DOI:10.3880/j. issn. 1003 - 9511. 2023. 02. 008

水利工程装配式建筑的生态效率评价

张云宁,李　敏,宋亮亮,陈金怡

(河海大学商学院,江苏 南京　211100)

摘要:“双碳”目标和高质量发展对建筑行业提出了绿色转型的新要求,而装配式建筑作为建筑领域践行绿色低碳发展理念的重要措施,在水利工程中也得到了实践应用。为衡量水利工程装配式建筑的环境-经济影响,引入生态效率概念作为衡量指标,基于单一比值法构建了装配式混凝土泵房生态效率评价模型,将生态效率转化为功能、成本与碳排放的比值,并分别采用结构熵权法、生命周期成本理论和生命周期评价法构建计量模型计算功能、成本与碳排放值。工程实例计算结果表明,装配式混凝土泵房的生态效率高出传统现浇建造模式 8.16%,得益于水利工程装配式建筑在工期、质量、节能减排等方面效益更佳,装配式建造模式主要在功能和碳排放方面占据优势,其中功能系数提高 9.64%,碳排放系数降低 8.06%,但受我国预制构件生产技术的限制,在成本方面不及传统现浇建造模式;未来应在成本和环境影响两方面着重发力以进一步提高水利工程装配式建筑的生态效率。

关键词:水利工程;装配式建筑;生态效率;结构熵权法;生命周期成本理论;生命周期评价法

中图分类号:F407.9;TV675　　**文献标志码:**A　　**文章编号:**1003 - 9511(2023)02 - 0047 - 05

2020 年 9 月,习近平总书记在参加第七十五届联合国大会时向国际社会作出“双碳”承诺,提出中国将力争于 2030 年前实现碳达峰,2060 年前实现碳中和[1]。在“双碳”目标和高质量发展的双重背景下,传统建造模式在资源环境保护方面的缺点日益凸显,发展绿色建筑,推动施工方式变革、促进建筑产业转型已成为大势所趋。装配式建筑,作为建筑领域践行绿色低碳发展理念的重要体现,得到了政府的大力推行。早在 2016 年,国务院就出台了《关于进一步加强城市规划建设管理工作的若干意见》,提出要力争用 10 年时间,使装配式建筑占新建建筑的比例达到 30%[2]。至 2018 年,我国装配式建筑市场占有率已达 13.9%[3],与此同时,建成了一批具有代表性的装配式建筑。2021 年 3 月 5 日,李克强总理在第十三届全国人民代表大会第四次会议上作《政府工作报告》时提出,“十四五”时期的主要任务包括“推动绿色发展,促进人与自然和谐共生”,其中,单位国内生产总值能耗和二氧化碳排放分别降低 13.5% 和 18%[4]。2022 年 10 月 16 日,习近平总书记在党的二十大报告中再次强调坚持绿色发展道路,明确“积极稳妥推进碳达峰碳中和”,并特别指出,要在工业、建筑、交通等重点领域推进清洁低碳转型[5],为装配式建筑提供了更为广阔的发展前景。

装配式建筑,是一种由预制构件组装而成并以预制构件为主要受力构件的建筑,具有标准化设计、工厂化生产、装配式施工等特点[6]。目前,国内外学者针对装配式建筑的研究主要面向住宅,水利工程方面的研究相对较少,且集中于技术研究和方案评价。洪晓林等[7]梳理归纳了我国农田水利装配化技术发展情况,将预制装配技术发展划分为萌芽、试点、大规模示范和推广革新 4 个阶段,随着发展阶段的不断深入,技术、经济效益稳步提升。侯新月等[8]从高寒地区水利工程施工角度出发,认为使用装配式的水工建筑物能缩短工期,符合高寒地区农田水利工程施工期较短的特点。袁承斌等[9]研发了一种新型全装配式田间涵闸,该构件以插接的方式进行装配,质量可控、操作简单;张少卿[10]在该研究基础上,对涵闸混凝土材料和常见的涵闸断面规格进行了研究,可为装配式田间涵闸的实际应用提

