

纺织服装产品的化学品足迹核算与评价

田泽君, 王来力, 李 一

(浙江理工大学 a. 服装学院; b. 浙江省服装工程技术研究中心; c. 浙江省丝绸与时尚文化研究中心 杭州 310018)

摘要: 为解决纺织服装产品生命周期内化学品过量使用所引发的环境负荷难以量化、评价, 以及不同产品生命周期内环境负荷难以比较等问题, 文章在综述化学品足迹概念及其研究进展的基础上, 重点阐述了纺织服装产品化学品足迹核算与评价中的核算边界、核算方法、结果评价等关键问题。认为纺织服装产品化学品足迹核算与评价可以实现产品间和工序间环境负荷的量化比较; 进行特征因子不确定性分析和 USEtox 模型优化, 可提高纺织服装产品化学品足迹核算结果的精度; 综合生态毒性和人体毒性的综合评价, 可增加纺织服装产品生命周期内化学品管控的科学性。

关键词: 化学品足迹; 纺织服装产品; 核算; 人体毒性; 生态毒性

中图分类号: TS101.9; TS94.1 文献标志码: A 文章编号: 1001-7003(2019)01-0033-05 引用页码: 011106

Calculation and assessment of chemical footprint of textiles and apparel

TIAN Zejun, WANG Laili, LI Yi

(a. School of Fashion Design & Engineering; b. Engineering Research Center of Clothing of Zhejiang Province; c. Silk and Fashion Culture Research Center of Zhejiang Province, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018, China)

Abstract: It is difficult to quantify and evaluate environmental load caused by the excessive consumption of chemicals in the life cycle of textile and apparel, and to compare environmental load in the life cycle of different products. To solve the problems, this paper reviewed the definition and research progress of chemical footprint firstly. On the basis of that, some key issues, such as calculation boundary, calculation method and assessment of chemical footprint of textile and apparel products were discussed in detail. It is concluded that the calculation and assessment of chemical footprint can realize the quantitative comparison of environmental load of different products and processes. The accuracy of chemical footprint calculation can be increased by the uncertainty analysis of characterization factors and the USEtox model optimization. At last, the comprehensive assessment of ecotoxicity and human toxicity can improve the chemicals management scientificity in the life cycle of textile and apparel products.

Key words: chemical footprint; textiles and apparel; calculation; human toxicity; ecological toxicity

过量化学品使用造成的严重污染已被联合国列为影响人类生存与发展的全球性重大环境问题之一^[1]。中国是有毒有害风险化学品生产和消费大

国, 区域性、结构性、布局性环境风险日益凸显。国家《“十三五”生态环境保护规划》明确要求建立化学品环境与健康风险评估方法、程序和技术规范体系, 开展多污染物协同控制^[2]。

纺织工业是典型的“三高一低”(高耗能、高排放、高污染和低效率)行业, 化学品的大量使用是造成纺织工业高排放和高污染的重要原因之一^[3]。纺织工业不仅是化学品消费大户, 据统计, 每生产 1 kg 的服装产品需要消耗 1.5 ~ 6.9 kg 的化学品, 同时还是受化学品使用风险影响最大的行业之一^[4]。化学品贯穿纺织工业的全产业链, 其中不乏重金属、苯系

收稿日期: 2018-04-17; 修回日期: 2018-11-15

基金项目: 国家自然科学基金项目(71503233); 浙江省自然科学基金项目(LQ16G030012, LY17G030035); 浙江理工大学优秀研究生学位论文培育基金项目(2018-XWLWPY-M-04-02); 浙江省大学生科技创新项目(2018R406018); 浙江省大学生科技创新活动计划项目(2018R406041)

作者简介: 田泽君(1994—), 女, 硕士研究生, 研究方向为纺织服装化学品足迹理论。通信作者: 李一, 讲师, liyi2009@zstu.edu.cn。

物、壬基酚等有毒有害化学品,严重影响生物健康和生态安全^[5]。

在当前化学品污染研究领域,化学品足迹已作为一种核算和评价人类活动排放的化学品对生态环境产生负荷的重要方法,在产品、组织和区域等不同层面进行了初步探讨和应用。本文回顾了当前国内外化学品足迹核算与评价的研究进展,并就纺织服装产品化学品足迹核算与评价的核算边界、核算方法、结果评价等问题进行了分析讨论,为纺织工业的化学品管理和化学品污染治理提供参考。

