

DOI:10.16799/j.cnki.csdqyfh.2023.01.028

高密度建成区径流污染源精确计量与系统阻控关键技术及应用

吕永鹏¹,王金兵²,蒋柱武³,谢 胜¹,王 盼¹,操文章⁴,陈 健⁵,高 尚⁶,张添彬³

[上海市市政工程设计研究总院(集团)有限公司,上海市 200092; 2.中建四局建设发展有限公司,福建 厦门 361006;
3.福建全立建设发展有限公司,福建 宁德 352200; 4.福建省高创建设工程有限公司,福建 龙岩 364000;
5.福建工程学院,福建 福州 350118; 6.福州市城区水系联排联调中心,福建 福州 350004]

摘 要:雨水径流污染是制约我国城市水环境质量提升的重要原因。为解决这一难题,在径流污染源解析计量、排水管道精确检测和原位修复、污染系统阻控技术体系等领域开展研究,形成了系列技术和装备,突破高密度建成区排水系统提质增效技术壁垒。研发成果在福州、厦门、上海等多地应用,取得了良好的环境和社会效益,为我国城市水环境改善提供重要支撑。

关键词:径流污染;高密度建成区;排水系统;提质增效

中图分类号: S276.3

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2023)01-0113-05

0 引 言

长期以来,快速城镇化形成了我国以不透水硬质地面为主要类型的城市用地状况。受重地上轻地下、重水量轻水质的城市建设传统理念的影响,我国对城市排水系统的建设和有效运行问题重视不足,雨水径流控制的基础研究和工程实践相对落后。未能得到有效治理的地表雨水径流,以及低效运行的排水系统产生了大量污染负荷,严重制约城市水环境质量的改善。

排水系统提质增效是解决城市水体黑臭问题的根本途径。然而,在城市高密度建成区,排水系统建设年代早,其更新改造面临空间狭小、人口密集、土地覆被复杂、污染冲击负荷高、排水设施能力不足且老化等难题。因此,亟需在径流污染溯源、管道修复和系统治理等方面实现技术突破,实现高密度建成区水环境质量的提升。

1 研究背景

城市高密度建成区的既有特点,导致其实施排水系统提质增效难度较大,同时受限于技术进步和管理理念,相关应用研究和工程实践经验也较为匮乏。排水系统提质增效的主要技术难点表现在以下三个方面:

(1)缺乏径流污染源解析计量理论方法,难以支撑复杂土地覆被下污染负荷的量化计算;

(2)缺乏地下管道精确检测及高效修复技术,难以支撑排水系统的提质增效;

(3)缺乏污染多重复合治理技术体系,难以支撑城市污染负荷的系统削减。

针对上述技术难题,开展了径流污染源解析计量、排水管道精确检测和原位修复、污染系统阻控技术体系等研究,解决缺陷管道检测漏损修复、灰绿协同污染系统阻控技术难题,获得关键技术参数,并进行工程实践。研究技术路线见图 1。

