

基于蒙特卡罗模拟的建筑中水回用效益模型应用研究

朱天琳^{1,2}, 王广智¹, 倪 稷³, 李 欣¹, 赵文莉^{1,2}

(1. 哈尔滨工业大学 环境学院, 黑龙江 哈尔滨 150090; 2. 中规院(北京)规划设计公司, 北京 100044;
3. 住房和城乡建设部 计划财务与外事司, 北京 100835)

摘要:以建筑中水设施所服务的整个生命周期为尺度,对前期设计、落地建设、实际运维、废弃肃清四个阶段内发生的成本及直接效益进行识别,并以此为基础,进一步构建起以净现值为评价指标的建筑中水项目全生命周期效益预测模型,也即节约洁净水资源所带来的利益。对厦门某高校中水回用项目进行模拟分析,结果表明:该项目全生命周期效益为 964.75 万元,其全生命周期成本为 3 313.65 万元,仅刚收回成本,收益甚微。水价增长率为对建筑中水回用项目全生命周期效益影响最大的因素,为更好的推广建筑中水发展,建议采取以下措施:(1)形成规模效益降本增效;(2)采取经济补贴措施或适当提高自来水价;(3)合理增加初期投资以降低后期运行方面非年度发生的大修、替换等成本。

关键词:全生命周期效益;建筑中水;蒙特卡罗模拟

中图分类号: TU991.67

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2019)06-0909-08

Application of benefit model of reclaimed water in buildings based on Monte Carlo simulation

ZHU Tianlin^{1,2}, WANG Guangzhi¹, NI Ke³, LI Xin¹, ZHAO Wenli^{1,2}

(1. School of Environment, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, China;

2. Caupd Beijing Planning & Design Consultant Co., Beijing 100044, China;

3. Planning Finance and Foreign Affairs Division Ministry of Housing and Urban-Rural Development, Beijing 100835, China)

Abstract: Taking the whole life cycle served by the reclaimed water facilities in the building as the scale, identifying the costs and direct benefits in the four stages of design, construction, operation and maintenance, and disposal, and on this basis, further building up the whole life cycle benefit prediction model of reclaimed water project with net present value as evaluation index, which means the benefits of saving clean water. The simulation analysis on the reclaimed water reuse project of a university in Xiamen shows that the project's whole life cycle benefit is 9.6475 million yuan, and its whole life cycle cost is 33.1365 million yuan. The growth rate of water price is the factor that has the greatest influence on the whole life cycle benefit of reclaimed water projects in buildings. In order to better promote the development of reclaimed water in buildings, the following measures are proposed: (1) Reclaimed water facilities form economies of scale to reduce costs and increase benefits; (2) Take economic subsidy measures or appropriately raise the price of water; (3) Reasonably increase initial investment to reduce non-annual repair and replacement costs in later operation.

Key words: whole life benefit; reclaimed water in building; Monte Carlo simulation

水资源是约束城镇承载规模与可持续发展的重要条件之一,面对北方城市本地水资源不足供求关系极度不平衡,南方城市水环境问题突出、千河过境却无水可用的现状,当务之急是缓解城市严峻的涉水问题,而建筑中水回用作为水资源循环利用、缓解水危机的重要方式^[1],推广其发展迫在眉睫。在日本,为了缓解城市用水紧张,每

年以 130 个的速率增设废水回用设施^[2];在澳大利亚,住宅综合水循环规划理念深入人心,全国近 12% 的人口在使用分散式系统处理回用污水^[3];在新加坡,新生水项目利用 MF+RO+UV 技术将全部废水循环净化至可直接饮用的超纯标准,其产水量几乎占到全国需水量的 40%^[4]。而在我国随着“水十条”颁布,再生水利用指标也进一步趋

收稿日期: 2019-03-29

修改稿日期: 2019-11-25

基金项目: 住房和城乡建设部政策研究项目(JY20171010)

第一作者: 朱天琳(1995—),女,硕士生,主要从事中水价格政策与市政工程规划研究. E-mail: ztlwyh@126.com

通信作者: 王广智(1979—),男,博士,副教授,主要从事水污染控制技术研究. E-mail: hitwgz@126.com

严^[5], 国家已提出将缺水地再生水利用率指标下限抬高至 20% 的要求. 随着技术的进步, 绝大部分的生产和生活污水可以得到最大程度的回收利用. 除了国家技术的扶持外, 国家也出台了一些相关政策来提倡建筑中水的发展, 其前景不容忽视^[6].

