

# 基于生命周期评价的市政污泥烟气干化环境影响评价及其经济性分析

董进宁, 马晓茜

(华南理工大学电力学院, 广东省绿色能源技术重点实验室, 广东 广州 510640)

**摘要:**应用 LCA 方法和技术经济学的观点对市政污泥烟气干化系统进行环境影响和经济性分析, 结果表明, 处理 1 t 湿污泥, 对环境的总影响负荷为 2 954.392 毫人当量, 资源耗竭系数为 4.265 毫人当量, 干化污泥掺混发电 3 206.08 kWh, 污泥烟气干化对环境影响主要为固体废弃物, 占 50.71%, 其次为全球变暖 21.84%; 各个过程中掺混发电与干化影响为 80.56%, 污泥运输过程影响最小为 0.02%; 而对该系统进行投资, 其动态投资回收期为 3.13 年, 内部收益率高达 53.07%。

**关键词:** 市政污泥; 烟气; 生命周期评价; 技术经济; 资源消耗; 环境影响

中图分类号: TK6; X7

文献标识码: A

文章编号: 0253-4320(2009)04-0082-05

## Environmental impact and technical economics LCA analysis on the drying of integrative system of the municipal sludge drying by with flue gas by LCA

DONG Jin-ning, MA Xiao-qian

(Guangdong Provincial Key Laboratory for Green Energetic Technology, School of Electric Power,

South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

**Abstract:** The environmental impacts and economic benefits of the integrative system of the municipal sludge drying with flue gas are analyzed by methodologies of LCA and technical economics. The results indicate that when 1t wet municipal sludge is treated, the values of the environmental impacts and resources consumption are 2 954.392 mPET and 4.265 mPET, and 3 206.08 kWh electric power is provided. The main environmental impacts of the integrative system of the municipal sludge drying with flue gas is the solid wastes emission, as 50.71%, second is global warming as 21.84% in the category of environmental impacts; the impact in the process of sludge drying and mixing-power generation is 80.56%, and the impact in the sludge transportation is the least as 0.02%; when the capital is invested in the system, the dynamic recovery period of investment is 3.13 years and the internal rate of return (IRR) is 53.07%. Obviously, the environmental and economic benefits of the integrative system of the municipal sludge drying with flue gas are very credible.

**Key words:** municipal sludge; flue gas; life cycle assessment; technical economics; resource consumption; environmental impact

目前,我国污泥处理能力低下,而产量逐年增加<sup>[1]</sup>,污泥的“无害化,减量化,资源化”利用问题成为我国迫切需要解决的问题。而我国又是一个火电为主的国家,烟气排放温度较高,排放的烟气中含有大量的二氧化硫等酸性气体,如能利用烟气废热,将污泥进行干化,且在干化同时利用污泥中含有的大量水分,加入脱硫剂对通入烟气进行脱硫,这样即可以解决污泥和烟气中硫分所带来的环境问题,又可以充分利用烟气废热将污泥进行资源化利用,同时还具有良好的经济性和社会效益。市政污泥的烟气干化系统就是利用烟气对污泥进行干化并脱硫,干化后污泥与煤掺混利用循环流化床锅炉进行焚烧

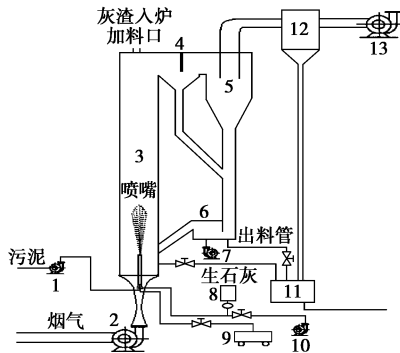
发电,产生的烟气对污泥进行干化并脱硫。前人对污泥干化处理的研究<sup>[2]</sup>比较多,但是对污泥烟气干化的综合研究比较少,为了掌握利用市政污泥烟气干化系统处理污泥的资源消耗与环境影响的全面数据和该系统的经济效益,笔者利用生命周期的方法对该系统进行环境影响评价,并对该系统进行技术经济分析。

## 1 污泥烟气干化的生命周期清单分析

### 1.1 研究目标与研究范围

本文中以市政污泥烟气干化系统为研究对象,该系统中采用干化后污泥与煤掺混焚烧发电,采用

130 t/h 的循环流化床,配 25 MW 汽轮机发电机组,设发电效率为 30%,污泥的烟气干化与脱硫采用循环流化床干燥,如图 1 所示,污泥通过循环流化床干燥后经过惯性分离器,旋风分离器等捕捉收集与煤掺混后送入循环流化床锅炉,以系统每处理 1 t 湿污泥对环境造成的影响进行分析和计算,所以环境影响评价的功能单位为 1 t 湿污泥。



