

引用格式: Jia Jiajia, Ma Jinge, Shen Ming, *et al.* Research on Spatial-temporal Dynamic Changes of Flood in Lake Chaohu Basin based on Sentinel-1 SAR Satellite Image[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2022, 37(1): 173-185. [贾佳佳, 马金戈, 沈明, 等. 基于 Sentinel-1 SAR 数据巢湖流域洪水时空动态变化监测研究[J]. 遥感技术与应用, 2022, 37(1): 173-185.]
DOI: 10.11873/j.issn.1004-0323.2022.1.0173

基于 Sentinel-1 SAR 数据巢湖流域洪水时空 动态变化监测研究

贾佳佳^{1,2}, 马金戈², 沈明², 齐天赐², 曹志刚², 何艳芬¹, 段洪涛^{1,2}

(1. 西北大学 城市与环境学院, 陕西 西安 710127;

2. 中国科学院南京地理与湖泊研究所 遥感与地理信息科学研究室, 江苏 南京 210008)

摘要: 洪涝灾害危害巨大, 对区域人民生命财产和经济发展造成重大威胁, 回溯区域洪水事件, 甄别洪水风险区, 判断洪水时空特征, 并给出规划建议非常重要。以巢湖流域为试验区, 基于 Sentinel-1 合成孔径雷达 (SAR) 影像, 构建了谱间关系与阈值分割相结合的洪水淹没识别方法, 应用于 Google Earth Engine 平台上, 获得了 2015~2020 年巢湖流域洪水时空格局, 结合土地利用数据, 分析了洪水对巢湖流域农田和以建设用地代表的居民点的影响。结果表明: ①该方法精度相比单波段阈值和简单指数法提升了 3%~7%, 能够快速应用遥感数据提取历年流域洪水淹没范围; ②2015~2020 年间, 监测到两次特大洪水和一次小规模洪水, 淹没范围集中在杭埠河、裕溪河、兆河等河流区域; ③农田占据受淹面积的 86.47%~95.35%, 建设用地占据 4.47%~5.36%, 受到洪水影响的居民点主要为基层村庄及乡镇。研究表明了 SAR 卫星数据在监测巢湖流域洪水有良好的适用性, 有助于掌握洪水对农田和乡村居民点的破坏程度, 对于未来制定相关规划战略, 加强流域乡村洪水控制保障人员与粮食安全十分关键。

关键词: 巢湖流域; Sentinel-1; 洪水灾害; GEE

中图分类号: TN957.52; P332 **文献标志码:** A **文章编号:** 1004-0323(2022)01-0173-13

1 引言

洪水灾害是全球发生最频繁、影响最严重的自然灾害之一^[1]。1970~2015 年期间, 全球共报告了约 12 000 起水文灾害, 超过 67 亿人受灾, 总损失超过 26 000 亿美元^[2]。根据中国水利部发布的水旱公报^[3-7], 2006~2018 年, 我国洪水总受灾人口 14.73 亿人, 直接损失共计 25 770.6 亿元人民币, 平均每年 1 982.3 亿元人民币。因此, 加强对洪水灾害的现状监测和事后评估, 辅助政府部门决策, 对于抢救打捞、应急处置和未来科学规划都具有重要意义。卫

星遥感技术具有速度快、时效性强、视野广阔等特点, 已成为现代洪水监测与评估工作的重要手段^[8]。一般来说, 可以使用两种类型的卫星遥感影像来观测洪水区域, 光学影像和合成孔径雷达 (Synthetic Aperture Radar, SAR) 影像^[9]。光学传感器, 包含可见光、近红外、短波红外等波段, 能够监测不同土地覆盖的反射特征, 可用于识别水域^[10]。但是, 光学传感器易受云雨天气影响, 常在洪涝期间缺乏有效监测数据^[11], 难以用于洪灾监测。SAR 属于主动遥感, 可发射雷达脉冲记录地表信息, 能够穿过云层并在夜间收集数据^[12-13]。使用 SAR 进行洪水灾害

收稿日期: 2021-10-21; 修订日期: 2021-12-27

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项 (2017ZX07603-001) 资助。

作者简介: 贾佳佳 (1994-), 女, 河南驻马店人, 硕士研究生, 主要从事洪水遥感及规划应用研究。E-mail: jiajiajia@stumail.nwu.edu.cn

通讯作者: 何艳芬 (1978-), 女, 陕西汉中, 副教授, 主要从事资源环境遥感和地理信息系统应用研究。E-mail: yanfen_lily@163.com

监测具有巨大优势。当前运行的 SAR 卫星有 Sentinel-1、Alos、Radarsat-2、COSMO-SkyMed、ERS-2/SAR 以及国内的高分三号,时间分辨率在 2~24 d 左右。其中,Sentinel-1 SAR 传感器干涉宽幅(Interferometric Wide swath,IW)模式的空间分辨率为 10 m^[14],扫描范围可达 400 km,时间分辨率为 6~12 d^[15],具有高精度、数据源稳定、获取成本低、时间分辨率较短等优点,适用于洪水长期监测^[16]。

关于 SAR 提取洪水的研究可以分为 3 类:一是适用于自动化、近实时的洪水监测和监控的阈值法^[17]。如,根据使用长时序影像、考虑洪水的不同深度的归一化洪水指数算法(Normalized Difference Flood Index,NDFI)^[18];基于纹理进行提取、根据洪水前后变化阈值提取算法(Change Detection And Threshold,CDAT)^[19];基于大津法(OTSU)的全局自动阈值算法及局部阈值算法^[2,20-23]。二是能够提供更高的精度需要模型训练的方法,更适用于小区域内的精准测绘。比如针对纹理增强的单张 SAR 图像提出的神经模糊洪水监测方法^[24];利用机器学习算法和阈值法结合^[25-26]和基于航天飞机水体数据集的全自动分类树方法^[20]。三是联合其他数据判断洪水区域的方法,侧重于洪水造成的损失估算。如基于时间序列影像多时间变化监测洪水和洪水后土地覆盖的差异法^[27];卫星数据与人群来源数据相结合推导的洪水范围图^[28]等。

Google Earth Engine(GEE)借助于谷歌公司强大的计算能力和海量的在线数据,为大规模遥感数据处理和挖掘分析提供有利条件^[29],能够分析对比不同方法的精度并应用于大量影像上。因此,研究中依托 GEE 对比适用的方法有利于迅速选取高精度方法并实际应用。阈值法是用于图像二值分类的最快速的方法^[30],在应急情况下能够快速提供支持,因此最先被考虑采用。各类阈值法中,NDFI 和 CDAT 相对于 OTSU 法精度更高,但在阈值的确认上需要更详尽的工作和更详细的洪水期前后影像,削弱了在不同地区快速应用的可能。因此研究优先对比了 OTSU 单波段阈值法、SDWI 指数法和谱间关系结合 OTSU 这 3 种方法,选取精度最高的应用巢湖流域。当前,对于巢湖流域,相关研究使用有 Grey-Markov 预测理论对洪水进行预测的^[31],或者过去 600 a 内的洪水历程分析^[32],或是针对巢湖流域洪涝灾害进行风险评价^[33],或是就防洪规划进行探讨、对近期洪水分析及应对思考^[34-36]。另外,使

用遥感监测的重点则多在水质环境安全^[37],而非洪水监测,关于巢湖流域的单个洪水事件分析则多从水利的角度出发,未对大范围长时序流域洪水特征进行统一表述。

研究借助 GEE 云平台,使用 Sentinel-1 数据绘制巢湖流域 2015~2020 年的洪水分布时间序列,用以了解整个流域的洪水侵袭情况。研究目标主要分为三部分:

(1)通过 GEE 平台对比以下 3 个洪水提取方法并应用于巢湖流域:OTSU 单波段阈值法、SDWI 指数法和谱间关系结合 OTSU 的方法。

(2)绘制 2015~2020 年洪水地图分析其时空格局。根据洪水出现的时间、范围,结合现有防洪圩区分析巢湖流域各区域的洪水风险。

(3)确定巢湖流域受洪水影响的农田与城镇建设用地。明确经常受洪水淹没的农田与建设用居民点,结合洪水管理与国土规划,减轻洪水对农田、生态系统、人们健康以及财产的破坏。