1 化学品足迹的概念

对于化学品足迹的概念有多种定义,其主要的概念分类有毒性压力^[3 6-7]、环境空间占用^[8-10]和质量^[11]3类。环境空间占用表达形式是从环境空间容量的角度,结合化学品排放量,量化并评价将其稀释到对环境无危害浓度所占用的资源;毒性压力表达形式是从生态系统承载能力的角度,表征在一定时间、一定空间体积内,排放的化学品对生态系统和人体健康的影响;质量表达形式是从产品生命周期的角度,来核算产品在生命周期内的有害物质成分的量及其对人类和生态系统造成的潜在风险。

对于产品化学品足迹而言,毒性压力的定义和解释应用最为广泛。其毒性评估过程主要借助 USEtox 模型毒性特征因子,量化产品全生命周期内由化学品排放产生的人体毒性和生态毒性。Berthoud 等^[12]量化了小麦种植过程各阶段的淡水生态毒性影响,得出施肥过程毒性影响最大。并对可供选择的 38 种农药的毒性影响进行评估,以期将施肥过程毒性影响降到最低。Florent 等^[13]量化了汽油、柴油和煤三种能源,在汽车行驶 1 km 中,全生命周期(包含能源开采、加工及汽车使用等整个过程)毒性排放,结果显示基于 USEtox 模型的化学品足迹可以很好地评估污染物排放的毒性影响。Van Hoof 等^[14]量化了两种洗涤剂排入环境中的毒性影响,并对其排放清单中的 60 余种化学组分进行了核算,得出模型的结构机理能很好模拟并解释化学品进入环境并产生毒性的过程。Roos 等^[3]率先在纺织服装领域引入 USEtox 模型,并对两种涤棉白色病人服及不同染料

的蓝色工作服的人体毒性和生态毒性影响进行量化,结果显示未经漂白的服装比漂白的服装毒性影响更大;化学助剂的毒性影响远高于染料。但其研究仅限于毒性影响的计算并未提出纺织服装产品化学品足迹的概念,也未对化学品足迹的核算边界与核算模型等进行系统化的阐述。

2 纺织服装产品化学品足迹

纺织服装产品种类繁多,全生命周期(始于纤维原材料的获取,经过加工直至最终制成成品使用、废弃和回收)链条长,工艺环节复杂。纺织用化学品种类繁多,产品生产污染物量大类多,仅依赖于综合指标和单一指标评价缺陷明显。针对此类排污性质比较复杂的问题,发达国家在印染等行业纳入综合毒性指标^[15]。基于 USEtox 模型的化学品足迹理论可实现纺织服装产品全生命周期化学品使用和排放潜在毒性的可计量、可比较和可评价,全面反映化学品使用及其污染物排放造成的环境负荷。基于此可构建出一条基于纺织服装产品全生命周期内以化学品本身为治理载体的监管模式,有利于重点污染工序及链段的识别,为纺织工业模块化化学品管理提供理论基础。

2.1 核算边界

化学品足迹的核算边界主要是对时间范围和空间尺度的界定^[16]。对于纺织服装产品来说,时间范围包括生命周期的某个阶段(原材料、生产、服装、使用等)或某些阶段内化学品的排放量^[17]。化学品足迹核算与评价过程中,在界定时间范围内的投入和产出属于空间边界的范畴^[5]。核算和评价的边界不一致,会直接影响结果的可比性^[18]。对于纺织服装产品而言,“纺织化学品”是指直接参与纺织服装产品生命周期任何部分的化学品。能源生产和燃料使用中排放的化学物质(如二氧化碳和微粒等),不认为是纺织化学品。纺织服装产品关注的化学品分布在整个供应链上,从种植阶段使用的农药和化肥,到印染过程使用的染料和助剂,再到染整废水中的难降解产物和产品上残留的化学品。在纺织服装产品化学品足迹具体核算边界内,化学品以有组织或是无组织的形式向环境排放。通过对纺织服装产品整个工业链进行梳理,得到纺织服装产品化学品足迹的核算边界,如图 1 所示。

