

适应复杂区域的时序 SAR 影像洪水监测与分析

李聪好, 刘家奇, 刘欣鑫, 李树涛, 康旭东

湖南大学 电气与信息工程学院, 长沙 410082

摘要: 洪涝灾害对中国沿湖沿江地带的国家经济和人民财产威胁巨大。针对洪涝灾害期间光学影像质量低, 单幅 SAR (Synthetic Aperture Radar) 影像水体提取多依赖经验阈值且可靠性不足等问题, 本文提出了一种适应复杂区域的时序 SAR 影像洪水监测方法。为获取完整的洪水淹没区域, 首先结合影像序列的统计分析结果, 设计了两个归一化差异指数——突出临时洪水的淹没范围提取指数 SREI (Submerged Range Extraction Index) 和突出矮植被覆盖的植被区淹没范围提取指数 SRVEI (Submerged Range in Vegetation area Extraction Index); 然后, 根据同一区域植被季候性分布较为稳定的前提, 给出了阈值的自适应选取方式; 最后, 考虑中国湖泊周围地物特点, 构建了适应的后处理过程, 优化提取区域, 形成了洪水淹没区域提取与监测的详细流程和通用框架。本文以东洞庭湖流域为主要研究区域验证了方法的提取精度, 并在此基础上进行了 2020 年东洞庭湖流域洪涝灾害态势分析和洪水淹没地物分析, 展示了方法在洪涝灾害监测评估上的应用性能。另外, 本文还将该方法应用于东洞庭湖流域往年数据, 进行了汛期洪水淹没范围年际分析, 并添加了同年鄱阳湖洪水淹没区域的实验, 验证了方法时空应用的稳定性。相关实验结果表明, 本文方法对洪水淹没区域的提取精度高, 用户依赖性低, 可跨越时空地应用于不同洪水淹没区域监测场景, 且可以初步区分不同属性的洪水淹没范围, 能够为本文涉及区域及其他区域的洪涝灾害监测、评估和预警提供一定的参考。

关键词: 洪涝灾害, 合成孔径雷达, 时序监测, 水文遥感, SAR, 洞庭湖

中图分类号: TP701/P2

引用格式: 李聪好, 刘家奇, 刘欣鑫, 李树涛, 康旭东. 2024. 适应复杂区域的时序 SAR 影像洪水监测与分析. 遥感学报, 28(2): 346–358

Li C Y, Liu J Q, Liu X X, Li S T and Kang X D. 2024. Flood monitoring and analysis based on time-series SAR image for complex area. National Remote Sensing Bulletin, 28(2): 346–358 [DOI: 10.11834/jrs.20211228]

1 引言

洪涝灾害是中国平原地区影响最为严重的自然灾害之一, 每年带来的灾害损失超过所有自然灾害损失的 40% (黄萍等, 2018)。中国沿湖沿江地带聚集着大量农业区与经济发达地区, 一旦发生洪水, 将对国家经济和人民财产带来巨大损害。快速而准确地预报洪涝灾害, 获知灾害发生的地点、范围、程度等信息尤为重要 (陈秀万, 1997)。

近年来, 遥感技术的发展为自然资源调查、生态环境保护、气象灾害预测应急和国家重大工程建设等提供了重要支撑 (孙伟伟等, 2020)。针对洪水区域监测和灾害评估等问题, 国内外众多学者基于遥感监测技术开展了大量研究。Wang 等

(2019) 以 GEE (Google Earth Engine) 为平台计算历年鄱阳湖的淹没频率, 探讨了 1988 年—2016 年间鄱阳湖的时空变化, 并比较了这期间鄱阳湖水域面积的差异。Li 等 (2019) 在贝叶斯融合框架下, 使用 ALOS-2 数据对 2015 年日本关东东北部由强降雨导致的 Joso 洪水事件进行了监测评估。王嘉芑等 (2016) 以余姚市东侧姚江沿岸为研究区域, 对灾中 COSMO-SkyMed 雷达影像提取的水体和灾前 SPOT-5 光学影像提取的水体进行空间差值运算, 得到洪水淹没范围信息。高伟等 (2018) 结合 Landsat 8 OLI 数据、Landsat 7 ETM+、MODIS 地表反射率产品等多源数据, 采用数据协同的方式对 2016 年长江主要支流一挙水流域的暴雨洪涝

收稿日期: 2021-04-29; 预印本: 2021-08-24

基金项目: 国家自然科学基金(编号:61890962, 61901166); 湖南省重点实验室项目(编号:2018TP1013)

第一作者简介: 李聪好, 研究方向为遥感图像处理与应用。E-mail: licongyu@hnu.edu.cn

通信作者简介: 刘欣鑫, 研究方向为高光谱图像处理, 遥感影像分析应用。E-mail: liuxinxin@hnu.edu.cn

灾害进行时序监测分析, 重现淹没情形。

随着越来越多高时间、高空间分辨率遥感卫星的发射和数据公开, 水域提取方法的研究越来越深入多样, 主要采用的遥感手段分为光学遥感和微波遥感。利用光学遥感来提取水域的方法, 主要有阈值法、光谱分析法和分类后提取法等。这些方法常结合归一化差异水分指数 NDWI (Normalized Difference Water Index) 和归一化差异湿度指数 NDMI (Normalized Difference Moisture Index) 等光谱指数来表征光学图像中的水分信息 (Liu 等, 2016; Sun 等, 2012)。但光学遥感极易受云雾干扰, 而洪灾期间往往伴随降水过程, 云量较大, 光学遥感影像获取的水体信息有限。

不同于光学遥感成像, 合成孔径雷达 SAR (Synthetic Aperture Radar) 采用主动成像方式, 在微波范围内提供能量源, 接收地物的反射信号, 可以实现不受大气条件和天气影响的全天候成像, 保证了暴雨、云雾等恶劣天气下洪灾区域的连续观测。另外, SAR 数据可以较好地突出开阔平坦的水域, 因为平坦的水面会将微波能量散射出去, 导致 SAR 数据在平坦水域记录的后向散射强度低, 像素值小, 与非水域形成显著对比 (Martinis 和 Rieke, 2015; Martinis 等, 2015b)。故在洪灾区域监测中, SAR 数据常常被作为首选。利用微波遥感来进行水域提取的方法具体可以分为以下 6 类 (Liang 和 Liu, 2020): (1) 基于后向散射图阈值的方法 (Boni 等, 2016; Chini 等, 2017; Greifeneder 等, 2014; Twele 等, 2016); (2) 基于干涉图相干计算的方法 (Chini 等, 2019); (3) 基于区域增长算法和活动轮廓模型的方法 (Giustarini 等, 2013; Li 等, 2014; Tong 等, 2018); (4) 面向对象分类的方法 (Kuenzer 等, 2013; Pulvirenti 等, 2011); (5) 基于模糊统计的方法 (Martinis 等, 2015a; Twele 等, 2016; Amitrano 等, 2018; 王志豪 等, 2020); (6) 变化检测的方法 (Shen 等, 2019)。其中, 基于后向散射图阈值的方法可操作性强, 计算代价小, 但由于不同 SAR 影像数据的差异以及影像中部分地物后向散射系数的相似性, 选取与最高提取精度相匹配的阈值较为困难, 且十分依赖于用户经验。基于干涉图相干计算的方法虽然理论精度高, 但相位展开易受相干因素的干扰, 且复杂噪声与微小变化之间的混叠易造成错误的监测结果, 应用范围存在一定的限制。区域生长

算法可以获得内部连通的提取结果, 但计算代价大, 且种子点的选取对提取结果影响明显。面向对象分类的方法可以有效减少逐像素提取时结果图中椒盐噪声的现象, 但此类方法需要较为全面的信息以获取不同对象的特征, 故多用于极化 SAR 影像。模糊统计的方法易于实现且避免了阈值的设定, 但其方法应用时大多需要进行复杂的归一化过程, 同时规则的设置仍然依赖于经验, 有时需要通过繁琐的规则才能得到较为理想的结果。基于变化检测方法种类丰富, 是一类非常具有潜力的方法, 但在具体应用中, 需要结合实际明确变化的内涵, 否则将给结果带来误差。为了降低用户依赖性, 提高洪水监测精度, 以较小的计算代价和易于获取的数据得到比较理想的提取结果, 结合了变化检测和阈值的方法可以快捷且准确地监测洪水引起的雷达后向散射变化。由此, 一类通过计算洪水期间图像与非洪水期间图像之间的绝对差异, 然后根据差异图应用阈值来分离洪水的方法开始被采用 (Long 等, 2014)。但此类方法在设计时, 没有充分考虑不同地表被洪水淹没时的不同特点, 且实验大多面向地表覆盖较为单一的洪水区域, 不适应中国洪涝灾害多发地区地物分布复杂的特点, 在具体分析和实际应用于中国河流湖泊汛情时存在较大的局限性。

