

潘婧, 陈燕, 唐伟, 等. 基于 InfoWorks ICM 的临安亚运场馆暴雨内涝模拟研究[J]. 水利水电技术(中英文), 2023, 54(6): 12-21.

PAN Jing, CHEN Yan, TANG Wei, et al. InfoWorks ICM-based simulative study on rainstorm waterlogging for Asian Games venues in Lin'an District[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2023, 54(6): 12-21.

# 基于 InfoWorks ICM 的临安亚运场馆 暴雨内涝模拟研究

潘婧<sup>1,2</sup>, 陈燕<sup>1,2</sup>, 唐伟<sup>3</sup>, 王锣洋<sup>1,2</sup>, 王品<sup>1,2</sup>, 胡潭高<sup>1,2</sup>

(1. 杭州师范大学 遥感与地球科学研究所, 浙江 杭州 311121; 2. 浙江省城市湿地与区域变化研究重点实验室, 浙江 杭州 311121; 3. 浙江省测绘科学技术研究所, 浙江 杭州 311100)

**摘要:**【目的】杭州亚运会举办期间正值汛期, 亚运场馆及其周边区域内涝灾害风险显著增加, 以水文水动力模型为支撑的暴雨内涝模型是预防、降低重点区域内涝灾害损失的重要手段。【方法】以临安区亚运场馆为例, 运用 InfoWorks ICM 模型, 构建核心区域的一维-二维暴雨内涝耦合模型。以 2022 年 7 月 31 日、2022 年 9 月 13 日两场实测降雨对模型进行参数率定验证。在此基础上模拟不同设计降雨重现期下(10 a、20 a、50 a 和 100 a)的积水情景, 分析核心区域的主要内涝点和成因, 从而为预防城市内涝灾害提供决策依据。【结果】结果表明: 模型的相对误差范围为 11.11%~17.65%, 表明其具有一定的可靠性。在不同设计降雨重现期下, 受地形与排水管径大小等因素的影响, 九州街与秀泉路路段积涝情况均比较严重。在重现期大于 20 a 时, 亚运场馆西侧道路上出现深度大于 0.40 m 的积水, 并随着重现期增大, 积水面积也不断扩大; 在降雨重现期为 100 a 的情况下, 九州街与秀泉路路段积水最深达 58 cm, 积水面积为 13.68 hm<sup>2</sup>。【结论】临近场馆道路的大面积积水对赛事的顺利举行将会带来一定挑战。建议增加周边商业地块与住宅区的绿地等透水面积, 并在积涝危险程度较大处设置排水泵。研究成果对解决城市内涝问题、制定相关策略具有参考价值。

**关键词:** InfoWorks ICM; 暴雨内涝; 亚运场馆; 临安区; 气候变化; 降雨; 内涝灾害损失; 积涝风险

DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2023.06.002

开放科学(资源服务)标志码(OSID):

中图分类号: TV213.4

文献标志码: A

文章编号: 1000-0860(2023)06-0012-10



与作者互动  
浙语音聊科研

## InfoWorks icm-based simulative study on rainstorm waterlogging for Asian Games venues in Lin'an District

PAN Jing<sup>1,2</sup>, CHEN Yan<sup>1,2</sup>, TANG Wei<sup>3</sup>, WANG Luoyang<sup>1,2</sup>, WANG Pin<sup>1,2</sup>, HU Tangao<sup>1,2</sup>

(1. Institute of Remote Sensing and Earth Sciences, Hangzhou Normal University, Hangzhou 311121, Zhejiang, China;

2. Zhejiang Provincial Key Laboratory of Urban Wetlands and Regional Change, Hangzhou 311121, Zhejiang, China;

3. Zhejiang Institute of Surveying and Mapping Science and Technology, Hangzhou 311100, Zhejiang, China)

收稿日期: 2022-12-01; 修回日期: 2022-12-29; 录用日期: 2023-12-30; 网络出版日期: 2023-03-17

基金项目: 国家高分辨率对地观测重大科技专项项目(5-Y30B01-9001-19/20-4); 浙江省基础公益研究计划项目(LY19D010004)

作者简介: 潘婧(2001—), 女, 助理研究员, 学士, 主要从事土地利用变化和城市内涝相关研究。E-mail: panjing2001@stu.hznu.edu.cn

通信作者: 胡潭高(1983—), 男, 教授, 博士, 主要从事土地利用变化和城市内涝相关研究。E-mail: hutangao@hznu.edu.cn

©Editorial Department of Water Resources and Hydropower Engineering. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license.

**Abstract:** [Objective] The Hangzhou Asian Games is held just in a flood season, and then the risk of waterlogging disaster risk at Asian Games venues and their surrounding areas increase significantly, for which the hydrology-hydrodynamic model-based rainstorm waterlogging model is an important means to prevent and reduce the losses in the relevant key areas from waterlogging disaster. [Methods] Taking the Asian Games venues in Lin'an District as the study case, a 1D~2D waterlogging coupling model for the core area is established with InfoWorks ICM model. The model parameters are calibrated and verified by the measured data of the rainfalls occurred on July 31, 2022 and September 13, 2022. On the basis of this, the water ponding scenarios under different design rainfall return periods (10a, 20a, 50a and 100a) are simulated, and then the main water ponding points and their causations are analyzed as well, so as to provide the decision-making basis for preventing the urban waterlogging disaster therein. [Results] The result shows that the relative error range of the model is 11.11%~17.65%, which indicates that it has certain reliability. Under the conditions of different design rainfall return periods, both the water ponding situations in the areas of Jiuzhou Street and Xiuquan Road are relatively serious under the influences from the factors of topography and drain pipe diameter, etc. When the return period is greater than 20 years, there will be ponding with a depth of more than 0.40 m on the road on the west side of the Asian Games venue, and with the increase of the return period, the area of ponding will continue to expand. Under the condition of the rainfall return period of 100a, the maximum depth of water ponding is to be 58 cm with the area of 13.68 hm<sup>2</sup> in Jiuzhou Street and Xiuquan Road. [Conclusion] The large area of ponding near the venue road will bring certain challenges to the smooth holding of the event. It is suggested to increase the area of the permeable surfaces such as green areas in the surrounding commercial and residential areas and arrange drain pumps at the places with greater waterlogging risk.

