

朱威达, 卢顺翔, 蔡志文, 等. 光纤传感技术应用于深圳市典型天然海绵体效能监测[J]. 净水技术, 2022, 41(1):129-134.
ZHU W D, LU S X, CAI Z W, et al. Effectiveness monitoring system of typical natural sponges based on optical fiber sensing technology in Shenzhen City[J]. Water Purification Technology, 2022, 41(1):129-134.



扫我试试?

光纤传感技术应用于深圳市典型天然海绵体效能监测

朱威达¹, 卢顺翔², 蔡志文³, 李泽丰⁴, 杜逸凡⁴

(1. 深圳市节约用水办公室, 广东深圳 518000; 2. 武汉理工大学深圳研究院, 广东深圳 518000; 3. 深圳市城市规划设计研究院有限公司, 广东深圳 518000; 4. 武汉理工大学市政工程系, 湖北武汉 430070)

摘要 目前, 国内的海绵城市建设中, 对于天然海绵体设施的成效监测一直作为一个难题。文中以深圳市有关部门对海绵城市监测领域的课题研发需求作为依托, 基于光纤传感器的温度敏感性特点, 以监测得到的透水速度作为变量参数, 构建出了天然海绵体(早熟禾-土壤系统)可收纳雨水有效容量的实时监测模型, 并通过试验手段对该模型系统进行了评估。试验结果表明: 在各暴雨条件下, 透水速度和土壤含水率皆存在对应关系; 在模拟降雨下, 不同雨型的监测误差在 5% 以内, 光纤传感监测系统展现出了优越的性能。

关键词 天然海绵体 监测系统 光纤温度传感器 土壤含水率 雨型

中图分类号: TU992 文献标识码: A 文章编号: 1009-0177(2022)01-0129-06

DOI: 10.15890/j.cnki.jsjs.2022.01.020

Effectiveness Monitoring System of Typical Natural Sponges Based on Optical Fiber Sensing Technology in Shenzhen City

ZHU Weida¹, LU Shunxiang², CAI Zhiwen³, LI Zefeng⁴, DU Yifan⁴

(1. Shenzhen Water Conservation Office, Shenzhen 518000, China;
2. Shenzhen Research Institute of Wuhan University of Technology, Shenzhen 518000, China;
3. Shenzhen City Planning and Design Institute Co., Ltd., Shenzhen 518000, China;
4. Department of Civil Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China)

Abstract At present, in the construction of sponge cities in China, monitoring the effectiveness of natural sponge facilities has always been a problem. This paper relied on the research and development needs of relevant departments in Shenzhen City for sponge city monitoring. Based on the temperature sensitivity of optical fiber sensor, a real-time monitoring model of effective capacity of rainwater collected by natural sponge (poa-soil system) was established with monitored water permeability as a variable parameter, and model system was evaluated by experimental means. Experimental results showed that under various rainstorm, there was a corresponding relationship between water permeability and soil water content. The monitoring error of different rain patterns was within 5% under simulated rainstorm. And optical fiber sensor monitoring system showed superior performance.

Keywords natural sponges monitoring system optical fiber temperature sensor moisture content of soil rainfall pattern

在近些年的城市化进程中, 海绵城市一直作

为城市雨洪管理的指导理念。海绵设施在应用过程中, 被证实可有效缓解城市内部的洪涝问题和改善地表径流的水质情况^[1]。住房和城乡建设部发布《海绵城市建设绩效评价与考核办法》, 要求对海绵设施建设成效进行定量化的监测^[2]。天然海绵体, 即绿化带、下凹式绿地、生物滞留池等, 作

[收稿日期] 2020-09-25

[基金项目] 海绵城市建设水系统科学湖北省重点实验室开放基金资助(2019-06); 基于光纤传感控制的深圳海绵城市设施在线监测系统研发(20191h0266)

