

分步迭代的多光谱遥感水体信息高精度自动提取

骆剑承¹, 盛永伟², 沈占锋¹, 李均力³, 郜丽静¹

1. 中国科学院 遥感应用研究所, 北京 100101;

2. 美国加州大学洛杉矶分校(UCLA) 地理系, CA90095-1524;

3. 中国科学院 新疆生态与地理研究所, 乌鲁木齐 830011

摘要: 以 LANDSAT 卫星遥感数据为信息源, 在归一化差异水指数(NDWI)计算的基础上, 采用“全域—局部”的分步迭代空间尺度转换机制, 将全域分割、全域分类、局部分割与分类等计算过程有机地结合起来, 分阶段地融合了水体信息提取所需的不同层次知识, 并建立迭代算法实现了水体最佳边缘的逐步逼近, 获得了高精度的水体信息提取。通过对青藏高原试验区湖泊信息提取的实验表明, 该方法除了能够实现复杂多样的水体信息进行高精度自动提取外, 还可有效避免与阴影等信息的混淆。

关键词: 分步迭代, 水体, 信息提取, 面向对象

中图分类号: TP751

文献标识码: A

1 引言

遥感信息提取是在定性和定量化地学模型基础上, 建立与目标相对应的数据间映射关系, 导出地物的物理量、识别目标及其空间分布的过程(周成虎等, 2003)。遥感信息提取的主要对象是针对陆地表层系统中的各类自然和人文要素, 水体是其中主要自然要素之一, 具体表现为湖泊、河流、湿地等形态。通过遥感手段对水体信息进行监测, 主要应用于水资源调查和自然灾害评估等领域中(Borton, 1989; 陆家驹 & 李士鸿, 1992; Zhou 等, 2000); 另外, 水体的形成与消失、扩张与收缩及其引起的生态环境的演化过程是全球的、区域的和局部的构造和气候事件共同作用的结果(柯长青, 2004), 水体遥感信息动态变化监测也是获得揭示全球生态环境演变规律的重要因子的核心技术手段。

由于水体和陆地对太阳辐射的反射、吸收和透射特性的不同, 在遥感影像上的差异也比较明显, 水陆界线相对比较清楚, 因此对于水体遥感提取的研究开展较早, 其应用水平也比较深入。一般水体信息提取模型可直接通过水体的波谱特性和成像机

理建立, 在 AVHRR 等中低尺度影像中已获得了很好的效果(盛永伟等, 1994; 周成虎等, 1996; 杜云艳 & 周成虎, 1998; 杨存建等, 1998); 后来逐渐引入了纹理、形态等多种特征, 采用阈值分割、边缘提取、决策树、神经网络等图像分割和分类算法, 实现了对中高分辨率影像水体信息的有效提取(都金康等, 2001; 何智勇等, 2004; Liu 等, 2004); 针对水体在 AVHRR、TM 等多光谱遥感数据上的波谱特性, 提出并发展了多种水体指数, 其中 McFeeters(1996)提出的归一化差异水体指数(NDWI), OUMA 等结合 TC 变换的湿度指数进一步发展了一种新的水体指数 WI(Gao, 1996), 徐涵秋(2005)也通过修正波段组合提出了改进的归一化差异水体指数(MNDWI), 这些指数定量地描述了水体信息在影像上的表现特征, 同时也可有效地与阴影等信息进行区分。

上述水体信息提取方法大多是建立在统一的模型基础上实施的, 是通过对全域影像的一体化计算过程, 获得整体上的水体信息与背景的分隔。然而, 在实际应用中, 在同一幅影像上, 不同水体单元各自物理化学特征或因周边环境差异会造成其成像特征并不一定能保持均衡, 如果再采用全域的统一模型来提取各个水体单元, 与精确提取的目标就

收稿日期: 2007-11-08; 修订日期: 2008-11-19

基金项目: 国家自然科学基金项目(编号: 40871203, 40601057)和国家“863”计划项目(编号: 2007AA12Z141, 2009AA12Z123)。

