

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2022.02.023

典型海绵设施水循环过程综合实验场构建

欧阳友^{1,2}, 潘兴瑶¹, 张书函¹, 杨默远¹, 李炳华¹

(1. 北京市水科学技术研究院, 北京 100048; 2. 首都师范大学 资源环境与旅游学院, 北京 100048)

摘要: 低影响开发(LID)是海绵城市建设的重要技术之一,常用的LID设施又称典型海绵设施。为了对典型海绵设施的降雨、入渗、径流、蒸发过程进行长期监测分析,丰富典型海绵设施水文过程与污染物迁移转化过程的研究内容,加深对海绵设施的水量、水质转化全过程的了解,在北京市西郊雨洪调蓄工程园区建立了一个典型海绵设施水文过程综合监测实验场。该实验场的研究对象包括透水铺装、生物滞留设施和绿色屋顶。主要介绍该实验场典型海绵设施的结构设计、水循环过程以及污染物削减过程监测系统构建等,可为类似研究提供参考。

关键词: 典型海绵设施; 透水铺装; 生物滞留设施; 绿色屋顶; 综合实验场

中图分类号: TU992 **文献标识码:** B **文章编号:** 1000-4602(2022)02-0132-07

Construction of a Comprehensive Experimental Field for the Water Cycle Process of Typical Sponge Facilities

OUYANG You^{1,2}, PAN Xing-yao¹, ZHANG Shu-han¹, YANG Mo-yuan¹, LI Bing-hua¹

(1. Beijing Water Science and Technology Institute, Beijing 100048, China; 2. College of Resource Environment and Tourism, Capital Normal University, Beijing 100048, China)

Abstract: Low Impact Development (LID) technology is an important technology for sponge city construction. The commonly used LID technology is also known as typical sponge facilities. In order to carry out long-term monitoring and analysis of the rainfall, infiltration, runoff, and evaporation process, to enrich the research content of the hydrological process and pollutant migration and transformation process, and to deepen the understanding of the whole process of water volume and water quality conversion in sponge facilities, a comprehensive monitoring experimental field for typical sponge facility hydrological process has been established in the stormwater storage project park in the western suburbs of Beijing. The research objects of experimental field include permeable pavements, bioretention facilities and green roofs. The article mainly describes the structure design, the water cycle process and the construction of a monitoring system for the pollutant reduction process in the experimental field, which could provide references for similar researches.

Key words: typical sponge facility; permeable pavement; bioretention facility; green roof; comprehensive experimental field

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41730749); 北京市重点研发项目(Z201100008220005); 国家重点研发计划项目(2019YFC0408703)

通信作者: 杨默远 E-mail: ymoyuan@163.com

海绵城市强调恢复城市下垫面对雨水径流的存蓄、入渗和净化等自然功能,是未来城市建设的重要发展方向。《海绵城市建设技术指南(试行)》指出,针对不同类型城市下垫面特点,选取适宜的海绵设施进行组合应用,能够充分发挥海绵城市建设的源头径流调控与面源污染物削减作用。典型海绵设施包括透水铺装、生物滞留设施和绿色屋顶等类型,相关学者针对各类海绵设施的运行效果开展了大量实验研究。透水铺装的研究主要关注铺装结构设计和面层材料对径流污染过滤净化作用的影响^[1-2],生物滞留设施的研究主要围绕植物选型、结构优化和填料改良等方面开展对比分析^[3-5],在常规水量水质调控效果研究的基础上,绿色屋顶的研究重点关注植被配置、基质层轻质化改良、养护管理等环节^[6-7]。然而上述研究在实验监测对象上主要针对外排径流量这一关键要素,在分析指标上主要关注径流滞蓄、洪峰削减和洪峰延迟效果,缺乏从水循环的角度系统开展海绵设施的多要素联合监测与综合分析^[8-9]。在降雨过程中伴随着径流的入渗滞蓄,海绵设施土壤和填料的水分含量逐渐增加,调蓄能力不断消耗。降雨结束后,海绵设施通过蒸散发过程降低土壤含水量,逐渐恢复其原有的调蓄能力。入渗和蒸散发过程的耦合作用是影响海绵设施径流调控效果的重要原因,因此迫切需要在传统降雨、径流监测分析的基础上,补充开展分层土壤水分和蒸散发监测,同时进行关键环节的水质采样分析,实现海绵设施水循环要素全面感知与污染物迁移转化过程系统监测。

