

基于高分一号影像的武汉市洪涝遥感监测与分析

张丽文^{1, 2} 梁益同^{1, 2} 李兰¹

(1 武汉区域气候中心, 武汉 430070; 2 江汉平原生态气象遥感监测技术协同创新中心, 荆州 434025)

摘要: 2016年6月30日—7月6日, 强降雨引发了武汉及其邻近地区多处的城市内涝及河堤溃坝等严重洪涝灾害。以洪涝前后高分一号(GF-1)WFV影像和2015年30 m土地覆盖类型图为数据源, 在分析典型地物与洪涝期不同水体的GF-1光谱曲线特征的基础上, 对比NDWI阈值法与面向对象分析法提取研究区各类水体信息的适宜性, 采用最优算法对武汉市洪涝灾害范围进行识别和判定。结果显示, 面向对象分类法对洪涝期不同城市水体类型的遥感提取结果总体上要优于水体指数阈值法提取结果; 城市郊区由河水漫堤和河堤溃坝等原因导致的洪涝淹没范围可以通过GF-1 WFV数据有效地进行识别。该研究成果可以对国产高分一号影像在城市洪涝灾害监测气象业务服务提供科学参考。

关键词: 高分一号, 水体识别, NDWI, 面向对象, 洪涝监测

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2018.05.007

Characteristic Analysis of Flood Monitoring in Wuhan City Based on GF-1 Remote Sensing Data

Zhang Liwen^{1, 2}, Liang Yitong^{1, 2}, Li Lan¹

(1 Wuhan Regional Climate Center, Wuhan, 430074 2 Collaborative Innovation Center of Remote Sensing Technology in Ecological and Meteorological Monitoring in the Jiangnan Plain, Jingzhou 434025)

Abstract: Severe flooding and river embankment dam collapse in Wuhan City was caused by heavy rainfall from June 30 to July 6, 2016. In this study, GF-1 WFV images before and after the floods were used to analyze the spectral characteristics of water bodies during the flooding period and to compare the suitability of this data for extracting various types of information about the water bodies using NDWI thresholds and object-oriented classification. An optimal algorithm was adopted for monitoring the flood disaster. The results showed that the object-oriented classification method was superior to the NDWI threshold method for extracting the results of different types of urban water bodies during the flood season. The flood submergence area caused by flooding of rivers and river embankments was effectively identified from GF-1 WFV images using object-oriented classification methods. The results provide a reference for the application of GF-1 image analysis to monitor urban flood disasters.

Keywords: GF-1 WFV, flood monitoring, NDWI, object-oriented, water identification

0 引言

城市洪水和内涝作为我国当前主要的城市生态风险与灾害之一受到公众、学界与政府部门的广泛重视^[1]。城市的防洪抗涝能力取决于城市水生态循环系统的结构和完善程度^[2]。随着城市化进程的不断发展, 城市水生态失衡问题日渐突出^[3], 一旦在雨季出现强降水天气, 就会频繁出现严重的城市洪涝问题, 严重威胁人身、财产安全。受到自然地理环境及气候条件、“雨岛效应”、城市快速发展给水生态环境带来的负面问题等多种因素的综合作用^[4], 武汉城市湿地防洪蓄水生态功能下降、城市洪涝灾害频繁。在此背景下, 提高洪涝灾害监测与评估的时效性和精度是

加强洪涝灾害管理的迫切需求^[5]。

卫星遥感监测技术因具有客观、时效性强、覆盖范围广且不受地面监测条件影响等优势, 在对洪涝灾害开展及时准确的动态监测及影响评估中及为国家相关部门提供重要科学决策数据中发挥着重要作用^[6]。不同类型的遥感数据源在洪涝灾情信息提取中具有各自的优势和特点, 应用比较广泛的光学数据主要有风云气象卫星、MODIS、Landsat、SPOT、环境减灾卫星等, 微波遥感数据主要有SAR、ASAR、SSM/I、MRI等^[5, 7-9]。以上中、低等分辨率卫星常用于省域或区域范围洪涝, 难以捕捉城市尺度细小洪涝灾情、满足行业应用精度要求。2013年4月国产高分一号卫星成功发射投入使用, 为城市尺度洪涝监测打开了全新的局面。目前针对GF-1影像进行水体信息识别的研究较多, 立足于城市洪涝水体监测的案例尚不多见。水

