

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2021.07.010

无人船技术应用于城市内河水质监测

赵同强¹, 韩超¹, 徐玉良¹, 郭金军², 任霖¹, 张涛³, 陈潘镇⁴,
何仕均³

(1. 昆山市张浦水利<水务>站, 江苏 昆山 215323; 2. 昆山市张浦镇人民政府, 江苏 昆山 215323; 3. 清华大学核能与新能源技术研究院, 北京 100084; 4. 珠海云洲智能科技有限公司, 广东 珠海 519000)

摘要: 随着社会经济和城市的不断发展,城市内河的污染程度不断加大,严重影响居民的居住和自然生态环境。水质监测是城市内河进行综合管理和治理时的一项基础与必要工作。传统监测方式是人工取样监测,往往存在效率低、工作量大等弊端。利用搭载水质传感器[溶解氧(DO)、pH、电导率、温度、化学需氧量(COD)、氨氮(NH₃-N)电极]的无人船对昆山市张浦镇内河进行在线监测和取样,通过综合水质标识指数分析内河的水质状况和首要污染因子。结果表明,无人船可按照预先规划的航行路径,在比较恶劣环境下,自动避障,精确定位监测取样,同时将数据实时回传,实现了水质监测的智能化。无人船搭载的 COD 和 NH₃-N 探头的监测数据与实验室分析测试的数据质控比对结果一致性较好,显示无人船在城市内河水质监测中具有广阔的应用前景。

关键词: 城市内河; 水质监测; 无人船; 综合水质标识指数

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2021)07-0071-07

Application of Unmanned Surface Vehicle in Urban River Water Quality Monitoring

ZHAO Tong-qiang¹, HAN Chao¹, XU Yu-liang¹, GUO Jin-jun², REN Lin¹,
ZHANG Tao³, CHEN Pan-zhen⁴, HE Shi-jun³

(1. Kunshan Zhangpu Water Conservancy <Water> Station, Kunshan 215323, China; 2. Zhangpu Town People's Government of Kunshan City, Kunshan 215323, China; 3. Institute of Nuclear and New Energy Technology, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 4. Zhuhai Yunzhou Intelligence Technology Co. Ltd., Zhuhai 519000, China)

Abstract: The continuous development of social economy and city has created serious pollution to urban rivers, which seriously affects the resident's living and the natural ecological environment. Water quality monitoring is a basic and necessary work in comprehensive management and treatment of urban rivers. The traditional monitoring method is manual sampling monitoring, which often has the disadvantages of low efficiency and heavy workload. Therefore, on-line monitoring and sampling of rivers in Zhangpu Town, Kunshan was carried out by an unmanned surface vehicle with water quality sensors of dissolved oxygen (DO), pH, conductivity, temperature, chemical oxygen demand (COD) and ammonia

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFC1402500)

通信作者: 何仕均 E-mail: heshj@tsinghua.edu.cn

nitrogen ($\text{NH}_3 - \text{N}$). The water quality status and main pollution factors of urban rivers were analyzed by comprehensive water quality mark indices. The unmanned surface vehicle could automatically avoid obstacles, accurately locate monitoring samples and send back the real-time data according to the pre-planned navigation path under harsh environment, thus realize intelligent water quality monitoring. The monitoring data of COD and $\text{NH}_3 - \text{N}$ probes carried by the unmanned surface vehicle were in good consistency with those obtained by laboratory analysis, indicating that the unmanned surface vehicle had a broad application prospect in urban river water quality monitoring.

Key words: urban river; water quality monitoring; unmanned surface vehicle; comprehensive water quality mark indices

城市内河具有为居民提供日常休闲娱乐的功能,同时在调节城市的生态环境方面起到举足轻重的作用^[1]。随着我国社会经济的快速发展,部分城市内河的污染程度远远超出了水体环境的承载能力,有些水体甚至出现黑臭现象^[2]。城市内河水体污染的情况,已经对居民的居住环境和自然生态环境以及社会的经济发展产生影响。

根据国务院的《水污染防治行动计划》,江苏省制定的《江苏省水污染防治工作方案》中提出了“到2030年,地表水水质优良比例达到75%以上”的目标。因此,对江苏城市内河水质进行科学、全面、客观的监测评价,可以为内河水质生态系统的综合管理和治理修复提供坚实的基础。

