

文章编号: 1009-6000(2018)02-0024-08
中图分类号: TU984.16 文献标识码: B
doi: 10.3969/j.issn.1009-6000.2018.02.004

作者简介: 李琪, 香港中文大学建筑学院硕士研究生;
任超, 香港中文大学建筑学院副教授、博士生导师;
万丽, 香港中文大学建筑学院, 博士后研究员。

海绵城市规划设计中的指标量化研究 ——以济南城区为例

Quantitative Study in Sponge City Planning and Design: A
Case Study of the City Proper of Jinan

李琪 任超 万丽

LI Qi REN Chao WAN Li

摘要:

针对城市内涝频发、水资源分布不均等问题, 中国已在部分城市开展海绵城市建设试点工作。由于目前试点范围相对局部、量化分析不足等原因, 试点城市应对暴雨内涝的能力仍十分有限。故本文选取济南中心城区为案例进行研究, 结合当地背景条件, 通过数值模拟的方式量化分析城市内易积水点及低影响开发设施应用前后地表径流量的差异性变化, 从而细化海绵城市控制指标, 为研究区域及其他城市的海绵城市规划提供合理、科学的依据。

关键词:

海绵城市; 量化分析; 数值模拟; 地表径流; 规划设计

Abstract: In response to the recent frequent urban waterlogging events and uneven distribution of water resources in China, some cities have initiated a pilot project of sponge city planning and urban development. However, currently the pilot cities have very limited capabilities to cope with rainstorm waterlogging due to the limited scope of pilot areas and relative lack of quantitative analysis to support the relevant decision making in the process of sponge city development. This paper focuses on the case study of downtown areas of Jinan city. Based on the local geographical conditions, numerical simulations and relevant quantitative analysis are conducted to investigate those urban spots susceptible to waterlogging and the variance in surface runoff before and after the application of low-impact development facilities so as to refine the control indicators of sponge city development, with the aim of providing reasonable and scientific basis for the sponge city planning of the regions and other cities.

Key words: sponge city; quantitative analysis; numerical simulation; surface runoff; planning and design

0 引言

近年来, 中国城镇化进程迅猛, 但模式粗放。在全球气候变化、极端气候多发的背景下, 一系列城市环境问题随

之产生, 尤以水资源短缺、城市内涝积水等多种水问题为甚^[1]。具体而言, 在城镇化进程中, 下垫面条件发生巨变, 地表不透水率增加, 城市雨水排泄主要

依赖于当前的市政排水管网。然而,城市雨洪管理设施建设较为滞后,早期排水管网的设计标准也相对较低,加剧了城市水资源分布不均、城市内涝等问题。所以,为了缓解乃至解决以上问题,中国于2013年正式提出了符合中国国情的雨洪管理概念——海绵城市。

现阶段,国外的雨洪管理体系在理念与技术层面都已相对成熟且处于不断创新中,规模也从单纯的技术层面逐步走向与景观生态的结合^{[2][3]}。由于起步较晚,中国的海绵城市建设多参考美国低影响开发与设计(Low Impact Development and Design, LID)的技术体系,其研究也主要停留在理论政策的定性分析、相关工程设施的技术研究与城市局部街区范围的探讨。作为一项复杂的立足于宏观尺度、流域层面的系统工程,中国海绵城市的建设势必需要严谨科学的城市规划方法以实现各个层面不同尺度的承接配合。然而,现有的城市规划体系还不足以支撑中国海绵城市的可持续建设,类如设计偏离实际、缺乏定量分析、分析方法不够严谨、各项规划之间脱节^[4]、规划范围过于局部等诸多问题,制约着中国现阶段海绵城市的建设与发展。

本文以城市内涝问题较为严重的济南中心城区为案例,旨在将海绵城市建设内容和要求与当地的水文地质、城市排水管网布局等背景条件有机结合,利用模拟软件量化分析相关数据并落实到海绵城市的规划设计中,从而科学有效地解决水问题,并为其他城市的海绵城市规划提供设计参考。

1 海绵城市建设现状

自2013年开始,国务院、住建部等部门开始进一步重视城市排水防涝问题,几年内即制定了一系列的条例、政策,如提出加大对雨污合流区排水管网的改进力度,增加雨水管渠和雨水调蓄设施;

推进海绵城市建设试点城市的申报评选工作并给予入选城市强有力的财政支持;明确海绵城市的建设指标、雨水就地消纳和达标面积的百分比等^[5]。住房城乡建设部于2014年10月颁布了《海绵城市建设技术指南(试行)》^[6](以下简称《指南》)用于指导中国海绵城市的建设。

目前,我国在建的海绵城市试点有30个。以研究区济南为例,其试点区域暂时局限于部分路段的街道两侧和绿化率、透水率本就很高的景区内,试点区域分布零散,不成规模。主要包括以景区公园(如英雄山景区、千佛山景区、小姑山公园等共10处)为代表的山体类绿地和以道路、河道(如二环南路部分路段、英雄山路部分路段和玉绣河河道等共9处)为代表的非山体类绿地^[20]。

