

高分七号卫星在流域级数字孪生水利中的应用研究与实践

陈杰^{1,2}, 李国元^{1*}, 崔希民², 严登华³, 神栋梁^{1,4}, 张斌¹, 刘昌儒^{1,2}, 周晓青¹,
袁德宝²

- (1. 自然资源部国土卫星遥感应用中心, 北京 100048;
2. 中国矿业大学(北京)地球科学与测绘工程学院, 北京 100083;
3. 中国水利水电科学研究院, 北京 100038;
4. 山东科技大学测绘与空间信息学院, 山东 青岛 266590)

摘要: 高分七号卫星装备了我国首台业务化对地观测激光测高仪和亚米级光学立体相机, 获取高精度激光测高数据和亚米级光学影像数据, 可实现无地面控制点 1:10000 比例尺立体测图, 在数字孪生水利的大范围空间底座建设和湖库水位监测方面具有独特的应用优势。研究以密云水库为主要研究区, 使用该卫星激光和立体影像对水库水位和周边数字表面模型进行了提取, 并开展了应用实践分析。研究结果表明: 基于激光测高数据提取的水库水位绝对误差小于 0.15 m, 与国外同类型数据精度相当; 基于数字表面模型进行的水面范围预测结果 F_1 高于 0.85, 水量变化监测误差小于 3%, 可以满足相关水文学分析应用的要求。相关结论对于推广国产高分七号卫星激光测高和立体影像数据在水利领域的应用, 更好助力流域级数字孪生水利建设具有参考价值。

关键词: 高分七号卫星; 激光高程数据; 数字表面模型; 水位提取; 水文学分析
中图分类号: P236 **文献标识码:** A

Application research and practice of GF-7 satellite in basin-level digital twin water conservancy

Chen Jie^{1,2}, Li Guo-Yuan^{1*}, Cui Xi-Ming², Yan Deng-Hua³, Shen Dong-Liang^{1,4}, Zhang Bin¹, Liu Chang-Ru^{1,2}, Zhou Xiao-Qing¹, Yuan De-Bao²

- (1. Land Satellite Remote Sensing Application Center, Ministry of Natural Resources, Beijing 100048, China;
2. College of Geoscience and Surveying Engineering, China University of Mining and Technology-Beijing, Beijing 100083, China;
3. China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China;
4. College of Geodesy and Geomatics, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China)

Abstract: The GF-7 satellite is equipped with China's first operational earth observation laser altimeter and sub-meter optical stereo camera. High-precision laser altimetry data and sub-meter-level optical imagery data enable 1:10,000-scale stereoscopic mapping without ground control points, offering unique application advantages in large-scale spatial infrastructure construction for digital twin water resources management and water level monitoring of lakes and reservoirs. In the study, Miyun Reservoir is taken as the main research area. The GF-7 laser altimetry data and stereo image are used to extract the reservoir water level and the surrounding digital surface model (DSM), and the application practice analysis is carried out. The results show that the absolute error of reservoir water level extracted based on laser altimetry data is less than 0.15 m, which is equivalent to the accuracy of the same type of foreign data. Based on the digital surface model, the water surface range prediction result F_1 is higher than 0.85, and the water volume change moni-

基金项目: 国家民用航天预研项目(D030104); 自然资源部科技创新人才项目(BO2202); 国家自然科学基金项目(52174160);

Foundation items: Supported by National Civil Aerospace Pre-research Project (No. D030104); Ministry of Natural Resources Science and Technology Innovation Talent Program (No. BO2202); the National Natural Science Foundation of China (No. 52174160)

作者简介 (Biography): 陈杰(1998-), 男, 安徽淮南人, 硕士研究生, 主要研究领域为激光测高数据处理与应用, E-mail: CUMTBCchenjie@163.com

* 通讯作者 (Corresponding author): E-mail: ligy@lasac.cn

toring error is less than 3%, which can meet the requirements of related hydrological analysis applications. The relevant conclusions are of reference value for promoting the application of domestic GF-7 satellite laser altimetry and stereo image data in water conservancy, and better assisting the construction of basin level digital twin water conservancy.

Key words: GF-7 Satellite, laser elevation data, digital surface model, lake level extraction, hydrological analysis
PACS:

引言

自“十三五”以来,我国开始大力发展智慧水利建设^[1]，“十四五”规划纲要提出“构建智慧水利体系,以流域为单元提升水情测报和智能调度能力”。数字孪生水利作为智慧水利建设的重要措施,是指通过数字技术对水利系统进行高精度的数字化映射和动态仿真。数据底板作为数字孪生水利建设的重要基石^[2],其包括的数字资源主要由地理信息数据、监测数据等组成。针对地理信息数据,按照《数字孪生流域建设技术大纲(试行)》的要求,可将其按照数据精度和建设范围分为L1/L2/L3三级,分别针对数字孪生流域中低精度面上建模、流域重点区域精细建模、流域重要实体场景建模。为满足L2级流域重点区域的数字孪生空间底座建设需求,传统的人工实测、无人机航测等手段存在耗时久、成本高和数据更新周期长的缺点^{[3][4]},相较之下基于遥感卫星数据的高精度数字高程模型(Digital Elevation Model, DEM)和数字表面模型(Digital Surface Model, DSM)则更符合数字孪生流域级建设的大面积数据获取需求。目前我国资源三号系列卫星(ZY3)、高分七号卫星(GF-7)等多颗民用卫星具备1:50000、1:10000比例尺的高精度立体测图能力和全流域覆盖能力,针对L2级的覆盖需求和精度要求,GF-7卫星理论上具有很大的应用潜力和应用价值。而针对监测数据,GF-7卫星搭载的激光测高仪可以对湖库水位提供水位监测数据,目前水位监测数据主要采用水位站实测的方式获取,虽然该方法获取的数据较为准确,但存在建设成本高、建设周期长等问题,在面对突发水患灾害时,无法在受灾区域进行快速有效的水位获取。因此,使用激光测高数据进行水位的提取可以有效的填补这方面的空白。

国内外机构及学者针对数字水利开展了多项研究。例如美国联邦地质调查局(United States Geological Survey, USGS)于2024年启动了三维水文计划(3D Hydrography Program, 3DHP)^[5]。该计划包括一个三维水文网络数据集,该网络数据将由当前三维高程计划(3D Elevation Program, 3DEP)的高程数

据集生成并集成,旨在为相关的数字水利计划提供河流坡度等地理信息数据,目前该项目仍在建设中^[6]。国内学者也针对数字孪生水利进行了相关研究,但研究中所使用的地理信息数据主要为国外卫星数据或开源数据:在地理信息数据方面,多数研究在构建模型时使用的地形数据来源于Copernicus DEM、SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) 和 ALOS(Advanced Land Observing Satellite) DEM等开源地形数据^[7-9];在水位监测数据方面,大部分学者以ICESat/ICESat-2、GEDI等数据为主^[10-15],而针对国产卫星激光测高数据,仅有部分学者研究了数据的可行性并进行了少量应用示范,其应用潜力与精度水平仍待明确。

为更好地发掘国产卫星数据应用潜力,扩大国产卫星数据在水利工程与灾害防治中的应用范围,提高我国基础地理信息数据的独立自主能力,本文使用GF-7卫星数据在北京市密云水库区域开展应用实践:使用该卫星激光测高数据进行水位提取试验,验证了GF-7卫星水位提取的精度水平;同时结合立体影像数据生成GF-7数字表面模型(GF-7 DSM),进行湖泊水面范围变化与水量变化监测试验,以探寻国产卫星数据在水利领域的应用前景与优势。

