孙连鹏,徐一凡,林健新,等. 城市智慧排水管控中多元监测体系构建研究[J]. 环境科学与技术,2024,47(S1):226-234. Sun Lianpeng, Xu Yifan, Lin Jianxin, et al. Construction of multi-dimensional monitoring system in urban intelligent drainage control[J]. Environmental Science & Technology, 2024,47(S1):226-234.

城市智慧排水管控中多元监测体系构建研究

孙连鹏[1], 徐一凡[1], 林健新[2], 朱津君[1],
李险峰[3], 祝新哲[1*]

(1.中山大学环境科学与工程学院,广东 广州 510006;
2.广东爱科环境科技有限公司,广东 中山 528400;
3.澳门科技大学计算机科学与工程学院,中国 澳门 999078)

摘 要:城市河流与排水管网污染溯源的时效性差与监测体系空间覆盖不平衡等仍是城市水环境管理的突出问题。随着无人机、物联网、水质在线监测、高精度定位等技术的发展,实现快速污染溯源的多元监测体系正逐步实现。该研究通过对中山市濠头涌区域的排水管网关键节点与河流关键断面安装分布式检测仪表,并应用无人监测船对城市河流进行地形测量、水质监测,完成了监测体系的构建和多元监测数据的获取,实现了分布式仪表与无人监测船的优势互补。此外,基于电导率与氨氮相关性系数大于0.92的结果及氨氮作为主要污染物的现状,验证了电导率作为主要水质实时监测指标的合理性。

关键词:智慧排水管控; 多元监测体系; 无人监测船; 分布式检测仪表; 电导率

中图分类号:X84 **文献标志码**:A **doi**:10.19672/j.cnki.1003-6504.2009.23.338 **文章编号**:1003-6504(2024)S1-0226-09

Construction of Multi-dimensional Monitoring System in Urban Intelligent Drainage Control

SUN Lianpeng[1], XU Yifan[1], LIN Jianxin[2], ZHU Jinjun[1],
LI Xianfeng[3], ZHU Xinzhe[1*]

(1. School of Environmental Science and Engineering, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510006, China;
2. Guangdong AIKE Environmental Science and Technology Co.,Ltd, Zhongshan 528400, China;
3. School of Computer Science and Engineering, Macau University of Science and Technology, Macau 999078, China)

Abstract: The poor timeliness of pollution traceability of urban rivers and drainage networks and the imbalance of spatial coverage of the monitoring system are still outstanding problems in urban water environment management. With the development of technologies such as drones, Internet of Things, online water quality monitoring, and high-precision positioning, the construction of a multifaceted monitoring system that rapidly conducts pollution traceability is gradually being realized. The distributed detection instruments were installed at key nodes of the drainage network and key sections of the river in Haotouchong area of Zhongshan City, while unmanned surface vehicle was applied to conduct topographic measurement and water quality monitoring on the urban river. Thereafter, the monitoring system was completed and used for multivariate monitoring data, which suggested the complementary advantages of the distributed instruments and the unmanned monitoring boat. In addition, based on the result that the correlation coefficient between conductivity and NH_3-N was not less than 0.92, and the current situation of ammonia nitrogen as the main pollutant, it verifies the rationality of it as the main water quality monitoring index.

Key words: intelligent drainage control; multiple monitoring system; unmanned surveillance ship; distributed detection instrument; electric conductivity

近年来我国的人口快速增长和城市化进程加快,黑臭水体在多个城市、多个流域均有出现,城市水污染治理进入攻坚阶段[1-3]。现有研究表明,点源污染物的输入是城市水环境污染的主要原因,其中因排水管网不完善

《环境科学与技术》编辑部:(网址)http://fjks.chinajournal.net.cn(电话)027-87643502(电子信箱)hjkxyjs@vip.126.com
收稿日期:2023-10-19;修回2023-11-27
基金项目:国家重点研发计划(2019YFE0111400);澳门科学技术发展基金(0079/2019/AMJ)
作者简介:孙连鹏(1973-),男,教授,博士,研究方向为水污染控制,(电子信箱)eesslp@mail.sysu.edu.cn;*通讯作者,女,副教授,博士,研究方向为环境大数据及智慧水务,(电子信箱)zhuxzh8@mail.sysu.edu.cn。

而导致的污水直排入河是外源污染物排放的主体[4-6]。城市水环境污染的解决方法主要包括点源治理、面源治理、内源治理和生态恢复[7]。其中点源治理，也称截污控源，是解决城市水环境污染的前提和根本方法。

现阶段城市排水点源污染溯源可按照其迁移路线进行逆向溯源。基于物理搜索的污染溯源方法包含多种城市河流与排水管网的监测方法，但现有方法以单一监测为主，各种方法应用关联性不足，具体表现为其时效性与空间覆盖能力不平衡，导致高溯源精度与长期持续溯源难以同时实现[8-10]。基于固定监测站的地表水水质常规监测法、分布式在线监测法具有较好的时效性，但其昂贵造价限制了空间覆盖能力；光谱（质谱）分析法、无人船监测法、排水管道检测法空间覆盖能力强，但难以实现长期持续监测。

基于无人控制技术、物联网通信技术、水质在线监测技术、高精度定位技术等现有技术条件，本研究开发了一套适用于城市河流监测的无人监测船与适用于排水系统的分布式检测仪，并构建一套可快速溯源的多元监测系统，为城市排水点源污染溯源提供一种高集成度、覆盖全面、现实可行的数据监测新方法。

1　材料与方法

1.1　研究区域

研究区域位于广东省中山市火炬开发区的濠头涌区域，该区域总面积约为69.70 hm²；河流总长约640 m，宽约14~23 m，面积约1.097 hm²；区域内排水用户主要为电子加工厂等企业以及沿河分布的居民住宅。

