

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2021.04.013

海绵城市建设的技术装备应用综述

王哲晓,徐 源,王晨曲,田延昭,秦培瑞

(中建环能科技股份有限公司,四川 成都 610045)

摘要:结合某区域海绵城市建设,从源头减排、过程控制、系统治理 3 个方面重点介绍了透水铺装、CSO 调蓄池、一体化水处理设备等项目各阶段涉及的主要技术装备。同时,归纳总结了各阶段其他技术装备的特点及适用条件,指出海绵城市建设技术装备体系将向预制化、集成化和运维简易化方向发展。

关键词:海绵城市;源头减排;水环境;水安全;装备

中图分类号:TV213.4;X52 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-6933(2021)04-0089-08

A summary of application of technology and equipment in sponge city construction // WANG Zhexiao, XU Yuan, WANG Chenqu, TIAN Yanzhao, QIN Peirui (CSCEC SCIMEE Sci. & Tech. Co., Ltd., Chengdu 610045, China)

Abstract: Combining with the construction of a regional sponge city, this paper introduces such the main technical equipment as permeable pavement, CSO storage tank, Integrated water treatment equipment, etc. involved in each stage of the project from three aspects: source emission reduction, process control and system governance, and summarizes the characteristics and applicable conditions of various technical equipment. It is pointed out that the construction technology system of sponge city will develop in the direction of prefabrication, integration and operation and maintenance simplification.

Key words: sponge city; source emission reduction; water environment; water safety; equipments

自“海绵城市”提出以来,通过 3 年的试点城市建设,海绵理念和功能定位越来越明确,技术体系也逐步得以完善^[1]。在顶层设计上,总规、专规等对城市建设做提纲挈领的规划,又有系统化实施方案作为城市建设单行本,在规划与设计之间无缝对接^[2]。技术体系的每一个环节对应的都有数量众多的技术装备^[3],各个环节的技术装备构建成了与技术体系响应的装备体系。中华人民共和国住房和城乡建设部科技发展促进中心在 2016 年相继颁布《海绵城市建设先进适用技术与产品目录(第一批)》和《海绵城市建设先进适用技术与产品目录(第二批)》,系统梳理了海绵城市技术产品装备体系。

笔者总结曾参与的第一、二批试点海绵城市建设项目实践,结合某试点城市的小区改造、管网建设、点源截污、生态补水、排涝泵站等类型的工程项目,分析试点区域内技术与相关装备综合应用对流域水体水环境、水生态、水安全、水资源的提升效果,

系统梳理并分析探讨该区域海绵城市建设过程中技术、装备的综合应用,以期海绵城市建设的技术体系落地和装备体系衔接提供参考。

1 研究背景

我国城镇化正在急速推进,2011 年我国的城市化率超过 50%^[4],2020 年超过 60%^[5]。由于城市开发强度过高,我国大多数城镇面临着水资源、水环境、水生态、水安全 4 个方面的“水淹、水少、水脏”等问题^[6-7],城市内涝、地面沉降、水质恶化、植被破坏、水土流失、河湖水体破碎化等问题也层出不穷^[8-11]。2012 年 4 月,“2012 低碳城市与区域发展科技论坛”上首次提出“海绵城市”的概念^[12]。基于我国水情和生态问题,众多学术研究和工程实践进行了海绵城市建设探索。苏义敬等^[13]对不同条件下下沉式绿地的设计参数选择进行了探讨,并优化了竖向、淹水时间、景观等设计方法。任心欣等^[14-15]采用 SWMM 模型对不同降雨条件下的海绵

作者简介:王哲晓(1983—),男,高级工程师,硕士,主要从事水污染控制工程及环境信息化研究。E-mail: wzx@scimee.com

通信作者:徐源(1989—),男,工程师,硕士,主要从事水污染控制工程研究。E-mail: xuyuan@scimee.com

城市指标体系进行了模拟分析,并总结归纳了指标体系的应用要点。邹宇等^[16]以湖南省宁乡县海绵城市建设为例,系统分析了宁乡县的建设方案和实施效果,并总结了海绵城市项目建设经验和对策建议。马冰然等^[17]以西宁海绵城市试点区为例,模拟了 50 年极端降水条件下的城市内涝情况,并设计了 LID 和管网的改造方案。但是,对作为决定海绵城市实际建成效果关键因素的技术装备,关于其应用选择和对比分析的研究相对较少。

2 建设技术方案及装备应用

海绵城市建设工程属于多目标系统工程^[18],采用不同的技术种类组合,实现源头减排、过程控制、系统治理的建设目标。装备化的技术产品是技术方案高度凝练的产物,在应用实践中充分体现了集成、高效、普适的特点。在《海绵城市建设先进适用技术与产品目录》中,技术装备产品被分为 6 大类:收集与渗透技术、调蓄技术、传输技术、截污净化技术、黑臭水体治理技术、设计与管理技术。

总结第一、二批海绵城市试点项目的实践,发现装备体系的构建和装备的合理化应用主要有以下 3 个原则:①可靠性原则。目前的海绵城市试点项目运营期大多较长,装备的可靠性决定了项目后期运营的困难程度和运营成本,因此在装备选择方面,可靠性是首要考虑的问题。②项目的适应性原则。海绵城市的试点项目涉及面广、本底情况复杂、项目新旧不一,因此,如何因地制宜地合理选择装备,决定着项目落地后的效果。如针对城市内河的治理,水体异位处理的用地情况和对居民的影响决定了水处理设备选择的成功与否。③组合配置的灵活性原则。海绵城市建设过程中,众多技术问题,如建筑屋面雨水的汇流、道路雨水的收集等,往往无成型成套的技术装备与之对应。如何合理地组合现有技术装备,解决实际问题,决定着项目能否经济、有效、合理

地落地。如针对老旧小区道路雨水问题,在部分地形允许的区域,可采用行车减速带与路缘石下卧的方式代替原有破路建设线性截水沟的装备选择思路,可大幅度削减项目预算和后期运维难度。

