

引用格式: 庞璇, 张永勇, 潘兴瑶, 等. 城市雨洪模拟与年径流总量控制目标评估: 以北京市未来科技城为例[J]. 资源科学, 2019, 41(4): 803-813. [Pang X, Zhang Y Y, Pan X Y, et al. Urban stormwater simulation and assessment of the control rate of total annual runoff: A case of the Future Science and Technology Park in Beijing[J]. Resources Science, 2019, 41(4): 803-813.] DOI: 10.18402/resci.2019.04.16

城市雨洪模拟与年径流总量控制目标评估 ——以北京市未来科技城为例

庞璇^{1,2}, 张永勇¹, 潘兴瑶³, 杨默远³

(1. 中国科学院地理科学与资源研究所, 陆地水循环及地表过程重点实验室, 北京 100101;
2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 北京市水科学技术研究院, 北京 100048)

摘要: 伴随城市化进程加快, 硬化地表面积的增加, 城市降雨径流过程已发生明显变化, 导致洪涝问题突出。城市雨洪模拟是当前城市水文学研究热点和难点之一, 也是城市洪涝防治、海绵城市建设评估的关键技术手段。本文选取北京市未来科技城为研究区, 利用SWMM模型构建城市雨洪模型, 模拟不同降雨条件下地表和管网径流过程; 依据不同场次雨型设计年径流总量控制目标对应的降雨过程, 并驱动已构建的雨洪模型, 评估现状地块下年径流总量控制目标实现情况; 据此, 提出不同海绵措施的空间布局以实现年径流总量控制目标。结果表明: 城市雨洪模型模拟精度较高, 洪峰流量误差在8~26%之间, 而峰现时间误差为-8%, -1%和0。现状地块条件未达到北京市年径流总量控制目标(80%); 采用在道路、建筑和绿地分别增设透水铺装、绿色屋顶和下沉式绿地, 并分别按20%, 40%和40%的方案比例分配时研究区90%的地块均可达到年径流总量控制目标, 还增加1.79万m³可利用水量。本文既可为海绵城市年径流总量控制目标的评估提供参考借鉴, 也可为城市海绵措施布局优化等提供决策依据。

关键词: 城市雨洪模拟; 暴雨径流管理模型(SWMM); 年径流总量控制目标; 海绵措施; 北京市未来科技城

DOI: 10.18402/resci.2019.04.16

1 引言

伴随中国城市化进程加快, 城市水问题日益突出, 特别是内涝灾害^[1-3]。2008—2010年全国有60%以上的城市发生内涝, 其中有近140个城市洪涝灾害超过3次以上^[4]。2016年全国城市内涝灾害严重, 受淹城市192座, 累计受淹面积1542 km², 受灾人口389万人, 直接经济损失91亿元^[5]。城市内涝已成为制约中国新型城镇化建设的瓶颈问题之一。针对这一问题, 2016年2月国务院发文提出推进中国海绵城市建设^[6,7], 并将年径流总量控制率作为重要的考核指标, 以确定不同海绵措施规模及布

局。年径流总量控制目标是以城市开发建设后径流排放量接近开发建设前自然地貌的排放量为标准^[8], 通过实施雨水下渗减排和集蓄利用提高雨洪资源利用率。年径流总量控制率是中国海绵城市建设实施和考核的关键指标, 也是低影响开发雨水系统的径流总量控制标准^[8], 贯穿海绵城市整个规划和实施过程。

城市雨洪模拟是城市水文研究中的热点之一, 也是当前城市内涝防治工作中关键技术手段^[9]。城市雨洪模拟起步于20世纪70年代, 经过数十年的发展涌现出大量经典模型, 如SWMM、MIKE 21、

收稿日期: 2018-11-05; 修订日期: 2019-02-10

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFC0400902); 国家自然科学基金项目(41671024; 41730645)。

作者简介: 庞璇, 女, 山东莒县人, 硕士生, 研究方向为城市水文。E-mail: pangx.16s@igsrr.ac.cn

通讯作者: 张永勇, E-mail: zhangyy003@igsrr.ac.cn

HSPF 和 InfoWorks CS 等^[10-13]。SWMM 即暴雨径流管理模型,因其具有完备的管网水流模拟功能、低影响开发和水质模拟功能、模型软件界面友好易于操作和模型开源易于实现二次开发的优点,目前广泛应用于城市排水规划管理、城市雨洪形成与机理研究和低影响开发模拟分析方面^[11]。

在海绵措施年径流总量控制目标评估方面,韦峰^[14]等以南宁市中心城区核心地区为研究区,利用容积法计算了年径流总量控制率目标下各海绵措施的设计调蓄容积,以达到减少外排雨量目的。结果表明,运用修正后的有效容积计算年径流总量控制率的方法更为合理。马萌华等^[15]以陕西省西安市与咸阳市建成区之间部分区域为研究区,分别模拟了传统开发与海绵措施开发模式下径流控制率等,结果显示海绵措施对短历时降雨的调控效果优于长历时降雨。王晓昌等^[16]选取年径流总量控制率等作为考核指标,利用 SWMM 对深圳市某体育中心的海绵措施进行评估,发现研究区在全年连续降雨条件下采用海绵措施时的年径流总量控制率为 60%,与传统开发相比降低 45.1%。在城市雨洪模拟方面,Hu 等^[17]选取南京市河西新城为研究区,利用模型模拟评估了海绵措施在缓解洪水淹没方面的作用,结果表明海绵措施在减轻城市洪水淹没危害方面具有良好效果,尤其是在洪水灾害风险高的地区。Li 等^[18]利用城市雨洪模型和层次分析法,建立了西安市西影路—浐河的海绵综合效益评估系统,并对海绵措施进行设计和优化,结果表明,单一海绵措施按综合效益排序依次为:生物滞留>雨水桶>低海拔绿化带>绿色屋顶>渗透路面,并且生物滞留和绿色屋顶组合的综合效益最佳。

目前的研究大多选取中国内涝严重的城市区域,开展关于海绵措施控制效果的模拟研究。其中,部分研究在此基础上对不同海绵措施方案进行了比较和评价。然而,多数研究通过在模型中设置不同的海绵措施方法开展评估,缺乏对已建立的海绵城市试点区域现有海绵措施评估的研究,同时也缺乏利用现有雨型对年径流总量控制目标的评估。另外,部分研究在模型模拟方面缺乏率定和验证,进而影响海绵措施的评估结果。因此,本文选取海绵城市试点区——北京市未来科技城北区为

