

太湖流域大尺度洪涝淹没仿真模型的建立及应用

徐天奕,刘克强,李琛,刘增贤

(太湖流域管理局水利发展研究中心,上海 200434)

摘要:利用 DEM 数据及 GIS 空间分析技术构建洪涝淹没分析模块,将圩区概化为“零维调蓄单元”,实现圩区的精细化模拟,与细化后的太湖流域水文水动力学模型耦合,建立能够可靠模拟太湖流域洪涝淹没状态的数学模型。选择 2016 年流域性暴雨洪涝资料进行模拟验证,与代表站实测水位及实际洪涝灾情分布对比表明,构建的洪涝淹没仿真模型可靠有效。针对梅雨与台风雨组合情景,采用该模型模拟了太湖流域洪涝灾害状态,得出了科学合理的结果,为流域洪水风险管理提供了技术支撑。

关键词:平原河网;太湖流域;洪涝淹没;水动力学模型;圩区

中图分类号:TV877 文献标志码:A 文章编号:1006-7647(2021)04-0040-06

Establishment and application of large-scale flood inundation simulation model for Taihu Basin//XU Tianyi, LIU Keqiang, LI Chen, LIU Zengxian (*Water Conservancy Development Research Center, Taihu Basin Authority, Shanghai 200434, China*)

Abstract: DEM data and GIS spatial analysis technology were used to construct a flood and inundation analysis module. Polder areas were generalized into a zero-dimensional storage unit to realize elaborate simulation of polder areas. Coupled with the refined hydrological and hydrodynamic model of the Taihu Basin, a reliable flood inundation simulation model was established. The flood event occurred in 2016 was selected for model verification. Comparison of water levels and real flood inundation distribution between the simulation and observation from the Taihu station and other representative stations shows that the constructed model is reliable. The verified model was used to simulate the flood inundation of the Taihu Basin under the scenario of plum rain encountering typhoon rainstorm. The simulation results are scientific and reasonable, which can provide technical support for basin flood risk management.

Key words: plain river network; Taihu Basin; flood inundation; hydrodynamic model; polder areas

太湖流域是典型的平原河网地区,地形低洼平坦、河道密集交错、湖泊星罗棋布、圩区连绵成片、水利工程众多,流域的产汇流特性非常复杂,洪涝灾情的模拟和分析一直是一个难点^[1-2]。近年来,随着流域内城市化以及水利工程的建设,洪涝灾害的成因和特点发生了显著变化,而流域经济社会的发展对洪涝灾害的治理提出更高的要求,如何科学合理地模拟流域洪涝灾情成为关键。多年来,国内外专家学者对平原河网地区水情的数值模拟开展了大量研究,初步建立了一系列基于水文学、水动力学的数学模型^[3-8],很多已经用于区域洪涝灾害的模拟、预报和治理工作。在太湖流域,张念强等^[9]以上海市浦西区为研究区域,考虑较小河流上水闸、泵站等工程的综合影响,提出了河网排涝单元模型并与二维洪水演进模型耦合,开展风暴潮影响下平原河网区域的城市洪涝模拟研究。钟桂辉等^[10]选择 MIKE

FLOOD 软件建立了一、二维耦合模型,应用于阳澄淀泖区的洪水模拟。王静等^[11]针对圩区众多的平原河网区域,基于已有的一、二维非恒定流水动力学理论建立的城市洪涝仿真模型,应用于嘉兴市暴雨洪涝分析。目前的研究成果多是基于 PCSWMM、InfoWorks ICM、MIKE 等国外商业软件,产汇流模拟方式主要采用综合径流系数法等,较为粗糙,不适用于河网概化密度要求较高,水文水动力条件复杂,人类活动影响剧烈的较大尺度区域。二维水动力学模型虽能精细化模拟洪水演进,但其网格尺度一般较小,应用于流域尺度的研究区时存在计算量过大导致计算速度缓慢、耗时过长及资料条件不能支撑等问题。由于近年来太湖流域土地利用、水利工程、水文情势发生了较大变化,资料的可靠度、精确度、维度都有了很大提高,太湖流域的传统模型更是不能充分利用这些资料可靠地模拟流域洪涝灾情特性。

