

# 混凝土建筑物化阶段碳排放测算 与减排路径研究

赵 愈<sup>1</sup>, 刘 陆<sup>1</sup>, 孙 杨<sup>2</sup>, 孙思园<sup>1</sup>

(1. 沈阳建筑大学管理学院, 辽宁 沈阳 110168; 2. 沈阳建筑大学交通与测绘工程学院, 辽宁 沈阳 110168)

**摘 要:**科技高速发展带来的环境问题日益严重,碳排放成为全球普遍关注的问题。中国相应提出“双碳”目标,建筑业作为国民经济支柱产业之一,有效测算其碳排放总量是实现碳减排的重要前提。研究将碳排放因子法与能值分析法相结合,提出了碳排放核算模型 EA-CEF,并应用于混凝土建筑物化阶段。将物化科学中相图表达引入混凝土建筑物化阶段碳排放驱动因素分析,构建了能值相图与评价指标体系,进一步评估建筑发展可持续性。案例分析结果显示:混凝土建筑物化阶段碳排放量位居前四依次为混凝土、水泥、钢、涂料;EA-CEF 核算模型提高了传统碳排放量测算的准确性,考虑了区域性、时效性以及可持续性,为建筑物化阶段碳减排路径的研究奠定了基础。

**关键词:**碳排放因子法;能值分析;碳减排;相图

**中图分类号:**X323;TU111.195

**文献标志码:**A

2020年,中国提出了“二氧化碳排放力争于2030年前达到峰值,努力争取2060年前实现碳中和”的“双碳”目标。混凝土建筑全生命周期由物化、运行维护和拆除等阶段组成,相对于建筑运行维护阶段,物化阶段更具有实施碳减排的潜在空间<sup>[1]</sup>。在既有建筑物改造与新增建筑物双重叠加下,建筑物化阶段碳排放的测算与节能减排工作至关重要<sup>[2]</sup>。刘明达等<sup>[3]</sup>在国内外碳排放核算方法研究综述中,指出了基于间接数据的碳排放因子法应用更广泛,但其方法本身的系统误差无法避免,计算结果易受到影响;张勇等<sup>[4]</sup>利用能值分析法评估旧工业建筑改造,有效地避免了传统评价的缺点,兼顾了对经济效益与环境污染等多方面的影响;张军学

等<sup>[5]</sup>应用能值分析法与碳排放因子法测算建筑物碳排放量,相对于碳排放因子法,能值分析法的应用增加了建筑物可持续性评估的准确性,但该文献未将各自的计算结果统一标度后进行对比;张雪花等<sup>[6]</sup>基于能值理论提出了“全碳排”核算方法,为地区碳减排的责任认定提供了科学依据,但其公式忽略了地区转换系数的差异性及其时效性。

研究通过文献梳理,结合能值分析(Emergy Analysis, EA)和碳排放因子法(Carbon Emission Factors, CEF)提出 EA-CEF 碳排放核算模型,将计算结果统一标度的同时考虑其时效性,并基于能值分析指标构建能值相图,应用能值相图对混凝土建筑物化阶段的碳排放水平进行评估。

一、混凝土建筑碳排放测度与评价方法

1. 碳排放因子法

碳排放因子是生产活动过程中单位能源消耗所产生的碳排放量;碳排放因子法的实质是根据能源消耗量与碳排放因子测算出碳排放量。该方法得到了联合国政府间气候变化专门委员会 (Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC) 的认可,可用于评估建筑的可持续性。

碳排放因子法的基本公式为

$$C_{\text{co}_2} = \sum_{i=1}^n M_i \times EF_i \tag{1}$$

$$M_i = m_i \times (1 + Q_i) \tag{2}$$

式中: $C_{\text{co}_2}$  为物质生产过程中  $\text{CO}_2$  的排放量; $M_i$  为物质所用第  $i$  种建筑材料的用量总和; $m_i$  为建筑施工过程中第  $i$  种建筑材料的用量; $Q_i$  为建筑施工过程中不可避免的合理损耗量; $EF_i$  为物质所用第  $i$  种建筑材料或机械的排放因子。

