

综合生命周期分析在可持续消费研究中的应用

刘晶茹¹, Glen P. Peters², 王如松¹, 杨建新¹

(1. 城市与区域生态国家重点实验室, 中国科学院生态环境研究中心 北京 100085;

2. Norwegian University of Science and Technology, NO-7491 Trondheim, Norway)

摘要:1992 年联合国提出可持续消费的概念, 经过 10 几年的发展, 生命周期分析已经成为可持续消费的主要研究方法。由于传统生命周期分析方法需要大量基础数据支持, 因此目前综合生命周期分析方法被广泛应用于可持续消费研究中。以 1997 年中国投入产出表为基础, 建立了包括 CO₂ 排放量的投入产出表延长表。并对居民终端消费产生的 CO₂ 排放总量及其与产业部门的关系进行了分析。结果表明, 1997 年城市居民终端消费人均 CO₂ 排放量为 1576.62kg, 是农村居民 CO₂ 排放量的 24.96 倍, 城市居民每个单位货币消费量所产生的 CO₂ 的排放量也远远高于农村居民, 电力生产部门对居民消费环境影响的贡献率最大。对该方法中存在的一些问题进行了讨论, 这些问题主要产生在价值量与物理量转换过程及分配过程中。

关键词:可持续消费; 综合生命周期分析; 投入产出分析; 居民消费

文章编号: 1000-0933(2007)12-5331-06 中图分类号: Q143 文献标识码: A

Hybrid life-cycle analysis and its applications in sustainable consumption researches

LIU Jing-Ru¹, Glen P. Peters², WANG Ru-Song¹, YANG Jian-Xin¹

1 State Key Laboratory of Urban and Regional Ecology, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, 18 Shuangqing Road, Haidian District, Beijing 100085, China

2 Norwegian University of Science and Technology, NO-7491 Trondheim, Norway

Acta Ecologica Sinica, 2007, 27(12): 5331 ~ 5336.

Abstract: In 1992, the United Nations brought forward the concept of sustainable consumption and called for life cycle thinking as an important approach in promoting sustainable consumption. After more than 10 years development, life cycle analysis (LCA) has been accepted as the main method in sustainable consumption research. To overcome the limitation of traditional LCA, hybrid LCA, which is a method that combine economic input-output analysis and traditional LCA is now widely used in sustainable consumption research. In this paper, we use an example to explain the method of hybrid LCA and its usages in sustainable consumption research. We first established an extended Chinese input-output table with CO₂ emission. Then we analyzed the CO₂ emissions of final consumption and their interaction with industrial sectors. Our calculations showed that in 1997, per capita CO₂ emission from urban households were 1576.62kg, 24.96 times higher than rural households. The electricity production and supply sector is the main CO₂ emission contributor to final consumption. Uncertainties in using hybrid LCA were reviewed.

Key Words: sustainable consumption; hybrid life-cycle assessment; input-output analysis; household consumption

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(70433001); 国家重点基础研究发展规划资助项目(2005CB724206).

收稿日期: 2006-10-10; 修订日期: 2007-09-17

作者简介: 刘晶茹(1973~), 女, 黑龙江人, 博士, 主要从事城市及产业生态学研究. E-mail: liujingru@rcees.ac.cn

Foundation item: The project was financially supported by National Natural Science Foundation of China (No. 70433001) and the National Basic Research Program of China (No. 2005CB724206)

Received date: 2006-10-10; **Accepted date:** 2007-09-17

Biography: LIU Jing-Ru, Ph. D., mainly engaged in urban and industrial ecology. E-mail: liujingru@rcees.ac.cn

