

doi: 10.6046/zrzyyg.2022052

引用格式: 何彬方, 姚筠, 冯妍, 等. 基于 Sentinel-1A 的安徽省 2020 年梅雨期洪水淹没监测[J]. 自然资源遥感, 2023, 35(1): 140-147. (He B F, Yao Y, Feng Y, et al. Sentinel-1A based flood inundation monitoring in Anhui Province during the plum rain period of 2020[J]. Remote Sensing for Natural Resources, 2023, 35(1): 140-147.)

# 基于 Sentinel-1A 的安徽省 2020 年梅雨期洪水淹没监测

何彬方<sup>1,2</sup>, 姚筠<sup>1,2</sup>, 冯妍<sup>1,2</sup>, 刘惠敏<sup>1,2</sup>, 戴娟<sup>3</sup>

(1. 安徽省气象科学研究所, 大气科学与卫星遥感安徽省重点实验室, 合肥 230031; 2. 寿县国家气候观象台, 中国气象局淮河流域典型农田生态气象野外科学试验基地, 淮南 232200; 3. 安徽省气候中心, 合肥 230031)

**摘要:** 2020 年超长梅雨期内的持续强降雨, 导致安徽省发生全域性洪涝灾害, 为了快速、准确地提取洪涝淹没范围, 为防汛救灾提供科学支撑, 选取安徽境内巢湖流域和淮河流域的灾前和灾中 Sentinel-1A 数据, 首先, 在快速预处理基础上, 采用双极化水体指数 (Sentinel-1A dual-polarized water index, SDWI) 法, 并结合地形因子对平原和山区分别提取水体信息, 建立一套洪水淹没区监测流程; 然后通过该流程利用灾前、灾中两期合成孔径雷达数据提取 2020 年 7 月 27 日巢湖流域、淮河流域行蓄洪区洪水淹没范围。结果显示: SDWI 比直接用后向散射系数提取水体具有优势; 7 月 27 日巢湖流域洪水淹没区面积为 524.8 km<sup>2</sup>, 其中受洪灾较重的是白石天河子流域, 西河子流域次之; 淮河流域安徽境内行蓄洪区, 沿淮的 4 个地市淹没面积从大到小依次为淮南市、阜阳市、六安市、蚌埠市。研究表明, 基于 Sentinel-1A 数据, 采用 SDWI 和地形因子建立的洪水淹没区监测流程对平原和山区都具有较好的准确性、适用性, 且具有较高的时效性, 便于及时开展洪水灾害监测。

**关键词:** Sentinel-1A/SAR; 洪水监测; 梅雨; SDWI; 坡度

**中图分类号:** TP 79 **文献标志码:** A **文章编号:** 2097-035X(2023)01-0140-08

## 0 引言

长江中下游和淮河流域自古以来是我国洪涝灾害频发的地区, 对江淮流域地区极端降水变化的研究表明极端降水量呈现较为明显的增加趋势<sup>[1-4]</sup>。特别是在每年江淮流域的梅雨期内, 降水天气过程多、暴雨频繁、降水持续, 导致江河、湖泊、水库水位上涨, 引发严重的洪涝灾害。安徽省具有过渡型气候特征, 天气多变, 且地势地形多样, 气象灾害发生频繁、种类多样, 其中受旱涝灾害影响最为严重, 一年中旱涝逆转、旱涝并存也时有发生。各类气象灾害引起的损失中, 最重的是暴雨洪涝引起<sup>[5-6]</sup>, 所以非常有必要对洪涝灾害进行快速、准确的监测与评估, 为抗洪减灾工作抢得先机。

利用卫星遥感技术可以快速、动态、精确地监测江河、湖泊、水库水体面积的时空动态变化<sup>[7]</sup>, 并结合地理信息技术, 直观地展示其空间分布及动态变化。这对水资源保护、防洪减灾都具有重要意义。

NOAA/AVHRR, EOS/MODIS, FY-3/MERSI, Landsat8/OLI, GF-6/WFV 和 Sentinel-2/MSI 等光学遥感影像数据先后被用来监测洪水淹没区域、提取面积<sup>[8-10]</sup>。但由于洪涝灾害发生期间, 通常伴随着连续阴雨天气、云覆盖量大, 光学遥感影像难以发挥作用, 其监测的准确性、时效性下降。星载合成孔径雷达 (synthetic aperture Radar, SAR) 具有全天候、全天时对地观测能力, 不受云雨影响、数据时空分辨率较高, 应用于洪涝监测可大大提高时效性。近年来, 随着 SAR 技术的发展, 雷达卫星种类和数量逐年增加<sup>[11]</sup>。特别是欧洲航天局的 Sentinel-1、我国高分三号 (GF-3) 雷达遥感卫星发射以来, 数据能免费下载、且已被广泛地应用<sup>[12-13]</sup>。这为应用 SAR 数据连续动态监测洪水灾害提供了数据支撑。

基于 SAR 影像的水体信息提取方法主要包括目视解译、阈值分割<sup>[14]</sup>、面向对象分类法<sup>[15-17]</sup>、纹理特征分析<sup>[18-19]</sup>等。其中阈值分割法具有简单、稳定、快速特点, 满足服务时效性的要求, 所以应用最为广泛。阈值分割法有单阈值分割法、自适应全局

收稿日期: 2022-02-14; 修订日期: 2022-07-28

基金项目: 淮河流域气象开放研究基金项目“安徽省中小河流特性提取和洪涝监测方法”(编号: HRM201609)和安徽省气象局科技发展基金项目“卫星遥感技术在西藏山南的应用研究”(编号: KM202004)共同资助。

第一作者: 何彬方 (1978-), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事生态环境遥感方面的工作。Email: he\_binfang@sina.com。

