

谢明辉, 阮久莉, 乔琦, 等. 基于生命周期评价的多晶硅片环境影响研究[J]. 环境工程技术学报, 2016, 6(1): 72-77.

XIE M H, RUAN J L, QIAO Q, et al. Research on environmental impacts of multi-silicon wafer based on life cycle assessment[J]. Journal of Environmental Engineering Technology, 2016, 6(1): 72-77.

基于生命周期评价的多晶硅片环境影响研究

谢明辉¹, 阮久莉¹, 乔琦^{1*}, 李海玲², 王文静², 吕芳³, 张嘉³

1. 中国环境科学研究院国家环境保护生态工业重点实验室, 北京 100012

2. 中国科学院电工研究所, 北京 100190

3. 中国可再生能源学会光伏专业委员会, 北京 100190

摘要 选用我国终点破坏类影响评价模型(Chinese endpoint damage model, CEDM), 采用生命周期评价(LCA)法研究了我国多晶硅片生命周期环境影响。通过座谈和问卷调查的方式, 获得多晶硅片生命周期能量物质的输入/输出和环境外排数据。结果表明: 从环境影响的最终破坏受体来看, 我国多晶硅片生命周期环境影响主要集中在对人体健康的损害方面, 占 70.21%; 其次是对资源衰竭方面的影响, 占 26.22%; 而对生态系统的损害最小, 仅占 3.57%。从各环境要素来看, 由多晶硅原料带来的环境影响是所有环境要素中最高的, 占 70.83%; 其次是电耗和砂浆液, 分别占 19.44% 和 7.62%; 生产过程污染物排放对环境的影响仅占 0.07%。降低多晶硅片环境影响应首先考虑减少原料消耗; 其次考虑节能和废砂浆循环利用。我国多晶硅片环境影响略高于欧洲平均水平, 主要是由原料端(高纯多晶硅)差异导致。

关键词 多晶硅片; 生命周期评价(LCA); 环境影响; 太阳能级多晶硅

中图分类号: X820.3 文章编号: 1674-991X(2016)01-0072-06 doi: 10.3969/j.issn.1674-991X.2016.01.011

Research on Environmental Impacts of Multi-silicon Wafer Based on Life Cycle Assessment

XIE Minghui¹, RUAN Jiuli¹, QIAO Qi¹, LI Hailing², WANG Wenjing², LÜ Fang³, ZHANG Jia³

1. State Environmental Protection Key Laboratory of Eco-industry, Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China

2. Institute of Electrical Engineering, Chinese Academy of Science, Beijing 100190, China

3. Solar PV Committee, China Renewable Energy Society, Beijing 100190, China

Abstract The life cycle assessment (LCA) approach was used to examine the environmental impacts in the life cycle of multi-silicon wafer, based on Chinese Endpoint Damage Model (CEDM). The data for the mass, energy fluxes and environmental emissions were obtained from site investigations and questionnaires. It showed that from the end-point of environmental impacts, the damage to human health presented the largest contribution to life cycle environmental impacts of multi-silicon wafer, which accounted for 70.21% of the total environmental impacts. However, the damage to depletion of resources and ecosystem quality was 26.22% and 3.51%, respectively. From the point of environmental factors, solar-grade poly-silicon consumption was the highest of all, accounting for 70.83%, followed by electric power consumption, silicon carbide and polyethylene glycol consumption, accounted for 19.44% and 7.62%, respectively. The environmental impacts of emission from cut process only accounted for 0.07% of whole life cycle environmental impacts. The first measure to reduce environmental impacts should be

收稿日期: 2015-05-21

基金项目: 环境保护公益性行业科研专项(201209056)

作者简介: 谢明辉(1981—), 男, 博士, 主要从事生命周期评价和清洁生产技术政策研究, xiemh@craes.org.cn

* 责任作者: 乔琦(1963—), 女, 研究员, 长期从事清洁生产技术政策研究, qiaoqi@craes.org.cn

decrease in raw material consumption, and secondly reduction in energy saving and waste recycling. Compared with the average level in Europe, the environmental impacts in China were slightly higher, which was caused by raw material (solar-grade poly-silicon).

