

面向SWOT内陆水体水位观测的误差补偿修正方法

宋杰¹, 张胜军¹, 孔祥雪², 王万宁², 车德福¹

1. 东北大学 资源与土木工程学院, 沈阳 110819;

2. 辽宁省地震局, 沈阳 110031

摘要: 地表水和海洋地形卫星SWOT (Surface Water and Ocean Topography) 的发射为全球内陆水体水位监测带来了革命性突破, 其宽刈幅测高模式通过二维成像观测获取水体表面高程信息, 相较传统沿轨测高实现了由线到面的观测转变。然而, SWOT观测数据中仍存在显著的随机误差与系统误差, 制约了其在高精度水位监测中的应用。为此, 本文基于SWOT的L2_HR_PIXC产品, 选取太湖、巢湖、青海湖3个大型湖泊以及辽宁省与太湖地区的水库与河流为研究对象, 系统分析了SWOT水位观测中存在的随机误差与系统误差特征。针对随机误差造成的数米至数十米的观测噪声, 提出两步去噪法, 有效剔除了异常离散点; 随后, 通过分析湖泊水面变化特征, 揭示离海距离不同时SWOT残余系统误差的空间分布规律; 在此基础上, 结合湖泊水面近似水平的特性, 提出一种最低仅需单个控制站水位即可实现残余系统误差修正的方法。与实测水位的验证结果表明, SWOT在仅去噪时精度为分米级, 不同测站的RMSE在0.1—0.5 m; 残余系统误差在不同轨次下呈现不同的规律, 离海较近时与跨轨距离近似线性相关, 较远时为二次相关。经修正后, 辽宁省区域RMSE降低0.07 m, 太湖区域降幅超过0.300 m, 分别达到了0.230 m和0.160 m。总之, 本文建立的SWOT水位产品的精化处理流程可为其高精度应用提供理论支撑与实践路径。

关键词: 内陆水体, 卫星测高, 水位监测, SWOT, 随机误差, 两步去噪法, 系统误差, 误差修正

中图分类号: TP701/P2

引用格式: 宋杰, 张胜军, 孔祥雪, 王万宁, 车德福. 2026. 面向SWOT内陆水体水位观测的误差补偿修正方法. 遥感学报, 30(6): 1757–1774

Song J, Zhang S J, Kong X X, Wang W N and Che D F. 2026. Error compensation and correction method for SWOT inland water level observations. National Remote Sensing Bulletin, 30(6): 1757–1774 [DOI: 10.11834/jrs.20265280]

1 引言

内陆水资源 (包括湖泊、河流和水库等) 在维系生态系统稳定与促进社会经济可持续发展方面具有重要作用 (Xu等, 2024)。水位作为水体状态的关键指标, 与水体面积和水储量之间存在稳定的对应关系 (Xiong等, 2021)。传统水位监测主要依赖地面水位站, 其优势在于可提供高时间分辨率的连续水位数据。然而, 该类方法存在布设成本高、空间覆盖范围有限等局限, 且受地方政策限制, 相关数据常难以公开获取 (张国庆, 2018)。在如青藏高原等交通不便的地区, 地面监测手段的适用性进一步受限, 其局限性尤为明显 (Biancamaria等, 2016; 熊景华等, 2023)。

作为遥感对地观测的重要手段, 卫星测高技术相较于传统地面水位站, 具备获取大范围、高精度地表水位信息的能力, 可有效弥补地面实测站点在部分区域覆盖不足的问题 (Wu等, 2023; Yao等, 2024a)。尽管Jason系列、Sentinel-3等传统星下点测高卫星被广泛应用于水位监测研究 (Jiang等, 2017; 娄燕寒等, 2023; 高贤文等, 2024), 但受限于较长的重访周期和有限的空间分辨率, 其在中小型水体和动态水文过程监测中的应用效果仍存在一定局限 (Yao等, 2024b)。

2022年12月, 由法国国家空间研究中心 (Centre National d'Études Spatiales) 与美国国家航空航天局 NASA (National Aeronautics and Space Administration) 联合牵头发射的地表水和海洋地形卫星SWOT

收稿日期: 2025-07-30; 预印本: 2026-02-25

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金 (编号: N25GFY007)

第一作者简介: 宋杰, 研究方向为遥感水文和卫星测高。E-mail: 2301113@stu.neu.edu.cn

通信作者简介: 张胜军, 研究方向为卫星遥感与卫星大地测量学。E-mail: zhangshengjun@mail.neu.edu.cn

(Surface Water and Ocean Topography) 成功升空。这是全球首颗以水资源调查为核心任务的宽幅测高卫星, 标志着卫星测高技术在水位监测领域迈入了全新阶段 (Getirana等, 2024; Fu等, 2024)。SWOT搭载Ka波段雷达干涉仪 (KaRIn), 采用接近垂直的入射角, 可同时监测星下点两侧共计约120 km范围内的地表水体, 实现对湖泊、水库和河流的高分辨率测量 (Andreadis等, 2025; Laipelt等, 2025; Wu等, 2025), 其水文学目标为观测小至0.0625 km²的水体以及宽度低至100 m的河流。

当前, 对于SWOT卫星在内陆水体水位监测方面的研究主要集中于精度评估 (Maubant等, 2025; Patidar等, 2025)。Yu等 (2024) 以Hydroweb和GREALM提供的水位数据为参考真值, 对全球8个区域的湖泊进行了精度评定, 结果表明SWOT湖泊产品的平均绝对误差 (MAE) 分别<0.5和0.3 m, 均方根误差 (RMSE) 分别<1.52 m。Yao等 (2025) 利用ICESat-2数据进行交叉验证, 发现SWOT的栅格产品的精度高达0.18 m。Zhao等 (2025) 提出一种结合四分位距与自适应统计方法的离群值剔除策略, 应用于L2_HR_PIXC产品后, 其水位结果与实测值之间的 R^2 超过0.85, MAE<0.4 m, RMSE<0.5 m, 优于其他产品。

目前对SWOT在内陆地区的误差分析的研究还相对较少, 除随机误差外, SWOT观测还存在与跨轨距离相关的系统误差, 如相位误差和滚转误差等。理论上可通过交叉校正方法加以消除 (白卓等, 2023), 但受限于内陆水体分布不均和高随机噪声, SWOT官方在海洋上进行自交叉, 并在时间维度插值至陆地获得内陆的校正值 (JPL, 2024a)。该方法依赖误差随时间可建模, 且插值模型足够稳健。当水体远离海洋时, 修正效果将显著下降。Köhn和Nielsen (2025) 在丹麦37个湖泊观测中发现, SWOT数据普遍存在系统偏移, 且在偏移不固定时, 误差与跨轨距离呈现线性关系。他们通过3个独立的Sentinel-3虚拟站估算恒定的残余系统误差, 应用于所有湖泊后, 中值RMSE由0.11 m降至0.07 m, 相关系数由0.75提升至0.77, 表明SWOT在内陆水位观测精度方面仍具提升潜力。

针对现有研究中对SWOT在内陆地区误差分析不足的问题, 本文对L2_HR_PIXC产品的误差特征开展了系统研究。首先, 提出两步去噪方法, 有效剔除观测中随机误差导致的噪声点; 随后, 通过分析大型湖泊在多个周期中水位沿跨轨方向的变

化特征, 以及多个跨轨位置不同的水库水位与跨轨距离的关系, 揭示残余系统误差的分布规律; 最后, 基于湖泊/水库水面近似水平的假设, 结合控制点水位信息, 提出一种残余系统误差修正方法, 以提高SWOT在内陆水体中的水位观测精度, 并为其高精度应用提供技术支撑。

2 研究区概况与数据来源

2.1 研究区概况

本文的研究对象包括湖泊、水库与河流3类水体 (表1)。其中, 湖泊包括太湖、巢湖和青海湖3个大型湖泊, 其离海距离各不相同, 分别代表近海与远海区域, 可用于分析SWOT在不同离海距离下残余系统误差的分布规律。此处的“离海距离”指测站沿SWOT轨道方向至最近海洋的距离, 而非地理意义上到最近海岸线的直线距离, 其本质上反映了测站观测时刻与最近一次海洋交叉校正时刻之间的时间差异。实测站点分布在辽宁省和太湖区域, 其中辽宁的水库水域面积为20—50 km², 可作为缺乏大型湖泊区域的代表; 而太湖水域面积广阔, 仅利用太湖即可对其整个刈幅范围内的残余系统误差进行修正。

辽宁省 (38°43'N—43°26'N, 118°53'E—125°46'E) 位于中国东北地区南部, 大陆海岸线长达2290 km。全省拥有流域面积超过100 km²的河流共432条, 辽河、浑河、太子河等主要水系的干支流上分布有清河、柴河、大伙房等9座重点调控水库。本文选取大伙房、清河、柴河、观音阁、筏窝5座大型水库及抚顺、铁岭等5个河道站, 分布见图1 (a)。鉴于辽宁省纬度较高, 每年11月—次年4月为结冰期, 分析中剔除了该时段的数据, 以避免冰雪影响。太湖 (30°55'N—31°32'N, 119°52'E—120°36'E) 位于长江三角洲南缘, 是中国五大淡水湖之一, 湖面面积2329 km², 湖岸线全长393 km。湖区西部和西南部为丘陵山地, 东部以平原和水网为主。本文选取太湖和大溪、沙河、横山3个水库, 以及丹阳站与平望站作为观测对象, 分布见图1 (b)。巢湖 (30°25'N—31°43'N, 117°16'E—117°51'E) 位于安徽省中部长江与淮河水系过渡带, 呈东西走向, 最大长度55 km, 常态水域面积约787 km², 如图1 (c) 所示。青海湖 (36°32'N—37°15'N, 99°36'E—100°16'E) 位于青海省, 湖面东西最长106 km, 水域面积约4667 km², 如图1 (d) 所示。

表1 不同测站的详细信息								
Table 1 Detailed information for different monitoring stations								
所属区域	站名	类型	水域面积/km ²	河流宽度/m	经度/(°)	纬度/(°)	时间间隔/s	离海距离/km
辽宁省	大伙房	水库	51.2		124.083	41.883	9—29	50—160
	清河	水库	37.1		124.167	42.550		
	观音阁	水库	34.8		124.150	41.317		
	筏窝	水库	31.9		123.518	41.236		
	柴河	水库	20.8		123.983	42.267		
	辽阳	河流		298.3	123.200	41.267		
	抚顺	河流		265.1	123.916	41.867		
	本溪	河流		135.3	123.767	41.317		
	铁岭	河流		130.5	123.833	42.333		
	唐马寨	河流		121.9	122.716	41.183		
太湖区域	太湖	湖泊	2329.1		120.192	31.194	60、100	330、550
	大溪	水库	11.1		119.372	31.397		
	沙河	水库	9.1		119.433	31.317		
	横山	水库	4.6		119.573	31.241		
	平望	河流		166.3	120.635	30.997		
	丹阳	河流		91.4	119.575	32.012		
安徽省	巢湖	湖泊	786.9		117.520	31.548	120、149	660、820
青海省	青海湖	湖泊	4266.6		100.188	36.868	490	2695

