

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2021.05.007

广东省不同区域污水资源化建设需求分析

李深林^{1,2,3,4,5}, 洪昌红^{1,3,4,5}, 邱静^{1,3,4,5}, 杨志峰^{2,5}

(1. 广东省水利水电科学研究院, 广东 广州 510635; 2. 广东工业大学环境生态工程研究院, 广东 广州 510006;
3. 广东省水动力学应用研究重点实验室, 广东 广州 510635; 4. 广东省水安全科技协同创新中心, 广东 广州 510635;
5. 广东省流域水环境治理与水生态修复重点实验室, 广东 广州 510635)

摘要:为有序推进污水资源化建设,应用层次分析法,从水资源开发利用需求、用水效率提升需求和水环境质量改善需求等角度构建了广东省各地市污水资源化建设需求评价层次结构模型,对不同地市开展污水资源化建设的需求动力进行了分析。结果表明:深圳、东莞和广州对开展污水资源化建设需求强烈,珠海、汕头、佛山等9个地市需求一般,汕尾、韶关、河源等9个地市需求较弱。

关键词:污水资源化;用水效率;水环境质量;层次分析法;广东省

中图分类号:TV213.4 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-6933(2021)05-0043-05

Demand analysis of sewage reclamation construction in different regions of Guangdong Province // LI Shenlin^{1,2,3,4,5}, HONG Changhong^{1,3,4,5}, QIU Jing^{1,3,4,5}, YANG Zhifeng^{2,5} (1. Guangdong Research Institute of Water Resources and Hydropower, Guangzhou 510635, China; 2. Institute of Environmental & Ecological Engineering, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China; 3. Guangdong Key Laboratory of Hydrodynamic Research, Guangzhou 510635, China; 4. Guangdong Provincial Science and Technology Collaborative Innovation Center for Water Safety, Guangzhou 510635, China; 5. Guangdong Provincial Key Laboratory of Water Quality Improvement and Ecological Restoration for Watersheds, Guangzhou 510635, China)

Abstract: In order to orderly promote the construction of sewage reclamation, the analytic hierarchy process was applied to construct the hierarchical structure model of sewage reclamation construction needs evaluation in different regions of Guangdong Province from the perspectives of water resources development and utilization needs, water efficiency improvement needs and water environment quality improvement needs. The demand level of sewage reclamation construction in different regions was analyzed. The results show that Shenzhen, Dongguan and Guangzhou have strong demand for sewage reclamation construction, the demand level of 9 cities such as Zhuhai, Shantou and Foshan is general, and the demand level of 9 cities such as Shanwei, Shaoguan and Heyuan is weak.

Key words: sewage reclamation; water use efficiency; water environment quality; analytic hierarchy process; Guangdong Province

污水资源化就是按地表水资源标准对污水进行无害化处理、资源化利用^[1]。污水资源化一方面可以有效削减排入自然环境中的污水量,减少环境污染,改善环境质量,另一方面无害化处理后的水资源可以作为新生水源利用,缓解水资源供应压力,是贯彻国家“节水优先”治水方针的一项重要措施,是解决新时期我国水资源不足问题、改善水环境、保障国家高质量发展的一项战略性重要举措^[1]。

国内现阶段对污水资源化的研究主要集中在污

水资源化技术、管理和效益方面。技术层面重点对污水处理工艺展开研究,如,陈皓琪^[2]深入分析了城市污水再利用的2种处理模式以及4个主要处理工艺步骤;涂仁杰等^[3]研究了利用城市污水培养微藻技术,以实现污水无害化处理;曹达啟等^[4]研究了藻酸盐污水处理合成研究现状与应用前景;赵昕宇等^[5]研究了基于斜生栅藻培养的城市生活废水资源化利用。管理层面,张云等^[6]提出澳门污水资源再生利用近期、中期和远期利用方案;王伟峰

基金项目:广东省水利科技创新项目重点项目(2015-08);广东省软科学研究计划项目(2018B020207004)

作者简介:李深林(1991—),男,博士,主要从事水环境变化与水资源配置研究。E-mail: lishenlinola@qq.com.

通信作者:洪昌红(1982—),男,正高级工程师,硕士,主要从事水资源保护研究工作。E-mail: changjianghong@126.com.

