引文格式：刘波,李英冰,杨新红. 卡霍夫卡溃坝造成的下游灾情评估[J]. 地理空间信息, 2024, 22(1): 39-43. doi:10. 3969/j.issn. 1672-4623.2024.01.009

卡霍夫卡溃坝造成的下游灾情评估

刘　波[1]，李英冰[1*]，杨新红[2]
（1. 武汉大学 测绘学院，湖北 武汉 430079；2. 中国地震应急搜救中心，北京 100049）

摘　要：2023年6月6日凌晨乌克兰赫尔松州卡霍夫卡水电站大坝被炸毁。该大坝坐落于第聂伯河下游，上游约有18亿m^3水库蓄水，下游有60多个村镇、数10万居民，溃坝洪水对下游产生了巨大影响。基于Sentinel-1遥感影像，利用双极化水体指数与最大类间方差法（OTSU）提取了第聂伯河下游区域受灾前后的水域分布情况；通过对比分析溃坝前后一周内的情况提取受灾区域，结合地物分类数据和交通矢量数据，综合评估了部分重要地物的受灾情况，约170.72 km^2的农田、5.14 km^2的建筑被淹没，16.63%的道路存在不同程度的淹没情况。

关键词：溃坝；洪水；灾情评估；遥感；OTSU
中图分类号：P237　　**文献标志码：**B　　**文章编号：**1672-4623（2024）01-0039-05

Downstream Disaster Evaluation Caused by the Kakhovka Dam Failure

LIU Bo[1], LI Yingbing[1], YANG Xinhong[2]
(1. School of Geodesy and Geomatics, Wuhan University, Wuhan 430079, China;
2. China Earthquake Emergency Search and Rescue Center, Beijing 100049, China)

Abstract: In the early morning of June 6, 2023, the dam of Kakhovka hydroelectric power plant in Kherson Oblast, Ukraine, which was located in the downstream of Dnieper River with about 1.8 billion m^3 of reservoir water stored upstream and more than 60 villages and towns with hundreds of thousands of inhabitants downstream of the dam, was blown out, and the dam failure flood had a huge impact on the downstream. In this paper, we used Sentinel-1 remote sensing images to extract the pre and post-disaster water distribution in the Dnieper River downstream by the dual-polarized water body index and the maximum inter-class variance method (OTSU), and compared and analyzed the affected areas within one week before and after the dam failure to extract the affected areas. Finally, combined with the feature classification data and traffic vector data, we comprehensively evaluated the damage extent of some important features, including 170.72 km^2 of agricultural land and 5.14 km^2 of buildings were flooded, and 16.63% of roads were also flooded to different degrees.

Key words: dam failure, flood, disaster evaluation, remote sensing, OTSU

由于水库蓄水具有巨大的势能，溃坝洪水通常会对下游的人员和建筑物造成巨大破坏[1]。许多高风险大坝缺乏紧急行动计划，无法在大坝发生故障时，判断哪些下游地区将被淹没[2]。因此，定量评估溃坝洪水灾害是大坝应急行动规划的核心，对救灾减灾具有决定性作用[3]。通过数值模拟[4-10]或物理模型[11-15]追踪溃坝演进过程，可计算洪水淹没范围，如借助二维溃坝数值模型[10]、元胞自动机[15]等方法可精确计算溃坝任意时刻的淹没情况。在此基础上，部分学者结合历史溃坝数据[16]、高分辨率地形数据[17]等进一步提高模型准确度；进而构建灾情风险评估体系，如利用模糊综合评价方法[18]、概率图[19]等对不同指标、不同地点的淹没情况进行量化，以评估洪水风险和综合灾情。利用全天候、大范围遥感卫星获取地表实时水体信息，可快速计算洪水淹没范围[20-21]。已有研究证明了遥感得出的水位在建模序列中的作用[22]，可为洪涝灾害管理提供实际帮助[23]，满足灾害应急过程中对不同时空尺度信息的需求[24]，而具备较强穿云透雾能力的SAR卫星在洪水监测中往往更加适用[25]。

