



# 纺织服装产品环境足迹核算与评价

储江, 李一, 徐平华, 王来力

(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:** 为了加强对纺织服装产品生产的环境负荷评价, 综述了水足迹、碳足迹、化学品足迹等环境足迹的概念, 分析讨论了纺织服装产品环境足迹核算中的核算边界、核算方法、分配方法以及结果评价等关键性问题。通过对三类足迹进行梳理和分析发现, 对纺织服装产品环境足迹核算过程中的公共投入部分进行产值和产量的分配, 可提高核算结果的精确性和准确性; 纺织服装产品环境足迹的评价可分为组织层面、产品层面和区域层面。文章最后提出了当前纺织服装产品环境足迹研究中亟待解决的问题: 一方面需对三类足迹核算结果进行统一化和标准化; 另一方面是需要建立纺织服装产品各类投入的特征化因子和排放系数数据库。

**关键词:** 纺织服装产品; 环境足迹; 水足迹; 碳足迹; 化学品足迹

中图分类号: TS101; TS941

文献标志码: A

文章编号: 1673-3851(2019)11-0707-09

## Calculation and assessment of product environmental footprint of textiles and apparel

CHU Jiang, LI Yi, XU Pinghua, WANG Laili

(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:** In order to strengthen the environmental load evaluation of textiles and apparel production, this paper summarized the concepts of water footprint, carbon footprint, chemical footprint and other environmental footprints. Key issues, such as calculation boundary, calculation method, distribution method and the result assessment of environmental footprint of textiles and apparel products were discussed in detail. By collating and analyzing the three kinds of footprints, it is found that the output value and output distribution of the public input in the accounting process can improve the accuracy of the accounting results. The assessment of environmental footprint of textiles and apparel is divided into organizational level, product level and regional level. Finally, the difficulties and challenges in the study of environmental footprint of textiles and apparel were put forward. On the one hand, it is necessary to unify and standardize the accounting results of three types of footprints. On the other hand, it is necessary to establish a database of characteristic factors and emission coefficients of various inputs of textiles and apparel.

**Key words:** textiles and apparel; environmental footprint; water footprint; carbon footprint; chemical footprint

收稿日期: 2019-03-20 网络出版日期: 2019-07-29

基金项目: 教育部人文社会科学研究项目(19YJCZH092); 浙江省自然科学基金项目(LY17G030035); 国家自然科学基金项目(61702460); 国家重点研发计划项目(2018YFF0215703)

作者简介: 储江(1994-), 男, 安徽安庆人, 硕士研究生, 主要从事纺织服装环境足迹方面的研究。

通信作者: 王来力, E-mail: wangll@zstu.edu.cn

## 0 引言

产品环境足迹(Product environmental footprint, PEF)是2013年欧盟为建立统一的绿色产品市场,以生命周期评价理论为基础而提出的一种评价产品环境绩效的方法。PEF评价体系<sup>[1]</sup>所涉及的对象包括:全球气候变化、臭氧层消耗、生态毒性-淡水、人体毒性-癌症、人体毒性-非癌症、可吸入无机物、电离辐射-人体健康、光化学臭氧合成、酸化、富营养化-陆地、富营养化-水体、资源消耗-水、资源消耗-矿物、化石、土地转换等。PEF几乎涵盖了现有所有的足迹类指标,但是对某些具体产品而言,在进行环境足迹评价的过程中并非涉及到所有的环境影响类型。笔者对国内外相关文献做了检索分析,发现关于纺织服装产品在其生命周期阶段范围内涉及环境足迹的研究主要包括水足迹、碳足迹和化学品足迹的核算与评价。虽然该领域的相关研究较多,但是大多数都是靶向性单一污染物的减排研究,对纺织服装产品环境负荷的综合性评价却鲜有报道,缺少系统性、统一性的集合各种减排物的标准,本文融合三类环境足迹对纺织服装产品进行综合性评价,通过纳入不同的环境指标来提高核算结果的科学性和完整性。

## 1 概念简介

### 1.1 水足迹

水足迹的概念由Hoekstra等<sup>[2]</sup>在2002年提出,是评价水资源环境负荷的主要工具。国际上对于水足迹的研究主要分为两种。2014年以前,采用的是Water Footprint Network(WFN)体系,包括蓝水足迹、绿水足迹和灰水足迹三种<sup>[3]</sup>。WFN体系将水足迹定义为已知人口在特定时间和空间范围内消耗的淡水资源的量。2014年8月ISO发布了ISO14046:2014《Environmental management-Water footprint-Principles, requirements and guidelines》,以国际标准的形式规范了水足迹核算与评价的方法。该标准将水足迹分为水稀缺足迹和水劣化足迹两大类,将水足迹定义为量化与水相关潜在环境影响的指标。ISO14046:2014的提出是为了弥补灰水足迹的不足,因为灰水足迹实际上采用的是稀释理论,即将污染的废水稀释到对环境无害所需的淡水量,实际上并没有体现出废水对环境的实际影响,而水劣化足迹则是通过具体的指标(如水酸化足迹、水碱化足迹等)来评价对环境的影响,

较单纯的用水量而言更具有科学性<sup>[4]</sup>。

### 1.2 碳足迹

碳足迹的概念源于Wackernagel等<sup>[5]</sup>所提出的生态足迹,是评价温室气体排放对气候影响的重要工具。国际上对于碳足迹概念的界定较为统一,现有文献中关于碳足迹的定义主要分为两类:一类是基于生命周期理论来核算人类活动所造成的温室气体的量或碳当量<sup>[6-8]</sup>;另一类是基于化石燃料和环境承载能力,核算其消耗所产生的CO<sub>2</sub>的排放量<sup>[9-10]</sup>。无论是第一类还是第二类定义都可以将其概括为:人类在生产活动中向环境中排放的直接或间接的温室气体的量<sup>[11]</sup>。碳足迹的研究对象包括:组织(如国家、区域、城市、行业、机构和家庭)、项目、技术、个人、产品和服务等<sup>[12]</sup>。

