

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2022.01.014

城市暴雨道路积水监测技术及其应用进展

栾清华^{1,2}, 秦志宇¹, 王东³, 刘家宏³, 付潇然³

(1. 河北工程大学河北省智慧水利重点实验室, 河北 邯郸 056038;

2. 河海大学洪涝灾害风险预警与防控应急管理部重点实验室, 江苏 南京 210098;

3. 中国水利水电科学研究院流域水循环模拟与调控国家重点实验室, 北京 100038)

摘要:针对日益频发的极端暴雨事件使得城市道路积水的问题,为获得及时准确的积水数据,从道路积水监测技术层面,梳理了人工监测、传感器监测、遥感和视频影像监测的技术原理及相关改进,对比分析了不同传感器监测的优缺点。在此基础上,总结了道路积水监测技术的应用情况,并就未来发展趋势进行了展望。分析认为,道路积水监测需充分利用现有的视频设备、改进遥感水体识别技术、构建多源立体监测网以及基于海量监测数据的雨洪物理-数字耦合模型等方面开展研发和应用,全方位提高城市的雨洪预警水平和能力。

关键词:城市暴雨;道路积水;监测技术;传感器监测;遥感影像识别;视频图像识别

中图分类号:TP291 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-6933(2022)01-0106-11

Review on monitoring technology of urban road waterlogging after rainstorm and its application // LUAN Qinghua^{1,2}, QIN Zhiyu¹, WANG Dong³, LIU Jiahong³, FU Xiaoran³ (1. Hebei Key Laboratory of Intelligent Water Conservancy, Hebei University of Engineering, Handan 056038, China; 2. Key Laboratory of Flood Disaster Prevention and Control of the Ministry of Emergency Management in China, Hohai University, Nanjing 210098, China; 3. State Key Laboratory of Simulation and Regulation of Water Cycle in River Basin, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China)

Abstract: Aiming at the problem of urban road waterlogging caused by the increasingly frequent extreme rainstorm events, in order to get timely and accurate water accumulation data, the technical principles and related improvements of manual monitoring, sensor monitoring, remote sensing and video image monitoring were combed from the technical level of road waterlogging monitoring technology. Advantages and disadvantages of different sensors and monitors were compared and analyzed. On this basis, the application of road waterlogging monitoring technology was summarized, and the future development trend was prospected. The analysis shows that the road waterlogging monitoring needs to make full use of the existing video equipment, improve the remote sensing water body identification technology, build a multi-source three-dimensional monitoring network and the physical digital coupling model of rain and flood based on massive monitoring data, so as to improve the level and ability of rain and flood early warning in the city in an all-round way.

Key words: urban rainstorm; road waterlogging; monitoring technology; sensor monitoring; remote sensing image recognition; video image recognition

2021年郑州“7·20”特大暴雨和北京“8·16”短时强降雨事件再次唤起民众对城市暴雨内涝的关注,并引发了对城市内涝灾害预警预案的思考^[1]。同一时期,美国纽约曼哈顿街区、德国西部地区和日本岛根县均经历了大暴雨,洪水灌入地铁和下穿隧道,城市道路变成行泄通道,造成财产损失和民众伤

亡。突发的暴雨事件,使得决策者不仅要从宏观上对区域整体内涝风险进行快速评估,还要针对具体易涝点进行预警,有的放矢制定相应的预警方案。近年来,采用非工程措施来降低城市极端降雨内涝灾害损失的重要性被不断提及,国内外许多学者通过建立精确的物理模型来实现上述管理需求^[2-4];

基金项目:河北省重点研发计划(20375401D);国家自然科学基金(51809078)

作者简介:栾清华(1978—),女,教授,博士,主要从事水文学及水资源研究。E-mail: carol97011202@163.com

通信作者:刘家宏(1977—),男,正高级工程师,博士,主要从事水文学及水资源研究。E-mail: liujh@iwhr.com

随着信息收集和传输的飞速发展,一些学者尝试采用深度学习等技术算法分析挖掘数据间的潜在联系,并构建数据驱动模型来反映城市暴雨内涝问题^[5-7]。然而城市地表空间有限,地下空间也布满了各种管道、地铁等基础设施,要想实现精细化分析,充足准确的数据和本底资料非常关键^[8-9]。道路交通作为城市基础设施的重要组成部分,必然是预警、预案涉及的一个重要方面,监测分析不同暴雨过程下的道路积水分布及特征成为城市洪涝预警和预案设计的关键内容^[10-11]。此外,我国尚未大面积开展城市雨水管网的实时监测,在率定和验证区域雨洪管理模型时,借助道路积水监测数据也是一种有效的解决途径^[12-14]。本文立足上述城市暴雨内涝灾害防治的需求背景,在总结归纳道路积水不同监测技术原理及优缺点的基础上,阐述各技术在城市内涝预警中的应用情况,进而探究其发展趋势,以期其他学者和管理者在城市内涝模拟及预警方面提供借鉴和参考。

1 道路积水监测技术

1.1 人工监测技术

城市雨水排放的概念很早就有过记载,如古罗马的地下管网系统和我国赣州的福寿沟^[15-16]。早期的城市排水或积水监测主要是采用水尺等工具,人工测量水深(图1)。按照测量要素的不同又可分为现场实时监测和最大积水深度踏勘。现场实时监测是指在城市易涝点派专人蹲守,通过设立的水尺记录下整场降雨的水位变化过程;内涝最大积水深度踏勘是指通过实时测量或事后补测的方法获取数据,一般多次读数后取其平均值。最大积水深度踏

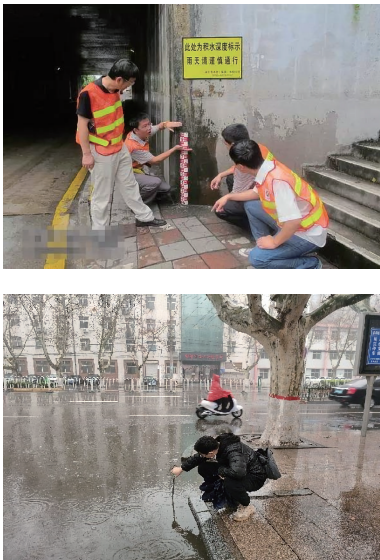


图1 人工道路积水监测
Fig.1 Manual road waterlogging monitoring

勘能直观地获取水位数据,是较为准确可靠的单点监测方法,在监测固定积水点的基础上,可根据不同降雨内涝的实际情况,充分发挥人的能动性,采用人工实地测量和勘察,灵活补充测点以弥补单点固定监测的不足,因此也常用于校核自计水位装置。然而该方法的自动化程度较低,且读数误差、时间耗费和人员风险也是难以避免的问题^[17]。单靠人工记录获取监测点的积水深度、积水过程线并通过电话短信上报的形式,已不能满足城市内涝快速预警预案的需要^[18]。

1.2 传感器监测技术

随着电子设备的更新,水位监测开始从人工向自动化转变,目前大多数城市通过布设水位传感器^[19-20],建立基于传感器的道路积水监测系统来实现数据采集、传输、存储模块与水位传感器的紧密结合^[21-22]。按测量方式的不同,水位传感器可分为接触式和非接触式,其中,接触式又分为电子水尺和压力式水位传感器2类;非接触式又分为超声波、红外光、雷达和激光水位传感器4类。

