

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2021.12.008

# 海绵城市源头工程设施运行维护管理技术体系研究

单溪环<sup>1,2</sup>, 房志达<sup>1,3</sup>, 谢文霞<sup>2</sup>, 余年<sup>4</sup>, 赵洪涛<sup>1,3</sup>, 李叙勇<sup>1,3</sup>

(1. 中国科学院生态环境研究中心 城市与区域生态国家重点实验室, 北京 100085; 2. 青岛大学 环境科学与工程学院, 山东 青岛 266071; 3. 中国科学院大学, 北京 100049; 4. 珠海深圳清华大学研究院创新中心, 广东 珠海 519080)

**摘要:** 我国海绵城市工程设施的运行维护管理是当前亟需重视的问题。针对国内现有的不同雨水设施的运行维护需求,提出了科学运行维护管理的技术体系,如日常巡护制度、运行效能监测和衰减性能监测。其中,运行效能监测主要是观测雨水设施运行过程中对径流峰值和污染物总量的调控。当雨水设施运行效果不达标时,应及时进行设施的衰减性监测。通过对雨水设施的介质土表征测试、沉积物积累测试和表面渗透性测试等步骤,评估雨水设施当前的衰减程度,并根据设施的衰减程度进行针对性维护。同时,运用物联网等技术建立智慧海绵动态管控系统,保证雨水设施持久有效运行,由此实现了运行维护指标体系的系统化,以期今后我国海绵城市运行维护提供有力的技术支撑。

**关键词:** 雨水设施; 海绵城市; 运行维护

**中图分类号:** TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2021)12-0042-08

## Study on Technical System of Operation, Maintenance and Management of Source Engineering Facilities in Sponge City

SHAN Xi-huan<sup>1,2</sup>, FANG Zhi-da<sup>1,3</sup>, XIE Wen-xia<sup>2</sup>, SHE Nian<sup>4</sup>, ZHAO Hong-tao<sup>1,3</sup>, LI Xu-yong<sup>1,3</sup>

(1. State Key Laboratory of Urban and Regional Ecology, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China; 2. College of Environmental Science and Engineering, Qingdao University, Qingdao 266071, China; 3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 4. Tsinghua Innovation Center in Zhuhai, Zhuhai 519080, China)

**Abstract:** The operation and maintenance management of engineering facilities for sponge city is an urgent problem in China. According to the operation and maintenance requirements of different stormwater facilities in China, the technical system of scientific operation and maintenance management is proposed: daily patrol system, operation efficiency monitoring and attenuation performance monitoring. Among them, the operation efficiency monitoring is mainly to observe the regulation of runoff peak value and total amount of pollutants during the operation of stormwater facilities. When the operation effect of the stormwater facilities is not up to the standard, the attenuation monitoring of the facilities shall be carried out in time. The current attenuation degree of the stormwater facilities is evaluated through the

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41771529,41471417); 国家重点研发计划项目(2017YFC0505803)  
通信作者: 赵洪涛 E-mail:htzhao@rcees.ac.cn

steps of characterization test of medium soil, sediment accumulation test and surface permeability test, and corresponding maintenance is carried out according to the attenuation degree of the facilities. Meanwhile, the intelligent sponge dynamic management and control system is established by using Internet of Things and other technologies to ensure the sustainable and effective operation of stormwater facilities. Therefore, the systematization of the operation and maintenance index system is realized, in order to provide strong technical support for the operation and maintenance of sponge cities in China in the future.

**Key words:** stormwater facilities; sponge city; operation and maintenance

目前来看,我国第一批和第二批海绵试点城市建成并投入使用,对城市内涝及径流污染的缓解具有一定贡献。由于雨水设施具有种类多、基数大、布局分散等特性,为使海绵城市中雨水设施充分发挥缓解暴雨径流的作用,建成后应加强对雨水设施的维护管理。因此,对海绵城市中雨水设施今后的运行维护已经成为当前亟需重视的问题。

当前国内外对海绵城市的研究重点集中在三个方面:一是对生物滞留系统、透水铺装等单个 LID 设施的运行效果分析,以及对多个 LID 设施组合优化使其发挥最佳滞渗效果的技术研发;二是海绵城市理念在市政园林景观设计和街区城市的应用实践;三是 LID 设施对年径流总量控制率的贡献,以及内涝防控雨洪模拟模型的开发研究。对雨水设施的运行维护管理涉及较少,而且国内 30 个试点城市的监测与评估也仅满足了住房和城乡建设部的考核目标或者是排水系统的提质增效要求,缺乏长期的运行管理和维护章程。如何科学地对雨水设施进行运行维护,使其长期稳定发挥“自然积存,自然渗透,自然净化”的功能已成为当前亟需解决的问题。