阈值法和改进的最大类间方差法 (OTSU)<sup>[20-21]</sup> 几种, 研究表明 OTSU 分割法对水体的提取结果较好<sup>[22]</sup>。由于在不同极化下的后向散射系数图上, 水体像元均表现为低值, 背景像元均表现为高值的特征, 利用双极化数据相乘得到新的水体指数, 即双极化水体指数 (Sentinel-1A dual-polarized water index, SDWI) 来提取水体, 目的是为了增强这一特征, 在阈值分割时能更容易获取阈值<sup>[23]</sup>。业务服务中常常基于单一特征因子, 采用阈值法提取水体。但 SAR 影像的成像方式为斜距成像, 在地形起伏较大的皖南山区和大别山区, 受山体的影响, 会产生特有的阴影现象, 使得背向雷达方向的山坡的后向散射系数与水体的后向散射系数一致, 易被误提为水体。单纯采用 SDWI 进行阈值分割法难以有效消除阴影对水体提取的影响<sup>[24-25]</sup>。为此, 提出 SDWI 结合地形因子的改进 OTSU 阈值分割法对 SAR 影像实现平原和山区水体提取。该方法能够有效去除山体阴影, 较于传统水体提取方法, 速度快, 原理简单, 提取精度明显增高, 能获得最佳水体提取结果。

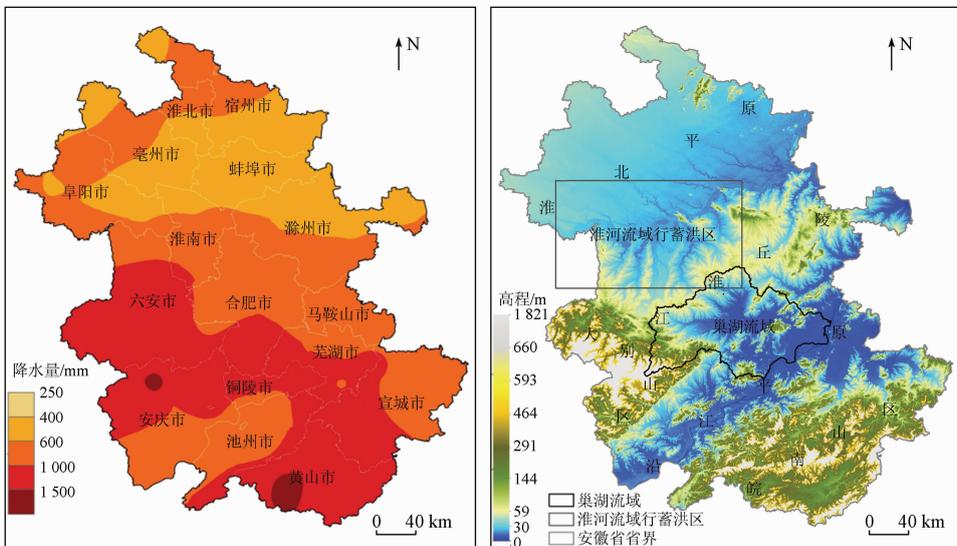
2020 年安徽省梅雨期为 6 月 2 日—7 月 31 日, 梅雨期 60 d, 入梅以来, 全省出现 10 次大范围持续性强降水, 梅雨期内各气象站平均累计降水量为 856 mm, 是常年同期的 2.1 倍, 多地降水强度创极值, 梅雨期之长、暴雨日数之多、累计雨量之大、覆盖范围之广、梅雨强度之强, 均为历史第一位。持续强降雨造成安徽省发生全域性洪涝灾害, 巢湖流域出现世纪性洪水, 洪灾受害严重。为了快速、准确监测安徽省内洪涝淹没面积, 选取受灾严重的安徽省巢

湖流域和淮河流域作为研究区, 选用 Sentinel-1A 数据, 针对常规的雷达后向散射系数不易区分水体和非水体、山区水体的提取易受阴影干扰的问题, 采用 SDWI 结合地形因子对平原和山区分别提取水体信息, 再通过灾前和灾中水体信息的对比实现洪水淹没范围快速提取, 为防灾减灾救灾提供第一手资料 and 科技支撑。

## 1 研究区概况和数据源

### 1.1 研究区概况

安徽省位于中国中东部地区, E114°54′ ~ 119°37′ 与 N29°41′ ~ 34°38′ 之间, 总面积约 14.01 万 km<sup>2</sup>。省内地形地貌复杂多样、南北差异较大, 北部多为平原、中间为丘陵地带, 西部和南部多山地。从北到南可将安徽省细分为 5 个自然区域: 淮北平原、江淮丘陵、大别山区、沿江平原和皖南山区<sup>[26]</sup>。长江、淮河横贯安徽省境, 境内水系主要分属淮河流域、长江流域和新安江流域, 山区水库密集、沿淮和沿江地区湖泊众多, 其中中国五大淡水湖之一的巢湖面积近 800 km<sup>2</sup>。2020 年安徽省梅雨期天气气候异常, 全省出现大范围持续性强降水, 超过 1 000 mm 以上的强降水中心主要位于安徽省大别山区、皖南山区和巢湖流域 (图 1(a))。大范围持续性强降水导致安徽省发生全域性洪涝灾害, 巢湖出现世纪性洪水, 本研究主要选取分析 2020 年梅雨期间受洪灾较重的巢湖流域和淮河流域行蓄洪区 (图 1(b))。



(a) 2020 年安徽省梅雨期降水量分布图

(b) 安徽省数字高程图及研究区

图 1 研究区概况

Fig. 1 Overview of the study area

## 1.2 数据源及其预处理

Sentinel-1A 卫星是欧洲航天局 (European Space Agency, ESA) 哥白尼计划 (Global Monitoring for Environment and Security, GMES) 中的系列对地观测卫星, 载有频率为 5.404 GHz 的 C 波段 SAR。包括 4 种模式的斜距单视复数 (single look complex, SLC) 和地距多视产品 (grand range detected, GRD) 产品 (表 1)<sup>[27]</sup>, 本文研究中采用 Sentinel-1A/SAR 的干涉宽幅模式下的地距多视产品数据, 该产品包含经过多视处理、采用 WGS84 椭球投影至地距的聚焦数据 (<https://scihub.copernicus.eu>)。Sentinel-1A 数据能够用于开展湖泊和水库水体面积变化、山体滑坡、林火 (过火面积)、农业地表覆盖分类、作物产量估产的研究, 具有广阔的应用前景<sup>[28]</sup>。