第一作者简介: 骆剑承(1970—), 男, 研究员。主要研究方向为遥感影像信息提取与地学计算, 发表学术论文 100 余篇, 合作出版著作 3 部, E-mail: luojc@irsa.ac.cn。

会有一些差距。比如，在 Landsat 卫星影像上，青藏高原湖泊广为分布，虽然其成像条件好，湖泊表现清晰，但是由于湖泊内部或者湖泊之间盐度成分差异大，类型多样(冰川湖、火山湖、溶蚀湖等均有分布)，加之山地阴影的影响，水体在图像上表现出了极大的光谱差异，如何进行湖泊信息自动提取并进而实现对湖泊演化过程的精确监测，成为了开展高原湖泊遥感监测研究的难点。本文依据遥感地学分析分层分类理论，提出了“全域—局部”迭代转换的信息提取方法，实现了全域分割分类和局部分割分类的迭代算法，并以高原湖泊信息提取为试验，实现了高精度水体信息的自动提取。

2 “全域—局部”的分步迭代方法

区域分异的客观规律是多层次的，分层分类是遥感地学分析的重要方法之一，根据景观分异的树状结构模式对景物总体结构进行逐级分层次分类，按总体结构特征建立分类标志，对每一层次设计相应的分类决策规则，对影像中的单元进行逐层的判别分类(陈述彭, 1997)。在分层分类方法中，不同层次尺度选择与转换问题是其中的关键。在对一幅影像进行信息提取时，不同尺度的选择会导致最终的信息提取精细结果的不同。如何根据不同成像条件、不同提取目标及不同环境影响等因素，选择合适的尺度进行影像信息单元的提取，并在这些单元的特征提取基础上进行单元分析与地物属性的判定，直接关系到遥感影像信息提取的准确率。实际上，不同空间尺度对应了不同层次知识的融合。因此，分层分类的影像分析与信息提取必须建立一个合理的尺度转换模型，根据用户的需要进行对不同层次单元的合并与转换，开展尺度空间上的单元分析，从粗到细地逐步实现高精度信息提取，这也是目前面向对象的遥感影像信息提取与目标识别研究的重要内容。

根据以上尺度转换的分层分类的思想，针对高精度专题信息自动提取的目标，提出了“全域—局部”双重尺度转换的技术体系，并以陆地卫星为遥感数据源，采用迭代计算方法实现了水陆边界的高精度逐步逼近的提取工作。图 1 描述了整个面向水体信息提取的“全域—局部”迭代转换方法体系。

整个方法体系包含了水体指数计算、全域信息提取、局部区域选择、局部信息提取等相互衔接的过程。首先，在原始遥感数据基础上，通过计算归一化差异水体指数(NDWI)获得对全域水体的定量化

