DOI: 10. 3880/j. issn. 1004 - 6933. 2020. 05. 007

基于 InfoWorks_ICM 模型的山地城市老旧 建筑小区海绵化改造方案设计及评估

袁绍春^{1,2},王怀鋆^{1,2},吕 波²,刘 杰²

- (1. 重庆交通大学水利水运工程教育部重点实验室,重庆 400074;
 - 2. 重庆市海绵城市建设工程技术研究中心,重庆 400020)

摘要:为解决山地城市老旧建筑小区内涝积水问题,以重庆市万州区某老旧建筑小区海绵化改造为例,基于 InfoWorks_ICM 模型,提出一套海绵化改造方案和效能评估的方法。采用万州区典型年实测 5 min 降水数据序列对改造前后的年径流总量控制率和年径流 SS 污染负荷削减率进行模拟分析,采用芝加哥雨型 2h 设计暴雨过程线分别对改造前后 1 年一遇、3 年一遇、5 年一遇、10 年一遇、30 年一遇、50 年一遇暴雨过程进行内涝积水风险模拟分析,结果表明,改造方案满足规划指标要求,能够显著改善小区内涝积水问题。

关键词:山地城市;老旧建筑小区;海绵化改造;InfoWorks_ICM模型;内涝积水风险;雨洪模型中图分类号:TV121⁺.11;TU992 文献标志码:A 文章编号:1004-6933(2020)05-0043-07

Design and evaluation of sponge city reconstruction scheme for old building district in mountainous city based on InfoWorks_ICM model // YUAN Shaochun^{1,2}, WANG Huaijun^{1,2}, LYU Bo², LIU Jie² (1. Key Laboratory of Hydraulic and Waterway Engineering of the Ministry of Education, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China; 2. Engineering Research Center for Sponge City Construction of Chongqing, Chongqing 400020, China)

Abstract: To solve the problem of waterlogging and ponding in the old building district of Mountainous City, taking the sponge city reconstruction of an old building district in Wanzhou District of Chongqing City as an example, a sponge city reconstruction scheme and efficiency evaluation method based on Infoworks_ICM model was proposed. The 5-minute rainfall data series measured in typical years in Wanzhou District of Chongqing City were used to simulate and analyze the total annual runoff control rate and the reduction rate of SS pollution load before and after the reconstruction. The risk of waterlogging and ponding during the rainstorm process of 1 a, 3 a, 5 a, 10 a, 30 a and 50 a before and after the modification is simulated and analyzed by using 2-hour long rainstorm process line of the K. C method. The results showed that the reconstruction scheme met the requirements of planning indexes and can significantly improve the situation of waterlogging and ponding in the old building district.

Key words: mountainous city; old building district; sponge city reconstruction; InfoWorks_ICM model; risk of waterlogging and ponding; rain-flood model

在海绵城市系统构建过程中,雨洪模型已成为不可或缺的设计优化和效果评估工具[1]。InfoWorks_ICM模型的应用更是日趋广泛,它在单个模拟引擎里整合了城市一维(1D)排水管网模型和城市流域二维(2D)洪涝淹没分析模型,相对其他模型而言,其建模便捷、精度更高。王锋[2]借助 ICM模型对深圳市南坪快速路海绵改造项目进行量化评价,发现改造方案能较好地达到海绵城市建设的目标效果。孙晓光[3]利用 ICM 模型对娄底水洋新区

海绵城市规划进行评估,指出建立雨水排水模型评估目标地块内海绵化改造效果具有现实意义,可为项目决策提供依据。马旭^[4]基于 ICM 模型建立了北京市马草河流域精细化雨洪模型,量化模拟马草河流域内涝情况,发现海绵改造能有效控制流域内涝问题。黄子千等^[5]基于 ICM 模型研究了不同重现期和雨峰位置的设计降雨对济南市少年路积水的影响,验证了模拟积水过程和深度与区域水位站的实际观测情况较为吻合,模型具有良好的精度和可靠性。

