

秸秆发电系统能值分析*

刘华财^{1,2} 阴秀丽¹ 吴创之¹

(1. 中国科学院可再生能源与天然气水合物重点实验室, 广州 510640; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100049)

【摘要】 利用能值分析方法对 1 MW 气化发电、5.5 MW 气化发电和 25 MW 直燃发电 3 种典型生物质发电系统的可持续性进行了评价。在能值成本和能值收益概念基础上, 引入了能值收益率和能值净收益两个指标。结果表明: 利用单位能量的秸秆, 5.5 MW 气化发电系统能回收的能值最多且效率最高; 1 MW 气化发电系统的能值成本最低, 但相应的能值收益也最小; 和 1 MW 气化发电相比, 25 MW 直燃发电系统能值收益率较低而能值净收益较高。

关键词: 秸秆发电 能值 可持续性

中图分类号: TK6 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2011)11-0093-06

Energy Evaluation of Straw-based Power Generation System

Liu Huacai^{1, 2} Yin Xiuli¹ Wu Chuangzhi¹

(1. Key Laboratory of Renewable Energy and Natural Gas Hydrate, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China
2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract

Energy analysis was applied to evaluate three typical straw-based power generation systems: 1 MW gasification and power generation system, 5.5 MW gasification and power generation system, and 25 MW combustion and power generation system. Based on the concepts of energy costs and energy benefits, two indicators were employed: environmental yield ratio (EYR) and net energy. The results show that the 5.5 MW system is the most efficient one in recovering energy from straw (the highest EYR) and is capable of saving the greatest quantity of energy per MJ of straw used (the highest net energy); the 1 MW system is the best one in terms of energy costs, but the worst in terms of energy benefits. Compared with the 1 MW system, the 25 MW system has a lower EYR but higher net energy.

Key words Biomass power generation, Energy, Sustainability

引言

我国的农作物秸秆资源十分丰富,除了饲料、肥料和工业原料用途外,还有大量的秸秆可作为能源利用。但随着近年来农村经济的发展和水平的提高,秸秆不再是农民能源消费的首要选择,大量剩余秸秆被遗弃或在田间地头焚烧,既浪费资源又污染环境。利用秸秆发电是生物质能高效洁净利用的重要方式之一,分散、独立的离网或并网生物质分布式电站具有广阔的发展前景。

气化发电和直燃发电是我国秸秆发电的两种主要技术。对秸秆发电系统进行评价,传统的方法是进行经济、能量和环境性分析,国内学者在这方面做了不少工作^[1-4]。但是,经济指标无法对资源消耗和环境影响进行合适的评估^[5],而常规的能量分析关心的则是产品生产过程中直接和间接的能源消耗(主要是化石能源的消耗),未能将环境贡献以及人工和经济投入考虑在内^[6],也无法将不同“质”的能量进行区分^[7-8]。如果能在经济 and 能量的基础上融入环境可持续性的内涵进行综合分析,将能为其提

收稿日期: 2011-01-13 修回日期: 2011-02-17

* 国家高技术研究发展计划(863 计划)资助项目(2009AA05Z434)和中国科学院创新方向项目(KGCX2-YW-329)

作者简介: 刘华财,博士生,主要从事生物质能利用技术的评价研究, E-mail: liuhe@ms.giec.ac.cn

通讯作者: 阴秀丽,研究员,博士生导师,主要从事生物质能源转化研究, E-mail: xlyin@ms.giec.ac.cn

供更客观全面的评价。能值分析方法是能够实现这个评价目的的有效手段,它将不同形式的能量、材料、人工和经济服务等赋予一个相同的基础单位进行计量,能真实地衡量自然资源和经济资源投入,不受限于资源的价格和能量,已被应用于生物质发电项目^[9-10]和气化站^[11]的评价。

本文对3个具有代表性的秸秆发电系统:1 MW 气化发电、5.5 MW 气化发电和25 MW 直燃发电,采用能值分析方法进行分析,并在此基础上进行评价和比较。

1 能值分析方法

能值分析方法^[7, 12-14]是生态学家 Odum 在20 世纪80 年代后期创立的以能量为基础的系统分析方法。能值分析以能值为基准,把生态系统或生态经济系统中不同种类、不可比较的能量转换成同一标准的能值来衡量和分析,从中评价其在系统中的作用和地位;综合分析系统中各种生态流(能量流、货币流和信息流等),得出一系列能值综合指标,定量分析系统的结构功能特征。其特点可以概括为^[15]:①共同的单位。②可以进行人工、费用、原材料、商品和服务之间的比较。③体现了某种资源或产品包含的所有能量记忆。④能识别关键过程。⑤衡量自然资源的真实价值。⑥提供历史信息。