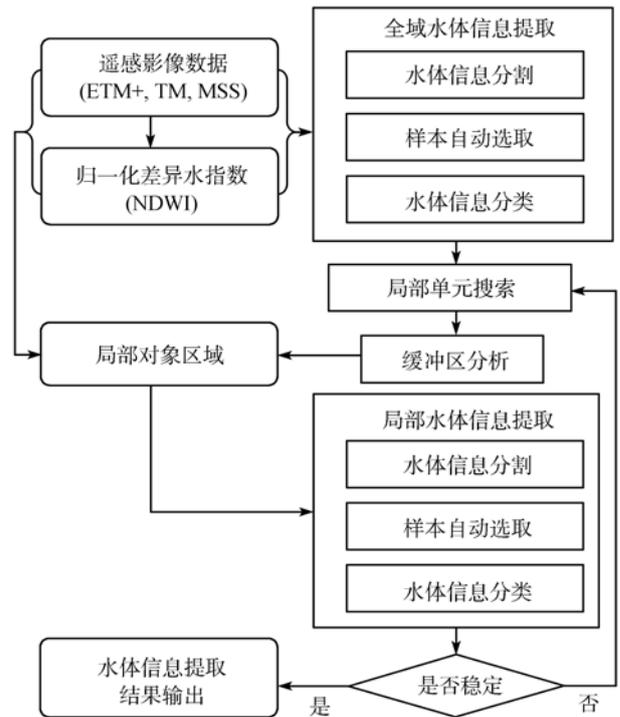


图 1 面向水体信息提取“全域—局部”迭代转换方法

增强信息；第 2 步，对 NDWI 数据进行分割，初步获得水体与陆地的分离，然后在分割图像上进行水体与陆地样本信息的自动选择，加入更多图像波段，采用分类器进行图像分类，获得全域范围水体信息的提取；第 3 步，在全域水体信息提取的基础上，通过对水体单元进行搜索获得工作单元的局部空间位置，并通过对各个单元进行缓冲区分析，选择确定局部信息提取的各个区域；最后，在各个局部区域内，不断迭代重复图像分割和分类的过程，逐步实现对精细提取结果的逼近。

3 具体算法实现

根据“全域—局部”迭代转换机制，我们在自主研发的遥感信息提取与目标识别软件平台(TARIES)的支持下，针对陆地卫星遥感数据资源(ETM, TM, MSS)的特点，采用 Visual C++开发完成了面向水体自动提取的原型系统，其中所采用的方法体系中各个主要部分的具体算法的实现如下。

3.1 水体指数计算

在光学遥感中，水体对太阳光具有很强的吸收性，与其他陆地信息相比较总体上呈现出较弱的反射率；然而，水体在各个波长的波谱特性并不相同，通常从可见光到中红外波段，水体的反射逐渐减弱，

尤其在近红外和中红外波长范围内其吸收最强。根据水体的波谱特性,采用比值运算建立并发展了对水体信息进行增强的水体指数(McFeeters, 1996; Gao, 1996; 徐涵秋, 2005)。我们这里采用了其中最经典的归一化差异水体指数(NDWI),其计算公式如下:

$$NDWI = \frac{GREEN - NIR}{GREEN + NIR}$$

式中, Green 代表绿色波段; NIR 代表近红外波段。在 Landsat 影像中,分别对应了 2 和 4 波段。NDWI 的计算,抑制了陆地植被等信息而突出了水体信息,同时可有效与阴影等信息进行区隔。另外,在 NDWI 计算过程中,统一对 NDWI 数值进行了拉伸,可使不同传感器、不同成像条件的影像也可获得具有可比较的、相近统计特性的 NDWI 影像波段,便于后续建立统一的信息提取模型。

3.2 全域水体信息提取

全域水体信息提取是在最大影像尺度上通过对 NDWI 影像分割和多波段图像分类两个过程实现对整体影像中水体与陆地的初步分离。为了说明整个“全域—局部”转换体系中各个算法有机衔接而体现的高精度和自动化,这里也仅采用了传统的直方图阈值分割和最大似然分类方法,在今后工作中如果采用改进的分割方法和分类方法将会得到更精确的信息提取结果(骆剑承等, 2002; 王晶等, 2006)。

3.3 局部区域搜索与选择

在全域水体信息提取基础上,重新建立局部提取模型对各个水体单元进行更精细的描述。在进行局部水体信息提取之前,必须在全域范围内对各个对象进行搜索并确定各个局部对象信息处理的工作区域。最简单的局部区域选择方式是单元多边形的最小外接矩形,但是由于多边形形态复杂或者多边形之间犬牙交错等因素,使得作用区域内单元内外范围不均或者单元之间相互干扰,会在一定程度上带来局部提取模型的不确定性,从而影响了局部区域信息提取的精度。采用了缓冲区分析的方法进行局部区域的搜索与选择(图 2),具体算法如下:

水体像元搜索:在全域水体信息提取图像(包含水和背景的二值图像)上,自上而下搜索水体像元,直到找到像元点 $W(i, j)$ 为水体像元;

