

# 基于小波变换和数学形态学的潮沟提取方法研究

和思海, 韩震, 朱言江, 胡旭冉, 丁如一

(上海海洋大学 海洋科学学院, 上海 201306)

**摘要:** 潮沟是潮滩的主要地貌类型之一, 潮沟信息的检测对湿地生态环境的监测和保护有着重要意义。本文以长江口九段沙下沙北部发育比较复杂的潮沟为研究对象, 使用 2016 年 1 月 26 日 Landsat8 全色波段数据, 采用了一种融合小波变换、最大类间方差法和数学形态学的方法对潮沟边缘信息进行了检测。小波变换中通过减小高层小波系数, 达到弱化潮滩灰度变化的目的; 通过增大低层小波系数, 达到增强潮沟信息的目的; 利用数学形态学和图像之间的几何(加减乘)运算, 完成潮沟的提取; 最后, 分别在原始数据和检测结果相应的位置取样进行精度验证, 样方潮沟面积一致性精度平均为 92.1%。

**关键词:** 潮沟; 小波变换; 最大类间方差法; 数学形态学; 基于连通域的断点连接  
**中图分类号:** TP 75      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1000-3096(2017)09-0123-07  
**DOI:** 10.11759/hyxx20170412002

边缘检测一直是遥感图像处理的热点之一。边缘检测方法很多, 有基于梯度的边缘检测, 包括 Robert, Sobel, Prewitt, Laplacian, Canny, Kirsch 算子等; 有基于数学形态学的边缘检测; 有基于小波变换的边缘检测等等<sup>[1]</sup>。Canny<sup>[2]</sup>提出了 Canny 算子, 并且给出了边缘检测三条准则, 即信噪比准则, 定位精度准则, 单边边缘响应准则。Zhou 等<sup>[3]</sup>使用了 Haar、Daubechies、Coiflets 和 Symlets 等小波函数进行了道路信息检测, 结果表明 Coiflets 小波函数检测边缘效果最好。胡晓辉等<sup>[4]</sup>通过小波变换将图像分为高频和低频部分, 分别对高频和低频部分处理, 将两部分的边缘图像进行融合, 得到了精度较高的边缘信息。陈翔等<sup>[5]</sup>在长江口九段沙 TerraSAR-X 微波遥感数据的基础上, 结合增强 LEE 滤波和数学形态学的方法完成了对九段沙潮沟的提取。郭永飞等<sup>[6]</sup>获取高分辨率长江口九段沙图像, 通过灰度形态学完成对潮沟边缘信息的检测, 并对潮沟进行分维研究。张伟等<sup>[7]</sup>利用小波系数相关性, 对小波系数设置权重, 增大低层小波系数, 减小高层小波系数, 达到去除部分背景噪声, 突出边缘的作用。Feyisa 等<sup>[8]</sup>在 Landsat 数据的基础上, 提出了自动水体提取指数, 结果表明, 该方法提取的大部分地区水体分类精度高于归一化水体指数和最大似然法。巢子豪等<sup>[9]</sup>以 Landsat 图像为数据源, 通过改进归一化水体指数、二值化、潮位校正模型提取海岸线, 并且通过数字海岸线分析系统对 1984—2012 年海州湾海岸线的时空演变进行了分析。朱庆光等<sup>[10]</sup>通过数值模型模拟近 30 a 的

