DOI: 10.5846/stxb201509091860
白雪,胡梦婷,朱春雁,任晓晶,鲍威,孙亮.基于 ISO 14046 的工业产品水足迹评价研究——以电缆为例.生态学报,2016,36(22): - .
Bai X, Hu M T, Zhu C Y, Ren X J, Bao W, Sun L. Evaluation of the Water Footprint of Industrial Products Based on ISO 14046 using Cables as an Example. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(22): - .

基于 ISO 14046 的工业产品水足迹评价研究
——以电缆为例

白 雪[1,*],胡梦婷[1],朱春雁[1],任晓晶[2],鲍 威[1],孙 亮[1]
1 中国标准化研究院, 北京 100191
2 轻工业环境保护研究所, 北京 100089

摘要:水足迹国际标准(ISO 14046)于 2014 年发布,基于生命周期评价(LCA)的思想,水足迹被定义为量化与水相关潜在环境影响的指标。本文在 ISO14046 的原则、要求和方法学框架基础上,介绍了工业产品水足迹的计算和评价方法,并以铜电缆和铝合金电缆为例进行研究,分别评价了两类电缆生命周期过程产生的与水相关环境影响。与水足迹网络(WFN)的方法侧重于计算生产产品所需要的水资源总量不同,ISO 的方法更关注于产品全生命周期过程的环境影响评价。案例研究表明:铜电缆生命周期全过程耗水量与铝合金电缆相比少 24.8%,水短缺足迹相比则少 97.9%。这是因为铜电缆生产地江苏的水资源压力指数(WSI)小于铝合金电缆生产地河北的 WSI。由此,在江苏地区生产电缆使用的水资源对当地水环境压力造成的影响远小于在河北地区生产电缆造成的影响。采用科学合理的水足迹评价方法,量化工业产品全生命周期带来的环境影响,能为我国实现工业布局的合理规划和水资源的可持续利用提供科学依据。

关键词:水足迹;生命周期评价;水资源;环境影响

Evaluation of the Water Footprint of Industrial Products Based on ISO 14046 using Cables as an Example

BAI Xue[1], HU Mengting[1], ZHU Chunyan[1], REN Xiaojing[2], BAO Wei[1], SUN Liang[1]
1 *China National Institute of Standardization*, *Beijing* 100191, *China*
2 *Environmental Protection Research Institute of Light Industry*, *Beijing* 100089, *China*

Abstract: The international standard of water footprints (ISO 14046) was published in 2014 based on life cycle assessment (LCA), which is defined as the index for quantifying potential water-related environmental influences. Based on the principle, requirements, and methodology of ISO14046, the aim of the present study was to introduce methods for calculating and evaluating water footprints, and analyze copper and aluminum alloy cables in relation to this. We evaluated the influence of water during the life cycles of the two cable types. Unlike the water footprint network (WFN), which emphasizes the calculation of the total requirement of water resources for production, the ISO method focused on the environmental influence assessment during the product life cycle. The case study indicated that the water consumption and footprint of the copper cable were lower by 24.8 and 97.9%, respectively, than that of aluminum alloy cable during their life cycles. This is because the water stress index (WSI) of Jiangsu Province, where copper cables are produced, is lower than that of Hebei Province, where aluminum alloy cables are manufactured. Therefore, the water usage for cable production in Jiangsu will influence the local water environment considerably less than in Hebei. Adopting scientific methods to evaluate

基金项目:质检公益性行业科研专项项目(201310289)
收稿日期:2015-09-09; **修订日期**:2016-03-17
* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: baixue@cnis.gov.cn

the water footprint and quantify the environmental influence accompanying the full life cycle of industrial products provides a scientific basis for effective planning of the industrial distribution and sustainable utilization of water resources in our country.