水体单元搜索:从 W 点开始进行区域填充,直到将包含 W 点的水体单元 O 全部搜索到;

水体单元的缓冲区分析:对 O 进行数学形态学的多次膨胀,并在膨胀过程中跳过外围水体像

元,当膨胀面积等于(或者略大于) O 的面积时停止,从而得到 O 的局域信息提取的工作区域 A ;

不断重复 — ,直到找到区域图像的所有局域区域(图 2 为矢量化局域区域的实例)。

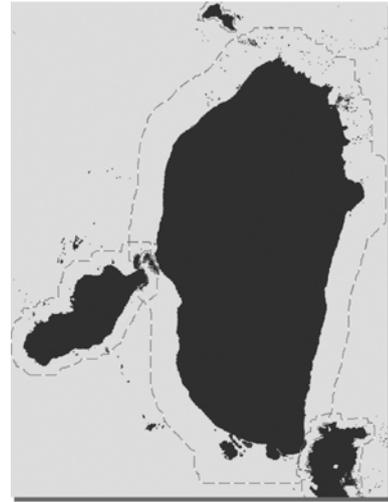


图 2 局部区域搜索与选择示例

3.4 局部水体信息提取

通过对全域图像的分解,得到局部信息提取的工作区域,再开展局部水体信息的精确提取。在局部工作区域内,由于水体与陆地的范围大致均匀,同时该单元的水体也不受周围其他水体的干扰,数据统计特性更为单纯,从而降低了局部提取模型的不确定性。在局部水体信息提取模型中,采用迭代计算方法实现了局部水陆边界的精确逼近,具体算法如下:

局域水体分割:在水体单元 O 的工作区域 A 内,基于 NDWI 进行直方图阈值分割;

局域样本选取:根据阈值点选取水陆样本,使得样本的选取遵循直方图特性。记录各个样本的位置,得到样本点集 P ;根据 P ,加入更多图像波段,读出与各个样本点相对应的像元点灰度向量,得到样本集合 S ;

局域水体分类:在样本集 S 基础上,分别建立水体和陆地的最大似然函数,逐步计算区域 A 内各个像元点的类别归属,得到工作区域内水体与陆地的分类图像 I ;

迭代计算:重复对工作区域 A 进行单元搜索、分割以及分类等处理,判断新生成的图像 I' 与 I 之间的变化关系,如果趋于稳定则停止;

对各个工作区域进行组合归并,重新得到全域水体信息提取图像。

4 试验及结果分析

本文试验选择了利用 Landsat 影像进行青藏高原湖泊的信息提取。青藏高原平均海拔 5000m, 素有“世界屋脊”之称, 分布着地球上海拔最高、数量最多、面积最大的高原湖群。据统计, 仅青藏高原面积大于 1.0km² 的湖泊就有 1091 个, 总面积约 44993.3km², 约占全国湖泊总面积的 49.4%。青藏高原湖泊不仅是其水循环的关键因子, 也是生态环境的重要要素, 湖泊变化则是气候变化敏感的指示器。在全球气候变暖的影响下, 对气候反应敏感的冰川和冻土在退缩和融化, 青藏高原的湖泊也有明显的响应。中国其他地区重要的内陆湖泊的变化通常受人类活动影响较大, 而位于青藏高原的高原湖泊多处于自然状态, 受人类活动影响较小, 能够较真实地反映气候状况。因此, 开展青藏高原的湖泊变化研究对研究全球气候变化和可持续发展具有重要的意义(朱大岗等, 2007)。

但是, 青藏高原高寒缺氧, 自然环境恶劣, 交通条件很差, 给数据采集和实地调查工作带来很大困难, 很多地点因人无法到达而影响了调查的精度。因此, 卫星遥感技术是探测湖泊动态变化的必不可少的技术手段(Ouma & Tateish, 2006; 鲁安新等, 2006)。30 多年来, 美国 Landsat 卫星已经多次覆盖了整个高原区域, 积累了大量的影像数据资料并通过信息网络为研究者共享, 同时源源不断的对地观测系统获得的数据资料正在迅猛增长, 不断为青藏高原湖泊动态监测提供良好的数据资源。青藏高原幅员辽阔, 地形复杂, 湖泊类型丰富, 给遥感信息