基于此,参考国外运行维护的相关经验,探索运行管理和维护的内容要求和技术路线,梳理科学诊断和监测的有效性和实用性,进而提出海绵城市科学的运行维护管理技术体系,可为科学编制海绵城市运行维护方案提供参考。

## 1 海绵城市运行维护进展

### 1.1 国内外运行维护的研究进展

国外某些发达国家在城市开发过程中,提出了多种解决城市内涝和水生态危机的管理理念和比较完善的运行维护管理机制,并取得了一定成效<sup>[1]</sup>,但针对雨水设施运行维护的相关研究很少。在水资源利用管理研究较早的美国,大部分地区采用相关的法律法规并结合当地的气候、地理条件等特征颁

布施行的管理运行维护手册来规范对雨水设施的运行维护。英国在雨水设施运营维护规划指导手册中,明确规定维护的内容和框架对手册的内容及时补充更新<sup>[2]</sup>。德国柏林为尽快排除地面积水减轻排管压力,开发了“洼地-渗渠”地下管道与地面明沟相结合的新型雨水处理系统,对雨水设施管理维护实现产业化<sup>[3]</sup>。各个国家的国情和典型雨水设施的安置类型不同,因此运行维护的重点也不尽相同。对于淡水水资源缺乏的日本,雨水资源利用设施多以大型地下水库、雨水调节池及政府鼓励家庭和企业购买的集雨装置为主,这就决定了其维护任务的重点落在了对这些设施的定期清洁工作上<sup>[4]</sup>。为解决雨洪和水资源缺乏等问题,新加坡的集水和排水系统较先进,企业和组织机构主要进行水库和河道的清淤及底泥疏浚等维护工作<sup>[5]</sup>。

参考国外的运行维护经验,国内有部分学者对雨水设施的运行维护需求进行了总结。高雪等<sup>[6]</sup>对雨水设施运行中常出现的杂质淤积及积水排空等问题提出了有针对性的维护措施;王琦等<sup>[7]</sup>对雨水设施维护过程中关于责任分配、维护人员要求、维护要点等问题进行了探讨;丁继勇等<sup>[8]</sup>则分析了雨水设施的社会属性,提出了“管养分离”的管理模式。我国部分海绵城市对雨水设施运行维护制定了技术导则或规程。例如,《宁波市海绵城市建设工程设施运行与维护技术导则(试行)》中将 24 种雨水设施分为渗滞、储存、调节、截污净化、转输排放以及附属设施六大类,并对各类设施的维护要点和注意事项进行了解释说明;《天津市海绵城市设施运行维护技术规程》(DB/T 29—275—2019)对其中 15 种雨水设施维护周期和维护方法进一步细致化;深圳《光明新区低影响开发设施运营维护和建设项目海绵城市绩效测评要点(试行)》中增加了各个设施的构造示意图和查看运维记录以及文件运维效果的评

测。相比较而言,国内现有的运行维护导则仅仅停留在对雨水设施的分类归纳和日常巡护层面。

## 1.2 运行维护的不足和难点

目前我国的运行维护较国外发展还有较大差距,主要体现在三个方面:第一,国家政策层面缺乏明确的运行维护参照标准和相关法律法规的约束,缺乏参照标准导致的维护频次较少或维护方法不合理,使雨水设施的生命周期降低;没有相关法律法规的约束,建成后雨水设施疏于管理也会使其效果大打折扣。第二,管理体制层面缺乏明确的责任维护主体,维护管理模式单一<sup>[9]</sup>。雨水设施从设计施工到建成运行需经过多个部门和企事业单位的参与,多个城市管理部门权责不明确,存在监管盲区;移交体制不完善等问题对设施长期运行维护的开展产生负面影响。第三,技术层面缺乏运行维护的定性监测指标和方法。技术层面对海绵城市设施运行维护的不足,也是将来科学运维的难点。目前,运行维护集中在对雨水设施的日常巡护,通过观察雨水设施结构的完整性、植被生长状况、边坡稳定的表观情况来判定需要运行维护的内容。为保证雨水设施的长效运行,需对其运行效果是否衰减做出科学诊断,并及时维护以延长其使用的生命周期。

