

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2023.05.009

# 模型与水质特征因子耦合的污水管网数值诊断方法

苗伟波, 刘国庆, 王荣合

(深圳天澄科工水系统工程有限公司, 广东 深圳 518101)

**摘要:** 采用基于管网模型与多参数智能在线监测设备相结合的数值化诊断方法“管网医院”,可对静态设施属性进行分析,解决管网的拓扑与状态问题;对动态运行数据进行分析,解决管网的监测与运行问题。针对佛山市顺德区某污水处理厂服务范围内污水管网系统的入流入渗问题进行了空间分布解析,并诊断出污水管网外来水入流量和污水溢流量。结果表明:污水主干管网存在81个污水溢流排放口、2处孤立管段、1处大管接小管和1处逆坡管段;污水处理厂大部分时段处于高水位运行状态,导致污水外溢,应将现状末端窰井的水深由7.50 m降至6.22 m,保证旱季各溢流口无污水溢流;占污水管网总长6.7%的局部管段,其外来水入流量占总入流量的47.3%,对污水管网入流情况严重和较为严重的3处管段进行修复,可显著降低整个管网系统的入流量等级。

**关键词:** 管网模型; 水质特征因子; 数值诊断; 管网医院; 入流入渗

**中图分类号:** TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2023)05-0060-07

## A Method for Numerical Diagnosis of Sewage Pipe Network Based on Coupling of Model and Water Quality Characteristic Factors

MIAO Wei-bo, LIU Guo-qing, WANG Rong-he

(Shenzhen Texen Science & Technology Water System Engineering Co. Ltd., Shenzhen 518101, China)

**Abstract:** This paper proposed the numerical diagnosis method “pipe network hospital” based on the combination of pipe network model and multi-parameter intelligent online monitoring equipment, which was capable of analyzing the attributes of static facilities and solving the topology and status problems of pipe network. In addition, the method could also analyze the dynamic operational data to solve the monitoring and operational problems of pipe network. The spatial distribution of sewage pipe network inflow and infiltration in the service area of a sewage treatment plant in Shunde District, Foshan City was analyzed, and the volumes of sewage overflow and inflow caused by external water were calculated. There were 81 overflow discharge outlets, 2 isolated pipe sections, 1 large pipe connecting small pipe and 1 reverse slope pipe section in the main sewage pipe network. The sewage treatment plant was operated at a high water level for most of time, resulting in sewage overflow. Therefore, the current water depth of the terminal manhole should be reduced from 7.50 m to 6.22 m to ensure that no sewage overflow occurred at each overflow mouth in the dry season. In the local section which accounted for 6.7% of the total length of the sewage pipe network, the inflow caused by external water accounted for 47.3% of the total inflow. Therefore, repairing the three sections of sewage pipe network with serious or relatively serious inflow problems could significantly reduce the inflow level of the entire network system.

**Key words:** pipe network model; water quality characteristic factor; numerical diagnosis;

pipe network hospital; inflow and infiltration

目前我国水环境治理的第一轮大潮已经结束,开始进入行业的“下半场”,即污水提质增效和水务资产管理的时代。广东省于2021年1月发布的《广东省城镇生活污水处理提质增效工作指引》中提出了提质增效的相关要求:将不是污水的外水赶出污水管网,提升污水浓度,控制溢流污染,改善河涌水质。由于城镇污水管网外水侵占成因复杂,导致整治任务十分艰巨。对于排水管网的诊断,通常采用CCTV、QV等物理检测技术手段,但由于管网是动态运行的,而物理检测方法只能检测某一时间点的管网情况,且肉眼无法判断各种水质,实施难度也较大。近几年发展起来的水质特征因子诊断方法<sup>[1-4]</sup>为管网诊断提供了新的技术思路。国内徐祖信等<sup>[5-7]</sup>、尹海龙等<sup>[8]</sup>将水质特征因子诊断方法用于对排水系统混接污染源以及排水系统管网破损程度的判定。考虑到城镇管网通常由几万段或几十万段管道组成,依靠手算的方法效率较低,且计算易出现错误。为此,笔者提出将管网模型(包含水量和化学质量平衡算法)和多参数智能在线监测相结合的诊断方法,即“管网医院”,主要通过对厂-站-网-河进行全要素、系统化、静态和动态大数据分析,采用夜间基流法(即旱季通过对夜间水量大、浓度低的点位进行水量及水质监测,确定地下水入渗量或河涌水倒灌量)和雨季入流法(即雨季通过对水量暴增、浓度降低的点位进行水量及水质监测,确定雨水入流量)等评估排水管网的运行状况,发现制约管网运行的各类问题。

