

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2020.11.018

基于 SWMM 的海绵改建小区雨水径流调控研究

陈 韬¹, 夏蒙蒙¹, 刘云鹏¹, 车爱伟²

(1. 北京建筑大学 城市雨水系统与水环境教育部重点实验室, 北京 100044; 2. 中国市政工程西北设计研究院有限公司, 甘肃 兰州 730000)

摘 要: 以北京通州某建筑小区海绵改建示范项目为研究对象,利用 SWMM 雨水管理模型,依据降雨径流实测数据率定、校验模型参数,构建了海绵改建小区雨水径流多级调控系统,分析了海绵改造前后以及不同情景下 LID 设施参数、管道参数等对雨水调控能力的影响。结果表明,一级 LID 措施调控后年径流总量控制率可达到 41.51% ~ 57.40%、污染物削减率均在 25% 以上;二级调控雨水管道尺寸最为有效,当排水沟底宽或最大深度增加 60% 时,可保证小区 10 年一遇降雨重现期下无积水现象发生;三级调控蓄水池容积,可以实现小区 3 年一遇降雨重现期下无积水现象发生,同时雨水资源利用率达到 3.93%。

关键词: 海绵城市; SWMM; 建筑小区; 雨水径流调控

中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2020)11-0103-09

Regulation of Stormwater Runoff in Sponge Reconstructed Community Based on SWMM

CHEN Tao¹, XIA Meng-meng¹, LIU Yun-peng¹, CHE Ai-wei²

(1. Key Laboratory of Urban Stormwater System and Water Environment <Ministry of Education>, Beijing University of Civil Engineering and Architecture, Beijing 100044, China; 2. CSCEC AECOM Consultants Co. Ltd., Lanzhou 730000, China)

Abstract: A multi-level regulation system of stormwater runoff in a sponge reconstruction demonstration project of a residential community of Tongzhou, Beijing was established by SWMM software. The model parameters were calibrated and verified by measured rainfall data. The influence of LID facilities and pipeline parameters on stormwater regulation capability before and after sponge reconstruction at different scenarios was analyzed. After the first-level regulation, annual runoff control rate could reach 41.51% - 57.40%, and the reduction rate of pollutants was more than 25%. The secondary level regulation of storm pipeline size was the most effective. No ponding took place in the area during the rainfall with 10-year return period when the bottom width or the maximum depth of drainage ditch increased by 60%. The third level regulation of reservoir volume could realize no ponding in the community during the rainfall with 3-year return period, and the utilization rate of rainwater resource could reach 3.93%.

Key words: sponge city; SWMM; residential community; regulation of stormwater runoff

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2017ZX07103-002)

国务院办公厅印发的《关于推进海绵城市建设的指导意见》明确指出“从 2015 年起,城市新区要全面落实海绵城市建设要求”“老旧小区有机更新”。2019 年 6 月国务院常务会议强调要加快改造城镇老旧小区。海绵化改造作为老旧小区更新的重要组成部分,对于缓解小区内涝、改善城市生态环境等方面具有重要作用^[1-2]。但改造过程中往往存在基础设施落后、用地功能混杂、空间条件限制等问题^[3-4],改造难度较大。目前,对雨水管理的研究多关注于评估海绵改建后 LID 设施的效果^[5-8],对整体分析建筑小区内雨水调控方法的研究较少。

笔者以北京通州海绵改建小区为研究对象,基于 SWMM 模型,利用雨水流出小区之前的全路径构建海绵改建小区雨水径流多级调控系统。在不同降雨情景下,通过调整 LID 设施促渗减排参数、管网系统输水能力参数、蓄水池参数,探究多级调控对海绵改建小区雨水调控效果的影响,以期为建筑小区类海绵改造选择科学有效的调控手段提供参考。

1 模型构建

1.1 研究小区基础条件

研究小区位于北京通州,属暖温带大陆性半湿润季风气候,夏季炎热多雨,冬季干燥寒冷,年均气温为 13.4℃,年均降水量为 526 mm。小区整体地势北高南低,相对平坦,以砂土壤为主,地下水位为 6.5~8.7 m。小区建于 2001 年,包含 9 栋住宅建筑、2 栋商业建筑和 1 栋配套教育建筑。小区绿化率为 21.9%,建筑密度为 34.3%,是集住宅、教育、商业为一体的大型社区,紧邻北运河和潮白河。

1.2 研究区域概化

研究小区总面积为 49 380.44 m²,其中,建筑物占地面积为 17 098.70 m²、混凝土以及沥青路面为 12 819.20 m²,不透水面积为 29 917.90 m²,占总面积的 60.59%。以小区路网、地形及房屋的分水岭为基础,结合 U 型排水沟的布置,将研究区域概化为 14 个子汇水区,排水口 1 个。选择 2 号楼西侧垃