基金项目:国家自然科学基金青年科学基金(71801082)

作者简介:张云宁(1959—),男,副教授,主要从事工程经济与项目管理研究。E-mail: zyn1105@aliyun.com

供参考。黄远洪[11]从施工安全角度,采用熵权-层次分析法构建了装配式水闸施工安全风险评价体系。张景奎等[12]在层次分析的基础上,结合使用多级模糊综合评价法建立了小型渠系装配式建筑质量综合评价模型,并通过实证分析验证了该模型的可行性。顾强[13]采用直觉模糊隶属度法和层次分析法,构建了装配式水工建筑物经济性评价指标体系,可根据评价结果判断水利工程是否适合使用装配式建造模式。

在水利工程中应用装配式建筑的优势主要体现在以下几点:①精密生产,质量可控。装配式预制构件的生产全程在预制工厂中采用标准化模具完成,不仅提高了构件的浇筑精度,还规避了恶劣环境对混凝土凝结的不利影响,为预制构件的质量提供保证。②提高效率,缩短工期。水利工程由于其特殊的行业性质往往要求施工过程在枯水季完成,故水利工程对工期的要求远超其他类型的建筑,而水利工程装配式建筑在现场的施工作业以预制构件的吊装和连接为主,可大幅缩短工期。③环境友好,绿色低碳。水利工程装配式建筑选用的水工预制构件具备薄、轻、巧、强的优点,可大幅减少材料和能源的消耗,符合当下低碳减排的建造新要求。

装配式建筑在政府的鼓励和支持下发展迅速,但目前采用装配式模式建设水利工程尚存在一些阻碍:①产能与需求不匹配,整体造价偏高。目前已有的预制工厂主要面向房屋建筑工程,鲜有水利工程的预制构件生产商。生产预制构件需要在前期投入高昂的模具设计费用,中后期的构件运输和吊装费用也不低,均带来了明显的成本增量。有研究表明,相较于传统现浇建造模式,装配式建筑的成本要增加 237 ~ 437 元/m^2[14],且预制率每提高 10%,成本增加 150 元/m^2[15]。②装运风险高,辐射范围有限。预制构件因其体积和质量较大的特点,在物流运输、二次搬运和吊装的过程中均存在较大风险。预制构件装运的困难,也同时导致了预制工厂辐射范围受到限制。③实践经验少,专业人才缺乏。现阶段水利工程应用装配式建筑的实践主要局限于小型农田水利工程,中、大型的水利工程装配式建筑极为罕见。不仅如此,与装配式建造模式对技术人员的高要求相悖,水利行业对懂技术、懂产业的专业人才储备尚不充分。

目前针对水利工程装配式建筑的研究大多从技术发展和评价两方面进行,评价研究也是基于成本、质量、进度、安全等传统角度,基于环境角度的评价成果很少。虽然我国装配式建筑发展遇到的首要阻碍是高建造成本,但随着我国生态文明建设以及可持续发展理念的深入贯彻,仅用成本、质量等传统指标来衡量发展装配式建筑的意义显然不够全面。因此,本研究引入生态效率概念对水利工程装配式建筑的环境-经济影响进行系统研究,构建装配式建筑生态效率评价模型并结合工程实例进行定量计算,以期为水利工程装配式建筑未来发展提供参考。

1 评价模型

1.1 评价框架

1.1.1 目标与范围

本研究以水利工程中的泵房为研究对象,目的是通过计算生态效率量化装配式混凝土建筑的环境-经济影响,并将其与传统现浇建造模式对比。定义生态效率评价范围为建筑从无形到建成落地的物化阶段,主要包括构件的生产、运输和现场装配 3 个过程[16]。