20 世纪 90 年代联合国首次提出了可持续消费的概念,同时也提出了从生命周期角度研究可持续消费的必要性。2002 年约翰内斯堡世界可持续发展峰会对可持续消费的十年发展进行了总结,再一次强调了生命周期思想在可持续消费研究中的重要性,并发布了《可持续生产与消费十年框架》(Ten-year framework on Sustainable Consumption and Production)的报告^[1],指定由联合国环境署牵头,积极推进以生命周期分析方法为主的基础研究和政策实施。在这种背景下,生命周期分析方法逐渐成为研究消费问题的主要手段。为推进生命周期分析方法在可持续消费研究中的应用,联合国环境署组织了一系列学术研讨会。2002 年在奥地利国际系统分析研究所(IIASA)举办了“可持续消费的生命周期研究方法学术研讨会”^[2],2003 年在日本举办了“可持续消费第一届国际研讨会”^[3],2004 年在英国举办了“可持续消费研究的机遇与挑战研讨会”^[4]。同时,联合国环境署从 2003 年起,每年召开一次“生命周期分析专家研讨会”,这些会议主要围绕着生命周期分析方法及其在可持续消费研究中的应用这个主题。2004 年欧盟资助了由挪威科技大学主持的“生命周期分析方法在可持续消费研究中的可行性和应用范围”项目,积极推进生命周期分析方法在欧盟国家中的应用。

1 综合生命周期分析方法及其在产业生态学中的应用

投入产出分析是由美国经济学家列昂杰夫在 20 世纪 60 年代提出来的,该方法通过描述产业部门间及产业系统与终端消费系统之间的货币流,来反映经济系统内各部门的相互关系及经济结构。从 20 世纪 70 年代初开始,西方经济学家将投入产出分析应用到环境领域,建立了一系列包含环境内容的延长型投入产出模型^[5]。1989 年 Robert Frosch 等提出了产业生态学的概念,因为产业生态学所研究的对象也是产业系统及其与消费之间的物质能量代谢过程及结构,因此 Duchin 等认为,投入产出分析方法同样适用于产业生态学。并从 90 年代起开始探讨投入产出分析方法在产业生态学中的应用,提出了综合生命周期分析方法(hybrid LCA)^[6,7],该方法也可以称为经济投入-产出生命周期分析模型(EIO-LCA)。目前综合生命周期分析方法在产业生态学研究领域的应用主要涉及废弃物管理,物质流分析,能量分析及可持续消费研究等^[8,9]。

消费行为离不开产品,用生命周期分析方法去研究消费所涉及到的所有产品需要大量的数据支持,但是现阶段生命周期分析的数据库不完善,因此目前应用综合生命周期分析方法的研究案例较多。本文采用综合生命周期分析的方法,以 1997 年投入产出数据为基础,对综合生命周期分析方法在中国可持续消费研究中的应用进行了案例研究。

2 包括 CO₂排放的投入产出延长表

以 1997 年中国投入产出表为基础,本文构建了包括以 CO₂排放为环境影响参数的投入产出延长表,利用列昂杰夫逆矩阵,计算了 1997 年各产业部门 CO₂的排放强度。根据终端居民消费在各部门的支出费用及各部门的 CO₂排放强度,计算了居民终端消费的 CO₂排放总量。利用层次分析方法,分别分析了城市居民及农村居民消费所产生的 CO₂排放的主要来源。各产业部门的 CO₂排放量是根据中国能源统计年鉴中各部门当年消费的各种能源的实物量推算而来,各种主要能源的 CO₂排放系数来自于 IPCC。

2.1 能量消费量的计算

利用能源统计表中各部门消费的燃料的实物量及其热值、能源的非燃料使用量的热值及转换系数,可以计算出当年各产业部门的能量消费量。各种燃料的热值来源于能源统计年鉴^[10]。计算过程中,需要考虑能源损失量及非能源燃料使用量。能源损失总量在统计年鉴中有总数,本文假设能源损失量与能源使用量相关,并根据各部门使用的能源占有所有部门总能源消费总量的比例,将能源损失总量在各部门之间进行分配。本文假设当年所有的非能源燃料使用量都用于 5 个化工部门,并根据 5 个化工部门的总产出量(价值量),将非能源燃料使用量在这 5 个部门中进行分配。炼油,炼焦等一次能源加工部门的能源消费量没有被计算到总能源消费量中,以免重复计算。