本文根据新形势下太湖流域洪涝治理工作的需求,采用新的土地利用、河道湖泊、水利工程等基础信息,基于 DEM 数据及 GIS 空间分析技术,将太湖流域水文水动力模型与洪涝淹没模拟分析模块耦合,构建了可以模拟太湖流域洪涝淹没状态的数学模型,选择典型暴雨洪水对构建的模型进行验证。在此基础上,针对极端天气情景组合状态,对太湖流域洪涝淹没进行模拟分析,为流域洪水风险图编制及洪水风险管理提供支持。

1 模型的原理与方法

1.1 水文水动力模型原理

太湖流域水文水动力模型主要由降雨径流模块和水动力模块组成。降雨径流模块涉及平原区 16 个水力计算分区的圩内和圩外区域的产流计算。针对流域土地利用特点,将下垫面划分为水面、水田、旱地、非耕地、城市绿地、不透水面等类型分别进行产流计算,各单元区域的产流量则为各类下垫面产流量之和。平原区不同类型下垫面产流计算模式如下:

a. 水面产流。计算公式为

$$R_1 = P - E_1 \tag{1}$$

式中: R_1 为水面产流量; P 为降水量; E_1 为水面蒸散发量。

b. 水田产流。按作物生长期的需水、水稻田适宜水深、耐淹水深及水稻灌排模式得出。适宜水深下限主要控制水稻不致因水田水深不足影响产量;适宜水深上限是水稻最佳生长允许的最大水深;耐淹水深是水稻短时间可以耐受的最大水深,当水田水深超过耐淹水深时,要及时排除多余水量,其排水量即为水田的净雨深。水田产流公式如下:

$$R_2 = \begin{cases} P - E_2 & H + P - E_2 - I \leq 0 \\ 0 & H_s < H + P - E_2 - I \leq H_m \\ H - H_m & H_m < H + P - E_2 - I \leq H_m + H_e \\ H_e & H + P - E_2 - I > H_m + H_e \end{cases} \tag{2}$$

式中: R_2 为水田排水量或灌溉量; H 为水田水深; E_2 为水田蒸散发量; I 为水田渗漏量; H_s 为水田平均适宜水深; H_m 为水稻耐淹水深; H_e 为水田排涝能力。

c. 不透水面产流。计算公式为

$$R_3 = P - V_3 - E_3 \tag{3}$$

式中: R_3 为不透水面净雨量; V_3 为初损量; E_3 为不透水面积雨期蒸发量。

旱地、非耕地、城市绿地这几种类型下垫面均属于透水地面,可以采用蓄满产流模型按不同参数进

行模拟^[12]。

区域坡面汇流采用分布式汇流单位线方法^[13]。

水动力模块根据太湖流域平原河网的特点,将流域内影响水流运动的因素分别以零维模型(湖、荡、圩等零维调蓄节点)、一维模型(一维河道)以及联系要素(堰、闸、泵控制建筑物等)3 类要素进行模拟,采用圣维南方程组模拟太湖流域一维河网非恒定流水流运动情况:

$$\begin{cases} B \frac{\partial Z}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q \\ \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\partial Q^2}{A} \right) + gA \frac{\partial Z}{\partial x} + gA \frac{|Q|Q}{K^2} = qv_x \end{cases} \tag{4}$$

式中: Q 、 A 、 B 和 Z 分别为河道断面流量、过水面积、河宽和水位; q 为旁侧入流; v_x 为旁侧入流流速在水流方向上的分量; K 为流量模数; α 为动量校正系数。

1.2 洪水淹涝分析模块原理

淹涝模块考虑了洪水漫溢导致的淹水,以及圩区因排涝动力不足、限排等原因导致的内涝积水。利用 DEM 数据以及 GIS 空间分析技术,对漫溢水量进行展布来模拟漫溢水量的淹没范围。

