

# 南河河道修复工程中海绵设施的效果评估

李昆朋<sup>1</sup>, 刘邦俊<sup>1</sup>, 吴 雨<sup>2</sup>, 许贻乔<sup>3</sup>, 吴 磊<sup>3</sup>

(1. 南京市水利规划设计院股份有限公司, 江苏 南京 210000;

2. 南京市雨花台区水务总站, 江苏 南京 210000;

3. 东南大学 能源与环境学院, 江苏 南京 210000)

**摘要:**通过雨洪管理模型(SWMM)建立了该海绵设施的效果评估模型,对不同边界条件下该海绵设施的径流控制和污染净化效果进行了模拟。结果表明在一定的暴雨强度下,河滨地带下垫面渗透性越差的区域,采用海绵设施的效果越好。但是,随着降雨强度的继续增大,海绵设施的影响逐渐弱化。

**关键词:**海绵化建设; 渗透性铺装; 植草沟; SWMM; 评估

中图分类号:TV85

文献标识码:B

文章编号:1007-7839(2021)02-0011-08

## Effect evaluation of sponge facilities in Nanhe River rehabilitation project

LI Kunpeng<sup>1</sup>, LIU Bangjun<sup>1</sup>, WU Yu<sup>2</sup>,  
XU Yiqiao<sup>3</sup>, WU Lei<sup>3</sup>

(1. Nanjing Water Planning and Designing Institute Co., Ltd., Nanjing 210000, China;

2. Yuhuatai District Water Conservancy Bureau, Nanjing City, Nanjing 210017, China;

3. School of Energy and Environment, Southeast University, Nanjing 210000, China)

**Abstract:** The effect evaluation model of the sponge facility was established by storm water management model (SWMM), and the runoff control and pollution purification effects of the sponge facility under different boundary conditions were simulated. The results showed that under a certain rainstorm intensity, the lower the permeability of the underlying surface of the riverbank was, the better the effect of sponge facilities was. However, with the continuous increase of rainfall intensity, the influence of sponge facilities gradually weakened.

**Key words:** sponge construction; permeable pavement; grass ditch; SWMM; evaluation

传统城市雨洪管理的规划设计理念是“快速排除”和“末端集中”,使用管渠、泵站等“灰色”硬质设施直排雨水<sup>[1-2]</sup>。这种管理中存在3类问题:第一,主要依靠硬性设施来外排径流雨水,增加了市政雨水管网及水体容纳排涝设施压力;第二,初期

降雨未经植物层的净化,大量污染物随雨水入河,影响城市水环境质量;第三,雨水大量流失,浪费水资源,导致排不出水,但实际又缺水的矛盾<sup>[3]</sup>。如考虑将设计理念转变为“慢排缓释”和“源头分散”,优先利用“绿色”措施来组织排水,既能避免洪涝,

收稿日期:2020-10-18

作者简介:李昆朋(1987—),男,工程师,硕士研究生,主要从事水环境治理与水生态修复工作。E-mail:wuhalkplkp@163.

com

又可以有效收集利用雨水。由此便诞生了“海绵城市”的概念,其内涵在于“渗、滞、蓄、净、用、排”。具体含义指城市能够像海绵一样会“呼吸”,在适应环境变化和应对雨水带来的自然灾害等方面具有良好的弹性,在下雨时吸水、蓄水、渗水、净水,需要时,将蓄存的水“释放”并加以利用<sup>[4]</sup>。形成城市内部良性水循环模式,在此过程中既解决了洪涝灾害问题,又自动吸收了系统的污染物质,对城市水土起到净化作用。

海绵城市通常包括低影响开发雨水系统、城市雨水管渠系统和超标雨水径流排放系统,其中低影响开发雨水是最主要的实现途径<sup>[5]</sup>。低影响开发雨水系统(Low Impact Development, LID)指在城市开发建设过程中,通过生态化措施,尽可能维持城市开发建设前后水文特征不变,缓解不透水面积增加造成的径流总量、径流峰值与径流污染的增加等对环境造成的不利影响<sup>[4]</sup>。其规划控制目标包括总量控制、径流峰值控制和径流污染控制。径流总量控制一般是低影响开发雨水系统的首要规划控制目标,而径流峰值和污染一般通过径流总量控制来实现。对于径流峰值,一般低影响开发设施对中小型降雨事件的峰值削减效果较好,而对大暴雨事件的错峰、延峰幅度较低。对于径流污染,其控制指标采用 SS、TP、TN、COD 等<sup>[6]</sup>,其中 SS 和 COD 常被选为主要控制指标。