收稿日期: 2018年6月16日; 修回日期: 2018年7月27日

第一作者: 张丽文(1985—), Email: luomarsp2013@163.com

体作为洪涝灾害的基本载体，但洪涝淹没区有别于纯水体区，淹没水深及淹没覆盖土地类型的不同，往往导致洪涝期水体光谱信息较非灾期更为复杂。本文旨在以2016年6月30日—7月6日梅雨期强降水导致的武汉市洪涝灾害为例，开展高分一号影像洪涝期不同水体光谱特征分析及水体识别适宜度性对比，弥补现有研究与应用空白。

1 研究背景

1.1 研究区概况

本文以武汉市边界到达的四方区域为研究区域，包括武汉市主城区、新洲区、黄陂区、蔡甸区、东西湖区、江夏区、汉南区及其接壤的周边地区，如2016年6月14日GF-1 WFV 4、3、1（近红外、红、蓝）三波段合成图（图1）所示。研究对象为区内地表水体，包括长江及其支流等河流、湖泊、养殖水域、降雨导致的淹没区域及其他形式的小面积水体。

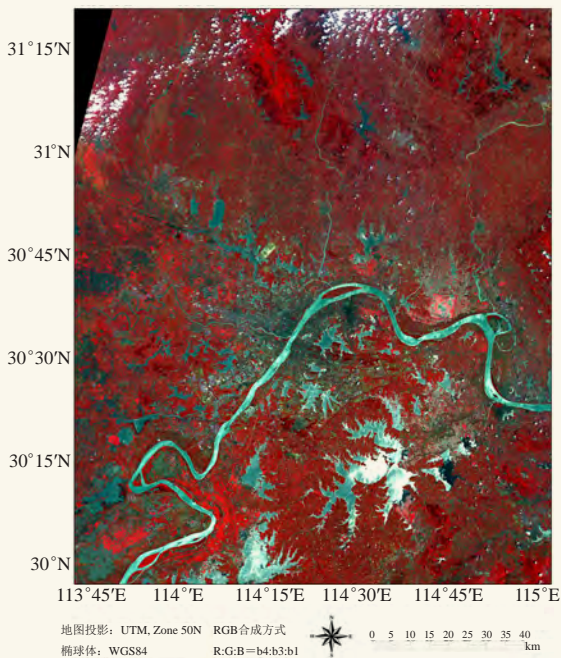


图1 研究区GF1-WFV多通道合成图

Fig. 1 GF1-WFV multi-channel composite map in the study area

1.2 强降雨过程

对2016年梅雨期（6月18日入梅，7月21日出梅）武汉市5个国家站（蔡甸、黄陂、新洲、江夏和武汉）日降雨量统计显示，6月30—7月6日（以下简称7日）武汉市出现大范围连续强降水过程（图2），据湖北省气象灾害评估报告（第9卷第2期）记载，江夏、新洲等站7日过程雨量突破历史极值。同时对武汉市及周边地区国家站和区域自动站降雨观测数据

进行IDW空间插值，以显示7日累积面雨量空间分布特征。由图3可知，武汉市为强降雨中心所在地，武汉中心城区、江夏区、新洲区、黄陂区及蔡甸区大部地区7日的累积降雨量均超500 mm，局地超700 mm。此次强降雨过程造成以上地区出现严重的城市内涝和河流洪涝灾害。

2 数据与方法

2.1 数据

根据气象数据的分析，选择强降雨过程前后时间最近且为晴空条件的2016年6月14日和7月9日的GF-1 WFV多光谱卫星影像作为本研究遥感数据源。GF-1卫星搭载了WFV1、WFV2、WFV3和WFV4四个WFV传感器，同时成像的幅宽可达800 km左右。WFV传感器的主要参数如表1所示。

为排除不同传感器及天气差异造成的影响，遥感数据的预处理过程包括：首先对来源及时相不同的洪涝前后两景GF-1 WFV影像进行辐射定标，再通过FLAASH大气校正方法得到地表反射率。以15 m Landsat8 OLI全色影像和30 m DEM为基准，对洪涝前后两景影像进行正射校正以消减地理变形和偏差，使两幅需对比的影像空间高度匹配。最后，选取研究区矢量边界，对多时相影像进行裁剪，获得研究区内洪水发生前、发生时的影像及水体动态变化范围。以上所有GF-1 WFV数据的预处理过程均在ENVI5.3和ArcGIS平台上实现。

