

DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdkj.2020.0032

王琳,王浩程,卫宝立. 小城镇低影响开发雨洪控制效果模拟[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2020, 18(2): 99-106. WANG L, WANG H C, WEI B L. Simulation of control effect of rainfall and flood in low impact development of small towns[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2020, 18(2): 99-106. (in Chinese)

小城镇低影响开发雨洪控制效果模拟

王琳¹, 王浩程¹, 卫宝立²

(1. 中国海洋大学 海洋环境与生态教育部重点实验室, 山东 青岛 266100; 2. 青岛市勘察测绘研究院, 山东 青岛 266011)

摘要:选择山东营丘镇区为研究对象,运用SWMM软件结合镇区地形地势和土地利用现状对研究区域进行合理概化,参考潍坊市暴雨强度公式设计降雨模型,完成对确定及不确定性参数的设定,并基于径流系数法对不确定性参数进行校准,最后利用多场降雨对校准后的理想解集进行稳定性验证。同时,结合研究区所布设的低影响开发雨水综合蓄集利用系统,完成对其低影响开发(LID)措施参数的设定,最终实现对研究区在不同重现期(1、3、10 a)下有无LID设施时的水量及水质情况的模拟。结果表明,LID措施对径流总量、径流系数、峰现时间、峰值流量和TSS排放负荷等方面的控制效果显著,且LID措施在重现期较小的降雨情景中对地表径流的滞纳效果更明显。

关键词:SWMM模型;低影响开发;降雨重现期;降雨径流;污染负荷

中图分类号:TU992 文献标志码:A 开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Simulation of control effect of rainfall and flood in low impact development of small towns

WANG Lin¹, WANG Haocheng¹, WEI Baoli²

(1. College of Environmental Science and Engineering, Ocean University of China, Qingdao 266100, China;

2. Survey and mapping institute of Qingdao City, Qingdao 266011, China)

Abstract: Taking Yingqiu Town of Shandong Province as the research object, the SWMM software was used to combine the topography and land use status of the township to rationalize the study area. The rainfall model was designed according to the rainstorm intensity formula of Weifang City, and by completing the setting of the determined and uncertain parameters. The model was calibrated by the uncertain parameters based on the runoff coefficient method. Finally, the stability of the calibrated ideal solution set was verified by using multiple fields of rainfall. Simultaneously, the low-impact development of the integrated rainwater storage and utilization system were combined in the study area. The parameters of low-impact development measures (LID) were set, and finally, the simulation of water quantity and quality in the study area with or without low-impact development facilities in different return periods (one year, three years, ten years) were completed. The results showed that LID measures have significant control effects on total runoff, runoff coefficient, peak time, peak discharge and TSS discharge load. Moreover, the effect of LID measures on surface runoff delay was more obvious in rainfall scenarios with smaller rainfall return period.

Key words: SWMM model; LID; rainfall return period; rainfall runoff; pollution load

收稿日期: 2019-03-19 修回日期: 2019-08-09 网络出版时间: 2019-08-28

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20190828.0923.004.html>

基金项目: 2015年住房城乡建设部科学技术项目(2015-R2-026); 2017年济南市社会民生重大专项(201704315); 国家重点研发计划项目(2018YFC0408000; 2018YFC0408004)

作者简介: 王琳(1966—),女,山东潍坊人,教授,博士生导师,主要从事水资源利用与水污染控制研究。E-mail: 191089658@qq.com

随着城镇化进程的加快,城市水文特征发生重大改变,由降雨集中而导致的城镇内涝现象愈发普遍,同时城镇非点源污染情况也越来越严重^[1]。为提升雨水资源的利用率和降低面源污染,低影响开发技术(low impact development, LID)作为一门新兴的雨水管理技术,基于源头控制理念及模拟自然水文条件原理,可以有效削减雨水径流量和污染物负荷,在全球范围内被广泛应用^[2]。为深入了解城镇化区域下垫面变化对雨水径流、汇流过程的影响,多种水文模型被开发研究,国际上较为成熟的城市水文模型有: SWMM 模型、GWLf 模型、AN-SWERS 模型、HSPF 模型、SWAT 模型和 MOUSE 模型等^[3-4]。其中 SWMM 模型(storm water management model,暴雨洪水管理模型)是 20 世纪 70 年代由美国环保署开发的城市排水防涝系统模拟模型,主要用于对单一或长时间连续降雨事件中径流量和污染物负荷变化的模拟^[5]。被广泛应用于防涝系统设计、城市排水管网设计、BMPs 控制效果模拟和多功能调蓄与 CSO 控制设施的设计及控制效果评价等领域^[6]。SWMM 模型集水文、水质、水力模拟功能于一身,在 SWMM5.0 版本新增加低影响开发(LID)模块,包括生物滞留池、透水铺装、下渗沟、雨水罐、植草沟 5 种 LID 措施,在最新版本 SWMM5.1 中又新增雨水花园、屋面雨水断接及绿色屋顶 3 种雨水处置技术,并且 LID 措施相关参数设置也在 SWMM5.1 版本中得到补充^[7-8]。SWMM 模型自开发投入使用以来,国外一些发达国家关于水文模拟研究已有大量工程实例。Lee 等^[9]运用 SWMM 和 HSPF 模型对汉江某小流域的降雨径流量和污染物负荷进行模拟研究,得出结论 SWMM 水文模型更加适用于对小尺度流域的模拟。Jia 等^[10]运用 SWMM 模拟北京奥运村排水系统采用 LID 和最佳管理措施 BMPs 后的降雨情景,结果表明研究区经改造后,雨水径流中的重金属、致病菌、油脂类及悬浮颗粒物等污染物均达到了预期处理效果。Camorani 等^[11]研究发现,SWMM 中模型平均地表坡度、曼宁系数、地表漫流宽度、不渗透面积比、地表入渗率、洼地储存深度和入渗衰减系数的参数设定与土地利用类型有关。国内关于 SWMM 模型的研究与应用起步相对较晚,目前尚处于初期阶段,苏波等^[12]以江苏南京大学为研究对象,运用 SWMM 对该工程拟采用的 3 种 LID 布置方案进行模拟,通过对不同重现期的径流量和径流系数进行对比分析,评估不同低影响开发方案的雨洪控制效果。张胜杰等^[13]运用 SWMM 对某新规

