doi:10.7522/j.issn.1000-0240.2013.0019

Wang Huini, Liu Haisong, Dong Sheng, *et al*. Study of the processing method of high spatial resolution remote sensing data in dynamic monitoring the thermokarst lakes in the Tibetan Plateau[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2013, **35**(1): 164－170. [王慧妮, 刘海松, 董晟, 等. 青藏高原热融湖塘动态监测中高分辨率遥感数据处理方法研究[J]. 冰川冻土, 2013, **35**(1):164－170.]

青藏高原热融湖塘动态监测中高分辨率遥感数据处理方法研究

王慧妮[1,2], 刘海松[1,2], 董 晟[3], 倪万魁[1], 林战举[2]

(1. 长安大学 地测学院, 陕西 西安 710054; 2. 中国科学院 寒区旱区环境与工程研究所冻土工程国家重点实验室, 甘肃 兰州 730000; 3. 北京工业大学 建筑工程学院, 北京 100124)

摘 要: 遥感技术由于能够快速、宏观的获得研究区域的数据, 已成为青藏高原热融湖塘动态监测的重要技术手段. 基于野外现场调查和SPOT-5、QuickBird两种高分辨率遥感卫星数据的特性分析, 结合影响青藏高原热融湖塘发育的一系列特征因素, 探讨了最适合于青藏高原热融湖塘动态监测的高分辨率遥感数据的纠正、融合和信息提取方法. 应用该方法对2006—2009年间北麓河盆地北侧的红梁河至秀水河段公路沿线局部63 km^{2}范围的热融湖塘进行了变化特征分析, 结果表明该区的热融湖塘个数和总面积在研究时段都有所增加, 其中湖塘由70个增加到75个, 湖塘总面积增量19.65%.

关键词: 多年冻土; 热融湖塘; 遥感影像; 融合; 信息提取

中图分类号: P642.14 **文献标识码**: A

0 引言

所谓热融湖塘, 是指由自然或人为因素引起季节融化深度加大, 导致地下冰或多年冻土层发生局部融化, 地表土层随之沉陷而形成热融沉陷, 积水后形成的湖塘[1]. 热融湖塘又称热喀斯特湖, 广泛分布在冰缘地区[2－4].

由于青藏高原湖泊区人烟稀少, 自然条件恶劣, 受自然和物质因素的约束, 难以从陆地上全面的获取和采集其广泛区域内的热融湖塘信息. 为了获取准确的青藏高原热融湖塘的分布、面积以及与地表径流的关系等重要信息, 我们充分利用高分辨率卫星遥感数据实时、连续、准确地获取大范围地表信息的优势, 获取青藏高原热融湖塘的信息[5].

本文为了研究青藏高原热融湖塘的变化, 获取覆盖研究区域的两个年代的高分辨率遥感影像数据——2006年QuickBird卫星遥感数据和2010年SPOT-5卫星遥感数据. 针对青藏高原热融湖塘的地物波谱特性, 对两种遥感数据源纠正、融合、解译、图像分割等数据处理方法进行选择与研究, 以获得最优化的SPOT-5和QuickBird两种高分辨率遥感数据提取热融湖塘信息的处理方法.

1 研究区概况

研究区位于北麓河盆地北侧的红梁河至秀水河段, 气候寒冷, 平均海拔4 600 m. 经纬度范围92°55′7.69″～92°59′54.76″ E, 34°55′33.0″～34°58′55.74″ N, 青藏公路里程为K3037～K3044, 青藏铁路里程为K1113～K1120, 研究区沿铁路、公路两侧宽度5 km, 区域总面积63 km^2, 详见图1. 研究区地处青藏高原腹地, 海拔高、气压低、高寒, 大气稀薄而纯净、透明度高, 太阳辐射强度大, 气温日变幅大, 大陆性气候特征明显, 地形复杂, 局地小气候影响大. 该区属冲、洪积高平原地貌, 地

收稿日期: 2012-08-27; 修订日期: 2012-11-16

基金项目: 国家自然科学重点基金项目(41030741); 国家重点基础研究发展计划(973计划)项目(2012CB02601); 中国科学院西部行动计划项目(KZCX2-XB3-19); 国家自然科学创新群体项目(41121061)资助