从全生命周期考虑,混凝土建筑物主要经历建筑材料生产及运输、施工建造、建筑运行及维护、拆除与回收处理阶段。各阶段的碳排放因子包括建材、单位距离的运输强度、建材再循环及能源消耗等。笔者研究范围限定在混凝土建筑物化阶段,所采用的碳排放因子主要为建材碳排放因子与机械能源消耗碳排放因子。

2. 能值分析法

能值分析法利用能值转化率将不同系统内的物质转换在同一系统内,任何形式的资源、产品或劳务所包含太阳能的数量就是其所具有的太阳能值,单位为太阳能焦耳 (Solar emjouers, sej) [7]。当转换类别单位分别为物质质量、能量、劳务费用时,采用式 (3) ~ 式 (5)。能值的计算公式为

$$E(\text{sej}) = M(\text{g}) \times \tau(\text{sej/g}) \tag{3}$$

$$E(\text{sej}) = N(\text{J}) \times \tau(\text{sej/J}) \tag{4}$$

$$E(\text{sej}) = V(\text{\$}) \times \tau(\text{sej/\$}) \tag{5}$$

式中: $E$  为能值; $M$  为物质质量; $N$  为能量消耗; $V$  为服务价值; $\tau$  为能值转化率。能值分析将所有不同类别的能量、资源、产品,甚至

劳务和服务等不可比、难核算的项目核算为统一的量纲——太阳能值,从而对建筑物可持续性进行评估。

根据能值理论对建筑物进行可持续性评价可得出:能值产出率、环境负载率、可持续发展性指标 [7], 计算公式为

$$Y_{\text{ELR}} = \frac{N}{R} \tag{6}$$

$$Y_{\text{EYR}} = \frac{N + R + F}{F} \tag{7}$$

$$Y_{\text{ESI}} = \frac{Y_{\text{EYR}}}{Y_{\text{ELR}}} \tag{8}$$

式中: $R$ 、 $N$  和  $F$  分别为更新资源能值、不可更新能值和输入资源能值; $Y_{\text{ELR}}$  为环境负载率; $Y_{\text{EYR}}$  为能值产出率; $Y_{\text{ESI}}$  为可持续发展性指标。三元相图理论与能值分析相结合构建的能值相图模型,适用于生态经济系统的运行状态、发展趋势、影响因素、优化模拟和政策选择的研究 [8] (见图 1)。能值相图包括  $R$ 、 $N$  和  $F$  3 个顶点,可借助能值相图中的资源线、敏感线和可持续线等指标进行评估 [9], 分析运用能值理论计算的  $Y_{\text{ELR}}$ 、 $Y_{\text{EYR}}$  和  $Y_{\text{ESI}}$ 。

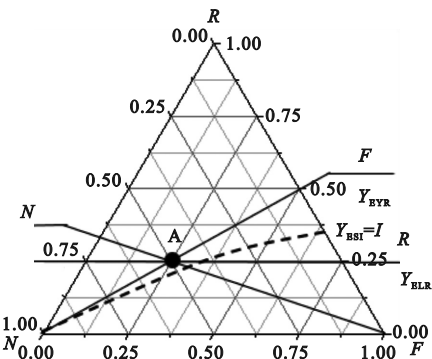


图 1 能值指标的相图分析

3. EA-CEF 碳排放核算模型

在混凝土建筑物化过程中,利用能值分析修正不同区域、不同时间点的碳排放因子,构建 EA-CEF 碳排放核算模型。主要从建筑材料和建筑设备两方面入手。计算公式为

$$\sum_{k=1}^n C_{(\text{co}_2)_k} = \sum_{k=1}^n \frac{A_k}{r} \times \tau \times \frac{1.380}{3.6 \times 10^6} \tag{9}$$

式中: $C_{(\text{co}_2)_k}$  为第  $k$  类物质 (包括钢筋、混凝土等材料) 生产过程中产生的碳排放量; $A_k$  为第  $k$  类物质的原始数据 (如物质本身的能