[作者简介] 朱威达(1980—), 男, 高级工程师, 研究方向为海绵城市、水污染控制, E-mail: 774263056@qq.com。

为海绵城市的调蓄和渗滤主体并发挥重要作用^[3-4]。目前,并没有较好的监测方法对土壤基质的雨水调蓄能力进行评估。因此,基于深圳市典型天然海绵体,试图建立一套光纤传感监测系统,以实现对天然海绵体土壤基质的调蓄能力进行监测。

1 光纤温度传感器系统监测原理

1.1 光纤温度传感器

外界环境的变化会影响光纤光栅所输出的波长信号,这种影响包括了环境的应力变化和环境的温度变化^[5]。2种环境变化对光纤光栅的影响,最终都表现为光栅的栅距和折射率的改变,进而导致光栅的反射光谱和透射光谱发生改变。采用应变补偿法对光纤光栅进行封装,使其仅对环境的温度变化敏感^[6]。通过检测光纤光栅反射谱或透射谱的变化,并以波长漂移信号的形式输出,建立波长漂移量与环境温度变化量的关系,可实现对环境温度变化的监测。

1.2 监测原理

天然海绵体对雨水具有渗蓄的功能。雨水在入渗到天然海绵体的过程中分为3个阶段,分别是渗润、渗吸和渗透阶段^[7],即随着土壤含水率变化,雨水的入渗速度也会发生改变。由于雨水的入渗,土壤环境的温度会降低。根据这一现象,考虑在天然海绵体内的垂直方向上,布置光纤温度传感器。降雨时,随着雨水的入渗,土壤含水率不断上升,而在此过程中,传感器不断被低温雨水浸润冲刷,直到传感器周围土壤含水率达到近似饱和状态,温度趋于恒定。而上下布置的传感器,两者会在温度变化上存在时间滞后的现象。光纤温度传感器产生的波长信号,随着环境温度的改变会发生波长漂移,且这一漂移量与环境温度的变化呈线性关系^[8]。因此,可通过波长漂移量变化的滞后性,反映出雨水在天然海绵体内的透水速度。

1.3 系统组成

降雨时随着雨水渗入天然海绵设施的土层中,光纤温度传感器将所监测到的光信号传递到光纤光栅解调仪上,经过解调仪解调后转化为电信号,以波长漂移量的形式在计算机上展现,经数据处理后得到及时的海绵体内的雨水透水速度。

2 材料与方法

2.1 试验设备及材料

光纤光栅温度传感器、光纤光栅解调仪、PC计算机、自制降雨模拟装置、自制天然海绵体模拟装置,试验用雨水于深圳市罗湖区某居民点接取,以草坪草-土壤构建天然海绵体,其中,土壤为华南地区分布最为广泛的红壤土^[9],草坪草品种为早熟禾。

光纤光栅温度传感器具体参数如下:中心波长为1 510~1 590 nm;分辨率为0.01℃;精度为±0.5℃;反射率>80%。光纤解调仪具体参数如下:通道数为8个;波长为1 529~1 569 nm;波长分辨率为 1×10^{-12} m;扫描频率为100 Hz;动态值为40~60 dB。

试验土壤的理化性质如下:pH值为5.0~5.5;盐基饱和度为40%;有机质含量<20 g/kg;腐殖质中胡敏酸/富里酸(H/F)为0.3~0.4;密度为2.76 g/cm³;饱和和质量含水率为28.5%。

早熟禾草坪草铺装特性参数如下:高度为(5.3±0.5) cm;根长为(9.5±1.0) cm;盖度为86.2%±1.0%;密度为(21 000±500)株/m²。

2.2 试验装置结构

采用北京东成人工降雨模拟器(GC-JY),通过程序设置,可模拟出试验所需要的雨型和降雨强度。天然海绵体模拟装置如图1所示。天然海绵体模拟装置上部设置径流排出口,底部设置渗透水排出口。土层下垫设工程透水隔土布和细碎石,防止底部土壤流失。

