

doi: 10.11830/ISSN.1000-5013.201703018



# 采用混合像元分解的水库面积 提取及变化监测

孔美美, 陈锻生

(华侨大学 计算机科学与技术学院, 福建 厦门 361021)

**摘要:** 利用 Landsat-5 TM, Landsat-7 ETM+ 和 Landsat-8 OLI 遥感影像数据和高空间分辨率(1.14, 0.54 m)的 Google Earth™ 地面实况图进行水库面积检测与变化监测的技术研究. 采用完全约束最小二乘法混合像元分解(FCLS)方法提取不同水库水体信息, 并与常用水体指数法及支持向量机(SVM)分类法进行比较, 利用多时相 FCLS 方法监测厦门杏林湾水库 2006—2014 年间的面积动态变化. 结果表明: 基于 FCLS 的方法比 NDWI 等水体指数方法更能准确地获取水库水体面积大小及其变化信息.

**关键词:** 水体面积提取; 混合像元分解; 遥感; 变化检测; 环境监测; 杏林湾水库

**中图分类号:** TP 391(257) **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-5013(2017)03-0385-06

## Reservoir Water Area Extraction and Monitoring Using Pixel Unmixing

KONG Meimei, CHEN Duansheng

(College of Computer Science and Technology, Huaqiao University, Xiamen 361021, China)

**Abstract:** We use Landsat-5 TM, Landsat-7 ETM+, and Landsat-8 OLI remote sensing images and high spatial resolution (1.14, 0.54 m) Google Earth™ ground truth images to extract surface water and detect changes of reservoir area. Using fully constrained least squares method pixel unmixing (FCLS) method to extracting different reservoir surface water information and compared with water index method and support vector machine (SVM). Finally, using multi-temporal FCLS method to dynamic monitoring Xinglin Bay Reservoir water area in Xiamen between 2006 and 2014. The experimental results showed that, compared with NDWI and other indexes method, FCLS based method can obtain more accurate dynamic information of the reservoir surface water area.

**Keywords:** water area extraction; pixel unmixing; remote sensing; change detection; environment monitoring; Xinglin Bay Reservoir

水面面积是衡量水库储水量的一个重要指标,传统人工测量方法耗时费力,而利用遥感技术能够实时、快速、准确地提取水体信息并监测水体变化. 利用遥感信息提取水体的方法可分为单波段阈值法、多波段谱间关系法、水体指数法和分类后提取法等 4 类<sup>[1-8]</sup>. 遥感影像不可避免地存在混合像元,中低分辨率影像尤为严重,而以上水体提取方法计算过程大都是以像元为单位,对于混合像元进行判断时,只能分为水体像元或非水体像元,造成较大的精度损失. 为了提高水体提取精度,本文采用完全约束最小二乘法混合像元分解(FCLS)方法<sup>[9]</sup>,结合地理信息处理软件 ENVI 5.1,使用多时相 Landsat 遥感影像和 1.14 m 高分辨率 Google Earth™ 图像提取厦门杏林湾水库水体信息,并动态监测其面积变化情况.

**收稿日期:** 2016-02-29

**通信作者:** 陈锻生(1959-),男,教授,博士,主要从事计算机视觉与多媒体技术的研究. E-mail: dschen@hqu.edu.cn.

**基金项目:** 国家自然科学基金面上资助项目(61370006);福建省科技计划(工业引导性)重点项目(2015H0025)

# 1 研究区域和数据源

## 1.1 研究区域概况

杏林湾水库处于厦门市集美风景区和杏林工业区之间,建成于 1979 年.集雨面积达 142 km<sup>2</sup>,总库容为 1 660 万 m<sup>3</sup>,受益面积可达 10 km<sup>2</sup>.杏林湾水库必要时可向市区供水,是厦门重要后备水源,也供水产养殖之用.石兜水库位于集美区西北部后溪镇的苎溪上游,集雨面积为 59.3 km<sup>2</sup>,总库容为 6 280 万 m<sup>3</sup>,正常库容为 4 550 万 m<sup>3</sup>,是厦门市最好的饮用水源.

