

# 基于在线监测的排水管网事故预警技术研究与应用

郭效琛<sup>1,2</sup>, 李萌<sup>2</sup>, 史晓雨<sup>3</sup>, 杜鹏飞<sup>1</sup>, 李志一<sup>1</sup>

(1. 清华大学 环境学院, 北京 100084; 2. 北京清环智慧水务科技有限公司, 北京 100083;  
3. 同济大学 环境科学与工程学院, 上海 200092)

**摘要:** 排水管网是城市重要的基础保障设施之一,排水管网运营过程中如果发生事故将严重影响其安全有效运行,甚至影响整个城市的正常运行。为此,针对排水管网事故的监控与管理模式进行了梳理与研究,强调了开展排水管网在线监测对事故预警的重要意义。案例分析表明,在城市易涝点布设液位在线监测,可以对内涝事故进行预警,以便提前采取具有针对性的措施,预防事故发生,保障城市排水安全。

**关键词:** 排水管网; 事故预警; 在线监测

**中图分类号:** TU992 **文献标识码:** C **文章编号:** 1000-4602(2018)19-0129-05

## Research and Application of Warning Technology for Drainage Network Accidents Based on On-line Monitoring

GUO Xiao-chen<sup>1,2</sup>, LI Meng<sup>2</sup>, SHI Xiao-yu<sup>3</sup>, DU Peng-fei<sup>1</sup>, LI Zhi-yi<sup>1</sup>

(1. School of Environment, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 2. Beijing Tsinghuan Smart Water Tech. Co. Ltd., Beijing 100083, China; 3. School of Environmental Science and Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

**Abstract:** Drainage Network is one of the important basic supporting infrastructures in a city. The accidents of the drainage network can seriously affect the safety and efficiency of the system, and even affect the normal running of the whole city. Therefore, monitoring and management mode of drainage network accidents was collected and analyzed. It was found that carrying out on-line monitoring had important implications for accident early warning. According to the case analysis, waterlogging accidents could be warned by setting on-line liquid monitoring system in waterlogging points of the city in order to carry out targeted measures in advance. So, the accidents were prevented, and the safety of the urban drainage was ensured.

**Key words:** drainage network; accident warning; on-line monitoring

城市排水管网是城市重要的基础保障设施之一,但我国多数城市的排水管网建设系统性不强,一部分排水管道的实际排水能力较差,一定程度上造成了城市内涝问题,影响居民生产、生活甚至威胁生命财产安全。除了在降雨期严重的内涝事故,一些

偶然事件的发生也会导致城市排水管网出现事故,影响整个排水系统的正常运行<sup>[1]</sup>。近年来,我国对排水管网事故尤其是内涝问题进行了研究与预警,对城市内涝监控系统进行了设计与研究,但是大部分地区的监测属于间断性采样,监测方案不系统,监

控硬件设备配备不全面,导致排水管网的监测流于形式<sup>[2]</sup>,只能事后处理,而缺少对事故进行提前预警的能力。为此,笔者结合实际案例,强调对排水管网进行在线监测的重要性,并对其在事故预警中所起的作用进行了探讨。

## 1 排水管网运营事故

### 1.1 城市内涝问题

随着城市化进程的加快,我国大部分地区都经历过“逢雨必涝”和“城市看海”的现象,2012年—2014年,平均每年都有100多个城市受到外洪内涝的威胁,这其中包括了北京、上海、广州等大城市。按全国特大城市的要求,其防御洪水的能力应达到50年或100年一遇以上标准,大城市为30~50年一遇,中小城市和城镇为20~30年一遇,但大部分江河沿岸的区县、乡镇以及重要小城镇的防洪工程标准仅能达到10年一遇。根据《室外排水设计规范》(GB 50014—2006),我国对雨水灌渠的设计标准与发达国家相比明显偏低,而且一些老城区的排水系统设计比规定的下限还要低<sup>[3]</sup>。

针对日益严峻的城市内涝问题,除了采取工程措施,进行城市排水管网的新建与改造,还可利用有效的监控对内涝进行及时的预警预报,这是提高城市排水系统运行效能有效的非工程措施。城市内涝监控系统的发展主要经历了以下3个阶段:

