

基于混合特征空间 MRF (Markov Random Filed) 模型的高分辨率遥感影像水体提取

李士进, 王声特

(河海大学计算机与信息学院, 江苏 南京 210098)

[摘要] 水体信息提取是遥感图像在水资源调查与利用、水生态监测等应用中的关键技术之一。针对现有的水体指数法或影像分类法在水体边界处理效果不够精确、易产生误提取和漏提取等问题, 提出一种基于混合特征空间与 MRF 模型图像分割算法的水体提取新算法。结合遥感图像颜色特征与归一化差异水体指数 NDWI 创建混合特征空间, 将遥感图像中的像素作为 MRF 模型中的随机变量, 构建基于混合特征的能量函数, 使用迭代的图割算法 (Graph Cut) 最小化能量函数确定水体边界, 然后根据已提取的水体主体的水体指数及颜色特征等信息对水体边界进行自适应精细化处理。对石梁河水库水体提取的实验表明, 该方法能够自动对周边环境复杂的水库水体信息进行提取, 并且水体边界的提取效果良好, 达到较高的水体提取精度。

[关键词] 水体提取, MRF 模型, 归一化差异水体指数 (NDWI), 混合特征, 图割算法 (Graph Cut)

[中图分类号] TP753 [文献标志码] A [文章编号] 1001-4616(2017)01-0013-07

A New Algorithm Based on Hybrid Feature Space MRF (Markov Random Filed) Model for Water Information Extraction from High Resolution Remote Sensing Imagery

Li Shijin, Wang Shengte

(College of Computer and Information, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: Water information extraction in remote sensing images is an important application of remote sensing technology in water resources surveying and utilization, detection of water ecology change and other aspects. The existing water extraction methods as water index or image classification are not accurate enough for water boundary treatment, and they are easy to produce the problem of error extraction and leakage extraction. Based on the existing algorithms that constructing water index to extract water information, we have proposed a new algorithm which combine image segmentation algorithm based on MRF model with normalized difference water index (NDWI) for extraction of water information. We represent the pixels in a remote sensing image as random variables in an MRF model, and introduce hybrid feature in the energy function on these variables, minimize the energy function to find the optimal water boundary, by using an iterative graph cut scheme. Then water boundary is adaptively refined according to the water index and color feature of the extracted water body. The experiment of water information extraction in Shilianghe Reservoir shows that our approach can achieve significant accuracy as it automatically adapts to the extraction of water information in reservoir whose surroundings are complicated and the boundary of water bodies is handled precisely.

Key words: water body extraction, MRF model, normalized difference water index (NDWI), hybrid feature space, Graph Cut

遥感技术具有观测范围广、信息量大、获取信息快、节省人力物力等优势, 遥感图像中水体信息自动提取技术已经成为水资源调查与利用、水生态变化监测、水利规划评估等方面研究的有力手段^[1]。水体和陆地、植被等对太阳辐射的反射、吸收和透射特性不同, 在遥感图像上的差异较明显^[2], 这种特性有利于对

收稿日期: 2016-05-14.

基金项目: 国家自然科学基金 (61170200)、江苏省重点研发计划 (社会发展) 项目 (BE2015707)。

通讯联系人: 李士进, 博士, 教授, 研究方向: 模式识别和数据挖掘。E-mail: lishijin@hhu.edu.cn

水体信息进行提取.遥感图像的水体信息提取方法有很多,常用的可分为两类:一类是基于波谱分析的方法,另一类是基于影像分类的方法.