划区内不同降雨重现期的 LID 措施对降雨径流进行模拟研究,结果表明 LID 措施可以削减降雨径流的洪峰流量,推迟峰现时间和减小开发区域内的地表径流系数,且 LID 措施对重现期较小降雨事件地表径流滞纳效果更明显。龙剑波等^[14]以自贡釜溪河流域城市规划区为研究对象,运用 SWMM 分别对研究区下垫面规划后不透水率为 30%和规划前 70%时的径流情况进行模拟分析,对比结果表明,规划后 TSS 峰值浓度平均降低了 55%,径流峰值流量平均降低了 58%。目前,关于城镇化地区在不同降雨重现期中有无 LID 措施对径流量及水质作用效果的研究相对较少,因此本文以山东营丘镇区为研究对象,基于 SWMM 软件构建雨洪模型,完成对城镇化地区不同重现期下有无 LID 措施时的水量及水质情况的模拟,通过对比分析 LID 措施对雨水径流量、洪峰流量和径流污染物的控制效果,旨在为海绵城市在城镇化地区的实践提供参考。

1 内容与方法

1.1 研究区概化

营丘镇由潍坊市昌乐县管辖,镇区位于镇域中部偏西。研究区域属暖温带半湿润大陆性季风气候,平均年降雨量为 625 mm,其中汛期(6—9 月)平均降雨 440.12 mm,占年均降雨量的 71.13%,现状总面积为 122.83 hm²,整体地势西高东低,南高北低,高程介于 80~113 m,不透水区域为居住区建筑用地和道路,透水区域为耕地、林地、绿地和部分空地。基于 SWMM 模型对研究区域进行概化,共划分子汇水区 25 个,用 ZMJ 表示;管渠 23 条,用 GQ 表示;拐点 23 个,用 J 表示;排水口 1 个,用 PEK 表示;雨量计 1 个,用 YLJ 表示。概化结果见图 1。

1.2 设计降雨模型

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^[15]。目前用于合成暴雨雨型的常用方法包括 YC 法、Huff 法、PC 法、SCS 法和 CHM(芝加哥雨型法)^[16-17]。

资料显示,CHM 法雨型是基于暴雨强度公式推求得到的,雨峰位置由暴雨统计资料确定,且针对短历时设计降雨雨型效果较好,不仅能满足精度要求而且容易确定雨强过程^[18-19]。本研究采用 CHM 法合成降雨情景,结合《昌乐县营丘镇总体规划》(2014—2030 年),确定设计降雨重现期 P 为 3 a,雨峰系数 r 取 0.4,降雨历时为 120 min,时间间隔为

