

上海分流制污水系统运行状况评价研究

张杰¹, 陈希², 唐建国², 魏源源², 杨冯睿¹

[1. 同济大学, 上海市 200092; 2. 上海市城市建设设计研究总院(集团)有限公司, 上海市 200125]

摘要: 分流制污水系统是上海目前主要的排水体制, 有必要构建评价系统综合掌握其运行状况。调研了16项相关的国家、行业、地方和团体标准, 建立了包含3层网络层次结构的分流制污水系统运行状况评价体系, 涵盖了结构属性、功能属性、混接及入渗属性和资料完备属性下的20个评价指标。同时, 采用专家问卷调查与层次分析(AHP)的方法, 确定了各层次指标的权重和相应的评价等级。评价体系有望为相关运营维护工作提供支持, 助力提高污水系统的管理水平。

关键词: 分流制; 污水系统; 评价体系; 层次分析法

中图分类号: TU992.3

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2025)03-0178-06

Evaluation and Study on Operational Condition of Separated Sewage Systems in Shanghai

ZHANG Jie¹, CHEN Xi², TANG Jianguo², WEI Yuanyuan², YANG Fengrui¹

[1. Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Shanghai Urban Construction Design & Research Institute (Group) Co., Ltd., Shanghai 200125, China]

Abstract: The separated sewage system is the main drainage system in Shanghai now. It is necessary to build the evaluation system to comprehensively master its operational status. The 16 relevant national, industry, local and group standards are investigated. The evaluation system of operational status of separated sewage system containing a three-layer hierarchical network structure is established to cover 20 evaluation indexes under the structural attribute, functional attribute, mixed connection and infiltration attribute and data completeness attribute. Additionally, the expert questionnaire investigation and the analytic hierarchy process (AHP) are used to determine the weights and corresponding evaluation grades of the indicators at each level. The evaluation system is expected to provide the support for the relevant operational and maintenance, and improve the management level of the sewage system.

Keywords: separated system; sewage system; evaluation system; analytic hierarchy process (AHP)

0 引言

目前,上海市污水处理区域包括石洞口、竹园和白龙港三大片区,污水处理总规模已经超过850万 m^3/d ^[1]。其中除中心城区内存在约123 km^2 的65个合流制排水系统区域外,其余地区均使用分流制污水系统^[2],形成了分流制为主、合流制为辅的城市排水特点^[3]。正常运行的分流制污水系统具有减小污水处理设施规模、控制溢流污染风险等优势。但是,一些已建成的分流制污水系统,或因施工安装质量欠缺,或因后期运维保障策略出现问题,可能处于带病运行的状

态。这样的系统不仅不能充分发挥分流制污水系统的优势,还会增加管理的难度与成本。因此,需要及时掌握城市分流制污水系统的运行状况,便于因地制宜地制定合理的养护、维修方法,为相关部门的管理工作提供便利。

现阶段,经过多年研究和积累,我国的给水系统评价相关研究已经比较成熟,但是排水系统的评价体系研究仍然处于起步阶段^[4]。为解决实际工程中遇到的问题,国内一些学者将统计学方法用于评价排水系统。例如,杨少平等人^[5]通过统计水量、水质数据,建立了深圳市建筑小区雨污分流改造的绩效评价体系。相似的,谢冰冰等人^[6]利用层次分析法,构建了分流制污水系统混接程度评价体系,为定量评估雨污混接程度、制定雨污混接改造方案提供了技术支撑。余凯华等人^[7]则构建了排水系统运行综

收稿日期: 2024-10-13

作者简介: 张杰(1972—),男,博士,研究员,从事环境工程教学科研成果转化工作。

通信作者: 陈希(1983—),男,硕士,高级工程师,从事交通工程设计与研究工作。电子信箱: 82693280@qq.com

合风险评估指标体系,利用层次分析法评估了排水系统运行时的单项风险和综合风险。总之,现有的排水系统评价研究多偏向于解决某一单方面问题,而较少涉及评价整个系统的综合情况,因此构建的评价指标体系在完整性和系统性维度上还有很大的拓展空间。