1.2.1 接触式

电子水尺(电极式)主要运用水的微弱导电性原理获取数据,其长度一般有8 cm、12 cm、18 cm、20 cm等不同规格,测量精度为1 cm,由于传感器与水体直接接触,防护多采用具有密闭性的不锈钢外壳。该设备基本不受温度、压力、湿度、泥污等外界环境的影响,适合测量静态和动态水面^[23];其采样精度取决于电极间距,所以实测中还能将不同长度的电子水尺组合,增大测量量程^[24]。为增加数据监测传输的可靠性,防止市电的停运,一般都配有太阳能供电设备(图2),但电子水尺体积较大,对布设场地有要求。



图2 电子水尺
Fig.2 Electronic water gauge

压力式水位传感器通过测量液体的静水压力来获取数据,其尺寸规格一般有10 ~ 80 m可选,精度可达0.1 cm。根据传感器安装位置不同还可分为气泡式和投入式^[25],两者的区别在于气泡式水位传感器安装在液面以上,将水压力通过气管中的空气或

惰性气体传至传感器,投入式传感器则埋于水下,多用于城市道路积水监测(图3)。其优点在于测量精度高,体积小、重量轻、密封性好和便于安装,但会受大气压强变化、被测液体密度变化和降雨外力等环境因素的影响,所以在运行前需进行校准^[26]。



图3 压力式传感器

Fig.3 Pressure-type sensor

1.2.2 非接触式

激光水位传感器利用了激光测量周期短、精度高、无发散角的优势^[25]。在测量时,顶部激光器发出激光到液面反射板,通过测量激光相位变化得到光程,从而获得水位变化情况^[27];其量程一般为5 m、10 m、20 m、30 m,测量精度可达0.1 cm;测量时基本不受环境因素影响,但因其强穿透性,在监测液面时需加装反光板才能使传感器接收到反射光信号,增加了成本和施工难度。超声波水位传感器利用超声波高频、短波、方向性好以及遇不同密度介质分界面时发生反射的特性,通过超声波测距原理来测量水位^[25];根据仪器的安装位置可细分为气介式、固介式和液介式3种,气介式多用于城市道路积水监测^[28],其量程一般为1 m、5 m、10 m、20 m、40 m;

该类型传感器生产成本低、功耗较低,在保证高精度测量的同时,有很长的使用寿命,测量盲区也较小;缺点是易受到温度、空气密度以及回波检测等因素的影响,针对这些问题,可以通过确定传感器和被测水体的最佳距离以及添加温度检测电路等措施来从一定程度上提高设备测量精度^[29]。红外线是具有部分光特性的电磁波^[29],用红外传感器测量水位时,光电探测器也会接收到不同的光信号,最后根据光强弱的不同将光信号转为电信号进行数据记录和路面状态的检测分析;同超声波技术相比,其技术难度较低,成本也低,最重要的是在近距离测量上比超声波的测距精度更高^[31],但受光照的影响,在测量时须考虑系统进行光照补偿的问题^[32]。上述的测量方法都有各自的优缺点,需根据使用环境和目标需求选择更合适的方法。本文基于道路积水监测情景,对上述电子水尺、压力传感器、激光传感器、超声波传感器以及红外传感器5种监测设备的规格、精度、优点和待改进问题进行了对比,如表1所示。

由表1可见,水位传感器均能实现道路积水监测。接触式传感器的缺点主要是由于直接接触水体而导致设备易受腐蚀和水中其他物质干扰,而非接触式传感器尽管避免了设备腐蚀的风险,但会受温度、光照等环境因素的影响。立足这些问题,一些学者就不同应用场景,基于原有的传感器的技术特性,设计改进了相应的监测系统。针对立交桥区域,陈春梅等^[33]设计了一套超声波积水监测系统,实现了非接触式测量与远程水位监控和报警;忻龙玉^[34]设计了一套雷达积水监测系统;孙凤华等^[35]将电子水尺的控制和供电组件安装在桥上,并对其耗电量较高的问题做了优化,保证了该设备在市政供电故障

表1 水位传感器对比

Table 1 Comparison of water level sensors

方法	规格	精度/cm	优点	待改进问题
电子水尺	8 cm、12 cm、18 cm、20 cm	1.0	使用场景多 无零点与温度漂移 有刻度线利于校验 可拼接扩大测量量程	安装较复杂 与水体直接接触、易被腐蚀 水体表面的悬浮物影响测量
压力传感器	5 m、10 m、20 m、40 m、80 m	0.1	无测量盲区 体积小、量程大 重量轻、精度高 不受电磁波和悬浮物干扰	低水位时读数不准 大气压强变化影响精度 与水体直接接触、易被腐蚀 泥沙淤积较多时,传感器易失效
激光传感器	5 m、10 m、20 m、30 m	0.1	非接触测量 测量光束发散角小、量程大 测速快,适合大变幅水位	有测量盲区 有雾和水蒸气时精度降低 需加装反光板增强水面反射
超声波传感器	1 m、5 m、10 m、20 m、40 m	0.1	非接触测量 体积小、成本低,功耗较低 精度高,使用寿命长	有测量盲区 超声波穿透能力较弱 易受温度、空气密度以及回波检测等因素影响
红外传感器	0.2 ~ 1.5 m	0.5	非接触测量 近距离测量精度高于超声波 使用寿命长	易受光照影响,需加装保护管 使用有局限性,成本较高 须考虑系统光照补偿的问题

注:电子水尺可根据需求拼接增加量程,在此指的是拼接尺的量测规格。

时正常工作;针对下穿隧道区域,刘永志等^[36]设计了一套接触式道路积水监测装置,运用杠杆的原理进行水位测量并实现了积水监控装置与排水泵的联动;Hassan 等^[37]设计了一种基于浮子传感器并能将积水预警信息在显示屏上及时展示的道路积水监测系统。还有学者在监测系统的采集传输技术方面进行了改进,曾铨泓等^[38]将基于 STM32 的水深测量装置搭载于汽车上,以高效获取城市道路积水状况。随着交通视频监控的推广和技术升级,将其与水位传感器相结合逐渐成为当下采用的一种道路积水监测手段。严建华等^[39]将电子水尺与视频监控相结合,两种数据源的结合提高了隧道积水监测的准确性;徐青林等^[40]设计了一套由道路积水监测控制器、电子水尺、多路接触开关、视频摄像机、太阳能供电系统等组成的自感应式道路积水监测设备。

1.3 影像监测技术

随着城区不断扩张和极端暴雨事件的频发,及时全面地获得城区大尺度范围的积涝情况愈加重要。尽管传感器监测实现了自动化监测和传输,但也只能反映单个测点的积水情况,且获取的数据量有限。为快速全面的获取积水数据,目前采用两种技术方法:①利用 3S (remote sensing, RS; geographic information system, GIS; global positioning system, GPS) 技术进行水体提取^[41-42];②利用监控视频图像进行积水区域识别^[43]。

1.3.1 遥感影像监测技术

遥感影像监测技术常用于城市内涝灾害快速评估,其利用水体在 $0.4 \sim 2.5 \mu\text{m}$ 电磁波段低反射率的特性,通过识别水体的光谱特征和分析空间位置关系实现水体信息提取^[44]。以光学影像信息为主的水体提取方法主要有阈值法、分类器法和自动化法^[45];以雷达影像为主的方法主要有阈值法、滤波法、基于 DEM 法和基于 GLCM 法,也有将两种影像相结合的模式法^[45]。目前用于洪水监测的遥感资料主要有美国的陆地资源卫星 Landsat TM 与 ETM+、法国的资源卫星 SPOT、美国的极轨气象业务卫星 NOAA/AVHRR、中国的极轨气象卫星 FY-1、FY-2、高分三号卫星、美国的对地观测系统卫星 EOS/MODIS 以及加拿大的雷达卫星 Radarsat SAR 等^[47]。

