引用格式：牛荻涛，慕锦程，吕瑶. 陕西省工业建筑全生命周期碳排放核算研究[J]. 工业建筑，2026，56(1)：91-105. NIU Ditao，MU Jincheng，LYU Yao. Research on Carbon Emission Accounting for the Whole Life Cycle of Industrial Buildings in Shaanxi Province[J]. Industrial Construction，2026，56(1)：91-105 (in Chinese). DOI：10.3724/j.gyjzG25030102

陕西省工业建筑全生命周期碳排放核算研究*

牛荻涛[1,2]　慕锦程[2]　吕　瑶[2,3]

（1. 西安建筑科技大学绿色建筑全国重点实验室，西安　710055；2. 西安建筑科技大学土木工程学院，西安　710055；
3. 北京科技大学绿色低碳钢铁冶金全国重点实验室，北京　100083）

摘　要　近年来，我国大力推进新型工业化进程，在工业建筑的建造和运行中产生了大量的CO_2。为了实现“双碳”目标，对工业建筑碳排放核算方法进行了研究，提出了三类建筑面积拆分方法，基于全生命周期理论建立了省域层面建筑碳排放核算模型，选取陕西省工业建筑为研究对象，对全生命周期各阶段碳排放量进行计算。结果表明：2004—2021年，陕西省工业建筑碳排放量呈上升趋势，至2021年达到了1004.23万t，其中材料生产阶段和建筑运行阶段的碳排放量占比最大；钢材和水泥生产是材料生产阶段碳排放量主要的构成部分，所占比例均约为39%；电力、原煤、热力和天然气的消耗是建筑运行阶段碳排放的主要来源，其中电力贡献最高，占建筑运行阶段碳排放量的38.99%。

关键词　全生命周期；工业建筑；面积拆分；碳排放核算

Research on Carbon Emission Accounting for the Whole Life Cycle of Industrial Buildings in Shaanxi Province

NIU Ditao[1,2]　MU Jincheng[2]　LYU Yao[2,3]

（1. *State Key Laboratory of Green Building，Xi'an University of Architecture and Technology，Xi'an* 710055，*China*；2. *School of Civil Engineering，Xi'an University of Architecture and Technology，Xi'an* 710055，*China*；3. *State Key Laboratory of Advanced Metallurgy，University of Science and Technology Beijing，Beijing* 100083，*China*）

Abstract：In recent years，China has vigorously promoted the new industrialization process，and the construction and operation of industrial buildings have generated a large amount of carbon dioxide. In order to achieve the “dual carbon” goals，the research on the carbon emission accounting method for industrial buildings has been carried out，and three types of building-area-splitting methods have been proposed. Based on the whole life cycle theory，a provincial-level building carbon emission accounting model was established. Taking the industrial buildings in Shaanxi Province as the research object，the carbon emissions at each stage of the life cycle assessment were calculated. The results showed that from 2004 to 2021，the carbon emissions of industrial buildings in Shaanxi Province showed an upward trend，reaching 10.0423 million tons in 2021；among them，the carbon emissions at the material production stage and the building operational stage accounted for the largest proportion. The production of steel and cement was the main component of carbon emissions at the material production stage，each accounting for approximately 39%；the consumption of electricity，raw coal，heat，and natural gas was the main source of carbon emissions at the building operation stage，among which electricity contributed the most，accounting for 38.99% of the carbon emissions at the building operational stage.

Keywords：whole life cycle；industrial buildings；area splitting；carbon emissions accounting

* 国家自然科学基金专项项目（52341803）；绿色低碳钢铁冶金全国重点实验室开放基金项目（KF24-10）。

第一作者：牛荻涛，教授，博士后导师，主要从事混凝土结构低碳设计、工程结构耐久性、既有结构性能评估与提升方面研究，niuditao@163.com。

通信作者：吕瑶，讲师，主要从事混凝土结构低碳设计、工业建筑混凝土结构耐久性方面研究，lvyaozuibangde@163.com。

收稿日期：2025-03-01

© 2026 工业建筑

0 引 言

随着工业化和城市化的快速发展,CO_2排放量逐年显著增大。大量CO_2进入大气,造成了温室效应从而导致气候变暖,由此引发的海平面上升、冰川融化、极端天气增多、原生态系统内生物多样性锐减等问题正严重威胁着人类社会的生存与发展。建筑业是我国国民经济的重要支柱,也是我国能源消耗的三大主要来源之一。建筑作为人们工作和生活的主要空间载体,建材的生产运输、建筑的建造以及建筑的运行均会产生大量CO_2。根据《2022年全球建筑和建造业状况报告》,2021年全球建筑物运营所产生的CO_2约为100亿t,占全球排放量的37%,排放量达到了历史最高水平。

早在20世纪70年代至80年代初期,环保组织开始关注气候变化和碳排放问题,但由于当时缺乏标准的计算方法和基础数据,碳排放核算边界不清晰、结果不准确[1]。20世纪80年代末至90年代初期,国际组织开始探索碳排放核算的标准化方法。1992年,联合国气候变化框架公约(UNFCCC)成立,并制定了《联合国气候变化框架公约》。随后还发布了一系列的技术指南,旨在帮助各国制定并实施碳排放核算的标准。目前世界上建筑碳排放核算标准主要建立在生命周期评价方法(Life Cycle Assessment,LCA)的基础上。LCA方法将建筑的生命周期碳排放分为从材料生产、建筑运输施工、建筑的运行维护以及拆解回收共计四个阶段。

发展至今,碳排放核算方法主要有四种:排放因子法[2]、物料平衡法[3]、实测法[4-5]和大数据计算法[6]。排放因子法是碳排放核算应用最广泛的方法,是以投入的能源、材料用量与排放因子的乘积计算碳排放量,优点是简单明确、易于理解,缺点是碳排放因子受到技术水平、工艺过程等影响导致不确定性较大。物料平衡法的原理是物质守恒定律,由输入碳含量减去非CO_2的碳输出量计算CO_2排放量,具有较强的科学性及实施有效性,但物料跟踪困难,详细数据获取难度大、测量成本高[7]。实测法是基于排放源实测基础数据得到碳排放量,优点是中间环节少,结果准确,缺点是消耗人力和物力较大,成本较高。大数据计算法是基于人工智能方法或统计方法,通过算法模型构建碳排放与其他变量的关联关系,利用分析模型计算碳排放数据,但采用遥感、灯光数据可能会导致核算结果误差过大[8]。

我国建筑物主要分居住建筑、公共建筑和工业建筑,目前建筑领域碳排放核算的研究主要聚焦于居住建筑与公共建筑,缺乏针对工业建筑碳排放的研究。Wang等[9]基于碳排放因子法,建立了大型公共建筑物化阶段碳排放核算模型,提出减排率(ERR)作为定量评估大型公共建筑物化阶段碳排放的指标。Alaux等[10]开发了奥地利公有办公建筑的建筑存量模型,该模型预测了从新建、翻修和拆除到2050年的运营和隐含温室气体排放。研究结果表明,即使在建筑运营中逐步淘汰化石燃料的使用,在2050年仍超过奥地利公共办公建筑的可用碳预算,较高的更新改造率可以通过降低能源需求促进化石燃料的淘汰。张瀚等[11]选取天津市某既有居住建筑作为实验对象,通过水平正交试验法研究了外墙传热系数、外窗传热系数、屋面传热系数、地面传热系数、使用年限和采暖设备能效比6种影响因素对建筑运行阶段和全生命周期内碳排放的影响,结果表明使用年限是影响碳排放的最主要因素。

此外,现有研究多以特定片区或单体建筑为对象开展碳排放核算,面向省域层面的碳排放核算数据多聚焦于城市运行碳排放。然而,包含隐含碳排放的建筑全生命周期的综合数据分析较少。Wang等[12]基于城市统计数据和省级能源平衡表构建了中国362个城市建筑运行碳排放数据库。Li等[13]以中国福州市为例,对居住建筑照明和电器用电的碳排放进行了综合核算,结果表明,人均GDP、城镇化率和常住人口是碳排放的主要驱动因素,人均GDP每增加1%,城市碳排放增加0.66%。周小迦[14]考虑了建筑物电力、燃气能耗统计数据、城镇开发边界、兴趣点以及规划数据,对城市建筑运行碳排放的分布和强度进行精细化研究和时空分析。

我国经济发展迅速,工业产品需求加剧,工业建筑面积不断增大。工业建筑作为建筑产业的重要分支,具有能耗高的特点。但是长期以来,与居住建筑和公共建筑相比,工业建筑碳排放重视程度不足,工业建筑的节能减排已刻不容缓。陕西省作为“一带一路”的起点,同时也是西北地区的工业大省,其工业建筑的碳排放尤为突出,亟需开展陕西省工业建筑全生命周期碳排放核算。省域工业建筑碳排放核算不仅是政策制定与监管的重要工具,更是企业降本增效、行业技术升级以及国际贸易合规的关键支撑。其应用场景贯穿从宏观规划到微观管理、从技术研发到市场机制的全链

条，成为推动区域绿色低碳高质量发展的核心抓手。通过对省域内工业建筑碳排放总量、强度及分布特征的核算，可以精准识别高排放区域，为制定差异化的减排政策和优化能源结构提供科学依据。同时，这一核算体系为绿色建筑认证与评价提供了重要的数据支撑，助力推动行业技术革新与标准建设，促进低碳技术的研发与应用。基于省域数据，能够明确技术攻关方向，推动建筑全生命周期碳计量的发展，为实现区域绿色低碳转型奠定坚实基础。

