

基于不同排水片区的低影响开发措施优化方案选取

韩璐遥¹, 叶兴成², 王飞², 朱程亮², 栾慕¹, 周宏¹, 刘俊¹

(1. 河海大学水文水资源学院, 江苏南京 210098; 2. 宿迁市水务局, 江苏宿迁 223800)

摘要:以福建省龙岩市中心城区为例,运用SWMM模型中的LID模块,模拟分析了10%的雨水花园、20%的绿色屋顶、15%的渗透铺装以及一项组合措施(包括3%的雨水花园、7%的绿色屋顶和5%的渗透铺装)对研究区上、中、下游典型排水片区(依次记为A、B、C)的径流总量、洪峰流量及污染物负荷的削减控制效果,包括削减效率及对降水历时的敏感性。通过分配指标权重对各LID措施效果进行综合评价,最终确定各排水片区的LID最佳布设方案。研究表明:A片区优选绿色屋顶方案,B片区优选组合措施方案,C片区优选雨水花园方案。

关键词:SWMM模型;不同排水片区;降水历时敏感性;洪峰削减;污染物削减;综合评价;LID最佳布设方案

中图分类号:TV125;TV992

文献标识码:A

文章编号:1672-643X(2018)01-0160-06

Selection of optimal LID measures based on spatial difference of drainage area

HAN Luyao¹, YE Xingcheng², WANG Fei², ZHU Chengliang², LUAN Mu¹, ZHOU Hong¹, LIU Jun¹

(1. College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. Suqian Water Authority, Suqian 223800, China)

Abstract: Taking the downtown area of Longyan in Fujian as an example, based on the LID module in SWMM model, this paper simulated 10% of Rain Garden, 20% of Green Roof, 15% of Permeable Pavement and a combination measure (including 3% Rainwater garden, 7% green roof and 5% infiltration pavement) to analyze the reduction rate, including the reduction of efficiency and sensitivity to precipitation over time, of the total runoff, peak flow and pollutant load in the upper, middle and lower reaches (denoted as A, B and C) of the central urban area of Longyan City, Fujian Province. The comprehensive evaluation was carried out by introducing the weighting coefficient. Based on the spatial difference of the drainage area, the LID optimal layout scheme of each drainage area is finally determined. The results show that the A area should select the green roof scheme, the B area should select the best combination scheme, and the C area should choose the rainwater garden scheme.

Key words: SWMM model; spatial difference drainage area; rainfall duration sensitivity; reduction rate of peak flow; reduction rate of pollutant load; comprehensive evaluation; LID optimal scheme

近年来,基于源头控制理念的low影响开发措施(LID)被广泛应用于新老城区的改造中,不同的low影响开发措施减控效果主要通过SWMM模型来模拟分析^[1-2]。SWMM模型(雨水管理模型)是由美国环保局在1971年首次提出,经过不断的发展,在最新版本SWMM5.1中提供了8种LID措施的控制模拟^[3]。国内关于LID措施的研究多侧重于不同LID措施在不同降雨重现期下水量水质的削减控制效果对比,而对于各LID在不同排水条件下的综合削减控制效果没

有过多关注。在应对区域尺度的海绵城市规划时,为提高源头控制整体效果,应针对不同的排水条件寻找适用于各片区的最佳LID布设方案。

基于此目标,本文研究了龙岩市中心城区不同排水片区的各LID措施布设效果差异,同时由于研究区域属于山区城市,各排水片区多依据地势就近排入相应河道,在选取LID布设方案时为最大程度缓解相应河道排涝压力,本文对各LID措施的综合削减控制效果分别进行长、短历时降水模拟。模拟结果包括分析

收稿日期:2017-08-09; 修回日期:2017-10-14

基金项目:国家自然科学基金项目(41471015)

