

doi: 10.6046/gtzyyg.2014.03.11

引用格式: 王亚飞,程亮,李满春,等.基于像元级 SAR 图像时间序列相似性分析的水体提取[J].国土资源遥感,2014,26(3):67-73.(Wang Y F,Cheng L,Li M C,et al.Extraction of water areas based on similarity analysis using pixel-level SAR image time series[J].Remote Sensing for Land and Resources,2014,26(3):67-73.)

# 基于像元级 SAR 图像时间序列相似性分析的水体提取

王亚飞,程亮,李满春,陈伟,陈小雨,谌颂

(南京大学江苏省地理信息技术重点实验室 南京 210093)

摘要:针对 SAR 图像数据集的特点,提出了一种基于像元级图像时间序列相似性的水体提取方法。其基本思想是:构建像元级 SAR 图像时间序列,选取动态时间归整(dynamic time warping,DTW)算法作为时间序列相似度的度量方法,计算所有像元与标准水体像元时间序列的相似性;将水体边缘混合像元的 DTW 距离值设定为参考阈值,采用阈值法提取相似性较高的时间序列数据,其对应的像元即被识别为水体像元;最后利用每个像元的 DTW 距离值代替其后向散射值,采用 8 邻域搜索方法提高水体识别的精度。以 2008 年 1—12 月获取的 25 景分辨率为 150 m 的 ENVISAT ASAR 图像进行水体像元提取试验,结果表明,该方法的完整率和正确率均较高,能够应用于大范围区域水体的提取与制图。

关键词: SAR; 像元级; 时间序列; 相似性; 动态时间归整(DTW); 水体分布提取

中图法分类号: TP 751.1 文献标志码: A 文章编号: 1001-070X(2014)03-0067-07

## 0 引言

水资源是自然生态环境资源的重要组成部分,水资源的分布和供需状况已经成为评价一个国家或地区综合竞争力的重要指标之一<sup>[1-2]</sup>。遥感技术在水体分布提取方面得到了广泛的应用,如利用 MODIS, TM, SPOT 等卫星遥感图像进行水体提取<sup>[3-7]</sup>。在微波遥感领域, SAR 图像能够不受日照和天气条件的限制完成对地观测任务,并对某些地物具有一定的穿透能力,具有多极化、多入射角、多模式和短重访周期等特点,在水资源提取与监测中具有独特的优势<sup>[8-9]</sup>。然而,由于 SAR 斜距成像的特点,山体阴影、雨季积水及部分植被严重影响了水体提取的精度<sup>[10-12]</sup>。针对 SAR 图像中的水体目标,学者们提出了很多提取方法,如小波纹理分析<sup>[13]</sup>、模糊加权支持向量机<sup>[14]</sup>、主成分变换<sup>[15]</sup>、最大类间方差阈值法<sup>[16]</sup>和非线性滤波<sup>[17]</sup>等。然而上述方法都存在以下缺点:①大多针对单景图像提取水体,无法去除雨季积水及部分植被(如水稻)的影响;②采用多时相水体提取方法虽能够在一定程度上克服以上影响,但不够彻底;③制图要求中明确规定,湖泊、水库等水体制图应以水涯线(即 1 a 中大部分时间

平稳的常水位)为准,而以往的方法只能提取瞬时图像中的水体分布,无法提取常年稳定的水体面积。

针对以上问题,本文提出了一种基于动态时间归整(dynamic time warping,DTW)的 SAR 图像时间序列水体提取方法。其主要步骤有:①构建像元级 SAR 图像时间序列,生成时间序列文本数据;②采样选取纯净水体像元和混合水体像元的时间序列,计算其 DTW 值作为参考阈值;③计算所有像元的像元级 SAR 图像时间序列与纯净水体像元时间序列的 DTW 值,采用阈值法分割 SAR 图像,获取二值图像;④采用 8 邻域搜索方法对二值图像进行运算,以提高水体识别精度。本文以 2008 年 1—12 月获取的 26 景分辨率为 150 m 的 ENVISAT ASAR 图像进行试验,利用本文方法提取研究区内的水体像元;以 2008 年的土地类型变更数据为依据,评价该方法的水体提取精度,并与单时相和多时相图像的水体提取方法进行对比。

## 1 时间序列的构建

像元级 SAR 图像时间序列的构建一般包括 SAR 图像的选取、裁剪和拼接、参数修正、几何纠正、辐射校正、图像配准及噪声去除等。本文利用欧

收稿日期: 2013-07-18; 修订日期: 2014-01-13

基金项目: 国家科技支撑计划课题“多尺度地理国情要素监测技术”(编号: 2012BAH28B02)和国家自然科学基金资助项目“‘空-车’ LiDAR 点云数据一体化的高质量自动集成方法研究”(编号: 41371017)共同资助。

