

村镇能源系统的低成本要素量化研究

王 婧¹,徐 旭²,张 旭³

(1.同济大学 建筑与城市规划学院,上海 200092; 2.同济大学建筑设计研究院,上海 201804;
3.同济大学 机械学院,上海 201804)

摘要:以村镇资源当地化和能源的清洁可再生化为前提,通过将村镇能源系统的成本分解为经济成本和环境成本 2 部分,建立了村镇能源系统低成本要素量化评价模型,其中环境成本以生命周期评价清单输出为数据基础.以 15 年为周期,将我国严寒地区、寒冷地区 3 个典型村镇的 12 个能源系统方案作为算例进行综合成本比较,从量化分析结果看,以化石燃料(煤炭、液化石油气)为主的能源系统经济成本较高、环境成本较高;以秸秆、柴薪为主的能源系统经济成本较低、环境成本较高;以秸秆气、沼气为主的能源系统经济成本和环境成本都较低,且人均综合成本小于 5 000 元,是未来农村能源系统规划的优选方案.

关键词: 生命周期; 评价; 清洁可再生能源; 村镇; 低成本; 能源系统
中图分类号: X 24 **文献标识码:** A

Quantitative Study on Low Cost Element of Rural Energy System

WANG Jing¹, XU Xu², ZHANG Xu³
(1. College of Architecture and Urban Planning, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Architectural Design And Research Institute of Tongji University, Shanghai 201804; 3. College of Mechanical Engineering, Tongji University, Shanghai 201804, China)

Abstract: Quantitative assessment model of low cost element is first established by dividing rural energy system cost into economic cost and environmental cost. And the latter is determined based on output data of life cycle inventory. With 15 years as a life cycle, 12 energy system schemes of 3 typical villages from freezing zone, cold zone in China are compared synthetically as case studies. From the quantitative result, the fossil energy (coal, LPG) system schemes have higher economic and environmental cost; straw and fuel wood energy system schemes have lower economic cost but higher environmental cost; straw gas and methane energy system schemes have lower economic and environmental cost, and the

integrated cost is below 5 000 yuan · capita⁻¹, which are the optimum schemes for the future rural energy system planning.
Key words: life cycle; assessment; clean and renewable energy; village and town; low cost; energy system

在世界能源供需日益紧张和我国大力发展村镇建设的背景下,如何解决农民能源使用问题已经成为不容忽视的课题,村镇能源系统低成本化的必要性日显突出.村镇能源可持续发展规划研究涵盖建筑、结构、能源、环境、社会、经济等多个领域,是以可持续村镇发展和建设为目标综合性、多学科交叉研究.生物质能是农村最易获得的一种能源,而且经济成本低廉,但由于其直接燃烧设备效率低下,不仅造成了生物质能的极大浪费,带来的大气污染严重程度也日益凸显.可再生能源和新能源项目虽然在环境资源方面有利于可持续发展,但是其高额投资与中国农民实际消费水平相矛盾.从能源评价角度出发,目前国内环境评价方法也限于从资源和环境保护出发,未考虑我国农民的消费现状和实际经济承受力,无法体现能源规划的可持续性.如何将环境代价考虑到村镇能源系统的成本分析中即“环境成本内部化”^[1]具有十分重要的现实意义,这将有利于推进可再生能源项目在中国农村地区的快速发展.因此,从理论和实证的角度出发,提出在村镇地区可持续发展的“低成本能源系统”评价方法,给出定性问题量化的解决途径,是当前发展村镇低成本能源建设的必要之举.本研究关注村镇能源系统的建设,通过生命周期评价(life cycle assessment, LCA)的方法研究不同能源系统对生态环境的影响,建立村镇能源系统的 LCA 评价体系

收稿日期: 2009-06-18
基金项目: “十一五”国家科技支撑计划资助项目(2006BAJ11B08, 2006BAC02A03);上海市博士后基金资助项目(09R21415700)
作者简介: 王 婧(1979—),女,工学博士,主要研究方向为低碳建筑与可持续能源规划. E-mail: wangjing20030@gmail.com

及案例示范,试图将村镇能源系统可能带来的外部不经济性内部化,以便更科学合理地确定村镇能源发展规划的目标,得到可以对工程设计起指导作用的结论.

