

# 应对气候变化的碳足迹研究综述\*

耿涌<sup>1</sup> 董会娟<sup>1,2</sup> 郝凤明<sup>1</sup> 刘竹<sup>1,2</sup>

(1. 中国科学院沈阳应用生态研究所, 辽宁 沈阳 110016; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100049)

**摘要** 由温室气体引起的全球变暖问题已引起国际社会的普遍关注,随着全球变暖成为社会关注的热点,碳足迹成为一个新的研究方法并迅速得到学术界的认可。本文从碳足迹的起源和各种定义入手,系统阐述了碳足迹的概念,并从不同角度探讨了碳足迹的各种分类。本文重点介绍了碳足迹的计算方法,主要包括投入产出分析方法、生命周期评价法、IPCC计算方法和碳足迹计算器等四大类,并总结和比较了四种方法的优缺点。在此基础上,对国内外相关研究系统地进行了归纳和总结,客观分析和评价了当前碳足迹的研究现状和存在的问题。本文还介绍了目前国际上四个主要的碳足迹评估标准:英国的PAS 2050:2008标准、世界可持续发展商业协会和世界资源研究院共同发起制定的GHG议定书、日本的标准仕様书TS Q 0010标准和ISO 14067标准,并以GHG议定书和PAS 2050两个标准为例分析了进行碳足迹评估的重要前提——边界界定问题。最后对碳足迹研究的重点领域和发展方向进行了展望。

**关键词** 碳足迹;生命周期评价;投入产出分析;边界;标准

中图分类号 F205;X24 文献标识码 A 文章编号 1002-2104(2010)10-0006-07 doi:10.3969/j.issn.1002-2104.2010.10.002

自19世纪工业革命以来,能源短缺、环境污染、生态破坏和气候变化等各种环境问题逐渐显现,目前尤以二氧化碳等温室气体引起的气候变暖问题最为严峻。全球变暖问题已引起了国际社会的普遍关注,《联合国气候变化框架公约》、《京都议定书》以及2009年受到高度关注的哥本哈根会议,都表明了国际社会在应对全球变暖问题方面所进行的不懈努力。

我国政府对于全球气候变暖问题高度重视,国务院在2009年11月26日正式提出2020年我国单位国内生产总值二氧化碳排放比2005年下降40%—45%的发展目标,将其作为约束性指标纳入国民经济和社会发展中长期规划,并制定相应的国内统计、监测和考核办法。在此背景下,我国将逐渐加大关于碳减排的研究力度,并急需合适的研究方法解决相关的碳排放量化评价问题。碳足迹是目前国内外普遍认可的用于应对气候变化、解决定量评价碳排放强度的研究方法,为此,我们开展关于碳足迹研究的文献综述,从概念、分类、标准、计算和边界确定等多角度介绍国内外关于碳足迹研究的最新进展,为我国应对气候变化、系统推进节能减排工作奠定科学理论基础。

## 1 碳足迹的概念

“足迹”这个概念最早起源于哥伦比亚大学的Rees和Wackernagel提出的生态足迹的概念,即要维持特定人口生存和经济发展所需要的或者能够吸纳人类所排放的废物的、具有生物生产力的土地面积<sup>[1]</sup>。碳足迹源于生态足迹的概念,最早出现于英国,并在学界、非政府组织和新闻媒体的推动下迅速发展起来<sup>[2]</sup>。

碳足迹虽然起源于生态足迹的概念,却有其特有的含义<sup>[3]</sup>,即考虑了全球变暖潜能(GWP)的温室气体排放量的一种表征<sup>[4]</sup>。关于碳足迹的概念,目前社会各界的定义各不相同。争议主要有两个方面,第一:碳足迹的研究对象是二氧化碳的排放量还是用二氧化碳当量表示的所有温室气体的排放量(下文简称为二氧化碳当量排放量);第二:碳足迹的表征是用重量单位还是土地面积单位。

维德曼等<sup>[5]</sup>列出了碳足迹的不同定义,并对碳足迹的概念进行了明确的界定和探讨。他们将碳足迹定义为:一项活动中直接和间接产生的二氧化碳排放量,或者产品的各生命周期阶段累积的二氧化碳排放量,并明确指出碳足迹是对二氧化碳排放量的衡量,且用重量单位表示。哈蒙

收稿日期:2010-04-25

作者简介:耿涌,博士,研究员,博导,主要研究方向为循环经济、产业生态学和环境管理等。

\* 本文受到中国科学院百人计划项目(No.2008-318),辽宁省自然科学基金(No.20092078),沈阳市科技计划项目(No.1091147-9-00),中国科学院沈阳应用生态研究所博士启动基金(No.Y0SBS161S3)的资助。