## 2 科学运维体系的建立

### 2.1 科学运维管理的内容和要求

为建立适宜本地区的运行维护管理方案,应综合考虑设施类型、维护制度建设及指标体系的建立等多个方面,具体研究思路见图1。

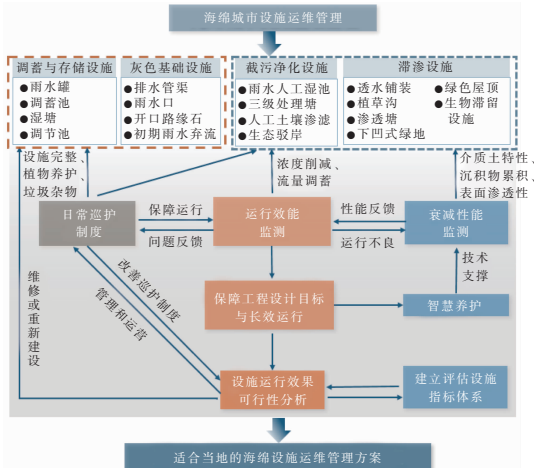


图1 雨水设施运行维护管理的研究思路

Fig.1 Research idea of operation, maintenance and management for stormwater facilities

雨水设施建设完成经过试运行及调试验收合格后,建设方应将档案资料(竣工图纸等)及时移交运行维护管理方,除必要的日常巡护外,运行效能和衰减性能监测应交由专业人员定期开展。

① 日常巡护制度。建立海绵城市中雨水设施的日常维护制度、暴雨前巡查制度、应急处置制度等。培训运行管理的专业人员,使其具备海绵城市设施运行维护管理的专业技术知识。

② 运行效能监测。开展至少每年一次的运行效能监测评估,主要针对雨水设施对径流水质、水量的调控效果,通过自然/模拟降雨测试提出评估结论和改进建议。对运行效能下降明显的设施,需要进一步进行相关性能的衰减诊断监测。

③ 衰减性能监测。雨水设施在长期运营过程中会出现损坏、老化等问题,为保障海绵城市设施运行效果的可持续性,实现其运维的规范化和精细化,需要定期对海绵城市设施的相关性能进行衰减监测,评估其效能衰减性,提高海绵城市设施运行维护水平。主要监测方面为介质土表征测试、沉积物积累测试、表面渗透性测试。

④ 智慧养护。根据不同类型的雨水设施,确定设施相关影响因子,制定设施模型,确定评价机制,通过智慧园林模块采集雨水设施数据,模型计算、分析、展示,计划制定及考核整合至海绵平台。

### 2.2 科学运维管理的类型和监测方法

运行维护管理方为保障设施的运行效能,需根据雨水设施类型和当地气候等因素具体分析各项指标的衰减情况,并及时维护。技术路线见图2。

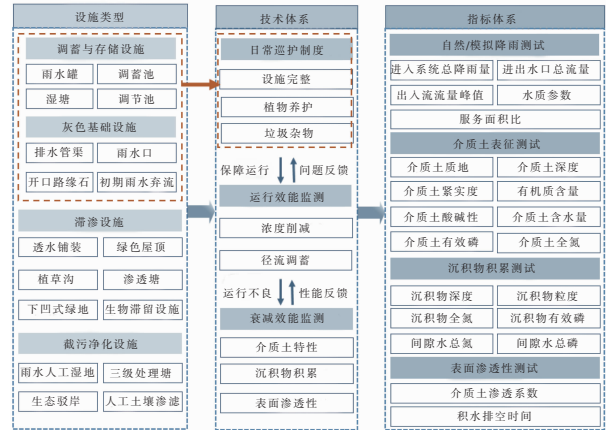


图2 雨水设施运行维护管理的技术路线

Fig.2 Technical route of operation, maintenance and management for stormwater facilities



2.2.1 日常巡护

海绵城市中雨水设施的可持续运行在于定期的检查和维护,除了日常巡护以外,更要在雨季前后进行重点巡查,针对不同的雨水设施及时做好运行维护记录表,方便下一步修复。同时应注意雨水设施不同的维护需求,对于有植物的雨水设施,需要对植物进行浇灌施肥、除草防冻补种等工作,在发挥滞

渗功能的同时实现附加的景观效果<sup>[10]</sup>。透水铺装应在每年雨季前对人员聚集、交通繁忙地段通过抽真空器械清理或高压冲洗等方式清理表面封堵空隙,绿色屋顶应在雨季前重点检查是否存在渗漏现象,蓄水池、雨水罐、调节池等应在雨季和冬季到来前降至调节水位或排空,防止对设施造成损坏<sup>[11]</sup>。不同雨水设施的维护要点见表 1。