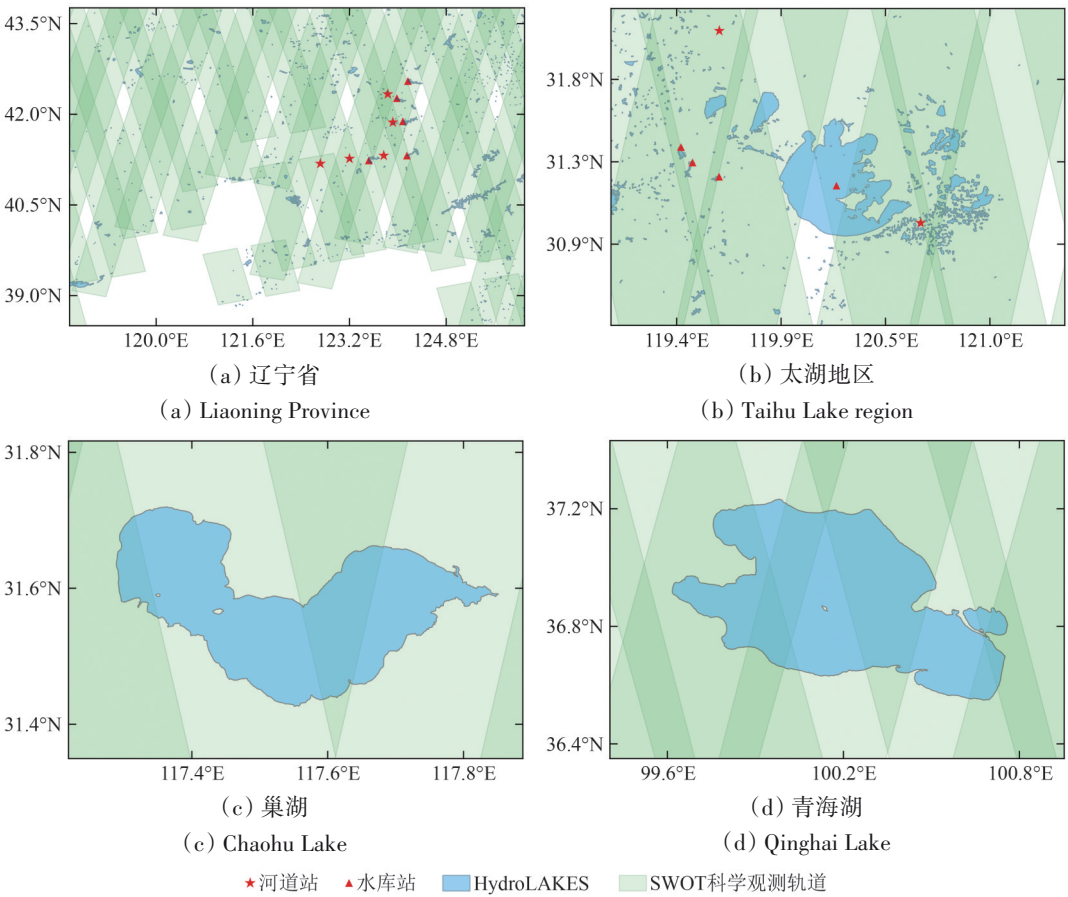


图1 水位站地理分布及SWOT科学轨道观测轨迹

Fig.1 Geographical distribution of water level stations and SWOT scientific orbit observation trajectories

2.2 SWOT 卫星数据

SWOT 卫星的内陆水位产品包括一级产品和二级产品, 其中一级产品 L1_HR_SLC 面向专业用户, 普通用户通常使用二级产品即可满足应用需求 (JPL, 2024a)。根据聚合程度的不同, 二级产品可分为多种类型, 主要包括像素云产品 (L2_HR_PIXC)、河流单轨矢量产品 (L2_HR_RiverSP)、湖泊单轨矢量产品 (L2_HR_LakeSP) 以及栅格产品 (L2_HR_Raster) 等。其中, L2_HR_PIXC 具备最高的空间分辨率和数据自由度, 是其他衍生产品的基础 (JPL, 2024b)。

已有研究表明, 直接基于 L2_HR_PIXC 产品进行处理, 可获得更高时间分辨率和更精确的水位估计结果 (Zhao 等, 2025)。因此, 本文采用 L2_HR_PIXC Version C 产品, 时间范围覆盖 2023 年 7 月—2025 年 5 月。

2.3 水体掩膜及实测水位

根据水体类型的不同, 掩膜数据的获取方式有所区别。对于大型湖泊或水库, 其水面坡度较小, 水域面积大且边界稳定性高, 因此本文利用 HydroLAKES 产品 (Messenger 等, 2016) 获取高精度的边界信息, 保证该范围内的水位变化较小。同时, 在水库站的选择过程中已确保不存在显著的边界收缩现象, 局部水体收缩的区域可通过自适应直方图去噪与精去噪消除对结果的影响。

相比之下, 河道宽度较小、水位存在坡度, 且受季节性变化影响显著, 因此本文采用前期研究中提出的方法——融合 Sentinel-1 影像与地形坡度信息, 并结合多模态分割网络, 提取河道边界。

在数据获取方面, 基于 GEE 平台, 获取了研究区 2023 年 7 月—2025 年 5 月的 Sentinel-1 数据。同时, 从水利部信息中心获取了 2023 年 7 月至 2025 年 5 月期间各水位站每日上午 8:00 的实测水位数据, 用于验证 SWOT 观测的水位精度。其中, 辽宁省水库和部分河道站点在 2023 年 9 月—2024 年 6 月存在实测数据缺失。研究中所使用的主要数据详见表 2。

3 研究方法

3.1 整体流程

根据误差来源的不同, 可将其划分为随机误差和残余系统误差。随机误差具有不可预测性,

难以通过建模方式加以消除, 且误差影响较大, 可达数米甚至数 10 m。针对该类误差所引发的异常值问题, 本文提出两步去噪方法, 以有效识别并剔除明显离群点。

表 2 本文使用的所有数据

Table 2 All data used in this paper

数据集	产品	时间分辨率/d	时间范围	数据源
SWOT	L2_HR_PIXC	21	2023-07—2025-05	NASA
HydroLAKES	Vector boundaries	—	2000 年	McGill University
Sentinel-1	VV/VH	12	2023-07—2025-05	GEE
Copernicus DEM	Slope	—	2010 年—2015 年	GEE
实测水位	水位	1	2023-07—2025-05	水利部信息中心

相比之下, 系统误差通常具有一定规律性, 误差影响相对较小 (一般在米级或更低), 可通过建模方式实现有效修正。而残余系统误差影响更小, 一般仅在分米级。本文基于湖泊水面近似水平的假设, 结合控制站的实测水位数据, 建立跨轨距离与残余系统误差之间的关系模型, 从而对控制站所在区域的水位数据进行残余系统误差的修正, 整体处理流程如图 2 所示。

3.2 水位计算

SWOT 观测的水面高程 WSE (Water Surface Elevation) 是基于 EGM2008 重力场模型的海拔高, 是指减去潮汐效应后, 水面相对于大地水准面的高程 (JPL, 2024a), 如下式所示:

$$WSE_{SWOT} = H - \text{geoid} - \text{solid_earth_tide} - \text{load_tide} - \text{pole_tide} \quad (1)$$

式中, WSE_{SWOT} 表示相对于大地水准面的水面高程, H 表示相对于参考椭球面的水面高度, geoid 表示参考椭球体上的大地水准面高度, solid_earth_tide 表示固体地球潮汐高度, load_tide 表示地心负荷潮位, pole_tide 表示地心极潮高。实测水位的高程基准为 1985 黄海高程系统, 因此在进行水位数据分析时需要对接高程系统进行统一。太湖地区的实测水位高程基准采用的是镇江吴淞高程基准, 与 1985 黄海高程基准相比低 1.717 m, 而 1985 高程基准与大地水准面之间的高差为 0.320 m (翟振和等, 2011)。因此, 实测水位高程可以通过以下公式转换为 SWOT 观测的大地高:

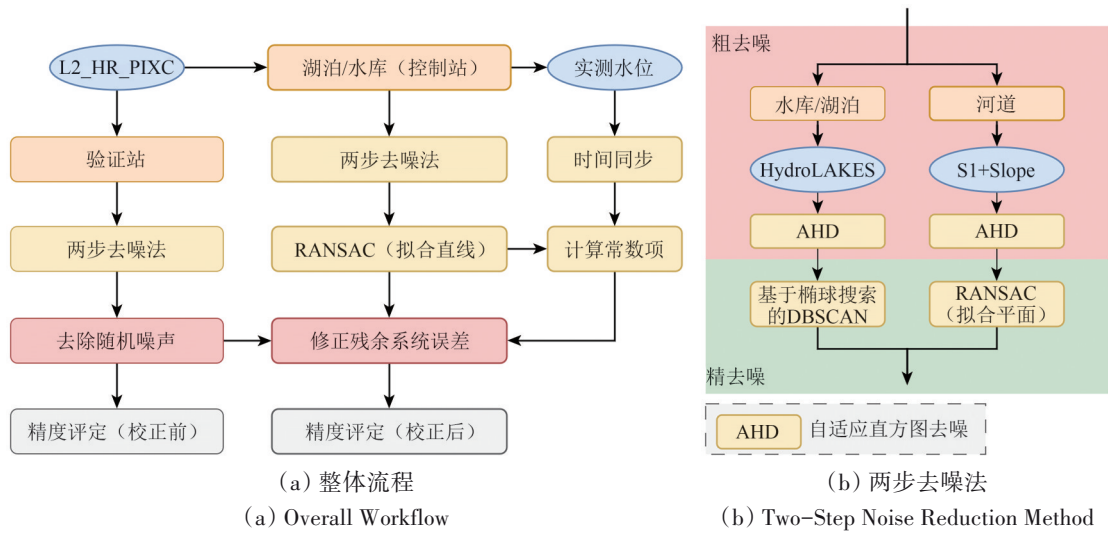


图2 L2_HR_PIXC产品处理的整体流程

Fig.2 L2_HR_PIXC product processing workflow

$$WSE_{in_situ} = H_{in_situ} - 1.717 + 0.32 \quad (2)$$

式中， WSE_{in_situ} 为高程基准统一后的实测水位， H_{in_situ} 为吴淞高程基准的实测水位。转换后的水文站水位的高程基准与水准面之间仍可能存在差异，因此通过式 (3) 和式 (4) 进一步修正高程基准偏差：

$$\Delta h = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (WSE_{SWOT,i} - WSE_{in_situ,i}) \quad (3)$$

$$WSE_{cor_SWOT} = WSE_{SWOT} + \Delta h \quad (4)$$

式中， Δh 为高程基准偏差， $WSE_{in_situ,i}$ 为实测水位， WSE_{cor_SWOT} 为移除偏差后的SWOT观测水位。考虑到该方法可能造成精度高估，本文在去噪后对比移除前后结果以确定精度范围。

由于实测水位获取时间与SWOT观测时间不完全重合，本文通过线性插值方法对两者时间进行同步。考虑到大型水库水位变化较缓慢，插值时前后时间差限制为不超过2 d。而河道站水位变化较快，时间差限定在1 d以内，以降低水位时变对精度评估带来的影响。

3.3 随机误差

已有研究表明，直接采用质量位筛选方法可能导致大量真实有效的观测数据被误剔除。鉴于此，本文在处理水库站数据时未使用质量位筛选，以尽可能多的保留有效观测点 (Zhao等, 2025)。然而，对于河道站而言，由于仅保留测站方圆250 m范围内的观测点，数据量本身较小，若不进行质量筛选，噪声点数量可能远超真实观测点，从而导致异常结果 (Andreadis等, 2025)。因此，本文对

河道站数据进行质量位筛选，剔除质量位标记为 tpv_bad 的观测点。尽管这会减少一定观测次数，但能显著提升数据的有效性与稳定性。

粗去噪过程包括两个步骤。第一步，利用水体掩膜剔除陆地观测点；第二步，采用自适应直方图去噪方法，将测站范围水位值限制在合理范围，并降低后续精去噪的计算量。该方法基于直方图分布原理：首先以组距 bin_width 划分水位区间并统计频数，以频数最高的区间为中心区间，向两侧扩展获得潜在有效区间。当区间频数与中心区间频数比值低于阈值 $drop_ratio$ ，或与中心区间的水位差超过最大差值 max_range 时，判定为异常值。本文参数设置较为保守： bin_width 设为0.2 m， $drop_ratio$ 设为0.1， max_range 在水库站设为0.5 m、河道站设为1.0 m，以尽可能保留有效观测值并避免过度去噪。

由于点云在平面位置和高程方向上分布不均，传统点云去噪算法难以有效识别局部异常观测。为此，本文在处理水库和湖泊数据时，对DBSCAN算法 (Ester等, 1996) 进行了改进，提出一种基于椭圆搜索半径的DBSCAN算法。该方法中，每一个观测点的搜索半径定义如下：

$$d_i = \sqrt{\left(\frac{x - x_i}{a}\right)^2 + \left(\frac{y - y_i}{b}\right)^2 + \left(\frac{wse - wse_i}{c}\right)^2} \quad (5)$$

