

生物质固体成型燃料全生命周期评价

霍丽丽^{1,2}, 田宜水¹, 孟海波¹, 赵立欣¹, 姚宗路¹

(1.农业部规划设计研究院, 北京100125; 2.中国农业大学工学院, 北京100083)

摘要：为探讨生物质固体成型燃料的能源效率和温室气体排放量，采用全生命周期评价分析原理，对北京地区以玉米秸秆为原料的生物质固体成型燃料进行全生命周期分析。结果表明：生物质固体成型燃料的净能量为13243.5MJ/t，能量产出投入比为10.8，其中，种植阶段、加工阶段以及秸秆运输能源消费居前三位，分别占总量的58.65%、24.23%、12.58%。CO₂当量排放量为11.13g/MJ，约为煤的1/9。这说明生物质固体成型燃料具有较大的节能、减少温室气体排放的效益。

0引言

目前，我国大力推广发展可再生能源，生物质固体成型燃料作为其中的一部分，其生产过程产出的有效能与其能源消耗相比具有多大优势亟需进行系统的评价。生物质能的生命周期评价研究主要针对生物质液体燃料^[1,2]。

在对生物质固体成型燃料的能量平衡研究方面，朱金陵等^[3]

指出生物质固体成型燃料加工阶段的能耗最高

，该燃料大大降低了CO₂的排放，但研究模型中假设玉米种植阶段CO₂

是永久循环的，忽略了此过程的机械、电力、油等消耗的一次能源和相应的温室气体排放，因此对净能值和能量产出投入比估值过高；林成先等^[4]

对煤和秸秆成型燃料生命周期进行对比，研究假设煤与秸秆成型燃料的运输距离均为400km，得出秸秆成型燃料对环境的影响负荷比煤小79.8%，成型燃料的能量产出投入比低且生命周期成本比煤高，但生物质固体燃料建厂可选择地点，不受地质因素限制，该研究对秸秆成型燃料的运输距离估值过高，导致秸秆成型燃料的能量和环境效益低，并且该研究也忽略了种植阶段及原料运输等过程。因此，应合理选择生物质固体燃料的生命周期分析边界，从而正确评价生物质固体成型燃料能耗与排放，对该技术的推广和发展具有重要意义。

本文采用全生命周期评价分析(LCI)原理^[5]，利用已有评价系统^[6]

，建立玉米秸秆类生物质固体成型燃料的分析模型，针对北京地区玉米种植、生物质固体成型燃料技术及能源使用状况，定量评价玉米秸秆转化为生物质固体成型燃料的能量平衡关系及温室气体的排放量，从而为正确评价我国生物质固体成型燃料的能源可持续性提供参考依据。

1 生物质固体成型燃料全生命周期系统

1.1 模型的建立

可持续评价系统是利用线性规划法和电子数据表工具(SPREADSHEET)进行数学优化。本研究为生物质固体成型燃料，包括农业种植、生物燃料工业转化等的能量平衡和污染物排放，可利用该模型原理建立生物质固体成型燃料的生命周期评价系统。

生物质固体成型燃料生命周期系统是由化石能和太阳能共同驱动的生物能源系统，其能量的输入、输出及内部流动如图1。研究功能单元为年产1万t的生物质固体成型燃料。研究范围从玉米种植阶段到生物质固体成型燃料应用阶段的全生命周期。

系统分为玉米种植阶段、秸秆从田间到燃料厂运输阶段、生物质固体燃料加工成型阶段、生物质固体成型燃料的运输及生物质固体成型燃料的应用5个阶段。该系统的输入能量包括玉米种植所投入的能源(包括种子、机械、肥料、农药、电力及燃料等)、生物质固体成型燃料转化阶段消耗的电力及各种运输的油耗及生物质固体成型燃料应用的耗电

。研究5个阶段的直接能源(煤、石油、电力等)和间接能源(化肥、农药等)的开采与生产相关的能量投入和温室气体排放。该周期系统分析假设玉米生长过程吸收的碳与生命结束排放的碳是可循环的。本研究忽略生物质固体成型燃料厂房、设备建设的耗能、人工以及燃烧后的灰渣回田的能量。