上述基于 InfoWorks ICM 模型的海绵城市建设 研究主要集中于中、东部的城市,且偏重流域范围的 海绵城市建设雨洪过程的整体模拟,鲜有对西部山 地城市建筑小区,尤其是单个地块老旧建筑小区海 绵化改造方案及效果评估的模拟研究。山地城市建 筑小区是西部地区城镇人居环境的重要组成部 分[6],是城市建设与经济发展的主要载体。建筑小 区用地一般占城市建设用地的 40%,其产生的雨水 径流约占城市径流总量的 50% [7]。老旧建筑小区 通常面临硬化率高、排水标准低、用地紧张等问题。 对老旧建筑小区进行海绵化改造、提高雨水径流控 制率是海绵城市建设的重要内容之一[8-9]。山地城 市地形独特,对暴雨响应更为强烈,海绵城市建设具 有特殊性。本文聚焦山地城市老旧建筑小区,以重 庆市万州区海绵试点区内某老旧建筑小区海绵化改 造为例,通过现状分析,按照因地制宜的原则,开展 海绵化改造方案研究。结合 InfoWorks_ICM 模型模 拟改造前后典型年降雨情景下小区径流变化过程, 模拟不同重现期设计暴雨强度下改造前后内涝积水 情况,并对改造效果进行评估,以期为山地城市老旧 建筑小区海绵化改造提供借鉴。

1 山地城市老旧建筑小区海绵化改造特点

山地城市建筑小区具有地势陡、坡度大、硬化程度高、土层薄、土壤渗透能力差、暴雨产流迅速、冲刷效应明显、小雨易积水、大雨易内涝等特征。同时,因老旧小区建设年代久远,普遍存在环境条件差、配套设施落后、排水系统设计暴雨重现期不足 1 a、管网溢流频繁、外排雨水污染负荷高等现象。山地城市老旧小区海绵化改造本底条件差,地形与空间限制多,布置大型多样的组合 LID 设施、构建流域尺度的海绵排水系统难度大。通过布置多数量的小体量LID 设施,因地制宜地布置小型梯级 LID 设施,把小区地表铺装更新、景观绿化升级打造与小区雨水径流的源头控制有机结合起来,形成小区尺度的山地城市立体空间海绵系统。

2 改造方案设计

2.1 现状条件

改造小区为老旧建筑小区,位于重庆市万州区,总建设用地面积 13 973. 67 m²。区域多年平均降水量 1 184 mm,年降水量波动小,最大降水量集中在夏季(6—8 月),雨峰靠前、雨型急促、降雨历时较短,约占全年降水量的 43%。小区整体地势南高北低、西高东低;最高点高程 204. 46 m、最低点高程 198. 18 m。地形分 3 个台级,地面高程由西向东逐

级递减,各台级平均高程分别为 $203.42 \,\mathrm{m}\ 201.13 \,\mathrm{m}\ 199.66 \,\mathrm{m}$,地面坡度 $3.5\% \sim 7.0\%$ 。现状下垫面包括硬质屋面、硬质铺装、绿地,分别占比 $35.79\%\ 52.85\%\ 11.36\%$,综合径流系数 0.848。现状雨水通过管径 $200\sim300\,\mathrm{mm}$ 的雨水管和部分断面尺寸 $200\,\mathrm{mm}\times350\,\mathrm{mm}$ 的雨水沟排入市政雨水管网,最终排至龙宝河。

2.2 问题分析

小区主要存在以下 4 点问题:①下垫面硬化率高,坡度陡,暴雨地表径流量大,小区东侧存在较大内涝积水风险;②雨水系统过流能力不足,排水不畅,井管溢流现象频发;③小区绿地及开敞空间局促,绿地率仅 11.36%,大型渗透性 LID 设施不适用;④小区现状屋面承重、排水条件差,不宜采用绿色屋顶。

2.3 改造方案

根据《万州区城市规划区海绵城市专项规划(2016—2020年)》,通过指标分解,确定该小区海绵化改造指标:实现年径流总量控制率 53.15%,年径流污染物去除率(以 SS 计)39.86%。改造以降低小区雨水径流外排总量,削减暴雨峰值流量,减少老城区合流制管网溢流频次,缓解管网排水压力,解决内涝、积水等问题和改善小区环境为导向,融入海绵元素,以生态化改造代替传统的大拆大建,将海绵化改造与小区有机更新、功能提升相结合[7,10-11]。

2.3.1 雨水管控分区和地面高程分级

在自然汇水分区基础上,结合雨水系统、建设用地和道路布局,将小区划分为12个雨水管控分区(图1),用于海绵指标分解及雨水分区控制。结合山地城市建筑小区地形情况,将小区划分为4个高程系(图2),A高程系代表屋面高程、B高程系代表平均高程203.42m地块、C高程系代表平均高程201.13mm地块、D高程系代表平均高程199.66m地块,用于LID设施布局指引,实现分层级雨水源头控制,尽可能削减分区间大高差地形造成的客水影响。

