

夏热冬冷地区建筑业碳排放的关联性与波及性及敏感性分析——以湖南省为例

于洪铎¹, 张旺^{1,2*}, 赵晨¹

¹湖南工业大学城市与环境学院, 湖南 株洲

²湖南省绿色工业与城市低碳发展社科研究基地, 湖南 株洲

收稿日期: 2022年6月15日; 录用日期: 2022年7月29日; 发布日期: 2022年8月11日

摘要

建筑业发展拉动了关联产业发展, 不仅促进后者能耗碳排放的增长, 也导致前者自身碳排放的增长, 因而波及到整个国民经济各部门。基于EIO-LCA模型, 采集湖南省2002、2007和2012年42部门投入产出表等数据, 测算和分析建筑业能耗碳排放的关联性、波及性和敏感性及其变化。结果表明: 建筑业是典型“高影响、高排放”部门, 交通运输、仓储业和邮政业的前向关联性较大且稳定, 通用、专用设备制造业的后向关联性也如此; 建筑业能耗碳排放的影响力系数呈逐年上升之势, 感应力系数却呈逐年下降之势, 其他部门对建筑业能耗碳排放的拉动作用不显著; 三个年份建筑业碳排放的技术、结构责任系数、及对各部门碳排放强度弹性的较大部门, 集中在能源开采和洗选业, 石油加工、炼焦及核燃料加工业, 非金属矿物制品业, 金属冶炼及压延加工业, 电力、热力的生产和供应业, 它们多属资源开采及加工部门。因此一应降低该部门生产中的碳排放, 二来建筑业也要尽量减少对该部门的产品或服务需求。

关键词

建筑碳排放, 关联性, 波及性, 敏感性, EIO-LCA模型

The Analysis of Correlation Properties and Spreading and Sensitivity Characteristics on CO₂ Emission from Energy Consumption of Construction Sector in Hot Summer and Cold Winter Zone: A Case Study of Hunan Province

*通讯作者。

文章引用: 于洪铎, 张旺, 赵晨. 夏热冬冷地区建筑业碳排放的关联性与波及性及敏感性分析——以湖南省为例[J]. 地理科学研究, 2022, 11(4): 407-416. DOI: 10.12677/gser.2022.114040

Hongduo Yu¹, Wang Zhang^{1,2*}, Chen Zhao¹

¹College of Urban and Environmental Sciences Hunan University of Technology, Zhuzhou Hunan

²Research Base for Green Industry and Low Carbon Development of City in Hunan Province, Zhuzhou Hunan

Received: Jun. 15th, 2022; accepted: Jul. 29th, 2022; published: Aug. 11th, 2022

Abstract

The development of construction sector has promoted the development of related industries. It not only promotes the growth of the latter's energy consumption and carbon emissions, but also leads to the growth of the former's own carbon emissions, which affected the whole national economy. Based on the EIO-LCA model, data such as IO Tables of 42 sectors in Hunan Province for 2002, 2007 and 2012 year were collected to measure and analyze the correlation properties and spreading and sensitivity characteristics of carbon emissions from energy consumption sector and their changes on the construction sector. The results show that: the construction sector was one of the typical "high-impact/high-emission" sectors; the forward correlation property of Transportation, Storage and Post Industry was large and stable, the backward correlation property of Manufacture of General and Special Purpose Machinery was also the same; the influence coefficients of construction sector's carbon emissions from energy consumption were on the rise year by year, but sensitivity coefficients were on the declining year by year; the pulling affection were not significant for other sectors on the construction sector's carbon emissions from energy consumption; the greater sectors of technical responsibility coefficients and structural responsibility coefficients on construction sector's CO₂, and elasticity regarding CO₂ emission intensity of all sectors in 2002, 2007 and 2012 year, concentrated in Mining and Washing of energy, Processing of Petroleum, Coking, Nuclear Oil, Manufacture of Non-Metallic Mineral Products, Manufacture and Processing of Metals, Production and Supply of Electric & Heat Power, which mostly belong to the resource extraction and processing sectors. Therefore, one should reduce CO₂ emissions from these sectors' production, and the construction sector should also minimize demand for products or services of these sectors.

