

关军, 储成龙, 张智慧. 基于投入产出生命周期模型的建筑业能耗及敏感性分析[J]. 环境科学研究, 2015, 28(2): 297-303.

GUAN Jun, CHU Chenglong, ZHANG Zhihui. Evaluation and sensitivity analysis of the energy consumption of the Chinese construction sector based on input-output LCA model[J]. Research of Environmental Sciences, 2015, 28(2): 297-303.

## 基于投入产出生命周期模型的建筑业能耗及敏感性分析

关 军, 储成龙, 张智慧\*

清华大学建设管理系, 北京 100084

**摘要:** 建设活动消耗了大量能源, 研究建筑业能耗测算方法并分析其影响因素有助于建筑业的节能减排. 采用投入产出生命周期评价模型测算建筑业能耗, 分析建筑业能耗对部门间联系、部门能源强度和建筑业规模等因素变化的敏感性, 提出部门对建筑业能耗的技术责任系数和结构责任系数, 以判断部门在降低建筑业能耗中的责任. 结果表明, 2010 年我国建筑业能耗为  $1.07 \times 10^9$  t(以标准煤计); 技术责任系数最大的部门是黑色金属冶炼及延压(0.489 8), 其次是非金属矿物制品(0.479 8)和化工(0.211 8)等; 除建筑业外, 结构责任系数较大的部门包括非金属矿物制品(0.276 4)和黑色金属冶炼及延压(0.246 0)等; 建筑业能耗对黑色金属冶炼及延压(0.243 8)和非金属矿物制品(0.203 4)等部门能源强度的变化最敏感. 降低建筑业能耗应注重促进高能耗建材生产节能、强化建设活动科学管理、推广高性能低能耗材料应用、提高基础设施建设水平和深化住房市场化改革等方面.

**关键词:** 建筑业; 能源消耗; 投入产出分析; 敏感性分析

中图分类号: X38

文章编号: 1001-6929(2015)02-0297-07

文献标志码: A

DOI: 10.13198/j.issn.1001-6929.2015.02.18

## Evaluation and Sensitivity Analysis of the Energy Consumption of the Chinese Construction Sector Based on Input-Output LCA Model

GUAN Jun, CHU Chenglong, ZHANG Zhihui\*

Department of Construction Management, Tsinghua University, Beijing 100084, China

**Abstract:** Given that construction activities consume large amounts of energy, quantitatively assessing the construction sector's energy consumption and analyzing its influencing factors are helpful for promoting energy saving and emission reduction in construction. This paper quantified the Chinese construction sector's energy consumption using an input-output life-cycle assessment model, and conducted a sensitivity analysis for energy consumption with respect to the changes in linkages between sectors, sector energy intensity and scale of construction. Technical responsibility coefficients and structural responsibility coefficients were defined to examine the related responsibility of given sectors on reducing the construction sector's energy consumption. The results showed that the Chinese construction sector's energy consumption in 2010 was  $1.07 \times 10^9$  tons standard coal. The smelting and pressing of ferrous metals sector (0.4898) had the highest technical responsibility, followed by the manufacture of non-metallic mineral products (0.4798). Except construction, the sectors of manufacture of non-metallic mineral products (0.2764) and smelting and pressing of ferrous metals (0.2460) shared the top structural responsibilities. The energy consumption was most sensitive to the change of energy intensity of the smelting and pressing of ferrous metals sector (0.4898) and the manufacture of non-metallic mineral products (0.4798). Suggestions to promote energy saving in energy-intensive material production, to strengthen the scientific management of construction activities, to promote the application of high performance and low embodied energy materials, to improve the level of infrastructure construction and to deepen the housing market reform are proposed to reduce the construction sector's energy consumption.

**Keywords:** construction sector; energy consumption; input-output analysis; sensitivity analysis

建筑能耗占全球能耗总量的 1/3 以上, 建筑是多

数国家温室气体排放的最大来源<sup>[1]</sup>. 从生命周期看, 建筑能耗主要包括建筑物化能耗和运行能耗, 前者指在材料开采、生产与运输、施工机具制造和施工过程中消耗的能源, 后者指建筑运行消耗的能源<sup>[2]</sup>. 根据国民经济行业分类标准, 建筑业是从事建筑产品生产活动的行业, 因此该研究将建筑业能耗界定为建筑物

收稿日期: 2014-04-25 修订日期: 2014-10-28

基金项目: 国家自然科学基金项目(70971075)

作者简介: 关军(1977-), 男, 河北唐山人, guan\_jun.hit@163.com.

