

ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

生态学报

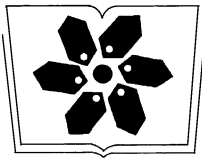
Acta Ecologica Sinica



第 31 卷 第 24 期 Vol.31 No.24 **2011**

中国生态学学会
中国科学院生态环境研究中心
科学出版社

主办
出版



中国科学院科学出版基金资助出版

生态学报

(SHENGTAI XUEBAO)

第 31 卷 第 24 期

2011 年 12 月 (半月刊)

目 次

柑橘黄龙病株不同部位内生细菌群落结构的多样性·····	刘 波,郑雪芳,孙大光,等 (7325)
小兴安岭红松径向生长对未来气候变化的响应·····	尹 红,王 靖,刘洪滨,等 (7343)
污水地下渗透系统脱氮效果及动力学过程·····	李海波,李英华,孙铁珩,等 (7351)
基于生态系统服务的海南岛自然保护区体系规划·····	肖 燧,陈圣宾,张 路,等 (7357)
羌塘地区草食性野生动物的生态服务价值评估——以藏羚羊为例·····	鲁春霞,刘 铭,冯 跃,等 (7370)
湖北省潜江市生态系统服务功能价值空间特征·····	许倍慎,周 勇,徐 理,等 (7379)
滇西北纳帕海湿地景观格局变化及其对土壤碳库的影响·····	李宁云,袁 华,田 昆,等 (7388)
基于连接性考虑的湿地生态系统保护多预案分析——以黄淮海地区为例·····	宋晓龙,李晓文,张明祥,等 (7397)
青藏高原高寒草甸生态系统碳增汇潜力·····	韩道瑞,曹广民,郭小伟,等 (7408)
影响黄土高原地物光谱反射率的非均匀因子及反照率参数化研究·····	张 杰,张 强 (7418)
基于 GIS 的下辽河平原地下水生态敏感性评价·····	孙才志,杨 磊,胡冬玲 (7428)
厦门市土地利用变化下的生态敏感性·····	黄 静,崔胜辉,李方一,等 (7441)
我国保护地生态旅游发展现状调查分析·····	钟林生,王 婧 (7450)
黄腹山鹧鸪稳定的配偶关系限制雄性欺骗者·····	褚福印,唐思贤,潘虎君,等 (7458)
食物蛋白含量和限食对雌性东方田鼠生理特性的影响·····	朱俊霞,王 勇,张美文,等 (7464)
具有捕食正效应的捕食-食饵系统·····	祁 君,苏志勇 (7471)
桑科中 4 种桑天牛寄主植物的挥发物成分研究·····	张 琳,WANG Baode,许志春 (7479)
栗山天牛成虫羽化与温湿度的关系·····	杨忠岐,王小艺,王 宝,等 (7486)
人工巢箱条件下杂色山雀的巢位选择及其对繁殖成功率的影响·····	李 乐,万冬梅,刘 鹤,等 (7492)
鸭绿江口湿地鸕鹚类停歇地的生物生态研究·····	宋 伦,杨国军,李 爱,等 (7500)
锡林郭勒草原区气温的时空变化特征·····	王海梅,李政海,乌 兰,等 (7511)
UV-B 辐射胁迫对杨桐幼苗生长及光合生理的影响·····	兰春剑,江 洪,黄梅玲,等 (7516)
小麦和玉米叶片光合-蒸腾日变化耦合机理·····	赵风华,王秋凤,王建林,等 (7526)
利用稳定氢氧同位素定量区分白刺水分来源的方法比较·····	巩国丽,陈 辉,段德玉 (7533)
2010 年冬季寒冷天气对闽江口 3 种红树植物幼苗的影响·····	雍石泉,仝 川,庄晨辉,等 (7542)
人参皂苷与生态因子的相关性·····	谢彩香,索风梅,贾光林,等 (7551)
苈对黑麦草根系几种低分子量有机分泌物的影响·····	谢晓梅,廖 敏,杨 静 (7564)
盐碱地柠条根围土中黑曲霉的分离鉴定及解磷能力测定·····	张丽珍,樊晶晶,牛 伟,等 (7571)
不同近地表土壤水文条件下雨滴打击对黑土坡面养分流失的影响·····	安 娟,郑粉莉,李桂芳,等 (7579)
煤电生产系统的能值分析及新指标体系的构建·····	楼 波,徐 毅,林振冠 (7591)
专论与综述	
东南亚高山森林植被变化对流域产水量的影响·····	张远东,刘世荣,顾峰雪 (7601)
干旱荒漠区斑块状植被空间格局及其防沙效应研究进展·····	胡广录,赵文智,王 岗 (7609)
利用农业生物多样性持续控制有害生物·····	高 东,何霞红,朱书生 (7617)
研究简报	
洪湖湿地生态系统土壤有机碳及养分含量特征·····	刘 刚,沈守云,闫文德,等 (7625)
氯氰菊酯和溴氰菊酯对萼花臂尾轮虫生殖的影响·····	黄 林,刘昌利,韦传宝,等 (7632)
学术信息与动态	
SCOPE-ZHONGYU 环境论坛(2011)暨环境科学与可持续发展国际会议成功举办·····	(7639)
《生态学报》3 篇文章入选 2010 年中国百篇最具影响国内学术论文 等·····	(I)
期刊基本参数:CN 11-2031/Q * 1981 * m * 16 * 316 * zh * P * ¥70.00 * 1510 * 36 * 2011-12	



封面图说: 泥炭藓大多生长在多水、寒冷和贫营养的生境,同时有少数的草本、矮小灌木也生长在其中,但优势植物仍然是泥炭藓属植物。泥炭藓植物植株死后逐渐堆积形成泥炭。经过若干年的生长演变,形成了大片的泥炭藓沼泽。这种沼泽地有黑黑的泥炭,绿绿的草甸和亮晶晶的斑块状水面相间相衬,远远看去就像大地铺上了锦绣地毯一样美丽壮观。

彩图提供: 陈建伟教授 国家林业局 E-mail: cites.chenjw@163.com

楼波,徐毅,林振冠. 煤电生产系统的能值分析及新指标体系的构建. 生态学报, 2011, 31(24): 7591-7600.

Lou B, Xu Y, Lin Z G. Emergy analysis of coal-fired power generation system and construction of new emergy indices. Acta Ecologica Sinica, 2011, 31(24): 7591-7600.

煤电生产系统的能值分析及新指标体系的构建

楼 波*, 徐 毅, 林振冠

(华南理工大学电力学院, 广州 510640)

摘要: 煤电生产是我国废弃物粉尘和酸性气体的排放最主要来源。以某 2×600MW 超临界燃煤发电机组为案例, 按传统能值指标体系分别对简单发电系统、发电加除尘系统和发电加除尘脱硫系统进行能值分析。结果表明, 投入废物循环利用系统后可持续性指标反而下降。因此, 传统的能值指标已不适合废弃物产生较大的煤电生产系统的可持续性评价。针对这一特点, 提出了能反映煤电生产系统的相应指标体系, 即有效能值产出率 (EEYR)、能值环境影响率 (EEIR)、有效能值可持续指数 (EESI), 计算出简单发电系统、发电加除尘系统和发电加除尘脱硫系统的 EESI 分别为 2.249、2.628、2.642。随着废物处理程度的提高, 系统的可持续性更好, 显示出环保系统投入的积极意义。

关键词: 煤电生产系统; 能值分析; 废弃物; 能值指标; 可持续性

Emergy analysis of coal-fired power generation system and construction of new emergy indices

LOU Bo*, XU Yi, LIN Zhenguan

School of Electric Power, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China

Abstract: Coal-fired power generation is the main source of waste dust and acid gas emissions. As a case of a certain 2×600MW supercritical power generation units, according to traditional emergy indices system, simply power generation system, power generation system with dedusting system and power generation system with dedusting and desulfurization system were analyzed. The results have showed that although waste recycling systems were installed in coal-fired power generation system, Emergy Sustainability Index (ESI) decreased. Therefore, traditional emergy indices system has not been suitable for sustainable evaluation of the coal-fired electrical power generation system, which produces so much waste. On the basis of this character, the corresponding indices were put forward for reflecting coal-fired electrical power generation system, including Effective Emergy Yield Ratio (EEYR), Emergy Environment Influencing Ratio (EEIR) and Effective Emergy Sustainability Index (EESI). The EEIR of the three power generation system were 2.249, 2.628, 2.642, respectively. With the increase of waste treatment level, the sustainability of system was better that showed the positive significance of the investment in environmental protection systems.