## 1.2 Landsat 遥感影像

文中涉及的数据来源于美国地质调查局发布的研究区域 Landsat-5 TM 数据(2006 年 11 月 5 日,2008 年 11 月 10 日,2010 年 10 月 31 日),Landsat-7 ETM+数据(2012 年 11 月 13 日),Landsat-8 OLI 数据(2013 年 10 月 23 日,2014 年 12 月 29 日).Landsat 影像皆为 Level 1T 地形矫正影像,已经过系统辐射矫正和几何校正.

## 1.3 参考数据

用于精度评价的地面实况参考图像是空间分辨率为 1.14,0.54 m 的 Google Earth<sup>TM</sup> 地图数据,其 Landsat 实验数据和参考图像的成像时间基本一致,如 2014 年 12 月 29 日的 Landsat-8 OLI 影像数据对应 2014 年 12 月 30 日的 Google Earth<sup>TM</sup> 参考数据.

# 2 研究方法

## 2.1 图像预处理

影像的预处理是遥感影像信息提取的前提,使用 ENVI 5.1<sup>[10]</sup> 对实验影像进行预处理操作.具体流程,如图 1 所示.

## 2.2 水体指数法和支持向量机

实验的水体指数法包括 NDWI,MNDWI,AWEI<sub>nsh</sub>,AWEI<sub>sh</sub> 等,支持向量机<sup>[11]</sup> 选择不同的内核函数对结果有所影响.对研究区域进行不同内核函数实验,结果显示线性核函数更适合该区域.各水体指数表达式,如表 1 所示.

表 1 各水体指数表达式

Tab. 1 Expression of each water index

水体指数	表达式	文献
NDWI	$NDWI = (Green - NIR) / (Green + NIR)$	[5]
MNDWI	$MNDWI = (Green - MIR) / (Green + MIR)$	[6]
AWEI <sub>nsh</sub>	$AWEI_{nsh} = 4 \times (Green - MIR) - (0.25 \times NIR + 2.75 \times SWIR)$	[7]
AWEI <sub>sh</sub>	$AWEI_{sh} = Blue + 2.5 \times Green - 1.5 \times (NIR + MIR) - 0.25 \times SWIR$	[7]

## 2.3 纯净像元提取

选取合适的端元是混合像元分解的关键,现有的图像端元提取方法大致分为交互式端元提取和自动端元提取<sup>[12-13]</sup>.但以上方法大多是基于纯数学判据,可能选出不具有物理意义的端元.考虑到个人对杏林湾水库的熟悉度及拥有分辨率高达 1.14 m 的 Google Earth<sup>TM</sup> 地图数据,采用手动端元提取方法,结合数学形态学方法,准确提取遥感影像上的纯净像元.

## 2.4 完全约束最小二乘法混合像元分解

线性光谱分解模型是解决中低分辨率遥感图像混合像元问题的简单、有效的方法,根据混合像元的光谱是由该瞬时视场内各类地物光谱的线性组合,可表示为

$$\left. \begin{aligned} R_i &= \sum_{j=1}^n F_j R_{e,i,j} + \epsilon_i, \\ \text{s. t. } \sum_{j=1}^n F_j &= 1, \quad 0 \leq F_j \leq 1. \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式(1)中: $R_i$  为第  $i$  波段反射率; $F_j$  为第  $j$  类地物在该像元中所占百分比; $R_{e,i,j}$  为第  $i$  波段的第  $j$  类地物

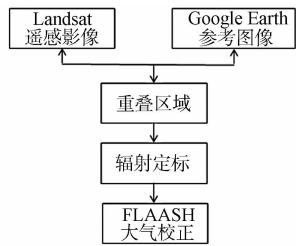


图 1 图像预处理流程图  
Fig. 1 Flow chart of image pre-processing

反射率; $\epsilon_i$  为第  $i$  波段误差. 线性混合像元分解可以看成是一个带约束的非线性最优化问题, 即

$$\begin{aligned} &\min D(\mathbf{S}, \mathbf{X}\mathbf{F}), \\ &\text{s. t. } \left. \begin{aligned} &\sum_{j=1}^n f_j = 1, \quad 0 \leq f_j \leq 1, \quad j = 1, \dots, n. \end{aligned} \right\} \end{aligned} \tag{2}$$

