

# 广州市东濠涌流域低影响开发措施雨洪控制效应评估

张明珠<sup>1</sup>, 麦叶鹏<sup>2</sup>, 孟庆强<sup>1</sup>, 李丹<sup>1</sup>, 刘浩<sup>1</sup>, 黄国如<sup>2,3</sup>

(1. 广州市水务科学研究所, 广东 广州 510220; 2. 华南理工大学 土木与交通学院, 广东 广州 510640;  
3. 华南理工大学 亚热带建筑科学国家重点实验室, 广东 广州 510640)

**摘要:** 随着我国城市化进程的快速推进和海绵城市理念的不断加深, 低影响开发(LID)措施日益受到各地重视。为评估LID措施的雨洪控制效果, 构建基于SWMM的东濠涌流域城市雨洪模型, 分析选取适合该研究区域的LID措施, 分别采用重现期为0.5、1、2、5、10年的设计降雨对LID措施的雨洪控制效应进行分析。研究表明: LID措施能够较为有效地减小流域洪峰流量、径流量及推迟峰值时间, 对初期雨水径流污染负荷也具有较好的削减作用, 且径流量和污染物削减率均随着重现期增大而减小。

**关键词:** 低影响开发; SWMM模型; 降雨径流; 污染物负荷; 雨洪控制; 效应评估; 东濠涌流域

中图分类号: TV213.4; TU992.0

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2017)04-0028-07

## Assessment of flood control effect under low impact development in East Ho Chong Watershed, Guangzhou City

ZHANG Mingzhu<sup>1</sup>, MAI Yepeng<sup>2</sup>, MENG Qingqiang<sup>1</sup>, LI Dan<sup>1</sup>, LIU Hao<sup>1</sup>, HUANG Guoru<sup>2,3</sup>

(1. Guangzhou Water Science Research Institute, Guangzhou 510220, China; 2. School of Civil Engineering and Transportation, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China; 3. State Key Laboratory of Subtropical Building Science, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

**Abstract:** With the rapid progress of urbanization in China and the deepening of the concept of Sponge City, Low Impact Development (LID) measures have attracted more and more attention all over the country. In order to evaluate the effect of flood control on LID measures, the urban flood model of East Ho Chong watershed is constructed based on SWMM model. Then the suitable LID measures are selected for the study area, and the flood control effect of the LID measures is analyzed by using the design rainfall with the return period of 0.5, 1, 2, 5, and 10 years. The results showed that LID measures can effectively reduce the peak flow, runoff and delay the peak time. They also had good effect on reducing pollutant loads of first flush runoff, and the runoff and pollutant reduction rate decreased with the increase of the return period.

**Key words:** low impact development; SWMM model; rainfall runoff; pollutant loads; flood control; effect assessment; East Ho Chong Watershed

随着我国城市化进程的进一步加快, 城市不透水面积比例不断增加, 降雨下渗量不断减少, 又加之城市排水系统建设标准较低, 导致城市暴雨内涝灾害频发, 城市面源污染加剧, 为有效地解决错综复杂的城市水问题, 采用基于低影响开发(LID)的海绵城市建设模式十分必要。低影响开发(LID)通过分

散的、小规模源头控制措施, 用于控制城市暴雨产生的径流和污染, 其在源头对降雨径流和污染物控制能力已经获得普遍认可。随着海绵城市建设的不断推进, 利用城市雨洪模型定量化评估LID措施水文效应可为海绵城市建设提供科学依据。SWMM模型为一类较为有效的城市雨洪模型, SWMM5.0

收稿日期: 2017-04-09; 修回日期: 2017-08-18

基金项目: 广州市水务科技项目(GZSW-201401); 广东省水利科技创新项目(2016-32); 广州市科技计划项目(201707020020); 广东省科技计划项目(2016A020223003)

