

王泉, 汤明杰, 施珮, 等. 智慧海绵城市研究进展与展望[J]. 水利水电技术(中英文), 2025, 56(5): 47-58. DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2025.05.004

WANG Quan, TANG Mingjie, SHI Pei, et al. Research progress and prospects of smart sponge cities[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2025, 56(5): 47-58. DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2025.05.004

智慧海绵城市研究进展与展望

王 泉^{1,2}, 汤明杰¹, 施 珮², 彭志强³

(1. 南京信息工程大学 自动化学院, 江苏 南京 210000; 2. 无锡学院 物联网工程学院, 江苏 无锡 214000; 3. 无锡梁溪地铁上盖开发有限公司, 江苏 无锡 214000)

摘要:【目的】随着我国城市化和社会经济的持续发展, 排水管道的不合理部署、排水设施的低效、不透水区域面积增加, 使得城市内涝灾害问题逐渐增多。为进一步促进海绵城市向数字化、智能化发展, 对现有海绵城市智慧化建设的研究进展和发展趋势进行分析。【方法】首先, 通过近年来相关文献梳理了智慧海绵的内涵、基本特征以及发展历程; 其次, 重点介绍了智慧海绵建设中使用的物联网技术及其架构、关键技术; 最后, 阐述了当前智慧海绵研究发展存在的问题和不足, 并对其今后的发展给出了相关的建议。【结果】研究发现: 在对智慧海绵城市底层信息的采集过程中, 传感器在耐久性、无线通信技术传输在低功耗等方面仍存在技术难题需要进一步解决; 同时, 物联网技术、地理信息系统、建筑信息模型、大数据挖掘与分析、数字孪生等多种技术手段在海绵设施监测和应急管理过程中具有广阔的应用前景。【结论】针对智慧海绵城市发展过程中存在的问题提出建议如下: 需要建立健全相关标准及技术规范; 建立跨部门的协调机制, 提高沟通效率; 需要突破核心技术, 不断探索技术创新; 海绵城市在实现智慧型建设的过程中, 需要注重数字信息安全并探索多元化的融资渠道来降本增效。智慧海绵城市的建设是我国加快推进海绵城市基础设施建设向智慧化转型的发展趋势。

关键词: 海绵城市; 物联网技术; 技术体系; 发展前景; 综述

DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2025.05.004

开放科学(资源服务)标志码(OSID):

中图分类号: TU984.11

文献标志码: A

文章编号: 1000-0860(2025)05-0047-12



Research progress and prospects of smart sponge cities

WANG Quan^{1,2}, TANG Mingjie¹, SHI Pei², PENG Zhiqiang³

(1. School of Automation, Nanjing University of Information Technology, Nanjing 210000, Jiangsu, China; 2. School of IoT Engineering, Wuxi University, Wuxi 214000, Jiangsu, China; 3. Wuxi Liangxi Subway Upper Cover Development Co., Ltd., Wuxi 214000, Jiangsu, China)

Abstract: [Objective] The ongoing urbanization and economic development in China have led to factors that have exacerbated the problem of urban waterlogging. These include the improper placement of drainage pipes, the inefficiency of drainage

收稿日期: 2024-05-13; 修回日期: 2024-07-05; 录用日期: 2024-07-12; 网络出版日期: 2024-07-19

基金项目: 国家自然科学基金项目(62072216); 江苏省高校自然科学研究面上项目(21KJB520020); 无锡市“锡山英才计划”创新领军人才项目(2022xsyc002); 无锡市“太湖之光”科技攻关项目(K20221044); 2023年度江苏省高校优秀科技创新团队项目

作者简介: 王 泉(1980—), 男, 正高级工程师, 博士, 主要从事工业物联网、车联网研究。E-mail: wangquan@cwxi.edu.cn

©Editorial Department of Water Resources and Hydropower Engineering. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license.

infrastructure, and the expansion of impervious surfaces. To further promote the digital and intelligent development of sponge cities, this study analyzes the research progress and development trends in the construction of smart sponge cities. [Methods] Firstly, relevant literature in recent years was reviewed to explore the connotation, fundamental characteristics, and development of smart sponge cities. Secondly, Internet of Things technology, its architecture, and key technologies used in the construction of smart sponge cities were highlighted. Finally, the problems and shortcomings of the current research and development of smart sponge cities were explained, and relevant suggestions for future development were given. [Results] The research found that in the process of collecting the underlying information of the smart sponge city, technical challenges remain, such as the durability of the sensor and the transmission of wireless communication technology with low power consumption. At the same time, various technological method, including Internet of Things technologies, geographic information system, building information modeling, big data mining and analysis, and digital twins, have broad application potential in sponge facility monitoring and emergency management. [Conclusion] Suggestions for overcoming the challenges in the development of smart sponge cities are as follows: comprehensive standards and technical specifications need to be established; cross-departmental coordination mechanisms should be created to enhance communication efficiency. Secondly, it is important to overcome core technological challenges and explore technological innovation. Finally, in the process of achieving smart construction, sponge cities need to focus on digital information security and explore diversified financing channels to reduce costs and increase efficiency. The construction of smart sponge cities is a development trend in China aim at accelerating the smart transformation of sponge city infrastructure.

Keywords: sponge city; Internet of Things technology; technical system; development prospects; review

0 引言

近年来,我国城市经济和城市规模发展迅速,同时也给城市环境带来了一定的影响,出现了生态环境严重破坏、水资源消耗过度等一系列环境资源与污染问题。与此同时,极端气候频发,全球变暖显著^[1-2],由于基础设施管网设施不完善,不易透水区域面积加大,雨水难以下渗,造成城市内涝等问题严重,影响人民生活 and 生命财产安全。因此,缓解城市内涝、改善水环境问题刻不容缓^[3-4]。为了解决这些“水”问题,更好地收集城市雨水作为二次利用,海绵城市的建设在一定程度上缓解了城市内涝问题也减轻了城市水资源短缺等问题。2013年,我国首次提出海绵城市概念^[5]。

智慧海绵城市是基于新一代信息技术与海绵城市相结合提出的一种新型水管理模式,可以有效降低城市内涝风险、缓解水体污染。智慧城市起源于2008年IBM公司提出的“智慧地球”,智慧城市旨在探索城市如何通过信息通信技术提升城市整体效率、生活质量。随着物联网技术的广泛应用,海绵城市与智慧城市相融合,形成了以智慧海绵城市为导向的智慧型建设^[6]。李运杰等^[7]提出了“智慧海绵城市”的理念,分别探讨了智慧化建设理念在海绵城市的规划、管理、成效三个层面的应用。刘怀义^[8]以多元需求分析为基础,提出西宁市智慧海绵空间构建思路,并

设计了智慧海绵城市的基本框架,从基础设施、信息融合、服务管理以及监测反馈四个方面探索了具体规划举措,给智慧海绵城市建设提供了参考。SHAO等^[9]针对海绵城市建设中存在的大量数据提出了方案,并对应用进行了效果评估。总的来说,智慧海绵城市是一套集监测、分析、预测、预警、控制等功能于一体的水环境、水管理体系,该体系的建设和发展将成为智慧海绵城市建设的重要内容^[10]。

