

# Embodiment Analysis of Urban Energy System

—A case of Beijing

Lixiao Zhang<sup>†</sup>, Yueyi Feng, Qihong Hu

State Key Laboratory of Water Environment Simulation, School of Environment, Beijing Normal University, Beijing 100875, China

<sup>†</sup>Email: zhanglixiao@bnu.edu.cn

## Abstract

In contrast to measuring the end energy consumption, the embodied energy analysis could provide systematic accounting of regional energy system with regard to direct and indirect terms. Presented in this paper is an embodiment analysis of urban energy system of Beijing during the period of 1987-2007 using input-output technique. Results show the energy consumption in Beijing increased rapidly during 1987-2007: direct energy consumption increased from 20.03 to 52.80 Mtce while the embodied energy consumption increased from 38.86 to 206.20 Mtce; Meanwhile, the energy intensity presents a declined trend but the decrease of energy intensity slows down especially during the last five years; The proportion of direct energy decreased from 51.55% to 25.60% while that of the indirect energy grow from 48.45% to 74.4% among embodied energy of Beijing; The primary sectors of energy consumption are transforming from the traditional heavy industry to modern manufacture, construction and the tertiary sector with relatively low direct energy consumption but higher indirect consumption; The evident contrast between direct and indirect energy consumption demonstrated the fact that the traditional energy analysis focusing on terminal energy consumption could lose effectiveness on urban scale and new approach needs the combination of end technical energy saving with source reduction of product consumption.

**Keywords:** Urban Energy System; Input-output Model; Embodied Energy; Energy Saving and Emission Reduction

## 城市能源系统的体现能过程解析<sup>\*</sup>

——以北京市为例

张力小, 冯悦怡, 胡秋红

北京师范大学 环境学院水环境模拟国家重点实验室, 北京 100875

**摘要:** 与末端能源消费计量不同, 体现能分析能够系统核算区域系统中的直接和间接能耗。本研究以北京市为例, 运用投入产出分析方法对 1987-2007 年城市经济过程中的体现能耗 (包括直接能耗和间接能耗) 进行系统核算。结果表明: 1987-2007 年间, 北京市能源消费呈现快速增长趋势, 直接能耗从 2003.13 增至 5279.81 万 tce, 体现能耗从 3885.87 增至 20620.48 万 tce, 能耗强度呈现下降趋势, 但下降的速度逐渐减缓; 北京市能耗体现结构发生重大变化, 直接能耗所占比重越来越小, 间接能耗所起作用越来越明显, 而且主要的能耗部门逐渐转向具有低直接能耗、高间接能耗特征的产业部门, 如建筑业、服务业和电子通信设备制造业等; 产业部门直接与间接能耗的结构性差异, 说明传统的基于末端能源消费的管理策略在城市尺度上可能会失效, 需要转变能源管理理念, 采用末端技术节能与源头消费控制相结合、多产业部门协同调控是未来城市节能减排工作的新思路。

**关键词:** 城市能源系统; 投入产出模型; 体现能; 节能减排

## 引言

能源是国家重要的战略物资, 能源系统的高效管理是世界各国实现社会经济可持续发展的重要前提。现

<sup>\*</sup>基金资助: 受科技支撑项目支持资助 (编号: 216029)。

有的研究多是对生产活动中的直接能耗或者终端能耗进行计量<sup>[1-8]</sup>，忽略了贸易或区域间产品或服务交换所引发的间接能耗，无法系统、真实地反映经济系统能源消费情况。例如，某城市经济系统较少生产工业产品，消费的产品多是外部输入，其直接能耗量相对较小，然而其经济活动所引发的间接能源消耗却非常大，因此仅仅依靠直接能耗进行决策可能会提供一些错误的信息。另外，能源消费的影响多是通过农业、工业、建筑业等中间生产部门实现的，无法体现产品选择性消费行为所带来的环境影响，即无法反映消费者在选择能耗密度高的产品或能耗密度低产品时所带来的能耗差异，削弱了人在驱动能源消费中的主观能动性作用<sup>[9]</sup>。因此，有学者开始寻求从产品入手对能源消费进行系统核算，即通过产品的体现能（包括直接和间接能耗）的核算来统计产品消费所引发的环境影响。

体现能（embodied energy）又称为内含能或隐含能，指某产品或服务生产过程中直接或间接投入的能量总量<sup>[10]</sup>。核算方法一般来说有两种，一是过程分析方法，即生命周期评价；另外一种投入产出分析方法。面对复杂的经济系统，运用生命周期评价方法对各种产品或服务的体现能进行核算往往数据要求较高，过程繁杂，工作量较大，而投入产出分析方法可以基于投入产出表，运用数学模型方便快捷的实现多个部门产品体现能耗的核算，被广泛应用于核算产品服务中体现的直接、间接的能源、水、温室气体等各种生态要素<sup>[11-29]</sup>。

