

济南历阳河流域海绵城市建设的水文效应分析

张爱玲¹, 宫永伟^{1,2}, 印定坤², 王建龙², 杜晓丽³, 师洪洪³

(1. 北京建筑大学 城市雨水系统与水环境教育部重点实验室, 北京 100044; 2. 北京建筑大学 水环境国家级实验教学示范中心, 北京 100044; 3. 北京未来城市设计高精尖创新中心, 北京 100044)

摘要: 海绵城市建设对缓解城市内涝、恢复雨水对地下水的回补、维护城市水文的健康循环有重要作用。为分析海绵城市建设的水文效应,以济南历阳河流域为例,利用模型模拟了海绵城市建设前后雨水径流和入渗等方面的水文状态变化。结果表明,在海绵城市建成后,该流域内的雨水径流控制效果显著,在汛期雨水径流控制比例达到了80%左右;另外,下渗回补地下水效益显著,汛期平均总入渗量增至 $491 \times 10^4 \text{ m}^3$,是海绵城市建设前的2.6倍。

关键词: 海绵城市; 水文效应; 径流控制; 雨水下渗

中图分类号: TU992 **文献标识码:** C **文章编号:** 1000-4602(2018)13-0135-04

Hydrological Effect Analysis for Sponge City Construction in Liyang River Watershed of Jinan, China

ZHANG Ai-ling¹, GONG Yong-wei^{1,2}, YIN Ding-kun², WANG Jian-long², DU Xiao-li³, SHI Hong-hong³

(1. Key Laboratory of Urban Stormwater System and Water Environment <Ministry of Education>, Beijing University of Civil Engineering and Architecture, Beijing 100044, China; 2. National Demonstration Center for Experimental Water Environment Education, Beijing University of Civil Engineering and Architecture, Beijing 100044, China; 3. Beijing Advanced Innovation Center for Future Urban Design, Beijing 100044, China)

Abstract: Sponge city construction plays an important role in relieving urban waterlogging problems, restoring the ability of rainwater to recharge groundwater and maintaining the healthy circulation of urban hydrology. In order to analyze the hydrological effect of sponge city construction, the Liyang River Watershed of Jinan was taken as an example, and the changes of hydrological status (rainwater runoff and infiltration) were simulated before and after the sponge city construction. The results showed that remarkable controlling effect of the rainwater runoff was achieved after the completion of the sponge city construction, and about 80% of the rainfall runoff was controlled under flood season. In addition, the groundwater recharging efficiency was improved significantly, and the annual average infiltration volume could increase to $491 \times 10^4 \text{ m}^3$, which was 2.6 times of the annual average infiltration volume before the sponge city construction.

Key words: sponge city; hydrological effect; runoff control; rainwater infiltration

基金项目: 国家自然科学基金资助面上项目(51478026); 北京市属高校高水平教师队伍支持计划青年拔尖人才培养计划项目(CIT&TCD201704055); 北京建筑大学金字塔人才培养工程资助项目

“海绵城市”是一种城市建设的新理念,是水生态文明建设的具体实践形式,其力求恢复城市开发前的水文循环状态,有利于缓解城市内涝,恢复雨水对地下水的回补,促进雨水资源的开发利用,同时实现径流污染控制^[1]。

济南是北方地区典型的资源型缺水城市,然而受地势和气候条件影响,城区在汛期常遭受洪涝威胁。济南市的汛期为6月—9月,汛期降雨量占全年降雨量的75%左右,其中7月和8月的暴雨居多^[2]。因此济南市海绵城市建设的重要目标之一就是削减雨水径流、缓解城市洪涝。另外,济南素以“泉城”著称,泉水的主要补给来源之一是降雨的渗漏。济南泉域范围内有24个强渗漏带,是泉域的命脉和源泉,汇水面积大,渗透能力强,对补充地下水、保持区域生态平衡等方面都具有重要作用^[3]。近年来随着城市建设强度不断增大,强渗漏带不断被开发,导致济南市的地下水源涵养能力明显下降。因此,保护和恢复城市强渗漏带范围内城市建设用地的下渗能力与健康水文循环,并最终实现促渗保泉,是济南市海绵城市建设的另一个重要目标。为评价海绵城市建设在改善城市水文循环方面的良好效果,笔者以济南市海绵城市试点建设区域中的历阳河流域为例,从海绵城市建设对雨水径流排放和入渗等方面的影响进行分析。