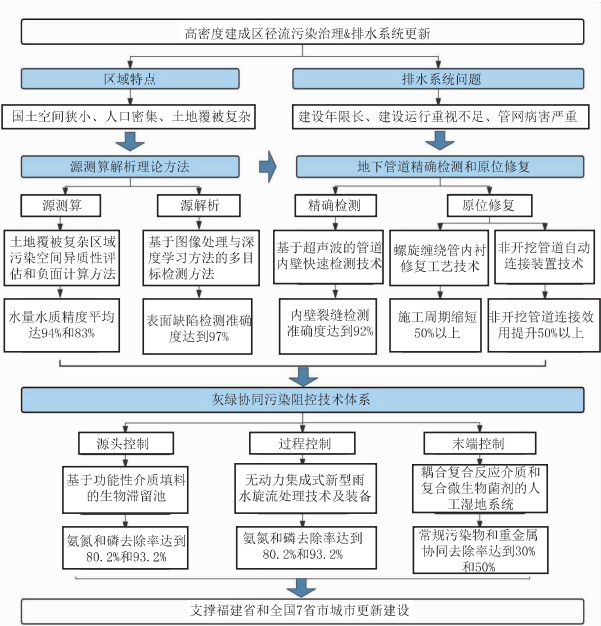


图 1 研究技术路线

收稿日期: 2022-12-21

作者简介: 吕永鹏(1982—),男,博士,高级工程师,从事流域治理与海绵城市相关研究与规划设计工作。

2 研究成果

2.1 径流污染源解析计量方法

2.1.1 径流污染来源有效性分析及计量方法

传统的面源污染计算方法通常采用经验系数模型,将各个用地类型的区域视为相互独立的污染输出板块,并将同一用地类型的降雨径流污染进行单一化的均值定量。这种方法无法精细识别面源污染的不同来源,会导致面源污染空间分布分析和污染负荷评估与实际情况存在较大差距。

本研究基于“有效不透水面”概念,构建了面源污染来源有效体系(见表1),将污染来源研究对象细化为①有效不透水面(EIA, effective impervious area),即产生的地表径流直接汇入(或通过管网排入)自然水体的不透水面,②非有效不透水面,即产生的地表径流可通过绿地等城市透水面的调蓄或被收集利用的不透水面,③绿地,即具备径流入渗能力的下垫面,和④水体。

表1 面源污染来源有效体系

序号	下垫面类型	备注
①	①-1 屋面类有效不透水面(EIA-Rf)	点位污染输出系数(SMC)
	①-2 地面类有效不透水面(EIA-Rd)	
②	非有效不透水面	—
③	绿地	—
④	水体	—

针对径流污染的主要来源①有效不透水面(EIA),将其进一步细化为①-1 屋面类有效不透水面(EIA-Rf)和①-2 地面类有效不透水面(EIA-Rd)^[1]。在此基础上提出了点位污染输出系数,又称点位平均浓度(SMC, Site Mean Concentration),将区域内下垫面看成由无数单位面积积分而成,各单位面积上SMC存在差异且具有空间关联性。SMC的计算见式(1)和式(2)。

本研究建立的方法可从面源污染来源有效性和计量精细化等方面提高面源污染空间分布分析和污染负荷评估的精确程度。

$$SMC = \frac{\sum_{i=0}^n (EMC_i \cdot P_i)}{\sum_{i=0}^n P_i} \quad (1)$$

式(1)中: P_i 是指第*i*次降雨量,L; EMC_i 是指第*i*次降雨径流平均浓度,mg/L,采用式(2)计算:

$$EMC = \frac{M}{V} = \frac{\sum_{j=0}^n Q_j C_j}{\sum_{j=0}^n Q_j} \quad (2)$$

式(2)中: EMC 是指事件平均浓度,mg/L; M 是降雨事件径流污染物总量,mg; V 指降雨事件径流总量,L; Q_j 是第*j*次取样时所对应的径流量,L/min; C_j 指*j*次取样时的径流污染物浓度,mg/L。

2.1.2 高效高精度的径流污染空间分布特征与污染负荷计量方法

基于空间信息数据分析,利用局部加密的网格布点采集雨水径流污染信息,建立了雨水径流污染空间信息数据库,并以残差平方和(RSS)及最小和决定系数(R²)最大为标准构建了最优统计学模型,进而生成降雨径流污染等级空间分布图,核算地面类和屋面类有效不透水面的径流污染负荷,以及区域径流污染负荷。该方法采用的技术路线见图2。

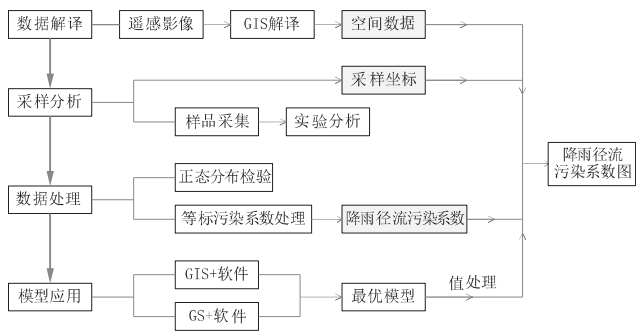


图2 高效高精度的降雨径流污染分析方法技术路线图

该方法通过采用地统计学模型对径流污染进行空间模拟和分析,大大减少了区域需采样数量和化验分析数量,有效节约项目人力成本和基础评估分析时间;并且提高了面源污染空间分布和污染负荷的评估结果精确度,为后续污染削减措施和水环境修复的措施的设置提供科学依据。