1.2.1 河道漫堤模拟

进行水动力计算时,当河道计算水位超过河堤高程,模型将通过堰流公式来计算通过侧向连接的水流,用以模拟洪水从河道漫流进入河网多边形内部的过程。

1.2.2 圩区内涝模拟

圩内地势平坦,水面几乎没有比降,水流速度较小,可基于水量平衡原理将圩作为零维调蓄单元,以简化模型计算维度,提高计算效率。零维调蓄单元通过虚拟联系与周围河道进行水量交换(图 1(a))。模型假定圩内外河道的水量交换是通过一些微小沟渠实现的,这些微小沟渠总宽度就是虚拟联系的宽度,与通过的河段长之比定义为过水连通率,可取为 0.01。虚拟联系的底高程设定为通过河段的底高程。根据 DEM 高程数据生成每个零维单元的水位-面积曲线(图 1(b))。降雨经产流计算汇入零维调蓄单元,如果排水不畅则蓄积在零维要素中,根据零维单元的水位-面积曲线可以推求不同情况下对应的淹没水深,淹没水量可按式推算:

$$\sum Q_i = A_z \frac{\partial Z}{\partial t} \tag{5}$$

式中: $\sum Q_i$ 为进出零维调蓄单元的水量; A_z 为调蓄单元内水面面积。

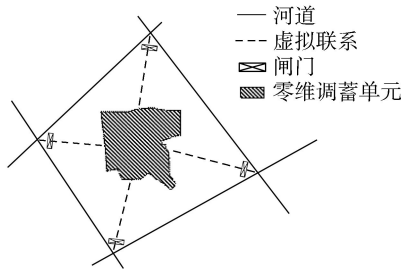
对于设置为零维调蓄单元的圩,由于概化了与周边河道的联系,应针对不同情况进行排涝模拟。

a. 常规调度模式:根据圩区资料,按照每个圩

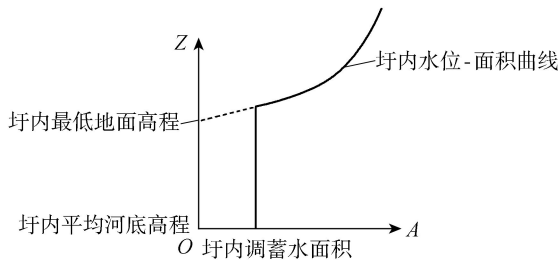
的实际调度规则进行调度,控制水闸和排水泵的启闭和水位,水闸开启度及排水泵控制流量等。

b. 限排模式:当汛期外河水位过高,超过设定的危险水位时,需要对圩区进行限排,以防止外河水位持续快速升高造成河道漫溢和圩堤溃决引发淹没灾害。

c. 破圩模式:针对圩堤溃决发生破坏情况,根据圩与周边河道的联系按相应的溃决方式设置溃口宽度、底高程等参数,通过堰流公式计算破圩流量。



(a) 零维调蓄单元概化



(b) 零维调蓄单元水位-面积曲线

图1 圩区零维调蓄单元设置示意图

2 模型构建及验证

2.1 洪涝淹没模型构建

基于现有的太湖流域河网模型,采用最新的下垫面、河湖水利工程资料进行细化,其中县级以上河道采用实测断面,部分县级以下河道采用概化断面。细化后的平原区河道 1793 条,总长 15 058.63 km,河道断面 10 112 个,1 km² 面积以上的圩外湖泊 117 个。工程概化范围主要是流域沿江、沿杭州湾外边界、环太湖、沿流域重点河道等主要控制线,加之城市大包围及 5 万亩以上重点圩区闸泵工程,合计 863 座。

太湖流域湖西区山前平原、圩区和东部及洮、漏湖两岸地势低洼,西南一线直接承接山区的来水,下游易受长江及太湖高水位顶托,洪水不易外排;浙西区位于太湖上游,是流域降水量最多的区域,由于山高坡陡,山洪下泄经常引发长兴平原洪涝;杭嘉湖区地势低洼,河道水系紊乱,淤积严重,排水缓慢,频繁发生洪涝。因此,本文选取湖西平原区、浙西区平原区和杭嘉湖区作为重点研究对象,对这 3 个水利分区内近 1 500 个圩进行了“零维调蓄单元”处理,通过虚拟联系与周围河道建立联系进行水量交换。太湖流域平原河网及圩区概化示意图见图 2。

