DOI:10.3880/j.issn.1003-9511.2023.02.010

基于模糊经济计算的自来水厂 PPP 项目投资决策研究

杨　冰[1],李慧敏[2],周雪涛[3]

(1. 浙江省钱塘江管理局勘测设计院,浙江 杭州　310016; 2. 华北水利水电大学水利学院,河南 郑州　450046;
3. 中国电力建设集团华东勘测设计研究院,浙江 杭州　311122)

摘要:水是城市生活的重要资源,会对居民的生活产生一定影响。城市自来水厂具有一定的公益性质,其经济利益具有一定的限制,再加上部分城市存在不同程度的财政困难,使得自来水厂存在资金短缺的现象,无法满足正常运营需要。因此,为更好地适应市场经济发展,促进自来水厂的长期稳定,需要依靠资本的投资。在建设及运营期间,自来水厂项目具有诸多不确定性,利用传统的投资决策模型无法充分考虑项目的不确定性,可能会直接影响投资决策的可靠性和科学性。在工程经济模糊计算的基础上,构建基于模糊经济计算的自来水厂投资决策模型,以研究自来水厂 PPP 项目投资决策。通过实例计算可知,模糊工程经济方法具有处理此类不确定性问题的适用性和有效性,能为投资者提供项目收益的多种可能性,帮助投资者降低投资风险。

关键词:城市用水;工程经济;投资决策;PPP 项目

中图分类号:F299.24;TV9　　**文献标志码:**A　　**文章编号:**1003-9511(2023)02-0058-05

城市用水是城市经济,城市发展的基础性资源。《"十四五"节水型社会建设规划》提出,节水型社会建设的重点任务之一是要补齐供水管网短板,新城区高起点规划、高标准建设供水管网系统[1]。城市供水管网系统必须满足城市发展和城镇居民的生产、生活、城市绿化及环境卫生等用水需求,而自来水厂具有可投资价值,是城市供水管网系统中关键的一环[2],采用政府和社会资本合作(Public-Private-Partnership,PPP)项目模式对减轻政府财政负担、提高基础设施提质增效具有重要意义[3]。由于自来水厂 PPP 项目在建设及运营期间存在诸多不确定性因素,比如,原水净化工艺精进导致生产成本具有不确定性,原水水量与水价不确定性及售出水量不确定性,未来水价的高低因与不同地区的水资源供需形势、经济社会发展水平和居民承受能力相关具有不确定性等[4]。如何充分考虑这些不确定性因素,降低此类风险发生的概率,是做出正确投资决策的关键。

传统投资决策依赖于工程经济学中经济评价方法,分析项目未来可能得到的收益,但项目的收益往往会受市场需求、通货膨胀等不确定性因素的影响,如果在投资决策过程中没有充分考虑这些不确定因素,就可能会做出错误的投资决策。Zadeh[5]提出,模糊数学可用于不确定性经济决策中,同时模糊经济学可将不确定性的经济参数进行模糊化表达。模糊工程经济学提出之后,国内外学者进行了相关开拓性的研究。如,Kanhraman 等[6]给出了模糊最优因子、模糊单利与复利、模糊名义利率与实际利率、模糊离散与连续复利等工程经济分析的基本术语;Liou 等[7]将模糊参数应用于等价均匀年价值分析,研究了模糊集在经济决策问题中的作用和重要性;Appadoo 等[8]提出模糊可能净现值的封闭表达式,构建了可能性模糊净现值模型;张志君等[9]利用基于模糊集的水资源安全评价方法,对 2016 年新疆水资源安全状况进行了评价;杨兴雨等[10]将风险资产的收益率视为模糊变量,通过建立一个模糊收益率拟合模型确定了各资产收益率的模糊分布,在模糊环境下考虑交易费用和基数约束的分散化投资组合调整问题;黄裕春等[11]利用模糊决策理论对配电网综合评价系统的综合评价指标进行设计,提出了一