**Keywords:** InfoWorks ICM; rainstorm waterlogging; Asian Games venues; Lin'an District; climate change; rainfall; loss of waterlogging disaster; waterlogging risk

## 0 引言

近年来,受全球气候变化影响,我国各地的降水量、降水频度和降水强度发生了改变,极端降水事件逐年增加<sup>[1]</sup>。同时,快速城市化进程导致城市不透水面增加,加上人为改变原始水文条件,使得城市内涝灾害不断加剧<sup>[2-3]</sup>。作为现代化都市和 2022 年亚运会承办城市,杭州市深受城市内涝灾害的困扰,据杭州市应急管理局统计,2020 年梅汛期期间杭州市总计 20.7 万人受灾,直接经济损失约 25.31 亿元<sup>[4]</sup>。2021 年 8 月,杭州市最大小时雨强达 40 mm<sup>[5]</sup>,杭州市内多处道路出现严重积水,极大影响了道路正常通行与人民生命财产安全。杭州亚运会将于 2023 年梅汛期期间举办,有效的应对内涝风险,保障亚运会顺利举办,对于提升城市形象、确保人民生命财产安全具有重要意义。因此,构建亚运场馆及其周边地区的暴雨内涝监测预警模型,从而实现暴雨内涝风险的预测与有效治理,对于提升城市管理水平具有重要意义。

目前,城市雨洪模型被广泛用于城市暴雨内涝模拟。国内主要的雨洪模型包括城市雨水管道计算模型(SSCM)<sup>[6]</sup>,城市雨水径流模型(CSYJM)<sup>[7]</sup>,平原城市雨洪模型<sup>[8]</sup>,分布式城市雨洪模型等<sup>[9]</sup>,这些模型大多缺乏良好的前、后处理程序,主要是基于某一特定区域应用研发,未进行大范围推广,没有得到广

泛使用<sup>[10]</sup>。现在,国内外广泛应用的雨洪模型主要为 SWMM 模型、MIKE 系列模型和 InfoWorks ICM 模型等<sup>[11]</sup>。SWMM 模型是美国环保局于 1971 年研制开发的一款能够对城市降雨径流过程进行完整模拟的水文模型,被大量运用于城市区域降雨事件的模拟<sup>[12-14]</sup>。MIKE 系列模型(MIKE 21, MIKE Urban, MIKE FLOOD 等)是由丹麦水力研究所(DHI)研发,被广泛用于城市径流、管道水流和暴雨事件模拟<sup>[15-16]</sup>。InfoWorks ICM 是由 Wallingford 公司开发的 InfoWorks 系列模型中最新推出的独立引擎软件,该软件将城市排水管网及河道一维水力模型与区域二维雨洪淹没模型相结合,在城市雨洪模拟方面应用效果良好<sup>[17-19]</sup>。CHOO 等<sup>[20]</sup>使用 SWMM 模型在韩国釜山的 Oncheon 和 Suyeong 流域构建城市内涝模型,通过设置不同的条件,分析不同减洪方法的效果;常晓栋等<sup>[21]</sup>基于 SWMM 模型构建了北京市清河流域城市雨洪模型,进行多场次暴雨模拟,并对结果进行分析,得到模型有较好适用性的结论。TANSAR 等<sup>[22]</sup>基于 MIKE 11 和 MIKE 21 分别构建了泰国 Ping River 流域下游的一维河道模型和二维水动力模型,并采用 MIKE FLOOD 耦合模拟不同重现期下研究区的淹没范围和积水深度;陈融旭等<sup>[23]</sup>以濮阳市为研究区,构建了基于 MIKE FLOOD 平台的一二维耦合模型,模拟极端降雨下濮阳市的内涝风险情况。王滢等<sup>[24]</sup>借助 InfoWorks ICM 软件构建吉安市排水系统水力模型,

进行排水能力与风险评估, 针对各内涝点提出改造意见, 辅助制定吉安市的最优内涝治理方案; SIDEK 等<sup>[25]</sup>利用 InfoWorks ICM 构建了马来西亚 Damansara 流域的城市内涝模型, 并用实测数据进行验证, 研究结果显示, 构建的模型具有较好的模拟精度。

整体来看, SWMM、MIKE 系列模型以及 InfoWorks ICM 模型在城市内涝模拟中均广为使用, 但是相较于 SWMM 模型只能进行一维排水管网的模拟, MIKE 系列模型和 InfoWorks ICM 模型均能够实现一维与二维模型的有效耦合, 但是 MIKE 系列模型的一二维耦合需要借助 MIKE FLOOD 模型实现, InfoWorks ICM 则可以在单个模拟引擎里实现一二维耦合。目前, InfoWorks ICM 已在评估现状排水系统的性能<sup>[26]</sup>、控制模拟城市降雨径流<sup>[27]</sup>、预报预测城市洪涝灾害<sup>[28-29]</sup>等诸多方面得到了广泛应用。因此, 研究选用 InfoWorks ICM 模型进行城市内涝模型构建。此外, 目前国内外关于亚运场馆内涝建模的研究较少, 本研究以广泛使用的 InfoWorks ICM 进行临安亚运场馆的内涝建模, 不仅实现了亚运场馆内涝建模, 而且研究具有一定的推广意义, 可以作为模板供其他亚运场馆乃至其他国际赛事场馆参考。

本文以承办杭州 2022 年第 19 届亚运会跆拳道和摔跤项目的杭州市临安区体育文化会展中心及其周边区域为研究区, 基于 InfoWorks ICM 模型构建

社区尺度的一维-二维暴雨内涝耦合模型, 利用历史降雨与实测数据进行模型率定与验证, 并进行不同情景场次降雨模拟, 分析内涝点成因, 提出改造对策与建议, 以保障亚运会期间场馆安全以及后续使用。

## 1 研究区及数据

### 1.1 研究区概况

研究区 (30°11'49"N—30°12'18"N, 119°41'07"E—119°41'42"E) 地处杭州市临安区锦南新城, 东起云锦路、西至秀溪、北起九州街、南至文景街, 是以临安区体育文化会展中心为核心的一个相对独立的汇水单元, 域内地势东高西低, 总面积 51.14 ha, 高程范围为 49.61~89.63 m, 域内地势东高西低, 区域内来水由排水管道汇集向西排入秀溪。研究区属亚热带季风气候, 年均降雨量丰富, 达 1 613.9 mm, 降雨集中在夏季, 每年的梅雨季节及台风季节所带来的大暴雨都会造成不可避免的内涝灾害<sup>[30]</sup>。