作者简介: 王慧妮(1982—), 女, 湖北潜江人, 2007年毕业于武汉大学, 现为长安大学在读博士研究生, 主要从事环境地质工程研究. E-mail: katejohn@163.com

© 1994-2013 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

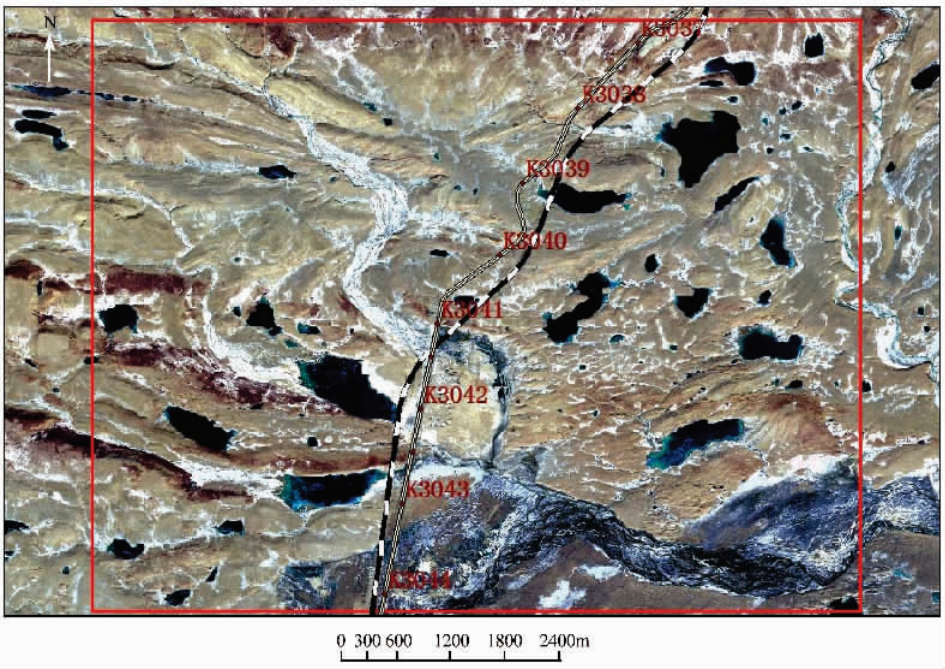


图 1　研究区范围的 SPOT-5 卫星遥感影像数据

Fig. 1　SPOT-5 remote sensing image of the research area

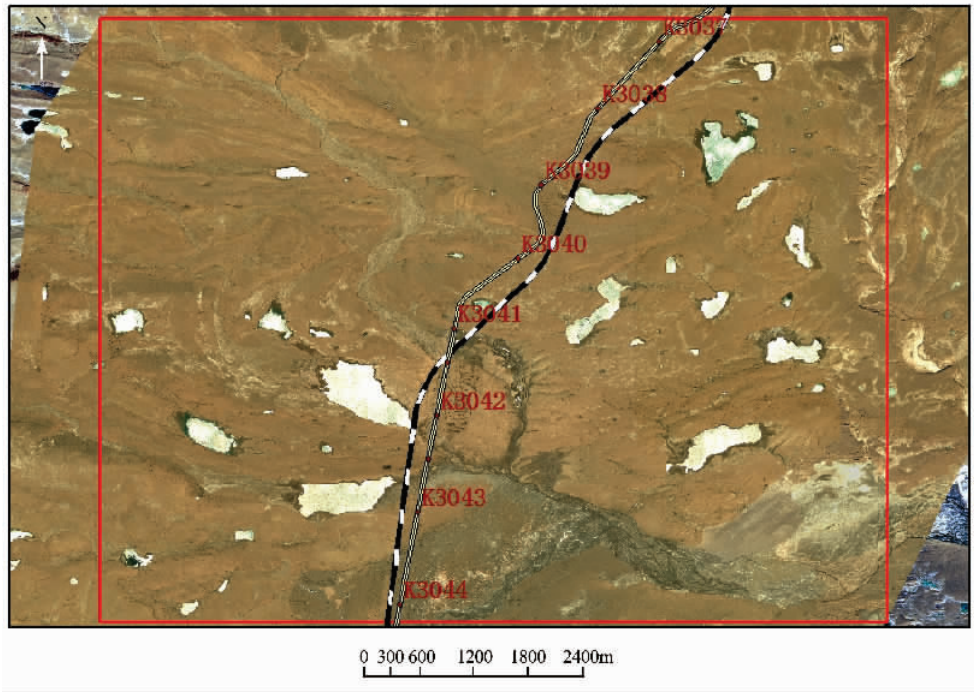


图 2　研究区范围的 QuickBird 卫星遥感影像数据

Fig. 2　QuickBird remote sensing image of the research area

形略有起伏，低丘与洼地相间，冲沟发育，地表植被稀疏，局部分布沙丘、沙地. 多年冻土大片分布，厚度小于 60 m，年平均地温－0.5～－1.0 ℃. 天然地面多年冻土上限 1.5～2.0 m，冻土类型大多为富冰冻土和多冰冻土，局部有含土冰层存在，属于热融灾害多发区域.

2　遥感数据源及处理

2.1　研究区数据源

2.1.1　遥感数据源

为了研究青藏高原热融湖塘的变化，我们获取了不同年代的覆盖区域的高分辨率遥感影像数据.

© 1994-2013 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