2016年夏季,南方地区再次遭遇严重水患。据不完全统计^[7],第一批16个海绵城市试点中有10个发生内涝,第二批14个海绵城市试点中有9个发生内涝,这其中包括北京、天津、重庆等直辖市,也包括福州、武汉、南宁、研究区济南等多个省会城市。总的来说,试点城市内涝比例达63%,现阶段海绵城市的大力建设在应对暴雨洪涝方面并未起到立竿见影的效果。

正如上文提及,现阶段我国海绵城市的建设多参考国外LID技术,主要由增加透水铺装、绿色屋顶、生物滞留池等小型、分散式设施为主。LID技术是在大尺度流域系统的功能性和结构性均完善的基础上对城市进行斑块式开发,从而实现降低地表径流和面源污染的雨洪管理体系^[8]。而中国的海绵城市概念是在原有生态水系统、土地、植被等被快速城镇化进程破坏的状况下提出。两者背景不同,因此适用于局部小范围的LID技术无法完全解决需要立足于宏观尺度、流域层面的中国海绵城市要解决的问题^[9]。同时,现行的政策条例及控制指标均为国家层面的宏观调控,

缺乏详细的因地制宜的量化分析和对控制指标的细化,将LID设施在不同的地区进行生搬硬套是不可取的。不仅如此,海绵城市主要用于解决发生频率较高的中小降雨事件,大暴雨、特大暴雨仍然需要依赖城市排水管网^[10]。因此,不难理解,以局部街区为设计建设范围起步的中国海绵城市试点,无法解决暴雨袭城的问题。

综上,在考虑分析研究区域的水文地质条件和城市排水管网系统等灰色基础设施的基础上,通过科学的量化分析手段(如数字化模型)把海绵城市规划扩展到城市、流域层面将是海绵城市设计、建设成功的重要保障。否则,不但无法有效解决城市内涝等水问题,还会造成极大的人力、财力浪费。

2 海绵城市规划设计

2.1 规划理念

《指南》指出,中国的海绵城市规划要结合研究区域的土地利用情况、水系、绿地系统及市政基础设施(主要为排水管网),因地制宜地确定城市年径流总量控制率及其对应的设计降雨量目标,利用数字化模拟软件分解LID控制目标及指标、细化LID设计要点并制定相关实施策略,确定重点实施区域。

中国现行规划控制目标一般包括径流总量控制、径流峰值控制、径流污染控制、雨水资源化利用等^[6]。鉴于径流污染控制目标、雨水资源化利用目标大多可通过径流总量控制实现,各地在构建低影响开发雨水系统时可选择年径流总量控制作为首要规划控制目标。根据不同地区的背景条件,《指南》给出了不同的年径流总量的控制系数 α (表1)。其计算公式可以理解为^[11]:

$$\text{径流总量控制率 } \alpha = (\text{年降雨量} - \text{年地表径流量}) / \text{年降雨量} \quad (1)$$

而海绵城市的建成主要通过不同海绵体的相互配合,如传统河流湖泊以及起到

表1 我国大陆地区年径流总量控制率分区^[6]

分区	年径流总量控制率 α	代表城市
I	$85\% \leq \alpha \leq 90\%$	拉萨、和田、乌鲁木齐、玉树、格尔木、敦煌、西宁、兰州、银川、酒泉、化德、阿尔山、呼玛
II	$80\% \leq \alpha \leq 85\%$	昆明、腾冲、西昌、成都、西安、延安、太原、石家庄、呼和浩特、赤峰、长春、哈尔滨、齐齐哈尔
III	$75\% \leq \alpha \leq 85\%$	贵阳、会理、兴仁、永州、赣州、长沙、重庆、宜昌、杭州、上海、合肥、郑州、北京
IV	$70\% \leq \alpha \leq 85\%$	南宁、河池、桂林、厦门、万源、南昌、武汉、信阳、驻马店、蚌埠、徐州、安阳、济南、威海、大连
V	$60\% \leq \alpha \leq 85\%$	海口、三亚、钦州、汕头、汕尾

渗透、储存、转输作用的LID设施^[6]。本文选取较适合城市区域的透水铺装、植草沟、生物滞留池和绿色屋顶4种LID策略，并对其进行量化分析，以期获得满足海绵城市建设年径流总量控制率的控制指标。

2.2 数值模拟——ArcGIS、SWMM

本案例将基于ArcGIS软件的水文分析模块实现在SWMM中研究区域的相关模拟。由美国环境系统研究所(Environmental Systems Research Institute, ESRI)开发的ArcGIS软件,其水文分析模块可以根据数字高程模型(Digital Elevation Model, DEM)提取河流流向、长度、分布及划分子汇水区;由美国环境保护署开发设计的Storm Water Management Model(SWMM),是一个用于管理城市雨洪的动态的降水-径流模拟综合性数学模型^[12],其主要应用于雨洪模拟、水质模拟和LID评价。