### 1.3 化学品足迹

化学品足迹的概念是由Panko等<sup>[13]</sup>在2011年提出,是评价化学品污染物对生态系统影响的工具。对于化学品足迹的定义也有很多,总体上可分为三类:第一类是基于毒性压力,评价在单位时间和空间内化学品污染物对生态系统和人体健康的影响<sup>[14-15]</sup>;第二类是基于环境空间占用,核算将化学品污染物稀释到对环境无危害浓度所需要的资源<sup>[16-18]</sup>;第三类是以质量为表达形式核算污染物的质量对人类和生态系统造成的压力<sup>[19]</sup>。其中第一类为主流定义,原因在于化学品足迹从本质上所体现的是一种毒性压力,单纯用空间占用和质量不足以表达对生态和人体健康的影响。化学品足迹应包括三个方面:以人为主体的、以排放的有毒化学品为主题和以环境空间为表达形式进行毒性压力的可持续性评价<sup>[20]</sup>。

## 2 纺织服装行业相关研究

纺织工业是中国国民经济的支柱型产业,同时也是高耗能、高耗水和高排放的行业。纺织服装产品从原材料获取到废弃物回收利用全生命周期链条长,生产加工工序繁多,在生产过程中(纺纱、织造、染整等)投入大量的能源(煤炭、电力、蒸汽等)、新鲜水、化学品(洗涤剂、染色剂、消毒剂等)<sup>[21-22]</sup>,同时会排放大量的废水、废气、废渣,对生态环境和人体健康产生影响<sup>[23-24]</sup>。本文结合产品环境足迹理论将纺织服装产品的环境足迹纳入水足迹、碳足迹和化学品足迹三种环境影响类型,从而对纺织服装产品进行综合性影响评价。《纺织工业“十三五”发展规划》明确提出了绿色发展目标:到2020年,纺织单位工

业增加值能耗、取水以及污染物排放总量累计分别下降 18%、23% 和 10%。因此减少能耗、水耗、化学品消耗及污染物的排放是实现纺织工业可持续发展的重要途径<sup>[25]</sup>。通过对纺织服装产品环境足迹的研究,可以掌握各类纺织产品在生产加工过程中对资源的消耗以及污染物排放的环境负荷。

本文对国内外纺织服装行业的水足迹、碳足迹以及化学品足迹研究的相关文献进行了整理和分析,同时从三个层面对三类足迹研究进行了划分,分别为行业层面、产品层面和消费层面,其中产品层面又可进一步细分为原材料、工序、纱线、织物、成品等,具体内容如表 1 所示。

表 1 纺织服装领域环境足迹相关研究分类

对象	层面	分类	研究学者
水足迹	行业	概念方法	王来力等 <sup>[26-29]</sup> ; 李一等 <sup>[30]</sup> ; 何琬文等 <sup>[31]</sup> ; 孙清清等 <sup>[32]</sup> ; 许璐璐等 <sup>[33]</sup> ; 马建华等 <sup>[34]</sup> ; 赵心婷等 <sup>[35]</sup> ; 王东等 <sup>[36]</sup> ; 刘秀魏等 <sup>[23]</sup> ; 邵珍珍 <sup>[37]</sup>
		原材料	Chapagain 等 <sup>[38]</sup>
	产品	工序	许璐璐等 <sup>[39]</sup>
		织物	王来力等 <sup>[25]</sup> ; 严岩等 <sup>[40]</sup>
		成品	何琬文等 <sup>[41]</sup> ; 钟玲等 <sup>[42]</sup> ; Astudillo 等 <sup>[43]</sup> ; Chico 等 <sup>[44]</sup>
消费	能源物料	张音等 <sup>[45]</sup>	
碳足迹	行业	概念方法	王来力等 <sup>[46]</sup> ; 李昕等 <sup>[47]</sup> ; 黄少良等 <sup>[48]</sup> ; 郭燕 <sup>[49]</sup> ; 孙庆智等 <sup>[50]</sup> ; 何叶丽 <sup>[51]</sup> ; 黄瑞等 <sup>[52]</sup> ; 周杰民等 <sup>[53]</sup> ; Jürgen 等 <sup>[22]</sup> ; 孙庆智等 <sup>[54]</sup> ; 吴猛 <sup>[55]</sup> ; Muthu <sup>[56]</sup>
		原材料	姚蕾 <sup>[57]</sup> ; 杨自平等 <sup>[58]</sup>
	产品	纱线	董艳红 <sup>[59]</sup> ; 李雪月等 <sup>[60]</sup>
		织物	王来力等 <sup>[25]</sup> ; 李戎等 <sup>[61]</sup> ; 蒋婷等 <sup>[62]</sup> ; 赵年花等 <sup>[63]</sup> ; 冯文艳等 <sup>[64]</sup>
		成品	李一等 <sup>[65]</sup> ; 杨楠楠 <sup>[66]</sup> ; 邓转利 <sup>[67]</sup> ; 徐宝峰 <sup>[68]</sup> ; Bevilacqua 等 <sup>[69]</sup> ; Muthu <sup>[56]</sup>
消费	生产运输 销售使用	王来力等 <sup>[70]</sup> ; 陈丽华 <sup>[71]</sup> ; 郭燕 <sup>[72]</sup> ; 吕小妮 <sup>[73]</sup> ; 卢安等 <sup>[74-75]</sup> ; 郝淑丽等 <sup>[76]</sup> ; 李昕等 <sup>[77]</sup>	
化学品足迹	行业	概念方法	Roos <sup>[78]</sup> ; 田泽君等 <sup>[79]</sup>
	产品	成品	钱佳鸿等 <sup>[24]</sup> ; Van Hoof 等 <sup>[80]</sup>

## 2.1 纺织服装领域水足迹的研究

从表 1 可以看出对于水足迹的研究,在行业的层面上,主要的研究学者有王来力、李昕、Muthu 等,研究的内容主要包括:对纺织服装行业水足迹概念的界定,分析讨论了纺织服装行业水足迹核算的框架、边界、方法、和意义等内容。例如,王来力等<sup>[26]</sup>将工业水足迹理论引入到纺织服装行业,同时针对纺织服装行业的特点,对边界、方法、评价等关键性问题进行统一,从而加强对纺织服装行业的水资源管理。能够发现,在行业层面上纺织服装领域的水足迹研究集中在对行业水足迹的概念、方法和意义上的探索,目的是为了能够为纺织服装行业水足迹研究提供统一的算法标准,从而加强对水资源的管理。