其中，QuickBird 卫星遥感影像数据(图 2)景号为 06JUN28045302-P2AS-052453118010，数据获取时间为 2006 年 6 月 28 日，卫星遥感图像数据层次丰富、清晰易读、色调均匀、反差适中，无明显噪声、斑点和坏线，数据中云、雪覆盖量总和小于 5%；SPOT-5 卫星遥感数据景号为 235280-101104，数据获取时间为 2011 年 11 月 4 日，数据级别为 1A 级，影像质量极好，入射角度为 11.915211°.

2.1.2 基础地理信息数据源

获取研究区基础地理信息数据作为遥感影像数据正射纠正的参考数据，现有的资料有 1954 年北京坐标系的 1∶100 000地形图资料和 30 m 格网间距 DEM 数据.

2.2 数据处理流程

遥感数据处理主要包括配准、融合、纠正以及信息提取等环节. 根据本次研究区获取的数据制订了遥感数据处理流程：首先以全色波段数据为参照对多光谱数据进行配准，然后选择适合的融合方法融合全色影像和多波谱影像，在此基础上利用卫星的星历参数对融合影像进行纠正，而后利用纠正后的正射影像数据进行热融湖塘信息提取，最终获得热融湖塘相关信息. 数据处理流程图见图 3.

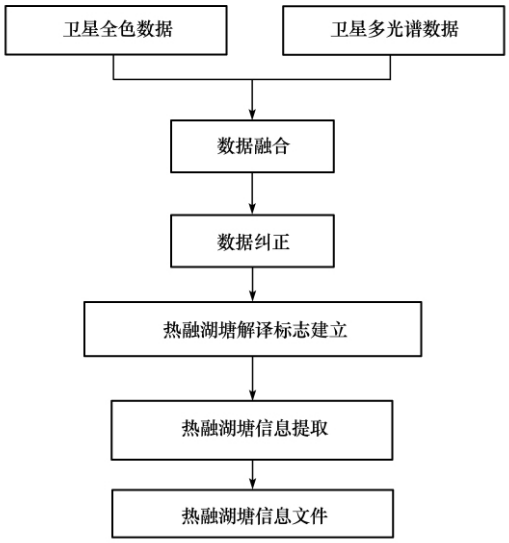


图 3 数据处理流程图

Fig. 3 Data processing flow chart

2.3 数据融合

QuickBird 和 SPOT-5 卫星遥感影像的全色数据与多光谱数据分别具有高空间分辨率与高光谱分辨率的相对优势，融合是实现二者优势互补的基本途径. 目前，高分辨率卫星遥感数据的融合方法较多[6-8]，基于像元的融合算法可大致归为基于色彩域的融合算法，如 PC 和 HIS 变换，基于空间频率域的滤波融合算法，如 SFIM[9]和 HPF[10]变换，基于代数的融合算法，如 Brove 变换、加权加法变换、乘法变换和比值变换，以及基于信息分解的融合算法，如小波变换等 4 类.

