J. Lake Sci.(湖泊科学), 2027, 39(3):000-000
DOI 10.18307/2027.0351
©2027 *by Journal of Lake Sciences*

ICESat-2 激光测高数据在中国水库水位变化监测中的应用评估*

陶卓怡[1, 2]，常利伟[1, 2]，王晓霞[1, 3]，刘　攀[1, 2]，夏　军[1, 2]，程　磊[1, 2,**]
(1：武汉大学水利水电学院，武汉 430072)
(2：武汉大学水资源工程与调度全国重点实验室，武汉 430072)
(3：海南省水务厅，海口 571126)

摘　要：水库水位是水资源调度与管理的关键变量，但受限于数据共享壁垒，实测数据难以获取。ICESat-2 卫星的激光测高技术可以提供高精度的水库水位观测，但目前针对其在中国复杂地表环境下的适用性评估仍不足。研究利用近五年（2018 年 10 月—2023 年 12 月）的 ICESat-2 ATL13 数据，采用归一化中位数绝对偏差方法，反演了中国 847 座水库的水位，系统分析了 ICESat-2 的数据精度及时空覆盖规律，探究了中国水库水位的季节性变幅和趋势特征。结果表明，ICESat-2 监测水库水位精度极高，与 93 座水库的实测水位对比验证的平均绝对误差为 0.126 m，相关系数为 0.978，均方根误差为 0.164 m，且对面积<1km^2的水库具备较强监测能力。对七大流域片区典型水库水位距平序列分析发现，大型水库的水位变化与流域性旱涝急转、台风等水文气象事件具有较好对应关系，表明 ICESat-2 在监测流域极端水文情势及水库调蓄响应方面可行性较强。基于具备完整四季观测记录的 158 座水库分析表明，水库水位季节性变幅呈现“西高东低”空间异质性，其中西南诸河流区与长江流域平均变幅分别高达 22.40 m 和 19.63 m。通过对具备至少 3 年完整四季观测的 109 座水库进行趋势分析发现，研究时段内全国水库水位整体呈下降趋势，净变化率为−0.228 m/a，水位变化趋势呈现“东升西降”的大致特征，西南诸河与长江流域水位显著下降，珠江、海河及辽河流域则普遍呈现水位回升趋势。本研究系统分析了 ICESat-2 监测中国区域水库水位变化的潜力，可为区域水资源管理与调度提供科学依据。
关键词：ICESat-2；卫星测高；中国水库；水位变化

Assessment of ICESat-2 Laser Altimetry Data for Monitoring Reservoir Water Level Changes in China*

Tao Zhuoyi[1, 2],Chang Liwei[1, 2],Wang Xiaoxia[1, 3], Liu Pan[1, 2],Xia Jun[1, 2]& Cheng Lei[1, 2]**
(1: *School of Water Resources and Hydropower Engineering, Wuhan University, Wuhan* 430072, *P.R.China*)
(2: *State Key Laboratory of Water Resources Engineering and Management, Wuhan University, Wuhan* 430072, *P.R.China*)
(3: *Department of Water Affairs of Hainan Province, Haikou* 571126, *P.R.China*)

Abstract：Reservoir water level (RWL) data are critical for water resource management, but are often inaccessible because of data sharing restrictions. ICESat-2 laser altimetry offers high-precision measurements, yet its performance under the complex environmental conditions in China has not been thoroughly assessed. Using ICESat-2 ATL13 data from October 2018 to December 2023, this study retrieved RWL time series for 847 reservoirs across China based on the Normalized Median Absolute Deviation (NMAD) method, and systematically examined the accuracy coverage, seasonal amplitudes, and temporal trends of the retrieved RWL data. Validation against in-situ observations from 93 reservoirs showed high retrieval accuracy (MAE = 0.126 m, R = 0.978, RMSE = 0.164 m), and the method remained effective even for small reservoirs (< 1 km²). Analysis of RWL anomalies in seven major river basins revealed strong correspondences between RWL fluctuations and hydro-meteorological events, including abrupt drought-flood alternations and typhoons. These results confirm the ability of ICESat-2 to monitor extreme hydrological conditions and reservoir regulation responses. Seasonal amplitudes of RWL exhibited pronounced spatial heterogeneity, with a pattern of higher values in the west and lower values

* 2026-02-03 收稿；2026-06-18 收修改稿;2026-07-07 录用。
国家重点研发计划项目（2022YFC3202804）和国家自然科学基金项目（U2340207）联合资助。
**通信作者；Email：lei.cheng@whu.edu.cn。

in the east; the largest amplitudes occurred in the Southwest Rivers (22.40 m) and the Yangtze River Basin (19.63 m). At the national scale, RWL showed an overall declining trend of -0.228 m/a. Spatially, RWL changes displayed a zonal pattern of rising in the east and falling in the west. Significant decreasing trends were detected in the Southwest River Basin and the Yangtze River Basin, while increasing trends were found in the Pearl River Basin, Haihe River Basin, and Liaohe River Basin. This study confirms the reliability of ICESat-2 for national-scale dynamic monitoring of RWL, and offers a scientific basis for regional water resource management.
Keyword: ICESat-2; satellite altimetry; reservoirs in china; water level change

水库作为人类调控地表径流、应对洪旱灾害的关键工程设施，是中国淡水资源的重要调节载体[1]。准确地监测水库水位动态，对于实现水资源的高效管理、优化调度以及保障流域生态安全具有重要的意义[2-3]。水库水位的获取主要依赖于地面水文站的定点观测。然而，实测站点分布稀疏，且多集中于大型水利枢纽，中小型水库往往缺乏连续的实测数据[4]。在涉及跨行政区或多方运营管理的流域中，受限于水库调度与河川径流调控数据的获取难度与共享壁垒，获取全流域尺度连续水位数据面临诸多挑战[5]。随着遥感技术的发展，卫星测高已成为监测内陆水体水位重要的替代数据来源[6]。

在早期内陆水体监测中，雷达高度计应用广泛[7-8]。现有研究基于雷达测高数据建立了包括Hydroweb[9]、DAHITI[10]在内的多个全球水位数据库，对全球大型湖泊水库水位变化进行了广泛研究[11-13]。然而，传统雷达高度计受限于公里级的地面有效足印，在观测过程中易受到岸边地形污染，导致其在监测中小型水库或位于山谷狭长地带的水库时，存在数据缺失严重或精度不足的局限。这一技术瓶颈很大程度限制了卫星测高数据在中国水库群水位精细化监测中的大规模应用。为了突破传统雷达测高的空间分辨率限制，美国国家航空航天局(NASA)于 2018 年 9 月 15 日发射的 ICESat-2(Ice, Cloud and land Elevation Satellite-2)激光测高卫星，其搭载的 ATLAS(Advanced Topographic Laser Altimeter System)系统凭借微米级的光子计数技术，实现了约 14 m 的超小光斑直径与 0.7m 的沿轨采样间隔，为内陆水体的高精度监测提供了全新的机遇。其中 ICESat-2 ATL13 内陆水体水面高程产品广泛用于内陆水体水位监测，现有研究证实了 ATL13 产品在不同水体类型中的高精度。Dandabathula 和 Rao 基于 15 个水库或水体的 46 组近实时水尺数据验证了 ATL13 产品，指出其水面高程误差可达到厘米级，但强、弱光束之间有时存在 5-10cm 的相对差异[14]。Xu 等利用 ICESat-2 ATL13 产品估算全球湖泊和水库月尺度水位变化，并基于美国和澳大利亚共 33 个水位站进行验证，结果显示 ATL13 提取水位与实测水位具有较高一致性，总体 RMSE 为 0.08m，相关系数为 0.999[15]。Kaya 基于加拿大 182 个湖泊评估了 ATL13 水位监测性能，结果表明空间筛选数据能够降低误差，但小型湖泊和复杂岸线条件下误差仍相对较大[16]。Chen 等针对河流虚拟站提出了 ATL13 自动分割与异常值处理方法，结果显示处理后的河流水面高程与实测水位具有较好一致性[17]。

近年来国内外学者基于 ICESat-2 数据在中国区域水库水位反演方面开展了多项研究工作。黄玉帅等[18]采用 ICESat-2 与 Sentinel-1 数据构建了水位面积曲线，估算了丹江口水库水位的连续变化并分析了其与气候因素的关系。张建涛等[19]使用 ICESat、ICESat-2 数据监测了丹江口水库 2003—2019 年间水位变化，验证了激光测高数据的高精度特性。路锦华等[20]运用 ICESat、ICESat-2 数据监测了黄河中上游 4 座水库 2003—2022 年间的水位变化。Liu 等[21]基于 ICESat-2 数据与 Google Earth Engine 平台，实现了黄河流域 11 个湖泊和 8 座水库水位的高精度监测，并揭示了水位动态特征及降水驱动机制。Yuan 等[22]运用中国 30 座水库的实测水位数据，对 ICESat-2 数据的测高精度进行了评估。龙笛等[23]利用 ICESat-2 数据，监测了青藏高原 52 个大型湖泊 2000-2020 年的水位变化，并揭示了其三阶段增长特征。此外，通过融合 ICESat-2 数据在内的多种测高数据，学者们提供了全国水库的综合数据集，例如，Shen 等[24]融合 CryoSat-2、Sentinel-3、ICESat-2 等多源卫星测高与光学遥感数据，构建了 2010—2021 年中国 338 座大型水库的月度水位变化数据集。Chen 等[25]融合 2017-2021 年间 ICESat-2、CryoSat-2、GEDI 等多源卫星测高数据、多种水位产品（如 DAHITI、Hydroweb、CRWLD 等）及 DEM 数据，构建了 662 座中国大型水库的水位–面积–容积关系曲线，为量化区域水库蓄水量变化提供数据支撑。相较于传统测高卫星的粗糙分辨率，具有精细空间覆盖和高测量精度的 ICESat-2 激光数据，是拓展遥感水库监测能力的关键一环。现有研究

已经证实了 ICESat-2 的应用价值，但受限于 ICESat-2 运行时间较短导致前期数据积累不足，过去的研究大多数仅关注了其在部分大型水库水位监测上的表现，尚未充分评估 ICESat-2 在不同大小水库中的应用潜力。同时，基于 ICESat-2 数据的连续观测，能否捕捉水库水位对于流域水文事件的响应，从而服务于大尺度的水文变化监测，有待进一步研究。

本文选取全球水库和大坝数据库（Global Reservoir and Dam Database, GRanD）中包含的 921 座中国水库作为研究对象[26]。GRanD 系统收录了中国境内面积大于0.1 km^2的水库，总库容 684.92 km^3，并提供了包括大坝建成时间、总库容、水体表面积及主要功能在内的详尽属性信息[27]，值得注意的是，由于筑坝和人为调控，GRanD 数据集将西藏羊卓雍错、江苏洪泽湖等部分受人工调节的天然湖泊也纳入了水库统计范畴。在此基础上，本文选取 2018—2023 年作为研究时段，基于 ICESat-2 光子计数激光测高数据，构建高精度的水库水位时间序列。评估 ICESat-2 数据对水库水位变化的监测能力，系统分析近年来中国水库水位的特征与演变规律，为我国水资源精细化管理与调度提供科学的数据支撑与决策依据。

1 数据与方法

1.1 研究区概况

依据水利部水资源一级区划标准，将研究区划分为黑龙江、辽河、海河、黄河、淮河、长江、珠江、浙闽台、西南诸河及内陆河湖区等十大流域片区[28]（图 1(a)）。受地理位置与地貌格局影响，各流域具有不同的气候及水文气象特征。其中，黑龙江、辽河、海河、黄河及淮河流域地处北方温带季风区，降水季节性集中，近年来降雨带北移、极端降雨频发；长江、珠江及浙闽台河流位于南方亚热带季风区，水资源相对丰沛但易受梅雨与台风扰动，旱涝急转频发；西南诸河流区具有独特的山地垂直气候特征，水库多位于高山峡谷，研究期内受长周期气象干旱累计效应影响较大；而西北内陆河湖区位于内陆，属于温带大陆性气候，降水稀少、蒸发强烈，水资源主要依赖高山冰雪融水补给。