Key Words: water footprint; life cycle assessment; water resource; environmental influence

水是人类发展不可或缺的自然资源,也是一切生物赖以生存的基础。然而,地球上可以直接利用的水资源十分匮乏,并且随着人口膨胀与工农业生产规模的不断扩大,全球水资源的使用和消耗增长迅猛,淡水供需矛盾日益突出。在水资源短缺愈发严重的同时,人类又在大规模污染水源,进一步导致了水质恶化。解决水资源短缺问题,不仅需要使用开源节流等传统手段提高水资源利用效率,更要在水资源的管理方式、管理理论等方面进行创新和完善。因此,如实地衡量人类对水资源消费利用情况显得十分必要,水足迹评价为此提供了可行的办法。通过水足迹的计算和评价,能够实现对水资源利用效率的总体把握,为水资源的合理利用提供决策依据,同时能够根据不同地域、行业、产品对谁环境影响的程度,实现水资源的优化配置[1]。

水足迹(Water Footprint)概念是荷兰学者 Hoekstra 在虚拟水理论研究[2]的基础上提出的,用以描述人类消费对水资源系统的影响。Hoekstra 将水足迹定义为:任何已知人口(一个国家、一个地区、一个人)在一定时间内消耗或生产的所有产品和服务所需要的水资源总量(包含人类生活所必需的食品及生活用品所含虚拟水、生活用水及生态环境用水)[3]。水足迹的概念一经提出,就受到了学术界、国际机构、商界以及公众的广泛关注。随着水足迹理论研究的不断深入及其实证研究范围的不断扩大,水足迹的标准化也成为研究的热点,目前国际上有两个组织分别发布水足迹的评估标准:一是水足迹网络("Water Footprint Network, WFN),二是国际标准化组织(International Standard Organization, ISO)。

2011 年由 WFN 正式出版书籍《The Water Footprint Assessment Manual》,作为国际上第一本专门针对水足迹的评价手册,该手册系统阐述了水足迹评价的四个步骤:设定目标和范围、核算水足迹、评价水足迹可持续性和制定水足迹响应方案。WFN 描述的水足迹中包括蓝水、绿水和灰水足迹三种,所得水足迹结果为具体的数值,此方法侧重于过程、产品、消费者、企业、区域、流域和国家的水足迹核算方法[4]。

2014 年 8 月,由国际标准化组织 207 技术委员会正式发布了 ISO 14046:2014《Environmental management — Water footprint — Principles, requirements and guidelines》。作为第一项水足迹评价国际标准,该标准基于生命周期评价核心标准"ISO14040-环境管理-生命周期评估-原则和框架(ISO14040 2006)"和"ISO14044-环境管理-生命周期评估-要求和指南(ISO14044 2006),提出了水足迹评价应包含四个步骤:目的和范围的确定、清单分析、影响评价和结果解释[5]。ISO14046 涵盖了不同环境影响类型的水足迹评价,所得水足迹结果为当量值,此方法侧重于通过对产品、过程和组织各生命周期阶段水足迹的量化结果,识别和理解与水相关的潜在环境影响的大小和重要性。ISO 14046 的发布,为统一和规范水足迹评价的相关原则、要求和方法学框架提供了依据,也为进一步研究和制定具体行业或产品的水足迹标准奠定了基础。

本文选择电缆这种典型工业产品,基于 ISO 14046 开展产品水足迹评价方法和案例研究。

1 基于 ISO 14046 的工业产品水足迹评价方法

为便于不同产品、不同生产阶段以及不同产地的产品之间的比较[6],根据 ISO 14046 及相关研究资料[7-14],采用水当量(例如 H_2O eq)作为评价指标。

1.1 目的和范围的确定

开展产品水足迹的核算和评价,其首要任务是确定研究目的和范围,主要包括确定系统边界。产品水足迹评价通常应该包括产品生命周期的所有阶段,即:原材料阶段、生产阶段、分销和储存阶段、使用阶段和处置回收阶段的输入和输出。产品水足迹系统边界如图 1 所示[15]。

