

---

# 基于洪水过程的农业洪灾变化遥感快速评估模型及其应用<sup>\*1</sup>

汪权方<sup>1, 2</sup> 孙佩<sup>1\*</sup> 王新生<sup>1, 2\*</sup> 汪倩倩<sup>1</sup> 王渊<sup>1</sup> 袁琳<sup>1</sup> 王亚彭<sup>1</sup> 徐慧<sup>1</sup>

陈志杰<sup>1, 2</sup> 魏立飞<sup>1, 2</sup> 李中元<sup>1, 2</sup>

(1. 湖北大学资源环境学院, 湖北武汉 430062;

2. 农业部遥感应用中心武汉分中心, 湖北武汉 430062)

**【摘要】**: 洪涝灾情的准确测度需要同时兼顾淹没区的面积大小和淹水时长信息。利用淹没区内由水和作物等多种地物所组成的“复合水体”不同于水体的波谱时间变化特性, 将不同洪灾时期的水体指数和植被指数进行信息复合, 以有效凸显水体和洪涝淹没区之间的影像差异, 据此进行了灾初期、峰期和中后期等 3 个时段受淹范围的有效识别。在此基础上, 根据洪涝灾情随着淹没时长而加重以及灾区内淹水时长非均匀分布的特性, 建立基于淹没时长的受淹面积不等权参与的洪灾扩展动态指数(Variation Index of Flood, VIF) 和区域灾情比较指数(Comparison Index of Flood Disaster, CIFD) 两种模型, 并将模型应用于鄱阳湖区 2016 年夏季农业洪涝灾害的时空变化遥感监测。结果显示, 应用上述两种模型不仅可以准确获取鄱阳湖区本次农业洪涝灾情的演变趋势, 而且能够方便地对比分析区域内不同地方的受灾程度。鄱阳湖区在 2016 年 6 月 23 日~ 7 月 25 日期间的洪涝灾情具有由弱增强再趋弱的特征, 其 VIF 指数由初始阶段(6 月 23 日~ 7 月 9 日) 的 3.75 降至后续阶段(7 月 9 日~ 7 月 23 日) 的 1.29; 鄱阳县是研究区内受灾最严重的区域, 其 CIFD 指数值居于研究区内各受灾县市之首, 该县受灾总面积以及多次被淹的灾区面积均高于其他县市。

**【关键词】**: 洪涝过程; 时序遥感影像; 特征指数信息复合; 洪灾扩展动态指数; 区域灾情比较指数; 鄱阳湖区

**【中图分类号】**: TP79 **【文献标识码】**: A **【文章编号】**: 1004-8227(2017)11-1831-12

---

<sup>1</sup> 收稿日期: 2017-04-07; 修回日期: 2017-07-12

**基金项目**: 国家自然科学基金项目(41371344, 40601003) [National Natural Sciences Foundation of China (41371344, 40601003)]; 农业部—农业农村资源监测统计项目(06162130111242026) Project of Agricultural and Rural Resources Monitoring of Ministry of Agriculture, China, (06162130111242026)]; 安徽省智慧城市与地理国情监测重点实验室开放基金(2016-K-02Z) [Foundation of Anhui Province Smart City and Geographical Condition Monitoring Key Laboratory(2016-K-02Z)]

**作者简介**: 汪权方(1974 ~ ), 女, 博士, 副教授, 主要从事土地遥感和农情监测. E-mail: wangqf@hubu.edu.cn

**\* 通讯作者 E-mail**: 838543594@qq.com, wxs818@hubu.edu.cn

洪涝灾害是当今世界上最严重的自然灾害之一,对农业生产的威胁严重。中国农作物受灾面积和受灾面积比自 1950 年以来都呈上升的趋势,对农业洪涝灾害及其影响进行准确及时高效监测已成为国内外学者的研究热点和难点问题<sup>[1~3]</sup>。遥感(RS)技术具有覆盖范围广、时效性强、精准定位,以及与地理信息系统(GIS)技术结合后的强大的空间数据管理和分析功能等特点<sup>[1,4~7]</sup>,因此,自 Rango 等<sup>[8]</sup>在 20 世纪 70 年代采用 Landsat1/MSS 数据成功开展了密西西比河 1973 年的春季洪水遥感监测试验以来,遥感技术在洪涝灾害研究中得到了越来越多的应用,特别是在淹没区范围确定及灾情分析中的应用非常广泛<sup>[9~15]</sup>,例如 Yamagata 等<sup>[9]</sup>利用两期 Landsat TM 影像对 1988 年 8 月日本 Kanto 地区的被淹水稻田进行了识别提取,并对水稻灾损进行了回归分析; Brivio 等<sup>[10]</sup>应用卫星雷达影像,结合数字地形数据,对 1994 年 12 月意大利 Piemonte 地区的特大洪水淹没区范围进行了遥感测算;朱强等<sup>[12]</sup>利用 Radarsat-1 卫星资料对 2003 年 7 月淮河中游地区的洪涝灾情进行了实时监测; Singh 等<sup>[15]</sup>开发了 HKFCM- $\sigma$  分类器并将其应用于 2014 年 9 月克什米尔地区的洪水淹没范围遥感识别;在洪灾动态监测系统研发<sup>[16~19]</sup>、洪涝损失评价及风险评估<sup>[20~25]</sup>等方面,遥感技术的应用也非常普遍,遥感技术已成为当前洪涝灾害监测中不可替代的重要手段之一。不过,纵观既有研究,大多数案例在进行洪涝灾害实时监测研究时,对处于不同受灾状况的淹没区范围(面积)采用等权的方式进行处理。然而,洪灾发生以后,不同区域的受灾状况通常会因为后续降雨以及次生涝灾等因素的影响而并不相同,且常常处于不断的动态变化之中:有的地方在洪灾初期被淹但过了一段时间以后洪水消退,有的地方在洪灾初期没有被淹但因为后续的降雨以及次生涝灾等而被淹,还有的地方在初期被淹后洪水一直未退。考虑到淹水历时是作物洪水淹没减产损失的一个重要致灾因子,并且作物的受淹时间越长,灾损通常会越大<sup>[26~30]</sup>。因此,即便上述不同地区的受淹面积相同但灾损并不一致。要准确测度这种不断变动的洪涝灾情,必需从洪水过程出发,依据淹水时长,对处于不同洪灾阶段的淹没区面积赋予相应的时间权重以后再纳入灾情评估体系,由此得到的农业洪灾监测结果显然更能满足灾害实时监测预警及农业精准抗灾决策的需求。

鄱阳湖是我国长江中下游极为重要的洪水调蓄区,洪涝灾害频发<sup>[31]</sup>。自 2016 年 3 月入汛以后,鄱阳湖区多次发生强降雨过程,再加上长江洪水的顶托,使得该地区出现了严重的洪涝灾害,农业生产损失较大,多地发生早稻和中稻等农作物被淹的现象<sup>[32~34]</sup>。为了对此次农业洪涝灾害进行快速调查与分析,本文依据水体遥感识别的原理和洪灾变化过程特性,以成像于此次洪水发生前后的鄱阳湖区多时次遥感影像为主要信息源,从淹没区内由水和作物等多种地物所组成的“复合水体”有着不同于纯水体的时间变化特性出发,探索一种能够扩大淹没区与原有水体之间影像差异的淹没区信息增强和提取方法,在此基础上,构建基于淹没时长的受淹面积非等权参与的洪涝灾情遥感监测评估模型。