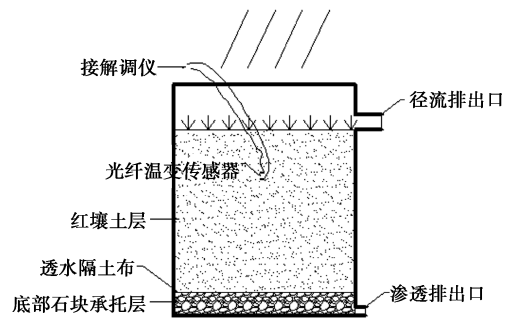


图1 天然海绵体模拟装置

Fig. 1 Simulation Devices of Natural Sponges

2.3 试验方法

2.3.1 透水速度监测试验

试验用土样先进行烘干处理,在烘箱中以105~110℃条件下烘干6 h左右。进行透水速度试验时,

在早熟禾草坪草下 5 cm 布置第一个光纤光栅温度传感器,在其下面竖直方向上每隔 10 cm 布置一个光纤光栅温度传感器,顺次布置 3 个,共布置 4 个。布置完毕后,通过降雨装置模拟降雨,记录经光纤解调仪解调后的波长数据。含水率的测定采用烘干法。

2.3.2 透水速度与含水率关系试验

自然条件下,红壤土中质量含水率一般在 10%~30%^[10],因此,试验用土壤的含水率条件参考此范围。将烘干的红壤土样,按质量含水率为 10%、13%、16%、19%、22%、25%、27%,加入蒸馏水混匀后放入容器,以保鲜膜封口并置于恒温恒湿箱中,保存 24 h 左右。将备好的土样以 15 cm 深度均匀填入玻璃器皿,表面铺以早熟禾草坪草,并分别在玻璃器皿底部上 5 cm 以及草坪草根系下 5 cm,安装好光纤光栅温度传感器。通过雨水模拟装置进行降雨模拟,记录 2 个光纤光栅温度传感器的响应时间差,从而计算出对应含水率下,早熟禾-土壤系统天然海绵体的透水速度。

2.4 数据处理方法

模拟降雨时,记录上下 2 个光纤光栅温度传感器的波长数据,通过 Matlab 软件进行数据处理,并建立波长变化滞后模型,模型计算如式(1)~式(3),可以计算海绵体内的雨水透水速度。

$$\lambda_{an} = \lambda_{bn} \quad (1)$$

$$\Delta t_n = t_{an} - t_{bn} \quad (2)$$

$$u = \frac{h_a - h_b}{\Delta t} \quad (3)$$

其中: λ_{an} 、 λ_{bn} ——光纤波长,mm;

t_{an} 、 t_{bn} —— λ_{an} 、 λ_{bn} 对应时刻,min;

u ——透水速率,cm/min;

Δt_n ——某一波长下滞后时间,min;

h_a 、 h_b ——两光栅埋深深度,cm。

3 结果与讨论

3.1 透水速度监测

在不同重现期下,本研究进行了透水速度的监测试验。根据深圳市气象局发布的《深圳市暴雨强度公式及查算图表》(2015 版)^[11],计算得到多种重现期下,不同降雨历时的平均暴雨强度,结果如表 1 所示。

表 1 不同重现期及降雨历时下的暴雨强度
Tab. 1 Rainstorm Intensity under Different Return Periods and Rainfall Durations

重现期 (P)/a	降雨历时 30 min 暴雨强度 /(mm·min ⁻¹)	降雨历时 60 min 暴雨强度 /(mm·min ⁻¹)	降雨历时 120 min 暴雨强度 /(mm·min ⁻¹)
1	1.113	0.762	0.536
2	1.259	0.904	0.615
5	1.546	1.142	0.804
10	1.716	1.282	0.920
20	1.870	1.406	1.024
50	2.053	1.552	1.150
100	2.185	1.658	1.242

