

引用格式:Lei Xiao, Ke Linghong, Yong Bin, *et al.* Evaluation of River Water Level Monitoring from Satellite Radar Altimetry Datasets over Chinese Rivers[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2022, 37(1): 61-72. [雷逍, 柯灵红, 雍斌, 等. 卫星雷达测高水位数据产品在中国区河流的监测精度评价[J]. 遥感技术与应用, 2022, 37(1): 61-72.]

DOI:10.11873/j.issn.1004-0323.2022.1.0061

卫星雷达测高水位数据产品在中国区河流的 监测精度评价

雷 逍, 柯灵红, 雍 斌, 张金山, 曹倩怡

(河海大学 水文水资源学院, 江苏 南京 210098)

摘要:河流水位监测对于淡水资源供应、灾害预防至关重要,同时关系到气候变化及其对水循环影响的理解和应对。随着卫星遥感技术的发展,基于卫星平台的河流水位观测提供了一种新型的自动化、长时序、低成本的河流监测方案。对于卫星雷达河流观测数据的原理、特征和精度的把握是产品应用的首要条件。研究总结了目前国际上3种主要的卫星雷达河流观测数据集Hydroweb、DAHITI、GRRATS及主要卫星传感器的特征和现状,并结合我国境内32个水位站实测数据(2008~2018)开展了精度验证及分析。验证结果表明:Hydroweb数据集整体精度(RMSE平均0.70 m)高于DAHITI(RMSE平均1.29 m)与GRRATS(RMSE平均3.21 m)。Hydroweb数据集大量使用Sentinel-3卫星观测数据, Sentinel-3卫星水位观测精度(RMSE平均为0.51 m)显著高于Envisat(RMSE平均为3.34 m)与Jason卫星(Hydroweb与GRRATS的Jason卫星RMSE平均分别为1.69 m与2.96 m)。3个数据集均应用了Jason卫星,3个数据集基于Jason卫星均在个别站点有较好结果,其中DAHITI在高村站精度最高(RMSE为0.22 m),但3个数据集精度均不稳定(5/9的站点RMSE大于2 m)。另外河流干湿季水位变化与河流周边的小型湖泊、水塘、季节性水体影响水位观测的精度。本研究为相关水位测高数据集应用提供指导,同时对明晰现有水位提取算法在我国区域的问题及将来可能算法改进研究提供参考。

关键词:河流水位;雷达高度计;测高数据集;精度评价

中图分类号:P332;TP79 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-0323(2022)01-0061-12

1 引言

河流是陆地水循环中大陆分支的一部分,在供应满足人类和经济需要的淡水方面发挥着至关重要的作用,河流水资源与人类生活息息相关^[1-2]。河流观测对于淡水资源评价、洪涝灾害监测与预防、气候变化研究有重要意义,在水资源综合管理和政府决策中具有重要的参考价值^[3]。河流水位是指基准面以上的河流水面的高程,是河流水文/水力学

的一个基本量,是河流观测中的一个重要参数。由于政治、经济以及地域条件的限制,全球径流数据中心(Global Runoff Data Centre, GRDC)显示自1978年开始,全球水文站数量急剧减少^[4-5]。随着卫星遥感技术的发展,其依靠实时、高效、覆盖范围广、低成本等特点开始在内陆水体的监测中扮演重要角色,为资料稀缺的地区的河流观测提供了重要的数据补充,逐渐成为一种具有广泛应用前景的河流水位监测手段^[6-8]。

收稿日期:2021-06-15;修订日期:2021-12-11

基金项目:国家重点研发计划(2018YFA0605400),中央高校基本科研业务费专项资金(B210202003)资助。

作者简介:雷 逍(1997—),男,四川宜宾人,硕士研究生,主要从事河流水文遥感研究。Email:leixiao@hhu.edu.cn

通讯作者:柯灵红(1985—),女,湖北黄石人,副教授,主要从事水文遥感、冰冻圈遥感研究。Email:kelinghong@hhu.edu.cn

目前卫星遥感技术主要通过搭载在卫星上的雷达高度计测量内陆水体表面高程提供水位观测数据集。在卫星轨道与河流网络的交叉点上,定期提取河流水情信息,形成类似无人值守的水文观测站,被称为虚拟观测站(virtual station)技术^[9]。虚拟站点的水文观测可以覆盖全球网络,提供偏远无资料区的观测数据,并以经济、高效的方式补充现有水文观测网络。雷达高度计提取水位的原理,是通过计算发射电磁波与接收来自地面反射电磁波的时间间隔,并加入地球物理和大气层延迟改进参数后,测算星下点高程。雷达测高的关键是对雷达反射波形进行分析,确定微波脉冲到达地表的时间,即距离窗口必须在时间上被正确定位(即窗口延迟),这个过程被称为波形重跟踪^[10]。卫星雷达高度计最初是为了观测海洋表面而开发,针对典型的海洋单波峰回波的波形,重跟踪算法主要有重心偏移算法(Offset Centre of Gravity, OCOG)^[11]、窄主峰重跟踪算法(Narrow Primary Peak Retracker, NPPR)^[12]、改进阈值重跟踪算法(Improved Threshold Retracker, ITR)^[13]、基于 OCOG 改进的 Ice 算法^[1](适用于冰面)等,其精度能达到厘米级别。最近的一些研究也证明可以将其应用于内陆水体中^[14],由于内陆水体与冰面回波的相似之处,测高卫星的原始跟踪测高产品便是采用的 Ice-1 算法(OCOG 算法改进)进行波形重跟踪处理并提供原始测高产品的,另外目前主要有 3 种基于卫星测高研制的全球河流水位时序数据库:①Hydroweb 数据集,该数据集是由地球物理和空间海洋学研究实验室于 2011 年开发的湖泊和河流的水位数据集(<http://hydroweb.theia-land.fr/>);②DAHITI 数据集,该数据集是由德国慕尼黑工业大学于 2013 年开发的提供内陆水体水位时间序列的数据集(<https://dahiti.dgfi.tum.de/en/>);③GRRATS 数据集,该数据集是由 Stephen Coss 等于 2019 年开发生成的一个针对全球大型河流(河宽大于 900 m)的水位时序数据集(<https://doi.org/10.5067/PSGRA-SA2V1>)。基于这些水位数据,可以开展湖泊水储量以及河流径流反演等方面的研究。例如 Yue 等^[15]利用 Hydroweb 数据集与 Landsat 数据建立中国五大湖泊水位、面积、水储量时间序列;Keys 等^[16]利用 MODIS 卫星图像和 Hydroweb 测高数据,建立了 10 个大型热带地表水体的储存量变化的高频时间序列;Dka 等^[17]借助 Hydroweb 数据集及其他水位数据,几

