基于对象及隶属规则的海岸水边线提取方法

毕京鹏^{1,2},张 丽^{1,3*},王 萍⁴,李 通¹,杨昊翔¹,毕 森¹

(1.中国科学院 遥感与数字地球研究所 数字地球重点实验室,北京 100094;
2.生态环境部 卫星环境应用中心,北京 100094; 3.海南省地球观测重点实验室,海南 三亚 572029;
4.山东科技大学 测绘科学与工程学院,山东 青岛 266590)

摘 要:以在分辨率、光谱成像能力等方面具有优势的 Sentinel 2A 为数据源,突破传统以像元为研究单元提取海岸 水边线的思路,构建以像元聚类形成的语义单元为对象,获取决策分类规则后,基于隶属度及模糊函数获取海岸水 边线位置的方法。结果表明,本文方法解决了传统分类方法在下垫面地物类型复杂条件下不易于采用传统分类方 法提取海岸水边线的限制条件。基于面积法的距离准则线段匹配法和断面线距离分析方法应用于海岸水边线精 度评价的结果显示,本文方法提取的海岸水边线位置与传统目视解译方法得到的海岸水边线位置在约 85%的区域 具有一致性,误差的集中区域表现在近岸和近海地物波谱相似处,如受水质水深、悬浮泥沙等影响的淤泥质潮滩处 以及受人工海岸开发影响的近岸地区等,建议在这些地区结合目视解译的方法进行海岸水边线的位置修正,进而 快速、准确地获取海岸线的真实位置信息,为海岸带生态环境保护、海岸带开发的合理规划和建设,以及经济与环 境的科学协同发展提供技术支持。

关键词:Sentinel 2A;面向对象;规则分类;海岸水边线;精度评价

中图分类号:TP79 **文献标识码:**A **文章编号:**1002-3682(2019)04-0247-14

doi:10.3969/j.issn.1002-3682.2019.04.001

引用格式: BI J P, ZHANG L, WANG P, et al. Algorithm for extracting transient coastal water edge line based on object and membership rule[J]. Coastal Engineering, 2019, 38(4): 247-260. 毕京鹏,张丽,王萍,等. 基于对象及 隶属规则的海岸水边线提取方法[J]. 海岸工程, 2019, 38(4): 247-260.

海岸带是受气候变化和人类活动影响最敏感的区域,也是地球表层波动变换最为频繁的区域,生态系统的脆弱性极为突出^[1]。全世界将近 60%的人口生活在仅占陆地面积 10%的海岸带区域^[2]。海岸线作为海岸带开发的前沿阵地,蕴藏着丰富的地理环境、生态人文、经济发展建设等信息,也是政治、文化、社会发展的孕育港湾。利用遥感影像定期进行海岸线提取,获取岸线走向、岸线长度及种类的变化信息,可为地图更新、船舶导航、资源管理和地形反演提供准确详实的数据^[3],对基础地理信息快速更新、资源调查和海岸带的科学管理都具有重要意义。

遥感影像海岸水边线提取利用的数据源主要有 Landsat, IKONOS, SPOT, ASTER 和高分数据(GF-1/2)等影像^[4],分辨率从1m至30m不等,随着空间分辨率的提高,遥感影像的数据量成指数增长,用传统方法提取高分辨率影像信息,运算量大、速度慢且不能满足遥感信息快速提取的要求^[5]。2015年,欧洲航天局(European Space Agency, ESA)发射的 Sentinel 2影像是目前可免费获取数据中分辨率最高的影像^[6],为海岸水边线的提取提供了新的高分辨率数据源。针对海岸水边线提取算法研究,国内外研究学者提出了许多方

收稿日期:2019-08-20

资助项目:海南省重大科技计划项目-海南省遥感大数据服务平台建设与应用示范 - 海南省资源环境遥感动态监测应用示范(ZD-KJ2016021-2);中国科学院战略性先导科技专项(A类)——一带一路生态环境监测与评估 - 海上丝绸之路海岸带生态环境 监测与评估(XDA19030302);国家高分辨率对地观测重大科技专项项目——环境保护遥感动态监测信息服务系统(二期)(05-Y30B01-9001-19/20-2)

作者简介:毕京鹏(1993-),男,硕士研究生,主要从事海岸带信息提取方面研究. E-mail: kedabijingpeng@126.com

(陈 靖 编辑)

^{*} 通讯作者:张 丽(1975-),女,研究员,博士,博士生导师,主要从事全球生态与海岸带遥感方面研究. E-mail:zhangli@aircas.ac.cn

法,如目视解译法^[4]、阈值分割法^[7]、边缘检测法^[8]、支持向量机(Support Vector Machine, SVM)法^[9]、水平 集法(Level Set Method, LSM)^[10]等,其中基于图像分类后提取海岸线水边线的方法多采用基于像元的分 类方法,相当于图像理解过程的第一层次^[11]。影像分辨率的不断提升,使得遥感数据包含了更加丰富的空 间信息、地物几何结构及纹理信息,改变了传统以像元为单元分析的思路^[12]。面向对象方法是海岸水边线 自动解译方法中的一种,结合目标地物本身光谱、纹理、色调和形状等特征,先对图像进行分割,得到内部属 性相对一致或均质程度较高的图像区域,然后通过分割斑块单元的特征进行分类。面向对象方法不仅考虑 了地物的光谱信息,而且兼顾了几何信息和拓扑信息,在高分辨率遥感影像分类中具有较大优势^[13-14]。此 外,基于自动化提取算法只能获取影像成像时刻的瞬时海岸水边线,是获取真实海岸线位置的必要一步,后 期应当根据不同区域的站点潮位数据进行修正以获取真正的海岸线位置。

