DOI: 10.5846/stxb201507311610
方恺.环境足迹的核算与整合框架——基于生命周期评价的视角.生态学报,2016,36(22): - .
Fang K.A framework for quantification and integration of environmental footprints: From the perspective of life cycle assessment.Acta Ecologica Sinica, 2016,36(22): - .

环境足迹的核算与整合框架
——基于生命周期评价的视角

方 恺[1,2,*]
1. 浙江大学公共管理学院, 杭州 310058
2. 荷兰莱顿大学环境科学学院, 莱顿 2333CC

摘要:环境足迹及其与生命周期评价(LCA)的关系是工业生态学关注的新热点。从探讨环境足迹与 LCA 的关系入手,以碳足迹、水足迹、土地足迹和材料足迹为例,分别对每一项足迹指标两个版本的核算方法进行了比较。根据清单加和过程的特点,将所有足迹指标划分为基于权重因子和基于特征因子两类,总结了两者的适用性和局限性。在此基础上提出了一个环境足迹核算与整合的统一框架。该框架基于 LCA 视角建立,但对系统边界和清单数据的要求相对灵活,因而也适用于生命周期不甚明确的情形。研究在一定程度上揭示了足迹指标的方法学实质,同时也为环境影响综合评估提供了一条规范化的途径。
关键词:环境足迹;生命周期评价;清单加和;足迹整合

A framework for quantification and integration of environmental footprints: From the perspective of life cycle assessment

FANG Kai[1,2,*]
1 *School of Public Affairs, Zhejiang University, Hangzhou* 310058, *China*
2 *Institute of Environmental Sciences, Leiden University, Leiden* 2333*CC*, *The Netherlands*

Abstract: Over the past few years, there has been a growing interest in environmental footprints and their relationship to life cycle assessment (LCA), particularly in the field of industrial ecology. Environmental footprints and LCA have much in common, and it is clear that the strengths of LCA in assessing environmental impacts would allow many footprint topics to be addressed under an LCA look-alike framework. This paper starts with the concept of bringing clarity to the nexus between environmental footprints and LCA, an area that remains ambiguous and thus poses an obstacle to the robustness of footprint methods. Methods for accounting for environmental footprints have been reviewed using a selection of existing footprint indicators, including the carbon footprint, the water footprint, the land footprint, and the material footprint. The results demonstrate that each of the four footprints has two versions that apply weighting factors and characterization factors to inventory aggregation, respectively. The distinction between weighting factors and characterization factors is distinct. The former reflect the relative importance they are assigned in a study based on stated or revealed preferences and judgments, whereas the latter are derived from science-based mechanism models that communicate the relative contributions of inventory results to specific impact categories. Consequently, two broad categories of environmental footprints are identified, namely, Version 1.0 (hereafter $EF_{1.0}$) and Version 2.0 (hereafter $EF_{2.0}$). $EF_{1.0}$ and $EF_{2.0}$ differ in aspects other than the way they address inventory aggregation. Whereas the two footprint categories have own pros and cons, we argue that only

基金项目:国家公派留学基金项目(20113005)
收稿日期:2015-07-31; **修订日期**:2016-03-24
* 通讯作者 Corresponding author.E-mail: fangk@zju.edu.cn

$EF_{2.0}$ has the potential to constitute an integrated footprint family due to the risks of double counting and double weighting in the $EF_{1.0}$model. Inspired by the results of two decades of intense debate in the LCA community, this paper establishes a unifying framework consisting of a four-step sub-framework for the accounting of environmental footprints and a three-step sub-framework for the integration of environmental footprints. Although this framework follows the general logic of LCA, it allows for wider applicability than current LCA frameworks as it can be implemented in contexts where there is no clear life cycle or even without an LCA. This paper proposes a composite index for environmental footprints, with the aim of providing decision makers with a holistic picture of the overall environmental impacts of investigated systems at multiple scales, ranging from individual products to the whole world. Our study offers novel insights into the fundamental nature of environmental footprints, particularly for those without LCA expertise. More importantly, it may serve as a starting point for clearing the footprint jungle, and for sparking discussion between research communities that are currently quite disparate, such as those of LCA, the water footprint, and the ecological footprint.

