2.4 评价指标

本研究选取了能源、环境、经济和EEE4个评价指标,每个指标都选取了相应的参数进行表征(表1).

表1 评价指标及其表征参数

Table 1 Assessment indicators and characteristic parameters

评价指标	表征参数
能源指标	能量返还率(r_E)、资源耗竭系数(r_{RD1})
环境指标	环境影响负荷(r_{EL})
经济指标	生命周期成本(r_{LCC})
EEE指标	$r_{EEE} = r_{LCC} \times \alpha_{LCC} + r_{EL} \times \alpha_{EL} + r_{RD1} \times \alpha_{RD1}$

注: α_{LCC} 、 α_{EL} 、 α_{RD1} 分别为各指标权重值.

能量返还率(r_E)是单位产品所包含的能量与生产单位的该产品所需要投入的不可再生能量的比值(Hammerschlag, 2006),资源耗竭系数(r_{RD1})简单地反映了产品资源消耗占整个自然资源的份额,同

时也反映了资源的稀缺性(杨建新等, 2002), 环境影响负荷 (r_{EIL})反映了所研究产品系统在其整个生命周期中对环境系统的压力大小(杨建新等, 2002). 以上各系数的计算方法分别如式(1)~式(3)所示.

$$r_E = \frac{E_{out}}{E_{in, nonrenewable}} \quad (1)$$

$$r_{RDI} = \sum WR(j) = \sum WF(j) \times \frac{RC(j)}{RC(j)_{90}} \quad (2)$$

$$r_{EIL} = \sum WP(j) = \sum WF(j) \times \frac{EP(j)}{EP(j)_{90}} \\ = \sum \left[WF(j) \times \frac{\sum Q(j)_i \times EF(j)_i}{EP(j)_{90}} \right] \quad (3)$$

式中, E_{out} 为单位产品所包含的能量(J); $E_{in, nonrenewable}$ 为生产单位该产品投入的不可再生能量(J); $WR(j)$ 为加权后的资源消耗潜值(无量纲); $WF(j)$ 为权重; $RC(j)$ 为产品系统的资源消耗量(kg); $RC(j)_{90}$ 为1990年全球(或地区)资源消耗总量(kg); $WP(j)$ 为各种环境影响类型加权后的环境影响潜值(无量纲); $EP(j)$ 为产品系统对第 j 种潜在环境影响的贡献; $EP(j)_{90}$ 为第 j 种环境影响1990年的全球(或地区)影响潜值总和; Q_i 为第 i 种物质排放量(kg); $EF(j)_i$ 为第 i 种排放物质对第 j 种潜在环境影响的当量因子.

生命周期成本(LCC)是在产品生命周期过程中发生的所有成本的总和, 包括内部成本和外部成本两部分(王寿兵等, 2006).

EEE指标是为了平衡经济、环境影响和能源消耗这3个指标而将三者有机组合所建立的指标(Hu *et al.*, 2004), 用来对产品系统进行综合评价. EEE指标越小, 评价对象越具有优势, 公式表示如式(4)所示.

$$r_{EEE} = [r_{LCC} \ r_{EIL} \ r_{RDI}] \begin{bmatrix} \alpha_{LCC} \\ \alpha_{EIL} \\ \alpha_{RDI} \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中, r_{LCC} 为整个生命周期的经济评价指标值, α_{LCC} 为经济评价指标的权重; r_{EIL} 为环境评价指标值, α_{EIL} 为环境评价指标的权重; r_{RDI} 为能源评价指标值, α_{RDI} 为能源消耗的权重.

2.5 数据收集

秸秆成型燃料相关数据由大连鑫宝生物质能有限公司大连分公司实地调查而得, 其它数据都来自公开出版的统计文献资料(国家统计局工业交通统计司, 1998; 杨建新等, 2002; 胡名操, 1990; 叶笃正等, 1992; Bergerson *et al.*, 2005; Jaramillo *et al.*, 2008; 茅于軾等, 2008).