城市内河以往水质监测的方式是人工取样,实验室测试分析。受城市发展、自然地理条件等因素的影响,城市内河部分流域无法实现人工采样,同时,人工采样存在误差大、风险大、强度大、效率低和部分水质指标无法实时获取的弊端^[3],这就造成水质监测数据无法及时、客观和准确地反映城市内河监测区域水质的状况。

近几年国内外已有多家单位设计、建造应用于环境监测等领域的无人船,例如:英国普利茅斯大学的“Springer”^[4]、国家海洋局第一海洋研究所研发的“USBV”^[5]等。无人船(USV, Unmanned surface vehicle 或 ASV, Autonomous surface vehicle)以微型船只为基础,搭载水质监测的传感器,如:溶解氧、pH、电导率、温度等,利用GPS自主导航或遥控导航,并将监测数据实时传输,其具有收放便捷、成本经济、数据准确等特点^[6]。无人船在水库、城市内河水体监测方面具有明显的技术优势,将是未来水质监测的一个发展趋势^[7]。

在昆山市张浦镇内河水质在线监测和取样中,

即采用了搭载溶解氧(DO)、pH、电导率、温度、化学需氧量(COD)、氨氮($\text{NH}_3 - \text{N}$)电极的ESM30全自动采样监测无人船,取样后对总磷(TP)进行实验室测试,对COD和 $\text{NH}_3 - \text{N}$ 指标进行实验室测试并与无人船在线监测数据进行对比。以期为张浦镇内河水质监管和治理提供准确数据,更为无人船在城市内河水质监测中的应用提供参考。

1 无人船和水质监测指标测试评价方法

1.1 无人船系统

本次监测的无人船为ESM30型全自动采样监测无人船(见图1)。



图1 ESM30 无人船

Fig.1 ESM30 unmanned surface vehicle

它主要由船体、主控、导航、通信、监测等单元组成,可以按照预先规划的路径自主航行,完成采样点监测、拍照和定量采样作业后,将监测数据和照片实时传输到地面控制基站^[8]。

1.2 水质监测指标测试和评价方法

① 测试方法

实时监测项目包括COD、 $\text{NH}_3 - \text{N}$ 、pH、溶解氧(DO)、电导率、温度等,均采用无人船搭载传感器进

行实时监测。

实验室水质分析项目:化学需氧量采用《水质 化学需氧量的测定 快速消解分光光度法》(HJ/T 399—2007)测定;氨氮采用《水质 氨氮的测定 纳氏试剂分光光度法》(HJ 535—2009)测定;总磷采用《水质 总磷的测定 钼酸铵分光光度法》(GB 11893—1989)测定。

② 评价标准和方法

本次监测按照《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002),采用综合水质标识指数法对河流综合水质进行定性和定量评价^[9]。

2 无人船在张浦镇内河应用试验和数据分析

2.1 张浦镇内河应用试验

2019年6月,在昆山市张浦镇部分内河用无人船进行水质监测、取样工作。此次水质监测内河分为2大部分,总共有12条,总长度大约为14 km。水质监测的指标为溶解氧(DO)、pH、温度、电导率、化学需氧量(COD)、氨氮($\text{NH}_3 - \text{N}$)和总磷(TP)。无人船水质监测实施前,对城市内河进行现场考察。根据城市内河现场的实际情况和设置的监测取样点,规划无人船布放、航行、监测、取样和回收的实施方案。

在进行无人船水质监测时,根据预先制定的实施方案,通过岸边基站把航行路径传输给无人船,无人船自动航行,并在设定的监测、取样点进行监测、取样,监测时长为30 s,取样体积为2 L,取样深度为0.5 m。无人船水质监测数据实时传输回岸边基站,所取水样TP进行实验室测试,COD、 $\text{NH}_3 - \text{N}$ 同样进行实验室测试,对比无人船监测数据。

传统人工进行的河道巡查、监测工作,具有耗时久、效率低和劳动强度大的缺点。人工在城市内河监测的一种方式是在岸边或者一些桥梁上投放取样器获取水样,这容易受到地理位置和天气等条件的限制,造成工作效率较低,工作强度较大,还无法客观、准确地获取水质监测数据。另外一种是人携带大量的监测设备在船只上进行监测、取样,这不仅效率较低,同时增加了作业者的危险性。

相较于传统人工监测的方式,无人船可以根据监测所需,搭载水质监测传感器,通过预先设定的路线,借助卫星定位系统、智能避障系统,自主航行或人工远程控制,完成河道任意位置的水质监测和取样工作,并可以将图像和监测数据实时回传。无人

