

基于多模态融合平台的排污口系统化管理范式

李睿, 李佳川, 顾群

(上海誉帆环境科技股份有限公司, 上海市 200335)

摘要: 入河排污口系统化管理是水环境治理的关键环节。提出一种新范式, 即通过“受纳水体—排污口—排污通道—排污单位”的全链条协同, 构建动态化、精细化、智能化的管理体系。智慧化监管平台融合多源数据监测、空间分析、模型模拟与AI技术, 实现排污口问题的及时抓取、精准溯源与整治效果对比分析, 优化监管效率与响应机制, 推动入河排污口的长效治理。实践表明, 这种新范式可提升排污口管理的科学性与系统性, 为流域水环境质量改善提供有效支撑。

关键词: 入河排污口; 多模态融合; 系统化管理; 智慧平台

中图分类号: TU992

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2026)01-0019-05

Systematic Management Paradigm for Pollution Discharge Outlets Based on Multi-modal Fusion Platform

LI Rui, LI Jiachuan, GU Qun

(Shanghai Yufan Environmental Technology Co., Ltd., Shanghai 200335, China)

Abstract: The systematic management of pollution discharge outlets of rivers is a key link of water environment governance. A new paradigm is proposed, that is, through the full-chain coordination of “receiving water body - discharge outlet - discharge channel - discharge unit” to build a dynamic, refined and intelligent management system. An intelligent supervision platform integrates the multi-source data monitoring, spatial analysis, model simulation and AI technology to achieve the timely detection of pollution discharge outlet problems, and comparative analysis of precise source tracing and rectification effects. The supervision efficiency and response mechanisms are optimized and the long-term governance of pollution discharge outlet of river is promoted. The practice shows that this new paradigm can enhance the scientific and systematic performances of discharge outlets, which provides the effective support for the improvement of watershed water environment quality.

Keywords: pollution discharge outlet of river; multi-modal integration; systematic management; smart platform

0 引言

随着城市化和工业化的快速发展, 人类排污活动不断增强, 河流、湖泊水质污染问题日益严重, 污水排放已成为主要的环境问题之一。当前排污口的排查主要为人工巡河的方式。“靠腿跑、用眼盯”的巡河手段成本高, 管理难度大, 主观性强, 容易出现漏查、漏报现象。因此, 有必要利用多种高新技术手段来有效解决这些现存问题^[1-2]。

近年来, 我国出台多项政策引导文件来规范入河排污口的系统化管理。2022年, 国务院办公厅发布《关于加强入河入海排污口监督管理工作的实施

意见》^[3], 提出要强化科技支撑; 2023年, 生态环境部发布《入河入海排污口监督管理技术指南 入河排污口规范化建设》, 提出建设规范化的监测体系。2024年, 生态环境部发布《入河排污口监督管理办法》, 标志着我国水环境治理进入“精细化管理”阶段^[4]。这些政策共同构建了“受纳水体—排污口—排污通道—排污单位”的全链条监管体系, 推动水环境质量持续改善。

随着物联网、地理信息、模型、AI等数字化转型技术的快速发展, 这些数字化技术不断推动环保治理向智能化、精准化、高效化方向发展。物联网为管理者提供详实的监测数据^[5], 地理信息技术为运维提供精准的位置分析^[6], AI则凭借其高精准性和高效率的优势及时发现一些日常中容易被忽略的异常状况, 这些技术的综合运用为排口的系统性管理创

收稿日期: 2025-09-02

作者简介: 李睿(1989—), 男, 博士, 高级工程师, 从事智慧水务方面的研究工作。

造可能。在实践中,南京市建立了基于GIS的入河排污口管理系统,形成“一张图”信息应用体系^[7]。黑龙江省建设了省排污口综合监管系统省级管理平台、手机排查整治APP等支持排查整治工作^[8]。辽宁省建立了入海排污口监测信息管理平台提高了业务管理的运作效率,为改善水环境质量提供了管理支撑^[9]。山东省济宁市鱼台县构建“源—厂—网—河”一体化监测系统,实现对污水全流程的智能监管与预警^[10]。台州黄岩区建立了全域生态智治平台,结合AI实现对排污行为的实时监控、智能预警与精准溯源^[11]。本文将详细介绍如何通过多模态融合智慧化平台助力实现河道排口的系统化管理。

1 系统总论

多模态融合平台以入河排污口的“查、测、溯、治、管”为总体思路(见图1),推动实现“接纳水体—排污口—排污通道—排污单位”的全链条管控手段,

加强环境预警能力、环境问题发现能力、污染溯源分析能力,全面调度能力及数据分析研判能力,通过数智化手段的运用,例如物联网、地理信息、管网模型、AI等,着力解决目前排污口日常监管难、污染溯源难、传递压力难的问题,为逐步改善水生态环境质量提供助力。