1.1.2 框架构建

目前,生态效率在学术界尚无公认的定义,尽管不同的组织机构或学者对生态效率的概念界定略有不同,但本质上都是反映经济价值和环境影响之间的比值关系,本研究采用文献[17]的定义,以经济价值与环境影响的比值表示生态效率。本研究采用单一比值法对生态效率进行评价,计算公式为

$$\eta_{\mathrm{eco}} = \frac{V}{E} = \frac{F/C}{E} \tag{1}$$

式中:η_{eco}为生态效率;V 为产品或服务的价值,本研究采用价值工程理论,以功能与成本的比值表示;E 为环境影响,根据泵房的特点及采用装配式混凝土建筑的可行性,仅考虑温室效应,采用碳排放单一指标法来衡量,即 E 为碳排放计量值;F 为功能度量值;C 为成本计量值。

在计算具体装配式建筑的生态效率时,先根据子模型求出功能值、成本值和碳排放值,再通过系数法得出与传统现浇建造模式相比的功能系数、成本系数与碳排放系数。以功能系数计算为例,计算公式为

$$I_F = \frac{F_{\mathrm{p}}}{F_{\mathrm{o}} + F_{\mathrm{p}}} \tag{2}$$

式中:I_F 为功能系数;F_{p} 为装配式建造模式下的功能度量值;F_{o} 为传统现浇建造模式下的功能度量值。

计算得到功能系数、成本系数与碳排放系数后,生态效率采用下式计算:

$$\eta_{\mathrm{eco}} = \frac{I_F/I_C}{I_E} \tag{3}$$

式中:I_C 为成本系数;I_E 为碳排放系数。

1.2 功能度量模型

1.2.1 建立评价指标体系

本研究生态效率值的计算是相较于传统现浇建造模式而言的,而装配式建造模式与传统现浇建造

模式的区别主要体现在作业方式上,故构建评价指标体系时仅考虑与作业方式相关联的部分。

现有研究对于建筑的功能分析往往偏向于基本属性功能,本研究结合泵房的特点,综合考虑泵房的建筑基本性能与用户需求功能,再将 2 个一级指标细分为结构性能、施工性能、空间性功能、适用性功能和经济性功能 5 个二级指标。根据物化阶段的工程建设活动,将二级指标进一步分解为 19 个三级指标,构建泵房整体功能评价指标体系如图 1 所示(括号中数据为评价指标权重值)。

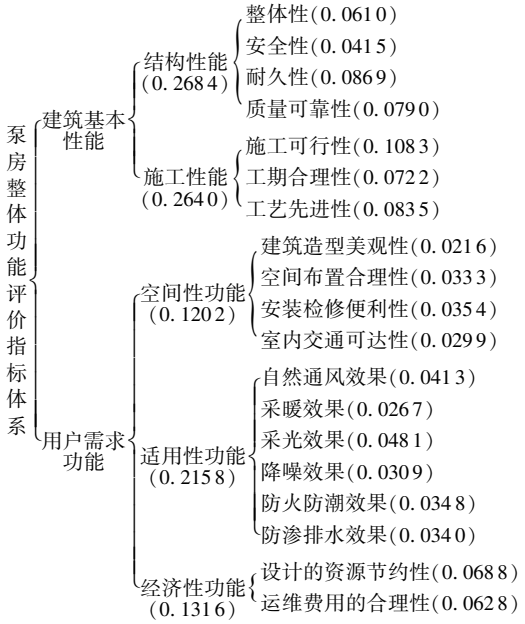


图 1　泵房整体功能评价指标体系

1.2.2　确定指标权重

运用结构熵权法计算各项评价指标的权重。

1.2.2.1　德尔菲法确定“典型排序”

采用德尔菲法收集专家意见,邀请专家组成员根据各自的知识储备与实践经验,独立对测评指标定性排序,通过多轮确认、反馈形成“典型排序”。

n 项指标组成的指标集记为 $C=\{c_1,c_2,\cdots,c_n\}$,假设有 k 个专家对指标从 1 ~ n 进行重要性排序,每个专家形成一个打分集,则专家 i 打分集对应的典型排序表示为$(a_{i1},a_{i2},\cdots,a_{in})$,得到 k 个专家打分集形成的典型排序矩阵 $\boldsymbol{A}=(a_{ij})_{k\times n}$,其中 $i=1,2,\cdots,k$,$j=1,2,\cdots,n$,a_{ij}为专家 i 对指标 c_j 的排序。