等^[7]提出了利用湿地资源处理乡镇废水的生态循环经济模式;崔志清等^[8]建立南水北调受水城市的污水排放预测模型,提出基于水质分级的受水区污水利用规划。效益层面,高旭阔等^[9]从经济效益、环境效益和社会效益等方面对再生水项目的费用和效益进行评价;刘晓君等^[10]建立了综合考虑各方面因素的“社会-经济-水资源-环境”模型,研究不同污水资源化策略的综合效果;宿立明等^[11]分析了利用湿地进行废水资源化的经济效益、社会效益和环境效益。

国外对污水资源化的实践研究相对较早,在部分区域已经形成相当成熟的产业。如,美国加利福尼亚州有3亿m³/a的再生水用于农业灌溉;日本早在1962年就开始污水再生利用,现有再生水年总产量1.92亿m³;新加坡的樟宜新生水厂,每天生产约23万t新生水,可提供新加坡约15%的用水^[1]。另外,国外学者对污水资源化技术进行了大量研究^[12-14],同时也涉及污水资源化建设对社会经济、自然环境、土壤和地下水的影响^[15],社会文化因素对污水资源化的影响^[16],污水资源化建设方案的成本控制^[17]等。

整体来讲,国内污水资源化利用尚在起步阶段,大规模推动的时机还不成熟。同时,不同区域水资源的禀赋条件和供需矛盾不尽相同,对实行污水资源化利用的实际需求也有所差异。因此,十分有必要针对不同区域污水资源化的建设需求展开分析,以选择需求强烈的区域开展示范性建设,推动污水资源化利用有序开展。本文采用层次分析法,从水资源开发利用需求、用水效率提升需求和水环境质量改善需求等角度,对广东省21个地市污水资源化的建设需求进行综合量化分析,以期广东省选择试点城市开展污水资源化建设提供参考。

1 研究区概况

广东省地处珠江流域下游,多年平均降水量1170.5mm,水资源总量较为丰沛,但水问题也非常突出。广东省水资源时空分布不均、需求量大,供水矛盾十分突出。时间上,受季风气候影响,汛期降水占全年降水量的80%,而枯水期由于来水量不足,在历史上多次形成冬旱和春旱灾害;空间上,珠江三角洲9市水资源总量仅占全省的30%,但GDP占比为80%,水资源空间分布与生产力布局严重不匹配;需求上,随着粤港澳大湾区和深圳中国特色社会主义先行示范区建设不断纵深发展,未来广东省经济社会发展的用水需求依然旺盛,水资源安全供给的压力十分严峻。广东省水环境问题突出,污水排

放量且利用率低,2018年全省废污水排放量114.4亿t,但现状污水资源化利用只有1.2亿t,污水资源化率仅为1.0%。大量废污水简单处理后直排入河,造成河流水质恶化,进一步加剧了水资源短缺、水环境污染和水生态破坏等问题。开展污水资源化建设可以有效缓解以上水问题,且广东省整体经济发达,具备开展污水资源化建设的经济条件。而且,广东省内各地市之间自然环境和水平发展水平的巨大差异,对研究差异化发展、如何科学选择先行试点地区具有很强的代表性。

2 研究方法

选择层次分析法(analytic hierarchy process, AHP)对不同地市污水资源化建设的需求水平进行综合量化分析。层次分析法是一种定性和定量相结合的、系统化、层次化的分析方法,可以将多指标、多层次又存在不确定性和主观信息的综合评价问题通过逻辑层次进行量化表达^[18-23]。不同地区污水资源化建设需求的评价需要考虑多方面多层次的影响因素,涉及的指标体系较为复杂,层次分析法对其具有较强的适用性。

2.1 评价体系构建

鉴于污水资源化对提供稳定再生水源、提升用水效率以及减少污染排放等方面的突出作用,对于水资源开发利用强度较高,用水效率提升难度较大,水环境污染严重的地区,污水资源化的建设需求将更加强烈。因此,研究选择从水资源开发利用需求、用水效率提升需求和水环境质量改善需求3个准则层对各地市污水资源化的建设需求进行综合评价,评价体系如图1所示。各项指标的选择旨在充分反映地区的水资源禀赋条件和水资源开发利用水平,以及其面临的水资源和水环境问题,由此全面评估各地区对污水资源化的建设需求。实际计算时,利用归一化后的指标值和通过层次分析法确定的指标权重计算加权平均值,以此作为对应准则层的评价

