

基于 RECARGA 模型生物滞留池设计参数的水文效应

涂安国^{1,2}, 李英^{1,2}, 莫明浩^{1,2}, 聂小飞^{1,2}

(1.江西省土壤侵蚀与防治重点实验室,南昌 330029;2.江西省水土保持科学研究院,南昌 330029)

摘要:为探讨运用数学模型进行生物滞留池构型和参数优化设计的方法,以 RECARGA 模型为工具,评估生物滞留池的设计参数和结构改变的径流水文调节效果,定量分析设计参数与水文性能的关系,从而确定适宜的生物滞留池配置方法。结果表明:设施底层土壤导水率是整个滞留系统水文性能的限制因素,年雨水滞留量随土壤导水率的增加呈显著的对数函数增加。雨水滞留率与设施表面积比率有着显著的对数函数关系。雨水滞留量与蓄水层厚度呈显著的幂函数关系,而与根系层和贮水层厚度呈良好的线性关系;考虑排水因素,蓄水层深度建议不宜大于 15 cm。研究结果可为生物滞留池的科学设计提供理论依据。

关键词:生物滞留池;水文效应;RECARGA 模型;设计参数

中图分类号:TV121

文献标识码:A

文章编号:1009-2242(2020)01-0149-05

DOI:10.13870/j.cnki.stbcxb.2020.01.022

Hydrological Effects of Design Parameters Optimization of Bioretention Facility Based on RECARGA Model

TU Anguo^{1,2}, LI Ying^{1,2}, MO Minghao^{1,2}, NIE Xiaofei^{1,2}

(1.Jiangxi Provincial Key Laboratory of Soil Erosion and Prevention, Nanchang 330029;

2.Jiangxi Institute of Soil and Water Conservation, Nanchang 330029)

Abstract: Bioretention facilities are one of the effective measures for rainwater management with low impact development. In order to explore the method of optimizing the configuration and parameters of biological facilities by using mathematical models, the RECARGA model was used to evaluate the hydrological regulation effect of the changes of design parameters and structure of biological detention facilities, and to quantitatively analyze the relationship between design parameters and hydrological performance, so as to determine the appropriate method of setting biological detention pools. The results showed that the soil hydraulic conductivity at the bottom of the facility was a limiting factor for the hydrological performance of the whole system, and the annual rainfall retention increased with the increase of soil hydraulic conductivity in a significant logarithmic function. There was a significant logarithmic function relationship between rainfall retention rate and facility surface area ratio. Rainwater retention had a significant power function relationship with depression zone thickness, and a good linear relationship with root layer and storage layer thickness. Considering drainage time factors, the depth of depression zone should not be greater than 15 cm. These research results could provide a theoretical basis for the scientific design of bioretention facilities structure.

Keywords: bioretention; hydrological effect; RECARGA model; design parameters

随着城市的高速发展,不透水下垫面比例不断增加,由此造成了城市洪涝灾害频发,初期暴雨径流污染水环境甚至危害人体健康^[1-2]。海绵城市通过采用渗、滞、蓄、净、用、排等多种生态化技术,构成低影响开发雨水系统,可有效控制径流总量、径流峰值和径流污染^[3-4]。生物滞留设施作为低影响开发海绵城市建设中的重要技术之一,其在径流调控、补给地下水及水质改善方面具有显著的功效,近年来在世界各地城市雨洪管理中得到了广泛推广和应用^[5-7]。生物滞

留池结构层通常由蓄水层、根系层、贮水层(人工填料层)及底部排水系统等组成,不同结构层参数配置必然影响到设施的运行效果。生物滞留池的水文效应受设计深度、设施面积、填料性质等因素的影响^[8]。同时,生物滞留池场地土壤水分渗透性也会影响其水文性能调节的功效。Li 等^[9]研究表明,生物滞留设施的降雨入渗量随着填料层厚度增大而增大;唐双成等^[10]试验结果表明,增大设施的蓄水深度,设施发生溢流的时间缩短;高建平^[11]基于非饱和土壤水分运动理论,采用数值模拟方法研究了 4 种降雨作用下