本文以陕西省工业建筑为研究对象，建立年末实有工业建筑面积计算模型，采用碳排放因子法，提出省域层面工业建筑全生命周期碳排放核算方法，分析工业建筑各阶段碳排放占比，揭示原材料用量和能源消耗对碳排放的影响。本研究提出了省域层面三类建筑面积的拆分方法，为省域层面精确统计三类建筑面积提供新的思路，对工业建筑全生命周期各阶段提出了减碳降碳策略，为推动陕西省建筑全生命周期低碳评价提供重要支撑，为实现我国“双碳”战略目标奠定基础。

1　工业建筑面积拆分方法

我国城市建筑面积数据如表1所示[15]。可知，1998—2022，《中国城市建设统计年鉴》中有各省份房屋建筑面积、居住建筑面积、公共建筑用地面积和工业建筑用地面积，而从2007年开始，该统计年鉴不再统计房屋建筑面积和居住建筑面积。《中国建筑业统计年鉴》中有各省份公共建筑竣工面积和工业建筑竣工面积。各类统计年鉴均缺乏年末实有工业建筑面积，若采用年末实有房屋建筑面积（S_1），即工业建筑、住宅建筑与公共建筑三类建筑面积之和，则导致碳排放数据偏大，无法实现省域层面工业建筑碳排放精准核算。因此，需要对年末实有房屋建筑面积（S_1）进行拆解分析，得到1998—2022年陕西省年末实有工业建筑面积。

基于那威[16-17]等提出的基于泰勒级数神经网络的方法，对我国公共建筑、居住建筑以及工业建筑面积进行拆分。需要对以下几种建筑面积相关数据进行分析，数据包括：年末实有房屋建筑面积（S_1）、年末实有居住建筑面积（S_2）、公共建筑竣工面积（S_3）、工业建筑竣工面积（S_4）、公共建筑用地面积（S_5）、工业建筑用地面积（S_6）。上述所有数据均来自各类统计年鉴，其中与工业建筑面积相关的数据是S_1和S_2，分析可知二者之差是年末实有公共建筑面积（S_p）与年末实有工业建筑面积（S_i）之和，由于统计年鉴中只有1998—2006年的S_1和S_2数据，通过进一步分析数据S_3、S_4、S_5、S_6数据之间的关系，分别构建1998—2006年和2007—2021年的年末实有工业建筑面积计算模型。拆分过程分为两步，具体过程如下：

表1　工业建筑相关数据来源

Table 1　Sources of data on industrial buildings

数据名称	数据来源	数据详情
年末实有房屋建筑面积（S_1）	1998—2006年《中国城市建设统计年鉴》[15]	该年度的居住建筑、公共建筑和工业建筑面积之和
年末实有居住建筑面积（S_2）	1998—2006年《中国城市建设统计年鉴》	该年度居住建筑面积
公共建筑竣工面积（S_3）	1998—2022年《中国建筑业统计年鉴》	该年度公共建筑竣工面积
工业建筑竣工面积（S_4）	1998—2022年《中国建筑业统计年鉴》	该年度工业建筑竣工面积
公共建筑用地面积（S_5）	1998—2022年《中国城市建设统计年鉴》	该年度公共建筑用地面积
工业建筑用地面积（S_6）	1998—2022年《中国城市建设统计年鉴》	该年度工业建筑用地面积

1）1998—2014年陕西省工业建筑面积。

查找《中国城市建设统计年鉴》和《中国建筑业统计年鉴》中的相关数据，将数据S_1与S_2二者做差得到S_p与S_i之和，然后对上述数据进行相关性分析，发现每年度公共建筑、工业建筑竣工面积与用地增量面积具有相关性。因此，可以将每年公共建筑竣工面积$S_{p,c}$与工业建筑竣工面积$S_{i,c}$之比即$S_{p,c}/S_{i,c}$作为因变量，以公共建筑用地面积增量$\Delta S_{p,o}$与工业建筑用地增量$\Delta S_{i,o}$之比即$\Delta S_{p,o}/\Delta S_{i,o}$作为自变量构建函数模型，通过SPSS软件分析得出函数模型为：

$$\frac{S_{p,c}}{S_{i,c}} = a + bx + cx^2 + dx^3 + fe^x + ge^2x + he^3x + ie^4x + jxe^x + kxe^2x \tag{1}$$

式中：x为自变量$\Delta S_{p,o}/\Delta S_{i,o}$；$a$，$b$，$c$，$d$，$f$，$g$，$h$，$i$，$j$，$k$均为常数。

将1998—2014年公共建筑和工业建筑竣工面积、用地面积增量数据代入式（1）中，采用SPSS非线

性拟合求解出函数模型中的各项系数。拟合结果如表2所示。

表2　函数模型参数估计值

Table 2　Parameter estimates of the function model

参数	参数估计值
a	−3808.806
b	−2107.905
c	−441.163
d	−34.733
f	2429.7
g	1350.731
h	31.96
i	−0.482
j	−2622.113
k	−497.516

分析模型计算偏差如表3所示。由于2001年起房屋建筑面积统计范围为设市城市和县城,报表制度为城市、县城建设统计报表制度。统计范围发生了较大变化,导致了城市房屋建筑面积数据突增,拟合值出现过大偏差,其余年份拟合值偏差均较小,绝大部分年份拟合值相对偏差在10%以内,证明函数模型的准确性较好。

与上述公共建筑、工业建筑竣工面积与用地面积增量的相关性类似,各年度公共建筑、工业建筑面积与用地面积也具有同样的相关性,将年度公共建筑面积与工业建筑面积之比S_p/S_c作为因变量,以公共建筑用地面积与工业建筑用地面积之比$S_{p,o}/S_{i,o}$作为自变量构建函数,即:

$$\frac{S_p}{S_c} = a + bx + cx^2 + dx^3 + fe^x + ge^2x + he^3x + ie^4x + jxe^x + kxe^2x \quad (2a)$$

$$S_p + S_c = S_1 - S_2 \quad (2b)$$

式中:x为自变量$S_{p,o}/S_{i,o}$。

将1998—2006年公共建筑、工业建筑用地面积数据代入式(2)中,得到每年公共建筑面积与工业建筑面积比值S_p/S_c,S_1与S_2数据之差为公共建筑面积与工业建筑面积之和,将两式联立求解,得到1998—2006年年末实有公共建筑面积和年末实有工业建筑面积,计算结果见表4。

表3　1998—2014年各年份拟合值偏差分析

Table 3　Analysis of the deviation between fitted and actual values (1998–2014)

年份	S_p/S_i	$\Delta S_{p,o}/\Delta S_{i,o}$	拟合值	偏差	相对偏差/%
1998	2.81	0.732	2.61	−0.21	−7.4
1999	3.20	−0.005	3.12	−0.09	−2.7
2000	5.91	1.382	5.88	−0.03	−0.4
2001	4.52	2.940	−24.13	−28.65	−633.5
2002	4.26	−3.317	4.25	−0.01	−0.3
2003	3.31	0.868	3.40	0.09	2.7
2004	5.17	1.919	4.78	−0.40	−7.6
2005	3.65	−0.310	3.58	−0.06	−1.8
2006	2.31	0.665	2.35	0.04	1.8
2007	2.34	0.261	2.42	0.08	3.5
2008	1.96	0.366	2.20	0.24	12.5
2009	2.90	−0.107	3.34	0.44	15.1
2010	2.21	0.353	2.22	0.01	0.5
2011	1.51	−2.847	1.50	−0.01	−0.5
2012	3.32	−0.747	3.28	−0.04	−1.2
2013	2.74	−1.051	2.75	0.02	0.6
2014	3.36	0.099	2.85	−0.51	−15.3

表4　1998—2006年陕西省公共建筑面积和工业建筑面积

Table 4　Public and industrial building areas in Shaanxi Province (1998–2006)　10^4 m^2

年份	公共建筑面积	工业建筑面积
1998	4443.21	2110.79
1999	4536.53	2167.47
2000	4603.77	2191.23
2001	6772.79	3108.21
2002	5636.82	2402.73
2003	6274.74	2597.16
2004	8173.77	2586.63
2005	8456.85	2544.95
2006	9851.68	3101.92

2) 2007—2021年陕西省工业建筑面积。

根据1998—2006年工业建筑面积以及工业建筑竣工面积数据,可以得到各年份工业建筑面积以及工业建筑竣工面积累加值,通过数据分析得到各年度工业建筑面积与工业建筑竣工面积累加值的变化趋势相似,具有很强的相关性,如图1所示。由于2001年数据统计范围发生了变化,导致了城市建筑面积数据突增,拟合值偏差过大,剔除该年的误差数据后,相关性更为显著。

