

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2019.06.012

雨洪管理设施的监测与智慧景观设计结合的跨学科实证

周怀宇¹, 刘滋菁², 刘海龙¹, 姜会全³, 张益章¹

(1. 清华大学建筑学院, 北京 100084; 2. 清华大学环境学院, 北京 100084; 3. 清华大学机械工程学院, 北京 100084)

摘要:以在线监测为目标,依托物联网技术,跨学科合作构建城市雨洪管理设施的监测系统。通过比较水文学科及景观学科在雨洪管理设施监测方面的专业优势与合作需求,探讨在线监测与智慧景观设计相结合的途径。以清华大学胜因院为例,证实了“以景观项目为研究对象,由景观学科综合统筹监测方案的设计与实施,水文学科提供技术框架与理论支持”这一合作途径的有效性与优越性。

关键词:雨洪管理;监测;智慧景观;海绵城市;跨学科合作;清华大学胜因院

中图分类号:X85,TU986.2 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-6933(2019)06-0082-07

Interdisciplinary demonstration of combination of stormwater management facilities monitoring and smart landscape design // ZHOU Huaiyu¹, LIU Zijing², LIU Hailong¹, JIANG Huiquan³, ZHANG Yizhang¹ (1. School of Architecture, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 2. School of Environment, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 3. Department of Mechanical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: Taking online monitoring as the goal, a monitoring system of urban stormwater management facilities was build relying on the IOT (internet of things) technology and interdisciplinary cooperation. By comparing the professional advantages and cooperation needs of hydrology and landscape discipline in the monitoring of stormwater management facilities, this paper discussed the way of combining online monitoring with smart landscape design. Taking Shengyinyuan of Tsinghua University as an example, this paper proves the effectiveness and superiority of the cooperative approach of “taking landscape project as the research object, planning the design and implementation of comprehensive monitoring scheme by landscape discipline, and providing technical framework and theoretical support by hydrology”.

Key words: stormwater management; monitoring; smart landscape; sponge city; interdisciplinary cooperation; Shengyinyuan of Tsinghua University

城市雨洪管理的发展以及我国海绵城市建设的深入离不开水利、环境、景观的跨学科合作。雨洪管理设施的监测是水文学科主导和推动的,以建设绩效评估、模型模拟验证、水文过程还原为主要目标的新兴研究领域^[1]。该领域当前面临的最主要问题是:雨洪管理设施的监测系统设计与施工严重滞后于设施的建设,监测系统设计与设施本身设计脱节。雨水花园、雨水湿地等设施一旦建成,监测设备较难补装,导致雨洪管理设施监测难以开展。城市雨洪管理设施已与城市景观高度融合,如果前期景观设计不考虑监测,后期进行监测评估将限制重重,因此

亟须探讨一条水文与景观跨学科搭建监测平台的合作途径,解决当前海绵城市难管理、难评估、缺数据、缺依据的困境。

我国海绵城市建设的前期强调雨洪管理工程与景观空间设计的结合,兼顾功能与美观。而在新时期,传感技术、物联网及数据模拟分析技术已为获取城市水文数据、实现在线监测与评估创造了新条件。因此,以跨学科视角探讨城市雨洪管理设施的监测与智慧景观设计的结合,有利于解决雨洪管理设施建设与监测脱节的问题,保障监测系统的有效性,提高海绵城市决策与管理的科学性^[2]。

基金项目:国家自然科学基金(51478233);清华大学研究生教育改革项目(201803J001)

作者简介:周怀宇(1993—),男,硕士研究生,研究方向为景观水文、智慧景观。E-mail:415318047@qq.com

通信作者:刘海龙,副教授。E-mail:liuhlong@tsinghua.edu.cn

1 水文学科视角下的雨洪管理设施监测

1.1 水文学科中城市雨洪管理监测的实践与研究进展

传统雨洪管理设施的离线监测数据可应用于:①支撑海绵城市建设的绩效评估,指导海绵城市更新^[3];②识别与判断不同种类基础设施的实际效用,指导海绵城市建设运行维护管理^[4];③还原城市水文过程,探究城市水环境问题产生原因,从而解决水体黑臭、热岛效应等城市环境问题;④指导城市水文模型的率定与验证^[5]。Hunt 等^[6-7]利用离线监测方法,从水质及水量方面对雨水花园进行绩效评估;唐双成等^[8]利用离线监测方法,基于填料及降雨特征研究雨水花园对径流的削减作用;郭超等^[9]利用离线监测方法研究雨水花园运行寿命。传统离线监测主要用于实验室或户外小范围雨洪管理设施的监测。