对于水足迹的研究在产品层面上又可细分为原材料、工序、织物和成品四个部分,主要的研究学者有 Chapagain、何琬文等,研究的内容主要包括:对棉花、棉针织印染布、牛仔裤、丝绸、天然色蜡染工艺等进行了水足迹的核算与评价。例如,Chapagain 等<sup>[38]</sup>研究了 1997—2001 年全球棉花在生长过程中的绿水足迹、蓝水足迹和灰水足迹,从原材料的角度

对棉花进行了水足迹的核算。严岩等<sup>[40]</sup>核算了四种典型的棉纺织产品花灰布、漂白布、染色布、色织布的工业水足迹,得出其中漂白布的水足迹最小,色织布的水足迹最大,同时指出深浅不同的同种产品中深色产品的水足迹大于浅色产品。何琬文等<sup>[41]</sup>核算了丝绸产品在缫丝、染整、织造阶段的水短缺足迹和水劣化足迹,并对不同阶段的水足迹进行了比较分析。产品层面的水足迹研究,涉及到纤维、纱线、织物以及成品等各个具体阶段,采用的方法既有 WFN 体系中的绿水足迹、蓝水足迹和灰水足迹,也有 ISO14046:2014 标准中的水稀缺足迹和水劣化足迹,为相关企业改进技术、加强水资源管理提供了依据。

在消费层面上对于水足迹研究的学者有张音、丁雪梅等,研究的内容包括:纺织服装行业中的能源及物料的水足迹系数、以及影响纺织服装产品水足迹核算的因素。例如,张音等<sup>[45]</sup>研究了纺织服装行业中原煤、石油天然气、火电、金属制品、纸制品、塑料制品的水足迹系数,解决了纺织服装产品水足迹核算过程中能源和物料水足迹系数难以确定的问题,为纺织服装产品水足迹评价体系的建立提供了基础。

## 2.2 纺织服装领域碳足迹的研究

对于纺织服装行业碳足迹的研究,在行业的层面上主要的研究学者有王来力、李昕、王赛赛、郭燕、Muthu等。例如,王来力等<sup>[46]</sup>核算了1991—2009年中国纺织服装行业的碳排放量,指出在该时期内中国纺织服装行业的碳排放量持续增加的同时碳排放强度在下降,纺织服装碳排放量与工业总产值之间存在紧密的联系。李昕等<sup>[47]</sup>研究了纺织服装行业碳足迹核算中的核算边界、公用能耗及物料数据的拆分、设备实际工作时间、生产环境差异等问题,并提出应从不同学科分析碳足迹的核算方法。Muthu<sup>[56]</sup>介绍了碳足迹测量的概念、原理、测量方法及其在纺织服装供应链中的应用,并提出了进行纺织产品碳足迹核算的关键挑战。

对于纺织服装行业碳足迹的研究,在产品层面上可细分为原材料、纱线、织物以及成品四个部分,主要的研究学者或机构有姚蕾、王来力、赵年花、蒋婷等学者以及几家大型的服装公司,研究的内容主要包括对棉花、大麻纤维、纯棉普梳纱、香云纱、涤纶长丝织物、棉针织印染布、牛仔裤、羊毛衫、衬衫、T恤等的碳足迹核算与评价。例如,姚蕾<sup>[57]</sup>以棉花为案例,分析了纺织服装原材料阶段的碳足迹,提出将棉花种植阶段的系统边界划分为四个阶段,同时给出各阶段碳足迹的核算方法。蒋婷等<sup>[62]</sup>核算了香云纱面料全生命周期内的碳足迹,并指出在蚕茧养殖到缂丝阶段碳排放量最大。可以看出,产品层面上的碳足迹研究较为完善,一方面是因为与水足迹和化学品足迹相比碳足迹概念的提出相对较早,相关方面的研究也比较深入;另一方面国际上对于产品碳足迹的研究方法较为统一,大大促进了相关研究的发展。

对于纺织服装行业碳足迹的研究,在消费层面上主要的研究学者有俞璐、陈丽华、卢安、郝淑丽、郭燕、李昕等,研究的内容主要包括:服装运输环节、销售环节、使用环节、废弃阶段的碳足迹,以及产品碳足迹的能源排放系数的计算方法等。例如,郭燕<sup>[72]</sup>研究了废旧服装不同处置方式的碳足迹,发现与焚烧、填埋等方式相比,通过对废旧服装的再使用,可减少温室气体的排放,从而减少对环境的影响。郝淑丽等<sup>[76]</sup>研究了服装在使用环节的碳足迹,并将使用环节划分为穿着、洗涤护理和贮存等阶段,通过实例分析发现服装在使用环节的碳排放量最大。消费层面上的碳足迹研究关注的是对纺织服装产品进行使用和处理而产生的碳排放,并不是生产加工所造

成的排放,实际上是一种间接碳足迹,通过对间接碳足迹的研究能够更加完整的了解产品全生命周期的碳排放情况,从而为相应的节能减排措施提供理论基础。

## 2.3 纺织服装领域化学品足迹的研究

对于纺织服装行业化学品足迹的研究,Roos<sup>[78]</sup>提出将纺织化学品的使用和排放纳入LCA研究中,发现将纺织化学品毒性评估纳入LCA评价当中,会影响纺织产品的整体环境绩效评估。田泽君等<sup>[79]</sup>研究了纺织服装产品的化学品足迹核算问题,提出需要对特征因子进行不确定性分析以及优化USEtox模型,来提高核算结果的准确性。钱佳鸿等<sup>[24]</sup>核算了牛仔织物在染整过程中的化学品足迹,其中包括人体毒性和生态毒性,同时对不同化学品污染物的毒性进行了比较分析。可以看出,与水足迹和碳足迹相比,纺织服装领域的化学品足迹研究相对较少,研究的方法也较为单一,主要借助的是USEtox模型,尚未建立较为完善的化学品足迹核算与评价体系。