作者简介: 张明珠(1985-), 女, 安徽东至人, 高级工程师, 主要从事生态水文学与水环境治理技术研究。

通讯作者: 黄国如(1969-), 男, 江苏南京人, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事水文水资源研究。

版本增加了LID措施模块,可以利用该模型评估研究区域在采取LID措施前后对降雨径流及其污染物控制效果,近年来SWMM模型广泛运用于评估LID措施的雨水控制效应<sup>[1-8]</sup>,但这些研究大多用于开展LID的雨水径流控制效果评估,而对面源污染控制研究相对较少。本文以广州市东濠涌流域为研究对象,构建基于SWMM的城市雨洪模型,评估LID措施对东濠涌流域洪涝减缓和初期雨水径流污染的影响,进而为流域海绵城市建设提供科学参考。

## 1 东濠涌流域城市雨洪模型构建

### 1.1 流域概况

东濠涌位于广州市越秀区中心地带,是集截污、雨水排放和防洪排涝功能于一体的城市河涌。东濠涌流域的位置如图1所示,流域面积约为10.38 km<sup>2</sup>,其主涌现状防洪排涝能力仅为1年一遇标准,流域内绝大部分地下排水管道仅采用1年一遇设计标准,少部分甚至只有0.5年一遇标准,当流域遭遇暴雨时,部分区域管道排水能力不足,容易造成内涝灾害。流域范围属于典型老城区,采用合流制排水系统,由于拆迁成本过高、施工空间有限等问题,雨污分流改造不彻底,面源污染问题较为严重。同时由于河道较窄,高架桥桥墩众多,河道排水能力不足,加之下游潮位顶托作用致使涝水无法顺利排入河道,容易造成溢流污染问题。



图1 东濠涌流域位置示意图

### 1.2 SWMM模型构建

SWMM是集水文、水力和水质模拟功能于一体的降雨径流模拟模型<sup>[9-10]</sup>,基于SWMM模型构建东濠涌流域城市雨洪模型,主要分为以下几个步骤:

(1)根据研究区域管网数据,利用数据提取、VBA编程处理、谷歌地图及ArcGIS软件等,进行管网数据相关属性匹配,且进行相关拓扑关系检查(去除孤立点、重复点/线等),修正部分不合理数据,同时根据谷歌地图和地形图等资料,将道路概化为地表浅明渠管线,补充地表层管线信息,建立现状管网数据库,共计得到10 762根管线和10 588个节点。针对模型计算模式,将个别短管与相邻管道进行合并、删除个别简单支管等,对排水管网系统进行适当概化,便于模型计算稳定,最终简化为8 425根管线及7 702个节点。

(2)由于流域面积较大,无法直接进行手动子汇水区划分,先提取地面高程信息(高程点和等高线),利用ArcGIS进行流域水文分析,初步划分为11个子流域,然后进一步根据道路、管线分布、建筑结构类型划分为77个集水区,在此基础上采用泰森多边形法把流域划分为7 702个子汇水区。

(3)利用坡度分析功能获取每个子汇水区的平均坡度信息,利用地形图结合谷歌地图提取出各类用地类型(重载道路、小区道路及广场用地、屋面、城市绿化带以及公园),统计各子汇水区中的不透水率以及用地类型信息(道路、绿地和屋面),最终建立包括子汇水区编号、边界点坐标、子汇水区面积、汇入节点编号、流域宽度、不透水率、用地类型等信息的子汇水区数据库。

### 1.3 模型参数

SWMM模型参数包括水量和水质两部分。SWMM模型中的水量参数有些可以根据研究区域的实际情况予以事先确定,比如流域面积、坡度、汇水区不透水率等,其他一些参数如汇水区漫流宽度、不透水区曼宁系数及霍顿产流参数等,则需根据模型使用手册、相关文献资料和临近地区相关研究成果确定<sup>[3,9-12]</sup>,最终得到的水量参数如表1。