Keywords

CO₂ Emission of Construction Sector, Correlation Properties, Spreading Characteristics, Sensitivity Characteristics, EIO-LCA Model

Copyright © 2022 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

伴随我国城市化和工业化的迅猛发展，建筑业不仅自身的能耗碳排在持续增长，而因其产业带动性，也会造成金属冶炼、非金属制品、化工、机械制造、交通运输等产业能耗碳排放的间接增加，另其产业波及性，使得仓储物流、住宿餐饮、批发零售等产业能耗碳排放的增长又以建筑领域能耗碳排放的增加为载体和代价。因此需对建筑产业链在整个经济体系中所引发的能耗碳排放进行系统核算，从宏观层面把握建筑业能耗碳排放的影响度和感应度及敏感性，破解当前建筑业末端低碳乃至近零、零碳技术，

所导致“此减彼升”“局部减，全局升”，甚至“局部越减，全局越升”的现实局面，并提供建筑低碳化政策的决策依据。

考虑到建筑业自身能耗具有直接碳排放效应，它还通过产业关联的带动作用引起间接碳排放效应。而为测算其完全(直接 + 间接)碳排放，国内外学界广泛应用生态投入产出生命周期评价法(EIO-LCA)。它借助经济投入产出表所提供的部门关联信息或环境数据来测算某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[1]。国外的典型研究有测度美国居住和商业建筑碳足迹[2]及用于核算建筑材料环境影响的混合投入产出表[3]等；也有运用上述方法的研究表明挪威[4]和爱尔兰[5]的建筑业完全碳排放均远高于其直接碳排放。国内的研究紧跟国外，大部分研究关注更多的也是整个国家尺度建筑业能耗或碳排放及其影响因素[6] [7]。张智慧等在计算了 2002、2005 及 2007 年我国建筑业及其他行业的直接、间接和关联碳排放后，还利用关联碳排放系数和碳排放拉动系数比较了主要工业行业单位产出的碳排放能力[8]。关军等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，提出各部门对建筑业能耗的技术和结构责任系数，以判断这些部门在降低建筑业能耗中的责任[9]。冯祥玉等运用投入产出法与假设抽取法，对我国 2012 年由建筑业消费而引起的供应链生命周期隐含碳排放进行了定量解析；在此基础上构建了 3 种城镇化情景，预测了建筑业发展对经济系统中其他行业隐含碳排放的拉动力[10]。综合上述国内外文献，已有研究主要集中于测算国家尺度某一年份的建筑业碳排放[11] [12] [13] [14]，但由于不同国家和地区的气候特点和能源结构不同，建筑业能耗碳排放的区域差异较大，不同时期的数据变化也不小，因而也需在区域尺度，构建动态的 EIO-LCA 模型，来展开深入细致的变化研究，据此再有的放矢地提出建筑领域的节能减碳对策。课题组已在前期，基于 PB-LCA 方法以典型的夏热冬冷省区湖南为例，构建了省区层面的宏观建筑碳足迹模型，定量测度和比较 2004~2016 年建筑各个阶段的碳足迹及其变化情况[15]，这只是建筑直接碳排放，本文在此基础上基于 EIO-LCA 模型，测算建筑业的完全能耗碳排放，并分析其关联性、波及性和敏感性及其变化，这是一个新的尝试。

2. 研究方法与数据来源及处理方法

2.1. 研究方法

2.1.1. EIO-LCA 模型

1970 年 Leontief 将投入产出模型应用于环境问题的研究，构建了 EIO-LCA 模型[16]。EIO-LCA 模型利用直接消耗系数(A)和完全消耗系数矩阵(B)来分别计算，后者考虑了部门之间全部的直接与间接联系对建筑业能耗二氧化碳排放(后文全部统一省写为“碳排放”)的贡献，两者之间的关系如下：

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

式中， I 是 $n \times n$ 阶单位矩阵， n 是部门数。

2.1.2. 产业碳排放关联性与波及性

碳排放强度表示某部门单位产值所产生的碳排放量，用 C_{ij} 表示，即 i 部门在生产中单位产值所产生的碳排放量。为便于模型计算，采用对角矩阵 C_{ij} 表示：

$$C_{ij} = \begin{cases} 0 & (i \neq j) \\ C_i & (i = j) \end{cases} \quad (2)$$

在此基础上，计算出碳排放完全需求系数矩阵 B_R ，即 $B_R = C^{-1}(I - A)^{-1}$ 。

1) 部门碳排放完全消耗系数与完全分配系数

碳排放完全消耗系数表示某部门(如 j 部门)单位产出消耗其它部门的产品或服务(如 i 部门)而产生的碳排放量。碳排放完全分配系数则表示某部门(如 i 部门)生产单位产值所产生的碳排放量分配给其它部门(如 j 部门)的量[8]。

