

DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdtqk.2018.0119

田福昌, 赵胤懋, 苑希民. 基于 MIKE FLOOD 耦合模型的塔洋河下游洪水演进分析[J]. 南水北调与水利科技, 2018, 16(5): 16-20, 84. TIAN F C, ZHAO Y M, YUAN X M. Flood routing analysis of the lower reaches of Tayang river based on MIKE FLOOD[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2018, 16(5): 16-20, 84. (in Chinese)

基于 MIKE FLOOD 耦合模型的塔洋河下游 洪水演进分析

田福昌, 赵胤懋, 苑希民

(天津大学 水利工程仿真与安全国家重点实验室, 天津 300072)

摘要: 海南省塔洋河下游段降水丰富, 洪水灾害频发, 急需构建该河段洪水演进分析模型, 为科学防洪减灾措施制定提供支持。基于塔洋河下游河段实测断面资料与高精度 DEM, 采用 MIKE FLOOD 建立河段一维水动力模型和两岸洪水威胁区二维水动力模型并实现两者的实时动态耦合, 模拟分析下游河段 50 年一遇洪水漫溢演进过程及淹没风险, 计算不同时段内洪水淹没范围和水深分布, 并从水量平衡和流场分布等角度对计算结果进行合理性分析。结果表明, 所建模型能够有效模拟塔洋河下游洪水演进过程及风险分布特征, 计算结果较为合理可靠, 可为区域防汛指挥、洪水风险管理与防洪预案制定等提供重要基础信息。

关键词: 塔洋河; 洪水风险; 水动力模型; 洪水演进; MIKE FLOOD

中图分类号: TV 122 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-1683(2018)05-0016-05

Flood routing analysis of the lower reaches of Tayang river based on MIKE FLOOD

TIAN Fuchang, ZHAO Yinmao, YUAN Ximin

(State Key Laboratory of Hydraulic Engineering Simulation and Safety, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: The rainfall in the lower reaches of the Tayang river is abundant and frequently causes flood disasters. It is urgent to build a flood routing analysis model for the river to provide support for the formulation of scientific flood control and disaster mitigation measures. Based on the measured section data and high precision DEM of the lower reaches of the Tayang river, we established a 1-D hydrodynamic model of the river section and a 2-D hydrodynamic model of the flood threat zones on both banks by MIKE FLOOD, and realized the real time dynamic coupling of the two. Then we analyzed the evolution process and inundation risk of a 50-year flood in the lower reaches, calculated the inundation range and water depth distribution in different periods, and analyzed the rationality of the calculation results using water balance analysis and flow field distribution. The results showed that the model can effectively simulate the process of flood routing and risk distribution in the lower reaches of the Tayang River. The calculation results were reasonable and reliable, and can provide important basic information for regional flood control command, flood risk management, and flood control plan formulation.

Key words: Tayang river; flood risk; hydrodynamic model; flood routing; MIKE FLOOD

近年, 全球极端天气频繁出现, 洪水灾害严重 威胁临河城镇的发展。为减少城镇发展过程中的

收稿日期: 2018-01-08 修回日期: 2018-04-28 网络出版时间: 2018-06-14

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20180614.0644.002.html>

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2017YFC0405601); 高等学校学科创新引智计划(B14012); 科技部重点领域创新团队(2014RA4031)

Funds: National Key R & D Program of China (2017YFC0405601); Program of Introducing Talents of Discipline to Universities (B14012); Fund for Key Research Area Innovation Groups of China Ministry of Science and Technology (2014RA4031)

作者简介: 田福昌(1989), 男, 河北沧州人, 博士研究生, 主要从事防洪减灾及水利信息化方面的研究。E-mail: fuchang_cool@163.com