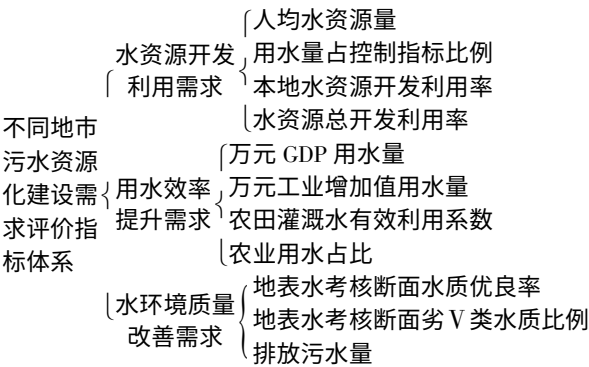


图1 评价体系

Fig. 1 Evaluation system

值,然后在准则层进行同样处理,得到不同地市污水资源化建设需求的综合评价结果。

2.2 指标预处理

由于不同指标表征的意义不同,各类指标单位和数量级之间存在差异,在进行综合量化评价前需要进行数据预处理,包括指标正向化和标准化。指标包括正向指标和负向指标,正向指标是指对评估结果产生正向作用的指标,本研究中用水量占控制指标比例、本地水资源开发利用、水资源总开发利用、农田灌溉水有效利用系数、地表水考核断面劣V类水质比例等为正向指标,其指标值越大,对应地市污水资源化的建设需求越强烈;负向指标是指对最终评价结果产生负作用的指标,本研究中人均水资源量、万元GDP用水量、万元工业增加值用水量、农业用水占比、地表水考核断面水质优良率等为负向指标,其指标值越小,对应地市污水资源化的建设需求越强烈。标准化处理是将不同单位和量级的参数转化为相同数量级的无量纲参数。本研究将不同指标值标准化处理之后,转化为0~5之间的非负数,并将所有指标统一为正向指标。

2.3 成对比较阵及权向量

从层次结构模型的指标层开始,对于从属于(或影响)上一层每个因素的同一层诸因素,用成对比较法和1~9比较尺度构造成对比较阵,直到最上层。成对比较的相对重要性的等级用1、3、5、7、9量化,如指标A相对于指标B的相对重要性的等级为

1,说明指标A相对于B同等重要,如等级为9,说明指标A相比于指标B显得极端重要。对于每一个成对比较阵计算最大特征根及对应特征向量,并进行一致性检验。若检验通过,特征向量(归一化后)即为权向量;若不通过,需重新构造成对比矩阵。

2.4 综合量化评分

按照组合权向量表示的结果进行各地市污水资源化建设需求水平定量化评价。评价得分范围为0~5之间,当评分超过3时,对应城市的建设需求强烈;当评分在1~3之间时,对应城市的建设需求一般,即表现为有一定的需求,但是需求紧迫性不突出;当评分值小于1时,对应城市的建设需求较弱。

3 评价结果与分析

表1为需求评价结果。由表1中各地市水资源开发利用需求评价结果可见,深圳、东莞、广州、佛山和汕头5个地市的评分分别为4.25、3.76、3.73、3.45和3.38,说明从水资源开发利用需求的角度看,以上5个地市对污水资源化的建设需求强烈;珠海、梅州、惠州、汕尾、中山、湛江、茂名、潮州和揭阳9市评分在1~3之间,表现为一般需求;韶关、河源、江门、阳江、肇庆、清远和云浮7个地市评分在1分以下,其需求较弱。

由表1中各地市用水效率提升需求评价结果可见,需求强烈的地市包括广州、深圳、珠海、汕头、佛山、东莞和中山7市,均为粤港澳大湾区城市或者经

表1 不同地市污水资源化建设需求评价结果

Table 1 Evaluation results of sewage reclamation construction needs in different regions

