

城市洪涝试验研究进展

郝晓丽¹, 穆杰^{1,2}, 喻海军^{1,2}, 黄绵松³, 吴滨滨^{1,2}

(1. 中国水利水电科学研究院减灾中心, 北京 100038; 2. 水利部防洪抗旱减灾工程技术研究中心, 北京 100038;
3. 北京首创股份有限公司, 北京 100044)

摘要:城市洪涝物理试验与原型试验是开展数值模型验证及提高预报预警精度的重要手段。从城市产流过程、地表洪水演进以及地表径流与管网水流交互三方面, 综述了近年来国内外城市洪涝试验的研究进展。针对目前城市洪涝试验研究中存在的不足, 指出今后应完善现有城市产汇流过程相关机理方面的试验研究, 深入研究地表与管网垂向交互过程, 加强与城市洪涝期间的流动行为密切相关过程的定量试验研究。

关键词:城市洪涝; 物理试验; 城市产流; 地表洪水演进; 地表-地下水流交互; 综述

中图分类号:TV131.61 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-7647(2021)01-0080-07

Advances in experimental research of urban flooding//HAO Xiaoli¹, MU Jie^{1,2}, YU Haijun^{1,2}, HUANG Miansong³, WU Binbin^{1,2}(1. Hazard Reduction Center, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China; 2. Research Center on Flood & Drought Disaster Reduction of the Ministry of Water Resources, Beijing 100038, China; 3. Beijing Capital Co., Ltd., Beijing 100044, China)

Abstract: Laboratory experiments and field tests of urban flooding are important approaches for model validation to improve the accuracy of simulation results. Advances in the research of urban flood characteristics by laboratory experiments were reviewed in three aspects, including the urban runoff generation process, the surface flood evolution, and the interaction of surface runoff with pipe network flow. Aiming at the shortcomings in the current study, it is necessary to improve the research on the mechanism of the surface runoff process through physical experiments and to intensify the research on the vertical interaction process between surface and pipe network flow. Quantitative experimental research on the associated processes closely intertwined with flow behavior during urban flooding should be strengthened.

Key words: urban flooding; physical experiment; urban runoff generation; surface flood evolution; interaction between surface and underground flow; review

在全球气候变化与城市化的背景下, 极端水文事件的发生频率、影响范围及影响程度等均有所增加, 而由极端降雨所引发的洪涝灾害目前已成为全球范围内发生最频繁、影响最严重的自然灾害之一, 引起了社会各界的广泛关注^[1-7]。随着城市化进程加快, 城市中的不透水面积急剧增加, “先地上, 后地下”的开发模式导致管网排水能力严重不足, 城市也面临着不断上升的洪涝风险。例如, 2013年6月加拿大西部、印度北部及欧洲中部地区、2013年9月美国科罗拉多州和新墨西哥州、2018年2月印度尼西亚雅加达地区、2018年7月日本东京等地都遭受了不同程度的洪涝灾害^[8-10]。在城市化发展和季

风气候的双重影响下, 我国的洪涝灾害也十分严重。2018年, 全国有30多个省(市、区)的83座城市遭受了不同程度的洪涝灾害, 因灾致死人数达187人, 直接经济损失高达1615.47亿元^[11]。

通过城市洪涝过程的模拟仿真可更好地应对频发的城市区域性洪涝问题, 提高城市防洪减灾能力, 最大程度降低洪涝灾害带来的损失。近年来, 通过构建城市精细化数值模型来模拟洪涝演进过程及淹没范围, 为洪涝预警预报、灾害预估以及应急响应决策支持等方面提供理论支撑已成为城市洪涝研究领域的研究热点^[12-15]。目前, 国内外学者基于 Mike Urban、Infoworks CS、Wallingford 以及 SWMM 等模

基金项目: 国家重点研发计划(2017YFC1502703); 国家自然科学基金(51909272); 固原海绵城市建设及运营关键技术研究(SCHM-2018)
作者简介: 郝晓丽(1992—), 女, 博士研究生, 主要从事城市防灾减灾研究。E-mail: haoxiaoli19920909@163.com
通信作者: 穆杰(1988—), 女, 高级工程师, 博士, 主要从事防洪减灾研究。E-mail: mujie@iwhr.com

型,开展了部分城市的洪涝影响研究,并形成了一些代表性成果。然而,由于城市特征的高度异构性、模型局部概化不合理以及实测数据验证不足等因素的影响,数值模拟结果的准确性不高^[16-17]。为此,研究人员针对城市洪涝数值模型的三大模拟过程,即降雨产流过程、地表汇流演进过程和管网汇流过程,开展了一系列的城市洪涝物理试验及原型试验,探索了城市洪水演进机理^[18-19]。本文针对上述三大模拟过程,从城市产流过程、地表洪水演进、地表径流与管网水流交互三方面对城市洪涝试验发展动态进行综述,旨在为数值模型产汇流参数设定、城市建筑物防洪优化布局、地表径流和地下管流的交互过程合理概化等提供参考。