圾桶旁的雨水算子作为雨水监测点,进行流量计安装及雨水取样试验。研究小区 LID 布置和 SWMM 概化系统如图 1 所示。

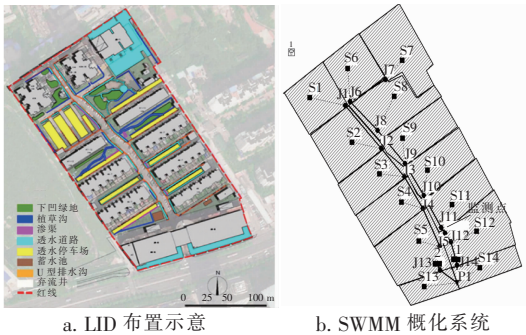


图 1 研究小区 LID 布置和 SWMM 概化系统

Fig. 1 LID layout and SWMM generalized system of study area

1.3 模型参数选择

在计算子汇水区产流过程中,由于研究区域范围较小,故采用 Horton 模型模拟小区内雨水下渗过程。小区土壤下渗能力采用 SK-500 型试坑双环注水试验装置测量,依据达西定律求得小区土壤饱和和导水率为 1.67×10^{-5} m/s,属于土壤水文分类中的 A 类土,具有良好的入渗能力。实测 Horton 方程中最大入渗速率为 100 mm/h,最小入渗速率为 10 mm/h,衰减系数取 4.0 h^{-1} 。SWMM 模型采用非线性水库法模拟汇流过程,利用公式推理法初选小区透水区和不透水区的曼宁系数分别为 0.15 和 0.017、透水区和不透水区的填洼量分别为 12 和 2 mm、无洼不透水区所占的百分比为 70%。流量演算采用运动波进行模拟,水质的冲刷和累积均选取指数模型模拟。实测建筑小区 1 h 内天然雨水中 COD 浓度为 $(46 \pm 13) \text{ mg/L}$ 、TN 为 $(2.55 \pm 0.63) \text{ mg/L}$ 、TP 为 $(0.77 \pm 0.12) \text{ mg/L}$ 。

1.4 模型率定与验证

依据实际监测降雨结果率定模型,使模拟结果与实际结果相拟合。使用 2019 年 8 月 9 日和 9 月 9 日的两场降雨进行模型校准,使用 2019 年 9 月 13 日的降雨进行模型验证。降雨记录数据见表 1。

表 1 降雨记录数据

Tab. 1 Rainfall record data

降雨日期	降雨历时/min	降雨量/mm	平均雨强/ (mm · min ⁻¹)	最大雨强/ (mm · min ⁻¹)	干燥天数/d	降雨类型	样品个数
2019-08-09	320	28.97	0.09	0.92	10	大雨	9
2019-09-09	313	38.84	0.12	0.86	19	暴雨	10
2019-09-13	316	15.10	0.05	0.68	3	中雨	11

水力参数率定如表 2 所示,水质参数率定如表 3 所示。

表 2 水力参数率定

Tab. 2 Calibration of hydraulic parameters

项 目	初始假定参数	率定参数
透水区曼宁系数	0.15	0.12
不透水区曼宁系数	0.017	0.015
透水区填注量/mm	12	10
不透水区填注量/mm	2	2.4
无注不透水所占百分比/%	70	45

表 3 水质参数率定

Tab. 3 Calibration of water quality parameters

项 目	参数名称	COD	TN	TP
累积参数	道路			
	最大累积量/($\text{kg} \cdot \text{km}^{-2}$)	300	15	3
	累积常数/ d^{-1}	6	0.4	0.03
	屋面			
	最大累积量/($\text{kg} \cdot \text{km}^{-2}$)	250	10	2
	累积常数/ d^{-1}	5	0.3	0.02
冲刷参数	绿地			
	最大累积量/($\text{kg} \cdot \text{km}^{-2}$)	180	8	1
	累积常数/ d^{-1}	4	0.2	0.02
	道路			
	冲刷系数	0.004	0.002	0.002
	冲刷指数	1.5	1.4	1.4
冲刷参数	屋面			
	冲刷系数	0.003	0.002	0.002
	冲刷指数	1.5	1.5	1.5
	绿地			
	冲刷系数	0.003	0.002	0.002
	冲刷指数	1.6	1.5	1.4

图 2 为水力参数率定后模型模拟值与实测值对比结果。

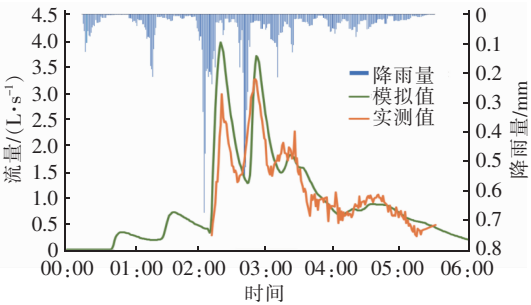


图 2 水力参数率定后模型模拟值与实测值对比结果

Fig. 2 Comparison results between model simulated values and measured values after calibration of hydraulic parameters

率定后模型的纳什效率系数为 0.89,说明模型的可靠性较高。

图 3 为水质参数率定后模型模拟值与实测值对比结果。可知,COD、TN、TP 的浓度变化过程与实际监测结果拟合较好,模型率定结果达到要求,可利用该模型进行进一步模拟^[9]。