2.1 源头减排

2.1.1 源头减排技术

在项目建设初期,通过对项目区域内地块进行逐一调研,分析各地块绿化条件、竖向高程和居民需求,确定地块内透水铺装、下凹式绿地、雨水花园、调蓄水池设计方案。通过合理布置,使项目内各措施连接形成海绵系统,如屋面雨水就近接入下凹式绿地或雨水花园,道路雨水通过植草沟转输到雨水花园进行消纳,透水铺装坡向下凹式绿地等,以达到年径流总量控制率目标,削减径流量和面源污染负荷。

2.1.2 源头减排装备应用

在源头减排的技术装备中,透水铺装的应用最为广泛。透水铺装属于多孔介质材料,按照面层材料不同,可分为透水砖铺装、透水水泥混凝土铺装和透水沥青混凝土铺装。透水铺装适用于广场、停车场、人行道以及车流量和荷载较小的道路。透水铺装施工方便,减少了雨水对硬化铺装的冲刷,促进雨水入渗补充地下水,并具有一定的峰值流量削减和雨水净化作用^[19-22]。但透水铺装的净化作用主要依靠其有效空隙,若无针对性的运营维护方案,易发生堵塞并逐渐丧失透水性能。透水铺装的面层材料要求渗透系数大于 1×10^{-4} m/s,透水面砖的有效孔隙率不小于 8%,透水混凝土的有效孔隙率不小于 10%,透水面砖的抗压强度、抗折强度、抗磨强度等应符合 JC/T 945—2005《透水砖》中的相关规定。表 1 为常见透水铺装技术装备情况。

透水铺装发生堵塞时,使用高压水枪冲洗或负压真空除尘设备难以将透水铺装面层和基层彻底清洗,若频繁更换面层,运营成本将大大提高。为解决这一问题,可将材料透水模式和结构透水模式相结

表 1 常见透水铺装装备信息及适用范围

Table 1 Information and application scope of common permeable pavement equipment

类型	孔隙率/%	抗压强度/MPa	透水系数/(mm·s ⁻¹)	主要产品	适用范围
透水路面砖 ^[21]	15~20	≥30	≥1.0	透水路面砖	建筑与小区、广场、公园人行道及非重载路面等
				混凝土透水砖	
				骨料透水砖	
				陶瓷基透水砖	
				砂基透水砖	
透水植草砖		≥35		开孔透水混凝土植草砖 多功能植草砖	路面荷载较高且有透水要求的停车场、公园步道等
透水水泥混凝土 ^[22]	10~25	≥20	≥1.0	透水水泥混凝土 彩色透水水泥混凝土	建筑小区、公园人行道,广场,停车场等路面,轻型车辆车行道以及各种体育设施的地面
透水沥青混凝土 ^[23]	18~25	≥20	1.6~2.6	透水沥青混凝土 彩色透水沥青混凝土 排水式沥青路面	建筑小区、公园人行道,广场,停车场等路面,轻型车辆车行道以及各种体育设施的地面

合,面砖采用倒梯形透水砖,底部设置沟槽导水,雨水排入收集设施统一调蓄利用。在面砖堵塞后,仍能通过面砖间缝隙进行排水,增加地面雨水消纳能力^[24]。

类似于透水铺装在海绵城市建设实施阶段起到的下渗^[25]、净化等功能,在海绵城市全寿命周期各阶段中,装备体系保证着技术体系的落地,是最终海绵效果实现的重要保证。在本底调研阶段,SWMM模型可以在源头上对区域进行降雨规律模拟^[26];管线探测仪用于本底摸排地下管线位置、走向、埋深等探测;液位监测仪用于水量监测,在线SS/浊度监测仪用于探究点面源污染情况。在建设实施阶段,主要通过对项目范围内小区、公园、绿地等地块的海绵改造实现面源污染控制。在建设过程中,雨水罐、蓄水模块可用于源头集水回用,溢流井、线性沟用于源头雨水的溢流收集排放。在验收考核阶段,则需要监测设备对源头减排效果进行监测评价。在运营维护阶段,要考虑建设实施阶段的技术产品的性能维护,需要高压水枪冲洗铺装内部污渍和杂质,用负压真空除尘设备吸出杂质,不同孔隙率的透水路面可以采用不同的喷水压力以保证效果。表2为海绵城市源头减排其他相关装备情况。

2.1.3 源头减排主要装备适用性对比分析

透水砖铺装作为源头减排措施中应用最广泛的措施之一,其砖型选择决定着源头减排措施的最终效果。目前常用的透水砖类型主要包括:陶瓷透水砖、混凝土透水砖、砂基透水砖等。陶瓷透水砖主要以矿渣、陶瓷废料、纤维等为原料,采用添加造孔剂

法或颗粒堆积法,经高温烧结,形成多孔透水结构,具有高透水性、高孔隙率、高抗压、装饰效果好等特点^[27];但成本较高,吸水率低,易迅速达到饱和,进而产生地表径流^[28]。混凝土透水砖则是以干硬性混凝土为主要原料,以水泥等胶粘材料采用二次布料成型技术,经压制而成的透水砖,具有透水性能好,经济、环保等特点;但由于其原材配比、成型工艺等无行业标准,易出现破损、反碱等质量问题而影响最终效果。砂基透水砖是以硅砂为骨料,以有机高分子胶凝材料为黏合剂,经免烧成型工艺后制成的透水砖,透水性较好,且由于其孔隙较小,对雨水的净化能力强^[29];但其抗压、抗拉强度差,实际应用过程中易出现破损。陶瓷透水砖、混凝土透水砖、砂基透水砖的性能^[30]对比如下:①抗压强度由大到小:陶瓷透水砖,混凝土透水砖,砂基透水砖;②抗拉强度由大到小:陶瓷透水砖,混凝土透水砖,砂基透水砖;③抗冻性由大到小:混凝土透水砖,砂基透水砖,陶瓷透水砖;④耐磨性由大到小:混凝土透水砖,陶瓷透水砖,砂基透水砖;⑤透水系数由大到小:陶瓷透水砖,砂基透水砖,混凝土透水砖。