式(2)中: $D(\mathbf{S}, \mathbf{X}\mathbf{F})$ 为目标函数,表示目标光谱  $\mathbf{S}$  和估计光谱  $\mathbf{X}\mathbf{F}$  的某种距离;  $\mathbf{S}$  为混合像元反射光谱,  $\mathbf{S}=(s_1, s_2, \dots, s_b)^T$ ,  $b$  为光谱波段数;  $\mathbf{X}$  为  $b \times n$  矩阵,表示端元反射光谱,  $\mathbf{X}=(X_1, X_2, \dots, X_n)$ ,  $X_j$  为第  $j$  个端元的光谱;  $\mathbf{F}$  为端元丰度,  $\mathbf{F}=(f_1, f_2, \dots, f_n)^T$ ,  $n$  为端元的数目.

文献[9]在考虑高光谱图像的完全约束线性混合问题时,提出完全约束最小二乘法混合像元分解方法,该方法基于最小二乘法和子空间的正交投影(OSP). 考虑到影响水体提取精度的主要问题之一是水陆边界的混合像元,将该方法用于解决多光谱图像完全约束线性混合问题,有利于提高水库水体提取精度,更好地监测水库水面面积变化情况.

实际上,完全约束最小二乘法混合像元分解是最小化目标光谱和估计光谱的欧氏距离,即

$$\begin{aligned} &\min D(\mathbf{S}, \mathbf{X}\mathbf{F})^T (\mathbf{S} - \mathbf{X}\mathbf{F}), \\ &\text{s. t. } \left. \begin{aligned} &\sum_{j=1}^n f_j = 1, \quad 0 \leq f_j \leq 1, \quad j = 1, \dots, n. \end{aligned} \right\} \end{aligned} \tag{3}$$

利用 ENVI 5.1 软件实现 FCLS 方法提取杏林湾水库水体信息,采用 ENVI 分块技术,对于输入文件的大小没有限制,而且在每一处循环时,对分块数据进行混合像元分解和 RMS 的计算,效率最优;采用均方根误差(RMSE)对端元提取和混合像元分解结果进行精度评价. 反复多次实验,选择合适的阈值,计算提取水体的面积,统计并分析提取精度.

2.5 水库水体变化检测新方法

文献[14]采用多种水体提取方法提取乌尔米湖水体,比较得到 NDWI 水体指数法最适合该区域水体提取,并参照 NDMI-PCs 方法,提出基于多时相 NDWI 主成分分析(PCA)变化检测方法 NDWI-PCs,用于检测乌尔米湖 2000—2013 年的变化情况,达到与多时相 NDWI 检测相近的变化检测精度,但其使用的实地情况参考图是相同卫星数据源的 Landsat ETM+ 2000 和 Landsat TM 2010 的波段 4 在屏幕上进行目视判别的图像,只有相同的 30 m 的空间分辨率.

类似地,通过比较多种水体提取方法,得到 FCLS 方法最适合水库水体提取,从而考虑将 NDWI 替换为 FCLS,得到基于多时相 FCLS 的主成分分析(FCLS-PCs)方法检测杏林湾水库变化情况.

3 结果与分析

3.1 不同水体提取方法的比较分析

采用不同方法提取 2013,2014 年杏林湾水库区域水体 Landsat-8 OLI 遥感影像,对以上方法的水体提取结果进行精度评价. $\delta_r = \frac{s_c - s}{s} \times 100\%$ . 其中, $\delta_r$  为相对误差; $s_c$  为测量值; $s$  为真值,将杏林湾水库 Google Earth<sup>TM</sup> 参考图像目视解译得到的面积作为水库水面面积的真值,2013,2014 年的参考面积分别为 5.932 261,5.843 909 km<sup>2</sup>. 各方法提取水面面积的相对误差,如表 2 所示. 各方法提取结果的精度分析,如表 3 所示. 表 3 中: $\eta_{on}$  为总体精度.