华南理工大学曾以广州市新河浦社区为研究对象,针对社区中的一些典型排水区进行了相关污染负荷的现场监测和取样分析,并用实测降雨径流水质资料对模型参数进行了率定和验证,所得到的模型参数具有一定的精度和可靠性<sup>[11-12]</sup>。新河浦社区位于本研究区域内东南部,在污染负荷来源、类型等方面与本研究区域都有高度的相似特征,具备代表性、真实性和适用性,最终选定TSS、BOD、COD、TP、TN、NH<sub>3</sub>-N 6种污染负荷指标作为研究区域的考核分析指标。另外,考虑到新河浦社区作为当地文明社区,社区规划较为合理完善、雨污分流程度较

高及街道环卫水平相对较高等因素,结合对比东濠涌全流域的社会环境及雨污分流程程度等,确定流域

内污染负荷总量和浓度相对新河浦社区具有 2.5 倍的差异系数,据此得到各污染负荷模拟参数如表 2。

表 1 东濠涌流域雨洪模型水量参数

模型		子汇水区					管道	霍顿模型		
汇流模型	下渗模型	不透水区 曼宁系数	透水区 曼宁系数	不透水区 注蓄深/mm	透水区 蓄深/mm	不透水区中无注 不透水面积比例/%	管道曼宁系数	最大下 渗率	最小下 渗率	渗透衰 减系数
动力波法	霍顿模型	0.011	0.24	2.5	5	25	0.013	78.1	3.3	3.35

表 2 东濠涌流域污染物累积与冲刷模型参数

下垫面类型	参 数	TSS	BOD	COD	TP	TN	NH <sub>3</sub> —N
屋面	冲刷模式	EXP	EXP	EXP	EXP	EXP	EXP
	冲刷系数	0.008	0.002	0.005	0.015	0.004	0.004
	冲刷指数	1.8	1.7	1.7	1.8	1.5	1.5
	清扫效率/%	70	70	70	70	70	70
	累积模式	SAT	SAT	SAT	SAT	SAT	SAT
	最大累积量/(kg·hm <sup>-2</sup> )	180	10	60	0.3	7.5	2
	半饱和和累积时间/d	7	7	7	7	7	7
道路	冲刷模式	EXP	EXP	EXP	EXP	EXP	EXP
	冲刷系数	0.008	0.003	0.008	0.008	0.002	0.002
	冲刷指数	1.8	1.7	1.8	1.6	1.4	1.5
	清扫效率/%	70	70	70	70	70	70
	累积模式	SAT	SAT	SAT	SAT	SAT	SAT
	最大累积量/(kg·hm <sup>-2</sup> )	230	16	110	0.2	5	2
	半饱和和累积时间/d	4	4	4	4	4	4
绿地	冲刷模式	EXP	EXP	EXP	EXP	EXP	EXP
	冲刷系数	0.03	0.008	0.03	0.042	0.007	0.008
	冲刷指数	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2
	清扫效率/%	0	0	0	0	0	0
	累积模式	SAT	SAT	SAT	SAT	SAT	SAT
	最大累积量/(kg·hm <sup>-2</sup> )	100	20	40	1	10	1.8
	半饱和和累积时间/d	20	20	20	20	20	20

最后将构建的数据库导入到 SWMM 模型中,输入设计暴雨、计算时间步长、污染负荷等相关参数后,构建出东濠涌流域城市雨洪模型。

## 2 LID 措施设计

城市雨洪管理在不同尺度上的侧重点各不相同<sup>[13]</sup>,根据东濠涌流域面积,参照国内类似等级项目的雨洪控制和低影响开发控制目标,结合东濠涌流域实际情况,制定东濠涌流域低影响开发目标为提高流域内防洪能力及减小对河道和下游的冲击。