2 研究区与方法

2.1 研究区域概况

巢湖流域在安徽省腹地,位于 117°17'~117°52'E、31°43'~31°25'N 之间,流域总面积 13 486 km²(图 1)。其集水范围包括两市五县,属于长江下游左岸水系^[38]。流域内地形复杂,大部分地区比较低缓,河网密布。巢湖流域属亚热带季风气候,年平均降水量为 1 100 mm,雨季(6~8 月)降水量占年降水量 51%。这些复杂自然条件,加之巢湖流域属于安徽省经济较发达区,人口稠密,是重要的产粮区^[39],人类活动对下垫面的影响比较大。降雨期间汇水量急剧增加,使得巢湖流域成为洪灾多发区^[40]。面对这一现实,需要对巢湖流域的洪灾风险评价研究,掌握区域洪灾风险空间分布特征及演变规律,加强洪水管理,从而指导规划防洪减灾。

2.2 数据

2.2.1 Sentinel-1 SAR 数据

研究涉及的主要卫星数据为 Sentinel-1 SAR。Sentinel-1 卫星是欧洲航天局哥白尼计划(GMES)中的对地观测卫星,由两颗卫星组成,分别为 Sentinel-1A 和 Sentinel-1B,载有 C 波段合成孔径雷达,可提供连续图像(白天、夜晚和各种天气)。Sentinel-1 有 4 种条带扫描模式,其中 IW 模式的 SAR 图像特别设计用于获取陆地表面的图像^[41],具有 VV

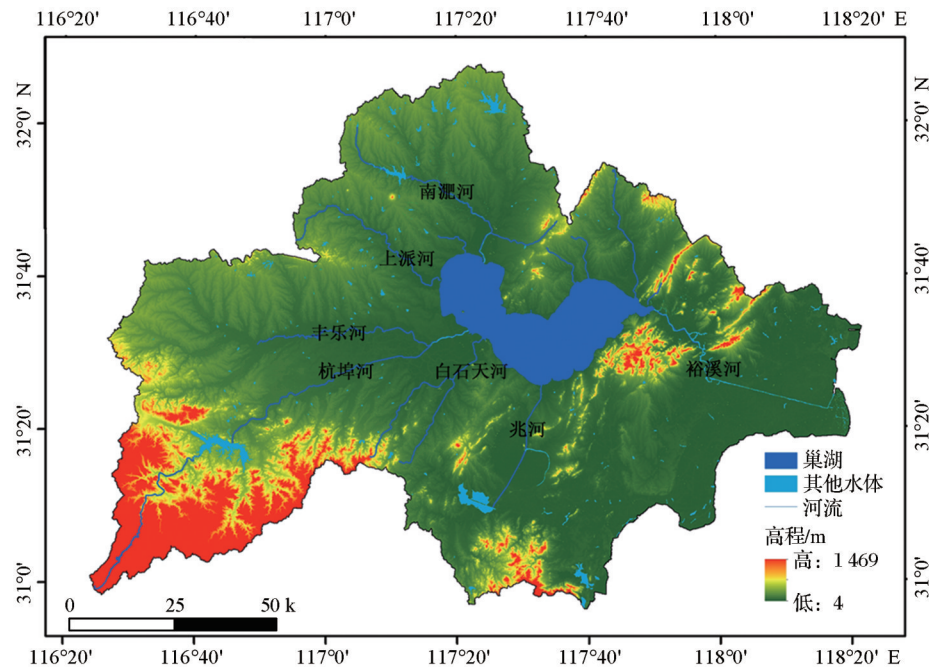


图 1 巢湖流域地理特征

Fig.1 The geographical characteristics of the Chaohu basin

和 VH 两种极化模式,因此,研究选用 IW 模式下 Level-1 的地距多视影像(Ground Range Detected, GRD)数据产品,从 GEE (<https://developers.google.com/earth-engine>)获取(表 1)。接着通过预处理获得每个像素的后向散射系数:①应用轨道文件(用恢复的轨道文件更新轨道元数据);②GRD 边界噪声去除(去除低强度噪声和场景边缘上的无效

数据);③消除热噪声(通过减少多带采集的子带的不连续性来消除附加噪声);④辐射校准(使用传感器校准参数校准反向散射强度);⑤使用航天飞机雷达地形任务(SRTM-DEM)或 ASTER DEM 进行地形校正(将数据从地面范围几何转换为后向散射系数)。最终得到 2015~2020 年 5~8 月的所有可用数据(表 2),总计 228 景影像。

表 1 研究所用数据集概要

Table 1 Dataset summary

数据	时间范围/年	分辨率/m	来源	使用目的	下载地址
哨兵一号 (Sentinel-1)	2015~2020	10	欧洲航天局	提取洪水影响区域并为易发洪水的建设用地区域识别	https://developers.google.com/earth-engine
高程数据 (SRTM-DEM)	2000	30	美国国家航空航天局	掩膜山体阴影	https://developers.google.com/earth-engine
全球地表水动态数据集	1999~2020	30	马里兰大学全球土地分析和发现实验室	验证数据集	https://www.glad.umd.edu/dataset/global-surface-water-dynamics
中国水利部水旱公报	2006~2018	-	中国水利部	验证洪水地图	http://www.mwr.gov.cn/2006-2018
EM-DAT 洪水档案	1960~2018	-	国际灾难数据库	统计洪灾记录	https://www.emdat.be/
土地利用数据集	2015	-	中华人民共和国土地覆被地图集	计算受洪水影响的农田与建设用地	-

2.2.2 辅助数据

(1) 全球地表水动态数据集(Global Surface Water Dynamic Dataset, GSWD)^[42]。GSWD 包含了 1999~2020 年所有 Landsat 5、7、8 的全球影像,记

录了这一时期的地表水的范围变化,并提供了永久水体、季节性水体、流失水体等。源于马里兰大学全球土地分析和发现实验室(<https://www.glad.umd.edu/dataset/global-surface-water-dynamics>)。

表 2 Sentinel-1 所使用的影像统计

Table 2 Image statistics used by Sentinel-1

时间阶段/年	2015	2016	2017	2018	2019	2020	总计	
洪水前	5月	3	10	9	9	12	11	54
期间	6月	7	6	8	10	10	10	51
	7月	9	6	9	11	10	10	55
	8月	9	11	9	9	17	13	68
总计		28	33	35	39	49	44	228

本数据集被用于验证洪水提取结果的精度。

(2) SRTM-DEM 数据。30 m 分辨率高程数据,源于美国国家地理空间情报局(NGA)和美国国家航空航天局(NASA)下的航天飞机雷达地形任务,可直接在 GEE 上调用该数据。用 DEM 数据掩盖了不太可能发生洪水的丘陵地形,并使用山体阴影数据减少洪水提取的误差。

(3) 土地利用数据集。此数据集涵盖了 2015 年巢湖流域范围内的土地利用情况,源于《中华人民共和国土地覆被地图集》^[43]。农田与建设用地面积范围是研究中主要使用的数据,用于洪水提取后的影响分析。

(4) 洪水历史数据。主要来源于中国水利部的《水旱公报》^[3-7] (<http://www.mwr.gov.cn/2006-2018>) 和国际灾难数据库的 EM-DAT 全球洪水档案^[44] (<https://www.emdat.be/>)。记录了 1960~2018 年阶段发生洪水的次数、影响面积以及遭受的人员和财产损失。历史数据可以辅助判断洪水发生的年份以及发生的高峰月份。

(5) 降雨月值数据。源于中国气象数据 (<https://data.cma.cn/>), 含有巢湖站点 1990~2021 年点位的降雨量月值数据、日降雨量高于 0.1 mm 的天数。用于辅助判断洪水滞留的时间、强度。

2.3 方法

2.3.1 洪水淹没范围提取方法

洪水提取方法不仅需要准确区分水与其他用地,还能够适用在大量的数据上。Sentinel-1 的两种极化方式影像 VV 与 VH 都能够使用简单的阈值分割识别洪水,但不同时间或轨道上 SAR 影像具有不同的后向散射分布,单一阈值判断水体通常会致偏差。因此,在流域中选取典型洪水淹没区域,分别测试 VV 和 VH 结合的 OTSU 单波段阈值方法、SDWI 指数法和双极化乘积结合 OTSU 的方法在提取水体的性能,以选择最优提取方法。