1 城市产流过程试验

针对城市下垫面对地表产汇流的影响,当前主要采用室内(外)人工降雨-径流模拟试验法、室外真实降雨法以及原型试验法等来开展两类研究工作,部分代表性成果见表1。第一类研究关注地表产流过程,定性分析不同的下垫面类型对地表径流量、径流深和径流系数等的影响规律。结果表明,在同一降雨强度下,随着下垫面的透水性及粗糙程度的增加,地表汇流时间增长,产流量和径流系数减小。如果城市下垫面的坡度较大,则汇流过程短、洪峰较大^[19-22]。地表植被具有延缓径流、增加土壤下渗量的作用。在植被覆盖率高的区域中,土质通常较为

疏松,土壤下渗速率较大,达到稳定下渗状态所需的时间较短,土壤蓄水能力较强,导致地表径流量较小。此外,地表的植被覆盖类型以及空间分布等因素也会影响地表径流量,游宇等^[23]研究发现林冠截留效应能有效减少降雨产流量。

另一类研究侧重于下渗参数的测定,通过双环渗水试验法、Guelph 入渗仪等方法来测定下渗相关参数。北京、西安、南京、厦门及淮南等地区下垫面下渗参数均已实测^[24-28],研究表明城市下渗能力与下垫面的类型以及功能区的作用相关,城市不同下垫面类型下土壤下渗能力从大到小顺序为林地、草地、裸土、道路,城市不同功能区的土壤下渗能力从大到小顺序为农田保护区、风景区、文教区、工业区、商业区,不同海绵措施下土壤的下渗能力也有所不同,入渗能力从大到小顺序为多孔纤维棉、转输型植草沟、隔水顶板,相关数据集可用于模型参数率定。随着海绵城市建设工作的持续开展,海绵设施的下渗特性也成为研究热点,Abbott 等^[22]研究发现透水砖铺装结构下渗速率约是普通砖下渗速率的50倍。张书函等^[28-29]通过室内模型试验寻找最佳的铺装结构形式,张阳维等^[30]通过人工降雨-径流试验法研究横坡坡度、纵坡坡度及降雨强度等因素对不同类型透水铺装的下渗参数的影响,结果表明稳定下渗率与降雨强度之间呈对数关系,与坡度呈负相关关系。海绵城市的低影响开发(LID)措施对于减少降雨径流量非常重要,其中 Mai 等^[31]通过模

表1 城市产流过程的物理试验成果

类型	试验方法	文献	研究地区	下垫面类型	研究参数	研究结论
产流过程	室内人工降雨-径流模拟试验法	岑国平等 ^[20]	西安	绿地、水泥地、裸土	径流系数	径流系数随不透水面积比例增大而增大,不透水面积位置影响产流时间
	室外人工降雨-径流模拟试验法	刘慧娟等 ^[21]	北京	绿地、透水砖、不透水砖	产流效率	产流效率从大到小顺序为不透水面、透水砖、绿地
	室外真实降雨观测试验法	Abbott 等 ^[22]	英国瓦林福德	透水路面	径流率	透水路面径流率约为67%
		游宇等 ^[23]	北京	8种园林乔木	截留率	相同降雨条件下,截留率从大到小顺序为园柏、雪松、银杏、毛白杨、国槐、龙爪槐、紫叶李、西府海棠;降水量与截留量呈对数相关关系
下渗过程	双环渗水试验法	杨霄 ^[24]	西安	不同利用环境的绿地、小路、裸土等	稳定下渗率	道路绿化区、校园绿地、公园绿地、居民小区绿地、踩踏小路、裸土的稳定下渗率分别为0.013 8~0.031 2 cm/min、0.049 2~0.078 0 cm/min、0.010 8~0.040 2 cm/min、0.051 0~0.088 8 cm/min、0.012 0~0.043 8 cm/min、0.006~0.015 cm/min
	双环渗水试验法	檀海洋 ^[25]	淮南	不同功能区的裸土	稳定下渗率	商业区、工业区、文教区、农田保护区、风景区的稳定下渗率分别为0.040 mm/min、0.029 mm/min、0.031 mm/min、0.089 mm/min、0.043 mm/min
	一维垂直定水头入渗法	赵云鹏等 ^[26]	银川	砂石	下渗量	随着城市绿地的砂石覆盖厚度增加,土壤下渗速率增大,土壤下渗量增加;覆盖砂石厚度为10 cm时的绿地下渗量最大
	Guelph 入渗仪法	刘家宏等 ^[27]	厦门	不同海绵措施的道路	土壤饱和导水率	入渗能力从大到小顺序为多孔纤维棉、转输型植草沟、隔水顶板
	室内人工降雨-径流模拟试验法	张书函等 ^[28]	北京	8种透水铺装结构	下渗量	透水砖面层与无砂混凝土、单级配碎石的组合下渗效果最好