研究区内布设有雨量桶, 可以监测暴雨来临时研究区降雨情况。临安区体育文化会展中心将承办第 19 届亚运会跆拳道和摔跤项目, 建立该区域的城市内涝模型不仅对亚运会期间保障场馆及其周边安全具有重要意义, 而且能够为今后该地区的准确灾情预报和有效应急管理提供保障。

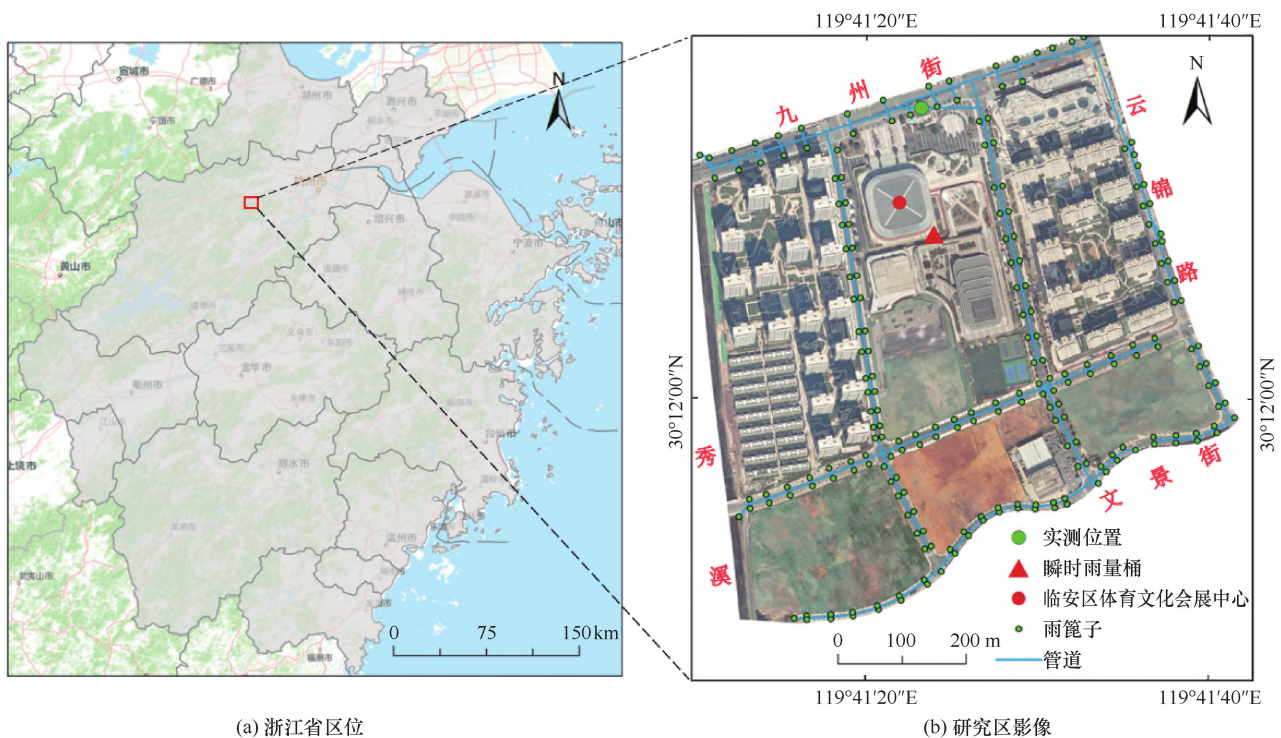


图 1 研究区概况

Fig. 1 Overview of the study area

## 1.2 数据

### 1.2.1 基础地理数据

基础地理数据包括高精度数字高程模型 (Digital Elevation Model, DEM)、高分辨率遥感影像和土地利用数据。DEM 数据为经过处理后得到的 2 m 分辨率的栅格文件, 作为模型地面输入参数; 高分辨率遥感影像是于 2022 年 3 月获得的无人机影像, 空间分辨率为 0.2 m。在高分辨率遥感影像基础上, 采用人工目视解译的方法, 获取道路、建筑、裸地、绿地和其他 5 类土地利用数据, 作为研究区内的产流表面。

### 1.2.2 管网数据

管网数据来源于临安区城市管理局。研究区管道总长 5 687.3 m, 经过概化后共有 335 段管道, 337 个节点, 其中节点数据包括节点编号、节点坐标和节点高程等信息, 管道数据包含管道编号、管径、管材和上下游底标高等信息。

### 1.2.3 历史降雨和实测数据

历史降雨数据为“2022 年 7 月 31 日”和“2022 年 9 月 13 日”两场降雨过程, 来自于研究区内布设的雨量桶, 其每 10 min 记录一次数据。实测数据为两场降雨期间的积涝点现场实测积水深度数据。

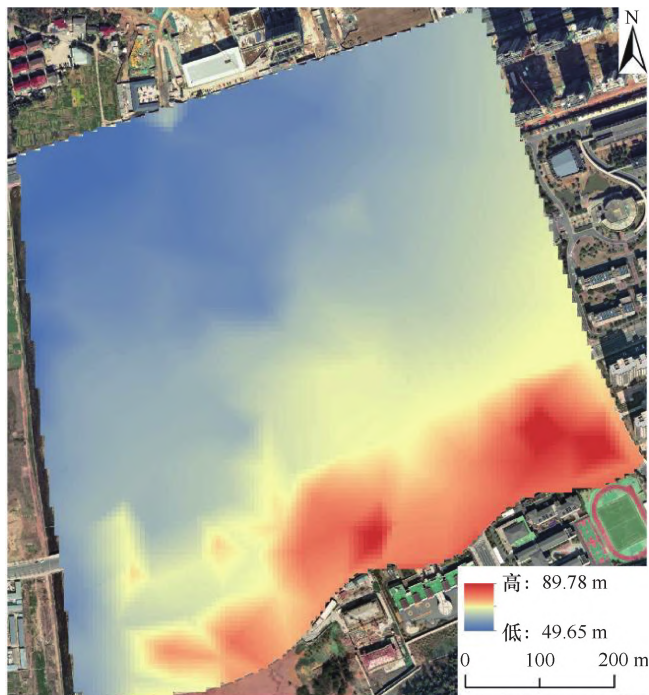


图 2 研究区 DEM

Fig. 2 DEM of the study area

## 2 研究方法

### 2.1 模型构建

#### 2.1.1 子汇水区划分

InfoWorks ICM 模型的构建需要先进行子汇水区划分。子汇水区的划分结果与降雨的汇流过程密切相关, 为了合理划分子汇水区, 使所构建模型的模拟结果更加符合实际, 研究根据概化后的雨篦子使用泰森多边形法自动生成子汇水区, 再综合考虑研究区内道路、建筑分布情况, 进行手动调整, 最终得到 207 个子汇水区。