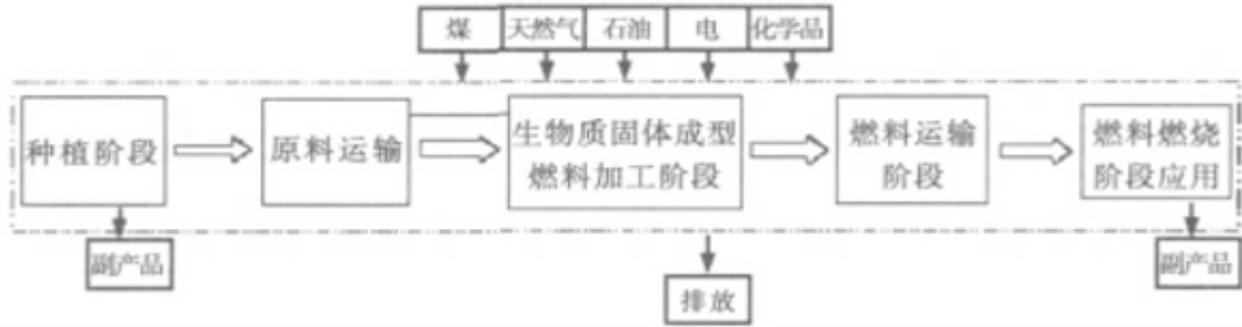


图 1 生物质固体成型燃料生命周期模型

Fig. 1 LCA model of densified biofuel

1.2评价指标

1.2.1净能量与能量产出投入比

研究输入的能源与输出的生物质能之间的关系，可以用净能量或能量产出投入比来表示。净能量为生物质固体成型燃料燃烧释放的热能与生产生物质固体成型燃料消耗的总能量之差。能量产出投入比为生物质固体成型燃料燃烧释放的热能与生产生物质固体成型燃料消耗的总能量之比：

$$NE = BE - \sum HE_i \quad (1)$$

$$\eta = \frac{BE}{\sum HE_i} \quad (2)$$

式中, NE ——净能量; BE ——生物质固体成型燃料燃烧释放的热能; BE_i ——生产生物质固体成型燃料第 i 种物质消耗的能量; η ——能量产出投入比。

1.2.2 温室气体 CO₂ 当量排放

温室气体包含 CO₂、CH₄、N₂O 这 3 种温室气体的全球增温潜力系数^[7,8] 分别为 1、23、296, CO₂ 当量为三类温室气体量与增温潜力系数的乘积之和。

$$HF_i = \sum (He_i \lambda) \quad (3)$$

式中, HF_i ——第 i 种物质 CO₂ 当量排放量; λ ——各类能源消耗所占总能源消耗的比例。

²数据来源

2.1 种植阶段

玉米种植能量输入

包括种子、氮肥、磷肥、钾肥、杀虫剂、除草剂、农机(柴油)、电力(灌溉)^[2]。各地区典型种子和化肥用量投入见表^{1[9, 10]}。

表 1 夏玉米种植阶段投入 (g/m²)

Table 1 Energy inputs of planting phase (g/m²)

项目	北京郊区	山东	吉林	黑龙江	安徽
种子	4.500	4.493	5.096	3.668	3.994
氮肥	22.500	25.340	20.764	14.777	22.693
磷肥	5.000	4.655	5.437	4.449	2.877
钾肥	3.000	3.167	3.210	1.598	0.793
产量	750.000	630.530	652.650	442.450	415.300

由表1可见，不同地区的用量存在差异。本研究采用北京郊区数据进行计算。该地区主要为“冬小麦-夏玉米”轮作

²，磷肥折成P₂O₅用量约为5.0g/m²，钾肥约为3.0g/m²。
。除草剂采用防治效果较好的50%乳油，在玉米播种后出苗前使用，施用量为0.3mL/m²，加水750L后喷雾除草。杀虫剂采用2.5%敌百虫粉，施用量为0.75g/m^{2[9]}。

农机包括播种机

、收割机、脱粒机及打捆机，均使用柴油动力，其耗油量总估算值为10.5mL/m²。
。电力主要是水泵灌溉，北京市玉米种植约9065.76万m²，灌溉用水均为地下水，用水量约1300万m³，水泵采用TOP40-4型，电机功率6.3kW，效率为40m³/h，则用电量约为0.0225kWh/m^{2[10]}。
。温室气体排放计算详见表2。

表 2 种植阶段能耗与温室气体排放
Table 2 Energy inputs and greenhouse gas emission of planting phase

项目	各能源 所占比例 /%	温室气体排放 /g·MJ ⁻¹			参考 文献
		CO ₂	CH ₄	N ₂ O	
煤	80.41	23.660	0.016	0.133	[1]
石油	3.78	18.333	0.065	0.343	[2]
天然气	12.18	14.032	/	0.020	[2]
水电	2.30	/	/	/	
核电	1.33	/	/	/	