提取工作带来了极大的困难, 自动化、高精度信息提取是进行高原湖泊动态监测的工作基础。我们分别在三期覆盖青藏高原的 Landsat 影像数据中选择了 3 个整景的典型影像(1977-03-06 的 MSS 影像、1994-10-24 的 TM 影像和 2000-12-19 的 ETM 影像)作为实验数据, 利用我们提出并开发的方法和软件平台进行了具体的试验工作, 获得了湖泊信息提取的结果。

图 3 的 MSS 影像中是一个盐湖, NDWI 计算后得到了相对均匀的水体信息, 通过模糊分割基本获得了水陆分离, 但在靠近岸边的一些区域上存在误分, 进一步加入多个波段进行全域分类后, 提高了分类精度, 但仍存在一些噪声, 再在局部工作区域内重复迭代地分割和分类, 获得了高精度的提取结果。

进一步的实验包括 1994-10-24 的 TM 影像和 2000-12-19 的 ETM 影像, 实验的 TM 影像是一个部分结冰的淡水湖泊, NDWI 计算后可看出其多层分布, 所以在阈值分割中, 由于所得到的阈值是全域作用的结果, 很难与局部最佳阈值匹配, 多波段分类虽然提高了分类效果, 但在冰区仍然明显地存在误差, 而通过局部提取后, 就得到了比较完整的水体单元; 图 4 中, 实验的 ETM 影像, 存在两个冰湖, 同时提取还受附近山体阴影影响, 而通过 NDWI 就可有效避免与阴影的混淆, 同样经过全域到局部的提取过程, 得到了水陆分界清晰的提取结果。

图 4 为整景 ETM 影像数据及其水体信息提取的实例, 可以看出, 通过提取可以有效得到整个影像上水体信息的精确分布。

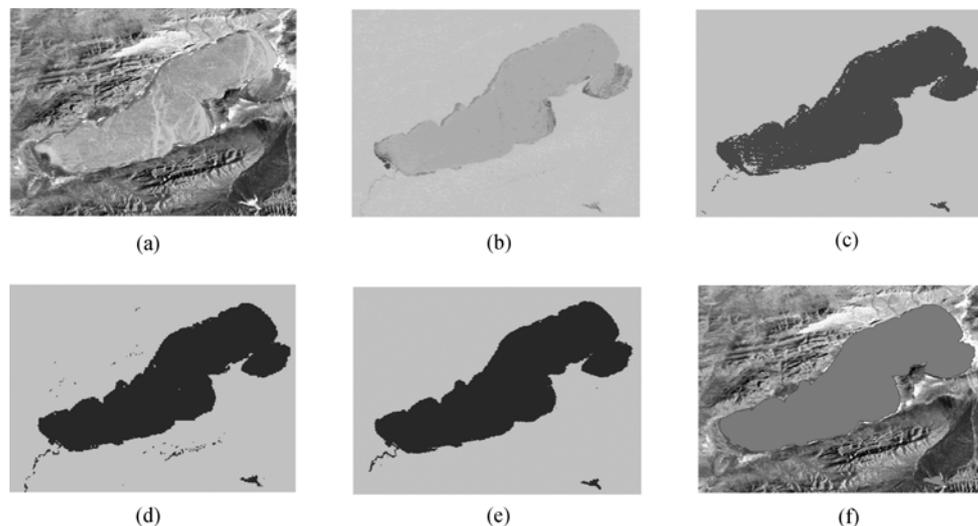


图 3 MSS 影像(1977-03-06)局部水体信息提取试验

(a) MSS 影像(4, 3, 1 合成); (b) NDWI 指数; (c) 全域直方图分割结果; (d) 全域分类结果; (e) 局部分类结果(5 次迭代); (f) 矢量化水体单元