① 人工监控阶段。主要依赖雨情信息,依靠人工巡查以实现监控和预警,不仅信息反馈速度慢、数据少、差错多、连续性差,而且很难对数据进行长时间保存,不利于后续利用。在降雨时,现场巡查人员管理困难,巡查质量难以保障,也影响了有关部门和管理人员对内涝情况做出及时、准确的判断,以至于对内涝采取的预警和措施不及时甚至不恰当。

② 远程监控阶段。设备安装、设置及操作都相对复杂,所得到的排水管网信息也较为有限,主要是地理信息和相关内涝数据,不能进行实时在线监测,从而无法进行优化分析、动态模拟以及有效的预警预报。另外,该阶段设备对操作人员的技术要求高,实用性较差。

③ 内涝预警阶段。借助物联网传感技术、移动互联传输技术、GIS技术等,结合数字城市、智慧城市等的建设要求,对城市内涝监控实现提前预警、提前发现问题,可多点进行同时监测,相关部门统一指挥,做好应对措施。

### 1.2 其他运营事故

排水管网作为地下设施,具有较强的隐蔽性,易被忽略,在运行过程中一些外部因素也有可能引起排水管网出现事故,如污水溢流、井盖丢失、管道塌陷等。主要运营事故的原因及概述如表1所示<sup>[4]</sup>。

表1 城市排水管网主要运营事故

Tab. 1 Main operation accidents of urban drainage network

事件	原因	描述
降雨积水	系统接纳能力不足,超负荷	城市排水管网设计标准偏低,大于设计标准的降雨即可引起积水;运营管理不良造成低于设计标准的降雨引起积水
爆管	超设计流量	来水流量长时间超过管道最大通过能力,管网长期带压运行,材质较差或老化,可能造成管道爆裂
污水冒溢	管道破损;运营不良	由于管道破损或泵站运行不当,造成污水从破损处流出地面或污水运行水位高于管顶标高,造成地面污水冒溢
中毒	有毒有害气体	在排水作业空间内,除了H <sub>2</sub> S等常规有毒有害气体受控监测之外,其他不明有毒有害气体缺乏监控手段,如果短时大量涌入,在有限的地下空间内,易造成作业人员中毒
地下结构破坏	管道破损	管道破损后,污水长期冲刷,破坏了地下基础,造成地下空洞,引发地面坍塌,危及构筑物基础
闪爆	可燃气体	管网中出现的高浓度可燃气体在有限空间聚集到一定程度,遇到明火或电火花而产生爆燃
水质超标	来水超过接管标准	后续污水处理单元无法达标处理污水,引发次生环境污染风险

## 2 排水管网在线监测

根据城市排水、降雨实际情况及监测目的,对排水管网多点进行实时在线监测,包括液位、流量、流速、水质等指标,利用智能中继器、短距通讯、GPRS等技术进行在线采集,收集信息后,通过短信或微信等方式向多用户、分权限进行及时的推送和通知。

开展排水管网在线监测首先要对监测点位进行筛选,根据各区域的具体情况,收集城市内河水系、排水管网、土地利用等资料,初步确定监测点位。事故类型不同,则监测点位的选择也有所差异,对于内

涝事故的预警预报,主要选择历史积水点进行监测;其他一些外部事故的预警,则主要考虑事故施工地点附近。由于在线设备有一定的安装条件,需要进行现场踏勘,确定是否满足安装与监测要求。安装在线监测设备后,可持续获取各个监测点的数据信息,当所得数据与常态数据相比出现异常情况时,则可发出相应的预警预报,并通过采取有效措施,尽可能避免事故的发生。基于在线监测数据,可准确记录事故或典型事件发生的完整过程曲线,不仅可对事故进行预判,还可对事故进行回溯分析,以便于下次针对类似的事故,可以更快制定出具有针对性和有效性的措施。基于排水管网在线监测技术对事故进行预警预报的整体流程如图1所示。

