

无/缺水下地形数据的高原堰塞湖水量遥感估算

朱长明¹, 张新^{2,5}, 方晖^{3,4}, 王伟胜^{3,4}

1. 江苏师范大学 地理测绘与城乡规划学院, 徐州 221116;
 2. 中国科学院空天信息创新研究院 遥感科学国家重点实验室, 北京 100101;
 3. 中国科学院新疆生态与地理研究所, 乌鲁木齐 830011;
 4. 中国科学院中亚生态与环境研究中心, 乌鲁木齐 830011;
 5. 中国科学院大学, 北京 100049

摘要: 水量遥感动态监测对于高原堰塞湖风险评估、预报预警和处置决策等具有重要意义。针对高原无资料或缺资料区, 充分利用空天遥感技术, 文章提出了一种无/缺水下地形数据的高原堰塞湖水量遥感定量估算方法。该方法首先通过遥感水域面积提取, 获取堰塞湖淹没空间范围; 进而采用不规则复杂多边形中线定位算法, 确定堰塞湖中心线位置; 然后基于河道中心特定点高程信息, 结合局部河道比降估算, 生成堰塞湖水下地形河道中线约束因子; 再根据河道边坡高程信息和水下地形约束因子自适应拟合出局部堰塞河道的水下未知地形; 最后通过三维曲面离散积分实现堰塞湖水量遥感动态定量估算。实验以东帕米尔高原的萨雷兹堰塞湖为研究区, 展开遥感水量调查与局部验证研究, 结果表明: 萨雷兹堰塞湖当前水域面积约为89.09 km², 水量约为162.49亿m³; 这一结果与专家预估的水资源量155—165亿m³基本吻合。经局部模拟实验精度对比验证, 模拟结果与实际数据动态误差总体控制在10%以内, 相关系数达到0.95 ($P<0.01$, 双尾), 进一步证明了算法的鲁棒性和估算结果的可信度。为无/缺水下地形数据的高原堰塞湖水量遥感估算提供了一种有效的方法, 实现了水下地形未知的高原堰塞湖水量遥感快速反演与定量测算。

关键词: 堰塞湖, 水量估算, 水下地形, 水文遥感, 萨雷兹湖

引用格式: 朱长明, 张新, 方晖, 王伟胜. 2022. 无/缺水下地形数据的高原堰塞湖水量遥感估算. 遥感学报, 26(1): 148–154

Zhu C M, Zhang X, Fang H and Wang W S. 2022. Dammed lake water volume estimation by satellite imagery and digital elevation model under unknown underwater terrain scenario. National Remote Sensing Bulletin, 26(1): 148–154 [DOI: 10.11834/jrs.20221211]

1 引言

堰塞湖蓄水量是决定堰塞湖溃决风险大小的最关键性因子(黄艳等, 2019; 王杨科等, 2013; 谢建丽, 2013)。通常来说堰塞湖蓄水量越多安全性威胁越大, 溃决洪水冲击力越危险, 带来的自然灾害越严重(匡尚富等, 2008; 刘宁等, 2016; 吕杰堂等, 2002)。因此, 实时监测高原堰塞湖库区蓄水量动态对于堰塞湖的险情评估、灾害推演、安全管理以及降险处置决策等均具有重要的意义(匡尚富等, 2008; 刘宁等, 2016)。传统的湖泊水量计算主要有测绘学方法和水力学方法, 分别

基于图上地形量测和基于实地水文观测模拟(曹波, 2006; 甘拯等, 2017; 米鸿燕等, 2007; 童思陈和周建军, 2003)。具体计算方法上可以概括为两大类:(1)直接计算静库容代替总库容, 相关算法有网格法、等高线法以及横断面法等(高圣益和李成国, 2007; 米鸿燕等, 2007); (2)基于简化河槽形态和实测数据, 采用水文动力学模型计算总库容, 这种算法包括了动库容和静库容(Furnans和Austin, 2008; 秦惠承, 1983; 许海军和陈守煜, 2002)。图上测量要求有较为详细的湖泊地形资料, 水文动力学模型则需参数较多、计算耗时较长, 时效性较差; 导致了传统水量监测

收稿日期: 2021-04-15; 预印本: 2021-09-26

基金项目: 国家重点研发计划(编号: 2021YFB1407004); 江苏高校优势学科建设工程资助项目

第一作者简介: 朱长明, 1983年生, 男, 副教授, 研究方向为遥感信息智能提取, 水文水资源遥感以及干旱区生态环境遥感。E-mail: zhuchangming@jsnu.edu.cn