表 2 各水体提取方法提取水面面积的相对误差  
Tab.2 Relative error of extracted surface water area for each water extraction method

方法	$s/\text{km}^2$		$\delta_r/\%$	
	2013 年	2014 年	2013 年	2014 年
NDWI	5.410 8	5.278 5	-8.79	-9.68
MNDWI	4.125 6	5.744 7	-30.45	-1.70
AWEI <sub>nsh</sub>	5.643 0	5.529 6	-4.88	-5.38
AWEI <sub>sh</sub>	5.773 5	5.077 8	-2.68	-13.11
SVM	5.580 0	5.439 6	-5.94	-6.92
FCLS	5.901 3	5.802 3	-0.52	-0.71

表 3 各水体提取方法提取结果精度分析

Tab. 3 Accuracy assessment analyses of each water extraction method

方法	2013 年		2014 年	
	$\eta_{\text{oa}}/\%$	Kappa 系数	$\eta_{\text{oa}}/\%$	Kappa 系数
NDWI	90.494 0	0.789 7	89.136 8	0.756 9
MNDWI	84.676 1	0.645 9	88.593 6	0.751 2
AWEI <sub>nsh</sub>	91.568 9	0.815 1	89.345 3	0.758 4
AWEI <sub>sh</sub>	91.046 0	0.805 0	88.690 6	0.750 3
SVM	91.460 4	0.812 2	90.358 9	0.785 1
FCLS	91.593 5	0.817 8	90.931 1	0.800 5

由表 3 可知:FCLS 和 SVM 的总体精度和 Kappa 系数值优于其他方法;FCLS 的总体精度为 91%左右,Kappa 系数值为 0.8 左右;FCLS 方法提取的水库水面面积相对误差为-0.52%和-0.71%,比 SVM 方法更优.综合考虑,FCLS 方法更适合于水库水体提取.

为了验证 FCLS 方法对其他水库水体提取的适应性,对厦门石兜水库 2013 年 Landsat-8 OLI 遥感影像数据进行实验.各方法提取石兜水库水体结果的精度分析,如表 4 所示.表 4 中: $E_c$ 为错分误差; $E_o$ 为漏分误差; $\eta_{\text{pa}}$ 为制图精度; $\eta_{\text{ua}}$ 为用户精度.

各水体提取结果叠加在波段 5,4,3 组成的假彩色实验图上的显示效果,如图 2 所示.

表 4 厦门石兜水库 2013 年各水体提取方法精度分析

方法	$\eta_{\text{oa}}/\%$	Kappa 系数	$E_c/\%$	$E_o/\%$	$\eta_{\text{pa}}/\%$	$\eta_{\text{ua}}/\%$
NDWI	96.170 7	0.896 4	0.45	14.21	85.79	99.55
MNDWI	93.903 0	0.829 7	0	23.25	76.75	100.00
AWEI <sub>nsh</sub>	95.904 0	0.888 8	0.49	15.20	84.80	99.51
AWEI <sub>sh</sub>	95.370 4	0.873 4	0.36	17.35	82.65	99.64
SVM	95.260 5	0.870 2	0.33	17.80	82.20	99.67
FCLS	96.249 2	0.899 1	1.13	13.32	86.68	98.87