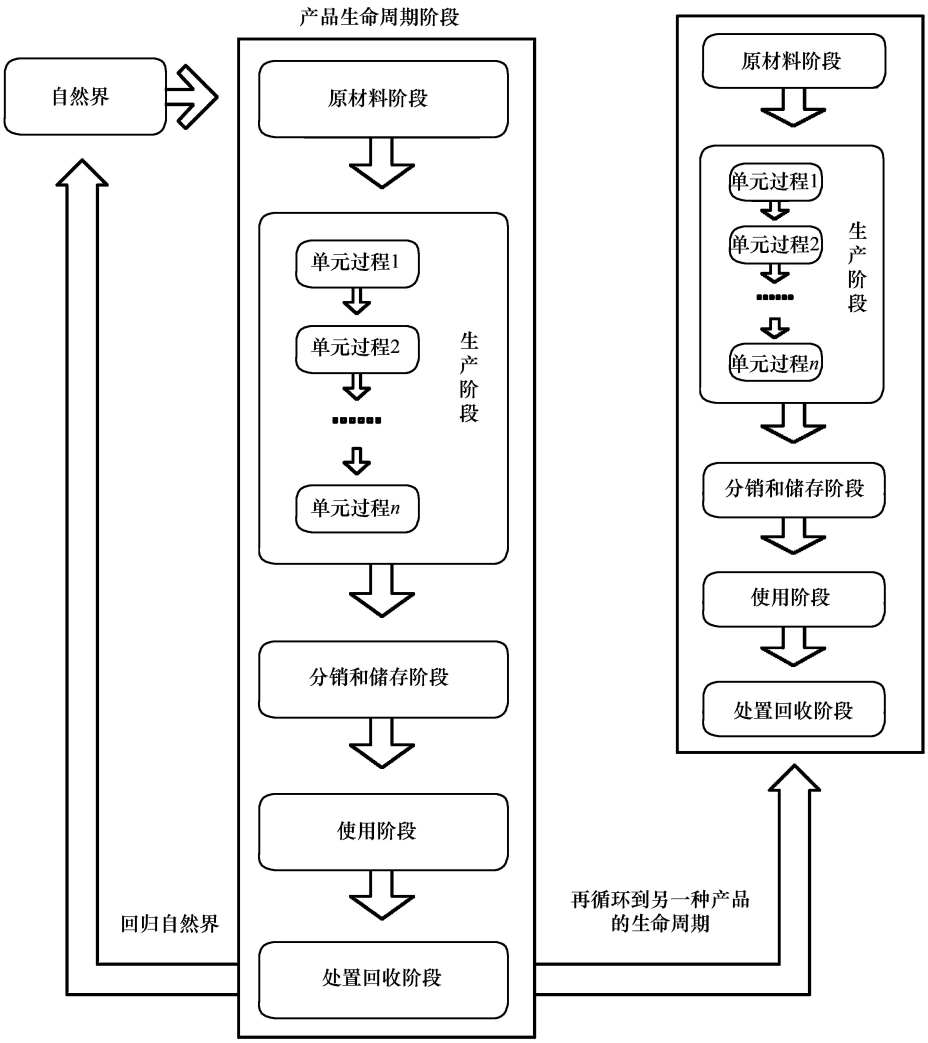


图 1　产品水足迹系统边界

Fig.1　system boundaries of product water footprint

1.2　清单分析

产品水足迹清单分析包括产品生命周期所有阶段(原材料阶段、生产阶段、分销和储存阶段、使用阶段和处置回收阶段)涉及的水资源使用量、能源消耗量、物料消耗量、废水或废物排放量等。

1.3　影响评价

产品水足迹评价可以将水足迹清单结果划归以下主要的影响类型:

1)水短缺足迹

水短缺足迹是用来评价产品全生命周期过程中对水资源短缺的影响,其计算公式如下[7]:

$$WF_{sc,p} = \sum_{i=1}^{4} \sum_{j} \frac{WSI_j}{WSI_{gl}} \cdot C_j$$

式中:$WF_{sc,p}$为水短缺足迹,单位为 m^3H_2O 当量;WSI_j为位置 j 的水压力指数;WSI_{gl}为全球或全国平均水压力指数,0.60;C_j为为位置 j 的用水量;i 为产品生命周期阶段。1—4 分别代表原材料阶段、生产阶段、使用阶段和处置回收阶段。

水压力指数是特征因子,有多种计算方法和模型,本文采用[16]中的方法,基于取水量和水资源可利用性之比,可通过谷歌地图确定。该方法提供的水压力指数在 0.01(没有水资源压力)和 1(最高水资源压力)