## 1 研究区域

研究区域为佛山市顺德区某污水处理厂服务范围内的污水管网系统,总服务面积为28.5 km<sup>2</sup>,配套污水管网总长为39.2 km,污水处理厂于2020年建成并运行,处理规模为3.0×10<sup>4</sup> m<sup>3</sup>/d,污水管网系统平面布置见图1。两条污水主干管交汇后进入污水处理厂厂区,中途无污水提升泵站。

由2020年7月污水处理厂的化验报表可知,进水总氮最小值为8.3 mg/L,最大值为16.5 mg/L,平均值为11.1 mg/L,远低于设计进水总氮指标45.0 mg/L;进水氨氮最小值为7.1 mg/L,最大值为12.3 mg/L,平均值为9.0 mg/L,远低于设计进水氨氮指标

35.0 mg/L。污水厂旱天进水量约为22 323.0 m<sup>3</sup>/d,与污水管网服务范围内收集的污水量相对照,判断管网系统处于高水位运行状态,部分污水通过排口溢流至附近河涌。由于进厂水质浓度低,判断存在大量外来入流渗入量。据现场反馈,污水厂凌晨3点以后管网进水量几乎为零,由此可见地下水入渗的可能性较小,污水管道的外来水入流应主要来自河涌水倒灌。



图1 污水管网系统平面布置

Fig.1 Layout of sewage pipe network system

## 2 诊断方法

### 2.1 管网模型及水量和化学质量平衡算法

#### 2.1.1 管网模型

污水管网入流渗入诊断主要基于“和合排水软件”中的水量和化学质量平衡算法<sup>[8-9]</sup>,它是一种基于水质特征因子的管网诊断方法,通过对管网关键节点进行水质特征因子监测,结合管网地理信息系统、管网节点化学质量平衡模型和入流水质特征因子浓度数据库,从上游至下游依次递推求得各管段外来水量。管网入流渗入诊断基本原理如图2所示。“和合排水软件”是适用于我国国情的雨污水收集系统动态波水文模型,为国内自主开发的软件系统,除了包含SWMM、Mouse、InfoWorks的所有功能外,还拥有这些软件所没有的国情化功能,并且可保障国家基础设施信息安全。

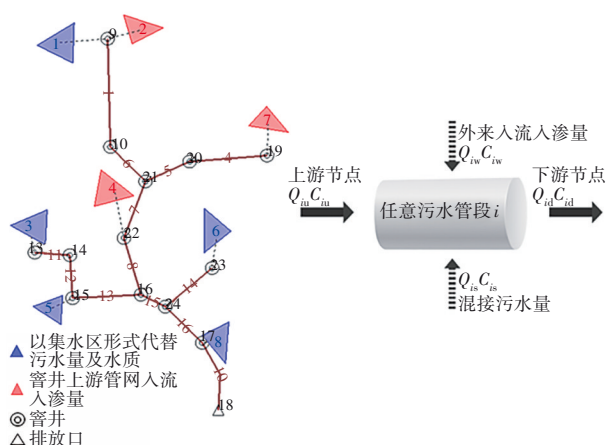


图2 管网入流渗诊断模型

Fig.2 Diagnostic model of inflow and infiltration in pipe network

### 2.1.2 污水管网整体入流渗量算法

对整个污水管网系统而言,若旱天水量来源为生活污水和河涌水倒灌,在已知末端水量和水质的条件下,可建立整个管网系统的水量和化学质量平衡方程,其算法如图3所示。其中, $Q_m$ 、 $Q_s$ 、 $Q_w$ 分别为污水管网系统末端总水量、污水管网接纳的生活污水量、污水管网内外来入流渗量, $m^3/d$ ;  $C_m$ 、 $C_s$ 、 $C_w$ 分别为污水管网系统末端水质指标浓度、污水管网接纳的生活污水水质指标浓度、污水管网内外来入流渗水质指标浓度, $mg/L$ 。

