

DOI:10.3969/j.issn.1003-5060.2023.09.011

# 基于 Sentinel-1 卫星 SAR 数据的 2020 年巢湖洪涝监测及灾情分析

朱臻阳<sup>1</sup>, 耿君<sup>1</sup>, 李金超<sup>2</sup>, 徐立晨<sup>1</sup>, 徐杰铭<sup>1</sup>, 涂丽丽<sup>3</sup>

(1. 合肥工业大学 土木与水利工程学院, 安徽 合肥 230009; 2. 安徽省基础测绘信息中心, 安徽 合肥 230031; 3. 安徽农业大学 资源环境学院, 安徽 合肥 230036)

**摘要:**受持续降雨的影响,2020年6—8月巢湖流域水位超洪水设防的百年一遇标准,对巢湖流域的经济和生态环境造成严重危害。文章采用具有全天时、全天候、全覆盖优势的 Sentinel-1 卫星合成孔径雷达(synthetic aperture radar,SAR)影像数据,对比单阈值法、哨兵-1 双极化水体指数(Sentinel-1 dual-polarized water index,SDWI)阈值法和支持向量机(support vector machine,SVM)分类算法 3 种方法的精度,选择最优方法来提取巢湖水体,实现对淹没区域面积的动态监测;同时利用 Landsat 8、Sentinel-2 卫星中、高空间分辨率光学影像对灾前研究区进行地物分类,分析灾情期间各类地物的受灾程度。结果显示:采用单阈值法可有效提取洪水淹没范围,总体精度达到 98.43%以上,淹没面积为 424.10 km<sup>2</sup>;淹没土地类型包括农用地、建成区和裸地等,其中淹没情况最严重的是农用地,淹没面积达到 278.95 km<sup>2</sup>。

**关键词:**洪涝监测;水体提取;Sentinel-1 卫星合成孔径雷达(SAR)影像;巢湖;灾后评估

**中图分类号:**TP79;X43 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-5060(2023)09-1217-07

## Flood monitoring and disaster analysis of Chaohu Lake in 2020 based on Sentinel-1 SAR data

ZHU Canyang<sup>1</sup>, GENG Jun<sup>1</sup>, LI Jinchao<sup>2</sup>, XU Lichen<sup>1</sup>, XU Jieming<sup>1</sup>, TU Lili<sup>3</sup>

(1. School of Civil and Hydraulic Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China; 2. Anhui Provincial Fundamental Geomatics Center, Hefei 230031, China; 3. School of Resources and Environment, Anhui Agricultural University, Hefei 230036, China)

**Abstract:** Affected by continuous rainfall, the water level in Chaohu Lake basin exceeded the 100-year flood control standard from June to August 2020, causing serious harm to the economy and ecological environment of Chaohu Lake basin. In this study, Sentinel-1 synthetic aperture radar(SAR) image data with the advantages of all-day, all-weather and full coverage were used to compare the accuracy of the single threshold method, Sentinel-1 dual-polarized water index(SDWI) threshold method, support vector machine(SVM) classification algorithm, and the optimal method was selected to extract Chaohu Lake water body, realizing dynamic monitoring of inundation area. Meanwhile, Landsat 8 and Sentinel-2 optical images with medium and high spatial resolution were used to classify the ground objects in the study area before the disaster and analyze the degree of damage of various ground objects during the disaster. The results show that using the single threshold method, the inundation area is effectively extracted, the overall accuracy is more than 98.43%, and the inundation area is 424.10 km<sup>2</sup>. The submerged land types include agricultural land, built-up area and bare land, among which agricultural land is the most seriously submerged, with an area of 278.95 km<sup>2</sup>.

**Key words:** flood monitoring; water body extraction; Sentinel-1 synthetic aperture radar(SAR) image; Chaohu Lake; post-disaster assessment

**收稿日期:**2021-12-10;**修回日期:**2022-03-20

**基金项目:**国家自然科学基金资助项目(41801234;41701383);安徽省自然科学基金资助项目(1808085QD105)

**作者简介:**朱臻阳(1997—),女,江苏淮安人,合肥工业大学硕士生;

耿君(1988—),男,安徽合肥人,博士,合肥工业大学讲师,硕士生导师,通信作者,E-mail:gengj@hfut.edu.cn.