基于波谱分析的方法通过分析地物在不同波段的反射率波谱特征,找出水体同其他地物反射特性差异较大的波段并使用数学运算等方式加大差异,从而提取水体信息^[3]. 遥感图像中水体在可见光波段吸收少、反射率低,在红外波段吸收多、反射率高^[4]. 单波段密度分割法和水体指数法在提取水体的过程中利用了水体的这些特性. 其中,单波段密度分割法的提取速度快,精度较高,但容易包含更多的非水体像素^[5]. 水体指数法考虑了遥感图像中水体独特的谱间关系,在一定程度上减少了误提取,因此得到学者们的青睐. McFeeters 等人(1996)用遥感影像的特定波段进行归一化差值处理,以凸显影像中的水体信息,提出归一化差异水体指数 NDWI(Normalize Difference Water Index)^[6];徐涵秋等人(2005)分析了城市水体及其背景地物的反射特点,提出能更好地提取城市水体信息的改进归一化差异水体指数(MNDWI)^[7];沈占锋等人(2013)针对遥感影像中河流水体提取的问题,在归一化差异水体指数(NDWI)的基础上,提出采用高斯归一化水体指数(GNDWI)提取河流水体的模型^[3];周艺等人(2014)通过对归一化差异水体指数 NDWI 中的绿波段修正,提出不依赖于中红外波段的伪归一化差异水体指数 FNDWI(False NDWI)^[8];陈文倩(2015)等人针对山区水体信息提取的问题,提出单波段阈值法与阴影水体指数 SWI(Shadow Water Index)相结合的决策树水体信息提取方法^[9]. 基于波谱分析的方法通常需要设定合适的阈值来实现水体信息提取,如何设定最优的阈值也是研究的热点.

基于影像分类的方法采用监督分类或非监督分类的方法,以特征在类内方差最小、类间方差最大为准则对水体和非水体进行分类来提取水体. 基于影像分类的方法有最大似然法、ISODATA(Iterative Self-Organizing Data Analysis Technique Algorithm)聚类法、决策树法等^[10]. 基于影像分类的方法根据地物的光谱特征进行聚类,由于不同类型的水体在不同外界条件下所表现的波谱特征不同,采用不同波段组合遥感数据对于分类的结果影响较大^[3].

同一影像中,不同水体单元的水质、泥沙含量等情况差异较大,成像特征不一定能保持均衡^[2],增大了水体提取的难度. 湖泊、水库、河流等水体边界像元主要由滩地和水体组成^[11],由于人类活动、浮游生物生长、季节性水位波动变化等原因,水体边界情况复杂多样. 在高分辨的遥感图像中,水体边界处存在含水量很大的混杂区域,如水田、沙滩及淤泥淤积等区域,传统的水体指数法或影像分类的方法在水体边界处易产生误提取和漏提取等问题. 水体边界处理效果不理想,对水体周边环境的进一步的分析产生影响,如水体周边环境的变化检测中常需要排除自然、季节性的变化情况,混杂区域的情况随着季节变化而变化,直接影响水体周边环境的变化检测的结果,因此需要能够精确处理混杂区域的水体提取算法.

为实现高分辨率遥感图像中复杂背景下水体信息的精确提取,提出基于 MRF(Markov Random Filed)模型的图像分割算法与归一化差异水体指数(NDWI)模型相结合的方法提取水体. 对高分一号卫星遥感图像进行预处理,创建融合颜色特征和水体指数的混合特征空间 RGBW. 将遥感图像中的像素作为 MRF 模型中的随机变量,构建基于 RGBW 特征的 MRF 模型能量函数,使用迭代的图割算法(Graph Cut)^[12]最小化能量函数自动确定水体主体范围,然后根据已提取的水体主体的水体指数及颜色特征等信息,对水体边界处进行自适应精细化处理.

1 高分一号遥感图像预处理及 RGBW 混合特征

高分一号卫星 16 m 分辨率的多光谱宽覆盖 WFOV(Wide Field of View)相机提供 4 个波段(蓝光波段 0.45 μm ~0.52 μm 、绿光波段 0.52 μm ~0.59 μm 、红光波段 0.63 μm ~0.69 μm 、近红外波段 0.77 μm ~0.89 μm)的遥感数据^[13]. 高分一号的多分辨率遥感影像用 DN(Digital Number)值表示遥感影像像元亮度值,记录地物的灰度值.

归一化差异水体指数 NDWI 以地物在各个波段的 DN 值为基础构建,其计算公式为:

$$\text{NDWI} = \frac{\text{DN}_{\text{green}} - \text{DN}_{\text{NIR}}}{\text{DN}_{\text{green}} + \text{DN}_{\text{NIR}}}, \quad (1)$$

式中, DN_{green} 表示绿光波段的 DN 值, DN_{NIR} 表示近红外波段的 DN 值,在高分一号的多光谱遥感影像中分别对应第二和第四波段. NDWI 水体指数抑制陆地植被等信息而突出水体信息,且式(1)对 NDWI 数值进

行了拉伸,可使不同传感器、不同成像条件的影像获得具有可比较的、相近统计特性的 NDWI 水体指数,便于后续建立统一的信息提取模型^[2].