之间。

2)水富营养化足迹

水富营养化足迹用来评价组织中存在的排入各种水体的氮、磷等污染物所造成水资源潜在富营养化影响。计算公式如下[17]:

$$WF_{eu,p} = \sum_{i=1}^{4}\sum_{j=1}^{n}\alpha_{eu,j} \times M_{eu,j}$$

式中:$WF_{eu,p}$为水富营养化足迹,单位为 kgPO_4^{3-} 当量或 kg NO_3^-当量。$\alpha_{eu,j}$为为排入水体的污染物 i 的特征化因子,单位为 kgPO_4^{3-} 当量/kg 污染物或 kgNO_3^-当量/kg 污染物[18-19]。a)$M_{eu,j}$为为排入水体的污染物 i 的质量。i 为产品生命周期阶段。1—4 分别代表原材料阶段、生产阶段、试用阶段和处置回收阶段。

3)水酸化足迹

水酸化足迹用来评价组织中存在的排入各种水体的酸性污染物所造成的潜在酸化影响。计算公式如下:

$$WF_{aci,p} = \sum_{i=1}^{4}\sum_{j=1}^{n}\alpha_{aci,j} \times M_{aci,j}$$

式中:$WF_{aci,p}$为水酸化足迹,单位为 kgSO_2当量。$\alpha_{aci,j}$为排入水体的污染物 x 的特征化因子,单位为 kgSO_2当量/kg 污染物[18-19]。$M_{aci,j}$为排入水体的污染物 x 的质量,单位为 kg。i 为产品生命周期阶段。1—4 分别代表原材料阶段、生产阶段、试用阶段和处置回收阶段。

4)水生态毒性足迹

水生态毒性足迹用来评价组织中存在的排入各种水体的金属、有机污染物等所造成的潜在毒性影响。计算公式如下:

$$WF_{eco,p} = \sum_{i=1}^{4}\sum_{j=1}^{n}\alpha_{eco,j} \times M_{eco,j}$$

式中:b)$WF_{eco,p}$为水生态毒性足迹,单位为 m^3H_2O 当量。c)$\alpha_{eco,j}$为排入水环境介质的污染物 i 的特征化因子,单位为 m^3H_2O 当量/kg 污染物[18-27]。d)$M_{eco,j}$为排入水环境介质的污染物 i 的质量,单位为 kg。e)i 为产品生命周期阶段。1—4 分别代表原材料阶段、生产阶段、试用阶段和处置回收阶段。

2 产品水足迹评价案例

近年我国电线电缆产业取得了令人瞩目的成绩,在世界范围内,中国电线电缆总产值已超过美国、日本,成为世界上第一大电线电缆生产国[28]。目前国内外对电线电缆行业产品或工艺的生命周期评价(LCA)的研究很少,国外只有少量涉及 6 类线缆的生命周期评价研究,而国内仅有针对铝合金电缆和铜电缆整个生命周期过程中的环境影响评价,主要包括中国资源消耗、能源消耗、酸化、全球变暖、富营养化和工业用水 6 大方方面[29]。

2.1 目的

本文选取铜电缆和铝合金电缆分别进行水足迹计算和评价,并将结果进行比较,以期从水足迹角度衡量铝合金与铜芯电缆的可持续性。

2.2 系统边界

为了能更加全面的反映铜电缆和铝合金电缆在全生命周期中的环境影响,本研究尽可能对相关产品的原材料获取、产品制造、产品使用、运输和废弃阶段进行全面的数据收集,并根据生命周期评价(LCA)的方法进行计算和分析。