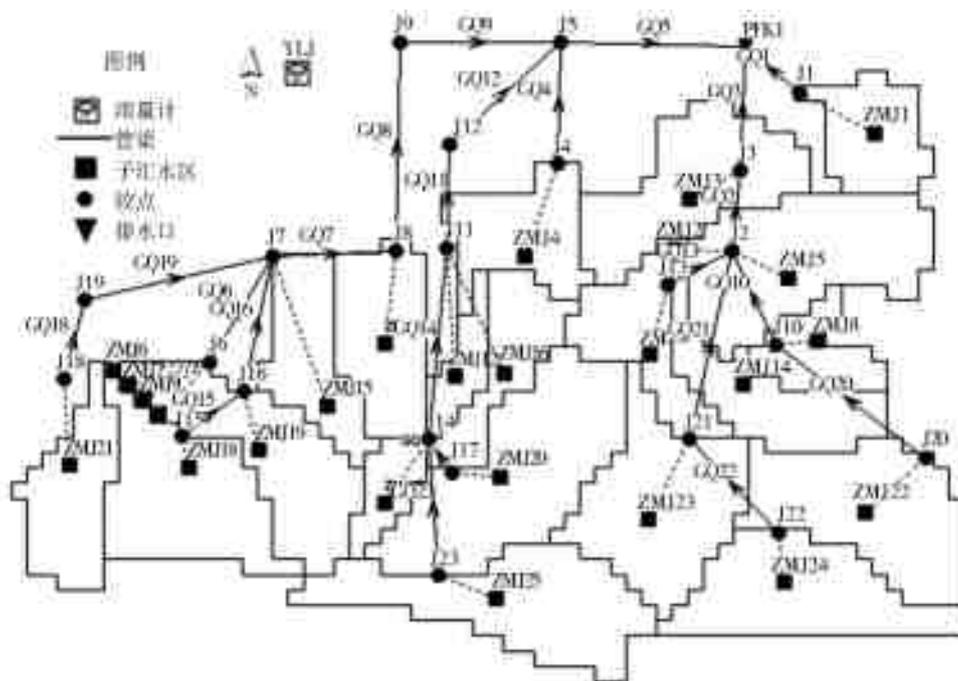


图1 研究区概化

Fig.1 Schematic diagram of the research area

1 min,时间步长取 1 min,模拟总时长为 12 h,汇水面积1 228 274 m²。

暴雨雨型的合成还需参考当地暴雨强度公式,本研究区隶属山东潍坊市,因此采用潍坊市暴雨强度公式

$$q = \frac{4\ 091.17 \times (1 + 0.824 \times \lg P)}{(t + 16.7)^{0.87}} \quad (1)$$

式中: q 为暴雨强度,L/(s·hm²); P 为重现期; a ; t 为降雨历时,min。合成后的雨型 120 min 累计降雨量为 57 mm,根据潍坊市暴雨强度公式和 CHM 法生成本研究所需的暴雨雨型,见图 2。

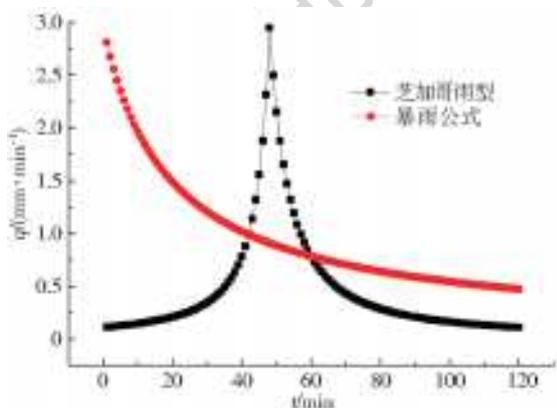


图2 潍坊市芝加哥雨型(P=3,t=120 min)

Fig.2 Rainfall pattern of Chicago in Weifang City (P=3,t=120 min)

1.3 参数设置及校准

1.3.1 参数设置

本研究假设土壤层中的饱和土壤地带与非饱和

土壤地带存在明显分界,雨水降落至非饱和地带开始入渗,此时需考虑土壤初始湿度污损值,土壤导水率等参数设置,因此采用 GREEN-AMPT 渗透模型,为便于研究,汇流模拟采用的是非线性水库模型,旨为假设每个子汇水区形状规则,同时假定各子汇水区特征宽度代表地表径流的典型宽度,同时将非线性水库概化为矩形区域,对于排水系统管段流量演算采用的是动力波水力模型,以模拟沟渠、管道内的回水效果。其中,子汇水区面积、坡度、特征宽度、管道形状、长度等确定性参数可借助 GIS、ENVI 软件分析、《昌乐县营丘镇总体规划》文本、市政管网资料和实地勘察等手段获知。对于透水及不透水面的曼宁系数及洼蓄量、吸入水头、初始污损、导水率等不确定性参数设定时,

参考《雨水管理模型 SWMM(5.0)用户手册》给出的参考值和国内相关研究采用的典型值^[6,18-20]。

水质模拟方面,SWMM 模型可对降雨情景中污染物负荷变化情况进行模拟,根据研究区土地利用现状定义各子汇水区中的土地利用类型,对增长和冲刷函数进行设置,确定研究区的径流水质情况^[21]。为模拟营丘镇区 LID 措施实施前后水质的变化情况,本研究将 TSS 作为目标污染物,为便于研究,将土地利用类型分为未开发和开发两类,各子汇水区根据实际情况进行土地利用赋值;对于增长模块,通过参考《雨水管理模型 SWMM(5.0)用户手册》及相关文献^[6,22],对于开发区的悬浮固体增长

以常速为 $1.12 \text{ kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{d})$ 进行,直到达到 $56.00 \text{ kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{d})$,增长函数选择幂函数(POW),选择 area 做为正规化器,并且设定未开发区的增长是开发区一半;对于冲刷模块,设定恒定事件平均质量浓度在开发区为 $100 \text{ mg}/\text{L}$,未开发区为 $50 \text{ mg}/\text{L}$,当径流发生时将维持这一质量浓度,直到可用的增长被耗尽,函数类型选择 EMC,系数为 100;设定模拟前期干旱日为 5 d;其他值为缺省值。

