

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2021.03.005

不同 LID 设施组合对区域雨洪控制效果的影响模拟

周 昕,高玉琴,吴 迪

(河海大学水利水电学院,江苏 南京 210098)

摘要:为研究不同 LID 设施组合对区域雨洪控制效果的影响,以南京市雨花台区一区域为研究区构建了暴雨径流管理模型,在模型中分别设定 4 种 LID 设施组合来模拟分析研究区 2 年一遇、3 年一遇、5 年一遇、10 年一遇降雨条件下的地表径流、排水管网溢流及污染物排放情况。结果表明:不同 LID 设施组合对研究区均有减小径流量、缓解节点溢流和削减污染物排放量的作用,但随着降雨重现期的增大,对雨洪控制效果降低;以绿色屋顶和透水铺装为主,加以适当比例生物滞留设施和雨水花园的 LID 设施组合对研究区的雨洪控制效果较好。

关键词:低影响开发;雨洪控制;暴雨径流管理模型;地表径流;节点溢流;南京市

中图分类号:TV121⁺.1 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-6933(2021)03-0026-06

Simulation on influence of regional rain-flood control effect under different combinations of LID measures//ZHOU Xin, GAO Yuqin, WU Di(*College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China*)

Abstract: To study the effect of regional rain-flood control under different combinations of LID measures, a storm water management model is established by taking a region in Yuhuatai District, Nanjing as the study subject. Four combinations of LID measures are added to the model respectively to simulate and analyze the situations of surface runoff, node overflow and pollutant discharge in the study region under the condition of two-year, three-year, five-year, and ten-year rainfalls. The results show that different combinations of LID measures could decrease surface runoff, mitigate node overflow and reduce pollutant discharge in the study region. However, with the increase of rainfall recurrence period, the effect of rain-flood control is reduced. Giving priority to green roof and permeable pavement, with appropriate proportion of biological detention facilities, and the combination of rainwater garden facilities, have a better control effect on the rain-flood in the study area combination of LID measures which includes many green roofs, many permeable pavements, a appropriate proportion of biological retention measures and rainwater gardens has a better effect on the rain-flood control in the study region.

Key words: low impact development; rain-flood control; storm water management model; surface runoff; node overflow; Nanjing City

随着城市化进程的加快,极端暴雨引发的城市内涝问题不断加剧,低影响开发(low impact development, LID)理念逐渐在现代城市建设中得以实践^[1-2]。LID 提倡因地制宜,常采用绿色屋顶、植被浅沟、下凹绿地、渗渠、生物滞留等设施对雨水径流进行生态化、低能耗处理,尽可能模拟雨水自然循环过程,对改善城市的生态环境具有重要作用和意义。Pyke 等^[3]对波士顿南部某重建区域进行了雨水模拟分析,指出 LID 设施能提高社区适应降水变

化的能力;Danfoura 等^[4]评估了旧金山市某渗渠设施的雨水径流氧化还原状况,结果表明渗渠设施可以有效降低地下水污染;Ercolani 等^[5]在城市流域尺度上分析了绿色屋顶对缓解城市化水文影响的作用,表明建造绿色屋顶是减少城市排水系统流量的有效方法;Matos 等^[6]研究了 LID 对 UIAD 校园的水文影响,结果表明 LID 设施可使峰值流量降低 68%~95%;常晓栋等^[7]以北京市清河流域为研究对象,在各种重现期降水方案下对不同 LID 设施组

基金项目:江苏省自然科学基金(BK20181310);中央高校基本科研业务费专项(2019B45314)

作者简介:周昕(1996—),女,硕士研究生,研究方向为水利水电工程。E-mail: 92589091@qq.com

通信作者:高玉琴(1978—),女,副教授,博士,主要从事水利水电工程研究。E-mail: yqgao@hhu.edu.cn

合进行了模拟分析,结果表明 LID 组合措施对高频暴雨的洪峰流量和径流总量削减率可高达 66.2% 和 49.4%;李静思等^[8]以西安市某辖区为例,模拟分析了不同降雨频率下汇流单元协同改造的效果,结果表明汇流单元的协同改造可有效削减不同降雨频率下的径流洪峰,降低径流总量,减小区域整体径流系数。可见 LID 设施对缓解城市内涝、改善地下水水质、削减城市雨水径流量起到积极作用。本文在前人的研究基础上,对不同重现期降雨下,不同 LID 设施组合对城市地表径流、排水管网溢流及污染物排放情况的改善作用进行模拟研究。