子汇水区是由不同比例的土地利用类型概化的 5 类产流表面所组成, 5 种不同产流表面的相关属性如表 1 所列。

#### 2.1.2 一维管网模型

InfoWorks ICM 通过完全求解圣维南方程组进行一维管道内的水流扩散与传输的模拟, 圣维南方程组的数学表达式如下

$$\begin{cases} \frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = 0, \\ \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{Q^2}{A} \right) + gA \left( \cos\theta \frac{\partial h}{\partial x} - S_0 + \frac{Q|Q|}{K^2} \right) = 0 \end{cases} \quad (1)$$

式中,  $A$  为管道断面面积 ( $\text{m}^2$ );  $Q$  为流量 ( $\text{m}^3/\text{s}$ );



图 3 子汇水区划分

Fig. 3 The subcatchment of the study area

表 1 5 种不同产流表面相关参数属性

Table 1 Related parameters attributes of five different types of runoff surface

产流表面编号	产流表面	径流量类型	固定径流系数	初损类型	初期损失值/m	汇流模型	汇流参数	总面积/hm <sup>2</sup>
1	道路	Fixed	0.90	Abs	0.0015	SWMM	0.020	7.40
2	建筑	Fixed	0.85	Abs	0.0010	SWMM	0.020	7.99
3	裸地	Horton	—	Abs	0.0030	SWMM	0.030	3.53
4	绿地	Horton	—	Abs	0.0025	SWMM	0.040	17.49
5	其他	Fixed	0.85	Abs	0.0015	SWMM	0.020	14.73

$t$  为时间(s);  $x$  为管道沿水流方向的长度(m);  $g$  为重力加速度( $m^2/s$ );  $\theta$  为管道中心线与水平线的夹角( $^\circ$ );  $h$  为水位(m);  $S_0$  为渠底坡度;  $K$  为输水率, 由曼宁公式确定。

首先, 将概化后的管网数据输入 InfoWorks ICM, 并通过软件提供的工具来检查管线是否连通; 然后, 将划分好的子汇水区数据输入模型中, 根据土地利用类型输入不同产流表面的相关属性, 并利用面积自动提取工具自动计算出每个子汇水区的不同产流表面比例; 最后, 输入降水数据, 进行一维模拟计算。

### 2.1.3 二维淹没模型

Infoworks ICM 在模拟二维淹没时是基于 TIN 通过有限体积法求解浅水方程, 该方程忽略了水流在垂直方向上的流动, 仅保留水平方向上的流动。模拟时采用的浅水控制方程如下所示

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial(hu)}{\partial x} + \frac{\partial(hv)}{\partial y} = q_{1D} \quad (2)$$

$$\frac{\partial(hu)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left( hu^2 + \frac{gh^2}{2} \right) + \frac{\partial(huv)}{\partial y} = S_{0,x} - S_{f,x} + q_{1D}u_{1D} \quad (3)$$

$$\frac{\partial(hv)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left( hv^2 + \frac{gh^2}{2} \right) + \frac{\partial(huv)}{\partial x} = S_{0,y} - S_{f,y} + q_{1D}v_{1D} \quad (4)$$

式中,  $h$  为水深(m);  $u$ 、 $v$  分别为  $x$ 、 $y$  方向上的流速分量( $m/s$ );  $S_{0,x}$ 、 $S_{0,y}$  分别为  $x$ 、 $y$  方向上的底坡分量( $m^2/s$ );  $S_{f,x}$ 、 $S_{f,y}$  分别为  $x$ 、 $y$  方向上的摩阻分量( $m^2/s$ );  $q_{1D}$  为单位面积出流量( $m^3/s$ );  $u_{1D}$ 、 $v_{1D}$  分别为  $q_{1D}$  在  $x$ 、 $y$  方向上的速度分量( $m/s$ )。

构建二维淹没模型需要根据研究区大小确定二维区间的计算区域。利用模型自带的网格生成器生成研究区三角网格, 网格中最大三角形面积为  $50 m^2$ , 最小三角形面积为  $25 m^2$ 。屋面高于地面, 被认为是不透水区域, 因此将其设置为空白区; 路面通常低于两侧人行道, 为模拟真实场景, 将其设置为网格化区间, 调整其最大三角网面积为  $10 m^2$ , 根据研究区道路路缘实际高度, 并通过查询相关资料<sup>[31-32]</sup>,

统一将路面高程降低  $15 cm$ , 模拟道路的行洪作用。

### 2.2 降雨情景设计

考虑到不同重现期对积水深度和积水面积的影响, 设置不同的降雨情景。设计降雨采用芝加哥雨型, 其他参数参考浙江省住房和城乡建设厅发布的《暴雨强度计算标准》(DB33/T 1191—2020) 中最新公布的临安区暴雨强度公式, 公式如下<sup>[33]</sup>

$$q = \frac{2763.132 \times (1 + 0.399 \lg P)}{(t + 10.870)^{0.753}} \quad (5)$$

式中,  $q$  为设计暴雨强度 [ $L/(s \cdot hm^2)$ ];  $t$  为降雨历时(min);  $P$  为设计重现期(a)。

研究选择重现期为 10 a 一遇、20 a 一遇、50 a 一遇、100 a 一遇四种降雨情景进行分析, 设计降雨时间间隔为  $5 min$ , 降雨总历时为  $120 min$ , 雨峰系数为  $0.4$ 。

