

基于 SAR 数据的鄱阳湖水体提取及变化监测研究

王庆^{1,2}, 廖静娟¹

(1. 中国科学院对地观测与数字地球科学中心, 北京 100101; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘要: 以 C 波段 Envisat ASAR 和 L 波段 ALOS PALSAR 交替极化模式的数据为数据源, 分析了鄱阳湖主要地物的散射特性, 并分别引入纹理特征和不同极化通道间的极化差和极化比等参数增强地物的表征; 应用主成分变换对地物的参数向量进行特征提取, 增强水体与其他地物的差异, 并在第一主成分中选择适当阈值, 准确提取出不同时期的鄱阳湖水体信息。实验表明, 用上述方法提取水体信息的精度比直接使用地物后向散射系数的监督分类法提取精度要高得多。通过分析和对比上述不同波段 SAR 数据中水体与其他类别间的 Jeffries - Matusita 距离可以看出, C 波段 SAR 数据提取鄱阳湖水体的精度比 L 波段高。并给出了鄱阳湖水体在 2007 年春、夏和冬 3 个季节中水域面积的动态变化情况。

关键词: 纹理; 主成分变换; 水体提取; ASAR; PALSAR

中图分类号: TP 79 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-070X(2010)04-0091-07

0 引言

水体变化范围提取一直是湖泊变化及洪涝灾害监测等领域研究的重要内容。鄱阳湖是我国最大的淡水湖泊, 掌握其水体表面的变化信息直接关系到对该地区生态系统的有效维护和科学管理。

随着遥感数据源的增多, 应用光学遥感技术提取水体信息的研究和应用已有较多的发展^[1-3]。随着近年来星载合成孔径雷达 SAR (Synthetic Aperture Radar) 技术的发展, 大量星载 SAR 系统 (如 Envisat ASAR^[4]、ALOS PALSAR、TerraSAR-X 及 Radarsat-2 等) 投入运行, 雷达遥感数据的应用得到了极大的发展。鉴于 SAR 对地观测的全天候全天候特点, 以及 SAR 对水体提取较为敏感的优势, 开展 SAR 水体变化范围提取和监测研究, 对提高水体变化监测的频率和准确性有着重要意义。

对于水体的提取及其变化检测已有了许多相关研究, 如廖静娟等^[5]利用变化向量分析方法对地表淹没状况进行了研究; 沈国状等^[6]应用面向对象技术提取了鄱阳湖地区地表淹没范围; 朱俊杰等^[7]应用纹理和 SAR 成像知识在高分辨率 SAR 图像上进行了水体检测提取; 也有一些基于光学遥感数据和 SAR 数据融合方法提取洪水淹没范围的研究^[8,9]; 还有利用阈值分割进行水体提取的试验, 该方法虽简便快捷, 但面临着特征选择及阈值设定等困难

问题。

本文在不同极化通道数据中引入纹理特征、极化差和极化比等特征信息, 以增强地物参数化的表征; 并利用主成分变换方法有效地增大水体与其他地物间的特征差异, 应用阈值分割对第一主成分分量进行分割, 准确地提取出鄱阳湖开阔水体信息; 同时分析了不同波段 SAR 数据提取水体的精度差异和鄱阳湖水域面积在 2007 年 3 个季度的变化情况。

1 研究区概况

鄱阳湖是我国最大的淡水湖, 位于江西省北部, 28°22' ~ 29°45' N, 115°47' ~ 116°45' E 范围内。鄱阳湖南北长 110 km, 东西宽 50 ~ 70 km, 北部狭窄段仅宽 5 ~ 15 km, 汇集赣江、修水、鄱江、信江和抚江 (简称“五河”) 等江河, 并经湖口注入长江。其水位的涨落受“五河”以及长江水回灌作用的双重影响, 在“五河”与鄱阳湖交汇处, 水位常年显著的变化, 形成了大量的滩地、沼泽和沙洲, 已成为我国重要的湿地生态系统 (湖滩草洲湿地)。植被类型与群落随湖底高程和相应水深变化具有垂直分带性, 因此随着不同季节水域淹没范围和植被覆盖程度的不同, 呈现周期性干湿交替的动态变化, 出现“夏秋一水连天, 冬春荒滩无边”的景象。