综合表 1 中暴雨强度数据,选取 0.5、1.0、1.5、2.0、2.5 mm/min 的平均时降雨强度进行试验,试验结果如图 2 所示。

观察不同降雨强度下,该系统的 3 个土层的透水速度曲线变化过程,发现该系统的下层土层的透水速度受上层土层状态所影响。上层土壤需要完成渗润阶段后,雨水才能继续下渗,但渗润阶段完成后,土层含水率增加,雨水通过上层透水速度减缓。因此,海绵体的整体透水速度,在一定程度上取决于上层土层的透水速度。在降雨暴雨强度较低[图 2(a)~图 2(b)]的条件下,系统下层土层的透水速度明显低于上层土层的透水速度。在此过程中上层土壤含水率并未达至饱和,土层在雨水下渗过程中,将一部分雨水滞留,以增加本层土壤的含水率。在图 2(d)~图 2(e)条件下,暴雨强度逐步增大至 2.5 mm/min,上层土壤含水率达到饱和和所需时间变短,当上层土壤含水率达至饱和后,上层土壤所吸收的雨水,皆通过重力作用下渗到下层土壤,此时雨水的透水速度基本趋于稳定。随着暴雨强度的继续增加,上层土壤的含水率增加更为迅速,而透水速度的下降趋势与含水率上升趋势成反比。这说明天然海绵体土壤的含水率,会影响天然海绵体的透水速度。由图 2 可知,光纤光栅温度传感器监测系统在不同降雨强度下,皆能灵敏并及时地反映出早熟禾-土壤海绵体系统在不同纵深下土层的透水速度变化情况。同时,早熟禾-土壤海绵体的含水率变化与透水速度变化具有明显的相关性,透水速度变化对含水率的变化特点,具有良好的反馈性。