针对上述问题, 本文提出了一种适应复杂区域的时序 SAR 影像序列洪水监测方法, 该方法通过时序 SAR 影像, 构建了两个可以初步区分不同属性的洪水淹没范围提取指数—突出临时洪水的淹没范围提取指数 SREI (Submerged Range Extraction Index) 和突出矮植被覆盖的植被区淹没范围提取指数 SRVEI (Submerged Range in Vegetation area Extraction Index), 之后通过自适应方法确定阈值, 然后根据中国湖泊周围地物特点设计了后处理过程, 形成了洪水淹没区域监测的详细流程和通用框架。实验部分, 本文针对位于湖南省的东洞庭湖流域进行了洪水淹没区域监测, 并选取了 4 种可用于变化检测的方法作为对比, 验证了本文方法的洪水淹没区域提取精度, 并结合分类数据对监测结果加以具体应用, 进行了东洞庭湖流域的 2020 年洪水态势分析和洪水淹没地物分析。另外, 通过东洞庭湖流域年际最大洪水淹没区域面积分析和位于江西省北部的鄱阳湖数据的相关实验, 验证了该方法可跨越时间与地理距离应用于多种

复杂洪水淹没范围监测场景。实验表明, 本文提出的时序 SAR 影像序列分析的洪水监测方法具有较高的洪水淹没区域提取精度, 参数设置简单, 阈值确定的用户依赖性低, 具有良好的鲁棒性和通用性。该方法可跨越时空应用于不同环境的洪水监测场景, 提高了洪灾区域监测效率, 对关注重要河流、湖泊及其部分支流汛情发展, 防范流域性洪涝及城乡积涝等有重要意义。该方法中设计的两个归一化差异指数, 相比于传统洪水提取方法, 可初步区分不同属性的被淹没范围, 分别监测开阔地带和含矮植被浅水地带的洪水淹没区域, 对于洪涝应急情况下的部分农业活动规划也有重要参考意义。

2 方法

2.1 适应复杂区域的 SREI 和 SRVEI 指数

随着地球观测进入大数据时代, 获取地物的长时间影像序列不再困难。除了洪水期间的影像之外, 还有大量的洪水期前后的参考场景, 对长时间序列影像进行统计分析为洪水淹没区域监测提供新的思路。例如, Cian 等 (2018) 提出将非洪水期的多时相 SAR 影像序列作为参考集, 构建两个影像序列, 一个序列仅包含参考集, 另一个序列包含参考集和待监测的洪水影像, 通过分别对两个影像序列的后向散射值 σ_0 进行统计分析, 利用被淹没区域的像素值相对于非洪水期减小的原理, 获得归一化洪水差异指数 NDFI (Normalized Difference Flood Index); 结合浅水区的矮植被会使其后向散射值比无植被的水域高的规律, 获得植被区归一化洪水差异指数 NDFVI (Normalized Difference Flood in Vegetated areas Index), 并通过经验所得的常数确定两个差异指数的阈值, 共同突出洪水淹没区域。这两个指数可用于简单快速的洪水制图, 其结果在马拉维和乌干达洪水事件中得到了测试。

然而, 将上述方法应用于中国河湖洪涝灾害的监测时结果并不理想, 其原因如下: (1) 上述研究均开展于单一气候特点的区域, 研究区域有明显的干湿两季, 地物分布简单, 因此在指数的设计及处理流程的构架上没有充分考虑复杂地物分布的情况, 而中国洪涝灾害易发地区多为季风气候, 降水量丰富, 适合农作物生长和水产养殖, 洪水区域附近常密布池塘和水田, 此外, 重要河

流湖泊中常有船舶通航, 在 SAR 影像中体现为异常高值, 对提取结果的准确性造成了不同程度的影响; (2) 上述方法在归一化差异指数的设计上均基于时序统计值, 使得洪水淹没范围的提取结果与洪水影像当天的实际情况关联性较低, 限制了该方法在洪水动态监测中的进一步应用; (3) 上述方法所提指数的阈值依赖经验判定, 且最佳阈值随着每景洪水影像内淹没范围的变化而浮动, 实际提取结果对洪水淹没区域的突出性不强, 误警区域较多, 提取精度存在极大的不稳定性。

针对上述问题, 本文提出了适应复杂区域的淹没范围提取指数 SREI (Submerged Range Extraction Index) 和植被区淹没范围提取指数 SRVEI (Submerged Range in Vegetation area Extraction Index), 其数学模型如下:

$$SREI = \frac{\text{median}(\sigma_0(\text{"reference"})) - \sigma_0(\text{"flood"})}{\text{median}(\sigma_0(\text{"reference"})) + \sigma_0(\text{"flood"})} \quad (1)$$

$$NDFVI = \frac{\max\sigma_0(\text{"reference + flood"}) - \text{mean}\sigma_0(\text{"reference"})}{\max\sigma_0(\text{"reference + flood"}) + \text{mean}\sigma_0(\text{"reference"})} \quad (2)$$

$$SRVEI = \frac{NDFVI - \sigma_0(\text{"flood"}) \times 10^p}{NDFVI + \sigma_0(\text{"flood"}) \times 10^p} \quad (3)$$

式中, σ_0 指的是影像序列中像素的后向散射值, "reference" 表示包含参考集的影像序列, "flood" 表示待监测洪水时刻的影像序列, "reference + flood" 则表示同时包含了参考集和待监测洪水时刻的影像序列, 10^p 是平衡洪水影像后向散射值与 NDFVI 指数值之间数量级差异的参数。

为了捕捉洪水导致的水体范围变化, SREI 的构建充分考虑了每个像素在非洪水期和洪水时刻的状态变化。具体来说, SREI 采用参考影像序列每个像素的中值刻画像素在非洪水期的平稳状态, 有效避免了参考影像序列因出现极大或极小值对像素非洪水期状态的错误表示, 例如船舶通航会使代表水体的像素在某些时刻出现异常高值。另外, 中国河流湖泊周围常常水田密布, 由于水中作物生长期与收割期的不同, 也存在一些非洪水因素的水体变化。比如, 当水田中无作物时, 后向散射值低, 存在作物时, 后向散射值变高。因此, 完全依赖时序统计信息计算变化水体的方法 (如 NDFI 指数) 容易引入较大误差, 而本文提出的 SREI 指数将非洪水期平稳状态与洪水时刻的实际情况进行关联, 可以捕捉到洪水时刻后向散射

值突然降低的区域, 凸显洪水当日被洪水淹没的区域。据此分析, 影像序列中的永久水体和永久非水体的像素值在时间序列中变化不大, 其 *SREI* 指数相应较低; 而被洪水淹没的区域像素值突然减小, 其 *SREI* 指数相应较高。*SREI* 指数能够突出临时洪水淹没区域, 但对于植被区的后向散射变化情况不敏感, 易遗漏水体边界含有矮植被的洪水淹没区域, 因此需要设计能够突出矮植被区洪水淹没区域的指数加以结合。由于Cian等(2018)提出的 *NDFVI* 指数只能反映时序内出现过浅水矮植被的区域, 对淹没植被的提取不够明确, 本文提出了 *SRVEI* 指数, 将 *NDFVI* 指数与洪水期影像进行差异化计算, 提高了计算结果与洪水影像当天情况的关联性。后续实验也证明原 *NDFVI* 指数仅能提取出水中存在过矮植被的区域, 而 *SRVEI* 指数能够在含植被水域的基础上突出被洪水淹没的区域(图4(a))。

2.2 阈值选取

在计算 *SREI* 和 *SRVEI* 指数之后, 选取合适的阈值至关重要。Long等(2014)通过分析差异指数结果的直方图寻找合适的阈值。遵循相似的思路, 本文将 *SREI* 和 *SRVEI* 指数的阈值设定为差异指数结果的均值加上 k 倍的标准差, 为了简化计算, k 可取同一常数, 其公式如下:

$$th_{SREI} = \text{mean}(SREI) + k \times \text{std}(SREI) \quad (4)$$

$$th_{SRVEI} = \text{mean}(SRVEI) + k \times \text{std}(SRVEI) \quad (5)$$

根据 *SRVEI* 指数的设计原理, 其提取范围主要为永久水体外围被洪水淹没的矮植被区域, 由于同一场景中相应区域矮植被的季候性分布较为稳定, 同一场景可使用相同的 *SRVEI* 阈值进行提取。而当同一场景影像序列的 th_{SRVEI} 值固定时, 每张洪水期影像中常数 k 的取值可以通过 th_{SRVEI} 反算求得, 由此再计算 th_{SREI} 。后续实验表明, 针对于哨兵一号经预处理后的地距多视产品(IW GRD)的VH极化影像, th_{SRVEI} 一般在0.9—1.0之间, 其值域相对稳定, th_{SREI} 则随着待监测洪水影像内水量的多少而波动, 范围约在0.4—0.7之间。对于洪水淹没范围变化较大的影像序列, 自适应的常数 k 使得 *SREI* 阈值更加符合当景影像洪水淹没情况, 洪水淹没区域提取更加完整, 减少用户依赖性。