Key Words: coal-fired power generation system; emergy analysis; waste; emergy indices; sustainability

电力是国民经济发展的基础工业,截至到 2010 年 9 月,我国电力总装机容量突破了 9.6×10^8 kW, 其中化石能源发电装机容量占总装机容量的 72.2%^[1]。煤电生产是我国化石燃料消耗的最主要方式,当然其废弃物粉尘和酸性气体的排放对环境的影响也十分严重,而且煤电在未来相当长一段时期内仍将占我国电力总量

基金项目:广州市应用基础研究专项(7421154389972)

收稿日期:2011-07-30; 修订日期:2011-11-17

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: loubo@scut.edu.cn

的相当大一部分^[2]。为此,探讨火电厂如何实现经济、生态效益的平衡,走可持续发展的道路是很有意义的。

能值分析理论是定量评价生产系统的经济效益、生态效益以及可持续性的一个强有力工具,它把不同种类、不同质量、不可比较的能量转换成统一标准——太阳能值来进行比较^[3-5],从而实现了不同质能量的区别对待和统一评价,并且建立了基本能值评价指标^[6-8]。对于工业系统的评价,传统的能值分析方法在对废弃物排放和生态经济效益评价等方面都尚待完善,吸引了许多国内外学者运用能值分析理论对工业系统进行分析,并取得一定的成果^[9-17],但对污染物排放以及系统可持续性的影响方面还处于完善过程。笔者以煤电系统为例,分析了传统能值指标体系具有明显的局限性,并提出适用于煤电生产系统的新指标体系。

1 研究对象

某发电公司 2×600MW 超临界机组项目总投资为 50 亿元,工程同步配有烟气脱硫、除尘系统,公司机组所使用煤种为神府煤,发电机组采用电除尘器方式进行除尘,除尘得到煤粉灰。烟气脱硫技术采用石灰石-石膏湿法烟气脱硫工艺,副产物为二水硫酸钙(即石膏)。除尘灰和脱水石膏都可作为建筑原料向市场销售,具有良好的经济价值。

2 煤电生产系统的能值分析

2.1 典型的工业系统能值分析

对于典型工业系统的能值分析如图 1。

2.2 煤电生产系统生产过程

煤电生产系统分别由火电三大主机:锅炉、汽轮机和发电机组组成。煤电生产系统要从自然环境获取可再生资源 R 和不可再生资源 N ,同时从社会上通过货币 F 购买设备、原料、技术、劳务等进行建设、运行和维护投资等,在生产过程中,部分废弃物 W_T 没有经过处理直接排放到自然环境中;另一部分废物 W_Y 经过处理后回收,可作为另一个生产过程的原料,在社会上具有经济价值。

2.3 煤电生产系统中子系统的能值分析

简单煤电生产系统(图 2)不考虑废弃物处理,输入不可再生资源是煤,输出产品是电。而目前实际煤电生产系统中都要不同程度考虑废物处理,发电过程中产生煤粉灰和二氧化硫的废物需要通过除尘与脱硫子系统处理,处理后得到新的可利用产品:煤粉灰(用做水泥和制砖的原料)与工业石膏。除尘与脱硫子系统的能

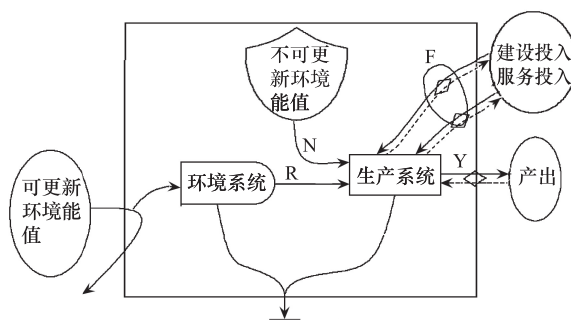


图1 典型的工业系统能值流动总图

Fig.1 Aggregated emergy flow diagram of the typical industrial system

R : 可再生环境资源能值; N : 不可再生环境资源能值; F : 经济投入; Y : 输出能值

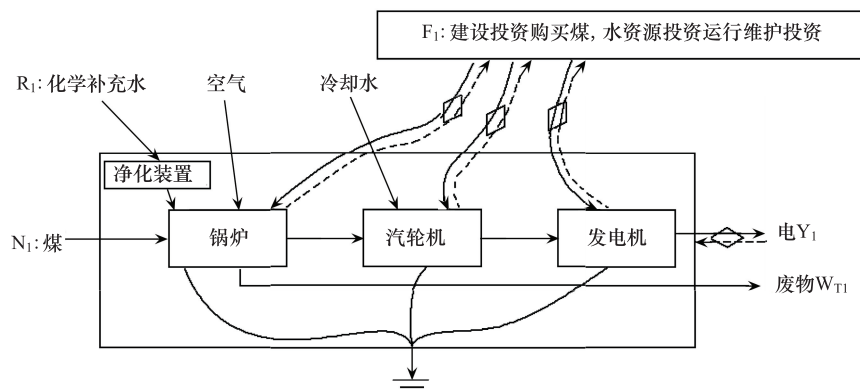


图2 简单煤电生产系统能值分析图

Fig.2 Emergy flow diagram of a simply power generation system

R_1 可再生环境资源: 化学补充水、空气、冷却水; N_1 不可再生环境资源: 煤; F_1 经济投入: 建设投资, 购买煤和水资源投资、运行维护投资; Y_1 输出能值: 电; W_{T1} 废物: 煤粉灰、二氧化硫

值分析见图 3、图 4。

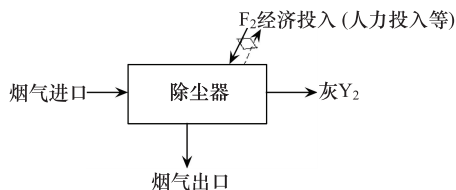


图 3 除尘子系统能值分析图

Fig. 3 Emergy flow diagram of dedusting system

F_2 经济投入, 包括 F_{21} 电力投入, F_{22} 运行投资, F_{23} 建设投资, F_{24} 维护投资

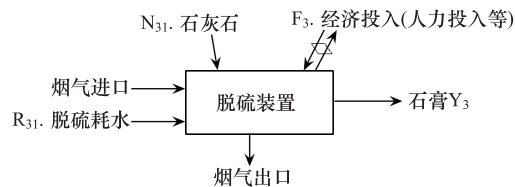


图 4 脱硫子系统能值分析图

Fig. 4 Emergy flow diagram of desulfurization system

F_3 经济投入, 包括 F_{31} 电力投入, F_{32} 运行与维护, F_{33} 建设投资, F_{34} 、 F_{35} 购买水、石灰石资源投资

2.4 两个考虑废物处理的煤电生产系统的能值分析

为了分析除尘与脱硫子系统对煤电生产系统能值分析的影响, 本文中分别对简单煤电生产系统、带除尘的煤电生产系统以及带除尘和脱硫的煤电生产系统进行能值分析, 其中带除尘的煤电生产系统以及带除尘和脱硫的煤电生产系统的能值分析见图 5、图 6。