常用的能值指标有能值产出率(EYR)和环境负载率(ELR)^[7],还有衡量可持续发展能力的综合性指标(ESI)^[16]。这些指标都有一定的局限性,EYR 不是越高越好,ELR 也不是越低越好^[17]。Brown M T 等提出 ESI 小于1 代表发达系统,大于10 代表不发达系统的同时,谨慎地表示其应用领域还有待进一步确认^[16],而在随后的研究中发现风电、水电等可再生电力的 ESI 都大于10,化石能源电力的 ESI 则小于1^[18],间接证明了这种谨慎的必要。能值分析方法已被应用于对农业废弃物和垃圾回收利用系统的评价^[9, 11, 19-20]。针对不同特点的系统,学者们在探索着更科学客观的评价指标^[21-23]。垃圾所包含的能值和处理垃圾所投入的能值没有必然联系^[24],所以垃圾本身的能值不计入垃圾发电的投入中^[25]。同理,由于秸秆的生产即作物种植过程的投入并不是为了秸秆利用,秸秆本身所包含的能值和利用秸秆所投入的能值没有必然联系,所以秸秆本身的能值也应该不计入秸秆发电的能值投入中。秸秆利用和垃圾回收利用的目的,都是在实现能量和物料最大程度回收的同时最大可能地减少对环境的排放。故本文采用文献^[22, 23]中的能值指标:能值成本、能值收益和能

值收益率。能值成本是指单位能量秸秆利用过程中所消耗的能值,能值收益是指从单位能量秸秆回收的能值,能值收益率是能值收益和能值成本之比。

2 秸秆发电系统

根据文献^[12]可得如图1 所示的秸秆发电系统能流示意图,把秸秆发电分成秸秆收储运、电厂建设和运行进行考察。秸秆灰的处理有多种方式,可以直接还田,可以作为工业原料,还可以填埋,本文不将其考虑在内。

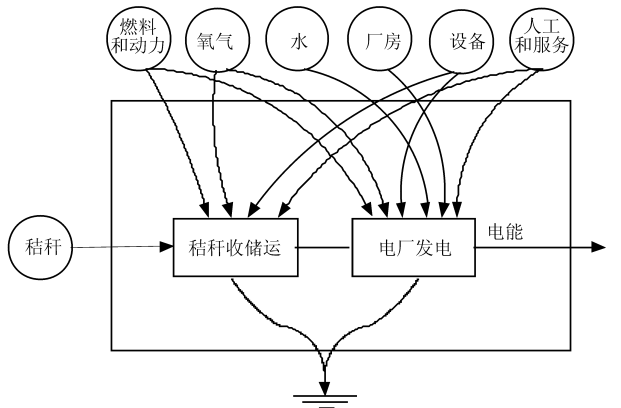


图1 秸秆发电系统能流示意图

Fig.1 Energy system diagram of straw-based power generation

2.1 秸秆收储运

秸秆资源由于空间分布分散、能量密度小等特性,收集、运输、装卸和储存成为制约其大规模能源化利用的重要因素。我国大部分地区以户为单位的耕作模式使得该问题更加突出。在运输前对秸秆进行致密化处理,可以克服其容积密度小、储运不方便的缺点;建立中间收储站点可以解决其空间分布分散、收集困难的问题,保证秸秆供应的稳定性,但是,秸秆收储运中每一步中间操作都意味着开支的增加。学者们在探寻适合我国情况的秸秆供应体系^[26-27]方面做了不少工作,目前主要的供应方式有两种,中心料场直接收集和收储站分散收集储存,如图2 所示^[28-29]。

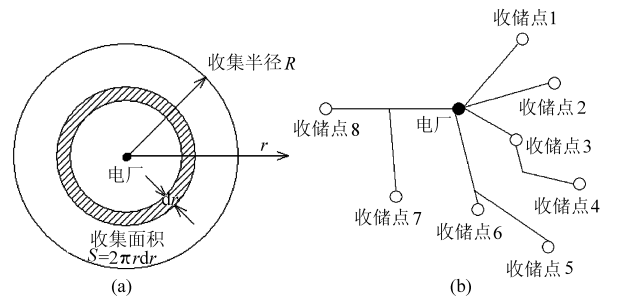


图2 秸秆供应示意图

Fig.2 Schematic diagram of feedstock supply for straw-based power plants

(a) 中心料场直接收集 (b) 收储站分散收集储存

前者中间环节少,但对地方交通状况和料场吞吐效率要求较高;后者能克服秸秆储运不方便的缺点,但相应的中间操作费用也较高。气化发电系统由于所需秸秆量较少,可以由中心料场直接收集散料,本文将其燃料供应简化成以电厂为中心的一定半径内的收集,收集范围内秸秆分布均匀;直燃发电规模较大,其燃料供应模式一般为收储站分散收集储存然后集中供应电厂,它们

