

# 基于能值的不同煤基发电系统的可持续性评价

王灵梅<sup>1</sup>, 倪维斗<sup>2</sup>, 李政<sup>2</sup>, 刘宇<sup>2</sup>

(1.山西大学工程学院, 山西省太原市 030013; 2.清华大学热能工程系, 北京市海淀区 100084)

## Sustainability Evaluation of Coal Generation Electricity System Based on Emergy Account

WANG Ling-mei<sup>1</sup>, NI Wei-dou<sup>2</sup>, LI Zheng<sup>2</sup>, LIU Yu<sup>2</sup>

(1.College of Engineering, Shanxi University, Taiyuan 030013, Shanxi Province, China; 2. Department of Thermal Engineering, Tsinghua University, Haidian District, Beijing 100084, China)

**ABSTRACT:** Traditional evaluation indices of coal-based generation electricity systems are only efficiency or economy or environmental effect with process performance. Under a background of sustainable development, it is necessary to evaluate the sustainability that reflects the relation about coal-based generation electricity systems with economic system, environmental system and social system, so emergy account are employed. Coal-based generation electricity systems cause waste. Emergy sustainability index for coal-based generation electricity systems considered waste is put forward. As cases study, emergy of polygeneration system based on coal gasification with electricity and fuel (methanol etc.), IGCC (integrated gasification combined-cycle), PFBC-CC (pressured fluidized bed combustion combined-cycle), supercritical power plant are analyzed respectively. The result shows that new emergy indices are practical on evaluating the coal-based generation electricity system; the sustainability of polygeneration system is higher than IGCC, PFBC-CC, supercritical power plant.

**KEY WORDS:** thermal power engineering; coal-based generation electricity system; energy; polygeneration; sustainability

**摘要:**传统的煤基发电系统评价是对其效率、经济性、环境影响等单一指标进行。在可持续发展的背景下,需要对煤基发电系统与经济系统、环境系统和社会系统的作用关系进行分析,建立与三者紧密联系的统一评价的客观尺度进行可持续性评价。文中针对煤基发电系统存在废物的特点,运用能值分析理论建立了能反映煤基发电系统特性的可持续性评价指标。对不同的煤基发电系统:多联产能源系统(以甲醇-

电力多联产能源系统为例)、整体煤气化联合循环(IGCC)、增压循环流化床联合循环(PFBC-CC)、超临界火电厂进行了可持续性分析。结果表明:该能值可持续性评价指标能比较全面地度量煤基发电系统及其可持续性,多联产能源系统的可持续性较煤粉发电厂、PFBC-CC, IGCC电厂显著提高;IGCC电厂、PFBC-CC电厂的可持续性较煤粉发电厂也有不同程度的提高。

**关键词:** 热能动力工程; 煤基发电系统; 能值; 多联产; 可持续性

## 0 引言

伴随着环境问题和煤资源的减少,中国煤基发电系统正在向可持续发电技术发展,即从燃烧煤粉的火电厂向增压循环流化床联合循环(PFBC-CC)、整体煤气化联合循环(IGCC)和多联产能源系统(polygeneration energy system)<sup>[1-5]</sup>发展。

传统的煤基发电系统评价是对其效率、经济性、环境影响等单一指标进行。在可持续发展的背景下,需要对煤基发电系统与经济系统、环境系统和社会系统的作用关系分析、建立三者紧密联系和统一评价的客观尺度进行可持续性评价。能值分析方法可以实现这个目的。

能值分析理论是美国著名生态学家 H.T.Odum 在能量生态学、系统生态学、生态工程学及经济生态学的发展基础上提出的。能值分析理论以能值为量纲,突破了传统能量分析方法中存在的能质壁垒,实现了不同质能量的区别对待和统一评价。能值分析方法将系统分析边界拓展,考虑了系统的资源投入和环境支持,对环境-经济整体系统的消耗(含能量、物质、劳务、资金)和全部利润(人与自然资源贡献)转化为同一标准——太阳能值(solar emergy),

**基金项目:** 国家自然科学基金重大研究计划项目(90210032); 国家重点基础研究发展计划项目(2005CB221207); 中国博士后基金项目(2005037346)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China (90210032); Project Subsidized by the Special Funds for Major State Basic Research Projects of China (2005CB221207).