为了研究不同 LID 设施组合对区域雨洪调控效果的影响,以南京市雨花台区一区域为研究对象,建立暴雨径流管理模型(storm water management model, SWMM),模拟 4 种不同 LID 设施组合下研究区的地表径流、排水管网溢流及污染物排放情况,以期为该区域的雨洪控制方案制定提供参考。

1 研究区概况

研究区位于江苏省南京市雨花台区,总面积约 9.94 km²,如图 1 所示。研究区内整体地势平坦,平均坡度 2.69%,属亚热带季风气候,多年平均降水量为 1090.4 mm,年内降水分布不均,5—9 月为汛

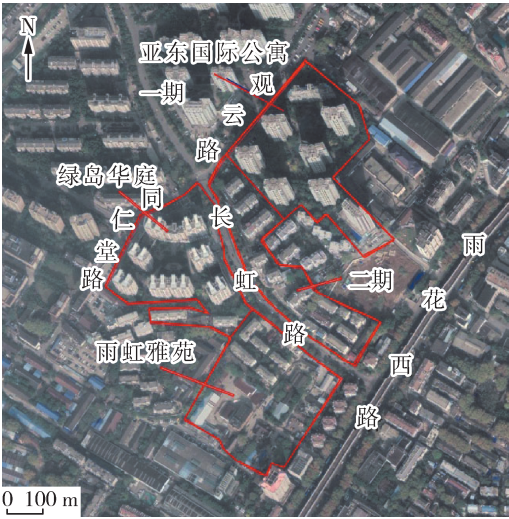


图 1 研究区示意图

Fig.1 Sketch map of the study region

期,其中 6、7 月梅雨季为全年降雨集中时期,易形成洪涝灾害。

研究区主要以住宅建筑群、小区道路、停车场等不透水硬质下垫面为主,也包括绿地、裸露地面等软质透水地面,其中不透水地面面积占总面积的 78.9%,无天然或人工水系发挥雨水调蓄作用,遭遇暴雨时仍采用快速排放模式,不能有效解决内涝问题。研究区内部建设有比较完备的排水管网。

2 模型构建与模拟方案设计

SWMM 是美国环保局为解决城市排水问题而推出的暴雨径流管理模型,该模型可对单场暴雨产生的径流进行动态模拟,进而解决城市排水系统存在的相关水量和水质问题。模型中的 LID 模块可结合水文模块和水质模块模拟 LID 设施对地表径流、排水管网溢流及污染物排放情况的影响。

2.1 基础数据

研究区雨洪模型构建所涉及的基础数据有:实测降雨资料及对应降雨下研究区出口水量和水质检测数据、排水系统布置图、土地利用数据、地形数据(表 1),其中出口水质数据主要为 TSS、COD、TN 和 TP 这 4 项监测指标的数据。

2.2 模型构建

2.2.1 研究区概化

根据设计单位提供的综合管网布置图及实际检测和勘察数据,对研究区域排水管网进行适当概化。借助 ArcGIS 软件的空间分析及数据采集处理功能,结合研究区域 DEM 图、土地利用图和排水系统布置图,利用泰森多边形法和人工局部调整相结合的方法对汇水区进行划分。整个研究区共划分为 54 个子汇水区,概化后的排水管道有 78 条,管网节点 78 个,管网末端出水口 1 个,如图 2 所示。

2.2.2 设计暴雨

根据 GB 50014—2006《室外排水设计规范》,暴雨强度计算公式如下:

q = \frac{167A_1(1 + ClgP)}{(t + b)^n} \tag{1}

式中:q 为设计暴雨强度,mm/min;P 为设计重现期,

表 1 研究区基础数据

Table 1 Basic data of the study region

数据	类型	内容	数据来源
实测降雨资料	文本	每 5 min 降雨强度记录	南京市气象局
排水系统布置图	CAD 图	排水管道布置图	南京市市政设计研究院
土地利用数据	CAD 图	土地利用图	南京市市政设计研究院
地形数据	DEM 栅格数据	DEM 图	地理空间数据云下载、剪裁
出口流量数据	Excel 表格	特定时间下的出口流量值	南京市市政设计研究院
出口水质数据	Excel 表格	特定时间下的污染物质量浓度值	南京市市政设计研究院