以工业建筑面积S_c为因变量,工业建筑竣工面积累计值S_{ic}为自变量,应用SPSS、ORIGIN等软件进行相关性分析,建立函数模型,见式(3)。

$$S_c = a_1 + b_1 \lg S_{ic} + c_1 \lg^2 S_{ic} + d_1 \lg^3 S_{ic} \quad (3)$$

式中:a_1,b_1,c_1,d_1为常数。

将1998—2006年工业建筑面积和工业建筑竣工面积累加值分别代入式(3),求解待定系数,结果如表5所示。

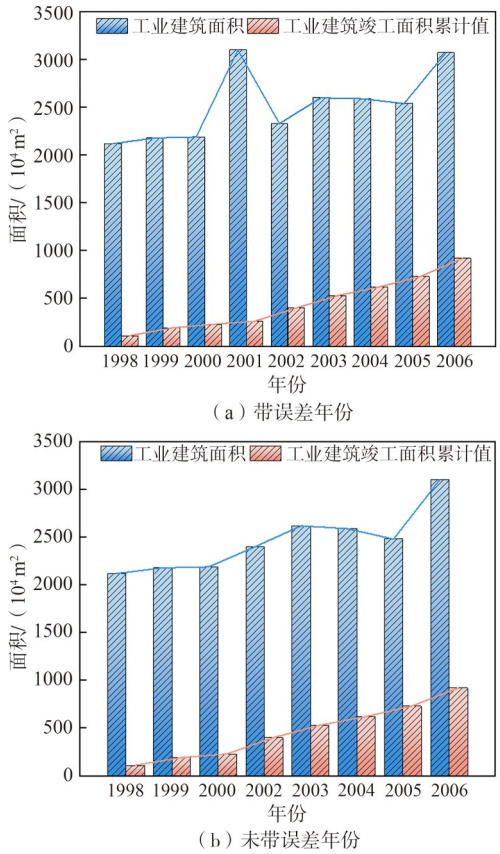


图 1　工业建筑面积与竣工面积累加值趋势示意

Fig. 1　Trends of cumulative industrial building and completed areas

表 5　函数模型参数估计值

Table 5　Parameter estimates of the function model

参数	参数估计值
a_1	−9907.15
b_1	16181.57
c_1	−7333.22
d_1	1125.8

模型计算偏差分析结果如表 6 所示。同样由于 2001 年统计范围发生了较大的变化，导致 2001 年建筑面积数据出现异常，数值出现较大偏差，其余年份相对偏差均小于 10%，证明模型准确性较好。

将 2007—2021 年工业建筑竣工面积累计值分别代入函数模型中，得到陕西省 2007—2021 年年末实有工业建筑面积。根据上述方法同样可以计算出陕西省 2007—2021 年年末实有公共建筑面积以及年末实有居住建筑面积。将其与 1998—2006 年数据合并，得到 1998—2021 年公共建筑面积、工业建筑面积以及居住建筑面积，结果如表 7 所示。

2　LCA 阶段划分与核算方法

2.1　建筑全生命周期划分

建筑全生命周期是指建筑物从开始设计直到最后拆除的全过程，国内外学者对于全生命周期阶段的划分进行了研究。目前欧盟国家建筑领域的生命周期评估已较为成熟，并已被纳入《可持续发展标准建筑》《建筑产品法规》以及 BREEAM、LEED 等多项可持续建筑认证计划[18-20]中。欧洲标准 DS/

表 6　1998—2006 年工业建筑面积模型的计算偏差

Table 6　Calculation deviations of the industrial building area model (1998–2006)

年份	工业建筑竣工面积累加值/（10^4 m^2）	工业建筑面积/（10^4 m^2）	计算值/（10^4 m^2）	偏差/（10^4 m^2）	相对偏差/%
1998	84.3	2110.79	2099.33	−11.46	−0.54
1999	159.7	2167.47	2187.95	20.48	0.94
2000	206	2191.23	2219.85	28.62	1.31
2001	282	3108.21	2276.39	−831.82	−26.76
2002	379.3	2402.73	2361.63	−41.10	−1.71
2003	506.5	2597.16	2488.67	−108.49	−4.18
2004	600.4	2586.63	2589.06	2.42	0.09
2005	739.9	2544.95	2743.28	198.34	7.79
2006	980.2	3101.92	3013.11	−88.81	−2.86

表 7　陕西省 1998—2021 年公共建筑、工业建筑以及居住建筑面积

Table 7　Shaanxi Province public buildings, industrial buildings and residential building area (1998–2021) 10^4 m^2

年份	公共建筑面积	工业建筑面积	居住建筑面积
1998	4460.11	2099.33	6501.79
1999	4485.33	2187.95	6823.32
2000	4602.26	2219.85	8644.66
2001	5011.14	2276.39	15559.13
2002	5719.21	2361.63	18265.83
2003	6555.40	2488.67	19694.57
2004	7583.37	2589.06	20903.35
2005	8685.20	2743.28	22363.63
2006	9886.49	3013.11	24303.51
2007	10963.74	3252.43	27233.01
2008	12344.22	3615.23	31606.80
2009	13788.03	3868.59	36998.12
2010	15371.47	4229.52	44180.48
2011	17369.69	4878.94	55891.57
2012	19388.99	5171.25	68324.17
2013	21582.13	5556.55	83534.49
2014	23763.41	5869.63	100675.94
2015	25923.20	6100.99	118500.64
2016	27963.62	6333.06	135098.72
2017	30047.27	6589.06	151746.33
2018	32076.45	6986.60	167804.46
2019	33940.29	7472.41	182084.92
2020	35829.00	7921.17	197593.09
2021	37623.17	8313.69	212650.77

EN 15978:2012[21]中明确将全生命周期分为4个阶段,分别是产品阶段、建造过程阶段、使用阶段、拆除阶段。每个阶段还可以细分为不同的子阶段,如产品阶段可以分为原材料供应、材料运输以及材料加工3个子阶段。其他学者对于建筑全生命周期阶段的划分各有不同,见表8。

表8 全生命周期阶段划分部分研究成果汇总

Table 8 Summary of literature on the classification of whole life cycle stages

研究学者	全生命周期阶段划分
刘学贤等[22]	前期准备阶段、建筑物化阶段、使用维护阶段和拆解回收阶段
王玉[23]	建材生产阶段、工厂化生产阶段、物流阶段、装配阶段、使用和维护更新阶段、拆除和回收阶段
Li等[24]	原材生产阶段、材料运输阶段、建筑施工阶段、建筑运营阶段、回收阶段
王艳等[25]	建筑材料生产和加工阶段、施工阶段、建筑运行使用阶段、建筑的拆除处置阶段
Shen等[26]	设计阶段、建材开采与生产阶段、施工阶段、运营维护阶段、拆除处置阶段
龚先政等[27]	建筑材料物化阶段、建筑施工阶段、建筑使用阶段、建筑物废弃阶段
于萍等[28]	线性划分:原材料生产阶段、建设阶段、运行阶段、拆除阶段 服务类型划分:建设阶段、运行阶段、维护阶段、翻新阶段、拆卸阶段
尚春静等[29]	物化阶段、运营维护阶段、拆除处置阶段

结合国内外学者的观点,本文将建筑全生命周期划分为以下5个阶段,分别为材料生产阶段、材料运输阶段、建筑建造阶段、建筑运行阶段以及建筑拆除阶段。对各个阶段分别进行碳排放量核算。

2.2 LCA各阶段碳排放核算方法

2.2.1 材料生产阶段核算方法

材料生产阶段的碳排放量计算采用碳排放因子法计算,其碳排放量通过各类建材生产量与各类建材的碳排放因子的乘积累加计算得出,即:

$$C_1 = \sum_{i=1}^{n} M_i F_i a_s \tag{4}$$

式中:C_1为材料生产阶段的碳排放量,tCO_2e;M_i为建材i的消耗量,t;F_i为建材i的碳排放因子,tCO_2e/t;a_s为陕西省工业建筑面积占总建筑面积之比。

本文研究的建材种类包括:钢材、木材、铝材、水泥和玻璃这五种常用建材,通过查阅联合国政府间气候变化专门委员会(IPCC)清单以及各类资料得到各类建筑材料的碳排放因子,如表9所列。

各类建材的消耗量数据来源于每年《中国建筑业统计年鉴》,其中统计了各省每年上述五种建筑材料的消耗量,但是该数据代表各省每年的所有建筑类型所消耗建材的总量。本文通过各类建筑面积占比将各类建材消耗量进行拆分,得到每年工业建筑的各类建材消耗量,这样就可以计算出陕西省工业建筑建材生产阶段的碳排放量。

表9 建筑材料碳排放因子

Table 9 Carbon emission factors of building materials

建材种类	单位	碳排放因子
钢材	$t\ CO_2e/t$	2.050
铝材	$t\ CO_2e/t$	28.500
水泥	$t\ CO_2e/t$	0.735
木材	$t\ CO_2e/m^3$	0.139
玻璃	$t\ CO_2e/t$	1.130

在统计年鉴中玻璃的单位是用重量箱表示的,木材的单位是用立方米表示的,为了方便后续计算,将两种材料的单位进行了统一,都转化为吨来表示。通过查阅资料可知,每重量箱玻璃的质量是0.05 t,木材的密度为0.53 t/m^3。

2.2.2 材料运输阶段核算方法

材料运输阶段碳排放量主要来源于运输工具在运输过程中所产生的能源消耗,常用的材料运输方式主要包含公路运输、铁路运输和水路运输。材料运输阶段的碳排放含量等于材料运输量、运输距离和运输方式的碳排放因子三者的乘积,即:

$$C_2 = \sum C_{2i} = \sum M_{ir} D_{ir} F_r \tag{5}$$

式中:C_2为材料运输阶段的碳排放量,$t\ CO_2e$;C_{2i}为建筑材料i在材料运输阶段产生的碳排放量;M_{ir}为建筑材料i使用运输方式r的运输量,t;D_{ir}为建筑材料i使用运输方式r的平均运输距离,km;F_r为运输方式r的碳排放因子,其具体数值见表10。

表10 各运输方式碳排放因子

Table 10 Carbon emission factors for various transportation modes $tCO_2e/(t\cdot km)$

