

文章编号: 1001-1595(2010)06-0611-07

一种利用 TM 影像自动提取细小水体的方法

杨树文^{1,2}, 薛重生¹, 刘涛², 李轶鲲²

1. 中国地质大学 地球科学学院, 湖北 武汉 430074; 2. 兰州交通大学 数理与软件工程学院, 甘肃 兰州 730070

A Method of Small Water Information Automatic Extraction from TM Remote Sensing Images

YANG Shuwen^{1,2}, XUE Chongsheng¹, LIU Tao², LI Yikun²

1. Faculty of Earth Science, Geosciences University of China, Wuhan 430074, China; 2. School of Mathematics, Physics and Software Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China

Abstract: Since the decrease rate of bright values of water body and shadow in blue-green bands are significantly different, the proposed approach build a novel water body extraction model of multi-band spectral relationship based on difference operation. Firstly, the approach utilizes the new model to extract water body among various ground objects and shadows. Secondly, the approach fills empty holes and connects short lines based on dilation filtering algorithm of mathematical morphology. Thirdly, the approach utilizes binary image thinning algorithm to thin the extracted water bodies. The analysis and comparison of experimental results show that the proposed approach overcomes the major shortcoming of many water body extraction approaches, which are only able to extract large water bodies. In summary, the approach is able to automatically extract small water bodies of hilly area with high precision. Moreover, it is able to effectively remove interference information such as shadows.

Key words: model of multi-band spectral relationship; water bodies; automatic extraction; fill filter; image thinning

摘要: 提出一种利用 TM 影像自动提取山区细小水体的多波段谱间关系改进方法。该方法在典型谱间关系法的基础上, 针对水体与阴影在蓝绿光波段亮度值降低速率差异较大的特征, 基于差值运算, 构建新的多波段谱间关系水体提取模型。首先利用该模型将水体从其他地物及阴影中分离出来, 然后基于数学形态学膨胀滤波算法进行空洞填充和短线连接, 最后通过图像细化算法实现目标的细化。经过试验比较表明, 该方法克服了许多水体提取模型只能有效提取较大面积水体的缺点, 除了能够对山区的细小水体进行高精度自动提取外, 还能够有效地去除阴影等干扰信息。

关键词: 多波段谱间关系法; 水体; 自动提取; 膨胀滤波; 图像细化

中图分类号: P237 文献标识码: A

基金项目: 国家自然科学基金(40871208); 中铁第四勘察设计院集团有限公司基金(2009D-1)

1 引言

从遥感影像中准确、快速地提取水体信息已在水资源调查、监测管理、土地分类、自然灾害评估及工程地质调查等方面相继得到应用。水体遥感提取的研究开展较早, 并已取得丰富的研究成果。目前水体提取方法很多, 有多波段谱间关系法、水体指数法、决策树法、图像分类法、密度分割法、比值法、差值法及阈值法等, 其中以多波段谱间关系法、水体指数法及决策树法研究、应用较多。针对水体在 TM、AVHRR 等遥感影像上的波谱特性, 文献[1-2]提出水体指数法 NDWI; 文献[3-5]在进一步研究的基础上提出了水体指数法改进模型 MNDWI、EWI 和 NWI; 文献[6-9]利用多波段综合的优势基于波段谱间关系提出了水

体信息提取的多波段谱间关系法及其改进方法; 文献[10-11]利用决策树法从 SPOT 影像上成功地提取了水体信息。另外, 文献[12-13]基于图像的纹理特征, 使用灰度共生矩阵较为有效的提取了水系信息。

上述水体的提取方法大多在针对较大水体(湖泊、干流等)的提取上卓有成效, 而针对山区、细小水体(水塘、细小支流)的提取效果并不理想, 其原因主要在于山区地形阴影与水体光谱特征相近, 造成水体与阴影的分离较为困难, 不能有效地去除地形阴影。

通过大量试验研究, 基于 TM 影像的多波段谱间关系法在山区、地形阴影较多地区提取水体信息更为准确, 提取的信息量更多, 其原因在于该方法利用更多的波段参与运算。本文在常用的多