基金项目:教育部人文社会科学项目(19YJC630078);国家自然科学基金面上项目(71974056)

作者简介:杨冰(1997—),女,硕士研究生,主要从事水利工程经济、水文学及水资源研究。E-mail:1372342032@qq.com

通信作者:李慧敏(1982—),男,副教授,博士,主要从事工程项目管理、PPP 项目融资研究。E-mail: lihuimin3646@163.com

种新型模糊决策的配电网扩展规划综合评价系统；雷震等[12]借鉴模糊数学思想，构建模糊决策条件下的 PPP 水利项目期权价值评估模型，找出了模糊期权价值的关键影响因素；王喜平等[13]将三角模糊数和二叉树期权模型相结合，构建了 CCS 投资决策的模糊实物期权模型。基于已有丰富的研究成果，笔者结合模糊经济计算与投资决策，利用模糊工程经济计算方法构建自来水厂 PPP 项目的投资决策模型，体现了自来水厂 PPP 项目收益的多种可能性，旨在帮助投资者了解项目风险，进行合理投资。

1 模糊经济评价

模糊性是客观事物差异的中间过渡中表现出的亦此亦彼性，模糊性不能用随机数学刻画与处理，只能利用模糊数学[14-15]来处理。在对 PPP 项目进行投资决策时，项目未来的收益具有模糊性，而模糊工程经济评价方法恰恰能够解决这一问题。基于参考文献[4-8]的研究成果，首先给出模糊工程经济计算基本经济指标计算方法。

1.1 模糊经济评价参数

内部收益率是投资决策的重要指标之一，在某些情况下，项目被接受和被拒绝的边界是模糊的，在这种情况下，模糊内部收益率 I_{RR} 就能表达这种不确定性。

模糊净现值 N_{PV}、模糊内部收益率 I_{RR} 计算公式为

$$N_{PV} = P_B - P_C = \sum_{t=0}^{n} (B_t - C_t)(1+i)^{-t} \quad (1)$$

$$I_{RR} = \sum_{t=0}^{n} \frac{C_{Ft}}{(1+\tilde{I}_{RR})^t} \quad (2)$$

式中：P_B 为模糊现金流入；P_C 为模糊现金流出；B_t 为第 t 年收入；C_t 为第 t 年费用；n 为运营期年份；i 为基准折现率；C_{Ft} 为第 t 年的现金流量；$\tilde{I}_{RR} = \{I_{RRl}, I_{RRm}, I_{RRu}\}$，$I_{RRl}, I_{RRm}, I_{RRu}$ 分别为模糊内部收益率下界、最有可能模糊内部收益率、模糊内部收益率上界。现金流中涉及的相关数额下界定义为 l，上界定义为 u，最可能的值定义为 m，下列公式同。

1.2 基于三角模糊数的经济分析

构建模糊经济评价数学模型的动机来自这样一种认识，即基准折现率、未来收益和支出的成本会受到不确定性因素的影响[16]。然而在大多数情况下，由于缺乏数据统计信息，很难用概率模型来建模。事实上，通常可得到的是模糊估计收益或定性专家意见，模糊数据有时以“区间估计”“三点估计”“四点估计”的形式表示，可直接转换为矩形模糊数、三角模糊函数和梯形模糊数。

用三角模糊数来描述工程经济计算的不确定性参数，相关参数为

模糊现值 $P = \{P_l, P_m, P_u\}$，模糊终值 $F = \{F_l, F_m, F_u\}$，模糊等价年 $A = \{A_l, A_m, A_u\}$，模糊折现率 $i_{模糊} = \{i_l, i_m, i_u\}$。根据三角模糊数算子及运算性质可得以下模糊数 A 与 P、A 与 F 模糊等值计算公式：

$$A = P\{A/P, i_{模糊}, n\} \quad (3)$$

$$A = F\{A/F, i_{模糊}, n\} \quad (4)$$

其中

$$\{A/P, i_{模糊}, n\} = \left\{\frac{i_l(1+i_l)^n}{(1+i_l)^n-1}, \frac{i_u(1+i_m)^n}{(1+i_m)^n-1}, \frac{i_u(1+i_u)^n}{(1+i_u)^n-1}\right\}$$

$$\{A/F, i_{模糊}, n\} = \left\{\frac{i_l}{(1+i_l)^n-1}, \frac{i_m}{(1+i_m)^n-1}, \frac{i_u}{(1+i_u)^n-1}\right\}$$