1 研究区概况与数据源

1.1 研究区概况

密云水库建成于1960年9月,坐落于北京市东北部密云区境内,地处华北平原与燕山山脉的构造过渡带,横跨潮河与白河两大天然河道,是华北地区规模最大的山谷型多年调节水库。从地貌特征看,水库主体位于燕山沉降带东南缘的峡谷区域,主坝建设于海拔150米的基岩峡谷段,拦蓄系统由坝高42.6 m的主坝及5座副坝共同构成,形成总控制流域面积约15,788 km²、湖面面积约180 km²的巨型人工水体^{[16][17]}。水库总库容4.375*10⁹ m³,水源主要来自于潮河与白河两条天然河道,并同时承接部分南水北调的水源^[18]。

2024年夏季,受北京降水增多和上游来水量增

加的影响,该年7月至11月间密云水库水位持续升高。截至2024年10月29日早8时,密云水库库容量达 $3.581 \times 10^9 \text{ m}^3$,水库蓄水位为155.31 m,超过2021年10月1日历史最高蓄水量($3.579 \times 10^9 \text{ m}^3$)^[19];至11月1日水库蓄水位达到峰值,为155.35 m。2024年7月至11月间,密云水库库容水位和库容水量变化如图1所示。

1.2 GF-7卫星基本情况

GF-7卫星是我国首颗民用亚米级光学传输型立体测绘卫星,于2019年11月3日在太原卫星发射中心成功发射,运行于太阳同步轨道^[20]。其搭载的两线阵立体相机可获取宽20 km、分辨率优于0.8 m的全色立体影像和2.6 m分辨率的多光谱影像。该卫星同时搭载了一台两波束激光测距仪,以3 Hz的重频获取高精度激光测高数据,测距仪的定标测距精度优于0.1 m,业务化生产的激光测高数据测高精度优于0.3 m(平地区域3倍Sigma)。并配备了激光足印相机,可通过获取的激光足印影像(Laser Footprint Image, LFI)记录激光足印点周围的地物影像^{[21][22]},示意图如图2所示。其主要性能指标如表1所示。

2 研究方法

2.1 湖面激光点筛选

由于全波形体制的激光测高数据提供了完整的回波波形数据,因此在筛选时可以使用饱和度、脉宽等多个波形参数进行多层次约束,具体流程如图3所示。

在使用到的筛选参数中,云量、波形饱和与否、回波波峰个数等筛选条件较易判定,即保留无云、

表1 高分七号卫星载荷主要性能指标

Table 1 Main performance indexes of GF-7 satellite load

载荷		项目	性能指标
激光 载荷	激光仪	波束数	2波束
		重频率	3 Hz
		激光波长	1064 nm
		地面足印	21 m(实测)
		沿轨向地面足印间距	2.4 km
足印	分辨率	3.2 m	
相机	幅宽	1.76 km	
光学 载荷	全色 影像	分辨率	前视:0.65 m 后视:0.80 m
		幅宽	≥20 km
		前后视夹角	31°
	多光谱影像	波段数	4
		分辨率	2.6 m
	幅宽	≥20 km	

波形未饱和、回波波峰个数为1的激光点。而卫星侧摆角与回波脉宽变化两个筛选条件则需要结合具体卫星参数进行分析,相关筛选阈值的确定过程如下:

(1)卫星侧摆角

卫星侧摆角的大小会直接影响星载激光器的激光指向角。受激光指向角测量误差影响,过大的激光指向角会导致激光点平面位置偏差增大,进而影响激光点的高程精度,在地表坡度较大的区域这种影响会更加显著^[23]。因卫星侧摆和地形起伏引起的高程误差计算公式如式1所示。

$$\Delta h = H \times \Delta \theta \times \tan(S + \theta) \quad (1)$$

式中: Δh 为高程误差,H为卫星轨道高度,S为地表

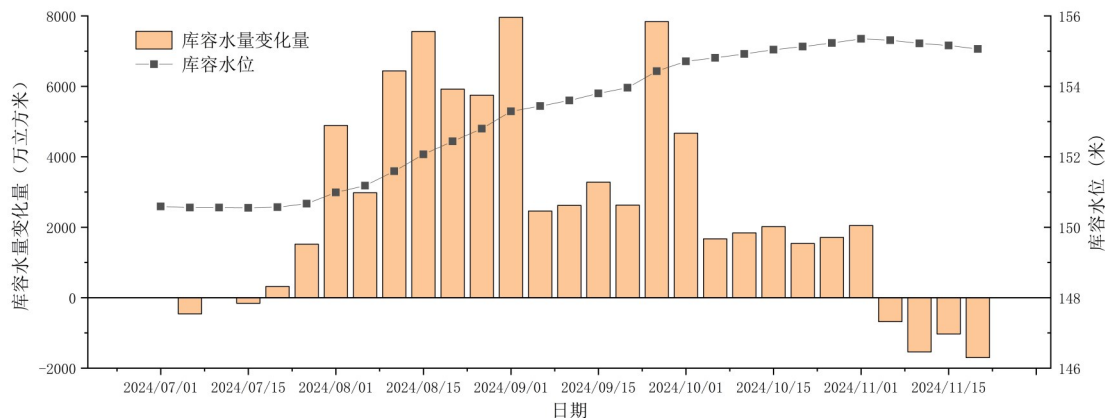


图1 密云水库水位及水量变化示意图

Fig. 1 The schematic diagram of water level and water quantity change of Miyun Reservoir

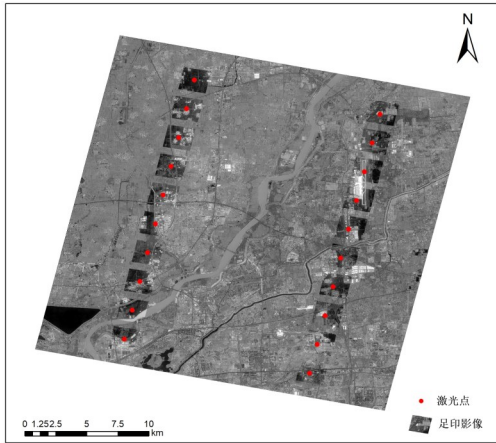


图2 GF-7卫星立体影像数据和激光点示意图

Fig. 2 Diagram of GF-7 satellite laser points and stereo image data

坡度, θ 为卫星激光测高仪的指向角, $\Delta\theta$ 为激光指向角测量精度。

结合本文的实际研究区域与研究数据, GF-7 卫星的轨道高度 H 约为 500 km, 平静的湖泊水面坡度 S 可视为 0° , GF-7 卫星的激光指向角测量精度 $\Delta\theta$ 为 $2.5''$, 将上述参数代入公式 1 中, 可得出: 如湖泊激光点需达到 0.15 m 的高程精度, 则星载激光器的指向角应小于 1.4° 。考虑到 GF-7 卫星的两波束星载激光仪存在约 0.7° 的安装角, 因此将卫星的侧摆角阈值设置为 0.7° 。