表 1 Sentinel-1A 的成像参数

Tab. 1 Imaging parameters of Sentinel-1A

模式	幅宽/m	分辨率(距离向×方位向)/m	极化类型
条带模式(SM)	80	5×5	HH+HV, VH+VV, HH, VV
干涉宽幅模式(IW)	250	5×20	HH+HV, VH+VV, HH, VV
超宽幅模式(EW)	400	25×100	HH+HV, VH+VV, HH, VV
波浪(WV)	20×20	5×20	HH, VV

另外收集了研究区高程栅格数据和行政边界、流域边界等矢量数据, 是为了辅助 SAR 数据的预处理 (地形校正、地理编码)、提高洪水淹没区的提取精度及淹没面积的解译精度。其中高程数据采用由美国宇航局和国防部国家测绘局联合发布的分辨率为 30 m、hgt 格式的 SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) 高程数据。

采用欧洲航天局开发的 Sentinel 系列数据处理软件 (Sentinel applications platform, SNAP) 进行数据预处理。主要的预处理包括轨道纠正、边缘噪声移除、热噪声去除、滤波、辐射定标、地形校正、地理编码、分贝化, 重采样得到分辨率为 10 m、UTM 投影分贝化的后向散射系数数据。最后, 对同天同轨相邻或者不同天临近轨道的 2 幅 Sentinel-1A IW GRD 影像进行镶嵌<sup>[29]</sup>。使用 SNAP 中的 GraphBuilder 模块按照对 Sentinel-1 IW GRD 数据预处理步骤添加相应的预处理模块, 建立预处理流程, 并保存为 XML 文件, 实现重复利用, 减少数据多次读写过程, 并极大提高运算效率。

## 2 淹没区监测方法

由地表目标的微波散射特性可知, 相对雷达波

波长, 非水体表面粗糙, 是漫反射, 后向回波强、后向散射系数大; 水体表面相对平整, 主要呈现为镜面反射, 后向散射回波弱、后向散射系数小。后向散射系数分贝化后直方图呈现双峰型分布, 近似看作由 2 个高斯分布构成。在 VV 和 VH 极化通道, 水体的后向散射系数分贝化后的值一般低于 -15, 而非水体的后向散射系数分贝化后的值一般高于 -15, 根据 SAR 图像中水体的后向散射系数比非水体 (植被、土壤等) 低这一特性, 为了增大水体与非水体像元之间的差异, 采用 2 个双极化的后向散射系数  $\sigma_{VV} \times \sigma_{VH}$  乘积再乘 10 进行增强处理, 然后取自然对数, 当自然对数的自变量大于 1 时, 曲线的斜率逐渐减小, 便于找到合理的分割阈值, 即为 SDWI<sup>[19]</sup>。公式为:

$$SDWI = \ln(10 \times \sigma_{VV} \times \sigma_{VH}), \quad (1)$$

基于得到的 SDWI 图像, 采用改进的 OTSU 方法计算得到水体与非水体的类间方差除以水体和非水体类内方差之和达到最大值时所对应的阈值, 即为水体和其他地物分割的最佳阈值, 实现水体信息的提取<sup>[16]</sup>。

为了对比后向散射系数与 SDWI 提取水体的优势, 对巢湖流域 2020 年 7 月 27 日的 VV 和 VH 极化后向散射系数图和 SDWI 图制作直方统计图 (图 2)。从直方统计图可以看出, 经过 SDWI 增强后, 2 个峰值比后向散射系数峰值增大、宽度变窄, 说明增强后水体和背景内部各自的像素值相近, 具有较好的内聚性, 水体和背景内部像素趋于均匀一致, 类内方差变小。同时, 经过 SDWI 增强后波谷更为狭窄, 直方图上双峰特征更为明显, 水体与其他地物的差异明显增大, 类间方差增大。选择改进的 OTSU 方法, 这样更加易于获取水体与其他地物之间的阈值。SAR 影像的成像方式为侧视成像, 在安徽省大别山区, 由于地形起伏的影响 SAR 影像会可能出现特有的弱反射信号或者无反射信号的阴影现象<sup>[30]</sup>。SAR 图像上背向卫星方向的山体后向散射系数较小就是阴影现象导致的, 使得其后向散射系数与水体的后向散射系数相差不大, 导致二者的 SDWI 也差别不大, 易被误判为水体。针对阴影引起的虚假信息误提的问题, 根据安徽省地形特征, 利用 30 m 的 SRTM 高程数据, 通过双线性插值成 10 m 分辨率的栅格数据与 Sentinel-1A 数据匹配; 再根据安徽省地形地貌特征, 经验设定区分山区和平原地区的高程阈值  $T_0$  为 100 m, 根据高程阈值分别建立山区和平原地区水体提取方法。同时山区水体 (水库、湖泊、河道) 的坡度 (Slope) 一般较小, 所以选用坡度