## 3 环境足迹核算流程

### 3.1 核算边界

在纺织服装产品全生命周期过程中,三类足迹并不是相互独立的,一种足迹产生会伴随其他足迹的产生。本文结合纺织服装生产工艺链段得出纺织服装产品环境足迹核算边界,如图1所示。

核算边界的确定是足迹类研究的基础和前提,纺织服装产品环境足迹的核算边界可分为时间边界和空间边界<sup>[26, 65, 79]</sup>。结合纺织服装产品生产加工的特点,环境足迹的时间边界指的是从作物种植(或动物养殖)到废弃服装回收处理之间的工序单元,包括纺纱、织造、染整、运输、销售、使用等工艺链段<sup>[24, 81]</sup>。环境足迹的空间边界指的是在各个工序内的投入和产出,主要包括新鲜水、能源物料以及化学品的投入和废水、废气以及化学品污染物的排放<sup>[25, 41]</sup>。对核算边界进行统一界定,从而使核算结果可以进行可比性分析。

### 3.2 核算方法

#### 3.2.1 水足迹的核算方法

a) WFN体系中关于蓝水足迹、绿水足迹和灰水足迹的核算方法<sup>[12, 26, 33-34, 39-40]</sup>如式(1)—(3)所示:

蓝水足迹:

$$WF_{\text{proc, blue}} = Q_{\text{bwe}} + Q_{\text{bwi}} + Q_{\text{bf}} \quad (1)$$

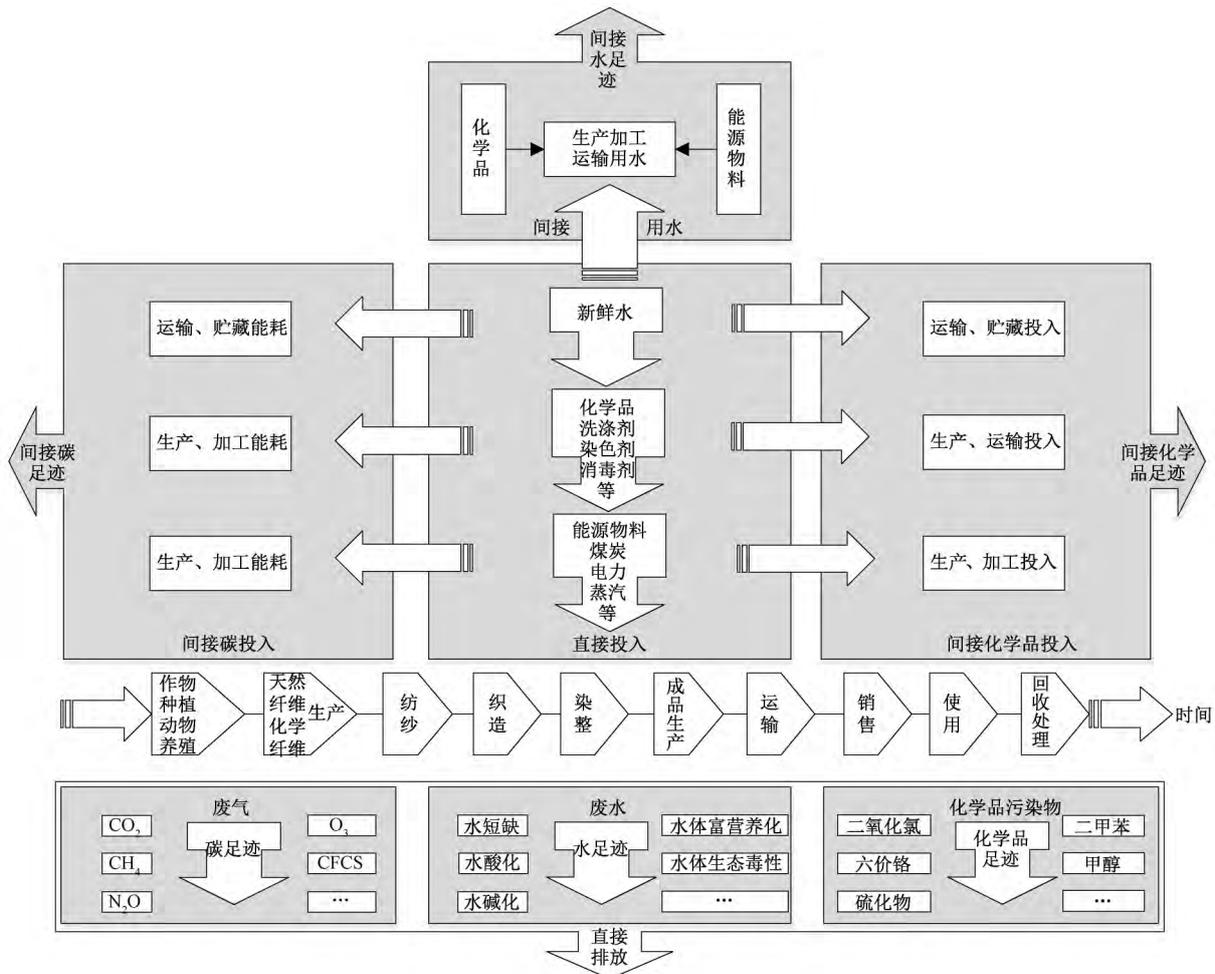


图 1 纺织服装产品环境足迹核算边界

其中： $WF_{proc, blue}$  为工序蓝水足迹， $m^3$ ； $Q_{bwe}$  为蓝水蒸发量， $m^3$ ； $Q_{bwi}$  为蓝水纳入量， $m^3$ ； $Q_{bf}$  为损失的回流， $m^3$ ；

绿水足迹：

$$F_{proc, green} = Q_{gwe} + Q_{gwi} \quad (2)$$

其中： $F_{proc, green}$  为工序绿水足迹， $m^3$ ； $Q_{gwe}$  为绿水蒸发量， $m^3$ ； $Q_{gwi}$  为绿水纳入量， $m^3$ ；

