

城市绿地空间径流下渗与海绵设施参数研究

蒋春博¹, 许文斌², 高佳玉¹, 李家科¹, 刘柯涵¹, 党振国¹

(1.西安理工大学 省部共建西北旱区生态水利国家重点实验室,
陕西 西安 710048; 2.南昌市城市规划设计研究总院, 江西 南昌 330038)

摘要: [目的] 对城市绿地空间径流下渗特性与海绵设施参数进行研究,为城市建成区绿地空间海绵设施构建提供理论支持。[方法] 以江西省南昌市为例,通过土壤颗粒级配和 SPAW(Soil-Plant-Air-Water)模型演算获取土壤特性参数;利用单环现场实测结合 Matlab 拟合霍顿(Horton)入渗公式,获取初始、稳定入渗率与衰减系数;通过 HYPROP2 与 HYPROP-Data Evaluation Software(HYPROP-DES)测定土壤水张力以及非饱和导水率。[结果] 现场入渗开始 5~10 min 后基本达到稳定入渗过程,且稳定入渗率大部分低于 100 mm/h;入渗过程受水文土壤分组差异以及人为扰动等影响较大;土壤在完全饱和状态下约需 7 d 可以恢复到初始状态的下渗速率;基于 RECARGA 模型构建了海绵城市理念下绿地空间海绵设施改建技术路线。[结论] 3 种方法推演绿地土壤下渗过程可提高海绵设施关键参数设计精度。模型演算过程需考虑初始含水率与现场因素影响。

关键词: 雨水径流; 绿地空间; 水分特征曲线; 恢复系数

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2023)04-0146-08

中图分类号: X52

文献参数: 蒋春博, 许文斌, 高佳玉, 等. 城市绿地空间径流下渗与海绵设施参数研究[J]. 水土保持通报, 2023, 43(4): 146-153, 169. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2023.04.018; Jiang Chunbo, Xu Wenbin, Gao Jiayu, et al. Runoff infiltration in urban green space and parameters of sponge facilities [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2023, 43(4): 146-153, 169.

Runoff Infiltration in Urban Green Space and Parameters of Sponge Facilities

Jiang Chunbo¹, Xu Wenbin², Gao Jiayu¹, Li Jiake¹, Liu Kehan¹, Dang Zhenguo¹

(1. State Key Laboratory of Eco-hydraulics in Northwest Arid Region of China, Xi'an University of Technology, Xi'an, Shaanxi 710048, China; 2. Nanchang Urban Planning & Design Institute, Nanchang, Jiangxi 330038, China)

Abstract: [Objective] The infiltration characteristics of urban green space runoff and the infiltration parameters for sponge facilities were studied in order to provide theoretical support for the construction of sponge facilities in built-up urban green space areas. [Methods] Taking Nanchang City, Jiangxi Province as a case area. Soil characteristic parameters were calculated by particle size distribution (PSD) and the soil-plant-air-water (SPAW) model. The Horton infiltration equations were fitted to single-ring infiltration field measurements of infiltration rate using Matlab to obtain the initial and stable infiltration rates and the attenuation coefficient. Soil water tension and unsaturated hydraulic conductivity were estimated by HYPROP2 and HYPROP-data evaluation software (HYPROP-DES). [Results] The stable infiltration rate was basically reached the stage of stable infiltration 5—10 min after the start of on-site infiltration, and most of the observed stable infiltration rates were less than 100 mm/h. The infiltration process was greatly affected by differences in hydrological soil groups and human disturbance. It took about seven days after full saturation for the infiltration rate of the soil to recover to the initial state. Based on the RECARGA model, a technical route for green space sponge facility reconstruction under the concept of sponge city was constructed. [Conclusion] The three

收稿日期: 2022-12-07

修回日期: 2023-02-21

资助项目: 国家自然科学基金项目“改良填料生物滞留系统淋溶—堵塞过程与多元阻控机制研究”(52000150); 南昌市第二批科技计划项目(2020-NCGCZX-005)

第一作者: 蒋春博(1990—), 男(汉族), 陕西省西安市人, 博士, 讲师, 主要从事城市雨洪管理与利用相关研究。Email: chunbo@xaut.edu.cn。

通讯作者: 李家科(1975—), 男(汉族), 湖北省荆门市人, 博士, 教授, 主要从事非点源污染与水资源保护相关研究。Email: xaut_ljk@163.com。

methods can be used to deduce the process of urban green space soil infiltration and can improve the design accuracy of key parameters of sponge facilities. Initial water content and site factors need to be considered in the process of model calculations.

Keywords: rainfall runoff; green space; moisture characteristic curve; restoration coefficient

城市化的快速发展导致不透水面代替了原有能够涵养水源的自然地面,天然状态下的水文机制、排水方式发生了很大变化^[1]。城市内涝灾害频发增加了城市发展和居民生活的安全风险,与此同时,我们也面临雨水径流污染控制和雨水收集利用的挑战^[2]。海绵城市(sponge city)建设具有有效防治城市雨洪灾害、改善城市水环境和水生态、提高生物多样性等方面的服务功能^[3-4]。如何统筹低影响开发雨水系统(微排水系统, <1 a/h),城市雨水管渠系统(小排水系统, 2~10 a/h)及超标雨水径流排放系统(大排水系统, 20~100 a/h),对缓解城市内涝、面源污染、雨水资源流失与水资源短缺矛盾等问题具有重要意义。另外,海绵城市建设具有缓解城市热岛效应,促进建筑能耗降低等的作用,海绵城市建设与中国“双碳”目标具有一致性^[5]。海绵型公园绿地具有“多功能、多效益”的特征,不仅具备休闲游憩、文化教育、防灾避险、改善周边环境的功能,也可作为海绵城市体系的主要载体和重要场地,能够对周边硬化区域的径流进行自然渗透、调蓄和净化,集社会效益和生态环境及经济效益于一身^[6]。对于城市道路绿化带,考虑道路产流量与设施布局功能相匹配、植物生境适应性、景观效果、土壤改良、管理维护等方面,建设道路海绵设施,在削减径流量、截留径流污染等方面具有潜力^[7]。新建城区海绵城市建设需以目标为导向,在土壤质地、降雨特征、资源环境和社会经济等条件下因地制宜地进行城市海绵设施规划和建设。建成区/老城区致灾因子主要包括污水收集率低、合流制溢流污染、初期雨水污染等水环境问题;极端天气、排涝能力不足、地势低洼区等水安全隐患;河道基流小、水动力不