1.2　系统构建

1.2.1　系统架构组成及工作原理

该多元监测系统主要由无人监测船、分布式检测仪表、云端数据管理平台组成（图1）。

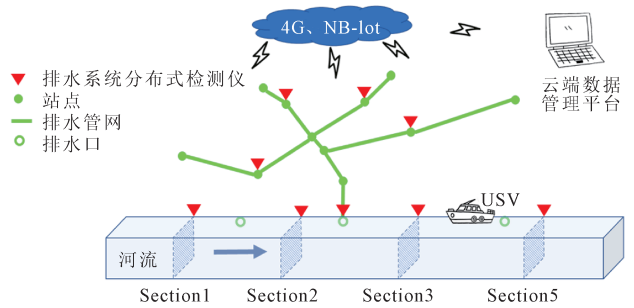


图1　多源监测系统架构图

无人监测船主要用于河流地形测量与水质分布监测，为河流水力模型的构建提供河床地形数据，为基于空间变化的水质相关性分析提供监测数据[11]。排水系统分布式检测仪主要用于排水系统的排水管网、河流的液位与水质监测，通过在排水管网的关键节点、河流的关键断面上布置分布式检测仪，连续监测排水系统的液位、水质、流量等指标。云端数据管理平台为无人监测船、排水系统分布式检测仪提供云端数据存储管理服务，并通过Web端的交互界面实现设备状态、监测数据等信息的实时浏览。

1.2.2　无人监测船

无人监测船的设计原则为小型化、一体化与高精度监测，其硬件功能设计如图2。无人监测船的数传模块为完全自主开发，飞控采购开源产品进行二次开发，船体、推进器、电子调频器等其他电子设备整合市场成熟产品。

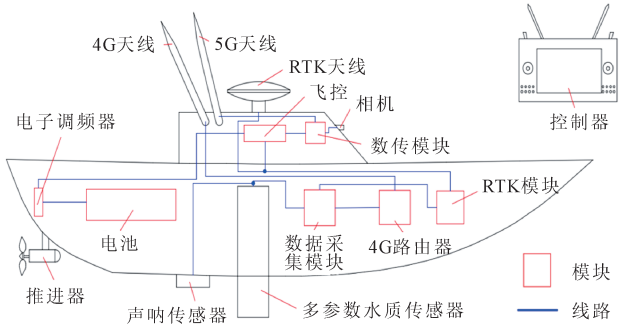


图2　无人监测船硬件功能设计图

无人监测船的关键性能指标如下：

（1）尺寸载重：船长约1.5 m，整备质量约40 kg，载重能力不小于20 kg。

（2）通讯距离：5.8 GHz频段通讯距离大于500 m，4G移动网络通讯距离取决于实际的网络信号覆盖范围。

（3）续航能力：不低于4 h或者10 km。

（4）定位功能：水平定位精度±3 cm，高程定位精度±5cm，最大采集频率为10 Hz。

（5）水质监测：最大采集频率为1 Hz，具体指标见表1。

表1　无人监测船监测指标

指标	量程	分辨率	精度
坐标	/	1 mm	±3 cm(X&Y) ±5 cm(Z)
深度	0.2~20 m	0.01 m	±0.5%F.S.
温度	0~50 ℃	0.1 ℃	±0.5 ℃
电导率	0~5 000 μS·cm^{-1}	1 μS·cm^{-1}	±1.5%F.S.
pH	0~14 pH	0.01 pH	±0.1 pH
ORP	−1 500~1 500 mV	1 mV	±6 mV
DO	0~20 mg·L^{-1}	0.01 mg·L^{-1}	±0.6 mg·L^{-1}
NH_3-N	0~20 mg·L^{-1}	0.01 mg·L^{-1}	±10%F.S.