灰水足迹：

$$WF_{grey} = \frac{L}{c_{max} - c_{nat}} \quad (3)$$

其中： $WF_{grey}$  为灰水足迹， $m^3/t$ ； $L$  为水体中污染物的量， $t/s$ ； $c_{max}$  为污染物的水质标准浓度， $mg/L$ ； $c_{nat}$  为收纳水体的自然本底浓度， $mg/L$ 。

b) ISO14046: 2014 标准中关于水稀缺足迹和水劣化足迹的核算方法<sup>[31, 41, 82]</sup>如式(4)–(5)所示：

$$PWF_{sc} = \sum_{i=1}^n V_i \quad (4)$$

其中： $PWF_{sc}$  为产品水稀缺足迹， $m^3 H_2Oeq$ ； $V_i$  为系统边界内的各单元过程  $i$  的新鲜水消耗量， $m^3$ ； $i$

为系统边界内的各单元过程。

$$PWF_{deg} = \sum_{j=1}^m \left( \sum_{i=1}^n \alpha_{deg, ik} \times M_{deg, ik} \right) \quad (5)$$

其中： $PWF_{deg}$  为第  $j$  类产品水劣化足迹，单位由特征化因子决定； $\alpha_{deg, ik}$  为第  $j$  类产品水劣化足迹中第  $i$  项特征污染物的特征化因子； $M_{deg, ik}$  为第  $i$  项特征污染物的排放量， $kg$ ； $i$  为污染物种类； $j$  为系统边界内的各单元过程； $k$  为产品水劣化足迹类型（水酸化足迹、水体富营养化足迹、水体生态毒性足迹等）。

水稀缺足迹是从用水量的角度来衡量产品或服务在其生命周期内所消耗的新鲜水的量。水劣化足迹是从水质的角度来评价产品或服务对环境的潜在影响，水劣化足迹又可细分为水酸化足迹、水碱化足迹、水体富营养化足迹和水体生态毒性足迹等，不同污染物的特征化因子是进行水劣化足迹核算的关键。

### 3.2.2 碳足迹的核算方法

国际上对于产品碳足迹的评价标准包括世界可持续发展工商理事会/世界资源研究所发布的《GHG

Protocol: Product Life Cycle Accounting and Reporting Guidance》、国际标准化组织发布的 ISO 14040: 2006《Environmental management-Life cycle assessment-Principles and framework》、ISO 14044: 2006《Environmental management-Life cycle assessment-Requirements and guidelines》和 ISO 14067: 2018《Greenhouse gases-Carbon footprint of products-Requirements and guidelines for quantification》等标准以及英国标准协会发布的 PAS 2050: 2008《Specification for the assessment of the life cycle greenhouse gas emissions of goods and services》等标准,其中 PAS 2050 规范应用最为广泛<sup>[48, 55, 83]</sup>。对于纺织服装产品碳足迹的核算,需要明确产品全生命周期内的投入以及各类投入的碳排放系数,其核算方法<sup>[61, 65, 81, 84]</sup>如式(6)所示:

$$PCF = \sum_{i=1}^n I_i \times f_i \quad (6)$$

其中:PCF 为产品碳足迹,kgCO<sub>2</sub>e/kg;  $I_i$  为第  $i$  类投入,kg;  $f_i$  为第  $i$  类投入的碳排放系数;  $i$  为系统边界内的各单元过程。

### 3.2.3 化学品足迹的核算方法

纺织服装产品化学品足迹的核算方法主要有两种:一种是基于 USE<sub>tox</sub> 模型来核算产品的化学品足迹<sup>[20, 24, 79]</sup>;另一种方法是基于复合潜在影响比例阈值来计算产品的化学品足迹<sup>[17, 20, 85]</sup>。具体核算方法如式(7)~(10)所示。

a) 基于 USE<sub>tox</sub> 模型的化学品足迹核算方法:

$$CHF = f \times \sum_{i=1}^n CF_{USE_{tox}} \times E \quad (7)$$

其中:CHF 为化学品足迹,cases 或 PAF·m<sup>3</sup>·day;  $f$  为修正因子,取值为 290;  $CF_{USE_{tox}}$  为特征化因子,case/kg<sub>emission</sub> 或 PAF·m<sup>3</sup>·day/kg<sub>emission</sub>;  $E$  为污染物的质量,kg;  $i$  为系统边界内的各单元过程。

$$CF_{USE_{tox}} = EF_{USE_{tox}} \times XF_{USE_{tox}} \times FF_{USE_{tox}} \quad (8)$$

其中: $EF_{USE_{tox}}$  为效应因子,case/kg 或 PAF·m<sup>3</sup>/kg;  $XF_{USE_{tox}}$  为暴露因子,day<sup>-1</sup>;  $FF_{USE_{tox}}$  为归宿因子,day。

b) 基于复合潜在影响比例阈值的化学品足迹核算方法:

$$msPAF_{av} = \frac{\sum msPAF_s \cdot Volume_s}{\sum Volume_s} \quad (9)$$

其中: $msPAF_{av}$  为联合毒性压力; $msPAF_s$  为不同环境区间复合潜在影响比例,%;  $Volume_s$  为不同环境区间体积,m<sup>3</sup>。

$$ChF = \frac{msPAF_{av}}{msPAF_{max}} \cdot ES_{total} \quad (10)$$

其中:ChF 为化学品足迹,m<sup>3</sup>;  $msPAF_{max}$  为复合潜在影响比例阈值(政策边界下为 0.1%和自然边界下为 3%);  $ES_{total}$  为化学品排放占据的总环境空间,m<sup>3</sup>。

