

## 基于 Sentinel-1A 的 2016 年长江中下游重灾区洪水遥感监测及灾情评估

李晟铭<sup>1,2</sup>, 刘吉平<sup>1</sup>, 王铭<sup>2</sup>, 尚盈辛<sup>2</sup>, 宋开山<sup>2\*</sup>

(1. 吉林师范大学旅游与地理科学学院, 吉林四平 136000; 2. 中国科学院东北地理与农业生态研究所, 吉林长春 130102)

**摘要** 基于 Sentinel-1A 雷达成像系统, 对 2016 年 5 月 18 日—8 月 10 日长江中下游流域洪水灾害最为严重的区域(115°~117° E, 28°~31° N) 的整个洪水周期进行了时序动态监测, 掌握整个流域的洪水水情状况, 并快速提取了洪水淹没范围, 对受灾地区的灾情进行评估。据监测结果, 整个研究区受灾面积总计达 2 096.95 km<sup>2</sup>, 受灾最为严重的区域位于大型湖泊、水库周围地势相对平坦低洼的区域; 在各县级行政单元中, 安徽省南部的县城受灾最为严重, 宿松县受淹面积最大, 达 290.09 km<sup>2</sup>, 占全县面积的 12.12%; 在各地表覆被类型中, 耕地和居民地受洪水灾害影响最大, 占总受淹面积的 80.33%, 受淹耕地总计 947.45 km<sup>2</sup>, 受灾居民地总计 76.06 km<sup>2</sup>, 其中, 旱地受洪灾影响最严重的区域位于安徽省怀宁县(150.95 km<sup>2</sup>), 占有受灾旱地面积的 22.55%, 水田受洪灾影响最为严重的县为安徽省宿松县(90.58 km<sup>2</sup>), 占有受灾水田面积的 32.57%; 居民地受洪灾影响最为严重的为安徽省怀宁县(12.85 km<sup>2</sup>), 占有受灾居民地总面积的 16.89%。

**关键词** 洪水; 遥感监测; Sentinel-1A; 长江中下游流域; 灾情评估

**中图分类号** S127 **文献标识码** A **文章编号** 0517-6611(2018)10-0068-07

### Flood Remote Sensing Monitoring and Disaster Assessment in Heavy Disaster Area of the Middle and Lower Reaches of Yangtze River in 2016 Based on Sentinel-1A Imagery

LI Sheng-ming<sup>1,2</sup>, LIU Ji-ping<sup>1</sup>, WANG Ming<sup>2</sup> et al (1. College of Tourist and Geoscience, Jilin Normal University, Siping, Jilin 136000; 2. Northeast Institute of Geography and Agroecology, CAS, Changchun, Jilin 130102)

**Abstract** Based on the Sentinel-1A radar imaging system, the flood period in the hardest-hit region of the middle and lower reaches of Yangtze river (115°-117° E, 28°-31° N) between the May 18 to August 10 of 2016 was divided into accumulating period, flooding and stabilizing period, the temporal dynamic monitoring was observed and the inundated areas of different phases was obtained quickly, which would help to understand the process of flooding condition comprehensively. The results indicated that, from May 18 to August 10, the sum of inundated areas in the study was 2 096.95 km<sup>2</sup> and low-lying regions around the large lakes and rivers were submerged seriously. Among the country-level administrative units, the heaviest hit region was the southern area of Anhui Province and the serious country was Susong with the damage area of 290.09 km<sup>2</sup>. In terms of the cover types, the most serious types were cultivated lands and the inhabited area which accounted for 80.33% of the whole inundated areas, the sum of the inundated cultivated lands and the inhabited area were respectively 947.45 km<sup>2</sup> and 76.06 km<sup>2</sup>. The most serious hit region of dry lands was the country of Huaining in Anhui Province, its inundated areas was 150.95 km<sup>2</sup> which accounted for 22.55% of the whole inundated dry land; The most serious hit region of paddy field was the country of Susong in Anhui Province, its inundated areas was 90.58 km<sup>2</sup>. The inhabited area of Huaining in Anhui Province accounted for 16.89% of the whole inundated paddy field.

**Key words** Flood; Remote sensing monitoring; Sentinel-1A; The middle and lower reaches of Yangtze river; Flood evaluation

卫星遥感技术以其速度快、时效性强、视野广阔等特点逐渐成为现代洪水监测与评估工作的重要手段, 随着遥感技术的不断发展, 用于洪水灾害监测的遥感数据源大大增加, 国内外学者使用多种数据源进行了洪水灾害监测方面的研究, 拓展了卫星遥感技术在洪水监测与评估领域的应用<sup>[1-2]</sup>。谢秋霞等<sup>[3]</sup>提出利用小波变换法和 Gram-Schmidt (GS) 变换法来提取洪水信息的方法, 获得了较高的洪水淹没范围提取精度; 刘明月等<sup>[4]</sup>利用 HJ-1 卫星和 Landsat 8 卫星影像, 对 2013 年汛期内松花江和嫩江交汇段水情进行实时监测, 构建洪水监测遥感影像集, 利用 2 种影像确定不同时相的洪水淹没范围, 掌握洪水发展的过程, 对淹没区的灾情进行快速评估; 马丽云等<sup>[5]</sup>基于 FY-3 卫星 MERSI 数据, 采用归一化差异水体指数 NDWI, 对新疆北疆沿天山一带 2009—2011 年发生的融雪性洪水灾害进行了监测。

星载合成孔径雷达 (SAR) 技术由于其快速传播能力、强干涉能力以及不受云雾干扰的优势, 受到了空间遥感界的高度重视<sup>[5]</sup>, 使用 SAR 进行洪水灾害监测的相关研究不断增

加。Benjamin<sup>[6]</sup>提出了基于雷达数据, 并与水文模型相结合的方法, 对突发性洪水灾害进行评估与预测; Kuenzer 等<sup>[7]</sup>基于 2007—2011 年时间序列下的 Envisat ASAR Wide Swath Mode 数据, 对湄公河三角洲进行了长时间序列的洪水灾害监测与预测; Giustarini 等<sup>[8]</sup>针对高空间分辨率的城市地区的 SAR 数据, 提出了一种结合后向散射阈值、区域增长算法与变化检测的方法, 较为精确地提取出洪水淹没范围; 孙涛等<sup>[9]</sup>基于 Envisat ASAR 多极化数据, 对广西梧州市“6.23”特大洪涝灾害进行了监测与灾情评估; 杨存建等<sup>[10]</sup>提出了在地形数据的支持下, 基于 SAR 的洪水水体半自动提取方法, 较好地去除了洪水水体提取中的阴影部分, 获得了较高的洪水范围提取精度。