1.3.2 参数校准

查阅相关资料,获得的适用于本研究区的雨水径流确定性参考数据较少,因此为使模拟结果更加符合实际情况,需要对不确定参数进行调整迭代从而得到最优解。本文采用刘兴波^[22]提出的基于径流系数校准径流模型参数的方法,以径流系数作为模型校准的目标函数,将 SWMM 模型模拟得到的径流系数与排水管网设计所采用的综合径流系数进行比较。本文以图 1 的研究区概化图为研究对象,对模型的不确定性参数进行校准。SWMM 模型参数校准的具体步骤如下。

1.3.2.1 确定研究区综合径流系数

研究区域综合径流系数可由各子汇水区径流量按面积加权平均除以降雨量得到,查阅相关文献及 GB 50014—2006《室外排水设计规范》(2016 版),得到汇水区综合径流系数见表 1^[14-15]。

参考《昌乐县营丘镇总体规划》(2014—2030 年)确定本研究区总面积为 122.83 hm^2 ,居住区建筑用地占总面积的 31.5%,综合平均径流系数为

0.45,属于城镇建筑比较稀少居住区。

表 1 汇水区综合径流系数

Tab. 1 Comprehensive runoff coefficients in catchment areas

区域情况	不透水面积比例	综合径流系数
城镇建筑密集居住区	>70%	0.60~0.80
城镇建筑较密集居住区	50%~70%	0.50~0.70
城镇建筑比较稀少居住区	30%~50%	0.40~0.60
城镇建筑稀少居住区	<30%	0.30~0.50

1.3.2.2 确定模型参数校准集

根据模型管理手册和相关文献中的参数经验值确定待校准参数的初始值,通过对待校准参数经过多次迭代调整,最终得到模型参数校准的“满意解”见表 2^[22]。从表 2 中可以看出当透水与不透水区的曼宁系数与洼蓄量、初始污损、吸入水头和导水率参数初始值分别为 0.1、0.01、0.050、0.050、0.260、80、12.0 时,模拟的综合径流系数为 0.59,虽然模拟得到的径流结果介于表 1 中城镇建筑比较稀少居住区所对应的综合径流系数取值区间,但与本研究区综合平均径流系数 0.45 依然相差较大,因此需对该模型的待校准参数进行调整,使模拟得到径流情况更加与营丘镇区实际径流情况相符。从表 2 所示的校准参数集的过程中发现,经 5 次迭代调整后综合径流系数为 0.49,与营丘镇区综合平均径流系数 0.45 相差不大,因此本研究将第五次迭代后的模型参数校准集作为此次模型参数校准的“满意解”。

表 2 SWMM 模型不确定性参数校准($P=3, r=0.4, T=120 \text{ min}$)

Tab. 2 Uncertainty parameter values during the calibration of SWMM model($P=3, r=0.4, T=120 \text{ min}$)

待校准参数	初始值	调整值				
		第一次	第二次	第三次	第四次	第五次
透水区曼宁系数	0.10	0.15	0.20	0.25	0.30	0.35
不透水区曼宁系数	0.01	0.015	0.020	0.025	0.030	0.035
透水区洼蓄量/mm	0.050	0.055	0.060	0.065	0.070	0.075
不透水区洼蓄量/mm	0.050	0.055	0.060	0.065	0.070	0.075
初始土壤含湿量污损(分数值)	0.260	0.265	0.270	0.275	0.280	0.285
吸入水头/mm	80	81	82	83	84	85
导水率/($\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$)	12.0	12.5	13.0	13.5	14.0	14.5
模拟综合径流系数	0.59	0.56	0.54	0.53	0.51	0.49
参考综合径流系数		0.40~0.60				

1.3.2.3 模型参数的稳健性验证

为了验证模型参数在不同降雨情景下的稳健性,需采用多场降雨来验证校准结果^[13]。本文采用重现期 $P=1 \text{ a}$ 和 $P=10 \text{ a}$ 的降雨情景进行稳健性验证,模拟过程中相关参数选择表 2 中第五次

迭代后模型参数校准集,模拟得到 $P=1 \text{ a}$ 和 $P=10 \text{ a}$ 的综合径流系数分别为 0.46 与 0.55。这说明本研究采用的参数集在常用降雨重现期范围内具有较强稳健性,可用来进行 LID 措施实施效果模拟。

