引文格式：张永合,范城城,陈明,等. 联合多源卫星遥感影像自动提取高原冰冻淡水湖泊[J]. 地理空间信息, 2025, 23(2): 78-81. doi:10. 3969/j. issn. 1672-4623.2025.02.017

联合多源卫星遥感影像自动提取高原冰冻淡水湖泊

张永合[1,2,3]，范城城[1,2,3]，陈　明[4*]，蔡济济[1,2,3]，马振玲[4]
（1. 中国科学院微小卫星创新研究院，上海 201304；2. 上海微小卫星工程中心，上海 201304；
3. 卫星数字化技术重点实验室，上海 201210；4. 上海海洋大学信息学院，上海 201306）

摘　要：利用卫星遥感影像快速准确地获取淡水湖的水体信息，对于国家淡水资源的合理利用和规划发展都有着十分重要的意义。针对高原冰冻淡水湖泊与周围地物光谱反射特性类似难以提取的问题，以扎陵湖为研究区域，基于Landsat8 OLI卫星遥感影像，选择适合高原冰冻淡水湖泊的水体指数进行湖泊提取，并作为掩膜应用于新技术试验A星（SY-01）自由曲面相机获取的冰冻淡水湖泊遥感影像，实现联合多源卫星遥感影像的冰冻淡水湖泊自动提取。结果为国产卫星应用于水利遥感领域提供了一种思路。

关键词：多源卫星遥感影像；SY-01；冰冻淡水湖；水体指数；掩膜
中图分类号：P237　　文献标志码：B　　文章编号：1672-4623（2025）02-0078-04

Automatic Extraction of Plateau Frozen Freshwater Lake Using Multiple Satellite Images

ZHANG Yonghe[1,2,3], FAN Chengcheng[1,2,3], CHEN Ming[4], CAI Jiji[1,2,3], MA Zhenling[4]
(1. Innovation Academy for Microsatellites of Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201304, China;
2. Shanghai Engineering Center for Microsatellites, Shanghai 201304, China;
3. Key Laboratory of Satellite Digital Technology, Shanghai 201210, China;
4. College of Information Technology, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China)

Abstract: Freshwater information extraction quickly and accurately using the satellite images is of great significance for the utilization and planning development of national freshwater resources. It is difficult to extract the plateau frozen freshwater on the panchromatic satellite image due to their similar spectral reflection characteristics with surrounding environment. Taking Zhaling Lake as the research area, we used the suitable water body index produced by Landsat 8 OLI satellite images to extract the lake on the image obtained by the new technology test satellite-A (SY-01), which was developed by Innovation Academy for Microsatellites of Chinese Academy of Sciences. The automatic extraction method for frozen freshwater lakes using multiple satellite images provides a way for the domestic satellite application for water resource protection.

Keywords: multiple satellite images, SY-01, frozen freshwater lake, water body index, mask

淡水是人类生活中不可缺少的一部分，如何快速准确地获取淡水湖的水体信息以及随时间季节的变化对于国家淡水资源的合理利用和规划发展都有着十分重要的意义。航天技术、传感器技术、通信技术的迅速发展推动卫星遥感技术已经进入高空间、高光谱、高时间分辨率对地观测数据获取阶段。因此利用卫星遥感影像进行淡水湖水体提取是水利遥感领域的重要应用之一。

经过国内外学者的长期研究，利用卫星影像进行水体提取已经有了较为成熟的方法，分为分类器法、自动器法（深度学习方法）及阈值法3种方法[1]。分类器法是基于支持向量机、决策树和面向对象的方法，其优势在于能够精确提取边缘部分的细小水体，SVM分类法是一种基于统计学的机器学习方法，该方法的性能与模型的设置以及参数的选取相关较大，邱凤婷等[1]提出了改进SVM分类器法的水体提取模型并应用于马哈伟利河流域进行水体提取，实验结果显示这种改进的SVM分类器法可以解决山体阴影和水田误分类的问题；决策树分类是一种监督分类方法，使用这种方法便于抑制噪声、处理图像缺失的空白值，陈静波等[2]提出了基于决策树的水体提取方法，用密度聚类方法对噪声环境下空间密度特征进行描述，解决城市水体与建筑物阴影无法准确区分的问题；面向对象法的关键是图像分割算法，将同质像元通过聚类划为同一对象，将所有像元分割成不同对象，从而实现影像