### 2.1 LID 措施特征参数

LID 措施设计需要考虑各方面条件限制,包括场地条件、地形地势、土壤性质、下垫面性质及建设

空间需求等<sup>[14]</sup>,具体见图 2。

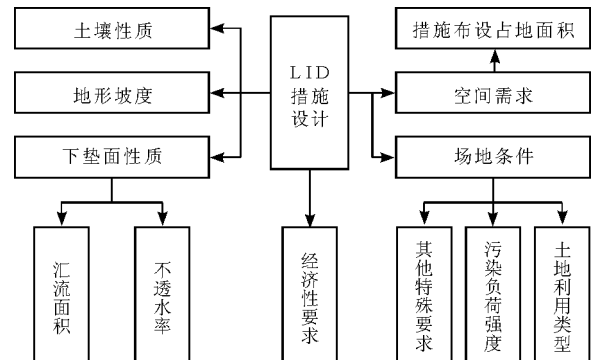


图 2 LID 措施设计考虑因素

根据《海绵城市建设技术指南——低影响开发雨水系统构建(试行)》相关指导,得知不同用地类

型对各类 LID 措施具有不同程度的适应性,具体见表 3。

表 3 不同用地类型对各项 LID 措施的适应性

用地类型	渗透技术				储存技术			转输技术	截污净化技术	
	透水性路面	绿色屋顶	下沉式绿地	生物滞留设施	雨水湿地	蓄水池	雨水桶	植草沟	植被缓冲带	初期雨水弃流设施
建筑与小区	●	●	●	●	●	○	●	●	●	●
城市道路	●	×	●	●	●	×	○	●	●	○
绿地与广场	●	×	●	○	●	○	○	●	●	○
城市水系	○	×	○	○	●	×	○	○	●	×

注:“●”为适宜;“○”为可选;“×”为不适宜。

## 2.2 LID 措施初选及设置

在城市雨洪模型建立过程中,结合现场调研、高清卫星图及图纸资料,对流域内用地类型进行了统计和整理,结果如表 4。

表 4 研究区域用地类型统计表

用地类型	面积/km <sup>2</sup>	比例/%	性质
重载道路	1.27	12.24	不透水
小区道路和广场	2.87	27.65	不透水
屋面	3.18	30.64	不透水
绿化带	1.92	18.50	透水
山地和公园	1.14	10.98	透水
总计	10.38	100	

根据低影响开发中各项 LID 措施的实际布设原则和适应类型,将流域内的用地划分为重载道路、小区道路和广场、屋面、绿化带及山地和公园等 5 类,据此得到流域平均不透水率约为 70.52%。东濠涌流域作为广州市中心老城区,城市化水平较高,由于靠近广州“市肺”白云山生态区,流域绿化率可达 29.47%。但由于山地主要集中于流域北部,中心区域建筑物密度较大,不透水面积集中,遭遇降雨地表汇流时间短。

结合流域实际情况,最终选择适合东濠涌流域的 LID 措施分别为调蓄池、透水性路面和生物滞留带等。

## 2.3 LID 措施布设

(1)调蓄池。调蓄池容积计算公式如式(1)所示:

$$V = 10 \varphi HF \quad (1)$$

式中:  $V$  为设计调蓄容量,  $m^3$ ;  $H$  为设计降雨量,  $mm$ ;  $\varphi$  为综合雨量径流系数;  $F$  为调蓄池服务汇水面积,  $hm^2$ 。

考虑到东濠涌流域为老城区,建筑密度较大,但

仍能够实现部分改造,匡算得到蓄水池总服务面积为  $183 \text{ hm}^2$ ,综合雨水径流系数取 0.85,设计降雨量采用 85% 年径流总量控制率下的设计降雨量  $43.4 \text{ mm}$ ,得出总蓄水容积约为  $67 \ 509 \text{ m}^3$ 。

(2)透水性路面。透水性路面以下渗为主且顶部无蓄水空间,虽然基层具有一定的蓄水能力,但是受面层或基层的渗透性能影响很大,因此采用综合雨量径流系数计算方式确定规模。由于透水性路面铺设成本相对较低,本文模拟透水性路面在除承重道路外的硬化道路、停车场和露天广场铺设率为 50%,尽可能多增加城市透水率,改善下垫面情况,匡算得到总铺设面积为  $143 \text{ hm}^2$ 。