## 1 研究地区与研究方法

### 1.1 研究区概况

南河位于江苏省南京市主城西南,是建邺区和雨花台区的一条界河。南河当前现状存在生态环境较差、安全得不到保障、未充分发挥区域生态补水功能、滨水空间功能品质与两岸城市建设不协调等问题。南河工程的建设,主要满足黑臭水体整治、引排体系完善、防洪安全保障、滨水空间提升、区域可持续发展等方面的需要,将南河建设成为一条清澈的河、生态的河、美丽的河、创新的河。为此,南河工程指挥部将海绵化建设技术引入工程红线范围内的河滨地带,作为削减该地段入河雨水量、延缓雨水峰值和控制初雨污染的工程措施。

南河河道全长 9.30 km,设计河底高程 5.00 m,常水位 7.50 m,洪水位 11.10 m。两侧岸坡为生态岸坡,主要形式是硬质护坡,局部为草皮、仿木桩等,其面积约为 32 200 m<sup>2</sup>。

### 1.2 海绵设施

根据《南河海绵化建设设计方案》,南河沿岸选用渗透性铺装和植草沟作为海绵化建设的措施。渗透性铺装按照面层材料不同可分为透水砖铺装、透水水泥混凝土铺装和透水沥青混凝土铺装,嵌草砖、园林铺装中的鹅卵石、碎石铺装等也属于渗透铺装。主要适用于广场、停车场、人行道以及车流量和荷载较小的道路,如建筑与小区道路、市政道路的非机动车道等。其特点是适用区域广,施工方便,可补充地下水,并具有一定的峰值流量削减和雨水净化作用,但易堵塞,寒冷地区有被冻融破坏的风险。

南河雨花区选用的渗透性铺装形式为滨水步道透水砖路,总长度 2.54 km,平均宽度 2.5 m,总面积约占汇水面积的 6%。透水砖路自上而下包括透水混凝土砖 60 mm、1:3 水泥砂浆 30 mm、透水混凝土 100 mm 和厚碎石垫层 100 mm,底部由素土夯实,两侧有白花岗岩作为护堤。

植草沟指种有植被的地表沟渠,适用于建筑与小区内道路,广场、停车场等不透水面的周边,城市道路及城市绿地等区域,可收集、输送和排放径流雨水,并具有一定的雨水净化作用,可用于衔接其他各单项设施、城市雨水管渠系统和超标雨水径流排放系统。植草沟具有建设及维护费用低,易与景观结合等优点。

南河项目建设植草沟总长度 20.04 km,面积约为 8 000 m<sup>2</sup>,占汇水面积的 8%。植草沟宽度约为 400 mm,深度 400 mm,包括 200 mm 的种植土层和 200 mm 的排水层(内含穿孔集水管),以砾石排水层分隔。植草沟未设置纵向坡度。雨花区二标段及三标最新段所设计植草沟的植被类型为天堂草,三标最后一段(K6+650~K7+550)采用细叶结缕草,规格均为 30 g/m<sup>2</sup>。

### 1.3 研究方法

海绵化建设常用城市雨洪模型进行评估。城市雨洪模型的类别繁多,目前应用较广泛的雨洪模型可分为水文模型与水力模型 2 类。水文模型采用系统分析的方法,将汇水区域中复杂的水文变化概化为“黑箱”或者“灰箱”系统;水力模型以水力学为理论基础,通过联立连续性方程与动量方程模拟水体自身以及水体与河床、管道、污染物等其他介质之间的相互关系。现行的雨洪模型多将水文模型与水力模型进行耦合,可用于城市排洪防涝规划,城市市政雨水管网设计以及非点源污染控制