研究区,构建 SWMM 雨洪模型,并采用 3 场降雨出口断面实测流量对模型参数进行率定和验证,在此基础上具体分析该区的下垫面条件和产流情况,以防治内涝为目标,设计一定年径流总量控制率目标下研究区的海绵措施方案,为城市未来建设规划及防洪排涝提供科学依据。

2 研究区概况、数据来源和研究方法

2.1 研究区概况

北京市作为中国首都和国家中心城市,城市化发展处于全国领先地位,但同时也遭遇汛期短历时降雨引发的洪涝灾害,特别在老城区由于雨水管网基础设施建设滞后而带来的洪涝隐患。近 10 年来,北京先后于 2007、2008、2009、2011、2012、2015 年发生了严重的内涝灾害,并在 2011 年 6 月至 7 月下旬一个月内先后遭遇了 3 次较为严重的内涝灾害。自 21 世纪以来,城市内涝已造成全市经济损失达数十亿元;尤其是 2012 年 7.21 特大暴雨导致全城交通瘫痪、航班大面积延误、79 人死亡、160.2 万人受灾,经济损失达 116.4 亿元,占当年北京 GDP 总量的 0.65%。

未来科技城位于北京市昌平区(图 1),总面积约为 10 km²,以温榆河和定泗路为界分为北区和南区,两区之间核心绿地 3.38 km²。作为海绵城市重点示范区域,未来科技城建设了包含“渗、滞、蓄、净、用、排”六大海绵措施的示范工程,园区内增设了透水铺装面积约 60 万 m²,下沉式绿地和雨水花园总面积约 38 万 m²,雨水调蓄设施容积约 53 万 m³,以及实施在道路下方的雨水生态沟渠长约 31 km,以削减径流和减少污染物的外排^[19]。本文选取的研究区域为未来科技城北区,总集水面积为 3.66 km²。

2.2 数据来源

本文涉及典型街区雨洪模拟和年径流总量控制率评估,其中雨洪模拟所需数据包括数字高程模型(DEM)、街区边界、排水管网、土地利用、实测降雨径流资料等。DEM 数据、街区边界和排水管网来自北京市水科学技术研究院,根据 DEM 数据采用 ArcGIS 计算出研究区的高程、坡度等地形参数;土地利用数据来自中国城市科学学会的下垫面解译数据,利用 ArcGIS 提取每种土地利用类型的面积;降雨数据来自未来科技城雨量站实际观测数据,

2019年4月

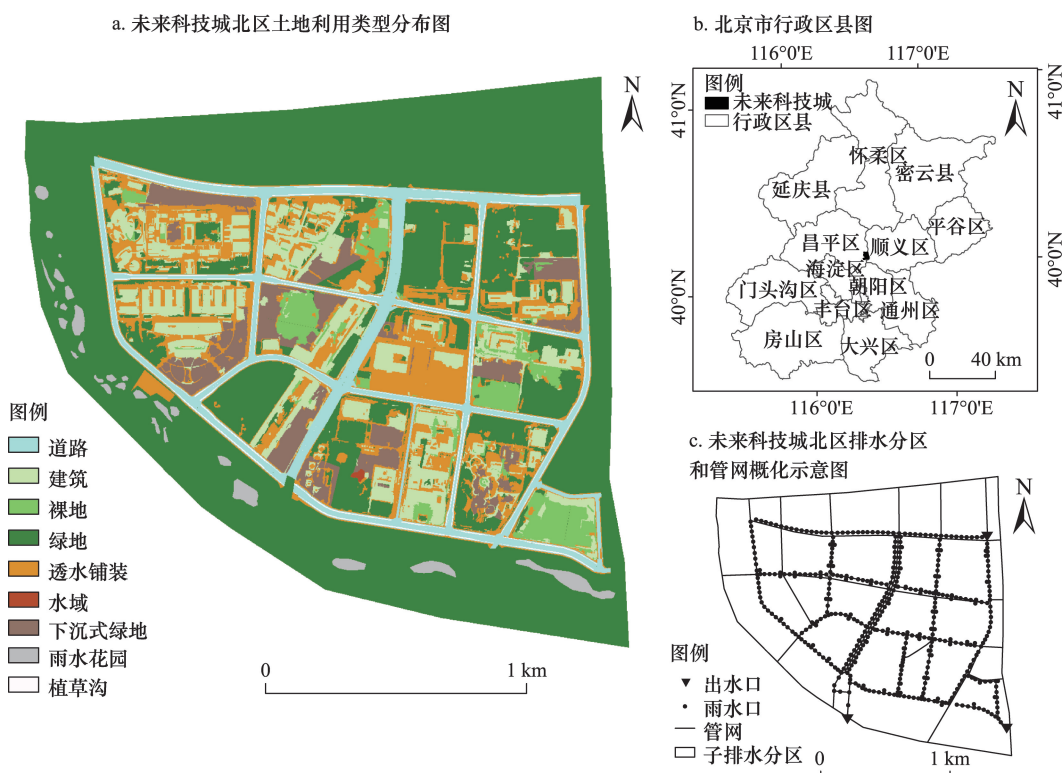


图1 研究区概略图

Figure 1 Schematic diagram of the study area

降雨资料时间段为2016/6/9 20:45—2016/6/10 0:25、2016/7/14 19:10—2016/7/15 5:45和2016/7/20 1:25—2016/7/21 6:20;流量数据则来自未来科技城北区排水口的实测流量,时间段为2016/6/9 22:30—2016/6/10 6:00、2016/7/14 19:10—2016/7/15 12:00和2016/7/20 4:00—2016/7/21 6:00。另外年径流总量控制率评估需要长序列降水观测资料,因此采用离未来科技城最近的海淀气象站1964—2013年日降雨资料,数据来源于中国气象数据网(<http://data.cma.cn/>)。

2.3 研究方法

2.3.1 SWMM模型

城市雨洪模拟选取国内外使用广泛的SWMM模型。该模型最早由梅特卡夫—埃迪公司、佛罗里达大学和美国水资源公司于1969—1971年联合开发,可用于城市地区单一场次和长期连续的降雨径流及其伴随的水质过程模拟。

