

碳足迹分析方法研究综述

王微, 林剑艺*, 崔胜辉, 吝涛

(中国科学院城市环境研究所, 福建 厦门 361021)

摘要:随着全球气候变暖日益引起各国政府和公众的普遍关注,碳足迹分析方法成为近年来学术界的新兴研究热点之一。碳足迹分析是一种评价碳排放影响的全新测度方法,其从生命周期的角度揭示不同对象的碳排放过程,具体衡量某种产品全生命周期或某种活动过程中直接和间接相关的碳排放量,为探索合理有效的温室气体减排途径提供科学依据。文章对国内外现有的碳足迹研究进行了系统的回顾,重点介绍了碳足迹的定义、计算方法和应用案例。其中碳足迹计算方法主要包括过程分析法和投入产出法。应用案例主要从不同尺度的碳足迹研究与特定产业/部门的碳足迹分析来阐述。最后,针对当前碳足迹的研究现状和研究趋势,从碳足迹的概念内涵、计算方法、研究尺度及研究内容等四个方面对碳足迹研究进行了展望,以期推动我国碳足迹模型的理论与实践的发展。

关键词:碳足迹; 生命周期评价; 投入产出分析; 应用案例; 研究方向

中图分类号:X828 **文献标志码:**A **doi:**10.3969/j.issn.1003-6504.2010.07.017 **文章编号:**1003-6504(2010)07-0071-08

An Overview of Carbon Footprint Analysis

WANG Wei, LIN Jian-yi*, CUI Sheng-hui, LIN Tao

(Institute of Urban Environment, Chinese Academy of Sciences, Xiamen 361021, China)

Abstract: Carbon footprint has become an effective approach for evaluating carbon emission, aiming at tracking down total carbon emission across the life cycle to provide scientific bases for carbon reduction. This paper presents the research progress in carbon footprint analysis based on a comprehensive literature review, summarizing definitions, computational methods and application case histories of carbon footprint. As for computational methods, process analytic method and input-output analysis approach are highlighted. Case histories in this paper report the application of footprint analysis with respect to different scales and industrial sectors/infrastructure departments. Prospects for research trends in the area of carbon footprint are discussed as well.

Key words: carbon footprint; life cycle assessment; input-output analysis; application case; research direction

最新科学研究表明未来100年全球变暖的趋势还会进一步加剧,而且会对自然系统和社会经济产生更为显著的负面影响^[1-2]。如何有效地减少碳排放成为国际政治、经济及学术研究关注的热点之一。对于碳排放方面的研究大部分集中在碳排放机理、碳排放与经济增长演进、碳排放与能源结构演进等方面的关系研究^[3-5],而对于碳排放的源头分析则相对较少。碳足迹分析方法从生命周期的视角分析碳排放的整个过程,并将个人或企业活动相关的温室气体排放量纳入考虑,可以深度分析碳排放的本质过程,进而从源头上制定科学合理的碳减排计划^[6]。特别是在当今全球化时代,面对全球气候变化问题,若仅着眼于自己国家的碳排放的削减,并不足以适应当前的严峻形势,因

此碳足迹的研究具有特别的意义^[7]。国外对于碳足迹分别从概念内涵、计算方法以及实例计算开展研究^[8-9],研究尺度包括个人/产品、家庭、组织机构、城市以及国家等^[9-15],包括的产业部门涵盖工业、交通、建筑、供水、医疗等^[11,16-18],但总体来说仍处于起步阶段,而国内的碳足迹研究尚处于萌芽阶段。本文对碳足迹的国内外研究现状进行了回顾,主要从概念内涵、计算方法和研究案例三个方面进行总结和分析,最后对碳足迹的研究进行展望,以期推动国内碳足迹理论和实践的发展,为发展低碳经济,探索合理减排途径提供科学依据。

1 碳足迹定义

“碳足迹”的概念缘起于“生态足迹”^[19-20],主要是

收稿日期:2009-09-10;修回 2009-10-15

基金项目:国家自然科学基金资助项目(40701059);中国科学院知识创新工程重要方向项目(KZCX2-YW-450);中国科学院知识创新工程青年人才领域前沿项目(0714071d30)

作者简介:王微(1984-),女,硕士研究生,研究方向为低碳经济与可持续发展,(电话)0592-6190678(电子信箱)wwang@iue.ac.cn;* 通讯作者,(电话)0592-6190658(电子信箱)jylin@iue.ac.cn。

指在人类生产和消费活动中所排放的与气候变化相关的气体总量,相对于其他碳排放研究的区别,碳足迹是从生命周期的角度出发,破除所谓“有烟囱才有污染”的观念,分析产品生命周期或与活动直接和间