公路运输	铁路运输	水路运输
1.92×10^{-4}	9.41×10^{-6}	1.83×10^{-5}

其中,M_{ir}可由式(6)计算:

$$M_{ir} = M_i b_r \tag{6}$$

式中:M_i为建筑材料i的消耗量,t;b_r为通过运输方式r货运量占三种运输方式货运总量的百分比。

由于建筑材料在运输阶段的平均运距难以统计,在《中国统计年鉴》中仅有关于各类材料铁路运

输的平均运距，没有公路运输及水路运输的平均运距，所以需要通过对数据进行分析推算得出。在《陕西统计年鉴》中运输业板块可以找到陕西省每年三类运输方式的货运量和货运周转量。结合《中国统计年鉴》中按货物分类的国家铁路运输货运量及货运周转量数据，通过计算可以得到陕西省各种建材通过铁路运输、公路运输和水路运输的货运量以及货运周转量。平均运距等于货运周转量除以货运量，其计算式为：

$$D_{ir} = \frac{T_{ir}}{V_{ir}} \tag{7}$$

式中：D_{ir}为建材 i 通过运输方式 r 的平均运距，km；T_{ir}为陕西省建材 i 通过运输方式 r 的货运周转量，Mt·km；V_{it}为陕西省建材 i 通过运输方式 r 的货运量，Mt。

货运周转量的计算式为：

$$T_{it} = \frac{t_i t_{st}}{t_z} \tag{8}$$

式中：T_{it}为陕西省建材 i 通过铁路运输的货运周转量，Mt·km；t_i为全国建材 i 通过铁路运输的货运周转量，Mt·km；t_{st}为陕西省铁路运输货运周转量，Mt·km；t_z为全国货物铁路运输货运周转量，Mt·km。

货运量的计算式为：

$$V_{it} = \frac{v_i v_{st}}{v_z} \tag{9}$$

式中：V_{it}为陕西省建材 i 通过铁路运输的货运量，Mt；v_i为全国建材 i 通过铁路运输的货运量，Mt；v_{st}为陕西省铁路运输货运周转量，Mt；v_z为全国货物铁路运输货运量，Mt。

陕西省各类建材公路运输和水路运输方式的货运量以及货运周转量计算式均可采用式(10)、(11)计算：

$$T_{ij} = \frac{T_{it} t_{sj}}{t_{st}} \tag{10}$$

式中：T_{ij}为陕西省建材 i 通过运输方式 j 的货运周转量，Mt·km；t_{sj}为陕西省建材 i 通过运输方式 j 的货运周转量，Mt·km。

$$V_{ij} = \frac{V_{it} v_{sj}}{v_{st}} \tag{11}$$

式中：V_{ij}为陕西省建材 i 通过运输方式 j 的货运量，Mt；v_{sj}为陕西省建材 i 通过运输方式 j 的货运量，Mt。

2.2.3　建造及拆除阶段核算方法

建筑施工阶段碳排放量主要由建筑建造阶段和拆除阶段产生，建造阶段的碳排放量主要来源于建造阶段使用的机械设备、照明和工作人员生活办公产生的能源消耗，在《中国能源统计年鉴》中统计了各省份建筑业施工阶段使用的能源种类及其消耗量。

查阅文献[30-32]可知建筑物在拆除阶段所消耗的能源是建造阶段的90%，根据统计，我国每年建筑业的拆除面积是当年施工面积的10%，所以可以认为拆除阶段的能源消耗是建造阶段能源消耗的9%，由此可以计算出建筑建造阶段与拆除阶段的碳排放量。陕西省工业建筑建造与拆除阶段碳排放量计算式为：

$$C_3 = \frac{\sum_{i=1}^{n} E_{SG,i} EF}{1.09} \tag{12a}$$

$$C_4 = 0.09 C_3 \tag{12b}$$

式中：C_3为建造阶段的碳排放量，tCO_2e；C_4为拆除阶段的碳排放量，tCO_2e；$E_{SG,i}$为建筑业施工阶段第 i 种能源使用量折算标煤量，tce；EF为标准煤的碳排放系数，tCO_2e/tce。

2.2.4　建筑运行阶段核算方法

建筑运行阶段碳排放主要是由建筑设备能耗引起，如照明设备、通风设备、供暖设备、制冷设备等运行所产生的能源消耗。根据秦贝贝[33]的研究，提出了中国建筑能耗宏观计算公式为：

$$\begin{aligned} E_{jz} = & \sum_{i=1}^{n} (E_{shi} + E_{pfi} + E_{qti}) - E_{shq} - 0.95E_{shc} - \\ & 0.95(E_{pfq} + E_{qtq}) - 0.35(E_{pfc} + E_{qtc}) + \\ & 0.05\sum_{i=1}^{n} E_{gyi} + 2.5\sum (E_{shr} + E_{pfr} + E_{qtr}) \end{aligned} \tag{13}$$

式中：E_{jz}为建筑能耗，tce；E_{shi}为生活消费第 i 种能源消耗量，tce；E_{pfi}为批发、零售和餐饮业中第 i 种能源消耗量，tce；E_{qti}为其他能源中第 i 种能源消耗量，tce；E_{shq}为生活消费中的汽油消耗量，tce；E_{shc}为生活消费中的柴油消耗量，tce；E_{pfq}为批发、零售和餐饮业中的汽油消耗量，tce；E_{pfc}为批发、零售和餐饮业中的柴油消耗量，tce；E_{qtq}为其他能源中的汽油消耗量，tce；E_{qtc}为其他能源中的柴油消耗量，tce；E_{gyi}为工业中第 i 种能源消耗量，tce；E_{shr}为生活消费中的热力消耗量，tce；E_{pfr}为批发、零售和餐饮业中的热力消耗量，tce；E_{qtr}为其他能源中的热力消耗量，tce。

将上述核算方法应用于陕西省建筑能耗计算，通过各类建筑面积占比将建筑运行阶段耗能量进行拆分，可以得到陕西省工业建筑运行阶段能耗公式为：

$$E_{yx}=[\sum_{i=1}^{n}(E_{shi}+E_{pfi}+E_{qti})-E_{shq}-0.95E_{shc}-0.95(E_{pfq}+E_{qtq})-0.35(E_{pfc}+E_{qtc})+0.05\sum_{i=1}^{n}E_{gyi}+2.5\sum(E_{shr}+E_{pfr}+E_{qtr})]\times a_s \quad (14)$$

式中:E_{yx}为工业建筑运行阶段能耗量,tce;其他变量的物理含义同式(13)。

在《中国能源统计年鉴》中统计了各省份的能源平衡表(实物量),为方便后续计算,统一将各类能源实物消耗量换算成标煤量进行计算。煤、天然气、石油等一次能源的折算方法单一,且计算简便。对于二次能源中的电力折算则需要对折算系数进行计算,本文核算方法中电力折算采用发电煤耗计算法。发电煤耗计算法与电热当量计算法的差别在于计算时是否统计了一次能源转化成电力并输送到建筑过程中所产生的系统能源消耗及传输、派送损耗。因此,中国能源平衡表中电力能源消耗总量由式(15)计算:

$$E_{dl}=S_{fdm}-S_{drdl}+E_{dlbm} \quad (15)$$

式中:E_{dl}为电力能源消耗总量,tce;S_{fdm}为发电煤耗计算法,tce;S_{drdl}为电热当量计算法,tce;E_{dlbm}为电力标煤量,tce。

电热当量计算法向发电煤耗计算法换算的换算系数由式(16)计算:

$$a_{drdl}=\frac{E_{all}}{E_{dlbm}} \quad (16)$$

式中:a_{drdl}为电热当量计算法向发电煤耗计算法换算的换算系数,kgce/kW·h;E_{all}为电力能源消耗总量,tce。

发电煤耗折算系数由式(17)计算:

$$a_{fdm}=\frac{E_{all}}{E_{dlbm}}\times a_{dldl} \quad (17)$$

式中:a_{fdm}为发电煤耗计算法计算的电力折算系数,kgce/(kW·h);a_{dldl}为电力当量折算系数,取0.1229 kgce/(kW·h)。在进行各省、自治区、直辖市能源换算时即可采用此系数进行实物量向标准量的换算。

工业建筑运行阶段碳排放量等于运行阶段的能耗量与碳排放因子的乘积。

$$C_5=E_{yx}\cdot EF \quad (18)$$

式中:C_5为运行阶段碳排放量,tCO_2e。

3 数据分析

3.1 材料生产阶段

通过公式计算得到2004—2021年陕西省工业建筑主要建材消耗量以及材料生产阶段碳排放量,结果如表11、12所示。

表11 2004—2021年主要建材消耗量

Table 11 Major building material consumption (2004-2021)

10^4 t

年份	钢材	铝材	水泥	木材	玻璃
2004	18.12	0.40	70.63	5.53	0.25
2005	28.70	2.01	108.83	4.65	0.34
2006	41.51	1.06	105.61	4.77	0.31
2007	48.07	1.13	153.18	5.87	0.34
2008	101.66	2.68	224.50	7.08	0.28
2009	81.87	1.76	233.71	7.83	0.29
2010	65.55	2.41	250.06	8.33	0.49
2011	125.51	2.37	396.19	11.00	0.60
2012	79.16	4.21	244.66	19.95	0.80
2013	82.88	2.81	231.30	15.74	0.81
2014	98.86	2.65	234.16	17.69	0.56
2015	79.11	6.78	219.87	23.45	0.86
2016	91.84	4.25	222.48	25.05	0.86
2017	83.50	4.44	214.62	23.67	0.74
2018	124.57	11.43	242.16	23.12	0.59
2019	101.35	9.37	262.28	18.43	0.45
2020	100.77	2.81	290.21	15.23	0.22
2021	158.34	1.65	360.42	12.40	0.14