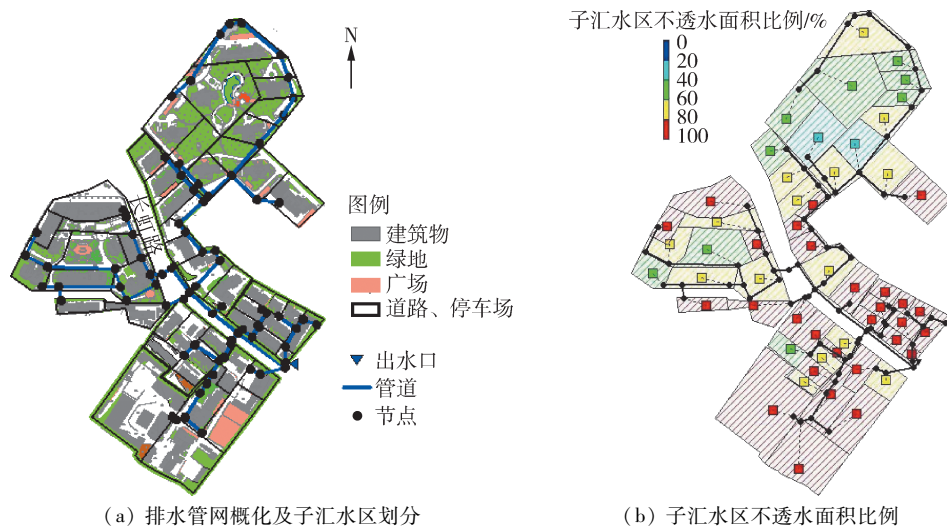


图2 研究区SWMM子汇水区划分

Fig.2 Sub-catchment division in SWMM of the study region

$a; t$ 为降雨历时, min; A_1, C, b, n 为参数。研究区地处南京市, A_1, C, b, n 取值分别为 64.172、0.837、32.9 和 1.011。采用芝加哥雨型法设计暴雨, 降雨历时 2 h, 降雨雨峰相对位置取 0.4, 由式(1)计算得到设计重现期为 2 a、3 a、5 a 和 10 a 的 2 h 降雨强度过程线如图 3 所示。

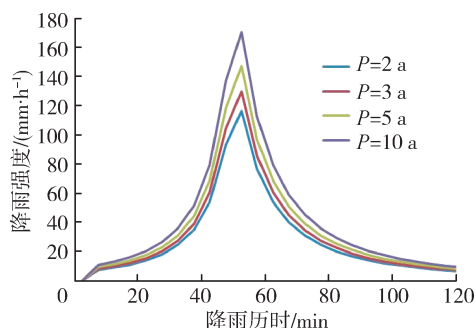


图3 不同重现期暴雨的降雨强度过程线

Fig.3 Rainfall intensity curve under different rainfall recurrence periods

2.3 模型参数

研究区的子汇水区面积大小、特征宽度、平均坡度、不透水面积比例、管径大小、管长、管道形状、节点高程等可由下垫面信息和排水管网信息得到, 本文主要通过 GIS 软件和实测数据获取。

2.3.1 水文模块的参数设置

水文模块主要模拟地表径流的产流和汇流过程。参考 SWMM 用户手册^[9], 地表产流采用 Horton 入渗模型来模拟研究区的产流入渗过程, 研究区内土壤属壤土, 最大下渗率为 78 mm/h, 最小下渗率为 5.5 mm/h, 衰减系数为 3 h^{-1} 。管段进出口及平均损失系数取 0.012, 由于研究区地表情况复杂, 均匀性差, 无注不透水区面积占比取为 25%。地表汇流需要率定的参数初值: 不透水区洼蓄量 1.5 mm, 透水

区洼蓄量 7.5 mm, 不透水区曼宁系数 0.015, 透水区曼宁系数 0.18, 管段曼宁系数 0.13。

2.3.2 水质模块的参数设置

参考 GB 3838—2002《地表水环境质量标准》, 选取 TSS、TN、TP、COD 共 4 种非点源污染物作为水质模拟的主要污染物指标, 模拟其在研究区排水管网末端出水口处的排放状况。根据研究区域特点, 将下垫面分为屋面、道路、绿地 3 种土地利用类型, 各子汇水区根据实际情况分别赋予 3 种下垫面相应的面积比。不同下垫面均选取指数函数进行污染物的累积与冲刷模拟, 参考 SWMM 用户手册提供的参考值以及查阅相关的研究资料^[11], 选取参数初值如表 2 所示。

表2 污染物累积与冲刷参数初值

Table 2 Initial parameters values of pollutant accumulation and erosion

下垫面	污染物	最大可能累积量/($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)	累积常数/d	冲刷系数	冲刷指数
屋面	TSS	38	0.5	0.010	1.8
	TN	0.75	0.4	0.005	1.7
	TP	0.27	0.4	0.004	1.6
	COD	21	0.5	0.006	1.8
道路	TSS	42	0.6	0.011	1.9
	TN	0.95	0.4	0.004	1.7
	TP	0.38	0.4	0.004	1.6
	COD	29	0.5	0.008	1.8
绿地	TSS	28	0.5	0.008	1.6
	TN	0.55	0.5	0.005	1.3
	TP	0.11	0.4	0.004	1.3
	COD	13	0.5	0.006	1.5