Sentinel-1 是一个全天时、全天候雷达成像系统, 它是欧洲委员会 (EC) 和欧洲航天局 (ESA) 针对哥白尼全球对地观测项目研制的首颗卫星, 于 2014 年 4 月发射, 具有双极化、短重访周期、快速产品生产的能力, 可以实现全球陆地、海岸带、航线的高分辨率监测, 也可以实现全球海洋的大区域覆盖<sup>[11-12]</sup>, 其重访周期短 (12 d)、较大覆盖范围 (幅宽达 400 km), 传播能力快速, 涉能力强干, 不受云雾干扰, 在洪水灾害监测及评估方面应用潜力巨大。

长江流域洪水灾害频发, 是我国最严重的自然灾害之

**基金项目** 国家重点基础研究发展计划项目 (2013CB430401); 吉林省科技发展计划项目 (20150519006JH)。

**作者简介** 李晟铭 (1991—), 男, 福建龙岩人, 硕士研究生, 研究方向: 水环境遥感。\* 通讯作者, 研究员, 博士, 从事水环境遥感研究。

**收稿日期** 2018-01-19

—<sup>[13-14]</sup>。2016 年入汛以来,长江流域发生了 31 次降雨过程,共有 145 条河流发生超警戒水位洪水,中下游监利县以下干流及两湖水位全线超警,是 1999 年以来第一次出现中下游干流全线超警现象,灾情严重,给国民经济带来巨大损失。笔者基于 2016 年汛期(5—8 月)的 Sentinel-1A 数据产品,对长江中下游受洪水灾害最为严重的区域(115°~117°E,28°~31°N)进行了洪水灾害的时序性遥感监测与灾情评估,监测重灾区的洪水过程,并探索研究区洪灾淹没面积变化特征,以县级行政单元为研究对象,统计并评估了洪水灾害对各县级单元中各类土地覆盖类型的淹没情况,以期为灾情监测提供数据和技术支撑。

## 1 研究区概况与数据来源

### 1.1 研究区概况

长江中下游流域地处亚热带季风气候,降水充沛,流域内水系发达,干流具有较稳定的巨大河槽,有利于大量洪水的宣泄,加上沿江湖泊众多,使其对洪水有天然的调节作用,但长江中下游尤其是中游地区的地质构造和水系特点,决定了长江是一条雨洪多发河流。选择长江中下

游流域(115°~117°E,28°~31°N)为研究区(图 1),包括湖北、江西、安徽等省,总计覆盖 45 个县级行政单元,流域内包含鄱阳湖、龙感湖、大关湖等大型湖泊,土地覆盖类型以旱地、水田、林地为主。

### 1.2 数据选择及其预处理

Sentinel-1A 数据采用条带成像(SM)模式、干涉宽幅(IW)模式、超幅宽(EW)模式、波浪(Wave mode)模式来获取,其中,IW 模式因其大范围覆盖、中等分辨率的特征,是陆地覆盖的默认模式。Sentinel-1A 的数据产品通过 Level-0、Level-1、Level-2 这 3 层次成果进行分发,其中,Level-1 包含单视复数影像 SLC (single look complex)、地距影像 GRD (ground range detected) 这 2 种类型产品,GRD 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,相对于 SLC 数据而言,GRD 数据消除热噪声以提高图像质量<sup>[5]</sup>,综合该研究的目的及需求,从欧洲航天局(European Space Agency)官方网站:(<https://sci-hub.copernicus.eu/dhus//home>)获取需要的 Sentinel-1A 数据产品,获取数据信息见表 1。

表 1 数据产品详情

Table 1 The information of data products

获取卫星 Satellite	产品级别 The product level	成像日期 Imaging date	极化方式 Polarization mode	接受模式 Accept pattern	分辨率 Resolution m × m
Sentinel-1A	GRD	2016-05-18	VV	IW	5 × 20
Sentinel-1A	GRD	2016-05-30	VV	IW	5 × 20
Sentinel-1A	GRD	2016-06-11	VV	IW	5 × 20
Sentinel-1A	GRD	2016-07-05	VV	IW	5 × 20
Sentinel-1A	GRD	2016-07-17	VV	IW	5 × 20
Sentinel-1A	GRD	2016-08-10	VV	IW	5 × 20

利用欧空局网站发布的 SNAP(sentinels application platform)数据处理平台对从 Sentinel-1 卫星获取的雷达影像进行分析处理<sup>[15]</sup>。数据预处理主要分为以下步骤:①辐射定标。为了消除数据获取和传输系统产生的系统的、随机的辐射失真或畸变,利用 SNAP 数据处理软件的辐射校正工具(Calibrate)对各时期影像数据进行辐射校正处理,并获取了各时期影像的后向散射系数。②几何校正。地形起伏会对 SAR 影像造成很大的几何畸变,导致透视收缩、迭掩、阴影等现象,因此必须对原始数据进行几何校正才能进行下一步的处理分析。使用 SNAP 数据处理软件的几何校正(terrain correction)工具,选取 RangeDoppler 方法对各时期的影像进行几何校正。③滤波处理。SAR 图像中通常会出现随机分布的黑白斑点,称为斑点(Speckle)噪声<sup>[16]</sup>。为了抑制噪声的影响,采用 Refined Lee 滤波器进行处理,窗口大小设为 7 × 7,抑制斑点噪声,提高影像质量。④图像配准。为了实现基于同一区域的洪水动态变化监测,需将各个时期的影像依次进行配准。使用 SNAP 数据处理软件的图像配准工具(automatic coregistration)进行覆盖同一地区的多幅雷达影像的自动配准。

采用 ENVI5.1 数据处理平台,对经过以上预处理获得的

包含后向散射系数的单波段影像进一步处理,主要包括以下步骤:①对数刻度转换。经过以上预处理获得的影像为线性刻度,使用 ENVI 数据处理软件的波段计算工具把线性刻度转换为对数刻度。②影像裁剪。由于研究区范围较大,将处理后的影像进行相应的裁剪,以满足对整个研究区下一步的信息提取工作。对研究区内各个时期的原始雷达影像进行了以上数据预处理,并选择平水期与洪水期的两景影像进行对比,发现经过预处理后,原始雷达影像的斑点噪声被有效抑制,倒置的影像被纠正并赋予了合适的投影,水体的轮廓较为清晰(图 1)。