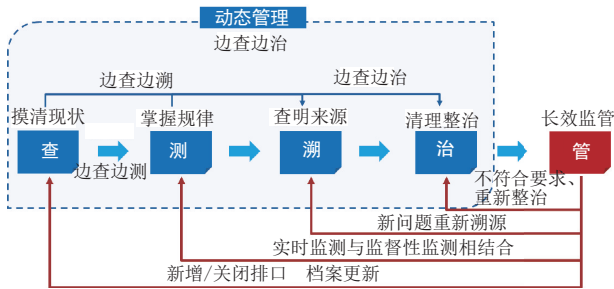


图1 入河排污口管理总体思路示意图

多模态融合平台基于Web GIS开发,以物联感知和地理信息为基础,融合AI算法及数字孪生模型,采用微服务架构和模块化设计,具体架构如图2所示。

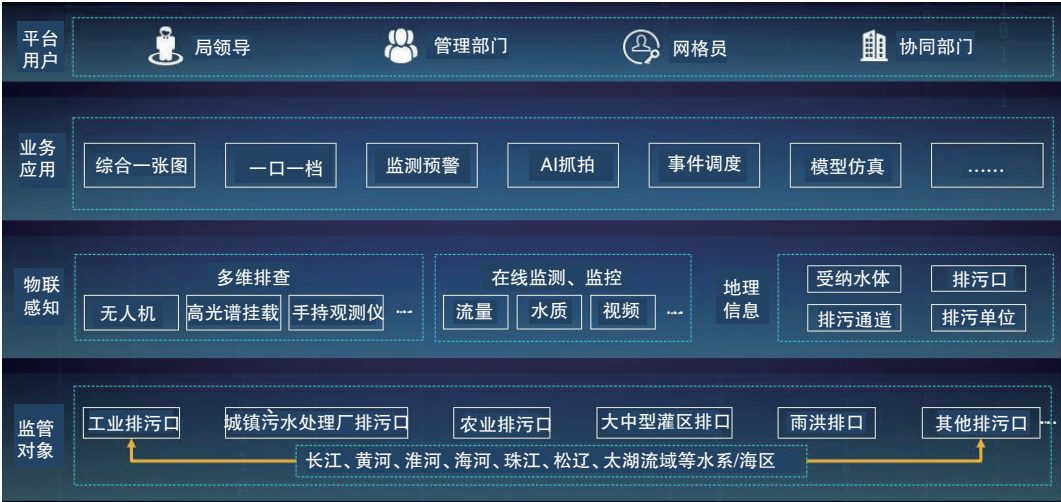


图2 入河排污口智慧管理系统架构图

2 功能介绍

多模态融合平台通过“事前、事中、事后”和“多角度、多手段”的智能监管方式实现对排污口的全面智能监管。其中在事前主要实现智能预警,提前通知责任部门加强管控,在事中实现智能告警、智能溯源、智能调度,抓住战机,降低污染影响,在事后实现智能分析,总结经验,有针对性的开展排污口日常管理工作,打造排污口智能监管的闭环管理机制。平台的相关功能如图3所示。

2.1 摸清现状(查)

利用无人机、手持热成像观测仪等设备,实现排污口大范围排查、疑似排口核查认定,形成一口一



图3 入河排污口智慧管理系统功能结构示意图

档,落实责任主体,并与地理信息充分融合,做到摸底排查“查明白”。

2.2 掌握规律(测)

利用视频监控、水质监测仪、流量计等物联网设备,实现水质流量实时监测和排水情况的实时监控,利用AI算法实现异常事件智能识别和抓拍,做到排

放监测“测全面”。

2.2.1 实时监测预警

通过对重点排水户、管网重要节点以及排口的水质水量指标监测,及时发现潜在的问题,提前通知责任部门加强管控,避免或减少污水下河的现象发生。

2.2.2 图像识别报警

图像识别模型的训练原理包括数据准备、特征提取、模型选择、模型训练和模型评估等关键步骤。通过这些步骤,模型能够学习如何准确地识别图像中的物体或场景。通过监控摄像机对排口全天候不间断的抓拍,通过 AI 算法进行分析,一旦发现排口异常出流即可通过平台进行实时预警,让管理人员能够快速发现排口异常排放问题,做到释放人力,提升效率。逻辑流程图和部分目标检测场景如图 4 所示。