城市是一个特定的区域经济系统，其聚集了中国 40%的人口和 75%的经济活动，能耗占全国 84%左右<sup>[1-2]</sup>，而且随着城市化进程的进一步加快，其主导性作用将日益加强。目前城市能耗的大量增加可能是短期经济扩张的结果，也可能是城市经济结构、消费结构长期变动的必然，因为过去的二十多年是我国城市化进程的关键时期。北京作为国家首都、特大型城市是全国经济活动中心，能源消费仅次于上海，随着社会经济的迅猛发展，能源问题已经成为北京市可持续发展的瓶颈，在城市能源研究方面具有一定的典型性。因此，本研究拟以北京市为例，运用投入产出分析方法，对其 1987-2007 年城市经济过程中的体现能耗（包括直接和间接）进行系统性核算，观察其动态演变规律及趋势，剖析其背后深层次原因，以期为北京市乃至全国节能减排等政策的长期规划与制定提供定量化的依据。

## 1 研究方法

### 1.1 能源投入产出模型

投入产出分析是 19 世纪 30 年代由美国经济学家 Wassily W Leontief 提出的，该方法主要是通过编制投入产出表，并利用线性代数等数学方法建立相应的数学模型，来反映经济系统内各部门之间的相互关系及经济结构。其最初仅仅用于经济分析，自 19 世纪 70 年代开始拓展到能源环境领域<sup>[30-31]</sup>，经过三十多年的发展，已被广泛应用于分析国民经济、区域经济、部门生产以及国际贸易等活动所产生的能源环境效应，相关案例国家主要包括中国、澳大利亚、西班牙、英国、韩国、日本等<sup>[11-25]</sup>，城市尺度上也有学者进行了初步探索，如 Ji 运用投入产出分析方法对北京市 2002 年经济活动中体现的水、能源、能值等生态要素进行了系统核算<sup>[26]</sup>，Liang et al.运用投入产出分析方法对苏州关键能耗部门进行辨识，并进行了二氧化碳排放预测<sup>[27]</sup>，以及泰国学者 Phdungsilp 对北京、上海、曼谷、东京四个城市的能耗需求进行核算并进行了比较<sup>[28]</sup>。

投入产出模型是以现有的投入产出表为数据基础的。当今世界上有两种国民经济核算体系同时并存，即“国民帐户体系”（简称 SNA）和“物质平衡体系”（简称 MPS），基于不同国民经济账户体系，投入产出表可以分为价值型和实物性，价值型投入产出表是基于国民账户核算体系（SNA），以货币为编制单位；而实物性投入产出表是基于物质平衡体系（MPS），以实物为单位编制投入产出表。中国从建国初期的 1952 年到 1984 年采用的是 MPS；1985 到 1992 年是 MPS 和 SNA 两种核算体系共存阶段；从 1993 年至今，中国取消了 MPS，建立与联合国新 SNA 接轨的中国国民经济核算体系<sup>[20]</sup>。而投入产出表，中国应用较晚，针对实物型投入产出表，中国曾内部编制过 1973 年和 1981 年两张，由国家统计局正式公布的仅有 1992 年的实物型投入产出表一张；针对价值型投入产出表，自 1987 年即开始制度化，每 5a（逢 2、逢 7 年份）调查和编制一次全国投入产出基本表，基本表编制年份以后 3a（逢 5、逢 0 年份）编制延长表，现已编

制完成 1987 年、1992 年、1997 年、2002 年和 2007 年五张投入产出基本表以及 1990 年、1995 年、2000 年和 2005 年四张投入产出延长表，各地区投入产出编制方法与国家同步。

理论上讲，实物型投入产出表最能反映各个部门之间的实物量之间的流动，不受任何价格的影响，但由于其对数据要求高，能源投入产出表的编制困难，目前应用尚少。价值型投入产出模型和混合型投入产出模型，尽管各有缺点，目前应用较为广泛<sup>[15,18-19]</sup>。限于数据可得性，本研究拟应用价值型投入产出模型进行研究。

本研究涉及到的一些基本模型假设<sup>[15]</sup>：（1）同一部门所有产品的能源强度相同；（2）存储产品的能源强度与本年相同；（3）外地调入产品的能源强度与本地相同；（4）同一部门产品价格相同。基本的投入产出模型为：

$$AX + Y = X \tag{1}$$

$$X = (I - A)^{-1}Y \tag{2}$$

其中， $A$  为  $(n \times n)$  的直接消耗系数矩阵，元素  $a_{ij} = x_{ij} / X_j$ ，表示为  $j$  部门单位总产出直接消耗  $i$  部门的产品； $X = (X_1, X_2 \cdots X_n)^T$  为总产出，列向量； $I$  为  $(n \times n)$  的单位矩阵； $AX$  为中间使用产品，列向量； $Y = (Y_1, Y_2 \cdots Y_n)^T$  为终端需求，列向量； $(I - A)^{-1}$  为 Leontief 逆矩阵。