针对海绵设施水文转化过程精细化分析需求,

综合运用蒸渗仪、土壤水分传感器、干湿沉降仪、土壤溶液提取装置、水质自动采样器的监测设备,构建了一个包含透水铺装、生物滞留设施和绿色屋顶等实验对象的海绵设施水循环过程综合实验场,实现了降雨-入渗-产流-蒸发与污染物迁移转化过程系统监测。该实验场的建设能够为海绵设施的水循环转化机理、运行效果评估、结构材料优选等多角度研究提供基础实验支撑平台,并为相关实验方案设计提供借鉴,服务海绵设施的技术改进与运维管理。

1 实验场概况与海绵设施结构设计

1.1 实验场概况

实验场总面积 2 200 m²,设有透水铺装、生物滞留设施、绿色屋顶三个实验区域。其中,透水铺装实验区位于停车场,共设有 6 处透水铺装;生物滞留设施实验区位于停车场周围的绿地,共设有 3 处生物滞留设施;绿色屋顶实验区位于停车场西边空地,设有 5 个绿色屋顶、1 个混凝土屋顶和 7 个布设在小型蒸渗仪上的绿色屋顶。

1.2 透水铺装结构设计

每个透水铺装单独为 1 个实验小区,共 6 个透水铺装实验小区,各小区均采用透水混凝土长方砖隔开,各透水铺装结构见表 1。透水铺装的面层和垫层材料均为影响透水铺装实际渗透能力的主要因素,因此选择了 4 种应用较广泛的面层材料和 2 种垫层材料,以此探究面层材料和垫层材料对透水铺装的渗透能力影响,而且为了对透水铺装的水循环过程进行精细化监测,将其中 1 个透水铺装布设在蒸渗仪上。

表 1 透水铺装结构

Tab.1 Structure of permeable pavements

编号	面层	垫层	土层
I	60 mm 灰色透水混凝土长方砖	50 mm C15 无砂细石混凝土+200 mm C20 透水混凝土+200 mm 碎石土	300 mm 换填土+原状土
II	60 mm 灰色陶瓷透水砖		
III	60 mm 灰色嵌缝式透水砖		
IV	60 mm 现浇透水混凝土		
V	60 mm 灰色透水混凝土长方砖	50 mm、1:6 干硬性水泥砂浆+200 mm C20 透水混凝土+200 mm 碎石土	300 mm 换填土+590 mm 原状土+200 mm 反滤层
VI	60 mm 灰色透水混凝土长方砖		