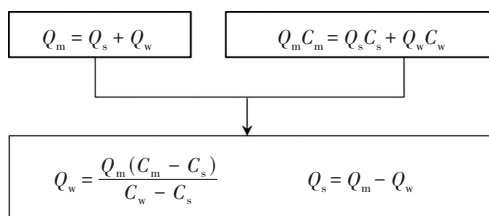


图3 污水管网整体入流渗量算法模型

Fig.3 Algorithm model for the overall inflow and infiltration of sewage pipe network

### 2.1.3 污水管网节点入流渗量算法

在污水管网整体河涌水倒灌计算的基础上,在管网中选择若干关键节点进行水质监测,针对节点管段建立水量和化学质量平衡模型,可求得对应管段的河涌水倒灌量,其算法如图4所示。其中, $Q_{iu}$ 、 $Q_{id}$ 、 $Q_{is}$ 、 $Q_{iw}$ 分别为任意*i*污水管段上游节点来水量、下游节点来水量、*i*管段接纳的生活污水量、*i*管段内外来入流渗量, $m^3/d$ ;  $C_{iu}$ 、 $C_{id}$ 、 $C_{is}$ 、 $C_{iw}$ 分别为任意*i*污水管段上游节点水质指标浓度、下游节点水质指

标浓度、*i*管段接纳的生活污水水质指标浓度、*i*管段内外来入流渗水质指标浓度, $mg/L$ 。

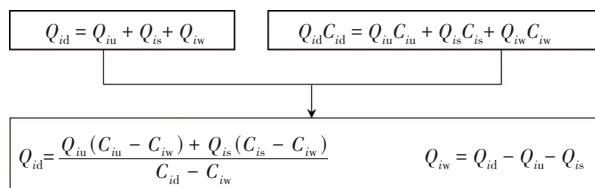


图4 污水管网节点入流渗量算法模型

Fig.4 Algorithm model for inflow and infiltration of nodes in sewage pipe network

## 2.2 水质特征因子选取及监测方法

水质特征因子<sup>[7]</sup>用以指示某种混接类别水质的物理、化学指标。根据诊断区域的本底调查结果显示,氨氮在排水管道中较为稳定且在生活污水中较其他类型水质指标的浓度差异较为明显,可作为理想的生活污水水质特征因子;为得到合理解析结果,选取电导率作为排水管网模型校核特征因子,进行检测指标的相互校核及验证。

采用多参数智能在线监测设备对污水管网关键节点的水质、水量、液位数据进行实时读取。数据采集时段分别为2020年8月7日06:00至8月8日03:00和2020年9月15日00:00—21:00,采集时段均为旱天,且48 h前无降雨。采集频率:液位监测时间间隔15 min/次;流量监测时间间隔30 min/次;水质监测时间间隔30 min/次。

## 2.3 监测点位布置

为了解服务片区的水量平衡关系,根据排水管网的拓扑连接关系和现场踏勘情况,在污水主干管网布置了12个监测点位,其初步平面布置见图5。

根据2020年8月7日06:00至8月8日03:00时段数据采集的初步分析可知,电导率与氨氮具有关联性,总体趋势保持一致,检测结果可相互印证,监测点位水质浓度变化见图6,其中QL1-02由于塑料袋拦截取水导致未取到水样,无检测数据。初步诊断污水主干管大部分管网存在一定量外来低浓度水汇入,QL1-03上游管网完整性较好,存在少量外来低浓度水汇入;QL1-06至QL1-07、QL1-11至QL1-12之间管网完整性较好,无外来入流渗情况;QL1-07的高浓度水与QL1-08和QL1-11的低浓度水混合后浓度降低,电导率平均值为546  $\mu S/cm$ ,与QL1-12的电导率平均值521  $\mu S/cm$ 接近,故判断QL1-07至QL1-12之间管网完整性较好。



