碳足迹的概念和核算方法研究进展

计军平 马晓明

（北京大学 深圳研究生院 环境与能源学院 城市人居环境科学与技术重点实验室，广东 深圳 518055；
北京大学 环境科学与工程学院，北京 100871）

摘要：碳足迹提供了分析人类活动对气候变化影响的新视角。从概念和核算方法两个方面对有关碳足迹的研究进行了分析：（1）概念上，碳足迹目前无统一的定义。在分析度量单位、温室气体种类及系统边界的基础上，文章提出了碳足迹的建议定义。（2）方法上，碳足迹目前无统一的核算方法。投入产出分析、生命周期评价及混合生命周期评价是三种主要的核算方法。文章对这三种方法的原理、适用范围、优缺点及应用情况进行了分析。最后，从方法、应用和不确定性三个方面对碳足迹研究作了展望。

关键词：碳足迹；投出产出分析；生命周期评价；混合生命周期评价

文献引用：计军平，马晓明. 碳足迹的概念和核算方法研究进展[J]. 生态经济，2011（4）：76～80.

中图分类号：F224；F062.2　　**文献标识码：**A

Review of Carbon Footprint: Definitions and Accounting Methods

JI Junping, MA Xiaoming

(Key Laboratory for Urban Habitat Environmental Science and Technology, School of Environment and Energy, Shenzhen Graduate School, Peking University, Shenzhen Guangdong 518055, China;
College of Environmental Sciences and Engineering, Peking University, Beijing 100871, China)

Abstract: The concept of carbon footprint provides new perspective on impact of human activities on climate change. In this paper we investigate the definitions and accounting methods of carbon footprint by reviewing related studies. A widely accepted definition of carbon footprint does not exist. After analyzing units, scope of emissions and system boundaries about carbon footprint in existing literatures, we propose a definition. A widely accepted method for accounting carbon footprint does not exist either. Instead, three methods are frequently used to calculate carbon footprint separately, that is input-output analysis, life cycle assessment, and hybrid LCA. We analyze theories, scopes of application, advantages and disadvantages, and applications of these three methods. Finally, we suggest some research areas of carbon footprint, which are related to methods, applications and uncertainty.

Key words: carbon footprint; input-output analysis (IOA); life cycle assessment (LCA); hybrid LCA

以全球变暖为主要特征的气候变化是世界各国共同面临的严峻挑战，而人类活动是引起气候变化的重要原因[1]。目前，越来越多的组织机构和政府部门开始采用“碳足迹（carbon footprint）”来衡量产品、服务、组织、城市及国家的温室气体排放量，为减排方案的制订提供决策依据[2～4]。

尽管研究日益增多，但“碳足迹”一词仍然缺乏一致的定义和标准的核算方法。不同文献对碳足迹的度量单位、温室气体种类和系统边界的定义并不一致[5]，而核算方法则包括生命周期评价（LCA）、投入产出分析（IOA）、混合生命周期评价（hybrid LCA）等。随着研究的深入，明确碳足迹的定义、认识各种核算方法的优缺点和应用范围对于推动温室气体减排工作具有现实意义。

1 碳足迹的概念

碳足迹起源于生态足迹的概念，但现在已形成其特有的含义。里斯（Rees）和瓦克纳格尔（Wackernagel）采用生态足迹来描述人类生产消费活动造成的生态影响[6]，以生态生产性土地面积表示，而碳足迹关注的是某项活动或某个组织所排放的温室气体量，以质量或面积表示。

碳足迹概念的发展大致可分为两个阶段。第一个阶段，非政府组织、公司和政府部门提出了众多定义，多数主张碳足迹度量的是某一活动或产品直接排放的二氧化碳或温室气体量，以及与电力消耗相关的排放量[5, 7～8]。这些定义大部分来自灰色文献而非经过严格同行评议的学术论

基金项目：北京大学深圳研究生院院长基金资助项目（2009021）

作者简介：计军平（1983～ ），男，江苏苏州人，博士生，研究方向为环境规划与管理；马晓明（1962～ ），男，黑龙江齐齐哈尔人，博士，教授，博士生导师，主要研究方向为环境管理以及环境信息与环境数学模型。