\* 责任作者, 张智慧(1963-), 男, 山西临猗人, 教授, 博导, 主要从事建设项目环境影响评价研究, zhzhg@tsinghua.edu.cn

化能. 我国正处于快速城镇化阶段, 建设规模增长迅速, 房屋竣工面积从 1995 年的  $3.57 \times 10^8 \text{ m}^2$  增至 2012 年的  $3.59 \times 10^9 \text{ m}^2$ , 年均增速高达 15.26%. 这必将导致建筑业能耗的快速增长, 必须引起高度重视. 因此, 有必要研究建筑业能耗的测算方法并分析其影响因素, 以更好地控制建筑业能耗.

在测算方法方面, LCA (life-cycle assessment, 生命周期评价) 方法已广泛应用于建筑材料<sup>[3-4]</sup>、产品<sup>[5-6]</sup>、施工过程<sup>[7-8]</sup>和建筑业<sup>[9-10]</sup>的环境影响分析. LCA 方法可应用于产品全部或部分生命周期阶段的环境影响分析<sup>[11]</sup>, 包括 P-LCA (process LCA, 过程生命周期评价) 和 IO-LCA (input-output LCA, 投入产出生命周期评价) 方法. 其中, P-LCA 的计算结果针对性强, 精确度高, 方便在产品之间进行比较, 多用于建筑材料、施工过程和特定建筑物的环境影响研究<sup>[12-13]</sup>. 而 IO-LCA 方法中常用的为 EIO-LCA (economic input-output LCA) 模型<sup>[14]</sup>, 该模型借助经济投入产出表提供的部门关联信息和部门环境数据来测算某产业产品或服务的环境影响, 其结果反映了部门的平均消耗或排放水平, 成为研究宏观层面(国家或产业等)环境影响的主流方法<sup>[15]</sup>. 常远等<sup>[16]</sup>构建了基于直接消耗系数的 EIO-LCA 模型, 测算了 2007 年我国建筑业能耗及其对大气环境产生的影响, 并对 2015 年建筑业能耗和大气环境影响水平进行了预测, 但忽略了产业间接联系对分析结果的影响. HE 等<sup>[17]</sup>构建了以 EIO-LCA 测算城市住宅建筑物化环境影响、以 P-LCA 测算建筑运行环境影响的混合模型, 分析了城市住宅的全生命周期能耗、水消耗和其他环境污染排放. 总体来看, 已有研究尚未全面地测算我国建筑业能耗. 该研究尝试借助完全消耗系数构建建筑业能耗的 EIO-LCA 测算模型.

在 EIO-LCA 模型基础上分析影响因素的方法包括事后分析方法和事前分析方法 2 类. 其中, 事前分析方法是在 EIO-LCA 模型基础上, 采用敏感性分析方法研究建筑业对直接消耗系数、部门能源强度变化和建筑业规模等因素变化的敏感性<sup>[20]</sup>. 该方法能够识别影响建筑业能耗的关键产业间的联系, 研究结果具有前瞻性<sup>[21]</sup>. 该研究采用事前分析方法研究部门间联系(直接消耗系数)、部门能源强度和建筑业规模的变化对建筑业能耗的影响. 需要说明的是, 已有研究中, 事前分析方法主要用于分析部门间联系对国家或地区碳排放<sup>[21-23]</sup>或电力消费<sup>[24]</sup>等的影响, 这与该研究的研究范围不同. 该研究借助建筑业对其他

部门产品的完全消耗关系, 构建能够完整测算建筑业能耗的 EIO-LCA 模型, 在此基础上分析建筑业能耗对部门间联系、部门能源强度和建筑业规模等变化的敏感性, 以期为进一步提出降低建筑业能耗的合理对策以及促进建筑业的节能减排提供参考.

## 1 研究方法

### 1.1 EIO-LCA 模型的构建

Leontief<sup>[25]</sup>于 1970 年将投入产出模型应用于环境问题研究, 建立了 EIO-LCA 模型. 该模型根据部门之间的经济联系追溯到投入到建筑业的各种材料与设备隐含的能耗, 具有完整的评价边界<sup>[11]</sup>. 该研究的建筑业能耗涵盖了建筑生命周期中从材料开采至建筑产品建造完成的阶段. 建筑业能耗可进一步划分为直接能耗和间接能耗, 其中前者代表施工过程的能耗, 后者代表投入到建筑业的材料、设备和服务等上游生产过程中所隐含的能耗<sup>[10]</sup>. EIO-LCA 模型由消耗系数矩阵、卫星矩阵和产出列向量 3 个要素构成<sup>[26]</sup>.

