

文章编号: 1672-8785(2022)04-0041-08

# 基于哨兵 1 号卫星合成孔径雷达 资料的淀山湖附近水域水体 提取关键技术研究

陆一闻 郭 巍 崔林丽 杨 阳

(上海市生态气象和卫星遥感中心, 上海 200030)

**摘 要:** 长三角一体化示范区内河网水系的水环境容量有限且地势低洼, 所以在暴雨季节易发生洪涝灾害。卫星遥感技术因其宏观、动态的特点而成为洪涝灾害监测的重要手段之一。基于哨兵 1 号(Sentinel-1) C 波段合成孔径雷达(Synthetic Aperture Radar, SAR)影像对淀山湖附近水域的水体识别方法进行了试验, 初步实现了 2020 年梅雨期间多时相水体面积提取, 并结合 FROM-GLC 全球下垫面资料对积水状况进行了分析。根据研究结果可得出以下结论: (1) 欧空局官方 SNAP 软件对 SAR 影像的斑点噪声具有较好的抑制作用; (2) 由于淀山湖水体的后向散射系数在图像上表现为单峰形态, 可用阈值分割方法提取水体信息; (3) 梅雨期间的水域水情较 4 月份增长约 40 km<sup>2</sup>; (4) 受强降水影响, 耕地被淹没区的面积最大, 不透水地表和裸地受影响较小。

**关键词:** 哨兵 1 号; 水体识别; 淀山湖

中图分类号: P237 文献标志码: A DOI: 10.3969/j.issn.1672-8785.2022.04.006

## Research on Key Technology of Water Body Extraction Based on Sentinel-1 SAR Images in Dianshan Lake

LU Yi-wen, GUO Wei, CUI Lin-li, YANG Yang

(Shanghai Ecological Forecasting and Remote Sensing Center, Shanghai 200030, China)

**Abstract:** Because the water environment capacity of river network in the integrated demonstration area of Yangtze River Delta is limited and the terrain is low, flood disasters usually appear in rainstorm season. Satellite remote sensing technology has become one of the important means of flood disaster monitoring because it is macroscopic and dynamic. In this paper, based on Sentinel-1 C-band synthetic aperture radar (SAR) images, the water body identification method of Dianshan Lake is studied, and the multi-temporal water area extraction is preliminarily realized during plum rain in 2020. Combined with FROM-GLC global land cover type data, the water accumulation situation is analyzed. According to the research results, the following conclusions can be drawn: (1) SNAP software of ESA has a good suppression effect on speckle noise of SAR images; (2) Since the backscattering coefficient of Dianshan Lake water body shows a single-peak shape on the image, the threshold segmentation method can be used to extract water information; (3) The water regime during plum

收稿日期: 2021-12-16

作者简介: 陆一闻(1991-), 男, 硕士, 主要从事遥感应用研究。E-mail: ywlu9129@163.com

rain increases by about 40km<sup>2</sup> compared with that in April. (4) Under the influence of heavy rainfall, the area of submerged farmland is the largest, while impervious surface and bare land are less affected.

**Key words:** Sentinel-1; water body extraction; Dianshan Lake

## 0 引言

2019 年 1 月 19 日, 国家发改委发布《长三角生态绿色一体化发展示范区总体方案》。近年来, 长三角区域不但受全球气候变化的影响, 而且受到高度城市化发展引起的城市热岛效应的影响, 因此沿水城市遭受暴雨洪涝灾害的风险与日俱增。其中, 作为该示范区中心的淀山湖区域对长三角示范区和上海的洪涝监测有着极为重要的作用。大范围且有效地获取水资源分布信息对区域内生态环境管理、用水安全保障和灾害快速评估等具有重要应用价值<sup>[1-8]</sup>。在光学影像中, 由于水体受天气因素影响而呈现出不同的光谱特征, 影像水体分布制图的难度增大了, 且会受到云覆盖的干扰。然而, SAR 影像对云雨雾的敏感性不高, 因此以镜面散射为主的水体能够呈现出与其他地物类型后向散射能力截然不同的特征。该优势有效地弥补了传统光学影像的局限性<sup>[9]</sup>。Sentinel-1A 卫星是欧洲航天局“哥白尼计划”所发射的第一颗环境监测卫星。该卫星的重访周期为 12 天, 其最大特色是搭载了 C 波段 SAR 系统。利用 Sentinel-1 卫星可实现大范围、短周期的对地监测, 并可对淀山湖附近水域水体进行有效监测和识别, 从而为长三角区域一体化发展和防灾减灾提供科学支撑。本文基于 Sentinel-1 数据研究了 2020 年梅雨期间淀山湖附近水域的水体识别提取技术。