考虑到全国不同地区对分流制污水系统的要求各不相同,为方便操作、细化研究内容,本文针对上海的实际情况和要求,利用层次分析法构建了一套适用于上海的分流制污水系统运行状况评价指标体系,以期对相关工作提供参考和借鉴。

1 评价指标的选取

构建评价体系前,先确定拟采用的评价指标。由于目前尚无全面涵盖评价分流制污水系统所需指标的单一标准,因此本研究首先收集了国内排水系统评价相关的标准、规范与政策性文件,以筛选出评价体系中所采用的具体指标。

1.1 分流制污水系统相关标准与规范

表1列出了评价分流制污水系统主要涉及的标准,涵盖了排水系统的检测技术、评价流程以及维护方法等多个方面。

其中,国家标准和政策文件对排水管道流速、充满度,以及排水系统的收集率、处理率等运行参数有所规定,但没有给出具体的评价方法。行业标准中,《城镇排水管道检测与评价技术规程》(CJJ 181—2012)比较详细地介绍了排水管道检测与评价的方法和指标,但主要侧重基于不同检测方法的评价内容,没有提供整个排水系统的全面评价体系。在团体标准方面,《城镇排水管道混接调查及治理技术规程》(T/CECS 758—2020)、《上海市分流制地区雨污混接调查技术导则(试行)》(SSH/Z 10005—2016)重点关注了管道系统混接情况的相关评价方法。由此可见,现有的标准基本涵盖了评价分流制污水系统时应考虑的不同角度,各有侧重,急需梳理一套完整的评价体系。

1.2 分流制污水系统评价指标的选取

依据现有的标准、规范与政策性文件,列出分流制污水系统评价相关的指标,并将各项指标在不同类型标准中出现的频次标注于表2。为进一步筛选出拟采用的评价指标,赋予不同等级的标准不同的分数:若某一指标在国家标准或相关政策文件中出现一次计5分,在行业标准中出现一次计3分,在上海的地方或团体标准中出现一次计2分,在其它地

表1 分流制污水系统评价相关标准

序号	类型	标准号	名称	地区
1		GB 50014—2021	室外排水设计标准	
2	国家标准	GB 50268—2008	给水排水管道工程施工及验收规范	国家
3		GB/T 31962—2015	污水排入城镇下水道水质标准	
4		GB 51222—2017	城镇内涝防治技术规范	
5	行业标准	CJJ 181—2012	城镇排水管道检测与评价技术规程	行业
6		CJJ 68—2016	城镇排水管道与泵站运行、维护及安全技术规程	
7		DB 44/T 1025—2012	城镇公共排水管道检测与评价技术规程	广东省
8		DB 37/T 5107—2018	城镇排水管道检测与评价技术规程	山东省
9		DB 34/T 3587—2020	城镇排水管道检测与修复技术规程	安徽省
10	地方标准	DB 42/T 1615—2021	城镇排水管道检测与评价技术标准	湖北省
11		DB 31/T 444—2022	排水管道电视和声呐检测评价技术规程	上海市
12		DB11/T 1593—2018	城镇排水管道检查技术规程	北京市
13		DB 33/T 1124—2016	城镇排水管道运行与维护技术规程	浙江省
14	团体标准	T/CECS 758—2020	城镇排水管道混接调查及治理技术规程	团体
15		T/CECS 1507—2023	室外排水管道检测与评价技术规程	
16		SSH/Z 10005—2016	上海市分流制地区雨污混接调查技术导则(试行)	上海市

方或团体标准中出现一次计1分,统计结果同样列于表2中。本研究拟选取得分排名前85%的指标,列入分流制污水系统的评价指标体系,可以较为全面地评价分流制污水系统的实际情况。