但目前“重建轻管”意识固化, 已建中水设施成本倒挂, 水价不合理等问题严重制约了我国建筑中水回用的发展^[7], 因此, 对建筑中水回用经济性研究备受关注. García-Montoya 等人^[8]对住宅小区的回用水网进行了优化, 并引入生命周期方法, 评估其对环境的影响, 使其与经济目标相协调, 以达成降低洁净水消耗和年总成本的目标. 张义庭^[9]指出了污水再生利用工程具有显著的社会和环境效益, 提出将环境会计理论耦合到工程的综合经济分析中, 以环境会计的层面为立脚点, 形成多层次的工程模糊综合评估体系, 并以此完成对其综合效益的度量. 李东等^[10]对西安思源学院中水项目经济性进行了分析并预测了 2017 年项目的节水经济效益, 但没有引入全生命周期理论,

缺乏对成本效益不确定性的量化研究. 柴宏祥等^[11]对绿色建筑的全生命周期综合效益进行了研究, 但引入了环境社会效益, 提高了效益的可观性, 不具有实际意义.

考虑到建筑中水回用项目的直接经济效益是推广其发展的重要环节, 因此, 在技术的层面上构建建筑中水回用效益的分析模型, 引入蒙特卡罗模拟方法, 并通过工程实例进行模拟, 以期能为政府和投资者的决策提供科学合理的依据, 从而积极推动建筑中水回用的发展.

1 工程案例背景

1.1 项目概况

厦门某高校中水站于 2014 年建成, 中水设施占地面积为 512 m². 原水来源于教学区学生公寓生活污水, 处理后回用于冲厕和绿化, 服务学生人数约为 2 万人. 中水设施的设计处理能力达到饱和, 设计处理能力为 4 300 m³/d, 而实际处理规模达到 5 000 m³/d. 其中中水回用量为 2 000 m³/d, 溢流量为 3 000 m³/d. 水量平衡图见图 1.

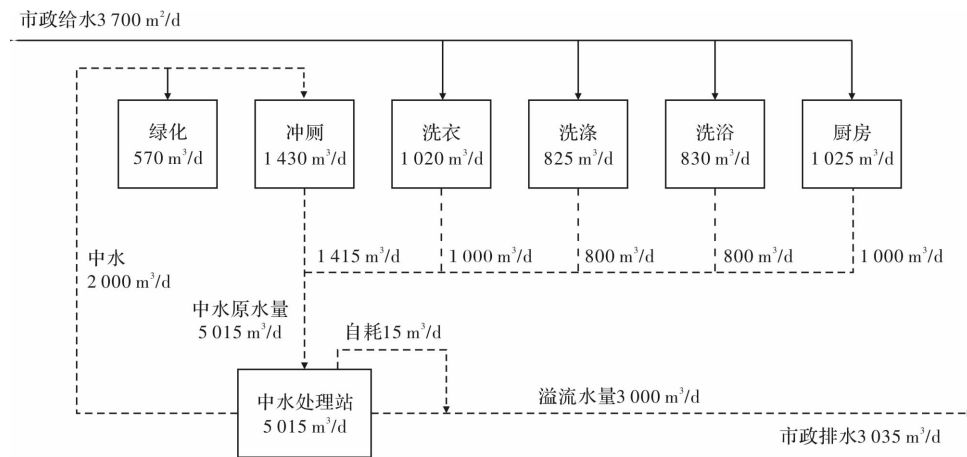


图 1 水量平衡图

Fig. 1 Water balance diagram

1.2 主体工艺

本工程案例的中水处理采用了耐冲击负荷的 A²O 工艺, 校园污水经过前端处理进入中水站后, 通过生物降解以及超滤处理技术, 成为可再次利

用的中水. 校园卫生间内可看到白绿两种颜色的管道, 其中绿色管道中是用来冲厕的中水. 通过这种方式学校每天大致可节约两千吨清洁水. 其中水处理工艺如图 2 所示.

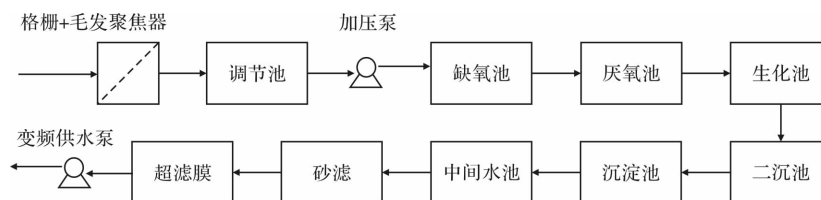


图 2 中水处理工艺流程图

Fig. 2 Flow chart of reclaimed water treatment process

1.3 处理效果

厦门某高校中水站对 BOD₅、NH₃-N、SS 等的

去除效果均良好，处理出水的水质满足《城市杂用水水质》(GB/T 18920-2002)，处理效果见表 1。

表 1 建筑中水系统处理效果

Tab. 1 Treatment effect of reclaimed water system in buildings

项目	pH	SS /mg · L ⁻¹	COD /mg · L ⁻¹	BOD ₅ /mg · L ⁻¹	NH ₃ -N /mg · L ⁻¹	TN /mg · L ⁻¹	TP /mg · L ⁻¹	色度/度	臭味
原水	8-9	≤200	≤300	≤150	≤40	≤50	≤7	≤40	有刺激性
中水	6-9	≤5	≤50	≤10	≤10	≤15	≤0.5	≤15	无不快感