空局(European Space Agency, ESA)的 NEST(next ESA SAR toolbox) 软件完成 SAR 图像时间序列构建<sup>[18]</sup>, 具体流程见图 1。

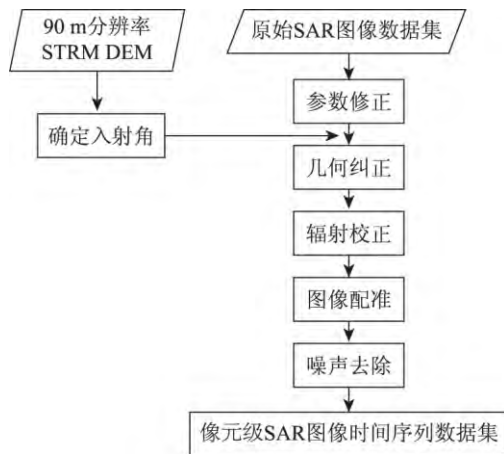


图 1 像元级 SAR 图像时间序列构建流程

Fig. 1 Flowchart of construction for pixel-level SAR image time series

此外,面向大数据量的图像处理,NEST 软件还提供了批处理的功能,通过模块化设计和脚本语言编程,可迅速完成图像数据集的预处理,包括:

1) 参数修正。根据图像本身的实际情况,通过图像数据的原始文件信息,查阅和下载欧空局网站上相应的最新辅助文件,修正定标和轨道参数等;其中,轨道参数主要包括精确的卫星位置和运动速率等信息。由于辐射定标工作的不断完善,辐射校正参数也在不断变化,欧空局会处理生成最新的外部定标文件,提供用户实现更高精度的数据辐射校正处理。

2) 几何纠正。由于侧视成像的特点,在 SAR 图像上会形成其固有的几何特性(如透视收缩、叠掩、阴影等)。对 SAR 图像进行几何纠正也有不同的方法,NEST 软件提供了距离-多普勒地形纠正和 SAR 模拟地形纠正等方法。本文利用距离-多普勒地形纠正方法,根据各景 SAR 图像的轨道状态参数和下载的 90 m 分辨率的航天飞机雷达地形测绘使命(shuttle radar topography mission, SRTM)数字高程模型(digital elevation model, DEM)数据对 SAR 图像进行地形纠正。

3) 辐射校正。由于 SAR 斜距成像的特点,原始图像的像元辐射强度值并不能真实地表达地表反射的雷达后向散射值,而且对不同传感器、不同时段、不同模式和处理器获取的 SAR 图像之间的比较也非常困难。因此,需要将原始图像的辐射强度值转换为后向散射系数值。针对不同的高级合成孔径雷达(advanced SAR, ASAR)数据,可采用不同的辐射

校正方法。本文针对 ENVISAT ASAR 数据,采用下式计算每个像元的后向散射系数值,即

$$\sigma_{ij}^0 = \frac{DN_{ij}^2}{K} \sin \alpha_{ij} \quad (1)$$

式中:  $\sigma^0$  为雷达后向散射系数;  $DN$  为图像像元灰度值;  $\alpha$  为像元入射角;  $K$  为绝对定标因子;  $i, j$  分别为像元所在的行、列数。为压缩变化范围、便于后续数据处理,将  $\sigma^0$  以分贝(dB)表示。

4) 图像配准。采用 NEST 软件进行 SAR 图像的几何配准,总体步骤包括主、副图像的确定,特征点的选取,特征点对偏移量的初始估计,移动窗口的相关系数计算和配准多项式的仿射变换等。通过调节采样窗口大小、总体均方根误差(RMS)阈值和拟合多项式的阶数提高配准的精度,使几何配准的误差保持在 0.5 个像元以内。

5) 噪声去除。由于 ASAR 成像过程中的相干波特性,使 SAR 图像中存在大量的相干斑点噪声,这些光斑噪声将对图像时间序列结果造成大量的干扰。本文采用 3 像元 × 3 像元窗口的 Enhanced Lee 滤波方法对 SAR 图像剔除光斑噪声。

