

青海省湖岸岸坡 GF-7 DSM 高程精度验证和 影响因子分析

张怀文^{1,2}, 曹引^{1,2}, 赵红莉^{1,2}, 蒋云钟^{1,2}, 赵慧子^{1,3},
王镒^{1,4}, 徐浩玮^{1,2}

1. 中国水利水电科学研究院 水资源研究所, 北京 100038;

2. 水利部数字孪生流域重点实验室, 北京 100038;

3. 河海大学 水文水资源学院, 南京 210024;

4. 大连理工大学 建设工程学院, 大连 116024

摘要: 高分七号卫星 (GF-7) 可以获取湖岸岸坡地形数据 (DSM), 在无地面观测湖泊蓄变量遥感监测中具有应用潜力。但湖泊地形复杂, 量化 GF-7 DSM 的高程精度及影响因素对开展基于 GF-7 DSM 的湖泊蓄变量遥感监测应用具有重要意义。为验证湖岸岸坡 GF-7 DSM 高程精度, 基于青海省 9 个湖泊岸坡高精度实测地形数据, 分析了湖岸岸坡 GF-7 DSM 高程精度、稳定性及其高程相对精度的主要影响因素。结果表明, 湖岸岸坡 GF-7 DSM 存在系统误差, 高程绝对精度较差, 具有显著地形相关性, 其高程相对精度较高, 高差绝对误差总体小于 1.7 m, 当坡度小于 15° 时, 高差绝对误差小于 1.5 m, 而后随坡度增大精度下降; 利用实测高程对 GF-7 DSM 进行修正, 可以显著提升高程绝对精度, 高程误差整体小于 0.85 m, 最大高程中误差小于 1.4 m, 高程相对精度总体优于 1.25 m, 最大误差小于 1.6 m, 修正后的湖岸岸坡 GF-7 DSM 无明显地形相关性。GF-7 DSM 高程相对精度主要受基准点坡度及坡度变化共同影响, 其中坡度变化是主要影响因素, 二者权重分别为 0.019 和 0.047。同一地点不同时相的 GF-7 DSM 之间具有极强的相关性, R^2 高于 0.98, 通过相对修正能够极大地削弱不同时相 GF-7 DSM 的系统误差, 使得多景 GF-7 DSM 通过拼接融合可用于大型湖泊蓄水量变化遥感监测, 从而在无地面观测湖泊蓄水量变化遥感监测中具有极大应用潜力。

关键词: GF-7 DSM, 精度验证, 地形相关性, 影响因子, 青海省, 实测地形, 湖岸岸坡

中图分类号: TP702/P2

引用格式: 张怀文, 曹引, 赵红莉, 蒋云钟, 赵慧子, 王镒, 徐浩玮. 2025. 青海省湖岸岸坡 GF-7 DSM 高程精度验证和影响因子分析. 遥感学报, 29(10): 3047-3062

Zhang H W, Cao Y, Zhao H L, Jiang Y Z, Zhao H Z, Wang R and Xu H W. 2025. Elevation accuracy validation and influence factor analysis of GF-7 DSM on Lakeshore in Qinghai Province. National Remote Sensing Bulletin, 29(10): 3047-3062 [DOI: 10.11834/jrs.20254009]

1 引言

近年来, 国内外卫星遥感技术快速发展, 卫星性能和应用水平不断提升 (唐新明和胡芬, 2018), 数据可获得性大大提高, 遥感逐渐成为湖泊时空监测研究的主要手段 (张闻松等, 2022)。湖泊蓄变量是反映湖泊变化的重要特征 (Song 等, 2013; 赵云等, 2017; Jiang 等, 2017; Wu 等,

2019; 宋春桥等, 2020; 何飞等, 2020), 对气候变化及人类活动十分敏感 (王苏民和窦鸿身, 1998), 是湖泊遥感监测的重点研究方向, 也是水资源评价和管理中的重要环节和参考指标 (张润科, 2018)。高分七号卫星 (GF-7) 作为立体测绘卫星, 通过其立体像对可以快速获取大范围的高精度地形数据——GF-7 DSM, 为湖泊蓄变量遥感监测提供了新数据源, 也为 GF-7 数据应用于水资

收稿日期: 2024-01-08; 预印本: 2025-06-19

基金项目: 国家自然科学基金 (编号: 52309040, 52279031); 国家重点研发计划 (编号: 2023YFF1304202)

第一作者简介: 张怀文, 研究方向为水资源遥感。E-mail: 2640725634@qq.com

通信作者简介: 曹引, 研究方向为水资源遥感。E-mail: caoyin@iwhr.com

源遥感监测领域提供了新思路。

GF-7是中国首颗民用亚米级高分辨率光学遥感卫星,也是中国首颗1:10000立体测绘卫星,于2019年11月3日成功发射入轨。GF-7搭载了一套双线阵测绘相机和一台激光测高仪,用于获取同期的立体测绘影像和激光测高数据。其中,前视相机全色影像地面像元分辨率为0.8 m,成像角度与正视方向夹角为+26°。后视相机成像角度与正视方向夹角为-5°,更接近正视成像有利于正射影像生产,其全色影像地面像元分辨率为0.65 m,多光谱影像配置4个波段,地面像元分辨率为2.6 m。GF-7的影像幅宽为20 km,摄影测量基高比约为0.62(曹海翊等,2020),通过前后视立体像对可以生产高精度地形数据DSM(Digital Surface Model),基于GF-7 DSM数据在无地面监测湖泊蓄变量遥感监测中具有独特优势。

对于GF-7 DSM的高程精度,已有研究均在大尺度地貌分类前提下,利用外业实测高程、LiDAR或DEM等作为验证数据,对同一点位的GF-7高程与真值高程进行直接对比验证GF-7 DSM高程精度。其中孙畅等(2022)和赵文普等(2022)从生产1:10000比例尺的4D产品(DEM, DOM, DLM, DRG)角度出发,利用高精度外业实测数据验证GF-7 DSM在平地、丘陵等地形条件下的高程精度介于0.3—0.7 m,在山地、高山地等地形条件下的高程精度有所下降,约1.3 m;同时,唐新明等(2021)利用GF-7同平台获取的激光测高数据作为高程控制点显著提升了GF-7 DSM的高程精度,优化后的GF-7 DSM平均高程精度优于1 m,最大高程误差小于1.5 m。由于GF-7 DSM的高程精度验证及影响因素研究目前相对较少,有学者对国内第一颗立体测绘卫星——资源三号(ZY-3)进行了DSM高程精度验证研究。对于ZY-3 DSM,部分学者同样在大尺度范围内以实测高程或高精度DEM为相对真值开展ZY-3 DSM高程精度验证,并探究了地面控制点的布设对于地形精度提升的影响。结果表明,ZY-3 DSM高程精度随地形复杂度的上升而下降,其中平地区域高程中误差最低,山区、丘陵地区高程中误差依次增大(Tang等,2015; Lu等,2016),而基于高精度实测数据修正后的ZY-3 DSM高程精度显著提升,其高程精度优

于2 m,高程中误差介于1.6—2.0 m(唐新明等,2012; Gao等,2013)。在地形数据生产过程中,通过向立体影像中加入一定数量的地面控制点GCP(Ground Control Point)可以有效提高定位精度,精度提升效果在平坦地区表现更好(潘红播等,2013),且控制点布设数量要随地形复杂度的提升而增加(Li等,2016)。

上述研究证明了GF-7/ZY-3卫星的立体测绘精度与地形有关,但已有研究仅侧重于在大尺度传统地形划分的条件下,GF-7 DSM在丘陵、山地等宏观地貌下的精度,而在湖岸岸坡这类特殊区域,则无法采取传统地形划分方式,GF-7 DSM高程精度仍缺乏研究。故需深入探究立体测绘地形高程精度的影响因子,以具体影响因子进行地形划分并开展精度验证,进而更好地表征GF-7 DSM在湖岸岸坡区域的高程精度。此外,现有研究缺乏针对GF-7 DSM与地形影响因子之间互馈关系的定量研究,使得基于GF-7 DSM开展湖泊蓄变量遥感监测存在不确定性。因此,分析GF-7 DSM在不同地形下的高程精度以及GF-7 DSM高程精度随坡度的变化情况,对于量化湖泊蓄变量监测的误差来源,推动GF-7服务于水资源遥感监测具有重要意义。

针对上述问题,本文基于青海省部分湖泊岸坡实测地形数据,着重开展岸坡区域GF-7 DSM数据高程精度验证,旨在明确在湖岸岸坡这类特殊区域,GF-7 DSM的高程精度及其稳定性。同时探究GF-7 DSM高程相对精度的地形影响因子,着重剖析并量化了地形影响因子对GF-7 DSM高程相对精度的影响权重,最后通过多元回归分析构建了地形因子对湖岸岸坡GF-7 DSM高程相对精度的影响关系模型。