根据刘家宏等^[13]对国内外SWMM研究进展的总结,国外对SWMM的研究历史几乎与其开发历史相当,在雨洪模拟方面,已有若干研究在不同地区对雨洪过程的预测或验证都取得了良好的模拟效果;在低影响开发方面,也有较为成熟的研究,在不同人工模拟重现期的降水强度下,对相关LID措施进行了模拟研究。

国内虽起步较晚,但在参数的敏感分析、自动率定以及与GIS耦合等方面形成了一定的理论研究体系。本案例在模拟过程中就参考了其他研究者黄国如等^[14]对济南率定及校核后的模型参数,

该率定参数下的模拟结果误差均在20%以内,与实际情况相近。

3 案例研究

3.1 研究区概述

济南市位于山东省中西部,地处鲁中南低山丘陵与鲁西北冲积平原的过渡带上,南高北低,为典型的山前平原城市。区域内分布有黄河与小清河两大水系。其中,黄河水系流经济南北部,冲击淤高使河床高于地表,城市洪水无法排入;小清水系则成为济南城市洪水外排的唯一通道,而其南部支流坡度骤然变缓,河道狭窄,运水能力较差^[15],难以满足城市洪水外排需求。济南属暖温带大陆性季风气候,降雨主要集中于夏季,仅7、8月份的降雨量就已超全年降雨量的50%。综合以上因素,济南较易遭受城市内涝灾害侵袭。近些年,城市不透水面积日益扩张,降水下渗量减少,径流系数增大,路面积水严重——不断加快的城镇化进程带来的水文效应更加剧了济南城市内涝问题。

根据相关历史资料记载,早在1840年至1948年间,济南就以平均每4.9年一次的频率经历了22场暴雨事件。建国之后,城市内涝灾害更加严重,以平均每2.4年一次的频率经历过约28场暴雨事件。以2007年7月18日的暴雨事件为例,超强暴雨侵袭时段恰与交通高峰期重合,城市受灾严重,直接经济损失约合人民币1.23亿元^[16]。作为全省的文化、政治、教育中心,济南的城市洪涝灾害问题亟待解决。

本文选取泉水分布集中、城市化程度较高、地表不透水率较大、内涝问题相对较为严重的济南市中心城区作为研究区域,该区域为黄台桥水文站所辖,内含大明湖、千佛山、趵突泉等名胜景区,总面积约为85km²,如图1、图2所示。

3.2 研究方法

本案例将利用ArcGIS对研究区流域进行前期的水文分析及子汇水区的划分,运用SWMM对研究区域进行水文水力处理。结合当地的水文地质、汇水面信息及城市排水管网等背景数据,通过ArcGIS和SWMM的耦合量化分析不同降雨重现期下,LID技术(透水铺装、绿色屋顶、生物滞留池、植草沟)对易积水点、易积水区域(重点改善区)地表径流量的影响,从而细化控制指标,为研究区及其他城市海绵城市总体规划和建设提供参考。其中相关LID实施面积百分比根据土地利用状况(如济南占地面积百分比、道路面积百分比等)结合《指南》对建成各项LID实施的要求比例粗略计算得出。图3为本案例的研究方法流程图。

3.3 研究区域背景数据参数

由于在模拟过程中,部分数据如地面高程、城市排水管网数据、降雨数据、土壤渗透系数等难以收集,故本次案例利用ArcGIS的水文分析模块处理研究区域的DEM数据以获得研究区河流走向、河网、坡度和子汇水区划分等相关信息(图4)。将提取得到的河网模型与实际地图(图5)进行比较发现,其分布及流向与实际情况基本吻合,故处理后的数据图像可以用