消耗系数矩阵可分为直接消耗系数矩阵( $\mathbf{A}$ )和列昂惕夫逆矩阵( $\mathbf{B}$ ). 直接消耗系数反映了经济系统中各部门间的直接消耗关系, 列昂惕夫逆矩阵系数(非主对角线的系数, 也称完全消耗系数)反映了部门间的完全消耗关系. 二者的关系:

$$\mathbf{B} = (\mathbf{I} - \mathbf{A})^{-1} \quad (1)$$

式中,  $\mathbf{I}$  为  $n \times n$  阶单位矩阵,  $n$  为部门数.

EIO-LCA 模型可利用直接消耗系数矩阵或列昂惕夫逆矩阵进行计算, 前者忽略了部门之间的间接联系对建筑业能耗的贡献, 而后者则考虑了全部的直接与间接联系<sup>[11]</sup>. 该研究选择后者.

卫星矩阵( $\mathbf{C}$ )反映了各产业部门的能源强度(该部门的能源消耗与总产出之比). 在应用列昂惕夫逆矩阵时, 产出列向量应选择最终使用向量( $\mathbf{y}$ ). 假设建筑业为投入产出表中的第  $m$  个部门, 建筑业能耗<sup>[26]</sup>为

$$E_m = \mathbf{B} \cdot \mathbf{C} \cdot \mathbf{y} = (\mathbf{I} - \mathbf{A})^{-1} \cdot \mathbf{C} \cdot \mathbf{y} \quad (2)$$

为便于进行敏感性分析, 将式(2)采用如下等价公式表达:

$$E_m = \sum_{i=1}^n b_{im} EI_i y_m \quad (3)$$

式中:  $E_m$  为建筑业能耗,  $10^4 \text{ t}$  (以标准煤计);  $b_{im}$  为建筑业对部门  $i$  的完全消耗系数;  $EI_i$  为部门  $i$  的能源强度,  $\text{t}/10^4 \text{ 元}$ , 以标准煤计;  $y_m$  为建筑业最终使用,  $10^4 \text{ 元}$ .

### 1.2 建筑业能耗的敏感性分析模型

由 EIO-LCA 模型可知, 建筑业能耗受直接消耗

系数、部门能源强度和最终使用的影响,三者分别代表了广义的建筑生产技术(部门间关联)、部门能源强度和建筑业规模对建筑业能耗的影响. 该研究应用敏感性分析方法研究上述 3 类因素变化对建筑业能耗的影响. 敏感性分析是指从定量分析的角度研究有关因素发生某种变化对某一个或一组目标变量影响程度的不确定分析技术<sup>[27]</sup>,通常可借助弹性系数来表达. 弹性系数( $\delta_z$ )定义:

$$\delta_z = \frac{(\text{obj}_{i+1} - \text{obj}_i) / \text{obj}_i}{(Z_{i+1} - Z_i) / Z_i} = \frac{\Delta \text{obj}_i / \text{obj}_i}{\Delta Z_i / Z_i} \quad (4)$$

式中,  $\text{obj}$  为关键指标,  $Z$  为相关变量,  $Z_i$  和  $Z_{i+1}$  分别为变化前和变化后的  $Z$ , 其余类似.

结合式(3)(4),可得到建筑业能耗对最终使用的弹性系数恒为 1. 表明在其他条件不变时,建筑业能耗与建筑业规模同比例增长.

### 1.2.1 建筑业能耗对直接消耗系数的弹性

直接消耗系数的变化将引起列昂惕夫逆矩阵元素的变化,进而导致建筑业能耗变化. 根据误差传递理论的核心——Sherman-Morrison 公式<sup>[28-29]</sup>,任一第  $k$  行第  $l$  列直接消耗系数( $\alpha_{kl}$ )的变化导致建筑业完全消耗系数( $b_{im}$ )的变化( $\Delta b_{im}$ )为

$$\Delta b_{im} = \frac{b_{ik} b_{lm} \Delta \alpha_{kl}}{1 - b_{lk} \Delta \alpha_{kl}} \quad (5)$$

将式(5)代入式(3),可得到建筑业能耗的变化( $\Delta E$ ):

$$\Delta E_m = X_m \cdot \sum_{i=1}^n \frac{EI_i b_{ik} b_{lm} \Delta \alpha_{kl}}{1 - b_{lk} \Delta \alpha_{kl}} \quad (6)$$

将式(6)代入式(4),可得到建筑业能耗对直接消耗系数的弹性( $\delta_a$ ):

$$\delta_a = \frac{\sum_{i=1}^n EI_i \frac{\alpha_{kl} b_{ik} b_{lm}}{1 - b_{lk} \Delta \alpha_{kl}}}{\sum_{i=1}^n EI_i b_{im}} \quad (7)$$

$\delta_a$  越大,说明直接消耗系数对建筑业能耗的影响越大,反之亦然. 较大的弹性系数对应着影响建筑业能耗变化的关键部门间联系.