并建立了基本能值评价指标<sup>[6-8]</sup>。

考虑到基本能值评价指标是基于自然生态系统和生态经济系统提出的，而在自然生态系统和生态经济系统没有废物。因此，文中针对煤基发电系统存在废物的特点，运用能值分析理论建立了能反映系统特性的可持续性评价指标。对不同的煤基发电系统：多联产能源系统(以甲醇-电力多联产能源系统为例)、IGCC、PFBC-CC、超临界火电厂进行了可持续性分析，旨在从可持续性的角度指出中国煤基发电系统的发展方向。

## 1 煤基发电系统的能值可持续性指标

Caruso C, Catenacci G, Marchettini N<sup>[9-10]</sup>用基本能值指标对发电厂的能值进行评估，其结果与考虑废物影响是有差别的。Ulgiati和Brown<sup>[11-13]</sup>认识到基本能值指标重成本结构分析而轻排污影响分析的缺陷，提出了改进的能值指标。该指标考虑用稀释污染物所需的生态系统服务能值来反映废物对环境的影响，但他们并没有考虑处理后的废物又是可利用的资源的特点，而且也没有考虑人为处理废物的投资。

运用能值分析理论<sup>[6]</sup>，针对煤基发电系统的特点，绘制出煤基发电系统的能值流图，如图 1 所示。 $F_p$ 表示系统投资， $F_w$ 表示系统的废物处理投资(文中指系统处理渣、废水的投资)，这样可以明显地反映废物对过程的影响。对煤基发电系统，废物或副产品处理有 3 种方式：①被处理后进入系统再循环利用，如废水，用  $W_R$ 表示循环后的再生资源的能值；②被处理后成为另一厂的输入，如灰渣，用  $W_N$ 表示循环后的不可再生资源的能值；③被投资处理达到环境保护标准要求后进入环境系统，如废气的处理，文中用  $W_{tw}$ 表示经处理的废气排放到环境的部分。用  $W_{uw}$ 表示未经处理的废物排放到环境的部分。废水循环利用节省了水资源，灰渣处理后成为另一厂的输入，也节约了资源。

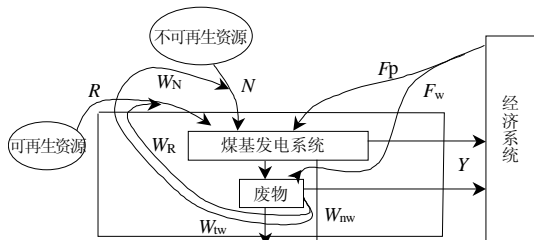


图 1 煤基发电系统能值流图

Fig. 1 The energy flow of coal-based generation electricity system

定义基于能值的煤基发电系统的可持续性指标和能值转换率如下：

(1) 煤基发电系统的能值产出率。

$$e_{PEYR} = \frac{Y}{F + F_w} = \frac{N + R + F + F_w}{F + F_w} \quad (1)$$

式中： $Y$ 为系统产品，对单独发电系统产品为电，对于热电联产系统为系统产品，产品为电和热，对于多联产能源系统，其主要产品包括电、化工产品，单位为sej/年(sej为太阳能焦耳，solar emjoules)； $N$ 为投入系统的不可再生资源，不可再生资源包括煤、土地资源投入等，sej/年； $R$ 为投入系统的可再生资源，包括水、空气等，sej/年； $I$ 为投入系统的不可再生资源 $N$ 和可再生资源 $R$ 之和： $I = N + R$ ，sej/年； $F$ 为煤基发电系统的所需要的投资，包括设备、劳务、管理、运输成本等，sej/年； $F_w$ 为处理废物需要的投资，单位sej/年。