2 基于模糊经济计算的自来水厂模糊经济评价模型构建

PPP 自来水厂的年售水量及水价受城市经济发展、人口、通货膨胀、政策等因素影响，会在一定范围内变化，因此具有不确定性。利用三角模糊数表示运营期自来水厂的年售水量、水价的不确定性，基于模糊经济计算方法构建自来水厂经济评价模型：每年售水量为模糊数，其余经济指标均为确定数时的经济评价模型（模型 1）；每年售水量、出厂水价均为模糊数，其余经济指标均为确定数时的经济评价模型（模型 2）。

2.1 模型 1

已知，自来水厂项目年模糊售水量为 $S = \{S_l, S_m, S_u\}$，出厂水价为确定值，设为 $W_{p确定}$，逐年政府补贴设为 G，年运营费用设为 B，每年借款本息和偿还数额设为 K，i 为基准折现率。

2.2 模型 2

已知，自来水厂项目年模糊售水量为 $S = \{S_l, S_m, S_u\}$，模糊出厂水价设为 $W_{p模糊} = \{W_{p模糊l}, W_{p模糊m}, W_{p模糊u}\}$，逐年政府补贴设为 G，年运营费用设为 B，每年借款本息和偿还数额设为 K，i 为基准折现率。

2.3 模型计算

对模型进行计算，可得年运营收入 Q（万元）为

$$Q = SW_p \quad (5)$$

式中 W_p 为出厂水价。

运营第 t 年模糊现金流入 P_{Bt}（万元）为

$$P_{Bt} = Q + G_t \quad (6)$$

式中 G_t 为运营第 t 年政府补贴。

运营第 t 年模糊现金流出 P_{Ct}（万元）为

$$P_{Ct} = B + K \quad (7)$$

运营第 t 年模糊净现金流量 N_{CFt}（万元）为

$$N_{CFt} = P_{Bt} - P_{Ct} \quad (8)$$

将两个模型的模糊净现金流量、模糊净现值分别代入式（1）（2）可得两个模型对应的第 t 年的模糊净现值以及第 t 年的模糊收益率。

3 案例分析

3.1 S 镇自来水厂项目概况

S 镇自来水厂欲采用 PPP 模式,即由政府与社会资本共同出资建设和运营,其中政府控股 5%,社会资本在新项目公司中股权占比为 95%,付费模式为“可行性缺口补贴”。该项目建设期为 2 年,运营期为 20 年。建设总投资为 6 894.6 万元,出厂水价为 5.6 元/m^3,年均售水量约为 342 万 m^3,年运营费为 1 551.9 万元。该项目的资本金是总投资的 25%,项目合理利润率采用 6.5%,基准折现率采用 6.5%,社会资本对 S 镇自来水厂项目投资前,需对其进行经济评价,从而做出投资决策。

S 镇自来水厂现金流入共计 47 477.2 万元,其中,运营收入为 38 304 万元;补贴收入为 9 173 万元。现金流出共计 42 650.9 万元,其中,建设投资资本金 1 723.7 万元,运营费 31 038 万元,借款本息和偿还年费用 9 889.3 万元,借款利息 277.3 万元,借款本息和 5 448.3 万元,建设投资 6 894.6 万元。净现金流量为 4 826.3 万元,净现值 749.6 万元,全投资内部收益率为 9%。