本次研究为了最大限度的准确获取青藏高原热融湖塘的相关信息，提高高分辨率卫星遥感数据的融合质量和效果就显得尤为重要. 针对青藏高原热融湖塘遥感监测应用，通过不同的融合方法对高分辨率卫星遥感数据进行融合处理比较，探寻一种适合于高分辨率影像湖塘遥感监测的融合方法，使融合后的图像重点突出湖塘水体的特性，为青藏高原热融湖塘遥感监测提供实时的变化信息.

通过各种融合算法对全色与多光谱数据进行融合，并计算影像的灰度平均值、标准差、信息熵、相关系数和相对偏差指数，以及目视效果，来比较分析各融合方法对空间信息的增强以及光谱信息的保持能力. 本文认为在热融湖塘的信息提取方面，PANSHARP 融合方法对于 QuickBird 数据的融合效果最优；同时对于缺少蓝波段的 SPOT-5 数据而言，为了使图像信息量最大化，通过计算将数据色彩调整接近真彩色：

$$\text{蓝通道：NewB1}=\text{MIN}(255;\ \text{MAX}(0;\ 2\times P\times B1/(B1+B2))) \quad (1)$$

$$\text{绿通道：NewB2}=\text{MIN}(255;\ \text{MAX}(0;\ 2\times P\times B2/(B1+B2))) \quad (2)$$

$$\text{红通道：NewB3}=\text{MIN}(255;\ \text{MAX}(0;\ 0.3\times P+0.7\times B3)) \quad (3)$$

式中：B1 为 SPOT-5 中绿波段；B2 为 SPOT-5 中红波段；B3 为 SPOT-5 中近红外波段.

由于 SPOT-5 缺少蓝波段，故可利用下述公式，将数据色彩调整接近真彩色：

$$\text{RNC(红)}=0.1\times\text{NewB3}+0.9\times\text{NewB2}+0.0\times\text{NewB1} \quad (4)$$

$$\text{GNC(绿)}=0.2\times\text{NewB3}+0.0\times\text{NewB2}+0.8\times\text{NewB1} \quad (5)$$

$$\text{BNC(蓝)}=0.0\times\text{NewB3}+0.0\times\text{NewB2}+1.0\times\text{NewB1} \quad (6)$$

2.4 数据纠正

目前，比较常用的几何纠正方法有严格轨道模型、有理函数模型、多项式几何模型[11]. 研究区域两期遥感数据均为具有卫星星历参数的高分辨率单景卫星遥感数据，为了保证纠正精度，对单景数据采用严格轨道模型进行正射纠正. 严格轨道模型根

© 1994-2013 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

据卫星星历参数建立严密数学模型，是正射纠正的首选模型，适合于能提供严格卫星星历参数并有DEM的影像数据.

采用1∶100 000地形图数据作为地理参考数据，利用30 m格网间距的DEM高程数据为地形改正基础，选取待纠正影像和基础底图上均有的同名明显特征地物点为纠正控制点，对遥感影像进行正射纠正，获取该区域的正射影像数据. 其中，控