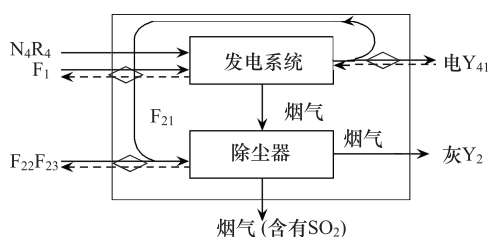


图 5 带除尘的煤电生产系统分析图

Fig. 5 Emergy flow diagram of power generation system with dedusting system

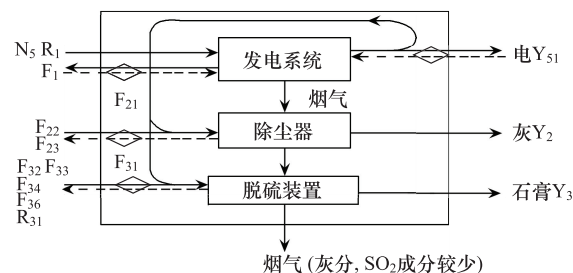


图 6 带除尘和脱硫的煤电生产系统能值分析图

Fig. 6 Emergy flow diagram of power generation system with dedusting and desulfurization system

3 电厂能值数据计算处理表

电厂能值数据计算处理结果见表 1—表 5。

表 1 简单煤电生产系统能值数据表

Table 1 Emergy evaluation table for electricity production of power plant without waste treatment

项目 Item	基础数据 Basic data	能值转换率 ^① Solar transformity	太阳能值 Solar emergy/Sej
输入 Input			
不可再生资源 N_1			
煤 N_{11}	$5.52 \times 10^{16} \text{ J/a}^{[a]}$	$4.00 \times 10^4 \text{ sej/J}^{[h]}$	2.208×10^{21}
可再生资源 R_1			
化学补充水 R_{11}	$6.31 \times 10^{11} \text{ g/a}^{[b]}$	$6.64 \times 10^8 \text{ sej/g}^{[h]}$	4.190×10^{17}
空气 R_{12}	$2.25 \times 10^{13} \text{ g/a}^{[c]}$	$5.16 \times 10^7 \text{ sej/g}^{[h]}$	1.161×10^{21}
冷却水 R_{13}	$7.37 \times 10^{13} \text{ g/a}^{[d]}$	$6.64 \times 10^8 \text{ sej/g}^{[h]}$	4.894×10^{19}
经济投入 F_1			
发电系统建设投资 F_{11}	$2.21 \times 10^7 \text{ \$}^{[e]}$	$5.78 \times 10^{12} \text{ sej/\$}^{[i]}$	1.297×10^{20}
购买煤资源投资 F_{12}	$3.01 \times 10^8 \text{ \$}^{[e]}$	$5.78 \times 10^{12} \text{ sej/\$}^{[i]}$	1.766×10^{21}
购买水资源投资 F_{13}	$2.83 \times 10^7 \text{ \$}^{[e]}$	$5.78 \times 10^{12} \text{ sej/\$}^{[i]}$	1.663×10^{20}
化学补充水处理费 F_{14}	$4.33 \times 10^8 \text{ \$}^{[f]}$	$5.78 \times 10^{12} \text{ sej/\$}^{[i]}$	2.541×10^{18}
运行维护投资 F_{15}	$3.05 \times 10^6 \text{ \$}^{[e]}$	$5.78 \times 10^{12} \text{ sej/\$}^{[i]}$	1.790×10^{19}

续表

项目 Item		基础数据 Basic data	能值转换率 ^① Solar transformaty	太阳能值 Solar emergy/Sej
输出 Y ₁ Yeild	电 Y ₁₁	2.37×10 ¹⁶ J/a ^[g]	2.20×10 ⁸ sej/J ^[j]	5.208×10 ²¹
废物 W _{T1} Waste	废弃煤粉灰 W _{T11}	3.42×10 ¹¹ J/a ^[y]	8.30 ×10 ⁸ sej/J ^[h]	2.835×10 ²⁰
	排放二氧化硫 W _{T12}	2.07×10 ¹⁰ J/a ^[z]	4.27 ×10 ⁸ sej/J ^[u]	8.864×10 ¹⁸

①由参考文献^[25]可知,产品(能量、物质或劳务)的能值转换率等于它包含的能值除以它的质量,即单位能量所含的能值;实际使用的能值单位是太阳能焦耳,故常用太阳能值转换率;笔者参考 G. Q. Chen, Z. M. Chen, Z. F. Yang 等人的研究^[18-20]可以得到中国最新不同资源或经济投入的能值转换率

表 2 除尘子系统能值数据表

Table 2 Emery evaluation table for dedusting system

项目		基础数据	能值转换率	太阳能值/sej
输入	不可再生资源 N ₂			
	原灰 N ₂₁	3.42×10 ¹¹ g/a ^[k]	8.30×10 ⁸ sej/g ^[h]	2.839×10 ²⁰
	经济投入 F ₂			
	电力投入 F ₂₁	3.25×10 ¹² J/a ^[1]	2.20×10 ⁸ sej/J ^[j]	7.142×10 ¹⁷
	建设投资 F ₂₂	5.08×10 ⁴ \$ ^[e]	5.87×10 ¹² sej/\$ ^[i]	2.982×10 ¹⁷
	运行维护投资 F ₂₃	2.31×10 ⁴ \$ ^[e]	5.87×10 ¹² sej/\$ ^[i]	1.357×10 ¹⁷
输出	灰 Y ₂	3.42×10 ¹¹ g/a ^[k]		2.850×10 ²⁰

表 3 脱硫子系统能值数据表

Table 3 Emery evaluation table for desulfurization system

	项目	基础数据	能值转换率	太阳能值/sej
输入	不可再生资源 N ₃			
	石灰石 N ₃₁	3.60×10 ¹⁰ g/a ^[m]	1.00×10 ⁹ sej/g ^[h]	3.602×10 ¹⁹
	二氧化硫 N ₃₂	2.08×10 ¹⁰ g/a ^[n]	4.27×10 ⁸ sej/g ^[u]	8.865×10 ¹⁸
	可再生资源 R ₃			
	脱硫耗水 R ₃₁	8.25×10 ¹¹ g/a ^[o]	6.64×10 ⁸ sej/g ^[h]	5.478×10 ¹⁷
	脱硫耗空气量 R ₃₂	2.24×10 ¹⁰ g/a ^[p]	5.16×10 ⁷ sej/g ^[h]	1.153×10 ¹⁸
	经济投入 F ₃			
	电力投入 F ₃₁	1.85E+14 J/a ^[q]	2.20×10 ⁸ sej/J ^[j]	4.066×10 ¹⁹
	运行与维护 F ₃₂	8.32×10 ⁸ \$ ^[e]	5.87×10 ¹² sej/\$ ^[i]	4.886×10 ¹⁸
	建设投资 F ₃₃	1.33×10 ⁶ \$ ^[e]	5.87×10 ¹² sej/\$ ^[i]	7.807×10 ¹⁸
	购买水资源投资 F ₃₄	3.14×10 ⁸ \$ ^[r]	5.87×10 ¹² sej/\$ ^[i]	1.846×10 ¹⁸
	购买石灰石投资 F ₃₅	8.24×10 ⁸ \$ ^[s]	5.87×10 ¹² sej/\$ ^[i]	4.834×10 ¹⁸
	输出			
	石膏 Y ₃	5.58×10 ¹⁰ g/a ^[t]		1.066×10 ²⁰

表 4 带除尘的煤电生产系统能值分析数据表

Table 4 Emery evaluation table for power generation system with dedusting system

项目	基础数据	能值转换率	太阳能值/sej
输入	不可再生资源 N_4		
煤 N_{11}	$5.52 \times 10^{16} \text{ J/a}^{[a]}$	$4.00 \times 10^4 \text{ sej/J}^{[h]}$	2.208×10^{21}
可再生资源 R_4			
化学补充水 R_{11}	$6.31 \times 10^{11} \text{ g/a}^{[b]}$	$6.64 \times 10^8 \text{ sej/g}^{[h]}$	4.190×10^{17}
空气 R_{12}	$2.25 \times 10^{13} \text{ g/a}^{[c]}$	$5.16 \times 10^7 \text{ sej/g}^{[h]}$	1.161×10^{21}
冷却水 R_{13}	$7.37 \times 10^{13} \text{ g/a}^{[d]}$	$6.64 \times 10^8 \text{ sej/g}^{[h]}$	4.894×10^{19}
经济投入 F_4			
发电系统建设投资 F_{11}	$2.21 \times 10^7 \text{ \$}^{[e]}$	$5.87 \times 10^{12} \text{ sej/\$}^{[i]}$	1.297×10^{20}
除尘系统建设投资 F_{22}	$5.08 \times 10^4 \text{ \$}^{[e]}$	$5.87 \times 10^{12} \text{ sej/\$}^{[i]}$	2.982×10^{17}