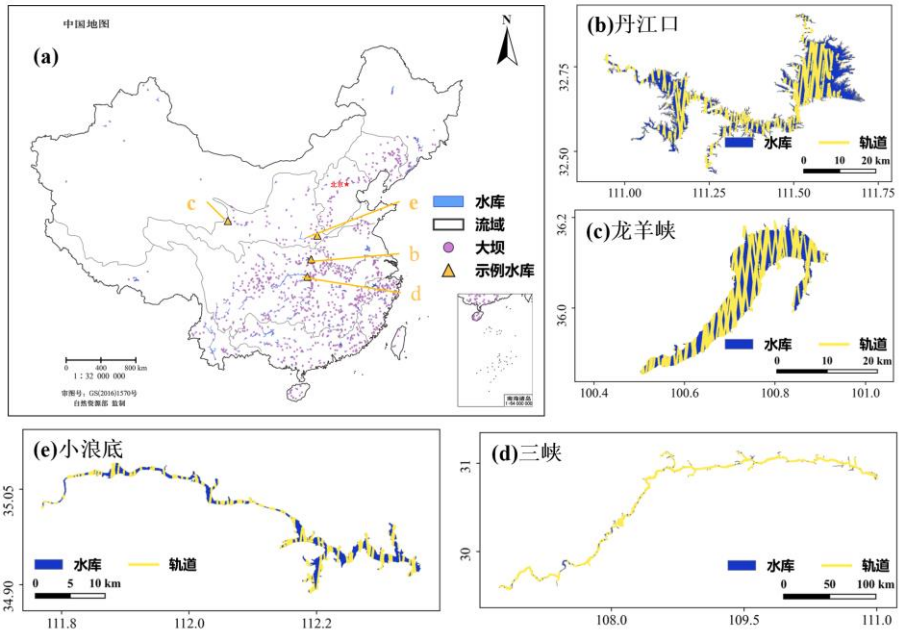

图 1.基于 GRanD 数据的中国水库与大坝总体分布格局(a)，子图(b)-(e)展示了三峡等典型大型水库的水域范围（深蓝色）及研究期内 ICESat-2 过境水面轨迹（黄色）

Fig.1. Overall distribution pattern of reservoirs and dams in China based on GRanD data. Subplots (b)-(e) showcase the water extents (dark blue) and the tracks of ICESat-2 overpassing water surfaces (yellow) during the study period for representative large reservoirs such as the Three Gorges

1.2 ICESat-2 数据及水位提取方法

NASA 在 2018 年 9 月 15 日发射了新一代星载激光雷达卫星 ICESat-2，采用了微脉冲多波束光子计数激光雷达技术，所搭载的先进地形激光高度计系统(ATLAS)采用微脉冲、高重频(10kHz)的光子计数体制，通过分束光学系统发射 3 对 6 条工作波长为 532 nm 和 1064 nm 的激光束，实现了对地表的高密度覆盖[29]。相邻波束对间距约 3.3 km，组内强弱光束间距约 90 m，沿轨方向前后光束相距约 2.5 km，激光足印直径约为 14 m，沿轨采样间隔仅 0.7 m，极大提升了空间分辨率与地形重建能力。基于 ATLAS 原始光子数据，美国国家冰雪数据中心(National Snow and Ice Data Center)发布了多级科学数据产品，其中 ATL13 数据是专门面向内陆水体的 Level-3A 级数据产品，以 gt1l、gt1r 等 6 个轨道组分别保存每束激光测量结果，保存有经度、纬度、水面高程、大地水准面差距等信息。

为了从 ICESat-2 ATL13 测高产品中提取高精度的水库水位时间序列，首先进行基于地理空间约束的数据初筛。基于水体掩膜与 ATL13 测高数据进行空间相交处理。通过提取落入水体掩膜范围内的激光足印，有效剔除了岸边陆地及非水体区域的无效观测。由于在大尺度研究中获取高频动态水体掩膜的计算成本较高，本研究采用代表枯季水面积的 GRanD 数据集中的静态掩膜进行数据初筛，但该方法难以完全规避由于水面积变动裸露浅滩或岸坡带来的地形污染。因此，本研究在后续流程中引入了 normalized median absolute deviation (NMAD)统计去噪与标准差约束以弥补此局限性。特别地，针对三峡水库，由于库尾水位受入库流量影响更大、更接近河道特性，而坝前水位更能代表水库整体蓄水状态，为减小纵向比降引起的统计误差，本研究对三峡水库内的 ICESat-2 数据进行了空间筛选，仅保留经度 $108.5^\circ E \sim 111^\circ E$范围内的下游近坝区观测数据。

由于激光测高数据容易受到云层遮挡、大气散射及水面镜面反射等因素影响，原始数据中往往包含偏离真实水面的噪声。因此以单次过境的观测轨道为单元对数据进行分组，采用 2 倍归一化中位数绝对偏差（NMAD）去除异常值[30]，仅保留位于区间范围内的有效高程点，以剔除显著的异常值。相比于传统的 3 倍标准，2 倍 NMAD 能更严苛地筛选由于近岸地形或大气干扰产生的异常数据点。由于该算法仅剔除偏离单次观测中值的异常点，而洪水事件表现为时间上的突变，此方法不会导致代表极端水位事件的洪水峰值水位被误删。基于筛选后的数据点，计算每个观测轨道的高程中位数作为过境当日的水库水位。部分大型水库在同一天内可能存在多条过境轨道，所有轨道水位的中位数记为研究时段的日水位值。

为了进一步提高水位数据的精度，对初步提取的水位数据集进行质量控制，剔除低质量数据与异常值。基于有效观测点数进行筛选，仅保留用于计算日水位的有效点数大于等于 5 个的观测记录，保证单次水位提取具有足够的样本量，避免因稀疏光子导致的统计偏差。然后基于标准差进行筛选，剔除标准差大于 0.5m 的数据。较大的标准差通常意味着此次观测受到了显著的风浪影响、近岸地形干扰或噪声污染，将此类数据剔除可提升水位序列数据的稳健性。

1.3 实测水位验证与精度评价

实测水位数据来源于全国水雨情信息网（http://xxfb.mwr.cn/index.html）。为验证 ICESat-2 测高数据的精度，系统收集并整理了 2019 年 7 月—2021 年 7 月期间 93 座中国主要水库的 54466 条水位实测数据，平均单库观测记录约 585.7 条，作为评估 ICESat-2 激光测高精度的基准。

由于实测水位记录通常采用 1985 国家高程基准，而 ICESat-2 ATL13 水准面数据的高程参考系基于 WGS84 椭球的 EGM2008 大地水准面，两者之间存在物理意义上的系统偏差。为消除基准不一致对误差评估的影响，在进行时间匹配后，通过计算各水库验证点位的平均偏差进行基准对齐，确保评估指标能够准确反映反演水位与实测值之间的线性相关性及随机误差。基于实测水位数据对 ICESat-2 数据提取的水位序列进行精度验证。通过将实测水位与 ICESat-2 数据进行时间匹配，在参与验证的 93 座水库中筛选出 639 条有效配对记录，平均每座水库具有约 6.9 次有效验证匹配，中位数为 5 次，最少为 3 次，最多为 72 次。2 个水库的验证点超过 20 个，本研究仍采用平均绝对误差（MAE）、皮尔逊相关系数（R）和均方根误差（RMSE）进行精度评估。

1.4 水库水位波动特征及年际趋势分析

在构建上述高精度水库水位时间序列数据集基础上，对水库水位的典型波动特征及其对极端水文事

件的响应展开分析。在中国 7 个主要流域中分别从面积排名前 5 的水库中依据观测频率选出 3 座代表性的大型水库。大型水库凭借其广阔的水域面积与巨大的调节库容，其水位动态能够有效整合并反映流域尺度的降水与径流变化，具有高度的代表性。采用水位距平指标直观表征水位的相对波动强度并剔除绝对高程的差异。具体而言，计算各水库在研究时段内的平均水位，并将各观测时刻水位减去该均值得到距平序列。基于此距平序列，结合历史水文气象事件记录，分析距平变化与近年水文气象事件的对应关系，验证 ICESat-2 数据在水文事件监测中的准确性。

进一步揭示了2018至2023年间中国水库水位的季节性波动特征。为确保季节性变幅计算的准确性，避免因季节性观测缺失导致水位波动范围被低估，保留了研究时段内至少有一个年份具备完整四季观测数据的 158 座水库。在此基础上，提取各有效年份内的最高水位与最低水位，计算两者之差作为当年的年内水位最大变幅；再对各年份的变幅结果进行算术平均，获得各水库的多年平均季节性变幅。通过平均处理方式一定程度上削弱了特大洪水或干旱等单一极端水文年份的干扰，更准确地反应水库水位的波动范围。

最后，量化了 2018 至 2023 年间中国水库水位的年际变化趋势，剔除了观测记录稀疏、时间跨度不足或季节性缺失的水库样本，仅保留在研究时段内至少有 3 个年份具备完整四季观测数据的 109 座水库。在此基础上，采用 Theil-Sen 斜率估算方法计算各水库的水位趋势。作为一种非参数统计方法，Theil-Sen 斜率对离群值不敏感。相比于传统的线性回归，该方法在处理样本量有限、非正态分布或含噪声的长时序数据时，能够更稳健地估计水位序列的长期变化趋势[31-33]。为了更客观地表征不同区域及全国尺度下的水位整体演变特征，各流域及全国的年际净变化率均采用水库面积加权平均法计算，其计算公式如下：

$$R_{net} = \frac{\sum_{i=1}^{n}(A_i \times r_i)}{\sum_{i=1}^{n} A_i} \tag{1}$$

其中：R_{net}为统计单元（各流域或全国）的年际净变化率(m/a)；A_i为第 i 个水库的水面面积(km^2)；r_i为通过 Theil-Sen 斜率估算的第 i 个水库的年际水位变化率(m/a)；n 为统计单元内参与计算的水库总数。通过面积加权给予大面积水库更高的权重，从从而反应区域水资源的盈亏状态。

1.5 水库水位变化趋势归因

为探究水库水位长期演变的气象驱动机制，采用欧洲中期天气预报中心发布的第五代全球大气再分析数据集 ERA5-Land(https://cds.climate.copernicus.eu/)。ERA5-Land 基于 ECMWF 的地表模型开发，采用高分辨率全球数值积分。该数据集整合历史气象记录，以优化模型输出与实际观测数据之间的一致性，并于 2019 年 7 月 12 日正式发布[34]。ERA5-Land 的数据以 0.1º 的空间分辨率提供。本研究直接采用研究时段内的月尺度降雨、径流、水面蒸发以及 2 米气温数据。降水与蒸发是影响内陆水体水位最直接的两个气候因素。并且，温度通过融化冰川和积雪以及改变湖泊蒸发速率产生间接影响。径流作为降水扣除流域蒸散发损耗后的最终净产水量，直接影响水库水位变化。对全国水位变化趋势与不同因素间的关系进行分析。