注: 原状土为当地含砂量较高的土壤。

1.3 生物滞留设施结构设计

每处生物滞留设施单独为 1 个实验小区,共 3

个生物滞留设施实验小区。3 处生物滞留设施结构见表 2。生物滞留设施 I 为常规结构,填料为再生

骨料^[10];生物滞留设施Ⅱ为倒置结构^[11];生物滞留设施Ⅲ为布设在蒸渗仪上的常规结构。生物滞留设施Ⅰ、Ⅲ均收集来自屋面的雨水,雨水通过增设

的檐沟和雨落管收集,其汇水面积分别为97、21 m²;生物滞留设施Ⅱ收集来自非透水路面的雨水,雨水通过明沟引入,汇水面积120 m²。

表2 生物滞留设施结构

Tab.2 Structure of bioretention facilities

项 目	生物滞留设施Ⅰ	生物滞留设施Ⅱ _a	生物滞留设施Ⅱ _b	生物滞留设施Ⅲ
设施面积/m ²	8	4	4	4
设施外汇水面积/m ²	97	60	60	21
植物种类	鸢尾	马莲		鸢尾
植物种植密度/(株·m ⁻²)	12	12		12
蓄水层厚度/mm	200	200		150
树皮覆盖层厚度/mm	50			
种植土层厚度/mm	250(壤土和3 mm 粒径再生材料体积比为1:1)	400(5~10 mm 粒径火山岩)	200(填料层,5~10 mm 粒径砾石)	300(砂、草炭和黏土体积分数分别为75%、20%和5%)
砾石填料层厚度/mm	250(10 mm 粒径再生材料)	200(5~10 mm 粒径砾石)	400(5~10 mm 粒径火山岩)	300(砂、壤土、蛭石和珍珠岩体积分数分别为75%、10%、5%和10%)
原状土层厚度/mm	防渗膜			400
反滤层厚度/mm				200(混凝土)
注: 生物滞留设施Ⅱ分隔开的两块Ⅱ _a 、Ⅱ _b 整体布设大致相同,差别仅为两块生物滞留设施的种植土层和填料层两层位置相反。				

1.4 绿色屋顶设施结构设计

绿色屋顶实验区包括大型绿色屋顶实验区和小型绿色屋顶实验区。大型绿色屋顶实验区包括5个绿色屋顶和1个混凝土屋顶;小型绿色屋顶实验区为7个均布设在蒸渗仪上的小型绿色屋顶。

① 大型绿色屋顶实验区

大型绿色屋顶实验区设有5个绿色屋顶(分别是Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ、Ⅳ、Ⅴ)和混凝土屋顶Ⅵ,大型绿色屋顶实验区建设方案见表3。

表3 大型绿化屋顶实验区设施建设方案

Tab.3 Construction plan of large green roof experimental area facilities

分区	面积	屋顶处理	蓄水模块	排水口形式
Ⅰ	50	佛甲草	无	b
Ⅱ	25	佛甲草	无	c
Ⅲ	50	佛甲草	无	b
Ⅳ	50	佛甲草	有	c
Ⅴ	100	佛甲草	无	a
Ⅵ	25	混凝土	无	a

绿色屋顶的种植植物选择了耐旱性好且适宜在北京生长的佛甲草,种植密度为80 株/m²。为了研究不同排水口形式对径流峰值大小及其延迟时间的影响,设计了3种不同排水口形式:a. 出水口设

置为全透水砖;b. 在设置30 mm 不透水砖基础上安放透水砖;c. 在预埋30 mm 的排水管上安放不透水砖。

绿色屋顶Ⅳ相较于传统绿色屋顶进行了改进,安装了蓄水模块作为雨水回用的设施^[12]。为研究设置不同密度吸水柱情况下蓄水模块的供水能力,进行了3种处理,其中处理Ⅰ:铺设吸水柱18 根/m²,共15 m²;处理Ⅱ:铺设吸水柱12 根/m²,共15 m²;处理Ⅲ:铺设吸水柱8 根/m²,共20 m²。

② 小型绿色屋顶实验区

小型绿色屋顶实验区共设有7个绿色屋顶,且均布设在小型蒸渗仪上。实验采用正交实验原理设置7个处理方案,实验设计如表4所示。

表4 小型绿色屋顶实验设计

Tab.4 Experimental design of small green roofs

绿色屋顶	基质厚度	排水方式	灌溉水平
Ⅰ	C1	D1	M2
Ⅱ	C2	D2	M2
Ⅲ	C2	D2	M1
Ⅳ	C1	D2	M1
Ⅴ	C1	D2	M2
Ⅵ	C2	D1	M2
Ⅶ	C2	D1	M3

实验方案考虑了基质层厚度、排水方式和灌溉水平3个因素。基质厚度有C1(6 cm)和C2(10 cm)两个水平;排水方式有D1(蓄排水层直接排水)和D2(透水侧墙排水)两个水平;灌溉水平有M1(蓄水关键期补充水分)、M2(充分灌溉)和M3(无灌溉)3个水平。