式中， x 和 y 表示平面坐标， wse 表示水位高程。具体而言，若某观测点在以其为圆心、长半轴为 a 、短半轴为 b 的椭圆范围内，若其邻近点的水位高程与该点的差值小于设定阈值 c ，则为该观测点的内点。当内点数量少于预设的最小点数阈值 min_pts

时, 该观测点被判定为噪声点。本文将 a 和 b 均设为 100 m, 以保证在理论最高分辨率的搜索范围内包含足够数量的观测点; c 设为 0.1 m, 以限定局部范围内的水位变化幅度较小; min_pts 设为 10, 以确保在噪声率高达 90% 时仍能识别出有效簇。

对于水位存在一定变化的河道站, 通过随机采样一致性算法 RANSAC (RANDOM SAMPLE CONSENSUS) (Fischler 和 Bolles, 1981), 对局部水位点进行鲁棒拟合, 以构建可靠的局部平面模型。

RANSAC 方法相比最小二乘法对异常值具有更高的容忍度, 广泛用于直线和平面拟合。其过程为: 从样本点中随机采样最小点集以建立模型并计算参数, 再计算所有点到该模型的距离, 距离小于阈值 $\text{residual_threshold}$ 的点视为内点。重复上述步骤 max_trials 次, 记录内点数量, 并选择内点最多的模型作为最佳结果。考虑到河道站范围为 250 m, 水位变化较小, 故将 $\text{residual_threshold}$ 设为 0.1 m。最大迭代次数 max_trials 满足:

$$\text{max_trials} = \frac{\ln(1-p)}{\ln(1-w^n)} \quad (6)$$

式中, p 为成功率, n 为最小样本数 (平面取 3), w 为内点率。本文考虑了极端情况, 即内点率低至 0.1。此时若要求成功率达到 0.99, 最低迭代次数需不低于 4603 次。综合计算代价与精度需求, 将 max_trials 设为 5000, 以确保在不同条件下均能获得最优结果。

河道站的筛选范围以水位站为圆心构建, 因此观测值中位数位置接近于质心, 与水位站位置基本一致, 理论上不会因河流自身坡度而造成精度误估。水库与湖泊虽在理论上存在坡度, 且其观测值质心与水位站距离相对较远, 但从 SWOT 计算的坡度结果表明, 坡度引起的水位变化幅度 < 0.02 m。因此, 本文不考虑测站坡度对误差的影响。

3.4 残余系统误差

SWOT 的系统误差主要指由仪器本身引起的观测误差, 主要包括 KaRIN 噪声、滚转误差、相位误差、基线膨胀误差和计时误差 (Ma 等, 2023), 表现为观测点的误差值与其跨轨距离之间存在二次函数关系 (Dibarbour 等, 2012; Dibarbour 和 Ubelmann, 2014):

$$\text{WSE}_{\text{obs}}(x, t) = \text{WSE}_{\text{real}}(x, t) + x^2 d_B(t) + x d_h(t) + x d_u(t) + d_T(t) + e(x, t) \quad (7)$$

式中, $\text{WSE}_{\text{obs}}(x, t)$ 为 SWOT 的观测水位, $\text{WSE}_{\text{real}}(x, t)$ 为真实水位, x 为跨轨距离, $d_B(t)$ 、 $d_h(t)$ 、 $d_u(t)$ 、 $d_T(t)$ 分别为基线膨胀误差、滚转误差、相位误差和计时误差, $e(x, t)$ 为 KaRIN 噪声。尽管 SWOT 水位产品已通过海洋区域的交叉轨道校正进行了修正, 但仍存在残余系统性误差: 在近海地区主要表现为线性偏差, 而在远海地区则呈现二次关系。本文实测站点均位于近海地区, 残余系统误差修正后的水位可表示为

$$\text{WSE}_{\text{cor}}(x, t) = \text{WSE}_{\text{SWOT}}(x, t) + x d_a(t) + b(t) \quad (8)$$

式中, $\text{WSE}_{\text{cor}}(x, t)$ 为修正后的水位值, $\text{WSE}_{\text{SWOT}}(x, t)$ 为交叉校正后的水位值, $d_a(t)$ 为残余系统误差中的一次项系数, $b(t)$ 为残余系统误差中的常数项。当 SWOT 的同一次观测覆盖多个湖泊区域时, 可基于“湖面近似水平”的假设, 将各湖泊的水位值与跨轨距离进行线性拟合, 从而分别估算出多个一次项系数 $d_i(t)$ 。若这些一次项系数之间差异较小, 且至少包含 2 个或以上的湖泊样本, 将它们取平均可获得更稳定和准确的一次项系数 $d_a(t)$:

$$d_a(t) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n d_i(t) \quad (9)$$

将其应用于控制站, 并与高精度水位进行求差, 即可获得残余系统误差模型中的常数项 $b(t)$:

$$b(t) = \text{WSE}_{\text{con_in_situ}}(t) - \text{WSE}_{\text{SWOT}}(t) - x_{\text{con}} d_a(t) \quad (10)$$

式中, $\text{WSE}_{\text{con_in_situ}}(t)$ 为控制站的高精度水位, x_{con} 为控制站所在的跨轨距离。由于研究区与 ICESat-2 等传统测高任务的时空匹配率较低, 在各研究区选取一个水库站作为控制站, 利用其实测水位进行误差修正。考虑到实测水位的高程基准与水准面之间存在偏差, 残余系统误差实质上为 SWOT 观测残差与高程基准偏差的综合。该方法不仅能够直接消除高程基准偏差, 还能避免因低精度数据源估算基准偏差而导致的不稳定性。

在拟合点的选取方面, 沿每个湖泊的跨轨方向以固定步长 (20 m) 提取观测点, 通过 3 倍标准差法剔除离群值, 并以剔除后的平均值作为该位置的代表水位值。考虑到仍可能存在残余的随机误差及湖面地形影响, 若采用最小二乘法对水位与跨轨距离进行拟合, 结果容易受到噪声点的干扰, 导致拟合曲线不能准确反映真实的误差变化趋势。为此, 本文通过 RANSAC 算法进行鲁棒拟合。考虑到 SWOT 观测范围达 120 km, 且残余系统误差通常为 0.1—0.3 m, 本研究将 $\text{residual_threshold}$ 设为

0.03 m, max_trials设为100, 以确保拟合成功。但在部分观测中, 受局部降雨等因素影响可能无法拟合, 若强行校正易引入新误差。为避免此类情况, 设定最低内点比例为0.7, 避免错误修正引入新的误差。

3.5 评价指标

本文使用4种评价指标对SWOT观测水位的精度进行定量评估, 分别为RMSE、MAE、MAPE以及 R^2 。其中, RMSE通过计算误差平方均值的平方根, 能够突出反映大误差样本对总体评估结果的影响; MAE以误差绝对值的均值衡量整体偏差水平, 具有对异常值不敏感的特点; MAPE表征的是观测水位相对于实测水位的相对误差水平; R^2 用于量化观测水位与实测水位之间的相关程度。上述评价指标的数学表达式如下所示:

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\text{WSE}_{\text{SWOT}} - \text{WSE}_{\text{in_situ}})^2} \quad (11)$$

$$\text{MAE} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |\text{WSE}_{\text{SWOT}} - \text{WSE}_{\text{in_situ}}| \quad (12)$$

$$\text{MAPE} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left| \frac{\text{WSE}_{\text{SWOT}} - \text{WSE}_{\text{in_situ}}}{\text{WSE}_{\text{in_situ}}} \right| \quad (13)$$

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (\text{WSE}_{\text{SWOT}} - \text{WSE}_{\text{in_situ}})^2}{\sum_{i=1}^N (\text{WSE}_{\text{in_situ}} - \overline{\text{WSE}_{\text{in_situ}}})^2} \quad (14)$$

式中, WSE_{SWOT} 为SWOT观测水位, $\text{WSE}_{\text{in_situ}}$ 为实测水位, $\overline{\text{WSE}_{\text{in_situ}}}$ 为实测水位的平均值, N 为有效观测的次数。

4 结果与分析

4.1 两步去噪法去噪结果

4.1.1 水库站

以2024年8月13日SWOT对大伙房水库的观测数据为例, 验证所提两步去噪方法在水库站应用中的有效性, 如图3所示。从图3(a)可见, 大伙房水库与多条河流相连, 地形复杂。粗去噪虽能将水位范围限制在合理区间, 但仍存在较多局部噪声。应用改进的DBSCAN算法后, 这些局部离群噪声点能被有效剔除。

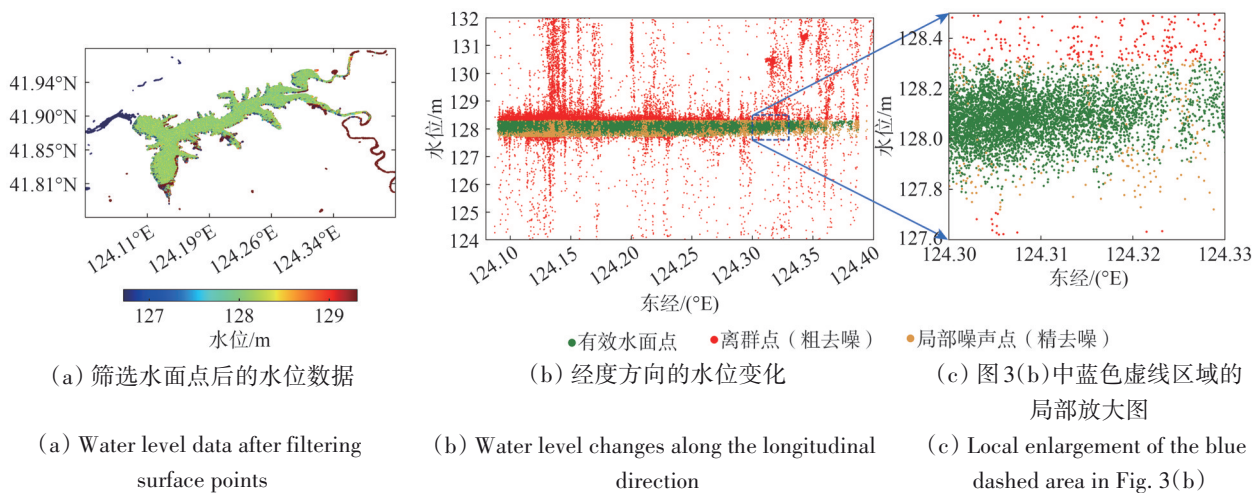


图3 2024年8月13日大伙房水库的SWOT观测结果

Fig.3 SWOT observation results for Dahuofang Reservoir on August 13, 2024

图4显示了9个水库站经过去噪处理并移除高程基准偏差后, SWOT观测水位与实测水位的相关性, 图5显示了两者的时序对比。表3汇总了2个地区各水库站移除前后的评价指标。结果表明, 观测水位与实测水位整体一致性较高, 除太湖外, 其余测站的相关系数 R^2 均超过0.93。大部分测站的MAE保持在约0.2 m, 部分更低。2个地区的整体RMSE均 <0.5 m, 其中辽宁省在移除高程基准偏差

后RMSE无明显变化, MAE仅下降0.06 m, 表明高程基准偏差幅度较小; 而太湖区域的RMSE下降0.17 m, MAE下降0.25 m, 说明存在约0.20 m的高程基准偏差。此外, 不同水体的水位精度存在差异, 例如辽宁省面积最大的大伙房水库反而表现出最高的RMSE。这一结果表明, SWOT的观测精度不仅受观测点数量影响, 还受到观测几何和地形复杂性等多重因素的制约 (Pitcher等, 2019)。

