

LID 措施与雨水调蓄池联合运行的模拟研究

张 勤¹, 陈思飘¹, 蔡松柏², 刘长兴²

(1. 重庆大学 城市建设与环境工程学院, 重庆 400045; 2. 中国市政工程西南设计研究总院有限公司, 四川 成都 610081)

摘要: 选取昆明某片区为研究对象,以截留全年50%总降雨量为目标,采用SWMM模拟研究LID措施与雨水调蓄池联合运行的效果。在0.5、1、2年一遇重现期下分别运行仅设雨水调蓄池和LID+雨水调蓄池两种方案,结果表明,LID+雨水调蓄池措施对径流总量、径流峰值均有明显削减作用,对污染物的截留量有显著提升,且截留效率随重现期的增加而减小;在目前设置参数下,LID措施对径流峰值的出现时间无明显影响。另外,设置LID措施可显著削减雨水调蓄池容积。

关键词: 低影响开发; 雨水调蓄池; SWMM; 滇池

中图分类号: TU992 **文献标识码:** C **文章编号:** 1000-4602(2018)09-0134-05

Simulation of LID Measures Combined with Stormwater Detention Tank

ZHANG Qin¹, CHEN Si-yao¹, CAI Song-bai², LIU Chang-xing²

(1. College of Urban Construction and Environmental Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, China; 2. Southwest Municipal Engineering Design & Research Institute of China, Chengdu 610081, China)

Abstract: Taking a section of Kunming as the research object, SWMM model was used to simulate the effect of LID measures combined with stormwater detention tanks, and it was aimed to intercept 50% of the total annual rainfall. Two programs of only detention tanks and LID + stormwater detention tanks were operated respectively in the return period of 0.5, 1 and 2 years. The simulation results indicated that obvious reduction effects of runoff volume and peak runoff were achieved by LID + stormwater detention tanks, and there was a significant increase of pollution interception, and the interception efficiency decreased with the increase of the return period. Under the current setting parameters, LID measures had no obvious effect on the occurrence of the peak runoff. In addition, the volume of stormwater detention tank could be remarkably reduced by LID measures.

Key words: LID; stormwater detention tank; SWMM; Dianchi Lake

在控制径流污染、缓解城市内涝的问题上,雨水调蓄池是一种成熟有效的解决措施,已经被广泛用于国内外的面源污染与城市内涝治理工程中^[1,2],其主要储蓄污染严重的初期雨水或超出系统容纳能力的洪峰径流,以达到削减洪峰与控制面源污染的

效果,是一种行之有效的“中端”治理措施。20世纪90年代兴起的低影响开发(LID)措施则是通过小型和分散的处理、调蓄、收集技术来保持或恢复建筑小区的原始水文状况,从而起到削峰、控污的作用。两种技术各有侧重,雨水调蓄池侧重集中、宏观的调

控,LID 则侧重小区或更小区域的微观治理,主要针对占全年降雨量 80%~90%的中小降雨事件。

城市内涝和面源污染影响因素众多,情况复杂多变,仅凭单一技术无法面面俱到。一些国家将传统管道排水称为小排水系统,将由地表通道和大型调蓄设施组成的排水系统称为大排水系统^[3],通过两者的结合运用来达到治理内涝的效果。借鉴此经验,为了达到削减城市暴雨洪峰和控制径流污染的双重目的,笔者选取昆明市典型排水管网片区,在实测数据的基础上,利用 SWMM 软件建立管网模型,模拟研究雨水调蓄池与 LID 措施组合方案的运行效果以及 LID 措施对调蓄池功效的影响,以期为滇池流域及我国其他地区的削峰控污工程提供参考。