Key Words: environmental footprints; life cycle assessment (LCA); inventory aggregation; footprint integration

环境足迹是近年来可持续发展领域诞生的新概念[1]。随着新兴指标的涌现,环境足迹的研究范围和研究手段都日趋多样化,形成了以分析人为环境效应为导向的足迹家族指标体系[2]。一些工业生态学的研究方法,如生命周期评价(Life Cycle Assessment, LCA)、投入产出分析(Input-Output Analysis, IOA)、物质流分析(Material Flow Analysis, MFA),被广泛地应用于环境足迹定量核算。工业生态学家正逐步取代生态经济学家,成为环境足迹研究的新领军群体。由国际工业生态学学会主办的期刊 *Journal of Industrial Ecology* 更是于2014 年推出了一期“足迹专刊”,围绕足迹研究的若干前沿问题展开了深入而激烈的讨论[3]。

指标核算与整合始终是环境足迹研究的重中之重[4]。国内外学者为此开展了大量卓有成效的工作,例如:姚亮等[5]采用多区域投入产出(Multi-Regional Input-Output, MRIO)模型对中国各区域的居民消费碳足迹进行了分析;徐长春等[6]基于 LCA 核算了小麦产品的水足迹;方恺[2]提出了基于系统资源代谢和基于生命周期影响的环境足迹整合范式;Čuček 等[7]将 LCA 用于核算生物质能源供应链的环境足迹;Ewing 等[8]提出了基于环境扩展 MRIO 模型的生态足迹和水足迹计算方法;Huysman 等[9]基于火用能和 IOA 模型比较了不同国家资源消费的环境足迹。上述成果大多以 LCA 或 IOA 知识为基础,推动了环境足迹定量研究向规范化、系统化的方向发展。

同时也应看到,一个具备较高共识度的环境足迹核算与整合框架尚未建立。究其原因,很重要的一点,目前不少研究仅仅从数学可行的角度来考虑指标的核算与整合,缺乏对不同足迹指标所代表的实际环境问题的认识。例如,有学者提出将所有足迹统一转换成以面积为单位的空间性指标,以便与传统的生态足迹指标相累加。事实上,人类大量消费水、材料等非土地资源,这些资源消费量如果用面积来表征将丧失实际的环境关联性,加之诸多环境排放(如持久性有机污染物)没有明确对应的单位面积自然消纳速率参数,因此,将所有环境足迹换算成土地面积既缺乏科学性,也不具备可操作性。

近年来,随着 LCA 在环境足迹研究中的地位不断强化,两者关系成为工业生态学者关注的新热点[10]。从目前研究来看,学界主要持三种观点:①环境足迹不断吸收和借鉴了大量 LCA 的知识成果,是对 LCA 的继承和发展[11];②环境足迹只有完全纳入现有 LCA 分析框架才能保证量化的科学性和准确性[12];③环境足迹在研究目标、方法、尺度等方面与 LCA 存在本质区别,但两者可以相互补充共同用于环境评估[13]。笔者认为,厘清环境足迹与 LCA 的辩证关系,对于理解环境足迹的方法学实质具有重要意义。为此,本文从探讨环境足迹与 LCA 的关系入手,选取若干环境足迹指标深入分析和比较各自的核算方法,据此提出一个足迹核算与整合的统一框架,以期为环境足迹的定义、分类、核算和整合提供一条规范化的实现途径。

1 主要环境足迹核算方法的比较

碳足迹、水足迹、土地足迹和材料足迹是 4 项主要的环境足迹指标[3,14]。本文对其现有核算方法进行归

纳与比较。为了保证研究思路的连贯性与称谓的一致性,借鉴 LCA 的逻辑框架及术语,提出如下前提与假设:①清单分析和清单加和是各项环境足迹核算的关键步骤;②前者对人类经济系统(如产品、国家)与环境交换的物质输入(土地、水等资源)和输出(废气、废水等排放)进行数据汇编;③后者对清单分析的结果(以下简称清单结果,主要包括资源投入和环境排放)进行定量加和,从而最终形成单一的足迹指标;④清单分析在 LCA、MFA 等研究中已有广泛讨论,这里重点考查清单加和的类型及其特点。

