

DOI:10. 3880/j. issn. 1004 - 6933. 2018. 05. 03

城市雨水径流污染及 LID 控制效果模拟

陈 莎^{1,2,3}, 陈晓宏^{1,2,3}

(1. 中山大学水资源与环境研究中心, 广东 广州 510275; 2. 华南地区水循环和水安全广东普通高校重点实验室, 广东 广州 510275; 3. 广东省华南地区水安全调控工程技术研究中心, 广东 广州, 510275)

摘要:采用 SWMM(storm water management model)模型对城市雨水径流及水质进行模拟,分析不同降雨条件下,LID(low impact development)控制措施对城市雨水径流及污染物的削减效果。结果发现:LID 控制措施对城市雨水径流量、污染物总负荷以及径流峰值均有明显削减作用,对径流峰现时间有延迟作用;雨水径流量、污染物总负荷以及径流峰值的削减率随雨峰系数的增大呈先增大、后较小的变化趋势,随重现期的增大而减小;峰现时间的延迟效果与雨峰系数和重现期均呈负相关;相对雨峰系数,重现期对雨水径流量、污染物负荷的削减率、径流峰值以及峰现时间的影响更显著。

关键词:海绵城市;SWMM 模型;LID 控制措施;城市雨水径流

中图分类号:P349 文献标志码:A 文章编号:1004 - 6933(2018)05 - 0013 - 07

Simulation of urban rainfall runoff pollution and control effect by low impact development

CHEN Sha^{1,2,3}, CHEN Xiaohong^{1,2,3}

(1. Center of Water Resources and Environment, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China; 2. Key Laboratory of Water Cycle and Water Security in Southern China of Guangdong High Education Institute, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China; 3. Guangdong Engineering Technology Research Center of Water Security Regulation and Control for Southern China, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China)

Abstract: SWMM (storm water management model) was used to simulate the effect of low impact development (LID) control measures on urban rainwater runoff and pollutant reduction under different rainfall conditions. Results show that LID control measures can significantly reduce the runoff, total pollutant load, and peak value of runoff, and delay the peak time of runoff. The reduction rates of rainwater runoff, total pollutant load, and peak runoff increase first and then decrease with the increase of rainfall peak coefficient, and decrease with the increase of recurrence period. The delay effect of peak time is negatively correlated with the rainfall peak coefficient and recurrence period. Relative to the rainfall peak coefficient, the recurrence period has more significant effect on rainfall runoff, pollutant load reduction rate, runoff peak value, and peak time.

Key words: sponge city; SWMM; LID control measure; urban rainfall runoff

过去几十年,中国的经济快速发展,城市化进程加快,导致城市下垫面不透水率增加,水循环模式发
生变化,对城市的径流过程造成影响^[1]。城市雨水径流冲刷草地、屋顶、道路等不同下垫面,携带各种

基金项目:国家自然科学基金(91547202,51210013, 51509127);国家重点研发计划(2017YFC0405900)
作者简介:陈莎(1992—),女,硕士研究生,研究方向为水文与水资源。E-mail:454358375@qq.com
通信作者:陈晓宏,教授。E-mail: eescxh@mail. sysu. edu. cn

污染物如营养盐、重金属、悬浮固体等进入水体,造成非点源污染,导致城市水体污染加剧^[2]。

国内外对城市非点源污染管理措施展开了大量的研究,比较显著的研究成果有美国的最佳管理措施(best management practices, BMPs)、英国的可持续排水系统(sustainable urban drainage system, SUDS)、新西兰的低影响开发(low impact development, LID)技术等。其中, LID 提倡采用工程措施和非工程措施作为非点源污染的削减措施,非工程措施一般是采取一系列的管理措施控制污染,工程措施是通过工程设施的建立控制和削减污染,减少雨水径流中污染物的浓度和排放总量^[3],常见的有绿色屋顶、透水铺装、雨水花园等,这些控制措施在不同降雨条件下对城市雨水径流及污染物作用效果不同。国内外许多学者采用暴雨雨水管理模型(storm water management model, SWMM)对城市雨水径流及水质进行模拟,模拟效果较好^[3-9]。本文采取 SWMM 模型,研究在不同降雨重现期和不同雨型条件下 LID 措施对城市雨水径流及污染物的削减效果,以期为城市海绵城市工程建设提供参考。

1 研究方法

1.1 SWMM 模型

SWMM 是 20 世纪 70 年代由麦特卡夫-埃迪有限公司、佛罗里达大学和美国水资源有限公司 3 个单位联合研制的一个综合性数学模型,可以用来模拟完整的城市降雨径流和污染物的运动过程^[4]。SWMM 模型是应用最为广泛的的城市雨洪模型,其排水管网模型的模拟过程主要由 3 部分构成,即地表径流模拟、地表污染物模拟和管网传输系统模拟。