接相关的碳排放过程。但对于“碳足迹”的准确定义目前还没有统一,各国学者有着各自不同的理解和认识,如表 1 所示。

表 1 碳足迹的定义
Table 1 Definitions of carbon footprint

来源	定义
BP(2007) ^[21]	碳足迹是指人类日常活动过程中所排放的 CO ₂ 总量。
Energetics(2007) ^[22]	碳足迹是指人类在经济活动中所直接和间接排放的 CO ₂ 总量。
ETAP(2007) ^[23]	碳足迹是指人类活动过程中所排放的温室气体转化的 CO ₂ 等价物,来衡量人类对地球环境的影响。
Hammond(2007) ^[24]	从功能和含义上看,碳足迹应称之为个人或活动所释放的碳重量,所以碳足迹应改为“碳重量”或其他相关词汇。
WRI/WBCSD ^[5]	将碳足迹定义为三个层面:第一层面是来自机构自身的直接碳排放;第二层面将边界扩大到为该机构提供能源的部门的直接碳排放;第三层面包括供应链全生命周期的直接和间接碳排放。
Carbon Trust(2007) ^[9]	碳足迹是衡量某一种产品在其全生命周期中(原材料开采、加工、废弃产品的处理)所排放的 CO ₂ 以及其他温室气体转化的 CO ₂ 等价物。
POST(2006) ^[17]	碳足迹是指某一产品或过程在全生命周期内所排放的 CO ₂ 和其他温室气体的总量,后者用每千瓦时所产生的 CO ₂ 等价物(gCO ₂ eq/kWh)来表示。
Wiedmann & Minx(2007) ^[8]	碳足迹一方面为某一产品或服务系统在其全生命周期所排放的 CO ₂ 总量;另一方面为某一活动过程中所直接和间接排放的 CO ₂ 总量,活动的主体包括个人、组织、政府以及工业部门等。
Global Footprint Network(2007) ^[25]	碳足迹是生态足迹的一部分,可看作化石能源的生态足迹。
Grub & Ellis(2007) ^[26]	碳足迹是指化石燃料燃烧时所释放的 CO ₂ 总量。

在以上各类碳足迹的定义中,以 Wiedmann 和 Minx 所提出的碳足迹定义较为全面准确,但是该定义中的碳足迹仅指 CO₂ 的排放量,而没有衡量其他温室气体对于气候变化的影响。而大量研究表明^[9,17,25],CH₄、NO_x 等温室气体尽管排放量相对较小,但其对于气候变化有着不可忽视的影响。因此,综合现有研究,应在上述定义的基础上,将碳足迹衡量的范畴进一步扩展到其他温室气体,即碳足迹是某一产品或服务系统在其全生命周期内的碳排放总量,或活动主体(包括个人、组织、部门等)在某一活动过程中直接和间接的碳排放总量,以 CO₂ 等价物来表示。

2 碳足迹计算方法

计算碳足迹是评价温室气体排放的重要而有效的途径之一,目前碳足迹研究中的主要方法有两类^[6]:一是“自下而上”模型,以过程分析为基础;二是“自上而下”模型,以投入产出分析为基础。这两种方法的建立都依据生命周期评价的基本原理^[27]。本文将着重介绍以下两种方法:过程分析法和投入产出法。

2.1 过程分析法

过程分析法以过程分析为基本出发点,通过生命周期清单分析得到所研究对象的输入和输出数据清单,进而计算研究对象全生命周期的碳排放,即碳足迹。该方法以节碳基金(Carbon Trust)^[9]基于生命周期评价理论提出的产品碳足迹计算方法最有代表性。

2.1.1 计算过程^[9]

(1)建立产品的制造流程图。这一步骤的目的是尽可能地将产品在整个生命周期中所涉及的原料、活

动和过程全部列出,为下面的计算打下基础。主要的流程图有两类:一类是“企业-消费者”流程图(原料-制造-分配-消费-处理/再循环);另一类是“企业-企业”流程图(原料-制造-分配),不涉及消费环节。

(2)确定系统边界。一旦建立了产品流程图,就必须严格界定产品碳足迹的计算边界。系统界定的关键原则是:要包括生产、使用及最终处理该产品过程中直接和间接产生的碳排放。以下情况可排除在边界之外:碳排放小于该产品总碳足迹 1%的项目;人类活动所导致的碳排放;消费者购买产品的交通碳排放;动物作为交通工具时所产生的碳排放(如发展中国家农业生产中使用的牲畜)。

(3)收集数据。其中两类数据是计算碳足迹必须包括的:一是产品生命周期涵盖的所有物质和活动,二是碳排放因子,即单位物质或能量所排放的 CO₂ 等价物。这两类数据的来源可为原始数据或次级数据。一般的,应尽量使用原始数据,因其可提供更为精确的排放数据,使研究结果更为准确可信。

(4)计算碳足迹。通常,在计算碳足迹之前需要建立质量平衡方程,以确保物质的输入、累积和输出达到平衡。即:输入=累积+输出。然后根据质量平衡方程,计算产品生命周期各阶段的碳排放,基本公式为:

$$E = \sum_{i=1}^n Q_i \times C_i \quad (1)$$

其中 E 为产品的碳足迹, Q_i 为 i 物质或活动的数量或强度数据(质量/体积/千米/千瓦时), C_i 为单位碳排放因子(CO₂eq/单位)。

(5)结果检验。这一步骤是用来检测碳足迹计算结

果的准确性,并使不确定性达到最小化以提高碳足迹评价的可信度。提高结果准确度的途径有以下几种:用原始数据代替次级数据;使用更准确而合理的次级数据;计算过程更加符合现实并细致化;请专家审视和评价。

2.1.2 局限性

过程分析法适用于不同尺度的碳足迹核算,如产品/个人、家庭、组织机构、城市、区域乃至国家等,但存在以下三方面的不足之处:(1)由于该方法允许在无法获知原始数据的情况下采用次级数据,因此可能会影响到碳足迹分析结果的可信度;(2)碳足迹分析没有对原材料生产以及产品供应链中的非重要环节进行更深入思考;(3)因无法具体获悉产品在各自零售过程中的碳排放,所以零售阶段的碳排放结果只能取平均值。