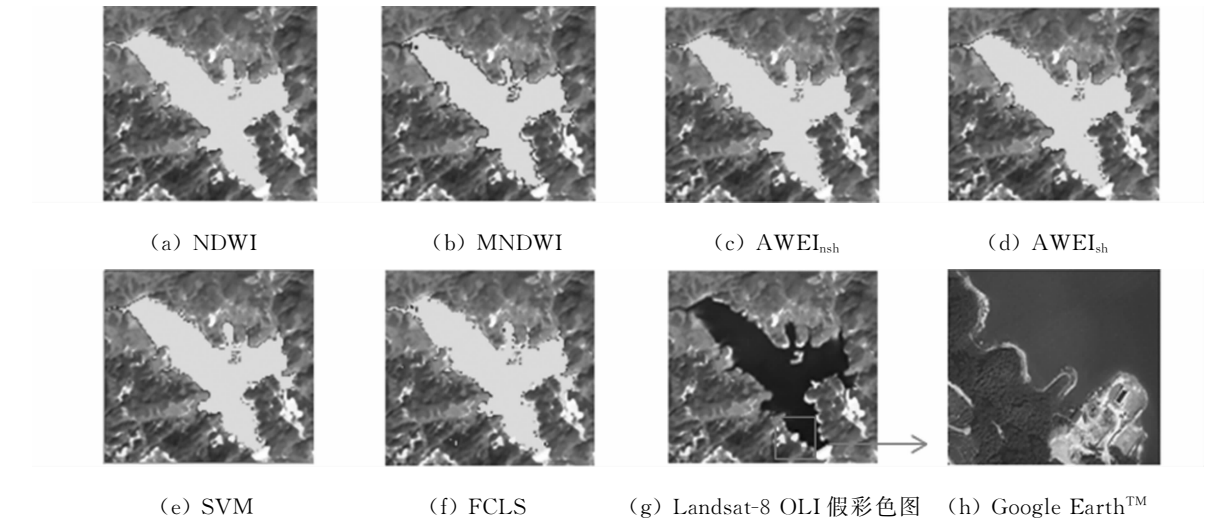


图 2 厦门石兜水库水体提取叠加图

Fig. 2 Water extraction overlay image of Xiamen Shidou Reservoir

3.2 变化检测方法的比较分析

以 2013,2014 年 Landsat-8 OLI 遥感影像为实验数据,统计多时相提取方法和 FCLS-PCs 方法的变化检测结果,并做精度、误差和不确定分析,如表 5 所示.表 5 中: $s_c$ 为变化面积; $s_{\text{axe}}$ 为绝对误差.

由表 5 可知:FCLS-PCs 方法、多时相 FCLS 方法、多时相 NDWI 方法和多时相 SVM 方法在检测水库水面面积变化方面具有优势,虽然精度都比较高,但只有 FCLS-PCs 方法和多时相 FCLS 检测水库水面面积变化的精度值在 95%以上.因此,FCLS-PCs 方法和多时相 FCLS 方法更适合检测水库水面面

积变化情况.

表 5 2013—2014 杏林湾水库水面面积变化统计及精度分析

Tab. 5 Surface water area change statistics and accuracy assessment between 2013 to 2014 Xinglin Bay Reservoir						
方法	$s_c/\text{m}^2$	$s_{axe}/\text{m}^2$	$\eta_{sa}/\%$	Kappa 系数	$\eta_{pa}/\%$	$\eta_{ua}/\%$
实况图	88 352	0	100.00	1.000 0	100.00	100.00
FCLS-PCs	98 100	9 748	98.29	0.962 7	97.38	95.30
多时相 FCLS	99 000	10 648	97.04	0.934 8	96.39	95.13
多时相 NDWI	132 300	43 948	96.88	0.927 1	96.18	93.80
多时相 MNDWI	-1 619 100	1 707 452	90.56	0.771 7	71.79	99.89
多时相 AWEI <sub>nsh</sub>	565 200	476 848	96.29	0.915 8	98.37	88.51
多时相 AWEI <sub>sh</sub>	695 700	607 348	95.75	0.901 1	96.50	92.28
多时相 SVM	140 400	52 048	96.68	0.924 6	98.21	91.84

3.3 水库面积变化动态监测及分析

选择 FCLS 方法提取 2006 年,2008 年,2010 年,2012 年,2013 年,2014 年杏林湾水库水体的 Landsat 影像数据,检测杏林湾水库 2006—2014 年水面的变化情况. FCLS 方法提取的多时相杏林湾水库水体结果图(2006—2014 年)和不同年份变化叠加图,如图 3 所示.