个水文模型估算刚果河流量;Rai 等^[18]利用 Hydroweb 与 DAHITI 数据集的水位估计恒河的流量。应用这些水位数据的前提是数据集的水位观测精度情况,目前的 3 种数据集原作者在国外一些特定的流域进行了精度验证,精度一般能达到 RMSE 在几厘米到几十厘米左右,Hydroweb 在亚马逊河流域^[20](基于 Envisat、Jason 卫星)与内尼日尔三角洲^[22](基于 Envisat、Jason、Sentinel-3 卫星)RMSE 分别为 0.10~1.70 m 与 0.40~1.60 m,DAHITI 数据集在亚马逊流域^[23]RMSE 为 0.04~1.13 m,GRRATS 数据集在选定的验证河流^[25] RMSE 为 0.57~1.18m。另外,Jamro 等^[19]评估了 DAHITI 与 Hydroweb 数据集在印度河的水位监测精度,结果表明 R^2 均大于 0.6, RMSE 平均分别为 0.5 m 与 0.6 m。但是 3 种数据集在中国河流的水位监测精度情况尚未有报道。

结合实测数据,本研究对 Hydroweb、DAHITI、GRRATS 3 个测高数据集在中国的河流覆盖情况及其水位监测精度进行了评价,评价了不同数据集在中国区域的水位观测精度,并分析比较了不同传感器与不同数据集的水位提取算法的水位提取精度,还分析了不同季节(干季与湿季)、不同空间区域以及河流周边小型水体对河流水位提取精度的影响。本研究首次提供了目前主要测高数据产品在我国河流观测方面的能力和精度情况,为相关数据集应用提供指导;同时对于明晰现有水位提取算法在我国区域的问题及将来可能算法改进研究有参考价值。

2 研究数据与方法

2.1 卫星测高数据集

现有 3 种数据集的主要特征如表 1 所示,其在中国的虚拟站点分布如图 1 所示。Hydroweb 数据集的算法主要基于多种卫星雷达高度计的 GDR (Geophysical Data Records) 数据产品,采用一定的数据筛选和滤波方法来生成最终的水位产品^[20-22]。GDR 数据产品是测高卫星提供的不包含原始波形数据的地球物理数据记录,其中包含距离测量以及各种误差修正参数,距离测量是基于 Ice-1 波形重跟踪算法得到。Hydroweb 数据集采用后向散射系数来选择最具回声特性的测量结果来计算水面高度,根据每个虚拟站水位观测结果的均值与相关标准偏差来进行滤波,得到最后的水位观测结果。

Hydroweb 数据集的测高数据产品在中国共有 626 个虚拟站点,其中 Envisat 3 个、Jason 36 个、Sentinel-3 587 个。

DAHITI 数据集与 Hydroweb 不同,DAHITI 主要采用 SGDR(Sensor Geophysical Data Records)数据提供的原始波形数据的传感器地球物理数据记录来提取水位^[23]。DAHITI 数据集选择阈值为 10% 的“改进阈值追踪器”(Improved Threshold Retracker)对选择的 SGDR 数据进行波形的重跟踪,然后采用扩展的异常值剔除和卡尔曼滤波方法^[24]来严格组合可选的高度计任务来观测水位。DAHITI

数据集的测高数据产品在中国共提供了 11 个河流水序列。GRRATS 数据集采用的原始测高数据是 ENVISAT、Jason-2 等卫星的 GDR 数据产品^[25]。GRRATS 数据集根据全球河流宽度(Global River Widths from Landsat , GRWL)数据集^[26-27]来选取虚拟站点,获取 GDR 测量数据及修正参数,对每一个站点使用先验数据高程模型来进行数据过滤,最后选择每个站点过滤后的 GDR 测量数据的均值作为该虚拟站点的观测水位。GRRATS 数据集的测高数据产品在中国包含长江和黑龙江共计 36 个虚拟站点,其中 Envisat 29 个、Jason 7 个。

表 1 卫星测高数据集信息
Table 1 Information of Radar Altimeter datasets

数据集	提出者	数据源卫星	时间跨度	空间跨度(虚拟站)	算法
Hydroweb	LEGOS	Envisat/ Jason/ Sentinel-3	2002~2012/2008~ 2016/2016 至今	1 049/907/10 592	GDR 数据/无波形重跟踪/Ice-1 算法/三倍标准差去噪
DAHITI	DGFI-TUM	Envisat/ Jason	2002~2012/2008~ 2016/2016 至今	52/143	SGDR 数据/波形重跟踪/10% 的改进 threshold 算法/扩展的异常值剔除和卡尔曼滤波
GRRATS	Stephen Coss et al.	Envisat/ Jason/	2002~2012/2008~ 2016	696/235	GDR 数据/无波形重跟踪/Ice-1 算法/先验 DEM 去噪

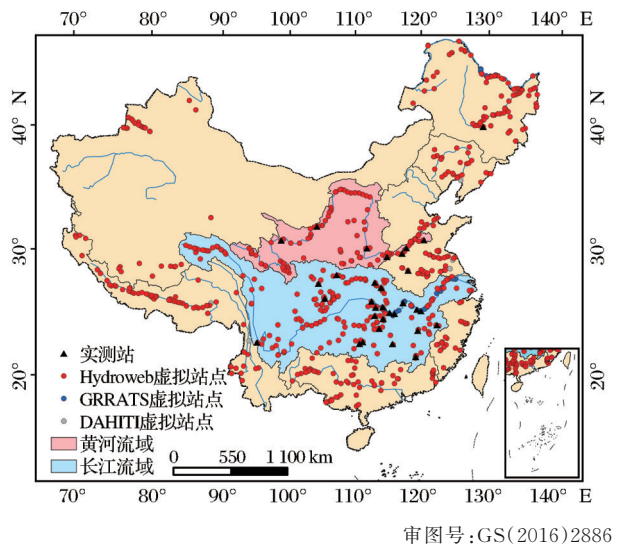


图 1 全国虚拟站点分布图
Fig.1 Distribution of virtual stations in China

对中国的河流水位监测,3 种数据集使用的 3 种测高卫星基本参数如表 2 所示。3 种卫星在运行时间、重复周期、脚印点大小上均有不同,对水位观测精度会有不同的影响。Sentinel-3 卫星的步幅直径远小于 Envisat 以及 Jason 卫星,其采样回波收到周边地物的影响较小。在中国区河流监测中,该卫星仅在 Hydroweb 数据集中得到了应用。