1.3 分流制污水系统评价体系的构建

选取好评价指标后,本研究遵循系统性、客观性、科学性、代表性、可操作性的原则^[8],结合专家咨询,构建了分流制污水系统运行情况的评价体系,如图1所示。分流制污水系统运行状况评价体系为3层网络层次结构,首先分为结构属性、功能属性、混接及入渗属性和资料完备属性4个准则层指标,然后包含10个一级指标层,接下来又再细分为20个具体二级指标层。各项指标的含义和具体出处如表3所列。

表2 分流制污水系统评价体系采用的指标在各类标准中出现的频次

评价指标	类型				得分	列入评价指标体系
	国家标准及政策文件	行业标准	地方标准	团体标准		
管道修复指数		●	★●●●●●	●	10	√
检查井修复指数		●●	★●●●●●	●	13	√
环境指数			●●●	●	4	√
污水收集率	●●				10	√
污水处理率	●				5	√
污水泵站运行情况		●		★●	6	√
管内流速	●				5	√
管内最大充满度	●				5	√
过水断面损失		●	★●●●●●	●	10	√
积泥深度与管径之比		●	★●●●●●	●	10	√
养护情况		●	●●		5	√
混接点密度		●		★●	6	√
混接水量程度		●		★●	6	√
外水入渗情况	●●			★●	13	√
设计及验收资料	●				5	√
管道埋深		●			3	
管道规格		●			3	
管道材质		●			3	