(2) 回波脉宽变化

回波脉宽变化量是指激光回波相较于出射激光产生的脉宽变化量, 即二者的差值, 其在一定程度上反映了激光足印内地物是否平整。回波波形脉宽变化越小的激光点, 其高程精度相对越高。因此在筛选过程中, 需依据激光器设计值、地面实验值和实际数据值, 确定回波脉宽变化阈值, 以对湖面激光点进行质量控制^[24]。激光回波的脉宽变化量与地表坡度、激光发散角等参数的关系如式 2 所示。

$$\Delta\tau = \tau_s - \sqrt{(\tau_h^2 + \tau_f^2) + \frac{4H^2 \tan^2\theta}{c^2} (\tan^2 S + \tan^2\theta)} \quad (2)$$

式中, $\Delta\tau$ 为回波脉宽变化量, τ 为回波波形脉宽, τ_f 为发射波形脉宽, τ_h 为硬件引起的波形展宽, H 为卫星高度, θ 为激光发散角, c 为光速, S 为地表斜率。将 GF-7 卫星的相关仪器参数代入式中进行计算, 根据结果将脉宽变化阈值设置为 0.8 ns。

2.2 激光数据辅助 DSM 模型生成

使用 GF-7 卫星激光测高数据与 GF-7 卫星立体影像进行 DSM 生成的流程图如图 4 所示, 流程中主要分为以下步骤:

(1) 激光高程控制点提取: 结合 GF-7 卫星激光数据的特点, 综合使用卫星运行状态、激光回波波形特征、激光足印周围环境因素等参数进行多层次约束, 以实现 GF-7 卫星激光高程控制点的自动提取^[24]。

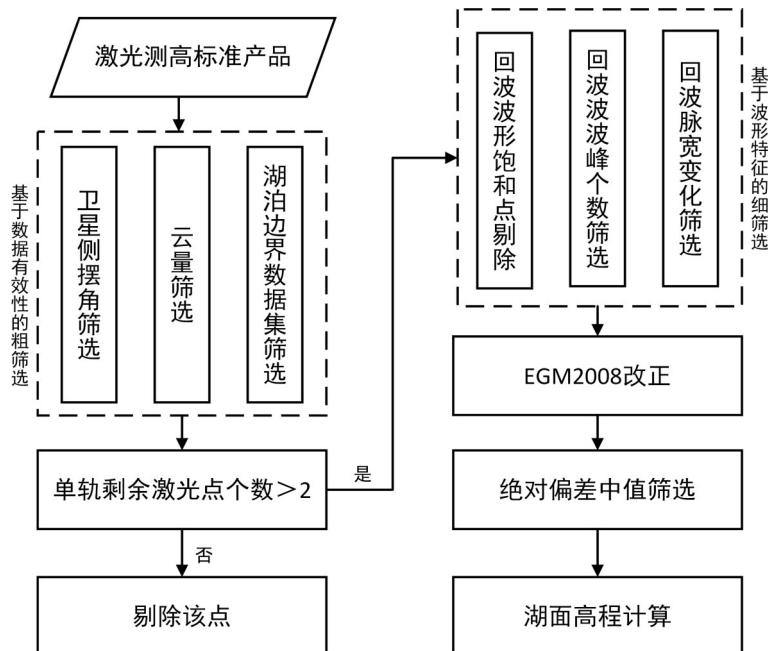


图3 全波形式激光测高数据筛选示意图

Fig. 3 Full waveform laser altimetry data screening schematic diagram

(2)激光测高数据辅助立体影像区域网平差:使用有理函数模型作为立体影像成像几何模型,并使用激光测高数据辅助立体影像区域网平差。通过求解误差方程,更新立体影像成像几何模型,获取精度提升后的立体影像,再经影像密集匹配提取DSM^[25-27]。

(4)水面异常DEM校正:由于大面积的湖面中缺乏特征点,立体影像较易出现匹配异常,影响湖面区域的高程值。利用GF-7卫星后视相机获取的同轨多光谱影像,使用NDWI算法进行水体提取,得到当日水体的实际范围,再将水体范围内的DSM高程值校正为当日的实测水位值。

2.3 湖库水量变化量监测

(1)基于湖岸地形的蓄水量变化监测

湖泊蓄水量的计算首先需要基于地形数据,使用区域生长算法确定湖泊水面的范围,然后在水面范围内使用水位高程值和格网高程值计算每个水面格网的新增水量,统计后得到整个水面的水量变化量。计算方法如式3所示:

$$\Delta V = \sum_{i=1}^N S_i (H - h_i) \quad (3)$$

式中: ΔV 为水量变化量, S 为淹没区面积, S_i 为单个格网的面积, H 为淹没区水位, h_i 为单个像元的表面高程值, N 为淹没区的像元个数。

(2)基于水面面积的蓄水量变化监测

在无地形数据的研究区,较为常见的蓄水量变化监测方法是使用基于多期遥感影像提取出的不同时相的水面面积数据,并结合同时间段内的水位变化数据,进行水量变化估算^[28],具体公式如公式(4)所示:

$$\Delta V = \frac{1}{3} \times \Delta H \times (A_1 + A_2 + \sqrt{A_1 \times A_2}) \quad (4)$$

式中: ΔV 为水量变化量, ΔH 为湖泊水位变化量, A_1 、 A_2 为不同时相下的湖泊水面面积。

3 应用研究与实践

3.1 湖面激光点筛选精度验证

GF-7卫星在2019年—2024年间共过境密云水库7次,其中满足筛选条件的过境次数5次。将使用章节2.1中的湖面激光点筛选方法得出卫星水位和未经过筛选的湖面激光点得出的卫星水位进行对比,并使用实测水位进行精度验证,结果如表2所示。密云水库实测水位数据可从北京水务局官网获取(<https://nsbd.swj.beijing.gov.cn>),该实测水位高程基准为大沽高程基准,大沽水准面与卫星激光水位数据的EGM2008基准之间存在1.295 m的系统差异,为便于直观比较,表2中的实测水位为转换后EGM2008基准面下的实测水位值。

通过表2可以看出,GF-7卫星在过境密云水库的7次中,侧摆角偏大的有2次,绝对误差分别为-0.603 m和0.216 m,高于其他侧摆角较小的测量结果;在剩余5次的过境测量中,经筛选每轨剔除了约1~2个激光点。筛选前后水位测量的精度有了显著提升,绝对误差RMSE由0.249 m减小至0.061 m。验证结果表明本文提出的多层级筛选方式可以有效提取高程精度较高的湖面激光点。

3.2 GF-7 DSM精度验证

为验证基于GF-7卫星激光测高数据与立体影像数据生成的DSM在堤坝区域的高程精度,在肇庆市西江使用无人机采集的堤坝三维数据作为验证数据进行精度验证,同时将GF-7 DSM与常用的Co-