地表径流模拟过程包括了从降雨开始到进入排水管道之前的水文过程,由产流模型和汇流模型两部分组成。产流过程就是降雨扣除损失形成净雨的过程,模型根据下垫面及地表排水状况,将研究区域划分为若干个子汇水区,子汇水区的下垫面分为有注蓄量的不透水地表、无注蓄量的不透水地表和透水地表,3 种类型的下垫面分别进行产流计算,子汇水区的出流量为 3 个部分出流量之和。地表汇流演算是把各个子流域的净雨过程转化成流域的出流过程,在 SWMM 模型中,每个子汇水区都被看成是一个非线性水库,其容量就是最大的注蓄量,当“水库”的水深超过了最大注蓄量时就会产生径流,如图 1 所示。

地表污染物模拟包括污染物累积模型和冲刷模型,累积模型包括幂函数累积模型、指数函数累积模型和饱和函数累积模型,冲刷模型包括指数模型、流

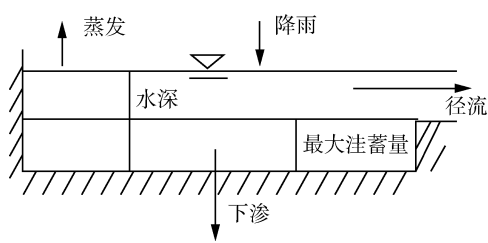


图 1 子汇水区非线性水库模型

量特性冲刷曲线模型和次降雨平均浓度模型^[7]。

管网传输系统模拟一般将排水系统概化为由节点连接起来的一系列的管道。主要是通过输送模块和扩展输送模块来进行排水系统的流量演算,由求解圣维南方程组得到。

1.2 LID 控制措施

LID 技术是采用植被洼地、植草沟、雨水花园、滞留槽和可渗透地表等措施减小集水区的不可渗透地表的影响,或将这些措施直接连接到区域内的雨水系统中^[3]。本研究涉及的 LID 控制措施有雨水花园、透水铺装、绿色屋顶。

a. 雨水花园通常是由具有吸收能力的工程性或本地土壤基质、覆盖层和灌木、花草等植物构成的茶碟状或者浅挖的景观洼地。可用于暂时储蓄和处理来自落水管、排水管、人行道等产生的雨水径流,并渗透到土壤层中^[10]。雨水花园对应的 LID 措施参数包括表面层参数:蓄水深度为 200 mm,植被覆盖率为 0.15,表面粗糙系数及表面坡度为 0;土壤层参数:厚度为 800 mm,孔隙率为 0.479,产水能力为 0.371,枯萎点为 0.251,导水率为 0.5 mm/h,导水率坡度为 15,吸水头为 290 mm;蓄水层参数:高度为 300 mm,孔隙比为 0.5,导水率为 250 mm/h,堵塞因子为 0;暗渠层的参数率定都为 0。

b. 透水铺装是指将透水性好、孔隙率高的建筑材料铺设在道路或者广场等开放空间的面层或基层,使雨水径流暂时储存在基层中,可以渗入周围土地土壤层或者通过排水暗管汇入市政管网,从而达到控制径流的作用。透水铺装对应的 LID 措施参数包括表面层参数:蓄水深度为 60 mm,植被覆盖率为 0.6,表面粗糙系数为 0.15,表面坡度为 0.4;路面层参数:厚度为 150 mm,孔隙比为 0.18,不渗透表面小数为 0,渗透性为 200 mm/h,堵塞因子为 0;蓄水层参数:高度为 300 mm,孔隙比为 0.5,导水率为 250 mm/h,堵塞因子为 0;暗渠层的参数率定都为 0。

c. 绿色屋顶是将植物种植于建筑物顶部,不与自然土壤直接接壤的雨水控制设施。绿色屋顶对应的 LID 措施参数包括表面层参数:蓄水深度为 40 mm,植被覆盖为 0.2,表面粗糙系数和表面坡度为 0;土壤层参数:厚度为 150 mm,孔隙率为 0.479,产水能

力为 0.371, 枯萎点为 0.251, 导水率为 0.5 mm/h, 导水率坡度为 15, 吸水头为 290 mm; 蓄水层参数: 高度为 300 mm, 孔隙比为 0.5, 导水率为 250 mm/h, 堵塞因子为 0; 暗渠层的参数率定都为 0^[11]。

