

其他水系统研究与应用

袁嵘, 霍广炼, 柯臻玮, 等. 污水主干失效风险评估和解决策略——广州市沥滘和西朗污水系统案例[J]. 净水技术, 2023, 42(4):137-143, 168.

YUAN R, HUO G L, KE Z W, et al. Failure risk assessment and solution strategy of main sewage pipes——Cases of Lijiao and Xilang sewage systems in Guangzhou[J]. Water Purification Technology, 2023, 42(4):137-143, 168.

污水主干失效风险评估和解决策略——广州市沥滘和西朗污水系统案例

袁 嵘¹, 霍广炼¹, 柯臻玮¹, 周午阳², 朱世泰², 王广华^{2,*}

(1. 广州市城市排水有限公司, 广东广州 510006; 2. 广州市市政工程设计研究总院有限公司, 广东广州 510060)

摘 要 城市污水主干是污水输送的大动脉, 若出现事故, 将造成严重的溢流污染危害, 特别在人口密集、地下管线空间资源紧张的中心城区, 会对民众的生命财产及社会的安全运行产生极大的影响。为此, 需研究污水主干失效风险的评估方法及相应解决策略。文中以广州市沥滘和西朗污水系统的污水主干为研究对象, 建立水力模型, 并用实际运行数据对模型进行率定, 模拟流量与实际流量相似度达到 99.5%。利用模型模拟结果中的水力参数和污水主干的物理属性、环境因素共同作为主干失效风险评估的指标, 采用层次分析法耦合专家问卷调查法计算总风险得分, 从而评估出高风险管段, 提出连通策略, 并进一步对连通策略进行评价。结果表明, 通过增设连通管, 南洲路污水主干日累计流量下降 33.98%, 超负荷状态从 2.00 降低为 0.78。表明互连互通策略降低主干失效风险, 从而保障污水主干的安全运行。

关键词 污水主干 互连互通 水力模型 层次分析法 风险评估

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-0177(2023)04-0137-08

DOI: 10.15890/j.cnki.jsjs.2023.04.017

Failure Risk Assessment and Solution Strategy of Main Sewage Pipes——Cases of Lijiao and Xilang Sewage Systems in Guangzhou

YUAN Rong¹, HUO Guanglian¹, KE Zhenwei¹, ZHOU Wuyang², ZHU Shitai², WANG Guanghua^{2,*}

(1. Guangzhou Urban Drainage Co., Ltd., Guangzhou 510006, China;

2. Guangzhou Municipal Engineering Design & Research Institute Co., Ltd., Guangzhou 510060, China)

Abstract The main sewage pipe is the main artery of sewage transportation. If the accident occurs, it will cause serious overflow pollution harm, especially in densely populated downtown with narrow underground space. Therefore, it is necessary to study the failure risk assessment method and solution strategy of main sewage pipe. A hydraulic model was established for the main sewage pipeline of Lijiao and Xilang sewage systems in Guangzhou, and the model was calibrated with actual operation data. The similarity between simulated flow and actual flow was 99.5%. Then using the hydraulic parameters of model and physical properties of trunk sewer, environmental factors as main failure risk assessment indices. Analytic hierarchy process coupled with expert questionnaire method was used to calculate the total risk score, then obtaining the high-risk section which was needed to be connected, further the connected strategy was evaluated. The results showed that the accumulated daily flow of the main sewage pipe under Nanzhou Road decreased by

[收稿日期] 2022-11-16

[基金项目] 广州市城市排水有限公司科技项目(穗排水合字 CG[2021]16号);广东省水利科技创新项目(2020-34)

[作者简介] 袁嵘(1979—),女,硕士,主要从事城市给排水运营管理、内涝治理与水环境治理技术研究, E-mail:13792513@qq.com。

[通信作者] 王广华(1976—),男,博士,主要从事城市水环境治理、水力模型、内涝防治与智慧水务等工程设计与技术研究, E-mail:75302423@qq.com。

33.98%, and the overload state decreased from 2.00 to 0.78. The failure risk of the main sewage pipe can be effectively reduced by adding the connecting pipe, so as to ensure the safe operation of the main sewage pipe.