续表

	项目	基础数据	能值转换率	太阳能值
输出 Y_4	购买煤资源投资 F_{12}	3.01×10^8 \$ ^[e]	5.87×10^{12} sej/\$ ^[i]	1.766×10^{21}
	购买水资源投资 F_{13}	2.83×10^7 \$ ^[e]	5.87×10^{12} sej/\$ ^[i]	1.663×10^{20}
	化学补充水处理费 F_{14}	4.33×10^7 \$ ^[f]	5.87×10^{12} sej/\$ ^[i]	2.541×10^{18}
	运行维护 ($F_{15} + F_{23}$)	3.07×10^6 \$	5.87×10^{12} sej/\$ ^[i]	1.804×10^{19}
	电 Y_{41}	2.37×10^{16} J/a ^[v]		5.207×10^{21}
废物 W_{T2}	灰 Y_2	3.42×10^{11} g/a		2.850×10^{20}
	废弃煤粉灰 W_{T21}	5.12×10^8 g/a ^[y]	8.30×10^8 sej/J ^[h]	4.252×10^{17}
	排放二氧化硫 W_{T12}	2.07×10^{10} g/a ^[z]	4.27×10^8 sej/J ^[u]	8.864×10^{18}

表 5 带灰尘和脱硫的煤电生产系统能值分析数据表

Table 5 Emergy evaluation table for power generation system with dedusting and desulfurization system

	项目	基础数据	能值转换率	太阳能值/sej
输入	不可再生资源 N_5			
	煤 N_{11}	5.52×10^{16} J/a ^[a]	4.00×10^4 sej/J ^[h]	2.208×10^{21}
	石灰石 N_{31}	3.60×10^{10} g/a ^[m]	1.00×10^9 sej/g ^[h]	3.602×10^{19}
	可再生资源 R_5			
	化学补充水 R_{11}	6.31×10^{11} g/a ^[b]	6.64×10^8 sej/g ^[h]	4.190×10^{17}
	空气 R_{12}	2.25×10^{13} g/a ^[c]	5.16×10^7 sej/g ^[h]	1.161×10^{21}
	冷却水 R_{13}	7.37×10^{13} g/a ^[d]	6.64×10^8 sej/g ^[h]	4.894×10^{19}
	脱硫耗水 R_{31}	8.25×10^{11} g/a ^[o]	6.64×10^8 sej/g ^[h]	5.478×10^{17}
	脱硫耗空气量 R_{32}	2.24×10^{10} g/a ^[p]	5.16×10^7 sej/g ^[h]	1.153×10^{18}
	经济投入 F_5			
	发电系统建设投资 F_{11}	2.21×10^7 \$ ^[e]	5.87×10^{12} sej/\$ ^[i]	1.297×10^{20}
	除尘系统建设投资 F_{23}	5.08×10^4 \$ ^[e]	5.87×10^{12} sej/\$ ^[i]	2.982×10^{17}
	脱硫系统建设投资 F_{33}	1.33×10^6 \$ ^[e]	5.87×10^{12} sej/\$ ^[i]	7.807×10^{18}
	购买煤资源投资 F_{12}	3.01×10^8 \$ ^[e]	5.87×10^{12} sej/\$ ^[i]	1.766×10^{21}
	购买水资源投资 ($F_{13} + F_{34}$)	2.86×10^7 \$	5.87×10^{12} sej/\$ ^[i]	1.681×10^{20}
	化学补充水处理费 F_{14}	4.33×10^8 \$ ^[f]	5.87×10^{12} sej/\$ ^[i]	2.541×10^{18}
	购买石灰石投资 F_{35}	8.24×10^8 \$ ^[s]	5.87×10^{12} sej/\$ ^[i]	4.834×10^{18}
	运行维护 ($F_{15} + F_{23} + F_{32}$)	3.91×10^6 \$	5.87×10^{12} sej/\$ ^[i]	2.292×10^{19}
输出 Y_5	电 Y_{51}	2.35×10^{16} J/a ^[w]		5.165×10^{21}
	灰 Y_2	3.42×10^{11} g/a		2.850×10^{20}
	石膏 Y_3	5.58×10^{10} g/a		1.066×10^{20}
废物 W_{T3}	废弃煤粉灰 W_{T21}	5.12×10^8 g/a ^[y]	8.30×10^8 sej/J ^[h]	4.252×10^{17}
	排放二氧化硫 W_{T32}	2.07×10^9 g/a ^[z]	4.27×10^8 sej/J ^[u]	8.864×10^{17}

(a—z) 意义见附录

4 传统的能值指标体系

4.1 传统的能值指标的计算

传统的能值指标体系包括:能值产出率 $EYR = Y/F = (R+N+F)/F$;环境负荷率 $ELR = (N+F)/R$;能值投资率 $EIR = F/(N+R)$;能值可持续指数 $ESI = EYR/ELR$ 。利用上述电厂能值数据,计算出传统的能值指标如表 6 所示。

4.2 传统能值指标体系的局限性

由表 6 可知,传统能值指标具有很大的局限性,表现为:

(1) 根据带除尘煤电生产系统与简单煤电生产系统指标的比较,由于除尘系统能值投入量 (F_2) 相对于整个发电系统总体投入 (Y_{11}) 的比例较小 (有 3 个数量级差异), EYR 与 ESI 指标几乎一样,完全掩盖了除尘环

保系统投用的积极作用,该能值指标体系的计算方法不能体现加装除尘子系统的优越性。

(2)对发电系统产生的烟气同时进行除尘脱硫时,将煤粉灰收集作为建筑原料,将 SO_2 脱除转化为石膏,产出增多,能值指标中能值产出率 EYR 有所增大,但同时能值投资率 EIR 不变,环境负载率 ELR 变大,能值可持续指数 ESI 变小,这表现为使用废物循环利用系统后反而使系统可持续性下降。而实际生产中投入除尘和脱硫系统后,增加产出和减少污染,增加了可持续性,因此传统能值指标体系不适合评价系统煤电生产系统的可持续性状况。

表 6 传统能值指标下不同发电系统传统能值流动和能值指标的对比

Table 6 Comparison of emergy flows and emergy based evaluation indices for different kinds of power generation with traditional emergy indices system

指标 Indices	系统类型 System types		
	简单煤电生产系统	带除尘煤电生产系统	带除尘与脱硫煤电生产系统
F/(sej/a)	2.082×10^{21}	2.083×10^{21}	2.102×10^{21}
R/(sej/a)	1.210×10^{21}	1.210×10^{21}	1.212×10^{21}
N/(sej/a)	2.208×10^{21}	2.208×10^{21}	2.244×10^{21}
Y/(sej/a)	5.501×10^{21}	5.501×10^{21}	5.558×10^{21}
EYR	2.642	2.641	2.644
ELR	3.545	3.545	3.586
ESI	0.745	0.745	0.737
EIR	0.609	0.609	0.608