2 实例应用

选取佛山市新城片区的依云水岸小区为研究对象, 研究区域面积为 134 270 m²。佛山市位于珠江三角洲腹部, 属亚热带季风性湿润气候区, 气候温和, 雨量充足。年降雨量 1 600 ~ 1 700 mm, 年平均降雨日 140 d, 在时间分布上, 降水主要集中在 3—9 月。佛山新城片区位于佛山市顺德区乐从镇北部, 北临东平水道, 东至华阳路, 南沿裕和路、富华路, 西沿汾江路。研究区域下垫面及管网等信息来自《佛山新城市政规划专项规划说明书》和《雨水工程现状图》, 降雨数据及节点监测井水深来自于实际监测。模型涉及的设计降雨量按照佛山市 2011 年编制的单一重现期暴雨强度公式计算, 设计雨型根据芝加哥雨型计算。

2.1 模型参数率定

SWMM 模型中包含水文模块和水质模块两部分。水文模块参数确定分为两部分, 一部分根据物理意义直接获得, 还有一部分需要率定得到。水质模块包括污染物累积模型和冲刷模型, 本研究选取饱和函数累积模型和指数冲刷模型, 模型参数参考国内研究^[7,9,12-13]得到, 见表 1 和表 2。

2.1.1 模型参数率定的误差分析与效率检验准则

Nash 与 Sutcliffe 在 1970 年提出了模型效率系数(确定性系数)来评价模型模拟的精度, 它直观地体现了实测与模拟的拟合程度的好坏^[7]。本研究采用 3 个目标函数作为评价实测与模拟的拟合程度好坏的指标, 分别是反映节点水深精度的相对误差 R_e , 反映节点水深过程与实测水深过程吻合程度的

模型效率系数 N_s 和相关系数 R^2 , 3 个评级指标的计算公式为

$$R_e = \frac{Q_p - Q_0}{Q_0} \tag{1}$$

$$N_s = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_0 - \bar{Q}_p)^2}{\sum_{i=1}^n (Q_0 - \bar{Q}_0)^2} \tag{2}$$

$$R^2 = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (Q_0 - \bar{Q}_0)(Q_p - \bar{Q}_p)}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (Q_0 - \bar{Q}_0)^2 \sum_{i=1}^n (Q_p - \bar{Q}_p)^2}} \right]^2 \tag{3}$$

式中: Q_0 为观测值; $\bar{Q}_0$ 为观测值的均值; Q_p 为模拟值; $\bar{Q}_p$ 为模拟值的均值; n 为数据个数。通常情况下, $|R_e| < 20\%$, $R^2 > 0.8$, $N_s > 0.5$, 即认为模型拟合精度令人满意^[14]。

2.1.2 水文参数率定

根据《佛山市雨水工程现状图》对研究区域排水管网系统进行了适当概化, 提取研究区域管网及节点的数据信息, 其中包括代表管道图形要素的空间位置、检查井的埋深、管道的长度、流向、管径等属性信息, 得到研究区域的排水管网概化图(图 2)。根据用地属性的不同划分为 5 个排水小区, 其中 ZHS58 和 ZHS59 是居住小区, ZHS83、ZHS84 和 ZHS85 是道路; 根据检查井位置确定 4 个节点; 根据雨水管道的布设确定 4 条管道; 根据雨水排放口确定 1 个雨水出口。雨量站位置位于 ZHS58 楼顶, 采用 J104 检查井水深作为模型的校检数据。

根据降雨监测资料, 选取 2017 年 9 月 4 日 10:00 ~ 13:00 的降雨过程作为模型模拟的降雨序列, 前期干旱天数为 5 d。由于 SWMM 模型中敏感的参数有子汇水区宽度、不渗透性粗糙系数、渗透性粗糙系数、不渗透性洼地蓄水、渗透性洼地蓄水以及

表 1 累积模型参数

污染物	居住区		马路		草地	
	最大累积量/ (kg · hm ⁻²)	半饱和累积 时间/d	最大累积量/ (kg · hm ⁻²)	半饱和累积 时间/d	最大累积量/ (kg · hm ⁻²)	半饱和累积 时间/d
TSS	180.0	7	230	4	100.0	20
COD	60.0	7	110	4	40.0	20
TP	0.3	7	0.2	4	1.0	20
NH ₄ ⁺ -N	2.0	7	2	4	1.8	20

表 2 冲刷模型参数

污染物	居住区			马路			草地		
	冲刷系数	冲刷指数	清扫去除率/%	冲刷系数	冲刷指数	清扫去除率/%	冲刷系数	冲刷指数	清扫去除率/%
TSS	0.008	1.8	70	0.008	1.8	70	0.030	1.2	0
COD	0.005	1.7	70	0.007	1.8	70	0.030	1.2	0
TP	0.015	1.8	70	0.008	1.6	70	0.042	1.2	0
NH ₄ ⁺ -N	0.004	1.5	70	0.002	1.5	70	0.008	1.2	0