(1) OTSU 单波段阈值法:OTSU 法是一种通过检查所有可能的值来找到分割阈值的迭代方法。

当图像具有双峰分布,且目标要素占据图像 30% 以上时,OTSU 的阈值接近最佳分割值,当目标区域降低到 10% 时,OTSU 的分割性能略显不足^[45]。研究范围内存在明显的双峰分布(图 3(c)),较为适用。

(2) SDWI 算法。将 VV 和 VH 极化影像相乘,并且乘以 10,以此扩大水体与其他地物之间的差异,再以自然对数作为函数式(公式(1))。当自然对数自变量大于 1 时,曲线的斜率会逐渐减小,即可找到合理的经验阈值分割水体。

$$K_{SDWI} = \ln(10 * VV * VH) - 8 \quad (1)$$

(3) 谱间关系结合 OTSU 法的自动分割算法。首先, VV 与 VH 极化影像相乘,以放大水体与其他地物的差距^[46],然后对整个流域执行 OTSU 阈值方法从而对影像进行二值化。在实际操作中需要对单日的影像进行镶嵌,并在执行二值化操作后计算水体的面积以筛选不完整的影像(图 2)。在有山区的雷达图像上,基于合成孔径雷达(SAR)提取地表水体容易与山体阴影的亮度值混淆。因此需要通过 DEM 地形建模掩膜山体阴影,提高水体提取精度。在此次研究中直接调用了 GEE 中的 Hill Shade 算法计算了山体阴影的范围并在生成的水体范围中应用。

洪水淹没范围通过对比洪水前与洪水期间的水体范围数据获得。巢湖流域的农田中,水田占比比较高。水田在不同季节表现差异较大,冬季近乎旱地,夏季则在影像上多表现为小的水域。如果采用早期水体范围,如 1 月、12 月等,容易出现洪水水体的超算,因此采用雨季前的 5 月是比较合适的参照范围。计算雨季每个月份的最大水体范围数据与五月的水体范围之差,即为洪水范围。

2.3.2 洪水提取结果验证方法

对于生成的洪水地图准确性评估分为两部分:①通过历史记录数据确认洪水事件。②参考 GSWD 包含的水体范围,使用永久水体掩膜后与洪水提取结果对比。评估的主要方法为混淆矩阵。混淆矩阵也称误差矩阵,是表示精度评价的一种标准格式,用 n 行 n 列的矩阵形式来表示。具体评价指标有总体精度、制图精度、用户精度等,这些精度指标从不同的侧面反映了图像分类的精度^[47]。混淆矩阵需要准确的参照点:首先根据洪水历史记录选取发生过特大洪水的年份作为参照,接着排除由于降雨或阴云对影像造的质量不佳的情况,调用 GSWD 永久水体掩膜月度水体范围数据,得到月度洪水范围图后对图像进行采样获取验证点,再手动确认每

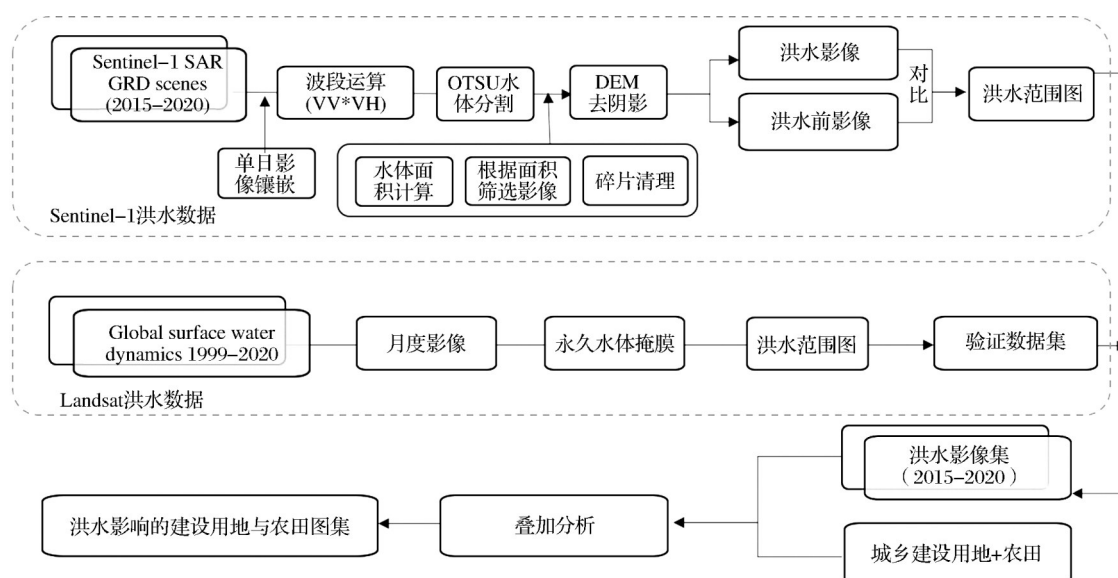


图 2 方法流程框架图

Fig.2 The diagram of study frame

一个验证点是否为洪水。最后代入混淆矩阵计算测定洪水地图的准确性。

3 洪水信息提取结果与验证

3.1 洪水提取方法对比结果

3种方法都能够提取洪水区域,但提取精度存在差异(图3)。单波段 VV 极化直接使用 OTSU 方

法误把山区阴影也识别成了洪水,并伴有大量碎片(图3(d)中(2))。利用 SDWI 指数能减少一部分阴影的问题,但是水面较为完整的区域存在把其他用地识别为水体的问题,失去被淹没圩区的纹理(图3(e)中(1))。另外,SDWI需要手动确定阈值,大批量的数据处理则存在较大的误差。

双极化结合 OTSU 提取洪水有效地避免以上

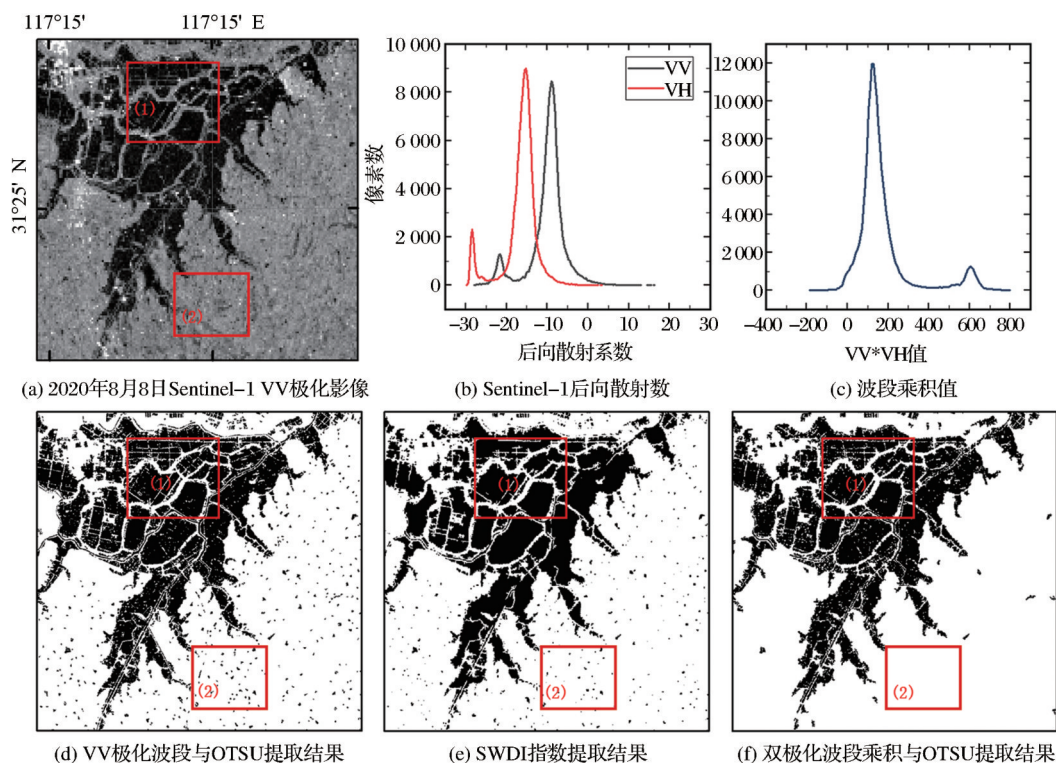


图 3 基于 2020 年 8 月 Sentinel-1 图像的不同方法对比

Fig.3 Comparison of different methods to extract flooding area on Sentinel-1 image on 8 August 2020