1—污泥泵;2—一次风机(高压);3—流化床脱硫塔;  
4—惯性分离器;5—旋风分离器;6—流化床返料器;  
7—返料风机;8—给料机;9—空压机;10—输料风机;  
11—物料收集槽;12—布袋除尘器;13—引风机

图 1 市政污泥烟气干化系统

由于污泥烟气干化系统相当复杂,因此在进行生命周期分析时忽略次要因素,考虑主要因素。在系统运行过程中忽略污泥产生,以及干化污泥与煤掺混的影响,由于本文主要研究基于该系统污泥干化以及掺混焚烧发电对环境造成的影响,且该系统使用年限很长(20 年),因此忽略系统建设所需要的

(上接第 81 页)

因此硝化脱氮能力显著,这一特点在高氨氮的炼油及化工污水处理方面具有显著优势。

#### 4 结论

(1) 中试试验在进水量为 0.22 m<sup>3</sup>/h、曝气量 12~24 m<sup>3</sup>/h、溶解氧质量浓度 2~5 mg/L、生化反应总停留时间为 48 h 的情况下对 COD 和 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 的平均去除率分别达到了 83.2% 和 99.46%,处理效果良好,达到预期目标。

(2) 中试试验与同期炼油污水净化厂生化系统处理效果做对比,结果表明,A/O<sup>2</sup>/MBBR 组合工艺出水水质明显优于 A/O<sup>2</sup> 工艺出水,MBBR 可以提高 A/O<sup>2</sup> 工艺的容积负荷率和处理效率,具有处理效率高、停留时间短、抗冲击负荷能力强的特点,在工程应用上具有很大的优势。

(3) 试验结果表明,MBBR 与活性污泥法相结合

原料制作以及报废所造成的影响,主要过程有污泥运输、干化脱硫、煤炭开采运输、焚烧发电 4 个子过程。对这 4 个子过程进行分析时,主要从环境影响和能源消耗 2 个方面进行分析。其中,该系统在处理污泥过程中产生的电能折算为化石能源补充处理过程的能源消耗,市政污泥烟气干化系统的生命周期系统边界分析如图 2。

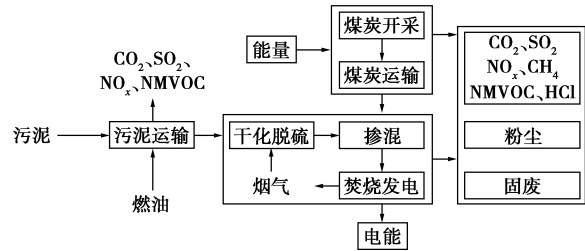


图 2 市政污泥烟气干化系统的生命周期系统边界分析

#### 1.2 系统物料计算

本文中处理将含水率 83.48%、干燥基热值为 5 MJ/kg 市政污泥<sup>[3]</sup>,通过烟气干化为 45% 的污泥,然后与热值为 22.16 MJ/kg 的无烟煤掺混燃烧发电,通过对循环流化床干燥器与循环硫化床锅炉计算<sup>[4]</sup>可以得出处理 1 t 湿污泥时,该系统各种物质的输入输出量如表 1。

表 1 系统处理 1 t 湿污泥的物料量

污泥处理量/t	燃料消耗量/kg	烟气体积/m <sup>3</sup>	污泥干化量/kg	煤炭消耗量/kg	脱硫剂消耗量/kg
1	2105.78	17113.81	300.36	1805.42	41.66

的处理工艺具有高效、出水稳定和耐冲击负荷的特点。结合试验结果和现有炼油污水厂实际运行情况,说明 MBBR 应用于现有炼油污水厂生化系统的改造是完全可行的,可以在不改变构筑物池容的条件下提升现有生化单元的处理能力和处理效果,确保出水水质达标。

(4) 砂滤工艺对 COD<sub>Cr</sub> 和 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 去除率均有所提高,COD<sub>Cr</sub> 平均去除率可提高 20% 左右。