5 新能值指标体系

5.1 新能值指标评价体系的建立

由上文分析可得,在考虑大规模污染物排放和回收系统的煤电生产系统中,传统的指标评价体系已经不能满足可持续性发展的要求。其实,具有废物处理的工业系统难以很好用原有的能值指标分析已被很多国内外学者认识,并在某些领域内进行积极有益的探讨。刘圣等人^[14]对一种生产体系进行能值分析并针对这体系构建出新能值指标;张小洪、邓仕槐等人^[15]进行基于废物交换的两个工业系统的能值分析;王玲梅等人^[16]运用能值分析理论建立能反映煤基发电系统特性的可持续性评价指标;针对污水处理、人工湿地生态系统学者们也提出了改进能值分析方法和指标体系并用实例分析^[17,21-23]。

笔者在本研究时发现,废弃物包含在系统的有效能值产出中,导致本案例中煤粉灰收集回收再利用、二氧化硫处理成为石膏有益环保措施的积极意义无法体现,因此尝试改进原来的能值指标分析方法,可用于煤电生产系统的可持续性分析。

5.1.1 有效能值产出率(EEYR; Effective Emergy Yield Ratio)

传统能值分析评价中能值产出率被定义为总输出能值 Y(等于总投入能值)与从社会购买能值(F)之比。由于一般生态系统输出的能值都是积极的,很少废弃物产生,能值产出率适用于评价某一系统的生产效率。而对于煤电生产系统生产过程输出有三类:第一是产品,第二是排放废弃物,第三是部分废物经过环保系统处理后的副产品。传统的能值分析中总输出能值 Y 包括了废弃物,使得能值产出率不能准确地衡量某一系统的经济效益和在社会中的竞争力。因此,笔者受有效功概念启发,提出用有效产品能值($Y - W_T$)来替代原来总输出能值(Y),这样,有效能值产出率表示为:

$$\text{EEYR} = \frac{Y - W_T}{F}$$

式中, W_T 为被排放至环境的废弃物能值(sej)。EEYR 值越大,表明该煤电生产系统生产效率越高,竞争力越强。

5.1.2 能值环境影响率(EEIR; Emergy Environment Influencing Ratio)

传统能值分析评价中用环境影响率 ELR 来衡量环境的付出,定义为不可再生资源能值与从社会购买能

值之和除以可再生资源能值在工业系统的应用中有两方面不足:(1) ELR 越大,表示不可再生资源与社会能值投入大,就是说要付钱的投入大,而攫取不花钱的可再生资源小,这对工业系统来说明显是注重经济效益,而忽视对可再生资源以及环境的保护;(2) 环境负载率的分析与计算没有考虑到废弃物直接排入环境的影响,与生态系统的资源循环利用不同,工业系统的废弃物排放破坏了环境,可导致可再生资源逆变为不可再生资源,增加了自然环境的负载。为此提出能值环境投入概念,定义为生产系统总能值投入(包括可再生能值、不可再生能值、社会能值以及废弃物能值,因这些能值最终都表现为我们所处的环境来承受)除以有效产品能值,即表示为:

$$EEIR = \frac{N+R+F+W_T}{Y-W_T}$$

ELR 值越小,表明该煤电生产系统使环境承受的负荷越小,物质能量循环利用率高。

5.1.3 有效能值可持续指数(EESI; Effective Emery Sustainability Index)

工业系统能值可持续指数(EESI)定义为有效能值产出率(EEYR)与能值环境影响率(EELR)的比值。

$$EESI = \frac{EEYR}{EELR}$$

5.2 改进的能值指标的计算

同样按照上述电厂能值数据,运用改进的能值指标分析方法,如表 7 所示,计算得出改进的能值指标。

表 7 改进能值指标下不同发电系统能值流动和改进的能值指标体系的对比

Table 7 Comparison of emery flows and emery based evaluation indices for different kinds of power generation with new emery indices system

指标 Indices	系统类型 System types		
	简单煤电生产系统	带除尘煤电生产系统	带除尘与脱硫煤电生产系统
F/(sej/a)	2.082×10^{21}	2.083×10^{21}	2.102×10^{21}
R/(sej/a)	1.210×10^{21}	1.210×10^{21}	1.212×10^{21}
N/(sej/a)	2.208×10^{21}	2.208×10^{21}	2.244×10^{21}
Y/(sej/a)	5.501×10^{21}	5.501×10^{21}	5.558×10^{21}
$W_T/(sej/a)$	2.924×10^{20}	9.289×10^{18}	1.312×10^{18}
EEYR	2.501	2.637	2.643
EELR	1.112	1.003	1.000
EESI	2.249	2.628	2.642

对改进的能值评价指标计算,结果见表 7。可发现增加废物处理系统以后,增加了有效能值产出率 EEYR,能值环境影响率 EELR 降低,有效能值可持续指数 EESI:显示简单发电系统、发电加除尘系统和发电加除尘脱硫系统为 2.249、2.628、2.642,可见随着废物处理程度的提高,可持续更好,显示出环保系统投入的积极意义。

6 结论

(1) 以煤电生产系统作为案例,传统的能值分析发现,投入废物循环利用系统后指标显示反而使系统可持续性下降。而实际生产中投入除尘和脱硫系统后,增加了产出并减少污染,有利于系统的可持续性。因此传统能值指标体系已不适合评价煤电生产这一类废弃物产生较大的工业系统可持续性评价。

(2) 引入能值环境影响率,考虑包括废弃物在内对环境影响的总能值,新的工业系统可持续指标显示简单发电系统、发电加除尘系统和发电加除尘脱硫系统为 2.249、2.628、2.642。带有除尘和脱硫环保装置的发电系统,随着废物处理程度的提高,可持续更好,显示出环保系统投入的积极意义。

附录:

计算过程(注释:美元对人民币汇率取为 1 \$ =6.56 元)

(a) 由某发电厂提供数据, $2 \times 600 \text{ MW}$ 超临界机组年耗煤量 2530000 t (以年运行 5500 h 计), 煤的发热量为 21805 kJ/kg , 故 1 a 需热量 $5.52 \times 10^{16} \text{ J/a}$ 。

(b) 该厂每台锅炉产生蒸汽量是 1913 t/h , 每小时补充化学除盐水的比例为 3% , 1 a 运行时间为 5500 h , 2 台锅炉 1 a 需要的化学除盐水量是 63.1 万 t , 即 $6.31 \times 10^{11} \text{ g/a}$ 。

(c) 该厂所用煤质资料: $A_{\text{ar}} = 15\%$, $M_{\text{ar}} = 13\%$, $C_{\text{ar}} = 57.33\%$, $H_{\text{ar}} = 3.62\%$, $O_{\text{ar}} = 9.94\%$, $N_{\text{ar}} = 0.70\%$, $S_{\text{ar}} = 0.41\%$, $Q_{\text{ar.net}} = 21805 \text{ kJ/kg}$ 。 1 kg 燃料完全燃烧所需的理论空气量 $V^0 = \frac{1}{0.21} (1.866 \frac{C_{\text{ar}}}{100} + 5.55 \frac{H_{\text{ar}}}{100} + 0.7 \frac{S_{\text{ar}}}{100} - 0.7 \frac{O_{\text{ar}}}{100})$ 和实际空气量公式 $V_k = \alpha \times V^0$ (α 过剩空气系数取 1.2), 计算得出燃烧实际需要的空气量是 225 万 t , 即 $2.250 \times 10^{13} \text{ g/a}$ 。

(d) 该厂每台锅炉产生蒸汽量是 1913 t/h , 1 a 运行时间为 5500 h , 循环冷却水采用闭式循环系统, 补充比例为锅炉蒸汽量 5% , 假设循环冷却倍率为 70 , 2 台锅炉 1 a 需要的冷却水量为 $7.37 \times 10^{13} \text{ g/a}$ 。

(e) 厂家提供数据。

(f) 由(b)得每年电厂需要化学除盐水 63.1 万 t , 而每吨处理成本约为 4.5 元, 因此一年化学补充水耗资 284 万元, 按汇率换算成美元即 $4.33 \times 10^8 \text{ \$/a}$ 。

(g) 某电厂 1 a 运行时间为 5500 h , 因此 $2 \times 600 \text{ MW}$ 超临界机组每年的发电量 $Y_1 = 2 \times (600 \text{ MW}) \times (5500 \text{ h}) = 2 \times (6 \times 10^8) \times 5500 \times 3600 \text{ J} = 2.37 \times 10^{16} \text{ J}$ 。