2.3 基于 *SREI* 和 *SRVEI* 的洪水监测流程

根据 *SREI* 和 *SRVEI* 指数的特点, 一种适应复杂区域的时序SAR影像序列的洪水监测方法被提出。如图1所示, 在该方法中, 首先对多时相的SAR影像序列进行影像校正、裁剪和配准等预处理, 制作数据集; 然后依照 *SREI* 和 *SRVEI* 指数的计算公式与阈值界定进行洪水淹没区域的初步提取; 最后结合河流湖泊周围的地物特点进行相应后处理。

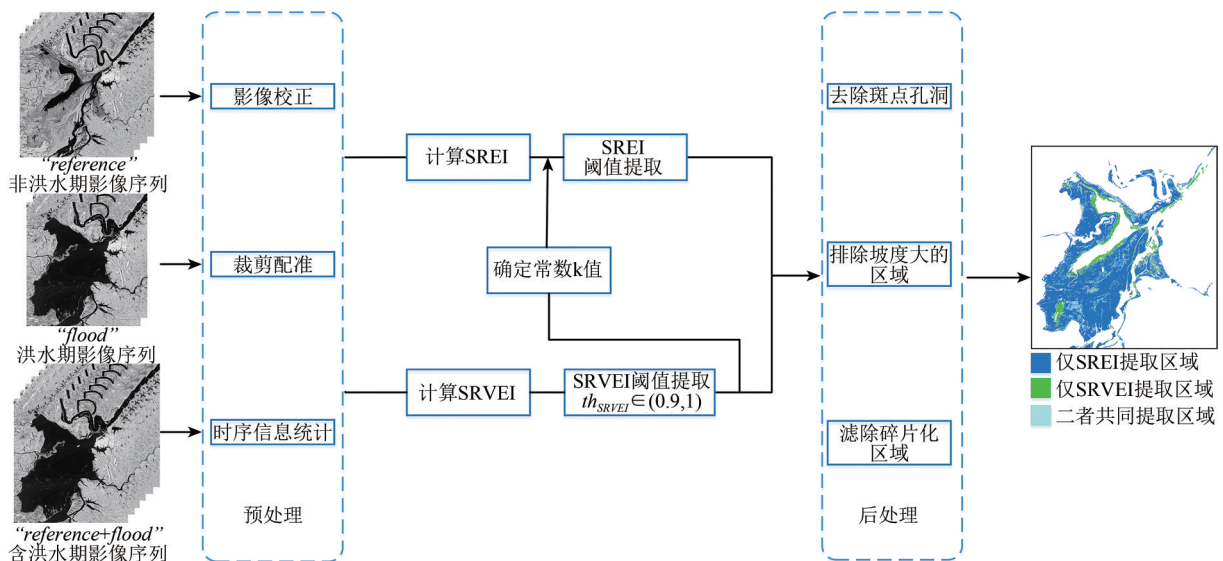


图1 基于 *SREI* 和 *SRVEI* 的洪水淹没范围监测流程

Fig. 1 Flood submerged range monitoring process based on *SREI* and *SRVEI*

预处理部分主要包括影像校正、裁剪配准和时序信息统计3个步骤。SAR影像校正流程主要有轨道校正、热噪声去除、辐射定标、相干斑滤波

和地形校正等操作。影像的裁剪配准需要通过地理位置信息来进行, 在后处理制作DEM掩膜和叠加分析部分也需要配准后的多源数据联合分析。

将裁剪配准后的影像序列进行时序信息统计, 以计算 *SREI* 和 *SRVEI* 指数与阈值。

后处理主要包括3个步骤: (1) 为了减少初步提取结果中斑点孔洞的影响, 使用开闭运算对初步结果图进行滤波, 在保留边界的同时去除小孔。另外, 去除初步结果中像素个数过少的像素簇, 以优化提取区域。

(2) 排除不太可能发生洪水的区域。使用数字高程模型计算坡度, 坡度大于 5° 的像素应被排除于洪水淹没范围之外。根据不同的地形场景, 可适当调整坡度的阈值。

(3) 滤除碎片化区域。在进行了前两步后处理之后, 仍有少量面积略大的碎片化区域未被去除, 其地物类型为城市用地中的光滑平面和远离洪泛区的水田等, 这些地物类型会产生类似于水体的镜面反射或者不规律的后向散射值变化。结合这些碎片化区域面积相比于主要监测的洪水淹没范围小, 且其形态多为规则多边形特点, 故去除矩形度较高且面积较小的连通域, 即可达到去除效果。

3 实验与结果

3.1 研究区域

洞庭湖位于湖南省岳阳市西南面, 经纬度介于 $28^\circ 30'N$ — $30^\circ 20'N$ 和 $112^\circ 25'E$ — $113^\circ 15'E$ 之间, 地处长江中下游平原, 地势平坦, 湖区内多为沼泽洼地和围湖造田形成的圩田。洞庭湖承纳了长江中上游和湖南的湘江、资水、沅水、澧水四条江河水量, 是长江重要的调蓄湖泊, 具有强大蓄洪能力, 流域内降水丰富且具有明显季节性变化, 夏季降水占年总降水量一半以上, 且多为大雨和暴雨, 冬季则降水稀少。每年水位始涨于4月, 7—8月最高, 11月到翌年3月为枯水期。丰水期时水面辽阔, 若遇各路洪峰汇集, 易发生洪涝灾害, 枯水期水面严重萎缩, 湖周边形成多草的滩地(饶品增等, 2019)。

本实验选取了东洞庭湖周边流域作为研究区域(图2), 包含东洞庭湖、南洞庭湖的部分区域和长江与洞庭湖相接河段, 主要地区涵盖了湖南省的岳阳市、益阳市和湖北省荆州市。

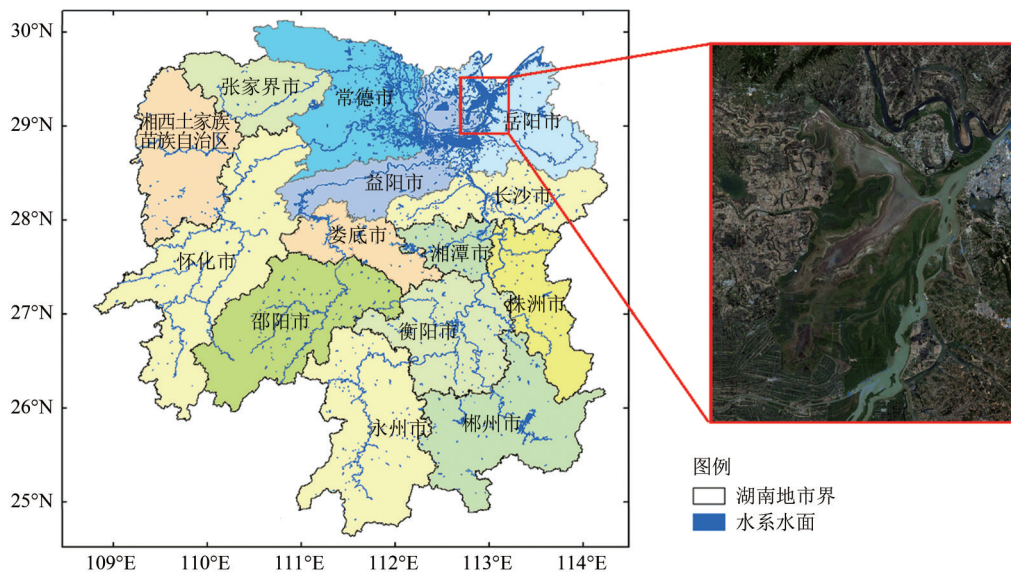


图2 东洞庭湖流域示意图(右图为高分一号WFV彩色合成影像)

Fig. 2 Schematic diagram of the East Dongting Lake Basin (The picture on the right shows the color composite image of GF-1 WFV)

3.2 实验数据

(1) 哨兵一号SAR数据。哨兵一号(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, 具有多种成像模式和极化方式, 单

星重访周期为12天, 即每12天可获取相同区域的新的一景遥感影像, 时间分辨率较高, 故采用其作为时间序列分析的基础数据。本文为了监测东洞庭湖流域洪水淹没范围, 分别收集了2020年1—8月的Sentinel-1A的16景数据和2017年—2019年历史数据15景, 共31景数据。影像模式选择为干

涉宽幅模式 (TOPS Mode), 数据类型为地距多视产品 (IW GRD), 极化方式为 VV+VH 极化。(哨兵一号数据下载网址: <https://scihub.copernicus.eu/dhus/#/home>[2021-03-01])

(2) ASTER GDEM 高程数据。本文高程数据选择先进星载热发射和反射辐射仪全球数字高程模型 ASTER GDEM (Global Digital Elevation Model of Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer)。ASTER GDEM 是根据新一代对地观测卫星 Terra 的详尽观测结果制作完成的全球数字高程数据, 其空间分辨率为 30 m。高程数据可以有效地表示坡度、坡向及坡度变化率等地貌特性, 用于地理制图和水域提取时去除山体阴影。(数据来源于中国科学院计算机网络信息中心地理空间数据云平台 <http://www.gscloud.cn>[2021-03-01])