的操作流程如图 3 所示。图中不同流程的秸秆质量之比设为 1:1,以气化发电燃料供应为例,卸车堆垛和卸车后直接破碎利用的秸秆质量之比为 1:1。

收储运设备的参考参数如表 1 所示,使用的燃料为柴油或电力。设备投入主要考虑钢材消耗,计算相关参数取值如表 2 所示。设秸秆储存方式为荒地露天储存,不需额外的料场建设。

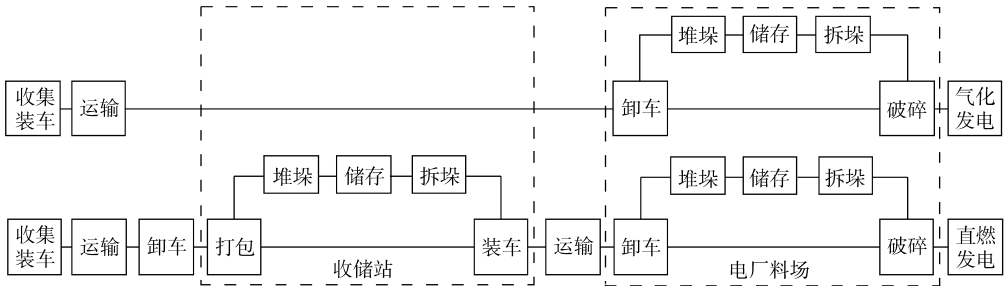


图 3 收储运流程图

Fig. 3 Flow chart of feedstock supply for straw-based power plants

表 1 秸秆收储运过程机器参数

Tab. 1 Equipment specifications used in straw supply

设备名称	价格 /万元	处理量	燃料消耗	寿命 /年
拖拉机	0.4	1 t/车	0.08 L/(km·t)	8
拖拉机挂车	9	16 包/车	0.06 L/(km·t)	12
打包机 ^①	25	9 包/h	54.25 kW	10
叉车	10	1 包/min	2.5 L/h	10
破碎机	2	3 t/h	4.75 kg/h	6
抓草机	3	4 t/h	2 L/h	10
秸秆抓斗起重机 ^②	15	20 t/h	18 kW	10
秸秆捆抓斗起重机 ^②	150	80 包/h	46.2 kW	10

注:①每包秸秆质量 450 kg。②实际功耗取为额定功率的 60%。

表 2 收储运相关参数取值

Tab. 2 Key parameters used in the model

参数	取值
秸秆资源密度/t·km ⁻²	307
拖拉机及挂车运输速度/km·h ⁻¹	20
人员工资/元·h ⁻¹	6
柴油密度/kg·L ⁻¹	0.85
秸秆田间装车费用/元·t ⁻¹	30
收储点到电厂运输距离/km	30
收储站日工作时间/h	10
柴油 LHV/MJ·kg ⁻¹	51.5

收储运过程中人工和服务的投入计算式为^[30]

$$C=0.000\ 2P+1.2C_{pe}$$

式中,0.000 2*P* 为机器修理和维护费用(元/h),其中*P* 为机器购买费用;1.2*C_{pe}* 为人员工资(元/h),假

设人员工作时间是机器工作时间的 1.2 倍。

2.2 电厂参数

我国近 20 年来自主研发的生物质气化发电技术已经解决了一些关键性技术,目前已开发出多种以木屑、稻壳、秸秆等生物质为原料的固定床和流化床气化炉,成功研制了从 200 kW 到 10 MW 不同规格的气化发电装置。秸秆直接燃烧技术的研究在我国起步较晚,目前国内的示范项目主要是引进国外的秸秆直燃发电核心技术,如河北省晋州市和山东省单县等项目引进的都是丹麦 BWE 公司的技术。国内自主研制的锅炉也基本达到了实际运行要求且日趋完善,部分机组已投产运行。本文选取 3 种不同规模的发电系统,各发电系统的基本参数^[2,4,31]如表 3 所示。