雨洪管理设施的在线监测则拓宽了离线监测的应用尺度与价值:①在线监测为城市较大范围水文过程的在线模拟创造条件,运用实时监测数据可将离线的既成状态模型转变为在线的实时模拟模型,便于探究城市水文效应的实时动态;②结合实时监测数据及实时模型,建立雨洪灾害预报预警平台,对城市雨洪灾害进行有效管控;③频次高、过程连续、监测时间长的高精度在线监测数据为在线模型的实时率定算法优化提供了数据支撑,为实现大尺度的水文过程在线模拟及实时率定验证创造了条件。

目前,在水文研究领域搭建智慧水务平台,实现从离线模拟分析、监测率定进阶到在线监测、实时模拟预警已是大势所趋,世界各地的学者及研究机构正努力尝试构建水文在线监测平台。韩国学者搭建在线连续水文监测平台监测城市水文过程^[10],美国研究机构结合物联网与传感技术搭建在线水质监测平台^[11],希腊学者应用传感器构建土壤水文监测系统^[12],意大利学者搭建在线水质监测平台管控供水管网中的水质情况^[13]。国内学者在搭建水文水质监测平台方面也做出诸多努力,郭效琛等^[14]研究城市管网水量在线监测预警系统的构建及监测点的布局优化,广州、青岛、西安等多地政府及相关领域公司也致力于搭建城市水情的在线监测平台^[15-17]。

1.2 水文学科中城市雨洪管理监测的技术框架

雨洪管理设施监测应覆盖城市雨洪过程的全部阶段,建立“源头-过程-末端”的监测体系^[16]。监测的主体按照设施类型可划分城市典型下垫面、地下管网与供水设施和城市河湖湿地水系等受纳水体;按照设施尺度可划分为单项设施监测(小于 0.5 hm^2)、建设项目设施总体监测(10 hm^2 以内)及

城市片区雨洪管理设施系统监测(10 hm^2 以上)。城市雨洪管理设施监测系统构建流程主要包括需求分析与资料收集,确定监测尺度,制定并实施监测方案,布局终端设备以及构建信息化、模型或实验平台等过程(图1)。在现有成熟的物联网体系下,监测的终端设备由多种水文传感器组成,水文传感器是整个监测系统的硬件基础^[18],主要布置于道路、管网、水体、土壤、监测井等空间节点。目前雨洪管理监测系统设计中常用的传感器可分为三大类:各项气象数据传感器(雨量传感器、大气温湿度、PM2.5等),水量传感器(水位、流量、流速、土壤下渗量等)及水质传感器(SS、PH、溶解氧探头等)。在监测终端设备方面,国内部分学者的研究成果已完成了产品转化过程^[19],相对成熟的产品如无线液位及流速探头、水质传感探头、自动取样器等主要用于地下设施或终端设施的监测。相比之下,源头设施监测设备组合较为复杂,需要根据场地进行定制化设计。

2 智慧景观视角下的雨洪管理设施监测

智慧景观强调在城市景观项目中根据项目特点,构建感知、网络、数据、平台及应用五大结构层次,建立景观信息模型^[20],实现项目的智慧化管理,其核心目标在于优化景观项目管理模式,推动循证设计与设计评估(图2)。

智慧景观主要针对景观项目:小到街头绿地、口袋公园设计与使用的智慧化,大到风景区规划与管理的智慧化。智慧景观涉及气象环境监测、使用管理、植物管理、雨洪管理、生态修复等多个方面,内容颇为综合。由于城市雨洪管理(尤其是源头阶段)与景观项目的高度融合,因此在智慧景观体系中,雨洪管理设施的监测数据有突出的重要性。景观项目中,雨洪管理的在线监测数据可用于指导景观项目绿色雨水设施的维护与管理,评估场地竖向组织、设施容量设计的合理性,提供项目水安全预警,兼顾实现景观水文教育功能(表1),使得景观项目能够“智慧”应对城市暴雨及内涝问题。

智慧景观中的在线监测研究虽尚处于起步阶段,但相关离线监测研究案例已为在线监测的系统构建提供了重要借鉴。美国风景园林师协会(American Society of Landscape Architects, ASLA)总部大楼屋顶花园设计项目中^[21],学者利用流量传感器及自动取样器共收集了65场降雨事件的数据,研究绿色屋顶对径流流量与污染物的削减作用。宾夕法尼亚大学 Shoemaker Green 绿地项目^[22](获2016年美国风景园林师协会研究类荣誉奖),以校园绿地为研究对象,从雨水、地表水、灌溉用水、土壤、植