遥感影像提取水体具有覆盖范围广、周期短、时效性强的优点。缺点是提取的水体与陆地边界区分较差、无法完全消除背景干扰、不易提取细小水体^[48]。而城市区域的地物分布错综复杂,建筑物、道路、涵洞、明渠等相互交错,微小的地形误差就可能导致测量失败,对遥感影像监测技术有着更高的要求^[49],且提取道路积水和计算深度需要高精度的

遥感和 DEM 数据,获取这些数据的成本也要考虑在内。若能将地面视频监控设备获取的数据与之结合,便能更好地应用于城市洪涝模拟和预警管理。

为改进遥感影像水体识别技术,使其更加适用于城市尺度的积水监测,王俊海等^[50]从城市水体识别技术着手,通过结合光谱信息、形状信息和纹理信息,以减少城市阴影对水体识别的影响;崔齐等^[51]提出一种面向遥感影像的矢量约束水体提取的方法,该方法不仅能有效抑制地物阴影的影响,还可以准确提取细小水体信息。还有学者在遥感积水数据提取上采用不同方法进行尝试或改进,如董玉波等^[56]将最大熵的遥感积水影像提取技术与最小二乘法的道路预警方法相结合,推进了道路积水预警的发展;Irwin 等^[57]运用多源遥感数据,建立了包含光学遥感影像数据、SAR 数据和机载激光雷达数据的融合分类模型,通过最小化单个数据集模型之间的差异实现水体的高精度提取。

就雷达卫星而言,多与地面站降雨数据结合输入到城市内涝模型来预测道路积水深度^[52]。唐颖等^[53]通过雷达外推结合降水量与雷达基本反射率公式预测降水量,进而将预测降雨数据导入水力模型来现城市内涝预警;李恒升等^[54]利用雷达 OHP (1 h precipitation accumulation) 产品数据通过网格插值法处理成内涝数学模型所需的降雨数据,再带入模型中进行积水预测;杨东等^[55]将无人机载激光雷达技术用于提取区域高精度 DEM 数据,基于此数据建立了城市内涝模型,模拟结果在积水面积和深度上都有较好的表现。

1.3.2 视频图像监测技术

城市中监控摄像头随处可见,能否将这些摄像头采集的信息用于道路积水分析成为近来研究热点。现阶段的提取方法根据目标对象的不同大致分为两类:①通过分析事先在积水区域设置的水尺图像得到水位线信息,该过程通常先通过截取监控视频的图像,再对彩色图像进行灰度转换,删减无用信息提高运算效率,之后对图像中的水尺进行分割提取,最后进行图像降噪与刻度线信息的提取;②直接分析区域的积水图像,运用多种技术手段提取分析积水影像,例如使用基于大数据的深度学习技术,通过海量积水图像的不断训练,增强模型对城市道路各种复杂情景下算法的鲁棒性,从而提高积水检测、识别、分割的精度。相比第一种方法,后者省去了积水点布设水尺和日常维护的步骤,大大提高了测量的机动性,但识别精度有待提高。

视频图像监控技术在城市内涝监测中的普及离不开通信技术和计算机视觉的发展^[58],其优点在于

可利用城市现有的监控摄像头,通过对图像的处理便可获取水位信息,降低了设备安装成本;但其抗气候干扰能力较弱,在天气情况良好的情况下,水位信息采集的精确度较高,如遇小雨、雾霾等天气,会影响到摄像头采集图片的质量,虽然可通过软件进行去噪、均衡化等操作来还原部分图像,仍会对测量精度产生影响。目前,不论是对道路水尺图像的提取算法或是道路积水识别的深度学习模型在技术上都有待改进,但随着影像识别技术精度的不断提高,视频图像监测技术将在未来逐渐成为主导。

针对目前水尺图像识别和水尺刻度提取精度等技术问题,我国多位学者^[59-61]对水尺边缘提取技术开展研究,结果表明 sobel、roberts 和 canny 等边缘算子均有较好的抗噪、抗光照不均效果。石玉立等^[62]利用水面上下图像亮度差异的特性,构建了基于视频图像的 IDL(interactive data language)水位提取检测模型;高晓亮等^[63]设计了一种基于 HSV(hue, saturation, value)颜色空间的水位检测法,解决了传统边缘检测算子在图像质量较差时无法准确测算的问题;肖卓等^[64]运用基于卷积神经网络的目标检测算法(single shot multibox detector, SSD)提取水尺特征进行检测的准确率达 95%,误差控制在 2 cm 内;王磊等^[65]用 YOLO-v3 和 ResNet 网络算法检测水尺对象和识别水尺刻度,运行准确率可达 95% 以上;周衡等^[66]不再通过识别水尺刻度进行数值提取,而是利用水尺刻度对相机进行标定,再通过目标区域图像差分提取水位变化区域,简化了算法的同时能较精确测得实际水位值,但需保证相机与水尺位置都固定住不发生移动。

在提高道路积水图像的识别技术方面,深度学习等人工智能技术也逐渐被采纳。张勤学等^[67]设计了一种基于图像识别技术的城市道路积水监测系统,该系统将采集后的图像运用大数据平台实现深度学习以构建数据库,从而实现 4 个维度的图像分类模型,达到智能化监测道路积水的目的;白岗岗等^[68]设计了一种基于深度学习技术的城市内涝积水面积监测方法,通过 CNN(convolutional neural network)模型和 YOLOv2 模型设计出一种可自动识别积水的方法;Vitry 等^[69]使用深度卷积神经网络(deep convolutional neural network)和静态观测洪水指数从视频监控中获取道路积水信息,将人工智能处理加入监控视频中为市区提供城市内涝监测数据,并结合多种信息构建优化监测系统。

另有学者将多元信息融合应用于积水监测,如黄伟等^[70]将降雨资料和压力水位传感器与视频图像获取的 3 种信息相结合,设计了一套大数据分析

与机理模型协同的道路积水监测系统,通过分析视频图像的像素面积与道路实际面积的关系得出降雨情景下的道路积水面积和深度;奚春华等^[71]将区域高精度 DEM 影像、对应的高分辨率遥感影像和视频监控图像三者相结合,根据建立的几何映射关系以及 DEM 影像映射结果,实现直接在监控视频图像上进行积水深度测量。

还有学者将图像中的车轮和车辆作为参考物来进行积水识别,黄晶等^[72]利用城市视频监控系统作为积水图像的采集设备,提出了一种利用汽车轮胎测量出城市道路积水深度的方法,该方法将各种汽车轮胎视频作为数据源,通过对视频的深度学习达到在现实中应用的效果;Garcia 等^[73]通过对城市内涝中车辆图像的识别分割以及相关区域地表图像的检索来实现道路积水深的估测,但还需加强复杂环境下的抗干扰性;刘军等^[74]研究出一种基于浮动车数据(floating car data, FCD)的桥下积水点识别方法,通过 AcrGIS 编写算法程序得以实现,该方法排除了 GPS 随机因素干扰,减少了积水时段常发性拥堵对判断的影响。