2 建筑中水回用项目成本效益分析与讨论

建筑中水回用项目的全生命周期效益选用净现值作为经济评价指标。由于建筑中水设施的生命周期很长，平均可达到 20~50 a，因此，在研究建筑中水回用项目的效益时，其逐年产生的现金流具有一定的波动性^[12]。为了模拟这种波动的不确定性，本文采用了蒙特卡罗模拟方法^[13]，并依托水晶球软件完成模拟计算。

蒙特卡罗模拟方法利用统计抽样的数学概念^[14]，根据构成全生命周期内综合效益的不同指标变量的分布和特征值，用计算机从各个指标的概率分布中抽取独立样本来对效益净现值进行计算，得到效益净现值的模拟样本值，当达到一定的运行次数时，这些净现值样本分布就可以看做

是净现值的总体分布。

2.1 成本效益构成分解

建筑中水回用工程，通过非传统水源利用的技术，一方面增加了运行、维护等全生命周期成本，而另一方面，产生了节约清洁水带来的经济效益。因此建筑中水回用工程的全生命周期成本效益构成分解可如表 2 所示。

2.2 模型变量分析

2.2.1 折现率

相关研究表明，折现率可采用资本资产定价模型，由无风险报酬率和风险报酬率之和计算^[15]，人民币存款利率和国债利率加权平均计算得到的无风险报酬率^[16]为 3.287%，上市水务公司净资产收益率的加权平均值扣除无风险报酬率作为行业风险报酬率为 4.446%，故折现率为： $R_i=7.733\%$ 。

表 2 建筑中水工程全生命周期成本效益构成分解

Tab. 2 Cost-benefit decomposition of the whole life cycle of reclaimed water engineering in buildings

构成要素	符号	现值	备注
经济效益	$C_{\text{经济效益}}$	$P_{\text{水价}} \times Q_{\text{直接节水}} \times \sum_{N=1}^T \left(\frac{1+b}{1+R_i} \right)^N$	$P_{\text{水价}}$ 为第一年水价 b 水价增长率逐年恒定增长
初始投资	$C_{\text{初始投资}}$	$C_{\text{初始投资}}$	
运行成本	$C_{\text{运行}}$	$P_{\text{运行}} \times Q_{\text{中水处理}} \times (P/A, R_i, T)$	$P_{\text{运行}}$ 为吨水能耗电耗
维修成本	$C_{\text{维修}}$	$C_{\text{维修}} \times \sum_{K=1}^T \left(\frac{1+e}{1+R_i} \right)^K$	e 为维修费年增长率
人工成本	$C_{\text{人工}}$	$C_{\text{人工}} \times \sum_{M=1}^T \left(\frac{1+f}{1+R_i} \right)^M$	f 为人工费年增长率
折旧成本	$C_{\text{折旧}}$	$\frac{C_{\text{折旧}}}{t_h} \times (P/A, R_i, T)$	
大修成本	$C_{\text{大修}}$	$C_{\text{大修}} \times (P/A, [(1+R_i)t_x - 1], INT(T/t_x))$	t_x 为大修频率 INT 为向下取整公式
替换成本	$C_{\text{替换}}$	$C_{\text{替换}} \times (P/A, [(1+R_i)t_h - 1], INT(T/t_h))$	t_h 为替换频率
净残值	$C_{\text{残值}}$	$C_{\text{残值}}(P/F, R_i, T)$	R_i 为折现率 T 为周期

2.2.2 水价

自 1999 年以来,厦门市的居民生活用水价格有 16 年未进行调整,直至 2016 年,民用水中其他非居民生活用水价格由 2.30 元/t,调整为 3.20 元/t^[17],年均增长率约为 2%。厦门市水价与同期各大城市相比,仍处于较低水平,因此未来有一定的上涨空间。

国内外的相关研究表明,居民生活用水的水费支出占家庭总收入的 2.5%~3% 时较为合理^[18]。

2018 年厦门市城镇居民人均可支配收入达到 42 296 元,年增长率为 8.1%。以家庭收入的 2.5% 进行预测,城市居民家庭对水价的承受能力为 10.68 元/t。根据用水需求价格和收入弹性的关系^[19]求得在理想状态下,当用水价格与居民收入对用水量的作用达到一致时,水价的年均增长率需达到 13.4%。

