

文章编号: 1001-1595(2011)05-0544-07

图谱迭代反馈的自适应水体信息提取方法

胡晓东^{1,3}, 骆剑承¹, 夏列钢², 沈占锋¹, 朱长明¹, 乔程¹

1. 中国科学院 遥感应用研究所, 北京 100101; 2. 浙江工业大学 软件学院, 浙江 杭州 310023; 3. 中国科学院 研究生院, 北京 100049

Adaptive Water Body Information Extraction Using RS TUPU Computing Model

HU Xiaodong^{1,3}, LUO Jiancheng¹, XIA Liegang², SHEN Zhanfeng¹, ZHU Changming¹, QIAO Cheng¹

1. Institute of Remote Sensing Applications, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China; 2. Software College, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310023, China; 3. Graduated University, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract: A RS TUPU computing mechanism is designed, considering the advantages of the features of spatial clustered layer and non-linear spectral mapping layer, which aims to approach the accurate regional boundary of thematic area step by step. Meanwhile, extraction parameters in the process are adjusted automatically by adaptive information computing method. Subsequently, the RS TUPU computing model is proposed, which will be applied in water body extraction. The existing valid methods for water body extraction are analyzed first. On this basis, an adaptive water body extraction method using RS TUPU computing model (WERSTP) is proposed, where ETM image is selected as experimental data source. WERSTP combines with the advantages of methods based on index computing and spectral classification, and the experimental results show that this method obtains an effective extraction result to make it achieve the level of accuracy and automation in water body information extraction.

Key words: water body information extraction; spatial clustered structure; spectral feature mapping; iterative computing; RS TUPU information

摘 要: 提出图谱迭代反馈模型, 结合空间聚合图特征和非线性谱映射结果的优点, 设计图谱迭代反馈机制, 并通过自适应信息计算方法自动地调整提取参数, 逐步地计算逼近正确的专题区域边界。结合水体提取案例, 在分析当前较为有效的水体提取方法基础上, 选取 ETM 影像作为数据源, 提出图谱迭代反馈的自适应水体信息提取 (WERSTP) 理论与方法。试验比较表明, 该方法能充分结合基于指数和基于光谱分类提取方法的优势并成功融入水体空间分布特征, 获得较好的提取效果。

关键词: 水体信息提取; 空间聚合图; 谱特征映射; 迭代计算; 遥感图谱信息

中图分类号: TP751

文献标识码: A

基金项目: 国家自然科学基金(40871203; 40971228); 国家 863 计划(2009AA12Z148); 水体污染控制与治理科技重大专项(2009ZX07318-001)

1 引言

利用遥感技术手段进行水体自动提取, 在水环境的定量探测、水资源调查、洪水监测、水利规划评估等领域都具有重要的意义; 特别是随着对地观测技术的发展, 遥感数据的种类和数量空前丰富, 人们对于实时、准确的遥感信息产品的需求日益迫切, 这就为自动、精确的水体提取方法提出了更高的要求。

综合当前较为有效的水体提取方法, 最常用的有指数分割法^[1]、监督分类法^[2]以及决策树法^[3]等, 针对不同的影像特征和应用, 可以选择不同的水体提取方法。例如文献[4]针对 TM 影像进行了分析, 认为用影像分类的方法效果最好, 但

需要较多的人工参与; 文献[5]综合了指数和波段叠加的聚类方法, 避免了阈值选取的繁琐, 提高了自动化水平; 文献[6]认为针对 MODIS 影像, 水体指数法能够提取出最准确的水体信息; 文献[7]通过比较五种不同水体提取指数模型的原理分析, 结合具体实例进行水体遥感提取, 确定了在不同时期和不同用途时可采用最佳的水体提取模型; 也有关于更高级别基于语义的水系提取方法的探讨^[8]; 为了实现水体提取的自动化和精确化, 指数模型法和分类法是效果较好的方法, 基于此发展的“全域-局部”分步迭代方法^[9]被证明对于精确提取湖泊等面状水体十分有效。

综上, 目前的方法存在着光谱与空间分析分离, 自动化程度较低等不足。笔者以 ETM 数据

为提取对象, 提出了图谱迭代反馈的自适应水体提取方法(WERSTP), 并将其与自动化程度较高的阈值分割方法和准确度较高的监督分类方法做了试验比较与分析, 证明了该方法不仅充分结合了空间图和波段谱的特征, 提高了提取精度, 而且能自适应地调整模糊阈值, 最优地确定提取结果, 达到了自动运算的要求。