表 1 雨水设施的维护要点

Tab. 1 Key points of stormwater facilities maintenance

项 目		维护要点									
		清除苔藓、杂草,定期修剪植被	补种受损植物、补充种植土	修补坍塌、调整坡度	清除设施内淤泥、垃圾及杂物	清理进出水口阻塞物	修补损坏结构组件	测量并修复不完整覆盖层	检修泵站、阀门、电气自控设备	观测雨水排空时间	更换丢失、损坏的安全标识
滞渗设施	透水铺装	√			√	√	√			√	
	绿色屋顶	√	√		√	√	√	√	√	√	
	下凹式绿地	√	√	√	√	√	√	√		√	
	植草沟	√	√	√	√	√	√	√		√	
	生物滞留设施、渗透塘	√	√	√	√	√	√	√		√	√
截污净化设施	雨水人工湿地、三级处理塘	√	√	√	√	√	√		√		√
	缓冲带与生态驳岸	√	√	√	√	√	√	√			√
	人工土壤渗滤	√	√	√	√	√	√	√	√		
调蓄与存储设施	雨水罐				√	√	√		√		√
	调蓄(蓄水)池				√	√	√		√	√	√
	湿塘		√	√	√	√	√		√		√
	调节池(干塘)	√		√	√	√	√	√	√	√	√
灰色基础设施	排水管渠				√	√	√		√		
	雨水口				√	√	√		√		
	开口路缘石				√	√	√				
	初期雨水弃流设施			√	√	√	√		√		√
维护最低频次		1 次/月	1 次/月	1 次/3 个月	1 次/月	1 次/2 个月	1 次/月	1 次/3 个月	1 次/月	1 次/2 个月	1 次/2 个月

注: 维护最低频次为参考限值,应结合当地气候、降雨频次、沉积物累积速率等影响因素进行适当调整。

2.2.2 运行效能监测

运行效能监测主要是为雨水设施的整体运行效果评估进行服务。根据不同地区雨水设施的实际情况,采用在线和人工监测相结合的方法,在雨水设施的进出水口、管网的关键节点安装监测装置,实现水量水质的同步监测。运行效能监测至少每年一次监测评估,就径流水质、水量调控效果出现的问题,提出改进建议。

① 径流峰值控制效果。海绵城市雨水设施的径流控制率和径流控制体积对其运行效能具有重要影响,如具有水量调控功能的滞渗设施和截污净化设施。通过模拟降雨事件,针对雨水设施内不同目

标污染物浓度变化情况评估设施的水质净化效果<sup>[12]</sup>,并及时对不达标的雨水设施进行下一步的衰减性能监测。雨水设施的径流监测主要包括设施进出口流量、径流峰值流量、径流体积、峰现时间控制效果。通过与设施设计降雨量等参数的比较,以及场降雨或年连续降雨水量平衡计算,最终可以得到雨水设施的径流控制规律,为雨水设施的管理和运行维护提供技术支持。

② 污染物总量控制效果。海绵城市雨水设施对径流污染物的削减能力是评价其运行效能的重要指标,雨水径流经过雨水设施的分级渗透,达到污染物的削减甚至去除的效果。因此,对雨水设施进行

污染物控制监测具有重要意义。考虑到系统的整体性,在源头、中间和末端对雨水设施的分段监测可以推算出整个汇水区的径流控制情况<sup>[13]</sup>。污染物的控制监测与径流总量监测同步进行,监测内容主要包括雨水设施进口污染物浓度、污染物去除能力(底部排放污染物浓度)、场/年污染物总量控制效果、单一不透水下垫面的径流污染特征(如通过设施进水水质监测分析相应下垫面的初期效应)等。通过对雨水设施污染物控制率的核算,可以得到雨水设施对多种污染物的控制规律,最终为雨水设施的管理和运行维护提供技术支持。

③ 监测指标与评价标准。海绵城市雨水设施施工完成后,应按照运行维护方案定期进行管理和监测,并对监测指标进行统计评估。在运行效能监测阶段,主要监测内容为进出水流量、水质、透水系数和服务面积比,通过监测内容进一步计算出径流控制率和污染物削减率两大评估指标值。参考《海绵城市建设效果监测与评估规范》(DB 11/T 1673—2019),运行效能监测指标及评价标准见表 2。