为进一步从部门间关联的角度分析各部门在降低建筑业能耗中的责任,在此参照投入产出分析中部门的影响力系数和感知力系数<sup>[30]</sup>来定义部门对建筑业能耗变化的技术责任系数和结构责任系数. 部门  $V$  所在行的弹性系数之和代表了所有部门对部门  $V$  的直接消耗系数同时变化单位百分比的情况下(不考虑交互影响)建筑业能耗的变化幅度,反映了部门  $V$  对建筑业能耗变化的“影响力”. 将部门  $V$  所在行

的弹性系数之和定义为部门  $V$  对建筑业能耗的技术责任系数( $T_V$ ),计算公式:

$$T_V = \sum_{j=1}^n \delta_{Vj} \quad (8)$$

技术责任反映了该部门能耗水平通过影响所有部门产品隐含能来影响建筑业能耗的程度. 对于技术责任系数越大的部门,降低其生产能耗将会大幅减少该部门通过其他部门投入到建筑业的能耗.

部门  $V$  所在列的弹性系数之和代表了部门  $V$  对所有部门的直接消耗系数同时变化单位百分比的情况下(不考虑交互影响)建筑业能耗的变化幅度,代表了部门  $V$  “感知”其他部门能耗水平变化进而影响建筑业能耗的程度. 将部门  $V$  所在列的弹性系数之和定义为部门  $V$  对建筑业能耗的结构责任系数( $S_V$ ),计算公式:

$$S_V = \sum_{i=1}^n \delta_{iV} \quad (9)$$

结构责任反映了该部门的产品隐含能受所有部门生产能耗水平的影响进而影响到建筑业能耗的程度. 在建筑生产链中,降低对结构责任系数较大的部门产品或服务的需求相当于降低了众多上游过程通过该产品或服务投入到建筑业的能耗.

### 1.2.2 建筑业能耗对部门能源强度的弹性

由式(3)(4)可得,建筑业能耗对部门  $V$  的能源强度变化的弹性( $\delta_{E1}$ ):

$$\delta_{E1} = b_{Vm} EI_V / \sum_{i=1}^n b_{im} EI_i \quad (10)$$

### 1.3 数据来源

根据 2010 年我国 65 部门投入产出表和《中国能源统计年鉴 2011》中的能源消费数据来测算 2010 年建筑业能耗. 在 EIO-LCA 模型应用中,常面临投入产出表的产业划分、能源和环境统计数据产业分类不一致等问题,为此将投入产出表由 65 个部门合并为 35 个部门,重新计算了直接消耗系数与完全消耗系数,并分析 2010 年我国建筑业能耗. 建筑业直接能耗可在中国能源统计年鉴中查询,间接能耗为建筑业总能耗与建筑业直接能耗之差.

## 2 结果与分析

### 2.1 2010 年我国建筑业能耗

2010 年我国建筑业能耗为  $1.07 \times 10^9$  t,其中建筑业直接能耗与间接能耗所占比例分别为 5.9% 和 94.1%. 这反映了投入到建筑业的材料、设备等的隐含能耗占绝对比例,施工过程能耗所占比例较小. 由

表1可知,对建筑业能耗贡献最大的部门是黑色金属冶炼及延压业(24.38%),其次是非金属矿物制品业(20.34%),交通运输、仓储及邮政业(7.73%),化工(7.34%),电力、热力的生产和供应业(7.04%),建

筑业(5.9%),石油加工、炼焦及核燃料加工业(5.73%),煤炭开采和洗选业(4.39%),有色金属冶炼及压延业(3.60%),这些部门对建筑业能耗的总贡献达到86.44%.