(3)生物滞留带。生物滞留带计算公式如式(2)和式(3)所示:

$$V_s = V - W_p \quad (2)$$

$$W_p = KJA_s t_s \quad (3)$$

式中:  $V_s$  为渗透设施的有效调蓄容积,包括设施顶部和结构内部蓄水空间的容积,  $m^3$ ;  $V$  为渗透设施的进水量,  $m^3$ ;  $W_p$  为渗透量,  $m^3$ ;  $K$  为土壤渗透系数,  $m/s$ ;  $J$  为水力坡降,一般可取为 1;  $A_s$  为有效渗透面积,  $m^2$ ;  $t_s$  为渗透时间,一般可取 2 h;经过匡算得到生物滞留带布设总面积为  $40 \ 198 \text{ m}^2$ 。

本模型中所涉及到的各 LID 措施的参数参考模型手册<sup>[9-10]</sup>和相关文献[3,13,15],具体设计参数如表 5~7。

表 5 调蓄池设计参数

调蓄池结构	设计参数	参数取值
储蓄层	池高/mm	900
	出流系数	0
下层排水	出流指数	0.5
	管底抬高/mm	50

表6 透水性路面设计参数

透水性路面结构	设计参数	参数取值
表面层	滞留深度/mm	20
	空间植被覆盖率/%	0
	曼宁系数	0.11
	表面坡度/%	0.5
储蓄层	厚度/mm	500
	孔隙率/%	0.2
	下渗率/(mm·h <sup>-1</sup> )	500
	阻碍因子	250
透水层	厚度/mm	100
	孔隙率/%	0.2
	不透水率/%	0
	渗透率/(mm·h <sup>-1</sup> )	200
下层排水	阻碍因子	250
	出流系数	0
	出流指数	0.5
	管底抬高/mm	50

表7 生物滞留带设计参数

生物滞留带结构	设计参数	参数取值	
表面层	滞留深度/mm	200	
	空间植被覆盖率/%	0	
	曼宁系数	0.15	
	表面坡度/%	1	
	土壤层	厚度/mm	500
		孔隙率/%	0.45
		产流能力	0.19
		凋萎系数	0.085
	水力传导度	10.9	
	水力传导坡度	10	
	水吸力	110	
储蓄层	厚度/mm	200	
	孔隙率/%	0.2	
	下渗率/(mm·h <sup>-1</sup> )	500	
	阻碍因子	250	
下层排水	出流系数/(mm·s <sup>-1</sup> )	0.07	
	出流指数	0.5	
	管底抬高/mm	50	

### 3 LID 措施效能量化评价

采用广州市暴雨强度公式,利用芝加哥雨型得

到0.5、1、2、5、10年不同重现期1h设计降雨过程线,通过对比LID措施前后东濠涌流域出口的水量和污染负荷情况,定量评价LID措施对减少城市径流和面源污染的效能。

#### 3.1 遭遇0.5年一遇1h设计暴雨

当研究区域遭遇0.5年一遇1h设计降雨时,计算结果见图3和表8。由图3可知,采取LID措施后,通过调蓄和下渗作用改善了流域下垫面条件,流域产流削峰作用明显,峰现时间稍有推后,污染负荷指标变化过程与流量过程呈现出一致性规律,其中BOD、TN、NH<sub>3</sub>-N的滞纳效果较好,其他指标削减效果较差。

表8 遭遇0.5年一遇1h设计降雨东濠涌流域LID措施前后径流量和污染物负荷量及其削减率

指标	LID措施前	LID措施后	削减率/%	
洪峰流量/(m <sup>3</sup> ·s <sup>-1</sup> )	118.49	80.67	31.92	
径流量/m <sup>3</sup>	336141	192288	42.80	
TSS	69723	64594	7.36	
BOD	4267	2333	45.33	
污染物	COD	30410	26757	12.01
负荷量/kg	TP	112	94	16.07
	TN	1059	518	51.09
	NH <sub>3</sub> -N	367	176	52.04