卡霍夫卡大坝因战争损毁，属于突发随机事件，缺乏必要的建模参数，常规数学物理方法应用难度较大。为快速评估下游损失，本文以Sentinel-1卫星影像为数据源，利用最大类间方差法（OTSU）提取溃坝前后地表水域，差分求解洪水范围；并联合土地利

收稿日期：2023-09-10。
项目来源：国家重点研发计划资助项目（2018YFC0807000、KJSP2020020101、KJSP2020020303）。
第一作者简介：刘波（2000—），硕士研究生，主要研究方向为空间大数据分析，E-mail：2838322646@qq.com。
通信作者：李英冰（1973—），博士，副教授，主要研究方向为空间大数据分析，E-mail：ybli@whu.edu.cn。

用数据、交通矢量数据定量描述灾情影响。

1 基于遥感影像的溃坝灾情评估方法

1.1 技术路线

本文直接利用谷歌地球引擎（GEE）平台内置函数从数据库中筛选出拍摄时间、覆盖范围、含云量均满足要求的影像进行拼接镶嵌，大大提高了影像处理效率[26]。技术路线见图1。

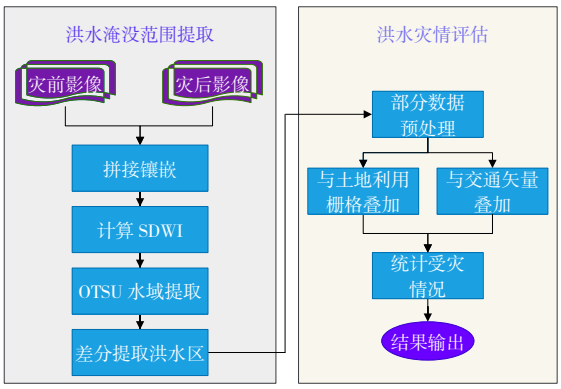


图1 技术路线

1.2 洪水淹没范围提取方法

根据地物的光谱特性曲线，对遥感影像不同波段进行组合，达到增强水域与其他地物区分度的目的。Sentinel-1双极化水体指数（SDWI）结合了微波遥感中水域信息在影像中的特点，进一步反映了Sentinel-1双极化数据之间水体信息提取的关系，以达到增强水体特征的目的，同时消除土壤和植被[27]。其表达式为：

$$\mathrm{SDWI}=\ln(10\times \mathrm{VV}\times \mathrm{VH})-8 \tag{1}$$

式中，VV、VH为Sentinel-1影像中的同名波段。

经SDWI增强后的影像，水体与背景之间的差异最大化，再利用OTSU算法进行分割。OTSU算法是日本学者大津于1979年提出的一种图像二值化阈值分割算法[28]，首先统计分析影像的灰度分布，并根据其差异分为两个聚类；再利用方差量化描述两个聚类之间的差异，二者的类间方差越大，则认为构成图像的这两部分差别越大，通常一部分是需提取的图像信息，另一部分是无效信息。OTSU算法的基本思路为：

1）假设图像的总灰度级为 $L-1$，给定初始阈值 T_0，可将图像分为待提取目标（前景）和背景信息（背景）两部分。

2）若图像的像素总数为 N，前景、背景分别为 N_f 和 N_b，每个灰度级为 N_i，则有（假设待提取目标灰度值高于背景）：

$$\begin{cases} P_\mathrm{f}=\sum_{i=T_0}^{i=L-1}\dfrac{N_i}{N} \\ P_\mathrm{b}=\sum_{i=0}^{i=T_0}\dfrac{N_i}{N} \end{cases} \tag{2}$$

3）分别求解背景、前景和图像整体的灰度平均值，即

$$\begin{cases} M_\mathrm{f}=\sum_{i=T_0}^{i=L-1} i\times\dfrac{N_i}{N_\mathrm{f}} \\ M_\mathrm{b}=\sum_{i=0}^{i=T_0} i\times\dfrac{N_i}{N_\mathrm{b}} \\ M=P_\mathrm{f}\times M_\mathrm{f}+P_\mathrm{b}\times M_\mathrm{b} \end{cases} \tag{3}$$