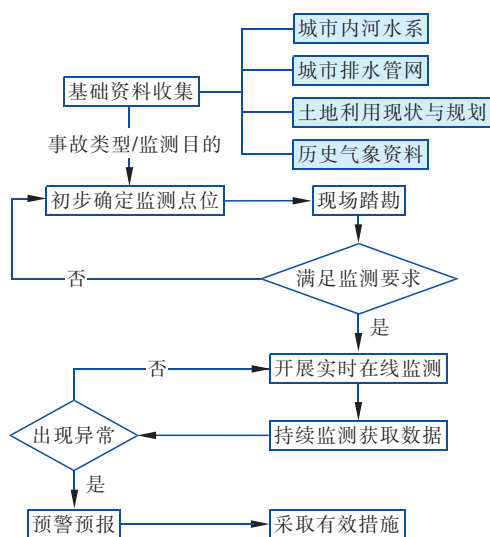


图1 基于在线监测技术的排水管网事故预警预报流程

Fig.1 Flow chart of drainage network accident warning based on on-line monitoring technology

## 2.1 内涝事故的预警预报

内涝事故的预警预报如图2所示。

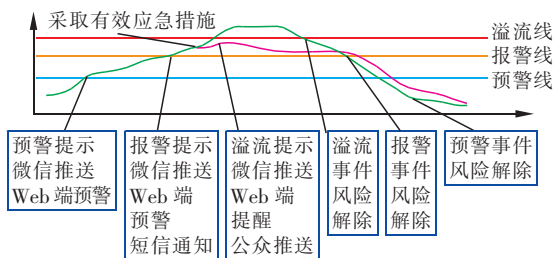


图2 内涝事故预警预报示意

Fig.2 Schematics of waterlogging accidents warning

一般而言,当积水深度达到15 cm(即与道路侧石齐平)时,车道可能因机动车熄火而完全中断,将

影响交通和产生其他灾害,即发生城市内涝。具体可根据各地降雨及控制的实际需求,设置预警报警的阈值,对溢流、内涝等事件进行全过程监控和动态预警预报,提前感知风险,辅助应急处置,减少甚至避免内涝事故的发生。

## 2.2 其他事故预警

### ① 井盖安全的监控

对井盖位移进行实时监测,对井盖状态定期上传,当井盖发生移动、存在异常时,及时进行安全报警,对异常状况进行通知和提醒,并对井盖位置进行跟踪定位。

### ② 管道坍塌

基于长期液位在线监测数据,可得到某节点正常的日变化曲线,将实时监测数据与历史正常变化规律曲线进行对比,当液位明显偏高时,下游管道可能发生阻塞或坍塌;当液位明显偏低时,则可能是上游管道阻塞或坍塌,进而辅助发现排水管网事故隐患,提前进行预警。

### ③ 外部事故

现代城市的地下空间非常复杂,给水、排水、电力、煤气、通讯等各种管道密布,其中任何一种管道出现事故,都可能对周边其他管道产生影响,甚至带来更大的安全隐患。上海市2011年10月27日发生在恒丰路长安路口的路面塌陷事故,就是因为一根污水管道漏水,小水流一直冲刷,造成泥沙流失,地下出现空洞<sup>[4]</sup>。利用在线监测数据,可直观、及时地发现外部因素导致的排水管网运行负荷变化。

## 3 内涝监测预警案例分析

### 3.1 研究区域概况

以华北地区某市为例,该市冬季和春季干旱少雨,降雨主要集中在夏季,且多为暴雨,排水管道多为合流制。研究区域范围内,老城区部分排水管网设计能力不足且年久失修,维护管理不到位,城市内积水现象严重。由于之前未对排水管网开展监测,没有相关数据积累,通过人工巡查的方式,在暴雨时对积水情况进行调研后,在6个主要积水点安装在线监测液位计,并在该区域安装1台分钟级雨量计进行雨量监测。