地市	水资源开发利用需求		用水效率提升需求		水环境质量改善需求		污水资源化建设需求	
	评价值	需求评价	评价值	需求评价	评价值	需求评价	评价值	需求评价
广州	3.73	强烈	3.95	强烈	2.11	一般	3.07	强烈
深圳	4.25	强烈	4.91	强烈	3.32	强烈	3.95	强烈
珠海	2.14	一般	4.23	强烈	0.90	偏弱	1.91	一般
汕头	3.38	强烈	3.26	强烈	2.08	一般	2.81	一般
佛山	3.45	强烈	3.97	强烈	0.84	偏弱	2.40	一般
韶关	0.64	偏弱	1.11	一般	0.08	偏弱	0.47	偏弱
河源	0.66	偏弱	0.89	偏弱	0.07	偏弱	0.44	偏弱
梅州	1.09	一般	0.66	偏弱	0.07	偏弱	0.60	偏弱
惠州	1.03	一般	2.78	一般	1.57	一般	1.51	一般
汕尾	1.61	一般	2.14	一般	0.04	偏弱	1.00	一般
东莞	3.76	强烈	4.37	强烈	4.41	强烈	4.13	强烈
中山	2.82	一般	3.87	强烈	0.95	偏弱	2.17	一般
江门	0.87	偏弱	2.17	一般	0.38	偏弱	0.85	偏弱
阳江	0.57	偏弱	2.02	一般	0.53	偏弱	0.76	偏弱
湛江	2.28	一般	2.14	一般	0.07	偏弱	1.32	一般
茂名	1.81	一般	2.17	一般	0.43	偏弱	1.27	一般
肇庆	0.60	偏弱	2.09	一般	0.07	偏弱	0.59	偏弱
清远	0.57	偏弱	1.81	一般	0.76	偏弱	0.83	偏弱
潮州	2.42	一般	2.50	一般	1.39	一般	1.99	一般
揭阳	2.36	一般	2.58	一般	1.92	一般	2.20	一般
云浮	0.92	偏弱	1.40	一般	0.04	偏弱	0.61	偏弱

济特区;需求一般的地市是韶关、惠州、汕尾、江门、阳江、湛江、茂名、肇庆、清远、潮州、揭阳和云浮等12个地市;需求较弱的地市为河源和梅州。需求一般或者较弱的地市,其现状的万元GDP用水量和万元工业增加值用水量都较高,农业用水占比较大,而且农田灌溉水有效系数较低,可以优先通过改进生产技术,尤其是农业节水技术等手段来提高用水效率。而需求强烈的地市用水效率指标已处于较为先进的状态,为追求用水效率的进一步提高,对污水资源化的建设需求意向更加强烈。

由表1中各地市水环境改善需求评价结果可见,深圳市和东莞市水环境质量改善的需求强烈,广州、汕头、揭阳、惠州和潮州等5个地市需求一般,珠海、韶关等14个地市需求较弱。深圳市和东莞市现阶段考核控制断面水质优良率较低(深圳42.9%,东莞28.6%),且劣V类断面比例较高(深圳28.6%,东莞42.9%),因此对水环境改善表现出相对强烈的建设需求。

由表1中各地市污水资源化建设需求评价结果可见,21个地市中,污水资源化建设需求强烈的为深圳、东莞和广州3市,需求一般的为珠海、汕头、佛山、惠州、中山、湛江、茂名、潮州和揭阳等9个地市,需求较弱的为汕尾、韶关、河源、梅州、江门、阳江、肇庆、清远和云浮等9个地市。整体来看,对污水资源化建设需求的评价结果与各地市的实际情况基本相符。需求强烈的地市为深圳、东莞和广州,其共同特点是人均本地水资源量少,分别为 229 m^3 、 285 m^3 和 506 m^3 ,属于重度甚至极度缺水城市。深圳、东莞和广州的水资源开发利用程度很高,3市本地水资源开发利用分别达到71.14%、86.64%和81.06%,考虑未来可能增长的用水需求,水源保障的压力较大。同时,3市用水效率已经达到较高水平,万元GDP和万元工业增加值用水量均处于省内先进水平,进一步提升的空间有限。再者,3市均存在较强烈的水环境质量提升改善需求,地表水考核断面优良率分别只有42.9%、53.8%和28.6%。开展污水资源化建设可以有效缓解3市水资源、水环境面临的凸出问题,从而表现出强烈的需求动力。需求较弱的韶关、河源、清远和阳江等地市,本地人均水资源量均在 4000 m^3 以上,实际用水量只占到用水总量控制指标的85%左右,本地水资源的开发利用潜力较大。而且,此类地市农业用水占比较大,工农业生产的用水效率都还有很大的提升空间,整体水环境质量也较高。由于水资源和水环境问题并不突出,这些地市开展污水资源化建设的需求动力较弱。需求一般的地市如湛江和茂名等,各项指标得分均

处于中等水平,部分地市,如佛山和汕头等地,表现出某一方面的水资源问题,比如汕头人均水资源量偏少,仅为 321 m^3 ,但是其水环境状态较好,污水资源化建设可以作为可选工程之一,但需求动力并不强烈。