德(Hammond)在 Nature 上发表文章强调碳足迹是一个人或一项活动所产生的“碳重量”,甚至建议称碳足迹为“碳重量”<sup>[6]</sup>。而欧盟对碳足迹的定义是指一个产品或服务的整个生命周期中所排放的二氧化碳和其它温室气体的总量<sup>[7]</sup>。荷威奇(Hertwich)和波都(Baldo)等学者也将碳足迹定义为一个产品的供应链或生命周期所产生的二氧化碳和其它温室气体的排放总量<sup>[8-9]</sup>。

综合碳足迹的各种定义发现,大多数学者都用重量单位来表征碳足迹,而以二氧化碳排放量和二氧化碳当量排放量为研究对象的学者均不少。因此,本文认为碳足迹概念在维德曼和敏克斯定义的基础上进一步修改比较合理,即:一项活动、一个产品(或服务)的整个生命周期、或者某一地理范围内直接和间接产生的二氧化碳排放量(或二氧化碳当量排放量)。这里值得注意的是碳足迹的定义要合理、清晰、一致,以便保证所开展的碳足迹计算的准确性和科学性<sup>[10]</sup>。

## 2 碳足迹分类

根据对碳足迹研究对象和研究尺度等的不同,碳足迹的分类也不尽相同。如按照研究对象不同碳足迹可分为:产品碳足迹、企业碳足迹和个人碳足迹;按照研究尺度不同碳足迹可分为:国家碳足迹、区域碳足迹和家庭碳足迹;按照计算边界和范围不同碳足迹又可分为:直接碳足迹和间接碳足迹。此外,也可以按照国际气候变化专门委员会(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)的分类方法,按部门不同将碳足迹分为:能源部门碳足迹、工业过程和产品使用部门碳足迹、农林和土地利用变化部门碳足迹、废弃物部门碳足迹等。

产品碳足迹是指产品或服务从摇篮到坟墓的整个生命周期中所产生的二氧化碳排放量(或二氧化碳当量排放量)。企业碳足迹指在企业所界定的范围内产生的直接和间接二氧化碳排放量(或二氧化碳当量排放量)。个人碳足迹是指每个人日常生活中的衣、食、住、行等所导致的二氧化碳排放量(或二氧化碳当量排放量)。目前网络上流行的碳足迹计算器多用来估算个人、家庭、企业和产品的碳足迹。安德鲁斯(Andrews)经过统计发现 76 个在线碳足迹计算器中有 52 个是计算个人和家庭碳足迹的,12 个是计算工业碳足迹的,10 个是计算企业碳足迹的,只有 2 个是计算产品碳足迹的<sup>[11]</sup>。

## 3 碳足迹的计算方法

碳足迹的计算方法多种多样,包括投入产出法(input-output, I-O)、生命周期评价法(life cycle assessment, LCA)、《2006 年 IPCC 国家温室气体清单指南》计算方法(下文简

称为 IPCC 方法)<sup>[12]</sup>、碳足迹计算器<sup>[13]</sup>等,而尤以 I-O 法、LCA 法和 IPCC 法应用较多。

### 3.1 投入产出法(I-O 法)

投入产出法(I-O 法)是由美国经济学家瓦西里·列昂惕夫(Wassily Leontief)创立的,目前已经作为一种成熟的工具,广泛应用于经济学领域。I-O 法利用投入产出表进行计算,通过平衡方程反映初始投入、中间投入、总投入,中间产品、最终产品、总产出之间的关系,反映其中各个流量之间的来源与去向,也反映了各个生产活动、经济主体之间的相互依存关系<sup>[14]</sup>。投入产出法将深刻复杂的经济内涵与简洁明了的数学表达形式完美结合,是经济系统分析不可替代的工具<sup>[15]</sup>。

目前已有不少学者应用 I-O 法进行碳足迹的计算。根据研究对象与周边地区的贸易类型不同,I-O 法可分为单边投入产出模型(single-region input-output, SRIO)、双边投入产出模型(two-region input-output, TRIO)和多边投入产出模型(multi-region input-output, MRIO)<sup>[16-18]</sup>。三种模型对应的贸易类型如图 1 所示,类型 A 中各个国家或区域之间是相互独立的,不存在贸易交换;类型 B 中各区域之间存在单向贸易,但不存在反馈环;类型 C 中不仅考虑了区域间的相互贸易,而且考虑了相互贸易之间的反馈环。投入产出法是一种自下而上的计算方法,计算过程缺少详细的细节,但模型一旦建立比较省时省力,比较适合于宏观尺度上温室气体排放的计算。