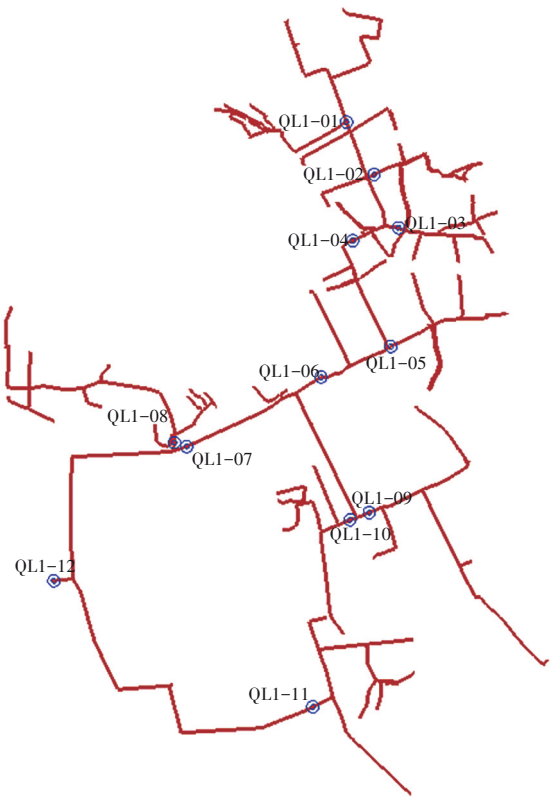


图5 监测点位初步平面布置

Fig.5 Preliminary layout of monitoring points

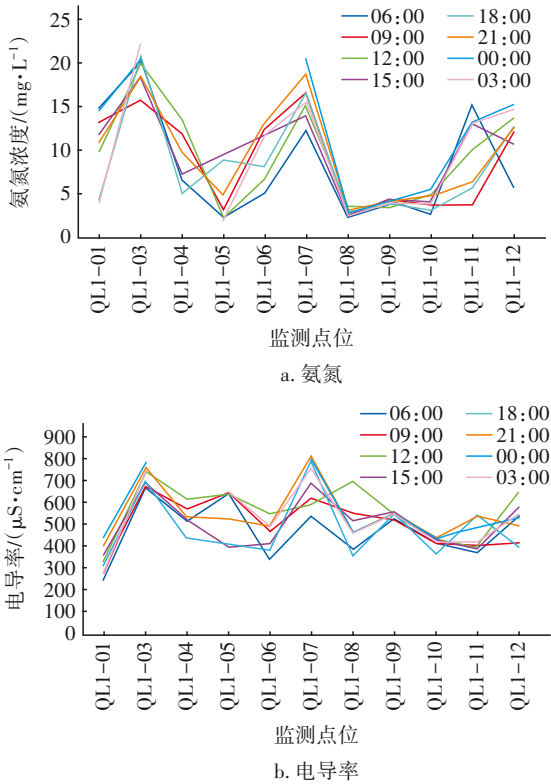


图6 水质浓度变化

Fig.6 Change of water quality concentration

根据初步排查结果对监测点位进行优化调整,调整后的监测点位由12个减少至11个,其平面布置如图7所示。

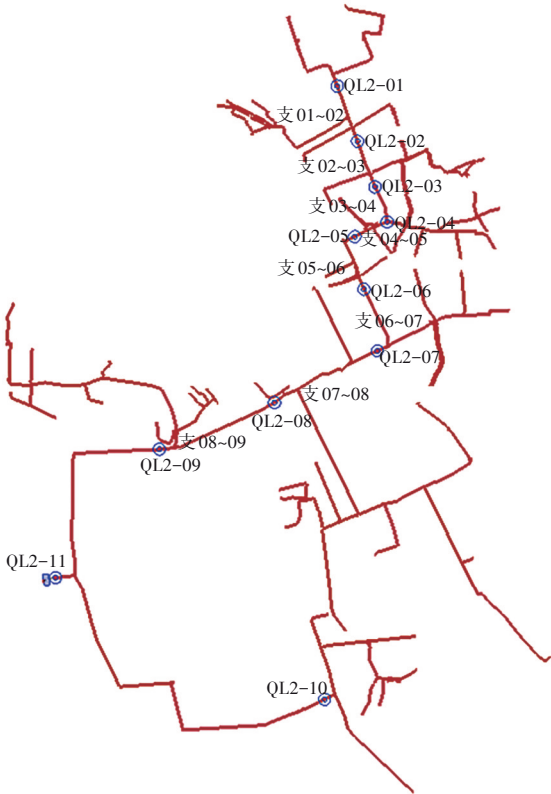


图7 监测点位优化调整平面布置

Fig.7 Layout of the optimized monitoring points

下一步,通过采集优化调整后的监测点位数据,借助管网模型进行验证并找出流入渗管段,从而为污水处理厂的提质增效排查及评估提供理论依据。

3 管网模型验证

在2020年9月15日00:00—21:00对优化调整后的监测点位进行数据采集,并用于排水模型验证,保证水面线和流量的模拟结果与实测数据相符合。

3.1 水面线验证

优化调整后主干管11个监测点位的实测水面线标高如表1所示。通过对管网模型进行流量分配、管道糙率等参数调整,使得模拟结果与实测数据基本一致,可知模型中水面线始端标高为2.50 m,末端标高为0.20 m,与实测数据误差均在0.05 m以内,污水主干管监测点位模拟水面线的变化如图8所示。

表 1 主干管监测点位水面线计算

Tab.1 Calculation of water surface profile at monitoring points of main pipeline m

监测点位	井底标高	12:00 对应监测点水深	水面线标高
QL2-01	-0.907	3.379	2.472
QL2-02	-1.203	3.666	2.463
QL2-03	-1.451	3.906	2.455
QL2-04	-1.641	4.084	2.443
QL2-05	-1.821	4.180	2.359
QL2-06	-2.139	4.200	2.061
QL2-07	-2.707	4.217	1.510
QL2-08	-3.518	4.513	0.995
QL2-09	-4.486	4.957	0.471
QL2-10	-1.684	0.317	-1.367
QL2-11	-5.980	6.222	0.242

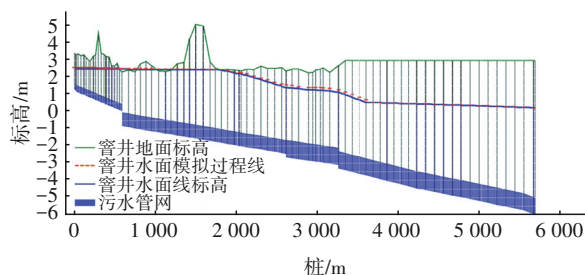


图 8 污水主干管监测点模拟水面线变化

