

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2026.14.007

基于AI和空间大数据的排口溢流分析与溯源应用

曾洁, 李旭, 林峰, 苏洋, 李肖玉
(深圳市环境水务集团有限公司, 广东 深圳 518000)

摘要: 排放口精细化管理是实现排水系统提质增效和水环境创优的重要措施。结合空间大数据、视觉人工智能(AI)、机器学习算法等新技术,构建排口溢流识别深度学习模型和排口溢流高速溯源模型,实现AI排口智能溢流识别、排口溯源分析、工单长效闭环管理的数字化应用场景。以S市S河流域为例,提出排口管理数字化诊治模式,形成全链条闭环管控的数字化解决思路,AI排口智能溢流识别准确率超过90%,溯源连通性达89%,旱季河道溢流次数降低40%。

关键词: 水环境创优; 排口管理数字化; 视觉AI; 排口溢流识别; 排口溯源

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2026)14-0051-04

Outlet Overflow Analysis and Traceability Applications Based on AI and Spatial Big Data

Zeng Jie, Li Xu, Lin Feng, Su Yang, Li Xiaoyu
(Shenzhen Water and Environment Group Co. Ltd., Shenzhen 518000, China)

Abstract: Clarified management of outlets is an important gripper in realizing the quality and efficiency improvement of the drainage system and the creation of an optimal water environment. Combining spatial big data, visual artificial intelligence (AI), machine learning algorithms and other new technologies, this study devolps a deep learning model of outlet overflow identification and high-speed traceability of outlet overflow, to realize the digital application scenarios including AI-powered intelligent identification of outlet overflow, traceability analysis of outlets, and long-term closed-loop management of work orders. Taking the S River watershed in S City as an example, this study proposes a digital diagnosis and treatment model for outlet management, forming a digital solution concept for whole-chain closed-loop control. The results show the AI intelligent identification of outlet overflow achieves an accuracy rate of over 90%, and the traceability connectivity reaches 89%, and the number of river overflows reduces 40% in the dry season.

Keywords: water environment optimization; digitization of outlet management; visual AI; outlet overflow identification; outlet traceability

排口设施作为城市排水管网与河道之间的重要连接节点,及时准确地发现污水溢流现象,并通过精准溯源技术确定污染源,是有效控制水体污染、维护城市水生态平衡的关键环节。因此,加强

排口设施的监测与管理,提升污水溢流感知与溯源能力,对于保障城市水环境安全具有重要意义。目前,国内外都极其重视城市水环境的治理和保护,在排口精细化管理方面,各地因地制宜,积极探索

通信作者: 李旭 E-mail: 715528723@qq.com

适合自身的排口治理模式。国外发达国家从 20 世纪中后期开始关注排口精细化管理,如通过建立完善的排水管网系统和管理机制,加强对排口排放水质的监测和执法力度,实现对排水过程的全面监控和精细化管理^[1]。近几年,国内部分地区通过制度约束、管理强化、专项治理、污水处理厂扩建、信息化支撑等多方面对排口管理采取综合措施^[2-4]。

排口作为雨水管网行洪的核心节点,其顺畅性对防洪排涝至关重要。同时,排口管理也是水污染治理和水环境优化目标中的关键环节,具有数量多、分布广的特点。然而,目前排口的溢流管理面临诸多挑战,如溢流发现不及时、问题溯源效率低、问题解决不闭环、数据应用不充分等。本文以 S 市 S 河流为研究案例,运用视觉人工智能(AI)、空间大数据、物联网(IoT)、机器学习算法等新技术,提出基于 AI 和空间大数据的排口溢流分析与溯源应用系统方案,可适配类似地区排水污染治理新要求。

1 流域概况与难点

S 市 S 河流域面积 596 km², 河长 37.6 km, 一级支流 5 条。2022 年流域人口密度 2.3 万人/km², 供水量 188 万 m³/d。S 河属于雨源型和感潮型河流, 水体自净能力差, 环境容量小; 全市年均降雨量 1 936 mm, 雨量分布不均, 雨天河流水质波动较大。流域内排水体制为截流式分流制, 2023 年该市提出 S 河国家地表水考核断面(简称国考断面)年均水质达地表水Ⅲ类、降雨量为 15 mm 时保持地表水Ⅲ类、降雨量为 75 mm 时城区无积水内涝的管理目标。研究表明, S 河流域溢流污染占全年入河总污染负荷的 30% 左右, 因此亟须加强对管网与河道连接口即排口的精细化管控, 助力水环境创优。