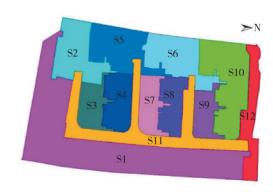


图 1 雨水管控分区

Fig. 1 Service zone of rainwater control

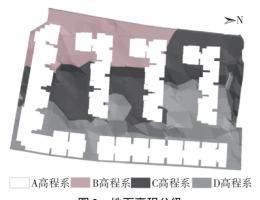


图 2 地面高程分级

Fig. 2 Ground elevation classification

2.3.2 设施布置

研究表明,在海绵城市建设中采用多种措施结合、注重竖向设计的方式比大量建设单一设施更为有效^[12]。结合小区现有建设条件,本方案在小区 A 高程系,布置 11 座小型雨水花台、5 座现状花台原位改造为雨水花台;B 高程系人行道改为透水砖铺装、北侧绿地增设 1 座雨水花园处理路面雨水;C 高程系布置 3 条生物滞留带对停车坝雨水进行控制;D 高程系主车道路面改造为透水沥青削弱地表径流(图 3)。通过分区、分层级进行 LID 设施布置,实现雨水源头滞蓄和净化。各分区具体 LID 设施设计见表 1。

3 改造方案效能评估模型

3.1 模型建立

InfoWorks_ICM 模型整合了 1D 排水系统和 2D 地面高程模型,1D 用于评估管网过流能力、提供溢流位置及溢流水量,2D 用来模拟地面积水的深度、流速和流向。1D 系统的节点出现溢流工况时,模型

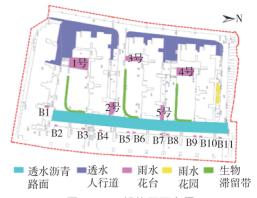


图 3 LID 设施平面布置 Fig. 3 LID facility layout

启动堰流公式,将节点溢出水流与 2D 地面网格化高程模型进行关联,实现 1D/2D 耦合计算。

3.1.1 LID 设施模型

LID 设施模型的建立是通过对各子集水区的属性及其对应的参数表格设置实现的,把海绵化改造方案确定的 LID 设施类型与模型中创建的子集水区对应,对 LID 设施面积及其服务面积进行赋值,再对各子集水区的产流表面类型、比例进行设置。子集水区产流表面分不透水表面、透水表面和绿地3种类型,不透水表面产流模型采用固定径流系数模型(fixed PR model),透水表面和绿地产流模型采用霍顿渗透模型(Horton infiltration model);汇流模型采用 SWMM 模型(非线性水库法)。管道计算采用圣维南方程组。

3.1.2 1D 排水模型

小区实测雨水系统的井编号、井坐标、井底高程、地面高程、管段编号、管径、上下游管底标高等属性数据,经 ArcGIS 软件处理成 shp 格式后,导入 InfoWorks_ICM 模型,在模型中,把研究区域排水系

表 1 LID 设施设计
Table 1 LID facility design

| 雨水管控分区 | LID 设施 | LID 设施面积/m² | 服务面积/m² | 改造项目 |
|--------|-------------------|--------------------|----------------------|-----------|
| S1 | B1~B11 雨水花台 | 22. 00 | 1 060. 13 | 空地 |
| S2 | 1 号雨水花台 1 号透水砖 | 103. 13 186. 05 | 707. 81 186. 05 | 花台 人行道 |
| S3 | 1号生物滞留带 | 42. 72 | 543. 50 | 空地 |
| S4 | 2 号雨水花台 | 36. 22 | 461. 73 | 花台 |
| S5 | 3 号雨水花台 3 号透水砖 | 37. 68 218. 21 | 693. 19 218. 21 | 花台 人行道 |
| S6 | 4 号雨水花台 4 号透水砖 | 63. 57 281. 59 | 617. 14 281. 59 | 花台 人行道 |
| S7 | 2 号生物滞留带 | 56. 04 | 564. 22 | 空地 |
| S8 | 5 号雨水花台 | 25. 78 | 449. 798 9 | 花台 |
| S9 | 3 号生物滞留带 | 42. 00 | 509. 73 | 空地 |
| S10 | 雨水花园 透水砖 | 74. 36 149. 65 | 1 276. 00 149. 65 | 绿地 人行道 |
| S11 | 透水沥青路面 | 899. 08 | 899. 08 | 车行道 |
| S12 | 无 | | | |

统概化为 12 个子集水区,36 条雨水管道,37 座雨水井。

3.1.3 2D 积水模型

小区实测地形高程数据在 ArcGIS 软件中筛选、插值处理后,导入 ICM 模型,生成地面高程模型 (TIN 模型),创建 2D 模拟区间,屋面设为空白区,对模拟区间进行网格化(图4),生成1136 个网格三角形,216 个网格元素(最大网格元素面积 100 m²,最小25 m²)。再将模型网络中节点的洪水类型由"Stored"设为"2D",实现1D/2D 耦合。

