

基于高分三号的北江洪水水域提取方法及应用

冯佑斌^{1,2}, 何颖清^{1,2}, 潘洪洲^{1,2}

(1. 水利部珠江河口治理与保护重点实验室, 广东 广州 510611;
2. 珠江水利委员会珠江水利科学研究院, 广东 广州 510611)

摘要: 利用高分三号合成孔径雷达影像, 分析了双极化波段在不同地类(水体、山体、建筑等)中的回波信号物理机制和统计特征, 提出了一种基于后向散射系数最小值的水体提取方法, 并探讨了 DEM 和影像纹理作为辅助优化数据的作用。在 2022 年和 2024 年北江第 2 号洪水期间, 通过与光学影像对比验证, 运用该方法成功提取了两次洪水的淹没范围。结果表明: 英德市大站镇、滘江清城段清侨镇、大燕河清城段龙塘镇临河农田和村镇均受到洪水的严重影响; 2022 年洪水淹没范围更大, 2022 年北江英德段大站镇、滘江清城段清侨镇受灾严重, 2024 年北江英德段大站镇、连江英德段张陂镇受灾严重。
关键词: 北江洪水; 洪水水域提取; 高分三号; 合成孔径雷达影像; 洪水遥感监测

中图分类号: TP79; TV122 文献标志码: A 文章编号: 1004-6933(2025)03-0101-10

Method for water area extraction of Beijiang River floods based on GF-3 images and its application//FENG Youbin^{1,2}, HE Yingqing^{1,2}, PAN Hongzhou^{1,2} (1. Key Laboratory of the Pearl River Estuary Regulation and Protection of Ministry of Water Resources, Guangzhou 510611, China; 2. Pearl River Water Resources Research Institute, Pearl River Water Resources Commission, Guangzhou 510611, China)

Abstract: By using GF-3 synthetic aperture radar images, the physical mechanisms and statistical characteristics of dual-polarization backscatter signals across various land cover types (water bodies, mountains, buildings, etc.) were analyzed. A water area extraction method based on the minimum backscatter coefficient was proposed, and the auxiliary optimization effects of DEM and image texture features were investigated. During the No. 2 floods of the Beijiang River in 2022 and 2024, the inundation extents of the two floods were successfully extracted using the method through comparison and verification with optical images. Results indicate that the riverside farmland and villages of Dazhan Town in Yingde City at the confluence of the Beijiang and Wengjiang rivers, Qingqiao Town in Qingcheng section of the Pajiang River, and Longtang Town in Qingcheng section of the Dayan River were severely affected by floods. The flood inundation extent in 2022 was larger. Specifically, Dazhan Town in Yingde section of the Beijiang River and Qingqiao Town in Qingcheng section of the Pajiang River suffered severe damage in 2022, while Dazhan Town in Yingde section of the Beijiang River and Zhangbei Town in Yingde section of the Lianjiang River were significantly impacted in 2024.

Key words: floods of the Beijiang River; extraction of flooded area; GF-3; synthetic aperture radar images; remote sensing monitoring of floods

卫星遥感是开展大规模洪水监测的重要技术手段,能够快速有效地支持洪水灾害评估与灾后重建。早在 1998 年,童庆禧^[1]通过卫星和航空雷达影像对我国 1998 年夏季长江中游和东北嫩江-松花江流域的特大洪水进行了监测,为国家有关部门提供了重要的科学数据,证实了遥感技术在洪水监测中的重要作用。

根据成像谱段的不同,用于洪水监测的遥感影像可以分为光学遥感影像和极化雷达影像两类。光学遥感影像具有丰富的地物光谱及纹理特征,适用

于水体的精细提取^[2]。然而,受洪灾期间多云多雨的天气影响,重访周期较长的光学影像(如 Landsat-8/9 双星的重访周期为 8d, Sentinel-2A/B 双星重访周期为 5d)较少直接用于洪水发生时的应急监测^[3]。重访周期较短的光学影像,如 MODIS、风云 3 号等,能较好地捕捉到洪水期间的水体动态变化过程,被较多地应用于洪水应急监测^[4-6]。但其空间分辨率较低,导致水陆交接处存在大量混合像元,影响水体提取的精度。针对光学遥感影像的优缺点,

基金项目: 珠科院科技创新自立项目([2021]ky014)

作者简介: 冯佑斌(1989—),男,高级工程师,硕士,主要从事水利遥感和水环境遥感研究。E-mail: robinut@qq.com

通信作者: 何颖清(1985—),女,正高级工程师,博士,主要从事水利遥感和水环境遥感研究。E-mail: heyingqing@foxmail.com

一方面可以通过时空融合算法生成增强影像开展洪水监测^[7-8];另一方面可以充分利用具有高空间分辨率和高重访频次优势的 Planet、吉林一号等小卫星星座群监测洪水淹没范围。

不同于光学卫星传感器,合成孔径雷达(synthetic aperture radar, SAR)成像不依赖太阳光,而是主动发射电磁波探测地物。由于微波信号的波长较长,在云、雨、雾等恶劣天气下仍能记录地物的实际情况,成为洪水监测的有效工具。目前广泛使用的 SAR 影像有欧洲航天局的 Sentinel-1 和我国的高分三号(GF-3)。前者因影像资源免费、重访周期稳定、处理软件 SNAP(sentinel application platform)开源的优势,在国内外洪水淹没研究中有较多应用^[9-14]。然而,由于 Sentinel-1B 星仪器损坏的影响^[15],目前仅 Sentinel-1A 星在轨运行,影像获取周期由 6 d 延至 12 d,降低了洪灾监测的应急能力。GF-3 是我国首颗高分辨率多极化 SAR 卫星,能够根据抢险救灾需求临时调整传感器姿态,获取对地观测影像,成为当前国内开展洪水灾害监测的重要数据来源,目前已应用在 2017 年黄河第 1 号洪水^[16]、2020 年 7 月六安洪水^[17]、2020 年 7 月鄱阳湖洪水^[18]和 2021 年 7 月郑州洪水等监测中^[19-20]。

本文以 2022 年 6 月的北江第 2 号洪水和 2024 年 4 月北江第 2 号洪水为应用场景,通过分析不同极化雷达影像在水体和其他地物的后向散射差异,提出基于极化雷达影像特征的水体提取方法,经同类模型及洪水期间的光学遥感影像对比验证,提取并对比两次洪水的淹没范围。

1 研究区概况与数据来源

1.1 研究区概况

北江是珠江水系干流之一,主要流经广东省韶关市、清远市、佛山市,与西江相通后汇入珠江三角洲。其中,广州到北部山区南侧清远附近河段属 12 h 暴雨高风险区^[21]。2022 年 6 月 14 日,北江发生当年第 1 号洪水,北江干流石角水文站最大洪峰流量达 1.44 万 m³/s,超 10 年一遇的最大洪峰流量。仅 5 d 后的 6 月 19 日,北江形成第 2 号洪水,飞来峡水库最大入库流量达 1.99 万 m³/s,超 100 年一遇的最大入库流量;随后在连日强降雨和上游来水影响下,22 日 12 时,清远市下辖的英德市城区北江水位达 35.95 m,超警戒水位 9.95 m,石角水文站于 23 日前后出现 2 万 m³/s 的洪峰流量,为 1924 年有数据记录以来北江下游最大洪水。