### 3.2 监测数据

2016年9月11日12:00—12日12:00,经历了一场降雨,24 h累积降雨量为74 mm,相当于该地区1年一遇的降雨,各监测点的液位变化见图3。



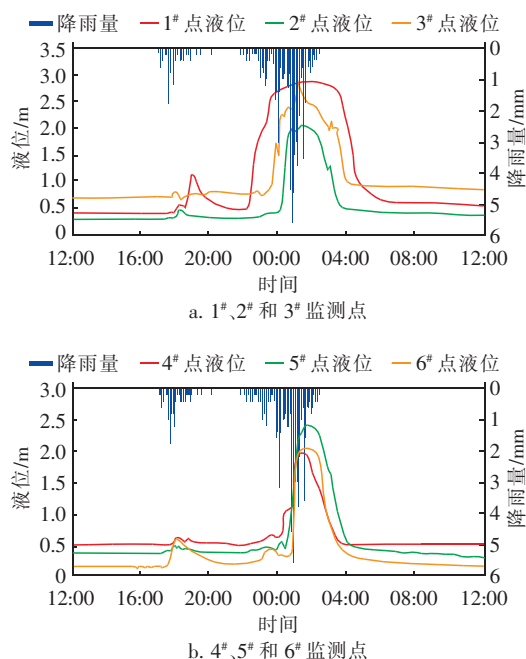


图3 各监测点的液位变化

Fig. 3 Change of liquid level of each monitoring point

根据各监测点所处功能区、井盖距底部高度、管径大小等,设置预警线、报警线和溢流线,如表2所示。

表2 各监测点的预警和报警线设置

Tab. 2 Setting of precautionary and warning lines for each monitoring point m

监测点编号	管顶线	预警线	报警线	溢流线
1 <sup>#</sup>	0.6	2	2.2	2.4
2 <sup>#</sup>	0.5	1.5	1.8	2
3 <sup>#</sup>	1	1.8	2.2	2.6
4 <sup>#</sup>	0.6	1.8	2	2.2
5 <sup>#</sup>	0.6	1.6	1.8	2
6 <sup>#</sup>	0.4	1.1	1.5	2

结合图3和表2可以看出,这场降雨中有两次峰值,第1次在11日18:00左右,降雨强度较小,各点液位均有小幅上升,仅1<sup>#</sup>和6<sup>#</sup>监测点的液位超过管顶,其余监测点的液位仍位于管顶线以下,为非满管流状态,由于降雨强度本身较小,且20:00—22:00降雨基本停止,各易涝点的液位均下降,接近旱季液位。23:00之后,降雨强度增大,各点液位迅速上升,除4<sup>#</sup>监测点未超过溢流线外,其余监测点都先后超过了预警线、报警线和溢流线,出现积水现象。

### 3.3 分析与讨论

#### 3.3.1 内涝情况对比

经统计,1<sup>#</sup>、2<sup>#</sup>、3<sup>#</sup>、5<sup>#</sup>和6<sup>#</sup>监测点的积水时长分

别为320、30、30、100、45 min,最大积水深度分别为45.6、7.7、27.3、41.4、4.6 cm。可以看出,在这场降雨中,各易涝点发生内涝的严重程度并不一样,4<sup>#</sup>监测点的液位虽然超过了预警线和报警线,但未超过溢流线。目前对于内涝点没有统一的定义,各地的标准也不同,一般情况下,积水深度 $\geq 15$  cm且积水时间 $\geq 30$  min,即认为出现了内涝问题,据此可知,1<sup>#</sup>、3<sup>#</sup>和5<sup>#</sup>监测点出现了内涝问题。

#### 3.3.2 内涝预警

本次降水主要是在11日—12日的夜间,积水现象主要发生在12日01:00—04:00,此时城市居民的生产生活活动较少,相对而言对城市道路交通影响较少,但通过图3和表2的对比可以看出,在累积降雨量为74 mm的降雨下,该片区已经出现了较为严重的内涝问题,尤其是1<sup>#</sup>监测点,积水时间长且深,对居民正常的生产生活造成较大影响。

对内涝进行及时的预警预报,将可提前采取措施进行控制,避免液位深度超过溢流线,降低内涝发生的风险。预警值和报警值的设置,对内涝事故的预警有直接影响:设置较低的预警和报警值,则液位距离溢流值较远,仍有较长的一段时间可采取措施,可更大程度避免内涝事故;但较低的设置值,会使得预警频繁,耗费较多的人力、物力和财力。

不同功能区预警和报警值的设置应有所差异。对于人口密集的居住区、重要行政办公区以及有特殊功能的文体中心区等,一旦发生内涝,将会对居民正常的生产生活活动产生较大影响,因此对这类区域设置的预警和报警值应适当低一些,以便能及时采取有效措施。对于生态休闲区、公园绿地等,相对而言发生内涝的影响较小,则设置的预警和报警值可适当高一些。在本研究案例中,1<sup>#</sup>监测点位于公园绿地附近,设置的预警和报警值相对较高,发出预警和报警的时间较晚。

不同时间预警和报警值的设置亦有所差异。白天居民活动频繁,内涝对居民生产生活的影响较大,因此预警和报警值需设置得小一些;而夜间内涝事故的危害相对较小,可适当提高预警和报警值。

