

基于遥感数据的河冰过程解译及分析

李超,李畅游,赵水霞,冀鸿兰

(内蒙古农业大学水利与土木建筑工程学院,内蒙古 呼和浩特 010018)

摘要: 鉴于河冰的野外观测受观测技术、条件及方法的限制而无法获得大尺度、长序列的河冰过程数据,而遥感技术可有效完成复杂时空尺度海量信息的收集处理,以 Landsat8 遥感影像为数据源,通过单波段信息量比较及相关系数、信息熵和最佳指数的联合分析,得到最佳波段组合;采用监督分类的最大似然法对黄河内蒙古段三湖河口河段 2013—2014 年冬季不同时期遥感卫片数据进行解译,并对解译结果进行分析,从而获得该河段不同时期河冰的消融演变过程及特性。结果表明:应用 7、4、3 波段组合获得了较高的河冰解译精度,解译影像可以反映大尺度下冬季河冰的消融演变及输移过程,结合气象、水文等数据可以解释典型河冰现象,为河冰的理论分析及机理研究提供数据支撑。

关键词: 河冰;遥感技术;最佳波段组合;最大似然法;黄河内蒙古段

中图分类号: TV82 **文献标志码:** A **文章编号:** 1006-7647(2016)03-0052-05

Interpretation and analysis of river ice process based on remote sensing data//LI Chao, LI Changyou, ZHAO Shuixia, JI Honglan (*Water Conservancy and Civil Engineering College, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010018, China*)

Abstract: Due to the limitations of techniques, conditions, and methods for river ice field observation, it is difficult to obtain large-scale and long-sequence data regarding river ice processes. Remote sensing technology can be used to effectively collect and deal with vast amounts of complex temporal and spatial-scale information. In this study, a Landsat8 remote sensing image was used as the data source, and the optimal band combination was obtained through comparison of single-band information and joint analysis of the correlation coefficient, information entropy, and the optimal index. The maximum likelihood method of supervised classification was used to interpret and analyze the remote sensing image data from the Sanhuhekou River bend of the Inner Mongolia reach of the Yellow River over various periods in the winter of 2013 to 2014. Through analysis of the interpretation results, the growth and melting processes and characteristics of river ice over different periods in the study of the river bend were determined. The results of this study show that TM743 is the optimal band combination for interpretation of the remote sensing data, and the interpretation image can reflect the growth, melting, and transport processes of river ice at a large scale in the winter. In combination with meteorological and hydrological data, the interpretation image can explain typical river ice phenomena, providing technical support for analysis of river ice theory and mechanism studies.

Key words: river ice; remote sensing technology; optimal band combination; maximum likelihood method; Inner Mongolia reach of Yellow River

在河冰研究中,理论分析、数值模拟和历史资料的统计分析等都需要在大量野外观测数据的基础上进行,从而实现河冰过程的模拟及预报。同时,理论分析及数值模拟结果也需要野外观测数据的验证。野外观测中的河冰输移轨迹、形态、位置及演化过程等因素是影响河冰分析的关键。传统的野外观测受到观测技术、条件及方法的限制而无法获得大尺度、长序列的河冰过程数据,而遥感技术可以有效完成复杂时空尺度海量信息的收集处理,因而广泛应用于野外生态、环境等方面监测研究中^[1-3]。在冰情监测方面,遥感主要用于海冰、冰川及湖冰面积、冰量、冰厚等相关参数研究,而关于遥感在河冰方面的研究相对较少^[4-5]。传统的河冰野外观测采用目测法,往往受到目视距离、天气条件、观测位置以及交通条件等方面的制约而导致观测的精度、范围不能满足要求。同时,由于观测人员的技术水平、分析角度不

同使得观测结果受人为主观因素影响明显。因此,仅靠巡河野外观测和水文站点的观测资料无法满足冰情研究的广度和精度,更不能满足大尺度、长距离、全范围河冰监测的要求。遥感及其相关技术的发展为河冰的大尺度、系统分析提供了技术支撑^[6-7],可实现由传统的点观测拓展到河段观测,弥补了河冰野外观测尺度小、同时性差的缺陷。