Key words multi-silicon wafer; life cycle assessment (LCA); environmental impact; solar-grade poly-silicon

太阳能电池行业近年来发展迅速,2013 年我国太阳能电池装机容量达到 12.1 GW,增长迅速,直接带动了整个产业链中多晶硅、硅片等行业的发展。以硅片为例,2013 年我国硅片产量为 29.5 GW,占全球市场的 75%^[1]。相对于太阳能级多晶硅生产,硅片生产污染较少、能耗较低,但在切割过程会产生大量含有硅粉的废切割液,如不能有效回收废液,不仅会污染环境,还会造成资源浪费;同时,切割过程还耗费大量的切割线(不锈钢,全文同)、玻璃,会产生大量的固体废物。由于社会多关注产业链上游多晶硅提纯过程的环境问题而忽视了硅片生产的环境问题,因此,亟需识别在硅片生产过程中产生的环境问题及其环境影响,以便科学指导相关环境管理政策的制定。

随着太阳能电池行业的发展,其所带来的环境问题开始逐渐受到重视。早期的研究主要集中在太阳能电池的能量回收期(energy payback time)上^[2-3],国外学者还针对其在生产过程的温室气体排放进行研究^[4-6];近几年,国内外学者开始从生命周期评价(life cycle assessment, LCA)的角度研究太阳能电池对环境的影响^[7-9],但国内目前的多数研究都是针对整个光伏系统全产业链的^[10-12],以及针对高纯多晶硅生产过程的^[13],鲜有单独针对硅片生产过程环境影响的研究。因此,笔者以硅片生产过程为研究对象,采用部分本地化修正的终点破坏类影响评价模型(Chinese endpoint damage model, CEDM)^[13],对硅片生产过程的环境影响进行定量评价,以期宏观决策及相关法规的制定提供参考。

1 研究内容

针对硅片生产过程,基于 ISO 14040 ~ 14043 中生命周期评价理论^[14]设计研究方法为:1)确定 LCA 的目标范围和系统边界;2)进行清单分析,确定各流程输入(原料、辅料和能源等)和输出(向空气、水、土壤中的排放及固体废物)数据;3)进行影响评价,对清单数据进行定量评价;4)结果解释,对评价结果进行解释说明。

采用座谈和问卷调查的方法收集硅片切割过程

的资源能源消耗和环境外排数据,基于我国终点破坏类影响评价模型,选择与硅片生产过程相关的 7 个环境影响类别,即致癌、呼吸系统影响、气候变化、生态毒性、酸化/富营养化、矿产资源、化石燃料等建立评价模型。该模型中的资源属性本地化基准值核算基于“品位-能源”模型^[15],根据 2004—2010 年中国有色金属工业年鉴中主要有色金属开采量、原矿品位以及化石燃料开采量数据,以 2010 年为基准年核算了我国(作为基准区域)的资源(矿产资源、化石燃料)标准化基准值^[16-17],影响评价模型各参数见表 1。

表 1 影响评价模型参数

Table 1 Characterization, normalization and weight of life cycle impact assessment

| 破坏受体 | 影响类别 | 基准值 | 权重 |
|------|------------------|-----------------------|-------|
| 人类健康 | 致癌/(DALY/kg) | 1.51×10^{-2} | 60% * |
| | 呼吸系统影响/(DALY/kg) | 1.51×10^{-2} | |
| | 气候变化/(DALY/kg) | 1.51×10^{-2} | |
| 生态系统 | 生态毒性/(PDF/kg) | 1.19×10^3 | 25% * |
| | 酸化/富营养化/(PDF/kg) | 1.19×10^3 | |
| 资源 | 矿产资源/(MJ/kg) | 4.33×10^5 * | 15% * |
| | 化石燃料/(MJ/MJ) | 4.33×10^5 * | |