4 结 语

本文从水资源开发利用需求、用水效率提升需求和水环境质量改善需求3个方面,建立了广东省各地市污水资源化需求评价层次结构模型,对广东省21个地市污水资源化的建设需求展开评价。评价结果显示,深圳、东莞和广州3市对污水资源化建设具有强烈需求,珠海、汕头、佛山、惠州、中山、湛江、茂名、潮州和揭阳等9个地市表现为一般需求,其他地市需求较弱。利用层次评价模型,可以综合考虑水资源自然禀赋,开发利用状态和水资源管理考核等多个指标,较为全面客观地评估不同地市在水资源、水环境领域面临的突出问题,从而判断各地市对污水资源化建设的需求动力。

参考文献:

- [1] 张春园,赵勇.实施污水资源化是保障国家高质量发展的需要[J].中国水利,2020(1):1-4. (ZHANG Chunyuan,ZHAO Yong. The implementation of wastewater reuse is the need to ensure the high quality development of China[J]. China Water,2020(1):1-4. (in Chinese))
- [2] 陈皓琪.城市污水资源化及再利用技术探析[J].中国资源综合利用,2018,36(5):51-53. (CHEN Haoqi. Study on urban wastewater reuse and water resources recycling[J]. China Resources Comprehensive Utilization, 2018,36(5):51-53. (in Chinese))
- [3] 涂仁杰,金文标,韩松芳,等.基于城市污水资源化的跑道池培养小球藻条件优化[J].化工进展,2018,37(3):1181-1186. (TU Renjie, JIN Wenbiao, HAN Songfang, et al. Optimization of culture condition for biodiesel production by chlorella pyrenoidosa grown in municipal wastewater in open raceway ponds [J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2018, 37(3):1181-1186. (in Chinese))
- [4] 曹达啟,王振,郝晓地,等.藻酸盐污水处理合成研究现状与应用前景[J].中国给水排水,2017,33(4):1-6. (CAO Daqi, WANG Zhen, HAO Xiaodi, et al. Research situation and application prospects on alginate bio-synthesized from wastewater treatment[J]. China Water & Wastewater,2017,33(4):1-6. (in Chinese))
- [5] 赵昕宇,廖利民,成杰,等.基于斜生栅藻培养的城市生活废水资源化利用研究[J].水资源保护,2016,32(3):44-49. (ZHAO Xinyu, LIAO Limin, CHENG Jie, et