Keywords main sewage pipe interconnection hydraulic model analytic hierarchy process (AHP) risk assessment

排水系统在城市水污染防治和城市防洪、防涝中发挥着重要作用,污水干管是排水系统的核心组成部分^[1]。城市中心城区污水干管服务范围广、管道规模大,老城区人口密集,地下空间资源紧张,产生的污水干管事故导致失效时难以处置。污水干管多为重力流管道,难以通过系统间的合理调配降低溢流风险,污水系统安全运行韧性低,管道出现事故时甚至影响城市正常运行。因此,需通过调蓄、连通调配等措施,应对污水系统失效风险^[2]。评估排水管道失效风险可提高排水管网的管理水平,在事故未发生前进行主动预防,对维护社会稳定、保护民众生命财产安全具有十分重要的意义。

目前,国内外关于排水系统互连互通的研究聚焦在管网数学模型的建立和网络结构的分析研究^[2-3],重点研究枝状管网的脆弱度,以及如何搜寻等压差点构建环状网络,实现事故时的双向输送和调配^[4-6]。国内关于城市污水系统互连互通研究的应用实例主要针对污水厂、泵站之间的连通^[7-8]。关于污水系统干管风险量化评估和污水干管互连互通的研究尚处于初级阶段,污水管道的风险评估尚没有形成全面的评估指标体系和完善的评估模型,主要依靠经验,正处在由定性到半定量的发展阶段^[9-10]。本文以广州市中心城区的污水系统作为研究对象,中心城区具有地下空间拥挤、污水干管故障造成危害大、增加连通管道较为困难等特点;通过调研现状污水干管的失效风险,建立污水干管系统的

水力模型,分析管网水量变化特性^[11];基于模型的模拟结果,进一步构建污水干管系统风险评价方法;同时,依据风险评价结果制定解决策略,并对该策略进行效果评价,从而为污水干管网系统连通调控、优化运行提供依据。

1 研究对象

1.1 沥滘污水系统

沥滘污水系统位于广州市中心城区南部,服务范围是整个海珠区(除洪德分区污水西调至西朗污水处理系统外)、番禺区的大学城小谷围地区和黄埔区的长洲岛,总服务面积为 113.50 km²,已建成沥滘污水处理厂处理能力为 75 万 m³/d,排水管道(渠)约为 84.6 km,污水干管设有马涌 2 号泵站、东晓路 4 号泵站、广州大桥 5 号泵站、琶洲 7 号泵站、新滘南 8 号泵站等 10 座污水泵站(图 1)。

1.2 西朗污水系统

西朗污水处理系统位于广州市主城区西南部,服务范围包括荔湾区珠江以南区域(花地河以东分区、花地河以西分区)及海珠区的洪德分区,总服务面积为 54.17 km²,与沥滘污水处理系统共同属于南片区。已建成西朗污水处理厂处理能力为 50 万 m³/d,排水管道(渠)约为 124.3 km,污水干管设有东沙泵站、广中泵站、龙溪泵站等 6 座污水泵站(图 1)。

沥滘和西朗污水系统的主干管分布如图 1 所示,南片区 1~7 为沥滘污水系统,南片区 8~10 为西



图 1 沥滘和西朗污水系统主干管的分布

Fig. 1 Distribution of Drainage Main Sewage Pipes in Lijiao and Xilang Sewage Systems

朗污水系统, 沥滘系统和西朗系统通过过江管道相连接, 系统较为复杂, 且一旦污水干管失效, 将造成严重的后果。

2 技术手段与研究方法

2.1 技术手段

2.1.1 水力模型

本研究选用 InfoWorks ICM 作为本次建模软件。该软件能够对城市综合排水系统进行模拟, 具有拓扑关系分析和推断功能, 以及较好的排水管道运行情况展示和查询功能, 且该软件能够较好地与 ArcGIS 软件相衔接, 因此, 该软件符合本研究需求^[11]。通过收集并梳理沥滘和西朗系统的污水干管、泵站、污水厂等基础资料和运行数据, 整理出建模所需的基础数据, 并借助已有的 GIS 数据进行初步建模, 再对污水干管模型进行补充、修正, 并利用运行数据对模型进行率定, 完成率定的水力模型可模拟得出各污水干管的水力数据, 用于下一步的风险评估。