同时，还结合研究区乡镇界及以GlobeLand30产品为基础更新的2015年30 m土地覆盖类型栅格数据开展灾情评估。

2.2 方法

2.2.1 水体类型光谱特征分析

以7月6日研究区范围预处理后的GF-1影像为例，选择农田、林地、建筑物、裸地、云、水体及阴影7种地物类型（其中水体又细分成河流、湖泊、养殖池塘及盐水区4类）的典型样地作为感兴趣区，统计GF-1影像4通道平均地表反射率绘制光谱特征曲线。如图4a所示，农田和林地都具有相似而典型的植被光谱特征，即低蓝光和红光波段反射、较高绿光反射和极高的近红外反射，且四个通道的反射率都是农田大于林地。建筑物及裸地信息随着波段数的增加，反射率不断增加，但变幅较植被要小。和其他地类相比，云在各个通道都有较高的反射率，在近红外通道达到最高。而水体信息，则独特地表现出在从绿光通道到近红外通道反射率逐渐下降的趋势。在近红外波段（B4），水体信息与其他地物信息反射率差距最

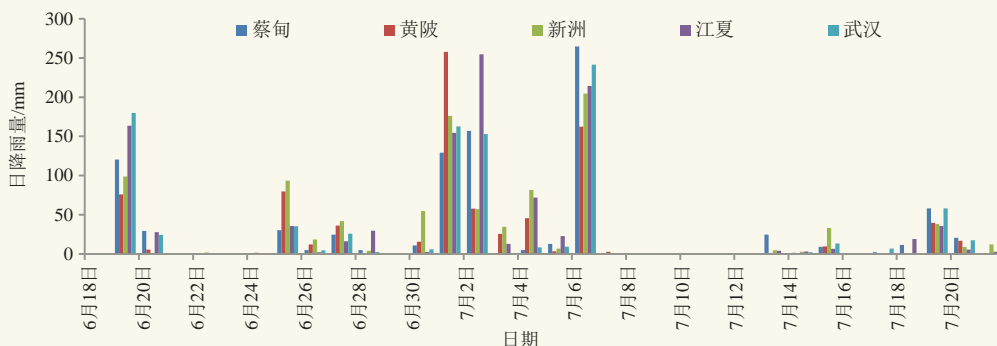


图2 武汉市5个国家站2016年梅雨期日降雨量统计分析

Fig. 2 Daily rainfall characteristics of five national meteorological stations in Wuhan municipality during the rainy season in 2016

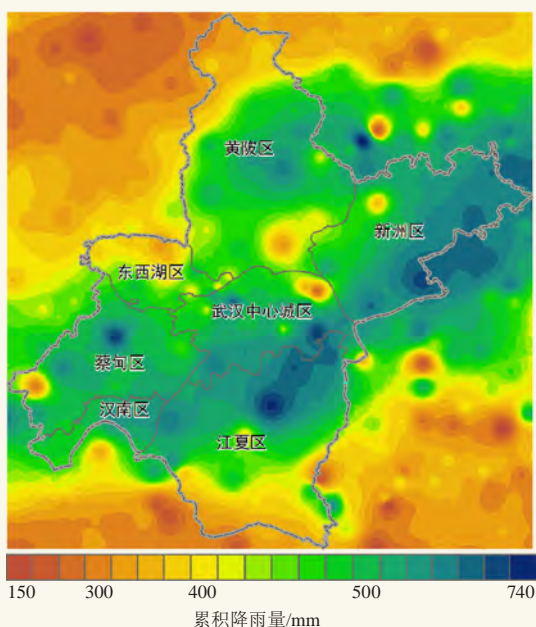


图3 研究区2016年6月30日—7月6日累积降雨量空间分布图
Fig. 3 Spatial distribution of cumulative rainfall during 30 June to 6 July in 2016 in the study area

表1 WFV 传感器的主要参数

Table 1 Main parameters of remote sensors

波段	波长范围/ μm	空间分辨率/m
B1 (蓝)	0.45~0.52	16
B2 (绿)	0.52~0.59	16
B3 (红)	0.63~0.69	16
B4 (近红外)	0.77~0.89	16

大。图4b为洪涝时期(7月9日)不同水体类型GF-1影像四波段光谱曲线,可知洪涝发生时,由于水中泥沙含量明显增加,且受到不同深度及不同淹没土地类型的影响,洪涝水体光谱特性变得复杂。