拟降雨和径流,证明红壤地区通过 LID 措施可以有效减少降雨径流量。

2 城市二维地表洪水演进试验

城市二维地表洪水演进的物理模型试验中,通常将城市区域概化为街道、建筑物^[32]和交叉路口^[33]等的组合,研究地表洪水的流动特性,从而获得其多向流动路径以及水深、流速等信息,以便为城市数值模拟提供更为精细和丰富的验证数据。

2.1 道路交叉路口的洪涝演进试验

国内外针对城市地表道路交叉路口的洪涝演进研究所采用的物理模型比尺通常较小,一般为 1/200~1/10,试验模拟径流的来流方式主要是上游径流(表 2)。目前已开展的研究主要有下述两类:第一类研究主要关注局部尺度的交叉路口研究,以三岔路口或四岔路口作为研究对象,通过测定分析不同路口方位的水深、流速及流量等参数,发现对城市道路交叉路口分流规律影响较大的因素包括尾水的弗劳德数、下游堰高、流入功率比以及支流占总流的流量比^[34-39],且进一步推导出公式来预测交叉路口的流量分配规律。第二类研究则是基于缩比尺的城市区域模型,探讨城市街区的洪水演进特性,Velickovic 等^[37]通过 1/200 比尺的精细化城市十字路口试验平台,研究了不同的道路宽度、坡度和上游洪水来流量的城市街道水流流动的演进特征,研究表明每条街道的分流水量与流入总量以及上游街道入流位置无关,与街道宽度正相关,街道的坡度影响交叉路口水跃的形成位置^[40-41]。

2.2 建筑物对洪涝演进的影响试验

地表建筑物的阻水作用改变了城市洪涝演进过程。目前,已开展的物理试验工作主要分析了建筑物的布局及覆盖度等因素对地表径流的影响。该类模型的比尺通常比较小,一般为 1/300~1/20。在

开展物理模型试验时,部分学者将建筑物概化为规则砌块,以研究建筑物的布局方式、覆盖度、透水性及类型等参数对地表径流二维演进过程的影响。Soares-Frazão 等^[42-44]通过 1/150 比尺的试验平台来开展规则砌块在不同布局方式下的物理试验,重现了地表二维水流绕过建筑物的过程。黄琼等^[45]研究表明当建筑物与水流方向平行时建筑物之间的水深最小,建筑物与水流方向夹角越大建筑物之间的水深越大。Huang 等^[46]通过 1/100 比尺的试验平台来开展物理试验,量化了建筑物与曼宁系数的关系,并提出在数值模拟中通过调整曼宁系数的方式来概化不同建筑物的阻水作用,这种概化建筑物的方法具有一定的合理性,但是由于建筑物前洪水波的反射效果明显,流场复杂多变,仅以曼宁系数来量化建筑物的方法无法准确模拟出建筑物周围流场的变化情况。Zhou 等^[47]针对不同透水性的城区,以 1/300 比尺的试验平台来开展物理试验,研究了建筑物的地表二维水流流动模式,表明随着建筑物的不透水性增大,建筑物间的水深增加。

部分学者则是以城市中的真实房屋或其他建筑物作为原型开展研究,通过开展尺度物理试验来进行有关房屋洪水入侵、洪涝易发区等方面的研究^[48-53]。Liu 等^[48]以 PVC 板制作了比尺为 1/20 的房屋模型开展物理试验来再现洪水在单一房屋周围的流动特性及入侵过程,研究表明,与房门上锁时相比,在不锁门的情况下屋内水位上升更为迅速,当洪水来流方向垂直于房屋正面时将会产生最大的冲击力。Güney 等^[51]建立了比尺为 1/150 的模型,再现了城市区域内洪水的传播过程。Larocque 等^[52]以新奥尔良十七街区运河溃口附近的区域作为原型,建立了 1/50 比尺物理模型对建筑物周围的流场和水深进行实测。这些研究为数值模型提供了有效的水深、流速等验证数据集。