不同监测点的液位变化规律有所差异,预警和报警值的设置需根据各个监测点的具体情况进行调整。在本研究案例中,对于同一场降雨,1<sup>#</sup>监测点的液位在降雨初期就有明显上升,而其他监测点都有一定的滞后。若1<sup>#</sup>监测点位于城市核心区,所造成

的内涝问题持续时间长、积水深度深、影响过大,就应设置更低的预警和报警值来避免内涝事故的发生。不同降雨条件下,各个监测点的液位变化规律可能出现差异,通过长期积累在线监测数据,可对监测点的预警和报警值进行不断的调整与优化。

### 3.3.3 内涝控制

在累积降雨量为74 mm的情况下,6个主要积水点有3个都发生了内涝,说明在此次降雨中,该城市对降雨基本没有蓄积作用,内涝问题较严重。

虽然累积降雨量较小,但在9月12日00:00—02:00期间,集中降雨较多,降雨强度大,最高达到了67.2 mm/h;在9月11日19:00—22:00,降雨有所停歇,后半段的累积降雨量为62.4 mm,但持续时间较短,相当于该地区2年一遇的降雨。后半段降雨强度虽然有所增大,但仍属于小型降雨,在该降雨强度下即出现较为严重的内涝问题,说明该城市对降雨径流的控制作用较为有限。虽然利用排水管网在线监测技术可对内涝事故进行一定的预警预报,但无法从根本上解决城市内涝问题。该城市应结合海绵城市建设理念,加强低影响开发设施的建设,加强城市雨洪管理,对城市内涝问题进行控制。

## 4 结论

① 利用排水管网在线监测系统,实时监测排水管网有关数据,可以随时掌握管网运行状态,对管网异常情况做出预判。以实际监测数据为依据进行事故预警,更加直观,而且可靠性得以提高。采取相关措施后,对排水管网状态可进行持续监测,分析措施的有效性,不仅可进行事故的预警预报,还可在事后进行回溯分析,总结经验教训以更好应对类似事件。

② 以华北某城市老城区为研究案例,对城市易涝点布置在线监测液位仪,在24 h累积降雨量为74 mm的降雨条件下,记录了不同易涝点的液位变化情况,分析了各点的内涝情况。通过设置合理的预警和报警值,可采取有效措施,对降雨引起的内涝事故进行预警,降低事故发生的风险。

③ 排水管网是城市重要的基础保障设施之一,从对事故进行预警预报、降低事故发生风险、确保城市安全运行的角度出发,应当对排水管网开展实时监测,以提供数据支持,及时分析排水管网的运行动态。

## 参考文献:

- [1] 凌勇. 基于物联网的城市排水管线在线监测系统的设计与实现[D]. 济南:山东大学,2013.  
Ling Yong. Design and Implementation of the Urban Drainage Pipe Line Monitoring System Based on Internet of Things[D]. Jinan:Shandong University,2013 (in Chinese).
- [2] 赵冬泉,王浩正,陈吉宁,等. 监测技术在排水管网运行管理中的应用及分析[J]. 中国给水排水,2012,28(8):11-14.  
Zhao Dongquan, Wang Haozheng, Chen Jining, et al. Application and analysis of monitoring technology in operation and management of urban drainage network[J]. China Water & Wastewater, 2012, 28(8): 11-14 (in Chinese).
- [3] 李小坤. 城市排水管网(内涝)监控系统开发及城市内涝监测点优化布置研究[D]. 广州:华南理工大学,2016.  
Li Xiaokun. The Development of Urban Drainage Pipeline Network (Waterlogging) Monitoring System and the Optimization of Urban Waterlogging Monitoring Points[D]. Guangzhou:South China University of Technology, 2016 (in Chinese).
- [4] 李建勇. 上海城市排水管网运营风险事件识别及应对措施[J]. 给水排水,2013,39(12):103-105.  
Li Jianyong. Identification and measures of the risks in urban municipal drainage pipe network management[J]. Water & Wastewater Engineering, 2013, 39(12): 103-105 (in Chinese).



作者简介:郭效琛(1992-),女,山西太原人,博士研究生,研究方向为城市雨洪管理。

E-mail: guoxiaochen\_92@163.com

收稿日期:2018-03-06