2024 年,受流域强降雨影响,石角水文站 4 月 7 日流量涨至 1.2 万 m³/s,刷新 1980 年 4 月历史记

录,形成当年首场编号洪水,为全国主要江河 1998 年有编号洪水统计以来最早。至 4 月 20 日,北江再次形成编号洪水,洪峰于 4 月 22 日通过清远市区,石角水文站实测流量高达 1.81 万 m³/s,仅次于 2022 年北江第 2 号洪水的情况。

1.2 数据来源

a. GF-3 SAR 影像。两次洪水过程共收集了 10 景 GF-3 SAR 影像,覆盖范围如图 1(a)所示,各景成像时间及中心点坐标详见表 1。影像频段为 C 波段,极化方式为 HH、HV 双极化,成像模式为精细条带 2,中心观测角约 30.62°,产品级别 L1A,即单视复数产品,产品地理坐标为 WGS84(world geodetic system 1984)。采用 PIE-SAR(pixel information expert-SAR)软件对该级别产品进行复数转换、多视处理、自适应滤波、分贝化、地理编码等预处理后,获取空间分辨率为 10 m 的双极化方式地表后向散射系数 σ_{HH} 、 σ_{HV} 。

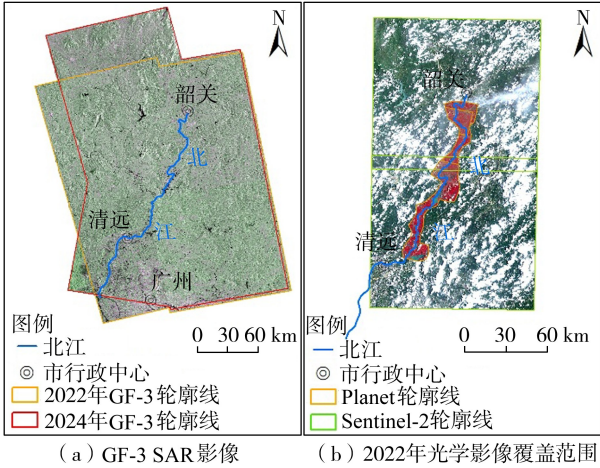


图 1 研究区影像覆盖示意图

Fig. 1 Sketch of research area image coverage

表 1 洪水期间 GF-3 SAR 影像成像参数

Table 1 GF-3 SAR imaging parameters during flood periods

序号	成像时间	中心经度/(°)	中心纬度/(°)
1	2022-06-19T17:58	112.876	24.598
2	2022-06-19T17:58	113.167	23.608
3	2022-06-23T18:32	113.698	24.696
4	2022-06-23T18:32	113.907	23.697
5	2024-04-20T18:31	113.652	24.713
6	2024-04-20T18:31	113.864	23.715
7	2024-04-21T18:02	112.950	25.037
8	2024-04-21T18:02	113.233	24.036
9	2024-04-23T06:15	113.101	23.666
10	2024-04-23T06:15	113.274	24.598

b. Sentinel-2 光学影像。2024 年洪水期间云层影响较大,无有效光学影像数据。2022 年洪水过程影像覆盖范围见图 1(b),拼接域编号为 T49QGG 和 T49RGH,过境日期 6 月 23 日。另收集了洪水前无

云覆盖影像提取正常水域范围,2022 年洪水前的成像日期为 4 月 4 日,2024 年洪水前的成像日期为 1 月 14 日,成像时刻均为当地时间 10:55。产品等级 L2A,其 10 m 空间分辨率的蓝、绿、红、近红外波段影像像元值以 uint16 整型存储,除以 10 000 得到大气校正的地表反射率。影像投影坐标为 UTM (universal transverse Mercator grid system)49N。

c. Planet 卫星群影像。2022 年洪水期间的 Planet 卫星群影像成像日期以 6 月 23 日为主,部分支流为 6 月 25 日,成像时刻为当地时间的 10:41,影像覆盖范围见图 1(b),空间分辨率 3 m,数据内容为可见光至近红外的 4 波段地表反射率,投影坐标为 UTM49N。

2 研究方法

水面对雷达波束以镜面反射为主,后向散射较弱;而陆域的土壤、植被、城镇等地物表面较为粗糙,对雷达波束的后向散射能力较强。因此,可通过分析不同极化方式在水体与陆域的回波强度,构建某波段组合方式,突出二者的差异提取水体。例如:贾诗超等^[22]针对 Sentinel-1 SAR 影像的 VV、VH 极化方式构建了 SDWI (sentinel-1 dual-polarized water index),但目前尚无相关研究提出针对 GF-3 SAR 影像 HH、HV 极化方式的水体指数。本文旨在通过 GF-3 SAR 影像提取洪水淹没范围,并分析比较 2022 年和 2024 年北江第 2 号洪水的空间分布特征,包括:①分析不同地物(水体、山体、建筑等)在双极化(HH、HV)波段的后向散射特性及其物理机制;②基于双极化后向散射系数 σ_{HH} 、 σ_{HV} 最小值 σ_{min} 提取水域范围,并探讨 DEM 和影像纹理数据作为辅助信息以消除山体阴影干扰的作用;③利用洪水期间的光学影像进行验证,确定洪水淹没范围,并对两次洪水的空间分布特征进行对比分析。

2.1 极化方式比较

由于 V 极化较 H 极化的穿透能力更强,使得交叉极化在探索水体内部信息时具有一定的优势^[23];但在区分水体表面与陆地边界时,会因水体组分干扰,降低边界提取精度。如图 2 所示,HV 极化影像的水体(黑色区域)较 HH 极化影像更为粗糙。因此,相关研究认为同极化扩大了水体与陆域的差异,更适用于洪水区制图^[24]。但实际应用中,建筑物和河道船只只在 HH 极化影像中表现出较强的十字星耀斑,干扰水体提取(图 2(c))。这是因为此类地物顶部多呈现一定的倾斜角度,或为金属制顶棚,角反射或金属反射增强了回波信号。因此,也有相关研究采用 HV 极化影像提取洪水^[17,19]。

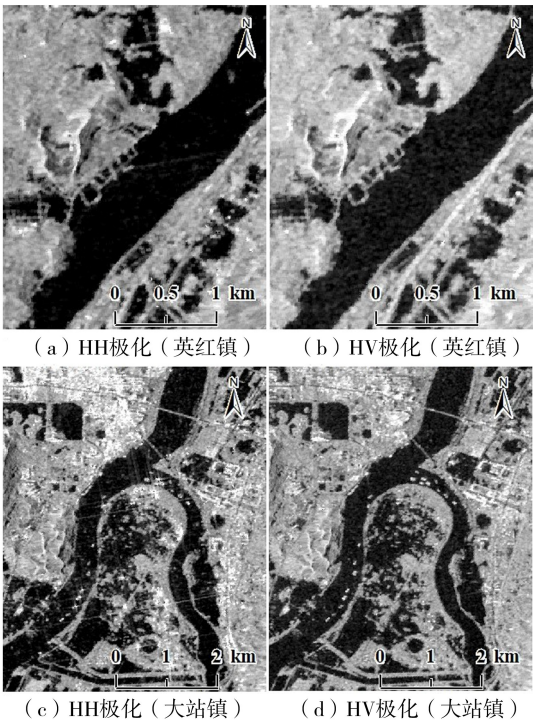


图 2 不同极化方式 GF-3 SAR 影像中的北江局部河道
Fig. 2 Local channels of the Beijiang River in GF-3 SAR images with different polarization modes