3 结果 (Results)

3.1 生命周期能耗

r_E 反映的是产品将能量投入转化为产出的尺度. 如果 $r_E < 1$, 则净能量产出为负, 即产品所包含的能量比生产时投入的能量少, 那就应该直接利用投入的不可再生能源. 只有当 $r_E > 1$, 净能量产出大于0时, 才说明从能量投入中获得了一定的能量收益. r_E 越大, 说明从能量投入获得的能量产出越多. 表2列出了煤和秸秆成型燃料的单位(1 t)能量投入与产出, 及它们各自的 r_E 值. 由表2可知, 煤和秸秆成型燃料的 r_E 值都远大于1, 表明煤和秸秆成型燃料在生产过程中都有很大的净能量产出, 可从能量投入中获得较大的能量收益. 但煤的 r_E 值几乎是秸秆成型燃料的2倍, 这说明生产煤时从能量投入获得的能量产出要比秸秆成型燃料多.

表2 煤和秸秆成型燃料的 r_E 值

Table 2 Values of r_E of coal and straw briquettes

燃料类别	每吨产品能量投入					每吨产品能量产出 / MJ	r_E
	煤 / kg	柴油 / kg	汽油 / kg	电 / (kW·h)	总计 / MJ		
煤 ^①	19.40	0.37	0.28	29.44	538.89	20908	38.80
秸秆成型燃料	-	-	0.71	216.37	808.74	16675	20.62

注: ①数据来自文献(国家统计局工业交通统计司, 1998); “-”表示秸秆燃料整个生命周期过程的资源消耗中不包含煤和些油的消耗.

表3列出了煤和秸秆成型燃料在其整个生命周期过程中各种资源的消耗量, 及其对整个自然系统资源消耗所产生的影响(r_{RDI}). 无论是煤还是秸秆成型燃料, 燃烧阶段均不涉及资源的消耗. 由表3可知, 对煤而言, 资源的消耗主要集中在采选阶段. 采

选阶段的煤耗量占整个生命周期煤耗量的80%以上, 采选阶段总的资源消耗占整个生命周期资源消耗的99%以上. 对秸秆成型燃料而言, 煤耗主要集中在加工生产阶段, 燃油消耗主要集中在运输阶段. 秸秆成型燃料整个生命周期过程中, 运输阶段

的 r_{RD} 最大. 与煤相比, 秸秆成型燃料整个生命周期消耗的煤和石油都比较多, 但是水消耗量较少, 整

个生命周期的 r_{RD} 也比煤小 82.1%.

表 3 煤和秸秆成型燃料生命周期资源消耗量及资源耗竭系数 r_{RD}

Table 3 Life cycle resource consumption and r_{RD} of coal and straw briquettes

燃料类型	生命周期阶段	资源消耗量 /kg			r_{RD}
		煤	石油	水	
煤	采选 ^①	81.06×10^6	1.69×10^6	$4.348.40 \times 10^6$	8.25×10^{-6}
	运输 ^②	15.29×10^6	2.64×10^6	-	0.05×10^{-6}
	整个生命周期	96.35×10^6	4.33×10^6	$4.348.40 \times 10^6$	8.30×10^{-6}
秸秆成型燃料	秸秆的收集与储运	-	2.28×10^6	-	0.02×10^{-6}
	燃料加工生产	276.80×10^6	-	64.00×10^6	0.66×10^{-6}
	运输	-	108.84×10^6	-	0.81×10^{-6}
	整个生命周期	276.80×10^6	111.12×10^6	64.00×10^6	1.49×10^{-6}

注: ①国家统计局工业交通统计司, 1998; ②杨建新等, 2002 “-”表示燃料在其某个生命周期阶段并不产生所对应资源的消耗, 下同.