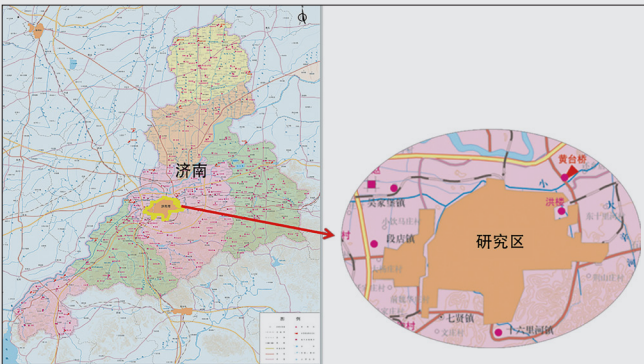


图1 研究区域位置图
图片来源：济南市水文局。

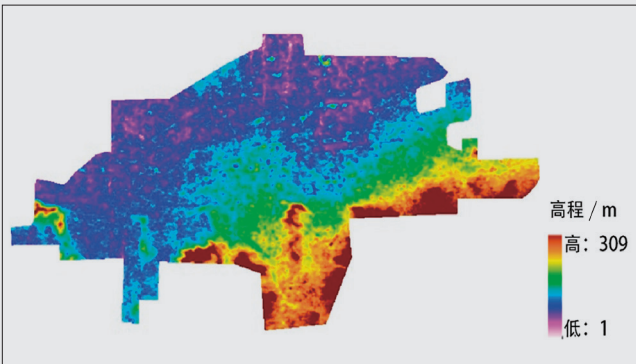


图2 研究区域数字高程模型示意图

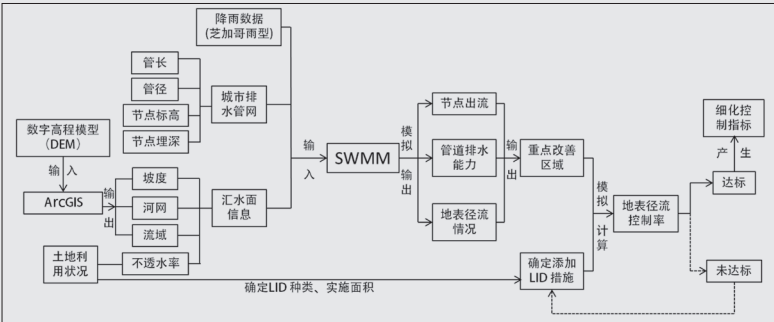


图3 研究方法流程图

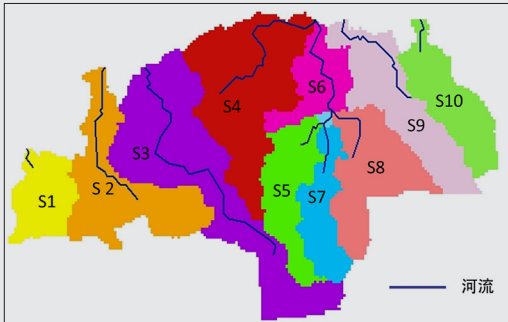


图4 研究区汇水区分割及河流分布



图5 研究区河网实际分布

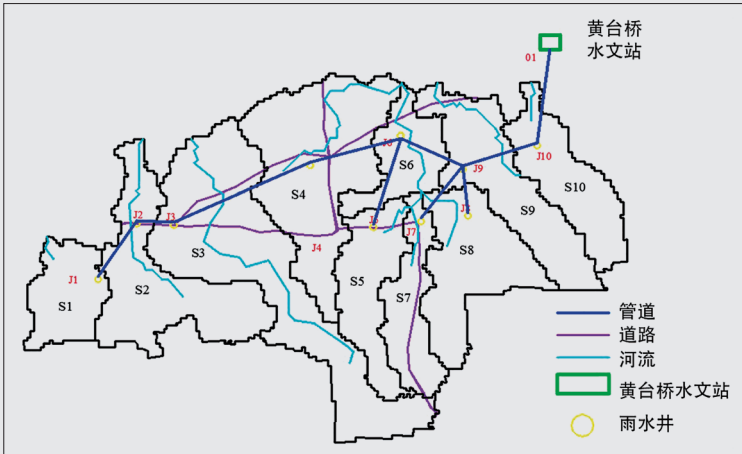


图6 研究区管网排布

于后续模拟。同时,根据研究区域的遥感图像和土地利用情况进行子汇水区不透水率的分级处理。排水管网方面,根据排水管网的现行设计标准^[17]及研究区域的地形条件进行合理的规划与设计(图6);降雨数据方面,本案例根据济南市政设计研究院修订的暴雨强度公式计算出符合济南当地的芝加哥雨型^[21],考虑到海绵城市建设主要应对中小型暴雨,且近些年济南暴雨发生的频率为2.4年一次,故采用重现期为1年(1a)、2.5年(2.5a)和20年(20a),降雨历时为2h的情况(图7),并以重现期为2.5a的降雨数据为基准模拟分析研究区雨后管网负载、节点淹没和地表径流情况,从而分析出需要重点改善的汇水区;LID技术选择和应用方面,本案例选择较典型并广泛被应用的透水铺装、生物滞留池、植草沟和绿色屋顶;设施的相关设计参数和系数参考《指南》和向璐璐阐述的生物滞留池相关设计方法^[18];各LID单项设施实施面积的确定则综合参考济南目前土地利用状况(如占地建筑面积比例、硬化道路面积比例)和其他城市的案例,不断尝试以实现控制指标的细化。根据2005年的土地利用状况^[19],推算出2016年研究区域建设用地占75.4%、居民工矿用地

64%、交通地7.93%、水利占地4.12%。其中控制指标方面,选择年径流总量控制系数 α 来衡量研究区域海绵城市规划建设是否达标。但由于数据资料有限,且在SWMM模型中模拟全年所有的降雨事件并不现实,故此处选择在重现期为1年的单个降雨事件背景下,模拟分析本案例中实施设计的4种LID措施能否满足研究区域海绵城市建设的年径流总量控制系数 α 。根据我国大陆地区年径流总量控制率分区,本研究区(济南市中心城区)改善后的 α 应居于70%~85%。其他的相关参数率定则参考相关经验值及其他研究者的参数组合^[14]。