(1)产流过程。未来科技城产流计算首先将研究区域根据街区、小区边界以及排水管网走向等,划分为30个排水区,其中每个排水区包含不同的下

垫面组成和特征,如中国电网、武钢集团等教育科研用地,调蓄水厂、公交站等市政公用设施用地,绿地等公共用地等。根据各排水区的特性分别计算其产流过程,最终通过汇流演算获得各排水区出流。各个排水区根据地表特征概化成三部分:透水部分、有注蓄量的不透水部分和无注蓄量的不透水部分。各部分的地表产流计算如下:

$$R_1 = P - E \quad (1)$$

$$R_2 = P - D \quad (2)$$

$$R_3 = (i - f)\Delta t \quad (3)$$

式中: R_1 、 R_2 、 R_3 分别为无注蓄不透水地表、有注蓄不透水地表和透水地表的产流量(mm); P 为降雨量(mm); E 为蒸发量(mm); D 为注蓄量(mm); i 为降雨强度(mm/h); f 为入渗强度(mm/h); Δt 为时间间隔(h)。三部分地表面单独进行产流计算,整个排水区的产流量等于三部分产流量之和。

研究区位于北京城市地区,入渗量的计算选取适合城市地区下渗特点的霍顿(Horton)方程^[20]。该方程主要描述下渗率随降雨时间变化的关系,参数

少且适用于小流域。具体公式如下:

$$f_t = f_c + (f_0 - f_c)e^{-kt} \quad (4)$$

式中: f_t 为 t 时刻的下渗率(mm/h); f_c 为土壤稳定下渗率(mm/h); f_0 为土壤初始下渗率(mm/h); k 为下渗衰减系数(1/h), 与土壤物理性质有关; t 为时间(h)。

(2)地面汇流过程。考虑到未来科技城下垫面的复杂性,地面汇流计算采用非线性水库模型,将每个子排水分区概化成非线性蓄水池,蓄水池的入流项为降雨和上游子排水区入流,出流项为下渗、蒸发和地表径流。蓄水池容量为最大洼地蓄水量。当蓄水池水深超过 d_p 时,地表径流 Q 产生并由曼宁公式计算出流量。地面汇流计算需联立求解连续方程和曼宁公式:

$$\frac{dV}{dt} = A \frac{dd}{dt} = Ai^* - Q \quad (5)$$

$$Q = \frac{1.49W}{n} (d - d_p)^{5/3} S^{1/2} \quad (6)$$

式中: V 为地表集水量(m^3); t 为时间(s); A 为地表面积(m^2); d 为水深(m); i^* 为净雨强度(mm/s); Q 为出流量(m^3/s); W 为子排水区漫流宽度(m); n 为地表曼宁糙率; d_p 为地表最大洼蓄深(m); S 为子排水区平均坡度。

(3)管道汇流过程。SWMM管网汇流模拟包含3种计算方法,分别为恒定流法、运动波法和动力波法,均由渐变非恒定流质量和动量方程的守恒控制(求解圣维南方程组)。其中,动力波法求解完整一维圣维南方程组,相比恒定流法和运动波法的结果最为精确,考虑了渠道蓄水、回水、进出口损失、逆向流和压力流。由于研究区的管网数据较详细、且研究区的面积较小,适合更精确的计算,因此采用动力波法模拟管网汇流。模型的建立需要构建管网控制方程和节点控制方程两部分。

管网控制方程包括管道的水流连续方程和动量方程,如下式:

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial A_c}{\partial t} = 0 \quad (7)$$

$$gA_c \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{\partial(Q^2/A_c)}{\partial x} + \frac{\partial Q}{\partial t} + gA_c S_f = 0 \quad (8)$$

式中: x 为距离(m); A_c 为过水断面面积(m^2); t 为时间(s); g 为重力加速度($9.8m/s^2$); H 为水深(m); S_f 为

摩阻坡度。由曼宁公式求得:

$$S_f = \frac{K}{gA_c R^{4/3}} |Q|V \quad (9)$$

式中: $K=gn^2$; n 为管道的曼宁糙率; R 为过水断面的水力半径(m); V 为流速,取绝对值表示摩擦阻力与水流方向相反。

节点控制方程指节点处的连续方程,如下式:

$$\frac{\partial H}{\partial t} = \frac{\sum Q_i}{A_{sk}} \quad (10)$$

式中: H 为节点水头(m); Q_i 为节点处的流量(m^3/s); A_{sk} 为节点的自由表面积(m^2)。

2.3.2 年径流总量控制目标评估

本文采用年径流总量控制率表征年径流总量控制目标。通过在未来科技城区增加海绵措施的方式,增强渗透、储存、蒸散发环节,统计该地块全年累计控制(不外排)的雨量占全年总降雨量的百分比^[8]即为年径流总量控制率 α , 其计算方法为:

$$\alpha = \frac{(\Delta S_1 + \Delta S_2)}{P_0} \times 100\% \quad (11)$$

式中: ΔS_1 为年雨水入渗量(m^3); ΔS_2 为年雨水滞蓄量(m^3); P_0 是全年全部雨量(m^3)。

年径流总量控制率的确定首先需要推求设计降雨量,本文选取1964—2013年共50年的(理论上至少选取近30年)的日降雨(不包括降雪)资料,扣除 ≤ 2 mm 的降雨事件的降雨量,将日降雨量从小到大排序,统计小于某一降雨量的降雨总量(其中小于或等于该降雨量的日降雨量按真实雨量计算降雨总量,大于该降雨量的日降雨量按该降雨量计算降雨总量,两者累计加和)在总雨量中的比率,该比率对应的日降雨量为设计降雨量。

为达到年径流总量控制目标,在原下垫面类型基础上设置不同的海绵措施。考虑到未来科技城主要下垫面类型分别为绿地、道路和建筑,因此采用的主要海绵措施为下沉式绿地、透水铺装和绿色屋顶。参照海绵城市设计指南来确定不同措施的径流削减量分别为200 mm、30 mm和14 mm^[21]。海绵措施的设置方式参考相关文献^[16,22],并遵循最大设置比例原则,规定透水铺装、绿色屋顶和下沉式绿地的布设比例分别不超过道路、建筑和绿地面积的30%、40%和40%。依次设置以下3种情景:情景

2019年4月

1的透水铺装、绿色屋顶和下沉式绿地的布设比例为20%,40%和40%;情景2的布设比例分别为30%,40%和30%;情景3的布设比例分别为30%,30%和40%。以情景1为例,每个子排水区的边缘部分一般为道路,20%面积的道路上铺设透水铺装;研究区建筑的分布主要集中在中部,在每个子排水区40%面积的建筑屋顶上铺设绿色屋顶;绿地的分布较分散,以四周居多,对每个排水区的40%的面积上的绿地改造为下沉式绿地。情景2和3的设置原理和情景1相同,只改变设置比例。