2 典型海绵设施的精细化监测

2.1 气象与水质监测

为了精确获取降雨、温度等气象数据,在实验场布设了一个小型气象站,开展风速、风向、降雨、温度、相对湿度等指标的自动监测,并利用蒸发皿获取水面蒸发数据。针对大气干湿沉降过程,布设了一个降水降尘自动采样器,自动收集干沉降与雨水样品后进行水质指标检测。在海绵设施的入流与出流处均布设径流自动采样器,以发生降雨或开始产流为触发条件,按照5~60 min的间隔时间进行径流水样的自动采集,以便掌握径流污染的输入和输出过程。

2.2 透水铺装水文过程监测

透水铺装需监测的水文要素有降雨、地表径流、砾石层出流、土壤水等。6个透水铺装的集水区独立封闭,透水铺装实验区的监测仪器布设见图1。

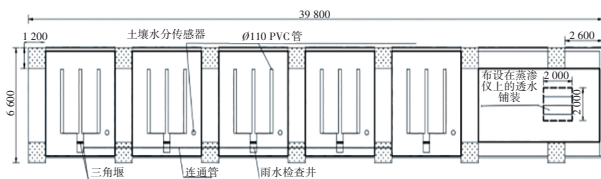


图1 透水铺装监测仪器布设

Fig.1 Overall monitoring instruments layout of the permeable pavements

2.2.1 透水铺装 I~V 水文过程监测

透水铺装 I~V 需监测的水文要素有:降雨、地表积水、砾石层出流、土壤湿度,监测仪器布设见图2。以透水铺装 I 实验小区仪器布设为例,在实验小区的末端开挖1座监测井,井口是边长0.4 m的方形,井深1 m,底部铺设300 mm厚的砾石。透水铺装 I~V 除降雨外无其他来水,降雨通过气象站监测数据理论计算获得;为监测实验小区的地表径流过程,通过封闭实验小区的线性排水沟收集雨水并通过监测井中的含压力式水位计的三角堰排出;为充分反映土壤水的变化,在距透水砖面610、710、

910、1 310 mm处均布设1个土壤水分传感器;在砾石层底部布设一根 $\phi 100$ mm的穿孔管,穿孔管中的水通过监测井的含压力式水位计的三角堰排出,以此监测透水铺装的砾石层出流过程。5个监测井通过PVC管相互连通,当水位到达一定高程时,水泵自动启动将监测井中的水排到周围绿地里。