对国内外大量相关文献的调研表明,上述 4 项环境足迹都至少存在两个版本同时满足上述前提假设(表 1)。为加以区分,将两个版本称为环境足迹 1.0 版(以下简称 $EF_{1.0}$)和 2.0 版(以下简称 $EF_{2.0}$)。在 $EF_{1.0}$中,碳足迹和土地足迹分别相当于生态足迹的碳吸收和生物生产性土地利用部分,清单加和由清单结果乘以各自的权重因子实现;水足迹和材料足迹则由清单结果直接等权加和得到(权重系数为 1)。以上 4 项 $EF_{1.0}$的核算过程均可表示为:

$$EF_{1.0} = \sum_i M_i \times WF_i \tag{1}$$

式中,M_i为 i 项清单结果;WF_i为 i 项清单结果对应的权重因子。

表 1　主要环境足迹的核算方法

Table 1　Comparison of accounting methods for major environmental footprints

环境足迹 Environmental footprint	指标版本 Version of indicator	清单结果 Inventory results	指标表达式 Formula	符号说明 Symbolic description	计量单位 Metric unit	代表性文献 Key reference
碳足迹 Carbon footprint (CF)	$CF_{1.0}$	CO_2	$\frac{1}{CSR}\sum M_i$	CSR:碳吸收速率;M_i:i 类能源的碳排放质量	hm^2	[15]
	$CF_{2.0}$	温室气体	$\sum M_i \times GWP_i$	M_i:i 类温室气体排放质量;GWP_i:i 类温室气体的全球暖化潜势	kg(以 CO_2 当量计)	[16]
水足迹 Water footprint (WF)	$WF_{1.0}$	H_2O	$\sum V_i$	V_i:i 类水资源消费体积	m^3	[17]
	$WF_{2.0}$	H_2O	$\sum V_i \times WSI_i$	WSI_i:i 类水资源压力指数	m^3(以 H_2O)当量计)	[18]
土地足迹 Land footprint (LF)	$LF_{1.0}$	土地	$\sum M'_i / Y_i \times EQF_i$	M'_i:i 类土地的产品质量;Y_i:i 类土地的单产;EQF_i:i 类土地均衡因子	hm^2	[15]
	$LF_{2.0}$	土地	$\sum A_i \times LDF_i$	A_i:i 类土地占用面积;LDF_i:i 类土地扰动因子	hm^2(以建设地当量计)	[19]
材料足迹 Carbon footprint (CF)	$MF_{1.0}$	资源	$\sum M_i$	M_i:i 类资源消费质量	kg	[20]
	$MF_{2.0}$	非生物资源	$\sum M_i \times ADP_i$	M_i:i 类非生物资源消费质量;ADP_i:i 类非生物资源损耗潜势	kg(以锑当量计)	[21]

对 $EF_{2.0}$来说,清单加和也由清单结果乘以相应系数并加和得到,这些系数有别于一般意义上的无量纲的权重因子。以碳足迹为例,其加和系数为最常见的特征因子——全球暖化潜势(Global Warming Potential, GWP)。GWP 由具有较高科学性和共识度的大气环境机理模型测算得到[22],单位为 kg CO_2-eq/kg,反映了 CH_4、N_2O 等各类温室气体相对于 CO_2对气候变化的贡献。4 项 $EF_{2.0}$的核算过程均可表示为:

$$EF_{2.0} = \sum_i M_i \times CF_i \tag{2}$$

式中,CF_i为 i 项清单结果对应的特征因子。

可见,$EF_{1.0}$与 $EF_{2.0}$的数学结构相似。与此同时,两者在清单加和以及其他方面又存在明显区别:

(1) 加和方式　为了不损害清单结果本身的物理含义,$EF_{1.0}$采用权重因子进行清单加和(以下简称权重化);由于等数量不同物质之间的环境影响(如气候变化、富营养化)往往呈现巨大差异,$EF_{2.0}$不直接从量的角度汇总清单物质,而是采用特征因子进行清单加和(以下简称特征化)。

(2) 系统边界　$EF_{1.0}$由非 LCA 学者提出,主要针对终端消费,缺乏对整个系统边界的清晰界定;$EF_{2.0}$大多由 LCA 学者提出,虽然也基于消费者负责的观点,但是旨在反映所研究的人类经济系统(以下简称目标系

统)的全生命周期情况。

(3) 结果指向 $EF_{1.0}$表征人为驱动的资源投入或环境排放的绝对大小;$EF_{2.0}$通常以某种物质为参照,表征其他物质相对于该物质的潜在环境影响。