波段谱间关系法的基础上,针对阴影与水体在蓝绿光波段下降速率差异较大的特征,通过差值运算,构建新的多波段谱间关系模型,以华南山区细小河流为研究对象,成功地提取细小水体,较为理想地去除了地形阴影。

2 水体自动提取算法模型

2.1 水体、阴影光谱特性分析

水体的反射率在可见光范围内总体上比较低,一般为4%~5%,并具有随波长增大逐渐降低的特征,其反射率在蓝绿光波段最高,在近红外波段最低,几乎完全吸收,因此水体在影像上呈暗色调,水陆界线相对比较清楚,利用此特性和不同波谱间的水体光谱特征可以将水体提取出来。但同时由于阴影的灰度值与水体比较接近,造成一些阴影同时被误提取出来。通过对研究区水体、阴影、植被及居民地等地物光谱特征的统计、分析,如表1、图1所示,从中可发现,在TM影像中水体具有波段2灰度值加波段3灰度值大于波段4加波段5灰度值的典型特点^[14],同时在蓝绿光波段,水体的亮度值降低较慢、阴影的亮度值下降较快的特点^[9]。水体、阴影的这些光谱特性是从影像中分离、提取水体的重要依据和算法设计的基础。

表1 水体及相关地类的典型光谱值(均值)

Tab. 1 Water and related land type spectrum typical value (mean)

波段	水体	阴影	居民地	植被
1	80	62	85	68
2	64	37	71	40
3	55	30	74	42
4	32	29	75	98
5	17	18	75	66
7	13	11	55	34

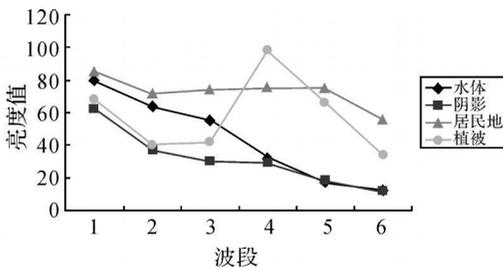


图1 水体及相关地类的典型光谱曲线

Fig. 1 Water and related land type typical spectral curve

2.2 多波段谱间关系算法

文献[6]在分析TM影像中水体与其他地物的光谱特性时,发现水体具有波段2灰度值加波段3灰度值大于波段4加波段5灰度值的特点,据此提出的谱间关系算法模型为

$$(B_2 + B_3) > (B_4 + B_5) \quad (1)$$

文献[8]在进一步研究的基础上,发现TM影像中水体还具有波段4灰度值与波段2灰度值的比值小于0.9的特性,提出了改进的多波段谱间关系模型

$$\left. \begin{aligned} (B_2 + B_3) - (B_4 + B_5) > 0 \\ B_4 / B_2 < 0.9 \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

文献[9]在研究喜马拉雅山南峰地区的水体提取方法时,发现在可见光范围内水体的亮度值下降较慢,阴影亮度值下降较快的特点,同时在该地区具有波段3中河流的亮度值高于阴影但低于冰雪、冲击物和冰水沉积物的特点,据此提出了去除阴影和冰雪地貌的谱间关系改进模型

$$\left. \begin{aligned} (B_2 + B_3) > (B_4 + B_5) \\ (B_1 - B_2) < K \\ M < B_3 < N \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

其中, K 、 M 、 N 分别是根据该地区研究对象光谱反射率经反复试验设定的阈值。

这些算法模型的研究、应用都较为有效地从TM影像上提取出湖泊、河流等面域较大的水体,并在一定程度上消除地形阴影的干扰。但是上述算法模型在提取河网密布、地形阴影极为发育的华南山区的水体时,不能有效地提取细小水体及去除地形阴影。

2.3 新建多波段谱间关系模型

笔者经过大量的试验研究,在现有的多波段谱间关系算法模型的基础上,依据水体、阴影在蓝绿波段所具有的下落幅度差异较大的特征,基于差值运算,构建了新的多波段谱间关系模型,利用该模型可简单、有效、准确地提取水体及消除了阴影。该算法模型为

$$((B_2 + B_3) - (B_4 + B_5) - (B_1 - B_2)) > N \quad (4)$$

其中, N 是根据试验获取的华南山地地区的经验性阈值。

新建模型是对谱间关系算法模型和差值运算进行深入分析的基础上,从中得到启发后发现的,是对文献[9]方法的改进。改进方法的优点在于:

① 文献[9]基于逻辑“与”运算(AND)构建模型,

而新建模型 3 次利用像元亮度值的差值运算构建了模型,实现水体、阴影等地物光谱值的增益和分离;②新建模型更简洁、实用。对比、分析提取结果,论文方法具有:①对细小水体的提取更为有效,水体的连续程度更好;②更为有效地消除了地形阴影等的影响。

差值运算是指两幅同样行、列数的图像,对应像元的亮度值相减,相减后的值反映了同一地物光谱反射率之间的差^[15]。由于不同地物反射率差值不同,两波段亮度值相减后,差值大的被突出出来^[16]。对于某一像素点 $f(x, y)$, 其差值运算的定义为

$$F_D(x, y) = f_1(x, y) - f_2(x, y) \quad (5)$$

TM 影像中 $(B_2 + B_3) - (B_4 + B_5)$ 可增大水体与阴影及其他地类间光谱值的差异,计算结果是水体及部分阴影的灰度值为正值,其他地类灰度值为负值,从而可将水体与其他地类及大部分阴影中分离出来;水体与阴影在蓝绿光波段的差异性利用差值运算 $(B_1 - B_2)$ 增益出来;再次利用差值运算,将 $(B_2 + B_3) - (B_4 + B_5)$ 运算中未分离出来的阴影提取出来,通过试验设定合适的阈值就可最终实现水体准确、快速地自动提取。

2.4 水体提取后处理

2.4.1 数学形态学的膨胀滤波

利用新建的算法模型可快速、准确地提取水体,但是部分细小水体(如溪流等)由于河床地形复杂、溪水从石缝中穿流及水草发育等原因,提取出来的部分细小水体往往呈断线状。笔者对比研究了种子点扩散算法^[17]、基于形态学的膨胀滤波等算法^[18-19],发现基于数学形态学的膨胀滤波算法可较为有效地解决空洞及细小水体的短线连接问题。

数学形态学是由文献[20]提出的一种以形态为基础对图像进行分析处理的数学模型。基于形态学的滤波算法目前被广泛应用于图像处理,其中基于形态学的膨胀滤波算法可填平图像中小孔和弥合小裂缝^[21]。本文采用典型的数学形态学膨胀算法,其定义如下:

设 $f(s, t)$ 是输入图像, $b(x, y)$ 为结构元素。用结构元素 b 对输入图像 f 进行灰度膨胀的定义为

$$(f \oplus b)(s, t) = \max\{f(s-x, t-y) + b(x, y) \mid (s-x, t-y) \in D_f; (x, y) \in D_b\} \quad (6)$$

其中, D_f 和 D_b 分别是 f 和 b 的定义域。

2.4.2 二值图像细化

水体经过膨胀算法处理后达到了空洞填充、部分断线连接的目的,然后需对细小水体(非主干河流)进行细化处理,以提取细小水体的中心线。

图像细化是在不影响原图像拓扑连接关系下,将宽度大于一个像素的图形线条转变为单像素宽线条的处理过程^[22]。目前可用于二值图像细化的算法有基于形态学的侵蚀算法、Pavlidis 算法、Hilditch 算法、Rosenfeld 算法、OPTA 算法和 Zhang 快速并行细化算法等。其中, Pavlidis 细化算法通过并行和串行混合处理来“剥”去不符合模式的边缘像元^[23],该算法具有比“经典”法大大减少了模式比较次数,提高效率的特征,并且该算法细化后的图像基本保持原图像的信息,对一些杂质的去除有明显的的作用,没有细小短枝的产生^[24],因此,试验以 Pavlidis 算法为基础设计了代码。在程序中 2 次采用 $S/L \leq A$ 的方法将线状河流与其他水体分开、非主干河流与主干河流分开,以免出现将面状河流一并细化的问题,执行细化的目标是非主干河流,即细小水体。其中, S 是水体面积, L 是水体周长, A 是阈值。而较宽河流、水塘及湖泊等面状水体,采用的方法是在提取的栅格影像上利用改进的边缘追踪算法实现矢量化和拓扑重建。