2 方法原理

2.1 图谱迭代反馈模型

WERSTP 方法的核心部分是图谱迭代反馈模型。所谓图谱迭代反馈, 是指针对专题信息提

取任务, 以一定的知识(地物指数或波谱相似指数)作为初始输入, 通过空间聚合与分割以及非线性特征映射方法分别形成最初的空间聚合图和谱特征映射层; 接着进行图和谱的反馈运算, 获得新的图, 并进一步生成新的谱; 然后根据新的图和谱进行迭代计算, 直至迭代终止而获得最优的提取结果(图 1)。图谱迭代反馈模型是个自动演算的智能机器, 它充分利用了遥感图谱信息, 具有自适应信息计算机制, 表现在它能根据输入的数据以及每一步的计算结果来适时地调整计算参数, 并能准确地预知、排除、修正计算过程中产生的错误。

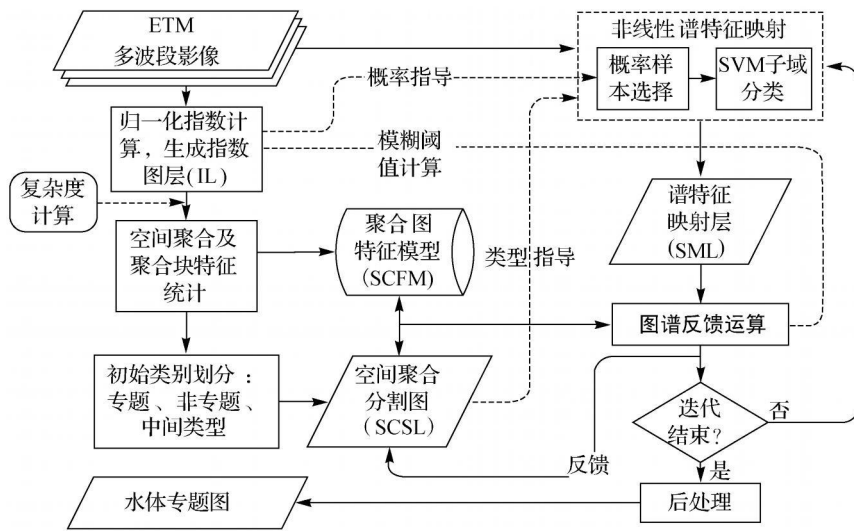


图 1 图谱迭代反馈的自适应水体提取方法流程图

Fig.1 The flow chart of WERSTP

由于作为初始输入的指数及波谱种类丰富^[10]且大多已十分成熟, 因此图谱迭代反馈模型是一个具有普适性的通用信息提取方法。为了深入、完整地介绍该模型, 将结合基于 NDWI 的水体信息提取来具体阐述, 同时进一步介绍 WERSTP 方法的技术实现思路。

2.2 WERSTP 方法

在陆地表层系统中的水体主要表现为湖泊、河流和冰雪等形态。一方面由于水体和陆地对太阳辐射的反射特性不同, 其光谱差异比较明显, 并且水体内部在空间上表现为很强的连续性和均匀性, 使图谱结合的提取思路成为可能; 另一方面由于水中杂质及漂浮物和水陆交错地区等影响而产生了混合像元, 使水体与某些地物以及阴影等特殊地物产生了混提或误提等现象。笔者综合考虑了以上的水体空间分布及光谱表现特征, 基于图

谱迭代反馈理论模型, 提出了 WERSTP 方法, 其总体步骤如下(见图 1):

(1) 聚合图特征模型的生成。首先对 ETM 多波段影像进行水体指数计算, 生成水体指数图层(index layer, IL); 接着对 IL 进行空间聚合, 生成空间聚合图(spatial clustered layer, SCL), 其中通过复杂度计算来确定聚合的尺度; 在此基础上通过聚合块特征统计形成聚合图特征模型(spatial clustered feature model, SCFM)。如图 2 所示, (a) 为 ETM 的 4、3、2 波段假彩色原图, (b) 为对 (a) 进行 NDWI 指数计算的结果 IL, (c) 为对 (b) 进行空间聚合得到的 SCL。

