

DOI: 10. 19853/j. zgjsps. 1000-4602. 2024. 11. 018

城市路面径流量水质原位自动监测系统研究

林博智, 叶雨笑, 张煜, 秦华鹏

(北京大学深圳研究生院环境与能源学院 城市人居环境科学与技术重点实验室,
广东 深圳 518055)

摘要: 针对目前城市路面径流量水质雨水口原位监测存在的径流漫汇流、雨水口空间狭小、环境干扰大和降雨时空随机性等问题,研发了一种基于机械双稳态翻斗结构、结合紫外-可见光谱的城市路面径流量水质雨水口原位自动监测系统,实现了雨水口原位水量水质连续自动监测。率定及评估结果表明,该监测系统可操作性强、空间适应性高,可获取逐分钟雨水口原位水量水质数据,满足径流量为1~200 L/min的监测需求,修正后翻斗动态计量相对误差小于5%,可适用于不同类型降雨径流监测,为城市路面径流雨水口原位监测和径流污染研究提供技术参考。

关键词: 路面径流; 雨水口; 原位; 径流量水质; 自动监测

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2024)11-0121-08

Development and Evaluation of an In-situ Automatic Monitoring System for Urban Pavement Runoff Quantity and Quality

LIN Bo-zhi, YE Yu-xiao, ZHANG Yu, QIN Hua-peng

(Key Laboratory for Urban Habitat Environmental Science and Technology, School of Environment and Energy, Peking University Shenzhen Graduate School, Shenzhen 518055, China)

Abstract: This paper developed an automatic monitoring system for urban pavement runoff quantity and quality at gutter inlets based on a mechanical bistable tip-bucket structure combined with UV-visible light spectrum, which realized continuous automatic monitoring of runoff quantity and quality in-situ at gutter inlets, so as to solve the existing challenges such as runoff confluence, limited space of gutter inlet, significant environmental disturbance and spatio-temporal variability of rainfall. The calibration and evaluation results demonstrated that the monitoring system exhibited robust operability and high spatial adaptability. It was capable of acquiring in-situ runoff quantity and quality data from the gutter inlets every minute, meeting the monitoring requirements for runoff flows ranging from 1 L/min to 200 L/min. The relative error of the modified tipping bucket dynamic measurement was less than 5%, rendering it suitable for monitoring various types of rainfall runoff. The system provided valuable technical guidance for in-situ monitoring of urban pavement runoff at gutter inlets and controlling runoff pollution.

Key words: pavement runoff; gutter inlet; in-situ; runoff quantity and quality; automatic monitoring

基金项目: 深圳市自然科学基金基础研究项目(JCYJ20200109120416654)

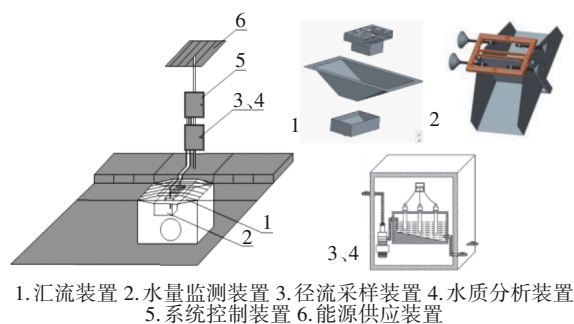
通信作者: 秦华鹏 E-mail: qinhp@pkusz.edu.cn

随着水污染治理技术的发展和点对源污染的持续关注,当前我国城市点源污染控制效果显著,城市面源污染尤其是城市径流污染占比逐年增加^[1-2]。相比于屋面径流、庭院径流等径流污染,交通活动频繁的路面径流因汽车尾气排放、轮胎和路面磨损等产生大量的悬浮颗粒物、重金属污染物和氮磷营养物质,严重威胁城市水环境安全^[3-5]。当前城市路面径流水量水质数据主要来自雨水口人工监测和雨水管网流速计、水质探头等设备监测,但传统人工监测费时费力,而且降雨时间和空间具有随机性,难以实现城市降雨径流连续、自动监测^[6-9];此外,不同下垫面、不同用地类型的径流污染规律不尽相同^[10-13],而雨水管网内设备监测无法准确识别各类型路面径流污染特征,加之市政雨水口空间狭小、环境干扰大,导致堰槽、流速计等当前常用水量水质监测设备在雨水口原位安装困难、测量误差大^[14-16],造成目前城市路面径流水量水质雨水口原位监测数据难以连续自动获取,无法满足径流污染特征识别和海绵城市建设效果评估需求。鉴于此,笔者研发了一种基于机械双稳态翻斗结构、结合紫外-可见光光谱的城市路面径流水量水质雨水口原位自动监测系统,以满足路面径流雨水口原位自动监测需求,阐述了该系统的结构组成与工作过程,进行了系统率定实验,并以校园路面为例对该监测系统进行实地应用,以评估其实际效果。