2 研究区与数据

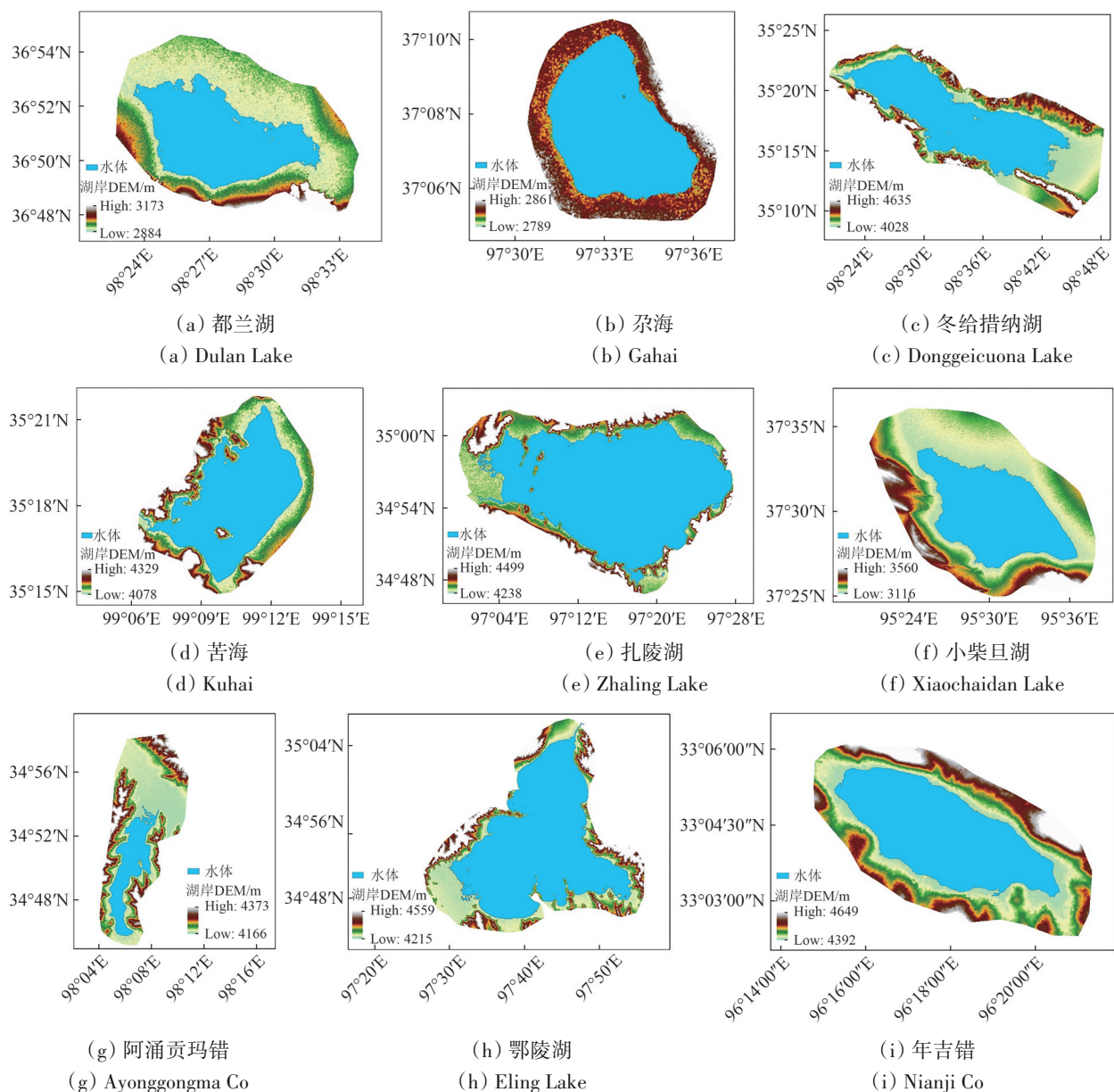
2.1 研究区

青海省(31°39'N—39°19'N, 89°35'E—103°04'E)深居中国西北内陆,位于青藏高原东北隅,总面积约72.2万km²。青海省平均海拔高于3000 m,境内海拔落差极大,整体地形复杂,涵盖平地,丘陵,山地,高山地等地形地貌。青海省是中国西

北地区重要的生态功能区，境内的“三江源”是长江、黄河、澜沧江等大江大河的发源地，水资源总量相对丰富。根据第一次全国水利普查结果，青海省内湖泊众多，1 km²及以上湖泊有242个，湖泊总面积为13098.04 km²，湖泊个数和面积分别占全国1 km²及以上湖泊总数和面积的8.45%和16.01% (<http://www.mwr.gov.cn/sj/tjgb/dycqgslpcgb> [2024-01-08])。

本文选取青海省部分湖泊的岸坡区域作为GF-7 DSM精度验证的试验区，试验区范围由高空分辨率卫星底图绘制得到，以包住湖岸岸坡

范围为原则，本研究试验区均匀分布于青海省中部，岸坡海拔从2789 m到4649 m。试验区内地形复杂，不同试验区海拔差异大，能够为探究高分七号卫星在不同海拔下的成像稳定性、数据相关性，剖析GF-7 DSM的高程精度变化及其地形相关性（表征GF-7立体影像高程精度随地形类别（平地、丘陵、山地）的变化关系）提供具有代表性的验证数据。图1以像元分辨率为30 m的SRTM DEM地形数据为例展示了青海省地形及试验区分布情况。



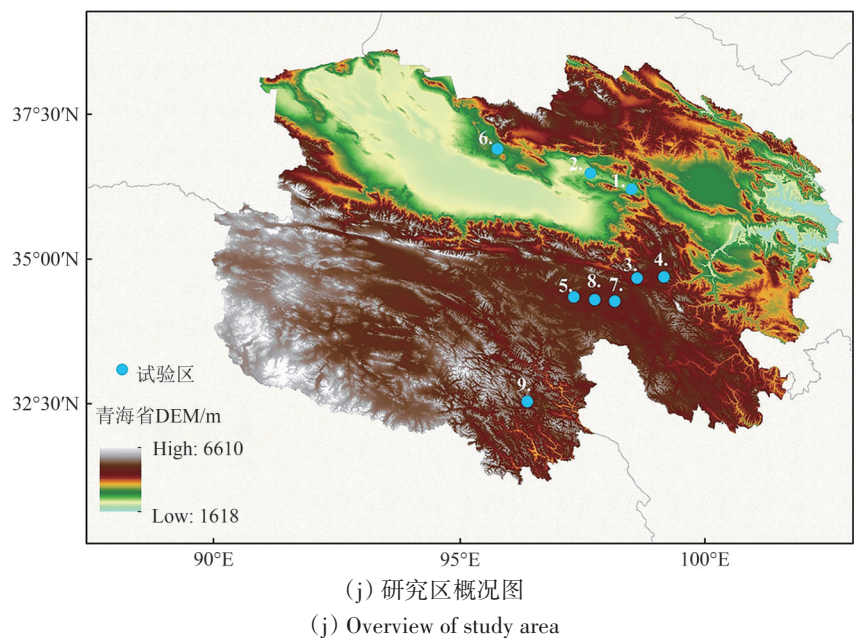


图1 青海省地形及试验区分布图

Fig. 1 The terrain of Qinghai province and the distribution of verification regions

2.2 数据源

基于实测地形数据的GF-7 DSM数据精度验证所涉及的数据源包括GF-7 DLC影像、RTK实测高程数据、无人机航摄DSM数据。本文使用的GF-7 DLC数据,属于高分七号卫星数据中的L1A级数据,是在原始数据的基础上,消除相机各探元间的辐射差异并调整相机各CCD片间色差形成的辐射影像产品。基于GF-7高分辨率的前后视影像,利用卫星自带的RPC参数对同期GF-7前后视全色影像进行正射校正后,采用密集图像匹配(Dense Image Matching)技术获取影像间的同名像点,再通过摄影测量的前方交会解算出像点坐标并采用RPC参数转换得到对应坐标系下的实际坐标,最后在匹配点之间进行内插得到影像重叠区域的DSM。

此外,实测验证数据的获取方式大致如下,利用华测(CHCNAV)-HCE600 GPS RTK,接入区域CORS网,在研究区的湖泊岸边沿坡度下降方向,约以十步为间隔测量若干高精度验证点,验证点下垫面为硬质不变地面,且周围基本无大量植被覆盖。采用大疆经纬M300 RTK无人机搭载5镜头立体测绘相机开展研究区航摄观测,飞行高度300 m,获取研究区高精度正射影像数据和DSM数据,空间分辨率约为5 cm。

数据获取时间、来源及用途如表1所示,图2以年吉错为例,展示了湖岸岸坡整体地形情况(图2(a))、不同试验数据的获取情况(图2(b))以及部分精度验证样本点的选取和布设情况(图2(c))。

表1 研究数据来源与用途
Table 1 Sources and purposes of research data

序号	数据	数据来源	数据用途	数据获取时间
1	GF-7 DLC影像	中国资源卫星应用中心	获取湖泊水面以上沿岸区域的地形数据(DSM)	2020年8月—2023年7月
2	RTK实测高程 点位数据	实地采集	获取湖泊沿岸区域高程点位数据,用于修正UAV DSM和 验证GF-7 DSM的高程绝对精度	2022年7月11日—20日
3	无人机航摄 DSM数据	实地拍摄	获取湖泊沿岸区域内大范围的地形数据, 用于验证GF-7 DSM的高程绝对、相对地形精度	2022年7月11日—20日

注:数据获取时间存在2—3年时间跨度,鉴于本研究聚焦于天然湖泊的岸坡区域,在无人为因素和自然灾害等影响下,假设天然湖泊近岸区域地形在3—5年的时间跨度内无显著变化,因而可以忽略数据时间跨度对研究结果的影响。