表1 2010年各部门对我国建筑业能耗的贡献

Table 1 Contribution of each sector to the Chinese construction sector's energy consumption in 2010

部门				部门			
编号	名称	能耗/10 <sup>4</sup> t	所占比例%	编号	名称	能耗/10 <sup>4</sup> t	所占比例%
1	农林牧渔	545	0.51	19	黑色金属冶炼及延压	26 090	24.38
2	煤炭开采和洗选	4 701	4.39	20	有色金属冶炼及延压	3 849	3.60
3	石油和天然气开采	2 508	2.34	21	金属制品	1186	1.11
4	黑色金属矿采选	1 312	1.23	22	通用设备制造	714	0.67
5	有色金属矿采选	408	0.38	23	专用设备制造	276	0.26
6	非金属矿采选	863	0.81	24	交通运输设备制造	304	0.28
7	食品及酒精饮料	318	0.30	25	电气机械制造	391	0.37
8	烟草制品	25	0.02	26	通信设备制造	194	0.18
9	纺织	433	0.40	27	仪器仪表制造	77	0.07
10	服装制造	59	0.05	28	工艺品及其他制造	409	0.38
11	皮革、毛皮制品	15	0.01	29	电力、热力的生产和供应	7 531	7.04
12	木材加工	329	0.31	30	燃气生产和供应	107	0.10
13	造纸,印刷	889	0.83	31	水的生产和供应	123	0.11
14	文教体育用品	13	0.01	32	建筑	6 314	5.90
15	石油加工	6 129	5.73	33	交通运输、仓储及邮政	8 270	7.73
16	化工	7 850	7.34	34	批发、零售、住宿	1 085	1.01
17	塑料、橡胶制品	709	0.66	35	其他行业	1 219	1.14
18	非金属矿物制品	21 770	20.34				

2.2 直接消耗系数变化对建筑业能耗的影响

所构建的 EIO-LCA 模型包含 35 个部门,共有 1 225 (35 × 35) 个直接消耗系数,任何一个直接消耗系数的变化都可能引起列昂惕夫逆矩阵变化,进而诱

发建筑业能耗的改变. 利用式(7)计算了建筑业能耗对直接消耗系数的弹性( $\delta_a$ ),选取  $\delta_a > 0.01$  所对应的 53 个直接消耗系数为关键系数(见表2),关键系数对应影响建筑业能耗关键部门间的联系.

表2 弹性大于0.01的关键系数对应的部门间联系

Table 2 Linkages between sectors with elasticity over 0.01

部门间联系	$\delta_a$	部门间联系	$\delta_a$	部门间联系	$\delta_a$	部门间联系	$\delta_a$
18 → 32	0.357 6	19 → 22	0.028 0	15 → 16	0.015 9	34 → 32	0.011 9
19 → 32	0.232 8	16 → 32	0.027 5	15 → 32	0.015 9	16 → 35	0.011 7
19 → 19	0.117 0	16 → 18	0.025 8	26 → 26	0.015 8	5 → 20	0.011 6
33 → 32	0.094 5	2 → 29	0.025 6	15 → 18	0.015 7	29 → 4	0.011 3
18 → 18	0.090 6	29 → 18	0.024 2	15 → 19	0.015 7	21 → 18	0.011 1
16 → 16	0.069 9	16 → 17	0.023 3	19 → 18	0.014 5	2 → 19	0.011 1
29 → 29	0.064 3	20 → 25	0.023 2	24 → 24	0.013 8	32 → 32	0.010 7
3 → 15	0.048 3	2 → 18	0.023 1	21 → 21	0.013 4	13 → 13	0.010 7
4 → 19	0.043 6	20 → 32	0.020 7	19 → 23	0.013 3	29 → 16	0.010 3
21 → 32	0.041 8	22 → 32	0.020 5	12 → 32	0.013 2	17 → 32	0.010 3
19 → 21	0.041 8	22 → 22	0.020 3	33 → 18	0.012 6	23 → 32	0.010 1
20 → 20	0.039 0	6 → 18	0.016 9	29 → 19	0.012 5		
25 → 32	0.037 4	2 → 2	0.016 4	25 → 25	0.012 1		
15 → 33	0.034 0	33 → 33	0.016 0	35 → 32	0.011 9		

注: 18→32 表示部门 18 投入到部门 32 的部门间联系, 其余类似; 部门编号所对应的部门名称请参考表 1, 下同.

各部门的技术责任系数与结构责任系数如表 3 所示. 其中,技术责任系数最大的部门是黑色金属冶炼及延压加工业(0.489 8),其次是非金属矿物制品业(0.479 8),化工(0.211 8),电力、热力的生产和供应业(0.187 2),交通运输业(0.177 4),石油加工、炼焦及核燃料加工业(0.132 6)等产业. 这些部门应尽量降低生产过程能耗. 结构责任系数最大的部门是建筑业(0.955 1),其次是非金属矿物制品业(0.276 4),黑色金属冶炼及延压加工业(0.246 0),化工(0.138 5),电力、热力的生产和供应业(0.116 8)等行业. 建筑产品生产过程应尽可能降低对这些产业部门产品或服务的需求.