## 2 时间序列相似性分析

### 2.1 时间序列相似度

由于极化不同、入射角不同和成像时间间隔不一致,本文构建的像元级 SAR 图像时间序列为不等长、非平稳的时间序列,且存在大量的数据缺失和异常值。如何评价其相似性,需要选择恰当的时间序列相似性度量方法。常见的时间序列相似性度量方法包括欧式距离、皮尔逊(Pearson)相关系数和动态时间归整(DTW)等<sup>[19-20]</sup>。其中,DTW 是一种通过寻找成本最低的弯曲路径来计算 2 个时间序列的最短距离,并以此衡量其相似度的算法<sup>[21]</sup>。与其他相似性度量方法相比,DTW 在一定程度上克服了尺度位移问题,解决了不等长时间序列的匹配问题,且能够抵抗异常值,取得更好的相似特征匹配效果。

设时间序列  $A$  和  $B$  的长度分别为  $n$  和  $m$ ,即  $A = a_1, a_2, \dots, a_n$ ;  $B = b_1, b_2, \dots, b_m$ 。为了利用 DTW 将时间序列  $A$  和  $B$  对准,需要定义一个距离矩阵  $D$ ,其元素为  $d(a_i, b_j) = (a_i - b_j)^2$ ,即

$$D = \begin{bmatrix} d(a_1, b_1) & \dots & d(a_n, b_1) \\ \vdots & & \vdots \\ d(a_1, b_m) & \dots & d(a_n, b_m) \end{bmatrix} \quad (2)$$

在距离矩阵  $D$  中,定义一组连续矩阵元素的集合  $P = p_1, p_2, \dots, p_k$ ,称之为“弯曲路径”。该路径需

满足以下条件:

1) 边界条件。  $p_1 = d(a_1, b_1)$   $p_k = d(a_n, b_m)$  ,即该路径必须从距离矩阵的第一个元素开始 ,到最后

一个元素截止。  
2) 连续性。若  $p_k = d(a_r, b_c)$   $p_{k-1} = d(a'_r, b'_c)$  ,则必有  $(r - r') \leq 1$  且  $(c - c') \leq 1$  ,即路径中相邻元素必须是连续的。

3) 单调性。若  $p_k = d(a_r, b_c)$   $p_{k-1} = d(a'_r, b'_c)$  ,则必有  $(r - r') \geq 0$  且  $(c - c') \geq 0$  ,即路径的后一位置必须在前一位置的基础上保持在行方向和列方向不减;也就是说 ,若路径  $P$  通过点  $(i, j)$  ,则其必须至少通过  $(i - 1, j)$   $(i, j - 1)$  和  $(i - 1, j - 1)$  这 3 个点中的 1 个。

4) 有界性。  $\max(m, n) \leq k \leq (m + n - 1)$  ,由前 3 条性质即可推导出此性质 ,即该路径所经过的矩阵元素个数存在上限和下线。

在时间序列  $A$  和  $B$  的距离矩阵  $D$  中 ,元素  $(a_1, b_1)$  到元素  $(a_n, b_m)$  的弯曲路径并不唯一 ,但总可以找到一条弯曲路径  $P = p_1, p_2, \dots, p_k$  ,使得  $\sum_{i=1}^k p_i$  达到最小 ,这条路径即为距离矩阵的“最佳弯曲路径” ,把这个最小值定义为时间序列  $A$  和  $B$  的“动态时间弯曲路径”(即 DTW 值)。

### 2.2 相似性阈值

本文采用 DTW 值作为像元级 SAR 图像时间序列的相似性度量 ,利用阈值法确定 DTW ,因此要解决的关键问题是阈值的确定。如图 2 所示 ,纯净像元  $i$  的地物类别为 A ,混合像元  $j$  的地物类别包括 A ,B 和 C(其中类别 A 所占像元面积最大)。 $N$  和  $M$  分别是纯净像元  $i$  和混合像元  $j$  的时间序列 ,其长度分别为  $n$  和  $m$  ,即  $N = a_1, a_2, \dots, a_n$ ;  $M = b_1, b_2, \dots, b_m$ 。