3 模型构建

3.1 排水系统概化

由于研究区受人类活动影响显著,地表径流就近流入雨水口,子排水分区的划分采用人工划分方法。由于实际排水系统资料和模型模拟复杂度的限制,系统内部的所有排水管网、节点及其他信息不可能均作为排水分区划分的依据,本文将街区、主要的雨水干网和关键节点作为划分子排水分区的依据,进行排水系统概化,共划分排水分区30个。未来科技城主要包含9种下垫面类型,分别为道路、建筑、裸地、绿地、透水铺装、下沉式绿地、雨水花园、植草沟和水域(图1)。其中,由于资料所限,在模型中采用将透水铺装、下沉式绿地、雨水花园和植草沟4种海绵措施的下垫面概化为透水地面的方式进行模拟。对于排水管网部分,通过管网资料和SWMM建模要求提取了排水节点空间位置、顶底高程,排水管网的节点位置、长度、坡向、断面形状、顶底高程等信息,并概化为排水节点467个,

管网465段以及出水口3个,其中主排水口1个,位于研究区正南部。

3.2 降雨径流资料预处理

本文选取场次降雨径流进行模拟,降雨径流资料选自北区主排水口附近断面实测资料(表1)。受实测资料的限制,仅收集到2016年汛期3场降雨径流过程进行模型参数率定和验证。根据场次降雨量可将3场降雨划分为大暴雨、大雨和中雨(表2),率定期选择2016/7/14和2016/7/20两场降雨径流资料,验证期选择2016/6/9的降雨径流资料。

3.3 模型参数率定和验证

SWMM模型中子流域的参数具有物理意义,然而由于受场地实际情况限制,有些参数无法通过实际测量获得,需要参考模型手册、文献资料、北京市水文手册等资料获得参数取值或范围^[11,23-24]。根据SWMM手册中的部分参数取值范围、模型建模要求及文献资料,选取不透水区和透水区洼蓄深,不透水区、透水区和管道的曼宁系数,排水区漫流宽度,最大入渗率、最小入渗率、衰减系数和排干时间10个参数作为不确定性参数,并确定取值范围或预估值(表3)。

本次研究选取峰值流量和峰现时间的相对误差和Nash效率系数作为评价模拟结果的指标。其中,根据中国《水文情报预报规范》(GB/T 22484-2008)^[25]中的误差评定方法的规定,降雨径流预报以实测洪峰流量的20%作为许可误差;峰现时间以预报时间至实测峰现时间之间时距的30%作为许可误差。

表1 北京市未来科技城北区断面场次降雨对应径流过程

Table 1 Runoff process corresponding to precipitation in the north section of the Future Science and Technology Park in Beijing

降雨开始时间	终止时间	摘录起始时间	摘录截止时间	降雨排泄时间	径流量/m ³
2016/6/9 20:45	2016/6/9 22:35	2016/6/9 21:00	2016/6/10 6:00	7h25min	6 739
2016/7/14 19:10	2016/7/15 5:45	2016/7/14 19:00	2016/7/15 12:00	6h15min	10 886
2016/7/20 1:25	2016/7/21 6:20	2016/7/20 4:00	2016/7/21 23:00	16h40min	123 898

表2 实测降雨特征分析

Table 2 Characteristics of the measured precipitation

场次	降雨量/mm	降雨分级	雨峰强度/(mm/5min)	峰现时间/h	平均雨强/(mm/5min)
2016/6/9	23.70	中雨	5.80	2.83	0.53
2016/7/14	33.10	大雨	6.80	0.50	0.30
2016/7/20	195.00	大暴雨	3.90	11.67	0.56

表3 模型不确定性参数取值范围或预估参数

Table 3 Ranges/estimates of the uncertain model parameter values

参数		取值范围	来源
注蓄深/mm	不透水区	1.27~2.54	模型手册、文献资料
	透水区	2.54~7.62	模型手册
曼宁系数	不透水区	0.011~0.024	模型手册
	透水区	0.06~0.80	模型手册
	管道	0.011~0.026	模型手册
排水区参数	漫流宽度/m	$Width=k \times \sqrt{area}$ ($0.2 < k < 5$) ¹⁾	文献资料
Horton 公式	最大入渗率/(mm/h)	121.90	文献资料、北京市水文手册
	最小入渗率/(mm/h)	45.72	文献资料、北京市水文手册
	衰减系数/(1/h)	2~7	文献资料、模型手册
	排干时间/d	2~14	文献资料、模型手册

1) width是漫流宽(m);area是子汇水区面积(m²),k是经验参数。

4 结果与分析

4.1 场次暴雨径流模拟与验证

SWMM模型的参数率定为手动调整参数。在结合模型手册、文献资料和北京市水文手册确定参数取值基础上,按照实测径流资料逐一对每个排水分区模拟参数进行率定(表4)。

表4 参数率定结果

Table 4 Results of parameter calibration

参数		取值
注蓄深/mm	不透水区	2.5
	透水区	12.0
曼宁系数	不透水区	0.018
	透水区	0.450
	管道	0.020
排水区参数	漫流宽度/m	$k=0.5$
Horton 公式	最大入渗率/(mm/h)	121.9
	最小入渗率/(mm/h)	45.72
	衰减系数/(1/h)	4
	排干时间/d	7

图2、图3分别是率定和验证阶段出口断面径流模拟和实测过程。2016/07/14场降雨的模拟结果较好,峰值相对误差小,仅8%(表5),峰现时间误差较小,为-8%,模拟和实测的流量过程线吻合较好(图2)。2016/07/20场径流模拟结果较好,峰值相对误差较小,为13%,峰现时间误差小,仅为-1%,模拟流量值总体略小于实测流量值。验证期2016/06/09场降雨的模拟结果也较好,峰值相对误差为26%,峰现时间误差为0,Nash效率系数0.51。其中,对于率定期和验证期3场降雨径流的洪峰模拟误差和峰现时间模拟误差,除验证期的洪峰模拟误差为26%外,其他误差均远小于规范要求。

4.2 年径流总量控制率的确定和评估

北京市未来科技城位于《海绵城市建设技术指南》^[8]年径流总量控制Ⅲ区,对应的控制率为75%~85%之间。本文将年径流总量控制率定为80%,根据累计降水频率曲线求得对应的设计降雨总量为