#### 参考文献

[1] 赵江冰,胡龙兴.移动床生物膜反应器技术研究进展与现状[J].环境科学与技术,2004,27(2):103-106.  
[2] 柴社立.移动床生物膜反应器及其应用[J].上海环境科学,2004,23(6):257-261.  
[3] 宋敏,高富丽,杨云龙.移动床生物膜反应器及应用研究[J].科技情报开发与经济,2007,17(2):153-154.  
[4] 刘韬韬,刘元琴,姜凯.生化法在炼油厂污水处理中的应用[J].工业安全与环保,2007,33(12):10-13. ■

### 1.3 清单分析

假设污泥的产生地与该系统距离较近,运输半径为 10 km,采用 25 t 运输卡车,则运输 1 t 湿污泥消耗柴油 0.16 L<sup>[5]</sup> 排放 CO<sub>2</sub> 19.2 g, CO 0.01 g, NO<sub>x</sub> 0.09 g, SO<sub>2</sub> 0.04 g, 非甲烷挥发性有机化合物(NM VOC) 1.01 g<sup>[6]</sup>。根据《中国节能技术政策大纲(2005 年修订征求意见稿)》知全国吨石灰石生产综合能耗为 214 kg 标煤,煤炭开采综合能耗为 20.3 kg 标煤,由文献[7-8]知处理 1 t 湿污泥排放尾气为 SO<sub>2</sub> 635.06 g, 灰尘 2 948.6 g, CO<sub>2</sub> 308 861.69 g。煤炭开采运输过程所排放 CO<sub>2</sub> 139 558.74 g, CO 339.42 g, NO<sub>x</sub> 2 202.61 g, SO<sub>2</sub> 1 328.79 g, CH<sub>4</sub> 8 034.11 g, NM VOC 353.86 g, 烟尘 584.96 g<sup>[9]</sup>, 消耗柴油、汽油为 28.48 kg<sup>[7]</sup>, 标煤 36.65 kg。在焚烧发电以及烟气干化脱硫过程中假设脱硫效率达到 90%, 系统发电效率达到 30%, 厂用电占发电量的 5%, 则供电量为 3 206.08 kW/h, 设发电煤耗为 374 g/kWh<sup>[10]</sup> 折算标煤 1 199.08 kg, 消耗燃料油为 24.59 kg, 消耗原煤折算为标煤污染物排放为 CO<sub>2</sub> 4 007 773.69 g, CO 1 652.17 g, NO<sub>x</sub> 3 453.78 g, SO<sub>2</sub> 1 464.55 g, CH<sub>4</sub> 10 555.28 g, 灰尘 3 866.73 g。

在研究该系统的资源消耗与环境影响中,假设该系统焚烧掺混燃料所产生的电能折算为标煤,提供整个生命周期过程中能源、资源,故系统处理 1 t 湿污泥的生命周期排放清单如表 2。

表 2 处理 1 t 湿污泥的生命周期排放清单

项目	污泥运输	石灰生产	煤炭开采运输	掺混焚烧发电与干化	合计
CO <sub>2</sub> 排放量/g	19.20	308861.69	139558.74	4007773.69	4456213.32
CO 排放量/g	0.01	—	339.42	1652.172	1991.6
NO <sub>x</sub> 排放量/g	0.09	—	2202.61	3543.781	5746.48
SO <sub>2</sub> 排放量/g	0.04	635.06	1328.79	1464.55	3428.44
CH <sub>4</sub> 排放量/g	—	—	8034.11	10555.28	18589.39
NM VOC 排放量/g	1.01	—	353.86	—	354.87
烟尘排放量/g	0	2948.86	584.96	3866.73	7400.54
HCl 排放量/g	—	—	—	92.93	92.93
固体废弃物排放量/g	—	—	—	606522.3	606522.3
煤用量/kg 标煤	—	8.91	36.65	166.54 <sup>①</sup>	212.10
油用量/L	0.16	—	28.48	24.59	53.23

注:①产生电能与消耗原煤折算为标煤相加。

## 2 生命周期的影响评价

### 2.1 环境影响评价

环境影响评价包括定量和定性评价。按照国际

标准化组织的 ISO 14040 的框架<sup>[11]</sup>,影响评价包括分类、特征化和加权评估 3 个步骤。上述清单分析结果只表达了各种输入和输出的相对值大小,因各种排放因子对生态系统和环境变化的贡献不同,所以需要进行生命周期影响评价,将清单分析的结果转化为既容易理解,又能反映环境影响潜值的指标。