等<sup>[7-8]</sup>。

国外对于相关理论的研究始于20世纪30年代。进入20世纪60年代后,计算机技术的蓬勃发展为城市雨洪模型提供了良好的技术保障。据统计,与城市雨洪模拟相关的模型有40余种。目前应用较广泛的模型包括SWMM、HSPF、Inforworks CS、MIKE、MOUSE等<sup>[9]</sup>。

SWMM(Storm Water Management Model,暴雨雨水管理模型)由麦特卡尔夫 & 艾迪公司、美国佛罗里达大学、美国水资源有限公司联合研发,首发于1971年。经过数十年的研究发展,软件进行了多次升级,目前最新版本为5.1010。自5.0版本开始,SWMM加入了LID控制模块,为低影响开发的设计规划以及推广提供了条件。

SWMM模型凭借自身操作简单易掌握、运用范围广、包含LID模块、模拟误差相对较小、模型源代码均开源等优点在国内外得到广泛应用。据统计,国内与SWMM相关的文献达千余篇,研究相对成熟。结合研究区域的实际情况,本文选择SWMM作为雨洪模拟模型。

## 2 模型构建

### 2.1 基本参数

#### 2.1.1 气候条件

温度采取系统缺省值,蒸发量平均值为0.1079 mm/d。

#### 2.1.2 水文条件

(1)雨量计:根据南京市暴雨强度公式计算并录入。共8种雨量条件(0.5~50a),降雨过程线如图1(以累积降水量表示)。

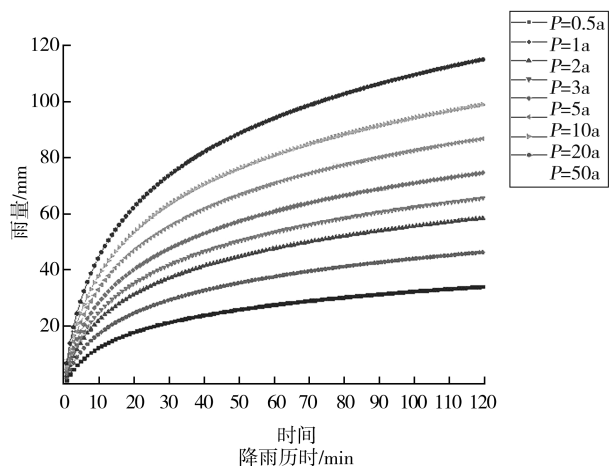


图1 南京市不同重现期下的降雨过程线

(2)子汇水面积:将每条植草沟对应的汇水区

域划分为一个子汇水面积,没有植草沟的区域根据实际分布情况划分为4个子汇水面积。系统由南到北共分为25个子汇水面积,部分具体参数(面积、坡度、特征宽度等)由海绵设施平面图及大样图读出,敏感参数则需率定(见章节参数率定)。具体设置见表1。

(3)LID控制:南河右岸所选海绵设施概化图,见图2。其中植草沟底部含排水管,并非典型的植草沟结构,可以用SWMM中的Bio-Retention Cell措施进行模拟,其结构包括表面层(含植被)、土层和排水层。具体参数(表面、土壤、排水材料等)取经验值。