根据式（1），同理则有<sup>[15]</sup>

$$E^d + \varepsilon A \hat{X} = \varepsilon \hat{X} \tag{3}$$

其中： $E^d = (E_1^d, E_2^d, \cdots E_n^d)$ ，为各个部门的直接能耗量，行向量； $\varepsilon = (\varepsilon_1, \varepsilon_2, \cdots \varepsilon_n)$  为各部门体现能耗强度，行向量； $\hat{X}$  为总产出列向量的对角矩阵， $\varepsilon A \hat{X}$  为中间使用产品的体现能耗，即间接能耗。

经推导可得，

$$\varepsilon = E^d \hat{X}^{-1} (I - A)^{-1} = \varepsilon^d (I - A)^{-1} \tag{4}$$

式中， $\varepsilon^d = E^d \hat{X}^{-1} = (\varepsilon_1^d, \varepsilon_2^d \cdots \varepsilon_n^d)$ ，是直接能耗强度，行向量。

城市总需求体现能耗可表达为：

$$E = \varepsilon Y \tag{5}$$

## 1.2 数据收集与整理

本研究收集了北京市 1987、1992、1997、2002、2007 年共 5 张投入产出基本流量表和 1990、1995、2000 和 2005 年 4 张投入产出延长表。由于部门分类方法及统计价格不同，如 1987、1990、1992 和 1995 年共四张投入产出表为 33 部门，1997 和 2000 年为 40 部门，2005 和 2007 年为 42 部门，本研究首先参照国民经济行业分类（GB/T4754-2002）将各年投入产出表统一合并汇总为 30 部门（见表 1），然后通过 GDP 指数编制可比价投入产出表。本研究中的能源消费数据主要来自于《北京统计年鉴》，其中不包括生物质能源、太阳能等可再生能源类别。

表 1 整合后的产业部门分类情况

| 序号 | 部门名称      | 序号 | 部门名称           |
|----|-----------|----|----------------|
| 1  | 农业        | 16 | 金属制品业          |
| 2  | 煤炭采选业     | 17 | 机械工业           |
| 3  | 石油和天然气开采业 | 18 | 交通运输设备制造业      |
| 4  | 金属矿采选业    | 19 | 电器机械及器材制造业     |
| 5  | 其他非金属采选业  | 20 | 电子及通信设备制造业     |
| 6  | 食品制造业     | 21 | 仪器仪表及其他计量器具制造业 |
| 7  | 纺织业       | 22 | 其他工业           |

| 序号 | 部门名称           | 序号 | 部门名称        |
|----|----------------|----|-------------|
| 8  | 缝纫机及皮革制品业      | 23 | 建筑业         |
| 9  | 木材加工及家具制造业     | 24 | 交通运输、邮电及仓储业 |
| 10 | 造纸及文教用品制造业     | 25 | 商业          |
| 11 | 电力及蒸汽、热水生产供应业  | 26 | 饮食住宿业       |
| 12 | 石油加工、炼焦及煤气煤制品业 | 27 | 公用事业及居民服务业  |
| 13 | 化学工业           | 28 | 文教卫生科研事业    |
| 14 | 建材及其他非金属矿物制品业  | 29 | 金融保险业       |
| 15 | 金属冶炼及压延加工业     | 30 | 行政机关        |

## 2 结果分析

### 2.1 北京市 1987-2007 年直接能耗动态变化

如图 1 所示, 1987-2007 年间, 北京市直接能耗一直处于较为快速的增长态势, 从 1987 年的 2003.13 万吨标准煤增至 2007 年的 5279.81 万吨标准煤, 共增长了 1.64 倍, 年均增长率为 4.97%, 而同时期受经济总量快速增长的影响 (见图 2), 单位产出所消耗的能源却呈直线下降态势, 从 2.66 吨标准煤/万元降至 0.70 吨标准煤/万元, 下降幅度达 73.86%, 平均下降速度为 6.49%; 从下降趋势来看, 主要分为三个大的阶段, 1987-1992 “十一五” 期间, 北京市虽然实施了一系列如首钢搬迁等节能减排措施, 但直接能耗并未出现明显下降, 说明传统的工程节能措施所带来的潜力正逐渐减小, 甚至是消耗殆尽。