通信作者简介: 张新, 1974年生, 男, 研究员, 研究方向为生态安全遥感、数字海洋。E-mail: zhangxin@radi.ac.cn

技术手段通常难以满足应急抢险救灾的时效性需求。所以堰塞湖水量准时快速精准监测一直是堰塞湖风险评估中的一个技术难点。

随着空间对地观测信息技术的发展,水量遥感定量估算与动态监测已经成为水文遥感研究的重要内容,在应急、抢险和救灾中彰显了突出的技术优势(陈晓玲等,2008; 黄诗峰等,2013; 谢建丽,2013; 朱长明等,2015)。目前水量遥感计算模型主要有统计经验模型和物理量测模型两大类。统计经验模型是通过实测数据建立水位面积库容曲线,再根据实时遥测面积或者水位信息估算出湖泊水量(Zhang等,2014; Duan和Bastiaanssen,2013)。如:吕杰堂等(2002)通过湖泊的面积和库容的关系计算了西藏易贡滑坡堰塞湖库容;田雨等(2017)利用实地水文统计数据,建立水库面积—库容模型,完成雪野水库库容量的测算;Duan和Bastiaanssen(2013)通过库容曲线协同测高卫星和遥感影像反演出动库容。而物理量测模型是通过实时遥感数据匹配高精度的水下地形数据,直接从地形图上定量计算出湖泊水量(蔡青等,2012; 曹波,2006; 刘东和李艳,2012)。但是,从现有的文献来看目前水量遥感计算模型主要是面向湖盆水下地形数据或者库容曲线已知的情况。然而,针对高原无/缺资料区突发性地质灾害形成的堰塞湖,可用基础资料异常匮乏,基本上没有详细的水下地形数据;加上应急处置的紧迫性、区域地质环境的复杂性和现场监测的困难性,很难在较短时间内获取得到高精度的水下地形数据,这给水量遥感定量动态监测带来了挑战。故,如何在缺少水下地形数据的情况下,快速准确地获取堰塞湖水量数据是亟待解决的技术难题。

为此,本文提出了一种无/缺水下地形数据的高原堰塞湖水量遥感快速定量测算方法,实现了水下地形特征数据不完备的高原地区堰塞湖水量遥感测算问题,为无水下地形数据的高原堰塞湖水量遥感快速估算提供了一种有效的方法。

2 研究区与数据源

2.1 研究区介绍

实验选取帕米尔高原百年堰塞湖—萨雷兹堰塞

湖为主要研究区(图1),地处帕米尔高原东部穆尔加布河谷,38°10'N—38°20'N,72°30'E—73°10'E,形成于1911年的一场强烈地震。由于地震引起巨大山体滑坡,堵塞了东西走向的穆尔加布河道,水位快速上升形成了高原堰塞湖。其中乌索伊大坝就是滑坡体堆积形成的天然坝体。

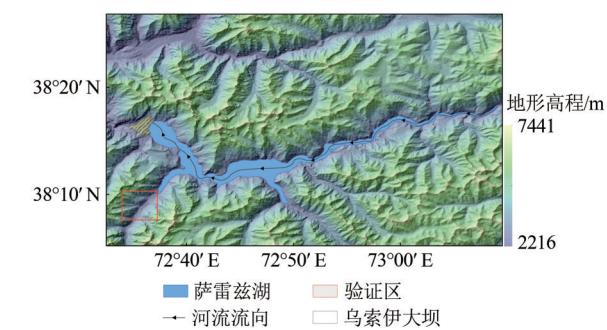


图1 研究区

Fig. 1 Study area

萨雷兹堰塞湖集水面积超过16000 km²,水域淹没面积约80 km²,长度约60 km,平均宽度约1.44 km,最深处超过了500 m,不断上升的水位严重威胁着下游的重要基础设施和数百万群众的生命财产安全(杨立信,2008a; Ischuk,2011)。萨雷兹湖安全问题及风险监测引起了当地政府和国际社会的广泛关注,一旦溃决或引发洪水必将是一场空前生态大灾难,曾被英国《焦点》杂志列为全球十大潜伏的致命性自然灾害(杨立信,2008b)。但是,区域交通可通达性差、地质环境恶劣,实地地形测量和水文信息采集非常困难,详细的水下地形资料缺乏,导致堰塞湖水量动态监测和风险评估技术难度较大。本文试图通过空天遥感信息技术完成水下地形数据未知的萨雷兹湖水资源量定量估算,为萨雷兹湖风险监测和预报预警提供技术支撑。