1 雨水口原位自动监测系统开发

1.1 系统的结构与工作过程

城市路面径流水量水质雨水口原位自动监测系统如图1所示,主要由6部分组成,包括汇流装置、水量监测装置、径流采样装置、水质分析装置、系统控制装置和能源供应装置,是由传感技术、测量技术、分析技术等组成的综合性系统。



a. 监测系统组成



b. 监测系统实物

图1 监测系统的组成与实物

Fig.1 Composition and real picture of monitoring system

汇流装置由径流收集器、多功能汇流口和径流衔接池组成。其中,径流收集器尺寸契合市政雨水口,适应雨水口空间狭小的特性,针对径流漫汇流特性,对路面径流进行有效汇聚,并实现径流传送;多功能汇流口可以阻隔径流杂质,防止其堵塞测量装置,同时蓄积径流至水位检测探头检测水位,为水质采集积累原始径流;径流衔接池用于承接径流,衔接径流至下方的水量监测装置,对来自上方的径流起到缓冲作用,提高测量精度和安装便利性。汇流装置各部件相互配合来完成路面径流初期收集任务。

水量监测装置又称悬挂式翻斗流量计,包括主体支架和翻斗装置。主体支架具体包括顶部、侧部和底部支架,可同其他部件共同发挥调平、缓冲、支撑、固定作用。悬挂式翻斗流量计基于机械双稳态翻斗结构,利用计量斗对来自径流衔接池的径流自动连续地进行已知体积分割处理,自主设计的翻转轴承结构保证水量监测装置循环往复翻转,并根据计量斗重复充满、排放的次数和时间计量径流量^[17-18],通过计量传感装置和数据采集装置完成数据实时记录、上传,实现城市路面径流水量雨水口原位自动监测,获取分钟级径流水量数据。悬挂式翻斗流量计单侧计量斗的最大量程为5 L,并且可以根据实际监测需求调节单侧计量斗的量程。悬挂式翻斗流量计的主体支架与翻斗装置等部件均为自主原创。

径流采样装置用于配合汇流装置完成路面径流定期采样工作,以待水质分析装置分析,其中采样泵为直流切割式污水泵,内设旋转刀片进一步处理杂质;流通池有内部斜面、双出水口和虹吸装置,确保及时排净径流。

水质分析装置依托紫外-可见光多光谱传感器,对采集至流通池的径流水样进行实时分析,经由通讯技术将监测数据储存至系统控制装置中工控机内置软件,实现城市路面径流雨水口水质原位自动监测,获取分钟级径流水质数据。其中,紫外-可见光多光谱传感器采用中国环境监测总站检测通过的HR-UVS型紫外吸收水质在线分析仪。HR-UVS可对径流水样实时扫描获取200~730 nm、分辨率为2.5 nm的紫外-可见光全波段吸收光谱,并结合内置水质模型计算径流水样的浊度和COD,其中,浊度测定量程为0~2 000 NTU, COD测定量程为0~1 000 mg/L。

系统控制装置包括工控机、水位检测探头、水位控制器和无线远程组件等,对径流收集器中的径流水位进行实时检测、调控,并通过4G技术实现径流数据实时显示、查询等功能;可根据实际监测需求,调节采样周期、分析周期和水质指标等参数。能源供应装置因考虑到市电接通不便、存在安全隐患等现实因素,遂采用太阳能集成方式供应,包括太阳能电池板、数显控制器和锂电池;功耗测试结果表明,该监测系统功耗小,120 A·h太阳能满电状态可满足7 d以上降雨监测。该监测系统目前已申请国家专利^[17],其结构见图2。