## 2 洪水淹没范围快速提取

### 2.1 水体的散射特性

在 Sentinel-1A 影像上,平静水体主要表现为简单的单次镜面反射,其回波功率较小,在图像上一般色调较暗,在影像中呈现暗色或黑色,与其他地物具有较高的区分度<sup>[16-17]</sup>。为了分析影像中不同地物的后向散射特性,以洪水未发生(平水期),即 2016 年 5 月 18 日的影像为例,辅以时间相近的 Landsat8/OLI 影像(成像日期为 2016 年 5 月 6 日),在研究区内均匀地选择耕地(5 771 个像素)、水体(264 264 个像素)、城区(1 569 个像素)、植被(220 743 个像素)4 种占研究区比例较大的地物覆被类型作为感兴趣

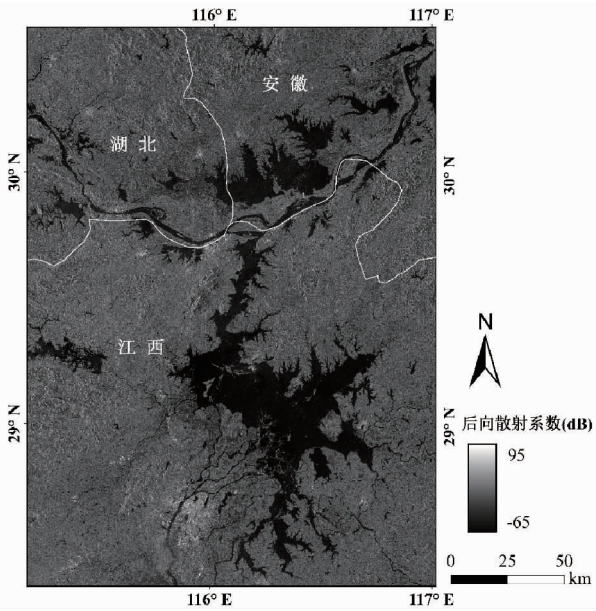


图1 研究区影像

Fig. 1 The map of the study region

区域,统计分析了各种地物类型的后向散射特性。由图2可知,水体的后向散射系数小于植被、耕地、城区等地物,与其他地物类型分离度较好,根据此特性,可以将水体信息从 Sentinel-1A 影像中提取出来。

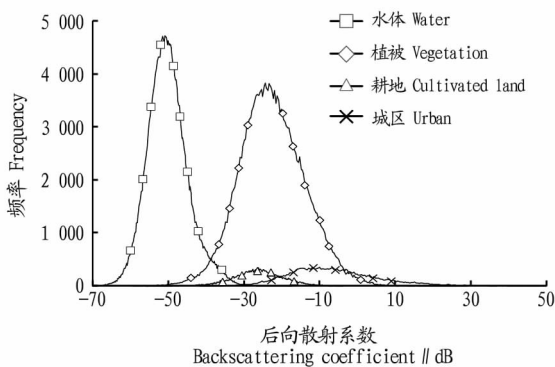


图2 各类地物后向散射系数频率

Fig. 2 The backscattering coefficient frequency of different lands

**2.2 水体提取方法** 目前,基于 SAR 影像的水体提取方法主要包括阈值法、基于纹理信息的提取<sup>[18-20]</sup>、结合地形辅助信息的提取以及独立成分分析。其中,阈值法使用最广泛,可以快速、高效地提取水体边界,适合于对时效性要求较高的洪水监测方面的应用。

使用阈值法提取水体范围的关键在于阈值的设定,传统的阈值确定方法需要大量的先验知识,受人为主观影响较大,鲁棒性较低。基于各幅经过预处理的影像的灰度直方图,采用最大类间方差法来自动确定水体提取阈值,最大类间方差法是由日本学者 Otsu 于 1979 年提出的一种全局最优阈值确定方法,其基本思想是将图像分成背景和目标 2 部分,以目标和背景类间方差最大为原理,动态确定图像的分割阈值<sup>[21-22]</sup>。以 2016 年 5 月 18 日的 Sentinel-1A 影像为例,可发现其直方图呈现明显的双峰形状,根据最大类间

方差算法原理,利用 IDL8.3 平台编写实现算法并进行阈值动态选取,最终确定 -37.55 为最佳阈值(图 3)。依照此算法,依次确定各时期影像的水体提取最佳阈值。

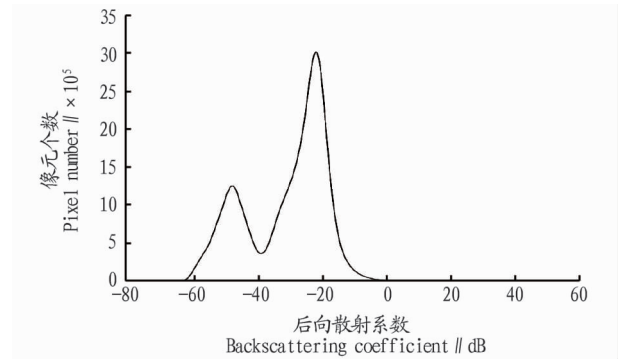


图3 灰度直方图(2016年5月18日)