作者简介:韩璐遥(1990-),女,江苏沛县人,硕士研究生,研究方向为城市防洪与排水方面。

通讯作者:刘俊(1968-),男,安徽马鞍山人,博士,教授,博士生导师,主要从事城市水文方面研究。

短历时降水情况下 LID 措施对径流总量、洪峰流量及 TSS 负荷的削减效率,以及长历时降水情况下各 LID 措施对 3 个指标削减效果的降水历时敏感性。在此基础上为各片区选取了最佳 LID 布设方案,可为宏观尺度的优化 LID 布设方案提供参考。

1 研究区概况

龙岩市位于福建省西南部,属亚热带海洋性季风气候。该区域雨季长、雨量多、强度大,多年平均降雨量 1 450 ~ 2 200 mm。中心城区地处龙岩市盆地,境内山岭与河谷相间,整体呈带状分布。地势总体呈南高北低、西高东低的走向。该区域依据地势进行排水分区,各分区排水可根据管网布局及地形因素就近入河。研究区域总面积 134.56 km²,平均不透水面积 39.3%。城市土地利用类型主要包括住宅(33.94%)、工业用地(21.74%)、道路(16.09%)、绿地(9.56%)、公共设施(9.43%)以及商业和服务设施(4.74%)。由于该区域管网布设标准偏低,且城市化进程较快,土地利用紧张,故雨水管网改扩建困难,暴雨洪水问题突出^[4]。

2 研究区域模型构建

2.1 研究区域模型概化

中心城区包括城区、郊区及山丘区。本文通过 GIS 软件提取城区的地形地貌及土地利用布局,结合城区实际的管网排水情况来划分子汇水区。郊区位于中心城区外侧,未进行雨水管网布设,故依据地形资料进行分区。中心城区上游的山丘区采用《福建省暴雨洪水查算图表》进行产汇流计算,并通过汛期水库调度模式计算出流,将山丘区汇水概化为 SWMM 模型的上边界入流。根据研究区的管网布局和地形因素,地面径流可就近入河。最终将研究区划分为 553 个子汇水区,包括 711 个节点,698 条管段和 11 个堰。模型概化见图 1。

2.2 模型参数设置

依据研究区实际情况并结合相关文献和 SWMM 用户手册,对模型参数进行选取。本文主要采用霍顿下渗模型来模拟研究区域的产流入渗过程。最大下渗率范围为 25.4 ~ 50.8 mm/h,稳定下渗率为 2.54 mm/h,衰减系数 2 ~ 7 h⁻¹。子流域坡度依据龙岩市中心城区实际地形及规划资料选取,范围为 0.32% ~ 10.01%。不透水区糙率取 0.015,洼蓄量 1 mm;透水区糙率取 0.2,洼蓄量取 5 mm。不透水区无洼蓄百分比在整个研究区范围为 25%

~80%。汇流模块采用非线性水库模型,排水系统的流量演算采用动力波演算模型^[5]。

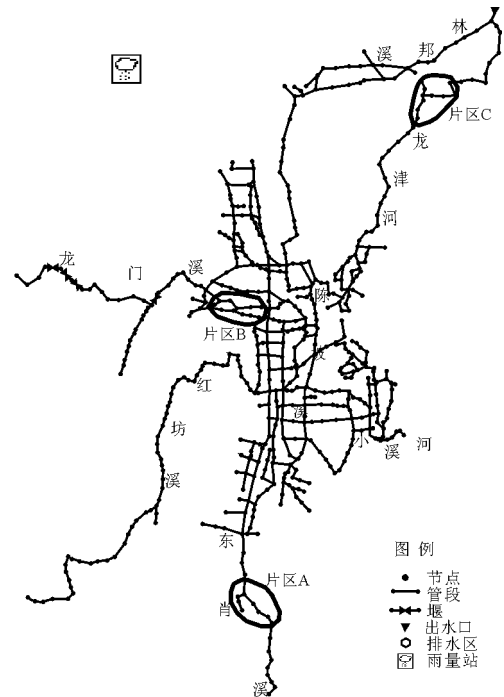


图1 龙岩市中心城区模型概化图

为分析各 LID 措施对面源污染减控效果的空间差异性,选取 TSS 作为污染指标^[6-7],根据相关文献及研究区实际情况,在 SWMM 模型水质模块中率定并输入相应参数,如表 1 所示:

表1 水质模块模型参数表

土地利用类型	指数函数累积模型			指数冲刷模型	
	最大累积量/ (kg · hm ⁻²)	速率常 数/d ⁻¹	幂/饱 和常数	冲刷 系数	冲刷 指数
屋面	70	0.2	5	0.0055	1.7
道路	120	0.2	5	0.0070	1.8
绿地	20	0.5	5	0.0035	1.2

2.3 模型参数率定

SWMM 模型参数的率定主要是对地表粗糙系数、洼蓄量等具体数值需要通过模型率定确定或者经多项调查研究加经验取值才能确定的参数进行率定。为检验基于 SWMM 模型构建的暴雨内涝模型是否符合城市内涝研究的要求,此次参数率定采取 2010 年 6 月 14 日 22 时至 6 月 15 日 22 时共计 24 h 实测暴雨,降雨总量为 120.50 mm,主要用于积水点率定。为分析模拟的可靠性,模拟得出易涝区与福建省龙岩市城乡规划局提供的实际易涝区的对比情况见表 2。

表2 模拟易涝区与实际易涝区对比表

序号	模拟易涝区	现状易涝区
1	社兴、东新村	社兴、东新村
2	中山路一、二期 (含街心广场)	中山路一、二期 (含街心广场)
3	登高东路森宝下穿铁路段	登高东路森宝下穿铁路段
4		东兴路森宝老厂段
5	东宫下村	东宫下村
6	莲东路军休所段	莲东路军休所段
7	曹溪路段	曹溪路段
8	龙腾南路下穿龙潭高速段	龙腾南路下穿龙潭高速段
9	凤凰路下穿铁路段	凤凰路下穿铁路段
10		罗龙东路下穿铁路段
11	东环路下穿铁路段	东环路下穿铁路段
12	洋潭路与龙腾南路汇合口	
13	曲潭路段	
14		
15		
16		
17	华莲路与龙岩大道交叉口段	

从模拟结果来看,模拟易涝区与实际易涝区相比总体情况比较吻合,说明模型的计算结果较为可靠。但有些与实际情况仍存在差别,其原因主要有两方面:(1)由于地面淹水情况是调查资料,而实际

淹水调查资料不够详实,有些是估计得出,部分地区存在漏报错报现象,所以模拟易涝点比实际易涝点多;(2)由于系统无法模拟一些细小管道,对于管道临时性堵塞的情况也无法全面调查,所以对于一些局部地区的淹水点,无法可靠地模拟和分析。

2.4 典型排水片区选取及其空间差异性对比

为测试 LID 措施的效果并分析其对水量、水质在不同排水片区的减控作用,从上述概化区域中选取 3 个典型的独立排水片区。根据河流水系的分布、地形地貌的变化,结合现状排水系统的建设等情况,按原《龙岩市中心城区管线综合规划》,选取位于中心城区的上游、中游和下游的排水片区,记为片区 A、片区 B 和片区 C(见图 1)。

3 个排水片区均具有多种用地类型,其下垫面组成情况分别为片区 A:屋顶 38%、广场 0%、道路 14%、绿地 48%;片区 B:屋顶 40%、广场 0%、道路 17%、绿地 43%;片区 C:屋顶 33%、广场 0%、道路 26%、绿地 41%。

3 个排水片区占地面积和平均不透水率相差不大,但各自用地功能定位不同。通过 GIS 提取信息及实际调研情况,对比得出各排水片区的排水条件差异性见表 3。

表3 排水条件差异性对比表

片区	区域位置	用地类型	径流初始 TSS 浓度/($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	占地面积/ km^2	平均不 透率/%	排水出 口位置
A	上游	以仓储用地和居住用地为主	191	1.60	44.17	东肖溪
B	中游	以商业用地和居住用地为主	230	1.64	46.62	龙门溪
C	下游	以工业用地和交通建设用地为主	450	1.77	49.96	龙津河