1 模型建立

1.1 研究区域简介

已有研究表明,入滇污染负荷的 20%~30%为昆明市城市面源污染和合流污水溢流污染^[4],控制面源污染对滇池治理具有重要意义;同时,昆明旱、雨季分明,夏季雨量集中,且多为大雨、暴雨,降水量占全年降水量的 60%以上,易受洪涝灾害,因此缓解城市内涝也是亟待解决的问题。研究区域位于滇池东岸洛龙河与新开河之间,片区面积为 750.5 hm²,在富康路以东为城市新建区域,主要以居住小区和商业区为主,含有部分道路和绿地公园;在富康路以西目前为农业用地,全部为蔬菜大棚。片区内雨污分流,雨水全部直接排入就近水体。本研究基于的专项课题要求:初期雨水截留量占全年降雨总量的 50%。为此,需要将初期雨水收集排入沿河截流干管,并送至污水处理厂。但现状条件下,沿河干管仅用作排输污水,无法容纳所有截流雨水,因此需要根据模型的初步运行结果提出解决方案。

1.2 模型构建与参数率定

根据卫星图和现状高程,将研究区域划分为 197 个子汇水区域。根据排水管网图纸进行管网概化,保留雨水干管与沿河污水干管。研究区域的概化模型见图 1,包括 280 条管段和 440 个节点。

模型选用 Horton 方程模拟降雨下渗过程,参考相关文献^[4~6]和 SWMM 用户手册确定初始参数。在 2013 年—2014 年间,选取夏季的 3 场降雨实测数据进行参数率定,实际降雨情况如下:2013 年 8 月 2 日 16:37—17:12,总降雨量为 11.6 mm,平均降雨强度为 0.322 mm/min;2013 年 8 月 8 日 00:30—

03:15,总降雨量为 12 mm,采样期间平均降雨强度为 0.088 mm/min;2014 年 8 月 18 日 17:01 开始降雨、17:17 开始采样直到 20:05 结束,期间降雨量为 15 mm,采样期间平均降雨强度为 0.081 mm/min。通过对模型参数的不断调整,达到模型运行结果与实测降雨数据相吻合。水量模型参数最终率定结果如下:不渗透性和渗透性粗糙系数 N 值分别为 0.011、0.15,不渗透性和渗透性洼地蓄水分别为 3、6.5 mm,无洼地蓄水不渗透性为 25%,管道粗糙系数为 0.012,最大、最小入渗速率分别为 76.2、3.8 mm/h,衰减系数为 4.1 h⁻¹,排干时间为 7 d。

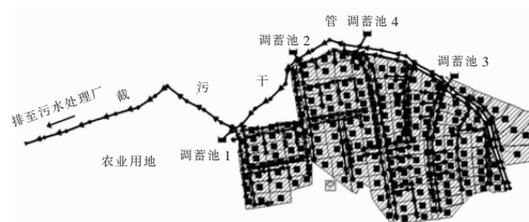


图 1 研究区域概化模型

Fig. 1 Generalized model of study area

在城市径流污染物中,SS 通常与其他污染物指标有一定相关性,因此本研究选用 SS 作为径流污染物控制指标。水质模型参数最终率定结果如下:住宅用地、办公用地、商业用地、道路、绿地的最大 SS 累积量分别为 200、200、220、250、80 kg/hm²,SS 累积常数均为 0.5 d⁻¹,冲刷系数均为 0.009,冲刷指数分别为 1.5、1.5、1.5、1.5、1.4。

沿河污水干管内旱季流量由实测数据确定。选取富康路和蔡玉中路上的两个污水检查井作为监测点,于 2014 年 8 月 31 日 06:00—22:30 进行流量监测,监测历时 16.5 h,涵盖了一天的排水高峰期及低谷期,有一定代表性。监测污水总量为 12 942 m³,污水干管的总服务面积为 579.5 hm²,因此单位面积的平均污水流量为 0.375 L/(s·hm²)。