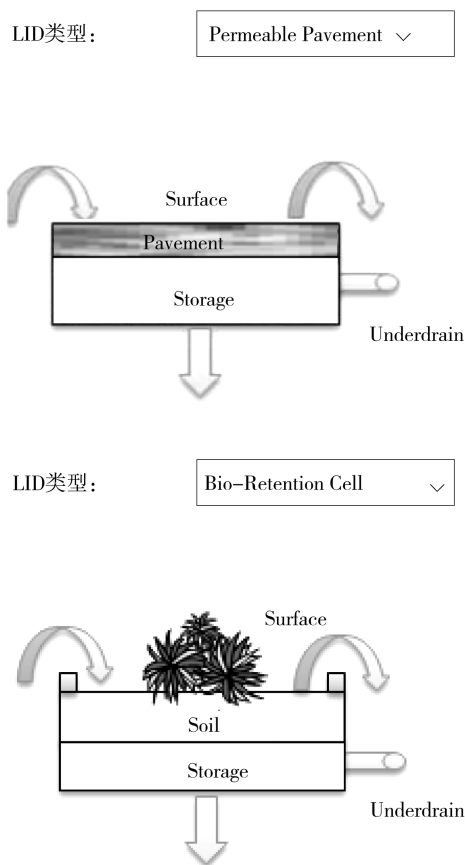


图2 渗透性铺装与植草沟示意图

#### 2.1.3 水力条件

将南河概化为管段,子汇水区域对应的排放口概化为排放口节点。管段形状、长度、标高等参数从设计平面图中读取。

#### 2.1.4 水质条件

(1)污染物:根据面源污染的特性,选取COD和SS为主要污染物,观察其控制情况;

(2)土地利用:创建绿地、道路、屋面3种土地利用类型,按照每个区域实际情况赋值。

表 1 子汇水区域详情

子汇水 区域	面积/ m <sup>2</sup>	特征宽度/ m	坡度	不渗透 百分比/%	无洼地蓄水不 渗透百分比/%	道路/ %	绿地/ %	屋面/ %
1	3 360	4.42	0.5	90	90	90	0	10
2	6 080	8.11	0	15	15	5	85	5
3	3 760	10.08	0.4	90	90	90	5	5
4	840	8.40	0.33	70	70	67	31	2
5	2 140	10.86	0	95	95	95	5	0
6	700	7.61	0.33	15	15	15	85	0
7	810	8.80	0.4	95	90	90	5	5
8	5 040	7.80	0.4	90	90	85	7.5	7.5
9	1 490	16.74	0.4	65	65	65	32	3
10	3 910	30.79	0.33	80	80	70	20	10
11	860	15.64	0.4	80	80	80	16	4
12	1 700	18.89	0.4	55	55	35	32	33
13	1 340	17.78	0.4	55	55	50	40	10
14	650	13.00	0.4	5	5	5	95	0
15	1 820	16.55	0.4	40	40	40	55	5
16	4 280	19.28	0.4	30	30	35	65	0
17	370	5.43	0.4	15	15	15	85	0
18	1 740	17.76	0.4	75	75	39	21	40
19	1 000	15.87	0.4	65	65	39	31	30
20	4 660	19.50	0.4	60	60	34	36	30
21	830	16.60	0.4	90	90	40	10	50
22	13 000	13.61	0.4	80	80	70	20	10
23	3 900	7.35	0.4	85	85	55	10	35
24	40 700	16	0.4	25	25	40	30	30
25	900	8.00	0.4	40	40	40	60	0

## 2.2 参数率定

敏感参数包括洼蓄量、曼宁粗糙系数及下渗参数,针对南河河滨地带土壤情况,本文采取 Horton 公式计算下渗情况。取值范围如表 2。

根据 SWMM 校准原理,以重现期  $P=0.5$  a 的降雨过程线为例进行校准。道路、屋面和绿地的径流系数取常用经验值,根据各区域土地利用比例做加权,得到综合径流系数  $\Psi \approx 0.62$ ,该值与目标值

(0.6) 相吻合。以该值为校准目标,校准过程见表 3。

表 2 经验参数取值范围

参数	下垫面类型	取值范围	数据来源
注蓄量/ m	不透水区	1.40 ~ 2.50	模型手册
	透水区	2.50 ~ 5.00	模型手册
曼宁粗糙 系数	不透水区	0.01 ~ 0.025	模型手册
	透水区	0.012 ~ 0.015	模型手册
Horton 参数	最大入渗率	74.0 ~ 78.0 mm/h	相关文献 <sup>[4,6]</sup>
	最小入渗率	3.10 ~ 4.00	相关文献 <sup>[4,6]</sup>
	衰减常数	2 ~ 4/h	相关文献 <sup>[4,6]</sup>

表 3 模型参数校准过程

待校准参数	初始 经验值	第 1 次	第 2 次	第 3 次
不透水区粗糙系数	0.015	0.015	0.015	0.015
透水区粗糙系数	0.012	0.012	0.012	0.012
不透水区注蓄量	1.5	1.5	2.5	2.5
透水区注蓄量	4	4	5	5
最大入渗率	75	78	78	78
最小入渗率	3	4	4	4
衰减系数	2	2	2	2
模拟径流系数	0.74	0.69	0.65	0.62