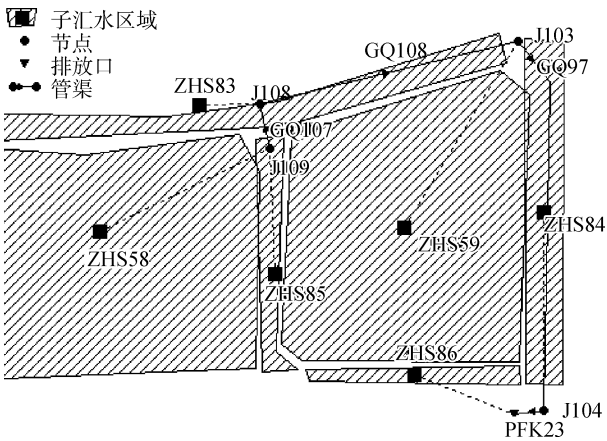


图2 研究区排水管网概化图

无洼地蓄水不渗透性,因此需要对这些参数进行率定^[4,7],模型中土壤渗透模型参数参考《佛山市海绵城市建设试点城市申报实施方案》,采用 Green-Ampt 入渗模型,参数吸入水头为 210 mm、导水率为 0.46 mm/h,经过参数的不断调整,最终率定结果见表 3,计算得到参数调整后模型的 N_s 为 0.93、 R^2 为 0.96、 R_e 为 -19.4%,模型模拟结果较好。

表3 水文参数率定结果

地表漫流路 径宽度/m	地表平均 坡度/%	不渗透性 粗糙系数	渗透性粗 糙系数	不渗透性注 地蓄水/mm
200	0.05	0.015	0.24	1.5
渗透性洼地 蓄水/mm	无洼地蓄水 不渗透性/%	吸入水头	导水率	初始亏损
3.81	50	210	0.46	3

2.2 模型验证

选取 2017 年 9 月 4 日 16:10~17:00 的降雨过程对模型进行验证,此次降雨历时为 50 min,将降雨数据输入到建立好的 SWMM 模型中,进行时间长度为 3 h 的模拟,得到的模拟结果见图 3。计算得到模型的 N_s 、 R^2 和 R_e 分别为 0.88、0.91 和 14%,模型模拟精度较好。

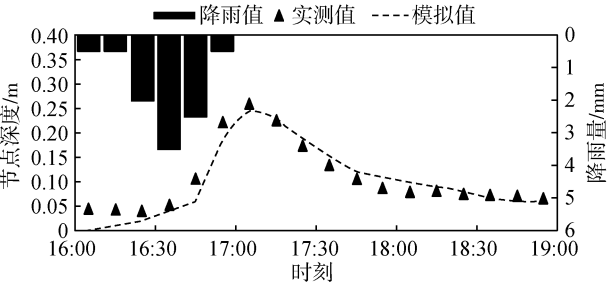


图3 模型验证节点深度过程线

3 结果与分析

3.1 设计降雨

为综合分析不同降雨条件下采取 LID 措施对雨

水径流及污染物的削减效果,本研究设定以下 4 种降雨强度:1 年一遇、3 年一遇、5 年一遇和 10 年一遇,降雨历时为 2 h,根据《佛山新城市政专项规划说明书》,1 年一遇、3 年一遇、5 年一遇和 10 年一遇的降雨量按照佛山市 2011 年编制的单一重现期暴雨强度公式计算,分别见式(4)~(7),设计雨型根据芝加哥雨型计算,见式(8)。

$$q = 3189.598 / (t + 11.998)^{0.728} \quad (4)$$

$$q = 2969.154 / (t + 10.423)^{0.652} \quad (5)$$

$$q = 2890.678 / (t + 9.841)^{0.624} \quad (6)$$

$$q = 2791.429 / (t + 9.099)^{0.587} \quad (7)$$

$$I = \begin{cases} \frac{A}{\left(\frac{t_1}{r} + b\right)^n} \left(1 - \frac{nt_1}{t_1 + rb}\right) & \text{雨峰前} \\ \frac{A}{\left(\frac{t_2}{1-r} + b\right)^n} \left[1 - \frac{nt_2}{t_2 + (1-r)b}\right] & \text{雨峰后} \end{cases} \quad (8)$$