注：F.S.表示满量程状态下的精度。

（6）河流测深：量程为0.45~20.25 m，精度±1%F.S.，分辨率0.01 m。

（7）视频拍摄：720 p直播视频，延迟不大于10 ms（5.8 GHz）。

针对无人监测船现场使用时实时查看监测数据及任务管理的需求，自主开发无人监测船的现场管控软件（图3），其功能包括：

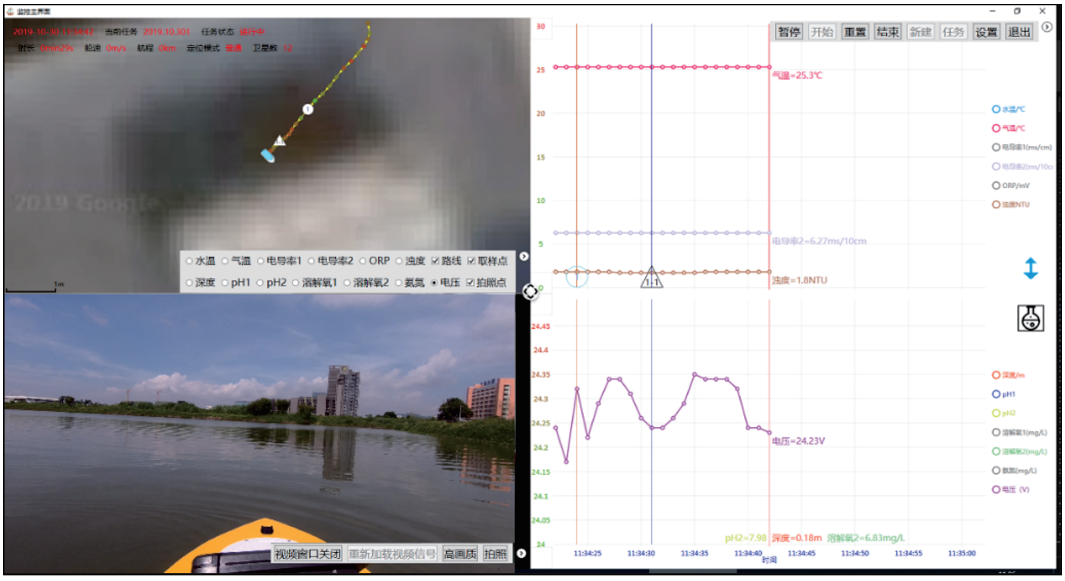


图3 无人监测船现场管控软件

(1)地图功能:通过地图窗口实时查看无人监测船的位置、航向、状态等信息。

(2)水质数据显示:通过数据曲线窗口实时查看各个监测指标的数值变化,并可根据监测需求显示或者隐藏某一种指标的曲线。

(3)水质变化分布显示:选择某一种水质指标,依据水质指标的监测数值变化在地图窗口的监测点位上显示不同的颜色,实时查看该水质指标的空间变化分布。

(4)视频直播与拍照:通过视频窗口实时查看无人监测船拍摄的视频,可根据监测区域的信号优劣调节视频的分辨率,进行拍照时软件自动记录拍照的位置与时间。

(5)任务管理:自动生成任务数据报告,并且可将任务数据报告上传至云服务器。

(6)低电压报警:根据设置的电压下限进行低电压报警,防止因电池电量不足造成的危险。

(7)信号切换:可根据信号状况选择4G网络信号或者5.8 GHz信号。

1.2.3 排水系统分布式检测仪

排水系统分布式检测仪的开发重点在于保证在恶劣使用场景下具有良好的数据采集稳定性、通讯稳定性、续航时长等,其硬件构成主要包括防水外壳、电池、主板、天线、电导率传感器、液位传感器,并可根据监测需求更换不同的传感器。其中主板为基于STM32芯片自主设计的单片机模块,可根据监测需求编写相应的控制代码。

排水系统分布式检测仪的性能参数如下:

(1)尺寸大小:通讯模块尺寸为84 mm×84 mm,整备尺寸小于300 mm×250 mm×2 000 mm。

(2)通讯方法:采用窄带物联网通讯,支持移动、电信、联通三大运营商。

(3)数据采集:最小采集间隔30 s,支持3路温度监测输入、1路485通讯输入、1路模拟量输入、1路TTL通讯输入。

(4)电池与续航:锂亚电池,容量38 000 mAh,续航时间不小于3个月。

(5)定位功能:具有GPS定位功能,水平定位偏差不大于10 m。

(6)数据保存功能:具有SD卡保存功能,最大SD卡支持容量为32 Gb。

1.2.4 云端数据管理平台

云端数据管理平台基于ArcGIS进行开发,实现对监测数据的云端存储,实时更新至平台界面(图4)。

1.3 数据处理

1.3.1 基于无人监测船的监测数据

无人监测船监测指标的量程、分辨率、精度如表1所示。无人监测船在测量河流深度时存在被悬浮障碍物影响的可能,导致局部位置深度异常偏小,需要对深度异常偏小的数据进行人工识别、去除。

1.3.2 基于排水系统分布式检测仪的监测

为了对研究区内的排水管网、河流进行连续性监测,使用分布式检测仪,结合在线多参数检测仪、在线雨量计、在线流量计,对排水管网的关键节点、排放口以及河流的关键断面的进行监测(图5),监测指标如表2。

分布式检测仪的传感器在使用过程中存在被河流或者管网中的悬浮物污染、水面高程过低而露出水面等问题,其监测数据存在异常点或者异常时段。另外,河流在退潮时河床存在露出水面的情况,电导率