通讯作者: 赵胤懋(1994), 女, 四川绵阳人, 主要从事水文预报和水资源调度方面的研究。E-mail: sciencce@tju.com

洪涝灾害影响,结合“洪涝风险管理”理念的洪水灾害风险分析是防洪减灾非工程措施发展的重要方向之一。

关于洪水灾害风险理论与实践,最早由国外学者发起。20世纪40年代,由美国吉尔伯特·怀特(Gilbert F. White)首次提出洪灾风险分析理论^[1],之后于20世纪80年代引起全球学者广泛关注,并在洪水演进分析领域得到应用实践。Chua等^[2]运用二维水动力模型模拟分析了莱茵河溃堤洪水在沿线洪泛区域内的淹没情况;Vacondio等^[3]运用光滑粒子水动力数值模型模拟了开边界条件下的洪水浅水运动。在我国,冯平和朱元甦等^[4-5]基于洪灾风险理论建立了二维复合事件风险组合模型并成功应用于南水北调中线工程防洪风险分析;槐文信等^[6]采用曲线坐标系下的有限分析法离散数值格式模拟计算了不规则区域的二维非恒定流运动过程。然而,基于概率统计方法的洪水风险分析,缺乏对系统不确定性和复杂性的全面考虑;二维浅水动力模型可以解析洪泛区洪水平面运动过程,但尚无法准确、实时的描述窄深河道内任意时刻水位与流量等水力要素^[7-8]。所以,河道与洪泛区一、二维水动力耦合模型融合了各自独特的优势,在洪灾风险管理与洪水演进分析中发挥着非常重要的作用^[9-14]。

本文以海南省塔洋河下游河段为研究对象,根据水量平衡和动量守恒原理,基于 MIKE FLOOD 建立塔洋河下游河段一、二维水动力耦合模型,模拟计算其遭遇50年一遇洪水时的漫溢洪水淹没过程及灾害风险,为塔洋河防洪体系完善、防汛应急抢险、洪水风险管理等提供重要参考。

1 洪水演进分析方法及原理

1.1 洪水分析方法确定

塔洋河为海南省万泉河的一级支流,干流全长63.60 km,平均坡降1.36‰,流域集水面积357 km²。据记载,历史上万泉河洪水灾情较为严重的年份主要有1948年、1954年、1970年、1976年、1983年和2013年等。由于缺少塔洋河下游区域详细的历史洪水灾害数据,水文学法和历史水灾法均不适用于该河段洪水风险分析。因此,本文采用水力学方法开展塔洋河下游河段50年一遇洪水风险分析,基于 MIKE FLOOD 建立河道及两岸洪水威胁区域一、二维水动力耦合模型,实现漫溢处堤内外水流的实时动态交互模拟,分析计算洪水动态演进过程中不同时刻对应的水位、流量和水深等水力要素。

1.2 洪水演进计算模型原理

(1) 一维水动力模型。

塔洋河下游河段一维水动力模型基本方程如下:

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial A}{\partial t} = q \quad (1)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial(\alpha \frac{Q^2}{A})}{\partial x} + gA \frac{\partial Z}{\partial x} + \frac{\partial Q|Q|}{C^2 AR} = 0 \quad (2)$$

式中: Q 为断面过水流量(m³/s); A 为过水面积(m²); x 为沿程距离(m); t 为时间(s); q 为区间来水(m²/s); R 为水力半径(m); C 为谢才系数(s/m^{1/3}); Z 为断面水位(m); α 为动量修正系数,为无量纲常量。

(2) 二维水动力模型。

塔洋河下游河段两岸洪水威胁区域二维水动力模型基本方程如下:

连续方程:

$$\frac{\partial H}{\partial t} + \frac{\partial M}{\partial x} + \frac{\partial N}{\partial y} = q \quad (3)$$

动量方程:

$$\frac{\partial M}{\partial t} + \frac{\partial(uM)}{\partial x} + \frac{\partial(vM)}{\partial y} + gH \frac{\partial Z}{\partial x} + g \frac{n^2 u \sqrt{u^2 + v^2}}{H^{1/3}} = 0 \quad (4)$$

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial(uM)}{\partial x} + \frac{\partial(vM)}{\partial y} + gH \frac{\partial Z}{\partial y} + g \frac{n^2 v \sqrt{u^2 + v^2}}{H^{1/3}} = 0 \quad (5)$$

式中: Z 为水深(m); H 为水位(m); q 为连续方程中的源汇项(m/s); M 与 N 分别为 x 和 y 方向的垂向平均单宽流量(m²/s); u 和 v 分别为垂向平均流速在 x 与 y 方向的分量(m/s); n 为曼宁糙率系数; g 为重力加速度(m/s²)。