另外,图像细化后会出现一些毛刺,针对毛刺一端为端点,另一端为三叉点或端点,且通常毛刺是很短的特点,采用边缘追踪算法(Canny 算法)实现毛刺的去除和部分间隔较大断线的连接。

3 试验及其结果分析

试验以瓯江上游支流小溪溪谷地区为例,该地区位于浙江省景宁畲族自治县沙湾镇附近,山峦叠峰,群峰林立,水系发育,属典型的华南山地景观。试验采用 Landsat ETM⁺ 1—7 波段 30 m 单波段数据(该图像获取于 2001-10-21),同时以该地区 15 m 的全色波段数据作为辅助验证资料。

水体提取的试验流程为:①影像预处理,包括对原始 Landsat ETM⁺ 的 1—7 波段进行大气校正处理、图像融合等;②目标水体信息自动提取;③后处理,包括对提取的水体影像进行形态学膨胀滤波和二值图像细化等处理。

试验数据处理及自动提取处理都是在基于 ENVI+ IDL 自主研发的遥感解译信息系统下进行的。影像预处理为常规处理,文中不再细述。

3.1 水体提取及后处理

基于在研的遥感解译系统, 首先进行水体提取试验。图 2~ 图 6 是进行局部细小水体自动提取及后处理试验结果截图(400 × 400 像素)。其中, 图 2 是为了对比、验证提取结果合成的目标区域的 ETM+ 543 假彩色图像(近似真彩色)。图 3 是基于目前使用较多的 NDWI 水体提取指数自动提取的结果, 根据试验比较, 给定的经验阈值 ≥ 0.2 。该算法对细小支流(图 3 左上角、右下角)的提取效果不理想, 且对部分地形阴影难以去除(图 3 河流下方白色点)。图 4 是基于文献[8]提出的谱间关系改进算法自动提取的结果, 给定的经验阈值 ≥ 30 和 ≤ 0.9 , 该算法对细小水体的提取效果较好, 但提取结果中仍保留了较多的阴影噪声(图 4 中白色孤点), 难以去除。图 5 是基于文献[9]提出的改进算法自动提取的结果, 给定的经验阈值是 < 15 。该算法对植被不发育的高山地区水体提取效果较好, 但对植被发育、地形复杂、阴影发育的华南山区细小水体的提取效果并不理想, 且提取结果中仍存在大量的阴影噪声难以去除(图 5 中白色孤点)。图 6 是基于本文新建模型提取的结果, 给定的阈值 ≥ 17 , 从提取结果看, 该算法既很好地提取了细小水体又基本消除了阴影的影响。

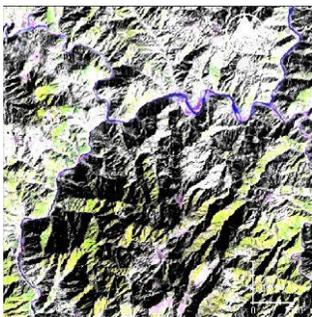


图 2 TM543 合成影像

Fig. 2 TM543 composite images



图 3 NDWI 方法提取的水体结果

Fig. 3 Result of extraction using NDWI

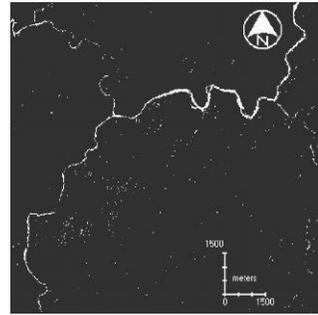


图 4 文献[8]方法的提取结果

Fig. 4 Result of extraction using reference [8]

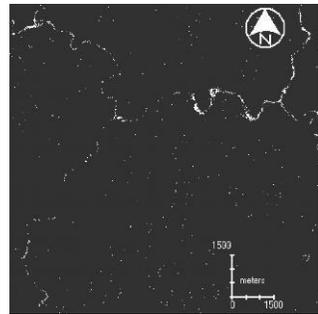


图 5 文献[9]方法提取结果

Fig. 5 Result of extraction using reference [9]