2 系统架构与算法设计

以 AI+空间大数据作为底层技术, 构建排口管理数字化诊治模块, 解决排口溢流发现不及时、溯源效率低等管理难点。运用排口视频, 结合深度学习算法及视觉 AI 技术, 以排口出流、干涸等业务标识建立目标图像区域与目标事件之间的映射模型, 动态确定目标图像区域内是否存在目标事件, 并通过目标事件校核和工单派发实现闭环处理。结合空间大数据将排口收水范围内所有可溯源的风险数据以及与排口状态相关的业务数据通过拓扑空间关系关联并分类, 最终实现智能排口溢流分析与

溯源, 以支撑水污染溯源及排查工作。

2.1 系统架构

系统整体框架由数据层、平台层和业务支撑层组成(见图 1), 数据层实现排水 GIS 资产、动态行为和物联感知数据的归集与治理, 汇聚工程信息、工地信息、小区管理信息等多维业务数据及视频监控、液位监测等在线监测数据, 实现流域排水设施要素的深度感知。平台层构建以智能视觉 AI 系统、排口综合管理和全链条外勤业务执行闭环的标准规范体系, 实现排口管理高效运维和闭环管理。业务支撑层以数据层和平台层为基础, 构建水污染治理、防洪排涝等业务场景融合 AI 智能溢流识别、AI 智能积水识别等智能应用, 辅助实现流域排水系统提质增效。

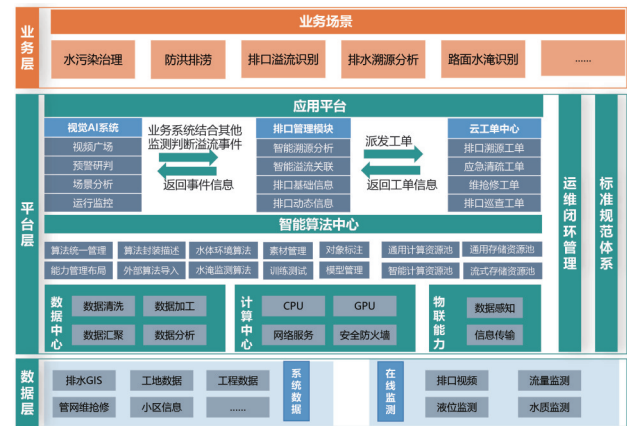


图 1 系统架构

2.2 构建排口溢流识别深度学习模型

2.2.1 基本原理

应用深度学习技术构建排口溢流识别深度学习模型, 算法设计流程如图 2 所示。

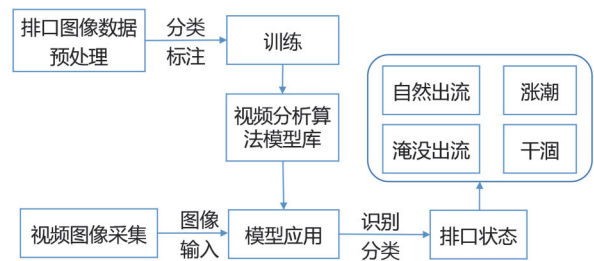


图 2 排口溢流深度学习算法设计流程

在模型实现过程中, 需先构建高质量的数据集。通过收集多样化场景、时段及状态下的排口监控视频, 并经过图片抽帧、人工标注及数据增强技术的处理, 确保数据集的丰富性与准确性。模型采

用YOLO卷积神经网络进行排口图像的特征提取,将448×448像素的图像输入神经网络,并切割成7×7的网格。通过卷积与池化运算预测网格中心点的特征,涵盖水流形态、颜色变化及水位高度等信息并生成识别特征的预测位置边框,根据这些特征将排口状态分为涨潮、干涸、自然出流和淹没出流4种。经过对大量标注排口图像的训练,排口溢流识别深度学习模型已具备实时分析新图像或视频帧的能力,能准确有效地检测排口溢流情况。