(3) 一、二维水动力模型的耦合衔接。

为了充分利用一维模型和二维模型在各自领域单独应用时的优势,避免模型单独使用时存在的网格精度和准确性问题,本文基于 MIKE FLOOD 采用侧向连接方式实现一维模型和二维模型的动态耦合,由塔洋河下游河段一维水动力模型实时动态提供两岸洪水威胁区域二维模型固定时间步长内的入流条件,模拟计算河道洪水沿堤线漫溢淹没过程及风险分布情况。

2 洪水演进计算耦合模型建立

2.1 模型计算范围

根据塔洋河下游河段洪水风险图编制成果,确

定模型计算范围为福寨村至南面村段(塔洋河入河口)及两岸洪水威胁区域(图 1), 计算河段长度 16.37 km, 堤防设计防洪标准 10 年一遇, 两岸洪水威胁区计算面积 63.87 km²。采用水力学洪水分析方法, 建立塔洋河下游河段河道与两岸洪水威胁区域一、二维水动力耦合模型, 模拟其遭遇 50 年一遇洪水时的漫溢分流过程及演进淹没风险。

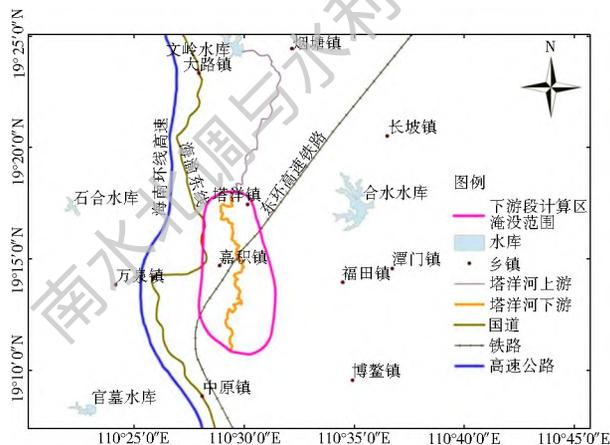


图 1 塔洋河下游段模型计算范围

Fig. 1 Model calculation range of the lower reaches of the Tayang River

2.2 河道断面设置与网格剖分

(1) 断面设置。河道断面是一维水动力模型重要的基础数据, 本文根据塔洋河下游河段实际宽度及其蜿蜒曲折情况, 在 1:10 000 矢量地形图和测量断面基础上对河道断面进行内插加密处理, 共设置 80 个断面, 断面平均间距为 204.63 m。

(2) 网格剖分。采用无结构不规则网格剖分技术对两岸洪水威胁区域进行网格划分, 根据线性阻水建筑物和地势地形确定网格尺度及其分布情况, 充分反映计算区域的地形特征。不规则三角形网格最大面积不超过 0.003 km², 适度加密重要地区或地形变化较大区域的计算网格, 共剖分网格数量 6.87 万个, 网格平均面积为 9.29×10^{-4} km²。

2.3 主要参数设置

(1) 糙率。糙率是水动力学模型最重要且较为灵敏的计算参数, 反映了洪泛区地表、河道底部以及岸坡影响水流阻力的综合系数^[12]。塔洋河下游河段河道内具有少量石块或杂草, 根据《洪水风险图编制技术细则(试行)》及《海南省琼海市塔洋河防洪整治工程初步设计报告》, 确定塔洋河下游河段河道综合糙率为 0.036; 根据《水力计算手册(第二版)》, 确定塔洋河下游段两岸洪水威胁区域农田植被糙率值为 0.06, 居民地糙率值为 0.04。

(2) 计算时间步长。综合考虑模型稳定性及运

算效率等因素, 设定塔洋河下游段河道一维水动力模型计算时间步长为 1 s, 两岸洪水威胁区域二维水动力模型最大计算步长为 1 s、最小计算步长为 0.01 s, 模型可根据洪水信息与地形条件自动调整计算时间步长。

2.4 边界条件确定

塔洋河下游河段一、二维水动力耦合模型控制边界主要包括上游入流边界(福寨村断面)、区间汇流及下游出流边界(末端出口入万泉河), 对应边界条件分别为福寨村断面 50 年洪水流量过程、区间汇流流量过程、塔洋河河口(接万泉河)断面 50 年一遇洪水过程。