式(1)是衡量煤基发电系统对经济活动净贡献大小的指标，并能评价煤基发电系统对基本资源的利用情况。即在评价发电系统的经济性时不仅要考虑系统的投资——内部成本 $F$ ，而且要考虑外部成本——环境修复和治理成本 $F_w$ 以及废物(废水、渣)被处理节省的资源或产生的新产品，是电产品绿色经济性的反映。

$e_{PEYR}$ 值越高，表明系统获得一定的经济能值投入后，生产出来的产出能值越高，即系统的生产效率越高。高 $e_{PEYR}$ 值的系统经济活动竞争力强，是实现系统可持续发展的基础条件。

(2) 煤基发电系统的能值投资率。

$$e_{PEIR} = \frac{F + F_w}{N + R} \quad (2)$$

能值投资率是反映煤基发电系统对基本原料的利用和对外部投资的利用相比较的情况，所以， $e_{PEIR}$ 的值越大，过程对原料的利用越少，受本地资源储备情况的影响就越小。

(3) 煤基发电系统的能值环境负荷率。

环境系统与煤基发电系统的作用表现为提供资源、稀释排放物以及排放物对环境的影响。传统的能值环境负荷率为

$$e_{PELR} = (F + N) / R \quad (3)$$

传统的能值分析方法采用环境负荷率 $e_{PELR}$ 值表示过程对环境造成压力的大小，即过程使用的不可再生资源越多，过程对环境的压力越大。它反映的是煤基发电系统的成本结构。实际上，目前的技

术已完全可以将过程可能排放的废物资源化,如煤利用过程中的煤气化技术、先进的末端治理技术等,能够将煤利用过程中的灰、硫及CO<sub>2</sub>转化为可直接利用的资源。因此,直接利用式(3)计算是不合适的。

煤基发电系统都对废物进行处理,有些废物处理后变成可利用的资源,节约了相应的不可再生资源 and 可再生资源,节省的资源应该反映在能值指标中。因此,定义煤基发电系统的能值环境负荷率为

$$e_{PELR} = \left( \frac{F + F_w + N - W_N}{R + W_R} \right) \quad (4)$$

式(4)既反映了煤基发电系统的成本结构,又反映了节省的资源和生态系统的服务,其表明:减少投入煤基发电系统的不可再生能源和环境排放、增加投入可再生能源、提高废物资源化程度都会减少环境负荷。

(4) 煤基发电系统的能值可持续性指标。

煤基发电系统要成为可持续系统,就要充分利用可再生资源 and 不可再生资源,使社会获得净效益,同时环境负荷还要小。因此评价煤基发电系统的可持续性要综合考虑  $e_{PEYR}$  和  $e_{PELR}$  这2个指标的共同作用。于是令

$$e_{PIES} = e_{PEYR} / e_{PELR} = \frac{Y}{F + F_w} / \frac{F + F_w + N - W_N}{R + W_R} \quad (5)$$

$e_{PIES}$ 高,意味着单位环境压力下的社会经济效益越高,煤基发电系统的可持续性越好。

(5) 能值转换率。

$$T_r = Y/E$$

$T_r$ 高,说明在相同数量的该产品的生产过程中投入了多的太阳能值,即它所包含的积累的太阳能值多。

对多联产能源系统

$$T_r = Y/(E_A + E_B)$$

A和B分别表示多联产能源系统的产品电和化工产品(如甲醇)。

## 2 案例研究

以我国已采用或即将采用的几种典型的煤基发电系统为案例进行分析:①燃用煤粉的超临界火电厂,石灰石脱硫、低 NO<sub>x</sub> 燃烧技术;②PFBC-CC 电厂,采用石灰石炉内脱硫技术;③IGCC 电厂;