2.1.2 层次分析法

风险评估方法可分为定性评估、半定量评估、定量评估 3 类^[12]。影响排水系统失效风险的因素较多, 部分因素无法量化, 因此, 宜选用半定量评估方法。本研究采用半定量评估的层次分析法, 选用 yaahp V12.8 版本层次分析软件, 通过将研究对象分解成不同的层次和因素, 对比两种因素重要程度得到判断矩阵。通过相关的矩阵计算, 可以求出所研究指标的相对重要性, 该方法通过定性和定量相结合解决了评估对象结构复杂且难于量化的问题, 其具有很好的实用性和适用性, 是适合目前国内城市排水管道运行风险的评估方法^[13]。

2.1.3 专家调查问卷法

专家调查问卷法是将问题设定为调查问卷的形式, 并邀请相关领域的专家完成, 然后将专家的意见加以科学统计分析, 从而将定性问题量化的方法, 该方法主要针对结构化或半结构化的问题。为尽量消除单一专家打分过程中的主观性, 采用多位专家群决策的方法对判断矩阵进行集结, 从而得出趋近于真实的结果^[14]。

2.2 研究方法

综合上述 3 种技术手段对中心城区污水干管开展综合性仿真模拟、风险评估研究。采用水力模型进行拓扑分析, 并以排水运行管理的实际运行数据进行模型率定, 动态模拟得出污水干管水力数据。再利用层次分析法耦合专家调查问卷法建立风险层次分析模型, 进行污水干管风险评估, 得出各风险评估指标的权重。基于所收集的中心城区污水干管资料进行数学统计、拟合, 给风险评估指标赋分, 最终计算各污水干管的风险评估总分, 筛选出高风险管段。在此基础上针对高风险管段提出相应的互连互通和其他应对方法, 并对互连互通后的运行效果进行了二次模型模拟分析和风险评估。

3 水力模型构建与率定

构建的污水干管模型如图 2 所示, 建模范围包括整个海珠区、大学城以及荔湾区珠江以南区域, 总面积约为 167.7 km², 系统干管总长约为 209.9 km, 共 16 座污水泵站。

为率定水力模型, 将各泵站的实际运行流量数据作为依据, 修正模型参数。然后将修正后的模型中各泵站处的模拟流量与泵站实际运行流量进行对比, 结果如图 3(a) 所示, 两者非常接近, 通过计算可

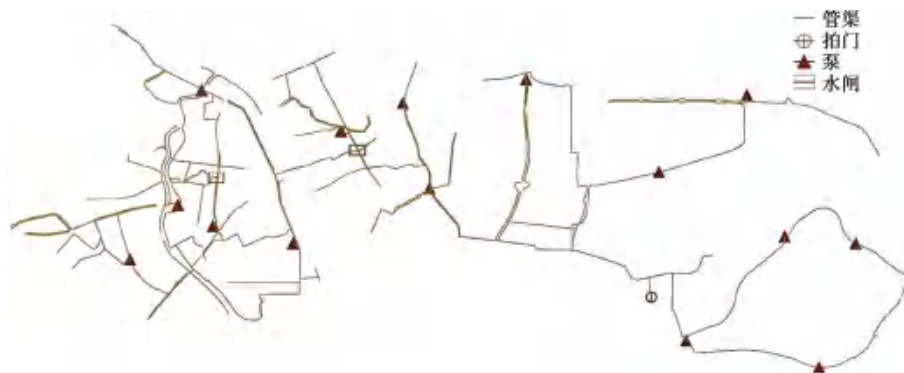
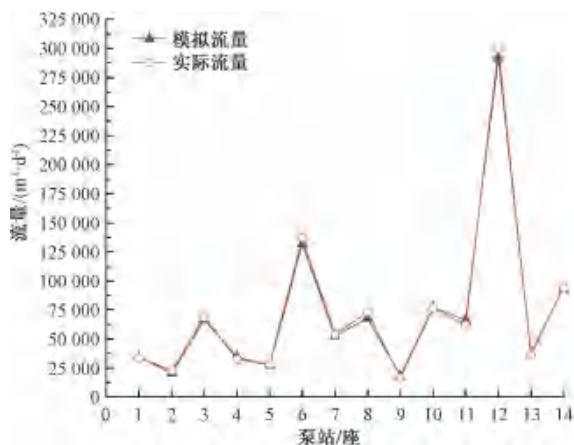