(3) 地物分类数据本实验获取了 Gong 等 (2020) 生产的 2018 年中国 30 m 分辨率的土地利用数据。该数据将地物分为 10 种土地利用类型, 包括农田、森林、草地、灌木丛、湿地、水域、不透水面、裸地、苔原和冰雪。本文选取了洞庭湖流域的土地利用数据, 包括湖南省常德市、益阳市和岳阳市 3 个地级市, 涵盖了 8 种土地利用类型, 主要土地利用类型为农田、森林、水域和不透水面等 (图 3), 用于洪水淹没地物分析。(地物分类数据下载网址: <http://data.ess.tsinghua.edu.cn/data/EULUC/EULUC-China-2018.zip>[2021-03-01])

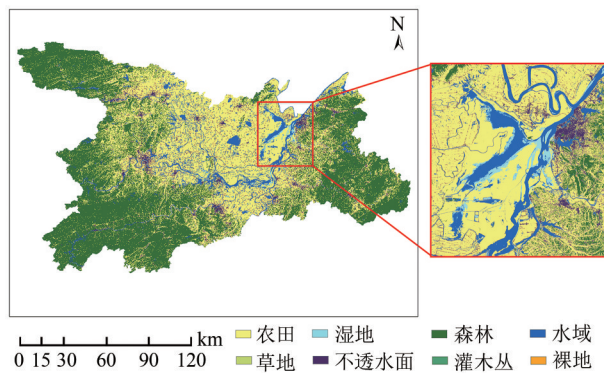


图 3 东洞庭湖流域地物分类数据

Fig. 3 Ground feature classification data in the East Dongting Lake Basin

3.3 实验设置与结果

本实验采用 2020 年 1—5 月的 10 张非洪水期的 SAR 影像作为参考集, 由于 VV 极化方式中水体的后向散射值易受到水面粗糙度的影响, 而 VH 极化

方式对水体和非水体的后向散射值区分度更大 (Clement 等, 2018), 故所有影像的极化方式均选择 VH 极化。将 2020 年 6—8 月、2017 年—2019 年历史影像与参考集一起制作含洪水影像序列, 按照影像校正、裁剪配准、数据统计的步骤计算 *SREI* 和 *SRVEI* 指数。其中, th_{SRVEI} 的值选取为 0.9。后处理部分, 开闭运算的滤波器窗口大小设置为 3×3 像素, 坡度限制在 5° 以下, 矩形度限制在 50% 以下。最终以 *SREI* 和 *SRVEI* 合并的提取结果作为洪水淹没区域。

为定量评价本方法的洪水淹没范围提取精度, 参照时间相近的光学影像及 Google Earth 影像, 结合哨兵一号当景假彩色合成影像进行目视解译, 标记出 2020 年洪水影像的淹没范围以及非洪水淹没范围, 作为提取结果精度评估的参考。本文采用 F1 值、Kappa 系数和 OA 系数进行精度评价, 定义如下:

$$P = \frac{x_{11}}{x_{11} + x_{21}}, R = \frac{x_{11}}{x_{11} + x_{12}}, F1 = \frac{2 \times P \times R}{P + R} \quad (6)$$

$$Kappa = \frac{\sum_{i,j=1}^2 x_{ij} \sum_{i=1}^2 x_{ii} - \sum_{i=1}^2 (\sum_{j=1}^2 x_{ij} \times \sum_{j=1}^2 x_{ji})}{(\sum_{i,j=1}^2 x_{ij})^2 - \sum_{i=1}^2 (\sum_{j=1}^2 x_{ij} \times \sum_{j=1}^2 x_{ji})} \quad (7)$$

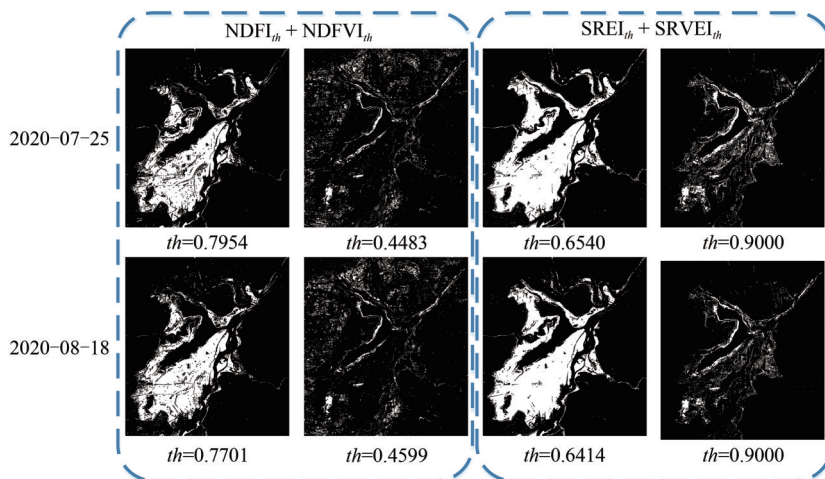
$$OA = \frac{\sum_{i=1}^2 x_{ii}}{\sum_{i,j=1}^2 x_{ij}} \quad (8)$$

式中, x_{11} 为参考中被标记为洪水淹没范围且结果中被提取为洪水淹没范围, x_{12} 为参考中被标记为洪水淹没范围但结果中未被提取为洪水淹没范围, x_{21} 为参考中被标记为非洪水淹没范围但结果中被提取为洪水淹没范围, x_{22} 为参考中被标记为非洪水淹没范围且结果中未被提取为洪水淹没范围。

为验证所提方法的有效性, 兼顾方法对比时的公平性, 本文收集了 4 种可用于 SAR 影像变化检测的方法, 分别是 OTSU 阈值法 (Otsu, 1978)、KI 阈值法 (Kitler 和 Illingworth, 1986)、基于模糊规则的方法 (Amitrano 等, 2018) 和 NDFI-NDFVI 联合指数提取方法 (Cian 等, 2018)。OTSU 阈值法和 KI 阈值法的步骤为: 将预处理后的洪水期与非洪水期影像相除获得变化信息; 然后进行对数运算增强变化信息, 最后分别使用由 OTSU 方法和 KI 方法确定的阈值, 提取洪水淹没区域。基于模糊规则的方法和 NDFI-NDFVI 联合指数的方法则完全

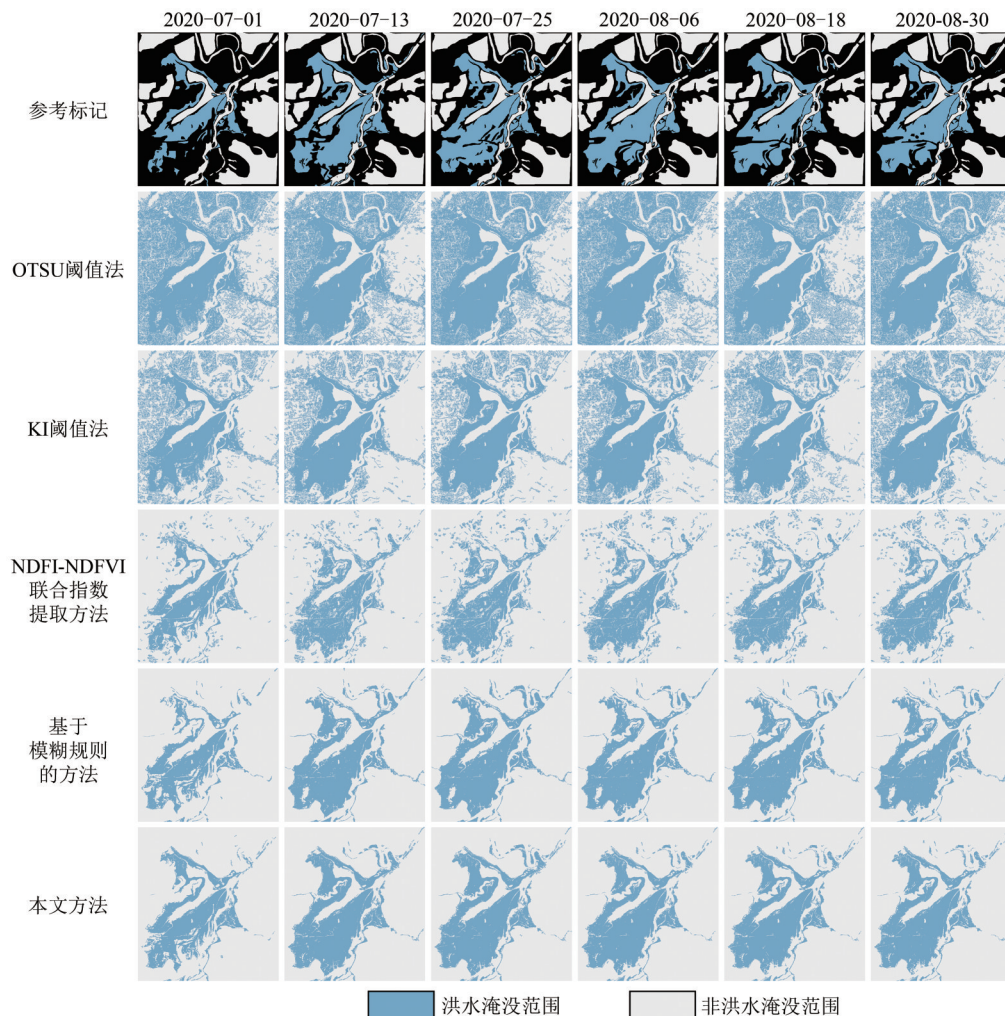
按照对应论文所提的洪水提取步骤进行操作，并使用了作者推荐的参数设置。此外，对比方法均以

