

海绵城市中 LID 设施对降雨径流及非点源污染的控制研究

张泉荣, 姚允龙, 陈 鑫

(江苏省水文水资源勘测局镇江分局, 江苏 镇江 212028)

摘要: 低影响开发 (LID) 以源头控制和延缓冲击负荷为核心理念, 强调城镇开发应减小对环境的冲击, 是海绵城市建设的重要途径。研究以海绵城市试点区域虹桥港片区为例, 采用暴雨洪水管理模型 (SWMM 模型), 对研究区域 LID 设施实施前后降雨径流以及非点源污染的变化情况进行定量和定性研究。研究结果表明: LID 设施对地表径流量峰值削减作用明显, 但随着降水重现期的增加, 削峰作用降低; 同时, 对径流污染物总量削减效果明显, 在不同降雨强度下, 均能有 50% 以上的削减作用。

关键词: LID 设施; 海绵城市; SWMM 模型; 降雨径流; 非点源污染

中图分类号: TV213.9 **文献标识码:** B **文章编号:** 1007-7839 (2018) 12-0008-06

Study on the control of rainfall runoff and non-point source pollution by LID facilities in sponge City

ZHANG Quanrong, YAO Yunlong, CHEN Xin

(Zhenjiang Hydrology and Water Resources Investigation Bureau of Jiangsu Province, Zhenjiang 212028, Jiangsu)

Abstract: Low Impact Development (LID) is an important approach to the construction of sponge cities with the core concept of source control and delay of buffering load, which emphasized that the urban development should reduce the impact on the environment. Taking Hongqiao Harbor Experimental Area of sponge city as an example, the rainfall runoff and non-point source pollution before and after the implementation of LID facilities in the study area were quantitatively and qualitatively studied by using SWMM model. The results showed that the LID facility could significantly reduce the peak value of surface runoff, but with the increase of precipitation recurrence period, the peak value was reduced. Meanwhile, the total amount of runoff pollutants was significantly reduced, which could have more than 50% reduction effect under different rainfall intensity.

Key words: LID facilities; sponge city; SWMM model; rainfall runoff; non-point source pollution

0 引言

随着城市化进程的逐步加快, 城市可渗透性地表面积越来越小, 随降水径流而产生的非点源污染突发性高、冲击性强, 已成为构成水环境恶

化的重要原因之一。2014 年 4 月, 习近平总书记在关于保障水安全重要讲话中指出, 要根据资源环境承载能力构建科学合理的城镇化布局, 尽可能减少对自然的干扰和损害, 节约集约利用土地、水、能源资源, 解决城市缺水问题, 必须顺应自然,

收稿日期: 2018-08-14

基金项目: 江苏省水利科技项目 (2016024)

作者简介: 张泉荣 (1963—), 男, 本科, 高级工程师, 研究方向为水文水资源。

建设自然积存, 自然渗透、自然净化的“海绵城市”。

海绵城市起源于低影响开发(LID), 低影响开发模式(LID)以尽可能地模拟自然水文条件为设计策略, 近年来广泛应用于发达国家雨洪控制利用中^[1-3]。一般来讲, 海绵城市建设的作用: 一是可以减少径流, 减少暴雨天气期间城市排水管网和排涝设施的压力; 二是通过源头控制, 减少初期雨水污染, 达到减排的效果。

对于镇江而言, LID 是一个全新的理念和技术, 作为目前城市雨水管理措施的最新研究成果, 它是否是一种真正可以实现对生态环境低影响的措施, 是人们目前最关心的问题。因此, 本文对镇江市海绵城市试点区域虹桥港片区展开研究, 定性定量分析 LID 设施实施前后区域降雨径流及非点源污染的变化情况, 进而建立适用于研究区域的海绵城市绩效评价指标体系, 为考核部门提供技术支撑, 也可为区域水资源优化配置提供相关建议。

1 SWMM 概述

暴雨洪水管理模型(SWMM 模型)是美国环保局为设计和管理城市雨洪而研制的一个综合性数学模型, 是一个运用相当广泛的城市暴雨径流量、水质模拟和预报模型。SWMM 模型作为分布式、连续模拟模型, 在城市非点源污染中得到了广泛应用^[4-5]。