量、质量、能值); $\tau$  为能值转化率; $\gamma$  为电能的能值转换率( $1.05 \times 10^5 \text{ sej/J}$ ),  $1 \text{ kW} \cdot \text{h} = 3.6 \times 10^6 \text{ J}$ ;东北三省供用电排放量为  $1.380 \text{ kg CO}_2/\text{kW} \cdot \text{h}^{[10]}$ 。

$$\sum_{k=1}^n C_{(\text{co}_2)_k} = \sum_{k=1}^n A_k \times \gamma_1 \times \delta_1 \tag{10}$$

式中: $\gamma_1$  为由原始数据转为  $2.930 \times 10^7 \text{ J}$  的转换系数<sup>[11]</sup>;  $\delta_1$  为由  $2.930 \times 10^7 \text{ J}$  转为碳排放量的转换系数<sup>[12]</sup>。

$$\sum_{k=1}^n C_{(\text{co}_2)_k} = \sum_{k=1}^n B_k \times \gamma_2 \times 1.380 \tag{11}$$

式中: $B_k$  为第  $k$  类物质的原始数值; $\gamma_2$  为物质单位台班的能源消耗。

二、混凝土建筑物化阶段碳排放实例

1. 项目概况

本案例为位于辽宁省沈阳市某小区高层住宅建筑楼,属于东北地区典型的混凝土建筑,建筑物整体为框架剪力墙结构,总建筑面积约  $1\,398.98 \text{ m}^2$ ,总高  $40.5 \text{ m}$ ,地上 18 层、地下 2 层,分为 A、B 两栋。混凝土建筑物化阶段能值流动系统如图 2 所示,混凝土、水泥以及钢材为主要建材投入;工业用水、用电,运输燃料为能源投入;建材搬运、机械加

工、劳动力等为劳务投入,经过建筑物化过程后竣工验收。

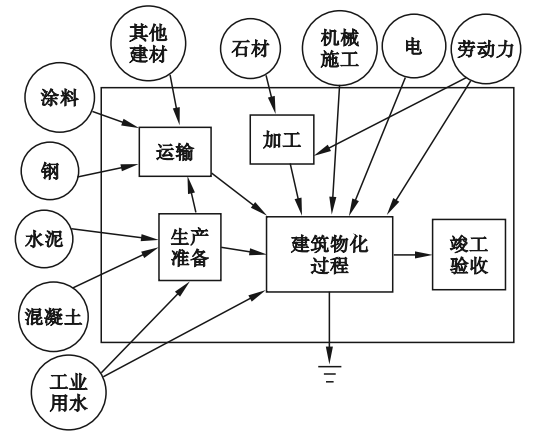


图 2 高层住宅建筑物化过程能值流动系统

2. 能值分析

能值评价指标体系是利用能值计算公式,将不同的物质通过能值转化率转为统一的太阳能值<sup>[13]</sup>,主要从建筑材料和建筑设备两方面进行计算。

案例中混凝土建筑主要建材用量与能值量测算结果如表 1 所示,项目能值总量为  $3.06 \times 10^{19} \text{ sej}$ 。混凝土、水泥、钢材的能值占建材总能值的  $91.41\%$ 。