将遥感数据的近红外波段、红光波段和绿光波段分别对应红、绿、蓝 3 个通道合成标准假彩色数字图像. 标准假彩色遥感图像能充分显示各种地物影像特征的差别,能很好地区分不同地物特性,解译地物类型. 结合标准假彩色遥感图像与 NDWI 水体指数值合成的灰度图像,构建结合遥感数据彩色颜色特征与 NDWI 指数的混合特征空间,本文称之为 RGBW 特征(W 即 NDWI 水体指数). RGBW 特征空间既考虑了标准假彩色遥感图像中水体与其他地物的颜色特征区别,也考虑了传统水体指数对水体提取的突出作用,可为后续水体分割模型提供具有较强鉴别能力的输入信息.

2 基于 MRF 模型的水体提取算法

近年来,基于 MRF 模型的图像分割算法广泛运用于各种目标与背景分界不清晰,前景背景相似等情况复杂的图像中提取目标^[14]. 如图 1,水体边缘与水体边界交界处存在浅滩、水坑等混杂区域,本文提出利用 MRF 模型进行复杂背景中水体信息精确提取. 将遥感图像中的像素作为 MRF 模型中的随机变量,构建基于 RGBW 特征的 MRF 模型能量函数,使用迭代的图割算法(Graph Cut)最小化能量函数来确定水体主体部分,然后根据已提取水体主体的水体指数及颜色特征等信息,自适应地对水体边界处进行进一步精细化处理. 下面首先给出 MRF 模型中的能量函数定义.

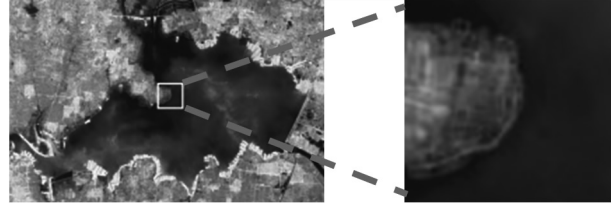


图 1 水库边界的混杂区域情况

Fig. 1 Reservoir boundary mixed area

2.1 MRF-Gibbs 能量函数

基于 MRF 模型的分割方法建立在 MRF 模型和贝叶斯理论(Bayesian Theory)的基础上,根据统计决策和估计理论中的最优准则确定图像分割问题的目标函数,采用优化算法求取满足条件的 MRF 模型的最大可能分布,从而将图像分割问题转换为求解 MRF 分布的最优化问题^[15].

图像分割可以看成像素标记问题, N 个像素的图像可以用数组 $X = \{X_1, X_2, \dots, X_N\}$ 来表示,每个像素 X_i 都有一个标记 $x_i \in \{0, 1\}$ (0 代表背景,1 代表前景). 将 X 作为 MRF 的结点并定义图的 Gibbs 能量函数为:

$$E(x, \theta, z) = R + B = \sum_{i=1}^N R_i(x, \theta, z) + \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^C B_{i,j(i \neq j)}(x, z), \quad (2)$$

式中, C 为邻域像素集合的数目, $x = \{x_1, x_2, \dots, x_N\}$ 为每个像素的标记, $z = \{z_1, z_2, \dots, z_N\}$ 表示像素的亮度值, θ 为 MRF 模型参数,由图像前景和背景像素的 RGBW 特征值的分布确定. 式(2)中, $R = \sum_{i=1}^N R_i(x, \theta, z)$ 为区域能量项(Regional Term),是像素被归类为目标或者背景的惩罚,定义为像素 i 分割为标记 x_i 的概率的负对数:

$$R_i(x, \theta, z) = -\log P(z_i | x_i). \quad (3)$$

区域能量项 R 可由灰度直方图^[12]或高斯混合模型 GMM(Gaussian Mixture Model)^[16]计算获得. 式(2)中, $B = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^C B_{i,j(i \neq j)}(x, z)$ 为边界能量项(Boundary Term),边界能量项体现邻域像素 i 和 j 不连续的惩罚,在 RGBW 特征空间中,采用欧氏距离衡量两像素的相似性:

$$B_{i,j(i \neq j)}(x, z) = \lambda B_{\langle i, j \rangle} \delta(i, j), \quad (4)$$

式中, $\delta(i, j) = \begin{cases} 0, & x_i = x_j \\ 1, & x_i \neq x_j \end{cases}$, $B_{\langle i, j \rangle} = \exp(-\beta \|z_i - z_j\|^2)$, $\lambda = 50$, β 由图像像素间的差异度决定, $\beta = (2(z_i - z_j)^2)^{-1}$.