足、河道岸线硬质比例高等水生态问题^[8],海绵化改造工程需以区域问题为导向进行项目落地。城市绿地空间海绵设施改建需考虑入流条件、填料配比、蓄水层高度、排空时间等参数,如何通过关键参数的优化设计进行海绵设施提效得到广泛关注。土壤水分滞留和水力传导特性参数是土壤水分运动数值模拟中的主要参量,直接影响数值模拟精度及应用的可靠性^[9]。

城市绿地空间土壤饱和-非饱和下渗过程的实测与模拟为海绵设施建设提供基础数据支撑,促进海绵项目的落地,本研究通过土壤级配、有机质、水力传导度、土壤张力与含水率关系等分析,明确了城市绿地空间土壤下渗基本特性,提出了城市建成区绿地空间海绵设施构建途径。

1 材料与方法

1.1 区域概况与方案设计

南昌市位于长江中游地区,濒临赣江、抚河、鄱阳湖,属典型的亚热带湿润季风气候区。该市多年平均降水量 1 612 mm(1951—2015年),汛期(4—6月)降水量可达全年的 1/2。历年统计资料显示,年平均气温 17.5 °C,极端最高气温 40.6 °C,极端最低气温 -9.3 °C。2021年7月15日至8月15日,选取南昌市老城中心区(点位1—6)和新城红谷滩片区(点位7—12)乔灌木和草地下垫面进行现场单环入渗试验和土壤样品采集,点位涉及公园绿地、市政道路绿化带、建筑小区绿地等海绵设施典型应用场景(表1)。采集的土壤样品在实验室完成检测,检测指标包括颗粒级配、容重、有机质和盐度、非饱和含水率等。

表1 研究区监测点位分布

Table 1 Distribution of monitoring points in study area

编号	分类	下垫面类型	位置	编号	分类	下垫面类型	位置
1	公园绿地	乔灌木下垫面	八一公园	7	公园绿地	乔灌木下垫面	赣江市民公园
2	公园绿地	草地下垫面	八一公园	8	公园绿地	草地下垫面	赣江市民公园
3	市政道路	乔灌木下垫面	八一大道	9	市政道路	乔灌木下垫面	学府大道
4	市政道路	草地下垫面	八一大道	10	市政道路	草地下垫面	学府大道
5	建筑小区	乔灌木下垫面	紫金城小区	11	建筑小区	乔灌木下垫面	绿地外滩公馆
6	建筑小区	草地下垫面	紫金城小区	12	建筑小区	草地下垫面	绿地外滩公馆

1.2 监测与检测方法

1.2.1 土壤持水特性估算 SPAW(soil-plant-air-water)是由美国华盛顿州立大学开发的,用于模拟农

业景观中日水文状况。模型用途有两个:一个是模拟农田;另一个是模拟蓄水池,如湿地、池塘、泻湖、水库。SPAW中的Soil Water Characteristics模块专

门用于估算土壤的持水特性,通过一组广义方程来描述土壤张力、电导率与土壤水分含量之间的关系,是一组关于砂粒和粉粒含量与有机质含量的函数。土壤颗粒分析土壤风干后,平摊剔除植物、石块等残体,碾压后过 2 mm 土壤筛。采用马尔文 MS2000 激光粒度分析仪湿法测量,土壤质地分类采用美国制土壤粒级划分标准,根据美国土壤质地分类三角表确定土壤质地。有机质含量测定方法采用水合热重铬酸钾氧化—比色法。

1.2.2 单环入渗试验 入渗特性采用单环定水头入渗试验测定,试验设备由马氏瓶、支柱、单环入渗仪以及辅助设施组成。入渗环内径 28 cm,外径 30 cm,环高 20 cm,其中 10 cm 埋入地下,10 cm 露出地面。根据马氏瓶水面下降高度,计算进入土壤的水量〔公式(1)〕,从而计算近似的饱和导水率〔公式(2)〕。Horton在大量试验研究的基础上,提出了土壤入渗能力随时间呈指数变化的经验入渗模型〔公式(3)〕,研究表明Horton模型对含碎石夹层土壤入渗规律的适用性要优于 Kostiakov 模型和 Philip 模型,Horton 下渗模型也是城市雨水管理模拟中应用最为广泛的模型之一^[10-11],通过拟合 Horton 入渗公式,可获取初始、稳定入渗率与衰减系数。

$$Q = \pi R^2 (H_0 - H_t) \quad (1)$$

$$K(\theta_s) = \frac{Q}{A \Delta t} \quad (2)$$

$$f(t) = f_c + (f_0 - f_c)e^{-kt} \quad (3)$$

式中:Q 为 t 时间内进入内环土壤的水量;K(θ_s)为近似的饱和导水率(mm/h);R 为马氏瓶半径(cm); H_0 为初始马氏瓶水面读数; H_t 为各时间间隔马氏瓶的水面读数; Δt 为入渗时段;A 为内环的横截面积(cm^2); $f(t)$ 为 t 时刻降雨入渗率; f_0 为初始入渗率(mm/h); f_c 为稳定入渗率; k 为衰减系数(h^{-1});t 为时间(h)。

1.2.3 非饱和导水率曲线 土壤水分入渗过程较为复杂,受到土壤质地、降雨强度、初始含水率等自然条件的影响,土壤水张力以及非饱和导水率测定可提高土壤水分下渗过程模拟精度。HYPROP2 是一个基于辛德勒蒸发法(Schindlers evaporation method)的全自动测量和评估系统,用于确定土壤样品的水力特性。该装置使用两个深度的张力计测量土壤水张力以及非饱和导水率。另外,通过连续记录重量损失来计算体积含水量。HYPROP 数据评估软件(HYPROP Data Evaluation Software)用于分析蒸发