## 1 研究区域与数据

### 1.1 研究区域

本文选取淀山湖及周边区域(见图 1)作为研究区域。该区域范围为 31.05°N~31.25°N、120.76°E~121.04°E。淀山湖位于上海市青浦区与江苏省苏州市的交界处, 是上海最大的淡

水湖泊, 总面积约为 62 km<sup>2</sup>。该湖泊在长三角范围内起到了调节径流的重要作用, 同时还具备灌溉农作、水产养殖、供水航运等各种功能, 是上海市的主要水源地之一。然而, 由于水资源容量有限, 雨季的大量降雨更容易造成淀山湖及其周边的洪涝灾害。

### 1.2 研究数据

2020 年 6 月 9 日, 上海正式入梅, 较常年偏早 8 天; 7 月 21 日上海正式出梅, 较常年偏晚 11 天。梅雨期长达 42 天, 较常年多了 19 天。受连续暴雨、天文大潮以及上游来水的影响, 7 月 7 日苏州河上游出现最高水位, 超出 2019 年“利奇马”台风期间的原历史最高纪录。青浦区金泽站的最高水位达到 3.99 m, 超出警戒线 0.44 m, 仅比历史记录低 0.10 m。因此, 本文收集了 2020 年梅雨期间覆盖了淀山湖附近的 Sentinel-1A\_SAR 卫星影像的 IW 模式图像, 并将其用于水体信息的提取。表 1 列出了 Sentinel-1 参数信息。

表 1 Sentinel-1 参数设置

参数	指标
工作频段	C 频段
极化方式	VH
成像模式	宽幅模式(IW)
分辨率	5 m×20 m
幅宽	240 km

为了对整个洪涝灾害期间的洪涝淹没区进行识别和提取, 选取 2020 年 6 月 23 日、7 月 5 日、7 月 17 日和 7 月 23 日的 4 景图像进行水体识别和监测分析。此外, 为了对比入梅前后的水体面积变化, 将 4 月 12 日的 Sentinel-1A 水体监测结果作为基准进行比较。表 2 列出了 Sentinel-1A 影像数据的时间和文件名。



图 1 研究区位置

表 2 Sentinel-1A 影像数据参数

序号	时间	文件名
1	2020 年 4 月 12 日	S1A_IW_GRDH_1SDV_20200412T095449
2	2020 年 6 月 23 日	S1A_IW_SLC_1SDV_20200623T095452
3	2020 年 7 月 5 日	S1A_IW_SLC_1SDV_20200705T095453
4	2020 年 7 月 17 日	S1A_IW_SLC_1SDV_20200717T095453
5	2020 年 7 月 23 日	S1A_IW_SLC_1SDV_20200723T095422

为了进一步分析降水对不同下垫面积水的影响程度, 采用了清华大学 30 m 分辨率的 FROM-GLC 全球下垫面产品<sup>[16]</sup>。研究区内的下垫面覆盖类型如图 2 所示。

## 2 技术方法

基于 Sentinel-1A 的 SAR 数据进行的洪涝淹没范围监测主要利用了不同地物的微波后向散射的不同强度。SAR 影像的后向散射强度明显受到地物表面粗糙度的影响, 而水体由于表面光滑大多产生镜面散射, 弱化了雷达信号的后向散射能力<sup>[10]</sup>, 在影像上就表现为不同地物间的灰度值变化<sup>[17-20]</sup>。因此, 基于阈值分割的 SAR 图像水体信息提取方法简单高效<sup>[11-15]</sup>。