经计算得种植阶段温室气体排放

项目	单位能耗 10 ⁻⁴ /MJ·m ²	温室气体排放 10 ⁻⁵ /kg·m ²			参考 文献
		CO ₂	CH ₄	N ₂ O	
种子	44.30	434.431	0.424	2.983	[15]
氮肥	57.46	2696.307	2.403	17.115	[13,14]
磷肥	7.36	76.748	0.068	0.487	[13,14]
钾肥	6.85	38.729	0.017	0.157	[13,14]
杀虫剂	284.82	183.979	0.133	1.014	[15]
除草剂	266.56	172.184	0.124	0.949	[15]
农机 (柴油)	38.72	218.751	0.360	0.360	[15]
电力 (灌溉)	11.91	580.887	1.063	8.336	[15]

注：“/”表示排放量极少或无，可忽略不计。氮、磷、钾肥工业用能煤、石油、天然气所占比例分别为 65.60%、22.60% 和 11.8%，其他项均按表中北京能源统计年鉴各能源所占比例计算。

该阶段主要产出玉米和玉米秸秆,产量数据来源于北京市大兴区农户,按照每平方米产0.75kg玉米,单位能量为44.3MJ/kg^[9]

,9000kg玉米秸秆,单位能量为14.6MJ/kg计算。本文主要考虑玉米秸秆的利用产生的能耗和温室气体排放,因此,采用能量分配法分配种植阶段的投入能量,即每万平方米产出的玉米秸秆能量占玉米种植总能量的30%。

2.2 秸秆原料运输阶段

秸秆到燃料厂的运输阶段,玉米秸秆加工的损耗率约16.67%,即1万t生物质固体成型燃料需要1.2万t秸秆。秸秆收集方式

采用农民分散

送厂和加工厂直接收集两种

,秸秆运输主要用农用柴油车,柴油的能量强度为38.72MJ/L^[15],耗油量0.056L/(t·km)^[16,17]。

运输距离采用收集半径模型计算。原料的收集半径中,资源收集量=收集面积×单位面积耕地废弃物产出的秸秆量×耕地面积占区域面积的比例×秸秆用于能源的比例^[18]。可得原料的收集半径计算模型为:

$$R^2 = M / \pi M_0 \alpha \beta \quad (4)$$

式中, R ——原料的收集半径, m; M ——年秸秆废弃物收集量, kg; M_0 ——单位面积秸秆废弃物产量, kg/m²; α ——种植面积的比例; β ——秸秆废弃物用于能源的比例。

我国年秸秆用于能源和废弃总量占总秸秆量的43%^[19],大兴区土地面积1031km²,其中玉米种植面积25000m²

,玉米种植面积占全区的比例为24%,设大兴周边地区的玉米种植面积与大兴区种植情况一致。玉米秸秆单位产量为0.90kg/m²,年秸秆需要量12000t,由公式(4)可计算出原料的收集半径为65.6km。

2.3 生物质固体成型燃料加工阶段

生物质固体成型燃料加工阶段,采用生产率较高的环模式成型机^[20]

,工艺路线包括原料粉碎、细粉、输送、除尘、成型、冷却、包装等工序,分为压块和制粒两条,其中压块只进行一次粉碎即可成型,省略了细粉工序。本模型计算假设制粒和压块各生产5000t生物质固体成型燃料,生物质固体成型燃料加工主要消耗电力能源,制粒消耗93.375kWh/t,压块消耗86kWh/t,数据来源于生物质固体成型燃料厂。

单位电力投入的能源及碳排放参照文献[21~25],电力投入各能源比例参考中国统计年鉴。本阶段包含燃料厂到生产车间转运过程的能量,此过程运输的平均距离设为1km,采用叉车,柴油的能量强度为38.72MJ/L,耗油量0.05L/(t·km)^[17]。

2.4 生物质固体成型燃料运输阶段

生物质固

体成型燃料运输一般采

用四轮柴油货车,柴油的能量强度为38.72MJ/L,耗油量为0.05L/(t·km)^[17],设运输的平均距离为30km。

2.5 生物质固体成型燃料使用阶段

大兴生物质固体成型燃料主要供温室大棚使用,使用时间为2400h,采用生物质锅炉供暖,其单位用量10.4kg/h,1万t生物质固体成型燃料可供400个温室大棚使用(数据来源于大兴温室大棚用户)。生物质固体成型燃料燃烧消耗部分