受温带大陆性气候影响,加之特殊的河道走向,使黄河内蒙古段成为凌汛灾害严重而频发的地区之一。国内很多学者开展了黄河内蒙古段河冰特征及规律研究^[8-10]。Fu 等^[11]应用 YRIDM 河冰模型研究黄河宁蒙河段开河期最大过流能力。黄河内蒙古段河道东西跨度大,且河道形态、气象、水文条件多异,加之各水文站点间距较大,传统的野外观测无法在空间尺度和信息量方面满足河冰分析的需要。笔者选取黄河内蒙古段为研究区域,通过对三河湖口河段遥感影像的解译分析,为全河段河冰研究提供参考。

1 研究区概况

黄河内蒙古段河道总长约 840 km,位于黄河干流上游最北端,介于北纬 39°~41°之间,其间有石嘴山水文站(宁蒙交界)、巴彦高勒水文站、三湖口水文站、昭君坟(包头)水文站、头道拐水文站。黄河内蒙古段受内蒙古高压控制,冬季严寒而漫长,结冰期长达四五个月,纬度高的中游段气温低、冰期长;纬度低的上下游段气温高、冰期短。一般 11 月中下旬开始流凌,翌年 3 月中下旬解冻开河。封冻天数一般 100 d 左右,最长达 130 多 d,封冻期冰盖厚度平均 0.78 m,最厚 1.12 m,最薄 0.37 m。封河时,分别以下游的万家寨库尾末端和中游段包神铁路桥附近为首封点,逐段向上游封冻。下游河道因比降大、流速高,封河形态呈大块流冰堆积的立封,冰盖表面粗糙;中游河段流速小,冰盖表面光滑,封河形态多为平封,整个内蒙古段封冻长度 700 余 km。由于上游纬度低、气温高,自上游向下游开河,开河速度中游慢,下游快。

2 遥感影像的选择与获取

目前我国广泛应用的遥感图像数据主要包括美国的 Landsat TM 数据、MODIS 数据及法国的 SPOT 等卫星数据。

黄河内蒙古段河面宽为 200~800 m,受地形、水流条件影响,同一河宽上冰情并不相同。MODIS 数据虽然每天都能够获取,但其分辨率为 250 m×250 m,其精度显然不能满足野外观测要求;SPOT 卫

星数据分辨率可达 10~20 m,但其周期为 26 d,时间上不能满足要求,因此采用美国 Landsat8 传感器数据。Landsat8 携带运行陆地成像仪(OLI)和热红外传感器(TIRS)2 个主要荷载,Landsat8 上的遥感器太阳同步轨道高度 705 km,16 d 全球覆盖周期(除两极最高纬度区),每周期 233 轨,轨道倾角 98.2°,周期 98.9 min。

选取 Landsat8 轨道号为 128/32 的遥感数据,各通道影像数据信息见表 1。从表 1 可以看出 Landsat8 遥感卫片的分辨率为 30 m×30 m,波段 8 的分辨率达 15 m×15 m,其精度满足河冰解译的要求。

表 1 Landsat8 各通道的主要参数

波段号	类型	波谱范围/nm	分辨率/m
B1	深蓝色	433~453	30×30
B2	蓝色	450~515	30×30
B3	绿色	525~600	30×30
B4	红色	630~680	30×30
B5	近红外	845~885	30×30
B6	短红外 2	1 560~1 660	30×30
B7	短红外 3	2 100~2 300	30×30
B8	全色	500~680	15×15
B9	短红外	1 360~1 390	30×30
B10	热红外	10 300~11 300	100×100
B11	热红外	11 500~12 500	100×100

本文全部遥感数据从美国地质调查局 USGS 获取。Landsat8 影像 16d 获取一景,但如果影像云量过大,信息量严重缺失,不能很好地反映地物信息,因此不对其进行解译。本次解译选取的卫片天空被该卫片中所有的云遮蔽的总比例均小于 10%,影像数据时间分别为 2013 年 12 月 9 日、2014 年 1 月 10 日、2014 年 1 月 26 日、2014 年 2 月 27 日、2014 年 3 月 15 日,包含了河冰流凌期、封冻期和解冻期,能够反映河冰的变化过程及特性。

3 最佳波段组合

波段组合的选择有利于各类地物的区分。综合运用单波段信息量的比较、波段间相关系数的分析、最佳指数法和信息熵等方法^[12],对研究区域内遥感影像各波段进行最佳波段组合的计算,使得到的组合最有利于目视解译中各类地物的区分。