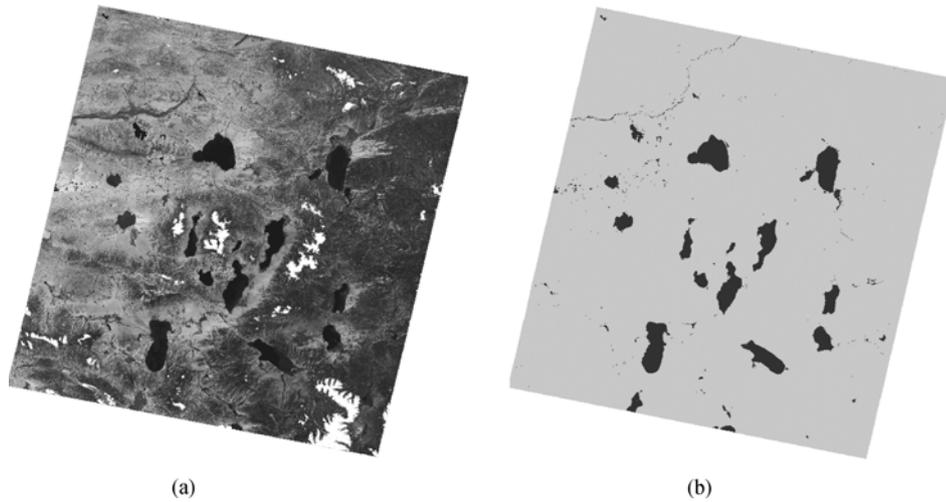


图4 整景 ETM 影像(2001-06-13)水体信息提取结果
(a) ETM 全景图像(4, 3, 1 合成); (b) 水体信息提取结果

进一步通过测试样本对方法中涉及的各个步骤所得到的信息提取结果进行精度测试。测试影像为 2000-12-19 的 ETM 影像。测试样本是通过目视过程从影像上选取的, 包含了内湖区、水陆交错区、平坦陆地、山区等区域, 充分考虑了影像中的各种地貌类型, 包含了 710 个水体样本和 616 个陆地样本。从表 1 中可以看出, 采用水体指数可以大幅度提高分类精度, 随着转换过程的尺度细化, 精度得到了提高, 说明从全域到局部的转换过程中, 随着不同层次知识的逐步融合、统计模型的纯化, 水陆分离的精确程度得到了有效地提高。

表 1 每个步骤的分类精度测试列表

测试 步骤	水体		陆地		测试精度 /%
	正确	误分	正确	误分	
全域分割 (第 4 波段)	412	298	525	91	70.66
全域分割 (水体指数)	556	154	610	6	87.93
全域分类	639	71	582	34	92.08
局域分割分类 (无迭代)	701	9	585	31	96.98
局域分割分类 (5 次迭代)	707	3	590	26	97.81

在计算效率方面, 如果一个组合型计算过程仅仅是把分割、分类等算法进行简单排列, 相对于每一步骤, 整个方法的计算性能会受到极大影响。本方法采用的“全域—局部”思想则通过“像素级”到“对象级”的转换有效避免计算效率的降低。在“全域”层面上, 采用了指数计算、直方图分割等“像素级”计算方法, 相对神经网络等复杂映射方法, 其精度虽然不能保障但计算效率高; 在“局部”

层面上, 则通过“对象化”转换过程将计算作用范围缩小到了有限区域内, 在整体上可保证其计算效能得到优化。因此, 相对于传统的整体性信息提取方法, 本方法在提高精度的同时也有效控制了计算效率下降的问题。