表 1 高层住宅建筑主要建材的能值量与碳排放量统计

材料名称	建材用量/kg	能量转化率/( sej · kg <sup>-1</sup> )	单因素能值/sej	电能/J	电能/( kW · h )	碳排放量/t
混凝土	10 267 419.26	$1.81 \times 10^{12}$	$1.86 \times 10^{19}$	$1.77 \times 10^{14}$	$4.92 \times 10^7$	$6.78 \times 10^4$
水泥	2 447 349.83	$2.59 \times 10^{12}$	$6.34 \times 10^{18}$	$6.04 \times 10^{13}$	$1.68 \times 10^7$	$2.31 \times 10^4$
钢	434 087.61	$6.97 \times 10^{12}$	$3.03 \times 10^{18}$	$2.88 \times 10^{13}$	$8.00 \times 10^6$	$1.10 \times 10^4$
涂料	53 013.55	$1.52 \times 10^{13}$	$8.06 \times 10^{17}$	$7.67 \times 10^{12}$	$2.13 \times 10^6$	$2.94 \times 10^3$
瓷砖	194 942.58	$2.52 \times 10^{12}$	$4.91 \times 10^{17}$	$4.68 \times 10^{12}$	$1.30 \times 10^6$	$1.79 \times 10^3$
石材	362 560.43	$1.00 \times 10^{12}$	$3.63 \times 10^{17}$	$3.45 \times 10^{12}$	$9.59 \times 10^5$	$1.32 \times 10^3$
碎石	316 588.27	$1.00 \times 10^{12}$	$3.17 \times 10^{17}$	$3.02 \times 10^{12}$	$8.38 \times 10^5$	$1.16 \times 10^3$
玻璃	39 960.58	$7.87 \times 10^{12}$	$3.14 \times 10^{17}$	$3.00 \times 10^{12}$	$8.32 \times 10^5$	$1.15 \times 10^3$
石灰	100 302.75	$1.69 \times 10^{12}$	$1.70 \times 10^{17}$	$1.61 \times 10^{12}$	$4.48 \times 10^5$	$6.19 \times 10^2$
有机材料	14 204.72	$6.88 \times 10^{12}$	$9.77 \times 10^{16}$	$9.31 \times 10^{12}$	$2.59 \times 10^5$	$3.57 \times 10^2$
砖	19 442.21	$2.52 \times 10^{12}$	$4.90 \times 10^{16}$	$4.67 \times 10^{11}$	$1.30 \times 10^5$	$1.79 \times 10^2$
木材	24 194.26	$8.79 \times 10^{11}$	$2.13 \times 10^{16}$	$2.03 \times 10^{11}$	$5.63 \times 10^5$	$7.76 \times 10$
铝合金	962.35	$1.27 \times 10^{13}$	$1.22 \times 10^{16}$	$1.16 \times 10^{11}$	$3.23 \times 10^5$	$4.46 \times 10$
铜	168.00	$6.77 \times 10^{13}$	$1.14 \times 10^{16}$	$1.08 \times 10^{11}$	$3.01 \times 10^4$	$4.15 \times 10$

案例中混凝土建筑主要施工机械设备用量与能值量计算结果如表 2 所示,能值总量为  $8.06 \times 10^{18} \text{ sej}$ 。电渣压力焊机、对焊机和塔吊的能值占施工机械总能值的  $63.15\%$ 。

3. 基于 EA-CEF 模型的碳排放核算

案例中混凝土建筑的碳排放量主要应用公式(9)进行计算,计算结果可与碳排放因子法所得结果进行对比分析。基于表 1 可知各

因素的太阳能值,经对应转化率转为电能<sup>[14]</sup>,再由电能转为碳排放量,主要建材的碳排放量汇总如表 1 所示。现场施工机械设备的碳排放测算途径,由对应能值转为电能,再经对应转换系数得到其碳排放量,案例中建筑主要

施工机械设备的碳排放量如表 2 所示。  
现场施工机械还可应用式(10)、式(11),利用相应转换系数测算出碳排放量<sup>[15]</sup>,案例中建筑施工现场的运输机械能耗用量与碳排放量计算结果如表 3 所示。