在传统经济评价计算中,使用的年售水量为年均售水量 342 万 m^3,但在实际情况下,每一年的售水量、水价受综合因素影响会在一定范围内波动,项目实际净现值和内部收益率亦是不确定的。为了帮助决策者了解项目投资的风险,可用模糊数代替不确定性经济指标进行模糊经济评价。

3.2 模糊经济评价计算

3.2.1 模型 1 计算

本案例中,项目年运营费用 $B=1559.1$ 万元,每年借款本利和偿还数额 $K=494.5$ 万元,政府逐年补贴详细金额见表 1,年模糊售水量 S(万 m^3)设为 $\{307.8,342,393.3\}$。其中,最小值为最可能的值减少 10%,最大值为最可能的值增加 15%。可得模糊年运营收入 Q_1(万元)、运营第 1 年模糊现金流入 $P_{B1,1}$(万元)为

$$Q_1 = SW_{p确定} = \{1\,723.7, 1\,915.2, 2\,202.5\} \tag{9}$$

$$P_{B1,1} = Q_1 + G_1 = \{1\,832.7, 2\,042.2, 2\,311.5\} \tag{10}$$

表 1 政府逐年补贴数额 单位:万元

年份	数额	年份	数额	年份	数额	年份	数额
第 1 年	109.03	第 6 年	246.50	第 11 年	434.84	第 16 年	692.89
第 2 年	133.17	第 7 年	279.58	第 12 年	480.16	第 17 年	754.99
第 3 年	158.88	第 8 年	314.81	第 13 年	528.43	第 18 年	821.12
第 4 年	186.27	第 9 年	352.33	第 14 年	579.84	第 19 年	891.55
第 5 年	215.43	第 10 年	392.28	第 15 年	634.58	第 20 年	966.56

运营第 1 年现金流出 P_{C1}(万元)为

$$P_{C1} = B + K = 2\,046.4 \tag{11}$$

运营第 1 年模糊净现金流量 $N_{CF1,1}$(万元)为

$$N_{CF1,1} = P_{B1,1} - P_{C1} = \{-213.7, -22.1, 265.1\} \tag{12}$$

将模糊净现金流量代入式(1)可得模糊净现值。同理可得运营第 2 年至运营第 20 年每一年的三角模糊净现值,由于篇幅限制,在此不列出每一年的现金模糊流量。

将每一年模糊净现金流量数据代入式(1)(2)可得模型 1 的模糊净现值 $N_{PV,1}$(万元)为 $\{-1\,111.0, 749.6, 3\,540.9\}$,模糊收益率 $I_{RR,1}$ 为 $\{2\%, 9\%, 20\%\}$。

3.2.2 模型 2 计算

在本案例中,项目年运营费用 B 为 1 559.1 万元,每年借款本利和偿还数额 K 为 494.5 万元,政府逐年补贴 G_t 收入为 9 173.0 万元,年模糊售水量 S(万 m^3)为 $\{307.8, 342, 393.3\}$,最小值为最可能的值减少 10%,最大值为最可能的值增加 15%,模糊出厂水价 $W_{p模糊}$(元/m^3)为 $\{5.5, 5.6, 5.7\}$,可得模糊年运营收入 Q_2(万元)为

$$Q_2 = SW_{p模糊} = \{1\,692.9, 1\,915.2, 2\,241.8\} \tag{13}$$

运营第 1 年模糊现金流入 $P_{B1,2}$(万元)为

$$P_{B1,2} = Q_2 + G_1 = \{1\,801.9, 2\,042.2, 2\,350.8\} \tag{14}$$

运营第 1 年模糊净现金流量 $N_{CF1,2}$(万元)为

$$N_{CF1,2} = P_{B1,2} - P_{C1} = \{-244.4, -22.1, 304.5\} \tag{15}$$

同理可得运营第 2 年至运营第 20 年每一年的三角模糊净现金流量值。

将每一年模糊净现金流量数据代入式(1)(2)可得模糊净现值 $N_{PV,2}$(万元)为 $\{-1\,410.0, 749.6, 3\,922.5\}$,模糊内部收益率 $I_{RR,2}$ 为 $\{1\%, 9\%, 22\%\}$。综上可得,模型 1、模型 2 的模糊净现值、模糊内部收益率的隶属函数和隶属函数图像。