2 道路积水监测技术应用

2.1 传感器积水监测应用进展

早在 20 世纪 70 年代,美国国家气象局就具有了一套功能较完备的水文自动测报系统服务于天然流域的河湖内涝预警^[21]。进入 21 世纪,随着集成电路的发展与应用、终端监测设备的升级、数据传送方式的多样化,许多地区也将多种传感器监测设备用于城市内涝预警领域。菲律宾马尼拉地铁站附近安装了压力传感器监测道路积水,并通过无线网络将积水情况发送到用户的手机中^[75]。尼日利亚首府乌约市的内涝监测和检测系统涵盖了首府乌约市的 15 个易涝点,通过获取的湿度、温度、水位和降水量向附近的居民发送预警通知^[76]。无锡市道路积水预警系统将 AVR 单片机与 GPRS 相结合,用超声波传感器进行监测的同时,利用积水水位以及水位变化率计算出预警系数用于提前预警^[77]。重庆两江新区将气介式超声波传感器用于道路积水监测,其中加入了温度补偿计算、数字滤波算法和水位上升速度计算模块,降低了温度和水面波浪对传感器的影响^[78]。常州市建设的基于 WSN 技术的道路积水监测系统运用了超声波传感器和 BP 神经网络水位预测模型,并通过控制水泵运作实现闭环控制^[79]。长沙市城市内涝监测系统在香樟东路高铁南立交桥等多处易涝区安装了雷达水位传感器,该系统在 2017 年“7·1”暴雨中发布道路灾情信息 31

次,为车辆避险及人员撤离提供了宝贵的时间^[80]。

还有学者将多种传感器相结合应用于道路积水测量系统,丁榕^[81]将电子水尺和超声波传感器分别安装在广州、绵阳等城市低洼地段和窨井内,开展城市道路管网的积水监测研究。上海市水务部门在沪实施的道路积水监测项目中,选择了压力式和超声波两种水位传感器相结合的方式,保证了测量量程的同时也便于水位监测数据的校核。美国佛罗里达州道路积水监测系统中使用了 WL700 超声波传感器,通过无线通信系统将道路积水数据与 NOAA 卫星的降雨预报联系起来,实现了城市道路积水的监测与预报,系统中还加入了视频监控模块,但仅有道路交通和积水点的视频对外发布^[43]。

2.2 影像监测技术应用进展

2.2.1 遥感影像应用

随着遥感技术的不断发展,城市尺度内涝预警采用遥感影像提取积水水体并开展应用的逐渐增多,得到了许多研究者和管理者的关注,其中积水影像提取从数据源角度又可分单个卫星和多个卫星的应用。在单一卫星监测方面,张斌^[82]利用雷达卫星影像数据分析了岳阳市的内涝灾害情况,通过快速提取洪水淹没区,监测洪水多发区的时序保障了城市内涝预警的时效性;Mason 等^[83]在英国 Tewkesbury 郡 150 年一遇的洪水事件中经由航拍验证图像对比,用 TerraSAR-X 雷达卫星可准确提取城市内涝水体的可见区和遮挡区,可用来校准和验证城市暴雨内涝模型;Vorawit 等^[84]在马来西亚吉隆坡城区将地面视图的 SfM (Structure from Motion) 数据与服饰滤波 LiDAR 数据相结合建立了多维视图融合-数字地形模型 (MFV-DTM),该模型在积水深度和水体范围识别上都有较好的精度,可用作城市内涝模型的数据输入。在多卫星组合监测方面,为提高城市细小水体的提取准确度,德国航空航天的卫星信息中心开发出基于 MODIS 和 TerraSAR-X 雷达卫星的双尺度城市内涝监测预警系统,对俄罗斯和阿尔巴尼亚的两场内涝事件进行了监测与评估^[85]。王嘉芃等^[86]用灾中 COSMO-SkyMed 雷达影像和灾前 SPOT-5 光学影像的优缺点进行空间差值运算提取水体,设计了基于多源遥感数据的洪水淹没信息快速提取模型,并在浙江余姚“10.7”水灾中得到了很好的验证。针对建筑物和植被遮挡水体的问题,Mason 等^[87]使用合成孔径雷达 (SAR) 和城区激光探测及测距系统,通过检测地面和积水相邻建筑物墙壁间的双散射强度实现积水探测,准确率可达 91%。

2.2.2 视频图像应用

由于通过计算机视觉技术和多媒体传输技术的视频影像技术可以最大限度发挥监控系统的作用,远程获取道路积水数据^[88-89],因此基于视频图像的道路积水识别技术逐渐成为近年的研究热点,主要集中于水尺图像、水位刻度线的识别和路面积水图像的识别。

在水尺图像识别方面,济宁城市水文监测系统为城区所有积水站点配置了视频监控系统,可在通过视频监控系统观测现场设立的水尺,实现实时积水水深数据采集、接入^[90]。牛智星等^[91]设计了一套基于水尺图像的水位自动监测系统,利用图像识别技术,采用 4G 网络进行数据传输,实现了远程遥测,在应用测量误差不超过 2 cm。通过查阅大量相关文献发现,以往的视频监控模块在道路积水监测系统中仅用于积水区域的视频查看和影像存储,并且需要耗费人力手动查看,存在很大的局限性^[92-93]。而水尺图像智能识别技术是近年的研究热点,具有很大推广价值。但有关水尺图像的深度学习、基于计算机视觉等方法多处于技术研究阶段,还需继续完善。

除了水尺图像的提取,薛丰昌等^[94]在南京信息工程大学校园进行基于视频监控的道路积水研究,通过图像差分,区域分割等技术使得系统能准确获得积水区实时情况,从而实现动态监控,有利于实现地区内涝精细化监测预警。Bhola 等^[95]运用计算机视觉技术,以图像中的静态物体为参考来估计道路积水水位,已在德国库尔姆巴赫县进行了 3 场实测。近年来,大数据也逐渐融入城市积水预警中,上海水务部门通过气象预报结合内涝风险图、积水物联网传感器、视频积水图像识别和热线灾报 4 种方式获取上海的道路积水情况,并用短信、政务微信等新技术手段发布预警信息,大大缩短了道路积水事件的发现率^[96-97]。天津市中心城区积水监测信息系统以视频监控设备与电子水尺相结合的方式,通过在地道和道路低洼区域建设电子水尺和视频水位识别系统,实现了天津积水现场的可视化、积水水位数据量化及精细化。还有国内外学者运用新思路来处理城市道路积水监测,吴先华等^[98]设计了一种基于微博大数据分析城市暴雨内涝灾情以及民众情绪反应的流程和方法,以行政区来划分,将微博事件的 IP 地址与物理地址关联,在南京市 2016 年 6、7 月份两场暴雨中按提取到的暴雨内涝、情感词汇进行积水深度分类;Wang 等^[99]用自然语言处理技术和计算机视觉技术分析了 Twitter 和 MyCast 的数据,在南卡罗来纳州查尔斯顿的内涝事件可通过该数据提