④甲醇-电力多联产能源系统。

对超临界电厂、PFBC-CC 电厂、IGCC 电厂,

总装机容量均为 2×200 MW,其产品为电。灰渣直接销售用于生产建材,设灰渣利用率为 80%;废水循环利用,循环利用率为 90%。

麻林巍<sup>[14]</sup>等对甲醇-电力多联产能源系统(methanol-electricity polygeneration system)进行了研究分析。该文是在文献[15]分析的基础上对年产 20 万吨甲醇和 300 MW 电力,富 CO 气体一次通过液相甲醇合成工艺的串联多联产能源系统(简称 CGOT 多联产能源系统)进行可持续性分析。对于多联产能源系统,硫作为产品直接销售,系统对 CO<sub>2</sub> 压缩回收,灰渣直接销售用于生产建材,假设利用率 80%。废水循环利用,循环利用率 90%。

采用式(1)~(4)分别对上述各案例进行能值分析,结果示于表 1~表 4。

图2示出超临界煤粉发电厂、PFBC-CC发电厂、IGCC发电厂和甲醇-电力多联产系统的可持续性分析结果。

图3为煤基发电系统的能值转换率的分析结果。

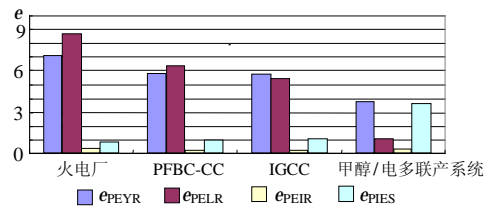


图2 不同煤基发电系统的可持续性分析结果  
Fig. 2 Sustainability of different coal generation electricity system

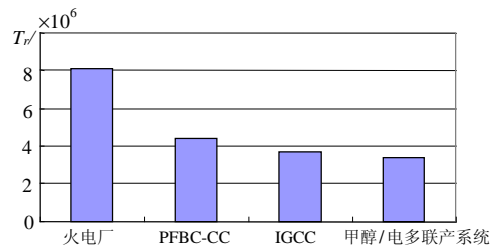


图3 不同煤基发电系统的能值转换率  
Fig. 3 Emergy transformativity of different coal generation electricity system

表1 燃用煤粉的超临界火电厂的能值评估表

Tab. 1 Emergy evaluation table for pulverized coal fired power plant

| 输入/出 | 项目                  | 基本数据/年                  | $T_r$                        | 太阳能值/sej              |
|------|---------------------|-------------------------|------------------------------|-----------------------|
| 输入   | 煤 $N$               | $3.49 \times 10^{16}$ J | $4.00 \times 10^4$ sej/J     | $1.39 \times 10^{21}$ |
|      | 水(工业) $R$           | $6.25 \times 10^{12}$ g | $6.64 \times 10^5$ sej/g     | $4.15 \times 10^{18}$ |
|      | 石灰石 $N$             | $1.78 \times 10^{10}$ g | $1.00 \times 10^9$ sej/g     | $1.78 \times 10^{19}$ |
|      | 空气 $R$              | $5.10 \times 10^{11}$ g | $5.16 \times 10^7$ sej/g     | $2.63 \times 10^{20}$ |
|      | 投资和运行维护成本 $F + F_w$ | $1.88 \times 10^8$ \$   | $3.46 \times 10^{12}$ sej/\$ | $6.48 \times 10^{20}$ |
| 输出   | 运行和维护成本 $F$         | $1.95 \times 10^7$ \$   | $3.46 \times 10^{12}$ sej/\$ | $6.90 \times 10^{19}$ |
|      | 产品 $Y$ 电            | $2.85 \times 10^{15}$ J | $8.11 \times 10^5$ sej/J     | $2.32 \times 10^{21}$ |
|      | $W_N$ 灰             | $3.30 \times 10^{11}$ g | $8.30 \times 10^8$ sej/g     | $2.39 \times 10^{20}$ |
|      | $W_N$ 石膏            | $1.10 \times 10^{10}$ g | $1.00 \times 10^9$ sej/g     | $1.10 \times 10^{19}$ |
|      | $W_R$ 处理后的水         | $1.60 \times 10^{12}$ g | $6.64 \times 10^5$ sej/g     | $1.62 \times 10^{18}$ |