2.2 投入产出法

投入产出模型是研究一个经济系统各部门间的“投入”与“产出”关系的数学模型,该方法最早由美国著名的经济学家瓦·列昂捷夫(W. Leontief)^[28-29]提出,是目前比较成熟的经济分析方法。Matthews等^[30]根据世界自然基金会(WRI)和世界可持续发展商会(WBCSD)对于碳足迹的定义,结合投入产出模型和生命周期评价方法建立了经济投入产出-生命周期评价模型(EIO-LCA),该方法可用于评估工业部门、企业、家庭、政府组织等的碳足迹。根据世界资源研究所(WRI)和世界可持续发展工商理事会(WBCSD)对碳足迹的定义,该方法将碳足迹的计算分为三个层面,以工业部门为例:第一层面是来自工业部门生产及运输过程中的直接碳排放;第二层面将第一层面的碳排放边界扩大到工业部门所消耗的能源如电力等,具体指各能源生产的全生命周期碳排放;第三层面涵盖了以上两个层面,是指所有涉及到工业部门生产链的直接和间接碳排放,也就是从摇篮到坟墓的整个过程。

2.2.1 计算过程

(1)根据投入产出分析,建立矩阵,计算总产出。

$$x=(I+A+A^*A+A^*A^*A+\dots)y=(I-A)^{-1}y \quad (2)$$

其中 x 为总产出, I 为单位矩阵, A 为直接消耗矩阵, y 为最终需求, A^*y 为部门的直接产出, A^*A^*y 为部门的间接产出,以此类推。

(2)根据研究需要,计算各层面碳足迹。

$$\text{第一层面: } b_i=R_i(I)y=R_iy \quad (3)$$

$$\text{第二层面: } b_i=R_i(I+A^*)y \quad (4)$$

$$\text{第三层面: } b_i=R_ix=R_i(I-A)^{-1}y \quad (5)$$

其中 b_i 为碳足迹, R_i 为 CO_2 排放矩阵, 该矩阵的对角线值分别代表各子部门单位产值的 CO_2 排放量(由该子部门的总 CO_2 排放量除以该子部门的生产总

值得到)。 A^* 为能源提供部门的直接消耗矩阵。

2.2.2 局限性

投入产出分析的一个突出的优点是它能利用投入产出表提供的信息,计算经济变化对环境产生的直接和间接影响,即用 Leontief 逆矩阵得到产品与其物质投入之间的物理转换关系。该方法的局限性在于:(1)EIO-LCA 模型是依据货币价值和物质单元之间的联系而建立起来的,但相同价值量产品在生产过程中所隐含的碳排放可能差别很大,由此造成结果估算的偏差;(2)该方法是分部门来计算 CO_2 排放量,而同一部门内部存在很多不同的产品,这些产品的 CO_2 排放可能千差万别,因此在计算时采用平均化方法进行处理很容易产生误差;(3)投入产出分析方法核算结果只能得到行业数据,无法获悉产品的情况,因此只能用于评价某个部门或产业的碳足迹,而不能计算单一产品的碳足迹。

3 碳足迹分析方法应用研究

根据目前国内外碳足迹应用研究内容,本文大致将其分为两类来阐述:不同尺度的碳足迹研究与特定产业/部门的碳足迹分析,其中研究尺度包括个人/产品、家庭、组织机构、城市、国家等;特定产业/部门包括工业、交通、建筑、供水、医疗等。

3.1 不同尺度的碳足迹研究

3.1.1 个人尺度

个人碳足迹是针对每个人日常生活中的衣、食、住、行所导致的碳排放量加以估算的过程。2007年6月20日,英国环境、食品及农村事务部(Defra)^[13]在其官方网站发布二氧化碳排放量计算器,让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。该计算器将根据个人或家庭使用的耗能设备、家电和交通工具的情况计算二氧化碳的排放量,并为访问者提供节能降耗的建议。美国加州环保署也委托伯克利大学设计了碳足迹计算器,该计算器应用了生命周期的评估方法,是目前涵盖层面较为完整的碳足迹计算器^[31]。2006年以来,我国国内一些网站也公布了二氧化碳排放量计算器,让公众可以借鉴使用^[32]。以上碳足迹计算器都是基于自下而上(Bottom-Up)的方法来评估碳足迹,即依照个人日常生活中实际消费、交通型态为估算依据。另有一种计算方法是依据“自上而下”模型,如以家户收支调查为基础,辅以环境投入产出分析,计算出一国中各家庭或是各收入阶层的碳足迹的平均概况。

3.1.2 产品尺度

产品碳足迹则是用于计算产品和服务在整个生

命周期内(从原材料的获取,到生产、分销、使用和废弃后的处理)温室气体排放量。最先系统运用生命周期方法进行碳足迹核算的是节碳基金(Carbon Trust)^[9]关于产品和服务的碳足迹应用研究。通过对产品全生命周期碳排放的计算分析,企业可将其产品的碳足迹以贴上“碳标签”(carbon footprint label)的方式告知消费者,从而引导消费者的市场购买行为。2007年7月,百事公司旗下某薯片产品首次应用此碳足迹计算方法进行了碳足迹分析,成为第一个被贴上“碳标签”的产品。到目前为止,该方法已经被广泛应用到全世界20多个公司的75种产品^[33]。此外,Carbon Trust与英国标准协会(British Standards Institution)、英国环保部及英国环境食品暨乡村事务部(Defra)已发布关于碳足迹评估的标准方法PAS2050(Publicly Available Specification),即《商品和服务生命周期温室气体排放评估规范》。该方法以Carbon Trust关于产品碳足迹的研究为基础,对现有英国标准(British Standard)进行有益的补充^[33]。PAS 2050是一项独立的标准,宗旨是帮助企业在管理自身生产过程中所形成的温室气体排放量的同时,寻找在产品的设计、生产和供应等过程中的减排途径^[34]。