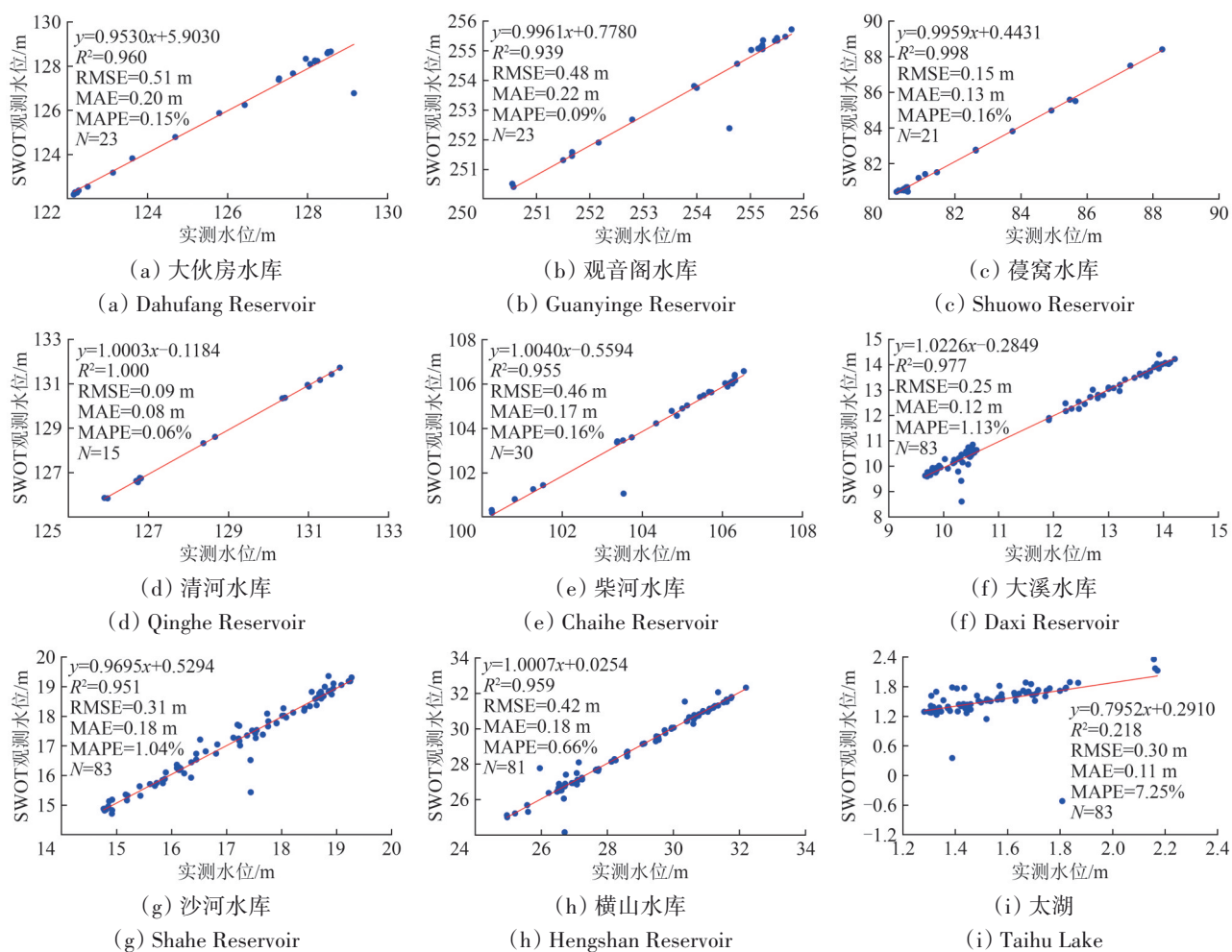
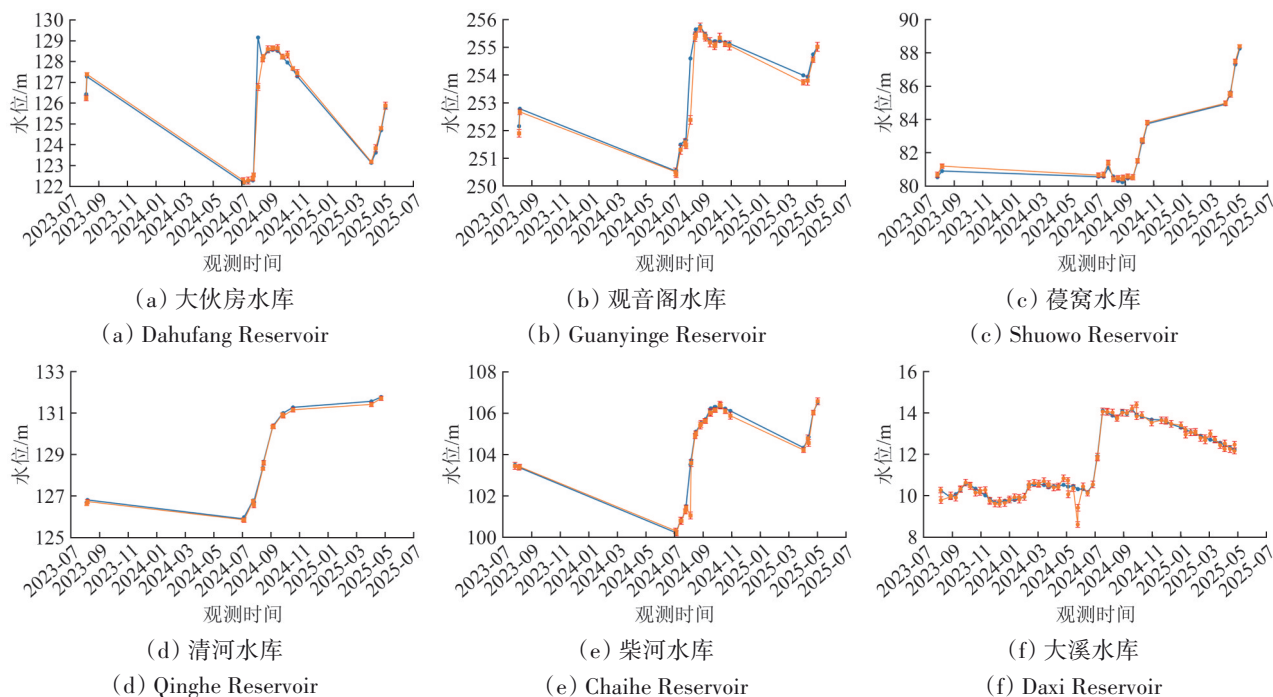


图4 9个水库站的SWOT观测水位与实测水位的相关性

Fig.4 Correlation between SWOT-derived and *in situ* water levels at nine reservoir station

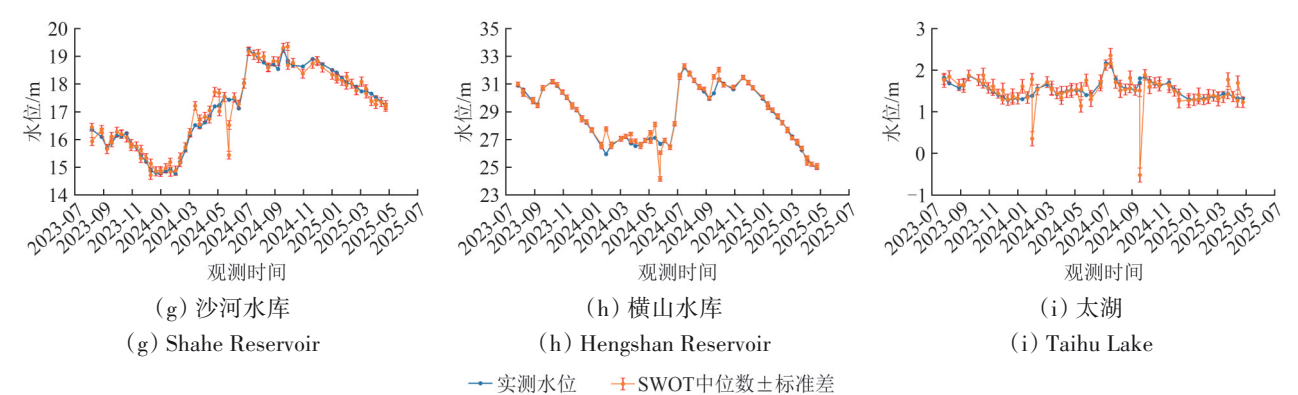


图5 9个水库站的SWOT观测水位与实测水位的时序变化

Fig.5 Temporal variation between SWOT-derived and *in situ* water levels at nine reservoir stations

表3 2个地区水库站所有观测移除高程基准偏差前后的评价指标

Table 3 Evaluation metrics before and after removing elevation datum bias for all reservoir stations in the two regions					
研究区	移除基准偏差	RMSE/m	MAE/m	MAPE/%	观测次数
辽宁省	是	0.41	0.17	0.13	112
	否	0.41	0.23	0.20	
太湖区域	是	0.33	0.15	2.53	330
	否	0.50	0.40	7.02	

从时序上看，多数测站的两条曲线整体高度吻合，且所有观测的标准差均<0.18 m，从而验证了去噪方法在水库站应用中的有效性。

4.1.2 河道站

以抚顺河道站2024年7月3日的观测数据为例，说明两步去噪方法在河道站上的去噪效果，如图6

所示。在以水位站为中心250 m范围内，尽管水位存在一定坡度，但整体变化相对较小。经过两步去噪处理后，河面上的离群点基本被剔除。

图7显示了7个河道站去噪后观测水位与实测水位的相关性，图8显示了两者的时序对比，表4汇总了2个地区的整体评价指标。总体而言，河道站的观测精度与水库站相当，说明河流坡度对误差的影响较小。辽宁省河道站的结果显示，随着河道宽度的增加，RMSE逐渐减小，说明更多的观测点有助于获得更稳健的观测水位。丹阳站与平望站的大部分观测标准差超过0.15 m，不确定度较高，表明SWOT的极限观测空间分辨率约为100 m，低于该尺度时结果的可信度显著下降。尽管如此，总体RMSE均<0.5 m，大多数观测与实测水位保持一致，验证了两步去噪方法在河道站数据处理中的有效性。