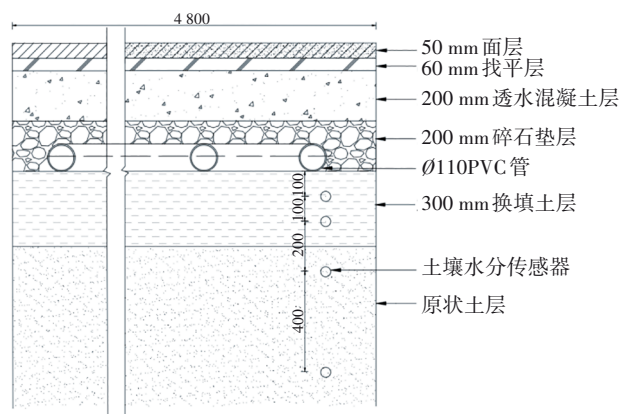


图2 透水铺装 I~V 监测仪器布设

Fig.2 Monitoring instruments layout of the permeable pavement I~V

2.2.2 透水铺装 VI 水文过程监测

透水铺装 VI 需监测的水文要素有降雨、土壤湿度、砾石层出流、深层渗漏、蒸发,监测仪器布设见图3。

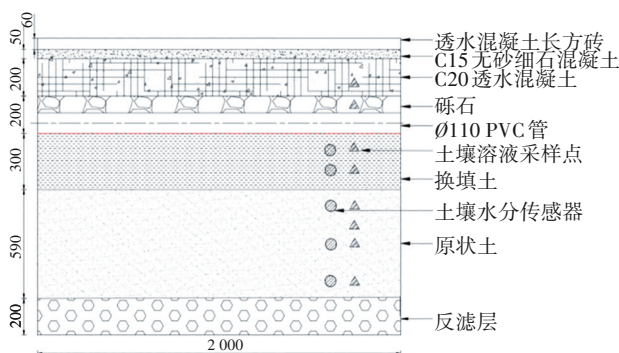


图3 透水铺装 VI 监测仪器布设

Fig.3 Monitoring instruments layout of the permeable pavement VI

透水铺装 VI 除降雨外无其他来水,降雨通过气象站监测数据理论计算获得;土壤湿度通过蒸渗仪的称重系统测得,为充分反映土壤水变化,识别土壤层湿度变化规律,在距面层600、700、900、1 100、1 300 mm均布设1个土壤水分传感器;为了监测砾石层排水情况,在砾石层设置一根穿孔管,水从铁箱上的开孔流出,并通过PVC管与翻斗流量计相

连;同理,在反滤层的底部开孔,下渗的水通过开孔排出,开孔与另一个翻斗流量计相连。在两个翻斗流量计下放置一个水箱,用于承接翻斗流量计的来水,当水量达到一定值,水泵自动启动将水排出蒸渗仪;设施的蒸发则借助蒸渗仪通过水量平衡计算得到。此外,为了分析透水铺装的污染物削减效果,在距表面260、400、600、700、900、1 000、1 100、1 300 mm处均布设土壤溶液提取装置。

2.3 生物滞留设施水文过程监测

2.3.1 生物滞留设施 I、II

生物滞留设施 I、II 需监测的水文要素有降雨、入流、地表积水、溢流、土壤湿度、砾石层出流。生物滞留设施 I、II 具体监测细节见图4。设施的汇入水量由直接落在设施的降雨和设施外接汇水

面的来水组成,降雨通过气象站监测数据获得,汇水面(屋面、道路)来水通过安装有压力式水位计的三角堰监测;在生物滞留设施 I、II 旁均布设监测井,生物滞留设施 II 垂直均分的两部分共用一座监测井;为监测生物滞留设施的溢流量,在表层土面的中间布设 $\varnothing 110$ mm PVC溢流管,溢流管的水从低于监测井面300 mm的安装有压力式水位计的三角堰排出;在靠近溢流管处垂直安装压力式水位计,用于监测地表径流过程;通过距离种植土层顶端5 cm和15 cm对称布设的土壤水分传感器监测种植土层水分变化;在砾石层底部安放一根 $\varnothing 110$ mm的穿孔管,穿孔管中的水通过监测井中另一个安装有压力式水位计的三角堰排出,以此监测砾石层出流;两种生物滞留设施的蒸散发均可通过水量平衡计算出。