收稿日期: 2009-12-11; 修订日期: 2010-03-21

基金项目: 863 计划项目 (编号: 2009AA12Z102) 和 973 计划项目 (编号: 2009CB723906) 共同资助。

2 数据源及其预处理

2.1 数据源

选用 Envisat ASAR 和 ALOS PALSAR 数据,模式均为交替极化,极化通道分别为 HH/VV 和 HH/HV。其中,ASAR 数据是精校正图像产品,为多视、地距幅度图像;PALSAR 是 1.5 级数据产品,为已经过几何纠正和地理参考编码的地距幅度图像(详见表 1)。还使用具有地理编码的 TM5 图像作为几何纠正参考图像及解译辅助数据(2007 年 4 月 12 日)。

表 1 研究中使用的 SAR 数据
Tab. 1 SAR data used in this study

传感器	过境时间	波段	极化方式	入射角/(°)	像元大小/m ²
ASAR	2007-04-01	C	HH/HV	30~36	12.5 × 12.5
	2007-04-04	C	HH/VV	39~43	
	2007-04-06	C	HH/VV	39~43	
	2007-07-28	C	HH/VV	18~26	
	2007-07-28	C	HH/VV	18~26	
PALSAR	2007-07-13	L	HH/HV	34~42	12.5 × 12.5
	2007-07-13	L	HH/HV	34~42	
	2007-11-28	L	HH/HV	34~42	
	2007-11-28	L	HH/HV	34~42	

2.2 预处理

获取的 SAR 数据为幅度数据,需进行定标。ASAR 数据使用了欧空局开发的 ASAR 图像处理工具包 BEST(Basic Envisat SAR Toolbox)^[10],将原始幅度数据导入 BEST,转换为功率图后再换算成后向散射系数值。对于 PALSAR,其定标公式为

$$\sigma^0 = 10 \lg DN^2 + CF \quad (1)$$

式中, σ^0 为最后得到的雷达后向散射系数值;DN 为图像数据的灰度值;CF 为定标因子,在头文件中可以查得,对于一般的 1.5 级 PALSAR 数据产品,CF = -83.0 dB。参照具有地理投影和编码的 TM5 全色波段数据对上述 2 种 SAR 数据进行几何

纠正、图像拼接及研究区裁剪。

为提高 SAR 图像对后期水体类别提取的精度,本文选用了 Enhanced Frost 自适应滤波器^[11,12]。Frost 滤波是一种环形对称的滤波器,为滤波窗口的每一像元设一权重值^[13],其滤波效果具有很好的边缘保持性,对提高水陆边界两侧的水陆分割精度很有意义。实验中对比了 Lee、Enhanced Lee、Enhanced Frost 和 Gamma 滤波效果,发现 Enhanced Frost 在减小同质区域内的方差和保持异质区域间的边界方面的特性最好。

3 研究方法

3.1 散射特征分析

在 SAR 图像上,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,所以在 SAR 图像上一般色调较暗。受风的吹动及水流的影响,一些区域的水体表面会形成布拉格散射(Bragg scattering),在 SAR 图像上比镜面反射的区域要亮。

鄱阳湖的植被主要为苔属类型的植被(芦苇、苔草等),对其一般可以用细长的圆柱体模型表征。雷达波对植被呈体散射,散射过程较复杂,在 SAR 图像上后向散射系数的动态范围较宽。值得注意的是,在“五河”流入鄱阳湖的区域,河边的浓密植被与水面会形成二面角反射器,具有较强的后向散射回波(如图 1(a)、(b)所示);而沙滩、沼泽等由于地表的高含水量,致使其介电常数增大,其后向散射系数也较大。选择鄱阳湖西南方向的典型“掌形”滩地进行水体、植被和沙地等 3 类地物的后向散射系数分析(图 1)。在两种图像上分别选取 3 个典型地物区域——水体(红色框内区域)、植被(绿色框内区域)和沙滩(蓝色框内区域),每种地物约 1 800 个像素,其后向散射系数分布情况见图 1(c)~(f)。