2.5 设计降雨模型

2.5.1 短历时设计暴雨 短历时降雨强度计算采用福建省住房和城乡建设厅发布的暴雨强度公式:

$$q = \frac{2399.136(1 + 0.471 \lg T)}{(t + 8.162)^{0.756}} \quad (1)$$

式中: q 为降雨强度, $\text{L}/(\text{s} \cdot \text{hm}^2)$; T 为降雨重现期, a ; t 为降雨历时, min 。

按照管道排水设计要求,短历时设计暴雨采用 120 min 作为统计历时,并采用芝加哥雨型作为短历时设计雨型^[8]。通过统计分析雨量站历时 120 min 最大雨量时间分布,确定综合雨峰位置系数 $r = 0.54$ 。结合龙岩市暴雨强度公式,得出 1 年一遇、2 年一遇及 5 年一遇降雨重现期下短历时设计降雨过程见图 2。

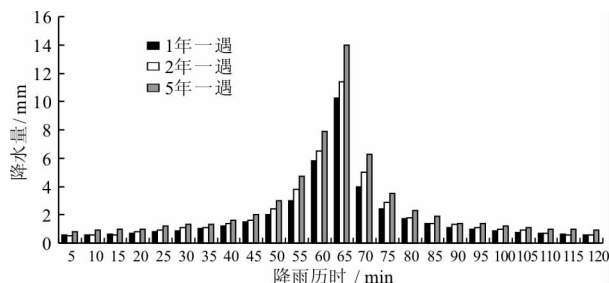


图2 短历时设计降雨过程

2.5.2 长历时设计暴雨 为研究各 LID 措施对长历时降水的敏感性,对长历时设计暴雨采用同频率缩放法计算 24 h 设计暴雨^[9]。长历时设计暴雨时程分配按照福建省最大 3 d 设计雨型表得到 24 h 设计降雨过程,见图 3。

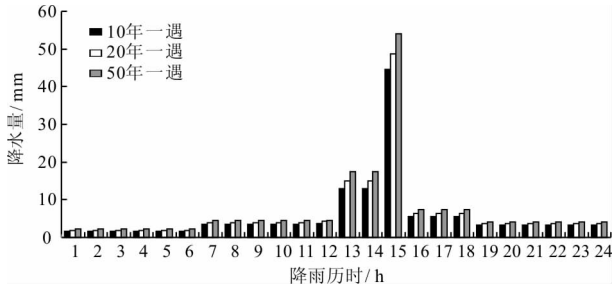


图 3 长历时设计降雨过程

2.6 LID 布设方案

根据研究区域特性选取适用于研究区域的低影响开发措施^[10],包括雨水花园、绿色屋顶和渗透铺装。在本次制定方案时,除需结合研究区域实际情况选择布设 LID 措施及相应布设比例外,还要控制各工程投资总数的大致相同。各 LID 措施投资成本及维护状况如表 4 所示。综合考虑以上因素,在 A、B、C 3 个排水片区拟定 4 种方案:(1)设置 10% 的雨水花园;(2)设置 20% 的绿色屋顶;(3)设置 15% 的渗透铺装;(4)组合措施(包括 3% 的雨水花园、7% 的绿色屋顶和 5% 的渗透铺装)。为兼顾缓解管道排水与相应河道排涝的要求,选取 2 h 短历时设计暴雨(包括重现期为 1 年一遇、2 年一遇和 5 年一遇)和 24 h 长历时设计暴雨(包括重现期为 10 年一遇、20 年一遇和 50 年一遇)共 6 场,来模拟各 LID 模块在不同排水片区的径流总量、洪峰流量和污染物负荷的削减效果,以寻求在不同重现期降雨情况下的最佳总体效果。本次研究的总体效果评价包括在短历时降水情况下的减控效率,以及对长历时降雨的敏感性,即选取效率较高且较为稳定的 LID 措施方案。短历时设计雨量范围为 44.1 ~ 66.7 mm,长历时设计雨量范围为 128.6 ~ 153.9 mm。