2.4 模型参数率定与验证

分别采用 2017 年 7 月 21 日和 8 月 24 日两场降雨研究区排水管网末端出水口的实测流量及各污染物质量浓度数据来率定和验证模型参数。这两场

降雨雨量适中,形成较大径流,监测结果应用性良好。选取决定系数 R^2 和 Nash 系数 E_{NS} [10-11] 评价模型的模拟效果。

采用 2017 年 7 月 21 日降雨对模型进行率定,模型参数率定结果见图 4,可以看出:研究区排水管网末端出水口流量和各污染物质量浓度模拟值与实测值拟合程度较好, R^2 值与 E_{NS} 值均高于 0.81。

采用 2017 年 8 月 24 日降雨对模型进行验证,模拟结果中的研究区排水管网末端出水口流量及各污染物质量浓度与实测值的拟合程度及变化趋势吻合良好, R^2 值与 E_{NS} 值均高于 0.84,表明模型对研究区的适用性好,满足要求,因此模型参数的取值为上述水文、水质模块参数设置中的初值。

2.5 模拟方案设计

通过对研究区场地条件的实地勘察和分析,初步选取 LID 设施为:绿色屋顶、生物滞留设施、雨水

花园、植草沟、渗渠、透水铺装和雨水桶。根据模型模拟得到研究区当前的排水管网运行情况,在溢流点所在区间加大 LID 设施面积的布置比例。参考相关研究成果及实际工程经验 [12-19],对 7 种 LID 设施进行组合设定了 4 种方案。

a. 方案 1。按照最基本的 LID 布置方式,布置最常见、建设简单、成本较低的植草沟、渗渠和雨水桶(收集利用雨水)。大体设计方案为:小区内道路两边的雨水沟采用植草沟或渗渠来传输、调蓄雨水;适宜的建筑周边使用雨水桶收集屋面雨水。共布置雨水桶 196.5 m²、植草沟 4000 m²、渗渠 2000 m²。

b. 方案 2。采用雨水桶、雨水花园、生物滞留设施、绿色屋顶、透水铺装这 5 种 LID 设施。布置方案如下:小区内道路周边绿地设置生物滞留设施;在景观水体或其他水系以及地势低洼处建设雨水花园或生物滞留设施;在未设置雨水桶的住宅建筑屋面