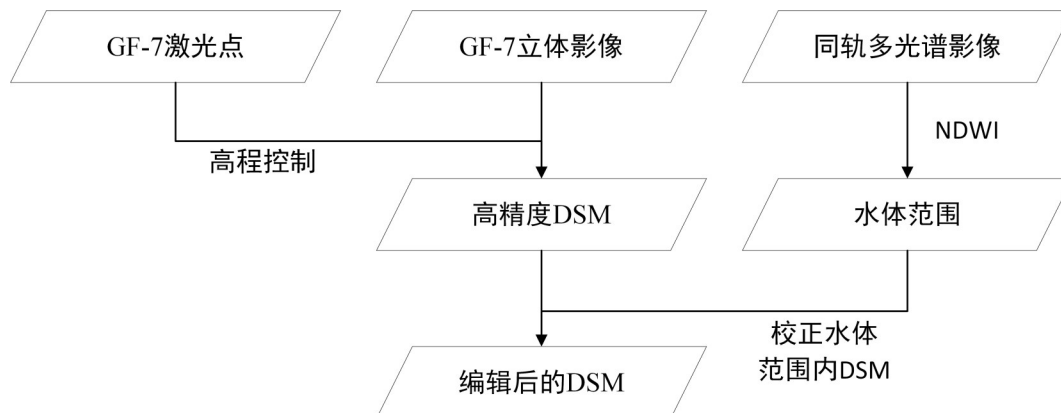


图4 高精度DSM模型生成

Fig. 4 High-precision DSM model generation

表2 GF-7/SLA03密云水库水位对比

Table 2 Water level comparison of GF-7 / SLA03 Miyun Reservoir

时间	侧摆角/ $^{\circ}$	实测水位/m	筛选前			筛选后		
			点数	卫星水位/m	绝对误差/m	点数	卫星水位/m	绝对误差/m
2022. 08. 01	0. 8	150. 805	3	150. 202	-0. 603	/	/	/
2022. 12. 02	0	150. 485	4	150. 445	-0. 040	3	150. 503	0. 018
2023. 03. 25	0	150. 175	4	150. 045	-0. 130	4	150. 042	-0. 133
2023. 11. 21	0	150. 035	4	149. 993	-0. 042	2	150. 049	0. 014
2024. 01. 14	-1. 4	149. 745	3	149. 961	0. 216	/	/	/
2024. 03. 18	0	149. 775	5	149. 735	-0. 040	3	149. 758	-0. 017
2024. 11. 04	0	154. 035	6	154. 009	-0. 026	5	154. 021	-0. 014

pernicus DEM 进行精度对比。无人机数据采集于 2024 年 9 月,空间分辨率为 0.5 m,高程精度优于 0.1 m。无人机验证数据示意图如图 5 所示。

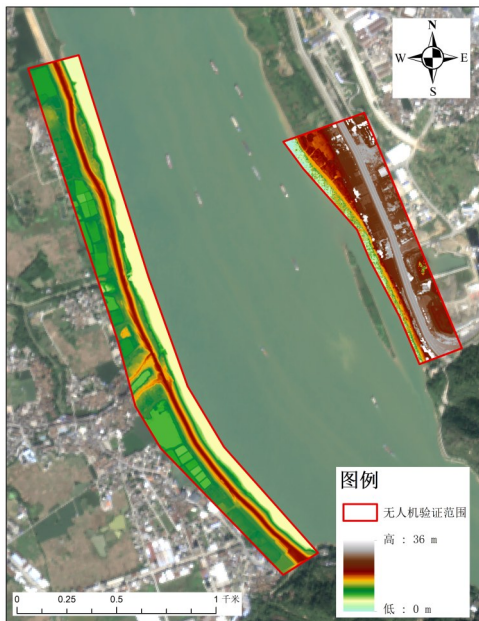


图5 无人机验证数据示意图

Fig. 5 UAV verification data schematic diagram

使用无人机数据分别对无激光控制和有激光控制的 GF-7 DSM、Copernicus DEM 在堤坝区域的总体高程精度进行验证,总体验证结果表明:无激光控制的 GF-7 DSM 在堤坝区域的高程均方根误差为 8.194 m;有激光控制的 GF-7 DSM 在堤坝区域的高程均方根误差为 0.76 m, Copernicus DEM 在堤坝区域的高程均方根误差为 5.11 m。通过对比可以看出,经激光高程控制后,GF-7 DSM 在堤坝区域的高程精度有了显著提升,且明显优于 Copernicus DEM。

对基于有激光控制的 GF-7 DSM 堤坝提取精度进行验证:基于无人机数据提取出的东岸、西岸堤坝相对高度分别为 10.66 m、12.66 m,基于有激光控制的 GF-7 DSM 提取出的东岸、西岸堤坝相对高度分别为 10.33 m、12.51 m。对比结果显示:基于有激光控制的 GF-7 DSM 可以进行堤坝相对高度的有效提取,东岸、西岸的堤坝相对高度误差分别为 0.33 m 和 0.15 m。

在西江东、西河岸多处使用垂直于河流的堤坝剖面高程线进行详细对比,对比图如图 6 所示。通过对比可以看出:基于有激光控制的 GF-7 DSM 的堤坝高程剖面线与无人机数据的一致性较高,且拥有较高的绝对精度,可以较为准确的反映河岸及堤坝的高程变化情况,而基于 Copernicus DEM 的堤坝高程剖面线受限于网格较大(Copernicus DEM 为 30 m 网格),无法展示堤坝剖面的连续高程变化,且绝对精度比有激光控制的 GF-7 DSM 更低。

3.3 水面范围变化监测精度验证

使用基于 GF-7 卫星数据生成的密云水库缓冲区高精度 DSM 数据与水位数据,使用区域生长法对湖泊在不同水位情况下进行水面范围变化预测,该地区的 DSM 示意图如图 7 所示。为便于湖面范围变化预测结果的精度验证,选取有国产高分辨率光学卫星过境的日期进行试验,即 2024 年 8 月 30 日(GaoFen-6, GF-6)、2024 年 10 月 3 日(GaoFen-1B, GF-1B)和 2024 年 10 月 29 日(GaoFen-1C, GF-1C);验证时基于国产多光谱影像使用 NDWI 算法进行水体提取,以作为真值来验证预测精度。由于生成 DSM 的数据为 GF-7 卫星于 2020 年 12 月 19 日获取,因此使用该日的湖面范围作为起始范围,预测上述三个日期的湖面范围变化。预测湖面范围及与实际湖面范围的细节对比如图 8 所示。