表 4 低影响开发技术设施投资及维护状况

项目	雨水花园	绿色屋顶	渗透铺装
投资/(元·m ⁻²)	500 ~ 1500	400 ~ 900	200 ~ 400
维护需求	中等	低	高

3 模拟结果分析

3.1 径流总量控制效果对比

径流总量反映了区域产流能力。为降低区域洪涝风险,需综合考虑 LID 措施对区域径流总量及洪峰流量的控制^[11-12]。相对于无 LID 布置,不同 LID 布置方案下各片区径流总量削减率如表 5 所示。

表 5 各 LID 布置方案下的径流总量削减率

片区	降雨历时/h	重现期/a	径流总量削减率/%			
			雨水花园	绿色屋顶	渗透铺装	组合措施
A	2	1	25.19	36.57	28.72	31.21
		2	27.37	32.33	23.45	28.43
		5	27.29	29.77	22.41	25.20
	24	10	24.89	25.11	17.67	22.82
		20	21.21	20.19	14.30	15.93
		50	12.38	9.84	3.85	8.28
B	2	1	28.96	30.76	26.23	35.34
		2	27.02	29.67	22.81	31.77
		5	24.49	26.20	20.10	29.68
	24	10	20.92	22.39	16.67	25.49
		20	18.97	17.09	10.90	17.15
		50	13.42	8.02	4.60	10.97
C	2	1	29.87	33.73	24.04	30.40
		2	29.58	26.88	24.35	28.02
		5	27.32	25.31	21.38	26.32
	24	10	25.97	23.32	17.96	23.29
		20	22.64	16.37	13.68	14.26
		50	15.10	9.76	2.83	8.95

在不同降雨重现期下,片区 A、片区 B、片区 C 的径流总量削减范围依次为 3.85% ~ 36.57%、4.60% ~ 35.34%、2.83% ~ 33.73% (表 5)。综合长历时和短历时共 6 个重现期的降雨场次模拟结果,比较各方案对径流总量总体的削减效果(包括短历时降雨情况下的削减效率及长历时降雨情况下的敏感性)可以得出在片区 A 中以绿色屋顶方案最优,为 9.84% ~ 36.57%;片区 B 中组合措施最优,为 10.97% ~ 35.34%;片区 C 中雨水花园方案最优,为 15.10% ~ 29.87%。

随着降雨重现期的增大,各 LID 布置方案对径流削减控制效果均有所降低,但变化程度各有不同(表 5)。其中以渗透铺装较为明显,即渗透铺装短历时低重现期时对径流削减效果较好,在长历时高重现期时效果较差^[14]。绿色屋顶及组合措施对不同降雨历时的敏感性一般,雨水花园对不同降雨历时的敏感性不明显,故在结合长历时降水时,LID 措施对径流总量的削减效果以雨水花园最稳定。

3.2 洪峰流量控制效果对比

相对于无 LID 方案,不同 LID 布置方案下各片

区的峰值流量削减率如表6所示。

表6 各LID布置方案下的洪峰流量削减率

片区	降雨 历时/h	重现 期/a	洪峰流量削减率/%			
			雨水 花园	绿色 屋顶	渗透 铺装	组合 措施
A	2	1	16.86	29.76	18.45	24.00
		2	16.42	28.68	19.48	26.01
		5	15.82	25.47	17.54	22.34
	24	10	15.80	18.89	15.17	17.37
		20	12.24	10.03	13.67	7.96
		50	7.57	4.35	10.48	5.24
B	2	1	17.95	26.03	19.84	25.68
		2	16.99	24.08	17.90	24.62
		5	14.74	22.23	16.07	23.20
	24	10	14.33	9.41	15.97	11.68
		20	12.15	7.99	14.42	8.05
		50	9.42	3.94	12.66	7.58
C	2	1	18.46	24.84	22.56	20.68
		2	18.07	23.19	21.07	21.77
		5	16.99	22.09	20.40	21.04
	24	10	15.61	9.57	18.91	12.69
		20	12.53	7.28	13.06	7.79
		50	10.06	4.16	10.37	4.09