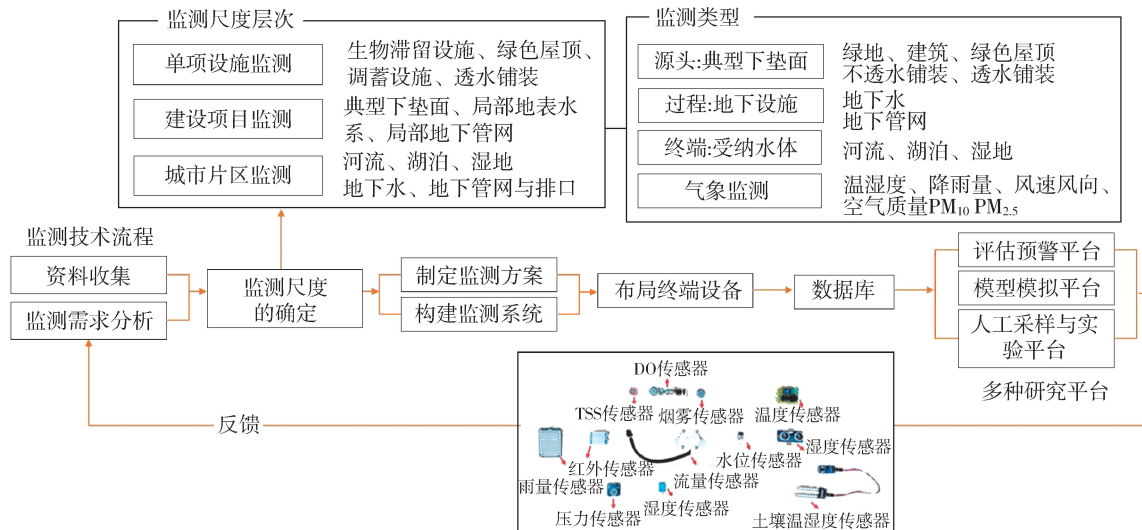


图1 水文学科中城市雨洪管理设施监测的技术体系

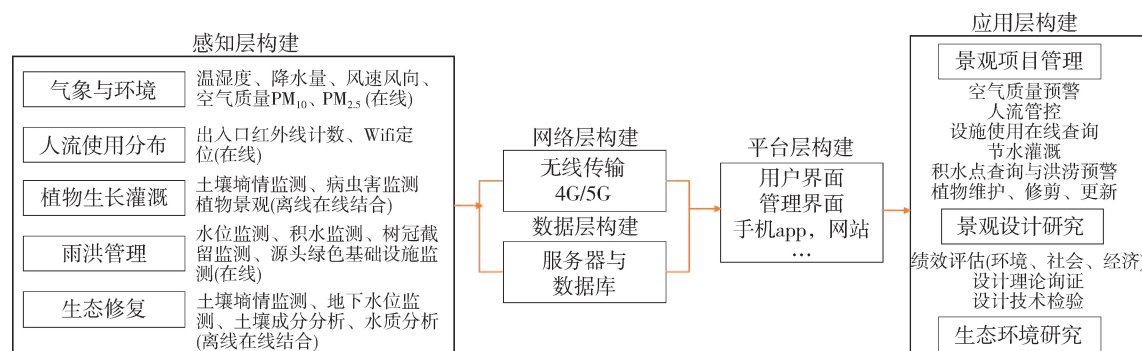


图2 智慧景观中城市雨洪管理设施监测的技术体系

表1 智慧景观雨洪管理设施在线监测体系

智慧景观雨洪管理	维护与管理	灰色设施:连通性、堵塞情况、工作状态
		绿色设施:出流与溢流管堵塞、填料层堵塞、下渗性能
	设计评估	积水状况:植物长时间淹没
		综合效果:水量、水质 设施容量:合理性
	灾害预警	竖向设计:连通性 流程设计与设施布局:连通性 植物设计:植物选种合理性 气象预报 积水点分布查询 河流水位预警

景观教
物方面获取雨洪管理的绩效评估数据。与国内西安高校类似实践^[23-24]不同,这两个案例以经典景观项目为研究对象,雨洪管理设施监测在项目初期便纳入考量,监测范围覆盖项目的各个环节,监测系统与景观系统协调共生。

3 跨学科合作途径探讨

综合国内外研究,在城市雨洪管理设施监测方面,水文学科率先开展在线监测系统的构建,形成了较为成熟的技术体系;景观学科则擅长于雨洪管理

设施的空间设计与施工,保证监测系统能够在项目建设前搭建;且两个学科雨洪管理设施监测的监测目标及技术框架具有高度的一致性。因此,水文学科与景观学科的跨学科合作是实现雨洪管理设施设计、监测、评估与管理的一体化、解决设施建设与监测脱节问题的重要途径。以城市景观项目为研究对象,以水文学科相对成熟的监测技术思路与体系为基础,由景观学科综合统筹景观设计及监测系统的施工落地,同时实现景观项目雨洪管理的智慧化,是一条双赢的合作路线^[25]。