试验数据和拟合非饱和土壤水力特性的计算机程序。HYPROP-Fit 程序允许用户选择不同的模型来分析 HYPROP2 的测量值,本研究采用 Van Genuchten 模型来分析实测数据,其中土壤的体积含水量通过以下公式计算:

$$S_e = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \quad (4)$$

$$S_e = \left[\frac{1}{1 + (\alpha h)^n} \right]^m \quad (5)$$

式中: S_e 为有效饱和度(cm^3/cm^3); h 为压头(cm); θ 为体积含水量(cm^3/cm^3); θ_r 为残余含水量(cm^3/cm^3); θ_s 为饱和含水量(cm^3/cm^3); α 为与进气压力的倒数(cm^{-1})相关的形状参数; n 为控制进气区域滞留曲线弯曲和剩余含水量渐近曲率的形状参数, m 等于 $1 - 1/n$ 是附加形状参数。

2 试验结果

2.1 土壤下渗特性模型演算

根据确定好的土壤分类原则、颗粒分级结果和有机质含量测定结果,借助 SPAW 模型来推求出各点位的土壤物理属性,各项结果详见表 2。本文采用 SPAW 6.02 版本进行计算,土壤方程选用 2005 版本。软件输入砂粒(sand)、黏粒(clay)、砾石(gravel)、有机质(organic matter)、盐度(salinity)数据,可得出凋萎系数(wilting point)、田间持水量(field capacity)、饱和导水率(sat. hydraulic cond.)等土壤基本特性参数。本研究采用 SPAW 模型对研究区域土壤特性进行推算,得到土壤质地、凋萎系数、田间持水量、饱和导水率、土壤容重等一般特性。姜晓峰等^[12]采用联合国粮农组织公开的和谐世界土壤数据库 1.1 版为基础数据,采用联合国粮农组织(FAO)公开的和谐世界土壤数据库(HWSD)与华盛顿州立大学开发的土壤水特性模型 SPAW 相结合的方法,建立了阿什河流域的 SWAT 模型土壤数据库,率定期和验证期的相关系数(R^2)和纳什效率(ENS)均在 0.89 以上。研究发现土壤初始入渗速率主要与初始含水率和植被覆盖度有关,稳定入渗速率主要与初始含水率和初始入渗速率有关^[13]。本研究取表层 2—10 cm 进行土壤颗粒分析,过 2 mm 土壤筛。依据激光粒度分析仪湿法测量结果推求出大部分下垫面土壤类型属于粉砂壤土,按照 SPAW 中的 Soil Water Characteristics 模块推算出的土壤稳定入渗率在 4.1~33.0 mm/h(平均值=9.1 mm/h)。

表 2 土壤基本特性参数
Table 2 Soil characteristic parameters

序号	实验室测定				土壤质地	经验推求参数			
	黏粒/ %	粉粒/ %	沙粒/ %	有机质/ %		凋萎系数/ %	田间 持水量/%	饱和导水率/ (mm·h ⁻¹)	土壤容重/ (g·cm ⁻³)
1	8	68	25	0.3	粉砂壤土	5.7	24.0	12.44	1.63
2	15	71	15	0.3	粉砂壤土	9.8	29.3	5.24	1.57
3	14	45	40	0.2	壤土	8.8	22.6	13.83	1.61
4	5	55	40	0.7	粉砂壤土	4.0	19.2	32.96	1.59
5	11	75	14	1.1	粉砂壤土	8.0	29.1	9.31	1.52
6	10	85	5	0.4	粉沙	7.2	30.5	4.12	1.59
7	13	84	4	0.6	粉砂壤土	9.0	31.9	4.05	1.54
8	13	81	7	0.6	粉砂壤土	8.9	31.1	4.74	1.55
9	14	80	6	1.3	粉砂壤土	9.9	32.4	6.86	1.47
10	13	83	4	1.3	粉砂壤土	9.4	32.7	6.60	1.47
11	15	74	12	0.5	粉砂壤土	9.9	30.3	5.16	1.55
12	18	76	6	0.4	粉砂壤土	11.6	32.6	3.30	1.53

2.2 现场单环入渗实测

本研究采用单环入渗仪测量研究区域绿地土壤下渗过程(图 1),利用 Matlab 拟合霍顿(Horton)入渗公式及其参数如表 3 所示。现阶段可通过非饱和下渗理论、饱和下渗理论和基于实际下渗试验的经验下渗曲线(Horton, Green-Ampt, SCS 曲线模型等)3 种途径来确定土壤下渗曲线。非饱和下渗理论和饱和下渗理论虽然提供了揭示下渗规律和分析影响因

素的工具,但它们所处理的下渗问题一般只限于简单情况。对通过观测实际问题取得的下渗资料,选配以合适的函数形式,并率定其中的参数,从而求得相应的下渗曲线,这种确定下渗曲线的途径是不同于前边的理论途径的,称为经验公式。现场实测数据拟合结果表明:典型下垫面稳定入渗率在 44.4~308.2 mm/h (均值=127.3 mm/h),现场入渗开始 5~10 min 后基本达到稳定入渗过程,且大部分低于 100 mm/h。