根据 1.3 节清单分析的结果,污泥烟气干化可能造成的资源耗竭和潜在环境影响,见表 3。

表 3 市政污泥烟气干化的生命周期影响类型

资源耗竭	能源耗竭	全球性
环境影响潜值	全球变暖(GW)	全球性
	光化学臭氧(PO)	地区性
	酸化(AC)	地区性
	富营养化(NE)	地区性
	烟尘和灰尘(SA)	局地性
	固体废弃物(SW)	局地性

### 2.2 资源耗竭系数

资源耗竭系数通过一次能源消耗来表征,在此将能源作为资源进行评价,由于表 2 中的消耗量只表达了资源的绝对消耗量,并没有反映其相对大小,因此笔者采用资源消耗基准<sup>[12]</sup>进行标准化得出煤、油等资源消耗潜值,见表 4。其单位为毫人当量,反映了市政污泥烟气干化系统所耗资源占人均资源消耗量的比重(以 1990 年为基准)。标准化后的资源消耗仅仅反映各种资源消耗的相对大小,并没有反映该资源的稀缺性。经标准化与加权分析之后的资源消耗各值如表 4 所示。

表 4 标准化后 1 t 湿污泥的资源消耗

资源	标准化后的资源消耗/ mPE <sub>w90</sub>	加权后的资源消耗/ 可供应期 <sup>[12]</sup> /a	加权后的资源消耗/ mPR <sub>90</sub>
油	89.92	43	2.091
煤	369.51	170	2.174

标准化后煤炭的消耗依然是主要部分,占 80.43%,油的消耗为 19.57%,考虑了资源的稀缺性,标准化加权后,煤的消耗比重降为 50.97%,而油则升为 49.03%。我国能源结构中煤的消耗占据主要地位,经过该系统处理污泥并对其进行资源化利用后,有效地遏制了煤炭资源的消耗,经过加权分析后,使得煤炭与油的消耗趋于均衡。该系统处理 1 t 湿污泥的资源消耗系数为  $4.265 \times 10^{-3}$  人当量。该系统每处理 1 t 湿污泥的资源消耗系数见图 3。

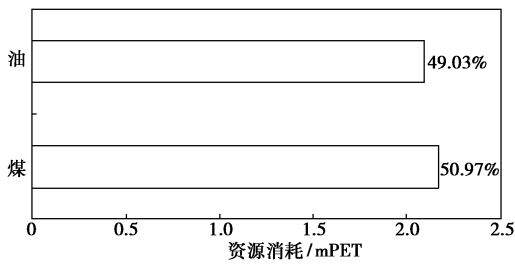


图3 加权后1t湿污泥的资源消耗

### 2.3 环境影响负荷评价

#### 2.3.1 环境影响潜值计算

为了方便直观地表示出各种环境影响类型的影响潜值,全球变暖以 CO<sub>2</sub> 为参考物,同理酸化,富营养化,光化学臭氧分别以 SO<sub>2</sub>, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, C<sub>2</sub>H<sub>4</sub> 为参考物。其中各种排放物的效应当量因子如表 5 所示。

表 5 各种排放物的效应当量因子<sup>[13]</sup>

环境影响类型	全球变暖/ g·g <sup>-1</sup>	酸化/ g·g <sup>-1</sup>	富营养化/ g·g <sup>-1</sup>	光化学臭氧/ g·g <sup>-1</sup>	烟尘/ g·g <sup>-1</sup>	固废/ g·g <sup>-1</sup>
CO <sub>2</sub>	1(CO <sub>2</sub> eq)					
SO <sub>2</sub>		1(SO <sub>2</sub> eq)				
NO <sub>x</sub>	320(CO <sub>2</sub> eq)	0.7(SO <sub>2</sub> eq)	1.35(NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> eq)			
CO	2(CO <sub>2</sub> eq)			0.03(C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> eq)		
CH <sub>4</sub>	25(CO <sub>2</sub> eq)			0.007(C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> eq)		
HCl		0.88(SO <sub>2</sub> eq)				
VOC				0.6(C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> eq)		
灰尘					1	
固体废物						1

因此由表 2 与表 5 可以计算出各种物质在各个过程中的环境影响潜值,如表 6 所示。

表 6 各种排放物的环境影响潜值

环境影响类型	污泥 运输	石灰 生产	煤炭开 采运输	掺混发电 与干化	合计
全球变暖/ gCO <sub>2</sub> eq	46.86	308861.69	1045925.04	5408970.44	6763804
酸化/gSO <sub>2</sub> eq	0.10	635.06	2870.61	4026.981	7532.75
富营养化/ gNO <sub>3</sub> <sup>-</sup> eq	0.12	—	2973.52	4784.11	7757.74
光化学臭氧/ gC <sub>2</sub> H <sub>4</sub> eq	0.61	—	278.74	123.45	402.80
烟尘和灰尘/g	—	2948.86	584.96	3866.72	7400.54
固体废物/g	—	—	—	606522.3	606522.3