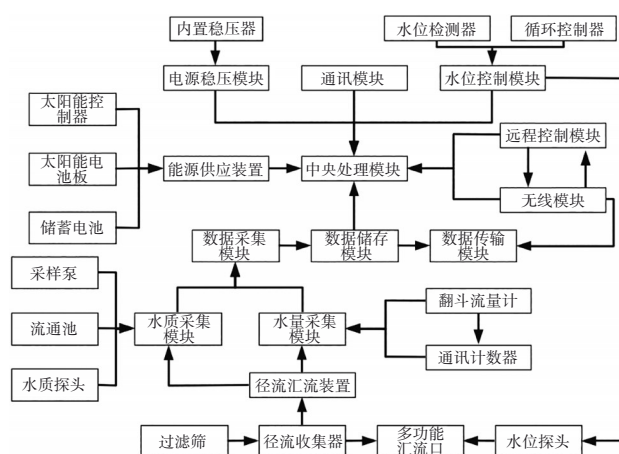


图2 监测系统结构示意图

Fig.2 Structure of the monitoring system

监测系统工作过程如下:监测点附近发生降雨后,汇水区域产流并汇流至雨水口,径流收集器格栅阻隔径流携带的杂质和落叶,携带固态颗粒物和少许杂质的路面径流进入径流收集器,多功能汇流口格栅进一步过滤杂质,确保可见杂质阻隔在外。

路面径流逐渐蓄积至水位检测探头预设启动高度,电信号传递至水位控制器,在水位控制器和循环控制器配合下,径流采样泵开始工作,径流水样进入流通池后,水质分析探头实时分析径流水质参数,并将水量水质数据储存至后台。本周期水质分析结束后,采样泵开启下周期进样,监测水样在斜面、虹吸等作用下排出流通池。降雨减小导致径流水位降低,径流水位低于预设水位后,水位控制器和循环控制器调节系统,采样泵停止工作,当径流水位再次达到预设高度,重复上述过程,以完成城市路面径流水量水质雨水口原位自动监测工作。

基于汇流、水量监测装置规格可调性和径流采样、能源供应等装置立杆安装方式,该监测系统可适用于多种符合《室外排水设计标准》(GB 50014—2021)规定的市政雨水口。一般来说,雨水口内部无严重破损或墙壁老化、雨水口外部可安装立杆时,均可实现监测系统的正常安装使用。然而,对于排水不畅的雨水口,当内部雨水高度超过翻斗流量计计量斗最低位置时,可能会影响其计量精度;对于堵塞程度严重的雨水口,甚至会导致翻斗流量计无法正常翻转;同时,对于径流泥沙含量过高、路面落叶等大型杂质过多的汇水区域,可能会因汇流装置、径流采样装置堵塞造成监测精度下降或发生故障。因此,在应用该监测系统前,研究人员在选取研究区域监测点位时,需要针对研究区域的实际情况进行合理判断,以确保所选点位满足系统长期稳定监测条件。

1.2 系统的率定

城市路面径流水量水质雨水口原位自动监测系统的监测精度受监测原理、系统结构、径流特性的影响,水量监测装置中翻斗翻转存在动态系统误差 W , W 与计量斗预设重量 G 的比值 E 为翻斗动态计量相对误差, E 的影响因素包括径流流入冲击力、翻斗部件安装角、计量斗预设重量等^[18-19];水质监测装置中紫外-可见光多光谱传感器标准物质的检测性能直接影响水质监测效果^[20]。通过减少翻转部件安装角、增加计量斗容积、降低翻转摩擦力矩等机械措施能够在一定程度降低监测误差,但无法彻底消除误差,因此对于机械措施无法优化的误差,可以采用误差分析实验加以率定。

采用实流校准法率定不同设计径流量下水量监测装置的测量精度,确定翻斗流量计的适用范

围,并拟合不同径流量误差曲线,以修正水量监测精度。以汇水面积为100 m²时梯度降雨强度产生的径流量为设计值,以水量监测装置测定的径流量为实测值,将两者进行对比分析,拟合梯度径流量下水量监测装置的误差曲线。其中设计降雨强度为0.01~2.00 mm/min,即设计径流量为1~200 L/min,以此来率定翻斗流量计的监测精度。

采用样品校准实验来率定水质监测精度时,首先,通过检测标准溶液,对比传感器实测值与标准值,构建标准曲线,调整传感器参数;其次,人工采集自然降雨路面径流进行实验室分析,对比实验室分析结果与水质装置监测结果,率定实际路面径流监测下水质装置精度。

翻斗动态计量相对误差 $E_{i,j}$ 计算公式如下:

$$E_{i,j} = \frac{M'_{i,j} - M_{i,j}}{M'_{i,j}} \times 100\% \quad (1)$$

式中: $E_{i,j}$ 为第*i*个设计径流量下第*j*次实验的相对误差,%; $M_{i,j}$ 为第*i*个设计径流量下第*j*次实验中翻斗流量计的实测径流量,L; $M'_{i,j}$ 为第*i*个设计降雨强度下第*j*次实验的设计径流量,L。