表 3 选取发电系统基本参数

Tab. 3 Performance of the power generation systems

参数	1 MW	5.5 MW	25 MW
	气化发电	气化发电	直燃发电
技术特征	流化床气化 + 燃气内燃机发电	流化床气化 + 内燃机 - 蒸汽轮机联合循环	高温高压锅炉 + 蒸汽轮机发电
发电效率/%	18	27	25.6
厂自用电率/%	10	10	8
年利用时间/h	6 000	6 000	6 500
年供电量/MW·h	5 400	29 700	149 500
年消耗秸秆量*/t	8 571	31 429	163 225
电厂寿命/a	15	15	15

* 秸秆低位热值为 14 MJ/kg

3 结果和讨论

本文太阳能值计算以年均太阳能总量 9.44×10^{24} sej 为准,各发电系统的能值分析如表 4 所示。能值成本,即利用每 MJ 秸秆所投入的总能值,从低到高分别为 1 MW 气化发电 1.01×10^{10} sej/MJ, 5.5 MW 气化发电 1.18×10^{10} sej/MJ, 25 MW 直燃发电 1.77×10^{10} sej/MJ。

从各阶段占总体投入的比例来看,3 个发电系统都是电厂运行阶段的投入最大,其次是秸秆收储运和电厂建设,如图 4 所示。收储运阶段在 25 MW 直燃发电系统中所占比例达 31.9%,其次为 1 MW

气化发电的 25.3%,秸秆的利用达到一定规模后,收储运的重要性会进一步提升。各发电系统中,各阶段的人工和服务投入之和占总投入的 56.7% ~ 63.6%,其中一部分是以货币形式计入的材料和能源。如图 5 所示的 25 MW 直燃发电能值投入,收储运的设备和能源投入以及电厂建设的材料投入在其中只占很小的比例,人工以及来自经济系统的服务在秸秆发电系统中发挥着重要作用。电厂运行阶段的氧气消耗则占总投入的 21.4% ~ 32.2%,能值分析方法从一个更宽广的角度来衡量自然环境对生态经济系统的贡献,不仅限于化石能源。

系统的能值收益取决于其发电效率,由 $2.00 \times$

表 4 秸秆发电系统能值分析
Tab.4 Energy analysis of straw-fueled power generation systems

阶段	项目	基本数据			量纲	能值 转换率 /sej·unit ⁻¹	能值 转换率 出处	太阳能值/sej·MJ ⁻¹		
		1 MW 气化	5.5 MW 气化	25 MW 直燃				1 MW 气化	5.5 MW 气化	25 MW 直燃
秸秆收储运	设备(以钢铁计)	8.60×10^{-3}	9.84×10^{-3}	2.65×10^{-2}	g/MJ	6.70×10^9	文献[34]	5.76×10^7	6.59×10^7	1.78×10^8
	柴油消耗	7.89×10^3	8.17×10^3	1.41×10^4	J/MJ	6.60×10^4	文献[35]	5.20×10^8	5.39×10^8	9.29×10^8
	电力消耗	0	2.31×10^2	3.77×10^3	J/MJ	2.00×10^5	文献[12]	0	4.63×10^7	7.55×10^8
	人工和服务 ^①	3.60×10^{-4}	3.82×10^{-4}	6.42×10^{-4}	\$/MJ	5.87×10^{12}	文献[36]	2.11×10^9	2.24×10^9	3.77×10^9
电厂建设 ^②	钢铁	4.90×10^{-2}	4.45×10^{-2}	2.07×10^{-2}	g/MJ	6.70×10^9	文献[34]	3.28×10^8	2.98×10^8	1.39×10^8
	水泥	3.65×10^{-3}	3.31×10^{-3}	4.79×10^{-3}	g/MJ	3.30×10^{10}	文献[7]	1.20×10^8	1.09×10^8	1.58×10^8
	耐火材料 ^③	9.42×10^{-3}	8.56×10^{-3}	3.54×10^{-3}	g/MJ	2.52×10^9	文献[25]	2.37×10^7	2.16×10^7	8.91×10^6
	保温材料	1.05×10^{-3}	9.55×10^{-4}	1.30×10^{-3}	g/MJ	1.50×10^9	文献[32]	1.58×10^6	1.43×10^6	1.95×10^5
	铜材	3.65×10^{-3}	1.87×10^{-3}	6.60×10^{-4}	g/MJ	2.00×10^9	文献[32]	7.29×10^6	3.74×10^6	1.32×10^6
	人工和服务	1.82×10^{-4}	2.36×10^{-4}	4.01×10^{-4}	\$/MJ	5.87×10^{12}	文献[36]	1.07×10^9	1.39×10^9	2.36×10^9
电厂运行	工业用水	4.15×10	3.55×10^2	7.11×10^2	g/MJ	6.64×10^5	文献[37]	2.76×10^7	2.35×10^8	4.72×10^8
	氧气 ^④	6.55×10	7.24×10	7.34×10	g/MJ	5.16×10^7	文献[32]	3.38×10^9	3.73×10^9	3.79×10^9
	人工和服务	4.10×10^{-4}	5.34×10^{-4}	8.75×10^{-4}	\$/MJ	5.87×10^{12}	文献[36]	2.41×10^9	3.13×10^9	5.14×10^9
总计								1.01×10^{10}	1.18×10^{10}	1.77×10^{10}

