

# 基于特征因子的排水管网地下水入渗分析方法

徐祖信, 汪玲玲, 尹海龙, 李怀正

(同济大学 污染控制与资源化研究国家重点实验室, 上海 200092)

**摘要:** 采用基于水质特征因子的雨污水管网化学质量平衡方程, 建立了污水管网和混接污水管网的地下水入渗量定量分析方法, 并据此建立了管道破损程度的评价方法. 针对上海市中心城区的3个排水系统, 采用总氮和硬度分别作为表征生活污水和地下水的水质特征指标, 并采用不确定性分析理论, 对该区域雨污水管网系统的地下水入渗量进行了解析. 计算结果表明, 管道破损不严重, 地下水入渗量符合设计要求, 管网破损程度评估结果符合预期管道状态; 表明提出的基于水质特征因子的地下水入渗量的分析计算方法可行, 可用于管网破损和维护判断. 与德国和美国标准相比, 我国排水管道地下水入渗基准值较高, 表明我国管道施工和养护技术有待进一步提高.

**关键词:** 地下水入渗; 水质特征因子; 管道破损; 排水系统

**中图分类号:** TU992; X52

**文献标志码:** A

## Quantification of Groundwater Infiltration into Urban Drainage Networks Based on Marker Species Approach

XU Zuxin, WANG Lingling, YIN Hailong, LI Huaizheng

(State Key Laboratory of Pollution Control and Resource Reuse, Tongji University, Shanghai 200092, China)

**Abstract:** A methodology was proposed to estimate its quantity and the corresponding pipe defect grade. This method was applied to estimating the groundwater infiltration into three separate sewer and storm systems of the City of Shanghai, China. Here, hardness and total nitrogen were used as markers to indicate groundwater and domestic wastewater into sewer pipes and storm pipes with inappropriate sewage entry. Absolute flows of groundwater were estimated in conjunction with Monte-Carlo entry-exit mass balance simulation. The apportioned groundwater flows fell within the allowable designing requirements, and the assessed pipe defect grades fit the anticipated pipe conditions,

proving the proposed method feasible and applicable to pipe maintenance assessment. Information also showed that actual allowable groundwater inflow was larger for the study site in comparison with German and US standards, and hence pipe construction and maintenance technologies in China need improving.

**Key words:** groundwater infiltration; marker species; pipe defect; drainage system

在高地下水位地区, 由于管网破损造成的城市地下水入渗不仅会增加污水处理厂、泵站的运行费用, 降低污水处理厂的处理效率, 而且还会造成合流制管道和雨水管道容量被地下水占据, 降低排涝能力.

管道修复费用较高, 根据管径和损坏程度的不同, 修复1 m的造价一般在数千至万元<sup>[1]</sup>. 由此, 需要建立合理的程序对排水系统进行调查. 夜间最小流量法是最早提出的排水管道地下水入渗评估方法<sup>[2-4]</sup>, 在国内外有较多的应用. 其基本原理是在凌晨2:00~4:00排水系统内污水流入量很少, 排水系统出口处的流量主要是地下水渗入量, 但是当系统服务范围比较大时, 夜间最小流量的峰谷不明显, 存在明显的误差. 由此, 近年来发展了基于排水系统水量平衡和化学质量平衡(同位素分析、污染负荷分析、电导率测定)的地下水入渗量分析方法<sup>[3,5-13]</sup>. 例如, Kracht等<sup>[8]</sup>采用水中稳定同位素法( $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ 和 $\text{D}/\text{H}$ ), 基于生活污水和地下水中的稳定同位素的差异, 分析污水管道中地下水入渗水量比例; Houhou等<sup>[11]</sup>综合采用水中稳定同位素( $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ 、 $\delta\text{D}$ )和硫酸盐同位素( $\delta^{18}\text{O}_{\text{H}_2\text{O}}$ 、 $\delta^{18}\text{O}_{\text{SO}_4}$ ), 对法国大南锡地区城市排水系统的水量平衡过程进行分析(地下水入渗、调蓄池暴雨溢流、雨水下渗等); Karpf和Krebs<sup>[12]</sup>建

收稿日期: 2015-06-10

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2013ZX07304-002, 2014ZX07303-003); 上海市研发基地建设项目(13DZ2251700)

第一作者: 徐祖信(1956—), 女, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为城市面源污染控制、水环境综合整治方向研究. E-mail: xzx@stcsn.gov.cn

通讯作者: 尹海龙(1976—), 男, 副教授, 工学博士, 主要研究方向为城市面源污染控制. E-mail: yinhailong@tongji.edu.cn

立了排水系统外来水量(地下水、倒灌河水)的计算公式,针对德国 Dresden 流域的排水管网,以污水处理厂的水量为约束条件,建立求解方程组分析排水管道的地下水入渗量和破损程度. 徐祖信等<sup>[13]</sup>针对分流制排水系统地区的混接雨水管网,建立了雨污水管网旱天水量平衡计算公式(生活污水、地下水、倒灌河水),可用于分析雨污水管网的整体地下水入渗量.