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net
淘宝店/VX公众号：碳中和研究库

表1 现有文献对“碳足迹”的定义

文献	对“碳足迹”的定义	单位	核算方法
德拉克曼（Druckman）等[17]	由某一活动直接及间接引起的CO_2排放总量，或是某一产品在整个生命周期内累积的CO_2排放总量	CO_2质量	投入产出
赫特威希（Hertwich）等[10]	用于最终消费的商品、服务在生产及消费过程中排放的CO_2、CH_4、N_2O及氟化物等温室气体的量	CO_2质量当量	投入产出
马修斯（Matthews）等[14]	商品或服务在生产、运输、使用、处置的整个生命周期内排放的温室气体总量	CO_2质量当量	投入产出
巴斯敏（Barthelmie）等[22]	产品或活动在整个生命周期中产生的CO_2总量	CO_2质量	生命周期
斯特鲁特（Strutt）等[23]	某项活动在整个生命周期或特定时段内排放到环境中（或从环境中去除）的CO_2、CH_4、N_2O及氟化物等气体的量	CO_2质量当量	生命周期
琼斯•爱德华兹（Edwards-Jones）等[24]	在商品的生产、加工、销售及使用过程中排放的温室气体总量	CO_2质量当量	生命周期
辛登（Sinden）[25]	产品在生命周期内产生的温室气体的影响	CO_2质量当量	生命周期
拉尔森（Larsen）等[13]	某一地理边界内消费的商品和服务在生产、消费整个生命周期中排放的温室气体量，而不管这些气体是产生在地理边界内或边界外	CO_2质量当量	混合法

文。第二个阶段，近两年学术界开始出现碳足迹概念的讨论，认为碳足迹度量的是某一活动或产品在生命周期内排放的温室气体量，但对于概念中涉及的温室气体种类及系统边界仍存在争议[5, 9~14]。

2010年7月9日在科学引文索引（Web of Science）上对“碳足迹”（carbon footprint）一词进行了检索，检索范围为1986年至今美国科技信息所数据库（Science Citation Index Expanded）收录的文献。共有155篇论文在标题、摘要或关键词中出现了“碳足迹”，2007年14篇，2008年37篇，2009年61篇，2010年43篇（截至2010年7月9日）。尽管近几年出现了大量论文，但大部分文章关注的是如何测量和减少特定过程、产品的温室气体排放量，对碳足迹的概念问题并没有充分地论述。明确对碳足迹作出定义的文献见表1。

1.1 度量单位

目前碳足迹拥有面积和质量两种度量单位。科提兹（Kitzes）等[15~16]将碳足迹作为生态足迹的一部分，称为“化石能源足迹”或“二氧化碳用地”，以全球性公顷（gha）为单位。魏德曼（Wiedmann）等[5, 10, 13, 17~18]采用二氧化碳的质量来表示碳足迹。

采用面积或质量单位均存在不足。将温室气体的排放量转换成土地面积需要基于一系列的假设，这会增加碳足迹核算的误差和不确定性[19]。另一方面，用温室气体的质量来表示碳足迹在表述上并不准确，因为足迹是个空间概念，以质量为单位容易引起误解[20]。

不过，由于国际上的温室气体减排协议及研究报告均以温室气体的质量来衡量排放量[1, 21]，因此为了同已有的研究和实践相协调，大部分文献采用二氧化碳的质量（或当量质量）作为碳足迹的单位[5, 20]。

1.2 温室气体种类

现有文献对于碳足迹应当包含哪些温室气体存在不同的观点。一部分学者认为[5, 17, 22, 26~27]碳足迹仅需计算二氧化碳的排放量，而另一部分学者认为[10, 13~14, 18, 23~25, 28]其他温室气体也应包括在内，但具体包含哪些气体尚存争议。

为回答上述问题，需考虑政府间气候变化专门委员会（IPCC）建立的温室气体排放核算机制。度量不同温室气体的全球变暖潜能值（GWP）是IPCC核算机制的核心。GWP反映了给定质量的温室气体对全球变暖的贡献大小，并指定二氧化碳的值为1[29]，每种气体可根据各自的GWP转化成二氧化碳当量。根据京都议定书，六类主要的温室气体具有引起气候变化的潜能，即二氧化碳（CO_2）、氧化亚氮（N_2O）、甲烷（CH_4）、氢氟碳化物（HFCs）、全氟化碳（PFCs）以及六氟化硫（SF_6）。以二氧化碳当量计算，二氧化碳的排放量占人为温室气体排放总量的78.7%[29]。虽然其他温室气体的排放量比重不大，但它们具有很高的变暖潜能值，从21至23 900[29]不等，在特定情况下其影响不可忽略。