表 3 监测点位下渗过程霍顿公式拟合
Table 3 Infiltration process based on Horton equation

点位	最大下渗/ (mm·h ⁻¹)	稳定下渗/ (mm·h ⁻¹)	衰减系数	拟合效果 (R ²)	霍顿公式
1	286.9	62.95	5.148×10 ⁻³	0.716	$f = 62.95 + (286.9 - 62.95)e^{-0.005148t}$
2	423.6	44.43	9.571×10 ⁻³	0.686	$f = 44.43 + (423.6 - 44.43)e^{-0.009571t}$
3	199.4	61.91	1.082×10 ⁻⁴	0.743	$f = 61.91 + (199.4 - 61.91)e^{-0.0001082t}$
4	545.5	62.85	6.488×10 ⁻³	0.716	$f = 62.85 + (545.5 - 62.85)e^{-0.006488t}$
5	387.9	120.5	1.610×10 ⁻⁴	0.721	$f = 120.5 + (387.9 - 120.5)e^{-0.000161t}$
6	525.1	308.2	1.098×10 ⁻⁴	0.689	$f = 308.2 + (525.1 - 308.2)e^{-0.0001098t}$
7	358.3	202.9	9.836×10 ⁻³	0.678	$f = 202.9 + (358.3 - 202.9)e^{-0.009836t}$
8	625.9	269.4	1.578×10 ⁻⁴	0.419	$f = 269.4 + (625.9 - 269.4)e^{-0.0001578t}$
9	629.3	65.17	9.321×10 ⁻³	0.657	$f = 65.17 + (629.3 - 65.17)e^{-0.009321t}$
10	199.6	47.52	3.562×10 ⁻³	0.888	$f = 47.52 + (199.6 - 47.52)e^{-0.003562t}$
11	551.1	201.4	8.443×10 ⁻³	0.687	$f = 201.4 + (551.1 - 201.4)e^{-0.008443t}$
12	303.5	80.03	6.540×10 ⁻³	0.825	$f = 80.03 + (303.5 - 80.03)e^{-0.006540t}$

2.3 土壤张力曲线变化

以研究区域代表性土壤类型粉砂壤土为对象(点位 4),采用 HYPROP2 测量土壤水分特征曲线(SWCC)和土壤非饱和导水率。随着时间的推移,水

分从土壤中蒸发,HYPROP2 记录其水势的变化过程,HYPROP-Fit 程序绘制了水势与含水量变化的关系图,最终得到张力值随时间的变化曲线和土壤水分特征曲线。土壤入渗能力受土壤容重、土壤质地、压

力水头、土壤初始含水量、有机质含量、保水性高分子材料含量等因素影响,其中,压力水头(积水深度)主要通过影响入渗界面处的压力势来影响水分的运移过程;土体构型对水分运移的影响主要是因剖面中不同质地土壤的孔隙、黏粒含量等差异导致渗透性、持水能力不同,且造成土层突变界面产生水力阻滞作用。土壤中孔隙的体积、结构和连通性在土壤水下渗过程中发挥的作用以及优先流的比例等,明确其在土壤水文过程中的作用有待进一步研究。土壤张力是土壤对水的吸力,是一种土壤水分强度指标,其大小与土壤水分的流动性和渗透深度、植物对土壤水分吸收的有效性和难易程度有密切关系。同时,它能够间接地反映土壤湿度。一般而言,土壤湿度越小,土壤的张力越大,对水的吸力也越强,致使植物很难吸收土壤中的水分。试验开始后 46 h 上下两个张力轴张

力值开始迅速上升,距试验开始 69 和 84 h 后,气泡开始进入张力轴,上下两个张力轴分别达到气蚀阶段,张力值开始缓慢下降,122 h 和 147 h 后上下两个张力轴张力值降为零。结果显示:土壤在完全饱和状态下大约需要 7 d 可以恢复到初始状态的下渗速率,整个过程中,土壤含水率由 44.2% 降为 2.2%。HYPROP2 中同时可选择 4 个模型(Brooks-Corey, Fredland-Xing, Kosugi 和 van Genuchten)进行分析,本研究中使用 van Genuchten 模型。HYPROP-Fit 程序拟合结果为: $\alpha=0.0786$; $n=1.456$,饱和含水率 $\theta_s=0.442$,凋萎含水量 $\theta_r=0$ 。通过此模型和相关参数,可以用来衡量城市绿地空间土壤水分的能量水平,估计植被生长的有效性,决定是否采取补水措施,推算土壤中孔隙分布和比水容量,为研究土壤释水性能指标和协调水气提供理论依据。

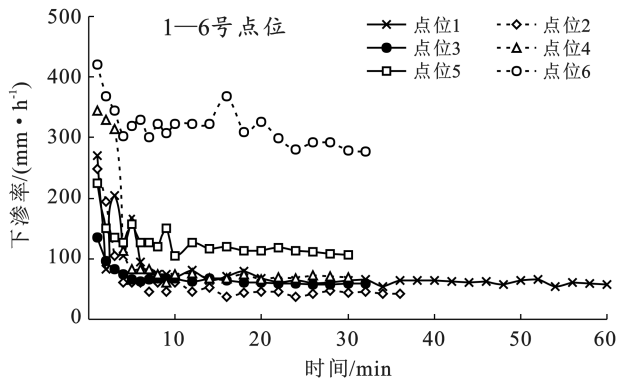


图 1 土壤入渗量与时间关系曲线

Fig.1 Relationship curve between soil infiltration and time-varying process

3 结果讨论

3.1 绿地土壤下渗过程影响因素分析

3.1.1 现场实测与模型推演的差异 实测土壤下渗率与 SPAW 模型演算出的饱和导水率存在一定差异,且不同点位之间波动性较大,考虑有以下几方面原因:①Soil Water Characteristics 模块专门用于估算土壤的持水特性,函数的建立是基于大量农田土壤监测取得的,其用于城市绿地空间土壤中的精度有待进一步探究;②土壤颗粒分析和有机质测定过程中,采用过 2 mm 筛的土壤颗粒进行分析测定,未考虑 >2 mm 颗粒的影响,由于实际下渗土壤剖面夹杂砾石、草根等可能形成大孔隙流,增加入渗速率;③水合热重铬酸钾氧化—比色法引入总有机碳与有机质转化经验系数(1.724)和氧化校正经验系数(1.32),这给结果带来了更大的误差,另外,利用浓硫酸加入溶液中释放的稀释热使重铬酸钾氧化有机碳,可能会因