表 2 道路交叉路口洪涝物理试验成果

径流来源	研究关注点	文献	尺度因子	尺度因子	研究成果
上游径流	局部尺度 (三岔路口)	El Kadi Abderrezzak 等 ^[34]	1/50	流量分配	$\lg \frac{Q_{x0}}{Q_{y1}} + Fr_{y02}^{0.98} = 0$
上游径流	局部尺度 (四岔路口)	Nanfa 等 ^[35]	1/10	流量分配	$\frac{Q_{y0}}{Q_{xi}} = 3.54 - 2.96 \left(\frac{h_{y0}}{h_{x0}} \right) + 4.94 \left(\frac{Q_{yi}}{Q_{xi}} \right) - 3.54 \left(\frac{b_1}{h_{x0}} \right) - 0.331 Fr_{xi}$
上游径流	局部尺度 (四岔路口)	Rivière 等 ^[36]	1/50	流量分配	$\frac{Q_{y0}}{Q_{xi}} = \left(0.685 - 0.141 \frac{c_y}{c_x} \right) \frac{Q_{yi}}{Q_{xi}} + 0.456 - 0.883 \left(\frac{c_y}{c_x} - 1 \right)$
上游径流	城区或区域街道多交叉路口	Velickovic 等 ^[37]	1/150	流量分配	来流方向与街道方向不一致时比来流方向与街道方向一致时对街道产生更大的流动阻力

注:Q_{x0}为侧向支路出流流量;Q_{y1}为进口流量;Fr_{y02}为出口弗劳德数;Q_{yi}为次要渠道进口流量;Q_{xi}为主要渠道进口流量;Q_{y0}为次要渠道出口流量;h_{y0}为次要渠道出水水深;h_{x0}为主要渠道出水水深;b₁为渠道宽度;Fr_{xi}为单向流入的弗劳德数;c_x为主要渠道堰高;c_y为次要渠道堰高。

3 地表-管网水流交互试验

地表-地下管网水流的交互作用是城市洪水演进过程中非常重要的垂向交互过程,地表径流通过雨水口的截流和泄流作用,将地表雨水下泄到排水管网中。在不同形式或位置的交互口附近,局部水动力模式也有所不同,在数值模型中应结合实际情况来运用合理的交互公式,以进行交互水流特性的研究。目前国内外已开展了一系列的物理试验(表3)来进行地表-管网水流交互过程的模拟。由于该类研究主要关注交互口在关键位置处的精细化水流状态,因此大部分的工作采用了原比尺模型,以上游来流模拟顺街洪水,研究在单个或多个雨水口的情况下,地表-管网单向排水及地表-管网-地表双向水流交互的规律。

表3 地表-地下管网水流交互物理模型试验成果

径流来源	水流交互模式	文献	流态	尺度因子	研究参数	研究成果
上游径流	地表到管道 单向排水 (单一雨水口)	Gómez 等 ^[54]	恒定流	1	雨水口下泄流量	偏沟式雨水口的流量经验公式: $Q = \alpha Q_{*}^{1-b} h^b$ $\alpha = \frac{1.988A^{0.403}}{p^{0.19} (n_1+1)^{0.088} (n_1+1)^{0.012} (n_d+1)^{0.082}}$ $b = 1.346 \frac{L^{0.179}}{W^{0.394}}$
		安智敏等 ^[55]	恒定流	1	雨水口下泄流量	道路边侧平篦式雨水口的下泄流量经验公式: $Q = 0.9WC \sqrt{S} (h-\Delta h)^3 + 0.887L \sqrt{(h-\Delta h)^3}$
		胡维芬 ^[56]	恒定流	1	雨水口下泄流量	隧道横截沟雨水口的下泄流量经验公式: $Q = 1.375h - 0.004$
		吴鹏等 ^[57]	恒定流	1	流量系数	偏沟式雨水口的下泄流量公式: $Q = \mu A \sqrt{2gh}$ 对矩形格条 $\mu = 0.8643$, 对圆形格条 $\mu = 0.9497$
		陈倩等 ^[58]	恒定流	2/3	流量系数	无坡度道路平篦雨水口堰流和孔口出流公式: $Q = \mu P \sqrt{2g} H_1^{1.5} \quad \left(\mu = 0.072, H_1 = h + \frac{\alpha v^2}{2g} \right)$ $Q = \mu A \sqrt{2gH_1} \quad \left(\mu = 0.116, H_1 = h + D_0 + \frac{\alpha v^2}{2g} \right)$
上游径流	管道-地表的双排水	Rubinato 等 ^[59]	恒定流+非恒定流	1/6	检查井流量系数	检查井的堰流、孔口出流和反涌出流公式: $Q = \mu \pi D \sqrt{2gh^3} \quad (\mu = 0.493 \sim 0.587)$ $Q = \mu \pi Dh \sqrt{2g(h+Z_{crest}-h_p)} \quad (\mu = 0.054 \sim 0.057)$ $Q = \mu \pi Dh \sqrt{2g(h_p-h-Z_{crest})} \quad (\mu = 0.159 \sim 0.174)$
上游径流	地表到管道 单向排水 (多个雨水口)	Leandro 等 ^[60]	恒定流	1/30	流量系数	圆形雨水口下泄流量公式: $Q = \mu A \sqrt{2gh} \quad (\mu = 0.279 \sim 0.306)$
降雨	地表到管道 单向排水 (多个雨水口)	Lee 等 ^[61]	恒定流	1/10	流量系数	网格形雨水口的堰流和孔口出流公式: $Q = \mu L \sqrt{2gh^3} \quad (\mu = 0.48)$ $Q = \mu A \sqrt{2gh} \quad (\mu = 0.57)$
		Noh 等 ^[16]	恒定流+非恒定流	1/20	水位、流量	方形雨水口的堰流和孔口出流公式: $Q = 0.390(2L+2W) \sqrt{2gh^3}$ $Q = 0.740A_0 \sqrt{2gh}$