洪涝灾害是对国民经济影响最严重的自然灾害之一,每年直接或间接造成的灾害损失占有自然灾害损失的 40%以上<sup>[1]</sup>。迅速分析受灾区域水情,评估洪水灾情状况,可为制定有效的洪涝灾害应对方案提供支撑。卫星遥感技术为洪水淹没范围的评估工作提供了先进的技术手段,在洪水淹没范围监测工作中具有大尺度、实时、动态等优点。

合成孔径雷达(synthetic aperture radar, SAR)采用主动式微波遥感系统,相较于传统的光学影像,SAR 影像具有全天时、全天候和全覆盖三大优势<sup>[2]</sup>,可有效提高水体变化监测的准确度,是提取洪水淹没范围、评估洪水灾害状况的高效工具<sup>[3-5]</sup>。常用的水体提取方法主要有阈值法、面向对象提取方法和传统的支持向量机(support vector machine, SVM)监督分类算法等。文献[6-7]采用 SVM 法提取水库和城区水体信息,结果表明该方法提取小型水体信息精度和准确率较高,但需先验知识判别,且仅适用于较小范围的高精度提取;文献[8]基于面向对象的方法提取研究区域不同灾害时期的 Sentinel-1A 卫星 SAR 影像淹水范围,结果表明该方法提取结果含杂斑较少,提取效果较好,但该方法的分割尺度需通过实验反复验证得到,应用面较窄;文献[9-10]利用阈值分割法监测洪涝灾情,结果表明该方法在汛情监测和淹没面积评估方面具有较好的实用性。阈值法包括经验阈值法、最大类间方差阈值法和双峰法等,其中基于经验的阈值法最适用于利用 Sentinel-1 卫星影像提取洪涝灾害时的水体信息<sup>[11]</sup>。

受持续降雨的影响,2020 年 6—8 月巢湖流域受灾情况严重,然而对于该时期巢湖流域洪涝灾情的相关研究较少。针对巢湖流域的实际条件,本文采用 Sentinel-1 卫星 SAR 影像数据,对比单阈值法、哨兵-1 双极化水体指数(Sentinel-1 dual-polarized water index, SDWI) 阈值法和 SVM 分类算法等 3 种水体提取方法的精度,选取最优方法对巢湖流域水体信息进行提取,进而获取巢湖流域洪水淹没范围;同时采用 Landsat 8、Sentinel-2 卫星中、高空间分辨率光学影像分析灾情期间各类地物的受灾程度,并分析巢湖流域的洪水特征,为灾后评估工作提供技术支持。

## 1 研究区概况与数据预处理

### 1.1 研究区概况

巢湖为我国五大淡水湖之一,是河成型湖泊,

人类活动对其影响较为严重。巢湖流域处于长江和淮河两大水系,位于安徽省中部,湖区面积为 760 km<sup>2</sup>,6—8 月长江中下游月降水量一般为 200~300 mm。2020 年入夏以后,我国长江流域、淮河流域持续发生严重的洪涝灾害。自汛期以来,由于持续强降雨及上游来水等多重因素影响,巢湖水位不断抬升,达到 150 年以来峰值。本文以洪水汛期前后的巢湖流域为研究对象,分析该流域洪水淹没范围的动态监测数据。研究区位置如图 1 所示(<http://xzqh.mca.gov.cn/>),其中数字高程模型(digital elevation model, DEM)地形底图来自 2000 年美国航天飞机雷达地形测绘使命(Shuttle Radar Topography Mission, SRTM)数据中的 30 m 空间分辨率 DEM 格网数据(<https://lpdaac.usgs.gov/>)。

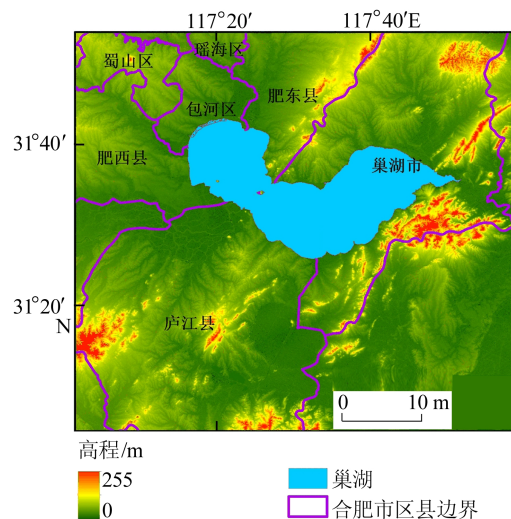


图 1 研究区位置

### 1.2 数据源及预处理

Sentinel-1 卫星影像从卫星拍摄到数据分发至数据库仅需 3~6 h,对地观测能够穿透云雾,不受天气影响,适合应用于洪涝灾害遥感监测。本文使用干涉宽幅(Interferometric Wide swath, IW)模式获取 Sentinel-1A 卫星 SAR 数据,该模式的宽幅为 250 km,空间分辨率为 5 m×20 m,具有空间分辨率高和幅宽大的特征。