的问题,在大量数据处理过程中结果稳定。在同日影像中,双极化结合 OTSU 的总体精度高于另外 3 种约 3%~7%(表 3),表现为更准确的水体识别和更稳定的批量数据识别。因此,本研究最终使用该方法监测洪水。

表 3 不同方法精度结果

Table 3 The result of different method accuracy			
方法	201608	202006	202008
单波段+OTSU	0.81	0.88	0.83
SDWI	-	-	0.89
VV*VH+OTSU	0.85	0.90	0.91

3.2 洪水提取结果精度评估

用参考样本对提取的洪水范围进行比较(图 4)。首先,根据 EM-DAT、中国水旱公报与 2020 年安徽省洪涝灾害应急公告可知,2016 年与 2020 年是发生特大洪水的年份。

排除影像质量不佳的数据后,分别在 2016 年 7 月和 8 月、2020 年 6 月和 8 月选取了 GSWD 月度水体数据集,总计 1 027 个,其中洪水点位 195 个,非洪水点位 832 个。最终通过计算混淆矩阵测定洪水地图的准确性。洪水图的验证结果精度如表 4 所示,总体精度在 0.84~0.91 之间,满足提取精度的要求。其中,2016 年准确度整体低于 2020 年,通过对比图 4 中同月份洪水提取范围图可知,洪水灾情不同导致的数据差异,使 2016 年整体洪水范围相比于 2020 年更加破碎,难以识别。

4 洪水时空格局分析

4.1 流域的洪水时空格局

根据提取结果绘制 2015~2020 的每月时间序列洪水范围图(图 5~图 6),整个巢湖流域,在图 6(a)中,2016 年、2017 年和 2020 年洪水范围波及范围较大,淹没区域主要集中在东南部长江下游沿岸的平原区域。其中,2020 年 8 月份淹没总面积最大达到

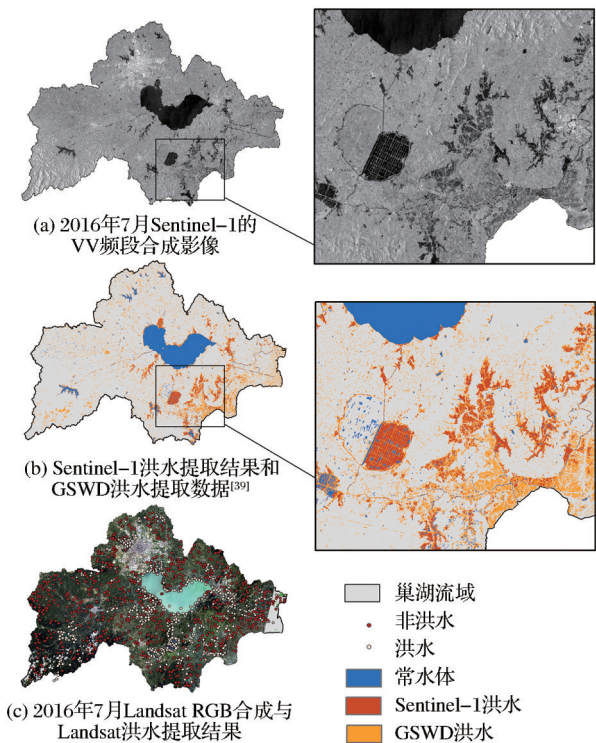


图 4 精度验证

Fig.4 Validation of extracted flooding area

了 1 211.64 km²,占巢湖流域总面积的 8.98%。

2016 年洪水淹没面积最大时间是在 8 月,最大淹没面积为 483.11 km²,7 月份降雨量最高时达 290.9 mm/d,降雨量月值达到 617.8 mm。极端降雨量是洪水的主要原因。图 5 表明 2016 年的洪水水域范围是逐渐扩大的,并在 8 月份监测到了最大面积,淹没区域主要分布在肥东县的南部、无为县的平原区域、以及庐江县杭埠河两岸。洪水造成了人员、农田、居住区及其他产业区域的极大损失。

2017 年洪水淹没面积最高时间是在 8 月,最大淹没面积为 485.32 km²。2017 年 6 月庐江县的东西圩区被淹没,但随即而来的 7 月份较为干旱,无洪水迹象;2017 年 8 月则出现大范围的洪水碎片。一般来说,巢湖流域的西南部为山区,地形相对陡峭,很

表 4 精度验证混淆矩阵

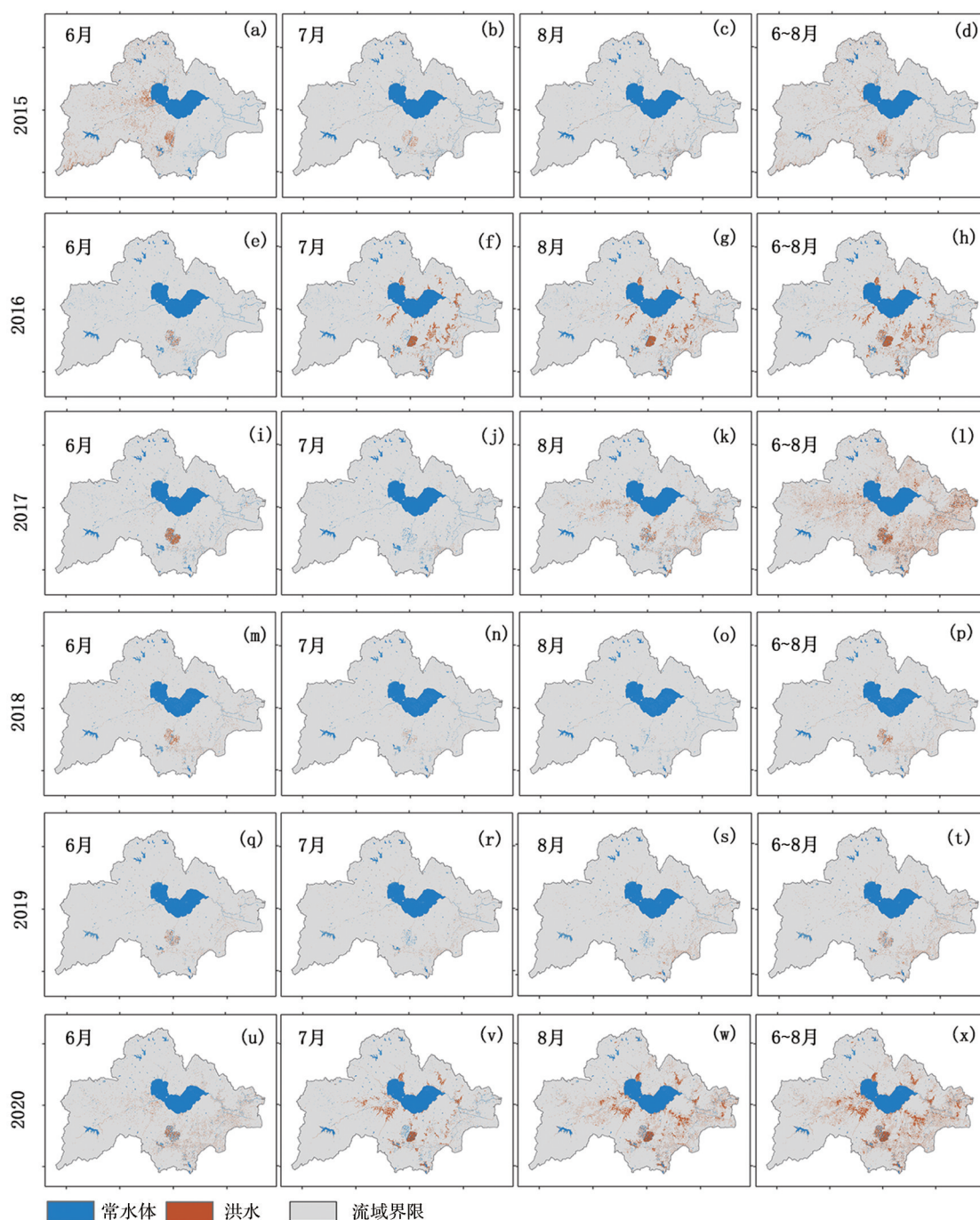
Table 4 Accuracy verification confusion matrix