1 “低成本”理论体系的提出

由于当前严峻的能源形势和目前村镇低能效高排放的能源消费现状,以煤炭和秸秆为主要能源的村镇能源模式已经不能适应目前可持续发展的要求,发展清洁可再生能源已经成为村镇能源规划的大趋势.因此在能源规划和能源方案的筛选过程中,既要达到较低的环境排放水平,又要保证在农民消费水平范围内,这是构成低成本能源系统的基本条件.此外,资源的当地化是能源系统低成本的必要条件.“资源当地化”是指因地制宜,利用地方优势资源,节约购置、交通运输消耗及费用,以降低建设成本,达到节能减排的目的.村镇能源系统的“低成本要素”不仅要涵盖经济成本低廉,还要求在环境排放方面代价小,因此在定量评价低成本要素构成时提出评价指标——“综合成本”,包括能源系统的经济成本(economic cost, EcC)和环境成本(environment cost, EnC)2 部分.

1.1 低成本能源系统最优化数学模型

若以能源系统成本最低为目标,则优化函数表达式为

$$F = F_1(x_1, x_2, \dots, x_n) + F_2(x'_1, x'_2, \dots, x'_n) \quad (1)$$

$$F_1 = \sum x_i m_i \quad (2)$$

$$F_2 = \sum x'_i m'_i; \quad (3)$$

约束条件为

(1) F 最小,即能源系统综合成本最低.

(2) 必须满足各项能源需求指标,其函数表达式为

$$E_{\text{supply}} \geq E_{\text{demand}} = \sum x_i \quad (4)$$

(3) 满足

$$x'_i = f(x_i) \quad (5)$$

式中: F_1 为经济成本 EcC 函数; F_2 为环境成本 EnC 函数; x_i 为能流变量, kWh · MJ; m_i 为经济性指标, (元 · 人⁻¹); x'_i 为环排变量, g; m'_i 为环境指标, (元 · t⁻¹); E_{supply} 为能源供应量; E_{demand} 为能源需求量; $f(x_i)$ 为以能流 x_i 为变量的环排函数.

1.2 评价方法的确定

评价方法分解为几个步骤:①围绕“低成本”的概念在对村镇能源系统现状全面调研的基础上,首先对村镇社会经济概况调研,对不同资源现状的村镇能源系统进行能量平衡分析,包括村镇当地化资源量估计及村镇能源需求量估计,通过软件模拟等手段进行能源转化技术筛选与系统末端设备先进性选择,建立村镇能源发展规划方案若干.②通过 LCA 的方法获得环境排放数据,建立 LCA 能源上游阶段清单分析模型,包括资源开采、能源生产、能源运输或输配、能源使用、能源处理回收阶段,并对村镇能源系统进行 LCA 评价与案例分析,获得清单分析输出参数,并进行环境影响评价.③通过对清洁可再生能源系统进行经济性分析,获得单位能源的经济成本,并以 LCI(life cycle inventory)分析数据输出为基础,基于不同的环境经济评价方法获得各能源方案的环境成本.④整合环境成本与经济成本为综合成本,最终解释低成本要素构成.评价方法流程如图 1 所示.经济性分析包括投资和效益分析,环境成本将立足于生命周期清单分析输出数据,将环境排放(g · 人⁻¹)转化为环境成本(元 · 人⁻¹),从而将环境成本内部化.技术经济分析在国内研究较为成熟,得到的主要指标为年人均能源消费成本(元 · 人⁻¹).

由于可再生能源的当地化特征,秸秆气和沼气目前在国内还没有明确的市场价格定位,下文根据不同村镇能源系统规划进行经济性成本分析,获得各地区每立方米燃气价格.通过利用当地资源和可再生能源转换技术经济性分析得到不同地区的可再生清洁能源沼气和秸秆燃气的单位立方米价格;根据不同地区能源消耗特征和能源优化系统可算出人均燃气需求量,从而得到不同能源方案的年人均能源消费量.