4）求解前景与背景之间的类间方差，即

$$\sigma^2=P_\mathrm{f}\times(M_\mathrm{f}-M)^2+P_\mathrm{b}\times(M_\mathrm{b}-M)^2 \tag{4}$$

5）通过设置不同的阈值 T_0 迭代，使得 σ^2 最大，此时得到最佳阈值。

理论上，通过OTSU算法可以最小的错分概率获取图像的有效信息，因此该方法通常与各类地物遥感指数结合使用，完成不同地物的精确语义分割。利用灾后水域减去灾前水域，即可得到新增的水域，也即洪水淹没区域。

1.3 洪水灾情评估方法

洪水灾情评估是对各种受影响实体的淹没情况进行全面统计与分析，以便挖掘出被淹没实体的分布规律。本文评估工作主要分为典型地物受灾评估和交通受灾评估两个方面，具体流程为：①数据格式与空间基准的统一化处理，在典型地物受灾评估中，洪水淹没数据和地物分类数据均采用栅格形式，统一重新采样至30 m分辨率，且统一采用WGS84坐标基准，而交通受灾评估需利用矢量形式的交通数据，因此将洪水淹没的栅格数据转换为矢量形式，并统一至WGS84椭球下的坐标系统；②空间叠加处理，通过算数求和计算典型地物栅格被淹没情况，并利用空间相交的方法为交通矢量数据赋予布尔类型的淹没属性值；③灾情统计评估，详细统计各类地物的总面积、淹没面积和淹没比例等指标，以量化描述受灾程度，并统计分析被淹没的交通枢纽、交通站点、道路和铁路等要素数量，以量化洪水对交通系统的影响程度。

2 卡霍夫卡溃坝淹没范围计算

2.1 研究区概况与数据来源

本文选取的研究区为卡霍夫卡水电站及其下游区域，涵盖会受到溃坝洪水影响的第聂伯河下游流域，地理范围为46.40875°~46.84634° E、32.22158°~33.41634° N，区域内最低高程为-30 m，最高高程为67 m，总面积

约为4 500 km²。第聂伯河是欧洲东部的第二大河，欧洲第四大河，源于俄罗斯瓦尔代丘陵南麓；向南流经白俄罗斯、乌克兰，注入黑海；主要支流包括杰斯纳河、索日河、普里皮亚季河等；上游有运河与涅曼河、西布格河以及西德维纳河相通；全长2 285 km，流域面积为50.3万km²，总落差为253 m，河口处全年平均流量为1 670 m³/s。

本文采用的土地利用/覆盖数据来源于世界资源研究所提供的Dynamic World数据集（https://www.wri.org/），这是一款10 m分辨率的近实时产品，包括9个类别概率和标签信息，并处于实时更新中。本文将分辨率为10 m×10 m的地表覆盖图像重采样至30 m×30 m，与其余栅格数据保持一致。由Dynamic World栅格可知，研究区内存在树木、草地、农田、建筑、裸地、水体、湿地7种地物类型。统计分析区域内所有地物分布发现（图2），区域内面积最大的地类为农田，广泛分布于东南区域和第聂伯河以北，总面积占比达到了44%；其次为草地（占比24%），主要聚集于第聂伯河南侧与树木交错分布，同时零散分布于农田间隙；建筑面积占比仅约为4%，大致沿河道两侧带状或块状分布。

本文利用GEE获取和处理来源于欧空局（https://scihub.copernicus.eu/）的Sentinel-1微波遥感影像[26]。通过志愿地理信息平台OpenStreetMap（https://www.openstreetmap.org）获取交通矢量数据。该平台是一种众包的世界地图，涵盖了全球的建筑、交通等矢量数据，全部开放下载。NASA的DEM产品（https://cmr.earthdata.nasa.gov/）是借助其他辅助数据优化90 m分辨率STRM产品，最终生成的30 m分辨率产品。