Sentinel-1 卫星影像在欧洲航天局(European Space Agency, ESA)的数据共享网站(<https://scihub.copernicus.eu/dhus/#/home>)下载。本次实验选用影像时间为 2020 年洪水前后的 6 个时间点,分别为 6 月 9 日、6 月 21 日、7 月 15 日、7 月 27 日、8 月 8 日和 9 月 13 日。

由于 Sentinel-1 卫星数据中含有雷达信号相干叠加产生的噪声,需要对原始影像数据进行预处理,达到去除噪声、增强地物后向散射信息的目的。预处理工作使用 ESA 的 SNAP (Sentinel Application Platform, 哨兵数据应用平台) 软件进行,主要工作流程如图 2 所示。

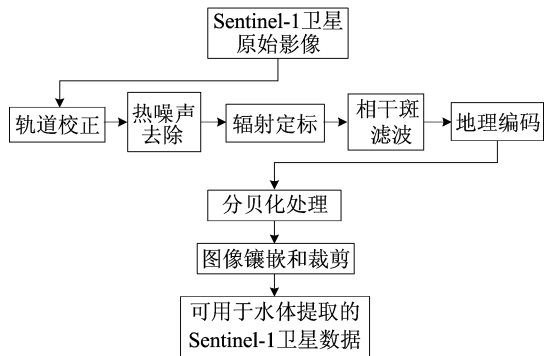


图 2 Sentinel-1 卫星数据预处理流程

## 2 研究方法

### 2.1 单阈值法

单阈值法又称为灰度阈值分割法,是依据水体在 SAR 图像中后向散射系数低、表现为暗区的特性,通过求解图像直方图的极值点来获取水体的分割阈值,形成二值图。Sentinel-1 卫星影像 VH 极化方式的灰度曲线如图 3 所示。

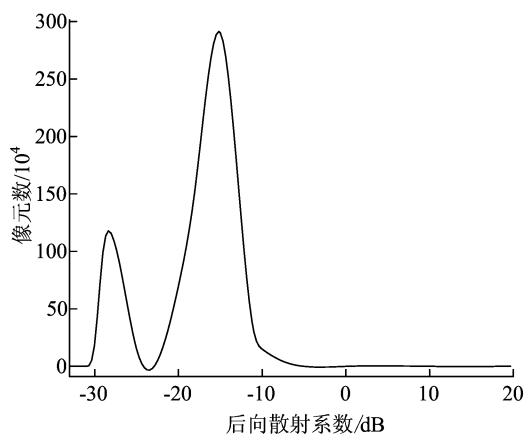


图 3 VH 极化影像灰度曲线

在本次实验中设定阈值为  $-24$ , 将散射值低于  $-24$  的部分标记为水体, 大于  $-24$  部分标记为背景, 从而实现水体的提取。

### 2.2 SDWI 阈值法

SDWI 水体信息提取方法<sup>[12]</sup>在归一化植被指数 (normalized difference vegetation index, NDVI) 和归一化水体指数 (normalized difference

water index, NDWI) 的基础上, 根据 SAR 影像中水体信息的特点, 对 Sentinel-1 双极化数据 (VV 极化、VH 极化) 之间水体信息提取的关系进行深入研究, 增强水体特征, 同时消除土壤和植被的干扰。利用载有 C 波段的 Sentinel-1 卫星 SAR 数据对大尺度的水体信息进行识别, 做波段运算后得到新的波段, 如图 4 所示。本次实验设定阈值为 0, 后向散射系数值大于 0 的为水体, 小于 0 的为非水体, 然后再利用波段运算得到二值图, 进而提取水体信息。