(2) 初始类别划分及非线性谱特征映射。对 SCL 进行初始的阈值分割, 形成包含专题、非专题、中间类型三种类型以及背景的空间聚合分割图(spatial clustered and segmented layer,

SCSL); 然后对原 ETM 影像进行分类, 本文称之为非线性谱特征映射, 得到谱特征映射层 (spectral mapping layer, SML)。

(3) 图谱迭代反馈运算。耦合 SCFM 和 SML 进行图谱反馈运算, 将 SML 中新增的类型反映射到 SCFM 的相应单元中, 并通过自适应模糊阈值的判断, 确定专题和非专题类型新增的分割块, 将其应用到下一次迭代映射中。

(4) 最优迭代结果确定。根据上一步骤中新增分割块的数量, 并结合当前已经提取的专题与非专题的指数值分布情况, 判断迭代计算是否终止, 同时确定最优的迭代结果。

(5) 后处理及水体专题生成。根据当前的 SCSL 和 SML 形成栅格专题层; 然后进行去除小斑块、对象化等后处理, 获得最终的水体专题图。

以上步骤中, (1) 和 (2) 分别获得了“图”和“谱”的信息, (3) 和 (4) 是 WERSTP 方法的核心, (5) 是优化和后处理过程。

3 具体算法实现

根据图谱耦合的思想, 在自主研发的遥感信息计算平台 (SINCE) 支持下, 针对陆地卫星遥感数据的特点, 用 Visual C++ 开发完成了 WERSTP 方法原型系统模块, 方法中各步骤具体算法实现如下。

3.1 聚合图特征模型的生成

SCFM 的生成需要经过指数计算、影像聚合 (分割) 和特征统计三个步骤。笔者采用归一化水体指数 (normalized difference water index, NDWI)^[11] 计算模型对 TM/ETM 多波段影像进行计算生成 IL, 其计算公式如下。其中, G_{REEN} 表示绿波段; N_{IR} 表示近红外波段。计算结果为 $[0, 255]$ 像素区间的栅格图层。

$$NDWI = \frac{G_{\text{REEN}} - N_{\text{IR}}}{G_{\text{REEN}} + N_{\text{IR}}}$$

对 IL 的空间聚合 (分割) 采用 MeanShift 多尺度分割算法^[12], 生成 SCL, 其中由于影像的复杂度不同, 需要在分割时进行复杂度计算以确定分割的尺度。尺度选择的问题较为复杂, 不作深入讨论, 采用文献^[13] 的尺度选择方法, 转换公式如下。其中 S 为局部均方根, $Scale$ 表示尺度, 起始尺度为 50。

$$Scale = 50 + 10000 \times \left[1 - \frac{S}{255} \right]$$

空间聚合完成后, 统计 SCL 上每个聚合块的面

积、均值等特征以及聚合块之间的邻接关系, 形成 SCFM。统计过程中通过快速连通域算法^[14] 生成标号图层, 其标号值将在 SCFM 中唯一地标识一个聚合块, 以“标号特征”的形式组织, 用“hash_map”的结构实现映射, 完成空间聚合块与特征的对应。

3.2 初始类别划分及非线性谱特征映射

3.2.1 初始类别划分

初始类别划分是通过粗略的阈值分割将上一步生成的空间聚合图划分为三种类型的聚合块: 专题、非专题和中间类型。其余的聚合块则作为背景, 形成 SCSL。其中, 用于划分类别的阈值基于 IL 层计算获得, 以下分别为三个类别的划定方法:

(1) 分别取 $[0, 31]$ 和 $[203, 255]$ 的区间作为水体和非水体的类别划分区间, 因为对于 NDWI 指数来说, 可认为这两个区间分别是水体和非水体的可靠界定区域。

(2) 取经验值 105 作为区分水体和非水体的初始分割值, 再用直方图分割的方法确定当前图像的分割值, 并取该值的 ± 15 的区域作为中间类型的界定区域, 因为此区域是水体和非水体的过度区域, 不能马上判断其类别, 因此作为中间类型。

(3) 其余的区间作为背景。

通过以上划分, 就将 SCL 转换成了 SCSL, 该图层中包含了三个类别以及背景, 可作为类别判定的标准。

值得注意的是, 此处设置中间类型是为了后续的非线性谱特征映射而考虑, 由于 SCSL 中的非水体类只是包含了最不像水体的那些地物, 而并不包含所有类型的地物, 因此类型不全, 谱特征映射时有可能将许多水体映射为非水体而造成误分; 设置后则将此像素暂时划分为中间类型, 在后续逐渐精细化的迭代过程中逐步确定最终类型, 提高了提取精度。