式中: q 为历时 t 内的平均雨强, mm/min; I 为瞬时降雨强度, mm/min; t_1 为峰前历时, min; t_2 为峰后历时, min; r 为雨峰系数; A 、 n 、 b 为参数^[4]。 r 的取值决定降雨峰值出现时间,从而决定降雨类型。本研究设定 8 种降雨雨型, r 分别取值 0.1、0.2、0.3、0.4、0.5、0.6、0.7、0.8,大致分为前锋型、中锋型和后峰型降雨。芝加哥雨型的缺点是雨峰过于尖瘦,特别当暴雨公式中 A 、 n 、 b 值较小时,因此本文中采用 5 min 时间间隔计算降雨强度。根据上述分析,分两种典型降雨情景研究:情景一是重现期相同, r 值不同,由于海绵城市建设适用于高频率小雨强,因此研究重现期为 1 年一遇时 8 种不同雨型下的雨水径流及污染物的削减效果;情景二是 r 值相同,重现期不同,由于国内大量统计资料表明,大部分地区 r 值介于 0.3~0.5 之间^[4],因此研究 r 值为 0.4 时 4 种不同重现期下的雨水径流及污染物的削减效果。两种情景下的降雨过程见图 4。

3.2 LID 控制措施削减效果分析

3.2.1 总量削减效果分析

参考《佛山市海绵城市建设试点城市申报实施方案》,一般情况下居住小区的下垫面构成为绿地占 30%,建筑占 30%,道路及铺装占 40%,其他用地参照此标准和实际情况确定。采取的径流污染控制措施以雨水花园、绿色屋顶、透水铺装为主,不同 LID 措施的地块指标比例见表 4。

a. 不同雨型总量削减效果分析。模拟情景一下未采取 LID 措施和采取 LID 措施两种情况,并计算采取 LID 措施对雨水径流及污染物的削减率,结果见图 5。

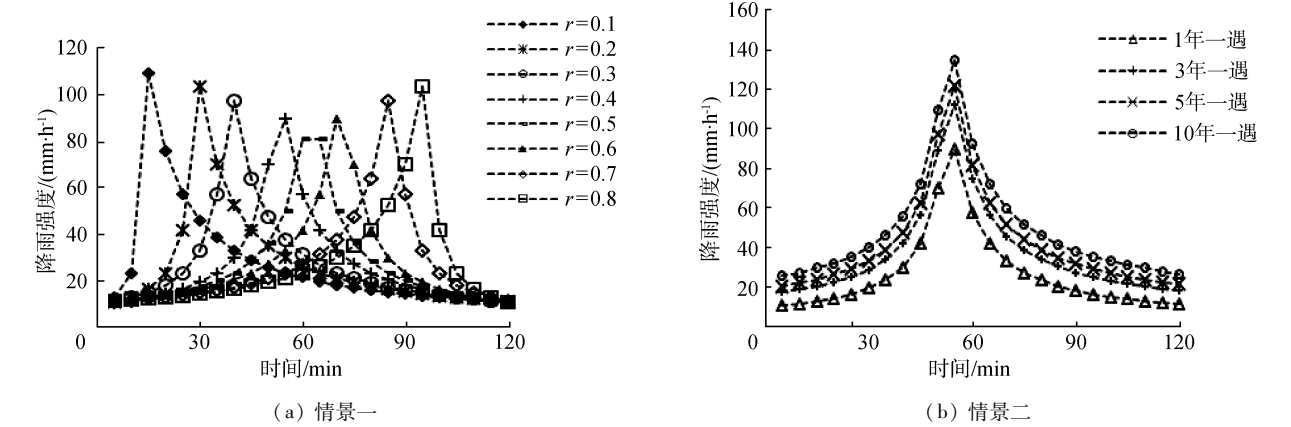


图 4 两种情景下的降雨-时间关系

表 4 不同 LID 措施的地块指标

LID 措施	对应下垫面条件	不同下垫面条件下 LID 措施对应的比例/%	占地块比例/%	LID 措施面积/m ²
雨水花园	绿地	60	18	24 169
透水铺装	道路及人行道、停车场、广场	90	36	48 337
绿色屋顶	建筑(屋顶)	60	18	24 169

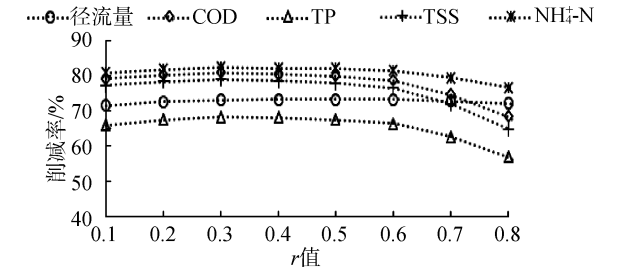


图 5 情景一下径流量及污染物削减率与 r 值关系

由图 5 可知,在平均降雨强度不变的情况下,随着 r 值的增大,LID 措施下的子汇水区出口处的雨水径流量以及污染物浓度的削减率呈现相同的变化规律,均呈现先增大后减小的变化趋势,与降雨量随雨峰系数的变化趋势一致,说明削减效果与降雨量密切相关。在 r 值较小或较大时,采取 LID 措施下的削减率小于雨峰系数位于中间时候,在 r 值为 0.3~0.5 时,雨水径流量以及污染物削减率达到最大,这与 $r=0.5$ 时雨量最小有关^[15]。相对于污染物的削减率变化,雨水径流量随 r 值的变化幅度较小,并且当 r 值较小时,即前锋或者中锋时,雨水径流及污染物的削减率较高,随 r 值变化幅度较小,而当 r 值较大时,即后峰型降雨时,削减率下降幅度变大,尤其是污染物浓度。