由表8可知,当流域遭遇0.5年一遇设计暴雨时,LID措施前后的洪峰流量和径流量的削减率分别为31.92%和42.80%,污染物负荷量也有不同程度的削减,其中BOD、TN和NH<sub>3</sub>-N削减效果较好,负荷量削减率分别可达45.33%、51.09%和52.04%,其余指标削减效果较差。

#### 3.2 不同重现期降雨综合评估

模拟不同设计重现期降雨的径流与污染物负荷量,可以发现东濠涌流域出口在LID措施前后流量和各种污染物负荷变化过程规律与遭遇0.5年一遇暴雨相似,这里不再赘述。汇总不同重现期情况下的径流量及各水质指标的削减率,结果见表9。

从表9可以看出,采取LID措施后,通过调蓄和下渗作用改善了流域下垫面条件,流域产流量明显减小,洪峰流量和径流量均减少,且径流量减少幅度大于洪峰流量减少幅度,LID措施对BOD、TN、NH<sub>3</sub>-N吸附和过滤作用较为明显。

另外,各种指标的LID措施的削减率均随着重现期增大而减小,这是由于LID措施蓄水能力有限,

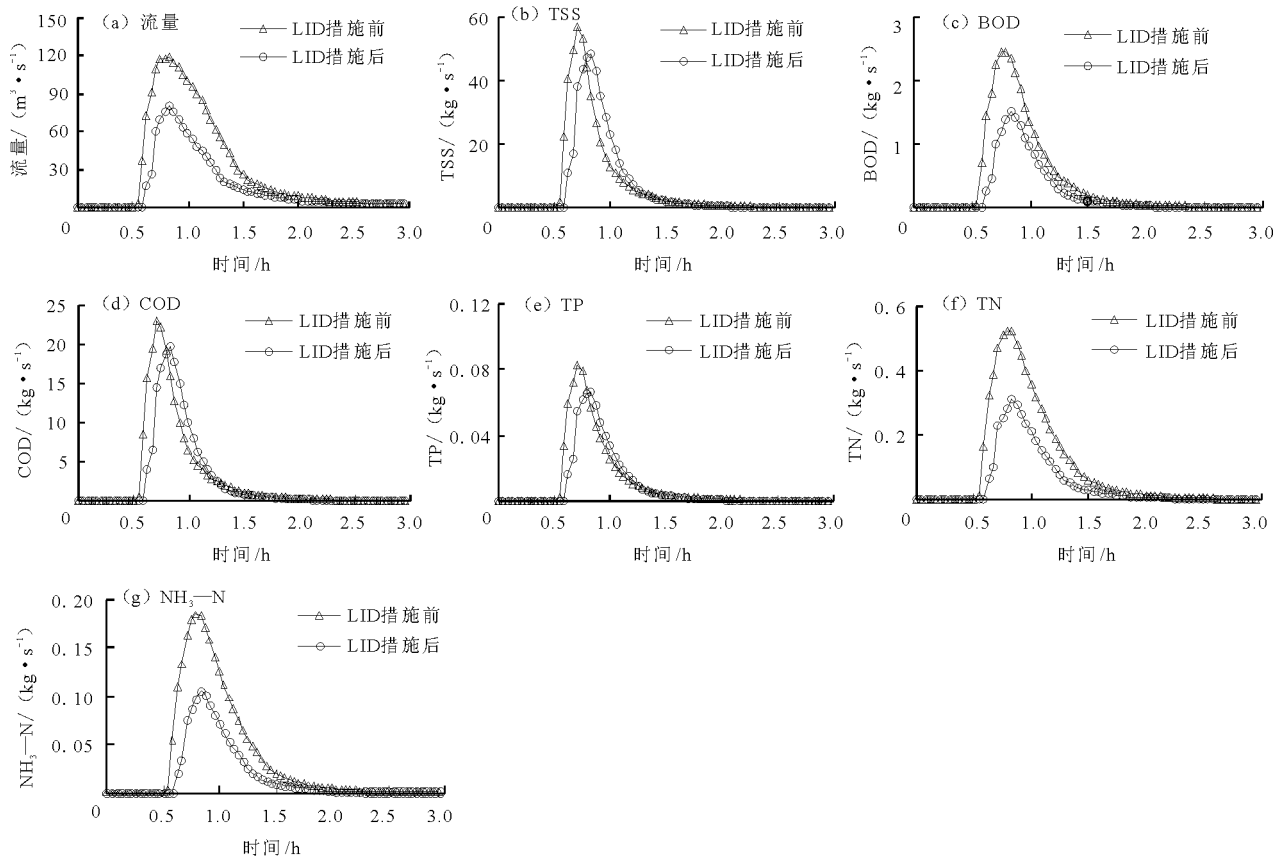


图3 0.5年一遇1h设计降雨东濠涌流域出口LID措施前后流量和各种污染物负荷变化过程

表9 遭遇各种重现期1h设计降雨下的径流量及不同指标污染物负荷削减率

设计重现期/a	洪峰流量	径流量	TSS	BOD	COD	TP	TN	NH <sub>3</sub> -N	%
0.5	31.92	42.80	7.36	45.33	12.01	16.07	51.09	52.04	
1	28.65	42.47	4.59	35.84	6.57	8.77	46.84	47.80	
2	26.82	42.14	3.09	26.68	3.49	4.35	43.02	43.85	