因此，碳足迹作为一个综合性指标不仅应包括二氧化碳，还应包括其他温室气体。另外，为有效配合京都议定书及其后继议定书的减排实践，应当将协议中规定的各类温室气体纳入碳足迹的核算范围。

1.3 系统边界

界定碳足迹的系统边界涉及两个问题：（1）是否需要包括隐含在生产链上游相关过程中的间接排放；（2）如果需要，那么边界应当划在哪里。现有文献中存在以下两种的观点：

一类观点是只有与产品或活动直接相关的排放量才应该被包括在内[8, 26, 30]，因为包含间接排放可能引起重复计算[31~32]且难以确定排放责任[33]。不过，马修斯（Matthews）等[14]核算了美国491个经济部门产品和服务的温室气体排放量，发现总体上直接排放仅占温室气体总排放量的26%，大部分是间接排放，拉尔森（Larsen）等[13]也得出了类似的结论。可见，仅考虑直接排放会低估

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net
淘宝店/VX公众号：碳中和研究库

与产品或活动相关的温室气体排放量，这种低估不利于减排政策的制订和实践。

另一类观点是碳足迹应当包括产品或活动在生命周期内直接和间接排放的温室气体量[5, 34~37]。为便于描述“直接”和“间接”排放源，同时也为避免重复计算，不同学者及研究机构提出了多种碳足迹清单[11, 13~14, 22, 38]。这些清单可归纳为范围逐渐增大的“层”：第一层包含产品或活动引起的直接排放，第二层包括因电力消费所引起的间接排放，第三层包括其他所有间接排放。分层的优点是便于研究者识别碳足迹的主要来源，从而制定经济有效的减排对策。

因此，从实践角度出发碳足迹应当包含产品或活动整个生命周期内直接及间接排放的温室气体量，同时为便于分析应建立分层的碳足迹清单。

1.4 对碳足迹的建议定义

基于以上分析，本文对碳足迹提出以下建议定义：碳足迹是对某一产品或活动在生命周期内直接及间接引起的温室气体排放量的度量，以二氧化碳质量当量为单位。温室气体包括京都议定书及其后继议定书中列明的各类温室气体。

2 碳足迹的核算方法

为反映产品或活动在生命周期内的碳足迹，现有文献主要采用了三种不同但相关的核算方法：投入产出分析，生命周期评价，以及混合生命周期评价。

2.1 投入产出分析

投入产出分析法最早由美国经济学家华西里•列昂惕夫（Wassily Leontief）于1936年提出[39]。该法主要通过编制投入产出表及建立相应的数学模型，反映经济系统各个部门（产业间）的关系。

结合各部门的温室气体排放数据后，投入产出分析法可用于计算各部门为终端用户生产产品或提供服务而在整个生产链上引起的温室气体排放量，计算公式见式（1）[40~41]：

$$B = b \cdot (I - A)^{-1} \cdot Y \qquad (1)$$

其中：B为各部门为满足最终需求Y而引起的温室气体排放量，包括直接排放和间接排放；b为直接排放系数矩阵，其元素代表某部门每单位货币产出直接排放的温室气体量；I为单位矩阵；A为直接消耗系数矩阵；Y为最终需求向量。

投入产出分析法是自上而下计算碳足迹的一种方法，以整个经济系统为边界，具有综合性和鲁棒性，且核算碳足迹所需的人力、物力资源较少[5]，适用于宏观系统的分析。目前，已有学者利用投入产出分析法对中国[28]、美国[14, 42]、英国[17]、澳大利亚[43]以及全球[10]的碳足迹进行了核算。

不过，由于投入产出分析法仅使用部门平均排放强度数据，因此不适合用于分析微观系统。另外，该方法难以准确反映进口产品或资本商品的温室气体排放量[44~45]。

2.2 生命周期评价

生命周期评价指分析一项产品在生产、使用、废弃及回收再利用等各阶段造成的环境影响，包括能源使用、资源消耗、污染物排放等[46]。该方法包含四个部分，分别是目标和范围定义、清单分析、影响评价和结果解释[46]。

采用生命周期评价法核算碳足迹时需要考虑方法和数据两方面的不确定性。首先应选择合适的核算方法，包括建模方法的选择，资本商品的处理以及土地利用变化的处理等，它们会对最终结果产生显著影响。其次，应确保数据质量达到ISO14044[46]及PAS2050[35]的标准，包括准确性、代表性、一致性、可再现性、数据源以及信息不确定性等。