### 2.3 模型率定和验证

为了保证模型模拟结果的准确性和可靠性, 使用人工试错法对模型进行率定。首先查询相关文献资料, 初始化模型参数; 然后选择“2022 年 7 月 31 日”和“2022 年 9 月 13 日”两场实测降雨进行积水深度模拟, 以实测积水深度数据与模拟结果数据的相对误差  $\delta$  为指标来调整模型参数, 直到相对误差在一个合理的范围<sup>[34]</sup>。相对误差公式如下

$$\delta = \frac{\Delta}{\mu} \times 100\% \quad (6)$$

式中,  $\delta$  为实际相对误差(%);  $\Delta$  为绝对误差(cm);  $\mu$  为真值(cm)。

## 3 结果与分析

### 3.1 模拟结果

#### 3.1.1 实测降雨模拟结果

为满足模型关键参数率定和验证准确性的要求, 采用 2022 年 9 月 13 日场次的实测降雨进行模型率定, 将得到的模拟积水深度与实测积水深度进行对比, 并计算相对误差, 之后再采用 2022 年 7 月 31 日场次的实测降雨进行模型验证。模型率定和验证得到水深模拟结果和误差统计如表 2 所列。模拟结果显

示,模型的相对误差范围为 11.11%~17.65%,表明模拟过程与实际变化趋势基本一致,证明该模型有较好的模拟效果和较高的可信度,能够进行内涝模拟研究。

表 2 水深模拟结果与误差统计

Table 2 Simulated and error statistics of water depth

时 期	实测时间 /年-月-日 T 时:分	实际水深/cm	模拟水深/cm	水深误差/cm	相对误差/%
率定期	2022-09-13 T 13:29	1.5	1.7	0.2	13.33
	2022-09-13 T 13:35	3.4	2.9	-0.5	-14.71
	2022-09-13 T 15:13	2.7	3.0	0.3	11.11
	2022-09-13 T 18:21	0.0	3.0	3.0	—
验证期	2022-07-31 T 17:12	1.4	1.2	-0.2	-14.29
	2022-07-31 T 17:15	1.7	1.4	-0.3	-17.65
	2022-07-31 T 17:24	0.0	0.4	0.4	—
	2022-07-31 T 18:00	0.0	0.1	0.1	—

### 3.1.2 设计降雨模拟结果

在完成验证的模型基础上,将不同重现期的设计降雨序列依次输入模型进行计算,设置时间步长为 1 min,运行 360 min 后统计不同重现期下最大积水深度情况。统计结果如表 3 所列,图 4 为不同重现期下的最大淹没场景。

表 3 不同设计降雨模拟结果

Table 3 Simulation results under different return periods

重现期/a	总降雨量 /mm	最大雨强 /mm·h <sup>-1</sup>	最大积水 深度/m	积水面积 /hm <sup>2</sup>
10	71.06	230.76	0.356	9.56
20	77.16	250.56	0.426	10.72
50	85.22	276.78	0.506	12.31
100	91.32	296.58	0.58	13.68

从模拟结果可以看出,在重现期为 10 a、20 a、50 a、100 a 的情况下,最大积水深度分别为 0.356 m、0.426 m、0.506 m、0.58 m,总积水面积分别为 9.56 hm<sup>2</sup>、10.72 hm<sup>2</sup>、12.31 hm<sup>2</sup>、13.68 hm<sup>2</sup>。

### 3.2 模拟结果分析

由模拟结果可以发现,随着设计暴雨重现期增大,研究区域的积水范围明显增加,积水深度亦呈现出增加趋势,内涝灾害明显加重,不同降雨情景设计下研究区范围内出现了不同程度的积水,但内涝趋势仍然具有一致性。

由图 2 可以看到,随着降雨重现期的不断增大,在积水范围方面,积水从最初的临安亚运场馆以北的九州街逐渐向四周,特别是向场馆东西两侧的秀泉路和双拥路扩散;整体来看,位于研究区下游的九州街与秀泉路的积水程度比较严重,主要原因是这两条街

道地势较低,且部分管道管径较小,为 200 mm,但汇水量大,管道排水压力大,路面积水程度严重。最大积水深度区域的分布也具有相似性,不同重现期下均位于亚运场馆西面的秀泉路上,这在一定程度上将会对交通安全与场馆运营造成不利影响。

已有研究表明,当路面积水深度大于 0.04 m 时,对行人和路面交通就会造成一定影响;当深度大于 0.10 m 时,行人必须趟水,车辆行驶减缓,对行人和路面交通造成较大的不便;当深度大于 0.20 m 时,路面积水较为严重,行人通行极不安全,汽车行驶速度缓慢且随时可能熄火;而当深度大于 0.40 m 时,行人生命安全受到极大威胁,车辆直接熄火并造成交通堵塞,路边建筑物也受到影[31]。从模拟结果可以看出,临安亚运场馆周边的排水系统能够较好的应对一定强度的降水,在重现期大于 10 a 时,场馆周边道路会有较大范围的深度大于 0.04 m 的积水出现,将会对道路安全以及周边的财产安全造成威胁。在重现期大于 20 a 时,亚运场馆西侧道路上出现深度大于 0.40 m 的积水,并随着重现期增大,积水面积也不断扩大,临近场馆道路的大面积积水对赛事的顺利举行将会带来一定挑战。

对上述模拟结果进行分析,可以得出该区域内涝发生原因主要有:(1)不透水面积较大。研究区内模拟得到的积水都主要分布在亚运场馆以北的九州街以及东西两侧的秀泉路与双拥路,而周边均是商业地块与住宅区,不透水面比例较高,导致大量雨水汇成径流进入管道,增加内涝风险。(2)管网排水能力不足。检查管网信息可以发现,九州街方向上的部分管网存在管径较小的现象。当降雨强度加大时,地表径流的汇集对管道排水不断产生压力,直到超过管道排水能力,路面出现积水。因此,提高城市的雨洪利用能力以及提高城市管网排水能力是缓解暴雨下城市内涝灾害的重要手段。可以通过增加周边商业地块与住宅区内低影响开发(Low Impact Development, LID)设施(透水铺装、绿色屋顶、下凹式绿地、植草沟、雨水罐等),提高雨水渗透量,降低内涝积水峰值。同时在九州街与秀泉路积涝点增加排水泵,核实泵站前池运行水位,对压力出流进行必要的核算,确保排水效率。