3.2.2 非线性谱特征映射

非线性谱特征映射的原理是采用 SVM 分类器^[15] 对原 ETM 影像进行分类, 包括样本的选取和 SVM 分类两个步骤, 参与分类的波段为 ETM 的 1、2、3、4、5、7 波段。其中为了保证分类的准确性, 样本的选取需要遵循一定的概率分布, 由 SML 确定样本的类别, 由 IL 确定样本分布, 具体的概率样本选择算法如下:

(1) 计算 IL 的直方图, 根据影像的大小和各个类别的总像素个数 (根据 SML 统计) 确定各类所需的样本点个数。

$$SN_{\text{image}} = MAX \left(150, \frac{MN}{256 \times 256} \right)$$

$$SN_{\text{class}} = 5\% N_{\text{class}}$$

$$SN = MIN(SN_{\text{image}}, SN_{\text{class}})$$

式中, SN_{image} 表示由影像大小确定的样本个数; MAX 和 MIN 分别表示取最大值和最小值; M 和 N 分别表示影像的宽和高; SN_{class} 和 N_{class} 分别表示由类别像素总个数确定的样本个数和类别像素总个数; SN 表示最终确定的该类别样本个数。

(2) 随机选择一个像素点, 对照 SML 确定样本类别。

(3) 若该像素点为背景, 则返回(2), 取该像素的指数值, 若该指数值对应的样本已经满足所需样本个数, 则返回(2), 指数值对应的所需样本个数公式如下

$$SN_{\text{value}} = \frac{H_{\text{isto value}}}{SN_{\text{class}}} SN$$

式中, SN_{value} 表示指数值 value 对应的所需样本个数; $H_{\text{isto value}}$ 表示直方图中 value 值对应的像素个数; SN_{class} 表示该类别的像素总个数; SN 表示该类别的所需样本总数。

(4) 三个类别都达到所需样本总数 SN 要求, 则算法结束;

(5) (2) ~ (4) 的循环次数超过循环上限(算法中设为 100 000 次), 则结束算法。

用按照以上算法选择的样本, 从原 ETM 影像中选取各个波段的像素值, 组成多维向量样本输入; 通过 SVM 的多类别分类模式进行样本训练、分类, 生成由三个类别组成的 SML。

3.3 图谱迭代反馈运算

由以上两步, 分别得到了 SC SL 和 SML, 前者与 SCFM 结合具有空间上的特征, 可以反映出水体在空间上的连续、邻接等关系; 后者结合了高维波段属性而具有光谱上的特征, 能反映水体区别于其他地物类型的属性。由于不包含空间关系的光谱映射, SML 中出现了 SC SL 中没有的新专题和非专题类别像素, 据此, 以下通过图谱迭代反馈算法, 在 SC SL 中找出新的水体聚合块。

(1) 找出 SC SL 中分别与专题和非专题相邻的中间类型和背景聚合块; 根据 SML 计算它们的专题和非专题的像素含量(像素个数百分比)。

(2) 若聚合块中专题像素含量大于 $T\%$, 并且指数均值大于 2.2 小节中的初始分割阈值, 则将该聚合块划分为专题类型。

(3) 若聚合块中非专题像素含量大于 $NT\%$, 则将该聚合块划分为非专题类型。

(4) 对于每个找到的聚合块进行(2)、(3)的处理, 其中, $T\%$ 和 $NT\%$ 由以下公式确定

$$T\% = F_T \cdot T_{IL}\%$$

$$NT\% = F_{NT} \cdot NT_{IL}\%$$

式中, $T_{IL}\%$ 和 $NT_{IL}\%$ 分别表示 IL 图层中经过初始分割后的专题和非专题百分比, 阈值为 2.2 小节中获得的分割阈值; F_T 和 F_{NT} 分别表示模糊因子, 可根据提取的精度要求选择, 取值范围分别为 $[0, 1/T_{IL}\%]$ 和 $[0, 1/NT_{IL}\%]$ 。