5 结 论

本文针对复杂多变、类型各异的专题信息提取问题, 提出了“全域—局部”分步迭代的精确提取模型, 并以 Landsat 为遥感数据源, 以高原湖泊信息提取为实验, 将水体指数计算、全域分割、全域分类、局部分割分类等计算过程有机地结合起来, 通过迭代计算方法实现了水陆边界的逐步优化区分, 获得了高精度的信息提取结果。从整个方法体系中, 可以看出, 从全域到局部的逐渐转换过程中, 除了水体指数这一从专题信息机理中总结得到的基础知识作为基本输入, 其他是在而后每一步骤中通过各类信息的自动融合所实现, 不需要进行任何样本采集、参数输入或其他人工干预工作, 从而初步达到了自动化信息提取的目标。

本文所描述的算法和试验中, 为了说明整个“全域—局部”转换模型的有效性, 在每一步骤都采用了简洁或经典的计算工具, 比如 NDWI 计算、阈值分割、最大似然分类等。事实上这些可以用更为合理、更有针对性、更加有效的算法替代, 可进一步提高整个方法体系的自动化程度和信息提取精度。另外, 除了面向水体信息的提取外, 该方法也可以推广到植被、荒漠、湿地等专题信息的精确提取, 值得在今后研究工作中逐步深入。

REFERENCES

- Borton I J. 1989. Monitoring floods with AVHRR. *Remote Sensing of Environment*, **30**(1): 89—94
- Chen S P. 1997. Time-space dimensions of remote sensing geo-analysis. *Journal of Remote Sensing*, **1**(3): 161—171
- Du J K, Huang Y S, Feng X Z and Wang Z L. 2001. Study on water bodies extraction and classification from SPOT Image. *Journal of Remote Sensing*, **5**(3): 214—219
- Du Y Y and Zhou C H. 1998. Automatically extracting remote sensing information for water bodies. *Journal of Remote Sensing*, **2**(4): 264—269
- Gao B C. 1996. NDWI-a normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space. *Remote Sensing of Environment*, **58**: 257—266
- He Z Y, Zhang X C, Huang Z C and Jiang H X. 2004. A water extraction technique based on high-spatial remote sensing images. *Journal of Zhejiang University*, **31**(6): 701—707
- Ke C Q. 2004. A review of monitoring lake environment change by means of remote sensing. *Transaction of Oceanology and Limnology*, **23**(4): 81—86
- LIU H and JEZEK K C. 2004. Automated extraction of coastline from satellite imagery by integrating canny edge detection and locally adaptive thresholding methods. *International Journal of Remote Sensing*, **25**(5): 937—958
- Lu A X, Wang L H and Yao T D. 2006. The study of Yamzho Lake and Chencuo Lake variation using remote sensing in Tibet Plateau from 1970 to 2000. *Remote Sensing Technology and Application*, **21**(3): 173—177
- Lu J J and Li S H. 1992. Improvement of the techniques for distinguishing water bodies from TM data. *Journal of Remote Sensing*, **7**(1): 17—23
- Luo J C, Wang Q M, Ma J H, Liang Y and Zhou C H. 2002. The EM-based maximum likelihood classifier for remotely sensed data. *Acta Geodaetica Et Cartographica Sinica*, **31**(3): 234—239
- McFeeters S K. 1996. The use of normalized difference water index (NDWI) in the delineation of open water features. *International Journal of Remote Sensing*, **17**(7): 1425—1432
- Ouma Y O and Tateishi R. 2006. A water index for rapid mapping of shoreline changes of Five East African Rift Valley Lakes: an empirical analysis using landsat TM and ETM+ data. *International Journal of Remote Sensing*, **27**(15): 3153—3181
- Sheng Y W and Xiao Q G. 1994. Water-body identification in cloud-contaminated NOAA/AVHRR image. *Environmental Remote Sensing*, **9**(4): 247—255
- Wang J, Pei T, Luo J C and Zhang Y N. 2006. A novel fuzzy thresholding method based on real-coded genetic algorithm. *Computer Application and Software*, **23**(11): 11—17
- Wu H Z, Jiang Q G and Cheng B. 2007. Study of dynamic changes of lakes in qinghai-tibet plateau based on remote sensing and GIS. *Global Geology*, **26**(1): 66—70
- Xu H Q. 2005. A study on information extraction of water body with the modified normalized difference water index (MNDWI). *Journal of Remote Sensing*, **9**(5): 589—595
- Yang C J and Xu M. 1998. Study on the water-body extraction methods of remote sensing information mechanism. *Geographic research*, **17**(add.): 86—89
- Zhou C H, Du Y Y and Luo J C. 1996. A description model based on knowledge for automatically recognizing water from NOAA/AVHRR. *Journal of Natural Disasters*, **5**(3): 100—108
- Zhou C H, Luo J C, Yang C J, Li B L and Wang S X. 2000. Flood monitoring using multi-temporal AVHRR and Radarsat imagery. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, **66**(5): 633—638
- Zhou C H, Luo J C, Yang X M and Yang C J. 2003. Geo-understanding and Analysis in Remote Sensing Image. Beijing: Science Press
- Zhu D G, Meng X G, Zheng D X, Qiao Z J, Shao Z G, Yang C B, Han J E, Yu J, Meng Q W and Lu R P. 2007. Change of rivers and lakes on the qinghai-Tibet Plateau in the past 25 years and their influence factors. *Geological Bulletin of China*, **26**(1): 22—30