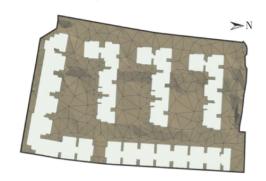


图 4 地面高程网格化

Fig. 4 Gridding of ground elevation

3.2 模型参数的选择及率定

模型参数的选择主要依据模型手册及相关文献^[13-15]。因缺乏模型率定所需的实测数据,模型参数率定选用基于径流系数的城市降雨径流模型参数校准方法。刘兴坡^[16]对此方法进行过研究,证明其能够达到模型参数率定要求。采用万州区 2013—2015 年实测降雨数据,模拟小区降雨及径流情况,获得径流系数模拟值,模拟结果见表 2。

表 2 小区模拟径流总量及综合径流系数

Table 2 Total simulated runoff and comprehensive runoff coefficient of the area

| 年份 | 降水量/ mm | 降水总量/ m ³ | 模拟径流 总量/m³ | 径流系数 模拟值 |
|------|------------|-------------------------|---------------|-------------|
| 2013 | 1 029. 3 | 14 383. 44 | 11 736. 79 | 0.816 |
| 2014 | 1 452. 1 | 20 291. 65 | 16 638. 15 | 0.820 |
| 2015 | 1 448. 7 | 20 244. 13 | 16 647. 21 | 0.822 |

模拟结果表明,小区径流系数模拟平均值为 0.819,与按分类下垫面面积加权平均求得的经验综合径流系数值 0.848 接近,表明模型参数取值较符合小区实际情况。具体参数取值如下:LID 设施模型构建中,雨水花台、生物滞留带和雨水花园的护壁高度设置为 200 mm;设施表面粗糙度(曼宁 n 值) 0.05;设施表面坡度分别取 0.02、0.03、0.015。产汇流和设施土壤模型参数取值见表 3~5。

3.3 设计降雨曲线

雨型主要用于反映暴雨强度随时间的变化过程,雨型不同,得到的降雨径流结果也有很大差异。凯弗(Keifer)和丘(Chu)基于暴雨强度公式提出芝加哥雨型(简称 K. C 法),短历时雨洪模拟一般采用 K. C 法 2 h 设计暴雨雨型[17-18]。本研究选用万州区典型年 2009 年(单年年降雨总量、累计降雨频率曲线与多年的相近程度均较高,且与多年年均降水量相对误差较小的年份)实测 5 min 降雨数据序列合成典型年降雨曲线(图 5),对小区改造前后年径流总量控制率和年径流污染去除率进行模拟评估。采用 K. C 法,基于万州区 2017 年修订暴雨强度公式,综合雨峰位置系数 r 取 0. 35,合成 1 年一遇、3 年一

表 3 ICM 产流表面参数取值

Table 3 ICM runoff surface parameters

| 产流表面 | 表面类型 | 产流模型 | SCS 深度/m | Horton 初渗率/ (mm・h ⁻¹) | Horton 稳渗率/ (mm・h ⁻¹) | Horton 衰减率/ h ^{- 1} | Horton 恢复率/ h ⁻¹ |
|-------|------|--------|----------|--------------------------------------|--------------------------------------|---------------------------------|--------------------------------|
| 不透水路面 | 不透水 | fixed | 0. 005 | | | | |
| 屋面 | 不透水 | fixed | 0.005 | | | | |
| 透水铺装 | 透水 | Horton | | 22.00 | 0.420 | 5. 300 | 96.00 |
| 绿地 | 透水 | Horton | | 23.00 | 6. 700 | 4. 210 | 96.00 |

表 4 ICM 汇流模型参数取值

Table 4 Parameter value of ICM concentration model

| 汇流表面 | 表面类型 | 汇流模型 | 汇流类型 | 汇流参数 | 径流类型 | 初损类型 | 初期损失值/m |
|----------|------|------|------|--------|--------|------|----------|
| 不透水路面 | 不透水 | SWMM | Abs | 0. 010 | fixed | Abs | 0.000071 |
| 屋面 | 不透水 | SWMM | Abs | 0. 015 | fixed | Abs | 0.000071 |
| 透水铺装 | 透水 | SWMM | Abs | 0.030 | Horton | Abs | 0.0025 |
| 绿地 | 透水 | SWMM | Abs | 0. 200 | Horton | Abs | 0. 002 5 |