智慧海绵城市建设通过利用物联网技术(Internet of Things, IoT)、地理信息技术(Geographic Information Technology, GIS)、建筑信息模型(Building Information Modeling, BIM)、大数据驱动(Big Data-Driven)等多种技术手段,对海绵城市进行全方位的信息感知,经过无线通信传输、云平台数据存储、数据可视化等操作,实现海绵城市基础设施的全方位监控,对城市内涝实现智能预警、对紧急事件做出科学管理与决策。然而在实现智慧海绵城市的过程中,物联网等信息技术还有很大的发展空间。

基于此,开展智慧海绵城市研究具有重要现实意义。为深入探究物联网体系下海绵城市发展的情况,本文从技术研发与工程应用视角对智慧海绵城市进行分析,梳理了智慧海绵城市中运用的各项关键技术,并对现有研究进展和发展趋势进行总结,最后分析指出智慧海绵城市建设存在的问题与不足,对其未来的发展给出了相关建议。

1 智慧海绵概述

1.1 智慧海绵城市内涵

智慧海绵城市的核心是增强生态系统的整体服务性功能,结合多种技术共同打造多尺度的水生态基础设施。同时,在应对暴雨洪涝灾害并控制水体污染,实现雨水的“渗、滞、蓄、净、用、排”,让雨水资源充分地二次利用,达到良性的水循环为目的^[11]。智慧海绵城市是将海绵城市的理念和智慧城市的技术融入传统的海绵城市建设中,通过信息化、智能化的手段,实现对城市水资源的高效管理和科学利用。它以城市水循环系统为核心,借助物联网技术、地理信息技术、数据可视化技术等,构建智慧水务平台,实现城市水资源的感知、分析、预测、预警和控制,最终实现城市防洪减灾、水资源优化配置、水环境改善等目标^[12-13]。智慧海绵城市的发展提升了海绵城市建设的效率和可持续性,实现城市资源的协同管理和高效利用,最终达到城市可持续发展目标。

1.2 智慧海绵城市基本特征

智慧海绵城市建设依托现代信息技术如:物联网技术、GIS技术、BIM建模技术、可视化技术等,在物联网的体系架构之下,整个智慧海绵系统呈现出以下几个特征^[14]。

(1)全面感知。智慧海绵城市利用感知设备,对片区各个节点进行信息采集。其中,使用到的设备包括多普勒流量计、翻斗式雨量计、压力式液位计、雷达水位计、气象站、水利遥测终端机等,将这些设备布设在片区易涝监测点、泵站、蓄水池等多个区域,构建底层物联感知体系,并将采集到的数据信息进行有效的存储和管理。

(2)智能决策。智慧海绵城市采用大数据分析、数据挖掘、智能优化算法等手段,对当前水质环境、易涝点情况进行分析与处理,并为城市应急管理提供决策依据。与传统海绵建设相比较,智慧海绵的建设不仅秉承了原有的生态建设目标,同时能够实现精细化管理和科学决策。

(3)高度可视化。基于现代信息技术、物联网技术、GIS技术、BIM建模技术、可视化技术,设计和开发用户终端应用平台,实现智慧海绵监测、管理、决策信息的实时可视化过程,提升智慧海绵城市建设的质量和效率。

(4)节能减排。依托节能环保技术,降低海绵城市建设和运营的能耗。通过水资源的循环利用和生态修复,提高城市水环境质量,促进城市可持续发展。

1.3 智慧海绵城市发展历程

智慧海绵城市建设的初衷是通过采集水环境、易涝点相关数据,并进行信息数字化,实现实时环境监测;综合利用数字化结果,融合多源、多模态信息,实现对海绵城市建设管理的智慧化、科学化、系统化管理,为城市环境科学治理提供理论支撑。智慧海绵城市是将海绵城市理念与智慧城市技术融合的产物,海绵城市建设正逐渐由数字化过渡到智慧化,其详细发展历程如图1所示。2012年国务院在《关于大力推进信息化发展和切实保障信息安全的若干意见》中指出,要引导智慧城市建设健康发展^[15];2013年住房城乡建设部发布了第三批“智慧城市”建设试点,我国进入了智慧城市建设的快车道;2015年,确定第一批16个海绵城市建设试点城市实施项目,智慧信息技术开始在这些试点中应用;2016年,李运杰等^[7]对智慧海绵城市规划、管理、成效三个层面进行了探讨;2021年确定了首批20个海绵示范城市;2022年确定了第二批25个海绵示范城市;2023年确定了第三批15个系统化全域推进海绵城市建设示范城市。其中诸多海绵示范城市中运用了智慧信息技术,例如深圳市福田区建立了全市雨水监控和预警系统,应用传感器技术和信息平台,提升城市应对极端天气的能力;苏州河沿岸智慧海绵设施建设结合大数据和物联网技术,实现区域性水文监测和管理,改善水环境质量;河北雄安新区全面采用智慧海绵城市理念,建设综合性水生态系统,从而提升区域水资源管理和环境保护水平。随着物联网等信息技术的不断发展,国家提出进行数字中国、基础设施物联感知、城市信息平台、城市运行管理平台建设的新要求。

2 关键技术以及发展现状

2.1 智慧海绵城市建设整体技术架构

基于物联网体系架构,董金凯等^[15]将智慧海绵城市的整体结构大致分为五层,其中包括:感知层、网络传输层、智能决策层、应用层以及展示层。此外,孙忠等^[16]、马振强等^[17]也分别提出了类似的海绵城市智慧管控平台整体结构的技术框架。目前,在海绵城市建设的物联网体系架构中,通常基于底层感知设备、GIS、B/S架构相融合的技术思路,综合应用现代信息技术,并以物联网技术为核心。主要技术架构自下而上划分为信息感知层、智能决策层、业务应用层,详细架构如图2所示。信息感知层主要使用微型水质监测站、雷达水位计、多普勒流量计、气象