完全相同的参数设置进行了章节2.3中的预处理和后处理步骤。对比结果与精度展示如图4和表1。



(a) NDFI+NDFVI 与 SREI+SRVEI 指数提取结果对比

(a) Comparison of NDFI+NDFVI and SREI+SRVEI index extraction results



(b) 对比实验提取结果展示

(b) Comparison experiment extraction result display

图4 东洞庭湖流域洪水淹没范围提取结果对比

Fig. 4 Comparison of the extraction results of flood submerged range in the East Dongting Lake Basin

表1 东洞庭湖流域洪水淹没范围提取精度对比

Table 1 Comparison of the extraction accuracy of flood submerged range in the East Dongting Lake Basin

指标		影像日期					
		2020-07-01	2020-07-13	2020-07-25	2020-08-06	2020-08-18	2020-08-30
OTSU 阈值法	F1	67.28	78.50	77.79	77.36	73.84	76.63
	Kappa	48.40	59.05	58.14	58.19	51.28	57.16
	OA	73.56	78.75	78.22	78.29	74.20	77.72
KI 阈值法	F1	79.01	88.66	88.56	85.75	83.83	85.14
	Kappa	68.72	80.10	80.18	75.30	75.01	74.43
	OA	85.75	90.18	90.25	87.77	86.08	87.37
NDFI-NDFVI 联合指数提取方法	F1	91.80	85.21	84.40	86.04	86.48	86.26
	Kappa	88.71	77.04	76.00	78.44	79.29	78.91
	OA	95.50	89.36	88.97	90.11	90.57	90.38
基于模糊规则的方法	F1	90.06	94.44	94.72	93.82	93.42	93.28
	Kappa	86.72	91.10	91.63	90.40	89.92	89.68
	OA	94.94	95.81	96.09	95.58	95.41	95.29
本文方法	F1	96.18	96.98	97.08	96.85	96.98	96.80
	Kappa	94.72	95.04	95.24	94.98	95.23	94.93
	OA	97.89	97.64	97.75	97.65	97.78	97.64

结合图4和表1的目视及定量评价结果可以发现, OTSU 阈值法和KI 阈值法提取精度整体偏低, 即使在添加了本文的后处理步骤后, 淹没范围内仍存在较多孔洞, 结果图中“椒盐噪声”现象十分明显; NDFI-NDFVI 联合指数提取方法使用 *NDFI* 和 *NDFVI* 两个指数及其阈值, 提取出了洪水淹没范围, 但仍存在一定的提取误差, 包括将较多水田和含水量高的矮植被错误地当成了洪水淹没区域, 这主要是因为方法在设计之初没有充分考虑复杂区域的地物特点; 基于模糊规则的方法通过变化指数与洪水期影像的在模糊分类系统中的语义属性限制, 提取出洪水淹没范围, 在添加了本文的后处理过程后提取精度较高, 但存在较多含矮植被的淹没区域的漏提取, 原因在于其变化指数和模糊关系的设定较为简单, 未考虑到复杂洪泛区中植被等地物的后向散射变化。本文提出的基于 *SREI* 和 *SRVEI* 的洪水淹没范围监测方法充分考虑了复杂洪泛区地物分布特点, 可有效降低斑点孔洞、水田的影响, 使得淹没区域与非淹没区域的边界更加清晰平滑, 对洪水淹没范围的提取精度高, 整体提取精度均高于4种对比方法。

4 分析与应用

4.1 东洞庭湖洪灾态势与淹没地物分析

在图4 (b) 的基础上, 将7月1日至8月30日的

洪水淹没范围提取结果进行时序分析, 统计二值图中洪水淹没像素的个数, 乘以经过地形校正的SAR 图像标准几何分辨率可得提取到的水域面积 (图5)。

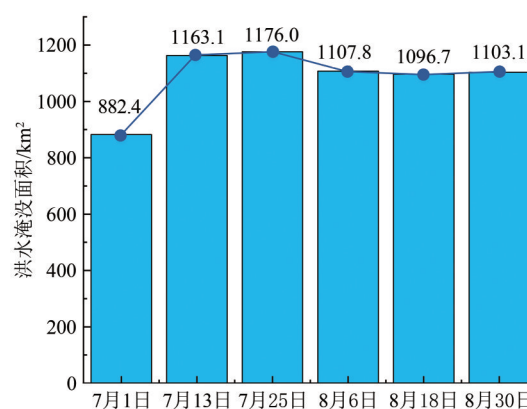


图5 东洞庭湖流域2020年洪水淹没区域统计图

Fig. 5 Statistical map of the flood submerged range in the East Dongting Lake Basin in 2020

结合图5所展示的情况, 自2020年入汛以来, 东洞庭湖流域洪水淹没范围面积在7月稳定增长, 7月上旬淹没范围面积大幅度增长, 在7月下旬达到顶峰。其原因主要在于7月份上游暴雨造成的三峡水库入湖洪峰, 外加7月整月洞庭湖流域的强降雨过程持续时间长, 降水量大, 进一步增加了资、沅、澧三水的入湖流量, 造成东洞庭湖水域面积急剧扩张, 淹没范围增大。在7月25日的结果中,

水域面积达到最大，湖泊面积明显扩张，部分河道明显变宽，湖泊和河道附近也出现了许多细小的过水斑块，上涨的洪水淹没了部分农田，扩大了洪水覆盖范围。进入8月，水域面积有所减小，但幅度不大，其原因是湖南省内仍有小范围降雨，同时受下游高水位顶托，行洪不畅，水位消退十分缓慢。

结合2020年洪灾相关新闻报道与洪水态势分析，本文将7月25日的结果视为汛期洪水最大淹没范围。将7月25日洪水淹没范围提取结果制作掩膜，与地物分类数据以地理位置信息为依据进行配准和矢量叠加，洪水淹没范围掩膜覆盖的地物即为洪水淹没地物（图6），统计分析各类被淹没地物情况如图7。

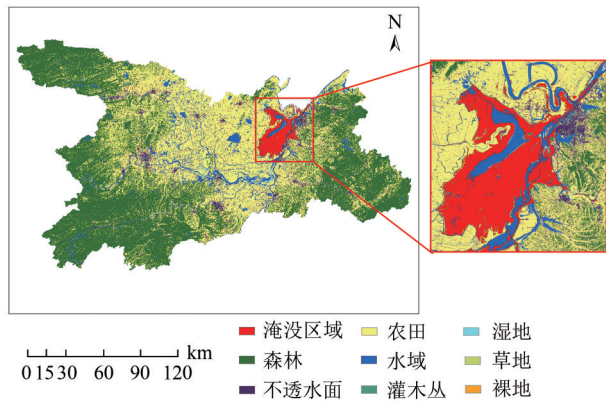


图6 东洞庭湖流域洪水淹没地物分析

Fig. 6 Analysis of flood submerged ground features in the East Dongting Lake Basin

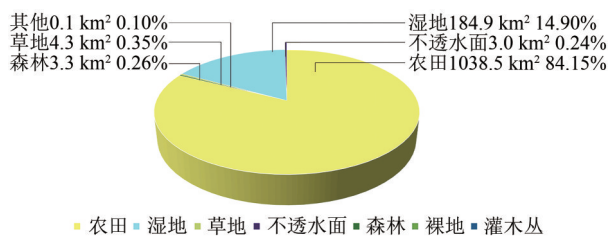


图7 东洞庭湖流域洪水淹没地物面积统计饼状图

Fig. 7 A pie chart of the area statistics of flood submerged features in the East Dongting Lake Basin

根据图7分析可知，东洞庭湖流域洪水淹没地物主要为农田和湿地，淹没农田面积约1038 km²，占被淹没面积的84%，淹没湿地面积约185 km²，占被淹没面积的15%，另有少量森林和城镇的沿湖不透水面被洪水淹没。原因主要是东洞庭湖流域地势平坦，洞庭湖接纳长江和四水的洪水，洪水不断向洞庭湖汇入，急剧增多却无法向下游正常排泄，水位发生上涨时，洪水便向沿岸农田和湿

地蔓延，淹没沿岸滩地。东洞庭湖流域湖泊沿岸淹没区域主要集中在岳阳市。据新闻报道，7月8日，因暴雨造成岳阳县麻塘镇畔湖村20多户70余人被水围困（骆一歌和童滢滢，2020）；7月10日，位于洞庭湖边的巴陵广场景观道与通往君山岛景区的道路已被湖水淹没，廊桥、走道也已经被湖水淹没，只剩下护栏顶部还露在水面，装饰用的路灯几乎被水面拦截了一半（骆一歌等，2020），也验证了该分析结果（http://epaper.xxcb.cn/xxcba/html/2020-07/11/content_3025974.htm[2020-07-11]）。