具体阐述这一合作途径(图3)包括以下几个主要部分:①选择具有条件开展合作的典型城市景观项目,在景观方案设计阶段将雨洪管理设施监测进行一体化考虑;②水文学科负责制定初步的监测方案,提供技术与产品样例;③景观学科梳理雨洪管理体系,匹配空间设计方案与监测方案;④景观学科根据场地条件深化设计监测装置,保证其可建性与美观性;⑤景观学科负责景观方案及监测系统的施工,水文学科或信息、机械学科指导监测设备的调试;⑥水文学科搭建共享的数据库平台,多学科研究者可从不同视角、依据共享数据展开专题研究。

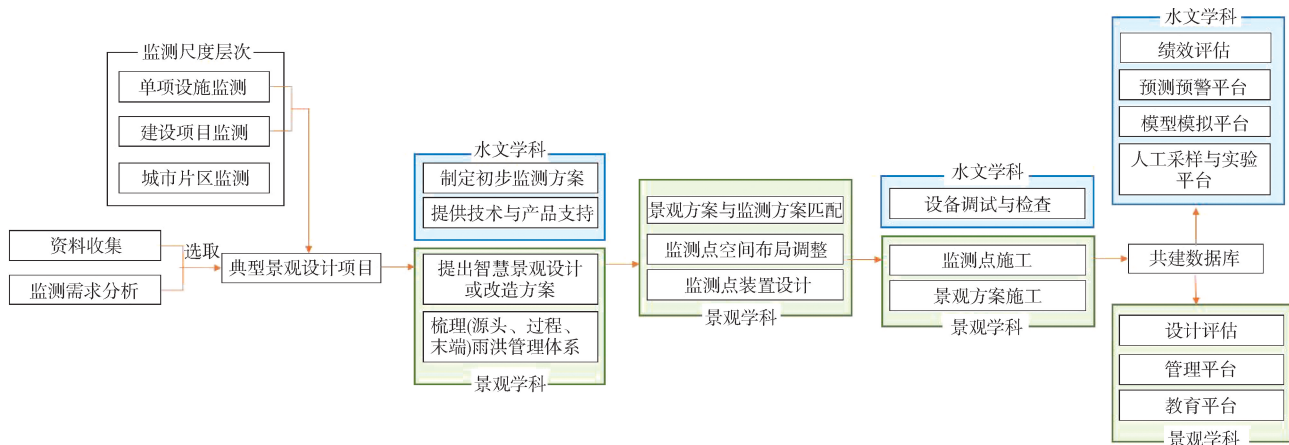


图3 城市雨洪管理设施监测中水文学科与景观学科的合作途径

在这一合作过程中,景观学科体现出了以下几点优势:①景观设计师对于场地使用功能需求、竖向设计、排水组织、道路结构了解更充分,能够更好地平衡场地正常使用功能需求与监测需求;②水文过程的精细化监测与模拟离不开精细化的场地模型的建模,而景观学科在利用无人机遥感、Rhino 建模、ArcGIS 分析等方面有着独特的学科优势;③景观设计师对于绿色基础设施的材料、结构、植物的形式与习性理解更充分,实现绿色基础设施监测的精细化;④景观设计师能够准确地把握设施布局的合理性、使用的安全性、施工的准确性以及美观与协调,实现监测统筹、实施过程与景观施工同步进行。

4 实践研究:清华大学胜因院雨洪管理设施监测系统设计

清华大学胜因院始建于1946年,曾是近现代教师住宅群,并于2011—2013年进行景观改造与雨洪管理设计,现为科研单位办公场所。胜因院作为我国较早实践雨洪管理景观设计^[26]及设计后评价(POE)^[27]的项目,其后续提升与绩效评估得到了设计方、施工方、业主及校方的着重关注。近年来由于相关维护的缺乏及业主需求的提升,对胜因院实行进一步的景观改造及智慧化提升势在必行。在清华

大学建设“双一流”及智慧校园的大背景下,依托清华大学胜因院景观改造与提升工程,实践雨洪管理设施监测与智慧景观设计的结合。

4.1 胜因院雨洪管理监测技术路线

胜因院雨洪管理设施监测系统的设计与研究团队来自景观、环境工程及机械工程专业。在跨学科合作中,景观专业统领系统设计与施工,环境专业负责完善监测方案、优化技术细节,机械专业提供相关设备连接、通讯、数据采集等技术支持。参照智慧景观的系统框架,最终在胜因院搭建的监测系统分为感知、网络、数据、平台及应用5个层次,监测内容包含项目整体监测与基础设施精细化监测两个尺度。项目整体监测反应项目整体在降雨事件中的产流情况,包括了相对基础的气象环境、降雨入流、出流与管网监测;基础设施精细化监测用于指导雨水花园等绿色基础设施的维护、管理及相关科学研究,监测指标更为细致(图4)。与以往监测不同的是,由于胜因院植被覆盖度高,树冠截留对场地雨洪过程影响较大,因此系统中纳入了对4种主要乔木类型(柳、国槐、家杨、泡桐)树冠截留的监测,可结合正投影图确定树冠截留的面积,作为新的降雨影响因子,纳入雨洪管理过程模拟中。