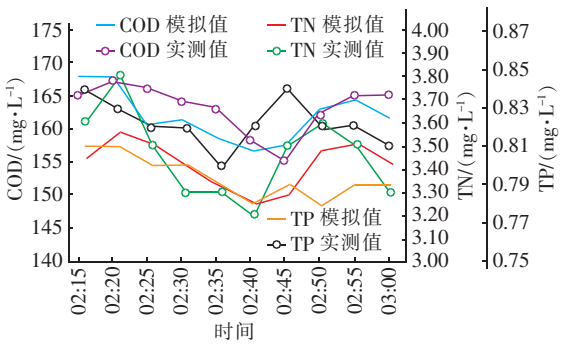


图 3 水质参数率定后模型模拟值与实测值对比结果

Fig. 3 Comparison results between model simulated values and measured values after calibration of water quality parameters

2 多情景下的模拟调控

海绵改建小区的雨水径流多级调控系统如图 4 所示。对于中小强度的降雨事件,一级 LID 设施调控发挥作用,就地拦截消纳雨水;当超过一级调控的能力时,对于中高强度的降雨事件,通过二级雨水管网调控,快排雨水;三级末端蓄水池调控,在二级雨水管网系统的末端,通过末端蓄水设施来收集、储存雨水。

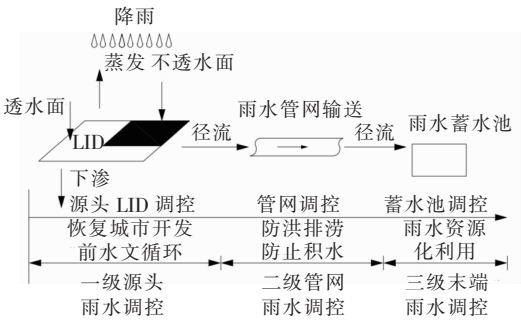


图 4 海绵改建小区的雨水径流多级调控系统示意

Fig. 4 Schematic diagram of stormwater runoff multi-level regulation system for sponge reconstruction in a residential community

2.1 暴雨情景设置

依据《雨水控制与利用工程设计规范》和北京暴雨分区的划分,研究小区为第Ⅱ区,设计暴雨强度 q 按式(1)或者式(2)计算(P 为重现期, t 为降雨历时)。

$$q = \frac{2\,001(1 + 0.811\lg P)}{(t + 8)^{0.711}} \quad (1)$$

适用范围: $t \leq 120 \text{ min}$, $P \leq 10$ 年。

$$q = \frac{1\,378(1 + 1.047\lg P)}{(t + 8)^{0.642}} \quad (2)$$

适用范围: $t \leq 120 \text{ min}$, $P > 10$ 年。

在重现期 P 分别为 1、3、5、10、50 年的条件下,当降雨历时为 120 min 时,设计暴雨范围为 45.82 ~ 122.44 mm。

2.2 一级源头LID设施调控情景下的模拟

《海绵城市建设——透水铺装设计指南》《海绵城市建设技术指南——低影响开发雨水系统构建(试行)》《SWMM5.1 用户手册》中指出,透水铺装的铺装层厚度一般为 40 ~ 180 mm,蓄水层厚度一般为 150 ~ 350 mm;下凹绿地的土壤层厚度一般为 250 mm,蓄水层厚度一般为 200 ~ 300 mm;LID 设施的表面粗糙度范围为 0.011 ~ 0.80。研究小区的一级调控通过调控透水铺装和下凹式绿地两种 LID 设施共同的构造层参数,包括表面粗糙度、铺装层厚度、土壤层厚度、蓄水层厚度等,分析调控相关参数对降雨径流及其污染物的影响,探讨实现一级源头 LID 设施雨水调控的可能。

以改建后的 U 型排水沟为雨水管网,模拟重现期分别为 1、3、5、10 年,降雨历时为 120 min 的设计暴雨情景下的调控。具体调控情景:情景 1,模拟无 LID 设施和 LID 设施建设完成时的对比;情景 2、3、4,模拟 LID 设施建设完成时的情景,分别调整 LID 表面粗糙度同比增加 20%、40%、60% 条件下的情景,调整土壤层厚度(透水铺装调整铺装层厚度)同比增加 20%、40%、60% 条件下的情景,LID 设施的蓄水层厚度同比增加 20%、40%、60% 条件下的情景。通过比较 44 种设计降雨场景排放口的峰值流量、综合径流系数、污染物负荷,分析不同调控手段对降雨径流的影响。

2.3 二级管网雨水调控情景下的模拟

二级管网雨水调控是基于雨水管网系统,将超过一级源头 LID 设施处理能力的雨水快速排走,防止建筑小区积水情况的发生。研究小区的二级调控以小区的雨水排水管道为研究对象,在小区 LID 设施改造完成、一级调控完全发挥作用的背景下,模拟降雨历时为 120 min、不同重现期(1、3、5、10、50 年)下的管网环境。具体情景如下:情景 1,小区雨水管网未改建前,采用雨污合流情景下的模拟;情景 2,小区雨水管网改建为 U 型排水沟情景下的模拟;情景 3,以情景 2 为背景,管道布置不变,各节点最大深度一次增加 20%、40%、60% 时的模拟;情景 4,以情景 2 为背景,U 型排水沟的最大深度增加 20%、