以上算法确定了新增专题和非专题聚合块后的新 SC SL, 即可被用于下一次迭代过程非线性谱特征映射中的样本类别确定。

3.4 最优迭代结果确定及后处理

本文通过统计在图谱迭代反馈运算中增加的专题聚合块个数来确定当前是否已经达到最优的迭代结果。一般来说迭代到最后, 新增聚合块数将会趋于或达到 0, 规定新增聚合块数小于 3 时迭代终止。

判断迭代结束后, 得到了当前的 SC SL 和 SML。首先将 SC SL 的中间类型和背景赋为非专题类; 再将其与最优迭代结果 SML 进行叠加运算, 将 SML 为水体的所有像素赋予 SC SL, 获得水体专题; 然后采用区域生长法进行小板块去除, 并进行对象化后, 生成水体专题图。

以上为图谱迭代反馈的自适应水体提取方法的全部过程。该方法的特点在于:

(1) 有机结合了图的聚合、相邻等空间特征和高维波段映射的谱分析, 优势互补, 使提取结果更加符合实际, 也更精确, 并为实现自适应的计算机制提供了可能。

(2) 体现了自适应思想, 例如通过复杂度计算自动选择分割尺度、根据直方图确定最初的分割阈值、通过 IL 指导样本的概率、根据 IL 确定图谱迭代反馈运算中的像素含量模糊阈值等, 为实现达到自动化水平提供了可能。

(3) 通过迭代机制, 从初始分割图开始, 逐步地确定专题信息和剔除非专题信息, 每一次迭代都累积上一次的迭代结果信息, 形成了一个自适应的逐步求精过程。

4 试验与分析

本文的试验选择了利用 ETM 影像进行渤海

湾区域沿海水体提取^[16-17]。海岸带是我国利用程度最高的国土资源部分,但也是海洋灾害频发和生态极其脆弱的区域,当前海岸带在自然和人工作用下,变化剧烈,海岸信息急需更新,需要快速、及时、同步地获取海岸带资源环境信息,为开发利用和环境保护提供依据。本文旨在通过遥感技术手段实现水体自动化、精确化提取,为进一步岸线监测、水陆变化检测等的时效性应用提供方法支持。

首先选取了图 2 所示的影像区域(2007-09-21 的 ETM 影像,大连郊区的滨海养殖场),在 SINCE 平台中完成了 WERSTP 方法的集成,并同时集成了阈值分割和监督分类的水体提取方法,用于方法间的比较。试验效果如图 3 所示,(a)为初始阈值分割后的 SCSL,表征了最纯的水体和非水体。(b)和(c)分别是迭代一次和两次后的 SCSL,同样地,(d)、(e)、(f)分别是迭代一次、两次和三次后的 SML,图中的水体和非水体区域随着迭代的进行而渐渐地变得清晰,直至迭代结束,获得(g)图。(h)和(i)则分别是经过小斑块去除和矢量化后的水体专题图。通过(g)与(j)和(k)的比较,可以看出,

(g)图中岸线更为精确,将简单的指数阈值分割无法区分的浅滩部分也已提取出来,并且也准确地剔除了养殖区间的泥地,这为进一步的养殖区提取和岸线提取提供了很好的基础信息。

进一步的试验采用了渤海湾天津、河北一带的海岸影像(2009-08-30 的 ETM 影像),用人工选样本的方式对提取精度进行测试和比较。测试样本是通过目视过程从影像上选取的,包含了海水、养殖区、池塘等水体,平坦陆地、丘陵、植被等非水体,沙滩、滩涂等水陆交错区,充分考虑了影像中的各种地貌类型,包含了 1 078 个水体样本,933 个非水体样本。从表 1 中可以看出,WERSTP 方法在水体的提取精度上有了很大的提高,不过还是存在非水体误提为水体的现象,从样本数据里分析,这些误分的样本绝大多数出现在水陆交错区,由于光谱的复杂性和相似性,并且空间上也满足了与水体临近的条件,因此产生了误提的现象。从总体精度和 Kappa 系数的比较上来看,WERSTP 方法的提取精度提升明显,较之其他方法具有明显的优势。

表 1 三种水体提取方法的精度对比

Tab. 1 The accuracy comparison of three water extraction methods

方法	水体			非水体			总体精度	Kappa
	正确	误分	精度	正确	误分	精度		
阈值分割法	946	133	87.8%	914	19	98.0%	92.5%	0.849
监督分类法	994	85	92.2%	914	19	98.0%	94.9%	0.897
WERSTP 方法	1065	14	98.8%	912	21	97.7%	98.3%	0.937