水下地形演化, 得到水道和沙脊的侵蚀淤积情况。Schaffer-Smith 等<sup>[11]</sup>选用 23 a(1983—2015)的 Landsat 数据, 得到不同的光谱与监督分类方法的水体指数阈值, 并且进行了分类和验证, 结果表明分类效果较好。Yu 等<sup>[12]</sup>基于区级神经网络(CNN)和逻辑回归(LR)分类的方法提取 Landsat 卫星的 3 幅图像数据集中的水体, 实验结果表明, 该模型的性能优于支持向量机(SVM)和人工神经网络(ANN)。随着遥感图像分辨率的提高, 图像去噪越来越重要。小波变换去噪通常有阈值法、模极大值法和小波系数相关法等<sup>[13]</sup>, 其中小波系数相关法简单实用, 通过改变不同尺度的小波系数, 能够在去除噪声的同时, 保留细节。潮沟位于海陆交汇的活跃地带, 是潮滩与外海进行物质和能量交换的主要通道。潮沟通常也是船只进出航道的避风和停泊场所。Landsat 8 卫星携带陆地成像仪(OLI)和热红外传感器(TIRS)两个传感器。其中 OLI 设有 9 个波段, 包括可见光、近红外和短波红外波段。TRIS 设有 2 个波段, 包括热红外 1 和热红外 2 波段。表 1 为 Landsat 8 OLI 传感器和 TRIS 传感器波段参数列表。

收稿日期: 2017-04-12; 修回日期: 2017-08-02  
 基金项目: 国土资源部公益性行业科研专项(201211009)  
 [Foundation: The public welfare industry special scientific research of land and resources ministry, No.201211009]  
 作者简介: 和思海(1990-), 男, 河南焦作人, 硕士研究生, 从事海洋技术研究, E-mail: 1780606227@qq.com; 韩震, 通信作者, 博士, 教授, E-mail: zhhan@shou.edu.cn

表 1 Landsat 8 OLI 和 TRIS 传感器波段参数  
Tab. 1 Band parameters of Landsat 8 OLI and TRIS sensors

序号	波段名称	波段范围(μm)	空间分辨率(m)
Band 1	海岸/气溶胶	0.443~0.453	30
Band 2	蓝	0.450~0.515	30
Band 3	绿	0.525~0.600	30
Band 4	红	0.630~0.680	30
Band 5	近红外	0.845~0.885	30
Band 6	短波红外 1	1.560~1.660	30
Band 7	短波红外 2	2.100~2.300	30
Band 8	全色	0.500~0.680	15
Band 9	卷云	1.360~1.390	30
Band 10	热红外 1	10.300~11.300	100
Band 11	热红外 2	11.500~12.500	100

本文选取长江口九段沙下沙潮沟发育比较复杂的一片区域为研究对象(图 1), 数据来自于 2016 年 1 月 26 日 Landsat 8 全色波段图像, 采用小波变换、最大类间方差法、数学形态学相结合的方法进行潮沟信息检测, 为潮滩资源的合理开发利用提供了科学依据。

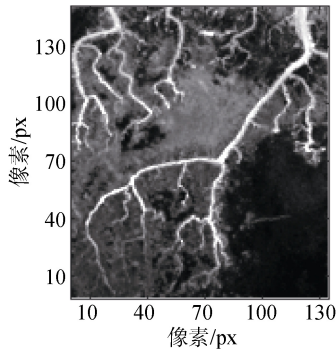


图 1 原始数据  
Fig.1 Original data

## 1 潮沟提取技术流程

首先利用 ENVI5.1 软件对 2016 年 1 月 26 日 Landsat 8 全色波段图像进行了辐射定标和几何校正, 然后对校正后的图像进行小波变换, 利用 wavedoc 2 函数和 waverec 2 函数将图像进行多层分解和重构, 在重构图像的过程中, 将低层小波系数的权重缩小, 将高层小波系数权重增大。然后利用最大类间方差法确定二值化阈值, 将潮沟与潮滩分割。接着利用数学形态学膨胀算法对断开的潮沟进行连接, 结构元素选取为 $[1\ 1\ 1; 1\ 1\ 1; 1\ 1\ 1]$ 。之后将低阈值二值化图

像与数学形态学膨胀后的二值化图像对应位置像素相乘, 得到乘积图像。将乘积图像与最大类间方差法确定阈值的二值化图像对应位置像素相减, 得到插值图像, 在此基础上, 通过连通域个数的判别, 得到断裂处像素。最后将最大类间方差法确定阈值后的二值化图像加上断裂处像素, 得到完整的潮沟信息。潮沟信息检测技术路线如图 2 所示。