3.2.3 结果与讨论

模型 1、模型 2 模糊内部收益率隶属函数 $A_{IRR,1}$、$A_{IRR,2}$ 如图 1 所示。

$$A_{IRR,1} = \begin{cases} \dfrac{I_{RR,1} - 2\%}{9\% - 2\%} & 2\% \leqslant I_{RR,1} \leqslant 9\% \\ \dfrac{20\% - I_{RR,1}}{20\% - 9\%} & 9\% \leqslant I_{RR,1} \leqslant 20\% \end{cases} \tag{16}$$

$$A_{IRR,2} = \begin{cases} \dfrac{I_{RR,2} - 1\%}{9\% - 1\%} & 1\% \leqslant I_{RR,2} \leqslant 9\% \\ \dfrac{22\% - I_{RR,2}}{22\% - 9\%} & 9\% \leqslant I_{RR,2} \leqslant 22\% \end{cases} \tag{17}$$

模型 1、模型 2 模糊净现值隶属函数 $A_{NPV,1}$、$A_{NPV,2}$ 如图 2 所示。

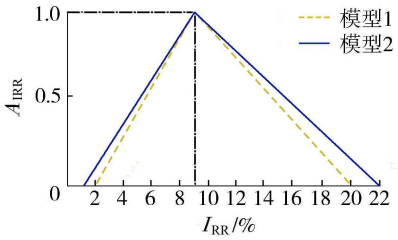


图 1　模型 1、模型 2 模糊内部收益率隶属函数

$$A_{NPV,1}=\begin{cases}\dfrac{N_{PV,1}-(-1\,111.0)}{749.6-(-1\,111.0)} & -1\,111.0\leqslant N_{PV,1}\leqslant 749.6\\ \dfrac{3\,540.9-N_{PV,1}}{3\,540.9-749.6} & 749.6\leqslant N_{PV,1}\leqslant 3\,540.9\end{cases}\tag{18}$$

$$A_{NPV,2}=\begin{cases}\dfrac{N_{PV,2}-(-1\,410.0)}{749.6-(-1\,410.0)} & -1\,410.0\leqslant N_{PV,2}\leqslant 749.6\\ \dfrac{3\,922.5-N_{PV,2}}{3\,922.5-749.6} & 749.6\leqslant N_{PV,2}\leqslant 3\,922.5\end{cases}\tag{19}$$

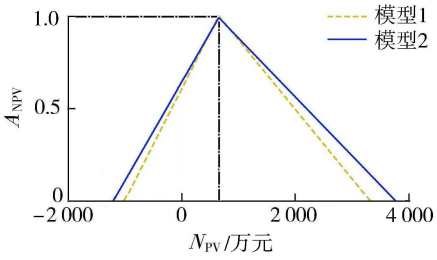


图 2　模型 1、模型 2 模糊净现值隶属函数

由图 2 可知，最可能模糊净现值为 749.58 万元，最可能模糊收益率为 9%。根据图 1 和图 2 可知，该项目存在收益为 0 的情况，即模糊收益率小于基准折现率 6.5%、模糊净现值小于 0 时，该项目亏损，不宜投资。隶属函数图像左半部分实际反映的是项目风险的大小，越接近最小可能值，风险越大；右半部分反映的是项目能够获益多少，越接近最大可能值，项目的收益就越大；模糊隶属度值越大，对应的概率越大。同时，模型 2 隶属函数范围更广，因为模型 2 中水价、水量都是模糊的，相较于模型 1 能更真实地反映了未来收益的不确定性。