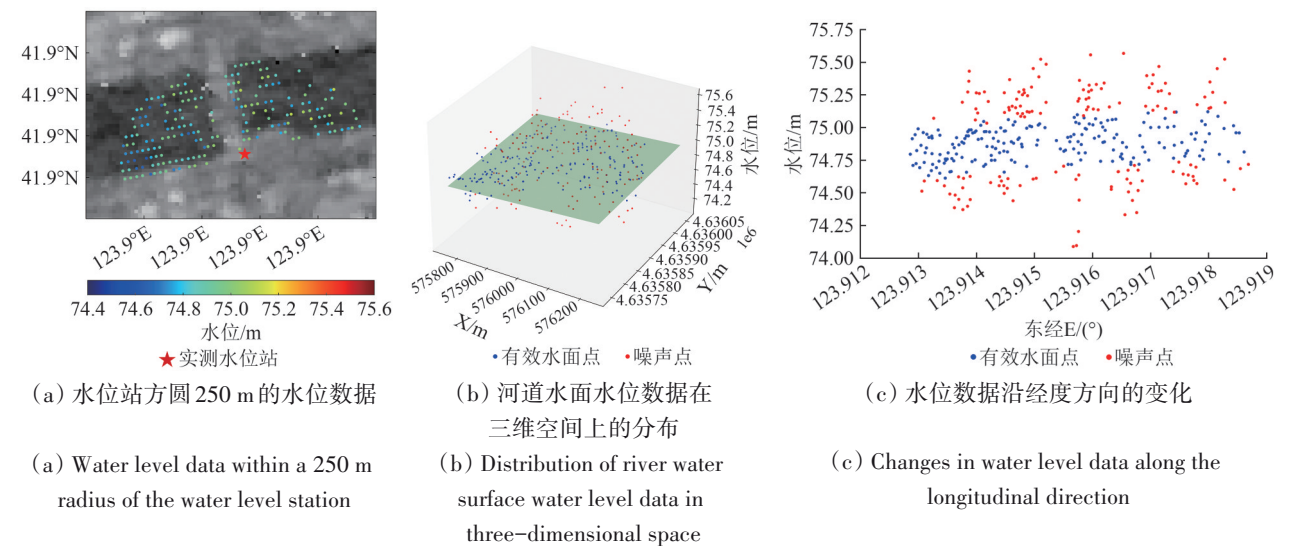


图6 抚顺河道站2024年7月3日的SWOT观测结果

Fig.6 Fushun River Station's SWOT observation results on July 3, 2024

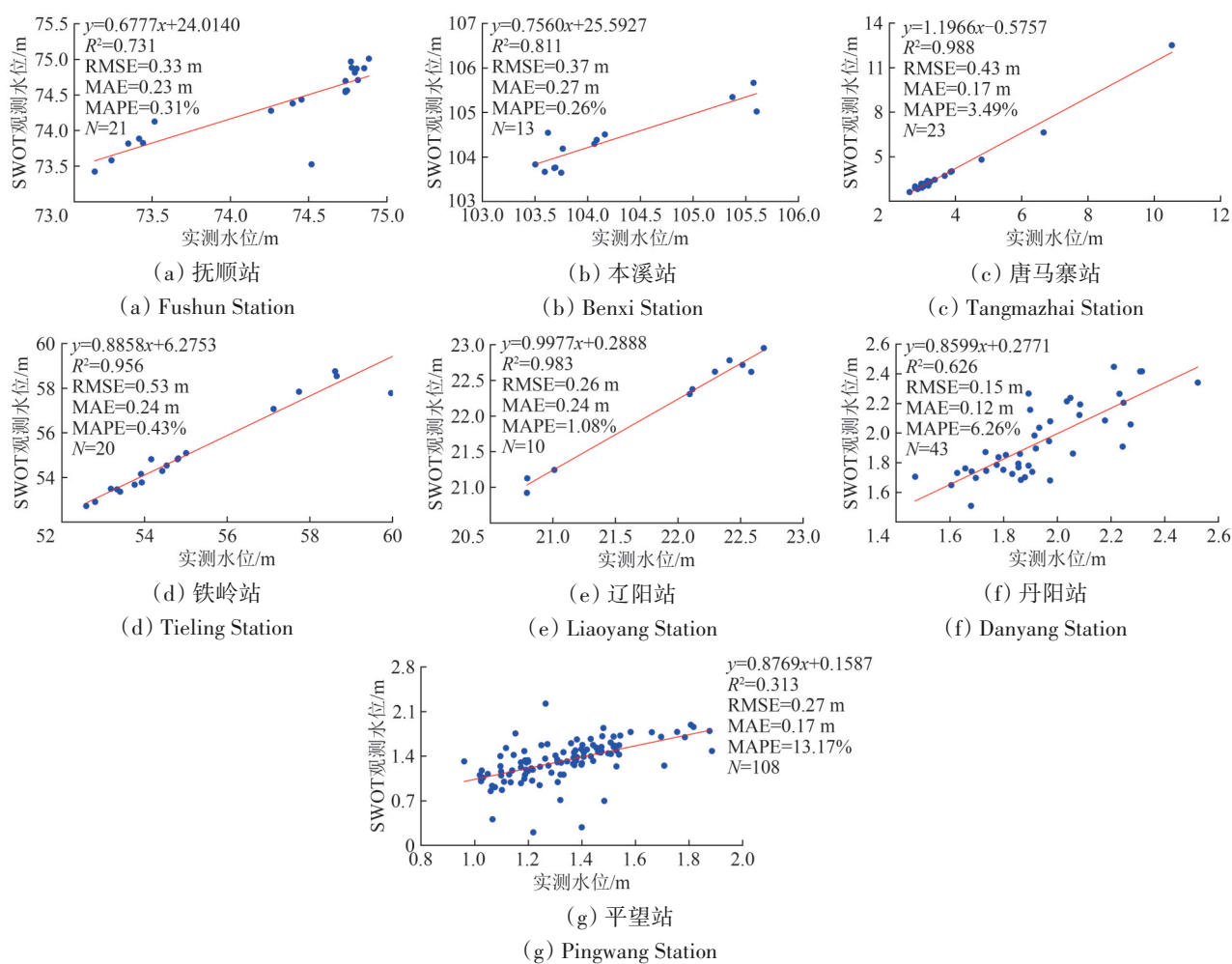
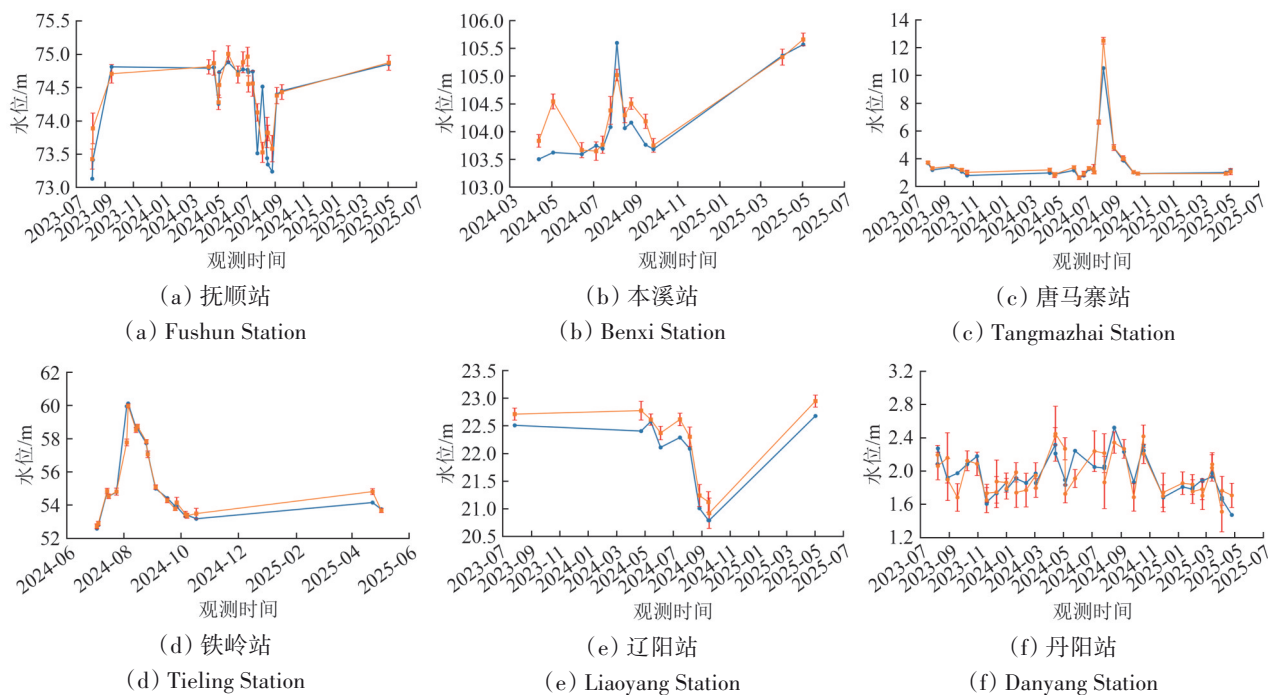


图7 7个河道站的SWOT观测水位与实测水位的相关性

Fig. 7 Correlation between SWOT-derived and *in situ* water levels at seven river stations

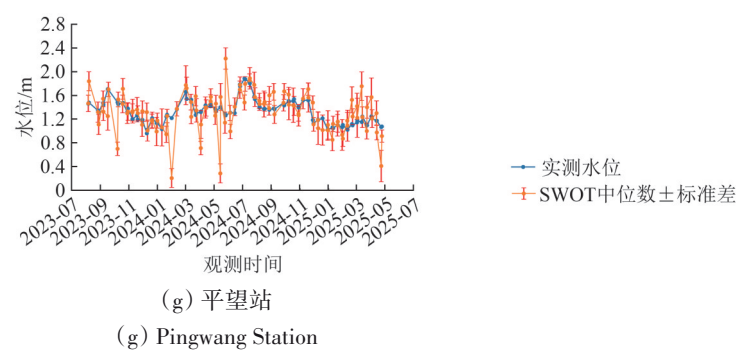


图8 7个河道站的SWOT观测水位与实测水位的时序变化
Fig. 8 Temporal variation between SWOT-derived and *in situ* water levels at seven river stations

表4 2个地区河道站所有观测移除高程基准偏差前后的评价指标

Table 4 Evaluation metrics before and after removing elevation datum bias for all river stations in the two regions					
研究区	移除基准偏差	RMSE/m	MAE/m	MAPE/%	观测次数
辽宁省	是	0.41	0.23	1.26	87
	否	0.49	0.35	2.84	
太湖区域	是	0.24	0.16	11.20	151
	否	0.45	0.39	21.29	

4.2 残余系统误差的存在及分析

4.2.1 大型湖泊水面变化特征

本节通过3个大型湖泊的水位沿跨轨方向的变化，确定残余系统误差的分布规律。图9显示了第15周期第478轨次（Pass）在太湖的过境情况及水位沿跨轨方向的变化。为消除水位量纲的影响，每个观测点水位值减去了所有观测点的中位数（ ΔH ），以

便仅关注水位变化趋势和幅度。由图可见，以下2点现象尤为突出：其一，水位残差与跨轨距离近似呈线性关系；其二，在距最低点0—5 km噪声较大。

为避免单个湖泊和观测周期的偶然性干扰，进一步对3个湖泊在不同周期的水位变化进行了分析，如图10所示。结果表明，同一个湖泊的不同周期的水位变化趋势和幅度存在差异，说明水位变化并非源于湖面坡度，而是由SWOT观测误差造成。具体而言：太湖的多数观测表现出线性规律；巢湖部分观测呈线性规律，部分近似呈二次规律；青海湖的大部分观测则表现出明显的二次规律。这表明近海区域的残余系统误差主要由相位误差引起，与跨轨距离近似线性相关，而在远离海洋的区域，基线膨胀误差无法忽略，呈二次关系。此外，部分周期未表现出规律性，噪声分布显著，说明并非所有观测均适合进行修正。

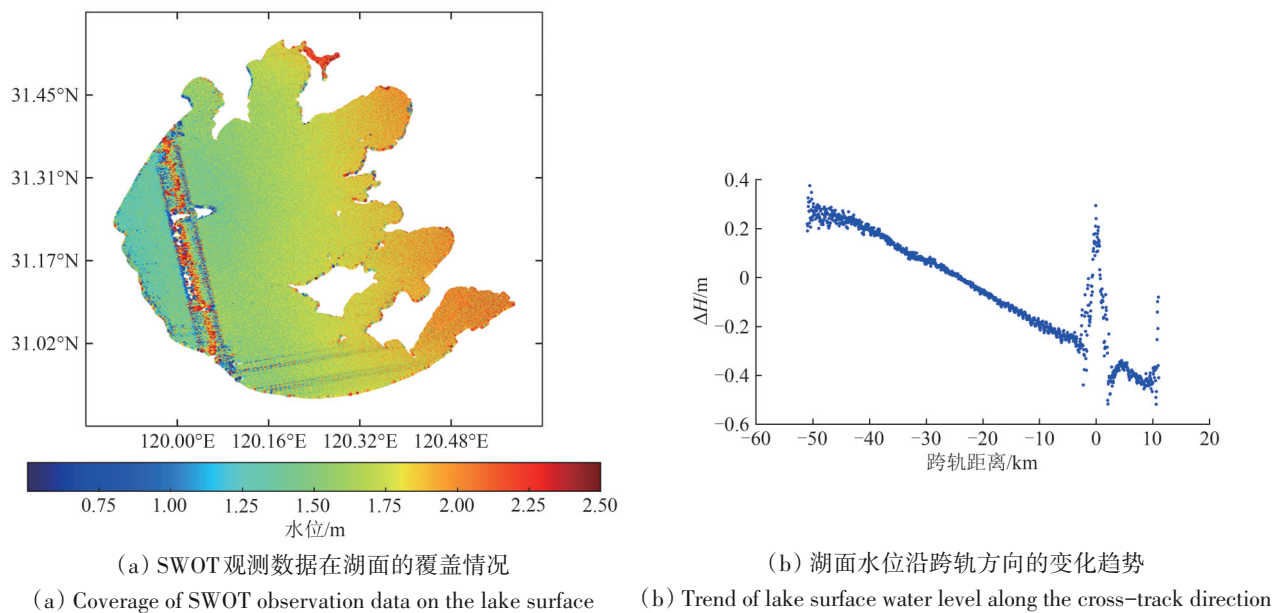


图9 周期15中轨次478在太湖的过境情况及湖面水位沿跨轨方向的变化情况
Fig.9 Transit characteristics of pass 478 in cycle 15 and cross-track water level variations of Taihu Lake