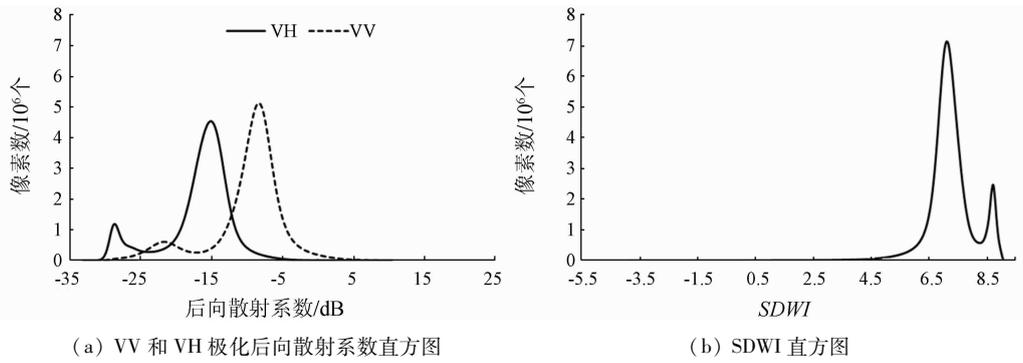


图2 2020年7月27日巢湖流域各指数直方图

Fig.2 Histogram of various index in Chaohu Lake basin on July 27, 2020

作为山区水体提取的另外一个参数进行阈值分割,参考相关文献  $T_2$  的阈值设定为  $10^\circ$ ,消除阴影的影响,从而提取山区水体<sup>[21]</sup>。最后基于2期 SAR 影

像,提取灾前和灾中的水体范围,叠加获取洪水淹没区,并统计区域内淹没面积,流程图见图3。

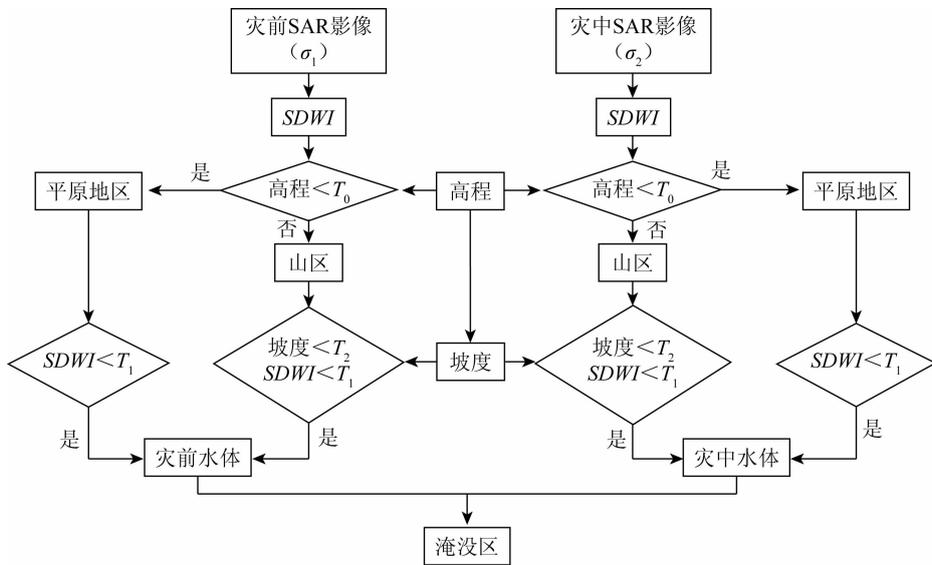


图3 Sentinel-1A 影像的洪水监测流程图

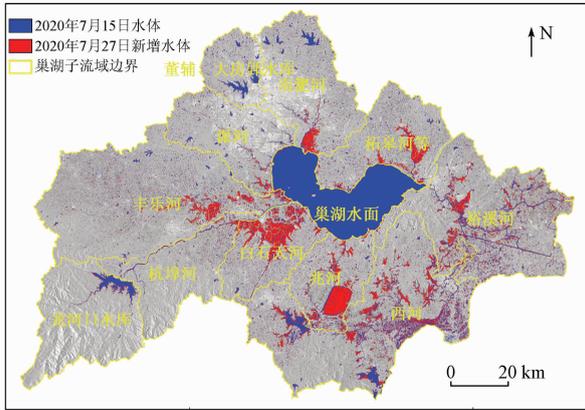
Fig.3 Flow chart of flood monitoring base on sentinel-1A SAR image

### 3 结果与分析

#### 3.1 巢湖流域淹没区监测

巢湖流域属于长江流域,总面积 13 486 km<sup>2</sup>,受 2020 年梅雨期间多轮次强降雨影响和长江水位持续偏高的顶托作用,巢湖流域出现世纪性洪水。从流域空间分布来看,西南部的杭埠河、白石天河、兆河、西河等子流域累计面雨量大,普遍在 1 100 ~ 1 300 mm,北部及东部子流域累计面雨量相对偏小,普遍在 800 ~ 1 000 mm(图4 和表2)。湖心的忠庙水位站 7 月 22 日出现本次洪水最高水位 13.43 m(超警 2.93 m,超保 0.93 m,超历史 0.63 m),超过 1991 年最高洪水水位,为建站以来极值<sup>[31]</sup>。流域内先后启用了十八联圩、滨湖联圩、蒋口河联圩、沿河联圩、裴岗联圩等 9 个万亩以上大圩和 186 个中小

圩口蓄洪泄洪。利用 2020 年 7 月 15 日和 27 日 Sentinel-1A SAR 灾前和灾中影像、安徽省高程和巢湖流域边界地理信息数据,提取巢湖流域洪水淹没区(图4)。基于改进的 OTSU 方法,得到提取水体的 SDWI 阈值为 8.25,洪水淹没区主要分布在巢湖四周的支流附近,监测到流域内灾前水体面积为 1 341.8 km<sup>2</sup>,灾中水体面积为 1 866.6 km<sup>2</sup>,巢湖流域内淹没面积为 524.8 km<sup>2</sup>。从表 2 可知,7 月 27 日巢湖流域内白石天河子流域受淹面积最大为 110.2 km<sup>2</sup>,受灾较重;西河子流域次之为 105.4 km<sup>2</sup>;第三是兆河子流域为 92.9 km<sup>2</sup>,主要是东大圩泄洪导致。除杭埠河子流域外,梅雨期间累计面雨量较大的子流域受灾也较重,监测结果与洪水灾情实际调查情况符合<sup>[32]</sup>。杭埠河子流域是因为上游处于大别山区,洪水较快的汇流于下游地区的白石天河子流域,所以累计面雨量较大,但受灾面积较小。