本研究基于水库矢量边界对 ERA5 原始格点数据进行掩膜裁剪与空间聚合，提取各水库的月尺度气象序列。在构建序列时，根据要素物理属性对降水、径流及水面蒸发等通量型变量求取月累加值，对气温提取月平均值。采用与 2.4 节相同的 Theil-Sen 斜率法，分别估算出各水库降水、径流、蒸发及温度的变化率。最后，计算全国以及不同趋势流域分组内水库水位演变趋势与降雨、径流、蒸发及温度变化率之间的相关系数及显著性水平，进而定量揭示自然气候变化与人类活动对水库水位趋势的影响。

2 结果与讨论

2.1 ICESat-2 数据精度及覆盖率

本研究基于 93 座水库的实测水位数据，采用 MAE、R 和 RMSE 三个指标，对 ICESat-2 ATL13 产品提取的水位序列进行了精度评估。图 2 展示 ICESat-2 提取的水位序列与实测水位之间的偏差总体较小。在参与验证的 93 座水库中，90 座验证水库提取水位序列数据精度较高，尽管有 3 座水库因地形复杂误差略大，但总体精度较高。统计结果以“均值±标准差（极值范围）”的形式呈现，结果表明：MAE 为

$0.126 \pm 0.194(0.005\sim0.907)$m，$R$ 为$0.978 \pm 0.094(0.285\sim1.000)$，RMSE 为$0.164 \pm 0.274(0.005\sim1.289)$m。表明 ICESat-2 数据不仅在数值上与实测值高度接近，而且在时间序列上表现出极高的一致性。

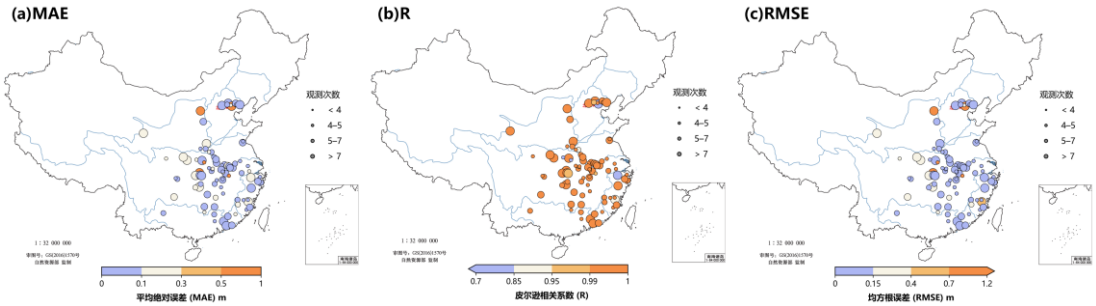

图 2 .ICESat-2 提取水位与实测水位误差指标(a)平均绝对误差(MAE)，(b)皮尔逊相关系数(R)，和(c)均方根误差(RMSE)的空间分布。点的颜色指示误差大小，点的大小指示观测次数多少

Fig.2 Spatial distribution of error metrics between ICESat-2 derived and measured water levels: (a) Mean Absolute Error (MAE), (b) Pearson Correlation Coefficient (R), and (c) Root Mean Square Error (RMSE). Point color indicates error magnitude, and point size indicates the number of observations

图 3 展示了提取水位与实测水位时间序列对比，ICESat-2 对不同规模的水体均保持了稳健的监测性能。对于大型水库，提取水位数据精度很高，其中：丹江口水库的 MAE 为 0.084m、R 为 0.998、RMSE 为 0.106 m；密云水库的 MAE 为 0.024 m、R 为 0.999、RMSE 为 0.031m；官厅水库的 MAE 为 0.035m、R 为 0.995、RMSE 为 0.049 m；三峡水库的 MAE 为 0.300 m、R 为 0.999、RMSE 为 0.449 m。除大型水库外，对于面积区间为 1-10 km^2的小型水库，ICESat-2 数据在 16 座验证水库中具备较高的精度，其中平均 MAE 为 0.130 m，RMSE 为 0.152 m，R 达到 0.993，具备在狭窄水域内监测水位的能力：薄山水库的 MAE 为 0.031m、R 为 0.999、RMSE 为 0.034 m；尾斗山水库的 MAE 为 0.061m、R 为 0.993、RMSE 为 0.076m；龙潭水库的 MAE 为 0.094 m、R 为 0.999、RMSE 为 0.127 m。表明 ICESat-2 数据在不同大小的水库中均与实测数据高度一致，总体实现了高精度的监测。

研究时段内 ICESat-2 监测到 921 座水库中的 847 座。图 4(a)统计了研究时段内每座水库的 ICESat-2 水位观测次数的空间分布。全国水库 5 年间的年均观测次数约为 3 次，不同水库的总有效被观测次数分布在 1~233 次之间，差异较大。研究时段内，观测次数的 25%、50%、75%分位数达到 4、8、14 次，因此图 4(a)采用基于四分位数的分组方法展示观测频率的空间差异。有效观测次数超过 5 次的水库共 558 座，有效观测次数超过 10 次的水库共 309 座。更为显著的是，共有 98 座水库的平均观测频率超过每季度 1 次。对于三峡水库，ICESat-2 能实现月度监测。ICESat-2 数据能为大部分水库提供较为丰富的水位数据。从时间维度看，高观测频次组（8~233 次）在各月份的观测数量分布较均匀，但低观测频次组（1~8 次）的观测记录在汛期显著上升。此外，监测水库数量表现出持续增长的稳健态势（图 4(b)），从 2018 年的 283 座累计增长至 2023 年的 847 座，前 2-3 年增长较快，2022 年之后增长缓慢，稳定在 800 座以上，随着时间累计，ICESat-2 监测覆盖范围仍将缓慢增长。

图 5 展示了 ICESat-2 的观测次数、年均观测频率与水库面积呈现出正相关的特性，即水库面积越大，被卫星轨道经过的概率越高。这一规律解释了观测频次的季节性差异，即以大型水库为主的高频次组水库因水面广阔稳定，观测波动较小；而以中小型水库为主的低频次组水库在汛期因水面扩张，显著提升了被 ICESat-2 监测的概率。图 5(a)显示不同观测次数组的箱线图呈现出明确的上升趋势，并且随着观测次数的增加，观测到的水库数量逐渐减少。在 0-13 次观测组中表面积在 0~10 km^2之间的水库数量最多，数量占比为83.3%，在 13~233 次观测组中表面积在 10~100 km^2之间的水库数量最多，数量占比为69.4%。图 5(b)显示了水位观测频率在不同区域间呈现一定的差异，以年均观测频率为衡量指标，西南诸河流区、黑龙江流域具有较高的观测频率（> 3.0次），而长江流域、浙闽台河流区较低（< 2.0次）。并且回归分析显示，观测频率与水库面积符合关系$N = 0.61 \cdot A^{0.47}$，拟合参数 b 为 0.47，表明观测频率随面积减小而

下降，但单位面积的观测密度却随面积下降而上升，侧面反映了 ICESat-2 数据对中小型水库仍能保持较高的观测覆盖水平。基于提取结果对 ICESat-2 对小型水库的监测能力进行评估，数据显示 ICESat-2 对小型水库（<100 km^2）的监测覆盖率高达 92.3%。即便对于表面积小于 1 km^2的水库，研究时段内总有效观测次数也达到了 3.4 次。监测到最小的水库面积仅为 0.170 km^2。这表明了 ICESat-2 对小型水库监测方面具有较强的轨道覆盖优势与数据获取能力。

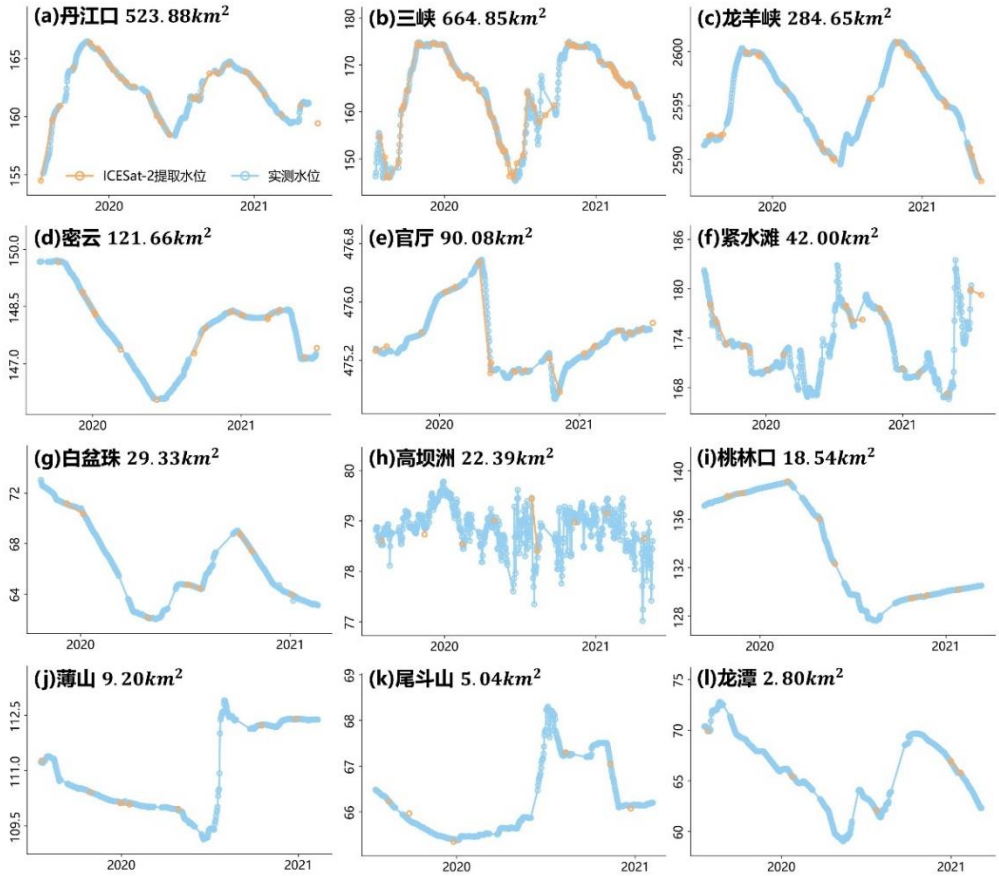

图 3 .ICESat-2 提取水位与实测水位在(a)丹江口、(b)三峡、(c)龙羊峡、(d)密云、(e)官厅、(f)紧水滩、(g)白盆珠、(h)高坝洲、(i)桃林口、(j)薄山、(k)尾斗山、(l)龙潭代表性水库中的时间序列一致性对比

Fig.3 Time-series consistency comparison between ICESat-2 derived and measured water levels for representative reservoirs: (a) Danjiangkou, (b) Three Gorges, (c) Longyangxia, (d) Miyun, (e) Guanting, (f) Jinshuitan, (g) Baipenzhu, (h) Gaobazhou, (i) Taolinkou, (j) Boshan, (k) Weidoushan, and (l) Longtan

2.2 水库水位序列波动分析

结合各流域水库覆盖率与气候带特征，选取长江流域、黄河流域、珠江流域、海河流域、浙闽台河流区、西南诸河流区中的代表性水库作为研究对象，代表性水库的水位序列距平值均展现出显著的年内周期性波动，为探究 ICESat-2 数据对水文事件与水库调控共同作用下水位波动的监测能力奠定良好观测基础。