(h) 参考文献^[24]。

(i) 随着社会经济的变化, 能值/货币取值也会相应变化, 根据参考文献^[20], 查得最近公布 2005 年中国能值/货币取值为 $5.87 \times 10^{12} \text{ sej/\$}$ 。

(j) 电的能值转换率 $= (N_1 + R_1 + F_1 - W_{T1}) / Y_1 = (5.208 \times 10^{21} \text{ sej}) \div (2.37 \times 10^{16} \text{ J}) = 2.20 \times 10^8 \text{ sej/J}$

(k) 燃煤的灰分质量分数 $A_{\text{ar}} = 15\%$, 灰分的质量 $= (2530000 \text{ t}) \times 15\% = 379500 \text{ t}$, 假设燃烧后飞灰占总灰量 90% , 则飞灰含量 $= 90\% \times 379500 \text{ t/a} = 3.42 \times 10^{11} \text{ g/a}$ 。

(l) 由厂家数据, 除尘系统年耗电量为 90.3 万度, 即 1 a 的电力投入量 $= (90.3 \times 10^4 \text{ kW} \cdot \text{h/a}) \times (3600 \times 10^3 \text{ J} \cdot \text{kw}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}) = 3.25 \times 10^{12} \text{ J/a}$ 。

(m) 由脱硫反应: $2\text{SO}_2 + 2\text{CaCO}_3 + 4\text{H}_2\text{O} + \text{O}_2 = 2\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O} + 2\text{CO}_2$, 每年 CaCO_3 的消耗量为 $2.075 \times 10^{10} \times 100/64 = 3.242 \times 10^{10} \text{ g}$, 按石灰石里面含有 90% 的 CaCO_3 来算, 需要石灰石的质量为 $3.242 \times 10^{10}/0.9 \text{ g} = 3.602 \times 10^{10} \text{ g}$ 。

(n) 硫的质量分数 $S_{\text{ar}} = 0.41\%$, 每年燃料煤中 S 的质量 $= (2530000 \text{ t} \times 0.0041) = 1.037 \times 10^{10} \text{ g}$, 由化学反应 $\text{S} + \text{O}_2 = \text{SO}_2$ 知 32 g S 与 32 g O_2 可以生成 64 g 的 SO_2 , 得到二氧化硫质量 $m_{\text{SO}_2} = 64/32 \times (1.037 \times 10^{10} \text{ g}) = 2.08 \times 10^{10} \text{ g}$ 。

(o) 根据厂家提供数据, 脱硫系统一年耗水量为 82.5 万 t , 即 $8.25 \times 10^{11} \text{ g/a}$ 。

(p) 由脱硫反应方程式可得反应需要的 O_2 量的体积为 $(2.08 \times 10^{10} \times 16/64) \times 22.4/32000 \text{ m}^3 = 3.63 \times 10^6 \text{ m}^3$, 氧气在空气里约占 21% , 因此空气的质量为 $3.63 \times 10^6 \times 1.293 \times 1000 / 0.21 = 2.24 \times 10^{10} \text{ g}$ 。

(q) 脱硫系统年耗电量为 5133 万度电, 合计 $(5.13 \times 10^7 \text{ kW} \cdot \text{h/a}) \times (3600 \times 10^3 \text{ J} \cdot \text{kw}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}) = 1.85 \times 10^{14} \text{ J/a}$ 。

(r) 购买水资源的价格是每吨 2.5 元, 再按汇率兑换成美元, 购买脱硫耗水的投资为 $8.25 \times 10^{11} \times 2.5/1 \times 10^6/6.56 = 3.14 \times 10^8 \text{ \$}$ 。

(s) 购买石灰石的价格是每吨 150 元, 再按汇率兑换成美元, 购买石灰石的投资为 $(3.602 \times 10^4 \text{ t}) \times (150 \text{ 元/t}) / (6.56 \text{ 元/\$}) = 8.24 \times 10^8 \text{ \$}$ 。

(t) 由脱硫反应方程式, 脱硫后得石膏总量为 $172 \times 253 \times 10^{10} \times 0.41\% / 32 \text{ g} = 5.58 \times 10^{10} \text{ g}$ 。

(u) 由参考文献^[25]可知,硫的能值转换率是 $8.60 \times 10^8 \text{ sej/g}$,空气的能值转换率为 $5.16 \times 10^7 \text{ sej/g}$,由于 $\text{S} + \text{O}_2 = \text{SO}_2$ 反应中 1 g 硫充分燃烧后会放出 9.36 kJ 热量,由参考文献^[25]可得热能的太阳能值转化率为 $6.1 \times 10^3 \text{ sej/J}$,可以算出生成 2 g SO_2 的太阳能值 $= (8.60 \times 10^8 \text{ sej}) + (5.16 \times 10^7 \text{ sej}) - (9.36 \times 10^3 \text{ J}) \times (6.1 \times 10^3 \text{ sej/J}) = 8.545 \times 10^8 \text{ sej}$,也就可以得到 SO_2 的转换率为 $4.273 \times 10^8 \text{ sej/g}$ 。

(v) 带除尘的煤电生产系统的年发电量 = 简单煤电生产系统的年发电量 - 除尘子系统的年耗电量 $= (2.37 \times 10^{16} \text{ J/a}) - (3.25 \times 10^{12} \text{ J/a}) = 2.37 \times 10^{16} \text{ J/a}$

(w) 带除尘与脱硫煤电生产系统的年发电量 = 简单煤电生产系统的年发电量 - 除尘子系统的年耗电量 - 脱硫子系统的年耗电量 $= (2.37 \times 10^{16} \text{ J/a}) - (3.25 \times 10^{12} \text{ J/a}) - (1.85 \times 10^{14} \text{ J/a}) = 2.35 \times 10^{16} \text{ J/a}$

(x) $V_y = \frac{22.4}{100} \left(\frac{C_{\text{ar}}}{12} + \frac{H_{\text{ar}}}{2} + \frac{N_{\text{ar}}}{28} + \frac{S_{\text{ar}}}{32} + \frac{M_{\text{ar}}}{18} \right) + 0.79V^0 + (\alpha - 1)V^0 = 7.33 \text{ m}^3/\text{kg}$, 计算可得每年总烟气体积为 $1.85 \times 10^{10} \text{ m}^3$ 。

(y) 未处理每年排放煤粉灰 $A_{\text{m1}} = \text{煤量} \times A_{\text{ar}} \times \text{飞灰比例} = (2530000 \times 10^6) \times 15\% \times 90\% = 3.42 \times 10^{11} \text{ g/a}$; 处理后每年排放煤粉灰 $A_{\text{m2}} = 3.42 \times 10^{11} \text{ g/a} \times (1 - 0.9985) = 5.12 \times 10^8 \text{ g/a}$ (假设除尘效率 99.85%); 根据 (x) 中每年总烟气体积。计算出未处理煤粉灰浓度 $= 5500 A_{\text{m1}} / (2530000 V_y) = 1.842 \times 10^4 \text{ mg/m}^3$; 处理后煤粉灰浓度 $= 1.842 \times 10^4 \times (1 - 0.9985) = 27.62 \text{ mg/m}^3$, 满足当地的排放标准^[26]。

(z) 未处理二氧化硫每年排放量 $\text{SO}_{2\text{m1}} = m_{\text{SO}_2} = 2.08 \times 10^{10} \text{ g}$; 处理后每年二氧化硫排放量 $\text{SO}_{2\text{m2}} = 2.08 \times 10^{10} \text{ g} \times (1 - 0.9) = 2.08 \times 10^9 \text{ g}$ (假设脱硫效率 90%); 根据 (x) 中每年总烟气体积。计算出未处理二氧化硫浓度 $= \text{SO}_{2\text{m1}} / (2530000 V_y) = 1.119 \times 10^3 \text{ mg/m}^3$; 处理后二氧化硫浓度 $= 1.119 \times 10^3 \times (1 - 0.9) = 1.119 \times 10^2 \text{ mg/m}^3$, 满足当地的排放标准^[26]。