表 5 LID 设施土壤参数取值

Table 5 Soil parameter value of lid facilities

| 土壤类别 | 孔隙度 | 含水率 | 萎蔫含水量 | 毛细吸力/mm | 蓄水层厚度/mm | 蓄水层孔隙率 | 渗透率/(mm・h ⁻¹) | 入流系数/(mm⋅h ⁻¹) |
|------|-------|--------|--------|---------|----------|--------|---------------------------|----------------------------|
| 沙壤土 | 0.463 | 0. 232 | 0. 116 | 88. 9 | 300 | 0. 5 | 36 | 2. 0 |

遇、5 年一遇、10 年一遇、30 年一遇、50 年一遇 2h 暴雨过程线(图 6),对小区改造前后内涝积水风险进行模拟评估。

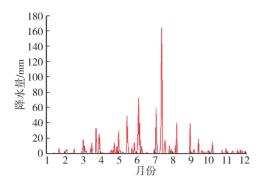


图 5 典型年实测 5 min 降雨曲线

Fig. 5 5 min rainfall curve measured in typical years

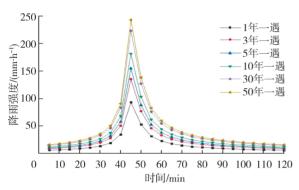


图 6 设计 2 h 历时 K. C 雨型曲线

Fig. 6 Design of 2 h duration K. C rain pattern curve

4 模拟结果与效能评估

4.1 改造指标评估

在基于 InfoWorks_ICM 软件建立的小区海绵系统模型网络中,采用万州区典型年 5 min 降雨曲线,进行一年的连续降雨模拟,评估全年雨水径流、蒸发、下渗等情况。模拟结果表明:改造后小区典型年峰值降雨径流量削减明显(图 7);小区年降水量16 544.83 m³,改造前年径流总量 13 384.7 m³,改造后年径流总量6358.7 m³;改造后年径流总量控制率

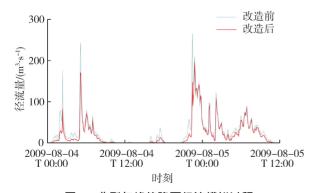
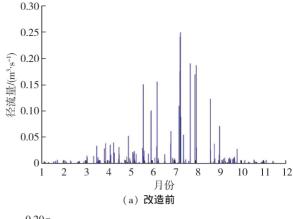


图 7 典型年峰值降雨径流模拟过程 Fig. 7 Simulation process of typical annual peak rainfall runoff

由改造前的 19. 10% 提升至 61. 57%, 满足规划指标(图 8)。



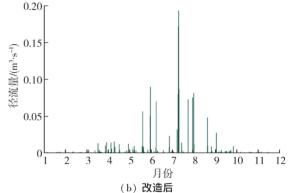


图 8 改造前后典型年径流模拟结果对比

Fig. 8 Comparison of simulation results of typical annual runoff before and after reconstruction

SS 和 COD 是地表径流中主要污染物,且 SS 通常与 COD、氮、磷等指标具有一定相关性,本设计采用 SS 作为径流污染物控制指标[19-20]。根据 LID 设施对 SS 的平均去除率和对应的年径流总量控制率的乘积计算年径流污染物负荷削减率。参考《海绵城市建设技术指南——低影响开发雨水系统构建(试行)》,透水沥青 SS 去除率范围 80% ~90%,本方案取 80%;雨水花园、雨水花台和生物滞留带属于复杂型生物滞留设施, SS 去除率范围 70% ~95%,本方案取 85%;普通屋面和硬质铺装 SS 去除忽略不计;绿地 SS 去除率取 73% [21]。计算结果表明,改造后年径流污染物负荷削减率由改造前的7.12%提升至49.69%,满足规划指标。

4.2 不同重现期下内涝积水评估

在基于 InfoWorks_ICM 软件构建的 1D/2D 耦合模型,以设计 1 年一遇、3 年一遇、5 年一遇、10 年一遇、30 年一遇、50 年一遇 2h 历时 K. C 降雨过程线作为降雨事件,对小区改造前后内涝积水情况进行模拟和评估。

4.2.1 海绵化改造前

1年一遇降雨强度下,小区雨水系统过流能力 严重不足,一半以上的雨水管道处于超负荷状态,2 座雨水井发生溢流,溢流深度 $0 \sim 0.1 \,\mathrm{m}$,小区东南侧出现小面积内涝积水,积水深度小于 $0.2 \,\mathrm{m}$; 3 年一遇、5 年一遇降雨强度下,处于超负荷状态的雨水管道比例上升至 2/3,共 4 座雨水井发生溢流,溢流深度介于 $0.1 \sim 0.2 \,\mathrm{m}$,东南侧内涝积水面积大幅增加,大部分积水深度超过 $0.2 \,\mathrm{m}$; 10 年一遇、30 年一遇、50 年一遇降雨强度下,处于超负荷状态的雨水管道比例达到 3/4,小区东侧的雨水井几乎全部发生不同程度溢流,东南侧内涝积水面积急剧增加,大部分点位积水深度超过 $0.3 \,\mathrm{m}$ (图 $9(a) \sim (f)$)。