在不同降雨重现期下,片区A、片区B、片区C的洪峰流量削减范围依次为4.35%~29.76%,3.94%~26.03%,4.16%~24.84%(表6)。各LID布置方案对洪峰流量的总体削减效果,在片区A中绿色屋顶最好,为4.35%~29.76%;片区B中组合措施最好,为7.58~25.68%;片区C中渗透铺装最好,为10.37%~22.56%。

从表6中还可以看出,绿色屋顶在短历时低重现期时对洪峰流量削减控制效果较好;雨水花园和组合措施对洪峰流量的削减效果受降雨历时的影响一般;渗透铺装对于降雨历时的敏感性不明显,在不同降雨历时及不同重现期下对洪峰流量的削减效果较稳定。各LID布置方案对洪峰流量的控制效果均随着降雨重现期的增加有不同程度的降低。

3.3 面源污染负荷控制效果对比

本文主要研究了各LID布置方案在不同排水片区对TSS的控制效果的差异。相对于无LID布置,不同LID布置方案下对各片区的TSS削减率如表7所示。

表7 各LID布置方案下的TSS削减率

片区	降雨 历时/h	重现 期/a	TSS削减率/%			
			雨水 花园	绿色 屋顶	渗透 铺装	组合 措施
A	2	1	38.37	44.86	41.21	39.05
		2	37.23	36.04	32.76	35.74
		5	36.29	32.42	26.05	30.21
	24	10	33.08	16.74	20.76	25.50
		20	25.45	10.68	17.09	17.95
		50	19.33	6.24	10.16	7.76
B	2	1	39.29	42.25	40.00	38.75
		2	38.89	37.44	35.63	32.62
		5	35.40	32.73	28.34	30.35
	24	10	30.53	19.83	21.16	23.07
		20	26.18	13.03	11.43	18.04
		50	17.93	7.04	9.87	6.87
C	2	1	40.89	45.11	41.50	39.88
		2	37.61	43.50	39.26	33.49
		5	36.04	33.71	31.09	27.62
	24	10	30.70	21.53	20.88	24.03
		20	27.23	15.09	19.47	16.63
		50	23.50	10.66	12.43	8.42

在不同降雨重现期下,片区A、片区B、片区C的TSS污染负荷削减范围依次为6.24%~44.86%,7.04%~42.25%,8.42%~45.11%(表7)。综合长、短历时共6个重现期的降雨场次分析,得出结论:片区A、片区B、片区C对TSS负荷的削减率均以雨水花园效果最好,分别为19.33%~38.37%、17.93%~39.29%和23.5%~40.89%。

在结合了长历时降雨的情况下,相比于其他布置方案,雨水花园对TSS负荷的削减效果对不同降雨历时及重现期的敏感程度最低(表7),因为降雨历时的增加延长了雨水花园与污染物的接触时间,从一定程度上减弱了高强度降雨对地表TSS冲刷的影响。绿色屋顶和渗透铺装短历时低重现期下对TSS削减效果较好,但在长历时高重现期时由于受到雨水的冲刷,导致部分被吸附存储的污染物再次进入径流,从而降低了其对TSS的削减控制效果^[15]。

4 方案选取及结果分析

为综合评价各LID措施对径流总量、洪峰流量

及面源污染负荷的削减控制效果,根据海绵城市的指导理念并结合研究区的实际情况,设定径流总量削减率指标所占权重为 0.6,洪峰流量和污染物负荷削减率指标所占权重均为 0.2。

综合长、短降水历时情况下对径流总量、洪峰流量和 TSS 负荷 3 个指标的削减控制效果可以得出:

片区 A 的 LID 最佳布设方案为绿色屋顶方案。由于片区 A 以仓储用地及居住用地为主,结构相对简单,故划分的子汇水区数量少且面积大,各子汇水区之间影响较小。LID 布设方案中以绿色屋顶方案布设比例最大,因此对于径流总量及洪峰流量的削减率较高。且片区 A 位于上游,污染物浓度相对较低,综合以上因素,片区 A 优选绿色屋顶方案。