## 1 研究区与数据源

### 1.1 研究区域概况

鄱阳湖是我国目前最大的淡水湖泊,位于江西省北部、长江中下游以南,地理位置介于 115° 49' ~ 116° 46' E、28° 24' ~ 29° 46' N 之间(图 1)。集水面积 21 174 km<sup>2</sup>,约占鄱阳湖流域面积的 13%,容纳了赣江、抚河、信江、饶河和修水一共五大水系(简称“五河”)以及博阳河、东河和西河诸河来水,经鄱阳湖调蓄后由湖口汇入长江<sup>[31]</sup>。气候属亚热带湿润季风型气候,具有雨热同期的特征,再加上“五河”来水和长江洪水的双重影响,使得鄱阳湖区经常遭受不同程度的洪涝灾害。特别是每年 4 ~ 6 月,湖水水位随“五河”洪水的入湖而上涨,7 ~ 9 月则因长江涨水引起顶托或倒灌而维持高水位,从而产生了“高水是湖,低水似河”和“洪水一片,枯水一线”的独特景观<sup>[31,35]</sup>。鄱阳湖水质优良,水域面积宽广,水生动植物资源丰富;湖区不仅具有发展水产、水禽、水生经济作物等农业产品的优越条件,而且普遍种植水稻等大宗农作物,素有“鱼米之乡”之称,既是江西的粮仓,也是我国重要商品粮基地之一。然而,鄱阳湖流域对洪水的适应能力普遍较弱,1949 ~ 2007 年平均每年因洪灾导致流域内农作物受灾面积达 5 800 km<sup>2</sup>,洪水灾害非常严重<sup>[31,35,36]</sup>。

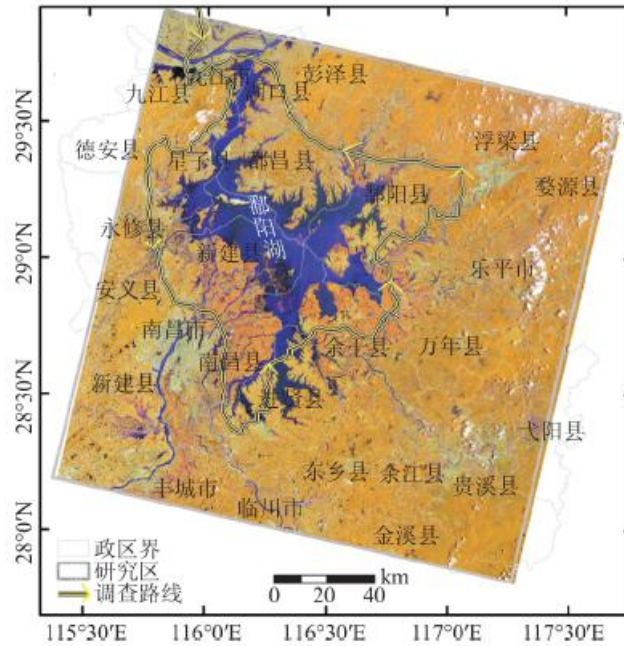


图1 研究区地理位置及实地调查路线

Fig. 1 Location of the Study Region and GPS based Field Investigation

在本研究中，以一景 Landsat8/OLI 影像 (Path121/Row040) 在鄱阳湖区的覆盖范围为研究区域，主要包括江西省所辖的鄱阳、东乡、都昌、进贤、南昌、万年、新建、永修、乐平、余干、星子、九江等县市。

## 1. 2 主要数据来源与预处理

主要包括 2016 年 6 ~ 7 月的三期 30 m Landsat8/OLI 影像 ( Path121 /Row040)、两期 16 m 高分一号卫星影像，以及洪水期间的 GPS 实地调查数据等。其中，Landsat8 /OLI 影像是本文开展研究区域灾情监测及演变趋势评估的主要数据源，它们的成像时间分别为 2016 年 6 月 23 日、2016 年 7 月 9 日和 2016 年 7 月 25 日，刚好对应此次洪灾的初期、峰期中后期。两期高分一号影像 GF1 /WFV3 和 GF1 /WFV2 的成像时间分别是 2016 年 5 月 16 日和 2016 年 7 月 8 日，主要用来辅助 2016 年 6 月 23 日和 7 月 9 日的 Landsat8 /OLI 影像解译。

要开展洪涝灾情的准确评估，仅有卫星影像数据显然难以满足需求，还需要有地面数据的支持。为了准确获取研究区域本次洪涝灾情的第一手资料，作者于 2016 年 7 月 16 ~ 17 日携带高精度的 Trimble GPS 赴灾区进行了环鄱阳湖实地调查 (图 1) ，期间不仅通过地面样方调查来采集受灾作物的类型，同时还通过农户访谈对灾害的发生和持续时间、此次洪灾对当地早稻和中稻等作物生产的影响等进行了调查。另外，本研究还获取了研究区域的 Google earth 高分影像、2014 年 8 月 5 日的 Landsat8 /OLI 影像以及土地利用现状数据，以有助于被淹没区域地面情况 (尤其是农作物、空田和建筑区) 的精确解译。

上述数据中，OLI 影像经过系统几何校正后精度非常高<sup>[37]</sup>，与 Trimble GPS 采集的道路等地面数据空间位置匹配良好；GF1 和 Google earth 影像的位置偏差较明显，参考 OLI 影像作几何精校正。

## 2 主要研究方法

---

## 2. 1 淹没区影像特征增强

洪涝灾害遥感监测的技术关键在于如何从混合型的遥感电磁波信息中提取洪涝灾情信息,在此过程中,准确识别水体和精确提取洪涝淹没区至关重要<sup>[1, 38~40]</sup>。水体的反射率具有在可见光较强(在绿光波段上反射最强)、然后随着波长增加(往近红外和中红外波长方向)则逐渐降低这一明显不同于非水地物的波谱特性,很多学者据此构建了比值型水体指数以达到突出影像中水体信息的效果<sup>[1]</sup>,例如 Mcfeeters 提出的归一化差异水体指数(Normalized Difference Water Index, NDWI)<sup>[41]</sup>、徐涵秋改进型归一化差异水体指数(Modified NDWI, MNDWI)<sup>[42]</sup>,以及可以进一步凸显水体与植被之间差异的逆 NDVI 指数(InverseNDVI, INDVI)等。

由于水体在 NDWI、MNDWI 和 INDVI 指数影像上都位于高值区,因此,在由这 3 种水体指数构成的复合影像上,水域(包括水体及淹没区)与非水域之间通常都有着较为明显的表现差异<sup>[41, 42]</sup>。不过,无论是 NDWI 指数、MNDWI 指数还是 INDVI 指数,都只是单纯地从水体自身的波谱反射与背景地物之间的差异来构建的,未考虑洪水淹没区这种临时性的“复合水体”所具有的特殊性,从而增加了仅依据水体遥感原理进行淹没区识别时实现该类“复合水体”与原有水体之间有效区分的难度<sup>[43, 44]</sup>。

洪涝灾害实际上是一种具有时间和空间对比性的自然现象<sup>[4]</sup>。淹没区实为一种特殊的“复合水体”,它与原有水体在时间尺度上具有不同的变化特性(图 2)。一般来说,原有水体无论在灾前还是灾后都保持较为稳定的影像表现特征:NDVI (Normalized Difference Vegetation Index, 式 4)指数始终处于低值状态、MNDWI 和 NDWI 指数始终处于高值状态;被淹作物则与水体不同,它在灾前的影像上通常符合植被的表现特征(NDVI 指数较高、MNDWI 和 NDWI 指数较低),在灾后的影像上却表现出类水的特征且 NDVI 指数接近于水体。被淹作物在洪灾前、后这种显著的影像表现差异及其与水体之间不同的 NDVI 指数变化趋势,显然可以作为遥感区分淹没区(被淹作物)与原有水体的重要依据。