3.1 单波段的信息量比较

设某幅图像中某个像元的灰度值为 $A_{ij}(i=1,2,3,\dots;j=1,2,3,\dots)$,其图像大小为 $M\times N$,整幅图像的平均灰度值为 A_0 ,则标准差为

$$S = \frac{1}{MN} \sqrt{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N (A_{ij} - A_0)^2} \quad (1)$$

亮度差反映灰度值的变化程度,其大小等于最大亮度值减去最小亮度值,计算公式为

$$f_{\text{range}}(i,j)=f_{\text{max}}(i,j)-f_{\text{min}}(i,j) \quad (2)$$

图像中地物的平均反射强度为

$$f=\frac{\sum_{i=0}^{M-1}\sum_{j=0}^{N-1}f(i,j)}{MN} \quad (3)$$

式中 $f(i,j)$ 为某个像元的亮度值。

3.2 相关系数计算

为得到波段间的内在联系,需要进行相关性分析。假设 A_{mn} 、 B_{mn} 分别代表两幅大小为 $M\times N$ 的图像中某像元的灰度值, A_0 、 B_0 分别代表这两幅图像的平均灰度值,则波段间的相关系数计算式为

$$R=\frac{\sum_m\sum_n(A_{mn}-A_0)(B_{mn}-B_0)}{\sqrt{\sum_m\sum_n(A_{mn}-A_0)^2(B_{mn}-B_0)^2}} \quad (4)$$

3.3 信息熵计算

信息熵是图像的一种特征统计值,表示图像中各灰度值聚集特征所包含的信息量。根据仙农(Shannon)理论用熵来表征信息量的原理,一副8bit的图像 X 的熵为

$$H(X)=-\sum_{i=0}^{255}P_i\log_2P_i \quad (5)$$

式中 P_i 为图像像素灰度值为 i 的概率。

3.4 最佳指数计算

该方法综合考虑单波段图像的信息量及波段间的相关性,其值与波段内的标准差成正比,与波段间的相关系数成反比,它更接近于波段选择的原则。最佳指数(I_{OIF} 指数)的计算公式如下:

$$I_{\text{OIF}}=\frac{\sum_{i=1}^3S_i}{\sum_{i=1}^3|R_{ij}|} \quad (6)$$

式中: S_i 为第 i 个波段的标准差; R_{ij} 为 i,j 波段的相关系数($j=1,2,3$,且 $i\neq j$)。 I_{OIF} 指数越大,则相应组合的影像所包含的信息量就越大。根据 I_{OIF} 指数大小排序判断波段组合的优劣,最大的 I_{OIF} 指数对应的波段组合即为理论上的最佳波段组合。

通过相关系数、信息熵、 I_{OIF} 指数的验证, Landsat 8 选取了波段7、4、3进行R、G、B彩色合成。

4 冰情解译结果分析

遥感影像的分类方法有监督分类和非监督分类。监督分类将一定数量的已知样本作为训练样本,以其观测值对样本进行训练,再依据判别规则对该样本的所属类别作出判定。监督分类的常用方法有最小距离法、平行六面体法、最大似然法等,其中较为常用的方法是最大似然法。

分类后得到的初步结果还需进行一些合理的处理才能得到较为理想的结果。常用的分类后处理包括更改分类颜色、分类统计分析、聚类处理、过滤处理、分类叠加、小斑点处理等。

利用ENVI 4.7,通过监督分类中的最大似然法对2013—2014年冬季不同时期黄河内蒙古段三湖河口河段河冰冰情进行解译。解译时,首先在野外利用光谱仪采集不同形态的河冰,包括流凌、冲击冰、平滑冰、水体、滩地等的光谱值。然后根据不同形态河冰的光谱值及其位置点选定不同类型河冰的感兴趣区域;最后,根据感兴趣区域的光谱值,采用最大似然法进行不同形态河冰遥感影响分类。图1给出了2013—2014年冬季不同时期三湖河口河段河冰形态解译图。

根据野外观测,三湖河口河段于2013年11月27日开始流凌,图1(a)(b)分别给出了流凌期和稳封期河冰的解译图。由于三湖河口河段为连续弯道,主流在弯道处靠近凹岸一侧。可以看出流凌期河道主流区为流凌带,流凌随主流向下游输移;河道的两岸有岸冰生成,在水深浅、流速低的地方有静态岸冰生成,靠近河岸流速高的地方或静态岸冰的附近有流凌堆积而成的冲积岸冰。但当流速大于