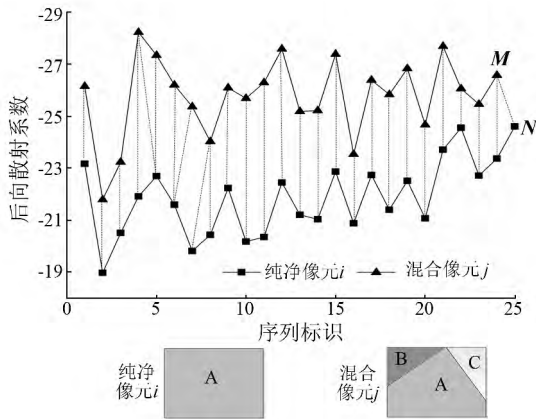


图 2 纯净像元与混合像元时间序列之间的 DTW 距离

Fig. 2 DTW distance between pure pixel time series and mixed pixel time series

图 2 中的虚线即为时间序列  $N$  和  $M$  的动态弯曲路径。当云层、噪声等因素存在时 ,像元值缺失或

异常会导致时间序列  $N$  和  $M$  不等长 ,DTW 将会进行局部的伸长或压缩(即一个元素对应多个元素 ,使其长度一致以便能够寻找最佳弯曲路径)。像元  $i$  和  $j$  的时间序列曲线在形态上有很强的相似性 ,即像元  $i$  表现为地物 A 的时间序列特征 ,而混合像元  $j$  也表现为最大面积地物 A 的时间序列特征。

本文利用目视采样选取足够多的混合像元和纯净像元 ,其中混合像元均符合最大面积地物类别。主要参考 Google 影像地图 ,并结合已有研究所得到的该类地物像元的后向散射系数值 ,通过目视解译选取相对的纯净像元和混合像元。以水体为例 ,混合水体像元选取大型水体的边缘位置像元 ,纯净水体像元选取大型水体的中心位置像元。针对不同时期的图像 ,依次计算所采样的纯净像元和混合像元后向散射值的平均值 ,得到 1 条新的纯净像元时间序列曲线和 1 条新的混合像元时间序列曲线。计算 2 条新的图像时间序列曲线的 DTW 值 ,作为相似性判断的阈值。当任意像元的时间序列与纯净水体像元的时间序列之间的 DTW 值小于该阈值时 ,即可判断为水体像元;如此 ,便可以有效区分水体与非水体像元。

### 2.3 水体信息提取

针对像元级 SAR 图像时间序列的构建结果 ,首先按时序将配准后的图像排序 ,构建 SAR 图像文件列表;然后依次读取 SAR 图像文件列表 ,生成像元级 SAR 图像的时间序列文本数据 ,并存储为 Excel 格式或存储在 Access 等数据库中。采样选取标准水体像元和最大面积混合水体像元 ,提取其时间序列作为参考 ,计算其 DTW ,作为相似性分析的阈值;依次计算所有像元与平均标准水体像元的 DTW 相似度距离 ,并根据确定的阈值采用阈值法提取水体像元(即小于阈值的时间序列对应的像元即为待提取的水体像元)。为提高水体的识别精度 ,考虑到地理位置的连通性问题 ,采用 8 邻域搜索寻找误判像元 ,最终得到提取的水体区域(图 3)。

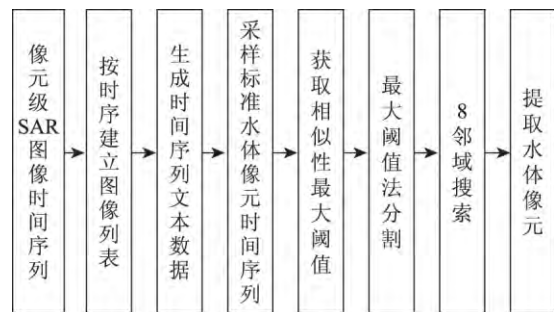


图 3 基于 DTW 相似度的水体提取流程

Fig. 3 Flowchart of extracting water pixel based on DTW similarity

水体提取的主要流程可分为以下步骤:

1) 按时序建立 SAR 图像文件列表,以便于对 SAR 图像数据集的管理和读取。

2) 生成像元级 SAR 图像时间序列文本数据。考虑到图像的大数据量问题,采用并行技术读写生成文本数据,即按进程数平均划分 SAR 图像数据集。各进程以行为单位,依次读取各图像分块;然后根据像元坐标标识提取该像元在图像文件列表中的后向散射系数值,每个像元生成一条时间序列记录,并写入 Excel 或 Access 等数据库中。

3) 对待提取地类的纯净像元和最大面积混合像元进行目视采样,提取其时间序列曲线。具体作法为:通过目视采样选取 20 个地类纯净像元和 20 个最大面积混合像元,求取其各时间节点的平均后向散射系数,形成 1 条标准地类像元的时间序列曲线和 1 条最大面积混合像元的时间序列曲线。

4) 获取时间序列相似性分析的阈值。计算步骤 3) 中获取的标准地类纯净像元的时间序列和最大面积混合像元的时间序列之间的 DTW 值,作为时空相似性划分的初始阈值。