基于稳定同位素化学质量平衡分析方法,通常只适用于远距离供水的研究区域(认为其地质同位素成分存在差异);水量平衡法只适用于完整的自封闭系统. 本文借鉴美国雨水管网混接调查技术指南中提出的水质特征因子概念<sup>[14-15]</sup>,引入表征生活污水和地下水的水质特征因子,将水量平衡和化学质量平衡法结合起来,分析排水管网系统的地下水入渗量.

## 1 研究对象

研究区域为上海市中心城区 3 个相邻的分流制排水系统(如图 1 所示),以下分别简称为 Q 系统、X 系统和 L 系统,总服务面积 5.28 km<sup>2</sup>. 该区域主要为居住区和商业区,雨水系统相互独立,通过 3 个雨水泵站(Q 系统雨水泵站、X 系统雨水泵站和 L 系统雨水泵站)直接排向黄浦江. 生活污水收集输送至 DF 污水泵站和 LH 污水泵站(1 号),之后分别经由 HN 污水泵站—LD 污水泵站,以及 LH 污水泵站(2 号)—LH 污水泵站(3 号)两条污水输送支线,最终进入污水治理二期总管.

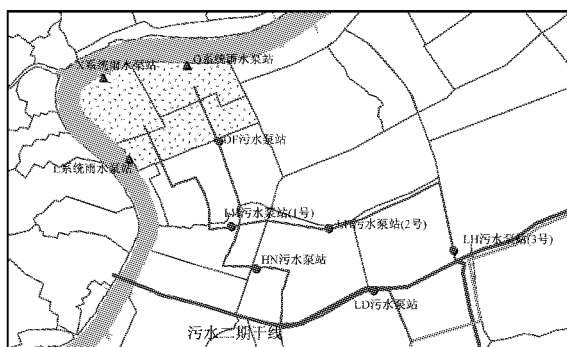


图 1 研究区域示意图

Fig.1 Depiction of the study site

根据 2012—2013 年期间对该区域的污水量调查,该区域共有污染源 401 个,合计污水产生量约 1407 万 t·年<sup>-1</sup>(平均 3.85 万 t·d<sup>-1</sup>),如表 1 示.

由于该区域存在雨污混接问题,部分生活污水

表 1 研究区域内污水产生量

Tab.1 Sewage output in the study area							
排水系统	服务面积/km <sup>2</sup>	污染源数量/个			污水产生量/万 t·年 <sup>-1</sup>		
		居住小区	事业单位	总计	居住小区	事业单位	总计
Q 系统	1.71	12	126	138	254	270	525
X 系统	1.65	4	56	60	71	258	329
L 系统	1.92	15	188	203	394	157	551

混接进入了雨水管道,为了控制雨水管道的混接旱流污染排放,在 3 个排水系统的雨水泵站内均安装了污水截流泵,旱天将混接污水输送到污水处理厂. 此外,由于上述排水系统设计为地下式雨水泵站,为了确保雨水泵站的运行安全,当旱天雨水管网中的水位达到 1.0~1.4 m(Q 系统和 X 系统)和 1.9 m(L 系统)时,必须开启雨水泵强排,混接污水和入渗地下水直接进入河道. 该区域雨水管网旱天运行信息见表 2.

表 2 研究区域雨水管网旱天运行信息

Tab.2 Information on dry-weather outflow of storm networks in the study site

排水系统	雨水泵开泵水位/m	雨水泵停泵水位/m	排放量/m <sup>3</sup> ·d <sup>-1</sup>	排放量范围/m <sup>3</sup> ·d <sup>-1</sup>
Q 系统	1.0~1.4	-3.0	12 958	10 665-1 018
X 系统	1.0~1.4	-3.0	9 269	7 155-12 739
L 系统	1.9	-2.0	14 102	10 669-17 979

## 2 研究方法

### 2.1 水质特征因子的选择

原则上,水质特征因子的筛选需满足以下要求<sup>[14-15]</sup>:不同混接类型浓度差异显著;保守物质(基本上不发生物理、化学及生物反应);具有合适的检出限、灵敏度和较高的可重复性. 本文研究区域的雨水管网旱流量来源来自于生活污水和地下水,因此需要确定生活污水和地下水的水质特征因子.