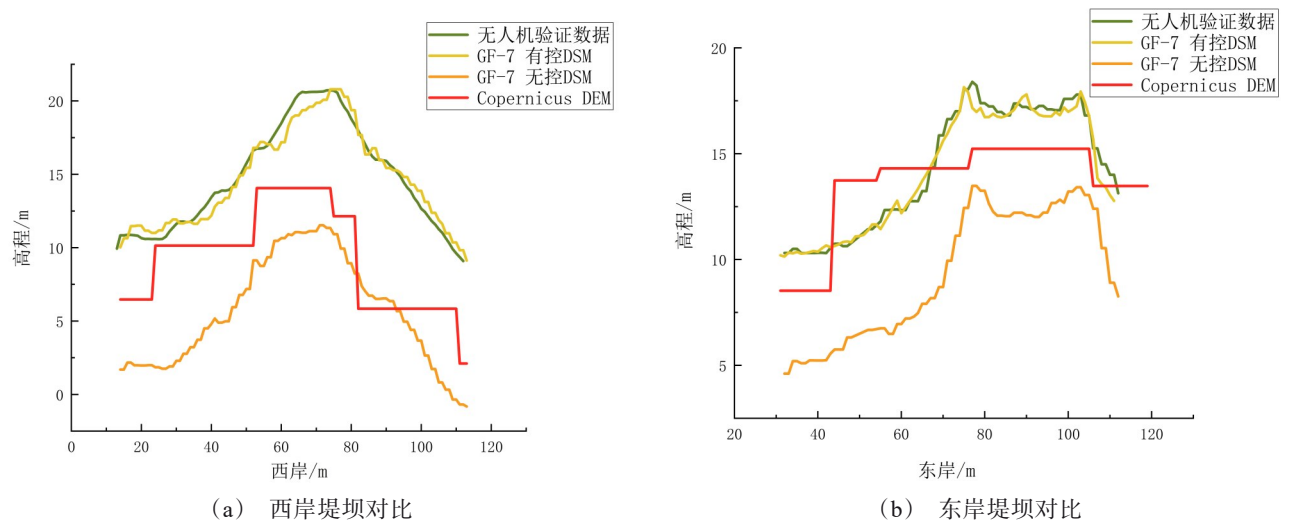


图6 堤坝高程剖面线对比

Fig.6 Embankment elevation profile line comparison

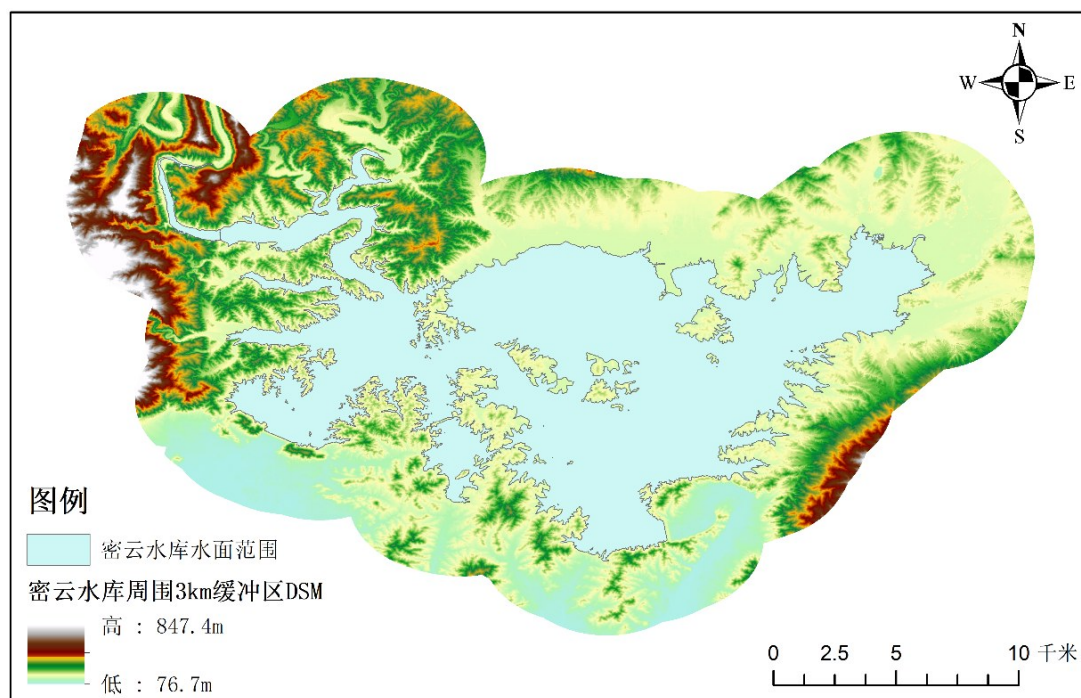
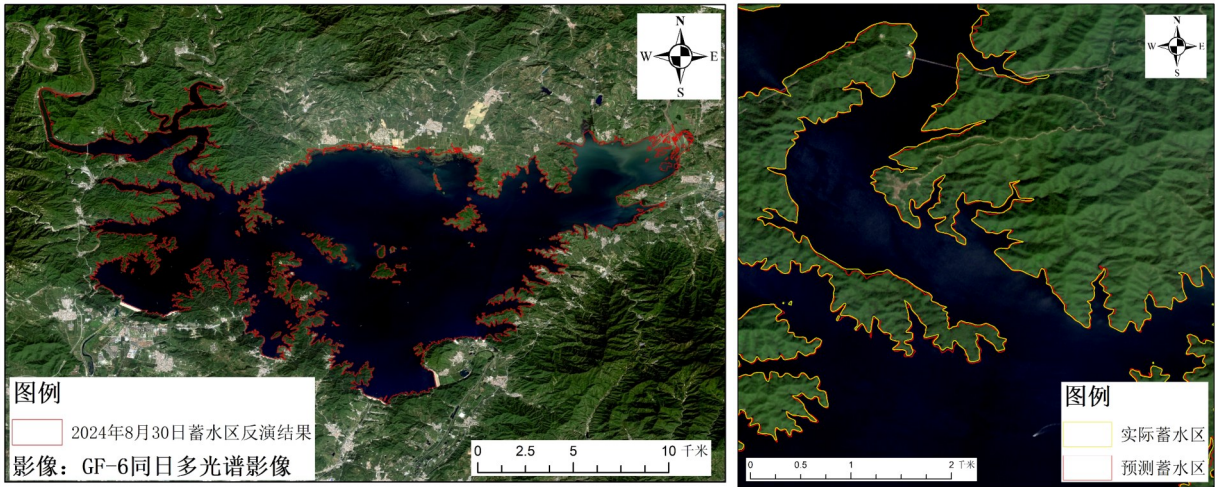
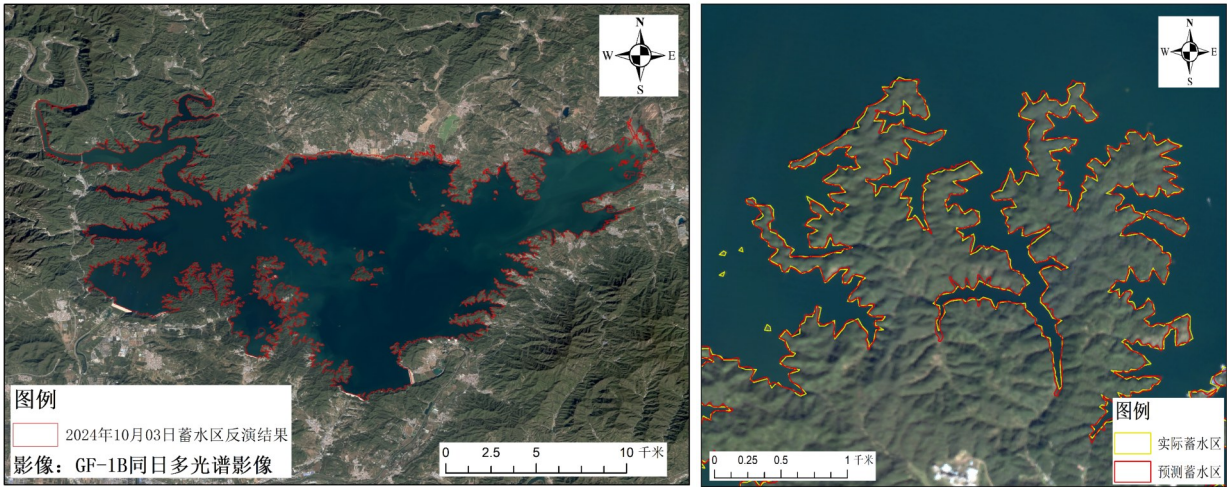