4.2 东洞庭湖汛期淹没范围年际变化

为分析东洞庭湖流域汛期洪水淹没区域的年际变化，评估2020年的洪涝灾害程度，本实验还收集了2017年—2019年东洞庭湖流域汛期的哨兵一号遥感影像。2017年—2019年的洪水期影像序列为每年7—8月中60天连续观测周期内的5景影像。由于每年汛期时间与汛期情况各不相同，本文对比了历年影像中每景数据的洪水淹没区域提取结果，展示历年影像中洪水淹没区域面积最大的影像（图8），并统计了历年汛期连续5景影像的洪水淹没区域面积作为评估当年汛期洪涝灾害程度的基础数据（图9）。

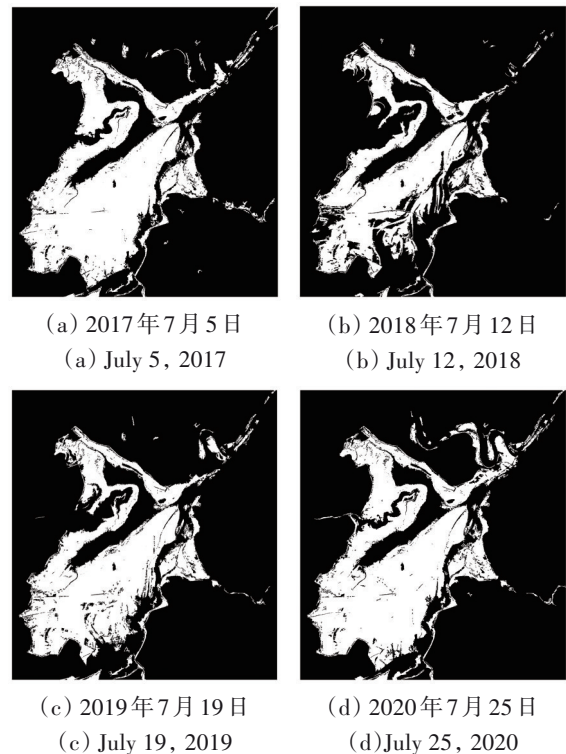


图8 东洞庭湖流域最大淹没范围年际变化

Fig. 8 Interannual variation of the maximum submerged area in the East Dongting Lake Basin

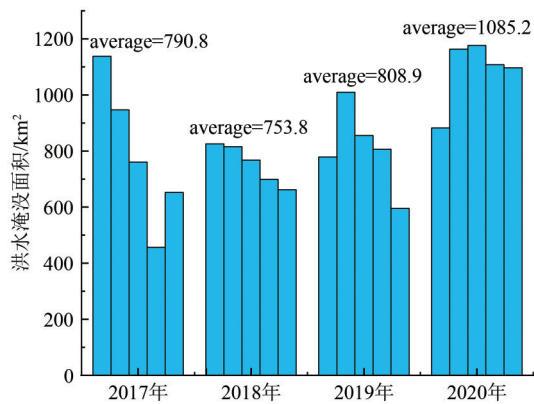


图9 东洞庭湖流域淹没范围年际统计图

Fig. 9 Interannual statistical map of the submerged range in the East Dongting Lake Basin

结合图8的年际最大淹没范围图和图9的统计图分析东洞庭湖流域汛期洪水淹没区域年际变化可知，2017年和2019年东洞庭湖流域汛期洪水淹没情况总体相差不大，属正常年份；2018年洪水淹没区域面积总体偏小，大部分时间在800 km²以下，属枯水年份；2020年洪水淹没区域面积总体偏大，一直在1000 km²以上，相比正常年份，平均淹没面积增大了近40%，淹没范围较大，受灾区域更广。

据2017年和2018年湖南省水资源公报和历年相关新闻报道，2017年全省平均年降水量1499.1 mm，较多年平均偏多3.4%，属平水年份；2018年全省平均年降水量1363.7 mm，较上年偏少9.0%，较多年平均偏少6.0%，属平水偏枯年份；2019年汛期，全省平均降水量974.7 mm，较常年偏多5.6%，较上年偏多22.9% (<https://hn.rednet.cn/content/2019/>

09/30/6082184.html [2019-09-30]) (杨朝文, 2019); 2020年长江流域汛期雨水集中、过程频繁、累计雨量大, 平均降雨量为473.6 mm, 明显多于1998年的364.7 mm, 降水极端性强、短时强度大, 雨水集中期以来52天中有39天出现100 mm以上大暴雨 (<https://hn.rednet.cn/content/2020/07/20/7685115.html> [2020-07-20]) (杨艳和杨朝文, 2020)。即在降水量方面, 2017年、2019年为正常降水年份, 2018年为平水偏枯年份, 2020年为降水偏多年份, 也与本文分析结果相互佐证。

4.3 鄱阳湖洪水淹没区域监测

为了丰富实验数据与内容, 验证该监测方法可以跨越地理距离地应用于不同复杂区域的洪水淹没区域, 本文添加了鄱阳湖的相关实验。与洞庭湖几乎同期, 同样位于长江中下游流域的鄱阳湖也受到了长时间暴雨带来的防汛压力, 2020年7月6日2时, 鄱阳湖湖口水文站水位涨至警戒水位, 达到洪水编号标准, 形成了“鄱阳湖2020年第1号洪水” (<https://m.news.cctv.com/2020/07/06/ARTIoaMs29AVtWX7DhZk2NSp200706.shtml> [2020-07-06]) (郭一淳和刘昀彤, 2020)。补充实验收集了鄱阳湖区域2020年的SAR影像共18张, 其中12张时间跨度为2月至5月的影像用于制作非洪水期参考集, 其余6张为洪水期影像, 采用图1中的洪水淹没范围监测流程, 进行洪水淹没范围提取。实验中, 根据鄱阳湖影像场景中地物特点, th_{SRVEI} 的值选取为0.95, 其余实验设置同上, 实验结果与提取精度展示如图10、图11与表2。

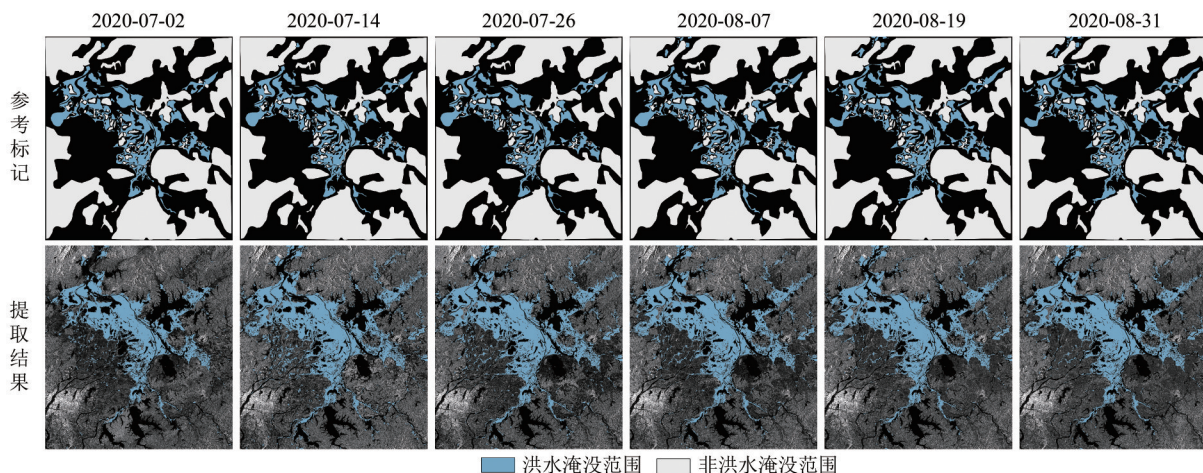


图10 鄱阳湖流域2020年汛期洪水淹没范围展示

Fig. 10 Show of the flood submerged range of Poyang Lake Basin in the 2020 flood season

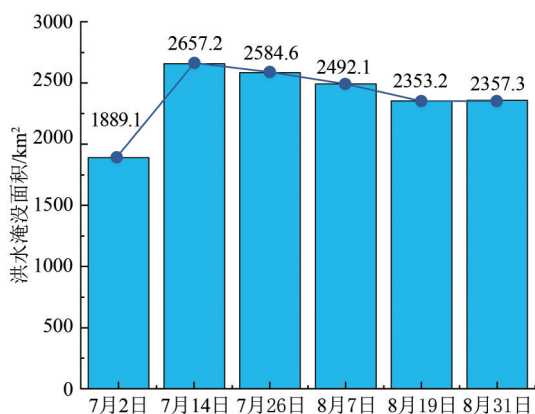


图 11 鄱阳湖流域 2020 年洪水淹没区域统计图

Fig. 11 Statistical map of the flood submerged range in the Poyang Lake Basin in 2020