2.2.2 水体遥感识别方法

洪水遥感监测的关键技术在于水体的识别技术。根据GF-1 WFV波段设置及数据特点,选择操作容易

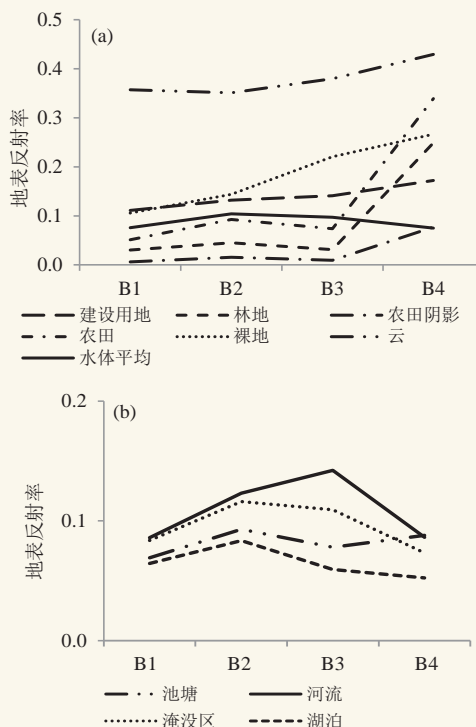


图4 多种地物 (a) 及洪涝期不同水体 (b) GF-1 WFV光谱特征

Fig. 4 Spectrum characteristics of GF-1 WFV for various land covers (a) and water bodies during the flooding period (b)

的归一化水体指数 (NDWI) 阈值法和研究较为热门的面向对象方法来研究不同水体提取方法监测此次区域洪涝灾害的适用性,并以GF-1 WFV影像4、3、1通道组合的RGB合成图为目的参考,评价对比两种方法提取的水体分布效果。选择最优方法提取研究区洪涝前后水体分布,得出洪涝分布及面积。

1) NDWI 阈值法

NDWI是根据水体在可见光与近红外波段的波谱特点,利用绿波段与近红外波段的比值构建而成^[10]。相比于其他指数如归一化差值植被指数 (NDVI) 和

地表水分指数 (LSWI) 等, NDWI 可以最大程度地抑制植被信息, 突出水体信息。式 (1) 为 NDWI 的计算公式, 其中, ρ_{Green} 和 ρ_{Nir} 分别对应 GF-1 WFV 数据的绿光通道 (B2) 和近红外通道 (B4) 的地表反射率。

$$NDWI = (\rho_{Green} - \rho_{Nir}) / (\rho_{Green} + \rho_{Nir}) \quad (1)$$

对预处理后的 GF-1 影像进行 NDWI 运算并对其进行灰度分布统计, 根据灰度分布曲线反复调试得到相应阈值, 实现普适用于各类水体的水陆最佳分割, 将 $NDWI \geq 0.11$ 作为 6 月 14 日影像水体提取阈值; 将 $NDWI \geq 0.28$ 作为 7 月 9 日影像水体提取阈值。

2) 面向对象的水体识别法

本文采用基于规则的面向对象分类来实现洪涝前后水体提取, 其基本步骤是先对影像进行尺度分割, 然后根据水体的光谱、纹理等特征进行对象特征选取, 最后建立规则得到分类结果。最优尺度分割的效果是使分割后的多边形对象和地物边界基本吻合, 以至于分割对象既不破碎也不过于集中^[11]。经多次尝试, 确定最优分割尺度为 38、合并阈值为 60, 同时建立以下分类规则: 6 月 14 日 $NDWI \geq 0.10$ 且近红外通道平均反射率在 0.174~0.218 之间时有最佳水体识别效果; 7 月 9 日 $NDWI \geq 0.14$ 且近红外通道平均反射率在 0.040~0.092 时有较理想的水体识别效果。其中, 近红外通道平均阈值由各类水体目视解译样本感兴趣区统计得到。

2.2.3 洪涝遥感监测方法

洪水遥感监测主要是以灾前、灾后多时相遥感数据为主, 辅以灾情信息、气象数据和舆情信息等数据, 分别提取灾前、灾后水体范围, 然后利用变化检测方法开展灾害范围动态监测, 同时结合土地覆盖类型数据, 解译洪水淹没类型及面积等信息^[5]。

2.2.4 技术流程

综上, 总结本研究的技术流程 (图 5) 主要包括: 在站点降雨数据统计分析的基础上, 选择强降水导致的洪涝灾情前后多时相高质量高分一号影像, 经过一系列影像预处理后, 首先分析典型地物及典型洪涝期水体类型光谱、纹理特征, 进而确定 NDWI 阈值法和面向对象分类法提取水体的阈值及法则, 通过目视对比选择最优方法提取的灾前灾后水体范围做变化检测, 得到洪涝空间范围, 最后叠加最新土地覆盖类型数据, 统计洪涝淹没土地覆盖类型及其面积, 对灾情进行特征分析及评估。