- al. Resource utilization of urban sewage water based on cultivation of *Scenedesmus obliquus* [J]. *Water Resources Protection*, 2016, 32(3): 44-49. (in Chinese))
- [6] 张云, 崔树彬, 汪义杰, 等. 澳门污水资源再生利用 [J]. *水资源保护*, 2014, 30(5): 86-90. (ZHANG Yun, CUI Shubin, WANG Yijie, et al. Sewage resources recycling and reuse in Macao [J]. *Water Resources Protection*, 2014, 30(5): 86-90. (in Chinese))
- [7] 王伟锋, 冯学岭, 庞清江, 等. 我国乡镇废水资源化利用模式及对策: 以临沂市河东区八湖镇为例 [J]. *水利经济*, 2010, 28(3): 39-42. (WANG Weifeng, FENG Xueling, PANG Qingjiang, et al. Utilization modes and countermeasures of town wastewater resources in China: case of Bahu Town in Hedong District of Linyi City [J]. *Journal of Economics of Water resources*, 2010, 28(3): 39-42. (in Chinese))
- [8] 崔志清, 李立铮, 董四方. 南水北调河北省受水区污水资源化利用 [J]. *水资源保护*, 2008, 24(3): 27-30. (CUI Zhiqing, LI Lizheng, DONG Sifang. Sewage recycling in water-receiving areas of South-to-North Water Transfer Project in Hebei Province [J]. *Water Resources Protection*, 2008, 24(3): 27-30. (in Chinese))
- [9] 高旭阔, 邓旋. 考虑社会及环境效益的再生水投资效率评价 [J]. *水土保持通报*, 2017, 37(1): 248-254. (GAO Xukuo, DENG Xuan. Evaluation of investment efficiency in reclaimed water with consideration of social and environmental benefits [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2017, 37(1): 248-254. (in Chinese))
- [10] 刘晓君, 付汉良, 孙伟. 西北干旱缺水城市污水再生利用系统决策优化 [J]. *环境工程学报*, 2017, 11(1): 211-217. (LIU Xiaojun, FU Hanliang, SUN Wei. Optimized decision-making of reclaimed water reuse system of water resources constraint cities in northwest China [J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2017, 11(1): 211-217. (in Chinese))
- [11] 宿立明, 郝强兴, 庞清江, 等. 利用湿地废水资源化的效益分析: 以八湖镇荷塘湿地为例 [J]. *水利经济*, 2011, 29(3): 22-24. (SU Liming, BING Qiangxing, PANG Qingjiang, et al. Benefit analysis and discussion of wastewater reuse in wetlands: a case study of pond wetlands in Bahu Town [J]. *Journal of Economics of Water Resources*, 2011, 29(3): 22-24. (in Chinese))
- [12] KIHILA J, MTEI K M, NJAU K N. Wastewater treatment for reuse in urban agriculture: the case of Moshi Municipality, Tanzania [J]. *Physics and Chemistry of the Earth*, 2014, 72/75: 104-110.
- [13] DURHAM B, BOURBIGOT M M, PANKRATZ T. Membranes as pretreatment to desalination in wastewater reuse [J]. *Membrane Technology*, 2002(3): 8-12.
- [14] CAMPOS C. New perspectives on microbiological water control for wastewater reuse [J]. *Desalination*, 2008, 218(1/2/3): 34-42.
- [15] CANDELA L, FABREGAT S, JOSA A, et al. Assessment of soil and groundwater impacts by treated urban wastewater reuse: a case study of application in a golf course (Girona, Spain) [J]. *Science of the Total Environment*, 2007, 374(1): 26-35.
- [16] SHAHEEN H Q H. Appraisal of social and cultural factors affecting wastewater reuse in the West Bank [J]. *International Journal of Environment & Pollution*, 2008, 33(1): 3-14.
- [17] GERALD J, FISCHER U, KONRAD H. Wastewater reuse: new approach to screen for designs with minimal total cost [J]. *Computers & Chemical Engineering*, 2001, 25(2/3): 203-215.
- [18] 赵衡, 闫旭, 王富强, 等. 基于 PSR 模型的三门峡库区湿地生态系统健康评价 [J]. *水资源保护*, 2020, 36(4): 21-25. (ZHAO Heng, YAN Xu, WANG Fuqiang, et al. Assessment on ecosystem health of Sanmenxia Reservoir wetland based on PSR model [J]. *Water Resources Protection*, 2020, 36(4): 21-25. (in Chinese))
- [19] 许树柏. 实用决策方法: 层次分析法原理 [M]. 天津: 天津大学出版社, 1988.
- [20] 陈建明, 程细英, 李美枫. 基于层次-熵权法的江苏省沿海垦区水生态效应评价 [J]. *水利经济*, 2020, 38(2): 43-48. (CHEN Jianming, CHENG Xiyang, LI Meifeng. Evaluation and analysis of water ecological effect in coastal reclamation area in Jiangsu Province based on AHP-entropy weight method [J]. *Journal of Economics of Water Resources*, 2020, 38(2): 43-48. (in Chinese))
- [21] 焦士兴, 王安周, 李青云, 等. 河南省城镇化与水资源耦合协调发展状况 [J]. *水资源保护*, 2020, 36(2): 21-26. (JIAO Shixing, WANG Anzhou, LI Qingyun, et al. Study on coupling and coordinated development of urbanization and water resources in Henan Province [J]. *Water Resources Protection*, 2020, 36(2): 21-26. (in Chinese))
- [22] 何杨杨, 苏怀智. 考虑规范分级的水闸安全云评价方法 [J]. *水利水电科技进展*, 2020, 40(2): 29-35. (HE Yangyang, SU Huaizhi. Cloud assessment method of sluice safety considering specification classification [J]. *Advances in Science and Technology of Water Resources*, 2020, 40(2): 29-35. (in Chinese))
- [23] 崔玉, 朱东升, 胡潇月, 等. 基于改进模糊层次分析法的二次设备差异化改造方案评价 [J]. *河海大学学报(自然科学版)*, 2020, 48(3): 276-283. (CUI Yu, ZHU Dongsheng, HU Xiaoyue, et al. Differential retrofit scheme evaluation of secondary equipment based on improved fuzzy analytic hierarchy process [J]. *Journal of Hohai University(Natural Sciences)*, 2020, 48(3): 276-283. (in Chinese))

(收稿日期: 2020-05-27 编辑: 王 芳)