表 2 鄱阳湖流域洪水淹没范围提取精度

Table 2 The extraction accuracy of flood submerged area in Poyang Lake Basin

指标	影像日期						/%
	2020-07-02	2020-07-14	2020-07-26	2020-08-07	2020-08-19	2020-08-31	
F1	91.43	91.16	91.73	91.38	91.58	91.26	
Kappa	90.05	89.24	90.04	89.55	89.86	89.37	
OA	97.62	96.85	97.18	96.98	97.13	96.89	

5 结论

洪涝灾害作为一种自然灾害，常常造成较严重的生命和财产损失。本文通过设计两个旨在适应复杂区域洪水淹没范围提取的归一化差异指数——SREI 指数和 SRVEI 指数，突出了临时洪水淹没区域和矮植被覆盖的洪水淹没区域，依据同一区域水边植被季候性分布较为稳定的前提获取自适应参数，并根据中国湖泊周围地物特点设计了适应的后处理过程，形成了洪水淹没区域监测的详细流程和通用框架。本文以湖南省东洞庭湖流域为重点研究区域进行了所提方法与其他四种方法的对比验证，实验表明本文方法用户依赖性低，阈值获取简单可靠，且可初步区分不同属性的淹没范围。在此基础上，通过数据协同分析的方式对东洞庭湖流域 2020 年洪涝灾害态势和洪水淹没地物进行了较为全面的分析和评估；另外，以同一非洪水期参考集对 2017 年—2019 年东洞庭湖流域的洪水期影像进行了洪水淹没区域提取，进行了汛期洪水淹没区域年际分析，验证了方法

可跨越时间距离；最后，添加了鄱阳湖相关实验以验证方法可跨越地理距离，应用场景广泛。

本文的工作可为灾情评估和筹建规划提供一定的参考，对资源环境的监测、洪灾的预防、灾后救援等具有重大的现实意义。SAR 遥感数据、光学遥感数据、高程数据等多源数据的融合，可有效运用于洪涝灾害的监测评估，但在实际应急方面，卫星影像获取效率仍显不足。在今后的工作中，可加入无人机、地面站点等多源平台的数据，弥补洪涝灾害期间卫星影像时间分辨率有限的缺点，更为综合高效地监测、评估和预测洪涝灾害，形成空地一体的洪涝灾害监测评估预警系统，为抗洪救灾工作提供更加科学和全面的依据和保障。

参考文献 (References)

- Amitrano D, Di Martino G, Iodice A, Riccio D and Ruello G. 2018. Unsupervised rapid flood mapping using sentinel-1 GRD SAR images. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 56(6): 3290-3299 [DOI: 10.1109/TGRS.2018.2797536]
- Boni G, Ferraris L, Pulvirenti L, Squicciarino G, Pierdicca N, Candela L, Pisani A R, Zoffoli S, Onori R, Proietti C and Pagliara P. 2016. A prototype system for flood monitoring based on flood forecast combined with COSMO-SkyMed and Sentinel-1 Data. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 9(6): 2794-2805 [DOI: 10.1109/JSTARS.2016.2514402]
- Chen X W. 1997. The application of remote sensing and geographical information system (GIS) in flood damage analysis. *Journal of Hydraulic Engineering*, (3): 70-73 (陈秀万. 1997. 遥感与 GIS 在洪水灾情分析中的应用. *水利学报*, (3): 70-73) [DOI: 10.13243/j.cnki.slxb.1997.03.011]
- Chini M, Hostache R, Giustarini L and Matgen P. 2017. A hierarchical split-based approach for parametric thresholding of SAR images: flood inundation as a test case. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 55(12): 6975-6988 [DOI: 10.1109/TGRS.2017.2737664]
- Chini M, Pelich R, Pulvirenti L, Pierdicca N, Hostache R and Matgen P. 2019. Sentinel-1 InSAR coherence to detect floodwater in urban areas: Houston and Hurricane Harvey as a test case. *Remote Sensing*, 11(2): 107 [DOI: 10.3390/rs11020107]
- Cian F, Marconcini M and Ceccato P. 2018. Normalized difference flood index for rapid flood mapping: taking advantage of EO big data. *Remote Sensing of Environment*, 209: 712-730 [DOI: 10.1016/j.rse.2018.03.006]
- Clement M A, Kilsby C G and Moore P. 2018. Multi-temporal synthetic aperture radar flood mapping using change detection. *Journal of Flood Risk Management*, 11(2): 152-168 [DOI: 10.1111/jfr3.12303]
- Gao W, Shen Q, Li M F and Hou J D. 2018. Analysis of time-serial monitoring of flood extent based on multi-source remote sensing data. *Geomatics and Spatial Information Technology*, 41(7): 8-10, 14 (高伟, 沈秋, 李梦瑶, 侯俊东. 2018. 基于多源遥感数据的洪

- 涝淹没范围时序监测分析. 测绘与空间地理信息, 41(7): 8-10, 14 [DOI: 10.3969/j.issn.1672-5867.2018.07.003]
- Giustarini L, Hostache R, Matgen P, Schumann G J P, Bates P D and Mason D C. 2013. A change detection approach to flood mapping in urban areas using TerraSAR-X. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 51(4): 2417-2430 [DOI: 10.1109/TGRS.2012.2210901]
- Gong P, Chen B, Li X C, Liu H, Wang J, Bai Y Q, Chen J M, Chen X, Fang L, Feng S L, Feng Y J, Gong Y L, Gu H, Huang H B, Huang X C, Jiao H Z, Kang Y D, Lei G B, Li A N, Li X T, Li X, Li Y C, Li Z L, Li Z D, Liu C, Liu C X, Liu M C, Liu S G, Mao W L, Miao C H, Ni H, Pan Q S, Qi S H, Ren Z H, Shan Z R, Shen S Q, Shi M J, Song Y M, Su M, Ping Suen H, Sun B, Sun F D, Sun J, Sun L, Sun W Y, Tian T, Tong X H, Tseng Y, Tu Y, Wang H, Wang L, Wang X, Wang Z M, Wu T H, Xie Y W, Yang J, Yang J, Yuan M, Yue W Z, Zeng H D, Zhang K, Zhang N, Zhang T, Zhang Y, Zhao F, Zheng Y C, Zhou Q M, Clinton N, Zhu Z L and Xu B. 2020. Mapping essential urban land use categories in China (EU-LUC-China): preliminary results for 2018. *Science Bulletin*, 65(3): 182-187 [DOI: 10.1016/j.scib.2019.12.007]
- Greifeneder F, Wagner W, Sabel D and Naeimi V. 2014. Suitability of SAR imagery for automatic flood mapping in the lower Mekong basin. *International Journal of Remote Sensing*, 35(8): 2857-2874 [DOI: 10.1080/01431161.2014.890299]
- Guo Y C and Liu Y T. 2020. The No. 1 flood of 2020 in Poyang Lake, Jiangxi is formed. CCTV news. (2020-07-06).<https://m.news.cctv.com/2020/07/06/ARTI0aMs29AVtWX7DhZk2NSp200706.shtml> (郭一淳, 刘昫彤. 2020. 江西鄱阳湖2020年第1号洪水形成. 央视新闻. (2020-07-06). <https://m.news.cctv.com/2020/07/06/ARTI0aMs29AVtWX7DhZk2NSp200706.shtml>)
- Huang P, Xu X H and Li D L. 2018. Rapid extraction of water area in Poyang Lake based on Sentinel-1 satellite images. *Journal of Water Resources Research*, 7(5): 483-491 (黄萍, 许小华, 李德龙. 2018. 基于Sentinel-1卫星数据快速提取鄱阳湖水体面积. 水资源研究, 7(5): 483-491) [DOI: 10.12677/JWRR.2018.75054]
- Kittler J and Illingworth J. 1986. Minimum error thresholding. *Pattern Recognition*, 19(1): 41-47 [DOI: 10.1016/0031-3203(86)90030-0]
- Kuenzer C, Guo H D, Schlegel I, Tuan V Q, Li X W and Dech S. 2013. Varying scale and capability of Envisat ASAR-WSM, TerraSAR-X Scansar and TerraSAR-X Stripmap data to assess urban flood situations: a case study of the Mekong delta in can tho province. *Remote Sensing*, 5(10): 5122-5142 [DOI: 10.3390/rs5105122]
- Li N, Wang R, Liu Y B, Du K N, Chen J Q and Deng Y K. 2014. Robust river boundaries extraction of dammed lakes in mountain areas after Wenchuan Earthquake from high resolution SAR images combining local connectivity and ACM. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 94: 91-101 [DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2014.04.020]
- Li Y, Martinis S, Wieland M, Schlaffer S and Natsuaki R. 2019. Urban flood mapping using SAR intensity and interferometric coherence via Bayesian network fusion. *Remote Sensing*, 11(19): 2231 [DOI: 10.3390/rs11192231]
- Liang J Y and Liu D S. 2020. A local thresholding approach to flood water delineation using Sentinel-1 SAR imagery. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 159: 53-62 [DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2019.10.017]
- Liu Z F, Yao Z J and Wang R. 2016. Assessing methods of identifying open water bodies using Landsat 8 OLI imagery. *Environmental Earth Sciences*, 75(10): 873 [DOI: 10.1007/s12665-016-5686-2]
- Long S, Fatoyinbo T E and Policelli F. 2014. Flood extent mapping for Namibia using change detection and thresholding with SAR. *Environmental Research Letters*, 9(3): 035002 [DOI: 10.1088/1748-9326/9/3/035002]
- Luo Y G, Li Q H and Wang L. 2020-07-11(A03). The water of Dongting Lake "occupies" hundreds of meters of Baling Square. *Xiaoxiang Morning News* (骆一歌, 李琼皓, 王亮. 2020-07-11(A03). 洞庭湖水"侵占"数百米巴陵广场. 潇湘晨报)
- Luo Y G and Tong Y Y. 2020-07-11(A03). Search and rescue trapped people in the dark in the water. *Xiaoxiang Morning News* (骆一歌, 童滢滢. 2020-07-11(A03). 水中摸黑搜救救出被困人员. 潇湘晨报)
- Martinis S, Kersten J and Twele A. 2015a. A fully automated TerraSAR-X based flood service. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 104: 203-212 [DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2014.07.014]
- Martinis S, Kuenzer C, Wendleder A, Huth J, Twele A, Roth A and Dech S. 2015b. Comparing four operational SAR-based water and flood detection approaches. *International Journal of Remote Sensing*, 36(13): 3519-3543 [DOI: 10.1080/01431161.2015.1060647]
- Martinis S and Rieke C. 2015. Backscatter analysis using multi-temporal and multi-frequency SAR data in the context of flood mapping at River Saale, Germany. *Remote Sensing*, 7(6): 7732-7752 [DOI: 10.3390/rs70607732]
- Otsu N. 1978. Discriminant and least square threshold selection//*Proc 4IJCPR*. [s.l.]: [s.n.], 592-596
- Pulvirenti L, Pierdicca N, Chini M and Guerriero L. 2011. An algorithm for operational flood mapping from Synthetic Aperture Radar (SAR) data using fuzzy logic. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 11(2): 529-540 [DOI: 10.5194/nhess-11-529-2011]
- Rao P Z, Jiang W G, Wang X Y and Chen K. 2019. Flood disaster analysis based on MODIS data-Taking the flood in Dongting Lake area in 2017 as an example. *Journal of Catastrophology*, 34(1): 203-207 (饶品增, 蒋卫国, 王晓雅, 陈坤. 2019. 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. 灾害学, 34(1): 203-207) [DOI: 10.3969/j.issn.1000-811X.2019.01.037]
- Shen X Y, Anagnostou E N, Allen G H, Brakenridge G R and Kettner A J. 2019. Near-real-time non-obstructed flood inundation mapping using synthetic aperture radar. *Remote Sensing of Environment*, 221: 302-315 [DOI: 10.1016/j.rse.2018.11.008]
- Sun F D, Sun W X, Chen J and Gong P. 2012. Comparison and improvement of methods for identifying waterbodies in remotely sensed imagery. *International Journal of Remote Sensing*, 33(21): 6854-6875 [DOI: 10.1080/01431161.2012.692829]
- Sun W W, Yang G, Chen C, Chang M H, Huang K, Meng X Z and Liu L Y. 2020. Development status and literature analysis of China's earth observation remote sensing satellites. *Journal of Remote Sensing*, 24(5): 479-510 (孙伟伟, 杨刚, 陈超, 常明会, 黄可, 孟祥珍, 刘良云. 2020. 中国地球观测遥感卫星发展现状及文献分析. 遥感学报, 24(5): 479-510) [DOI: 10.11834/jrs.20209464]
- Tong X H, Luo X, Liu S G, Xie H, Chao W, Liu S, Liu S J, Makhinova A N, Makhinova A F and Jiang Y Y. 2018. An approach for flood monitoring by the combined use of Landsat 8 optical imagery and