2.2 数据源选择

实验地面高程数据主要来源于美国NASA和日本METI共同发布的先进星载热发射和反射辐射仪全球数字高程模型ASTER GDEM V003(Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer Global Digital Elevation Model),数据获取时间是2000年—2009年,空间分辨率为30 m,经多次校正,正式发布于2019-08(数据下载:<https://cmr.earthdata.nasa.gov/search/concepts/C1299783579->)。

LPDAAC_ECS.html [2021-04-15]); 堰塞湖水域面积监测主要采用了美国陆地资源卫星 Landsat 系列遥感数据。堰塞坝区高精度数据来自中国科学院新疆生态与地理研究所的无人机倾斜航拍数据, 数据获取时间: 2017-07-30—31。由于涉及湖泊水域面积计算和体积估算, 将数据统一转换为阿尔伯斯等积圆锥投影。

3 堰塞湖水量遥感快速估算方法

无/缺水下地形数据的高原堰塞湖水量遥感定量估算方法技术流程见图 2。整体技术流程包括水域淹没面积提取、多边形中线确定、特定点河道高程获取、局部河道比降计算、水下地形拟合和三维曲面离散积分等 6 个模块。

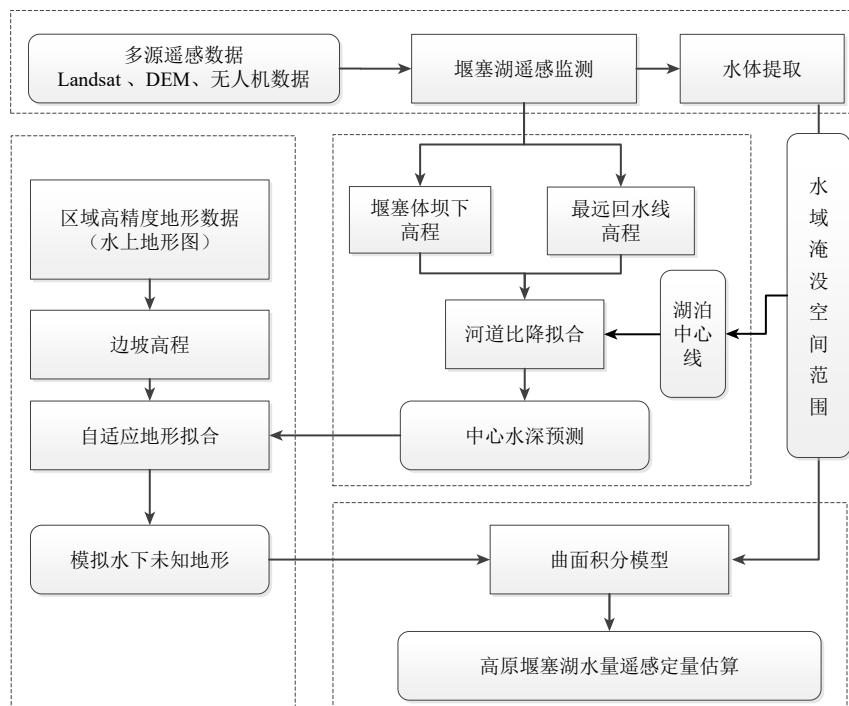


图 2 无水下地形的堰塞湖水量遥感估算方法流程

Fig. 2 Flow chart for dammed lake water volume estimation at underwater topographic data unknown

首先是基于光学遥感的提取水域淹没面积, 获取堰塞湖水域分布和坝体以及最远回水线位置; 然后, 通过泰森多边形 Delaunay 准则计算到河岸两边离散点距离相等的点集, 标识出河道中心线; 进而, 根据坝前高程、最远回水位的河道中心高程估算河道局部比降系数, 并据此推算出分段河道中心点高程, 作为水下地形模拟的约束因子; 通过左右边坡的高程信息并结合河床中心线高程约束因子构建河道已知高程集合; 在此基础上进一步通过地形拟合自适应模拟出堰塞湖水下未知地形; 最后, 结合实时淹没面积通过三维曲面离散积分快速计算堰塞湖蓄水量。

$$V_w = \int (H_w - H_b) ds \quad (1)$$

式中, V_w 为湖泊总蓄水量, H_w 为湖泊水面高程, H_b 为湖泊水低高程, ds 为微分单元面积。对于空

间栅格数据来说, 离散曲面积分可以进一步表示为式 (2)。

$$V_w = \sum_{i=1}^n (H_{w_i} - H_{b_i}) \cdot P_i \quad (2)$$

式中, n 为堰塞湖淹没的所有水域像元总数量, P_i 为单个像元面积, H_{w_i} 为第 i 个像元的湖面水位高程, H_{b_i} 为第 i 个像元的水下地形高程。