40%、60% 情景下的模拟;情景 5,以情景 2 为背景,U 型排水沟的底宽增加 20%、40%、60% 情景下的模拟。模拟降雨历时为 120 min、不同重现期(1、3、5、10、50 年)下的 55 种设计情景,分析不同二级管网调控对小区排水能力的影响。

2.4 三级末端雨水调控情景下的模拟

三级末端雨水调控是在雨水管网的末端,通过调控末端蓄水设施,收集、储存来自雨水管网末端的雨水,以实现雨水的资源化利用,同时也具有削峰、推迟峰现时间的作用。研究小区的三级调控以调控小区排水管网末端的雨水蓄水池为对象,在研究小区一级 LID 设施调控完成和二级管网改造为 U 型排水沟的背景下,模拟降雨历时为 120 min、不同重现期(1、3、5、10、50 年)下的三级末端雨水调控。具体情景:情景 1,模拟不同重现期下,有无三级末端调控情景下的模拟;情景 2,模拟不同重现期下,在 P1 进口前单独设置一个 340 m³ 蓄水池与分别设置 240 和 100 m³ 两个蓄水池的模拟;情景 3,模拟不同重现期下,两个蓄水池均为 500 m³ 的模拟。分析 15 种设计情景条件下三级末端雨水调控对雨水径流的影响。

3 结果与讨论

3.1 一级源头雨水调控分析

3.1.1 有无一级调控效果对比

以改建后的 U 型排水沟作为排水管道,进行不同重现期下有无一级 LID 设施调控的模拟。表 4 为不同重现期下有无一级源头调控的水力效果。

表 4 不同重现期下有无一级源头调控的水力效果

Tab. 4 Hydraulic effects with or without primary source control at different return periods

降雨重现期/年	有无一级调控	降雨量/mm	下渗量/mm	径流量/mm	产流时间/min	峰值流量/(m ³ ·s ⁻¹)	峰现时间/min
1	无	45.82	18.06	26.95	11	0.37	56
	有		25.02	19.52	13	0.34	60
3	无	63.55	19.81	42.94	9	0.40	55
	有		29.01	33.28	10	0.37	56
5	无	71.80	20.14	50.86	8	0.42	55
	有		30.79	39.74	9	0.39	55
10	无	82.98	20.51	61.69	7	0.45	54
	有		33.17	48.54	9	0.41	54

从表 4 可以看出,随着降雨重现期的增大,区域降雨径流量和峰值流量逐渐增大。无一级 LID 设施调控时,研究区域土壤下渗量达到 20 mm 左右时接

近饱和状态,仅通过小区的土壤条件难以自我消纳。当采取一级 LID 设施调控后,建筑小区整体降雨下渗量明显增加了 6.96 ~ 12.66 mm,且随降雨强度的增加而逐渐增大,但增加幅度逐渐减小;径流量减少 7.43 ~ 13.15 mm,综合雨水径流系数范围为 0.43 ~ 0.58。采取一级 LID 设施调控后年径流总量控制率可达 41.51% ~ 57.40%,说明一级调控效果明显,一级调控可以很好地促渗减流,减少小区的年径流总量,具有很好的削峰减流效果,可以有效降低区域的排水压力,充分拦截、消纳雨水,有利于涵养地下水、恢复城市开发前的水文循环。

表 5 为不同重现期下有无一级源头调控的水质效果。可知,采用一级 LID 设施调控可以有效削减各污染物的负荷总量,对各污染物的削减率均在 25% 以上。在 1 年重现期下对各污染物的削减作用最明显,可达到 35% 左右。随着降雨强度的增大,各污染物负荷总量逐渐增加,而污染物削减率却逐渐减少,主要是由于一级 LID 调控设施的调蓄容积有限,无法处理过量雨水,只能将超过一级 LID 设施调控能力的雨水通过二级管网雨水调控系统排走。熊赞等^[10]的研究结果也表明,低影响开发设施的滞蓄空间有限,超标暴雨无法再进入设施内部入参与净化是制约 LID 设施雨水净化能力的主要原因。

表 5 不同重现期下有无一级源头调控的水质效果

Tab.5 Water quality effects with or without primary source control at different return periods

降雨重现期/年	有无一级调控	COD/kg	TN/kg	TP/kg
1	无	276.780	5.693	0.889
	有	180.261	3.536	0.582
3	无	380.662	8.233	1.256
	有	280.062	5.611	0.889
5	无	407.839	9.096	1.386
	有	315.549	6.434	1.007
10	无	427.472	9.957	1.532
	有	349.587	7.339	1.140

3.1.2 表面粗糙度对一级调控的影响

在调控一级 LID 设施的表面粗糙程度进行模拟过程中发现,当 LID 设施的表面粗糙度同比增加 20%、40%、60% (即表面粗糙度范围在 0.026 ~ 0.144) 时,降雨下渗量波动范围为 0.01 ~ 0.16 mm,径流量变化范围为 0.01 ~ 0.17 mm。随着降雨重现期的增大,下渗量逐渐增加,径流量逐渐减少。这可