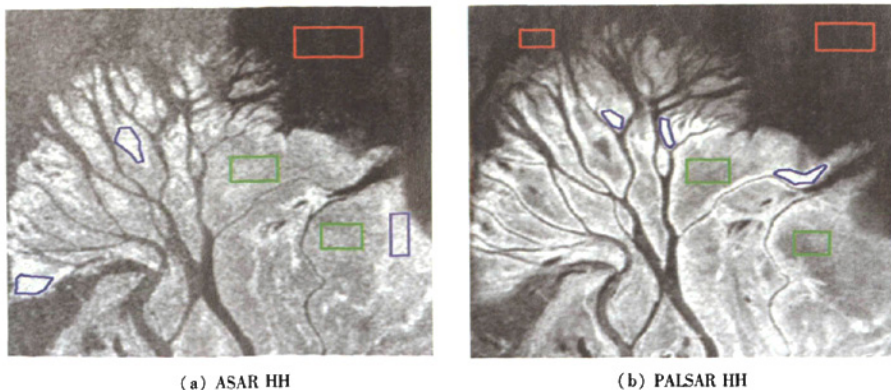


图 1-1 ASAR 和 PALSAR 图像上 3 种地物后向散射系数分布(红色—水体,绿色—植被,蓝色—沙滩)
Fig. 1-1 The backscattering coefficients of the three types of objects in the ASAR and PALSAR imagery

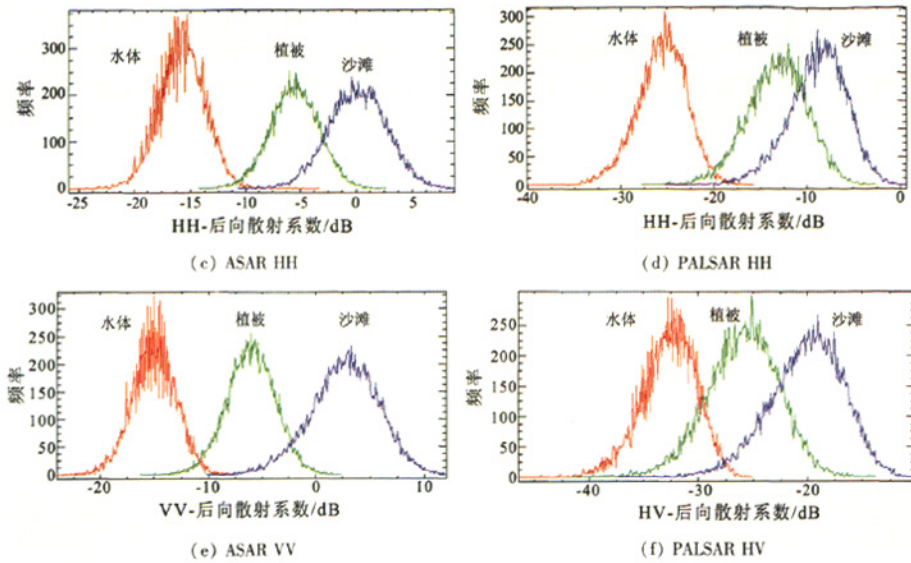


图 1-2 ASAR 和 PALSAR 图像上 3 种地物后向散射系数分布(红色—水体,绿色—植被,蓝色—沙滩)

Fig. 1-2 The backscattering coefficients of the three types of objects in the ASAR and PALSAR imagery