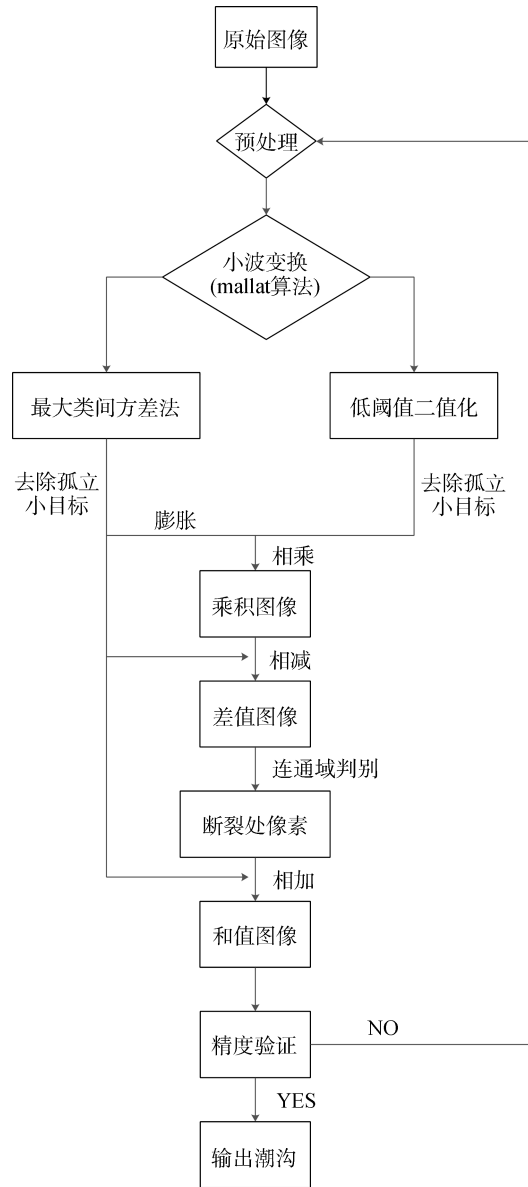


图 2 潮沟提取技术流程

Fig.2 Technology flow of tidal channel extraction method

## 2 潮沟信息提取数据具体处理方法

### 2.1 Mallat 算法<sup>[14]</sup>

Mallat 算法利用二进规范正交小波函数的特性,

分解过程中可以通过下采样直接由  $2^j$  级尺度系数得到  $2^{j-1}$  级小波系数和尺度系数。同理, 重构过程中可以通过上采样直接由  $2^{j-1}$  级小波系数和尺度系数得到  $2^j$  级尺度系数。Mallat 算法在小波变换中的地位如同快速傅里叶变换在傅里叶变换中的地位, 可以大大降低小波变换的计算量。

Mallat 分解算法公式如下

$$c_{j-1,k,m} = \sum_{l,n \in Z} \bar{h}_{l-2k} \bar{h}_{n-2m} c_{j,l,n} \quad (1)$$

$$d_{j-1,k,m}^1 = \sum_{l,n \in Z} \bar{h}_{l-2k} \bar{g}_{n-2m} c_{j,l,n} \quad (2)$$

$$d_{j-1,k,m}^2 = \sum_{l,n \in Z} \bar{g}_{l-2k} \bar{h}_{n-2m} c_{j,l,n} \quad (3)$$

$$d_{j-1,k,m}^3 = \sum_{l,n \in Z} \bar{g}_{l-2k} \bar{g}_{n-2m} c_{j,l,n} \quad (4)$$

Mallat 重构算法公式如下

$$c_{j+1,k,m} = \sum_{l,n \in Z} h_{k-2l} h_{m-2l} c_{j,k,m} + \sum_{l,n \in Z} h_{k-2l} g_{m-2l} d_{j,k,m}^1 + \sum_{l,n \in Z} g_{k-2l} h_{m-2l} d_{j,k,m}^2 + \sum_{l,n \in Z} g_{k-2l} g_{m-2l} d_{j,k,m}^3 \quad (5)$$