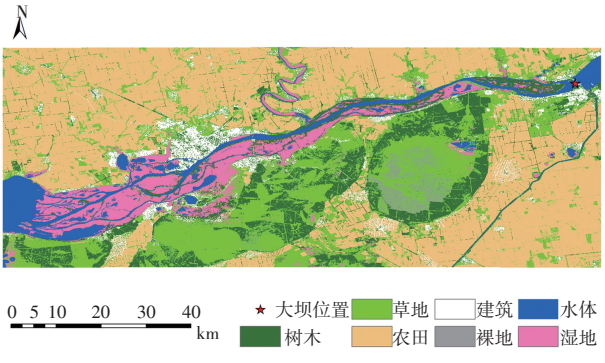
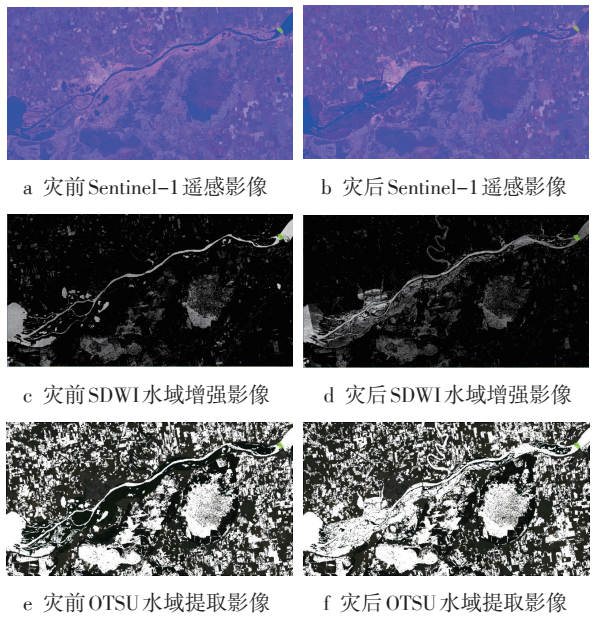


图2　不同地物分布

2.2　基于遥感影像的水域提取

Sentinel-1遥感卫星能实现高时效、大范围的地表监测，在洪水淹没区域提取上具有较大优势。本文借助GEE平台，利用SDWI与OTSU分别对研究区受灾前后进行了水域提取，并将水域变化部分作为洪水淹没范围。

以2023年6月1日—6月5日为灾前时间段、2023年6月6日—6月12日为灾后时间段，获取研究区遥感影像（图3），东北角绿色位置为卡霍夫卡水电站大坝，由图3b可知第聂伯河沿岸水域面积明显增加，支流河道也显著拓宽，均达到数倍水平；图3d除了能得到与图3b相同的结论外，还能直观感受到卡霍夫卡水库的水域面积因大量排水而减小，可视范围内面积减少了30%，表明水库中水位的下降；图3e、3f为二值影像，其中取值为1的部分（白色）为提取的水体，利用OTSU能精确提取水体，但将图3e与图2进行空间叠加发现，超过40%的植被、农田等由于含水量较大也被判定为水体，对地物分类造成一定影响。



a 灾前Sentinel-1遥感影像　b 灾后Sentinel-1遥感影像

c 灾前SDWI水域增强影像　d 灾后SDWI水域增强影像

e 灾前OTSU水域提取影像　f 灾后OTSU水域提取影像

图3　水域提取过程影像

2.3　洪水淹没范围计算

洪水可被定义为河流、湖泊、海洋等水域含水量大幅增加，超过一定水位对附近地区产生威胁，甚至造成灾害的一种水文现象。因此，本文将任意地区的地表水体划分为永久水体、季节性水体和洪水，永久水体是指在较长时间内稳定存在，流量和流域范围较固定的水体，通常可将旱季最低水位的河流湖泊视为永久水体；季节性水体是指在不同季节表现出明显变化，存在系统性规律的水体，主要受气温、降水等因素影响；洪水则是在上述类型之外，随机性与偶发性较强的水体，主要表现为短暂覆盖原区域其他地物而后退去，3类水体之间存在一定的相互影响与转换关系。