注:①1 \$ = 7.5 元,能值转换率为 2005 年值。②电厂主要材料的消耗来自文献[38 ~ 40],人工和服务投入包括安装、仪表和控制设备等工程费用。③耐火材料以耐火砖为主,本文以普通砖的能值转换率近似计算。④气化发电系统包括气化消耗和内燃机燃烧消耗,直燃发电系统只计锅炉燃烧消耗。收储运阶段耗氧量很少,可忽略不计。

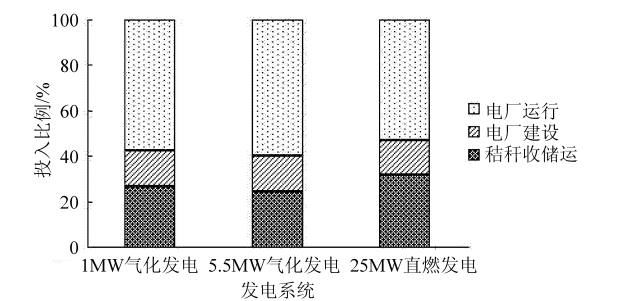


图 4 各发电系统能值投入

Fig.4 Percentage of various energy inputs of straw-based power generation systems

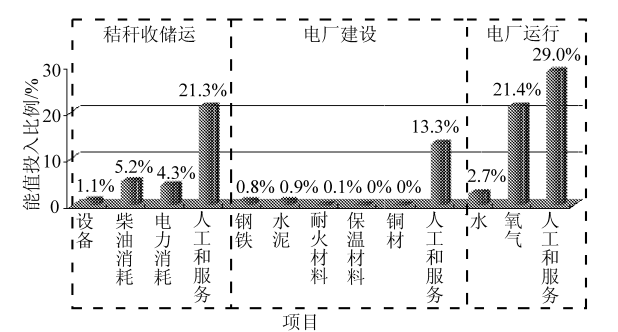


图 5 5.5 MW 气化发电系统能值投入

Fig.5 Energy investment of 5.5 MW gasification and power generation system

10^5 sej/J 的电力能值转换率^[12] 计算可得,1 MW 气化发电的能值收益为 3.24×10^{10} sej/MJ,5.5 MW 气化发电为 4.86×10^{10} sej/MJ,25 MW 直燃发电为 4.71×10^{10} sej/MJ。5.5 MW 气化发电从每 MJ 秸秆中得到的能值收益最高,对应的能值成本则高于 1 MW 气化发电,低于 25 MW 直燃发电。

综合能值成本和能值收益,得到各系统的能值收益率和能值净收益,其中能值净收益为能值收益和能值成本之差,如表 5 所示。5.5 MW 气化发电两项指标都是最高的,故其可持续性最好。25 MW 直燃发电与 1 MW 气化发电相比,利用单位能量的秸秆得到的能值净收益较高,而其效率即能值收益率却较低。

表 5 各发电系统能值净收益和能值收益率
Tab.5 Net energy and energy yield ratio of the three plants

发电系统	能值收益率	能值净收益/sej·MJ ⁻¹
1 MW 气化	3.22	2.23×10^{10}
5.5 MW 气化	4.11	3.68×10^{10}
25 MW 直燃	2.66	2.94×10^{10}

气化发电系统运行过程中,焦油可能会造成发电效率降低和运行维护费用增加^[31],由于缺乏商业运作数据,这些因素的影响未能精确衡量。另外,常规的能值分析方法并未将系统排放对经济和环境造成的影响考虑在内,已有学者尝试在这方面对其进行完善和改进^[32~33],这也是对秸秆发电系统进行客观评价时应予关注的。