其中, 河道的局部比降系数估算, 由于数据有限, 采用了线性拟合的方法。根据坝体下的河床高程和最远回水位置河床高程, 拟合局部河道的比降系数, 计算公式具体为

$$S = \frac{A - B}{D(AB)} \quad (3)$$

式中, S 为河道的局部比降系数, A 为坝体下的河床高程, B 为最远回水位置河床高程, $D()$ 为两点的距离。

4 方法验证与评估

为验证算法的有效性和定量估算结果的真实可信性。文章选取了穆尔加布河支流已知地形的河道作为实验验证区, 见图1中的标注。假设河道被堰塞, 模拟水位上涨到3450 m, 根据水上地形和该段河道的比降, 按照文中的方法去预测水下地形, 结果见图3。从图3的DEM晕渲图上看, 模拟结果基本能够很好地呈现出堰塞河道水下地形。进一步量化评估模拟水下地形的精度, 表1从定量统计的角度, 将模拟数据与真实数据进行了对比。真实数据和模拟数据的各项定量统计指标(如: 均值、方差、值域范围等)吻合度较高, 相关系数达到0.95以上, 误差均值约1.29 m。

图4显示了不同的淹没水位堰塞湖水量统计计算模拟, 绘制了两种情况的库容曲线。其中真实库容曲线是通过真实地形数据测算, 模拟库容曲线是用文中模拟水下地形方法估算。从库容曲线的结果对比来看: 本文中的方法基本上能够精确

地反演出堰塞湖的库容量, 模拟值与真实值在各个水位段上均保持高度一致, 相关系数达到了95% ($P<0.01$), 最大误差控制在10%范围之内, 证明了该算法的有效性和估算结果的可信度。

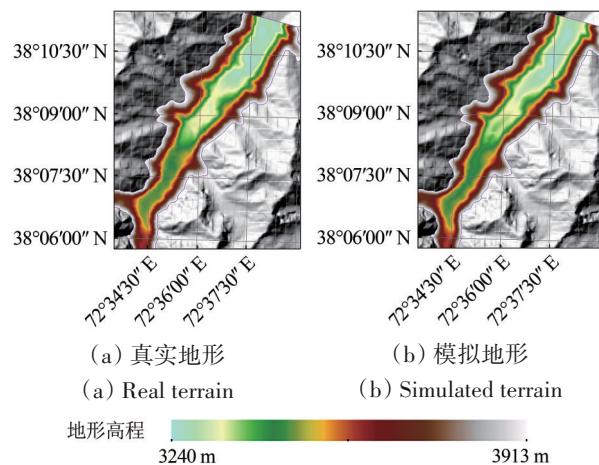


Fig. 3 Comparison between simulated underwater terrain with measured values
图3 局部区域水下地形模拟对比验证实验

表1 模拟数据与参考数据相关统计量对比

Table 1 Quantitative comparison of correlation statistics between simulated data and reference terrain

	均值/m	标准差/m	最大值/m	最小值/m	误差均值/m	相关系数/m
参考数据	3476.94	139.98	3884.00	3262.04		
模拟数据	3477.65	137.72	3880.07	3258.01	1.29	$R=0.95$