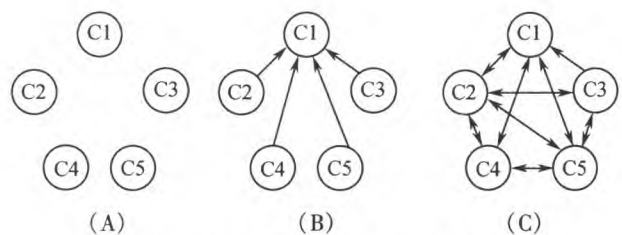


图 1 投入产出法的三种贸易模型  
Fig.1 Three trade types of input-output analysis

### 3.2 生命周期评价法(LCA 法)

生命周期评价法(LCA 法)是评估一个产品、服务、过程或活动在其整个生命周期内所有投入及产出对环境造成的和潜在的影响的方法<sup>[19]</sup>,是传统的从“摇篮”到“坟墓”的计算方法。LCA 法已经纳入 ISO14000 环境管理体系,具体包括互相联系、不断重复进行的四个步骤:目的与范围的确定、清单分析、影响评价和结果解释。

LCA 法是一种自上而下的方法,计算过程比较详细和准确,适合于微观层面碳足迹的计算。目前其在碳排放评估方面的应用主要集中于产品或服务的碳足迹计算,且已有成熟的相关标准供参考,如英国标准协会颁布的面向公

众的标准(publicly available specification)PAS 2050:2008,正在制定的碳足迹标准 ISO 14067。

由于 LCA 法和 I-O 法各有优缺点(见表 1),因此有学者提出了一种将 LCA 和 I-O 结合在一起的混合 LCA 法<sup>[20-21]</sup>,其融合二者之长以补其短。虽然混合 LCA 法已有十多年的历史,然而几乎没有用于碳足迹方面的研究。

表 1 I-O 法和 LCA 法的优缺点对比

Tab. 1 Comparison of I-O analysis and LCA analysis

	I-O 法(I-O analysis)	LCA 法(LCA analysis)
优点	1. 是一种自下而上的方法,适合于宏观层面的计算。 2. 数据一旦获得,则计算简单。 3. 系统完整性好。	1. 是一种自上而下的方法,适合于微观层面的计算。 2. 有详细的计算过程。
缺点	1. 计算过程比较粗略,不详细。 2. 数据量大,数据比较老,一般我国的投入产出表每 5 年才公布一次。	1. 生命周期阶段的确定和边界的确定比较复杂和困难。 2. 由于边界的限制,系统完整性往往比较差。

### 3.3 IPCC 计算方法

IPCC 方法是指联合国气候变化委员会编写的国家温室气体清单指南,其提供了计算温室气体排放的详细方法,并成为国际上公认和通用的碳排放评估方法。在最新修订版本 IPCC 2006 中,IPCC 方法将研究区域分为能源部门、工业过程和产品使用部门、农林和土地利用变化部门、废弃物部门四大部门,其中:

(1)能源部门是指依靠能源燃烧驱动的经济体部门。能源部门通常是温室气体排放清单中最重要的部门,一般占二氧化碳排放量的 90% 以上和温室气体总排放量的 75%。

(2)工业生产过程和产品使用部门是指从工业过程、产品中使用的温室气体、化石燃料碳的非能源使用(即作为原料)产生的温室气体排放。工业生产过程中化石燃料作为燃料使用产生的排放列入能源部门考核。

(3)农林和土地利用变化部门的碳排放包括农业活动和林地变化等引起的温室气体排放。农业通常为碳源,主要包括稻田甲烷排放、农田氧化亚氮排放、动物消化道甲烷排放、动物粪便管理中产生的甲烷和氧化亚氮排放。

(4)废弃物处置部门主要估算源自固体废弃物处置、固体废弃物的生物处理、废弃物的焚化和露天燃烧、废水处理和排放等过程中产生的二氧化碳、甲烷和氧化亚氮排放。

在 IPCC 计算方法中,针对不同的部门,碳足迹的计算

方法往往不完全相同,但最简单最常用的方法是:碳排放量 = 活动数据 × 排放因子。由于生产工艺、地域分布和技术水平等的差异,各国的排放因子往往不同。IPCC 给出了不同生产工艺和不同国家的各种缺省排放因子,在没有相关数据的情况下可以直接采用 IPCC 提供的缺省排放因子。

IPCC 计算方法的优点是详细、全面地考虑了几乎所有的温室气体排放源,并提供了具体的排放原理和计算方法。然而其缺点是仅适用于研究封闭的孤岛系统的碳足迹,是从生产角度计算研究区域内的直接碳足迹,无法从消费角度计算隐含碳排放。

### 3.4 碳足迹计算器

碳足迹计算器是网络上很流行的碳足迹计算软件,通常用来计算个人和家庭每日消耗能源而产生的二氧化碳排放量。通常利用简单的排放因子公式将电、油、气和煤等消耗量转化为二氧化碳的排放量,或者根据运输工具的类型和运输距离来计算相应的二氧化碳排放量。例如保护国际中国项目组及美国大自然保护协会提供的碳足迹计算器,其基本计算公式为:

(1)家居用电的二氧化碳排放量(kg) = 耗电度数(kWh) × 0.785 kg/kWh;

(2)开车的二氧化碳排放量(kg) = 油耗公升数(L) × 0.785 (kg/L);

(3)乘坐飞机的二氧化碳排放量(kg):

200 km 以内的短途旅行 = 公里数(km) × 0.275 (kg/km); 200 - 1 000 km 的中途旅行 = 55 + 0.105 (kg/km) × (公里数 - 200); 1 000 km 以上的长途旅行 = 公里数(km) × 0.139 (kg/km)。

然后按照 30 年冷杉吸收 111 kg 二氧化碳计算需要植多少棵树来补偿,从而将“公众日常消费——二氧化碳排放——碳补偿”这一链条直观而简洁地呈现出来<sup>[22]</sup>。

碳足迹计算器多种多样,由于不同碳足迹计算器的复杂程度和包含的计算项目不同,因此结果往往差别往往很大甚至相互矛盾<sup>[13]</sup>。虽然碳足迹计算器计算结果不是很精确,但由于其操作简单,易于理解,而且使公众可以随时上网计算自己每天生活中排放的二氧化碳量,帮助每个人有意识地检查自己日常生活中的习惯性行为,继而采取行动减少二氧化碳排放。因此碳足迹计算器对于提高公众碳足迹意识和低碳行为具有重要作用。

## 4 碳足迹研究概况

随着碳足迹研究方法的日益流行,自 2007 年以来,研究碳足迹的相关文章层出不穷。然而,碳足迹研究主要集中在国外,国内的研究还比较少,仍处于起步阶段。





#### 4.1 国外研究状况

国外对碳足迹的研究比较深入,研究角度、研究对象和研究方法也多种多样,其中国家、区域和家庭尺度上的研究较多。在国家尺度上,荷威奇(Hertwich)等利用 MRIO 模型从国家尺度上分别计算了卢森堡等 73 个国家和 13 个地区的碳足迹,发现各国碳足迹差别明显,其中卢森堡、香港和美国分别以 33.8 吨/(人·年)(t/py)、29.0 t/py 和 28.6 t/py 的碳足迹量位居前三,马拉维和孟加拉国等非洲国家碳足迹最低,约为 1 t/py;从全球来看,72% 的碳足迹是由于家庭消费引起的,而投资和政府消费分别为 18% 和 10%;发达国家碳足迹更侧重于运输和产品生产方面,而发展中国家则更倾向于食品和服务方面<sup>[8]</sup>。

在城市尺度上,Browne 等运用碳足迹方法计算了爱尔兰利默里克市固体废弃物的产量、处置率和回收率等对环境的影响,并通过降低废物产量、增加回收率以及进行填埋处理等因素的调整进行预案分析,其中将填埋率降至 14% 的方案最优<sup>[23]</sup>。Shimada 开发了一种基于宏观经济工具的区域碳足迹计算模型,并分别以滋贺县和京都市为案例计算了区域二氧化碳排放,该方法把区域分为工业部门、商业部门、居住部门、客运部门和货运部门五个部门进行计算,为实现政府制定的 2030 年低碳目标进行了预案分析。

其研究结果表明:可以在实现 2030 年低碳目标的同时保持 GDP 1.6% 的年增长率,其中社会经济结构变化和技术措施是重要影响因素,而土地规划、可再生资源 and 生活方式等相关措施的作用日益明显。Sovacool 等从交通工具、建筑和工业能源使用、农业、废弃物四个来源计算了北京、伦敦、纽约、墨西哥等 12 个城市的碳足迹,并分析了人均收入、人口密度、运输方式以及电力供应四个主要因素对不同国家碳足迹的影响。

在家庭尺度上,Druckman 等则利用类多边投入产出(quasi-multi-regional input-output, QMRIO)模型计算了英国 1990 - 2004 年的家庭碳足迹,并从产品和服务中的隐含碳、家庭直接能源使用、私家车和航空四个方面探讨了碳足迹情况。他们研究发现隐含碳所占的比例最大,能源使用次之,最后是私家车和航空,而生活需求的增多是碳排放增加的主要原因之一,不过满足人们基本需求的基础设施造成的碳排放也不可忽略<sup>[17]</sup>。Weber 等利用 MEIO 模型研究了美国家庭的碳足迹,考虑了家庭规模、收入和支出等因素对碳足迹的影响,对教育、健康、交通、能耗、休闲娱乐、服装、饮食等 13 个消费种类进行了探讨,发现能耗和交通的碳排放强度较高,且低收入和支出家庭的碳排放主要是集中在基本需求消费种类,且随收支水平增加,娱乐等高级消费种类的碳排放比重上升。