为探究不同极化组合方式的水体提取效果,结合光学卫星影像,在 GF-3 SAR 影像上均匀选取了水体、山体和建筑物 3 类样本,每类样本的像元数约为 8 000,并绘制了不同极化组合方式的统计直方图,如图 3 所示,图中红圈为水体与其他地物的重叠区域。从图 3 可以看出,除 $\sigma_{HH}-\sigma_{HV}$ 极化组合方式外,其余组合的水体与建筑物重叠区域均较小,但与山体有不同程度的重叠。造成该现象的原因是 SAR 影像为斜距成像,会在山区背阴面形成与水体类似的低回波区域,干扰水体提取^[12]。表 2 统计了 9 种极化组合方式中水体混入山体、建筑样本的比例,其中, σ_{min} 和 $\sigma_{min}\sigma_{HH}$ 极化组合方式中水体混入山体样本的比例最低,均为 2.43%,但前者混入建筑物样本的比例更低。为尽量降低水体内部回波及沿岸建筑、船只的干扰,本文采用 σ_{min} 进行水体提取,再经中值滤波进一步去除椒盐噪声。

2.2 阈值分割

SAR 影像水体提取算法一般分为阈值分割、面向对象分类、机器学习 3 类^[24]。面向对象分类和机器学习的影像特征提取能力较强,但需要高质量的训练数据和扎实的模型参数调整能力,才能获取较高的提取精度,因此,多应用于小区域的算法研讨。阈值分割基于影像像素的统计特征,通过设定分割阈值,将影像分为水体和非水体两类,具有计算速度快、算法简易的优点^[25]。

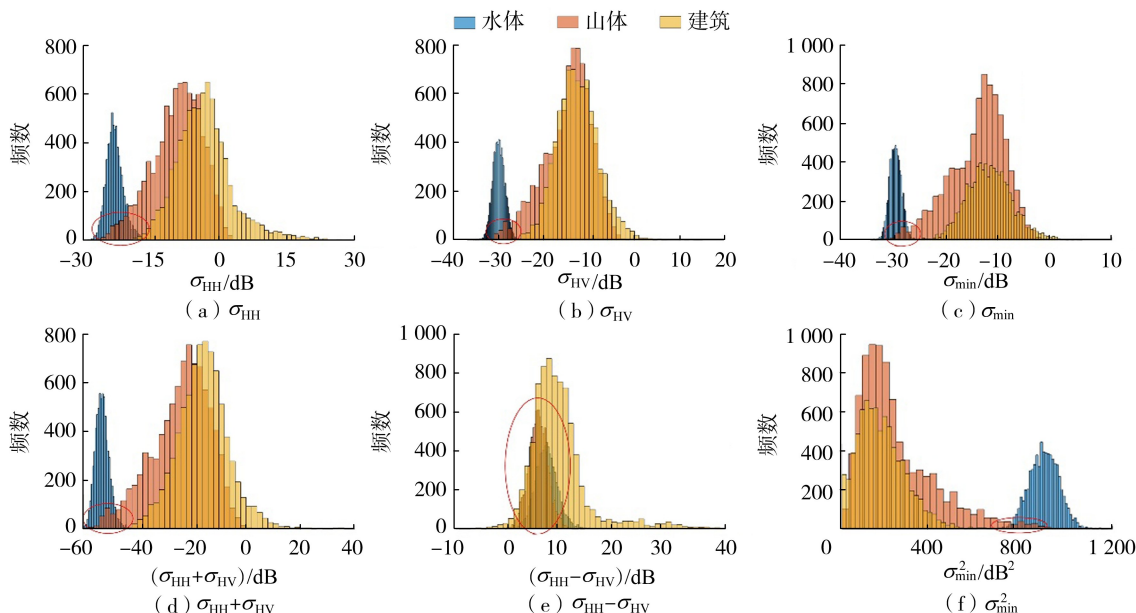


图3 水体、山体、建筑样本在不同极化组合影像中的统计直方图

Fig. 3 Histograms of water body, mountain, and building samples in different polarization combination images

表2 不同极化组合方式中水体汇入山体、建筑样本的比例
Table 2 Ratios of water bodies merged into mountain and building samples in different polarization combinations

极化组合方式	混入山体比例/%	混入建筑物比例/%
σ_{HH}	14.67	1.05
σ_{HV}	4.02	0.08
σ_{min}	2.43	0.08
$\sigma_{HH} + \sigma_{HV}$	6.42	0.06
$\sigma_{HH} - \sigma_{HV}$	99.72	90.78
$\sigma_{HH} \sigma_{HV}$	7.65	0.20
$\sigma_{min} \sigma_{HH}$	2.43	0.20
$\sigma_{min} \sigma_{HV}$	6.31	0.20
σ_{min}^2	3.02	0.20

以表1中序号2的SAR影像为例,其 σ_{min} 的全局统计直方图(图4(a))表现出明显的双峰特征,双峰谷底对应的像元值即为分割水体与非水体的阈值^[25]。为提高水体自动化提取程度和洪灾应急响应速度,可采用诸如全局迭代^[10]等的自适应算法确定分割阈值。本文根据双峰直方图的特性,通过频数单调性的变化确定阈值,主要步骤包括:①依次间隔5个组距取 σ_{min} 直方图的频数最大值,设为因变量 y ,对应组距所在的后向散射系数 σ_{min} 为自变量 x ,构建拟合函数 $f(x, y)$,以平滑原始直方图中的频数曲线,降低局部组距之间锯齿扰动。如图4(b)所示,谷底的蓝色组距对应频数存在高低起伏,红色曲线为平滑的拟合曲线。②根据拟合函数 $f(x, y)$ 的一阶导数判断收敛性,找到频数的局部最小值,对应的组距即为直方图双峰之间的谷底,将对应的后向散射系数作为水体分割阈值。本例中取 $\sigma_{min} = -25.9$ dB,水体提取结果如图4(c)所示。