设 cb_{ij} 为 B_R 的第 i 行第 j 列个元素, 从纵向上看, 属于碳排放完全消耗系数; 从横向上看, 则属于碳排放完全分配系数。

2) 部门碳排放影响力系数与感应力系数

部门碳排放影响度为某部门(如 j 部门)增加 1 个单位最终使用所引起的社会碳排放总和, 即为矩阵 B_R 的第 j 列之和, 记为 cb_j 。则 j 部门的碳排放影响力系数 INF_j 公式是:

$$INF_j = cb_j / \left(\frac{1}{n} \sum cb_j \right) \quad (3)$$

上式中, n 为各产业部门。

部门碳排放感应度为国民经济各部门增加单元产值时, 带动某部门(如 i 部门)产值增加而产生的碳排放总量, 体现了某部门(如 i 部门)为满足其它部门而产生的碳排放量[9], 即为 B_R 的第 i 行之和, 记为 cb_i 。则 i 部门碳排放感应力系数 IND_i 公式是:

$$IND_i = cb_i / \left(\frac{1}{n} \sum cb_i \right) \quad (4)$$

2.1.3. 各部门对建筑业碳排放的敏感性

敏感性分析法用于研究建筑业对直接消耗系数、部门能源(或碳排放)强度变化和建筑业规模等因素变化的敏感大小[17]。假设建筑业为投入产出表中的第 m 个部门, 则建筑业碳排放为:

$$E_m = \sum_{i=1}^n b_{im} EI_i y_m \quad (5)$$

上式中: E_m 为建筑业碳排放(单位: 万吨 CO_2), 计算方法来源于《建筑业碳排放系统计量方法》[18]; b_{im} 为建筑业对部门 i 的完全消耗系数; EI_i 为 i 部门的碳排放强度(单位: 吨/万元); y_m 为建筑业的最终使用量(单位: 万元)。

1) 弹性系数

敏感性分析是从定量分析的角度, 研究有关因素发生某种变化时, 对某一个或一组目标变量影响程度的不确定分析[19], 一般借助弹性系数来表达。在此将弹性系数定义为:

$$\delta_z = (\Delta obj_i / obj_i) / (\Delta z_i / z_i) \quad (6)$$

上式中, obj 是关键指标, z 是相关变量, Δ 是对应的变化量。

又采用误差传递理论的核心——Sherman-Morrison 公式[20] [21], 任何一个第 k 行第 l 列直接消耗系数 (a_{kl}) 的变化引起建筑业完全消耗系数 (b_{im}) 的变化 (Δb_{im}) 为

$$\Delta b_{im} = b_{ik} b_{im} \Delta a_{kl} / (1 - b_{ik} \Delta a_{kl}) \quad (7)$$

将式(7)代入式(5), 得到建筑业碳排放的变化量 (ΔE):

$$\Delta E_m = X_m \cdot \sum_{i=1}^n EI_i b_{ik} b_{im} \Delta a_{kl} / (1 - b_{ik} \Delta a_{kl}) \quad (8)$$

将式(8)代入式(6), 得到建筑业碳排放对直接消耗系数的弹性 (δ_α):

$$\delta_\alpha = \sum_{i=1}^n EI_i (a_{kl} b_{ik} b_{im} / (1 - b_{ik} \Delta a_{kl})) / \sum_{i=1}^n EI_i b_{im} \quad (9)$$

δ_α 说明直接消耗系数对建筑业碳排放的影响越大, 反之亦然。

2) 技术责任系数

再借助投入产出分析中部门的影响力系数和感知力系数[22]来定义部门对建筑业碳排放变化的技术责任系数和结构责任系数。部门 V 所在行的 δ_{α} 之和, 表示全体部门对部门 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)建筑业碳排放的变化幅度, 反映了部门 V 对建筑业碳排放变化的“影响力”大小。将部门 V 所在行的弹性系数之和定义为部门 V 对建筑业碳排放的技术责任系数(T_V):

$$T_V = \sum_{j=1}^n \delta_{Vj} \quad (10)$$

技术责任系数表示 V 部门碳排放的大小, 通过影响所有部门产品隐含碳排放来影响建筑业碳排放的程度高低。对技术责任系数越大的部门, 降低其生产碳排放, 将会大幅减少本部门通过其他部门投入到建筑业的碳排放。