本文以新加坡港东北部区域(103°57′41″~104°11′12″E,1°16′29″~1°30′50″N)的 Sentinel 2A 影像为数据源, 首先利用面向对象的方法提取影像的高层次语义信息,然后基于特征对象构建隶属度模糊函数,在对象层次上 分类形成水体陆地的二值图像,最后经过栅矢转换和线简化后得到瞬时海岸水边线的位置信息。算法提取精 度验证方面,采用基于面积法的距离准则线段匹配方法和断面线距离分析法,对本文提取的海岸水边线与传统 目视解译提取的海岸水边线的位置一致度上进行对比分析。海岸水边线的自动化提取是获取海岸线信息的重 要步骤,建立高精度的海岸线空间分布特征的基础数据,对于进一步探讨以海岸线为参考指标的海陆生态保护红 线、全球背景下的海平面上升、海岸带资源和生态的协调利用以及可持续发展等具有重要的指示意义。

1 研究区域与数据来源

1.1 研究区域

港口码头等人工岸线构筑区是岸线长度、类型变化均较为显著的地方,也是时序空间分析的重点区域之一。新加坡港口及其周边区域是世界上最繁忙的十大港口区域之一,扼守着太平洋和印度洋之间的航运要道。本文选取新加坡港口东北部区域(103°57′41″~104°11′12″E,1°16′29″~1°30′50″N)且包含多种岸线类型的区域作为研究区(图1),覆盖范围为25 km×26 km。采用 Band 8(NIR),Band 11(SWIR)和 Band 4(Red) 波段构成假彩色影像增强研究区域中的水体特征信息,该组合方式下地物种类显示清楚,其中水体背景特征明显,特别是在河流的分支部分,海上船舶呈明显的"白色"斑块,植被和建筑区域分别呈褐黄色和灰色(或银色)。



1.2 数据来源

哨兵卫星影像来源于 ESA 数据分发网站(https://scihub.copernicus.eu),成像时间为 2017-05 的 Sentinel 2A MSI 多光谱数据,包含 13 个光谱波段,具有 10 m(Band 2,Band 3,Band 4 和 Band 8),20 m(Band 5,Band 6,Band 7,Band 8a,Band 11 和 Band 12)和 60 m(Band 1,Band 9 和 Band 10)三个等级的空间分辨 率。Sentinel 2A 影像具有高空间分辨率、多光谱成像能力强、刈幅宽(290 km)以及重访周期短等特点^[15-18]。 本文采用的 Sentinel 2A 数据产品为 Level-L1C 级别,已经过辐射校正、基于地面控制点构建物理几何精校 正以及通过图像重采样、正射校正等处理操作,并附带有云、陆地、水体掩膜信息和辐射定标参数等信息^[18]。 利用 snap 软件的 sen2cor 模块进行预处理,后经过基于影像的半经验大气校正方法进行大气下垫面校正^[19] 后,得到 L2A 级别的大气下层地表反射率(Bottom of Atmosphere,BOA)产品,可表征地表地物的真实反射 率信息。本文主要利用了 Band 2,Band 3,Band 4,Band 8 和 Band 11(对应 Blue,Green,Red,NIR 和 SWIR 波段)进行海岸水边线提取,其中 Band 11 采用最近邻法重采样为 10 m 分辨率,对应波段与 Landsat TM, OLI 数据的光谱范围、分辨率对比^[20]如表 1 所示。

波段	Sentinel 2A MSI		Landsat 5 TM		Landsat 8 OLI	
	光谱范围/μm	分辨率/m	光谱范围/μm	分辨率/m	光谱范围/μm	分辨率/m
Blue	0.43~0.56	10	0.45~0.52	30	0.45~0.51	30
Green	0.53~0.60	10	0.52~0.60	30	0.53~0.59	30
Red	0.64~0.70	10	0.63~0.69	30	0.64~0.67	30
NIR	0.73~0.96	10	0.76~0.90	30	0.85~0.88	30
SWIR	1.52~1.70	20	$1.55 \sim 1.75$	30	$1.57 \! \sim \! 1.65$	30

表 1 Sentinel 2A, Landsat 5 和 Landsat 8 参数对比 Table 1 Comparison of the parameters among Sentinel 2A, Landsat 5 and Landsat 8

2 研究方法

本文从影像预处理、最优尺度分割、基于地类样本建立地物光谱特征和分类模糊函数、分类后处理、精度 评定与验证等方面,对瞬时海岸水边线的自动化提取进行方法研究,技术流程如图2所示。首先在光谱特性 以及形状、纹理、颜色等几何特征和结构信息的基础上进行像元聚类后,将影像分割为同质性较大的斑块,然 后在对象层次上提取特定地物类型的典型地物特征,建立隶属度规则约束下的归属度区间,划分对象层次为 指定类别,最后经过未分类对象类别属性赋予、类别合并、二值化等后处理,得到精确的海岸水边线位置特征 信息。

本文所提取的是遥感影像成像时刻的瞬时海岸水边线。在科学研究和现实应用中,海岸线的定义多 为多年平均大潮高潮线,此外,也有用低潮线(平均低潮线、平均低低潮线等)、高潮线(平均高潮线、多年 大潮高潮线等)、平均海平面与陆地交界线、瞬时水边线、痕迹线或干湿线等^[14,21-23]指示线进行定义。而 在海岸带复杂地理环境的背景下,受潮汐洋流、沿岸地形、水动力环境的影响,准确获取海岸线的位置较 为困难。海岸水边线的提取是获取海岸线的一个重要步骤和前提,在考虑到研究区的 SRTM 高程数据 (https://earthexplorer.usgs.gov)和地理位置状况后,将卫星过境时刻提取的海岸水边线用以指示海岸线的 位置是可行的。在精度评价方面,本文构建了基于面积法的距离准则线段匹配方法和断面线距离分析方法, 分别从提取的海岸水边线和目视解译得到的海岸水边线之间所围的摆动面积与位置偏移程度方面进行了对 比分析。