时间	分类	非洪水	洪水	用户精度	生产者精度	总体精度
201607	非洪水	197	0	0.735 1	1	0.842 2
	洪水	71	182	1	0.719 4	
201608	非洪水	218	2	0.767 6	0.990 9	0.847 5
	洪水	66	160	0.987 6	0.707 9	
202006	非洪水	198	3	0.872 2	0.985 1	0.909 9
	洪水	29	125	0.976 6	0.811 7	
202008	非洪水	219	11	0.883 1	0.952 2	0.910 1

少形成可以观测到的洪水。2017 年在山区附近碎片较为密集,表明出现局部山体洪水。

2020 年由于滞留的梅雨季导致汇入巢湖的水量急剧增加,在 8 月份洪水面积达到了高峰,淹没了

几乎所有划定的圩区。洪水分布范围很广,最为严重的区域是无为县的中部、肥西县与庐江县的相邻区域。淹没范围中包含相当大量的乡镇区域,对农田的破坏尤为严重。



注:(a~d)2015年;(e~h)2016年;(i~l)2017年;(m~p)2018年;(q~t)2019年;(u~x)2020年

图 5 2015~2020 Sentinel-1 影像洪水提取结果

Fig.5 Sentinel-1 image flood extraction results from 2015 to 2020

4.2 流域洪水频次特征和洪水热点

洪水频次描述了在某个时间段内某个片区被淹没的次数和出现的洪水热点。在 Sentinel-1 重访

周期内,研究统计了 2015~2020 年雨季 3 个月里卫星经过监测到流域内的淹没频次。巢湖流域中洪水频次高的区域均在河流、水体附近。如流域最南

侧竹丝湖、兆河两侧东西大圩、杭埠河以及两侧的丰乐河和白石天河、东侧的裕溪河等。

圩区是由圩地发展起来的封闭的防洪排涝保护区域,地形平坦,地势低洼,极易被洪涝灾害侵扰。根据 2015~2020 年洪水淹没频次图(图 7),流域中的大部分圩区均是洪涝风险相对较高的区域。圩区是当地防洪排涝的重要方式。有些片区并未

在划定的防洪圩区内,但在频次图中也表现出了较高风险,如双河镇、千人桥镇、红庙镇、十里墩乡和赫店镇(图 7(a)~图 7(d))。在未来的防洪工作中应予以关注。总体来说,地形是重要的影响因素。流域东南部靠近长江的平原流域是洪水灾害影响严重的片区。巢湖市东南侧的银屏镇四周环山,并靠近裕溪河与清溪河,同样是高风险区域。

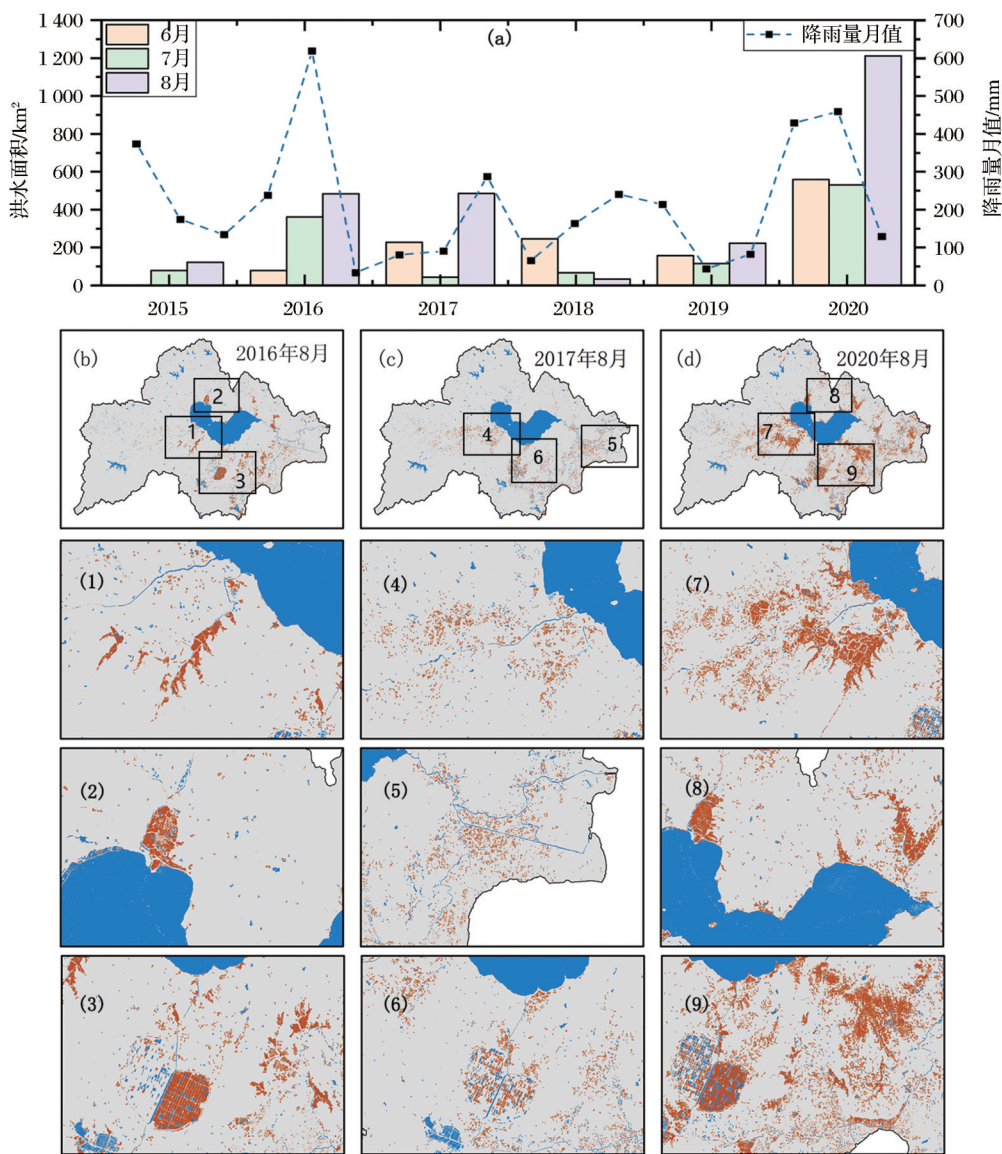


图 6 研究期间共捕捉到三次较为明显的洪水数据

(分别发生在 2016 年、2017 年与 2020 年,其中 2016 年与 2020 年均为特大洪水。2017 年主要在 8 月出现了小范围的洪水;(a)2015~2020 雨季降雨量月值与洪水面积统计;(b)2016 年 8 月洪水;(c)2017 年 8 月洪水;(d)2020 年 8 月洪水;(1)~(9)洪水淹没区域放大图)

Fig.6 Three significant floods were captured, which occurred in 2016, 2017 and 2020 respectively

4.3 流域农田与城镇建设用地受灾情况

巢湖流域中广大区域中都是乡村区域,农田与乡村居民点占比较高。洪水对农田的损失影响和洪水停留的时间与农田的作物有关,巢湖流域受灾

的作物主要为水稻。居民点的损失程度则主要由建设用地淹没范围来统计评估。农田占据了绝大部分被淹没的用地(图 8)。在统计的频次图中,2016 年和 2020 年特征较为相似,低频次中面积范围