图7 密云水库区域高精度DSM示意图

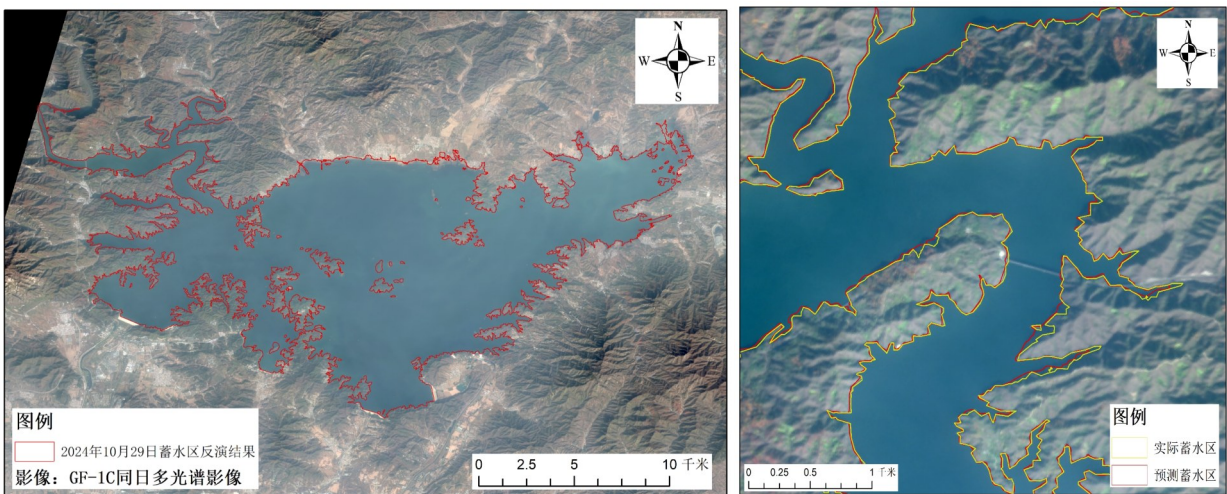
Fig. 7 High-precision DSM schematic diagram of Miyun Reservoir



(a) 2024年8月30日预测湖面范围



(b) 2024年10月3日预测湖面范围



(c) 2024年10月29日预测湖面范围

图8 预测湖面范围示意图

Fig.8 Schematic diagrams of predicted lake surface range

使用精确率 (precision)、召回率 (recall) 与 F_1 系数对预测结果进行定量评价, 三者的计算公式如式 5 所示, 结果如表 3 所示。

$$\begin{aligned}
 precision &= TP / (TP + FP) \\
 recall &= TP / (TP + FN) \\
 F_1 &= 2 * precision * recall / (precision + recall)
 \end{aligned}
 \tag{5}$$

式中: TP: True Positives, 即准确预测的新增淹没区面积; FP: False Positives, 即错分的非新增淹没区面积; FN: False Negatives, 即漏分的新增淹没区面积。

通过图 8 可以看出, 基于高精度 DSM 数据与水位数据预测出的水面范围与实际水面范围相似度较高, 证明了该预测方法的可靠性。使用多个定量参数对预测的湖面范围变化量进行评价, 通过表 3

的分析可以看出, 预测的湖面范围变化量的 F_1 系数均超过了 0.85, 且随着水位的上升, 新增湖面面积变大, 预测准确度也在逐步上升。

使用上述相同的方法, 基于 Copernicus DEM 开展水面范围变化监测试验。在试验过程中发现, 由于 Copernicus DEM 格网较大、地物表达能力较差, 使得密云水库南侧的个别水坝在 DEM 中没有较好的体现, 如图 9 所示, 导致在试验中出现了湖水外泄, 与事实严重不符。相比之下, GF-7 DSM 体现了较好的地物表达能力与较高的高程精度。

3.4 水量变化监测精度验证

利用密云水库地区高精度 DSM 数据与水位数据, 采用 2.3 节中基于湖岸地形的方法进行蓄水量

表 3 湖面范围变化预测精度验证

Table 3 Verification of prediction accuracy of lake surface range change

时间	预测新增湖面面积/km ²	实际新增湖面面积/km ²	precision	recall	F_1
2024. 08. 30	20. 635	23. 965	0. 791	0. 919	0. 850
2024. 10. 03	26. 155	28. 634	0. 846	0. 927	0. 885
2024. 10. 29	31. 879	30. 655	0. 912	0. 877	0. 894

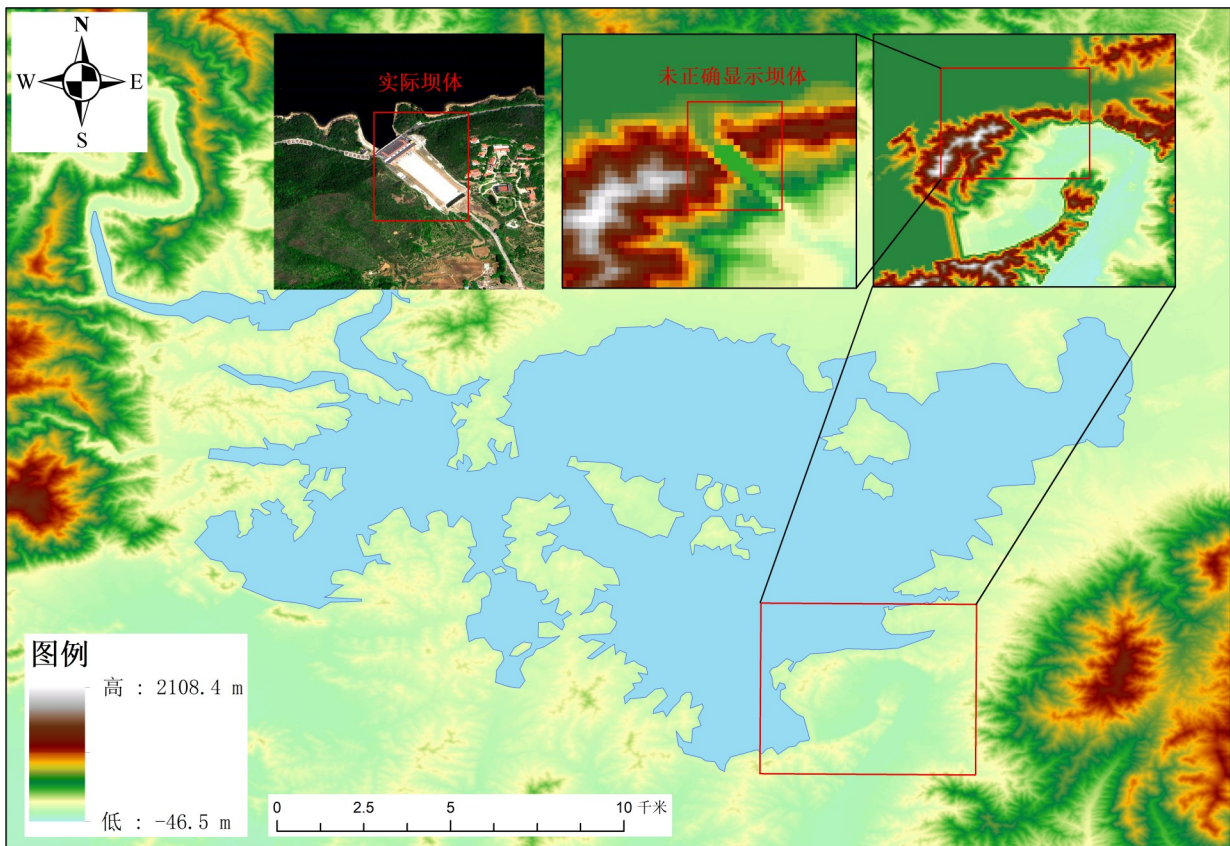


图 9 Copernicus DEM 湖水外泄示意图

Fig. 9 Copernicus DEM diagram

增量的预测。该DSM使用的原始数据为2020年12月19日获取,当日密云水库水位为148.35 m,水量为 $2.48 \times 10^9 \text{ m}^3$,以此为基准进行水量增量的预测,并使用实测水量增量作为验证数据验证预测精度。为使得结果更具有普适性,在150 m—156 m间阶梯式选取水位值作为预测条件,预测结果与实测结果对比如表4所示。