片区 B 优选组合措施方案。片区 B 位于中心城区中游,以商业用地及住宅用地为主,人流量较大,用地布局复杂,故子汇水区数量多且面积相对较小,各子汇水区易受其他子汇水区来水的影响。组合措施中的绿色屋顶能够有效削减各子汇水区自身的降雨径流,而雨水花园和渗透铺装具有一定的处理其他不渗透区域径流的能力,在短历时低重现期下,除了处理自身的降雨径流外,还可以处理部分其他来水从而提高整体效率。片区 B 污染物浓度相对较高,组合措施中各 LID 均具有削减 TSS 负荷的能力,且雨水花园在长历时下对污染物的削减仍可发挥显著作用。

片区 C 优选雨水花园方案。片区 C 处于中心城区下游,以工业用地和交通枢纽建设用地为主,该片区污染物浓度最高。在该片区,要求 LID 措施能够更有效减少 TSS 污染负荷。雨水花园对 TSS 负荷的削减控制效果受降雨历时的影响小于其他 3 个方案,故雨水花园方案效果较稳定。该片区的不渗透区域相对分散,而雨水花园能够处理其他不渗透区域来水的比例最高,且雨水花园对降水历时敏感性相对较小,因此对该片区的径流总量及洪峰流量也具有较好的削减效果。综合以上因素,片区 C 优选雨水花园方案。

5 结 论

(1) 本文通过模拟各 LID 布设方案在不同排水片区,对于径流总量、洪峰流量及面源污染负荷(TSS)的削减控制效果,可以看出各 LID 措施在不同的排水片区表现相似,但效果不同。

(2) 各 LID 措施对于不同排水片区水量和水质

的削减率均随着降雨历时及重现期的增加而降低,但降低程度略有不同。渗透铺装对径流总量削减在短历时降雨下效果较好,绿色屋顶对于洪峰流量削减在短历时降雨情况下效果较好。对于 TSS 削减,渗透铺装和绿色屋顶均在短历时降雨下较为有效。

(3) 通过权重分配对各 LID 措施效果进行综合评价,可以得出结论如下:上游排水片区 A 优选绿色屋顶方案;中游排水片区 B 优选组合措施方案;下游排水片区 C 优选雨水花园方案。

参考文献:

- [1] 栾慕,刘俊. LID 措施在老城区内涝风险管理中的应用[J]. 中国农村水利水电,2017(1):69-74.
- [2] 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(1):84-87+93.
- [3] ROSSMAN L A. Storm water management model user's manual (Version 5.1) [M]. Washington DC, US: EPA, 2015.
- [4] 李朋. 低影响开发措施净流控制效果及空间差异性研究[D]. 南京:河海大学,2016.
- [5] 王文亮,李俊奇,车伍,等. 城市低影响开发雨水控制利用系统设计方法研究[J]. 中国给水排水,2014,30(24):12-17.
- [6] 张一平. 城市化与城市水环境[J]. 城市环境与城市生态,1998,11(2):20-22+27.
- [7] 宫莹,阮晓红,胡晓东. 我国城市地表水环境非点源污染的研究进展[J]. 中国给水排水,2003,19(3):21-23.
- [8] 符锐,罗龙洪,刘俊,等. SWMM 模型中的低影响开发模块在排水防涝系统中的应用[J]. 水电能源科学,2014,32(9):71-74.
- [9] 王静. 基于 SWMM 模型的山地城市暴雨径流效应及生态化改造措施研究[D]. 重庆:重庆大学,2012.
- [10] 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,2015,51(5):152-156.
- [11] 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.
- [12] 常静,刘敏,许世远,等. 上海城市降雨径流污染时空分布与初始冲刷效应[J]. 地理研究,2006,25(6):994-1002.
- [13] 任玉芬,王效科,韩冰,等. 城市不同下垫面的降雨径流污染[J]. 生态学报,2005,25(12):3225-3230.
- [14] 罗红梅,车伍,李俊奇,等. 雨水花园在雨洪控制与利用中的应用[J]. 中国给水排水,2008,24(6):48-52.
- [15] 赵剑强. 城市地表径流污染与控制[M]. 北京:中国环境科学出版社,2002.