2.2.2 算法调优

运用多算法分析融合技术开展算法调优,主要原理为:针对每个视频点位,提供精细化配置能力,对任务的分析时段、调度优先级、具体执行周期、抓拍间隔等进行调整,完成编排后即可开始智能任务的下发和执行。该技术可实现视觉AI与现场硬件的软硬解耦,适配多种算力形式,基于差分进化算法实现自适应的算法编排,确立抓拍间隔和算法算力分配的最优解,获得最佳的算法执行效果。

通过收集错误样本,重新进行人工标注,调整学习率和批量等超参数以及调整置信度等调优工作,算法分析准确率由65%提升到90%以上,通过算法任务编排和资源调度策略,将分析效率提升至毫秒级,所用算力和带宽也有一定程度下降。

2.3 构建空间大数据溯源模型

城市排水系统涵盖市政管道、小区管线及各类管渠,数据总量高达数百万条,若依靠人工巡查记录排水设施问题,则通常需要投入大量人力,溯源排查时也难以对上述问题设施进行系统性判断和准确定位。本文利用空间大数据溯源技术结合地理信息系统(GIS)的空间分析、数据可视化和管理能力构建空间大数据溯源模型,其原理见图3。



图3 空间大数据溯源模型流程

首先,运用GIS空间检查工具,确认各管线起点、终点及管点在空间上的连接性;其次,核实上下游管线是否准确连接于同一管点;最后,依据管线流向,筛选出符合前述连接条件的管线,并通过前端渲染技术,对各段管线进行流向可视化处理,从而构建出实时的溯源路径。

为提高溯源效率,运用基于Redis的高速缓存管线拓扑数据模型,支持每秒10万条数据读写频率,其高效性能支持系统秒级响应,可实现数据快速分析。运用Elasticsearch搜索引擎数据库保存大量数据,支持过亿级的总数据量查询,便于调阅时快速进行问题诊断分析,实现排水管网及附属设施的污染物传播路径追踪和分析。同时,通过分析溯源路径上的管网属性,可自动识别大管接小管、混错接、逆坡等7大类管网拓扑问题,辅助管网问题分析与排查。

3 应用效果

3.1 涨潮河段排口溢流精准识别

S河受海湾涨落潮影响,其排口出流识别难度较大。AI智能排口溢流算法是基于深度学习实现的分类算法,利用卷积神经网络学习视频画面数据的本质特征,通过对排口状态特征进行分类,提取并识别画面中的排口是否具备自然出流、淹没出流、涨潮还是干涸状态的特征,判断后输出排口状态类别信息。

2023年11月—2024年3月非汛期的统计结果(见图4)表明,平台识别溢流达256次,识别准确率超过90%。溢流预警后触发排口溯源工单及时针对溢流问题进行溯源排查整治,河道干流的溢流量减少约2万m³。

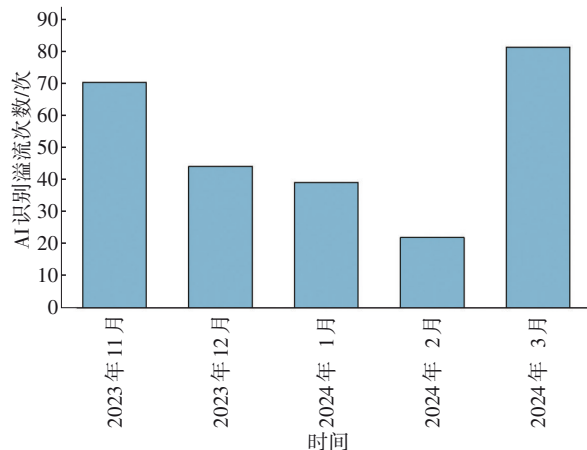


图4 非汛期AI识别溢流次数统计

3.2 排口小流域问题秒级溯源

运用空间大数据溯源模型结合管理需求设计排口管理数字化诊治模块,构建流域、排口、业务信息、AI+GIS溯源技术的小流域数字化闭环管理新模式,可实现排水设施的动态溯源,包含GIS及业务信息。该模块可动态监管小流域内小区污水零直排率、市政截污设施废除率、市政管网完善工程、三四级管渠隐患整改率4类重点任务。运用空间大数据、高速追溯引擎和外业工单,解决小区污水出路异常侦测、排口溯源2类管理难点。该模块还可实时呈现小流域治理成效、秒级追溯排口收水范围内的风险点,并闭环整治排口异常问题,排口雨水管网上游溯源连通性百分比可达89%。以某排口数字化诊治界面(见图5)为例,选中该排口后,系统后台自动溯源排口雨水管网约5.4 km,排口流域内源头小区雨污分流占比为92.5%,管网截污点8处,市政管网有1处正在施工,AI预警该排口发生溢流触发告警,外勤人员可快速定位可疑问题点,辅助问题排查,溢流事件处置效率提升约50%。