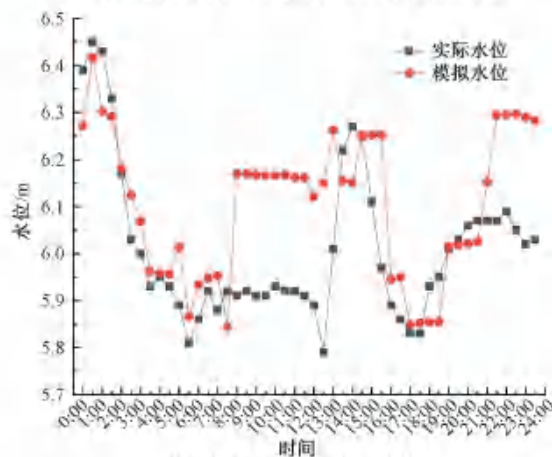
图 2 沥滘-西朗污水系统的水力模型

Fig. 2 Hydraulic Model of Lijiao and Xilang Sewage Systems

知模型流量:实际流量为0.995,相似度较高。此外,选取特征监测点的24 h实际监测水位与模型运行水位进行对比,结果如图3(b)所示,实际运行水位与模拟运行水位变化趋势平均偏差在5%以内,可认为所建立的水力模型满足要求。下一步的污水干管风险评估将基于该模型的模拟结果进行,从中选取单日累计流量和超负荷状态两项水力指标作为风险评估指标。



(a) 主要泵站实际运行流量与模拟运行流量的对比



(b) 特征点实际水位与模拟水位的对比

图3 实际运行结果与模拟结果的对比

Fig. 3 Comparison between the Results of Actual Operation and Simulation

4 风险评估和结果分析

4.1 评估方法与评估指标

排水管道风险评估的指标通常包括管道物理属性、环境影响因素、水力条件3大类^[10]。本研究结合中心城区污水干管的特征,筛选与干管风险关联性强、数据相对完整的评估指标作为分析对象,对评估指标进行分级和赋予分数,收集了大量沥滘和西

朗污水处理系统的物理属性资料和环境资料,并结合污水干管风险评估的需求和管网检修数据对各指标进行梳理分析,最终选取物理和环境属性的4个指标(管材、管径、埋深、道路等级)、水力条件2个指标(单日累计流量、超负荷状态),共6个指标进行评估。其中水力条件指标来自Infoworks ICM所建立的水力模型运行结果,超负荷状态小于1.00时表示等同于充满度;超负荷状态等于1.00时,表示水力坡度小于管道坡度;超负荷状态等于2.00时,表示水力坡度大于管道坡度。

4.2 指标计算与评估分析

基于沥滘和西朗污水处理系统上述6个指标的数据统计分析结果,对上述6个指标划分风险等级和赋予风险分数,最终风险分级及风险赋分结果如表1~表6所示。

表1 管材指标风险分级及赋分

Tab. 1 Risk Classification and Assignment of Pipe Materials

分级	管材	评估分数
I级	金属管	20
II级	钢筋混凝土管	30
III级	塑料管	60
IV级	玻璃钢和夹砂管、砖砌	100

表2 管径指标风险分级及赋分

Tab. 2 Risk Classification and Assignment of Pipe Diameters

分级	管径/mm	评估分数
I级	[1 500, ∞)	30
II级	[300, 500)	35
III级	[800, 1 500)	60
IV级	[500, 800)	100