### 2.1 卫星资料处理

本文根据数据质量选取的 Sentinel-1A 数

据均为 IW 模式的 L1 级别地距影像。数据预处理由欧空局官方提供的 SNAP 软件完成。如图 3 所示, 具体流程包括斑点滤波、辐射定标、地理编码、数据输出等。Sentinel-1 的原始数据中存在大量的由雷达信号相互干扰叠加造成的无关噪声, 因此需要对原始数据进行平滑滤波处理以尽可能消除影像的乘性噪声, 从而增强影像中不同地物的后向散射信息<sup>[21-25]</sup>。乘性噪声表现为 SAR 影像上的大量颗粒状的斑点(见图 4(a)), 图像中地物的后向散射信息的相互叠加造成了这些相干斑点噪声。在识别水体之前需要对这些噪声进行滤波处理, 从而去除乘性噪声影响。这样才能获取高精度的监测结果。经过 SNAP 软件处理后的 Sentinel-1 数据的颗粒状噪声有了明显改善, 异常值被滤波处理后的图像更加平滑且合理(见图 4(b))。

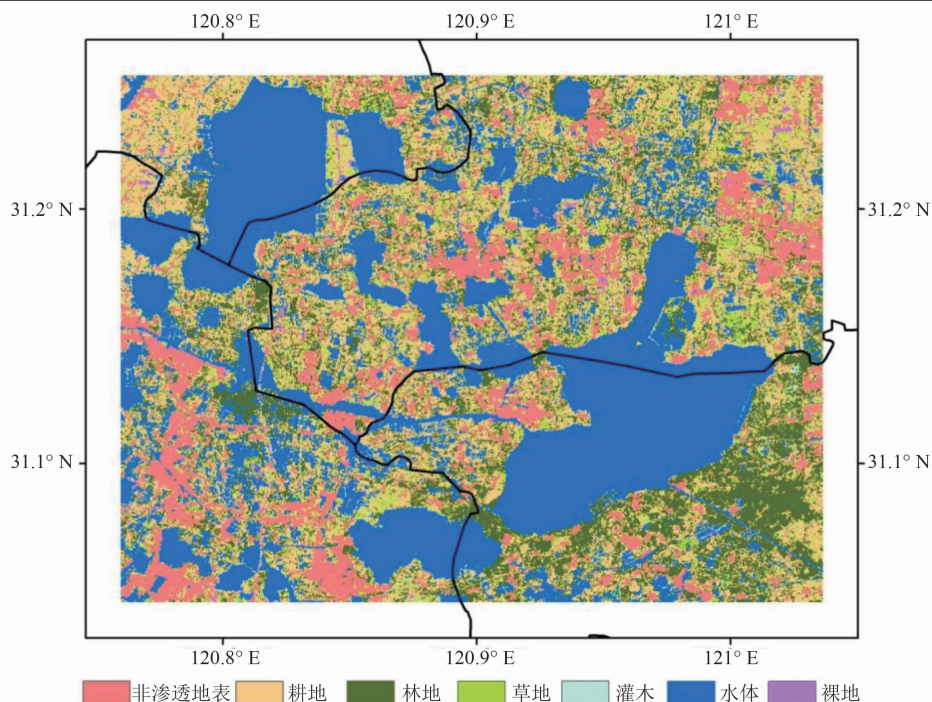


图2 研究区下垫面分类

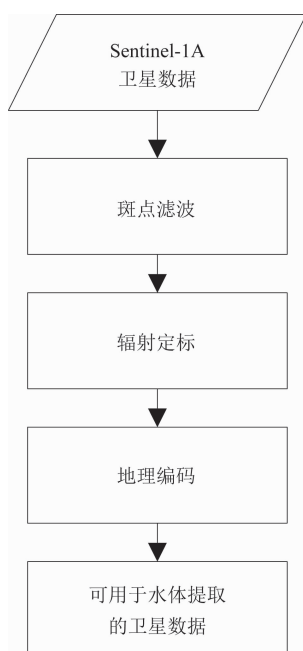


图3 基于 SNAP 软件的 Sentinel-1 预处理流程

## 2.2 水体识别阈值提取

实现雷达影像的水体提取可以采用以下几种方法：目视解译分类、纹理特征分析、监督分类模型、动态轮廓分类模型、图像阈值分割等。其中，纹理特征分析方法的原理是根据灰度共生矩阵来区分不同地物的纹理特征，从而提取特定的地物目标。该方法精度高但所需要