(底图为巢湖流域 2020 年 7 月 27 日 Sentinel-1A SAR/VV 极化数据)

图 4 巢湖流域洪水淹没范围监测结果图

Fig. 4 Monitoring results of flood inundation area in Chaohu Lake basin

表 2 巢湖流域淹没面积监测统计

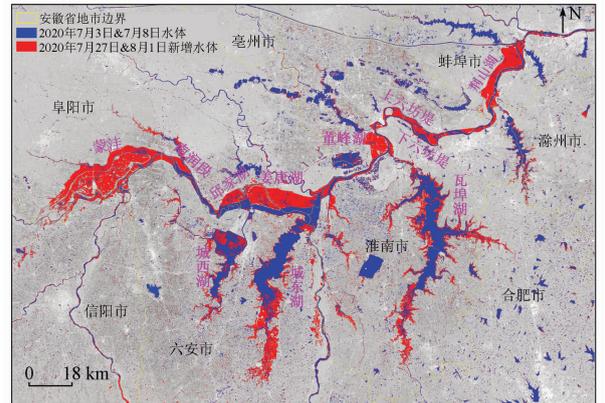
Tab. 2 Statistics of inundated area in Chaohu Lake basin

子流域	7 月 15 日 水体面 积/km <sup>2</sup>	7 月 27 日 水体面 积/km <sup>2</sup>	淹没水体 面积/km <sup>2</sup>	梅雨期子 流域累计 面雨量/mm
白石天河	26.5	136.7	110.2	1 116
西河	170.2	275.6	105.4	1 105
兆河	30.0	122.9	92.9	1 318
裕溪河	94.0	164.7	70.6	855
丰乐河	59.4	114.6	55.2	987
柘皋河	28.9	72.3	43.4	875
南淝河(董 铺水库等)	76.7	102.5	25.8	882
派河	21.8	32.1	10.3	849
杭埠河(龙 河口水库)	60.2	67.9	7.7	1 115
巢湖水面	774.1	777.3	3.2	860
总计	1 341.8	1 866.6	524.8	—

### 3.2 淮河行蓄洪区淹没监测

2020 年 7 月 20 日王家坝水位站达到本次洪水的最高水位 29.76 m,居历史第二位。7 月 20 日起淮河安徽境内的蒙洼、南润段、邱家湖、姜唐湖、董峰湖、上六坊堤、下六坊堤、荆山湖 8 个行蓄洪区先后开闸泄洪,随后利用覆盖淮河安徽境内行蓄洪区的泄洪前(2020 年 7 月 3 日和 8 日)和泄洪后的(2020 年 7 月 27 日和 8 月 1 日)Sentinel-1A SAR 影像分别提取泄洪前后水体(图 5),相比于 7 月上旬,六安市境内的城东湖、城西湖湖区向南扩展明显,淮南市境内的瓦埠湖湖区向四周扩展,蒙洼蓄洪区周边的淮河河道水体充盈、其他部分河道变宽,8 个行蓄洪区内新增大量水体。行泄洪区新增水体面积见表 3,上六坊堤、荆山湖的淹没面积比都在 90% 以上,南润段、邱家湖、姜唐湖、董峰湖淹没面积在 80% ~ 90% 之间,蒙洼蓄洪区淹没面积百分比最小为

62%。这是由于 7 月 23 日关闭王家坝闸,停止向蒙洼蓄洪区分洪,8 月 1 日退水闸开闸退洪,蒙洼蓄洪区西部洪水退去导致,监测结果与实际统计结果一致。在图 5 所示范围内(E115.490 5°~117.435 4°,N31.891 3°~33.037 8°)的安徽境内各地市洪水淹没面积统计见表 4。可见沿淮的 4 个地市淹没面积从大到小依次为淮南市 364.7 km<sup>2</sup>、阜阳市 332.0 km<sup>2</sup>、六安市 307.5 km<sup>2</sup>、蚌埠市 83.9 km<sup>2</sup>。



(底图为巢湖流域 2020 年 7 月 27 日和 8 月 1 日

Sentinel-1A SAR/VV 极化数据)

图 5 淮河安徽境内行蓄洪区洪水淹没范围监测结果图

Fig. 5 Monitoring results of flood inundation area in flood storage area of Huaihe River in Anhui Province

表 3 淮河安徽境内行蓄洪区淹没面积统计表

Tab. 3 Statistics of inundated area in flood storage area of Huaihe River in Anhui Province

行蓄 洪区	行蓄洪 区面积/ km <sup>2</sup>	2020 年 7 月 3 日和 8 日水 体面积/km <sup>2</sup>	2020 年 7 月 27 日 和 8 月 1 日水体 面积/km <sup>2</sup>	淹没 水体面 积/km <sup>2</sup>	百分 比/%
蒙洼	186.0	5.8	121.3	115.5	62
南润段	11.3	0.4	10.4	10.0	88
邱家湖	25.3	2.8	23.9	21.1	83
姜唐湖	114.4	8.4	107.0	98.6	86
董峰湖	39.9	0.6	35.1	34.5	86
上六坊堤	9.3	0.2	8.8	8.6	92
下六坊堤	19.3	4.7	18.6	13.9	72
荆山湖	68.1	2.1	64.4	62.3	91

表 4 特定范围内淮河安徽境内地市洪水淹没面积统计

Tab. 4 Statistics of inundated area of Huaihe River in Anhui Province within a specific scope (km<sup>2</sup>)

地市	2020 年 7 月 3 日和 8 日水体面积	2020 年 7 月 27 日和 8 月 1 日水体面积	新增水 体面积
淮南市	555.7	920.4	364.7
阜阳市	184.4	516.4	332.0
六安市	371.3	678.8	307.5
蚌埠市	126.6	210.5	83.9
合肥市	116.2	140.2	23.9
滁州市	31.4	45.3	13.9
亳州市	10.9	11.7	0.8