表 2 运行效能监测指标及评价标准

Tab. 2 Operation efficiency monitoring index and evaluation standard

监测指标	监测对象	监测内容	评价标准	备 注
径流控制率	滞渗设施	进入系统总降雨量、进出水口总流量、出入流流量峰值、汇水区面积、服务面积比	参考当地海绵城市建设技术规范对雨水设施径流控制的设计标准	与当地海绵城市建设技术规范的设计值进行比较,满足设计值为运行良好;高于设计值 20% 需要加大运维力度;低于设计值 20% 时需要进行衰减性能监测
污染物削减率	滞渗设施	雨水设施进出口径流水质参数	参考当地海绵城市建设技术规范对污染物(SS、总氮、总磷、氨氮、COD)去除的设计标准	

### 2.2.3 衰减性能监测

衰减性能监测在监测要求和监测精度基础上,加强在线监测与人工监测的结合。在典型设施上布设自动监测设备和在线监测设备测定相关参数,同时对要求精度高且不适合在线监测的指标进行人工监测。雨水设施在使用过程中会出现损坏、老化等问题,在运行效能监测完成后,如果发现雨水设施运

行效能衰减,则需要进行衰减性监测,监测周期为 1~2 次/a。主要监测内容为介质土表征测试、沉积物积累测试、表面渗透性测试。

① 介质土表征测试。海绵城市中雨水设施介质土的性能是影响雨水处理性能和整体功能的关键因素之一,主要体现在三个方面:一是介质土紧实度过大或质地过于细腻,会使渗透速率变慢,产生排水过缓的问题;二是介质土有机质含量过高或化学肥料过量,将导致介质土中的氮磷营养盐向水体转移,增加水体富营养化的概率;三是介质土层深度过浅,将无法充分处理雨水径流挟带的污染物,更不利于植被的健康生长。因此,作为衰减性能监测的一部分,通过对生物滞留设施的过滤介质、绿色屋顶的生长介质、植草沟和人工土壤渗滤的表层土壤介质等进行取样和测试,能够帮助诊断不良的植被覆盖、排水或处理性能差的原因,从而进行准确有效的设施维护。

在对雨水设施进行衰减性能监测时,确定其介质土相关参数是否在可接受的范围内,是判定雨水设施性能衰减程度的重要参考。表 3 描述了介质土的关键监测指标、监测标准和测试方法,并给出参考数据,精确数据应根据本地区土壤情况具体设定。其中监测指标参照全国第二次土壤普查养分分级标准,数值代表已确定的雨水设施的可接受范围(即在运行 3 年或更长的时间内),在进行衰减性能监测的数据分析时,若监测值超过此范围,应对介质土及时更换。

表 3 衰减性能监测指标及评价标准

Tab. 3 Monitoring index and evaluation standard of attenuation performance

监测指标	监测标准	测试方法
介质土地质	壤质砂土或砂质壤土; 70%~88% 的砂土颗粒; 12%~30% 粉砂颗粒; 20% 以下的黏土颗粒	粒度分布检测仪
有机质含量	20~40 mg/kg	重铬酸钾氧化法
介质土酸碱性	pH=6.5~7.5	pH 检测仪
介质土深度	设计深度波动 $\pm 10\%$	钻孔法
介质土紧实度	表面紧实度: $\leq 0.76$ MPa; 下表面紧实度: $\leq 1.79$ MPa; 容重: $1 \sim 1.45$ g/cm <sup>3</sup>	土壤紧实度仪
介质土含水量	参考介质土水分变化曲线	水分温度速测仪
介质土有效磷	10~40 mg/kg	连续流动分析仪
介质土全氮	1~2 g/kg	半微量凯氏定氮法

② 沉积物积累测试。雨水设施的主要功能是

拦截和收集雨水径流中悬浮的泥沙、垃圾和碎片,透水铺装或生物滞留设施表面的泥沙积累过多时,设施表面因细颗粒泥沙堵塞滤料,泥沙和相关污染物将被输出到水环境,其截留功能将会丧失。因此检查雨水设施沉积物的积累情况是保证雨水设施截留功能的重要步骤。除了对雨水设施的日常巡护外,还应注意对关键组件中沉积物积累的定期测量。

a. 监测沉积物的粒径分布和深度。采用粒度分布监测仪测定沉积物粒径分布是否在径流允许挟带的范围内,使用卷尺或探针测量滞渗设施进水口前的预处理设备(如路牙、透水砖、过滤器等)沉积物标高,当累积深度 > 5 cm,且沉积物阻挡了超过 1/3 进口宽度的径流时,估计并记录沉积物数量。对于截污净化类和调蓄存储类设施,则采用污泥取样器取样并估计深度。通过分析沉积物的粒径分布和深度,预测泥沙的移动距离并估计泥沙积累速率,进而优化日常维修工作的频率。

b. 测定沉积物和间隙水中氮磷含量,防止氮磷释放造成内源污染,进而增加水体富营养化的风险。若沉积物还未发生氮磷释放,经降雨冲刷后,沉积物表层颗粒挟带的氮磷营养盐会进入雨水设施的过滤介质床层内,成为介质土层的一部分。因此沉积物中的总氮和总磷含量不应该超过介质土全氮和有效磷限值。间隙水的总氮、总磷含量不应超过《地表水环境质量标准》(GB 3838—2002)中的Ⅲ类标准限值。具体指标的监测标准和测试方法见表 4。