(1) 入流边界条件。塔洋河下游河段洪水主要来源于上游降雨产汇流, 由于塔洋河流域内无实测洪水资料, 故根据 1991 年广东省暴雨参数等值线图查算暴雨参数, 采用综合单位线法间接推算福寨村断面 50 年一遇洪水流量过程见图 2。塔洋河区间洪水即福寨村至南面村(塔洋河入河口)范围内的汇流洪水, 采用综合单位线法推算区间来流洪水过程, 见图 3, 按照区间洪水沿河均匀汇入方式对其进行概化处理。

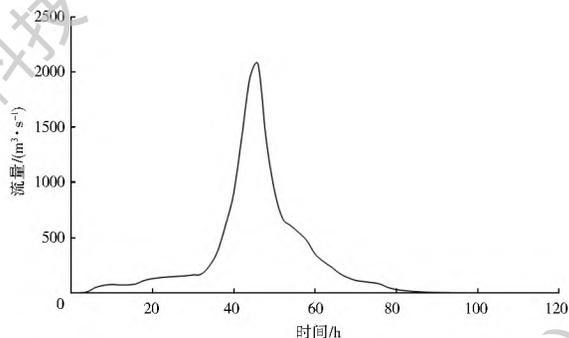


图 2 塔洋河福寨村断面 50 年一遇洪水流量过程

Fig. 2 The process of 50 year flood flow at the Fuzhai Village section of Tayang river

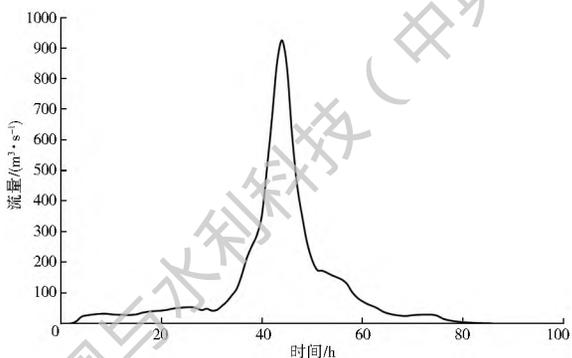


图 3 塔洋河下游段区间汇流洪水过程

Fig. 3 Confluence flood process in the lower reaches of Tayang River

(2) 出流边界条件。塔洋河下游河段出口受干流万泉河洪水顶托影响, 出流边界条件为河口处万泉河断面相应的 50 年一遇洪水过程, 见图 4。

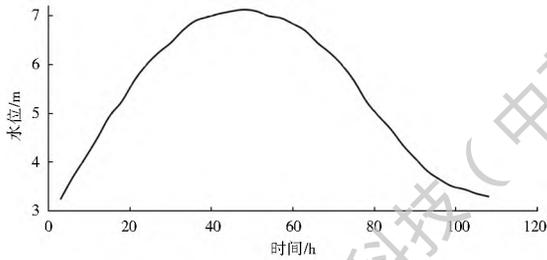


图4 塔洋河河口段断面 50 年一遇设计水位过程
Fig. 4 Design water level process of a 50 year flood in the Tayang River estuary section

3 洪水演进计算及结果分析

3.1 洪水淹没风险分析

根据所建塔洋河下游段一、二维水动力耦合模型,动态模拟其遭遇 50 年一遇洪水情况下的河道洪水演进过程及漫堤洪水淹没风险,采用非恒定流水动力学方法计算河段不同断面实时水位和流量以及漫堤洪水演进过程中任一网格不同时刻的洪水淹没风险要素。提取河道计算断面最高水位,连接绘制河道最高水面线,见图 5。

由图 5 分析可知,当塔洋河下游河段遭遇 50 年

一遇洪水时,全线堤段发生洪水漫溢现象,堤防漫溢长度 16 37 km,漫溢水头高,淹没风险大。两岸洪水威胁区域主要时刻淹没水深见图 6,洪水演进初始出现多个淹没区,淹没范围与积水深随时间增加不断加大而后逐渐减小。当洪水演进 12 h,加堆村附近水深迅速增加,最大水深 1.22 m,淹没区积水量 278 51 万 m³;洪水演进 45 h,河道两岸堤段均发生洪水漫溢现象,此时淹没区洪水演进至万泉河,大璞村附近淹没水深最大,多达 5.42 m,淹没区积水量 4 257.23 万 m³;洪水演进 120 h,淹没区大部分洪水退回至塔洋河,此时淹没区积水量 495.64 万 m³。