表3 埋深指标风险分级及赋分

Tab. 3 Risk Classification and Assignment of Buried Depths

分级	埋深/m	评估分数
I级	[0, 2)	45
II级	[2, 4)	60
III级	[4, 6)	90
IV级	[6, ∞)	100

表4 道路等级指标风险分级及赋分

Tab. 4 Risk Classification and Assignment of Road Grades

分级	道路等级	评估分数
I级	干道	50
II级	无道路	60
III级	支路	100

表5 累计流量指标风险分级及赋分
Tab. 5 Risk Classification and Assignment of Total Flow Quantity

分级	累计流量/(m ³ ·d ⁻¹)	评估分数
I级	[0, 20 000)	10
II级	[20 000, 50 000)	[10, 25)
III级	[50 000, 100 000)	[25, 50)
IV级	[100 000, 200 000)	[50, 100)
V级	[200 000, ∞)	100

表6 超负荷状态指标风险分级及赋分
Tab. 6 Risk Classification and Assignment of Overload

分级	超负荷状态	评估分数
I级	[0, 1)	[0, 80)
II级	1	80
III级	2	100

基于上述6个指标计算,选用yaahp V12.8版本软件作为层次分析法辅助计算软件,通过对污水干管系统风险进行多维指标体系条件下的层次分析,并进行模型层次绘制,得到分为3层的层次模型,利用模型进行高阶判断矩阵一致性计算和检验,并对不一致判断矩阵进行修正和自动补全,避免主观性判断造成的决策误差,极大地缩减计算量,有效避免计算误差,提高计算效率。

在模型计算和矩阵修正补全的基础上,设计了专家调查问卷,将上述评价指标之间相对重要性分为9级的,共组织10位从事一线运营管理工作的高级工程师、10位从事设计工作的高级工程师以及5位高校专家填写问卷。将问卷进行群决策计算,对评价指标体系进行权重计算及一致性检验。得到层次模型和各风险评价指标的权重结果如图4所示。

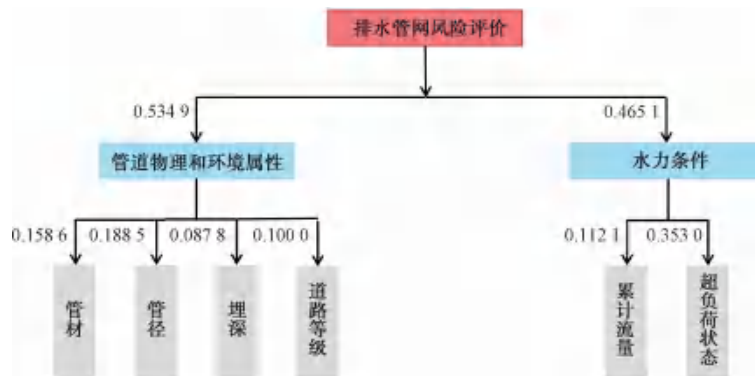


图4 层次分析模型及权重

Fig. 4 Model and Weights of Hierarch Analysis

将各指标对应的风险权重和风险分数代入式(1),计算出风险评估总分。

$$P = \sum_{i=1}^n P_i \times I_i \quad (1)$$

- 其中: P ——风险评估总分;
- P_i ——风险评估指标 i 的评分值;
- I_i ——对应 P_i 的权重;
- n ——风险评估指标的总数量。

对风险评估总分进行统计得出百分位数,依据数据分布情况将污水干管的风险等级分为高、中、低风险,风险评估总分平均值为48.63,为21.31~85.08。分别取百分位数97(风险分为70.87)以上为高风险,百分位数为80~97(风险分为59.31~70.87)为中风险,百分位数80(风险分59.312)以下为低风险。

4.3 风险管段的识别

将总风险评估得分结果导入ArcGIS软件,依据管道ID给污水干管连接上总风险评估得分这一属性,在管网图上进行风险分布的展示,结果如图5所示,可知高风险管段分布在新港东路、广州大道、南洲路、大学城外环路以及东沙泵站上游压力管等处。