生活污水水质特征因子. 传统的用来表征生活污水的水质特征因子指标包括氨氮、总氮等. 由于排水管网尤其是雨水管网旱天充满度较低,管道易处于好氧状态,导致管道中 NH<sub>3</sub>-N 会发生硝化反应. Shelton 等<sup>[16]</sup>在基于化学质量平衡分析污水管网系统中降雨入渗/入流时,对比分析了总氮、总悬浮物(TSS)、咖啡因、大肠埃希氏菌、肠球菌的指示性能,认为总氮作为生活污水指示指标的性能相对最优. 此外,在针对上海市中心城区某混接排水系统的混接诊断研究中<sup>[17]</sup>,验证了总氮作为生活污水水质特征因子的指示效果,与实测值相比,其用作生活污水的水量解析误差可达 5%以内. 因此,采用总氮作为

表征生活污水的水质特征因子。

地下水水质特征因子。在高地下水位地区,浅层地下水由于溶解了石灰岩导致其硬度值相对较高<sup>[14]</sup>。因此,硬度可作为表征地下水的水质特征因子指标。

## 2.2 基于特征因子法的管网入渗水量计算方法

### (1) 雨水管网化学质量平衡关系

3个排水系统的雨水管网旱天化学质量平衡关系如下:

$$W_{qg}C_{gi} + (W_{qm} - W_{qg})C_{wi} = W_{qm}C_{qmi} \quad (1)$$

$$W_{xg}C_{gi} + (W_{xm} - W_{xg})C_{wi} = W_{xm}C_{xmi} \quad (2)$$

$$W_{lg}C_{gi} + (W_{lm} - W_{lg})C_{wi} = W_{lm}C_{lmi} \quad (3)$$

式中: $W_{qg}$ 、 $W_{xg}$ 和 $W_{lg}$ 分别为Q系统、X系统和L系统雨水管网中入渗的地下水量; $W_{qm}$ 、 $W_{xm}$ 和 $W_{lm}$ 分别为Q系统、X系统和L系统雨水管网末端旱天出流量; $c_{wi}$ 和 $c_{gi}$ 分别为生活污水和地下水中水质特征因子*i*(总氮和硬度)的浓度; $c_{qmi}$ 、 $c_{xmi}$ 和 $c_{lmi}$ 分别为Q系统、X系统和L系统雨水管网末端水质特征因子*i*(总氮和硬度)的浓度。

由于混接源水质特征因子浓度不确定性以及末端排口水质特征因子浓度变化的不确定性,采用基于蒙特卡洛法的不确定性计算方法对式(1)~式(3)求解。依据该方法,在解析出每个系统雨水管网中地下水入渗量的同时,还可以反验出每个系统中地下水和生活污水的水质特征因子*i*(总氮和硬度)浓度总体均值。

### (2) 污水管网化学质量平衡关系

如图1示,DF污水泵站仅接纳该研究区域的生活污水(包括Q系统的全部范围和L系统的部分范围),因此可针对DF污水泵站建立化学质量平衡关系,判断污水管网系统的地下水入渗量。

$$W_{dg}C_{gi} + (W_d - W_{dg})C_{wi} = W_dC_{di} \quad (4)$$

式中, $W_{dg}$ 和 $W_d$ 分别为DF污水泵站收集服务范围内污水管网入渗地下水量和DF污水泵站总进水量; $c_{di}$ 为DF污水泵站前池水质特征因子*i*(总氮和硬度)浓度。

在雨水管网旱天化学质量平衡解析的基础上,由于可以基于蒙特卡洛法反验出研究区域地下水和生活污水的水质特征因子浓度总体均值,因此可对式(4)进一步简化。考虑到入渗地下水的总氮浓度相对于生活污水可以忽略不计,因此有

$$W_{dg} = (1 - \frac{C_{d,TN}}{C_{w,TN}})W_d \quad (5)$$

式中, $c_{d,TN}$ 和 $c_{w,TN}$ 分别为DF污水泵站前池的总氮浓度和生活污水的总氮总体浓度。

## 2.3 水质特征因子数据获取方法

### (1) 地下水

在该研究区域内钻探2口地下水水质监测井,采集浅层地下水水样。其中1口地下水水质监测井位于X系统雨水泵站内,距离黄浦江较近;另外1口监测井位于研究区域的中心绿地内,距离黄浦江较远。通过两口地下水监测井的监测结果表征研究区域地下水质的空间变化范围。水质采样点位于监测井水位以下30 cm处(约2.3~2.5 m),高于雨水管网旱天运行水位(表2示),代表了雨水管网入渗地下水的水质浓度。采样日期为2014年7月20日—7月26日,对应于雨污水管网末端的采样时间段。参照《城市地下水动态观测规程》(CJJ76-2012)中关于采样频率的相关规定<sup>[18]</sup>,每天采集1个水样能够满足要求,共计采集14个水样。