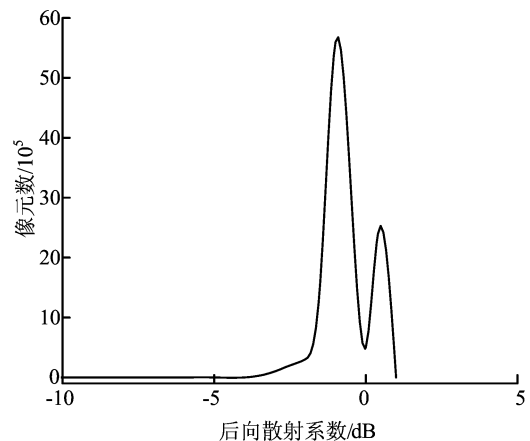


图 4 SDWI 阈值法灰度曲线

### 2.3 SVM 分类法

SVM 分类法是在统计学习理论 (statistical learning theory, SLT) 基础上优化后的机器学习方法<sup>[13]</sup>, 通过学习 SVM 算法, 可自动寻找对分类区分能力强的支持向量, 构造出分类器, 将各类的间隔最大化, 从而获得良好的推广性和较高的分类准确率。

在 ENVI (The Environment for Visualizing Images) 软件中, 对照原始影像和高清的谷歌地球 (Google Earth) 卫星影像, 绘制感兴趣区样本, 分为水体和非水体 2 类, 其中 70% 样本用作训练样本, 剩余 30% 用作验证样本。本文利用 SVM 监督分类算法对原始影像进行分类, 对 6 幅影像进行水体提取后, 通过混淆矩阵来验证此方法提取的精度。

## 3 结果与分析

### 3.1 精度评定

本文采用混淆矩阵对 3 种水体提取方法的成果进行精度分析。混淆矩阵中包含多种分类精度评价指标, 包括总体分类精度、Kappa 系数、错分误差和漏分误差等。总体精度是指被正确分类为

水体或非水体的像元数与总像元数之间的比值; Kappa 系数是一致性检验的指标,可用于衡量分类的效果;错分误差是指被错分为水体的像元数占水体真实参考像元数的比例;漏分误差是指被分为其他类型的水体像元数占水体真实参考像元数的比例。

采用单阈值法的精度评定结果见表 1 所列,总体精度大多高于 99%,Kappa 系数均高于 0.960。

表 1 单阈值法精度评定结果

影像日期	总体精度/%	Kappa 系数	错分误差/%	漏分误差/%
6月9日	99.79	0.995	0.55	0.06
6月21日	99.97	0.999	0.02	0
7月15日	99.91	0.998	0.16	0.07
7月27日	98.43	0.963	4.89	0.05
8月8日	98.71	0.969	4.08	0.02
9月13日	99.02	0.977	3.05	0.07

采用 SDWI 阈值法的精度评定结果见表 2 所列,总体精度均高于 98%,受灾后影像的错分误差较大。

表 2 SDWI 阈值法精度评定结果

影像日期	总体精度/%	Kappa 系数	错分误差/%	漏分误差/%
6月9日	98.82	0.972	0.74	0.05
6月21日	99.75	0.994	0.77	0
7月15日	99.57	0.990	1.34	0.01
7月27日	98.09	0.955	5.95	0.01
8月8日	98.31	0.960	5.30	0
9月13日	98.64	0.968	4.31	0

采用 SVM 分类法的精度评定结果见表 3 所列,总体精度大多高于 99%,部分时间点的影像错分误差稍高,漏分误差也略高于另 2 种方法。

表 3 SVM 分类法精度评定结果

影像日期	总体精度/%	Kappa 系数	错分误差/%	漏分误差/%
6月9日	99.36	0.985	2.03	0.07
6月21日	99.72	0.993	0.93	0
7月15日	99.54	0.989	1.50	0.01
7月27日	98.19	0.957	5.60	0.15
8月8日	98.44	0.963	4.96	0.02
9月13日	99.04	0.977	3.07	0.08

采用 3 种方法提取 Sentinel-1 卫星影像水体信息的局部效果如图 5 所示。单阈值法和 SDWI

阈值法需要确定先验阈值,经过优化和修正,达到提取水体的目的。

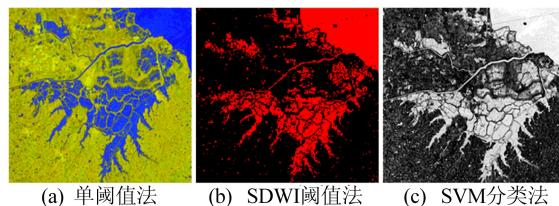


图 5 3 种方法水体信息提取结果局部图

对比分析 3 种方法提取精度和效果可知: SVM 分类法总体精度很高,适合较小范围的高精度提取;对于较大范围的洪涝灾害范围提取,考虑到应满足快速应用的要求,相比于 SVM 分类法需要人工制作样本,阈值法能更加迅速有效地作出回应,总体精度较高;在阈值法中,单阈值法具有原理简单、提取速度快、计算量小的优点,适用于低噪声、图幅较小 SAR 图像的水体提取。下面采用单阈值法提取成果对巢湖流域的水面面积进行动态监测。