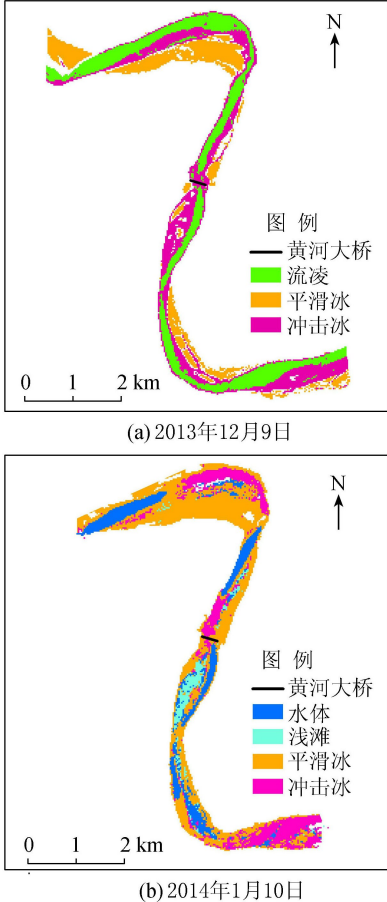
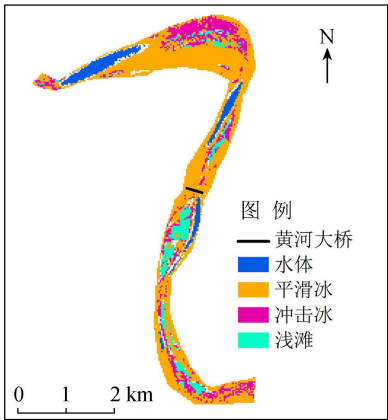


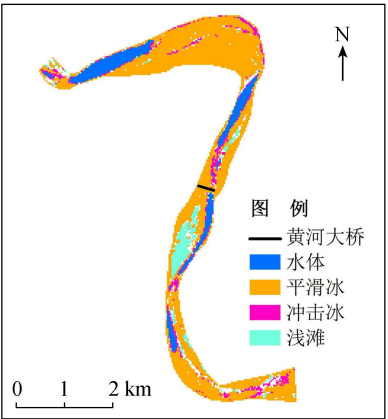
图1 2013—2014年冬季流凌、稳封期三湖河口河段河冰解译图

0.4 m/s 时,岸冰就不会再生成和发展。

2013 年 12 月 19 日三湖河口断面封冻,至此,该河段进入稳封期。从图 2(a)可以看出,每一个弯道的下游形成大小不一的清沟。分析清沟产生的原因主要有:首先,弯道处卡冰后,弯道下游的来冰量减少,弯道下游的产冰量不足以达到封河所需要的冰量;其次,上游卡冰后,弯道上游水位抬升,过流能力降低,弯道下游流量减小,水位降低,增加了弯道上、下游水面比降及流速,表面冰及冰花因流速过大而下潜,堆积在下游冰盖的底部,导致下游冰盖前缘向上游发展缓慢。



(a) 2014 年 1 月 26 日



(b) 2014 年 2 月 27 日

图 2 2013—2014 年冬季稳封期三湖河口河段河冰解译图

对比图 2(a)(b)可以看出,图 2(b)中清沟和平滑冰面积较图 2(a)有所增加。从 2013—2014 年三湖河口河段冰期日均气温分布(图 3)看出,2014 年 2 月 22 日日均气温转正,2 月 26 日最高气温接近 5℃,由于气温回升,加之水力作用影响,清沟边界的冰盖融化,导致 2 月 27 日清沟的面积较 1 月 26 日增大。同时,气温的回升导致冰盖表面融化,原来表面粗糙的冲击冰变得光滑,反射率增强,从而使冲击冰的面积减小,光滑冰的面积增大。