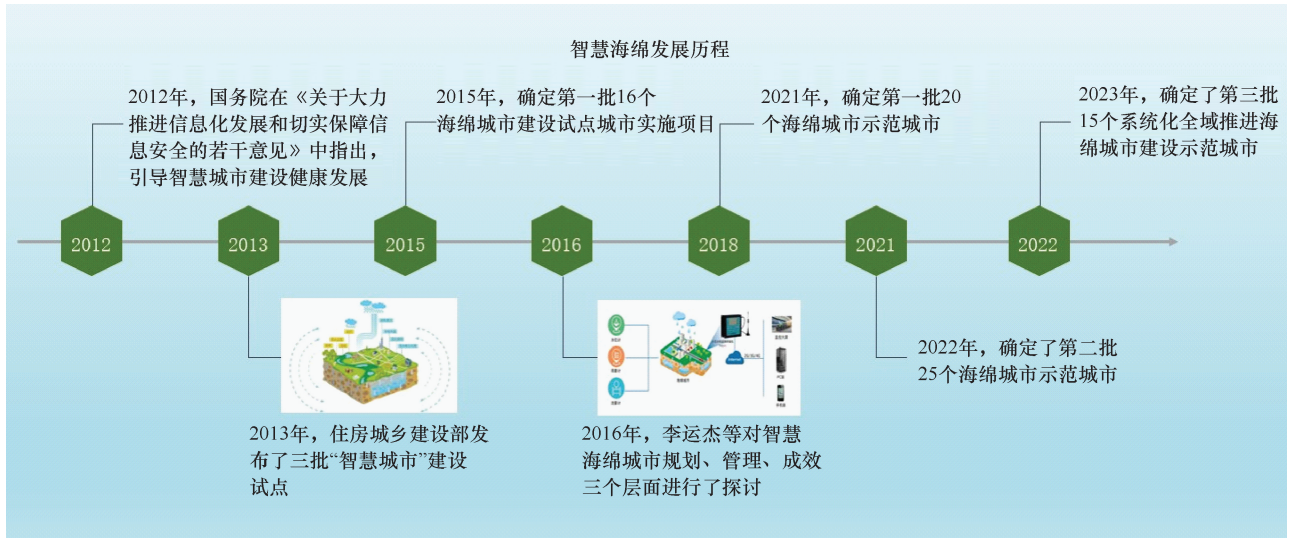


图1 智慧海绵发展历程

Fig. 1 Development timeline of smart sponge

环境监测站等设备负责对多源数据的采集, 该层为智慧海绵系统提供了数据支撑; 智能决策层则基于多网传输与通信、数据存储管理、数据挖掘分析、数据建模等技术, 负责终端设备下的应急响应决策功能; 业务应用层是智慧海绵城市数字化形式的呈现, 基于整体技术架构, 实现对智能决策层中各个功能模块集成信息的统一展示, 具体包括对前期工程的勘察设计, 整体系统的联动运行管控, 日常的运维养护管理三个模块。

2.2 信息感知层

信息感知层为智慧海绵系统提供数据支持, 通过底层感知设备实现数据信息的采集。按照现有的感知设备自身属性可以分为固定式数据采集终端、移动式数据采集设备。其中固定式数据采集设备包括微型水质监测站、多普勒流量计、超声波液位计等; 移动式数据采集设备有投入式液位仪。以无锡市天河公园智慧海绵建设工程项目为例, 该项目综合运用了排水监测、蓄水池水泵监控、地下水监测、自动气象监测站、土壤含水量监测等物联感知设备, 部分感知设备如图3所示。图中红色点位为现场实际传感设备的数据采集点。感知设备主要采集各个节点的数据信息, 通过定位、传输、监控, 实时动态感知现场的情况, 为智慧海绵提供准确高效的信息支持。信息感知层涉及的关键技术包括传感器智能识别技术、视频图像采集分析技术、实时定位技术等。

在传感器应用方面, 多集中于物联网技术体系架构下, 结合感知设备进行数据收集。冯永慧等^[18]基

于STM32处理器与采集箱上的传感器实现了对海绵城市水质数据的收集。吴学伟等^[19]通过527个液位计、40个雨量计, 结合IoT实现对监测点水位偏离情况进行监控分析, 对管网运行状态进行分析。刘家宏等^[20]通过液位计、流量计、SS检测仪、雨量计等感知监测设备实现了对数据监测和及时更新, 从而对城市的水循环过程有全面掌握。李素桂等^[21]通过物联网的高精度感知技术监测获取相关数据, 利用GPRS、4G、光纤等把采集的数据进行传输, 从而达到全过程、全方位的水安全、水资源、水环境监测与管理。李婷睿^[22]通过覆盖园区的监测设备、传感器等设备为智慧海绵系统提供更为详细的数据信息, 实现了对园区的数据进行传输和共享。牟春霖^[23]研发基于振弦式传感器的智能监测采集仪, 采用JSON格式将数据实时上传至云端服务器, 实现了传感器数据的自动化采集与共享。

目前, 传感器等设备能够很好地将需要采集的信息进行监测采集, 然而现阶段数字化信息采集在传感器的耐久性、设备清洗、传输效率等方面还有一定的差距。传感器对环境需要有一定要求, 面对高温、粉尘、电磁干扰的环境下适应能力不强; 传感器监测水质需要定时清洗传感器探头以保证数据的可靠性; 数据传输效率受到能源限制、信道容量限制以及无线传输干扰。

2.3 智能决策层

智能决策层作为智慧海绵建设中核心部分, 运用了多重关键技术, 其中包含了多网传输与通信、数据存储管理、大数据挖掘分析、数据驱动模型等。多网

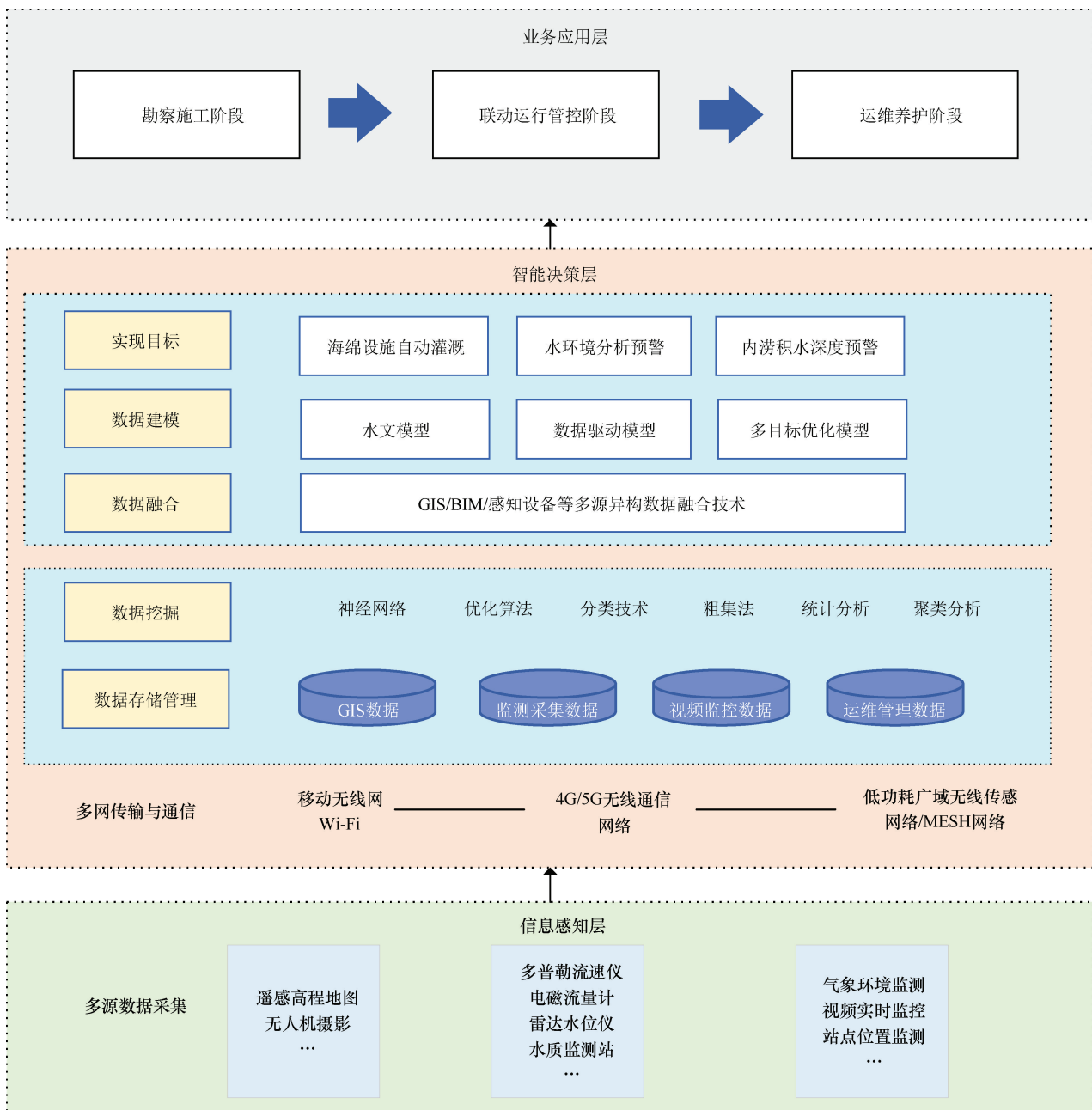


图 2 智慧海绵城市管控一体化平台总体结构

Fig. 2 Overall structure of the integrated platform for smart sponge city management and control