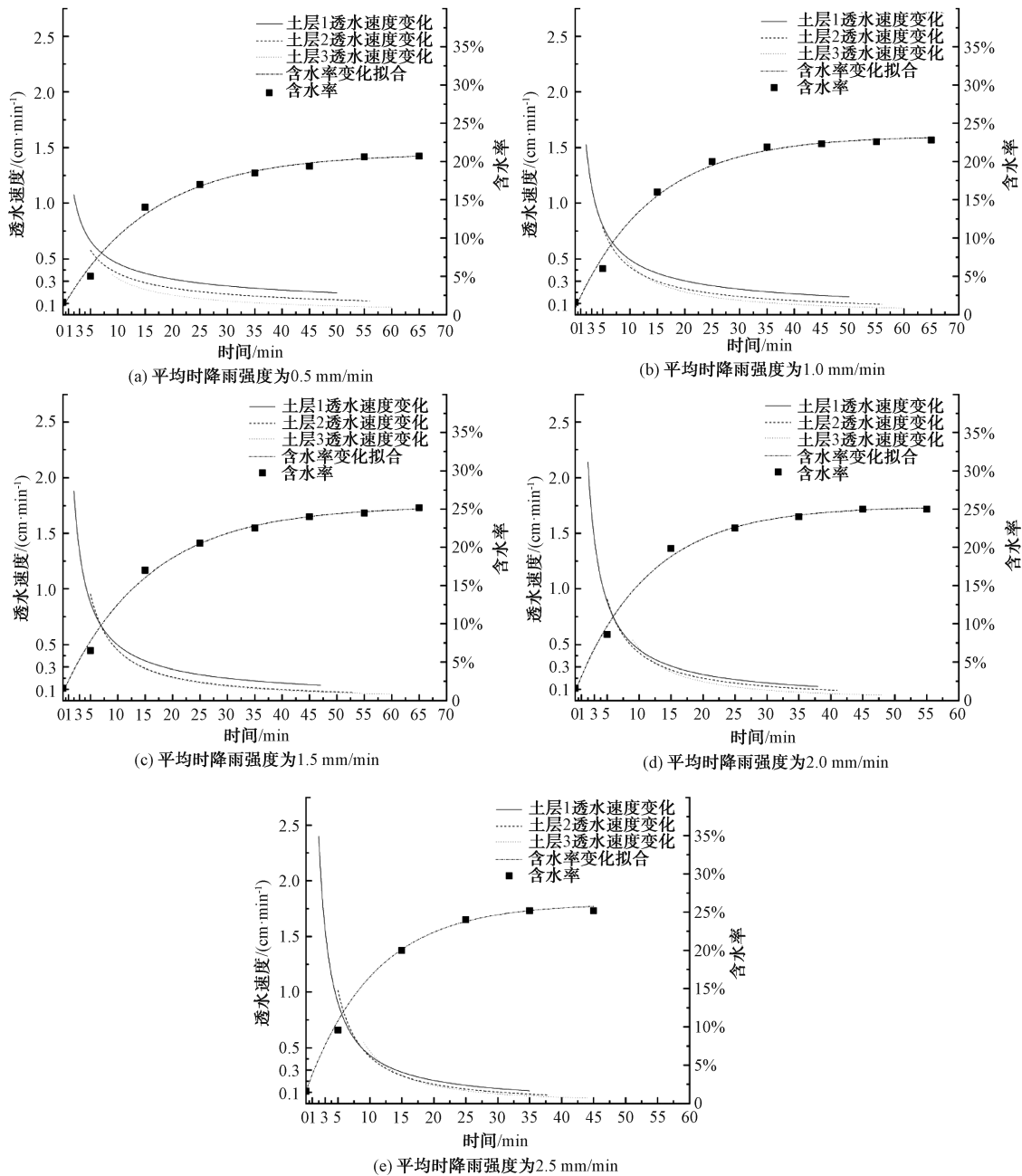


图2 不同降雨强度下土层渗透速率变化

Fig. 2 Changes of Soil Layer Permeability Velocity under Different Rainfall Intensities

水分渗入天然海绵体是水分在分子力、毛细力和重力的综合作用下的物理过程,入渗过程分为3个阶段:渗润阶段、渗吸阶段和渗透阶段^[7]。由图2(e)可知,土层1中当雨水入渗处于渗润阶段时($t=2\sim4$ min),早熟禾-土壤海绵体系统内的含水率较低,透水速度快且下降趋势明显,而含水率在此阶段迅速上升。在暴雨来临之际,渗润阶段可有效延迟径流的产生,缓解雨水管网压力。随着降雨的继

续,入渗过程进入到渗吸阶段($t=4\sim15$ min),透水速度继续减小,含水率进一步升高。推测是因为海绵体内含水率上升,植物根系土壤的间隙在浸润作用下缩小,且泥土浸润后对渗流的黏性作用增强,导致雨水在早熟禾-土壤海绵体中的下渗阻力增加,透水速度下降。在渗透阶段($t>15$ min),透水速度下降缓慢,海绵体的含水率增加也趋于平缓,且两者皆开始趋于临界值。

3.2 监测模型的建立

在 3.1 节透水速度的监测试验过程中,验证了含水率与透水速度存在着较强的相关关系,在不同含水率情况下,早熟禾-土壤海绵体的下渗表现不同,其能容纳的最大饱和含水量也不相同。为了准确监测各类天然海绵体可容纳雨水有效容

量的变化规律,本文进行了不同含水率下海绵体的透水速度试验,通过多次试验,将所得到的含水率和透水速度关系,采用多种数学模型进行拟合,选取了拟合性较好的 3 种(表 2)。其中,以 ExpAssoc 模型拟合效果最佳,拟合模型如图 3 所示。

表 2 透水速度与含水率关系拟合模型

Tab. 2 Fitting Model of Relationship between Permeability Velocity and Moisture Content of Soil

函数模型	拟合方程	R ²
ExpDec1	$M_n = 50.185e^{(-u/0.0757)} + 9.667$	0.976
Boltzmann	$M_n = 9.669 + 13414.635 / [1 + e^{(u+0.51817)/0.09276}]$	0.984
ExpAssoc	$M_n = 3.75852 \times 10^7 - 3.75851 \times 10^7 (1 - e^{-u/0.00648}) - 33.304(1 - e^{-u/0.132})$	0.997