3.2 生命周期环境影响

表 4 列出了煤和秸秆成型燃料在整个生命周期过程中所产生的各种环境影响潜值的大小, 以及它们生命周期各个阶段所产生的环境影响负荷 r_{EIL} . 由表 4 可知, 无论是煤还是秸秆成型燃料, 整个生命周期的全球变暖潜值、酸化潜值、工业烟尘和粉尘潜值、固体废弃物潜值和 r_{EIL} 都在燃烧阶段最大, 光化学臭氧合成潜值在运输阶段最大, 煤炭采选阶段

产生的大量矿井水使得煤的富营养化潜值在此阶段最大. 在所有的环境影响类型中, 煤和秸秆成型燃料整个生命周期的固体废弃物潜值最大. 与煤相比, 秸秆成型燃料的光化学臭氧合成潜值是煤的 40 多倍, 但其全球变暖潜值、酸化潜值、富营养化潜值、工业烟尘和粉尘潜值以及固体废弃物潜值都比煤小很多, 因此, 秸秆成型燃料整个生命周期的 r_{EIL} 比煤小 81.4%.

表 4 煤与秸秆成型燃料生命周期各种环境影响潜值及 r_{EIL}

Table 4 Life cycle environment impact potentials and r_{EIL} of coal and straw briquettes

燃料类型	生命周期阶段	环境影响潜值					r_{EIL}	
		全球变暖潜值	酸化潜值	光化学臭氧合成潜值	富营养化潜值	工业烟尘和粉尘潜值		固体废弃物潜值
煤	采选 ^①	1.28×10^{-5}	1.31×10^{-5}	-	0.60×10^{-5}	0.92×10^{-5}	168.13×10^{-5}	106.49×10^{-5}
	运输 ^①	0.72×10^{-5}	0.77×10^{-5}	1.35×10^{-5}	-	152.66×10^{-5}	-	95.21×10^{-5}
	燃烧 ^{②③}	3.38×10^{-5}	156.48×10^{-5}	-	-	142.68×10^{-5}	226.96×10^{-5}	342.39×10^{-5}
	整个生命周期	5.38×10^{-5}	158.56×10^{-5}	1.35×10^{-5}	0.60×10^{-5}	295.34×10^{-5}	395.09×10^{-5}	544.09×10^{-5}
秸秆成型燃料	秸秆的储运	0.01×10^{-5}	0.01×10^{-5}	0.41×10^{-5}	-	0.04×10^{-6}	-	0.25×10^{-5}
	运输	0.68×10^{-5}	2.26×10^{-5}	59.05×10^{-5}	-	0.31×10^{-5}	-	33.73×10^{-5}
	燃烧	0.78×10^{-5}	4.94×10^{-5}	-	-	1.02×10^{-5}	100.56×10^{-5}	67.19×10^{-5}
	整个生命周期	1.47×10^{-5}	7.21×10^{-5}	59.46×10^{-5}	-	1.33×10^{-5}	100.56×10^{-5}	101.17×10^{-5}

注: ①杨建新等, 2002; ②胡名操, 1990; ③叶笃正等, 1992

3.3 生命周期成本核算

表 5 是对煤和秸秆成型燃料生命周期成本核算的汇总. 其中, 资本投入包括工厂投资和交通基础设施建设费用两部分, 而且以年为基准进行折算; 外部成本包括产品整个生命周期对社会、环境和人

体健康产生的经济损失. 将 LCC 标准化即可得到 r_{LCC} 值. 由表 5 可知, 在煤的内部成本中, 资本投入占主要份额, 而在秸秆成型燃料的内部成本中, 原辅材料费用却占了主要份额. 总体而言, 秸秆成型燃料的内部成本比煤高. 虽然秸秆成型燃料整个生命

表 5 煤和秸秆成型燃料生命周期成本核算

Table 5 Life cycle costs of coal and straw briquettes

燃料类型	内部成本 /元				外部成本 /元	LCC /元	r_{LCC}
	资本投入	运营与维护成本	燃料费	原辅材料费			
煤	5.11×10^9 ^①	0.79×10^9 ^{①②}	0.31×10^9 ^{③④}	0.16×10^9 ^{③④}	3.90×10^9 ^⑤	11.42×10^9	46.31×10^{-6}
秸秆成型燃料	2.76×10^9	1.92×10^9	1.60×10^9	5.76×10^9	0.01×10^9	13.65×10^9	55.35×10^{-6}

注: ①Bergerson et al., 2005; ②Jaramillo et al., 2008; ③国家统计局工业交通统计司, 1998; ④杨建新等, 2002; ⑤茅于軾等, 2008.