● 地面积水深度/m ◆ 节点溢流深度/m ● 管渠超负荷状态 A 0~0.1 **▲** 0.1~0.2 <1(非满流)</p> - 1~2(I 型满流) I 型满流:水力坡度<管道坡度 ≥0.2 0.1~0.2 ■≥2(Ⅱ型满流) $\triangle 0.2 \sim 0.3$ **▲** ≥ 0.3 Ⅱ型满流:水力坡度>管道坡度 (a) 1 年一遇降雨模拟(改造前) (b) 3 年一遇降雨模拟(改造前) (c)5年一遇降雨模拟(改造前) (d) 10 年一遇降雨模拟(改造前) (e) 30 年一遇降雨模拟(改造前) (f) 50 年一遇降雨模拟(改造前) (g) 1 年一遇降雨模拟(改造后) (h) 3年一遇降雨模拟(改造后) (i) 5年一遇降雨模拟(改造后) (j) 10 年一遇降雨模拟(改造后) (k) 30 年一遇降雨模拟(改造后) (1) 50 年一遇降雨模拟(改造后) 图 9 海绵改造前后内涝积水模拟结果

4.2.2 海绵化改造后

1年一遇降雨强度下, 小区约 1/4 雨水管道仍

存在超负荷状态,但程度较改造前明显减弱,溢流和

内涝积水现象未见发生:3年一遇降雨强度下,雨水

管道超负荷状态略有增加,仅1座雨水井开始出现

轻微溢流,小区地面未出现内涝积水现象:5 年一遇

降雨强度下,仍仅有1座雨水井发生溢流,小区地面

开始出现小面积内涝积水现象,局部最大积水深度

0.2 m;10 年一遇降雨强度下,小区发生溢流的雨水

井增加至2座,地面内涝积水现象变化不大;30年

Fig. 9 Simulation results of waterlogging and ponding before and after sponge reconstruction

一遇、50年一遇降雨强度下,小区雨水管道超负荷状态有所增加,小区发生溢流的雨水井增加至 3 座,但最大溢流深度均未超过 0.1 m,地面内涝积水现象增加较为明显,局部最大内涝积水深度超过 0.3 m(图 $9(g) \sim (1)$)。

5 结 论

- **a.** 改造后小区年径流总量控制率和年径流 SS 负荷削减率均达到规划指标要求。
- b. 改造后小区内涝积水现象改善显著,低暴雨重现期雨水减控效果尤为明显。内涝积水暴雨重现期由改造前不足1年一遇提高至5年一遇,大于5年一遇暴雨重现期小区仍会发生轻微内涝积水,但内涝积水面积已大幅缩减至改造前的1/5以下,暴雨重现期与内涝积水程度具有显著相关性。
- c. 基于 InfoWorks_ICM 构建的 1D/2D 耦合小区排水模型能够准确地模拟山地城市老旧建筑小区全年雨水径流、蒸发、下渗等过程,并对改造后不同设计暴雨重现期下内涝积水情况进行直观有效的评估。

参考文献:

- [1] 黄绵松,杨少雄,齐文超,等. 固原海绵城市内涝削减效 果数值模拟[J]. 水资源保护,2019,35(5):13-18. (HUANG Miansong, YANG Shaoxiong, QI Wenchao, et al. Numerical simulation of urban waterlogging reduction effect in Guyuan sponge city [J]. Water Resources Protection,2019,35(5):13-18. (in Chinese))
- [2] 王锋. 基于雨洪模型的海绵城市评价方法的研究[D]. 北京:清华大学,2017.
- [3] 孔晓光. 基于 InfoWorks_ICM 模型娄底水洋新区海绵 城市规划评估研究[D]. 长沙:湖南大学,2018.
- [4] 马旭. 基于 InfoWorks_ICM 模型典型城市内涝模拟及海绵减控效果研究[D]. 西安:西安理工大学,2019.
- [5] 黄子千,庞博,任梅芳,等. 基于 InfoWorks_ICM 的济南市少年路暴雨内涝模拟研究[J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 2019, 55(1): 160-166. (HUANG Ziqian, PANG Bo, REN Meifang, et al. Simulation of rainstorm and waterlogging in Shaonian road of Jinan City based on infoworks ICM[J]. Journal of Beijing Normal University(Natural Science), 2019, 55(1): 160-166. (in Chinese))
- [6] 李玲. 以某小学为例的公建类小区海绵改造工程研究 [J]. 中国给水排水,2017,33(9):118-122. (LI Ling. Sponge retrofit design of public infrastructure: case study of a primary school[J]. China Water & Wastewater,2017, 33(9):118-122. (in Chinese))
- [7] 王建龙,涂楠楠,席广朋,等. 已建小区海绵化改造途径