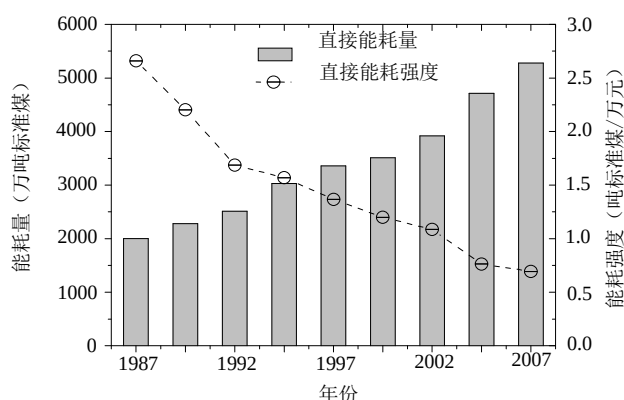


图 1 北京市 1987-2007 年直接能耗量和能耗强度变化

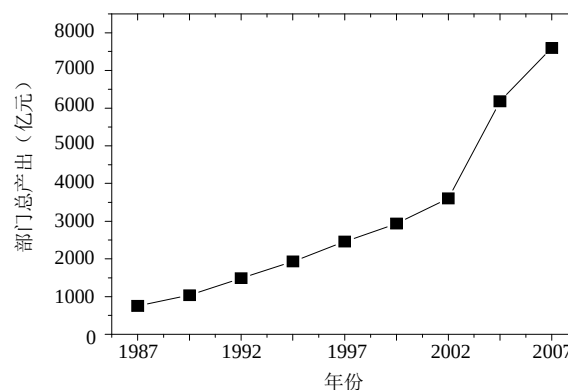


图 2 北京市 1987-2007 年部门总产出情况

### 2.2 北京市 1987-2007 年体现能耗动态变化

如图 3 所示, 北京市体现能耗也从 1987 年的 3885.87 万吨增至 2007 年的 20620.48 万吨标准煤, 共增长了 4.31 倍, 平均年增长率达 8.70%, 远远高于直接能耗增幅。从增长速度上来看, 1987-1997 年增速相对缓慢, 自 1997 年开始, 出现波动式快速增长的趋势。其原因可能是消费结构升级的结果, 80 年代末 90 年代初, 人们对低体现能耗的温饱型产品的消费较多, 如纺织品和初级加工粮食等; 随着经济的发展和人们生活水平的提高, 具有高体现能耗值的享用型产品消费的比例越来越大, 使城市总体体现能耗水平不断增加, 也就是间接能耗水平不断增加。

从能耗强度来看, 1987-2007 年间, 与直接能耗强度相比, 体现能耗强度下降幅度有所减小, 从 1987 年的 5.16 标准煤/万元下降至 2007 年的 2.71 吨标准煤/万元, 下降幅度为 47.37%, 且体现能耗强度也远远高

于直接能耗强度；从趋势上来看，在 1997 年之前呈平稳下降趋势，之后开始波动式发展。这表明虽然从直接能耗指标中反映出北京市能源利用效率有较大提高，但从体现能耗强度指标来看，北京市能耗利用效率提高幅度却没那么明显，尤其是在 1997 年之后，甚至出现能耗强度回升的态势。

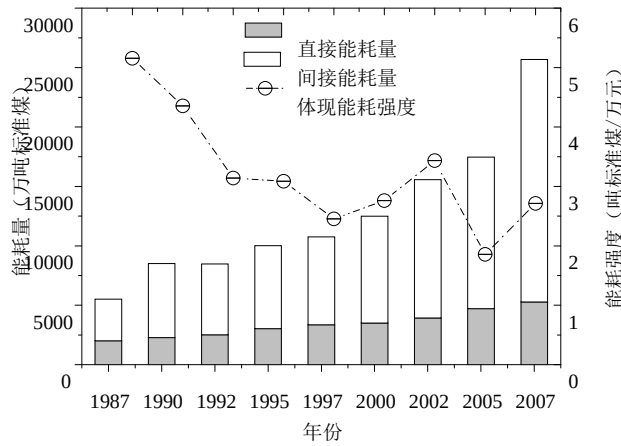


图 3 北京市 1987-2007 年体现能耗量和体现能耗强度变化

### 2.3 北京市系统能耗的结构性变化

由上所述，北京市的直接能耗和体现能耗分析结果不尽相同，而且存在较大差异。具体来说，在体现能耗中直接能耗所占比重正逐渐降低（如图 4 所示），在 2007 年仅占 25.60%，反而间接能耗在体现能耗中所起作用越来越明显，其所占比重已从 1987 年的 48.45% 增至 2007 年 74.40%，而且仍呈快速上涨的态势。进一步观察北京市间接能耗可知（见图 5），1987-2007 年间，北京市间接能耗呈现快速增长趋势，20 年间数量上共增长了 7.15 倍，达 15340.67 万吨标准煤，是直接能耗的 2.91 倍，而间接能耗强度下降幅度也相对较小，仅降低了 19.20%。