生命周期评价是自下而上计算碳足迹的一种方法，分析结果具有针对性，适合于微观系统的碳足迹核算[34]。已有学者利用该方法对卫生设备[47]、铲车[12]、制水[23]、小型社区[22]、小型经济体[48]及生物能源[49]等进行了核算。同时，为规范和促进碳足迹核算在企业中的应用，国际标准化组织、英国标准协会和世界资源研究所已制定或正在制定组织和产品碳足迹核算的标准[11, 35, 50]。

不过，生命周期评价法存在边界问题，即只有直接的和少数间接的影响被考虑在内，结果存在截断误差[51]。另外，为获取详细的清单数据，投入的人力、物力资源较大[52]。

2.3 混合生命周期评价

为了结合投入产出分析法及生命周期评价法的优点，有学者提出并发展了混合生命周期评价法（hybrid LCA）[53~56]。该方法将投入产出分析和生命周期评价整合在同一分析框架内，是近年来的研究热点[57]。

混合法的计算公式见式（2）[54]：

$$B' = \begin{bmatrix} \tilde{b} & 0 \\ 0 & b \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{A} & M \\ L & I - A \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} k \\ 0 \end{bmatrix} \qquad (2)$$

其中：B'为分析对象的温室气体排放量；$\tilde{b}$为微观系统的直接排放系数矩阵；$\tilde{A}$为技术矩阵，表示分析对象在生命周期各阶段的投入与产出；L表示宏观经济系统向分析对象所在的微观系统的投入，与投入产出表中的特定部门相关联；M表示分析对象所在的微观系统向宏观经济系统的投入；k为外部需求向量。b、I及A的含义同式（1）。

由于分析对象在生命周期各阶段的投入产出均可通过

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net
淘宝店/VX公众号：碳中和研究库

技术矩阵$\hat{A}$加以表示，因此微观系统的特定过程与宏观经济部门之间的联系可以在一个统一的框架下加以描述。这种方法即保留了生命周期评价法具有针对性的特点，又避免了截断误差，同时也能有效利用已有的投入产出表，减少了碳足迹核算过程中的人力、物力投入，适用于宏观和中微观各类系统的分析。

因混合法在实践中对研究人员的理论要求较高[57]，所以目前运用混合法核算碳足迹的研究不多，现有文献中仅有挪威的研究人员利用该法对挪威特隆赫姆市（Trondheim）的碳足迹进行了核算[13]。不过随着方法的不断推广和完善，未来利用混合法核算碳足迹的研究会逐渐增多[5, 57~58]。

3 结论与展望

近年来，“碳足迹”一词在政府部门、企业组织和科研机构的研究报告中被广泛使用。不过，不同的机构和学者并未给出一致的定义。本文从度量单位、气体种类及系统边界等方面分析了现有文献对“碳足迹”定义的差异，在此基础上给出了建议定义。

投入产出分析法以整个经济系统为边界，核算时所需的人力、物力资源较少，适合于宏观系统的碳足迹核算。生命周期评价法分析结果具有针对性，适用于微观系统，不过该方法存在边界问题，同时所需的人力、物力资源较大。混合生命周期评价法整合了前两种方法的优点，是当前碳足迹核算研究的热点。

目前，碳足迹核算在方法和实践上仍存在一些问题，今后可就以下内容做进一步研究：

（1）方法方面，建立统一的碳足迹核算方法框架体系，提高不同方法计算结果之间的可比性。另外，现有方法在处理资本商品和土地利用变化的碳足迹时仍存在争议，未来可就上述内容进行相关研究。

（2）应用方面，加强混合生命周期评价法在产品、企业、城市及国家等各层次的应用。另外，目前的应用研究多围绕核算碳足迹的量展开，未来可进一步就碳足迹的时空分布趋势及驱动力等问题展开研究。

（3）不确定性方面，由于方法和数据源方面的原因，目前很少有研究对核算结果进行不确定性分析。未来可就估算和降低碳足迹核算结果的不确定性进行研究。

参考文献：

[1]IPCC. Climate change 2007: Synthesis report [A]//Contribution of Working Groups i, ii and iii to the fourth assessment report of the intergovernmental panel on climate change [M]. Geneva: IPCC, 2007.

[2]Lash J, Wellington F. Competitive advantage on a warming planet [J]. Harvard Business Review, 2007, 85(3): 94-102.