图4 云端数据管理平台监测曲线查看功能

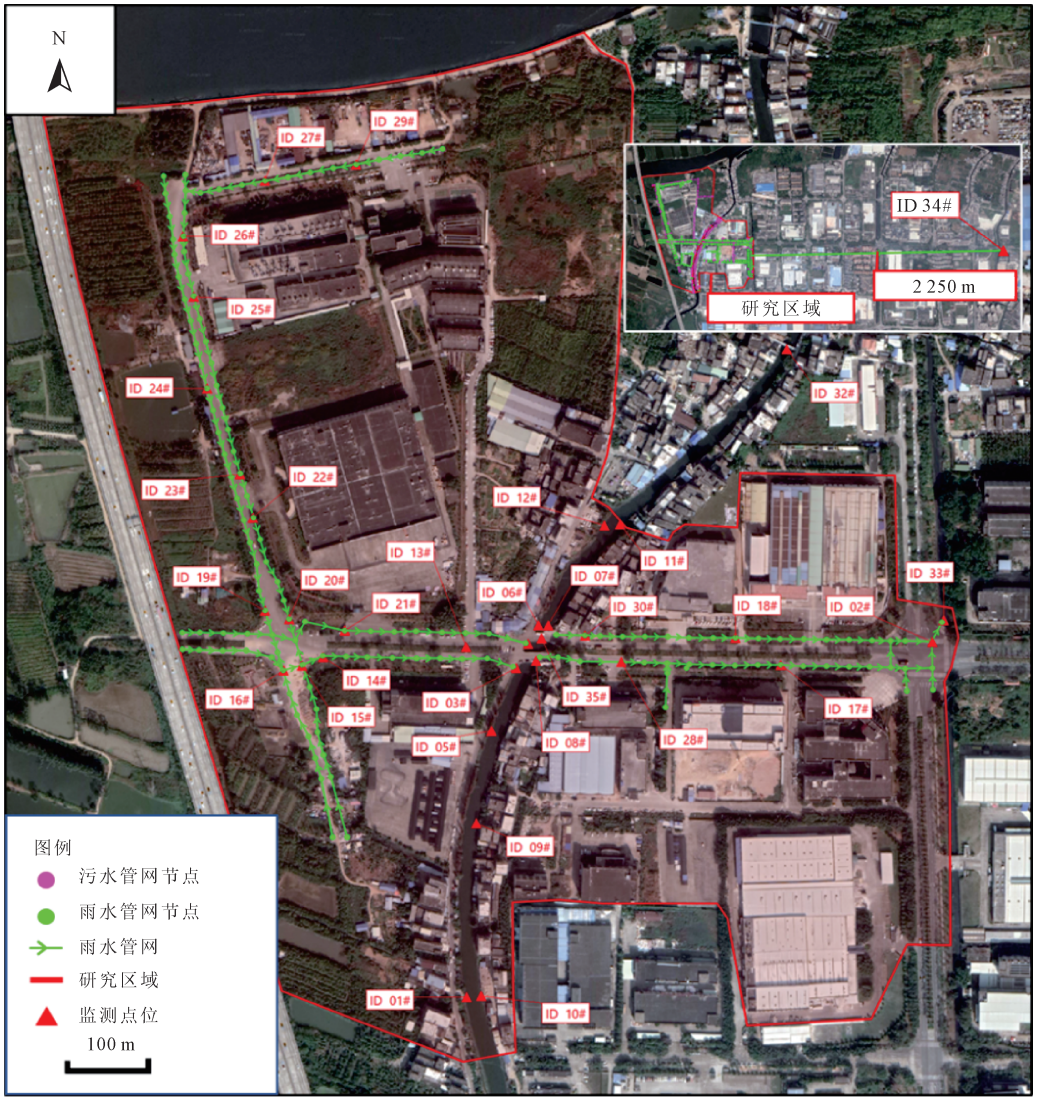
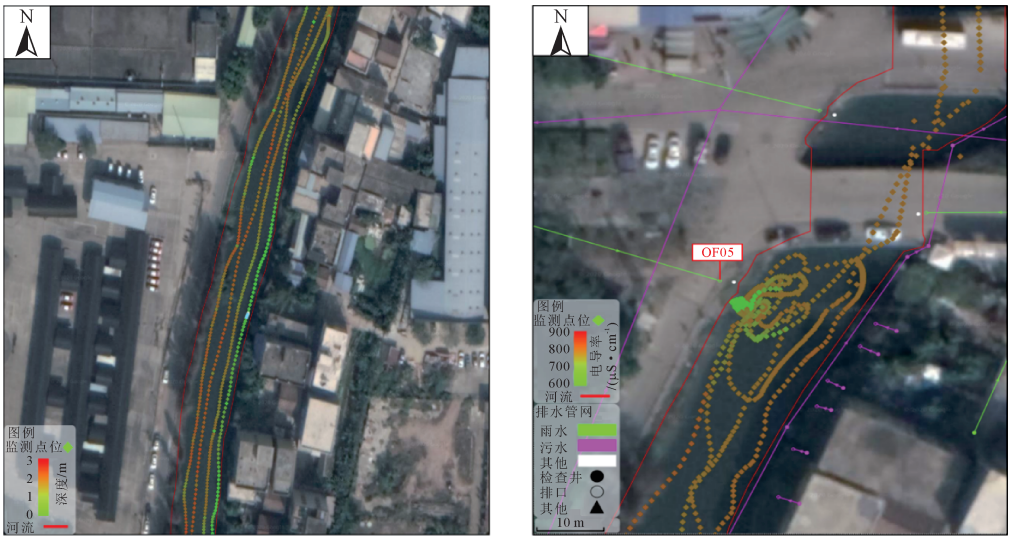


图5 分布式检测仪监测点位布置图

传感器直接露出水面，其监测值为0。3次插值法（下称“cubic法”）是利用极小点逼近的多项式插值法，具有收敛速度快等特点；sliner插值法则适合用于数据间距不均匀的插值处理。通过人工筛选的方式对异

表2 在线监测指标信息

指标	数量	量程	分辨率	精度
电导率	32	0~5 000 μS·cm^{-1}	1 μS·cm^{-1}	±1.5%F.S.
水面高程	26	0~10 m	0.01 m	±0.5%F.S.
流量	1	0.5~100 m^3·s^{-1}	0.01 m^3·s^{-1}	±1.5F.S.(≥V_k) ±5%F.S.(<V_k)
雨量计	1	0~20 mm·h^{-1}	0.01 mm·h^{-1}	±0.4 mm(≤10 mm·h^{-1}) ±4%F.S.(>10 mm·h^{-1})
pH	1	0~14	0.01	±0.1 pH
ORP	1	−1 500~1 500 mV	1 mV	±6 mV
DO	1	0~20 mg·L^{-1}	0.01 mg·L^{-1}	±0.6 mg·L^{-1}
NH_3−N	1	0~20 mg·L^{-1}	0.01 mg·L^{-1}	±10%F.S.



(a)深度测量 (b)水质监测

图6 无人监测船的部分河流深度测量与水质监测结果

常时段进行识别,若异常时段<1 h则使用cubic法进行插值,若>1 h则直接去除而不进行插值,并对该时段进行标记。对异常点进行自动识别,识别原理为对数据点前后各1 h的监测曲线进行拟合,去除实测值与拟合值相差超过100%的异常点,并使用sliner方法插值。

1.3.3 监测指标合理性评价

工程应用中COD、氨氮、总磷的在线监测一般依靠大型机柜进行取样测量,该方式存在价格高昂、设备体积大、监测间隔过大(≥1 h)等问题,选取一种水质指标作为分布式检测仪的监测指标具有低成本、稳定性好、能间接反映污染物浓度等优势。现有的研究表明,氨氮浓度在低浓度范围内(<3 mol/L)与电导率大小成正比[12]。因此,本研究选取电导率作为研究区排水系统的主要水质指标,并对电导率与其他水质指标间(如氨氮)进行了相关性分析,评估电导率作为主要水质实时监测指标的合理性。

2 结果与分析

2.1 基于无人监测船的监测

使用无人监测船对河流进行监测的时段选取在2020年1月5日09:00−17:00、2020年1月6日09:00−12:00。为了提高监测效率,使用无人监测船对研究区域的河流实行分段监测,在监测时段内共进行了12次有效的监测任务,以确保相同的河流区域的监测次数不小于2次。部分河流深度监测以及水质监测结果分别如图6所示。对无人监测船的测深数据进行人工识别处理,有效数据达90%以上,具有较好的稳定性。部分测深异常数据的处理结果如图7所示。