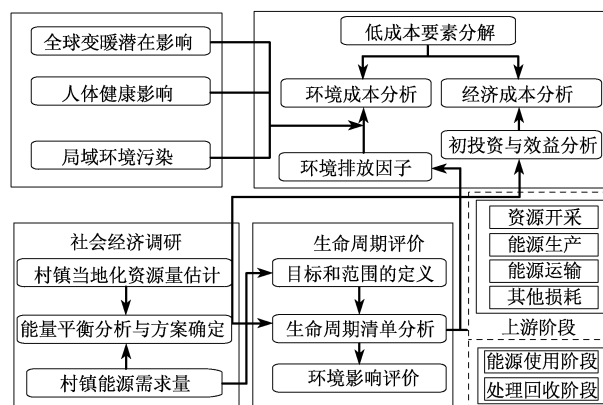


图 1 评价方法框架

Fig.1 Assessment method frame

2 案例分析

2.1 能源系统方案组合

根据 GB50178—93《我国建筑气候区划标准》，选取了严寒地区和寒冷地区的 A、D、E 3 个典型村镇为研究对象。这些地区资源条件、生态环境、生产力水平和人口密度等方面的情况具有普遍性，既不同于华东沿海经济发达、乡镇企业高度发展的村镇，也不同于西部经济欠发达、生产力和生活水平相对落后地区的村镇，而是接近全国平均水平。因此以该地区为对象来研究中国村镇的可持续发展模式，所形成的经验当会有较好的推广性和较广泛的现实意义。夏热冬冷地区的村镇人均能源消耗总量相对较小且无供热需求，因此选取 A、D、E 人均能源消耗总

量较大的村镇作为案例研究对象。

由于目前太阳能光电技术的成本过高，光热技术应用主要集中在太阳能热水器方面。由能量平衡分析可知，在以供热模式为主的 A、D、E 3 个北方村镇，太阳能的可得量较少，不足以供应冬季采暖需求；生活热水需求量的比例很小，分别占总能耗的 0.5%、2.0%、2.4%^[2]，不同于城市生活能源系统，在经济水平一般的村镇地区，增加这一部分投资显然不能适应目前实际情况，因此在设计能源系统方案组合时，暂时不考虑太阳能的使用。表 1 分别为 3 个村镇设计了 4 套能源系统组合，共 12 个能源方案，其中角标“0”代表初始方案，即当地既有代表性能源系统；角标“1”为以秸秆供热为主的常规能源规划方案；角标“1”，“3”代表基于清洁可再生目标的能源规划方案，分别为秸秆气化系统和沼气系统。

表 1 村镇能源系统方案
Tab.1 Compounding schemes of village energy systems

村镇	方案标号	冬季供热		炊事		生活用电来源
		能源种类	采暖系统	能源种类	炊事系统	
A	A ₀	煤	炕烟气辐射	煤	煤炉	市政电力
	A ₁	秸秆	燃气锅炉与炕盘管辐射	煤	煤炉	市政电力
	A ₂	秸秆气	燃气锅炉与炕盘管辐射	秸秆气	燃气灶	市政电力
	A ₃	沼气	燃气锅炉与炕盘管辐射	沼气	燃气灶	市政电力
D	D ₀	煤	热水锅炉与散热器	液化石油气	燃气灶	市政电力
	D ₁	秸秆	热水锅炉与散热器	秸秆	地锅	市政电力
	D ₂	秸秆气	燃气锅炉与盘管辐射	秸秆气	燃气灶	市政电力
	D ₃	沼气	燃气锅炉与盘管辐射	沼气	燃气灶	市政电力
E	E ₀	秸秆	炕烟气辐射	秸秆	地锅	市政电力
	E ₁	秸秆	炕烟气辐射	液化石油气	燃气灶	市政电力
	E ₂	秸秆气	燃气锅炉与炕盘管辐射	秸秆气	燃气灶	市政电力
	E ₃	沼气	燃气锅炉与炕盘管辐射	沼气	燃气灶	市政电力