[3]叶祖达. 城市规划：从“碳足迹”开始[J]. 建设科技，2009（15）：46～48.

[4]Minx J C, Wiedmann T, Wood R, et al. Input–output analysis and carbon footprinting: an overview of applications [J]. Economic Systems Research, 2009, 21(3): 187-216.

[5]Wiedmann T, Minx J. A definition of "carbon footprint" [M]. Ecological Economics Research Trends, Pertsova C C, New York: Nova Science Publishers, 2008.

[6]Wackernagel M, Rees W E. Our ecological footprint: Reducing human impact on the Earth [M]. Gabriola Island: New Society Publishers, 1996.

[7]POST. Carbon footprint of electricity generation [R]. London: Parliamentary Office of Science and Technology, 2006.

[8]Carbon Trust. Carbon footprint measurement methodology (version 1.3) [R]. London: The Carbon Trust, 2007.

[9]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.

[10]Hertwich E G, Peters G P. Carbon footprint of nations: a global, trade-linked analysis [J]. Environmental Science & Technology, 2009, 43(6): 6414-6420.

[11]WRI. The greenhouse gas protocol: a corporate accounting and reporting standard (Revised Edition) [M]. Geneva, Switzerland: World Business Council for Sustainable Development and World Resource Institute, 2004.

[12]Johnson E. Disagreement over carbon footprints: a comparison of electric and lpg forklifts [J]. Energy Policy, 2008, 36(4): 1569-1573.

[13]Larsen H N, Hertwich E G. The case for consumption-based accounting of greenhouse gas emissions to promote local climate action [J]. Environmental Science & Policy, 2009, 12(7): 791-798.

[14]Matthews H S, Hendrickson C T, Weber C L. The importance of carbon footprint estimation boundaries [J]. Environmental Science & Technology, 2008, 42(16): 5839-5842.

[15]Kitzes J, Galli A, Bagliani M, et al. A research agenda for improving national ecological footprint accounts [J]. Ecological Economics, 2009, 68(7): 1991-2007.

[16]Kitzes J, Peller A, Goldfinger S, et al. Current methods for calculating national ecological footprint accounts[J]. Science for Environment and Sustainable Society, 2007, 4(1): 1-9.

[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]Lynas M. Carbon counter: Calculate your carbon footprint [M]. Glasgow: HarperCollins Publishers, 2007.

[19]Lenzen M. Uncertainty in impact and externality assessments: Implications for decision-making [J]. The International Journal of Life Cycle Assessment, 2006, 11(3): 189-199.

[20]Hammond G. Time to give due weight to the 'carbon footprint' issue [J]. Nature, 2007, 445(7 125): 256.

[21]Stern N H. The economics of climate change: the stern review [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2007.

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net
淘宝店/VX公众号：碳中和研究库

[22]Barthelmie R J, Morris S D, Schechter P. Carbon neutral biggar: Calculating the community carbon footprint and renewable energy options for footprint reduction [J]. Sustainability Science, 2008, 3(2): 267-282.

[23]Strutt J, Wilson S, Shorney-Darby H, et al. Assessing the carbon footprint of water production [J]. Journal of the American Water Works Association, 2008, 100(6): 80.

[24]Edwards-Jones G, Plassmann K, York E H, et al. Vulnerability of exporting nations to the development of a carbon label in the United Kingdom [J]. Environmental Science & Policy, 2009(12): 479-490.

[25]Sinden G. The contribution of pas 2050 to the evolution of international greenhouse gas emission standards [J]. International Journal of Life Cycle Assessment, 2009, 14(3): 195-203.

[26]Kenny T, Gray N F. Comparative performance of six carbon footprint models for use in Ireland [J]. Environmental Impact Assessment Review, 2009, 29(1): 1-6.

[27]樊杰，李平星，梁育填. 个人终端消费导向的碳足迹研究框架——支撑我国环境外交的碳排放研究新思路[J]. 地球科学进展，2010，25（2）：61～68.

[28]孙建卫，陈志刚，赵荣钦，等. 基于投入产出分析的中国碳排放足迹研究[J]. 中国人口•资源与环境，2010，20（5）：28～34.

[29]IPCC. Climate change 2007: the physical science basis [A]// Contribution of working group i to the fourth assessment report of the intergovernmental panel on climate change [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2007.

[30]Padgett J P, Steinemann A C, Clarke J H, et al. A comparison of carbon calculators [J]. Environmental Impact Assessment Review, 2008, 28(2-3): 106-115.