除此之外,Gamage^[35]等基于生命周期方法比较了两种不同类型办公室座椅的碳足迹,研究发现,原料中含铝的座椅具有较高的温室效应系数(GWP100),这是因为,在铝的开采过程中会产生较多的温室气体排放量。而进一步研究发现,直接开采铝比利用循环铝排放更多的温室气体,因此回收利用废座椅中的铝能有效的降低其温室效应系数。

3.1.3 家庭尺度

对于家庭的碳足迹核算是国外碳足迹研究中起步较早,且相对较为成熟的内容。Christopher和Weber^[6]等运用区域间投入产出分析模型(MRIO)和生命周期评价方法,结合消费支出调查,分析了国际贸易对美国家庭碳足迹的影响。研究结果显示:随着全球贸易的增长,2004年美国家庭碳足迹的30%产生自美国境外;而且,家庭的收入和支出是影响碳足迹的最主要因素。在此基础之上,Druckman和Jackson^[36]将研究进一步扩展到多区域投入产出模型(quasi-multi-regional input-output model),并进行了时间尺度及不同家庭间的纵向和横向对比分析。研究显示,英国2004年家庭碳足迹比1990年增长了15%,其中产生自英国境外部分的碳足迹不断增长。通过对英国不同家庭碳足迹的对比分析显示,最高家庭的碳足迹比最低家庭多64%。该研究还发现,2004年英国家庭通过娱乐和休闲活动所排放的CO₂占其全部碳足迹

的四分之一以上。

家庭尺度碳足迹研究的另一个主要方向是对于碳足迹模型的评价分析。Kenny和Gray^[10]运用六种碳足迹评价模型分别计算了爱尔兰典型三口家庭的碳足迹。研究结论为这六种模型之间存在不一致性,甚至有时相互矛盾。Padgett^[37]等应用十种基于美国的碳足迹计算模型计算了美国家庭的碳足迹,也得出了上述相似结论:这些碳足迹计算模型大多缺乏一致性,尤其反映在评估美国家庭电力消费上,而且大部分模型缺乏对其方法和评价的详细说明。可见,尽管碳足迹计算模型发展迅速,但现有模型还存在一些不足和缺陷,反映在碳足迹计算边界的确定、各种碳排因子的选取、数据收集的准确性等方面。由于碳足迹计算模型可以促进公众对其个人行为所排放的CO₂的环境影响的意识,所以如何提高碳足迹计算模型的准确度和透明度,并对模型进行改进和完善将成为今后碳足迹理论研究的重点和难点之一。

3.1.4 组织机构尺度

现有研究中关于组织机构的碳足迹分析有企业和学校方面的案例。2009年3月,全球领先的第三方环境评估机构Camco完成了金光纸业(中国)投资有限公司(APP)首个“碳足迹”评估项目,评估对象包括APP(中国)旗下6家制浆造纸工厂和2家林业公司,完成评估的公司产能占APP(中国)全部产能的80%以上,此次评估为该公司制订明确的碳排放基准线和长期的节能减排管理措施奠定了基础^[38]。对企业进行碳足迹评估可以助其深入了解生产、经营活动对气候变化的影响,从而使企业采取有效的减排措施。

斯德哥尔摩环境研究所(Stockholm Environment Institute)^[39]结合过程分析和投入产出分析两种方法计算了英国学校的碳足迹。研究发现,英国2001年所有学校的碳足迹总和为92万吨CO₂,占英国CO₂总排放的1.3%。其中因采暖所导致的直接排放仅为26%,其余四分之三均来自间接排放,其中用电占22%,学校巴士占14%,其他交通方式占6%,化学药品占5%,教学设备占5%,纸张占4%,其他工业产品占14%,采矿和采石占2%,其他产品和服务占2%。该研究的创新之处在于,在投入产出分析的基础上,辅以过程分析即问卷调查的方式,获取了详尽的数据,该方法既有自上而下方法的系统性,又不失自下而上方法的细腻性,最终得到了较为准确而全面的研究结果。以上分析说明,这种混杂分析(Hybrid-EIO-LCA)方法较好地综合了过程分析和投入产出分析的优点,使两者相互补充,相互完善,将有可能成为今后碳足迹计算方法的发展趋势。

3.1.5 城市尺度

由于城市生命周期碳排放的数据获取较为困难,对于这一尺度的碳足迹研究相对薄弱。目前,仅有Brown等^[22]分析了2005年美国100个主要大城市地区的客运、货运交通及住宅区能源消费的碳足迹,结果发现,这100个大城市的人均居住碳足迹(2.24 t)仅为美国全国人均居住碳足迹(2.60t)的86%,也就是说大城市的能源利用效率要高于其他城市和地区。该研究还发现,这100个大城市的碳足迹也差别较大,其中人口密集、城市高速铁路运输发达的大城市的人均碳足迹较低。此外,货物运输价格、运输习惯、天气、电力来源以及电力价格等也是影响碳足迹的重要因素。