3.4 模拟结果

3.4.1 模拟现状

输入不同重现期的降雨数据进行模拟,上文提及将以重现期为2.5a的降雨数据为基准来分析研究区节点的淹没情况、管网负荷和地表径流。根据SWMM模型中的模拟结果,在整场降雨事件中,各节点的平均溢流量为 $1.9 \times 10^3 \text{ m}^3$,其中节点3(J3)、节点4(J4)、节点9(J9)溢流现象最严重:分别为 $3.34 \times 10^3 \text{ m}^3$ 、 $4.51 \times 10^3 \text{ m}^3$ 、 $5.38 \times 10^3 \text{ m}^3$;排水管3(P3)、排水管4(P4)和排水管9(P9)的管段满流时间分别为1.08h、1.72h、

1.47h,远高于其他管段的平均满流时间0.37h;汇水区3(S3)、汇水区4(S4)和汇水区9(S9)的地表总径流分别为0.31mm、0.41mm、0.42mm,与该研究区平均总径流量0.38mm相差不多。同时节点发生洪流的时间与相应管段满流的时间一致。在整个降雨事件过程中,各节点降雨事件的第52分钟发生最大溢流,具体情况如图8所示,洪峰时刻J9溢流速率最大为 $2.52 \text{ m}^3/\text{s}$,显示为红色,S3、S4地表径流量最大显示为红色,P2、P4和P9管段已经达到满流状态。

因此,S3、S4和S9为洪水泛滥重灾区,需要着重进行海绵城市建设,综合考虑节点溢流洪水、管段运水能力和地表径流各方面情况,S4尤为严重。下面将以改善S4汇水区为例,在SWMM中分别添加4种LID单项设施(透水铺装、绿色屋顶、生物滞留池、植草沟)并比较改善前后地表径流情况。

3.4.2 透水铺装

考虑到研究区域为济南市中心城区,且透水铺装主要用于广场、停车场、人行道以及车流量和荷载较小的道路。根据济南土地利用情况等相关信息的分析,建设用地比例为75.4%,交通用地比例约为

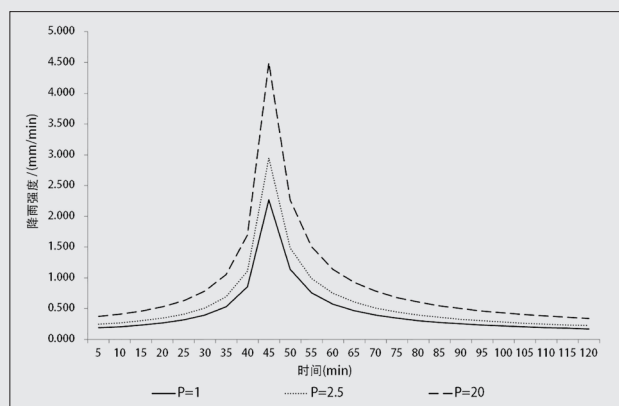


图7 济南设计暴雨过程线(芝加哥雨型)

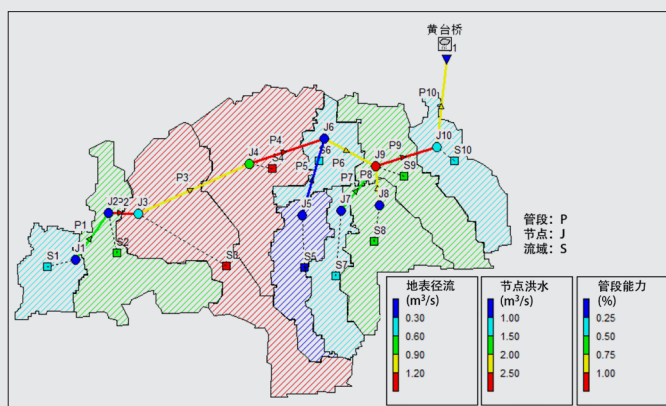


图8 研究区现状模拟结果(P=2.5a)