表 3 部门的技术责任系数与结构责任系数

Table 3 The technical responsibility coefficients and structural responsibility coefficients of sectors

部门编号	技术责任系数	结构责任系数	部门编号	技术责任系数	结构责任系数
1	0.021 0	0.015 9	19	0.489 8	0.246 0
2	0.093 3	0.049 4	20	0.117 4	0.081 5
3	0.055 8	0.032 3	21	0.100 2	0.089 1
4	0.051 9	0.039 6	22	0.090 0	0.083 4
5	0.015 8	0.012 0	23	0.037 0	0.034 4
6	0.033 1	0.025 0	24	0.041 2	0.038 3
7	0.017 9	0.014 9	25	0.080 8	0.077 1
8	0.001 8	0.001 6	26	0.031 7	0.029 8
9	0.017 7	0.013 7	27	0.011 9	0.011 2
10	0.007 5	0.007 1	28	0.020 2	0.016 4
11	0.002 0	0.001 9	29	0.187 2	0.116 8
12	0.029 1	0.026 0	30	0.003 4	0.002 3
13	0.032 4	0.024 0	31	0.002 3	0.001 2
14	0.001 9	0.001 8	32	0.014 1	0.955 1
15	0.132 6	0.075 3	33	0.177 4	0.100 1
16	0.211 8	0.138 5	34	0.034 1	0.024 0
17	0.049 6	0.043 0	35	0.061 2	0.049 8
18	0.479 8	0.276 4			

2.3 建筑业能耗对部门能源强度的弹性

由图 1 可见,建筑业能耗对各部门能源强度的弹性

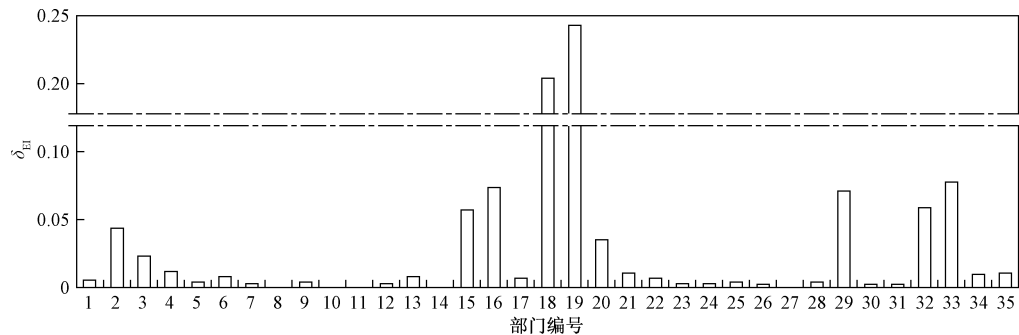


图 1 建筑业能耗对各部门能源强度的弹性

Fig. 1 Elasticity of the construction sector's energy consumption regarding sector energy intensity

由大到小分别为黑色金属冶炼及延压加工业(0.243 8),非金属矿物制品业(0.203 4),交通运输、仓储及邮政业(0.077 3),化工(0.073 4),电力、热力的生产和供应业(0.070 4),建筑业(0.05 9),石油加工、炼焦及核燃料加工业(0.057 3). 这些部门兼具能源强度较高、建筑业对其总需求较大的特点,其排序与技术责任系数排序大体一致,降低这些部门的能源强度对控制建筑业能耗具有较显著效果.

2.4 建议

分别从促进高技术责任部门节能、减少高结构责任部门产品消耗和控制建筑业规模 3 个层面提出降低建筑业能耗的建议:①促进高能耗建材生产节能,提高建设活动科学管理水平,降低建材生产、运输和施工等主要环节的能耗. 一是通过建材生产节能技术进步,降低钢材、水泥、玻璃、陶瓷、PVC 建材等主要建筑材料的生产能耗水平;二是构建建筑材料物流配送系统平台,统筹建材、设备等在各建设项目间的调配,尽量避免材料的长距离运输,降低运输能耗;三是强制推行绿色施工,确保施工过程的“四节一环保”(节能、节材、节水、节地和环保). ②推动建筑技术进步,推广高性能结构材料和新型高强轻型低能耗材料,降低传统高能耗、自重大材料的消耗. 一是通过建筑技术进步,推广高强度钢筋、高强度高性能混凝土等高性能结构材料来降低建筑对高含能材料的需求. 当前我国发展高强度钢筋、高强度高性能混凝土的主要制约在于技术层面,迫切需要通过技术进步缩小与先进国家的技术差距,扩大推广规模,充分发挥其经济节约、材料节约、能源节约、环境排放低等优势. 二是加强新型建筑材料的研发、推广与应用,发展高强轻型低能耗材料,逐步替代高能耗、自重大的传统材料. ③提高基础设施建设水平,深化住房市场化改革,控制建设规模. 一是在基础设施建设领域,合理规划,科学布局,减少重复建设,加强基础设施的