通过表4的对比结果可以看出,基于高精度DSM数据预测的水量增量的总体误差优于3%。将基于高精度DSM数据的水量增量预测结果与基于国产卫星多光谱影像提取出的湖泊面积的预测结果进行对比,对比结果如表5所示。

表5的结果显示,基于高精度DSM数据预测的水量增量误差百分比均小于3%,基于湖泊面积数据预测的水量增量误差百分比则均大于3%。通过对比可以发现基于高精度DSM数据的水量增量预测结果明显优于基于湖泊面积的预测结果。

4 总结与展望

湖库水位数据与高精度地形数据作为数字孪生水利建设的重要基石,对数字水利建设具有重要作用。本文使用国产GF-7卫星数据,分析了国产卫星数据在数字孪生水利建设应用中的作用。试验结果表明:

(1)使用GF-7卫星激光数据可以对湖泊水位进行有效提取,经实测数据验证,GF-7卫星在密云水库的水位提取的绝对精度优于0.15 m,具有较大

的应用潜力。

(2)使用激光数据和立体影像数据可以生成精度较高的DSM,基于激光高程控制后三维地形精度由8.14 m提升至0.76 m。由此开展的水面范围预测、水量变化监测等水文学分析应用都表现出了较高的精度,可以作为大范围流域级的数字孪生水利空间底板,更好地服务相关水文学分析。

但目前GF-7卫星数据在数字孪生水利应用方面仍存在部分问题,主要包括以下两个方面:

(1)目前GF-7卫星激光测高数据主要用于稀疏高程控制点获取,导致其在部分流域的覆盖能力较弱,需要大幅提高激光重频率和数据获取能力以满足业务化湖库水位激光测量应用需求。

(2)基于密集匹配自动生产的GF-7 DSM中保留了房屋、树木等地面物体的高程信息,对水面范围预测和水量变化监测产生了一定的影响,后续还需开展面向水利应用的DSM快速滤波研究。

截至2024年底,GF-7卫星共处理获取全球有效立体影像约 $7.41 \times 10^7 \text{ km}^2$;全国有效立体影像约 $9.26 \times 10^6 \text{ km}^2$,占全国陆域总面积的96.5%。我国七大河总流域面积约 450 km^2 ,约占全国总面积的46.9%,针对流域级大面积空间底座的建设需求,相较于无人机航测等手段,遥感卫星更具有应用优势。总体而言,根据《数字孪生流域建设技术大纲(试行)》的相关要求,高分七号卫星立体测图可以满足大范围L2级高精度地形数据精度需求,能更好的为大范围、流域级的水利工程空间底座建设提供

表4 湖泊水量增量预测精度验证

Table 4 Verification of prediction accuracy for lake water volume

日期	水位/m	实际水量增量/ m^3	预测水量增量/ m^3	误差绝对值/ m^3	误差百分比
2024.08.01	150.99	39430	39854	424	1.075%
2024.08.15	152.07	56410	57223	813	1.441%
2024.08.30	153.17	74080	75601	1521	2.053%
2024.09.20	153.96	90360	88284	2076	2.298%
2024.10.03	154.76	100380	102936	2556	2.546%
2024.10.29	155.31	109690	112735	3045	2.776%

表5 不同水量增量预测方法对比

Table 5 Comparison of different water volume increment prediction methods

日期	实际水量增量/ m^3	基于DSM数据预测			基于湖泊面积数据预测		
		预测水量增量/ m^3	误差绝对值/ m^3	误差百分比	预测水量增量/ m^3	误差绝对值/ m^3	误差百分比
2024.08.30	74080	75601	1521	2.053%	71763	2317	3.127%
2024.10.03	100380	102936	2556	2.546%	96880	3500	3.487%
2024.10.29	109690	112735	3045	2.776%	105967	3723	3.394%