电能，温室大棚锅炉电机有效功率为20W(数据来源于北京生物质锅炉厂家)。生物质固体成型燃料燃烧排放为零，即作物光合作用吸收的物质的量等于燃烧所排放的物质的量。

3结果与分析

3.1能量投入

3.1.1种植阶段

种植阶段主要产出玉米和玉米秸秆，经模型计算，该阶段的总能耗为2.3867MJ/m²，玉米秸秆占玉米种植总能量的30%，即分配后玉米秸秆的能量输入为0.7160MJ/m²

。种植阶段主要能量投入排在前三位，依次为氮肥、农机油耗、灌溉电力，分别占54.2%、16.9%、11.2%(见图2)。可见合理施用氮肥对能量输入有重要影响，可以大大减少一次能源的使用量。因此大力推广中耕或免耕技术和节水灌溉技术可大大减少玉米种植的能量投入，以降低生产生物质固体成型燃料的能耗。

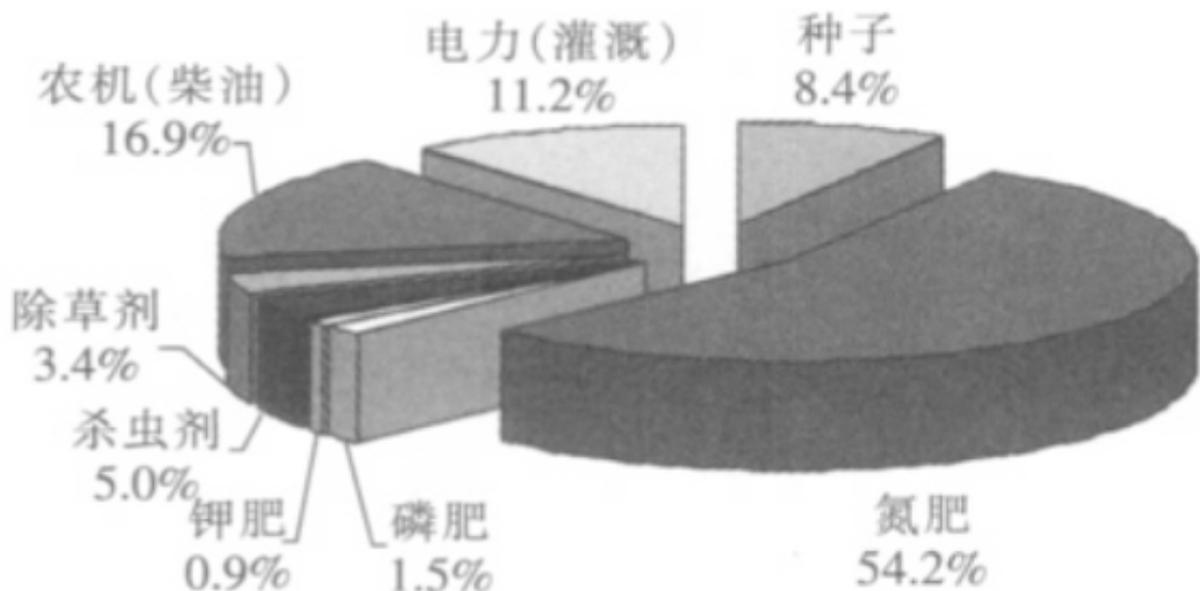


图2 种植阶段各能源投入比例

Fig. 2 Energy input in planting phase

3.1.2秸秆原料运输阶段

原料的收集运输是生物质固体成型燃料的能量成本投入的重要环节之一，原料运输距离短可降低生物质固体成型燃料的生产成本，运输距离短才能占据市场优势，否则成本过高会导致生物质固体成型燃料难以推广，因此合理选择建厂地点非常重要。本研究原料的运输半径经计算为65.6km。原料从田间运输到加工储料场的能耗为170.7MJ/t。

3.1.3生物质固体成型燃料加工阶段

生物质固体成型燃料加工阶段，生产1t生物质固体成型燃料所投入的能量为328.7MJ，主要为电力消耗。因此，如何降低生产设备的能耗是控制该过程能量投入的关键所在。

3.1.4生物质固体成型燃料运输阶段

生物质固体成型燃料销售主要为运输能耗，燃料的主要利用方式为周围温室大棚供暖，运输距离设为30km，能量消耗为58.1MJ/t。

3.1.5 生物质固体成型燃料使用阶段

生物质固体成型燃料的使用燃烧阶段炉具配套电机是能量消耗的主要因素。经测算使用过程的电力消耗3.5MJ/t。

3.2 能量产出

生物质固体成型燃料燃烧热值为14600MJ/t，即产出的生物质固体成型燃料燃烧释放的能量为14600MJ/t。

3.3 净能量及能量产出投入比

生物质固体成型燃料总能量投入1356.5MJ/t，与产出能量比较，生物质固体成型燃料的净能量为13243.5MJ/t，能量产出投入比为10.8。可见，能源的转化效率高，从能量角度看生物质固体成型燃料技术具有较大优势。