表 2 PFBC-CC 电厂的能值评估表

Tab. 2 Energy evaluation table for coal fired PFBC-CC plant

| 输入/出       | 项目          | 基本数据/年                  | $T_r$                        | 太阳能值/sej              |
|------------|-------------|-------------------------|------------------------------|-----------------------|
| 输<br>入     | 煤 $N$       | $3.37 \times 10^{16}$ J | $4.00 \times 10^4$ sej/J     | $1.38 \times 10^{21}$ |
|            | 水(工业) $R$   | $5.64 \times 10^{12}$ g | $6.64 \times 10^5$ sej/g     | $3.74 \times 10^{18}$ |
|            | 石灰石 $N$     | $9.00 \times 10^9$ g    | $1.00 \times 10^9$ sej/g     | $9.00 \times 10^{18}$ |
|            | 空气 $R$      | $4.30 \times 10^{12}$ g | $5.16 \times 10^7$ sej/g     | $2.21 \times 10^{20}$ |
| 投资和运行维护    |             | $7.13 \times 10^7$ \$   | $3.46 \times 10^{12}$ sej/\$ | $2.46 \times 10^{20}$ |
| 成本 $F+F_w$ |             |                         |                              |                       |
| 输出         | 产品 $Y$ 电    | $3.26 \times 10^{15}$ J | $4.38 \times 10^5$ sej/J     | $1.43 \times 10^{20}$ |
|            | $W_N$ 灰     | $2.44 \times 10^{11}$ g | $8.30 \times 10^8$ sej/g     | $2.02 \times 10^{20}$ |
|            | $W_R$ 处理后的水 | $1.53 \times 10^{12}$ g | $6.64 \times 10^5$ sej/g     | $1.01 \times 10^{18}$ |

表 3 IGCC 电厂的能值评估表

Tab. 3 Energy evaluation table for IGCC plant

| 输入/出       | 项目          | 基本数据/年                  | $T_r$                        | 太阳能值/sej              |
|------------|-------------|-------------------------|------------------------------|-----------------------|
| 输<br>入     | 煤 $N$       | $2.67 \times 10^{16}$ J | $4.00 \times 10^4$ sej/J     | $1.07 \times 10^{21}$ |
|            | 水(工业) $R$   | $4.03 \times 10^{12}$ g | $6.64 \times 10^5$ sej/g     | $2.67 \times 10^{18}$ |
|            | 空气 $R$      | $1.52 \times 10^{12}$ g | $5.16 \times 10^7$ sej/g     | $7.84 \times 10^{19}$ |
|            | 投资和运行维护     | $6.87 \times 10^7$ \$   | $3.46 \times 10^{12}$ sej/\$ | $2.41 \times 10^{20}$ |
| 成本 $F+F_w$ |             |                         |                              |                       |
| 输出         | 产品 $Y$ 电    | $3.74 \times 10^{15}$ J | $3.71 \times 10^5$ sej/J     | $1.39 \times 10^{21}$ |
|            | $W_N$ 灰     | $2.80 \times 10^{11}$ g | $8.30 \times 10^8$ sej/g     | $2.82 \times 10^{20}$ |
|            | $W_N$ 硫     | 1.279 kg/s              | $8.6 \times 10^8$ sej/g      | $2.18 \times 10^{19}$ |
|            | $W_R$ 处理后的水 | $1.08 \times 10^{12}$ g | $6.64 \times 10^5$ sej/g     | $7.22 \times 10^{17}$ |