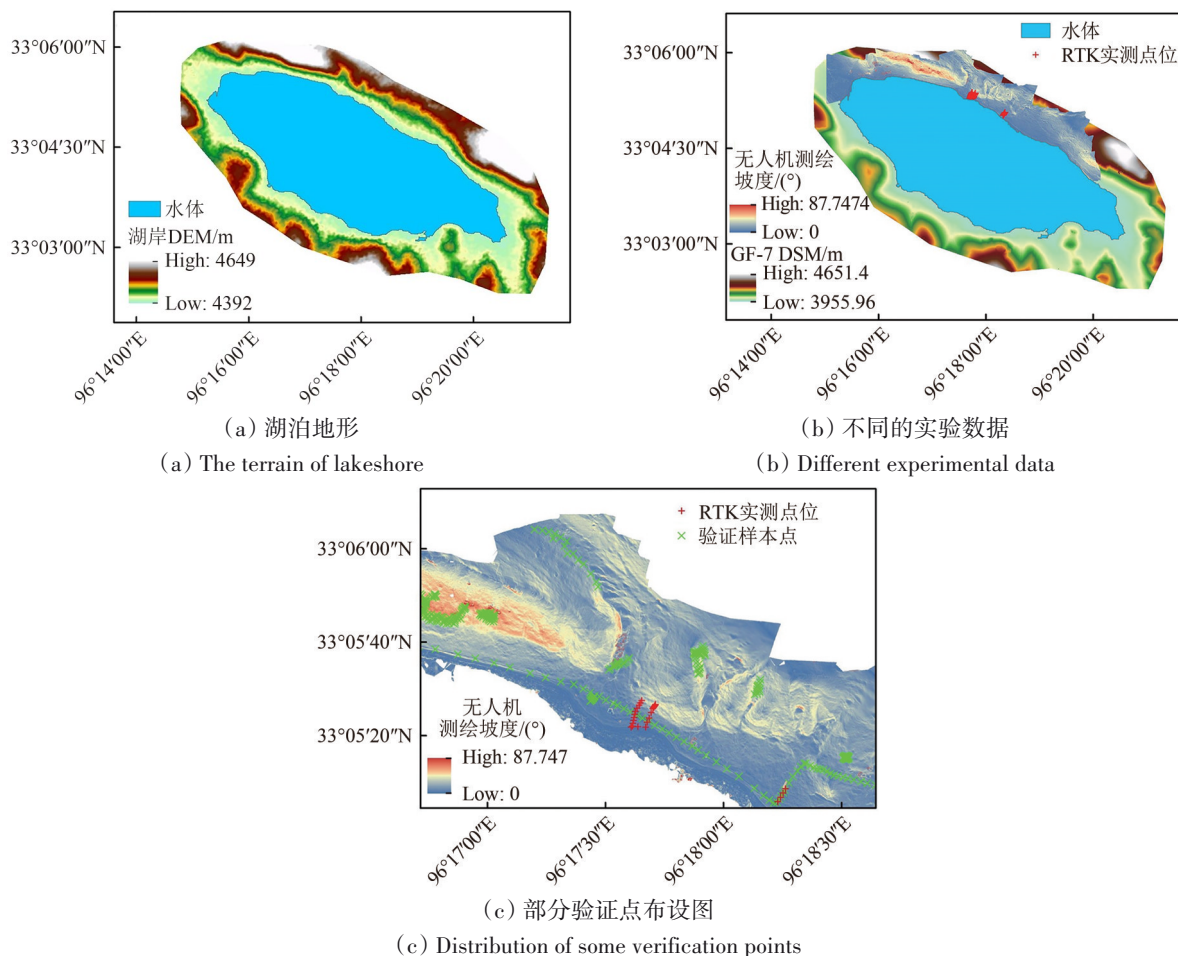


图2 年吉错试验区不同数据的获取情况及验证点布设图

Fig. 2 Different experimental data and the distribution of verification points in Nianji Co

3 精度验证方法

3.1 总体思路

GF-7 DSM数据作为构建湖泊蓄变量模型的基础数据,模型的精度和适用性与GF-7 DSM描述湖

岸岸坡地形变化的能力密切相关。因而,本文从构建湖泊蓄变量监测模型的应用角度出发,利用湖岸岸坡区域的实测地形数据,采用了GPS RTK实测和UAV DSM两种数据,从高程绝对精度和高程相对精度两方面开展GF-7 DSM的高程精度验证,验证流程如图3所示。

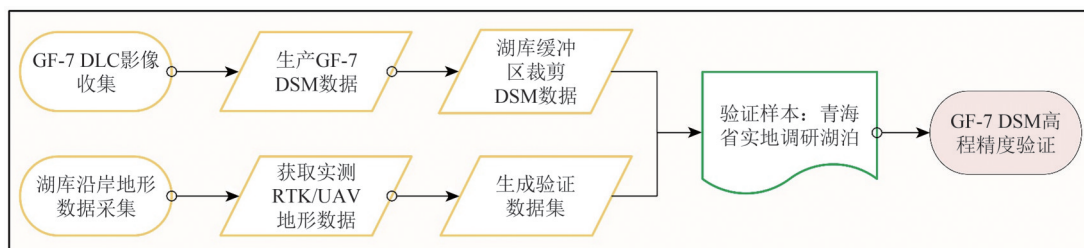


图3 湖岸岸坡 GF-7 DSM 高程精度验证流程图

Fig. 3 The workflow of elevation accuracy validation of GF-7 DSM at lakeshore

3.2 方案设计

基于GF-7 DSM开展湖泊蓄变量遥感监测本质上是利用GF-7 DSM数据反演湖岸岸坡等潜在水域

的水位—面积变化,构建水位—面积—蓄变量模型,进而实现湖泊蓄变量的动态遥感监测。GF-7 DSM作为基础建模数据,其在湖岸岸坡区域的高

程精度直接决定了模型的监测精度。因此,本研究面向基于 GF-7 DSM 的湖泊蓄变量遥感监测应用,基于青海省部分湖泊实测地形数据对湖岸岸坡 GF-7 DSM 的高程精度进行全面评价,验证 GF-7

DSM 在不同地形条件下的高程精度。选取同地区不同时相的 GF-7 DSM 对比验证其数据稳定性,验证方案具体分为 3 步,见图 4:

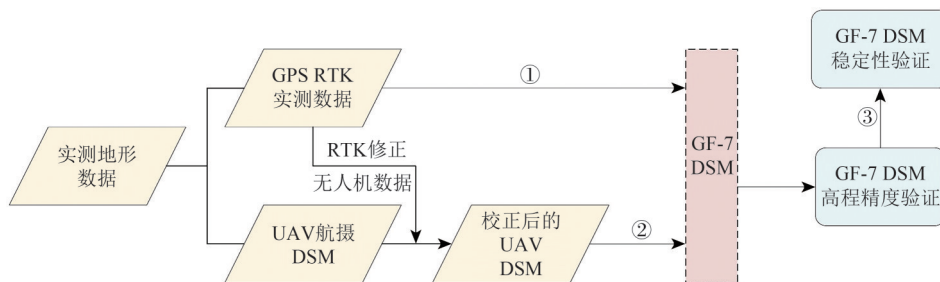


图 4 GF-7 DSM 反演地形变化精度验证流程

Fig. 4 Evaluating process of terrain change inversion accuracy for GF-7 DSM

(1) 实验①:从验证点绝对高程直接对比的验证思路出发,基于 GPS RTK /UAV DSM 数据验证湖岸岸坡 GF-7 DSM 高程绝对精度。

(2) 实验②:选定基准点后,以验证点与基准点间的高程差进行对比验证的思路出发,基于 UAV DSM 数据验证湖岸岸坡 GF-7 DSM 高程相对精度。基于 RTK 实测数据对 UAV DSM 进行修正,并重采样为 1*1 m 的像元分辨率,在不同坡度范围内选取无地表覆盖的不变地面点作为验证点,精度验证样本点所处坡度为 0°—50°,坡度范围具有较强的代表性。坡度区间按照 ≤2°、2°—6°、6°—15°、15°—25°、>25° 来划分,每个湖泊的验证样本点总数不少于 800 个。考虑到湖岸岸坡实测地形覆盖范围内鲜有坡度大于 25° 的区域,因此在大于 25° 区间内的样本点数量选取较少,其他坡度区间内的样本点数量、坡度分布基本均匀。

(3) 实验③:从验证点在不同时相 GF-7 DSM 中的高程值直接对比验证的思路出发,验证同地区不同时相 GF-7 DSM 高程数据一致性。利用不同时间获取的同一湖泊周边区域的 GF-7 DSM,随机

选取 150 个样本点,计算相同区域不同时相 GF-7 DSM 样本点的高程相关性,分析验证 GF-7 DSM 地形数据的稳定性。

按照不同的数据源条件,根据表 2 对 9 个试验区做出相应的试验安排。针对 GF-7 DSM 的高程绝对精度验证,直接对比不同的验证点 GF-7 DSM 与实测高程差异;验证 GF-7 DSM 高程相对精度时,由于实测地形数据覆盖区域大部分地形坡度均小于 20°,为了增加 GF-7 DSM 高程相对精度验证样本数,充分验证 GF-7 DSM 高程相对精度,文中根据不同坡度区间内的验证样本点数量分布,对 0°—15° 坡度区间的基准点进行了适当加密,最终分别以坡度为 0°、3°、6°、11°、15°、20°、25°、30° 的像元点作为高程相对精度验证的基准点。在选定基准点后,其他验证样本点高程均与基准点高程作差,对比基于 RTK 高程修正后 UAV DSM 和 GF-7 DSM 的高差差异。本文对 GF-7 DSM 的高程稳定性及高程精度的评价指标主要选取决定系数 R^2 、标准差 STD 和均方根误差 RMSE 3 个评价指标,最终 GF-7 DSM 高程绝对精度和高程相对精度均用 RMSE 取值来表征。

表 2 实测地形湖泊信息表

Table 2 Information table of lakes with filed surveying terrain

序号	湖泊名称	湖泊面积/km ²	湖岸平均坡度/°	验证数据	验证方案
1	都兰湖	33.9	5.47	GPS RTK	①
2	尕斯库勒湖	32.2	2.90	GPS RTK	③
3	冬给措纳湖	232	5.24	GPS RTK/UAV DSM	①/③
4	苦海	47.4	6.15	GPS RTK/UAV DSM	①/②
5	扎陵湖	528	8.77	GPS RTK	③
6	小柴旦湖	72.5	6.79	GPS RTK	①
7	阿涌贡玛错	29.2	12.04	GPS RTK	①
8	鄂陵湖	644	12.02	GPS RTK/UAV DSM	②
9	年吉错	19.7	10.52	GPS RTK/UAV DSM	①/②/③

4 结 果

4.1 GF-7 DSM 高程精度验证

4.1.1 基于 RTK 实测数据的 UAV DSM 高程精度验证

利用在年吉错、鄂陵湖等4个湖泊沿岸区域获取的高精度实测 GPS RTK 数据对同步获取的无控 UAV DSM 数据进行精度验证。同时，提取配准后的 UAV DSM 高程与 RTK 实测高程，形成 RTK-UAV DSM 高程散点，通过线性拟合构建高程修正模型以实现基于 RTK 实测高程的 UAV DSM 高程修正。由表3和图5可以看出，4个湖泊无控 UAV DSM 和 RTK 高程的 R^2 优于0.99，标准差均低于0.3 m，证明两种数据具有稳定的相关性，但 UAV DSM 的均

方根误差介于0.8—4.8 m，修正前的散点距离1：1线远近不一，证明无控 UAV DSM 高程绝对精度一般且不稳定。利用高精度 GPS RTK 实测数据对无控 UAV DSM 数据进行修正，修正后的 UAV DSM 均方根误差优于0.23 m，散点基本位于1：1线上，表明其高程精度和稳定性显著提高，下文将采用修正的 UAV DSM 验证 GF-7 DSM 高程精度。

表3 基于 RTK 实测高程的 UAV DSM 精度验证
Table 3 Elevation validation results of UAV DSM based on RTK measured data