2.1.4 源头减排装备应用案例

以某小区海绵城市改造项目为例,该项目占地约1.59hm²,属于已建成的住宅小区。项目整体地势东高西低,高差约8m,下垫面主要由建筑屋面、不透水路面和绿地构成,面积分别为3486m²、5587m²、6865m²,本底综合径流系数为0.55。改造前排水系统较为完善,屋面雨水通过雨水立管接入雨水系统,但存在雨污混接现象;小区路面为水泥路

表2 源头减排其他相关装备情况
Table 2 Source emission reduction equipment

装备名称	类型	功能及适用条件	主要参数
管线探测仪	硬件	地下管线位置、走向、埋深、破损点探测	探测范围0~10m
SWMM模型	软件	规划设计阶段对区域下垫面及管线数字化,模拟水量水质规律	
绿色屋顶雨水收集系统	硬件	将种植屋面的渗透水有组织收集,达到集水和二次利用的目的	径流量削减不小于50%,污染物去除率(以SS计)70%~80%
雨水罐	硬件	雨落管断接后收集屋面雨水回用	规格一般为0.5~5m ³ ,污染物去除率(以SS计)80%~90%
溢流井	硬件	下凹式绿地、雨水花园雨水溢流排放	多PP材质,外壁开孔增加渗透功能,附截污挂篮
蓄水模块	硬件	位于末端,处理超标雨水或用于雨水回用	蓄水空间不小于95%
线性沟	硬件	路面、广场雨水收集排放	
渗透管	硬件	在管道圆周上开出多排渗透孔同时外包土工布,实现多余雨水的收集、输送和再利用	环刚度2~25kPa,污染物去除率(以SS计)35%~70%,开孔率1%~3%。
液位监测仪	硬件	测量液体介质高低	量程0~20m,测量精度1%
流量监测仪	硬件	测量明渠或管道中流体流量	流速测量范围一般为0.02~6.00m/s,测量精度2%
巴氏计量槽	硬件	测量明渠流量	
在线SS/浊度监测仪	硬件	在线监测管道或明渠悬浮物浓度和浊度	测量范围一般为0.01~4000NTU,测量精度±0.1NTU
InfoWorks ICM	软件	管网能力分析、内涝情况评估	
透水铺装路面专用清洗车	硬件	透水铺装渗透性能维护	
监测平台	软件	监测设备统一运行管理,智能预警、实时调度	

面,人行道及嵌草砖停车位铺装破损严重。

项目源头减排中技术装备的应用选择主要包括以下几个方面。本底调研阶段,以管线探测/检测设备辅以水质水量检测设备对地下管线的混接、破损、淤堵等情况进行探查,明确雨污混接点 8 处,需清淤管段 93 m;以 SWMM 模型模拟雨水产汇流情况,结合模型模拟结果,设置透水铺装 2 156 m²,于场地低洼处设置下沉式绿地 873 m²、雨水花园 253 m²,于小区雨水系统末端设置调蓄池 40 m³;由于项目地势高差较大,降雨冲刷较大,初期雨水污染较严重,在调蓄池前的 2 座弃流井内设置浮空调流阀针对初期雨水污染进行弃流。建设实施阶段,由于项目为老旧小区改造,为减少对居民生活的影响,加快施工进度,溢流井、线性沟、雨水断接簸箕等均选用成品装备;对于部分收水困难、改造成本较大的路面,雨水采用“减速带/线性沟+路缘石下卧+植草沟”的形式引入附近海绵设施。验收考核阶段,以“液位监测仪+流量监测仪”的监测设备组合设置于小区雨水管网末端,监测项目建设效果。

2.2 过程控制

2.2.1 过程控制技术

海绵城市建设除源头减排外,还应当注重雨水及污水在产汇流过程中的控制。在雨污分流的前提下,初期弃流后的雨水进入自然水体排放,污水及弃流雨水进入污水处理厂。为保证直接进入自然水体的雨水不被污染并且污水处理厂进水浓度满足设计要求,区域内雨水管网、污水管网理论上要按照原设计理念运行。然而在实际项目中,由于前期设计不合理、运营不规范、管理不到位等多方面原因,老旧城区管网内普遍存在破损、淤积、混接、雨季冒溢等问题。为了对排水管网对进行必要的监测、修复,首先对管道内破损、淤积、混接部位进行初步勘察,然后对管道缺陷部分进行精确定位和缺陷程度测量。破损与淤积根据具体缺陷情况和现场施工条件,采取管道清淤、局部或整体非开挖修复、开挖修复等方式进行修复。

在实际工程中,合流制管网存在溯源困难、无法通过工程措施改造管网、改造成本及社会影响较大等问题。针对此种类型的管网,首先通过对比污水处理厂处理能力与截流量大小关系,如果污水处理厂处理能力不足,则采用新建 CSO 调蓄池或者新建一体化处理设备等不同的就近消纳的方式处理。

2.2.2 过程控制装备应用总结

现场踏勘中,需要用管道潜望镜 QV 设备进行初步勘探,利用排水管道闭路电视检测系统对管道的缺陷等级进行准确评判定位^[31]。在管网修复方面,传统开挖更换管道的措施适用非主干道道路的修复。针对主干道道路、地下管线复杂道路、新建成道路等不适用于开挖修复的情况,采用非开挖修复技术以最低的影响对破损有缺陷的管道进行修复。针对无法通过源头减排控制的面源污染问题和管网完善后依然无法彻底消除雨污混流问题,在确认污水处理厂消纳能力足够后,在管网末端修建截流井,阻止旱季污水排入河道。通过在截流井内安装浮控调流阀、鱼腹式堰门等设备实现旱天污水进入污水处理厂。当消纳能力不足时,针对雨天水量调节及水质调节问题,则可采用 CSO 调蓄池的形式进行处理,其中主要调蓄设备情况见表 3。由于 CSO 调蓄池受占地、投资建设成本、建设周期等多方面的影响,也可以采用一体化水处理设备作为处理措施。截流井、调蓄池、一体化水处理设备均属于末端治理的灰色设施,具有高集成、效果好的特点^[32]。