传输与通信实现了底层设备到平台之间的信息互通, 同时将采集的数据安全高效的传输到数据库; 数据存储管理利用数据库技术实现对大数据的调用, 供组织机构和科研人员使用; 在大数据挖掘分析环节将综合运用大数据, 实现对数据的清洗, 相关性筛选、降维、分析处理等操作; 数据驱动模型以多源数据融合为依托, 实现对水体质量的预测、易涝点水位的判断、内涝点的及时预警等。智能决策层需要综合运用多源数据融合技术, 实现智能感知与数据的集成处理。

2.3.1 通信技术

智慧海绵设施往往涉及的地域范围广、环境复杂, 良好的通信条件是实现数据采集的前提。随着通信技术的发展, 不仅实现了与底层感知设备的连接也与云平台等建立起桥梁, 并实现数据的采集与存储。当下无线通信技术包括射频识别 (RFID)、移动热点 (Wi-Fi)、蓝牙 (Bluetooth)、近场通信 (NFC)、紫蜂 (ZigBee)、长距离低功耗无线通信 (LoRa)、SigFox、窄带物联网 (NB-IoT)、第五代移动通信技术 (5G) 等^[24]。常见的无线通信技术标准信息 (见表 1)。



图 3 智慧海绵城市感知设备信息采集点

Fig. 3 Information collection points for smart sponge city perception devices

表 1 物联网中常用的无线通信技术

Table 1 Common wireless communication technologies in the Internet of Things

技术	标准	数据传输速率	范围	功耗
射频识别 (RFID)	ISO/IEC 18000	430 kbps	<10 cm; 10 cm~1 m; >12 m	低
移动热点 (Wi-Fi)	IEEE802. 11	2~800 Mbps	50 ~ 100 m	高
蓝牙 (Bluetooth)	IEEE802. 15. 1	25 Mbps	1 ~ 100 m	低
近场通信 (NFC)	ISO/IEC18092	100~424 kbps	<10 cm	低
紫蜂 (ZigBee)	IEEE802. 15. 4	250 kbps	10 ~ 100 m	低
远距离无线电 (LoRa)	LoRa Alliance	0. 3~50 kbps	1 ~ 10 km	低
SigFox	SigFox	<10 kbps	10 ~ 50 km	低
窄带物联网 (NB-IoT)	3 GPP	20~200 kbps	1 ~ 10 km	低
第五代移动通信技术 (5G)	3 GPP	10 Gbps	1 ~ 3 km	低

以 LoRa、SigFox、NB-IoT 等为代表的低功耗广域网 (LPWAN) 远程通信技术因其能耗低, 近些年来受到青睐。LoRa 更适合长距离或复杂环境, PHILIP 等^[25] 基于 LoRa 技术重点关注了水质监测系统中节电

设备, 实现了节能以及延长电池寿命, 并减少了碳排放。NB-IoT 更具有预测性, GARCÍA-MARTÍN 等^[26] 利用 IEEE802. 15. 4 g 和 NB-IoT 技术, 在降低功耗的同时实现了对配水系统的智能计量。GENARO

等^[27]利用 Sigfox 协议栈解决了远程水质监测系统的主要挑战, 并且降低了成本。

在低功耗的无线通信技术不断发展下, 实现了对海量数据低延时、安全可靠的实时采集和传输, 全面、准确、高效地掌握建筑设施的具体情况, 对于构建智慧海绵系统不可或缺。然而在评价某种无线通信技术利弊时, 采用“一刀切”的方式来评判某种无线通信技术的性能是不可取的, 应该结合特定的环境和场景中, 选用合适的无线通信技术。目前市面上绝大多数的感知设备都支持无线通信。5G 更是凭借着高带宽、低延迟、支持大规模设备连接等优点被广泛使用, 然而仍存在部署成本相对较高、功耗略高于 4G 等弊病。未来, 无线通信技术在保证传输效率的同时应在传输范围、功耗、延迟等方面继续优化发展。

2.3.2 数据存储与管理技术

数据存储与管理技术主要为智慧海绵系统提供数据支持。由于智慧海绵系统庞大、数据类型复杂, 且构建多源异构数据融合, 亟需良好的数据库系统对底层设备采集的数据进行存储。目前智慧海绵城市平台的数据存储种类包含 GIS 数据、常规业务数据、视频监控数据、水质采集数据、维护人员数据、气象环境数据等。而对大数据的存储技术通常包括 Hive、HBase、HDFS 等。基于数据存储与管理技术实现对智慧海绵的水质信息、易涝点信息等状况实时采集存储, 为智慧海绵水环境分析预警、城市低洼地段易涝点预警打下了坚实的基础。

SOOMRO 等^[28]认为关系数据仍是物联网体系架构下智慧城市应用中最常用的存储机制, 由于存储数据量大必须是采用分布式存储, 以便利用多个数据存储, 因而通常使用 HDFS、Amazon EC2 等数据存储解决方案。但大数据的来源广泛、格式多样, 传统的关系数据库 MySQL、Oracle 等难以处理海量数据问题。杨莉等^[29]认为海绵城市的智慧监管数据库系统要

根据需求不断调整、升级软件功能, 并建立健全更新机制, 逐步实现对数据库内容的整体入库。任海静等^[30]在城镇水务数据管理体系中建议数据存储采用分布式文件系统, 以更好地满足海量数据的存储和计算分析。针对数据管理应实时增加或删减服务器, 并对单个服务器的接口服务器进行配置, 提供更优的数据接口服务。VANGIPURAM 等^[31]利用采集的原始数据格式结合物联网技术发送到分布式数据存储和区块链边缘, 利用分布式和去中心化的架构来存储统计数据, 实现对地下水水质信息的有效管理。

海量的数据存储作为智慧海绵城市建设中的关键一环, 智慧海绵城市建设成功应用取决于数据的可用性以及数据管理基础设施的质量。因此, 如何实现高效、低成本的数据传输、存储、处理对智慧海绵管控系统的运行至关重要。

2.3.3 大数据挖掘与分析技术

在智慧海绵城市系统管控应用中, 对实时收集的数据运用到多种不同的大数据挖掘分析方法, 能够及时做出准确的预测和决策。现阶段大数据挖掘分析技术主要有以下几种方法: 如神经网络、优化算法、分类技术、粗集法、统计分析、聚类分析、回归分析等。不同大数据挖掘技术的优缺点如表 2 所列。

此外, PAN 等^[32]探讨了大数据具有多维层次性、完整性、关联性, 要求系统对数据生命周期采取有针对性的方法, 即数据采集、预处理、分析分类、相互关系分析, 来揭示数据中的规律。这表明了以数据驱动为代表的处理方式是智慧化进程中不可或缺的一部分。RATHORE 等^[33]在智慧城市的建设中提出了一种基于四层架构的完整系统, 利用 Hadoop 和 Spark 进行数据管理和数据实时处理。BADIDI 等^[34]认为当下边缘计算、雾计算等新兴技术有望解决智慧城市领域的大数据存储和分析的问题。通过对数据的快速分析, 对城市中发生的紧急事件做出应急管理。但大数据挖掘分析等技术带来便利的同时也存在一定