温度不够或者高温冷却太快而导致有机碳氧化不完全^[14],从而影响有机碳含量测定。④由于下渗试验敲击单环进入土壤剖面,土壤可能产生明显裂缝形成边壁流增加了下渗的速率,而侧向流也对实际入渗过程会产生明显的影响;⑤土壤的下渗受土壤表面结皮、人为压实、种植土回填等因素也会对入渗过程产生影响;⑥土壤颗粒级配在空间上存在差异。为获取更加准确的实测数据,可适当增加平行监测点位并进行纵向分层下渗分析。因城市绿地空间现场实测受交通条件、植被覆盖、市政基础设施建设等条件影响,根据区域现场条件,优先采用现场实测的方法确定土壤下渗率,同时通过模拟和参数反演进行校正。

3.1.2 产汇流与运行年限对入渗过程的影响 地表径流主要通过雨水口流量过程线来表征,主要包括地表产流过程和地表汇流过程。前者是计算降雨扣除地表蒸发蒸腾、植物截留、洼蓄蓄水和土壤入渗(Kostiakov 模型, Horton 模型, Green-Ampt 模型等)

后所得的净雨量过程;后者是计算各流域的产流汇集到雨水口的人流过程。常用的地表产流模型有综合径流系数法、蓄满产流法(指数型或抛物线型)、下渗曲线法、时变增益模型(Time Variant Gain Model, TVGM)等^[15-16]。地表汇流计算方法包括瞬时单位线法、等流时线法、非线性水库演算法等,管道中水流的流速和水深由圣维南方程组计算求得。海绵城市建设通过渗、滞、蓄、净、用、排等多种技术,实现城市良性水文循环。不同国家颁布的各种标准对海绵设施的渗透速率有不同的规定。美国环境保护署(EPA)和新西兰要求生物滞留池渗透系数 $>12.5\text{ mm/h}$ ($3.47\times 10^{-6}\text{ m/s}$),澳大利亚要求在 $50\sim 200\text{ mm/h}$ ($1.38\times 10^{-5}\sim 5.55\times 10^{-5}\text{ m/s}$)^[17]。根据中国的雨水特征情况,国内学者综合考虑径流量和污染物负荷的削减,建议渗透系数 K 应大于 10^{-5} m/s ^[18]。我们更关注建立能够很好地描述海绵设施的渗透性能和在寒冷气候条件下渗透的效率的最佳渗透模型^[19-20],以及随着时间推移系统功能的变异。对于初始导水率较大($K>200\text{ mm/h}$)的系统,随着时间的推移,在水力压实和泥沙的共同作用下,系统的入渗系数显著降低,这可能是由于系统表面的沉积物沉积和水力压实^[21-22]。也许海绵设施面临的最大挑战是堵塞,有研究发现,运行50周后,系统的平均入渗率下降至初始值的30.8%,适当的粒径分布是确保渗透孔隙有效性的有效措施^[23]。两类片区(老城中心区、新城红谷滩片区)3种下垫面(公园绿地、市政道路、建筑小区)的差异对研究区域绿地土壤稳定入渗率的影响并表现出普遍的规律,如何综合考虑各类因素实现绿地空间海绵化改造需要进一步探究。

3.1.3 初始含水率对入渗过程的影响 土壤初始含水量对入渗的影响一是土壤含水量与水势梯度的直接作用和土壤团聚体遇水后的崩解挤压作用。黄德良等^[24]利用Green-Ampt与Philip入渗模型得到相应土壤入渗特性参数,采用灰色关联分析法研究4个因素对累积入渗量、饱和导水率、稳定入渗率、湿润锋面吸力、吸渗率的影响程度。结果表明:影响水分入渗的主要因素表现为:颗粒级配 $>$ 土壤初始含水率 $>$ 土壤容重 $>$ 压力水头。马蒙蒙等^[25]通过室内积水入渗试验对湿润锋、累积入渗量、土壤剖面压力水头进行观测,探究积水深度、土体构型、初始含水量3种因素对层状土壤水分运移的影响,结果表明:积水深度、土壤初始含水量增加时,湿润锋运移速率和入渗率均增大,上砂壤一下粉砂壤构型较上粉砂壤一下砂壤构

型而言,整体湿润锋推进速率和入渗率较大,出流快,且入渗后期界面处的压力水头高于其他观测点。与此同时,天然条件下的下渗需要考虑更多的影响:考虑降雨强度是否有时间变化,同时考虑产一汇流过程;不同层土壤纵向下渗系数的变化;非均质土壤中的入渗;冬季土壤下渗状况;坡面下渗等。土壤中的胶质物、化学生物作用、地面覆盖物、温度、土壤气体含量、下渗水的水质等也是影响下渗的重要因素。

3.2 绿地空间海绵设施关键参数构建

海绵设施雨水调蓄能力受设施表面积、蓄水层深度、填料下渗能力和孔隙度等共同决定,推求下渗曲线的具体表达形式是下渗理论的一个重要课题,也是该类设施调蓄能力及其衰减过程的重要指标,基于土壤下渗参数构建绿地空间海绵化改造的技术路线和方法(图2)。在用户指定的降水和蒸发条件下,应用RECARGA模型^[26]对具有地表积水,3个不同土层和可选暗渠的单个设施水文性能进行模拟。该模型连续模拟整个设施(蓄水区、土层和暗渠)的水分运动,记录不同时段渗透、补给、溢流、暗渠、蒸散等的土壤湿度和水量,结果可用于确定设施的规模,以满足特定的调控目标。该模型使用Green-Ampt入渗模型作为土壤表面的初始入渗,并使用van Genuchten描述土壤层之间的排水关系。确定设计目标和约束条件后,通过测定研究区域土壤水分特征参数,可通过RECARGA模型进行海绵设施设计。海绵设施进水水量设计可根据当地暴雨强度公式计算降雨强度(选择合适的设计重现期和降雨历时),同时考虑汇流面积比(汇水面积/设施面积)确定设计水量;另一种方法以中小雨的降雨量等级($\leq 25\text{ mm/d}$)和合适的汇流面积比确定设计水量。同时考虑降雨雨型、汇水面糙率、坡度等的影响,将排空时间、积水深度、积水时长等也作为设施设计的约束条件。以生物滞留设施为例,其设计排空时间为 $12\sim 48\text{ h}$,土壤介质压实度不小于80%时的稳定入渗率测试值宜为设计稳定入渗率(f_m)的3~6倍,蓄水层深度为 $200\sim 300\text{ mm}$ 计算,设计稳定入渗率约为 $12.5\sim 150\text{ mm/h}$ ($3.50\times 10^{-6}\sim 4.20\times 10^{-5}\text{ m/s}$)^[27]。研究区域实测原状土稳定入渗率为 $44.4\sim 308.2\text{ mm/h}$ (均值 $=127.3\text{ mm/h}$),大部分低于 100 mm/h 。Soil Water Characteristics模块推算出的稳定入渗率在均值为 9.1 mm/h ,差异较大。对于稳定入渗率较低或长期运行后有较大衰减的区域,在新建/改建海绵设施时,应进行现场实测且考虑最不利条件进行参数设计。