2.3 数据来源

本次评价的数据来源主要包括企业调研数据、数据库数据和相关文献数据,其中数据库采用中国标准化研究院开发的生命周期数据库“GreenIn”。

电缆原材料阶段数据采用数据库(GreenIn)数据,制造阶段数据采用企业调研数据,使用阶段数据采用相

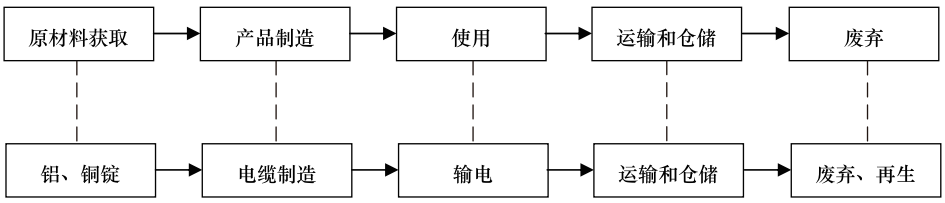


图 2　电缆生命周期示意图

Fig.2　Cable life cycle diagram

关标准中关于电力电缆使用过程中线损的计算方法计算得出,运输阶段和产品废弃(再生)阶段采用数据库(GreenIn)中的数据。

调研的铜电缆生产企业位于江苏省,铝合金电缆生产企业位于河北省,根据查询谷歌地球(Google Earth)可知,两地的 WSI 分别为 0.0278 和 1。

2.4　结果分析

2.4.1　铜电缆不同影响类型水足迹分析

基于 ISO 14046 计算出的铜电缆不同影响类型的水足迹如表 1 所示。其中,造成水富营养化的主要污染物为氮氧化物,其水富营养化足迹为 1225.3kgPO_4^{3-} eq/1000m;造成水酸化的主要污染物为二氧化硫,其水酸化足迹为 24136.28kgSO_2 eq/1000m;造成水生态毒性的主要污染物为二价镉,其水生态毒性足迹为 48×10^6 m^3 H_2Oeq/1000m。通过水足迹计算可知,在铜电缆生命周期过程中,排入水体的各种污染物造成的水资源潜在劣化影响(包括水富营养化、水酸化和水生态毒性等)较水资源短缺的影响更大[30-37]。

表 1　铜电缆不同影响类型的水足迹

Table 1　Different impact categories of copper cable water footprint

分类 Classifications	影响类型 Impact categories	单位 Unit	水足迹计算结果 Results of water footprint
水可利用性 Water availability	水短缺	m^3H_2Oeq/1000m	161.41
水劣化 Water degradation	富营养化	kgPO_4^{3-} eq/1000m	1317.59
	酸化	kgSO_2eq/1000m	31349.2
	生态毒性	m^3H_2Oeq/1000m	59.55×10^6

2.3.2　铜电缆和铝合金电缆水短缺足迹分析

基于 ISO 14046 计算出的铜电缆和铝合金电缆水短缺足迹分别如表 2 和表 3 所示。铜电缆生命周期过程中主要用水阶段为使用阶段,占总用水量的 97%,使用阶段计算的使用年限为 30 年,用水主要来自电力损耗所需要的水量。其次来自产品的原材料阶段,占比约为 2.2%,用水量最少的为废弃再生阶段,占比为 0.074%。

表 2　铜电缆水短缺足迹

Table 2　Water scarcity footprint of copper cable

序号 Serial number	生命周期阶段 Life cycle phase	用水量(m^3/1000m) Water consumption
1	原材料	78.11
2	生产	8.139
3	使用	3379.95
4	运输	17.368
5	废弃/再生	2.587
6	总计	3483.567
水短缺足迹		161.41(m^3H_2Oeq/1000m)

表 3　铝合金电缆水短缺足迹

Table3　Water scarcity footprint of aluminum alloy cable

序号 Serial number	生命周期阶段 Life cycle phase	用水量(m^3/1000m) Water consumption
1	原材料	941.447
2	生产	140.47
3	使用	3535.95
4	运输	12.023
5	废弃/再生	3.282
6	总计	4633.172
水短缺足迹		7721.95(m^3H2Oeq/1000m)

铝合金电缆生命周期过程中主要用水阶段为使用阶段,占总用水量的 76.32%,使用阶段计算的使用年限为 30 年,用水主要来自电力损耗所需要的水量。其次来自产品的原材料阶段,占比约为 20.32%,用水量最少的为废弃再生阶段,占比为 0.071%。

铜电缆生命周期全过程耗水量与铝合金电缆相比少 24.8%,水短缺足迹相比少 97.9%。这是因为铜电缆生产企业在江苏,其水资源压力指数 WSI 为 0.0278,而铝合金电缆的生产企业在河北,其水资源压力指数 WSI 为 1。WSI 越高,该区域的水资源匮乏越严重。结果表明,在江苏地区生产电缆使用的水资源对当地水环境压力造成的影响远小于在河北地区生产电缆造成的影响。

3 结论

本文采用基于 ISO 14046 的生命周期水足迹评价方法,分别对来自不同产地的铜电缆和铝合金电缆进行了产品水足迹评价研究,该方法具有较好的可操作性,为电缆工业产品水足迹评价提供了方法支持。得到以下结论:

(1)在铜电缆生命周期过程中,主要用水阶段为使用阶段,水资源潜在劣化影响(包括水富营养化、水酸化和水生态毒性等)较水资源短缺的影响更大。

(2)电缆生产企业所处地理位置的水资源短缺程度对其产品的水短缺足迹具有决定性影响。

(3)采用科学合理的水足迹方法评价产品原材料、生产、使用、运输、废弃再生等生命周期全过程对水资源和水环境的影响,能为我国实现工业布局的合理规划和水资源的可持续利用提供科学依据。

参考文献(References):

[1] 薛明娇, 王红瑞. 了解水足迹. 百科知识, 2007, (3): 26-27.