1.3.3 LID 系统参数的设定

参考王浩程等人^[23]的相关研究,获知本研究区的水雨利用系统设计为“透水铺装+下沉式绿地+植草沟、简易生物滞留池+湿塘、雨水湿地”的雨水综合蓄集利用系统,见图 3。LID 措施设计参数见表 3。其中湿塘、雨水湿地和下沉式绿地均是经 SWMM 模型中生物滞留池的表面处理层参数变换得到的。以雨水花园参数设定为例,布设方式为子汇水区层面^[1]。参考相关资料^[24-25]设置蓄水深度为 200 mm,土壤厚度为 50 mm,孔隙率为 0.5,孔隙比为 0.75,土壤导水率为 0.3 m/h。雨水花园底部不设暗渠,雨水下渗后直接补给地下水。



图 3 LID 措施系统布局
Fig. 3 LID measures system layout

表 3 LID 措施设计参数
Tab. 3 LID measures designed parameters

技术措施	总有效数量	设计参数	总设计调蓄容积/m ³
下沉式绿地	10 560.32 m ²	下凹深度 0.15 m	1 584.04
湿塘	9 477.57 m ²	湿塘蓄水高度 $h=1$ m	9 477.57
雨水花园	54 766.74 m ²	设计蓄水高度 0.2 m	10 953.35
雨水湿地	8 358.58 m ²	设计水深 0.3 m	2 507.57
蓄水池/雨水罐	12 个	5 m ³ /个	60
透水铺装	37 620.94 m ²	《透水砖路面技术规程》(CJJ/T188)	—
总设计调蓄容积			24 582.53

2 结果与分析

本研究在重现期 $P=1$ a、 $P=3$ a 和 $P=10$ a 时的设计降雨条件下,LID 实施前后区域内径流和 TSS 排放负荷随时间的变化情况见图 4 至 9。不同重现期 LID 实施前后径流总量、径流系数、峰现时间、峰值流量和 TSS 排放负荷等详细模拟结果分别见表 4、5 和 6,LID 实施前后在不同重现期降雨情景中的各指标削减量汇总情况见表 7。

从上述图表中可知:在不同重现期下,采取 LID

措施后,降雨径流量、地表径流系数、峰值流量均明显降低,同时延长了地表产汇流时间及峰现时间。但随着降雨重现期增大,即降雨强度增大,径流总量、峰值流量削减率呈逐渐降低趋势,这是由于高强度降雨导致土壤下渗量和滞纳量迅速饱和,当降雨强度过大,超过 LID 设施的下渗、调蓄能力时,LID 措施对径流总量、径流系数、峰现时间、峰值流量和 TSS 排放负荷等方面的作用进一步减弱,但仍对雨水径流及污染物排放情况有一定调控作用。

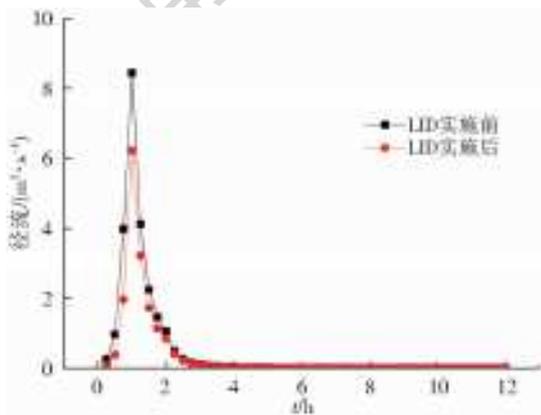


图 4 LID 实施前后径流随时间变化 ($P=1$ a)
Fig. 4 Runoff changes with time before and after LID implementation ($P=1$ a)

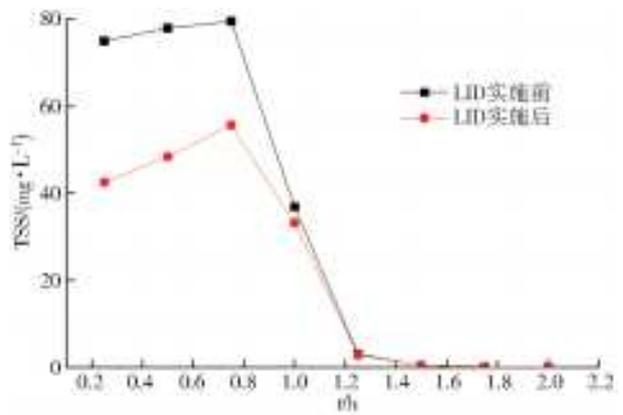


图 5 LID 实施前后水质随时间变化 ($P=1$ a)
Fig. 5 Water quality changes with time before and after LID implementation ($P=1$ a)

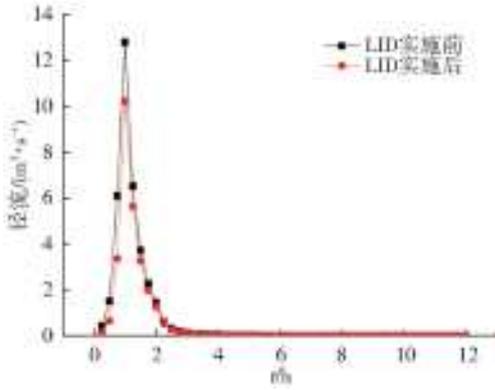


图 6 LID 实施前后径流随时间变化 ($P=3$ a)
Fig. 6 Runoff changes with time before and after LID implementation ($P=3$ a)