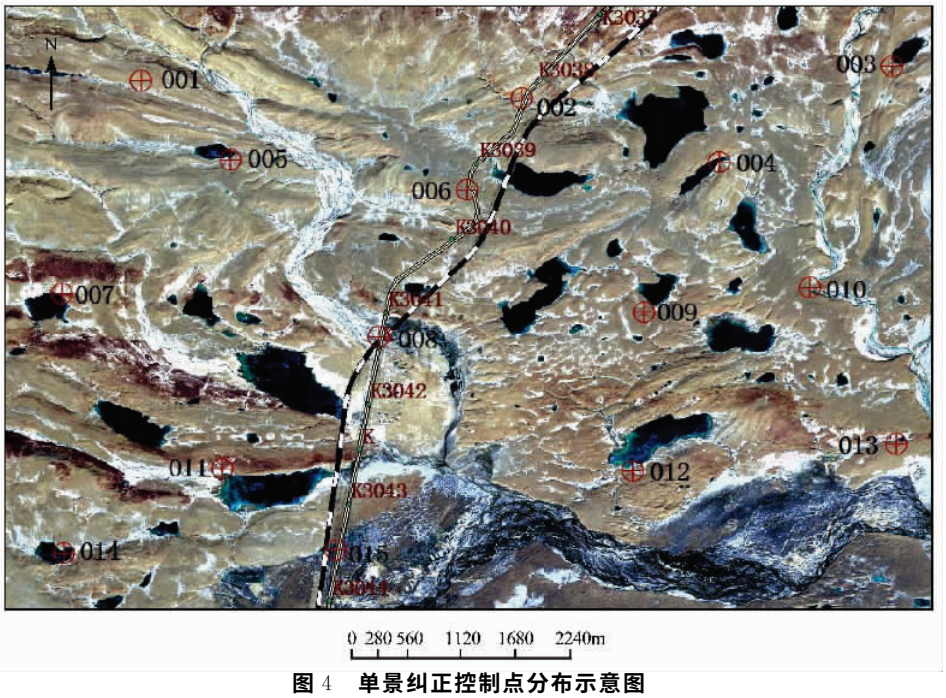


图4　单景纠正控制点分布示意图

Fig. 4　Distributions of the control points for single scene correction

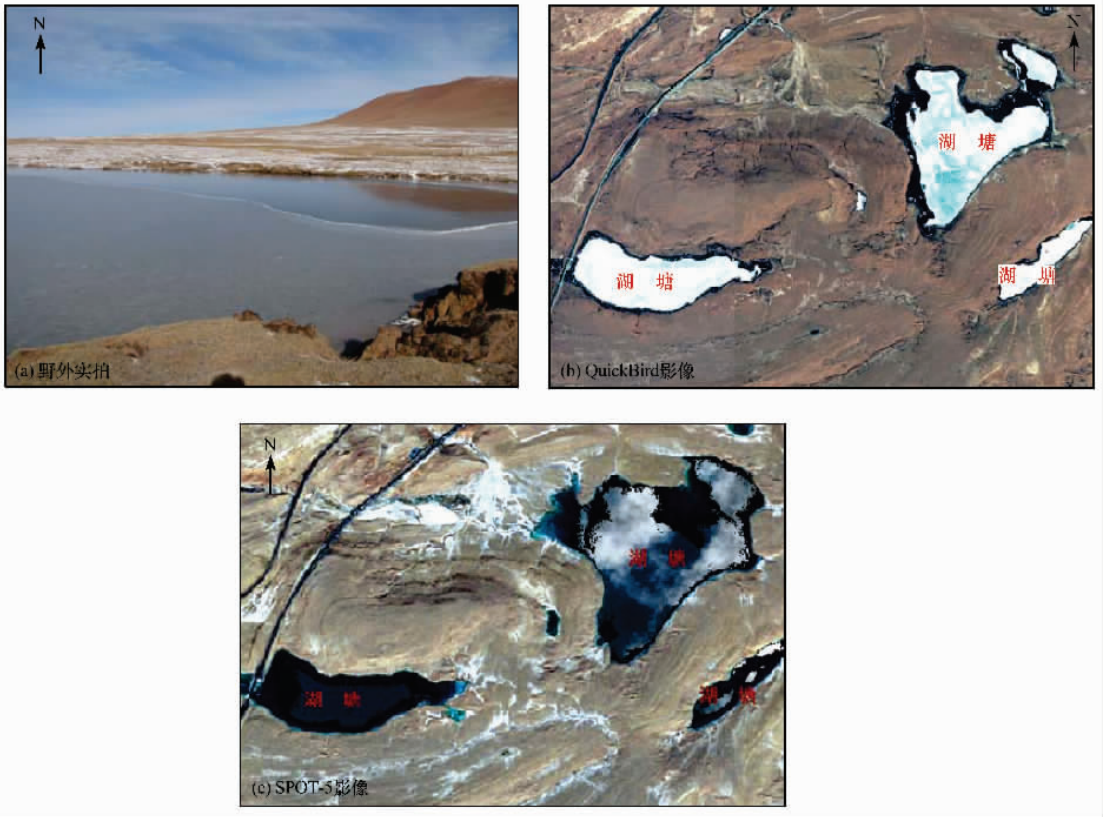


图5　热融湖塘的解译标志

Fig. 5　Interpretation marks of the thermokarst lakes

© 1994-2013 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

制点要求均匀分布整景数据，一般 9～15 个，控制点选取分布见图 4. 根据控制点残差文件，检查正射纠正控制点点位精度，由于研究区域为高原区域且基础地理信息数据的精度相对较低，因此要求纠正控制点残差中误差应不大于 2 个像素，取中误差的两倍为其最大误差.

2.5 SPOT-5 图像增强处理

因 SPOT-5 数据地面分辨率为 2.5 m，就分辨率而言远低于 QuickBird 数据，为了进一步提升 SPOT-5 分类精度，对 SPOT-5 数据进行图像增强处理. 通过拉普拉斯算子实现高通提升滤波，增强影像节信息和对比度，使水体的边缘更加锐化；通过非线性灰度变换来改善图像的灰度级动态范围，即扩展地面景物的灰度范围，从而达到突出湖塘边线特征和强化图像细节的目的.

2.6 热融湖塘信息提取

2.6.1 建立热融湖塘解译标志

依据遥感图像的特点、地物波谱和地面实况等性质，与研究区地理、地质、水文、气象等相关知识相结合，根据各种遥感数据的波谱特征建立热融湖塘的解译标志(图 5). 湖塘的影像形状不规则，轮廓明显，水面呈像与河流水面相似，色调一般较均匀.

2.6.2 热融湖塘信息提取方法