3) 结构责任系数

部门 V 所在列的 δ_{α} 之和, 表示部门 V 对全体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)建筑业碳排放的变化幅度, 代表了部门 V “感知” 其他部门碳排放大小变化, 进而影响建筑业碳排放的程度高低。将部门 V 所在列的 δ_{α} 之和, 定义为部门 V 对建筑业碳排放的结构责任系数(S_V) [9]:

$$S_V = \sum_{i=1}^n \delta_{iV} \quad (11)$$

4) 对碳排放强度的弹性

由公式(5)、(6)可得, 建筑业碳排放对部门 V 的碳排放强度变化的弹性(δ_{EI}):

$$\delta_{EI} = b_{Vm} EI_V / \sum_{i=1}^n EI_i b_{im} \quad (12)$$

2.2. 数据来源

在本文中, 湖南省 2002、2007 和 2012 年投入产出表来自湖南省统计局公布相应三个年份的 42 部门投入产出表。能源数据则来自历年的《中国能源统计年鉴》中湖南能源统计平衡表和《湖南统计年鉴》。

2.3. 处理方法

由于湖南省 42 部门投入产出表与能源数据的产业部门分类不一致, 因而将 42 个部门归并为 28 个部门(表 1, 2002 年因缺少废品废料业而只有 27 部门)后, 再计算投入产出表中的直接消耗系数和完全消耗系数。根据 2002、2007 和 2012 年投入产出表构建出动态的 EIO-LCA 模型。

3. 实证结果分析

3.1. 建筑业与其他部门的碳排放关联性及其变化

为分析湖南省建筑业与其他部门的碳排放关联性及其变化, 根据前文的公式(1)、(2)计算建筑业与前向关联部门的碳排放完全消耗系数, 以及与后向关联部门的碳排放完全分配系数。前一个系数, 表示建筑业每增加 1 个单位产值需要前向关联部门产生的碳排放量。后一个系数, 表示建筑业每增加 1 个单位产值需向后向关联部门分配的碳排放量。如表 2 所示, 碳排放完全消耗系数和完全分配系数排前 5 位的部门和位次, 在 2002、2007 和 2012 年的变化都较大。就碳排放完全消耗系数而言, 除交通运输、仓储和邮政业, 批发、零售业和住宿、餐饮业外, 2002 年有金属制品业, 非金属矿采选业及其他矿采选业, 通用、专用设备制造业; 但 2007 年这三个部门均不在其中, 取代它们的是建筑业, 其他行业, 石油加工、炼焦及核燃料加工业; 到了 2012 年除了交通运输、仓储和邮政业与建筑业仍保留外, 取代它们的

又变成食品制造及烟草加工业，燃气生产和供应业。由此可见交通运输、仓储和邮政业的前向关联性较大且稳定，这可能与建材的物流能耗较高有关。就碳排放完全分配系数而言，除其他行业，通用、专用设备制造业是三个年份都有的部门外，2002年还有批发、零售业和住宿、餐饮业，其他制造业，交通运输设备制造业；但2007年，取代它们的是仪器仪表及文化办公用机械制造业，金属矿采选业，金属制品业；到了2012年取代它们的又变成电气机械及器材制造业，建筑业。由此可见其他行业与通用、专用设备制造业的后向关联性较大且稳定，这是由于建筑业需向这两个部门分配的能耗和碳排放量较多。建筑业作为基础设施部门，主要是作为固定资产投入，一般极少作为生产资料直接投入到其他部门之中。

Table 1. The 28 industries classification and numbering in Hunan Province
表 1. 湖南省 28 个行业部门分类与编号

编号	行业部门	编号	行业部门
1	农林牧渔业	15	通用、专用设备制造业
2	能源开采和洗选业	16	交通运输设备制造业
3	金属矿采选业	17	电气机械及器材制造业
4	非金属矿及其他矿采选业	18	通信设备、计算机及其他电子设备制造业
5	食品制造及烟草加工业	19	仪器仪表及文化办公用机械制造业
6	纺织业	20	工艺品及其他制造业
7	纺织服装鞋帽皮革羽绒及其制品业	21	废品废料(2002年缺少该行业部门)
8	木材加工及家具制造业	22	电力、热力的生产和供应业
9	造纸印刷及文教体育用品制造业	23	燃气生产和供应业
10	石油加工、炼焦及核燃料加工业	24	水的生产和供应业
11	化学工业	25	建筑业
12	非金属矿物制品业	26	交通运输、仓储和邮政
13	金属冶炼及压延加工业	27	批发、零售业和住宿、餐饮业
14	金属制品业	28	其他行业