3 结果分析与讨论

3.1 不同水体识别方法结果对比

在 ArcGIS 平台生成随机检验样点, 以提取总精

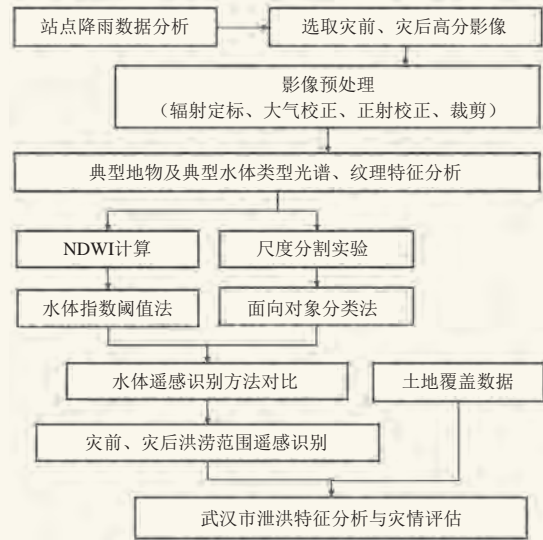


图 5 技术流程图
Fig.5 Technical flow chart

度为指标开展两种方法在 5 种洪涝期水体识别适用性精度评价, 提取总精度定义为正确提取的水体像素个数占总样本像素个数的百分比^[12], 不同方法洪涝期不同水体类型提取总精度统计见表 2。通过目视解译对比可知, 面向对象分类法及 NDWI 阈值法对主要河流和典型湖泊水体的提取范围很一致, 都接近于真实水体分布, 而在河流分支、养殖水域及淹没区三种类型中存在一定差异 (图 6)。对于河流分支等细长型水体, 还有光谱信息复杂的泛洪淹没区, 面向对象分类法识别精度要明显好于 NDWI 阈值法, 识别出的河流分支连贯性和完整性好, 没有出现河流断面的情况, 识别的淹没区集中成片, 避免了阈值法得到的图斑碎片化结果的产生。受到混合像元及面向对象法中尺度分割和对象合并的影响, 两种方法对养殖水域 (图 7) 的提取精度均较低, 面积小且有其他地物干扰的养殖区在两种方法中均出现漏提 (如图 7b 和 7c 中白色框区域), 集中养殖区面向对象分类法提取效果阈值法但剔除水域内的田坎等地类的效果不佳 (如图 7b 和 7c 中黄色框区域)。但总体而言, 面向对象分类法对洪涝期各种水体类型识别效果更佳, 所以本文最终采用面向对象分类法识别的灾前、灾后水体范围作

表 2 洪涝期水体识别精度评价表

Table 2 Accuracy evaluation table for water bodies in the flooding period

方法	提取总精度 (%)				
	主要河流	河流分支	典型湖泊	养殖水域	淹没区
NDWI 阈值法	98.2	71.9	92.0	41.9	72.0
面向对象分类法	100	87.5	97.3	61.3	90.7
检验样本数	55	32	75	31	75