SWMM 模型中利用曼宁公式进行产流量计算:

$$Q = W \frac{1.49}{n} (d - d_p)^{5/3} S^{1/2} \quad (1)$$

式中: W 为汇水区特征宽度, m; n 为曼宁系数; d 为降雨水深, m; d_p 为地表滞蓄水深, m; S 为汇水区地面坡度, m/m; Q 为地表产流量, m^3/s 。

模型采用圣维南方程组(Saint-Venant)对管网汇流系统进行演算求解:

$$\begin{aligned} \frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} &= q \\ \frac{v}{g} \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{1}{g} \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\partial h}{\partial x} + S_f - S_0 &= 0 \end{aligned} \quad (2)$$

式中: Q 为流量, m^3/s ; A 为过水断面面积, m^2 ; v 为管内流速, m/s; h 为管内水深, m; t 为时间,

s ; x 为距离, m; S_f 为摩阻坡度; S_0 为底坡; q 为单位长度旁侧入流量, m^3/s 。

2 研究区域模型构建

本文选取镇江虹桥港片区作为模拟汇水范围, 现状虹桥港片区内 LID 措施主要有绿色屋顶、透水铺装、雨水花园、下凹式绿地、生态树池和雨水回用设施。根据《镇江市海绵城市建设试点城市实施方案》, 研究区域的 LID 设施布置图如图 1 所示。

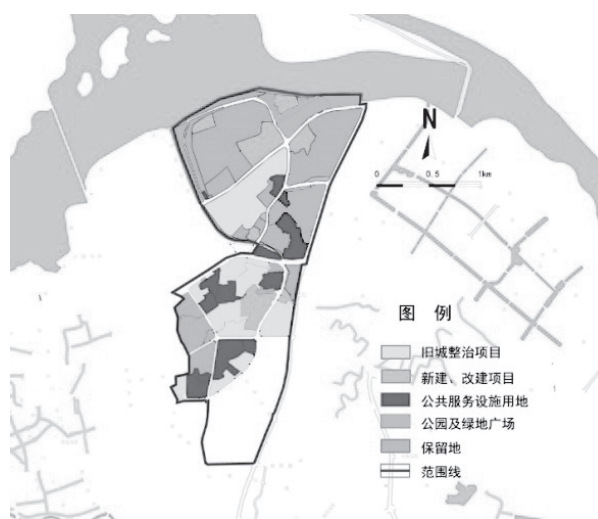


图 1 研究区域海绵城市 LID 设施布局图

本次研究区域内海绵城市改造区域面积为 277.28 ha, 其中绿色屋顶面积为 46865.50 m^2 , 雨水花园总面积为 180090 m^2 , 透水铺装总面积 119451 m^2 , 雨水回用设施 8131 m^3 。

2.1 汇水分区及排水系统概化

以《镇江市海绵城市建设试点城市实施方案》为基础, 将研究区域细化成为 46 个子汇水区域。对规划管网进行分析、概化后, 本次模拟共设雨水管渠 33 段, 检查井 33 座。根据管网分布以及现状实地调查, 区块内设置 5 座雨水排口。

2.2 模型参数率定

根据 2017 年片区水量水质同步监测数据对模型进行水动力和水质参数率定。

(1) 参数选取

结合现有的资料条件和模型原理, 将研究区土地利用类型分为屋面、绿地、交通道路 3 类。分别选用 Horton 模型、非线性水库模型以及运动波方程模拟降雨时片区产汇流过程; 同时针对 SS、COD、氨氮和总磷 4 种主要污染物, 利用饱和

函数、指数函数分别模拟污染物非雨期的累积和雨期的冲刷过程；并根据目前对水文水力参数的相关研究^[6-7]以及研究片区的现状初步确定水量水质初始参数的选取范围。

(2) 参数率定

根据上文建立的 SWMM 模型和选取的计算参数,按照 2017 年对排口的实测数据,对 SWMM 模型参数进行水量水质率定。将模型模拟计算结果与实测数据进行对比分析,如图 2 所示。