注:1. ●和★表示该类标准中涉及此项指标,★表示该标准为上海的地方或团体标准。

2. √表示该指标将包含在本研究构建的分流制污水系统评价体系中。

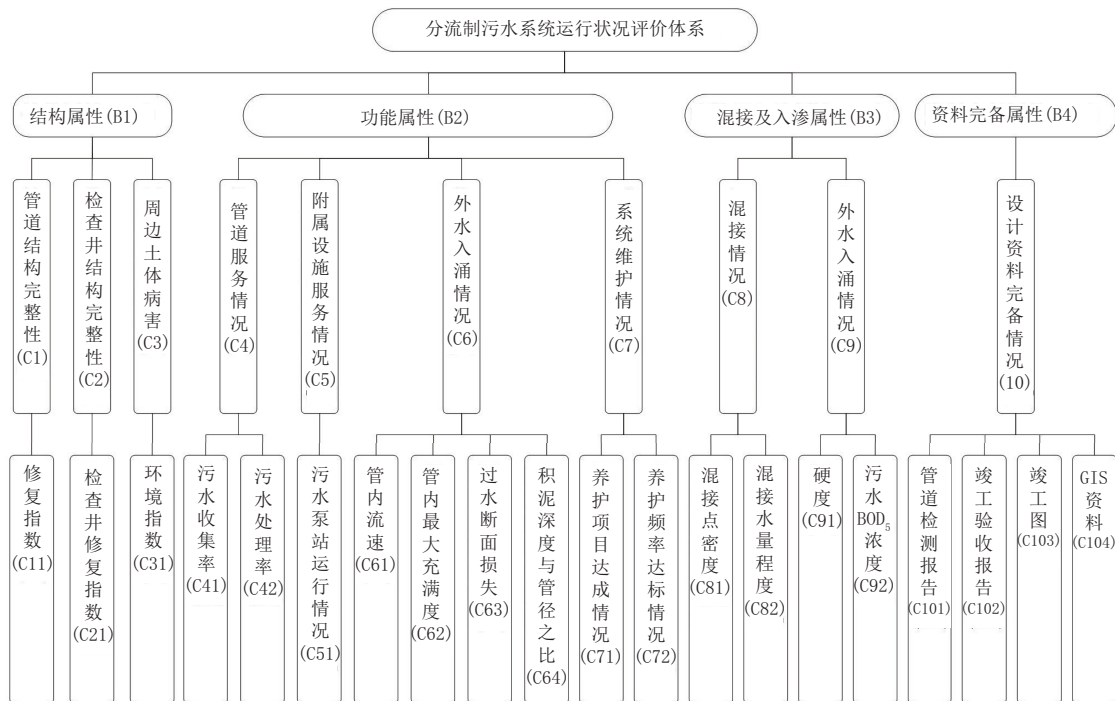


图1 分流制污水系统运行状况评价体系

2 指标权重的确定

本研究结合专家咨询和层次分析法计算各层级评价指标的权重。

2.1 判断矩阵的构建

通过问卷调查的方式,被调查者通过两两比较,

判断出每个指标之间的相对重要性。根据调查结果,可以建立各评价指标的判断矩阵,其一般形式如式(1)所示:

$$\begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & \cdots & C_{1n} \\ C_{21} & C_{22} & \cdots & C_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ C_{n1} & C_{n2} & \cdots & C_{nn} \end{bmatrix} \quad (1)$$

表3 分流制污水系统运行状况评价指标说明

编号	指标名称	指标含义	指标来源与计算方式
C11	修复指数	考虑管道的缺陷程度及其相对重要性,表征管道结构缺陷需要修复的紧迫程度	文献 ^[9] ,8.3.4条
C21	检查井修复指数	衡量检查井结构损坏的相对影响程度	文献 ^[10] ,13.5.8条
C31	环境指数	衡量管道周边环境状况出现的问题对管道安全运行的相对影响程度	文献 ^[10] ,12.5.4条
C41	污水收集率	服务区域收集到的BOD ₅ 总量与服务区域内居民排放的BOD ₅ 总量之比	文献 ^[11-12]
C42	污水处理率	服务区域收集到的污水量与服务区域内污水总排放量之比	文献 ^[11-13]
C51	污水泵站运行情况	污水泵站机电设备、附属设备、构筑物 and 运维水平情况	文献 ^[14] ,第4章
C61	管内流速	每日的高峰用水时间段管内污水流速,反映管道是否容易淤积	文献 ^[15] ,5.2.7条
C62	管内最大充满度	每日的高峰用水时间段管内污水充满度,反映管道过水能力是否充足	文献 ^[15] ,表5.2.7
C63	过水断面损失	现状过水断面相较于完好状态的损失比率	文献 ^[9] ,表8.2.4
C64	积泥深度与管径之比	管道底部沉淀淤积深度	文献 ^[9] ,表8.2.4
C71	养护项目达标情况	考察维护内容是否符合要求	文献 ^[14] ,第3章
C72	养护频率达标情况	考察维护的频率是否符合要求	文献 ^[14] ,第3章
C81	混接点密度	单位长度管道上的混接点和混接源数	文献 ^[16] ,7.2.3条
C82	混接水量程度	被调查区域内混接进入的水量与实际污水量之比	文献 ^[17] ,8.0.3条
C91	硬度	管道下游检测点硬度值是否高于上游检测点,衡量地下水入渗情况	文献 ^[16] ,5.3.4条
C92	污水BOD ₅ 浓度	被调查区域干管末端污水BOD ₅ 浓度,衡量入渗对污水的稀释情况	文献 ^[13]
C101	管道检测报告		
C102	竣工验收报告	被调查污水系统是否有相应的设计资料	文献 ^[18]
C103	竣工图		
C104	GIS资料		

对于判断矩阵中的任一元素 $C_{ij} (1 \leq i \leq n, 1 \leq j \leq n)$, 当指标 i 比指标 j 更加重要或同等重要时, C_{ij} 的值表示指标 i 比指标 j 更加重要的相对程度。心理学试验表明,通常人们心里对某一对象的认知或等级划分不超过9个等级,基于此理论,层次分析法一般采用9级制来评价相对重要程度^[19]。用1~9分来表示指标 i 比指标 j 更重要的程度,1分表示表示指标 i 和指标 j 同等重要,9分表示表示指标 i 比指标 j 极端重要。而当指标 j 比指标 i 更加重要时,则应先为 C_{ji} 取1~9的分值,然后 C_{ij} 直接取 C_{ji} 的倒数。换言之,判断矩阵右上角的元素和左下角的元素,以矩阵对角线为对称轴,互相为倒数,即 $C_{ij} = C_{ji}^{-1}$ 。