Fig. 3 Gray histogram on May 18, 2016

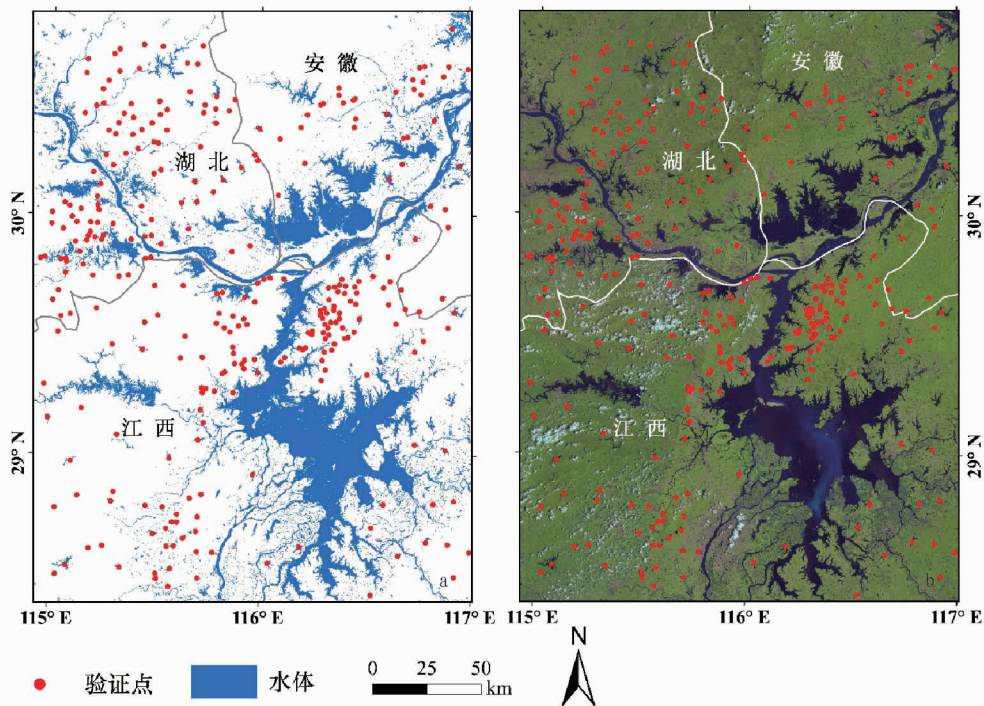
采用阈值法依次提取各时期影像中的水体,即可完成各阶段洪水的水情监测。以 2016 年 7 月 17 日影像为例,采用最大类间方差法动态获取最佳阈值,最终基于阈值法完成水体信息提取,提取结果较好,水体轮廓较为清晰(图 4)。在洪水遥感监测中,水体信息提取的精度会直接影响洪水灾害监测的结果,因此,选取 30 m 空间分辨率的 Landsat8/OLI 影像对水体提取结果进行精度评价,选用获取时期最为相近的 OLI 影像产品(2016 年 7 月 25),对基于 2016 年 7 月 17 日基于 Sentinel-1A 影像水体提取结果[图 4(a)]进行精度验证,基于 OLI 影像随机选取 300 个水体轮廓清晰、大小不一、均匀分布的水体验证点[图 4(b)],在所有的验证点中,水体提取结果有 284 个验证点正确提取,提取精度可达 94.6%,未准确提取的验证点主要是因为不同影像的空间分辨率差异以及影像获取日期的微小差异引起的,因此,提出的水体信息可以用来对洪水灾害进行监测。

### 3 洪水过程监测

为了分析洪水灾害在研究区的空间分布特征,将平水期的水体信息与洪水期的水体信息进行叠加分析,水面范围超出平水期水面的部分即为洪水淹没的范围(图 5 红色区域)。可以发现在研究区内,地势相对平坦低洼的区域都有大范围的积水,淹没范围最大的区域位于湖北省、安徽省南部,尤其在安徽南部的宿松县、怀宁县以及湖北省西部的黄梅县,由于湖泊、河渠众多,地势平坦,因此其洪灾最为严重,据相关资料显示,7 月 3 日暴雨之后,安徽省南部宿松县共有 27 座中小水库超汛限水位,其中 22 座中小水库溢洪道溢洪,内湖水位全面超警戒水位,部分圩堤逼近保证水位,山区乡镇河道、公路水毁严重,多处出现山体滑坡,28 条县、乡、村道塌方,进出山区的公路全部中断。

通过分析洪水暴发最严重区域的特征可以发现,洪水淹没的形式主要有以下形式:①洪水暴发后,原河道均出现拓宽的现象,河、湖水域平水期水位与洪水期水位之间的土地被完全淹没[图 5(a)];②河、湖周围地势相对平坦、低洼的区域,大量区域被淹没[图 5(b)];③大、小型湖泊、坑塘、水库均出现由于水位持续增加所导致的水面面积增加的现象。





注:a. 水体提取结果;b. 验证影像

Note:a. Water extraction result;b. Verification image

图4 水体提取结果及精度验证

Fig. 4 Water extraction result and the precision test

象[图 5(c)]。

据安徽省气候中心发布的气候公报,入汛以来(5月1日—7月6日),全省平均降水量 694 mm,较常年同期异常偏多 86%,主要强降水过程出现在 5月2日、5月7日、5月15日、5月26—28日、6月1日、6月18—20日、6月21—24日、6月25—28日和7月1—5日,其中7月1—5日暴雨过程最强、范围最广。根据湖北省气象局发布的5—8月气候评价月报,5月湖北省平均降水量 143 mm,基本正常,但降水空间分布不均;6月共出现5次较明显的暴雨洪涝灾害,分别为5月31日—6月3日、6月18—20日、6月23—26日、6月27—29日、6月30日—7月1日;7月上中旬大范围强降水过程多、雨量大,下旬持续晴热高温天气;8月局地分散性降水频繁。据江西省气候中心发布的气候公报,受史上最长厄尔尼诺影响,2016年江西省气候反常,气温偏高,降水偏多;汛期来得早、结束晚;暴雨过程多、累计雨量多、降雨强度大、洪涝灾害重,降水主要集中在5、6月。

根据各省的气候、气象服务资料,结合实际获取的影像产品,将整个洪水周期划分为3个阶段(表2),即平水期(5月18日—6月11日),洪水期(6月11日—7月17日)及稳定期(7月17日—8月10日)。依次将所有时期的水体信息进行叠加,计算各个时期水体范围的面积及相比于未发生洪水时期新增的水面面积,监测洪水过程(图6),分析在洪水过程中研究区内洪水淹没范围的增减,纵观整个洪水周期,在平水期,由于研究区各县市在此期间降水基本正常,因此新增的水面范围较小(图6绿色区域),由于降水空间分布不

均,积水主要出现在地势较为低洼的区域,5月30日—6月11日,无集中降水时期,水面范围较为稳定,无明显增加的水面范围;在洪水期,6月11日—7月5日,研究区水面面积明显增加,在整个研究区均可监测到新增的水面范围(图6黄色区域),尤其在河渠、湖泊附近地势较为平坦的区域,出现了大范围的新增水面,新增加的水面面积总计达 2 096.95 km<sup>2</sup>;7月5—17日,整体水面范围的面积略有减小,但相比于洪水未发生时期仍有 1 249.09 km<sup>2</sup> 的新增水面,由于实施了引流、截流、调蓄等相关抗洪减灾措施,水面范围发生了改变(图6红色区域);在稳定期,水面范围面积趋于稳定,水面范围变化较小(图6黑色区域),与未发生洪水时的水面范围面积相比总计增加 327.05 km<sup>2</sup>。

#### 4 洪水灾害评估

引入降水异常指数(降水距平与标准差的比值)来分析汛期内研究区的降雨异常状况,根据安徽省气候中心发布的安徽省 2016 年 7 月气温及降水异常指数,安徽南部望江县 2.6(异常偏多)、怀宁县 4.1(异常偏多)、太湖县 3.0(异常偏多)、宿松县 2.6(异常偏多)在全省范围内降水异常指数较高,降水极端偏多,因此其洪涝灾害最为严重。以县级行政单元为单位,根据之前对洪水灾害空间分布特征的分析及相关气象资料,选择洪水灾害最为严重的 13 个县级单位作为研究单元,分析其在洪水周期内,水面面积发生的变化及其标准差,统计每一个县级单元的最大淹没面积,同时分析各个县级单元地标覆被类型的受淹情况。