直接能耗是特定时空边界范围内城市能耗的反映，一般是以一年为时间边界，城市地域作为空间边界；而体现能耗则是跨越特定地域边界，以产品生命周期作为界限对产品消费所引发的能源影响进行系统性评价，因此间接能耗是反映城市对地域范围外的能源依赖性的一个重要指标，一个城市与其他区域的产品交换程度将对其产生重要影响，其比例的提高，表明随着北京市区域内外之间的产品交换活动不断活跃，城市系统结构逐渐由产品生产型转向产品消费、服务型转变，对外部能源的依赖性逐渐增强，同时也说明间接能耗已经日渐成为能耗分析不可忽视的重要组成部分，而且随着市场分工的深化和区域间产品交换的频繁，其作用将进一步增强，以传统能耗核算方法仅仅关注直接能耗可能会忽略很多重要的决策信息，转换视角，以产品为纽带的系统核算将成为高效的能源管理的关键。

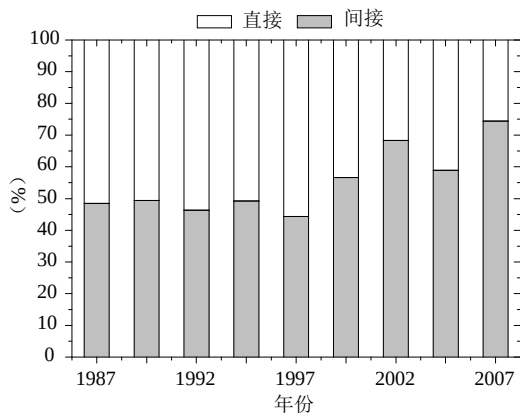


图 4 北京市 1987-2007 年能耗系统的结构性变化

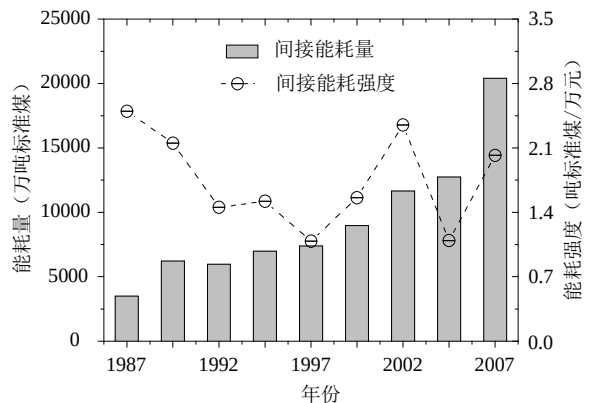
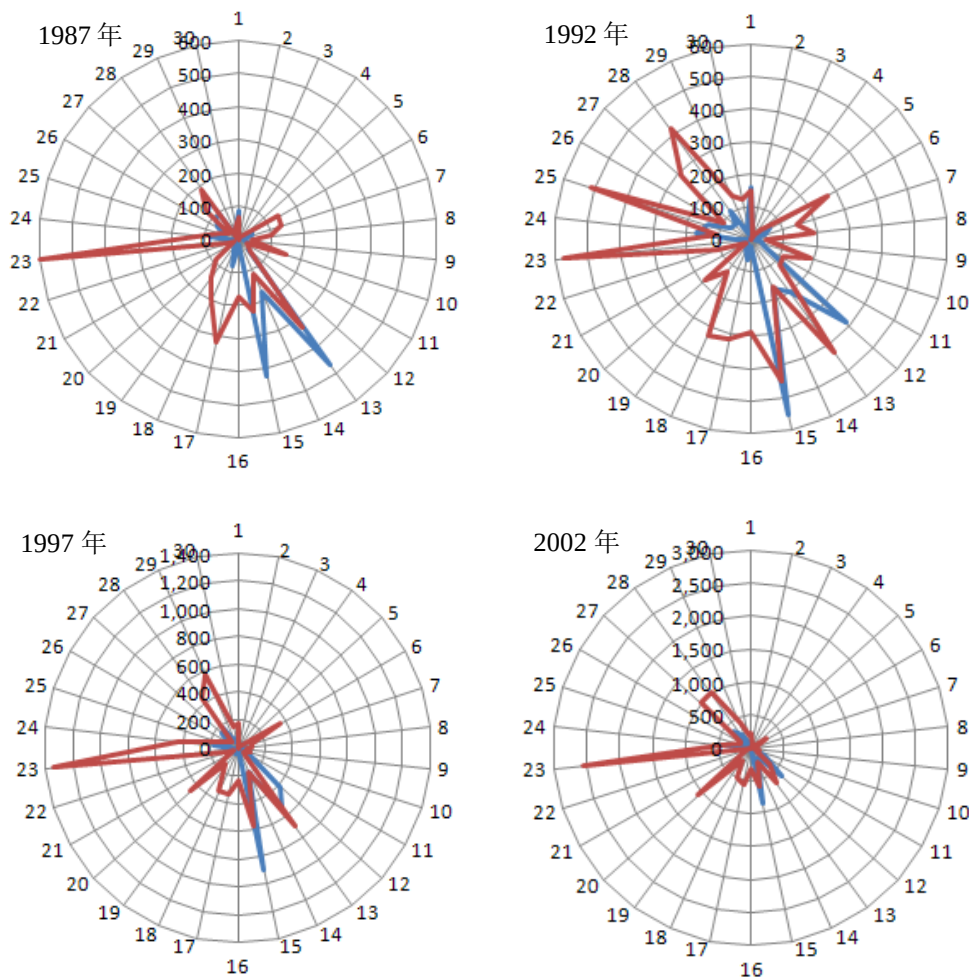