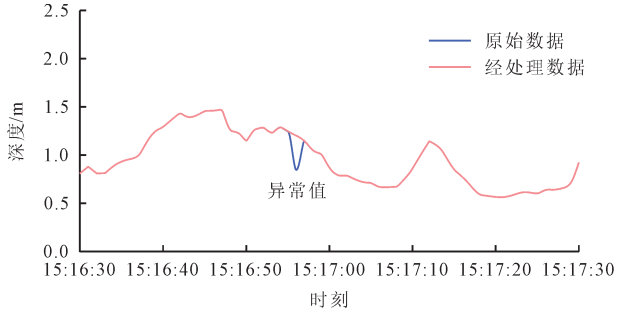


图7 无人监测船测深异常数据处理

2.2 基于排水系统分布式检测仪表的监测

2.2.1 电导率、水面高程监测数据

6号(河流)与20号点位(排水管网)的排水系统水面高程变化范围主要为0~2.0 m,电导率变化范围主要为300~700 μS/cm(图8~9)。

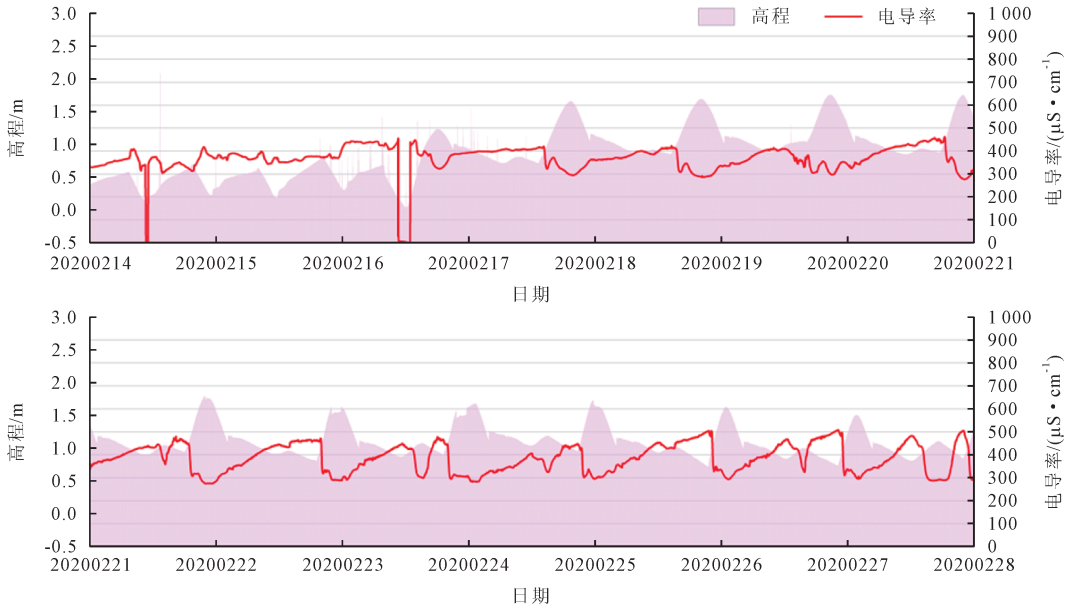


图8 6号点位的监测曲线

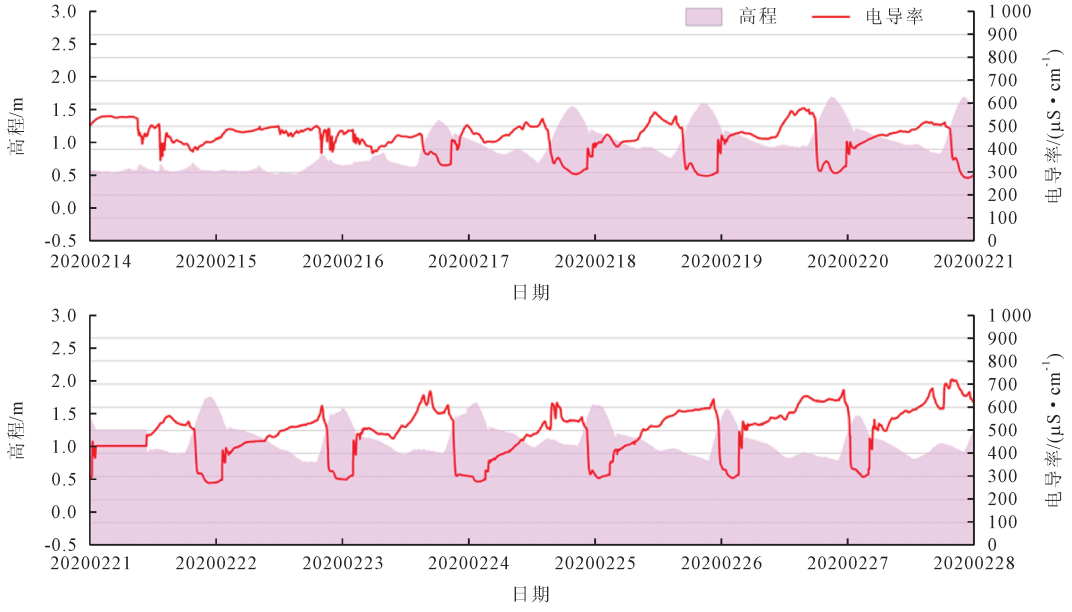


图9 20号点位的监测曲线

2.2.2　降雨监测数据

34号点位所在区域的降雨时段较少,主要集中在2020年3月27日之后,最大雨强不超过60 mm/h,降雨以小雨(<10 mm/(24 h))为主(图10)。

2.2.3　多参数水质监测数据

35号点位的河流氨氮变化范围主要为0~15 mg/L,ORP变化范围主要为-300~300 mV,DO变化范围主要为0~10 mg/L,pH变化范围主要为7.2~8.0(图11)。