2 雨水口原位自动监测系统评估方案

2.1 监测点位布置方案

为评估城市路面径流量水质雨水口原位自动监测系统的实际应用效果,在深圳市南山区大学城内安装监测系统,监测点位的雨水口内部完整无破损,空间尺寸符合《室外排水设计标准》(GB 50014—2021),可实现水量监测装置的安装,满足雨水口原位自动监测条件。

2.2 采样方案

人工采样采用“先密后疏”的方式,将样品采集至聚乙烯瓶中,根据实际降雨产流情况适当调整采样频率和数量,确保场次降雨径流水样数量为7~10个,记录产流时间及各径流水样采集时间,采样完成后立即将样品运回实验室,放于-20℃冰箱中冷藏保存^[14-16]。

2.3 气象监测方案

气象数据来源包括监测点位附近的小型气象站和深圳市气象局发布的桃源街道自动站监测数据。其中,小型气象站降雨监测设备为JDZ型翻斗式雨量计,降雨数据采集周期为1 min,降雨强度分辨率为0.2 mm/min;桃源街道自动站降雨数据采集周期为5 min,降雨强度分辨率为0.1 mm/min。

3 结果与分析

3.1 监测系统的率定结果与分析

水量率定实验结果表明,在设计径流量为1~200 L/min的情况下,实测径流量均小于设计径流量,率定结果与理论分析一致,主要是由翻斗流量计翻转时径流损失导致的翻斗动态计量相对误差,梯度设计径流量率定结果如图3所示。

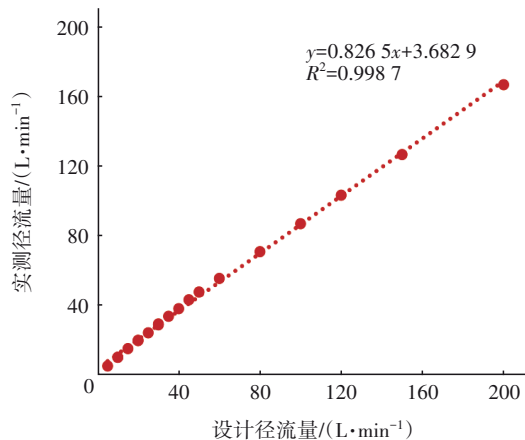


图3 径流量率定实验结果

Fig.3 Runoff quantity calibration experiment results

根据式(1)分析梯度设计径流量翻斗动态计量相对误差 E 可知,在设计径流量为1~200 L/min的情况下,翻斗动态计量相对误差 E 随设计径流量的减小而逐渐降低。其中,当设计径流量 ≤ 4 L/min时,监测效果较好,监测误差 $< 1\%$;当设计径流量 ≤ 10 L/min时,监测误差均在5%以下;当设计径流量为10~60 L/min时,监测误差在10%以下,表现出较高的准确性;在设计径流量高达150、200 L/min的情况下,监测误差仍然在20%以下。翻斗流量计良好的水量监测性能得益于翻转部件安装角、摩擦力矩的降低以及计量斗大容积等机械措施。

通过拟合设计径流量与实测径流量得到如下线性关系: $y = 0.8265x + 3.6829$, $R^2 = 0.9987$,拟合效果显著,可作为误差分析曲线对 E 加以修正,修正后在设计径流量为1~200 L/min的情况下,测量误差均小于5%。综上,对于汇水面积为100 m²、降雨强度为0.01~2.00 mm/min(0.6~120 mm/h)的城市路面,水量监测装置实测径流量相对误差绝对值可保持在5%以内,即能够有效满足城市路面径流量 ≤ 200 L/min时雨水口原位自动监测任务。

水质率定实验结果表明,紫外-可见光多光谱传感器中浊度和COD参数标准曲线的 R^2 均在0.99

以上;对于人工采集的降雨径流水样,水质传感器的检测结果整体小于实验室检测结果,主要是由传感器与实验室检测原理不同引起的,绘制实验室检测值与传感器检测值的关系图并进行线性拟合,两者的拟合曲线 R^2 均在 0.89 以上(见图 4),可满足城市路面径流水质雨水口原位自动监测任务需求。

