

文章编号:2096-3424(2020)02-0176-05

DOI:10.3969/j.issn.2096-3424.2020.02.011

基于产品全生命周期评价的环境影响分析

王伟晗, 崔伟强, 王清成

(上海应用技术大学 城市建设与安全工程学院, 上海 201418)

摘要: 产品全生命周期评价方法可有效的对产品系统造成的环境影响进行分析,对我国工业生产链有准确的指导性价值。分析工业产品 LCA 的发展历程, LCA 理论应用的最新研究,发掘我国工业产品的环境影响评价的不足之处。针对当前我国 LCA 出现的问题,提出应加强生命周期软件的研发,加大对产品环境影响评价模型的研究以及保证产品数据的真实性和敏感性,进一步规范企业进行绿色转型,使工业产品能够更好的服务社会,为中国工业可持续发展提供有力支撑。

关键词: 生命周期评价; 产品系统; 环境影响; 绿色工业

中图分类号: X 324

文献标志码: A

Environmental Impact Analysis Based on Product Life Cycle Assessment

WANG Weihan, CUI Weiqiang, WANG Qingcheng

(School of Urban Construction and Safety Engineering, Shanghai Institute of Technology, Shanghai 201418, China)

Abstract: As an effective tool for analyzing the environmental impact of the product system, the product life cycle assessment method is of accurate guiding value for Chinese industrial production chain. The development process of life cycle assessment (LCA) and the latest research on the application of LCA theory were analyzed, and the weakness of environmental impact assessment of industrial products in China was investigated. In view of the current problems in LCA in China, it is proposed that the development of life cycle software be strengthened, the research on product environmental impact assessment models be strengthened, and the authenticity and sensitivity of product data be guaranteed to further standardize the green transformation of enterprises and make sure that the industrial products can better serve the society and provide strong support for the sustainable development of China's industry.

Key words: life cycle assessment (LCA); product system; environmental impact; green industry

当前,面临着全球工业竞争的挑战,中国工业还需要更深入的研究来提高国际竞争力^[1]。近年来,我国也相继颁布了一些政策文件,逐渐将制造绿色产品理念深入到每个人心中。但工业产品在生产、制造和回收过程中难免会产生废气、废渣等有害物

质,而这些有害物质一定程度上损害了人们赖以生存的环境。面对日益突出的环境污染问题,以钢铁行业为例,不仅需要解决环境污染问题,还要承受公众舆论压力。产品全生命周期评价方法(life cycle assessment, LCA)非常适合解决中国工业高污染、

收稿日期:2019-08-30

基金项目:包头钢铁(集团)有限责任公司项目(J2016-91)资助

作者简介:王伟晗(1981-),女,讲师,博士,主要研究方向为生命周期评价及节能新技术。E-mail:darkxwang@163.com

<http://xuebao.sit.edu.cn>

高消耗和低附加值等问题^[2]。本质上来讲,LCA 是一种评估产品生产过程和其使用过程给环境带来的负面效应的客观评价方法,主要是通过检测、识别和评判某种产品在整个生命周期中所带来的环境影响或潜在影响。因此对工业产品全生命周期深度分析能够有效节约资源、减少能耗和保护环境,具有显著的社会效益和经济效益。本文以 LCA 为评价工具,介绍生命周期环境评价发展动态,并从产品全生命周期评价角度深度剖析工业产品全生命周期(原材料提取与制造、材料加工、包装运输、产品使用、废物回收与利用)所带来的环境影响研究进展。

1 LCA 发展历程

环境协调性评价来源于 20 世纪能源危机时期,最初理论来源于化学工程中“物质-能量流平衡”的概念,基本也是根据物质不灭定律和能量守恒原理来对产品生产、使用和回收等一系列过程中物质和能量损耗来计算,最后对产品造成的环境问题或潜在的影响进行评价并给出建议^[3]。