1.2.2.2　盲度分析

为消除典型排序矩阵中由数据噪声导致的偏差,采用熵理论计算矩阵 $\boldsymbol{A}$ 的熵值。矩阵 $\boldsymbol{A}$ 中任一典型元素 a_{ij},实现其典型排序定量转化的定性排序转化隶属函数为

$$b_{ij}=\frac{\ln(m-a_{ij})}{\ln(m-1)} \tag{4}$$

式中:b_{ij}为 a_{ij}对应的隶属函数值,$\boldsymbol{B}=(b_{ij})_{k\times n}$为隶属度矩阵;$m$ 为参数转化量,且 $m=n+2$。

假设专家对指标的影响度一致,称 k 个专家对指标 c_j 的一致看法为平均认知度 b_j:

$$b_j=(b_{1j}+b_{2j}+\cdots+b_{kj})/k \tag{5}$$

认知盲度指专家对指标认知产生的不确定性,记为 Q_j:

$$Q_j=\left|\{[\max(b_{1j},b_{2j},\cdots,b_{kj})-b_j]+[\min(b_{1j},b_{2j},\cdots,b_{kj})-b_j]\}/2\right| \tag{6}$$

针对指标 c_j,k 个专家的总体认知度 x_j 为

$$x_j=b_j(1-Q_j)\qquad(x_j>0) \tag{7}$$

得到指标集 C 的评价向量 $\boldsymbol{X}=(x_1,x_2,\cdots,x_n)$。

1.2.2.3　归一化处理

归一化处理后得指标 c_j 的权重 w_j,令:

$$w_j=x_j\Big/\sum_{j=1}^{n}x_j \tag{8}$$

由式(8)可得到全体专家对指标集 C 中所有指标重要性程度的一致性判断$(w_1,w_2,\cdots,w_n)$,$\boldsymbol{W}=(w_1,w_2,\cdots,w_n)$为 $C=\{c_1,c_2,\cdots,c_n\}$的权向量。

1.2.3　构建功能度量模型

在计算功能得分时,首先建立评价指标体系,在此基础上采用结构熵权法确定指标评价权重,然后再次邀请专家对各评价指标打分,最后根据各评价指标权重与综合得分的乘积计算功能总得分,计算公式为

$$F=\sum_{j=1}^{n}w_jf_j \tag{9}$$

式中f_j 为指标c_j 的综合得分,取专家打分均值。

1.3　成本计量模型

物化阶段的成本是建筑产品在交付使用前所产生的费用之和,本研究采用生命周期成本(life cycle cost, LCC)理论构建成本计量模型。该理论的分析步骤包括:确定研究目标和范围,定义成本构成,构建成本计量模型并计算,结果分析。

建筑工程成本计算一般参照工程量清单进行,本研究在相关研究[18-22]的基础上,对装配式混凝土建筑成本构成进行分析,结果表明:土建部分作为总成本的主体构成部分,是造成预制混凝土建筑造价增加的主要原因,费用差异主要体现在直接费部分,其余部分较总成本而言基本相同,可忽略不计。故为简化分析过程,本研究仅考虑土建工程中造成两种建造模式成本差异的部分,包括主体工程、砌筑工程、措施项目、保温隔热工程和抹灰工程。

假设除预制部分外,其余皆为现浇混凝土部分,装配式混凝土泵房物化阶段成本计量模型如下:

$$C_{\mathrm{s}}=C_{\mathrm{p}}+C_{\mathrm{o}} \tag{10}$$

其中　$C_{\mathrm{p}}=\sum_{u=1}^{d}\sum_{r=1}^{3}\sum_{q=1}^{4}C_{urq,\mathrm{p}}$　　$C_{\mathrm{o}}=\sum_{q=1}^{4}V_{\mathrm{o}}P_{q,\mathrm{o}}$