表 4 多联产能源系统的能值分析表

Tab. 4 Energy of energy polygeneration system

| 输入/出   | 项目                    | 基本数据                      | $T_r$                        | 太阳能值/sej              |
|--------|-----------------------|---------------------------|------------------------------|-----------------------|
| 输<br>入 | 煤 $N$                 | 967 MWth                  | $4.0 \times 10^4$ sej/J      | $9.04 \times 10^{20}$ |
|        | 水 $R$                 | $6.61 \times 10^{12}$ g/年 | $6.60 \times 10^5$ sej/g     | $4.37 \times 10^{18}$ |
|        | 空气 $R$                | $1.37 \times 10^{12}$ g/年 | $5.16 \times 10^7$ sej/g     | $7.07 \times 10^{19}$ |
|        | 投资 $F+F_w$            | $101.8 \times 10^6$ \$    | $3.46 \times 10^{12}$ sej/\$ | $3.52 \times 10^{20}$ |
| 输出     | 产品 $Y$ 电              | $3.93 \times 10^{15}$ J/年 | $3.33 \times 10^5$ sej/J     | $1.33 \times 10^{21}$ |
|        | 产品 $Y$ 甲醇             | $3.67 \times 10^{12}$ J/年 | $3.33 \times 10^5$ sej/J     | $1.33 \times 10^{21}$ |
|        | $W_N$ 渣               | $6.50 \times 10^{10}$ g/年 | $1.00 \times 10^9$ sej/g     | $6.50 \times 10^{19}$ |
|        | $W_N$ 硫               | 1.279 kg/s                | $8.6 \times 10^8$ sej/g      | $2.18 \times 10^{19}$ |
|        | $W_N$ CO <sub>2</sub> | 16.9 kg/s                 | $3.46 \times 10^{12}$ sej/\$ | $2.31 \times 10^{21}$ |
|        | $W_R$ 处理后的水           | $1.78 \times 10^{12}$ g/年 | $6.60 \times 10^5$ sej/g     | $1.17 \times 10^{21}$ |

注：企业生命周期取为 30 年。表 1~表 3 的基本数据依据文献[15]。

从图2可以看出：多联产能源系统的可持续性较煤粉发电厂、PFBC-CC电厂、IGCC电厂高，进一步验证了多联产系统煤耗低、投资少、产生的可直接利用的副产品多的特点。IGCC电厂、PFBC-CC电厂的可持续性较煤粉发电厂也有不同程度的提高。

从能值投资率的角度看，多联产能源系统、PFBC-CC电厂、IGCC电厂都较低，煤粉发电厂较高，进而说明这些电厂对资源的依赖程度不同。

从图3可以看出：多联产能源系统、煤粉发电厂、PFBC-CC电厂、IGCC电厂的能值转换率是不同的。多联产能源系统较煤粉发电厂、PFBC-CC、IGCC的能值转换率低，说明在相同数量的该产品的生产过程中投入了较少的太阳能值。

### 3 结论

(1)运用能值分析理论对煤基发电系统进行了能值分析，提出了能表明其特征的能值可持续性评价指标。以不同煤基能源系统为案例进行分析，获得了符合实际的分析结果，因此说明所提出的能值可持续性评价指标能比较全面地度量煤基能源系统及其可持续性。