利用灾后水域减去灾前水域，即可得到新增水域。根据前文定义，新增水域中永久水体被消除，且由于灾前灾后两组数据的时间跨度在两周以内，不考

虑季节性水体的影响。图3中存在的大量零散的误分为水域的像元，经算术相减后被消除，不会影响洪水区域的提取。由于系统误差干扰，存在部分零散的洪水像素点，本文根据连通性原理进行平滑处理，消除少于8个像素的洪水区域。最终的淹没分布范围见图4。利用DEM数据进行水文分析，经填洼、坡向计算、流量统计等步骤后得到研究区内的河网分布。图4提取的淹没范围与河网分布高度一致，表明提取的淹没范围是合理的。洪水主要分布于第聂伯河河岸附近，整个下游入海口均被淹没，因古列茨河沿岸淹没情况也较严重。除河流附近的集中淹没区域外，还有众多零散淹没区域，这些零散淹没区域均沿着计算的河网走势随机分布。

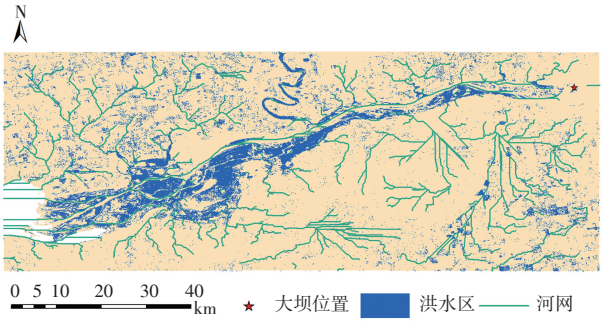


图4 洪水淹没范围

3 洪水灾情分析

3.1 典型地物受灾情况

不同地物淹没情况见图5、6，可以看出，湿地被大量集中淹没，主要分布于第聂伯河及其支流沿岸；农田呈现零散淹没格局，广泛分布于整个区域；整个研究区约有11.48%的区域被淹没，面积约为489.24 km^2，从面积绝对值来看，湿地与农田的受灾情况最严重，受灾面积分别达到243.55 km^{2}和170.72 km^2，但从面积占比来看，69.57%的湿地被淹没，8.60%的农田被淹没，其余地物被淹没占比均不足5%。结合图2可知，湿地主要分布于第聂伯河的河岸附近，河道水位上升时大部分都会被淹没，因此受灾情况最严重；农田是研究区内分布最广的地类，面积占比接近50%，因此受灾情况也较严重；相比之下，建筑仅有2.56%被淹没，面积约为5.14 km^2。

3.2 交通受灾情况

由OpenStreetMap获取研究区的交通枢纽（信号灯、十字路口等）、交通站点（公交站、铁路站等）、道路（公路、高速公路、城市道路等）和铁路数据（图7），共计1 511个交通枢纽、506个交通站点、