能是由于表面粗糙度的增加扩大了 LID 设施的有效表面积,增加了对降雨的拦截作用。同时,由于小区具有良好的土壤地质条件,提高了一级 LID 设施表面的粗糙度,强化了 LID 设施的入渗作用,增加了下渗量,削减了径流量,整体的下渗增加量和径流减少量大体相等。Dreelin 等^[11]的研究表明,表面粗糙度的增加可以减少径流量,甚至可以达到阻止地表径流的产生效果,同时也可以增加 LID 设施的污染物去除能力。

在 1 年重现期下,随着表面粗糙度的增加,对 COD、TN、TP 分别削减了 0.161 ~ 0.448、0.004 ~ 0.013、0.001 ~ 0.003 kg;3 ~ 10 年重现期下,排放口 COD、TN、TP 的污染物负荷分别增加了 0.058 ~ 0.829、0.001 ~ 0.018、0.001 ~ 0.003 kg,且与表面粗糙度的增加呈正相关。表明在低重现期下,提高一级 LID 设施的表面粗糙度可以提高 LID 设施对污染物的削减作用。但随着降雨重现期的增加,增加 LID 设施的表面粗糙度可能限制了 LID 设施的雨水净化能力。实际工程中,可采取铺设表面粗糙的透水砖或采用嵌草铺装系统、提高植物种植密度等来提高 LID 设施的表面粗糙度方式,以达到减少降雨径流量和净化雨水的目的。

3.1.3 土壤层厚度对一级调控的影响

当进行调控一级 LID 设施的土壤层厚度同比增加 20%、40%、60% (厚度变化范围为 13 ~ 150 mm) 时,降雨下渗量的波动范围为 0.13 ~ 0.40 mm,径流量变化范围为 0.01 ~ 0.03 mm。随着土壤层厚度的增加,小区整体下渗量和径流量逐渐减少,且削减作用随着土壤层厚度的增加而增大。当 LID 设施的土壤层厚度增加 60% (150 mm) 时,小区整体下渗量减少 0.40 mm,径流量减少 0.03 mm。这可能是由于土壤层厚度的增加减少了系统的下渗量,增加了土壤层的蓄水总量。同时,随着土壤层厚度的增加,对 COD、TN、TP 分别削减了 0.322 ~ 1.321、0.008 ~ 0.039、0.001 ~ 0.004 kg,且削减能力与土壤层厚度和降雨强度呈正相关,表明增加土壤层厚度可以提高土壤层对降雨径流中污染物的净化能力。VanWoert 等^[12]的研究结果也表明,土壤层厚度的增加可以提高土壤层的蓄水能力,将显著减少降雨径流量和降雨中的污染物负荷。

3.1.4 蓄水层厚度对一级调控的影响

当进行调控一级 LID 设施蓄水层厚度同比增加

20%、40%、60% (蓄水层厚度变化范围为 60 ~ 180 mm) 时,降雨下渗量的波动范围为 0.01 ~ 0.04 mm,径流量的变化范围为 0.01 ~ 0.04 mm,调整蓄水层厚度也存在随着降雨重现期的增大,下渗量逐渐增加、径流量逐渐较少的变化趋势,但整体对系统的影响较少。基于 SWMM 软件多次建模的结果表明,蓄水层变化对 LID 设施的影响均无明显变化,这可能是由于增加蓄水层厚度所增加的蓄水量在模型的径流误差范围内。所以,调整蓄水层厚度对系统整体影响较少。在 1 年降雨重现期下,蓄水层厚度对各污染物的去除效果无影响。随着降雨重现期的增加,对 COD 削减了 -0.001 ~ 0.107 kg,去除效果呈现先增加后减少的趋势;各重现期下对 TN、TP 的影响均不明显。蓄水层厚度对 COD 污染物负荷的影响较 COD 污染物负荷本身数量级相差较大,可以忽略。因此,调整蓄水层厚度对污染物的去除也无明显影响。

3.2 二级管网雨水调控分析

一级 LID 设施调控后年径流总量控制率可达 41.51% ~ 57.40%,各污染物负荷削减率均在 25% 以上。在此基础上,使用建筑小区未进行海绵改建前的雨污合流管道进行二级调控模拟,在降雨历时为 120 min、重现期为 1 年的设计降雨强度下,小区有 7 处积水现象发生、7 处管道超载,表明未改建小区的排水管网不满足设计暴雨重现期为 1 年的排水能力。这与依据《室外排水设计规范》管道最大流速取 10 m/s 时的水力计算结果一致。而使用改建后 U 型排水沟,在降雨历时为 120 min、暴雨重现期为 1 年模拟时,仅节点 J12 发生 0.03 h 的积水,管段 G12 超载 0.01 h,表明 U 型沟管道调控效果良好,管道系统改造前后节点积水情况如图 5 所示。