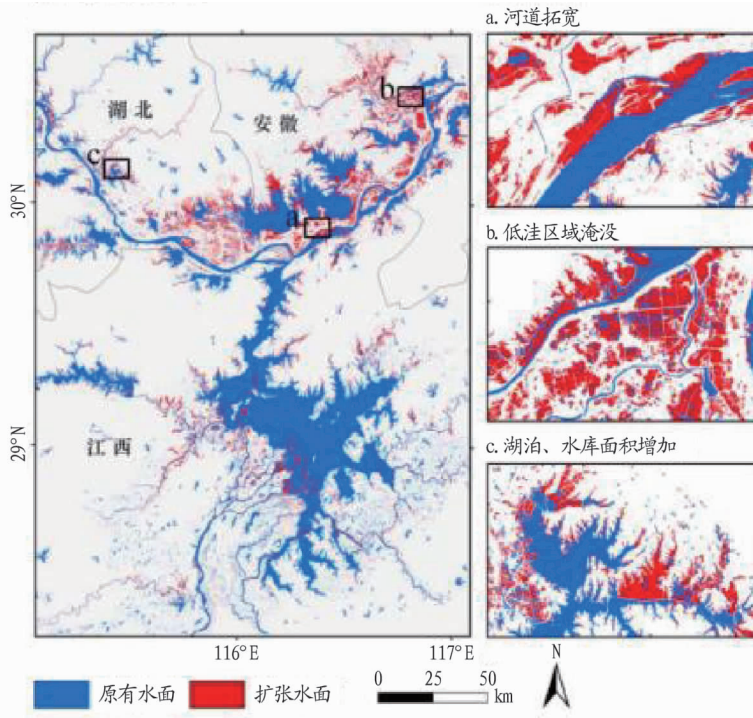


图5 洪水淹没范围空间分布

Fig. 5 Spatial distribution of the flood submerged area

表2 洪水过程

Table 2 The flood process

洪水过程 Flood process	影像获取日期 Image acquisition date	水面面积 Water area km <sup>2</sup>	淹没面积 Flooded area km <sup>2</sup>	洪水淹没情况 Submerged condition of flood
平水期 Normal river flow period	2016-05-18	8 878.32	0	水体面积稳定
	2016-05-30	8 885.15	6.83	地势较低区域出现积水
	2016-06-11	8 896.31	17.99	地势较低区域持续积水
洪水期 Flood period	2016-07-05	10 975.27	2 096.95	河道拓宽, 地势平坦区域积水严重
	2016-07-17	10 127.41	1 249.09	淹没面积减小
稳定期 Stationary period	2016-08-10	9 433.28	554.96	水体面积趋于稳定

各个县级单元的水面面积变化在洪水周期内均呈较为一致的规律,在平水期(5月18日—6月11日),湖北、安徽省各县市的降水基本正常,空间分布不均,且气温起伏较大,水面面积基本稳定略有减小;在洪水期(6月11日—7月17日),各县市降水偏多,均出现极端降水事件,集中强降水诱发多地山洪暴发,导致沿江中小河流水位迅猛上涨,湖泊、水库水位超出阈值,城市内涝、积水严重,水面面积明显增加;稳定期内(7月17日—8月10日),各县降水趋于正常水平,气温普遍增高,水势逐渐回落,趋于正常水平。各县由于其地形地貌等自然条件的不同,导致其洪峰过境时水面面积增加的幅度各有差异,统计各县的最大受淹面积可发现,安徽省南部县城均受灾较为严重,宿松县受淹面积最大,达290.09 km<sup>2</sup>,占全县面积的12.12%,望江县(受淹面积205.31 km<sup>2</sup>)、怀宁县(受淹面积154.57 km<sup>2</sup>)、太湖县(受淹面积28.49 km<sup>2</sup>)分别占全县面积的15.13%、12.11%和1.40%;湖北省的几个县,受灾最为严重的依次为黄梅县(受淹面积177.97 km<sup>2</sup>)、武穴市(受淹面积85.55 km<sup>2</sup>)、鄂州市(受淹面积

83.83 km<sup>2</sup>),分别占全县面积的10.46%、7.13%和5.26%(图7)。

选择 FROM - GLC 30 m 分辨率的全球土地覆盖图<sup>[23]</sup>(下载自 <http://www.globallandcover.com/>),该数据是利用 Landsat TM/ETM+ 图像,采用自动分类算法生产的二级分类2010年全球土地覆盖数据集,是世界上第一个综合的30 m分辨率全球土地覆盖数据集,已经在全球变化研究中得到广泛应用<sup>[24]</sup>。基于 FROM - GLC,获得研究区2010年30 m分辨率的土地覆盖类型,将研究区地表覆被类型分为旱地、水田、林地、草地、居民地、湿地、裸地、水体8种类型,分析了各县地表覆被类型的空间分布状况及其受洪水灾害的影响,研究单元内大量、均匀地分布旱地;林地集中分布在蕲春县、宿松县、太湖县;水田均匀分布于河渠、湖泊周围的流域。经统计分析,研究单元的地表覆被主要以旱地(7 797.86 km<sup>2</sup>)、林地(5 552.15 km<sup>2</sup>)、水田(3 006.17 km<sup>2</sup>)为主,分别占研究单元总面积的36.94%、26.30%和14.24%(图8)。

分析研究区内各地物类型的淹没情况,洪水淹没的主要地物类型为旱地与水田,集中分布于安徽南部的宿松县、怀



宁县、望江县以及湖北省黄梅县和武穴市等广袤的平原上。统计分析各个县地物类型的受淹状况,由于裸地在研究单元各县分布极少,在该次分析中未参与统计。受淹的各地物类型中,旱地、水田的受淹面积最大,分别占总受灾面积的 52.54% 和 21.82%,受洪水灾害最为严重的区域均位于大型湖泊、河渠周围以及低洼地区,其中,旱地受洪灾影响最严重的区域位于安徽省怀宁县(150.95 km<sup>2</sup>),占有受灾旱地面

积的 22.55%,水田受洪灾影响最为严重的县为安徽省宿松县(90.58 km<sup>2</sup>),占有受灾水田面积的 32.57%;由于持续的极端降水,研究区多处居民地受暴雨洪涝灾害影响较为严重,多地发生洪涝和城市内涝。据监测,研究区内受淹居民地面积总计 76.06 km<sup>2</sup>,占有受淹面积的 5.97%,其中,受洪灾影响最为严重的区域为安徽省怀宁县(12.85 km<sup>2</sup>),占有受灾居民地总面积的 16.89%(表 3)。