船在城市内河水质监测的应用中具有智能、绿色、安全和高效率的特点,可以比较完美地解决人工监测存在的问题,并推动河道管理的智慧化、精准化、高效化、数字化、全民化,为城市内河监测和治理提供了强有力的技术支撑。

无人船不仅在日常的河道监测中具有明显优于人工的优势,在一些应急事故中,无人船具备更大的优势,可以迅速对事发场所进行监测。例如天津港爆炸事故、江苏响水爆炸事故、安徽池州东至水污染、甘肃西和尾砂泄漏、河南西峡县淇河水污染等环境应急事故处理中,无人船监测为环保部门治理污染提供了第一手决策依据,为污染治理和智慧环保事业发挥了重要作用。

张浦镇内河无人船监测的流域以及相应取样点见图2。



图2 张浦镇内河水质监测区域

Fig.2 Urban river water quality monitoring area in Zhangpu Town

岸边基站传输给无人船的部分航迹截图如图3所示。

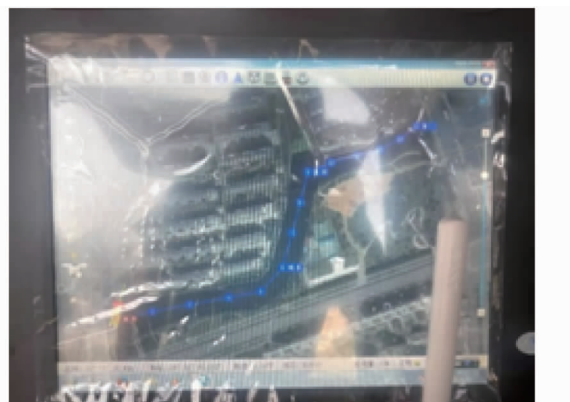


图3 岸边基站中规划的航迹图

Fig.3 Route plan in shore base station

无人船在内河中监测取样现场见图4。



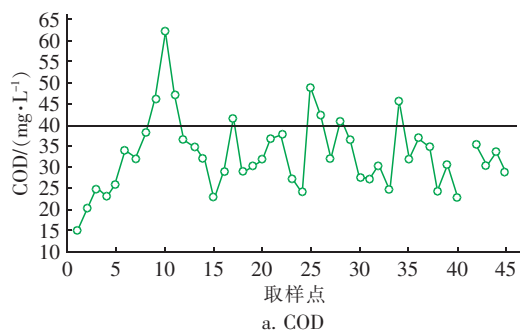
图4 在内河中自主航行监测的无人船

Fig. 4 An unmanned surface vehicle for autonomous navigation monitoring in urban river

表1 监测水样数据对比

Tab. 1 Comparison of monitoring water sample data

对比次数	COD			NH ₃ - N		
	无人船/ (mg · L ⁻¹)	比对值/ (mg · L ⁻¹)	相对误差/%	无人船/ (mg · L ⁻¹)	比对值/ (mg · L ⁻¹)	相对误差/%
1	20.10	18.36	9.48	0.400	0.52	-23.08
2	26.12	22.62	15.47	1.131	1.21	-6.53
3	32.14	28.70	11.99	1.631	1.74	-6.26
4	38.16	36.86	3.53	2.737	2.68	2.13
5	45.68	42.16	8.35	3.416	3.26	4.79
结果评价	合格			合格		



a. COD



b. COD 热点图

图5 取样点的 COD 浓度值和热点图

Fig. 5 COD and hot spot map of monitoring sampling points

2.2 监测数据分析

水样 COD、NH₃ - N 监测数据对比见表1。由表1可以看出,无人船搭载的 COD 和 NH₃ - N 探头的监测数据与实验室分析测试的数据质控比对结果一致性较好。这在一定程度上表明,无人船通过搭载的探头在城市内河自动航行监测中能够满足地表水监测数据的准确度要求,无人船在线监测不仅可以提高地表水监测的效率,同时还具有一定的可靠性和可行性。