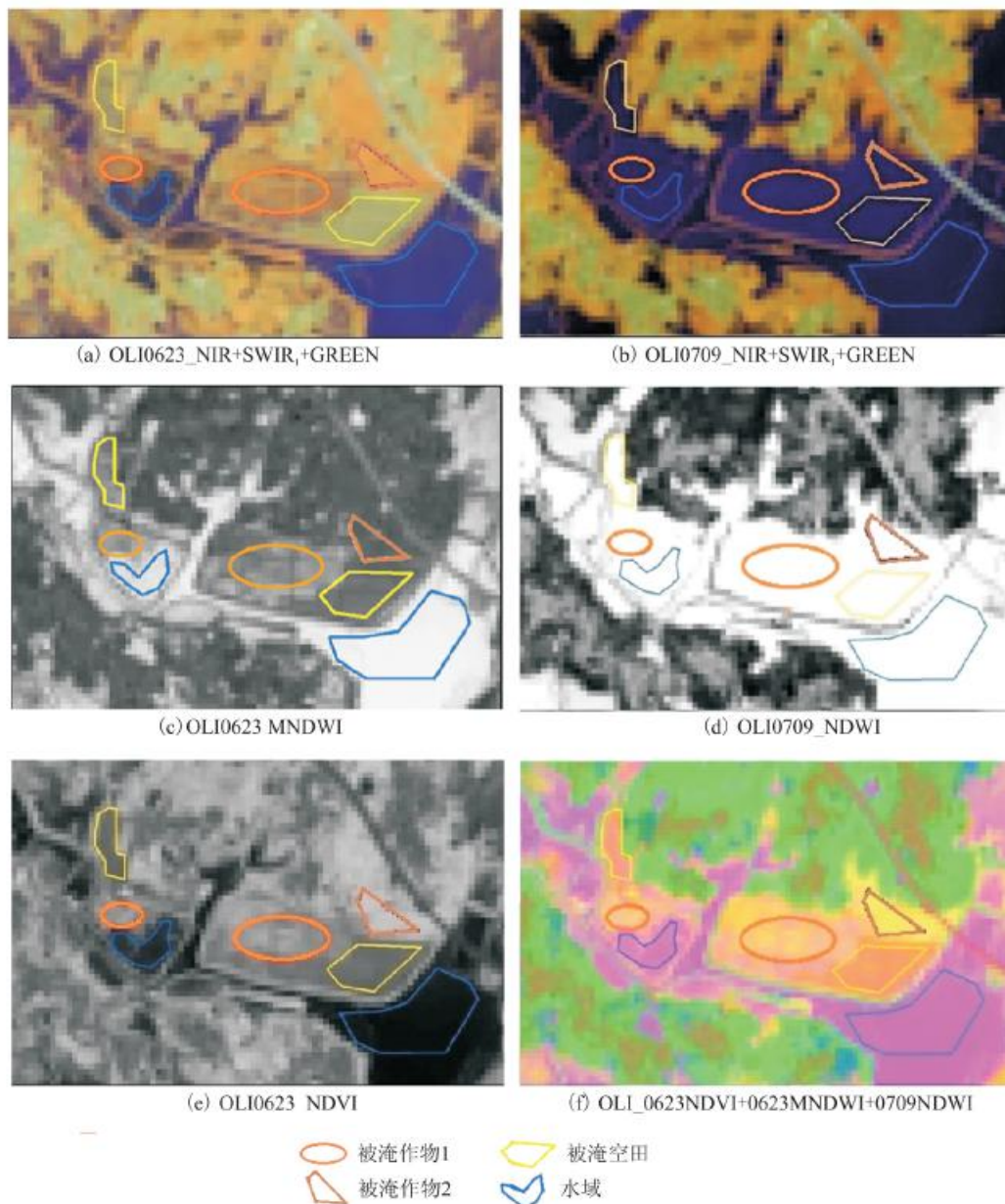


图2 研究区内水体和淹没区在2016年6月23日和7月9日OLI原影像及信息增强后的颜色表现

Fig. 2 Color Difference of Water and Flooded Area on Composed RGB Imagery of July 9<sup>th</sup> NDWI Images and June 23<sup>rd</sup> Images of NDVI and MNDWI in 2016

图2a和2b是采用2016年6月23日和7月9日研究区内局部地区的Landsat8/OLI多光谱影像，分别将它们第5、第6和第3波段按照“RGB”的显色模式进行波段组合显示的效果。对比两图可以发现，7月9日出现了早稻和空田被洪水淹没的现象，可是它们被淹没后，不论是在7月9日的OLI多光谱影像(图2b)还是NDWI指数影像(图2d)上面的表现特征都跟原有水体高度相似，从而很难对它们进行遥感区分。但是，在将6月23日的NDVI影像(图2e)和MNDWI影像(图2c)与7月9日的NDWI指数影像(图2d)进行RGB组合显示后，这些淹没区不仅与原有水体发生了显著的影像特征(色彩)变化，而且在被淹没的空田和作物之间也产生了明显的差异(图2f)。

为了验证上述方法对淹没区信息增强的有效性，作者还利用2016年7月25日Landsat8/OLI影像的NDWI指数与2016年

6月23日的NDVI指数和MNDWI指数进行了同样的合成试验,并将该合成影像从RGB颜色空间转换到蒙塞尔色彩空间HLC(Hue, Lightness and Chroma)以后,采用NBS(National Bureau of Standards Unit)距离度量法对原有水体与淹没区和退水区之间的色彩差异进行了测量<sup>[45~47]</sup>。结果(表1)显示原有水体与它们之间的NBS距离值都大于6.0,而从人类颜色视觉与NBS颜色距离的对应关系<sup>[48,49]</sup>来看,NBS值大于6.0时即能够用肉眼目测到显著不同的色差。由此可见,利用灾初的NDVI指数和MNDWI指数与灾后一段时间的NDWI指数进行组合形成的复合影像,可以凸显被淹区域与原有水体之间的影像差异,并且原有水体与淹没区和退水区等在该复合影像上的这种色彩差异非常有利于计算机视觉识别分类。

表1 研究区内水体与不同淹没区之间的NBS色彩距离系数(2016年6月23日~7月25日)

	0623 被淹	0623 早稻	0623 空田	0623 空田渍水	0623 空田渍水
	0725 退水	0725 被淹	0725 被淹	0725 被淹	0725 中稻
色彩距离值	6.297 0	17.697 3	16.001 3	7.706 8	11.722 3
视觉色差	显著差别	不同种颜色	不同种颜色	显著差别	著差别

## 2.2 水体及淹没区信息提取

如前所述,从洪涝灾害的发生发展过程来看,将灾区在淹没前的NDVI和MNDWI指数与淹没后的NDWI指数影像进行信息复合,可以有效凸显淹没区的影像表现特征(图2),从而有利于遥感区分原有水体和淹没区。为此,本研究获取了分别成像于本次洪灾初期、峰期中后期的三期OLI影像。然而,7月9日的OLI影像上局部地区有较多的云污染,需要参照成像于7月8日但缺少SWIR波段的GF1/WFV2影像以及其他时期的OLI影像等数据才能有效识别云覆盖区域的地面情况;同时,研究区内有部分区域在2016年6月23日之前已发生了洪涝灾害,但因为云雨天气等因素的影响,无法获取研究区域在邻近本次洪灾发生时的高质量OLI影像。

基于上述数据源状况,本文根据7月9日的OLI影像上是否有云覆盖而采用不同的淹没区信息提取策略(图3),具体过程是:



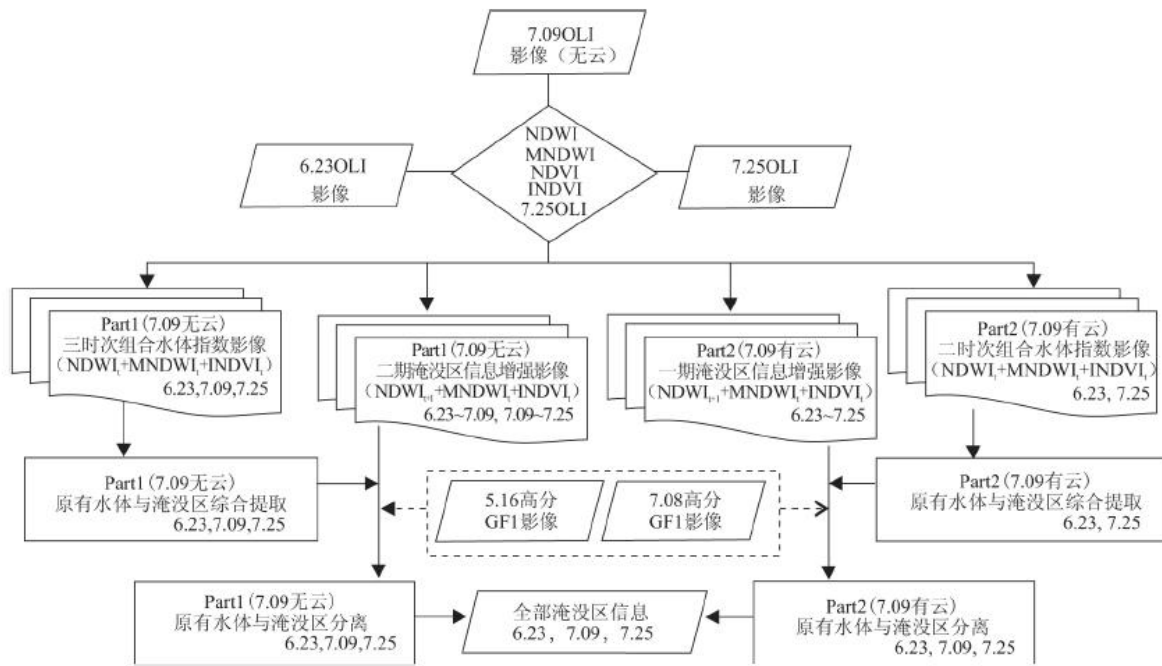


图3 研究区域不同时期原有水体与洪涝淹没范围的遥感识别区分方案

Fig. 3 Scheme of Discriminating Flooded Area From Water in the Study Region based on Remote Sensing Data During 23/6/2016–25/7/2016