生物滞留带结构层参数对设施积水、产流及径流调控效应的影响特性。由此可知,针对生物滞留设施相关研究^[12-14]大多是对其应用效果的试验监测和定性分析,对其设计参数与水文性能定量关系尚缺乏系统的研究,难以为生物滞留设施合理构型和优化布置提供具有指导意义的理论依据。数学模型作为科学有效的手段,可服务于生物滞留设施的优化设计和运行效果评估及预测。HYDRUS-1D、DRAINMOD、RECARGA、SWMM 等典型模型均可用于生物滞留设施的环境水文效果模拟^[15-17]。SWMM 模型一般适用于流域大尺度, HYDRUS-1D、DRAINMOD、RECARGA 则可模拟单项 LID 设施,但 HYDRUS-1D 和 DRAINMOD 模型对降雨汇流过程均需要特别处理且需要输入参数较多^[18-19]。RECARGA 模型则可用于连续模拟生物滞留入渗的各个水文要素。

南方红壤地区年降雨量丰富但时间分布不均,同时土壤质地黏重、水分入渗性较差^[20-21],故在应用生物滞留设施调蓄降雨径流时,应根据当地水文环境条件对生物滞留设施的结构参数进行优化。本研究利

表 1 研究区土壤机械组成

| 土层深度/ cm | 土壤粒径组成/% | | | 有机质/ % | 土壤容重/ ($g \cdot cm^{-3}$) |
|-------------|-------------------|---------------------|-----------------|-----------|--------------------------------|
| | 砂粒 2.0~0.05 mm | 粉粒 0.05~0.002 mm | 黏粒 <0.002 mm | | |
| 0-30 | 25.76 | 43.61 | 30.63 | 0.84 | 1.39 |
| 30-60 | 23.70 | 43.26 | 33.03 | 0.59 | 1.46 |
| 60-90 | 24.37 | 53.19 | 22.44 | 0.21 | 1.52 |

1.2 RECARGA 模型构建

1.2.1 模型概况 RECARGA 是由 Wisconsin 大学研发的专门针对生物滞留池等入渗设施水文性能分析和设计的软件,可以模拟分析不同设计要素下生物滞留池的水文性能,以此为生物滞留池的合理设计提供理论依据。模型运用 TR-55CN 程序模拟汇水区的渗透性部分及不渗透部分的入流径流量,Green-Ampt 方程模拟蓄水层至介质层土壤的入渗,并通过 van Genuchten 非线性方程模拟控制介质层至沙砾层和沙砾层至天然土壤间的水分运动,节流方程计算排水管流量。模型输入参数主要包括研究区的面积及其不透水性区域的比例及 CN,生物滞留池的面积、生物滞留池的土壤参数,如饱和导水率、土层厚度等。RECARGA 模型可有效模拟生物滞留池的降雨水文过程^[22-23]。

1.2.2 模型模拟 根据中国气象数据网(<http://data.cma.cn/>)中的中国地面气象站逐小时观测资料数据统计和计算,2012 年研究区降水量为 1 780.3 mm,年蒸发量为 1 029.4 mm(图 1)。研究区 2012 年降水量与 25% 频率下的年降水量 1 750.6 mm 大致相等,可作为丰水年典型年份。

模拟生物滞留池设计由蓄水层、种植土层、人工

用生物滞留池的模拟设计软件 RECARGA,通过改变生物滞留池的各设计要素参数,分析典型年降雨条件下生物滞留池主要设计参数对水文要素和径流滞留率的影响,建立不同生物滞留池设计参数与水文性能的定量关系,为生物滞留池在南方红壤区的设计与推广及海绵城市建设提供技术支撑。

1 材料与方 法

1.1 研究区概况

研究区位于江西省九江市德安县城,属亚热带湿润季风气候区,多年平均气温 16.7 °C,年日照时间 1 700~2 100 h,无霜期 245~260 d。研究区多年(2001—2016 年)平均降水量为 1 419.0 mm,其中 3—8 月可占全年降水量的 53.29%~85.08%。区域土壤为第四纪红黏土发育的红壤,质地为黏土,土层厚度为 50—150 cm,呈酸性至微酸性,土壤黏粒含量较高,但有机质含量低(表 1)。根据各土层的土壤机械组成,借助于 SPAW 软件包,估算研究区土壤饱和入渗率约为 0.26~0.65 cm/h,土壤水分入渗率较低。