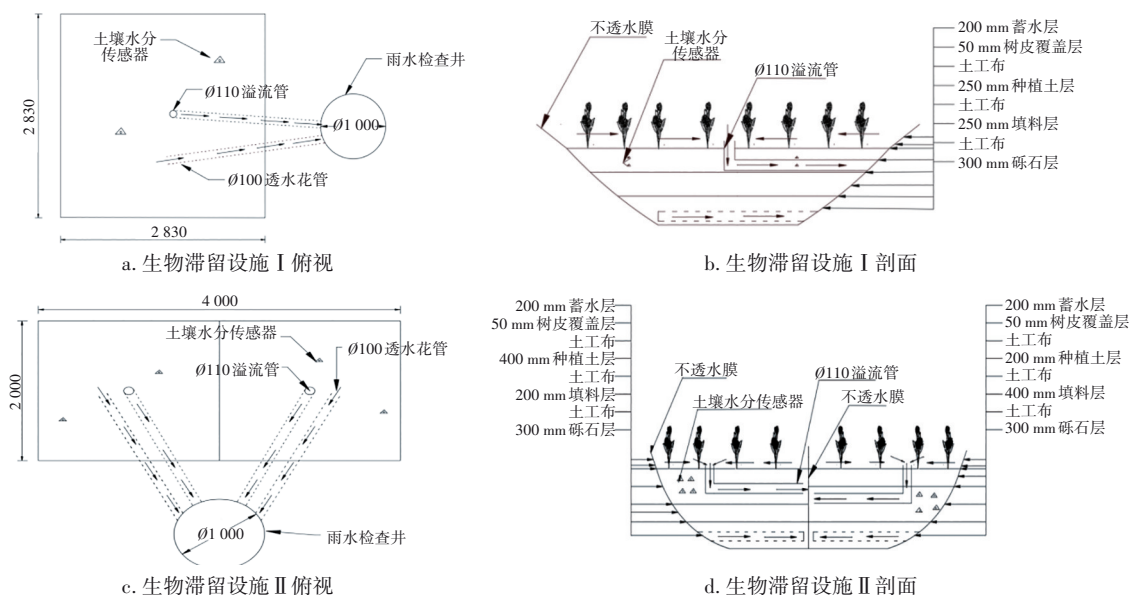


图4 生物滞留设施 I、II 的监测仪器布设

Fig.4 Layout of bioretention facility I and II monitoring instruments

2.3.2 生物滞留设施 III

生物滞留设施 III 需监测的水文要素有降雨、入流、地表积水、砾石层出流、土壤湿度、深层渗漏。生物滞留设施 III 的监测细节见图5。设施的汇入水量由直接落在设施的降雨和设施外接汇水面的来水组成,降雨通过气象站监测数据获得,汇水面(屋面)来水通过安装有压力式水位计的三角堰监测;在生物滞留设施地表中间位置安放压力式水位计用于监测设施地表积水过程;土壤湿度通过蒸渗仪的称重系统监测,为充分反映土壤水变化,识别土壤层湿度变化规律,在距离表面100、250、350、450、

1 000和1 100 mm处均布设一个土壤水分传感器;在砾石层安装一根穿孔管,使得砾石层的水可以从铁箱的开孔流出,并通过管道与翻斗相连(翻斗翻转一次,会形成一次脉冲,电脑会记录一次数据);同理,在铁箱反滤层底部也开了一个孔,通过管道与翻斗相连,使得深层渗漏的水排出;在两翻斗流量计下放置一个水箱,用于承接翻斗流量计的来水,当水量达到一定值时,水泵自动启动将水排出;设施的蒸散发则借助蒸渗仪通过水量平衡得以实现。此外,为了分析透水铺装的污染物削减效果,在距表面260、400、600、700、900、1 000、1 100、1 300

mm处均布设土壤溶液提取装置。

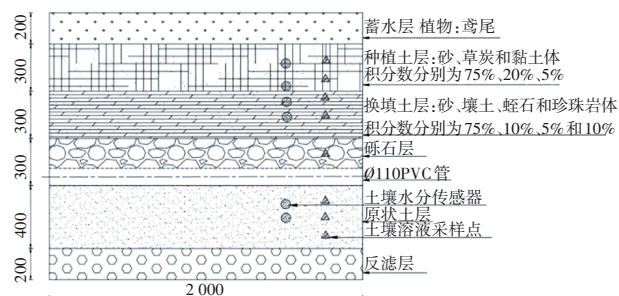


图5 生物滞留设施监测仪器Ⅲ布设

Fig.5 Layout of bioretention facility III monitoring instruments

2.4 绿色屋顶水文过程监测

① 降雨和径流监测

绿色屋顶实验区水文输入要素为直接落在屋面上的降雨,降雨通过气象站监测数据理论计算获得。大型绿色屋顶实验区的径流计量设备分为两部分:压力式水位计和计量堰,通过压力式水位计记录水位数据,利用堰流公式计算流量,径流收集后储存在蓄水池中。小型绿色屋顶的径流通过翻斗流量计监测。

② 土壤水分监测

在大型绿色屋顶中,为研究无蓄水模块以及设有蓄水模块情况下不同密度吸水柱设置土壤的墒情,采用土壤水分传感器对土壤含水率进行实时监测,监测数据可在相关网页读取。在绿色屋顶Ⅳ区域三种方案各设2个探头进行土壤含水量监测,同时在绿色屋顶Ⅰ设2个探头进行土壤含水量监测。每个小型绿色屋顶均布设6个土壤水分传感器,可对土壤含水率进行实时监测,监测数据可在相关网页读取。