定义 MRF 的 Gibbs 能量函数之后,图像分割的问题转化为求图的 Gibbs 能量函数最小化 x^* 的问题:

$$x^* = \arg \min_x E(x, \theta, z). \quad (5)$$

Boykov 等人提出基于最大流最小割(Max-Flow/Min-Cut)理论^[17],迭代求解全局 MRF 吉布斯(Gibbs)

能量函数最小化的图割算法(Graph Cut), 具有较快的分割速度同时能获得良好的图像分割结果.

2.2 水体提取的图割算法

对图像建立 GMM 模型可以利用多维特征来计算区域能量项 R , 获得更精确的分割结果. 每个 GMM 模型有 n 个高斯分量, 3 个参数: 每个高斯分量的权重 π , 每个高斯分量的均值向量 μ 以及协方差矩阵 δ . 分别建立描述目标的 GMM 和描述背景的 GMM, 参数分别通过 K -Means 算法聚类已知的目标像素和背景像素获得.

GMM 的高斯分量向量表示为 $k = \{k_1, k_2, \dots, k_n\}$, 图像中的每个像素都服从高斯分布:

$$P(z_i | x_i, \theta, k_i) = N(z, \theta; \mu(x_i, k_i), \delta(x_i, k_i)). \quad (6)$$

引入 GMM 模型后式(3)化为:

$$R_i(x, \theta, z) = -\log P(z_i | x_i, \theta, k_i) = -\log \left(\frac{\pi(x_i, k_i)}{\sqrt{\delta(x_i, k_i)}} \exp \left(-\frac{1}{2} [z_i - \mu(x_i, k_i)]^T \delta(x_i, k_i)^{-1} [z_i - \mu(x_i, k_i)] \right) \right). \quad (7)$$

由每个像素的 RGBW 特征值计算出该像素分别属于目标 GMM 和背景 GMM 的概率, 从而计算得到区域能量项 R .

图割算法(Graph Cut)首先对图像建立带权图模型 $G = (V, E)$, 其中 V 为图像像素节点的集合, 节点 $v_i \in V$ 表示图像的一个像素, E 为图像边的集合, $E_{i,j(i \neq j)}$ 表示连接节点 v_i 和 v_j 的边. 图 G 中, 边的权值表示两个像素的不相似性^[16], 计算式(4)中的边界平滑能量项 $B_{i,j(i \neq j)}$ 为边 $E_{i,j(i \neq j)}$ 的权值. 然后在图 G 上添加两个终端顶点 S 结点(代表目标)和 T 结点(代表背景), 并将 V 上的所有节点都新建一条边分别连接到 S 和 T 上, 边的权值由该节点属于目标或者背景的概率决定, 计算区域能量项 $R_i(x, \theta, z)$ 为边的权值.

当所有边的权值确定时, 图构建完成. 假设图像中每个像素的标签取值为 $L = \{l_1, l_2, \dots, l_n\}$, 其中 l_i 为 0 或者 1, 然后通过最大流最小割(Max-Flow/Min-Cut)算法来找到图发生在目标和背景的边界处的最小割 L (权值和最小的边的集合), 此时图的能量 $E(L) = R(L) + B(L)$ 最小, 同时断开的边恰好可以使目标和背景被分割开, 实现目标和背景的分.

Graph Cut 通过最大流最小割(Max-Flow/Min-Cut)算法最小化 MRF-Gibbs 能量函数 $E(x, \theta, z)$ 找到图 G 发生在目标和背景的边界处的最小割 L 以确定水体和非水体像素. 图割算法通过人工迭代的方式, 人机交互选择其中某次提取效果较好的分割结果作为最终的结果. 在本文算法中, 为了实现水体的自动提取, 提出了一种自动确定迭代最后结果的策略: 首先让图割算法自动迭代 q 次(q 一般取 5-8), 然后统计图像中每次迭代的结果中被分割为水体像素的次数, 将 q 次均被分割为水体的像素作为水体主体像素, 然后对水体边界区域进行精细化处理.