基础数据支持,更好的服务于“天空地水工”一体化监测感知体系建设。

References

- [1] Cai Yang, Cheng Jian- Guo, Zeng Yan, et al. vigorously promote the construction of intelligent water conservancy [J]. *Water Resources Development Research*, 2021, 21 (9): 32-36
(蔡阳, 成建国, 曾焱, 等. 大力推进智慧水利建设[J]. 水利发展研究), 2021, 21(9): 32-36.
- [2] Ye Yun-Tao, Jiang Y Z, Liang L L, et al., Digital Twin Watershed: New Infrastructure and New Paradigm for Future Watershed Management [J]. *Advances in Water Science*, 2022, 33 (05) : 683-704.
(冶运涛, 蒋云钟, 梁犁丽, 等. 数字孪生流域: 未来流域治理管理的新基建新范式[J]. 水科学进展), 2022, 33 (05): 683-704.
- [3] Partsch J, Alsdorf D, Rodriguez E, et al. Measuring Surface Water from Space[J]. *Reviews of Geophysics*, 2007, 2 (45): 2637-2655.
- [4] Ren Xiao-Ning, Jia L, Sha J X, et al. Development of satellite altimetry and its application in inland water bodies [J]. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 2021, 52(11): 64-72.
(任小宁, 贾玲, 沙金霞, 等. 卫星测高技术的发展及其在内陆水体的应用研究[J]. 水利水电技术(中英文)), 2021, 52(11): 64-72.
- [5] United States Geological Survey. 3D Hydrography Program [EB/OL], [2025-04-07]. <https://www.usgs.gov/3dhp>
(美国联邦地质调查局. 3D Hydrography Program [EB/OL], [2025-04-07]. <https://www.usgs.gov/3dhp>
- [6] United States Geological Survey. 3D National Topography Model [EB/OL], [2025-04-07]. <https://www.usgs.gov/3d-national-topography-model>
(美国联邦地质调查局. 3D National Topography Model [EB/OL], [2025-04-07]. <https://www.usgs.gov/3d-national-topography-model>
- [7] Yu Chen, Hu De- Yong, Zhang Ya- Ni, et al. Research and application of flood dynamic evolution algorithm based on DEM spatial block [J]. *Science of Surveying and Mapping*, 2020, 45 (10) : 181-189.
(于琛, 胡德勇, 张亚妮, 等. DEM空间分块的洪水动态演进算法研究与应用[J]. 测绘科学), 2020, 45 (10): 181-189.
- [8] Lin Xiao- Hui. Evolution process analysis and risk assessment of dam break flood [D]. Xihua University, 2023.
(林晓惠. 堰塞坝溃决洪水演进过程分析及风险评估 [D]. 西华大学, 2023.
- [9] Mai Zhan- Lin. Numerical simulation of flood routing and disaster risk assessment of cofferdam breach in the construction of Qiaosanglian dike project [D]. South China University of Technology, 2023.
(麦展林. 樵桑联围破堤工程施工围堰溃决洪水演进数值模拟及灾害风险评估[D]. 华南理工大学, 2023.
- [10] Wu Hong- Bo, Chen Yi- Duo, Estimation of lake water storage change of Qinghai Lake based on the ICESat satellite altimetry data and Landsat satellite imageries[J]. *Journal of Water Resources and Water Engineering*, 2020, 31 (05): 7-15.
(吴红波, 陈艺多. 联合 Landsat 影像和 ICESat 测高数据估计青海湖湖泊水量变化[J]. 水资源与水工程学报), 2020, 31(05): 7-15.
- [11] Yang Xiong- Dan, Li Guo- Yuan, Wang Pei- Xian, et al. Monitoring of Qinghai Lake changes with spaceborne laser altimetry and remote sensing images [J]. *Science of Surveying and Mapping*, 2020, 45(05): 79-87
(杨雄丹, 李国元, 王佩贤, 等. 星载激光测高结合遥感影像的青海湖变化监测[J]. 测绘科学), 2020, 45 (05): 79-87.
- [12] Hien-Phan Vu, Lindenbergh Roderik, Menenti Massimo. ICESat derived elevation changes of Tibetan lakes between 2003 and 2009 [J]. *INTERNATIONAL JOURNAL OF APPLIED EARTH OBSERVATION AND GEOINFORMATION*, 2012, 1712-22.
- [13] Sun Wei, Jin Jian- Wen, Li Guo- Yuan, et al. Accuracy evaluation of laser altimetry satellite ICESat-2 in monitoring water level of Taihu lake [J]. *Science of Surveying and Mapping*, 2021, 46(11): 6-11.
(孙伟, 金建文, 李国元, 等. 激光测高卫星 ICESat-2 监测太湖水位精度评价[J]. 测绘科学), 2021, 46 (11): 6-11.
- [14] Tian Shi- Yue, Wang Chang, He Jia- Yang, et al. Water level sequence construction and water level prediction of Poyang Lake based on ICESat-2 laser altimetry data [J]. *Science of Surveying and Mapping*, 2023, 48 (12) : 105-114.
(田时岳, 王昶, 何佳洋, 等. 基于 ICESat-2 激光测高数据的鄱阳湖水位序列构建及水位预测[J]. 测绘科学), 2023, 48(12): 105-114.
- [15] He Ming- Qin, Jin Shuang- Gen, Zhang Zhi- Jie, et al. Monitoring and assessing water level variation in Poyang Lake by ICESat-2 altimetry [J]. *Journal of Nanjing University of Information Science & Technology*, 2024, 05: 717-726.
(何明琴, 金双根, 张志杰, 等. 利用 ICESat-2 激光测高监测和评估鄱阳湖水位变化特征[J]. 南京信息工程大学学报(自然科学版)), 2024, 05: 717-726.
- [16] Liu Xiao- Dan, Li Lei, Zhang Hong, et al. Spatiotemporal evolution and prediction of carbon storage in Miyun Reservoir basin during 1985-2035 [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2025, 45 (01) : 244-253.
(刘小丹, 李垒, 张洪, 等. 1985-2035年密云水库流域生态系统碳储量时空演替格局与预测[J]. 水土保持通报), 2025, 45 (01): 244-253.
- [17] Fang Yuan, Xie Pei, Sun Ning, et al. Water ecological function zoning based on the dual drive of "nature-society": taking Miyun Reservoir Basin as an example [J]. *Journal of Environmental Engineering Technology*, 2022, 12 (06) : 2113-2123.
(方源, 谢培, 孙宁, 等. 基于“自然-社会”二元驱动的水生态功能分区——以密云水库流域为例[J]. 环境工程技术学报), 2022, 12 (06): 2113-2123.
- [18] Li Yi- Feng, Luo Yue- Gang, Liu Gang, et al. Effects of land use change on ecosystem services: a case study in Miyun reservoir watershed [J], *Acta Ecologica Sinica*, 2013, 33 (03): 726-736.
(李屹峰, 罗跃初, 刘纲, 等. 土地利用变化对生态系

- 统服务功能的影响——以密云水库流域为例[J]. 生态学报, 2013, 33 (03): 726-736.
- [19] BeiJing Waler Authority. The water storage capacity of Miyun Reservoir in Beijing has reached a new record high after three years [EB/OL], (2024-10-30) [2025-03-14]. https://swj.beijing.gov.cn/swdt/swyw/202410/t20241030_3931024.html
(北京水务局. 北京密云水库蓄水量, 时隔三年再创历史新高 [EB/OL], (2024-10-30) [2025-03-14]. https://swj.beijing.gov.cn/swdt/swyw/202410/t20241030_3931024.html)
- [20] Tang Xin- Ming, Liu Chang- Ru, Zhou Ping, et al. Satellite-Imagery Geometric Accuracy Improvement Based on Direct Correction of Dominant Coefficients[J]. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing: Journal of the American Society of Photogrammetry, 2020(4):215-224.
- [21] Tang Xin- Ming, Xie Jun- Fen, Liu Ren, et al. Overview of the GF-7 Laser Altimeter System Mission [J]. Earth and Space Science, 2020, 7(2): e2019EA000777.
- [22] Li Guo- Yuan, Tang Xin- Ming, Chen Ji- Yi, et al. Processing and preliminary accuracy validation of the GF-7 satellite laser altimetry data[J]. Acta Geodaetica et Cartographica Sinica, 2021, 50(10): 1338-1348.
(李国元, 唐新明, 陈继溢, 等. 高分七号卫星激光测高数据处理与精度初步验证[J]. 测绘学报), 2021, 50 (10): 1338-1348.
- [23] Li Guo- Yuan, Tang Xin- Ming. Accuracy evaluation of large lake water level measurement based on GF-7 laser altimetry data [J]. National Remote Sensing Bulletin, 2022, 26 (01): 138-147.
(李国元, 唐新明. 高分七号卫星激光测高数据大型湖泊水位测量精度评估[J]. 遥感学报), 2022, 26 (01): 138-147.
- [24] Li Guo- Yuan, Yao Jia- Qi, Tang Xin- Ming, et al. Research on automatic extraction method of GF-7 satellite laser elevation control points [C]. Proceedings of the 8th Academic Conference on High Resolution Earth Observation, 2022: 14.
(李国元, 么嘉祺, 唐新明, 等. 高分七号卫星激光高程控制点自动提取方法研究[C]. 第八届高分辨率对地观测学术年会论文集, 2022: 14.
- [25] Zhou Ping. Key technology of high-precision geometric processing and mapping efficiency evaluation method of ZY-3 satellite remote sensing image [D]. Wuhan University, 2016.
(周平. 资源三号卫星遥感影像高精度几何处理关键技术及测图效能评价方法[D]. 武汉大学, 2016.
- [26] Li De- Reng, Zhang Guo, Jiang Wang- Shou, et al. SPOT-5 HRS image RPC model regional network adjustment without control points [J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2006, 31 (5) : 377-381
(李德仁, 张过, 江万寿, 等. 缺少控制点的 SPOT-5 HRS 影像 RPC 模型区域网平差[J]. 武汉大学学报(信息科学版)), 2006, 31(5): 377-381.
- [27] Li Guo- Yuan, Tang Xin- Ming, Gao Xiao- Ming, et al. Integration of ZY3-02 Satellite Laser Altimetry Data and Stereo Images for High-Accuracy Mapping[J]. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 2018, 84 (9) : 569-578.
- [28] Zhang Guo- Qing, Wang Meng- Meng, Zhou Tao, et al. Progress in remote sensing monitoring of lake area, water level, and volume changes on the Tibetan Plateau [J]. National Remote Sensing Bulletin, 2022, 26 (01) : 115-125.
(张国庆, 王蒙蒙, 周陶, 等. 青藏高原湖泊面积、水位与水量变化遥感监测研究进展[J]. 遥感学报), 2022, 26 (01): 115-125.