项目来源：国家重点研发计划资助项目（2022YFE0204600）；国家自然科学基金青年基金资助项目（42101443）。
第一作者简介：张永合（1977—），博士，研究员，研究方向为信息融合处理、时频多体动力学，E-mail：zhangyh@microsate.com。
通信作者：陈明（1966—），博士，教授，研究方向为海洋工程与信息、物联网、模式识别，E-mail：mchen@shou.edu.cn。

信息的提取[3]，赵文琳等[4]使用面向对象的方法对咸阳湖水体信息进行提取，实验结果表明这种方法能够在简单的操作要求下得到较高的精度。自动器法是在深度学习的基础上对水体分类，能够运用于多种场景的水体分类，但是由于采用遥感数据提取水体信息的泛化性差、适用性不强，因此并没有成熟的结论。王雪等[5]提出了一种全卷积网络模型用于水体目标的提取，实验结果表明基于神经网络的水体提取方法是可行的，能够取得比传统阈值法稍强的效果。梁泽毓等[6]突破了常规方法在传感器、分辨率、时间等因素上的限制，使得基于深度学习的水体自动提取成为可能。阈值法利用合适波段构建水体指数，选择阈值进行水体提取（详见本文的研究方法部分）。此外Meng等[7]提出改进后的拓扑自适应动态轮廓（T-Snake）模型，解决了水体提取中拓扑冲突的检测与处理困难的问题，实验结果表明这种方法能够有效提取复杂的河流边界。Zhang等[8]使用MODIS地表反射率数据作为辅助数据确定阈值进行水体提取，解决了传统方法易受周围地物不同及噪声影响的问题。总体而言，这3种方法各自适用于不同的情况，并且它们之间还具有某种程度的互补性。然而，仍然存在一些问题尚未解决。例如，寒冷季节湖泊结冰，湖面与周围地物光谱反射特性类似，湖泊边界不清晰，给湖泊的提取带来不便[10]。

针对冰冻淡水湖泊与周围地物难以区分进而难以提取的问题，本文以扎陵湖为研究区域，基于Landsat 8 OLI卫星遥感影像，选择适合高原冰冻淡水湖泊的水体指数进行湖泊提取，并作为掩膜应用于中国科学院微小卫星创新研究院研制的新技术实验A星（SY-01）搭载自由曲面相机获取的冰冻淡水湖泊遥感影像上，实现联合多源卫星遥感影像的冰冻淡水湖泊自动提取。

1　研究方法

1.1　阈值法进行水体提取

本文采用阈值法，谱间关系法（multiband spectral relationship，MSR）、归一化差异水体指数（normalized difference water index, NDWI）、修正的归一化差异水体指数（modified normalized difference water index, MNDWI）、增强型水体指数（enhanced water index, EWI）等进行波段运算，并选取合适阈值进行水体提取，再选择最优结果作为掩膜提取结冰湖泊。

MSR（式1）根据水体的原始波段和特征波段来判断边界，分析过程较为复杂且无有效手段抑制不需要的背景信息[10]；Mcfeeters等[11]为了解决谱间关系法存在的问题，提出了NDWI（式2），利用水体在可见光波段强反射，在近红外波段强吸收的特点，增强水体与其他地物之间的反差，进行水体提取，虽然能够有效抑制植被信息，但对于建筑物的分离以及薄云有一定的局限性，适用于地势平坦的区域；徐涵秋等[12]为了将水体提取应用于城市区域，提出了MNDWI（式3），选择短波红外波段与绿波段进行计算，但这种方法对阴影的影响依然较大；为了解决这个问题，闫霈等[13]提出了EWI（式4），将NDWI与MNDWI二者进行结合，选择近红外波段、短波红外波段与绿波段进行计算，计算出的指数值增大了半干涸河道与土壤、居民地的差异，适用于半干旱地区的水体提取。

$$\text{Green}+\text{Red}>\text{NIR}+\text{SWIR} \tag{1}$$

$$\text{NDWI}=\frac{(\text{Green}-\text{NIR})}{(\text{Green}+\text{NIR})} \tag{2}$$

$$\text{MNDWI}=\frac{(\text{Green}-\text{SWIR})}{(\text{Green}+\text{SWIR})} \tag{3}$$

$$\text{EWI}=\frac{(\text{Green}-\text{NIR}-\text{SWIR})}{(\text{Green}+\text{NIR}+\text{SWIR})} \tag{4}$$