5	24.57	41.77	2.46	16.96	2.48	2.59	38.36	39.27	
10	22.41	41.37	2.92	11.73	2.83	2.59	34.62	35.43	

当降雨量增大时,即分母增大导致削减率减小。当研究区域遭遇0.5年一遇到10年一遇设计降雨时,洪峰流量、径流量和各污染物负荷均有不同程度的削减,洪峰流量和径流量的削减率分别为22.41%~31.92%和41.37%~42.80%,BOD、TN和NH<sub>3</sub>-N的削减率分别为11.73%~45.33%、34.62%~51.09%和35.43%~52.04%,而TSS、COD和TP的削减率分别仅为2.92%~7.36%、2.83%~12.01%和2.59%~16.07%。

## 4 结论

(1)分别采用重现期为0.5、1、2、5、10年的设计降雨对LID措施的雨洪效应进行评估,发现径流

量和污染物负荷量均有不同程度的削减效果,且径流量和污染物削减率均随着重现期增大而减小。

(2)采用LID措施后研究区域内的下垫面条件得到改善,在各重现期降雨条件下,流域产流明显减小,峰值流量稍有推后,具有较强的坦化效果。当研究区域遭遇0.5年一遇到10年一遇设计降雨时,洪峰流量和径流量的削减率分别为22.41%~31.92%和41.37%~42.80%。

(3)LID措施对流域内的污染负荷指标均有一定程度的滞留和过滤效果,其中对BOD、TN、NH<sub>3</sub>-N的作用较为明显,对其余指标削减效果较差。当研究区域遭遇0.5年一遇到10年一遇设计降雨时,BOD、TN和NH<sub>3</sub>-N的削减率分别为11.73%~

45.33%、34.62%~51.09%和35.43%~52.04%，而TSS、COD和TP的削减率分别仅为2.92%~7.36%、2.83%~12.01%和2.59%~16.07%。