### (2) 生活污水

生活污水总氮浓度范围参照2008年开展的上海市39个居住小区生活污水浓度调查结果<sup>[19]</sup>;生活污水硬度则依据作者在上海市徐汇某居住小区(田林十三村)的生活污水水质调查结果<sup>[20]</sup>。

### (3) 雨水管网末端排口

在3个排水系统雨水管网末端的市政泵站前池分别安装自动采样器(ISCO 6712),对雨水管网旱天出流进行自动采样。采样时间段为2014年7月20日—7月26日;期间每2 h采样1次,每个雨水泵站采集84个水样。

### (4) 污水管网末端排口

在DF污水泵站内人工采集污水收集系统末端水样。采样时间段为2014年7月20日—21日。期间每2 h采样1次,共采集24个水样。

对于现场采集的水样,每批次采样结束后,将水样及时运回实验室进行分析。每个水样监测的水质特征因子指标包括:总氮和硬度(钙、镁离子硬度总和)。其中,总氮采用碱性过硫酸钾消解紫外分光光度法(HJ 636-2012)监测,硬度采用电感耦合等离子发射光谱法<sup>[21]</sup>(ICP-AES法;ICP-Agilent 720ES)监测。

## 3 结果与讨论

### 3.1 水质特征因子监测结果

生活污水、地下水和研究区域内雨水泵站、污水泵站的水质特征因子监测结果如表3示。

(1) 生活污水的水质特征指标浓度范围存在较

表 3 研究区域雨水管网旱天入流与出流水质浓度监测结果  
Tab.3 Statistics of monitored water quality parameters  
for the sources and dry-weather outflows

旱天入流/出流	统计参数	总氮/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	硬度/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$
生活污水	范围	12.4-89	138-241
	均值±标准差	$33.3 \pm 12.1$	$162 \pm 24$
	变异系数	0.48	0.15
地下水	范围	1.4-2.7	311-433
	均值±标准差	$1.9 \pm 0.4$	$341 \pm 44$
	变异系数	0.20	0.13
Q 系统雨水泵站	均值±标准差	$19.1 \pm 2.9$	$261 \pm 28.7$
	变异系数	0.15	0.10
X 系统雨水泵站	均值±标准差	$10.3 \pm 1.9$	$257 \pm 24.1$
	变异系数	0.18	0.09
L 系统雨水泵站	均值±标准差	$16.9 \pm 1.9$	$268 \pm 25.5$
	变异系数	0.11	0.09
DF 污水泵站	均值±标准差	$25.8 \pm 3.2$	/
	变异系数	0.12	/

明显的波动. 生活污水的总氮浓度来自于上海市 39 个居住小区的监测结果, 由于一些居住小区雨污水管道混接、错接, 导致监测排放口的生活污水中灰水和黑水的比例不同, 总氮浓度监测结果波动幅度大. 因此, 表 3 中生活污水的总氮浓度范围实际上代表了介于灰水和黑水之间的总氮浓度值, 与采样点位置和采样年代无关, 具有普遍适用性. 另外, 由于本文中雨污水管网末端水质的监测时间为夏季, 因此对应的生活污水水质浓度范围及浓度均值为夏季的监测结果.

(2) 总体上旱天污水泵站和雨水泵站监测的总氮浓度较为稳定(变差系数为 0.12~0.18). 如图 1 所示, DF 污水泵站收集了 Q 系统的全部污水和 L 系统的部分污水. 由于该区域为人口密集居住区和发达的商业区, 污染排放点多, 生活污水流到污水泵站存在时间差, 因此生活污水中水质特征因子浓度较为稳定. 同样, 雨水管网中不同生活污水混接点污水流到泵站排放口也存在时间差, 生活污水总氮浓度也相对稳定. 这也表明, 采用夜间最小流量法难以判断管网地下水渗水量.

(3) 图 2 给出了 3 个系统雨水管网排口旱天总氮浓度随时间的动态变化过程线, 可以看出: 同一时刻雨水管网排放口的生活污水总氮浓度存在一定的波动幅度, 与旱天雨水泵开启导致的管网水位变化等因素有关. 这就进一步表明: 在计算雨水管网系统的地下水入渗量时, 要考虑地下水入渗量的不确定性, 以得到合理的解析结果.