式中：C_s 为装配式建筑的总成本；C_p 为预制部分总成本；C_o 为现浇部分总成本；u 为预制构件的种类；r 为物化过程的阶段（生产、运输、安装）；q 为成本构成要素，q 取值为 1、2、3、4，分别表示直接费的人、材、机和措施项目成本；$C_{urq,p}$ 为预制构件 u 在 r 阶段的第 q 项成本；V_o 为现浇部分体积；$P_{q,o}$ 为单位现浇体积的第 q 项成本。

若采用传统现浇建造模式，则无须考虑预制部分，只需计算 C_o。

1.4 碳排放计量模型

本研究基于生命周期评价（life cycle assessment，LCA）的概念与原理，采用碳排放生命周期评价方法对装配式混凝土建筑的环境影响进行定量评价，参考 ISO 14040 系列标准，将评价流程划分为 4 个步骤：①目标与范围界定。目标是对装配式混凝土泵房的碳排放量及产生的环境影响进行评估，范围为物化阶段。②碳排放路径分析。收集装配式混凝土泵房物化阶段涉及碳排放的数据清单，主要包括能源和材料消耗两大类。③影响评价。构建碳排放计量模型对碳排放进行定量计算，并分析环境影响。④结果解释。对结果进行客观解释与说明。

采用目前较为成熟的排放系数法建立计量模型，对预制部分和现浇部分进行单独核算，计算公式为

$$E_s = E_p + E_o \tag{11}$$

其中 $E_p = \sum_{u=1}^{d}\sum_{r=1}^{3}\sum_{z=1}^{g} N_{urz,p} Q_z \qquad E_o = \sum_{z=1}^{g} N_{z,o} Q_z$

式中：E_s 为装配式建筑碳排放总量；E_p 为预制部分碳排放总量；E_o 为现浇部分碳排放总量；g 为碳排放源总数（本研究只考虑材料与能源两大类）；$N_{urz,p}$ 为预制构件 u 在 r 阶段的 z 类碳排放源消耗量；$N_{z,o}$ 为现浇部分 z 类碳排放源的消耗量；Q_z 为 z 类碳排放源的碳排放因子。

若采用传统现浇建造模式，则无须考虑预制部分，只需计算 E_o。

2 工程实例分析

以引江济淮某泵站泵房为例，该项目由地上两层构成，建筑面积约每层 400 m^2，使用的装配式结构预制构件包括预制叠合板、预制外墙、预制楼梯和预制阳台，共计 136.20 m^3（表 1），其余部分采用传统现浇建造模式完成，共计 165 m^3。

2.1 数据来源

原始数据分为功能、成本、碳排放 3 块，其中功能部分的数据来源于 12 位专家对指标的排序与评分；成本部分的数据来源于项目资料、TY01-01（01）—2016《装配式建筑工程消耗量定额》、项目建设时期的建设材料市场信息价；碳排放因子的选取主要基于 IPCC 公布的数据、中国区域电网基准线排放因子[23]和 GB/T 51366—2019《建筑碳排放计算标准》，同时结合地区因素和相关文献[24-25]进行调整。

表 1 预制构件信息汇总

预制构件种类	总体积/m^3	总数量/件	平均单件钢筋质量/kg
预制叠合板	14.60	35	53
预制外墙	112.25	70	170
预制楼梯	3.70	2	208
预制阳台	5.65	4	154

2.2 功能度量值的计算

向 12 位专家发放问卷，邀请他们对二、三级指标进行排序，并为三级指标打分，分值取 1～10 之间的自然数，最终以专家打分均值作为该指标的得分。

采用结构熵权法确定二级指标和三级指标权重，结果见图 1。将三级指标权重与该指标的得分相乘后累加即为某方案的功能值。经计算，装配式建造模式和传统现浇建造模式的功能分分别为 8.684 9 和 7.925 6。