为了针对高风险管段准确得出互连互通方法,需要分析哪些管段的失效风险主要是水力因素造成的。因此,对所有管段的水力因素(超负荷状态与累计流量)风险得分与风险评估总分的占比(以下简称“水力占比 Z_1 ”)进行计算,得出整个系统的水力占比 Z_1 值为3%~71%,借助百分位数对 Z_1 数据分布情况进行分析,将百分位数80以上($Z_1 \geq 49.21\%$)定义为高占比,将上述结果导入ArcGIS软件,并标记出高占比的管段,进一步将高风险管段与



图5 沥滘和西朗污水系统现状风险分布图

Fig. 5 Risk Position Map of Lijiao and Xilang Sewage Systems

高水力占比管段进行空间位置叠加,得出同时高风险和高水力占比的管段,分布如图6所示。

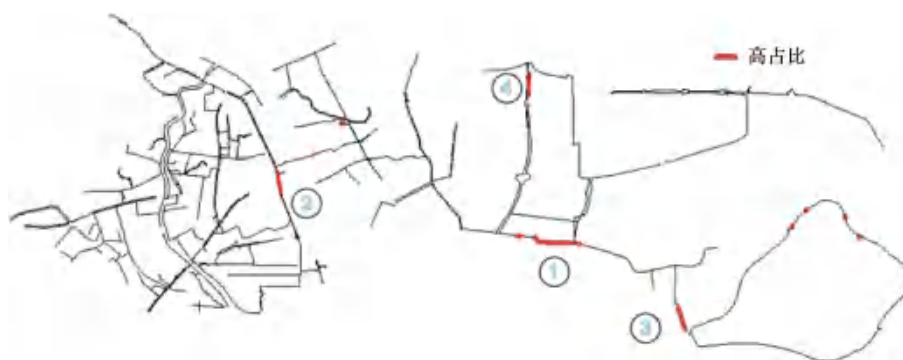


图6 同时高风险和高水力占比分布图

Fig. 6 Distribution Map of Both High Risk and High Hydraulic Ratio

由图6可知,在高风险管段中,点位①~④为水力因素风险分占比较高的点位,分别为:①南洲路;②东沙泵站上游压力管;③大学城外环路至小洲路的过江管;④广州大道5号泵站下游。因此,为降低管道风险,应着手通过增设连通管改善这几处管段的水力条件。

5 解决策略与效果评估

针对水力因素为主要风险因素的管段,为降低决上述高风险管段的失效风险,在沥滘和西朗系统增设连通管3处。①处连通管主要用于缓解南洲路干管的传输压力;②处连通管用于缓解东沙泵站上游过江压力管道的压力;③处连通管用于分担广州大道5号泵站的传输水量。连通管分布如图7所示。并借助模型优化调度,优化流量分配,从而消除管段失效风险。

对增加连通管后的沥滘和西朗污水主干系统重新进行风险评估,连通后①、②、④处风险管段的失效风险显著降低,如图8所示。以①处南洲路污水



图7 沥滘和西朗系统连通管分布示意图

Fig. 7 Distribution Map of Communicating Pipe

干管为例,连通后从高风险降低为中、低风险,累计流量从 $404\ 132\ \text{m}^3/\text{d}$ 降低为 $266\ 802\ \text{m}^3/\text{d}$,超负荷状态从2.00降低为0.78,管内水位从超过管顶压力流状态降至充满度为0.78,平均水位约下降1.8 m,如图9所示。

此外,针对水力因素影响较小的高风险管段,重点分析管段物理和环境属性。对管段物理和环境属性的风险得分之和与风险评估总分的占比(简称“物理和环境属性占比 Z_2 ”)进行计算,得出高风险管段中 Z_2 为40%~67%,借助百分位数对数据分布



图8 沥涪和西朗系统增设连通后的风险分布

Fig. 8 Risk Distribution of the Lijiao and Xilang Sewage Systems after Additional Sewage Trunk Connection