由图 1 可以看出,子研究区相对整幅图像可以忽略像素间的系统差异及像素自身地表特征差异,其后向散射系数的浮动变化主要受相干斑点影响;而水体后向散射系数的浮动范围要比具有较高后向散射强度的植被和沙滩小,这主要是由于同质区域的相干斑统计特性与该地物的后向散射强度大小有关。由单视图像得到的强度图像,其强度(或功率)服从负指数分布, $CV = 1$ ^[14],即同质区域的均方差与均值成正比;多视处理后的强度图像服从伽马分布^[14],由此而引出等效视数的概念,即均值平方比方差,该数值常被用来反映滤波平滑效果。所选择本水体、植被和沙滩的等效视数分别为 11、7 和 8,进一步说明水体和沙滩的散射特征比较纯,内部方差相对较小。而对于 L 波段的雷达波,上述 3 种地物的后向散射系数均比 C 波段的小,等效视数分别约为 10、5 和 8。对比两种数据的等效视数可以看出,植被在 L 波段的雷达图像上后向散射强度的离散度较大,这主要是由于 L 波段的穿透性强、受下垫面土壤等背景因素影响所致。

3.2 水体范围提取

由上述分析可知,选择一个阈值对水体进行分割精度较低,特别是当考虑整幅图像上不同地区的各种因素影响时,选择合适阈值分割则更难实现。为提高目标分类的精度,通过增加图像特征纹理参数以及同极化和交叉极化间的差值和比值来构成目标的描述向量,以增强不同地物差异的参数表征。

ASAR 数据的 C 波段 HH 和 VV 极化的后向散

射强度大小近乎一致,故利用其极化差和极化比并不能有效分离水体与其他类别。根据先前学者研究^[15-17],对 ASAR 数据中的 VV 极化功率图引入两个纹理特征参数,即角二阶矩和均匀性参数。本文在实验中发现,与其他由灰度共生矩阵计算出来的统计量相比,这两个参数对于描述图像上灰度较均匀的区域,表征效果较好。因此,用 ASAR 数据对地物的描述用向量 $[\sigma_{hh}^0 \ \sigma_{vv}^0 \ k \ l]$ 表示,其中

$$k = ASM = \sum_i \sum_j \{C_d[i, j]\}^2 \quad (2)$$

$$l = HOM = \sum_i \sum_j \frac{1}{1 + (i-j)^2} C_d[i, j] \quad (3)$$

$$C_d[i, j] = \{ [r, c] \mid I[r, c] = i \text{ 且 } I[r + dr, c + dc] = j \} \quad (4)$$

式中, i, j 为图像的灰度值; dr 为行方向的位移; dc 为列方向的位移; I 为灰度值的集合; C_d 为图像的灰度共生矩阵; ASM 为角二阶矩,表征图像灰度分布均匀性或平滑性的量度^[15,16](在雷达图像上水体区域与其他地物区域相比,均匀性较好、相应的 ASM 值较大); HOM 为纹理特征的局部相似性表征,能刻画局部区域的纹理特征,是区分不同目标的重要量度^[16,17]。

交叉极化(HV)的信息主要由体散射机制所引起,与 HH 极化信息量有明显差别,两者之间的差和比可以提供不同地物间的差异信息,故针对 PALSAR 数据对地物的描述用向量 $[\sigma_{hh}^0 \ \sigma_{hv}^0 \ k' \ l']$ 表示,其中, $k' = \sigma_{hh}^0 - \sigma_{hv}^0$; $l' = \frac{\sigma_{hh}^0}{\sigma_{hv}^0}$ 。例如在 HV 和 HH 极

化通道上,平静湖面上的水体的后向散射功率都很小;而在 HV 极化图像上,植被和沙滩的后向散射相对较大;因此通过两个通道间的极化差和极化比,可以增大上述 3 类地物间的差异。

主成分变换^[18]可以有效地增强地物特征的差异和降低数据的维度。经过特征扩充对 3 类地物描述后,再应用主成分变换将 4 个通道特征进一步优化、提取,得到更佳的特征参数(图 2)。