- COSMO-SkyMed radar imagery. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 136: 144-153 [DOI: 10.1016/j.isprsjrs.2017.11.006]
- Twle A, Cao W X, Plank S and Martinis S. 2016. Sentinel-1-based flood mapping: a fully automated processing chain. *International Journal of Remote Sensing*, 37(13): 2990-3004 [DOI: 10.1080/01431161.2016.1192304]
- Wang J P, Liu T, Yu Z Q, Hu T G, Zhang D R, Xun D D and Wang D H. 2016. A research on town flood information rapid extraction based on COSMO-SkyMed and SPOT-5. *Remote Sensing Technology and Application*, 31(3): 564-571 (王嘉芑, 刘婷, 俞志强, 胡潭高, 张登荣, 寻丹丹, 王冬海). 2016. 基于COSMO-SkyMed和SPOT-5的城镇洪水淹没信息快速提取研究. *遥感技术与应用*, 31(3): 564-571 [DOI: 10.11873/j.issn.1004-0323.2016.3.0564]
- Wang Y B, Ma J, Xiao X M, Wang X X, Dai S Q and Zhao B. 2019. Long-term dynamic of Poyang Lake surface water: a mapping work based on the Google Earth Engine cloud platform. *Remote Sensing*, 11(3): 313 [DOI: 10.3390/rs11030313]
- Wang Z H, Li G and Jiang X. 2020. Flooded area detection method based on fusion of optical and SAR remote sensing images. *Journal of Radars*, 9(3): 539-553 (王志豪, 李刚, 蒋骁). 2020. 基于光学和SAR遥感图像融合的洪灾区域检测方法. *雷达学报*, 9(3): 539-553 [DOI: 10.12000/JR19095]
- Yang C W. 2019. Hunan Province successfully avoided 567 geological disasters during the flood season (April-September) of 2019. *Red Net*. (2019-09-30). <https://hn.rednet.cn/content/2019/09/30/6082184.html> (杨朝文). 2019. 2019年汛期(4月—9月)湖南省成功避让地质灾害567起. *红网*. (2019-09-30). <https://hn.rednet.cn/content/2019/09/30/6082184.html>
- Yang Y and Yang C W. 2020. In-depth interpretation: what is the difference between the flood situation in Hunan in 2020 and 1998? How will it develop in the future? *Red Net*. (2020-07-20). <https://hn.rednet.cn/content/2020/07/20/7685115.html> (杨艳, 杨朝文). 2020. 深度解读: 2020年湖南汛情与1998年有哪些不同? 未来如何发展? *红网*. (2020-07-20). <https://hn.rednet.cn/content/2020/07/20/7685115.html>

Flood monitoring and analysis based on time-series SAR image for complex area

LI Congyu, LIU Jiaqi, LIU Xinxin, LI Shutao, KANG Xudong

School of Electrical and Information Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China

Abstract: Flood disasters are a great threat to the national economy and people's property along the lakes and rivers in China. Synthetic Aperture Radar (SAR) adopts active imaging methods that can realize all-weather imaging and ensure continuous observation of flood disaster areas under severe weather, such as heavy rains and clouds. The current flood-monitoring methods based on SAR images often have problems, such as difficulty in threshold selection, high computational cost, or inefficient use of time-series information. Aiming at the above problems, this paper makes full use of information from time-series SAR image sequence to design an effective and stable method of monitoring flood, which can be adapted to complex areas.

Through preprocessing and statistical analysis of the image sequence, two normalized difference indices including submerged range extraction index and submerged range in vegetation area extraction index are designed and applied to calculate the candidate area of flood inundation. Then, the adaptive selection method of threshold for flood extraction is given based on the stability assumption of vegetation seasonal distribution in the same area. Finally, considering the characteristics of the surrounding features of the lakes in China, a post-processing process is designed. The process involves removing spots and holes, excluding areas with large slopes and filtering out fragmented areas with large rectangular degrees. Post-processing is conducted to optimize the extraction area for the final results of flood-inundation range.

In the experiment, this paper takes the East Dongting Lake basin as the main research area to verify the effectiveness of the proposed method by comparing the extraction accuracy with the other four methods. Experimental results prove that the overall extraction accuracy of the proposed method is higher than that of all comparative methods. To achieve the purpose of flood-disaster monitoring and evaluation, an analysis of the flood-disaster situation in the East Dongting Lake Basin in 2020 and an analysis of flood submerged land cover types are conducted. The method has also been successfully applied to the data of the East Dongting Lake basin in previous years and the Poyang Lake basin in that the method can be applied across time and space.

Based on the time-series SAR image sequence, this paper proposes an effective method, forms a detailed process flow, and constructs a general framework for flood monitoring. The proposed method has advantages of simple parameter setting and low user dependence on threshold determination. Experiments show that the method has high extraction accuracy of submerged areas with good robustness and versatility. The proposed method can be applied to different flood-monitoring scenarios across time and space and can preliminarily distinguish different attributes of submerged areas. Thus, a certain reference is provided for flood-disaster monitoring, assessment, and early warning in other regions.

Key words: flood disaster, synthetic aperture radar, time series monitoring, hydrological remote sensing, SAR, Dongting Lake

Supported by National Natural Science Foundation of China(No. 61890962,61901166); Fund of Key Laboratory of Visual Perception and Artificial Intelligence of Hunan Province (No. 2018TP1013)