5) 阈值法分割。计算所有像元的像元级 SAR 图像时间序列与采样所得的纯净水体像元的时间序列的 DTW 距离,代替 SAR 图像的后向散射值;根据阈值分割所有像元的 DTW,获取二值图像。

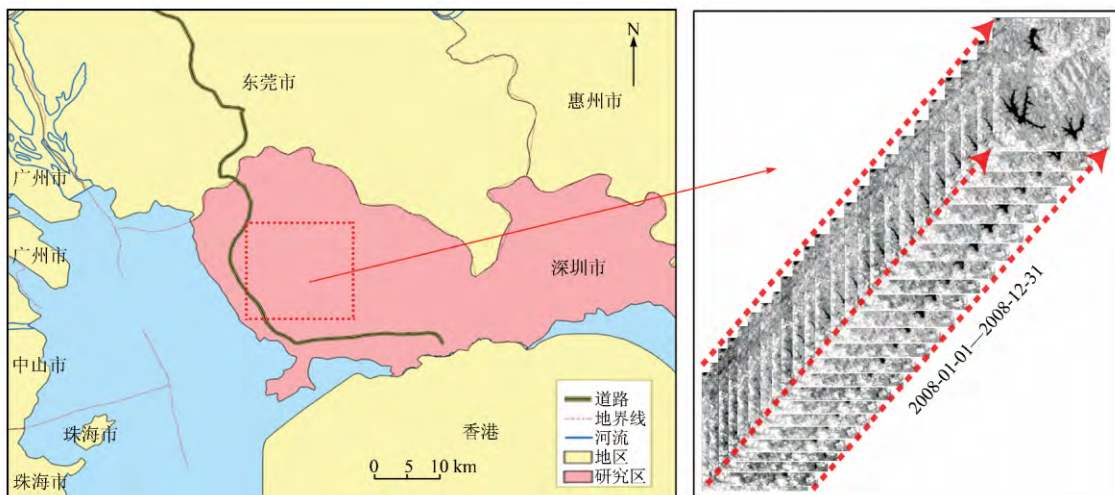
6) 8 邻域搜索。SAR 图像存在光斑噪声,产生大量异常值,去噪滤波操作可在一定程度上修正像元值,但仍会造成少量水体像元的遗漏。根据地理学第一定律(相邻的事物相似,远离的事物相异),考虑地物类型的区域连通性,对二值图像采用 8 邻域滑动窗口搜索方法,判断规则为若一个像元的周围 8 个像元均为水体像元,即把该像元划分为水体。

7) 图像水体提取与显示。根据像元坐标,标识提取经过以上操作判断出的所有水体像元,并标记显示。

### 3 试验结果与精度评价

#### 3.1 研究区与数据集

研究区选取深圳市宝安区西乡河中游段,地理范围在 E113.857°~113.991°,N 22.584°~22.719° 之间,覆盖面积为 225 km<sup>2</sup>(图 4(a))。研究区南临南海,处于亚热带季风气候区,夏季高温多雨,其余季节较为干燥。主要地表覆盖类型包括水体、建筑物、植被和裸地等。研究选用的数据为 2008 年 1—12 月获取的 25 景宽幅模式(wide swath,WSM)的 ENVISAT ASAR 图像(图 4(b))。该数据是标准格式的 1B 级产品,空间分辨率为 150 m,像元间距为 75 m,极化方式有 HH 和 VV 两种。



(a) 研究区位置

(b) ENVISAT ASAR 图像

图 4 研究区概况

Fig. 4 General situation of study area

#### 3.2 试验结果

对 25 景 ENVISAT ASAR 图像进行几何纠正、辐射校正、图像配准和噪声去除等处理,构建像元级 SAR 图像时间序列,并生成文本化的时间序列数据。通过与 Google 影像地图对比和目视解译,选取 20 个标准水体像元和 20 个混合水体像元,分别

提取其时间序列数据。其中,纯净水体像元选取大型水体的中心位置像元,混合水体像元选取大型水体的边缘位置像元。针对采样像元,分别求取不同时期的像元后向散射值的平均值,得到新的纯净水体像元和混合水体像元的时间序列  $N$  和  $M$  的参考数据(图 5)。