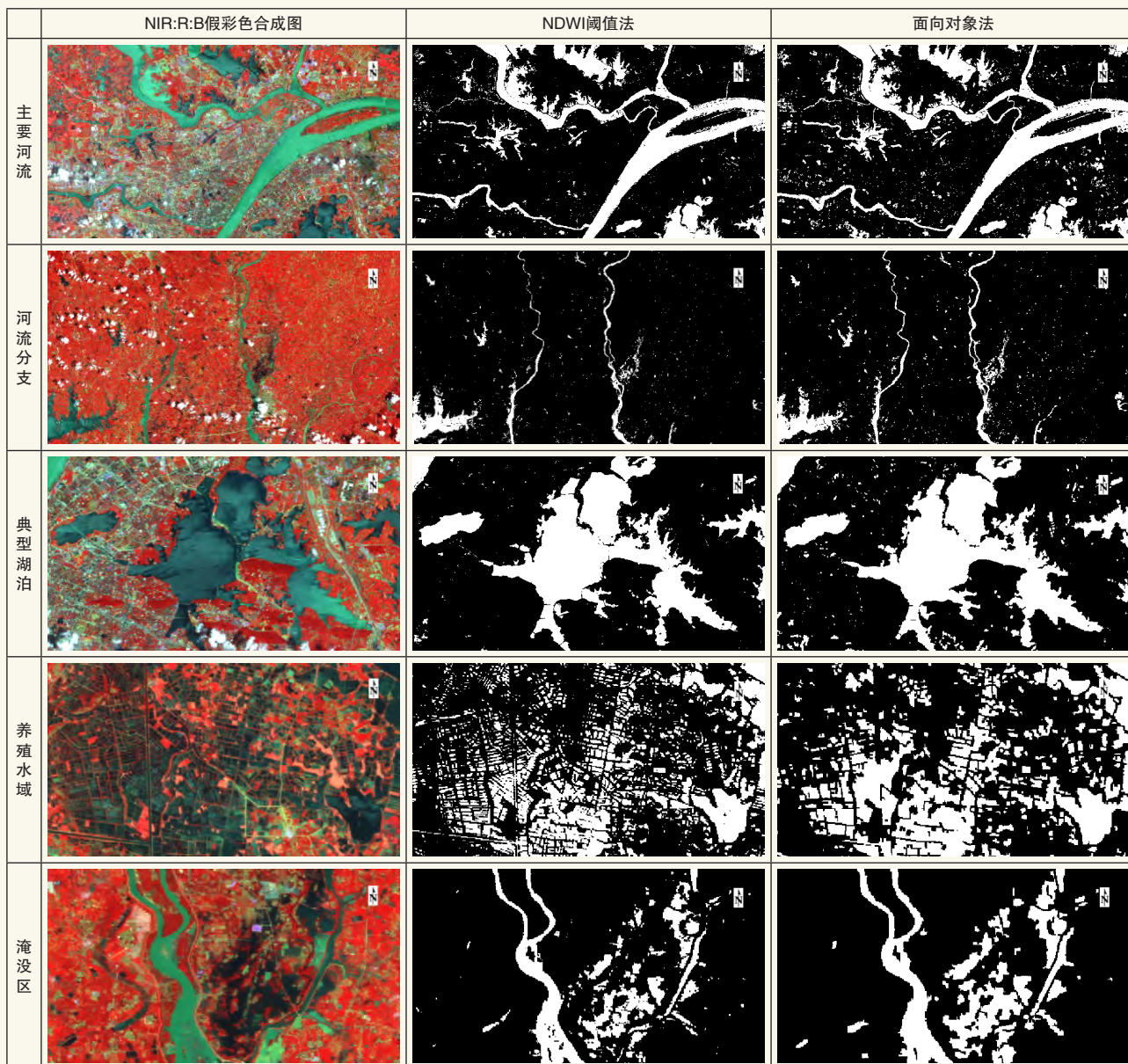


图6 NDWI阈值法与面向对象分类法识别各类水体效果对比图

Fig. 6 Comparison of NDWI threshold and object-oriented method for identifying various water bodies



图7 养殖水域（局部）提取结果对比图

(a) 4:3:1假彩色合成图, (b) NDWI阈值法识别结果+假彩色合成图, (c) 面向对象分类法识别结果+假彩色合成图

Fig. 7 Comparison of extracted results of cultured waters (local)

(a) 4:3:1 false color composite map, (b) NDWI threshold method recognition result + false color composite map, (c) object-oriented method recognition result + false color composite map)

为洪涝灾情范围分析。此分析结论与文献[13]的结论基本一致。

3.2 洪涝典型区分析

为更好地显示洪涝灾情分布，在显示典型洪涝受灾区、灾前灾后GF-1假彩色合成影像的同时，将两期GF-1影像面向对象水体识别结果进行二值化处理，形成洪涝前后水体变化检测图，其中蓝色代表（灾前）原有水体，红色代表（灾后）新增水体，白色范围为非水体地类。图8a显示黄陂滠水河支流溃口导致的村子洪涝淹没情况。黄陂区前川街下石村的下石河边有两处溃口，溃堤直接让上游的罗汉寺街和下游前

川街总共10多个村子浸泡在水中。图8b显示因保障天河机场正常运行对童家湖进行人工分洪后的洪涝淹没情况。据新闻报道，童家湖漫溃后导致盘龙城经济开发区附近的村湾6000余亩（1亩 \approx 666.7m²）鱼池被淹，临时转移安置周边群众40余人。这与文本统计的9.87 km²的湿地河滩淹没面积较为接近。府河附近麦家湖/任恺湖连片，淹没范围明显增加。图8c显示举水河新洲段河道显著增宽，河曲内农田被淹。图8d显示的是由于新洲区举水河支流东河溃口导致的洪涝淹没情况。据报道，7月1日晚上举水河水位急速上涨，22时左右，举水河支流东河在新洲区凤凰镇郑园村陶