表 2  高层住宅建筑主要施工机械设备的能值量与碳排放量统计

机械名称	定额功率/ kW	数量/ 台班	能值转化率/ (sej/台班)	单因素 能值/sej	电能/J	电能/ (kW·h)	碳排放量/t
电渣压力焊机	45	2	$9.00 \times 10^{17}$	$2.19 \times 10^{18}$	$2.09 \times 10^{13}$	$5.80 \times 10^6$	$8.01 \times 10^3$
对焊机	100	1	$2.00 \times 10^{18}$	$2.00 \times 10^{18}$	$1.90 \times 10^{13}$	$5.29 \times 10^6$	$7.30 \times 10^3$
塔吊	45	1	$9.00 \times 10^{17}$	$9.00 \times 10^{17}$	$8.57 \times 10^{12}$	$2.38 \times 10^6$	$3.28 \times 10^3$
交流电焊机	32	2	$3.20 \times 10^{17}$	$6.40 \times 10^{17}$	$6.10 \times 10^{12}$	$1.69 \times 10^6$	$2.33 \times 10^3$
搅拌机	15	2	$3.00 \times 10^{17}$	$6.00 \times 10^{17}$	$5.71 \times 10^{12}$	$1.58 \times 10^6$	$2.19 \times 10^3$
手提式电焊机	15	2	$3.00 \times 10^{17}$	$6.00 \times 10^{17}$	$5.71 \times 10^{12}$	$1.58 \times 10^6$	$2.19 \times 10^3$
水工压刨	7.5	2	$1.50 \times 10^{17}$	$3.00 \times 10^{17}$	$2.86 \times 10^{12}$	$7.93 \times 10^5$	$1.09 \times 10^3$
钢筋切断机	5.5	2	$1.10 \times 10^{17}$	$2.20 \times 10^{17}$	$2.10 \times 10^{12}$	$5.82 \times 10^5$	$8.03 \times 10^2$
离心泵	2.2	3	$4.40 \times 10^{16}$	$1.43 \times 10^{17}$	$1.36 \times 10^{12}$	$3.78 \times 10^5$	$5.22 \times 10^2$
钢筋弯曲机	2.8	2	$5.60 \times 10^{16}$	$1.12 \times 10^{17}$	$1.07 \times 10^{12}$	$2.96 \times 10^5$	$4.08 \times 10^2$
插入式振动机	1.1	5	$2.20 \times 10^{16}$	$1.07 \times 10^{17}$	$1.02 \times 10^{12}$	$2.83 \times 10^5$	$3.91 \times 10^2$
砂浆机	2	2	$4.00 \times 10^{16}$	$8.00 \times 10^{16}$	$7.62 \times 10^{11}$	$2.11 \times 10^5$	$2.92 \times 10^2$
水工平刨	3	1	$6.00 \times 10^{16}$	$6.00 \times 10^{16}$	$5.71 \times 10^{11}$	$1.58 \times 10^5$	$2.19 \times 10^2$
水工圆锯机	3	1	$6.00 \times 10^{16}$	$6.00 \times 10^{16}$	$5.71 \times 10^{11}$	$1.58 \times 10^5$	$2.19 \times 10^2$
平板振动机械	2.2	1	$4.40 \times 10^{16}$	$4.40 \times 10^{16}$	$4.19 \times 10^{11}$	$1.16 \times 10^5$	$1.60 \times 10^2$

表 3  施工现场运输机械能耗用量与碳排放量

机械名称	数量/台班	每台班能源用量			转换系数 $\gamma_1$	转换系数 $\delta_1$	碳排放量/t
		汽油/kg	柴油/kg	电能/(kW·h)			
履带式推土机	25	—	60.80	—	1.457 1	0.616	1.364
轮胎式装载机	30	—	58.75	—	1.457 1	0.616	1.582
自卸汽车	15	31.34	—	—	1.471 4	0.620	0.429
洒水车	20	30.21	—	—	1.471 4	0.620	0.551
混凝土抹平机	30	—	—	23.14	1.380	—	0.958

对于新型绿色建材(如再生混凝土)的碳排放量的计算,由于相关碳排放因子数据库还未完善,可采用 EA-CEF 核算模型进行计算。值得注意的是,EA-CEF 碳排放核算模型使用过程中能值转化路径不宜过长,并要充分分析混凝土建筑物化过程的建材与机械设备的能源消耗。

三、建筑物化阶段碳减排决策路径

1. 能值指标计算

基于案例中混凝土建筑主要建筑材料和施工设备的能值统计<sup>[16]</sup>,能值评价指标分析结果如表 4 所示。

表 4  混凝土建筑能值评价指标评价结果

能值指标	量符号	计算方法	数值
可更新能值	$R$	—	$3.27 \times 10^{18}$
不可更新能值	$N$	—	$3.30 \times 10^{19}$
外界输入能值	$F$	—	$2.42 \times 10^{18}$
能值总输入量	$I$	$R + N + F$	$3.87 \times 10^{19}$
环境负载率	$Y_{ELR}$	$(N + F)/R$	10.82
能值产出率	$Y_{EYR}$	$(R + N + F)/F$	15.99
持续发展指数	$Y_{ESI}$	$Y_{EYR}/Y_{ELR}$	1.48