湖泊名称	R^2	STD/m	RMSE/m	修正后 RMSE/m
冬给措纳湖	0.999	0.07	3.90	0.04
苦海	0.996	0.08	4.63	0.08
年吉错	0.999	0.15	0.83	0.12
鄂陵湖	0.993	0.29	4.76	0.23

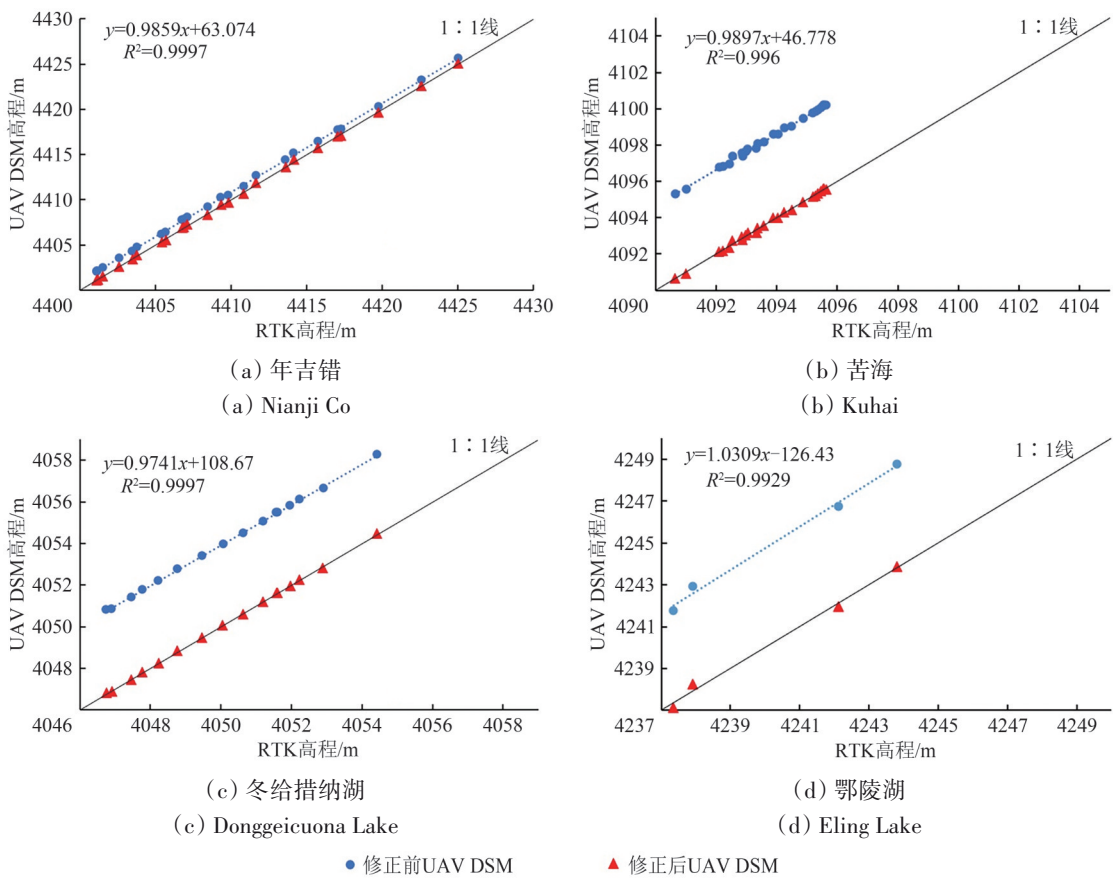


图5 基于 RTK 实测数据的无控 UAV DSM 精度验证
Fig. 5 Elevation validation results of UAV DSM based on RTK measured data

4.1.2 湖岸岸坡 GF-7 DSM 高程绝对精度验证

(1) 基于 RTK 实测高程数据验证 GF-7 DSM 高程绝对精度。在生产 GF-7 DSM 过程中会同步生产出像元匹配的全色影像，利用像元分辨率为1 m的

高清底图为基准，对像元匹配的全色影像开展平面精度验评估，验证了 GF-7 DSM 数据水平精度，水平方向误差为1—2像元以内。通过在青海省部分湖泊的岸坡区域进行 GPS RTK 实地点位测量，

获得了高精度的高程点位数据，最后提取对应位置的高程数据，通过直接对比验证 GF-7 DSM 的高程绝对精度，结果见表 4 和图 6。

原始 GF-7 DSM 高程与 RTK 实测高程差值的标准差均低于 0.7 m，表明同一景 GF-7 影像生产的 DSM 数据较为稳定，但高程绝对误差较大。图 6 中，不同湖泊修正前的散点距离 1 : 1 线远近不一，且 RMSE 介于 1—44 m，表明不同景 GF-7 影像生产的 DSM 存在显著的系统误差且系统误差间存在明显差异。基于高精度实测高程数据对 GF-7 DSM 进行高程修正，修正后的湖岸岸坡 GF-7 DSM 高程绝对精度优于 0.7 m，结合研究区的平均坡度 MS (Mean Slope) 来看，随着平均坡度上升，GF-7 DSM

高程绝对精度会有所下降。

表 4 基于 RTK 实测高程数据的 GF-7 DSM 高程绝对精度验证统计表

Table 4 Absolute accuracy validation results of GF-7 DSM elevation based on RTK measured data

湖泊名称	STD/m	RMSE/m	修正后 RMSE/m	MS/(°)
苦海	0.22	43.19	0.19	5.15
冬给措纳湖	0.27	5.59	0.24	5.24
都兰湖	0.28	36.04	0.28	5.47
小柴旦湖	0.35	1.20	0.38	6.79
年吉错	0.52	3.51	0.52	10.52
阿涌贡玛错	0.68	7.10	0.68	12.04

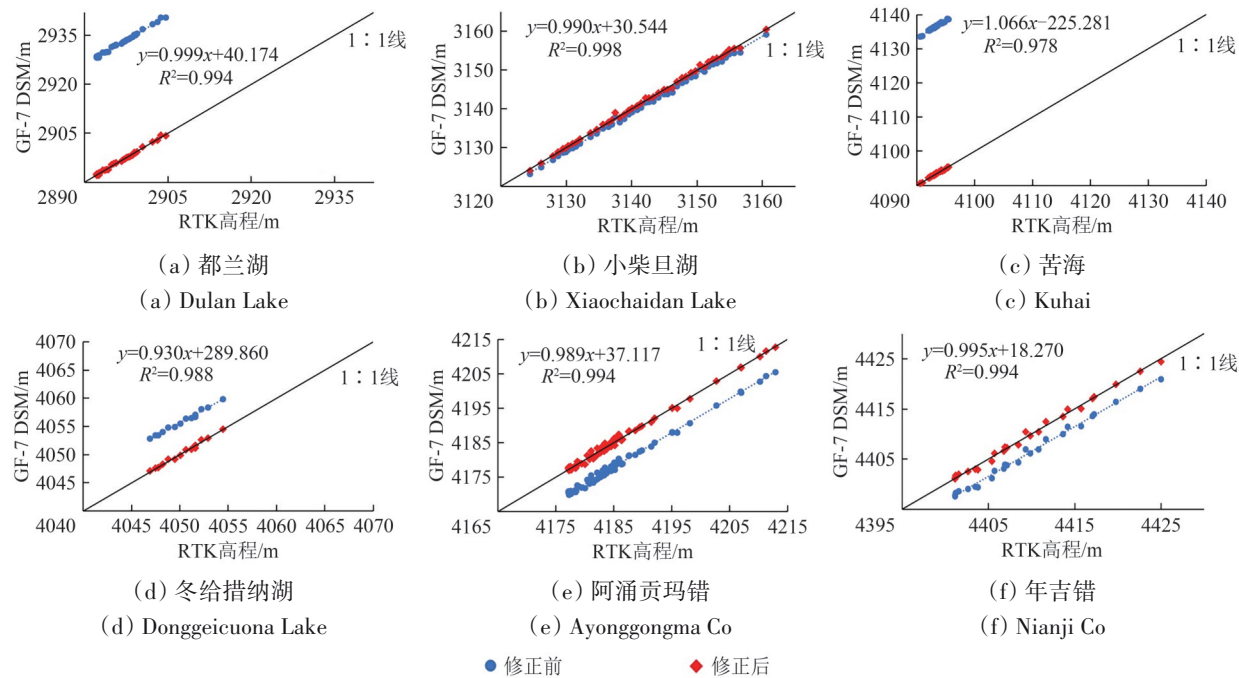


图 6 基于 RTK 实测高程数据验证 GF-7 DSM 高程绝对精度

Fig. 6 Absolute accuracy validation results of GF-7 DSM elevation based on RTK measured data

(2) 基于 UAV DSM 验证 GF-7 DSM 高程绝对精度。将验证样本点，按照 TD/T 1055—2019 中的耕地坡度分级表进行坡度分级 ($\leq 2^\circ$ 、 $2^\circ\text{—}6^\circ$ 、 $6^\circ\text{—}15^\circ$ 、 $15^\circ\text{—}25^\circ$ 、 $>25^\circ$ ，每类坡度区间左开右闭)，计算落在每个坡度等级内的样本点的平均坡度及平均 RMSE。由于不同时相的 GF-7 DSM 高程绝对精度存在差异，故对不同湖泊的精度验证结果进行分别整理，如图 7 所示。

验证结果表明，鄂陵湖、年吉错、苦海岸坡区域的 GF-7 DSM 高程绝对精度一般且不稳定，介于 5—44 m。同时，GF-7 DSM 的高程绝对精度与

平均坡度之间 R^2 均高于 0.83，表明原始湖岸岸坡 GF-7 DSM 存在显著的地形相关性，具体表现为随着坡度增大，其高程绝对精度有所下降。

基于高精度 UAV DSM 对 GF-7 DSM 进行高程修正，结果如图 8 所示。修正后的湖岸岸坡 GF-7 DSM 的全地形高程绝对精度总体优于 0.85 m，最大高程中误差优于 1.4 m，整体精度较高。每个坡度等级内，修正后的 GF-7 DSM 的高程绝对精度基本稳定在 1 m，不再具有显著的地形相关性。