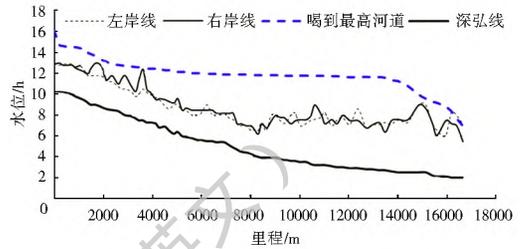


图5 塔洋河下游段 50 年一遇洪水水面线
Fig. 5 The water surface line of the 50 year flood in the lower reaches of the Tayang River

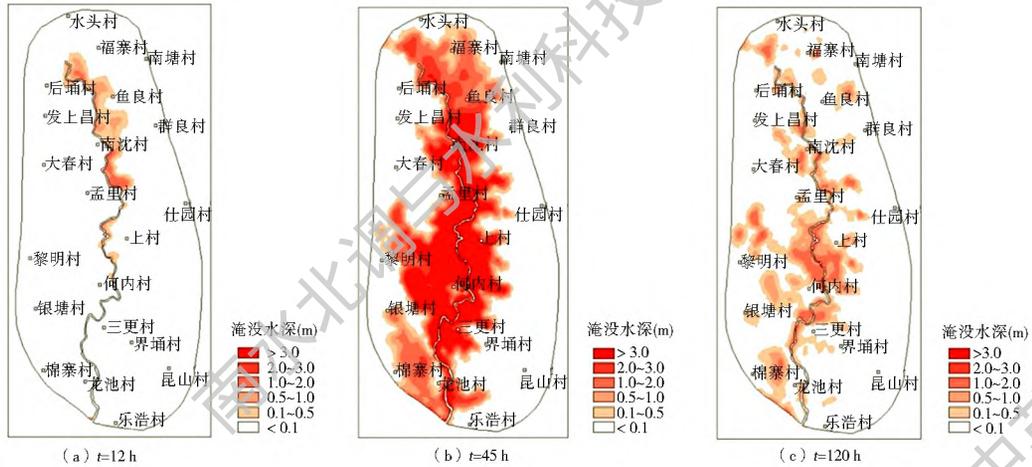


图6 洪水演进淹没水深
Fig. 6 Submerged depth map of flood routing

3.2 计算结果合理性分析

塔洋河下游区域无详细的历史实测洪涝灾害资料,本文主要从水量平衡、流场分布、地形水深比较等方面对模型计算结果进行合理性分析,一定程度上保证模型计算精准度、可靠性和合理性。

(1) 水量平衡分析。根据模型运算结果统计计算区域进出水量、河道槽蓄量与淹没区积水量,经验证满足“洪水威胁区域积水量=上游来水量-下游出水量-河道槽蓄量”关系式,说明所建模型洪水计算满足水量平衡要求。

(2) 流场分布及地形分析。淹没区局部水深、流

速、流场、DEM 高程统计见图 7,对比分析图 7(a)与图 7(b)可知:局部积水深和流场走向均符合地形分布特征,即洪水由高向低流动、低洼地带积水且水深较大、地形较高区域水深较小或无淹没;对比分析图 7(a)与图 7(c)可知:沿堤线部位洪水流速较大(由漫溢水头较高导致),离堤线距离越远流速越小,这与流场箭头长度和密度分布相吻合。可见,洪水流场光滑且分布均匀,洪水淹没水深、洪水流速、流场分布均与区域地形起伏分布特征相匹配且存在一定规律性,本文所建模型计算结果是基本合理可靠的。