### 3.2 洪水淹没面积动态监测与灾后评估

借助 Sentinel-1 卫星数据,运用单阈值法提取水体,并以 RGB 波段组合的方式在图像上展现,从而可以快速地提取洪水淹没范围<sup>[14]</sup>。根据单阈值法生成洪灾前后的水体、陆地二值图,采用 RGB 波段合成获得彩色图像,R(红光)对应 VH 极化方式下的原始影像,G(绿光)对应 VV 极化方式下的原始影像,B(蓝光)对应单阈值法提取得到的水体结果图。巢湖流域 2020 年 6—9 月 6 个时间点的彩色合成图如图 6 所示。

利用 ArcGIS 软件计算 6 个时间点的巢湖水面面积,单阈值法得到的水体面积拟合曲线如图 7 所示。由图 7 可知,淹没范围从 6 月中下旬开始逐渐扩大,在 7 月 27 日达到峰值,在 8 月洪水逐渐退下,9 月中旬逐渐恢复正常。

受灾后巢湖流域的淹没情况如图 8 所示。图 8 中:蓝色区域表示洪涝灾害发生前的水域范围;红色区域表示洪涝灾害发生后扩大的淹没范围。根据提取结果统计,洪灾前后水面面积变化高达 424.10 km<sup>2</sup>,提取结果与实际受淹面积相吻合。

灾后评估主要包括灾后损失评估和灾害等级判定 2 个方面。本文利用洪涝灾害未发生时的 Sentinel-2、Landsat 8 卫星中、高空间分辨率的光学影像对研究区域进行土地利用类型分类,研究受灾区域内各类地物的淹没情况。

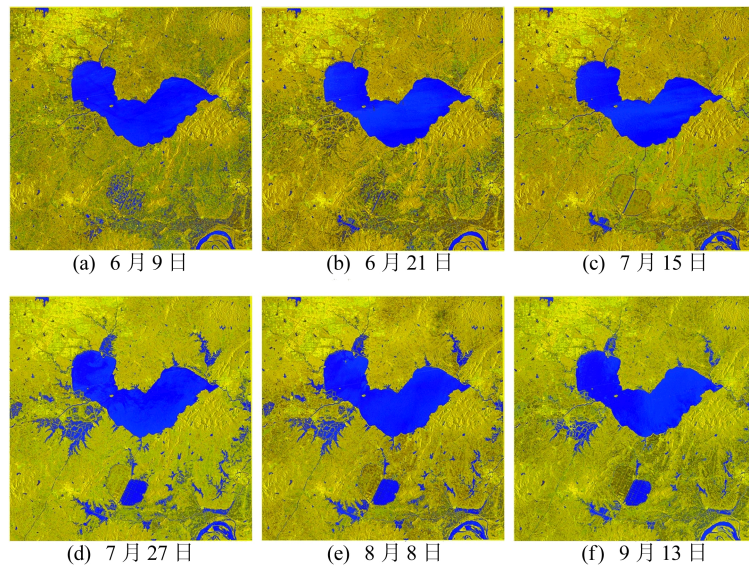


图 6 单阈值法对 6 个时间点影像的彩色合成图

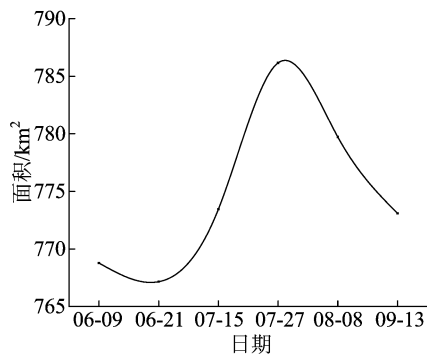


图 7 巢湖的湖泊水面面积变化曲线

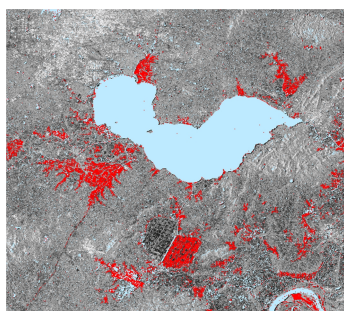


图 8 洪灾前后巢湖流域的水体变化情况

参考文献[15],结合研究区实际情况,将研究区分为农用地、建成区、水体和裸地 4 类。经过精度评定,分类结果的总体精度达到 91.49%,Kappa 系数为 0.880,其中各类地物分类总体精度均高于 90%(水体 91.61%、农用地 95.00%、建成区 91.33%、裸地 94.00%)。基于较高精度的地物分类图,叠加水体淹没范围进行灾后评估分析,如图 9 所示。