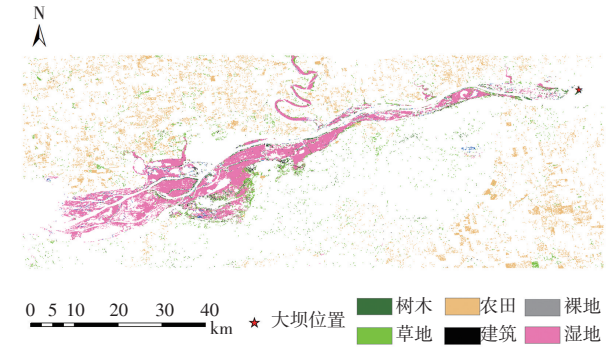


图5 不同地物被淹没情况

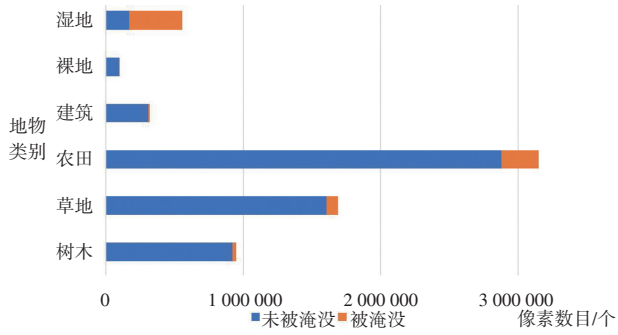


图6 不同地物淹没情况统计

19 076段道路曲线、514段铁路曲线。交通枢纽、交通站点主要分布在第聂伯河沿岸的居民区附近，呈现出明显的聚集现象；道路网在居民区密度最大，在农田区域呈规则形状排列；铁路由研究区西北穿过第聂伯河延伸至研究区东南。

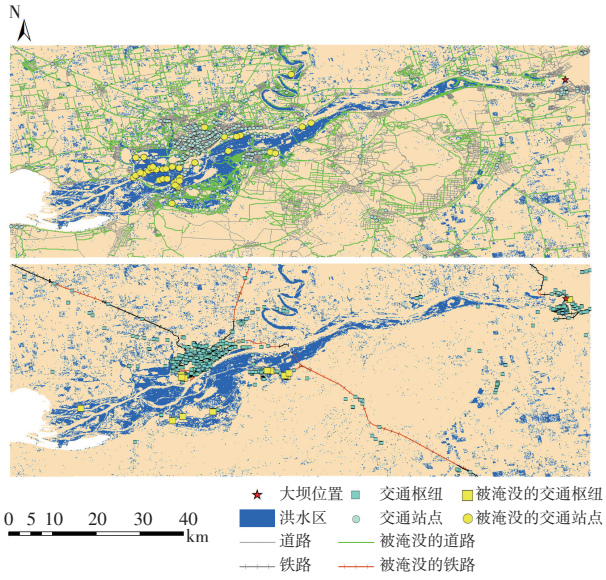


图7 交通受灾情况分布

对交通数据和洪水区数据进行叠加分析，统计交通淹没情况发现，交通整体受灾情况较轻，交通枢纽与交通站点分别仅有1.13%和7.91%被淹没，由于交通站点中包含了较多位于河道沿岸的渡船码头，因此被淹没比例明显高于交通枢纽；由于道路网在农田区域大量分布，因此在农田被淹没面积较大的同时道路

网被淹没比例也有一定升高，达到了16.63%；铁路横跨距离远，穿过了多片被淹没区域，但淹没比例较小（6.23%）。

4 结　语

卡霍夫卡水电站大坝在战争中被毁，对下游区域造成了重大影响，本文基于Sentinel-1卫星影像对大坝下游灾情进行统计分析。

1）基于Sentinel-1卫星影像，利用SDWI和OTSU算法提取了卡霍夫卡溃坝造成的淹没范围。

2）卡霍夫卡溃坝造成下游489.24 km^2被淹，其中湿地、农田、建筑被淹没面积分别为243.55 km^2、170 km^2和5.14 km^2。交通枢纽、交通站点主要分布在建筑群附近，道路淹没比例超过16%，铁路从西北向东南横跨整个研究区，存在6.23%的受灾路段。