式中，Green为绿色波段的反射值；Red为红色波段的反射值；NIR为近红外波段的反射值；SWIR为短波红外波段的反射值。

1.2　水体提取精度验证

为了验证利用4种水体指数进行水体提取的精度，本文利用ArcGIS软件在Landsat 8 OLI影像上进行矢量化提取水体边缘，作为水体边缘真实数据；对4种水体指数提取的水体结果利用经典的边缘检测算子Canny算子、Sobel算子、Robert算子和Prewitt算子进行水体边缘提取，然后利用矢量化真实数据与边缘提取结果建立准确度指标（式5）进行水体提取精度评价。其中，Robert算子是一阶微分边缘检测算子，通过局部交叉差分计算进行边缘检测，有着计算简单、计算量小、对细节反应敏感的特点；Prewitt算子利用像素灰度值进行差分运算来检测边缘，适合用来识别噪声较多、灰度渐变的图像；Sobel算子在Prewitt算子的基础上结合了高斯平滑和微分求导，通过增加了权重的概念，认为相邻点中距离越近的像素点对当前像素的影响越大，从而实现图像锐化并突出边缘轮廓；Canny算子是一种非微分边缘检测算子，先利用高斯滤波器去除图像噪声，再使用非最大值抑制细化边缘，最后利用双阈值对公共和弱边缘进行处理，能够有效减少边缘漏检。

$$\text{Precision}=a/i \tag{5}$$

式中，i 为矢量化真实数据中边缘像素的总个数；a 为边缘提取结果与矢量化真实数据中边缘像素位置一致的像素个数，将像素位置与标注位置相差值在0.001图片大小（高或宽）以内的偏差忽视，将他们视作在同一位置上，即允许预测边界与真实边界存在小的定位错误。

1.3 掩膜处理提取湖泊

由于冰冻淡水湖泊与周围地物光谱反射特性相似，直接对包含冰冻湖泊的遥感影像进行水体提取时会将冰冻水体附近的冻结地物当作水体进行提取，从而导致误判，因此本文将非结冰阶段的淡水湖泊提取结果作为掩膜，可以限制冰冻湖泊的范围，能够去除对冻结地物的误判，实现更高精度冰冻淡水湖泊提取。

利用阈值法提取的湖泊作为掩膜，与冰冻淡水湖泊影像相乘，得到冰冻淡水湖泊。提取的冰冻淡水湖泊内像素值保持不变，冰冻淡水湖泊外的像素值都为0，如式6所示。

$$g(x,y)=f(x,y)\times h(x,y) \tag{6}$$

式中，$f(x,y)$ 为冰冻淡水湖泊影像；$h(x,y)$ 为其他卫星提取的湖泊作为掩膜；$g(x,y)$ 为提取的冰冻淡水湖泊。

2 实验与结果分析

2.1 研究区域

扎陵湖位于青海高原玛多县西部构造凹地内，与玛多县城相距约40 km，湖东西长35 km，南北宽21.6 km，面积达526 km^2，平均水深约9 m，蓄水量为46亿m^3。湖区属于高寒地区，多年平均气温为-4℃。寒冷期漫长，10月至翌年4月的平均气温在0℃以下；夏季中的7-8月平均气温8℃左右，最高温在23 ℃左右。有3个小岛坐落在扎陵湖西南角，面积1~2 km^2，大量水鸟栖息在岛上，湖中浮游植物、鱼类资源丰富，是青海省重要的牧业基地和渔业生产基地。