从整体上看,受灾最严重的区域在巢湖流域西南及正南方向,巢湖的西北和东北方向也受到

一定程度的损害;巢湖周围支流附近也遭受淹没。

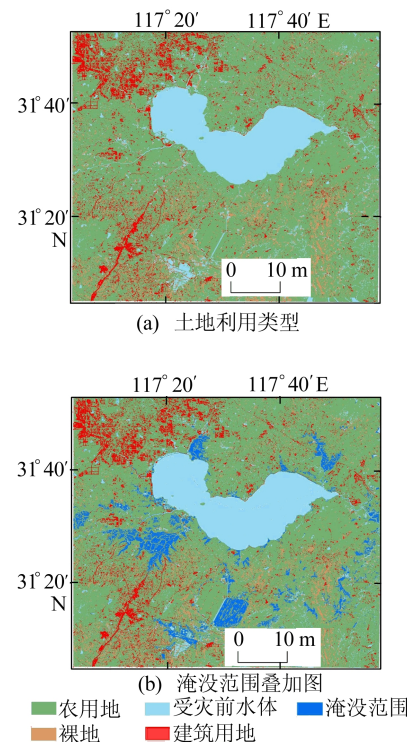


图 9 洪灾灾后水体淹没范围分析图

通过叠加分析,利用 ArcGIS 软件对淹没区域的各类地物淹没面积进行统计,得到农用地受灾情况最严重,淹没面积高达 278.95 km<sup>2</sup>,其次是裸地,淹没面积为 39.73 km<sup>2</sup>,建成区共淹没 18.87 km<sup>2</sup>。农用地和建成区的淹没受损,极大影响居民的日常生活出行与经济收益。结合 2020 年 6—8 月农田庄稼的物候特征进行分析,

该时段为农作物生长前期<sup>[16]</sup>,其中夏甘薯、夏玉米、晚稻、夏大豆等属于春播秋收农作物<sup>[17]</sup>,巢湖流域暴雨陆续发生,对农作物造成极大损害。

### 3.3 洪水特征分析

通过总结巢湖流域洪水的形成过程,能够深入分析巢湖流域洪水形成的原因及特点,对将来的洪水测验研究工作和水域附近居民生命财产的保护都具有重要意义。本文参考文献<sup>[18]</sup>对淮河流域安徽省多年的暴雨洪水特征分析思路,分析降雨过程和暴雨频率。合肥巢湖闸 6—8 月的降雨量与径流量数据利用合肥市水务局的监测资料。巢湖闸 6—8 月降雨量与径流量变化趋势如图 10 所示。

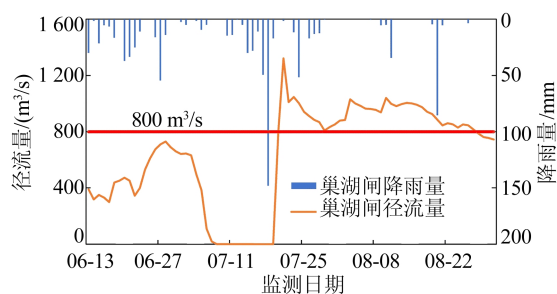


图 10 巢湖闸 6—8 月降雨量与径流量变化趋势

巢湖闸在 2020 年 6 月中旬到 8 月末,有 4 d 降雨量超过 50 mm,其中在 7 月 18 日降雨量最大,为 148 mm,属大暴雨级别。径流过程和降雨过程具有相同的变化趋势,流域径流包括产流阶段和汇流阶段,因此在时间上相对于降雨过程具有一定的滞后性。

在 6 月中旬至 7 月 7 日,降雨量和径流量变化趋势相同,在 6 月 27 日降雨量最大(54.5 mm),在 6 月 28 日径流量最大(730 m<sup>3</sup>/s)。在 7 月 8 日至 7 月 19 日,径流量为 0 m<sup>3</sup>/s,其原因是巢湖闸闸门关闭,过闸流量值为 0。在 7 月 20 日,巢湖闸开闸泄流,径流量逐渐增大,在 7 月 21 日达到最大值,为 1 322 m<sup>3</sup>/s。在 7 月 21 日至 8 月 27 日,径流量均较大,高于 800 m<sup>3</sup>/s。自 8 月 28 日后,由于降雨稀少,径流量逐渐减小。