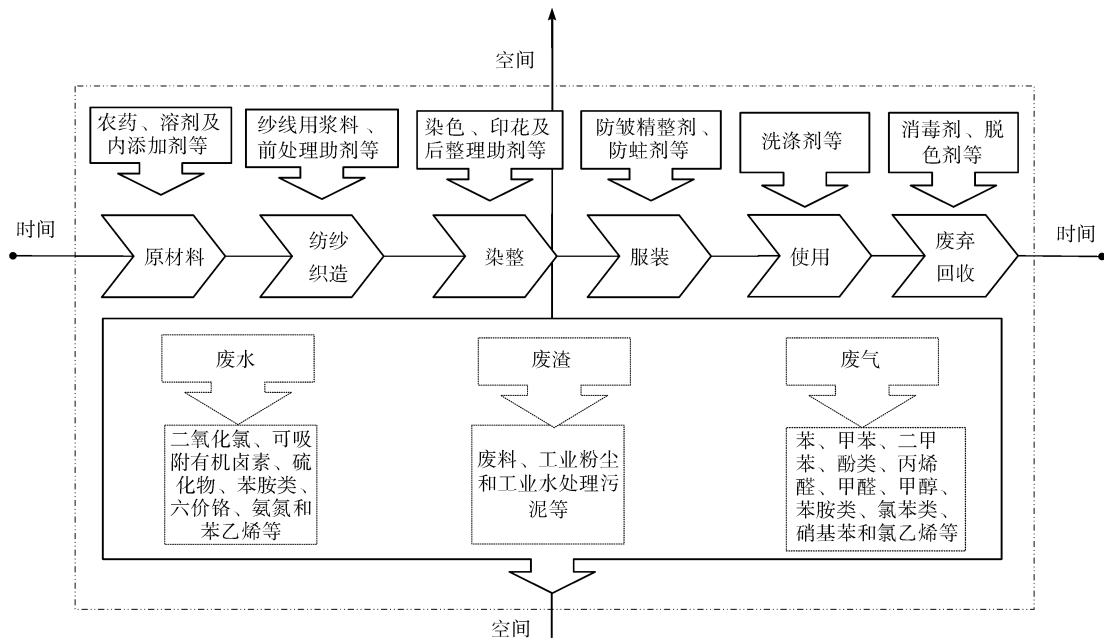


图 1 纺织服装产品化学品足迹核算边界

Fig. 1 Calculation boundary of chemical footprint of textiles and apparel

2.2 核算方法

环境影响包括对空气、水和土壤废弃物的排放，以及在生命周期不同阶段能源、水、物质和土地等资源的使用。纺织服装产品的化学品环境负荷核算的主要挑战在于纺织服装产品产业链的复杂性、纺织化学品使用和性能的多样性、全生命周期毒性影响潜力的复杂性。USEtox 模型涵盖了六类环境介质，模拟了化学品污染物进入生态环境发生降解、迁移、交换及人体内吸收整个过程，适合复杂多样的纺织服装化学品环境影响潜力的核算。USEtox 模型特征化因子的核算主要依赖于归宿、暴露和效应因子，其核算模型如下^[19]：

$$CF_{USEtox} = EF_{USEtox} \times XF_{USEtox} \times FF_{USEtox} \quad (1)$$

式中： CF 为特征化因子，cases/kg_{emission}（人体毒性）或 PAF·m³·day/kg_{emission}（生态毒性）； FF 为归宿因子，day； XF 为暴露因子，day⁻¹； EF 为效应因子，cases/kg（人体毒性）或 PAF·m³/kg（生态毒性）。

归宿因子 FF 代表某种化学物质在环境中的停留时间；效应因子 EF 代表污染物对人体和生态系统的毒性影响；暴露因子 XF 代表该化学物质的生物利用度。USEtox 模型运用于化学品足迹毒性评估中， EF 的毒性参考点不同， CF_{ChF} 和 CF_{USEtox} 存在如下转换关系^[19]：

$$CF_{ChF} = EF_{ChF} \times XF_{USEtox} \times FF_{USEtox} = f \times CF_{USEtox} \quad (2)$$

纺织服装化学品足迹是在现有的污染物排放清

单基础上，增加特征化因子数据计算而得。针对人体和生态系统两类不同性质的受体，模型给出了人体毒性和生态毒性两类不同性质的特征化因子。纺织服装化学品足迹的人体毒性足迹和生态毒性足迹核算模型如下^[20]：

$$ChF = f \cdot \sum CF_{USEtox} \cdot E \quad (3)$$

式中： ChF 为纺织服装化学品足迹，cases（人体毒性足迹）或 PAF·m³·day（生态毒性足迹）； f 为修正因子（取值为 290，无量纲）； E 为排入环境介质的污染物的质量，kg。

在纺织服装产品化学品足迹的量化中，生态毒性足迹有两种不同的计量单位：一种是体积形式，用来表征稀释污染物到一定浓度之下所需的淡水体积，与其评价边界内的可用淡水体积比较，进行可持续性的评估。另一种是体积与时间乘积形式，表达了污染物对淡水体积的消耗及对水体环境时间的占用，即如果已知污染发生的具体时间段，生态毒性足迹的体积形式和体积与时间形式，可以互相转化。