(1) 基于无云覆盖组合水体指数影像的原有水体和淹没区信息的混合提取，方法是首先将公式(1)～(4)分别应用于2016年6月23日～7月25日的OLI影像，生成由NDWI、MNDWI、INDVI构成的组合水体指数影像，然后参照Googleearth高分影像和外业调查数据等，对该组合水体指数影像分别进行ISODATA自动分类，并从中筛选出包含所有淹没区和原有水体、但并不具体区分是原有水体还是淹没区的初始识别结果；

(2) 无云覆盖区原有水体和淹没区的信息分离：利用前一时次的NDVI和MNDWI数据与后一时次的NDWI数据所构成的淹没区信息增强影像，依据原有水体和淹没区在该增强影像上的明显差异，结合其他参考数据，分别从7月9日和7月25日组合水体指数影像的初始识别结果中区分出原有水体和当前淹没区内的被淹地物类型；

(3) 云覆盖区域的原有水体和淹没区信息分离：参照研究区域往年同期的OLI影像以及当年5月16日和7月8日的两期高分一号影像(GF1/WFV2和GF1/WFV3)等多种数据，对2016年6月23日组合水体指数影像的初始识别结果以及7月9日的OLI影像上被云覆盖的区域地表状况进行二次解译和目视修正，获取云覆盖区的原有水体和被淹没的地类信息；

(4) 按时间顺序，将上述过程获取的原有水体和淹没区的解译结果进行镶嵌处理，即可分别得到研究区域在2016年6月23日、7月9日和7月25日的被淹地类和原有水体信息。

(5) 利用本次洪水期间的实地调查数据，结合Google earth高分辨率影像等，对水体和淹没区的遥感识别结果进行了精度评估，结果显示分类总精度和kappa系数分别等于86.7%和79.84%，其中淹没区的解译准确率超过了87.7%，因此，本研究结果可用于后续的灾情监测。

### 2.3 洪灾动态评估模型

考虑到持续性的洪水淹没带来的影响更大，本文依据灾区的被淹没规模和淹水的持续时间来构建洪灾扩展动态指数 (Variation Index of Flood, VIF) 和区域间灾情比较指数 (Comparison Index of Flood Disaster, CIFD)，据此进行研究区域洪涝灾害的时空变化动态监测。基本思路是：假设某区域在  $t_1$  时刻首次爆发洪灾， $t_2$  时刻洪灾仍然存在，则区域内不同地方在  $t_2$  时刻受灾的状况可分为两种：一种属于  $t_1$  时刻被淹、 $t_2$  时刻再次被淹的原有淹没区，另一种是在  $t_1$  时刻未淹但  $t_2$  时刻被淹的新增淹没区，而这两类区域所遭受的洪灾影响显然不一样，在洪灾监测评估中应予以区别对待。基于这一思路，建立如下的洪灾扩展动态度和灾情比较指数模型：

$$VIF_{t_1, t_2} = \frac{S_{t_2}}{S_{t_1}} = \frac{\sum_{i=1}^n S_{0, t_2}^i + \Delta T_{t_1, t_2} \times \sum_{i=1}^n S_{t_1, t_2}^i}{\sum_{i=1}^n S_{t_1}^i} \quad (1)$$

$$CIFD_{t_1, t_2}^i = S_{0, t_2}^i / \sum_{i=1}^n S_{0, t_2}^i + \Delta T_{t_1, t_2} \times S_{t_1, t_2}^i / \sum_{i=1}^n S_{t_1, t_2}^i \quad (2)$$

公式 (1) 和 (2) 中： $VIF_{t_1, t_2}$  为研究区域从  $t_1$  时刻到  $t_2$  时刻的洪灾扩展动态指数。 $CIFD_{t_1, t_2}^i$  为研究区内第  $i$  个地方 ( $i = 1, 2, 3, \dots, n$ ) 的灾情可比指数， $S_{t_1}$  为  $t_1$  时刻 (灾初期) 研究区内的淹没总面积， $S_{t_2}$  为  $t_2$  时刻研究区内的淹没面积加权和， $S_{t_1}^i$  为  $t_1$  时刻 (灾初期) 研究区内第  $i$  个地方的淹没面积， $S_{0, t_2}^i$  是指研究区内第  $i$  个地方仅在  $t_2$  时刻被淹的面积， $S_{t_1, t_2}^i$  是指研究区内第  $i$  个地方在  $t_1$ 、 $t_2$  时刻都被淹的面积， $\Delta T_{t_1, t_2}$  为  $t_1$  时刻到  $t_2$  时刻的洪灾持续时间权重系数，该系数主要考虑到洪水淹没时长与洪涝灾害的严重程度呈正相关，因此淹没时间越长， $\Delta T_{t_1, t_2}$  的取值越大。

洪灾发生后通常都要持续一段时间，在此期间因为降雨以及次生涝灾等因素的影响，淹没区的灾情处于不断的动态变化之中。因此，需使用洪灾发生后更多时次的观测数据才能满足精准掌握洪灾变化趋势、准确评估洪涝实时灾情的要求，由此也使得洪灾扩展动态指数和受灾区域内部各地的灾情指数计算需在上述方案的基础上进行调整。现假设对某区域一共开展了 3 个时次的洪灾监测，其中由  $t_1$  时刻到  $t_2$  时刻的洪灾扩展动态指数 VIF 和区域间的灾情可比指数 CIFD 采用公式 (1) 和 (2) 进行求算，对于  $t_2$  时刻到  $t_3$  时刻的 VIF 以及 CIFD 指数，则应根据区域内不同地方的受淹时长，采用公式 (3) 和 (4) 分别进行计算。



$$\begin{aligned}
VIF_{t_2, t_3} &= S_{t_3}/S_{t_2} = \left( \sum_{i=1}^n S_{0, 0, t_3}^i + \Delta T_{0, t_2, t_3} \times \right. \\
&\quad \left. \sum_{i=1}^n S_{0, t_2, t_3}^i + \Delta T_{t_1, 0, t_3} \times \sum_{i=1}^n S_{t_1, 0, t_3}^i + \right. \\
&\quad \left. \Delta T_{t_1, t_2, t_3} \times \sum_{i=1}^n S_{t_1, t_2, t_3}^i \right) / S_{t_2} \quad (3) \\
GIDF_{t_2, t_3}^i &= \left[ \left( S_{0, 0, t_3}^i / \sum_{i=1}^n S_{0, 0, t_3}^i \right) + \Delta T_{0, t_2, t_3} \times \right. \\
&\quad \left( S_{0, t_2, t_3}^i / \sum_{i=1}^n S_{0, t_2, t_3}^i \right) + \Delta T_{t_1, 0, t_3} \times \right. \\
&\quad \left( S_{t_1, 0, t_3}^i / \sum_{i=1}^n S_{t_1, 0, t_3}^i \right) + \Delta T_{t_1, t_2, t_3} \times \right. \\
&\quad \left. \left. \left( S_{t_1, t_2, t_3}^i / \sum_{i=1}^n S_{t_1, t_2, t_3}^i \right) \right] \quad (4)
\end{aligned}$$