附中文参考文献

- 陈述彭. 1997. 遥感地学分析的时空维. *遥感学报*, **1**(3): 161—171
- 都金康, 黄永胜, 冯学智, 王周龙. 2001. SPOT 卫星影像的水体提取方法及分类研究. *遥感学报*, **5**(3): 214—219
- 杜云艳, 周成虎. 1998. 水体的遥感信息自动提取方法研究. *遥感学报*, **2**(4): 264—269
- 何智勇, 章孝灿, 黄智才, 蒋亨显. 2004. 一种高分辨率遥感影像水体提取技术. *浙江大学学报*, **31**(6): 701—707
- 柯长青. 2004. 湖泊遥感研究进展. *海洋湖泊通报*, **23**(4): 81—86
- 鲁安新, 王丽红, 姚檀栋. 2006. 青藏高原湖泊现代变化遥感方法研究. *遥感技术与应用*, **21**(3): 173—177
- 陆家驹, 李士鸿. 1992. TM 资料水体识别技术的改进. *遥感学报*, **7**(1): 17—23
- 骆剑承, 王钦敏, 马江洪, 梁怡, 周成虎. 2002. 遥感图像最大似然分类方法的 EM 改进算法. *测绘学报*, **31**(3): 234—239
- 盛永伟, 肖乾广. 1994. 应用气象卫星识别薄云覆盖下的水体. *环境遥感*, **9**(4): 247—255
- 王晶, 裴韬, 骆剑承, 张艳宁. 2006. 结合实数编码遗传算法的模糊阈值方法. *计算机应用与软件*, **23**(11): 11—17
- 武慧智, 姜琦刚, 程彬. 2007. 基于 RS 和 GIS 技术青藏高原湖泊动态变化研究. *世界地质*, **26**(1): 66—70
- 徐涵秋. 2005. 利用改进的归一化差异水体指数(MNDWI)提取水体信息的研究. *遥感学报*, **9**(5): 589—595
- 杨存建, 徐美. 1998. 遥感信息机理的水体提取方法的探讨. *地理研究*, **17**(增刊): 86—89
- 周成虎, 杜云艳, 骆剑承. 1996. 基于知识的 AVHRR 影像的水体自动识别方法与模型研究. *自然灾害学报*, **5**(3): 100—108
- 周成虎, 骆剑承, 杨晓梅, 杨存建. 2003. 遥感影像地学理解与分析. 北京: 科学出版社
- 朱大岗, 孟宪刚, 郑达兴, 乔子江, 邵兆刚, 杨朝斌, 韩建恩, 余佳, 孟庆伟, 吕荣平. 2007. 青藏高原近 25 年来河流、湖泊的变迁及其影响因素. *地质通报*, **26**(1): 22—30