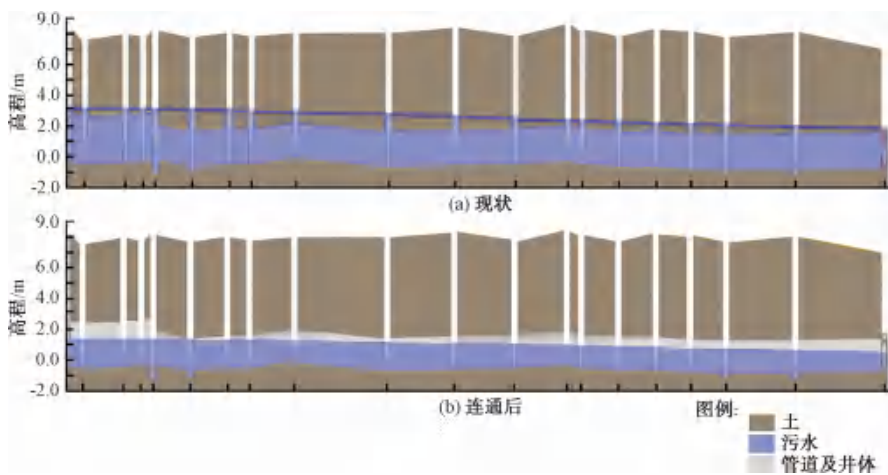


图9 污水主管连通前后的水面线变化

Fig. 9 Comparison of Pipeline Surface Line before and after Sewage Trunk Connection

情况进行分析,将百分位数 80 以上($Z_2 \geq 60\%$)定义为高占比,将上述计算结果导入 ArcGIS,并标记出高占比的管段,这些管段为因管道和环境属性较差导致风险高的管段。针对这些高风险管段,运行管理单位在后续养护过程应进一步实地检测,分析造成干管风险的具体因素,得出相应的改善策略。

以大学城外环路下污水主管为例,通过上述风险评估计算可知,影响该管段风险的主要因素为物理和环境属性,经分析大学城外环路下排水管材多为玻璃钢管材,而玻璃钢为脆性材料,易受植物根茎的破坏,管材是造成风险的主要因素,因此,可采取更换较好材质管道的措施降低管道风险。

6 结论

(1) 基于现状污水主管 GIS 数据,利用 InfoWorks ICM 软件建立了污水主管水力模型,经率定后能有效评估和发现现状污水主管系统存在的水力问题。

(2) 针对沥涪和西朗污水系统,以水力模型模拟得出的累计流量和超负荷状态作为水力条件的风险评价指标,结合管道物理属性指标和环境因素评估指标,建立污水主管现状失效风险综合评估层次模型,识别出 3 处高风险管段,提出增设连通管道的改进策略。

(3) 采用 InfoWorks ICM 软件建立污水主管水力模型耦合层次分析法进行风险评估的方法,能有效辨识出现有排水系统干管的风险管道,并通过管段的连通模拟,可改善干管水力条件,降低管段失效风险,为现有系统安全运行保障提供决策方法。

参考文献

[1] 谢震方. 城市污水主管运行风险评估方法指标体系与评估准则[J]. 净水技术, 2019, 38(6): 1-10.

(下转第 168 页)