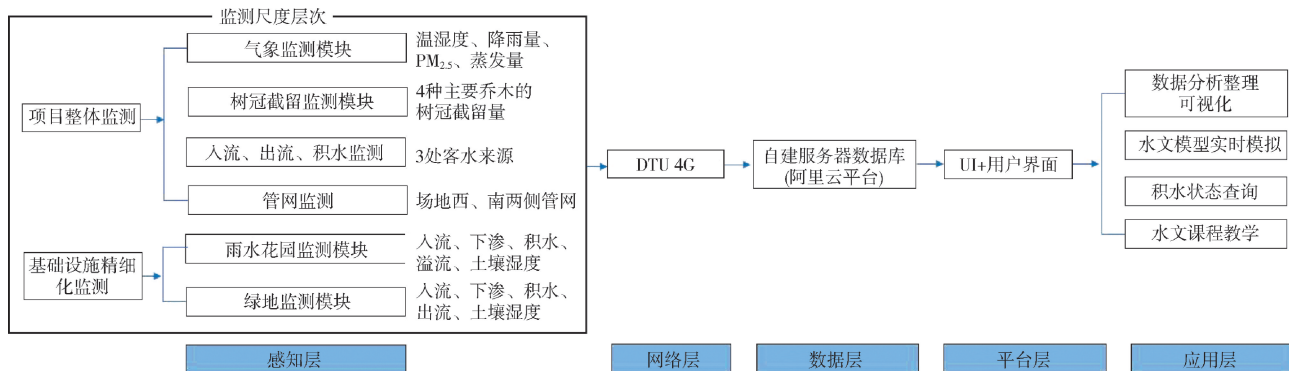
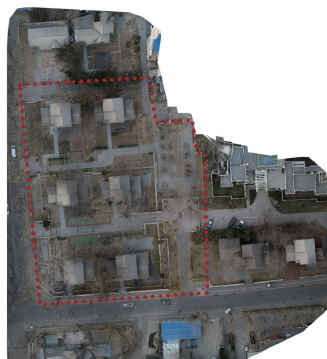


图4 胜因院雨洪管理设施监测技术路线

4.2 胜因院雨洪管理设施整体监测

整个系统的监测范围约 $6\,500\text{ m}^2$, 选择了胜因院相对封闭的流域(有抬高的人行道及矮墙阻隔客水进入), 仅开放东侧一个客水入口(积水超过 10 cm 是客水进入)。原设计方案资料中场地的竖向高程及汇水分区较为概化, 为指导监测设备的布局及后续水文模型的建立, 通过无人机实地测绘建立了全新的 $0.5\text{ m} \times 0.5\text{ m}$ 的精细化数字高程模型(图 5)。



(a) 正投影



(b) 3D 模型

图 5 胜因院无人机测绘正投影与 3D 模型

依据精细化的高程模型进行场地产汇流分析, 确定主要的积水点 2 处, 雨水花园监测点 4 处, 绿地监测点 1 处; 根据乔木分布及施工接线的便捷性考量, 确定树冠截留监测点 4 处; 气象站布局考虑不受建筑物及乔木干扰, 布局在胜因院东侧广场; 监测范围内无地下管网, 主要出水口为地下水窖, 因此管网监测点选在与水窖相连的雨水井中。监测点的整体布局、落点及装置设计见图 6。

展示平台方面, 研究团队现已搭建了交互式网页平台(www.xysmartla.com; 8050), 展示胜了因院雨洪管理监测系统于 2018 年 9 月 7 日运行启动到 12 月 15 日的监测数据, 共记录了两次较为典型的降雨事件(9 月 11 日, 9 月 28 日)。网页利用响应鼠标悬停事件功能(Hover)实现温湿度、空气颗粒物、降雨量及树冠截留等环境监测数据的分级展示。

4.3 雨水花园精细化监测

雨水花园精细化监测系统主要监测典型的降雨事件中雨水花园积水深度, 表层土壤(30 cm 处)土壤湿度的变化, 实际下渗曲线(通过砾石层下渗的)及溢流流量。精细化监测系统拟通过 2~3 年的精