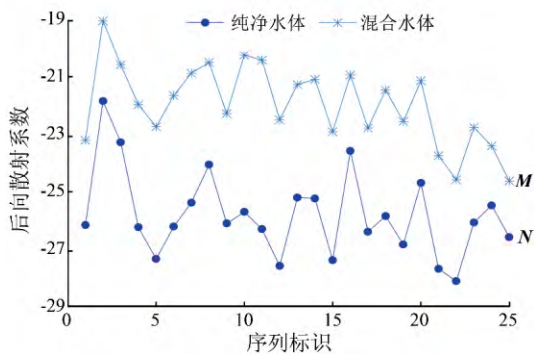


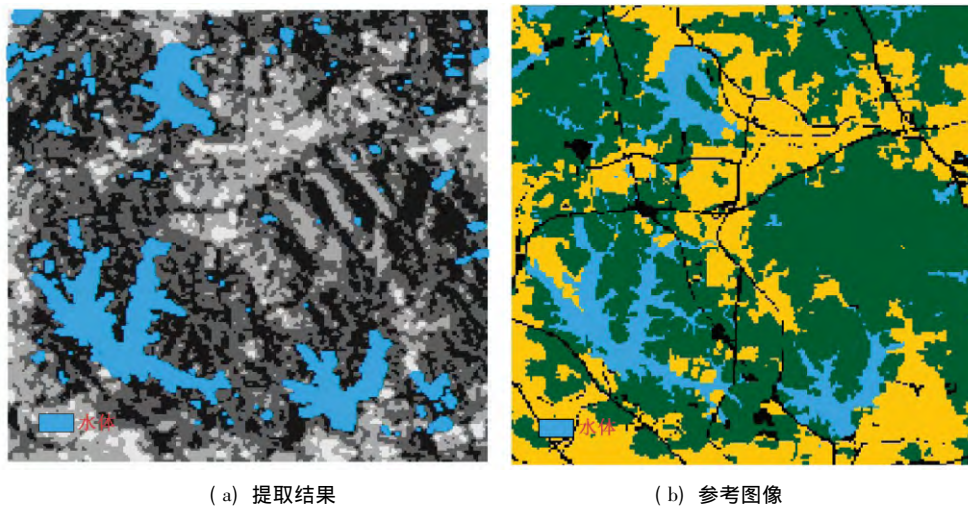
图 5 采样水体像元的时间序列曲线

Fig.5 Time series curve of sampling water pixels

由图 5 可以看出,不同时期 SAR 图像中的水体

的后向散射性差异较大,纯净水体像元和混合水体像元时间序列曲线在形态上的相似性较为明显。

利用本文提出的像元级 SAR 图像时间序列相似性分析方法,以 DTW 作为像元级 SAR 图像时间序列的相似度,计算采样所得的纯净水体像元与混合水体像元的 DTW 距离为 680;以 680 作为阈值提取研究区内的水体像元,并通过 8 邻域搜索最终提取出 3 865 个水体像元(图 6(a))。以 2008 年深圳市的土地利用类型变更矢量数据为参考,将其进行类型归并;采用 ArcGIS 最大面积法进行栅格化,同时归并孤立像元,作为本文典型地物提取精度评价的参考图像(图 6(b))。



(a) 提取结果 (b) 参考图像

图 6 水体像元提取

Fig.6 Extraction of water pixels

通过对比图 6(a) 和(b) 可以看出,本文以混合水体像元为依据,将其时间序列与纯净水体像元时间序列的相似度作为水体判断的衡量标准,能够有效地区分水体与非水体,防止边缘水体像元的遗漏,同时也减少了因部分植被和山体阴影影响造成的对水体的误判,取得了良好的效果。

3.3 精度评价

将本文方法的水体提取结果分别与其他单时相、多时相水体提取方法进行对比。其中,单时相图

像选取成像较好的 3 景 SAR 图像,获取时间分别为 2008-02-02,2008-07-08 和 2008-12-29,分别采用阈值法提取水体像元;多时相图像选取获取时间分别为 2008-02-02,2008-07-08,2008-09-15 和 2008-12-29 的 4 景 SAR 图像,利用 ENVI 软件中的最大似然分类法和支持向量机分类方法将地物划分为水体、植被、建设用地和其他共 4 类,并将分类结果与本文方法的提取精度进行对比,结果见表 1。

表 1 不同方法的水体提取精度对比

Tab.1 Accuracy comparison of different methods for water pixel extraction

提取方法	参考像元数	提取像元数	误判像元数	完整率/%	正确率/%
单时相	4 146	2 236	284	50.61	87.28
最大似然	4 146	3 271	371	69.94	88.67
支持向量机	4 146	2 797	198	62.48	92.95
时间序列	4 146	3 865	376	84.15	90.27