2.2.4　流量监测数据

对流量的正负定义:退潮出流(向北)为正,涨潮入流(向南)为负。32号点位的监测数据曲线如图12所示,研究区河流的流量变化范围主要为-16~16 m^3/s。

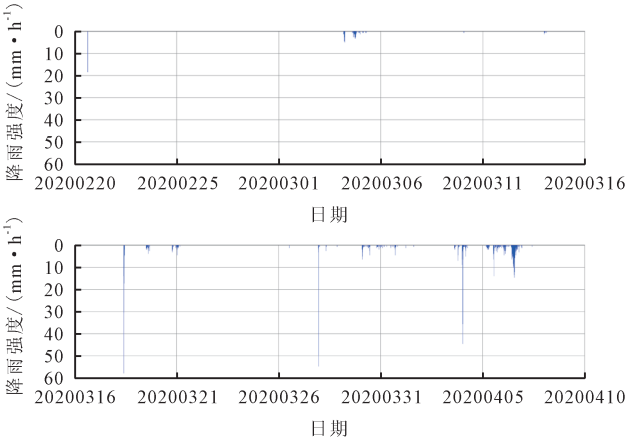


图10 34号点位的监测曲线

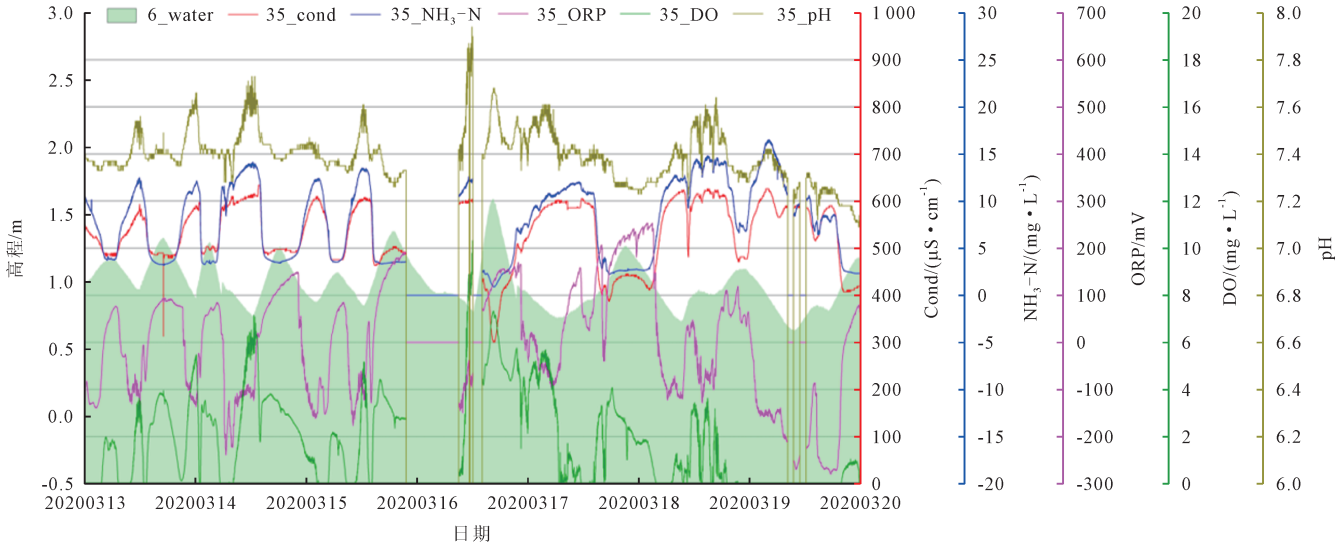


图11 35号点位的监测曲线

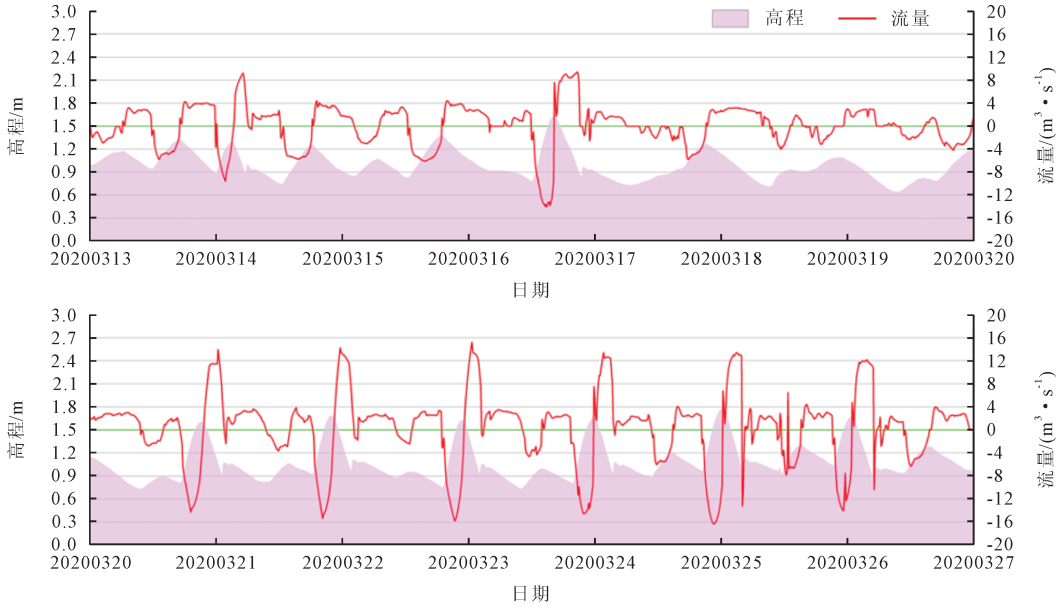


图12 32号点位的监测曲线

2.2.5 异常数据处理

分布式检测仪自动识别得出的电导率与水面高程的异常监测数据分别占总数据的0.55%与0.21%，呈现出高稳定性。数据处理结果示例如图13所示，经过异常时段的人工识别与异常点的自动识别，其异常数据基本上得到识别处理。