产品造成的环境问题不能仅仅依靠单一步骤来解决,必须依靠生产过程中各个环节、各个过程相互渗透,相互支持。环境管理制度在一开始只是以“末端治理”为主要措施,强制减少某一污染物的排放,以此来达到治理环境的目的。但这种方式形成的环境保护只是分区而治,不能从根源上解决问题。在实际应用上并未减少污染物的总量,而仅仅转移了污染源,严重缺乏系统性,以致于采用这种管理模式的国家环境治理尤为艰辛。为提高环境管理效率,多数国家开始推行“过程导向”工业环境管理模式,其旨在产品产业链过程中,单个企业通过整体系统化的管理模式,来减少工业产品带来的环境污染。当前我国国内产品工业基本都是“末端治理”和“过程导向”这 2 种模式。随着实际应用的推广,越来越多的企业发现,这 2 种环境保护措施提升空间有限,工业产品造成的环境问题主要原因是上游企业的管理水平。近几年,工业发达国家产生了一种新的环境管理模式——产品导向,有效提高了产品全生命周期的整体环境保护绩效。随之诞生的新制度“生产者延伸责任制度”约束了企业的生产规范,提高了企业家们环境保护意识。为提升环境保护绩效,欧盟提出“整合性产品策略(integrated product policy, IPP)”的新模式^[4]。这种政策主要以产品系统环境全生命周期理念为指引,全面减少环境影响。明确提出在延伸生产者责任的基础上,让所有人都能将环境保护当做自己的责任。从制度的建立角度分

析,整合性产品政策使得环境保护从使用产品过渡到生产设计阶段,一定程度上也使得消费者关注所用产品环境影响的问题,从而适用于产品服务过程。

总的来说,工业产品全生命周期内所造成的环境问题治理方式从“末端治理”和“过程导向”阶段,发展为“产品导向”模式。由此显示出,工业发展越来越重视污染物的排放,相关政策也对企业要求越来越高。从降低某一污染物的排放到整体环境治理的过程,表现出企业在环境管理过程中,重视产品全生命周期的环境问题,因此产品全生命周期环境影响评价的发展对环境保护具有重要意义。

2 产品全生命周期评价的环境影响研究现状

产品的生命周期评价环境影响评价发展迅速,因其在各行各业的利用率比较高。国内外对产品全生命周期的研究应用也越来越广泛。

2.1 LCA 理念的应用

钢铁制品的环境污染一直是热点问题,其生命周期评价研究也一直是研究对象。因此杨毅等^[5]采用生命周期评价理论分析氧化铝制备的环境影响,从不同发电方法来对原铝全生命周期内造成的环境问题进行评估,着重研究了原铝生产过程中的物料消耗和能源损失,分析了 4 种环境污染类型的来源和分布。最终得出原铝冶炼过程对环境影响较大,火力发电炼铝环境污染远高于水利发电。因此需要采取措施来解决这一问题。唐雅莉^[6]将 CBR、TRIZ、AHP 等创新理念相结合,基于现存的产品全生命周期研究,构建出一种新的绿色设计,通过先进的设计理念和技术找出现存的数据难点,构建多种途径集合的产品绿色设计过程模型并解决产品生命周期内各个阶段遇到的问题。Chen 等^[7]为了让人能够更好的了解产品制造和回收时的水消耗,提出产品全生命周期内水足迹的概念。通过统计评价钢铁制品水足迹的方法,详细介绍了产品全生命周期内的详细评估步骤和计算过程。以具体案例来展示水足迹评价的清单分析和影响评估过程中难点所在。时君丽等^[8]为了研究钢铁工业在制造时期所带来的资源环境影响,通过建立物耗、能耗和排放为模型,深度分析了能源消耗、富营养化、全球变暖和土壤酸化这 4 个指标来评价产品在制造过程中所带来的环境影响。碳污染问题在环境影响中尤为严重。Zheng 等^[9]采用 LCA 方法来计算碳足迹。提出一种以数据质量特性为输入,利用多元统计回归和拓展傅里叶幅度敏感度实验来分析该方法的敏感度,

使用蒙特卡洛模型来分析该方法的不确定度。最后计算出啤酒发酵罐的生命周期碳排放量,分析了生命周期库存数据的质量特征,总结出了数据的不确定性,使用响应面法对各项参数进行优化设计。