由表 1 可以看出,本文提出的像元级 SAR 图像时间序列相似度的水资源分布提取方法的完整率和正确率均很高,分别为 84.15% 和 90.27%,远远优

于其他方法;漏判的像元均为水体边缘的混合像元。对于单时相图像的水体像元提取而言,误判像元主要为山体阴影和部分植被;漏判像元除了水体

边缘混合像元外,还有一些标准水体像元。而多时相图像的水体像元提取方法虽优于单时相图像的方法,但无法彻底消除部分植被的影响,仍存在一些误判像元。

## 4 结 论

随着空间遥感数据获取技术的不断发展,图像的时间分辨率大大提高,导致遥感图像数据大量堆积。如何充分利用遥感图像数据集,挖掘其潜在的有用信息,具有重要的理论价值和现实意义。本文利用 SAR 图像数据集,提出了一种像元级 SAR 图像时间序列支持下的水体提取方法,该方法利用动态时间归整(DTW)作为相似性的度量提取水体像元。试验结果表明,该方法能够准确地提取稳定的水资源分布范围,提取结果不受山体阴影、雨季积水及部分植被的影响,精度较高,且能够满足水体制图的要求,能够应用于大范围区域水体的提取与制图。

### 参考文献(References):

- [1] 王浩,严登华,贾仰文,等.现代水文水资源学科体系及研究前沿和热点问题[J].水科学进展,2010,21(4):479-489.  
Wang H, Yan D H, Jia Y W, et al. Subject system of modern hydrology and water resources and research frontiers and hot issues [J]. Advance in Water Science, 2010, 21(4): 479-489.
- [2] Smith L, Inman A, Cherrington R. The potential of land conservation agreements for protection of water resources [J]. Environmental Science and Policy, 2012, 24: 92-100.
- [3] 丁莉东,余文华,覃志豪,等.基于MODIS的鄱阳湖区水体水灾遥感影像图制作[J].国土资源遥感,2007,19(1):82-85.  
Ding L D, Yu W H, Qin Z H, et al. The mapping of flood remote sensing image based on MODIS in Poyang Lake region [J]. Remote Sensing for Land and Resources, 2007, 19(1): 82-85.
- [4] 陈蕾,邓孺孺,陈启东,等.基于水质类型的TM图像水体信息提取[J].国土资源遥感,2012,24(1):90-94.  
Chen L, Deng R R, Chen Q D, et al. The extraction of water body information from TM imagery based on water quality types [J]. Remote Sensing for Land and Resources, 2012, 24(1): 90-94.
- [5] 汤旭光,王宗明,刘殿伟,等.基于面向对象的河道信息提取及其季节性变化分析[J].国土资源遥感,2014,26(1):13-16.  
Tang X G, Wang Z M, Liu D W, et al. Extraction of riverway information based on object-oriented method and analysis of seasonal variations [J]. Remote Sensing for Land and Resources, 2014, 26(1): 13-16.
- [6] 刘桂林,张落成,刘剑,等.基于Landsat TM影像的水体信息提取[J].中国科学院大学学报,2013,30(5):644-650.  
Liu G L, Zhang L C, Liu J, et al. Water body information extraction based on Landsat TM remote sensing imagery [J]. Journal of University of Chinese Academy of Sciences, 2013, 30(5): 644-650.
- [7] Huang S F, Li J G, Xu M. Water surface variations monitoring and flood hazard analysis in Dongting Lake area using long-term Terra/MODIS data time series [J]. Natural Hazards, 2012, 62(1): 93-100.
- [8] Ding X W, Li X F. Monitoring of the water-area variations of Lake Dongting in China with ENVISAT ASAR images [J]. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2011, 13(6): 894-901.
- [9] Hostache R, Matgen P, Wagner W. Change detection approaches for flood extent mapping: How to select the most adequate reference image from online archives [J]. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2012, 19: 205-213.
- [10] 朱俊杰,郭华东,范湘涛,等.单波段单极化高分辨率SAR图像纹理分类研究[J].国土资源遥感,2005,17(2):36-39,63.  
Zhu J J, Guo H D, Fan X T, et al. The application of the wavelet texture method to the classification of single-band single-polarized and high-resolution SAR images [J]. Remote Sensing for Land and Resources, 2005, 17(2): 36-39, 63.
- [11] 熊金国,王丽涛,王世新,等.基于多光谱影像辅助的微波遥感水体提取方法研究[J].中国水利水电科学研究院学报,2012,10(1):23-28.  
Xiong J G, Wang L T, Wang S X, et al. Microwave water extraction supported by multi-spectral images [J]. Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2012, 10(1): 23-28.
- [12] Hoque R, Nakayama D, Matsuyama H, et al. Flood monitoring, mapping and assessing capabilities using RADARSAT remote sensing, GIS and ground data for Bangladesh [J]. Natural Hazards, 2011, 57(2): 525-548.
- [13] 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.  
Zhu J J, Guo H D, Fan X T, et al. Water detection with high-resolution SAR image based on texture and imaging knowledge [J]. Advance in Water Science, 2006, 17(4): 525-530.
- [14] 程明跃,叶勤,张绍明,等.基于模糊加权SVM的SAR图像水体自动检测[J].计算机工程,2009,35(2):219-221.  
Cheng M Y, Ye Q, Zhang S M, et al. Water automatic detection from SAR image based on fuzzy weighted SVM [J]. Computer Engineering, 2009, 35(2): 219-221.
- [15] 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.  
Wang Q, Liao J J. Water area extraction and change detection of the Poyang Lake using SAR data [J]. Remote Sensing for Land and Resources, 2010, 22(4): 91-97.
- [16] 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(3):139-145.  
Li J G, Huang S F, Li J R. Research on extraction of water body from ENVISAT ASAR images: A modified Otsu threshold method [J]. Journal of Natural Disasters, 2010(3): 139-145.
- [17] 王栋,陈映鹰,秦平.盲信号分离和序贯滤波的SAR影像水体提取[J].计算机工程与应用,2011,47(2):165-168.  
Wang D, Chen Y Y, Qin P. Water extraction from SAR imagery based on sequential filtering and blind signal separation [J]. Computer Engineering and Applications, 2011, 47(2): 165-168.
- [18] 王亚飞,程亮,钟礼山,等.像素级SAR影像时间序列的建模方法研究[J].地理与地理信息科学,2013,29(4):109-112,