由于能源统计年鉴中只有 44 个部门的能源消费量,而投入产出表中包含了 124 个部门,因此需要将 44 个部门的能源消费量分配到 124 个部门中。本文所采用的是目前比较通用的分配方法,即根据部门的对应关系及投入产出表中各部门的最终产出价值量进行分配。例如在能源统计表中的交通部门对应于投入产出表

中的交通,存储,邮政和通讯业等 4 个部门,本文根据四个部门的产出价值量占 4 个部门总产出量之和的比例,将交通部门的能源消费在 4 个部门中进行分配。

2.2 CO₂排放量的计算

CO₂排放数据主要由不同燃料种类、平均发热值和碳的氧化率决定。各行业部门的氧化率数据来自中国气候变化国别研究组^[11],中国各行业部门的氧化率在 80%~95% 之间,低于 IPCC 的缺省值 98%。本文假设作为非能源使用及作为原料使用的能源的排放系数相同。

工艺过程的排放系数主要来自 IPCC 手册^[12],本文所考虑的主要工业过程包括:原材料化学(氨,碱的生产),非金属生产(水泥生产),钢铁材料的冶炼加工和非金属冶炼加工(焦炭作为还原剂)。

3 居民终端消费产生的 CO₂排放总量及来源分析

居民终端消费过程产生的 CO₂排放量主要来自两个过程,一是居民家庭使用能源所产生的直接排放,二是为居民家庭生活提供消费品的产业部门在生产过程所产生的排放,即间接排放。利用投入产出延长表,本文对 1997 年居民终端消费所产生的 CO₂排放总量及其与生产部门之间的联系进行了分析。

3.1 居民终端消费所产生的 CO₂排放总量

在投入产出表中,总产出等于中间使用与最终使用之和,用公式表达为:

$$x = Ax + y; x = (I - A)^{-1}y \quad (1)$$

式中, x 是经济的总产出; y 是终端消费量; A 是直接消耗系数矩阵。

在公式(1)中增加 CO₂排放强度因子 F ,则可以推导出计算居民终端消费 CO₂排放量的公式为:

$$f = Fx = F(I - A)^{-1}y \quad (2)$$

式中, F 是投入产出表中 124 个部门的 CO₂排放强度,单位为 kg/万元, y 为居民终端消费量,包括城市居民消费和农村居民消费,单位为万元。 F 为居民消费的 CO₂排放量,单位为 kg。

计算得到:1997 年城市居民终端消费所产生的 CO₂排放总量为 6.22×10^8 kg,人均排放量为 1576.62 kg。同年农村居民终端消费 CO₂排放总量为 5.32×10^8 kg,人均排放量为 63.15 kg。可见,1997 年城市人均 CO₂排放量是农村居民的 24.96 倍,而当年城市居民的人均消费额是农村居民人均消费额的 1.65 倍,这说明城市人均消费所产生的环境影响要远远高于农村居民。可以预见,随着城市化进程的加快及农村居民生活方式的城市化,居民人均产生的环境影响将呈增加的趋势。

3.2 居民终端消费所产生的 CO₂排放的产业部门排放源分析

路径分析(path analysis)方法可以用于探讨变量之间的影响关系,借助路径图,可以清楚表征变量之间的因果关系及影响途径。结构路径分析可以用公式(3)来表示:

$$f = F(I - A)^{-1}y = Fy + F^2y + F^3y + \dots \quad (3)$$

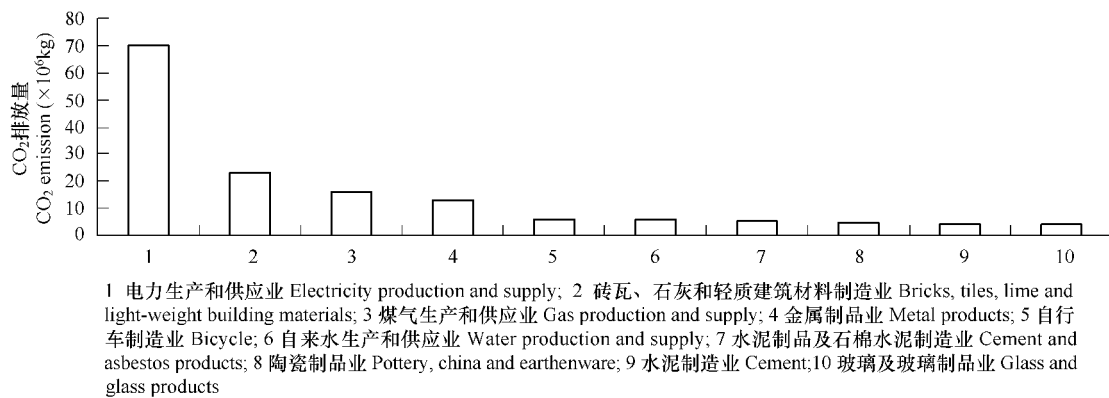
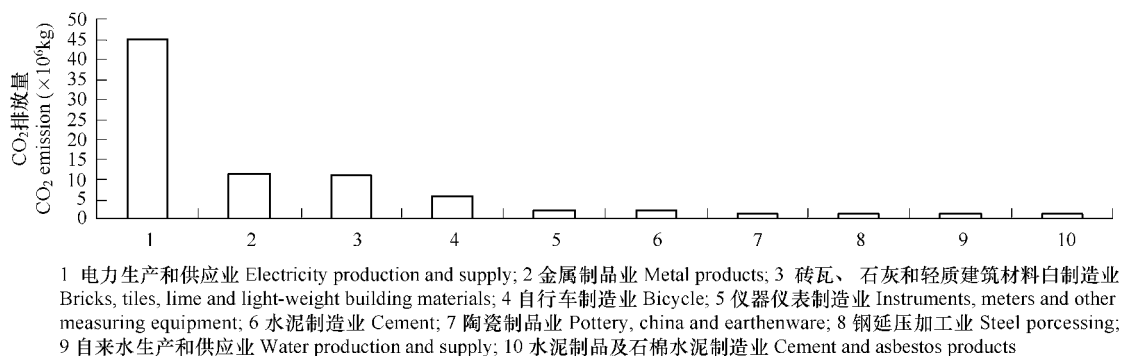
式中, Fy 表示为生产 y 而产生的环境影响, F^2y 表示为生产 Fy 而产生的影响, F^3y 表示为生产 F^2y 而产生的影响,以此类推,可以计算出为生产 y 产品所产生的所有直接及间接影响。这种路径分析方法应用到产业生态学中,实际上是反映了产业供应链的关系^[13~15]。在此处则可以分析不同产业部门对居民消费环境影响的贡献率。

应用路径分析方法,本文对 1997 年城市及农村居民终端消费所产生的 CO₂排放的产业部门的排放源进行了分析。结果如图 1 和图 2 所示,可以看出,农村居民和城市居民终端消费所产生的 CO₂排放的部门来源基本相同,电力生产和供应是主要的贡献者,该部门产生的 CO₂排放量远远高于其他部门。

CO₂排放强度最大的 10 个部门如表 1 所列,包括蒸汽热水生产和供应业、电力生产和供应业等。本文进一步计算了这十个 CO₂排放强度最大的部门对农村及城市居民消费的贡献率,结果如表 1 所示,10 个 CO₂排放强度最大的部门对城市居民终端消费排放量的贡献率为 16.09%,而对农村居民消费 CO₂排放量的贡献率为 9.2%。这说明对于每消费一个货币而言,城市家庭消费的排放强度要高于农村家庭。