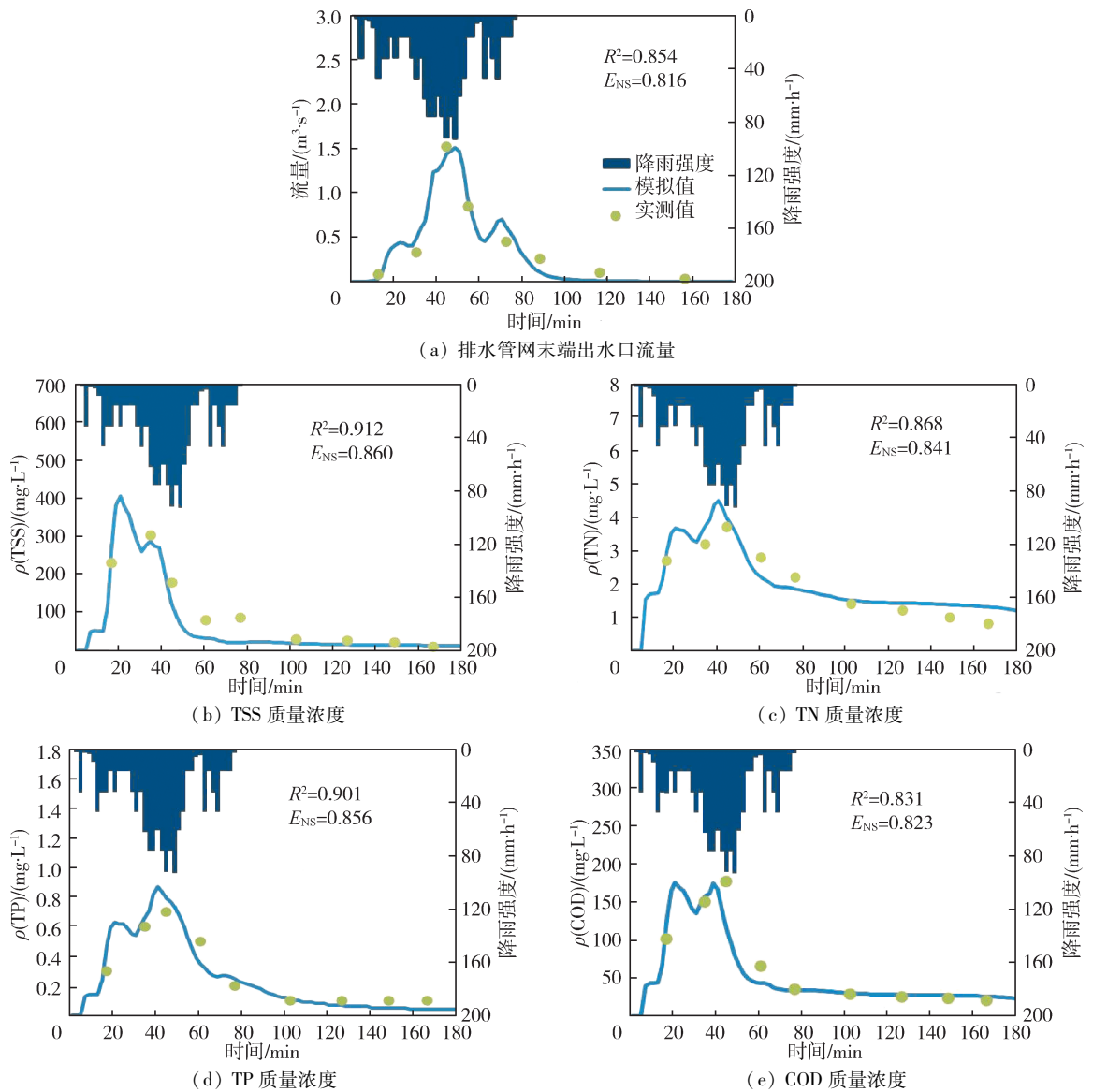


图 4 排水管网末端出水口流量与各污染物质量浓度率定结果

Fig. 4 Calibration results of discharge and pollutant concentration at the end of drainage network

建造绿色屋顶;在停车场、人行道等载重负荷较小的小区道路布设透水铺装。共布置雨水桶 78.6 m²、生物滞留设施 1 120 m²、雨水花园 1 040 m²、绿色屋顶 6 750 m²、透水铺装 9 020 m²。

c. 方案 3。选用全部 7 种 LID 设施,布置方案如下:小区内道路两边的雨水沟采用植草沟来转输、调蓄雨水,并搭配渗渠共同发挥作用;其他几类 LID 设施的布置形式与方案 2 大致相同。共布置雨水桶 39.3 m²、植草沟 2 600 m²、渗渠 1 300 m²、生物滞留设施 960 m²、雨水花园 800 m²、绿色屋顶 5 750 m²、透水铺装 8 000 m²。

d. 方案 4。考虑到透水铺装建造时需要破坏原有道路,选用除透水铺装外的 6 种 LID 设施。方案布置大致参照方案 3,共布置雨水桶 170.3 m²、植草沟 6 000 m²、渗渠 2 000 m²、生物滞留设施 800 m²、雨水花园 720 m²、绿色屋顶 4 000 m²。

在 SWMM 的 LID 模块中分别按照上述方案添加不同 LID 设施组合,结合水文、水质模块模拟不同重现期降雨条件下研究区 4 种 LID 方案的地表径流、排水管网溢流以及污染物排放情况,以此分析各方案的雨洪控制效果。

3 模拟结果与分析

3.1 地表径流

在不同重现期的降雨条件($P=2\text{ a}$ 、 3 a 、 5 a 、 10 a 时研究区 2 h 降水量分别为 59.2 mm、66.2 mm、75.0 mm 和 86.9 mm)下,4 种 LID 方案下研究区雨水入渗量及地表径流量模拟结果见表 3。由表 3 可见,相同重现期降雨条件下,不同 LID 方案均对雨水起到一定的滞蓄作用。方案 2 的雨水入渗量最大,

径流量最小,对雨水的滞蓄效果最好。当 $P=5\text{ a}$ 时,方案 2 较现状情况可使研究区降雨入渗量增大 10.594 mm,径流量减小 22.978 mm,削减率达 38.4%;径流系数减小 0.306。当 $P=10\text{ a}$ 时,方案 2 较现状情况可使研究区降雨入渗量增大 12.453 mm,径流量减小 25.274 mm,削减率达 35.8%;径流系数减小 0.291。