其中,  $h$  和  $g$  分别是高频滤波器和低频滤波器,  $c_{j,l,n}$  表示  $j$  级尺度下  $(l,n)$  处的低频系数,  $d_{j,l,n}^1$  表示  $j$  级尺度下  $(l,n)$  处的水平高频垂直低频系数,  $d_{j,l,n}^2$  表示  $j$  级尺度下  $(l,n)$  处的垂直高频水平低频系数,  $d_{j,l,n}^3$  表示  $j$  级尺度下  $(l,n)$  处的水平高频垂直高频系数。

利用 Coiflets 类小波函数对图 1 进行二维离散小波 10 层分解和重构, 通过小波分解获得分解后近似部分  $C_{A10}$  以及细节部分  $C_{H10}, C_{V10}, C_{D10}, \dots, C_{H1}, C_{V1}, C_{D1}$ 。其中,  $C_A$  表示近似分量,  $C_H$  表示水平细节分量,  $C_V$  表示垂直细节分量,  $C_D$  表示对角细节分量; 设定 1~3 层细节系数为低层系数, 4~10 层细节系数为高层系数时, 高层细节系数重构图像中含有部分有用的低频信息, 所以划分出的低层细节系数中所包含的地物信息不足, 处理的结果会导致地物细节信息的丢失。当重构 1~5 层细节系数为低层系数, 6~10 层细节系数为高层系数时, 低层细节系数重构图像中噪声的含量明显增加。所以最后选定 1~4 层细节系数为低层系数, 5~10 层细节系数为高层系数。低层系数的权重因子设置为 1~2 之间, 高层系数设置为 0.5~1 之间, 本文低层系数的权重因子为 2, 高层系数的权重因子为 0.5。图 3b 与图 3a 相比, 可以明显地发现, 非潮沟背景灰度差异明显变小, 降低了提取潮沟的难度。

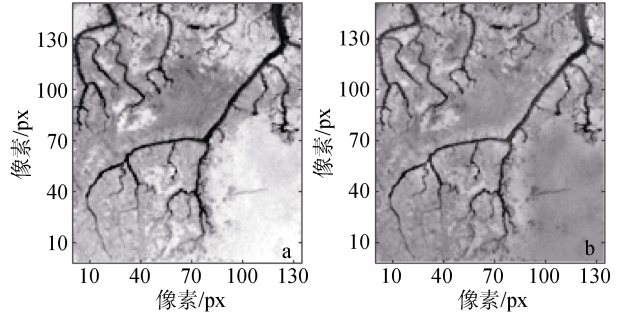


图 3 原始数据取反图像(a)与基于小波变换去噪得到的图像(b)

Fig.3 (a) Image of opposite original data and (b) image based on wavelet denoising

## 2.2 最大类间方差法阈值分割

为了能够达到更好的二值化效果, 选取二值化阈值非常重要。最大类间方差法是一种很好地确定阈值的方法。其原理是选取图像中某个灰度级为阈值, 在图像二值化的过程中, 确保整幅图像中所有像素的方差之和最大<sup>[12]</sup>。公式如下:

$$\sigma_B^2 = w_1 w_2 (\mu_1 - \mu_2)^2 \quad (6)$$

$$k^* = \arg(\max_k \sigma_B^2(k)) \quad (7)$$

其中,  $w_1$  为灰度值小于等于  $k$  的像素的概率,  $w_2$  为灰度值大于  $k$  的像素的概率。  $\mu_1, \mu_2$  分别为灰度值小于等于  $k$  以及灰度值大于  $k$  的像素的平均灰度。  $\sigma_B^2$  为整幅图像类间方差。  $k^*$  为  $\sigma_B^2$  最大时的灰度值。  $k^*$  的取值大于等于 1, 小于等于最大灰度值  $L$ 。对小波变换后的图像利用最大类间方差法计算出阈值为 104, 使用该阈值进行分割, 可以较好地从中提取出潮沟目标。之后利用 `bwareaopen` 函数去除一些小的连通域。潮沟在提取出来以后, 发生了一些断裂。为了能够得到完整的潮沟信息, 本次研究采用数学形态学和图像之间的几何运算来进一步处理。