供的高精度的位置信息用来定位积水点,这种基于网络社交媒体数据的积水监测方法丰富了现有的积水监测手段。

3 结 论

a. 目前,城市道路积水监测主要采用水位传感器,鲜有采用视频图像识别的水位监测方法。然而,就硬件设备而言,城市道路布设的视频图像监控,特别是用于交通监控的已经非常完备,图像数量和质量能够保证;就水体监测应用而言,在河流、明渠和水库中已逐步推广并得到了越来越多的应用。未来,城市道路积水监测应在充分利用固有的视频监控设备基础上,适当加密道路积水视频监控点,设计普适性的城市道路积水视频提取识别智能算法,提高道路积水信息的准确性和及时性,更好地服务于城市内涝应急和预警管理。

b. 遥感影像常用于流域的大面积洪涝监测,而面对城市内涝空间尺度小、精度高和时效强的需求,未来遥感影像应用研究的重心应聚焦遥感数据的快速获取分析,特别是极端暴雨事件下道路水体的提取上。可通过增加数据源,采用多源数据融合的手段来降低云层对遥感影像干扰。今后,随着云计算、大数据智能算法以及 5G 信息传输的飞跃发展,可构建基于 5G 传输、轻松上云、智能化自我校正的 AI 遥感监测系统,从数据精度、实时性、可视性全方位提升道路积水的遥感监测水平。

c. 对城市暴雨内涝预警管理而言,保证道路易涝点积水数据的精准性以及区域尺度积水淹没情况的准确性同等重要。因此,在开展积水监测时,区域尺度遥感影像要与道路视频影像以及重点道路、重点桥隧的电子水尺监测配合,做到“点面结合”,构建城市“天-地-空”各种手段相辅相成、互为补充的立体化监测网。在此基础上,根据管网溢流和道路积水的水力联系进一步优化监测点布局,升级信息存储的安全性,改进数据传递的时效性,真正实现城市道路积水监测传输的自动化,全方位、多手段夯实城市暴雨内涝预警的信息保障。

d. 实时监测数据是构建城市雨洪模型的关键。随着监测数据类型的增多,监测频次的加密,未来监测数据必然呈现井喷式增长并逐渐呈现大数据的海量特性。实时监测数据的增加不仅可以大幅提高传统物理机制模型的准确性,更使得以大数据为支撑的数学统计模型极有可能成为未来城市暴雨洪水预警管理的“新宠”,若将两类模型有效结合,互为验证,将会大幅调高城市内涝模拟的准确性,进而实现流域河渠湖库与城市雨水管网智能化联控联调的普

适化,最大程度减轻流域和城市的暴雨内涝致灾风险,为建设韧性城市提供有力的技术支撑和有效的决策建议。

参考文献:

- [1] 张春洋,王家卓. 公共卫生安全视角下城镇排水设施规划建设思考[J]. 给水排水, 2020, 46(5): 45-52. (ZHANG Chunyang, WANG Jiazhao. Thoughts on planning and construction of urban drainage infrastructure from the perspective of public health security[J]. Water & Wastewater Engineering, 2020, 56(5): 45-52. (in Chinese))
- [2] 徐宗学. 水文模型[M]. 北京: 科学出版社, 2009.
- [3] 黄国如, 黄维, 张灵敏, 等. 基于 GIS 和 SWMM 模型的城市暴雨积水模拟[J]. 水资源与水工程学报, 2015, 26(4): 1-6. (HUANG Guoru, HUANG Wei, ZHANG Lingmin, et al. Simulation of rainstorm waterlogging in urban areas based on GIS and SWMM model[J]. Journal of Water Resources & Water Engineering, 2015, 26(4): 1-6. (in Chinese))
- [4] 陆海明, 邹鹰, 孙金华, 等. 基于 SWMM 的铁心桥实验基地内涝防治效果模拟[J]. 水资源保护, 2020, 36(1): 58-65. (LU Haiming, ZOU Ying, SUN Jinhua, et al. Simulation of waterlogging control effect in Tiexinqiao experimental base based on SWMM[J]. Water Resources Protection, 2020, 36(1): 58-65. (in Chinese))
- [5] 解以扬, 李大鸣, 李培彦, 等. 城市暴雨内涝数学模型的研究与应用[J]. 水科学进展, 2005, 16(3): 384-390. (XIE Yiyang, LI Daming, LI Peiyan, et al. Research and application of the mathematical model for urban rainstorm water logging[J]. Advances in Water Science, 2005, 16(3): 384-390. (in Chinese))
- [6] 史潇, 徐家鹏, 杜毅贤, 等. 面向道路积水动态可视化的多源时空数据集成与管理方法[J/OL]. 武汉大学学报(信息科学版), 2020: 1-10. <https://doi.org/10.13203/j.whugis20190350>. (SHI Xiao, XU Jiapeng, DU Yixian, et al. Multi-source spatiotemporal data integration and management method for road waterlogging dynamic visualization[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2020: 1-10. <https://doi.org/10.13203/j.whugis20190350>. (in Chinese))
- [7] 刘昌军. 基于人工智能和大数据驱动的新一代水文模型及其在洪水预报预警中的应用[J]. 中国防汛抗旱, 2019, 29(5): 11-22. (LIU Changjun. A new generation of hydrological model driven by artificial intelligence and big data and its application in flood forecasting and early warning[J]. China Flood & Drought Management, 2019, 29(5): 11-22. (in Chinese))
- [8] 栾震宇, 金秋, 赵思远, 等. 基于 MIKE FLOOD 耦合模型的城市内涝模拟[J]. 水资源保护, 2021, 37(2): 81-