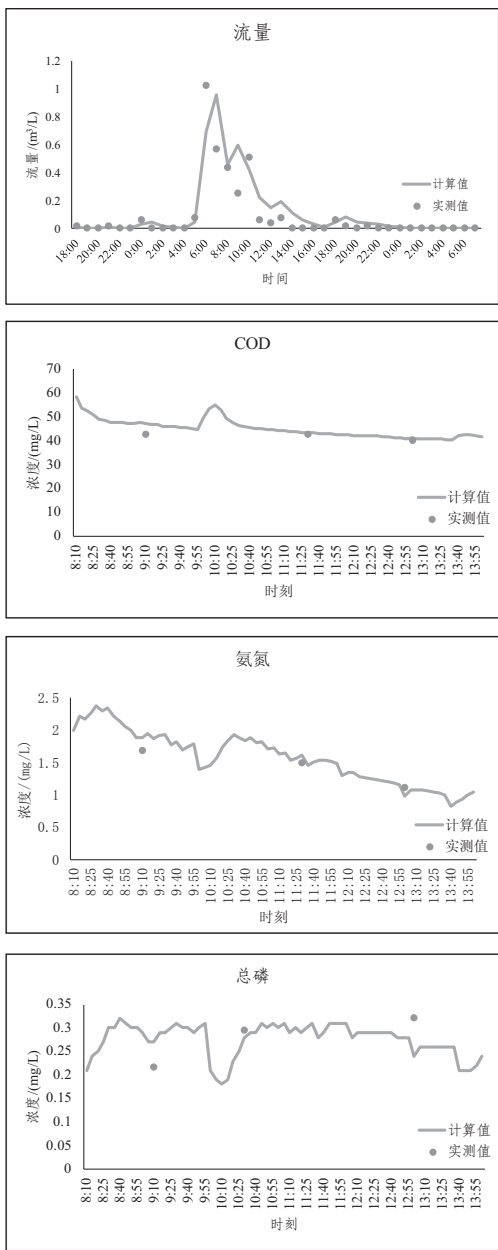


图 2 主要监测断面模型计算值与实测值对比图

由图 2 可知,主要监测排放口水量水质模型计算值与实测值之间吻合较好,相对误差在 30%

之内,说明建立的 SWMM 模型以及选用的水量水质参数符合该区域污染物非雨期的累积和雨期的冲刷过程。参数率定结果如表 1~3 所示。

表 1 水量参数率定结果表

参数	取值
透水区曼宁系数	0.1
透水区洼蓄量 (inches)	0.05
不透水区曼宁系数	0.01
不透水区洼蓄量 (inches)	0.05
最大下渗率 (mm/h)	50.8
最小下渗率 (mm/h)	0.5
无洼蓄量不透水区率 (%)	25
衰减系数	4

表 2 不同土地利用类型的各类污染物累积参数

土地利用	相关参数	COD	氨氮	总磷
交通道路	最大累积量 (kg/hm ²)	200	10	5
	半饱和常数 (d)	10	10	10
屋面	最大累积量 (kg/hm ²)	80	5	2
	半饱和常数 /d	10	10	10
绿地	最大累积量 (kg/hm ²)	10	15	8
	半饱和常数 (d)	10	10	10

表 3 不同土地利用类型的各类污染物冲刷参数

土地利用	相关参数	COD	氨氮	总磷
交通道路	系数	0.007	0.008	0.001
	指数	1.7	1	0.8
	清洁效率	70%	70%	70%
屋面	系数	0.007	0.008	0.001
	指数	1.7	1	1.3
绿地	系数	0.007	0.008	0.001
	指数	1.2	1	0.8

2.3 降雨雨型确定

根据《镇江市城市设计暴雨雨型研究与应用》成果, 镇江市新暴雨强度公式如下:

$$q = \frac{167(38.3623 + 39.0267 \log t)}{(t + 19.1377)^{0.975}} \quad (3)$$

式中: q 为设计暴雨强度, $L/(s \cdot hm^2)$; T 为设计暴雨重现期, 年; t 为设计暴雨历时, mm。

采用 K.C 法的雨型成果作为镇江市设计暴雨雨型。设计短历时强降雨雨型, 其重现期为 1、5 和 10 年, 降雨历时为 2 h, 雨峰系数为 0.354, 生成逐分钟降雨历时曲线。