### 3.2 雨污水管网系统地下水入渗量解析结果

#### 3.2.1 雨水管网系统地下水入渗量

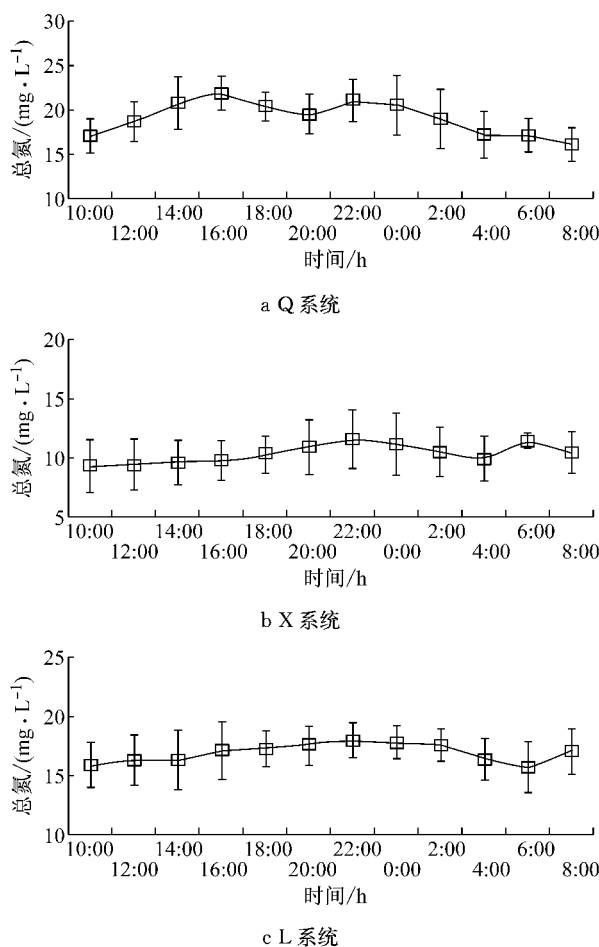


图 2 雨水管网末端总氮日变化曲线

Fig. 2 Total nitrogen concentration of the storm network outfalls over the course of one day

基于蒙特卡洛法的雨水管网系统地下水入渗量计算流程, 如图 3 示. 其中, 雨水管网排放口浓度以正态分布的形式生成随机数, 以反映出流水质波动和测量可能导致的误差; 而对于地下水和生活污水的浓度, 则根据表 3 中的数据范围, 以均匀分布的形式生成随机数, 原因是地下水入渗点通常不足一个, 生活污水的来源则包括居住小区、商业(餐饮、办公)等, 以均匀分布的形式更能涵盖旱天入渗/入流水质浓度的实际浓度区间(或总体浓度均值). 在此基础上, 通过随机运算求解, 在解析出地下水入渗水量比例的同时, 还能够反演出满足水量平衡(即水量总和等于 1)和化学质量平衡的生活污水和地下水的总体浓度均值.

图 4 给出了 3 个排水系统雨水管网地下水入渗量解析结果的频率直方图. 总体上 Q 系统、X 系统和 L 系统的雨水管网地下水入渗比例分别为 51.2%, 63.6% 和 57.5%, 对应总体上日均地下水入渗量约为  $6\,634 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ ,  $5\,988 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$  和  $8\,109 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ .

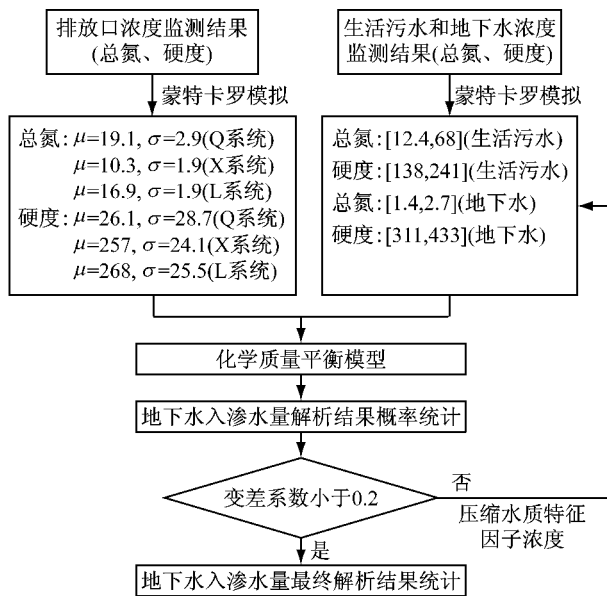


图3 基于蒙特卡罗算法的雨水管网地下水入渗量不确定性计算流程图

Fig.3 Flow chart of groundwater infiltration into the storm networks by Monte-Carlo-based simulation