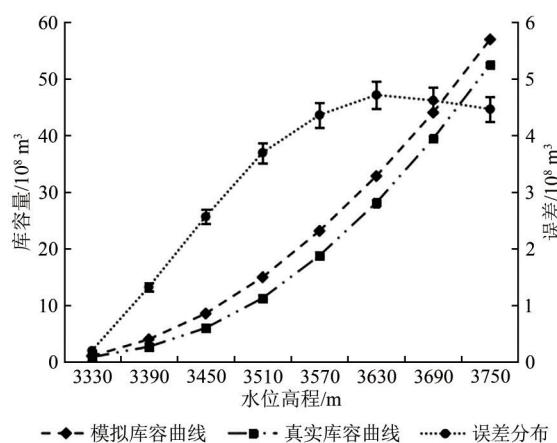


Fig. 4 Comparison between simulated volume and actual volume
图4 模拟库容与真实库容比较

5 方法的应用

5.1 萨雷兹湖水量估算

根据上述方法首先模拟出萨雷兹堰塞湖的水下未知地形(图5)。从水下地形模拟图上可以看出, 整个萨雷兹湖湖盆呈现东高西低的趋势; 最

深处在河流下游距离乌索伊大坝前的一段距离处, 最深处湖底高程约为2750 m左右。结合2018年夏季的卫星遥感影像水域掩模面积, 当前坝前水位约为3268 m, 由此可以得知萨雷兹湖最深处水深已经愈520 m。

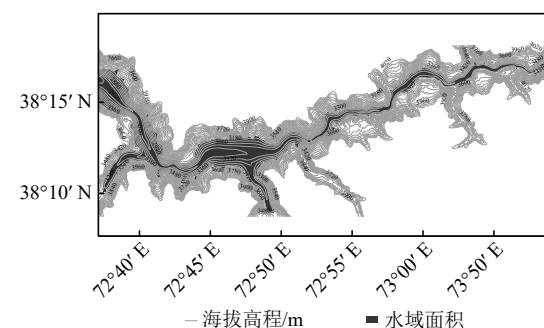


Fig. 5 Simulation underwater terrain of Sarez lake
图5 萨雷兹堰塞湖水下地形模拟图

根据这一模拟水下数字地形高程模型数据, 结合水域淹没空间范围, 通过离散曲面积分计算得到萨雷兹湖当前的蓄水量约为162.49亿m³。这一计算结果与现有的文献资料估测水量数据(最

大水深超过 500 m, 蓄水量约为 155—165亿 m^3) 基本吻合 (杨立信, 2008a)。

5.2 水量动态变化分析

基于研究区域 1972 年以来的 Landsat 存档遥感数据, 从中挑选了质量较高的遥感影像, 提取了 1972 年—2018 年萨雷兹湖的水域淹没面积分布。在此基础上, 结合模拟的水下地形数据, 采取曲面积分的方法定量计算了萨雷兹湖的水资源库容量, 并绘制萨雷兹湖的面积—水位—库容关系曲线, 见图 6。

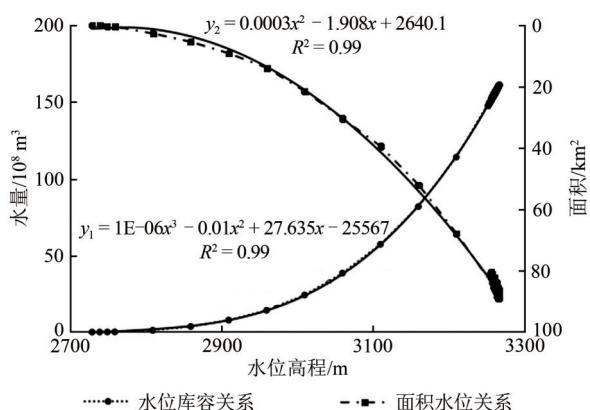


图 6 萨雷兹湖水位—面积—库容模型

Fig. 6 Water level-area-storage capacity model of Sarez Lake

6 结 论

本文提出了一种无/缺水下地形资料的高原堰塞湖水量遥感快速估算方法, 该方法能够快速估算高原堰塞湖水量, 算法精度较高技术通用性强, 初步实现了水下地形数据未知的高原堰塞湖水量遥感估算过程中的变量特征不完备难题, 为无/缺资料区高原堰塞湖水量遥感快速监测提供了一种可行的技术方法, 应用前景较为广阔。研究得到以下结论:

(1) 无/缺水下地形数据的高原堰塞湖水量遥感估算方法减少了遥感水量估算对水下实测地形数据的依赖, 为水下地形难以获取的高原堰塞湖水量遥感定量估算提供了可行的方法;

(2) 无/缺水下地形数据的高原堰塞湖水量遥感定量估算有效规避了传统水文学算法中静态库容和动库容纠缠, 降低了计算成本提高了信息获取时效性, 可适应快速应急响应监测要求。