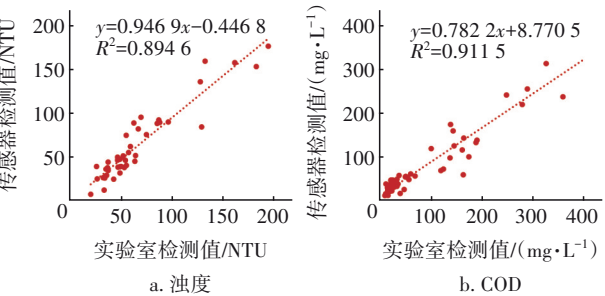


图 4 水质率定实验结果

Fig.4 Runoff quality calibration experiment results

3.2 监测系统的评估结果与分析

采用监测系统对 2022 年 5 月—9 月监测点位路面径流进行雨水口原位自动监测。2022 年 5 月—9 月共降雨 54 场,其中 25 场日降雨量 $<2\text{ mm}$ 未产生汇流,19 场因仪器设备调试未进行监测,其余 10 场完成了有效连续监测。10 场有效监测的降雨和径流特征见表 1,其中包含 1 场小雨、4 场中雨、3 场大雨和 2 场暴雨,降雨量为 $8.3\sim71.8\text{ mm}$,降雨历时为 $22\sim750\text{ min}$,雨前干旱期为 $0.5\sim28\text{ d}$,总径流量为 $0.290\sim3.509\text{ m}^3$,峰值径流量为 $8.4\sim130.0\text{ L/min}$,峰值径流量均在翻斗流量计可测范围内。

总降雨量是总径流量的重要影响因素,场次降雨量与场次径流量的关系如图 5 所示。可知,总径流量与总降雨量的变化趋势一致,场次径流量随场次降雨量的增加而增加,呈现明显的线性关系,两者的关系符合: $y=0.757\ 4x-1.465\ 4$, $R^2=0.89$ 。

表 1 降雨和径流特征

Tab.1 Characteristics of rainfall and runoff

降雨事件	降雨日期	总降雨量/mm	降雨历时/min	平均降雨强度/(mm·min ⁻¹)	峰值降雨强度/(mm·min ⁻¹)	总径流量/m ³	平均径流量/(m ³ ·h ⁻¹)	峰值径流量/(L·min ⁻¹)	雨前干旱期/d	降雨类型
R1	2022-05-27	29.0	210	0.14	1.00	1.330	0.380	39.2	12	大雨
R2	2022-06-08	71.8	420	0.17	0.76	3.509	0.501	47.7	11	暴雨
R3	2022-07-02	66.2	750	0.09	0.60	2.960	0.237	37.2	18	暴雨
R4	2022-08-02	24.8	160	0.16	1.68	1.170	0.439	120.0	28	中雨
R5	2022-08-03	20.0	180	0.11	0.68	0.955	0.318	57.0	0.5	中雨
R6	2022-08-04	40.0	390	0.10	0.24	0.972	0.150	8.4	0.5	大雨
R7	2022-08-09	36.0	300	0.12	0.68	1.161	0.232	28.8	3	大雨
R8	2022-08-28	8.3	22	0.38	1.20	0.290	0.791	45.0	3	小雨
R9	2022-08-29	18.5	32	0.58	2.60	0.875	1.641	130.0	0.5	中雨
R10	2022-08-31	23.1	64	0.36	1.80	1.245	1.167	110.0	1	中雨

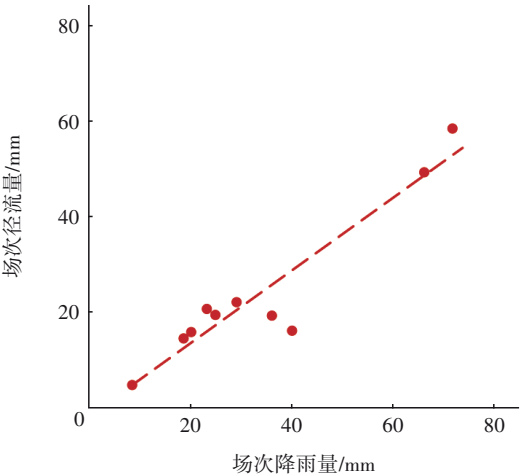


图 5 场次降雨量与场次径流量的关系

Fig.5 Relationship between rainfall and runoff

结合 10 场有效降雨径流监测数据及 25 场总降雨量 $<2\text{ mm}$ 未产流降雨数据可知,水量水质雨水口原位自动监测系统的水量监测评估效果显著,具有良好的监测性能。

以 R2 (2022-06-08)、R7 (2022-08-09)、R8 (2022-08-28) 3 场降雨事件为例,绘制径流量、浊度、COD 与降雨强度的关系图,并对比 R7 降雨事件中浊度和 COD 传感器检测数据与实验室检测数据,综合评估系统对径流量、浊度、COD 的实际监测效果,结果如图 6 和图 7 所示。由图 6 可知,R2 为双峰降雨、R7 为多峰降雨、R8 为单峰降雨,3 场降雨的最大径流量分别为 47.7 、 28.8 和 45.0 L/min ,均在水量监测装置的测量范围内($1\sim200\text{ L/min}$);分析场次