2.3 水体边界精细化处理

水体边界通常包含几种不同的情况: 人工建筑, 人工养殖区域, 浅滩, 淤泥淤积和浮游生物生长区域等. 水体边界的人工水坝、人造缓冲带等人工建筑通过 2.2 节基于 RGBW 特征的 Graph Cut 迭代分割能得到较好的处理, 但由于季节性或者水库人工蓄水及放水等原因, 水体的水位出现剧烈变化, 人工养殖区域、浅滩、淤泥淤积和浮游生物生长等混杂区域的情况复杂多样, 且混杂区域的水体指数值较高, 容易误提取.

基于 RGBW 特征的图割算法(Graph Cut)多次迭代分割后可以得到较完整的水体 W , 为减少混杂区域的误提取, 获得更精确的水体边界, 在分割得到的水体边界处做精细化处理. 水体边界 $M = \{m_1, m_2, \dots, m_n\}$, 以 m_i 为中心, 取 ω 为半径, 建立一条宽度为 2ω 的粗轮廓带作为待处理轮廓 U , 如图 2, U 同时包含水体和非水体像元, 水体主体为 $W' = W - U$.

精细化处理边界的主要目的是提取待处理区域 U 中的水体, 排除非水体像元. 针对水体边界不同区域的不同情况, 如人工建筑和浅滩带, 本文采用水体指数特征和颜色特征分别进行处理.

水体边界的人工建筑的 NDWI 水体指数值较小而水体区域的水体指数值较大, 设定合适的 NDWI 阈值 T_{NDWI} , 对待处理区域 U 中像元进行分类处理, 排除人工建筑区域像元. 本文实验中, 首先计算水体主体

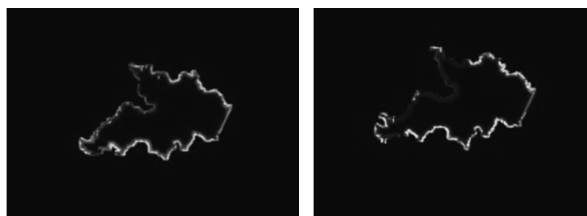


图 2 水库边界待处理轮廓 U

Fig. 2 The outer border area of the reservoir boundary U

W' 的 NDWI 水体指数值均值 \bar{W} , 然后设置 $T_{NDWI} = \bar{W} \times 0.8$ 筛选 U 中不符合水体特征的像元, 可以很好地去除人工水坝、人造缓冲地带等人工建筑区域, 同时保留 U 中符合水体特征的水体像元, 得到 U' .

水体边界的浅滩、淤泥淤积和人工养殖区域等混杂区域的 NDWI 水体指数值较大, 与水体主体的 NDWI 水体指数值接近, 水体指数特征不能有效区分混杂区域与水体. 而水体主体区域与混杂区域的颜色特征存在明显差异, 在 Lab 色彩空间中, 水体像元 b 通道的颜色值通常大于 0, 混杂区域像元 b 通道的颜色值通常小于 0. 根据这个特性设置 $T_b = 0$ 作为 U' 在 Lab 色彩空间中 b 通道的颜色值阈值筛选 U' 中的与水体区域颜色差异较大的浅滩、淤泥淤积和人工养殖区域等混杂区域, 得到 U'' .

经过上述处理, 精细化处理后的水体边界 U'' 与水体主体部分 W' 组合成完整的水体区域 $W = W' + U''$.