Fig.8 Change of simulated water surface profile at monitoring points of main sewage pipeline

### 3.2 流量验证

表 2 为污水主干管 11 个监测点位不同时刻实测流量与模拟计算流量的对比。

表 2 主干管监测点位实测流量与模拟计算流量对比

Tab.2 Comparison of measured and simulated flow at monitoring points of main pipeline

监测点位	监测时间	实测值/ ( $\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ )	计算值/ ( $\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ )	差值/ ( $\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ )
QL2-01	13:36	4 085.0	4 173.8	88.8
QL2-02	14:03	6 605.0	6 658.9	53.9
QL2-03	14:30	6 214.0	6 390.3	176.3
QL2-04	15:03	5 562.0	5 672.7	110.7
QL2-05	15:21	10 969.0	10 011.6	-957.4
QL2-06	15:42	8 805.0	9 642.5	837.5
QL2-07	15:54	11 394.0	11 883.1	489.1
QL2-08	17:26	15 251.4	15 778.2	526.8
QL2-09	17:42	19 968.1	19 492.5	-475.6
QL2-10	16:24	2 468.2	2 562.9	94.7
QL2-11	18:00	22 888.8	22 407.9	-480.9

由表 2 可知,除 QL2-05 和 QL2-06 流量的误差

平均值为  $\pm 9.12\%$ ,其余监测点流量的误差均在  $\pm 4.3\%$  以内。总体而言,所有监测点流量的误差均在  $\pm 10.0\%$  以内,模拟计算得到的流量可作为下一步管网数值化诊断的基础。

## 4 结果与讨论

### 4.1 管网模型拓扑分析

通过对服务片区内污水主干管、窨井、污水处理厂、污水量分配、计算引擎等基本属性进行设置,构建完整的排水管网模型。借助模型对静态设施数据进行拓扑连接关系自动识别,发现污水主干管网一共产生 81 个污水溢流排放口、2 处孤立管段、1 处大管接小管和 1 处逆坡管段,管网拓扑分析见图 9。对于孤立管段、大管接小管和逆坡管段应进行现场复核并整改。