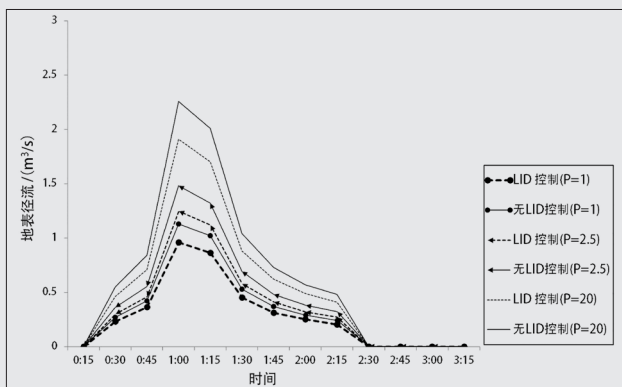


图9 S4透水铺装前后雨后地表径流量比较

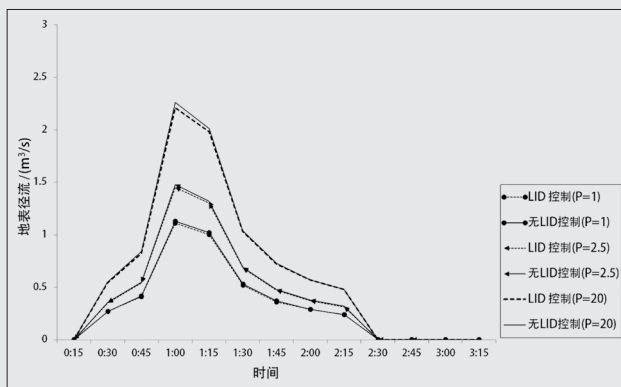


图10 S4应用植草沟前后雨后地表径流量比较

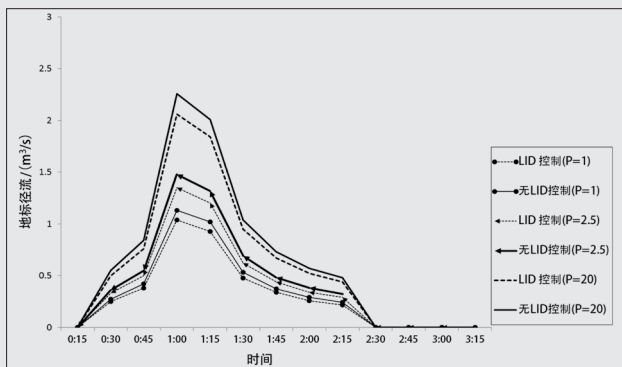


图11 S4生物滞留池应用前后雨后地表径流量比较

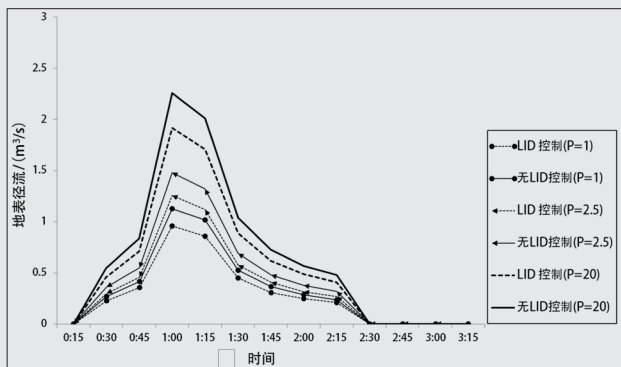


图12 S4应用绿色屋顶前后雨后地表径流量比较

7.93%。拟对S4汇水区15%面积进行透水铺装改造,改造后的模拟结果如图9所示。

图9展示了S4汇水区应用透水铺装前后在降雨重现期为1a、2.5a和20a之间的地表径流变化,不同线型的线条代表不同降雨重现期下的地表径流量,其中虚线代表经LID技术改善后的地表径流量,实线为未经过LID技术改造的地表径流量(下文相同)。可以发现,透水铺装在不同降雨重现期下均具有明显的径流削减作用,洪峰径流削减率分别为15.56%(1a)、15.52%(2.5a)和15.36%(20a)。

3.4.3 植草沟

考虑到植草沟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,但已建成区及开发强度较大的新建城区等区域因场地条件制约较难做到实际应用,故保守估算,本案例仅对S4区域2%面积应用植草沟,模拟结果如图10所示。

由图10可知,在降雨重现期为1a、2.5a和20a的情况下,植草沟对S4汇水区的地表径流并未起到明显的削减作用,地表径流量变化不明显。洪峰径流削减率分别为1.99%(1a)、2.04%(2.5a)和1.84%(20a)。植草沟应用面积较小及本身以传输为主的特性等因素共同影响了该模拟结果。

3.4.4 生物滞留池

在S4汇水区建设生物滞留池时,需对其面积进行相关计算。本案例将利用达西定律^[18]等公式计算生物滞留池面积。经计算,在服务汇水区S4上,生物滞留池的最佳应用面积为1.22km²,约占S4汇水区总面积的8.8%,应用后的相关模拟结果如图11所示。

由图11可知,生物滞留池对S4汇水区的地表径流同样具有较好的削减作用。洪峰径流削减率分别为7.96%(1a)、8.37%(2.5a)和8.85%(20a)。

3.4.5 绿色屋顶

与透水铺装应用面积比率的推算方

法相同,研究区居民及工矿企业占地面积达 64%。但考虑到部分楼房不可实施本策略,保守估算,本案例中绿色屋顶的应用面积将占 S4 汇水区的 15%,应用后的相关模拟结果如图 12 所示。

根据图 12,绿色屋顶对地表径流具有明显的削减作用。其削减效果与透水铺装类似。洪峰径流削减率分别为 15.23%(1a)、15.27%(2.5a)和 15.19%(20a),略低于透水铺装。