因为水体对太阳光具有强吸收性，在 SPOT-5、QuickBird 遥感传感器的波长范围内，总体上呈现较弱的反射率；在可见光范围内，主要集中在蓝绿光波段，不超过 10%，一般为 4%～5%，并具有随着波长的增加而进一步减弱的趋势. 为了从海量遥感数据中有效地提取地表水体信息、提高自动化提取效率，选取归一化植被指数(NDVI)构建遥感特征指数曲线. 根据地表水体在特征曲线中单调上升，植被在特征曲线中单调下降的规律，以最大似然法分类为基础，结合面向对象分类法[12]，充分利用影像中的光谱信息、几何结构、空间信息及上下文信息，建立自动化提取模型，并结合 DEM 生成的山体坡度和阴影信息，减少局部迭代过程中对其他地表特征与水体信息的误判，最后通过决策树模型初步实现地表水体的自动分类.

由于青藏高原热融湖塘这一专题的空间信息数据相对匮乏，所以自动分类方法获取的解译精度远低于人工目视解译的精度，为了进一步提高青藏高原热融湖塘信息提取的精度，以两期遥感影像自动分类获得热融湖塘解译数据为参考，而后采用人机交互的方式，对热融湖塘解译数据进行检核，以保证热融湖塘解译的不错不漏，确保信息提取的精度.

3 热融湖塘解译结果

通过对 QuickBird 和 SPOT-5 两期高分辨率遥感数据(图 1、2)的处理，提取了热融湖塘的信息(表 1). 由表 1 可知，2006—2009 年热融湖塘的个数明显增加，湖塘总面积增量为 19.65%. 实际上，根据 Niu 等[13]对北麓河典型热融湖塘监测获取的数据可知，年际湖岸最大后退宽度达 2.8 m，最小后退宽度达 0.8 m，平均后退宽度约 0.70 m·a^{-1}；在水位变化方面，5 月为丰水季；10 月为枯水季，水位高差最大可达 0.52 m(图 6). 整体显示北麓河监测的典型热融湖塘面积是增加的. 结合到本文研究的区域性对象，考虑到降水和蒸发的影响，尽管湖塘水体的总面积主要增长源为季节性降水，但还是有少部分的增量来源于融化的高含冰量冻土. 这一动态数据的获取，将为青藏高原热融湖塘的研究提供定量的数据参考.