Fig.2 Algorithm flow sheet

2.1 多尺度分割及其最优参数

2.1.1 对象分割参数的构建

在利用高分辨率遥感影像对海岸带的地物分类时,主要依据下垫面种类及其表现的光谱特征进行区分。 采用面向对象尺度进行语义分割,采用的关键参数包括光谱权重和形状权重,光谱信息是主要信息,在赋予光 谱和形状权重时,光谱信息权重要大于形状信息权重,两者之间的关系为{ρ_{shape} ∩ρ_{spectral} =0,ρ_{shape} ∪ρ_{spectral} =1}, 其中形状特征又由光滑度和紧致度参数刻画。若紧致度参数权重为 ρ_{compatness},则光滑度参数权重为 1-ρ_{compatness}。紧致度是空间结构特征的变量之一,它表征一个影像对象的精密度,影像对象的紧致度越高, 形状与正方形越相似^[5],如研究区中的港口码头位置处等;影像对象的光滑度因子越大,生成的对象边界越 平滑,如红树林广泛分布的河口位置处等。最佳紧致度和光滑度的确定是根据经验模型通过"经验法"得到 的,即在某一固定分割尺度下,控制住形状因子权重,寻找最优的紧致度因子,然后控制住紧致度因子再找最 优的形状因子。在本文的研究区域中,港口码头区域是较为规则的矩形条状,需要较高的紧致度参数,而沿 海的其他地区却需要较高的光滑度比重以拟合其外侧边缘特征。

下垫面表征的地物特征是由影像光谱波段的特征决定的,不同的光谱波段反映了不同地物在对应波段内的反射辐射特征,而且影像光谱波段特征对各类地物所提供的信息量也有不同。因此,从研究区影像采用的5个波段之间的利用权重关系入手,选取了研究区内的典型地物,包括水体、近海养殖塘、植被(红树林等)、种植区(棕榈树等)、建筑区(港口、码头等)和运输船舶共计6大类。对感兴趣区域(Region of Interest, ROI)的各类地物的光谱特征进行统计,利用均值法计算其表现特征,采用 Jeffries-Matusita 距离(简称 J-M 特征值)和转换分离度(transformed)评价这些地类的可分离性,J-M 特征值越大,表示地物之间的特征越明显,转换分离度也越大。

选取的 6 大类地物特征样本的均值特征曲线表明(图 3),水体与其他地类的可分离性在第 8 波段(NIR) 表现出明显的差异,水体的近红外波段的反射率较低,而其他地物的反射率较高。波段之间相关性分析表明 (表 2),相比其他波段,第 8 波段(NIR)的相关性较低,反映了该光谱波段信息具有较大的独立性,同时水体

250

在此波段的独特反射特性(图 3 中的水体反射曲线)表明了该光谱波段具有独特水体信息。分析地类特征样本的可分离度特征(表 3)可知,水体与自然植被、种植区植物、港口、养殖塘、船舶等其他特征地物能较好的从光谱反射特征上进行区分。



Table 2	2 Correlation coefficients of the Sentinel 2A bands					
波 段	Band 2	Band 3	Band 4	Band 8	Band 11	
Band 2	1.00	0.96	0.79	-0.14	0.20	
Band 3	0.96	1.00	0.90	-0.04	0.34	
Band 4	0.79	0.90	1.00	0.23	0.60	
Band 8	-0.14	-0.04	0.23	1.00	0.81	
Band 11	0.20	0.34	0.60	0.81	1.00	

表 2 Sentinel 2A 波段相关系数

表 3 特征样本的可分离度

Table 3 The degree of separability of the feature samples

杜尔士二	水体-	水体-	水体-	水体-	水体-	水体-
行但衣小	水体	植被	种植区	港口	养殖塘	船舶
J-M 特征	0.000	1.999	2.000	1.997	1.996	1.997
转换分离度	0.000	2.000	2.000	2.000	2.000	2.000

2.1.2 基于改进的局部方差法的最优分割尺度参数优选

在确定合适的光谱权重(包含利用波段之间的权重)以及紧致度因子权重后,多通过"试错法"获取最佳 分割尺度,此外也有如局部方差法、最大面积法、矢量距离指数以及建立图斑显著性变化曲线等^[12]模型算 法。本文采用改进的局部方差法^[24-28]进行最优尺度选择,其原理是自下而上采用迭代的方式产生不同尺度 的影像层(图 4a),以影像层中的所有对象标准差的均值(Local Variance,LV)和影像层之间的局部方差变化 率(Rate of Variation of Local Variance,ROC-LV)进行描述,二者之间的转换关系为

$$ROC-LV = \left(\frac{L - L_{-1}}{L_{-1}}\right) \times 100 , \qquad (1)$$

式中,L为当前影像层的LV,L-1为较低尺度影像层的LV。当ROC-LV出现"峰值"时,表示影像中的某种地物可能达到了最优分割尺度(图4b)。

对象分割的原理是以异质性最小、同质性最大为原则,基于像元单位划分语义对象,迭代运算后基于异质性最小区域合并算法(Fractal Net Evolution Approach,FNEA)合并低层次语义对象^[13],直至达到最优的分割尺度条件后完成分割。第一次分割只能选择基于像素合并,后面的分割可以基于像素层或是基于对象层进行自底向上合并(图 4a)。