[2] 黄凯, 王梓元, 杨顺顺, 金晨. 水足迹的理论、核算方法及其应用进展. 水利水电科技进展, 2013, 33(4): 78-83.

[3] Hoekstra A Y, Hung P Q. Virtual Water Trade: a Quantification of Virtual Water Flows Between Nations in Relation to International Crop Trade. Value of Water Research Report Series No. ll. Netherlands, Delft, 2002: 13-23.

[4] Hoekstra A Y, Chapagain A K, Aldaya M M, Mekonnen M M. The Water Footprint Assessment Manual: Setting the Global Standard. London, UK: Routledge, 2011.

[5] ISO 14046: 2014 Environmental management—water footprint—principles, requirements and guidelines. Switzerland: ISO, 2014.

[6] 徐长春, 黄晶, Ridoutt B G, 刘继军, 陈阜. 基于生命周期评价的产品水足迹计算方法及案例分析. 自然资源学报, 2013, 28(5): 873-880.

[7] Ridoutt B G, Pfister S. A revised approach to water footprinting to make transparent the impacts of consumption and production on global freshwater scarcity. Global Environmental Change, 2010, 20(1): 113-120.

[8] Ridoutt B G, Juliano P, Sanguansri P, Sellahewa J. The water footprint of food waste: case study of fresh mango in Australia. Journal of Cleaner Production, 2010, 18(16-17): 1714-1721.

[9] Ridoutt B G, Sanguansri P, Freer M, Harper G S. Water footprint of livestock: comparison of six geographically defined beef production systems. The International Journal of Life Cycle Assessment, 2012, 17(2): 165-175.

[10] 刘秀巍, 刘馨磊, 孙庆智, 王来力, 吴雄英. 产品水足迹研究及其在纺织行业的应用. 纺织导报, 2011, (3): 23-26.

[11] 贾佳, 严岩, 王辰星, 梁玉静, 张亚君, 吴钢, 刘馨磊, 王丽华, 杜冲. 工业水足迹评价与应用. 生态学报, 2012, 32(20): 6558-6565.

[12] 王来力, 吴雄英, 丁雪梅, 王丽华, 于建明. 棉针织布的工业碳足迹和水足迹实例分析初探. 印染, 2012, 38(7): 43-46.

[13] Ercin A E, Aldaya M M, Hoekstra A Y. Corporate water footprint accounting and impact assessment: the case of the water footprint of a sugar-containing carbonated beverage. Water Resources Management, 2011, 25(2): 721-741.

[14] 黄少良, 杜冲, 李伟群, 王丽华. 工业水足迹理论与方法浅析. 节能与环保, 2013, (3): 54-55.

[15] 林翎, 宋然世界可持续发展工商理事会, 世界资源研究所. 产品寿命周期核算与报告标准. 陈健华, 陈亮, 刘玫, 鲍威, 吴丽丽, 黄进, 高东峰, 付允, 王秀腾, 谢琴, 译. 北京: 中国质检出版社, 2013: 26-46.

[16] Keating B A, Carberry P S, Hammer G L, Probert M E, Robertson M J, Holzworth D, Huth N I, Hargreaves J N G, Mernke H, Hochman Z, McLean G, Verburg K, Snow V, Dimes J P, Silburn M, Wang E, Brown S, Bristow K L, Asseng S, Chapman S, McCown R L, Freebairn D M, Smith C J. An overview of APSIM, a model designed for farming systems simulation. European Journal of Agronomy, 2003, 18(3/4): 267-288.

[17] Helmes R J K, Huijbregts M A J, Henderson A D, Jolliet O. Spatially explicit fate factors of phosphorous emissions to freshwater at the global scale. The International Journal of Life Cycle Assessment, 2012, 17(5): 646-654.