综上可知,正如不存在一个普适性的环境足迹定义一样,环境足迹与 LCA 的关系也很难简单地用传承、取代或互补来概括,因而必须对足迹指标进行分类讨论。$EF_{1.0}$与 $EF_{2.0}$两类足迹指标都有一定的适用性和局限性。总的来说,$EF_{1.0}$既可以基于 LCA 也可以基于非 LCA 方法,其研究结果主要用于测度资源消费方面的胁迫压力、追踪主要驱动因素,可以作为自然资源管理和清洁生产的政策依据;$EF_{2.0}$遵循 LCA 的逻辑框架,尽管不一定严格涵盖从摇篮到坟墓的全生命周期,但显然主要适用于系统边界清晰、影响机理明确的环境排放方面的研究,其结果可以为科学评价目标系统的环境影响、合理确定优先治理方向提供决策支持。

总之,$EF_{1.0}$与 $EF_{2.0}$之间存在明显差异,将诸如属于 $EF_{1.0}$的水足迹和属于 $EF_{2.0}$的碳足迹混在一起整合[7],会导致前提假设不一致、账户重复核算等问题,这也是目前不少足迹整合研究存在的一个缺陷。

2 环境足迹核算与整合框架

应当指出,清单分析和清单加和不是环境足迹核算的全部内容。根据国际标准化组织 ISO14040 技术规范[23],一个完整的 LCA 当包括目的与范围定义、生命周期清单分析(Life Cycle Inventory, LCI)、生命周期影响评价(Life Cycle Impact Assessment, LCIA)和结果解释 4 个阶段。基于对环境足迹现有核算方法的分析,并参考 LCA 的阶段划分,本文提出一个以 $EF_{2.0}$为对象的环境足迹核算与整合的统一框架(图 1)。其中,核算子框架包括目的与范围定义、清单分析、特征化清单加和及结果解释;整合子框架包括环境足迹的标准化、权重化及结果解释。该框架与 LCA 既有联系又有区别:一方面,清单分析对应 LCI,特征化、标准化和权重化对应 LCIA,又可统称为后清单分析;另一方面,两者对系统边界和清单数据等的要求有所不同,该框架同样适用于生命周期不甚明确的情形,同时 LCA 研究实际上也并非一定遵循上述 4 个阶段(如 EcoDesign、LCSA)。现说明如下:

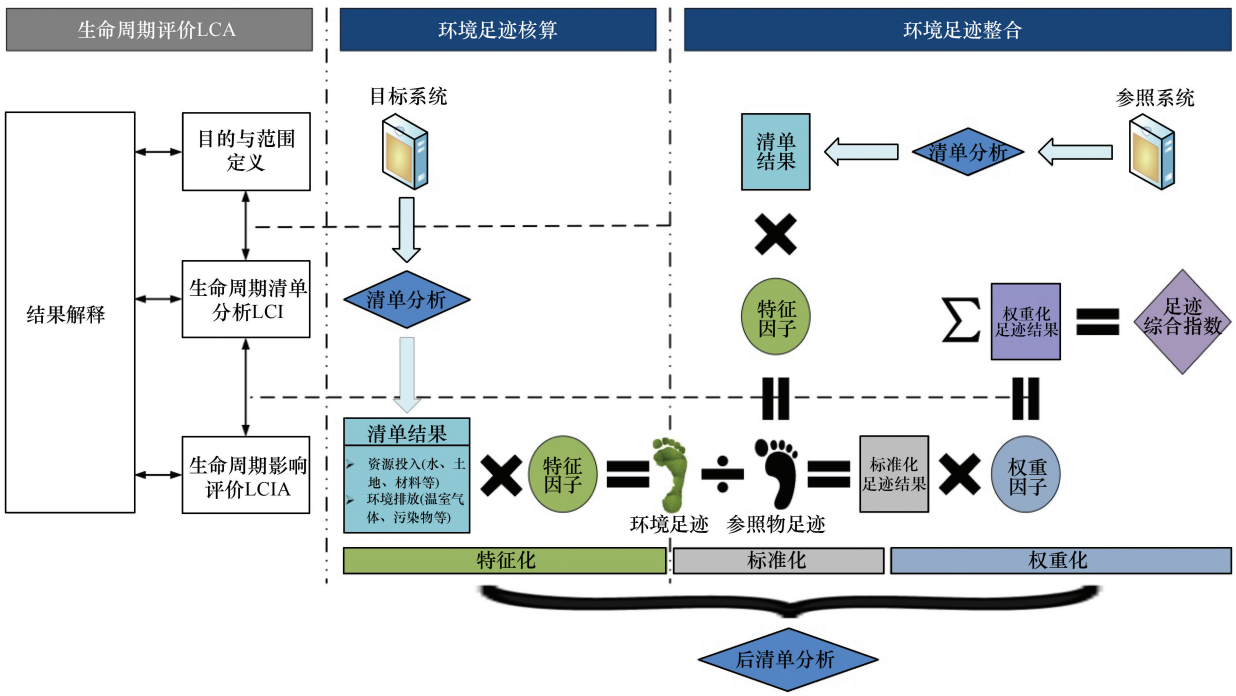

图 1 基于 LCA 视角的环境足迹核算与整合框架

Fig.1 An LCA-look-alikes framework for quantification and integration of environmental footprints

2.1　环境足迹核算子框架

2.1.1　目的与范围定义

目的与范围定义虽然不被足迹研究者所重视,但在 LCA 研究中占有重要地位,在 IOA、MFA 等方法中也有类似的步骤。因此,本文将目的与范围定义作为环境足迹规范化核算的第一步,旨在明确研究的目标系统及潜在受众,定义系统边界,以及确定清单物质种类(列表)等。目标系统以微观的产品和宏观的国家较为常见,不过从个人到全球的各尺度均可进行环境足迹研究[24]。系统边界除了典型的从摇篮到坟墓的全生命周期外,还可以从摇篮到大门、大门到大门、大门到坟墓等,甚至可以是其中的某些特定阶段(如原料开采、终端消费)。

2.1.2　清单分析

清单分析是对系统边界内的资源投入和(或)环境排放数据进行收集、审核和计算,汇总清单物质列表的各种输入和输出,以便作为下一步环境影响评估的依据。值得注意的是,LCA 并不是清单分析的唯一方法,其他如经济系统物质流分析(Economy-wide MFA, EW-MFA)和环境投入产出分析(Environmental IOA, EIOA)中皆有类似清单分析的步骤。无论具体采用何种方法,清单结果均可表示为:

$$M_i = \sum_k M_{ik} \tag{3}$$

式中,M_{ik}为 k 项人类活动所引发的清单物质 i 的输入或输出。

2.1.3　特征化清单加和

特征化旨在评估目标系统的潜在环境影响,其实质是一个将清单结果定量排序并加和的过程[25]。特征化清单加和是环境足迹核算最为关键的一步。特征因子一般以环境、资源和人体健康等领域的最新科学发现为基础,借助机理模型(如 USEtox、EUTREND)进行计算[22],而这部分本身并不属于 LCA 的范畴[26]。此外,对清单结果特征化也非 LCA 所独有,在风险评价等领域也有类似的处理方法。不论采用何种特征因子,特征化清单加和均可表示为:

$$EF_j = \sum_i M_i \times CF_{ij} \tag{4}$$

式中,EF_j为 j 项环境足迹;CF_{ij}为 i 项清单结果对 j 类环境影响的特征因子。

2.1.4　结果解释

结合所定义目的与范围,对环境足迹的核算结果进行分析和解读。不难看出,由上述几个步骤得到的环境足迹实际属于 $EF_{2.0}$的范畴,适合评价人类活动、特别是排放活动所产生的特定环境影响,从而为横向比较不同系统以及探索环境影响降低途径提供技术支持。需要指出,这里核算的环境足迹并不完全等同于 LCIA 中的影响类型指标,原因在于第二步清单分析既可以采用 LCI,也可能因为数据限制和实际需要,灵活截取供应链的某段进行不完全生命周期分析。因此,本文提出的环境足迹核算子框架较之 LCIA 有着更为广泛的适用性。

2.2　环境足迹整合子框架

2.2.1　环境足迹标准化

各项环境足迹之间由于计量单位的不同而不具备可比性。通过引入参照系统,建立标准化基准,可以解决这一问题。对于气候变化、臭氧层损耗等全球性环境影响,一般以全球尺度为参照;对于富营养化、光化学烟雾等区域性环境影响,通常以某一区域(如欧盟、中国)为参照[27]。上述核算子框架同样适用于参照系统的环境足迹核算。无论选取何种参照系统,目标系统的环境足迹标准化均可表示为:

$$NEF_j = \frac{EF_j}{EF_{ref,j}} = \frac{\sum_i M_i \times CF_{ij}}{\sum_i M_{ref,i} \times CF_{ij}} \tag{5}$$