2.2.3 过程控制主要装备适用性对比分析

管道状况及问题的调查作为过程控制各类措施的先决条件,检测设备的选择合理性决定着过程控制措施的最终效果。管道检测中主要应用设备包括管道检测设备和管道缺陷识别系统。

a. 管道检测设备。目前常用的管道检测设备主要分为管道潜望镜、闭路电视管道检测设备、声纳管道检测设备。管道潜望镜是以长柄将高清摄像头置于管道口,通过变焦和旋转,从而确定管道内缺陷情况,检测快速、安全性高、图像较清晰直观,但无法

表 3 主要调蓄设备情况
Table 3 Regulation and storage related equipment

类型	功能	种类
调流设备	保证污水处理厂最大处理能力的同时,保证污水和初期雨水最大限度地输送到污水处理厂进行处理	浮控调流阀、电控调流阀、流量控制闸门、智能流量控制器
拦渣设备	拦截或收集漂浮物等污染物,减少调蓄池的维护工作	自清理格栅、浮动挡板、水力拦渣浮筒
启闭设备	控制调蓄池进水口的开关,在调蓄池达到最大调蓄容积时关闭调蓄池进水口	旋转堰门、闸门
冲洗设备	在调蓄池排空后,将调蓄池冲洗干净	门式冲洗装置、水力冲洗翻斗、智能喷射器、真空冲洗装置
泄流设备	对调蓄池达到最大调蓄容积后的来水进行紧急泄流,保证系统安全	液动泄流闸门、水力自动闸门

注:调蓄池中还需排空泵将调蓄池排空,根据不同情况,还可设置防倒灌、在线处理等设备;雨水调蓄池还应设置排气和除臭等附属设施和检修通道。

检测水下情况,且检测距离较短,一般探查范围在50 m 以内。闭路电视管道检测设备是将管道机器人直接送入管道内部,通过管道机器人附带的摄像头实现管道内缺陷情况的检测,能够直观精确地了解管道内部状况,但其十分依赖管道清淤、封堵抽水等前置工作,作业费时费力。声纳管道检测设备是通过声纳装置向水下发射声波并接收分析反射波,以判断缺陷情况,但只用于有水作业,且其结构检测结果只能作为参考,需有进一步检测确认。具体项目检测过程中,若项目范围较大且检测精度要求较低时,建议采用管道潜望镜进行检测;若项目精度要求较高且以检测结果为依据进行管道修复,建议采用闭路电视管道检测设备进行检测;若无法封堵排水,建议采用声纳管道检测设备;若项目情况较为复杂,建议以管道潜望镜、声纳管道检测设备等采取初步检测,并根据对应检查结果采用闭路电视管道检测设备进一步精确检测。

b. 管道缺陷识别系统。目前常用的管道缺陷识别系统主要分为图像采集系统和管道缺陷检测算法。图像采集系统主要是依靠管道检测设备将检测图像传输至计算机。管道缺陷检测算法根据检测图像,结合数字图像处理、光学成像等相关技术实现管道检测,识别效率较高且识别结果不依靠人员经验,但所需成本较高。具体项目检测过程中,若项目范围较小,工作量较小,建议采用图像采集系统收集图像,并由相关工程师人工识别;若项目范围较大,建议采用图像采集系统结合管道缺陷检测算法。

2.2.4 过程控制装备应用案例

以海绵试点城市某试点片区为例,片区内基本实现雨污分流排水体制,但是区域现状用地以居住用地为主,河道两岸社区和城中村集中,排水系统不完善,由于错接及管理不善导致部分雨水管道内有大量污水混入,部分雨水汇入了污水管道。同时,片区内上游农贸市场区域存在1处污水直排口,中游存在4处雨污混流区域,对应存在4处雨污混接排口,各排口虽有截流措施,但截污设计不合理,点源污染、面源污染严重,大量污染物进入河道,严重影响流域内水环境质量。

为给项目制定切实可行的实施方案,摸清流域内管网主要存在的问题,需要通过监测手段实施。针对雨污混接问题识别,首先项目中采用“液位监测仪+流量监测仪”的监测设备组合进行各排口及管网系统主干线的实时监测。其次,需要进一步深挖监测数据产生的原因,以监测数据为依据,结合QV管道潜望镜,进行混接区域的初步定位。完成定位后,通过闭路电视管道检测机器人对管道缺陷

进行问题识别和精准测量,并根据情况进行整体或局部非开挖、开挖修复。通过以上技术设备,片区内共发现并解决了雨水管网中管道缺陷共计377处,其中雨污混接缺陷占比9.0%,管道结构性缺陷占比62.1%,管道功能性缺陷占比28.9%;污水管网中管道缺陷共计104处,其中管道结构性缺陷占比37.5%,管道功能性缺陷占比62.5%。

完成问题识别后,需要对不同类型的结构缺陷进行评估。管道缺陷根据严重程度分为1~4级,其中1级缺陷为轻微缺陷,2级为中等缺陷,3级为严重缺陷,4级为重大缺陷。结合评估结果、影像资料及踏勘调查报告,再有针对性地对不同部位缺陷制定处理方案。

2.3 系统治理

2.3.1 系统治理技术

系统治理中关于水环境方面,通过源头减排与过程控制可以限制大部分外源污染物进入流域水体,然而实际仍然存在海绵城市部分建设区域覆盖不完全、设计方案考虑不周全等情况。需要从控源截污、内源治理、生态修复、活水提质等不同技术措施出发,以问题为导向,提出综合治理措施。