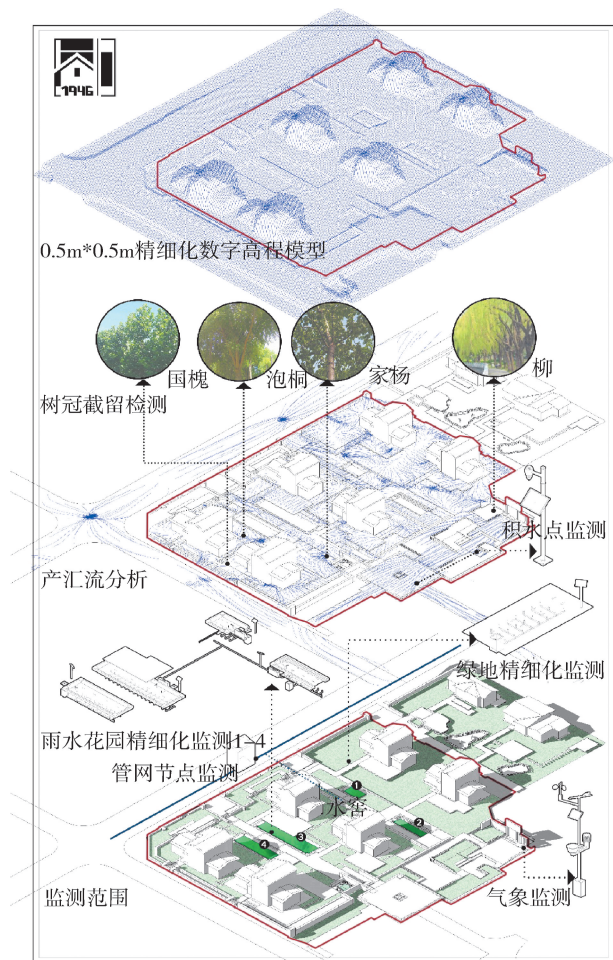


图 6 胜因院雨洪管理设施监测整体布局

细化监测解决以下两个主要的科学问题: ①不同降雨事件中, 户外雨水花园的有效入渗面积, 据此改进雨水花园设计方式, 节约绿化用地; ②户外雨水花园性能衰减周期研究, 弥补现有实验室内或简化条件下研究的不足。

感知层系统搭建中, 跨学科团队根据有限的场地条件、监测原理设计了特定的监测装置。其中, 设计师对硬件设备的量程、盲区、原理有着明确的认识, 严格控制了监测的误差; 系统中选用的超声波液位计有前后 25 cm 的盲区, 因此液位计监测井宽度不得少于 50 cm ; 下渗量监测会导致监测井内积水, 考虑利用水泵定时自动排空; 巴歇尔槽要求流入平稳, 出流顺畅, 防止倒灌; 设计中, 导流槽稍低于巴歇尔槽入口, 使得水流在进入槽前形成稳定的液面; 出流槽长于 50 cm , 并满足较大的排水坡度(30% 左右)。

传输与网络层搭建中, 跨学科合作拓宽了景观设计师及环境工程师的知识边界, 从实操层面掌握物联网在线监测技术细节; 出于安全与便捷考虑, 胜因院雨洪管理监测系统中包含的温湿度、红外线雨量、流量、液位、土壤湿度等传感器均采用 RS485 传输协议, 利用太阳能(12 V)供电, 考虑场地冬季光照

观学科综合统筹景观设计及监测系统的施工落地,实现景观项目雨洪管理设施设计、监测、评估及管理一体化”这一合作途径,该途径具有以下优越性:①打破专业局限,优化设计流程,在项目初期合作构建监测平台是解决雨洪管理设施建设与监测脱节问题的关键;②一体化设计不仅能够发挥水文学科的技术优势及景观学科的设计优势,还能节约建设成本,减小监测设备对城市景观的影响;③共享数据库能支持进一步的跨学科研究,实现合作的良性循环。

参考文献:

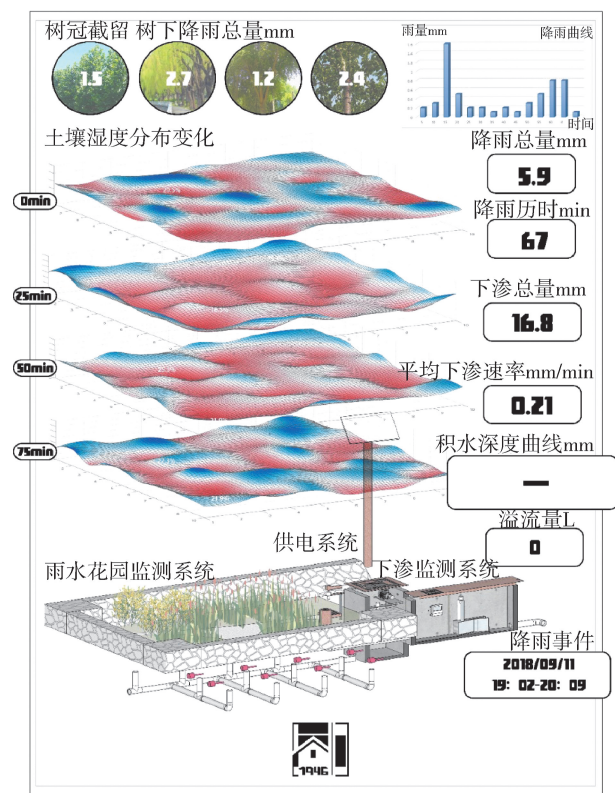


图7 雨水花园精细化监测数据案例

5 结 语

- [1] 刘晓东,杨党锋,蒋雅丽,等.西安小寨海绵城市智慧管控系统研究与应用[J].人民长江,2018,49(增刊2):300-303. (LIU Xiaodong, YANG Dangfeng, JIANG Yali, et al. Research and application of Xi'an Xiaozhai sponge city smart management and control system[J]. Yangtze River, 2018, 49(Sup2):300-303. (in Chinese))
- [2] 马海良,姜明栋,侯雅如.江苏省海绵城市建设的战略分析和路径规划[J].水利经济,2017,35(6):6-11. (MA Hailiang, JIANG Mingdong, HOU Yaru. Strategic analysis and path planning of constructing sponge cities in Jiangsu Province [J]. Journal of Economics of Water Resources, 2017, 35(6):6-11. (in Chinese))
- [3] 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))
- [4] 高玉琴,王冬冬, SCHMIDT A, 等.绿色屋顶对城市流域径流的影响[J].水资源保护,2018,34(5):20-26. (GAO Yuqin, WANG Dongdong, SCHMIDT A, et al. Analysis of effect of green roof on urban runoff[J]. Water Resources Protection, 2018, 34(5):20-26. (in Chinese))
- [5] 蔡庆拟,陈志和,陈星,等.低影响开发措施的城市雨洪控制效果模拟[J].水资源保护,2017,33(2):31-36. (CAI Qingni, CHEN Zhihe, CHEN Xing, et al. Simulation of control efficiency of low impact development measures for urban stormwater [J]. Water Resources Protection, 2017, 33(2):31-36. (in Chinese))
- [6] HUNT W, JARRETT A, SMITH J, et al. Evaluating bioretention hydrology and nutrient removal at three field sites in north Carolina [J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 2006, 132(6):600-608.
- [7] DAVIS A P. Field performance of bioretention: Hydrology impacts [J]. Journal of Hydrologic Engineering, 2008, 13(2):90-95.
- [8] 唐双成,罗纨,贾忠华,等.填料及降雨特征对雨水花园削减径流及实现海绵城市建设目标的影响[J].水土保持学报,2016,30(1):73-78. (TANG Shuangcheng, LUO Wan, JIA Zhonghua, et al. Effects of filler and rainfall characteristics on runoff reduction of rain garden and