研究区内具有明显特征的地物类型,如水体、广泛分布的不透水面、人工构筑物和植被等,因此在确定分 割尺度时,应以在沿海岸带区域的典型地物的外边界处具有明显的分割效果、且能贴近海岸水边线的位置为 原则,但自然状态下形成的如河口、养殖塘、近岸淤泥质潮滩等,由于各自物理化学特征或周边环境的差异性 比较大,边界部分往往容易与其他地物混淆,划分的对象单元不能完全由局部方差变化率指标所决定,故在 部分地区需借助 Manual Editing 工具(划分、切割、合并对象单元)实现对象单元边界的优化(图 5)。结果表 明,在分割尺度为 57,78,93,108 和 116 时,达到了下垫面不同地类地物的最优分割尺度;经过拟合效果评判 后,在保证能把地物划分出来的情况下,得出最佳分割尺度为 108。



(a) 研究区 (Sentinel 2A 432 波段合成)

Fig.5 Segmentation effects in typical areas under the optimal segmentation scale

2.2 隶属度规则和模糊函数分类

以最佳的分割尺度为参数进行分割后,建立合适的隶属规则和分类方法是重要的一步。海岸水边线的 目标特征较为单一,在尺度、范围上具有宏观性,相比于海岸带复杂的地物类型如人工构筑物、红树林等植 被、养殖围塘、河口等,水体信息具有较强的背景特征,当目标类别和背景类别在某一特征上差别很大时,可 以通过指定类算法来创建分类规则^[13]。

基于遥感影像的波谱关系形成了诸多的波段指数,如用来识别植被的归一化植被指数(Normalized Difference Vegetation Index, NDVI)、比值植被指数(Ratio Vegetation Index, RVI)等;用以识别水体的归一化水体指数(Normalized Difference Water Index, NDWI)、改进的归一化水体指数(Modified Normalized Difference Water Index, NDWI)、改进的归一化水体指数(Modified Normalized Difference Water Index, NDWI)等;用以识别建筑用地的建筑用地指数(Index-Based Built-up Index, IBI)、归一化建筑指数等(Normalized Difference Build-up Index, NDBI)。这些用于指示地物类别的特征指数,在广域范围内的地物粗识别方面具有较大的优势,同时也存在着不足,如仅用一种指数提取某类地物时,往往存在着较大的分类结果不确定性,特别是在地物种类较为复杂、特征区分不明显的区域。因此,采用几种或多种指数组合提取地物,尽可能减少分类结果的不确定性,是一种兼顾效率性与精确度的有效方法。本文通过特征对比筛选后,最终确定采用 NDVI,NDWI,NDBI和 MNDWI 四个指数特征进行组合提取研究区的地物,利用 NDVI 植被指数确定植被空间分布,利用 NDWI和 MNDWI 水体指数共同确定水体空间分布,利用 NDBI 建筑指数确定建筑区空间分布。各特征指数的计算公式分别为

$$NDVI = \frac{\rho_{\rm NIR} - \rho_{\rm RED}}{\rho_{\rm NIR} + \rho_{\rm RED}} , \qquad (2)$$

$$NDWI = \frac{\rho_{\text{GREEN}} - \rho_{\text{NIR}}}{\rho_{\text{GREEN}} + \rho_{\text{NIR}}},$$
(3)

$$MNDWI = \frac{\rho_{\text{GREEN}} - \rho_{\text{SWIR}}}{\rho_{\text{GREEN}} + \rho_{\text{SWIR}}} , \qquad (4)$$

$$NDBI = \frac{\rho_{\text{SWIR}} - \rho_{\text{NIR}}}{\rho_{\text{SWIR}} + \rho_{\text{NIR}}} , \qquad (5)$$

式中: \rho_{GREEN}, \rho_{RED}, \rho_{NIR}和 \rho_{SWIR}分别为 Sentinel 2A 的 Band 3(Green), Band 4(Red), Band 8(NIR)和 Band 11 (SWIR)四个波段的 BOA 反射率。

基于特征指数的信息提取中,确定合理的分割阈值是影响分类结果的决定性因素之一。最常采用的方 式是采用阈值不断逼近,通过观察分割效果以确定合理的阈值,通常选取的阈值位于图像灰度直方图波峰之 间的波谷地带,此外也有其他方法如最大类间方差法^[29]等。在确定对象单元类别归属的阈值时,往往难以 用一个精确的实数表达阈值的确定值,因此本文在优选的地物识别特征指数的基础上,构建了基于样本特征 和隶属度函数的模糊分类方法,其基本原理是通过构建各类地物的特定样本,基于样本的特征值获取样本的 隶属度函数后,以最小隶属度指标进行筛选。算法中选择 0.7 为分界点,即一个对象归属于一个类需达到一 个指定类型条件的 70%才能被划分,且被划分为隶属度最大的类型;若≪0.7,则被划分为未分类类型,后处 理中采用人工干预的方式对该类别进行指定类别的划分(式(6))。

$$\max(\rho_{A-\text{NDVI}}, \rho_{A-\text{NDWI}}, \rho_{A-\text{NDWI}}, \rho_{A-\text{NDBI}}) \quad \max(\rho_{A-\text{NDVI}}, \rho_{A-\text{NDWI}}, \rho_{A-\text{NDWI}}, \rho_{A-\text{NDBI}}) > 70\%$$
(6)
$$\max(\rho_{A-\text{NDVI}}, \rho_{A-\text{NDVI}}, \rho_{A-\text{NDBI}}, \rho_{A-\text{NDBI}}) \leqslant 70\%$$

式中,A代表目标对象; ρ_{A-NDVI} , ρ_{A-NDVI} , ρ_{A-NDVI} , ρ_{A-NDVI} 分别代表目标对象 A 归属于特征指数表征地类的 概率。