1 历阳河流域海绵城市建设概况

历阳河流域位于济南海绵城市试点建设区域的东北部,总面积为847 hm²,其中水域面积约为12.6 hm²。该流域地势南高北低、东高西低,东部为千佛山,南部为佛慧山和西姑山,北部为山前平原,包含山体、山前坡地和山前平原3种典型地貌,从建设需求上涵盖保护、修复/恢复和改造等各类项目,从下垫面构成上包括建筑小区、道路、公园绿地及山体、河湖水系等,因此选择对该流域的海绵城市建设效果进行研究有较好的示范作用。

历阳河为季节性河道,位于石灰岩渗漏带,渗透性较好,属于泉水直接补给区。但由于整体坡降较大,河道雨水径流无法及时蓄渗。济南市海绵城市建设注重强渗漏带用地的科学规划保护,通过场地内源头低影响开发设施分散控制雨水径流,结合河道拦蓄下渗,从而回补地下水,达到促渗保泉的目的。另外,济南市在历阳河上游建设了历阳湖工程,每天将 $(1 \sim 4) \times 10^4 \text{ m}^3$ 的大明湖弃水调至历阳湖

和历阳河进行下渗,渗漏量达到 $(0.8 \sim 1.0) \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,实现了地表水回补地下水。通过上述举措,争取实现下游泉水的连续喷涌。

经过3年的海绵城市建设,历阳河流域共完成海绵型建筑小区改造项目70项,公园绿地及山体改造项目7项,道路建设和改造项目6项,河道水系整治工程5项。其中,建筑小区的建设内容包括:下沉式绿地、生物滞留设施、透水铺装、植草沟、渗井、雨水桶、蓄水池、高位花坛等;公园绿地及山体的建设内容包括:下沉式绿地、山体植被修复、鱼鳞坑、水平阶、山谷拦蓄、渗透塘、透水铺装、蓄水池等;道路的建设内容包括:下沉式绿地、生物滞留、透水铺装等;河道水系的具体建设内容包括:植被缓冲带、生态驳岸、拦水坝、生态景观建设、防洪断面建设等。

2 历阳河流域水文模型构建

利用Infoworks ICM模型,依据历阳河流域的雨水管网拓扑数据、下垫面数据、地面高程、河道断面尺寸等资料,将流域概化为504条管段、508个节点、28个管渠排口、148个子集水区。径流分配时,将子集水区的径流量按权重分配至邻近管网。设施概化时应用SUDS模块在各子集水区内统一导入一种或多种LID设施,分别处理一定比例硬化面积的雨水径流量,用堰概化河道拦水坝。

基于流域内的实时降雨监测数据和历阳河流出试点区边界的流量实测数据,从中选取数据较完整的4场降雨(见表1)对模型的主要水文参数进行率定与验证。选取2017年8月6日和18日两场降雨的监测数据对模型参数进行率定,选取2017年7月18日和8月23日两场降雨的监测数据对模型参数进行验证。路面和屋面采用固定径流系数模型模拟产流,绿地采用霍顿模型模拟产流^[4];汇流过程采用SWMM汇流模型进行模拟。

表1 模型参数率定和验证选用的降雨信息

Tab.1 Rainfall events for model parameter calibration and validation

项 目	降雨量/ mm	降雨历 时/h	最大雨强/ (mm · min ⁻¹)
2017-07-18	30.3	2.2	2.2
2017-08-06	35.5	1.2	2.0
2017-08-18	45.1	1.8	2.0
2017-08-23	33.3	2.1	1.9

选取相关系数的平方(R^2)和Nash-Sutcliffe效

率系数(E_{NS})评价模型参数率定与验证效果^[5]。结果显示,2017年8月6日和18日两场降雨的流量 E_{NS} 值均大于0.53, R^2 均大于0.93;2017年7月18日和8月23日两场降雨的流量 E_{NS} 值均大于0.62, R^2 均大于0.83。说明历阳河流域模型的模拟结果与实测值拟合程度良好,构建的水文模型可用于后续分析。最终确定的模型参数如表2所示。

表2 模型参数率定结果

Tab.2 Model parameter calibration results

下垫面	曼宁系数	初期损失值/m	固定径流系数	Horton 初渗率/(mm·h ⁻¹)	Horton 稳渗率/(mm·h ⁻¹)	Horton 衰减率/h ⁻¹
建筑	0.011	0.001	0.9	—	—	—
道路	0.011	0.001	0.7~0.9	—	—	—
绿地	0.02~0.05	0.002	—	40~100	10~15	2~4