注: μ 为流量系数; Q 为雨水口下泄流量; Q_{*} 为上游来流量; L 为雨水口长度; W 为雨水口宽度; p 是空隙面积与格栅面积的比值; h 为来流水深; C 为谢才系数; S 为纵坡坡度; Δh 为雨水口内外侧高差; A 为雨水口总面积; n_1 为横栅个数; n_1 为纵栅个数; n_d 斜栅个数; g 为重力加速度; A_0 为泄流面积; D 为检修井直径; Z_{crest} 为地面高程; h_p 为检查井中水位; P 为湿周; H_1 为雨水口前 1 m 处的总水头; D_0 为侧支管形心到水槽底部的距离; α 为动能修正系数; v 为来流流速。

目前,大多数关于地表与管网交互流量系数的研究主要针对恒定流来展开,通过控制变量法研究了地表径流通过单一或多个雨水口下泄至地下管网的过程,以此分析道路雨水口下泄流量的影响参数。研究表明,雨水口下泄流量与雨水口前水深、流速、来流流量、雨水口形式(包括平篦形式、偏沟形式及立篦形式等)、栅条类型(包括横纵栅条、斜栅及曲栅等)、雨水口尺寸、道路横坡、纵坡以及地下管道内水压等因素相关;下泄流量随着横坡的增大而增大,随着纵坡的增大而减小,随着栅条角度的减少而增大^[54, 62-63]。在确定了雨水口下泄流量影响因素的基础上,安智敏等^[55-59]推导了不同形式雨水口(包括方孔形、圆孔形及栅格形等)的流量系数范围及经验公式(表3)。但需要注意的是,不同的试验条件下,雨水口的下泄流量公式及流量系数范围受

雨水口类型、道路坡度等因素的影响会有所差异。在开展数值模型研究时,可根据雨水口的实际情况并且参照表 3 中的对应雨水口试验条件来选取合适的参数开展模拟工作。

当水流为恒定流时,在数值模型中可通过堰流和孔口出流公式来较为合理地估算城市地表径流通过雨水口下泄入管网内水流的交互流量,但是在非恒定流的情况下,通过数值模型计算所得的交互流量大于物理模型的试验结果,这是由于在非恒定流的试验中产生了强烈的湍流效应,从而造成大量的水头损失,最终导致数值模拟结果偏大^[16,64]。因此,需开展相关试验来量化非恒定流的水头损失,以提高数值模型的准确性^[65]。

然而,已有的研究仍存在一定的局限性。例如,雨水口前水深的实测位置并未参照统一的标准来确定,导致现有交互流量公式的适用性有待提高。当地表的水深较浅时,径流并未覆盖整个雨水口区域。在超临界流条件下,部分试验忽略流速水头的假设已失效。此外,在试验过程中出现的水头损失也使结果存在一定的误差。

4 研究展望

a. 完善现有城市产汇流过程相关机理方面的试验研究。目前有关城市产汇流方面的试验研究大多定性地分析不同的下垫面类型对地表径流量、径流深和径流系数等的影响规律,同时有关城市产汇流过程对城市内涝的产生特征以及演化机制的试验研究略少。为此需开展包括下垫面的下渗相关参数、透水性以及植被类型和覆盖率等参数的机理推导,以便定量地分析地表产汇流过程,同时需要加强有关产汇流过程对城市内涝的产生特征及演化机制方面的物理试验研究,为城市内涝灾害的防治措施提供参考。

b. 深入研究地表与管网垂向交互过程。现有地表与管网垂向交互模型试验中,实测的稳定水深及流速的位置不同,导致部分流量经验公式的适用性不足,后期需加强流量系数试验中关于实测位置选取方面的论证研究,建立更适用于城市洪涝过程的雨水口下泄流量过程。除此之外,目前有关城市洪涝过程中检查井涌水的相关物理试验略少,建议今后应加强此方面的试验研究,为完善城市洪涝数值模拟过程提供基础。

c. 加强与城市洪涝期间的流动行为密切相关过程的定量试验研究。目前城市洪涝期间发生的“相关事件”的研究略少,包括估算进入建筑物或街区的水量,计算城市洪涝过程中漂浮物或者沉积物

的运输过程,淹没的街道中家具等的夹带流动分析等相关试验。对这些与城市洪涝期间的流动行为密切相关的过程进行定量的试验研究,有助于解开当前建模实践的关键瓶颈问题,从而为城市洪涝精细化模拟提供数据支撑。

参考文献:

[1] ARNELL N W, BROWN S, GOSLING S N, et al. The impacts of climate change across the globe: a multi-sectoral assessment [J]. Climatic Change, 2016, 134 (3): 457-474.