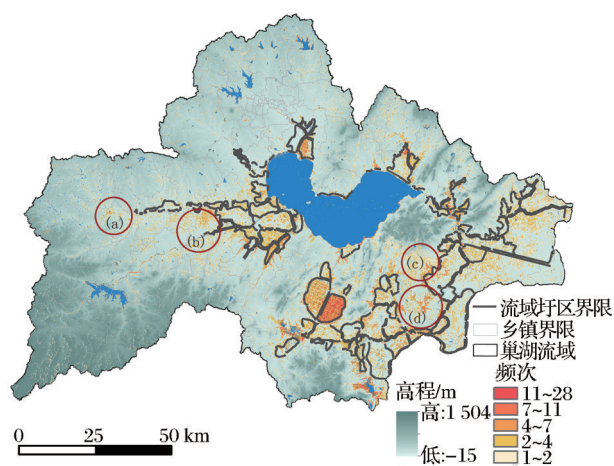
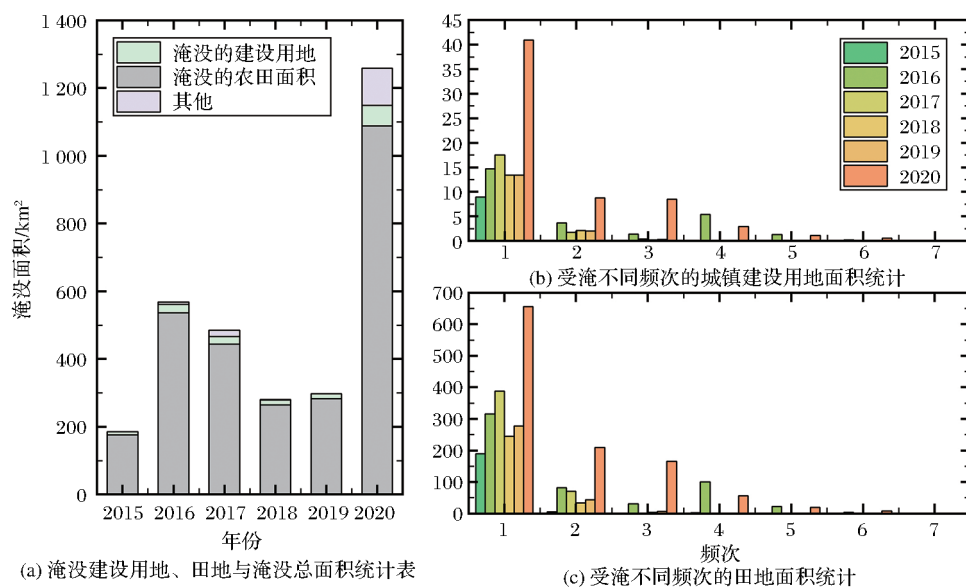


图7 巢湖流域洪水频率图(2015~2020)

(a)双河镇;(b)千人桥镇;(c)红庙镇;(d)十里墩乡和赫店镇

Fig.7 According to the flood frequency map of Chaohu Lake Basin from 2015 to 2020

较大,随着洪水逐渐减退,监测到的面积也逐渐消减。2017年则在低频次1~2次中面积较高,高频次近乎于无,表明在卫星过境间隙,洪水就已经消退,表现为应急损害。



(a) 淹没建设用地、田地与淹没总面积统计表

(c) 受淹不同频次的田地面积统计

图8 2015~2020年淹没面积统计表

Fig.8 Statistics of inundated area from 2015 to 2020

使用卫星数据完成区域规模研究时,卫星幅宽有限,每个卫星可能无法覆盖整个区域,要充分了解卫星采集参数的局限。另外,使用光学数据验证SAR洪水范围时,影像水提取带来的误差也应特别注意。尽管如此,在流域这样的空间尺度下,基于卫星的洪水监测仍旧是具有优势且相当有效的。

4.4.2 减轻洪灾的挑战与影响

随着未来气候变化,洪水的强度和频率预计都

2020年的洪涝灾害被淹田地达到1 088.57 km²,卫星监测到淹没次数超过2次以上的面积达到460.06 km²;建设用地被影响的总范围超过60 km²,这是6年来最严重的一次洪灾。2016年被洪水淹没的农田为536.25 km²,淹没的城乡建设用地达到25.42 km²。淹没农田分布范围基本和洪水的分布图保持高度一致(图9)。

4.4 讨论

4.4.1 不确定性分析

Sentinel-1影像的空间分辨率为10 m,所以它很难监测面积小的水体聚集区。洪水期间水流的汇集使淹没范围变化十分迅速,而Sentinel-1受卫星影像时间分辨率限制,影像也许不能准确记录洪水最大范围,以致提取的洪水最大范围有可能偏小。此外,未能完全去除的山地阴影影响、城市建筑物信号两次反射^[1]、大风和降雨会使水面粗糙改变水的镜面反射特性,这些因素都会降低洪水识别的准确度。在数据处理中,对提取的洪水细小碎片进行了筛选,这也可能是误差的来源。

会增加,规避洪水带来的影响对一个地区的发展具有重要意义。安徽省国土空间规划2021中,巢湖是重要的生态绿心,巢湖流域涵盖了江淮丘陵农业区和沿江平原农业区,是重要的生态腹地。更安全、更高效的发展高质量现代农业空间、城镇空间更加集约、协调农业空间布局、提高乡村空间治理水准都需要深刻考虑到洪水的影响。当前的防洪圩区中已经囊括了大部分的被淹区域,但是在2020年特

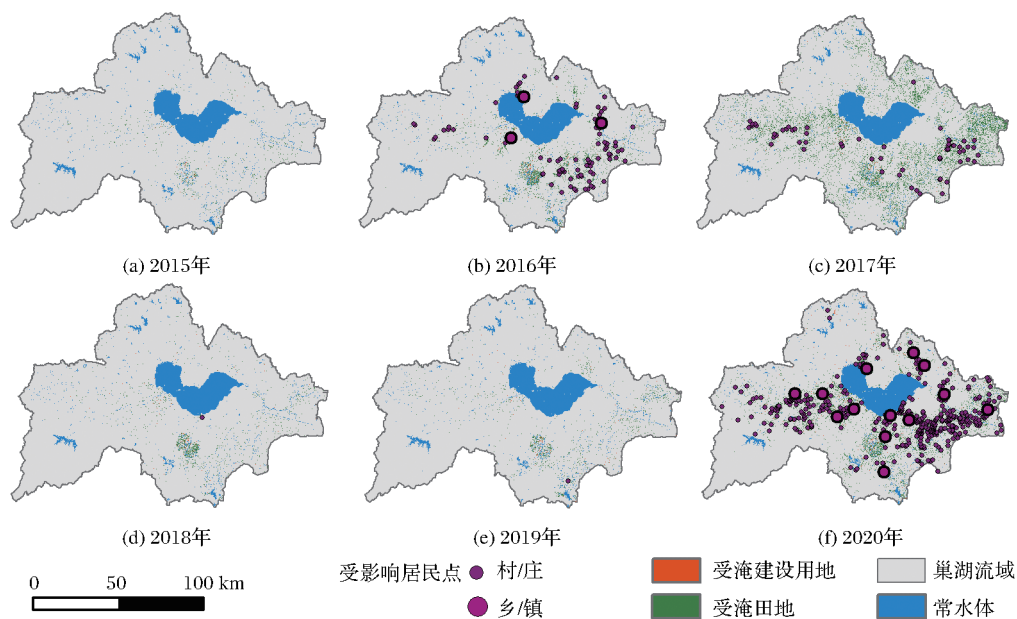


图9 2015~2020年受淹建设用地、农田和受洪水影响的居民点图

Fig.9 Map of flooded construction land, farmland and residential areas affected by flood 2015~2020

大洪水的情况下仍然有许多区域具有较高风险。并且,圩区的群众能够在政府的引导下撤离,但是产业与居住区域的经济损失依旧是民众的负担。防治洪涝灾害,识别高风险的区域,规划合理的泄洪与避险区域,及时预警、事前预防才能尽可能地减少损失与人员伤亡。

5 结 论

研究使用了 Sentinel-1 数据对巢湖流域 2015~2020 的洪水进行监测,并分析了洪水对农田与建设用地的淹没情况。在安徽所在的华东地区,梅雨季云量较高的情况下, Sentinel-1 仍然能够有效地绘制洪水区,进一步证明了其在洪水监测方面的潜力。随着 GEE 等云平台的发展,利用 Sentinel-1 快速跟踪洪水变化、分析洪水带来的影响会变的更高效,生成的洪水地图将有助于政府在未来的防洪、减灾以及由于洪水造成的水质问题方面的工作开展,观测到的被淹农田与居住区将能够帮助更准确的估算财产及粮食减产损失。未来将考虑加入多源卫星数据以提高精度,探索更大区域洪水监测和评估。

参考文献 (References):

- [1] Hirpa F, Pappenberger F, Arnal L, *et al.* Global flood forecasting for averting disasters worldwide[J]. *Global Flood Hazard*, 2018: 205-228. DOI: 10.1002/9781119217886.ch12.
- [2] Qiu J, Cao B, Park E, *et al.* Flood monitoring in rural areas of the Pearl River Basin (China) using Sentinel-1 SAR [J].