2.3 辅助数据优化

受山体阴影等低回波地物干扰,仅依靠SAR影

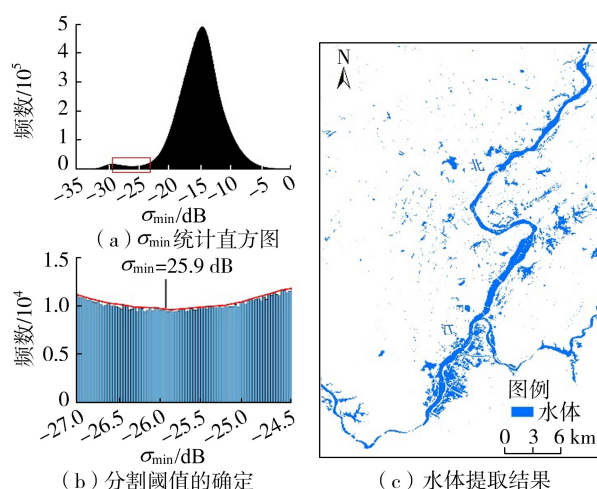


图4 基于 σ_{min} 的水体提取过程

Fig. 4 Water area extraction process based on σ_{min}

像回波强度信息容易导致水体的错误提取。因此,有必要采用地形、影像纹理、土地利用等辅助数据进一步提高水体提取精度^[24]。考虑到洪水应急监测的时效性,为减少不同类型的数据源,宜优先考虑已用于SAR影像地理编码的DEM或影像自身的纹理信息。

对于DEM,可设定高程或坡度阈值掩蔽低回波的山体阴影^[12]。然而,可公开获取的DEM采集普遍较早,局部地类变化后造成的水体漏提反而降低了提取精度。本文采用的DEM为SRTM(shuttle radar topography mission)项目在2000年采集制作。如图5所示的水塘(红框)和河道(黄框)两类水体样本,图中水塘样本在DEM中表现为山体的形态特征,高程为16~94 m,坡度为3~60°。因此,DEM作为辅助信息应适合以下情况:①DEM采集至今,洪水区域未发生水域与其他地类的转化;②DEM获取

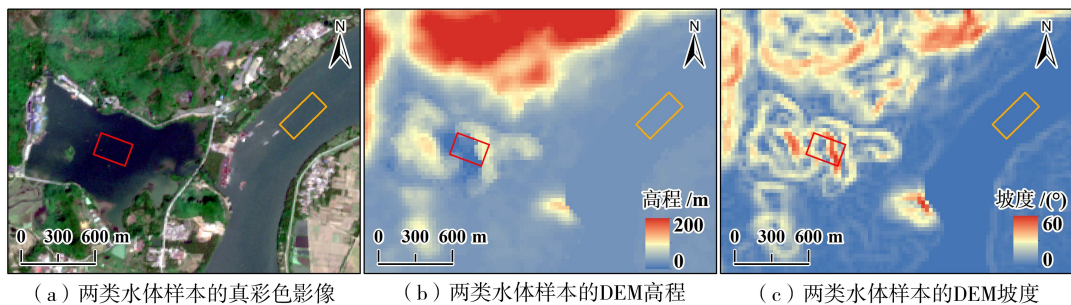


图 5 两类水体样本卫星影像及 DEM 辅助信息

Fig. 5 Satellite images and DEM auxiliary information of two typical water bodies

时间较新,能够反映洪水监测区域当前的地形情况;
③已获取洪水前后的同源 SAR 影像,经变化检测初步提取洪水区域后,DEM 可作为辅助数据降低卫星异轨和山体阴影的干扰。

对于影像纹理信息,可基于灰度共生矩阵 (grey level co-occurrence matrix, GLCM) 计算 SAR 影像均值、方差、对比度、熵、角二阶矩、相关性等纹理特征^[26-27]。经样本数据评估, $\sigma_{\min}$ 均值影像中水体混入山体阴影的比例明显降低,混入建筑物的情况被基本消除。为进一步评估纹理窗口大小对山体阴影的消除效果,依次计算了 3~15 个奇数窗口的 $\sigma_{\min}$ 均值影像,并统计了混入山体的比例。结果表明,窗口大小为 3 时,该比例为 1.588%;窗口大小为 7 时,该比例降低至 0.046%;窗口大小为 9 时,该比例降为 0,此时,取 $\sigma_{\min}$ 均值为 -27.5 dB,基本可排除山体和建筑的干扰。由于纹理窗口越大水体边界越模糊,且计算耗时越长,最终采用窗口大小为 9 时的 $\sigma_{\min}$ 均值对水体提取结果进行优化。

3 精度分析

3.1 水体样本提取的精度

结合光学影像,沿江均匀选取 50 个水体样本区、52 个非水体样本区 (共约 78 000 个像元) 开展 GF-3 SAR 影像水体提取的精度验证。精度评价主

要基于总体精度、漏提率、误报率 3 个统计量。总体精度为正确识别的像元数占总样本像元数的比例,漏提率为未提取的水体样本像元数占总水体样本像元数的比例,误报率为错误将其他地类识别为水体的像元数占总水体样本像元数的比例。本文得到的总体精度、漏提率和误报率分别为 98.75%、2.71% 和 0.22%。如图 6 所示,漏提的水域主要为河道沿岸浅滩和水面船舶,错提的主要为山体阴影。

3.2 同期光学影像对比

洪水期间,由于大量上游来水输入及下垫面径流汇集,受影响水域迅速扩张。随着洪水退去,地表径流减小并逐渐回归正常状态,水域会呈现较快的萎缩态势。在 2022 年 6 月 23 日的洪水高峰期,GF-3 极化雷达影像和 Sentinel-2、Planet 光学遥感影像的成像时间相差约 7 h,期间水域范围发生了较大变化。在无明显水域变化河段,对比同期光学影像水域人工勾绘和极化雷达影像水体自动提取结果,后者仅在局部河道中段漏提,重点水域 (河流主干道、河道沿岸淹没区、淹没农田) 与人工提取吻合度较高,如图 7 所示。