- 探讨[J]. 中国给水排水. 2017, 33(18):1-8. (WANG Jianlong, TU Nannan, XI Guangpeng, et al. Discussion on the way of sponge transfor-mation in the built community [J]. China Water & Wastewater, 2017, 33(21):1-8. (in Chinese))
- [8] 王春华,方适明,陈学良. 基于海绵城市建设理念的旧小区排涝治理实践[J]. 给水排水,2017,53(3):45-47. (WANG Chunhua, FANG Shiminng, CHEN Xueliang. Practice of drainage and management of old community based on the concept of sponge city construction [J]. Water & Wastewater, 2017,53(3):45-47. (in Chinese))
- [9] 陈垚,何智伟,张琦,等.基于水文控制目标的中小尺度 海绵城市改造方案评价[J]. 水资源保护,2019,35 (6):1-8. (CHEN Yao, HE Zhiwei, ZHANG Qi, et al. Evaluation of reconstruction schemes for small- and medium-scale sponge city based on hydrological control target[J]. Water Resources Protection,2019,35(6):1-8. (in Chinese))
- [10] 方帅,刘旭为,白永强,等. 建筑与小区低影响开发的设计思路与计算分析[J]. 中国给水排水,2017,33(8): 60-63. (FANG Shuai, LIU Xuwei, BAI Yongqiang, et al. Design method and calculation analysis of low impact development of building and community[J]. China Water & Wastewater,2017,33(8):60-63. (in Chinese))
- [11] 朱寒松,董增川,曲兆松,等.基于 SWMM 模型的城市 工业园区低影响开发效果模拟与评估[J]. 水资源保护, 2019, 35 (2): 32-36. (ZHU Hansong, DONG Zengchuan, QU Zhaosong, et al. Simulation and evaluation of low impact development effect of urban industrial park based on SWMM[J]. Water Resources Protection, 2019, 35(2):32-36. (in Chinese))
- [12] 向晨瑶,刘家宏,邵薇薇,等.海绵小区削峰减洪效率对降雨特征的响应[J].水利水电技术,2017,48(6):7-12. (XIANG Chenyao, LIU Jiahong, SHAO Weiwei, et al. Response of peak clipping and flood reduction efficiency to rainfall characteristics in sponge plot[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2017, 48(06):7-12. (in Chinese))
- [13] 黄金良,杜鹏飞,何万谦,等. 城市降雨径流模型的参数 局部灵敏度分析[J]. 中国环境科学,2007,27(4):549-553. (HUANG Jinliang, DU Pengfei, HE Wanqian, et al. Local sensitivity analysis for urban rainfall runoff modelling [J]. China Environmental Science, 2007, 27 (4):549-553. (in Chinese))
- [14] 林杰,黄金良,杜鹏飞,等. 城市降雨径流水文模拟的参数局部灵敏度及其稳定性分析[J]. 环境科学,2010,31 (9):2023-2028. (LIN Jie, HUANG Jinliang, DU Pengfei, et al. Local sensitivity and its stationarity analysis for urban rainfall runoffmodelling[J]. Environmental Science, 2010,31(9):2023-2028. (in Chinese))

(下转第70页)

- WANG Jin, et al. Runoff regime and its effect on river in Tarim River Basin during seventh emergency water supply period[J]. Water Resources Protection, 2011, 27(5):83-87. (in Chinese))
- [21] SCHULMAN E. Dendro climatic changes in semiarid America M. Tucson: University of Arizona Press, 1956.
- [22] 王宏江. 跨流域调水系统水资源综合管理研究[D]. 南京:河海大学,2003.
- [23] 刘普幸,陈发虎,靳立亚,等. 基于胡杨年轮重建黑河下游近 100 年春季径流量[J]. 干旱区地理,2007,30(5): 696-700. (LIU Puxing, CHEN Fahu, JIN Liya, et al. About 100-year reconstruction of spring streamflow based on tree rings in the lower reaches of Heihe River[J]. Arid Land Geography, 2007, 30(5): 696-700. (in Chinese))
- [24] 夏库热·塔依尔,海米提·依米提,麦麦提吐尔逊·艾则孜,等. 基于小波分析的开都河径流变化周期研究[J]. 水土保持研究,2014,21(1):142-146. (SHAKURE Tahir, HAMID Yimit, Mamattursun Eziz, et al. Research on period of annual runoff in Kaidu River based on wavelet analysis[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2014,21(1):142-146. (in Chinese))
- [25] 冯夏清. 基于小波分析的浑河流域径流量周期分析 [J]. 吉林水利, 2015 (3): 39-41. (FENG Xiaqing. Periodic analysis of runoff in the Hun River Basin based