2.2 水文站实测数据

研究选取了与卫星虚拟站点在同一河道上且距离在 5 km 范围半径内的水文站观测数据进行了水位精度验证(水文站点分布见图 1)。所有水文站实测数据均来自与《中华人民共和国水文年鉴》^[28],共获取了 32 个水位站 2005~2018 年的实测逐日平均水位数据。其中有部分站点有部分年份的数据缺失,水文站实测数据采用的是国家 85 黄海高程

表 2 测高数据集使用卫星主要信息

Table 2 The major information of the missions used in the altimetry data set						
卫星	应用数据集	轨道高度/km	运行时间	重复周期	雷达高度计	步幅直径
Envisat	GRRATS	800	2002~2012	35 d	Poseidon-3B	2~10 km
	DAHITI					
	Hydroweb					
Jason2/Jason-3	GRRATS	1 315	2008~今 2016~今	10 d	Radar Altimeter(RA2)	2~4 km
	DAHITI					
Sentinel-3	Hydroweb	814.5	2016~今	27 d	SAR Radar Altimeter (SRAL)	300 m

基准。

2.3 研究方法

实测水位是水文站日平均水位值,水位数据集测高水位是卫星过境时观测水位,为进行水位观测比较,本文根据卫星观测水位数据集的观测日期将水文站实测日平均水位与其一一匹配,即认为一般情况同一天内水位变化较小,测高数据集水位与对应水文站的当天日平均水位紧密联系。由于两者使用的高程基准不同以及位置的差异,即测高水位与实测水位存在一个垂直基准偏差^[1],可以选择用对应时间的测高水位与实测水位之差来进行偏差修正^[29],研究选择采用该站点位置实测数据与测高数据集的差值的中位数作为两者的垂直基准偏差将测高水位与实测水位的高程基准统一之后来进行精度评价。

$$H_m = H_0 - \text{median}(H_{0i} - H_{ei}) \quad (1)$$

其中: H_m 是修正之后的测高数据集水位; H_{0i} 是未经修正的测高数据集水位; H_{ei} 是水位站实测水位。

研究使用 4 个指标来评价两个数据集的差异,相关系数(R^2)来衡量测高水位与实测水位之间的相关性,均方根误差(RMSE)来衡量测高水位与实测水位在数量之间的一致性,定量分析误差的大小,纳什系数(NSE)用来评估数据集对水位估测的效率与准确性。相对均方根误差 RRMSE 用来衡量估计偏差相对于不同水位年内波动情况的水平。

$$R^2 = 1 - \frac{\sum (H_m - H_e)^2}{\sum (H_m - \bar{H}_m)^2} \quad (2)$$

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{\sum (H_m - H_e)^2}{Z}} \quad (3)$$

$$\text{NSE} = 1 - \frac{\sum (H_m - H_e)^2}{\sum (H_m - \bar{H}_m)^2} \quad (4)$$

$$\text{RRMSE} = \frac{\text{RMSE}}{\bar{H}_{\max} - \bar{H}_{\min}} * 100\% \quad (5)$$

其中: H_m 是修正之后数据集卫星测高水位; H_e 是水文站实测水位; Z 是每个站点观测水位数据量; \bar{H}_{\max} 为平均年内水位最大值,即多年平均波峰值; \bar{H}_{\min} 为平均年内水位最小值,即多年平均波谷值。

3 结果

3.1 精度评价结果

研究共选择了 36 个附近有实测水文站的虚拟站进行精度评价,其中 GRRATS 数据集 9 个,占该

数据集中国总河流点数量的 25%,DAHITI 数据集 2 个,占该数据集中国总虚拟站点数量的 20%,Hydroweb 数据集 25 个,占该数据集中国总虚拟站点数量的 4%,根据选择的虚拟站点数量以及在每个数据集国内总虚拟站占比来看,认为具有代表性统计意义,表 3 列出了可验证的虚拟站点情况及验证结果。

表 3 全国河流可验证站点验证结果

Table 3 Validation results of virtual stations of river in China

数据集	国内虚拟站点 (可验证点/总站点)			R^2	RMSE	NSE	RRMSE
				均值	均值	均值	均值
	Envisat	Jason	Sentinel-3				
Hydroweb	0/3	4/36	21/587	0.65	0.70 m	0.14	18%
DAHITI	0/1	2/10	-	0.80	1.29 m	-6.51	18%
GRRATS	6/29	3/7	-	0.53	3.21 m	-0.38	30%

总体来看,Hydroweb 数据集的平均 RMSE 小于 1m,NSE 系数为正,其整体精度要稍微好于 DAHITI,两者均比 GRRATS 的精度质量要好(RMSE 平均达到 3 m 以上)。3 种数据集中,DAHITI 与 GRRATS 数据集的 NSE 系数均值均小于 0,Hydroweb 数据集 NSE 系数大于 0 但是仅为 0.14,远小于 1,表明,3 个数据集对于波峰与波谷的水位难以精确捕捉。3 种数据集的精度统计如图 2 所示。图 2 箱型图的标准差很大,表示每个数据集的精度在不同站点的差异很大。例如,DAHITI 数据集在中国河流上只有两个虚拟站点可以进行验证,其在黄河高村站表现良好(R^2 为 0.94, RMSE 为 0.22 m),但是在长江枝城站的结果精度较差(R^2 为 0.66, RMSE 为 2.36 m)。GRRATS 数据集所有虚拟站观测结果中仅有长江枝城站 RMSE 为 1.29 m,精度较好,其余站点的结果 RMSE 均大于 2 m。Hydroweb 数据集的 RMSE 均值最低,共有 21 个虚拟站的 RMSE 小于 1 m,整体精度是最好的。

3.2 相同传感器不同算法(数据集)的水位监测精度

表 1 中列出不同数据集采用了不同的算法和去噪策略,这可能是造成精度差异的原因之一。Jason 卫星传感器是目前能提供最长时序和最高时间分辨率的观测数据。以 Jason 传感器测高产品为例,不同数据集在不同的站点有不同的表现,如表 4 和图 3 所示。