88. (LUAN Zhenyu, JIN Qiu, ZHAO Siyuan, et al. Simulation of urban waterlogging based on MIKE FLOOD coupling model[J]. Water Resources Protection, 2021, 37 (2): 81-88. (in Chinese))
- [9] 袁绍春,王怀鋈,吕波,等. 基于 InfoWorks ICM 模型的山地城市老旧建筑小区海绵化改造方案设计及评估[J]. 水资源保护, 2020, 36 (5): 43-49. (YUAN Shaochun, WANG Huaijun, LYU Bo, et al. Design and evaluation of sponge city reconstruction scheme for old building district in mountainous city based on InfoWorks ICM model [J]. Water Resources Protection, 2020, 36 (5): 43-49. (in Chinese))
- [10] 向小华,陈颖悟,吴晓玲,等. 城市二维内涝模型的 GPU 并行方法[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2020, 48 (6): 528-533. (XIANG Xiaohua, CHEN Yingwu, WU Xiaoling, et al. GPU parallelized algorithm of urban two-dimensional inundation model [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2020, 48 (6): 528-533. (in Chinese))
- [11] 徐治国,黄红. 对城市雨水排水系统的一些思考[J]. 能源与环境, 2008(6): 7-8. (XU Zhiguo, HUANG Hong. Some thoughts on urban rainwater drainage system [J]. Energy and Environment, 2008(6): 7-8. (in Chinese))
- [12] 侯精明. 深度学习技术在城市内涝监测中的应用[J]. 中国防汛抗旱, 2019, 29 (8): 8. (HOU Jingming. Application of deep learning technology in urban waterlogging monitoring [J]. China Flood & Drought Management, 2019, 29(8): 8. (in Chinese))
- [13] 付潇然,王东,栾清华,等. 大尺度无管流数据城区 SWMM 构建及模拟: II. 模型参数校验及暴雨径流模拟分析[J]. 水科学进展, 2020, 31 (1): 51-60. (FU Xiaoran, WANG Dong, LUAN Qinghua, et al. SWMM-based rainfall-runoff simulations in large-scale urban area with no pipeline-flow observations: II: model calibration and analysis of rainfall-runoff simulations [J]. Advances in Water Science, 2020, 31(1): 51-60. (in Chinese))
- [14] 来丽芳,姜元军,李亚丹,等. 城市内涝监控预警与联合调度系统设计与开发[J]. 地理空间信息, 2017, 15 (5): 88-90. (LAI Lifang, JIANG Yuanjun, LI Yadan, et al. Design and development of urban waterlogging monitoring and early warning and joint dispatching system [J]. Geospatial Information, 2017, 15 (5): 88-90. (in Chinese))
- [15] 吴运江,吴庆洲,李炎,等. 古老的市政设施: 赣州“福寿沟”的防洪预涝作用[J]. 中国防汛抗旱, 2017, 27 (3): 37-39, 56. (WU Yunjiang, WU Qingzhou, LI Yan, et al. An ancient drainage system: “happy and long-life” flood management channel in Ganzhou City [J]. China Flood & Drought Management, 2017, 27 (3): 37-39, 56. (in Chinese))
- [16] 鲍红信. 城市的良心: 古罗马城输水道和排水道的建设与管理[J]. 都市文化研究, 2016(1): 143-154. (BAO Xinghong. The conscience of the city: the construction and management of aqueducts and sewers in the ancient Roman City [J]. Urban Cultural Studies, 2016 (1): 143-154. (in Chinese))
- [17] 聂会冲,刘克浩,欧祖贤. 水位测量方法及设备研究综述[J]. 南方农机, 2020, 51 (23): 48-49. (NIE Huichong, LIU Kehao, OU Zhuxian. Summary of research on water level measurement methods and equipment [J]. China Southern Agricultural Machinery, 2020, 51 (23): 48-49. (in Chinese))
- [18] 徐志康,冯径,常昊天. 道路积水深度测量研究综述[J]. 电子测量技术, 2017, 40 (11): 1-6. (XU Zhikang, FENG Jing, CHANG Haotian. Research survey of road-water depth measurements [J]. Electronic Measurement Technology, 2017, 40(11): 1-6. (in Chinese))
- [19] 白宏图,刘华. 基于 STM32 的城市道路积水监测系统设计[J]. 自动化技术与应用, 2018, 37 (4): 156-158. (BAI Hongtu, LIU Hua. Design of road seep monitor based on STM32 singlechip [J]. Techniques of Automation and Applications, 2018, 37(4): 156-158. (in Chinese))
- [20] 徐敏,李闪,李进荣,等. 基于 GPRS 与组态技术的城市道路积水监测预警系统设计[J]. 轻工科技, 2015, 31 (2): 93-94. (XU Ming, LI Shan, LI Jinrong, et al. Design of monitoring and early warning system for urban road waterlogging based on GPRS and configuration technology [J]. Light Industry Science and Technology, 2015, 31 (2): 93-94. (in Chinese))
- [21] 张伟. 基于 ARM 和 GPRS 的城市道路积水自动监测与预警系统设计[D]. 成都: 成都理工大学, 2014.
- [22] 孙增义,吴越. 水情自动测报技术基础及其应用[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 1999: 12-18.
- [23] 邓柳. 电极式水位测量传感器的设计[J]. 湖北成人教育学院学报, 2013, 19(3): 1-4. (DENG Liu. Study on the design of electrode type water level sensor [J]. Journal of Hubei Adult Education Institute, 2013, 19 (3): 1-4. (in Chinese))
- [24] 徐海军,刘林海. 电子水尺在城市道路积水监测系统中的应用[J]. 水利信息化, 2010(3): 45-47. (XU Haijun, LIU Linhai. Application of electronic water gauge in monitoring system for urban road waterlogging [J]. Water Resources Informatization, 2010(3): 45-47. (in Chinese))
- [25] 安全,范瑞琪. 常用水位传感器的比较和选择[J]. 水利信息化, 2014 (3): 52-54. (AN Quan, FAN Ruiqi. Comparison and selection of common water level sensors [J]. Water Resources Informatization, 2014 (3): 52-54. (in Chinese))
- [26] 侯峥,鲍子云. 宁夏引黄灌区自动化测控设施应用效果分析[J]. 中国水利, 2013 (22): 49-51. (HOU Zheng, BAO Ziyun. Analysis on application effect of automatic measurement and control facilities in Ningxia Yellow River

- Irrigation District[J]. China Water Resources, 2013(22): 49-51. (in Chinese))
- [27] 杨润泽, 汤玉美, 邱剑, 等. 激光动态液位测量技术研究[J]. 宇航总体技术, 2021, 5(1): 37-41. (YANG Runze, TANG Yumei, QIU Jian, et al. Research on laser liquid level measurement technology and its system integration [J]. Astronautical Systems Engineering Technology, 2021, 5(1): 37-41. (in Chinese))
- [28] 莫德举, 刘艳艳. 超声波液位测量方法的研究[J]. 仪器仪表与分析监测, 2007(1): 21-22. (MO Deju, LIU Yanyan. Study on ultrasonic liquid level measurement[J]. Instrumentation Analysis Monitoring, 2007(1): 21-22. (in Chinese))
- [29] 洪峰. 基于气介式超声波传感器的雨量液位测量系统设计[J]. 现代电子技术, 2010, 33(23): 149-151. (HONG Feng. Rainfall liquid level measuring system based on air-coupled ultrasonic sensor [J]. Modern Electronics Technique, 2010, 33(23): 149-151. (in Chinese))
- [30] 王艳斌, 李秀红, 余国河, 等. 红外遥测式路面状况传感器的水厚度测量[J]. 电子产品世界, 2014, 21(4): 26-27. (WANG Yanbin, LI Xiuhong, YU Guohe, et al. The measure method of water-depth in the infrared remote sensing road surface sensor[J]. Electronic Engineering & Product World, 2014, 21(4): 26-27. (in Chinese))
- [31] 冯英. 传感器电路原理与制作[M]. 成都: 成都科技大学出版社, 1997.
- [32] 刘竞阳. 基于红外测距传感器的移动机器人路径规划系统设计[D]. 沈阳: 东北大学, 2012.
- [33] 陈春梅, 李博涵. 基于超声波的道路积水监测与移动终端报警系统[J]. 信息通信, 2015(11): 74-75. (CHEN Chunmei, LI Bohan. Ultrasonic-based road water monitoring and mobile terminal alarm system [J]. Information & Communications, 2015(11): 74-75. (in Chinese))
- [34] 忻龙玉, 牟丽琴, 俞淞, 等. 城市内涝积水点监测站: CN205607495U[P]. 2016-09-28.
- [35] 孙凤华, 潘兴瑶, 张岑, 等. 一种积水监测系统: CN211504302U[P]. 2020-09-15.
- [36] 刘永志, 张文婷. 一种城市隧道积水监测装置: CN209356023U[P]. 2019-09-06.
- [37] HASSAN W H W, JIDIN A Z, AZIZ S A C, et al. Flood disaster indicator of water level monitoring system [J]. International Journal of Electrical and Computer Engineering, 2019, 9(3): 1694-1699.
- [38] 曾铖泓, 徐海, 吴学淞, 等. 基于 STM32 的双探头水深测量装置设计[J]. 传感器与微系统, 2020, 39(10): 66-69. (ZENG Chenghong, XU Hai, WU Xuesong, et al. Design of dual probes water depth measuring device based on STM32[J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2020, 39(10): 66-69. (in Chinese))
- [39] 严建华, 雷声, 何秉顺, 等. 隧道积水监测系统: CN211740323U[P]. 2020-10-23.
- [40] 徐青林, 王海鹏, 张斐. 道路积水监测设备的研究[J]. 山西科技, 2016, 31(6): 74-77. (XU Qinglin, WANG Haipeng, ZHANG Fei. Research on monitoring equipment of road water [J]. Shanxi Science and Technology, 2016, 31(6): 74-77. (in Chinese))
- [41] 尹冬梅. 基于北斗的城市道路积水监测查询系统研究[J]. 广州航海学院学报, 2016, 24(2): 21-24. (YIN Dongmei. Research of urban road surface water monitoring and query system based on compass system satellite [J]. Journal of Guangzhou Maritime University, 2016, 24(2): 21-24. (in Chinese))
- [42] 钱津. 基于 GIS 的城市内涝数值模拟及其系统设计[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2012.
- [43] CHANG N B, GUO D H. Urban flash flood monitoring, mapping and forecasting via a tailored sensor network system [C]//IEEE International Conference on Networking. Washington D. C.: IEEE, 2006.
- [44] 陈秀万. 洪水灾害损失评估系统[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 1999: 1-172.
- [45] 苏龙飞, 李振轩, 高飞, 等. 遥感影像水体提取研究综述[J]. 国土资源遥感, 2021, 33(1): 9-19. (SU Longfei, LI Zhenxuan, GAO Fei, et al. A review of remote sensing image water extraction [J]. Remote Sensing for Land and Resources, 2021, 33(1): 9-19. (in Chinese))
- [46] 李丹, 吴保生, 陈博伟, 等. 基于卫星遥感的水体信息提取研究进展与展望[J]. 清华大学学报, 2020, 60(2): 147-161. (LI Dan, WU Baosheng, CHEN Bowei, et al. Review of water body information extraction based on satellite remote sensing [J]. Journal of Tsinghua University (Science & Technology), 2020, 60(2): 147-161. (in Chinese))
- [47] 李香颜, 陈怀亮, 李有. 洪水灾害卫星遥感监测与评估研究综述[J]. 中国农业气象, 2009, 30(1): 102-108. (LI Xiangyan, CHENG Huailiang, LI You. A review on monitoring and assessment of flood disaster by satellite remote sensing [J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2009, 30(1): 102-108. (in Chinese))
- [48] 陈德清. 遥感技术在洪涝监测中的应用[J]. 城市与减灾, 2018(6): 48-52. (CHENG Deqing. Application of remote sensing technology in flood monitoring [J]. Cities and Disaster Reduction, 2018(6): 48-52. (in Chinese))
- [49] 周鹏, 谢元礼, 蒋广鑫, 等. 遥感影像水体信息提取研究进展[J]. 遥感信息, 2020, 35(5): 9-18. (ZHOU Peng, XIE Yuanli, JIANG Guangxin, et al. Advances on water body information extraction from remote sensing imagery [J]. Remote Sensing Information, 2020, 35(5): 9-18. (in Chinese))
- [50] 王俊海, 阮仁宗, 柴颖, 等. 基于高分二号的面向对象城市水体信息提取[J]. 地理空间信息, 2018, 16(9): 34-40. (WANG Junhai, RUAN Renzong, CAI Ying, et al.