此外,除了 TM/ETM 等中分辨率影像外,本文还针对 QuickBird、SPOT、IKONOS 等高分辨率影像进行了试验,其前提条件是影像拥有 4 个以上的波段,并且包含计算归一化水体指数所需的近红外和绿波段,同样取得了较好的自动提取效果。如图 4 所示为采用 WERSTP 方法对 IKONOS 影像的提取效果,影像区域为海南省海口市琼山沿海一隅。

最后从计算效能上分析,由于 WERSTP 方法需要完成资源消耗量较大的多尺度空间聚合算法,并进行多次迭代计算,相较于其他方法需要更多的计算资源,包括运算和临时存储等,如图 2 所示的宽 641 像素、高 617 像素图像,经过 5 次迭代计算,共耗时 2 分 42 秒。这也是后续研究中需要解决的问题。

5 结论与展望

本文提出了图谱迭代反馈的自适应水体提取

方法,充分结合了“图”的空间特征和“谱”的高维分析优势,并成功融入了自适应思想及其迭代运算机制,实现了水体提取的自动化和精确化。试验表明,该方法具有较好的水体提取效果,并可为基于水体提取的资源评估、环境监测等应用提供很好的方法和技术支持。

计算效率是需要进一步考虑的问题。多尺度分割算法方面,拟采用分块的策略,充分利用多核资源,先进行粗略划分,再将各个图像块分布于各个计算内核进行运算;样本选择方面,将设计并实现优质样本保存机制,避免重复选择样本,节省计算时间;图谱迭代反馈运算算法方面,设计更优化的标号映射机制,以方便更快地发现空间临近聚合块;实现技术方面,将采用微软的并行模式库(parallel pattern library, PPL)^[18]实现算法的并行化,以充分利用日益先进的多核计算资源。

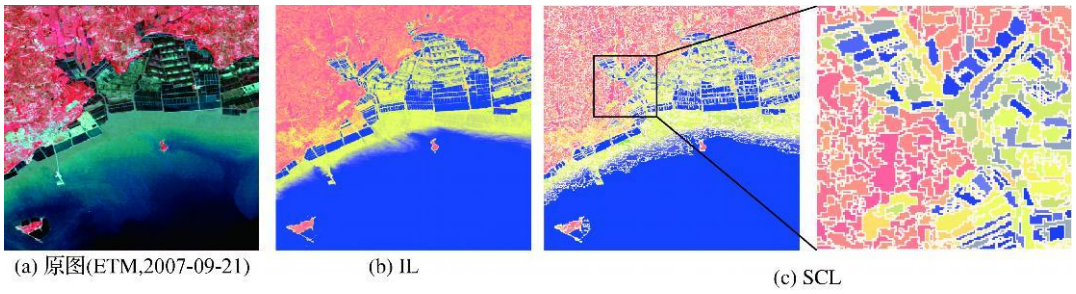
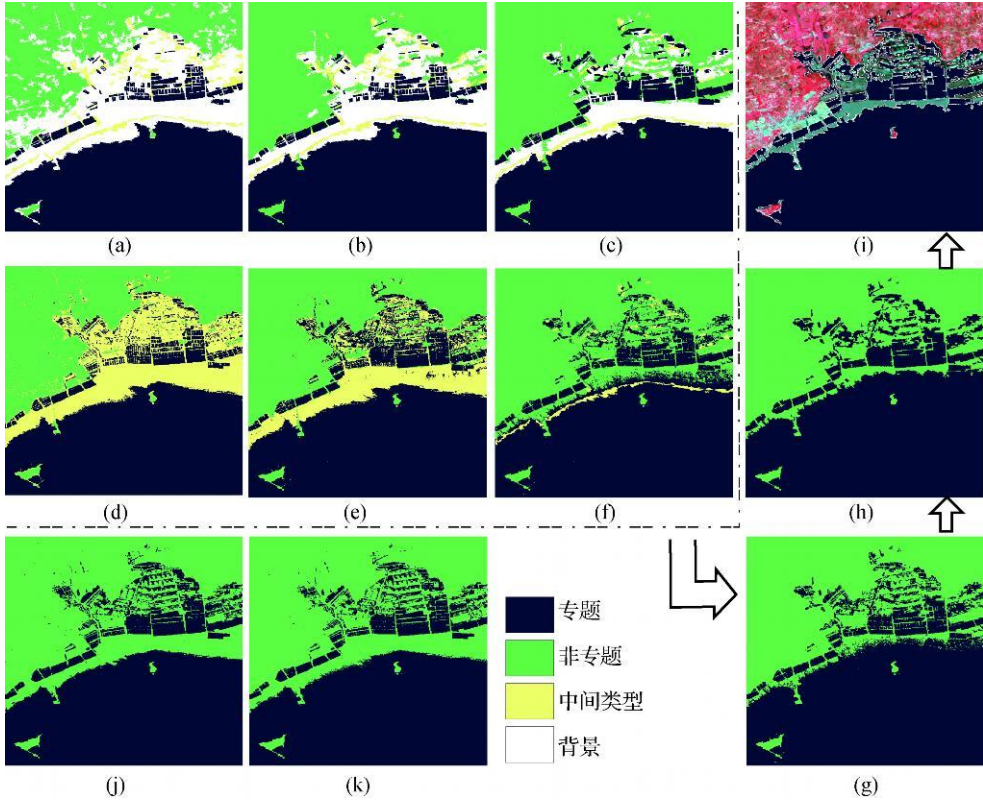