3 虹桥港片区非点源污染控制效益分析

根据上文建立的 SWMM 模型和选取的参数, 分别模拟 1 年一遇降雨、5 年一遇降雨以及 10 年一遇降雨 2 h 短历时降雨的状况下, 分析 LID 设施建设前后, 降雨产生的地表径流变化及其携带的污染物的变化。

3.1 径流变化分析

根据 SWMM 模型研究各重现期海绵城市建设前后对降雨径流量的影响变化。各排放口径流变化曲线如图 3 ~ 5 所示。

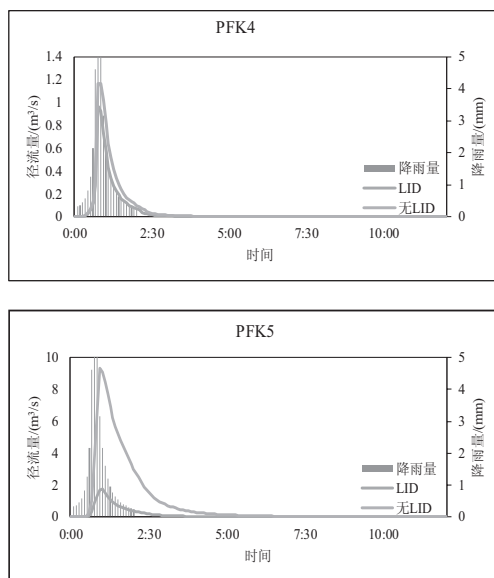
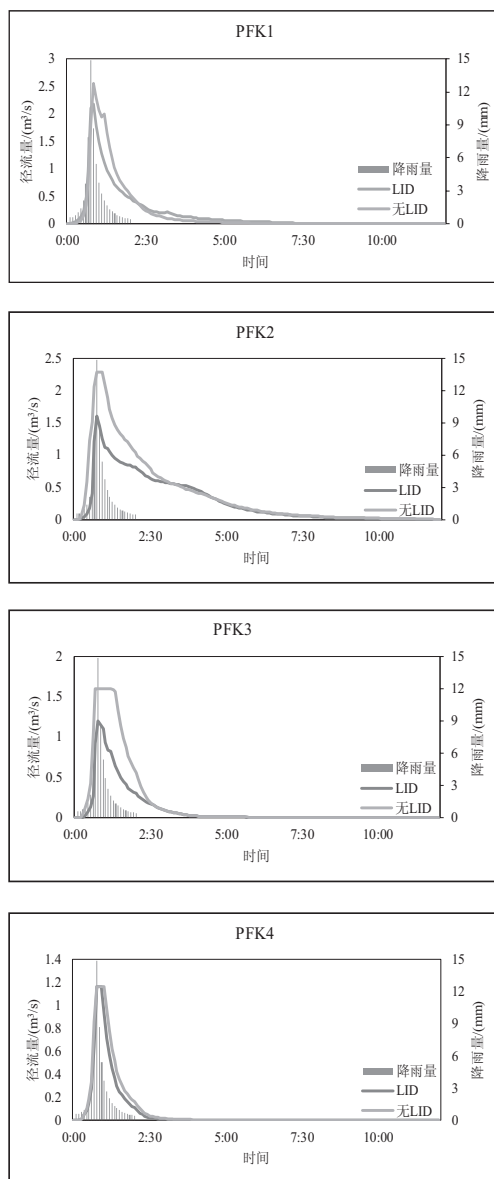
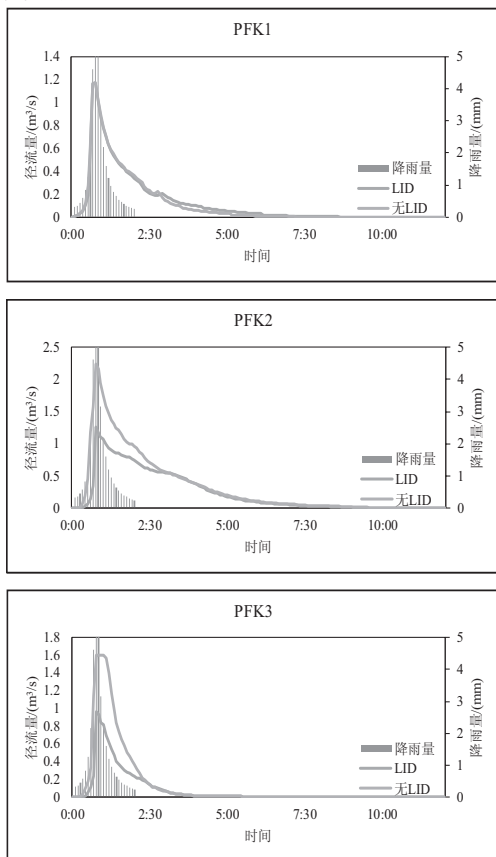