3.2 排水管网溢流

由表 4 可知,对于 $P=2\text{ a}$ 、 3 a 的降雨,研究区内相应的检查井节点均没有溢流情况出现,管道也无超载情况,说明 4 种设计方案均可使排水系统重现期提升至 3 a。对于 $P=5\text{ a}$ 的降雨,4 种 LID 方案均无节点溢流,方案 1 内有 3 条管道出现超载,超载状态持续时间均在 5 min 以内,其他方案无管道超载。当 $P=10\text{ a}$ 时,4 种 LID 方案均有节点溢流情况发生,溢流情况相比现状明显改善,溢流节点数减少,最大溢流时间缩短,可缓解当前研究区的排水压力。其中方案 2 中溢流点为 3 个,减少 75%;溢流时间为 9.0 min,缩短 75.8%;对节点溢流情况改善效果最好。

3.3 污染物排放

4 种 LID 方案下各污染物排放量削减率见表 5。由表 5 可见,4 种 LID 方案对研究区排水管网末端出水口处 4 种污染物的排放量有明显削减作用,该作用总体上随重现期的增大而减小,衰减幅度较小。方案 2 削减效果最佳,削减率在 60% 左右。

4 结 论

a. 建立了以南京市雨花台区一区域为研究区的暴雨径流管理模型,对研究区排水管网末端出水

表 3 雨水入渗量及地表径流量模拟结果

Table 3 Simulation results of rainfall infiltration and surface runoff

方案	入渗量/mm				径流量/mm			
	$P=2\text{ a}$	$P=3\text{ a}$	$P=5\text{ a}$	$P=10\text{ a}$	$P=2\text{ a}$	$P=3\text{ a}$	$P=5\text{ a}$	$P=10\text{ a}$
现状	6.671	6.694	7.463	7.606	45.597	51.858	59.863	70.606
1	11.113	11.221	11.340	11.472	41.866	48.139	56.279	67.281
2	15.430	16.595	18.057	20.059	26.845	30.771	36.885	45.332
3	14.010	14.436	15.015	15.847	32.744	37.835	44.347	54.090
4	12.707	12.993	13.373	13.891	37.679	43.237	50.392	60.477

表 4 节点溢流情况模拟结果

Table 4 Simulation results of node overflow situation

方案	溢流节点数				最大溢流时间/min			
	$P=2\text{ a}$	$P=3\text{ a}$	$P=5\text{ a}$	$P=10\text{ a}$	$P=2\text{ a}$	$P=3\text{ a}$	$P=5\text{ a}$	$P=10\text{ a}$
现状	5	6	9	12	<10	27	32.4	37.2
1	0	0	0	5				24.0
2	0	0	0	3				9.0
3	0	0	0	4				14.2
4	0	0	0	5				17.8

表 5 污染物排放量削减率

Table 5 Reduction rate of pollutant discharge

污染物	重现期/a	削减率/%			
		方案 1	方案 2	方案 3	方案 4
TSS	2	26.1	69.6	60.4	55.9
	3	25.9	68.6	60.0	55.5
	5	25.7	67.5	59.3	54.8
	10	25.4	66.6	58.2	53.8
TN	2	11.2	64.0	51.3	44.7
	3	10.6	61.8	49.1	42.6
	5	9.9	58.8	46.9	40.7
	10	9.0	55.8	43.8	38.3
TP	2	18.4	68.9	58.3	51.5
	3	17.5	66.0	56.0	48.8
	5	14.9	63.0	54.0	48.3
	10	14.1	65.4	58.2	53.6
COD	2	16.9	65.9	54.7	49.2
	3	16.5	64.4	53.4	47.9
	5	15.6	62.2	51.8	46.2
	10	14.7	59.9	49.3	44.1

口流量及各污染物质量浓度进行模拟,验证结果表明模型适用性好,满足要求。

b. 在不同重现期降雨条件下,4 种 LID 方案对研究区均有减小径流量、缓解节点溢流和削减污染物排放量的作用。但 LID 设施也具有一定的局限性,随着降雨重现期的增大,对研究区的雨洪控制效果降低。

c. 以绿色屋顶和透水铺装为主,并布置了适当比例的生物滞留设施与雨水花园的方案 2 对研究区的雨洪控制效果较好。

参考文献:

- [1] 刘曙光,回振全,代朝猛,等.低影响开发对城市径流污染的削减作用研究进展[J].人民长江,2019,50(6):11-14. (LIU Shuguang, HUI Zhenquan, DAI Chaomeng, et al. Influence of low impact development (LID) facility modules on urban runoff pollution reduction: a review[J]. Yangtze River, 2019, 50(6): 11-14. (in Chinese))
- [2] 王建龙,车伍,易红星.基于低影响开发的雨洪控制与利用方法[J].中国给水排水,2009,25(14):6-9. (WANG Jianlong, CHE Wu, YI Hongxing. Low impact development for urban stormwater and flood control and utilization[J]. China Water & Wastewater, 2009, 25(14): 6-9. (in Chinese))
- [3] PYKE C, WARREN M P, JOHNSON T, et al. Assessment of low impact development for managing storm water with changing precipitation due to climate change [J]. Landscape and Urban Planning, 2011, 103(2): 166-173.
- [4] DANFOURA M N, GURDAK J J. Redox dynamics and oxygen reduction rates of infiltrating urban stormwater beneath low impact development (LID) [J]. Water, 2016, 8(10): 435-455.

- [5] ERCOLANI G, CHIARADIA E A, GANDOLFI C, et al. Evaluating performances of green roofs for stormwater runoff mitigation in a high flood risk urban catchment [J]. Journal of Hydrology, 2018, 566: 830-845.
- [6] MATOS C, BRIGASÁ A, BENTES I, et al. An approach to the implementation of low impact development measures towards an ecocampus classification [J]. Journal of Environmental Management, 2019, 232: 654-659.
- [7] 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. (CHANG Xiaodong, XU Zongxue, ZHAO Gang, et al. Urban rainfall-runoff simulations and assessment of low impact development facilities using SWMM model: a case study of Qinghe Catchment in Beijing [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2016, 35(11): 84-93. (in Chinese))
- [8] 李静思,李山,李智录,等.基于协同改造理念的城市雨洪削减效果模拟研究[J].自然灾害学报,2019,28(4):79-89. (LI Jingsi, LI Shan, LI Zhilu, et al. Simulation study on urban stormwater reduction effect based on synergistic transformation concept [J]. Journal of Natural Disasters, 2019, 28(4): 79-89. (in Chinese))
- [9] ROSSMAN L A. Storm water management model user's manual (Version 5.0) [M]. Washington, D. C.: USEPA, 2009.
- [10] 李俊,吴珊,赵昕,等.雨型选择对 LID 设施效果影响的分析探讨[J].给水排水,2018,54(5):21-27. (LI Jun, WU Shan, ZHAO Xin, et al. Analysis on the effect of rain type selection on LID measures [J]. Water & Wastewater Engineering, 2018, 54(5): 21-27. (in Chinese))
- [11] 肖存艳,傅春,詹健.基于 SWMM 的中尺度雨水系统构建下的水质水量模拟[J].水利水电技术,2018,49(3):17-25. (XIAO Cunyan, FU Chun, ZHAN Jian. SWMM-based simulation on water quality and water quantity for construction of mesoscale rainwater system [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2018, 49(3): 17-25. (in Chinese))
- [12] 朱寒松,董增川,曲兆松,等.基于 SWMM 模型的城市工业园区低影响开发效果模拟与评估[J].水资源保护,2019,35(2):32-36. (ZHU Hansong, DONG Zengchuan, QU Zhaosong, et al. Simulation and evaluation of low impact development effect of urban industrial park based on SWMM [J]. Water Resources Protection, 2019, 35(2): 32-36. (in Chinese))
- [13] 陆海明,邹鹰,孙金华,等.基于 SWMM 的铁心桥实验基地内涝防治效果模拟[J].水资源保护,2020,36(1):58-65. (LU Haiming, ZOU Ying, SUN Jinhua, et al. Simulation of waterlogging control effect in Tiexinqiao experimental base based on SWMM [J]. Water Resources Protection, 2020, 36(1): 58-65. (in Chinese))

(下转第 73 页)