- Object-oriented urban water information extraction based on GF-2[J]. Geospatial Information, 2018, 16(9): 34-40. (in Chinese))
- [51] 崔齐, 王杰, 汪闽, 等. 矢量约束的面向对象高分遥感影像水体提取[J]. 遥感信息, 2018, 33(4): 115-121. (CUI Qi, WANG Jie, WANG Min, et al. Water extraction from high-resolution remote sensing imagery based on vector data constraint and object-based image analysis [J]. Remote Sensing Information, 2018, 33(4): 115-121. (in Chinese))
- [52] 温龙, 刘溯, 赵坤, 等. 两次降水过程的微降雨雷达探测精度分析[J]. 气象, 2015, 41(5): 577-587. (WEN Long, LIU Su, ZHAO Kun, et al. Precision evaluation of micro rain radar observation in two precipitation events [J]. Meteorological Monthly, 2015, 41(5): 577-587. (in Chinese))
- [53] 唐颖, 张永祥, 王昊, 等. 基于雷达外推的城市内涝实时预警[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2019, 51(2): 58-62. (TANG Ying, ZHANG Yongxiang, WANG Hao, et al. Research on real time urban flooding warning base on radar extrapolation [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2019, 51(2): 58-62. (in Chinese))
- [54] 李恒升, 高玉春, 陈德生. 雷达资料和网格法在城市内涝系统中的应用[J]. 电子设计工程, 2016, 24(3): 125-128. (LI Hengsheng, GAO Yuchun, CHEN Desheng. Radar data and grid method in the application of urban waterlogging system [J]. Electronic Design Engineering, 2016, 24(3): 125-128. (in Chinese))
- [55] 杨东, 侯精明, 张兆安, 等. 无人机载激光雷达技术在洪涝过程模拟中的应用[J]. 中国防汛抗旱, 2019, 29(8): 25-29. (YANG Dong, HOU Jingming, ZHANG Zhaoan, et al. Application of unmanned airborne lidar technology in flood process simulation [J]. China Flood & Drought Management, 2019, 29(8): 25-29. (in Chinese))
- [56] 董玉波. 降雨遥感图像中道路积水深度报警测量方法研究[J]. 科学技术与工程, 2013, 13(21): 6360-6364. (DONG Yubo. Rainfall in remote sensing image water depth measuring method road alarm [J]. Science Technology and Engineering, 2013, 13(21): 6360-6364. (in Chinese))
- [57] IRWIN K, BEAULNE D, BRAUN A, et al. Fusion of SAR, optical imagery and airborne LiDAR for surface water detection[J]. Remote Sensing, 2017, 9(9): 890-909.
- [58] IQBAL U, PEREZ P, LI W Q. How computer vision can facilitate flood management: a systematic review [J]. International Journal of Disaster Risk Reduction, 2021(53): 102030,
- [59] 兰华勇, 严华. 基于图像识别技术的水尺刻度提取方法研究[J]. 人民黄河, 2015, 37(3): 28-30. (LAN Huayong, YAN Hua. Research on application of the scale extraction of water-level ruler based on image recognition technology [J]. Yellow River, 2015, 37(3): 28-30. (in Chinese))
- [60] 任明武, 杨万扣, 王欢, 等. 一种基于图像的水位自动测量新方法[J]. 计算机工程与应用, 2007, 4(22): 204-206. (REN Mingwu, YANG Wankou, WANG Huan, et al. New algorithm of automatic water level measurement based on image processing [J]. Computer Engineering and Applications, 2007, 4(22): 204-206. (in Chinese))
- [61] 陈翠, 刘正伟, 陈晓生, 等. 基于图像处理的水位信息自动提取技术[J]. 水利信息化, 2016(1): 48-55. (CHEN Cui, LIU Zhengwei, CHEN Xiaosheng, et al. Technology of water level automatically extract based on image processing [J]. Water Resources Informatization, 2016(1): 48-55. (in Chinese))
- [62] 石玉立, 夏振, 王林. 基于IDL的视频图像水位检测新算法[J]. 科学技术与工程, 2014, 14(29): 114-116. (SHI Yuli, XIA Zhen, WANG Lin. A new algorithm of water level detection base on video image [J]. Science Technology and Engineering, 2014, 14(29): 114-116. (in Chinese))
- [63] 高晓亮, 王志良, 王馨, 等. 基于HSV空间的视频实时水位检测算法[J]. 郑州大学学报(理学版), 2010, 42(3): 75-79. (GAO Xiaoliang, WANG Zhiliang, WANG Xin, et al. An algorithm of real-time water level detection via video based on HSV space [J]. Journal of Zhengzhou University (Natural Science Edition), 2010, 42(3): 75-79. (in Chinese))
- [64] 肖卓, 陶青川, 沈建军. 基于SSD目标检测的视频水位检测算法[J]. 现代计算机(专业版), 2019(9): 60-64. (XIAO Zhuo, TAO Qingchuan, SHEN Jianjun. A video water-level recognition based on SSD object detect network [J]. Modern Computer, 2019(9): 60-64. (in Chinese))
- [65] 王磊, 陈明恩, 孟凯凯, 等. 基于深度学习算法的水位识别方法研究[J]. 水利信息化, 2020(3): 39-43. (WANG Lei, CHEN Ming'en, MENG Kaikai, et al. Research on water level recognition method based on deep learning algorithms [J]. Water Resources Informatization, 2020(3): 39-43. (in Chinese))
- [66] 周衡, 仲思东. 基于视频图像的水位监测方法研究[J]. 半导体光电, 2019, 40(3): 390-394. (ZHOU Heng, ZHONG Sidong. Research on water level monitoring based on image processing [J]. Semiconductor Optoelectronics, 2019, 40(3): 390-394. (in Chinese))
- [67] 张勤学, 颜继雄. 一种基于机器图像识别技术的城市道路积水图像识别系统: CN11353380A[P]. 2020-06-30.
- [68] 白岗岗, 侯精明, 韩浩, 等. 基于深度学习的道路积水智能监测方法[J]. 水资源保护, 2021, 37(5): 75-80. (BAI Ganggang, HOU Jingming, HAN Hao, et al. Intelligent monitoring method for road inundation based on deep learning [J]. Water Resources Protection, 2021, 37(5): 75-80. (in Chinese))