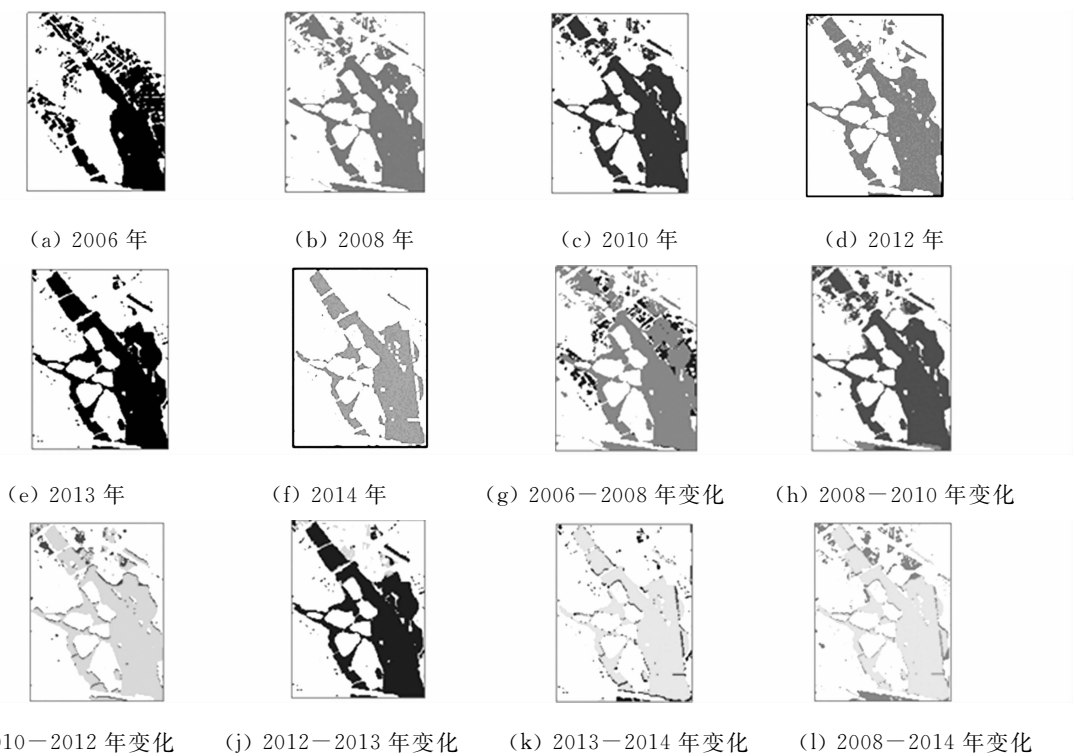


图 3 FCLS 方法提取 2006—2014 年杏林湾水库水面面积

Fig. 3 Surface water area of Xinglin Bay Reservoir between 2006 to 2014 by FCLS method

杏林湾水库 2006—2014 年的水库面积变化曲线,如图 4 所示.由图 4 可知:2006—2008 年杏林湾水库水面范围增大,水库面积大幅上升,到 2008 年水库面积增加到 5.976 9 km<sup>2</sup>;而 2008 年后水库面积开始大幅度减小,2010—2012 年水库面积变化不大,2012 年后水库面积逐年以较大幅度下降,到 2014 年水库面积减少到 5.802 3 km<sup>2</sup>,相对于 2008 年的峰值,面积减少了 0.174 6 km<sup>2</sup>.

据调查可知:2006—2008 年,杏林湾水库面积上升的主要原因是围田造湖,蓄水成景;2008—

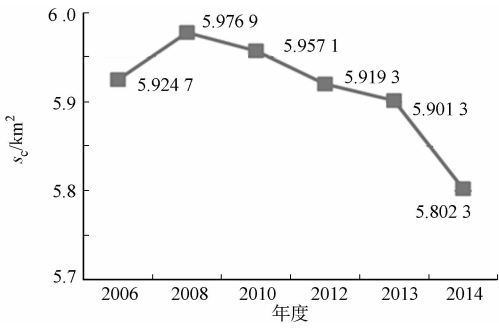


图 4 杏林湾水库面积趋势图

Fig. 4 Surface water area trend of Xinglin Bay Reservoir

2014 年,杏林湾水库面积逐年下降的主要原因是集美区经济快速发展及杏林湾地区得天独厚的地理优势,杏林湾水库周边房地产开发项目较多,工程蚕食水面不仅使杏林湾水库面积减小,还破坏了原本自然的水库景观.