Table 2. The top 5 sectors of completely consumption coefficient and fully distribution coefficient on construction sector's CO₂ emission in Hunan Province for 2002, 2007 and 2012 year

表 2. 2002、2007 和 2012 年湖南省碳排放完全消耗系数和分配系数排前 5 位的部门

年份	完全消耗系数排前 5 位的部门编号	完全分配系数排前 5 位的部门编号
2002	①26②15③14④25⑤4	①27②26③20④25⑤15
2007	①25②26③27④28⑤10	①28②15③19④3⑤14
2012	①25②26③5④23⑤4	①28②26③15④17⑤25

3.2. 建筑业与其他部门的碳排放波及性及其变化

为分析湖南省建筑业与其他部门的碳排放波及性及其变化，根据前文的公式(3)、(4)计算各部门碳排放影响力与感应力如表 3 所示。建筑业的碳排放影响度数值，表示建筑业每增加 1 个单位产值，将会导致国民经济其它部门排放相应个数值单位的能耗 CO₂。碳排放影响力系数如大于 1，则说明建筑业碳

排放的影响力居于湖南所有部门的平均水平以上,反之亦然。就影响度来说,从2002年的7.24剧降到2007年的1.51,又回升到2012年的3.90,在28个部门中的排位却从第16到降到第14,再降到第11,呈逐年下降之势。就影响力系数来说,从2002年的0.98增加到2007年的1.02,再增加到2012年的1.04,呈逐年上升之势,这表明其从处于平均水平以下增长到平均水平以上,因此需要进一步降低建筑业的碳排放影响度及影响力系数,减少对其它部门的间接能耗和CO₂排放,提升建筑业的碳核心竞争力。建筑业的碳排放感应度数值,表示国民经济其它各部门平均每增加1个单位的产值,将会促使建筑业排放相应个数值单位的能耗CO₂。碳排放感应力系数如小于1,则说明建筑业的碳排放感应能力在所有部门中低于平均水平,反之亦然。就感应度而言,从2002年的3.02剧降到2007年的0.43,又回升到2012年的0.87,在所有部门中的排位却从第14上升到第23,2012年保持在第23,呈较快上升之势。就感应力系数而言,从2002年的0.41减少到2007年的0.29,再减少到2012年的0.24,呈逐年下降之势,这反映湖南省国民经济其它部门的蓬勃发展,对建筑业碳排放的拉动作用并不特别显著,且呈递减之势。究其原因主要在于建筑业主要作为固定资产投入部门,并不能作为中间生产资料而投入其它部门的生产之中。

Table 3. The influence and sensitivity of construction sector's CO₂ emission in Hunan Province for 2002, 2007 and 2012 year

表 3. 2002、2007 和 2012 年湖南省建筑业碳排放的影响力与感应力

年份	建筑业碳排放的影响力			建筑业碳排放的波及性		
	影响度	排位	影响力系数	感应度	排位	感应力系数
2002	7.24	16	0.98	3.02	14	0.41
2007	1.51	14	1.02	0.43	23	0.29
2012	3.90	11	1.06	0.87	23	0.24

3.3. 建筑业碳排放的敏感性及其变化

3.3.1. 技术责任系数与结构责任系数及其变化

根据前文的公式(10)、(11)计算各部门对建筑业碳排放的技术责任系数和结构责任系数如表4所示。就技术责任系数来看,2002年排前5位的部门依次是:金属冶炼及压延加工业(0.4298),石油加工、炼焦及核燃料加工业(0.3306),电力、热力的生产和供应业(0.1296),非金属矿物制品业(0.1132),化学工业(0.0718);2007年排前5位的部门依次是:金属冶炼及压延加工业(0.3334),非金属矿物制品业(0.2844),石油加工、炼焦及核燃料加工业(0.1192),能源开采和洗选业(0.0959),化学工业(0.0484);2012年排前5位的部门依次是:石油加工、炼焦及核燃料加工业(0.3895),金属冶炼及压延加工业(0.2901),非金属矿物制品业(0.1995),电力、热力的生产和供应业(0.1579),能源开采和洗选业(0.1468)。总之,三个年份技术责任系数较大的都集中在能源开采和洗选业,石油加工、炼焦及核燃料加工业,化学工业,非金属矿物制品业,金属冶炼及压延加工业,电力、热力的生产和供应业等,大都属于资源开采及其加工部门,只是排位有所变动,这些部门应尽量降低其生产过程中的碳排放。就结构责任系数而言,2002年排前5位的部门依次是:能源开采和洗选业(0.3341),金属冶炼及压延加工业(0.1407)、电力、热力的生产和供应业(0.1145),金属矿采选业(0.1058),交通运输、仓储和邮政(0.0889);2007年排前5位的部门依次是:能源开采洗选业(0.2077),非金属矿物制品业(0.1685),金属冶炼及压延加工业(0.1080),金属矿采选业(0.0941),电力、热力的生产和供应业(0.0856);2012年排前5位的部门依次是:石油加工、炼焦及核燃料加工业(0.3239),能源开采和洗选业(0.2598),批发、零售业和住宿、餐饮业(0.1280),金属冶炼及压延加工业(0.1103),金属矿采选业(0.0912)。总之,三个年份结构责任系数较大的也都集中在能源开采和