表 4 沉积物积累测试监测标准和测试方法

表 4 沉积物积累测试监测标准和测试方法  
Tab. 4 Monitoring standards and test methods for sediment accumulation test

监测指标	监测标准	测试方法
沉积物粒度	粒径分布在径流允许挟带范围内	粒度分布检测仪
沉积物深度	≤5 cm	卷尺、探针、污泥取样器
沉积物全氮	1 ~ 2 g/kg	半微量凯氏定氮法
沉积物有效磷	10 ~ 40 mg/kg	连续流动分析仪法
间隙水总氮	≤0.1 mg/L	碱性过硫酸钾消解 - 紫外分光光度法
间隙水总磷	≤0.05 mg/L	钼酸铵分光光度法

③ 表面渗透性测试。渗透能力能够反映雨水设施的运行效果,通过计算渗透量,可以判断雨水设施当前的运行效能。其中,渗透量的计算可参考《海绵城市设计规程》(DB 37/T 5060—2016)。决定雨水设施入渗效率的关键因子为介质土渗透系数,受各因素影响应进行多次多地测量取其平均值。实地测量时,根据雨水设施的规划面积合理选择监测范围。生物滞留设施等含过滤介质床表面的设施,至少进行 5 次测量,每 25 m<sup>2</sup> 再测量一次过滤床的表面积。透水铺装路面至少进行 5 次测量,每 250 m<sup>2</sup> 再测量一次透水路面面积。理想情况下,测量应在降雨完全浸湿整个土层不久后进行。参考《贵州省海绵城市建设技术导则(试行)》和厦门《海绵城市建设工程材料技术标准(试行)》(DB 3502/Z 5011—2016),介质土渗透性测试方法见表 5。

表 5 表面渗透性测试监测标准和测试方法

Tab. 5 Monitoring standard and test method of surface permeability test

项 目	监测标准值	设施类型	测试方法
介质土渗透系数/ (m · s <sup>-1</sup> )	3 × 10 <sup>-6</sup> ~ 1 × 10 <sup>-5</sup>	生物滞留设施、植草沟等(过滤介质床表面)	表面渗透速率试验
	> 1.3 × 10 <sup>-6</sup>	人工湿地、渗透塘等(表土表面)	
	> 1 × 10 <sup>-4</sup>	透水铺装(透水路面)	渗透系数测试仪
积水排空时间/h	24 ~ 48	—	雨后实测

当雨水设施开始试运行后,随着介质土表面细颗粒泥沙的积累,渗透系数逐渐变小,导致入渗速度慢,渗透区易形成厌氧环境,不利于污染物截留净化。因此,当监测介质土渗透系数不符合规定值时,应及时进行修复。以过滤介质床为表面的生物滞留设施、植草沟等,应及时清除累积的沉淀物、覆盖物,并对顶部 20 ~ 30 cm 的过滤介质进行耕作,以消除表面结壳或大孔隙,并减少压实。当介质土损坏时,及时移除并更换表层 15 cm 部分或全部过滤介质。

使用表土的表面人工湿地、渗透塘等,应及时清除累积的沉积物和腐败植物,并将表土耕至 20 ~ 30 cm 深,以消除表层结壳,增加孔隙度和减小压实。采用透水铺装的透水路面,首先进行彻底清扫和吸尘,阻塞严重时尝试人工或压力清洗;极端情况下移除表面层和垫层部分重新安装。

2.3 智慧养护

对绿色雨水基础设施的智慧养护是指将海绵城市建设与智慧城市理念相结合,通过物联网等技术



实现对雨水设施的远程控制管理<sup>[14-15]</sup>,建立起海绵城市运行维护的智慧监测和动态管控系统。从我国当前的国情出发,应该由点及面逐层构建完善的智慧海绵体系。当典型示范区智慧海绵运维管理平台搭建运行取得明显成效后,应在不同片区的同类项目中继续深入推广。具体思路(见图3):首先在典型设施、典型项目、示范区内选取适宜的监测点位,并在典型设施、排水管道和排水分区排口的关键节点安装传感器、流量计和水质监测仪等在线监测设备。采用在线与人工监测相结合的方式对相关信息模块数据进行监测和汇集;然后,通过网络通信对数据进行入库处理和传输到智慧海绵运行维护管理平台;最后通过对实时数据的分析以及模型模拟情况结果的比较,对有偏差的设施进行风险预警和维护方案制定。同时对维护后效果进行绩效考评,对系统反馈结果进行新一轮修正。运行人员应定期对在线监测设备进行现场检查维护并做好记录。