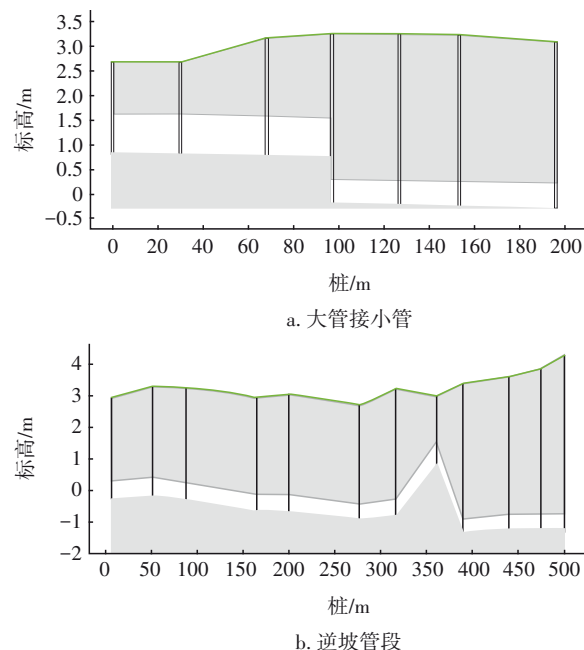


图 9 管网拓扑分析

Fig.9 Topology analysis of pipe network

### 4.2 污水管溢流量分析

当污水处理厂末端窨井日常水深为 7.5 m 时,通过对污水管网模型进行整体运行分析,发现污水主干管有 30 个溢流排放口存在一定外溢量。通过对其末端窨井水深进行不同工况的模拟,发现当末端进厂窨井水深降至 6.22 m 时,污水溢流排放口均无外溢量。由此可知,污水处理厂大部分时段处于高水位运行状态,导致部分污水量通过排口外溢至河涌。为保障污水处理厂的处理能力达到设计处理量,建议控制污水处理厂进水前池水位,保证末

端窨井水深不超过 6.22 m。

4.3 污水管外来水入流量分析

通过对污水处理厂服务片区进行本底调查可知,生活污水氨氮标准值为 25.0 mg/L,河涌水氨氮标准值为 2.18 mg/L。将监测点位水量和水质的平均数据代入模型进行水量和化学质量平衡模拟,进而求得各管段之间的河水入流量,见表 3。

表 3 各管段之间外来水入流量分析  
Tab.3 Analysis of inflow of external water between each pipe section

管段	上游流量/(m <sup>3</sup> ·d <sup>-1</sup> )	上游水质/(mg·L <sup>-1</sup> )	下游流量/(m <sup>3</sup> ·d <sup>-1</sup> )	下游水质/(mg·L <sup>-1</sup> )	河水入流量/(m <sup>3</sup> ·d <sup>-1</sup> )
QL2-01 上游管段	—	—	2 256.0	9.46	1 536.0
QL2-01~QL2-02 之间管段	2 256.0	9.46	3 508.0	12.40	400.6
QL2-02~QL2-03 之间管段	3 508.0	12.40	4 966.0	10.30	300.1
QL2-03~QL2-04 之间管段	4 966.0	10.30	7 250.0	13.40	486.4
QL2-04~QL2-05 之间管段	7 250.0	13.40	8 342.0	13.10	664.8
QL2-05~QL2-06 之间管段	8 342.0	13.10	9 013.0	13.50	191.9
QL2-06~QL2-07 之间管段	9 013.0	13.50	12 250.0	11.60	2 651.2
QL2-07~QL2-08 之间管段	12 250.0	11.60	16 250.0	12.55	1 672.3
QL2-08~QL2-09 之间管段	16 250.0	12.55	19 500.0	12.30	1 986.7
QL2-10 上游管段	—	—	2 750.0	10.40	1 759.4
QL2-09 和 QL2-10 至 QL2-11 之间管段	22 250.0	12.30 和 10.40	22 250.0	12.10	12 577.8