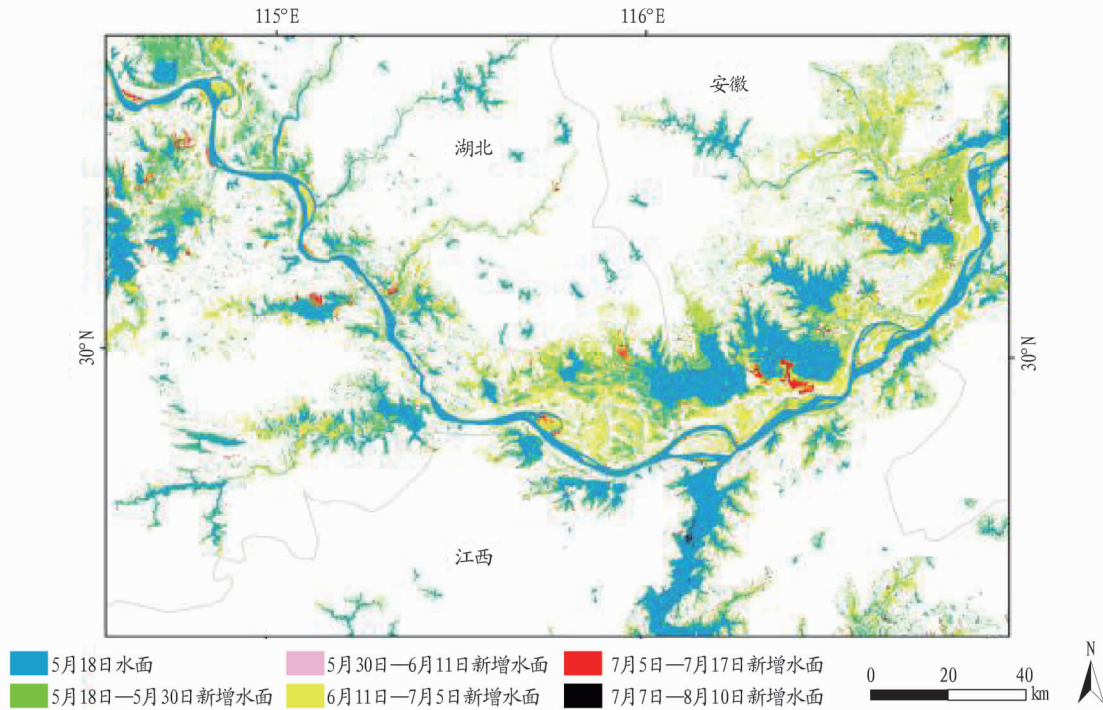


图 6 洪水过程

Fig. 6 The flood process

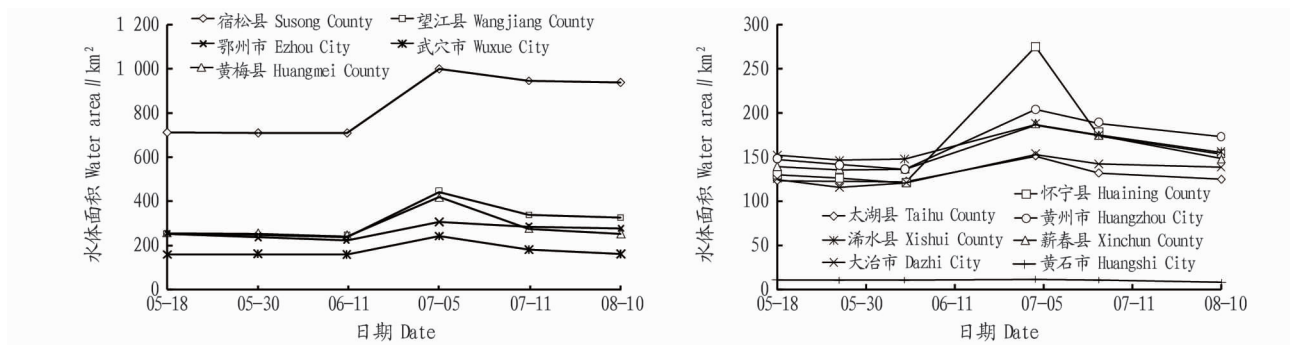


图 7 各县级行政单元水面面积变化

Fig. 7 The water surface area change of the counties

## 5 结论

该研究依据雷达影像的成像原理,根据水体的后向散射特性,选择合适的阈值提取洪水轮廓,提出了基于 Sentinel-1A 卫星 SAR 数据洪水淹没范围快速提取方法,并运用该方法对 2016 年汛期以来长江中下游发生的特大洪水进行了洪水灾害的时序性遥感监测与灾情评估,主要得到以下结论:①使用 Sentinel-1A 影像,其短重访周期、较大覆盖范围、快速传播能力、强干涉能力、不受云雾干扰的优势,在洪水灾害监测及评估领域具有很大优势。②整个研究区受灾面积总

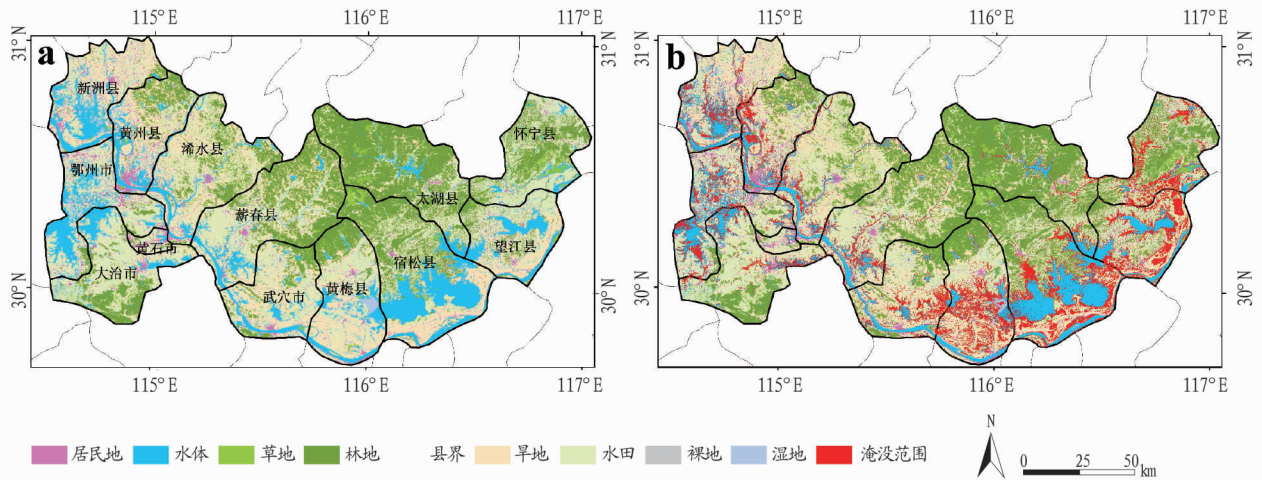
计达 2 096.95 km<sup>2</sup>,受灾最为严重的区域位于大型湖泊、水库周围地势相对平坦低洼的区域。③在各县级行政单元中,安徽省南部县城受灾最为严重,宿松县受淹面积最大,达 290.09 km<sup>2</sup>,占全县面积的 12.12%。④在各地标覆被类型中,耕地和居民地受洪水灾害影响最大,占总受灾面积的 80.33%,受淹耕地总计 947.45 km<sup>2</sup>,受灾居民地总计 76.06 km<sup>2</sup>,其中,旱地受洪灾影响最严重的区域位于安徽省怀宁县(150.95 km<sup>2</sup>),占有受灾旱地面积的 22.55%,水田受洪灾影响最为严重的县为安徽省宿松县(90.58 km<sup>2</sup>),占