3.3 同类方法提取精度对比

目前基于 GF-3 SAR 影像的洪水水域提取普遍通过阈值分割^[20,28]或 PIE-SAR 软件的水体提取模块完成。其中,PIE-SAR 软件的水体指数为

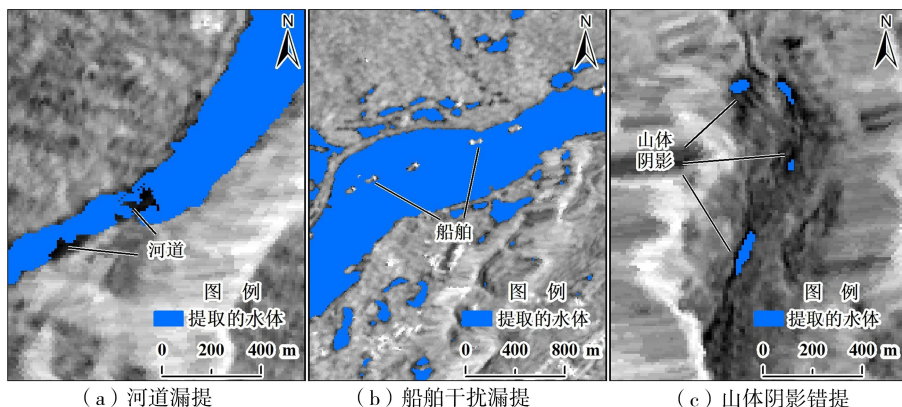


图 6 GF-3 SAR 影像水体提取的错误地类

Fig. 6 Incorrect land cover types in GF-3 SAR image water area extraction

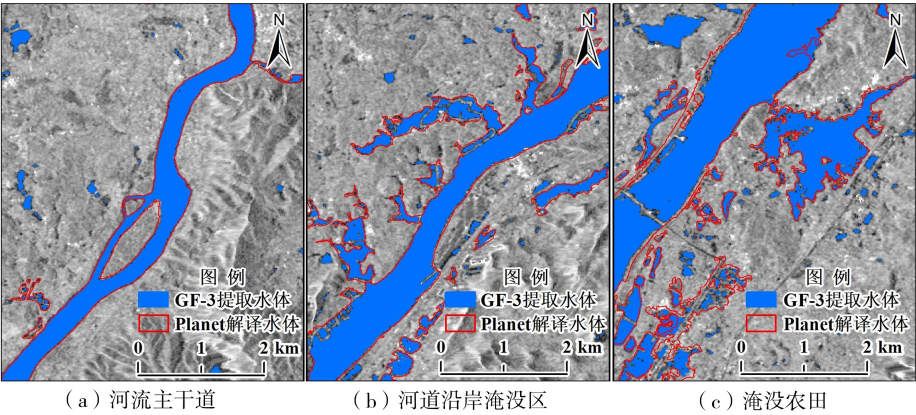


图 7 GF-3 SAR 影像与光学影像提取的水域对比

Fig. 7 Comparison of water areas extracted from GF-3 SAR and optical images

σ_{HH}/σ_{HV} ,未放大水体与陆域的差异,反而因水体在两个极化方式的回波信号均较弱,模糊了水陆边界,且自动阈值提取结果较差。因此,在 PIE 的水体提取模块中,以 σ_{HH} 、 σ_{HV} 、 σ_{min} 为输入数据,将手动阈值范围设定在 $-35 \sim -20\text{dB}$ 完成水体提取。同时,采用迭代自组织数据分析 (iterative self-organizing data analysis technique algorithm, ISODATA) 和 K 均值聚类算法以及最小距离、马氏距离、最大似然、平行六面体、支持向量机 (support vector machine, SVM)^[29] 等典型图像分类法完成上述 3 类输入数据的水体提取。

如表 3 所示,本文方法在总体精度、漏提率、错提率 3 个指标中均保持在较好的水平,且完成单景影像水体提取的时间控制在 1 min 内 (CPU 主频 2.8 GHz,内存 16 G),显示出在洪涝应急监测时的实用性。而 K 均值、马氏距离、最大似然、SVM 等方法在采用 σ_{min} 作为输入时,精度评价指标得到了较明显的提升,显示出双极化波段最小值在降低影像噪声、扩大水陆回波差异方面的优势。此外,引入自动阈值和辅助数据后,本文方法整体精度得到进一步提升,尤其在表征山体阴影干扰的错提率方面均高于其他方法,显示出本文方法在复杂山区环境下水体提取的适用性。如图 8 所示,本文方法提取的水体结果在保留干、支流水系及沿岸农田等低洼水域的同时,受山体阴影等细小图斑的影响相对较小,有利于提取和统计洪水淹没区域。

4 结果与分析

4.1 2022 年洪水淹没范围及动态变化

2022 年北江第 2 号洪水的淹没范围如图 9 所示,主要集中在英德市的望埠镇 (#1)、大站镇 (#2) 和清城区的清侨镇 (#3)、龙塘镇 (#4) 附近。其中,望埠镇主要受淹区域为北江干流沿岸农田,受淹区域沿干流向陆域地势较低的区域呈放射型分布;大

表 3 不同方法水体提取精度及单景影像处理时间对比
Table 3 Comparison of water area extraction accuracy and processing time of single image using different methods

方法	输入参数	总体精度/%	漏提率/%	错提率/%	单景耗时/s
本文方法	σ_{min}	98.75	2.71	0.22	31
	σ_{HH}	85.37	34.17	0.01	23
	σ_{HV}	96.18	0.15	8.76	27
	σ_{min}	95.28	0.00	11.05	23
ISODATA 聚类算法	σ_{HH}	79.12	28.40	20.36	12
	σ_{HV}	87.50	26.22	2.96	10
	σ_{min}	97.58	4.22	1.45	13
K 均值聚类算法	σ_{HH}	96.30	3.92	4.72	11
	σ_{HV}	93.60	13.77	1.18	11
	σ_{min}	98.79	1.49	1.34	12
最小距离分类法	σ_{HH}	89.81	0.61	23.20	19
	σ_{HV}	94.59	0.19	12.46	18
	σ_{min}	94.54	0.02	12.77	17
马氏距离分类法	σ_{HH}	95.50	5.85	4.67	62
	σ_{HV}	97.98	0.79	3.93	67
	σ_{min}	98.44	0.26	3.41	67
最大似然分类法	σ_{HH}	95.52	3.67	6.79	72
	σ_{HV}	97.65	0.50	5.00	63
	σ_{min}	98.01	0.14	4.52	60
平行六面体分类法	σ_{HH}	93.53	1.43	13.68	18
	σ_{HV}	96.11	0.23	8.85	12
	σ_{min}	96.94	0.04	7.13	21
SVM 分类算法	σ_{HH}	95.49	3.54	6.99	3 420
	σ_{HV}	97.98	0.79	3.92	3 180
	σ_{min}	98.84	0.59	2.13	2 940

站镇受淹情况较为严重,主要受淹区域为北江干流与潞江汇合处的江南村;清侨镇主要受淹区域为北江支流潞江沿岸的农田、鱼塘及清侨镇、江口镇大部分村落;龙塘镇主要受淹区域为源潭镇与龙塘镇之间的大燕河沿岸农田。经测算,此次北江洪水在清城区的淹没面积约为 49.79 km²,占清城区行政面积 (1 296.31 km²) 的 3.84%;在英德市的淹没面积约 91.41 km²,占英德市行政面积 (5 634 km²) 的 1.62%。

此次洪水从 6 月 18 日开始起涨,6 月 22 日流

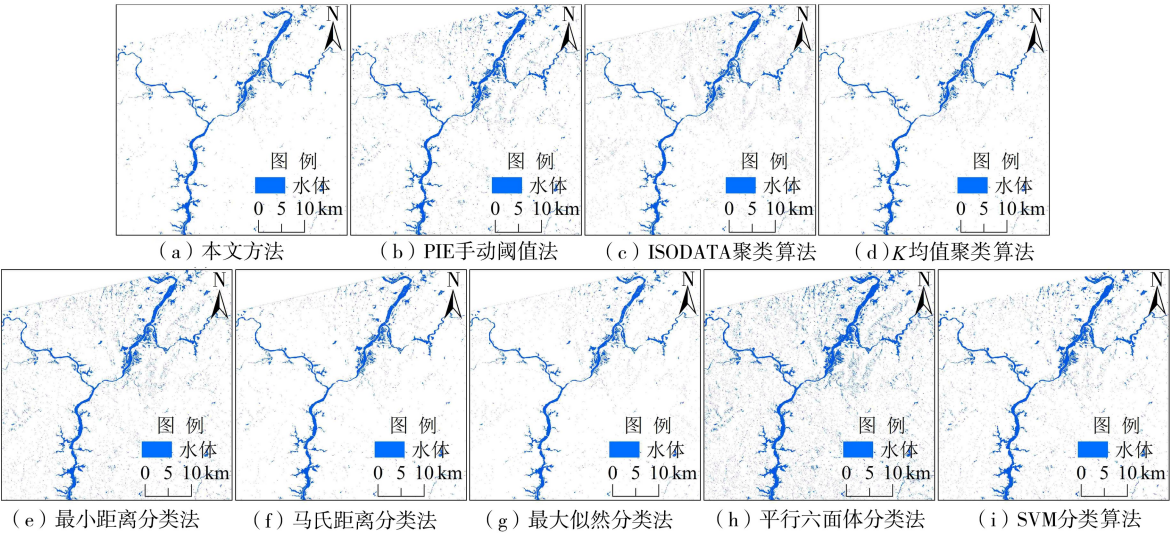


图 8 以 $\sigma_{\min}$ 为输入数据时不同方法的水体提取结果对比

Fig. 8 Comparison of water area extraction results using different methods with $\sigma_{\min}$ as input data