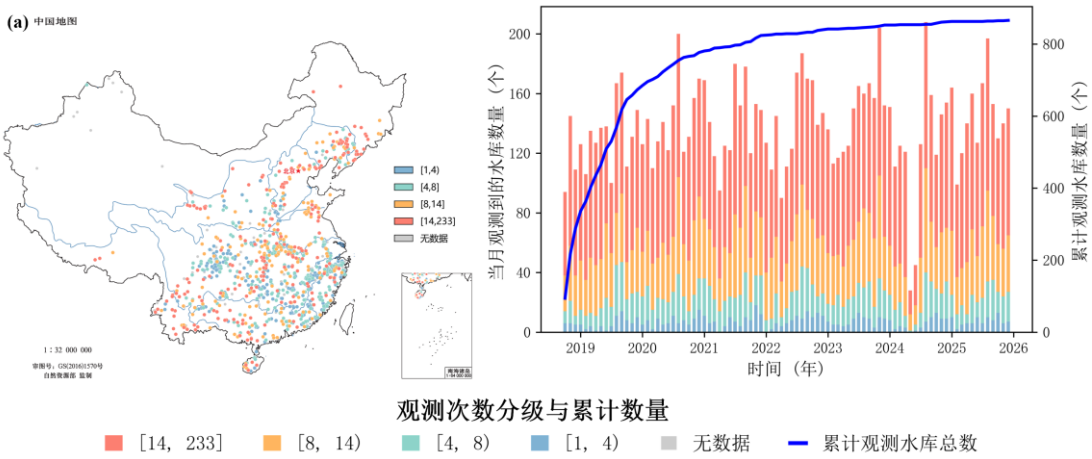

图 4 .ICESat-2 对中国水库观测次数的时空分布特征，展示了(a)各水库观测频率的空间格局以及(b) 2018—2023 年逐月观测数量与累计监测其实的时间序列统计

Fig.4 Spatiotemporal distribution characteristics of ICESat-2 observations over reservoirs in China, showing (a) the spatial pattern of observation frequency for each reservoir and (b) a time-series statistic of monthly observation counts and cumulative monitoring start times from 2018 to 2023

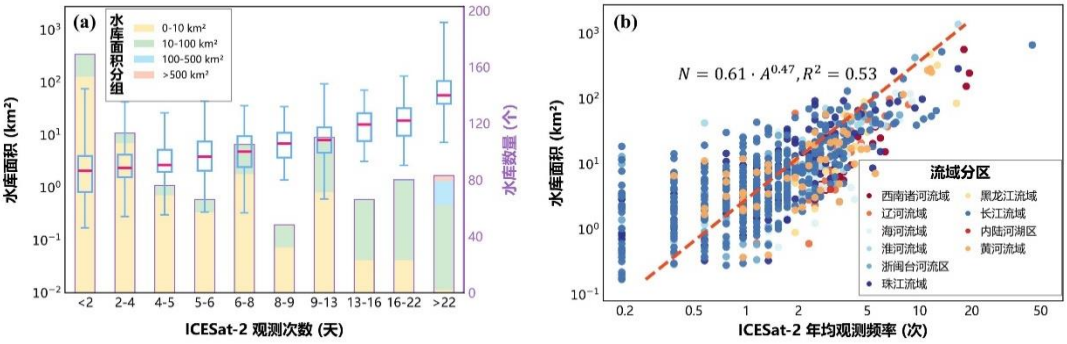

图 5 .ICESat-2 总有效观测次数、年均观测频率与水库面积的统计特征之间的相关性。（a）箱线图（对应左侧黑色纵坐标）展示不同观测次数分组下内水库的面积分布特征，及堆叠柱状图（对用右侧紫色纵坐标）展示不同观测次数分组内不同面积大小的箱线图（左侧黑色纵坐标）及对应的水库数量柱状统计（右侧紫色纵坐标），(b)解释了各流域内水库双对数坐标图展示年均观测频率（N）与水库面积 (A)之间显著的正的相关性，点的颜色展示了不同流域的差异

Fig.5 Correlations between ICESat-2 total effective observations, annual observation frequency, and reservoir area statistics.(a) Boxplots (left y-axis, black) showing the distribution of reservoir areas within groups defined by different total observation counts, and stacked bar charts (right y-axis, purple) showing the number of reservoirs in each area category for the same observation-count groups.(b) Double-logarithmic scatter plots of annual observation frequency (N) versus reservoir area (A) for reservoirs across different river basins, with points colored by basin, revealing a significant positive correlation between N and A

2.2.1 长江流域　图 6 展示了 ICESat-2 监测的长江流域三峡、丹江口、五强溪 3 座代表性水库的水位波动。从极端事件响应来看，2020 年夏季，三峡与丹江口水库呈现显著的正水位距平值，与同年长江流域特大洪水及“超级暴力梅”事件高度一致；2021 年秋季，丹江口水库的异常高水位距平值准确对应了汉江流域的严重秋汛。相比之下，2022 年秋冬季，上述三座水库的水位距平值均转为显著负值，这与长江流域罕见的夏秋连旱事件相对应，直观反映了干旱背景下蓄水量的严重亏缺。说明 ICESat-2 不仅能刻画长江流域水库的运行规律，还能有效揭示流域在“旱涝急转”中的水位响应特征。

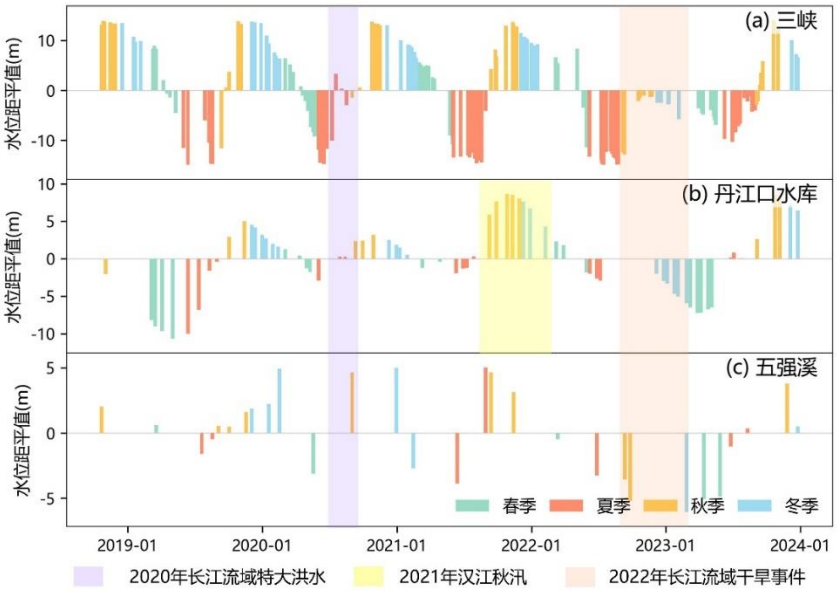

图 6 基于 ICESat-2 监测的长江流域(a)三峡、(b)丹江口（位于汉江流域）、(c)五强溪水库季节性水位波动。三种颜色竖条背景分别指示 2020 年长江流域大洪水、2021 年汉江秋汛、2022 年长江流域干旱事件

Fig.6　Seasonal water level fluctuations of (a) Three Gorges, (b) Danjiangkou (Hanjiang River Basin), and (c) Wuqiangxi reservoirs in the Yangtze River Basin, monitored by ICESat-2. The colored vertical bars in the background indicate major hydrological events: the 2020 Yangtze River Basin mega-flood, the 2021 Han River autumn flood, and the 2022 Yangtze River Basin drought

2.2.2 黄河流域　图 7 展示了 ICESat-2 监测的黄河流域龙羊峡、小浪底、三门峡 3 座代表性水库的水位波动。从干旱事件响应来看，2022 年全年，龙羊峡与小浪底水库水位普遍偏低，尤其在秋冬季呈现持续负水位距平值；这一数据特征与当年黄河流域发生的区域性气象干旱事件高度吻合，直观反映了受流域来水偏枯影响，水库难以有效回蓄，致使秋冬季蓄水量较常年同期显著偏低。说明 ICESat-2 不仅能揭示黄河流域水库的运行规律，还能有效捕捉枯水时段供水压力与气象干旱叠加驱动下的水位异常亏缺信号。

2.2.3 珠江流域　图 8 展示了 ICESat-2 监测的珠江流域龙滩、新丰江、天生桥一级 3 座代表性水库的水位波动。从极端事件响应来看，2022 年夏季，上述水库均表现出显著的正水位距平值，指示蓄水量远高于常年同期；这一高水位距平特征与 2022 年珠江流域的“龙舟水”特大洪水事件在时序上对应。从图 8 可知，ICESat-2 不仅能刻画珠江流域季风区水库的运行规律，还能敏锐捕捉极端气象水文事件驱动下的水位异常信号。

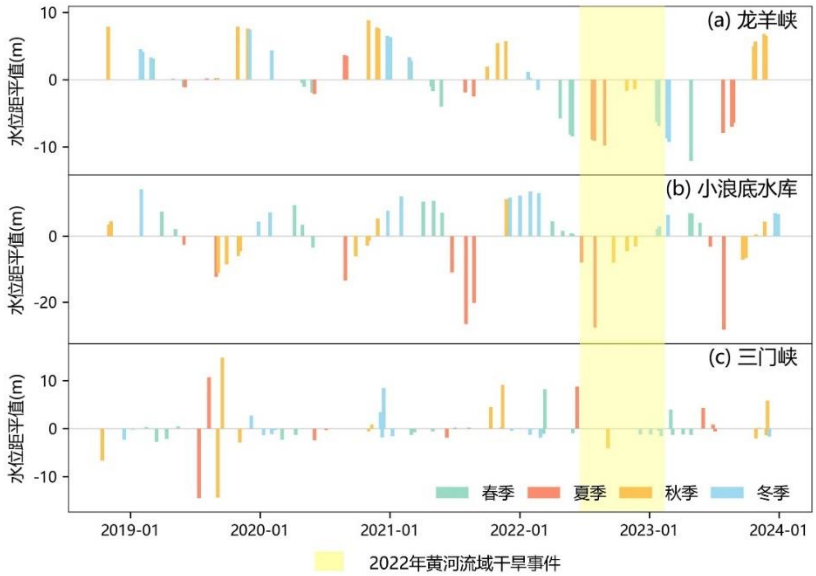

图 7 基于 ICESat-2 监测的黄河流域(a)龙羊峡、(b)小浪底、(c)三门峡水库季节性水位波动。
黄色竖条背景指示 2022 年黄河流域干旱事件

Fig.7 Seasonal water level fluctuations of (a) Longyangxia, (b) Xiaolangdi, and (c) Sanmenxia reservoirs in the Yellow River Basin, monitored by ICESat-2. The yellow vertical bar indicates the 2022 Yellow River Basin drought event

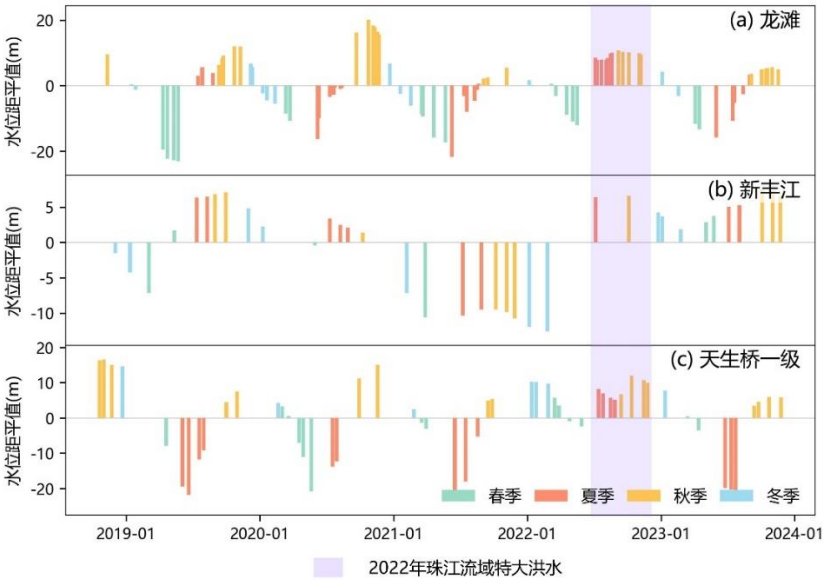

图 8 基于 ICESat-2 监测的珠江流域(a)龙滩、(b)新丰江、(c)天生桥一级水库季节性水位波动。
蓝色竖条背景指示 2022 年珠江流域特大洪水

Fig.8 Seasonal water level fluctuations of (a) Longtan, (b) Xinfengjiang, and (c) Tianshengqiao-I reservoirs in the Pearl River Basin, monitored by ICESat-2. The blue vertical bar indicates the 2022 Pearl River Basin mega-flood