表 1 热融湖塘信息

Table 1 Information of the thermokarst lakes

热融湖塘信息	2006 年 QuickBird 数据	2010 年 SPOT-5 数据
计数/个	70	75
最小值面积/m^2	865.313861	1067.034698
最大值面积/m^2	397495.86388	494333.42921
湖塘面积总和/m^2	3224442.5401	3858289.0585
面积平均值/m^2	46063.464859	52139.041332
面积标准差/m^2	75812.14955	99554.805847

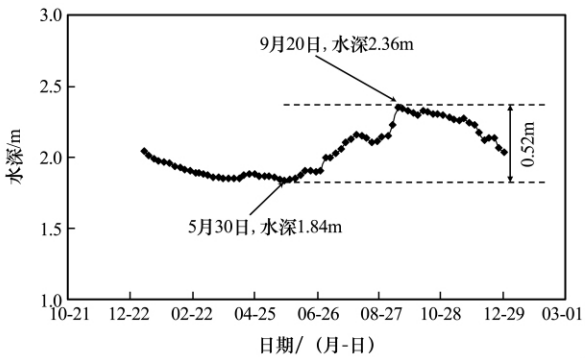


图 6 北麓河典型热融湖塘 2009 年水位变化监测结果

Fig. 6 Monitored water level change in a typical thermokarst lake in Beiluhe area, 2009

© 1994-2013 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

4　结论

（1）在明确了高分辨遥感数据用于青藏高原热融湖塘动态监测的极大优势前提下，对 SPOT-5、QuickBird 数据中热融湖塘特性的表现进行分析，获取最适合的融合、纠正、信息提取方法.

（2）使用具有针对性的计算方法对 SPOT-5、QuickBird 数据进行融合后纠正，获得了高数学精度、高几何精度、纹理清晰、色调均匀、反差适中，色彩接近自然真彩色的研究区域数字正射影像图，通过先进行计算机的自动判别，后进行人工判读的信息提取方法，保证了热融湖塘信息提取的精确度.

（3）应用该方法对 2006—2009 年间北麓河盆地北侧的红梁河至秀水河段公路沿线局部 63 km^2 范围的热融湖塘进行了变化特征分析，显示在未考虑降水和蒸发影响的情况下，研究区湖塘个数和总面积都有所增加.

参考文献(References)：

[1] Wu Qingbai, Zhu Yuanlin, Shi Bin. Study of frozen soil environment relating to engineering activities [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2001, **23**(2): 200－207. [**吴青柏，朱元林，施斌. 工程活动下的冻土环境研究**[J]. **冰川冻土**, 2001, **23**(2): 200－207.]

[2] Luo Jing, Niu Fujun, Lin Zhanju, *et al*. Permafrost features around a representative thermokarst lake in Beiluhe on the Tibetan Plateau[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2012, **34**(5): 1110—1118. [**罗京，牛富俊，林战举，等. 青藏高原北麓河地区典型热融湖塘周边多年冻土特征研究**[J]. **冰川冻土**, 2012, **34**(5): 1110－1118.]

[3] Cui Wei, Wu Qingbai, Liu Yongzhi. The thermal effect of a thermokarst lake on permafrost [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2010, **32**(4): 755－760. [**崔巍，吴青柏，刘永智. 热融湖塘对多年冻土的热影响**[J]. **冰川冻土**, 2010, **32**(4): 755－760.]

[4] Wang Yibo, Wu Qingbai, Niu Fujun. The impact of thermokarst lake formation on soil environment of alpine meadow in permafrost regions in the Beiluhe basin of the Tibetan Plateau[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2011, **33**(3): 659－667. [**王一博，吴青柏，牛富俊. 长江源北麓河流域多年冻土区热融湖塘形成对高寒草甸土壤环境的影响**[J]. **冰川冻土**, 2011, **33**(3): 659－667.]

[5] Lu Anxin, Yao Tandong, Wang Lihong, *et al*. Study on the fluctuations of typical glaciers and lakes in the Tibetan Plateau using remote sensing[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2005, **27**(6): 783－792. [**鲁安新，姚檀栋，王丽红，等. 青藏高原典型冰川和湖泊变化遥感研究**[J]. **冰川冻土**, 2005, **27**(6): 783－792.]