2. 能值相图分析

(1)资源线分析

由资源线分析(见图 3)可以看出,混凝土建筑物化过程中可更新资源能值  $R$  投入比例相对较低,环境负载率  $Y_{ELR}$  为 10.82,当



$Y_{ELR} > 10$  时,混凝土建筑对环境的负荷较高;而资源线  $N$  表明不可更新资源能值  $N$  投入占比很大;由资源线  $F$  可以看出系统输入能值  $F$  占比最小, $Y_{EYR}$  与资源线  $F$  相对应, $Y_{EYR} = 15.99$ ,  $> 5$ ,表明系统中一次能源投入较多, $Y_{ELR}$  值相对很大,说明一次能源中多为不可再生能源。

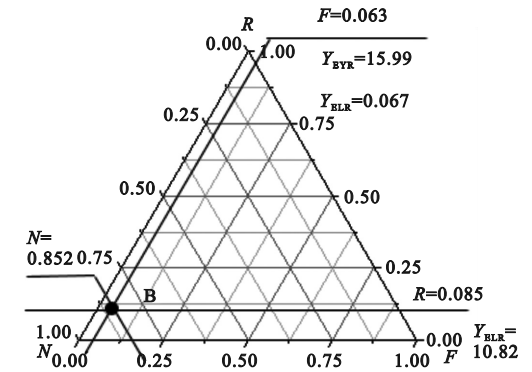


图 3 能值相图资源线分析

(2) 敏感线分析

敏感线用于分析某一资源沿着敏感线的发展路径所引起的另两类资源投入组合的变动关系,这反映了变量之间的投入是相互影响的。由敏感线分析(见图 4)可以看出,混凝土建筑物化过程中不可更新资源能值量占比很大,降低不可更新能值  $N$  的占比比调整其他两类资源对整体系统的优化更有效果。

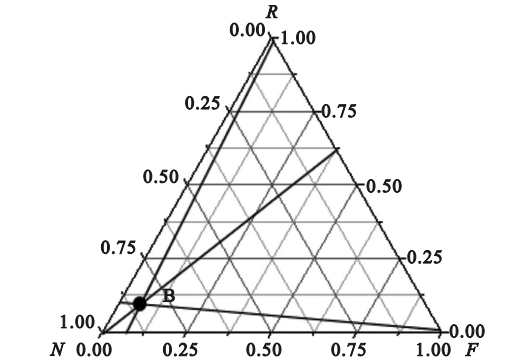


图 4 能值相图敏感线分析

(3) 可持续线分析

由可持续线(见图 5)可知,混凝土建筑物化过程中的可持续性  $Y_{ESI} = 1.58$ ,  $> 1$ ,  $< 5$ ,表明在一定时间内案例中建筑物具有一定的可持续性。综上所述,建筑物化过程中提高