Remote Sensing, 2021, 13(7):1384. DOI:10.3390/rs13071384.

- [3] The Ministry of Water Resources of People's Republic of China. 2006 China Flood and Drought Disaster Bulletin[R]. Bulletin of the Ministry of Water Resources of the People's Republic of China, 2008(1): 11-26.[中华人民共和国水利部.2006年中国水旱灾害公报[R]. 中华人民共和国水利部公报, 2008(1): 11-26.]
- [4] The Ministry of Water Resources of People's Republic of China. 2008 China Flood and Drought Disaster Bulletin[R]. Bulletin of the Ministry of Water Resources of the People's Republic of China, 2009(4): 2-20.[中华人民共和国水利部.2008年中国水旱灾害公报[R]. 中华人民共和国水利部公报, 2009(4): 2-20.]
- [5] The Ministry of Water Resources of People's Republic of China. 2007 China Flood and Drought Disaster Bulletin[R]. Bulletin of the Ministry of Water Resources of the people's Republic of China, 2009(1): 22-37.[中华人民共和国水利部.2007年中国水旱灾害公报[R]. 中华人民共和国水利部公报, 2009(1): 22-37.]
- [6] The Ministry of Water Resources of People's Republic of China. China Flood and Drought Disaster Bulletin 2010[R]. China Flood Control and Drought Relief, 2011, 21(4): 3.[中华人民共和国水利部.《中国水旱灾害公报 2010》发布公告[R]. 中国防汛抗旱, 2011, 21(4): 3.]
- [7] The Ministry of Water Resources of People's Republic of China. 2009 China Flood and Drought Disaster Bulletin[R]. Bulletin of the Ministry of Water Resources of the People's Republic of China, 2011(1): 14-30.[中华人民共和国水利部.2009

- 年中国水旱灾害公报[R]. 中华人民共和国水利部公报, 2011 (1):14-30.]
- [8] Klemas V. Remote sensing of floods and flood-prone areas: An overview[J]. Journal of Coastal Research, 2014, 31(4): 1005-1013.DOI: 10.2112/JCOASTRES-D-14-00160.1.
- [9] Schumann G J, Brakenridge G R, Kettner A J, *et al.* Assisting flood disaster response with earth observation data and products: a critical assessment[J]. Remote Sensing, 2018, 10 (8): 1230.DOI: 10.3390/rs10081230.
- [10] Feyisa G L, Meilby H, Fensholt R, *et al.* Automated water extraction index: a new technique for surface water mapping using Landsat imagery[J]. Remote Sensing of Environment, 2014, 140: 23-35. DOI: 10.1016/j.rse.2013.08.029.
- [11] Anusha N, Bharathi B. Flood detection and flood mapping using multi-temporal synthetic aperture radar and optical data [J]. The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science, 2020, 23(2):207-219.DOI: 10.1016/j.ejrs.2019.01.001.
- [12] Alsdorf D E, Roerigüez E, Lettenmaier D P. Measuring surface water from space[J]. Reviews of Geophysics, 2007, 45 (2).DOI: 10.1029/2006RG000197.
- [13] Schlaffer S, Matgen P, Hollaus M, *et al.* Flood detection from multi-temporal SAR data using harmonic analysis and change detection [J]. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2015, 38: 15-24. DOI: 10.1016/j.jag.2014.12.001.
- [14] Kaplan G, Avdan U. Sentinel-1 and Sentinel-2 data fusion for wetlands mapping: Balıkdami, Turkey [J]. International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing & Spatial Information Sciences, 2018, 42(3): 729-734. DOI: 10.5194/isprs-archives-XLII-3-729-2018.
- [15] Singha M, Dong J, Sarmah S, *et al.* Identifying floods and flood-affected paddy rice fields in bangladesh based on Sentinel-1 imagery and Google Earth Engine[J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2020, 166: 278-293. DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2020.06.011.
- [16] Kuntla S. An era of Sentinels in flood management: potential of Sentinel-1, -2, and -3 satellites for effective flood management [J]. Open Geosciences, 2021, 13: 1616-1642. DOI: 10.1515/geo-2020-0325.
- [17] Landuyt L, Wesemael A V, Schumann G J, *et al.* Flood mapping based on synthetic aperture radar: An assessment of established approaches[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2019, 57(2): 722-739. DOI: 10.1109/TGRS.2018.2860054.
- [18] Cian F, Marconcini M, Ceccato P. Normalized difference flood index for rapid flood mapping: taking advantage of EO Big Data [J]. Remote Sensing of Environment, 2018, 209: 712-730. DOI: 10.1016/j.rse.2018.03.006.
- [19] Clement M A, Kilsby C G, Moore P. Multi-temporal synthetic aperture radar flood mapping using change detection [J]. Journal of Flood Risk Management, 2018, 11(2): 152-168. DOI: 10.1016/j.ejrs.2019.01.001.
- [20] Huang W, Devries B, Huang C, *et al.* Automated extraction of surface water extent from Sentinel-1 data[J]. Remote Sensing, 2018, 10(5):10050797. DOI: 10.3390/rs10050797.
- [21] Cao H, Zhang H, Wang C, *et al.* Operational flood detection using Sentinel-1 SAR data over large areas[J]. Water, 2019, 11(4):786. DOI: 10.3390/w11040786.
- [22] Moharrami M, Javanbakht M, Attarchi S. Automatic flood detection using Sentinel-1 images on the Google Earth Engine [J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2021, 193 (5): 248.DOI: 10.1007/s10661-021-09037-7.
- [23] Mudi S, Prakash J, Das P. Flood hazard mapping in assam using Sentinel-1 SAR data[M]. 2022: 459-473. DOI: 10.1007/978-3-030-75197-5_20.
- [24] Dasgupta A, Grimaldi S, Ramsankaran R A A J, *et al.* Towards operational SAR-based flood mapping using neuro-fuzzy texture-based approaches[J]. Remote Sensing of Environment, 2018, 215:313-329.DOI:10.1016/j.rse.2018.06.019.
- [25] Sharifi A. Development of a method for flood detection based on Sentinel-1 images and classifier algorithms[J]. Water and Environment Journal, 2021, 35(3):924-929. DOI: 10.1111/wej.12681.
- [26] Kumar G, Kumar S, Ahmad S. Exploring Sentinel-1 and Sentinel-2 diversity for flood inundation mapping using deep learning [J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2021, 180: 163-173. DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2021.08.016.
- [27] Li S, Sun D, Goldberg M D, *et al.* Automatic near real-time flood detection using Suomi-NPP/VIIIRS data [J]. Remote Sensing of Environment, 2018, 204:672-689. DOI: 10.1016/j.rse.2017.09.032.
- [28] Panteras G, Cervone G. Enhancing the temporal resolution of Satellite-based flood extent generation using crowdsourced data for disaster monitoring [J]. International Journal of Remote Sensing, 2018, 39(5): 1459-1474. DOI: 10.1080/01431161.2017.1400193.
- [29] Xu Hanzeyu, Liu Chong, Wang Junbang, *et al.* Remote sensing extraction of citrus orchards in Southern Jiangxi supported by Google Earth Engine Platform [J]. Journal of Earth Information Science, 2018, 20(3): 396-404.[徐晗宇, 刘冲, 王军邦, 等. Google Earth Engine 平台支持下的赣南柑橘果园