### 3.3 分配方法

纺织服装产品往往为批量化生产,在生产加工的过程中,一种产品会与其他产品系统共享资源,因此,在进行纺织服装产品环境足迹核算时,需要确立合理的分配方法,从而使核算结果更加精确。在可能的情况下,可以将待核算的单元过程划分为众多的子过程,同时收集各个子过程的投入和产出,但实际操作性差。因此,在分配无法避免的情况下,可以通过反映产品之间相互关系的方式将投入和产出在产品或功能间分配<sup>[82]</sup>。根据这种方法可以按产量和产值两种因素进行分配<sup>[26, 81]</sup>,具体分配方法如式(11)~(12)所示:

$$I_{qj} = \frac{I_T}{Q_T} \times q_j \quad (11)$$

其中: $I_{qj}$  为  $j$  产品产量分配公共投入; $I_T$  为系统边界内总公共投入量; $Q_T$  为系统边界内产品产量; $q_j$  为  $j$  产品在系统边界内的产量。

$$I_{vj} = \frac{I_T}{V_T} \times v_j \quad (12)$$

其中: $I_{vj}$  为  $j$  产品产值分配公共投入; $V_T$  为系统边界内产品产值; $v_j$  为  $j$  产品在系统边界内的产值。

### 3.4 结果评价

纺织服装产品的环境足迹主要包括水足迹、碳足迹和化学品足迹,在进行核算的过程中,三类足迹具有各自的功能单位,水足迹中蓝水足迹、绿水足迹和灰水足迹是以体积(m<sup>3</sup>)为单位,而水劣化足迹的单位则是由特征化因子所决定;碳足迹以二氧化碳当量(CO<sub>2</sub>e)为单位;化学品足迹以人体毒性(cases)和生态毒性(PAF·m<sup>3</sup>/kg)或体积(m<sup>3</sup>)为单位;所以三类足迹之间不能进行比较评价,通过对纺织服装产品三类足迹研究的分析发现,根据评价对象的不同,可以将评价分为三个层面:组织层面、产品层面和区域层面。

a) 组织层面是从国家、行业、企业等不同主体来进行环境足迹的评价。对于国家,核算产品的环境足迹可以为环境政策的制定,污染物的排放标准等提供科学依据<sup>[46]</sup>。对于纺织服装行业,可以促进能源消费结构的调整,在节能减排的前提下提高产量,提高纺织行业对国民经济增长的贡献率<sup>[21, 37]</sup>。对

于企业,进行环境足迹的核算能够使企业掌握最优的工艺链段,提高工作效率,降低生产成本,提高在同类企业中的竞争力<sup>[32, 34, 49]</sup>。

b)产品层面是从时间边界和空间边界的角度出发,分别将系统边界内各个工序的投入和产出进行量化,比较相同纺织服装产品不同工序之间或不同产品同种工序之间的环境足迹,找出其中环境足迹占比较大的工艺链段或工序单元,即高耗能、高耗水以及高污染的部分,通过改进技术、优化工艺等手段,在减少环境污染的情况下,生产出高质量的纺织服装产品<sup>[24, 41, 65]</sup>。

c)区域层面强调的是纺织服装生产对区域环境的压力<sup>[20, 79]</sup>。不同的区域承受环境压力的能力不同,比如中国东部地区和西部地区在水资源环境承载力上表现出明显差异,东部地区水资源丰富,西部地区水资源稀缺,在进行纺织服装生产的过程中,西部地区对环境的影响更大。经济发达地区与欠发达地区同样存在差异,欠发达地区由于受人类活动影响小,生态环境优于经济发达地区,在受到同等污染的情况下对欠发达地区的影响更显著。此外,当某类纺织服装产品(如牛仔服装、丝纺织物等)在特定时间特定区域内形成集群时,还可评价该类服装产品对该区域生态环境的影响<sup>[26, 86]</sup>。

#### 4 结 语

纺织服装产品的环境足迹考虑了水、能源、化学品的消耗和污染物排放对环境 and 人类健康的影响,为进行纺织服装产品的环境负荷综合性评估提供了依据。由于纺织服装产品品种繁多、生产工艺流程长,在进行纺织服装产品环境足迹核算及评价时,仍然存在下述亟待解决的问题。

a)无论是水足迹、碳足迹还是化学品足迹,在核算的过程中都有各自的核算方法和功能单位,在核算结果没有进行统一之前,三类足迹之间不能进行比较评价,也就无法得出更严重的环境影响类型。因此,需要对核算结果进行统一化和标准化,从而提高核算结果的可比性。

b)水足迹、碳足迹和化学品足迹的核算依赖于各类投入的特征化因子和排放系数,在进行核算时存在数据缺失和数据不适用等问题。因此,建立纺织服装产品各类投入的特征化因子和排放系数数据库是纺织服装产品环境足迹核算结果评价的关键。