2.1.3 基于机器视觉的地下管道缺陷等级判译方法

管道缺陷等级直接影响到污染负荷的大小、修复的难度和工程量,目前最常用的地下管道闭路电视(CCTV)检测系统在管道图像数据采集、缺陷分类和分级判断的过程中,存在主观随意性和判别结果偏差大的缺点。

为提高管道缺陷识别精度,本研究提出基于机器学习的地下管道缺陷判译方法,大大降低人工成本和误差。该方法优化了支持向量机训练的管道缺陷检测技术流程,并对管道纹理特征提取方法和缺陷分类进行创新研究,为城市排水管道结构性缺陷检测提供新的思路和方法。

方法的具体实施主要包括以下五个步骤:

(1)管道检测原始数据获取:利用CCTV检测系统对排水管道进行拍摄,获取原始数据。

(2)管道图像提取:利用 Video Reader 函数读取视频原始数据,根据视频采集速率设置提取帧画面间隔值时间,保存提取对应帧下的管道图像。

(3)获取缺陷子图集:对抓取得到的管道图像进行粗分类,去除图像中的无关信息,再通过灰度变换、直方图均衡化处理、限制对比度自适应直方图均衡化处理、自适应中值滤波处理、边缘轮廓增强处理等措施,对有缺陷的图像进行预处理,从而获取缺陷子图集(如裂缝、错口、腐蚀等)。

(4)图像纹理特征提取:采用灰度共生矩阵(GLCM)法、改进的灰度共生矩阵复合特征向量提取(B_GLCM)法、灰度-梯度共生矩阵(GGCM)法、Gabor 法以及局部二值模式(LBP)法等 5 种不同图像纹理特征提取方法,对缺陷子图集进行图像特征提取。

(5)管道缺陷等级判译:通过构建基于向量机学习的二分类支持向量机(BSVM)分类器,对提取到的缺陷数据进行训练和分类,最终得到排水管道的缺陷等级检测的判译结果。

2.2 排水管道精确智能检测与原位修复技术

2.2.1 结合图像质量控制的地下管道多目标缺陷检测新方案

针对传统排水管道的缺陷检测识别方法效率低下、识别率不高等问题,本研究从分析地下管道图像质量问题、缺陷的不同类型入手,提出了图像质量评价控制方法及地下管道多目标缺陷检测方案,可显著提高缺陷检测、图像质量评价以及降质图像恢复的准确性。

研究构建了改进 SSD(SingleShotMultiBoxDetector)算法,实现了地下管道不同缺陷类型的多目标检测流程优化(见图 3)。整个流程包括视频图像帧提取,数据集构建,模型训练,基于不同特征图的边界框(Bounding Box)生成及检测结果输出。

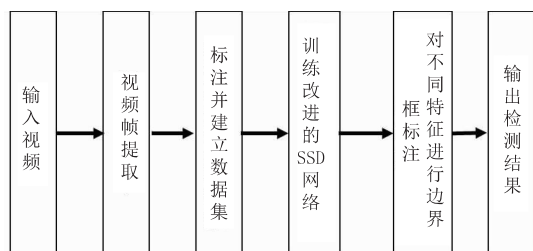


图 3 基于改进 SSD 算法的多目标检测流程

对管道图像进行质量评价,并在后续处理中对降质图像进行质量恢复是提高地下管道检测准确率的关键一环。研究提出一种基于双最大局部信息的图像质量评价方法用于模糊图像的质量评价^[2]。该方

法结合合适的窗口大小,采用步进方式计算不同位置窗口中的局部信息熵,并提取最大局部信息熵所对应的窗口作为关注区域,随后结合图像多通道信息计算关注区域中的最大梯度差值作为最终的图像质量评价。将本方法与其他常用无参考图片质量评价方法在不同数据集上的 F-检验进行对比,结果表明本方法优于大部分常用方法(见图 4)。