径流量与降雨量动态变化过程发现,水量监测装置能适应雨水口径流变化,相对误差绝对值保持在5%以内,可精准监测雨水口流量全过程。

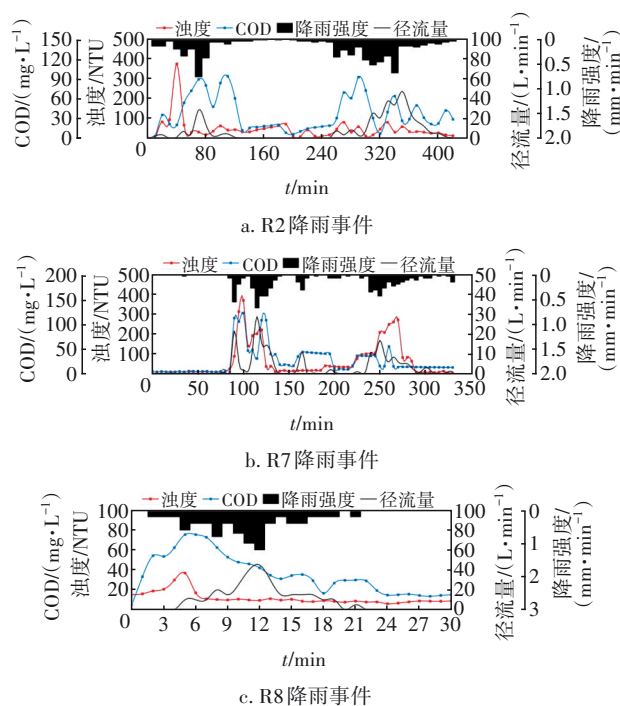


图6 降雨径流的水质水量同步监测结果

Fig.6 Synchronous monitoring results of quality and quantity of rainfall runoff

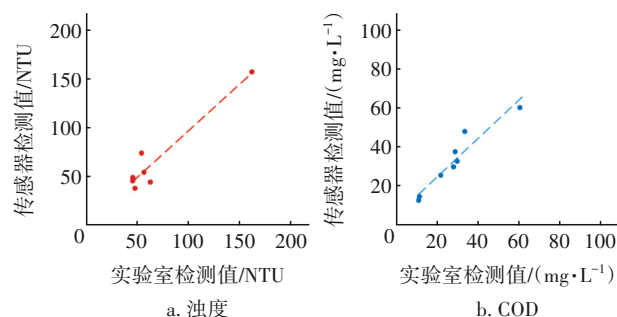


图7 R7降雨事件中浊度和COD传感器检测值与实验室检测值的关系

Fig.7 Relationship between sensor and laboratory detection values of turbidity and COD in R7 rainfall events

分析图6和图7可知,降雨径流的浊度和COD瞬时浓度受降雨强度的影响,浓度峰值出现在降雨初期或降雨峰值附近;R7降雨事件中浊度和COD传感器检测值与实验室检测值的相关系数分别为0.920 9、0.911 6,呈高度相关性,表明水质分析装置可准确监测路面雨水口径流的浊度和COD浓度变化。

此外,分析其余场次降雨监测数据发现,无论对不同雨量、雨型、降雨历时还是不同雨前干旱期类型的降雨,城市路面径流水量水质雨水口原位自动监测系统均表现出良好的监测性能,可连续监测路面径流的水量水质,自动获取分钟级雨水口原位径流数据,满足城市径流污染监测需求。

4 结论

① 研发了一种城市路面径流水量水质雨水口原位自动监测系统,由契合路面雨水口的汇流装置、基于机械双稳态翻斗结构的水量监测装置、结合光谱传感技术的水质分析装置、智能化系统控制装置和径流采样装置等构成,解决了城市路面径流雨水口原位监测中径流漫汇流、空间狭小、环境干扰大等问题,具备雨水口原位、连续、自动监测能力,具有空间适应性高、监测频次高等优点。

② 径流水量水质率定实验与评估结果表明,该系统能获取逐分钟水量监测数据,满足1~200 L/min径流量的监测需求,翻转部件安装角、摩擦力矩的降低以及计量斗大容积等机械措施效果显著,翻斗动态计量相对误差绝对值<5%;对于人工采集的降雨径流水样,紫外-可见光多光谱传感器的检测结果整体小于实验室检测结果,两者拟合的 R^2 均在0.89以上。