初步获得分类结果后(图 6b),对分类结果进行后处理是重要的一步。主要表现在图中未分类区以及错 分地类的再划分。例如,图 6b 中海上船舶的边界线不属于海岸水边线的部分(对应于图 6a 左下角部分),应 当将其归类到水体区域中;又如在淤泥质潮滩、近岸湿地、河流冲积扇等近岸区域,水体浑浊度、泥沙含量等 水质状况具有区域差异性,使得其光谱特征与典型水体、陆地特征差别不明显而易被错分,该处则根据实际 情况将可明显区分的部分划分到对应类别中。采用 Assign class 算法进行对象单元的再分类,采用 Combine class 算法将分类得到的建筑区域、植被区域归类到陆地层次,将水体和错分为陆地区域的部分归 类到水体区域,最终得到水体和陆地两个类别的二值影像(图 6c)。将水陆二值图像栅矢转换后,获得其边 界信息。一般获取的边缘与像元的边界重合,呈现锯齿状,因此利用指数核的多项式近似(Polynomial Approximation with Exponential Kernel, PAEK)线约简方法(线要素容差 0.01 m)平滑外边缘后,得到最终的 海岸水边线数据(图 6d)。



Fig.6 Ground object classification map and coastal water edge lines extracted based on Sentinel 2A images

3 模型验证与对比分析

海岸水边线位置精度的验证工作通常采用定性和定量两种方法进行。定性方法为与影像原图、实测结 果或采用其他提取方法得到的结果叠加,用目视观察岸线偏移位置的方式进行对比分析。定量方法为用一 定的岸线偏移指标进行定量化分析,如采用"(提取的海岸线长度一参考海岸线长度)/参考海岸线长度"的方 法比较提取误差^[30];采用提取结果和参考岸线之间所夹区域的面积来评价岸线提取结果^[31];又如基于线目 标匹配方法构建完整度、正确度和质量三个指标进行定量评价^[32]的方法。

本文研究区域缺少岸线点位实测数据,且生态环境复杂,受海岸带地物种类等多种因素的影响,常规分 类方法得出的分类结果误差较大,不易作为精度验证的参考。故在缺少实测和其他分类方法验证的条件下, 一方面从定性的角度,将算法提取结果与目视解译结果叠加后对比验证;另一方面从定量的角度,采用基于 面积法的距离准则线段匹配法^[3]和断面线距离分析法,分别从岸线摆动面积值和摆动距离幅度两个角度进 行误差分析。

3.1 海岸水边线位置精度评价方法

基于面积法的距离准则线段匹配法用于评价两条线之间的匹配精度,该计算方法既考虑了提取线和实际线的平均长度关系,又考虑到了两条线之间所夹区域的面积,最终得到两条线之间的"距离"指标并进行相关的精度评价(图 7a)。"距离"的计算方法为 *d* = *S*/*L*,其中 *d* 为两条线之间的距离,*S* 为两条线之间相应 首尾节点连接后围成的多边形面积,*L* 为实际线和提取线总长度的平均值。该方法的优点是能够准确地评 价实际线和提取线之间的平均偏差,而且能够从围成的多边形的面积分布判断出位置偏差较大的地方。本 文研究区中广泛分布的河口岸线处受地理环境等条件的限制,是所有基于遥感影像自动化提取海岸水边线 时误差固有的地方,故"距离"指标并不十分适用。因此,本文基于两条岸线之间所夹区域的面积,采用自然 间断点(Jenks Nature Break)分级的方法,从数据统计的角度分析误差存在的区域分布特点。

基于断面线距离分析采用数字岸线分析系统(Digital Shoreline Analysis System, DSAS)进行,将提取 的海岸水边线和实际海岸水边线分别记为 Shoreline 和 Baseline。以 Baseline 为基准,以一定的起点和方式 设置一定间隔的垂直断面线(垂直于 Baseline 方向),以 Shoreline 和 Baseline 所夹区域的断面线长度为指标 进行评价。通常计算所得的长度有正值、负值和零值三种情形,正值代表提取的海岸水边线偏向海洋,负值 代表提取的海岸水边线岸线偏向陆地,零值代表提取的海岸水边线与实际海岸水边线重合(图 7b)。





3.2 结果对比分析

本文采用目视解译法得到的基准海岸水边线验证本文实验结果。利用目视解译法获取基准海岸水边线的方法:

1)在河口位置处,考虑到河口岸线的地貌形态和水文要素,保留河口岸线的连续性和拓扑关系,取能够 最大程度反映河流形态特征的地方;

2) 在淤泥质岸线处,利用假彩色变换和线性拉伸等方法增强图像显示后,取靠内陆一侧具有明显解译标志(如植被线、干湿线等)、淤泥质岸滩上延且靠近陆地内轮廓的地方;

3)港口位置处一般与海水直接相连,具有规则的、呈白色且条状分布的水陆分界线,取其永久性人工构 筑物的外缘,形成向海一侧的连接线;

4)其他地方则依据遥感影像的色调、纹理、空间位置形态以及毗邻区域的地物、地貌信息等,结合位置界 定经验综合判读确定。

将提取的海岸水边线和目视解译提取的海岸水边线进行叠加,从而获取2条海岸水边线所包夹的区域。 基于获取的面积数据的固有自然分组,对分类间隔加以识别,并使得各个类之间的方差差异最大化,获取最 佳的数据分级,最终得到2条海岸水边线所夹面积的分级图(图8)。结果表明,本文方法提取的结果和位置 验证对比数据在大部分区域能够具有较好的拟合度(图8a),其中位置误差主要分布在图8b,图8c,图8d和 图8e四个类型区域。图8b为河口位置,水质条件、泥沙含量和河流的旱汛期等区域差异性是误差的主要来 源因素;图8c和图8d为淤泥质岸线分布的区域,近海一侧分布有大量的淤泥质潮滩等,或受人工开发的影 响,水体与陆地的光谱特性具有一定的相似性,因此后续从河流的旱汛期、近岸水深、水体悬浮物及浑浊度等 方面加入先验知识能否提高图8b,图8c和图8d的提取精度,还有待深入研究。图8e为港口区域,港口停泊 的大量船只与港口不透水面不易区分,与人为定义的海岸水边线具有差异,因此在获取真实海岸线位置时需 要进行人为修正。