在枝城站,GRRATS 数据集(图 3(e))表现良好, R^2 与 RMSE 分别为 0.92 与 1.17 m,DAHITI 数

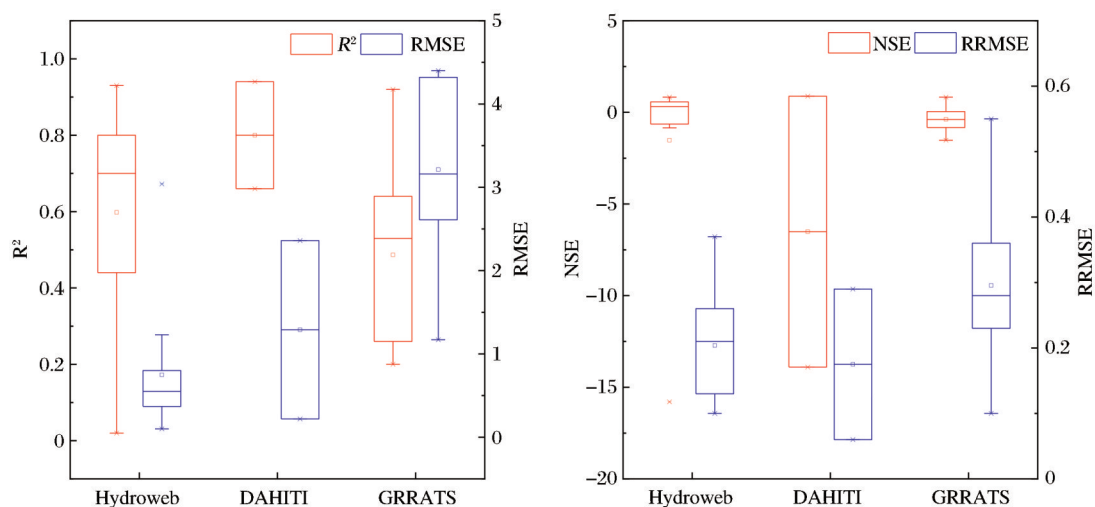


图 2 3种数据集精度评价结果箱型图

Figure 2 Box plot of the accuracy evaluation results of the three data sets

表 4 不同数据集 Jason 卫星观测结果验证

Table 4 Validation of Jason Satellite Observation Results of Different Data Sets

数据集	站点	R^2	RMSE	NSE	RRMSE
Hydroweb	贵德	0.92	0.25 m	0.83	10%
	沙市	0.24	3.04 m	-15.8	26%
	肖家湾	0.64	1.23 m	0.24	16%
	樟树	0.46	2.25 m	-15.24	19%
DAHITI	枝城	0.66	2.36 m	-13.9	29%
	高村	0.94	0.22 m	0.88	6%
GRRATS	汉口	0.4	4.33 m	-0.83	29%
	枝城	0.92	1.17 m	0.83	10%
	沙市	0.42	3.38 m	-1.52	28%

数据集(图 3(d))精度较差, R^2 与 RMSE 仅有 0.66 与 2.36 m,NSE 系数仅为 -13.9,数据集并没有捕捉到水位的高峰与低谷;在沙市站,Hydroweb 数据集与 GRRATS 数据集精度均不理想, R^2 均小于 0.5, RMSE 均大于 3 m。在其他站点中,Hydroweb 数据集在贵德与肖家湾站(图 3(a))精度较好, R^2 分别为 0.92 与 0.64, RMSE 分别为 0.25 m 与 1.23 m,但是在肖家湾站的 NSE 系数仅有 0.24 同样对于波峰与波谷的水位没有较好的捕捉,在樟树站(图 3(b))精度表现较差(R^2 为 0.46, RMSE 为 2.25 m);DAHITI 数据集在黄河的高村站(图 3(c))表现很好, R^2 与 RMSE 分别为 0.94 与 0.22 m;GRRATS 数据集在汉口站(图 3(f))精度也很差,时序数据中有较多的噪声。

从验证结果的整体来看,3 种数据集均在个别站点产生较好的效果,达到 $R^2 > 0.8$, RRMSE $\leq 10\%$ 的水平,但是精度并不稳定,较差的概率很大,

均出现了 RMSE 大于 2 m 的情况,并且较多站点的 NSE 系数均小于 0,证明很多站点均没有很好捕捉水位季节性变化幅度的情形,即对于水位波峰与波谷的监测能力较差。所有基于 Jason 的河流虚拟站点中,DAHITI 数据集集中的高村站精度最高, RMSE 仅为 0.2 m。可能是因为使用 SGDR 数据并进行了波形重跟踪,但是该数据集精度并不稳定,比如在长江的枝城站的水位提取精度较差(RMSE 为 2.36 m)。

3.3 相同数据集不同传感器的水位监测精度

不同传感器因为脚点大小,跟踪方式等不同,其对陆地水体水位提取的精度可能不一样。为了分析不同传感器对测高数据集水位精度的影响,研究对所验证的虚拟站中不同传感器的精度结果进行了对比,对比分析了 Hydroweb 数据集的 Jason 与 Sentinel-3 结果以及 GRRATS 数据集的 Envisat 与 Jason 结果。

从 Hydroweb 数据集的 Jason 与 Sentinel-3 结果对比来看, Sentinel-3 卫星的观测结果(R^2 与 RMSE 均值分别为 0.67 与 0.51 m)精度比 Jason 卫星(R^2 与 RMSE 均值分别为 0.56 与 1.69 m)高。从 GRRATS 数据集的 Jason 与 Envisat 的观测结果来看 Jason 卫星的结果(R^2 与 RMSE 分别为 0.58 与 2.96 m)精度较 Envisat 卫星(R^2 与 RMSE 分别为 0.51 与 3.34 m)更高。图 4 与图 5 分别是 Hydroweb 数据集的部分 Sentinel-3 以及 GRRATS 数据集的部分 Envisat 水位观测结果。Hydroweb 数据集使用的 Sentinel-3 卫星在较多的站点均有较好的精度表现,在可验证的 21 个虚拟站中,有 11 个站 RMSE 小于 0.5 m,比