表 2 大数据挖掘分析技术的优缺点

Table 2 Advantages and disadvantages of big data mining and analysis techniques

方法	优点	缺点
神经网络	鲁棒性好、自适应强、能够并行处理、容错度高	黑箱性、难以学习理解网络的学习决策过程
优化算法	全局搜索能力强、适应性强、易于结合其他算法	计算量大、参数选择复杂、收敛速度慢、难以处理约束条件
分类技术	简单易实现、分类速度快、灵活性较高、可解释性强	复杂度较高、特征选择困难、数据量较少时易过拟合
粗集法	属性简约、不需要额外信息、高效处理大规模数据	对噪声较为敏感、对数据规模有一定要求、处理复杂性问题有限、不适合处理动态数据
统计分析	数据驱动决策、应用场景较为广泛、支持数据可视化	对数据质量要求较高、复杂性和专业性较高、存在一定的局限性
聚类分析	无需监督、能够处理多维数据、降低数据复杂性	对噪声和异常值敏感、时间复杂度高、难以确定簇数
回归分析	原理简单易懂、可解释性强、预测效果好	对非线性关系的拟合能力有限、对异常数据敏感、存在过拟合风险

安全隐患。2000年,玛鲁奇市供水系统遭受攻击,遭到了超100万L污水的袭击。2017年伦敦劳埃德银行系统遭到黑客袭击,导致530亿美元的经济损失^[35]。因此,在大数据技术发展的过程中,信息安全建设问题不容忽视。

随着海绵城市建设的智慧化程度越来越高,对数据的收集和使用不断增加,数据隐私和安全性问题越来越突出。因此,在建设和管理的过程中应更加重视数据保护,采取更多的措施来确保数据安全。

2.3.4 多源异构数据融合与应用

智慧海绵城市建设中采用了多源异构数据融合等技术,通过对不同地方、不同形式、不同结构、不同标准的数据源进行清洗与预处理,再进行对数据整合,最后通过转换、管理对模型进行部署,从而达到对智慧海绵城市全过程的信息集成,实现海绵设施自动灌溉、水环境分析预警、城市低洼地段易涝点预警等互操作功能。

程水平^[36]在镇江某海绵公园实现了在不同土壤湿度等状态下,定量对海绵体进行浇灌,并通过灰色关联模型,融合了多源数据,实现对城市水质的智能分析。张净等^[37]基于NB-IoT技术设计了海绵城市滤水养鱼智能监控系统,通过多源数据的整合,提出EEMD-GWO-SVR模型并对其部署,实现了水质的在线预测取得了较好的效果。此外,赵明苍等^[38]基于多源数据提取地形、经纬度等变量集,运用RRF算法建立临沂市GPM产品的降尺度模型,并利用12个地面观测站资料进行验证。李文强等^[39]研发的无人值守泵、闸群智慧运管系统,通过多源数据采集、数据清洗和辅助决策等过程,实现了对泵、闸群的分布情况、具体定位、巡检人员位置的实时了解。当出现异常故障时,可利用该系统及时处理故障信息。

BHARDWAJ等^[40]基于物联网提出了利用机器学习进行对水质评估的框架,结果表明使用机器学习等人工智能技术后,相较于其他方法能更有效地管理水监测、完成水质评估。HEMDAN等^[41]提出了基于物联网下的智能水质预测,以便在监测系统进行有效的决策支持。

然而这些基于物联网技术下的水质分析评估并没有与智慧海绵城市相结合,随着海绵城市的发展,以及人工智能等AI技术的蓬勃发展,未来势必会有更多的数据模型能够结合边缘设备实现各种情景下的互操作功能。其次,在对边缘设备进行模型的部署中,在其精度、运行速度要求达标的前提下,轻量化的模型备受关注,是当下乃至未来的发展趋势。

2.4 业务展示应用层

业务展示应用层作为贯穿整个智慧海绵建设工程的核心部分,其包含了建设前期的勘察设计、施工建设管理以及建成后的运维养护管理大致三个模块。最终实现对于智慧海绵建设管理平台中各个业务功能模块集中统一展示。基于工程项目全生命周期管理的理念,结合“智慧”的含义,整个工程进展情况都将以数字化的形式进行记录。

在勘察设计阶段,通过对现场考察、GIS信息获取、场景建模,以及结合BIM技术极大地提高了建模效率。基于可视化等技术手段,实现了对底层采集信息的全方位数字化展示,如图4所示。同时结合虚拟现实技术、增强现实技术进一步提高了可视化展示效果。肖婉婷等^[42]通过人工智能算法对低影响开发设施布局进行优化,模拟降雨过程中的水文、水力学特性,综合考虑径流控制、污染物去除、洪涝控制三方面指标构建基于建设成本的综合效益目标。施工建设阶段通过全过程数字化的记录方式数字化展现每个环节的进度、安全风险等。运维养护阶段需要安排专员定期对设备进行维护并记录在案。高学珑等^[43]基于BIM技术,通过提取、关联、集成海绵城市全生命周期数据、实现从源头-过程-末端的全过程三维立体可视化,统筹管理海绵城市建设与运维。

2.5 智慧海绵城市建设相关案例

目前,智慧海绵城市建设在诸多城市中积极开展。深圳市正在积极创建中国特色社会主义先行示范智慧城区,并涌现出一批具有时代担当的智慧海绵城市建设典范项目。以深圳国际交流中心为例,由政府牵头规划引导、国有企业代建,人民共享共治的三方协作建设模式。基于智慧海绵城市平台架构,提出了多个系统功能模块方案,针对不同项目需求进行功能板块的定制,切实为人民生产生活提供更好的服务。以BIM数字平台为载体的监测布点及评估来确定片区水安全监测治理与生态空间格局管控,更好地服务于民、与民共享。

上海市作为第二批入选海绵城市建设试点城市,是全国面积最大的海绵城市试点地区。以临港海绵城市智慧管控平台(一期)为例^[44],基于数字信息技术构建以实时监测加统计分析为主、计算机仿真模型为辅的考核评估计算方法体系,实现对项目建设的全生命周期管理,从而助力智慧海绵城市平台长效管控。依托管控平台多方面高效联动各个主体,保障智慧海绵城市建设效果。