b. 不同重现期总量削减效果分析。模拟情景二下未采取 LID 措施和采取 LID 措施两种情况,并计算采取 LID 措施对雨水径流及污染物的削减率,结果见图 6。

由图 6 可知,当 r 值相同,随重现期的增大,采取 LID 措施下的子汇水区出口处的雨水径流量以及污染物的削减率变化规律相同,均呈现下降趋势,即雨水径流及污染物的削减率与重现期呈现负相关。

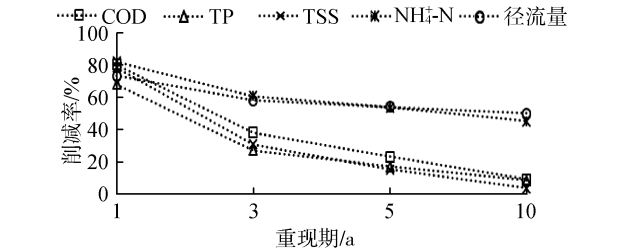


图 6 情景二下径流量及污染物削减率与重现期关系

在降雨强度较小时,采取 LID 措施对子汇水区的径流及污染物呈现较好的削减效果,与海绵城市建设适用于高频率小雨强相对应。相对于污染物的削减率变化,雨水径流量随 r 值的变化幅度较小,相对 r 值对雨水径流及污染物削减率的影响,重现期对削减率的影响更大。

3.2.2 径流峰值削减效果分析

a. 不同雨型径流峰值削减效果分析。模拟情景一下未采取 LID 措施和采取 LID 措施两种情况,计算采取 LID 措施对雨水径流峰现时间的延迟和对峰值的削减率,径流峰值及其削减率与 r 值的关系见图 7,不同 r 值下采取 LID 措施前后的径流与污染物峰现时间见表 5。

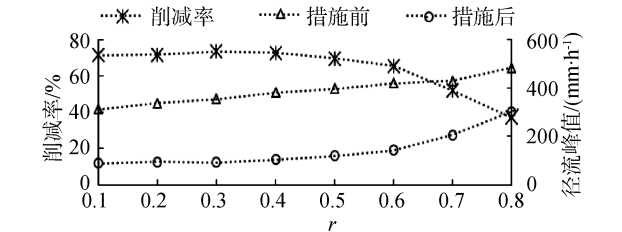


图 7 径流峰值削减率与 r 值关系

由图 7 可见,当重现期不变时,子汇水面出口处的径流峰值均随雨峰系数的增大,呈现增大的趋势。

在采取 LID 措施后,对径流峰值有明显的削减作用,削减率随 r 值的增大呈现先增大后减小的变化趋势,与 3.2.1 中情景一下径流量削减率随 r 值的变化关系一致。在中锋型降雨时,LID 措施对径流量峰值的削减效果最明显,削减率最大,出现这种现象的原因可能与中锋型降雨峰值小于前锋型降雨和后背型降雨有关。

由表 5 可见,当 r 为某一定值时,采取 LID 措施后的径流峰现时间始终滞后未采取 LID 措施,说明采取 LID 措施对径流峰现时间有很好的延时作用,且延时效果随 r 值的增大呈现减小的趋势。当重现期不变,径流量的峰现时间随着 r 值的增大逐步后移,与降雨峰值及径流量峰值随 r 值的变化趋势一致。

b. 不同重现期径流峰值削减效果分析。模拟情景二下未采取 LID 措施和采取 LID 措施两种情况,计算采取 LID 措施对雨水径流及污染物峰现时间的延迟和对峰值的削减率,不同重现期下采取 LID 措施前后径流与污染物的峰现时间见表 6,径流峰值及其削减率与重现期的关系见图 8。

由表 6 可见,当重现期为某一定值时,采取 LID 措施后的径流及污染物峰现时间始终滞后未采取 LID 措施,说明采取 LID 措施对径流峰值有很好的延时作用,尤其在降雨重现期较小时尤为明显,延时效果随重现期的增大呈现较小的趋势。当 r 值不