所有受灾水田面积的32.57%;居民地受洪灾影响最为严重的县为安徽省怀宁县(12.85 km<sup>2</sup>), 占有受灾居民地总面积的16.89%。

受遥感数据时间、空间分辨率等影响, 单一的遥感数据源很难实现精确的洪水监测。因此, 进行多源遥感数据融合, 充分利用各种数据源的优势, 建立多源遥感的洪灾灾情监测响应机制, 提高洪灾灾情的监测相应速度, 进而实现区

域河流水资源日常监管和突发灾害应急监测, 是进一步研究洪水监测的研究重点。

为更好地运用遥感与地理信息系统技术, 提高洪涝灾情数据的时效性和准确性的同时, 对于洪水灾害评估中评估内容、指标体系构建、评价方法选择以及如何实现监测结果与社会经济损失数据的有效匹配, 以达到更为精确的灾害评估, 仍需要进一步研究。



注: a. 淹没前; b. 淹没后

Note: Before submerge; After submerge

图8 各县地表覆被受淹情况

Fig. 8 The land covering submerged situation of different counties

表3 各县地表覆被受淹面积

Table 3 The land covering submerged area of different counties

县名 County	总计受淹面积 Total submerged area	水田 Paddy field	旱地 Dry land	湿地 Wetland	林地 Woodland	草地 Grass	居民地 Habitation
宿松县 Susong County	290.09	90.58	83.42	0	2.19	15.51	8.05
太湖县 Taihu County	28.49	0.36	22.53	0	9.60	0.23	3.58
望江县 Wangjiang County	205.31	56.92	108.89	0	3.37	5.98	9.96
怀宁县 Huaining County	154.57	12.35	150.95	0	4.77	2.21	12.85
黄梅县 Huangmei County	177.97	38.89	105.60	6.31	3.88	0.30	11.13
武穴市 Wuxue City	85.55	8.99	55.99	0	5.67	0.05	6.46
蕲春县 Qichun County	50.94	10.12	25.61	0	6.81	0	2.19
大治市 Dazhi City	37.65	4.77	19.49	0.69	1.83	0.42	4.24
浠水县 Xishui County	39.93	6.81	14.26	0	3.66	0.01	2.02
黄州市 Huangzhou City	67.70	21.90	22.15	2.15	3.85	3.67	5.20
鄂州市 Ezhou City	83.83	10.96	33.73	4.05	2.14	0.39	5.76
新洲县 Xinzhou City	48.46	15.41	26.67	1.82	1.30	0.13	4.41
黄石市 Huangshi City	3.54	0.03	0.07	0	0.30	0.03	0.20
总计 Total	1274.03	278.08	669.37	15.01	49.37	29.39	76.06

## 参考文献

- [1] 李加林, 曹罗丹, 浦瑞良. 洪涝灾害遥感监测评估研究综述[J]. 水利学报, 2014, 45(3): 253-260.
- [2] 李通, 张丽, 申茜, 等. 渭公河下游洪灾淹没面积多源遥感时序监测分析[J]. 应用科学学报, 2016, 34(1): 75-83.
- [3] 谢秋霞, 张佳晖, 陆坤, 等. 基于典型遥感影像融合方法的洪水信息精确提取研究与应用[J]. 灾害学, 2017, 32(1): 183-186, 204.
- [4] 刘明月, 贾明明, 王宗明, 等. 2013年松花江与嫩江交汇段洪水遥感监测[J]. 湿地科学, 2015, 13(4): 456-465.
- [5] 马丽云, 李建刚, 李帅. 基于FY-3/MERSI数据的新疆融雪性洪水灾害监测[J]. 国土资源遥感, 2015, 27(4): 73-78.
- [6] BENJAMIN M R. The use of radar and hydrological models for flash flood

evaluation and prediction [D]. Witwatersrand: The university of the Witwatersrand, 2016.

- [7] KUENZER C, GUO H D, HUTH J, et al. Flood mapping and flood dynamics of the Mekong Delta: ENVISAT-ASAR-WSM based time series analyses [J]. Remote sensing, 2013, 5(2): 687-715.
- [8] GIUSTARINI L, HOSTACHE R, MATGEN P, et al. A change detection approach to flood mapping in urban areas using TerraSAR-X [J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2013, 51(4): 2417-2430.
- [9] 孙涛, 黄诗峰. Envisat ASAR 在特大洪涝灾害监测中的应用[J]. 南水北调与水利科技, 2006, 4(2): 33-35.