References:

- [1] Statistical information department of China Electricity Council. The national electric power industry statistics bulletin. China Electricity Council, 2011
- [2] Wang X B, Li F G, Wang X J. Study on the eco-industrial park development mode based on big thermal power plant. Ecological Economy, 2007, (3): 116-119.
- [3] Odum H T, Odum E C. Ecology and Economy: "Emergy" Analysis and Public Policy in Texas. Austin: The Office of Natural Resources and Texas Department of Agriculture, 1987: 163-171.
- [4] Odum H T. Self-organization, transformity, and information. Science, 1998, 242(4882): 1132-1139.
- [5] Odum H T. Environmental Accounting: Emergy and Environmental Decision Making. New York: John Wiley and Sons, 1996.
- [6] Brown M T, Ulgiati S. Emergy-based indices and ratios to evaluate sustainability: monitoring economies and technology toward environmentally sound innovation. Ecological Engineering, 1997, 9(1/2): 51-69.
- [7] Lu H F, Lan S F, Li L, Peng S L. Studies on emergy indices for evaluating system sustainable development property. China Environmental Science, 2002, 22(4): 380-384.
- [8] Lu H F, Lang S F, Peng S L. Extending study on energy indices for sustainable development. Chinese Journal of Environmental Science, 2003, 24(3): 150-154.
- [9] Yang H, Li Y R, Sheng J Z, Hu S Y. Evaluating waste treatment, recycle and reuse in industrial system; An application of the emergy approach. Ecological Modelling, 2003, 160(1/2): 13-21.
- [10] Giannetti B F, Bonilla S H, Silva I R, Almeida C M V B. Cleaner production practices in a medium size gold-plated jewelry company in Brazil: when little changes make the difference. Journal of Cleaner Production, 2008, 16(10): 1106-1117.
- [11] Ometto A R, Ramos P A R, Lombardi G. The benefits of a Brazilian agro-industrial symbiosis system and the strategies to make it happen. Journal of Cleaner Production, 2007, 15(13/14): 1253-1258.
- [12] Caruso C, Catenacci G, Marchettini N, Principi I, Tiezzi E. Emergy based analysis of Italian electricity production system. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 2001, 66(1): 265-272.
- [13] Yang H, Li Y R, Shen J Z, Hu S Y. Evaluating waste treatment, recycle and reuse in industrial system; an application of the emergy approach. Ecological Modelling, 2003, 160(1/2): 13-21.

- [14] Liu S, Sun D L, Wan S W, Ding G H, Qin P. Emergy evaluation of a kind of biodiesel production system and construction of new emergy indices. *Journal of Nanjing University (Natural Sciences)*, 2007, 43(2): 111-118.
- [15] Zhang X H, Deng S H. Emergy evaluation of impacts of waste treatment methods on the sustainability of the industrial system. *Resources Science*, 2010, 32(9): 1806-1813.
- [16] Wang L M, Ni W D, Li Z, Liu Y. Sustainability evaluation of coal generation electricity system based on emergy account. *A Journal of the Chinese Society for Electrical Engineering*, 2006, 26(13): 98-102.
- [17] Zhang X H, Jiang W J, Wu J, Zhang T H. Improved emergy indices for analysing sewage treatment ecosystems. *Resources Science*, 2009, 31(2): 250-257.
- [18] Chen Z M, Chen G Q, Zhou J B, Jiang M M, Chen B. Ecological input-output modeling for embodied resources and emissions in Chinese economy 2005. *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*, 2010, 15(7): 1942-1965.
- [19] Chen G Q, Chen Z M. Carbon emissions and resources use by Chinese economy 2007: a 135-sector inventory and input-output embodiment. *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*, 2010, 15(11): 3647-3732.
- [20] Yang Z F, Jiang M M, Chen B, Zhou J B, Chen B G Q, Li S C. Solar emergy evaluation for Chinese economy. *Energy Policy*, 2010, 38(2): 875-886.
- [21] Zhou J B, Jiang M M, Chen B, Chen G Q. Emergy evaluations for constructed wetland and conventional wastewater treatments. *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*, 2009, 14(4): 1781-1789.
- [22] Chen B, Chen Z M, Zhou Y, Zhou J B, Chen G Q. Emergy as embodied energy based assessment for local sustainability of a constructed wetland in Beijing. *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*, 2009, 14(2): 622-635.
- [23] Chen Z M, Xia X H, Tang H S, Li S C, Deng Y. Emergy based ecological assessment of constructed wetland for municipal wastewater treatment: methodology and application to the Beijing wetland. *Journal of Environmental Informatics*, 2010, 15(2): 62-73.
- [24] Wang L M, Zhang J T. Emergy evaluation of power plant eco-industrial park. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2004, 15(6): 1047-1050.
- [25] Lan S F, Qin P, Lu H F. Emergy analysis of Eco-economic System. Beijing: Chemical Industry Press, 2002.
- [26] Guangdong Environmental Protection Department, Guangdong Quality and Technical Supervision Bureau. DB44/612—2009. Guangdong local standard coal-fired power plant standards for the discharge of atmospheric pollutants. Guangdong Environmental Protection Department, 2009.

参考文献:

- [1] 中电联统计信息部. 全国电力工业统计快报. 北京: 中国电力企业联合会, 2011.
- [2] 王孝斌, 李福刚, 王学军. 大型火电厂为中心的生态工业园发展模式研究. *生态经济: 学术版*, 2007, (3): 116-119.
- [7] 陆宏芳, 蓝盛芳, 李雷, 彭少麟. 评价系统可持续发展能力的能值指标. *中国环境科学*, 2002, 22(4): 380-384.
- [14] 刘圣, 孙东林, 万树文, 丁公辉, 钦佩. 一种生物柴油生产体系的能值分析及新能值指标的构建. *南京大学学报(自然科学版)*, 2007, 43(2): 111-118.
- [15] 张小洪, 邓仕槐, 肖鸿, 张延宗. 废物处理方式对工业系统可持续性影响的能值分析. *资源科学*, 2010, 32(9): 1806-1813.
- [16] 王灵梅, 倪维斗, 李政, 刘宇. 基于能值的不同煤基发电系统的可持续性评价. *中国电机工程学报*, 2006, 26(13): 98-102.
- [17] 张小洪, 蒋文举, 伍钧, 张天洪. 改进的能值指标用于分析污水处理生态系统. *自然科学*, 2009, 31(2): 250-257.
- [24] 王灵梅, 张金屯. 火电厂生态工业园的能值评估. *应用生态学报*, 2004, 15(6): 1047-1050.
- [25] 蓝盛芳, 钦佩, 陆宏芳. 生态经济系统能值分析. 北京: 化学工业出版社, 2002.
- [26] 广东省环境保护局, 广东省质量技术监督局. DB44/612—2009. 广东省地方标准火电厂大气污染物排放标准. 广州: 广东省环境保护局, 2009.