#### 2.3.2 环境影响潜值的标准化

对以上所计算的各类环境影响潜值(全球、地区和局地)采用其相应的标准化基准进行标准化,比较其相对大小。因标准化是以 1990 年为基准,因此利用权重因子加权将标准化值转换为 2000 年为基准。各种环境影响类型的标准化值和权重因子见表 7。

表 7 各种环境影响类型的标准化值和权重因子

环境影响类型	标准化基准 <sup>[12]</sup> /kg·(人·a) <sup>-1</sup>	权重因子 <sup>[12]</sup>
全球变暖(GW)	8700 CO <sub>2</sub> eq	0.83
光化学臭氧(PO)	36 SO <sub>2</sub> eq	0.73
酸化(AC)	62 NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> eq	0.73
富营养化(NE)	0.65 C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> eq	0.51
烟尘和灰尘(SA)	18	0.61
固体废物(SW)	251	0.62

故各种环境影响潜值标准化并加权的值如表 8 所示。

表 8 1t 湿污泥环境影响潜值标准化并加权(mPET<sub>2000</sub>)

环境影响类型	污泥 运输	石灰 生产	煤炭开 采运输	掺混发 电干化	合计
全球变暖(GW)	0.005	29.466	99.7834	516.028	645.283
光化学臭氧(PO)	0.002	12.878	58.210	81.658	152.748
酸化(AC)	0.001	—	35.011	56.329	91.341
富营养化(NE)	0.477	—	218.702	96.862	316.042
烟尘和灰尘(SA)	—	99.934	19.823	131.039	250.796
固体废物(SW)	—	—	—	1498.183	1498.183
合计	0.485	142.277	431.530	2380.100	2954.392

#### 2.3.3 加权评估及环境影响负荷

对上述标准化后的影响潜值进行加权,并计算其总环境影响负荷每处理 1t 湿污泥为 2954.392 毫人当量。系统各个过程中的相对贡献如图 4 所示。结果表明污泥掺混发电与干化过程对环境影响的贡献最大,占 80.56%,其次是煤炭开采与运输过程,占 14.60%,污泥运输过程贡献最小。各种环境影响类型的相对贡献见图 5。结果表明,市政污泥烟气干化在整个生命周期中对环境的主要影响为固体废物(50.71%),其次是全球变暖(21.84%),而富营养化(3.09%)最小。即说明,市政污泥的烟气干化中,局地性影响占据首位,其次是全球性影响,而地区性影响则最小。

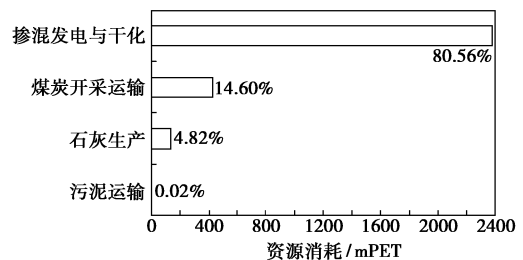


图 4 市政污泥烟气干化生命周期中各过程对环境影响的贡献

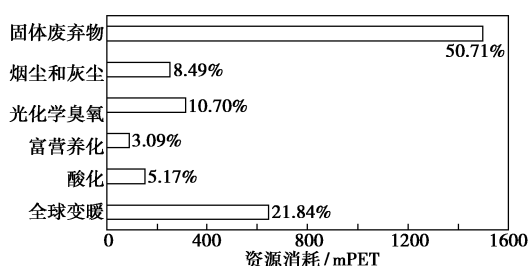


图 5 市政污泥的烟气干化生命周期环境影响类型的加权分析

### 3 技术经济分析

为了清晰表示出该系统的经济效益对该系统采用技术经济学<sup>[14]</sup>的观点进行分析。该系统根据 130 t 循环流化床锅炉每天可以处理污泥 240 t, 需要煤炭 434 t, 可供电 81.06 万 kWh, 假设处理每吨污泥政府补贴 150 元, 由于掺混焚烧发电, 上网电价为 0.55 元/kWh, 煤价为 850 元/t, 营业税率及附加税率为 3%, 银行利率(折现率)为 8%, 系统建设期为 1 年投资 5 000 万元, 工资福利为每年 200 万元, 设备维护为 100 万元/a, 燃料油等其他费用为 500 万元/a 则每年可盈利 2 654 万元, 假设该系统运行 20 年, 设备残值为 5%, 则该系统的静态投资回收期为 2.89 年(包括建设期), 总收益为 48 329 万元。