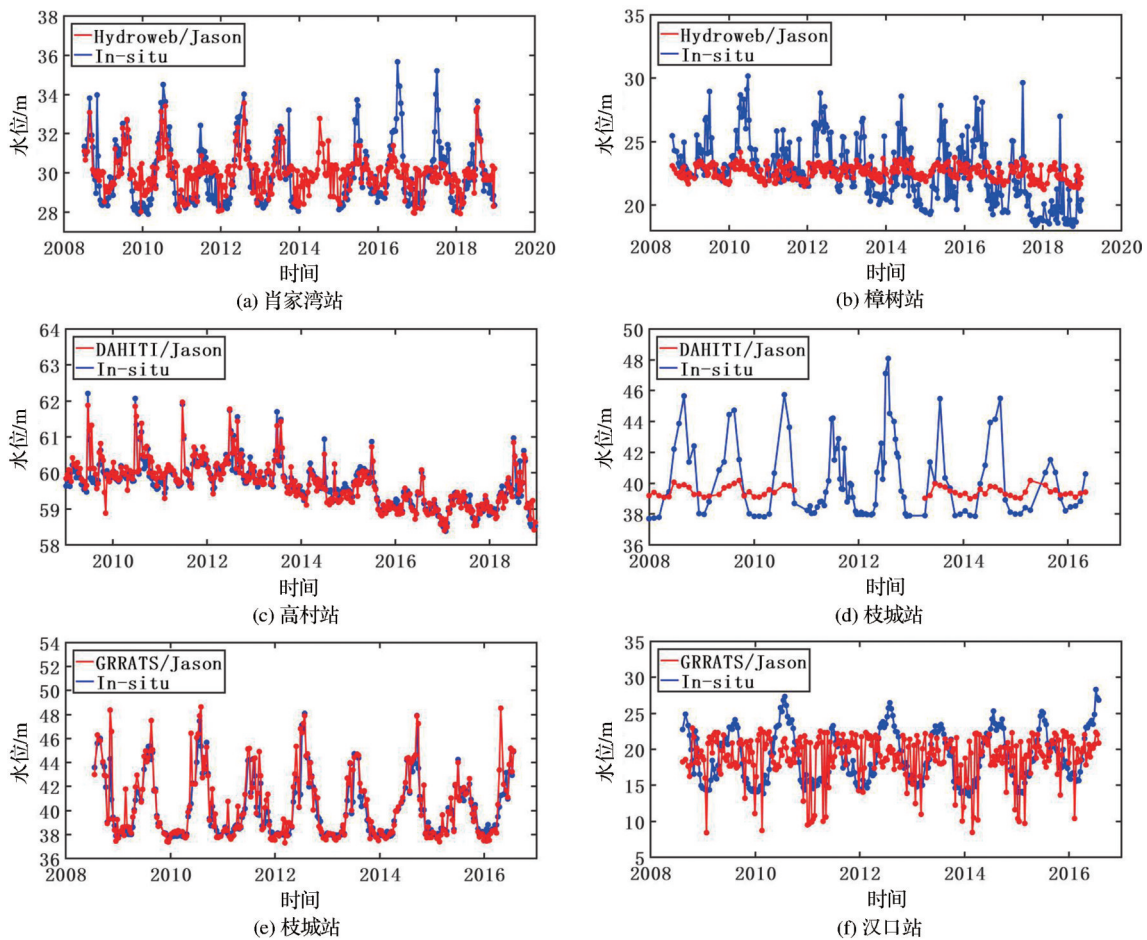


图3 Jason水位观测结果与实测结果对比

Fig. 3 Comparison between Jason altimetry data and measured data

如夹河滩站(图4(a))的RMSE为0.23 m,且 R^2 达到了0.95;但是Sentinel-3卫星也在一些站点精度较差,如大汶河站(图4(b))RMSE为1.08 m,即使如此,其精度还是普遍高于Jason与Envisat卫星的。GRRATS基于Envisat卫星的6个可验证虚拟站的水位提取精度RMSE均大于2 m,精度普遍较差,如汉口站(图5(a))与监利站(图5(b))的RMSE分别为4.4 m与2.52 m。

3.4 水位提取精度在不同季节的差异

以上比较中发现卫星在高水位期间和低水位期的观测效果有明显不同。本研究将每年的5月到10月定义为湿季,将11月到次年4月定义为干季,对比分析3种数据集在干湿季的水位精度。基于Jason卫星的DAHITI数据集在两个虚拟站所观测水位湿季结果相关性(R^2 均值为0.74)比干季(R^2 均值为0.47)高,但是湿季误差(RMSE均值为1.63 m)比干季(RMSE均值为0.75 m)更高。GRRATS数据集与Hydroweb数据集在湿季观测的水位(R^2 均值分别为0.50与0.70, RMSE均值分别为2.65 m与

0.60 m)精度要优于干季(R^2 均值分别为0.32与0.54, RMSE均值分别为3.64 m与0.75 m)。

图6是螺山站(GRRATS数据集基于Envisat结果)与安江站(Hydroweb数据集基于Sentinel-3结果)的干湿季的水位散点图,两个站点在湿季卫星观测水位更加接近实测的水位。GRRATS数据集在螺山站的水位观测,湿季精度(R^2 为0.88, RMSE为1.21 m)较干季(R^2 为0.20, RMSE为4.14 m)有了很大的提升;Hydroweb数据集在安江站湿季观测的水位精度(R^2 为0.91, RMSE为0.25 m)也比干季(R^2 为0.60, RMSE为0.31 m)更高。湿季的河流水位上涨,更加便于脚印点的选取,且受周边噪声影响小,精度会较干季有一定的提升。螺山站干湿季水位变化(落差近5 m)比安江站(落差近1 m)更大,其水位精度变化也更大。

3.5 数据集在不同区域的水位提取精度

Hydroweb数据集在长江、黄河、以及其他流域均有精度验证结果,因此研究选择Hydroweb数据集的Sentinel-3卫星观测水位结果来对比不同地区

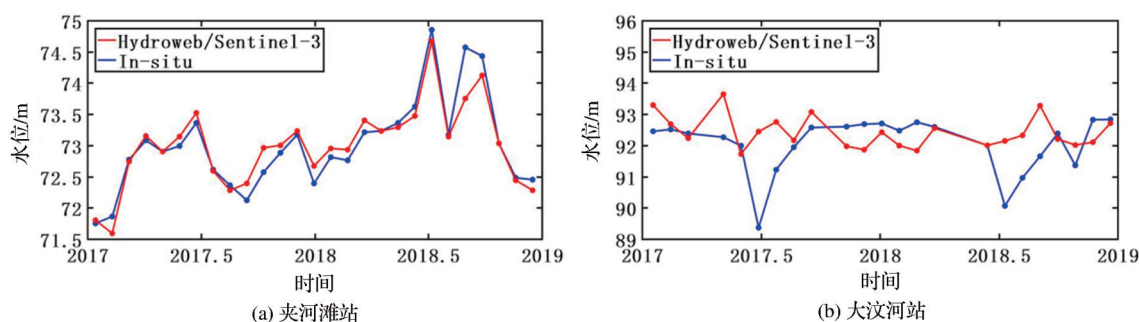


图 4 Hydroweb 数据集 Sentinel-3 水位观测结果与实测结果对比

Fig. 4 Comparison between Sentinel-3 altimetry data and measured data of Hydroweb