[18] Heijungs R, Guinée J B, Huppes G, Lankreijer R M, Udo de Haes H A, Sleeswijk A W, Ansems A M M, Eggels P G, van Duin R, de Goede H P. Environmental Life Cycle Assessment of Products. Guide and Backgrounds. Leiden: CML, 1992.

[19] Dreyer L C, Niemann A L, Hauschild M Z. Comparison of three different LCIA methods: EDIP97, CML2001 and Eco-indicator 99. The International Journal of Life Cycle Assessment, 2003, 8(4): 191-200.

[20] Boulay A M, Bulle C, Bayart J B, Deschênes L, Margni M. Regional characterization of freshwater use in LCA: modeling direct impacts on human health. Environmental Science & Technology, 2011, 45(20): 8948-8957.

[21] Boulay A M, Bouchard C, Bulle C, Deschênes L, Margni M. Categorizing water for LCA inventory. The International Journal of Life Cycle Assessment, 2011, 16(7): 639-651.

[22] Jolliet O, Margni M, Charles R, Humbert S, Payet J, Rebitzer G, Rosenbaum R. IMPACT 2002+: a new life cycle impact assessment methodology. The International Journal of Life Cycle Assessment, 2003, 8(6): 324-330.

[23] 郝天, 杜鹏飞, 杜斌, 曾思育. 基于 USEtox 的焦化行业优先污染物筛选排序研究. 环境科学, 2014, 35(1): 304-312.

[24] 徐建英, 赵春桃, 魏东斌. 生物毒性检测在水质安全评价中的应用. 环境科学, 2014, 35(10): 3991-3997.

[25] 马梅. 新的生物毒性测试方法及其在水生态毒理研究中的应用[D]. 北京: 中国科学院研究生院, 2002.

[26] 吴文俊, 蒋洪强. 我国工业废水重金属排放的等标负荷特征分析. 环境科学与技术, 2012, 35(11): 180-185.

[27] 范辞冬, 王幸锐, 王玉瑶, 刘方, 吴崇丹. 中国人类活动源非甲烷挥发性有机物(NMVOC)排放总量及分布. 四川环境, 2012, 31(1): 82-87.

[28] 罗卫东. 我国电线电缆产业发展剖析. 价值工程, 2014, (11): 50-51.

[29] 党朋, 苏桓, 刘斌, 郑秋, 曾伟, 王乐. 铝合金电缆与铜电缆的生命周期评价研究. 环境工程技术学报, 2014, 4(1): 73-79.

[30] 尹婷婷, 李恩超, 侯红娟. 钢铁工业产品水足迹研究. 宝钢技术, 2012, (3): 25-28.

[31] 任丽娟. 生命周期评价方法及典型纸产品生命周期评价研究[D]. 北京: 北京工业大学, 2011.

[32] 叶宏亮, 马文会, 杨斌, 任玖阳, 刘大春, 戴永年. 工业硅生产过程生命周期评价研究. 轻金属, 2007, (11): 46-49.

[33] 严岩, 贾佳, 王丽华, 杜冲, 刘馨磊, 付晓, 刘昕, 吴钢. 我国几种典型棉纺织产品的工业水足迹评价. 生态学报, 2014, 34(23): 7119-7126.

[34] Rosenbaum R K, Bachmann T M, Gold L S, Huijbregts M A J, Jolliet O, Juraske R, Koehler A, Larsen H F, Macleod M, Margni M, Mckone T E, Payet J, Schuhmacher M, van de Meent D, Hauschild M Z. USEtox—the UNEP-SETAC toxicity model: recommended characterisation factors for human toxicity and freshwater ecotoxicity in life cycle impact assessment. The International Journal of Life Cycle Assessment, 2008, 13(7): 532-546.

[35] 田彬彬, 徐向阳, 付鸿娟, 王顺. 基于生命周期的产品碳足迹评价与核算分析. 中国环境管理, 2012, (1): 21-26.

[36] 马倩倩, 卢宝荣, 张清文. 基于生命周期评价(LCA)的纸产品碳足迹评价方法. 中国造纸, 2012, 31(9): 57-62.

[37] 王来力, 丁雪梅, 吴雄英. 纺织产品的灰水碳足迹核算. 印染, 2013, 39(9): 41-43.