③ 城市路面径流水量水质雨水口原位自动监测系统可适用于不同雨量、雨型、降雨历时和雨前干旱期的降雨径流监测,有效克服了降雨径流时空随机性,可应用于自然降雨下路面径流水量水质雨水口原位监测,为城市路面径流水量水质监测提供技术支持,以更好地服务于城市径流污染管理和海绵城市建设工作。

参考文献:

- [1] 杨默远, 潘兴瑶, 刘洪禄, 等. 基于文献数据再分析的中国城市面源污染规律研究[J]. 生态环境学报, 2020, 29(8): 1634-1644.
YANG Moyuan, PAN Xingyao, LIU Honglu, et al. Urban non-point pollution characteristics in China: a meta-analysis[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2020, 29(8): 1634-1644 (in Chinese).
- [2] 牛司平, 袁庆科, 金永喆. 高速公路路面雨水径流污染物排放特征研究[J]. 环境科学学报, 2020, 40(9): 3311-3322.

- NIU Siping, YUAN Qingke, KIM Youngchunl. Characterization on the discharge of pollutants present in highway stormwater [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2020, 40(9): 3311–3322 (in Chinese).
- [3] 潘欣荣, 左剑恶, 张宇, 等. 廊坊市区径流污染时空分布特征及来源解析[J]. *环境科学*, 2022, 43(2): 795–802.
- PAN Xinrong, ZUO Jian'e, ZHANG Yu, *et al.* Temporal and spatial distribution characteristics and source apportionment of runoff pollution in Langfang City [J]. *Environmental Science*, 2022, 43(2): 795–802 (in Chinese).
- [4] 赵晓佳, 王少坡, 于贺, 等. 天津中心城区典型下垫面降雨径流污染冲刷特征分析[J]. *环境工程*, 2019, 37(7): 34–38, 87.
- ZHAO Xiaojia, WANG Shaopo, YU He, *et al.* Analysis on characteristics of rainfall runoff pollutants flush of typical underlying surfaces in Tianjin central city [J]. *Environmental Engineering*, 2019, 37(7): 34–38, 87 (in Chinese).
- [5] 吴民山, 李思敏, 张文强, 等. 天津滨海临港工业园区径流污染特征及其控制策略[J]. *环境工程学报*, 2020, 14(12): 3435–3446.
- WU Minshan, LI Simin, ZHANG Wenqiang, *et al.* Pollution characteristics and control strategies of runoff in Tianjin Binhai Lingang Industrial Park [J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2020, 14(12): 3435–3446 (in Chinese).
- [6] 张强, 王美荣, 张书函, 等. 城市降雨径流监测自动采样技术研发与应用[J]. *环境工程*, 2020, 38(4): 141–144, 150.
- ZHANG Qiang, WANG Meirong, ZHANG Shuhan, *et al.* Development of an automatic sampling technology for urban rainfall runoff quality monitoring and its application [J]. *Environmental Engineering*, 2020, 38(4): 141–144, 150 (in Chinese).
- [7] 刘京, 刘廷良, 刘允, 等. 地表水环境自动监测技术应用与发展趋势[J]. *中国环境监测*, 2017, 33(6): 1–9.
- LIU Jing, LIU Tingliang, LIU Yun, *et al.* Application and development trend of automatic monitoring technology for surface water environmental quality [J]. *Environmental Monitoring in China*, 2017, 33(6): 1–9 (in Chinese).
- [8] WANG Z B, QI F, LIU L Y, *et al.* How do urban rainfall-runoff pollution control technologies develop in China? A systematic review based on bibliometric analysis and literature summary [J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 789: 148045.
- [9] 许莉, 余凯华, 丁敏, 等. 初期雨水水质水量在线监测系统优化及初步应用[J]. *中国给水排水*, 2014, 30(13): 110–114.
- XU Li, YU Kaihua, DING Min, *et al.* Optimization and preliminary application of initial rainwater on-line monitoring system [J]. *China Water & Wastewater*, 2014, 30(13): 110–114 (in Chinese).
- [10] 岳桢铨, 李一平, 周玉璇, 等. 南宁市老城区降雨径流溯源及污染特征分析[J]. *环境科学*, 2022, 43(4): 2018–2029.
- YUE Zhenwu, LI Yiping, ZHOU Yuxuan, *et al.* Analysis on the source tracing and pollution characteristics of rainfall runoff in the old urban area of Nanning City [J]. *Environmental Science*, 2022, 43(4): 2018–2029 (in Chinese).
- [11] 李曼, 曲直, 刘佩勇, 等. 基于人工降雨的北方城市道路径流污染特征研究[J]. *中国给水排水*, 2020, 36(21): 110–114.
- LI Man, QU Zhi, LIU Peiyong, *et al.* Characteristics of urban road runoff pollution in northern city based on artificial rainfall test [J]. *China Water & Wastewater*, 2020, 36(21): 110–114 (in Chinese).
- [12] 徐宇婕, 龚玥敏, 毕军鹏, 等. 宁波市典型城市下垫面雨水径流污染特征解析[J]. *环境科学*, 2020, 41(7): 3275–3284.
- XU Yujie, GONG Yuemin, BI Junpeng, *et al.* Analysis of rainwater runoff pollution characteristics of various typical underlying surfaces in Ningbo [J]. *Environmental Science*, 2020, 41(7): 3275–3284 (in Chinese).
- [13] 何梦男, 张劲, 陈诚, 等. 上海市淀北片降雨径流过程污染时空特性分析[J]. *环境科学学报*, 2018, 38(2): 536–545.
- HE Mengnan, ZHANG Jin, CHEN Cheng, *et al.* Analysis of the temporal and spatial characteristics of rainfall-runoff pollution in Dianbei basin of Shanghai [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2018, 38(2): 536–545 (in Chinese).
- [14] 田欢, 王文海, 李芸, 等. 雨水口径流流量计量方法的研究及应用[J]. *环境工程*, 2016, 34(12): 12–16, 22.
- TIAN Huan, WANG Wenhai, LI Yun, *et al.* The research and application of a method for flow