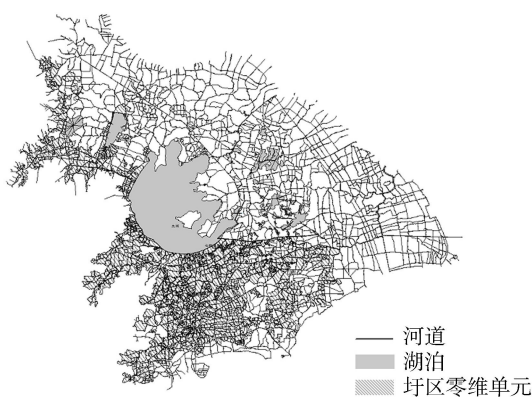


图2 研究区域河网概化示意图

在流域河道、湖泊、闸泵、堤防、圩区、控制线工程概化的基础上,初步建成可以模拟流域洪涝淹没状况的模型。

2.2 模型验证

为了验证所建立模型的合理性,对涉及的参数进行合理设置,需要对模型进行率定。本文选择 2016 年梅雨洪涝作为典型,针对流域河道实测洪水位与淹没区域分布资料,对比和分析模拟结果与实测状况的差异,在分析模型的可靠性基础上,对模型参数进行率定和调整,以提高模型的模拟精度。

通过模拟计算,得出 2016 年梅雨期太湖流域河网水位过程,通过与实测水位过程比较,相互之间拟合程度较好,太湖日均最高水位计算值与实测水位误差仅为 0.01 m。地区代表站日均最高水位误差也在 0.1 m 以内。图 3 为部分重点节点代表站模拟洪水位与实测水位对比。2016 年湖西区受灾比较严重,洪涝灾情统计比较充分,重点模拟和分析了湖西区洪涝淹没状况,图 4 为模拟湖西区淹没范围与实际调查受灾范围对比。结果表明,模拟淹没范围主要集中在洮湖、漏湖西侧和南侧,基本与实际淹没情况一致,宜兴市基础资料不足,模拟的淹没范围比实际略小,属于合理范围。2016 年湖西区淹没模拟值 303.0 km²,接近实际调查值 353.4 km²。根据 2016 年的验证成果,总体来看构建的太湖流域洪涝淹没模型基本可信,可以用于太湖流域洪涝淹水状况的模拟分析。

3 情景模拟分析

太湖流域成灾降雨的类型主要有两类:一类为梅雨型,特点是降雨历时长、总量大、范围广。另一类为台风暴雨型,特点是降雨强度大、暴雨集中。台风与梅雨一旦遭遇,将会容易形成降雨的叠加效应,,增加威胁流域防洪安全的大洪水暴发的可能性^[14]。2016 年太湖流域发生梅雨型大洪水,梅雨量达 426.8 mm,是多年平均梅雨量的 1.75 倍,暴雨中心主要分布在