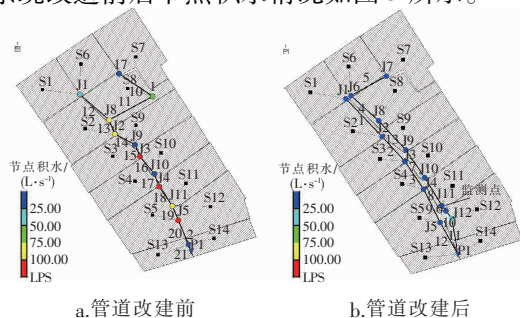


图5 管道系统改造前后节点积水情况

Fig.5 Node ponding before and after reconstruction of pipeline system

当雨水管道改建为 U 型排水沟进行模拟时,不同重现期下的节点积水、管段超载情况见表 6。可以看出,随着降雨重现期的增大,节点 J12 的积水情况和管段 G12 的超载情况愈加严重,且节点 J5、节点 J6、管段 G4、管段 G11 开始出现超载情况。在降雨历时为 120 min、重现期为 50 年时,节点 J5、J6、J12 发生积水现象,积水时间分别为 0.49、0.08、0.82 h,管段 G4、G11、G12 超载,超载时间分别为 0.07、0.45、0.76 h。较未改建雨污合流管网,改建 U 型排水沟系统具有较好的排水输水能力,可通过相关调控满足建筑小区 50 年一遇的防洪标准。

表6 管道改建后不同重现期下小区节点积水、管段超载情况

Tab.6 Ponding in nodes and overloading of pipe section at different return periods after pipeline reconstruction

重现期/年	节点数据和管道数据			
1	积水节点	J12		
	积水时间/h	0.03		
	超载管段	G12		
	超载时间/h	0.01		
3	积水节点	J12		
	积水时间/h	0.26		
	超载管段	G12		
	超载时间/h	0.23		
5	积水节点	J5	J12	
	积水时间/h	0.13	0.34	
	超载管段	G11	G12	
	超载时间/h	0.07	0.31	
10	积水节点	J5	J12	
	积水时间/h	0.26	0.43	
	超载管段	G11	G12	
	超载时间/h	0.23	0.40	
50	积水节点	J5	J6	J12
	积水时间/h	0.49	0.08	0.82
	超载管段	G4	G11	G12
	超载时间/h	0.07	0.45	0.76

在一级 LID 设施调控布置完成,二级管网采用 U 型排水沟布置进行调控模拟,仅调整节点参数中的节点最大深度依次增加 20%、40%、60% (0.1 ~ 0.36 m) 时,各节点、管段的运行情况均与未调整前无变化,仅调整节点最大深度对缓解小区积水情况影响不大。

调整管道系统参数,模拟分析不同重现期下调整管道最大深度依次增加 20%、40%、60% (0.1 ~ 0.36 m) 时的积水情况,当 U 型排水沟最大深度增

加20% (0.1~0.12 m)时,1年重现期下小区无积水现象发生;当U型排水沟的最大深度增加40% (0.2~0.24 m)时,5年重现期下无积水现象发生;当U型排水沟的最大深度增加60% (0.3~0.36 m)时,10年重现期下无积水现象发生,但在50年重现期下,节点J12积水0.22 h,管段G12超载0.18 h。模拟不同重现期下调整管段的底宽依次增加20%、40%、60% (0.05~0.36 m)时的积水情况,当U型排水沟的底宽增加20% (0.05~0.1 m)时,1年重现期下无积水现象发生;当U型排水沟的底宽增加40% (0.1~0.24 m)时,5年重现期下无积水现象发生;当U型排水沟的最大底宽增加60% (0.15~0.36 m)时,10年重现期下无积水现象发生,但在50年重现期下,节点J12积水0.22 h,管段G12超载0.18 h。

由于小区U型排水沟的截面多为正方形,调整U型沟的最大深度和底宽,相同程度地改变了U型排水沟的截面面积,故具有相同的调控效果。对于节点J12在暴雨重现期为50年的积水问题,可通过调整相关节点的高程或管段管径进行调控,但改变节点高程往往受周围地形的限制,如节点J12受节点J11和排放口P1高程的限制,不能很好地进行调控,只能采取增大管道管径的方式来提高雨水系统的输水能力,解决节点积水情况。陈梓迁等^[13]和李彦伟等^[14]的研究结果也均认为,改变管径是雨水管网调控中最有效的调控手段。研究小区二级调控可保证小区10年暴雨重现期下无积水现象发生。

综上所述,二级管网雨水调控的手段有调整管道的最大深度、改变管道的底宽和改变节点高程,3种调控方案都可有效进行管网调控。其中,增大管道的最大深度和底宽可改变管径来提升管道系统的输水能力;而改变节点高程,往往由于地形的限制,同时会增加下游节点溢流的风险。总体看来,改变管径更易实施,是较合适的调控手段,且可以有效防止积水内涝现象的发生。

3.3 三级末端雨水调控分析

在一级LID设施调控布置完成、二级管网采用U型排水沟布置时进行三级末端雨水调控模拟,与未设置蓄水池相比,不同重现期下的下渗量和径流量变化见表7。在降雨重现期分别为1、3、5、10、50年的情况下,出流时间分别推迟了6、6、6、5、4 min,峰值流量分别减少了0.13、0.06、0.05、0.02、0.01

m^3/s ,峰现时间推迟了2~11 min,1年重现期下可将峰值流量降低38.24%,3年重现期下小区无积水现象发生。与未布置末端蓄水池时的二级调控相比,增设雨水蓄水池不仅可以加强系统的削峰减流效果,还可以提高整个小区的防洪标准。