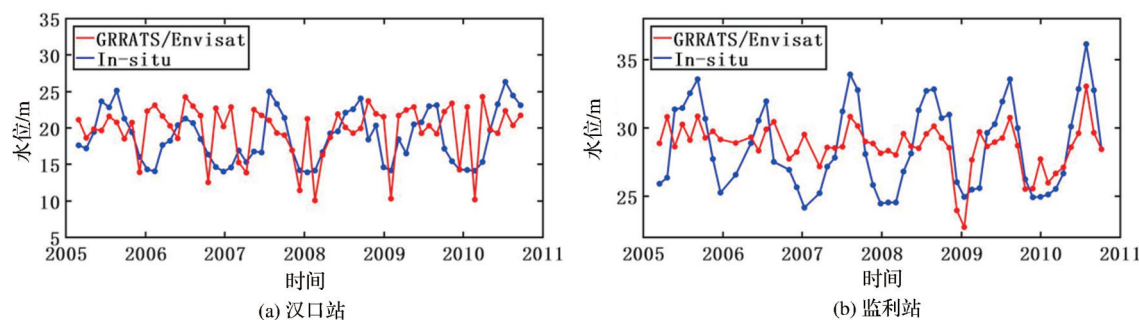


图 5 GRRATS 数据集 Envisat 水位观测结果与实测结果对比

Fig. 5 Comparison between Envisat altimetry data and measured data of GRRATS

表 5 干湿季水位精度统计

Table 5 Accuracy statistics of water level in dry and wet seasons

数据集	季节	R^2	RMSE/m	NSE	RRMSE
Hydroweb	干季	0.54	0.75	-0.54	35%
	湿季	0.70	0.60	0.24	22%
DAHITI	干季	0.47	0.75	-1.09	19%
	湿季	0.74	1.63	-5.35	25%
GRRATS	干季	0.32	3.64	-0.45	50%
	湿季	0.50	2.66	-0.02	28%

的水位观测精度。

图 7 是 Sentinel-3 卫星的 21 个水位观测结果的精度分布情况,本次验证的站点主要集中在黄河流域以及长江流域。从验证结果来看,黄河流域的水位观测(R^2 平均为 0.88, RMSE 平均为 0.41 m)精度要高于长江流域(R^2 平均为 0.65, RMSE 平均为 0.48 m)以及其他流域(R^2 平均为 0.51, RMSE 平均为 0.62 m)。

影响卫星观测水位的精度除了周边地物以外,还有一些季节性水体的因素。Jean-Francois Pekel 等^[30]利用 Landsat 影像制作了全球尺度的近 32 a 以来的地表水动态变化图(包括全球地表水频率分布图),我们基于此图比较了长江周边季节性水体较多的黄家港(图 8(a))、襄阳(图 8(b))以及周边季节

性水体较少的金溪站(图 8(c))的水位精度情况。发现受到周边季节性水体影响的黄家港以及襄阳站,水位观测结果 R^2 分别为 0.46 和 0.56, RRMSE 分别为 22% 和 23%,而周边季节性水体较少的金溪站水位结果 R^2 为 0.92, RRMSE 为 11%。可以看出长江上,河段周边的季节性水体,尤其是小型湖泊或者水塘会降低卫星观测水位的精度。

4 讨 论

从验证结果来看,3 种数据集在中国的水位提取精度的不同与其使用的水位提取算法(波形重跟踪与去噪)以及选择的测高卫星不同有关。DAHITI 数据集使用了 SGDR 数据并进行波形重跟踪,其在黄河的高村站确实表现出了非常好的精度,但是其精度也不稳定(枝城站精度较差)。Hydroweb 数据集与 GRRATS 数据集均选择 GDR 数据,只是数据去噪的策略不同,两种数据集也在一些特定的站点有较好的精度,但是也有大量站点精度较差。以 Hydroweb 数据集为例,基于 Sentinel-3 雷达高度计的水位精度整体好于 Jason 传感器,可能是由于 Sentinel-3 卫星使用合成孔径雷达观测,步幅直径(300 m)显著低于公里级别步幅直径的 Jason 和 Envisat 传感器,受陆地污染、岛屿等的影响较小^[31],因此大量使用 Sentinel-3 卫星观测数据的 Hydroweb

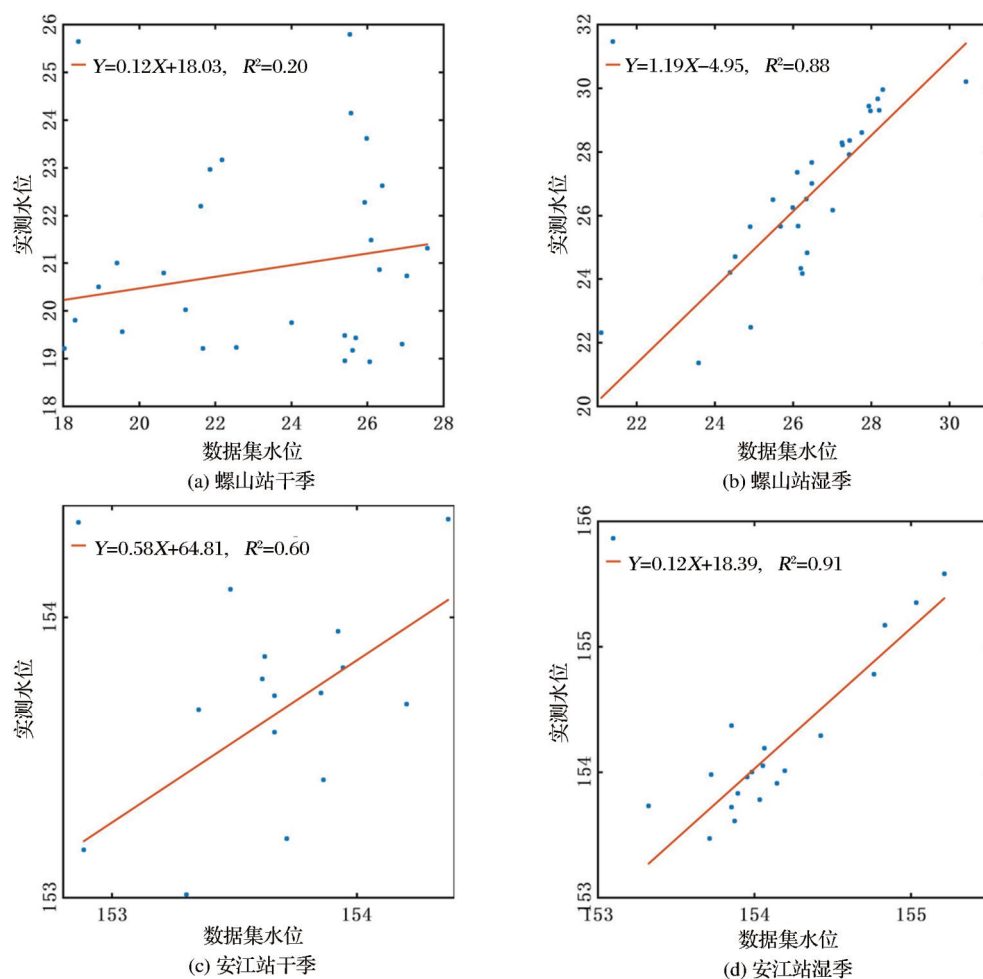


图 6 典型站点干湿季卫星水位与实测水位对比图

Fig. 6 Comparison between altimetry data and measured data in dry and wet season of typical stations