图 6 本文算法的提取结果

Fig. 6 Result of extraction using the method of this paper

进一步的试验包括对已提取的水体进行形态学膨胀滤波和二值图像细化等处理。图 7 是对图 6 提取的结果进行数学形态学膨胀处理, 采用的是 5×5 的算子, 初始半径为 3, 迭代半径为 6。图 8 是对图 7 的膨胀处理结果进行细化后的结果。其中, 膨胀滤波和细化算法都要进行交叉迭代处理, 文中试验为 3 次迭代。

3.2 提取结果验证

为了检验算法提取的结果, 将提取结果转为矢量数据后叠加在合成的彩色影像上, 进行对比试验, 可清楚检测水体提取效果。图 9 是将图 8

细化后的细小水体(线状)叠加在 ETM⁺ 543 合成影像上, 可发现提取结果与影像水体地图基本吻合, 但在部分尖锐弯角处有取直现象, 对比图 6, 该问题出在膨胀和细化处理算法上。图 10 是将较大支流(面状)叠加在 ETM⁺ 543+ 8 融合影像上(融合后图像空间分辨率为 15 m), 可检测出河流的提取情况, 部分河段河面呈畸形面状, 应是将含水丰富的河床沉积物误提所致。另外, 提取结果中仍保留极少量散点, 通过对比分析, 这些散点源是阴影和地物。

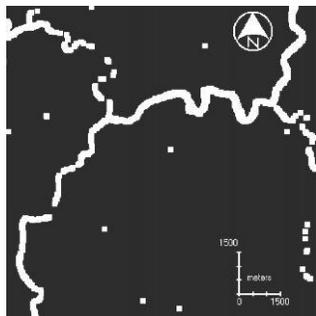


图 7 形态学的膨胀算法处理结果

Fig. 7 Result of the expansion of morphological algorithms

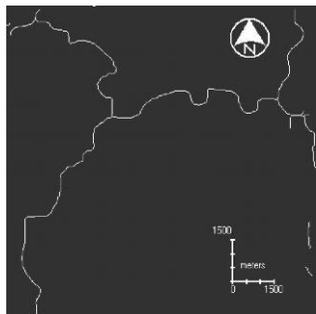


图 8 细化处理后的结果

Fig. 8 Result of the thinning algorithm

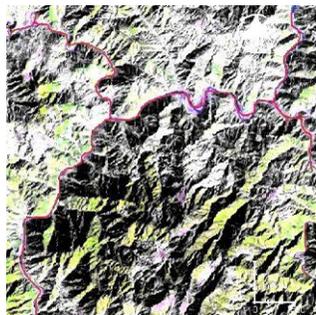


图 9 细小线状河流叠加验证效果

Fig. 9 Extraction result of small rivers and original image superposition

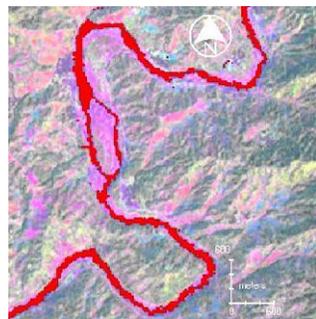


图 10 面状支流叠加验证效果

Fig. 10 Extraction result of wide branch and original image superposition

图 11、图 12 分别是试验区全景影像和全景水体提取结果。在缺乏实测数据情况下, 通过分析目前的量化统计方法的实用性缺陷, 论文对全景图像水体提取结果进行了目视匹配检验, 检验结果认为吻合度高, 误提、漏提水体信息少, 优于其他方法提取结果, 达到了软件设计的要求。