2.2.4 西南诸河流区　图 9 展示了 ICESat-2 监测的西南诸河流区糯扎渡、小湾、龙江 3 座代表性水库的水位波动。从年际趋势来看，2022 年至 2023 年间，糯扎渡与小湾水库的秋冬季水位距平值总体呈下降趋势，与同期云南及周边地区频发的冬春季节气象干旱背景相对应。特别地，2019 年糯扎渡水库呈现出显著的负水位距平值特征，与澜沧江流域的“空汛”事件相对应，反映了因汛期来水严重不足导致全年蓄水量偏低，对后续年份低水位运行产生的持续性影响。从图 9 可知，ICESat-2 不仅具备捕捉西南诸河流区水库季节性水位变化的能力，还能有效揭示西南诸河流区长周期干旱背景下水库水位异常。

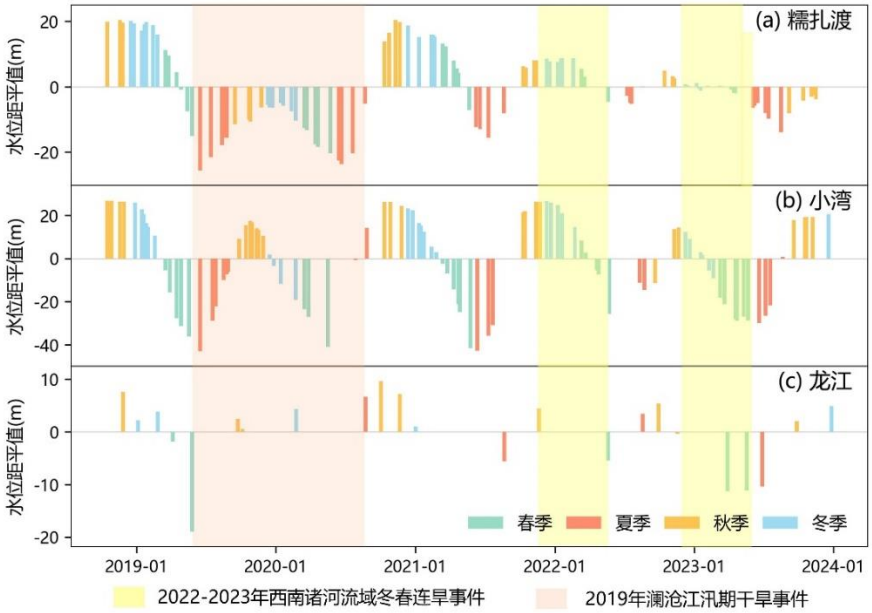

图 9.基于 ICESat-2 监测的西南诸河流区(a)糯扎渡、(b)小湾、(c)龙江水库季节性水位波动。两种颜色竖条背景分别指示 2019-2023 年西南诸河流区冬春连旱事件、2019 年澜沧江干旱事件

Fig.9 Seasonal water level fluctuations of (a) Nuozhadu, (b) Xiaowan, and (c) Longjiang reservoirs in the Southwest Rivers Region, monitored by ICESat-2. The colored vertical bars indicate the 2019-2023 winter-spring consecutive drought and the 2019 Lancang River drought event

2.3 水库水位季节性变幅分析

筛选出 158 座在年内四个季节均具有有效观测记录的水库，并采用多年平均变幅作为分析指标。图 10 展示了筛选后水库平均季节性变幅的分布情况。全国 158 座水库水位季节性变幅的均值为 4.76 m。72.0%水库的季节性水位变化幅度小于 10.00 m，变幅超过 50.00 m 的水库仅有 3 座，各水库水位季节性变化差异显著。其中，位于长江流域雅砻江的锦屏一级水库监测到最大季节性变幅，该水库 2022 年的年均水位变幅高达 74.71 m。锦屏一级水库为典型的峡谷型年调节水库，死水位为 1800 m，正常蓄水位为 1880m，允许的理论消落变幅达 80 m，需要通过大幅水位落差实现 49.11 亿 m^3 的调节库容[35]。雅砻江梯级水电站联合调度中为了实现发电量最大化的需求，锦屏一级水库水库的水位波动将会较为剧烈。

图 11(a)显示了中国水库水位季节性变幅在三级流域尺度上的空间分布格局。各三级流域的平均水位变幅覆盖了从 0.16m 至 45.61m 的宽广区间，在空间分布上呈现出“西高东低”的大致格局。具体而言，西南诸河流区、长江流域上游等高地势区的水位变幅较大，而珠江流域、浙闽台河流区等下游低地势区变幅较小。“西高东低”的变幅格局认为是人工调度与地形特征共同作用的结果，西部多为峡谷型水库，受限于地形，其兴利库容相对于径流量较小，库容系数小，调节能力有限，水位对水量调蓄响应剧烈；东部多为平原湖泊型水库，库面开阔且库容系数大，水位变化相对平缓[7]。在数据覆盖方面，ICESat-2 在研究时段内成功监测了 78 个三级流域内的水库季节性变幅，在西南诸河流区、长江流域、珠江流域及浙

闽台河流区，ICESat-2 数据保持了较高的监测率，有效捕捉水资源密集区的水位动态。图 11(b)展示了聚合至一级流域尺度的平均水位季节性变幅统计结果。西南诸河流区和长江流域是水位季节性波动最为剧烈的两大流域，其平均变幅分别高达 22.24 m 和 19.65 m。

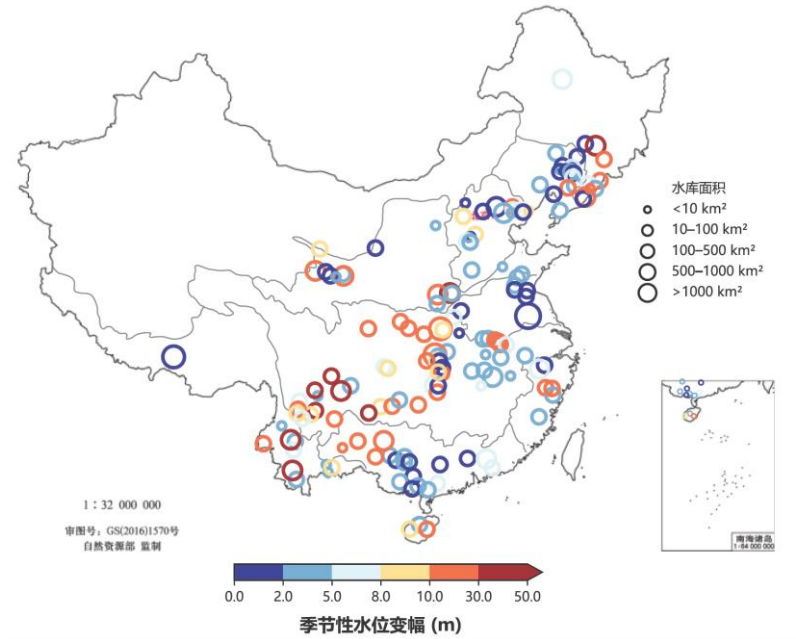

图 10 中国水库季节性水位变幅空间分布特征

（空心圆圈的颜色映射水位振幅大小，圆圈大小指示水库水域面积）

Fig.10 Spatial distribution of seasonal water level amplitude for reservoirs in China. The color of hollow circles maps the magnitude of water level amplitude, and the circle size indicates the reservoir water area

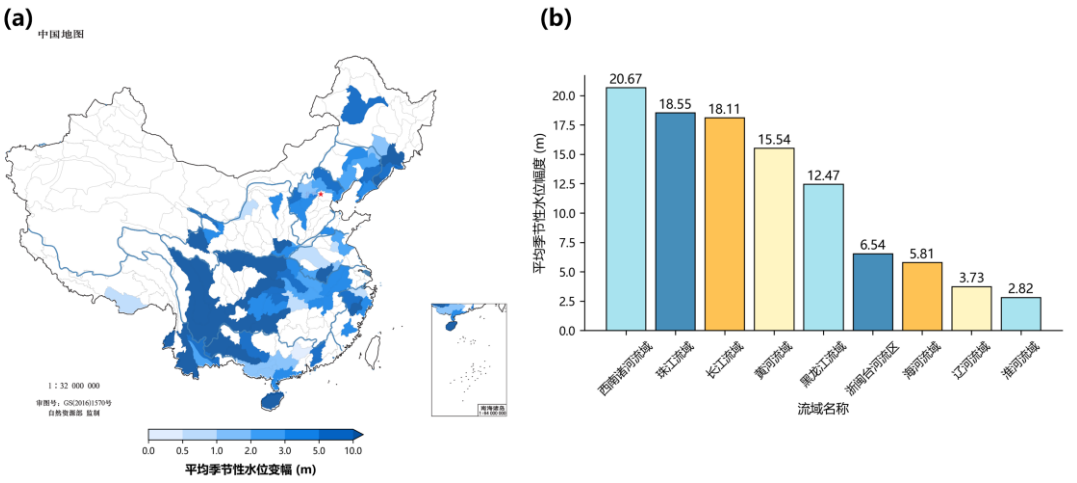

图 11 中国水库水位季节性变幅在三级流域水资源区划下的空间分布格局，(a)图中三级流域填充颜色指示平均水位振幅大小，图(b)展示了中国主要流域内面积最大的五座水库的平均水位振幅

Fig.11 Spatial distribution of reservoir water level seasonal amplitude under the tertiary basin water resources zoning in China. (a) The fill color of tertiary basins indicates the mean water level amplitude. Subplot (b) displays the mean water level amplitude of the five largest reservoirs (by area) within China's major river basins

2.4 水库水位趋势分析

为确保年际趋势分析的可靠性，最终保留率109座具备至少3年完整四季观测的水库样本进行分析。表1展示了筛选后109座水库在研究时段内的水位趋势分析结果，全国水库整体的水位动态表现为下降趋势，净变化率为−0.228 m/a，表明中国水库整体处于水量亏损状态。虽然56个呈现上升趋势的水库总面积达5368.64 km^2，略高于53个呈现下降趋势的5201.67 km^2水库总面积，但下降趋势的水库水位跌幅更为剧烈。下降型水库的平均下降速率为−0.8714 m/a，其速率绝对值远高于上升型水库0.395 m/a的平均上升速率。这种剧烈的下降速率导致了整体水位的净下降。

表1 基于ICESat-2监测数据的全国不同流域水库水位变化趋势统计

Tab.1 Statistics of water level change trends for reservoirs across different river basins in China, based on ICESat-2 monitoring data

流域名称	总面积/km²	上升面积/km²	上升率/(m/a)	下降面积/km²	下降率/(m/a)	净变化率/(m/a)
黄河流域	1944.74	288.97	0.2146	755.77	-0.9199	-0.6061
西南诸河流区	1108.76	9.64	0.1527	1099.12	-1.107	-1.096
长江流域	2700.59	1196.18	0.2269	1504.41	-1.2284	-0.5838
海河流域	514.73	406.10	0.5669	108.63	-0.6729	0.3031
淮河流域	1629.00	1441.67	0.1431	187.34	-0.5892	0.0589
浙闽台河流区	664.81	196.22	0.2662	468.59	-0.1572	-0.0322
珠江流域	1237.24	935.10	0.7819	302.14	-0.3962	0.4942
黑龙江流域	995.65	414.40	0.5124	581.25	-0.4262	-0.0356
辽河流域	488.73	369.75	0.5129	118.98	-0.1083	0.3617
内陆河湖区	186.05	110.60	1.4976	75.45	-1.7769	0.1697