图 5 北京市 1987-2007 间接能耗量和能耗强度变化

## 2.4 北京市 1987-2007 年部门体现能耗动态变化

仅仅从终端直接能耗来看（见图 6），1987 年北京市直接能耗最大的两个部门是化学工业（13）和金属冶炼及压延加工业（15）；随着北京市经济发展模式的转型，这两个产业分别自 1997 年和 2000 年开始呈现下降态势，而在此过程中，石油加工炼焦及煤气煤制品业（12）与交通运输邮政及仓储业（24）部门的能耗呈现快速增长，到 2007 已经跃居为北京市最大的两大终端能源消费部门，反映出交通运输业在城市化过程中的重要指示性地位。北京市主要的能耗部门虽然发生了根本性变化，但是大部分仍然属于重要的中间产品部门，这些部门的终端能源消费的往往不但受到本部门产品终端需求的影响，同样受到下游产业部门需求的影响，而间接能耗则是对产业关联机制所导致的间接影响的反映。

就间接能耗来说，研究期内建筑业一直是间接能耗最高的部门，说明建筑业对城市体现能耗水平的决定性作用，虽然其直接能耗一直处于较低水平。除此之外，从图 6 不难发现，现代服务业（如 27 公用事业及居民服务业和 28 文教卫生科研事业）与高附加值产业（如 20 电子及通信设备制造业）已经成为 2007 年北京市的主要间接能耗部门。而在 1987 年，化学工业（13）和机械工业（17）是除建筑业之外的重要间接能耗部门。间接能耗产业部门的变换，也很大程度上反映了北京市在城市化过程中产业结构优化升级的过程。虽然这些部门的直接能耗较低，但对这些部门产品消费的消减，可通过消费的传导效用降低其他产业部门的能源消耗。随着北京市城市化进程加快和产业结构的升级，以高附加值为特点的现代产业往往具有低直接能耗、高间接能耗的特点，仅仅从终端能源消费进行分析，往往为我们的认识带来以一些误区，因此基于产品的部门体现能耗系统核算即反映源头部门产品生产通过产业关联机制对整个经济系统的能源消费影响来认识城市能源消费是能源管理的重要切入点。



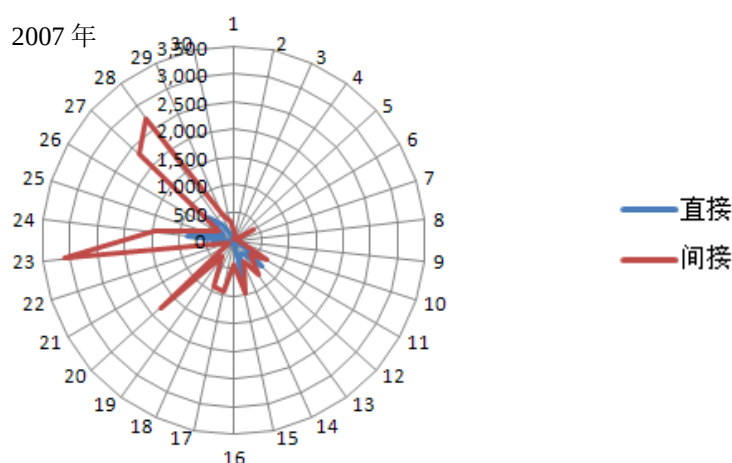


图6 北京市 1987-2007 年部门体现能耗

### 3 结论与讨论

(1) 1987-2007 年间，不管从直接能耗指标还是从体现能耗指标来看，北京市能源消费均呈现快速增长态势：直接能耗从 2003.13 增至 5279.81 万吨标准煤，体现能耗从 3885.87 增至 20620.48 万吨标准煤。从能耗强度来看，万元 GDP 能耗下降态势明显，直接能耗强度从 2.66 吨标准煤/万元降至 0.695 吨标准煤/万元，体现能耗强度从 5.16 下降至 2.71 吨标准煤/万元，表明在过去的 20 年中，北京市整体能耗效率存在一定程度的提高。但是，值得注意的是，从动态趋势上来看，能耗强度下降的速度正逐渐减缓，特别是“十一五”期间，北京市虽然实施了一系列节能减排措施，但能耗强度并未出现明显下降，说明传统的城市节能措施所带来的潜力空间正逐渐减小。