1.3 设计降雨序列

本研究采用芝加哥雨型,结合昆明地区暴雨强度公式[见式(1)]进行降雨序列合成。昆明地区的降雨类型为前峰型,峰值 r 为 0.42,降雨历时为 2 h。因为 LID 措施主要针对小规模降雨,因此重现期选取 0.5、1 和 2 年。

$$q = \frac{12.1 + 14.4 \lg P}{(t + 14.4)^{0.8}} \quad (1)$$

式中: q 为降雨强度,mm/min; P 为降雨重现期,

年; t 为降雨历时, min。

根据前期研究^[7], 为实现全年 50% 降雨量的截留, 需要对小于 9.7 mm 的降雨进行截留。为在 SWMM 模型中实现截留, 首先根据设计降雨得到累积降雨量曲线, 求出 0.5、1、2 年重现期下达到 9.7 mm 累积雨量的对应历时, 分别是 70、65、61 min, 均在 1 h 左右; 然后在 SWMM 中通过设置 control rules, 以降雨历时为条件进行截留控制。

1.4 模型排水能力改进与调蓄池设置

在现状条件下, 以 2 年重现期为标准运行模型, 发现截流干管(原污水干管)存在严重溢流。不考虑 LID 措施, 调整部分干管管径并在 4 处严重溢流点增设调蓄池, 直到基本消除溢流。改进后的模型见图 1, 考虑到工程实际, 取整后的调蓄池参数设置如下: 4 个调蓄池的有效水深分别为 5、4.5、4.5、4 m, 面积均为 1 000 m², 容积分别为 5 000、4 500、4 500、4 000 m³。该方案能够满足截留需求, 但调蓄池容积偏大, 因此考虑在不改变调蓄池位置的情况下, 通过 LID 措施进行削减。

1.5 LID 措施参数确定

考虑到研究区域道路密集、宽度有限、自建房较多等特点, 选择生物滞留措施和透水铺装路面作为研究区域的 LID 措施, 两者在 SWMM 中的模型示意图见图 2。结合 SWMM 用户手册推荐值与相关国内外研究成果^[8,9], 确定模型参数见表 1。

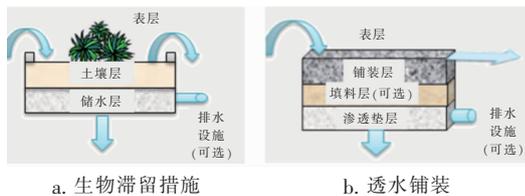


图 2 生物滞留措施和透水铺装示意

Fig. 2 Schematics of bioretention cells and permeable pavement

表 1 LID 参数设置

Tab. 1 Parameters of LID measures

生物滞留措施			透水铺装		
表层	滞留水深/mm	150	表层	滞留水深/mm	10
	表面坡度/%	0.4		铺装层	表面坡度/%
土壤层	厚度/mm	600	渗透垫层		厚度/mm
	孔隙率/%	0.43		孔隙率/%	0.15
储水层	厚度/mm	300	渗透垫层	厚度/mm	300
	孔隙率/%	0.5		孔隙率/%	0.5

为确定两种措施的设置面积, 选取以下 5 种情

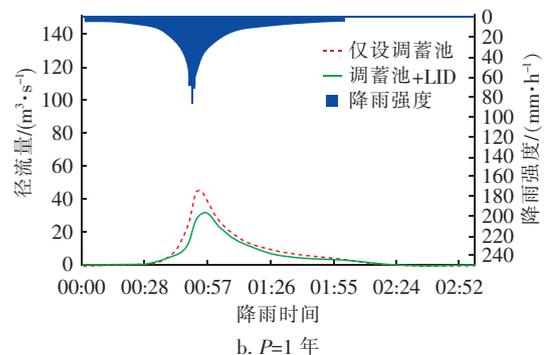
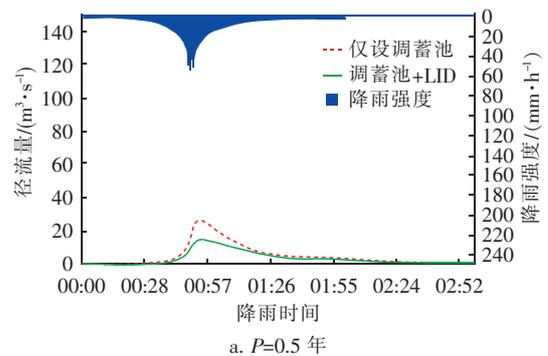
况: 设置 LID 措施面积占汇水区总面积的 1%、2%、3%、4%、5%, 对应控制径流比例分别为 10%、20%、30%、40%、50%。单独设置一种措施运行模型, 研究单一措施对径流的控制效果。结果表明, 在同等设置比例下, 透水铺装的径流控制效果远低于生物滞留措施。在 1% ~ 5% 的面积比例下, 透水铺装的径流削减比例仅为 2.66% ~ 13.63%, 生物滞留措施则达到了 9.35% ~ 46.87%。这是因为生物滞留措施有土壤层、储水层以及表层三层蓄水层, 而透水铺装仅能依靠渗透垫层, 蓄水层总厚度远低于生物滞留措施, 因此在降雨过程中会迅速趋于饱和。