2.3 成本计量值的计算

参考 TY01-01（01）—2016《装配式建筑工程消耗量定额》，生产与安装阶段成本可按消耗量定额合并计算，运输阶段成本独立计算。

a. 生产与安装阶段成本。项目建设时期预制叠合板除税价格为 2 895.67 元/m^3，预制外墙为 3 417.74 元/m^3，预制楼梯为 2 975.02 元/m^3，预制阳台为 3 339.16 元/m^3。参考定额及相关规范文件可计算各预制构件在生产与安装阶段的单位成本，经计算，生产与安装阶段预制叠合板成本为 3 205.27 元/m^3，预制外墙为 3 748.14 元/m^3，预制楼梯为 3 464.18 元/m^3，预制阳台为 3 672.86 元/m^3，结合各预制构件的工程量，汇总得到预制部分生产与安装阶段成本为 501 081 元。

b. 运输阶段成本。泵房包含 4 种预制构件，共计 111 件，根据总剩余空间最小化原则制定运输方案，运输次数约为 13 次。项目施工场地与预制工厂之间的运输距离约为 80 km，综合考虑施工场地内的二次运输，单次运输成本为 1 100 元，运输阶段总成本为 14 300 元。

c. 总成本。预制构件在生产、运输、安装阶段的成本汇总后得预制部分总成本 515 381 元。除预制部分外，还需以同样的方式计算现浇部分成本，与预制部分成本汇总后得总成本 1 024 445 元。

假设本项目采取传统现浇建造模式，预制部分等体积转为现浇，根据总工程量及单价计算传统现浇建造模式下的总成本为 929 274 元。

2.4 碳排放计量值的计算

根据碳排放计量模型,对能源和材料两种类型的碳排放因子进行汇总。其中,能源类中柴油和电力的碳排放因子分别为 2.73 $kgCO_{2e}/kg$ 和 0.7921 $kgCO_{2e}/(kW \cdot h)$;材料类中钢筋、混凝土、砂浆、铝、木材、砌块的碳排放因子分别为 2.34 $kgCO_{2e}/kg$、295.00 $kgCO_{2e}/m^3$、234.00 $kgCO_{2e}/t$、2.60 $kgCO_{2e}/kg$、110.54 $kgCO_{2e}/kg$ 和 184.26 $kgCO_{2e}/m^3$。

参考项目资料及定额,对生产、运输和安装阶段的能源、材料消耗量进行核算,根据碳排放计量模型中预制部分碳排放计算公式,可得本案例预制部分碳排放量为 79.786 tCO_{2e}。同理计算现浇部分的碳排放,汇总可得装配式建造模式的碳排放总量为 195.045 tCO_{2e}。

在计算传统现浇建造模式的碳排放总量时,将预制部分等体积转为现浇,可得传统现浇建造模式的碳排放量为 210.401 tCO_{2e},还需考虑 4% 的额外钢筋耗损,故传统现浇建造模式下的总碳排放量为 210.539 tCO_{2e}。

2.5 生态效率的计算

将前面的计算结果代入式(2)和式(3),可得到生态效率值,如表 2 所示。

表 2 两种建造模式计算结果

建造模式	功能值	成本值/元	碳排放值/tCO_{2e}	功能系数	成本系数	碳排放系数	生态效率值
装配式	8.6849	1024445	195.045	0.523	0.524	0.479	2.082
传统现浇	7.9256	929274	210.539	0.477	0.476	0.521	1.925

2.6 结果分析

计算结果(表 2)表明,采用装配式建造模式所带来的环境-经济影响更好,生态效率值较传统现浇建造模式提升了 8.16%,也就是说,装配式建筑消耗单位环境影响所创造的产品或服务价值,比传统现浇建造模式高 8.16%。

a. 从功能系数来看,装配式建造模式较传统现浇建造模式高出 9.64%, 表明在功能方面更具优势。功能评价中各指标得分表明,装配式建造模式在保证其他指标得分与传统现浇建造模式持平的情况下,在经济性功能方面表现突出,同时,得益于装配式建造模式采用预制构件建造的固有优势,装配式建造模式在工期和质量可靠性方面表现更好,故其在结构性能与施工性能分类下的大部分指标得分更优秀。