周期的外部成本远远低于煤, 但其在内部成本上的劣势使得其生命周期成本比煤高 19.5%.

3.4 EEE 指标

表 6 是对煤和秸秆成型燃料 EEE 指标的比较结果. 其中, 能源、环境和经济性指标的权重采用层次分析法计算得到: $\alpha_{RD1} = 0.23$, $\alpha_{EIL} = 0.26$, α_{LCC}

$= 0.51$. 由表 6 可知, 虽然秸秆成型燃料的经济指标比煤高 19.5%, 而且权重最大, 但秸秆成型燃料在能源和环境方面的优势使得秸秆成型燃料的 EEE 指标值比煤低 79.8%. 从平衡能源、环境和经济三者之间的关系考虑, 秸秆成型燃料是一种较理想的能源类型.

表 6 煤和秸秆成型燃料的 EEE 指标比较

Table 6 Comparison of the EEE indicator between coal and straw briquettes

燃料类型	r_{LCC}	r_{EIL}	r_{RD1}	r_{EEE}
煤	46.31×10^{-6}	$5.440.90 \times 10^{-6}$	8.30×10^{-6}	$1.440.16 \times 10^{-6}$
秸秆成型燃料	55.35×10^{-6}	$1.011.70 \times 10^{-6}$	1.49×10^{-6}	291.61×10^{-6}
增量	19.5%	- 81.4%	- 82.8%	- 79.8%

4 讨论 (Discussion)

4.1 能耗分析

在计算 r_E 的过程中, 能量投入包括燃料生产过程的能量投入和上游能量投入 (采煤、秸秆的收集与储运) 两部分. 目前, 国内玉米秸秆的收割方式是人工收割, 认为秸秆收割过程无能量投入, 因此, 秸秆收集与储运过程的能耗主要是以下两个运输过程中的燃油消耗: 将秸秆从农田运输到秸秆收集点; 从秸秆收集点运输到秸秆成型燃料加工厂. 秸秆成型燃料生产过程中有净能量产出, 具备作为替代能源的基本条件, 但其 r_E 值比煤小, 因此, 从能量投入产出角度来看, 煤比秸秆成型燃料更具优势.

水是再生资源, 但目前国内水资源的供给能力与水资源的需求之间存在缺口, 淡水资源的可供期仅为 1 年 (杨建新等, 2002), 故本研究在计算 r_{RD} 时也将水资源消耗包括在内. r_{RD} 的计算采用资源可供期的倒数作为权重, 淡水资源非常短的可供期最终导致秸秆成型燃料整个生命周期的 r_{RD1} 比煤小.

4.2 环境影响分析

煤炭从开采到使用的每个生命周期阶段都会对环境产生巨大影响. 与煤相比, 秸秆成型燃料在秸秆收割时, 人工收割方式不会对环境产生影响; 在燃料的生产过程中, 因秸秆成型燃料是先粉碎后高温高压成型的物理过程, 故无 CO_2 、 SO_2 和 NO_x 等环境污染物产生. 同时, 对象企业在秸秆粉碎过程中配备了专门的粉尘吸收装置, 所以, 秸秆粉碎过程中的粉尘也基本无逸出; 而水在高温条件下转化成蒸汽, 以物质流的形式进入产品系统, 并以产品的形式产出, 压型过程亦无废水产生; 在燃烧过程

中, 秸秆的高挥发分能有效降低 NO_x 的排放, 而且玉米秸秆本身 0.3% 的含 N 量就比煤低 (含 N 量 0.5% ~ 3.0%), 所以, 燃烧排放的 NO_x 比煤少 (Easterly *et al.*, 1996; 王晶红等, 1998); 玉米秸秆 40% 的碳含量及 0.1% 的硫含量都较低 (煤的含碳量为 55% ~ 90%, 含硫量为 0.4% ~ 7.0%), 因而燃烧排放的 CO_2 和 SO_2 也比煤少. 虽然秸秆成型燃料的光化学臭氧合成潜值是煤的 40 多倍, 但其整个生命周期的 r_{EIL} 要比煤小. 因此, 综合各种环境影响, 秸秆成型燃料是一种比煤清洁的能源形式, 以秸秆成型燃料替代煤可以减轻当地的环境负担.