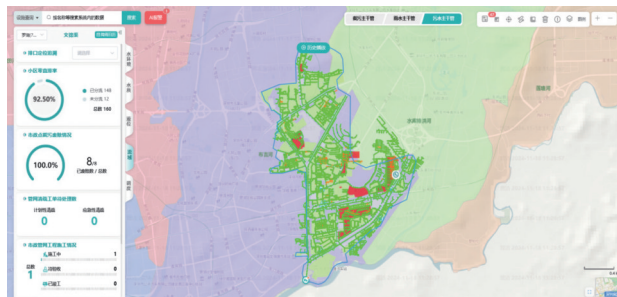


图5 小流域数字化诊治模块界面

3.3 排口小流域数字化闭环管理

在问题处置方面,通过AI排口溢流智能识别后,结合空间大数据将排口收水范围内所有可溯源的风险数据及与排口状态相关的业务数据进行关联并分类,最终实现智能排口溢流分析与溯源,利用工单系统实现排查诊治闭环,以支撑水污染现场溯源及排查工作,辅助实现排放口精细化管理。具体处置流程如图6所示。

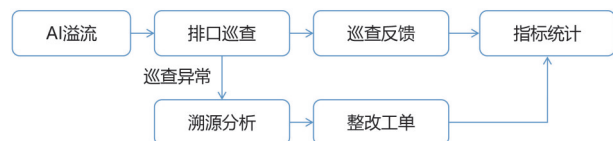


图6 排口溢流处置流程

4 结论

本文针对排水系统提质增效、排放口溢流难管理等问题,以AI+空间大数据作为底层技术,构建排口溢流视觉AI算法和排口溢流高速溯源模型,形成监测-预警-溯源-处置的排口管理数字化闭环诊治模式。目前,本文构建的模型已应用在S市S河流域治理中,实现了技术突破、管理创新,对提升行业排水系统数字化管控水平具有推广和借鉴意义。

① 运用物联网技术及视觉AI技术构建的排口溢流识别深度学习模型,针对S河排口(非汛期),可实时检测偷排、漏排等问题。该算法经过多次迭代,识别准确率达到90%。

② 运用空间大数据技术实现了排口及小流域的快速溯源,并关联集成排口流域内全量空间和业务数据,针对水污染问题进行快速溯源排查整治,雨水管渠上游溯源连通性百分比达89%,河道干流的溢流量减少约2万 m^3/d 。

③ 本文提出的排口管理数字化诊治体系框架,统筹规划小流域及排口数字化管理,构建从排口到管网再到小区的一体化小流域数字长效闭环整治平台,实现排口问题快速定位及全链条闭环管理。

参考文献:

- [1] 刘兴坡. 新加坡城市内涝治理经验及启示[J]. 中国给水排水, 2013,29(22):11-13.
- [2] 陆文涛, 陈波, 雷豁, 等. 常州市排水基础设施安全运行监测平台建设与研究[J]. 环境工程, 2023,41(11):25-33.
- [3] 邹凯波, 杨智, 彭菲, 等. 云南省九湖流域低污染水总量、类型及利用现状分析[J]. 环境工程技术学报, 2024,14(3):889-896.
- [4] 唐俊逸, 余香英, 刘晋涛, 等. 广东省入海排污口分类分布特征及监督管理措施研究[J]. 海洋科学, 2021,45(3):51-58.

作者简介:曾洁(1992—),女,江西吉安人,硕士,高级工程师,主要研究方向为排水及水环境智慧化架构设计与综合应用。

E-mail:1339261410@qq.com

收稿日期:2024-08-01

修回日期:2024-12-31

(编辑:丁彩娟)