能值产出率、降低环境负载率,使  $R$ 、 $F$ 、 $N$  之间达到一个合理的结构比例,可以促进建筑物化过程的良性发展<sup>[17]</sup>。

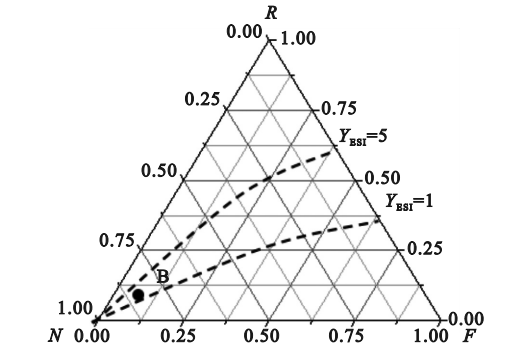


图 5 能值相图可持续线分析

(4) 碳减排实施路径决策

基于资源线分析,相点  $B$  代表案例中的混凝土建筑,靠近不可再生资源顶点  $N$ ,产出率大于一般值,表明应用一次能源多,并且环境负载率数值较高,进一步说明应用一次能源中不可再生能源占比过大。因此,降低其不可再生资源占比,可促进建筑整体碳减排。由敏感线分析可清晰得出,当可再生资源  $R$  占比增加,不可再生资源  $N$  占比减少,将降低建筑物化阶段对生态系统的环境负载率,促进碳减排,相点  $B$  将会向三角中心区域移动。基于可持续线分析可知,建筑物整体的可持续指标  $Y_{ESI}$  将不断接近并超越 5,这意味着混凝土建筑物化过程将朝着可持续方向发展,伴随着清洁生产、设备革新等技术方面的进步,推动传统建筑逐步向绿色建筑转变。综上所述,不可再生资源与可再生资源占比是影响建筑碳减排的驱动因素。

混凝土是建设工程中用量最大、碳排放含量最高的建材,基于 EA-CEF 模型的碳排放核算,进一步表明混凝土建筑施工的可操作性成为建筑物化阶段碳减排的驱动因素。传统混凝土生产过程中不可再生能源占比过大,导致环境负载率过高,使物化阶段整体碳排放量增多及可持续性降低。采用绿色混凝土可使环境负载率降低,并促进碳减排。建材的生产应尽可能利用粉煤灰、煤矸石等工业废弃物,废弃混凝土、砖石、砂浆等建筑垃圾,增加绿色混凝土本身可再生资源占比,降

低环境负载率、提高能值产出率。相对于传统混凝土生产过程中产生的大量污水及粉尘,绿色混凝土生产及施工过程从源头上提高了可再生资源的占比,减少了对自然环境的负荷,增强了再生混凝土的耐久性,进一步降低了环境负载率,增强了混凝土建筑物化阶段的可持续性。

四、结 语

传统碳排放因子法计算碳排放量简单直接,但在不同区域、不同时间误差相对较大,而单一能值分析法无法直接利用碳排放量进行评估,研究所提出的 EA-CEF 核算模型将碳排放因子法与能值分析建立联系,在计算建筑物碳排放量的同时可追踪混凝土建筑物化过程的能耗流动,将物化学科中的相图引入碳减排驱动因素分析,为实现可持续发展提供了重要的参考信息。同时,EA-CEF 核算模型缩短了传统碳排放量测算的转换路径,降低了核算结果的误差值,考虑了区域差异和时效性,为建筑物碳排放总量的正确评估提供了保障,为建筑业低碳减排工作提供了数据支持,为未来建筑碳排放的标准化、定量化研究奠定了基础。

基于研究案例分析得出混凝土建筑物化阶段碳减排决策路径,从混凝土建筑物化过程的可操作性入手,通过提高其可更新能源占比、利用可再生材料,提高能值产出率、降低环境负载率,促进建筑整体物化阶段的碳减排,进一步激发建筑行业碳减排的节能潜力,助力“双碳”目标的实现。

参考文献:

[1] 清华大学建筑节能研究中心. 中国建筑节能年度发展研究报告 2021(城镇住宅专题)[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2021.

[2] 周琳,宋梦歌. 沈阳市既有建筑碳排放量核算及节能减排对策研究[J]. 沈阳建筑大学学报(社会科学版),2017,19(5):509-513.

[3] 刘明达,蒙古军,刘碧寒. 国内外碳排放核算方法研究进展[J]. 热带地理,2014,34(2):248-258.

[4] 张勇,陈曦虎,李慧民,等. 基于能值分析的旧工业建筑改造评价[J]. 工业建筑,2013,43(10):24-27.

[5] 张军学,王晨杨. 基于能值法和碳排放法的建筑可持续性对比评估研究[J]. 城市建筑,2018(11):103-106.

[6] 张雪花,李响,叶文虎,等. “全碳排”核算与碳绩效评价方法研究[J]. 北京大学学报(自然科学版),2015,51(4):639-646.

[7] 蓝盛芳,钦佩,陆宏芳. 生态经济系统能值分析[M]. 北京:化学工业出版社,2002.

[8] GIANNETTI B F, BARRELLA F A, ALMEIDA C M V B. A combined tool for environmental scientists and decision makers: ternary diagrams and emergy accounting[J]. Journal of cleaner production, 2004, 14(2):201-210.