- 遥感提取研究[J]. 地球信息科学学报, 2018, 20(3): 396-404.]
- [30] Martinis S, Twele A, Voigt S. Towards operational near real-time flood detection using a split-based automatic thresholding procedure on high resolution TerraSAR-X data[J]. Natural Hazards and Earth System Sciences, 2009, 9(2): 303-314. DOI: 10.5194/nhess-9-303-2009.
- [31] Li X, Wang X, Shao W, *et al.* Forecast of flood in Chaohu Lake Basin of China based on Grey-Markov theory[J]. Chinese Geographical Science, 2007, 17(1): 64-68. DOI: 10.1007/s11769-007-0064-3.
- [32] Shi Wenyu. Study on flood and drought disasters in Chaohu Lake Basin since 600 years[D]. Shanghai: Shanghai Normal University, 2011.[施汶好. 600年以来巢湖流域水旱灾害研究[D]. 上海: 上海师范大学, 2011.]
- [33] Hao Dandan. Flood disaster risk assessment and scenario analysis in Chaohu Lake Basin[D]. Wuhu: Anhui Normal University, 2014.[郝丹丹. 巢湖流域洪水灾害风险评估与情景分析[D]. 芜湖: 安徽师范大学, 2014.]
- [34] Shi Zhengbao. Study on urban flood control in Chaohu city, Anhui province[J]. Water Conservancy Planning and Design, 2014(9): 1-4, 51.[石正宝. 安徽省巢湖市城市防洪研究[J]. 水利规划与设计, 2014(9): 1-4, 51. DOI: 10.3969/j.issn.1672-2469.2014.09.001.]
- [35] Wan Nengsheng, Qi Pengyun. Practice and thinking on the response to the catastrophic flood disaster in Chaohu Lake Basin in 2020[J]. China Flood Control and Drought Relief, 2021, 31(4): 37-41.[[万能胜, 齐鹏云. 巢湖流域2020年特大洪涝灾害应对实践与思考[J]. 中国防汛抗旱, 2021, 31(4): 37-41.]
- [36] Xie Meichao. Flood analysis of Chaohu Lake Basin in 2020[J]. Journal of Anhui Water Resources and Hydropower Vocational and Technical College, 2021, 21(2): 7-10, 22.[谢每超. 巢湖流域2020年洪水分析[J]. 安徽水利水电职业技术学院学报, 2021, 21(2): 7-10, 22.]
- [37] Qi Guohua, Ma Xiaoshuang, He Shiyu, *et al.* Analysis of temporal and spatial variation of water bloom length in Chaohu Lake (2009-2018) and prediction of occurrence probability based on multi-source remote sensing data[J]. Lake Science, 2021, 33(2): 414-427.[祁国华, 马晓双, 何诗瑜, 等. 基于多源遥感数据的巢湖水华长时序时空变化(2009~2018年)分析与发生概率预测[J]. 湖泊科学, 2021, 33(2): 414-427.]
- [38] Lü Jun. Research on flood disaster risk assessment and Risk management based on cloud model[D]. Wuhu: Anhui Normal University, 2019.[吕军. 基于云模型的洪涝灾害风险评估与风险管理研究[D]. 芜湖: 安徽师范大学, 2019.]
- [39] Zhang Pingping. Study on security evaluation and safeguard measures of cultivated land resources in Wanjiang Urban belt based on food security[D]. Wuhu: Anhui Normal University, 2011.[张平平. 基于粮食安全的皖江城市带耕地资源安全评价及保障措施研究[D]. 芜湖: 安徽师范大学, 2011.]
- [40] Yang Fubao, Wang Guohan. Analysis of flood control situation and control countermeasures in Chaohu Lake Basin[J]. Water conservancy planning and design, 2018(7): 33-36.[杨富宝, 王国汉. 巢湖流域防洪形势与治理对策分析[J]. 水利规划与设计, 2018(7): 33-36.]
- [41] Torres R, Snoeij P, Geudtner D, *et al.* GMES Sentinel-1 mission[J]. Remote Sensing of Environment, 2012, 120: 9-24. DOI: 10.1016/j.rse.2011.05.028.
- [42] Pickens A H, Hansen M C, Hancher M, *et al.* Mapping and sampling to characterize global inland water dynamics from 1999 to 2018 with full landsat time-series[J]. Remote Sensing of Environment, 2020, 243: 111792. DOI: 10.1016/j.rse.2020.111792.
- [43] Qi Caimei. Atlas of land cover of the People's Republic of China (1:1 Million) officially published[J]. Geological and mineral mapping, 2017, 33(4): 50.[祁彩梅. 《中华人民共和国土地覆被地图集》(1:100万)正式出版[J]. 地矿测绘, 2017, 33(4): 50. DOI: 10.16864/j.cnki.dkch.2017.0067.]
- [44] REVILLA-ROMERO B, Hirpa F A, Pozo J T-D, *et al.* On the use of global flood forecasts and Satellite-Derived inundation maps for flood monitoring in data-sparse regions[J]. Remote Sensing, 2015, 7(11): 15702-15728. DOI: 10.3390/rs71115702. DOI: 10.3390/rs71115702.
- [45] Lee S U, Yoon Chung S, Park R H. A comparative performance study of several global thresholding techniques for segmentation[J]. Computer Vision, Graphics, and Image Processing, 1990, 52(2): 171-190. DOI: 10.1016/0734-189X(90)90053-X.
- [46] Jia Shichao, Xue Dongjian, Li Chengrao, *et al.* Research on water information extraction method based on Sentinel-1 data[J]. People's Yangtze River, 2019, 50(2): 213-227.[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): 213-227.]
- [47] Zhang Pan. Research on classifier selection integration method based on confusion matrix[D]. Jiaozuo: Henan University of Technology, 2016.[张盼. 基于混淆矩阵的分类器选择集成方法研究[D]. 焦作: 河南理工大学, 2016.]

Research on Spatial-temporal Dynamic Changes of Flood in Lake Chaohu Basin based on Sentinel-1 SAR Satellite Image

Jia Jiajia^{1,2}, Ma Jinge², Shen Ming², Qi Tianci², Cao Zhigang², He Yanfen¹,
Duan Hongtao^{1,2}

(1.Northwestern University School of Urban and Environmental Sciences, Xi'an 710127, China;

2.Institute of Remote Sensing and Geo-Information Science, Nanjing, China Institute of Geography and Lakes,
Chinese Academy of Sciences, Nanjing 21000, China)

Abstract: Flood disaster has great harm and poses a great threat to regional people's lives and property and economic development. Therefore, the continuous high-time resolution remote sensing monitoring will be conducive to more objective and accurate detection of the temporal and spatial variation characteristics of flood risk areas. This research takes Chaohu Lake Basin as the experimental area, based on Google Earth Engine platform, collects Sentinel-1 Synthetic Aperture Radar (SAR) images, uses the flood inundation identification method combining spectral relationship and threshold segmentation to map the flood range of Chaohu Lake Basin from 2015 to 2020, and combines land use data, The impact of flood on farmland and residential areas represented by construction land in Chaohu Lake Basin is analyzed. The results show that: (1) the accuracy of this method is 3%~7% higher than that of single band threshold method and simple index method, and can quickly extract the flood inundation range of watershed over the years by using remote sensing data; (2) From 2015 to 2020, two major floods and one small-scale flood were monitored, and the inundation scope was concentrated in Hangbu River, Yuxi River, Zhaohe River and other river areas; (3) Farmland accounts for 86.47%~95.35% of the flooded area, and construction land accounts for 4.47%~5.36%. The residential areas affected by the flood are mainly grass-roots villages and towns. The research shows that the application of SAR satellite data in flood monitoring can effectively monitor the impact range of flood on farmland and rural residential areas, which is very key to formulate relevant planning strategies in the future, strengthen rural flood control in the basin and ensure personnel and food security.

Key words: Chaohu Lake Basin; Sentinel-1; Flood disaster; GEE