#### 参考文献:

- [1] Manfredi S, Allacker K, Chomkhamri K, et al. Product Environmental Footprint (PEF) Guide [R]. Ispra: European Commission Joint Research Center, 2012.
- [2] Hoekstra A Y, Hung P Q. Virtual Water Trade: A Quantification of Virtual Water Flows Between Nations in Relation to International Crop Trade[R]. IHE Delft: Value of Water Research Report Series(No.11), 2002.
- [3] Hoekstra A Y, Chapagain A K, Aldaya M M, et al. The Water Footprint Assessment Manual: Setting the Global Standard[M]. London: Routledge, 2011: 7-15.
- [4] 任晓晶, 白雪, 刘丹, 等. 水足迹评价方法对比及案例研究[J]. 水利经济, 2018, 36(6): 18-23.
- [5] Wackernagel M, Rees W. Our Ecological Footprint: Reducing Human Impact on the Earth[M]. Gabriola Island, Canada: New Society Publishers, 1998: 7-13.
- [6] Wiedmann T, Minx J. A Definition of 'Carbon Footprint' [M]. USA: Nova Science Publishers, 2007, 1-11.
- [7] Hammond G. Time to give due weight to the 'carbon footprint' issue[J]. Nature, 2007, 445(7125): 256.
- [8] Hertwich E G, Peters G P. Carbon footprint of nations: A global, trade-linked analysis [J]. Environmental Science & Technology, 2009, 43(16): 6414-6420.
- [9] Global Footprint Network. Ecological footprint glossary [EB/OL][2019-03-14]. [https://www.footprintnetwork.org/resources/glossary/?tdsourcetag=s\\_pcqq\\_aiomsg.html](https://www.footprintnetwork.org/resources/glossary/?tdsourcetag=s_pcqq_aiomsg.html).
- [10] ETAP. The Carbon Trust Helps UK Businesses Reduce their Environmental Impact [R]. European Commission: The Reality of Carbon Neutrality, 2007.
- [11] 方恺. 足迹家族: 概念、类型、理论框架与整合模式[J]. 生态学报, 2015, 35(6): 1647-1659.
- [12] 王来力. 纺织服装碳足迹和水足迹研究与示范[D]. 上海: 东华大学, 2013.
- [13] Panko J M, Hitchcock K M. Chemical footprint: Enduring product sustainability [J]. EM: AWMA Magazine for Environ Managers, 2011, 61(12): 12-15.
- [14] Roos S, Posner S, Jönsson C, et al. Is unbleached cotton better than bleached? exploring the limits of life-cycle assessment in the textile sector[J]. Clothing and Textiles Research Journal, 2015, 33(4): 231-247.
- [15] Roos S, Peters G M. Three methods for strategic product toxicity assessment: The case of the cotton T-shirt [J]. The International Journal of Life Cycle Assessment, 2015, 20(7): 903-912.
- [16] 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.
- [17] Zijp M C, Posthuma L, van de Meent D. Definition and applications of a versatile chemical pollution footprint methodology [J]. *Environmental Science & Technology*, 2014, 48(18): 10588-10597.
- [18] 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.
- [19] Konkel L. Chemical footprinting: Identifying hidden liabilities in manufacturing consumer products [J]. *Environmental Health Perspectives*, 2015, 123(5): 130-133.
- [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.
- [21] 李一, 石瑞娟, 骆艳, 等. 纺织工业碳排放峰值模拟及影响因素分析: 以宁波市为例[J]. *丝绸*, 2017, 54(1): 36-42.
- [22] Jürgen S, 谢峥. 中国的纺织品碳足迹[J]. *印染*, 2012, 38(20): 54-55.
- [23] 刘秀巍, 刘馨磊, 孙庆智, 等. 产品水足迹研究及其在纺织行业的应用[J]. *纺织导报*, 2011(3): 23-26.
- [24] 钱佳鸿, 李一, 王来力. 牛仔织物化学品足迹核算与评价[J]. *印染*, 2018, 44(13): 52-55.
- [25] 王来力, 吴雄英, 丁雪梅, 等. 棉针织布的工业碳足迹和水足迹实例分析初探[J]. *印染*, 2012, 38(7): 43-46.
- [26] 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.
- [27] 王来力, 丁雪梅, 吴雄英, 等. 纺织产品的灰水碳足迹核算[J]. *印染*, 2013, 39(9): 41-43.
- [28] Wang L L, Ding X M, Wu X Y. Blue and grey water footprint of textile industry in China[J]. *Water Science and Technology*, 2013, 68(11): 2485-2491.
- [29] Wang L L, Ding X M, Wu X Y. Textiles industrial water footprint: Methodology and study[J]. *Journal of Scientific & Industrial Research*, 2013, 72(12): 710-715.
- [30] Li Y, Lu L Y, Tan Y X, et al. Decoupling water consumption and environmental impact on textile industry by using water footprint method: A case study in China[J]. *Water*, 2017, 9(2): 124.
- [31] 何琬文, 李一, 王来力. 基于 ISO 14046 的纺织服装产品水足迹核算与评价[J]. *印染*, 2017, 43(17): 52-55.
- [32] 孙清清, 黄心禹, 石磊. 纺织印染企业水足迹测算案例[J]. *环境科学研究*, 2014, 27(8): 910-914.
- [33] 许璐璐, 吴雄英, 陈丽竹, 等. 纺织服装灰水足迹核算中相关参数的选择[J]. *印染*, 2015, 41(13): 38-42.
- [34] 马建华, 杨爱民. 纺织印染企业水足迹的核算与评价[J]. *染整技术*, 2018, 40(7): 22-25.
- [35] 赵心婷, 丁雪梅. 基于投入产出法的纺织服装行业完全水足迹模型构建及应用探讨[J]. *河南工程学院学报(自然科学版)*, 2018, 30(3): 10-14.
- [36] 王东, 李戎, 宋阳, 等. 水足迹与印染[J]. *印染*, 2011, 37(4): 37-39.
- [37] 邵珍珍. 中国纺织工业水足迹与经济发展关系的实证分析[D]. 天津: 天津工业大学, 2016.
- [38] Chapagain A K, Hoekstra A Y, Savenije H H G, et al. The water footprint of cotton consumption: An assessment of the impact of worldwide consumption of cotton products on the water resources in the cotton producing countries[J]. *Ecological Economics*, 2006, 60(1): 186-203.
- [39] 许璐璐, 吴雄英, 陈丽竹, 等. 分阶段链式灰水足迹核算及实例分析[J]. *印染*, 2015, 41(16): 38-41.
- [40] 严岩, 贾佳, 王丽华, 等. 我国几种典型棉纺织产品的工业水足迹评价[J]. *生态学报*, 2014, 34(23): 7119-7126.
- [41] 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.
- [42] 钟玲, 柳若安, 刘尊文, 等. 工业园区纺织产品水足迹核算与评价[J]. *环境与可持续发展*, 2016, 41(6): 40-43.
- [43] Astudillo M F, Thalwitz G, Vollrath F. Life cycle assessment of Indian silk [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2014, 81: 158-167.
- [44] Chico D, Aldaya M M, Garrido A. A water footprint assessment of a pair of jeans: The influence of agricultural policies on the sustainability of consumer products[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2013, 57: 238-248.
- [45] 张音, 巢晃, 吴雄英, 等. 纺织服装工业用能源及物料的水足迹系数[J]. *印染*, 2013, 39(18): 41-45.
- [46] 王来力, 杜冲, 吴雄英. 我国纺织服装行业的碳排放分析[J]. *纺织导报*, 2011, (10): 19-22.
- [47] 李昕, 吴雄英, 丁雪梅, 等. 纺织服装工业碳足迹核算中的若干问题[J]. *印染*, 2013, 39(12): 35-38.
- [48] 黄少良, 杜冲, 刘馨磊, 等. 纺织品碳足迹评估: 理论与现实与选择[J]. *中国纤检*, 2012, 40(18): 40-42.
- [49] 郭燕. 服装企业组织碳足迹评价分析[J]. *毛纺科技*, 2016, 44(11): 78-82.
- [50] 孙庆智, 王丽华, 刘秀巍, 等. 碳足迹与纺织工业[J]. *纺织导报*, 2011(3): 15-18.