的计算量非常大。此外，其实际效果对纹理窗口的尺寸容量有较大的依赖。监督分类模型通过标注样本训练分类器来提取目标地物，其算法稳定但需要人工标注样本，且对样本库的精度要求较高。动态轮廓模型具有较高的鲁棒性，因此对噪声有很强的辨识能力。但是它对参数设置非常敏感，使得其真实的应用效率相对较低。

阈值分割分类算法是遥感领域应用最为广泛且实用的水体提取方法，其原理是通过寻找不同地物的后向散射系数阈值来分割雷达影像。水体的后向散射能力较差，因此图像中小于水体极限阈值的区域即为水体，大于阈值的区域为非水体，最终获得水体/非水体二值图。该方法的优势在于非常容易实现，且计算量相对较小。但阈值的准确性极大影响了最终结果的准确性。相对稳妥的方法是通过人机交互目视解译的方式来调整和选取阈值，不适合处理大批量的数据且效率低下，同时阈值的主观性强。但是，在针对范围相对较小的固定监测目标时，其阈值准确性较高的优势就很好地体现出来。

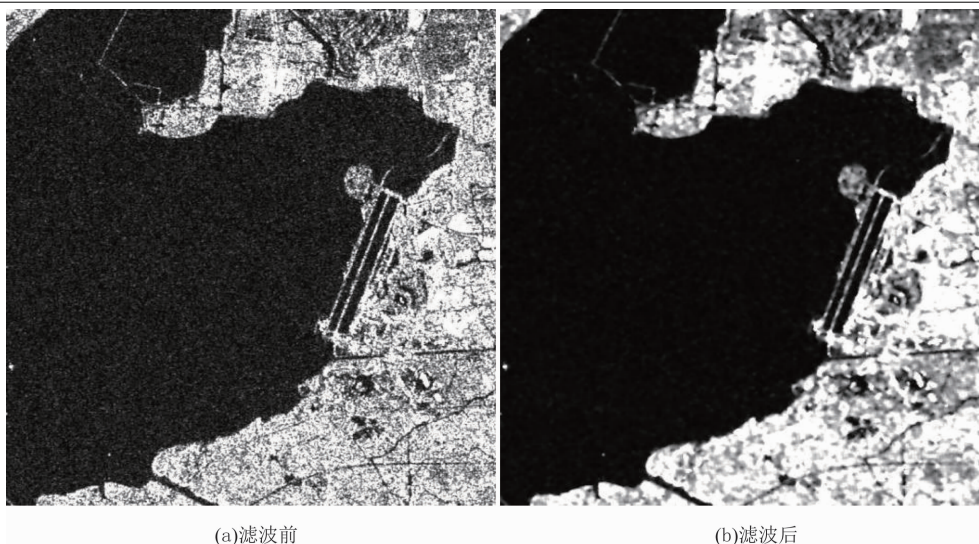


图 4 滤波前后卫星影像对比

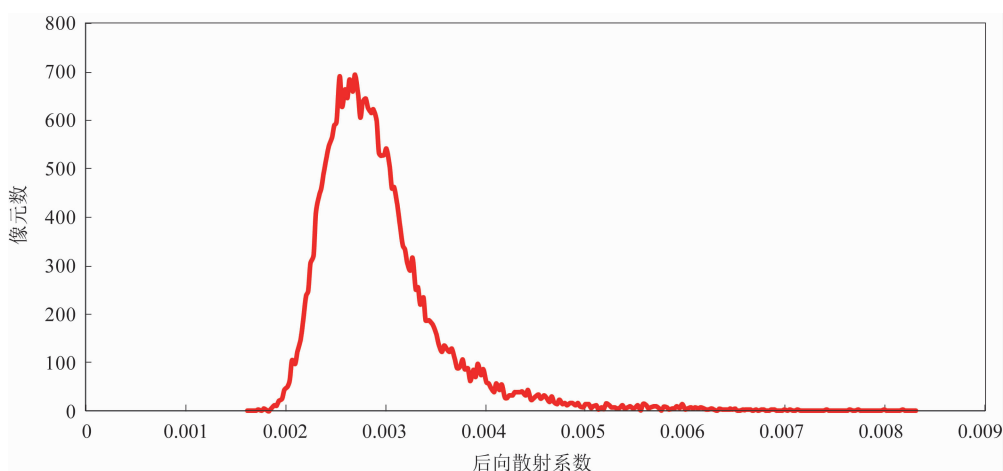