图5为张浦镇内河水水质监测取样点的 COD 浓度值和热点图。

由图5可以看出,44个监测取样点中,COD最小值为15.07 mg/L,最大值为62.14 mg/L,超过劣V类标准的有8个监测点,占有监测点的18.18%。从热点图可以明显看出,南范基江和菁华河附近9[#]~11[#]、西横塘江25[#]~26[#]和垌坵江与东横泾交叉的35[#]点附近COD较高。分析原因可能是居民小区梅花苑和菁华时代彩慧苑、锦绣港湾和对岸自然村、玫瑰苑与牡丹苑小区排放的生活污水溢出截污管井,流入附近的河道水体所致,同时在南范基江和菁华河附近仍存在部分居民直接在河水中清洗清洁工具、倾倒生活污水的现象。建议定期对截污管井进行疏浚,避免生活污水溢流到河道之中,同时也要对附近居民进行环保知识的科普宣传工作,提高居民的环保意识。

图6为此次监测取样点的氨氮浓度和热点图。由图6可以看出,44个监测取样点中,氨氮的最小值为0.287 mg/L,最大值为3.975 mg/L,超过劣V类标准的有11个监测点,占有监测点的25%。从热点图可以看出,里巷浜、银河路新开河和西横塘江监测点的氨氮值较高,这和图5中COD浓度较高的部分位置出现重合,原因疑似一致。除此之外,也

不排除银河路新开河、菁华河流段河道中沉积的污泥释放出来的 N、P 重新进入水体,导致水体存在一定的内源污染。针对这种情况,建议在后续河道的治理工作中,不仅要关注河水的外源污染,还要加强内源污染的控制。同时,可以增强此段流域水体的流动与交换,也可以对这部分流域底泥进行一定的疏浚,以降低河水的内源污染负荷。

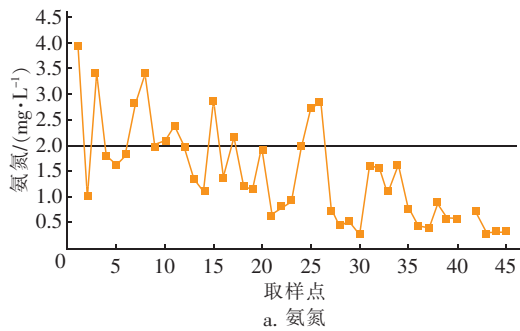


图6 取样点的氨氮浓度和热点图

Fig. 6 $\text{NH}_3 - \text{N}$ and hot spot map of monitoring sampling points

图7为此次监测取样点的TP浓度和热点图。由图7可见,44个监测取样点中,TP最小为0.108 mg/L,最大为0.453 mg/L。TP超过劣V类标准的有2个监测点,占有监测点的4.55%,这就说明,此次无人船水质监测流域的TP指标基本符合地表水V类标准。从热点图可见,银河路新开河、菁华河和西横塘江监测点的TP相对较高,垌坵江及附近流域TP相对较低。分析原因可能是,银河路新开河、菁华河和南范基江附近居住的居民较多,且部分居民具有将生活污水直接倾倒入河水,或者在河水中清洗清洁工具的习惯,导致含磷清洁剂进入水体,且这一部分水体流动较慢,河底污泥中也容易积累氮、磷等营养物质。垌坵江附近的流域两岸基本属于工业园,没有太多居民,同时河水流速较快,水体

交换频繁,氮磷等营养物质也不易沉积、再释放。

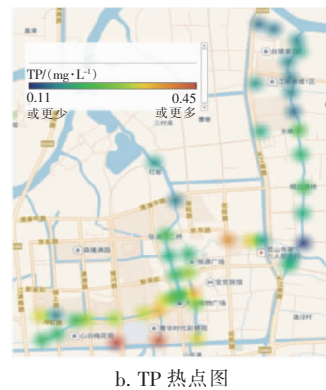
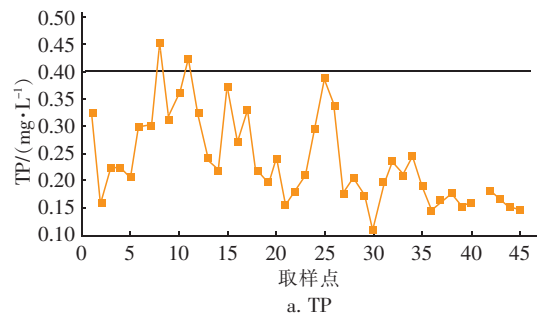