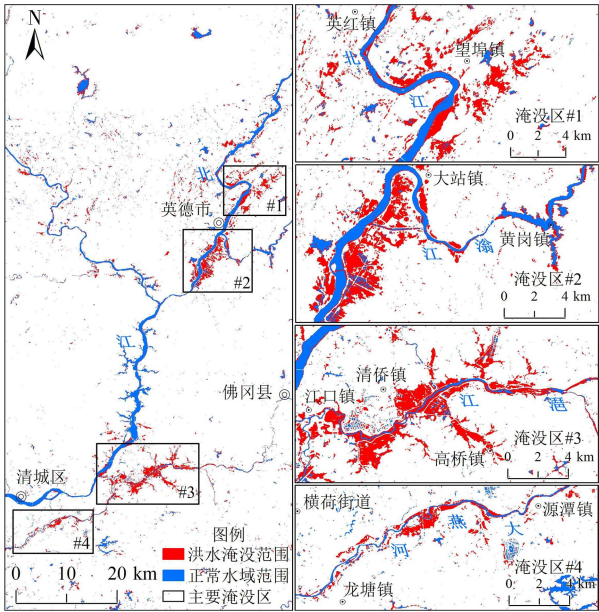


图 9 2022 年北江第 2 号洪水的洪水淹没范围及主要淹没区

Fig. 9 Inundation extent and main inundation areas of No. 2 flood of the Beijiang River in 2022

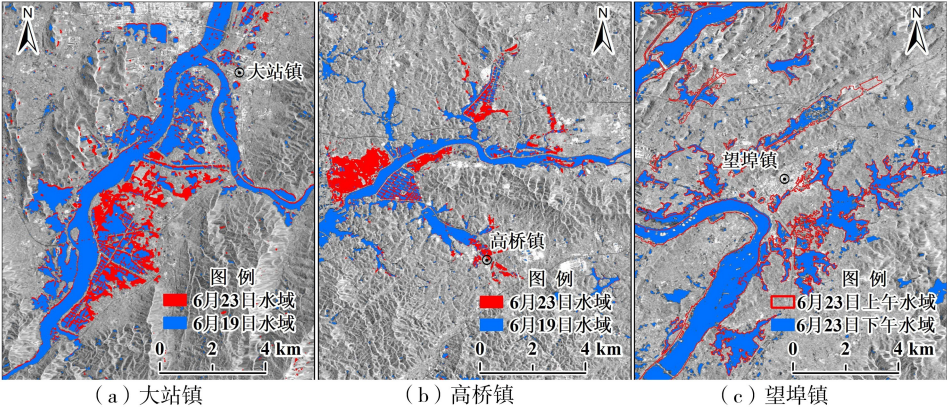


图 10 2022 年北江第 2 号洪水主要淹没范围变化

Fig. 10 Typical areas of inundation extent variation during No. 2 flood of the Beijiang River in 2022

量达到最大,6 月 23 日后开始退水。根据 6 月 19 日(北江第 2 号洪水编号日期)、6 月 23 日(石角站出现有记录以来的最大洪峰流量)的水体提取结果,期间水域范围持续增加的区域主要在英德市大站镇(图 10(a))和清城区高桥镇(图 10(b))。前者主要为北江干流与滙江汇合处的下游农田;后者为滙江两岸的农田。此外,根据望埠镇附近水域多源影像,相较于 6 月 23 日上午过境的光学影像水体结果,下午 SAR 影像提取的水域范围明显变小,退水区主要集中在沿岸城镇区域(图 10(c))。

4.2 2024 年洪水淹没范围及动态变化

2024 年 4 月北江第 2 号洪水的淹没范围如图 11 所示,除了英德市的大站镇(#6)、清城区的清侨镇(#7)和龙塘镇(#8)附近水域,连江沿岸的张陂镇(#5)受淹较为严重,主要受淹没区域为临江的低洼农田。

此次洪水从 4 月 20 日开始起涨,期间洪峰向北江下游行进,至 22 日通过清远市区。根据期间的

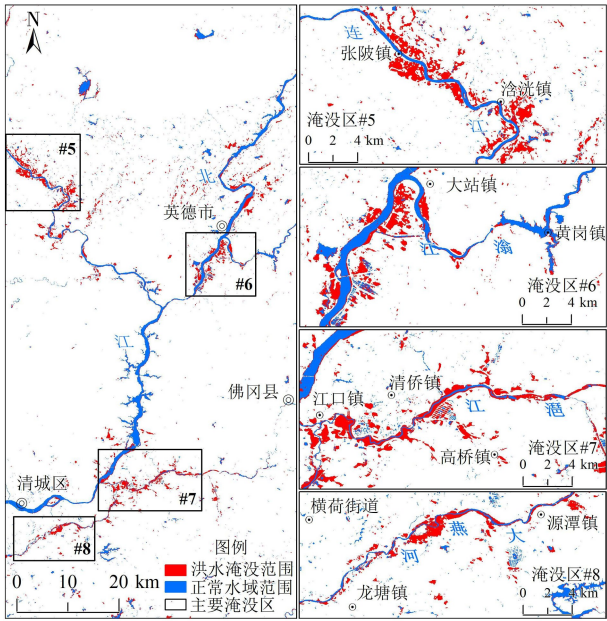


图 11 2024 年北江第 2 号洪水的淹没范围及主要淹没区
Fig. 11 Inundation extent and main inundation areas of No. 2 flood of the Beijiang River in 2024

SAR 影像水体提取结果,4 月 20 日北江沿岸淹没区以上游的韶关段水域为主,21 日上游洪水逐渐消退(图 12(a));4 月 21 日,北江英德段沿岸的大站镇、

连江英德段沿岸的张陂镇受淹较为严重,至 23 日上午洪水逐渐消退(图 12(b)(c))。

4.3 两次洪水淹没范围对比

取两次洪水期间 SAR 影像捕捉的最大水域进行比对,2022 年洪水水域范围较 2024 年整体偏大。英德市、清城区的水域面积分别增加了 20.23、17.15 km²,增大的水域主要集中在北江英德市大站镇(图 13(a))、湛江清城区清侨镇(图 13(b))。但在连江张陂镇附近,2024 年洪水淹没范围较 2022 年有所增加(图 13(c))。