图 2 NDWI 指数图层及其空间聚合图示意

Fig. 2 The NDWI IL and its SCL



注: (a)、(b)、(c) 分别为 1 次、2 次、3 次迭代后的 SCSTL; (d)、(e)、(f) 分别为 1 次、2 次、3 次迭代后的 SML; (g) 为 WERSTP 方法提取的水体分布图(5 次迭代); (h) 为(g) 去除小版块后的专题图; (i) 为矢量化后的水体专题图; (j) 为阈值分割法水体提取结果; (k) 为监督分类法水体提取结果

图 3 WERSTP 方法试验结果及比较

Fig. 3 The experimental result of WERSTP method and comparison to other methods

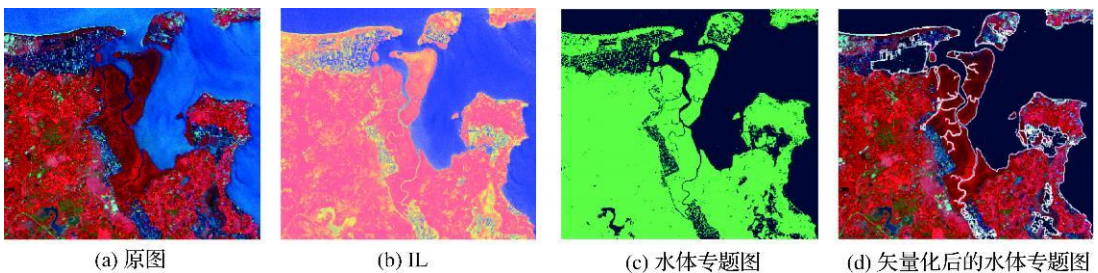


图 4 IKONOS 影像提取结果

Fig. 4 The extraction result of IKONOS image

参考文献:

- [1] 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.)
- [2] JIA Keli, CHANG Qingrui. Extracting Water Body Information Using Principal Components Analysis [J]. *Journal of Huaiyin Teachers College: Natural Science Edition*, 2006 5(3): 242-245. (贾科利, 常庆瑞. 利用主成分分析法提取水体信息[J]. *淮阴师范学院学报: 自然科学版*, 2006, 5(3): 242-245.)
- [3] CAO Kai, JIANG Nan. The Study of Automatically Extracting Water Information in City Zone Based on SPOT 5 Image [C] // *Proceedings of IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, IGARSS'02*. Denver: IEEE, 2006: 1481-1484.
- [4] YU Huan, ZHANG Shuqing, LI Xiaofeng, et al. Inland Limnetic Wetlands Water Body Extraction Using TM Imagery [J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 2008, 23(3): 310-315. (于欢, 张树清, 李晓峰, 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.)
- [5] XI Xiaoyan, SHEN Nan, LI Xiaojuan. Research of Automatic Extraction of Water Bodies on ETM+ Images [J]. *Computer Engineering and Design*, 2009, 30(4): 993-996. (席晓燕, 沈楠, 李小娟. ETM+影像水体提取方法研究[J]. *计算机工程与设计*, 2009, 30(4): 993-996.)
- [6] YI Shanzhen, WANG Zhihui. Application of Different Methods in Water Extraction by Remote Sensing Data [J]. *Infrared*, 2007, 28(4): 1-4. (易善桢, 王志辉. 不同方法在水体遥感提取中的应用实现[J]. *红外*, 2007, 28(4): 1-4.)
- [7] WANG Zhihui, YI Shanzhen. Comparison and Research on the Different Index Models Used in Water Extraction by Remote Sensing [J]. *Science Technology and Engineering*, 2007, 7(4): 534-537. (王志辉, 易善桢. 不同指数模型法在水体遥感提取中的比较研究[J]. *科学技术与工程*, 2007, 7(4): 534-537.)
- [8] LI Lin, ZHU Haihong, WANG Hong, et al. Semantic Analyses of the Fundamental Geographic Information Based on Formal Ontology: Exemplifying Hydrological Category [J]. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 2008, 37(2): 230-242. (李霖, 朱海红, 王红, 等. 基于形式本体的基础地理信息语义分析: 以陆地水系要素类为例[J]. *测绘学报*, 2008, 37(2): 230-242.)
- [9] LUO Jiancheng, SHENG Yongwei, SHEN Zhanfeng, et al. Automatic and High-precise Extraction for Water Information from Multispectral Images with the Step-by-step Iterative Transformation Mechanism [J]. *Journal of Remote Sensing*, 2009, 13(4): 604-615.
- [10] WANG Jindi, ZHANG Lixin, LIU Qinhuo, et al. *The Spectrum Knowledge Base for Typical Objects in China* [M]. Beijing: Science Press, 2009. (王锦地, 张立新, 柳钦火, 等. *中国典型地物波谱知识库* [M]. 北京: 科学出版社, 2009.)
- [11] GAO B C. NDWI: A Normalized Difference Water Index for Remote Sensing of Vegetation Liquid Water from Space [J]. *Remote Sensing of Environment*, 1996, 58: 257-266.
- [12] SHEN Zhanfeng, LUO Jiancheng, HU Xiaodong, et al. A Mean Shift Multi-scale Segmentation for High-resolution Remote Sensing Images [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2010, 35(3): 313-316. (沈占锋, 骆剑承, 胡晓东, 等. 高分辨率遥感多尺度均值漂移分割算法研究[J]. *武汉大学学报: 信息科学版*, 2010, 35(3): 313-316.)
- [13] MING Dongping, WANG Qun, YANG Jianyu. Spatial Scale of Remote Sensing Image and Selection of Optimal Spatial Resolution [J]. *Journal of Remote Sensing*, 2008, 12(4): 529-537. (明冬萍, 王群, 杨建宇. 遥感影像空间尺度特性与最佳空间分辨率选择[J]. *遥感学报*, 2008, 12(4): 529-537.)
- [14] KONG Bin. A Fast Connected Component Analysis Algorithm and Its Implementation [J]. *PR & AI*, 2003, 16(1): 110-115. (孔斌. 快速连通域分析算法及其实现[J]. *模式识别与人工智能*, 2003, 16(1): 110-115.)
- [15] LUO Jiancheng, MING Dongping, SHEN Zhanfeng, et al. Multi-scale Information Extraction from High Resolution Remote Sensing Imagery and Region Partition Methods Based on GMRF-SVM [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2007, 28(15): 3395-3412.
- [16] LIU H, JEZEK K C. Automated Extraction of Coastline from Satellite Imagery by Integrating Canny Edge Detection and Locally Adaptive Thresholding Methods [J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2004, 25(5): 937-958.
- [17] PAUL S F, KENNETH J P. Water Body Detection and Delineation with Landsat TM Data [J]. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 2000, 66(12): 1461-1467.
- [18] Microsoft Visual Studio 2010. Parallel Patterns Library (PPL) [EB/OL]. [2010-07-20] <http://msdn.microsoft.com/en-us/library/dd492418.aspx>.

(责任编辑:雷秀丽)

收稿日期: 2010-08-25

修回日期: 2010-11-19

第一作者简介: 胡晓东(1982—), 男, 博士生, 主要研究方向为遥感信息提取及其自适应计算。

First author: HU Xiaodong (1982—), male, PhD candidate, majors in remote sensing information extraction and its adaptive computing methods.

E-mail: mydome@gmail.com