针对水安全方面,管网设计需要结合城市降雨特征,除考虑排水标准外,也要充分考虑防洪标准^[33],适当提高管网过洪能力。针对雨季可能存在河道顶托、排水受限的区域,需要考虑采用设置排涝泵站的方式提高城市水安全级别。

2.3.2 系统治理装备应用总结

针对水环境内源治理,传统的挖掘机和水力冲挖机组能够彻底地将污染底泥清运治理,但往往作业时间长,需预先排水,对施工周围的环境影响较大;抓斗式、泵吸式或绞吸式吸泥船可直接进行内源治理作业,无须预排水,但作业时对作业水面有面积要求,出泥伴随大量河水,需进行进一步处理,且清淤不彻底,只能去除部分内源污染物;工程颗粒菌、锁磷剂等针对性固定剂则可实现底泥的原位治理,无进一步污泥处理问题,但治理范围往往存在限制,且成本高,对环境可能存在二次污染。

针对活水提质,由于国内城市内河多存在流动性差、补水缺乏以及两岸用地紧张的现状,一体化泵站与一体化水处理设备的结合得到了广泛的应用。两者联动后,于河道下游取水、经一体化水处理设备净化后,上游出水,不仅提升了水体质量,还给河流补充了生态基流,提升了自净能力。除此之外,根据不同的污染物去除种类,通过采用与之对应的技术装备均能在不同程度上为污染负荷的去除做出贡献,各类污染物处理装备情况^[34]见表4。

表 4 各类污染物处理装备
Table 4 Various pollutant treatment equipment

去除污染物种类	处理技术	适用条件
浮渣和漂浮物	浮动挡板	适用于现场无法供电,合流污水或雨水在溢流前需拦截过滤其携带的漂浮物的场合
	拦渣浮筒	
	水平转鼓式格栅	
	水力自洁式滚刷	
	堰流过滤装置	
砂粒	溢流格栅	适用于现场可供电,合流污水或雨水在溢流前需拦截过滤其携带的漂浮物的场合
	高效涡流装置	
	水力颗粒分离器	
悬浮物	高效沉淀装置	适用于污水直排、溢流排放和初期雨水弃流等需去除砂粒的场合
	泥渣砂三相砂分离装置	
	磁分离装置	
	自循环高密度悬浮污泥滤沉装置	
有机物和氨氮等溶解性污染物	快速生物处理装置	分流制污水口直排、雨污水混接,合流制污水直排等需去除悬浮物、有机物和氨氮的场合

针对水安全问题,一体化泵站在海绵城市建设的应用过程中,充分体现出技术集成设备的优势。工期影响方面,由于一体化泵站定制性强,生产制作周期是影响项目进度的关键工期;工艺技术方面,需要对玻璃钢筒体有限元分析计算及流体力学计算^[35];自动化程度方面,为了实现在运营期对泵站运行情况的及时掌握和控制,需要与智慧管理平台相结合,实现较强的自控程度。

另外针对海绵城市建设中的水安全问题,根据技术体系与技术路线的不同,对应的技术产品也不尽相同。表 5 为水安全技术装备情况。

表 5 水安全技术装备情况
Table 5 Water safety equipment

装备名称	类型	功能及适用条件
管道检测设备	硬件	检测管道缺陷问题,评估管道的输送能力是否符合要求
SWMM 模型	软件	规划设计阶段对区域下垫面及管线数字化,模拟水量水质规律
MIKE URBAN 模型	软件	模拟现状排水管网的运行状态,对排水能力进行评估
MIKE FLOOD 模型	软件	模拟项目区域内详细洪淹模式以及河流和风暴潮洪灾
InfoWorks ICM 模型	软件	模拟项目区域内排水管网、雨水径流状态,进行内涝风险分析
防潮闸	硬件	调节河流水位,防止海水倒灌
调蓄设施	硬件	存蓄雨水,削减峰值流量,雨水回用
雨量计	硬件	监测降雨量,辅助监测平台
城市雨洪预警系统	硬件	城市雨洪及内涝预警,指导应急排涝设施工作

2.3.3 系统治理装备应用案例

以海绵试点城市某城市内河为例,该河道全长约 4000 m,春冬两季流水较少,夏秋汛期水流较大。河道缺少清洁水源补给,水动力条件极差,水体基本无流动,水质为劣 V 类,水环境容量有限。

根据河道水质现状、底泥淤积情况,分析水体环

境容量,结合受纳水体需削减的污染负荷,单纯的循环难以满足规划水质,故选择对河道水质进行处理。通过一体化泵站将下游河道水提升至超磁混凝系统中,通过投加磁种、混凝剂和助凝剂 3 种物质,形成包含磁种的悬浮物(磁性絮团),然后利用超磁分离机稀土永磁体产生的高强磁力实现磁性絮团与水的快速分离,被吸附打捞出水体的磁性污泥进入磁分离磁鼓,通过磁分离磁鼓的高速分散装置进行磁种与污泥的分离,磁种被回收循环利用,剩余污泥从磁鼓底部经污泥泵加压送入污泥脱水装置进行脱水,脱水后含水率 80% 的泥饼外运处置^[36-37]。

河道水体经过超磁一体化处理设备后,削减 SS、色度、COD_{Cr}、TP、有机污染物黑臭因子,明显改善水质;设备停留时间为 6~8 min,设备整体占地面积小,该工程使用占地面积 200 m²,在有限的占地空间下,解决现场用地紧张问题。该系统采用移动式可拆卸方式构造,现场施工安装方便。