5 结 论

a. 综合运用极化雷达影像和 DEM、影像纹理等辅助优化数据,有效提高了水域识别的准确性。经光学影像对比验证,该方法总体精度达到 98.75%,漏提率为 2.71%,误报率为 0.22%。此外,单景影像的水体提取控制在 1 min 内,适用于洪水应急监测时的快速响应。

b. 对比分析 2022 年、2024 年两次北江洪水,清远市受淹区域集中在英德市的张陂镇、望埠镇、大站镇,清城区的清侨镇、江口镇、龙塘镇;发生洪水河道

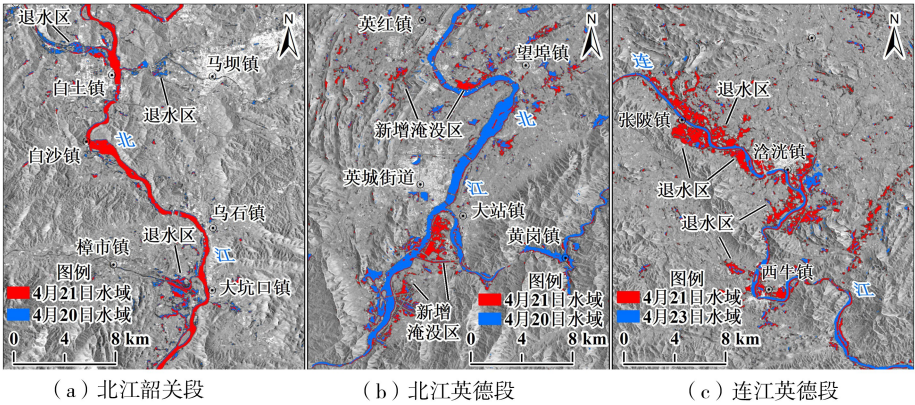


图 12 2024 年北江第 2 号洪水 4 月 21—23 日主要水域变化

Fig. 12 Variation of main water areas during No. 2 flood of the Beijiang River from April 21 to 23, 2024

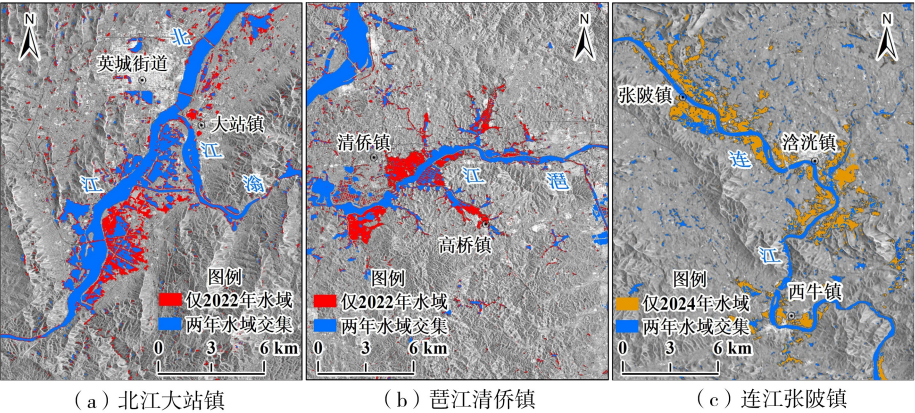


图 13 两次洪水淹没范围的主要变化区域

Fig. 13 Main change areas of inundation extent between two floods

除北江干流外,还有连江、潞江、潯江、大燕河;受淹地类主要为沿江农田和村镇,且村镇退水较快。此外,因河道流量差异,2022 年受淹没范围大于 2024 年。

c. 本文方法在北江流域洪水监测中展现了良好的适用性,未来可结合建筑物掩膜、不透水面信息、土地覆盖类型等多源数据,提高复杂环境下的洪水水域提取精度,拓展该方法在不同研究区的适用性。

d. 开展流域性洪水淹没范围应急监测时,可充分结合光学影像和 SAR 影像各自的优势,提高洪水灾害监测的准确性和效率。SAR 影像能够实现全天候、全天时的地表监测,特别适用于洪水灾害的应急响应;而高空间分辨率的光学影像能够通过地物光谱特征差异,清晰地显示地表细节,有助于准确识别洪水淹没范围。结合高频次观测的星座群影像,有助于跟踪洪水动态发展情况。

参考文献:

[1] 童庆禧. 遥感在 1998 年洪水监测中的作用[J]. 气候与环境研究,1998,3(4):314-322. (TONG Qingxi. Role of remote sensing in flood monitoring in 1998[J]. Climatic and Environmental Research, 1998, 3(4): 314-322. (in Chinese))

[2] 吴庆双,汪明秀,申茜,等. Sentinel-2 遥感图像的细小水体提取[J]. 遥感学报,2022,26(4):781-794. (WU Qingshuang, WANG Mingxiu, SHEN Qian, et al. Small water body extraction method based on Sentinel-2 satellite multi-spectral remote sensing image[J]. National Remote Sensing Bulletin,2022,26(4):781-794. (in Chinese))

[3] 朱辉,何祺胜,李金阳,等. 基于多源遥感数据的蓄洪区洪涝遥感监测与分析[J]. 河海大学学报(自然科学版),2022,50(4):50-57. (ZHU Hui, HE Qisheng, LI Jinyang, et al. Remote sensing monitoring and analysis of flood in flood storage area based on multi-source remote sensing data[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2022,50(4):50-57. (in Chinese))

[4] 饶品增,蒋卫国,王晓雅,等. 基于 MODIS 数据的洪涝灾害分析研究:以 2017 年洞庭湖区洪水为例[J]. 灾害学,2019,34(1):203-207. (RAO Pinzeng, JIANG Weiguo, WANG Xiaoya, et al. Flood disaster analysis based on MODIS data: taking the flood in Dongting Lake area in 2017 as an example [J]. Journal of Catastrophology,2019,34(1):203-207. (in Chinese))

[5] ZHENG Wei,SHAO Jiali,GAO Hao. Songhua River Basin flood monitoring using multi-source satellite remote sensing data[C]//IGARSS 2019-2019 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Yokohama: IEEE,2019: 9760-9763.

[6] Earthdata. Near real-time MODIS global flood product now available from NASA's LANCE[EB/OL]. (2024-10-22) [2025-03-07]. <https://www.earthdata.nasa.gov/news/feature-articles/near-real-time-modis-global-flood-product-now-available-from-nasas-lance>.

[7] 石晨烈,王旭红,张萌,等. 3 种时空融合算法在洪水监测中的适用性研究[J]. 国土资源遥感,2020,32(2):111-119. (SHI Chenlie, WANG Xuhong, ZHANG Meng, et al. Analysis of the applicability of three remote sensing spatiotemporal fusion algorithms in flood monitoring[J]. Remote Sensing for Land & Resources,2020,32(2):111-119. (in Chinese))

[8] ZHU Xiaolin,HELMER E H,GAO Feng, et al. A flexible spatiotemporal method for fusing satellite images with different resolutions[J]. Remote Sensing of Environment, 2016(172):165-177.