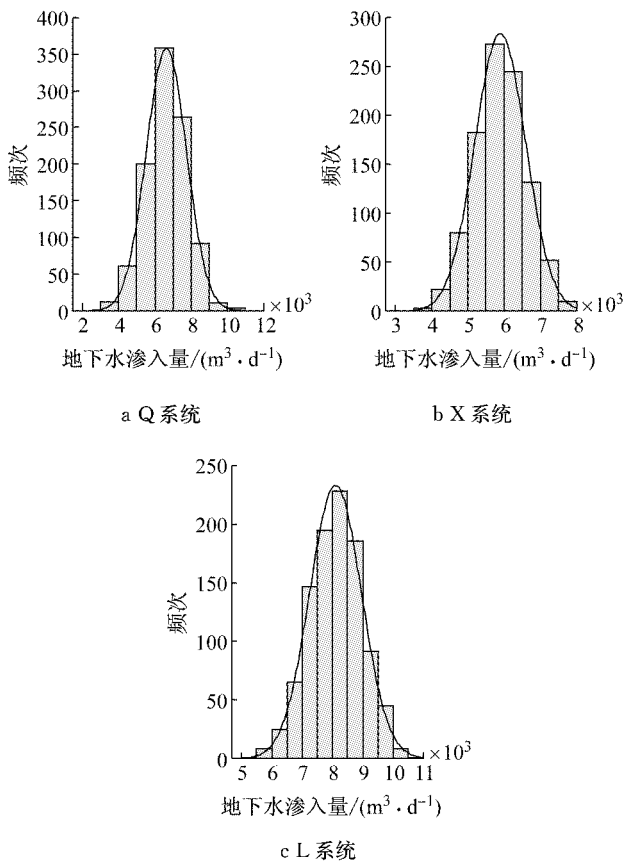


图4 研究区域雨水管网入渗地下水量解析结果

Fig. 4 Histogram of apportioned groundwater infiltration into the storm network

表4进一步给出了基于不确定性算法反演的3个排水系统雨水管网中生活污水和地下水的总氮和

硬度浓度总体均值。对于生活污水,可以看出:Q系统和L系统的总氮浓度基本一致,接近于居民区混合生活污水的浓度均值(表3示);X系统的总氮浓度明显低于Q系统和L系统。其原因解释如下:如表1示,Q系统和L系统的居民点较多,以居民区生活污水为主,因此进入雨水管网的生活污水很可能以老式居民区生活污水直接接入雨水管网为主,相应反演的生活污水总氮浓度较高;相比而言,X系统为中央商务区,其生活污染以餐饮、办公废水为主,灰水比例相对较高,因此混接生活污水的总氮浓度相对居民区生活污水要低。这也同时说明,在分析污水管网中的地下水入渗比例时,有必要根据生活污染源的特点,合理确定总氮浓度范围。

表4 基于解析结果的反演地下水和生活污水总体浓度均值

Tab.4 Apportioned general chemistry of groundwater and sanitary sewage in the study site

排水系统名称	旱天入流	总氮/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	硬度/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$
Q系统	生活污水	37.00	176
	地下水	2.04	341
X系统	生活污水	24.90	145
	地下水	2.01	338
L系统	生活污水	36.90	172
	地下水	2.03	339

### 3.2.2 污水管网系统地下水入渗量

根据上述分析,研究区域生活污水的总氮浓度约为  $24.9 \sim 37.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。在污水收集管网中,其收集污水既包括部分居民区生活污水,也包括餐饮、办公等事业单位生活污水,可取生活污水的总体浓度均值为  $31.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。

根据式(5),可通过比较生活污水和污水管网系统末端的总氮浓度,确定污水管网系统中地下水的入渗比例。以生活污水和DF污水系统泵站的总氮浓度均值计算,该污水管网系统中地下水比例为17%,相应生活污水的比例为83%。

根据DF系统污水泵站的运行记录,DF系统污水泵站每天的输水量较为稳定,平均约  $18\,200 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ 。相应,DF污水管网系统中地下水入渗量约  $3\,094 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ ,收集的生活污水量约  $15\,106 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ 。

### 3.3 管道破损状况分析

对管道破损状况的分析,涉及到雨污水管道允许地下水入渗量的基准数值。为了定性、定量评价管道破损程度,提出采用评价方法如下:

$$\epsilon = \frac{\delta}{\delta_0} \quad (6)$$

式中: $\delta$  表示管道实际地下水入渗量当量值; $\delta_0$  表示管道允许地下水入渗量当量值; $\epsilon$  表示管道破损指数,提出: $\epsilon \leq 1$ ,表示排水管网基本不破损; $1 < \epsilon \leq 2$ ,表示排水管网轻度破损; $\epsilon > 2$ ,表示排水管网严重破损.

对于污水管道,可按照平均日综合生活污水量的 15%~20%作为基准值<sup>[1,22]</sup>, $\delta_0 = 15106 \times 20\% = 3021 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$ . 相应, $\epsilon = 3094/3021 = 1.02$ . 可以认为管道处于基本不破损状态.