4 结论

- (1)利用单位能量的秸秆,在秸秆收储运、电厂建设和电厂运行阶段的能值投入以及 3 个阶段的总能值投入,从低到高都是 1 MW 气化发电、5.5 MW 气化发电和 25 MW 直燃发电。其中总能值依次为 1.01×10^{10} sej/MJ、 1.18×10^{10} sej/MJ 和 1.77×10^{10} sej/MJ。
- (2)5.5 MW 气化发电的能值收益率和能值净收益都是最高的,即其可持续性最好。25 MW 直燃发电和 1 MW 气化发电相比,能值收益率较低而能值净收益却较高。常规的能值分析方法只考虑了系统的直接投入,要对秸秆发电系统进行更客观的评价,有必要在能值分析中将可能导致间接投入的排放影响也考虑在内。

参 考 文 献

1 吴创之,马隆龙,周肇秋,等. 生物质气化发电项目经济性分析[J]. 太阳能学报, 2009, 30(3):368~373.
Wu Chuangzhi, Ma Longlong, Zhou Zhaoqiu, et al. Economic analysis of biomass gasification and power generation projects [J]. Atca Energiæ Solaris Sinica, 2009, 30(3):368~373. (in Chinese)

2 王伟,赵黛青,杨浩林,等. 生物质气化发电系统的生命周期分析和评价方法探讨[J]. 太阳能学报, 2005,26 (6): 752~759.
Wang Wei, Zhao Daiqing, Yang Haolin, et al. Life cycle analysis on biomass gasification & power generation and inquiry to assessment method [J]. Atca Energiæ Solaris Sinica, 2005,26 (6):752~759. (in Chinese)

3 贾小黎,丁航. 秸秆直接燃烧供热发电项目上网电价初步测算[J]. 可再生能源, 2006,24(1):50~55.
Jia Xiaoli, Ding Hang. The preliminary estimation of the selling price of the grid of straw-fired (heat supply &) power generation projects in China [J]. Renewable Energy Resources, 2006,24(1):50~55. (in Chinese)

4 刘志强,孙学峰. 25 MW 生物质直燃发电项目及其效益分析评价[J]. 应用能源技术, 2009, 37(6):32~34.
Liu Zhiqiang, Sun Xuefeng. 25 MW biomass direct combustion power generation project and its benefit analysis evaluation [J]. Applied Energy Technology, 2009, 37 (6):32~34. (in Chinese)

5 Ayres R U. Eco-thermodynamics: economics and the second law [J]. Ecological Economics, 1998, 26 (2): 189~209.

6 Franzese P P, Rydberg T, Russo G F, et al. Sustainable biomass production: a comparison between gross energy requirement and emergy synthesis methods [J]. Ecological Indicators, 2009, 9 (5): 959~970.

7 蓝盛芳,钦佩,陆宏芳. 生态经济系统能值分析[M]. 北京:化学工业出版社,2002.

8 Yang H, Chen L, Yan Z, et al. Emergy analysis of cassava chips-suitable feedstock for fuel ethanol in China [J]. Ecological Engineering, 2010, 36(10): 1 348~1 354.

9 罗玉和,丁力行. 生物质直燃发电 CDM 项目可持续性的能值评价[J]. 农业工程学报, 2009, 25(12): 224~227.
Luo Yuhe, Ding Lixing. Sustainability evalutaion on CDM project of biomass direct combustion power generation based on emergy theory[J]. Transactions of the CSAE, 2009, 25(12): 224~227. (in Chinese)

10 罗玉和,丁力行. 基于能值理论的生物质发电系统评价[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(32): 112~117.
Luo Yuhe, Ding Lixing. Evaluation of biomass power generation systems based on emergy theory [J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(32): 112~117. (in Chinese)