[9] 陈志国. 高分辨率 SAR 卫星影像洪水区域提取应用研究[D]. 武汉:武汉大学,2017.

[10] 范伟,何彬方,姚筠,等. 基于哨兵 1 号的洪水淹没面积监测[J]. 气象科技,2018,46(2):396-402. (FAN Wei, HE Binfang, YAO Jun, et al. Survey study of flood inundation areas based on Sentinel-1[J]. Meteorological Science and Technology, 2018, 46(2): 396-402. (in Chinese))

[11] 郭山川,杜培军,蒙亚平,等. 时序 Sentinel-1A 数据支持的长江中下游汛情动态监测[J]. 遥感学报,2021,25(10):2127-2141. (GUO Shanchuan, DU Peijun, MENG Yaping, et al. Dynamic monitoring on flooding situation in the middle and lower reaches of the Yangtze River Region using Sentinel-1A time series [J]. National Remote Sensing Bulletin, 2021, 25(10): 2127-2141. (in Chinese))

[12] 陈赛楠,赵霞. 基于 Sentinel-1 SAR 数据的洪水淹没应用与极化分析[J]. 甘肃科学学报,2021,33(1):41-47. (CHEN Sainan, ZHAO Xia. Flood inundation application and polarization analysis based on Sentinel-1 SAR data [J]. Journal of Gansu Sciences,2021,33(1): 41-47. (in Chinese))

[13] 张文璇,王卷乐. 基于 SAR 影像后向散射特性的中俄黑龙江流域洪水监测[J]. 地球信息科学学报,2022,24(4):802-813. (ZHANG Wenxuan, WANG Juanle. Flood monitoring of Heilongjiang River Basin in China and Russia transboundary region based on SAR backscattering characteristics [J]. Journal of Geo-Information Science, 2022,24(4):802-813. (in Chinese))

[14] 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. (JIA Jiajia, MA Jing, 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

- Applications,2022,37(1):173-185. (in Chinese))
- [15] European Space Agency. Mission ends for Copernicus Sentinel-1B satellite[EB/OL]. (2022-03-08)[2024-04-26]. https://www.esa.int/Applications/Observing_the_Earth/Copernicus/Sentinel-1/Mission_ends_for_Copernicus_Sentinel-1B_satellite.
- [16] 李胜阳,许志辉,陈子琪,等. 高分3号卫星影像在黄河洪水监测中的应用[J]. 水利信息化,2017(5):22-26. (LI Shengyang,XU Zhihui,CHEN Ziqi,et al. Application of GF-3 satellite remote sensing image on Yellow River flood monitoring[J]. Water Resources Informatization, 2017(5):22-26. (in Chinese))
- [17] 任正情. 高分三号影像在洪涝灾害应急监测中的应用[J]. 西部资源,2021(4):112-114. (REN Zhengqing. Application of GF-3 images in flood disaster emergency monitoring[J]. Western Resources, 2021(4):112-114. (in Chinese))
- [18] 李磊,崔倩,张志新,等. 基于GF-3的2020年鄱阳湖洪水动态监测与影响评价[J]. 水文,2022,42(3):43-47. (LI Lei, CUI Qian, ZHANG Zhixin, et al. Dynamic monitoring and impact assessment of Poyang Lake flood in 2020 based on GF-3[J]. Journal of China Hydrology, 2022,42(3):43-47. (in Chinese))
- [19] 何颖清,齐志新,冯佑斌,等. 基于高分三号雷达遥感影像的洪涝灾害监测;以郑州“7·20”特大暴雨灾害为例[C]//中国水利学会2021学术年会论文集第二分册. 北京:中国水利学会,2021:333-340.
- [20] 王景旭,邱士可,王正,等. 基于GF-3号遥感影像水体信息提取的郑州市洪涝灾害监测[J]. 河南科学,2021,39(10):1701-1706. (WANG Jingxu, QIU Shike, WANG Zheng, et al. Flood disaster monitoring based on water body extraction of GF-3 image in Zhengzhou[J]. Henan Science,2021,39(10):1701-1706. (in Chinese))
- [21] 廖一帆,林炳章,丁辉. 广东省暴雨高风险区划[J]. 水资源保护,2022,38(2):7-16. (LIAO Yifan, LIN Bingzhang, DING Hui. High-risk rainstorm zonation of Guangdong Province[J]. Water Resources Protection, 2022,38(2):7-16. (in Chinese))
- [22] 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 Shichao, XUE Dongjian, LI Chengrao, et al. Study on new method for water area information extraction based on Sentinel-1 data[J]. Yangtze River, 2019, 50(2):213-217. (in Chinese))
- [23] 徐丹,邓孺孺. 广州市典型地物及果树极化特征[J]. 热带地理,2008,28(4):317-321. (XU Dan, DENG Ruru. The polarization characteristics of typical surface objects and fruit trees in Guangzhou[J]. Tropical Geography, 2008,28(4):317-321. (in Chinese))
- [24] 高寒新,陈波,孙洪泉,等. SAR卫星影像洪水检测研究进展及展望[J]. 地球信息科学学报,2023,25(10):1933-1953. (GAO Hanxin, CHEN Bo, SUN Hongquan, et al. Research progress and prospect of flood detection based on SAR satellite images[J]. Journal of Geo-Information Science,2023,25(10):1933-1953. (in Chinese))
- [25] 黄敏敏. 基于Sentinel-1/2数据的寿光市洪涝灾害监测与预测研究[D]. 南京:南京信息工程大学,2022.
- [26] 胡启明. 基于灰度共生矩阵的地形纹理特征量化研究[D]. 福州:福州大学,2017.
- [27] 陈媛媛,郑加柱,魏浩翰,等. 基于Sentinel-1A数据的南京市水体信息提取[J]. 地理空间信息,2020,18(9):62-65. (CHEN Yuanyuan, ZHENG Jiazhu, WEI Haohan, et al. Water information extraction of Nanjing City based on Sentinel-1A data,2020,18(9):62-65. (in Chinese))
- [28] 陈喆,向大享,姜莹,等. 基于国产高分三号星座的洪涝灾害应急监测模式研究;以洞庭湖区团洲垸溃口险情为例[J]. 长江科学院院报,2024,41(12):189-195. (CHEN Zhe, XIANG Daxiang, JIANG Ying, et al. Flood disaster emergency monitoring based on China's Gaofen-3 satellite; application to Tuanzhou Embankment Breach in Dongting Lake area[J]. Journal of Changjiang River Scientific Research Institute,2024,41(12):189-195. (in Chinese))
- [29] 周婷,汪炎,邹俊,等. 基于PCA和SVM的遥感影像水体提取方法及验证[J]. 水资源保护,2023,39(2):180-189. (ZHOU Ting, WANG Yan, ZOU Jun, et al. PCA and SVM-based algorithm of water area extraction from remote sensing images and its verification[J]. Water Resources Protection,2023,39(2):180-189. (in Chinese))

(收稿日期:2024-05-24 编辑:施业)