2.3 结果评价

首先，在纺织服装产品化学品足迹核算中，人体毒性足迹和生态毒性足迹是两类不同性质的单位，不能进行具体影响的综合评价。针对该问题主流的是模糊数学评价模型，先在核算边界内构建多个时间段内人体毒性、生态毒性的交叉列联表，从而得出人体毒性足迹和生态毒性足迹的权重矩阵（可以采

用加权法)和隶属度矩阵,然后将权重矩阵与隶属度矩阵做乘法,得到模糊数学综合评价集,最后取其中最大者为所对应的产品化学品足迹。

其次,在纺织服装产品化学品足迹评价中,应该包括两个层面:产品层面和区域层面。产品层面是从纺织服装产品全生命周期的角度,依据投入产出模型,量化不同类或同类不同种纺织服装产品的化学品足迹,核算结果可用来识别优先污染产品,进而实行更加环保的产业规划或产品配置;纺织服装产品不同工序链段间化学品足迹核算,可识别优先污染工序,指导合理的技术改革和工艺优化的进行。纺织用化学品的选择(如染料、助剂等)将直接影响产品的质量,也会影响化学品足迹的核算结果。统一的核算边界,功能单位和质量标准等是纺织服装产品化学品足迹可比较的前提。

区域层面是从纺织服装产品工业生产对区域环境影响的角度,生产区域不同,其排放同质同量化学品污染所产生的环境影响也不尽相同。USEtox模型参数设定中,区域选择是影响特征化因子精确度的关键因素。目前USEtox模型中只包括中国东部的毒性特征化因子数据,因此数据库的扩充和模型的优化是今后中国产品化学品足迹研究的重要内容之一。

3 展望

化学品足迹综合考虑了纺织服装产品毒性影响潜力和时间效应,为环境与健康风险评估提供了依据。纺织服装产品具有产品种类多、工艺链条长的特点,加之化学品污染物成分复杂,存在多重合作用,化学品足迹为纺织工业的化学品管控提供了新的思路。

1) 化学品环境负荷的定量化,有利于实现纺织用化学品管理从“源头管控”和“末端治理”到“过程风险防范”的转变,更符合当前化学品全生命周期管理的需要。

2) 基于USEtox模型的纺织服装化学品足迹过多地依赖于模型的毒性因子,进行归宿因子、暴露因子和效应因子的不确定性分析及模型的优化,有利于纺织服装产品环境负荷核算结果精度的提高。

3) 化学品足迹核算结果的表征包括生态毒性与人体毒性,对于针对不同受体的两种毒性表征方法,进行综合评价有利于核算结果的可比性和完整性,

可为纺织服装化学品排放限值的制定提供依据。

4) 在相同的核算边界内,不同类别与同类别不同纺织服装产品及工序之间环境负荷的对比,以及生产全过程合理的模块化拆分研究,可为优先污染产品和优先污染工序的识别提供参考,有利于纺织服装产品环境负荷的削减。

参考文献:

- [1] United Nations Environment Programme. Global Chemicals Outlook: Towards Sound Management of Chemicals [M]. Nairobi: Gannett Publishing Services, 2012.
- [2] 中华人民共和国工业和信息化部. 纺织工业“十三五”规划 [EB/OL]. (2017-08-26) [2018-07-15]. <http://www.miit.gov.cn/n1146295/n1652930/n3757019/c5267251/content.html>.
Ministry of Industry and Information Technology of the Peoples Republic of China. Textile industry “much starker choices and graver consequences in planning” [EB/OL]. (2017-08-26) [2018-07-15]. <http://www.miit.gov.cn/n1146295/n1652930/n3757019/c5267251/content.html>.
- [3] ROOS S, POSNER S, JONSSON C, et al. Is unbleached cotton better than bleached? Exploring the limits of life-cycle assessment in the textile sector [J]. Clothing & Textiles Research Journal, 2015, 33(4): 250-261.
- [4] ROOS S. Towards Sustainable Use of Chemicals in the Textile Industry: How Life Cycle Assessment Can Contribute [D]. Gothenburg: Chalmers University of Technology, 2015.
- [5] 王来力, 吴雄英, 丁雪梅, 等. 纺织品及服装的工业水足迹核算与评价 [J]. 纺织学报, 2017, 38(9): 162-167.
WANG Laili, WU Xiongying, DING Xuemei, et al. Calculation and assessment of industrial water footprint of textiles and apparel [J]. Journal of Textile Research, 2017, 38(9): 162-167.
- [6] PANKO J M, HITCHCOCK K M. Chemical Footprint: Enduring Product Sustainability [M]. EM: AWMA Magazine for Environ Managers, 2011: 12-15.
- [7] ROOS S, PETERS G M. Three methods for strategic product toxicity assessment—the case of the cotton T-shirt [J]. International Journal of Life Cycle Assessment, 2015, 20(1): 1-10.
- [8] POSTHUMA L, BJØRN A, ZIJP M C, et al. Beyond safe operating space: finding chemical footprinting feasible [J]. Environmental Science & Technology, 2014, 48(11): 6057-6059.
- [9] ZIJP M C, POSTHUMA L, VAN de M D. Definition and applications of a versatile chemical pollution footprint methodology [J]. Environmental Science & Technology,