2.2.3 模型变量概率分布

成本效益模型中各构成要素变量及其概率分布见表 3。

表 3 某高校中水回用项目成本效益模型变量概率分布情况

Tab. 3 Probability distribution of variables in the cost-benefit model of a reclaimed water project in a university

成本效益模型变量	基准值	单位	概率分布
水价增长率 b	2%		满足最大值 13.4%, 最小值 0% 的三角分布
经济效益			
直接年节水量 $Q_{\text{直接节水}}$	730 000	m ³ /a	满足标准偏差为 10% 的正态分布
周期 T	50	a	
初始投资 $C_{\text{初始投资}}$	245	万元	
运行成本			
中水处理单位能耗药耗 $P_{\text{运行}}$	0.71	元/m ³	满足最大值 0.78 元/m ³ , 最小值 0.47 元/m ³ 的三角分布
中水处理量 $Q_{\text{中水处理}}$	1 825 000	m ³ /a	满足标准偏差为 10% 的正态分布
维修成本			
维修费 $C_{\text{维修}}$	2.5	万元	
维修费年增长率 e	2%		满足最大值 2.3%, 最小值 1.7% 的三角分布
人工成本			
人工费 $C_{\text{人工}}$	20	万元	
员工工资年增长率 f	8%		满足最大值 12%, 最小值 3% 的三角分布
折旧成本	99.36	万元	
替换成本			
替换成本 $C_{\text{替换}}$	115	万元	满足标准偏差为 10% 的正态分布
替换频率 t_h	15	年/次	满足 10~20 年的离散均匀分布(整数)
大修成本			
大修成本 $C_{\text{大修}}$	2.173 5	万元	满足最大值 2.484 万元(以可计提折旧固定资产的 2.4% 计算), 最小值 1.7595 万元(1.7%) ^[20] 的三角分布
大修频率 t_x	8	年/次	满足 5~10 年的离散均匀分布(整数)
净残值 $C_{\text{残值}}$	4.14	万元	满足最大值 5.157 万元, 最小值 3.105 万元的三角分布

2.3 建筑中水回用项目全生命周期成本效益模型构建

由上述成本效益构成分析可得到模型为:

$$\begin{aligned}
 LCC_{\text{全生命周期效益}} &= LCC_{\text{节水直接效益}} - LCC_{\text{全生命周期成本}} \\
 &= P_{\text{水价}} \times Q_{\text{直接节水}} \times \sum_{N=1}^T \left(\frac{1+b}{1+R_i} \right)^N - [C_{\text{初始投资}} + \\
 &P_{\text{运行}} \times Q_{\text{中水处理}} \times (P/A, R_i, T) + C_{\text{维修}} \times \\
 &\sum_{K=1}^T \left(\frac{1+e}{1+R_i} \right)^K + C_{\text{人工}} \times \sum_{M=1}^T \left(\frac{1+f}{1+R_i} \right)^M + \frac{C_{\text{折旧}}}{t_h} \\
 &\times (P/A, R_i, T) + C_{\text{大修}} \times (P/A, \\
 &[(1+R_i)t_x - 1], INT(T/t_x)) + C_{\text{替换}} \times (P/A,
 \end{aligned}$$

$$[(1+R_i)t_h - 1], INT(T/t_h)) - C_{\text{残值}} (P/F, R_i, T)]$$

2.4 全生命周期成本效益模拟结果与讨论

2.4.1 全生命周期成本模拟结果

利用搭载 crystal ball 软件的 excel 进行蒙特卡罗模拟,保证置信度为 0.95,计算可得到一万个厦门某高校建筑中水回用项目全生命周期成本净现值的模拟结果,根据这些模拟的样本可作出全生命周期成本频率直方图如图 3 所示,累计频率统计图如图 4 所示。

本次蒙特卡罗模拟中得到的全生命周期成本

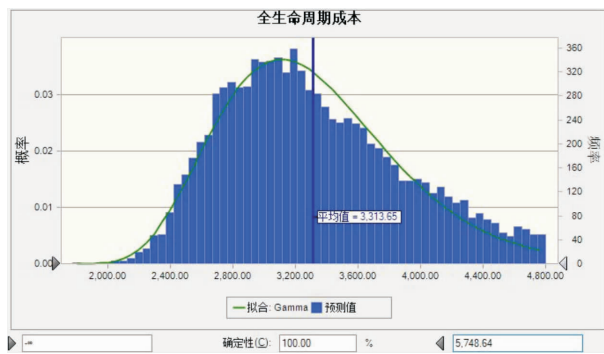


图 3 某高校中水回用工程全生命周期成本净现值频率分布直方图

Fig. 3 Frequency distribution histogram of the net present value of the whole life cycle cost of a reclaimed water project in a university