[2] WINSEMIUS H C, JONGMAN B, VELDKAMP T I, et al. Disaster risk, climate change, and poverty: assessing the global exposure of poor people to floods and droughts [M]. Berne: World Bank, 2015.

[3] SCHULZ K, BERNHARDT M. The end of trend-estimation for extreme floods under climate change [J]. Hydrological Processes, 2016, 30(11): 1804-1808.

[4] 夏军,刘春蓁,刘志雨,等. 气候变化对中国东部季风区水循环及水资源影响与适应对策[J]. 自然杂志, 2016, 38(3): 167-176. (XIA Jun, LIU Chunzhen, LIU Zhiyu, et al. Impact of climate change and adaptive strategy on terrestrial water cycle and water resources in East Monsoon Area of China [J]. Chinese Journal of Nature, 2016, 38(3): 167-176. (in Chinese))

[5] 张建云,王银堂,刘翠善,等. 中国城市洪涝及防治标准讨论 [J]. 水力发电学报, 2017, 36 (1): 1-6. (ZHANG Jianyun, WANG Yintang, LIU Cuishan, et al. Discussion on the standards of urban flood and waterlogging prevention in China [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2017, 36 (1): 1-6. (in Chinese))

[6] 许怡,吴永祥,王高旭,等. 伦敦城市洪水风险管理的启示[J]. 水利水电科技进展, 2019, 39(4):13-18. (XU Yi, WU Yongxiang, WANG Gaoxu, et al. Enlightenment of urban flood risk management in London [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2019, 39(4): 13-18. (in Chinese))

[7] 黄国如,罗海婉,卢鑫祥,等. 城市洪涝灾害风险分析与区划方法综述[J]. 水资源保护, 2020, 36 (6): 1-6. (HUANG Guoru, LUO Haiwan, LU Xinxiang, et al. Study on risk analysis and zoning method of urban flood disaster [J]. Water Resources Protection, 2020, 36 (6): 1-6. (in Chinese))

[8] 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 Xiaomeng, ZHANG Jianyun, WANG Guoqing, 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. (in Chinese))