虽然生物滞留措施的径流削减效果显著, 但其构造特性会妨碍地面的原本功能, 且土壤长期浸水会对附近建筑基础造成影响, 因此并不能大范围设置。虽然透水铺装路面的径流削减率低于生物滞留池, 但设置方式较为灵活, 可以在较大范围内设置。综上, LID 措施组合方案以研究区域内道路为参照, 沿途以一定宽度布设透水铺装路面和生物滞留措施, 布设的具体参数如下: 生物滞留措施占研究区域总面积的 1.5%, 透水铺装路面占总面积的 2.5%。

2 模型运行结果分析

2.1 LID 措施对径流的削减效果

分别在不同重现期下运行 LID + 雨水调蓄池模型, 研究区域内径流量随时间的变化见图 3。



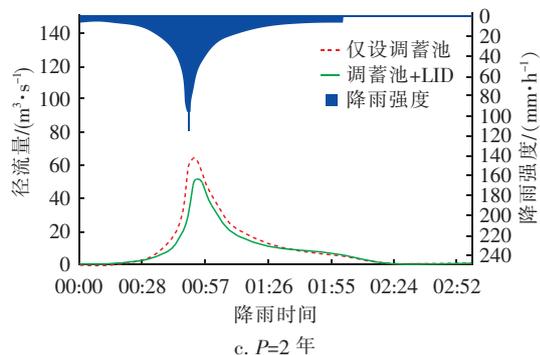


图 3 不同重现期下径流量和降雨量的变化

Fig. 3 Variation of precipitation and runoff under different return periods

由图 3 可知,在雨水调蓄池的基础上增设 LID 措施后,0.5 年重现期下,峰值径流量从 $26.28 \text{ m}^3/\text{s}$ 降至 $16.33 \text{ m}^3/\text{s}$,削减了 41.75%;1 年重现期下,峰值径流量从 $46.05 \text{ m}^3/\text{s}$ 降至 $33.07 \text{ m}^3/\text{s}$,削减了 28.19%;2 年重现期下,峰值径流量从 $64.87 \text{ m}^3/\text{s}$ 降至 $53.85 \text{ m}^3/\text{s}$,削减了 18.6%。三种重现期下峰值出现时间均无明显变化。随着重现期的增加,径流削减率从 41.75% 降至 18.6%,下降明显,可见 LID 措施对小重现期降雨的径流控制效果更明显。在本研究的参数设置情况下,LID 措施对峰值径流无明显延后作用。在总体径流量削减上,运行结果也表现出相近的规律,在 0.5、1、2 年重现期下,增设 LID 措施后,径流量削减率分别为 33.48%、26.18% 和 20.6%,变化幅度略小于峰值削减率。原因是透水铺装的透水性和入渗速度较低,在延缓峰值流量上作用不明显^[10];但相较于生物滞留措施,透水铺装灵活且可大范围设置,因此整体模拟结果仍能体现出较强的径流削减作用。