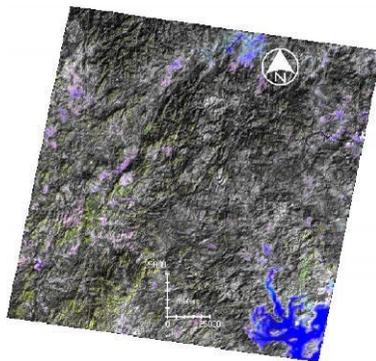


图 11 ETM 全景影像

Fig. 11 ETM panoramic image

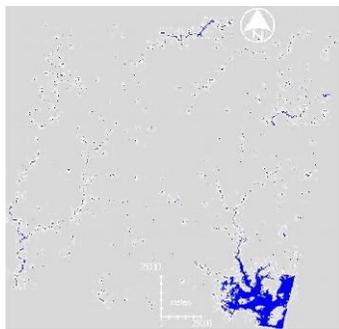


图 12 全景影像水体信息提取结果

Fig. 12 Extraction result of water of panoramic image

4 结论与建议

针对山区阴影发育、细小水体提取较难的问

题, 论文提出了一种多波段谱间关系法的改进模型, 并以 TM 影像为数据源, 通过试验验证, 成功地提取了华南山区的细小水体。该算法模型简单易操作, 在实际应用中只需根据研究地区的光谱差异设定一个经验性阈值(N)。

本研究的不足之处在于, 一是水体提取试验中阈值的确定是通过分类地物光谱值的统计获取的, 有待研究阈值自动计算方法, 如人工智能、机器学习等方法; 二是试验中采用的形态学膨胀滤波算法和二值图像细化算法都是常用的典型算法, 虽然具有较高的处理效率和较好的处理效果, 但缺乏针对性, 因此处理的结果在细小水系密布、水体间断断续等局部不理想, 对这些算法有待进一步改进; 三是对提取结果的验证量化不足, 有待在目前利用混淆矩阵等量化计算的基础上研究针对性更强、实用性更好的验证统计方法。

参考文献:

- [1] MCFEETERS S K. The Use of Normalized Difference Water Index (NDWI) in the Delineation of Open Water Features [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 1996, 17(7): 1425-1432.
- [2] LUO Jiancheng, SHENG Yongwei, SHEN Zhanfeng, et al. Step Iterative Multi-spectral Remote Sensing Information on High-precision Automatic Extraction of Water [J]. *Journal of Remote Sensing*, 2009, 13(4): 610-615. (骆剑承, 盛永伟, 沈占锋, 等. 分步迭代的多元光谱遥感水体信息高精度自动提取[J]. *遥感学报*, 2009, 13(4): 610-615.)
- [3] XU Hanqiu. A Study on Information Extraction of Water Body with the Modified Normalized Difference Water Index (MNDWI) [J]. *Journal of Remote Sensing*, 2005, 9(5): 589-595. (徐涵秋. 利用改进的归一化差异水体指数 (MNDWI) 提取水体信息的研究[J]. *遥感学报*, 2005, 9(5): 589-595.)
- [4] YAN Pei, ZHANG Youjing, ZHANG Yuan. A Study on Information Extraction of Water System in Semi-arid Regions with the Enhanced Water Index (EWI) and GIS Based Noise Remove Techniques [J]. *Remote Sensing Information*, 2007(6): 62-67. (闫霏, 张友静, 张元. 利用增强型水体指数 (EWI) 和 GIS 去噪技术提取半干旱地区水体信息的研究[J]. *遥感信息*, 2007(6): 62-67.)
- [5] DING Feng. A New Method for Fast Information Extraction of Water Bodies Using Remotely Sensed Data [J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2009, 24(2): 167-171. (丁凤. 一种基于遥感数据快速提取水体信息的新方法[J]. *遥感技术与应用*, 2009, 24(2): 167-171.)
- [6] DU Yunyan, ZHOU Chenghu. Automatically Extracting Remote Sensing Information for Water Bodies [J]. *Journal of Remote Sensing*, 1998, 2(4): 264-269. (杜云艳, 周成
- 虎. 水体的遥感信息自动提取方法[J]. *遥感学报*, 1998, 2(4): 264-269.)
- [7] YANG Cunjian, XU Mei. Study on the Water body Extraction Methods of Remote Sensing Information Mechanism [J]. *Geographic Research*, 1998, 17(S): 86-89. (杨存建, 徐美. 遥感信息机理的水体提取方法的探讨[J]. *地理研究*, 1998, 17(S): 86-89.)
- [8] WANG Jinghua, ZHANG Yongbin, KONG Gaihong. Application of Water Feature Extraction with Model of Spectral Relationship [J]. *Mine Surveying*, 2002(4): 30-32. (汪金花, 张永彬, 孔改红. 谱间关系法在水体特征提取中的应用[J]. *矿山测量*, 2002(4): 30-32.)
- [9] ZHANG Minghua. Extracting Water body Information with Improved Model of Spectral Relationship in a Higher Mountain Area [J]. *Geography and Geo-Information Science*, 2008, 24(2): 14-16. (张明华. 用改进的谱间关系模型提取极高山地区水体信息[J]. *地理与地理信息科学*, 2008, 24(2): 14-16.)
- [10] DENG Jinsong, WANG Ke, LI Ju, et al. Study on the Automatic Extraction of Water Body Information from SPOT-5 Images Using Decision Tree Algorithm [J]. *Journal of Zhejiang University: Agric & Life Sci*, 2005, 31(2): 171-174. (邓劲松, 王珂, 李君, 等. 决策树方法从 SPOT-5 卫星影像中自动提取水体信息研究[J]. *浙江大学学报: 农业与生命科学版*, 2005, 31(2): 171-174.)
- [11] FU June, WANG Jizhou, LI Jiren. Study on the Automatic Extraction of Water Body from TM Image Using Decision Tree Algorithm [C] // *Proceedings of the SPIE: International Symposium on Photoelectronic Detection and Imaging 2007: Related Technologies and Applications*. Beijing: SPIE, 2008: 1-9.
- [12] HUANG Chunlong, XING Lixin, HAN Dong. Extracting the Information of Water System Based on Texture Features [J]. *Journal of Jilin University: Earth Science Edition*, 2008, 11(38): 226-250. (黄春龙, 邢立新, 韩冬. 基于纹理特征的水系信息提取[J]. *吉林大学学报: 地球科学版*, 2008, 11(38): 226-250.)
- [13] ZHOU Liguang, FENG Xuezhong, XIAO Pengfeng, et al. An Investigation of Urban Water Automatic Extraction Based on Texture and Imaging Knowledge from High Resolution SAR Images [C] // *Proceedings of IEEE Conferences: 2009 Joint Urban Remote Sensing Event*. Shanghai: IEEE: 1570-1575.
- [14] ZHOU Chenghu, LUO Jiancheng, YANG Xiaomei, et al. Geo-understanding and Analysis in Remote Sensing Image [M]. Beijing: Science Press, 2003. (周成虎, 骆剑承, 杨晓梅, 等. *遥感影像地学理解与分析* [M]. 北京: 科学出版社, 2003.)
- [15] CHEN Huafang, WANG Jinliang, CHEN Zhong, et al. Comparison of Water Extraction Methods in Mountainous Plateau Region from TM Image [J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2004, 19(6): 479-484. (陈