3 结论与展望

海绵改造中技术体系与装备体系是密不可分的,技术体系需要依托于装备体系来完成设计和效果落地,装备体系需要以技术体系为指导进行完善,并最终为技术体系服务^[38]。本文从源头减排、过程控制、系统治理 3 个方面系统介绍了技术装备产品在海绵城市建设中的用途、优势,根据不同的需求、不同的阶段,选择不同的海绵城市技术装备产品。着重介绍了透水铺装、CSO 调蓄池、一体化水处理设备、一体化泵站等技术装备产品在海绵城市建设中的应用。这些技术装备产品与海绵城市建设的结合为今后海绵城市建设发展提供了应用案例和经验借鉴。

装备体系对项目建设的优化和难点攻克提供帮

助。在海绵城市不断发展和成熟的过程中,如何在纷繁复杂的技术产品中积极引入成熟的装备设施,并在实施过程中主动思考现有设备的不足,思考解决办法和未来发展方向,有待在海绵城市建设过程中进一步思考和总结。通过对第一、二批海绵城市试点项目的装备应用总结和分析,装备体系的主要发展方向包含以下3个方面:

a. 预制化趋势。目前海绵城市的建设大多针对城市中的公园绿地、市政道路、建筑小区等,冗长的工程施工周期将严重限制城市的发展,影响居民日常生活。通过预制化的方式对现有海绵装备进行发展,将极大地实现海绵城市的“去工程化”,缩短建设周期,如一体化水处理站、一体化泵站的推广应用。

b. 集成化趋势。海绵城市现有的技术体系中,透水铺装、下沉式绿地、雨水花园等海绵技术措施大部分采用传统工程方式进行建设。但通过第一、二批海绵城市试点项目的实践发现,建设过程中存在市政道路施工时间限制、小区施工用地限制等大量实际困难阻碍着海绵城市项目的落地。通过集成化的方式对现有海绵装备进行精简、综合、升级,代替原有传统工艺,可缩短施工工期,提高项目绿地利用率,克服现有项目限制,最终达到海绵效果。如以蓄水模块代替传统调蓄池、雨水花园的下垫结构层等实现蓄水功能。

c. 运维简易化趋势。随着第一、二批海绵城市试点项目逐步进入运营期,众多海绵装备的维护成本高、维护效果差等问题逐渐暴露出来。如何使现有海绵设备更易于运维,是海绵城市装备设施发展的重要方向之一。如针对透水铺装的运维问题,通过对砖型和铺设方式的调整发展,合理地采用结构缝隙透水辅助透水铺装实现海绵透水功能。

参考文献:

[1] 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. Theory and practice of “sponge city”[J]. City Planning Review, 2015, 39(6):26-36. (in Chinese))

[2] 黄津辉,段亭亭. 中国海绵城市开发与加拿大综合雨洪管理对比研究:以多伦多为例[J]. 水资源保护,2017,33(5):5-12. (HUANG Jinhui, DUAN Tingting. Comparative study on sponge city development in China and integrated stormwater management in Canada: a case study of Toronto[J]. Water Resources Protection, 2017, 33(5):5-12. (in Chinese))

[3] 李兰,李锋. “海绵城市”建设的关键科学问题与思考

[J]. 生态学报,2018,38(7):2599-2606. (LI Lan, LI Feng. The key scientific issues and thinking on the construction of “Sponge City”[J]. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(7):2599-2606. (in Chinese))

[4] 吴妙珍. 设计重现期对城市内涝的影响研究[D]. 长沙:湖南大学,2015.

[5] 李敏静. 论我国城镇化的速度[J]. 城市建设理论研究(电子版),2014(22):5417. (LI Minjing. On the speed of urbanization in China[J]. Theoretical Research in Urban Construction, 2014(22):5417. (in Chinese))

[6] 胡庆芳,王银堂,李伶杰,等. 水生态文明城市与海绵城市的初步比较[J]. 水资源保护,2017,33(5):13-18. (HU Qingfang, WANG Yintang, LI Lingjie. et al. Preliminary comparison between water-ecological civilization city and sponge city[J]. Water Resources Protection, 2017, 33(5):13-18. (in Chinese))

[7] 丁继勇,蔡珏芳,李娜,等. 全生命期视角下海绵城市建设的管理机制探析[J]. 水利经济,2019,37(6):53-59. (DING Jiyong, CAI Juefang, LI Na, et al. Management mechanism of sponge city construction from perspective of lifecycle[J]. Journal of Economics of Water Resources, 2019, 37(6):53-59. (in Chinese))

[8] 中华人民共和国国务院. 国家新型城镇化规划(2014—2020年)[EB/OL]. [2019-02-16]. http://www.gov.cn/zhengce/2014-03/16/content_2640075.htm.

[9] 王峤. 高密度环境下的城市中心区防灾规划研究[D]. 天津:天津大学,2013.

[10] 殷雅玉. 基于可拓学的城市水资源可持续利用水平综合评价与管理对策研究:以太原市为例[D]. 成都:成都理工大学,2011.

[11] 汤鹏,王玮,张晨,等. 海绵城市建设中建成区雨洪格局的量化研究[J]. 南京林业大学学报(自然科学版),2018,42(1):15-20. (TANG Peng, WANG Wei, ZHANG Chen, et al. Quantitative research on rain-flood patterns of urban area in the construction of “Sponge Cities”[J]. Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition), 2018, 42(1):15-20. (in Chinese))

[12] 吴丹洁,詹圣泽,李友华,等. 中国特色海绵城市的新兴趋势与实践研究[J]. 中国软科学,2016(1):79-97. (WU Danjie, ZHAN Shengze, LI Youhua, et al. New trends and practical research on the sponge cities with chinese characteristics[J]. China Soft Science Magazine, 2016(1):79-97. (in Chinese))

[13] 苏义敬,王思思,车伍,等. 基于“海绵城市”理念的下沉式绿地优化设计[J]. 南方建筑,2014(3):39-43. (SU Yijing, WANG Sisi, CHE Wu, et al. Optimization design of sunken greenbelt based on the concept of “sponge city”[J]. South Architecture, 2014(3):39-43. (in Chinese))