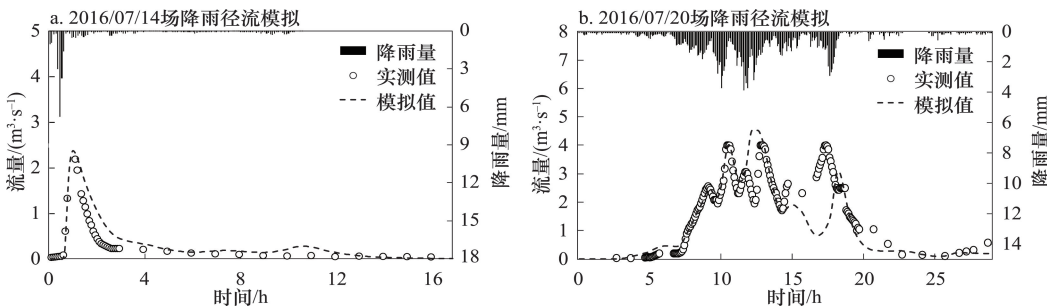


图2 率定期降雨径流模拟结果

Figure 2 Simulation results of rainfall and runoff in model calibration

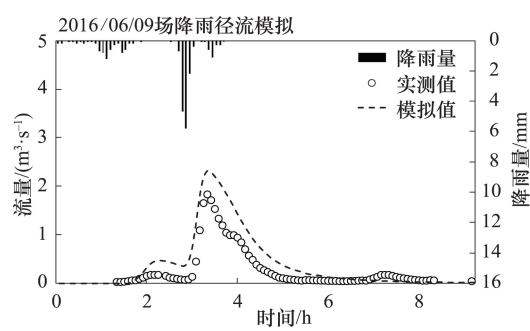


图3 验证期降雨径流模拟结果

Figure 3 Simulation results of rainfall and runoff in model verification

29 mm(图4)。基于已有的3场降雨雨型,将降雨总量进行分配,得到3场设计降雨过程(图5),模拟研究区出口流量过程,发现三场降雨条件下地块均有径流外排,因此年径流总量控制目标并未能实现。从各地块的径流系数空间分布特征来看(图6),径

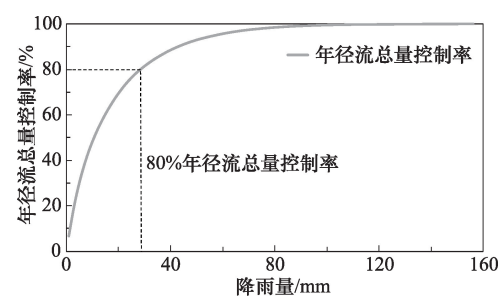


图4 北京市不同降雨量下的年径流总量控制率图

Figure 4 Control rate of total annual runoff of Beijing under different amounts of precipitation

流系数在0.01~0.58之间,平均值为0.19;周边地块径流系数较低,在0.15以下,中部地块径流系数较高,原因是中部地块主要是科研教育用地及住宅和公建用地,下垫面不透水率较高,而周边地块为公共和防护用地,绿地面积占比较高。

表5 降雨—径流模拟的统计结果

Table 5 Statistical results of precipitation-runoff simulations

降雨场次		模拟峰值 流量/(m³/s)	实测峰值 流量/(m³/s)	模拟峰现 时间/h	实测峰现 时间/h	峰值 误差/%	峰现时间 误差/%	Nash效率 系数
率定期	2016/07/14	2.37	2.20	1.00	1.08	8	-8	0.45
	2016/07/20	4.53	4.00	12.58	12.75	13	-1	0.41
验证期	2016/06/09	2.31	1.84	3.33	3.33	26	0	0.51

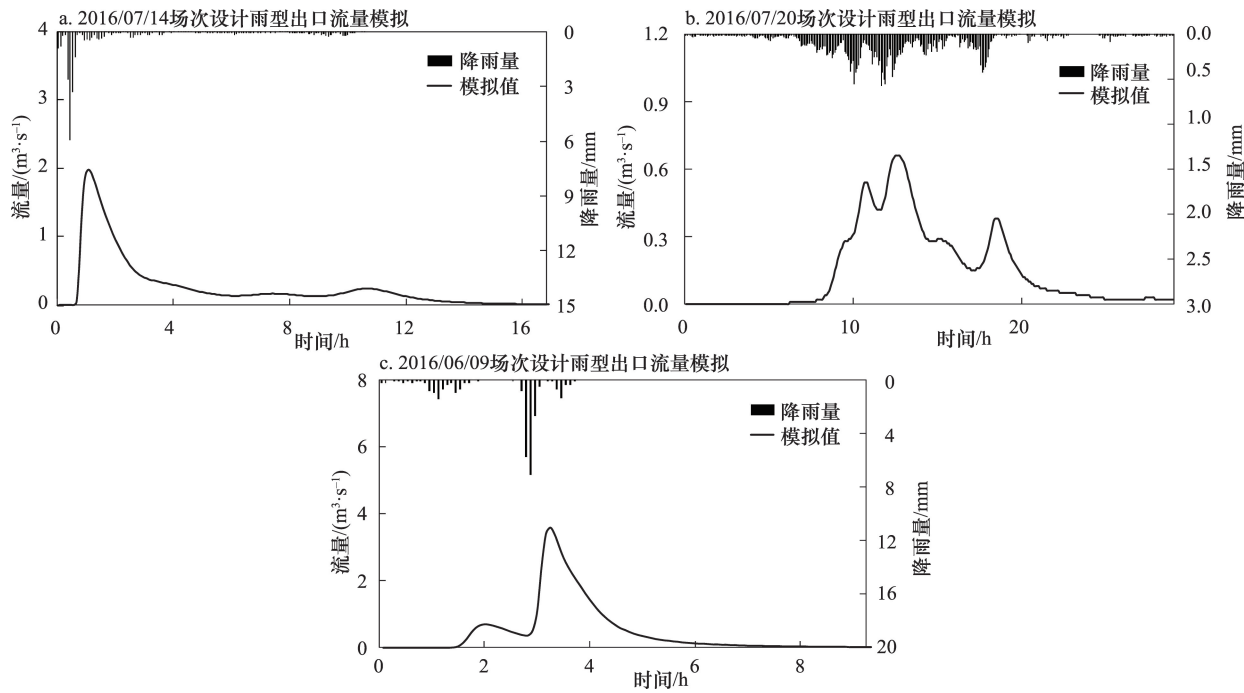


图5 3场设计降雨对应的出口流量模拟

Figure 5 Simulation of outlet flows corresponding to three types of rainfall conditions