## 4 讨 论

研究基于实测降雨条件下的模拟结果对模型进行率定与验证,最终相对误差范围为 11.11%~17.65%,表明模拟过程与实际变化趋势基本一致,

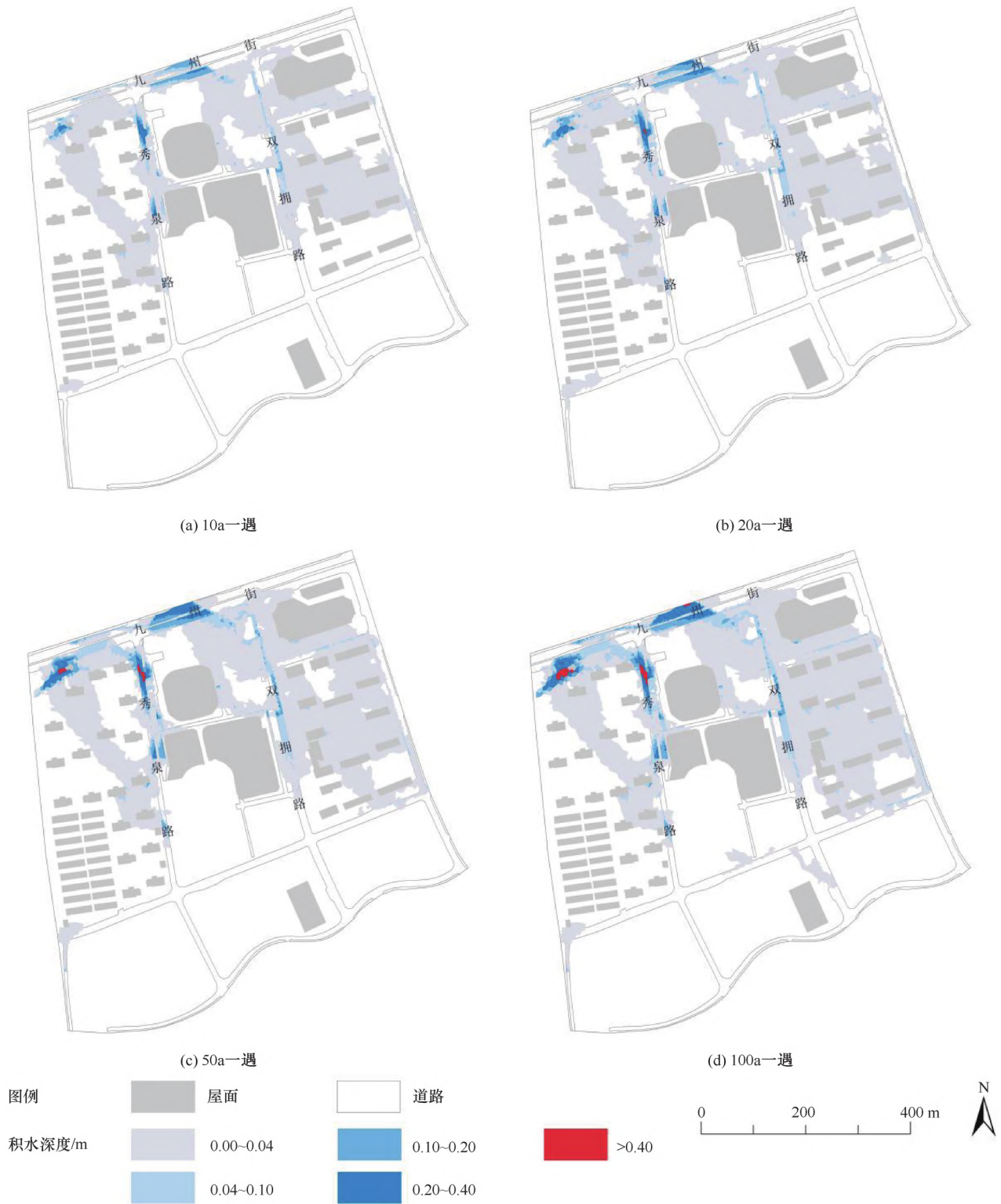


图 4 不同重现期下的最大淹没场景

Fig. 4 Maximum urban waterlogging depth under different return periods

证明该模型有较好的模拟效果和较高的可信度。但受 2022 年总体降水偏少与亚运场馆竣工时间不长, 研究区内积水实测资料积累较少等因素的影响, 进行模

拟的实际最大积水深度仅达到对行人和路面交通会造成一定影响的程度。同时, 研究区的土地利用目前仍处于变化阶段, 现有的土地利用结果也会对模拟精度

造成影响。在后续的研究中将努力获取更多的实测降雨数据和积水资料以及最新的土地利用数据,构建更加精细的内涝模型,使得模拟结果更加贴合实际情况。

此外,在4种不同重现期的设计降雨模拟结果对比中可以得到,研究区内的内涝淹没范围主要集中在临安亚运场馆的西部道路秀泉路中段与研究区西北侧的道路以南区域。研究区西北侧道路以南为居民社区,由于社区建造会设计截水沟、雨水罐等提高雨水渗透率的设施,但是在土地利用信息提取以及内涝模型构建时没有考虑这些设施的布置,导致该区域的模拟结果比实际情况更加严重。

目前,研究发现研究区部分区域积水严重,并对此提出了一些内涝防治措施,但未进行相关试验。今后可以深入探究各项内涝削减措施的效果,评估各项措施的合理性和必要性,最后更有针对性的提出亚运场馆治理方案,做到“一点一方案”。

## 5 结论

本文以杭州市临安区体育文化会展中心及其周边地区为研究区域,利用InfoWorks ICM模型进行了城市内涝模型的快速构建,采用历史降雨数据与实测数据进行了验证,同时模拟了在不同重现期下研究区域的积水情况,得到如下结论:

(1)基于InfoWorks ICM模型构建研究区的城市内涝模型,采用2022年7月31日与2022年9月13日的历史降雨数据和实测积水深度数据对模型进行率定和验证,最终相对误差范围为11.11%~17.65%,结果表明构建的模型较为可靠。

(2)在不同设计降雨情景下,最大积水深度与积水面积随着重现期的增大而增加。在一定降雨强度下,受地形与管径大小等因素的影响,九州街与秀泉路的路面积水相较其他区域比较严重,积水深度最深达58 cm。增加周边商业地块与住宅区的绿地等透水面积,并在积涝危险程度较大处设置排水泵,确保暴雨时管道排水效率,这对解决研究区内涝问题制定对策具有一定借鉴意义。