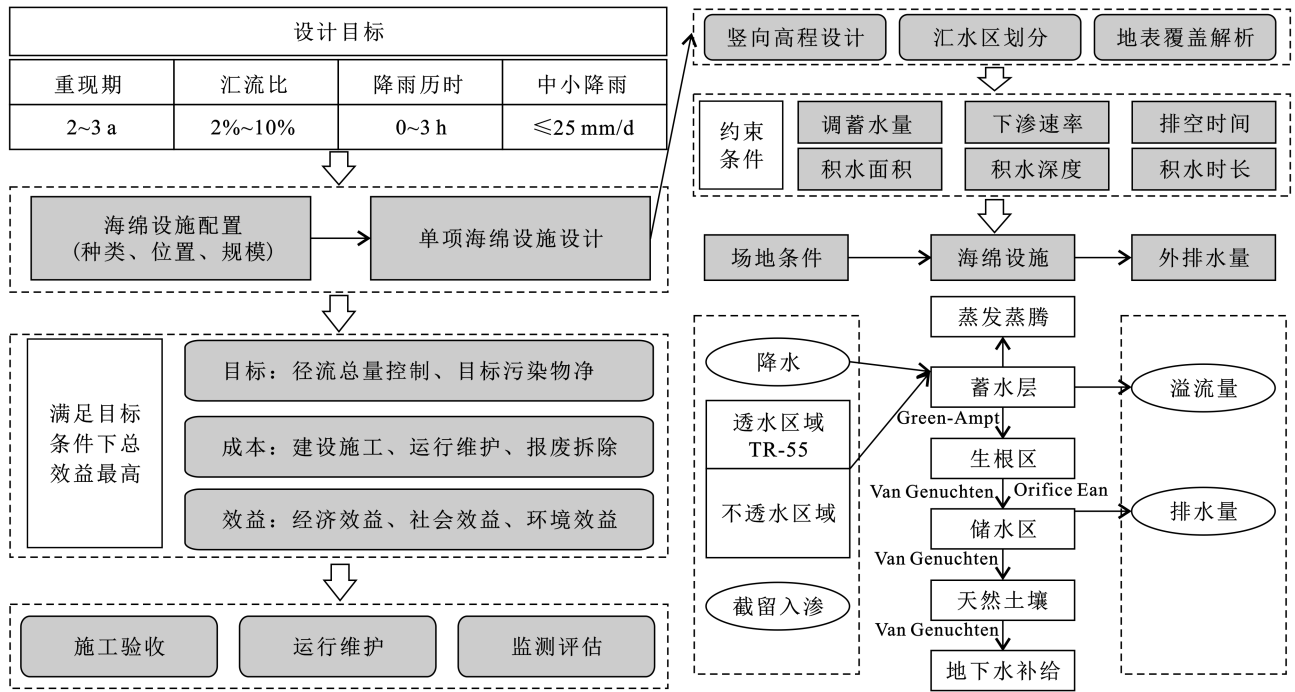
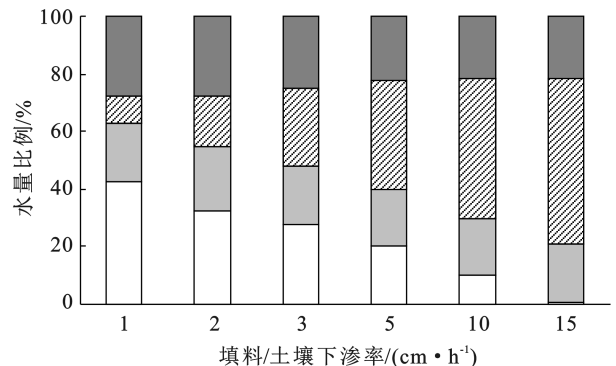


图 2 绿地空间海绵化改造的技术路线和方法

Fig.2 Technology roadmap and methods for sponge transformation project of green space

采用上述技术路线,以 20:1 汇流比,50 mm 降雨量,SCS Type II 雨型,填料/土壤下渗率分别为 10, 20,30,50,100 和 150 mm/h 条件下,海绵设施溢流量、地下补给量、穿孔管外排量和滞留量如图 3 所示。由图 1 可知,随着填料/土壤下渗率的逐渐增加(10~150 mm/h),溢流量逐渐减小、穿孔管外排量逐渐增加,滞留量和地下补给量基本保持不变。可见,海绵设施径流水量削减率、地下水补给量对填料层和原状土层下渗率有明显的响应关系。专家学者们通过优化海绵设施配置(植被类型、填料种类及组合形式、设计水力和污染负荷等),使设施最大限度地调控径流水量、净化雨水径流污染物,从而提高系统调控效率和可持续性^[28]。填料的改良主要从入渗能力(水力传导度、蓄水层深度、表面积)和净化能力(填料基本特性、污染物本底含量、生物多样性)两方面进行考量,入渗能力方面则主要考虑渗滤介质层、过渡层、排水层的组合形式和粒径分布。级配良好的冲洗砂的过渡层(防止细粒冲入排水层),深度为 100—350 mm;砾石排水(基层)层采用细冲洗的砾石(2—5 mm)或粗冲洗的砂(1 mm),通常深度为 100—300 mm;另外,填料 TN,PO₄³⁻ 等含量需在合适的范围,否则较大的人渗率将影响植物的生长、造成营养淋溶等风险^[29]。众多研究采用高渗透能力的壤质砂土和砂质壤土作为最佳填料类型,考虑降雨过程中的吸附截留等作用,以及降雨间隔期的植物摄取和生物降解,填料改