注:标*数据来自环境保护公益性行业科研专项“我国新能源产业(太阳能电池)环境影响和管理研究”课题成果;DALY 为伤残调整寿命年(disability adjusted of life years);PDF 为潜在消失比例(potentially disappeared fraction)。

在 SimaPro^[18] 软件中进行了 CEDM 的构建,得出相应的环境影响潜值,并进行了生命周期影响评价和结果的解释。

2 研究方法

2.1 功能单位和系统边界界定

2.1.1 功能单位

硅片生产过程生命周期评价的功能单位为 1 万片多晶硅片,表面积为 243.36 m^2 /万片,质量为 102.05 kg /万片(每片尺寸为 $156 \text{ mm} \times 156 \text{ mm}$,厚度为 0.18 mm)。

2.1.2 系统边界

包括清洗、铸造、破方、黏接、线锯切割、破方、脱

胶、清洗等步骤,系统边界如图 1 所示。

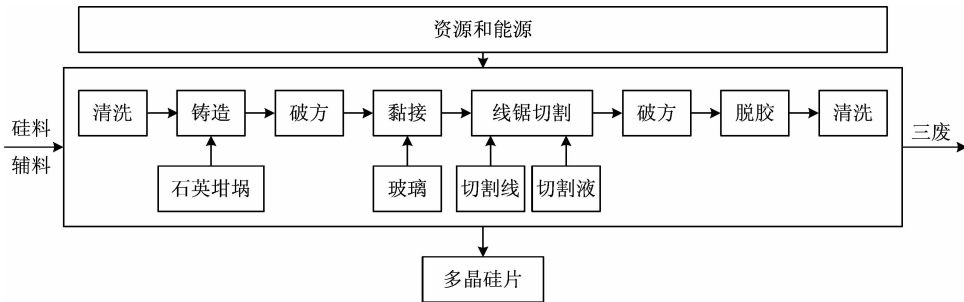


图 1 多晶硅片生命周期评价的系统边界

Fig. 1 The system boundaries of multi-silicon wafer

2.2 清单分析

硅片生产过程的数据清单主要通过企业座谈和问卷调查,由于硅片生产过程的相似度极高,技术工艺无较大差异,因此,选择 4 家不同生产规模的企业进行调研。调研企业从规模到技术实力均代表了我国硅片生产的先进技术水平,所调研企业硅片年产量占我国当年硅片总产量的 20%,通过规模加权平均得到资源能源消耗清单和三废排放清单。单位资源能源消耗量的数据清单以国内数据查找为主(如高纯多晶硅^[13]、电耗^[19-21]等),部分国内没有的数据清单通过 Ecoinvent 数据库^[22]获取。各类单位消耗量数据清单及来源见表 2。

表 2 多晶硅片数据清单及来源

Table 2 Source of life cycle inventory of multi-silicon wafer

| 资源(能源)消耗类型 | 单位消耗量 |
|---|---------------|
| 高纯多晶硅/kg ^[13] | 201.9 ~ 209.1 |
| 电耗/(kW · h) ^[19-21] | 6 574 ~ 7 359 |
| 陶瓷坩埚/kg ^[22] | 40.1 ~ 46.3 |
| 氟气/kg ^[22] | 69.1 ~ 87.6 |
| 切割线/kg ^[22] | 77.1 ~ 125.5 |
| 砂浆(碳化硅)/kg ^[22] | 60.1 ~ 89.2 |
| 砂浆液(聚乙二醇)/kg ^[22] | 245.4 ~ 259.7 |
| 黏合剂(丙烯酸)/kg ^[22] | 0.4 ~ 0.5 |
| 清洗剂(二丙二醇单甲醚, DPM)/kg ^[22] | 6.1 ~ 6.7 |
| NaOH(固体)/kg ^[22] | 0.48 ~ 0.52 |
| HCl(35%)/kg ^[22] | 1.17 ~ 1.31 |
| HF(50%)/kg ^[22] | 2.1 ~ 2.9 |
| HNO ₃ (65%)/kg ^[22] | 7.5 ~ 7.9 |
| 乙酸/kg ^[22] | 5.1 ~ 5.5 |
| 玻璃/kg ^[22] | 11.3 ~ 11.5 |