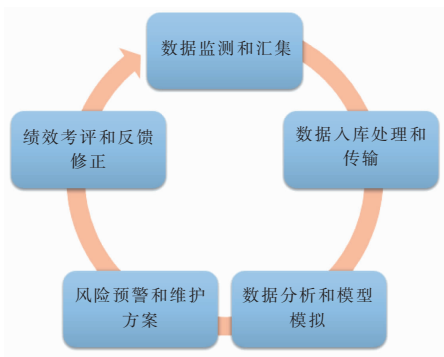


图3 智慧海绵运行维护管理系统流程

Fig.3 Flow chart of intelligent sponge operation, maintenance and management system

目前,我国海绵试点城市采用的SWMM、SUSTAIN、TOPMODEL或Infoworks CS等相关模型,主要是对洪涝风险、流域风险及管网排水调蓄能力的评估以及方案的设计和优化,还少有针对性绿色雨水基础设施运行维护的模型。因此,应采用如园林养护等其他模型与上述模型相结合的方式,以精确模拟绿色雨水基础设施并服务于整个系统。除了对绿色雨水基础设施的运行维护外,还可以耦合灰色基建管网排水系统,控制雨污混合的溢流污水和减缓内涝带来的损失,实现区域内涝风险可视化、监测数据集成显示、动态评估控制指标等功能。

### 3 结语

海绵城市中雨水设施的运行维护是保证其长久

有效运行的关键环节。按照科学运维体系的步骤对雨水设施进行运行管理维护,以最大化发挥其功能,延长使用的生命周期。对雨水设施的维护不仅仅是政府和企业的责任,更要提高全民参与的意识。

① 在现有的人工定期检修运行维护情况的基础上,逐步实现现代化和信息化的智能监测和动态管控的线上一体化。通过传感器和流量计、雨量计等相关辅助设备感应是否存在阻塞等日常维护问题,在线监测渗透、土壤或介质土的关键参数及植物生长参数等,并实时传送到云端智能监测系统,对数据出现问题的设施及时进行反馈,以便随时掌握雨水设施的工作状态以及优化设施的运行维护情况。

② 我国现已研究出多种模型对降雨进行模拟计算,考虑到雨水花园、植草沟等海绵城市的雨水设施都是以地表漫流的方式完成汇流,无论是机器还是人工监测,其数据都存有一定的误差,造成模拟精度不准确的问题。因此,应尝试研发能够评估和修正相关数据参数的人工智能软件,提高数据的精度,以便更好地进行模型的模拟研究。

③ 某些雨水设施的表层覆盖土和介质土遭遇强降雨后很容易出现吸水饱和或粉化的现象,使雨水设施的下渗滞蓄功能减弱,根据不同的介质土类型,每半年到一年就需要更换一次,造成大量的财力物力消耗。在今后的研究中,应加大对新型介质土的研究,在保证保水、保肥等基本性能的同时,实现可循环使用和渗透性能的提升。

### 参考文献:

- [1] 张蓓,李家科,李亚娇. 不同开发模式下城市雨洪及污染模拟研究进展[J]. 环境科学与技术,2017,40(8):87-95.  
ZHANG Bei, LI Jiako, LI Yajiao. Study on urban storm water and non-point source simulation under different development patterns [J]. Environmental Science & Technology, 2017, 40(8): 87-95 (in Chinese).
- [2] 耿潇. 城市雨水基础设施维护运营管理研究[D]. 北京:北京建筑大学,2017.  
GENG Xiao. Research on Urban Stormwater Facility Maintenance and Operation Management [D]. Beijing: Beijing University of Architecture, 2017 (in Chinese).
- [3] 张玉鹏. 国外雨水管理理念与实践[J]. 国际城市规划,2015,30(增刊):89-93.  
ZHANG Yupeng. Philosophy and practice of overseas