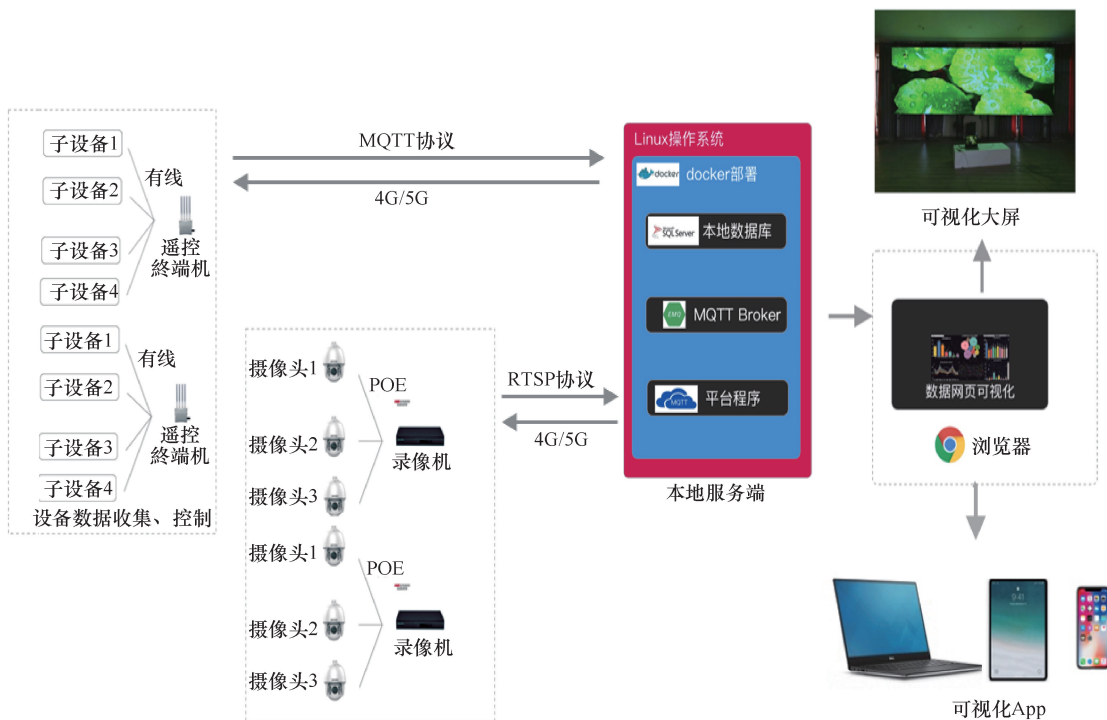


图4 智慧海绵系统终端界面可视化

Fig. 4 Visualization of terminal interface for smart sponge system

四平市在智慧海绵城市建设中^[45], 引进现代计算机信息技术、物联网技术、GIS技术及模型分析技术等手段, 构建了排水管网GIS平台、排水管理移动APP、综合管理系统及“源—网—厂—河”监测体系, 形成领导驾驶舱、黑臭水体治理、城市防汛排涝、污水提质增效、智慧海绵城市、综合管理系统六大业务板块, 为四平市提供了聚合资源、统一服务、全方位监控管理支撑, 提高了城市排水应急指挥能力。因地制宜加强平台地域特色, 根据四平市的地势特征、径流分配不均问题, 合理选取监测设备及点位, 优化布局位置, 使得海绵城市与物联网等信息技术更好的融合。

上述智慧海绵城市案例说明我国目前在海绵城市建设的智慧化已经初步取得了一定的成效。海绵城市的智慧化发展有利于人民宜居、有利于实现对水资源的科学治理、有利于对城市内涝灾害的安全防护, 通过智慧海绵城市的建设让智慧海绵城市的理念更加深入人心。

3 存在的问题与相关建议

3.1 现有问题

随着国家大力发展数字经济, 以5G为代表的新型网络基础设施建设是未来中国打造数字经济的风向标。在创新、协调、绿色、开放、共享的新发展理念

指引下, 我国数字经济发展迅速。

目前, 诸多信息技术已在很多领域已经展开建设, 例如: 智慧医疗、智慧农业、无人驾驶等领域均取得了颇为丰硕的成果。然而, 海绵城市建设在信息化、数字化的发展过程中仍处在探索阶段, 所依赖的技术还不成熟, 在建设的过程中仍需要进一步完善。例如: 地区环境差异、建设资源缺失、职能部署、技术垄断等方面还存在很多问题。

(1)政策和法规滞后。对新型交叉领域智慧海绵的建设发展缺乏系统性的认识, 顶层设计和一系列全面规划还不完善。相较于传统海绵城市的建设, 信息化技术更新迭代迅速, 因而在发展过程中不能直接照搬之前发展模式且缺乏统一的标准和规范。

(2)技术复杂。目前, 智慧海绵系统的新兴技术手段尚未集成统一。海绵城市覆盖广、体量大、涉及信息面广, 然而现阶段海绵城市包含的多源异构数据融合体系不够完善, 采集的监测数据量之多, 数据类型多元化, 对数据的存储、检索和挖掘能力形成了极大的挑战。因此, 如何实现对相关数据融合处理还需要进一步的探索。

(3)信息风险高。数字信息化时代, 网络安全、恶意攻击、高危漏洞等仍是网络信息安全建设离不开的话题, 防范风险能力有待进一步提高。此类高危风

险都会对基础设施造成严重影响,同时给社会带来不可估量的损失。因此,需要对智慧化建设的安全可靠性提出更高的要求。

(4)管理协调难度大。智慧海绵建设周期长、涉及范围广,不同管理部门缺少有效沟通,使得信息发布不及时、信息共享程度不流畅等问题,产生了较为严重的经济损失。且我国智慧海绵城市建设仍处于起步阶段,没有出台相关的管理规章制度。其背后主要原因是相关规范体系的缺失、相关人才稀缺。

(5)建设成本高运维难。建设智慧海绵城市的成本较高,尤其是对老城区的改造。其次,在对于智慧海绵等一系列基础设施的维护上需要高额的费用以及相关专业的技术人员。

3.2 相关建议

未来,海绵城市的建设势必是智慧化、数字化、综合化。基于物联网、云计算等信息技术,将其水质监测系统、内涝预警系统、智慧水务系统等集成实现。在整个智慧海绵城市的建设过程中,物联网技术承担着从底层设备信息采集到云端通信再到可视化的强有力支撑角色。可以预见,随着未来技术不断的发展,物联网等信息技术在海绵城市建设领域将具有更广阔的应用空间。目前相关研究和应用更多还处于起步阶段,从当下需求来看并结合现有问题提出了以下几点建议。

(1)建立健全相关标准及技术规范,加强顶层设计和规范相关标准。通过试点城市,逐步完善智慧海绵城市和信息化平台的统一规范建设标准。通过信息技术与海绵城市的融合,实现对智慧海绵数据的资源化、控制智能化、管理精细化、决策智慧化,不断推进智慧海绵城市建设的全面健康可持续发展。

(2)突破核心技术,不断探索技术创新。近年来,物联网、数字孪生、人工智能等技术发展日新月异。但在无线通信技术、人工智能等核心技术方面仍面临卡脖子现象,如何突破这些核心技术?只有不断实践创新,打破技术垄断。实现对相关技术不断的创新,才能更好的为智慧化建设奠定坚实的基础,为构建成熟完善的技术体系提供强有力的支撑。

(3)数字化发展是海绵城市实现智慧型发展的重要途径。在智慧海绵城市建设的过程中,物联网等信息技术必不可少。要进一步提高数据使用效率,推动不同设施之间数据共享。更大程度上释放数字化应用价值,从而推动数字经济效益。在数据高度共享的同时,也要注重数据安全等问题,切实加强网络信息安全、数据隐私安全等机制。建立健全平台监测,将信

息化安全防控思想融入智慧海绵城市建设的每个环节中。

(4)建立跨部门的协调机制,设立专门的机构、事务办等,利用信息技术提升数据共享和沟通效率。并建立完善的复合型人才培养体系,培养更多交叉型复合型人才。

(5)探索多元化的融资渠道,例如政府牵头,分阶段实施项目降低一次性投入压力。并制定详细的运维计划,培训专业技术人员,来提高运维效率。

4 结 论

海绵城市与智慧城市的融合是我国实现可持续发展理念的贯彻,也是打造绿色城镇化发展的趋势,是我国实现低碳、打造良好生态的必经之路。通过打造智慧海绵城市,可以更好地应对城市内涝灾害,并在一定程度上缓解水体污染,改善城市环境质量。