维护与保养等措施来完善基础设施,充分发挥规模效应;二是在住房建设领域,通过住房市场化的深入改革,推进房产税立法,充分发挥经济杠杆效应,适度控制房地产市场财富效应,激发房地产市场活力,活跃二手房与新建存量房屋的销售与租赁,合理控制住房建设规模.

### 3 结论

a) 2010年我国建筑业能耗为  $1.07 \times 10^9$  t,间接能耗占绝对比例(94.1%).

b) 技术责任系数最大的部门是黑色金属冶炼及延压加工业(0.4898),其次是非金属矿物制品业(0.4798),化工(0.2118),电力、热力的生产和供应业(0.1872),交通运输、仓储及邮政业(0.1774),石油加工、炼焦及核燃料加工业(0.1326)等产业.

c) 除建筑业外,结构责任系数较大的部门包括非金属矿物制品业(0.2764),黑色金属冶炼及延压加工业(0.2460),化工(0.1385),电力、热力的生产和供应业(0.1168)等行业.

d) 建筑业能耗对黑色金属冶炼及延压加工业(0.2438),非金属矿物制品业(0.2034),交通运输、仓储及邮政业(0.0773)和化工(0.0734)等部门能源强度的变化较为敏感.

e) 降低建筑业能耗的途径在于促进高能耗建材生产节能、强化建设活动科学管理、推广高性能低能耗材料应用、提高基础设施建设水平和深化住房市场化改革等.

### 参考文献 (References):

- [1] UNEP SBCL. Buildings and climate change: a summary for decision-makers [EB/OL]. 2009 [2014-03-20]. <http://www.unep.org/SBCI/pdfs/SBCI-BCCSummary.pdf>.
- [2] LANGSTON Y L, LANGSTON C A. Reliability of building embodied energy modelling: an analysis of 30 Melbourne case studies [J]. *Construction Management and Economics*, 2008, 26(2):147-160.
- [3] 龚志起,张智慧. 建筑材料物化环境状况的定量评价[J]. 清华大学学报(自然科学版),2004,44(9):1209-1213.  
GONG Zhiqi, ZHANG Zhihui. Quantitative assessment of the embodied environmental profile of building materials[J]. *Journal of Tsinghua University (Science and Technology)*, 2004, 44(9): 1209-1213.
- [4] 王婧,张旭,黄志甲. 基于LCA的建材生产能耗及污染物排放清单分析[J]. 环境科学研究,2007,20(6):149-153.  
WANG Jing, ZHANG Xu, HUANG Zhijia. Life cycle assessment energy consumption and pollutant emission inventory analysis of construction materials production [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2007, 20(6):149-153.
- [5] ZHANG Zhihui, WU Xing, YANG Xiaomin, *et al.* BEPAS: a life cycle building environmental performance assessment model [J]. *Building and Environment*, 2006, 41:669-675.
- [6] CHANG Yuan, RIES R J, LEI Shuhua. The embodied energy and emissions of a high-rise education building: a quantification using process-based hybrid life cycle inventory model [J]. *Energy and Buildings*, 2012, 55:790-798.
- [7] BILEC M, RIES R J, MATTHEWS H S, *et al.* Example of a hybrid life-cycle assessment of construction process [J]. *Journal of Infrastructure Systems*, 2006, 12:207-215.
- [8] LI Xiaodong, ZHU Yimin, ZHANG Zhihui. An LCA-based environmental impact assessment model for construction process [J]. *Building and Environment*, 2010, 45:766-775.
- [9] CHANG Yuan, RIES R J, WANG Yaowu. The quantification of the embodied impacts of construction projects on energy, environment and society based on I-O LCA [J]. *Energy Policy*, 2011, 39:6321-6330.
- [10] ONAT N C, KUCUKVAR M, TATARI O. Scope-based carbon footprint analysis of U. S. residential and commercial buildings: an input-output hybrid life cycle assessment approach [J]. *Building and Environment*, 2014, 72:53-62.
- [11] ORTIZ O, CASTELLS F, SONNEMANN G. Sustainability in the construction industry: a review of recent developments based on LCA [J]. *Construction and Building Materials*, 2009, 23:28-39.
- [12] SHARRARD A L, MATTHEWS H S, RIES R J. Estimating construction project environmental effects using an input-output-based hybrid life-cycle assessment model [J]. *Journal of Infrastructure Systems*, 2008, 14(4):327-336.
- [13] PIERAGOSTINI C, MUSSATI M C, AGUIRRE P. On process optimization considering LCA methodology review article [J]. *Journal of Environmental Management*, 2012, 96(1):43-54.
- [14] HAWKINS T, HENDRICKSON C, HIGGINS C, *et al.* A mixed-unit input-output model for environmental life-cycle assessment and material flow analysis [J]. *Environmental Science & Technology*, 2007, 41:1024-1031.
- [15] CABEZA L F, RINCON L, VILARUNO V, *et al.* Life cycle assessment (LCA) and life cycle energy analysis (LCEA) of buildings and the building sector: a review article [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2014, 29(1):394-416.
- [16] 常远,王要武. 基于经济投入产出生命周期模型的我国建筑物化能与大气影响分析[J]. 土木工程学报,2011,44(5):136-143.  
CHANG Yuan, WANG Yaowu. Analysis of building embodied energy and atmosphere impacts in China based on economic input-output life-cycle assessment model [J]. *China Civil Engineering Journal*, 2011, 44(5):136-143.
- [17] HE Xiaosai, LIU Yi, LI Tianwei, *et al.* Does the rapid development of China's urban residential buildings matter for the environment? [J]. *Building and Environment*, 2013, 64:130-137.
- [18] DIETZENBACHER E, LOS B. Structural decomposition analysis with dependent determinants [J]. *Economics Systems Research*,