Fig.8 The accuracy evaluation of the coastal water edge lines, that is, the swing area distribution of coastline

对岸线摆动面积进行统计分析的结果表明(图 9a),在得到的1 933 个摆动面积要素中,约 90.74%的面积值小于 6.78 m²,且摆动面积值越大,对应面积的统计个数越少;摆动面积值越小,统计值个数越多,即摆动面积的大小与统计个数成反比,表明大多数岸线摆动面积区域均为小误差区域。摆动面积较小值的存在 是引起海岸水边线位置不确定性的主要因素,在可控的(即岸线信息提取误差所允许的)范围内是能够被接受的;同时摆动面积较大的地方与图 8b、图 8c、图 8d 和图 8e 位置处具有一致性。

为准确比较人工提取的海岸水边线和采用本文方法提取的海岸水边线之间在纵向位置上的摆动性(图

9b),以10m为间隔单元设置长度为100m的垂直于基准岸线的断面线。其中,若提取的海岸水边线在基 准线的左侧(向陆地一侧),则其之间的距离为负值;提取的岸线在基准线的右侧(向海一侧),则其之间的距 离为正值。实验共计得到断面线34515条,其中提取的断面线中偏向陆地一侧的共计12912条,距离值小 于一个像元宽度的有8066条,占比62.47%;距离值小于两个像元宽度的有10894条,占比84.37%。偏向 海洋一侧共计21603条,其中距离值小于一个像元宽度的有12103条,占比56.02%;距离值小于两个像元 宽度的有18379条,占比85.08%,表明多数的岸线误差控制在2个像元以内。此外,断面线的距离值表明 正值误差值个数多于负值误差值个数,即提取的海岸水边线更多的在参考岸线的右侧(向海一侧),这与海岸 带的近海水环境的复杂度密切相关,如港口停靠船舶处、淤泥质岸滩处、河流入海口等,表明海岸带水环境较 为复杂的地方也同时具有较大的岸线摆动误差,在空间位置分布上,与图8得到的结果具有一致性。

对断面线数据统计及高斯拟合后得到偏移值与误差值个数之间的关系曲线(图 9b),呈现均值为1个像 元的正态分布特点。这表明本文方法在提取精度上达到和基准岸线的一致性,在2个像元的误差范围内,约 85%的区域实现了海岸水边线的有效提取。





4 结 论

基于隶属度规则和模糊函数的面向对象分类方法提取了新加坡港东北部区域的海岸水边线,并采用基 于面积法的距离准则线段匹配方法和断面线距离分析方法,从定量的角度对海岸水边线的结果精度进行评价,主要结论:

1)充分发挥高分辨率影像的深层次信息,从 Sentinel 2A 影像的语义层次上进行重新构造和解译,构建 了基于改进的局部方差法的最优多尺度分割。

2)区别于传统的以像元为单位利用统计学原理进行地物分类后提取海岸水边线的方法,本文构造了以 语义对象和特征指数为基础的地类识别方法,通过基于隶属度规则的模糊函数分类,有效提高了地物解译 效果。

3)在海岸水边线提取精度分析方法上,构造了岸线摆动面积、误差偏移幅度2个评价指标进行定量分析,解决了传统海岸水边线提取精度评价上的局限性。结果表明,本文方法在85%的区域实现了海岸水边线的有效提取。

海岸水边线的位置提取精度受多种限制因素的制约,如遥感影像的成像质量状况、海岸带地理环境的复杂性,以及海岸水边线位置的不确定性等,因此对本文存在提取误差的区域提出以下建议:

1) 在光谱特性不易区分以及受水深、水质浑浊度和悬浮物浓度等影响的区域, 建议增加下垫面种类及其 识别规则, 以提高解译精度。 3)可结合潮位数据通过潮汐校正方法推求海岸线的真实位置。

参考文献(References):