4 结论及讨论

本文应用综合生命周期分析方法,利用 1997 年中国投入产出表,结合案例对该方法在可持续消费研究中

图1 城市居民家庭消费 CO₂ 的排放量Fig. 1 Main sources of urban households CO₂ emission图2 农村居民家庭消费行为 CO₂ 排放的主要来源Fig. 2 Main sources of rural households CO₂ emission

的应用进行了探讨。以 CO₂ 为例,利用综合生命周期分析方法,对城市和农村居民终端消费的环境影响进行了计较分析。结果表明,城市居民的人均环境影响要远远高于农村居民。中国正在经历快速的城市化过程,目前城市化平均水平 41.8%,预计 2010 年后,将以每年至少一个百分点的递增速度上升,到 2020 年将达到 60% 左右^[16]。中国是一个资源相对短缺的国家,同时面临着严重的生态环境问题,随着城市化速度的进一步加快,居民消费将给生态环境带来更大的压力。因此,我国需要尽快开展可持续消费方面基础研究,广泛开展教育选出,并制订相关的政策措施,减缓由于城市化进程及生活方式的城市化所带来的环境压力。

除了本文所涉及到的两个方面外,在可持续消费研究中,还可以应用该方法建立不同消费产品类型环境影响的数据库^[17],分析消费品国际贸易的环境影响等^[18]。所涉及到的环境影响类型除了温室气态外,目前的研究还包括水资源^[19]和土地资源^[20,21]等。

该方法本身还存在着一些问题。首先,投入产出表是价值型的,而环境影响是实物型的,如何将价值型转换为实物型,是目前该方法面临的最大问题。目前的研究多使用混合单位的投入产出表,混合单位与传统投入产出表的一个明显区别在于,它不能实现行与列的平衡。其次,该方法涉及到分配的问题,例如本文涉及到如何将能源统计资料中 44 个部门的数据分配到投入产出表的 124 个部门中。本文是根据各部门的总产出价值进行分配的,进行这种分配的其前提条件是这些部门所使用的能源价格相同,这与实际情况有出入。再者,使用中国的投入产出表计算居民消费问题,实际上是忽视了消费品中的进口问题,而假设中国进口的产品与国内生产技术相同。实际上,中国生产技术的能源消耗强度大,这样的假设高估了进口产品的能源强度,而进口占中国最终消费的 16%。

表 1 CO₂ 排放强度最大的十个部门及其对居民终端消费 CO₂ 排放量的贡献率Table 1 Top-ten CO₂ emission intensive sectors and their contribution rates to final consumption

部门 Sectors	城市居民消费 Urban households		农村居民消费 Rural households	
	CO ₂ 排放量 CO ₂ emission(× 10 ⁶ kg)	部门贡献率 Contribution rate	CO ₂ 排放量 CO ₂ emission(× 10 ⁶ kg)	部门贡献率(%) Contribution rate
蒸汽热水生产和供应业 Steam and hot water production and supply	3.56	0.57%	0.00	0.00
电力生产和供应业 Electricity production and supply	69.86	11.23%	44.66	8.40
煤气生产和供应业 Gas production and supply	16.01	2.57%	0.00	0.00
钢延压加工业 Steel processing	1.11	0.18%	1.21	0.23
铁合金冶炼业 Alloy iron smelting	0.00	0.00%	0.00	0.00
炼钢业 Steel-smelting	0.00	0.00%	0.00	0.00
采盐业 Salt mining	0.00	0.00%	0.00	0.00
炼铁业 Iron-smelting	0.00	0.00%	0.00	0.00
水泥制品及石棉水泥制造业 Cement and asbestos products	5.24	0.84%	1.00	0.19
水泥制造业 Cement	4.32	0.69%	2.00	0.38
10 个部门的 CO ₂ 排放量 Total CO ₂ emission of top-ten sectors	100.09		48.88	
居民消费的 CO ₂ 排放总量 Total emissions of consumption	621.96		531.56	
10 个部门占总排放量的比例 Percentage of top-ten sectors emissions to total emissions		16.09%		9.20