## 4 讨论和结论

### 4.1 讨论

针对洪水淹没信息的快速提取问题,本文基于具有全天时、全天候的 Sentinel-1A SAR 数据,建立一套快速洪水淹没区监测流程。首先,建立可视化的预处理流程,对 L1 级的 GRD 数据进行预处理,实现一次读写数据、缩短预处理时间,为后续水体信息提取提供基础;其次,采用 SDWI 来扩大水体与其他地物之间的差异,并利用改进的 OTSU 算法获取二者分割的最佳阈值,同时结合高程和坡度信息,对平原和山区分别提取水体,利用灾前和灾中水体信息变化获取洪水淹没区。基于 SDWI 图像,设置初始阈值并通过循环,使水体与非水体的类间方差除以水体和非水体类内方差之和达到最大值时所对应的阈值为提取水体的最佳阈值。同时在山区坡度阈值设置时,参考孙亚勇等<sup>[25]</sup>的坡度阈值的选取,同时对比 SAR 图像的后向散射图像,当山区阴影去除较好时来设置坡度阈值,后续需要进行定量分析坡度阈值设置时对水体提取的影响。

### 4.2 结论

本文在对欧空局发布的 Sentinel-1A SAR 数据快速预处理基础上,基于 SDWI 结合坡度因子,采用改进的 OTSU 法,获得分割水体的最优阈值,对平原和山区分别提取水体信息,对 2020 年梅雨期,安徽省巢湖流域和淮河流域行蓄洪区洪水淹没范围进行监测,结果表明:

1) SDWI 比直接用后向散射系数提取水体具有优势,采用 SDWI 增强后,水体和非水体的类内方差变小;SDWI 直方图上双峰特征更为明显,水体和非水体的类间方差增大。

2) 巢湖流域淹没面积为 524.8 km<sup>2</sup>,巢湖流域南部的白石天、西河、兆河子流域受灾较重,淹没面积分别为 110.2 km<sup>2</sup>,105.4 km<sup>2</sup>和 92.9 km<sup>2</sup>,受灾区域与实际的累计面雨量大小的分布相吻合。

3) 沿淮的 8 个行蓄洪区中,上六坊堤、荆山湖的淹没面积比都在 90% 以上,南润段、邱家湖、姜唐湖、董峰湖淹没面积在 80% ~ 90% 之间,沿淮地市中受灾程度依次为淮南市、阜阳市、六安市、蚌埠市,监测结果与实际调查一致。

文中相关监测结果在 2020 年汛期撰写成决策服务材料上报安徽省政府防汛办,并被由安徽省应急厅牵头成立了安徽省政府 2020 年安徽省洪涝灾害调查评估组采用,纳入 2020 年安徽省洪涝灾害调查评估报告中。但文中监测方法仅仅采用坡度数

据,去除 SAR 影像上山体遮挡阴影区域,有可能阴影区域坡度实际较小,增加了误判水体信息。后续可以基于 SAR 数据成像时刻的卫星位置信息和监测区域的高程信息,通过二者几何关系模拟得到实际阴影区域分布图,从而有效去除监测结果中阴影区域,得到更为准确的洪涝淹没结果<sup>[33-34]</sup>。在实际业务中,基于洪水监测流程,在自动水体提取的基础上,后期需要结合人工判识对其结果进行订正,实现既提高效率,又保证提取结果的准确性。

### 参考文献 (References):

- [1] 王蒙,殷淑燕. 近 52 a 长江中下游地区极端降水的时空变化特征[J]. 长江流域资源与环境, 2015, 24(7): 1221-1229.  
Wang M, Yin S Y. Spatio-temporal variations of the extreme precipitation of middle and lower reaches of the Yangtze River in recent 52 years[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2015, 24(7): 1221-1229.
- [2] 潘欣,尹义星,王小军. 1960—2010 年长江流域极端降水的时空演变及未来趋势[J]. 长江流域资源与环境, 2017, 26(3): 436-444.  
Pan X, Yin Y X, Wang X J. Spatio-temporal characteristics and future trend of extreme precipitation in the Yangtze River basin during 1960 to 2010[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2017, 26(3): 436-444.
- [3] 余敦先,夏军,张永勇,等. 近 20 年来淮河流域极端降水的时空变化及统计特征[J]. 地理学报, 2011, 66(9): 1200-1210.  
She D X, Xia J, Zhang Y Y, et al. The trend analysis and statistical distribution of extreme rainfall events in the Huaihe River basin in the past 50 years[J]. Acta Geographica Sinica, 2011, 66(9): 1200-1210.
- [4] 王莉萍,王维国,张建忠. 我国主要流域降水过程时空分布特征分析[J]. 自然灾害学报, 2018, 27(2): 161-173.  
Wang L P, Wang W G, Zhang J Z. Analysis on spatial and temporal distribution characteristics of precipitation processes over main river basin in China[J]. Journal of Natural Disasters, 2018, 27(2): 161-173.
- [5] 何彬方,冯妍,苟尚培,等. 安徽省 50 年日照时数的变化特征及影响因素[J]. 自然资源学报, 2009, 24(7): 1275-1285.  
He B F, Feng Y, Xun S P, et al. Climatic change of sunshine duration and its influencing factors over Anhui Province during the last 50 years[J]. Journal of Natural Resources, 2009, 24(7): 1275-1285.
- [6] 张宏群,范伟,苟尚培,等. 基于 MODIS 和 GIS 的洪水识别及淹没区土地利用信息提取[J]. 灾害学, 2010, 25(4): 22-26.  
Zhang H Q, Fan W, Xun S P. Flood identification method based on MODIS and GIS and information extraction of land use of submerged area[J]. Journal of Catastrophology, 2010, 25(4): 22-26.
- [7] 张薇,杨思全,王磊,等. 合成孔径雷达数据减灾应用潜力研究综述[J]. 遥感技术与应用, 2012, 27(6): 904-911.  
Zhang W, Yang S Q, Wang L, et al. Review on disaster reduction application potentiality of synthetic aperture Radar[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2012, 27(6): 904-911.
- [8] 邵佳丽,郑伟,刘诚. 卫星遥感洞庭湖主汛期水体时空变化