- [1] HOU X Y, LIU J, SONG Y, et al. Environmental ecological effect of development and utilization of China's coastline and policy recommendations[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2016, 31(10): 1143-1150. 侯西勇, 刘静, 宋洋, 等. 中国大陆海岸线开发利用 的生态环境影响与政策建议[J]. 中国科学院院刊, 2016, 31(10): 1143-1150.
- [2] XULH, LIJL, LIWF, et al. Progress in impact of human activities on coastal resource and environment[J]. Journal of Nanjing Normal University (Natural Science Edition), 2014, 37(3): 124-131. 徐谅慧,李佳林,李伟芳,等. 人类活动对海岸带资源环境的影响研究综述[J]. 南京师范大学学报(自然科学版), 2014, 37(3): 124-131.
- [3] GE X Z. Object-oriented coastline classification and extraction from remote sensing imagery[D]. Qingdao: Shandong University of Science and Technology, 2013. 葛锡志. 面向对象的遥感影像海岸线分类与提取[D]. 青岛:山东科技大学, 2013.
- [4] XU J Y, ZHANG Z X, ZHAO X L, et al. Spatial-temporal analysand of coastline changes in northern China from 2000 to 2012[J]. Acta Geographica Sinica, 2013, 68(5): 651-660. 徐进勇,张增祥,赵晓丽,等. 2000—2012 年中国北方海岸线时空变化分析[J]. 地理学报, 2013, 68(5): 651-660.
- [5] ZHANG J, ZHU G L, LI Y, et al. Scale effect and optimal scale in object-oriented information extraction of high spatial resolution remote sensing image[J]. Science of Surveying and Mapping, 2011, 36(2): 107-109. 张俊, 朱国龙, 李妍, 等. 面向对象高分辨率影像信息 提取中的尺度效应及最优尺度研究[J]. 测绘科学, 2011, 36(2): 107-109.
- [6] HAN T, PAN J J, ZHANG P Y, et al. Study on differences between Sentinel-2A and Landsat-8 images in rape identification[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2018, 33(5): 890-899. 韩涛,潘剑君,张培育,等. Sentinel-2A 与 Landsat-8 影像在油菜识别中的 差异性研究[J]. 遥感技术与应用, 2018, 33(5): 890-899.
- [7] QU J S, WANG C, WANG Z Z. A Multi-threshold based morphological approach for extracting coastal line feature from remote sensed images[J]. Journal of Image and Graphics, 2003, 8(7): 805-809. 瞿继双, 王超, 王正志. 一种基于多阈值的形态学提取遥感图象海岸线特征方法[J]. 中国图象图形学报, 2003, 8(7): 805-809.
- [8] YUAN X H, WANG P, ZHANG Y, et al. Research on edge detection and object-oriented for automatic extraction of coastline[J]. Beijing Surveying and Mapping, 2019, 33(2): 148-152. 原晓慧, 王萍, 张英, 等. 基于边缘检测的海岸线自动提取研究[J]. 北京测绘, 2019, 33 (2): 148-152.
- [9] ZHU C M, ZHANG X, LUO J C, et al. Automatic extraction of coastline by remote sensing technology based on SVM and auto selection of training samples[J]. Remote Sensing for Land and Resources, 2013, 25(2): 69-74. 朱长明,张新,骆剑承,等. 基于样本自动选择与 SVM 结合的海岸线遥感自动提取[J]. 国土资源遥感, 2013, 25(2): 69-74.
- [10] LIU P C. Feature extraction of coastline contour based on level set theory[J]. Remote Sensing for Land and Resources, 2015, 27(2): 75-79. 刘鹏程. 基于水平集理论的海岸线轮廓特征提取[J]. 国土资源遥感, 2015, 27(2): 75-79.
- [11] CHEN Y H, FENG T, SHI P J, et al. Classification of remote sensing image based on object-oriented and class rules[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2006, 31(4): 316-320. 陈云浩, 冯通, 史培军, 等. 基于面向对象和规则的遥感影像分类研 究[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2016, 31(4): 316-320.
- [12] LIQ, GAO X Z, ZHANG T, et al. Optimal segmentation scale selection and evaluation for multi-layer image recognition and classification[J]. Journal of Geo-Information Science, 2011, 13(3): 409-417. 李秦,高锡章,张涛,等.最优分割尺度下的多层次遥感地物分类 实验分析[J].地球信息科学学报, 2011, 13(3): 409-417.
- [13] ZHAOZL, LIH, DONGYE, et al. Object-oriented waterline extraction based on GF-1 satellite remote sensing images[J]. Spacecraft Recovery & Remote Sensing, 2017, 38(4): 106-116. 赵芝玲, 李慧, 董月娥, 等. 高分一号卫星遥感影像面向对象的水边线提取[J]. 航天返回与遥感, 2017, 38(4): 106-116.
- [14] WU X J, XIAO C C, CUI Z Y, et al. Coastline extraction based on object-oriented method using GF-2 satellite data[J]. Spacecraft Recovery & Remote Sensing, 2015, 36(4): 84-92. 吴小娟, 肖晨超, 崔振营, 等. "高分二号"卫星数据面向对象的海岸线提取[J]. 航天返回与遥感, 2015, 36(4): 84-92.
- [15] YUE Z G. European Sentinel-2A satellite is about to show off: brief introduction of Copernicus Earth observation Program (I)[J]. Infrated, 2015, 36(8): 34-48. 岳帧干. 欧洲 Sentinel-2A 卫星即将大显身手——"哥白尼"对地观测计划简介(上)[J]. 红外, 2015, 36(8): 34-48.