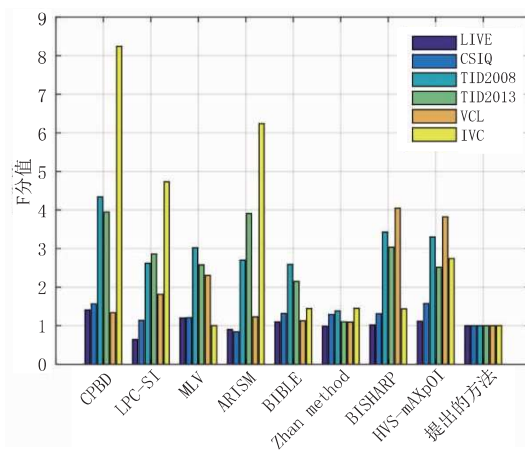


图 4 本项目研发方法与主要无参考图像质量评价方法在不同数据集上的 F-检验对比结果

针对地下管道图像特征繁杂、失真类型多的问题,本研究提出了基于无配对图像的域自适应网络实现图像质量恢复方法。该方法训练流程见图 5。首先,由来自不同设备与环境采集得到的失真图像/清晰图像构建无配对数据的数据集,其次,引入 CycleGAN 网络用于模型训练,实现对降质图像的恢复^[3]。

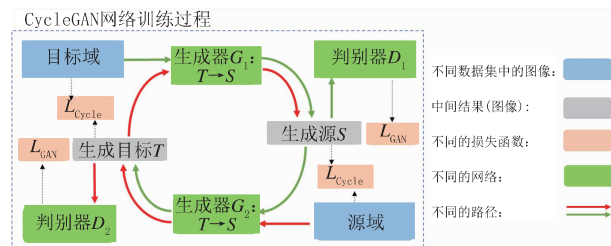


图 5 基于 CycleGAN 的图像质量恢复模型训练

结合图像处理与深度学习方法,研究提出应用于地下管道缺陷检测的图像质量评价算法、降质图像恢复方法及多目标检测方案。该方案包括图像采集模块、图像质量评价模块、图像质量恢复模块及表面缺陷检测模块,实现了管道缺陷的全方位、高准确率检测。

2.2.2 集成式地下管道智能缺陷监测系统

高密度建成区老化的排水设施的渗漏率较高,传统的监测维护方法往往依靠人工巡视,或者依靠单一方法或仪器进行监测,监测效率较低,且无法适应排水管道水质、水量变化和高浓度有毒有害气体

的复杂环境,无法探明破裂、塌陷、冒溢等不同缺陷情况,难以准确定位与判定缺陷等级及影响范围,不适用于长时间及大范围的管道监测。针对上述问题,研制了联合抽压式污水管道排污疏通机器人,多功能管道检测车及配置了多线激光雷达测距定位、CCTV 相机以及 IMU (Inertial Measurement Unit) 参数量化标定的集成式管道智能缺陷检测器的地下管道智能缺陷监测系统。

监测系统主要包括执行装置、控制室、检测车等组成部分。

其中,执行装置是检测车的核心部分,实现了信号与图像多模态数据融合。项目研发的超声波检测器利用超声波导的回波信号推断波导的形态,以判定管道缺陷的各类属性。超声波检测系统在计算机及专用软件系统的支持下对接收的反射声波信号进行自动处理,经过专业软件处理后形成管道的横断面图,以此来准确判断管径和管道损坏程度等情况。超声波信号具有高穿透率低损耗的特征,可以实现长距离管道的内壁检测。在此基础上,结合 2.2.1 中提到的地下管道多目标缺陷检测方法,可大幅提高管道缺陷检测的准确性。

控制室中集成了基于图像质量评价方法、图像恢复方法及多目标检测算法的处理装置,并结合图像处理结果完成对管道缺陷的检测与识别,进而了解和评价管道的性质、状态、内部结构及缺陷类型等。