[14] 任心欣,伟真. 海绵城市年径流总量控制率等指标应用初探[J]. 中国给水排水,2015(13):105-109. (REN Xinxin, WEI Zhen. Application of capture ratio of total

- annual runoff volume in spongy city[J]. China Water & Wastewater,2015(13):105-109. (in Chinese))
- [15] 刘志峰,陈晨. 基于 SWMM 的大型地下建筑绿色屋顶低影响开发应用研究[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2018, 42(6): 165-173. (LIU Zhifeng, CHEN Chen. A study on the application of low impact development of green roof in large underground buildings based on SWMM [J]. Journal of Nanjing Forestry University(Natural Sciences Edition), 2018,42(6): 165-173. (in Chinese))
- [16] 邹宇,许乙青,邱灿红,等. 南方多雨地区海绵城市建设研究:以湖南省宁乡县为例[J]. 经济地理,2015,35(9):65-71. (ZOU Yu, XU Yiqing, QIU Canhong, et al. The research on sponge city construction in southern hilly area;a case study of ningxiang county in Hunan Province [J]. Economic Geography, 2015, 35(9): 65-71. (in Chinese))
- [17] 马冰然,曾逸凡,曾维华,等. 气候变化背景下城市应对极端降水的适应性方案研究:以西宁海绵城市试点区为例[J]. 环境科学学报,2019,39(4):1361-1370. (MA Bingran, ZENG Yifan, ZENG Weihua, et al. Adapt to urban extreme precipitation under climate change;a pilot scale study in Xining, China [J]. Acta Scientiae Circumstantiae,2019,39(4):1361-1370. (in Chinese))
- [18] 丁继勇,冷向南,陈军飞,等. 海绵城市建设“碎片化”问题及其治理[J]. 水利经济,2020,38(4):33-40. (DING Jiyong, LENG Xiangnan, CHEN Junfei, et al. Governance of fragmented phenomenon of sponge city construction [J]. Journal of Economics of Water Resources,2020,38(4):33-40. (in Chinese))
- [19] COLLINS K A, HUNT W F, HATHAWAY J M. Hydrologic comparison of four types of permeable pavement and standard asphalt in Eastern North Carolina [J]. Journal of Hydrologic Engineering, 2008, 13(12): 1146-1157.
- [20] COLLINS K A, HUNT W F, HATHAWAY J M. Side-by-side comparison of nitrogen species removal for four types of permeable pavement and standard asphalt in Eastern North Carolina [J]. Journal of Hydrologic Engineering, 2010, 15(6): 512-521.
- [21] 刘亚楠. 海绵城市中透水铺装的应用推广研究[D]. 北京:北京建筑大学,2017.
- [22] 陈汉昌. 透水水泥混凝土力学性能试验研究[J]. 施工技术, 2011, 40(11): 51-54. (CHEN Hanchang. Experimental research on mechanics properties of permeable cement concrete [J]. Construction Technology, 2011,40(11): 51-54. (in Chinese))
- [23] 蒋玮. 透水性沥青路面混合料配合比设计与路用性能研究[D]. 西安:长安大学,2008.
- [24] 王俊岭,张智贤,秦全城,等. 改良型透水铺装对弱透水土质地区的水质控制试验[J]. 水资源保护,2019,35(3): 63-68. (WANG Junling, ZHANG Zhixian, QIN Quancheng, et al. Water quality control test of modified permeable pavement in weak permeable soil quality area [J]. Water Resources Protection,2019,35(3): 63-68. (in Chinese))
- [25] 杜新强,贾思达,方敏,等. 海绵城市建设对区域地下水资源的补给效应[J]. 水资源保护,2019,35(2):13-17. (DU Xinqiang, JIA Sida, FANG Min, et al. Recharge effect of sponge city construction on regional groundwater resources [J]. Water Resources Protection,2019,35(2): 13-17. (in Chinese))
- [26] 陈莎,陈晓宏. 城市雨水径流污染及 LID 控制效果模拟[J]. 水资源保护,2018,34(5):13-19. (CHEN Sha, CHEN Xiaohong. Simulation of urban rainfall runoff pollution and control effect by low impact development [J]. Water Resources Protection,2018,34(5):13-19. (in Chinese))
- [27] 张智贤,王俊岭,秦全城,等. 改良型透水铺装对弱透水土质地区 SS 的去除效果试验[J]. 水资源保护,2019,35(4):76-79. (ZHANG Zhixian, WANG Junling, QIN Quancheng, et al. Experiment on removal effect of improved permeable pavement on SS in weak permeable soil area [J]. Water Resources Protection,2019,35(4): 76-79. (in Chinese))
- [28] 姚莎莎,张德顺,刘鸣,等. 城市绿地常用渗透性铺装材料的性能对比[J]. 中国城市林业,2018,16(3):31-35. (YAO Shasha, ZHANG Deshun, LIU Ming, et al. Performances comparison of commonly used permeable pavement materials in urban parks [J]. Journal of Chinese Urban Forestry,2018,16(3):31-35. (in Chinese))
- [29] 曾宪沂,彭红涛,卞立波,等. 砂基多孔隙透水材料探析[J]. 施工技术,2018,47(增刊1):1305-1306. (ZENG Xianyi, PENG Hongtao, BIAN Libo, et al. Study on sand-based porous permeable material [J]. Construction Technology,2018,47(Sup1):1305-1306. (in Chinese))
- [30] 翁邦正,李亮,马竞,等. 海绵城市改造工程的路面透水性性能比选与应用研究[J]. 中国给水排水,2019,35(12):19-22. (WENG Bangzheng, LI Liang, MA Jing, et al. Performance comparison and application of permeable bricks in sponge city projects [J]. China Water & Wastewater,2019,35(12):19-22. (in Chinese))
- [31] DURAN O, ALTHOEFER K, SENEVIRATNE L D. State of the art in sensor technologies for sewer inspection[J]. IEEE Sensors Journal,2002,2(2):73-81.
- [32] 李辉,李娜,俞茜,等. 海绵城市建设基本原则及灰色与绿色结合的案例浅析[J]. 中国水利水电科学研究院学报,2017,15(1):1-9. (LI Hui, LI Na, YU Qian, et al. Integrating green and gray infrastructure into a sustainable future [J]. Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2017, 15(1): 1-9. (in Chinese))