将消耗量与单位消耗量数据清单相乘,再加上硅片生产过程实测的污染物排放数据,即可得出硅片生产过程的数据清单(表 3)。

表 3 多晶硅片生产生命周期污染物排放数据清单

Table 3 Life cycle inventory of multi-silicon wafer

| kg/万片 | | | |
|-------------------|------------------------|------------------|------|
| 气体污染物 | 排放量 | 水体污染物 | 排放量 |
| CO ₂ | 3.22 × 10 ⁴ | 氯化物 | 257 |
| SO ₂ | 226 | Si | 239 |
| CH ₄ | 193 | Ca ²⁺ | 93.6 |
| NO _x | 107 | Na ⁺ | 83.1 |
| TSP | 30.3 | Mg | 52.1 |
| PM _{2.5} | 18.1 | Al | 48.6 |
| CO | 22.6 | K ⁺ | 39.7 |
| HCl | 7 | COD | 29.8 |
| NM VOC | 3.42 | BOD ₅ | 15.5 |
| Si | 2.12 | TOC | 5.57 |
| HF | 0.77 | DOC | 5.54 |

2.3 影响评价

用生命周期软件 SimoPro 7.1 对多晶硅片进行环境影响评价,结果如图 2 和图 3 所示。

从图 2 和图 3 可以看出,生产多晶硅片带来的环境影响潜值为 2 472 Pt/万片,其环境影响主要集中在无机物对呼吸系统、化石燃料、致癌和气候变化 4 个方面,环境影响潜值分别为 1 224、635、261 和 256 Pt/万片,分别占全生命周期环境影响的 49.52%、25.69%、10.55% 和 10.35%。从环境影响要素来看,由于太阳能级多晶硅作为原料进入了系统边界,而生产太阳能级多晶硅的单位能耗较高,因此其作为原料带入的环境影响也是最高的(1 751 Pt/万片),占全生命周期环境影响的 70.83%;其次是生产过程的电耗和砂浆液带来的环境影响,分别

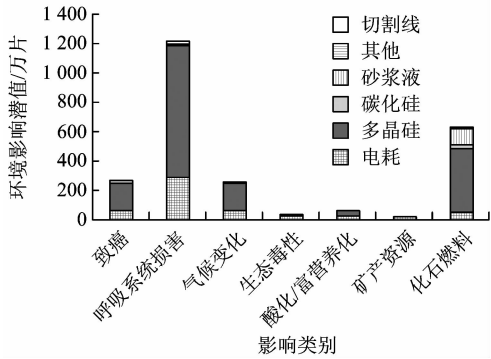


图 2 多晶硅片环境影响类别评价

Fig. 2 Environmental impact categories of multi-silicon wafer

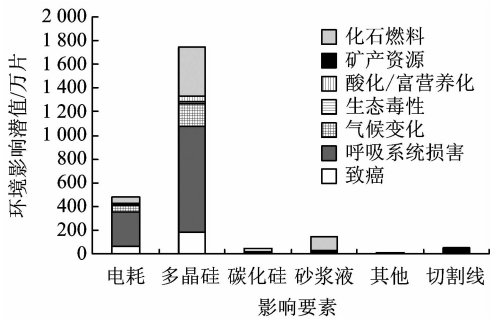


图 3 多晶硅片环境影响要素评价

Fig. 3 Environmental impact factors of multi-silicon wafer

占 19.44% 和 7.62% ;生产过程中排放污染物对环境的影响仅占 0.07%。

将各环境影响类别加和到对应最终破坏受体,计算出的多晶硅片生产过程对人体健康的损害、生态系统的破坏和资源的衰竭产生的影响依次为 1 741.86 和 645 Pt/万片,分别占全生命周期环境影响的 70.21%、3.57% 和 26.22% (图 4)。可以看出多晶硅片对环境的影响主要集中在对人体健康的损害方面。