- 11 胡艳霞,周连第,李红,等. 北京郊区生物质两种气站净产能评估与分析[J]. 农业工程学报, 2009, 25(8): 200~203.
Hu Yanxia, Zhou Liandi, Li Hong, et al. Evaluation and analysis of net emergy yield of two bio-energy stations in Beijing suburb [J]. Transactions of the CSAE, 2009, 25 (8): 200~203. (in Chinese)
- 12 Odum H T. Environmental accounting: emergy and environmental decision making [M]. New York: John Wiley & Sons Inc, 1996.
- 13 Odum H T. Self-organization, transformity, and information [J]. Science, 1988, 242(4882): 1 132~1 139.
- 14 蓝盛芳,钦佩. 生态系统的能值分析[J]. 应用生态学报, 2001, 12(1): 129~131.
Lan Shengfang, Qin Pei. Emery analysis of ecosystems [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2001, 12(1): 129~131. (in Chinese)
- 15 Zhelev T. The conceptual design approach—a process integration approach on the move [J]. Resources, Conservation and Recycling, 2007, 50(2): 143~157.
- 16 Brown M T, Ulgiati S. Emery-based indices and ratios to evaluate sustainability: monitoring economies and technology toward environmentally sound innovation [J]. Ecological Engineering, 1997, 9(1~2): 51~69.
- 17 陆宏芳,叶正,赵新锋,等. 城市可持续发展能力的能值评价新指标[J]. 生态学报. 2003, 23(7): 1 363~1 368.
Lu Hongfang, Ye Zheng, Zhao Xinfeng, et al. A new emery index for urban sustainable development [J]. Acat Ecological Sinica, 2003, 23(7): 1 363~1 368. (in Chinese)
- 18 Brown M T, Ulgiati S. Emery evaluations and environmental loading of electricity production systems [J]. Journal of Cleaner Production, 2002, 10(4): 321~334.
- 19 郝艳红,王灵梅,邱丽霞. 生活垃圾焚烧发电工程的能值分析[J]. 电站系统工程. 2006, 22(6): 25~26, 28.
Hao Yanhong, Wang Lingmei, Qiu Lixia. Energy analysis of engineering of power plant using municipal solid waste (MSW) [J]. Power System Engineering. 2006, 22 (6): 25~26, 28. (in Chinese)
- 20 Brown M T, Buranakarn V. Emery indices and ratios for sustainable material cycles and recycle options [J]. Resources Conservation and Recycling, 2003, 38 (1): 1~22.
- 21 Bastianoni S, Marchettini N. The problem of co-production in environmental accounting by energy analysis [J]. Ecological Modelling, 2000, 129(2~3): 187~193.
- 22 Brown M T, McClanahan T R. Emery analysis perspectives of Thailand and Mekong river dam proposals [J]. Ecological Modelling, 1996, 91(1~3): 105~130.
- 23 Marchettini N, Ridolfi R, Rustici M. An environmental analysis for comparing waste management options and strategies [J]. Waste Management, 2007, 27(4): 562~571.
- 24 Vassallo P, Paoli C, Fabiano M. Emery required for the complete treatment of municipal wastewater [J]. Ecological Engineering, 2009, 35(5): 687~694.
- 25 Björklund J, Geber U, Rydberg T. Emery analysis of municipal wastewater treatment and generation of electricity by digestion of sewage sludge [J]. Resources, Conservation and Recycling, 2001, 31(4): 293~316.
- 26 张艳丽,王飞,赵立欣,等. 我国秸秆收储运系统的运营模式、存在问题及发展对策[J]. 可再生能源. 2009, 27(1): 1~5.
Zhang Yanli, Wang Fei, Zhao Lixin, et al. The operation model, existing problems and development strategies for China's straw storage and transportation system [J]. Renewable Energy Resources, 2009, 27(1): 1~5. (in Chinese)
- 27 邢爱华,刘罡,王垚,等. 生物质资源收集过程成本、能耗及环境影响分析[J]. 过程工程学报, 2008, 8(2): 305~313.
Xing Aihua, Liu Gang, Wang Yao, et al. Economic, energy and environment analysis on biomass collection process [J]. The Chinese Journal of Process Engineering, 2008, 8(2): 305~313. (in Chinese)
- 28 刘岗,郝德海,董玉平. 生物质秸秆收集成本研究及实证分析[J]. 技术经济, 2006(2): 85~88.
- 29 王学锋,迟瑞娟,张义斌,等. 生物质发电燃料物流成本分析[J]. 安徽农学通报. 2007, 13(7): 198~200.
Wang Xuefeng, Chi Ruijuan, Zhang Yibin, et al. Analysis the logistic costs of the fuel in bio energy [J]. Anhui Agriculture Science Bulletin. 2007, 13(7): 198~200. (in Chinese)
- 30 Sokhansanj S, Kumar A, Turhollow A F. Development and implementation of integrated biomass supply analysis and logistics model (IBSAL) [J]. Biomass and Bioenergy, 2006, 30(10): 838~847.
- 31 Wu Chuangzhi, Yin Xiuli, Ma Longlong, et al. Design and operation of a 5.5 MWe biomass integrated gasification combined cycle demonstration plant [J]. Energy & Fuels, 2008, 22(6): 4 259~4 264.
- 32 Ulgiati S, Brown M T. Quantifying the environmental support for dilution and abatement of process emissions: the case of electricity production [J]. Journal of Cleaner Production, 2002, 10(4): 335~348.
- 33 Zhang Xiaohong, Deng Shihuai, Wu Jun, et al. A sustainability analysis of a municipal sewage treatment ecosystem based on emery [J]. Ecological Engineering, 2010, 36 (5): 685~696.