- stormwater management [J]. Urban Planning International, 2015, 30(S1): 89-93 (in Chinese).
- [4] 米文静, 张爱军, 任文渊. 国外低影响开发雨水资源利用对中国海绵城市建设的启示[J]. 水土保持通报, 2018, 38(3): 345-352.
- MI Wenjing, ZHANG Aijun, REN Wenyuan. Oversea utilization and development of urban rainwater resources with low impact and its implications for construction of sponge city in China [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2018, 38(3): 345-352 (in Chinese).
- [5] 潘丽娟. 浅谈新加坡的雨水综合利用系统[J]. 城市道桥与防洪, 2013(7): 160-161.
- PAN Lijuan. Talking about rainwater comprehensive utilization system in Singapore [J]. Urban Roads Bridges & Flood Control, 2013(7): 160-161 (in Chinese).
- [6] 高雪, 吴斯文. 海绵设施运行中存在的问题及维护措施探讨[J]. 市政技术, 2019, 37(2): 156-159, 162.
- GAO Xue, WU Siwen. Discussion on the problems and maintenance measures in sponge facility operation [J]. Municipal Engineering Technology, 2019, 37(2): 156-159, 162 (in Chinese).
- [7] 王琦, 宫永伟, 张维伟, 等. 源头径流控制设施的运行维护及相关问题探讨[J]. 中国给水排水, 2017, 33(7): 144-148.
- WANG Qi, GONG Yongwei, ZHANG Weiwei, et al. Operation and maintenance of source runoff control facilities [J]. China Water & Wastewater, 2017, 33(7): 144-148 (in Chinese).
- [8] 丁继勇, 王卓甫, 蔡珏芳, 等. 海绵城市设施运维管理模式及机制的分类设计[J]. 管理现代化, 2018, 38(6): 62-65.
- DING Jiyong, WANG Zhuofu, CAI Juefang, et al. Classification design of operation and maintenance management mode and mechanism of sponge city facilities [J]. Modernization of Management, 2018, 38(6): 62-65 (in Chinese).
- [9] 陈垚, 段玲红, 熊毅, 等. 海绵城市建设中雨水花园的维护管理[J]. 给水排水, 2017, 43(增刊): 93-96.
- CHEN Yao, DUAN Linghong, XIONG Yi, et al. Maintenance and management of rainwater garden in sponge city construction [J]. Water & Wastewater Engineering, 2017, 43(S): 93-96 (in Chinese).
- [10] 于荣兴, 李俊奇, 宫永伟, 等. 低影响开发雨水设施的维护管理[J]. 建设科技, 2015(7): 44-45.
- YU Rongxing, LI Junqi, GONG Yongwei, et al. Maintenance and management of low impact development rainwater facilities [J]. Construction Science and Technology, 2015(7): 44-45 (in Chinese).
- [11] 李俊奇, 徐亨, 杨正, 等. 城市雨水系统维护管理模式及关键问题的思考[J]. 给水排水, 2019, 45(2): 45-52.
- LI Junqi, XU Xiang, YANG Zheng, et al. Thinking on the maintenance management mode and key problems of urban stormwater system [J]. Water & Wastewater Engineering, 2019, 45(2): 45-52 (in Chinese).
- [12] 古润竹, 陈力, 丁磊. 美国雨水 BMP 评估体系对我国海绵城市建设的借鉴[J]. 给水排水, 2018, 44(增刊): 115-120.
- GU Runzhu, CHEN Li, DING Lei. Reference of rainwater BMP evaluation system in the United States to sponge city construction in China [J]. Water and Wastewater Engineering, 2018, 44(S): 115-120 (in Chinese).
- [13] 丁留谦, 王虹, 李娜, 等. 美国城市雨污蓄滞深隧的历史沿革及其借鉴意义[J]. 中国给水排水, 2016, 32(10): 35-41.
- DING Liuqian, WANG Hong, LI Na, et al. Evolution of deep stormwater storage tunnel projects in the United States and its reference value to China [J]. China Water & Wastewater, 2016, 32(10): 35-41 (in Chinese).
- [14] 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, 171.
- LI Yunjie, ZHANG Chi, LENG Xiangyang, et al. Exploration and expectation of smart sponge city [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2016, 14(1): 161-164, 171 (in Chinese).
- [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 discussion and analysis of the overall architecture and key technologies of smart sponge city [J]. Intelligent City, 2017, 3(12): 19-21 (in Chinese).

作者简介: 单溪环(1995-), 女, 山东淄博人, 硕士研究生, 研究方向为城市面源污染控制。

E-mail: 1096063212@qq.com

收稿日期: 2020-02-21

修回日期: 2020-03-18

(编辑: 丁彩娟)