3.4 水体面积提取方法的比较分析

NDWI 能有效区分裸地与水体,但对于细小水体及建筑阴影等无法正确区分. MNDWI 水体指数在 NDWI 水体指数基础上,将指数波长组合改为绿波段和中红外波段归一化比值,有利于区别建筑阴影及植被等暗色地物和水体. AWEI<sub>sh</sub> 水体指数确实有利于区分水体与阴影,但同时也将细小水体去除,且将裸地误认为水体将其提取. SVM 和 FCLS 方法基于水体等地物的波谱信息,可更好地提取水体,但获取纯净的地物波谱信息比较耗时.

4 结束语

以 Landsat TM, Landsat ETM+ 和 Landsat OLI 遥感影像为实验数据,以高空间分辨率的 Google Earth<sup>TM</sup> 地面实况图为参考数据,采用 FCLS 方法提取杏林湾水库和石兜水库的水体信息,并与常见水体指数法及 SVM 分类法进行比较,可知 FCLS 的水体提取精度高于其他方法. 此外,提出 FCLS-PCs 方法用于检测水库水体变化信息,以多时相的杏林湾水库 Landsat-8 OLI 为实验数据,对比其他多时相水体提取方法,可知 FCLS-PCs 和多时相 FCLS 方法的变化检测精度都较高,更适合于研究区域的水体表面积变化检测.

参考文献:

[1] 陆家驹,李士鸿. TM 资料水体识别技术的改进[J]. 遥感学报,1992,7(1):17-23.

[2] HORWITZ H M, NALEPKA R F, HYDE P D, *et al.* Estimating the proportions of objects within a single resolution element of a multispectral scanner[C]//7th International Symposium on Remote Sensing of Environment. Michigan: [s. n. ],1971:1307-1320.

[3] HARALICK R M, WANG S, SHAPIRO L G, *et al.* Extraction of drainage networks by using the consistent labeling technique[J]. Remote Sensing of Environment,1985,18(2):163-175.

[4] 刘建国. 陆地卫星 MSS 图像地表水域信息的机助识别提取[J]. 遥感学报,1989,4(1):19-28.

[5] MCFEETERS S K. The use of the normalized difference water index (NDWI) in the delineation of open water features[J]. International Journal of Remote Sensing,1996,17(7):1425-1432.

[6] 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.

[7] FEYISA G L, MEILBY H, FENSHOLT R, *et al.* Automated water extraction index: A new technique for surface water mapping using Landsat imagery[J]. Remote Sensing of Environment,2014,140(1):23-35.

[8] ROKNI K, AHMAD A, SELAMAT A, *et al.* Water feature extraction and change detection using multitemporal landsat imagery[J]. Remote Sensing,2014,6(5):4173-4189.

[9] HEINZ D C, CHANG C I. Fully constrained least squares linear spectral mixture analysis method for material quantification in hyperspectral imagery[J]. Geoscience and Remote Sensing,2001,39(3):529-545.

[10] ENVI-IDL. ENVI 5.1 新功能[EB/OL]. [2013-11-15]. [http://blog.sina.com.cn/s/blog\\_764b1e9d0101bol6.html](http://blog.sina.com.cn/s/blog_764b1e9d0101bol6.html).

[11] CRISTIANINI N. 支持向量机导论[M]. 李国正,译. 北京:电子工业出版社,2004:82-106.

[12] BOARDMAN J W, KRUSE F A, GREEN R O. Mapping target signatures via partial unmixing of AVIRIS data [C]//Proceedings of the JPL Airborne Earth Science Workshop. Pasadena:[s. n. ],1995:23-26.

[13] WINTER M E. N-FINDR: An algorithm for fast autonomous spectral end-member determination in hyperspectral data[C]//Proceedings of SPIE. Boston:[s. n. ],1999:266-275.

[14] PHAU M H, TSUYUKI S, SOO L J, *et al.* Simultaneous detection of burned areas of multiple fires in the tropics using multisensor remote-sensing data[J]. Int J Remote Sens,2012,33(14):4312-4333.

(责任编辑: 钱筠 英文审校: 吴逢铁)