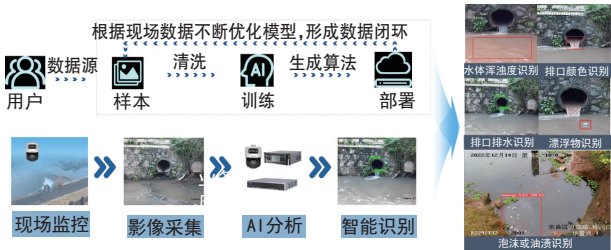


图 4 逻辑流程图和部分目标检测场景

2.3 查明来源(溯)

2.3.1 物联网+空间分析

系统可以对河道排口及上游汇水节点的水质监测数据进行统计分析,并对超标数据进行高亮展示。同时系统支持对超标水质排口查找关联管线,进一步可实现查找关联地块,为排水溯源提供参考依据,逻辑关系如图 5 所示。



图 5 溯源分析逻辑图

2.3.2 管网数学模型

基于数字孪生+大数据的地表水环境预警溯源分析技术,通过 GPU 加速管网数学模型的水质水量平衡分析,推断产生溢流潜在问题点的位置,如图 6 所示,从而提高排查效率,实现快速加密排查。

2.4 清理整治(治)

从管网裂缝到混接错接,相关的清理整治可集成到入河排污口综合管控一张图中,采用视频或图片的形式进行归档,可对同一点位整改前后的两张

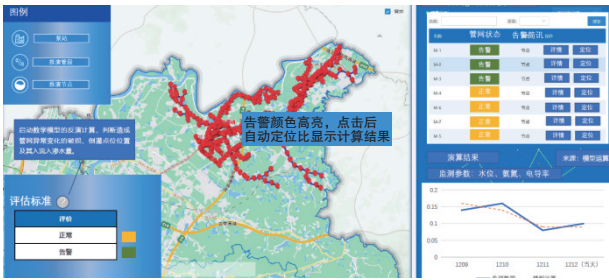


图 6 管网数学模型分析示意图

切片进行人工对比,直观了解整治变化及成效,图 7 所示为管道修复前后的对比。

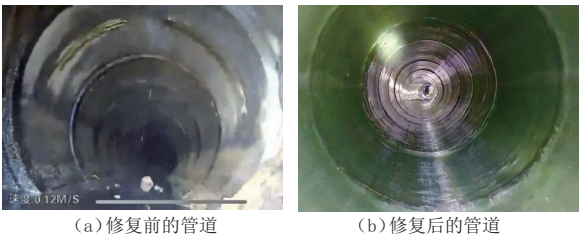


图 7 管道修复前后对比图

2.5 长效监管(管)

智能调度作为排污口日常监管的闭环管理手段,全程跟踪任务处理进度和处理结果,实现“事件接收—核实确认—事件分发—APP 处置反馈—归档记录—统计分析”的全过程闭环留痕,确保每件任务有落实、有回复、有记录、有评价(见图 8),最大程度保障针对排污口的长效监管机制。

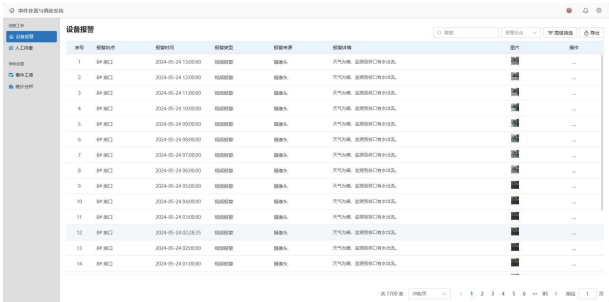


图 8 智能调度示意图

3 关键技术

在平台功能中有一项关键技术,利用 AI 智能抓拍方式替代“靠腿跑、用眼盯”的巡河手段,在解放人力的同时,实现了减少异常状况的漏查、漏报情况。本节将重点介绍 AI 智能检测这项关键技术的原理。

3.1 目标检测算法原理概述

基于 Pytorch 深度学习平台,采用目标检测算法,进行算法模型训练和测试。目标检测算法的网络结构,整体由 3 个核心部分组成:Backbone(主干网络)、Neck(特征融合层)和 Head(检测头)^[12]。

(1) Backbone(主干网络):采用了 C2f 模块

(cross-stage partial fusion),该模块通过更高效的特征融合方式,在减少参数量的同时保留更多语义信息。这样可以简化前处理操作,提升模型兼容性和推理效率。在Backbone的最后层加入SPPF模块(spatial pyramid pooling-fast),通过连续最大池化层操作模拟多尺度上下文,扩大感受野,提供更强大的全局语义特征,供Neck融合。