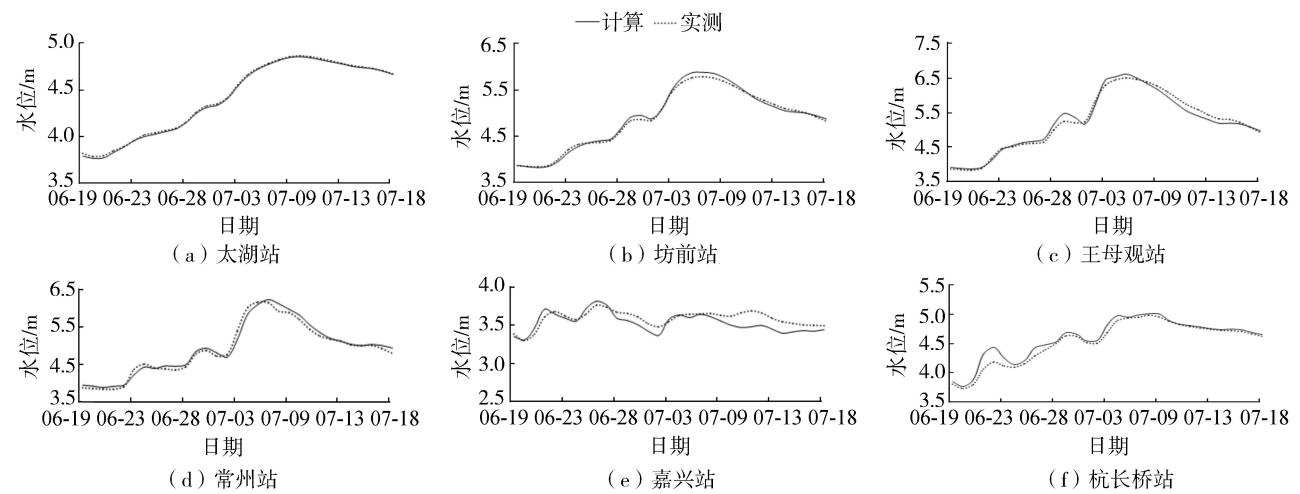


图3 2016年梅雨期间代表站计算与实测水位过程

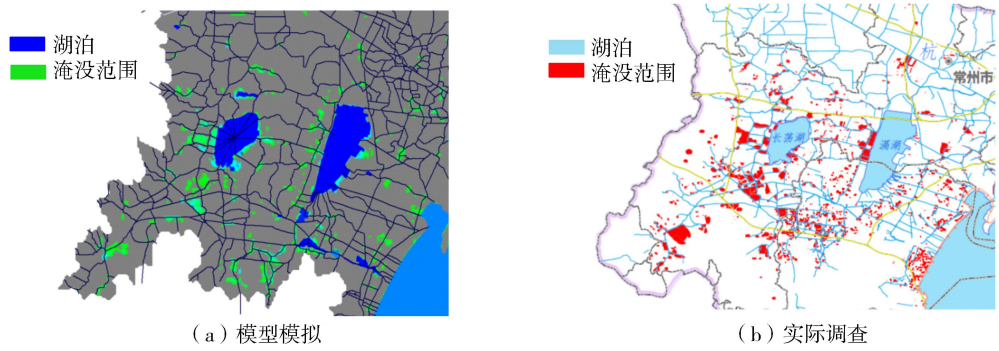


图4 2016年梅雨期湖西区模型模拟与实际调查受淹范围

湖西区、武澄锡虞区及太湖区。太湖水位于7月3日超过设计水位,同时,1601号台风“尼伯特”在美国关岛以南的西北太平洋洋面上生成,中间一度预报“尼伯特”台风要正面袭击太湖流域。本文情景设计以2016年梅雨为背景,考虑“尼伯特”台风正面袭击太湖流域,带来200mm的降雨,按2013年“菲特”台风降雨分布,暴雨中心主要在杭嘉湖区、浙西区、阳澄淀泖区、浦东浦西区和太湖区。

模拟结果表明,当太湖水位继续上涨并遭遇南部型200mm台风雨时,主要受灾区集中在湖西区平原、杭嘉湖区,浙西区长兴地区,3个区总的淹没面积达到1214km²,其中淹没水深大于0.5m的淹没

面积占44%。这3个区的淹没范围和淹没水深分布见图5,数据统计见表1和表2。从3个区淹没水深分布情况看,杭嘉湖区和浙西区总体上大部分淹没水深在0.5m以下,湖西区淹没水深超过1m的主要仍在洮湖、滬湖周边及南溪沿线,其他范围淹没水深大部分在0.5m以下。