实时动态水量遥感监测是防治堰塞湖次生灾

害发生过程中的一个技术难点。文章虽基本实现了无/缺水下地形数据的高原堰塞湖水量遥感定量估算方法; 但本算法模型仍然有需要改进和完善的地方。例如: 淹没面积提取可以考虑采用更高精度的卫星数据源如 GF-1/2、GF-3 等, 边坡高程受 GDEM 数据的精度影响, 可以进一步考虑无人机高精度三维立体测图数据。另外需要指出的是由于文中受数据获取的限制, 对河流的比降系数采取了线性估算, 但对于大区域来说可能会对模拟精度有直接的影响。随着可利用遥测数据源增多, 未来可以考虑多点采样的非线性比降拟合模型。例如: 机载激光测深系统和无人船水下测量相结合, 对水下地形分段抽样测量加密, 可进一步提高预测模型的精度。

参 考 文 献 (References)

- Cai Q, Huang L, Liang J, Li X D, Long Y, Xiao Y, Liu K B, Xie G X and Zeng G M. 2012. Estimation of the water volume of the Dongting Lake with TERRA/MODIS data. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 39(4): 64-69 (蔡青, 黄璐, 梁婕, 李晓东, 龙勇, 肖义, 刘卡波, 谢更新, 曾光明. 2012. 基于 MODIS 遥感影像数据的洞庭湖蓄水量估算. 湖南大学学报(自然科学版), 39(4): 64-69) [DOI: 10.3969/j.issn.1674-2974.2012.04.012]
- Cao B. 2006. Research on Reservoir Dynamic Capacity Based on Remote Sensing and DEM. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology (曹波. 2006. 基于遥感图像和 DEM 测定水库动态库容的方法研究. 武汉: 华中科技大学)
- Chen X L, Lu J Z, Cai X B, Li H and Yin S J. 2008. Geomatics-based method research on capacity calculation of Quake Lake. Journal of Remote Sensing, 12(6): 885-892 (陈晓玲, 陆建忠, 蔡晓斌, 李辉, 殷守敬. 2008. 基于空间信息技术的堰塞湖库容分析方法研究. 遥感学报, 12(6): 885-892)
- Duan Z and Bastiaanssen W G M. 2013. Estimating water volume variations in lakes and reservoirs from four operational satellite altimetry databases and satellite imagery data. Remote Sensing of Environment, 134: 403-416 [DOI: 10.1016/j.rse.2013.03.010]
- Furnans J and Austin B. 2008. Hydrographic survey methods for determining reservoir volume. Environmental Modelling and Software, 23(2): 139-146 [DOI: 10.1016/j.envsoft.2007.05.011]
- Gan Z, Zhong L and He X G. 2017. V-shaped reservoir capacity calculation based on fitting of underwater terrain. Yangtze River, 48(22): 89-92 (甘拯, 钟良, 何秀国. 2017. 基于水下地形拟合的 V 型河道库容计算方法. 人民长江, 48(22): 89-92)
- Gao S Y and Li C G. 2007. Research for survey technology of reservoir capacity. Yangtze River, 38(10): 98-99 (高圣益, 李成国. 2007. 水库库容测量技术研究. 人民长江, 38(10): 98-99) [DOI: 10.3969/j.issn.1674-2974.2007.10.021]