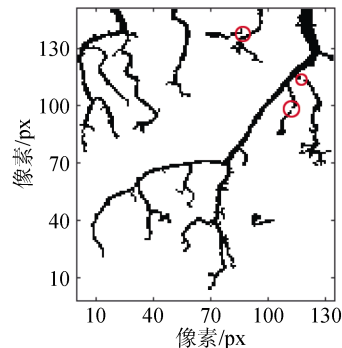


图 4 基于最大类间方差法得到的二值化图像

Fig.4 Binarization image based on Otsu

### 2.3 数学形态学处理

数学形态学可以用于去除噪声, 图像分割, 边缘检测, 特征提取, 纹理分析等等, 是图像处理中最常用的方法之一。图 4 红圈标记处出现断裂, 可以通过图像的膨胀以及几何运算实现断点连接, 膨胀公式如下:

记  $A$  为要处理的图像,  $B$  为结构元素:

$$\text{膨胀: } A \oplus B = \{a+b \mid a \in A, b \in B\} = A^b \quad (8)$$

潮沟在遥感图像中表现为细长的带状结构, 并且其曲率较大, 尺寸较大的结构元素容易造成潮沟真实信息的损失。这里针对潮沟采用  $3 \times 3$  正方形结构元素, 如图 5 所示

$$\begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

图 5  $3 \times 3$  正方形结构元素  
Fig.5  $3 \times 3$  square structural elements

通过形态去除函数 `bwareaopen` 来剔除图像中孤立的较小的目标, 接着利用  $3 \times 3$  正方形结构元素对二值化后的潮沟图像进行膨胀, 将原先断开的潮沟进行连接, 如图 4 中红圈标记处。剔除孤立像素并且膨胀之后的效果如图 6。

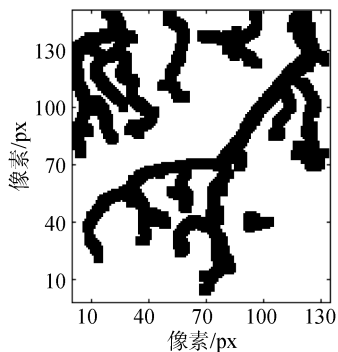


图 6 基于数学形态学膨胀得到的图像  
Fig.6 Image dilation based on mathematical morphology

膨胀之后, 可以明显看出潮沟变宽了, 为了减小膨胀后的潮沟的宽度, 可以将膨胀图像与低阈值图像相乘。首先在小波去噪后的图像的基础上选择一个低阈值, 阈值选取的准则为保证潮沟没有断裂。本文选取阈值为 52。基于低阈值提取的潮沟, 虽然噪声较多, 但是潮沟形状依然比膨胀之后的效果好, 尤其在潮沟宽度方面。膨胀图像与低阈值图像相乘结果如图 7。

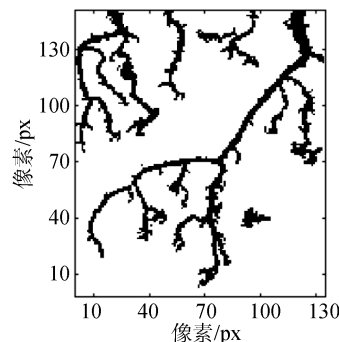


图 7 基于像素相乘得到的图像  
Fig.7 Image based on pixel multiplication

图 7 的宽度有所减小, 但是仍然比图 6 潮沟宽度大, 通过图 7 所示的灰度数值减去图 4 对应处的灰度数值, 得到图 8a。在图 8a 中, 大部分像素只与图 4 中的一个连通域相邻, 只有红圈标记处像素与图 4 中的两个连通域相邻, 根据这个原则筛选出图 4 中得到断裂处的像素, 如图 8b。最后将图 4 与图 8b 相加, 并且去除小连通域, 得到图 9。