2.3 水质相关性分析

选取无人监测船与35号点位多参数水质传感器的监测数据，分别从空间变化与时间变化的角度对电导率反映研究区域氨氮污染程度的能力进行评价。在空间变化上，氨氮与其他指标的相关性大小关系为：电导率(r=0.92)>ORP(r=−0.74)>DO(r=−0.65)>pH(r=−0.21)；在时间变化上，氨氮与其他指标的相关性大小关系为：电导率(r=0.93)>DO(r=−0.70)>pH(r=0.34)>ORP(r=0.12)。可见电导率相较于其他指标，与氨氮的相关性最高，并且在空间与时间变化上都具有很高的正相关系数(图14)。

对电导率与氨氮的监测数据进行线性拟合，可见电导率与氨氮的拟合r^2=0.806 5，说明电导率与氨氮浓度具有较好的拟合效果(图15)。曲线斜率k=0.329 8 S·L/(cm·mol) = 32.98 mS·m²/mol是NH_4^+摩尔电导率的理论值7.34 S·m²/mol的4.5倍，说明研究区排水系统水体的电导率除了氨氮还有其他种类的溶解性离子贡献。

对研究区排水系统的水质监测数据进行相关性分析，电导率在空间变化和时间变化上都与氨氮浓度有着高相关性，结合电导率传感器低成本、易维护、稳定性好的特点，电导率作为氨氮污染程度的指示性指标是合理的。

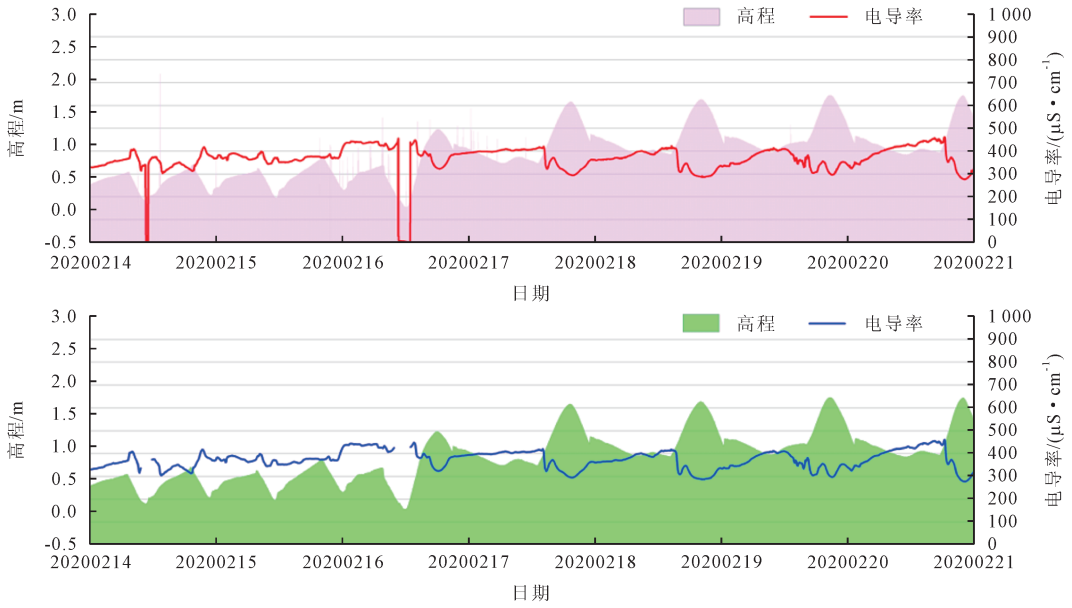


图13 分布式检测仪数据处理结果示例

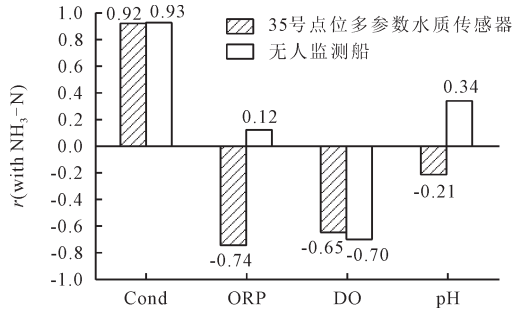


图14 不同水质指标与氨氮的相关性系数

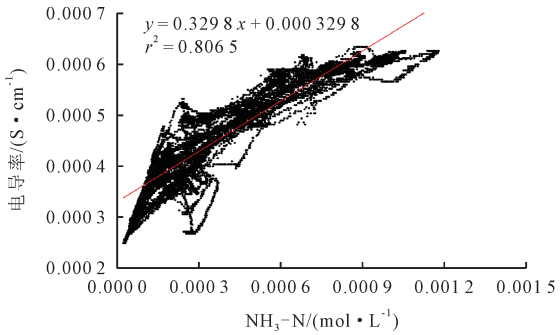


图15 电导率与氨氮拟合曲线

3 讨论

通过自主开发无人监测船,实现了对研究区河流的地形、水质数据的获取,但无人监测船的操作方式为人工现场控制,无人监测船操控的智能化水平未来有待进一步提高,后续的研究可考虑引进自动驾驶技术,实现无人监测船的自主航行,以提高河流的监测效率与监测航线选择的科学性[13]。