C2f模块原理,输入图像首先经过卷积层 conv1 (1×1 卷积),将通道数扩展至原始输入的2倍(例如输入通道为 c ,则输出 $2c$)。此步骤增强特征表达能力。

特征拆分与并行处理,conv1 的输出沿通道维度拆分为两部分:主路径,直接保留浅层特征(通道数 c),避免信息丢失。分支路径,送入 n 个串联的 Bottleneck 模块(通道数 c),每个 Bottleneck 包含两个 3×3 卷积层并嵌入残差连接,逐步提取深层语义特征。

特征融合与输出,将主路径特征与所有 Bottleneck 的输出在通道维度拼接(Concat),再通过 conv2 (1×1 卷积)压缩至目标通道数,完成跨层级特征聚合。

(2) Neck (特征融合层):采用 FPN (feature pyramid network) 结构,自顶向下传递语义信息,将高层语义增强后的特征图上采样,与低层特征图拼接融合。采用 PAN (path aggregation network) 结构,自底向上传递定位信息,将浅层细节与深层语义进一步融合。采用上采样(Upsample)+拼接(Concat)+卷积

融合(Conv),将高层特征上采样(恢复空间分辨率),再与浅层特征拼接融合。通过多种方法的多尺度特征融合操作,增强模型在不同尺寸目标上的检测能力,特别是对小目标的识别效果有显著提升。

(3) Head (检测头):采用了 anchor-free (无锚框) 机制,摒弃了传统的 anchor-based 方法。这种机制不再依赖预设的锚框,而是直接在特征图上回归目标边界框中心点、宽度和高度。这不仅减少了超参数的依赖,还提升了训练和推理的效率,尤其在处理多目标和小目标时表现更优。

3.2 训练策略与损失函数

目标检测算法在训练策略上也进行了多项优化。首先采用了自适应混合精度训练(AMP),能够显著提升训练速度并减少显存占用。其次,训练时采用多种数据增强技术,包括 Mosaic、MixUp、HSV 变换、图像翻转等,有效提升了模型的泛化能力。

在损失函数方面,目标检测算法采用了多任务损失,包括边界框回归损失,使用 CIoU (Complete IoU) 损失函数^[13],提高目标定位的精度。类别损失,采用二进制交叉熵损失函数 BCE (binary cross entropy) 损失进行分类。置信度损失,用于判断预测框是否包含目标,提高目标与背景的区别能力。