- 10.3969/j.issn.1001-4179.2007.10.041]
- Huang S F, Li X T, Tan D B, Xin J F, Chai F X and Cheng X J. 2013. Method and Practice of Remote Sensing Monitoring and Evaluation of the Dam Lake. Beijing: China Water and Power Press (黄诗峰, 李小涛, 谭德宝, 辛景峰, 柴福鑫, 程学军. 2013. 堰塞湖遥感监测评估方法与实践. 北京: 中国水利水电出版社)
- Huang Y, Ma Q, Wu J Y and Zhang L M. 2019. Dammed lake information acquisition and dam breaking flood forecasting. *Yangtze River*, 50(4): 12-19, 52 (黄艳, 马强, 吴家阳, 张黎明. 2019. 堰塞湖信息获取与溃坝洪水预测. 人民长江, 50(4): 12-19, 52) [DOI: 10.16232/j.cnki.1001-4179.2019.04.003]
- Ischuk A R. 2011. Usoi Rockslide Dam and Lake Sarez, Pamir Mountains, Tajikistan//Natural and Artificial Rockslide Dams. Berlin, Heidelberg: Springer: 423-440 [DOI: 10.1007/978-3-642-04764-0_16]
- Kuang S F, Wang X G, Huang J C and Wei Y Q. 2008. Risk analysis and impact assessment of dam-break in Barrier Lake. *China Water Resources*, (16): 17-21 (匡尚富, 汪小刚, 黄金池, 魏迎奇. 2008. 堰塞湖溃坝风险及其影响分析评估. 中国水利, (16): 17-21) [DOI: 10.3969/j.issn.1000-1123.2008.16.005]
- Liu D and Li Y. 2012. The calculation of area and storage of Poyang Lake based on remote sensing technology. *Remote Sensing Information*, (2): 57-61 (刘东, 李艳. 2012. 基于遥感技术的鄱阳湖面积库容估算. 遥感信息, (2): 57-61) [DOI: 10.3969/j.issn.1000-3177.2012.02.011]
- Liu N, Yang Q G and Chen Z Y. 2016. Hazard Mitigation for Barrier Lakes. Wuhan: Yangtze River Press (刘宁, 杨启贵, 陈祖煜. 2016. 堰塞湖风险处置. 武汉: 长江出版社)
- Lv J T, Wang Z H and Zhou C H. 2002. A tentative discussion on the monitoring of the Yigong landslide-blocked lake with satellite remote sensing technique. *Acta Geoscientia Sinica*, 23(4): 363-368 (吕杰堂, 王治华, 周成虎. 2002. 西藏易贡滑坡堰塞湖的卫星遥感监测方法初探. 地球学报, 23(4): 363-368) [DOI: 10.3321/j.issn:1006-3021.2002.04.014]
- Mi H Y, Zai J and Jiang X H. 2007. Contrast and analysis of reservoir storage calculation methods. *Surveying and Mapping of Geology and Mineral Resources*, 23(2): 1-4, 11 (米鸿燕, 宰建, 蒋兴华. 2007. 静库容计算方法的比较分析. 地矿测绘, 23(2): 1-4, 11) [DOI: 10.3969/j.issn.1007-9394.2007.02.001]
- Qin H C. 1983. Numerical calculation of dynamic capacity for flood routing. *Shuili Xuebao*, (1): 42-50 (秦惠承. 1983. 动态库容调洪的数值计算. 水利学报, (1): 42-50)
- Tian Y, Lin Z J, Lu X S and Liang Y. 2007. Remote sensing application in reservoir storage calculation. *China Rural Water and Hydropower*, (3): 17-18, 21 (田雨, 林宗坚, 卢秀山, 梁勇. 2007. 遥感技术在水库水容量测算中的应用. 中国农村水利水电, (3): 17-18, 21) [DOI: 10.3969/j.issn.1007-2284.2007.03.006]
- Tong S C and Zhou J J. 2003. Study of the approximate method of calculating the flood control capacity of mountainous reservoirs. *Journal of Hydroelectric Engineering*, (4): 74-82 (童思陈, 周建军. 2003. 河道型水库防洪库容近似计算方法. 水力发电学报, (4): 74-82) [DOI: 10.3969/j.issn.1003-1243.2003.04.011]
- Wang Y K, Sun H and Dai J J. 2013. Characteristics and prevention of dam breach in dammed lakes in China. *Science and Technology Information*, (19): 485-486, 514 (王杨科, 孙欢, 代娇娇. 2013. 我国堰塞湖溃坝特点及其防治. 科技信息, (19): 485-486, 514) [DOI: 10.3969/j.issn.1001-9960.2013.19.382]
- Xie J L. 2013. Calculation and Analysis of Hydrological Monitoring during the Hazard Removal Process of the Dam Lake. Lanzhou: Gansu People's Publishing House (谢建丽. 2013. 堰塞湖除险过程中的水文监测计算与分析. 兰州: 甘肃人民出版社)
- Xu H J and Chen S Y. 2002. Numerical-analytic method for reservoir backwater storage flood routing. *Shuili Xuebao*, (3): 69-73 (许海军, 陈守煜. 2002. 水库动库容调洪计算的数值-解析解法. 水利学报, (3): 69-73) [DOI: 10.3321/j.issn:0559-9350.2002.03.013]
- Yang L X. 2008a. Study on the governance of Sarez Dam Lake in Tajikistan. *Express Water Resources and Hydropower Information*, 29(6): 1-4 (杨立信. 2008a. 塔吉克斯坦萨雷兹堰塞湖治理研究. 水利水电快报, 29(6): 1-4) [DOI: 10.3969/j.issn.1006-0081.2008.06.001]
- Yang L X. 2008b. Study on the treatment and utilization scheme of Sarez Barrier Lake. *Express Water Resources and Hydropower Information*, 29(7): 1-3, 5 (杨立信. 2008b. 萨雷兹堰塞湖治理利用研究方案. 水利水电快报, 29(7): 1-3, 5) [DOI: 10.3969/j.issn.1006-0081.2008.07.001]
- Zhang S, Gao H L and Naz B S. 2014. Monitoring reservoir storage in South Asia from multisatellite remote sensing. *Water Resources Research*, 50(11): 8927-8943 [DOI: 10.1002/2014wr015829]
- Zhu C M, Zhang X, Lu M and Luo J C. 2015. Lake storage change automatic detection by multi-source remote sensing without underwater terrain data. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, (3): 309-315 (朱长明, 张新, 路明, 骆剑承. 2015. 湖盆数据未知的湖泊动态库容遥感监测方法. 测绘学报, (3): 309-315) [DOI: 10.11947/j.AGCS.2015.20130438]