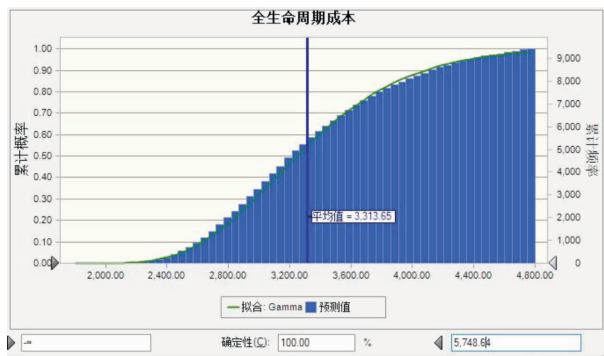


图 4 某高校中水回用工程全生命周期成本净现值累计频率图

Fig. 4 Cumulative frequency diagram of the net present value of the whole life cycle cost of a reclaimed water project in a university

净现值统计学指标与分布概率情况如表 4、5 所示.

表 4 某高校中水回用工程全生命周期成本净现值统计学指标

Tab. 4 Statistical index of the net present value of the whole life cycle cost of a reclaimed water project in a university	
指标	数据/万元
平均值	3 313.65
中间值	3 227.65
标准偏差	571.15
最大值	4 799.24
最小值	1 778.80 万元
平均标准误差	5.89

表 5 某高校中水回用工程全生命周期成本净现值分布概率

Tab. 5 Probability of the net present value distribution of the whole life cycle cost of a reclaimed water project in a university

净现值范围/万元	概率/%
<2 500	4.9
2 500~3 000	28.48
3 000~3 500	32.38
3 500~4 000	20.15
4 000~4 500	10.76
4 500~5 000	3.33
合计	100%

图 3 表明，某高校中水项目全生命周期成本大部分集中于 2 500~3 500 万元之间，这个范围内样本的累计概率达到 60.86%。由表 4 可知，全生命周期成本的均值为 3 313.65 万元，而标准偏差偏大，这主要是由于成本模型中考虑了折现率、中水年处理量、中水处理单位能耗药耗价格、员工工资年增长率、维修成本增长率、大修成本、大修频率、替换成本、替换频率和净残值 10 个随机变量参数，在模拟未来成本时，这 10 个随机变量参数的不确定性同步作用、联动变化，一起影响了全生命周期成本净现值的计算结果，因而导致了数据分布的分散程度较大。

2.4.2 全生命周期效益模拟结果

将经济效益变量参数代入 2.3 讨论得出的模型中，设置运行次数为一万次，在 0.95 的置信度下，利用搭载 crystal ball 软件的 excel 进行蒙特卡罗模拟，根据模拟的结果做出效益净现值样本的频率直方图见图 5，累计概率统计图见图 6。

本次蒙特卡罗模拟中得到的全生命周期效益净现值相关指标与分布概率情况如表 6、7 所示。

表 6 某高校中水项目全生命周期效益净现值统计学指标

Tab. 6 Statistical indexes of net present value of whole-life benefit of a reclaimed water project in a university

指标	数据/万元
平均值	964.75
中间值	916.01
标准偏差	1 007.39
最大值	3 997.61
最小值	-3 919.67
平均标准误差	10.21

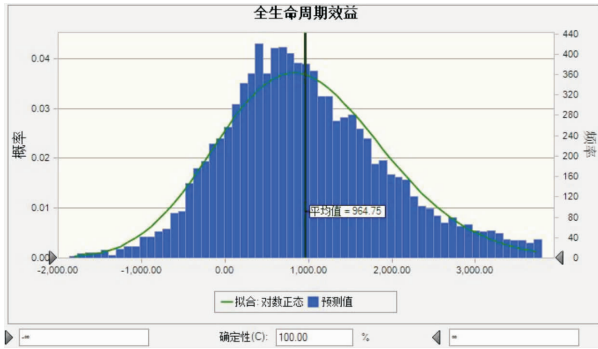


图5 某高校中水回用工程全生命周期
效益净现值频率分布直方图

Fig. 5 Frequency distribution histogram of the
net present value of the whole life cycle benefits of
a reclaimed water project in a university