在本研究中,通过对来自政府管理部门、国有企业(排水公司、施工单位)、设计院、高等院校以及排水产品提供商的多名专家进行问卷调查,两两比较各评价指标的相对重要程度。根据回收到的60份问卷,构建了各评价层级的判断矩阵。例如,本研究中的准则层,即结构属性、功能属性、混接及入渗属性和资料完备属性所对应的判断矩阵如式(2)所示。

$$\begin{bmatrix} 1.00 & 0.35 & 0.47 & 2.16 \\ 2.86 & 1.00 & 2.14 & 1.96 \\ 2.14 & 0.47 & 1.00 & 3.24 \\ 0.46 & 0.51 & 0.31 & 1.00 \end{bmatrix} \quad (2)$$

2.2 权重系数的计算

根据层次分析法的原理,对于判断矩阵 C 有特征方程 $Cx = \lambda x$, 可以计算出判断矩阵的最大特征值 λ_{max} 和对应的特征向量 x 。然后再对特征向量 x 进行归一化处理,即可获得判断矩阵 C 对应层级的权重向量 $w = (w_1, w_2, \dots, w_n)^T$ 。

例如对于本研究的准则层判断矩阵,通过解特征方程得到的最大特征值为 $\lambda_{max} = 4.21$, 其对应的特征向量为 $x = (0.31, 0.76, 0.53, 0.22)^T$ 。对 x 进行归一化处理,即可得到准则层指标的权重向量 $w = (0.168, 0.419, 0.294, 0.119)^T$ 。

2.3 一致性检验

当计算获得权重后,还需要通过一致性检验来判断所得权重相互之间是否存在矛盾。首先计算所得权重的一致性指标 CI (Consistency Index), 如式(3):

$$CI = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1} \quad (3)$$

式中: CI 为权重的一致性指标; λ_{max} 为判断矩阵的最大特征值; n 为判断矩阵的阶数。

再计算一致性比例 CR (Consistency Ratio), 如式(4):

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad (4)$$

式中:RI为平均随机一致性指标(Average Random Consistency Index)。

2~6阶矩阵的RI如表4所列^[20]。

表4 层次分析平均随机一致性指标值RI取值

n	RI
2	0
3	0.58
4	0.9
5	1.12
6	1.24

当CR≤0.1时,认为判断矩阵具有满意的一致性;当CR>0.1时,必须重新构造判断矩阵。例如本研究中的准则层判断矩阵,对所得权重进行一致性检

验,如式(5)和式(6)所示:

$$CI = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1} = \frac{4.21 - 4}{4 - 1} = 0.070 \quad (5)$$