- 特征及影响因子分析[J]. 长江流域资源与环境, 2015, 24(8): 1315 - 1321.
- Shao J L, Zheng W, Liu C. Analysis of spatial - temporal variations in the main flood season and their influencing factors of the Dongting Lake based on meteorological satellite data [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2015, 24(8): 1315 - 1321.
- [9] 郭立峰, 殷世平, 许佳琦, 等. 基于 FY - 3A/MERSI 的 2013 年夏秋间松花江和黑龙江干流洪水遥感监测分析[J]. 自然灾害学报, 2015, 24(5): 75 - 82.
- Guo L F, Yin S P, Xu J Q, et al. FY - 3A/MERSI - based flood remote sensing monitoring and analysis of main stream of Songhua River and Heilong River between summer and autumn in 2013 [J]. Journal of Natural Disasters, 2015, 24(5): 75 - 82.
- [10] 王大钊, 王思梦, 黄 昌. Sentinel - 2 和 Landsat8 影像的四种常用水体指数地表水体提取对比[J]. 国土资源遥感, 2019, 31(3): 157 - 165. doi:10. 6046/gtzyyg. 2019. 03. 20.
- Wang D Z, Wang S M, Huang C. Comparison of Seentinel - 2 imagery with Landsat8 imagery for surface water extraction using for common water indexes [J]. Remote Sensing for Land and Resources, 2019, 31(3): 157 - 165. doi:10. 6046/gtzyyg. 2019. 03. 20
- [11] 黄 萍, 许小华, 李德龙. 基于 Sentinel - 1 卫星数据快速提取鄱阳湖水体面积[J]. 水资源研究, 2018, 7(5): 483 - 491.
- Huang P, Xu X H, Li D L. Rapid extraction of water area in Poyang Lake based on Sentinel - 1 satellite images [J]. Journal of Water Resources Research, 2018, 7(5): 483 - 491.
- [12] 杨 魁, 杨建兵, 江冰茹. Sentinel - 1 卫星综述[J]. 城市勘测, 2015, 30(2): 24 - 27.
- Yang K, Yang J B, Jiang B R. Sentinel - 1 satellite overview [J]. Urban Geotechnical Investigation & Surveying, 2015, 30(2): 24 - 27.
- [13] 崔 斌, 张永红, 闫 利, 等. 高分三号 SAR 影像双阈值变化检测[J]. 遥感学报, 2020, 24(1): 1 - 10.
- Cui B, Zhang Y H, Yan L, et al. Dual - thresholds change detection in GF - 3 SAR images [J]. Journal of Remote Sensing, 2020, 24(1): 1 - 10.
- [14] 崔 倩, 毛旭东, 陈德清, 等. 基于高分三号卫星数据的水体自动提取及应用[J]. 中国农业信息, 2019, 31(5): 57 - 65.
- Cui Q, Mao X D, Chen D Q, et al. Research on automation and operability in water extraction based on GF - 3 [J]. China Agricultural Informatics, 2019, 31(5): 57 - 65.
- [15] 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 - 118.
- Wu W H, Wang L X, Ma Z. Flood extraction and monitoring based on Sentinel - 1B SAR data [J]. Geomatics & Spatial Information Technology, 2019, 42(4): 110 - 118.
- [16] 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.
- Tang L Y, Liu W, Yang D, et al. Flooding monitoring application based on the object - oriented method and Sentinel - 1A SAR data [J]. Journal of Geo - Information Science, 2018, 20(3): 377 - 384.
- [17] 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.
- Luan Y J, Guo J Y, Gao Y G, et al. Remote sensing monitoring of flood and disaster analysis in Shouguang in 2018 from Sentinel - 1B SAR data [J]. 2021, 30(2): 168 - 175.
- [18] Lyu W T, Yu Q Z, Yu W X. Water extraction in SAR images using GLCM and support vector machine [C]//IEEE 10th International Conference on Signal Processing Proceedings. Beijing, 2010: 740 - 743.
- [19] Gong M G, Li Y, Jiao L C, et al. SAR change detection based on intensity and texture changes [J]. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 2014, 93: 123 - 135.
- [20] 李景刚, 黄诗峰, 李纪人. ENVISAT 卫星先进合成孔径雷达数据水体提取研究——改进的最大类间方差阈值法[J]. 自然灾害学报, 2010, 19(3): 139 - 145.
- Li J G, Huang S F, Li J R. Research on extraction of water body from ENVISAT ASAR images: A modified Otsu threshold method [J]. Journal of Natural Disasters, 2010, 19(3): 139 - 145.
- [21] Claire H, Stephen C, Sandro M, et al. Improving the extraction of crisis information in the context of flood, landslide, and fire rapid mapping using SAR and optical remote sensing data [C]//IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Beijing, 2016: 171 - 182.
- [22] 郭 欣, 赵银娣. 基于 Sentinel - 1A SAR 的湖南省宁乡市洪水淹没监测[J]. 遥感技术与应用, 2018, 33(4): 646 - 656.
- Guo X, Zhao Y D. Flood inundation monitoring in Ningxiang of Hunan Province based on Sentinel - 1A SAR [J]. Remote Sensing Technology and Application, 2018, 33, (4): 646 - 656.
- [23] 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.
- Jia S C, Xue D J, Li C R, et al. Study on new method for water area information extraction based on Sentinel - 1 data [J]. Yangtze River, 2019, 50(2): 213 - 217.
- [24] 杨泽楠, 黄 亮, 王泉轩. 结合 DEM 的面向对象高分三号 SAR 影像高原山区水系提取[J]. 昆明理工大学学报(自然科学版), 2019, 44(1): 39 - 46.
- Yang Z N, Huang L, Wang X X. An object - oriented water extraction for plateau mountain areas in GF - 3 SAR image based on DEM [J]. Journal of Kunming University of Science and Technology (Natural Science), 2019, 44(1): 39 - 46.
- [25] 孙亚勇, 黄诗峰, 李纪人, 等. Sentinel - 1A SAR 数据在缅甸伊洛瓦底江下游区洪水监测中的应用[J]. 遥感技术与应用, 2017, 32(2): 282 - 288.
- Sun Y Y, Huang S F, Li J R, et al. The downstream flood monitoring application of Myanmar Irrawaddy River based on sentinel - 1A SAR [J]. Remote Sensing Technology and Application, 2017, 32(2): 282 - 288.
- [26] 贾良清, 欧阳志云, 赵同谦, 等. 安徽省生态功能区划研究[J]. 生态学报, 2005, 25(2): 254 - 260.
- Jia L Q, Ouyang Z Y, Zhao T Q, et al. The ecological function regionalization of Anhui Province [J]. Acta Ecologica Sinica, 2005, 25(2): 254 - 260.
- [27] European Space Agency. Sentinel - 1 user handbook [EB/OL]. [2018 - 06 - 01]. <https://sentinels.copernicus.eu/web/sentinel/user-guides/Sentinel-1-SAR>.
- [28] European Space Agency. Sentinel - 1 SAR user guide [EB/OL]. [2018 - 06 - 01]. <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/user-guides/Sentinel-1-SAR>.
- [29] European Space Agency. Sentinel - 1 SAR technical guide [EB/