填料层等组成。根据研究区土壤的实际和相关设计手册,模拟基础厚度蓄水层设为 15 cm;种植土层为沙壤土,饱和入渗率为 10 cm/h,厚度为 20 cm;人工填料层为沙土,饱和入渗率为 15 cm/h,厚度为 50 cm;设施底层土壤饱和导水率根据研究区的实际设为 0.33 cm/h。当模拟某一参数对水文调节性能影响时,其他结构参数设为基本参数,只改变需要分析的结构参数。

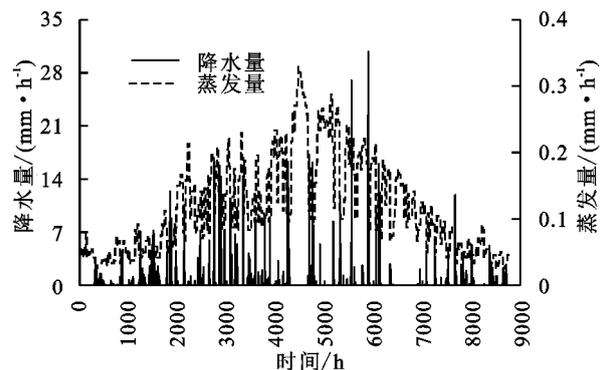


图 1 研究区 2012 年降水量与蒸发量

为了模拟不同底层土壤导水率(k)、不同设施面积比率(FAR)、不同结构层厚度(H)对生物滞留池的水文调节性能的影响,对一面积为 1 000 m^2 居民小区的生物滞留池的水文效应进行模拟分析。其中透水面积占比

10%,CN 值为 80。根据 2012 年逐降水量和蒸发量数据,利用 RECARGA 模型反复模拟不同生物滞留池设计参数下的设施地表径流溢出量(Runoff)、雨水滞留量(Stay-on)和入渗补给量(Recharge),从而分析各要素变化对生物滞留池的水文效应的影响。

2 结果与分析

2.1 底层土壤导水率对生物滞留池水文效应影响

生物滞留设施面积与汇水面积之比一般推荐为 5%~10%。图 2 为生物滞留池表面积占为 5%,10%,15%条件下的设施底层土壤饱和和导水率与各水

文要素量的关系。由图 2 可知,随着土壤饱和和导水率的增加,不同大小的 FAR 下从设施溢出的年地表径流量均呈先快速减少,之后减少趋势变缓,转折点约为 0.3~0.4 cm/h。整体上,地表径流溢出量均随着土壤导水率的增加均呈显著的幂函数减少,而雨水滞留量随土壤导水率的增加呈显著的对数函数增加。地表径流溢出量的减少和雨水滞留量的增加主要是由于底层土壤导水率的增加,加快了地下水的入渗补给速率。入渗补给量随着与土壤导水率增持呈显著的对数关系增加。

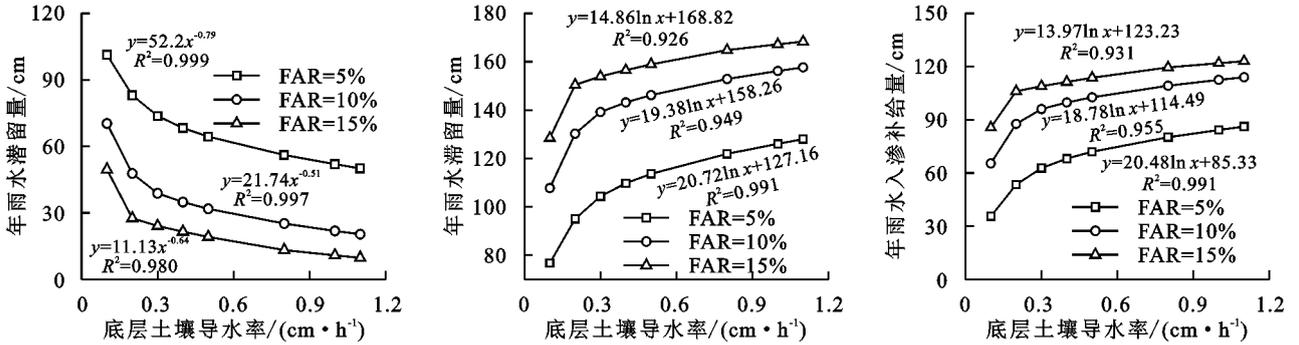


图 2 不同设施面积比率下底层土壤导水率与各水文要素的关系

由填料层不同土壤导水率(d)下的设施底层土壤饱和和导水率与各水文要素量的关系(图 3)可知,上层贮水层不同土壤导水率下各水文要素量差异较小,这说明设施土壤水分主要受底层土壤导水率的影响。