检测车装载具有抽压式排污结构的疏通机器人,可在污水管道中翻转,防止污水管道中的垃圾阻碍疏通机器人的前进。检测车使用摄像头观察污水管道内的情况,并结合水泵及冲击水管将堵塞物冲散,有效提升管道排污性能。

2.2.3 缺陷管道原位修复技术

螺旋缠绕制管内衬修复技术是一种专用于修复和更新排水管道的非开挖修复技术。本研究开发的固定口径螺旋缠绕制管内衬修复工艺是在原有的管道内,将带状 PVC 型材以螺形旋转方式缠绕形成一条固定管径的新管,并在新管和旧管之间的空隙内灌浆,最终形成一条紧密无缝隙的新管道,主要适用于 DN450 mm 至 DN2 500 mm 的管道。该工艺具有施工周期短、对环境影响小等特点,修复后管道具有较强的抗化学腐蚀能力和结构稳定性。

研发设备可以使缠绕机组件和灌浆组件安装在一起,无需现场安装和调试设备,降低了对施工场地的要求,有效节约了施工时间,大幅增加了管道修复

效率。该工艺流程见图 6。管道修复前后对比见图 7。

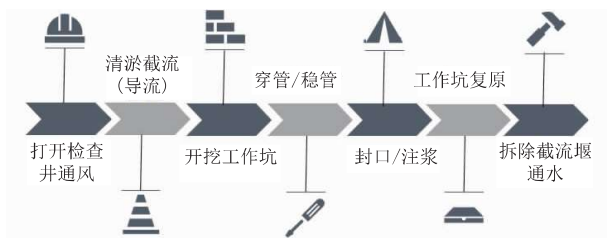


图 6 螺旋缠绕制管内衬修复工艺技术操作流程



(a)修复前

(b)修复后

图 7 螺旋缠绕制管内衬修复工艺修复前后对比

2.3 灰绿协同污染阻控技术体系

2.3.1 截流-调蓄排水系统设计关键技术

合流制排水系统溢流污染和分流制排水系统初期雨水污染是影响城市河道水环境改善的重要因素。雨水截流和处理是最常用污染治理手段之一。

本研究开发了以截流为基础、调蓄为补充、处理为提升的截流-调蓄排水系统设计关键技术。基于典型排水系统数学模型手段,研究提出在人口密度 250 人/hm²,区域径流系数 0.6,人均污水量平均 250 L/(人·d)的情况下,合流制系统适宜的截流倍数为 2~4。研究发现,对于不同排水体制的系统,降雨强度增大均会使水量和水质的截流率减小,但降雨雨型对截流率的影响不超过 2%;系统汇流时间延长 15~20 min 可使水量和水质的截流率分别提升 5%~10%;通过优化设计运行水位,可提高系统在线调蓄能力 30%左右^[4]。研究提出了适用于不同排水体制的调蓄规模计算方法,并对调蓄设施进水、放空和清淤等关键设计节点提出优化方向。

2.3.2 无动力集成式新型雨水旋流处理技术及装备

雨水地表径流面源污染,具有污染源时空离散和不均一、流量大、冲击性强、污染成分复杂、所含悬浮固体颗粒物粒径较小等特点,用常规污水处理技术很难达到低成本、快速、高效率的处理效果的问题。

结合我国高密度城区排水系统溢流污染水质水量特征,构建水力旋流分离器结构与雷诺应力模拟模型,通过对旋流器进水口直径、溢流口直径、低流口直径、进水曲率半径、挡流板位置和进水流量等参数对旋流器处理效率的影响分析,对旋流器内

的流场以及分离主体部分的速度分布等方面进行结构优化。

在此基础上,开发无动力集成式新型雨水旋流处理技术及装备,并开展中试试验验证,通过对比新型旋流分离器与传统旋流分离器的处理效果,新型旋流分离内部流速可提高 2~3 倍,对雨水中 SS 去除率可达到 65%以上,且对细小悬浮固体、磷酸盐、硝酸盐以及重金属也有一定的去除效果,去除颗粒物的粒径区间范围也有所扩大,对 200 μm 以上的颗粒物去除效果更明显。