采取第 3 次的校准值,利用重现期  $P=10$  a 的降雨过程线,得出综合径流系数经校验后的模型综合径流系数  $\Psi=0.73$ ,说明调整后的参数集的适应性满足常见重现期范围,并且与实际情况较为契合。

按照上述条件运行,得到连续性误差在 0.18% 以内的运行结果。根据 SWMM 用户手册,连续性控制在 10% 以内即可看作合理。

### 3 结果分析

#### 3.1 对系统径流排放的影响

分别模拟了 0.5 a、1 a、2 a、5 a、10 a 和 20 a 降雨重现期的 LID 模式、传统开发模式下的径流排放

情况,如图 3 所示。

由图 3 可看出,海绵设施对于控制径流和洪峰有一定作用。具体统计见表 4 ~ 5。

从表 4 ~ 5 中可看出,在  $P=0.5$  a 时,南河岸边汇水区在建设有海绵设施的影响下,相比传统开发模式(没有海绵设施)的累计径流量减少了  $1\,366\text{ m}^3$  (占总量的 31%),径流时间缩短了 70 min,峰值流量削减了  $0.16\text{ m}^3$  (占总量的 31%); $P=1$  a 时,南河岸边汇水区在海绵设施影响下的累计径流量减少了  $1\,949\text{ m}^3$  (占总量的 26%),径流时间缩短了 60 min,峰值流量削减了  $0.25\text{ m}^3$  (占总量的 28%); $P=2$  a 时,南河岸边汇水区在海绵设施的影响下,累计径流量减少了  $2\,516\text{ m}^3$  (占总量的 24%),径流时间缩短了 57 min,峰值流量削减了  $0.34\text{ m}^3$  (占总量的 26%); $P=5$  a 时,南河岸边汇水区的累计径流量减少了  $3\,253\text{ m}^3$  (占总量的 22%),径流时间缩短了 54 min,峰值流量削减了  $0.45\text{ m}^3$  (占总量的 23%); $P=10$  a 时,南河岸边汇水区的累计径流量减少了  $3\,810\text{ m}^3$  (占总量的 21%),径流时间缩短了 54 min,峰值流量削减了  $0.54\text{ m}^3$  (占总量的 23%); $P=20$  a 时,南河岸边汇水区的累计径流量减少了  $4\,256\text{ m}^3$  (占总量的 20%),径流时间缩短了 53 min,峰值流量削减了  $0.63\text{ m}^3$  (占总量的 22%)。

由以上分析可知,南河工程所设计的海绵设施对于中小强度降雨的径流控制效果较好,随着重现期的增大,其优势逐渐降低。

#### 3.2 对水质的影响

南京市降雨以中小型降雨为主,因此采用  $P=1$  a 的降雨过程线为例,分析道路、绿地和道路、绿地与屋面混合 3 种典型子汇水区域对应排放口的污染物变化情况(图 4),可看出海绵设施在各个区域内均有利于污染物的控制,但由于各排放口所服务区域的用地性质的不同,其控制效果略有差异。对于以道路和屋面为主的汇水区域,渗透性铺装和植草沟对 SS 和 COD 的净化效果较好,可以达到 40% 以上,随着绿地所占比例的加大,海绵设施对污染物的削减能力逐渐下降。由此可见,海绵化建设更适用于不渗透比例较大、渗透性较差的区域。