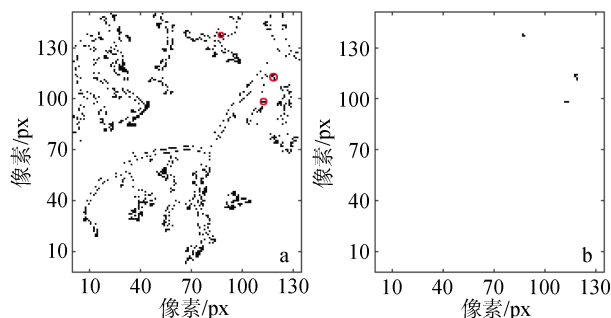


图 8 基于像素相减得到的图像(a)和基于连通域判别得到的图像(b)  
Fig. 8 Images based on (a) pixel subtraction and (b) connected domain identification at breaks

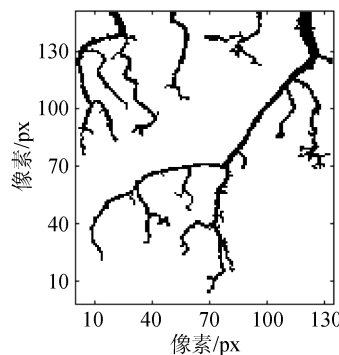


图 9 基于像素相加的图像  
Fig.9 Image based on pixel addition

### 3 精度验证

精度验证能够检测提取方法的优劣,是实验重要的一环。本实验将潮沟的面积作为评价参数,利用定量分析方法进行精度验证<sup>[16]</sup>。

定义检测结果中潮沟样方多边形冗余面积为  $S_1$ ,潮沟样方多边形遗漏面积为  $S_2$ ,原始数据中与之对应的参考多边形面积为  $S$ ,  $D_1$  表示冗余面积误差百分比;  $D_2$  表示遗漏面积误差百分比。面积一致性为 1 减去遗漏误差和冗余误差两者之和。为了保证原始图像中潮沟目视解译的精度,选取图像中潮沟与背景明显的区域作为检测区域。 $S$ 、 $S_1$ 、 $S_2$  均在 arcgis10.2 中通过目视解译法建立矢量面图统计得到。

$$D_1 = S_1 / S \quad (9)$$

$$D_2 = S_2 / S \quad (10)$$

将原始图像作为参考图像(图 10a),基于闭运算数学形态学进行断点连接的潮沟图像(图 10b)和本文方法提取的潮沟图像(图 10c)作为待检测图像,从直观的视觉方面解读,闭运算数学形态学提取结果,潮沟连接效果较差,且变形较大;本文方法提取结果,潮沟末端的遗漏误差较大,但是潮沟的连接效果较好,并且潮沟未发生形变;从细节方面解读,抽取潮沟 7 个样方矩形。基于闭运算的数学形态学提取效果遗漏误差较小,冗余误差较大,平均面积一致性为 89.9%;本文方法提取结果遗漏误差较大,冗余误差较小,平均面积一致性为 92.7%。

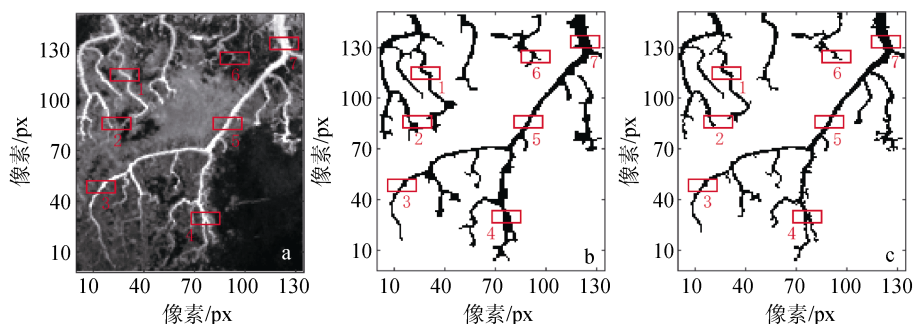


图 10 原始图像(a)以及不同方法提取结果(b), (c)