2.2 LCA 管理模式

中国企业缺少先进的绿色管理模式,因此杨晓英等^[10]提出基于全生命周期的钢铁产品数据管理模式。旨在分析工业制品全生命周期数据关系和集成管理需求,通过实例应用,最终证明了产品全生命周期数据管理系统取得良好效果。吴俊峰等^[11]提出基于 LCA,通过对 CML 评价模型对离心式制冷机全生命周期过程中的环境影响进行评估评价,最后通过详细分析计算得出制冷剂选取、能耗水平和运行时长是制冷机组造成环境影响的重要因素。谢英豪等^[12]使用 Eco-indicator99 评价模型来对废旧电池回收进行环境影响评价,分别从原矿冶炼、传统湿法回收、传统火法回收和定向循环这 4 种方式对环境的影响进行比较,清晰地显示出废旧电池回收全周期对环境的影响。Shimako 等^[13]为了能够得到最优的动态生命周期清单时间步长,建立起一个包含产品动态生命周期清单和影响评估框架模型。通过数据分析以及模型中动态生命周期清单时间步长对环境的影响和对生态的破坏程度,最后得出最好的动态生命周期清单时间步长等。赵志强等^[14]根据生态设计要求,以发明问题解决理论(theory of inventive problem solving, TRIZ)理论冲突解决原理为基础,结合创新绿色设计理念,使用最新数据处理系统技术。大量分析钢铁制品的全生命周期设计以及对环境的影响,建立一个新的 LCA 模型。通过具体事例验证,最后归纳出产品全生命周期是否符合绿色设计要求,是否能够补充产品整个生命周期内的环境影响缺陷。

2.3 LCA 模型、软件和数据的应用研究

现代产品全生命周期影响评价需要依靠大量数据作基础,各种模型作为工具,为提高研究效率,国内外已经开发出的软件包括 GaBi、CA-CP、SCP 等产品,以及中国研发的 eBalance 等。科技水平的进步给产品的生命周期评价研究带来了极大的帮助。

生命周期理论与建模方法在企业的应用研究始终得到一些跨国公司、学术团体及其研究者、国家政府和国际组织等的重视,并逐渐向规范化和标准化迈进。国际上生命周期理论方面的研究较多, Sonnemann 等^[15]提出了生态效率分析方法应用于企业及其伙伴的生命周期管理,并在巴斯夫公司进行了实践。Labuschagne 等^[16]对实体制造工业采用项

目生命周期管理进行了研究,建议采用可持续发展的项目生命周期管理,资产生命周期和产品生命周期需要被纳入综合考虑,并对项目生命周期管理的方法提出建议和展望。Descateaux 等^[17]利用生命周期理论分析了美国东北部市场在收取碳税背景下,采用可再生分布式发电技术的环境收益。Mazzi 等^[18]提出了环境管理系统与 LCA 相结合的 EMS-LCA 模型用于区域环境管理,并在意大利北部的威内托大区进行案例实践研究。国内北京工业大学李小青等^[19]将 LCA 应用于生态材料制备工程,针对企业的 LCA 研究涉及生产流程及复杂生产系统建模的集成化、可视化和形象化,基于单个元素过程的 LCA 清单建模方式,采用反馈式系统清单物质流和多层嵌套计算的高效算法模式等。曹晓明等^[20]以包钢生产的 U76CrRE 钢轨为研究内容,分析其钢铁制品在生命周期内造成的环境影响。通过研究 1 kg U76CrRE 钢轨在原材料开采到废钢循环利用的过程。经过 LCA 结果分析,最后得出 70%~80%的资源消耗发生在产品内部制作过程,土壤酸化在前期制备中产生,富营养化在产品运输中产生。中科院团队^[21-22]重点关注城市固废生命周期管理、城市物质流分析(MFA)、城市可持续交通系统、生态产业园规划与评价,循环经济与资源效率分析等。文献^[23-25]中致力于基于 LCA 的产品的生态设计、绿色制造方法研究。虽然生命周期理论方面的研究很多,但在企业大多应用在生命周期某个阶段或环节(如固废管理、产品生态设计等),真正系统化应用在环境管理与决策方面却鲜见报道。