3.1.6 国家尺度

气候变化是全世界共同面临和关注的问题,所以对于国家乃至国际尺度的碳足迹研究显得尤为重要。目前这一尺度上的碳足迹研究内容主要集中在进出口贸易等方面。Wiedmann^[7]的研究指出,虽然其于1992年至2004年间,英国国内的温室气体排放量下降了5%,但实际上,若将其因消费所导致的间接温室气体排放量纳入时,则其排放量反而是上涨了18%。Wang和Watson^[40]的研究亦指出,虽然中国现在总温室气体排放量已超越美国,成为世界第一,但其排放量中,有高达23%是因其为了制造产品满足先进国家生活所需所间接导致的排放量。刘强^[15]等的研究可以进一步佐证上述观点,该研究基于生命周期评价的方法,构建了中国出口贸易产品的“载能量及碳排放量评价模型”,对中国出口贸易中的46种重点产品的载能量和碳排放量进行了计算、比较和分析。结果显示,2005年中国46种出口贸易产品的碳排放量共2.17亿t碳(折7.96亿t CO₂),约占当年全国碳排放总量的14.5%。该研究建议,在对出口贸易产品结构调整的过程中,要根据产品所负载的能耗量和碳排放量,采取不同的对策和措施。通过以上研究不难发现,国家碳足迹应着眼于整个国家的总体物质与能源的耗用所产生的排放量,并着眼于“间接”与“直接”、“进口”与“出口”所造成排放量的差异之分析,以检视国际贸易引起的碳足迹区际转移与责任区域扩散等。

3.2 特定产业/部门碳足迹研究

3.2.1 工业碳足迹

为了探索更为合理的减排途径,国外学者对不同能源发展模式的碳足迹进行了对比分析。Post^[17]研究了目前英国电力产业中不同能源模式下全生命周期的碳排放,主要对比了现在及未来化石燃料燃烧模式(煤、石油、燃气)和低碳能源模式(风能、太阳能、水

能、生物能、潮汐能和核能)的碳足迹。结果显示,任何一种能源模式在其生命周期内都会排放CO₂,无一不是“零碳排”的。而其中化石燃料燃烧的碳足迹最大(最高达1000gCO_{2eq}/kWh),大部分产生于发电厂生产阶段;低碳发电模式的碳足迹较低(<100g CO_{2eq}/kWh),大部分CO₂排放来自发电厂非生产阶段。该研究指出,若低碳能源可以替代化石燃料,那么电力产业的碳足迹将会大大减少。

此外,金属铜和水泥的生产及使用过程会排放大量的CO₂等温室气体,也被越来越多的研究所证实。Giurco和Petrie^[4]运用动态物质流模型(Dynamic material flow models)评价了金属铜生产和使用过程中的碳足迹,并通过情景分析,评估了各情境下CO₂减排的不同效果。动态物质流模型主要用来提供生命周期影响评价(LCIA)的指示因子,以识别金属生命周期的关键干预因素。结果显示,仅依靠铜初级生产的技术革新对于实现2050年温室气体减排目标的作用不大,而循环利用铜的废料却能使减排效果从18%提高到80%。为实现这一目标,需要加强初级生产和次级生产部门的沟通协作。沈卫国等^[41]应用生命周期评价(LCA)方法对水泥生命周期的碳排放量进行了定量计算,结果显示,每吨硅酸盐水泥和混合水泥生命周期的温室效应系数分别为1.45t和1.21t,而每吨熟料的烧成过程约占0.9t,且增加运输距离也会显著提高碳的排放量。碱激发水泥、石膏矿渣水泥、活性氧化镁水泥以及抛填骨料混凝土技术都能大幅度降低熟料水泥用量,对降低碳足迹具有重要意义。

3.2.2 交通碳足迹

随着源自交通工具的碳排放增长率逐年增加,研究交通碳足迹对于缓解全球变暖具有十分重要的意义。国内外学者在道路修建、车辆生产、燃料消耗等方面开展了一系列研究。Huang^[42]等依据生命周期评价方法建立了道路修建和维护评价模型,并计算了英国A34道路重建过程中的能量消耗和温室气体排放。但该研究只计算了道路的原料(沥青、乳胶)生产、运输、处置过程中排放的CO₂量,并没有涉及道路的使用、破坏拆除以及循环处理过程中的碳排放,所以从严格意义来讲,该研究只计算了道路的部分碳足迹。

为评估车辆生产及使用过程中对气候变化的影响,美国Argonne国际实验室^[13]开发出了汽车全生命周期温室气体排放和能耗模型——GREET模型。该模型分别提供了汽车原材料开采阶段、汽车组件制造阶段、汽车装配、处置和再循环阶段的CO₂排放量的计算方法。应用GREET模型,该研究对比评估了六种中型客车全生命周期的能耗和温室气体排放:常规材

料和轻型材料的内燃机车 (ICEV)、混合动力车 (HEV)、燃料电池车 (FCV)。

在汽车燃料方面,张亮^[43]运用生命周期评价原理,建立了适合我国国情的煤基二甲醚全生命周期一次能源消耗与环境排放分析模型,以二甲醚公交客车为功能单位,运用发动机台架试验研究结合整车测试循环仿真,获得了该功能单位的燃料消耗与环境排放因子,得到了车用燃料煤基二甲醚路线的全生命周期一次能源消耗与温室气体排放量,评估了电力结构改变与温室气体减排技术的效果,分析了煤基二甲醚的规模应用对我国能源结构的影响,并将煤基二甲醚路线与传统柴油和煤制柴油路线进行了对比。