2.3.3 面源污染物阻控新技术

为实现径流污染的有效控制,项目致力于研发操作简单,效果良好,造价低廉的面源污染物阻控新技术。

本研究以一种以农业废弃物笋壳和氯化镁作为原材料,硅酸钠为粘合剂的生物炭制备技术,并创新膨润土、沸石、改性方法,获得低结晶度的水滑石介孔材料,与之结合生物炭和废弃煤渣,制备了一种适用于新型生物滞留池和人工湿地系统的复合反应介质^[5]。复合介质的制备过程见图 8。

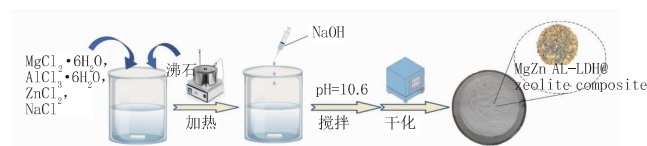


图 8 新型复合介质制备过程

此新型复合反应介质具有比表面积大、吸附容量大、生物附着膜性能优异的优点。采用此介质构建的生物滞留池,对面源污染总氮的去除率达 32.4%~47.9%,对总磷的去除率达 92.7%~96.5%,对氨氮的去除率达 73.6%~88.4%,对硝酸盐氮的去除率达 10.3%~48.8%,对磷酸盐的去除率达 90.4%~97.2%,对 COD 的去除率达 49.5%~59.4%,对 SS 的去除率达 94.1%~98.1%。

在人工湿地系统中采用新型复合反应介质与复合微生物菌剂,复合反应介质可以为植物乳杆菌、枯草芽孢杆菌、黑曲霉、绿色木霉菌、酿酒酵母等异养降解菌、硝化菌、脱氮菌或聚磷菌微生物的生长提供载体,实现物理吸附、化学沉淀与生物代谢功能的有机结合。研究表明,该系统可以同步、高效、快速地去

持在 80.2%以上和 93.2%以上。COD、氨氮、总氮、总磷、六价铬和总镍去除率分别达到 60%、80%、70%、65%、50%和 50%以上。

3 结 论

项目围绕径流污染源解析计量方法、管道智能检测、原位修复和污染阻控技术等开展研究,实现的主要技术突破包括:

(1)创新性建立了土地覆被复杂区域雨水产、汇流污染的空间异质性评估和负荷定量计算方法,构建了基于机器视觉的管道表面缺陷检测图像处理与深度学习方法,解决了径流污染源测算和管道病害源判译难题。

(2)创新性研发了超声波管道内壁无损快速检测技术,开发螺旋缠绕制管内衬修复工艺技术和非开挖管道自动连接装置技术,显著提高了排水管道非开挖修复施工效率。

(3)创新开发无动力集成式新型雨水旋流处理技术及装备,研发面源氮磷污染治理材料及生物体系,构建了灰绿协同污染阻控技术体系,解决高密度建成区径流污染原位高效控制难题。

研究成果在福州、厦门、上海等多地开展工程应用,取得了良好的环境和社会效益,为我国城市水环境持续改善提供重要支撑。

参考文献:

- [1] XIE S,YANG K,LYU,et al.Study on Spatial Characteristics and Load of Urban Non-Point Source Pollution Based on Geostatistical Model[C]// In International Low Impact Development Conference China 2016: LID Applications in Sponge City Projects,2017.
- [2] CHEN J,LI S,LIN L.A no - reference blurred colourful image quality assessment method based on dual maximum local information[J].IET Signal Processing,2021,15(9):597-611.
- [3] CHEN J,SUN Y,FANG Z,et al.Harmonized neonatal brain MR image segmentation model for cross-site datasets[J].Biomedical Signal Processing and Control,2021(69):1-12.
- [4] 王盼,柯杭,陈嫣.基于 InfoWorks CS 模型的合流制排水系统截流规模[J].净水技术,2019,38(4):54-58.
- [5] LI Y,WU M,WU J,et al.Mechanistic insight and rapid co-adsorption of nitrogen pollution from micro-polluted water over MgAl-layered double hydroxide composite based on zeolite[J].Separation and Purification Technology,2022(297):1-12.