- on wavelet analysis[J]. Jilin Water Resources, 2015(3): 39-41. (in Chinese))
- [26] 刘笑彤,蔡运龙. 基于小波分析的径流特性和影响因素多尺度分析:以通天河为例[J]. 北京大学学报(自然科学版),2014,50(3):549-556. (LIU Xiaotong, CAI Yunlong. Research of runoff's feature and impact factors in multiple dimensions based on wavelet analysis: a case study on Tongtian River[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 2014, 50(3):549-556. (in Chinese))
- [27] 东斌. 浅谈西大桥电站渠首导流堤续建工程的必要性和工程效益[J]. 内蒙古水利,2009(2):128-129. (DONG Bin. Discussion on the necessity and benefit of the construction of the diversion dike at Xidaqiao Hydropower Station[J]. Inner Mongolia Water Resources, 2009(2):128-129. (in Chinese))
- [28] 张瑞波,魏文寿,袁玉江,等. 1396—2005 年天山南坡 阿克苏河流域降水序列重建与分析[J]. 冰川冻土, 2009,31(1):27-33. (ZHANG Ruibo, WEI Wenshou, YUAN Yujiang, et al. A precipitation series of A. D. 1396-2005 in Aksu River Basin on the southern slopes of Tianshan Mount [J]. Journal of Glaciology and Geocryology,2009,31(1):27-33. (in Chinese))

(收稿日期:2019-08-20 编辑:熊水斌)

(上接第49页)

- [15] 宋耘,李琼芳,牛铭媛,等.基于 SWMM 模型的南京典型易涝区暴雨内涝模拟[J].水利水电科技进展,2019,39 (6): 56-61. (SONG Yun, LI Qiongfang, NIU Mingyuan, et al. Rainstorm and waterlogging simulation in typical inundated districts of Nanjing based on SWMM [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2019,39(6):56-61. (in Chinese))
- [16] 刘兴坡. 基于径流系数的城市降雨径流模型参数校准方法[J]. 给水排水,2009,35(11):213-217.(LIU Xingpo. Parameter calibration method for urban rainfall-runoffmodel based on runoff coefficient [J]. Water & Wastewater,2009,35(11):213-217.(in Chinese))
- [17] 朱勇年. 设计暴雨雨型的选用:以杭州市为例[J]. 中国给水排水, 2016, 32(1): 94-96. (ZHU Yongnian. Selection of design rainfallpattern: case of Hangzhou[J]. China Water & Wastewater, 2016, 32(1): 94-96. (in Chinese))
- [18] 黄津辉,王超,范泽华. 天津市设计暴雨雨型的演变 [J]. 水资源保护,2020,36(1):38-43. (HUANG Jinhui, WANG Chao, FAN Zehua. Evolution of design rainfall pattern in Tianjin[J]. Water Resources Protection,2020, 36(1):38-43. (in Chinese))
- [19] 李春林,刘淼,胡远满,等.沈阳市降雨径流初期冲刷效

- 应[J]. 生态学报, 2013, 33 (18): 5952-5961. (LI Chunlin, LIU Miao, HU Yuanman, et al. Analysis of first flush in rainfall runoff in Shenyang urban city[J]. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33 (18): 5952-5961. (in Chinese))
- [20] 张智贤,王俊岭,秦全城,等. 改良型透水铺装对弱透水 土质地区 SS 的去除效果试验[J]. 水资源保护,2019, 35(4):76-79. (ZHANG Zhixian, WANG Junling, QIN Quancheng, et al. Experiment on removal effect of improved permeable pavement on SS in weak permeable soil area[J]. Water Resources Protection, 2019, 35(4): 76-79. (in Chinese))
- [21] 袁溪,李敏. 基于 SWMM 模型的下凹式绿地污染物削减效应分析[J]. 环境科学与技术,2016,39(3):49-55. (YUAN Xi, LI Min. Analysis on reduction effect of different pollutants by sunkengreen space based on SWMM [J]. Environmental Science and Technology, 2016, 39 (3):49-55. (in Chinese))

(收稿日期:2019-11-18 编辑:王 芳)