b. 从成本系数来看,装配式建造模式较传统现浇建造模式高出 10.08%,整体造价偏高,这也是目前装配式建筑发展的主要阻碍之一。高成本归根结底是技术不成熟造成的,包括生产工艺、技术体系等的不完善,人员素质不高以及尚未形成相对统一的成本计量规则等,反映在数据上就是生产、安装阶段成本的增加,该部分成本占预制部分总成本的 97.23%,在考虑成本降低措施时应着重关注这两个阶段。未来,水利行业可尝试与房屋建筑部门的预制工厂合作,通过增开水利构件模具的形式“借鸡下蛋”,促进生产阶段成本降低。除了政府、行业层面的措施外,还可考虑引入新技术和优化预制构件生产流水线,如 BIM 技术与装配式模式结合,提高生产及施工效率,以达到降低装配式混凝土建筑整体成本的目的。

c. 从环境影响来看,装配式模式的碳排放系数降低了 8.06%,这是因为预制工厂标准化的生产方式大幅提高了材料与能源的有效利用率,且随着装配率的提高,建筑在物化阶段的碳排放还将进一步减少。计算过程表明,无论是装配式建造模式还是传统现浇建造模式,碳排放的主要来源都是材料的消耗,占碳排放总量的 90% 以上,为了更好地达到生态保护的目的,除了提高装配率,装配式建筑还应在材料和能源,尤其是材料的使用上提高效率。

3 结 语

本研究针对水利工程装配式建筑的生态效率评价问题,基于单一比值法建立了装配式混凝土泵房的生态效率定量评价模型,并结合实际项目对生态效率进行了计算,可为装配式建筑绿色发展提供案例参考。相较于传统现浇建造模式,水利工程在应用装配式建造模式时有更好的生态效率,具体来说,在功能和碳排放方面都更有优势,但在成本上,因目前技术不成熟的原因稍逊于传统现浇建造模式。为进一步提升水利工程装配式建筑的生态效率,未来可在成本和环境影响两方面着重发力。成本方面,可采用与房建部门合作、优化预制构件生产流水线等方法,降低水利工程装配式建筑的建造成本;环境影响方面,可通过提高材料和能源使用效率的方式减少资源消耗量,进一步提升环境效益。

参考文献:

[1] 习近平. 在第七十五届联合国大会一般性辩论上的讲话[J]. 中华人民共和国国务院公报,2020(28):5-7.

[2] 中共中央国务院关于进一步加强城市规划建设管理工作的若干意见(2016 年 2 月 6 日)摘录[J]. 城市规划学刊,2016(2):4.

[3] 薛红. 建造成本导向下装配式建筑项目利益相关者协作机制研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2020.

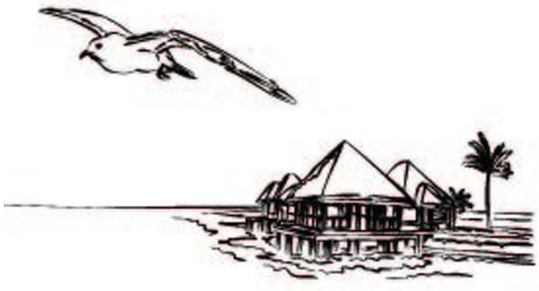
[4] 李克强. 政府工作报告[N]. 人民日报,2021-03-13(001).

(下转第 62 页)

53-58.
[10] 杨兴雨,刘伟龙,井明月,等.基于模糊收益率的分散化投资组合调整策略[J].广东工业大学学报,2020,37(5):13-21.
[11] 黄裕春,雷才嘉,李柏新,等.基于模糊决策的配电网扩展规划综合评价系统[J].能源与环保,2022,44(3):236-241.
[12] 雷震,郝方.PPP 水利项目模糊期权价值评估及影响因素分析[J].水利经济,2017,35(6):33-37.
[13] 王喜平,赵齐,谭锡崇,等.基于模糊实物期权的燃煤电厂 CCS 投资决策研究[J].工业技术经济,2019,38(12):148-155.
[14] 谢季坚,刘承平.模糊数学方法及其应用[M].武汉:华中科技大学出版社,2013.
[15] 张泽洋,刘强,王刚,等.基于 AHP-模糊数学模型和逐项评价法的凤河健康评价研究[J].人民珠江,2023,44(1):123-131.
[16] JIANG D. Integrated evaluation of corporate investment decision performance based on fuzzy sets and BP Neural Networks[J]. Journal of Sensors, 2022(7628124):1-7.
[17] MIN W. Comprehensive evaluation of government economic management performance based on multidimensional data mining in fuzzy comprehensive environment[J]. Journal of Environmental and Public Health,2022(4265125):1-10.
[18] 马可可,王祺,周律,等.标准化水厂建设工程造价模型[J].南水北调与水利科技(中英文),2021,19(1):191-197.