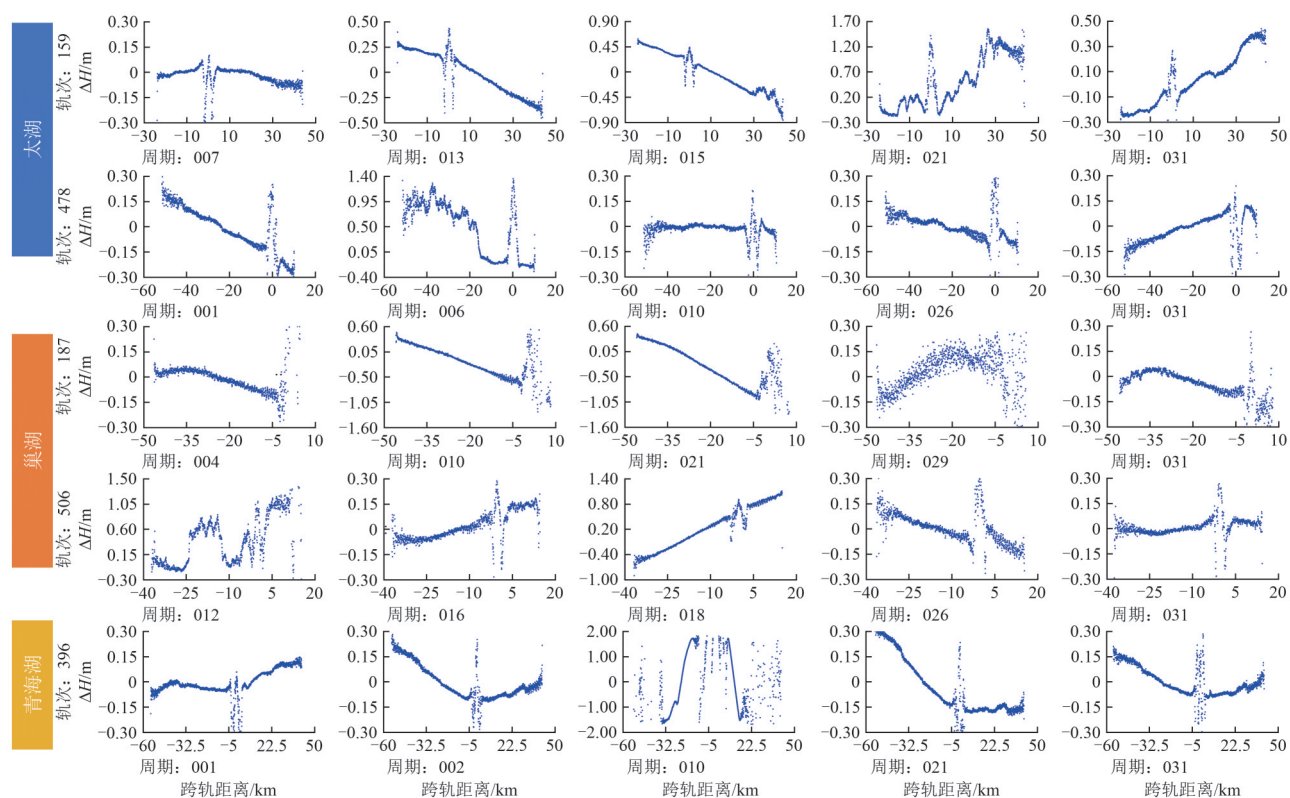


图10 太湖、巢湖、青海湖不同周期湖面水位与跨轨距离的关系

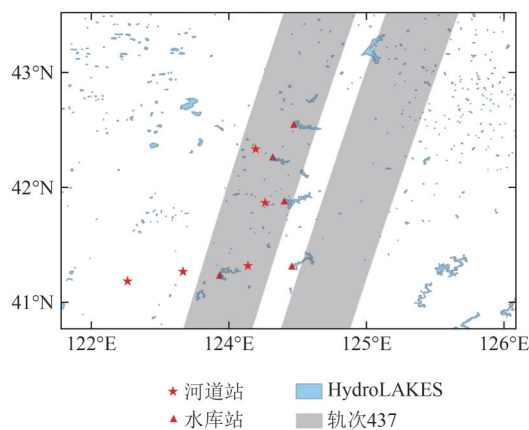
Fig.10 Relationship between lake water levels and cross-track distance for Taihu Lake, Chaohu Lake, and Qinghai Lake during different cycles

4.2.2 不同跨轨距离的水库水位变化特征

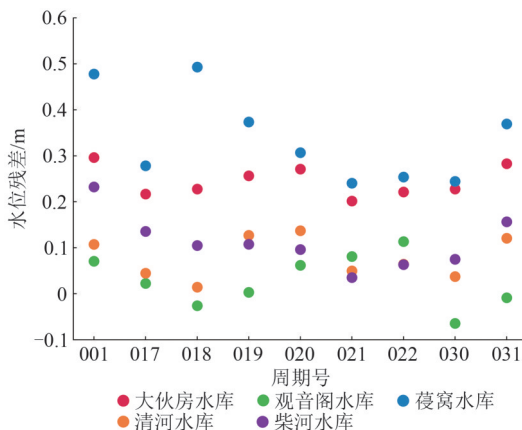
以辽宁省的多个水库站为研究区域，选取 Pass 437 的数据，基于多个大中型水库的水位分布特征，验证 SWOT 在近海地区观测中的残余系统误差特性。理论上，若不存在系统误差，SWOT 观测水位与实测水位之间的残差应呈现随机分布。

图 11 显示了 Pass 437 的过境路径及该轨道经

过的 5 个大型水库在 9 个周期的残差分布情况。尽管各周期的残差具有一定的离散性，但整体上呈现出较为一致的分布规律：在每个周期中，蓼窝水库的残差值最大，其次为大伙房水库和柴河水库，而清河水库和观音阁水库的残差最小。由于这几座水库在跨轨方向上的距离不同，推测其残差与跨轨距离存在相关性。



(a) 轨次 437 对实测水位站的覆盖情况

(a) Coverage of *in situ* water level stations by pass 437

(b) 不同周期各水库在轨次 437 的残差分布

(b) Residual distribution of different reservoirs in various cycles along pass 437

图 11 辽宁省实测水位站的分布及轨次 437 的残差分布

Fig.11 Distribution of *in situ* water level stations in Liaoning Province and residual distribution of pass 437

图12显示了周期20和周期30中各水库水位变化与跨轨距离的关系。由于大伙房水库部分区域位于距星下点0—5 km以内,受到较大噪声干扰,故未纳入分析。从图12中可见,4个水库的沿轨位置及距海远近不同,导致各自的变化斜率存在一定差异。然而,当对4个水库的斜率取平均后,其与基于残差值拟合的直线斜率基本一致。进一步地,

结合观音阁水库的实测水位作为高精度控制点获取拟合模型的常数项,最终得到的拟合曲线与由所有残差点直接拟合的直线高度一致。这一结果表明,通过融合多个水库的水位变化趋势,并引入控制点的高精度水位信息,构建较为可靠的局部Pass误差补偿模型,是一种切实可行的方法。

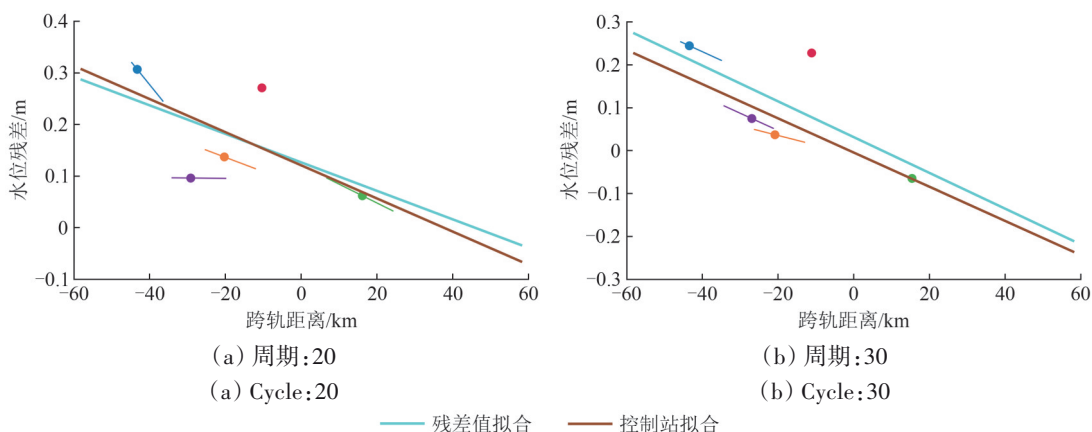


图12 不同周期下轨次437辽宁省4座水库水位沿跨轨方向变化

Fig.12 Cross-track variation of water levels for four reservoirs in Liaoning Province for pass 437 under different cycles

4.3 残余系统误差的修正结果

考虑到构建一个鲁棒的误差补偿模型需涵盖尽可能多的分布在不同跨轨距离的湖泊,或一个面积足够大的湖泊,本文在辽宁省地区对Pass 437轨道的修正前后结果进行了分析,在太湖地区则分析了Pass 478与Pass 159共计2个轨次。在控制站的选择方面,分别选取辽宁省的观音阁水库与太湖的实测水位,用于计算误差补偿模型中的常数项,以实现对其余测站水位的修正。

图13显示了各测站修正前后残差绝对值的分

布情况,表5给出了修正前后的整体评估指标。结果表明,经过误差修正后,残差值可降至0.2 m甚至更低,例如Pass 478的周期17。部分测站在修正前的误差达到米级,但经修正后可控制在0.2 m以内,如Pass 478的周期15。从整体降幅来看,辽宁省地区的误差修正效果略低于太湖区域,主要原因在于辽宁省离海更近,且高程基准偏差更小,因而残余系统误差较小,但修正后RMSE仍可降低0.07 m。而在太湖地区,因高程基准偏差较大,且更远离海洋,修正前的RMSE超过0.46 m,经误差修正后可降低至0.16 m以下,降幅达0.3 m。

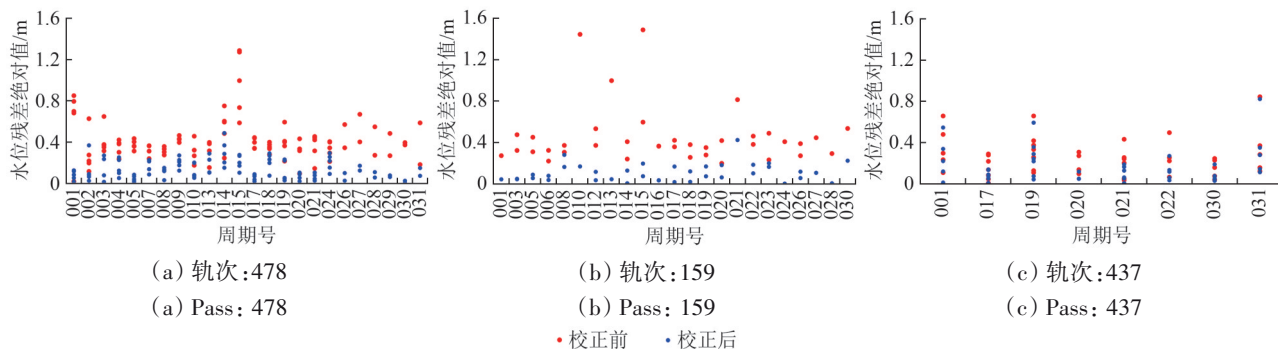


图13 所有测站修正前后的残差绝对值分布

Fig.13 Distribution of absolute residual values before and after calibration at all monitoring stations

表 5 2个地区所有测站的残余系统误差修正前后整体的评价指标

Table 5 Overall evaluation indicators for all monitoring stations in the two regions before and after correction of residual system errors