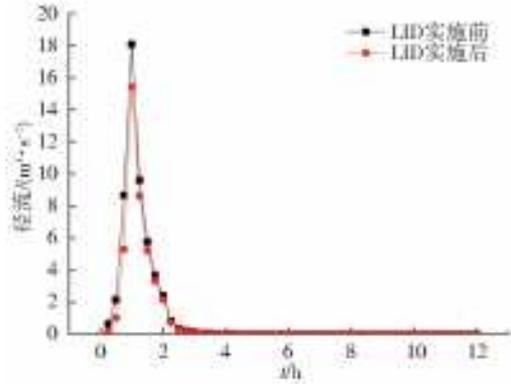


图 8 LID 实施前后径流随时间变化 ($P=10$ a)
Fig. 8 Runoff changes with time before and after LID implementation ($P=10$ a)

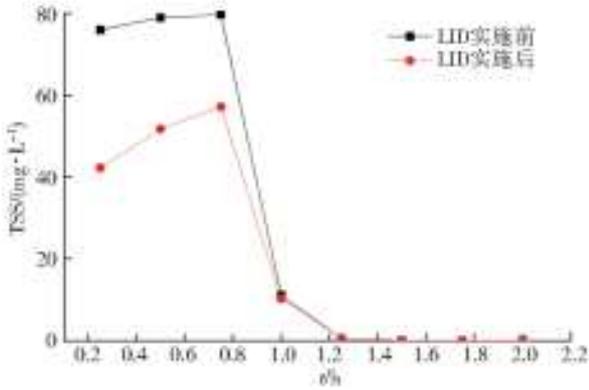


图 7 LID 实施前后水质随时间变化 ($P=3$ a)
Fig. 7 Water quality changes with time before and after LID implementation ($P=3$ a)

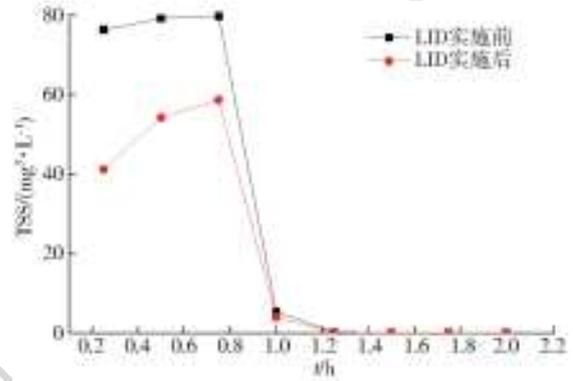


图 9 LID 实施前后水质随时间变化 ($P=10$ a)
Fig. 9 Water quality changes with time before and after LID implementation ($P=10$ a)

表 4 $P=1$ a 时常规开发与采取 LID 措施后 SWMM 模型模拟结果

Tab. 4 $P=1$ a; Simulation results of SWMM model after routine development and LID measures

开发方式	径流总量/mm	降雨量/mm	平均径流系数	峰现时间/min	峰值流量/($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	TSS/kg
LID 实施前	18.584	40.91	0.45	50	3.72	545.326
LID 实施后	12.903	40.91	0.32	58	2.54	255.141

表 5 $P=3$ a 时常规开发与采取 LID 措施后 SWMM 模型模拟结果

Tab. 5 $P=3$ a; Simulation results of SWMM model after routine development and LID measures

开发方式	径流总量/mm	降雨量/mm	平均径流系数	峰现时间/min	峰值流量/($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	TSS/kg
LID 实施前	28.410	57.00	0.49	52	5.78	565.298
LID 实施后	21.675	57.00	0.38	57	4.29	264.766

表 6 $P=10$ a 时常规开发与采取 LID 措施后 SWMM 模型模拟结果

Tab. 6 $P=10$ a; Simulation results of SWMM model after routine development and LID measures

开发方式	径流总量/mm	降雨量/mm	平均径流系数	峰现时间/min	峰值流量/($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	TSS/kg
LID 实施前	41.270	74.624	0.55	55	8.25	588.289
LID 实施后	33.436	74.624	0.45	57	6.50	276.106

表 7 LID 措施实施前后在不同重现期降雨情景中的各指标削减量汇总情况

Tab. 7 Summary of reduction of indicators in different rainfall scenarios before and after implementation of LID measures

设计降雨重现期	径流总量减小百分比/%	平均径流系数减小值	峰值流量减小百分比/%	峰值流量被滞后时间/h	TSS 污染物减小百分比/%
$P=1$ a	30.57	0.13	31.72	8	53.21
$P=3$ a	23.71	0.11	25.78	5	53.16
$P=10$ a	18.98	0.10	21.21	2	53.07