洗选业, 金属矿采选业, 石油加工、炼焦及核燃料加工业, 非金属矿物制品业, 金属冶炼及压延加工业, 电力、热力的生产和供应业等, 大也都属于资源开采及其加工部门, 只是排位有所变动。因而在建筑业全生命周期过程, 应尽可能降低对这些部门的产品或服务需求。

Table 4. The technical responsibility coefficients (T_V) and structural responsibility coefficients (S_V) of all sectors in Hunan Province for 2002, 2007 and 2012 year

表 4. 2002、2007 和 2012 年湖南省各部门技术责任系数(T_V)和结构责任系数(S_V)

编号	T_V			S_V			编号	T_V			S_V		
	2002	2007	2012	2002	2007	2012		2002	2007	2012	2002	2007	2012
1	0.0015	0.0013	0.0019	0.0080	0.0080	0.0096	15	0.0051	0.0051	0.0023	0.0233	0.0231	0.0118
2	0.0283	0.0959	0.1468	0.3341	0.2077	0.2598	16	0.0026	0.0016	0.0003	0.0078	0.0044	0.0012
3	0.0076	0.0116	0.0130	0.1058	0.0941	0.0912	17	0.0012	0.0019	0.0047	0.0080	0.0078	0.0142
4	0.0301	0.0126	0.0244	0.0137	0.0166	0.0362	18	0.0009	0.0005	0.0005	0.0025	0.0013	0.0012
5	0.0010	0.0006	0.0011	0.0028	0.0011	0.0022	19	0.0004	0.0003	0.0003	0.0058	0.0028	0.0009
6	0.0019	0.0011	0.0012	0.0036	0.0023	0.0019	20	0.0001	0.0003	0.0004	0.0099	0.0031	0.0006
7	0.0003	0.0005	0.0009	0.0030	0.0041	0.0021	21		0.0045	0.0012		0.0321	0.0132
8	0.0026	0.0042	0.0046	0.0061	0.0110	0.0059	22	0.1296	0.0415	0.1579	0.1145	0.0856	0.0803
9	0.0168	0.0063	0.0099	0.0095	0.0100	0.0099	23	0.0009	0.0001	0.0001	0.0018	0.0019	0.0002
10	0.3306	0.1192	0.3895	0.0635	0.0446	0.3239	24	0.0006	0.0005	0.0008	0.0022	0.0010	0.0009
11	0.0718	0.0484	0.0330	0.0580	0.0560	0.0476	25	0.0002	0.0006	0.0008	0.0044	0.0011	0.0009
12	0.1135	0.2844	0.1995	0.0366	0.1685	0.0592	26	0.0238	0.0125	0.0175	0.0889	0.0344	0.0392
13	0.4298	0.3334	0.2901	0.1407	0.1020	0.1103	27	0.0028	0.0022	0.0039	0.0726	0.0291	0.1280
14	0.0041	0.0064	0.0067	0.0154	0.0382	0.0073	28	0.0001	0.0001	0.0016	0.0657	0.0057	0.0555