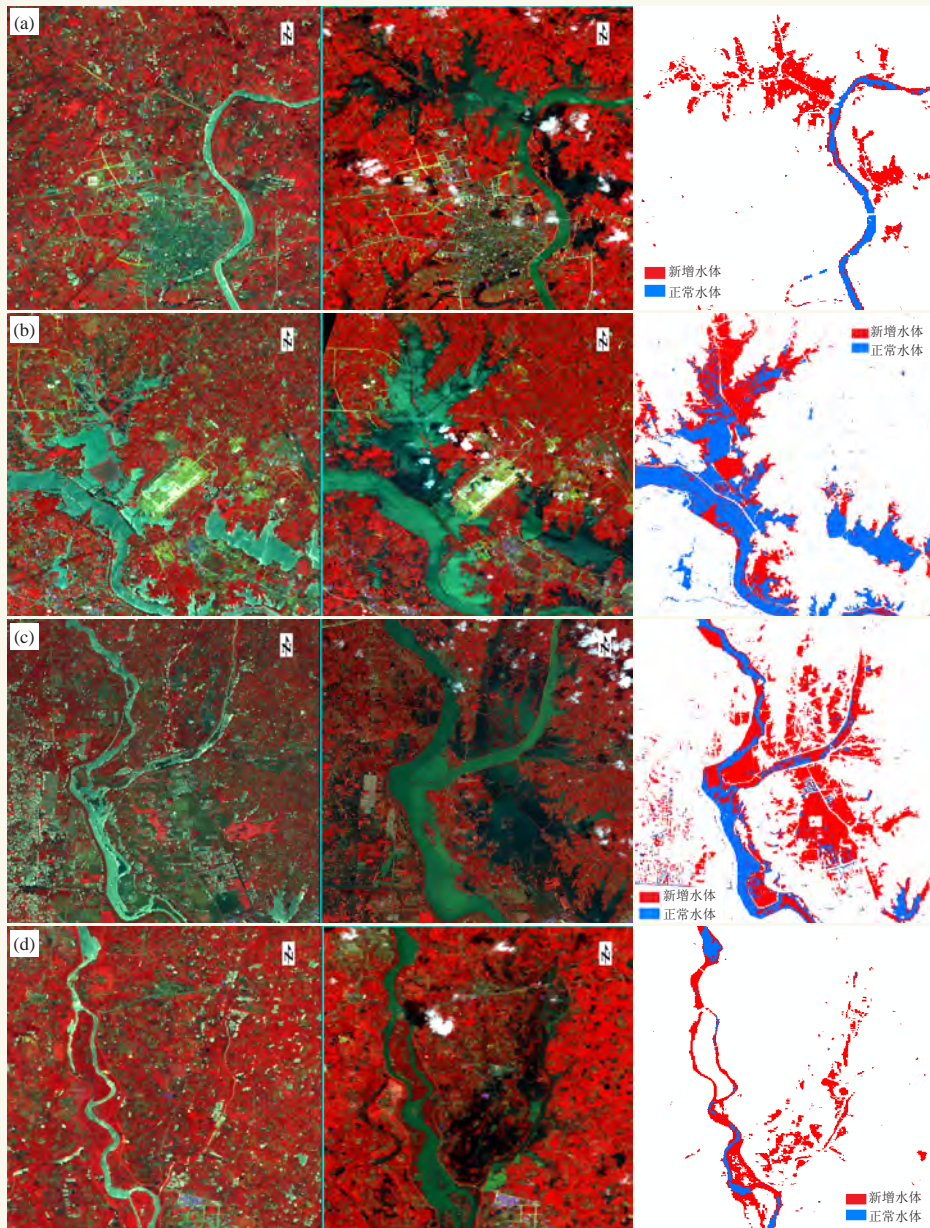


图8 典型洪涝受灾区灾前灾后GF-1号水体监测对比图

Fig. 8 Comparison of water monitoring of GF-1 before and after disasters in typical flooding areas

家河西圩垸处发生溃口，凤凰镇、三店街等20多个村庄，近万名群众被洪水围困。

将洪涝范围高分识别结果与重采样到16 m的土地覆盖类型数据进行叠加，以细致了解受暴雨洪涝灾害影响的各种地类面积。据统计（表3），由于河水漫堤、溃口或人工开垸的以上四个典型淹没区域，涉及淹没地类包含耕地、林地、草地、湿地河滩和建设用。耕地淹没比例四地区均超过50%以上，以举水河新洲段和黄陂童家湖附近区域农田受淹面积最大。

表3 典型洪涝区淹没地类面积统计/km²
Table 3 Statistics of submerged land area in typical floodplain /km²

	淹没总面积	耕地	林地	草地	湿地河滩	建设用地
举水河新洲段	30.91	26.11	4.76	0.03		0.01
举水河支流	4.66	2.88	1.74	0.04		0.00
黄陂滢水河支流	5.97	5.27	0.32	0.37		
黄陂童家湖	37.24	20.32	4.55	2.45	9.87	0.05