2.2 环境成本分析(EnCA)

环境成本以生命周期评价清单输出为数据基础。能源 LCA 清单模型如图 2 所示^[3]，其中 E_C 为能耗， E_E 为环排， L_{CEC} 为生命周期能耗， L_{CEE} 为生命周期环排。能源系统生命周期按 15 年计算。清单分析模型包括清单输入、计算及清单输出。过程的能源利用效率、能源结构、燃烧技术、不同燃烧技术的污染物排放系数、燃料的物性等组成了清单输入参数。清单输出参数包括总能消耗、温室气体及主要污染物的排放，又称环境负荷因子。总能消耗包括化石燃料和可再生能源；温室气体由 O_2 、 CH_4 、 N_2O 组成；主要污染物排放由挥发性有机物 VOC、CO、 SO_x 、 NO_x 、 PM_{10} 组成。环境成本分析将清单环境排放分别按全

球变暖潜在影响(GWPs)、人体健康影响(human health-damaging)和局域环境污染(shadow-pricing)3 种影响进行分类。其中全球变暖潜在影响因子包括 CO_2 、 CH_4 、 N_2O ，采用 2008 年清洁发展机制(CDM) CO_2 全球市场价为参考价格；人体健康影响采用目前国内广泛监测的 PM_{10} 作为指示性污染物来评估大气污染的健康效应，参考 2004 年我国城市颗粒物 PM_{10} 引起的健康损害成本进行估算^[4]；局域环境污染因子包括 SO_x 、 NO_x 、CO、非甲烷烃(NMHC)，利用影子价格法来计算局域大气污染成本^[5]。

经过迭代计算与分类评价，1~12 个能源方案的环境成本的计算结果分别为 13 493.2，21 871.6，1 383.2，1 854.3，7 883.9，25 420.8，1 502.2，

1 946.1, 20 855.3, 15 715.6, 1 183.5, 1 476.6 元·人⁻¹. 可以看出秸秆气化系统(A₂, D₂, E₂)和沼气系统(A₃, D₃, E₃)相比传统能源供应模式的环境成本较低, 环境友好性非常明显; 但是前面分析的经济成本较低的直接燃烧秸秆方案(A₁, D₁, E₀)都属于高环境成本系统, 因此需要考虑综合成本以得出最终结论.

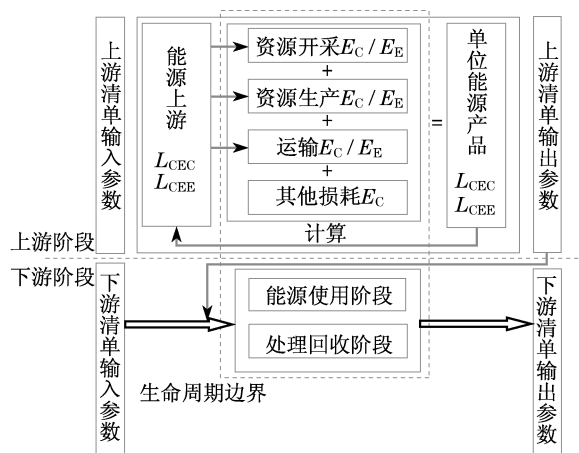


图2 能源产品生命周期清单模型

Fig.2 Life cycle inventory model of energy products

2.3 经济成本分析(EcCA)

通过当地资源和可再生能源转换技术经济性分析(包括初投资、运行费用等分析)得到不同地区可再生清洁能源沼气和秸秆燃气的单位立方米价格^[2], 根据不同地区能源消耗特征和能源优化系统可算出人均燃气需求量, 从而得到不同能源方案的年人均能源消费量. 通过式(1)计算每个能源系统方案的成本.