由于亚运场馆竣工时间不长,研究区内积水实测资料积累较少,使得模拟准确性在一定程度上有所降低。因此,在未来的研究中,将通过收集更多的实测资料,对模型进行进一步的率定和验证,不断提高模型模拟预测的精度和水平,及时为研究区的内涝风险预报和预防措施的制定提供可靠的科学支持。研究可以推广至其他亚运场馆,能够有效支持不同亚运场馆

及其周边地区开展暴雨内涝研究,为区域内涝问题的解决提供一定帮助。

## 参考文献(References):

- [1] DONG T Y, ZHU X, DENG R, et al. Detection and attribution of extreme precipitation events over the Asian monsoon region [J]. *Weather and Climate Extremes*, 2022, 38: 8.
- [2] 袁媛. 基于城市内涝防治的海绵城市建设研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2016.  
YUAN Yuan. Study on the Construction of Sponge City Based on City Waterlogging Prevention [D] Beijing: Beijing Forestry University, 2016.
- [3] 赵刚, 史蓉, 庞博, 等. 快速城市化对产汇流影响的研究: 以凉水河流域为例[J]. *水力发电学报*, 2016, 35(5): 55-64.  
ZHAO Gang, SHI Rong, PANG Bo, et al. Impact of rapid urbanization on rainfall-runoff processes in urban catchment: Case study for Liangshui River basin [J]. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2016, 35(5): 55-64.
- [4] 杭州市人民政府. 杭州市2020年自然灾害灾情情况[EB/OL]. (2020-11-27) [2022-12-16]. [http://www.hangzhou.gov.cn/art/2020/11/27/art\\_1228974533\\_59019459.html](http://www.hangzhou.gov.cn/art/2020/11/27/art_1228974533_59019459.html).  
Hangzhou People's Government. Natural disasters in Hangzhou in 2020 [EB/OL]. (2020-11-27) [2022-12-16]. [http://www.hangzhou.gov.cn/art/2020/11/27/art\\_1228974533\\_59019459.html](http://www.hangzhou.gov.cn/art/2020/11/27/art_1228974533_59019459.html).
- [5] 浙江天气网. 强天气通报(8月16日14时-17时)[EB/OL]. (2022-08-16) [2022-12-16]. <http://zj.weather.com.cn>.  
Zhejiang weather network. Strong weather report (14 am-17 am; 00, August 16th) [EB/OL]. (2022-08-16) [2022-12-16]. <http://zj.weather.com.cn>.
- [6] 岑国平. 城市雨水径流计算模型[J]. *水利学报*, 1990, 21(10): 68-75.  
CEN Guoping. A model to simulate stormwater runoff in urban area [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 1990, 21(10): 68-75.
- [7] 周玉文, 赵洪宾. 城市雨水径流模型研究[J]. *中国给水排水*, 1997, 13(4): 4-6.  
ZHOU Yuwen, ZHAO Hongbin. A study on urban storm runoff model [J]. *China Water and Wastewater*, 1997, 13(4): 4-6.
- [8] 徐向阳. 平原城市雨洪过程模拟[J]. *水利学报*, 1998, 29(8): 35-38.  
XU Xiangyang. Simulation of storm runoff process for plain urban [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 1998, 29(8): 34-38.
- [9] 刘佳明. 城市雨洪放大效应及分布式城市雨洪模型研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2016.  
LIU Jiaming. Research on the amplified hydrological effect and distributed model of urban stormwater [D]. Wuhan: Wuhan University, 2016.
- [10] 夏军, 张印, 梁昌梅, 等. 城市雨洪模型研究综述[J]. 武汉大