图 5 水体后向散射系数统计结果

由于 Sentinel-1A 卫星的回访周期较长, 不需要高频次的自动化监测, 且水体识别需要一定的人工目视解译判识辅助, 因此本文通过人机交互的方式选取阈值来进行水体判识。根据人工目视解译结果, 得到水体后向散射系数的直方图分布。从图 5 中可以看出, 后向散射系数分布呈现很好的单峰分布, 其值域范围为  $0.0016 \sim 0.008$ 。选取该值域作为水体判识的依据。最终将此阈值应用在不同时次的 Sentinel-1A 卫星影像上, 得到淀山湖附近水域的水体分布(见图 6)。

### 3 监测结果分析

由 Sentinel-1A 雷达卫星的暴雨洪涝反演结果(见图 7)可知, 入梅前太湖流域淀山湖、

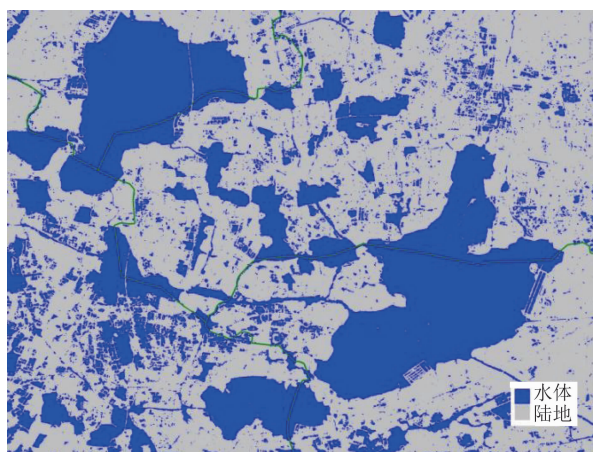


图 6 2020 年 4 月 12 日淀山湖地区水体监测结果

澄湖附近的水体面积约为  $276.52 \text{ km}^2$ 。入梅后受连续暴雨影响, 监测区域的水体面积明显增加。表 3 列出了 4 个监测时次淀山湖附近水域