[31]Lenzen M. Double-counting in life cycle calculations [J]. Journal of Industrial Ecology, 2008, 12(4): 583-599.

[32]Hammerschlag R, Barbour W. Life-cycle assessment and indirect emission reductions: Issues associated with ownership and trading [R]. Seattle: Institute for Lifecycle Environmental Assessment, 2003.

[33]Lenzen M, Murray J, Sack F, et al. Shared producer and consumer responsibility: Theory and practice [J]. Ecological Economics, 2007, 61(1): 27-42.

[34]Schmidt H. Carbon footprinting, labelling and life cycle assessment [J]. The International Journal of Life Cycle Assessment, 2009, 14(1): 6-9.

[35]BSI. Specification for the assessment of the life cycle greenhouse gas emissions of goods and services (PAS 2050) [R]. London: British Standards Institution, 2008.

[36]Matthews H S, Weber C, Hendrickson C T. Estimating carbon footprints with input-output models [R]. Pittsburgh: Department of Civil & Environmental Engineering, Carnegie Mellon University, 2008.

[37]Chambers J Q, Fisher J I, Zeng H C, et al. Hurricane Katrina's carbon footprint on U. S. gulf coast forests [J]. Science, 2007, 318(5853): 1107.

[38]CCAR. California climate action registry general reporting protocol [R]. Los Angeles: California Climate Action Registry, 2007.

[39]Leontief W. Input-output economics [M]. New York: Oxford University Press, 1986.

[40]Leontief W. Environmental repercussions and the economic structure: an input-output approach [J]. The Review of Economics and Statistics, 1970, 52(3): 262-271.

[41]Miller R E, Blair P D. Input-output analysis: foundations and extentions [M]. Englewood Cliffs, New Jersey: Prentice Hall, 1984.

[42]Weber C L, Matthews H S. Quantifying the global and distributional aspects of american household carbon footprint [J]. Ecological Economics, 2008, 66(2/3): 379-391.

[43]Wood R, Dey C J. Australia's carbon footprint [J]. Economic Systems Research, 2009, 21(3): 243-266.

[44]Peters G P, Hertwich E G. The importance of imports for household environmental impacts [J]. Journal of Industrial Ecology, 2006, 10(3): 89-109.

[45]Peters G P, Hertwich E G. Pollution embodied in trade: the Norwegian case [J]. Global Environmental Change, 2006, 16(4): 379-387.

[46]ISO. Environmental management - life cycle assessment: principles and framework (iso 14 040) [R]. Geneva: International Organization for Standardization, 2006.

[47]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): 1-12.

[48]Schulz N B. Delving into the carbon footprints of singapore-comparing direct and indirect greenhouse gas emissions of a small and open economic system [J]. Energy Policy, 2010, 38(9): 4848-4855.

[49]Guinée J B, Heijungs R, van der Voet E. A greenhouse gas indicator for bioenergy: some theoretical issues with practical implications [J]. International Journal of Life Cycle Assessment, 2009, 14(4): 328-339.

[50]ISO. Carbon footprint of products (ISO/Cd 14067-1, Under Development) [R]. Geneva: International Organization for Standardization, 2010.

[51]Lenzen M. Errors in conventional and input-output-based life-cycle inventories [J]. Journal of Industrial Ecology, 2001, 4(4): 127-148.

[52]Curran M A. Environmental life-cycle assessment [M]. New York: McGraw-Hill, 1996.

[53]Heijungs R, Suh S. The coumputational structure of life cycle assessment [M]. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 2002.

[54]Suh S, Huppes G. Methods for life cycle inventory of a product [J]. Journal of Cleaner Production. 2005, 13(7): 687-697.

[55]Bullard C W, Penner P S, Pilati D A. Net Energy analysis: Handbook for combining process and input-output analysis [J]. Resources and Energy, 1978, 1(3): 267-313.

[56]Lenzen M, Crawford R. The path exchange method for hybrid LCA [J]. Environmental Science & Technology, 2009, 43(21): 8251-8256.

[57]Suh S, Nakamura S. Five years in the area of input-output and hybrid LCA [J]. The International Journal of Life Cycle Assessment, 2007, 12(6): 351-352.

[58]Wiedmann T. Editorial: carbon footprint and input–output analysis – an introduction [J]. Economic Systems Research, 2009, 21(3): 175-186.

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

淘宝店/VX公众号：碳中和研究库