- [69] DE VITRY M M, KRAMER S, WEGNER J D. Scalable flood level trend monitoring with surveillance cameras using a deep convolutional neural network[J]. Hydrology Earth System Science, 2019(23): 4621-4634.
- [70] 黄伟, 赵亦欣, 袁海波, 等. 大数据分析 with 机理模型协同的道路积水深度监测方法及系统: CN112329582A[P]. 2021-02-05.
- [71] 奚春华, 车红磊, 陈亮. 基于监控视频与高精度 DEM 结合的道路积水监测方法及系统: CN112422917A[P]. 2021-02-26.
- [72] 黄晶, 王慧敏, 康晋乐, 等. 一种基于深度学习的城市积水深度监测方法: CN111241950A[P]. 2020-06-05.
- [73] GARCIA F C, RETAMAR A E, JAVIER J. A real time urban flood monitoring system for metro Manila [C]//Conference Annual International Conference Proceedings. Singapore: IEEE, 2016.
- [74] 刘军, 宋国华, 赵琦, 等. 基于 FCD 的桥下积水导致城市交通拥堵点段识别方法研究[J]. 交通信息与安全, 2013, 31(3): 43-48. (LIU Jun, SONG Guohua, ZHAO Qi, et al. FCD-based identification method for urban traffic congestion caused by flooding under bridge[J]. Journal of Transport Information and Safety, 2013, 31(3): 43-48. (in Chinese))
- [75] EDWARD N U, EETBONG B I. Flood monitoring and detection system using wireless sensor network[J]. Asian Journal of Computer and Information Systems, 2013(4): 108-113.
- [76] 姜世英. 基于 AVR 单片机的道路积水预警系统[J]. 自动化技术与应用, 2015, 34(9): 40-43. (JIANG Shiyang. Design and realization of road water early warning system based on AVR MCU [J]. Techniques of Automation and Applications, 2015, 34(9): 40-43. (in Chinese))
- [77] 秦玉忠, 吴银成, 黄春, 等. 城市道路积水监测用超声波水位传感器研究[J]. 自动化与仪器仪表, 2021(3): 101-104. (QIN Yuzhong, WU Yincheng, HUANG Chun, et al. Research on ultrasonic water-level sensor for urban road waterlogging measure [J]. Automation & Instrumentation, 2021(3): 101-104. (in Chinese))
- [78] 苗红霞, 文禹鸿, 白宏熙. 基于 WSN 的道路积水监控系统的设计与实现[J]. 计算机测量与控制, 2017, 25(12): 68-72. (MIAO Hongxia, WEN Yuhong, BAI Hongxi. Design and implementation of road waterlogging monitoring system based on WSN [J]. Computer Measurement & Control, 2017, 25(12): 68-72. (in Chinese))
- [79] 梅鹏. 水文监测设备在城市内涝预警中的应用[J]. 湖南水利水电, 2018(6): 83-85. (MEI Kun. Application of hydrological monitoring equipment in the early warning of urban waterlogging[J]. Hunan Hydro & Power, 2018(6): 83-85. (in Chinese))
- [80] 刘波, 吴思全, 周彤, 等. 道路积水自动监测预警系统设计与应用[J]. 低碳世界, 2016(21): 95-96. (LIU Bo, WU Siquan, ZHOU Tong, et al. Design and application of automatic monitoring and early warning system for road water [J]. Low Carbon World, 2016(21): 95-96. (in Chinese))
- [81] 丁榕. 面向城市排水管网和道路积水监控的防涝系统研发[D]. 广州: 华南理工大学, 2017.
- [82] 张斌. 遥感测量在洪水灾害淹没监测中的应用[J]. 城市勘测, 2018(4): 116-119. (ZHANG Bin. Application of remote sensing in monitoring the flood disasters[J]. Urban Geotechnical Investigation & Surveying, 2018(4): 116-119. (in Chinese))
- [83] MASON D C, SPECK R, DEVEREUX B, et al. Flood detection in urban areas using TerraSAR-X [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2010, 48(2): 882-894.
- [84] VORAWIT M, VOJINOVIC Z. Urban flood modelling combining top-view LiDAR data with ground-view SfM observations [J]. Advances in Water Resources, 2015(75): 105-117.
- [85] MARTINIS Sandro, TWELE André, STROBL Christian. A multi-scale flood monitoring system based on fully automatic MODIS and TerraSAR-X processing chains[J]. Remote Sens, 2013(5): 5598-5619.
- [86] 王嘉芃, 刘婷, 俞志强, 等. 基于 COSMO-SkyMed 和 SPOT-5 的城镇洪水淹没信息快速提取研究[J]. 遥感技术与应用, 2016, 31(3): 564-571. (WANG Jiapeng, LIU Ting, YU Zhiqiang, et al. A research on town flood information rapid extraction based on COSMO-SkyMed and SPOT-5 [J]. Remote Sensing Technology and Application, 2016, 31(3): 564-571. (in Chinese))
- [87] MASON D C, GIUSTARINIB L, GARCIA-PINTADOA J. Detection of flooded urban areas in high resolution synthetic aperture radar images using double scattering [J]. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2014(28): 150-159.
- [88] ARSHAD Bilal, OGIE Robert, BARTHELEMY Johan, et al. Computer vision and IoT-based sensors in flood monitoring and mapping: a systematic review[J]. Sensors, 2019, 19(22): 5012.
- [89] NARAYANAN R K, LEKSHMY V M, RAO S, et al. A novel approach to urban flood monitoring using computer vision [C]//Fifth International Conference on Computing, Communications and Networking Technologies. Konstanz: IEEE, 2014.
- [90] 孟翠翠, 时延庆, 陈硕. 济宁城市水文监测系统的功能及应用[J]. 山东水利, 2020(12): 32-33. (MENG Cuicui, SHI Yanqin, CHEN Shuo. Function and application of Jining urban hydrological monitoring system [J]. Shandong Water Resources, 2020(12): 32-33. (in Chinese))

(下转第 140 页)