2014 年 3 月 16 日三湖河口河段全面开河,图 4 给出了开河前一天河冰解译图。可以看出,河道主

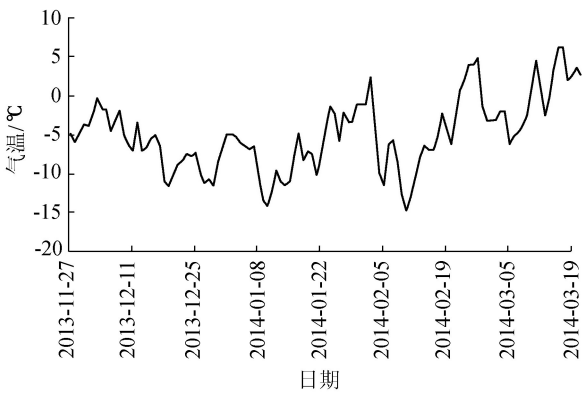


图 3 2013—2014 年三湖河口河段冰期日均气温

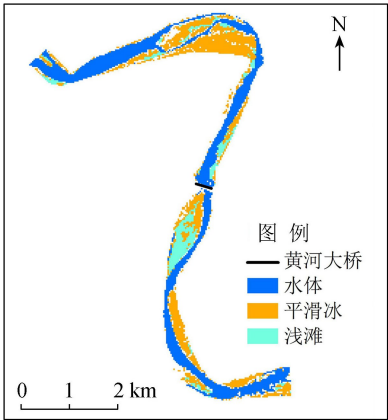


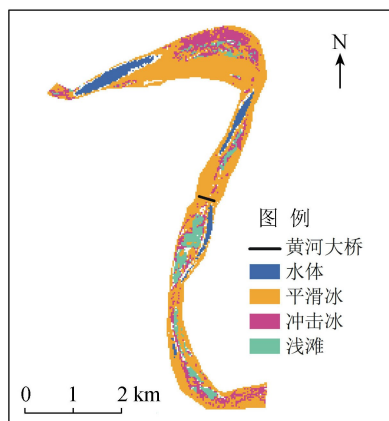
图 4 2014 年 3 月 15 日三湖河口河段河冰解译图

流区域受到水力条件和热力条件共同作用而开河。在河道浅滩附近及两岸,由于流速低、水力作用条件弱,仍有部分平滑冰盖存在。

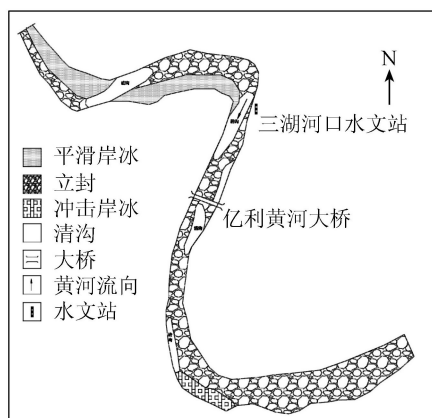
研究人员于 2014 年 1 月 15—29 日对三湖河口河段进行驻守式野外观测,绘制了三湖河口河段上、下游河冰图,从而验证河冰遥感解译的准确性。图 5 给出了野外观测图与解译图的对比,从图 5 可以看出,解译图与野外观测图在清沟的位置、形状及大小方面吻合较好,同时河冰的形态及分布也基本保持一致。

5 结 论

本文通过相关系数、信息熵、 I_{OF} 指数的验证,选取 Landsat8 中最佳波段进行 R、G、B 彩色合成,以黄河内蒙古段三湖河口河段为研究区域,对不同时期河冰的遥感影像进行解译,得到 2013—2014 年冬季三湖河口河段河冰形态、输移轨迹及生消演化过程,分析后得到以下结论:①进行 Landsat8 遥感卫片解译时,波段 7、4、3 为 R、G、B 彩色合成最佳波段。②利用遥感对河冰过程的解译,结合气温、水力等因素,可以解释河冰过程中典型的河冰现象,为河冰分析提供依据。③遥感卫片解译可以反映大尺度下河段流凌期、封冻期及解冻期不同形态河冰的生消演化过程及特征。



(a) 解译图



(b) 野外观测图

图5 三湖河口河段河冰解译图与观测图对比

参考文献:

[1] 贺佳,刘冰峰,李军. 不同生育时期冬小麦叶面积指数高光谱遥感监测模型[J]. 农业工程学报,2014,30(24):141-150. (HE Jia,LIU Bingfeng,LI Jun. Monitoring model of leaf area index of winter wheat based on hyperspectral reflectance at different growth stages[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering,2014,30(24):141-150. (in Chinese))