公式(3)和(4)中,  $VIF_{t_2, t_3}$ 为研究区域从  $t_2$  时刻到  $t_3$  时刻的洪灾扩展动态指数,  $CIDF_{t_2, t_3}^i$  为研究区内第  $i$  个地方从  $t_2$  时刻到  $t_3$  时刻的灾情比较指数,  $S_{t_2}$  的含义同公式(1),  $S_{t_3}$  为  $t_3$  时刻区域内的淹没面积加权和,  $S_{0, 0, t_3}^i$  是指研究区内第  $i$  个地方仅在  $t_3$  时刻被淹的面积,  $S_{0, t_2, t_3}^i$  是指研究区内第  $i$  个地方在  $t_2$ 、 $t_3$  时刻被淹但在  $t_1$  时刻未被淹的面积,  $S_{t_1, 0, t_3}^i$  是指研究区内第  $i$  个地方在  $t_1$  时刻被淹、 $t_2$  时刻未被淹、 $t_3$  时刻再次被淹的面积,  $S_{t_1, t_2, t_3}^i$  是指研究区内第  $i$  个地方在  $t_1$ 、 $t_2$ 、 $t_3$  时刻都被淹的面积,  $\Delta T_{0, t_2, t_3}$ 、 $\Delta T_{t_1, 0, t_3}$ 、 $\Delta T_{t_1, t_2, t_3}$  也都为洪灾持续时间权重系数, 但  $\Delta T_{0, t_2, t_3}$  是指在  $t_1$  时刻未被淹但在  $t_2$  和  $t_3$  时刻都被淹的洪灾持续时间权重系数、 $\Delta T_{t_1, 0, t_3}$  是指在  $t_2$  时刻未被淹但在  $t_1$  和  $t_3$  时刻都被淹的洪灾持续时间权重系数、 $\Delta T_{t_1, t_2, t_3}$  则指在  $t_1$  时刻、 $t_2$  时刻和  $t_3$  时刻都被淹的洪灾持续时间权重系数。

### 3 实验结果及分析

#### 3.1 受灾范围及空间分布

综合本次灾情的遥感监测结果(图4)来看,研究区域在2016年6月23日、7月9日和7月25日的受灾面积共计33329.28  $\text{hm}^2$ , 其中, 鄱阳县受灾面积约7508  $\text{hm}^2$ , 占全部受灾面积的22.5%, 居于各受灾县市之首; 其次是永修县, 受灾面积及其占比分别为5392  $\text{hm}^2$  和16.2%。除此之外, 余干、都昌、南昌、新建、星子、进贤等地在此次洪灾中的受淹面积都超过1000  $\text{hm}^2$ , 它们与鄱阳、永修两县的受灾面积共计26882.67  $\text{hm}^2$ , 占研究区域全部受灾面积的81%。

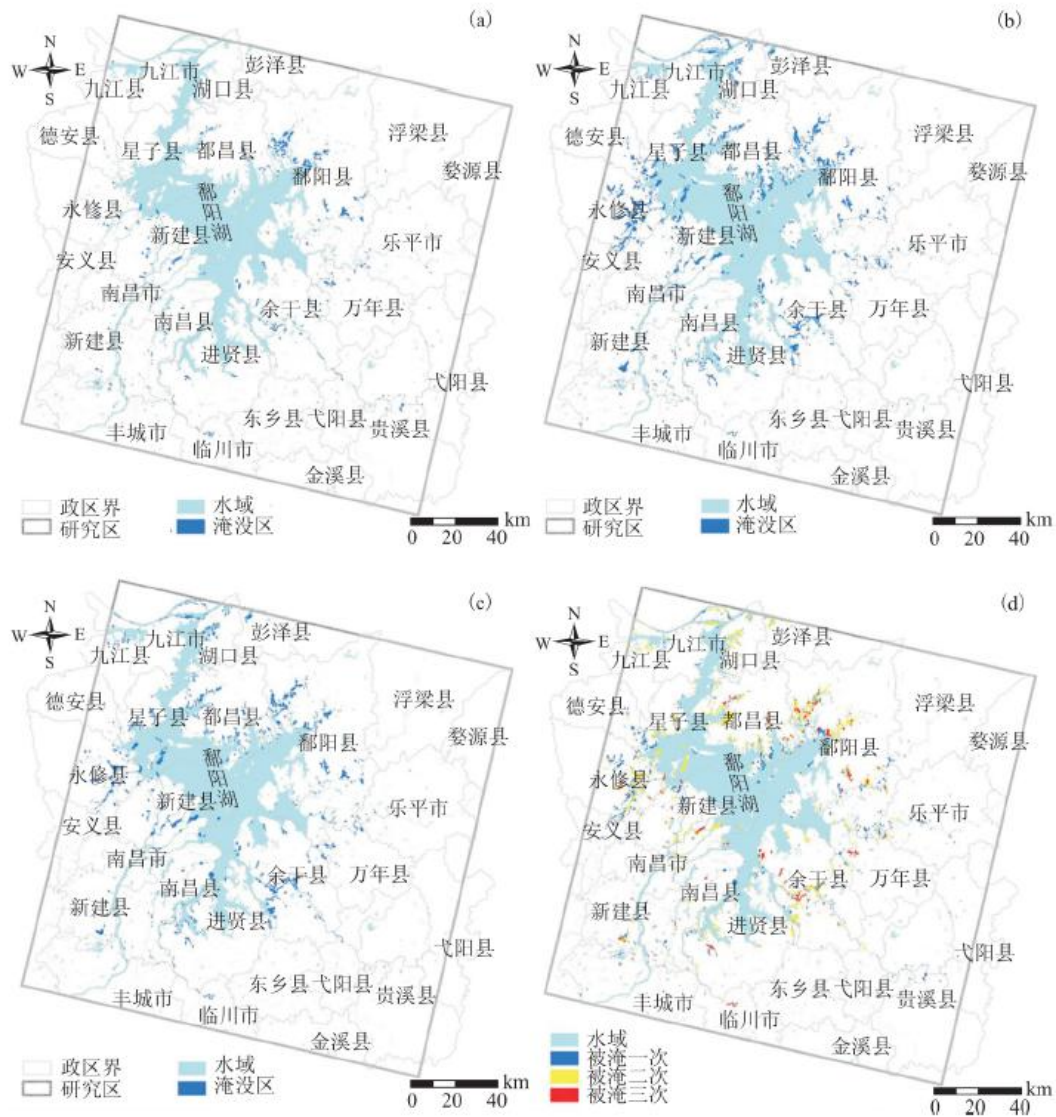


图4 研究区域洪涝淹没范围的时空变化(23/6/2016~25/7/2016)

Fig. 4 Spatial-Temporal Change of Flooded Area in the Study Region During 23/6/2016–25/7/2016

就本次洪灾淹没范围的空间分布来说, 绝大部分受灾区位于鄱阳湖周边的滨湖地带(图4), 其原因主要在于鄱阳湖流域自2016年3月入汛以后出现了连续强降雨天气<sup>[32, 33]</sup>, 再加上6~7月份长江水位上涨超过鄱阳湖水位以后倒灌入鄱阳湖<sup>[34]</sup>, 从而使得研究区内的滨湖低洼地方出现了洪水与内涝灾害相叠加的混合型洪涝现象<sup>[35]</sup>。

### 3. 2 洪涝灾情演变分析

依据研究区域在2016年6月23日、7月9日和7月25日的洪涝灾害遥感监测结果, 首先采用GIS空间分析功能来获取新增淹没区、退水区以及被淹一次、两次或三次的灾区面积信息, 然后采用公式(1)和公式(3), 分别计算研究区域在6月23日~7月9日和7月9日~7月25日期间的洪灾扩展动态指数。结果显示: 研究区域在这两个时段内的VIF指数分别为3.75和1.29, 表明研究区内的洪涝灾情呈先突增后缓降的趋势, 这与2016年夏季鄱阳湖的同期水位变化情况基本相一致(图5)。