3 结 语

本研究采用 SWMM 模型模拟分析了营丘镇区内所设计的透水铺装、下沉式绿地、植草沟、湿塘和雨水湿地等几种 LID 措施在降雨重现期为 1、3、10 a 条件下对径流和水质的控制效果。结果表明,采取 LID 措施后,地表的降雨滞纳量增加,降雨地表渗入量增大,由此地表径流系数减小,峰值流量减小,地表产汇流时间延长,峰现时间滞后。同时,重现期越大,其对应的降雨强度越大,采取 LID 措施后地表下渗量和滞纳量达到饱和状态的时间越短,甚至由于降雨强度过大,采用 LID 措施的地表还未达到饱和状态就出现产汇流情况,采取 LID 措施对径流总量、径流系数、峰现时间、峰值流量和 TSS 排放负荷等方面的作用减弱,因此 LID 措施在重现期较小的降雨情景中对地表径流的滞纳效果更明显。

SWMM 模型可用于探究 LID 措施对降雨径流和水质控制效果,为 LID 措施的规划建设提供参考,由于本研究区内确定性参考数据相对较少,对于参数设置方面大多采用国内外相关研究的经验值,所以需加强对后续 LID 措施实际效果的监测,以确保模拟结果的准确性。

参考文献(References):

- [1] 李家科,李亚,沈冰,等. 基于 SWMM 模型的城市雨水花园调控措施的效果模拟[J]. 水力发电学报,2014(4): 60-67. (LI J K, LI Y, SHEN B, et al. Effect simulation of urban rainwater garden regulation measures based on SWMM model [J]. Journal of Hydropower, 2014 (4): 60-67. (in Chinese))
- [2] 谭琪,丁芹. 低影响开发技术理论综述及研究进展[J]. 中国园艺文摘,2014,30(3): 54-56. (TAN Q, DING Q. Review and research progress of low impact development technology theory [J]. Chinese Horticultural Abstracts, 2014, 30 (3): 54-56. (in Chinese)) DOI:10. 3969/j. issn. 1672-0873. 2014. 03. 025.
- [3] 许迪. SWMM 模型综述[J]. 环境科学导刊,2014(6): 23-26. (XU D. SWMM model review [J]. Environmental Science Guide, 2014 (6): 23-26. (in Chinese)) DOI:10. 3969/j. issn. 1673-9655. 2014. 06. 005.
- [4] 王龙,黄跃飞,王光谦. 城市非点源污染模型研究进展[J]. 环境科学,2010(10): 2532-2540. (WANG L, HUANG Y F, WANG G Q. Advances in urban non-point source pollution models [J]. Environmental Science, 2010 (10): 2532-2540. (in Chinese))
- [5] 沈玉超. 基于 SWMM 的海绵城市防洪排涝效果评估[D]. 大连:大连理工大学,2016. (SHEN Y C. Evaluation of flood control and drainage effect in sponge cities based on SWMM [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2016. (in Chinese))
- [6] 王文亮,李俊奇,宫永伟,等. 基于 SWMM 模型的低影响开发雨洪控制效果模拟[J]. 中国给水排水,2012,28(21): 42-44. (WANG W L, LI J Q, GONG Y W, et al. Simulation of rainfall control effect for low impact development based on SWMM model [J]. Water Supply and Drainage in China, 2012, 28 (21): 42-44. (in Chinese))
- [7] CIPOLLA S S, MAGLIONICO M, STOJKOV I. A long-term hydrological modelling of an extensive green roof by means of SWMM [J]. Ecological engineering, 2016, 95: 876-887. DOI:10. 1016/j. ecoleng. 2016. 07. 009.
- [8] RAI P K, CHAHAR B R, DHANYA C T. GIS-based SWMM model for simulating the catchment response to flood events [J]. Hydrology Research, 2016, 48(2): 384-394. DOI:10. 2166/nh. 2016. 260.
- [9] SAE-BOM L, CHUN-GYEONG Y, KWANG WOOK J, et al. Comparative evaluation of runoff and water quality using HSPF and SWMM [J]. Water Science & Technology A Journal of the International Association on Water Pollution Research, 2010, 62(6): 1401.
- [10] JIA H, LU Y, YU S L, et al. Planning of LID-BMPs for urban runoff control: The case of Beijing Olympic Village [J]. Separation & Purification Technology, 2012, 84(2): 112-119.
- [11] CAMORANI G, CASTELLARIN A, BRATH A. Effects of land-use changes on the hydrologic response of reclamation systems [J]. Physics & Chemistry of the Earth, 2005, 30(8): 561-574.
- [12] 苏波,唐诗思,陈家乐. 基于 SWMM 的低影响开发径流量模拟及工程应用研究[J]. 建筑节能,2018(3): 64-68. (SU B, TANG S S, CHEN J L. Runoff simulation and engineering application of low impact development based on SWMM [J]. Building Energy Saving, 2018 (3): 64-68. (in Chinese)) DOI:10. 3969/j. issn. 1673-7237. 2018. 03. 014.
- [13] 张胜杰. 利用暴雨管理模型(SWMM)对低影响开发措施效果的模拟研究[J]. 中国建设信息,2013(19): 76-78. (ZHANG S J. A simulation study on the effect of low-impact development measures using storm management model (SWMM) [J]. China Construction Information, 2013 (19): 76-78. (in Chinese))
- [14] 龙剑波,司马卫平,王书敏,等. 城市规划与城市水环境响应研究[J]. 南水北调与水利科技,2014(1): 73-77. (LONG J B, SI MA W P, WANG S M, et al. Research on urban planning and urban water environment response [J]. South-to-North Water Transfer and