鉴于ICESat-2数据的有效覆盖率与样本代表性，本研究选取西南诸河、长江、珠江、海河及辽河五个主要一级流域进行趋势分析。图12展示了上述流域内水库水位的年际变化速率及面积特征，各流域呈现出“西南亏缺—东北回升”的大致格局。

长江流域水库水位在整体上表现为下降趋势，平均变化速率为−0.584 m/a。在筛选后的31座水库中，16座呈现下降趋势的水库与15座呈现上升趋势的水库数量相当。但下降型水库与上升型水库的规模与变化速率存在差异，下降型水库的总面积为1504.41km^2且平均下降速率为−1.228m/a；上升型水库为总面积略小，为1196.18 km²，且平均上升速率为0.227 m/a。其中，三板溪水库是长江流域下降速率最大的水库，下降速率达−3.646m/a，而潘口水库是长江流域上升速率最大的水库，为2.456 m/a。

珠江流域水库水位整体呈现上升趋势，平均变化速率为0.494 m/a。在筛选分析的15座水库中，呈现上升趋势的水库数量有9座，总面积达935.10km^2，平均上升速率较快，为0.782m/a。百色水库为珠江流域上升速率最大的水库，为1.751 m/a。6座下降型水库的总面积相对较小，为302.14 km²，平均下降速率为−0.396 m/a。松涛水库为珠江流域下降速率最大的水库，为−1.239 m/a。

海河流域水库水位在整体上表现为上升趋势，平均变化速率为0.303 m/a。在筛选后的9座水库中，有6座水库呈现水位上升趋势，上升型水库的总面积为406.10 km^2，平均上升速率为0.567 m/a。岗南水库是该区域水位上升速率最大的水库，为1.686 m/a。仅有3座水库呈现下降趋势，总面积为108.63km^2，平均下降速率较缓慢，为−0.683 m/a。潘家口水库是辽河流域下降速率最大的水库，为−1.341m/a。

辽河流域水库水位在整体上表现为上升趋势，平均变化速率为0.362 m/a。在筛选后的11座水库中，有9座水库呈现水位上升趋势，9座上升型水库的总面积为369.75 km^2，平均上升速率为0.513m/a。碧流河水库是该区域水位上升速率最大的水库，为1.078 m/a。仅有2座水库呈现下降趋势，平均下降速率较缓慢，为−0.108 m/a。

西南诸河流区的水位整体表现出明显的下降趋势，平均变化速率为-1.096m/a。在筛选后的 10 座水库中，有 9 座水库呈现水位下降趋势，呈现下降趋势的 9 座水库总面积达 1099.12 km^2，平均下降速率为-1.107 m/a。其中，糯扎渡水库下降趋势最为剧烈，下降速率达-2.798 m/a。区域内仅有功果桥水库一座水库呈现出水位上升趋势，其上升速率为 0.153 m/a。

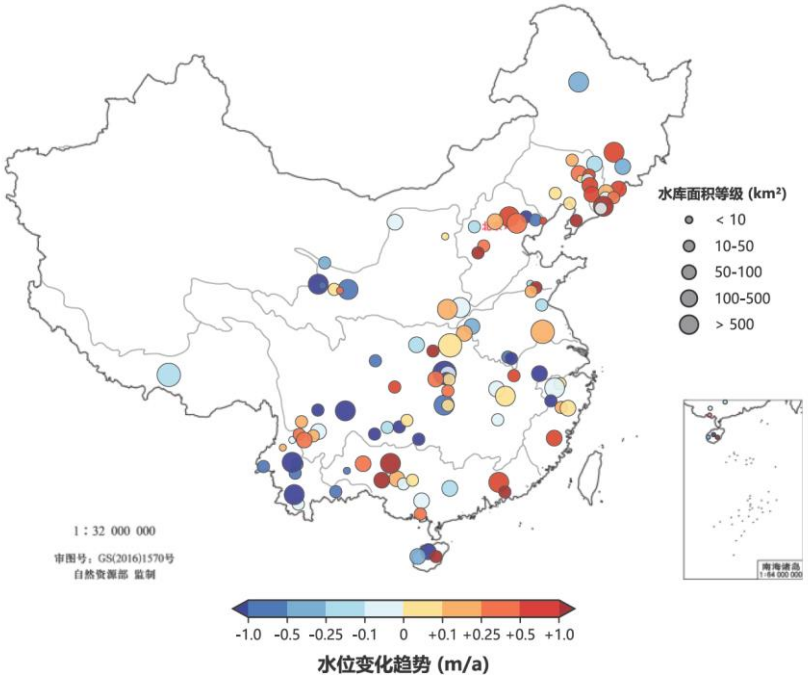

图 12 中国水库水位年际变化趋势空间分布格局，图中散点颜色及符号指示变化速率大小(m/a)，散点大小表示水库水域面积

Fig.12 Spatial distribution of interannual water level change trends for reservoirs in China. The color and symbol of scatter points indicate the rate of change (m/a), and the point size represents the reservoir water area

2.5 讨论

2.5.1 ICESat-2 对水库水位的监测能力　ICESat-2 凭借先进的光子计数激光雷达技术，展现了构建全尺度内陆水体监测网络的巨大潜力。统计结果表明，ICESat-2 数据提取水位与实测水位具有高度一致性，MAE 仅为$(\mathbf{0.126 \pm 0.194})$ m，R 高达$\mathbf{0.978 \pm 0.094}$，RMSE 仅为$(\mathbf{0.164 \pm 0.274})$ m。并且 ICESat-2 数据不仅对丹江口、密云等大型水库表现出极高的监测精度，还对薄山、尾斗山等小型水库也实现了精准监测，对大小型水库监测结果的相关系数均超过 0.99。在覆盖能力上，ICESat-2 成功监测到了 92.0%GRanD 数据集中的水库，并且对表面积小于 100 km²的水库覆盖率达到 92.3%。尽管观测频率随面积减小而下降，但单位面积的观测密度随面积减小而上升，印证了其对中小型水库优异的监测性能，表明 ICESat-2 数据在中小型水库监测上具有优越性。

然而，ICESat-2 数据的时空局限性仍不容忽视。受限于 91 天重访周期及云层遮挡，ICESat-2 数据对中国水库的年均有效观测仅为 3 次，并且稀疏采样导致反演水位存在不连续问题，其时间分辨率限制了对水体高频动态的监测[22,36]。值得注意的是，该局限性可通过多源数据融合进行克服，以 ICESat-2 数据为基准对雷达测高数据进行校正，不仅可对 Sentinel-3、Jason-3 等雷达测高数据的波形重定提供校正参考，消除传感器间的系统偏差[37-39]；还可结合 Landsat、Sentinel-2 等高频光学影像提取水体面积，构建高精度的“水位-面积-库容”关系曲线，利用面积观测外推插补水位数据[40,41]；此外，采用 XGBoost 等深度学习算法重构未被 ICESat-2 数据直接观测到的水位，也可以实现对水库水位的高频次、精细化协同

监测[33]。

2.5.2 ICESat-2 对水文变化的监测能力　ICESat-2 的高精度水位数据为揭示流域性水文事件及评估水库群运行规律提供了依据。在极端水文事件响应上，ICESat-2 敏锐捕捉到了水库对洪旱灾害的调蓄特征。2020 年长江特大洪水、2021 年海河“夏秋连汛”及 2022 年珠江“龙舟水”期间，三峡、丹江口、密云、龙滩等大型水库显著的正水位距平，直观反映了水库群削峰滞洪的调度过程；同时精准展示了 2022 年长江夏秋连旱及澜沧江“空汛”期间，糯扎渡、小湾等水库持续性的负水位距平，显示了干旱背景下流域水资源的严重亏缺。在季节性变幅上，ICESat-2 数据显示西南诸河及长江流域的年内平均水位变幅分别高达 22.24 m 与 19.65 m，这一高变幅特征主要归因于上游梯级水库群因防洪发电调度而产生的剧烈季节性消落。在区域趋势上，ICESat-2 捕捉到了全国水库整体的水量亏损信号，净变化率-0.228 m/a；并识别出西南诸河及长江流域显著的水位下降趋势，其速率分别为-1.096 m/a 与-0.584 m/a，为解释区域水量动态平衡与梯级开发影响提供了量化支撑。

然而，有效监测水库集中分布于西南诸河、长江、珠江及浙闽台河等南方流域，而北方、西北内陆地区存在大面积的监测空白，且 65.5%的三级流域缺乏准确的季节性变幅数据。这种有效观测数据的空间不均衡构成了制约 ICESat-2 精准解析区域水库水位变动规律的客观瓶颈[19,42]。尽管如此，随着卫星运行周期的延长与数据积累，持续增加的观测数据将逐步填充目前观测空白区域，在未来能够实现对水库水位更精确的监测。并且 ICESat-2 反演水位与水文模型的深度融合将显著提升流域水资源的精细化管理能力。一方面，ICESat-2 反演的水面高程及沿轨陆面高程信息可为缺资料河段的河道横断面刻画和水力模型参数率定提供观测约束，从而支持少资料河段水面高程与流量模拟[43]；另一方面，结合卫星反演的高精度水位序列与水量平衡分析，可反向推演水库的实际运行规则，量化水库调度对流域水文节律的重塑机制，为揭示梯级水库群的传递影响、制定跨区域水资源分配方案及实现流域联合优化调度提供坚实的科学决策支持[44]。

2.5.3 影响水位变化趋势的驱动因素　降水、蒸发及受气温调节的冰雪融水是影响内陆水位的主要气候因子[45-49]。其中，径流作为流域扣除蒸散发后的净产水量，直接影响水库水位的变化[50]。对全国水库水位变化趋势与不同因素进行相关性分析。结果显示，径流变化率是唯一呈现显著正相关性的因子，表明天然径流量的长期波动是驱动水库水位演变的主要自然条件。相比之下，降水、蒸发与气温变化率在全国尺度上的相关性均不显著。值得注意的是，所有气象因子的相关系数绝对值普遍处于较低水平，这说明相比于自然气候变异，人类活动对全国水库水位长期趋势的影响更为显著。

在水库水位呈现的下降趋势的长江及西南流域，水位趋势与径流呈现显著正相关，与温度呈现负相关，而与降水和蒸发趋势的相关性不显著。径流是水库水位的直接补给来源。然而数据表明，近年来西南流域多次遭遇汛期反枯及旱涝急转事件，雅砻江流域的反枯频率达 42%~50%，天然来水量的急剧下降导致水库难以回蓄[51,52]。此外，温度作为另一个呈负相关的显著因素，反映了极端高温对水库蓄水的显著影响。夏季异常高温不仅增加了水库水面蒸发，还大幅提升了下游农业灌溉及生态补水的需水量[53]。在干旱胁迫下，水库管理部门为保障下游综合用水安全，通常需要改变常规调度计划，增加放水量[54]。因此，该区域水位的显著下降是天然补给减少与人工增加放水调度共同作用的结果。