表1 淹没范围分类统计

淹没水深/m	淹没面积/km ²
0~0.3	517
0.3~0.5	139
0.5~1.0	220
>1.0	319
合计	1214

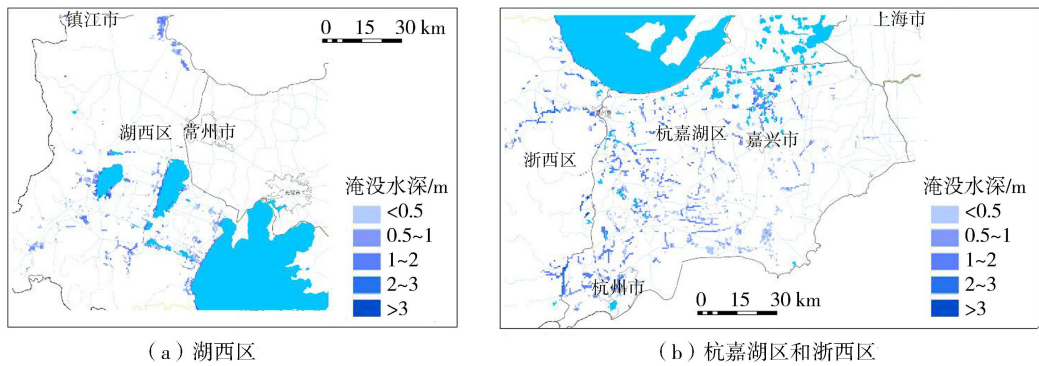


图5 湖西区、浙西区及杭嘉湖区淹没水深分布

表 2 各分区淹没面积与淹没水深统计			
统计区域	淹没面积/ km ²	平均淹没 水深/m	最大淹没水深 ≥0.5 m 的淹没面积/km ²
湖西区	328	0.57	195
浙西区	93	0.43	55
杭嘉湖区	793	0.34	309
合计	1214	0.45	559

为了更有效治理洪涝灾害,通过对洪涝灾情实景模拟,有必要深入分析洪涝灾情的成因。湖西和浙西平原区受淹主要归因太湖持续高水位,使得上游滨湖地区径流入湖困难,造成洮湖和漏湖西侧、南河沿线、宜兴环太湖地段的低洼地区积水。杭嘉湖区淹没范围主要集中分布于嘉兴市及周边区域、杭州市北部及余杭区、湖州南部与德清东部地区,南浔仅有零星淹没,主要原因是部分圩区防洪除涝标准偏低,圩堤达标治理迟缓,圩区动力抽排能力不足,水系治理滞后造成的现状防御能力低下引发积水成灾。

4 结 论

- a. 基于太湖流域水文水动力模型,构建了用于模拟流域尺度的太湖洪涝淹没的仿真模型。模型根据太湖流域高度城镇化地区复杂下垫面的产流规律,对不同下垫面分别采用不同的产流计算模式,并耦合了流域内河道、湖泊、行蓄洪区、圩区、水利工程等水动力过程。引入圩区“零维调蓄单元”概念,可以较为精细化地模拟单一圩的闸泵调度,实现单一圩禁排、限排或排涝动力不足引起内涝的模拟分析。
- b. 采用典型暴雨洪水资料验证了模型的可靠性,率定和合理确定了模型参数。应用新建模型模拟分析了流域梅雨与台风雨组合情景下的区域洪涝灾害状况,结果显示,淹没主要集中在湖西区洮漏湖西侧、南河沿线、宜兴环太湖区域及杭嘉湖区太浦河南岸嘉北地区、嘉兴西南部的桐乡、海宁地区,嘉兴市东南部等低洼地区。

太湖位于典型的平原感潮河网地区,影响因素组合多变且动态变化,特别是面广量大的圩区,其调度运行与淹没对流域骨干河道行洪、对太湖防洪的影响,用传统的分析方法较为困难。本文结合 GIS 和水文水动力洪水模拟技术,通过产汇流模块与圩区排涝动力学模块耦合,针对设定情景影响区域的近 1 500 个圩区进行“零维调蓄单元”处理,可以较为精细化地模拟单一圩排涝调控过程,实现对单圩的禁排限排功能,使圩区水情模拟更加符合实际,可以为圩区治理工作提供支持。

参考文献:

[1] 叶建春,章杭惠. 太湖流域洪水风险管理实践与思考

[J]. 水利水电科技进展, 2015, 35(5): 136-141. (YE Jianchun, ZHANG Hanghui. Practices and thinking of flood risk management in Taihu Lake Basin[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2015, 35 (5): 136-141. (in Chinese))