- OL]. [2018-06-01]. <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/technical-guides/Sentinel-1-SAR>.
- [30] Zhang M M, Li Z, Tian B S, et al. The backscattering characteristics of wetland vegetation and water-level changes detection using multi-mode SAR: A case study[J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2016, 45:1-13.
- [31] 王荣喜, 徐维国, 陈祥. 2020 年安徽省长江流域防汛抗洪回顾与启示[J]. *人民长江*, 2020, 51(12):52-55.  
Wang R X, Xu W G, Chen X. Review and enlightenment on Yangtze River flood control in Anhui Province in 2020 [J]. *Yangtze River*, 2020, 51(12):52-55.
- [32] 卢程伟, 刘佳明, 徐兴亚. 2020 年巢湖流域防洪存在的问题及其对策探讨[J]. *人民长江*, 2020, 51(12):155-159.  
Lu C W, Liu J M, Xu X Y. Discussion on existing problems and countermeasures of flood control in Chaohu Lake basin in 2020 [J]. *Yangtze River*, 2020, 51(12):155-159.
- [33] 唐德可, 王峰, 王宏琦. 基于马尔科夫分割的单极化 SAR 数据洪涝水体检测方法[J]. *电子与信息学报*, 2019, 41(3):619-625.  
Tang D K, Wang F, Wang H Q. Single-polarization SAR data flood water detection method based on Markov segmentation [J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2019, 41(3):619-625.
- [34] 孙亚勇, 李小涛, 杨锋杰, 等. 基于星载 SAR 数据的山区水体提取方法研究[J]. *中国水利水电科学研究院学报*, 2014, 12(3):258-263.  
Sun Y Y, Li X T, Yang F J, et al. Study on the method of mountain water extraction based on the space-borne SAR images [J]. *China Institute of Water Resources and Hydropower Research*, 2014, 12(3):258-263.

## Sentinel-1A based flood inundation monitoring in Anhui Province during the plum rain period of 2020

HE Binfang<sup>1,2</sup>, YAO Yun<sup>1,2</sup>, FENG Yan<sup>1,2</sup>, LIU Huimin<sup>1,2</sup>, DAI Juan<sup>3</sup>

(1. *Anhui Institute of Meteorological Sciences, Anhui Province Key Laboratory of Atmospheric Sciences and Satellite Remote Sensing, Hefei 230031, China*; 2. *Shouxian National Climatology Observatory, Huaihe River Basin Typical Farmland Ecological Meteorological Field Science Experiment Base of CMA, Huainan 232200, China*; 3. *Anhui Climate Center, Hefei 230031, China*)

**Abstract:** In 2020, a flood disaster occurred throughout Anhui Province due to the persistent heavy rainfall during the super-long plum rain period. To quickly and accurately extract the flood inundation ranges and provide scientific support for flood prevention and disaster relief, this study selected the pre-disaster and mid-disaster Sentinel-1A/SAR data of the Chaohu Lake and Huaihe River basin in Anhui Province. After rapid data preprocessing, this study extracted information about water bodies in the plains and mountainous areas using the Sentinel-1 dual-polarized water index (SDWI) method and topographic factors. Then, it established a monitoring process for flooded areas. Using this process, this study extracted the flood inundation ranges of the Chaohu Lake and Huaihe River basins on July 27, 2020 using the pre-disaster and mid-disaster synthetic aperture Radar (SAR) data. The results are as follows. The SDWI was superior to the backscattering coefficient in the extraction of information about water bodies. The Chaohu basin had a flood inundation area of 524.8 km<sup>2</sup> on July 27, and the Baishitian River subbasin was the most severely inundated, followed by the Xihe River subbasin. In the flood flowing and storage areas of the Huaihe River basin within Anhui Province, the flood inundation area of four cities along the Huaihe River basin decreased in the order of Huainan City, Fuyang City, Lu'an City, and Bengbu City. The results of this study show that the Sentinel-1A-based monitoring process of flood inundation areas established using SDWI and topographic factors has high accuracy, applicability, and timeliness for plains and mountainous areas and is convenient for the timely monitoring of flood disasters in these areas.

**Keywords:** Sentinel-1A/SAR; flood monitoring; plum rain; Sentinel-1 dual-polarized water index (SDWI); slope

(责任编辑: 张仙)