整个生命周期过程中，能量投入主要是种植阶段，约占58.65%；其次是生物质固体成型燃料加工阶段，约占24.23%；然后是秸秆原料运输阶段，约占12.58%；燃料成品运输阶段，约占4.28%；其余是成品燃烧电力消耗阶段，约占0.25%，如图3所示。

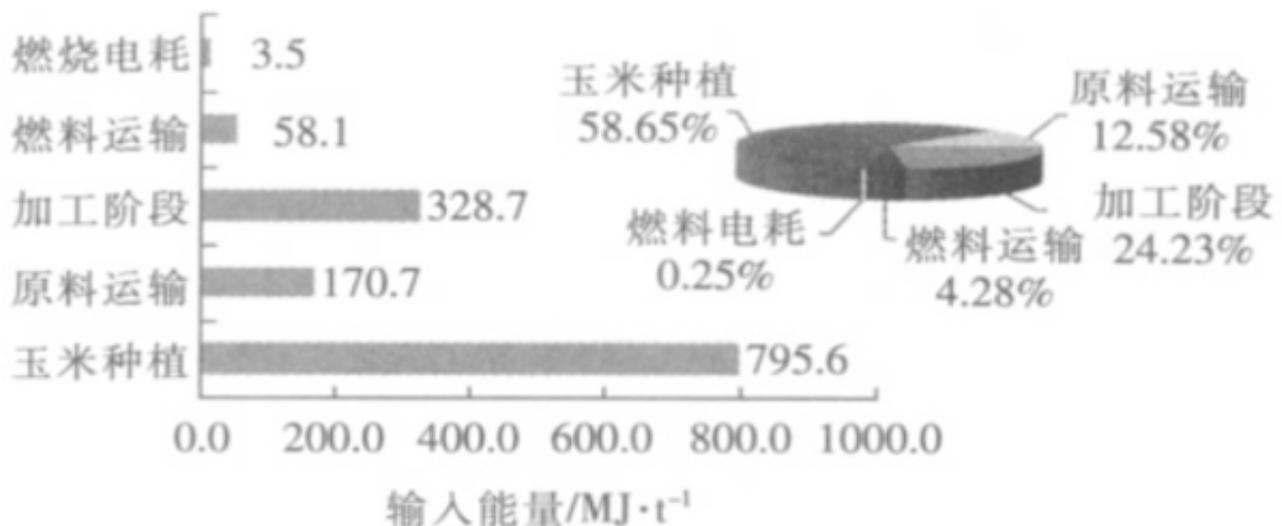


图3 生物质固体成型燃料的能量投入

Fig. 3 Energy input in densified biofuel

3.4 温室气体的排放

经计算CO₂

当量值为11.13g/MJ，即生物质固体成型燃料释放温室气

体(CO₂当量)为11.13g/MJ。各阶段排放的CO₂

当量如图4所示，种植阶段所排放的温室气体最多，对环境影响最大，占总温室气体排放的58.8%。加工电耗约占24.5%，原料运输占12.4%，销售运输占4.1%，生物质固体成型燃料应用电耗占0.3%。其中种植阶段N肥的温室气体排放占种植阶段总量的56.25%，如图5所示。N₂