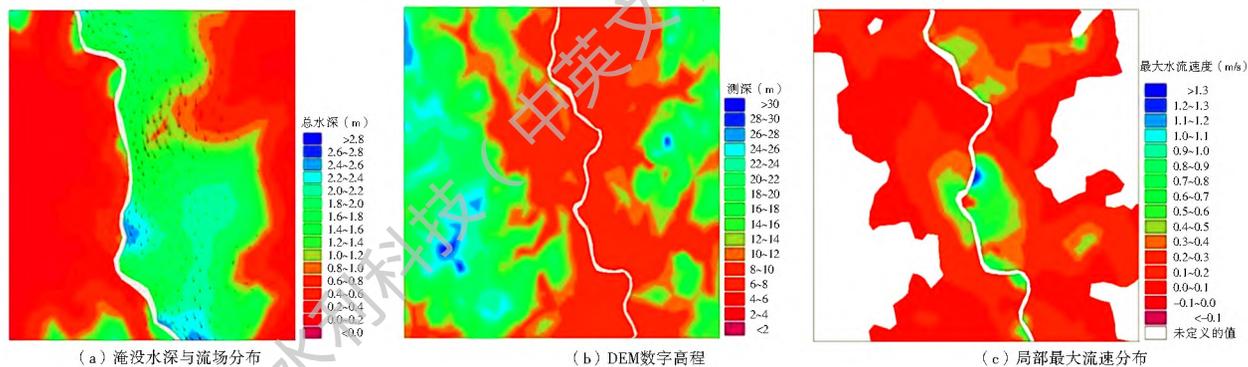


图 7 计算结果合理性分析

Fig. 7 Analysis of the rationality of the calculation results

4 结论

(1) 基于 MIKE FLOOD 构建了塔洋河下游段河道及两岸洪水威胁区域一、二维水动力耦合模型, 模拟了 50 年一遇洪水情景下河道水面线、漫堤洪水演进过程及淹没风险, 并从水量平衡、流场分布、地形水深比较等方面对计算结果进行了合理性分析, 研究表明, 所建模型精度较高、结果较为合理可靠, 可为区域防洪减灾措施制定提供参考。

(2) 塔洋河下游段河道具有蜿蜒、浅窄的特点, 遭遇超标准洪水情况下河道过水能力严重不足, 将造成两岸较大面积的洪水淹没范围, 洪灾风险很大, 需对塔洋河下游段进行河道疏浚清淤、堤防加高、护坡护岸等处理, 适度拓宽河道, 提高过流能力, 降低洪灾风险。

参考文献 (References):