Fig.10 (a) original image, (b) and (c) extraction results based on different methods

表 2 抽样评价结果

Tab.2 Sample results

项目	冗余面积误差 (图 12b)(%)	遗漏面积误差 (图 12b)(%)	冗余面积误差 (图 12c)(%)	遗漏面积误差 (图 12c)(%)	闭运算面积 一致性(%)	本文面积 一致性(%)
样方 1	3.0	0	3.0	0	97.0	97.0
样方 2	9.7	13.6	2.1	5.3	76.7	92.6
样方 3	0	1.1	0	0.9	98.9	99.1
样方 4	30.3	0	1.7	0	69.7	98.3
样方 5	0	7.3	0	7.7	92.7	92.3
样方 6	0	20.6	0	34.5	79.4	65.5
样方 7	1.8	0	0	0	98.2	100.0
均值	6.4	6.1	1.0	6.9	87.5	92.1

### 4 结论

在小波去噪的基础上,非潮沟背景灰度差异明显变小,方便图像进行最大类间方差分割。在最大类间方差法得到的二值化图像基础上加上其断裂处的弱化膨胀后的像素,可以在最大限度地在保持潮沟精确性的同时,完成对潮沟图像的断点连接。不过,本文方法在部分潮沟末端遗漏误差仍然较大,因此

下一步的工作重点是如何进一步降低潮沟提取图像时潮沟末端部分的遗漏误差。

参考文献:

- [1] 段瑞玲, 李庆祥, 李玉和. 图像边缘检测方法研究综述[J]. 光学技术, 2005, 31(3): 415-419.  
Duan Ruiling, Li Qingxiang, LI Yuhe. Research on image edge detection[J]. Optical Technology, 2005, 31(3): 415-419.