进一步分析修正前后的 GF-7 DSM 高程绝对精度验证结果可以看出，通过高精度的控制数据对

原始 GF-7 DSM 进行修正可以极大地削弱地形因素 的全地形高程绝对精度基本达到或优于 1 m。
对其高程精度的影响。平均来看,修正后 GF-7 DSM

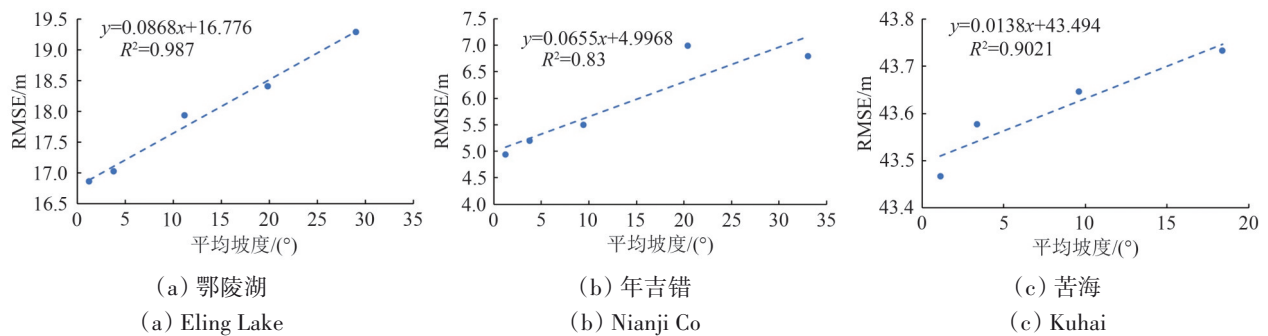


图7 基于 UAV DSM 的 GF-7 DSM 高程绝对精度验证

Fig. 7 Absolute accuracy validation results of GF-7 DSM elevation based on UAV DSM

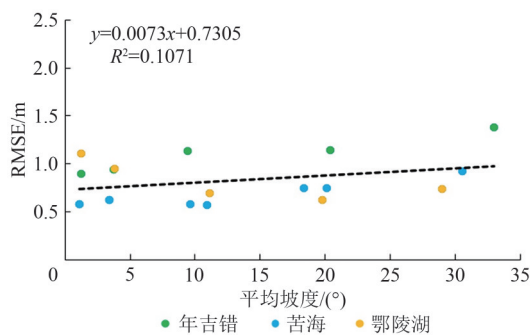


图8 Absolute accuracy validation results of the corrected GF-7 DSM elevation through UAV DSM

4.1.3 湖岸岸坡 GF-7 DSM 高程相对精度验证

为增加精度验证次数及样本量,在试验区选

取约 1000 个验证样本点,并分别以坡度最接近于 0° 、 3° 、 6° 、 11° 、 15° 、 20° 、 25° 、 30° 的验证点作为高程相对精度验证的基准点,探究在 5 级坡度划分的情况下,湖岸岸坡 GF-7 DSM 的高程相对精度与平均坡度之间的关系。

验证结果(图 9)显示,湖岸岸坡 GF-7 DSM 的高程相对精度与平均坡度之间的 R^2 均高于 0.5,表明湖岸岸坡 GF-7 DSM 的高程相对精度仍具备一定的地形相关性,综合来看,原始 GF-7 DSM 的高程相对精度较高,约为 1.67 m。3 个湖泊岸坡平均坡度从大到小的关系为鄂陵湖>年吉错>苦海,与决定系数 R^2 的变化趋势一致,同样表明湖岸岸坡平均坡度越大,GF-7 DSM 的高程相对精度在此区域内的地形相关性越强。

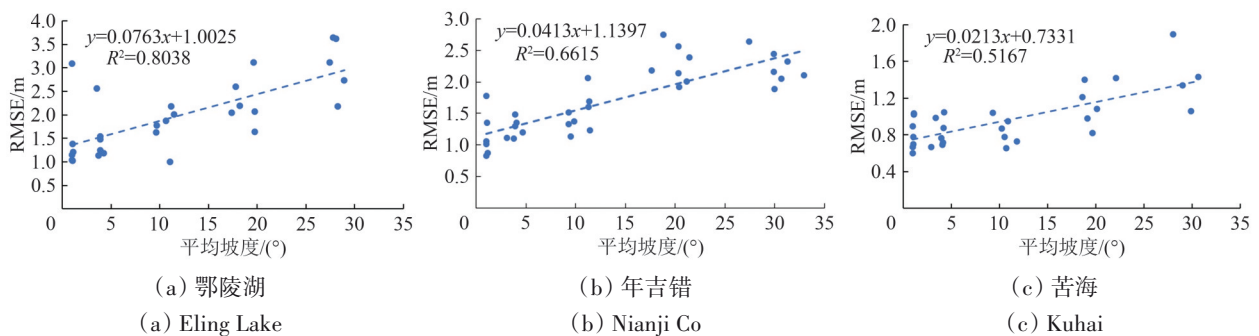


图9 基于 UAV DSM 的 GF-7 DSM 高程相对精度验证

Fig. 9 Relative accuracy validation results of GF-7 DSM elevation based on UAV DSM

同样以 UAV DSM 为基准对 GF-7 DSM 进行高程修正,修正后的湖岸岸坡 GF-7 DSM 全地形高程相对精度约为 1.22 m,精度较修正前显著提升。此外,修正后 GF-7 DSM 相对精度与平均坡度之间 R^2

均低于 0.26,较修正前明显降低,表明经过高精度控制数据修正后的湖岸岸坡 GF-7 DSM 的地形相关性明显减弱。

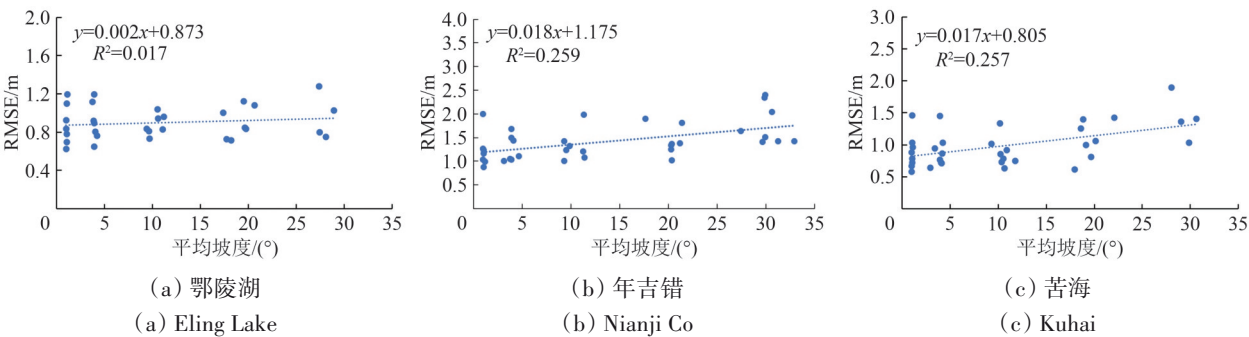


图10 基于UAV DSM修正后的GF-7 DSM高程相对精度验证
Fig.10 Relative accuracy validation results of the corrected GF-7 DSM elevation through UAV DSM

按照5级坡度划分，修正前后GF-7 DSM高程相对精度统计结果如表5所示。相较于GF-7 DSM不稳定且一般的高程绝对精度而言，在坡度较缓(≤15°)的区域，原始GF-7 DSM的高程相对精度优于1.5 m，而后随着坡度的增加，高程相对精度会有所损失，但仍优于2.4 m，全地形高程相对精度平均优于1.7 m。修正后，GF-7 DSM的全地形高程相对精度约为1.25 m，最大误差小于1.6 m。

表5 不同坡度区间内GF-7 DSM高程相对精度统计表
Table 5 Relative accuracy validation results of GF-7 DSM elevation in different slope intervals

坡度区间	≤2°	2°—6°	6°—15°	15°—25°	>25°
修正前RMSE/m	1.23168	1.317321	1.462437	1.959019	2.363437
修正后RMSE/m	1.098301	1.101102	1.118399	1.246463	1.522707

国内外常用的DEM数据主要有ASTER、AW3D30、MERIT、SRTM DEM、TanDEM-X、NASA DEM等，经验证，高程绝对精度最稳健的为AW3D30，其在平坦区域的垂直精度优于5 m，随着地形复杂度（即坡度）的增大，其高程绝对精度会逐步下降至12—14 m（Uuemaa等，2020；於佳宁等，2021）。GF-7 DSM较高的高程相对精度，证明GF-7 DSM绝对高程虽然存在系统误差，但通过两点绝对高程相减求高程变化，可以极大地削弱系统误差的影响，提高了数据的可用性，且湖岸岸坡周边潜在水域范围的坡度相对较缓(≤15°)，原始GF-7 DSM高程相对精度优于1.5 m，对比上述DEM数据，GF-7 DSM具备更高的高程相对精度，能够精确监测湖岸岸坡的地形变化，基本满足湖泊蓄变量遥感监测的应用需求。

4.2 GF-7 DSM稳定性验证

基于年吉错、尕海、冬给措纳湖、扎陵湖等

4个湖泊同地区不同时相的两景GF-7 DLC影像，开展GF-7 DSM稳定性验证，影像的基本信息如下表6所示。

表6 验证湖泊不同GF-7影像基本信息表
Table 6 Information list of the GF-7 images of verification lakes

湖泊	影像基本信息			
	成像时间1	产品号1	成像时间2	产品号2
年吉错	2020-11-11	240636	2020-12-30	289610
尕海	2020-12-05	262834	2021-12-14	652630
冬给措纳湖	2021-03-14	364660	2021-11-05	612653
扎陵湖	2020-09-03	183889	2021-02-27	349629

由相关性验证结果（表7、图11）可以看出，多期GF-7 DSM高差的均方根误差介于14—30 m，且R²均在0.98以上，表明同地区不同时相的GF-7 DSM并不固定，存在波动变化的系统误差，但通过相对修正可极大地消除系统误差，修正后的散点基本位于1：1线上。多期GF-7 DSM高差的标准差均低于2.88 m，表明高分七号立体测绘卫星平台在轨运行期间具有较好的系统稳定性。同时，分析表7中标准差和均方根误差随试验区的平均坡度的变化趋势，表明GF-7 DSM的稳定性与坡度具有一定的相关性，即随着地形坡度的增大，GF-7 DSM数据的稳定性会有所下降，但GF-7 DSM的系统误差与坡度则无显著关系。