图7 取样点的TP浓度和热点图

Fig. 7 TP and hot spot map of monitoring sampling points

图8为此次监测取样点的pH及热点图。

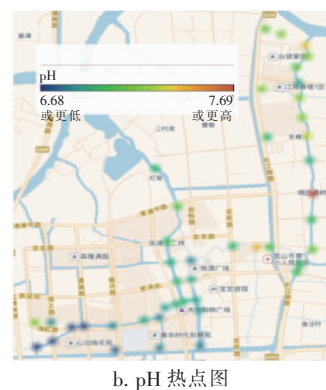
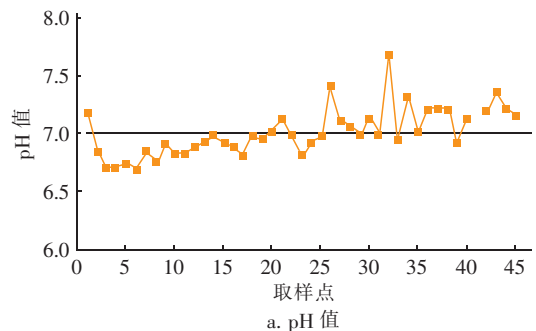


图8 取样点的pH值和热点图

Fig. 8 pH and hot spot map of monitoring sampling points

由图8可以看出,南范基江和西横塘江等流域 pH 值相对较低,基本在 6.6~7.0 左右,而垵垵江等水域 pH 值略高,基本在 7.0~7.5 之间。从 pH 值这个单因素水质指标可以简单地判定,张浦镇相关监测水域水质 pH 值没有异常。

图9为此次监测取样点的 DO 浓度和热点图。

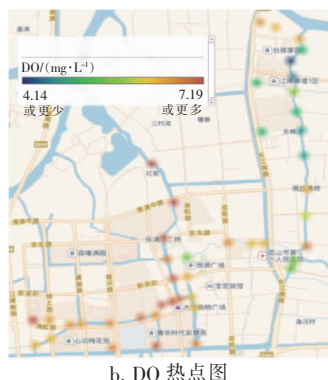
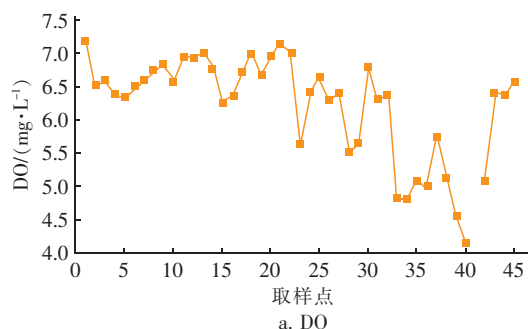


图9 取样点的 DO 浓度和热点图

Fig. 9 DO and hot spot map of monitoring sampling points

由图9可见,南范基江和西横塘江等水域 DO 较高,浓度基本在 6.5~7.5 mg/L,而垵垵江等相关水域 DO 略低一些,浓度基本在 4.5~5.5 mg/L。分析原因可能为,南范基江和西横塘江流域岸边以及水体中的挺水植物和沉水植物相对较多,这些植物在进行光合作用时释放出一定的氧气,溶于河水中。从 DO 单因素水质指标简单判定,张浦镇此次监测内河的水质 DO 属于正常范围,无黑臭问题。

图10为监测取样点的电导率数据和热点图。由图10可以看出,此次监测河道的电导率在 550~750 $\mu\text{S}/\text{cm}$,南范基江流域的电导率波动更小,垵垵江流域的电导率波动更大,分析原因可能为垵垵江附近不同位置存在工业园区,而南范基江附近更多为居民集聚地。从电导率单因素水质指标判定,张浦镇内河水质电导率基本均在正常范围内。

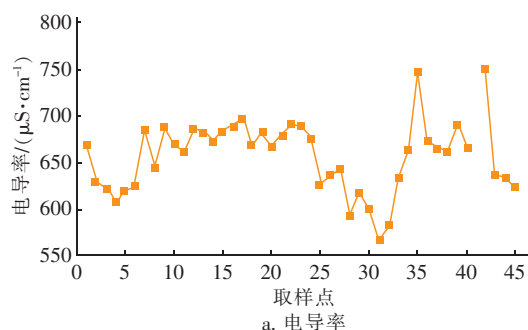


图10 取样点的电导率数据和热点图

Fig. 10 Conductivity and hot spot map of monitoring sampling points

3 结论与建议

① 无人船通过搭载适当的监测传感器,可以克服城市内河周围复杂地理环境所造成的监测困难。无人船搭载探头进行原位监测,可以更加客观、准确和实时地反映城市内河监测区域的水质状况,提高城市内河日常水质的监测和突发情况下应急的反应效率。