- [1] WHITE G F. Choice of Adjustment to Floods [D]. Research paper Chicago: University of Chicago, 1964.
- [2] CHUA L H C, MERTING F, HOLZ K P. River inundation modelling for risk analysis [J]. Progress in Water Resources, 2001: 373-382.
- [3] VACONDIO R, ROGERS B D, STANSBY P K, et al. SPH modeling of shallow flow with open boundaries for practical flood simulation [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2012, 138: 530-541. DOI: 10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0000543.
- [4] 冯平, 闰大鹏, 耿六成, 等. 南水北调中线总干渠防洪风险评估方法的研究 [J]. 水利学报, 2003(4): 40-45. (FENG P, RUN D P, GENG L C, et al. Study on flood risk assessment of the main channel in middle route of the water transfer project from south to north [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2003(4): 40-45. (in Chinese)) DOI: 10.13243/j.cnki.slxb.2003.04.008.
- [5] 朱元甦, 韩国宏, 王钦慈, 等. 南水北调中线输水工程的交叉建筑物水毁风险分析 [J]. 水文, 1995(3). (ZHU Y S, HAN G H, WANG Q C, et al. The Risk Analysis of Flood Damaging to the Cross structures on the Main Canal of the South to North Water Transfer Project [J]. Hydrology, 1995(3). (in Chinese))
- [6] 槐文信, 赵振武, 童汉毅, 等. 渭河下游河道及洪泛区洪水演进的数值仿真 (I): 数学模型及其验证 [J]. 武汉大学学报 (工学版), 2003, 36(4): 10-14. (WEI W X, ZHAO Z W, TONG H Y, et al. Numerical simulation on flood in downstream of Weihe River and flooded area (I): Mathematic model and its calculation method [J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2003, 36(4): 10-14. (in Chinese)) DOI: 10.1671-8844(2003)04-010-05.
- [7] 苑希民, 田福昌, 冯国娜, 等. 溃堤洪水的二维水动力模型及其应用 [J]. 南水北调与水利科技, 2015, 13(2): 225-230. (YUAN X M, TIAN F C, FENG G N, et al. Two dimensional hydrodynamic model and its application of levee breach flood [J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2015, 13(2): 225-230. (in Chinese)) DOI: 10.13476/j.cnki.nsbtdq.2015.02.008.
- [8] 田志静, 冯民权, 赵明登. 沁河高庄段洪水漫堤二维模拟 [J]. 武汉大学学报 (工学版), 2013, 46(4): 413-416, 422. (TIAN Z J, FENG M Q, ZHAO M D. 2D simulation of dike overtopping in Gaozhuang reach of Qinhe River [J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2013, 46(4): 413-416, 422. (in Chinese)) DOI: 10.1671-8844(2013)04-0413-04.
- [9] 付成威, 苑希民, 杨敏. 实时动态耦合模型及其在洪水风险图中的应用 [J]. 水利水运工程学报, 2013(5): 32-38. (FU C W, YUAN X M, YANG M. A real time dynamic coupling model for flood routing and its application to flood risk charting [J]. Hydro Science and Engineering, 2013(5): 32-38. (in Chinese)) DOI: 10.16198/j.cnki.1009-640x.2013.05.012.
- [10] 苑希民, 李长跃, 田福昌, 等. 多源洪水耦合模型在防洪保护区洪水分析中的应用 [J]. 水利水运工程学报, 2016(5): 16-22. (YUAN X M, LI C Y, TIAN F C, et al. Application of multi source flood coupling model to flood analysis of flood protection zone [J]. Hydro Science and Engineering, 2016(5): 16-22. (in Chinese)) DOI: 10.16198/j.cnki.1009-640x.2016.05.003.
- [11] 苑希民, 庞金龙, 田福昌, 等. 多溃口河网耦合模型在防洪保护区洪水分析中的应用 [J]. 水资源与水工程学报, 2016, 27(1): 128-135. (YUAN X M, PANG J L, TIAN F C, et al. Application of multi breach river network coupling model in flood analysis of flood control protection Zone [J]. Journal of Water Resources & Water Engineering, 2016, 27(1): 128-135. (in Chinese)) DOI: 10.11705/j.issn.1672-643X.2016.01.23.

(下转第 84 页)