李骞^[44]等采用物质流和生命周期相结合的分析框架研究,以 2003 年北京市居民的道路交通为对象,进行道路和车辆生命周期内的资源投入和污染排放的初步分析,揭示了北京市居民的道路交通活动对资源、环境的压力现状,即每提供 1 万人·公里的周转量,引起 331kg 的物质流和 10113MJ 的能量流。此外,还识别出影响压力的主要因素为:轿车、出租车的燃料效率;出租车的空驶率;轿车的材料比例;交通结构。调整这四个因素能最有效地降低道路资源的资源、环境压力。

可见,目前国内外关于交通领域的碳足迹研究都只是关注交通活动的某一方面,如道路等基础设施建设、车辆生产、车用燃料以及综合分析交通活动对环境压力等。但还缺乏对交通系统整体的碳足迹评价,也就是包括道路的施工、使用、破坏拆除和循环处理以及车辆的生产、运行、报废、再循环过程的全生命周期的碳排放。

3.2.3 建筑碳足迹

为量化分析不同建筑物在生命周期各阶段的能源消耗和温室气体排放情况,乔永峰^[45]以生命周期评价(LCA)方法的基本概念和理论框架为基础,建立了建筑物能源消耗和 CO₂ 排放量的数学计算模型。在分析建筑生命周期时,主要以建材生产、建造施工、居住使用、破坏拆除和废建材处理五个阶段为主。并以位于延安市枣园村的传统靠山窑洞、新式窑居太阳房以及新建砖混楼房三种建筑为实例进行计算分析,量化分析上述三种建筑在生命周期各阶段的能源使用和 CO₂ 排放情况,进一步探讨了传统民居建筑在节能和环境排放方面的可取之处和需要改进的地方。运用全生命周期评价法对传统民居进行碳足迹评价时,因为传统民居的建筑材料和施工工艺的独特性,其原理以及数据计算方法还有待进一步完善。尤其在数据获取方面,建立完善的、准确的、实用的建筑 LCA 数据库,对绿色建筑的研究与发展,以及传统建筑的再生都具

有很大的推动作用。

3.2.4 供水系统碳足迹

Lim 和 Park^[45]依据水系网络系统(water network system, WNS)方法,比较了基于两种水系网络系统(集成/单一)的工业部门供水系统的碳足迹。结果显示,采用集成水系网络系统可以经济有效地减少工业部门供水系统的碳足迹。另外,Friedrich^[46]等通过调查南非德班 eThekweni 自治县城市化与半城市化地区的供水和卫生系统,分别计算了三种缓解水资源匮乏措施的全生命周期碳排放总量——碳足迹。结果显示:在最大化使用现有供水和卫生设备的基础上,采取水循环利用措施的碳足迹最低;其次为新建基础设施;而使用瓶装矿泉水则会产生最大的环境负荷。同时,该研究也证实了碳足迹适用于评价复杂城市系统对环境的影响。

3.2.5 医疗卫生碳足迹

为评价腹腔镜手术对于气候变化的影响,Gilliam^[47]等通过对某医院 10 年间的腹腔镜手术排放的 CO₂ 进行分析,计算了腹腔镜手术汽缸的碳足迹。结果显示,在研究调查的十年里,腹腔镜手术例数约增加了 4 倍 ($n=174-688$),总共使用了 415 个汽缸,平均一例腹腔镜手术时间为 1.01h,平均一个汽缸的使用时间为 3.96h,一个汽缸仅排放出 0.9kg CO₂。因此该研究认为:尽管腹腔镜在外科系统的应用愈加广泛,但其对于全球变暖的影响可以忽略不计。Cole^[46]调查了英国国民健康保险制度(NHS)的碳足迹,分析发现,NHS 目前排放出 180 万吨 CO₂,占公共部门排放的四分之一,其中医疗采购占 60%,建筑占 22%,交通占 18%。该研究建议:采取减少医院食物中肉类和奶制品的供应量,循环利用医疗设备,到家中提供卫生保健等措施能有效减少 NHS 的碳足迹。

4 碳足迹研究展望

碳足迹分析方法从全新视角计算与评价碳排放,对正确而全面的评估温室气体效应具有十分重要的现实意义。国内外学者从不同角度研究了碳足迹的定义、计算方法以及研究案例,使碳足迹研究取得了一定的进展,但我国的碳足迹研究还处于萌芽阶段,与国外的研究体系相比存在较大差距。通过对现有相关研究的总结,笔者认为碳足迹的研究应在以下几个方面开展。

(1)在碳足迹的概念内涵上,目前还缺乏对碳足迹统一而明确的定义,碳足迹的概念直接关系到其计算边界,是碳足迹计算方法的理论基础和约束条件。今后的研究应继续加强对碳足迹理论体系的构建,不断充实并完善碳足迹的概念内涵。

(2)在碳足迹的计算方法上,过程分析法是现在最常用的方法,而过程分析法的计算边界、数据甄选、碳排系数等方面都有待进一步的探讨和完善;而对于投入产出法,由于数据获取困难,目前实物投入产出表法还很难应用于现实的碳足迹计算,碳足迹研究下一步应结合部门/产业、区域和国家的投入产出数据,实践并完善碳足迹的投入产出核算方法;另外,在改进和修正现有碳足迹的分析方法的同时,还应继续开展新的计算方法如混杂分析的研究。