- 华芳,王金亮,陈忠,等. 山地高原地区 TM 影像水体信息提取方法比较——以香格里拉县部分地区为例[J]. 遥感技术与应用, 2004, 19(6): 479-484.)
- [16] ZHA Yong, NI Shaoxiang, YANG Shan. An Effective Method of a Automatic Extraction of Urban Land Use Information from TM Images[J]. Journal of Remote Sensing, 2003, 7(1): 37-40. (查勇,倪绍祥,杨山. 一种利用 TM 图像自动提取城镇用地信息的有效方法[J]. 遥感学报, 2003, 7(1): 37-40.)
- [17] LEI Xiaoqi, WANG Weixing, LAI Jun. A Method of Road Extraction from High resolution Remote Sensing Images Based on Shape Features[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2009, 38(5): 457-465. (雷小奇,王卫星,赖均. 一种基于形状特征进行高分辨率遥感影像道路提取方法[J]. 测绘学报, 2009, 38(5): 457-465.)
- [18] GUPTA A, KHANDELWAL V, GUPTA A, et al. Image Processing Methods for the Restoration of Digitized Paintings[J]. Thamasat Int J Sc Tech, 2008, 13(3): 66-72.
- [19] ZHANG Dakun. Extended Closing Operation in Morphology and Its Application in Image Processing[C] // Proceedings of the 2009 International Conference on Information Technology and Computer Science: 1. Washington, DC: IEEE Computer Society, 2009: 83-87.
- [20] MARAGOS P, SCHAFFER R W. Morphological Filter Part I: Their Set Theoretic Analysis and Relation to Linear Shift Invariant Filter[J]. IEEE Trans ASSP, 1987, 35(8): 1153-1169.
- [21] CUI Yi. Analysis of Remote Sensing Image mathematical Morphology and Its Application[M]. Beijing: Science Press, 2002. (崔屹. 图像处理与分析: 数学形态学方法及应用[M]. 北京: 科学出版社, 2002.)
- [22] LI Su, TAN Yonglong. Image Fully Thinning Algorithm Based on Spanning Tree[J]. Computer Engineering and Design, 2006, 27(21): 4006-4007. (李舜,谭永龙. 基于生成树的图像完全细化算法[J]. 计算机工程与设计, 2006, 27(21): 4006-4007.)
- [23] PAVLIDIS T. Algorithms for Graphics and Image Processing[J]. Rockville: Computer Science Press, 1982.
- [24] MA Lei, QI Xingguang. Applications of Several Stroke Thinning Algorithms for Digital Image Processing of Paper Fiber Inspection and a Comparison among Them[J]. Journal of Shandong Institute of Light Industry, 2008, 22(4): 49-51. (马磊,綦星光. 常用细化算法在纸浆纤维图像处理中的应用与比较[J]. 山东轻工业学院学报, 2008, 22(4): 49-51.)

(责任编辑:丛树平)

收稿日期: 2010-02-08

修回日期: 2010-04-06

第一作者简介: 杨树文(1975—), 男, 博士生, 主要研究方向为遥感数字图像处理和遥感信息检测及提取。

First author: YANG Shuwen(1975—), male, PhD candidate, majors in remote sensing images processing, target detection/extraction.

E mail: yangshuwen@mail.lzjtu.cn; ysw040966@163.com

(上接第 610 页)

- Processing for Remote Sensing. [S. l.]: International Society for Optical Engineering, 2006: 1-10.
- [14] AHMED Z, SAYADI M, FANIECH F. Satellite Images Features Extraction Using Phase Congruency Model[J]. International Journal of Computer Science and Network Security, 2009, 9(2): 192-197.
- [15] BEZALEL E, EFRON U. Efficient Face Recognition Method Using a Combined Phase Congruency/Gabor Wavelet Technique[C] // Proceedings of SPIE, Optical Information Systems. San Diego: International Society for Optical Engineering, 2005: 437-444.
- [16] LINGURARU M G, BALLESTER M Á G, AYACHE N. A Multiscale Feature Detector for Morphological Analysis of the Brain[C] // The 6th International Conference on Medical Image Computing and Computer Assisted Intervention. [S. l.]: Springer, 2003: 738-745.
- [17] MULET-PARADA M, NOBLE J A. 2D+ T Acoustic Boundary Detection in Echocardiography[C] // Proceedings of the First International Conference on Medical Image Computing and Computer Assisted Intervention. Berlin, Heidelberg: Springer, 1998: 806-813.
- [18] READ R R, TREITEL S. The Stabilization of Two dimensional Recursive Filters via the Discrete Hilbert Transform[J]. IEEE Transactions on Geoscience Electronics, 1973(11): 153-160.
- [19] BOSE N K, PRABHU K A. Two dimensional Discrete Hilbert Transforms and Computational Complexity Aspects in Its Implementation[J]. IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing, 1979, 27(4): 356-360.

(责任编辑:雷秀丽)

收稿日期: 2009-12-19

修回日期: 2010-04-25

第一作者简介: 王珂(1982—)男, 博士, 主要研究方向为遥感数字图像处理、空间关系理论与应用。

First author: WANG Ke(1982—), male, PhD, majors in remote sensing digital image processing and the theory and application of spatial relationships.

E mail: wangke_A@hotmail.com