较低,尤其是不考虑温度和相对湿度情况,模型的 R^2 更小, E_{RMS} 、 χ^2 、 E_{MD} 更大。

(3)通过非线性拟合得到了白菜种子的质扩散系数公式。

参 考 文 献

1 Neslihan Colak, Arif Hepbasli. A review of heat pump drying: part I—systems, models and studies [J]. Energy Conversion and Management, 2009, 50(9): 2 180 ~2 186.

2 Kamil Sacilik. Effect of drying methods on thin-layer drying characteristics of hull-less seed pumpkin [J]. Journal of Food Engineering, 2007, 79(1): 23 ~30.

3 Demir V, Gunhan T, Yagcioglu A K. Mathematical modeling of convection drying of green table olives [J]. Biosystems Engineering, 2007, 98(1): 47 ~53.

4 Hi C L, Law C L, Cloke M. Modeling using a new thin drying model and product quality of cocoa [J]. Journal of Food Engineering, 2009, 90(2): 191 ~198.

5 John S Roberts, David R Kidd, Olga Padilla-Zakour. Drying kinetics of grape seeds [J]. Journal of Food Engineering, 2008, 89(4): 460 ~465.

6 王娟. 种子热泵变温干燥过程的实验及仿真研究[D]. 天津:天津大学,2007.

Wang Juan. Simulation and experimental study on the temperature-variable drying process with heat pump for seeds [D]. Tianjin: Tianjin University, 2007. (in Chinese)

7 İlhan Ceylan, Mustafa Aktas, Hikmet Dogan. Mathematical modeling of drying characteristics of tropical fruits [J]. Applied Thermal Engineering, 2007, 27(11 ~ 12): 1 931 ~1 936.

8 李雷. CO₂ 热泵干燥生物材料性能的研究[D]. 天津:天津大学,2008.

Li Lei. The study on CO₂ heat pump drying biomaterial performance [D]. Tianjin: Tianjin University, 2008. (in Chinese)

9 李思远. 种子干燥过程中传热传质以及生命物质变化规律研究[D]. 天津:天津大学,2007.

Li Siyuan. Study on the mechanism of heat and mass transfer and vitality variation during seed heat pump drying process[D]. Tianjin: Tianjin University, 2007. (in Chinese)

10 杨俊红. 植物性含湿多孔介质在干燥过程中优化传热传质机理的研究[D]. 天津:天津大学,1998.

Yang Junhong. Study on the mechanism of optimizing heat and mass transfer in drying process of biological wet porous materials[D]. Tianjin: Tianjin University, 1998. (in Chinese)

(上接第 98 页)

34 Ulgiati S, Odum H T, Bastianoni S. Emergy use, environmental loading and sustainability an emergy analysis of Italy [J]. Ecological Modelling, 1994, 73(3 ~ 4): 215 ~268.

35 Brandt-Williams S L. Handbook of emergy evaluation: a compendium of data for emergy computation issued in a series of folios. folio No. 4 – emergy of Florida agriculture. center for environmental policy, environmental engineering sciences, University of Florida, Gainesville, USA[EB/OL]. http://www.cep.ees.ufl.edu/pubs/Folio_4.

36 Yang Z F, Jiang M M, Chen B, et al. Solar emergy evaluation for Chinese economy [J]. Energy Policy, 2010, 38(2): 875 ~886.

37 Wang Lingmei, Ni Weidong, Li Zheng. Emergy evaluation of combined heat and power plant eco-industrial park (CHP plant EIP) [J]. Resources Conservation and Recycling, 2006, 48(1): 56 ~70.

38 王伟. 生物质气化发电系统的生命周期综合评价及方法学研究[D]. 广州:中国科学院广州能源研究所, 2005.

Wang Wei. Composite life cycle assessment of biomass gasification power generation & methodological studies of LCA [D]. Guangzhou: Guangzhou Institute of Energy Concersion, CAS, 2005. (in Chinese)

39 贾友见. 生物质能源系统可持续发展评价[D]. 合肥:中国科学技术大学, 2004.

Jia Youjian. A methodology and application for sustainability assessment of bioenergy systems [D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2004. (in Chinese)

40 林琳. 生物质直燃发电系统的生命周期环境评价和能效分析[D]. 广州:中国科学院广州能源研究所, 2007.