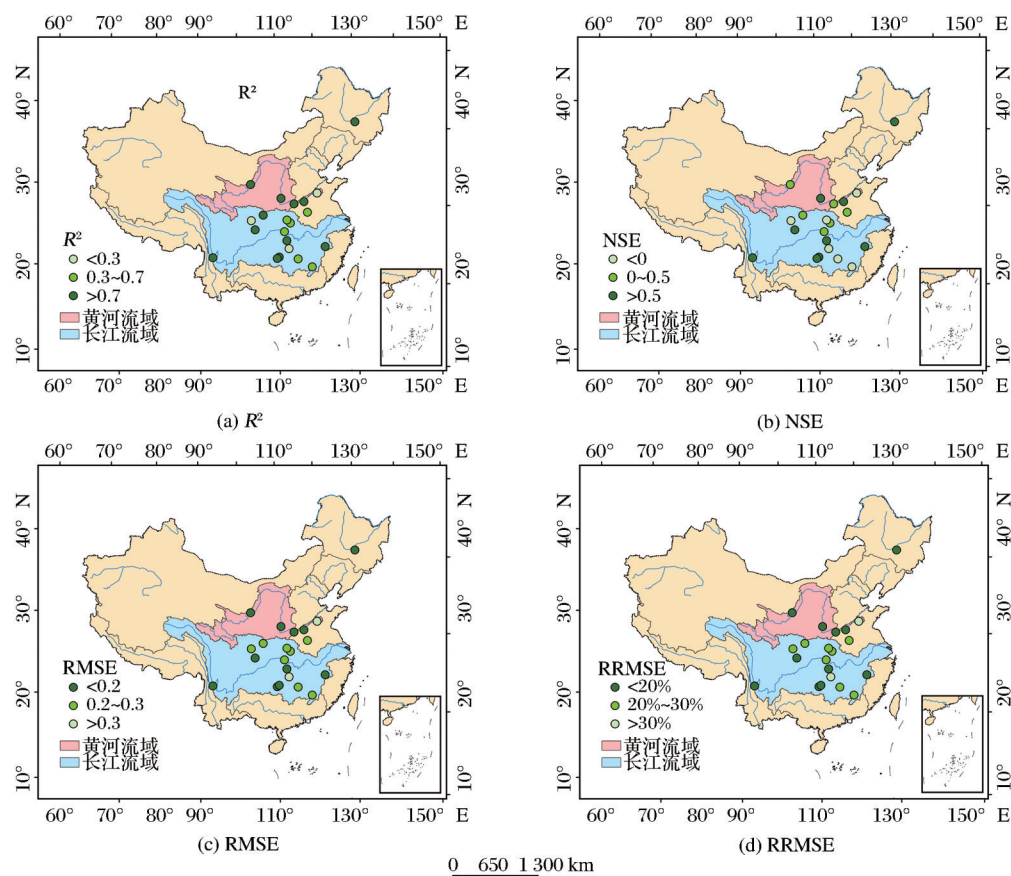
数据集整体精度相较于另外两个数据更高。

相较于现有产品原作者在其他的一些特定验证流域的精度验证结果(见引言部分),3个数据集在中国长江和黄河流域的精度偏低。本实验验证的3个数据集在中国基于 Jason 卫星(RMSE 平均分别为 1.69 m、1.29 m 与 2.96 m)的水位精度显著低于 3 种数据集在国外其他流域的精度。3 个数据集在中国河流水位监测精度较低的原因可能与中国河流区地表复杂的环境与气候有关,旱季低水位时期由于河流水面信号减弱,提取精度更易受地表环境影响。另外,由于卫星观测与实测数据的匹配性及数据缺失,可验证实测站点较少,可能会影响全面、系统的精度评估。

由于雷达高度计脚印点直径较大(几公里到十几公里级别),以及干湿季和周边水体的影响,内陆水体的回波比海洋回波更为复杂,传统的波形重订算法的精度会有很大不确定性。近年来针对内陆水体陆续提出了一系列的改进算法,例如 50% 阈值

与 Ice 组合算法(the 50% Threshold and Ice-1 Combined algorithm, TIC)^[24]、多波形持续峰值重跟踪算法(Multiple Waveform Persistent Peak Retracker, MwPP)^[32]、多子波多权重阈值重跟踪算法(Multi-subwaveform Multi-weight Threshold Retracker, MSMWTR)^[1]等。但是目前这些算法还没有产生相应系统性的产品。

对于未来的河流测高算法设计研究以及对于河流卫星测高数据产品的开发,可以考虑使用更多雷达卫星来进行原始波形数据的获取,提高测高卫星的性能,增加卫星数据源,考虑增加使用 CryoSat-2 以及 ICESat-2 等卫星^[33-34]。另外最近机器学习和深度学习相关技术的兴起也对未来河流测高算法的研究提供了新的思路,例如将小波分析与深度学习卷积神经网络相结合应用于卫星测高波形的分析中^[35],开展河流测高算法研究,提高水位监测精度。在河流水位监测研究的应用方面,也可以将卫星测高水位监测数据与水文模型相结合^[36],在



审图号:GS(2016)2886

图7 Sentinel-3卫星水位精度空间分布

Fig.7 Spatial distribution of water surface level accuracy of Sentinel-3

河流水文气候等领域进行研究,为水资源保护、政府决策等提供帮助。

5 结 论

本研究对 GRRATS、DAHITI、Hydroweb 3 个卫星测高数据集在中国的河流水位观测进行了精度评价,并分析了数据集使用的测高算法、卫星传感器、季节性水位波动以及空间区域的不同对数据集水位观测精度的影响,主要结论如下:

(1)精度评价结果显示,Hydroweb、DAHITI 以及 GRRATS 数据集的精度验证结果 R^2 与 RMSE 均值分别为 0.65 与 0.70 m、0.80 与 1.29 m 以及 0.53 与 3.21 m。