- YAN B C, WANG W Q, WANG C, et al. Application and research of AMAO process in wastewater treatment [J]. *New Technology & New Products of China*, 2019(4): 127-128.
- [5] 邹仲勋, 李祖鹏, 刘胜军, 等. BOD₅ 污泥负荷对多段多级 AO 工艺处理效果的影响[J]. *水处理技术*, 2016, 42(10): 89-91.
- ZOU Z X, LI Z P, LIU S J, et al. The influence of BOD₅ sludge loadings for AMAO process[J]. *Technology of Water Treatment*, 2016, 42(10): 89-91.
- [6] 梅特卡夫和埃迪公司. 废水工程: 处理及回用[M]. 4 版. 秦裕珩, 译. 北京: 化学工业出版社, 2004.
- Metcalf & Eddy, Inc. *Wastewater engineering: Treatment and reuse*[M]. 4th ed. QIN Y H, Translation. Beijing: Chemical Industry Press, 2003.
- (上接第 143 页)
- XIE Z F. Indicator system and evaluation criterion for operation risk assessment method of urban sewage mains [J]. *Water Purification Technology*, 2019, 38(6): 1-10.
- [2] 张彦晶. 上海中心城区污水干线模型构建及连通研究[J]. *中国给水排水*, 2022, 38(5): 54-58.
- ZHANG Y J. Modeling and connection of sewage trunk lines in downtown Shanghai[J]. *China Water & Wastewater*, 2022, 38(5): 54-58.
- [3] SUN Y, HU X C, LI Y, et al. A framework for deriving dispatching rules of integrated urban drainage systems [J]. *Journal of Environmental Management*, 2021, 298: 113401. DOI: 10.1016/j.jenvman.2021.113401.
- [4] BIRGANI Y T, YAZDANDOOST F. A framework for evaluating the persistence of urban drainage risk management systems[J]. *Journal of Hydro-environment Research*, 2014, 8(4): 330-342.
- [5] YOUNIS R, KNIGHT M A. Continuation ratio model for the performance behavior of wastewater collection networks [J]. *Tunnelling and Underground Space Technology incorporating Trenchless Technology Research*, 2010, 25(6): 660-669.
- [6] 龙浩, 李翠梅. 城市雨水管网系统脆弱性评价[J]. *深圳大学学报(理工版)*, 2014, 31(6): 593-599.
- LONG H, LI C M. Vulnerability assessment of urban storm sewer systems [J]. *Journal of Shenzhen University Science and Engineering*, 2014, 31(6): 593-599.
- [7] 罗亭, 付朝晖, 陈洪洪. 污水厂群应急联合调度——珠海香洲区污水系统规划案例[J]. *中国给水排水*, 2021, 37(6): 17-23.
- LUO T, FU Z H, CHEN H H. Emergency joint dispatching for sewage treatment plants: A case study on the sewage system planning in Xiangzhou District, Zhuhai [J]. *China Water & Wastewater*, 2021, 37(6): 17-23.
- [8] 尉鉴洋. 绍兴市排污总管互通互联“环状”管网建设[J]. *中国给水排水*, 2019, 35(4): 43-46.
- WEI J Y. Construction of “circular” drainage pipe network for interconnection arrangement in Shaoxing City[J]. *China Water & Wastewater*, 2019, 35(4): 43-46.
- [9] 张文俊, 谢震方, 黎雷. 城市污水干管运行风险评估指标体系[J]. *净水技术*, 2019, 38(6): 112-117, 121.
- ZHANG W J, XIE Z F, LI L. Assessment index system of operational risk for urban sewage mains [J]. *Water Purification Technology*, 2019, 38(6): 112-117, 121.
- [10] ANBARI M J, TABESH M, ROOZBAHANI A. Risk assessment model to prioritize sewer pipes inspection in wastewater collection networks [J]. *Journal of Environmental Management*, 2017, 190: 91-101. DOI: 10.1016/j.jenvman.2016.12.052.
- [11] 彭海琴, 张留臻. 上海污水干线总管网模型构建与调度研究[J]. *城市道桥与防洪*, 2020(1): 143-146, 158.
- PENG H Q, ZHANG L L. Study on construction and operation of sewage main network model in Shanghai [J]. *Urban Roads Bridges & Flood Control*, 2020(1): 143-146, 158.
- [12] HAWARI A, ALKADOUR F, ELMASRY M, et al. A state of the art review on condition assessment models developed for sewer pipelines[J]. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 2020, 93: 103721. DOI: 10.1016/j.engappai.2020.103721.
- [13] 巴振宁, 王鸣铄, 梁建文. 基于改进 F-ANP 方法的市政排水管网运行安全风险评估[J]. *安全与环境工程*, 2020, 27(6): 208-216.
- BA Z N, WANG M S, LIANG J W. Risk assessment of municipal drainage network operation safety based on improved F-ANP method[J]. *Safety and Environmental Engineering*, 2020, 27(6): 208-216.
- [14] 邢雯雯. 基于 GA-BP 神经网络模型的排水管道系统健康状况评估[D]. 西安: 长安大学, 2021.
- XING W W. Research on the health assessment model of sewer system based on BP neural network [D]. Xi'an: Chang'an University, 2021.