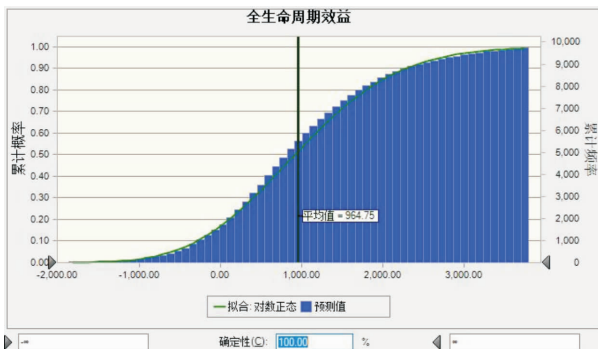


图6 某高校中水回用工程全生命周期
效益净现值累计频率图

Fig. 6 Cumulative frequency diagram of net present value
of the whole life cycle benefits of
a reclaimed water project in a university

表7 某高校中水项目全生命周期效益净现值分布概率

Tab. 7 Probability of net present value distribution of
whole-life benefit of a reclaimed water project in a university

净现值范围(万元)	概率/%
$< -1\ 000$	1.52
$-1\ 000 \sim 0$	13.77
$0 \sim 1\ 000$	40.61
$1\ 000 \sim 2\ 000$	29.11
$2\ 000 \sim 3\ 000$	10.84
$> 3\ 000$	4.14
合计	100

效益净现值的蒙特卡罗模拟结果中数据的分散程度相较于成本有所增加,这主要是因为效益模型构建中新引入了水价增长率和直接年节水量这2个随机变量参数,这2个参数的不确定性与原有参数的不确定性相互叠加,作用在全生命周期效益净现值的模拟中,因而导致标准偏差加大,

这也愈加说明了建筑中水回用项目的经济性是由各种错综复杂的不确定性参数共同决定的。

在不考虑小概率的蒙特卡罗模拟情况下,由计算结果可知某高校中水回用工程全生命周期效益净现值主要集中在 $-1\ 000.0 \sim 3\ 000$ 万元,概率为94.34%,其中 $0 \sim 2\ 000$ 万元的净现值分布已经比较集中,其概率达到69.72%。

以全生命周期效益净现值的均值来分析,某高校中水回用项目全生命周期效益为964.75万元,其全生命周期成本为3 313.65万元,效益费用比为全生命周期内节约洁净水所带来的全部收益与中水系统成本的比值,也即 $(964.75 + 3\ 313.65) / 3\ 313.65 = 1.29 > 1$,从经济的角度上,某高校建筑中水回用项目是可行的,但由计算结果可知,全生命周期效益为964.75万元,仅刚收回成本,收益甚微,这将严重影响中水回用项目建设和运营的积极性。

2.4.3 敏感性分析

图7为厦门某高校建筑中水回用工程全生命周期成本模型中各变量的敏感度图,图中反映了各变量对于全生命周期成本净现值的影响程度。敏感度以等级相关系数来表示,相关系数为正,则表示该变量的增大与成本净现值的增大相关,为负则表示相反的情况。相关系数的绝对值越大,影响程度越大。由图7可知,建筑中水回用项目的折现率对成本净现值的预测结果影响最大,相关系数绝对值达到0.67。员工工资增长率次之,相关系数为0.50,中水年处理量和单位处理能耗药耗价格分列第三和第四,相关系数分别为0.27和0.21。以上四个变量,应作为建筑中水回用项目全生命周期成本预测中重点考虑的指标。

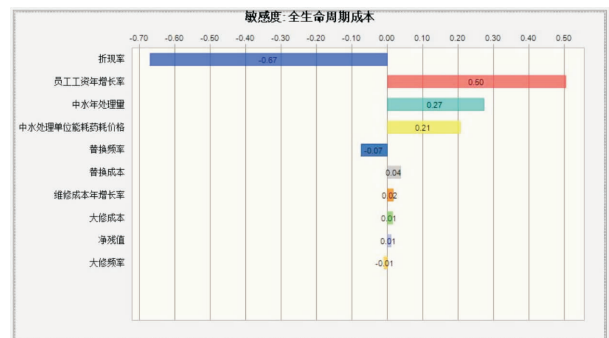


图7 某高校中水项目全生命周期成本
模型变量敏感度图

Fig. 7 Sensitivity diagram of model variables of whole-
life cycle cost of a reclaimed water project in a university

图8反映了各个变量对全生命周期效益的影响

程度。由图可知,在建筑中水回用项目中,对效益净现值的模拟预测结果影响最大的参数为水价年均增长率,相关系数高达0.81;影响程度排第二位的参数为员工工资年增长率,相关系数绝对值达到0.32;直接年节水量参数的影响程度为第三位,相关系数为0.27;中水年处理量和单位水量能耗药耗价格分列第四和第五,相关系数绝对值为0.16,0.10。由此可见,自来水价的变化趋势对于中水回用项目的效益有着至关重要的作用。