- Water Science & Technology, 2014 (1): 73-77. (in Chinese)) DOI: 10.3724/SP.J.1201.2014.01073.
- [15] 蒋明. 新暴雨形势下上海市设计暴雨雨型研究[J]. 湖南理工学院学报(自然科学版), 2015(2): 69-73. (JIANG M. Research on design rainstorm patterns in Shanghai under new rainstorm situation[J]. Journal of Hunan Institute of Technology (Natural science edition). 2015 (2): 69-73. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1672-5298.2015.02.015.
- [16] 朱玲, 龚强, 李杨, 等. 辽宁葫芦岛市新旧暴雨强度公式对比及暴雨雨型分析[J]. 暴雨灾害, 2017(3): 251-258. (ZHU L, GONG Q, LI Y, et al. Comparison of new and old storm intensity formulas and analysis of storm pattern in Huludao city, Liaoning Province[J]. Heavy Rain Disaster, 2017 (3): 251-258. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1004-9045.2017.03.008.
- [17] 梅超, 刘家宏, 王浩, 等. 城市设计暴雨研究综述[J]. 科学通报, 2017(33): 3873-3884. (MEI C, LIU J H, WANG H, et al. Summary of urban design rainstorm research[J]. Scientific Bulletin, 2017 (33): 3873-3884. (in Chinese)) DOI: CNKI: SUN: KXTB. 0. 2017-33-013.
- [18] 王静. 基于 SWMM 模型的山地城市暴雨径流效应及生态化改造措施研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2012. (WANG J. Studies on rainstorm runoff and ecological reconstruction measures of mountain cities based on SWMM model[D]. Chongqing: Chongqing University, 2012. (in Chinese))
- [19] 孙艳伟, 把多铎, 王文川, 等. SWMM 模型径流参数全局灵敏度分析[J]. 农业机械学报, 2012(7): 42-49. (SUN Y W, BA D D, WANG W C, et al. Global sensitivity analysis of runoff parameters in SWMM model[J]. Journal of Agricultural Machinery, 2012 (7): 42-49. (in Chinese)) DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2012.07.008.
- [20] 王永, 郝新宇, 季旭雄, 等. SWMM 在山区城市排水规划中的应用[J]. 中国给水排水, 2012(18): 80-83. (WANG Y, HAO X Y, JI X X, et al. Application of SWMM in urban drainage planning in mountain areas [J]. Water Supply and Drainage in China, 2012 (18): 80-83. (in Chinese)) DOI: CNKI: SUN: GSPS. 0. 2012-18-022.
- [21] 王俊松. 3S 技术支持下基于 SWMM 的城市非点源污染负荷定量化研究[D]. 昆明: 云南师范大学, 2008. (WANG J S. Quantitative study on urban non-point source pollution load based on SWMM with 3S technical support [D]. Kunming: Yunnan normal University, 2008. (in Chinese))
- [22] 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(11): 213-217. (LIU X B. Calibration method of urban rainfall-runoff model parameters based on runoff coefficient[J]. Water Supply and Drainage, 2009(11): 213-217. (in Chinese)) DOI: CNKI: SUN: JZJS. 0. 2009-11-058.
- [23] 王浩程, 王琳, 卫宝立. 基于 GIS 和 LID 的雨水集蓄技术研究—以山东省滨河小镇营丘镇为例[J]. 水土保持通报, 2019, 39(2): 155-160. (WANG H C, WANG L, WEI B L. Low impact development planning and design of rainwater storage facilities based on GIS—A case in Yingqiu town of Shandong province[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2019, 39 (2): 155-160. (in Chinese)) DOI: CNKI: SUN: STTB. 0. 2019-02-025.
- [24] 王晋. 基于小流域尺度的城市化 LUCC 水文效应及水生态综合修复技术研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2018. (WANG J. The research on the urbanization LUCC hydrological effects and the comprehensive restoration techniques for water ecosystem at small watershed scale [D]. Qingdao: Ocean University of China, 2018. (in Chinese))
- [25] 王雷, 杨凤阁, 王诚杰, 等. 基于 SWMM 模型的低影响开发模式在城市雨洪控制中的研究[J]. 中国农村水利水电, 2019(1): 83-86. (WANG L, YANG F G, WANG C J, et al. Research on low impact development model based on SWMM model in urban rainfall flood control[J]. Rural Water Resources and Hydropower in China, 2019 (1): 83-86. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1007-2284.2019.01.016.