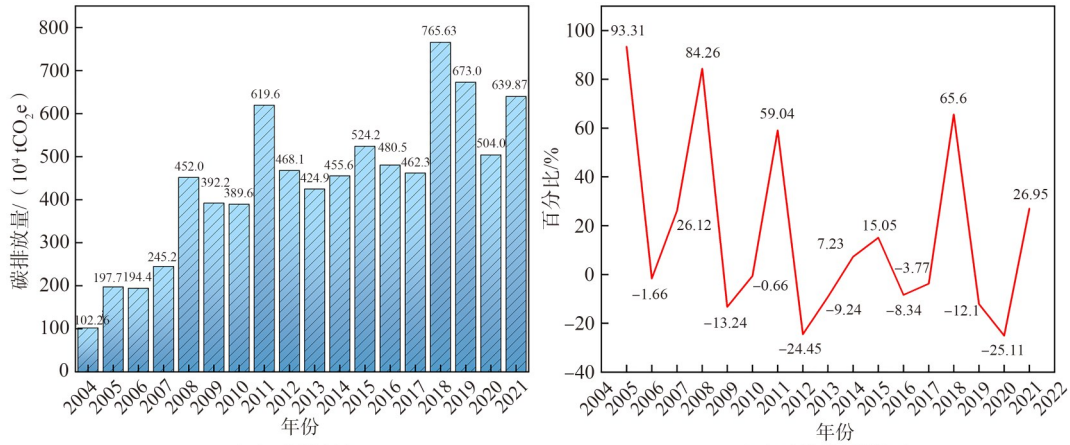
表12 2004—2021年材料生产阶段碳排放量

Table 12 Carbon emissions at the material production stage (2004-2021)

10^4 tCO_2e

年份	钢材	铝材	水泥	木材	玻璃	总计
2004	37.14	11.50	51.92	1.42	0.28	102.26
2005	58.84	57.27	79.99	1.20	0.38	197.68
2006	85.10	30.11	77.63	1.23	0.35	194.41
2007	98.55	32.15	112.59	1.51	0.38	245.18
2008	208.40	76.48	165.01	1.82	0.32	452.03
2009	167.84	50.24	171.78	2.02	0.33	392.19
2010	134.37	68.75	183.80	2.14	0.56	389.62
2011	257.30	67.63	291.20	2.83	0.68	619.64
2012	162.27	119.98	179.82	5.13	0.91	468.12
2013	169.91	79.98	170.01	4.05	0.92	424.86
2014	202.67	75.62	172.10	4.55	0.63	455.58
2015	162.18	193.37	161.61	6.04	0.98	524.17
2016	188.27	121.25	163.52	6.45	0.97	480.46
2017	171.17	126.50	157.74	6.09	0.83	462.34
2018	255.38	325.64	177.99	5.95	0.67	765.63
2019	207.77	267.18	192.78	4.75	0.51	672.99
2020	206.58	79.97	213.31	3.92	0.25	504.03
2021	324.61	47.01	264.91	3.19	0.16	639.87

结果表明,2004—2021年陕西省工业建筑材料生产阶段碳排放量呈波动增长趋势,如图2所示。建材生产阶段碳排放量由2004年的102.26万tCO_2e上升到2021年639.87万tCO_2e,在2018年碳排放量达到最高值765.63万tCO_2e。每年碳排放量增长率



（a）碳排放量　　（b）碳排放量增长率

图 2　2004—2021 年材料生产阶段碳排放量和碳排放量增长率

Fig. 2　Carbon emissions and growth rates at the material production stage（2004-2021）

波动较大，其中 2005 年和 2008 年增长率最高，分别为 93.31% 与 84.26%，2012—2017 年中大部分年份都出现负增长现象，但总体上 2004—2021 年的碳排放量呈增长趋势，其平均增长率为 16.42%。

2004—2021 年各建材生产阶段碳排放占比如图 3 所示。可见：钢材和水泥的碳排放占比最高，均占材料生产阶段碳排放量约 39%，其次是铝材，占总碳排放量的 21% 左右，在 2018—2019 年期间，铝材使用量剧增，铝材的碳排放量占比甚至高达 40% 以上。木材和玻璃的碳排放占比最小，其分别约占碳排放总量的 0.82%、0.14%，几乎可以忽略不记。尽管在多数年份中，水泥的消耗量高于钢材和铝材，但由于钢材和铝材的碳排放因子更高，这导致了在 2018—2019 年间，水泥的碳排放量低于钢材和铝材的碳排放量。

为有效降低建筑材料在生产阶段的碳排放量，

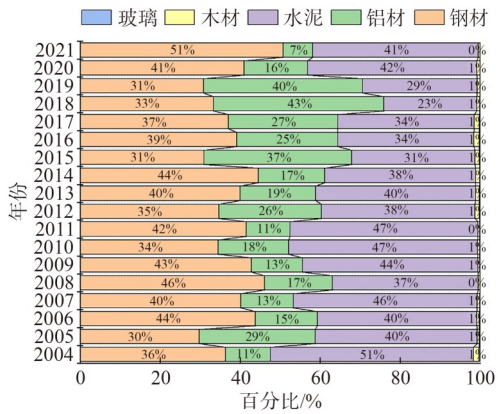


图 3　2004—2021 年各建材生产阶段碳排放占比

Fig. 3　Proportion of carbon emissions at different stages of building material production（2004-2021）

可从水泥与钢材两大建材入手实施减排策略。针对水泥碳排放问题，一方面可通过优化混凝土配合比设计，精准控制水泥用量，在保障混凝土性能的前提下实现水泥用量最小化；另一方面需聚焦水泥生产技术革新，通过应用新型节能工艺和低碳生产技术，降低单位水泥产品的碳排放因子，从源头削减碳排放强度。在钢材减排领域，应推行结构低碳化设计理念，通过优化建筑结构体系，在确保结构安全性的同时显著减少钢材使用量。同时，钢材生产企业需加快工艺升级步伐，大幅降低炼钢过程中的能源消耗与碳排放，从而在材料生产阶段实现碳足迹的有效压缩。

3.2　材料运输阶段

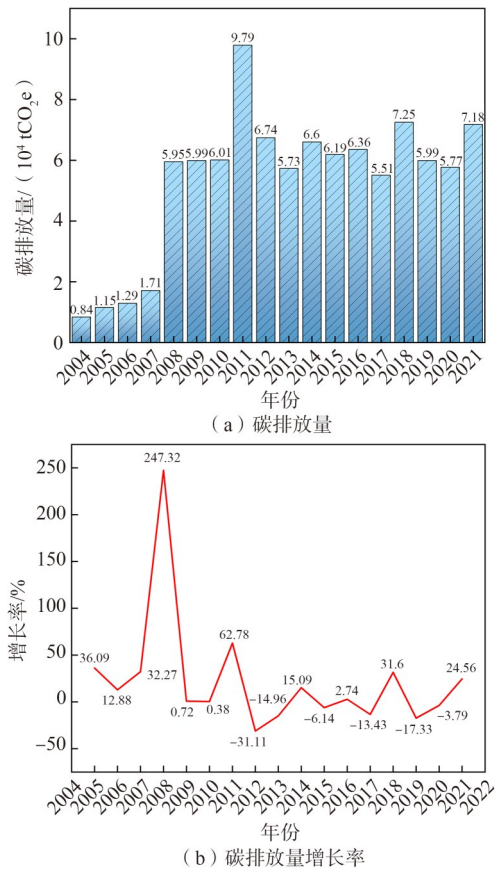
2004—2021 年陕西省工业建筑材料运输阶段各类运输方式的碳排放量如表 13 所列。材料运输阶段碳排放量和碳排放增长率如图 4 所示。结果表明，2004—2021 年陕西省工业建筑建材运输阶段碳排放量总体持先增长后平稳的态势，2004—2007 年碳排放量以较缓和的速率增长，2008 年增长率最高，达到 247.32%，之后保持平稳，2011 年再一次出现碳排放量剧增的情况，并且在该年碳排放量达到最高值 97876.09 tCO_2e，在 2012 年开始出现负增长，之后碳排放量波动较小，逐渐趋于平稳。

材料运输阶段各运输方式的碳排放占比如图 5 所示。从运输方式来看，建材运输阶段碳排放量主要是由铁路运输以及公路运输这两种方式产生，其中公路运输的碳排放量占比最大约为 96%，铁路运输的碳排放量占比约为 6%，水路运输产生的碳排放量几乎可以忽略不计。2004—2021 年陕西省工业建

表 13　2004—2021 年材料运输阶段碳排放量

Table 13　Carbon emissions at the material transportation stage（2004–2021）　tCO_2e

年份	铁路运输	公路运输	水路运输	合计
2004	1362.32	7064.04	1.03	8427.40
2005	1859.51	9607.81	1.32	11468.64
2006	2000.87	10943.56	1.37	12945.80
2007	2608.12	14513.89	1.63	17123.64
2008	3407.37	56061.29	4.73	59473.39
2009	3191.03	56705.54	4.19	59900.76
2010	2969.87	57155.67	3.64	60129.19
2011	4228.81	93643.03	4.25	97876.09
2012	2633.35	64789.87	2.48	67425.69
2013	2419.35	54914.63	2.61	57336.58
2014	2597.92	63390.54	1.95	65990.41
2015	2297.60	59641.57	2.49	61941.65
2016	2367.45	61271.96	2.52	63641.93
2017	2016.26	53078.00	1.58	55095.84
2018	2566.29	69938.91	1.51	72506.71
2019	2829.37	57112.23	1.85	59943.46
2020	2742.61	54924.61	1.77	57668.99
2021	3892.49	67938.42	1.10	71832.01