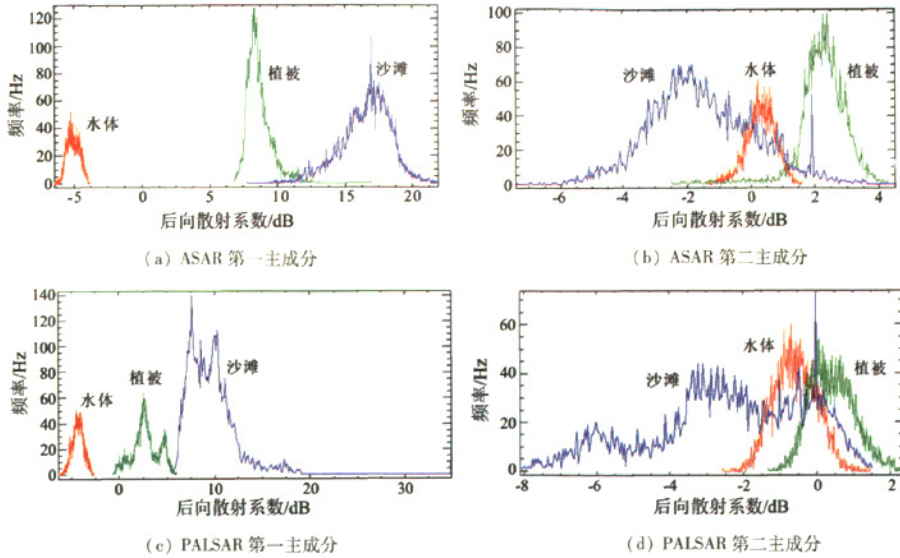


图 2 3 种地物的前两个主成分后向散射系数分布

Fig. 2 The backscattering coefficients of the first and second component about the three types of objects

由图 2 可以看出,3 种地物在第一主成分上的分离度明显增大,而在第二主成分上开始出现交叉。在 ASAR 图像上,水体的第一主成分主要位于小于零的一侧,而且与其他地物差异相当显著;在 PALSAR 图像上,水体的第一主成分与 ASAR 图像上相

似,但没有 ASAR 图像上的类间差异明显。此外,经主成分变换后,水体的第一主成分聚集度增大,类内方差降低明显。因此,通过设置一定的阈值可以将水体提取出来,本文选择的阈值分别是 ASAR 为 0, PALSAR 为 -1,水体提取结果如图 3 所示。

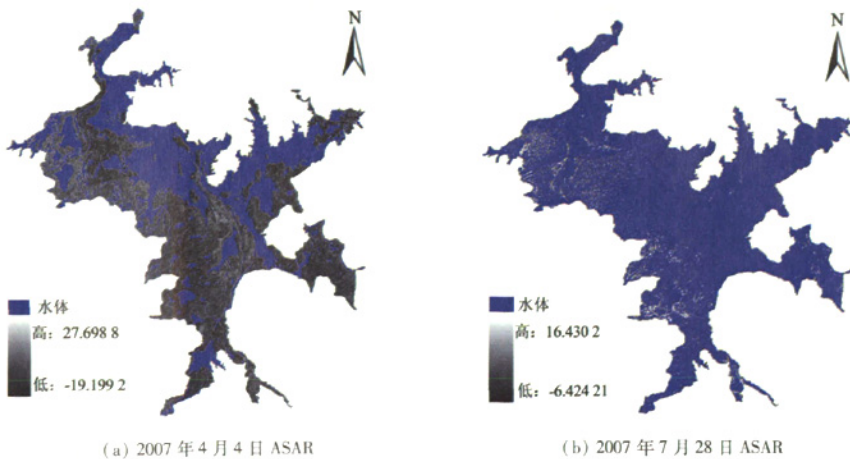


图 3-1 鄱阳湖水体提取范围及周围地物后向散射系数

Fig. 3-1 The open water distribution and backscattering coefficients of the surrounding objects