O的排放是其主要影响因素，因此合理施用氮肥对控制温室效应是最有效的途径。此外，如何实现氮肥行业的节能减排和合理施用氮肥是解决能耗和排放问题的重点。

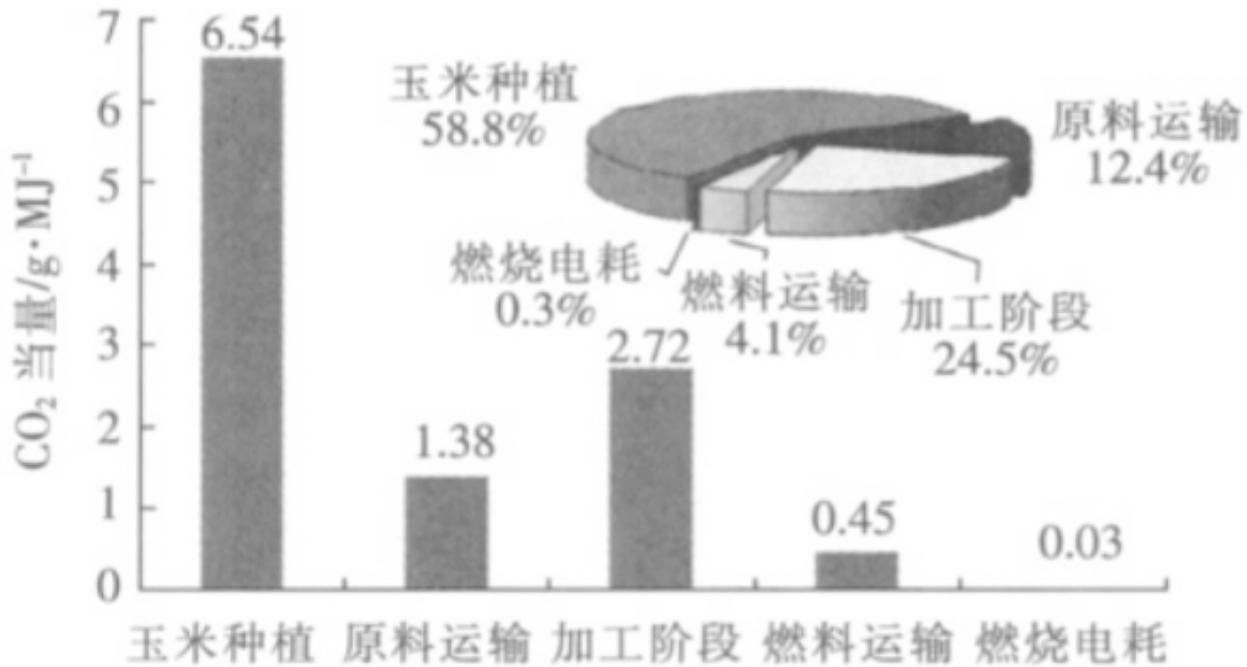


图 4 生物质固体成型燃料生产的温室气体排放

Fig. 4 Greenhouse gas emission of densified biofuel

3.5与煤炭比较

煤炭整个生产过程中能量投入主要为采选过程的电耗和运输的能量消耗。煤炭投入的能源中，石油消耗量为0.002MJ/MJ，煤碳消耗量为0.053MJ/MJ^[8]。

即1t煤需投入的总能量1149.94MJ，1t煤产出能量20908MJ，净能量为19758.06MJ/t，能量产出投入比为18.2，温室气体(CO₂当量)排放量为100.5g/MJ^[8]。

煤与生物质固体成型燃料产出1MJ能量的能量投入、净能量及CO₂

排放比较如图6所示，煤的能量投入约是生物质固体成型燃料的0.6，而温室气体排放量是生物质固体成型燃料排放量的9倍。随着煤炭能源的枯竭，生物质固体成型燃料作为一种新型无污染的可再生能源，优势将逐渐显现。