考虑到现金的时间价值, 该系统的累计净现值(NPV)如图 6 所示, 其动态回收期为 3.13 年(包括建设期), 总净现值为 21 112 万元, 内部收益率为 53.07%, 远大于折现率 8%, 因此该系统建设收益很好, 且抗风险性很好。

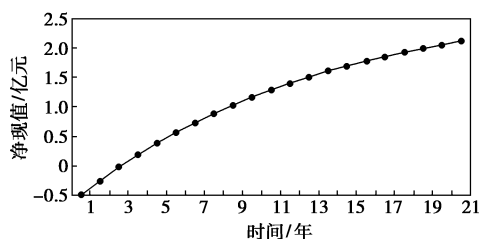


图 6 系统累计净现值量

### 4 结论

(1) 由于系统污泥掺混焚烧发电提供能量有效地减少了系统能耗, 折算后加权资源消耗煤占 50.03%, 油为 49.97%, 使得煤和油资源消耗趋于平衡;

(2) 市政污泥的烟气干化系统有效地利用了烟

气废热并脱硫, 有效的精简了设备结构, 使得污泥在资源化利用系统中污泥与煤产少提供电能 3 206.08 kWh, 为社会节能降耗做出积极贡献;

(3) 焚烧发电与干化过程对整个生命周期环境影响的贡献最大, 为 80.56%, 其次为煤炭开采运输占 14.60%, 污泥运输为 0.02% 影响最小; 各种环境类型的影响中固体废弃物对环境贡献最大为 50.71%, 其次为全球变暖 21.84%;

(4) 从技术经济学的角度分析, 该系统动态回收期为 3.13 年, 总净现值为 21 112 万元, 内部收益率高达 53.07%, 因此该系统投资对风险的抵抗性很高;

(5) 市政污泥烟气干化的局地性影响远远大于全球性影响, 而地区性影响最小, 故该系统对环境的负作用较小, 因此该系统对环境影响很小且投资效益很高, 值得大力推广。

### 参考文献

- [1] 余杰, 田宁宁, 王凯军. 我国污泥处理、处置技术政策探讨[J]. 中国给水排水, 2005, 21(8): 84-87.
- [2] Hara K, Mino T. Environmental assessment of sewage sludge recycling options and treatment processes in Tokyo[J]. Waste Management, 2008, 28(12): 2645-2652.
- [3] 刘渊源. 城市污水污泥在流化床中的焚烧特性及重金属排放特性研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2004.
- [4] 宋良贵. 锅炉计算手册[M]. 沈阳: 辽宁科学技术出版社, 1995.
- [5] Juergen Kuesters, Joachim Lammel. Investigations of the energy efficiency of the production of winter wheat and sugar beet in Europe[J]. European Journal of Agronomy, 1999, 11: 35-43.
- [6] Edgar Furuholt. Life cycle assessment of gasoline and diesel[J]. Resources, Conservation and Recycling, 1995, 14: 251-263.
- [7] 晓斌, 张阿玲, 陈贵锋. 中国洁净煤发电的生命周期清单分析[J]. 洁净煤技术, 2005(2): 1-4.
- [8] 蓝飞虎, 新疆石灰行业全力推进结构调整[EB/OL][2008-10-10]. <http://www.enpowdernet.com/detail/3705555.html> 2008-09-05.
- [9] Matsuno Y, Betz M. Development of life cycle inventories for electricity grid mixes in Japan[J]. The International Journal of Life Cycle Assessment, 2002, 5(5): 295-305.
- [10] 芦刚. 降低发电厂供电煤耗的分析及对策[J]. 科技信息, 2007(35): 624-625.
- [11] International Organization for Standardization. ISO 14040—1997 environment management: Life cycle assessment: Principles and framework [S]. Geneva: International Organization for Standardization, 1997.
- [12] 杨建新, 徐成, 王如松. 产品生命周期评价方法及应用[M]. 北京: 气象出版社, 2002.
- [13] Feng Chao, Ma Xiaoqian. The energy consumption and environmental impacts of a color TV set in China[J]. Journal of Cleaner Production, 2009, 17(1): 13-25.
- [14] 刘秋华. 技术经济学[M]. 北京: 机械工业出版社, 2005. ■