3 小结与讨论

本文以国产高分一号16 m影像为数据，对2016年梅雨期强降雨过程造成的武汉市洪涝开展了最佳水体遥感识别对比及灾情评估。结果显示，对洪涝期间不同城市水体类型的遥感提取结果，面向对象分类法要优于归一化水体指数阈值法，对于城市郊区由河水漫堤和河堤溃坝等原因导致的洪涝淹没范围可以通过GF-1 WFV数据有效地进行识别，分地类灾情统计与实际上报灾情结果较为一致。

此次强降水造成武汉主城区多处街道内涝灾情严重，例如南湖片区文馨街道等地。本研究也试图对其淹没范围灾情进行提取，但受GF-1 WFV数据空间及时间分辨率限制影响，城市主干道（>30 m）滞水信息虽然可以被监测到，但水体范围受混合像元影响难以准确提取，同时主干道上涝排水较及时，高分卫星观测时效性不足难以及时捕捉退水变化。所以仅靠GF-1 WFV 16 m影像暂时难以满足城市街道尺度内涝灾情遥感监测的服务需求，后续可加强对空间分辨率更高的GF-1 PSM（2 m全色/8 m多光谱）资料在城市

内涝监测中的应用研究。另外，不受云雨影响的雷达卫星资料可以实现全天候的洪涝水体监测，利用GF-3等雷达卫星监测城市内涝将具有很好的应用价值。

时间分辨率高、不受天气条件影响全天候观测的卫星资料可以实现洪涝消退的动态监测过程，但空间分辨率低、难以满足空间提取精度要求；而空间分辨率高的卫星影像往往光谱信息少，且重访周期长，难以实现动态监测，所以现阶段城市洪涝遥感监测离真正实时精准的城市尺度洪涝灾害遥感监测还尚有差距。目前，我国正逐步构建更为完善的高时空分辨率遥感综合观测体系，如国产高分卫星系列和风云气象卫星系列，可为今后提供更有力的数据保障。如何加强多源遥感资料的融合应用，实现洪涝淹没范围、淹没时长及深度等多维度洪涝灾情监测与评价，还有许多科学技术问题亟待解决。

参考文献

- [1] 吴志峰, 象伟宁. 从城市生态系统整体性、复杂性和多样性的视角透视城市内涝. 生态学报, 2016, 36(16): 4955-4957.
- [2] 王紫雯, 程伟平. 城市水涝灾害的生态机理分析和思考——以杭州市为主要研究对象. 浙江大学学报(工学版), 2002, 36(5): 582-587.
- [3] Wang Z W, Cheng W P. Analysis of ecological mechanism of urban flood and waterlog - Research based mainly on Hangzhou City. Journal of Zhejiang University, 2002, 36(5): 582-587.
- [4] 王肇磊, 丁小珊. 水生态视域下的武汉城市内涝问题研究. 江汉大学学报(社会科学版), 2014, 31(2): 74-79.
- [5] 李加林, 曹罗丹, 浦瑞良. 洪涝灾害遥感监测评估研究综述. 水利学报, 2014, 45(3): 253-260.
- [6] 童庆禧. 遥感在1998年洪水监测中的作用. 气候与环境研究, 1998, 3(4): 27-35.
- [7] 郑伟, 刘诚. FY-3卫星洪涝灾害监测应用. 上海航天, 2017, 34(4): 73-78.
- [8] 范一大, 和海霞, 李博, 等. 基于HJ-1 CCD数据的洪涝灾害范围动态监测研究——以黑龙江省抚远县为例. 遥感技术与应用, 2016, 31(1): 102-108.
- [9] Zhang F, Zhu X, Liu D. Blending MODIS and Landsat images for urban flood mapping. International Journal of Remote Sensing, 2014, 35(9): 3237-3253.
- [10] Mcfeeters S K. The use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features. International Journal of Remote Sensing, 1996, 17(7): 1425-1432.
- [11] 黄慧萍. 面向对象影像分析中的尺度问题研究. 北京: 中国科学院研究生院博士学位论文, 2003.
- [12] 闫利, 赵展, 聂倩, 等. 利用规则进行高分辨率遥感影像地物提取. 武汉大学学报(信息科学版), 2012, 37(6): 636-639.
- [13] 段秋亚, 孟令奎, 樊志伟, 等. GF-1卫星影像水体信息提取方法的适用性研究. 国土资源遥感, 2015, 27(4): 79-84.