2.2 LID + 调蓄池方案对径流污染的截留效果

LID + 调蓄池联合运行方案对污染物的截留主要通过两种方法:①在整个降雨过程中,通过 LID 措施对径流进行下渗、拦截,吸收部分径流中的污染物;②通过设置在截流干管上的调蓄池直接容纳部分初期雨水,通过沉淀去除部分污染物。在不同重现期下,仅设调蓄池方案及 LID + 调蓄池联合运行方案对污染物(以 SS 为代表)的截留情况见图 4。可知,在雨水调蓄池的基础上设置 LID 措施后,对污染物的截留量明显提升,且随着重现期的增加,提升效果愈加显著;但雨水调蓄池的截留量有所下降,因为 LID 措施已经从源头削减了地表径流的污染物浓

度,致使排水系统收集雨水中的污染物浓度降低,再加上 LID 措施对径流总量的削减,共同导致了雨水调蓄池对污染物截留量的下降。

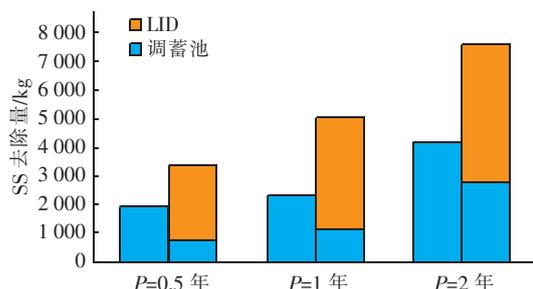


图 4 仅设调蓄池及 LID + 调蓄池方案对 SS 的截留效果

Fig. 4 Intercption of SS by stormwater detention tank and LID/stormwater detention tank

模拟结果表明,LID 措施对污染物的截留量占总截留量的比例较大,在 0.5、1 和 2 年一遇重现期下,分别达到了 76.40%、76.32% 和 63.40%,但随重现期无明显变化规律。这主要是因为研究区域的特殊截留规则:仅截留 9.7 mm 降雨量之前的雨水,因此调蓄池的截留仅针对部分雨水,效果有限;而 LID 措施则对整个降雨过程产生的径流污染进行截留,显著提高了整个系统的截留效果。

2.3 LID 措施对调蓄池容积的削减效果

LID 措施对调蓄池容积的削减效果见表 2。

表 2 LID 措施对雨水调蓄池容积的削减效果

Tab. 2 Reduction effect of detention tank volume by LID measures

项目	P=0.5 年			P=1 年			P=2 年		
	无 LID/ m ³	有 LID/ m ³	削减率/ %	无 LID/ m ³	有 LID/ m ³	削减率/ %	无 LID/ m ³	有 LID/ m ³	削减率/ %
池 1	2 650	1 110	58.11	2 750	1 420	48.36	4 790	3 340	30.27
池 2	2 920	1 150	60.62	2 530	1 280	49.41	4 310	2 890	32.95
池 3	2 050	960	53.17	2 480	1 410	43.15	4 260	2 950	30.75
池 4	2 510	1 420	43.43	2 520	1 590	36.90	3 780	2 810	25.66
总计	10 130	4 640	54.20	10 280	5 700	44.55	17 140	11 990	30.05

注:表中容积为 SWMM 模拟结果,与工程实际取值存在一定差异。

由表 2 可知,设置 LID 措施后,调蓄池容积大幅降低。在 0.5、1、2 年一遇重现期下,4 座调蓄池的容积分别可减少 43.43%~60.62%、36.90%~49.41%、25.66%~32.95%。调蓄池容积削减幅度大于径流量削减和污染物截留,这是因为调蓄池主要针对初期雨水截留,而这也是 LID 措施截留效率最高的时段,随着降雨的进行,土壤接近饱和,LID

措施的效果也随之减弱,直到完全失效。

3 结论

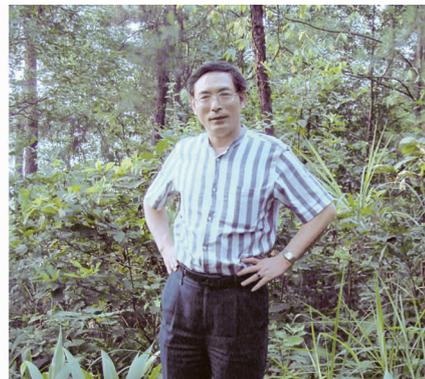
① 对于研究区域,根据现状管网部分扩大管径,在污水干管上增设调蓄池,在汇水区设置LID措施,能够有效截留全年50%的降雨。