[2] 戴羊羊,李成范,周时强,等. 基于遥感的上海地区雾霾监测研究[J]. 测绘工程,2015,24(12):29-32. (DAI Yangyang, LI Chengfan, ZHOU Shiqiang, et al. Haze monitoring of Shanghai area based on remote sensing[J]. Engineering of Surveying and Mapping,2015,24(12):29-32. (in Chinese))

[3] 徐涵秋. 水土流失区生态变化的遥感评估[J]. 农业工程学报,2013,29(7):91-97. (XU Hanqiu. Assessment of ecological change in soil loss area using remote sensing technology[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2013, 29 (7): 91-97. (in Chinese))

[4] 朱亚平,程周杰. 基于FY-2C的渤海海冰监测分析研究[J]. 海洋技术科学,2015,34(6):6-11. (ZHU Yaping, CHENG Zhoujie. Analysis on the sea ice monitoring in China's Bohai Sea with FY-2C multi-spectral data[J]. Journal of Ocean Technology, 2015, 34 (6): 6-11. (in

Chinese))

[5] 高晓,吴立宗,MOOL P K. 基于遥感和GIS的喜马拉雅山科西河流域冰湖变化特征分析[J]. 冰川冻土,2015,37(3):557-569. (GAO Xiao, WU Lizong, MOOL P K. Analysis of the characteristics of glacial lake variation in the Koshi River Basin, the Himalayas based on RS and GIS[J]. Journal of Glaciology and Geocryology,2015,37(3):557-569. (in Chinese))

[6] 宋波,何元庆,庞洪喜,等. 基于遥感和GIS的我国季风海洋型冰川区冰碛物覆盖型冰川边界的自动识别[J]. 冰川冻土,2007,29(3):457-461. (SONG Bo, HE Yuanqing, PANG Hongxi, et al. Identifying automatically the debris-covered glaciers in China monsoonal temperate-glacier regions based on remote sensing and GIS[J]. Journal of Glaciology and Geocryology,2007,29(3):457-461. (in Chinese))

[7] 崔秋洋,潘云,杨雪. 基于Landsat 8遥感影像的北京市平原区不透水层盖度估算[J]. 首都师范大学学报(自然科学版),2015,36(2):89-92. (CUI Qiuyang, PAN Yun, YANG Xue. Beijing Plain Area of remote sensing images based on Landsat8 impermeable layer coverage estimates[J]. Journal of Capital Normal University (Natural Science Edition),2015,36(2):89-92. (in Chinese))

[8] 于守兵,顾志刚,侯志军. 包神铁路黄河大桥冰凌开河期实体模型试验[J]. 水利水电科技进展,2014,34(4):57-61. (YU Shoubing, GU Zhigang, HOU Zhijun. Ice physical model of Baoshen Railway Bridge across Yellow River in thawing period[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2014,34(4):57-61. (in Chinese))

[9] 冀鸿兰,张傲姐,高瑞忠,等. 黄河内蒙古段开河日期预报模型及应用[J]. 水利水电科技进展,2012,32(2):42-45. (JI Honglan, ZHANG Aoda, GAO Ruizhong, et al. Application of the break-up date prediction model in the Inner Mongolia Reach of the Yellow River[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2012,32(2):42-45. (in Chinese))

[10] 张学成,可素娟,潘启民,等. 黄河冰盖厚度演变数学模型[J]. 冰川冻土,2002,24(2):203-205. (ZHANG Xuecheng, KE Sujuan, PAN Qimin, et al. Mathematical model of ice cover thickness evolution in the Yellow River[J]. Journal of Glaciology and Geocryology,2002,24(2):203-205. (in Chinese))

[11] FU C, POPESCU I, WANG C, et al. Challenges in modelling river flow and ice regime on the Ningxia-Inner Mongolia Reach of the Yellow River, China[J]. Hydrology and Earth System Sciences,2014,18(3):1225-1337.

[12] 金宝石,周葆华. TM影像在湖泊湿地信息提取中的最佳波段组合[J]. 光谱实验室,2012,29(6):3771-3774. (JIN Baoshi, ZHOU Baohua. The optimal bands combination of TM image using in extracting information of lake wetland[J]. Chinese Journal of Spectroscopy Laboratory,2012,29(6):3771-3774. (in Chinese))

(收稿日期:2015-05-20 编辑:骆超)