汽车废品回收一直是资源循环利用的重要问题,李兴福^[26]通过创建报废汽车综合回收利用环境影响评价模型,直观显示报废汽车资源回收利用率对环境影响的程度分析,有效地探索了我国汽车产品回收利用的关键问题,在保护环境的前提下高效的良好的回收报废汽车。李飞龙等^[27]使用 Greet 环境影响评价模型,对汽车产品材料轻量化能耗进行评价研究,分析了汽车回收节能减排能力。刘璟等^[28]使用 Greet 模型对比分析了纯动力汽车和混合动力汽车的能耗情况和温室气体排放量,并模拟了 2 种汽车的节能减排潜力,为未来电动汽车能源发展提供有力依据。杨沿平等^[29]为探索汽车零部件生态效益,创建出一种以汽车零部件生态效益评价模型为基础,适用于中国汽车生态效益评价软件,可适用于汽车电动座椅等产品。Duvall^[30]使用不同数据模型将 3 种汽车塑料零件回收的环境影响进行对比研究,探索到不同模型的使用燃料消耗和 CO₂ 排放不同。

Luz^[31]等从环境集中影响类别、回收方式和能源消耗等方面研究,并使用 Gabi 软件对汽车零件可替代产品进行计算,最后发现自然纤维复合材料对环境的影响比聚丙烯材料更小。Puri 等^[32]使用 SimaPro 生命周期评价软件创建汽车产品回收的环境评价模型,从能源消耗和材料循环利用的实际情况对钢材、玻璃等不同原材料进行分析,具有良好效果。为判断带有太阳能系统电动汽车的能源消耗,Strecker 等^[33]创建了以 Greet2 和 Matlab 为基准的环境评价动态模型,较好地反映了能源消耗和环境影响问题。秦雪梅^[34]在 GaBi 软件和 CML2001 的基础上对汽车产品零部件生命周期环境影响评价模型,更利于汽车零件回收利用和工艺设计。徐树杰等^[35]创建出一种差异模型,用于使用原材料和再生材料的环境影响和能源消耗,最后通过对比分析,再生材料的使用增加能够明显降低环境排放,而且在这种模型的基础上,可再生材料的新能源汽车零件环境影响更具有研究价值。李娟等^[36]在建立了以 Gabi 软件为基础的铝合金材料环境评价模型,主要针对汽车产品零件转化为铝合金材料全周期的环境排放问题,更直观的显示能源消耗情况。

共享单车市场的崛起刺激了新的经济增长,也越来越受欢迎。而这种现象带来的环境问题却无法知晓。因此,Zheng 等^[37]通过调研和生命周期评价方法对其进行研究。通过调查数据,使用 Gabi 软件对共享单车出行行为和生命周期变化对环境的影响进行建模。结果显示共享单车是一种有利于环境保护的做法,除了金属消耗以外,有效减少了碳排放等环境污染问题,可用来减少汽车产品在生命周期过程中产生的环境问题。

生命周期评价离不开数据支持,商业数据库和学术界开发的数据库主要来源于企业生产数据、报表统计等,而大多数企业都将不愿对外公开这类关乎产品成本等商业机密。因此,生命周期评价所需要的企业真实生产成本物料、能源消耗等数据很难获取。在相关政策支持下,“973 计划”“863 计划”、国家支撑计划和背景自然科学基金的实施,已形成较大规模数据库。刘夏璐等^[38]调研了中国 600 多种主要工业材料、能源和运输的生命周期数据,包含了多种关键的环境影响类型指标,为我国生命周期环境影响评价研究提供了有力的数据支撑。Huang 等^[39]提出一种数据质量评估办法。具体实施方式是基于产品全生命周期和敏感性分析,从数据的原始性和不确定评价性以及谱系矩阵数学关系开始,对生命周期产生的数据和敏感性进行分析。最后通