（a）碳排放量

（b）碳排放量增长率

图 4　2004—2021 年材料运输阶段碳排放量和碳排放增长率

Fig. 4　Carbon emissions and growth rates of carbon emissions at the material transportation stage（2004–2021）

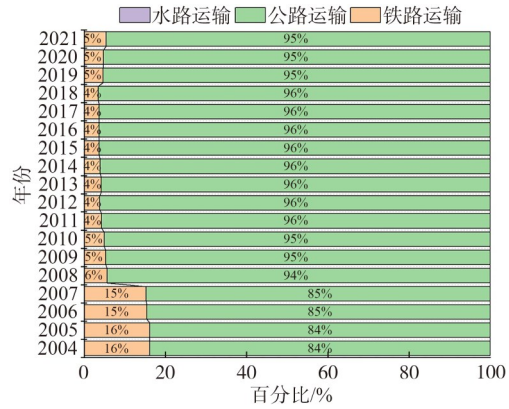


图 5　2004—2021 年各运输方式的碳排放占比

Fig. 5　Proportion of carbon emissions by transportation mode（2004–2021）

筑主要建材通过铁路运输、公路运输以及水路运输的碳排放量如图 6 所示。钢材和水泥的运输是该阶段主要的碳排放来源，其次是木材、铝材、玻璃。

在材料运输环节，为有效降低物流过程中的碳排放，应优先采用本地化资源调配策略，选用陕西省境内生产的原材料，从源头上压缩材料运输半径。在运输工具选型方面，需建立科学的运力配置模型，优先采用大吨位货运车辆，通过提升单车运载量来减少运输频次，进而降低燃油消耗总量。同时，应积极推进运输工具的绿色化升级，在条件允许的情况下，优先选用电动卡车等新能源运输设备，利用清洁能源替代传统化石燃料，从根本上阻断运输环节的碳排放链条，实现材料物流全流程的低碳化管控。

3.3　建造及拆除阶段

2004—2021 年陕西省工业建造及拆除阶段的碳排放量如图 7 所示。结果表明，2004—2021 年陕西省工业建筑建造及拆除碳排放量总体呈下降的趋势，在 2008 年达到最大值分别为 20.3 万 tCO_2e 和 1.8 万 tCO_2e，同时最大增长率也出现在该年，从 2010 年开始碳排放量出现连续负增长，碳排放量开始逐年下降，2016 年下降至最小值分别为 7.0 万 tCO_2e 和 0.6 万 tCO_2e。造成这一现象的原因可能是我国施工技术与施工工艺的发展从而减少了施工过程中的能源消耗，进而减少了 CO_2 排放量。

2004—2021 年建造及拆除阶段各能源消耗的占比如图 8 所示。从能源种类消耗占比来看，2004—2006 年期间，原煤和柴油消耗量为建造和拆除阶段主要碳排放来源，从 2007 年开始，原煤消耗量大幅减少，柴油消耗量仍然为主要碳排放来源，施工现场的台班机械大多以柴油为燃料，所以消耗量较大，同时

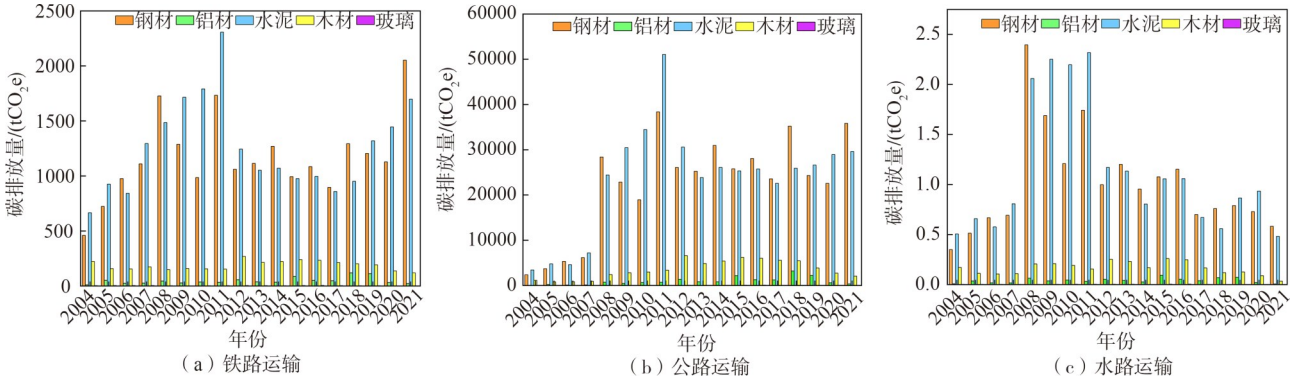


图 6　2004—2021 年主要建材各运输方式碳排放量

Fig. 6　Carbon emissions from different transportation modes of major building materials (2004–2021)

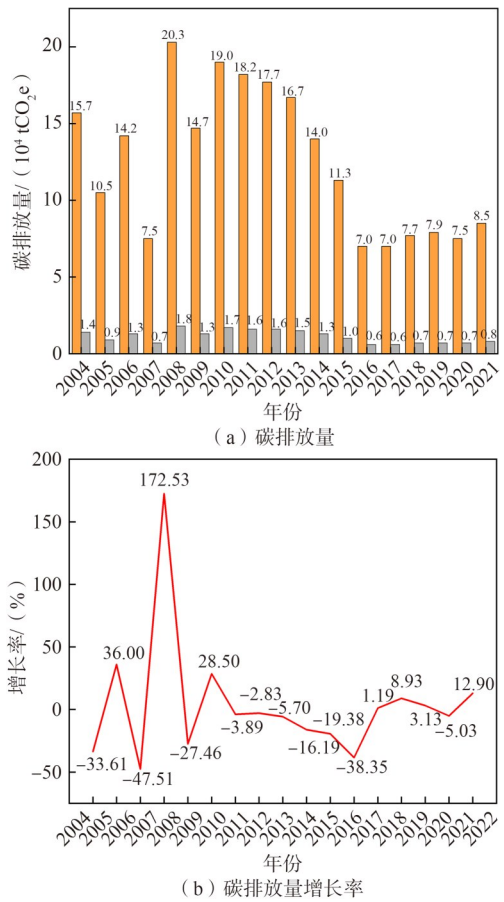


图 7　2004—2021 年建造与拆除阶段碳排放量与增长率

Fig. 7　Carbon emissions and growth rates at the construction and demolition stages (2004–2021)

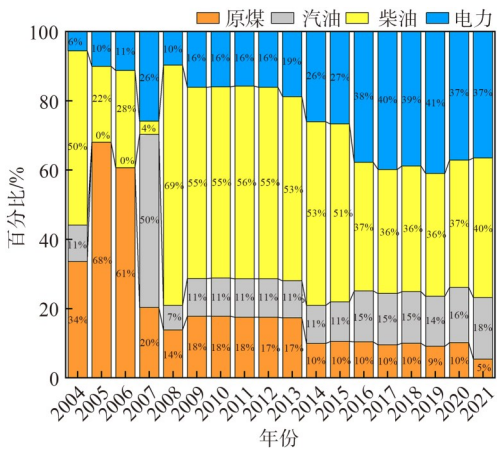


图 8　2004—2021 年建造与拆除阶段各能源消耗占比

Fig. 8　Proportion of various types of energy consumption at the construction and demolition stages (2004–2021)

电力消耗量开始逐年上升，替代原煤成为主要碳排放来源。

3.4　建筑运行阶段

本研究结合秦贝贝[33]提出的建筑运行阶段能耗计算方法得到陕西省建筑能耗，通过各类建筑面积占比拆分出陕西省工业建筑能耗，进而计算出建筑运行阶段的碳排放量。2004—2021 年陕西省工业建筑运行阶段的主要能源消耗量见表 14。由于统计年鉴中的能源种类较多，表中只展示消耗量较大的能源种类。

2004—2021 年陕西省工业建筑运行阶段的碳排放量总体呈上升趋势，如图 9 所示。2011 年碳排放量达到最大值 355 万 tCO_2e，从 2012 年开始逐年下降，可能是由于人们节能减排的意识逐渐提高，但是随着人民生活水平上升，人口数量增多，从 2017 年开始碳排放量又开始逐年上升。见图 9(b)，2004—2021 年总体平均增长率为 4.25%，最大增长率出现在 2005 年达到 43.07%，后续年份无论是正负增长，都较为平稳。

2004—2021 年建筑运行阶段各能源消耗的占比如图 10 所示。从能源种类消耗上看，电力、原煤、热力和天然气的消耗是产生碳排放的主要来源，其中电力贡献最高，占建筑运行阶段碳排放量的 38.99%，其次是原煤，占建筑运行阶段碳排放量的 21.29%，所以在电力消耗与煤炭的使用方面具有很大的减排潜力。电力通常被认为是一种低碳能源，

表 14　2004—2021 年建筑运行阶段主要能源消耗量

Table 14　Main energy consumption at the building operational stage (2004–2021)　10^4 tce