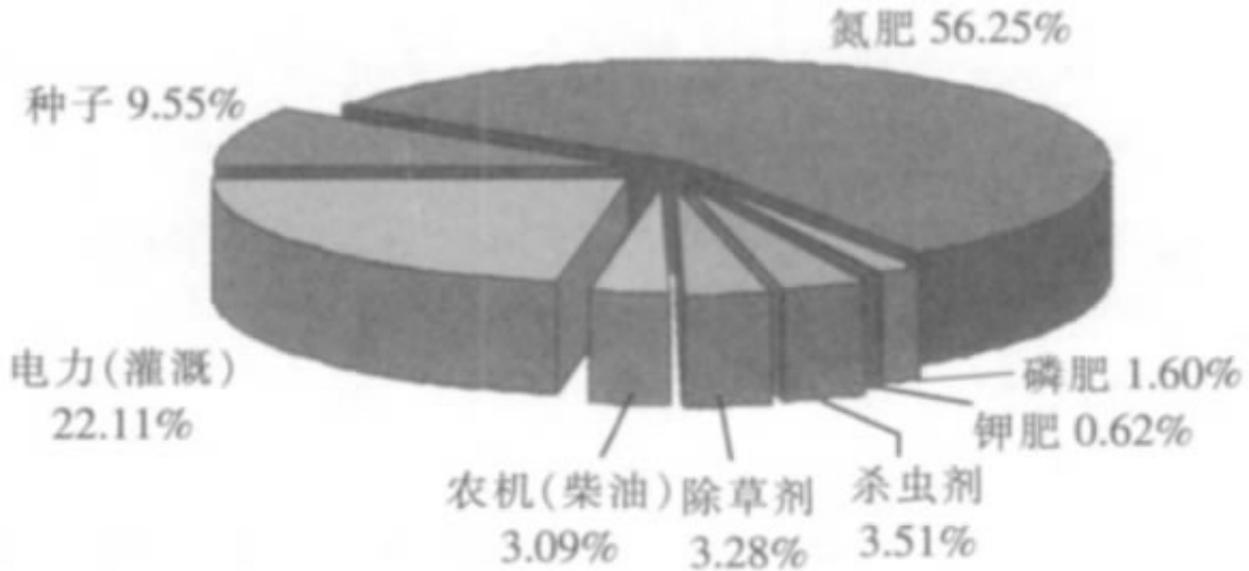


图5 种植阶段温室气体排放

Fig. 5 Greenhouse gas emission of planting phase

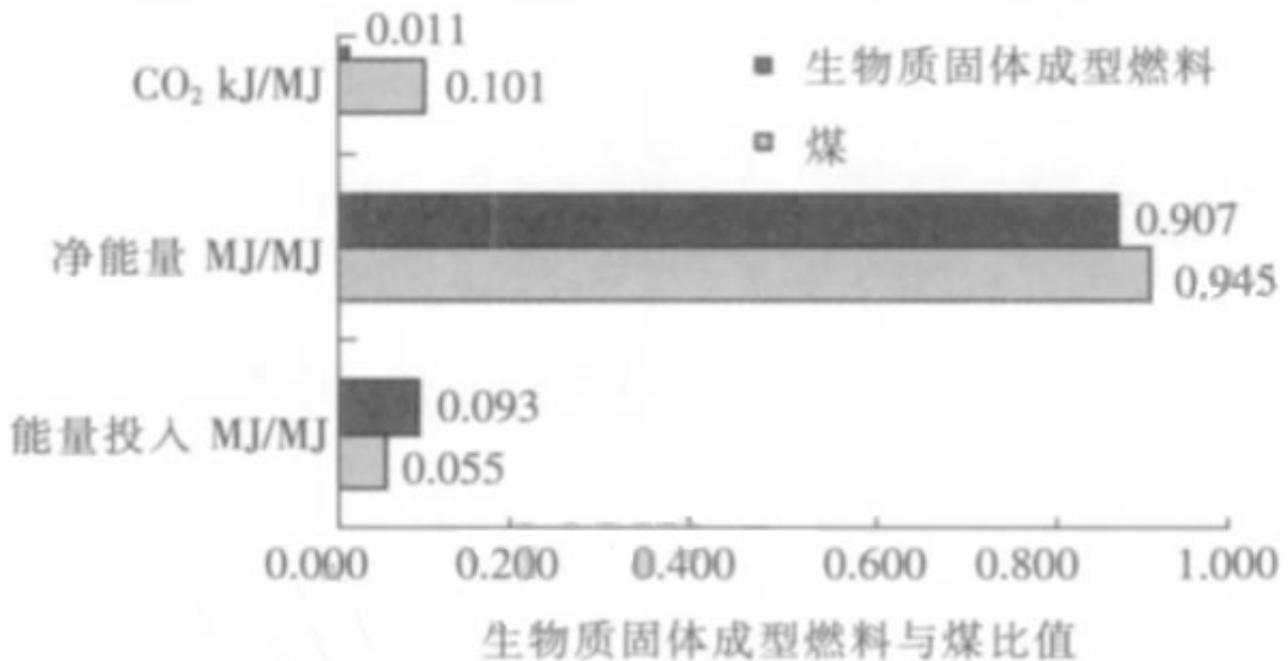


图6 生物质固体成型燃料与煤比较

Fig. 6 Comparison of densified biofuel and coal

1)基于生命周期清单分析原理，利用BSAS系统，建立评价模型，定量分析了生物质固体成型燃料从种植到燃烧整个生命周期的能源投入和温室气体排放。以北京市的玉米秸秆生产生物质固体成型燃料为例，对其进行能量平衡分析，净能量为13243.5MJ/t，能量产出投入比为10.8，产出大于投入，且能源转化效率较高；

2)生物质固体成型燃料全生命周期种植阶段的耗能最大，其中氮肥、机械耗油、灌溉电力是影响该过程能源消耗的主要因素。种植阶段对全球变暖潜力的影响最大，占整个生命周期指标的58.8%，其中氮肥的温室气体排放量占种植阶段的总排放量的56.25%。如何降低氮肥用量是减少生物质固体成型燃料能耗与温室气体排放的最关键因素；

3)生物质固体成型燃料的加工阶段的能耗其次，占总能耗的24.23%，排放的温室气体占总排放的24.5%。因此，如何降低成型过程的电耗是影响生物质固体成型燃料的能耗和温室气体排放的关键因素之二；

4)与煤相比，生物质固体成型燃料的温室气体排放量不到煤的1/9，能源环境效益巨大。

[参考文献]

[1]Hu Zhiyuan, Lou Diming, Pu Gengqiang.Life cycle im-pact assessment of fuel ethanol[J].Transactions of CSICE, 2005, 23(3): 258—263.