图 3 重现期 1 年各排放口径流变化曲线图



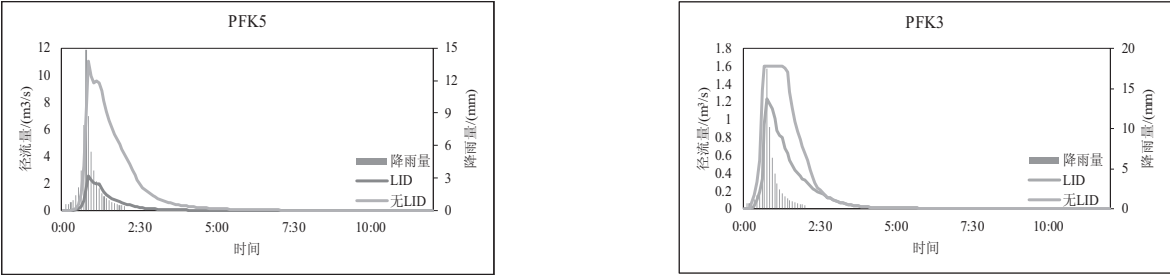


图 4 重现期 5 年各排放口径流变化曲线图

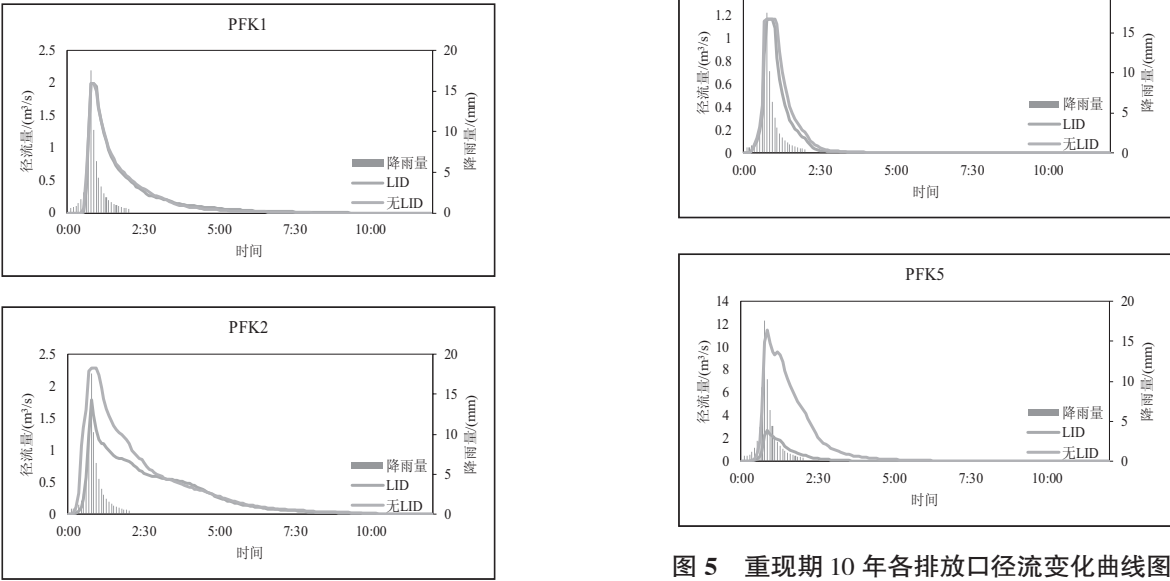


图 5 重现期 10 年各排放口径流变化曲线图

表 4 LID 设施调控前后降雨径流所含污染物总量表

重现期	有无 LID 调控	地表径流入河量			
		水量 (m ³)	COD (kg)	氨氮 (kg)	TP (kg)
1 年	LID 调控	26789.0	2272.4	132.9	18.4
	无 LID 调控	64857.0	4941.9	301.1	44.0
5 年	LID 调控	35949.0	2606.3	156.9	27.7
	无 LID 调控	84727.0	5629.4	353.0	65.3
10 年	LID 调控	39046.0	2629.5	162.0	30.9
	无 LID 调控	91186.0	5636.9	363.6	73.0

由图 3 ~ 5 可得:

(1) 不同的降雨重现期, 随着降雨强度的增加, 径流量峰值呈增大趋势。

(2) 不同的降雨重现期, LID 设施的建设对地表径流量均有不同程度的削减作用, 主要体现在峰值削弱上。重现期为 1 年, 各排放口径流峰值削弱最大为 81.5%, 最小为 17.09%; 重现期为 5 年, 各排放口径流峰值削弱最大为 76.81%, 最小为 6.61%; 重现期为 10 年, 各排放口径流峰值削弱最大为 75.95%, 最小为 2.51%。

3.2 主要污染物总量分析

根据 SWMM 模型研究各重现期海绵城市建设前后对降雨径流所含污染物总量的变化情况, 如表 4 所示。

由表 4 可得:

(1) 据污染物总量表分析, 虹桥港片区, LID 设施在有效控制径流量的同时, 对雨水径流中的污染物截留也有一定的作用。

(2) 重现期为 1 年, LID 方案对地表径流水量的削减达到 58.69%, COD 削减量 54.02%, 氨氮削减量 55.86%, TP 削减量 58.18%。