过蒙特卡洛模型对产品的关键数据和原始数据进行对比研究,得出数据质量中的热点具有非常高的不确定性和高灵敏度。龙苏华等^[40]采用 SimaPro8 对汽车产品进行数据分析和系统建模,并利用 CALCA 数据库和 Ecoinvent3 数据库来对某车产品零件进行生命周期环境影响评价。最后发现该车零件生产阶段对环境的影响较大,而其直接排放的污染非常小。通过实验得获取热成型钢材对环境负荷影响较大,未来应该改进相应的生产方式。

生命周期评价方法在产品系统中的应用越来越得到企业的认可,这种方法不仅能良好的利用数据来反应产品全生命周期对环境的影响,还能更直观的显示产品的不足,以便未来能够更好的推进绿色设计的进行。

3 结论和建议

针对以上结果,基于产品全生命周期评价的环境影响,提出以下建议:

(1) 利用软件来进行产品环境影响评价分析能够准确并且迅速地得出结果。国际上的 LCA 评价软件主要有 GaBi、GREET、TEAM、SimaPro 等,而国内的 LCA 评价软件却寥寥无几。因此,我国亦应投入生命周期软件的研发,走向世界科技强国道路。

(2) 产品全生命周期环境影响评价离不开模型的带入,一个合适的数学模型能够帮助解决大部分问题。应加大对产品环境影响评价模型的研究,能够有效提高环境评估效率,规范 LCA 研究过程,以便更准确地进行环境研究。

(3) 为保证 LCA 结果的准确性,应重视产品数据的真实性和敏感性,在数据调研过程中主要确保企业数据不确定性的表示方法、在数据不确定性条件下,模型的计算方法以及不确定性结果的解释及支撑决策方法。

参考文献:

- [1] 李新创. 中国钢铁产品全生命周期评价理论与实践[J]. 中国冶金, 2019, 29(4): 1-5.
- [2] 肖汉雄, 杨丹辉. 基于产品生命周期的环境影响评价方法及应用[J]. 城市与环境研究, 2018, 1: 88-105.
- [3] 姬莉, 王梦鹿, 汪志佳. LCA 评价方法在钢铁产品绿色设计中的应用研究[J]. 智库时代, 2019, 7: 263-264.
- [4] 谈翼飞. 高速干切滚齿机床生命周期评价及绿色创新优化[D]. 重庆: 重庆大学, 2018.
- [5] 杨毅, 郭尧琦, 朱文松, 等. 基于生命周期评价的我