研究区	轨次	残余系统误差	RMSE/m	MAE/m	MAPE/%	观测次数
辽宁省	437	修正前	0.30	0.24	0.30	44
		修正后	0.23	0.16	0.20	
太湖区域	159	修正前	0.53	0.45	14.52	38
		修正后	0.14	0.11	2.50	
	478	修正前	0.46	0.41	10.78	100
		修正后	0.16	0.13	3.26	

注：数值加粗表示每个指标的最优值。

图 14 显示了横山水库观测水位修正前后的时序变化。可以看出，修正后的水位曲线相较于修正前更接近实测水位。在 2024 年 1 月 30 日的观测中，内陆误差与海洋误差存在显著差异：修正前的误差为 1.44 m，修正后降至 0.17 m。这表明，所提出的误差修正方法可显著提升 SWOT 水位观测的精度，尤其是在内陆与海洋误差存在显著差异的观测。

5 讨论

5.1 残余系统误差在左右刈幅的变化特征

分析左右刈幅水位变化特征需依赖面积较大

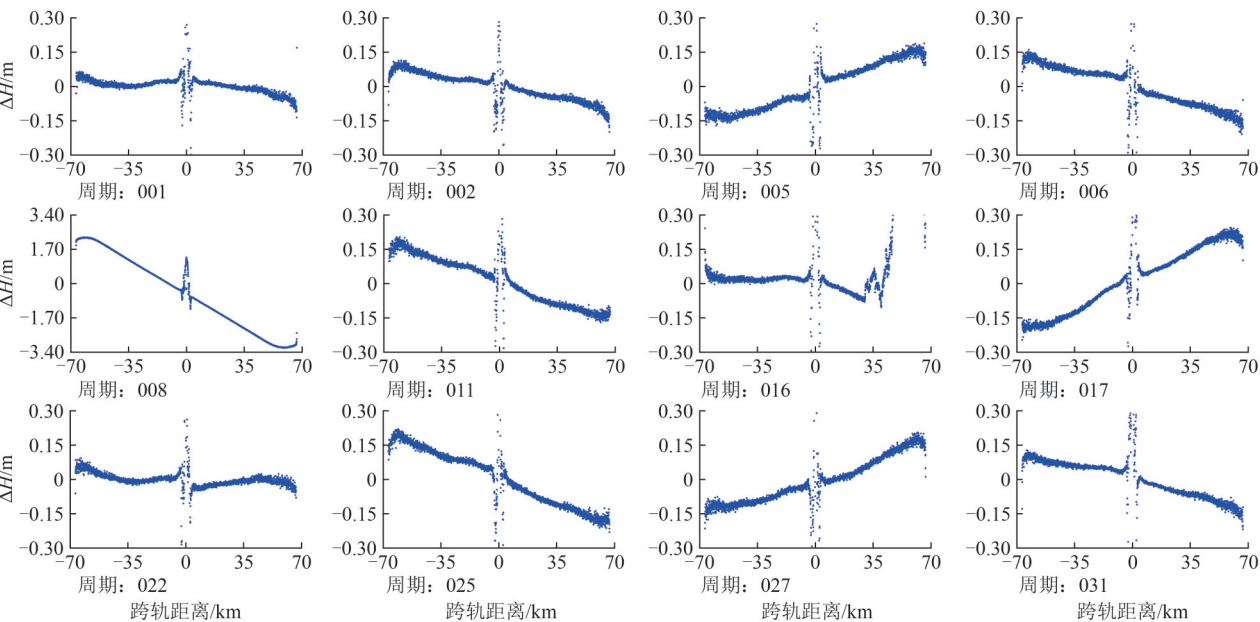


图 15 12个周期中苏比利尔湖(轨次:438,分幅号:070)的水位沿跨轨方向的变化情况

Fig.15 Changes in water level along the cross-track direction of Lake Superior (Pass 438, Tile 070) over 12 cycles

的湖泊，而本文所选取的两个研究区域中均缺乏满足条件的水体，因此以美国五大湖之一的苏比利尔湖作为示例，分析残余系统误差在左右刈幅的差异，如图 15 所示。除周期 16 随机噪声较大，未表现出明显规律外，其余周期的左右刈幅在残余系统误差上均呈现出较为一致的斜率与常数项。这表明，通过在多个不同跨轨距离的位置取湖面观测结果的平均值，构建整个刈幅的误差补偿模型是可行的。

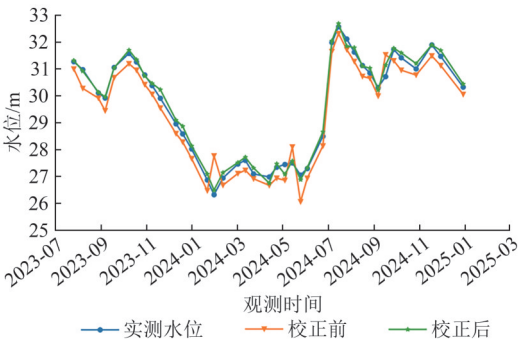


图 14 横山水库观测水位修正前后的时序对比

Fig.14 Temporal comparison of observed water levels at Hengshan Reservoir before and after correction

值得注意的是，在周期 8 的观测中，由于 L2_HR_PIXC 产品缺失了交叉校正，导致左右刈幅的水位差异高达 5 m，进一步凸显了在内陆地区开展误差补偿修正的必要性。

5.2 产品缺失交叉校正时的修正效果

在本文所选的两个实测站区域中，仅在辽宁省的一次观测中发现了缺失交叉校正的情况（周期19，Pass 116），如图16所示。在该次观测中，葛窝水库位于距离卫星轨道最低点0—10 km，经过两步去噪处理后未能获得有效水位数据。然而，观音阁、大伙房和柴河水库部分位于此次观测覆盖范围内，且其跨轨距离相近。利用观音阁水库的实测水位对大伙房和柴河水库的水位进行误差补偿后，两者的残差分别由2.19和2.28 m降低至0.16和0.25 m，说明当产品缺失交叉校正时非常有必要进行误差补偿。该次观测缺失交叉校正的原因可能在于观测数据本身受到了较强噪声干扰，导致即使在邻近海域也无法获取足够的交叉点用于系统误差校正。

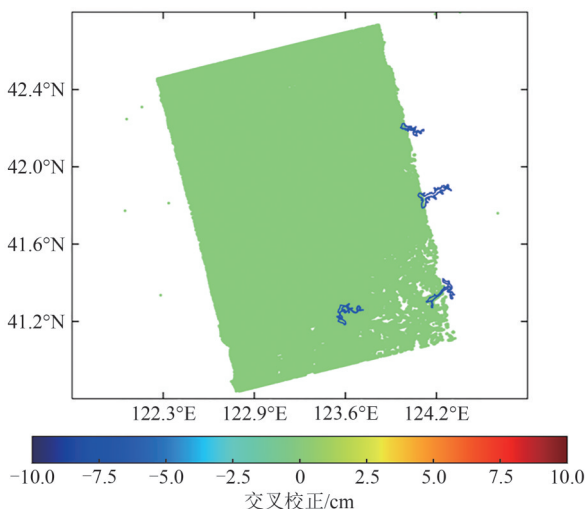


图16 第19周期轨次116的覆盖地区及产品自带的交叉校正值(已将填充值转为0;蓝色轮廓代表水库)

Fig. 16 Coverage area and inherent cross-calibration values of pass 116 in cycle 19 (The filled values have been converted to zero, and blue outlines represent reservoirs)

5.3 本文提出方法的局限性

本文所提出的系统误差修正方法虽在实际应用中展现出良好的性能，但仍存在以下局限性与改进空间：

(1) 由于内陆地区水体分布不均，为获取足够的水面观测数据，本文构建的误差补偿模型假设残余系统误差短时间内保持不变。然而，当局部地区气象条件存在显著差异（如降雨等）或研究区域空间跨度较大时，该假设可能不再成立，

影响模型的适用性和精度。

(2) 用于构建误差斜率模型的湖泊应具有近似水平的水面，即湖面自身的坡度应远小于系统误差的变化斜率。若湖泊水面存在显著坡度，则拟合得到的跨轨距离与水位的关系将混入水体本身的自然变化，无法准确反映系统误差特征，进而导致误差补偿失效甚至引入新的偏差。

在缺乏地面水位观测的区域，本文方法亦具有一定的推广潜力。一方面，可利用高精度卫星测高任务（如ICESat-2）获取的水面高程作为控制源，从而实现基于外部卫星高程的误差修正；另一方面，当无任何外部高精度观测可用时，可通过改进系统误差的时序内插模型，实现无控制点条件下的自适应误差补偿。此外，还可基于多区域样本建立残余系统误差与轨道几何、离海距离等特征的经验模型，以进一步提升在无实测站区域的误差估计与修正能力。

因此，未来的研究可进一步考虑系统误差的时变性，并尝试融合多颗传统测高卫星的数据获取水面的坡度数据，从而建立更高时空分辨率、稳定性更强的误差补偿模型，以提升SWOT在内陆水体监测中的应用精度。

6 结 论

本文以SWOT卫星的L2_HR_PIXC产品为研究对象，从随机误差和残余系统误差两个方面开展了系统性分析与方法设计。主要结论如下：(1) SWOT内陆水位观测在去除异常噪声后可达到分米级精度，具备开展大范围水位监测的应用潜力，但残余系统误差仍是限制精度进一步提升的关键因素；(2) 残余系统误差在空间上具有明确的跨轨特征：近海区域主要表现为与跨轨距离的线性关系，而远海区域则呈现二次变化规律；(3) 基于跨轨距离构建的误差补偿模型能够有效削弱残余系统偏差，在辽宁省和太湖区域均能显著提高观测精度，其中远离海洋的太湖区域改进效果更为显著；(4) 在缺乏交叉校正的情况下，本文方法仍能将米级误差控制至分米级，体现出较强的鲁棒性与实用性。综上所述，SWOT的随机误差经去噪后得到有效抑制，而残余系统误差表现出稳定的跨轨分布特征，建模后可通过少量控制数据实现校正，显著提升内陆水位观测精度。

志 谢 本研究衷心感谢数据提供者提供以下数据: SWOT 来源于 NASA EARTHDATA 平台 (<https://search.earthdata.nasa.gov/>); Sentinel-1 和 Copernicus DEM 来源于 GEE 平台 (<https://earthengine.google.com/>), 实测水位数据来源于水利部信息中心 (<http://xxzx.mwr.gov.cn/>), HydroLAKES 产品来源于 <https://www.hydrosheds.org/products/hydrolakes>。

参考文献 (References)