$$CR = \frac{CI}{RI} = \frac{0.070}{0.9} = 0.077 < 0.1 \quad (6)$$

由于CR<0.1,判断矩阵满足一致性检验,所得权重可信度较高。

3 评价体系的构建

按照上述步骤分别为各层级指标构建判断矩阵,计算出相应的权重,并通过一致性检验后,建立了分流制污水系统运行状况评价指标体系,如表5所列。

表5 分流制污水系统评价指标权重分配表

目标层A	准则层B	权重	一级指标层C	权重	二级指标层C	权重
排水系统运行状况	结构属性(B1)	0.168	管道结构完整性(C1)	0.689	修复指数(C11)	—
			检查井结构完整性(C2)	0.158	检查井修复指数(C21)	—
			周边土体病害(C3)	0.153	环境指数(C31)	—
	功能属性(B2)	0.419	管道服务情况(C4)	0.352	污水收集率(C41)	0.808
			附属设施服务情况(C5)	0.218	污水处理率(C42)	0.192
					污水泵站运行情况(C51)	—
			管道运行情况(C6)	0.278	管内流速(C61)	0.438
					管内最大充满度(C62)	0.348
					过水断面损失(C63)	0.112
					积泥深度与管径之比(C64)	0.103
	系统维护情况(C7)	0.152	养护项目达标情况(C71)	0.748		
			养护频率达标情况(C72)	0.253		
	混接及入渗属性(B3)	0.294	混接情况(C8)	0.792	混接点密度(C81)	0.177
			外水入渗情况(C9)	0.208	混接水量程度(C82)	0.823
硬度(C91)					0.142	
资料完备属性(B4)	0.119	设计资料完备情况(C10)	—	污水BOD ₅ 浓度(C92)	0.858	
				管道检测报告(C101)	0.429	
				竣工验收报告(C102)	0.152	
				竣工图(C103)	0.154	
					GIS资料(C104)	0.265

建立好分流制污水系统运行状况评价指标体系后,还需对二级指标划分具体的评分等级标准。每个指标采用10分制进行计分,但是考虑到精确打分具有困难性,为方便工程人员操作方便,能够根据污水系统的实际情况进行快速评级,采用四等级法平均划分分值范围。划分后的等级和对应的分数取值如表6所列。

在对拟评价的分流制污水系统开展调查、按表6获得各二级指标的评分后,则可将每个二级指标的得分与表5中对应的权重相乘,得到一级指标层的分数,依次类推,可以得到准则层的分数,再计算出

整个系统的总得分,如式(7)至式(9)所示。

$$P_C = \sum p_i \times w_i \quad (7)$$

$$P_B = \sum p_j \times w_j \quad (8)$$

$$P_A = \sum p_k \times w_k \quad (9)$$

式中: P_C为一级指标层各项得分; P_B为准则层各项得分; P_A为目标层得分(系统评价的总分); p_i和 w_i为二级指标层第 i 项的得分和对应的权重; p_j和 w_j为一级指标层第 j 项的得分和对应的权重; p_k和 w_k为准则层第 k 项的得分和对应的权重。

根据评价的总分 P_A, 可以将分流制污水系统的运行状况分为4级,如表7所列。

表 6 分流制污水系统评价指标等级划分和对应分数

编号	指标名称	分值				评分依据	
		0	3	6	10		
C11	修复指数	C11>7	4<C11≤7	1<C11≤4	C11≤1	文献[9],表 8.3.5	
C21	检查井修复指数	C21>7	5<C21≤7	1<C21≤5	C21≤1	文献[10],表 13.5.9	
C31	环境指数	C31>7	4<C31≤7	1<C31≤4	C31≤1	文献[10],表 12.5.4-3	
C41	污水收集率	C41<70%	—	70≤C41<75%	C41≥75%	文献[11,21]	
C42	污水处理率	C42<95%	—	—	C42≥95%	文献[13]	
C51	污水泵站运行情况	不合格	—	合格	优秀	文献[14],第 4 章	
C61	管内流速/(m·s ⁻¹)	C61<0.6	—	0.6≤C61<1.0	C61≥1.0	文献[15],5.2.7 条	
C62	管内最大充满度	C62>0.75	—	0.55<C62≤0.75	C62≤0.55	文献[15],表 5.2.4	
C63	过水断面损失	C63>50%	25%<C63≤50%	15%<C63≤25%	C63≤15%	文献[9],表 8.2.4	
C64	积泥深度与管径之比	C64>40%	—	20%<C64≤40%	C64≤20%	文献[9],表 3.3.2-1	
C71	养护项目达标情况	不合格	—	合格	优秀	文献[14],第 3 章	
C72	养护频率达标情况	不合格	—	合格	优秀		
C81	混接点密度/(个·km ⁻¹)	C81>10	5≤C81≤10	1≤C81<5	0	文献[16],表 7.2.4	
C82	混接水量程度	C82>50%	30%≤C82≤50%	0<C82<30%	0	文献[17],表 8.0.1	
C91	硬度	管道下游检测点硬度高于上游检测点		—	—	无明显变化	文献[16],5.3.4 条
C92	污水 BOD ₅ 浓度/(mg·L ⁻¹)	C92<70	70≤C92<100	—	C92≥100	文献[22-23]	
C101	管道检测报告						
C102	竣工验收报告						
C103	竣工图	缺少	具备但不详尽	—	具备且详尽	文献[18]	
C104	GIS 资料						