- 2000,12(4):497-514.
- [19] CELLURA M, LONGO S, MISTRETTA M. Application of the structural decomposition analysis to assess the indirect energy consumption and air emission changes related to Italian households consumption [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2012, 6:1135-1145.
- [20] ALCANTARA V, TARANCON M Á, RIO P D. Assessing the technological responsibility of productive structures in electricity consumption [J]. *Energy Economics*, 2013, 40:457-467.
- [21] HONDO H, SAKAI S, TANNO S. Sensitivity analysis of total CO<sub>2</sub> emission intensities estimated using an input-output table [J]. *Applied Energy*, 2002, 72(3):689-704.
- [22] TARANCON M Á, RIO P D. CO<sub>2</sub> emissions and intersectoral linkages: the case of Spain [J]. *Energy Policy*, 2007, 35:1100-1116.
- [23] TARANCON M Á, RIO P D. Assessing energy-related CO<sub>2</sub> emissions with sensitivity analysis and input-output techniques [J]. *Energy*, 2012, 37(1):161-170.
- [24] TARANCON M Á, RIO P D, CALLEJAS F. Determining the responsibility of manufacturing sectors regarding electricity consumption [J]. *Energy*, 2011, 36(1):46-52.
- [25] LEONTIEF W. Environmental repercussions and the economic structure: an input-output approach [J]. *Review of Economics and Statistics*, 1970, 52(3):262-271.
- [26] CHANG Yuan, RIES R J, WANG Yaowu. The embodied energy and environmental emissions of construction projects in China: An economic input-output LCA model [J]. *Energy Policy*, 2010, 38:6597-6603.
- [27] SALTELLI A, CHAN K, MARIAN S E. Sensitivity analysis Vol. 134 [M]. New York: Wiley, 2000.
- [28] TARANCON M Á, MORAN T, GONZALEZ P D R. A combined input-output and sensitivity analysis approach to analyze sector linkages and CO<sub>2</sub> emissions [J]. *Energy Economics*, 2007, 29:578-597.
- [29] 国涓, 唐焕文, 孙平. 投入产出弹性系数研究 [J]. *辽宁工程技术大学学报*, 2006, 25(5):754-757.  
GUO Juan, TANG Huanwen, SUN Ping. Research on input-output elasticity coefficients [J]. *Journal of Liaoning Technical University*, 2006, 25(5):754-757.
- [30] WU Xing, ZHANG Zhihui. Input-output analysis of the Chinese construction sector [J]. *Construction Management and Economics*, 2005, 23(5):905-912.

(责任编辑:周巧富)