经模拟分析,结果同样显示上层种植土层不同饱和土壤入渗率对整个系统的水文要素影响较小。因此,在红壤地区建设生物滞留设施,设施底部的土壤导水率低下是其水文性能发挥的限制因素。

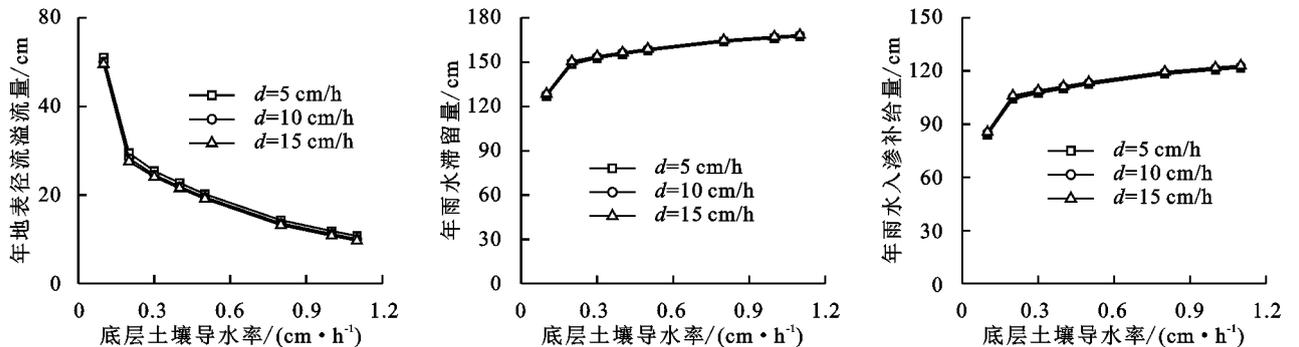


图 3 不同贮水层导水率下底层土壤导水率与各水文要素的关系

2.2 设施面积比率对生物滞留池水文效应影响

设施的水文性能取决于设施的表面积与产生径流的场表面面积的比率(设施面积比率 FAR)。生物滞留设施的表面积是最重要的设计参数,它将直接影响设施内的储存量和可供渗透的区域。由图 4 可知,从设施溢出的地表径流量随着设施面积比的增加先快速减少而后趋于平稳,其转折点位于 0.15。设施入渗补给量和雨水滞留量均随着 FAR 的增加而先快速增加,而后趋于平稳。整体上,地表径流溢流量与 FAR 有着良好的对数函数关系,Stay-on 和 Recharge 与 FAR 有着显著的对数函数关系。当 FAR 大于 0.12 时,区域年雨水滞留量为 83.11%,可达到《海绵城市建设技术指南——低影响开发雨水系统构建(试行)》^[24] 的年

径流总量控制率 80%~85%的要求。由此可知,研究区的 FAR 的最佳取值约为 0.12~0.15。

2.3 结构层厚度对生物滞留池水文效应影响

在确定场地和面积后,设施的结构层深度是需要考虑的重点。设施结构层厚度主要是确定蓄水层厚度、植物种植层厚度和填料层厚度(介质层)。由图 5 可知,设施年地表径流溢出量对结构层深度呈显著的指数函数关系,且对蓄水层增加反应最为敏感。年降雨滞留量与蓄水层深度呈显著的幂函数关系,而与种植层和填料层深度呈良好的线性关系。这表明增加单位深度的蓄水层对雨水滞留量最大,其次为填料层,种植层最小。与蓄水层的情况一样,增加种植层和填料层的厚度也增加了设施中的贮水能力。然而,