### 4 结 论

南河的海绵化建设包括渗透性铺装和植草沟 2 种措施。2 种海绵设施均匀分布于南河沿岸,共同对降雨所产生的径流和面源污染起到了良好的控制作用。

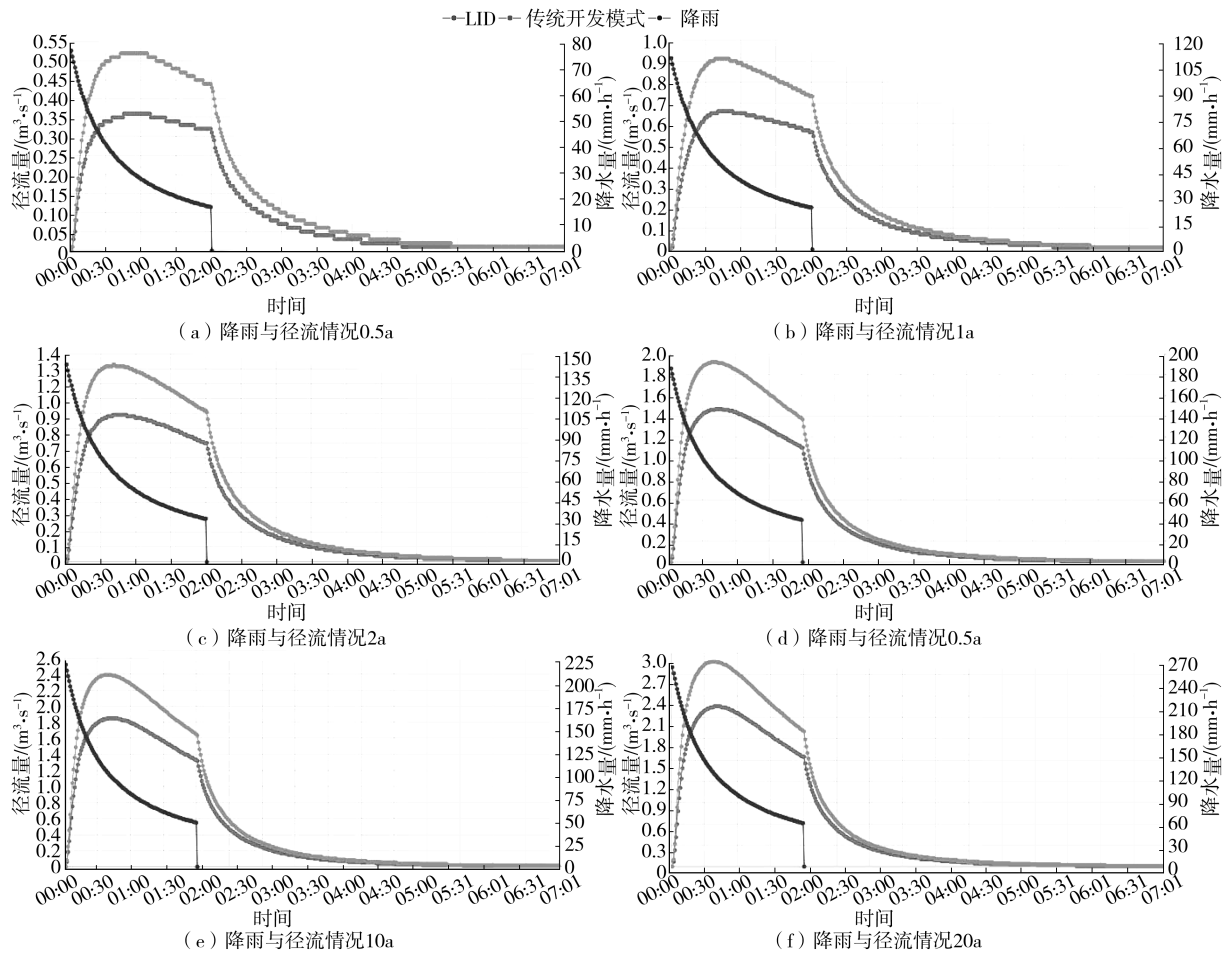


图3 (0.5a,1a,2a,5a,10a,20a) 重现期径流排放模拟情况

表4 不同重现期径流排放情况

重现期	开发模式	径流 开始时间	径流持续 时间/min	径流 结束时间	峰值时间	峰值流量/ (mm · h <sup>-1</sup> )	径流总量/ m <sup>3</sup>
0.5a	LID	00:02	372	06:13	00:46	0.36	3 062
	传统	00:02	442	07:23	00:43	0.52	4 428
1a	LID	00:02	410	06:51	00:41	0.66	5 527
	传统	00:02	470	07:51	00:38	0.91	7 476
2a	LID	00:02	427	07:08	00:41	0.99	8 062
	传统	00:02	484	08:05	00:41	1.33	10 578
5a	LID	00:02	441	07:22	00:42	1.47	11 447
	传统	00:02	495	08:16	00:38	1.92	14 700
10a	LID	00:02	447	07:28	00:39	1.85	14 016
	传统	00:02	501	08:22	00:36	2.39	17 826
20a	LID	00:02	452	07:33	00:39	2.25	16 590
	传统	00:02	505	08:26	00:36	2.88	20 846