对于雨水管道,参照《室外排水设计规范》(GB50014-2006)<sup>[22]</sup>,可采用单位管长法或者单位面积法确定入渗量基准值. 其中,在规范中对基于单位管长法的地下水入渗量基准值既给出了静态值,也给出了动态数值,以考虑地下水水位—管道埋深差值对地下水入渗量的影响;而基于单位面积法的地下水入渗基准值由于综合了区域不同位置管道的埋深,只给出了静态数值. 为简便起见,基于单位面积法确定雨水管道中地下水入渗量基准值(见表 5),并进一步给出了基于单位面积法的研究区域雨水管网破损程度评价结果(见表 6).

表 5 雨水管道地下水入渗量基准值  
Tab.5 Allowable designing criteria of groundwater infiltration into storm drains

方法	参数	来源
单位面积法/ $\text{m}^3 \cdot (\text{km}^2 \cdot \text{d})^{-1}$	3 800~6 300	上海 <sup>[22]</sup>
	1 296	德国 <sup>[22]</sup>
	20~2 800	美国 <sup>[22]</sup>

表 6 研究区域雨水管网破损程度评价结果  
Tab.6 Assessed storm pipe condition classes of the study site

参数	Q 系统 雨水管网	X 系统 雨水管网	L 系统 雨水管网
入渗量均值/ $\text{m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$	6 634	5 988	8 109
入渗当量水量均值/ $\text{m}^3 \cdot (\text{km}^2 \cdot \text{d})^{-1}$	3 880	3 629	4 223
破损系数(上海标准)	0.62~1.02	0.58~0.95	0.67~1.11
破损系数(德国标准)	2.99	2.80	3.26
破损系数(美国标准)*	>1.39 (2.75)	>1.30 (2.57)	>1.51 (2.99)

\*: 括号中数值按照表 5 中对应数值取值范围的平均值计算,即  $1410 \text{ m}^3 \cdot (\text{km}^2 \cdot \text{d})^{-1}$ .

由表 5 和表 6 可以看出:根据上海标准,Q 系统雨水管网,X 系统雨水管网和 L 系统雨水管网的破损指数最高为 1.02,0.95 和 1.11,处于基本不破损情形. 因为该管网位于上海中央商务区地区,上世纪 90 年代初高标准建成,管网破损程度评估结果符合预期管道状态;同时表明基于水质特征因子的地下

水入渗量的分析计算方法可行,可以用于管网破损和维护判断. 而以德国和美国标准衡量,总体上管道破损严重,地下水入渗量大大超过设计允许值. 究其原因,除上海市地下水位可能相对较高外,管材与接口技术陈旧以及养护水平不高也是重要原因. 上海属软土地基条件,部分区域为流沙性土壤,管道刚性接口错位、损坏易于造成沉管事故,导致管道地下水入渗量增加.

## 4 结语

建立了基于水质特征因子的雨污水管网系统化学质量平衡方程,既适用于对污水管网(或合流制管网)的地下水入渗量定量评估,也适用于混接雨水管网的地下水入渗量评估. 考虑到管道水位波动性较大,建议采用蒙特卡洛方法进行计算分析. 针对上海市中心城区的 3 个排水系统,采用总氮和硬度分别作为表征生活污水和地下水的水质特征指标,对该区域雨污水管网系统的地下水入渗量进行了解析,计算结果表明,以上海标准衡量,管道破损不严重,地下水入渗量符合设计要求,与实际情况吻合. 表明基于水质特征因子的地下水入渗量的分析计算方法可行,可以用于管网破损和维护判断. 与德国和美国标准相比,我国排水管道地下水入渗基准值较高,说明我国管道施工及养护技术有待进一步提高.

## 参考文献:

- [1] 时珍宝,李田. 上海市排水管道渗水量调查与修复决策[J]. 市政技术,2004,22(2):65.  
SHI Zhenbao, LI Tian. Investigation of drainage system condition and rehabilitation decision in Shanghai [J]. Municipal Engineering Technology, 2004, 22(2):65.
- [2] 李田,时珍宝,张善发. 上海市排水小区地下水入渗量研究[J]. 给水排水,2004,30(1):29.  
LI Tian, SHI Zhenbao, ZHANG Shanfa. Study on groundwater infiltration of Shanghai drainage systems [J]. Water & Wastewater Engineering, 2004,30(1):29.
- [3] 郭帅,张士乔, ZHU Z David. 地下水渗入排污管道的定量方法[J]. 中国给水排水,2013,29(4):21.  
GUO Shuai, ZHANG Tuqiao, ZHU Z David. Quantitative methods for groundwater infiltration into sewer system [J]. China Water & Wastewater, 2013, 29(4):21.
- [4] De Benedittis J, Bertrand-Krajewski JL. Infiltration in sewer systems: comparison of measurement methods [J]. Water Science and Technology, 2005,52(3):219.
- [5] 郭帅. 城市排水系统地下水入渗及土壤侵蚀问题研究[D]. 杭州:浙江大学,2012.  
GUO Shuai. Study on infiltration and soil erosion in sewer