通过计算 1~12 个方案的经济成本分别为 5 566.5, 1 335.9, 3 170.5, 2 071.5, 11 857.7, 719.6, 3 313.4, 2 223.4, 401.1, 8 403.9, 2 547.6, 1 645.3 元·人⁻¹. 直接燃烧秸秆方案(A₁, D₁, E₀)的经济成本都较低, 这也是农民为什么更愿意选择秸秆、柴薪作为直接燃烧能源最重要的因素. 而只要方案中选择液化石油气(LPG)为供应能源一种, 就会使得整个系统经济性成本升高很多, 这是由于 LPG 的高市场价格所造成的. 由于世界市场合同价格的提高, 世界各大石油公司在 2007 年 12 月已把液化石油气产品的价格每千克提高了 1%, 尽管油价出现下跌, 世界各大石油公司还是提高了石油产品的泵送价格. 由于国际合同价格 2007 年底开始下降, 因此 LPG 产品的价格在 2008 年初开始下降, 这是符合发展趋势的.

2.4 综合成本指标计算结果

根据式(3)计算的结果见图 3. 经济成本较小的秸秆直接燃烧方案 A₁, D₁ 由于环境成本的贡献使得综合成本超过原始方案 A₀, D₀; 村镇 E 以直接燃烧秸秆为主要用能方式, 经济成本较低, 但清洁可再生能源方案 A₂, A₃, D₂, D₃, E₂, E₃ 虽然经济成本所占比例较高, 但由于环境代价较小, 因此其综合成本绝对值在所有能源方案里都较小(小于 5 000 元·人⁻¹). 若分别以 A, D, E 村实际能源消费比(能源消费与人均收入之比且不计环境成本, 以实际调研数据为准) 14.62%, 10.31%, 9.63% 为基准线^[2], 即使包含环境成本, 清洁可再生能源方案 A₂, A₃, D₂, D₃, E₂, E₃ 的综合成本也仍在农民经济可承受范围之内(图 4), 再次证明了清洁可再生能源方案的经济性和环境友好性^[6-9].

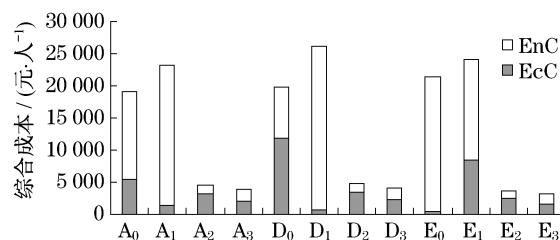


图3 各能源方案总成本

Fig.3 Total cost

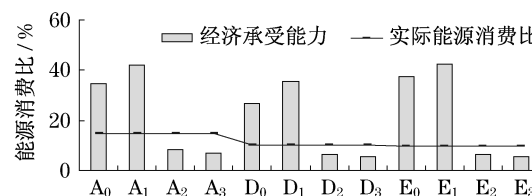


图4 能源系统人均经济承受力

Fig.4 Economic endurance per person of energy system

3 结论

(1) 提出村镇能源系统的低成本概念的新范畴及评价体系, 包括经济低成本和环境低成本 2 部分, 为村镇能源系统的低成本评价体系建立了理论框架雏形. 其中经济成本建立在经济性分析基础上, 获得当地化燃气成本; 环境成本基于生命周期清单环境排放数据, 分别按全球变暖潜在影响、人体健康影响和局域环境污染 3 种影响进行分类, 并对 3 个典型

村镇 12 个能源方案进行案例分析,将环境成本内部化.

(2) 目前缺少基于 LCA 的村镇能源评价体系,建立了村镇能源系统生命周期评价的清单分析模型,包括对能源上游阶段清单模型的改进(上游阶段包括开采、生产、运输、输送、分配等阶段)及对使用阶段清单模型的提出.新清单模型真正涵盖了由上而下的生命过程部分和能源产品的高阶循环部分 2 个层次.