CONTENTS

The community structure of endophytic bacteria in different parts of huanglongbing-affected citrus plants	LIU Bo, ZHENG Xuefang, SUN Daguang, et al (7325)
A research on the response of the radial growth of <i>Pinus koraiensis</i> to future climate change in the XiaoXing'AnLing	YIN Hong, WANG Jing, LIU Hongbin, et al (7343)
Efficiency and kinetic process of nitrogen removal in a subsurface wastewater infiltration system (SWIS)	LI Haibo, LI Yinghua, SUN Tieheng, et al (7351)
Designing nature reserve systems based on ecosystem services in Hainan Island	XIAO Yi, CHEN Shengbin, ZHANG Lu, et al (7357)
Assessing ecological services value of herbivorous wild animals in Changtang grassland: a case study of Tibetan antelope	LU Chunxia, LIU Ming, FENG Yue, et al (7370)
Spatial characteristics analysis of ecological system service value in QianJiang City of Hubei Province	XU Beishen, ZHOU Yong, XU Li, et al (7379)
Landscape pattern change and its influence on soil carbon pool in Napahai wetland of Northwestern Yunnan	LI Ningyun, YUAN Hua, TIAN Kun, et al (7388)
Multi-scenarios analysis for wetlands ecosystem conservation based on connectivity: a case study on HuangHuaiHai Region, China ...	SONG Xiaolong, LI Xiaowen, ZHANG Mingxiang, et al (7397)
The potential of carbon sink in alpine meadow ecosystem on the Qinghai-Tibetan Plateau	HAN Daorui, CAO Guangmin, GUO Xiaowei, et al (7408)
The relations of spectrum reflectance with inhomogeneous factors and albedo parameterization ...	ZHANG Jie, ZHANG Qiang (7418)
Groundwater ecological sensitivity assessment in the lower Liaohe River Plain based on GIS technique	SUN Caizhi, YANG Lei, HU Dongling (7428)
Ecological sensitivity of Xiamen City to land use changes	HUANG Jing, CUI Shenghui, LI Fangyi, et al (7441)
Investigation and analysis on situation of ecotourism development in protected areas of China	ZHONG Linsheng, WANG Jing (7450)
Handicapping male-cheaters by stable mate relationship in yellow-bellied prinia, <i>Prinia flaviiventris</i>	CHU Fuyin, TANG Sixian, PAN Hujun, et al (7458)
Effects of dietary protein content and food restriction on the physiological characteristics of female <i>Microtus fortis</i>	ZHU Junxia, WANG Yong, ZHANG Meiwen, et al (7464)
Predator-prey system with positive effect for prey	QI Jun, SU Zhiyong (7471)
Volatile constituents of four moraceous host plants of <i>Apriona germari</i>	ZHANG Lin, WANG Baode, XU Zhichun (7479)
Relationship between adult emergence of <i>Massicus raddei</i> (Coleoptera: Cerambycidae) and temperature and relative humidity	YANG Zhongqi, WANG Xiaoyi, WANG Bao, et al (7486)
Nest site selection and reproductive success of <i>Parus varius</i> in man-made nest boxes	LI Le, WAN Dongmei, LIU He, et al (7492)
A study on bio-ecology of the stopover site of waders within China's Yalu River estuary wetlands	SONG Lun, YANG Guojun, LI Ai, et al (7500)
The spatial-temporal change variations of temperature in Xilinguole steppe zone	WANG Haimei, LI Zhenghai, WU Lan, et al (7511)
The growth and photosynthetic responses of <i>Cleyera japonica</i> Thunb. seedlings to UV-B radiation stress	LAN Chunjian, JIANG Hong, HUANG Meiling, et al (7516)
Photosynthesis-transpiration coupling mechanism of wheat and maize during daily variation	ZHAO Fenghua, WANG Qiufeng, WANG Jianlin, et al (7526)
Comparison of the methods using stable hydrogen and oxygen isotope to distinguish the water source of <i>Nitratia Tangutorum</i>	GONG Guoli, CHEN Hui, DUAN Deyu (7533)
Effects of cold weather on seedlings of three mangrove species planted in the Min River estuary during the 2010 winter	YONG Shiquan, TONG Chuan, ZHUANG Chenhui, et al (7542)
Correlation between ecological factors and ginsenosides	XIE Caixiang, SUO Fengmei, JIA Guanglin, et al (7551)
Effects of pyrene on low molecule weight organic compounds in the root exudates of ryegrass (<i>Lolium perenne</i> L.)	XIE Xiaomei, LIAO Min, YANG Jing (7564)
Isolation of phosphate solubilizing fungus (<i>Aspergillus niger</i>) from <i>Caragana</i> rhizosphere and its potential for phosphate solubili- zation	ZHANG Lizhen, FAN Jingjing, NIU Wei, et al (7571)
Effect of raindrop impact on nutrient losses under different near -surface soil hydraulic conditions on black soil slope	AN Juan, ZHENG Fenli, LI Guifang, et al (7579)
Emergy analysis of coal-fired power generation system and construction of new emergy indices	LOU Bo, XU Yi, LIN Zhenguan (7591)
Review and Monograph	
The impact of forest vegetation change on water yield in the subalpine region of southwestern China	ZHANG Yuandong, LIU Shirong, et al (7601)
Reviews on spatial pattern and sand-binding effect of patch vegetation in arid desert area	HU Guanglu, ZHAO Wenzhi, WANG Gang (7609)
Sustainable management on pests by agro-biodiversity	GAO Dong, HE Xiahong, ZHU Shusheng (7617)
Scientific Note	
Characteristics of organic carbon and nutrient content in five soil types in Honghu wetland ecosystems	LIU Gang, SHEN Shouyun, YAN Wende, et al (7625)
Effects of cypermethrin and deltamethrin on reproduction of <i>Brachionus calyciflorus</i>	HUANG Lin, LIU Changli, WEI Chuanbao, et al (7632)

《生态学报》2012 年征订启事

《生态学报》是中国生态学学会主办的自然科学高级学术期刊,创刊于 1981 年。主要报道生态学研究原始创新性科研成果,特别欢迎能反映现代生态学发展方向的优秀综述性文章;研究简报;生态学新理论、新方法、新技术介绍;新书评介和学术、科研动态及开放实验室介绍等。

《生态学报》为半月刊,大 16 开本,280 页,国内定价 70 元/册,全年定价 1680 元。

国内邮发代号:82-7 国外邮发代号:M670 标准刊号:ISSN 1000-0933 CN 11-2031/Q

全国各地邮局均可订阅,也可直接与编辑部联系购买。欢迎广大科技工作者、科研单位、高等院校、图书馆等订阅。

通讯地址:100085 北京海淀区双清路 18 号 电 话:(010)62941099; 62843362

E-mail: shengtaixuebao@rcees.ac.cn 网 址: www.ecologica.cn

编辑部主任 孔红梅 执行编辑 刘天星 段 靖

生 态 学 报
(SHENGTAI XUEBAO)
(半月刊 1981 年 3 月创刊)
第 31 卷 第 24 期 (2011 年 12 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA
(Semimonthly, Started in 1981)
Vol. 31 No. 24 2011

编 辑	《生态学报》编辑部 地址:北京海淀区双清路 18 号 邮政编码:100085 电话:(010)62941099 www.ecologica.cn shengtaixuebao@rcees.ac.cn	Edited by	Editorial board of ACTA ECOLOGICA SINICA Add:18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China Tel:(010)62941099 www.ecologica.cn Shengtaixuebao@rcees.ac.cn
主 编	冯宗炜	Editor-in-chief	FENG Zong-Wei
主 管	中国科学技术协会	Supervised by	China Association for Science and Technology
主 办	中国生态学学会 中国科学院生态环境研究中心 地址:北京海淀区双清路 18 号 邮政编码:100085	Sponsored by	Ecological Society of China Research Center for Eco-environmental Sciences, CAS Add:18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China
出 版	科 学 出 版 社 地址:北京东黄城根北街 16 号 邮政编码:100717	Published by	Science Press Add:16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷	北京北林印刷厂	Printed by	Beijing Bei Lin Printing House, Beijing 100083, China
发 行	科 学 出 版 社 地址:东黄城根北街 16 号 邮政编码:100717 电话:(010)64034563 E-mail:journal@cspg.net	Distributed by	Science Press Add:16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China Tel:(010)64034563 E-mail:journal@cspg.net
订 购	全国各地邮局	Domestic	All Local Post Offices in China
国外发行	中国国际图书贸易总公司 地址:北京 399 信箱 邮政编码:100044	Foreign	China International Book Trading Corporation Add:P. O. Box 399 Beijing 100044, China
广告经营 许 可 证	京海工商广字第 8013 号		



ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

国内外公开发行

国内邮发代号 82-7

国外发行代号 M670

定价 70.00 元