在水库水位呈现的上升趋势的珠江、海河及辽河流域，水库水位趋势降水、径流及气温等因子的相关性均不显著($P<0.05$)，表明上述自然因子对区域水位上升趋势的解释力有限，水位变化可能还受到人工调度、跨流域调水及用水管理等人类活动的影响。在珠江流域，水位上升趋势与降水、径流及气温等因子的相关性几乎为零。这表明该区域水位受人工调度与库群管理等因素影响显著。珠江流域依托龙滩、百色等大型水库实施多目标联合调度，通过压咸补淡与西电东送，保障了枯季下游供水安全与生态需求，改变了水位自然变化规律[55,56]。在海河及辽河流域，水位趋势与自然因子的相关性同样不显著，人类活动对水资源影响显著。一方面，跨流域调水工程，如南水北调中线和东线工程，为北方大型水库提供了外部水源补给，实现了水资源的跨区调配[57,58]；另一方面，近年来实施的地下水超采综合治理与农业节水措施，有效减少了工农业生产对水库水源的支取压力[59]。因此，上述人为干预措施是该区域水位呈现上升趋势的可能原因。

表 2 水库水位变化率与主要因子变化率的相关系数及显著性

Tab.2 Pearson correlation coefficients and significance between reservoir water level trends and climatic factor trends

区域 / 分析因素	全国		长江及西南诸河流域		珠江流域		海河及辽河流域	
	R	*P*	*R*	*P*	*R*	*P*	*R*	*P*
降雨变化率(m/a)	0.127	0.189	0.282	0.125	-0.028	-0.922	0.134	0.572
径流变化率(m/a)	0.222	0.020	0.398	0.027	0.019	0.947	0.307	0.188
蒸发变化率(m/a)	0.050	0.606	0.091	0.623	-0.390	0.150	-0.221	0.349
温度变化率(K/a)	0.071	0.465	-0.333	0.068	0.255	0.359	-0.296	0.204

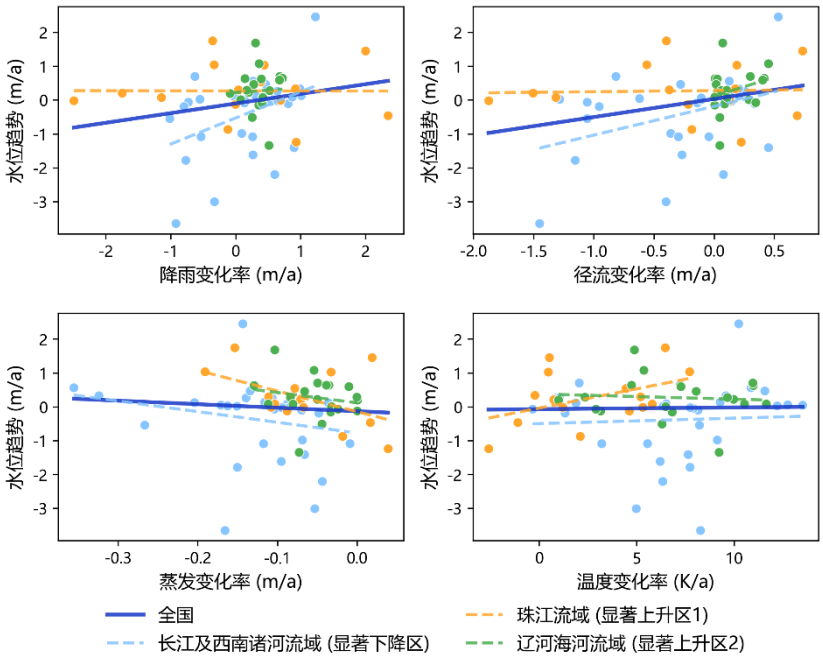

图 13 不同因素与中国水库水位变化趋势之间相关性

Fig.Correlation between different factors and China reservoir level annual rate

ICESat-2 数据为大尺度、高精度的水库监测提供了重要数据支撑，这为准确把握区域可用水量的变化、制定合理调控对策以应对洪旱风险至关重要。通过结合近实时观测、水文模型等，还能进一步提升区域的水资源管理能力。然而 ICESat-2 仍存在时间分辨率较低的问题，导致部分水库的水位时间序列连续性不足，难以支撑高时频的分析，不利于及时反演水库的动态变化特征。未来在面向高频水位监测需求时，建议结合 Sentinel-3、SWOT 等多源遥感数据或引入水文模型进行数据融合与插值重构，实现对水库更为全面、高频的时空动态监测。

3 结论

本文基于 ICESat-2 数据，构建并验证了 2018—2023 年中国水库的高精度水位序列数据，系统评估了其对水库监测的性能，并分析了中国水库水位的波动与趋势特征。主要结论如下：

1）ICESat-2 在水库水位监测精度和覆盖水库数量两方面均具有优势。ICESat-2 提取水位与实测水位高度一致，MAE 为$0.126 \pm 0.194(0.005\sim0.907)$ m，R 为$0.978 \pm 0.094(0.285\sim1.000)$，RMSE 为$0.164 \pm 0.274(0.005\sim1.289)$ m。且研究时段内 ICESat-2 数据监测到了全国 921 座水库中的 847 座，对于表面积小于 100 km²的水库的覆盖率高达 92.3%，在中小型水库水位反演中表现出卓越的应用潜力与稳健性。

2）通过对大型水库水位季节性波动的分析，发现 ICESat-2 能够识别水库水位对洪水、干旱、旱涝急转等极端水文气象事件的动态响应过程，体现了 ICESat-2 数据在区域水资源安全评估与灾害监测中的应用潜力。

3）通过对具有充足观测次数与观测时段长度的水库进行分析，发现水库水位的季节性变幅表现出鲜明的“西高东低”特征，西南诸河流区和长江流域是水位季节性波动最为剧烈的两大流域。在时间维度上，全国水库水位整体呈现下降趋势，长江、西南诸河流区呈现下降趋势，辽河、海河、珠江流域呈现上升趋势，揭示了长江、西南诸河流区近年来水资源储量的亏缺状态，辽河、海河、珠江流域水资源储量的回升状态。

4 参考文献

[1] Cooley SW, Ryan JC, Smith LC. Human alteration of global surface water storage variability. *Nature*, 2021, **591**(7848): 78-81. DOI: 10.1038/s41586-021-03262-3.

[2] Gao HL, Birkett C, Lettenmaier DP. Global monitoring of large reservoir storage from satellite remote sensing. *Water Resources Research*, 2012, **48**(9): 2012WR012063. DOI: 10.1029/2012WR012063.

[3] Avisse N, Tilmant A, Müller MF *et al*. Monitoring small reservoirs' storage with satellite remote sensing in inaccessible areas. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2017, **21**(12): 6445-6459. DOI: 10.5194/hess-21-6445-2017.

[4] Ryan JC, Smith LC, Cooley SW *et al*. Global characterization of inland water reservoirs using ICESat-2 altimetry and climate reanalysis. *Geophysical Research Letters*, 2020, **47**(17): e2020GL088543. DOI: 10.1029/2020GL088543.

[5] Das P, Hossain F, Khan S *et al*. Reservoir Assessment Tool 2.0: Stakeholder driven improvements to satellite remote sensing based reservoir monitoring. *Environmental Modelling & Software*, 2022, **157**: 105533. DOI: 10.1016/j.envsoft.2022.105533.

[6] Gao L, Liao JJ, Liu HL *et al*. Applying status and development tendency of satellite radar altimeter. *Remote Sensing Technology and Application*, 2013, **28**(6): 978-983. [高乐，廖静娟，刘焕玲等. 卫星雷达测高的应用现状及发展趋势.遥感技术与应用, 2013, **28**(6): 978-983.]

[7] Chen JM, Liao JJ. Monitoring lake level changes in China using multi-altimeter data (2016–2019). *Journal of Hydrology*, 2020, **590**: 125544. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2020.125544.

[8] Li ZY, Dai JQ, Huang D *et al*. Application and prospects of satellite remote sensing monitoring technology in water conservancy projects. *Advances in Water Science*, 2023, **34**(5): 798-811. DOI: 10.14042/j.cnki.32.1309.2023.05.014. [李子阳，戴济群，黄对等. 水利工程卫星遥感监测技术应用与展望. 水科学进展, 2023, **34**(5): 798-811.]

[9] Crétaux JF, Arsen A, Calmant S *et al*. SOLS: A lake database to monitor in the Near Real Time water level and storage variations from remote sensing data. *Advances in Space Research*, 2011, **47**(9): 1497-1507. DOI: 10.1016/j.asr.2011.01.004.

[10] Schwatke C, Dettmering D, Bosch W *et al*. DAHITI–an innovative approach for estimating water level time series over inland waters using multi-mission satellite altimetry. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2015, **19**(10): 4345-4364. DOI: 10.5194/hess-19-4345-2015.

[11] Birkett C, Reynolds C, Beckley B *et al*. From research to operations: The USDA global reservoir and lake monitor. *Coastal Altimetry*. Berlin, Heidelberg: Springer, 2010: 19-50. DOI: 10.1007/978-3-642-12796-0_2.

[12] 赵云. 雷达高度计数据中国主要湖泊水位变化监测方法研究. 北京：中国科学院大学(中国科学院遥感与数字地球研究所), 2017.

[13] 文京川. 测高卫星数据在我国湖库水位监测中的应用研究. 兰州：兰州交通大学, 2018.

[14] Dandabathula G, Srinivasa Rao S. Validation of ICESat-2 surface water level product ATL13 with near real time gauge data. *Hydrology*, 2020, **8**(2): 19. DOI: 10.11648/j.hyd.20200802.11.

[15] Xu N, Zheng HY, Ma Y *et al*. Global estimation and assessment of monthly lake/reservoir water level changes using ICESat-2 ATL13 products. *Remote Sensing*, 2021, **13**(14): 2744. DOI: 10.3390/rs13142744.

[16] Kaya Y. Evaluation of ICESat-2 laser altimetry for inland water level monitoring: A case study of Canadian Lakes. *Water*, 2025, **17**(7): 1098. DOI:

10.3390/w17071098.

[17] Chen Y, Liu QH, Ticehurst C *et al*. Refining ICESAT-2 ATL13 altimetry data for improving water surface elevation accuracy on rivers. *Remote Sensing*, 2024, **16**(10): 1706. DOI: 10.3390/rs16101706.

[18] Huang YS, Wang C, Wang HT *et al*. Water level estimation from spaceborne photon LiDAR data: A study case in Danjiangkou Reservoir. *Remote Sensing Technology and Application*, 2025, **40**(2): 454-460. DOI: 10.11873/j.issn.1004-0323.2025.2.0454. [黄玉帅，王成，王宏涛等. 基于星载光子 LiDAR 数据的水位估算研究——以丹江口水库为例.遥感技术与应用, 2025, **40**(2): 454-460.]

[19] Zhang JT, Liu CL. Water level change monitoring of Danjiangkou reservoir based on laser altimetry data. *Science of Surveying and Mapping*, 2021, **46**(2): 20-24, 84. DOI: 10.16251/j.cnki.1009-2307.2021.02.004. [张建涛，刘传立. 基于激光测高数据的丹江口水库水位变化监测. 测绘科学, 2021, **46**(2): 20-24, 84.]

[20] Lu JH, He R, Zhai HP. Monitoring water levels in upper and middle reaches of Yellow River Reservoirs based on ICESat/ICESat-2 satellite altimetry data. *Remote Sensing Information*, 2024, **39**(1): 157-166. [路锦华，何荣，翟慧鹏. 基于 ICESat/ICESat-2 卫星测高数据的黄河中上游水库水位监测. 遥感信息, 2024, **39**(1): 157-166.]

[21] Liu C, Hu RH, Wang YF *et al*. Monitoring water level and volume changes of lakes and reservoirs in the Yellow River Basin using ICESat-2 laser altimetry and Google Earth Engine. *Journal of Hydro-Environment Research*, 2022, **44**: 53-64. DOI: 10.1016/j.jher.2022.07.005.