基于农业生产活动的目的, 秸秆成型燃料的生命周期边界定义始于秸秆的收集和储运. 如果将其生命周期边界扩大, 将农作物生长过程也考虑在内, 则秸秆成型燃料燃烧所排放的净 CO_2 量为 0 (即作物光合作用吸收的 CO_2 等于其燃烧所排放的 CO_2 (阴秀丽等, 2000)), 而且将秸秆作为生物质能源加以利用也减少了其自然腐烂所产生的 CH_4 , 进一步减少了温室气体的排放 (陈祎等, 2007).

4.3 生命周期成本分析

导致秸秆成型燃料内部成本比煤高的主要原因是秸秆成型燃料的原辅材料费过高. 这是因为秸秆成型燃料热量值较低, 要提供相同的能量就必须加大秸秆成型燃料的产量, 从而增加了其原辅材料成本. 另外, 我国目前对煤炭从量征收的煤炭资源税仅为 1%, 煤矿基本是无偿开采, 而生产秸秆成型燃料所需原料秸秆收购价却高达 260 元 t^{-1} . 由此可见, 秸秆的收购价格和煤炭资源税直接影响到秸秆成型燃料和煤的生命周期成本. 只有当秸秆的收购价格降低, 或者煤炭资源税升高, 抑或二者同时发生时, 秸秆成型燃料在经济上才可能具有竞争力.

例如,国家正在准备实行煤炭资源税改,如果以后实行按 10% 从价征收煤炭资源税,每吨煤售价按 600元计,则秸秆的收购价格只要低于 157元 t^{-1} ,秸秆成型燃料就具有经济竞争力。

对煤炭外部成本产生影响的因素有以下几个方面:①煤炭开采会引起地表塌陷,严重破坏土地资源和地表基础设施建设;②加工和处理过程所产生的大量废水会破坏水生态系统;③煤炭运输过程中遗落的粉尘以及煤炭燃烧所产生的环境污染物会给生态环境带来巨大压力,同时还会导致哮喘和呼吸系统的疾病,危害公众的身体健康甚至生命。此外,由于安全投入不足导致煤矿事故频发,煤矿工人健康状况堪忧,交通事故时有发生等。因此,1 t 煤所造成的外部成本可达 150元(茅于軨等,2008)。而秸秆成型燃料在整个生命周期过程中的外部成本只包括污染物排放所造成的环境影响和社会成本及运输过程中交通事故所产生的费用,而且秸秆成型燃料燃烧所产生的污染物质比煤少,进一步导致秸秆成型燃料的外部成本比煤低很多。

5 结论 (Conclusions)

1) 秸秆成型燃料具备作为替代能源的基本条件,秸秆成型燃料生命周期的资源耗竭系数比煤小 82.1%,环境影响负荷比煤小 81.4%。因此,推广秸秆成型燃料能缓解淡水资源短缺的现状,同时能减轻当地环境负担。如果在运输过程中改用生物质燃料,不仅可减少石油消耗量,缓解石油供需矛盾,还能降低汽车尾气对城市空气产生的污染。但是,秸秆成型燃料的能量返还率只有煤的 50% 左右,生命周期中成本比煤高 19.5%,所以,秸秆成型燃料的推广需要政府的大力支持。

2) 秸秆成型燃料的 EEE 指标比煤小 79.8%,综合考虑煤与秸秆成型燃料生命周期能源、环境和经济学指标,秸秆成型燃料是一种较为理想的能源类型。

致谢 (Acknowledgment): 感谢大连鑫宝生物质能有限公司大连分公司常务执行董事曹斌先生在数据调研工作中给予的支持与帮助。

责任作者简介: 陈景文 (1969—), 男, 博士, 教授, 博士生导师。主要从事污染生态化学、污染控制化学、环境生态技术、产业生态学等方面的研究。E-mail: jwchen@dlut.edu.cn