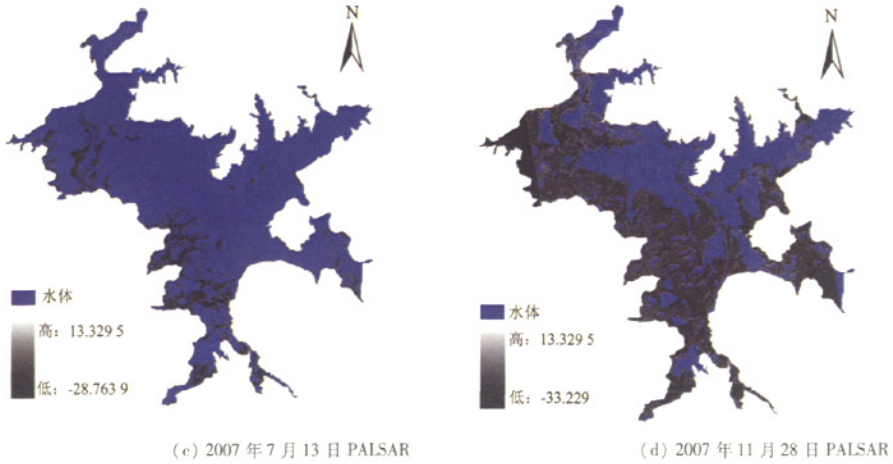


图 3-2 鄱阳湖水体提取范围及周围地物后向散射系数

Fig. 3-2 The open water distribution and backscattering coefficients of the surrounding objects

4 结果分析

4.1 鄱阳湖水域面积总体变化及分析

分类提取出水体区域后,经过掩模处理,根据 SAR 图像的像素面积(12.5 × 12.5 m²),计算出鄱阳湖在 2007 年的 3 个季度的水体面积及变化走势(图 4)。

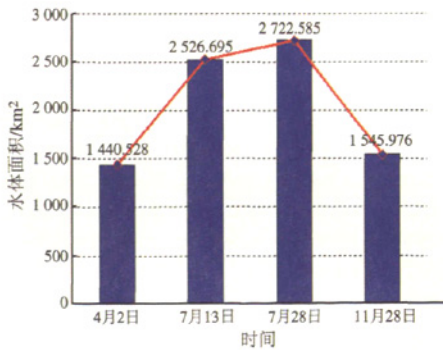


图 4 鄱阳湖水体表面积在 2007 年 3 个季度的变化

Fig. 4 The change of the open water area of Poyang Lake in the three seasons in 2007

从图 4 可以看出,鄱阳湖在夏季的水体表面积与春、冬相比增加了 75% 以上,其主要原因是:①鄱阳湖地区在夏季具有较强的降雨量;②流入鄱阳湖的“五河”水流量在夏季显著增大;③长江流域夏季多雨致使高水位的长江水倒灌鄱阳湖。鄱阳湖水位的变化直接反映为湖水表面积的变化,而影响鄱阳湖水位变化的因素有各支流、长江和降雨等。本文 3 个季节的 SAR 数据得到的水体表面积可以大概地反映鄱阳湖水面的变化走势。

4.2 水体分割的精度验证

为验证本文所用方法的效果,将样本区 1 800 个像素作为已知样本,应用贝叶斯最大似然法对鄱阳湖 4 月份的 ASAR 数据进行监督分类,提取水体类别,得到的混淆矩阵如表 2 所示。

表 2 贝叶斯最大似然监督分类混淆矩阵

Tab. 2 Confusion matrix of Bayesian maximum likelihood supervised classification

地类	水体	植被	沙地
水体	97.30	2.50	0.20
植被	0.53	94.70	4.77
沙地	0.48	6.12	93.40

同样,对 PALSAR 数据进行监督分类,分类结果中水体的分类正确率为 96%,误差主要是由于水体中个别像素与其他地物灰度相近,表面波谱相似造成的。然而,经过地物特征参数扩充和主成分变换,再对上述样本区数据进行阈值分割后,水体数据的分类正确率达到 99.4%。