良目的在于为增加填料的持水能力、吸附能力,提高微生物丰度、改善植物生长环境等。关于海绵设施中植物特性及其在各种功能中的对应机制相关研究比较分散,例如径流雨水滞留、渗透、抗介质堵塞、植物修复、蒸散发以及微生物在促进植物和填料、植物微生物相互作用和在海绵设施中不同功能的相对性能方面的作用仍然研究较少。随着运行周期的延长,有待进一步研究填料颗粒粒径分布规律、孔隙中有机—无机固体含量、吸附—解吸特性和生物过程(微生物降解、植物以及动物吸收)等。



注:汇水面积/设施面积=20:1,降雨量为 5 cm,蓄水层为 30 cm,不透水面积比例为 100%,下凹深度为 20 cm,排水管为 110 mm,雨型为 SCS Type II,填料层为 70 cm,原状土下渗率为 1 cm/h。

图 3 不同填料下渗率情景下海绵设施径流调控效果
Fig.3 Effect of sponge facility runoff control under different infiltration scenarios

4 结论与建议

针对海绵城市理念下,城市绿地空间海绵化改造中土壤渗透、蓄滞问题开展研究,通过经验模型演算,现场入渗过程实测,实验室土壤张力与含水率分析,明确南昌地区典型土壤下渗特性。研究区域土壤质地以粉砂壤土为主,按照 SPAW 中的 Soil Water Characteristics 模块推算出的土壤稳定入渗率在 4.1~33.0 mm/h(均值=9.1 mm/h)。不同植被覆盖绿地土壤现场单环入渗试验表明:现场入渗开始后基本 5~10 min 后达到稳定入渗过程,且大部分低于 100 mm/h。不同植被覆盖条件下并未体现出明显的差异。土壤在完全饱和状态下大约需要 7 d 可以恢复到初始状态的下渗速率。为分析现有绿地土壤改建为海绵设施的可能性,须根据设计雨量的不同同时考虑蓄水层高度、填料层厚度、淹没区高度设置,填料层、过渡层和排水层颗粒级配,下渗速率、有机质、恢复系数、TN、 PO_4^{3-} 、pH 等参数,通过模型模拟进行关键参数设计。后续研究需结合土壤纵向剖面结构,研究分层下渗过程;考虑植物根系生长和微生物过程对长期入渗过程的影响;建立海绵设施全寿命周期运行效能评估模型。

[参 考 文 献]

[1] 徐宗学,程涛.城市水管理与海绵城市建设之理论基础:城市水文学研究进展[J].水利学报,2019,50(1):53-61.

[2] Fernando C, Manuel K, Jochen H. A multi-parameter method to quantify the potential of roof rainwater harvesting at regional levels in areas with limited rainfall data [J]. Resources, Conservation and Recycling, 2020, 161:104959.

[3] 张建云,王银堂,胡庆芳,等.海绵城市建设有关问题讨论[J].水科学进展,2016,27(6):793-799.

[4] 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):1009-1022.

[5] 李晨璐,郑涛,彭开铭,等.基于全生命周期法的海绵城市雨水系统碳排放研究[J].环境与可持续发展,2019,44(1):132-137.

[6] 金铭涓,刘胜群.海绵型公园绿地空间分布特征及其影响因素分析[J].海南师范大学学报(自然科学版),2022,35(4):461-470.

[7] 高浩博.沔西新城道路海绵系统景观设计研究[D].陕西西安:西安建筑科技大学,2022.

[8] 赵寒雪.多雨地区高密度城区海绵实施策略研究[D].湖北武汉:华中科技大学,2017.

[9] 程勤波,陈喜,凌敏华,等.单环入渗试验与数值反演法结合推求土壤水力参数[J].水文地质工程地质,2010,37

(1):118-123.

[10] 冯娜,刘冬冬,丁继辉,等.反演含碎石碳酸盐岩红土水力特性[J].水土保持学报,2022,36(1):101-109.

[11] 陶涛,颜合想,李树平,等.城市雨水管理模型中关键问题探讨(二):下渗模型[J].给水排水,2017,53(9):115-119.

[12] 姜晓峰,王立,马放,等. SWAT 模型土壤数据库的本土化构建方法研究[J].中国给水排水,2014,30(11):135-138.

[13] 王榕.建筑与小区绿地土壤物理性质和微地形对降雨产流的影响研究[D].北京:北京建筑大学,2020.

[14] 钱宝,刘凌,肖潇.土壤有机质测定方法对比分析[J].河海大学学报(自然科学版),2011,39(1):34-38.

[15] 季民,黎荣,刘洪波,等.城市雨水控制工程与资源化利用[M].北京:化学工业出版社,2017.

[16] 夏军,叶爱中,王纲胜.黄河流域时变增益分布式水文模型(I):模型的原理与结构[J].武汉大学学报(工学版),2005,38(6):10-15.

[17] Coustumer S L, Fletcher T D, Deletic A, et al. Hydraulic performance of biofilter systems for storm-water management: influences of design and operation [J]. Journal of Hydrology, 2009,376(1):16-23.

[18] 向璐璐,李俊奇,邝诺,等.雨水花园设计方法探析[J].给水排水,2008,34(6):47-51.

[19] Wang Jianlong, Song Jianying, Lin Hongjun, et al. Comparison of infiltration models to describe infiltration characteristics of bioretention [J]. Journal of Hydro-environment Research, 2021,38:35-43.

[20] Ding B, Rezanezhad F, Gharedaghlou B, et al. Bioretention cells under cold climate conditions: Effects of freezing and thawing on water infiltration, soil structure, and nutrient removal [J]. Science of The Total Environment, 2019,649:749-759.