由于土壤介质和前期水分的存在,单位厚度增加的雨 水储存量种植层和填料层较蓄水层少。

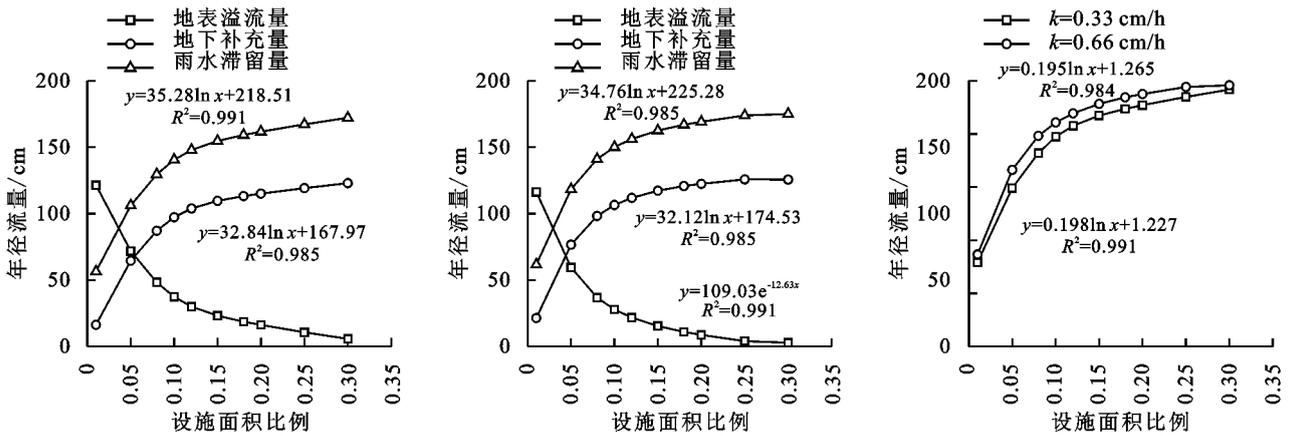


图 4 设施面积比率与各水文要素的关系

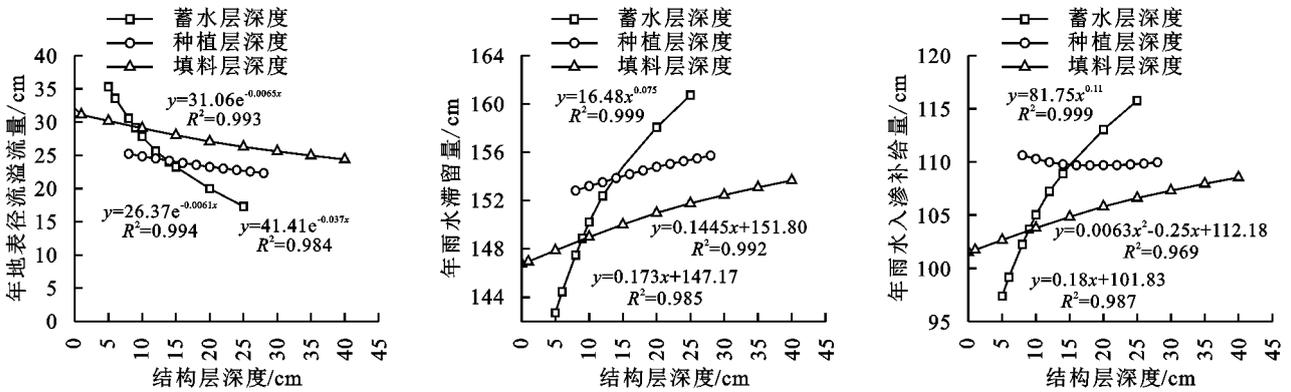


图 5 结构层厚度与各水文要素的关系

由结构层深度与雨水滞留量的关系曲线可知,增加蓄水层深度可最大提高雨水滞留量,但同时设施排水时间也将大大增大(图 6),尤其是当蓄水深度大于 15 cm 时。排空时间是生物滞留设施设计的重要参数,其取值会影响到设施用地面积、植物成长、设施运行维护频率、蚊蝇孳生和径流控制效果等多个方面^[25]。由于红壤心土层(B层)土壤水分入渗系数普遍较少,为了及时将生物滞留池中的水排空,需要在设施内底部埋设穿孔排水管或者采取土壤改良措施增加土壤导水率。