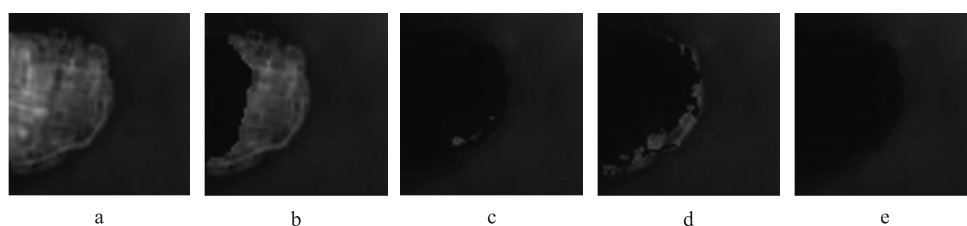
3 实验结果及分析

为验证本文方法的有效性, 对江苏省最大的水库——石梁河水库的遥感图像进行水体信息提取. 数据来源于中国卫星资源应用中心提供的高分一号卫星 WFV 遥感影像, 分辨率为 16 m, 选取 2014 年 4 个季度时相的影像进行实验.

首先利用 ENVI 软件的 Radiometric Calibration 辐射校正, FLAASH atmospheric Correction 大气校正, RPC Orthorectification 正射校正等工具对遥感影像进行预处理, 然后将近红外波段、红色波段、绿色波段的数据合成为 RGB 伪彩色图像, 同时根据式(1)计算出相应的 NDWI 水体指数值得到灰度图像, 从而得到 RGBW 四通道的图像作为水体提取方法的输入. 使用 2.2 节的水体提取图割方法进行水体提取, 然后通过 2.3 节的水体边界精细化处理方法对边界进行处理.

3.1 水体提取效果对比

图 3 是几种流行算法及本文方法对 2014 年 03 月 08 日高分一号 WFV2 遥感影像合成的假彩色图像中石梁河水库左边界存在浅滩与水体混杂等情况的部分区域的处理结果对比. 图 3(a) 为水库边界区域的原始图像, 图 3(b) 是仅仅采用 RGB 三通道图像的经典交互式图割算法 GrabCut^[16] 的处理结果, 单纯的基于颜色特征, 未考虑水体指数特征的 GrabCut 算法在提取水体时的误提取现象较为严重. 图 3(c) 为归一化水体指数 NDWI^[6] 阈值法的提取结果, 能排除浅滩与水体混杂区域中的大部分区域, 但小部分水体指数值较大的区域存在误提取现象. 图 3(d) 为阴影水体指数 SWI^[9] 阈值法的提取结果, 误提取现象较 GrabCut 算法有一定的改善, 但仍存在较明显的误提取现象. 由于设定全局化阈值的原因, NDWI 和 SWI 水体指数法会出现如图 4 的水体中心区域的漏提取现象. 图 3(e) 为本文算法的提取结果, 边界浅滩与水体混杂区域的处理效果较好.



从左到右分别是原始图像, GrabCut, NDWI, SWI, 本文方法

图 3 水库边界处理情况对比

Fig. 3 Comparison of mixed area extract results

图 5 从左到右依次是石梁河水库区域不同季节 (从上到下的时间是 20140308、20140512、20140922、20141212) 的遥感影像标准假彩色数字图像, 水库地面实况, GrabCut 算法处理结果、NDWI 阈值法、SWI 阈值法以及本文方法的处理结果. 石梁河水库边界以人工修筑的缓冲带及水坝和浅滩、淤泥淤积带为主, 并且人工养殖的水田、浅滩、淤泥淤积和水生植物生长等情况随着季节变化, 水位波动等原因表现出的情况不一. 通过几种方法的处理结果与水库