[2] 王杰,许有鹏,王跃峰,等. 平原河网地区人类活动对降雨-水位关系的影响:以太湖流域杭嘉湖地区为例[J]. 湖泊科学, 2019, 31 (3): 779-787. (WANG Jie, XU Youpeng, WANG Yuefeng, et al. Impacts of anthropogenic activity on the response of water level to rainfall in the urbanized plain river network: a case study in the Hangzhou-Jiaxing-Huzhou region of Taihu Basin [J]. Journal of Lake Sciences, 2019, 31 (3): 779-787. (in Chinese))

[3] 王船海,王娟,程文辉,等. 平原区产汇流模拟[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2007, 35 (6): 627-632. (WANG Chuanhai, WANG Juan, CHEN Wenhui, et al. Numerical simulation of runoff yield and confluence in plain area [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2007, 35(6): 627-632. (in Chinese))

[4] 刘浏,徐宗学. 太湖流域洪水过程水文-水力学耦合模拟[J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 2012, 48 (5): 530-536. (LIU Liu, XU Zongxue. Hydro-dynamical simulation of flood in the Taihu Basin [J]. Journal of Beijing Normal University (Natural Science), 2012, 48 (5): 530-536. (in Chinese))

[5] 符锐. 基于 SWMM 模型的山前平原区城市排水防涝计算方法探究[J]. 人民珠江, 2019, 40(2): 123-127. (FU Rui. Discussion on the calculation method of urban drainage and waterlogging prevention in piedmont plain based on SWMM[J]. Pearl River, 2019, 40(2): 123-127. (in Chinese))

[6] 钟桂辉,刘曙光,娄厦,等. 苏锡常排涝对江南运河产生的洪涝转移特征[J]. 水利水电科技进展, 2020, 40 (5): 40-47. (ZHONG Guihui, LIU Shuguang, LOU Sha, et al. Flood dispatching characteristics of Jiangnan Canal caused by drainage from Suzhou, Wuxi and Changzhou[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2020, 40(5): 40-47. (in Chinese))

[7] 张彬,戴贤波,徐向阳,等. SWMM 模型在感潮河网城市排水防涝计算中的应用[J]. 水电能源科学, 2014, 32 (10): 56-59. (ZHANG Bin, DAI Xianbo, XU Xiangyang, et al. Application of SWMM model in urban drainage and flood control calculation of tidal river network [J]. Water Resources and Power, 2014, 32 (10): 56-59. (in Chinese))

[8] 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))
- [9] 张念强, 李娜, 王静, 等. 平原感潮河网区域城市洪涝分析模型研究[J]. 水利水电技术, 2017, 48(5): 20-26. (ZHANG Nianqiang, LI Na, WANG Jing, et al. Study on urban flood inundation analysis model for plain tidal river network region [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2017, 48(5): 20-26. (in Chinese))
- [10] 钟桂辉, 刘曙光, 张泉鸣, 等. 阳澄淀泖区动态洪水风险图的编制及其管理系统的开发[J]. 水利水电科技进展, 2017, 37(6): 62-68. (ZHONG Guihui, LIU Shuguang, ZHANG Xiaoming, et al. Dynamic flood risk mapping and development of a management system for Yangcheng & Dianmao District [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2017, 37(6): 62-68. (in Chinese))
- [11] 王静, 李娜, 王杉. 考虑圩区分布的平原河网区暴雨洪涝分析模型建立[J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2020, 18(1): 70-79. (WANG Jing, LI Na, WANG Shan. Establishment of numerical model for simulation of storm flooding in flat river network area considering polders distribution: a case study of Jiaying City, China [J]. Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2020, 18(1): 70-79. (in Chinese))
- [12] 赵人俊. 流域水文模拟: 新安江模型与陕北模型 [M]. 北京: 水利电力出版社, 1984.
- [13] 乐红玲, 张萍霞, 王船海, 等. 平原河网区坡面汇流分布式单位线研究[J]. 水电能源科学, 2015, 33(2): 25-28. (LE Hongling, ZHANG Pingxia, WANG Chuanhai, et al. Research of distributed unit hydrograph of overland flow concentration in plain river network region [J]. Water Resources and Power, 2015, 33(2): 25-28. (in Chinese))
- [14] 赵静, 胡庆芳, 王腊春, 等. 基于 MSWEP 数据的太湖流域降水特性分析[J]. 水资源保护, 2020, 36(2): 27-33. (ZHAO Jing, HU Qingfang, WANG Lachun, et al. Analysis of precipitation characteristics in Taihu Lake Basin based on MSWEP [J]. Water Resources Protection, 2020, 36(2): 27-33. (in Chinese))