3.3.2. 对部门碳排放强度的弹性及其变化

根据前文的公式(12)计算出建筑业碳排放对各部门碳排放强度的弹性(δ_{EI})如表 5 所示。2002 年弹性排前 5 位的部门依次是: 金属冶炼及压延加工业(0.2992), 石油加工、炼焦及核燃料加工业(0.2098), 电力、热力的生产和供应业(0.1393), 非金属矿物制品业(0.1063), 能源开采和洗选业(0.0842); 2007 年弹性排前 5 位的部门依次是: 非金属矿物制品业(0.2435), 金属冶炼及压延加工业(0.2036), 电力、热力的生产和供应业(0.1721), 能源开采和洗选业(0.1444), 石油加工、炼焦及核燃料加工业(0.0824); 2012 年弹性排前 5 位的部门依次是: 能源开采和洗选业(0.2064), 金属冶炼及压延加工业(0.1976), 非金属矿物制品业(0.1620), 石油加工、炼焦及核燃料加工业(0.1591), 电力、热力的生产和供应业(0.1327)。总之, 三个年份建筑业碳排放对各部门碳排放强度的弹性较大部分集中在能源开采和洗选业、石油加工、炼焦及核燃料加工业, 非金属矿物制品业, 金属冶炼及压延加工业, 电力、热力的生产和供应业 5 大部门, 与技术责任系数和结构责任系数较大的部门也基本一致, 都属于资源开采及其加工部门, 只是排位有所变动。这些部门同时具有碳排放强度高、建筑业对其总需求大等特点, 因此降低这些部门的碳排放, 对控制建筑业碳排放具有较为明显的效果。

Table 5. The elasticity of construction sector's CO₂ emission regarding CO₂ emission intensity of all sectors in Hunan Province for 2002, 2007 and 2012 year**表 5.** 2002、2007 和 2012 年湖南省建筑业碳排放对各部门碳排放强度的弹性

编号	δ_{EI}			编号	δ_{EI}		
	2002	2007	2012		2002	2007	2012
1	0.0047	0.0040	0.0053	15	0.0017	0.0039	0.0017
2	0.0842	0.1444	0.2064	16	0.0015	0.0013	0.0002
3	0.0120	0.0140	0.0135	17	0.0007	0.0017	0.0031
4	0.0176	0.0196	0.0228	18	0.0005	0.0005	0.0007
5	0.0008	0.0008	0.0012	19	0.0003	0.0003	0.0003
6	0.0013	0.0011	0.0010	20	0.0001	0.0003	0.0004
7	0.0002	0.0005	0.0007	21		0.0021	0.0026
8	0.0019	0.0053	0.0035	22	0.1393	0.1721	0.1327
9	0.0125	0.0068	0.0076	23	0.0026	0.0001	0.0001
10	0.2098	0.0824	0.1591	24	0.0016	0.0014	0.0012
11	0.0543	0.0374	0.0241	25	0.0001	0.0005	0.0006
12	0.1063	0.2435	0.1620	26	0.0395	0.0346	0.0286
13	0.2992	0.2036	0.1976	27	0.0035	0.0115	0.0126
14	0.0028	0.0060	0.0058	28	0.0009	0.0004	0.0048

4. 结论与讨论

本文运用动态的 EIO-LCA 模型，以 2002、2007 和 2012 年湖南省投入产出表和部门碳排放强度为基础，分析了湖南省建筑业与其它各部门碳排放的关联性、波及性及敏感性，探讨了建筑业碳排放与其关联部门的关联性、与国民经济的波及性、对部门碳排放强度的弹性，及其变化特点，结论如下。

4.1. 结论

1) 建筑业属于典型的“高影响、高排放”部门，交通运输、仓储和邮政业等的前向关联性较大且稳定，其他行业与通用、专用设备制造业等的后向关联性较大且稳定。

2) 建筑业碳排放的影响力系数呈逐年上升之势，且居于所有部门的平均水平以上，需减少对其其它部门的间接碳排放；感应力系数却呈逐年下降之势，建筑业主要作为固定资产投资到其它部门生产之中，而其他部门对建筑业碳排放的拉动作用不显著，其蓬勃发展不会带来建筑业的巨大碳排放量。

3) 三个年份建筑业碳排放的技术责任系数、结构责任系数、及对各部门碳排放强度弹性的较大部门，集中在能源开采和洗选业，石油加工、炼焦及核燃料加工业，非金属矿物制品业，金属冶炼及压延加工业，电力、热力的生产和供应业，它们多属于资源开采及其加工部门，因而一是应降低这些部门自身生产过程中的碳排放，二来建筑业也要尽量减少对这些部门产品或服务的需求。

4.2. 讨论

值得注意的是，由于数据可得性和文章篇幅所限，本研究未能就湖南省 2002、2007 和 2012 年 135 部门的投入产出表进行计算和分析，也没探究直接消耗系数变化对建筑业碳排放的影响，这在一定程度上影响了结论的细致性、深入性和精准性，当是后续研究的重点内容。