表7 同一湖泊不同时相两景GF-7 DSM对比
Table 7 The comparison of different GF-7 DSMs at same lake

湖泊名称	R²	STD/m	RMSE/m	MS/(°)
尕海	0.998	1.84	29.19	2.90
冬给措纳湖	0.997	1.39	22.48	5.24
扎陵湖	0.986	2.10	17.04	8.77
年吉错	0.997	2.88	13.84	10.52

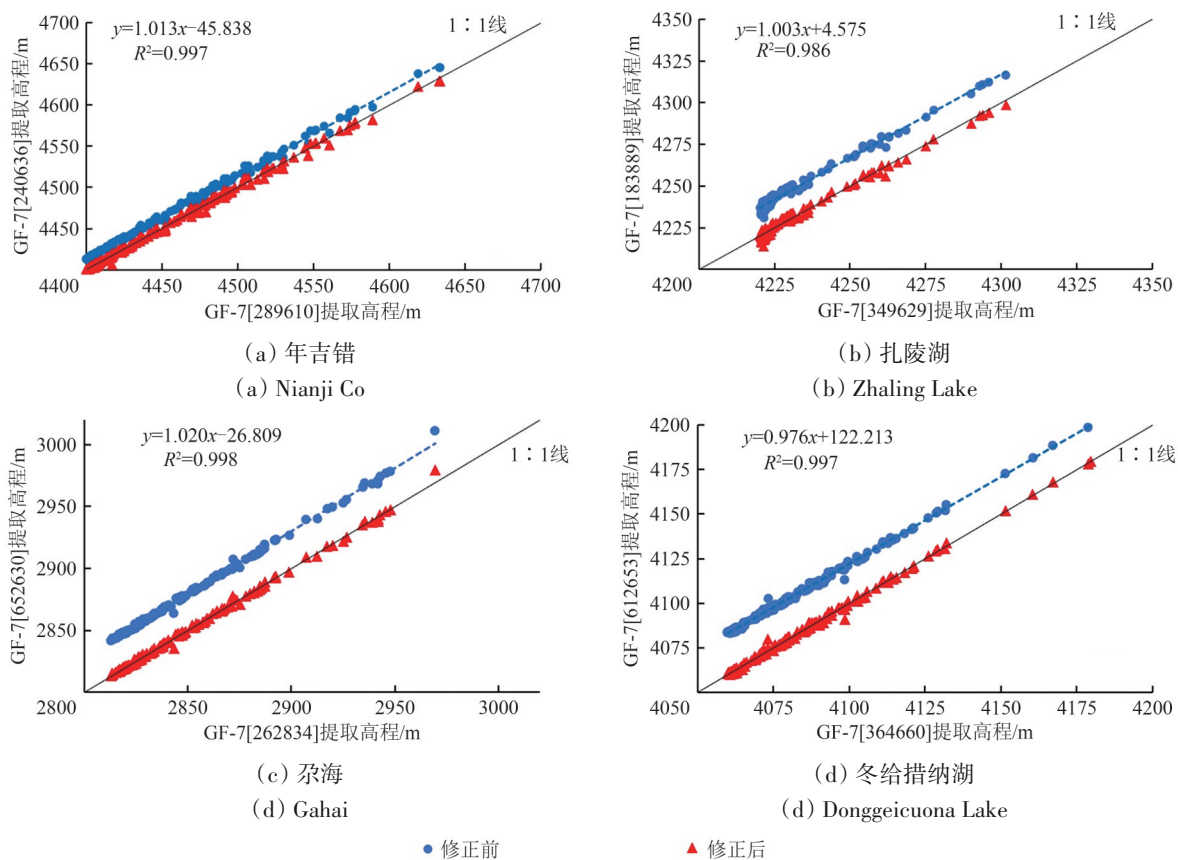


图 11 多期 GF-7 DSM 对比图

Fig.11 Comparison figures of different GF-7 DSMs

就湖泊蓄变量遥感监测应用而言,不同时的 GF-7 DSM 在湖岸岸坡区域高程变化相对较小,DSM 数据稳定强相关,通过修正可以极大削弱系统误差的影响,同一地区的多期 GF-7 DSM 数据则具备了拼接镶嵌的可能,对于 GF-7 DSM 数据在大型湖泊蓄变量遥感监测中的应用具有重要意义。

5 讨 论

本研究主要面向基于 GF-7 DSM 的湖泊蓄变量遥感监测应用场景开展湖岸岸坡区域 GF-7 DSM 高程精度验证。湖岸岸坡区域地形变化大,地貌特征丰富,在这类特殊区域,传统宏观地形分类(平地、丘陵、山地、高山地等)并不适用。本研究合理利用坡度来进行岸坡微地形划分,通过分析不同坡度区间内 GF-7 DSM 高程相对精度的变化,来剖析湖岸岸坡区域 GF-7 DSM 高程相对精度的影响因子,并通过构建影响关系模型来描述 GF-7 DSM 高程相对精度在不同坡度区间内的变化情况。

5.1 湖岸岸坡 GF-7 DSM 高程相对精度的地形影响因子

按照坡度分级标准划分坡度区间后,考虑到 3 个湖泊在相同坡度区间内的 GF-7 DSM 高程相对精度较为接近,差异小于 1 m,故将每个坡度区间内的平均坡度和 RMSE 取平均,统计分析 3 个湖泊的 GF-7 DSM 高程相对精度在修正前后随平均坡度的变化关系。

由图 12 (a) 可以看出,湖岸岸坡 GF-7 DSM 高程相对精度在不同的湖泊岸坡区域均呈现出一定的地形相关性,尤其当坡度大于 15° 时,湖岸岸坡 GF-7 DSM 的地形相关性十分显著。对比 3 个湖泊的线性拟合系数 k ,其大小变化趋势与 3 个湖泊的沿岸平均坡度变化一致,均为鄂陵湖>年吉错>苦海,表明湖岸岸坡坡度越大,湖岸岸坡 GF-7 DSM 的地形相关性越强,其高程相对精度越低。在经过高精度控制数据修正后(图 12 (b)),修正后的线性拟合系数 k 对比修正前明显减小,证明 GF-7 DSM 整体的地形相关性被极大地削弱。

为进一步探究湖岸岸坡 GF-7 DSM 高程相对精

度在不同坡度区间内的变化,以相对精度最高的苦海为例,图13(a)展示了苦海岸坡区域GF-7 DSM高程相对精度随平均坡度的变化关系,图13(b)由图12(a)和图12(b)将修正前后每个坡度区

间的验证结果求均值得到,展示了3个湖泊岸坡区域GF-7 DSM高程相对精度在修正前后随平均坡度的变化情况。

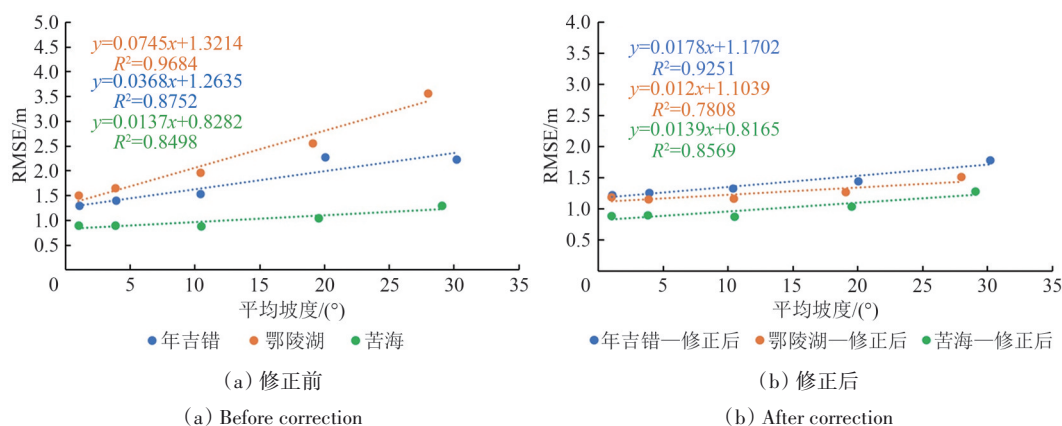


图12 修正前后的GF-7 DSM高程相对精度验证

Fig. 12 Relative accuracy validation results of GF-7 DSM elevation before and after correction

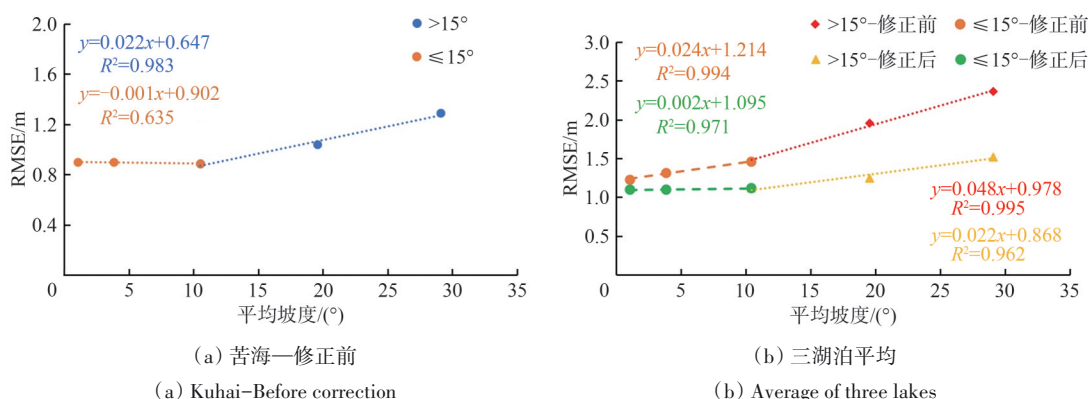


图13 GF-7 DSM高程相对精度在不同坡度区间内的变化

Fig. 13 Changes of relative accuracy of GF-7 DSM elevation in different slope intervals

图13(a)、图13(b)表明,当湖岸岸坡坡度较缓时($\leq 15^\circ$),GF-7 DSM的高程相对精度较为稳定,地形相关性较弱,修正前的GF-7 DSM高程相对精度约为1.34 m,修正后的GF-7 DSM的地形相关性被进一步削弱,高程相对精度有小幅提升,约为1.11 m;当湖岸岸坡坡度较大时($> 15^\circ$),GF-7 DSM的高程相对精度存在较为显著的地形相关性,即高程相对精度随坡度的增大而下降,修正前的GF-7 DSM高程相对精度整体约2.16 m,修正后的GF-7 DSM的地形相关性被明显削弱,相对精度显著提升,约为1.38 m。