(2) 1987-2007 年间，北京市体现能耗结构呈现较大变化，直接能耗所占比重正逐渐降低，间接能耗在体现能耗中所起作用越来越明显，其所占比重已从 1987 年的 48.45% 增至 2007 年 74.40%，表明北京市对外部能源的依赖性日益增强，间接能耗也已经日渐成为能耗分析不可忽视的重要组成部分。而且，随着城市化进程的进一步加快，北京市主要的能耗部门逐渐转向具有低直接能耗、高间接能耗特征的产业部门，如建筑业、服务业、电子通信设备制造业等。因此，传统的基于终端能源消费的管理策略在城市尺度上可能会失效，因此，需要转换视角，开展基于体现能分析的产业部门的系统核算。

(3) 从能源管理的角度来讲，任何产业部门的能源消费都是服务于产品生产的，受到消费需求的控制。而随着人们生活质量的提高，消费结构的升级，这种产品选择性消费行为所带来的能耗差异将会越来越大。因此，需要转变传统的能源管理观念，采用末端技术节能与源头消费控制相结合、多产业部门协同调控对未来节能减排工作是至关重要的。

(4) 投入产出分析方法以现有的投入产出表为基础，通过部门能耗关系可以实现体现能耗的系统核算，是分析经济活动的能源环境效应的一个重要工具，但限于数据可得性及方法本身的一些缺点，本研究可能会存在以下几方面的不确定性：其一，该方法模型是静态模型，以某时间点的数据信息代替全年信息，与现实不符；其二，在本研究过程对模型进行了一定的模型假设，如同一部门所有产品的能源强度相同、存储产品的能源强度与本年相同等，这些该假设可能与现实存在一定出入；其三，可能存在重复计算问题等，针对这些问题未来仍有待进一步研究。

### REFERENCES

- [1] S. Dhakal. "Urban Energy Use and Carbon Emissions from Cities in China and Policy Implications." *Energy Policy*. **37**(2009): 4208-4219
- [2] L.X. Zhang, Z.F. Yang, J. Liang, et al. "Spatial Variation and Distribution of Urban Energy Consumptions from Cities in China."