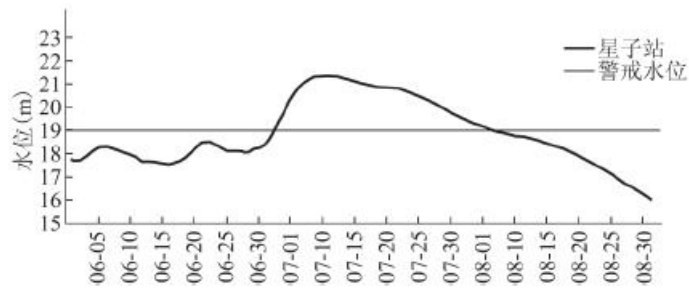
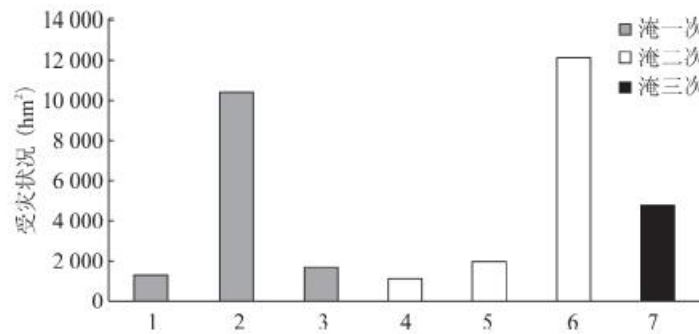


图5 研究区域的水位变化情况  
(2016年6月1日~8月30日)

Fig. 5 Water Level of Poyang Lake  
from June to August in 2016

另外, 灾初期(6月23日)研究区内的受灾面积为9 136. 044 5  $\text{hm}^2$ , 被淹区域主要分布于鄱阳县境内(图4a、图6); 7月9日, 研究区内的受灾面积扩大到28 397. 452 7  $\text{hm}^2$ , 其中属于6月23日和7月9日都被淹的灾区面积为5 890. 869 5  $\text{hm}^2$ , 只在7月9日被淹的新增灾区面积为22 506. 583 3  $\text{hm}^2$ , 占当日受灾总面积的79. 25%, 并且在整个研究区内爆炸式分布, 在鄱阳、都昌、余干、永修和星子等受灾严重的县市则连片出现(图4b、图6); 7月25日, 研究区内的受灾面积减小到20 547. 185 6  $\text{hm}^2$ , 其中: 只在7月25日被淹的新增灾区面积占当日受灾总面积的8. 21%, 为1 686. 653 6  $\text{hm}^2$ , 明显小于7月9日的新增淹没区范围, 但此时研究区内有23. 25%的受灾区域属于6月23日首次被淹、7月9日和7月25日仍然被淹, 68. 54%的受灾区域是7月9日首次被淹7月25日继续被淹或6月23日首次被淹7月9日未淹7月25日再次被淹(图4c、图4d、图6), 而这种长时间持续被淹现象, 对于灾区的农业生产, 尤其是当季作物早稻等的生长极为不利。



注: 1表示仅在6月23日被淹, 2表示仅在7月9日被淹, 3表示仅在7月25日被淹, 4表示在6月23日和7月9日都被淹, 5表示在6月23日和7月25日都被淹, 6表示在7月9日和7月25日都被淹, 7表示在6月23日、7月9日和7月25日都被淹。

图6 研究区域在不同时间节点的受灾状况

Fig. 6 Extent of Inundation in the Study Region at  
Different Observation Time in 2016

### 3. 3 各地灾情比较分析

精准应急救援和防汛抗涝调度决策不仅需要整个区域的灾情发展变化趋势, 还需要掌握灾区内各地的灾情(轻重)程度信息。

然而，洪灾发生后，常因为后续降雨以及次生涝灾和地形差异等多种因素的影响，使得具有不同淹水时长的淹没范围在灾区内非均匀分布，各地的洪涝灾情也处于不断的动态变化之中。鉴于此，结合研究区内遭受洪灾的地方往往种植了水稻等农作物，而长时间的淹水将会导致作物减产等现象的产生，对研究区内各县市不同淹水时长的受灾面积进行分析统计，以及各县市境内相对于整个研究区域的不同淹水程度的淹没范围面积比计算，在此基础上依据公式(4) 获得各地的灾情比较指数(图 7)。从 CIFD 指数值的计算结果来看，鄱阳县最高，为 1.954 0，居于各受灾县市之首，这跟该县不仅洪涝淹没范围最广，而且在其境内还分布有大量的长时间持续淹水区域有关。永修县以 0.657 4 的 CIFD 值居于第二位，但仅略高于余干县的 0.602 3，这显然与永修县的受灾面积(5 392hm<sup>2</sup>) 远远高于余干县(2 908 hm<sup>2</sup>) 的态势并不完全吻合，而造成该现象的原因与永修县境内在 6 月 23 日、7 月 9 日和 7 月 25 日只淹水一次的被淹灾区面积较大，长时间持续被淹的灾区面积较小有关；相比之下，余干县有 575 hm<sup>2</sup> 的灾区在 6 月 23 日~ 7 月 25 日之间都被淹，远远高于永修县境内连续 3 次都被淹的灾区面积( 187 hm<sup>2</sup>)。类似于永修县这种受灾总面积较大但因为长时间持续性的淹水范围较小，从而使得灾情有所减轻的现象在都昌县和星子县也同样存在(图 8)。

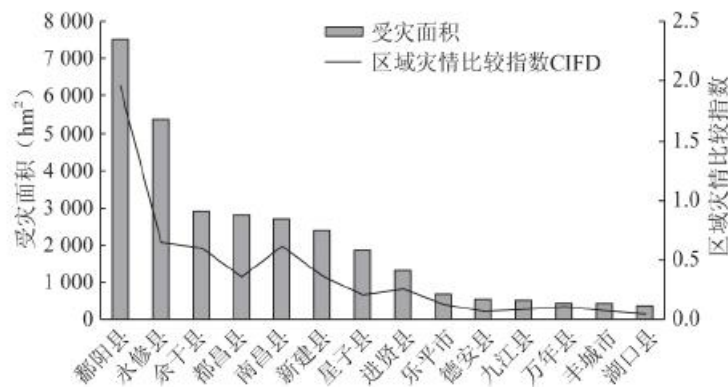


图 7 研究区内不同县市的总受灾面积和灾情比较指数  
 Fig. 7 Total Acreage of Inundation and CIFD Index of the Study Region at County Scale During 23/6-25/7/2016

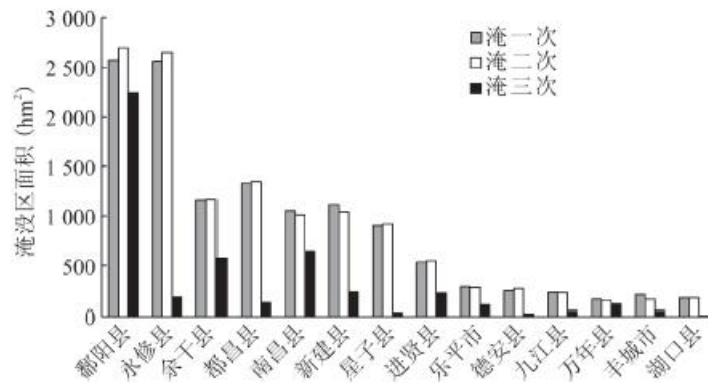


图 8 研究区内各县市不同受灾程度的淹没区面积统计  
 Fig. 8 Acreage of Different-Degree Inundation in the Study Region at County Scale During 23/6-25/7/2016

### 3. 4 讨论

农业洪涝灾情的评估需要综合受灾面积和作物的灾损情况。在本研究建立的农业洪灾动态变化遥感快速监测模型中,各淹没区面积因子按照被淹时间来赋予相应的权重,这种赋权方法简单直接有效,所得结果也较为客观地反映出了淹没时长在农业洪灾影响评估中的作用。但是,对于有作物的受灾区域来说,不同淹水时长导致的各类作物灾损情况并不相同,因此上述赋权方法仍然难以满足灾情评估中淹没时长贡献度的精确测度要求。另外,准确识别出被淹没的各种作物类型是量化灾害损失的前提。然而,鄱阳湖区2016年3月份即进入主汛期、6月初已遭受洪灾侵袭<sup>[32]</sup>,再加上6月下旬~7月下旬,该地区正处于早稻黄熟-收获、中稻分蘖拔节-孕穗以及晚稻播种的阶段,在此情况下,准确判别出本研究时段内(6月23日~7月25日)除了早稻以外的其他被淹作物类型等非常困难,这也将是后续进一步深入开展本项研究需要克服的首要挑战。