从研究过程来看，借助Sentinel-1卫星影像提取洪水淹没范围的方法具有快速、高效、大范围的优点。卫星遥感可长期连续观测特定区域，汛期利用卫星遥感技术及时有效监测江河、湖泊、水库空间分布及其面积动态变化对防洪减灾具有重要意义。Sentinel-1卫星在恶劣天气也能穿过云雾获取地表信息，因此其在洪水监测等方面具有广泛的应用前景。利用SDWI和OTSU算法提取水域时存在一定的错分现象，但经算术运算后对洪水淹没范围判定的影响较小。在此基础上，结合土地利用/覆盖数据以及交通矢量数据，即可统计农田、建筑、道路等承灾体的受灾情况，对灾情进行快速评估。然而，由于遥感卫星重访周期限制，本文无法获取卡霍夫卡水电站大坝被毁当日的遥感影像，因此在灾情评估时放弃了短时间内、暂时性的受灾情况，主要针对一周以内的中长期灾情。后续研究在地形、河道、管网等数据的支撑下，可以尝试将遥感影像与水文动力学模型相结合，对溃坝进行物理建模，并以遥感影像进行修正，实现任意时间节点的灾情评估。

参考文献

[1] Jiang X, Meng J, Fan B, et al. Comparative Analysis and Risk Assessment of Dam-break Floods: Taking Pingshuijiang Reservoir as an Example[J]. Hydrology Research, 2023,54(2):265-275

[2] Abdulrahman K Z, Faris M R, Ibrahim H M, et al. Hypothetical Failure of the Khassa Chai Dam and Flood Risk Analysis for Kirkuk, Iraq[J]. Natural hazards (Dordrecht), 2022, 113(3):1 833-1 851

[3] 张修杰,陈明辉,张伟锋,等. 改进溃口宽度经验公式在洪水模拟中的研究[J]. 中国农村水利水电,2023(10):23-29

[4] Cantero-Chinchilla F N, Bergillos R J, Gamero P, et al. Vertically Averaged and Moment Equations for Dam-break Wave Modeling: Shallow Water Hypotheses[J]. Water, 2020,12(11):3 232

[5] Ahmadi S M, Yamamoto Y. A New Dam-break Outflow-rate Concept and Its Installation to a Hydro-morphodynamics Simulation Model Based on FDM (an Example on Amagase Dam of Japan)[J]. Water,2021,13(13):1 759

[6] Wang W, Chen W, Huang G. Research on Flood Propagation for Different Dam Failure Modes: A Case Study in Shenzhen, China[J]. Frontiers in Earth Science, 2020(8): 527 363

[7] 周兴波,金松丽,杨子儒,等. 基于断波的溃坝洪水演进分析模型研究[J]. 应用基础与工程科学学报,2023,31(3):611-621

[8] Dumergue L E, Abadie S. Numerical Study of the Wave Impacts Generated in a Wet Dam Break[J]. Journal of Fluids and Structures,2022,114:103 716

[9] 胡航,王光进,苇英铭,等. 不同溃坝条件下尾矿库溃坝试验与灾害影响研究[J]. 中国安全生产科学技术,2022,18(7):114-121

[10] 张大朋,严谨,赵博文,等. 二维溃坝的数值模拟及其自由液面大变形流动研究[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版),2022,52(12):120-133

[11] Hu L, Yang X, Li Q, et al. Numerical Simulation and Risk Assessment of Cascade Reservoir Dam-Break[J]. Water, 2020,12(6):1 730

[12] Oguzhan S, Aksoy A O. Experimental Investigation of the Effect of Vegetation on Dam Break Flood Waves[J]. Journal of Hydrology and Hydromechanics, 2020, 68(3): 231-241

[13] 罗志雄,王迪,夏洪波,等. 中线式尾矿库洪水漫顶溃坝演化规律模拟研究[J]. 中国安全生产科学技术,2022,18(5):157-162

[14] 刘嘉欣,阎志坤,钟启明,等. 尾矿库漫顶溃坝机理与溃坝过程数值模拟[J]. 中南大学学报(自然科学版),2022,53(7):2 694-2 708

[15] 王威,李英冰. 卡特里娜飓风引起的新奥尔良市溃坝洪水演进过程模拟[J]. 水利水电技术(中英文),2022,53(6):56-65

[16] Aureli F, Maranzoni A, Petaccia G. Review of Historical Dam-break Events and Laboratory Tests on Real Topography for the Validation of Numerical Models[J]. Water, 2021,13(14):1 968

（下转第81页）