参考文献 (References)

- Bergerson J A, Lave L B. 2005. Should we transport coal gas or electricity? Cost efficiency, and environmental implications [J]. *Environmental Science & Technology*, 39(16): 5905—5910
- 陈祯, 罗永浩, 陆方, 等. 2007. 生物质与煤共燃污染物的研究 [J]. *锅炉技术*, 38(2): 40—47
- Chen Y, Luo Y H, Lu F, *et al*. 2007. Research on co-firing contamination of biomass and coal [J]. *Boiler Technology*, 38(2): 40—47 (in Chinese)
- Dinca C, Rousseaux P, Badea A. 2007. A life cycle impact of the natural gas used in the energy sector in Romania [J]. *Journal of Cleaner Production*, 15(15): 1451—1462
- Easterly J L, Bumhan M. 1996. Overview of biomass and waste fuel resources for power production [J]. *Biomass & Bioenergy*, 10(2-3): 79—92
- 国家统计局工业交通统计司. 1998. 中国能源统计年鉴 (1991—1996) [M]. 北京: 中国统计出版社, 27—129
- Department of Industry and Traffic Statistics of National Bureau of Statistics of China. 1998. Energy Yearly Statistics of China (1991—1996) [M]. Beijing: China Statistic Press, 27—129 (in Chinese)
- Hall D O, Scrase J I. 1998. Will biomass be the environmentally friendly fuel of the future [J]. *Biomass & Bioenergy*, 15(4-5): 357—367
- Hammerschlag R. 2006. Ethanol's energy return on investment: A survey of the literature 1990—Present [J]. *Environmental Science & Technology*, 40(6): 1744—1750
- Hill J, Nelson E, Tilman D, *et al*. 2006. Environmental, economic, and energetic costs and benefits of biodiesel and ethanol biofuels [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 103(30): 11206—11210
- 胡名操. 1990. 环境保护实用数据手册 [M]. 北京: 机械工业出版社, 80—84
- Hu M C. 1990. Applied Data Handbook for Environment Protect [M]. Beijing: China Machine Press, 80—84 (in Chinese)
- Hu Z Y, Pu G Q, Fang F, *et al*. 2004. Economics, environment, and energy life cycle assessment of automobiles fueled by bio-ethanol blends in China [J]. *Renewable Energy*, 29(14): 2183—2192
- 胡志远, 张成, 浦耿强, 等. 2004. 木薯乙醇汽油生命周期能源、环境及经济性评价 [J]. *内燃机工程*, 25(1): 13—16
- Hu Z Y, Zhang C, Pu G Q, *et al*. 2004. Life-cycle energy, environment, and economy assessment of cassava-based ethanol gasoline [J]. *Chinese Internal Combustion Engine Engineering*, 25(1): 13—16 (in Chinese)
- Jaramillo P, Griffin W M, Matthews H S. 2008. Comparative analysis of the production costs and life-cycle GHG emissions of FT liquid fuels from coal and natural gas [J]. *Environmental Science & Technology*, 42(20): 7559—7565
- Kalogirou S A. 2004. Environmental benefits of domestic solar energy systems [J]. *Energy Conversion and Management*, 45(18-19): 3075—3092
- Kaltsdmitt M, Reinhardt G A, Stekler T. 1997. Life cycle analysis of