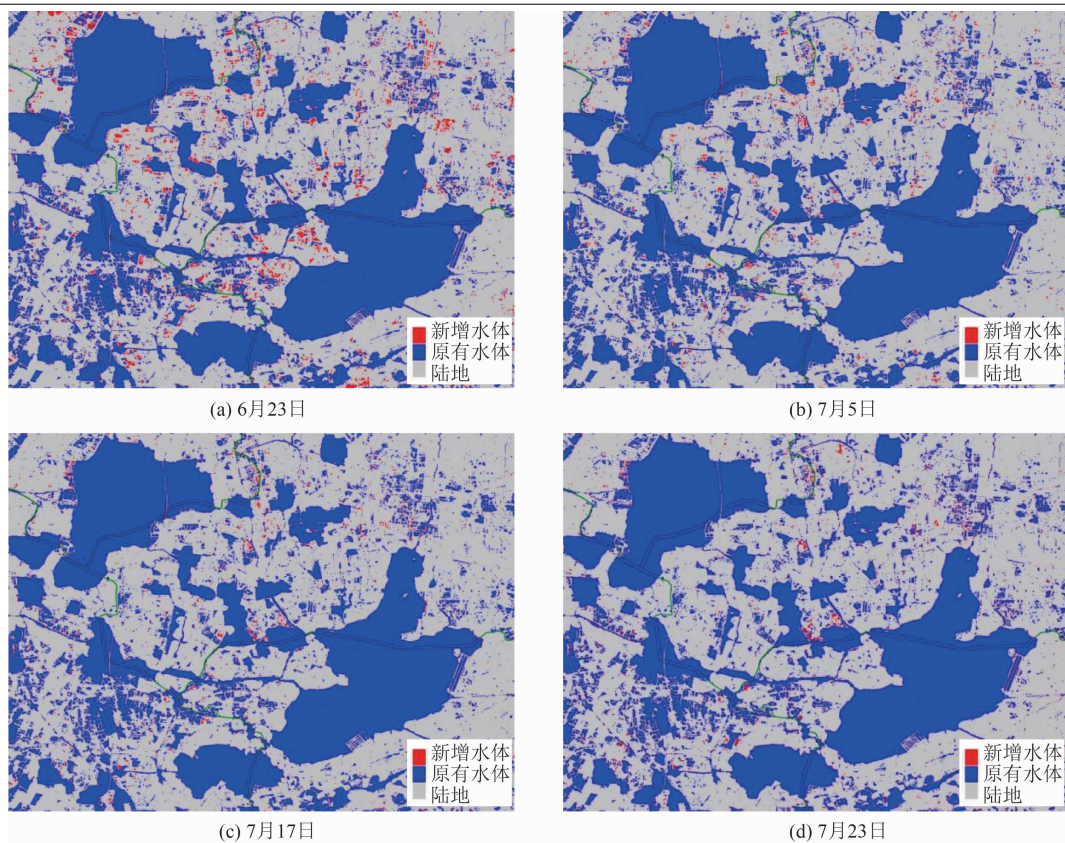


图 7 梅雨期间淀山湖地区的水体监测结果

表 3 梅雨期淀山湖区域的水体面积变化

时间	6 月 23 日	7 月 5 日	7 月 17 日	7 月 23 日
新增水体面积/km <sup>2</sup>	49.06	45.94	40.59	37.99

比入梅前增加的水体面积。6 月 21 日、22 日连续两天，区域大部分地区受大雨影响。6 月 23 日，淀山湖、澄湖附近的水体面积监测结果增加了 49.06 km<sup>2</sup>。7 月份开始直到 7 月 20 日，除 1 日与 10 日以外的大部分时间里区域均受雷阵雨或中到大雨影响。7 月 5 日和 7 月 17 日的淀山湖、澄湖附近水体面积监测结果分别比入梅前增加了 45.94 km<sup>2</sup> 和 40.59 km<sup>2</sup>。7 月 20 日之后，区域天气开始转好，以阴天为主。7 月 23 日的水体面积与入梅前相比增加了 37.99 km<sup>2</sup>。与前几次监测结果相比，增加的面积有一定程度的下降。

利用区域的 FROM-GLC 下垫面产品来统计不同时次新增水体所属下垫面类型的面积。由于水体的范围本身具有季节和年季变化的特点，因此存在新增水体区域属于水体下垫面类

型的情况。图 8 所示为统计分析结果。可以看出，耕地最早出现水体面积的增长，其次是林地，随后二者的新增水体面积逐渐减小。此外，水体下垫面类型中的水体监测面积逐渐增大。这可以理解降水首先导致耕地和林地的水体淹没区增加，然后随着耕地和林地排水措施的实施，这两类地物的积水逐渐排至湖泊和河流中，从而导致水体类型中的新增水体面积增加。