## 4 结论

依据淹没后内由水和被淹作物等组成的“复合水体”不同于纯水体的波谱时间变化特性,将不同时期的NDVI、MNDWI和NDWI指数进行信息复合,能够使得水体和洪涝淹没区的影像(色彩)差异得以凸显,据此以较高精度实现了水体与洪涝淹没区的遥感区分。2016年夏季,鄱阳湖区的总受灾面积约33 329.28 hm<sup>2</sup>,其中81%的受灾面积分布于鄱阳、永修、余干、都昌、南昌、新建、星子、进贤等县市。

依据农业洪涝灾情随着淹没时长而加重以及灾区内淹没时长非均匀分布的特性,建立了基于淹没时长的受淹面积不等权参与的洪灾扩展动态指数模型,据此进行研究区域2016年夏季农业洪涝灾害时空变化分析。在2016年6月23日~7月25日期间,鄱阳湖区的农业洪灾呈现出由弱增强再趋弱的灾情演变趋势,这一结果与该区域2016年夏季洪灾的实际变化过程相符合。最大受灾面积见于2016年7月9日(洪峰期),为28 397.4527 hm<sup>2</sup>,是6月23日(灾初期)的3倍;2016年7月25日(中后期),受灾面积较7月9日减少7 850 hm<sup>2</sup>,但仍然较6月23日(灾初期)的淹没面积高出124.9%。

针对灾区内淹水时长非均匀分布,且各地灾情处于不断的动态发展变化中,构建了便于对比分析灾区内不同地方洪涝灾害影响的区域灾情评估指数模型。该模型能够同时涵盖各地的淹水时长、受灾面积及其所占比重等方面的信息,由此得到的灾情评估结果较好反映了不同区域之间的灾情差异。鄱阳县是研究区内受灾最为严重的区域,该县的受灾范围(绝对规模)和多次被淹的重灾区面积都高于其他县市;受灾面积较大的永修县因为长时间持续性淹水的重灾区面积占比较小而使得其灾情相对较轻;受灾面积相对永修县明显较小的余干县,因为其境内在6月23日~7月25日之间都被淹的重灾区面积较大,其灾情程度严重于永修县。

### 参考文献:

[1] RAHMAN M S, DI L. The state of the art of spaceborne remote sensing in flood management [J]. *Natural Hazards*, 2017, 85(2) : 1223-1248.

[2] 顾西辉,张强,张生. 1961~2010年中国农业洪旱灾害时空特征、成因及影响[J]. *地理科学*, 2016, 36(3) : 439-447.

【GU X H, ZHANG Q, ZHANG S. Spatio-temporal properties of flood/drought hazards and possible causes and impacts in 1961-2010 [J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2016, 36(3) : 439-447.】

[3] 万金红,张葆蔚,刘建刚,等. 1950~2013年我国洪涝灾情时空特征分析[J]. *灾害学*, 2016, 31(2) : 63-68.

【WAN J H, ZHANG B W, LIU J G, et al. The distribution of flood disaster loss during 1950-2013 [J]. *Journal*



---

of Catastrophology, 2016, 31(2) : 63–68. 】

[4] KLEMAS V. Remote sensing of floods and flood-prone areas: an overview [J]. Journal of Coastal Research, 2015, 31 (4) :1005–1013.

[5] ALFIERI L, SALAMON P, BIANCHI A, et al. Advances in pan-European flood hazard mapping [J]. Hydrological Processes, 2014, 28(13) : 4067–4077.

[6] WANG Y. Advances in Remote Sensing of Flooding [J]. Water, 2015, 7(11) : 6404–6410.

[7] EMMANUEL U A, OJINNAKA O C, BAYWOOD C N, et al. Flood hazard analysis and damage assessment of 2012 flood in anambra state using GIS and remote sensing approach [J]. American Journal of Geographic Information System 2015, 4(1) :38–51.

[8] RANGO A, ANDERSON A T. Flood hazard studies in the Mississippi River Basin using remote sensing [J]. Water Resources Bulletin, 1974, 10(5) : 1060–1081.

[9] YAMAGATA Y, AKIYAMA T. Flood damage analysis using multitemporal Landsat Thematic Mapper data [J]. International Journal of Remote Sensing, 1988, 9(3) : 503–514.

[10] BRIVIO P A, COLOMBO R, MAGGI M, et al. Integration of remote sensing data and GIS for accurate mapping of flooded areas [J]. International Journal of Remote Sensing, 2002, 23(3) : 429–441.

[11] DHAKAL A S, AMADA T, ANIYA M, et al. Detection of areas associated with flood and erosion caused by a heavy rainfall using multitemporal Landsat TM Data [J]. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 2002, 68(3) : 233–239.

[12] 朱强, 陈秀万, 彭俊. 基于网格的洪水损失计算模型 [J]. 武汉大学学报(工学版), 2007, 40(6) : 42–46.

【ZHU Q, CHEN X W, PENG J. A mathematical model for flood loss estimation based on grid [J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2007, 40(6) : 42–46. 】

[13] SHAN J, HUSSAIN E, KIM K, et al. Flood mapping with satellite images and its web service [J]. Photogrammetric Engineering And Remote Sensing, 2010, 76(2) : 102–105.

[14] PULVIRENTI L, CHINI M, PIE RDICCA N, et al. Flood monitoring using multi-temporal COSMO-SkyMed data: Image segmentation and signature interpretation [J]. Remote Sensing of Environment, 2011, 115 (4) : 990–1002.

[15] SINGH K K, SINGH A. Identification of flooded area from satellite images using Hybrid Kohonen Fuzzy C-Means sigma classifier [J]. Egyptian Journal of Remote Sensing & Space Science, 2016, doi: 10. 1016 /ejrs. 2016. 04003.

[16] 周成虎. 洪水灾情评估信息系统研究 [J]. 地理学报, 1993(1) : 11–18.



- 
- 【ZHOU C H. On flood hazard evaluation information system [J]. Acta Geographica Sinica, 1993(1) : 11–18.】
- [17] 魏成阶, 王世新, 阎守邕, 等. 1998 年全国洪涝灾害遥感监测评估的主要成果——基于网络的洪涝灾情遥感速报系统的应用 [J]. 自然灾害学报, 2000, 9(2) : 16–312.
- 【WEI C J, WANG S X, YAN S Y, et al. The main accomplishment of flood hazard monitoring and evaluating for China by remote sensing in 1998—the application of flood hazard’s quick reporting system remote sensing based on network [J]. Journal of Natural Disasters, 2000, 9(2) : 16–312.】
- [18] 彭定志, 郭生练, 黄玉芳, 等. 基于 MODIS 和 GIS 的洪灾监测评估系统 [J]. 武汉大学学报(工学版), 2004, 37(4) : 7–10.
- [PENG D Z, GUO S L, HUANG Y F, et al. Flood disaster monitoring and assessing system based on MODIS and GIS [J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2004, 37(4) : 7–10.】
- [19] DI L, YU G, KANG L, ZHANG B, et al. A remote-sensing-based flood crop loss assessment cyber-service system for supporting crop statistics and insurance decision making [Z]. In: Proceedings of IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics (IEEE SMC2013) Special Session on Environmental Sensing, Networking and Decision Making, October 13–16, 2013, Manchester, UK.
- [20] 蔡毅, 朱秀芳, 陈阿娇, 基于遥感抽样的农作物灾害损失评估方法(I)——模拟实验研究 [J]. 农业现代化研究, 2015(4) : 690–695.
- 【CAI Y, ZHU X F, CHEN A J. Crop loss assessment based on remote sensing and statistical sampling techniques [J]. Research of Agricultural Modernization, 2015(4) : 690–695.】
- [21] APEL H, THIEKEN A H, MERZ B, et al. Flood risk assessment and associated uncertainty [J]. Natural Hazards & Earth System Sciences, 2004, 4(2) : 295–308.
- [22] VOIGT S, KEMPER T, RIEDLINGER T, et al. Satellite image analysis for disaster and crisis-management support [J]. IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing, 2007, 45(6) : 1520–1528.
- [23] MARCHI L, BORGAM, PRECISO E, et al. Characterisation of selected extreme flash floods in Europe and implications for flood risk management [J]. Journal of Hydrology, 2010, 394(1–2) : 118–133.
- [24] CLAUDIA K, ADONGGUO H U, SKAKUN S, et al. Flood hazard and flood risk assessment using a time series of satellite images: a case study in Namibia [J]. Risk Analysis, 2014, 34(8) : 1521–1537.
- [25] ASARE-KYEI D. Modeling flood hazard zones at the sub-district level with the rational model integrated with GIS and remote sensing approaches [J]. Water, 2015, 7(7) : 3531–3564.
- [26] 田玉刚, 廖小露, 张长兴. 基于时间序列 MODIS 影像的暴雨后作物淹没历时提取方法 [J]. 遥感技术与应用, 2012, 27(5) : 778–783.