Energies. **4**(2011): 26-38

- [3] L.X. Zhang, J. Liang. "Effect of the Regional Resource Endowment on Resource Utilization Efficiency." *Journal of Natural Resources*. **25**(2010): 1237-1247(in Chinese)
- [4] J. Liang, L.X. Zhang. "The Measure and Analysis on the Spatial Inequality of Urban Energy Consumption in China Based on Theil Index." *China Population, Resources and Environment*. **20**(2010): 85-88(in Chinese)
- [5] M. Xia, C.Y. Peng. "Analysis of Changes in Industry Association behind the Energy Shortage." *Social Science Journal*. **3**(2004): 52-56(in Chinese)
- [6] D. Shi, J.L. Zhang. "The Impacts of Industrial Structure Fluctuation on Energy Consumption." *Economic Theory and Business Management*. **8**(2003): 31-32(in Chinese)
- [7] X. Zhang, S.W. Niu, Y.X. Ding, et al. "Empirical Analysis of the Relationship between Energy Resource and Economic Growth in Provinces of China Based on 'Resource Curse' Hypothesis." *Journal of Natural Resources*. **25**(2010): 2040-2051(in Chinese)
- [8] L.T. Liu, L. Shen. "Spatio-temporal Evolution Pattern and Influential Factor of Regional Total Factor Energy Efficiency in China." *Journal of Natural Resources*. **25**(2010): 2142-2153(in Chinese)
- [9] D. Fridley. "Embodied Energy: An Alternative Approach to Understanding Urban Energy Use." Accessed March 28, 2012. <http://www.theoil.com/node/6482>
- [10] H.T. Odum. "Self-organization, Transformity, and Information." *Science*. **242**(1988): 1132-1139
- [11] M. Lenzen. "Primary Energy and Greenhouse Gases Embodied in Australian Final Consumption: An Input-output Analysis." *Energy Policy*. **26**(1998): 495-506
- [12] H.C. Park, E. Heo. "The Direct and Indirect Household Energy Requirements in the Republic of Korea from 1980 to 2000-An Input-output Analysis." *Energy Policy*. **35**(2007): 2839-2851
- [13] X. Labandeira, J.M. Labeaga. "Estimation and Control of Spanish Energy-related CO<sub>2</sub> Emissions: An Input-output Approach." *Energy Policy*. **30**(2002): 597-611
- [14] G.Q. Chen, B. Zhang. "Greenhouse Gas Emission in China 2007: Inventory and Input-output Analysis." *Energy policy*. **38**(2010): 6180-6193
- [15] Z.M. Chen, G.Q. Chen, J.B. Zhou, et al. "Ecological Input-output Modeling for Embodied Resources and Emissions in Chinese Economy 2005." *Commun Nonlinear Sci Numer Simul*. **15**(2010): 1942-1965
- [16] G. Machado, R. Schaeffer, E. Worrell. "Energy and Carbon Embodied in the International Trade of Brazil: An Input-output Approach." *Ecological Economics*. **39**(2001): 409-424
- [17] K. Nansai, Y. Moriguchi, S. Tohno. "Compilation and Application of Japanese Inventories for Energy Consumption and Air Pollutant Emissions Using Input-Output Tables." *Environmental Science & Technology*. **37**(2003): 2005-2015
- [18] H.T. Liu, Y. Xi, J.E. Guo, et al. "Energy Embodied in the International Trade of China: An Energy Input-output Analysis." *Energy Policy*. **38**(2010): 3957-3964
- [19] H.T. Liu, J.E. Guo, D. Qian, et al. "Comprehensive Evaluation of Household Indirect Energy Consumption and Impacts of Alternative Energy Policies in China by Input-output Analysis. *Energy Policy*. **37**(2009): 3194-3204
- [20] J.B. Zhou. "Embodied Ecological Elements Accounting of National Economy." PhD diss., Peking University, 2009(in Chinese)
- [21] G.Q. Chen. *Systems Carbon Metrics for Building*. Beijing: Xinhua Press, 2010 (in Chinese)
- [22] H.M. Chen. "The impacts of China's Foreign Trade on Energy and Environment." PhD diss., Fudan University, 2009(in Chinese)
- [23] Y. Chen, J.H. Pan, L.H. Xie. "Energy Embodied in Goods of International Trade in China: Calculation and Policy Implications." *Economic Research Journal*. **7**(2007): 11-25(in Chinese)
- [24] Q.Y. Liu, M. Xia, H.X. Zhang. "Reasons for Chinese Phase Change of Energy-consuming: An input-output Analysis." *Economic Theory and Business Management*. **7**(2007): 5-10(in Chinese)
- [25] Y. Q. H.M. Li, M. Xu. "Accounting Embodied Energy in Import and Export in China." *China Population, Resources and Environment*. **18**(2008): 69-75(in Chinese)
- [26] X. Ji. "Ecological Accounting and Evaluation of Urban Economy: Taking Beijing city as the Case." *Commun Nonlinear Sci*

Numer Simulat. **16**(2011): 1650-1669

- [27] S. Liang, C. Wang, T.Z., Zhang. "An Improved Input-output Model for Energy Analysis: A Case Study of Suzhou." *Ecological Economics*. **69**(2010): 1805-1813
- [28] A. Phdungsilp. "A Thermodynamic Framework for Urban Energetic Metabolism." ENETT2550-003, 2003
- [29] Y.M. Zhang, W.D. Xu, Q. Li. "An Energy Input-output Analysis in Shanghai." *Scientific Decision & Systems Engineering-The 6<sup>th</sup> Annual Meeting of the Systems Engineering Society of China*. Beijing: China Science and Technology Press, 1990: 435-438
- [30] W. Leontief. "Environmental Repercussions and the Economic Structure: An Input-output Approach." *The Review of Economics and Statistics*. **52**(1970): 262-271
- [31] R. Miller, P. Blair. *Input-output Analysis: Foundations and Extensions*. Englewood Cliffs, NJ: Prentice Hall, 1985

## 【作者简介】



<sup>1</sup> 张力小（1977-），男，汉族，博士，副教授，主要从事城市能源代谢，可再生能源系统分析等方面的研究，2004年毕业于北京大学环境学院，获理学博士学位。Email: zhanglixiao@bnu.edu.cn

<sup>2</sup> 冯悦怡（1989-），女，汉族，在读硕士，主要从事城市能源系统分析相关研究，就读于北京师范大学环境学院。Email: yueyi.feng@mail.bnu.edu.cn

<sup>3</sup> 胡秋红（1986-），女，汉族，硕士，主要从事城市能源代谢相关研究，2012年毕业于北京师范大学环境学院，获工学硕士学位。Email: huqiu hong1112@yahoo.com.cn