- [9] 姜付仁. 日本2018年7月特大洪灾及其应对[J]. 中国防汛抗旱, 2018, 28(8): 9-12. (JIANG Furen. Japan's devastating floods in July 2018 and its response to them[J]. China Flood & Drought Management, 2018, 28(8): 9-12. (in Chinese))
- [10] 师钰, 陈安. 日本2018年洪灾机理分析与应对策略[J]. 中国防汛抗旱, 2018, 28(9): 68-71. (SHI Yu, CHEN An. Mechanism analysis and countermeasures of Japan flood in 2018[J]. China Flood & Drought Management, 2018, 28(9): 68-71. (in Chinese))
- [11] 马啸. 2017年全国洪涝灾情综述[J]. 中国防汛抗旱, 2018, 28(8): 60-66. (MA Xiao. Review on flood disaster in China in 2017[J]. China Flood & Drought Management, 2018, 28(8): 60-66. (in Chinese))
- [12] 马建明, 喻海军, 张大伟, 等. 洪水分析软件在洪水风险图编制中的应用[J]. 中国水利, 2017(5): 17-20. (MA Jianming, YU Haijun, ZHANG Dawei, et al. Adoption of evaluation software in flood risk map drawing[J]. China Water Resources, 2017(5): 17-20. (in Chinese))
- [13] 毛献忠, 龚春生, 张锡辉. 城市湖泊暴雨过程中蓄洪能力研究[J]. 水力发电学报, 2010, 29(3): 119-125. (MAO Xianzhong, GONG Chunsheng, ZHANG Xihui. Flood storage capacity of urban lake during rainstorm[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2010, 29(3): 119-125. (in Chinese))
- [14] 宋耘, 李琼芳, 牛铭媛, 等. 基于SWMM模型的南京典型易涝区暴雨内涝模拟[J]. 水利水电科技进展, 2019, 39(6): 56-61. (SONG Yun, LI Qiongfang, NIU Mingyuan, et al. Rainstorm and waterlogging simulation in typical inundated districts of Nanjing based on SWMM[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2019, 39(6): 56-61. (in Chinese))
- [15] 龚政, 郭蕴哲, 杭俊成, 等. 沿海城市溃堤洪水模拟技术研究进展[J]. 水利水电科技进展, 2020, 40(3): 78-85. (GONG Zheng, GUO Yunzhe, HANG Juncheng, et al. Advances in dike-breaking flood simulation technology in coastal cities[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2020, 40(3): 78-85. (in Chinese))
- [16] NOH S J, LEE S, AN H, et al. Ensemble urban flood simulation in comparison with laboratory-scale experiments; impact of interaction models for manhole, sewer pipe, and surface flow[J]. Advances in Water Resources, 2016, 97: 25-37.
- [17] 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))
- [18] RONALDS R, ROWLANDS A, ZHANG H. On-site stormwater detention for Australian development projects: Does it meet frequent flow management objectives? Water Science and Engineering, 2019, 12(1): 1-10.
- [19] 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))
- [20] 岑国平, 沈晋, 范荣生, 等. 城市地面产流的试验研究[J]. 水利学报, 1997, 28(10): 48-53. (CEN Guoping, SHEN Jin, FAN Rongsheng, et al. Experimental study on urban surface runoff yield[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1997, 28(10): 48-53. (in Chinese))
- [21] 刘慧娟, 卫伟, 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 Huijuan, WEI Wei, WANG Jinman, et al. Experimental study on typical city underlyings runoff process[J]. Resources Science, 2015, 37(11): 2219-2227. (in Chinese))
- [22] ABBOTT C, COMINO-MATEOS L. In-situ hydraulic performance of a permeable pavement sustainable urban drainage system[J]. Water and Environment Journal, 2003, 17(3): 187-190.
- [23] 游宇, 车伍, 张伟, 等. 8种园林乔木林冠对雨水截留作用的研究[J]. 中国给水排水, 2018, 34(9): 121-127. (YOU Yu, CHE Wu, ZHANG Wei, et al. Effect of rainfall interception by eight species of garden arbors[J]. China Water & Wastewater, 2018, 34(9): 121-127. (in Chinese))
- [24] 杨霄. 关中地区城市下垫面雨水入渗性能的研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2015.
- [25] 檀海洋. 不同功能区城市土壤理化性质及入渗特性研究[D]. 合肥: 安徽理工大学, 2015.
- [26] 赵云鹏, 白一茹, 王幼奇, 等. 城市绿地覆盖砂石后土壤水分入渗过程及模型分析[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2017, 45(7): 66-72. (ZHAO Yunpeng, BAI Yiru, WANG Youqi, et al. Investigating and modeling soil infiltration process with gravel mulch on urban green space[J]. Journal of Northwest A & F University(Natural Science Edition), 2017, 45(7): 66-72. (in Chinese))
- [27] 刘家宏, 王东, 李泽锦, 等. 厦门海绵化改造区入渗性能测定及特征[J]. 水资源保护, 2019, 35(6): 9-13. (LIU Jiahong, WANG Dong, LI Zejin, et al. Measurement and characteristic analysis of infiltration performance in Xiamen spongification reconstruction area[J]. Water Resources Protection, 2019, 35(6): 9-13. (in Chinese))
- [28] 张书函, 陈建刚, 赵飞, 等. 基于入渗产流分析的透水砖地面铺装结构试验[J]. 水利水电科技进展, 2011, 31(5): 39-42. (ZHANG Shuhan, CHEN Jiangang, ZHAO Fei, et al. Experimental study on pavement structure of pervious bricks based on infiltration and runoff