Dammed lake water volume estimation by satellite imagery and digital elevation model under unknown underwater terrain scenario

ZHU Changming¹, ZHANG Xin^{2,5}, FANG Hui^{3,4}, WANG Weisheng^{3,4}

1. School of Geography, Geomatics and Planning, Jiangsu Normal University, Xuzhou 221116, China;

2. State Key Laboratory of Remote Sensing Science, Aerospace Information Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China;

3. State Key Laboratory of Desert and Oasis Ecology, Xinjiang Institute of Ecology and Geography, CAS, Urumqi 830011, China;

4. Research Center for Ecology and Environment of Central Asia, Chinese Academy of Sciences, Urumqi 830011, China;

5. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract: The real-time dynamic monitoring of water volume has great value for risk assessment, prediction, and early warning and disposal decision-making of dammed lakes. In view of the difficulty in obtaining underwater topographic data of dammed lake in areas without gauged data on the plateau, directly, quantitatively, and timely estimating the water volume of dammed lake by using remote sensing technology is difficult. This study aims to solve the problem of rapid quantitative estimation of water volume of plateau dammed lake under unknown underwater terrain scenario by remote sensing and perform the risk monitoring and disaster assessment of dammed lake.

According to the existing remote sensing data and digital elevation information, this study puts forward a remote sensing quantitative estimation method of water volume of dammed lake on the plateau without underwater terrain by fully using remote sensing data. The details are as follows. First, the submerged area of dammed lake is extracted from remote sensing images. Second, the center line of the complex polygon of the dammed lake is calculated. Specifically, according to the water area of the dammed lake, the Tyson polygon algorithm is used to calculate the position information of the dammed lake centerline. Third, through the location of the polygonal center line of the dammed lake, the fixed-point elevation measurement is carried out to complete the fitting calculation. Then, according to the fitting estimation of the middle line elevation and combined with the slope elevation information, the unknown underwater terrain of the dammed lake is adaptively simulated. Finally, based on the simulated underwater terrain and the submerged area of the dammed lake, the capacity of the dammed lake is calculated by 3D curved surface space discrete integration.

The dammed lake, namely, Sarez Lake in the Pamirs was selected as the research area. Remote sensing survey and empirical research on water volume were carried out using the proposed method. The research results show that the water area of Sarez dammed lake is approximately 89.09 km², and the water volume of Sarez Lake is approximately 16.25 billion m³. This result is consistent with the expert's estimated water volume of 15.5 billion m³ to 16.5 billion m³. The accuracy verification of the local simulation experiment shows that the overall dynamic error between the simulation data and the measured data is controlled within 10%, and the correlation coefficient is 0.95 ($P<0.01$, double tailed). This finding further proves the robustness of the algorithm and the credibility of the estimation results.

This method can rapidly estimate the water volume of plateau dammed lake, with high accuracy and strong technical universality. It provides an efficient method for remote sensing estimation of plateau dammed lake water volume under none or lack of underwater terrain data scenario. It also solves the problem of quantitative calculation of plateau dammed lake water volume with unknown underwater terrain.

Key words: dammed lake, water volume estimation, underwater terrain, hydrologic remote sensing, sarez lake

Supported by National Key Research and Development Program of China (No. 2021YFB1407004); Priority Academic Program Development of Jiangsu Higher Education Institutions