(2)多联产能源系统的可持续性较煤粉发电厂、PFBC-CC、IGCC显著提高，PFBC-CC电厂、IGCC电厂的可持续性较煤粉发电厂也有不同程度的提高。

### 参考文献

- 倪维斗, 李政. 以煤气化为核心的多联产能源系统——资源/能源/环境整体优化与可持续发展[J]. 煤化工, 2003, 104(1): 3-10.  
Ni Weidou, Li Zheng. Multi-generation energy system from coal gasification process[J]. Coal Chemical Industry, 2003, 104(1): 3-10(in Chinese).
- 王智化, 王勤辉, 骆仲泐, 等. 新型煤气化燃烧集成制氢系统的热力学研究[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(12): 91-97.  
Wang Zhihua, Wang Qinghui, Luo Zhongyang, et al. Thermodynamic analysis of hydrogen production by new coal utilization technology with combined gasification and combustion[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(12): 91-97(in Chinese).
- 周宏仓, 金保升, 仲兆平, 等. 三种煤的部分气化生成多环芳烃的试验研究[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(2): 156-160.  
Zhou Hongcang, Jin Baosheng, Zhong Zhaoping, et al. Experimental study on polynuclear aromatic hydrocarbons emission from partial gasification of three types of coals[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(2): 156-160(in Chinese).
- 孙东红, 王攀, 崔玉萍, 等. 燃煤工业锅炉无烟燃烧机理及试验研究[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(6): 200-203.  
Sun Donghong, Wang Qing, Cui Yuping, et al. Mechanism and experimental study on a coal smokeless combustion industrial boiler[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(26): 200-203(in Chinese).
- 李鑫, 李安定, 李斌, 等. 碟式/斯特林太阳能热发电系统经济性分析[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(12): 108-111.  
Li Xin, Li Anding, Li Bin, et al. Economic analysis of dishstirling solar power system[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(12): 108-111(in Chinese).

- [6] 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.
- [7] Brown M T, Ulgiati S. Emery-based indices and ratios to evaluate sustainability: monitoring economies and technology toward environmentally sound innovation[J]. *Eco. Eng.*, 1997, 9(1-2): 51-69.
- [8] Li Suancheng. Emery analysis for evaluation sustainability of Chinese economics[J]. *J Natural Resour.*, 2001, 16(4): 297-304.
- [9] Caruso C, Catenacci G, Marchettini N, et al. Emery based analysis of Italian electricity production system[J]. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 2001, 66(3): 265-272.
- [10] Odum H T. 2000. Emery evaluation of an OTEC electrical power system[J]. *Energy*, 25(4): 389-393.
- [11] 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.
- [12] Brown M T, Ulgiati S. Emery evaluations and environmental loading of electricity production systems[J]. *Journal of Cleaner Production* 2002; 10(4): 321-334.
- [13] 李金昌. 生态价值论[M]. 重庆: 重庆大学出版社, 17-218.
- [14] 麻林巍, 倪维斗, 李政, 等. 以煤气化为核心的甲醇、电的多联产系统分析[J]. *动力工程*, 2004, 24(3): 451-456.
- Ma Linwei, Ni Weidou, Li Zheng, et al. Analysis of the polygeneration system of methanol and electricity based on coal gasification[J]. *Power Engineering*, 2004, 24(3): 451-456(in Chinese).
- [15] 徐越, 邓世敏, 危师让. 一种电站技术筛选模型——TLCC 模型[J]. *热力发电*, 2000, 29(1): 12-14.
- Xu Yue, Deng Shimin, Wei Shirang. Total life cycle cost model for electric power station[J]. *Thermal Power Generation*, 2000, 29(1): 12-14(in Chinese).
- 
- 收稿日期: 2006-02-01。
- 作者简介:
- 王灵梅(1964—), 女, 山西大学工程学院副教授, 现为清华大学热能工程系博士后, 主要研究方向为可持续能源系统, 工业生态学原理与应用, [wanglingmei@mail.tsinghua.edu.cn](mailto:wanglingmei@mail.tsinghua.edu.cn);
- 倪维斗(1932—), 男, 浙江宁波人, 教授, 中国工程院院士, 目前在清华大学热科学与动力工程教育部重点实验室工作, 主要研究方向为可持续发展能源战略和可持续能源系统;
- 李 政(1965—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事热力系统建模与仿真研究, 目前正在清华大学热科学与动力工程教育部重点实验室开展基于煤气化的电力-液体燃料多联产系统方面的研究;
- 刘 宇(1982—), 男, 清华大学热能工程系博士生, 目前正在清华大学热科学与动力工程教育部重点实验室进行可持续能源系统研究。

(编辑 贾瑞君)