变,部分污染物的峰现时间随重现期增加呈现前移的趋势,其中 TP 表现最为明显。

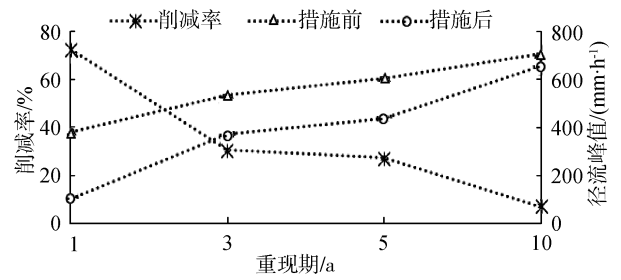


图 8 径流峰值及其削减率与重现期关系

由图 8 可见,当 r 值不变时,未采取 LID 措施和采取 LID 措施两种情况下,子汇水面出口处的径流峰值均随重现期的增大而增大,这与降雨强度随重现期的增大而增大有关。在采取 LID 措施后,对径流峰值有明显的削减作用,削减率随重现期的增大而减小,与 3.2.1 中情景二下的子汇水区径流量削减率与重现期的变化关系一致。在重现期较小时,对径流峰值有较好的削减作用,这可能因为重现期较小时,降雨量较小,产生的污染物少,LID 措施对污染物处理效果较好。而随着重现期增大,降雨量也随着增大,产生的污染物增多,LID 措施对污染物的处理效果降低有关。径流量过程和径流峰值随重现期的变化一致,这可能是 LID 措施下径流量和径流峰值削减率与重现期的相关关系一致的原因。

表 5 不同 r 值下采取 LID 措施前后的径流与污染物峰现时间

径流及 污染物	$r=0.1$			$r=0.2$			$r=0.3$			$r=0.4$		
	措施前	措施后	峰现延时	措施前	措施后	峰现延时	措施前	措施后	峰现延时	措施前	措施后	峰现延时
径流量	35	80	45	45	75	30	50	90	40	65	95	30
COD	30	80	50	40	75	35	45	90	45	60	95	35
TP	25	75	50	35	75	40	45	85	40	60	90	30
TSS	25	80	55	40	75	35	45	90	45	60	95	35
NH ₄ ⁺ -N	30	80	50	40	75	35	50	90	40	60	95	35

径流及 污染物	$r=0.5$			$r=0.6$			$r=0.7$			$r=0.8$		
	措施前	措施后	峰现延时	措施前	措施后	峰现延时	措施前	措施后	峰现延时	措施前	措施后	峰现延时
径流量	70	95	25	80	95	15	95	100	5	100	105	5
COD	70	95	25	75	95	20	90	100	10	100	105	5
TP	65	95	30	75	95	20	85	100	15	80	105	25
TSS	70	95	25	75	95	20	90	100	10	100	105	5
NH ₄ ⁺ -N	70	95	25	80	95	15	90	100	10	100	105	5

表 6 不同重现期下采取 LID 措施前后径流与污染物的峰现时间

重现期	1 年一遇			3 年一遇			5 年一遇			10 年一遇		
	措施前	措施后	峰现延时	措施前	措施后	峰现延时	措施前	措施后	峰现延时	措施前	措施后	峰现延时
径流量	60	90	30	60	70	10	60	70	10	60	70	10
COD	60	90	30	60	70	10	60	70	10	50	60	10
TP	60	90	30	50	70	20	50	70	20	40	60	20
TSS	60	90	30	60	70	10	60	70	10	50	60	10
NH ₄ ⁺ -N	60	90	30	60	70	10	60	70	10	60	70	10

4 结 论

采取 LID 措施对雨水径流及污染物的总量和峰值均有削减作用,对峰现时间有延迟作用。雨水径流及污染物的削减率随雨峰系数 r 值的增大呈先增大后较小的变化趋势,在 r 值为 0.3 ~ 0.5 时削减率达到最大。雨水径流及污染物的削减率随重现期的增大而减小,在降雨强度较小时,LID 措施对子汇水区的径流及污染物呈现较好的削减效果。峰现时间的延迟效果与 r 值和重现期均呈负相关,径流峰值削减率随 r 值的增大呈先增大后减小的变化趋势,随重现期的增大而减小,与径流量与降雨条件的变化关系一致。相对雨峰系数,重现期对径流量及污染物的削减率、峰现时间延迟以及径流峰值削减率的影响更显著。

参考文献:

[1] PUNAM P, MICHAEL A T, THERESA H, et al. Application of market mechanisms and incentives to reduce stormwater runoff: an integrated hydrologic, economic and legal approach[J]. Environmental Science & Policy,2005,8(2):133-144.