年份	原煤	洗精煤	型煤	焦炭	焦炉煤气	其他焦化产品	原油	汽油
2004	13.12	0.95	1.60	0.74	0.02	0.02	0.01	0.20
2005	44.78	1.39	0.01	0.98	0.06	0.04	0.91	0.33
2006	46.60	0.21	0.01	1.13	0.12	0.02	0.01	0.38
2007	18.84	0.56	2.13	1.55	0.11	0.02	0.01	0.29
2008	25.60	0.09	2.47	1.43	0.08	0.01	0.32	0.23
2009	38.76	0.12	0.01	2.25	0.12	0.04	0.36	0.23
2010	41.32	0.17	0.01	2.36	0.12	0.03	0.59	0.13
2011	34.02	10.45	0.01	2.41	0.09	0.03	0.59	0.13
2012	29.77	9.87	0.01	2.42	0.10	0.02	0.57	0.11
2013	32.39	0.15	0.00	2.28	0.02	0.06	0.55	0.17
2014	28.87	0.14	0.00	2.13	0.07	0.13	0.49	0.16
2015	23.33	0.12	0.00	1.91	0.07	0.11	0.39	0.15
2016	18.33	0.00	0.05	1.53	0.05	0.09	0.15	0.15
2017	15.15	0.00	0.06	1.41	0.05	0.03	0.16	0.13
2018	13.53	0.00	0.06	1.26	0.09	0.03	0.16	0.14
2019	13.65	0.00	0.06	1.22	0.12	0.03	0.14	0.15
2020	13.36	0.00	0.06	1.27	0.25	0.13	0.11	0.12
2021	11.93	0.00	0.06	1.20	0.34	0.15	0.10	0.11

年份	煤油	柴油	燃料油	液化石油气	天然气	热力	电力	其他能源
2004	0.01	3.36	0.21	4.86	15.42	5.41	31.26	0.00
2005	0.01	1.04	0.02	6.08	6.22	12.22	35.50	0.00
2006	0.01	1.20	0.01	6.08	15.02	13.19	38.77	0.15
2007	0.01	1.75	0.01	6.37	18.42	15.70	39.54	0.38
2008	0.02	1.72	0.04	9.45	18.79	14.71	42.18	0.06
2009	0.01	1.73	0.00	1.98	17.91	18.23	43.76	0.10
2010	0.01	2.49	0.00	2.54	20.84	22.15	46.28	0.08
2011	0.01	2.63	0.00	2.68	17.89	23.41	49.81	0.03
2012	0.01	2.30	0.00	2.38	16.93	25.55	50.19	0.04
2013	0.01	2.05	0.23	1.94	13.85	24.05	50.26	0.02
2014	0.01	1.90	0.07	1.70	13.95	24.70	48.74	0.04
2015	0.00	1.49	0.06	1.32	13.35	24.01	46.10	0.04
2016	0.00	1.47	0.00	1.55	12.30	28.67	48.13	0.08
2017	0.00	1.29	0.00	1.48	12.14	30.47	49.59	0.05
2018	0.00	1.33	0.06	1.49	12.24	33.05	53.18	0.08
2019	0.00	0.98	0.09	1.53	13.20	36.18	56.11	0.10
2020	0.00	0.82	0.08	1.45	12.63	41.43	56.08	0.01
2021	0.00	0.79	0.09	1.47	13.40	48.34	63.15	0.02

在提供相同功率输出的情况下,其碳排放量相对较低。通过优化提升以柴油为动力的机械设备运行效率,减少柴油与电力的消耗量,从而有效实现节能减排的目标。作为照明系统和工业设备运行的核心能源,电力的使用可通过优化设备运行时间、提高能效等措施加以控制和降低。此外,应大力发展绿电能源产业,增加低碳清洁能源在能源结构中的占比,逐步替代煤炭等高碳排放的传统能源,也是减少碳排放的有效途径之一。

3.5　建筑全生命周期阶段

陕西省工业建筑全生命周期碳排放量及增长率如图 11 所示。2004—2021 年全生命周期碳排放呈持续上升的趋势,碳排放总量由 2004 年的 310.7 万 tCO_2e 上升到 2021 年的 1004.23 万 tCO_2e,其中,2018 年建筑全生命周期碳排放总量最高,为 1068.82 万 tCO_2e。全生命周期碳排放量最大增长

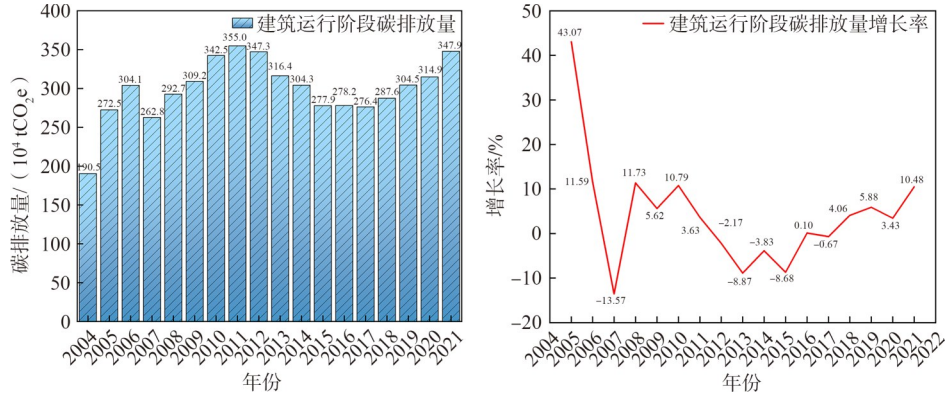


图 9　2004—2021 年建筑运行阶段碳排放量及增长率

Fig. 9　Carbon emissions and growth rates at the building operational stage（2004-2021）

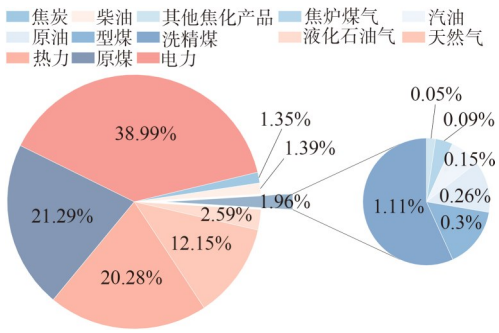


图 10　建筑运行阶段各能源消耗占比

Fig. 10　Proportion of various energy consumption at the building operational stage

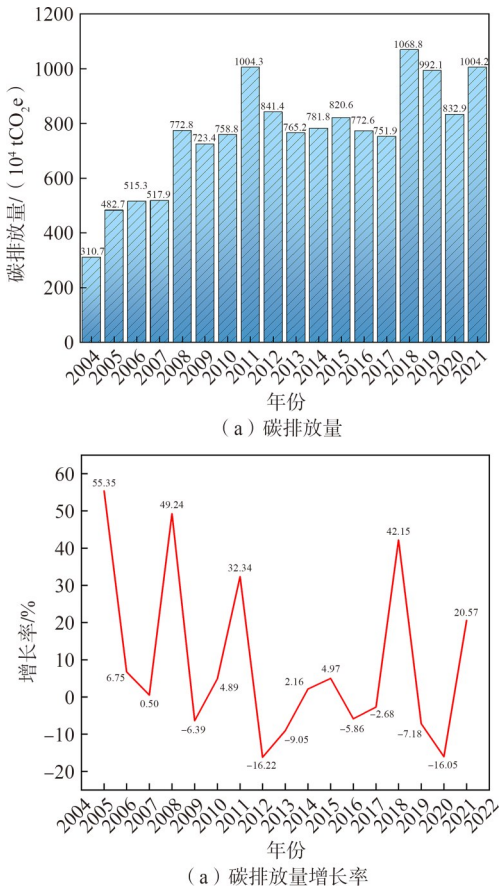


图 11　2004—2021 年全生命周期碳排放量及增长率

Fig. 11　Whole life cycle carbon emissions and growth rates（2004-2021）

率出现在 2005 年，达到 55.35%，后续年份增长率忽高忽低持续波动，但总体上正增长率居多且增长率较大，最大负增长率才达到-10.22%，估计未来几年陕西省工业建筑全生命周期碳排放量还会持续上升。

陕西省工业建筑 LCA 各阶段碳排放占比如图 12 所示。全生命周期各阶段中建筑运行阶段以及建材产生阶段的碳排放量最多，2004—2007 年期间，建筑运行阶段对于全生命周期碳排放量贡献最大，占总碳排放量 65% 左右，而建材生产阶段占总碳排放量的 33% 左右；自 2008 年开始，建材生产阶段的碳排放量超越建筑运行阶段成为全生命周期中碳排放量最多的阶段，占总碳排放量的 55% 左右。

4　结论与建议

本研究选取陕西省工业建筑为研究对象，从省域层面对工业建筑 LCA 碳排放量进行核算，得到陕西省工业建筑全生命周期各阶段的碳排放量，对各排放量分析和对比得出以下结论：

1）2004—2021 年陕西省工业建筑碳排放总量呈上升趋势，部分年份出现波动，工业建筑碳排放总量从 2004 年的 310.73 万 tCO_2e 增长到 2021 年的 1004.23 万 tCO_2e。

2）材料生产阶段和建筑运行阶段是 LCA 碳排放的主要阶段。2004—2007 年期间，建筑运行阶段对全生命周期碳排放贡献最大，占 LCA 碳排放量约 65%；自 2008 年开始，材料生产阶段的碳排放量超越建筑运行阶段，占 LCA 碳排放量约 55%。建筑建

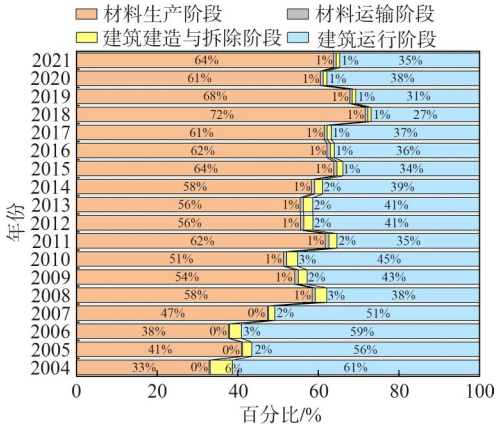


图 12 2004—2021 年 LCA 各阶段碳排放量占比

Fig. 12 Proportion of carbon emissions at each stage of LCA (2004-2021)