116.  
Wang Y F ,Cheng L ,Zhong L S ,et al. Research on modeling method for pixel – level SAR image time series [J]. *Geography and Geo – Information Science* 2013 ,29(4) : 109 – 112 ,116.
- [19] Lhermitte S ,Verbesselt J ,Verstraeten W W ,et al. A comparison of time series similarity measures for classification and change detection of ecosystem dynamics [J]. *Remote Sensing of Environment* , 2011 ,115( 12) : 3129 – 3152.
- [20] 宋 辞 裴 韬. 基于特征的时间序列聚类方法研究进展 [J]. *地理科学进展* 2012 ,31( 10) : 1307 – 1317.  
Song C ,Pei T. Research progress in time series clustering methods based on characteristics [J]. *Progress in Geography* ,2012 ,31( 10) : 1307 – 1317.
- [21] Petitjean F ,Inglada J ,Gancarski P. Satellite image time series analysis under time warping [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 2012 ,50( 8) : 3081 – 3095.

## Extraction of water areas based on similarity analysis using pixel – level SAR image time series

WANG Yafei , CHENG Liang , LI Manchun , CHEN Wei , CHEN Xiaoyu , CHEN Song  
( *Jiangsu Key Laboratory of Geographic Information Science and Technology , Nanjing University , Nanjing 210093 , China* )

**Abstract:** In view of the characteristics of SAR images stack data , this paper presents a method for extraction of the water area based on similarity analysis using pixel – level SAR image time series. The basic idea is as follows: Firstly , the pixel – level SAR image time series is constructed , and the dynamic time warping( DTW) is chosen as the similarity measurement to compute the similarities between all the pixels and sampled water pixel. Then , the water pixels are extracted with the threshold value method , referring to the DTW distance of mixed pixels on borders of water for threshold value. Lastly , by replacing the backward scattering coefficients with DTW distance of each pixel , the accuracy of water identification is improved by 8 – connected method. 25 wide – swath ENVISAT ASAR images collected during the period from January to December in 2008 , which have 150 m spatial resolution , were utilized to extract water pixels in the study area. The result shows that the water pixels extracted by this method have high accuracy and integrity , thus proving that this method is practical in the extraction and mapping of water body distribution at the large regional scale.

**Key words:** SAR; pixel – level; time series; similarity; dynamic time warping( DTW) ; water distribution extraction

第一作者简介: 王亚飞( 1988 – ) ,男 ,硕士研究生 ,主要从事遥感图像数据挖掘和高性能复杂地理计算等方面的研究。Email: wangyafei0730@ 126. com。

通信作者: 程 亮( 1978 – ) ,男 ,副教授 ,主要从事激光雷达遥感及地学应用、地理国情监测与分析等方面的研究。Email: lcheng@ nju. edu. cn。

( 责任编辑: 刘心季)