注: M_n 为监测土层 n 内土壤质量含水率

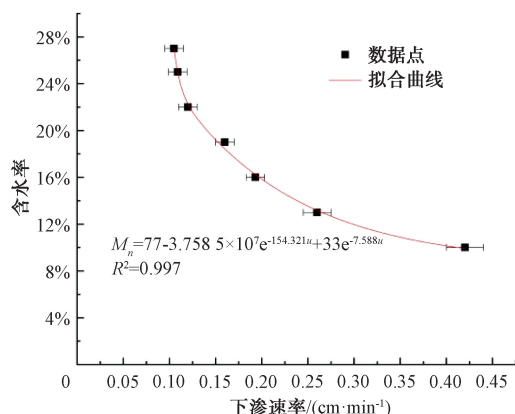


图 3 透水速度-含水率 ExpAssoc 关系模型

Fig. 3 ExpAssoc Relationship Model of Permeability Velocity-Moisture Content of Soil

将光纤系统测得的实时透水速率,代入上述模型,得到相对应的当前土壤质量含水率,通过式(4)可推算出当前土壤可承受的水量。

$$F = F_{\text{饱}} - \frac{\sum_{i=1}^n V_n M_n \rho}{\rho_{\text{水}}} \quad (4)$$

其中: $F_{\text{饱}}$ ——监测区域内土壤的饱和含水量, m^3 ;

F ——监测区域内土壤可承受的水量, m^3 ;

M_n ——监测土层 n 内土壤质量含水率;

V_n ——监测土层 n 土壤体积, m^3 ;

ρ ——土壤密度, kg/m^3 ;

$\rho_{\text{水}}$ ——水密度, $1 \times 10^3 \text{ kg}/\text{m}^3$ 。

3.3 天然海绵体可容纳雨水有效容量的应用

为有效验证所构建的模型系统在实际降雨情况下,其所表现出的监测性能,考虑在 3 种深圳市常见雨型条件下^[12],对监测结果进行验证,如图 4 所示。降雨量与产流量作差得到实际径流控制量,利用所建立模型计算得到监测径流控制量,并计算各自的相应径流控制率,结果如表 3 所示。

3 场不同雨型条件下,可知降雨的时间分布因素,会对天然海绵体的雨水径流控制率造成一定影响,但是光纤传感监测系统在各雨型条件下,其监测误差皆保持在较低值,表现出良好的监测性能。

3.4 光纤传感技术的优势

光纤监测系统具有适用性广泛、布点灵活的特点。由于光纤传感器的材质柔软,在面对环境复杂的天然海绵体设施时,也可以进行布设,同时光纤传感器还具备可嵌入的特点,能有效避免外界环境因素的干扰。运行管理便捷高效,对于监测需求面积大的区域,可进行广泛布点,集中收集和管理监测数据。