[21] Hatt B E, Fletcher T D, Deletic A. Hydraulic and pollutant removal performance of stormwater filters under variable wetting and drying regimes [J]. Water Science and Technology, 2007,56(12):11-19.

[22] Nabiul Afroz A R M, Boehm A B. Effects of submerged zone, media aging, and antecedent dry period on the performance of biochar-amended biofilters in removing fecal indicators and nutrients from natural stormwater [J]. Ecological Engineering, 2017, 102:320-330.

[23] Meng Yingying, Wang Huixiao, Zhang Shuhan, et al. Experiments on detention, retention and purifying effects of urban road runoff based on bioretention [J]. Journal of Beijing Normal University(Natural Science), 2013,49(2/3):286-291.

- [5] 肖继兵,孙占祥,蒋春光,等.辽西地区农耕地土壤侵蚀影响因素及相关关系[J].水土保持学报,2015,29(5):13-19.
- [6] Nguyen K A, Chen W, Lin B S, et al. Comparison of ensemble machine learning methods for soil erosion pin measurements [J]. *Isprs International Journal of Geo-Information*, 2021,10(1):42.
- [7] Zhang Hua, Lei Jinping, Wang Hao, et al. Study on dynamic changes of soil erosion in the North and South Mountains of Lanzhou [J]. *Water*, 2022,14(15):2388.
- [8] Sahour H, Gholami V, Vazifedan M, et al. Machine learning applications for water-induced soil erosion modeling and mapping [J]. *Soil and Tillage Research*, 2021, 211:105032.
- [9] Rahmati O, Tahmasebipour N, Haghizadeh A, et al. Evaluation of different machine learning models for predicting and mapping the susceptibility of gully erosion [J]. *Geomorphology*, 2021,298:118-137.
- [10] Zhang Yonghong, Ge Taotao, Tian Wei, et al. Debris flow susceptibility mapping using machine-learning techniques in Shigatse area, China [J]. *Remote Sensing*, 2019,11(23):2801.
- [11] Senanayake S, Pradhan B, Alamri A, et al. A new application of deep neural network (LSTM) and RUSLE models in soil erosion prediction [J]. *Science of The Total Environment*, 2022,845:157220.
- [12] Chen Zhijun, Zhu Zhenchuang, Jiang Hao, et al. Estimating daily reference evapotranspiration based on limited meteorological data using deep learning and classical machine learning methods [J]. *Journal of Hydrology*, 2020,591:125286.
- [13] 李明伟.辽西地区不同水土保持措施条件下土壤侵蚀量与降雨因子关系研究[J].*中国水土保持*,2018(8):29-33.
- [14] 周志华.机器学习[M].北京:清华大学出版社,2016.
- [15] 王升,付智勇,陈洪松,等.基于随机森林算法的参考作物蒸发蒸腾量模拟计算[J].*农业机械学报*,2017,48(3):302-309.
- [16] Dinh T V, Nguyen H, Tran X L, et al. Predicting rainfall-induced soil erosion based on a hybridization of adaptive differential evolution and support vector machine classification [J]. *Mathematical Problems in Engineering*, 2021, 2021:1-20.
- [17] 冯禹,崔宁博,龚道枝,等.利用温度资料和广义回归神经网络模拟参考作物蒸散量[J].*农业工程学报*,2016,32(10):81-89.
- [18] Alhassan A M, Zainon W M N W. Brain tumor classification in magnetic resonance image using Hardswish-based RELU activation function-convolutional neural network [J]. *Neural Computing and Applications*, 2021,33(15):9075-9087.
- [19] 张焕,张庆,于纪言.激活函数的发展综述及其性质分析[J].*西华大学学报(自然科学版)*,2021,40(4):1-10.
- [20] 刘定一,沈阳阳,詹天明,等.融合微博热点分析和 LSTM 模型的网络舆情预测方法[J].*江苏大学学报(自然科学版)*,2021,42(5):546-553.
- [21] 刘洁,陈晓宏,许振成,等.降雨变化对东江流域径流的影响模拟分析[J].*地理科学*,2015,35(4):483-490.
- [22] Zha Wenshu, Liu Yuping, Wan Yujin, et al. Forecasting monthly gas field production based on the CNN-LSTM model [J]. *Energy*, 2022,260:124889.
- [23] 任雨之,郑江坤,付滢,等.不同耕种模式下降雨等级对紫色土坡耕地产流产沙的影响[J].*中国水土保持科学*,2020,18(3):90-98.
- [24] Feng Ziyi, Huang Guanhua, Chi Daocai. Classification of the complex agricultural planting structure with a semi-supervised extreme learning machine framework [J]. *Remote Sensing*, 2020,12(22):3708.
- [25] 陈英义,程倩倩,方晓敏,等.主成分分析和长短时记忆神经网络预测水产养殖水体溶解氧[J].*农业工程学报*,2018,34(17):183-191.

(上接第 153 页)

- [24] 黄德良,费良军,曾健,等.基于灰色关联法土壤水分垂直入渗影响因素研究[J].*中国农学通报*,2018,34(32):95-101.
- [25] 马蒙蒙,林青,徐绍辉.不同因素影响下层状土壤水分入渗特征及水力学参数估计[J].*土壤学报*,2020,57(2):347-358.
- [26] Atchison D, Severson L. RECARGA User's Manual Version 2.3 [M]. University of Wisconsin, Madison, Civil & Environmental Engineering Department Water Resources Group, 2004.
- [27] 中国城镇供排水协会.T/CUWA40052-2022 雨水生物滞留设施技术规程[S],北京:中国城镇供排水协会,2022.
- [28] Facility for Advancing Water Biofiltration (FAWB). Stormwater Biofiltration Systems Adoption Guidelines: Planning, Design and Practical Implementation [C]. Version 1, Image and Sigal Processing-international Conference, 2009.
- [29] Tirpak R A, Hathaway J M, Franklin J A, et al. Suspended pavement systems as opportunities for subsurface bioretention [J]. *Ecological Engineering*, 2019, 134:39-46.