3.5 改善后效果验证

上文验证透水铺装、生物滞留池、植草沟、绿色屋顶 4 种单项设施对研究区雨后地表径流量均有一定的削减作用,因此现将该 4 种策略同时运用到 S4 汇水区,观察该汇水区应对暴雨的能力是否提高,图 13 展示了改善后发生最大溢流时刻整个研究区应对暴雨的情况。与改善前的状况(图 8)相比, S4 汇水区的地表径流明显降低,由 $1.48\text{m}^3/\text{s}$ 降为 $0.87\text{m}^3/\text{s}$;除 P5 管段外,研究区所有管段的管段能力都至少提高了一个等级(每个等级为 25%);所有节点的洪水溢流量均小于 $1\text{m}^3/\text{s}$ 。由以上可知, S4 汇水区的海绵城市建设不仅改善了本汇水区雨后地表淹没情况,还可以缓解周围的管网压力。

同时在重现期为 1a 的单个降雨事件背景下,4 种 LID 策略同时运用到 S4 汇水区后,其洪峰径流削减率为 41.39%,如图 14。经过改善设计,降雨重现期为 1a 时的径流总量控制系数 α 从 64.8% 提高至 79.12%,已达到济南的海绵城市规划建设的控制目标(70%~85%)。因此透水铺装应用率 15%、植草沟应用率 2%、生物滞留池应用率 8.8%、绿色屋顶应用率 15% 均可作为研究区济南中心城区 S4 汇水区进一步细化的指标,相关部门可根据细化指标对 S4 汇水区进行进一步的具体规划。其他汇水区均可按照同一方法针对各汇水区不同情况进行指标细化,进而对整个研究区进行模拟验证,

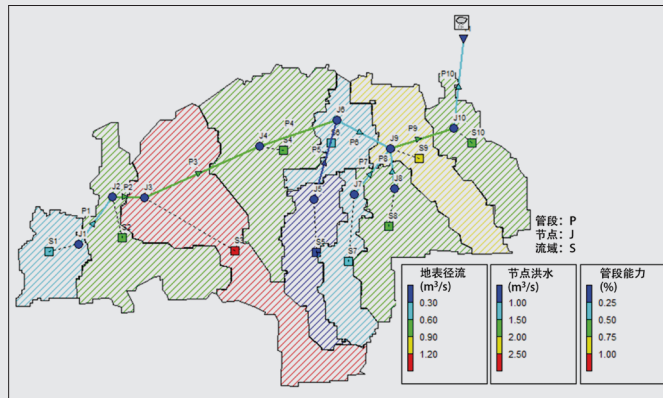


图 13 S4 汇水区低影响开发设施综合应用后 (P=2.5a)

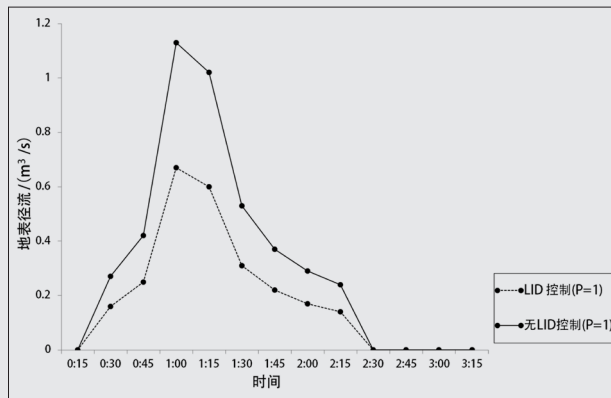


图 14 低影响开发设施应用前后地表径流比较

最终提高整个中心城区应对暴雨的能力,此处不再一一赘述。

4 结语

海绵城市的规划设计需要不同领域、不同层面的承接配合,既要定性也要定量。合理的规划是海绵城市建设成功的先决条件。通过本文案例可以看出,因地制宜是进行海绵城市规划的前提,量化分析是必要的手段,规划的格局决定着城市海绵体应对暴雨时的弹性。本文基于对研究区水文地质、城市排水管网布局等背景条件的分析,将研究区细分

为多个汇水区,从地表径流、管网压力等多个角度分析出雨后洪水泛滥重灾区,进行针对性的改善,从而以地表径流控制率为基准总结出一套验证改善策略效果、细化控制指标的方法,尤其适用于城市规划设计方案的推敲阶段。在实际运用过程中,可以对多个不同的细化指标方案进行模拟论证,以辅助选出最优方案。该方法不仅可以用于济南研究区,也可以为其他城市提供参考,避免盲目复制《指南》或其他城市的既有设计带来的弊端。由于部分数据难以收集,本文大部分参数是根据经验公式和前人研

究得到,可能存在一定的误差,未来进行规划时,将尽可能收集所需数据,以获得最为理想、准确的研究结果。

参考文献:

- [1]Booth D, Jackson C. Urbanization of aquatic systems: Degradation thresholds, stormwater detection, and the limits of mitigation[J]. Journal of the American Water Resources Association, 1997, 33(5): 1077-1090.
- [2]李志明,濮佩君.英文文献中的海绵城市研究进展:基于 Citespace 和 VOSviewer 的知识图谱分析[J].现代城市研究,2016(7):12-18.
- [3]董淑秋,韩志刚.基于“生态海绵城市”构建的雨水利用规划研究[J].城市发展研究,2011(12):37-41.
- [4]全贺,王建龙,车伍,等.基于海绵城市理念的城市规划方法探讨[J].南方建筑,2015(4):108-114.
- [5]吴丹洁,詹圣泽,李友华,等.中国特色海绵城市的新兴趋势与实践研究[J].中国软科学,2016(1):79-97.
- [6]住房和城乡建设部.海绵城市建设技术指

- 南:低影响开发雨水系统构建(试行)[S].2014.
- [7]王红茹.全国30个海绵城市试点,19城今年出现内涝[N].中国经济周刊,2016-09-17(35).
- [8]Trinh D, Chui T. Assessing the hydrologic restoration of an urbanized area via integrated distributed hydrological model[J]. Hydrology and Earth System Sciences Discussions, 2013, 10(4): 4099-4132.
- [9]伍业钢.海绵城市设计:理念、技术、案例[M].南京:江苏凤凰科学技术出版社,2015.
- [10]Chui T, Ngai W. Willingness to pay for sustainable drainage systems in a highly urbanized city: A contingent valuation study in Hong Kong[J]. Water and Environment Journal, 2016, 30(1-2): 62-69.
- [11]李俊奇,王文亮,车伍,等.海绵城市建设指南解读之降雨径流总量控制目标区域划分[J].中国给水排水,2015(8):6-12.
- [12]倪若晨,徐得潜.SWMM在雨水排水系统规划设计中的应用[J].工程与建设,2014(6):745-748.
- [13]刘家宏,陈根发,王海潮,等.暴雨径流

管理模型及应用:以SWMM为例[M].北京:科学出版社,2015.

- [14]黄国如,冯杰,刘宁宁,等.城市雨洪模型及应用[M].北京:中国水利水电出版社,2013.
- [15]陈淑芬,张克峰,汪峰.济南市“济南7·18”严重洪涝灾害成因分析[J].山东师范大学学报(自然科学版),2008(12):81-82.
- [16]胡伟贤.山前平原型城市雨洪模型构建及应用[D].广州:华南理工大学,2010.
- [17]建设部,国家质量监督检验检疫总局.室外排水设计规范(2016年版)(GB 50014-2006)[S].北京:中国计划出版社,2006.
- [18]向璐璐.雨水生物滞留技术设计方法与应用研究[D].北京:北京建筑大学,2009.
- [19]杨云涛,崔洪莉,谢爱民.济南市土地利用动态变化分析[J].山东国土资源,2011(5):43-44.
- [20]济南市城市园林绿化局,济南市园林规划设计研究院.济南市海绵城市绿地设计导则:山地与平原复合型城市绿地低影响开发雨水系统构建[S].济南:山东科学技术出版社,2016.
- [21]岑国平,沈晋,范荣升.城市设计暴雨雨型研究[J].水科学进展,1998(9):41-46.

(上接23页)

- [8]Singapore Public Utilities Board. Managing Stormwater for our Future[M]. Singapore: Public Utilities Board, 2014a.
- [9]Singapore Public Utilities Board. ABC Waters Design Guidelines[Z]. Singapore: Public Utilities Board, 2014b.
- [10]Vineyard D, Ingwersen W W, Hawkins T R, et al. Comparing green and grey infrastructure using life cycle cost and environmental impact: A rain garden case study in Cincinnati, OH[J]. Journal of the American Water Resources Association, 2015, 51(5): 1342-1360.
- [11]Wang M, Zhang D Q, Adhityan A, et al.

- Conventional and holistic urban stormwater management in coastal cities: A case study of the practice in Hong Kong and Singapore[J]. International Journal of Water Resources Development, 2016a. DOI: 10.1080/07900627.2016.1258355.
- [12]Wang M, Zhang D, Adhityan A, et al. Assessing cost-effectiveness of bioretention on stormwater in response to climate change and urbanization for future scenarios[J]. Journal of Hydrology, 2016b(543): 423-432.
- [13]Wise S, Braden J, Ghalayini D, et al. Integrating valuation methods to recognize green infrastructure's multiple benefits[Z].

Low Impact Development International Conference, 2010: 1123-1143.

- [14]Zahmatkesh Z, Burian S, Karamouz M, et al. Low-impact development practices to mitigate climate change effects on urban stormwater runoff: Case study of New York city[J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 2015, 141(1): 04014043.
- [15]Zhang D, Gersberg R M, Ng W J, et al. Conventional and decentralized urban stormwater management: A comparison through case studies of Singapore and Berlin, Germany[J]. Urban Water Journal, 2015. DOI: 10.1080/1573062X.2015.1076488.