124. (in Chinese) DOI: 1005 3409(2013) 03 0120 05.
- [27] 王倩, 杨太保, 杨雪梅. 伊犁河流域归一化植被指数的时空变化及其对气候的季节响应[J]. 兰州大学学报(自然科学版), 2016, 52(4): 466-474. (WANG Q, YANG T B, YANG X M. The spatio-temporal changes of normalized difference vegetation index and its response to seasonal climate in Ili River Basin[J]. Journal of Lanzhou University: Natural Sciences, 2016, 52(4): 466-474. (in Chinese). DOI: 10. 13885/j. issn. 0455-2059. 2016. 04. 007.
- [28] 周春艳, 王萍, 张振勇, 等. 基于面向对象信息提取技术的城市用地分类[J]. 遥感技术与应用, 2008, 23(1): 31-35 (ZHOU C Y, WANG P, ZHANG Z Y, et al. Classification of Urban Land Based on Object-oriented Information Extraction Technology[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2008, 23(1): 31-35. (in Chinese) DOI: 1004-0323(2008) 01-0031-05.
- [29] PERNOLLET C A, GUELMAMI A, GREEN A J. et al. A comparison of wintering duck numbers among European rice production areas with contrasting flooding regimes[J]. BIOLOGICAL CONSERVATION, 2015, 186: 214-224. DOI: 10. 1016/j. biocon. 2015. 03. 019.
- [30] POLYDOROS A, CARTALIS C. Use of Earth Observation based indices for the monitoring of built up area features and dynamics in support of urban energy studies[J]. Energy and Buildings, 2015, 98: 92-99. DOI: 10. 1016/j. enbuild. 2014. 09. 060.
- [31] 吴志杰, 赵书河. 基于 TM 图像的"增强的指数型建筑用地指数"研究[J]. 国土资源遥感, 2012(2): 50-55. (WU Z J, ZHAO S H. A Study of Enhanced Index-based Built up Index Based on Landsat TM Imagery[J]. Remote Sensing for Land and Resources, 2012, (2): 50-55. (in Chinese). DOI: 10. 6046/gtzyyg. 2012. 02. 10.
- [32] GAO Y C, GAN G J, LIU M F et al. Evaluating soil evaporation parameterizations at near instantaneous scales using surface dryness indices[J]. Journal of Hydrology. 2016, 541(8): 1199-1211. DOI: 10. 1016/j. jhydrol. 2016. 08. 027.
- [33] 郝敬锋, 刘红玉, 李玉凤, 等. 基于转移矩阵模型的江苏海滨湿地资源时空演变特征及驱动机制分析[J]. 自然资源学报, 2010, 25(11): 1918-1929. (HAO J F, LIU H Y, LI Y F et al. Spatio-temporal variation and driving forces of the coastal wetland resources based on the transition matrix in Jiangsu province[J]. Journal of Natural Resources, 2010, 25(11): 1918-1929. (in Chinese) DOI: 1000-3037(2010) 11-1918-12.
- [34] ZU O D P, XU Z X, YAO W Y et al. Assessing the effects of changes in land use and climate on runoff and sediment yields from a watershed in the Loess Plateau of China[J]. Science of The Total Environment, 2016, 544: 238-250. DOI: 10. 1016/j. scitotenv. 2015. 11. 060.
- [35] 冯仕超, 高小红, 顾娟, 等. 基于 CLUE-S 模型的湟水流域土地利用空间分布模拟[J]. 生态学报, 2013(3): 985-997. (FENG S C, GAO X H, GU J et al. Land use spatial distribution modeling based on CLUE-S model in the Huangshui River Basin[J]. Acta Ecologica Sinica, 2013, (3): 985-997. (in Chinese) DOI: 10. 5846/stxb201204280616.
- [36] 王丽艳, 张学儒, 张华, 等. CLUE-S 模型原理与结构及其应用进展[J]. 地理与地理信息科学, 2010, 26(3): 73-77. (WANG L Y, ZHANG X R, ZHANG H et al. Principle and structure of CLUE-S model and its progresses[J]. Geography and Geo-Information Science, 2010, 26(3): 73-77. (in Chinese) DOI: 10. 1672/0504(2010) 03 0073-05.
- [37] 朱春娇. 基于 Markov 和 CLUE-S 模型的浦东新区土地利用变化趋势分析[D]. 上海: 华东师范大学, 2015. (ZHU C J. Analyzing land use change and trend in Pudong New Area with Markov and CLUE-S model[D]. Shanghai: East China Normal University, 2015. (in Chinese)).
- [38] 李闻. 基于 CLUE-S 模型的土地利用模拟研究——以江苏省镇江市为例[D]. 南京: 南京师范大学, 2010. (LI W. Simulation of land use based on CLUE-S model——a case study of Zhenjiang City, Jiangsu Province[D]. Nanjing: Nanjing Normal University, 2010. (in Chinese))

(上接第 20 页)

- [12] 周洁, 董增川, 朱振业, 等. 基于 MIKE FLOOD 的洪泽湖周边滞洪区洪水演进模拟[J]. 南水北调与水利科技, 2017, 15(5): 56-62. (ZHOU J, DONG Z C, ZHU Z Y, et al. Flood routing simulation of Hongze Lake detention basin based on MIKE FLOOD[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2017, 15(5): 56-62. (in Chinese) DOI: 10. 13476/j. cnki. nsbdqk. 2017. 05. 009.
- [13] 苑希民, 田福昌. 宁夏黄河防洪保护区洪水分析与风险图编制研究[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2016. (YUAN X M, TIAN F C. Study on Flood Analysis and Risk Map Compilation of Yellow River Flood Control Area in Ningxia[M]. Beijing: China Water & Power Press, 2016. (in Chinese))
- [14] 苑希民, 薛文字, 冯国娜, 等. 溃堤洪水分析的一、二维水动力耦合模型及应用[J]. 水利水电科技进展, 2016, 36(4): 53-58. (YUAN X M, XUE W Y, FENG G N, et al. A coupled one and two dimensional hydrodynamic model for analysis of levee breach flood and its application[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2016, 36(4): 53-58. (in Chinese) DOI: 10. 3880/j. issn. 1006 7647. 2016. 04. 010.