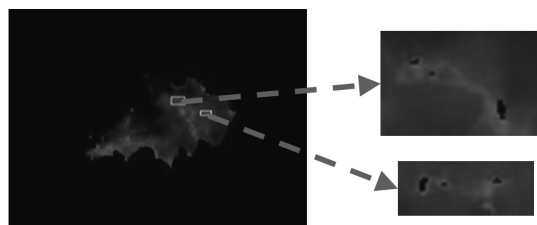
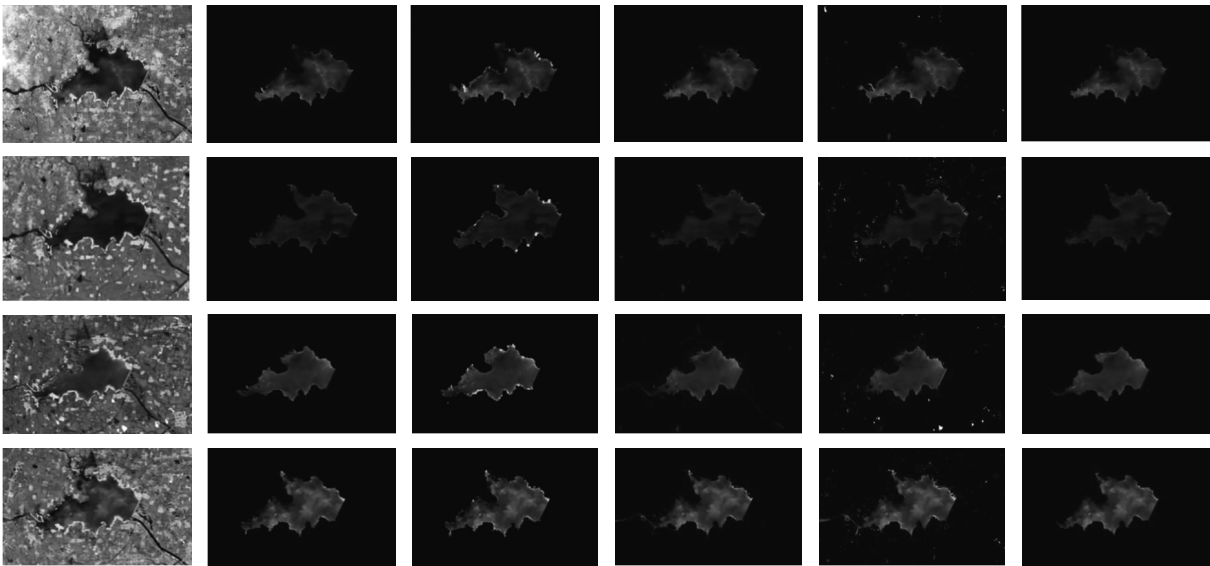


图 4 漏提取现象

Fig. 4 Leakage problems

地面实况图对比可以看出,现有的几种算法均能较完整地提取水库主体,但在处理边界时却产生误提取或边界处理效果不稳定等问题,而本文算法表现出优于其他几种算法的边界处理效果.



从左到右是假彩色合成图像,目视解译的标准提取结果,Graph Cut,NDWI,SWI 以及本文算法的处理结果

图 5 石梁河水库提取效果对比

Fig. 5 Comparison of water information extraction results at Shilianghe reservoir

3.2 水体提取结果定量对比分析

本文引入信息检索的评价指标查全率 R 、查准率 P 和 F 指数对上述的提取结果进行评价:

R = 提取的真正水体像素数目 / 目视解译的水体像素数目, (8)

P = 提取的真正水体像素数目 / 提取的像素数目. (9)

F 评价指数是查准率和查全率的加权调和平均值,本文采用 F 评价指数作为评估的综合指标,其计算公式为:

$$F = \frac{2PR}{P+R}. \tag{10}$$

表 1 不同方法水体提取结果对比

Table 1 Water information extraction results by different methods

时间	方法	查全率 R	查准率 P	F 指数	时间	方法	查全率 R	查准率 P	F 指数
20140308	GrabCut	99.76%	84.70%	91.62%	20140922	GrabCut	99.84%	84.89%	91.76%
	NDWI	90.26%	99.19%	94.52%		NDWI	89.98%	90.89%	90.43%
	SWI	94.05%	92.00%	93.01%		SWI	86.68%	92.57%	89.53%
	本文算法	97.08%	96.22%	96.65%		本文算法	96.13%	93.31%	94.70%
20140512	GrabCut	99.77%	82.53%	90.34%	20141212	GrabCut	99.51%	88.43%	93.64%
	NDWI	91.26%	97.25%	94.16%		NDWI	91.92%	94.96%	93.42%
	SWI	93.14%	86.60%	89.78%		SWI	92.13%	86.65%	89.31%
	本文算法	97.34%	93.54%	95.41%		本文算法	96.08%	94.79%	95.43%

注:GrabCut 是仅采用 RGB 三通道图像的提取结果;NDWI 是 OTSU 最佳阈值分割算法对 NDWI 指数处理结果;SWI 是 OTSU 最佳阈值分割算法对 SWI 指数处理结果;本文算法则采用 RGBW 混合特征空间和精细后处理.