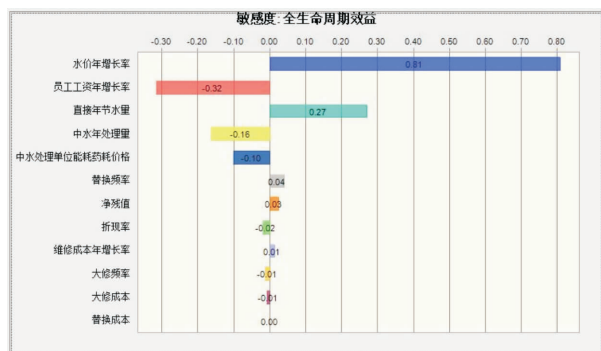


图8 某高校中水项目全生命周期效益模型变量敏感度图

Fig. 8 Sensitivity diagram of benefit model variable of the whole life cycle of a reclaimed water project in a university

3 结论

本文提出了建筑中水回用项目全生命周期效益的计算方法,通过对厦门某高校中水站案例进行分析计算,得出以下结论:

(1)该高校建筑中水回用项目的全生命周期效益为964.75万元,其全生命周期成本为3 313.65万元,效益费用比为 $1.29 > 1$,在经济上是可行的,在效益的计算中,没有将社会环境等边际效益加入到模型中,建筑中水回用项目固然可以为国家、社会在节约用水、污水处理等方面带来效益,但从实际经济受益者的角度来说,社会环境等效益无法直接带来经济收益,故本计算更具有现实意义。

(2)在当前水价下,建筑中水回用项目的全生命周期效益偏低,投资回收期较长,很大程度上影响了投资方的积极性,推行存在阻力。水价增长率作为对建筑中水回用项目全生命周期效益影响最大的因素,考虑到目前水价仍处于较低水平,今后仍有很大的上调空间,因此未来建筑中水的全生命周期效益将有很大的改观。

(3)为响应国家大力推行建筑中水回用的号召,切实改善其全生命周期效益的低水平现状,中水回用未来的发展形式应以相邻社区、企业、

建筑群等联合建设区域中水处理设施为主,实行中水设施共建共享机制,区域增量存量中水设施由中水业务企业综合管理调度,解决冗余分散低规模的中水设施带来的高投资、难管理问题,从而提高设施的设计处理能力利用率,实现降本增效;同时综合考量全生命周期效益的各项收益与成本,可合理增加初期投资以降低后期运行方面非年度发生的大修、替换等成本;此外,在处理工艺的选择上也应结合未来回用水质需求进行合理研判,在保障出水水质达标的前提下优先选择集约化、耐冲击负荷、自动化水平高、处理设备轻巧、性价比高的处理工艺;最后政府还可采用适当的经济补贴措施,以促进建筑中水回用项目的推广和认可。

参考文献 References

- [1] 李妍,狄彦强,张宇霞. 建筑小区中水处理工程的运行情况及问题分析[J]. 环境工程, 2015,33(9):6-9.
LI Yan, DI Yanqiang, ZHANG Yuxia. Analysis of operation situation and problems of water treatment engineering of residential building [J]. Environmental Engineering, 2015,33(9):6-9.
- [2] MATSUO T. Japanese experiences in water pollution control and wastewater treatment technologies [J]. Water Science and Technology, 2000, 42 (12): 163-172.
- [3] ADAPA S, BHULLAR N, DE SOUZA S V. A systematic review and agenda for using alternative water sources for consumer markets in Australia[J]. Journal of Cleaner Production, 2016,124:14-20.
- [4] TORTAJADA C, NAMBIAR S. Communications on technological innovations: Potable water reuse [J]. Water, 2019,11(2512).
- [5] 陈卓,吴乾元,杜烨,等. 世界卫生组织《再生水饮用回用:安全饮用水生产指南》解读[J]. 给水排水, 2018,54(6):7-12.
CHEN Zhuo, WU Qianyan, DU Ye, et al. Interpretation of potable reuse guidance for producing safe drinking water by WHO [J]. Water & Wastewater Engineering, 2018,54(6):7-12.
- [6] 梁昱升,刘荟,于大伟. 浅谈建筑中水回收及利用[J]. 建材与装饰, 2018(12):163-164.
LIANG Yusheng, LIU Yun, YU Dawei. Water recycling and utilization in buildings[J]. Construction Materials & Decoration, 2018(12):163-164.
- [7] 苑宏英,谷永,张昱,等. 再生水集中和分散处理与供水模式的历史进程[J]. 给水排水, 2017,53(8): 131-136.