(3)在研究尺度上,现有碳足迹的研究多集中在微观尺度上(产品、个人、家庭),但对于中观尺度(组织、机构)以及宏观尺度(城市、区域及国家)的碳足迹研究还较为欠缺。而气候变化已变成全球共同面对的问题,仅着眼于本区域或本国家的碳排放,可能导致仅碳排放源转移,实际上并未消减碳排放总量的假象。可见大尺度的碳足迹研究对于全球气候变化更具有现实意义,因此应着力拓展宏观尺度上的碳足迹研究。

(4)在研究内容上,应加强重点碳排放部门如工业、交通、建筑等行业的碳足迹分析,应开展碳足迹与可持续发展、生态安全、环境伦理等方面关系的研究,还应继续深入分析碳足迹的影响机制和驱动因子:一是应加强国际贸易、国内贸易等引起的碳足迹区际转移与责任区域扩散等研究;二是对不同消费模式、消费水平、消费文化背景下的碳足迹进行比较分析。

【参考文献】

- [1] Solomon S, Plattner G K, Knutti R, et al. Irreversible climate change due to carbon dioxide emissions[J]. PNAS, 2009, 106(6): 1704-1709.
- [2] Roger P J, Wigley T, Green C. Dangerous assumptions[J]. Nature, 2008, 452: 531-532.
- [3] Lim H J, Yoo S H, Kwak S J. Industrial CO₂ emissions from energy use in Korea: a structural decomposition analysis[J]. Energy Policy, 2009, 37 (2): 686-698.
- [4] 谭丹,黄贤金.我国东、中、西部地区经济发展与碳排放的关联分析及比较[J].中国人口·资源与环境, 2008, 18(3): 54-57.
Tan Dan, Huang Xian-jin. Correlation analysis and comparison of the economic development and carbon emissions in the eastern, central and western part of China[J]. China Population Resource and Environment, 2008, 18(3):54-57. (in Chinese)
- [5] 陈文颖,代光辉.广西重点行业二氧化碳减排潜力分析[J].环境科学与技术, 2007, 30(6):45-48.
Chen Wen-ying, Dai Guang-hui. Assessment of carbon emission reduction potentials in Guangxi[J]. Environmental Science & Technology, 2007, 30(6):45-48. (in Chinese)
- [6] Christopher L, Weber H S. Quantifying the global and distributional aspects of American household carbon footprint [J]. Ecological Economics, 2008, 66: 379-391.
- [7] Wiedmann T, Wood R, Lenzen M, et al. Development of an embedded carbon emissions indicator –producing a time series of input-output tables and embedded carbon dioxide emissions for the UK by using a MRIO data optimisation system [R]. Report to the UK Department for Environment, Food and Rural Affairs by Stockholm Environment Institute at the University of York and Centre for Integrated Sustainability Analysis at the University of Sydney, Defra, London, UK, 2007.
- [8] Wiedmann T, Minx J. A definition of carbon footprint[J]. SA Research & Consulting, 2007: 9.
- [9] Carbon Trust. Carbon Footprint Measurement Methodology [R]. version 1.1, 2007.
- [10] Kenny T, Gray N F. Comparative performance of six carbon footprint models for use in Ireland[J]. Environmental Impact Assessment Review, 2009, 29: 1-6.
- [11] Argonne. Development and Applications of GREET 2.7—the Transportation Vehicle-cycle Model[R]. 2006.
- [12] Marilyn A, Brown F S, Sarzynski A. The geography of metropolitan carbon footprints[J]. Policy and Society, 2009, 27: 285-304.
- [13] DEFRA. <http://campaigns.direct.gov.uk/actonco2/home.html>.
- [14] Giurco D, Petrie J G. Strategies for reducing the carbon footprint of copper: new technologies, more recycling or demand management[J]. Minerals Engineering, 2007, 20: 842-853.
- [15] 刘强,庄幸,姜克隽,等.中国出口贸易中的载能量及碳排放量分析[J].中国工业经济, 2008, 8: 46-55.
Liu Qiang, Zhuang Xing, Jiang Ke-juan, et al. Energy and carbon embodied in main exporting goods of China[J]. China Industrial Economics, 2008, 8: 46-55. (in Chinese)
- [16] Cole A. More treatment in surgeries and at home will help cut NHS carbon footprint[J]. British Medical Journal, 2009, 338.
- [17] POST. Carbon Footprint of Electricity Generation[R]. Parliamentary Office of Science and Technology, 2006; POST-note268.
- [18] 乔永锋.基于生命周期评价法(LCA)的传统民居的能耗分析与评价[D].西安:西安建筑科技大学硕士学位论文,2006.
Qiao Yong-feng. Studies on Energy Consumption of Traditional Dwelling Houses Based on Life Cycle Assessment [D]. Xi'an:Xi'an University of Architecture and Technology, 2006. (in Chinese)
- [19] Rees W E. Ecological footprints and appropriated carrying capacity: what urban economics leaves out[J]. Environment and Urbanization, 1992, 2: 121-130.
- [20] Wackernagel M, Rees W E. Our ecological footprint –reducing human impact on the earth[J]. Gabriola Island, B.C., Canada: New Society Publishers, 1996.