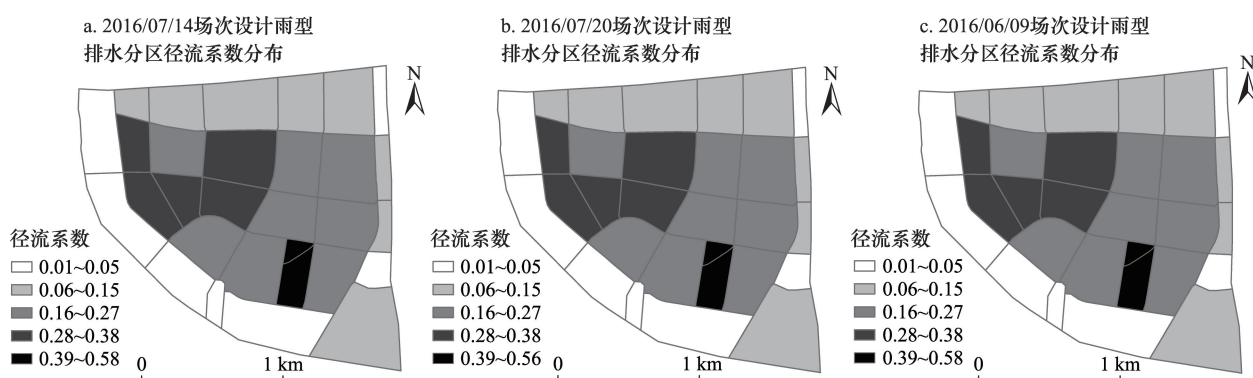


图6 3场次设计雨型各子汇水区径流系数分布

Figure 6 Runoff coefficient distribution of sub-catchments under three types of rainfall conditions

4.3 海绵措施调整

模拟不同海绵措施和降水情景下的径流过程,与现状相比其径流削减率空间分布情况见图7。从结果可以看出,3场降雨的情景1和3均有27个地块的径流削减率达到100%,占有所有地块的90%;对于

情景2,2016/07/14和2016/06/09两场设计降雨有25个地块的径流削减率为100%,2016/07/20场次设计降雨有26个地块的径流削减率为100%,分别占有所有地块的83%和87%。其中,未达到控制目标的地块不透水面积比重较大,可考虑增设蓄水池或增加

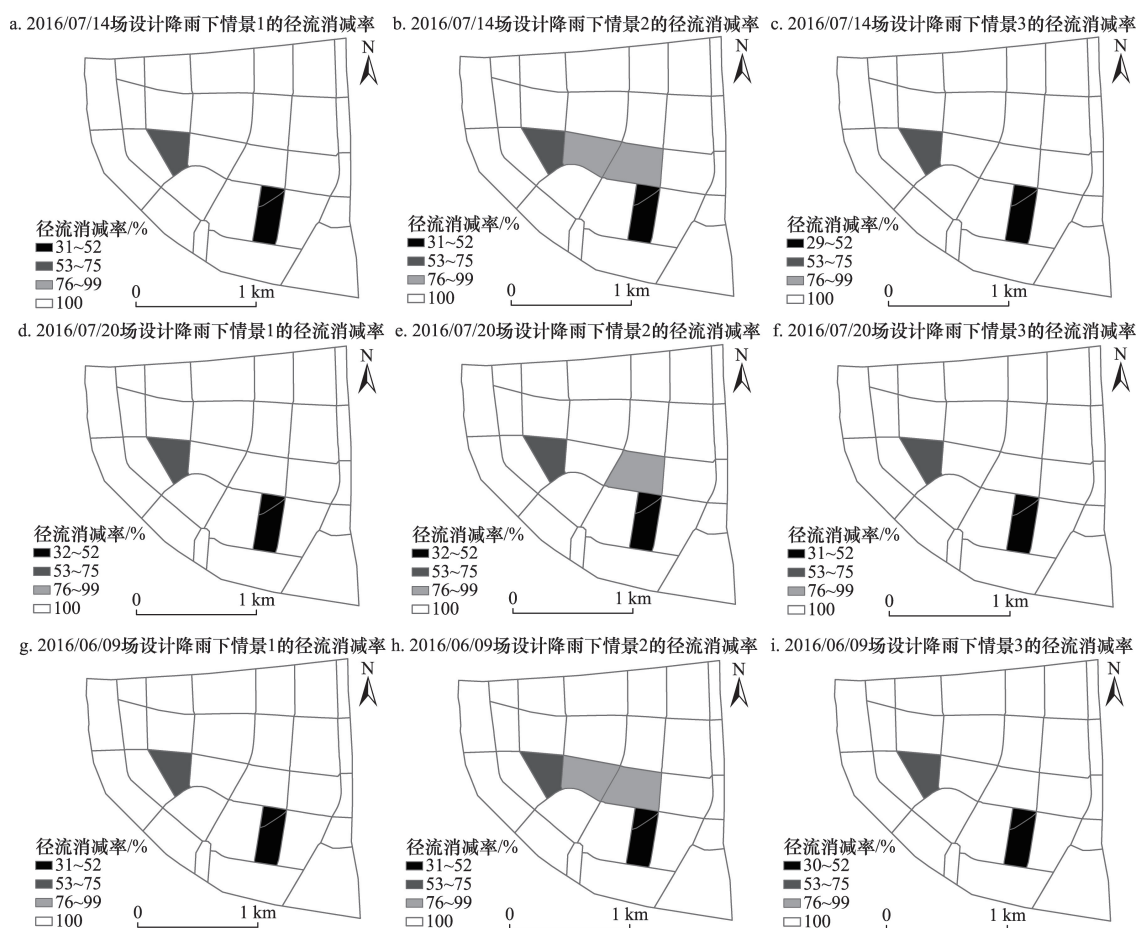


图7 3场设计降雨下3种情景的子汇水区径流削减率

Figure 7 Runoff reduction rates of sub-catchments in three scenarios under three types of rainfall conditions

2019年4月

透水铺装的比例。另外,计算出3场设计降雨下3种海绵情景对应的可利用水量(图8),数量上均为情景1>情景3>情景2;单次降雨场次可利用的水量最大为1.79万 m^3 ,最小为1.69万 m^3 ,平均为1.75万 m^3 。