从其它角度研究碳足迹的学者也不少。Larsen 等用法从消费观角度研究了特隆赫姆(Trondheim)市服务部门的直接碳足迹和间接碳足迹,发现间接碳足迹约占整个城市服务部门碳排放的 93%,其中 19% 来自特隆赫姆市,50% 来自特隆赫姆市以外的挪威其他地方,22% 来自挪威以外的其他国家。Rule 用法计算了地热发电、潮汐发电、水力发电和风能发电四种可再生发电技术的碳足迹,对比发现潮汐发电碳足迹最低,为 1.8 g CO<sub>2</sub>/kWh,其次为风能 3.0 g CO<sub>2</sub>/kWh,水力发电 4.6 g CO<sub>2</sub>/kWh,而地热发电碳足迹最大,为 5.6 g CO<sub>2</sub>/kWh。Eva 等研究了希腊宾馆的碳足迹,探索通过采取节约能源的措施来适应政府出台的能源政策。

#### 4.2 国内研究现状

国内对碳足迹的研究还比较少,且研究比较浅显,多集中于政策性和倡导性的范畴,鲜有深入的研究。樊瑛等提出了设定暖通空调(HVAC)系统的基准碳排放量的思想,并介绍了 HVAC 系统碳足迹的分析方法,提出了评价系统对环境影响程度的两个指标:碳排放量和单位输出能量的碳排放量。郭运功等计算了 1995 - 2006 年上海市能源利用的总碳足迹、各能源类型和产业类型的碳足迹、碳足迹的产值和生态压力值,并以此为基础,利用岭回归函数进行 STIRPAT 模型拟合,进一步研究经济发展与碳排放足迹之间的关系,最后提出适应性的管理策略。陈红敏对利用投入产出法计算隐含碳排放的框架进行了扩展,并利用该框架计算分析了 2002 年中国各部门最终消费和使用中的隐含碳排放情况。

结果发现,建筑业是隐含碳排放最高的部门,部门分类水平的粗细对于各部门生产过程隐含碳排放的核算结果具有较大的影响。

综合国内外研究发现,国外碳足迹的研究比较成熟,研究角度多种多样,既有国家和区域尺度的研究,也有家庭和特定部门的研究;既有直接碳足迹和间接碳足迹的对比研究,也有生产性碳足迹和消费性碳足迹的研究。碳足迹的评估方法也多种多样,以各种 I-O 法的应用较多。然而,国内对碳足迹的实质性研究还较少,且研究方法和视角均比较单一,有待于进一步的完善,从而更好地推动我国低碳经济的发展和减排目标的实现。

### 5 碳足迹的评估标准

碳足迹作为一个新概念,其评估方法和边界界定还比较模糊,迫切需要统一、规范化的标准来约束。目前关于碳足迹的规范和标准不断推出,主要包括欧盟的温室气体盘查议定书、英国的 PAS 2050:2008、日本的 TS Q 0010 和国际标准化组织正在制定的 ISO 14067 等。

### 5.1 英国的(Publicly Available Specification)PAS 2050:2008 标准

PAS 2050 由英国的碳基金(Carbon Trust)公司<sup>①</sup>以及环境、食品和农村事务部(Department for Environment, Food and Rural Affairs, Defra)共同发起,由英国标准协会(British Standard Institute, BSI)制定,于2008年10月底正式发布。PAS 2050 是产品和服务生命周期温室气体排放评估标准,是全球第一部产品碳足迹标准,为产品和服务碳足迹的评估和比较提供了一种可参考的标准化方法。PAS的宗旨是帮助企业真正了解他们的产品对气候变化的影响,寻找在产品的设计、生产和供应等过程中降低温室气体排放的机会,最终开发出碳足迹较小的新产品,能在应对气候变化方面发挥更大的作用<sup>[38]</sup>。

### 5.2 温室气体议定书(The Greenhouse Gas Protocol)标准

温室气体议定书(下文简称为GHG议定书)由世界可持续发展商业协会(World Business Council for Sustainable Development, WBCSD)和世界资源研究院(World Resource Institute, WRI)于1998年共同发起,目的是想透过一个开放的、透明的多方利害相关者参与机制,为企业开发一套温室气体的国际性评估和报告标准。GHG议定书于2001年10月发布第一版,经修正后于2004年发布第二版。此标准不仅提供了企业碳足迹评估和报告标准,而且提供了使用指南协助企业进行温室气体管理。WBCSD和WRI还将于2010年发布产品生命周期标准。

### 5.3 标准仕様书(TS)TS Q 0010 标准

TS Q 0010 标准由制定,于2009年4月正式发布,是关于产品碳足迹评估和标识的一般性原则规范。此规范详细介绍了适用范围、引用标准以及产品碳足迹的量化方法等。目前,此规范尚未成为正式的日本国家标准。