3 海绵城市建设的水文效应分析

3.1 雨水径流控制效果分析

采用济南市水文局提供的2012年—2017年汛期降雨数据模拟分析历阳河流域的雨水径流控制效果。根据济南市多年降雨情况可知,2012年—2017年包含枯水年、平水年、丰水年,具有一定的代表性。根据实际进展,历阳河流域的各项工程于2017年初完工,因此仅2017年为海绵城市建成后的状态。为分析海绵城市试点建设的长期效益,采用2012年—2017年的降雨数据模拟海绵城市建成后的效果。汛期雨水径流控制比例的计算公式如下:

$$\alpha = \frac{0.001P \times A - V_{\text{排}}}{0.001P \times A} \times 100\% \quad (1)$$

式中: α 为雨水径流控制比例; P 为总降雨量,mm; A 为流域面积,m²; $V_{\text{排}}$ 为总外排体积,m³。

各年汛期的雨水径流控制效果见图1。可知,经过海绵城市建设,历阳河流域汛期的多年平均雨水径流控制比例达到80%左右,雨水径流被有效控制,在一定程度上缓解了城市洪涝。通过在建筑小区、道路、公园绿地及山体、河道水系等下垫面进行径流控制,增加了城市雨水集蓄和渗透量,大幅减少了雨水资源的损失,为雨水资源利用提供了保障。模拟结果显示,汛期总降雨量 P 与雨水控制比例 α 存在一定的同步性,拟合发现二者呈负相关($\alpha = 1.4795P^{-0.099}$, $R^2 = 0.94$),拟合度较高,可作为海绵城市建成后雨水径流控制比例的测算依据。

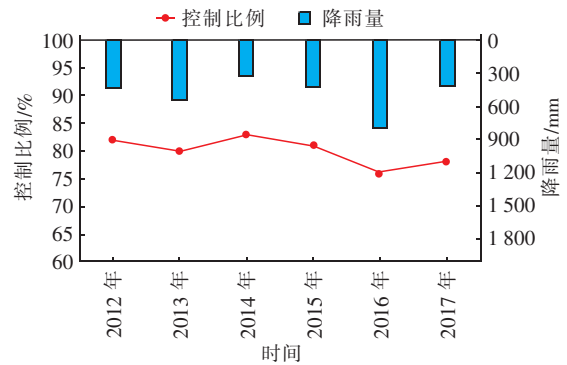


图1 2012年—2017年汛期总降雨量与雨水径流控制比例
Fig.1 Total rainfall and control ratio of runoff in wet season of 2012 - 2017

多年汛期月降雨量与对应雨水径流控制比例的统计分析结果见图2。

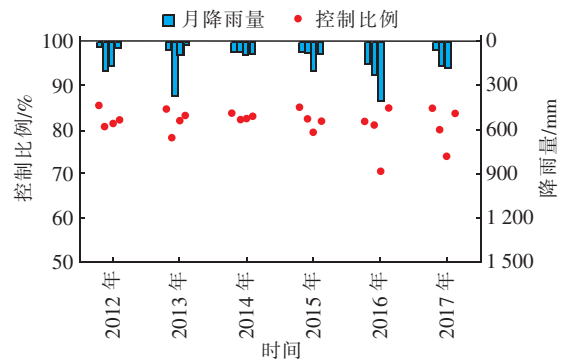


图2 汛期月降雨量与雨水径流控制比例

Fig.2 Monthly rainfall and control ratio of runoff in wet season

由图2可以看出,6月和9月的雨水径流控制比例略高于7月和8月,这主要是由于7月和8月的降雨量明显高于6月和9月,7月和8月的降雨集中(平均降雨天数分别为14和13d)且暴雨场次多。因此,月降雨量与雨水径流控制比例同样存在一定的同步性。通过单因素方差分析及 t 检验对数据进行分析得知,当以月降雨量作为影响因素时,汛期各月雨水径流控制比例随降雨量的变化而产生相对差异($P < 0.05$),且8月份差异最明显。从2012年—2017年的月降雨量-雨水径流控制比例数据中可知,月降雨量 < 166 mm时,雨水径流控制比例可达81%左右;月降雨量 > 166 mm时,雨水径流控制比例的变化幅度增大;月降雨量为417 mm时,雨水径流控制比例仅为70%,由此可见,海绵城市建设对中小降雨的控制效果更明显,随着降雨量与降雨强度的增加,雨水径流控制比例逐渐降低。