- achieving the goal of Sponge City constructions [J]. Journal of Water Conservation, 2016, 30 (1): 73-78. (in Chinese))
- [9] 郭超,李家科,马越,等.雨水花园运行寿命分析与价值估算[J].环境科学学报,2018,38(11):4391-4399. (GUO Chao, LI Jiake, MA Yue, et al. Fate analysis and value estimation for rain gardens [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2018, 38(11): 4391-4399. (in Chinese))
- [10] SHIN D, SEONG T, CHOI J, et al. Self-sustaining water-motion sensor platform for continuous monitoring of frequency and amplitude dynamics [J]. Nano Energy, 2017, 35: 179-188.
- [11] CHEN Y, HAN D. Water quality monitoring in smart city: a pilot project [J]. Automation in Construction, 2018, 89 (1): 307-316.
- [12] GRAVALOS I G, MOSHOU D E, LOUTRIDIS S J, et al. Design of a pipeline sensor-based platform for soil water content monitoring [J]. Biosystems Engineering, 2012, 113 (1): 1-10.
- [13] BODINI S F, MALIZIA M, TORTELLI A, et al. Evaluation of a novel automated water analyzer for continuous monitoring of toxicity and chemical parameters in municipal water supply [J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2018, 157: 335-342.
- [14] 郭效琛,李萌,赵冬泉,等.城市排水管网监测点优化布置的研究与进展[J].中国给水排水,2018,34(4):26-31. (GUO Xiaochen, LI Meng, ZHAO Dongquan, et al. Research and progress on optimal layout of monitoring points in urban drainage networks [J]. China Water and Wastewater, 2018, 34(4): 26-31. (in Chinese))
- [15] 张蓐,刘京,周伟,等.水质自动监测参数的相关性分析及在水环境监测中的应用[J].中国环境监测,2015,31(4):125-129. (ZHANG Ran, LIU Jing, ZHOU Wei, et al. Study on the correlation of water quality automatic monitoring parameters and its application in aquatic environment monitoring [J]. Environmental Monitoring in China, 2015, 31(4): 125-129. (in Chinese))
- [16] 郭效琛,赵冬泉,崔松,等.海绵城市“源头-过程-末端”在线监测体系构建:以青岛市李沧区海绵试点区为例[J].给水排水,2018,54(8):24-28. (GUO Xiaochen, ZHAO Dongquan, CUI Song, et al. Construction of on-line monitoring system of "source-process-end" of sponge city: taking the sponge pilot area of Licang District of Qingdao as an Example [J]. Water & Wastewater Engineering, 2018, 54(8): 24-28. (in Chinese))
- [17] 刘力,侯精明,李家科,等.西咸新区海绵城市建设对中型降雨致涝影响[J].水资源与水工程学报,2018,29(1):26-30. (LIU Li, HOU Jingming, LI Jiake, et al. Effects of LID measures on urban flood waterlogging for medium-sized rainfalls in Xi'xian New District Sponge City Program [J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2018, 29(1): 26-30. (in Chinese))
- [18] 艾萍,于家瑞,马梦梦.智慧水文监测体系中的关键技术简述[J].水利信息化,2018(1):36-40. (AI Ping, YU Jiangrui, MA Mengmeng. Brief introduction of key technologies in intelligent hydrological monitoring system [J]. Water Resources Informatization, 2018 (1): 36-40. (in Chinese))
- [19] 赵冬泉,李雪森,唐兰贵,等. Smart Water 智能在线液位监测预警系统介绍及应用[J].给水排水,2015,41(9):95-100. (ZHAO Dongquan, LI Xuesen, TANG Langui, et al. Introduction and application of Smart Water intelligent online liquid level monitoring and early warning system [J]. Water & Wastewater Engineering, 2015, 41 (9): 95-100. (in Chinese))
- [20] 彼得派切克,郭湧.智慧造景[J].风景园林,2013(1):33-37. (PETER Petschek, GUO Yong. Landscaping smart [J]. Landscape Architecture, 2013 (1): 33-37. (in Chinese))
- [21] GLASS C C. Green roof water quality and quantity monitoring [EB/OL]. (2007-06-26) [2018-09-12] www.asla.org/uploadedFiles/CMS/Green_Roof/Green_Roof_Water_Monitoring_Report.pdf.
- [22] ANDROPOGAN Associates. Weather-Smithing: assessing the role of vegetation, soil, and adaptive management in urban green infrastructure performance [EB/OL]. (2016-08-16) [2018-09-12] https://www.asla.org/2016awards/170435.html, 2016.
- [23] 唐双成,罗纨,许青,等.基于DRAINMOD模型的雨水花园运行效果影响因素[J].水科学进展,2018,29(3):407-414. (TANG Shuangcheng, LUO Wan, XU Qing, et al. Factors affecting rain garden operation based on drained simulations [J]. Advances in Water Science, 2018, 29(3): 407-414. (in Chinese))
- [24] 郭超,李家科,李怀恩,等.雨水花园集中入渗对地下水水位和水质的影响[J].水力发电学报,2017,36(12):49-60. (GUO Chao, LI Jiake, LI Huaien, et al. Impacts of stormwater concentrated infiltration in rainwater gardens on groundwater level and quality [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2017, 36 (12): 49-60. (in Chinese))
- [25] 谢佩琳,徐慧.基于水文化的城市水景观营造思路初探[J].水利经济,2018,36(3):70-73. (XIE Peilin, XU Hui. Planning of urban water landscape based on water culture [J]. Journal of Economics of Water Resources, 2018, 36(3): 70-73. (in Chinese))
- [26] 刘海龙,张丹明,李金晨,等.景观水文与历史场所的融合:清华大学胜因院景观环境改造设计[J].中国园林,2014,30(1):7-12. (LIU Hailong, ZHANG Danming, LI Jinchun, et al. The merging of landscape hydrology with historical site: reconstruction design of Shengyinyuan, Tsinghua University [J]. Chinese Landscape Architecture, 2014, 30(1): 7-12. (in Chinese))
- [27] 刘海龙.清华校园生态景观的建成后评估:以胜因院为例[J].住区,2018(1):96-101. (LIU Hailong. Post occupancy evaluation of ecology landscape in Tsinghua Campus: the case study of Shengyinyuan [J]. Design Community, 2018(1): 96-101. (in Chinese))

(收稿日期:2018-12-29 编辑:王芳)