(收稿日期: 2020-07-28 编辑: 郑孝宇)

(上接第 28 页)

- [14] 李宏恩, 盛金保, 何勇军. 近期国际溃坝事件对我国大坝安全管理的警示[J]. 中国水利, 2020(16): 19-23, 30. (LI Hong'en, SHENG Jinbao, HE Yongjun. Global dam break events raise an alert about dam safety management [J]. China water resources, 2020(16): 19-23, 30. (in Chinese))
- [15] 吴双. 2010 年以来美国溃坝统计与分析[J]. 大坝与安全, 2020(5): 61-65. (WU Shuang. Statistics and analysis of dam failures in United States since 2010 [J]. Dam and Safety, 2020(5): 61-65. (in Chinese))
- [16] Временное положение о надзоре за безопасностью гидротехнических сооружений электростанций Утв. Гл. техн. упр. по эксплуатации энергосистем 27/XII 1972 г. и др. [S]. Moscow: Government of the USSR, 1972.
- [17] Совет Федерации Федерального Собрания Российской Федерации. Федеральный закон № 117-ФЗ О безопасности гидротехнических сооружений [S]. Moscow: Federation Council of the Federal Assembly of the Russian Federation, 1997.
- [18] Совет Федерации Федерального Собрания Российской Федерации. Федеральный закон № 116-ФЗ О промышленной безопасности опасных производственных объектов [S]. Moscow: Federation Council of the Federal Assembly of the Russian Federation, 1997.
- [19] Правительство Российской Федерации. Постановление Правительства Российской Федерации № 401 О федеральной службе по экологическому, технологическому и атомному надзору [S]. Moscow: Government of the Russian Federation, 2012.
- [20] Волосухин В А, Волосухин Я В. Нормативное, правовое и техническое регулирование в области безопасности гидротехнических сооружений [J]. Гидросооружения, 2010(1): 22-30.
- [21] Шурский О М, Пименов В И, Волосухин В А. Проблемы безопасности бесхозяйных гидротехнических сооружений [J]. Промышленная безопасность, 2013(1): 31-34.
- [22] 徐泽平. 美国密歇根州大坝溃决事件的分析与思考 [J]. 水利水电快报, 2020, 41(6): 8-14, 51. (XU Zeping. Analysis and discussion on dam failure accidents in Michigan, USA [J]. Express Water Resources & Hydropower Information, 2020, 41(6): 8-14, 51. (in Chinese))
- [23] 贾金生, 王莎, 郑瑾莹, 等. 捷克水库大坝、水电工程管理及对我国的启示[J]. 水力发电学报, 2018, 37(7): 98-105. (JIA Jinsheng, WANG Sha, ZHENG Cuiying, et al. Investigation on management of hydro-projects in Czech Republic and comparison with China [J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2018, 37(7): 98-105. (in Chinese))
- [24] 张建云, 杨正华, 蒋金平, 等. 水库大坝病险和溃坝研究与警示 [M]. 北京: 科学出版社, 2014.
- [25] 顾冲时, 苏怀智, 刘何稚. 大坝服役风险分析与管理研究述评[J]. 水利学报, 2018, 49(1): 26-35. (GU Chongshi, SU Huaizhi, LIU Hezhi. Review on service risk analysis of dam engineering [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2018, 49(1): 26-35. (in Chinese))

(收稿日期: 2020-05-03 编辑: 郑孝宇)