3.2 雨水下渗效果分析

采用2012年—2017年的降雨数据分别模拟了海绵城市建设前后的状态,并按月统计,结果见图3。可知,建设后7月和8月的入渗量最多,分别占汛期入渗量的35%和34%;6月次之,占汛期入渗量的19%;9月最少,仅占汛期入渗量的12%。与建设前相比,海绵城市建设后整个汛期的雨水入渗量显著增多,多年平均入渗量达到 $491 \times 10^4 \text{ m}^3$,是建设前($186 \times 10^4 \text{ m}^3$)的2.6倍,可见低影响开发设施及河道拦蓄设施的作用明显,有效补给了强渗漏带范围的地下水资源,成功涵养了泉域水源。

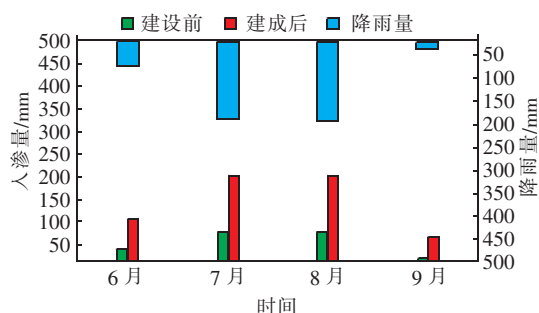


图3 2012年—2017年汛期月平均入渗量的变化

Fig. 3 Change of monthly average infiltration volume in wet season of 2012 - 2017

对多年月降雨量与入渗量进行拟合分析,结果表明两者呈显著线性正相关($R^2 = 0.99$)。当月降雨量 $< 227 \text{ mm}$ 时,两者的线性相关性强,月降雨量对入渗量的影响显著;当月降雨量 $> 227 \text{ mm}$ 时,两者的线性相关性降低;当月降雨量达到 370 mm 时,入渗量为 $322 \times 10^4 \text{ m}^3$;当月降雨量达到 417 mm 时,入渗量为 $323 \times 10^4 \text{ m}^3$,入渗量逐渐趋于稳定。

4 结论

① 经海绵城市建设,历阳河流域内汛期的雨水径流得到有效控制,控制比例达到了80%左右,在一定程度上缓解了城市洪涝,减少了雨水资源流失。雨水径流控制比例受汛期降雨量的影响,随着汛期降雨量与降雨强度的增加而呈下降趋势。

② 海绵城市建设后,历阳河流域的下渗量较建设前显著提高,总入渗量达到 $491 \times 10^4 \text{ m}^3$,是建设前($186 \times 10^4 \text{ m}^3$)的2.6倍。通过源头与河道拦蓄促渗是济南海绵城市建设的特色,充分利用其本土条件实现了雨水下渗回补,在一定程度上提升了地下水位,为促渗保泉做出了重要贡献。

参考文献:

- [1] 张毅,李俊奇,王文亮. 海绵城市建设的几大困惑与对策分析[J]. 中国给水排水,2016,32(12):7-11.
Zhang Yi, Li Junqi, Wang Wenliang. Analysis of several major puzzles and countermeasures of sponge city construction[J]. China Water & Wastewater, 2016, 32(12): 7-11 (in Chinese).
- [2] 尹承美,蔡哲,孙长征. 济南市区暴雨特征分析[J]. 中国人口·资源与环境,2015,25(5):248-250.
Yin Chengmei, Cai Zhe, Sun Changzheng. Heavy rainfall characteristics in Jinan urban area[J]. China Population, Resources and Environment, 2015, 25(5): 248-250 (in Chinese).
- [3] 孙蓓蓓. 济南岩溶水系统水资源调蓄潜力研究[D]. 济南:济南大学,2014.
Sun Beibei. Study on the Water Resource Regulation and Storage Potential of Karst Water System in Jinan[D]. Jinan: University of Jinan, 2014 (in Chinese).
- [4] 赵琬玉. InfoWorks ICM排水管网模型在实际中的应用[J]. 辽宁大学学报:自然科学版,2015,42(2):118-122.
Zhao Wanyu. Application of InfoWorks ICM drainage pipe network model in practice[J]. Journal of Liaoning University: Natural Sciences Edition, 2015, 42(2): 118-122 (in Chinese).
- [5] Moriasi D N, Arnold J G, Liew M W V, et al. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations[J]. Transactions of the ASABE, 2007, 50(3): 885-900.



作者简介:张爱玲(1993—),女,山东烟台人,硕士研究生,研究方向为城市雨洪控制与利用。

E-mail: 2456403958@qq.com

收稿日期:2018-02-02