需指出的是,GF-7 DSM的高程相对精度可能主要受到两个因素影响,一是两验证点间的坡度变化,二是基准点所处的坡度。因此,统计3个湖

泊所有验证数据组中基准点坡度及对应的RMSE均值,分为修正前和修正后两组,探究GF-7 DSM高程相对精度与基准点坡度之间的关系。

图14展示了修正前后的湖岸岸坡GF-7 DSM高程相对精度随基准点坡度的变化情况。其中,修正前GF-7 DSM高程相对精度约为1.61 m,决定系数 R^2 为0.79,表明其高程相对精度与基准点坡度之间存在显著相关性,即随着基准点坡度的增大,GF-7 DSM高程相对精度会随之降低。相反地,修正后GF-7 DSM高程相对精度约为1.19 m,且线性拟合系数 k 和决定系数 R^2 均显著减小,证明修正后GF-7 DSM高程相对精度较稳定,与基准点坡度不存在明显相关性。

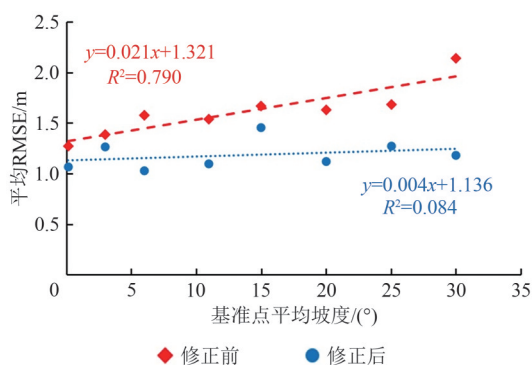


图14 修正前后的GF-7 DSM高程相对精度随基准点坡度的变化情况

Fig. 14 Variation of relative accuracy of GF-7 DSM elevation before and after correction with the slope of benchmark

5.2 地形因子对湖岸岸坡 GF-7 DSM 高程相对精度的影响关系模型

本文以基准点坡度和点间坡度变化两个独立的地形因子作为自变量，基于鄂陵湖、年吉错、苦海3个湖泊，共计筛选86组验证数据，采用多元线性回归方法，剖析湖岸岸坡GF-7 DSM高程相对精度与上述两个地形因子之间的作用关系。

在95%的置信水平下对GF-7 DSM的修正前RMSE、基准点坡度、点间坡度变化进行二元线性

回归分析，结果显示回归模型的 R^2 优于0.5，表明自变量与因变量之间线性关系较明显。回归模型的显著性值远小于0.05，因此通过F检验，认为线性回归整体显著。同时，模型中自变量及常数项的 P 值均远小于0.05，说明回归系数显著，通过t检验。

最终，GF-7 DSM的高程相对精度与基准点坡度、点间坡度变化的作用关系可由模型解释为

$$Y = 0.019 \times X_1 + 0.047 \times X_2 + 0.762 \quad (1)$$

式中， Y 表示未经修正的GF-7 DSM高程相对精度， X_1 表示基准点坡度， X_2 表示坡度变化，公式末尾为常数项，公式均保留至小数点后3位有效数字。

图15展示了回归模型的拟合效果及残差分布情况，由图15(a)可以看出，回归模型预测值与实际真值之间的决定系数为0.5，说明二者相关性较好，回归模型拟合效果较优，散点较为均匀的分布在1:1线两侧，同时图15(b)的直方图较为贴合标准正态分布曲线，表明建模数据基本符合正态分布。最后，图15(c)中残差散点以直线 $x=0$ 为对称轴，平均分布在两侧，没有明显聚集，也无明显的规律性，证明回归模型中两个自变量的相互独立性及模型拟合结果的可靠性。

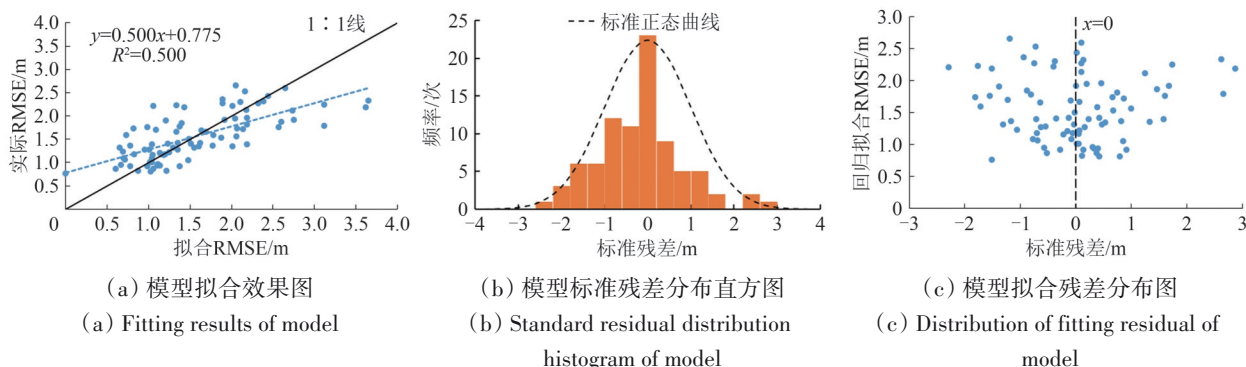


图15 回归模型拟合结果及残差分布图

Fig. 15 Fitting results and residual distributions of the regression model

6 结论

本文基于实测地形数据验证了湖岸岸坡GF-7 DSM高程精度及稳定性，探究了湖岸岸坡GF-7 DSM高程相对精度的地形影响因子，并构建了影响关系模型。得出主要结论如下：

(1) 原始湖岸岸坡GF-7 DSM存在可修正的系统误差且具有显著的地形相关性，其高程绝对精度存在明显差异，介于1—44 m，高程相对精度平

均优于1.7 m。经高精度控制数据线性拟合修正后，湖岸岸坡GF-7 DSM不再具备明显的地形相关性，其高程绝对精度显著提升，总体优于0.85 m，最大高程中误差优于1.4 m，高程相对精度平均优于1.25 m，最大误差小于1.6 m。

(2) GF-7 DSM的高程相对精度受坡度变化和基准点坡度影响，其中点间坡度变化是主要影响因素，二者权重分别为0.019和0.047。通过高精度控制数据修正能够极大地削弱基准点坡度及坡

度变化对 GF-7 DSM 高程相对精度产生的影响。

(3) 多期 GF-7 DSM 间具有极强的相关性, R^2 高于 0.98, 通过两点绝对高程相减求高程变化, 极大地削弱了 GF-7 DSM 高程系统误差的影响, 使同一范围内重叠的多景 GF-7 DSM 通过拼接融合后, 形成空间覆盖更广、精度一致的大范围 DSM 数据, 进而用于大型湖泊蓄变量遥感监测。

本文开展的精度验证工作聚焦于青海省湖岸岸坡 GF-7 DSM, 受限于验证样本数量及空间代表性, 所构建的影响关系模型适用性有待进一步验证和完善。后续将在全国范围内选择更多典型湖泊持续开展 GF-7 DSM 精度验证工作, 深入探究其高程精度的时空分布特征和影响因素, 为 GF-7 DSM 在无地面观测湖泊蓄变量遥感监测领域的广泛应用提供更有力的支撑。

参考文献(References)