- 国原铝生产的环境影响评估(英文)[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2019, 29(8): 1784-1792.
- [6] 唐雅莉. 基于 TRIZ 的绿色产品创新设计研究[D]. 西安: 陕西科技大学, 2017.
- [7] CHEN J L, CHEN Y B, HUANG H C. Quantifying the life cycle water consumption of a machine tool [J]. Procedia Cirp, 2015, 29: 498-501.
- [8] 时君丽, 关朋朋, 周茂军, 等. 基于 LCA 的机床切削单元能耗及环境排放研究[J]. 机械制造与自动化, 2017, 46(3): 14-16.
- [9] ZHENG H, XING M, CAO T, *et al.* Uncertainty study and parameter optimization of carbon footprint analysis for fermentation cylinder[J]. Sustainability, 2019, 11(3): 661.
- [10] 杨晓英, 徐严冬, 隋新, 等. 基于全生命周期的数控机床轴承数据模型研究[J]. 中国机械工程, 2016, 27(10): 1320-1326.
- [11] 吴俊峰, 张秀平, 贾磊, 等. 离心式冷水机组生命周期影响评价及关键影响因素分析[J]. 制冷学报, 2016, 37(4): 58-64.
- [12] 谢英豪, 余海军, 欧彦楠, 等. 废旧动力电池回收的环境影响评价研究[J]. 无机盐工业, 2015, 47(4): 43-46.
- [13] SHIMAKO A H, TIRUTA-BARNA L, BARBARA B D F A, *et al.* Sensitivity analysis of temporal parameters in a dynamic LCA framework[J]. Science of the Total Environment, 2018, 624: 1250-1262.
- [14] 赵志强, 韩雪飞, 陈世杰, 等. 基于 LCA 和 TRIZ 的产品生态设计方法研究[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2013, 36(1): 11-14.
- [15] SONNEMANN G, MARGNI M. Life Cycle Management [M]. Bordeaux: University of Bordeaux, 2015.
- [16] LABUSCHAGNE C, BRENT A C. Sustainable project life cycle management: The need to integrate life cycles in the manufacturing sector [J]. International Journal of Project Management, 2005, 23(2): 159-168.
- [17] DESCATEAUX P, ASTUDILLO M F, AMOR M B. Assessing the life cycle environmental benefits of renewable distributed generation in a context of carbon taxes: The case of the north eastern American market [J]. Renewable & Sustainable Energy Reviews, 2016, 53: 1178-1189.
- [18] MAZZI A, TONIOLO S, CATTO S, *et al.* The combination of an environmental management system and life cycle assessment at the territorial level [J]. Environmental Impact Assessment Review, 2017, 63: 59-71.
- [19] 李小青, 龚先政, 聂祚仁, 等. 中国材料生命周期评价数据模型及数据库开发[J]. 中国材料进展, 2016, 3: 171-178.
- [20] 曹晓明, 班华, 高明星. 包钢 U76CrRE 钢轨生命周期评价[J]. 包钢科技, 2019, 45(2): 30-32.
- [21] SONG X L, YANG J X, LU B, *et al.* Exploring the life cycle management of industrial solid waste in the case of copper slag [J]. Waste Management & Research, 2013, 31(6): 625-633.
- [22] 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.
- [23] 于随然, 陶璟. 产品全生命周期设计与评价[M]. 北京: 科学出版社, 2012.
- [24] 刘宇, 陶璟, 于随然. 基于特征 LCA 方法的压力机制造阶段碳排放研究[J]. 机械制造与自动化, 2016, 45(5): 1-4.
- [25] 刘志峰, 韩雪飞, 张雷. 基于汽车材料数据系统的 LCA 方法及应用[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2015, 38(1): 1-6.
- [26] 李兴福. 基于 GaBi 软件的报废汽车生命周期评价研究[D]. 天津: 南开大学, 2011.
- [27] 李飞龙, 郭孔辉, 杨沿平, 等. 基于 GREET 模型的汽车材料轻量化能耗评价研究[J]. 中国机械工程, 2013, 24(5): 681-685.
- [28] 刘憬, 赵涛. 混合动力和纯电动汽车节能减排研究[J]. 标准科学, 2014, 2: 21-25.
- [29] 杨沿平, 陈轶篙. 汽车零部件生态效益评价方法及评价实例[C]//BIT's 3rd Low Carbon Earth Summit 2013. [S.l.]: [s.n.], 2013: 247.
- [30] DUVAL D, MACHEAN H L. The role of product information in automotive plastics recycling: a financial and life cycle assessment[J]. Journal of Cleaner Production, 2007, 15(11-12): 1158-1168.
- [31] LUZ S M, CALDEIIRA-PIRES A, FERRÃO P M C. Environmental benefits of substituting talc by sugarcane bagasse fibers as reinforcement in polypropylene composites: Ecodesign and LCA as strategy for automotive components[J]. Resources, Conservation and Recycling, 2010, 54(12): 1135-1144.
- [32] PURI P, COMPSTON P, PANTANO V. Life cycle assessment of Australian door skins[J]. The International Journal of Life Cycle Assessment, Automotive 2009, 14(5): 420-428.
- [33] STRECKER B, HAUSMANN A, DEPCIK C. Well to wheels energy and emissions 68 plug-in series analysis of a recycled 1974 VW Super Beetle converted into hybrid electric vehicle[J]. Journal of Cleaner Production, 2014, 68: 93-103.