[2]Zhang Zhishan, Yuan Xigang.Carbon balance analysis of corn fuel ethanol life cycle[J].Environmental Science, 2006, 27(4): 616—619.

[3]Zhu Jinling, Wang Zhiwei, Shi Xinguang.Life cycle as-sessment of corn straw pellet fuel[J].Transactions of the CSAE, 2010, 26(6): 262—266.

[4]Lin Chengxian, Yang Shangbao, Chen Jingwen, et al.Hybrid life cycle analysis for coal versus straw briquettes.[J].Acta Scientiae Circumstantiae, 2009, 29 (11): 2451—2457.

[5]邓南圣, 王小兵.生命周期评价[M].北京：化学工业出版社，2003，6.

[6]Meng Haibo, Zhao Lixin, Gao Xinxing, et al.Bio-liquid fuel sustainable assessment system in China[J].Transac-tions of the CSAE, 2009, 25(12): 218—223.

[7]Turhollow A F, Perlack R D.Emissions of CO₂ from en-ergy crop production[J].Biomass and Bioenergy, 1991, 1(3): 129—135.

[8]Ou Xunmin, Zhang Xiliang.Fossil energy consumption and GHG emission s of final energy by LCA in China[J].China Soft Science Magazine, 2009, S2: 208—214.

[9]贾银锁, 郭进考.河北夏玉米与冬小麦一体化种植[M].北京：中国农业科学技术出版社，2009，1.

[10]Ding Wenwu, Yuan Lin, Tang Xiaoyu, et al.Analysis of net energy production in the corn ethanol life cycle[J].Journal of Harbin Engineering University, 2010, 31(6): 773—779.

[11]Xia Dejian, Ren Yulong, Shi Lefeng.Measurement of life-cycle carbon equivalent emissions of coal-energy chain[J].Statistical Research, 2010, 8(27): 82—89.

[12]Hu Zhiyuan, Tan Piqiang, Lou Diming, et al.Assess-ment of life cycle energy consumption and emissions for several kinds of feedstock based biodiesel[J].Transac-tions of the CSAE, 2006, 22(11): 141—146.

[13]国家发展与改革委和国家环境保护总局.氮肥行业清洁生产评价指标体系(试行)[EB/OL].http://wenku.baidu.com/view/e42453cdda38376baf1fae43.html.

[14]黄熠, 李平辉, 王罗强.氮肥行业节能减排的措施[J].化工时刊, 2008, 22(12): 57—60.

[15]张治山.玉米燃料乙醇生命周期系统的热力学分析[D].天津大学, 2005, 32—33.

[16]David Lorenz , David Morris.How much energy does it take to make a gallon of ethanol[R].Washington D.C. : Institute for Local—Self Reliance , 1995 , 1—5.

[17]中国交通年鉴社.中国交通年鉴2006[Z].北京：中国交通年鉴社，2007，129—131.

[18]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，2006，40—46.

[19]崔明，赵立欣，田宜水，等.中国主要农作物秸秆资源能源化利用分析评价[J].农业工程学报，2008，24(12)：291—296.

[20]霍丽丽，侯书林，田宜水.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，2010，22(7)：102—106.

[21]Yu Haiqin , Li Jin , An Hongguang.Analysis on carbon dioxide emission and reduction of thermal power plant[J].Journal of Beijing Jiaotong University , 2010 , 31(3) : 101—105.

[22]马忠海，潘自强，贺惠民.中国煤电链温室气体排放系数及其与核电链的比较[J].核科学与工程，1999，19(3)：268—274.

[23]王永征.电力用煤燃烧污染物协同析出与排放特性研究[D].济南：山东大学，2007，6.

[24]佟新华.中日一次能源消耗的碳排放及影响因素对比分析[J].现代日本经济，2008，(6)：46—51.

[25]Tristram O W , Gregg M.A synthesis of carbon sequestration , carbon emissions , and net carbon flux in agriculture : Comparing tillage practices in the United States[J].Agriculture , Ecosystems and Environment , 2002 , 91(1-3) : 217—232.

原文地址：<http://www.china-nengyuan.com/tech/119102.html>