由表 3 可知,基于管网监测点位的水量和化学质量平衡解析的各管段入流量总和为 11 649.4 m<sup>3</sup>/d,与基于管网末端监测点位的水量和化学质量平衡解析的入流量 12 577.8 m<sup>3</sup>/d 对比,相对误差约为 7.4%,两者基本保持一致。故在选择特定的水质特征因子基础上进行划分管网监测点位的水质和水量监测,不会影响整体管网的解析结果。

4.4 污水管网健康状况评估

根据表 3 中各管段之间外来水入流量解析结果,采用徐祖信等<sup>[6]</sup>建立的污水管网破损程度评价方法,如下所示:

$$\xi = \delta/\delta_0 \tag{1}$$

式中:ξ 为污水管网外来水入流指标;δ 为管道

外来水实际入流量, m<sup>3</sup>/d;δ<sub>0</sub> 为允许外来水入流量, m<sup>3</sup>/d(通常按管道日平均生活污水量的 15%~20% 考虑,本研究取 20% 进行计算)。当 ξ ≤ 1 时,表示管网外来水入流量较少;当 1 < ξ ≤ 2 时,表示管网存在一定量外来水入流量;当 ξ > 2 时,表示管网存在大量外来水入流量。

对于污水处理厂服务片区,δ=12 577.8 m<sup>3</sup>/d, δ<sub>0</sub>=4 450.0 m<sup>3</sup>/d,故 ξ=2.83。由此可判断污水管网系统存在大量外来水汇入。为进一步缩小管网入流点排查范围,对污水管网进行 DMA 分区诊断,共划分 10 个分区,根据各分区水质特征因子的变化情况,绘制污水管网 DMA 分区诊断健康状况示意图,如图 10 所示。

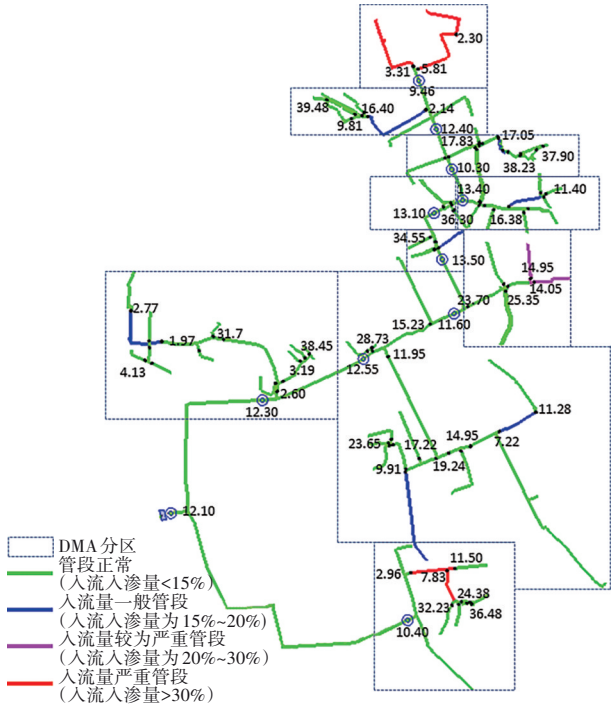


图 10 污水管网 DMA 分区诊断健康状况示意

Fig.10 Health status diagram of DMA zoning diagnosis for sewage pipe network

由图 10 可知,污水管网系统存在 2 处外来水入流严重管段,即 QL2-01 上游管段和 QL2-10 上游管段;存在 1 处外来水入流较为严重管段,即 QL2-06~QL2-07 之间管段;其余 7 处为外来水入流一般管段。其中外来水入流严重和较为严重管段长度共计 2 626.0 m,占管网总长度的 6.7%;外来水入流一般管段长度共计 2 705.0 m,占管网总长度的 6.9%。

若对外来水入流情况严重及较为严重的 3 处管

段进行修复,可以控制污水管网外来水入流量 $5\,946.6\text{ m}^3/\text{d}$ ,使整个污水管网系统的外来水入流量由修复前的 $12\,577.8\text{ m}^3/\text{d}$ 减至 $6\,631.2\text{ m}^3/\text{d}$ ;相应的污水管网外来水入流指标 $\xi$ 由修复前的2.83降至1.49,即整个污水管网系统外来水入流情况由严重( $\xi > 2$ )改善至一般( $1 < \xi \leq 2$ )。