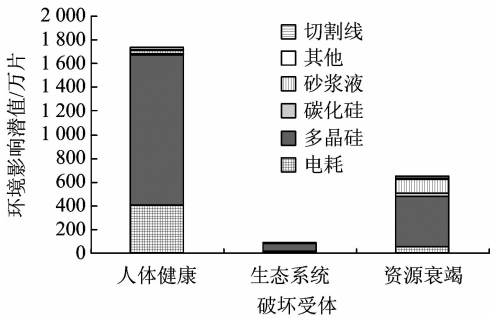


图 4 多晶硅片环境影响终点评价

Fig. 4 The endpoint environmental impacts of multi-silicon wafer

2.4 敏感性分析

根据 2.3 节结果选择多晶硅用量、废砂浆液回用率、电耗 3 个因子进行敏感性分析,分别浮动 $\pm 10\%$,分析其对整个环境影响的敏感程度。根据调研结果,废砂浆液回用率普遍在 70% 左右,因此浮动 $\pm 10\%$,其回收率分别为 63% 和 77%。敏感性分析结果如表 4 所示。

表 4 多晶硅片敏感性分析结果

Table 4 Sensitivity analysis of multi-silicon wafer %

| 因子 | 自身浮动 | 对结果的影响 |
|---------|----------|------------|
| 多晶硅 | ± 10 | ± 7.08 |
| 废砂浆液回用率 | ± 10 | ± 1.75 |
| 电耗 | ± 10 | ± 1.94 |

根据敏感性分析结果显示,多晶硅用量对于多晶硅片生命周期环境影响最为敏感,其次是电耗和废砂浆液回用率。因此对于多晶硅片环境管理而言,降低其环境影响应首先从源头减量及工艺革新开始,其次考虑节能和废物的循环利用。

2.5 中欧数据比较

将已公布的欧洲太阳能级多晶硅生产的生命周期数据清单^[23]输入 SimaPro 软件进行计算,并与国内的计算结果进行比较,结果如图 5 和图 6 所示。

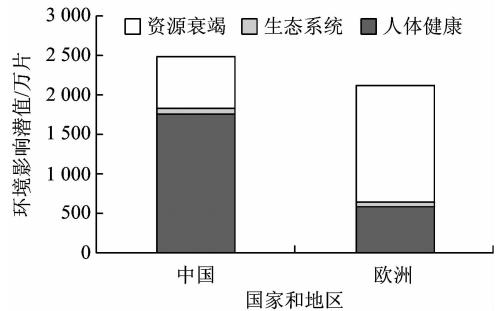


图 5 中欧多晶硅片环境影响终点比较

Fig. 5 The endpoint environmental impacts comparison of multi-silicon wafer between China and Europe

从图 5 可以看出,欧洲多晶硅片环境影响(2 124 Pt/万片)略低于我国水平(2 472 Pt/万片)。从环境影响最终破坏受体来看,欧洲多晶硅片环境影响主要集中在资源衰竭方面(1 490 Pt/万片,占 70.15%),而我国主要集中在人体健康方面(1 751 Pt/万片,占 70.83%)。

从图 6 可以看出,欧洲多晶硅片环境影响主要集中在化石燃料方面,这主要是由于太阳能级多晶

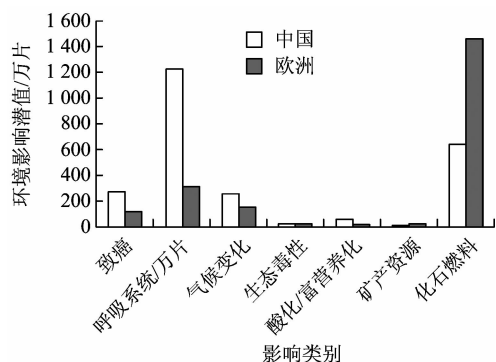


图 6 中欧多晶硅片环境影响类别比较

Fig. 6 Environmental impact categories comparison of multi-silicon wafer between China and Europe