造与拆除阶段的碳排放量较少,仅占 LCA 碳排放量约 2%。材料运输阶段碳排放量最少,甚至某些年份占 LCA 碳排放量 1% 不到。

3)钢材和水泥是材料生产阶段碳排放的主要贡献者,均占材料生产阶段排放量约 39%。其次是铝材,占材料生产阶段排放量约 21%。木材和玻璃的碳排放量最少,几乎可以忽略不计。公路运输占材料运输阶段碳排放量约 93%,是材料运输阶段主要的运输方式,其次是铁路运输,占材料运输阶段碳排放量约 7%,水路运输使用较少,其碳排放量几乎可以忽略不计。电力、原煤、热力和天然气的消耗是建筑运行阶段碳排放的主要来源,其中电力贡献最高,占建筑运行阶段碳排放量约 39.11%,其次是原煤,占建筑运行阶段碳排放量约 25.21%。

根据陕西省工业建筑 LCA 碳排放量核算结果可以得到工业建筑碳排放的主要来源以及减排重点,本研究分析提出以下减排建议:

1)钢材、水泥属于高能耗建材,工业建筑对于钢材和水泥需求量大,这也是造成建材生产阶段碳排放的主要原因,通过合理的低碳结构设计,减少高能耗建材的使用量,调节建材的使用结构,增加绿色建材的使用比例等途径达到减碳的目的。提倡就地取材,充分利用当地现有资源,优先考虑本地或相邻地区的建材,减少建材运输距离,也可以减少建材运输阶段的碳排放量。

2)建筑施工和拆除阶段的碳排放量占比较小,主要来源于施工机械的运作,可以通过优化施工技术和施工工艺,采用 BIM 智能化施工技术等,优化施工流程,减少能源使用;工业建筑大多为厂房等钢结构建筑,采用预制装配式构件也能有效减少施工机械和人力的使用,进而降低相关碳排放。

3)建筑运营阶段碳排放主要来源于电力和原煤消耗,建筑制冷、取暖、照明以及生产设备运行使用了大量的电力能源,通过采用新型建筑板材以及优化外墙保温设计,增强建筑保温隔热功能来减少建筑能源需求;采用节能照明技术,淘汰高能耗、低效率的老旧设备,减少电力和原煤消耗,提高可再生能源使用比例,降低建筑运行阶段的碳排放量。

本研究工作并未做到面面俱到,工业建筑碳排放仍有许多问题需要解决。在今后工作中,以下几点问题需要进一步研究:

1)在碳排放核算中,所有年份均采用统一的碳排放因子,然而,随着生产工艺的进步与科技发展,碳排放因子也应随之变化,在后续研究中,应研究碳排放因子随时间的变化特征,实现工业建筑碳排放精准核算。

2)本研究未对不同行业的工业建筑进行核算,由于生产工艺不同,电力、冶金等行业的建筑碳排放可能存在较大差异,在后续研究中可针对不同行业的建筑碳排放进行细致核算。

3)本文仅对碳排放量进行了核算分析,并未涉及对工业建筑碳排放的评价,目前国内对于建筑碳排放并没有一个标准的评价体系,在后续研究中应建立并完善工业建筑低碳评价体系。

参 考 文 献

[1] HE B, LIU Y, ZENG L, et al. Product carbon footprint across sustainable supply chain[J]. Journal of Cleaner Production, 2019, 241: 118320.

[2] Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Climate change 2013: the physical science basis[R]. NewYork: Cambridge University Press, 2013.

[3] WANG X, DUAN Z, WU L, et al. Estimation of carbon dioxide emission in highway construction: a case study in southwest region of China[J]. Journal of cleaner production, 2015, 103: 705-714.

[4] BILOTTA S, NESI P. Estimating CO_2 emissions from IoT traffic flow sensors and reconstruction[J]. Sensors, 2022, 22(9): 3382.

[5] SCHMIDT A, RELLA C W, GÖCKEDE M, et al. Removing traffic emissions from CO_2 time series measured at a tall tower using mobile measurements and transport modeling[J]. Atmospheric Environment, 2014, 97: 94-108.

[6] RYU B Y, JUNG H J, BAE S H, et al. Estimation of carbon dioxide emissions per urban center link unit using data collected by the Advanced Traffic Information System in Daejeon, Korea

[J]. Atmospheric Environment, 2013, 81: 433-442.
[7] 郑玉蓉, 孙文彬, 杜守航, 等. 煤炭企业碳排放核算方法研究综述[J]. 煤炭学报, 2024,49(增刊2):1143-1153.
[8] 吴杏平, 康重庆, 袁启恒. 我国碳排放影响因素及电力碳排放核算方法研究综述[J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(增刊1): 1-18.
[9] WANG Z, YANG X, ZHAN Z, et al. Carbon emission measurement and evaluation of large public buildings in the materialization stage[J]. Energy and Buildings, 2024, 324: 114840.
[10] ALAUX N, TRUGER B, LACKNER T, et al. Public buildings: life-cycle GHG emission scenarios and reduction trajectories by 2050[C]//IOP Conference Series: Earth and Environmental Science Proceedings of the SBEfin 2022 Emerging Concepts for Sustainable Built Environment. Cardiff UK: IOP Publishing Ltd, 2023, 2600: 152013.
[11] 张瀚, 舒平, 孟霞. 既有居住建筑运行阶段碳排放影响因素显著性分析[J]. 工业建筑, 2023, 53(增刊2): 13-17.
[12] WANG Q, JIA X, ZHAO Y, et al. A building operational carbon emissions database of 362 Chinese cities: construction process and spatiotemporal characteristic analysis[J]. Developments in the Built Environment, 2024, 20: 100546.
[13] LI X, LIN C, LIN M, et al. Drivers and spatial patterns of carbon emissions from residential buildings: an empirical analysis of Fuzhou city (China)[J]. Building and Environment, 2024, 257: 111534.
[14] 周小迦. 微观尺度下城市建筑运行碳排放监测评估和时空分析[J]. 北京测绘, 2024, 38(4): 580-586.
[15] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 中国城市建设统计年鉴[M]. 北京:中国统计出版社,1998
[16] 那威,王晗, 侯静, 等. 基于泰勒级数神经网络方法的我国公共建筑和工业建筑面积数据分析(2)[J]. 暖通空调, 2017, 47(11): 12-15.
[17] 那威, 王晗, 侯静, 等. 基于泰勒级数神经网络方法的我国公共建筑和工业建筑面积数据分析(1)[J]. 暖通空调, 2017, 47(11): 7-11.
[18] European Committee for Standardization. Sustainability of construction works-Sustainability assessment of buildings: EN 15643:2021[S]. Brussels: European Committee for Standardization, 2021.
[19] European Parliament, European Council. Construction products regulation: regulation (EU) No 305/2011 [S]. Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2011.
[20] BIRGISDÓTTIR H, RASMUSSEN F N. Introduction to LCA of buildings[M]. Danmark: Danish Transport and Construction Agency, 2016.
[21] Dansk Standard. Sustainability of construction works-assessment of environmental performance of buildings calculation method: DS/EN 15978:2012[S]. Copenhagen: Dansk Standard, 2012.
[22] 刘学贤, 张森, 张超. 生命周期评估在建筑设计阶段的碳足迹测算应用[J]. 建筑与文化, 2023(9): 22-23.
[23] 王玉. 工业化预制装配建筑的全生命周期碳排放研究[D]. 南京:东南大学, 2017.
[24] LI B, FU F F, ZHONG H, et al. Research on the computational model for carbon emissions in building construction stage based on BIM[J]. Structural Survey, 2012, 30(5): 411-425.
[25] 王艳, 冯群. 基于LCA的建筑全生命周期能耗研究[J]. 项目管理技术, 2023, 21(2): 70-74.
[26] SHEN J J, YIN X Q, ZHOU Q. Research on a calculation model and control measures for carbon emission of buildings[C]//Sustainable Construction and Prefabrication: International Conference on Construction and Real Estate Management 2018 (ICCREM 2018). Charleston, South Carolina, USA: American Society of Civil Engineering, 2018: 190-198.
[27] 龚先政, 王志宏, 高峰. 不同结构建筑生命周期能耗和温室气体排放研究[J]. 住宅产业, 2012(5): 51-54.
[28] 于萍, 陈效速, 马禄义. 住宅建筑生命周期碳排放研究综述[J]. 建筑科学, 2011, 27(4): 9-12.
[29] 尚春静, 储成龙, 张智慧. 不同结构建筑生命周期的碳排放比较[J]. 建筑科学, 2011, 27(12): 66-70.
[30] ZHANG X, WANG F. Life-cycle assessment and control measures for carbon emissions of typical buildings in China[J]. Building and Environment, 2015, 86:89-97.
[31] GONG X, NIE Z, WANG Z. Life cycle energy consumption and carbon dioxide emission of residential building designs in beijing: a comparative study[J]. Journal of Industrial Ecology, 2012, 16(4): 576-587.
[32] GONG X, NIE Z, WANG Z, et al. Life cycle energy consumption and carbon dioxide emission of residential building designs in Beijing[J]. Journal of Industrial Ecology, 2012, 16(4): 576-587.
[33] 秦贝贝. 中国建筑能耗计算方法研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2014.