② 无人船搭载的 COD 和 $\text{NH}_3 - \text{N}$ 传感器的监测数据与实验室分析测试的数据相对误差在 10% 左右,质控比对结果一致性较好。

③ 按照现有《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)中规定的综合水质标识指数评价方法,无人船水质监测的南范基江、张浦市河和垵垵江等相关水域的水质类别基本为 IV、V 类水。监测数据表明,氨氮和 COD 是主要的污染因子,结合当地情况推测,这可能是由于居民清洗清洁工具、倾倒生活污水和底泥释放的氮、磷等营养物质重新回到水体中所致。

④ 应该加强对附近居民的科普宣传,提高居民的环境保护意识,加强对重点流域的长期监测与综合管理。

参考文献:

- [1] 汤文艳,姚贤宇,潘婷,等. 城市内河水质监测与治理——以长沙市圭塘河为例[J]. 绿色科技, 2016(16):116-118,121.
TANG Wenyan, YAO Xianyu, PAN Ting, *et al.* Water quality monitoring and management of urban inland river—taking Guitang River in Changsha City as an example[J]. Journal of Green Science and Technology, 2016(16):116-118,121(in Chinese).
- [2] 於建明,吴成明,陈哲,等. 宁波市中塘河支流黑臭河道治理与生态修复[J]. 中国给水排水, 2013, 29(4): 64-67, 70.
YU Jianming, WU Chengming, CHEN Zhe, *et al.* Improvement and ecological remediation of malodorous river, Zhongtang River tributary in Ningbo City[J]. China Water & Wastewater, 2013, 29(4): 64-67, 70(in Chinese).
- [3] 王卫星,高奕龙,陈彬彬,等. 无人驾驶自动导航水质监测船[J]. 信息技术与信息化, 2014(5):36-38.
WANG Weixing, GAO Yilong, CHEN Binbin, *et al.* Unmanned automatic navigation water quality monitoring vessel[J]. Information Technology and Informatization, 2014(5):36-38(in Chinese).
- [4] NAEEM W, XU T, SUTTON R, *et al.* The design of a navigation, guidance, and control system for an unmanned surface vehicle for environmental monitoring[J]. Journal of Engineering for the Maritime Environment, 2008, 222(2):67-79.
- [5] 金久才,张杰,邵峰,等. 一种海洋环境监测无人船系统及其海洋应用[J]. 海岸工程, 2015, 34(3):87-92.
JIN Jiucui, ZHANG Jie, SHAO Feng, *et al.* An unmanned surface vehicle for ocean environment monitoring and its oceanic application[J]. Coastal Engineering, 2015, 34(3):87-92(in Chinese).
- [6] MANLEY J E. Unmanned surface vehicles, 15 years of development[J]. Oceans, 2008. DOI: 10.1109/OCEANS.2008.5152052.
- [7] 罗刚,张然. 无人监测船在城市内河水质监测中的应用[J]. 环境监控与预警, 2017, 9(1):18-20, 31.
LUO Gang, ZHANG Ran. Application of unmanned surveillance ship in inland river water quality monitoring[J]. Environmental Monitoring and Forewarning, 2017, 9(1):18-20, 31(in Chinese).
- [8] 郑秀亮. 无人船, 环保领域新利器[J]. 环境, 2016(8):54-56.
ZHENG Xiuliang. Unmanned ship, a new tool in environmental protection field[J]. Environment, 2016(8):54-56(in Chinese).
- [9] 柳超,钱彬杰,王莉元,等. 城市河流黑臭水体综合评价体系的建立及应用[J]. 中国给水排水, 2018, 34(11):73-77, 83.
LIU Chao, QIAN Binjie, WANG Liyuan, *et al.* Establishment and application of comprehensive evaluation system of urban black and odorous rivers[J]. China Water & Wastewater, 2018, 34(11):73-77, 83(in Chinese).

作者简介:赵同强(1982-),男,江苏昆山人,大学本科,工程师,主要从事河道水环境提升、水利水务行业监管以及水资源管理、水行政审批、水政执法等工作。

E-mail:76293321@qq.com

收稿日期:2019-10-08

修回日期:2020-04-17

(编辑:孔红春)

加强水土保持, 打造绿水青山