3.3 算法流程

目标检测算法流程如图9所示。

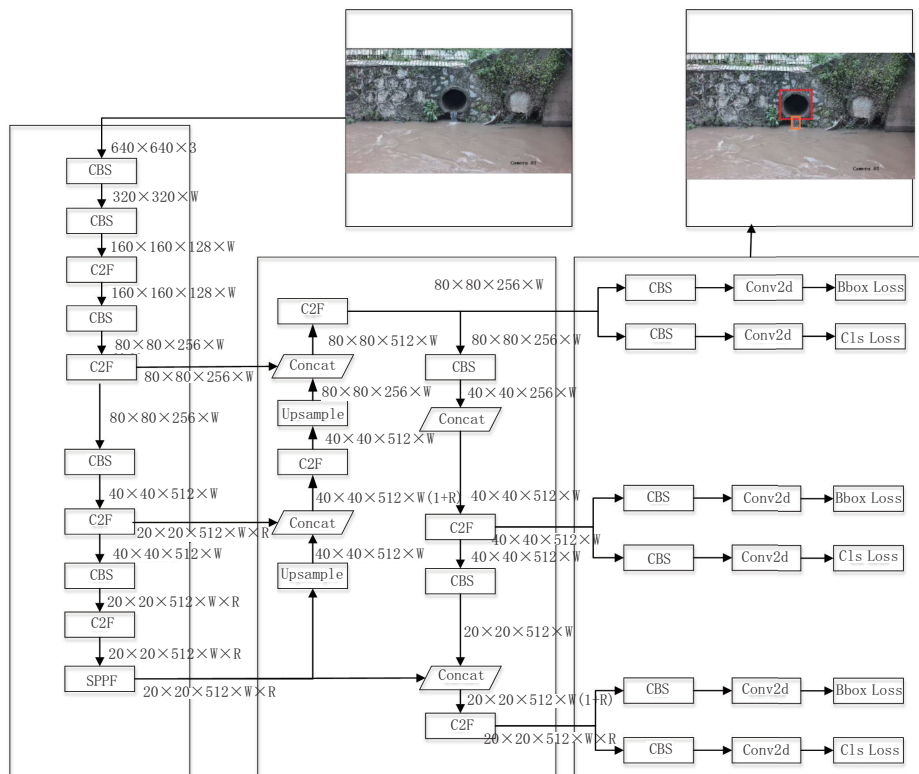


图9 目标检测算法流程图

3.4 训练结果

目标检测算法训练的P-R曲线如图10所示。

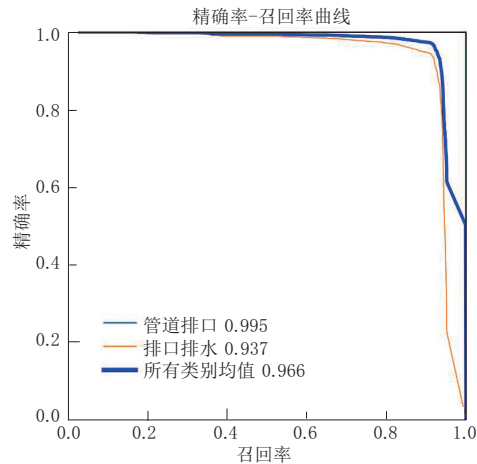


图10 目标检测算法训练P-R曲线图

3.5 识别效果

目标检测算法识别效果图11所示,大的方框表示排口的位置,小的长方形框表示排口水流的位置。



图11 目标检测算法识别效果图

4 案例应用

本文以湖南省某城市内河流的入河排污为例,该河流长达近30 km,有共计100多个排口,大部分为合流制排口,经常出现“污水晴天下河”的情况,但由于巡河人员数量有限,“靠腿跑、用眼盯”的传统巡河手段很难及时发现问题,更难以进行溯源整治工作了。

在充分了解当前入河排污口监督管理现状,分析出现存问题的根源之后,我们综合考虑经济及技术可行性,设计了符合地方监督管理的入河排污口管理新模式。通过对排口安装监控设备,并采用深度学习方法,来智能抓取排口的异常排放现象。经过前期模型的充分训练,并将参数优化,达到报警准确程度(精确率)在95%以上,同时漏报率低于10%(召回率>90%)。无论白天或黑夜,都可以精准抓拍,特别是让一些在夜间排放的现象也能够被发现,如图12所示。这极大地解放了巡河人员的时间精

力,极大地降低了人力成本,同时也取得了更好的管理效果。

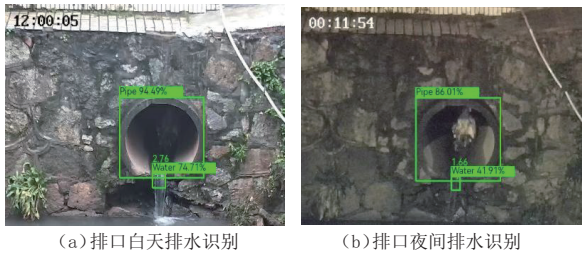


图12 非雨天异常排水抓拍(白天及夜晚)

此外,我们基于Web GIS开发的智慧排口监管平台,也融入了信息管理、多种在线监测、溯源管理、调度管理等多种功能,覆盖入河排污口从建档到巡查、整治、记录到销号一站式智慧管理,并以地图可视化的形式展现(见图13)。该多模态融合平台具有借鉴性,可有效处理现实中出现的各类问题,具有复制推广的意义,为入河排污口监督管理能力的提升提供参考。



图13 智慧排口监管平台

5 结 语

加强和规范入河排污口的监督管理,对改善水生态环境质量、促进绿色发展、保护和建设美丽河湖具有重要作用,是深入打好碧水保卫战的有力抓手。本文通过多模态智慧化监管平台的建设,可以有效解决入河排污口的日常监管难题、污染溯源难题,不但减少了人力物力投入,也提高了日常监管效率,是一种值得复制推广的新范式。对于实现水岸统筹,倒逼源头监管,有效改善水环境质量,具有借鉴意义。

参考文献:

[1] 刘洪先.关于加强入河排污口监督管理的思考与建议[J].水利发展研究,2017,17(11):18-20;38.
[2] 乔飞,方源,邓义祥,等.加强入河排污口精细化管理的思考和他议[J].环境保护,2021,49(24):9-11.
[3] 本刊讯.国务院办公厅印发《关于加强入河入海排污口监督管理工作的实施意见》[J].中国水产,2022(4):4-8.
[4] 给水排水.生态环境部水生态环境司有关负责人就《入河排污口

(下转第28页)