#### 4 结论与讨论

本文基于 Sentinel-1 影像并采用阈值分割法实现了 2020 年梅雨期间淀山湖附近水域的水体识别，然后对不同时间的水体面积进行了对比，并利用 FROM-GLC 产品分析了不同下垫面的水情影响。主要结论如下：

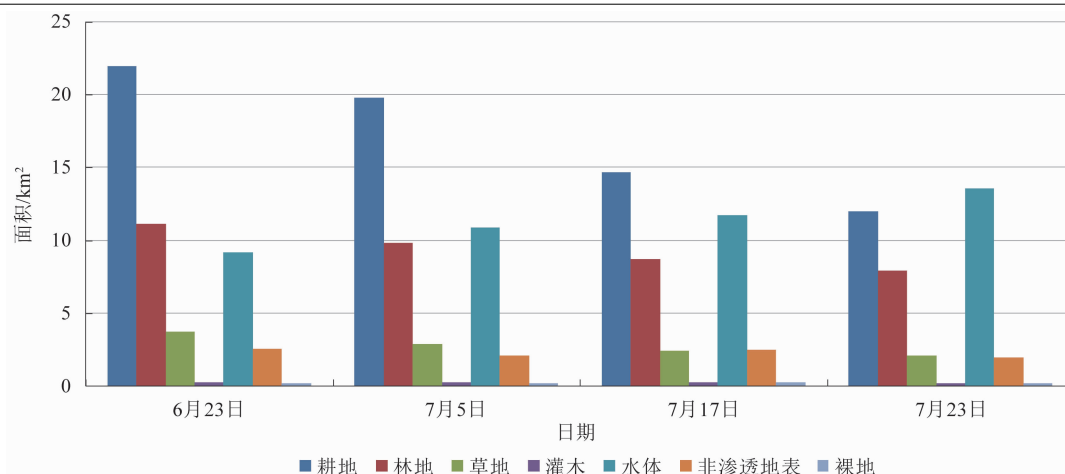


图 8 梅雨期间不同下垫面的新增水体监测结果

(1) 由于水体对雷达波束的镜面散射机制, 淀山湖水体的后向散射系数在 SAR 图像上表现为很好的单峰形态, 因此可以采用阈值分割方法有效提取淀山湖水体信息。

(2) 由于雷达信号相干叠加的原因, Sentinel-1 的原始数据会生成非常多的无关噪声, 在水体影像上表现为离散的噪声点。利用欧空局提供的 SNAP 软件进行的噪声处理, 对斑点噪声具有较好的抑制作用。

(3) 2020 年梅雨季以来, 6 月 23 日的淀山湖区域水情较 4 月份增长了  $49 \text{ km}^2$  左右, 随后水情逐渐好转但仍较之前增长了  $37 \text{ km}^2$  以上。

(4) 在所有受水情影响的区域中, 耕地面积最大, 非渗透地表和裸地面积较小。随着耕地和林地积水的有效排放, 二者的积水淹没逐渐有所好转。

与传统光学卫星相比, 雷达卫星因其全天候的遥感能力而在灾害性天气监测任务中具有非常大的应用潜力。本文中的研究方法可以在暴雨洪涝灾害下对监测区域进行准确的洪涝淹没判识, 为相关机构的抗洪救灾决策提供客观有效的科学依据, 因此具有重要的应用研究价值。此外, 本文中的研究内容大多依赖成熟的软件和传统的统计计算方法进行, 在技术的前沿性上尚有欠缺, 且存在雷达卫星回访周期长等业务应用问题需要解决。后续研究拟采用多星协同观测的方法来提高该技术的应用能力,