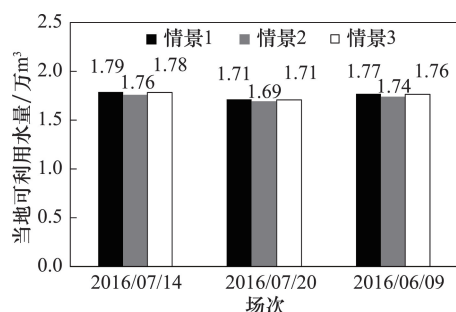


图8 3场设计降雨下3种情景对应增加的当地可利用水量

Figure 8 Increases in local available water resources corresponding to the three scenarios under three types of rainfall conditions

5 结论

本文基于SWMM构建了北京未来科技城的雨洪模型,利用2016年3场实测降雨径流过程对模型的适用性进行了探索;在此基础上,评估现状地块下年径流总量控制目标实现情况和不同海绵措施的空间布局,从而达到年径流总量控制率和提高水资源利用目标。主要的结论如下:

(1)城市雨洪模拟精度较高,峰值误差均在26%以内,峰现时间误差在8%以内,Nash效率系数在0.41以上。利用SWMM模型对未来科技城场次降雨—径流模拟,能较好地反映排水区域出口断面的流量状况,为年径流总量控制率评估和海绵措施优化布局等提供技术支持。

(2)现状下垫面条件下,未来科技城平均径流系数为0.19,径流系数较高的地块位于建筑用地较多的中间地块,而径流系数较低的地块位于绿地面积占比较高的周边公共和防护用地;整个街区未能达到年径流总量控制率的目标。

(3)增设不同比例透水铺装、绿色屋顶和下沉式绿地海绵措施,可有效提高水资源利用量,达到年径流总量控制率。其中透水铺装、绿色屋顶和下沉式绿地占比为20%,40%和40%或30%,30%和40%时排水分区径流削减率较高,90%的地块达到目标;透水铺装、绿色屋顶和下沉式绿地增设占比分别为20%、40%和40%时可利用水量增加最大,为

1.79万 m^3 (20160714场设计降雨)。

本文研究中由于缺少海绵措施详细参数,模型中对透水铺装、下沉式绿地、植草沟、雨水花园结合实际采用概化处理。因此后续将进一步利用详细海绵措施资料对该区进行模拟,同时加强场次降雨径流过程的观测。

参考文献(References):

- [1] Xia J, Zhang Y Y, Xiong L H, et al. Opportunities and challenges of the Sponge City construction related to urban water issues in China[J]. Science China Earth Sciences, 2017, 60(4): 652–658.
- [2] 刘慧娟, 王伟, 王金满, 等. 城市典型下垫面产流过程模拟实验[J]. 资源科学, 2015, 37(11): 2219–2227. [Liu H J, Wei W, Wang J M, et al. Experimental study on typical city underlyings runoff process[J]. Resources Science, 2015, 37(11): 2219–2227.]
- [3] 张建云, 宋晓猛, 王国庆, 等. 变化环境下城市水文学的发展与挑战: I. 城市水文效应[J]. 水科学进展, 2014, 25(4): 594–605. [Zhang J Y, Song X M, Wang G Q, et al. Development and challenges of urban hydrology in a changing environment: I. Hydrological response to urbanization[J]. Advances in Water Science, 2014, 25(4): 594–605.]
- [4] 张建云, 王银堂, 贺瑞敏, 等. 中国城市洪涝问题及成因分析[J]. 水科学进展, 2016, 27(4): 485–491. [Zhang J Y, Wang Y T, He R M, et al. Discussion on the urban flood and waterlogging and causes analysis in China[J]. Advances in Water Science, 2016, 27(4): 485–491.]
- [5] 杨卫忠, 张葆蔚, 符日明. 2016年洪涝灾情综述[J]. 中国防汛抗旱, 2017, 27(1): 26–29. [Yang W Z, Zhang B W, Fu R M. Summary of flood disasters in 2016[J]. China Flood & Drought Management, 2017, 27(1): 26–29.]
- [6] 中共中央国务院. 关于进一步加强城市规划建设管理工作的若干意见(中发[2016]6号)[EB/OL]. (2016–02–06) [2018–11–05]. <https://baike.baidu.com/item/中共中央国务院关于进一步加强城市规划建设管理工作的若干意见/19406715?fromtitle=关于进一步加强城市规划建设管理工作的若干意见&fromid=19406823&fr=Aladdin>. [Central Committee and the State Council. Several Opinions on Further Strengthening the Management of Urban Planning and Construction (Zhong Fa No. 6 [2016]) [EB/OL]. (2016–02–06)[2018–11–05]. <https://baike.baidu.com/item/中共中央国务院关于进一步加强城市规划建设管理工作的若干意见/19406715?fromtitle=关于进一步加强城市规划建设管理工作的若干意见&fromid=19406823&fr=Aladdin>.]
- [7] 中共中央国务院. 关于深入推进新型城镇化建设的若干意见(国发[2016]8号)[EB/OL]. (2016–02–02) [2018–11–05]. <https://baike.baidu.com/item/关于深入推进新型城镇化建设的若干意见>