[6] Chu Jinhai, Peng Peng, Li Zheng, *et al*. The fusion method for QuickBird data in mine remote sensing monitoring [J]. Remote Sensing for Land & Resources, 2009 (3): 107－109, 113. [**褚进海，彭鹏，李郑，等. 矿山遥感监测中** QuickBird **数据融合方法研究**[J]. **国土资源遥感**, 2009 (3): 107－109, 113.]

[7] Hu Gang, Liu Zhe, Xu Xiaoping, *et al*. Research and recent development of image fusion at pixel level[J]. Application Research of Computers, 2008, **25**(3): 650－655. [**胡钢，刘哲，徐小平，等. 像素级图像融合技术的研究与进展**[J]. **计算机应用研究**, 2008, **25**(3): 650－655.]

[8] Liu Songtao, Zhou Xiaodong. Recent development of image fusion techniques[J]. Laser & Infrared, 2006, **36**(8): 627－631. [**刘松涛，周晓东. 图像融合技术研究的最新进展**[J]. **激光与红外**, 2006, **36**(8): 627－631.]

[9] Liu J G. Smoothing Filter-based Intensity Modulation: a spectral preserve image fusion technique for improving spatial details [J]. International Journal of Remote Sensing, 2000, **21**(18): 3461－3472.

[10] Schowengerdt R A. Reconstruction of multispatial, multispectral image data using spatial frequency content[J]. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 1980, **46**: 1325－1334.

[11] Yu Shuying, Wang Haiyan, Han Pengfei, *et al*. Research on the remote sensing image correction method and accuracy analysis [J]. Geomatics Technology and Equipment, 2010, **12**(2): 22－23, 13. [**余树影，王海燕，韩鹏飞，等. 浅谈遥感影像纠正方法及精度分析**[J]. **测绘技术装备**, 2010, **12**(2): 22－23, 13.]

[12] Li Yi, Gao Yaping, Tang Yao. A study of information extraction based on QuickBird data-taking the extraction of cultivated land for an example [J]. Guangdong Agricultural Sciences, 2011(17): 144－146. [**李奕，高雅萍，唐尧. 基于** QuickBird **数据的信息提取方法研究——以耕地提取为例**[J]. **广东农业科学**, 2011(17): 144－146.]

[13] Niu F, Lin Z, Liu H, *et al*. Characteristics of thermokarst lakes and their influence on permafrost in Qinghai-Tibet Plateau[J]. Geomorphology, 2011, **132**(3－4): 222－233.]

© 1994-2013 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

Processing Method of High Spatial Resolution Remote Sensing Data in Dynamic Monitoring the Thermokarst Lakes in the Tibetan Plateau

WANG Hui-ni[1,2], LIU Hai-song[1,2], DONG Sheng[3], NI Wan-kui[1], LIN Zhan-ju[2]

(1.*College of Geology Engineering and Geomatics, Changan University, Xi'an Shaanxi* 710054, *China*; 2.*State Key Laboratory of Frozen Soil Engineering, Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, Lanzhou Gansu* 730000, *China*; 3.*The College of Architecture and Civil Engineering, Beijing University of Technology, Beijing* 100124, *China*)

Abstract: Remote sensing technology has become an important tool to dynamically monitor the processes of thermokarst lakes in the Tibetan Plateau, from which macroscopical spatial data can be obtained rapidly. In this work, the data processing methods including data correcting, data fusion and information extraction were proposed and discussed based on the characteristics of the high spatial resolution remote sensing data from QuickBird and SPOT-5, combining with character factors of the thermokarst lakes in the Qinghai-Tibet Plateau. Furthermore, a most suitable procedure was applied to investigate the change of the thermokarst lakes in a limited range, 63 km^2 in area, located in the north of the Beiluhe River basin from 2006 to 2009. The area is from Honglianghe to Xiushuihe along the Qinghai-Tibet Highway. The results show that the amount and total area of the thermokarst lakes have slightly increased.

Key words: permafrost; thermokarst lake; remote sensing image; fusion; information extraction

© 1994-2013 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net