传统经济评价是一种理想化的模型[17]，计算项目未来内部收益率时，没有考虑水量及水价的变化，而在模糊评价中，模糊收益率是不确定的，有大于基准收益率的模糊隶属度，有小于基准收益率模糊隶属度，这时，投资者可以根据项目收益的不确定性进行投资，充分地认识到项目收益和风险的不确定性，根据自己的风险偏好、风险承受能力做出决策。相较于传统经济评价，模糊经济评价表达了经济评价指标的不确定性，更加强调了不确定性也可以创造价值的特性。

4　结　语

社会资本投资前会考虑项目是否具有投资价值[18]。确定性条件下的传统工程经济分析方法是基于准确的项目成本、收益等参数进行计算投资收益参数的，但在现实中，准确预测未来现金流等数据是不可能的，所以社会资本需要在一个不确定的经济决策环境中进行投资决策，模糊工程经济为处理此类不确定性问题提供了一种可实现的解决方法。本研究首先给出了模糊工程经济计算基本参数的计算公式，其次采用三角模糊数表示 2 个具有不确定性的参数，最后构建了不确定性条件下自来水厂 PPP 项目的模糊经济投资决策模型。应用模糊经济投资决策法进行自来水厂 PPP 项目投资决策，通过综合考虑影响决策的模糊因素，表达了项目未来收益的不确定性，提高了决策水平，使结果更加科学、合理。一般情况下，投资方案的不确定性是客观存在的，不考虑不确定性因素的投资理念是盲目且有风险的，为合理规避投资风险，投资者可以利用模糊经济投资决策方法进行投资决策，该方法适应于灵活多变的投资环境，对于无法用随机性刻画的不确定性因素，投资者可以根据风险偏好、管理经验和内外部消息对未来进行合理预估，从而提高投资决策的准确性和有效性。

参考文献：

[1] 国家发展改革委. “十四五”节水型社会建设规划. [EB/OL]. [2021-10-28]. http://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2021-11/09/content_5649875.htm.

[2] 熊磊，季晓玉. 自来水厂及配套设施 PPP 项目的主要风险控制与建设管理研究[J]. 工程建设与设计，2021(1)：222-224.

[3] 马毅鹏，乔根平. 对运用 PPP 模式吸引社会资本投入水利工程的思考[J]. 水利经济，2016，34(1)：35-37.

[4] 高慧忠，王晓松，孙静，等. 国内外城市居民生活水价及可承受能力分析[J]. 水利经济，2021，39(1)：36-39.

[5] ZADEH L A. Disposifional logic [J]. Applied Mathewatics Letters, 1988, 1(1): 95-99.

[6] KAHRAMAN C, RUAN D, TOLGA E, et al. Capital budgeting techniques using discounted fuzzy versus probabilistic cash flows[J]. Information Sciences, 2002, 142(1): 57-76.

[7] LIOU T S, CHEN C W. Fuzzy decision analysis for alternative selection using a fuzzy annual worth criterion [J]. The Engineering Economist, 2006, 51(1): 19-34.

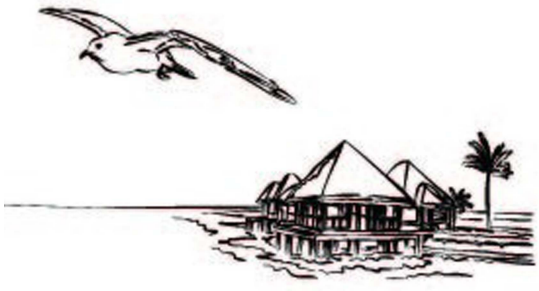
[8] APPSDOO S S, GUPTA P. Possibilistic fuzzy net present value model and application[J]. Mathematical Problems in Engineering, 2014(4): 1-11.

[9] 张志君，陈伏龙，龙爱华，等. 基于模糊集对分析法的新疆水资源安全评价[J]. 水资源保护，2020，36(2)：

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)