(收稿日期:2022-01-09 编辑:高虹)

(上接第 51 页)

[5] 习近平.高举中国特色社会主义伟大旗帜 为全面建设社会主义现代化国家而团结奋斗——在中国共产党第二十次全国代表大会上的报告[J].中华人民共和国国务院公报,2022(30):4-27.
[6] 袁振民.装配式混凝土结构建筑吊装序列规划与控制研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2019.
[7] 洪晓林,武世翔,刘复新.农田水利装配式建筑物技术研究与推广[J].水利水运工程学报,2001(1):62-67.
[8] 侯新月,钟幼兰.寒冷地区装配式农田小闸的应用[J].黑龙江水利科技,2011,39(3):88.
[9] 袁承斌,程吉林,钟小平,等.一种新型全装配式田间涵闸:CN108086265A [P].2018-05-29.
[10] 张少卿.田间装配式涵闸研究与应用[D].扬州:扬州大学,2018.
[11] 黄远洪.基于熵权—层次分析法的装配式水闸施工安全风险评价研究[J].中国水能及电气化,2021(7):27-31.
[12] 张景奎,刘长顺.小型渠系装配式建筑质量评价体系研究[J].水利发展研究,2021,21(6):102-105.
[13] 顾强.小型水工建筑物装配化技术相关问题研究[D].扬州:扬州大学,2021.
[14] MAO C, XIE F, HOU L, et al. Cost analysis for sustainable off-site construction based on a multiple-case study in China[J]. Habitat International, 2016, 57:215-222.
[15] 邹迎辉.EPC 模式下装配式建筑成本控制研究[J].建筑经济,2020,41(11):47-51.
[16] 苏舒,李小冬,张智慧.基于资源分类的资源耗竭度及当量系数[J].安全与环境学报,2015,15(1):339-343.
[17] WILLARD B. The sustainability advantage: seven business case benefits of a triple bottom line[M]. Cabriola Island: New Society Publishers,2002.
[18] 沈阳建筑大学课题组.装配整体式建筑工程成本分析研究报告[R].沈阳:沈阳建筑大学,2012.
[19] 李丽红,耿博慧,齐宝库,等.装配式建筑工程与现浇建筑工程成本对比与实证研究[J].建筑经济,2013(9):102-105.
[20] 李丽红,肖祖海,付欣,等.装配整体式建筑土建工程成本分析[J].建筑经济,2014,35(11):63-67.
[21] 冯清洁,李检保,王勇.基于分析统计的装配式与现浇式成本比较研究[J].建筑经济,2018,39(2):49-53.
[22] 苟寒梅,毛超,董茜月.预制装配式与现浇式建筑施工成本对比研究[J].建筑经济,2018,39(3):71-74.
[23] 中华人民共和国生态环境部应对气候变化司.2019 年度减排项目中国区域电网基准线排放因子[EB/OL].[2020-12-29]. http://www.mee.gov.cn/ ywgz/ydqhbh/wsqtkz/202012/t20201229_815386.shtml.
[24] 高源雪.建筑产品物化阶段碳足迹评价方法与实证研究[D].北京:清华大学,2012.
[25] 曹杰.住宅建筑全生命周期的碳足迹研究[D].重庆:重庆大学,2017.

(收稿日期:2022-03-04 编辑:熊水斌)