式中,NEF_j为 j 项标准化的目标系统环境足迹(以下简称标准足迹);$EF_{ref,j}$为参照系统的 j 项环境足迹;$M_{ref,i}$为参照系统的 i 项清单结果。

2.2.2 标准足迹权重化

不同标准足迹之间可以比较大小,但并不意味着等数值的两项足迹一定具有相同的环境危害[25]。为了解决标准化结果缺乏环境关联的问题,需要先对各项环境足迹的危害性排序,然后进行指标加和,该过程即为权重化。权重因子的确定主要有货币估价法、目标距离法、面板法和替代法等[28],反映了利益相关方或专家对清单物质重要性的主观认识。作为环境足迹整合的关键步骤,权重化的过程可表示为:

$$CIEF = \sum_j NEF_j \times WF_j \tag{6}$$

式中,$CIEF$ 为环境足迹综合指数(以下简称足迹指数);WF_j为 j 项标准足迹对应的权重因子。

2.2.3 结果解释

通过分析和解读环境足迹的整合结果,得出最终结论并提出政策建议。环境足迹整合子框架旨在克服单一类型环境足迹的局限,为决策者评价和比较各尺度经济系统的综合环境影响提供了一个集成的足迹指数,从而有助于可持续生产和消费模式的建立;同时,研究结果也为足迹研究者、特别是不具备 LCA 知识背景的研究者提供了一个可资借鉴的整合范式。需要指出,足迹整合与清单加和存在本质区别:后者可以基于科学的特征化模型;而对前者来说,这样一个贯穿不同环境影响类型的复杂机理模型并不存在。因此,即便理论上 $EF_{1.0}$也如 $EF_{2.0}$一样,可以通过标准化和权重化进行整合,但实际上意义不大:①$EF_{1.0}$采用权重化进行清单加和,导致不同指标之间可能存在重复计算,从而削弱足迹整合的科学基础;②各项 $EF_{1.0}$进行足迹整合相当于二次加权,将进一步增加整合结果的不确定性。正因为如此,在核算阶段特征化可以取代权重化,而在整合阶段则无法实现。还应指出,特征因子尽管在科学性方面优于权重因子,但多少仍含有一些主观因素,基于 100 a 时间跨度(而非其他时间跨度)计算 GWP 即为一例。

3 结语

以环境足迹为主题的文献成果纷繁复杂,不少研究观点迥异甚至相互冲突。本文借鉴 LCA 的逻辑框架及术语,在归纳和比较主要环境足迹核算方法的基础上,将足迹指标划分为基于权重因子加和的 $EF_{1.0}$和特征因子加和的 $EF_{2.0}$,并进一步构建了以 $EF_{2.0}$为对象的环境足迹核算与整合统一框架,为决策者全面评估综合环境影响提供了一条规范化的途径。该框架虽然基于 LCA 视角建立,但对系统边界和清单数据的要求相对灵活,因而也适用于生命周期不甚明确的情形。为足迹研究者、特别是非 LCA 背景学者深入理解足迹指标的方法学实质提供了新视角。

作为对环境足迹这一新兴领域的一次理论探索和总结,本文提出的核算与整合框架尚停留在概念化和公式化阶段。下一步需要对该框架进行应用和检验,其中关于特征化、标准化和权重化因子计算可分别参见文献[22]、[27]、[28]。相比于 LCA、IOA、MFA 等工业生态学的其他分支,环境足迹无论在理论基础、学科体系还是研究范式上都有很大的差距,足迹研究者之间缺乏沟通、各自为战的局面亟需改变。当然,环境足迹的不完善恰恰蕴含着广阔的研究前景。在各项足迹指标研究成果渐呈井喷之势的今天,我国学者应顺势而上,努力在这一国际前沿领域有所作为。

参考文献(References):

[1] Hoekstra A Y, Wiedmann T O. Humanity's unsustainable environmental footprint. Science, 2014, 344(6188): 1114-1117.

[2] 方恺. 环境足迹的指标分类与整合范式. 生态经济, 2015, 31(7): 22-26.

[3] Lifset R. Frontiers in footprinting. Journal of Industrial Ecology, 2014, 18(1): 1-3.

[4] 方恺. 足迹家族研究综述. 生态学报, 2015, 35(24): 7974-7986.