表7 增设蓄水池前后效果对比

Tab.7 Comparison results before and after adding reservoir

降雨 重现 期/年	有无 三级 调控	降雨 量/ mm	下渗 量/ mm	径流 量/ mm	出流 时间/ min	峰值流 量/ $(\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1})$	峰现 时间/ min
1	无	45.82	25.02	19.52	13	0.34	56
	有		25.02	19.52	19	0.21	67
3	无	63.55	29.01	33.28	10	0.37	55
	有		29.01	33.28	16	0.31	64
5	无	71.80	30.79	39.74	9	0.39	55
	有		30.79	39.74	15	0.34	64
10	无	82.98	33.17	48.54	9	0.41	54
	有		33.17	48.54	14	0.39	58
50	无	122.44	41.49	79.69	6	0.46	54
	有		41.49	79.69	10	0.45	56

在排放口前单独设置一个 340 m^3 的蓄水池,并分别设置240和 100 m^3 两个蓄水池进行对比,结果发现各项指标均无明显变化。表明当调蓄容积一定时,蓄水池的调蓄能力与蓄水池的个数无关。当蓄水池的调蓄容积为 1000 m^3 时,与 340 m^3 的调蓄容积相比,下渗量、径流量、出流时间等变化不明显,出流时间推迟了1~5 min,峰值流量减少了0.12~ $0.17 \text{ m}^3/\text{s}$,峰现时间推迟了5~9 min,说明增大雨水蓄水池的调蓄容积可以有效地削减峰值流量、提升小区的整体雨水调蓄能力,但随着降雨重现期的增加调控能力逐渐减弱。Di Matteo等^[15]和张勤等^[16]的研究也表明,蓄水池对径流总量和径流峰值均有明显的削减作用,对污染物的截留效果有明显提升。

布置蓄水池的调蓄容积为 340 m^3 ,通州年均降雨量为526 mm,按1年蓄水模块储满3次并回用计算,小区雨水资源利用率为 $340 \times 3 / (49\,380.44 \times 526 / 1\,000) = 3.93\%$;当蓄水池的调蓄容积为 1000 m^3 时,小区雨水资源利用率为 $1\,000 \times 3 / (49\,380.44 \times 526 / 1\,000) = 11.55\%$ 。增加末端蓄水池的调蓄容积有利于收集更多的雨水,可以提高小区雨水资源化利用水平。

综上所述,对于海绵改建小区的雨水径流多级

调控系统,一级雨水 LID 设施调控可通过调控 LID 设施参数影响小区整体径流量和下渗量,最多可使小区整体下渗能力提高 65.83%、年径流总量控制率可达 57.40%、污染物削减率达 35%;二级管网雨水调控可解决小区内下雨积水现象,减少节点溢流情况,防止积水现象的发生,断面宽度增加 20% 时 1 年重现期下无积水现象、断面宽度增加 60% 时 10 年重现期下无积水内涝现象发生;在无三级末端调控时,1 年重现期下节点 J12 积水、管段 G12 超载,当采用三级末端蓄水池(调蓄容积为 340 m³)调控时,3 年重现期下小区无积水现象发生,同时雨水资源利用率为 3.93%。总而言之,小区海绵改建效果良好,雨水径流多级调控系统能够有效调控不同重现期下的降雨径流,进而实现恢复地域开发前的水文循环、防止内涝积水、实现雨水资源化利用的调控目标。

4 结论与展望

① 采用一级 LID 措施调控后年径流总量控制率可达 41.51%~57.40%、污染物的削减率均在 25% 以上;二级管网调控中,改变管径是最有效的调控手段,排水沟底宽或最大深度增加 60% (0.36 m) 时,可保证小区 10 年一遇降雨重现期下无积水现象发生;采用三级末端蓄水池调控时,可保证小区 3 年一遇降雨重现期下无积水现象发生,雨水资源利用率达到 3.93%,三级末端调控仅与蓄水池的调蓄容积有关,与蓄水池的个数和位置关系不大。

② 一级源头 LID 设施调控中,提高 LID 设施的表面粗糙度可以增加 LID 设施对雨水的拦截净化作用;增加土壤层厚度有利于充分发挥土壤层滞留、净化雨水的能力;蓄水层的厚度对系统整体影响不明显。设计中可采用种植植物或植物种植密度大的 LID 设施来提高表面粗糙度,同时可考虑增加土壤层的厚度来增强 LID 设施的储存、净化雨水能力。

③ 在建模过程中,由于缺乏管网资料、地形地势资料,相关参数仅通过设计图纸和实地踏勘手工输入,未考虑管道蓄变、出入口损失、偏移量等,后期应完善相关数据后进行优化验证。

④ 依据水质水量同步监测结果率定验证模型可有效评估老旧小区海绵化改造效果,同时该方法具有较好的普适性,也可应用于其他类型住宅小区、工业园区等的模拟,但在多级调控系统中未能定量化各层级雨水调控范围。