③ 蒸散发

大型绿化屋顶蒸散发规律采用基于土壤水分动态的水量平衡分析。利用FDR土壤水分传感器测得的土壤水分动态和降雨、径流过程数据,采用水量平衡原理得到蒸散发量。对于小型绿色屋顶,基于蒸渗仪称重系统通过水量平衡分析算出蒸散发量。

3 结论

实验场主要特色体现在基于长时间尺度,对透水铺装、生物滞留设施和绿色屋顶三种典型海绵设施监测困难较小的水文要素进行监测,再借助蒸渗

仪进行包括土壤水、蒸散发、深层渗漏3种监测存在较大困难的水循环组成水文要素的监测,以此实现对透水铺装、生物滞留设施、绿色屋顶水文调控效果分析和水循环过程分析。

透水铺装选择了4种运用较广泛的面层材料和2种垫层材料,能实现对多种透水铺装的水文调控效果比较分析;布设在蒸渗仪上的透水铺装,在对透水铺装的多层土壤湿度、深层渗漏、蒸发进行监测分析的基础上实现了对透水铺装整个水循环的监测分析。

生物滞留设施实验区共设有3处生物滞留设施,能实现不同类型生物滞留设施的水文调控效果比较。其中2处生物滞留设施的结构分别为填料层材料采用再生骨料以及种植土层与填料层位置互换;布设在蒸渗仪上的生物滞留设施,在对生物滞留设施的多层土壤湿度、深层渗漏、蒸散发进行监测分析的基础上实现了对生物滞留设施整个水循环的监测分析。

基于绿色屋顶实验区可实现对绿色屋顶的水文调控效果分析,布设了土壤水分传感器的绿色屋顶Ⅰ、Ⅳ能实现绿色屋顶的水循环过程分析。大型绿色屋顶还能实现对不同排水口形式的绿色屋顶蓄水能力和设有蓄水模块在不同吸水柱密度土壤的墒情探究;通过小型绿色屋顶实验区可探究不同基质层厚度、排水方式、灌溉水平对绿色屋顶蒸散发的影响。

在污染物削减效果方面,实验场布设了降水降尘自动采样器对大气干湿沉降进行监测。透水铺装、生物滞留设施、绿色屋顶三种海绵设施均能实现不同出流时间的污染物削减效果分析。对于布设在蒸渗仪上的透水铺装、生物滞留设施两种设施,采取多层采样的方式,在设施的8个不同埋深进行土壤溶液采集,可在不同出流时间污染物浓度变化研究的基础上进行设施不同深度的污染物浓度变化研究。

参考文献:

- [1] 李美玉,张守红,王玉杰,等. 透水铺装径流调控效益研究进展[J]. 环境科学与技术, 2018, 41(12): 105-112, 130.
- LI Meiyu, ZHANG Shouhong, WANG Yujie, et al. Runoff management performances of permeable