硅作为原料其生产环节电耗较大所致。但由于欧洲的电力能源结构主要以天然气等清洁能源为主,因此虽然对化石燃料方面的环境影响较大,但发电过程产生的空气颗粒物对人体健康影响很小(311 Pt/万片,占 14.64%)。而我国电力结构是以燃煤为主,其对环境影响不仅表现在化石燃料方面(639 Pt/万片,占 25.85%),还表现在对人体呼吸系统损害的影响较大(1 224 Pt/万片,占 49.52%)。

从环境要素来看,欧洲和我国多晶硅片生产中都是多晶硅原料的环境影响占比最大,分别是 66.38% 和 70.83%,即欧洲的多晶硅原料带来的环境影响比我国的原料环境影响低 341 Pt/万片,基本上与中欧地区多晶硅片生产的全生命周期环境影响之差(348 Pt/万片)相同。

3 结论

(1)从环境影响的最终破坏受体来看,我国多晶硅片生命周期环境影响主要集中在对人体健康的损害方面,占整个影响的 70.21%,其中又以无机物对呼吸系统损害方面影响最大,占整个影响的 49.52%;其次是致癌和气候变化,分别为 10.55% 和 10.35%。资源衰竭方面的影响位列第二,占整个影响的 26.22%,其主要集中在化石燃料方面(25.69%)。对生态系统的损害最小,仅占整个影响的 3.57%。

(2)从各环境要素来看,由多晶硅原料带来的环境影响是所有环境要素中最高的,占 70.83%;其次是生产过程的电耗和砂浆液带来的环境影响,分别占 19.44% 和 7.62%;硅片切割过程中排放污染物对环境的影响占 0.07%。

(3)从敏感性分析结果来看,降低多晶硅片环境影响应首先考虑源头减量或工艺革新,减少高纯多晶硅原料消耗;其次考虑节能和废砂浆的循环利用。

(4)从我国多晶硅片生产水平和欧洲生产水平比较来看,我国多晶硅片环境影响略高于欧洲平均水平,主要是由于原料端差异导致的。

参考文献

- [1] 国际半导体设备与材料协会. 2013 中国光伏产业发展报告 [R]. 北京:国际半导体设备与材料协会,2013.
- [2] 胡润青. 我国多晶硅并网光伏系统能量回收期的研究[J]. 太阳能,2009(1):9-14.
- [3] 胡润青. 太阳能光伏系统的能量回收期有多长[J]. 太阳能,2008(3):6-10.
- [4] FTENAKIS V, ALSEMA E. Photovoltaics energy payback times, greenhouse gas emissions and external costs:2004-early 2005 status [J]. Progress in Photovoltaics: Research and Applications,2006,14(3):275-280.
- [5] ALSEMA E A. Energy pay-back time and CO₂ emissions of PV systems [J]. Progress in Photovoltaics: Research and Applications,2000,8(1):17-25.
- [6] FTENAKIS V. Update of PV energy payback times and life-cycle greenhouse gas emissions [C]//The 24th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition. Hamburg: WIP-Renewable Energies, 2009.
- [7] MEIJER A. Life-cycle assessment of photovoltaic modules: comparison of mc-Si, InGaP and InGaP/mc-si solar modules[J]. Progress in Photovoltaics: Research and Applications,2003,11(4):275-287.
- [8] FTENAKIS V M, KIM H C, ALSEMA E. Emissions from photovoltaic life cycles [J]. Environmental Science & Technology,2008,42(6):2168-2174.
- [9] JUNGBLUTH N, BAUER C, DONES R, et al. Life cycle assessment for emerging technologies: case studies for photovoltaic and wind power [J]. The International Journal of Life Cycle Assessment,2004,10:1-11.
- [10] 傅银银. 中国多晶硅光伏系统生命周期评价[D]. 南京:南京大学,2013.
- [11] 刁周玮,石磊. 中国光伏电池组件的生命周期评价[J]. 环境科学研究,2011,24(5):271-279.
DIAO Z W, SHI L. Life cycle assessment of photovoltaic panels in China[J]. Research of Environmental Sciences,2011,24(5):271-279.
- [12] 何洋. 太阳能级多晶硅的生命周期评价[D]. 成都:西南交通大学,2013.
- [13] 谢明辉,阮久莉,白璐,等. 太阳能级多晶硅生命周期环境影响评价[J]. 环境科学研究,2015,28(2):291-296.
XIE M H, RUAN J L, BAI L, et al. Environmental impacts of