尽管综合生命周期分析方法还存在着很多问题,但是该方法对于研究宏观消费问题,尤其是涉及到区域间与消费相关的“隐含”的环境污染问题研究非常有益。

References:

- [1] United Nations. Plan of implementation. Johannesburg, 2002.
- [2] Hertwich E G. Life-cycle approaches to sustainable consumption workshop proceedings. International Institute for Applied Systems Analysis, 2002.
- [3] Inaba A. Overview of the sustainable consumption project. The First International Workshop on Sustainable Consumption Report. Tokyo, 2003.
- [4] Huback K, Inaba A, Sigrid S. International workshop on driving forces of/and barriers to sustainable consumption. University of Leeds, 2004.
- [5] Miller R, Blai P D. Input-output analysis: Foundations and extensions. Englewood Cliffs, NJ, Prentice-Hall, 1985.
- [6] Duchin F. The conversion of biological materials and wastes to useful products. Structural Change and Economic Dynamics, 1990, 1: 243 — 261.
- [7] Duchin F. Industrial input output analysis: implications for industrial ecology. Proceedings of the National Academy of Sciences, 1992, 89: 851 — 855.
- [8] Suh S, Kagawa S. Industrial ecology and input-output economics: an introduction. Economic Systems Research, 2005, 17(4): 349 — 364.
- [9] Hertwich E G. Lifecycle approaches to sustainable consumption: A critical review. Environmental Science and Technology, 2005, 39 (13): 4673 — 4684.
- [10] Department of Industrial and Transportation Statistic, State Statistic Bureau. China energy statistical yearbook. Beijing: China Statistical Publishing House, 1998.
- [11] CCCS. China Climate Change Country Study. Beijing: Tsinghua University Press, 2000.
- [12] IPCC. Revised 1996 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories: Reference Manual (Volume 3). Intergovernmental Panel on Climate Change, 1996.
- [13] Duchin F, Steenge A E. Mathematical models in input-output economics. Rensselaer working papers in economics. Department of Economics, Rensselaer Polytechnic Institute, 2007.

- [14] MacKellar F L, Lutz W, Prinz C, Goujon A. Population, households, and CO₂ emissions. *Population and Development Review*. 1995; 21 (4), 849 — 865.
- [15] Dietzenbacher E, Los B. Structural decomposition techniques: Sense and sensitivity. *Economic Systems Research*, 1998;10, 307 — 323.
- [16] Lian Y M. Report of Chinese urban life quality. Beijing: China Modern Economic Publishing House, 2006
- [17] Chris T H, Lester B L, Matthews H S. Environmental life cycle assessment of goods and services : an input-output approach. Washington, D C : Resources for the Future, 2006.
- [18] Peters P G, Hertwich E G. The importance of imports for household environmental impacts. *Journal of Industrial Ecology*, 2006, 10(3) : 89 — 109
- [19] Guan D B, Hubacek K. Assessment of regional trade and virtual water flows in China. *Ecological Economics*, 2007, 61 (1) : 159 — 170.
- [20] Hubacek K, Giljum S. Applying physical input output analysis to estimate land appropriation (ecological footprints) of international trade activities. *Ecologica Economics*, 2003, 44(1) : 137 — 151.
- [21] Lai L, Huang X J, Liu W L, Zhao D H. Adjustment for regional ecological footprint based on input-output technique: a case study of Jiangsu Province in 2002. *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26(4) : 1285 — 1292.

参考文献:

- [10] 国家统计局工业交通统计司. 中国能源统计年鉴. 北京: 中国统计出版社, 1998.
- [11] 中国气候变化国别研究组编. 中国气候变化国别研究. 北京: 清华大学出版社; 2000.
- [16] 连玉明. 中国城市生活质量报告. 北京: 中国时代经济出版社, 2006.
- [21] 赖力, 黄贤金, 刘伟良, 赵登辉. 基于投入产出技术的区域生态足迹调整分析——以 2002 年江苏省经济为例. *生态学报*, 2006, 26(4) : 1285 ~ 1292.