### 5.4 ISO 14067 标准

ISO 14067 标准是国际标准化组织正在制定的产品碳足迹标准,预计将于2011年3月制定完成。此标准由两部分组成:第一部分为量化/计算(Quantification),第二部分为沟通/标示(Communication)。标示部分参考ISO 14020 环境标示系列,温室气体盘查部分将参考ISO 14064 温室气体系列,生命周期评估部分将参考ISO 14040 生命周期评价系列。ISO 14067 标准颁布后,其它碳足迹相关标准将终止或根据此国际标准进行修正。

## 6 碳足迹的边界界定

碳足迹评估边界的界定随研究对象和研究视角不同存在很大差异,对计算结果起着决定性作用,是计算碳足

迹的前提和关键。GHG议定书和PAS 2050这两个国际标准均将碳足迹的边界问题作为重要一部分进行了详细界定。本文分别以两个标准为例,详细说明碳足迹的边界问题。

### 6.1 GHG 议定书标准的边界界定

GHG议定书标准针对的是如何计算企业的碳足迹,其将碳足迹的边界划分为组织边界和操作边界。组织边界可以通过权益股份额或管辖控制范围两种方式来确定,组织边界确定后就可以进行碳足迹的计算。计算时根据操作边界的不同可以细分为三个层次(见图2):层次1为直接温室气体排放,指由公司所属的排放源直接产生的温室气体排放量,例如公司内锅炉、加热炉和汽车等的燃烧排放,生产过程排放等;层次2为公司所购买的电力和热力产生的温室气体的排放;层次3:其它处理过程产生的直接排放,如原材料的提取和生产、购买燃料的运输过程、购买的产品和服务的使用过程等所产生的排放。其中层次1为直接排放,层次2和层次3为间接排放。

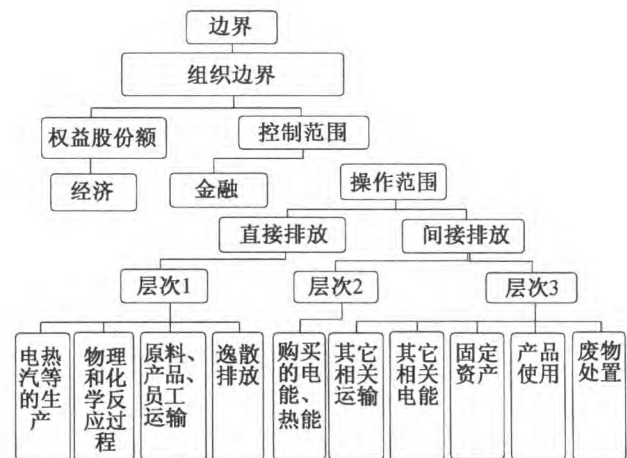


图2 GHG议定书边界示意图  
Fig.2 Diagram of GHG Protocol boundary

### 6.2 PAS 2050 标准的边界界定

PAS 2050 标准是计算产品/服务碳足迹的参考指南,其以LCA法为基础,根据产品种类规则(Product Category Rules, PCR)确定整个产品或服务生命周期阶段,分别界定了原材料、能源、生产资料、生产和服务提供、经营场所、运输、存储、使用和最终处置等九个方面的边界。PAS2050考虑了两种类型的边界:企业——企业(Business-to-Business, BTB)和企业——消费者(Business-to-Consumer, BTC)。BTC型边界包括原材料、生产、分配和零售、消费者使用、最终处置或回收五个阶段,是从摇篮到坟

① 碳基金(Carbon Trust)是一个由政府投资、以企业模式运作的独立公司,成立于2001年。目标是通过帮助商业和公共部门减少二氧化碳的排放,捕获低碳技术的商业机会,从而帮助英国走向低碳经济社会。

墓的全生命周期过程。而 BTB 型则仅包括原材料、生产、分配至另一生产商三个阶段,不包括最终产品的分配和零售、消费者使用和最终处置阶段。两种类型边界区别见图 3。

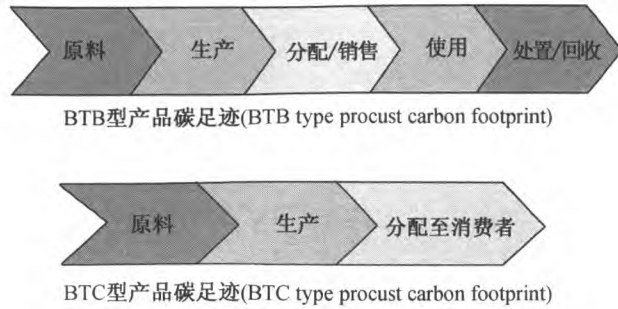


图 3 PAS 2050 标准中两种产品碳足迹边界对比  
Fig.3 Comparison of two types product carbon footprint boundaries in PAS 2050