参考文献:

- [1] 王建廷,魏继红. 基于海绵城市理念的既有居住小区绿化改造策略研究[J]. 生态经济, 2016, 32: 220 - 223.
Wang Jianting, Wei Jihong. Research on the greening strategy of the existed residential communities based on the concept of sponge cities[J]. Ecological Economy, 2016, 32: 220 - 223 (in Chinese).
- [2] Wright T J, Liu Y Z, Carroll N J, et al. Retrofitting LID practices into existing neighborhoods: Is it worth it? [J]. Environmental management, 2016, 57(4): 856 - 867.
- [3] 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): 12 - 19.
Wang Jianlong, Tu Nannan, Xi Guangpeng, et al. Discussion of residential district renovation combined with sponge city development [J]. China Water & Wastewater, 2017, 33(18): 12 - 19 (in Chinese).
- [4] 刘博文. 老旧小区雨水系统海绵城市改造设计研究[J]. 中外建筑, 2018(7): 107 - 109.
Liu Bowen. Research on design of sponge city in old residential area rainwater system [J]. Chinese & Overseas Architecture, 2018 (7): 107 - 109 (in Chinese).
- [5] 陈言菲,李翠梅,龙浩,等. 基于 SWMM 的海绵城市与传统措施下水水系统优化改造模拟[J]. 水电能源科学, 2016, 34(11): 86 - 89.
Chen Yanfei, Li Cuimei, Long Hao, et al. Storm-water system simulation optimization of sponge city and traditional measures based on SWMM model[J]. Water Resources and Power, 2016, 34 (11): 86 - 89 (in Chinese).
- [6] Xu T, Jia H F, Wang Z, et al. SWMM-based methodology for block-scale LID-BMPs planning based on site-scale multi-objective optimization: a case study in Tianjin [J]. Frontiers of Environmental Science & Engineering, 2017, 11(4): 48 - 59.
- [7] Lynn T J, Nachabe M H, Ergas S J. Modeling denitrifying stormwater biofilters using SWMM5 [J]. Journal of Environmental Engineering, 2017, 143(7): 04017017.
- [8] 马萌华,李家科,邓陈宁. 基于 SWMM 模型的城市内涝与面源污染的模拟分析[J]. 水力发电学报, 2017, 36(11): 62 - 72.
Ma Menghua, Li Jiako, Deng Chenning. Analysis of urban waterlogging and pollution load based on SWMM

- model[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2017, 36(11):62-72(in Chinese).
- [9] Rosa D J, Clausen J C, Dietz M E. Calibration and verification of SWMM for low impact development[J]. Journal of the American Water Resources Association, 2015, 51(3):746-757.
- [10] 熊赞,李子富,胡爱兵,等. 某低影响开发居住小区水量水质的SWMM模拟[J]. 中国给水排水, 2015, 31(17):100-103.
- Xiong Yun, Li Zifu, Hu Aibing, *et al.* Simulation of effect of LID facilities on water quantity and quality in residential area based on SWMM[J]. China Water & Wastewater, 2015, 31(17):100-103(in Chinese).
- [11] Dreelin E A, Fowler L, Carroll C R. A test of porous pavement effectiveness on clay soils during natural storm events[J]. Water Research, 2006, 40(4):799-805.
- [12] VanWoert N D, Rowe D B, Andresen J A, *et al.* Green roof stormwater retention: Effects of roof surface, slope, and media depth[J]. Journal of Environmental Quality, 2005, 34(3):1036-1044.
- [13] 陈梓迁,田蕾. 基于SWMM的城市雨水管网优化设计[J]. 中国设备工程, 2019(4):130-132.
- Chen Ziqian, Tian Lei. Optimization design of urban rainwater pipeline network based on SWMM[J]. China Plant Engineering, 2019(4):130-132(in Chinese).
- [14] 李彦伟,尤学一,季民,等. 基于SWMM模型的雨水管网优化[J]. 中国给水排水, 2010, 26(23):40-43.
- Li Yanwei, You Xueyi, Ji Min, *et al.* Optimization of rainwater drainage system based on SWMM model[J]. China Water & Wastewater, 2010, 26(23):40-43(in Chinese).
- Chinese).
- [15] Di Matteo M, Liang R J, Maier H R, *et al.* Controlling rainwater storage as a system: An opportunity to reduce urban flood peaks for rare, long duration storms[J]. Environmental Modelling Software, 2019, 111:34-41.
- [16] 张勤,陈思飒,蔡松柏,等. LID措施与雨水调蓄池联合运行的模拟研究[J]. 中国给水排水, 2018, 34(9):134-138.
- Zhang Qin, Chen Siyao, Cai Songbai, *et al.* Simulation of LID measures combined with stormwater detention tank[J]. China Water & Wastewater, 2018, 34(9):134-138(in Chinese).



作者简介:陈韬(1977-),女,辽宁开原人,博士,教授,研究方向为城市雨水低影响开发和城市节水。

E-mail:chentao@bucea.edu.cn

收稿日期:2020-01-02

实施国家节水行动,
统筹山水林田湖草系统治理