- [2] Candy J. A Computational approach to edge detection[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis & Machine Intelligence, 1986, 8(6): 679-698.
- [3] Ingrid D. Orthonormal bases of compactly supported wavelets II: variations on a theme[J]. Siam Journal on Mathematical Analysis, 1993, 24(2): 499-519.
- [4] 胡晓辉, 张晓颖, 陈俊莲. 一种融合小波变换和数学形态学的图像边缘检测算法[J]. 铁道学报, 2011, 33(3): 45-48.  
Hu Xiaohui, Zhagn Xiaoying, Chen Junlian. An image edge detection algorithm based on wavelet transform and mathematical morphology[J]. Railway journal, 2011, 33(3): 45-48.
- [5] 陈翔, 韩震. TerraSAR-X 在长江口九段沙潮沟信息检测中的应用[J]. 海洋湖沼通报, 2012, 4: 25-30.  
Chen Xiang, Han Zhen. Application of TerraSAR-X in the detection of sand tide channel in the nine section of Yangtze River Estuary[J]. Chinese Journal of Oceanology and limnology, 2012, 4: 25-30.
- [6] 郭永飞, 韩震. 基于 SPOT 遥感图像的九段沙潮沟信息检测及分维研究[J]. 海洋与湖沼, 2013, 44(6): 1436-1441.  
Guo Yongfei, Han Zhen. Study on information detection and fractal dimension of the nine section sand tidal channel based on SPOT remote sensing image[J]. Chinese Journal of Oceanology and limnology, 2013, 44(6): 1436-1441.
- [7] 张伟. 基于小波变换的遥感图像去云方法研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2013.  
Zhang Wei. Research on the method of remote sensing image based on wavelet transform[D]. Chengdu: University of Electronic Science and technology of China, 2013.
- [8] Feyisa G L, Meilby H, Fensholt R, et al. Automated water extraction index: A new technique for surface water mapping using Landsat imagery[J]. Remote Sensing of Environment, 2014, 140(1): 23-35.
- [9] 巢子豪, 高一博, 谢宏全, 等. 1984~2012 年海州湾海岸线时空演变研究[J]. 海洋科学, 2016, 40(6): 95-100.  
Chao Zhihao, Gao Yibo, Xie Hongquan, et al. Research on the space time evolution of coastline from 1984 to 2012 in Haizhou Bay coast[J]. Marine Sciences, 2016, 40(6): 95-100.
- [10] 朱庆光, 倪文斐, 高建华, 等. 基于数值模拟与统计学方法的南黄海近岸沙脊与水道稳定性评价[J]. 海洋科学, 2016, 40(8): 119-128.  
Zhu Qingguang, Ni Weifeng, et al., et al. Evaluation of the stability of the sand ridge and channel in the Southern Yellow Sea based on numerical simulation and statistical methods[J]. Marine Science, 2016, 40(8): 119-128.
- [11] Schaffer-Smith D, Swenson J J, Barbaree B, et al. Three decades of Landsat-derived spring surface water dynamics in an agricultural wetland mosaic; Implications for migratory shorebirds[J]. Remote Sensing of Environment, 2017, 193: 180-192.
- [12] Yu L, Wang Z, Tian S, et al. Convolutional Neural Networks for Water Body Extraction From Landsat Imagery[J]. International Journal of Computational Intelligence & Applications, 2017, 16(1): 1750001.
- [13] 黄奎. 基于小波变换的图像处理综述[J]. 价值工程, 2015, 34(8): 255-256.  
Huang Kui. Overview of image processing based on wavelet transform [J]. value engineering, 2015, 34(8): 255-256.
- [14] SG M. Multi-resolution approximations and wavelet orthogonal bases of  $L_2(\mathbb{R})$ . Trans Am Math Soc[J]. Transactions of the American Mathematical Society, 1989, 315: 67-68.
- [15] 钟雪君. 一种改进的 Otsu 双阈值二值化图像分割方法. 电子世界, 2013, 4: 104.  
Zhong Xuejun. Improved Otsu dual-threshold binary image segmentation method. Electronics World, 2013, 4: 104.
- [16] 朱言江, 韩震, 和思海, 等. 基于最大类间方差法和数学形态学的遥感图像潮沟检测方法[J]. 上海海洋大学学报, 2017, 1: 146-153.  
Zhu Yanjing, Han Zhen, He Sihai, et al. Remote sensing image detection method based on Otsu method and mathematical morphology[J]. Journal of Shanghai Ocean University, 2017, 1: 146-153.

# Research on tidal channel detection based on wavelet transformation and the mathematical morphology method

HE Si-hai, HAN Zhen, ZHU Yan-jiang, HU Xu-ran, Ding Ru-yi

(College of Marine Sciences, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China)

**Received:** Apr. 12, 2017

**Key words:** tidal flat; wavelet transform; Otsu method; mathematical morphology method; verify the accuracy; breakpoint connection based on connected domain

**Abstract:** Tidal channels are one of the major landforms in tidal flats, and their detection plays a key role in monitoring and protecting the wetland ecological environments. Considering a complex tidal channel from northern Xisha in the Jiuduan Sha of the Yangtze River estuary as an object, this paper adopted a fusion of wavelet transformation, the Otsu method, and the mathematical morphology method to detect the edge information using the Landsat8 panchromatic band data from January 26, 2016. During the process of wavelet transformation, reducing the high-level detail coefficients resulted in weakening the tidal flat information, whereas increasing the low-layer detail coefficients resulted in enhancing the tidal channel information. The mathematical morphology method and the operations, such as addition, subtraction, and multiplication of images, were used to complete the extraction of the tidal channel. The accuracy of the tidal flat area consistently averaged to 92.1%, which was verified by sampling the original data and the corresponding results.

(本文编辑: 李晓燕)