(下转第 104 页)

- relation with landscape pattern [J]. Water Resources Protection, 2019, 35 (5): 78-85. (in Chinese))
- [19] 陈思宁,王战勇. 云浮市南山河水环境综合整治措施及成效[J]. 环境, 2011 (增刊 1): 142-143. (CHEN Sining, WANG Zhanyong. Comprehensive improvement measures and effects of Nanshan River in Yunfu City [J]. Environment, 2011 (Supl): 142-143. (in Chinese))
- [20] 张鹏,逢勇,石成春,等. 闽江下游水质变化趋势分析[J]. 水资源保护, 2018, 34 (1): 64-69. (ZHANG Peng, PANG Yong, SHI Chengchun, et al. Analysis of change trend of water quality in Minjiang River downstream [J]. Water Resources Protection, 2018, 34 (1): 64-69. (in Chinese))
- [21] 于松延,徐宗学,武玮,等. 北洛河流域水质空间异质性及其对土地利用结构的响应[J]. 环境科学学报, 2014, 34 (5): 1309-1315. (YU Songyan, XU Zongxue, WU Wei, et al. Spatial variation of water quality and its response to landuse in the Beiluo River Basin [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2014, 34 (5): 1309-1315. (in Chinese))
- [22] 焦胜,杨娜,彭楷,等. 汾水流域土地景观格局对河流水质的影响[J]. 地理研究, 2014, 33 (12): 2263-2274. (JIAO Sheng, YANG Na, PENG Kai, et al. The effects of land-use and landscape pattern on water quality in Weihe river watershed [J]. Geographical Research, 2014, 33 (12): 2263-2274. (in Chinese))
- [23] 吕唤春,薛生国,方志发,等. 千岛湖流域不同土地利用方式对氮和磷流失的影响[J]. 中国地质, 2004, 31 (增刊 1): 112-117. (LYU Huanchun, XUE Shengguo, FANG Zhifa, et al. Influence of different land use patterns upon nitrogen and phosphorus loss in the Qiandaohu drainage area [J]. Geology in China, 2004, 31 (Supl): 112-117. (in Chinese))
- [24] 蔡莹,杨旭,万鲁河,等. 北方寒冷地区冻融期河岸缓冲区土地利用结构对河流水质的影响[J]. 环境科学学报, 2019, 39 (3): 679-687. (CAI Ying, YANG Xu, WAN Luhe, et al. Influence of land use structure in riparian buffers on river water quality during the freezing and thawing period in Northern Cold Region [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2019, 39 (3): 679-687. (in Chinese))
- [25] 谢国清,鲁韦坤,杨树平,等. 阳宗海、松华坝和云龙水库流域土地利用与水质变化[J]. 水资源保护, 2007, 23 (5): 15-17. (XIE Guoqing, LU Weikun, YANG Shuping, et al. Land use and water quality changes in Yangzonghai Lake, Songhuaba Reservoir and Yunlong Reservoir Basins [J]. Water Resources Protection, 2007, 23 (5): 15-17. (in Chinese))
- [26] 李杨,马晓明. 深圳坪山河流域土地利用变化对流域非点源污染负荷的影响[J]. 水资源保护, 2012, 28 (2): 42-45. (LI Yang, MA Xiaoming. Impacts of land-use change on non-point source pollution load in Pingshan River Watershed in Shenzhen City [J]. Water Resources Protection, 2012, 28 (2): 42-45. (in Chinese))

(收稿日期:2020-05-28 编辑:熊水斌)

(上接第 96 页)

- [33] 贾绍凤. 我国城市雨洪管理近期应以防涝达标为重点[J]. 水资源保护, 2017, 33 (2): 13-15. (JIA Shaofeng. China should prioritize waterlogging prevention for recent urban storm water management [J]. Water Resources Protection, 2017, 33 (2): 13-15. (in Chinese))
- [34] 住房和城乡建设部. 城市黑臭水体整治——排水口、管道及检查井治理技术指南[C]//中国土木工程学会全国排水委员会年会. 北京:中国土木工程学会, 2016.
- [35] 冯俊豪. 一体化泵站泵坑设计及流动数值分析[J]. 中国给水排水, 2016, 32 (21): 108-110. (FENG Junhao. Design of pump sump and numerical analysis of flow at integrated pump station [J]. China Water & Wastewater, 2016, 32 (21): 108-110. (in Chinese))
- [36] 蔡凌豪. 适用于“海绵城市”的水文水力模型概述[J]. 风景园林, 2016 (2): 33-43. (CAI Linghao. Introduction of hydrological and hydraulic models for “sponge city” [J]. Digital Landscape Architecture, 2016 (2): 33-43. (in Chinese))
- [37] 刘艳辉,陈明阔,刘媛,等. 超磁分离技术在矿井水处理中的应用[J]. 给水排水, 2015 (4): 55-57. (LIU Yanhui, CHEN Mingkuo, LIU Yuan, et al. Application of magnetic separation technology in underground water treatment of mine shaft [J]. Water & Wastewater Engineering, 2015, 41 (4): 55-57. (in Chinese))
- [38] 车生泉,谢长坤,陈丹,等. 海绵城市理论与技术发展沿革及构建途径[J]. 中国园林, 2015, 31 (6): 11-15. (CHE Shengquan, XIE Changkun, CHEN Dan, et al. Development and constructive approaches for theories and technologies of sponge city system [J]. Chinese Landscape Architecture, 2015, 31 (6): 11-15. (in Chinese))

(收稿日期:2019-04-19 编辑:王芳)