### 参考文献:

- [1] 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.
- [2] 常晓栋,徐宗学,赵刚,等. 基于SWMM模型的城市雨洪模拟与LID效果评价——以北京市清河流域为例[J]. 水力发电学报,2016,35(11):84-93.
- [3] 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.
- [4] 吴建立. 低影响开发雨水利用典型措施评估及其应用[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2012.
- [5] 何爽,刘俊,朱嘉祺. 基于SWMM模型的低影响开发模式雨洪控制利用效果模拟与评估[J]. 水电能源科学,2013,31(12):42-45.
- [6] 李霞,石宇亭,李国金. 基于SWMM和低影响开发模式的老城区雨水控制模拟研究[J]. 给水排水,2015,31(5):152-156.
- [7] 胡爱兵,任心欣,丁年,等. 基于SWMM的深圳市某区域LID设施布局与优化[J]. 中国给水排水,2015,31

(21):96-100.

- [8] 许萍,何俊超,任心欣,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.
- [9] Jorge G, Larry A R, Jennifer D. Storm water management model: applications manuals [EB/OL]. (2009-07) [2016-12-01]. [http://www.epa.gov/ednrmrl/models/swmm/epaswmm5\\_apps\\_manual.pdf](http://www.epa.gov/ednrmrl/models/swmm/epaswmm5_apps_manual.pdf).
- [10] Rossman L A. Storm water management model user's manual version 5.0 [EB/OL]. (2010-07) [2016-12-01]. [http://www.epa.gov/ednrmrl/models/swmm/epaswmm5\\_user\\_manual.pdf](http://www.epa.gov/ednrmrl/models/swmm/epaswmm5_user_manual.pdf).
- [11] 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.
- [12] 聂铁锋. 广州市城区暴雨径流非点源污染负荷核算技术研究[D]. 广州:华南理工大学,2012.
- [13] 乔梦曦. 区域开发不同尺度雨水系统关系研究[D]. 北京:北京建筑大学,2013.
- [14] 戚海军. 低影响开发雨水管理措施的设计及效能模拟研究[D]. 北京:北京建筑大学,2013.
- [15] 苏义敬,王思思,车伍,等. 基于“海绵城市”理念的下沉式绿地优化设计[J]. 南方建筑,2014(3):39-43.

(上接第27页)

- [10] 陈丽晖,何大明. 澜沧江-湄公河水梯级开发的生态影响[J]. 地理学报,2000,55(5):577-586.
- [11] 陈翔,赵建世,赵钢铁,等. 发电调度对径流情势及生态系统的影响分析——以小湾、糯扎渡水电站为例[J]. 水力发电学报,2014,33(4):36-43.
- [12] 钟华平,王建生. 澜沧江干流水电开发对径流的影响分析[J]. 水利水电技术,2010,41(12):72-74.
- [13] 何大明,冯彦,甘淑,等. 澜沧江干流水电开发的跨境水文效应[J]. 科学通报,2006,51(S2):14-20.
- [14] 雷四华,刘静楠,顾颖,等. 澜沧江干流水电站建设前后出境点径流变化分析[J]. 云南大学学报:自然科学版,2010,32(1):58-62.
- [15] 王国庆,庞慧,荆新爱,等. 清涧河流域的水文情势变化阶段及其特征[J]. 中国水土保持科学,2005,3

(2):23-27.

- [16] 王秀芬,杨艳昭,尤飞. 近30年来黑龙江省气候变化特征分析[J]. 中国农业气象,2011,32(S1):28-32.
- [17] 曹洁萍,迟道才,武立强,等. Mann-Kendall检验方法在降水趋势分析中的应用研究[J]. 农业科技与装备,2008(5):35-37+40.
- [18] 刘学锋,任国玉,范增禄,等. 海河流域近47年极端强降水时空变化趋势分析[J]. 干旱区资源与环境,2010,24(8):85-90.
- [19] Wang Guoqing, Zhang Jianyun, He Ruimin, et al. Run-off sensitivity to climate change for hydro-climatically different catchments in China[J]. Stochastic Environmental Research and Risk Assessment,2017,31(4):1011-1021.