本文针对海绵城市设施建设等相关领域的发展,尤其是基于物联网技术的智慧海绵城市的建设,重点介绍了其研究进展,总结其使用的相关技术,并阐述智慧海绵建设发展的过程中存在诸多问题和重大挑战,最后提出了相关建议。在实现其智慧化的过程中,要将信息技术贯穿海绵城市建设的各个环节,运用信息技术实现各个板块之间的全连接。同时,在发展的过程中不断摸索和总结相关技术,出台并完善智慧化建设体系方案,助力智慧海绵城市建设的创新发展。

参考文献(References):

- [1] ZHOU Y, SHARMA A, MASUD M, et al. Urban rain flood ecosystem design planning and feasibility study for the enrichment of smart cities [J]. Sustainability, 2021, 13(9): 5205.
- [2] TAN Y, CHENG Q, LYU F, et al. Hydrological reduction and control effect evaluation of sponge city construction based on one-way coupling model of SWMM-FVCOM: A case in university campus [J]. Journal of Environmental Management, 2024, 349: 119599.
- [3] 俞孔坚,李迪华,袁弘,等.“海绵城市”理论与实践[J].城市规划,2015,39(6):26-36.
YU Kongjian, LI Dihua, YUAN Hong, et al. The theory and practice of “sponge cities” [J]. City Planning, 2015, 39(6): 26-36.
- [4] MA J, LIU D, WANG Z. Sponge city construction and urban economic sustainable development: An ecological philosophical perspective [J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2023, 20(3): 1694.
- [5] 张旺,庞靖鹏.海绵城市建设应作为新时期城市治水的重要内容[J].水利发展研究,2014,14(9):5-7.
ZHANG Wang, PANG Jingpeng. Sponge city construction should be

- an important part of urban water management in the new era [J]. *Water Resources Development Research*, 2014, 14 (9): 5-7.
- [6] GUO Y, GUO X, GENG X, et al. Integration of smart city and sponge city based on BIM and artificial intelligence [C]//IEEE. 2022 Second International Conference on Artificial Intelligence and Smart Energy (ICAIS). New York: IEEE, 2022.
- [7] 李运杰, 张弛, 冷祥阳, 等. 智慧化海绵城市的探讨与展望 [J]. *南水北调与水利科技*, 2016, 14(1): 161-164.
- LI Yunjie, ZANG chi, LENG Xiangyang, et al. Exploration and prospect of intelligent sponge cities [J]. *South to North Water Diversion and Water Conservancy Technology*, 2016, 14(1): 161-164.
- [8] 刘怀义. 面向多元需求的城市智慧海绵空间探索 [J]. *青海师范大学学报(自然科学版)*, 2018, 34(3): 46-52.
- LIU Huaiyi. Exploration of urban smart sponge space for diversified needs [J]. *Journal of Qinghai Normal University (Natural Science Edition)*, 2018, 34(3): 46-52.
- [9] SHAO W, ZHANG H, LIU J, et al. Data integration and its application in the sponge city construction of CHINA [J]. *Procedia Engineering*, 2016, 154: 779-786.
- [10] 马珂. 海绵城市理念下的智慧水务建设研究 [J]. *智能建筑与智慧城市*, 2022(1): 139-141.
- MA Ke. Research on smart water construction under the sponge city concept [J]. *Intelligent Buildings and Smart Cities*, 2022(1): 139-141.
- [11] 袁再健, 梁晨, 李定强. 中国海绵城市研究进展与展望 [J]. *生态环境学报*, 2017, 26(5): 896-901.
- YUAN Zaijian, LIANG Chen, LI Dingqiang. Research progress and prospects of sponge cities in China [J]. *Journal of Ecology and Environment*, 2017, 26(5): 896-901.
- [12] GUPTA N. Editorial: Smart cities challenges, technologies and trends [J]. *Frontiers in Big Data*, 2023, 6: 1258051.
- [13] WANG K, ZHAO Y, GANGADHARI R K, et al. Analyzing the adoption challenges of the Internet of Things (IoT) and Artificial Intelligence (AI) for smart cities in China [J]. *Sustainability*, 2021, 13(19): 10983.
- [14] 杨柄桥, 黄金焕. 基于海绵城市理念的智慧水务应用研究 [J]. *中国住宅设施*, 2023 (5): 16-18.
- YANG Bingqiao, HUANG Jinhuan. Research on the application of smart water management based on sponge city concept [J]. *Residential facilities in China*, 2023(5): 16-18.
- [15] 董金凯, 孟青亮, 冯力文. 智慧海绵系统的总体架构与关键技术初探 [J]. *智能城市*, 2017, 3(12): 19-21.
- DONG Jinkai, MENG Qingliang, FENG Liwen. Preliminary exploration of the overall architecture and key technologies of smart sponge system [J]. *Smart City*, 2017, 3(12): 19-21.
- [16] 孙忠, 运迎霞, 耿红生. 智慧技术导向下的大城市内涝减缓方法研究 [J]. *天津大学学报(社会科学版)*, 2021, 23(6): 525-530.
- SUN Zhong, YUN Yingxia, GENG Hongsheng. Research on methods for mitigating urban waterlogging under the guidance of smart technology [J]. *Journal of Tianjin University (Social Sciences Edition)*, 2021, 23(6): 525-530.
- [17] 马振强, 隋军. 海绵城市智慧管控平台构建 [J]. *环境工程*, 2023, 41(S1): 545-549.
- MA Zhenqiang, SUI Jun. Construction of sponge city smart control platform [J]. *Environmental engineering*, 2023, 41(S1): 545-549.
- [18] 冯永慧, 刘路, 郑双华, 等. 基于STM32的智慧海绵城市数据采集系统设计 [J]. *工业控制计算机*, 2018, 31(11): 41-43.
- FENG Yonghui, LIU Lu, ZHENG Shuanghua, et al. Design of a smart sponge city data collection system based on STM32 [J]. *Industrial Control Computer*, 2018, 31(11): 41-43.
- [19] 吴学伟, 黄穗虹, 黄艳雄, 等. 广州海绵城市建设之智慧排水实践 [J]. *环境工程*, 2023, 41(11): 110-114.
- WU Xuewei, HUANG Suihong, HUANG Yanxiong, et al. Smart drainage practice in Guangzhou sponge city construction [J]. *Environmental Engineering*, 2023, 41(11): 110-114.
- [20] 刘家宏, 李泽锦, 张颖春, 等. 基于城市水文模型的海绵城市智慧管控 [J]. *水利水电技术*, 2019, 50(9): 1-9.
- LIU Jiahong, LI Zejin, ZHANG Yinchun, et al. Smart management and control of sponge cities based on urban hydrological models [J]. *Water Conservancy and Hydropower Technology*, 2019, 50(9): 1-9.
- [21] 李素桂, 龚让声, 林敏. 基于物联网的海绵城市在线监测系统设计与实现 [J]. *黑龙江生态工程职业学院学报*, 2018, 31(2): 15-18.
- LI Sugui, GONG Rangsheng, LIN Min. Design and implementation of sponge city online monitoring system based on the Internet of Things [J]. *Journal of Heilongjiang Ecological Engineering Vocational College*, 2018, 31(2): 15-18.
- [22] 李婷睿. 基于海绵城市理念的智慧水务应用研究 [J]. *给水排水*, 2017, 53(7): 129-135.
- LI Tingrui. Research on the application of smart water management based on sponge city concept [J]. *Water Supply and Drainage*, 2017, 53(7): 129-135.
- [23] 牟春霖. 智能监测采集仪在城轨基坑监测中的应用 [J]. *铁道勘察*, 2023, 49(5): 36-41.
- MU C L. Application of intelligent monitoring and collection instrument in monitoring of urban rail foundation pit [J]. *Railway Investigation and Surveying*, 2023, 49(5): 36-41.
- [24] SINGH R, CHHILLAR S, KARTHIKA G, et al. Hydro-informatics for drainage management in a smart city using artificial intelligent, IoT and machine learning [J]. *AIP Conference Proceedings*, 2023, 2800 (1): 1-11.
- [25] PHILIP M S, SINGH P. An energy efficient algorithm for sustainable monitoring of water quality in smart cities [J]. *Sustainable Computing: Informatics and Systems*, 2022, 35: 100768.
- [26] GARCIA-MARTIN J P, TORRALBA A, HIDALGO-FORT E, et al. IoT solution for smart water distribution networks based on a low-power wireless network, combined at the device-level: A case study [J]. *Internet of Things*, 2023, 22: 100746.
- [27] DI GENNARO P, LOFÚ D, VITANIO D, et al. Waters: A Sigfox-compliant prototype for water monitoring [J]. *Internet Technology Letters*, 2019, 2(1): e74.
- [28] SOOMRO K, BHUTTA M N M, KHAN Z, et al. Smart city big data analytics: An advanced review [J]. *Wiley Interdisciplinary Reviews*