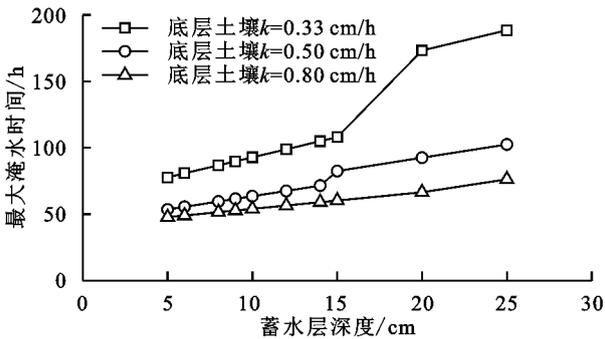


图 6 不同底层土壤导水率下蓄水层厚度与最大淹水时间的关系

3 讨论

建设场地的土壤水分入渗条件是生物滞留设施设计和性能最重要的控制条件。生物滞留设施下方土壤导水率是整个设施土壤水分下渗的限制层,是影

响设施设计和性能的最重要因素。土壤特性随空间和深度而变化^[26]。因此,在定位和设计生物滞留设施之前,必须对设施下层土壤进行表征,在具有最佳土壤的地区定位设施可以大大提高其性能。当生物滞留池收集雨水作为回用目的时,较小的土壤导水率可有效防止净化后的雨水流失,但为了达到水文调节目,必须增大设施面积,如底层土壤导水率由 0.66 cm/h 降低至 0.33 cm/h 时,雨水滞留率达到 80% 生物滞留池的表面积比率将由 9.23% 提升至 11.57%; 当作为补充地下水目的时,较小的土壤导水率将限制雨水的入渗。因此,对于底层土壤导水率的选择需要根据设施建设目的未确定。

对生物滞留措施的调控性能及设计要素进行深入分析可知,决定其水文调控性能最主要的因素本质上为其“有效容积”,即生物滞留池所能容纳的水量^[27]。增加蓄水层厚度均为雨水滞留有效容积,而增加相同厚度的种植层和填料层由于介质的存在使得有效容积大大减少。但种植层和填料层中的介质虽为无效容积,却是污染物去除的载体。同时需要特别注意的是,蓄水层厚度与生物滞留池各水文要素之间呈非线性关系。因此,在进行生物滞留池设计时,需要结合水文和环境效应系统考虑结构层厚度。增加设施面积比率也将提高有效容积,但当设施表面积比率大于 15% 时,其水文调节能增加效果有限。

本研究是基于 RECARGA 模型模拟的结果,缺乏现场数据来评估模型预测水文性能的真实性,在今后的研究中应加强实际工程的验证。同时,本研究只分析了单项因素对生物滞留池水文性能调节的影响,在今后的研究中应加强多因素综合影响分析。

4 结论

(1)随着土壤饱和导水率的增加,设施溢出的年地表径流量均呈先快速减少,之后减少趋势变缓。整体上,地表径流溢出量均随着底层土壤导水率的增加呈显著的幂函数减少,而雨水滞留量随土壤导水率的增加呈显著的对数函数增加。底层土壤导水率是设施水文性能发挥的限制因素。

(2)从设施溢出的地表径流量随着设施面积比的增加先快速减少而后趋于平稳,其转折点位于 0.15。设施入渗补给量和雨水滞留量均随着设施面积比率的增加而先快速增加,而后趋于平稳。整体上,地表径流溢流量与设施表面比率有着良好的对数函数关系,雨水滞留量和入渗补给量与设施面积比率有着显著的对数函数关系。

(3)年降雨滞留量与蓄水层深度呈显著的幂函数增加关系,而与种植层和填料层深度呈良好的线性关系。综合考虑设施排水因素,蓄水深度不宜大于 15 cm。

参考文献:

- [1] 熊立华,闫磊,李凌琪,等.变化环境对城市暴雨及排水系统影响研究进展[J].水科学进展,2017,28(6):930-942.
- [2] 梅超,刘家宏,王浩,等.城市设计暴雨研究综述[J].科学通报,2017,62(33):3873-3884.
- [3] 车伍,赵杨,李俊奇,等.海绵城市建设指南解读之基本概念与综合目标[J].中国给水排水,2015,31(8):1-5.
- [4] Liu H, Jia Y W, Niu C W. "Sponge city" concept helps solve China's urban water problems [J]. Environmental Earth Sciences, 2017,76(14):473-478.
- [5] Davis A P, Hunt W F, Traver R G et al. Bioretention technology: Overview of current practice and future needs [J]. Journal of Environmental Engineering, 2009, 135(3):109-117.
- [6] 蒋春博,李家科,马越,等.雨水花园对实际降雨径流的调控效果研究[J].水土保持学报,2018,32(4):122-127.
- [7] Trowsdale S A, Simcock R. Urban stormwater treatment using bioretention [J]. Journal of Hydrology, 2011,397(3/4):167-174.
- [8] Coustumer S L, Fletcher T D, Deletic A, et al. Hydraulic performance of biofilter systems for stormwater management: Influences of design and operation [J]. Journal of Hydrology, 2009,376(1):16-23.
- [9] Li H, Sharkey L J, Asce M, et al. Mitigation of impervious surface hydrology using bioretention in North Carolina and Maryland [J]. Journal of Hydrologic Engineering, 2009,14(4):407-415.
- [10] 唐双成,罗纨,贾忠华,等.西安市雨水花园蓄渗雨水径流的试验研究[J].水土保持学报,2012,26(6):75-79, 84.
- [11] 高建平,潘俊奎,谢义昌.生物滞留带结构层参数对道路径流滞蓄效应影响[J].水科学进展,2017,28(5):702-711.
- [12] 宫曼莉,左俊杰,任心欣,等.透水路面—生物滞留池组合道路的城市面源污染控制效果评估[J].环境科学,2018,39(9):4096-4104.
- [13] 李立青,胡楠,刘雨情,等.3种生物滞留设计对城市地表径流溶解性氮的去除作用[J].环境科学,2017,38(5):1881-1888.
- [14] 李鹏,李家科,林培娟,等.生物滞留槽对城市路面径流水质处理效果的试验研究[J].水力发电学报,2016,35(8):72-79.
- [15] 李亚娇,徐毓江,李家科.低影响开发单项设施模拟模型研究与应用进展[J].水资源与水工程学报,2017,28(5):135-141.
- [16] Brown R A, Skaggs R W, Iii W F H. Calibration and validation of DRAINMOD to model bioretention hydrology [J]. Journal of Hydrology, 2013,486:430-442.
- [17] Li J, Zhao R S, Li Y J, et al. Modeling the effects of parameter optimization on three bioretention tanks using the HYDRUS-1D model [J]. Journal of Environmental Management, 2018,217:38-46.
- [18] 李亚娇,徐毓江,李家科.低影响开发单项设施模拟模型研究与应用进展[J].水资源与水工程学报,2017,28(5):135-141.
- [19] 李家科,刘增超,黄宁俊,等.低影响开发(LID)生物滞留技术研究进展[J].干旱区研究,2014,31(3):431-439.
- [20] 曾健,费良军,裴青宝.土壤容重对红壤水分垂直入渗特性的影响[J].排灌机械工程学报,2017,35(12):1081-1087.
- [21] 康金林,杨洁,刘窑军,等.初始含水率及容重影响下红壤水分入渗规律[J].水土保持学报,2016,30(1):122-126.
- [22] Jayasooriya V M, Ng A W M. Tools for modeling of stormwater management and economics of green infrastructure practices: A review [J]. Water Air & Soil Pollution, 2014,225(8):2055-2061.
- [23] Boancă P, Dumitraș A, Luca L, et al. Analysing bioretention hydraulics and runoff retention through numerical modelling using RECARGA: A case study in a Romanian urban area [J]. Polish Journal of Environmental Studies, 2018,27(5):1965-1973.
- [24] 中华人民共和国住房和城乡建设部.海绵城市建设技术指南:低影响开发雨水系统构建(试行)[M].北京:中国建筑工业出版社,2015.
- [25] 梁小光,魏忠庆,上官海东,等.海绵城市建设中生物滞留设施排空时间研究[J].给水排水,2018,44(11):26-30.
- [26] 舒乔生,谢立亚.土壤水力特性的空间尺度效应研究进展[J].土壤,2010,42(4):513-518.
- [27] 孙艳伟, Pomeroy C A, 吕素冰,等.基于不同重现期降水的 LID 措施水文调控性能研究[J].农业机械学报,2016,47(6):178-186.