- pavements: a review [J]. *Environmental Science & Technology*, 2018, 41 (12): 105-112, 130 (in Chinese).
- [2] 赵远玲, 王建龙, 李璐菡, 等. 不同类型透水砖对雨水径流水量的控制效果[J]. *环境工程学报*, 2020, 14 (3): 835-841.
- ZHAO Yuanling, WANG Jianlong, LI Luhan, *et al.* Effect of different types of permeable brick on the stormwater runoff quantity control [J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2020, 14 (3): 835-841 (in Chinese).
- [3] 高晓丽, 张书函, 肖娟, 等. 雨水生物滞留设施中填料的研究进展[J]. *中国给水排水*, 2015, 31 (20): 17-21.
- GAO Xiaoli, ZHANG Shuhan, XIAO Juan, *et al.* Research development of filter media in stormwater bioretention facilities [J]. *China Water & Wastewater*, 2015, 31 (20): 17-21 (in Chinese).
- [4] 黄静岩, 李俊奇, 宫永伟, 等. 道路生物滞留带削减雨水径流的实测效果研究[J]. *中国给水排水*, 2017, 33 (11): 120-127.
- HUANG Jingyan, LI Junqi, GONG Yongwei, *et al.* Research on stormwater runoff reduction by roadside bioretention facilities [J]. *China Water & Wastewater*, 2017, 33 (11): 120-127 (in Chinese).
- [5] 李家科, 张兆鑫, 蒋春博, 等. 海绵城市生物滞留设施关键技术研究进展[J]. *水资源保护*, 2020, 36 (1): 1-8, 17.
- LI Jiake, ZHANG Zhaoxin, JIANG Chunbo, *et al.* Research progress on key technologies of bioretention facilities for sponge city construction [J]. *Water Resources Protection*, 2020, 36 (1): 1-8, 17 (in Chinese).
- [6] 邓陈宁, 李家科, 李怀恩. 城市雨洪管理中绿色屋顶研究与应用进展[J]. *环境科学与技术*, 2018, 41 (3): 141-150.
- DENG Chenning, LI Jiake, LI Huai'en. Research advances in application of green roof to management of urban storm-water runoff [J]. *Environmental Science & Technology*, 2018, 41 (3): 141-150 (in Chinese).
- [7] 李俊生, 尹海伟, 孔繁花, 等. 绿色屋顶雨洪调控能力与效益评价[J]. *环境科学*, 2019, 40 (4): 1803-1810.
- LI Junsheng, YIN Haiwei, KONG Fanhua, *et al.* Effects of a green roof on stormwater regulation and cost-benefit analysis [J]. *Environmental Science*, 2019, 40 (4): 1803-1810 (in Chinese).
- [8] 王浩, 梅超, 刘家宏. 海绵城市系统构建模式[J]. *水利学报*, 2017, 48 (9): 1009-1014, 1022.
- WANG Hao, MEI Chao, LIU Jiahong. Systematic construction pattern of the sponge city [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2017, 48 (9): 1009-1014, 1022 (in Chinese).
- [9] 杨默远, 刘昌明, 潘兴瑶, 等. 基于水循环视角的海绵城市系统及研究要点解析[J]. *地理学报*, 2020, 75 (9): 1831-1844.
- YANG Moyuan, LIU Changming, PAN Xingyao, *et al.* Analysis of sponge city system and research points from the perspective of urban water cycle [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2020, 75 (9): 1831-1844 (in Chinese).
- [10] 苏胜奇, 卢家成, 李嘉鹏, 等. 再生细骨料对蓄水层渗蓄性能的影响[J]. *材料导报*, 2019, 33 (增刊): 226-228.
- SU Shengqi, LU Jiacheng, LI Jiapeng, *et al.* Effect of recycled fine aggregate on permeability of layer [J]. *Materials Review*, 2019, 33 (Z1): 226-228 (in Chinese).
- [11] 林宏军, 王建龙, 赵梦圆, 等. 倒置生物滞留技术水量水质控制效果研究[J]. *水利水电技术*, 2019, 50 (6): 11-17.
- LIN Hongjun, WANG Jianlong, ZHAO Mengyuan, *et al.* Study on water quantity and quality control effect of inverted bioretention technology [J]. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 2019, 50 (6): 11-17 (in Chinese).
- [12] 杜垚, 李增玉, 文韬, 等. 玉溪东风广场雨水收集系统的设计与施工[J]. *中国给水排水*, 2019, 35 (12): 77-80.
- DU Yao, LI Zengyu, WEN Tao, *et al.* Design and construction of sponge city rainwater collection system in Yuxi Dongfeng Square [J]. *China Water & Wastewater*, 2019, 35 (12): 77-80 (in Chinese).

作者简介: 欧阳友(1997-), 男, 湖南郴州人, 硕士研究生, 研究方向为海绵设施的水量-水质转化过程和再生水的深度净化技术。

E-mail: oyy6554@163.com

收稿日期: 2021-05-29

修回日期: 2021-07-16

(编辑: 衣春敏)