[22] Yuan C, Gong P, Bai YQ. Performance assessment of ICESat-2 laser altimeter data for water-level measurement over lakes and reservoirs in China. *Remote Sensing*, 2020, **12**(5): 770. DOI: 10.3390/rs12050770.

[23] Long D, Li XY, Li XD *et al*. Remote sensing retrieval of water storage changes and underlying climatic mechanisms over the Tibetan Plateau during 2000—2020. *Advances in Water Science*, 2022, **33**(3): 375-389. DOI: 10.14042/j.cnki.32.1309.2022.03.003. [龙笛，李雪莹，李兴东等. 遥感反演 2000—2020 年青藏高原水储量变化及其驱动机制. 水科学进展, 2022, **33**(3): 375-389.]

[24] Shen YJ, Liu DD, Jiang LG *et al*. High-resolution water level and storage variation datasets for 338 reservoirs in China during 2010–2021. *Earth System Science Data*, 2022, **14**(12): 5671-5694. DOI: 10.5194/essd-14-5671-2022.

[25] Chen YZ, Wang YM, Li LQ *et al*. Monthly monitoring of inundated areas and water storage dynamics in China's large reservoirs using multisource remote sensing. *Water Resources Research*, 2024, **60**(8): e2023WR036450. DOI: 10.1029/2023WR036450.

[26] Lehner B, Liermann CR, Revenga C *et al*. High-resolution mapping of the world's reservoirs and dams for sustainable river-flow management. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 2011, **9**(9): 494-502. DOI: 10.1890/100125.

[27] Chang LW, Cheng L, Chen J *et al*. Comparison and application of georeferenced reservoir and dam data sets. *China Rural Water and Hydropower*, 2023, (6): 1-11, 20. DOI: 10.12396/znsd.230479. [常利伟，程磊，陈进等. 水库和大坝地理信息数据集的对比及其应用研究进展. 中国农村水利水电, 2023, (6):1-11, 20.]

[28] 水利部水资源研究及区划办公室. 中国水资源初步评价. 北京：水利电力出版社, 1981.

[29] Jasinski M, Stoll J, Hancock D *et al.* ATLAS/ICESat-2 L3A Along Track Inland Surface Water Data, Version 7[DS/OL]. Boulder: NASA National Snow and Ice Data Center Distributed Active Archive Center, 2025.

[30] Chen T, Song CQ, Luo SX *et al*. Monitoring global reservoirs using ICESat-2: Assessment on spatial coverage and application potential. *Journal of Hydrology*, 2022, **604**: 127257. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2021.127257.

[31] Aminjafari S, Brown IA, Frappart F *et al*. Distinctive patterns of water level change in Swedish Lakes driven by climate and human regulation. *Water Resources Research*, 2024, **60**(3): e2023WR036160. DOI: 10.1029/2023WR036160.

[32] Li Y, Zhao G, Allen GH *et al*. Diminishing storage returns of reservoir construction. *Nature Communications*, 2023, **14**: 3203. DOI: 10.1038/s41467-023-38843-5.

[33] Zhao YL, Liu WF, Li Z *et al*. Analyses of the evolution and influencing factors of natural runoff in China based on STL decomposition. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2025, **56**(2): 216-226, 239. DOI: 10.13243/j.cnki.slxb.20240083. [赵铁琳，刘文丰，李政等. 基于 STL 时序分解的天然径流演变规律与影响因素分析. 水利学报, 2025, **56**(2): 216-226, 239.]

[34] Muñoz-Sabater J, Dutra E, Agustí-Panareda A *et al*. ERA5-Land: A state-of-the-art global reanalysis dataset for land applications. *Earth System Science Data*, 2021, **13**(9): 4349-4383. DOI: 10.5194/essd-13-4349-2021.

[35] Huang GL. Exploration for drawdown water levels of mid-long term optimal operation of the cascade hydropower plants in the middle and lower reaches of the yalong river. *China Rural Water and Hydropower*, 2025, (2): 81-87, 96. [黄光伦. 雅砻江中下游梯级中长期联合优化调度消落水位

分析. 中国农村水利水电, 2025, (2): 81-87, 96.]

[36] Chen JM, Liao JJ. Monitoring lake level changes in China using multi-altimeter data (2016–2019). *Journal of Hydrology*, 2020, **590**: 125544. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2020.125544.

[37] Song LJ, Song CQ, Luo SX *et al*. Integrating ICESat-2 altimetry and machine learning to estimate the seasonal water level and storage variations of national-scale lakes in China. *Remote Sensing of Environment*, 2023, **294**: 113657. DOI: 10.1016/j.rse.2023.113657.

[38] Feng Y, Yang LK, Zhan PF *et al*. Synthesis of the ICESat/ICESat-2 and CryoSat-2 observations to reconstruct time series of lake level. *International Journal of Digital Earth*, 2023, **16**(1): 183-209. DOI: 10.1080/17538947.2023.2166134.

[39] An ZY, Chen P, Tang FC *et al*. Evaluating the performance of seven ongoing satellite altimetry missions for measuring inland water levels of the great lakes. *Sensors*, 2022, **22**(24): 9718. DOI: 10.3390/s22249718.

[40] Nong AL, Xiang LW, Wang HS *et al*. Hydrological regime change of Qinghai Lake from 2003 to 2023 and its response to climate change. *Advances in Water Science*, 2025, **36**(5): 796-806. DOI: 10.14042/j.cnki.32.1309.2025.05.007. [农爱乐, 相龙伟, 汪汉胜等. 青海湖 2003—2023 年水文情势变化及其对气候变化的响应. 水科学进展, 2025, **36**(5): 796-806.]

[41] Yao FF, Livneh B, Rajagopalan B *et al*. Leveraging ICESat, ICESat-2, and landsat for global-scale, multi-decadal reconstruction of lake water levels. *Water Resources Research*, 2024, **60**(2): e2023WR035721. DOI: 10.1029/2023WR035721.

[42] Li JR. Advance of hydrographic remote sensing with time. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2016, **47**(3): 436-442. DOI: 10.13243/j.cnki.slxb.20150981. [李纪人. 与时俱进的水利遥感. 水利学报, 2016, **47**(3): 436-442.]

[43] Sheffield J, Wood EF, Pan M *et al*. Satellite remote sensing for water resources management: Potential for supporting sustainable development in data-poor regions. *Water Resources Research*, 2018, **54**(12): 9724-9758. DOI: 10.1029/2017WR022437.

[44] Coppo Frias M, Liu SX, Mo XG *et al*. River hydraulic modeling with ICESat-2 land and water surface elevation. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2023, **27**(5): 1011-1032. DOI: 10.5194/hess-27-1011-2023.

[45] Bonnema M, Hossain F. Inferring reservoir operating patterns across the Mekong Basin using only space observations. *Water Resources Research*, 2017, **53**(5): 3791-3810. DOI: 10.1002/2016WR019978.

[46] Jiang LG, Nielsen K, Andersen OB *et al*. Monitoring recent lake level variations on the Tibetan Plateau using CryoSat-2 SARIn mode data. *Journal of Hydrology*, 2017, **544**: 109-124. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2016.11.024.

[47] Wang HB, Liu JH, Luo ZR *et al*. Hydrologic response and prediction of future water level changes in Qinghai Lake of Tibet Plateau, China. *Journal of Hydrology*: *Regional Studies*, 2025, **57**: 102168. DOI: 10.1016/j.ejrh.2024.102168.

[48] Fan CY, Song CQ, Li WK *et al*. What drives the rapid water-level recovery of the largest lake (Qinghai Lake) of China over the past half century *Journal of Hydrology*, 2021, **593**: 125921. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2020.125921.

[49] Song CQ, Huang B, Richards K *et al*. Accelerated lake expansion on the Tibetan Plateau in the 2000s: Induced by glacial melting or other processes *Water Resources Research*, 2014, **50**(4): 3170-3186. DOI: 10.1002/2013wr014724.

[50] Lei YB, Yao TD, Yang K *et al*. Lake seasonality across the Tibetan Plateau and their varying relationship with regional mass changes and local hydrology. *Geophysical Research Letters*, 2017, **44**(2): 892-900. DOI: 10.1002/2016gl072062.

[51] Zhang ZF, Cong ZT, Gao B *et al*. The water level change and its attribution of the Qinghai Lake from 1960 to 2020. *Journal of Hydrology*: *Regional Studies*, 2024, **52**: 101688. DOI: 10.1016/j.ejrh.2024.101688.

[52] Sun XT, Li QQ, Wang LJ. Characteristics of long-cycle abrupt drought-flood alternations in southwest China and anomalies of atmospheric circulation in summer. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2017, **41**(6): 1332-1342. DOI: 10.3878/j.issn.1006-9895.1705.16282. [孙小婷, 李清泉, 王黎娟. 我国西南地区夏季长周期旱涝急转及其大气环流异常.大气科学, 2017, **41**(6): 1332-1342.]

[53] Huang YX, Chen YH, Chao WL. Research on the law of multi-time-scale runoff and withering transfer of regulated reservoirs in the Yaqi River Basin. Water Resources and Power: 1-12. [黄晏渲, 陈英豪, 晁韦霖. 雅砻江流域调节性水库多时间尺度径流丰枯转移规律研究. 水电能源科学: 1-12.]

[54] Zhang Y, Liu XM, Wang KW *et al*. Hydrologic responses to hot droughts in the Yangtze River Basin. *Advances in Climate Change Research*, 2026, **17**(2): 400-410. DOI: 10.1016/j.accre.2025.12.005.

[55] Zhang XQ, Song ZH, Zhou T *et al*. Reservoir operation strategies to mitigate hydrological drought effects along the middle and lower reaches of the Yangtze River. *Journal of Hydrology*: *Regional Studies*, 2025, **58**: 102204. DOI: 10.1016/j.ejrh.2025.102204.

[56] Yi L, Wang YH, Lin RL *et al*. Study on the joint regulation of reservoir group for suppressing saltwater and replenishing freshwater in the Pearl River

Basin. *China Flood & Drought Management*, 2024, **34**(11): 11-16. [易灵，王玉虎，林若兰等. 珠江流域水库群“压咸补淡”联合调度研究. 中国防汛抗旱, 2024, **34**(11): 11-16.]

[57] He ZB. Situation, strategy and enlightenment of emergency water regulation of suppressing saltwater and replenishing freshwater in the Pearl River during the dry seasons in recent 20 years. *China Flood & Drought Management*, 2024, **34**(11): 6-10, 22. DOI: 10.16867/j.issn.1673-9264.2024360. [何治波. 近 20 年珠江枯水期“压咸补淡”应急水量调度形势、策略与启示. 中国防汛抗旱, 2024, **34**(11): 6-10, 22.]

[58] Xu YY, Gun Z, Zhao JW *et al*. Continuing severe water shortage in the water-receiving area of the south-to-north water diversion eastern route project from 2002 to 2020. *Water Resources Research*, 2023, **59**(10): e2022WR034365. DOI: 10.1029/2022WR034365.

[59] Chang LW, Cheng L, Zhang L *et al*. Faster and more effective recovery of surface water in the water-receiving area of the middle route south-to-north water diversion project. *Water Resources Research*, 2025, **61**(8): e2025WR040214. DOI: 10.1029/2025WR040214.

[60] Gao YY, Sun QY, Wen AX *et al*. Effectiveness of groundwater extraction in Beijing since the ingauration of the first phase of the South-to-North Water Diversion Project, China. *Journal of Groundwater Science and Engineering*, 2023, **11**(3): 294-307. DOI: 10.26599/jgse.2023.9280024.