[2] WALTERS S P, THEBO A L, BOEHM A B. Impact of urbanization and agriculture on the occurrence of bacterial pathogens and stx genes in coastal waterbodies of central California[J]. Water Research,2011,45(4):1752-1762.

[3] 偶锦文. 苏州城市河道非点源污染削减措施研究[D]. 苏州:苏州科技学院,2014.

[4] 汤鹏,王玮,张展,等. 海绵城市建设中建成区雨洪格局的量化研究[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2018,42(1):15-20. (TANG Peng, WANG Wei, ZHANG Zhan, et al. Quantitative research on rain-flood patterns of urban area in the construction of “sponge cities” [J]. Journal of Nanjing Forestry University (Natural Science Edition), 2018,42(1):15-20. (in Chinese))

[5] 李晶. 城市雨水径流污染控制理论与技术研究[D]. 天津:天津大学,2011.

[6] 蔡庆拟,陈志和,陈星,等. 低影响开发措施的城市雨洪控制效果模拟[J]. 水资源保护,2017,33(2):31-36. (CAI Qingni, CHEN Zhihe, CHEN Xing, et al. Simulation of control efficiency of low impact development measures for urban stormwater [J]. Water Resources Protection, 2017,33(2):31-36. (in Chinese))

[7] 栾慕,袁文秀,刘俊,等. 基于 SWMM-MIKE11 耦合模型的桐庐县内涝风险评估[J]. 水资源保护,2016,32(2):57-61. (LUAN Mu, YUAN Wenxiu, LIU Jun, et al. Risk assessment of waterlogging in Tonglu County based on SWMM-MIKE11 coupled model[J]. Water Resources Protection,2016,32(2):57-61. (in Chinese))

[8] 宋奔奔,高成,寇传和,等. 基于 SWMM 的生物滞留池

布置水文时空效应[J]. 水资源保护,2017,33(3):25-30. (SONG Benben, GAO Cheng, KOU Chuanhe, et al. Spatial and temporal hydrological responses of arrangement of bioretention cell based on SWMM[J]. Water Resources Protection,2017,33(3):25-30. (in Chinese))

[9] 马晓宇,朱元励,梅琨,等. SWMM 模型应用于城市住宅区非点源污染负荷模拟计算[J]. 环境科学研究, 2012,25(1),95-102. (MA Xiaoyu, ZHU Yuanli, MEI Kun et al. Application of SWMM in the simulation of Non-Point source pollution load in urban residential area[J]. Research of Environmental Sciences, 2012, 25(1):95-102. (in Chinese))

[10] 董欣,杜鹏飞,李志一,等. SWMM 模型在城市不透水区地表径流模拟中的参数识别与验证[J]. 环境科学, 2008,29(6):1495-1501. (DONG Xin, DU Pengfei, LI Zhiyi et al. Parameter identification and validation of SWMM in simulation of impervious urban land surface runoff[J]. Environmental Science, 2008, 29(6):1495-1501. (in Chinese))

[11] 袁慎崇. 基于情景驱动的低影响开发雨水系统评估方法研究[D]. 合肥:安徽工业大学,2016.

[12] 陈隐石. 城市降雨径流控制 LID-BMPS 实证研究[D]. 苏州:苏州科技大学,2014.

[13] 张绿水,张青萍. 上海世博园区雨水生态化处理技术分析[J]. 南京林业大学学报(自然科学版),2011,35(4):131-135. (ZHANG Lyushui, ZHANG Qingping. Study on ecological treatment technology of rainfall in Shanghai World Expo [J]. Journal of Nanjing Forestry University (Natural Science Edition), 2011,35(4):131-135. (in Chinese))

[14] 赵磊,杨逢乐,袁国林,等. 昆明市明通河流域降雨径流量水质 SWMM 模型模拟[J]. 生态学报,2015,35(6):1962-1972. (ZHAO Lei, YANG Fengle, YUAN Guolin et al. Simulation of the quantity and quality of the urban runoff [J]. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(6):1962-1972. (in Chinese))

[15] 黄国如,聂铁锋. 广州城区雨水径流非点源污染特性及污染负荷[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2012,40(2):142-148. (HUANG Guoru, NIE Tiefeng. Characteristics and load of non-point source pollution of urban rainfall runoff in Guangzhou, china [J]. Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition), 2012,40(2):142-148. (in Chinese))

[16] 梁钊雄,王兮之,王军. SWAT 模型在粤北连江流域的应用研究[J]. 水土保持研究:2013,20(6):140-144. (LIANG Zhaoxiong, WANG Xizhi, WANG Jun. Study on the application of SWAT model to lianjiang Basin in northern Guangdong [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2013,20(6):140-144. (in Chinese))

[17] 胡振龙. 山地城市典型下垫面径流系数研究[D]. 重庆:重庆大学,2016.