- Cao H Y, Zhang X W, Zhao C G, Xu C, Mo F and Dai J. 2020. System design and key technologies of the GF-7 satellite. *Chinese Space Science and Technology*, 40(5): 1-9 (曹海翊, 张新伟, 赵晨光, 徐驰, 莫凡, 戴君. 2020. 高分七号卫星总体设计与技术创新. *中国空间科学技术*, 40(5): 1-9) [DOI: 10.16708/j.cnki.1000-758X.2020.0052]
- Editorial Department of this Magazine. 2013. Bulletin of first national census for water. *Water Resources Informatization*, 2): 64 (本刊编辑部. 2013. 第一次全国水利普查公报. *水利信息化*, (2): 64 [DOI: 10.19364/j.1674-9405.2013.02.016])
- Gao X, Tang X, Zhang G and Zhu X. 2013. The geometric accuracy validation of the ZY-3 mapping satellite. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 40: 111-115 [DOI: 10.5194/isprsarchives-XL-2-W1-111-2013]
- He F, Liu Z F and Yao Z J. 2020. Evaluation of the monitoring accuracy of lake water level by the Jason-2 altimeter satellite. *Journal of Geo-information Science*, 22(3): 494-504 (何飞, 刘兆飞, 姚治君. 2020. Jason-2 测高卫星对湖泊水位的监测精度评价. *地球信息科学学报*, 22(3): 494-504) [DOI: 10.12082/dqxxkx.2020.190651]
- Jiang L G, Nielsen K, Andersen O B and Bauer-Gottwein P. 2017. Monitoring recent lake level variations on the Tibetan Plateau using CryoSat-2 SARIn mode data. *Journal of Hydrology*, 544: 109-124 [DOI: 10.1016/j.jhydrol.2016.11.024]
- Li G Y, Tang X M, Gao X M, Wang H B and Wang Y. 2016a. ZY-3 Block adjustment supported by glas laser altimetry data. *The Photogrammetric Record*, 31(153): 88-107 [DOI: 10.1111/phor.12138]
- Li G Y, Tang X M, Gao X M, Zhang C Y and Li T. 2016b. Improve the ZY-3 height accuracy using ICESat/GLAS laser altimeter data. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 41: 37-42 [DOI: 10.5194/isprs-archives-XLI-B1-37-2016]
- Lu S N, Huang S C, Pan Z Q, Deng H W, Stanley D and Xin Y B. 2016. High performance computing for DSM extraction from ZY-3 tri-stereo imagery. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 3: 113-120 [DOI: 10.5194/isprs-annals-III-1-113-2016]
- Pan H B, Zhang G, Tang X M, Wang X, Zhou P, Xu M Z and Li D R. 2013. Accuracy analysis and verification of ZY-3 products. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 42(5): 738-744, 751 (潘红播, 张过, 唐新明, 王霞, 周平, 许妙忠, 李德仁. 2013. 资源三号测绘卫星影像产品精度分析与验证. *测绘学报*, 42(5): 738-744, 751)
- Song C Q, Huang B and Ke L H. 2013. Modeling and analysis of lake water storage changes on the Tibetan Plateau using multi-mission satellite data. *Remote Sensing of Environment*, 135: 25-35 [DOI: 10.1016/j.rse.2013.03.013]
- Song C Q, Zhan P F and Ma R H. 2020. Progress in remote sensing study on lake hydrologic regime. *Journal of Lake Sciences*, 32(5): 1406-1420 (宋春桥, 詹鹏飞, 马荣华. 2020. 湖泊水情遥感研究进展. *湖泊科学*, 32(5): 1406-1420) [DOI: 10.18307/2020.0514]
- Sun C, Chu Q F and Wu J X. 2022. Accuracy verification of 1: 10000 scale stereo mapping of GF-7 satellite: a case study of northeast China. *Geomatics and Spatial Information Technology*, 45(S1): 124-126, 129, 132 (孙畅, 初启凤, 武建秀. 2022. 高分七号卫星 1: 10000 立体测图精度验证——以东北地区为例. *测绘与空间地理信息*, 45(S1): 124-126, 129, 132) [DOI: 10.3969/j.issn.1672-5867.2022.z1.041]
- Tang X M and Hu F. 2018. Development status and trend of satellite mapping. *Spacecraft Recovery and Remote Sensing*, 39(4): 26-35 (唐新明, 胡芬. 2018. 卫星测绘发展现状与趋势. *航天返回与遥感*, 39(4): 26-35) [DOI: 10.3969/j.issn.1009-8518.2018.04.004]
- Tang X M, Liu C R, Zhang H, Wang X, Li G Y, Mo F and Li F X. 2021. GF-7 satellite stereo images block adjustment assisted with laser altimetry data. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 46(10): 1423-1430 (唐新明, 刘昌儒, 张恒, 王霞, 李国元, 莫凡, 李丰翔. 2021. 高分七号卫星立体影像与激光测高数据联合区域网平差. *武汉大学学报(信息科学版)*, 46(10): 1423-1430) [DOI: 10.13203/j.whugis.20210417]
- Tang X M, Zhang G, Zhu X Y, Pan H B, Jiang Y H, Zhou P, Wang X and Guo L. 2012. Triple linear-array imaging geometry model of Ziyuan-3 surveying satellite and its validation. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 41(2): 191-198 (唐新明, 张过, 祝小勇, 潘红播, 蒋永华, 周平, 王霞, 郭莉. 2012. 资源三号测绘卫星三线阵成像几何模型构建与精度初步验证. *测绘学报*, 41(2): 191-198)
- Tang X M, Zhou P, Zhang G, Wang X, Jiang Y H, Guo L and Liu S H. 2015. Verification of ZY-3 satellite imagery geometric accuracy

- without ground control points. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 12(10): 2100-2104 [DOI: 10.1109/LGRS.2015.2450251]
- Uuemaa E, Ahi S, Montibeller B, Muru M and Kmoch A. 2020. Vertical accuracy of freely available global digital elevation models (ASTER, AW3D30, MERIT, TanDEM-X, SRTM, and NASA-DEM). *Remote Sensing*, 12(21): 3482 [DOI: 10.3390/rs12213482]
- Wang S M and Dou H S. 1998. *Chinese Lake Catalogue*. Beijing: Science Press (王苏民, 窦鸿身. 1998. *中国湖泊志*. 北京: 科学出版社)
- Wu Y H, Li M R, Guo L N, Zheng H X and Zhang H Y. 2019. Investigating water variation of lakes in Tibetan Plateau using remote sensed data over the past 20 years. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 12(7): 2557-2564 [DOI: 10.1109/JSTARS.2019.2898259]
- Yu J N, Liu K, Zhang B Y, Huang Y, Fan C Y, Song C J and Tang G A. 2021. Vertical accuracy assessment and applicability analysis of TanDEM-X 90 m DEM in China. *Journal of Geo-information Science*, 23(4): 646-657 (於佳宁, 刘凯, 张冰玥, 黄滢, 范晨雨, 宋春桥, 汤国安. 2021. 中国区域 TanDEM-X 90 m DEM 高程精度评价及其适用性分析. *地球信息科学学报*, 23(4): 646-657) [DOI: 10.12082/dqxxkx.2021.200450]
- Zhang R K. 2018. Reservoir area monitoring and change rectification based on remote sensing technology. *Standardization of Surveying and Mapping*, 34(2): 44-48 (张润科. 2018. 基于遥感技术的水库蓄水量监测与变化修正. *测绘标准化*, 34(2): 44-48) [DOI: 10.20007/j.cnki.61-1275/p.2018.02.012]
- Zhang W S and Song C Q. 2022. Spatial distribution and dynamics of lakes in China: progress in remote sensing monitoring at national scale and new inventory of the maximum lake extent and change trajectory. *National Remote Sensing Bulletin*, 26(1): 92-103 (张闻松, 宋春桥. 2022. 中国湖泊分布与变化: 全国尺度遥感监测研究进展与新编目. *遥感学报*, 26(1): 92-103) [DOI: 10.11834/jrs.20221290]
- Zhao W P, Liu Y, Wu X C, Jiao P T and Zhang X P. 2022. Accuracy verification of the scale of 1: 10000 stereo mapping based on GaoFen-7 satellite image. *Science of Surveying and Mapping*, 47(1): 165-171, 180 (赵文普, 刘钰, 吴晓春, 焦朋涛, 张雪萍. 2022. 利用高分七号卫星开展 1: 10000 立体测图精度验证. *测绘科学*, 47(1): 165-171, 180) [DOI: 10.16251/j.cnki.1009-2307.2022.01.019]
- Zhao Y, Liao J J, Shen G Z and Zhang X L. 2017. Monitoring the water level changes in Qinghai Lake with satellite altimetry data. *Journal of Remote Sensing (in Chinese)*, 21(4): 633-644 (赵云, 廖静娟, 沈国状, 张学良. 2017. 卫星测高数据监测青海湖水位变化. *遥感学报*, 21(4): 633-644) [DOI: 10.11834/jrs.20176217]

Elevation accuracy validation and influence factor analysis of GF-7 DSM on Lakeshore in Qinghai Province

ZHANG Huaiwen^{1,2}, CAO Yin^{1,2}, ZHAO Hongli^{1,2}, JIANG Yunzhong^{1,2}, ZHAO Huizi^{1,3},
WANG Rong^{1,4}, XU Haowei^{1,2}

1. Department of Water Resources, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China;

2. Key Laboratory of River Basin Digital Twinning of Ministry of Water Resources, Beijing 100038, China;

3. College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210024, China;

4. School of Infrastructure Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China

Abstract: Gaofen-7 satellite (GF-7) is the first Chinese sub-meter civil stereo mapping satellite, which can rapidly obtain Digital Surface Model (DSM) of lakeshore, and has application potential in remote sensing of lake water storage changes without ground observation. Due to the complex terrain of lakeshore, it is of great significance to quantify the accuracy and influence factors of GF-7 DSM elevation for remote sensing monitoring of lake water storage changes through GF-7 DSM. The objective of this study was to quantitatively evaluate the accuracy of GF-7 DSM elevation and its stability as well as the influencing factors of relative accuracy of GF-7 DSM elevation based on filed surveying data.

To validate the elevation accuracy of GF-7 DSM at lakeshore, several elevations at point scale derived by GPS RTK or DSMs at region scale derived by UAV of 9 lakeshores in Qinghai province were collected by filed surveying. Firstly, the absolute accuracy of GF-7 DSM elevation was evaluated by comparing the differences between the elevations derived from GF-7 DSM and the measured elevation at different verification points. Secondly, the relative accuracy of GF-7 DSM elevation was estimated by the elevation biases derived from GF-7 DSM and the measured elevation differences at different verification points based on benchmark. Thirdly, the stability of GF-7 DSM elevation was evaluated by analyzing the elevation difference and correlation derived from GF-7 DSMs of different time series at same regions. Finally, the driving mechanism of terrain factors on the relative accuracy of GF-7 DSM elevation was investigated through multiple regression analysis.

The results show that the elevations derived by GF-7 DSMs at different lakeshores have unstable systematic errors with poor absolute accuracy. The accuracy of GF-7 DSM elevation has significant correlation with terrain. The accuracy of GF-7 DSM elevation difference is

high with a mean error less than 1.7 m. When the mean slope of lakeshore within 15° , the mean error of GF-7 DSM elevation difference is less than 1.5 m. Then, the mean error of GF-7 DSM elevation difference decreases with the increase of mean slope. The absolute accuracy of GF-7 DSM elevation can be obviously improved by correction using field surveying elevation with an overall mean error less than 0.85 m and a maximum elevation median error within 1.4 m. The mean error of GF-7 DSM elevation difference is generally within 1.25 m, its maximum median error is less than 1.6 m. The elevation accuracy of corrected GF-7 DSMs at different lakeshores do not have obvious correlation with mean slope. The accuracy of GF-7 DSM elevation difference is mainly affected by the slope of benchmark and the slope variation, among which the slope variation is the main driving factor. The weight of the slope of benchmark and the slope variation are 0.019 and 0.047, respectively. There are significant correlations between GF-7 DSMs of different time series at same region with the R^2 more than 0.98.

The elevation derived from certain GF-7 DSM has obvious systematic error which can be corrected by filed observations. While the GF-7 DSM elevation difference has a high relative accuracy, the uncorrected certain GF-7 DSM can also be used to estimate the lake water storage changes. The GF-7 DSMs obtained at different times have different systematic errors, which can be relatively corrected by the correlation between the different GF-7 DSMs at same region. Therefore, multiple GF-7 DSMs can be used in remote sensing monitoring of water storage changes in large lakes via mosaicking. In conclude, The GF-7 has an enormous prospect in remote sensing monitoring of lake water storage changes without ground observation.

Key words: GF-7 Digital Surface Model, accuracy validation, terrain correlation, influence factors, Qinghai province, filed surveyed terrain, lakeshore

Supported by National Natural Science Foundation of China (No. 52309040, 52279031); National Key Research and Development Program of China (No. 2023YFF1304202)