另外,从巢湖流域 6—8 月降雨日数和总降雨量分析,结合美国国家环境预报中心(National Centers for Environmental Prediction, NCEP)气候预报系统第 2 版(Climat Forecast System Version 2, CFSv2)逐 6 h 数据产品(NCEP Climate Forecast System Version 2 6-Hourly Products),得知巢湖流域 2020 年 6—8 月降雨日数高

达 81 d,降雨日数占 6—8 月总日数的 88.04%,可见降雨的频繁性;在整个 6—8 月巢湖流域的降雨总量(折合平均降水深)高达 1 324.15 mm,降雨强度较大,容易引发洪涝灾害。

## 4 结 论

本文针对 2020 年汛期暴雨发生前后巢湖水面面积变化情况,收集 6 个关键时间点 Sentinel-1 卫星 SAR 影像,对研究区淹没面积动态变化进行监测分析。在对比 3 种水体提取方法的基础上,选取单阈值法对研究区洪水淹没范围进行提取,利用 ArcGIS 软件对淹没区域的各类地物淹没面积进行统计,淹没面积共计为 424.10 km<sup>2</sup>;淹没土地类型包括农用地、建成区和裸地等,其中影响最严重的是农用地,淹没面积达到 278.95 km<sup>2</sup>,其次为裸地,淹没面积为 39.73 km<sup>2</sup>,建成区共淹没 18.87 km<sup>2</sup>。及时对洪水灾情进行监测评估,可有效提高抗灾救灾工作效率。

本文对于洪灾前后的分析尚有不足之处,仅分析了洪水变化地点和地物变化,未来研究可以做更精确的分析,如结合行政区划边界分析各地区受灾面积、结合人口分布分析受灾人口、结合城镇建筑分布分析受灾的城镇数据等。

## [参 考 文 献]

- [1] 马亚玲,王金红,叶瑜,等. 1917 年海河流域洪涝灾害过程重建[J]. 古地理学报, 2015, 17(6): 851-860.
- [2] 李成绕,薛东剑,张露,等. 基于 Sentinel-1A 卫星 SAR 数据的水体提取方法研究[J]. 地理空间信息, 2018, 16(1): 38-40.
- [3] PHAM-DUC B, PRIGENT C, AIRES F, et al. Surface water monitoring within Cambodia and the Vietnamese Mekong Delta over a year, with Sentinel-1 SAR observations [J]. Water, 2017, 9(6): 366-386.
- [4] GULACSI A, KOVACS F. Sentinel-1-imagery-based high-resolution water cover detection on wetlands, aided by Google Earth Engine [J]. Remote Sensing, 2020, 12(10): 1614-1633.
- [5] 王航,秦奋. 遥感影像水体提取研究综述 [J]. 测绘科学, 2018, 43(5): 23-32.
- [6] POSSA E M, MAILLARD P. Precise delineation of small water bodies from Sentinel-1 data using Support Vector Machine classification [J]. Canadian Journal of Remote Sensing, 2018, 44(3): 179-190.
- [7] 胡德勇,李京,陈云浩,等. 单波段单极化 SAR 图像水体和居民地信息提取方法研究 [J]. 中国图象图形学报, 2008, 13(2): 257-263.