- measurement of runoff in inlet for stormwater [J]. *Environmental Engineering*, 2016, 34(12): 12–16, 22 (in Chinese).
- [15] 贾高峰, 王文海, 李俊奇, 等. 薄壁堰式智能流量监测装置的设计及其应用[J]. *环境工程*, 2019, 37(7): 88–92.
- JIA Gaofeng, WANG Wenhai, LI Junqi, *et al.* Design and application of intelligent measure and control system in the form of thin-wall weir [J]. *Environmental Engineering*, 2019, 37(7): 88–92 (in Chinese).
- [16] 张健, 覃翠, 余辉龙, 等. 浸入式双束多普勒流量计在污水管网流量监测中的应用[J]. *给水排水*, 2016, 42(2): 101–104.
- ZHANG Jian, QIN Cui, YU Huilong, *et al.* Application of immersed double-beam doppler flow meter in monitoring sewerage flow rate in drainage network [J]. *Water & Wastewater Engineering*, 2016, 42(2): 101–104 (in Chinese).
- [17] 林博智, 秦华鹏, 叶雨笑, 等. 一种基于悬挂式翻斗的城市雨水口流量自动监测装置: 202122338929. 3[P]. 2022–03–11.
- LIN Bozhi, QIN Huapeng, YE Yuxiao, *et al.* The Utility Model Relates to an Automatic Monitoring Device for Urban Stormwater Flow Based on Hanging Tipper: 202122338929. 3[P]. 2022–03–11 (in Chinese).
- [18] 廖敏涵, 刘九夫, 廖爱民, 等. 翻斗式雨量计左右斗平衡判别方法[J]. *仪器仪表学报*, 2020, 41(5): 58–65.
- LIAO Minhan, LIU Jiufu, LIAO Aimin, *et al.* Judgement method for left and right bucket balance of tipping bucket rain gauge [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2020, 41(5): 58–65 (in Chinese).
- [19] 李薛刚, 刘九夫, 廖爱民, 等. 八种国内翻斗式雨量计翻斗计量误差测评分析[J]. *水电能源科学*, 2019, 37(6): 160–163, 79.
- LI Xuegang, LIU Jiufu, LIAO Aimin, *et al.* Evaluation of measurement errors for eight domestic tipping bucket rain gauges [J]. *International Journal Hydroelectric Energy*, 2019, 37(6): 160–163, 79 (in Chinese).
- [20] YU Q J, YIN H, WANG K, *et al.* Adaptive detection method for organic contamination events in water distribution systems using the UV-Vis spectrum based on semi-supervised learning [J]. *Water*, 2018, 10(11): 1566.

作者简介: 林博智(1997–), 男, 河北秦皇岛人, 硕士研究生, 主要研究方向为城市下垫面面源污染监测分析。

E-mail: 13388012550@163.com

收稿日期: 2023–02–21

修回日期: 2023–05–09

(编辑: 刘贵春)

尊重自然界河流生存的基本权利,
把河流视作生命体, 建构河流伦理,
维护河流健康生命, 实现人与河流和谐共生