4 结论

(1) 在不同暴雨强度下,光纤传感系统皆可以灵敏反映典型天然海绵体的透水速度变化,且透水速度与含水率存在明显关系。

(2) 通过不同函数的拟合,寻找到了匹配度较好的 ExpAssoc 函数反映透水速度和天然海绵体含水率的关系并建立数学模型。

(3) 在模拟的实际降雨条件下,光纤传感监测系统在监测精度和灵敏性方面展现出了优越性。

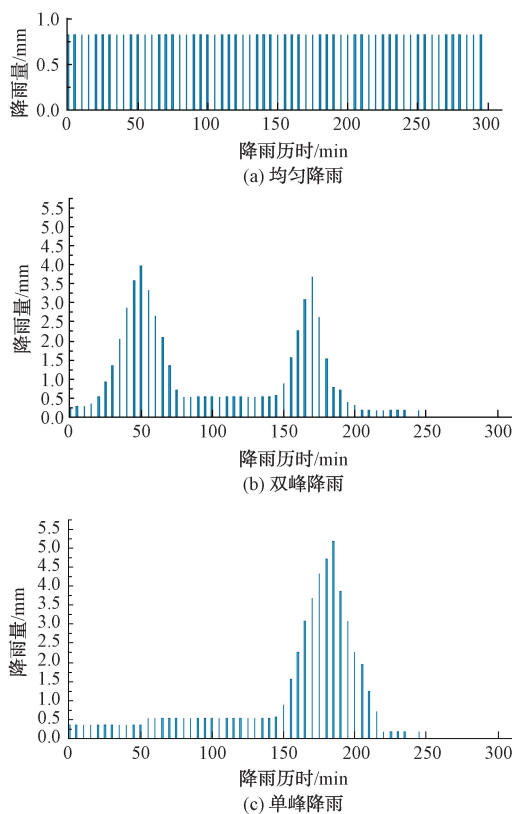


图4 模拟降雨雨强分布情况

Fig. 4 Distribution of Simulated Rainfall Intensity

表3 模拟降雨信息及监测效果

Tab. 3 Simulated Rainfall Information and Monitoring Results

雨型	降雨量 /mm	最大降雨强度 /(mm·min ⁻¹)	实际径流 控制率	监测相对 误差
均匀降雨	49.98	0.167	90.4%	3.2%
双峰降雨	52.99	0.791	87.8%	4.5%
单峰降雨	53.48	0.945	84.3%	4.8%

参考文献

[1] 李倩楠, 吴文婷, 汤佳, 等. 雨洪管理理论及其在城市景观

规划中的应用述评[J]. 给水排水, 2016, 52(s1): 155-160.

- [2] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 关于印发《海绵城市建设绩效评价与考核办法》的通知: 建成[2015]635号[EB/OL]. (2015-07-10) [2020-09-25]. <http://fgcx.bjcourt.gov.cn;4601/law?fn=chl405s154.txt>.
- [3] 陈韬, 夏蒙蒙, 赵大维, 等. 城市土壤特征对降雨径流控制的影响[J]. 科学技术与工程, 2020, 20(19): 7852-7857.
- [4] 成玉宁, 袁咏洋. 让自然做同事半功倍——正确理解“自然积存、自然渗透、自然净化”[J]. 生态学报, 2016, 36(16): 4943-4945.
- [5] WAN S, JUN Q, TANG Y B, et al. Edge technique for the measurement of Brillouin frequency shift in optical fiber sensor[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2006, 127(1): 9-12.
- [6] MARIN E, ROBERT L, TRIOLLET S, et al. Liquid Resin Infusion process monitoring with superimposed Fibre Bragg Grating sensor[J]. Polymer Testing, 2012, 31(8): 1045-1052.
- [7] ZHAO L, NAN H Y, KAN Y, et al. Infiltration behavior of heavy metals in runoff through soil amended with biochar as bulking agent[J]. Environmental Pollution, 2019, 254, 113114-113114. DOI: 10.1016/j.envpol.2019.113114.
- [8] 张在宣, 金尚忠, 王剑锋, 等. 分布式光纤拉曼光子温度传感器的研究进展[J]. 中国激光, 2010, 37(11): 2749-2761.
- [9] 黄应丰, 刘腾辉. 华南主要土壤类型的光谱特性与土壤分类[J]. 土壤学报, 1995, 32(1): 58-68.
- [10] 蒋文君, 汪时机, 李贤, 等. 含残膜紫色土土壤水分特征曲线及模型分析[J]. 排灌机械工程学报, 2021, 39(8): 844-850.
- [11] 深圳市气象局, 深圳市规划和国土资源委员会. 深圳市暴雨强度公式及查算图表(2015版)[EB/OL]. (2015-11) [2021-09-25]. https://weather.121.com.cn/data_cache/files/other/baoyuqianguogongshi_2015.pdf.
- [12] 柴苑苑, 孙翔. 深圳市流域暴雨雨型及变化趋势分析[J]. 水利技术监督, 2018(6): 140-142.

水厂视界

“海岛第一村”的现代化水厂

岛北水厂是舟山市自来水有限公司的下属水厂,地处誉有“中国海岛第一村”的马岙街道,是一座按照现代化水厂标准建设的新农村水厂,一期供水规模8万t/d,采用常规+深度处理工艺,于2015年4月竣工正式运行。水厂于2016年12月顺利通过“浙江省现代化水厂”评审,于2020年1月顺利通过“浙江省现代化水厂”复评,上榜“水利部2020年度农村供水规范化水厂”及浙江省水利厅“2021年度农村供水规范化水厂”。

(供稿人:舟山市自来水有限公司生产技术质量部部长 王璐佳)



扫描二维码阅读全文