基金项目

湖南省哲学社会科学基金项目《基于 LCA 的湖南省建筑碳足迹核算及减碳策略研究》(17YBA129)。

参考文献

- [1] Cabezalf, L.F., Rinconl, L., Vilarunov, V., Pérez, G. and Castell, A. (2014) Life Cycle Assessment (LCA) and Life Cycle Energy Analysis (LCEA) of Buildings and the Building Sector: A Review Article. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, **29**, 394-416. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.08.037>
- [2] Onat, N.C., Kucukvar, M. and Tatari, O. (2014) Scope-Based Carbon Footprint Analysis of U.S. Residential and Commercial Buildings: An Input-Output Hybrid Life Cycle Assessment approach. *Building and Environment*, No. 72, 53-62. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2013.10.009>
- [3] Hawkins, T., Hendrickson, C., Higgins, C., Scott Matthews, H. and Suh, S. (2007) A Mixed-Unit Input-Output Model for Environmental Life-Cycle Assessment and Material Flow Analysis. *Environmental Science & Technology*, **41**, 1024-1031. <https://doi.org/10.1021/es060871u>
- [4] Huang, L. and Bohne, R.A. (2012) Embodied Air Emissions in Norway's Construction Sector: Input-Output Analysis. *Building Research and Information*, **40**, 581-591. <https://doi.org/10.1080/09613218.2012.711993>
- [5] Acquaye, A.A. and Duffy, A.P. (2010) Input-Output Analysis of Irish Construction Sector Greenhouse Gas Emissions. *Building and Environment*, **45**, 784-791. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2009.08.022>
- [6] 刘立秋, 马家军, 孙鹏程. 基于投入产出方法的中国建筑业完全能耗影响因素分析[J]. 电子科技大学学报(社科版), 2015, 17(2): 41-45.
- [7] 刘秀丽, 汪寿阳, 杨翠红, 陈锡康, 谢刚, 李慧勇. 基于投入产出分析的建筑节能经济——环境影响测算模型的研究和应用[J]. 系统科学与数学, 2010, 30(1): 12-21.
- [8] 张智慧, 刘睿劼. 基于投入产出分析的建筑业碳排放核算[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2013, 53(1): 53-57.
- [9] 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): 297-300.
- [10] 冯祥玉, 白宏涛, 徐鹤. 中国建筑业隐含碳排放估算及来源解析[J]. 未来与发展, 2018, 42(7): 42-50.
- [11] 乐保林, 徐少君. 中国建筑业碳排放空间关联网络结构及其影响因素分析[J/OL]. 浙江理工大学学报(社会科学版), 2022: 1-9. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/33.1338.ts.20220505.1859.002.html>, 2022-05-07.
- [12] 王幼松, 石惠萌, 闫辉, 黄文炜, 郝志彪. 基于 SDM 的中国建筑业碳排放强度分布及空间效应分析[J]. 工程管理学报, 2021, 35(5): 1-6.
- [13] 张广泰, 贾楠. 中国建筑业碳排放效率测度与空间关联特征[J]. 科技管理研究, 2019, 39(21): 236-242.
- [14] 宋金昭, 陈策, 王晓平, 胡振. 基于超效率三阶段 DEA 模型的建筑业碳排放研究[J]. 环境科学与技术, 2019, 42(1): 193-200.
- [15] 张旺. 基于 PB-LCA 的湖南省建筑碳足迹测算及其机理分析[J]. 科技导报, 2019, 37(22):133-142.
- [16] Leontief, W. (1970) Environmental Repercussions and the Economic Structure: An Input-Output Approach. *Review of Economics and Statistics*, **52**, 262-271. <https://doi.org/10.2307/1926294>
- [17] Alcantara, V., Tarancon, M. and Rio, P. (2013) Assessing the Technological Responsibility of Productive Structures in Electricity Consumption. *Energy Economics*, **40**, 457-467. <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2013.07.012>
- [18] 陈国谦. 建筑碳排放系统计量方法[M]. 北京: 新华出版社, 2010.
- [19] Saltelli, A., Chan, K. and Marian, S.E. (2000) Sensitivity Analysis. Vol. 134, Wiley, New York.
- [20] Tarancon, M., Moran, T. and del Río González, P. (2007) A Combined Input-Output and Sensitivity Analysis Approach to Analyze Sector Linkages and CO₂ Emissions. *Energy Economics*, **29**, 578-597. <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2006.02.004>
- [21] 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.
- [22] Wu, X. and Zhang, Z.-H. (2005) Input-Output Analysis of the Chinese Construction Sector. *Construction Management and Economics*, **23**, 905-912. <https://doi.org/10.1080/01446190500183974>