- generation analysis [J]. *Advances in Science and Technology of Water Resources*, 2011, 31(5): 39-42. (in Chinese))
- [29] VALINSKI N A, CHANDLER D G. Infiltration performance of engineered surfaces commonly used for distributed stormwater management [J]. *Journal of Environmental Management*, 2015, 160:297-305.
- [30] 张阳维, 侯精明, 齐文超, 等. 透水铺装下渗率对降雨及地形特征的响应机制研究[J]. *给水排水*, 2018, 54(增刊2): 121-127. (ZHANG Yangwei, HOU Jingming, QI Wenchao, et al. Experimental study for effects of rainfall and terrain features on infiltration rate of permeable pavement [J]. *Water & Wastewater Engineering*, 2018, 54(Sup2): 121-127. (in Chinese))
- [31] MAI Y, ZHANG M, CHEN W, et al. Experimental study on the effects of LID measures on the control of rainfall runoff [J]. *Urban Water Journal*, 2019, 15(9):1-10.
- [32] SCHUBERT J E, SANDERS B F. Building treatments for urban flood inundation models and implications for predictive skill and modeling efficiency [J]. *Advances in Water Resources*, 2012, 41: 49-64.
- [33] MIGNOT E, PAQUIER A, HAIDER S. Modeling floods in a dense urban area using 2D shallow water equations [J]. *Journal of Hydrology*, 2006, 327(1/2): 186-199.
- [34] EL KADI ABDERREZZAK K, LEWICKI L, PAQUIER A, et al. Division of critical flow at three-branch open-channel intersection [J]. *Journal of Hydraulic Research*, 2011, 49(2): 231-238.
- [35] NANÍA L S, GÓMEZ M, DOLZ J, et al. Experimental study of subcritical dividing flow in an equal-width, four-branch junction [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2011, 137(10): 1298-1305.
- [36] RIVIÈRE N, TRAVIN G, PERKINS R J. Subcritical open channel flows in four branch intersections [J]. *Water Resources Research*, 2011, 47(10): 1-10.
- [37] VELICKOVIC M, ZECH Y, SOARES-FRAZÃO S. Steady-flow experiments in urban areas and anisotropic porosity model [J]. *Journal of Hydraulic Research*, 2017, 55(1): 85-100.
- [38] MIGNOT E, BONAKDARI H, KNOTHE P, et al. Experiments and 3D simulations of flow structures in junctions and their influence on location of flowmeters [J]. *Water Science and Technology*, 2012, 66(6): 1325-1332.
- [39] NANÍA L S, GONZALO R, GÓMEZ M. Influence of channel width on flow distribution in four-branch junctions with supercritical flow: experimental approach [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2013, 140(1): 77-88.
- [40] ARRAULT A, FINAUD-GUYOT P, ARCHAMBEAU P, et al. Hydrodynamics of long-duration urban floods: experiments and numerical modelling [J]. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 2016, 16(6): 1413-1429.
- [41] FINAUD-GUYOT P, GARAMBOIS P A, ARAUD Q, et al. Experimental insight for flood flow repartition in urban areas [J]. *Urban Water Journal*, 2018, 15(3): 242-250.
- [42] SOARES-FRAZÃO S, ZECH Y. Experimental study of dam-break flow against an isolated obstacle [J]. *Journal of Hydraulic Research*, 2007, 45(Sup1): 27-36.
- [43] LHOMME J, SOARES-FRAZÃO S, GUINOT V, et al. Modélisation á grande échelle des inondations urbaines et modèle 2D à porosité [J]. *La Houille Blanche*, 2007(4): 104-110. (in French)
- [44] TESTA G, ZUCCALA D, ALCRUDE F, et al. Flash flood flow experiment in a simplified urban district [J]. *Journal of Hydraulic Research*, 2007, 45(Sup1): 37-44.
- [45] 黄琼, 张倩, 彭勇. 基于概化模型的城市洪水水力特性试验研究[J]. *西南民族大学学报(自然科学版)*, 2016, 42(2): 229-236. (HUANG Qiong, ZHANG Qian, PENG Yong. Experimental study on hydraulic characteristics of the urban flood based on generalized models [J]. *Journal of Southwest University for Nationalities (Natural Science Edition)*, 2016, 42(2): 229-236. (in Chinese))
- [46] HUANG C J, HSU M H, TENG W H, et al. The impact of building coverage in the metropolitan area on the flow calculation [J]. *Water*, 2014, 6(8): 2449-2466.
- [47] ZHOU Q, YU W, CHEN A S, et al. Experimental assessment of building blockage effects in a simplified urban district [J]. *Procedia Engineering*, 2016, 154(8):44-52.
- [48] LIU L, SUN J, LIN B, et al. Building performance in dam-break flow: an experimental study [J]. *Urban Water Journal*, 2018, 15(3): 251-258.
- [49] SMITH G P, RAHMAN P F, WASKO C. A comprehensive urban floodplain dataset for model benchmarking [J]. *International Journal of River Basin Management*, 2016, 14(3): 345-356.
- [50] STURM M, GEMS B, KELLER F, et al. Experimental measurements of flood-induced impact forces on exposed elements [J]. *Proceedings of the E3S Web of Conferences*, 2018, 77(5):40-45.
- [51] GÜNEY M, TAYFUR G, BOMBAR G, et al. Distorted physical model to study sudden partial dam break flows in an urban area [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2014, 140(11):1-12.
- [52] LAROCQUE L A, ELKHOLY M, HANIF CHAUDHRY M, et al. Experiments on urban flooding caused by a levee breach [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2013, 139(9): 960-973.
- [53] BERETTA R, RAVAZZANI G, MAIORANO C, et al. Simulating the influence of buildings on flood inundation in urban areas [J]. *Geosciences*, 2018, 8(2): 77-83.
- [54] GÓMEZ M, RUSSO B. Methodology to estimate hydraulic efficiency of drain inlets [J]. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Water Management*, 2011, 10:40-45. (下转第94页)