表 7 分流制污水系统评价等级

评价等级	评分	描述
IV	$P_A < 4$	该系统运行状况很差,需要结合单项指标评价结果,立即采取有效措施进行整改
III	$4 \leq P_A < 6$	该系统运行状况较差,需要结合单项指标评价结果,尽快采取有效措施进行整改
II	$6 \leq P_A < 8$	该系统部分指标存在进一步提升空间,可综合考虑实际情况,安排适当整改
I	$P_A \geq 8$	该系统运行状况正常,没有明显需要处理的问题

4 结 语

本文全面梳理了排水系统相关的标准、规范以及政策性文件,确立了一套分流制污水系统运行状况的综合评价体系。该评价体系分为准则层、一级指标层、二级指标层共三个层级,全面涵盖了排水系统运行状态的结构、功能、混接等多个评价属性,并细化成可实际调查的 20 个指标。在此基础上,本研究采用专家问卷调研及层次分析法,定量计算出了评价体系中各层级指标的权重,并建立了指标的评价等级。实际操作时,根据相关数据确定 20 个二级指标的评分,即可依次计算出各层级指标的得分,并给出最终的评价总分,可较为直观地判断被调查分流制污水系统的运行情况。

参考文献:

[1] 张岩. 上海中心城区城镇污水水质特性分析[J]. 净水技术, 2023, 42(11): 101-111.

[2] 上海市长宁区人民政府-长宁区启动新一轮雨污混接普查和整治工作[EB/OL]. (2024-03-11)[2024-05-14]. <https://www.shen.gov.cn/col5684/20240403/1257331.html>.

[3] 对市十五届人大六次会议第 0122 号代表建议的答复-上海市水务局[EB/OL]. (2022-07-19)[2024-05-14]. <https://swj.sh.gov.cn/dbjy/20220815/dc71f6f05d4849ffb72ada1bf7467bdc.html>.

[4] 陈盛达,李树平,姜晓东. 给水管网可靠性评价研究进展[J]. 城镇供水, 2017(5): 91-95.

[5] 杨少平,任心欣,李柯佳,等. 通过水量、水质评价深圳市建筑小区雨污分流项目绩效的方法探索与实践[C]//中国城市规划年会暨 2021 中国城市规划学术季. 北京:中国城市规划学术季, 2020.

[6] 谢冰冰,张翔,王宁,等. 基于 AHP-模糊综合评价法的城市区域雨污水混接程度评价研究[J]. 福建建筑, 2023(2): 128-133.

[7] 余凯华. 上海某区排水系统运行风险综合评估及防范策略研究[J]. 给水排水, 2023, 59(2): 138-144.

[8] 唐小丽. 模糊网络分析法及其在大型工程项目风险评价中的应用研究[D]. 南京:南京理工大学, 2007.

[9] CJJ 181—2012, 城镇排水管道检测与评估技术规程[S].

[10] TCECS 1507—2023, 室外排水管道检测与评估技术规程[S].

[11] 关于印发城镇污水处理提质增效三年行动方案(2019—2021 年)的通知[EB/OL]. (2019-04-29)[2024-04-15]. <https://www.gov.cn/>

(下转第 199 页)