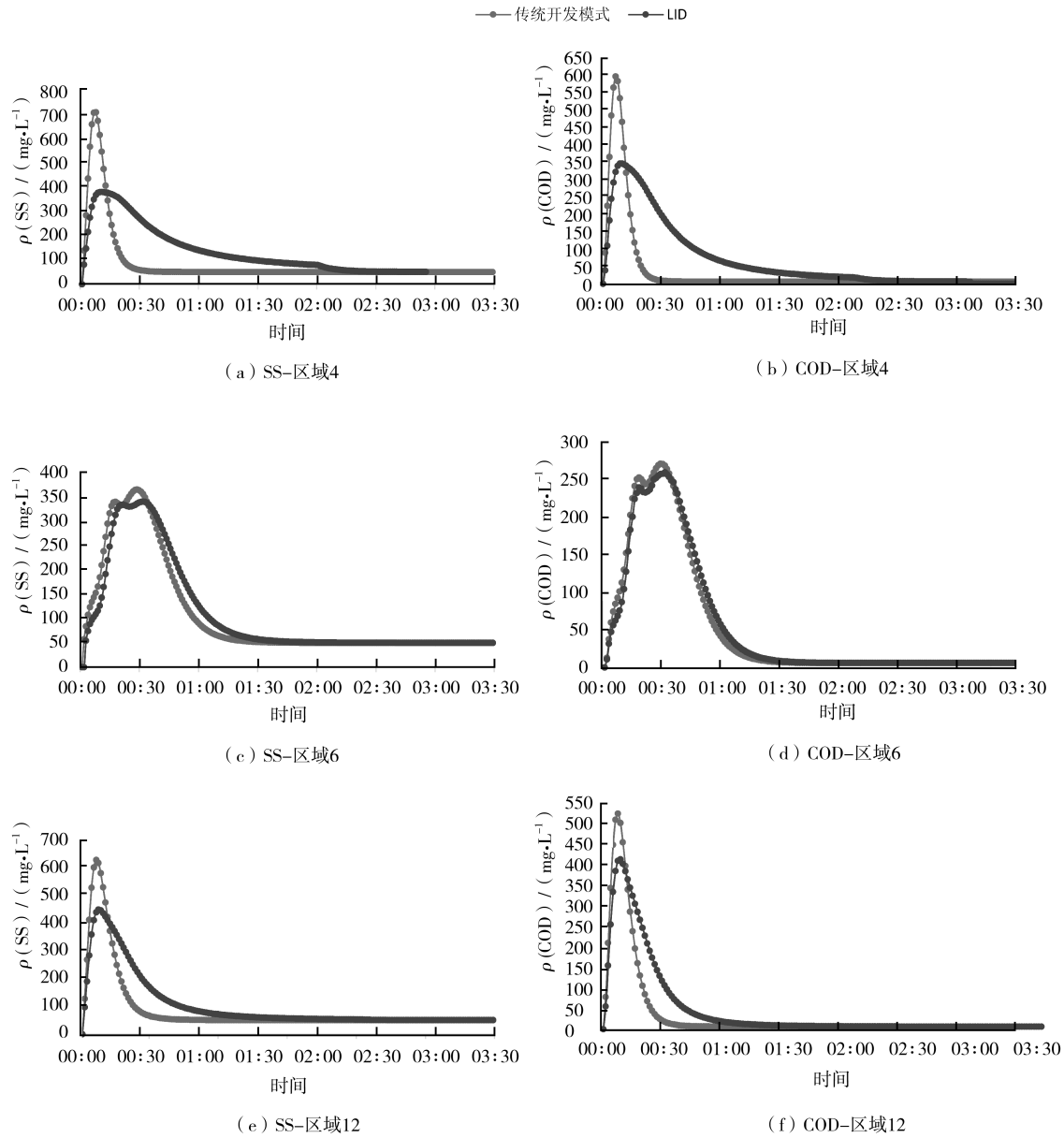


图 4 3 种土地利用类型的排放口污染负荷

表 5 植草沟对径流排放的影响

重现期	径流减少量/ $\text{m}^3$	径流缩短时间/min	峰值减少量/ $(\text{mm}\cdot\text{h}^{-1})$	径流减少比例	峰值减少比例
0.5a	1 366	70	0.16	0.308	0.308
1a	1 949	60	0.25	0.261	0.275
2a	2 516	57	0.34	0.238	0.256
5a	3 253	54	0.45	0.221	0.234
10a	3 810	54	0.54	0.214	0.226
20a	4 256	53	0.63	0.204	0.219

表 6 不同土地利用类型的排放口污染负荷

区域编号	土地利用类型	开发模式	峰值排放量/( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )		峰值削减比例	
			$\rho(\text{SS})$	$\rho(\text{COD})$	SS	COD
4	以道路为主	LID	377.59	345.54	0.464	0.420
		传统	704.06	595.54		
6	以绿地为主	LID	339.29	248.22	0.068	0.082
		传统	364.13	270.33		
12	道路、绿地、屋面同等比例	LID	446.6	412.61	0.285	0.213
		传统	624.77	523.96		

注:海绵化建设指岸坡采用了渗透性铺装和/或植草沟技术,传统不采用海绵化技术。

本文利用 SWMM 软件模拟了南京市南河修复过程中海绵设施的作用,发现海绵设施能够对控制径流和净化污染物起到积极作用。在径流控制方面,南河工程所设计的海绵设施对于中小强度降雨的径流控制效果较好,相比传统开发模式,径流时间可缩短 50 ~ 70 min,累计径流和径流峰值最高可削减 30% 以上。随着重现期的增大,其优势逐渐降低。