针对选择的样本数据,经过主成分变换后的水体分割精度与直接应用贝叶斯最大似然监督分类相比提高了不少,考虑到贝叶斯最大似然监督分类对不同的训练样本有不同的分类结果,因此利用第一主成分进行阈值分割的方法具有较好的鲁棒性。该分割阈值可以利用第一主成分的直方图统计得到,一般选择直方图从左至右的第一个波谷。

4.3 C、L 波段 SAR 图像提取水体差异分析

C 波段一般与地物表面或者植被冠层作用后即发生后向散射,而 L 波段具有较长的波长,可以穿透地物一定深度或植被冠层。C 波段的雷达波与 L 波段相比,对水面上的涟漪、起伏及浪花等更为敏感,易在图像上显示出其特征。因此,在不考虑系统

其他参数差别情况下,在HH极化下,水体在PALSAR图像上的后向散射系数比ASAR约小10 dB(图1),而且植被和沙滩的后向散射系数也比ASAR小,这主要由L波段的强穿透性所致^[17]。模式识别理论中常用Jeffries - Matusita距离(简称J - M距离)^[18]准则来分析类别间的可分性,3类样本间的J - M距离见表3。

表3 HH极化SAR图像上相同样本的J - M距离和分类误差^①

Tab.3 The J - M distance of the same samples in HH polarized SAR imagers and classification error

ASAR		PALSAR	
$J_{12} = 1.978\ 1$	$Pe = 0.01$	$J_{12} = 1.852\ 8$	$Pe = 0.03$
$J_{13} = 1.999\ 9$	$Pe = 0.01$	$J_{13} = 1.996\ 3$	$Pe = 0.01$
$J_{23} = 1.857\ 9$	$Pe = 0.03$	$J_{23} = 0.893\ 8$	$Pe = 0.09$

①: 1—水体,2—植被,3—沙滩; J_{12} 为水体和植被间的JM距离; Pe 为分类误差。

由表3可知,无论是C波段的ASAR数据还是L波段PALSAR数据,水体与植被、沙滩的分离度较高;但ASAR数据的分离度要比PALSAR好,其主要原因还是L波段在探测鄱阳湖周边芦苇、苔草等低矮植被时具有高穿透性,可以与地表发生作用,出现严重衰减,其回波功率与C波段相比远远减小,加之斑点等因素影响会产生一些与水体后向散射系数相似的像素。由于湖泊表面有一定的波浪,C波段对水体具有一定强度的表面后向散射;而L波段则对水体主要呈现镜面散射,故其后向散射回波功率比C波段小得多。综合地物的散射特点及类间的J - M距离,对水体提取分类时,C波段数据优于L波段。

5 结论

(1)通过引入极化差、极化比和图像上的纹理信息,增强了对地物的参数表征,提高了水体提取的精度;进一步使用主成分变换的方法增大了地物特征间的差异,从而在第一主成分上可以采用简单的阈值分割方法提取出水体范围。

(2)利用提取出的水体范围分割图,经过栅格向矢量的转换后,即可以获得不同时相的水体矢量数据,可以作为洪水灾害等系统的源数据,结合GIS功能进行查询分析等应用。

(3)通过对C波段ASAR图像和L波段PALSAR图像上水体、植被和沙滩等3类地物样本的散射机制、类内后向散射系数分布和类间J - M距离进行分析,表明在鄱阳湖地区水体分类提取中,C波

段ASAR数据比L波段PALSAR数据更适宜。

(4)利用3个季度的SAR数据对鄱阳湖水体进行提取,可以看出鄱阳湖在一年中的水域表面积变化特别显著,其主要特点是:春季洲滩显露,芦苇、苔草等植被旺盛生长,湖水主要集中在湖中心地势较低的区域;夏季因雨量增加、“五河”流量增加及长江水回灌等因素致使湖泊范围显著扩大,湖周洲滩大多被淹没,淹没地区主要集中在鄱阳湖的西南地区;秋冬季湖水退去,洲滩再现,各种湿地植被再次生长,水体范围又向湖中心区收缩。利用合成孔径雷达SAR对鄱阳湖的观测,可以有效地获取其水体变化信息,掌握其变化规律,为更好地管理鄱阳湖提供科学依据。