- Andreadis K M, Coss S P, Durand M, Gleason C J, Simmons T T, Tebaldi N, Bjerklie D M, Brinkerhoff C, Dudley R W, Gejadze I, Larnier K, Malaterre P O, Oubanas H, Allen G H, Bates P D, David C H, Domeneghetti A, Elmi O, Marc L F, Prata De Moraes Frasson R, Friedmann E, Garambois P A, Gehring J, Getirana A, Hughes M, Lee J, Matte P, Minear J T, Monnier J, Muhebwa A, Tourian M J, Pavelsky T M, Riggs R M, Rodríguez E, Sikder M S, Smith L C, Stuurman C, Taneja J, Tarpanelli A, Wang J D, Williams B A and Yadav B. 2025. A first look at river discharge estimation from SWOT satellite observations. *Geophysical Research Letters*, 52(9): e2024GL114185 [DOI: 10.1029/2024GL114185]
- Bai Z, Zhang H X, Ma C Y, Zhao C F and Chen G. 2023. Bilateral independent cross-calibration method of the satellite-borne imaging altimeter. *National Remote Sensing Bulletin*, 27(4): 919-931 (白卓, 张颢馨, 马纯永, 赵朝方, 陈戈. 2023. 星载成像高度计双侧独立交叉定标方法. *遥感学报*, 27(4): 919-931) [DOI: 10.11834/jrs.20221170]
- Biancamaria S, Lettenmaier D P and Pavelsky T M. 2016. The SWOT mission and its capabilities for land hydrology//Cazenave A, Champollion N, Benveniste J and Chen J, eds. *Remote Sensing and Water Resources*. Cham: Springer: 117-147 [DOI: 10.1007/978-3-319-32449-4_6]
- Dibarboure G, Labroue S, Ablain M, Fjortoft R, Mallet A, Lambin J and Souyris J C. 2012. Empirical cross-calibration of coherent SWOT errors using external references and the altimetry constellation. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 50(6): 2325-2344 [DOI: 10.1109/TGRS.2011.2171976]
- Dibarboure G and Ubelmann C. 2014. Investigating the performance of four empirical cross-calibration methods for the proposed SWOT mission. *Remote Sensing*, 6(6): 4831-4869 [DOI: 10.3390/rs6064831]
- Ester M, Kriegel H P, Sander J and Xu X W. 1996. A density-based algorithm for discovering clusters in large spatial databases with noise//*Proceedings of the Second International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining*. Portland: AAAI Press: 226-231
- Fischler M A and Bolles R C. 1981. Random sample consensus: a paradigm for model fitting with applications to image analysis and automated cartography. *Communications of the ACM*, 24(6): 381-395 [DOI: 10.1145/358669.358692]
- Fu L L, Pavelsky T, Cretaux J F, Morrow R, Farrar J T, Vaze P, Sengenès P, Vinogradova-shiffer N, Sylvestre-baron A, Picot N and Dibarboure G. 2024. The surface water and ocean topography mission: a breakthrough in radar remote sensing of the ocean and land surface water. *Geophysical Research Letters*, 51(4): e2023GL107652 [DOI: 10.1029/2023GL107652]
- Gao X W, Jin T Y and Li J C. 2024. An improved retracker considering spatial and temporal characteristics of inland water level changes for SAR altimetry. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 53(2): 217-230 (高贤文, 金涛勇, 李建成. 2024. 兼顾内陆水体水位时空变化特性的合成孔径雷达波形重跟踪算法. *测绘学报*, 53(2): 217-230) [DOI: 10.11947/j.AGCS.2024.20230266]
- Getirana A, Kumar S, Bates P, Boone A, Lettenmaier D and Munier S. 2024. The SWOT mission will reshape our understanding of the global terrestrial water cycle. *Nature Water*, 2(12): 1139-1142 [DOI: 10.1038/s44221-024-00352-0]
- 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]
- Jet Propulsion Laboratory. 2024a. SWOT Science Data Products User Handbook. Jet Propulsion Laboratory Internal Document, JPL D-109532[2025-07-30]. <https://podaac.jpl.nasa.gov/swot?tab=datasets-information§ions=about>
- Jet Propulsion Laboratory. 2024b. SWOT Product Description Document: Level 2 KaRIn High Rate Water Mask Pixel Cloud (L2_HR_PIXC) Data Product. Jet Propulsion Laboratory Internal Document, JPL D-56411 [2025-07-30]. <https://podaac.jpl.nasa.gov/swot?tab=datasets-information§ions=about>
- Köhn S J and Nielsen K. 2025. Validation of SWOT HR PIXC 2.0 based water levels on Danish lakes ESS Open Archive [DOI: 10.22541/essoar.173325114.47640060/v3]
- Laipelt L, De Paiva R C D, Fan F M, Collischonn W, Papa F and Ruhoff A. 2025. SWOT reveals how the 2024 disastrous flood in South Brazil was intensified by increased water slope and wind forcing. *Geophysical Research Letters*, 52(2): e2024GL111287 [DOI: 10.1029/2024GL111287]
- Lou Y H, Liao J J and Chen J M. 2023. Monitoring water level changes in the middle and lower reaches of the Yangtze River using Sentinel-3A satellite altimetry data. *Remote Sensing for Natural Resources*, 35(3): 221-229 (娄燕寒, 廖静娟, 陈嘉明. 2023. Sentinel-3A 卫星测高数据监测长江中下游河流水位变化. *自然资源遥感*, 35(3): 221-229) [DOI: 10.6046/zrzyg.2022239]
- Ma G, Jin T Y, Jiang P Y, Shi J S and Zhou M. 2023. Calibration of the instrumental errors on marine gravity recovery from SWOT altimeter. *Marine Geodesy*, 46(6): 496-522 [DOI: 10.1080/01490419.2023.2232107]
- Maubant L, Dodd L and Tregoning P. 2025. Assessing the accuracy of SWOT measurements of water bodies in Australia. *Geophysical Research Letters*, 52(6): e2024GL114084 [DOI: 10.1029/2024GL114084]
- Messenger M L, Lehner B, Grill G, Nedeva I and Schmitt O. 2016. Esti-

- inating the volume and age of water stored in global lakes using a geo-statistical approach. *Nature Communications*, 7(1): 13603 [DOI: 10.1038/ncomms13603]
- Patidar G, Indu J and Karmakar S. 2025. Performance assessment of Surface Water and Ocean Topography (SWOT) mission for WSE measurement across India. *Geophysical Research Letters*, 52(10): e2025GL115804 [DOI: 10.1029/2025GL115804]
- Pitcher L H, Pavelsky T M, Smith L C, Moller D K, Altenau E H, Allen G H, Lion C, Butman D, Cooley S W, Fayne J V and Bertram M. 2019. AirSWOT InSAR mapping of surface water elevations and hydraulic gradients across the Yukon Flats Basin, Alaska. *Water Resources Research*, 55(2): 937-953 [DOI: 10.1029/2018WR023274]
- Wu J, Ke C Q, Cai Y, Nourani V, Chen J and Duan Z. 2023. GEDI: a new LiDAR altimetry to obtain the water levels of more lakes on the Tibetan Plateau. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 16: 4024-4038 [DOI: 10.1109/JSTARS.2023.3268558]
- Wu S H, Cai Y, Ke C Q, Xiao Y, Li H L, He Z Y and Duan Z. 2025. SWOT mission enables high-precision and wide-coverage lake water levels monitoring on the Tibetan Plateau. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 59: 102357 [DOI: 10.1016/j.ejrh.2025.102357]
- Xiong J H, Guo S L, Jiang L G, Yin J B and Wang J. 2023. Exploring the potential of SWOT for water level monitoring in the Qinghai Lake. *National Remote Sensing Bulletin*, 27(8): 1888-1898 (熊景华, 郭生练, 姜丽光, 尹家波, 王俊. 2023. SWOT 卫星对青海湖的水位监测潜力研究. *遥感学报*, 27(8): 1888-1898) [DOI: 10.11834/jrs.20231628]
- Xiong J H, Guo S L and Yin J B. 2021. Discharge estimation using integrated satellite data and hybrid model in the midstream Yangtze River. *Remote Sensing*, 13(12): 2272 [DOI: 10.3390/rs13122272]
- Xu N, Lu H, Li W Y and Gong P. 2024. Natural lakes dominate global water storage variability. *Science Bulletin*, 69(8): 1016-1019 [DOI: 10.1016/j.scib.2024.02.023]
- Yao F F, Livneh B, Rajagopalan B, Wang J D, Yang K H, Crétau J F, Wang C and Minear J T. 2024a. Leveraging ICESat, ICESat-2, and landsat for global-scale, multi-decadal reconstruction of lake water levels. *Water Resources Research*, 60(2): e2023WR035721 [DOI: 10.1029/2023WR035721]
- Yao J Q, Xu N, Wang M R, Gong P, Lu H, Cao Y Q, Tang X M and Mo F. 2024b. Promoting global surface water monitoring research with the SWOT satellite. *The Innovation Geoscience*, 2(4): 100099 [DOI: 10.59717/j.xinn-geo.2024.100099]
- Yao J Q, Xu N, Wang M R, Liu T, Lu H, Cao Y Q, Tang X M, Mo F, Chang H Y, Gong H Y, Xin H C and Xu H. 2025. SWOT satellite for global hydrological applications: accuracy assessment and insights into surface water dynamics. *International Journal of Digital Earth*, 18(1): 2472924 [DOI: 10.1080/17538947.2025.2472924]
- Yu L P, Zhang H W, Gong W and Ma X. 2024. Validation of mainland water level elevation products from SWOT satellite. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 17: 13494-13505 [DOI: 10.1109/jstars.2024.3435363]
- Zhai Z H, Wei Z Q, Wu F M and Ren H F. 2011. Computation of vertical deviation of Chinese height datum from geoid by using EGM2008 model. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 31(4): 116-118 (翟振和, 魏子卿, 吴富梅, 任红飞. 2011. 利用EGM2008位模型计算中国高程基准与大地水准面间的垂直偏差. *大地测量与地球动力学*, 31(4): 116-118) [DOI: 10.3969/j.issn.1671-5942.2011.04.026]
- Zhang G Q. 2018. Changes in lakes on the Tibetan Plateau observed from satellite data and their responses to climate variations. *Progress in Geography*, 37(2): 214-223 (张国庆. 2018. 青藏高原湖泊变化遥感监测及其对气候变化的响应研究进展. *地理科学进展*, 37(2): 214-223) [DOI: 10.18306/dlkxjz.2018.02.004]
- Zhao Y, Fu J E, Pang Z G, Jiang W, Zhang P J and Qi Z X. 2025. Validation of inland water surface elevation from SWOT satellite products: a case study in the middle and lower reaches of the Yangtze River. *Remote Sensing*, 17(8): 1330 [DOI: 10.3390/rs17081330]

Error compensation and correction method for SWOT inland water level observations

SONG Jie¹, ZHANG Shengjun¹, KONG Xiangxue², WANG Wanning², CHE Defu¹

1. School of Resources and Civil Engineering, Northeastern University, Shenyang 110819, China;

2. Liaoning Earthquake Agency, Shenyang 110031, China

Abstract: The Surface Water and Ocean Topography (SWOT) mission represents a major advancement in satellite altimetry for inland water monitoring given its wide-swath interferometric capability. Although SWOT significantly improves spatial coverage and resolution compared with conventional nadir altimeters, inland observations remain affected by strong random noise and residual systematic errors, especially in regions far from ocean cross-calibration areas. These errors limit the accuracy and reliability of water level estimation over lakes, reservoirs, and rivers. This study aims to systematically analyze the characteristics of random and residual systematic errors in SWOT L2_HR_PIXC products and to develop an effective error compensation and correction framework for inland water level observations.

Taihu Lake, Chaohu Lake, Qinghai Lake, and multiple reservoirs and rivers in Liaoning Province and the Taihu region were selected as study sites. A two-step denoising strategy was first developed to mitigate large abnormal outliers caused by random errors. Coarse denoising constrained observations within reasonable elevation intervals using water masks and adaptive histogram filtering, while fine denoising employed an improved density-based clustering algorithm and RANSAC-based robust fitting to remove local outliers. After noise suppression, the spatial relationship between water surface elevation and cross-track distance was analyzed for large lakes to reveal the structure of residual systematic errors. On the basis of the assumption that lake surfaces are approximately horizontal, a residual systematic error correction model was constructed. The first-order slope term was derived from multi-lake cross-track fitting, and the constant term was determined using high-precision water level measurements from a control station.

After denoising, SWOT water level observations achieved decimeter-level accuracy, with RMSE values ranging from 0.1 m to 0.5 m across different stations. The residual systematic error exhibited distinct spatial patterns. It was approximately linearly correlated with cross-track distance in near-sea regions, whereas in far-sea areas, a quadratic trend was observed. The proposed correction approach effectively reduced these errors. In Liaoning Province, the overall RMSE decreased by 0.07 m (from 0.30 m to 0.23 m). In the Taihu Lake region, characterized by a greater distance from the ocean, the RMSE decreased by more than 0.30 m and was reduced to 0.16 m after correction. Even in extreme cases lacking cross-calibration information, the proposed method effectively constrained meter-level errors to the decimeter scale, highlighting its strong robustness and reliability.

This study establishes a systematic processing framework for SWOT inland water level refinement, including robust denoising and residual systematic error compensation. The proposed method requires a minimum of one control station's measurement data and can significantly improve inland water level accuracy without replacing the official cross-calibration procedure. Results demonstrate that residual systematic errors over inland regions exhibit predictable cross-track dependence and can be effectively modeled and corrected. This study provides theoretical insight and practical guidance for high-precision application of SWOT data in inland hydrological monitoring.

Key words: inland water bodies, satellite altimetry, water level monitoring, SWOT, random error, two-step denoising method, system error, error correction

Supported by Fundamental Research Funds for the Central Universities (No. N25GFY007)