### 6.3 GHG 议定书标准和 PAS 2050 标准边界对比

GHG 议定书标准和 PAS 2050 标准分别从企业角度和产品角度进行碳足迹的评估,边界界定的区别在于前者是从纵向考虑,而后者从横向进行界定,但二者有一定的交叉,其区别见图 4。由于两者界定的角度不同,因此计算结果没有可比性,甚至相差很大。例如:安德鲁斯分别用 GHG 议定书标准和 PAS 2050 标准计算了当地一个面包生产公司和其产品的碳足迹,分别为 5.56 t CO<sub>2</sub>e 和 1.01 t CO<sub>2</sub>e,相差 5 倍<sup>[11]</sup>。

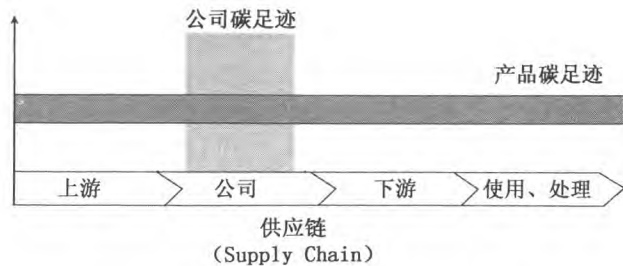


图 4 产品碳足迹和公司碳足迹的边界对比  
Fig.4 Comparison of the boundaries of product and corporate carbon footprint

## 7 研究展望

随着气候变暖问题日益严峻,碳足迹已不仅仅是一个流行于社会各界的新词汇,而更将成为研究的焦点和热点。与其它概念和方法相比,碳足迹更容易吸引公众的注意力,其可能会成为树立消费者环保意识和增强产品环境效应关注度的切入点<sup>[2]</sup>。综上所述,我们认为碳足迹有待于在以下几方面进一步研究:

(1) 新方法和新模型的涌现。碳足迹的计算方法多种多样,包括 I-O 法、LCA 法、IPCC 法和碳足迹计算器等。然而每种方法都有其优势和不足,因此新的计算方法和模型的开发对于碳足迹的进一步完善具有重要作用。混合 LCA 法既具有 LCA 法的详细性、准确性,又不失 I-O 法的完整性,是一种高级的方法。应用混合 LCA 法进行碳足迹研究无疑将是一种挑战。

(2) 排放因子的区域化。IPCC 法作为国际上比较通用的方法之一,得到了广泛的认同。然而由于其排放因子多是全球和国家尺度上的缺省值,不能准确地代表某一地区的真实情况,因此进一步完善和修正温室气体的排放因子,实现排放因子区域化是十分必要的。

(3) 边界的科学划分。研究目的和数据的获取状况决定了碳足迹的计算方法和研究边界。合理的边界确定可以有效避免重复计算,从而更有针对性地提出减排措施和建议。这里,购买的区域外生产的产品或服务而引起的碳足迹是否应该列入考虑范围,间接碳排放生命周期阶段如何进行合理的划分和碳储存等问题都是急需学界予以解决的工作。

(4) 碳足迹的科学利用。目前碳足迹的应用还存在一些争议,例如:碳足迹会不会也像“千年虫”、“萨斯”等新词汇一样随着媒体报道的逐渐减少以及公众对其逐渐熟悉,头上的光环也慢慢黯淡和消失。还有就是仅仅强调产品的碳足迹是否会误导人们过分关注碳排放,而忽视产品可能造成的酸雨、光化学烟雾等其它环境效应<sup>[4, 7]</sup>。因此,如何正确把握碳足迹的概念并有效运用碳足迹方法来提出科学的减排对策、实现减排目标、应对气候变暖问题,也将是碳足迹研究的重要领域。

(编辑:于 杰)