- systems [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2012.
- [6] 刘旭辉, 张金松, INIAL G. 深圳市排水系统地下水渗入量初步研究[J]. 中国给水排水, 2013, 29(3): 77.
- LIU Xuhui, ZHANG Jinsong, INIAL G. Groundwater infiltration in Shenzhen drainage system [J]. China Water & Wastewater, 2013, 29(3): 77.
- [7] Kracht O, Gujer W. Quantification of infiltration into sewers based on time series of pollutant loads [J]. Water Science and Technology, 2005, 52: 209.
- [8] Kracht O, Gresch M, Gujer W. A stable isotope approach for the quantification of sewer infiltration [J]. Environmental Science & Technology, 2007, 41(16): 5839.
- [9] Kracht O, Gresch M, Gujer W. Innovative tracer methods for sewer infiltration monitoring [J]. Urban Water Journal, 2008, 5(3): 173.
- [10] Prigiobbe V, Giulianelli M. Quantification of sewer system infiltration using  $\delta^{18}\text{O}$  hydrograph separation [J]. Water Science and Technology, 2009, 60(3): 727.
- [11] Houhou J, Lartiges B S, France-Lanord C, *et al.* Isotopic tracing of clear water sources in an urban sewer: a combined water and dissolved sulfate stable isotopic approach [J]. Water Research, 2010, 44: 256.
- [12] Karpf C, Krebs P. Quantification of groundwater infiltration and surface water inflows in urban sewer networks based on a multiple model approach [J]. Water Research, 2011, 45(10): 3129.
- [13] XU Zuxin, YIN Hailong, LI Huaizheng. Quantification of non-stormwater flow entries into storm drains using a water balance approach [J]. Science of the Total Environment, 2014, 487: 381.
- [14] US Environmental Protection Agency. Investigation of inappropriate pollutant entries into storm drainage systems: a user's guide [1993-01-15]. <http://www.epa.gov/nrmrl/pubs/600r92238/600r92238.pdf>.
- [15] Field R, Pitt R, Lalor M, *et al.* Investigation of dry weather pollutants entries into storm drainage systems [J]. Journal of Environmental Engineering, 1994, 120: 1044.
- [16] Shelton J M, Kim J, Fang J, *et al.* Assessing the severity of rainfall-derived infiltration and inflow and sewer deterioration based on the flux stability of sewage markers [J]. Environmental Science & Technology, 2011, 45: 8683.
- [17] 汪玲玲. 基于化学质量平衡模型和概率分析的雨水管网混接诊断研究[D]. 上海: 同济大学, 2015.
- WANG Lingling. Source apportionment of non-storm water entries into storm drains based on chemical mass balance and uncertainty simulation [D]. Shanghai: Tongji University, 2015.
- [18] 住房和城乡建设部. CJJ 76-2012 城市地下水动态观测规程[S]. 北京: 住房和城乡建设部, 2012.
- Ministry of Housing and Urban-Rural Development, CJJ 76-2012 Specification for dynamic observation of groundwater in urban area [S]. Beijing: Ministry of Housing and Urban-Rural Development, 2012.
- [19] 朱环, 李怀正, 叶建锋, 等. 上海市居民生活污水主要污染物产生系数的研究 [J]. 中国环境科学, 2010, 30(1): 37.
- ZHU Huan, LI Huaizheng, YE Jianfeng, *et al.* Coefficients of major pollutants in domestic sewage in Shanghai [J]. China Environmental Science, 2010, 30(1): 37.
- [20] 邱敏燕. 基于粪便指示菌的雨水管网混接生活污水识别技术研究[D]. 上海: 同济大学, 2014.
- QIU Minyan. Study on the Identification of sanitary sewage entries into storm Drains based on fecal indicator bacteria [D]. Shanghai: Tongji University, 2014.
- [21] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法[M]. 4版. 北京: 中国环境科学出版社, 2002.
- State Environmental Protection Agency of People's Republic of China. Methods on monitoring and analysis of water and wastewater [M]. 4th ed. Beijing: China Environmental Science Press, 2002.
- [22] 中华人民共和国建设部. GB50014-2006 室外排水设计规范[S]. 北京: 中华人民共和国建设部, 2006.
- Ministry of Construction of the People's Republic of China. GB50014-2006 Code for design of wastewater engineering [S]. Beijing: Ministry of Construction of the People's Republic of China, 2006.