- [16] YUE Z G. European Sentinel-2A satellite is about to show off: brief introduction of Copernicus Earth observation Program (II)[J]. Infrated, 2015, 36(9): 35-44. 岳帧干. 欧洲 Sentinel-2A 卫星即将大显身手——"哥白尼"对地观测计划简介(中)[J]. 红外, 2015, 36 (9): 35-44.
- [17] YUE Z G. European Sentinel-2A satellite is about to show off: Brief introduction of Copernicus Earth observation Program (III)[J]. Infrated, 2015, 36(10): 32-36. 岳帧干. 欧洲 Sentinel-2A 卫星即将大显身手——"哥白尼"对地观测计划简介(下)[J]. 红外, 2015, 36 (10): 32-36.
- [18] WANG L, YANG B, LI D, et al. Abnormal information extraction and application of mineralization alteration based on Sentinel-2A[J]. Journal of Southwest University of Science and Technology, 2018, 33(1): 55-61. 王磊,杨斌,李丹,等. 基于 Sentinel 2A 的矿化蚀变 异常信息提取应用[J]. 西南科技大学学报, 2018, 33(1): 55-61.
- [19] LITT, TIANLQ, LIJ, et al. Comparison study on the retrieval of chlorophyll in turbid waters based on Sentinel satellites[J]. Journal of Central China Normal University (Natural Sciences), 2017, 51(6): 858-864. 李亭亭,田李乔,李建,等. 基于 Sentinel 卫星的浑浊水体叶绿素反演对比研究——以鄱阳湖为例[J]. 华中师范大学学报(自然科学版), 2017, 51(6): 858-864.
- [20] NIKOLAKOPOULOS K G, PAPOULIS D. A preliminary comparison between Landsat-8 OLI and Sentinel-2 MSI for geological applications[C]// Living Planet Symposium. Prague: ESA-SP, 2016(740): 203.1-203.6.
- [21] SHITT, XUHQ, WANGS, et al. Remote sensing study of coastline dynamics of Quanzhou Port: starting point of the ancient maritime silk road[J]. Journal of Geo-information Science, 2017, 19(3): 407-416. 施婷婷, 徐涵秋, 王帅, 等. 海上丝绸之路起点一泉州港 岸线变化的遥感动态研究[J]. 地球信息科学学报, 2017, 19(3): 407-416.
- [22] HOUXY, WUT, WANGYD, et al. Extraction and accuracy evaluation of multi-temporal coastlines of mainland China since 1940s [J]. Marine Sciences, 2014, 38(11): 66-73. 侯西勇, 毋亭, 王远东, 等. 20世纪40年代以来多时相中国大陆岸线提取方法及精度评估 [J]. 海洋科学, 2014, 38(11): 66-73.
- [23] ZHONG Q Q. Analysis of Rizhao coastlines changes based on remote sensing[D]. Qufu: Qufu Normal University, 2016. 种晴晴. 基于 遥感的日照海岸线变迁分析[D]. 曲阜: 曲阜师范大学, 2016.
- [24] LUCIAN D, DIRK T, SHAUN R L. ESP: a tool to estimate scale parameter for multi-resolution image segmentation of remotely sensed data[J]. International Journal of Geographical Information Science, 2010, 24(6): 859-871.
- [25] HUANG H P. Scale issues in object-oriented image analysis[D]. Beijing: Institute of Remote Sensing Applications Chinese Academy of Sciences, 2003. 黄慧萍. 面向对象影像分析中的尺度问题研究[D]. 北京:中国科学院遥感应用研究所, 2003.
- [26] BIKY, NIUZ, HUANGN, et al. Identifying vegetation with decision tree model based on object-oriented method using multi-temporal Sentinel-2A images[J]. Geography and Geo-Information Science, 2017, 33(5): 16-20. 毕恺艺, 牛铮, 黄妮, 等. 基于 Sentinel-2A 时序 数据和面向对象决策树方法的植被识别[J]. 地理与地理信息科学, 2017, 33(5): 16-20.
- [27] WOODCOCK C E, STRAHLER A H. The factor of scale in remote sensing[J]. Remote Sensing of Environment, 1987, 21(3): 311-332.
- [28] KIM M, MADDEN M, WARNER T. Estimation of optimal image object size for the segmentation of forest stands with multispectral IKONOS imagery (Object-Based Image Analysis)[M]. Berlin Heidelberg: Springer, 2008: 291-307.
- [29] OTSU N. A threshold selection method from gray-level histogram[J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, 2007, 9(1): 62-69.
- [30] WANG L J, NIU Z, ZHAO D G, et al. The study of coastline extraction and validation using ETM remote sensing image[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2010, 25(2): 235-239. 王李娟, 牛铮, 赵德刚, 等. 基于 ETM 遥感影像的海岸线提取与验证研究 [J]. 遥感技术与应用, 2010, 25(2): 235-239.
- [31] BAGLI S, SOILLE P. Automatic delineation of shoreline and lake boundaries from Landsat satellite images[J]. Proceedings of Initial ECO-IMAGE GI and GIS for Integrated Coastal Management, 2004: 1-4.
- [32] ZHOU Y N, ZHU Z W, SHEN Z F, et al. Automatic extraction of coastline from TM image integrating texture and spatial relationship [J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 2012, 48(2): 273-279. 周亚男, 朱志文, 沈占锋, 等. 融合纹理特征和空间 特征的 TM 影像海岸线自动提取[J]. 北京大学学报(自然科学版), 2012, 48(2): 273-279.

Algorithm for Extracting Transient Coastal Water Edge Line Based on Object and Membership Rule

BI Jing-peng^{1,2}, ZHANG Li^{1,3}, WANG Ping⁴, LI Tong¹, YANG Hao-xiang¹, BI Sen¹

(1. Key Laboratory of Digital Earth Science, Institute of Remote Sensing and Digital Earth, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China;

2. Satellite Application Center for Ecology and Environment, MEE, Beijing 100094, China;

3. Key Laboratory of Earth Observation of Hainan Province, Sanya 572029, China;

4. College of Geosciences, Shandong University of Sciences and Technology, Qingdao 266590, China)

Abstract: By taking Sentinel-2A images which have advantages of spatial resolution and spectral imaging capability as the data sources and taking semantic unit formed by pixel clustering, rather than the traditional pixel-based unit, as the object, a method for acquiring the positions of coastal water edge line is proposed based on membership degree and fuzzy function and after the decision rules required. This method can solve the problems that the traditional classification methods cannot be easily used for extracting the coastal water edge line under the case of complex coastal conditions. For evaluating the accuracy of the extracted coastal water edge lines, the distance criterion line segment matching method and the section line distance analysis method based on the area method are applied. The results indicate that the positions of the coastal water edge lines extracted by the proposed method are consistent with those obtained by traditional visual interpretation method in about 85% of the study area. The error-concentrated areas are mostly at the places where the spectra of inshore and offshore ground objects are similar, such as the muddy tidal flat regions affected by water quality, water depth and suspended sediments, the coastal regions affected by artificial coastal exploitation, and so on. It is, therefore, suggested that at these places the positions of the coastal water edge line should be corrected by combining the visual interpretation method, in order to acquire the real position information of the coastline fast and accurately. This proposed method can provide technical supports for the protection of coastal ecological environment, the rational planning and construction of the coastal development and the scientific synergetic development of economy and environment in the coastal zone.

Key words: Sentinel 2A; object-oriented; rule-oriented; transient coastlines; accuracy assessment Received: August 20, 2019