(下转第91页)

方菌丝产量为 36.33 g/L, 高于对照 11.31%, 达极显著水平。

表 4 无机盐及 VB<sub>1</sub> 正交试验极差分析结果

Table 4 Range analysis results of orthogonal test of inorganic salt and VB<sub>1</sub>

试验号 No.	A KH <sub>2</sub> PO <sub>4</sub>	B MgSO <sub>4</sub> · 7H <sub>2</sub> O	空列 Vacant column	D VB <sub>1</sub>	菌丝干质量 Dry quality of mycelium g/L
1	1	1	1	1	26.33
2	1	2	2	2	30.75
3	1	3	3	3	22.79
4	2	1	2	3	31.68
5	2	2	3	1	33.73
6	2	3	1	2	31.07
7	3	1	3	2	33.52
8	3	2	1	3	36.26
9	3	3	2	1	29.09
K <sub>1</sub>	26.62	30.51	31.22	29.72	
K <sub>2</sub>	32.16	33.58	30.51	31.78	
K <sub>3</sub>	32.96	27.65	30.01	30.24	
R	6.33	5.93	1.21	2.06	

表 5 优化配方验证试验结果

Table 5 Verify test results of optimum formula

培养基配方 Culture medium formula	重复 1 Repeat 1	重复 2 Repeat 2	重复 3 Repeat 3	重复 4 Repeat 4	平均菌丝干质量 Average dry quality of mycelium/g/L
优化配方 Optimum formula	34.60	36.80	37.35	36.57	36.33 ± 1.20 aA
对照 Control group	31.57	32.44	34.10	32.44	32.64 ± 1.06 bB

注:不同小写字母表示差异显著 ( $P < 0.05$ ), 不同大写字母表示差异极显著 ( $P < 0.01$ )

Note: Different small letters within the same column mean significant differences ( $P < 0.05$ ), different capital letters within the same column show extremely significant differences ( $P < 0.01$ )

## 参考文献

[1] 张薇薇, 龚韬, 韩东河, 等. 人工虫草与冬虫夏草成分的比较研究[J]. 北京中医药, 2016, 35(1): 87-91.

[2] 吴雪晶, 马慧君, 刘宁. 北虫草与冬虫夏草的药用价值比较[J]. 浙江食用菌, 2009, 17(5): 12-14.

[3] 郑壮丽, 黄春花, 梅彩英, 等. 蛹虫草国内外研究的新进展[J]. 环境昆虫学报, 2011, 33(2): 225-233.

[4] 李昊, 吴百吕, 李春兰. 虫草人工栽培与深度开发[M]. 北京: 科学技术文献出版社, 2008: 2-3.

[5] 叶文皎, 冯武, 黄文, 等. 蛹虫草胞外多糖的体外抗氧化活性分析[J]. 华中农业大学学报, 2014, 33(5): 105-110.

## 3 讨论与结论

在类似的蛹虫草液体菌种培养基优化研究中, 许庆国等<sup>[7]</sup>认为马铃薯和蔗糖为最优碳源, 牛肉膏和蛋白胨为最优氮源; 邹湘月等<sup>[9]</sup>认为最佳碳源为玉米粉, 最佳氮源为麸皮。该研究的蛹虫草液体菌种最佳配方为红薯 50 g/L、可溶性淀粉 10 g/L、牛肉膏 10 g/L、酵母膏 10 g/L、KH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub> 1.5 g/L、MgSO<sub>4</sub> · 7H<sub>2</sub>O 1.0 g/L、VB<sub>1</sub> 0.10 g/L, 主要碳氮源与许庆国等<sup>[7]</sup>、邹湘月等<sup>[8]</sup>不同。分析最主要的原因是菌种差异, 其次是培养条件所致。此外, 由于配制培养基所利用的各种农产品地域及品种的不同以及牛肉膏、蛋白胨等复合材料生产厂家和生产原料的差异, 其有效成分均有所不同<sup>[10]</sup>。

该研究配方在 20 °C、120 r/min 的条件下振荡培养 6 d, 菌丝干质量可达 36.33 g/L, 较许庆国等<sup>[7]</sup>的研究结果明显偏高, 表明当地蛹虫草品种应用该配方有较高的生产潜力, 该研究成果对促进地方蛹虫草生产与推广有一定的应用价值。

[6] 郑剑玲, 齐贺, 黄竹青, 等. 北虫草菌丝发酵液和子实体抗氧化活性测定[J]. 微生物学杂志, 2012, 32(6): 93-95.

[7] 许庆国. 北虫草液体培养菌种碳氮源的研究[J]. 食用菌, 2011, 33(6): 13-14.

[8] 王战勇, 张建东, 李莹, 等. 北虫草液体培养基的研究[J]. 辽宁石油化工大学学报, 2004, 24(1): 19-21, 25.

[9] 邹湘月, 罗巍, 吴郑武, 等. 北虫草液体培养基配方的优化[J]. 食用菌, 2012, 34(4): 10-12, 31.

[10] 李学如, 涂俊铭. 发酵工艺原理与技术[M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2014: 75.

(上接第 74 页)

[10] 杨存建, 魏一鸣, 王思远, 等. 基于 DEM 的 SAR 图像洪水水体的提取[J]. 自然灾害学报, 2002, 11(3): 121-125.

[11] 杨魁, 杨建兵, 江冰茹. Sentinel-1 卫星综述[J]. 城市勘测, 2015(2): 24-27.

[12] 何连, 秦其明, 任华忠, 等. 利用多时相 Sentinel-1 SAR 数据反演农田地表土壤水分[J]. 农业工程学报, 2016, 32(3): 142-148.

[13] 施雅风, 姜彤, 苏布达, 等. 1840 年以来长江大洪水演变与气候变化关系初探[J]. 湖泊科学, 2004, 16(4): 289-297.

[14] 许有鹏, 于瑞宏, 马宗伟. 长江中下游洪水灾害成因及洪水特征模拟分析[J]. 长江流域资源与环境, 2005, 14(5): 638-643.

[15] 曾玲方, 李霖, 万丽华. 基于 Sentinel-1 卫星 SAR 数据的洪水淹没范围快速提取[J]. 地理信息世界, 2015, 22(5): 100-103.

[16] 韩春明, 郭华东, 王长林. SAR 图像斑点噪声抑制的本质[J]. 遥感学报, 2002, 6(6): 470-474.

[17] 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.

[18] 王庆, 廖静娟. 基于 SAR 数据的鄱阳湖水体提取及变化监测研究[J]. 国土资源遥感, 2010, 22(4): 91-97.

[19] 朱俊杰, 郭华东, 范湘涛, 等. 基于纹理与成像知识的高分辨率 SAR 图像水体检测[J]. 水科学进展, 2006, 17(4): 525-530.

[20] 胡玉福, 邓良基, 匡先辉, 等. 基于纹理特征的高分辨率遥感图像土地利用分类研究[J]. 地理与地理信息科学, 2011, 27(5): 42-45.

[21] OTSU N. A threshold selection method from gray-level histograms[J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, 1979, 9(1): 62-66.

[22] 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.

[23] GONG P, WANG J, YU L, et al. Finer resolution observation and monitoring of global land cover: First mapping results with Landsat TM and ETM+ data[J]. Int J Remote Sens, 2013, 34(7): 2607-2654.

[24] 冉有华, 李新. 全球第一个综合高分辨率土地覆盖图——中国 30m 分辨率全球土地覆盖图评述[J]. 中国科学: 地球科学, 2015, 45(8): 1243-1244.