- [51] 何叶丽. 气候变化、碳排放和纺织工业[J]. 印染, 2011, 37(6): 50.
- [52] 黄瑞, 孙庆智, 吴雄英, 等. 低碳认证与纺织服装业[J]. 印染, 2011, 37(14): 40-44.
- [53] 周杰民, 丁志刚, 徐琪. 浙江纺织产业碳足迹关键影响因素的实证分析[J]. 资源开发与市场, 2015, 31(2): 133-137.
- [54] 孙庆智, 王丽华, 刘秀巍, 等. 碳足迹与纺织工业[J]. 纺织导报, 2011(3): 15-18.
- [55] 吴猛. 基于生命周期的纺织服装产品碳足迹评价[J]. 纺织导报, 2018(6): 26-28.
- [56] Muthu S S. Assessing the Environmental Impact of Textiles: Summary and Conclusions[M]//Muthu S S, eds. Assessing the Environmental Impact of Textiles and the Clothing Supply Chain. Elsevier, 2014: 180-186.
- [57] 姚蕾. 纺织服装原材料阶段碳足迹评价及碳减排措施: 以棉花为例[J]. 天津工业大学学报, 2014, 33(1): 70-76.
- [58] 杨自平, 张建春, 张华, 等. 基于 PAS<sub>2050</sub> 规范的大麻纤维产品碳足迹测量分析[J]. 纺织学报, 2012, 33(8): 140-144.
- [59] 董艳红. 普梳棉纱和棉坯布加工过程的碳足迹研究[D]. 上海: 东华大学, 2012.
- [60] 李雪月, 徐文杰, 朱进忠, 等. 纯棉普梳纱碳足迹的计算方法[J]. 棉纺织技术, 2014, 42(9): 19-23.
- [61] 李戎, 吴丹丹, 蒋红, 等. 碳足迹及其在染整加工中的测算[J]. 印染, 2011, 37(18): 40-43.
- [62] 蒋婷, 陈泽勇, 姚婷婷, 等. 香云纱面料碳足迹评价[J]. 印染, 2012, 38(8): 39-41.
- [63] 赵年花, 周翔, 董锋. 涤纶纺织品的碳足迹评估[J]. 印染, 2012, 38(14): 42-45.
- [64] 冯文艳, 张庆娟, 丁雪梅, 等. 精纺羊毛织物工业碳足迹核算[J]. 毛纺科技, 2015, 43(5): 62-65.
- [65] 李一, 王君涛, 王来力, 等. 牛仔裤工业碳足迹核算与评价示范[J]. 现代纺织技术, 2017, 25(6): 58-61.
- [66] 杨楠楠. 以生命周期评估为方法论的服装产品碳足迹评估[J]. 毛纺科技, 2014, 42(9): 53-56.
- [67] 邓转利. 模杯型文胸产品生产过程中碳足迹分析及评估模型研究[D]. 西安: 西安工程大学, 2013.
- [68] 徐宝峰. 文胸产品碳足迹影响因素分析与碳标签评测方法研究[D]. 西安: 西安工程大学, 2014.
- [69] Bevilacqua M, Ciarapica F E, Giacchetta G, et al. A carbon footprint analysis in the textile supply chain[J]. International Journal of Sustainable Engineering, 2011, 4(1): 24-36.
- [70] 王来力, 吴雄英, 丁雪梅, 等. 中国纺织服装行业能源消费碳排放因素分析[J]. 环境科学与技术, 2013, 36(5): 201-205.
- [71] 陈丽华. 服装材料生产过程中的碳排放分析[J]. 棉纺织技术, 2014, 42(8): 79-82.
- [72] 郭燕. 废旧服装处置方式碳足迹比较[J]. 棉纺织技术, 2014, 42(1): 78-81.
- [73] 吕小妮. 服装生产环节碳足迹[J]. 山东纺织科技, 2014, 55(1): 29-33.
- [74] 卢安, 白洁. 服装销售环节的碳足迹评价研究[J]. 毛纺科技, 2014, 42(7): 56-60.
- [75] 卢安, 白洁. 服装运输阶段的碳足迹评价研究[J]. 山东纺织经济, 2014(1): 13-15.
- [76] 郝淑丽, 冯楠. 服装使用环节碳足迹核算分析[J]. 毛纺科技, 2014, 42(8): 53-56.
- [77] 李昕, 吴雄英, 巢晃, 等. 纺织服装产品碳足迹核算中常用能源排放系数[J]. 上海纺织科技, 2014, 42(1): 55-58.
- [78] Roos S. Towards Sustainable Use of Chemicals in the Textile Industry: How Life Cycle Assessment can Contribute [D]. Sweden: Chalmers University of Technology, 2015.
- [79] 田泽君, 王来力, 李一, 等. 纺织服装产品的化学品足迹核算与评价[J]. 丝绸, 2019, 56(1): 33-37.
- [80] Van Hoof G, Schowanek D, Franceschini H, et al. Ecotoxicity impact assessment of laundry products: A comparison of USEtox and critical dilution volume approaches[J]. The International Journal of Life Cycle Assessment, 2011, 16(8): 803-818.
- [81] 王来力, 丁雪梅, 吴雄英, 等. 纺织产品碳足迹研究进展[J]. 纺织学报, 2013, 34(6): 113-119.
- [82] 白雪, 胡梦婷, 朱春雁. ISO14046:2014《环境管理水足迹原则、要求与指南》国际标准解读[J]. 标准科学, 2015(9): 56-60.
- [83] 卢安. 基于 LCA 的服装产品碳足迹评价研究[J]. 纺织导报, 2013(2): 15-18.
- [84] 董艳红, 钱竞芳, 薛文良. 棉纺织品碳足迹的研究[J]. 上海纺织科技, 2012, 40(4): 1-2.
- [85] De Zwart D, Posthuma L. Complex mixture toxicity for single and multiple species: Proposed methodologies [J]. Environmental Toxicology and Chemistry, 2005, 24(10): 2665-2676
- [86] 贾佳, 严岩, 王辰星, 等. 工业水足迹评价与应用[J]. 生态学报, 2012, 32(20): 6558-6565.

(责任编辑:唐志荣)