[9] 赵愈,李学锋. 绿色混凝土生产效益能值评价:基于相图表达[J]. 混凝土,2017(9):125-129.

[10] 李晓娟. 装配式建筑碳排放核算及减排策略研究[M]. 厦门:厦门大学出版社,2021.

[11] 国家统计局能源统计司. 中国能源统计年鉴 2016[M]. 北京:中国统计出版社,2016.

[12] 田成诗,张诗雅. 中国行业供应链碳足迹的来源分解分析:基于投入产出的生命周期评价模型[J]. 环境经济研究,2019,4(2):58-75.

[13] NILSSON P O. Environmental accounting: emergy and environmental decision making[J]. Forest science,1997,43(2):305-306.

[14] BROWN M T, ULGIATI S. Energy quality, emergy, and transformity: H. T. Odum's contributions to quantifying and understanding systems[J]. Ecological modelling, 2004, 178(1):201-213.

[15] BROWN M T, ULGIATI S. Emergy evaluations and environmental loading of electricity production systems[J]. Journal of cleaner production,2002,10(4):321-334.

[16] 狄乾斌,张洁,吴佳璐. 辽宁省生态经济系统能值分析[J]. 生态经济(学术版),2012(1):32-37.

[17] 陈东景. 基于能值相图的海洋海业生态经济系统可持续发展证明价:以山东省为例[J]. 生态经济,2019,35(4):65-70.

# Research on Carbon Emission Calculation and Emission Reduction Path in Concrete Building Stage

ZHAO Yu<sup>1</sup>, LIU Lu<sup>1</sup>, SUN Yang<sup>2</sup>, SUN Siyuan<sup>1</sup>  
(1. School of Management, Shenyang Jianzhu University, Shenyang 110168, China; 2. School of Transportation and Geomatics Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang 110168, China)

**Abstract:** The rapid development of science and technology has brought about increasingly serious environmental problems, and carbon emissions have become a universal concern around the world. China has put forward the "dual carbon" target accordingly. As one of the pillars of the national economy, effective measurement of the total carbon emission of the construction industry is an important prerequisite for carbon emission reduction. Based on the combination between carbon emission factor method and energy analysis method, the carbon emission accounting model EA-CEF is proposed and applied to the concrete building stage. The phase diagram expression in physico-chemical science is introduced to analyze driving factors of carbon emission in the concrete building stage, and the energy phase diagram and index evaluation system are constructed to further evaluate the sustainability of building development. The case analysis results show that the top four carbon emissions of concrete buildings in concrete building stage are concrete, cement, steel and paint; the EA-CEF accounting method has improved the accuracy of traditional carbon emission measurement methods, taking into account regionality, timeliness, and sustainability, laying the foundation for the research on carbon emission reduction paths in the physical and chemical stages of buildings.

**Key words:** carbon emission factor method; energy analysis; carbon emission reduction; phase diagram

(责任编辑:王丽娜 英文审校:林 昊)

(上接第 371 页)

# Research on Level of Low-Carbon Development Assessment in Liaoning Province Based on the Entropy Weight-Topsis Method

LI Yanyan, GAO Tong, QIAO Yan  
(School of Management, Shenyang Jianzhu University, Shenyang 110168, China)

**Abstract:** The construction of low-carbon cities is an important part of achieving the "dual carbon" goal. Based on the concept and connotation of low-carbon city, the evaluation index system of urban low-carbon development is constructed with 20 indexes from five aspects: economic development, social progress, carbon sink, resource utilization and energy consumption emission. The entropy weight method was used to empower each index, and the TOPSIS model was used to evaluate the low-carbon development level of Liaoning Province from 2010 to 2020. The results show that the most influential factors of low-carbon development in Liaoning Province are the level of economic development and carbon source (industrial structure), and the author puts forward the countermeasures of low carbon emission reduction from perspectives of industrial structure, related policies, energy structure and business environment.

**Key words:** low-carbon development; weight-topsis; Liaoning province; carbon source  
(责任编辑:王丽娜 英文审校:林 昊)