② LID+雨水调蓄池措施对径流总量和径流峰值均有明显削减作用;对污染物的截留效果有显著提升,且截留效率随重现期的增加而减小。但在目前设置参数下,对径流峰值的出现时间无明显影响。

③ LID+雨水调蓄池措施能显著减少雨水调蓄池容积,削减率随着重现期的增加而减小。

参考文献:

- [1] 朱理铭,李钊. 广州市雨水调蓄池规划技术研究[J]. 中国给水排水,2010,26(18):46-49.
Zhu Liming, Li Chuan. Study on planning technology of rainwater storage tank in Guangzhou[J]. China Water & Wastewater, 2010, 26(18): 46-49 (in Chinese).
- [2] 陈华. 上海中心城区两类雨水调蓄池污染减排效应研究[J]. 中国给水排水,2012,28(15):45-48.
Chen Hua. Study on pollutant reduction effects of two different stormwater detention tanks in central Shanghai [J]. China Water & Wastewater, 2012, 28(15): 45-48 (in Chinese).
- [3] 车伍,杨正,赵杨,等. 中国城市内涝防治与大小排水系统分析[J]. 中国给水排水,2013,29(16):13-19.
Che Wu, Yang Zheng, Zhao Yang, et al. Analysis of urban flooding control and major and minor drainage systems in China[J]. China Water & Wastewater, 2013, 29(16): 13-19 (in Chinese).
- [4] 徐晓梅,黎巍,何佳,等. 昆明主城合流污水调蓄池截污效能模拟[J]. 环境科学研究,2012,25(10):1180-1186.
Xu Xiaomei, Li Wei, He Jia, et al. Simulation study on the interception efficiency of rainwater storage tanks in Kunming [J]. Research of Environmental Sciences, 2012, 25(10): 1180-1186 (in Chinese).
- [5] 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 runoff modelling [J]. Environmental Science, 2010, 31(9): 2023-2028 (in Chinese).
- [6] 谭琼,李田,张建频,等. 初期雨水调蓄池运行效率的计算机模型评估[J]. 中国给水排水,2007,23(18):47-51.
Tan Qiong, Li Tian, Zhang Jianpin, et al. Evaluation of computer model for operation efficiency of initial rainwater detention tank [J]. China Water & Wastewater, 2007, 23(18): 47-51 (in Chinese).
- [7] 张勤,刘阳. 滇池流域初期雨水的截流量确定方法研究[J]. 中国给水排水,2014,30(13):115-118.
Zhang Qin, Liu Yang. Determination of interception capacity of initial rainwater in Dianchi Lake Basin [J]. China Water & Wastewater, 2014, 30(13): 115-118 (in Chinese).
- [8] 许萍,何俊超,任欣欣,等. 基于SWMM模型的城市道路LID设施设计参数优化研究[J]. 水电能源科学,2016,34(2):21-25.
Xu Ping, He Junchao, Ren Xinxin, et al. Optimization of LID design parameters of urban road based on SWMM model [J]. Water Resources and Power, 2016, 34(2): 21-25 (in Chinese).
- [9] Palla A, Gnecco I. Hydrologic modeling of Low Impact Development systems at the urban catchment scale [J]. J Hydrol, 2015, 528: 361-368.
- [10] 胡作鹏,刘志强,彭森,等. 低影响开发(LID)雨水径流控制效果模拟[J]. 环境工程学报,2016,10(7):3956-3960.
Hu Zuopeng, Liu Zhiqiang, Peng Sen, et al. Simulation of storm water runoff control effect by low impact development (LID) [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2016, 10(7): 3956-3960 (in Chinese).



作者简介:张勤(1957-),男,重庆人,工学学士,教授,主要从事城市给水排水工程理论、水工程经济、建筑给排水工程研究。

E-mail: cq_zhangqin@163.com

收稿日期:2017-10-10