(3) 从量化分析结果看,以化石燃料为主的能源系统经济成本较高(A_0, D_0, E_1 分别为 5 566.5, 11 857.7, 8 403.9 元·人⁻¹),环境成本较高(A_0, D_0, E_1 分别为 13 493.2, 21 871.6, 20 855.3 元·人⁻¹);以秸秆、柴薪为主的能源系统经济成本较低(A_1, D_1, E_0 分别为 1 335.9, 719.6, 401.1 元·人⁻¹),环境成本较高(A_1, D_1, E_0 分别为 21 871.6, 25 420.8, 20 855.3 元·人⁻¹);以秸秆气、沼气为主的能源系统经济成本和环境成本都较低(A_2 为 3 170.5 和 1 383.2 元·人⁻¹, A_3 为 2 071.5 和 1 854.3 元·人⁻¹, D_2 为 3 313.4 和 1 502.2 元·人⁻¹, D_3 为 2 223.4 和 1 946.1 元·人⁻¹, E_2 为 2 547.6 和 1 183.5 元·人⁻¹, E_3 为 1 645.3 和 1 476.6 元·人⁻¹),是未来农村能源系统规划的优选方案.秸秆气、沼气为低经济成本、低环境成本能源,因此可称之为清洁可再生能源.

(4) 延伸和拓展了传统村镇能源系统成本的衡量概念,将成本概念界定为经济成本与环境成本耦合的综合成本,进一步将能源使用的外部环境成本内部化,并实现村镇能源系统的 LCA 定量化评价.

以 LCA 作为评价基础,直接从源头控制环境污染,对我国今后能源结构优化和减排体系完善将产生积极的推动作用;综合考虑经济成本控制和节能减排目标,提出经济低成本的和环境低成本的“低成本能源系统理论”和综合评价体系势在必行.本研究建立的评价体系将引导村镇可持续能源规划建设向有特色的“当地化”和“低成本化”方向绿色环保、生

态健康地发展.

参考文献:

- [1] 胡妍红,傅京燕.论环境成本内部化[J].生态经济,2001(4):13.
HU Yanhong, FU Jingyan. Discussion on internalization of environment cost[J]. Ecological Economy, 2001(4):13.
- [2] 王婧.村镇低成本能源系统生命周期评价及指标体系研究[D].上海:同济大学机械学院,2008.
WANG Jing. Life cycle assessment on low-cost rural energy system and study on evaluation index System[D]. Shanghai: Tongji University. College of Mechanical Engineering, 2008.
- [3] 王婧,张旭.基于 LCA 的能源上游阶段清单分析模型改进[J].同济大学学报:自然科学版,2009,37(4):520.
WANG Jing, ZHANG Xu. Model improvement of inventory analysis on energy upstream phase based on LCA[J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2009, 37(4):520.
- [4] 张清宇.大气污染健康损害成本估算方法及应用的研究[D].杭州:浙江大学环境与资源学院,2007.
ZHANG Qingyu. Study on methods and application of health damage cost Estimate by atmosphere pollution[D]. Hangzhou: Zhejiang University. College of Environmental and Resource Sciences, 2007.
- [5] 王寿兵.中国复杂工业产品生命周期生态评价方法与实例研究[D].上海:复旦大学环境科学与工程学系,1999.
WANG Shoubing. Eco method and case study of life cycle assessment on Chinese complicated products[D]. Shanghai: Fudan University. Department of Environmental Science and Engineering, 1999.
- [6] 王金南.环境经济学——理论·方法·政策[M].北京:清华大学出版社,1994.
WANG Jinnan. Environmental economics: theory, method and policy[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1994.
- [7] 邱大雄.能源规划与系统分析[M].北京:清华大学出版社,1995.
QIU Daxiong. Energy planning and system analysis[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1995.
- [8] International Organization for Standardization. ISO 14041 Environmental management, life cycle assessment, goal and scope definition and inventory analysis[S]. Geneva: International Organization for Standardization, 1998.
- [9] Wang M Q. GREET1. 5-transportation fuel-cycle model volume 1: methodology, development, use, and results[R]. Argonne: Argonne National Laboratory, 1999.