同时还要研发基于机器学习的高精度水体提取技术, 从而实现满足业务需求的雷达卫星暴雨洪涝监测。

### 参考文献

- [1] 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, 2016.
- [2] Wang Y Q, Ruan R Z, She Y J, et al. Extraction of Water Information based on RADARSAT SAR and Landsat ETM+ [J]. *Procedia Environmental Sciences*, 2011, **10**(1): 37-45.
- [3] 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.
- [4] 郑伟, 刘闯, 王正兴. 基于 ENVISAT-ASAR 数据的洪涝水体空间分布信息提取 [J]. *自然灾害学报*, 2009, **18**(4): 120-124.
- [5] Matgen P, Hostache R, Schumann G, et al. Towards an automated SAR-based flood monitoring system: Lessons learned from two case studies [J]. *Physics and Chemistry of the Earth*, 2010, **36**(7): 44-48.
- [6] Tong X H, Luo X, Liu S G, et al. An approach for flood monitoring by the combined use of Landsat-8 optical imagery and COSMO-Sky Med radar imagery [J]. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2018, **136**(1): 226-230.
- [7] 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.
- [8] 赵昕. 基于 MODIS 与 ASAR 数据的洪水淹没信息提取方法研究 [D]. 成都: 电子科技大学, 2012.
- [9] 安成锦, 牛照东, 李志军, 等. 典型 Otsu 算法阈值比较及其 SAR 图像水域分割性能分析 [J]. *电子与信息学报*, 2010, **32**(9): 2215–2219.
- [10] 陈玲艳, 刘智, 张红. 基于水体散射特性的 SAR 图像水体检测 [J]. *遥感技术与应用*, 2014, **29**(6): 963–969.
- [11] 邓滢, 张红, 王超, 等. 结合纹理与极化分解的面向对象极化 SAR 水体提取方法 [J]. *遥感技术与应用*, 2016, **31**(4): 714–723.
- [12] Guo Q D, Pu R L, Li J L, et al. A weighted normalized difference water index for water extraction using Landsat imagery [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2017, **38**(19): 5430–5445.
- [13] Hahmann T, Martinis S, Twele A, et al. Friedrichshafen; Extraction of water and flood areas from SAR data [C]. European Conference on Synthetic Aperture Radar, 2008.
- [14] Hong S, Jang H, Kim N, et al. Water area extraction using RADARSAT SAR imagery combined with landsat imagery and terrain information [J]. *Sensors*, 2015, **15**(3): 6652–6667.
- [15] Huang W L, DeVries B, Huang C Q, et al. Automated extraction of surface water extent from sentinel-1 data [J]. *Remote Sensing*, 2018, **10**(5): 797.
- [16] Ji L Y, Gong P, Geng X R, et al. Improving the Accuracy of the Water Surface Cover Type in the 30 m FROM-GLC Product [J]. *Remote Sensing*, 2015, **7**(10): 13507–13527.
- [17] 李智慧, 陈秀万, 罗鹏, 等. 基于混合阈值法的 Envisat 影像水体提取 [J]. *遥感信息*, 2013, **28**(2): 62–65.
- [18] Lv W, Yu Q, Yu W. Water extraction in SAR images using GLCM and Support Vector Machine [C]. Beijing: IEEE International Conference on Signal Processing, 2010.
- [19] Mason D C, Giustarini L, Garcia-Pintado J, et al. Detection of flooded urban areas in high resolution synthetic aperture radar images using double scattering [J]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2014, **28**: 150–159.
- [20] Musa Z N, Popescu I, Mynett A. A review of applications of satellite SAR, optical, altimetry and DEM data for surface water modelling, mapping and parameter estimation [J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2015, **19**(9): 3755–3769.
- [21] 庞科臣, 陈立福, 王思雨. 融合 DEM 去除山体阴影的水体提取方法 [J]. *电子科技*, 2016, **29**(4): 76–78.
- [22] 沈占锋, 夏列钢, 李均力, 等. 采用高斯归一化水体指数实现遥感影像河流的精确提取 [J]. *中国图象图形学报*, 2013, **18**(4): 421–428.
- [23] Sohn H G, Song Y S, Kim G H. Detecting Water Area During Flood Event from SAR Image [C]. Springer-Verlag: International Conference on Computational Science & Its Applications, 2005.
- [24] Sun W W, Du B, Xiong S L. Quantifying sub-pixel surface water coverage in urban environments using low-albedo fraction from landsat imagery [J]. *Remote Sensing*, 2017, **9**(5): 428.
- [25] 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.