(下转第 188 页)

- 特征及其影响因素[J]. 应用生态学报, 2017, 28(2): 485-492.
- [8] HUANG N E, SHEN Z, LONG S R, *et al.* The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis[J]. Proceedings A, 1998, 454(1971): 903-995.
- [9] HUANG N E, WU Z. A review on Hilbert-Huang transform; Method and its applications to geophysical studies[J]. Reviews of Geophysics, 2008, 46(2): RG2006. doi: 10.1029/2007RG000228
- [10] CHEN X, WU Z, HUANG N E. The time-dependent intrinsic correlation based on the empirical mode decomposition[J]. Advances in Adaptive Data Analysis, 2010, 2(2): 233-265.
- [11] HUANG Y, SCHMITT F G. Time dependent intrinsic correlation analysis of temperature and dissolved oxygen time series using empirical mode decomposition[J]. Journal of Marine Systems, 2014, 130: 90-100.
- [12] SANKARAN A, REDDY M J. Analysing the variability of streamflow and suspended sediment concentration using time dependent intrinsic correlation[J]. Procedia Technology, 2016, 24: 54-61.
- [13] ISMAIL D K B, LAZURE P, PUILLAT I. Application of Hilbert-Huang decomposition to temperature and currents data in the Réunion island [C]// OCEANS 2016 MTS/IEEE Monterey. [s. l.]: IEEE, 2016: 1-9.
- [14] ADARSH S, REDDY M J. Multiscale characterization and prediction of monsoon rainfall in India using Hilbert-Huang transform and time-dependent intrinsic correlation analysis[J]. Meteorology & Atmospheric Physics, 2018, 130: 667-688.
- [15] HOOVER K D. Nonstationary time series, cointegration, and the principle of the common cause[J]. The British Journal for the Philosophy of Science, 2003, 54(4): 527-551.
- [16] XAVIER R, MIQUEL R A. A new method to detect transitory signatures and local time/space variability structures in the climate system; The scale-dependent correlation analysis[J]. Climate Dynamics, 2006, 27(5): 441-458.
- [17] 刘熔熔. 1994—2017年杭州能见度特征及其与PM(2.5)关系[J]. 浙江气象, 2018, 39(3): 19-23.
- [18] 浦静姣, 徐宏辉, 马千里. 长江三角洲背景地区大气污染对能见度的影响[J]. 中国环境科学, 2017, 37(12): 4435-4441.
- [19] 周奕珂, 朱彬, 韩志伟, 等. 长江三角洲地区冬季能见度特征及影响因子分析[J]. 中国环境科学, 2016, 36(3): 660-669.
- [20] 刘凡, 谭钦文, 江霞, 等. 成都市冬季相对湿度对颗粒物浓度和大气能见度的影响[J]. 环境科学, 2018, 39(4): 1466-1473.
- [21] 董继元, 刘兴荣, 张本忠, 等. 兰州市大气相对湿度与PM₁₀浓度和大气能见度的相关性分析[J]. 生态环境学报, 2015, 24(12): 1995-2001.
- [22] 杜荣光, 齐冰, 胡德云, 等. 杭州市区相对湿度及PM_{2.5}对能见度的影响分析[J]. 南京大学学报: 自然科学版, 2015(3): 473-480.

(编辑 陈 红)

(上接第 180 页)

- [34] 秦雪梅. 面向绿色制造的汽车零部件产品生命周期评价研究[D]. 重庆: 重庆理工大学, 2014.
- [35] 徐树杰, 董长青. 基于 GREET 汽车全生命周期能耗排放研究[J]. 汽车工艺与材料, 2014, 2: 10-13.
- [36] 李娟, 杨沿平, 陈轶篙. 铝合金与铸铁缸盖的生命周期评价对比分析. 环境工程学报, 2015, 9(11): 5642-5648.
- [37] ZHENG F, GU F, ZHANG W, *et al.* Is bicycle sharing an environmental practice? Evidence from a life cycle assessment based on behavioral surveys [J]. Sustainability, 2019, 11(6): 1550.
- [38] 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.
- [39] HUANG N, WANG H, FAN C, *et al.* LCA data quality assessment and control based on uncertainty and sensitivity analysis[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2012, 32(6): 1529-1536.
- [40] 龙苏华, 赵松岭. 汽车零部件生命周期评价研究[J]. 汽车零部件, 2019, 7: 50-53.

(编辑 陈 红)