- solar-grade polysilicon based on life cycle assessment [J]. Environmental Science Research, 2015, 28(2):291-296.
- [14] REBITZER G, KEKVALL T, FRISCHKNECH R, et al. Life cycle assessment; part 1. framework, goal and scope definition, inventory analysis, and applications [J]. Environmental International, 2004, 30(5):701-720.
- [15] MÜLLER-WENK R. Depletion of abiotic resources weighted on the base of 'Virtual' impact of lower grade deposits in future [R]. St. Gallen; IWÖDiskussionsbeitrag; Universität, 1998.
- [16] 阮久莉, 谢明辉, 乔琦, 等. 资源耗竭性评价的两种方法比较 [C]//中国环境科学学会 2013 年学术年会论文集. 昆明: 中国环境科学学会, 2013.
- [17] RUAN J L, XIE M H, QIAO Q, et al. The localization application of the characterization and normalization method of resources depletion in China [J]. Energy Education Science and Technology Part A: Energy Science and Research, 2012, 30 (Suppl 1):1007-1012.
- [18] GOEDKOOP M, SCHRYVER A D, OELE M. Introduction to LCA with SimaPro 7 [R]. Amersfoort: Pre Consultants, 2007.
- [19] 狄向华, 聂祚仁, 左铁镛. 中国火力发电燃料消耗的生命周期排放清单 [J]. 中国环境科学, 2005, 25(5):632-635.
- DI X H, NIE Z R, ZUO T Y. Life cycle emission inventories for the fuels consumed by thermal power in China [J]. China Environmental Science, 2005, 25(5):632-635.
- [20] 侯萍. 中国电网电力的生命周期评价研究 [D]. 成都: 四川大学, 2012.
- [21] 刘夏璐, 王洪涛, 陈建, 等. 中国生命周期参考数据库的建立方法与基础模型 [J]. 环境科学学报, 2010, 30(10):2136-2144.
- LIU X L, WANG H T, CHEN J, et al. Method and basic model for development of chinese reference life cycle database of fundamental industries [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2010, 30(10):2136-2144.
- [22] Swiss Centre for Life Cycle Inventories. Ecoinvent database [DS/OL]. (2012-07-25) [2015-04-20]. Swiss: Swiss Centre for Life Cycle Inventories, 2010. <http://www.Ecoinvent.ch>.
- [23] JUNGBLUTH N. Life cycle assessment of crystalline photovoltaics in the Swiss Ecoinvent database [J]. Progress in Photovoltaics: Research and Applications, 2005, 13(8):429-446. ○

《环境工程技术学报》入选“中国科技核心期刊”

2015年10月20日,中国科学技术信息研究所在北京国际会议中心召开“中国科技论文统计结果发布会”,发布了《2015年版科技期刊引证报告》。由环境保护部主管、中国环境科学研究院主办的《环境工程技术学报》被收录为“中国科技核心期刊”(中国科技论文统计源期刊),证书编号为Z550-2015。

创刊5年来,依靠主管单位的行业主管优势,依托主办单位的科研优势,以及新常态下国家注重环境保护的新机遇,《环境工程技术学报》集中报道了国家科技重大水专项、国家大气环境治理专项,国家实施的大气、水、土壤污染防治的三个行动计划成果,最前沿环境工程技术方法、技术规范与标准,为国家环境治理技术体系的构建提供了学术创新和技术支撑交流平台,为引导行业先进技术发展,推动环保行业技术进步做出了重要贡献。

《环境工程技术学报》编辑部