(3) 重现期为 5 年, LID 方案对地表径流水量的削减达到 57.57%, COD 削减量 53.70%, 氨氮削减量 55.55%, TP 削减量 57.55%。

(4) 重现期为 10 年, LID 方案对地表径流水量的削减达到 57.18%, COD 削减量 53.35%, 氨氮削减量 55.43%, TP 削减量 57.71%。

4 结论分析

本文以镇江虹桥港为例, 建立了相应的暴雨洪水管理模型, 并在 3 种降雨重现期下对研究片

区内海绵城市的建设效果进行了定性和定量分析。通过模型模拟对比分析可以发现, 在海绵城市建设低影响开发下, 虹桥港片区地表径流峰值削弱明显, 同时径流量总量和径流污染量也得到削减, 削减率超过 50%。

在短历时降雨条件下, 研究区域内 LID 措施的实施对于区域降雨径流和城市非点源污染的控制具有一定的正效应, 对径流所产生的污染物入河量的控制效益是较为明显的。

参考文献:

- [1] 张大伟, 赵冬泉, 陈吉宁, 等. 城市暴雨径流控制技术综述与应用探讨 [J]. 给水排水, 2009, 45 (S1): 25-29.
- [2] 赵冬泉, 佟庆远, 王浩正, 等. SWMM 模型在城市雨水排水系统分析中的应用 [J]. 给水排水, 2009, 35 (5): 198-201.
- [3] 李立青, 尹澄清, 孔玲莉, 等. 2 次降雨间隔时间对城市地表径流污染负荷的影响 [J]. 环境科学, 2007, 28 (10): 2287-2293.
- [4] 张静, 周玉文, 刘春, 等. 降雨地表径流水质模拟中 SWMM 模型水质参数确定 [J]. 环境科学与技术, 2017, 40 (5): 165-170.
- [5] 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.
- [6] 张蓓, 李家科, 李亚娇. 不同开发模式下城市雨洪及污染模拟研究进展 [J]. 环境科学与技术, 2017, 15 (8): 23-27.
- [7] 官奕宏, 吕谋, 王灿, 等. 低影响开发技术的雨洪控制效果及水质影响分析——基于 SWMM 模型 [J]. 中国农村水利水电, 2017, 21 (01): 16-21.