在面源污染控制方面,海绵化建设在整个区域内都能起到控制污染物的作用,但区域用地性质的不同会导致其控制效果略有差异。在不渗透比例较大、渗透性较差的区域,海绵设施可以最大程度地发挥作用。对于以道路和屋面为主的汇水区域,渗透性铺装和植草沟对 SS 和 COD 的净化效果较好,可以达到 40% 以上。随着绿地所占比例的加大,海绵设施对污染物的削减能力逐渐下降。

#### 参考文献:

- [1] 吴才锐. 浅谈面向海绵城市的城市道路设计[J]. 江苏城市规划, 2016(6):43-46.
- [2] 周怀宇, 刘滋菁, 刘海龙, 等. 雨洪管理设施的监测与智慧景观设计结合的跨学科实证[J]. 水资源保护, 2019, 35(6):82-88.
- [3] 邓卓. 海绵城市理念在生态城市建设中的应用研究[J]. 绿色科技, 2017(7):77-88.
- [4] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 关于印发《海绵城市建设技术指南——低影响开发雨水系统构建(试行)》的通知(建城函[2014]275号)[R]. 北京:中华人民共和国住房和城乡建设部, 2014.
- [5] 徐多. 基于 SWMM 的海绵校园径流控制效果评估——以萍乡市北星小学为例[J]. 水利水电技术, 2019(7):32-39.
- [6] 骆辉. 城市道路路面初期径流污染特征分析——以南京市为例[J]. 环保科技, 2017, 23(5):22-27.
- [7] 张倩. 基于 SWMM 的海绵城市建设途径研究[D]. 青岛:青岛理工大学, 2016.
- [8] 袁绍春, 王怀鋈, 吕波, 等. 基于 InfoWorks\_ICM 模型的山地城市老旧建筑小区海绵化改造方案设计及评估[J]. 水资源保护, 2020, 36(5):43-49.
- [9] 陈虹, 李家科, 李亚娇, 等. 暴雨洪水管理模型 SWMM 的研究及应用进展[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2015, 43(12):225-234.