- biofuels under different environmental aspects [J]. *Biomass & Bioenergy*, 12(2): 121—134
- Kin S, Dak B E. 2004 Cumulative energy and global warming impact from the production of biomass for bio-based products [J]. *Journal of Industrial Ecology*, 7(3-4): 147—163
- 茅于軾, 盛洪, 杨富强, 等. 2008 煤炭的真实成本 [M]. 北京: 煤炭工业出版社, 6—29
- Mao Y S, Sheng H, Yang F Q, *et al*. 2008 The True Cost of Coal [M]. Beijing China Coal Industry Publishing House 6—29 (in Chinese)
- 钱伯章. 2007 国际可再生能源最新动态 [J]. 中国建设动态 (阳光能源), 4: 59—66
- Qian B Z. 2007 Developments of international renewable energy resources up to the minute [J]. *China Construction (Solar & Renewable Energy Sources)*, 4: 59—66 (in Chinese)
- Reinders L, Huijbregts M A J. 2007 Life cycle greenhouse gas emissions fossil fuel demand and solar energy conversion efficiency in European bioethanol production for automotive purposes [J]. *Journal of Cleaner Production*, 15(18): 1806—1812
- Sonnenmann G W, Schuhmacher M, Castells F. 2003 Uncertainty assessment by a Monte Carlo simulation in a life cycle inventory of electricity produced by a waste incinerator [J]. *Journal of Cleaner Production*, 11(3): 279—292
- 王晶红, 刘皓, 陆继东, 等. 1998 生物质燃料与煤混燃时 NO_x / N_2O 排放的研究 [J]. 华中理工大学学报, 26(1): 71—73
- Wang JH, Liu H, Lu J D, *et al*. 1998 On the emission of NO_x / N_2O during the co-combustion of biomass and coal [J]. *Journal of Huazhong University of Science and Technology*, 26(1): 71—73 (in Chinese)
- 王寿兵, 吴峰, 刘晶茹. 2006 产业生态学 [M]. 北京: 化学工业出版社, 74—107
- Wang S B, Wu F, Liu J R. 2006 Industrial Ecology [M]. Beijing Chemical Industry Press 74—107 (in Chinese)
- 吴锐, 任玉珑, 雍静, 等. 2004 4种天然气基汽车燃料的生命周期3E评价 [J]. 系统工程理论与实践, 27(9): 114—120
- Wu R, Ren Y L, Yong J *et al*. 2004. A 3E and life cycle assessment of four natural gas based automotive fuels [J]. *Systems Engineering—Theory & Practice*, 27(9): 114—120 (in Chinese)
- 杨建新, 徐成, 王如松. 2002 产品生命周期评价方法及应用 [M]. 北京: 气象出版社, 62—108
- Yang J X, Xu C, Wang R S. 2002 Methodology and Application of Life Cycle Assessment [M]. Beijing China Meteorological Press 62—108 (in Chinese)
- 叶笃正, 陈泮泮. 1992 中国的全球变化预研究 [M]. 北京: 中国地震出版社, 4—21
- Ye D Z, Chen P Q. 1992 Beforehand Research on Global Change of China [M]. Beijing China Earthquake Press 4—21 (in Chinese)
- 易红宏, 朱永青, 王建昕, 等. 2005 含氧生物质燃料的生命周期评价 [J]. 环境科学, 26(6): 28—32
- Yi H H, Zhu Y Q, Wang J X, *et al*. 2005. Life cycle assessment on oxygen biofuels [J]. *Environmental Science* 26(6): 28—32 (in Chinese)
- 阴秀丽, 吴创之, 徐冰熾, 等. 2000 生物质气化对减少 CO_2 排放的作用 [J]. 太阳能学报, 21(1): 40—44
- Yin X L, Wu C Z, Xu B Y, *et al*. 2000 The effect of biomass gasification on reducing CO_2 emission [J]. *Acta Energetica Solaris Sinica* 21(1): 40—44 (in Chinese)
- Zeng X Y, Ma Y T, Ma L R. 2007. Utilization of straw in biomass energy in China [J]. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 11(5): 976—987
- 张廷荣, 朱章华, 李勋贵. 2005. 小水电代燃料的生态效益研究 [J]. 小水电, 2: 15—18
- Zhang T R, Zhu Z H, Li X G. 2005. Ecological benefit of small hydropower for fuel [J]. *Small Hydro Power*, 2: 15—18 (in Chinese)
- 郑元, 桂萌. 2000 生命周期分析在能源技术中的应用 [J]. 上海环境科学, 19(8): 358—360
- Zheng Y, Gui M. 2000. Application of life-cycle analysis to comparison of energy technologies [J]. *Shanghai Environmental Science*, 19(8): 358—360 (in Chinese)