- catastrophic flood in Taihu Basin and the consideration for Taihu flood control planning [J]. Journal of Lake Sciences, 2000(1): 6-11. (in Chinese))
- [15] 陈红, 何建兵, 李蓓, 等. 调水对太浦河来水影响分析 [J]. 水利规划与设计, 2008(2): 32-35. (CHEN Hong, HE Jianbing, LI Bei, et al. Analysis of the impact of water transfer on the inflow of Taipu River [J]. Water Resources Planning and Design, 2008(2): 32-35. (in Chinese))
- [16] 郑春锋, 连振荣, 李超, 等. 太浦闸除险加固工程施工导流工作实践 [J]. 中国防汛抗旱, 2018, 28(7): 51-54. (ZHENG Chunfeng, ZE Zhenrong, LI Chao, et al. Construction diversion work practice of Taipu Sluice Reinforcement Project [J]. China Flood & Drought Management, 2018, 28(7): 51-54. (in Chinese))
- [17] 水利部太湖流域管理局. 太湖流域防洪规划 [R]. 上海: 水利部太湖流域管理局, 2007.
- [18] 伍永年, 黄巧盟, 张祎玮, 等. 太湖流域防汛抗旱减灾体系建设与成就 [J]. 中国防汛抗旱, 2019, 29(10): 89-98. (WU Yongnian, HUANG Yumeng, ZHANG Yiyang, et al. Construction and achievements of flood control, drought relief and disaster reduction systems in the Taihu Basin [J]. China Flood & Drought Management, 2019, 29(10): 89-98. (in Chinese))
- [19] 徐彬. 引江济太调水与太湖氮磷自净能力的相关性分析 [C]// 中国水利学会. 科技创新与水利改革——中国水利学会 2014 学术年会论文集 (上册). 北京: 中国水利学会, 2014: 390-396.
- [20] 秦伯强, 罗澈葱. 太湖生态环境演化及其原因分析 [J]. 第四纪研究, 2004(5): 561-568. (QIN Boqiang, LUO Liancong. Changes in eco-environment and causes for Lake Taihu, China [J]. Quaternary Sciences, 2004(5): 561-568. (in Chinese))
- [21] 陈洁, 朱广伟, 许海, 等. 不同雨强对太湖河网区河道入湖营养盐负荷影响 [J]. 环境科学, 2019, 40(11): 4924-4931. (CHEN Jie, ZHU Guangwei, XU Hai, et al. Influence of rainfall intensity on the nutrient loading from an inflowing river in the plain river network of the Taihu Catchment [J]. Environmental Science, 2019, 40(11): 4924-4931. (in Chinese))
- [22] 杨柳燕, 杨欣妍, 任丽曼, 等. 太湖蓝藻水华暴发机制与控制对策 [J]. 湖泊科学, 2019, 31(1): 18-27. (YANG Liuyan, YANG Xinyan, REN Liman, et al. Mechanism and control strategy of cyanobacterial bloom in Lake Taihu [J]. Journal of Lake Sciences, 2019, 31(1): 18-27. (in Chinese))
- [23] 王华, 陈华鑫, 徐兆安, 等. 2010—2017 年太湖总磷浓度变化趋势分析及成因探讨 [J]. 湖泊科学, 2019, 31(4): 919-929. (WANG Hua, CHEN Huaxin, XU Zhaoan, et al. Variation trend of total phosphorus and its controlling factors in Lake Taihu, 2010-2017 [J]. Journal of Lake Sciences, 2019, 31(4): 919-929. (in Chinese))

(收稿日期: 2019-12-20 编辑: 王芳)

(上接第 31 页)

- [14] 张晓宇, 董欣. 基于 SWMM 的 LID 设施对排水管网性能影响研究 [J]. 山西建筑, 2018, 44(29): 137-139. (ZHANG Xiaoyu, DONG Xin. Research on influence of LID on urban drainage system performance based on SWMM model [J]. Shanxi Architecture, 2018, 44(29): 137-139. (in Chinese))
- [15] 蔡庆拟, 陈志和, 陈星, 等. 低影响开发设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))
- [16] 罗玉婷. 海绵城市背景下老城区低影响开发 (LID) 雨水管理设施研究 [D]. 合肥: 合肥工业大学, 2018.
- [17] 张悦. 基于 SWMM 模型的海绵城市小区雨洪调控模拟研究 [D]. 西安: 西北大学, 2019.
- [18] 芮孝芳, 蒋成煜, 陈清锦, 等. SWMM 模型模拟雨洪原理剖析及应用建议 [J]. 水利水电科技进展, 2015, 35(4): 1-5. (RUI Xiaofang, JIANG Chengyu, CHEN Qingjin, et al. Principle analysis and application of storm water management model on stimulating rainfall runoff [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2015, 35(4): 1-5. (in Chinese))
- [19] 王宏杰, 董文艺, 吴建立, 等. 基于 SWMM 模型的城市低影响开发水文水质效应模拟分析 [J]. 广东化工, 2019, 46(15): 18-20. (WANG Hongjie, DONG Wenyi, WU Jianli, et al. Simulation analysis of hydrological and water quality effects of low impact development in urban area based on SWMM model [J]. Guangdong Chemical Industry, 2019, 46(15): 18-20. (in Chinese))

(收稿日期: 2020-01-10 编辑: 熊水斌)