参考文献:

- [1] 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(1):82-85.
- [2] 于欢,张树清,李晚峰,等. 基于TM影像的典型内陆淡水湿地水体提取研究[J]. 遥感技术与应用,2008,23(3):310-315.
- [3] 都金康,黄永胜,冯学智,等. SPOT卫星影像的水体提取方法及分类研究[J]. 遥感学报,2001,5(3):214-219.
- [4] 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.
- [5] 廖静娟,沈国状. 基于多极化SAR图像的鄱阳湖湿地地表淹没状况动态变化分析[J]. 遥感技术与应用,2008,23(4):373-377.
- [6] 沈国状,廖静娟. 面向对象技术用于多极化SAR图像地表淹没程度自动探测分析[J]. 遥感技术与应用,2007,22(1):79-82.
- [7] 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.
- [8] 殷悦,宫辉力,赵文吉. 基于SAR影像的洪水淹没范围信息提取的研究[J]. 测绘与空间地理信息,2007,30(4):50-54.
- [9] 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.
- [10] ESA. BEST - Basic Envisat SAR Toolbox[EB/OL]. [2009-02-10]. <http://earth.esa.int/best/software/>.
- [11] Frost S V, Stiles A J, Shanmugan S K, et al. A Model for Radar Images and Its Application to Adaptive Digital Filtering of Multiplicative Noise[J]. IEEE Trans. Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1982, 4(2):157-166.
- [12] Lopes A, Touzi R, Nezry E. Adaptive Speckle Filters and Scene Heterogeneity[J]. IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing, 1990, 28(6):992-1000.
- [13] 郭华东. 雷达对地观测理论与应用[M]. 北京:科学出版社,2001.
- [14] Oliver C, Quegan S. Understanding Synthetic Aperture Radar Images[M]. Boston and London: Artech House, 1998.
- [15] 袁礼海,宋建社,薛文通,等. 利用灰度和纹理特征的SAR图像分类研究[J]. 光电与控制,2007,14(4):58-62.
- [16] 宋建社,郑永安,袁礼海,等. 合成孔径雷达图像理解与应用[M]. 北京:科学出版社,2008.

[17] Lain H, Woodhouse. Introduction to Microwave Remote Sensing [M]. Taylor & Francis, 2006.

[18] 舒宁,马洪超,孙和利. 模式识别的理论和方法[M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2004.

Water Area Extraction and Change Detection of the Poyang Lake Using SAR Data

WANG Qing^{1,2}, LIAO Jing - juan¹

(1. Center for Earth Observation and Digital Earth, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China;

2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: In order to extract the open water from the Poyang Lake by applying SAR data in different periods, the authors firstly analyzed the scattering mechanism of water, vegetation and sand, then used the texture of SAR imagery and polarized ratio and polarized difference to enhance the description of targets, and employed principal component transformation to enhance the contrast of water and other objects. With the first component, the area of open water on SAR imagery could be effectively and accurately extracted by setting up a proper threshold. The SAR images used were Envisat - ASAR and ALOS - PALSAR alternating polarization mode data. Meanwhile, after the analysis of two kinds of sample data with Jeffries - Matusita distance, ASAR data with C band could provide more accurate extraction of open water than those of PALSAR with L band. Finally, the open water of the Poyang Lake was extracted from SAR imagery in spring, summer and winter, and the changes of water area indicated the regular change of the open water of the Poyang Lake.

Key words: Texture; Principal component transformation; Open water extraction; ASAR; PALSAR

第一作者简介: 王庆(1986-),男,在读硕士研究生,主要从事 SAR 数据信息提取、极化 SAR 数据处理和微波遥感应用等方面的研究。

(责任编辑: 刘心季)