虽然采用了较多数量的分布式检测仪,但是受限于成本,河流区域的水质监测点位数量为11个,明显少于排水管网19个的数量,河流与排水管网水质监测点位数量不平衡可能是低流量瞬时排放污染溯源精度不高的原因。后续的研究应进一步降低排水系统分布式检测仪的成本或者加大成本投入,实现河流与排水管网的监测点位数量均衡与饱和布置,以此揭示极端污染事件溯源精度低的原因以及开展监测点位的数量与空间布置对溯源效果的影响研究。

对于系统整体改进,应进一步优化检测监测端口的统筹设置,结合无人监测船和分布式检测仪的技术改进,提升多元监测系统的整体配合度,强化各组成部分协同增效[14]。

4 结论

本研究构建了基于无人监测船与分布式检测仪的多元监测系统,通过自主研发小型化、一体化、高精度监测的无人监测船及其配套软件,以及低成本、小型化、稳定性高的分布式检测仪,配合云端数据管理平台,对研究区域的排水管网与河流进行数据获取,主要包括河流的深度、水质,排水管网节点、排放口、河流断面的水面高程、电导率、多参数水质、流量,以及研究区域的降雨量,并对监测数据进行异常值处理,初步实现了无人监测船与分布式仪表的优势互补。为实现对水质的实时监测,通过构建易测量的水质指标(电导率)与不易测量指标(如氨氮)之间的关联关系(r>0.92),验证了电导率作为主要水质实时监测指标的合理性,从硬件和软件的角度为提升城市水环境管理提供了参考。

[参考文献]

[1] 陈国磊,田玲玲,罗静,等. 长江经济带城市黑臭水体空间分布格局及影响因子[J]. 长江流域资源与环境, 2019,28(5):

1003-1014.
Chen Guolei, Tian Lingling, Luo Jing, et al. Spatial distribution pattern and influencing factors of the urban black odorous water bodies in the Yangtze River economic belt[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2019,28(5): 1003-1014.

[2] 黄伟伟,王士杰,陈举烽,等. 淮安市洪泽区黑臭水体污染特征分析及整治方案[J]. 中国给水排水, 2018,34(12):31-36.
Huang Weiwei, Wang Shijie, Chen Jufeng, et al. Analysis of pollution characteristics of black and odorous water body in Hongze District of Huai'an City and its treatment scheme [J]. China Water & Wastewater, 2018,34(12):31-36.

[3] 张汇哲. 盐城市黑臭水体成因分析及治理建议[J]. 中国水利, 2018(11):27-28.
Zhang Huizhe. Cause analysis and treatment suggestions of black and odorous water body in Yancheng city[J]. China Water Resources, 2018(11):27-28.

[4] 王旭,王永刚,孙长虹,等. 城市黑臭水体形成机理与评价方法研究进展[J]. 应用生态学报, 2016,27(4):1331-1340.
Wang Xu, Wang Yonggang, Sun Changhong, et al. Research progress on formation mechanism and evaluation method of urban black and odorous water body[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2016,27(4):1331-1340.

[5] 王仲伟. 黑臭水体成因及生态治理措施研究[J]. 水利规划与设计, 2018(10):132-134.
Wang Zhongwei. Causes of black and foul water and ecological control measures[J]. Water Resources Planning and Design, 2018(10):132-134.

[6] 成银. 斗门区黑臭水体治理项目设计方案与分析[J]. 城市道桥与防洪, 2019(8):144-148.
Cheng Yin. Design scheme and analysis of black and odorous water treatment project in Doumen District[J]. Urban Roads Bridges & Flood Control, 2019(8):144-148.

[7] 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 management of drainage pipe network[J]. China Water & Wastewater, 2012,28(8):11-14.

[8] 张锡越,朱照荣,齐永良,等. 结合无人测量船的什刹海西海水下地形测绘[J]. 测绘通报, 2018(S1):121-123.
Zhang Xiyue, Zhu Zhaorong, Qi Yongliang, et al. Underwater topographic mapping of the west sea of Shichahai combined with unmanned survey ship[J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2018(S1):121-123.

[9] Ahmed F, Fakhruddin A N M, Imam M T, et al. Assessment of roadside surface water quality of Savar, Dhaka, Bangladesh using GIS and multivariate statistical techniques[J]. Applied Water Science, 2017,7(7):3511-3525.

[10] 周标,董毓良. 基于分布式传感器在线监测数据的排水管网安全运行问题识别与分析[J]. 科技创新与应用, 2019(25):1-6.
Zhou Biao, Dong Yuliang. Identification and analysis of drainage network safety operation based on online monitoring data of distributed sensor[J]. Technology Innovation and Application, 2019(25):1-6.

[11] 金久才,崔文连,张杰,等. 无人船系统应用于水库水样离岸采集:以棘洪滩水库为例[J]. 海洋科学, 2018,42(1):11-14.
Jin Jiucai, Cui Wenlian, Zhang Jie, et al. Water sampling from reservoirs in offshore districts using an unmanned surface vehicle: an application for the Ji-Hong-tan Reservoir [J]. Marine Sciences, 2018,42(1):11-14.

[12] Shcherbakov V V, Artemkina Y M, Ponomareva T N, et al. Electrical conductivity of the ammonia-water system[J]. Russian Journal of Inorganic Chemistry, 2009, 54(2): 277-279.

[13] 陈玲,孟巧,周陈炎,等. 水质监管船的无人驾驶技术研究[J]. 中国新通信, 2022,24(15):29-31.
Chen Ling, Meng Qiao, Zhou Chenyan, et al. Research on unmanned technology of water quality supervision ship[J]. China New Telecommunications, 2022,24(15):29-31.

[14] 陈刃,姜军. 城市水环境监测信息多级分布式采集系统[J]. 西安工程大学学报, 2020,34(3):81-86.
Chen Ren, Jiang Jun. Multistage distributed collection system for monitoring information of urban water environment [J]. Journal of Xi'an Polytechnic University, 2020,34(3):81-86.