图 5 中各种方法水体提取结果的定量对比见表 1. 可以看出,仅仅采用 RGB 三通道图像的 GrabCut 算法提取的结果不是很理想,只在 12 月取得了不错的效果,而在 3 月、5 月和 9 月的提取精度较差;在不同季节 NDWI 水体指数法表现不太稳定:在 3 月、5 月和 12 月表现较好,而在 9 月表现稍差. 阴影水体指数法除了对 3 月的影像取得了较好的精度,在其余 3 个季度都是最差的. 本文算法由于采用了混合特征空间作为图割算法的输入,并对水体主体进行边界精细化后处理,对 4 个季度的影像都取得了最好的精度.

4 结语

本文提出在包含 RGB 彩色模型与归一化差异水指数(NDWI)模型的 RGBW 混合特征空间中运用基于 MRF 模型的图像分割 Graph Cut 算法提取水体的方法,将 RGB 色彩模型与水体指数模型有机结合,并根据已提取水体主体的水体指数信息和图像在 Lab 色彩空间的特征在水体边界处进行自适应精细化处理.通过对石梁河水库四个不同季度的高分一号遥感图像进行水体提取的实验结果表明,该方法能够实现对周边环境较复杂的水库水体信息稳定地提取,达到较高的总体水体提取精度,并且在水体边界处的分割效果良好.

[参考文献]

- [1] 胡晓东,骆剑承,夏列钢,等. 图谱迭代反馈的自适应水体信息提取方法[J]. 测绘学报,2011,40(5):544-550.
- [2] 骆剑承,盛永伟,沈占锋,等. 分步迭代的多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] 沈占锋,夏列钢,李均力,等. 采用高斯归一化水体指数实现遥感影像河流的精确提取[J]. 中国图象图形学报,2013,18(4):421-428.
- [4] 王华. 基于 VWRD 的遥感影像面状居民地和水体提取[D]. 武汉:武汉大学,2010.
- [5] FRAZIER P S, PAGE K J. Water body detection and delineation with Landsat TM data[J]. Photogrammetric engineering and remote sensing, 2000, 66(12):1 461-1 468.
- [6] 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):1 425-1 432.
- [7] 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.
- [8] 周艺,谢光磊,王世新,等. 利用伪归一化差异水体指数提取城镇周边细小河流信息[J]. 地球信息科学学报,2014,16(1):102-107.
- [9] 陈文倩,丁建丽,李艳华,等. 基于国产 GF-1 遥感影像的水体提取方法[J]. 资源科学,2015,37(6):1 166-1 172.
- [10] 吉红霞,范兴旺,吴桂平,等. 离散型湖泊水体提取方法精度对比分析[J]. 湖泊科学,2015,27(2):327-334.
- [11] 陈亮,张友静,何厚军,等. 基于混合像元分解的水体面积提取算法[J]. 河海大学学报(自然科学版),2014,42(4):346-350.
- [12] BOYKOV Y Y, JOLLY M P. Interactive graph cuts for optimal boundary & region segmentation of objects in ND images[C]//2001 IEEE International Conference on Computer Vision(ICCV). Vancouver, Canada:IEEE,2001:105-112.
- [13] 朱利,李云梅,赵少华,等. 基于 GF-1 号卫星 WFV 数据的太湖水质遥感监测[J]. 国土资源遥感,2015,27(1):113-120.
- [14] MISHRA A, ALAHARI K, JAWAHAR C V. An MRF model for binarization of natural scene text[C]//2011 International Conference on Document Analysis and Recognition(ICDAR). Beijing, China:IEEE,2011:11-16.
- [15] 刘磊,石志国,宿浩茹,等. 基于高阶马尔可夫随机场的图像分割[J]. 计算机研究与发展,2013,50(9):1 933-1 942.
- [16] ROTHER C, KOLMOGOROV V, BLAKE A. Grabcut: interactive foreground extraction using iterated graph cuts[J]. ACM transactions on graphics(TOG), 2004, 23(3):309-314.
- [17] BOYKOV Y, KOLMOGOROV V. An experimental comparison of min-cut/max-flow algorithms for energy minimization in vision[J]. IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence, 2004, 26(9):1 124-1 137.

[责任编辑:丁 蓉]