### 参考文献 (References)

- [1] Wackernagel M, Rees W. Our Ecological Footprint: reducing human impact on the earth [M]. New Society Pub, 1996.
- [2] Weidema B P, Thrane M, Christensen P, et al. Carbon footprint-A catalyst for life cycle assessment? [J]. Journal of Industrial Ecology, 2008, 12(1): 3-6.
- [3] East A J. Vegetable Industry Carbon Footprint Scoping Study Discussion Paper 1: What is a Carbon Footprint? An Overview of Definitions and Methodologies [R]. Sydney: Horticulture Australia Limited, 2008.
- [4] Finkbeiner M. Carbon Footprinting-Opportunities and Threats [J]. International Journal of Life Cycle Assessment, 2009, 14(2): 91-94.
- [5] Wiedmann T, Minx J. A definition of Carbon Footprint [J]. ISA Research Report, 2007:1-7.
- [6] Hammond G. Time to Give due Weight to the 'Carbon Footprint' Issue [J]. Nature, 2007, 445(7125): 256-256.
- [7] JRC E C. Carbonfootprint-what it is and how to Measure it [J]. 2007.
- [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] Baldo G L, Marino M, Montani M, et al. The Carbon Footprint Measurement Toolkit for the EU Ecolabel [J]. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 2009, 14(7): 591 – 596.
- [10] Johnson E. Disagreement over Carbon Footprints: A Comparison of Electric and LPG Forklifts [J]. *Energy Policy*, 2008, 36(4): 1569 – 1573.
- [11] Andrews S. A Classification of Carbon Footprint Methods Used by Companies [D]. Boston: Massachusetts Institute of Technology, 2009: 1 – 59.
- [12] IPCC. Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories [M]. Intergovernmental Panel on Climate Change, 2006.
- [13] Kenny T, Gray N. Comparative Performance of Six Carbon Footprint Models for use in Ireland [J]. *Environmental Impact Assessment Review*, 2009, 29(1): 1 – 6.
- [14] 宁淼. 投入产出模型在工业生态系统分析中的应用 [J]. *中国人口·资源与环境*, 2006, 16(4): 69 – 72. [Ning Miao. Input-output Model for the Analysis of Industrial Ecosystem [J]. *China Population, Resources and Environment*, 2006, 16(4): 69 – 72.]
- [15] 王志峰, 李红. 基于投入产出理论的资源环境综合核算 [J]. *煤炭经济研究*, 2006, (7): 34 – 35. [Wu Zhifeng, Li Hong. Comprehensive Accounting of Resources and Environment Based on Input-Output Theory [J]. *Coal Economic Research*, 2006, (7): 34 – 35.]
- [16] Munksgaard J, Wier M, Lenzen M, et al. Using Input-output Analysis to Measure the Environmental Pressure of Consumption at Different Spatial Levels [J]. *Journal of Industrial Ecology*, 2005, 9(1 – 2): 169 – 185.
- [17] Druckman A, Jackson T. The Carbon Footprint of UK Households 1990 – 2004: A Socio-Economically Disaggregated, Quasi-Multi-Regional Input-Output Model [J]. *Ecological Economics*, 2009, 68(7): 2066 – 2077.
- [18] Jackson T, Papathanasopoulou E, Bradley P, et al. Attributing Carbon Emissions to Functional Household Needs: Methodology and Pilot Results [R]. Guildford: University of Surrey, 2006: 1 – 35.
- [19] 洪钢. 生命周期分析法——环境评估的有效工具 [J]. *能源工程*, 1999, (3): 21 – 23. [Hong Gang. LCA: an Effective Environment Assessment Tool [J]. *Energy Engineering*, 1999, (3): 21 – 23.]
- [20] Heijungs R, Suh S. Reformulation of Matrix-based LCI: From Product Balance to Process Balance [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2006, 14(1): 47 – 51.
- [21] Suh S. Input-output and Hybrid Life Cycle Assessment [J]. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 2003, 8(5): 257 – 257.
- [22] 单力, 阿柱. 计算你的碳足迹 [J]. *环境*, 2007, (8): 54 – 56. [Shan Li, A Zhu. Calculating Your Carbon Footprint [J]. *Environment*, 2007, (8): 54 – 56.]
- [23] Browne D, O'Regan B, Moles R. Use of Carbon Footprinting to Explore Alternative Household Waste Policy Scenarios in an Irish City-Region [J]. *Resources Conservation and Recycling*, 2009, 54(2): 113 – 122.

## A Review of the Research on Carbon Footprint Responding to Climate Change

GENG Yong<sup>1</sup> DONG Hui-juan<sup>1,2</sup> XI Feng-ming<sup>1</sup> LIU Zhu<sup>1,2</sup>

(1. Institute of Applied Ecology, Chinese Academy of Sciences, Shenyang Liaoning, 110016, China;

2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract** The problem of global warming, caused by greenhouse gases, has aroused increasing attention from the international community. With the increasing concerns on global warming, carbon footprint analysis has become a new method for assessing regional greenhouse gas emissions and has been widely applied by academia. This paper first presents the origin and the different definitions on carbon footprint, clearly clarifies the concept of carbon footprint and then explores different categorization approaches on carbon footprint. The main focus of this paper is to introduce different calculation methods on carbon footprint analysis, including life cycle assessment, input-output analysis, the IPCC method and carbon footprint calculator. Advantages and disadvantages of the four calculation methods are also summarized and compared. On the basis of this, we review the current research progress at home and abroad and identify the key issues. We also introduce four main evaluation standards on carbon footprint: the British Standard PAS 2050:2008, the Greenhouse Gas Protocol made by World Business Council for Sustainable Development and World Resource Institute, the Japanes standard TS Q 0010, and ISO 14067. Besides, the important premise of how to solve the boundary problem on carbon footprint evaluation is recognized based upon both GHG Protocol standard and PAS 2050 standard. We finally present the future research perspectives on carbon footprint analysis.

**Key words** carbon footprint; life cycle assessment; input-output analysis; boundary; standard