- 2014 , 48(18) : 10588-10597.
- [10]BJØRN A , DIAMOND M , BIRKVED M , et al. Chemical footprint method for improved communication of freshwater ecotoxicity impacts in the context of ecological limits [J]. *Environmental Science & Technology* , 2014 , 48 (22) : 13253-13262.
- [11]KONKEL L. Chemical footprinting identifying hidden liabilities in manufacturing consumer products [J]. *Environmental Health Perspectives* , 2015 , 123(5) : 130-133.
- [12]BERTHOUD A , MAUPU P , HUET C , et al. Assessing freshwater ecotoxicity of agricultural products in life cycle assessment (LCA) : a case study of wheat using French agricultural practices databases and USEtox model [J]. *International Journal of Life Cycle Assessment* , 2011 , 16 (8) : 841-847.
- [13]QUERINI F , MOREL S , BOCH V , et al. USEtox relevance as an impact indicator for automotive fuels. Application on diesel fuel , gasoline and hard coal electricity [J]. *International Journal of Life Cycle Assessment* , 2011 , 16 (16) : 829-840.
- [14]HOOF G V , SCHOWANEK D , FRANCESCHINI H , et al. Ecotoxicity impact assessment of laundry products: a comparison of USEtox and critical dilution volume approaches [J]. *International Journal of Life Cycle Assessment* , 2011 , 16(8) : 803-818.
- [15]靳强 , 李琛 , 刘莲 , 等. 基于毒性足迹的污染源头管控研究[J]. *环境与可持续发展* , 2017 , 42(4) : 19-21.
JIN Qiang , LI Chen , LIU Lian , et al. Environmental management on environmental pollution point sources by toxicity footprint [J]. *Environment and Sustainable Development* , 2017 , 42(4) : 19-21.
- [16]何琬文 , 李一 , 王晓蓬 , 等. 丝绸产品基准水足迹核算与评价[J]. *现代纺织技术* , 2018 , 26(2) : 41-45.
HE Wanwen , LI Yi , WANG Xiaopeng , et al. Calculation and assessment of benchmark water footprint of silk products [J]. *Advanced Textile Technology* , 2018 , 26(2) : 41-45.
- [17]王来力 , 李一. 杭州市纺织服装产业碳排放分析[J]. *丝绸* , 2016 , 53(6) : 44-48.
WANG Laili , LI Yi. Investigation on carbon emissions of textile and apparel industry in Hangzhou [J]. *Journal of Silk* , 2016 , 53(6) : 44-48.
- [18]王来力 , 丁雪梅 , 吴雄英. 纺织产品碳足迹研究进展[J]. *纺织学报* , 2013 , 34(6) : 113-119.
WANG Laili , DING Xuemei , WU Xiongying. Research progress of textile carbon footprint [J]. *Journal of Textile Research* , 2013 , 34(6) : 113-119.
- [19]郝天. 基于 USEtox 模型的焦化行业优先污染物筛选排序研究[D]. 北京: 清华大学 , 2013.
HAO Tian. Research on Ranking and Setting Priority to Coking Pollutants in Terms of Toxicity Based on USEtox [D]. Beijing: Tsinghua University , 2013.
- [20]杜翠红 , 王中钰 , 陈景文 , 等. 化学品足迹: 概念、研究进展及挑战[J]. *生态毒理学报* , 2016 , 11(2) : 18-26.
DU Cuihong , WANG Zhongyu , CHEN Jingwen , et al. Chemical footprint: concepts , research progress and challenges [J]. *Asian Journal of Ecotoxicology* , 2016 , 11 (2) : 18-26.