- [21] BP. What is a carbon footprint? British Petroleum. http://www.bp.com/liveassets/bp_internet/globalbp/, 2007.
- [22] Energetics. The reality of carbon neutrality[R]. 2007.
- [23] ETAP. The carbon trust helps. UK businesses reduce their environmental impact[R]. 2007.
- [24] Hammond G. Time to give due weight to the 'carbon footprint' issue[J]. *Nature*, 2007, 445(7125): 256.
- [25] GFN. Ecological Footprint Glossary [R]. Global Footprint Network, Oakland, CA, USA, 2007.
- [26] Grubb E. Meeting the carbon challenge: the role of commercial real estate owners, users & managers[R]. Chicago, 2007.
- [27] 邓南圣. 生命周期评价[M]. 北京: 化学工业出版社, 2003.
Deng N S. Life Cycle Assessment[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2003. (in Chinese)
- [28] Leontief W. The Structure of American Economy[M]. New York: IASP Publishing, 1941: 1919-1929.
- [29] Leontief W. Studies in the Structure of the American Economy[M]. London: Oxford University Press, 1953.
- [30] Matthews H S, Hendrickson C, Weber C. The importance of carbon footprint estimation boundaries[J]. *Environmental Science & Technology*, 2008, 42: 5839-5842.
- [31] <http://www.coolcalifornia.org/chinese/calculator.html>[EB/OL].
- [32] 山水自然保护中心. http://www.hinature.cn/Nature/what_we_care/001/carbon_tree/Main.shtml[EB/OL].
Shan Shui Conservation Center. http://www.hinature.cn/Nature/what_we_care/001/carbon_tree/Main.shtml[EB/OL]. (in Chinese)
- [33] Brentona P, Jones G E, Jensen M F. Carbon Labelling and Low Income Country Exports: an Issues Paper[R]. International Trade Department of The World Bank.
- [34] 中英标准信息平台. http://www.standardsgateway.org/China/News/carbonfoot_pas2050.xalter[EB/OL].
China-UK Standards Portal. http://www.standardsgateway.org/China/News/carbonfoot_pas2050.xalter[EB/OL]. (in Chinese)
- [35] Gamage G B, Boyle C, McLaren S J. Life cycle assessment of commercial furniture: a case study of Formway LIFE chair[J]. *Int J Life Cycle Assess*, 2008, 13: 401-411.
- [36] 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: 1-19.
- [37] Padgett J P, Steinemann A C, Clarke J H, et al. A comparison of carbon calculators[J]. *Environmental Impact Assessment Review*, 2008, 28: 106-115.
- [38] 中国经济新闻网. 2009.3.31. <http://www.jjxww.com/html/show.aspx?id=146646&cid=113>[EB/OL].
China Economic New Internet. 2009.3.31. <http://www.jjxww.com/html/show.aspx?id=146646&cid=113> [EB/OL]. (in Chinese)
- [39] SEI. UK schools carbon footprint scoping study for sustainable development commission by global action plan [R]. Stockholm Environment Institute, 2006.
- [40] Wang T, Watson T. Who owns China's carbon emissions [J]. Tyndall Briefing Note, 2007: 23.
- [41] 沈卫国, 蔡智, 刘志民, 等. 浅谈水泥混凝土工业二氧化碳排放技术[J]. *新世纪水泥导报*, 2008, 4: 1-6.
Shen W G, Cai Z, Liu Z M, et al. Low carbon dioxide emission technique for cement-concrete industry[J]. *Cement Guide for New Epoch*, 2008, 4: 1-6. (in Chinese)
- [42] Huang Y, Bird R, Bell M. A comparative study of the emissions by road maintenance works and the disrupted traffic using life cycle assessment and micro-simulation [J]. *Transportation Research Part D*, 2009, 14: 197-204.
- [43] Zhang L, Huang Z. Life cycle study of coal-based dimethyl ether as vehicle fuel for urban bus in China [J]. *Energy*, 2006, 32: 1896-1904.
- [44] 李骞, 张天柱. 北京市道路交通活动对环境的压力分析[J]. *生态经济*, 2004, 20: 35-41.
Li Q, Zhang T Z. The environmental pressure of road transportation in Beijing[J]. *Ecological Economy*, 2004, 20: 35-41. (in Chinese)
- [45] Lim S R, Park J M. Cooperative water network system to reduce carbon footprint[J]. *Environmental Science & Technology*, 2008, 42(16): 6230-6236.
- [46] Friedrich E, Pillay S, Buckley C A. Carbon footprint analysis for increasing water supply and sanitation in South Africa: a case study[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2009, 17: 1-12.
- [47] Gilliam A D, Davidson B, Guest J. The carbon footprint of laparoscopic surgery: should we offset[J]. *Surgical Endoscopy and Other Interventional Techniques*, 2008, 22(2): 573.
- [48] 再生的试验研究[J]. *汽车工程*, 2008, 30(8): 641.
Yao Guang-tao, Zi Xin-yun, Zhang Chun-run, et al. An experimental study on diesel particulate filter regeneration with fuel additive catalyst[J]. *Automotive Engineering*, 2008, 30(8): 641. (in Chinese)
- [21] Min Chen, J P Liu, Shouheng Sun. One-step synthesis of Fe Pt nanoparticles with tunable size[J]. *J Am Chem Soc*, 2004, 126: 8394.

(上接第 70 页)

- [18] Gilbert Blanchard, Lagny-Le-Sec, Jean-Yves Chane-Ching. Organic Colloidal Disperdion of Iron Particles, Method for Preparing Same and Use Thereof as Fuel Additive for Internal Combudtion Engines[P]. U.S., US2005/0039382, 2005-2-24.
- [19] James M Valentine. Cleaner Burning Diesel Fuel [P]. U.S., US20050160663, 2005-7-28.
- [20] 姚广涛, 资新运, 张春润, 等. 柴油机微粒捕集器燃油添加剂催化