- [8] 汤玲英,刘雯,杨东,等. 基于面向对象方法的 Sentinel-1A SAR 在洪水监测中的应用[J]. 地球信息科学学报, 2018, 20(3):377-384.
- [9] 吴文会,王丽欣,马卓. 基于 Sentinel-1B SAR 数据的洪水提取和监测[J]. 测绘与空间地理信息, 2019, 42(4): 110-111,118.
- [10] 栾玉洁,郭金运,高永刚,等. 基于 Sentinel-1B SAR 数据的 2018 年寿光洪水遥感监测及灾害分析[J]. 自然灾害学报, 2021, 30(2):168-175.
- [11] 周晗. 基于 Sentinel1/2 的斯里兰卡洪涝淹没范围提取研究[D]. 北京:中国科学院大学(中国科学院遥感与数字地球研究所),2018.
- [12] 贾诗超,薛东剑,李成绕,等. 基于 Sentinel-1 数据的水体信息提取方法研究[J]. 人民长江,2019,50(2):213-217.
- [13] 王晓航. 基于数据驱动的机器学习水体提取算法研究[D]. 北京:中国地质大学(北京),2019.
- [14] 曾玲方,李霖,万丽华. 基于 Sentinel-1 卫星 SAR 数据的洪水淹没范围快速提取[J]. 地理信息世界, 2015, 22(5): 100-103,107.
- [15] 国土资源部. 土地利用现状分类: GB/T 21010—2017[S]. [出版地不详:出版者不详],2017:5-13.
- [16] 陈水森,柳钦火,陈良富,等. 粮食作物播种面积遥感监测研究进展[J]. 农业工程学报,2005,21(6):166-171.
- [17] 李宝,胡阳,汪光胜,等. 江淮分水岭区农作物干旱时空变化特征[J]. 水土保持研究,2017,24(6):227-232,237.
- [18] 薛仓生,金菊良,丁峰,等. 淮河流域安徽省 2007 年的暴雨洪水特性分析[J]. 灾害学,2009,24(1):86-91.

(责任编辑 张淑艳)

## (上接第 1195 页)

- [9] 张国玺. 石墨含量及粒度对铜镀铜石墨复合材料性能的影响[J]. 粉末冶金技术,2016,34(3):196-198,204.
- [10] 陈亚军,马刘洋,解挺,等. 石墨粒径大小对铜基石墨复合材料摩擦学性能的影响[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版),2021,44(3):317-321.
- [11] 陈如诗,肖柱,戴杰,等. 铜石墨复合材料性能与石墨形状和粒径的相关性研究[J]. 有色金属材料与工程,2019, 40(5):1-7.
- [12] 胡铮,张楠,张万昊,等. 石墨含量对铜基摩擦材料摩擦磨损性能的影响[J]. 粉末冶金技术,2020,38(6):409-413.
- [13] ZHANG P, ZHANG L, WEI D, et al. Effect of graphite type on the contact plateaus and friction properties of copper-based friction material for high-speed railway train[J]. Wear,2019,432:202927.
- [14] 郭秀艳. 碳/铜复合材料摩擦磨损性能的研究[J]. 热加工工艺,2007(14):24-26.
- [15] YUE T, WAHAB M A. Finite element analysis of fretting wear under variable coefficient of friction and different contact regimes[J]. Tribology International, 2017, 107: 274-282.
- [16] FILLOT N, IORDANOFF I, BERTHIER Y. Modelling third body flows with a discrete element method-a tool for understanding wear with adhesive particles[J]. Tribology International,2007,40(6):973-981.
- [17] ZHONG J, SHAKIBA R, ADANS J B. Molecular dynamics simulation of severe adhesive wear on a rough aluminum substrate[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2013,46(5):055307.
- [18] 王爽. 离散单元法在金属粉末高速压制成形过程中的应用研究[D]. 长沙:中南大学,2012.
- [19] 马刘洋,解挺,陈亚军,等. 石墨含量对铜基滑动轴承材料摩擦特性影响的数值模拟[J]. 轴承,2021(3):26-30,35.
- [20] XIE T, LAI J, YANG H. Simulation of effect of counterface roughness on the friction transfer and wear of PTFE sliding against steel[J]. Industrial Lubrication and Tribology,2019,71(9):1086-1092.
- [21] 周健,池毓蔚,池永,等. 砂土双轴试验的颗粒流模拟[J]. 岩土工程学报,2000(6):701-704.
- [22] POTYONDY D O, CUNDALL P A. A bonded-particle model for rock[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences,2004,41(8):1329-1364.
- [23] 李猛. 研石充填材料力学行为及控制岩层移动机理研究[D]. 徐州:中国矿业大学,2018.
- [24] 石崇,张强,王盛年. 颗粒流数值模拟技术及应用[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2018.
- [25] 尹延国. 铜基石墨自润滑材料及其摩擦学研究[D]. 合肥:合肥工业大学,2006.
- [26] LIU X, CAI Z, SHEN M, et al. Fretting wear behavior of brass/copper-graphite composites as a contactor material under electrical contact[J]. International Journal of Mechanical Sciences,2020,184:105703.
- [27] XU E, HUANG J, LI Y, et al. Graphite cluster/copper-based powder metallurgy composite for pantograph slider with well-behaved mechanical and wear performance[J]. Powder Technology,2019,344:551-560.

(责任编辑 张 镛)