- Data Mining and Knowledge Discovery, 2019, 9(5): e1319.
- [29] 杨莉, 王红武, 胡坚, 等. 镇江市基于信息化技术的海绵城市智慧监管系统研究 [J]. 中国给水排水, 2018, 34(10): 7-10.
YANG Li, WANG Hongwu, HU Jian, et al. Research on the smart supervision system of sponge city in Zhenjiang city based on information technology [J]. China Water Supply and Drainage, 2018, 34(10): 7-10.
- [30] 任海静, 许冬件, 于栋, 等. 城镇水务系统数据管理体系构建研究 [J]. 建设科技, 2023 (10): 14-18.
REN Haijing, XU Dongjian, YU Dong, et al. Research on the construction of data management system for urban water management system [J]. Building Technology, 2023(10): 14-18.
- [31] VANGIPURAM S L T, MOHANTY S P, KOUZIANOS E, et al. G-DaM: A distributed data storage with blockchain framework for management of groundwater quality data [J]. Sensors, 2022, 22 (22): 8725.
- [32] PAN Y, TIAN Y, LIU X, et al. Urban big data and the development of city intelligence [J]. Engineering, 2016, 2(2): 171-178.
- [33] RATHORE M M, AHMAD A, PAUL A, et al. Urban planning and building smart cities based on the Internet of Things using big data analytics [J]. Computer Networks, 2016, 101(C): 63-80.
- [34] BADIDI E, MAHREZ Z, SABIR E. Fog Computing for smart cities' big data management and analytics: A review [J]. Future Internet, 2020, 12(11): 190.
- [35] WEBBER J L, FLETCHER T, FARMANI R, et al. Moving to a future of smart stormwater management: A review and framework for terminology, research, and future perspectives [J]. Water Research, 2022, 218: 118409.
- [36] 程冬平. 基于物联网的海绵城市水雨情智慧监管系统的设计与实现 [D]. 镇江: 江苏大学, 2019.
CHENG Dongping. Design and Implementation of a Smart Monitoring System for Water and Rain Conditions in Sponge Cities Based on the Internet of Things [D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2019.
- [37] 张净, 崔建军, 蒋礼兵, 等. 基于窄带物联网的海绵城市滤水养鱼智能监控系统设计 [J]. 中国给水排水, 2020, 36(14): 61-65.
ZHANG Jin, CUI Jianjun, JIANG Libing, et al. Design of intelligent monitoring system for sponge city filtration and fish farming based on narrowband internet of things [J]. China Water Supply and Drainage, 2020, 36(14): 61-65.
- [38] 赵明苍, 孙秀丽. 基于 RRF 算法临沂市 GPM 卫星降水量降尺度研究 [J]. 水利科学与寒区工程, 2024, 7(6): 72-74.
ZHAO M C, SUN X L. Study on downscaling precipitation using GPM satellite in Linyi City based on RRF algorithm [J]. Hydro Science and Cold Zone Engineering, 2024, 7(6): 72-74.
- [39] 李文强, 何智才, 陈志平, 等. 基于海绵城市理念的无人值守泵、闸群智慧运管 [J]. 中国给水排水, 2022, 38(16): 101-105.
LI Wenqiang, HE Zhicai, CHEN Zhiping, et al. Unmanned pump and intelligent operation management of gate group based on sponge city concept [J]. China Water Supply and Drainage, 2022, 38 (16): 101-105.
- [40] BHARDWAJ A, DAGAR V, KHAN M O, et al. Smart IoT and machine learning-based framework for water quality assessment and device component monitoring [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2022, 29(30): 46018-46036.
- [41] HEMDAN E E-D, ESSA Y M, SHOUMAN M, et al. An efficient IoT based smart water quality monitoring system [J]. Multimedia Tools and Applications, 2023, 82(19): 28827-28851.
- [42] 肖婉婷, 宋聚生, 马翔, 等. 基于 SWMM 的校园海绵城市布局优化研究: 以深圳市某中学校园为例 [J]. 水利水电技术(中英文), 2023, 54(9): 48-60.
XIAO Wanting, SONG Jusheng, MA Xiang, et al. Optimization of LID facilities planning strategy based on PSO algorithm and SWMM model: A case study of middle school campus in Shenzhen [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2023, 54(9): 48-60.
- [43] 高学琰, 陈奕, 许乃星, 等. 基于 BIM 的海绵城市规划建设运维管控关键技术研究 [J]. 给水排水, 2019, 55(10): 51-56.
GAO Xuelong, CHEN Yi, XU Naixing, et al. Research on key technologies of sponge city planning, construction, operation and maintenance control based on BIM [J]. Water Supply and Drainage, 2019, 55(10): 51-56.
- [44] 吕永鹏, 马玉. 数字化“海绵”更智慧: 临港海绵城市智慧管控平台(一期)应用效果显著 [N]. 中国建设报, 2022-06-30(6-7).
LYU Yongpeng, MA Yu. Digital “Sponge” is smarter: Lingang sponge city smart control platform (Phase I) has significant application effects [N]. China Construction Daily, 2022-06-30(6-7).
- [45] 付强, 刘学, 王成日. 智慧海绵平台加码绿色生态城市建设: 四平市创新打造“平急两用”海绵项目典范 [N]. 中国建设报, 2024-05-30(6-7).
FU Qiang, LIU Xue, WANG Chengri. Smart sponge platform boosts green ecological city construction: Siping city innovates to create a model of sponge projects for “Level and emergency use” [N]. China Construction Daily, 2024-05-30(6-7).

(责任编辑 王 璐)