2.2 实验数据

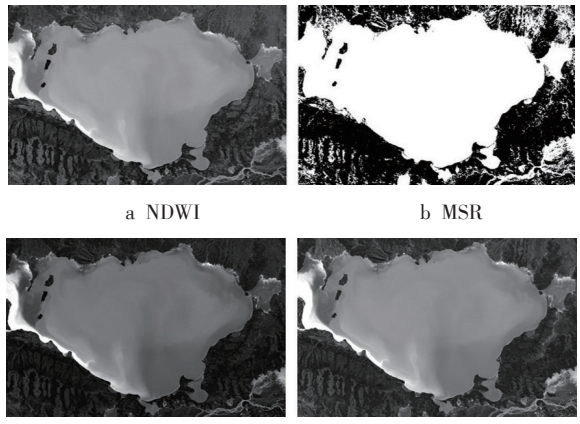
本次实验采用中国科学院微小卫星创新研究院研制的新技术实验A星（SY-01）搭载自由曲面相机于2023年4月15日4点20分获取的遥感影像以及Landsat 8 OLI卫星于2020年9月17日拍摄的扎陵湖地区的遥感影像开展实验。Landsat 8 OLI卫星影像与SY-01号卫星影像分辨率接近，前者为15 m，后者为17 m，为了减小淡水湖泊因为季节气候等原因导致的误差，避开春天（积水融化）、夏天（干旱）以及冬天（结冰），因此选择季节气候影响较小的九月份遥感影像进行掩膜提取。SY-01的自由曲面相机参数情况如表1所示。

表1. SY-01号卫星自由曲面相机参数情况

序号	名称	技术要求
1	工作波段	400~900 nm
2	幅宽	35 km×35 km@500 km
3	分辨率	17 km×17 km@500 km
4	工作温度	-20℃~40℃
5	光机形式	全铝光机
6	总质量	3±0.2 kg

2.3 实验与结果分析

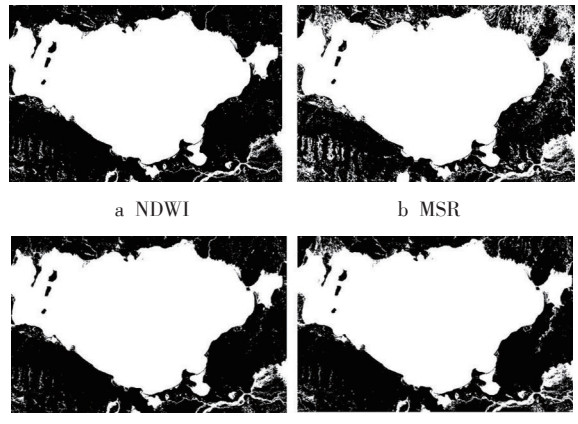
利用Landsat8OLI影像进行NDWI、MNDWI、MSR、EWI计算，结果如图1所示。



a NDWI　b MSR　c EWI　d MNDWI

图1 扎陵湖各水体指数计算结果

结合各水体指数灰度直方图，将整个值域划分为大小相同的区间（MSR进行二值化处理，因此只有2个区间），寻找水体与非水体之间斜率接近0的灰度值，确定最佳阈值，设置NDWI阈值为0.1，EWI阈值为-0.277，MNDWI阈值为0.03。根据确定的阈值对水体指数影像进行二值化处理，结果如图2所示。



a NDWI　b MSR　c EWI　d MNDWI

图2 扎陵湖各水体指数二值化影像

对4张二值化后的水体指数影像分别通过Canny算子、Sobel算子、Robert算子和Prewitt算子进行水体边缘提取，利用式（5）进行准确度评价，结果如表2、图3所示。

表2　计算得出的准确度结果

水体提取指数	Canny算子	Sobel算子	Robert算子	Prewitt算子
NDWI	0.792 7	0.780 2	0.768 9	0.780 7
MSR	0.624 9	0.608 5	0.601 2	0.600 1
EWI	0.733 8	0.719 8	0.711 2	0.720 1
MNDWI	0.653 1	0.637 7	0.630 1	0.639 1