---

【TIAN Y G, LIAO X H, ZHANG C X. Method on crop inundated time extraction after rain-storm using time series MODIS images [J]. Remote Sensing Technology and Application, 2012, 27(5) : 778—783. 】

[27] 王品, 张朝, 陈一, 等. 湖南省暴雨洪涝灾害及其农业灾情评估 [J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 2015, 51(1) : 75—79.

【WANG P, ZHANG Z, CHEN Y, et al. Spatial-temporal patterns of rainstorm-flood in Hunan Province and the related agricultural damage assessments [J]. Journal of Beijing Normal University(Natural Science), 2015, 51(1) : 75—79. 】

[28] 徐鹏. 洪涝胁迫的水稻长势光谱响应与灾情遥感评估 [D]. 西安科技大学, 2014.

【XU P. Spectral response of growth and disaster assessing for rice under flooding and waterlogging stress [D]. Xi'an University of Science and Technology, 2014. 】

[29] 谢彦, 张茂文, 刘许生, 等. 洪涝对早、中稻生产的影响调查与研究结果简报 [J]. 中国农学通报, 2011, 27(9) : 281—286.

【XIE Y, ZHANG M W, LIU X S, et al. Floods of early rice production and research results presentation impact survey [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2011, 27(9) : 281—286. 】

[30] 王振省. 分蘖期淹涝胁迫对水稻生长的影响及其应用研究 [D]. 扬州大学, 2015.

【WANG Z S. Research on effects of Waterlogging Stress on rice growth at tillage stage and its application [D]. Yangzhou University, 2015. 】

[31] 马定国, 刘影, 陈洁, 等. 鄱阳湖区洪灾风险与农户脆弱性分析 [J]. 地理学报, 2007, 62(3) : 321—332.

【MAD G, LIU Y, CHEN J, et al. Farmers' vulnerability to flooding in the poyang lake region [J]. Acta Geographica Sinica, 2007, 62(3) : 321—332. 】

[32] 王樊. 江西进入主汛期, 江西新闻网, 2016-03-23, <http://jiangxi.jxnews.com.cn/system/2016/03/23/014777814.shtml>.

[33] 吴继波. 率先建立机制, 科学搭建平台主动引导社会力量有序参与抗洪救灾 [J]. 中国减灾, 2016(17) : 28—31.

【WU J B. Take the lead in establishing a mechanism to establish a mechanism and actively guide social forces to build a platform of scientific and orderly participation in flood relief [J]. Journal of Disaster Reduction in China. 2016(17) : 28—31. 】

[34] 李征, 王欢, 王祺. 长江洪水倒灌鄱阳湖, 洪涝灾害已致我省损失 3.3 亿元, 中国江西网, 2016-07-05. <http://jiangxi.jxnews.com.cn/system/2016/07/05/015017870.shtml>.

- 
- [35] 林联盛, 李加洪, 刘道南, 等. 鄱阳湖地区洪涝灾情及其遥感分析 [J]. 遥感技术与应用, 1997(1) : 31—35.
- 【LIN L S, LI J H, LIU D N, et al. Flooding and waterlogging disaster condition and remote sensing analysis of Poyang Lake Region [J]. Remote Sensing Technology and Application, 1997(1) : 31—35. 】
- [36] 刘剑宇, 张强, 顾西辉, 等. 鄱阳湖流域洪水变化特征及气候影响研究 [J]. 地理科学, 2016, 36 (8) : 1234—1242.
- 【LIU J Y, ZHANG Q, GU X H, et al. Floods characteristics and impacts from climate indices in the Poyang Lake Basin [J]. Scientia Geographica Sinica, 36 (8) : 1234—1242. 】
- [37] Department of the Interior U S Geological Survey (2016) . LANDSAT 8 (L8) DATA USE RS HANDBOOK. Online.
- [38] 赵裴, 时信华. 面向洪水灾害遥感监测的多星观测调度方法 [J]. 科学技术与工程, 2013, 13(2) : 528—533.
- 【ZHAO P, SHI X H. Multi-satellites observing scheduling based on dynamic task merging for disaster monitoring [J]. Science Technology and Engineering, 2013, 13(2) : 528—533. 】
- [39] 杨存建, 周成虎. 利用 RADARSAT SWASAR 和 Landsat TM 的互补信息确定洪水水体范围 [J]. 自然灾害学报, 2001, 10(3) : 43—50.
- 【YANG C J, ZHOU C H. Application of complementary Information of RADARSAT SWA SAR and Landsat TM in deciding the flood extent [J]. Journal of Natural Disasters, 2001, 10(3) : 43—50. 】
- [40] 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.
- 【LI J L, CAO L D, PU R L. Progresses on monitoring and assessment of flood disaster in remote sensing [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2014, 45(3) : 253—260. 】
- [41] MCFEETERS S K. The use of the Normalized Difference Water Index ( NDWI) in the Delineation of open water features [J]. International Journal of Remote Sensing. 1996, 17(7) : 1425—1432.
- [42] XU H Q. Modification of normalised difference water index (NDWI) to enhance open water features in remotely sensed imagery [J]. International Journal of Remote Sensing, 2006, 27(14) : 3025 - 3033.
- [43] 王嘉芑, 刘婷, 俞志强, 等. 基于 COSMO\_ SkyMed 和 SPOT-5 的城镇洪水淹没信息快速提取研究 [J]. 遥感技术与应用, 2016, 31(3) : 564—571.
- 【WANG J P, LIU T, YU Z Q, et al. A research on town flood information rapid extraction based on COSMO-SkyMed and SPOT-5 [J]. Remote Sensing Technology and Application, 2016, 31(3) : 564—571. 】
- [44] 郑伟, 刘闯, 曹云刚, 等. 基于 Asar 与 TM 图像的洪水淹没范围提取 [J]. 测绘科学, 2007, 32(5) : 180—181.

---

【ZHENG W, LIU C, CAO Y G, et al. Extracting the flood inundated area based on Asar and TM image [J]. Science of Surveying and Mapping, 2007, 32(5) : 180—181. 】

[45] MIYAHARA M, YOSHIDA Y. Mathematical transform of (R, G, B) color data to Munsell( H, V, C) color data [J]. SPIE Visual Communications and Image Processing, 1988, 1001(3) : 650—657.

[46] 王圆圆, 丁志杰, 万华林. 基于视觉颜色聚类的彩色图像分割 [J]. 北京理工大学学报, 2003, 23(6) : 772—775.

【WANG Y Y, DING Z J , WAN H L. Perceptual color clustering for limage segmentation [J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2003, 23(6) : 772—775. 】

[47] 王可, 陆长德, 乐万德. 色彩相似性度量的研究与应用 [J]. 计算机应用研究, 2005(10) : 168—170.

【WANG K, LU CD, YUE W D. Research and application of color similarity measurement [J]. application research of computers, 2005(10) : 168—170. 】

[48] GONG Y, PROIETTI G, FALOUTSOS C. Image indexing and retrieval based on human perceptual color clustering [Z]. In: Proceedings of the International Conference on Computer Vision & Pattern Recognition, Mumbai, 1998: 578—585.

[49] LI X, ZHAO Z, CHENG H, et al. A fuzzy logic approach to image segmentation [Z] //Proceedings of the 12th IAPR International Conference on Pattern Recognition, Jerusalem, 1994, 1: 337—341.