- 见/19392681?fr=Aladdin. [Central Committee and the State Council. Several Opinions on Deepening the Construction of New Urbanization (Guo Fa No. 8 [2016]) [EB/OL]. (2016-02-02) [2018-11-05]. <https://baike.baidu.com/item/关于深入推进新型城镇化建设的若干意见/19392681?fr=Aladdin>.]
- [8] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 海绵城市建设技术指南: 低影响开发雨水系统构建(试行)[EB/OL]. (2014-10-15) [2018-11-05]. <https://wenku.baidu.com/view/c06dabd1be1e650e53ea9904.html>. [Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Technique Guideline of Sponge City Construction: Building Rainfall Water Management System of Low Impact Development (Trail Version) [EB/OL]. (2014-10-15) [2018-11-05]. <https://wenku.baidu.com/view/c06dabd1be1e650e53ea9904.html>.]
- [9] 宋晓猛, 张建云, 王国庆, 等. 变化环境下城市水文学的发展与挑战: II. 城市雨洪模拟与管理[J]. 水科学进展, 2014, 25(5): 752-764. [Song X M, Zhang J Y, Wang G Q, et al. Development and challenges of urban hydrology in a changing environment: II. Urban stormwater modeling and management[J]. Advances in Water Science, 2014, 25(5): 752-764.]
- [10] Zoppou C. Review of urban storm water models[J]. Environmental Modelling & Software, 2001, 16(3): 195-231.
- [11] Rossman L A. Storm Water Management Model User's Manual Version 5. 0[R]. Cincinnati: National Risk Management Research Laboratory, U. S. Environmental Protection Agency, 2008.
- [12] Danish Hydraulic Institute (DHI). MIKE 21 Flow Model, Hydrodynamic Module User Guide[R]. Danish: DHI, 2007.
- [13] Cryer S A, Fouch M A, Peacock A L, et al. Characterizing agrochemical patterns and effective BMPs for surface waters using mechanistic modeling and GIS[J]. Environmental Modeling & Assessment, 2001, 6(3): 195-208.
- [14] 韦峰, 黄任, 陈海, 等. 建筑小区年径流总量控制率和年SS总量去除率的计算分析[J]. 给水排水, 2018, 44(3): 79-81. [Wei F, Huang R, Chen H, et al. Calculation and analysis of annual runoff total control rate and annual SS total removal rate in building communities[J]. Water & Wastewater Engineering, 2018, 44(3): 79-81.]
- [15] 马萌华, 李家科, 邓陈宁. 基于SWMM模型的城市内涝与面源污染的模拟分析[J]. 水力发电学报, 2017, 36(11): 62-72. [Ma M H, Li J K, Deng C N. Analysis of urban waterlogging and pollution load based on SWMM model[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2017, 36(11): 62-72.]
- [16] 王晓昌, 王永坤, 任心欣, 等. 深圳市某体育中心低影响开发系统应用与模拟评估[J]. 给水排水, 2016, 42(5): 91-96. [Wang X C, Wang Y K, Ren X X, et al. Application and simulation-based evaluation of a low impact development system in a sports center in Shenzhen[J]. Water & Wastewater Engineering, 2016, 42(5): 91-96.]
- [17] Hu M, Sayama T, Zhang X, et al. Evaluation of low impact development approach for mitigating flood inundation at a watershed scale in China[J]. Journal of Environmental Management, 2017, 193: 430-438.
- [18] Li J, Deng C, Li Y, et al. Comprehensive benefit evaluation system for low-impact development of urban stormwater management measures[J]. Water Resources Management, 2017, 31(15): 4745-4758.
- [19] 肖鹏, 康文, 刘峰. 北京未来科技城海绵城市实施与监测评价探索[J]. 建设科技, 2017, (1): 27-29. [Xiao P, Kang W, Liu F. Exploration on implementation, monitoring and evaluation of Sponge City in Beijing Future Science and Technology Park[J]. Construction Science and Technology, 2017, (1): 27-29.]
- [20] 丛翔宇, 倪广恒, 惠士博, 等. 基于SWMM的北京市典型城区暴雨洪水模拟分析[J]. 水利水电技术, 2006, 37(4): 64-67. [Cong X Y, Ni G H, Hui S B, et al. Simulative analysis on storm flood in typical urban region of Beijing based on SWMM[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2006, 37(4): 64-67.]
- [21] 刘昌明, 张永勇, 王中根, 等. 维护良性水循环的城镇化LID模式: 海绵城市规划方法与技术初步探讨[J]. 自然资源学报, 2016, 31(5): 719-731. [Liu C M, Zhang Y Y, Wang Z G, et al. The LID pattern for maintaining virtuous water cycle in urbanized area: A preliminary study of planning and techniques for Sponge City [J]. Journal of Natural Resources, 2016, 31(5): 719-731.]
- [22] 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 X D, Xu Z X, Zhao G, 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.]
- [23] 赵树旗, 晋存田, 李小亮, 等. SWMM模型在北京市某区域的应用[J]. 给水排水, 2009, 35(S1): 448-451. [Zhao S Q, Jin C T, Li X L, et al. Application of SWMM model in a certain area of Beijing [J]. Water & Wastewater Engineering, 2009, 35(S1): 448-451.]
- [24] 赵刚, 庞博, 徐宗学, 等. 基于SWMM模型的北京大红门排水片区雨洪模拟研究[J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 2014, (5): 452-455. [Zhao G, Pang B, Xu Z X, et al. Simulation of urban storm at Dahongmen drainage area by SWMM[J]. Journal of Beijing Normal University (Natural Science), 2014, (5): 452-455.]
- [25] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 水文情报预报规范. (GB/T 22482-2008). [State Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, China National Standardization Administration. Standard for hydrological information and hydrological forecasting. (GB/T 22482-2008).]

Urban stormwater simulation and assessment of the control rate of total annual runoff:

A case of the Future Science and Technology Park in Beijing

PANG Xuan^{1,2}, ZHANG Yongyong¹, PAN Xingyao³, YANG Moyuan³

(1. Key Laboratory of Water Cycle and Related Land Surface Processes, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

3. Beijing Water Science and Technology Institute, Beijing 100048, China)

Abstract: Along with the acceleration of urbanization process, urban impervious surfaces have increased, and the urban rainfall and runoff processes have undergone significant changes, resulting in outstanding flooding problems. Urban stormwater simulation is one of the hotspots and challenges in current urban hydrology research. It is also a key technical means for urban flood control and total annual runoff control rate evaluation of “sponge cities.” In this study, the Future Science and Technology Park in Beijing was selected as the research area. We constructed an urban stormwater model using the stormwater management model (SWMM) to simulate surface and pipe network runoff processes under different rainfall conditions. We designed the precipitation processes corresponding to the control rate of total annual runoff according to the characteristics of different field rainfalls. Moreover, we drove the constructed urban stormwater model to assess the achievement of current land blocks with regard to the control rate of total annual runoff. On this basis, the spatial layout of different “sponge city” measures was proposed to achieve the control rate of total annual runoff. The results demonstrate that the model simulation accuracy was high. The peak errors of the three rainfall and runoff processes were between 8%~26%, and the peak time errors were -8%, -1%, and 0, respectively. Under the current land use conditions, the control rate of total annual runoff of the city of Beijing (80%) has not been reached. With the addition of permeable pavements, green roofs, and sunken green spaces of 20%, 40%, and 40%, respectively on roads, buildings, and green spaces, 90% of the land blocks would reach the control rate of total annual runoff, and the maximum amount of available water would reach 17870 m³. This study can provide a reference for the assessment of the control rate of total annual runoff and specific decision-making basis for the optimization of the spatial layout of urban “sponge city” measures.

Key words: urban stormwater simulation; stormwater management model (SWMM); objective of controlling total annual runoff; sponge city measures; the Future Science and Technology Park of Beijing