其中Canny算子+NDWI水体指数表现最好，准确度为79.27%。相比于另外3种算子，Canny算子检测率高，只对边缘进行响应，有着定位精确、检测到的边缘与原始图像中边缘差别小的特点，由于Canny算子使用了非最大值抑制算法（抑制边缘的多次响应）和双阈值改进算法（减少边缘漏检），能够有效细化湖泊边缘，因此得到较好的水体提取结果。

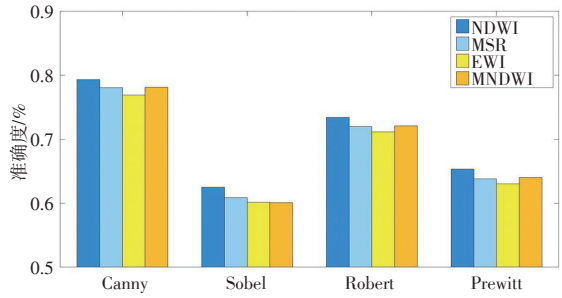


图3　4种水体提取指数结果的整体准确度对比图

因此，本文选择基于Landsat8 OLI影像的NDWI水体结果作为掩膜，用于SY-01扎陵湖影像，实现SY-01结冰湖泊的自动提取。

3　结　语

利用卫星遥感影像快速准确地获取淡水湖的水体信息，以及随时间季节的变化对于国家淡水资源的合理利用和规划发展都有着十分重要的意义。然而高原冰冻淡水湖泊与周围地物光谱反射特性类似，给卫星遥感影像提取工作带来不便，针对这个问题，本文以扎陵湖为研究区域，基于Landsat8 OLI卫星遥感影像，利用谱间关系法（multiband spectral relationship，MSR）、归一化差异水体指数（normalized difference water index，NDWI）、修正的归一化差异水体指数（modified normalized difference water index，MNDWI）、增强型水体指数（enhanced water index，EWI）等进行波段运算，并选取合适阈值进行水体提取，再选择最优结果作为掩膜应用于中国科学院微小卫星创新研究院研制的新技术试验A星（SY-01）搭载自由曲面相机获取的冰冻淡水湖泊遥感影像上，实现联合多源卫星遥感影像的冰冻淡水湖泊自动提取。结果为国产卫星应用于水利遥感领域提供了一种思路。

参考文献

[1] 邱凤婷,过志峰,张宗科,等. 基于改进SVM分类法的SAR图像水体面积提取研究[J]. 地球信息科学学报,2022,24(5):940-948

[2] 陈静波,刘顺喜,汪承义,等. 基于知识决策树的城市水体提取方法研究[J]. 遥感信息,2013,28(1):29-32

[3] 吴小娟,肖晨超,崔振营,等. “高分二号”卫星数据面向对象的海岸线提取法[J]. 航天返回与遥感2015,36(4):84-92

[4] 赵文琳,羊秀娟. 基于面向对象的咸阳湖水体提取方法研究[J]. 安徽农学通报,2018,24(16):146-149

[5] 王雪,隋立春,钟棉卿,等. 全卷积神经网络用于遥感影像水体提取[J]. 测绘通报,2018(6):41-45

[6] 梁泽毓. 基于深度学习的多源遥感水体信息提取方法及其应用研究[D]. 合肥:安徽大学,2019

[7] Meng L K, Lyu Q. Improved Orthogonal T-snake Model for Complex Water Boundary Extraction[J]. ACTA Geodaeticaet Cartographica Sinica,2015,44(6):670-677

[8] Zhang H B, Li J S, Xiang N P, et al. A Study of Extracting Water Bodies Automatically Based on the MODIS Surface Reflectance Data [J]. Remote Sensing Technology and Application,2015,30(6):1 160-1 167

[9] 王航,秦奋. 遥感影像水体提取研究综述[J]. 测绘科学,2018,43(5):23-32

[10] 颜梅春. 基于TM数据的水域变化信息提取研究[J]. 水资源保护,2005(6):35-37

[11] McFeeters S K. The Use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the Delineation of Open Water Features[J]. InternationalJournalof RemoteSensing,1996,17(7):1 425-1 432

[12] 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

[13] 闫霈,张友静,张元. 利用增强型水体指数(EWI)和GIS去噪音技术提取半干旱地区水系信息的研究[J]. 遥感信息,2007(6):62-67