[5] 姚亮, 刘晶茹, 王如松, 尹科. 基于多区域投入产出(MRIO)的中国区域居民消费碳足迹分析. 环境科学学报, 2013, 33(7): 2050-2058.

[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] Čučekek L, Varbanov P S, Klemeš J J, Kravanja Z. Total footprints-based multi-criteria optimisation of regional biomass energy supply chains. Energy, 2012, 44(1): 135-145.

[8] Ewing B R, Hawkins T R, Wiedmann T O, Galli A, Ercin A E, Weinzettel J, Steen-Olsen K. Integrating ecological and water footprint accounting in a multi-regional input-output framework. Ecological Indicators, 2012, 23: 1-8.

[9] Huysman S, Schaubroeck T, Dewulf J. Quantification of spatially differentiated resource footprints for products and services through a macro-economic and thermodynamic approach. Environmental Science & Technology, 2014, 48(16): 9709-9716.

[10] Fang K, Heijungs R. Rethinking the relationship between footprints and LCA. Environmental Science & Technology, 2015, 49(1): 10-11.

[11] Lenzen M. An outlook into a possible future of footprint research. Journal of Industrial Ecology, 2014, 18(1): 4-6.

[12] Ridoutt B, Fantke P, Pfister S, Bare J, Boulay A M, Cherubini F, Frischknecht R, Hauschild M, Hellweg S, Henderson A, Jolliet O, Levasseur A, Margni M, McKone T, Michelsen O, Milà i Canals L, Page G, Pant R, Raugei M, Sala S, Saouter E, Verones F, Wiedmann T. Making sense of the minefield of footprint indicators. Environmental Science & Technology, 2015, 49(5): 2601-2603.

[13] Hoekstra A Y. The sustainability of a single activity, production process or product. Ecological Indicators, 2015, 57: 82-84.

[14] Fang K, Heijungs R. Investigating the inventory and characterization aspects of footprinting methods: lessons for the classification and integration of footprints. Journal of Cleaner Production, 2015, 108: 1028-1036.

[15] Wackernagel M, Rees W. Our Ecological Footprint: Reducing Human Impact on the Earth. Gabriola Island: New Society Publishers, 1996.

[16] Wiedmann T, Minx J. A definition of 'carbon footprint' // Pertsova C C, ed. Ecological Economics Research Trends. Hauppauge, NY: Nova Science Publishers, 2008.

[17] 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. 11. Delft, the Netherlands: UNESCO-IHE Institute for Water Education, 2002.

[18] 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.

[19] Lenzen M, Murray S A. A modified ecological footprint method and its application to Australia. Ecological Economics, 2010, 37(2): 229-255.

[20] Schoer K, Weinzettel J, Kovanda J, Giegrich J, Lauwigi C. Raw material consumption of the European Union-Concept, calculation method, and results. Environmental Science & Technology, 2012, 46(16): 8903-8909.

[21] Fang K, Heijungs R. Moving from the material footprint to a resource depletion footprint. Integrated Environmental Assessment and Management, 2014, 10(4): 596-598.

[22] Hauschild M Z, Goedkoop M, Guinée J, Heijungs R, Huijbregts M, Jolliet O, Margni M, De Schryver A, Humbert S, Laurent A, Sala S, Pant R. Identifying best existing practice for characterization modeling in life cycle impact assessment. The International Journal of Life Cycle Assessment, 2013, 18(3): 683-697.

[23] ISO (International Organization for Standardization). ISO 14040-2006 Environmental management-Life cycle assessment-Principles and framework. Geneva: International Organization for Standardization, 2006.

[24] Hellweg S, Milà i Canals L. Emerging approaches, challenges and opportunities in life cycle assessment. Science, 2014, 344(6188): 1109-1113.

[25] 杨建新, 王如松, 刘晶茹. 中国产品生命周期影响评价方法研究. 环境科学学报, 2001, 21(2): 234-237.

[26] Heijungs R. Ten easy lessons for good communication of LCA. The International Journal of Life Cycle Assessment, 2014, 19(3): 473-476.

[27] Sleeswijk A W, van Oers L F C M, Guinée J B, Struijs J, Huijbregts M A J. Normalisation in product life cycle assessment: an LCA of the global and European economic systems in the year 2000. Science of the Total Environment, 2008, 390(1): 227-240.

[28] Ahlroth S. The use of valuation and weighting sets in environmental impact assessment. Resources, Conservation and Recycling, 2014, 85: 34-41.