- YUAN Hongying, GU Yong, ZHANG Yu, et al. Historical development of centralized and decentralized treatment of reclaimed water and its supply mode[J]. *Water & Wastewater Engineering*, 2017, 53(8): 131-136.
- [8] GARCIA-MONTOYA M, SENGUPTA D, NAPOLES-RIVERA F, et al. Environmental and economic analysis for the optimal reuse of water in a residential complex[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2016, 130: 82-91.
- [9] 张义庭. 基于环境成本的项目综合评价研究[J]. *情报杂志*, 2011, 30(5): 95-98.
- ZHANG Yiting. Study on synthetic evaluation of projects based on environmental cost [J]. *Journal of Intelligence*, 2011, 30(5): 95-98.
- [10] 李东, 张洪生, 付波, 等. 5年A~2/O-MBR中水回用系统经济调查分析: 以西安思源学院为例[J]. *给水排水*, 2017, 53(S1): 163-166.
- LI Dong, ZHANG Hongsheng, FU Bo, et al. Five years A~2/O-MBR water reuse system economic investigation and analysis: A case study of Xi'an siyuan university [J]. *Water & Wastewater Engineering*, 2017, 53(S1): 163-166.
- [11] 柴宏祥, 胡学斌, 彭述娟. 绿色建筑节水项目全生命周期综合效益经济模型[J]. *华南理工大学学报(自然科学版)*, 2010, 38(9): 113-117.
- CHAI Hongxiang, HU Xuebin, PENG Shujuan. Comprehensive benefit economy model in full life cycle of water-saving projects for green building [J]. *Journal of South China University of Technology(Natural Science Edition)*, 2010, 38(9): 113-117.
- [12] 侯玲. 基于蒙特卡罗模拟的绿色建筑节水和中水回用的决策模型[J]. *安徽农业科学*, 2012, 40(8): 4732-4734.
- HOU Ling. Monte carlo simulation-based decision-making model for the water conservation and intermediate water recycling of conservationminded buildings [J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2012, 40(8): 4732-4734.
- [13] 孙海虹, 叶晓甍. 基于蒙特卡罗模拟技术的工程造价风险因素分析[J]. *重庆建筑大学学报*, 2005(6): 121-126.
- SUN Haihong, YE Xiaosu. Analysis of risk factors of project cost base on the monte-carlo simulation [J]. *Journal of Chongqing Jianzhu University*, 2005(6): 121-126.
- [14] 王利珍, 谭洪卫. 应用蒙特卡罗模拟方法预测区域建筑负荷[J]. *西安建筑科技大学学报(自然科学版)*, 2017, 49(5): 763-770.
- WANG Lizhen, TAN Hongwei. Prediction of the regional building load using Monte Carlo simulation method [J]. *J. of Xi'an Univ. of Arch. & Tech. (Natural Science Edition)*, 2017, 49(5): 763-770.
- [15] 陈留平, 程静. 企业价值评估中折现率参数的确定[J]. *江苏大学学报(社会科学版)*, 2014, 16(4): 68-72.
- CHEN Liuping, CHENG Jing. On the determination of discount rate parameter in business valuation appraisal [J]. *Journal of Jiangsu University(Social Science Edition)*, 2014, 16(4): 68-72.
- [16] 玉峰, 傅莉. 关于折现率的选择与计算[J]. *中国农业会计*, 2005(9): 20-22.
- YU Feng, FU Li. Selection and calculation of discount rate [J]. *Chinese Agricultural Accounting*, 2005(9): 20-22.
- [17] 李志宏. 厦门年鉴[G]. 厦门: 厦门市人民政府地方志办公室, 2017.
- LI Zhihong. Yearbook of xiamen[G]. Xiamen: Local Chronicles Office of Xiamen Municipal People's Government, 2017.
- [18] 徐雄峰. 综合性水利工程水价测算分析[J]. *中国农村水利水电*, 2015(3): 114-116.
- XU Xiongfeng. Water price calculation and analysis of comprehensive water conservancy projects [J]. *China Rural Water and Hydropower*, 2015(3): 114-116.
- [19] 张立尖, 刘素芳, 周旭捷, 等. 上海市城镇居民生活用水需求弹性分析[J]. *给水排水*, 2018, 54(1): 18-21.
- ZHANG Lijian, LIU Sufang, ZHOU Xujie, et al. Analysis on the elasticity of domestic water demand of urban residents in Shanghai [J]. *Water & Wastewater Engineering*, 2018, 54(1): 18-21.
- [20] 郭功俭, 李宗祥, 王兆奎, 等. 给水排水工程概预算与经济评价手册[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1993: 999页.
- GUO Gongquan, LI Zongxiang, WANG Zhaokui, et al. Water supply and drainage engineering budget and economic evaluation manual [M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 1993: 999.

(编辑 吴海西 桂智刚)