- 学学报(工学版), 2018, 51(2): 95-105.
- XIA Jun, ZHANG Yin, LIANG Changmei, et al. Review on urban storm water models [J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2018, 51(2): 95-105.
- [11] CHEN Y, HOU H, LI Y, et al. Urban inundation under different rainstorm scenarios in Lin'an City, China [J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2022, 19(12): 7210.
- [12] ROSSMAN L A. Storm water management model: User's manual Version 5.0 [EB/OL]. (2009-02-15) [2022-12-16]. <http://www.epa.gov/edn-nrmrl/model/swmm/epaswmm5-user-manual.pdf>.
- [13] 黄国如, 张灵敏, 锥翠, 等. SWMM 模型在深圳市民治河流域的应用[J]. 水电能源科学, 2015, 33(4): 10-14.
- HUANG Guoru, ZHANG Lingmin, LUO Cui, et al. Application of SWMM model in Minzhi River Basin of Shenzhen City [J]. Water Resources and Power, 2015, 33(4): 10-14.
- [14] 王江坤. 基于 SWMM 模型与城市扩张模拟的海绵城市多目标优化[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2021.
- WANG Jiangkun. Multi-objective Optimization of Sponge City based on SWMM Model and Urban Expansion Simulation [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2021.
- [15] 李瑶, 胡潭高, 潘骁骏, 等. 城市内涝灾害模拟与灾情风险评估研究进展 [J]. 地理信息世界, 2017, 24(6): 42-49.
- LI Yao, HU Tangao, PAN Xiaojun, et al. Research Progress on Disaster Simulation and Risk Assessment for Urban Waterlogging [J]. Geomatics World, 2017, 24(6): 42-49.
- [16] ZHANG H, ZHANG J P, FANG H Y, et al. Urban flooding response to rainstorm scenarios under different return period types [J]. Sustainable Cities and Society, 2022, 87: 14.
- [17] 张大伟, 赵冬泉, 陈吉宁, 等. 芝加哥降雨过程线模型在排水系统模拟中的应用[J]. 给水排水, 2015(8): 354-357.
- ZHANG Dawei, ZHAO Dongquan, CHEN Jining, et al. The application of the Chicago Rainfall model in drainage system simulation [J]. WATER & WASTEWATER ENGINEERING, 2015(8): 354-357.
- [18] 马旭. 基于 Infoworks ICM 模型的典型城市内涝模拟及海绵减控效果研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2019.
- MA Xu. Typical Urban Waterlogging Simulation And Sponge Reduction Control Effect Research Based on InfoWorks ICM Model [D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2019.
- [19] 陈翠珍, 蒋佳鑫, 李敏. 基于水力模型的青山海绵示范区排水防涝风险评估[J]. 中国给水排水, 2016, 32(17): 105-108.
- CHEN Cuizhen, JIANG Jiaxin, LI Min. Risk assessment of drainage and waterlogging prevention system for Qingshan sponge demonstration area based on hydraulic model [J]. China Water & Wastewater, 2016, 32(17): 105-108.
- [20] CHOO Y M, SIM S B, CHOE Y W. A study on urban inundation using SWMM in Busan, Korea, using existing dams and artificial underground waterways [J]. Water, 2021, 13(12): 13.
- [21] 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 Xiaodong, XU Zongxue, ZHAO Gang, 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.
- [22] TANSAR H, BABUR M, KARNCHANAPAIBOON S L. Flood inundation modeling and hazard assessment in Lower Ping River Basin using MIKE FLOOD [J]. Arabian Journal of Geosciences, 2020, 13(18): 16.
- [23] 陈融旭, 韩冰, 赵凌栋, 等. 极端降雨条件下濮阳市马颊河流域水灾害风险研究 [J]. 水利水电技术(中英文), 2022, 53(6): 34-43.
- CHEN Rongxu, HAN Bing, ZHAO Lingdong, et al. Study on water disaster risk of Majiahe River Watershed in Puyang City under extreme rainfall [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2022, 53(6): 34-43.
- [24] 王滢, 周小伟. Info Works ICM 在山地丘陵城市内涝治理中的应用 [J]. 中国给水排水, 2018, 34(19): 118-123.
- WANG Ying, ZHOU Xiaowei. Application of InfoWorks ICM in control of urban waterlogging in mountainous and hilly cities [J]. China Water & Wastewater, 2018, 34(19): 118-123.
- [25] SIDEK L M, JAAFAR A S, MAJID W H A W A, et al. High-resolution hydrological-hydraulic modeling of urban floods using InfoWorks ICM [J]. Sustainability, 2021, 13(18): 10259.
- [26] 刘华超, 梁风超, 徐薇, 等. 基于 Infoworks ICM 的城市排水(雨水)系统排水能力及内涝风险评估 [J]. 城市道桥与防洪, 2021(12): 71-74.
- LIU Huachao, LIANG Fengchao, XU Wei, et al. Evaluation on drainage capacity and waterlogging risk of urban drainage (rainwater) system based on Infoworks ICM [J]. Urban Roads Bridges & Flood Control, 2021(12): 71-74.
- [27] 蒋海红. 基于 Infoworks ICM 模型的万州城区海绵城市试点建设雨水径流总量模拟分析[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2019.
- JIANG Haihong. Simulation of Total Rainwater Runoff Before and After the Sponge City Pilot Construction in Wanzhou City Based on Infoworks ICM Model [D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2019.
- [28] 苏东霞, 吕放放, 张功良, 等. 基于 Infoworks ICM 模型的城市下凹桥区内涝积水诊断与治理方案研究 [J/OL]. 水利水电技术(中英文): 1-12. [2022-05-16]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/10.1746.TV.20220513.1601.002.htm>.
- SU Dongxia, LYU Fangfang, ZHANG Gongliang, et al. Study on diagnosis and treatment scheme of waterlogging at an urban underpass area based on Infoworks ICM model [J/OL]. Water Resources and

- Hydropower Engineering: 1-12. [1] [2022-05-16]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/10.1746.TV.20220513.1601.002.html>.
- [29] 叶陈雷, 徐宗学, 雷晓辉, 等. 基于 InfoWorks ICM 的城市洪涝模拟及其风险分析: 以福州市白马河片区为例[J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 2021, 57(6): 784-793.
- YE Chenlei, XU Zongxue, LEI Xiaohui, et al. Coupling simulation of hydrological and hydrodynamics processes for urban river networks based on InfoWorks: case of the urban area and the northeast mountainous area in Fuzhou City[J]. Journal of Beijing Normal University (Natural Science), 2021, 57(6): 784-793.
- [30] 黄哲, 张霏燕, 孙小平, 等. 临安暴雨气候特征及其与洪涝关系初探[J]. 浙江气象, 2015, 36(4): 26-31.
- HUANG Zhe, ZHANG Feiyan, SUN Xiaoping, et al. The characteristics of rainstorm weather and its relationship with flood in Lin'an [J]. Journal of Zhejiang Meteorology, 2015, 36(4): 26-31.
- [31] 程涛, 徐宗学, 洪思扬, 等. 济南市山前平原区暴雨内涝模拟[J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 2018, 54(2): 246-253.
- CHEN Tao, XU Zongxue, HONG Siyang, et al. Simulating rainstorm waterlog in piedmont plains in Jinan City[J]. Journal of Beijing Normal University (Natural Science), 2018, 54(2): 246-253.
- [32] 黄国如, 罗海婉, 陈文杰, 等. 广州东濠涌流域城市洪涝灾害情景模拟与风险评估[J]. 水科学进展, 2019, 30(5): 643-652.
- HUANG Guoru, LUO Haiwan, CHEN Weniie, et al. Scenario simulation and risk assessment of urban flood in Donghaochong basin, Guangzhou [J]. Advances in Water Science, 2019, 30(5): 643-652.
- [33] 李伟, 高俊波, 祁旭阳, 等. 基于耦合雨洪模型的城市内涝数值模拟与风险分析[J]. 水利技术监督, 2021(12): 56-61.
- LI Wei, GAO Junbo, QI Xuyang, et al. Numerical simulation of urban waterlogging and risk analysis based on a coupled model [J]. Technical Supervision in Water Resources, 2021(12): 56-61.
- [34] 王丽晶, 潘兴瑶, 王俊文, 等. 基于 InfoWorks ICM 模型的北京市东城区海绵城市改造效果分析与研究[J]. 中国防汛抗旱, 2021, 31(9): 43-48.
- WANG Lijing, PAN Xingyao, WANG Junwen, et al. Analysis and research on the effects of the sponge city construction in Dongcheng District of Beijing based on InfoWorks ICM model [J]. China Flood & Drought Management, 2021, 31(9): 43-48.

(责任编辑 王海锋)