## 5 结论

① 采用管网模型对污水处理厂配套管网进行拓扑分析和动态模拟分析,可定性和定量识别管网存在的系列问题。通过管网模型拓扑分析,可识别污水管网静态设施数据存在的几何属性问题;通过管网模型动态运行诊断,可解决污水处理厂高水位运行和污水外溢现象,应控制进厂前池液位,保证末端窰井水深降幅在1.28 m以上。

② 通过对管网外来水量和健康状况进行诊断分析,发现整个污水管网系统的外来水入流量由局部有限管段河涌水倒灌所致。若对外来水入流严重和较为严重的3处管段(占管网总长度的6.7%)进行修复,可控制47.3%的外来水量;对外来水入流一般的7处管段(占管网总长度的6.9%)进行修复,可控制剩余52.7%的外来水量。

## 参考文献:

- [1] KUPPUSAMY M R, GIRIDHAR V V. Factor analysis of water quality characteristics including trace metal speciation in the coastal environmental system of chennai ennore [J]. *Environment International*, 2006, 32(7): 174-179.
- [2] YU S X, SHANG J C, ZHAO J S, *et al.* Factor analysis and dynamics of water quality of the Songhua River, northeast China [J]. *Water, Air & Soil Pollution*, 2003, 144:159-169.
- [3] EL-SAYED A, SHABAN M. Developing Egyptian water quality index for drainage water reuse in agriculture [J]. *Water Environment Research*, 2019, 91(5):428-440.
- [4] TRAN N H, HU J Y, LI J H, *et al.* Suitability of artificial sweeteners as indicators of raw wastewater contamination in surface water and groundwater [J]. *Water Research*, 2014, 48:443-456.
- [5] 徐祖信,汪玲玲,尹海龙. 基于水质特征因子和 Monte Carlo 理论的雨水管网混接诊断方法[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2015, 43(11):1715-1721, 1727.
- XU Zuxin, WANG Lingling, YIN Hailong. Quantification of non-storm water flow entries into storm drains using Monte Carlo based marker species approach [J]. *Journal of Tongji University (Natural Science)*, 2015, 43(11):1715-1721, 1727(in Chinese).
- [6] 徐祖信,汪玲玲,尹海龙,等. 基于特征因子的排水管网地下水入渗分析方法[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2016, 44(4):510-517.
- XU Zuxin, WANG Lingling, YIN Hailong, *et al.* Quantification of groundwater infiltration into urban drainage networks based on marker species approach [J]. *Journal of Tongji University (Natural Science)*, 2016, 44(4):510-517(in Chinese).
- [7] 徐祖信,王诗婧,尹海龙,等. 基于节点水质监测的污水管网破损位置判断方法[J]. 中国环境科学, 2016, 36(12):3678-3685.
- XU Zuxin, WANG Shijing, YIN Hailong, *et al.* Locating the sewer network defect based on marker investigation at pipe manholes [J]. *China Environmental Science*, 2016, 36(12):3678-3685(in Chinese).
- [8] 尹海龙,徐祖信,李怀正,等. 电子企业水质特征因子与雨污混接诊断研究[J]. 中国环境科学, 2015, 35(9):2713-2720.
- YIN Hailong, XU Zuxin, LI Huaizheng, *et al.* Tracer parameters to identify and quantify electronic industrial flow entries into storm drains [J]. *China Environmental Science*, 2015, 35(9):2713-2720(in Chinese).
- [9] 刘旭辉,张金松,王荣和,等. 城市排水管网物联网技术研究与应用[J]. 中国给水排水, 2015, 31(3):86-89.
- LIU Xuhui, ZHANG Jinsong, WANG Ronghe, *et al.* Study and application of IOT technology in city drainage pipe network [J]. *China Water & Wastewater*, 2015, 31(3):86-89(in Chinese).

作者简介:苗伟波(1987—),男,河南济源人,硕士,工程师,主要研究方向为水环境综合治理及污水提质增效。

E-mail:silence-miao@163.com

收稿日期:2022-02-11

修回日期:2022-05-07

(编辑:沈靖怡)