(2)以 Jason 卫星观测结果为例,3 个数据集均在个别站点有较高的精度,但是精度并不稳定,所有基于 Jason 的河流虚拟站点中,DAHITI 数据集的高村站精度最高, R^2 为 0.94, RMSE 仅为 0.2 m。

(3)Hydroweb 基于 Sentinel-3 卫星的水位精度 (平均 RMSE 为 0.51 m) 总体好于 Jason (平均

RMSE 为 1.69 m); GRRATS 基于 Jason 卫星精度 (平均 RMSE 为 2.96 m) 总体好于 EnviSat (平均 RMSE 为 3.34 m)。

(4)GRRATS 数据集与 Hydroweb 数据集在湿季观测的水位精度要优于干季 (R^2 更高, RMSE 更小)。而 DAHITI 数据集在中国的河流水位结果湿季 R^2 更高,而 RMSE 比干季大。

(5)Hydroweb 数据集基于 Sentinel-3 卫星在黄河流域的水位精度 (R^2 均值为 0.88, RMSE 均值为 0.41 m) 高于长江与其他流域,同时,河流周边季节性水体以及河流周边的小型湖泊、水塘等等会降低河流水位观测的精度。

对目前国际上 3 种卫星测高数据产品在中国区河流的精度进行了评定,目前国际上开放的河流虚拟站水位观测数据突显了卫星技术在河流监测中的潜力和前景,但是目前数据集中的算法在中国区域未能取得稳定、良好的结果,我国东南部季风区复杂的河流周边环境(人工地表、湖泊等)可能是水位提取精度较低的原因所在。未来对于中国河流

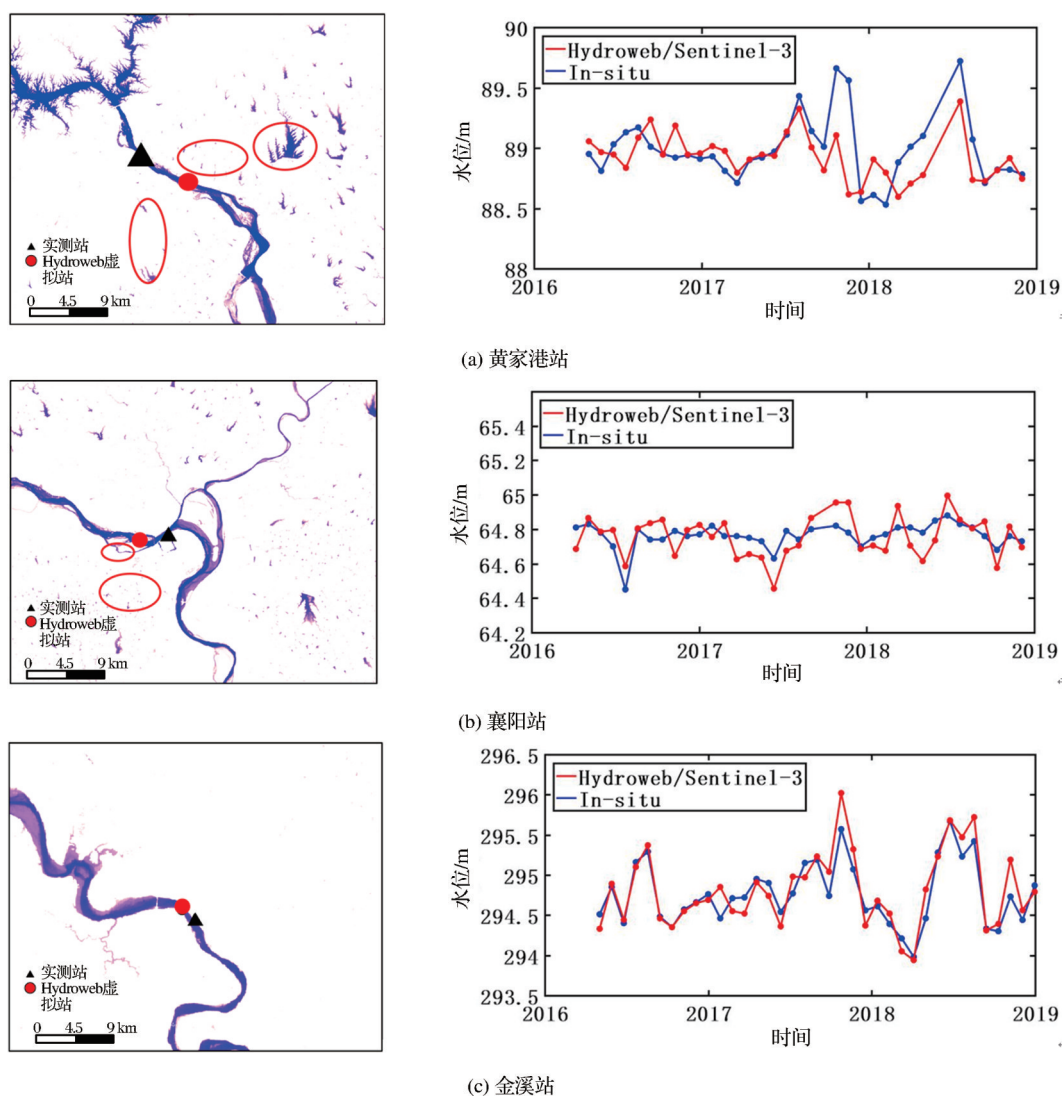


图8 不同地表环境下的水位提取精度

Fig. 8 Accuracy of water surface level extraction in different surface environments

水位监测,可以考虑从卫星传感器、季节性水位波动等方面来改进算法提高水位观测精度。同时还需要考虑不同的空间分布以及河流周边小型水体(小型湖泊、水塘、季节性支流)对水位精度的影响,开展适合于中国所有河流的水位监测算法研究。未来还可以考虑增加测高卫星数据源为卫星测高提供更多的波形数据,将深度学习等方法应用于卫星波形处理中,以提高卫星对河流水位监测的精度,将监测的河流水位与水文模型结合开展河流径流量估算、降雨等水文气候方面的研究。

参考文献(References):

- [1] Yuan Cui. Applied research on radar altimetry over inland waters[D]. Beijing: The University of Chinese Academy of Sciences (Institute of Remote Sensing and Digital Earth), 2017.

- [2] Haddeland I, Heinke J, Biemans H, *et al.* Global water resources affected by human interventions and climate change [J]. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2014, 111(9):3251-3256.
- [3] Jiang L, Nielsen K, Dinardo S, *et al.* Evaluation of Sentinel-3 SRAL SAR altimetry over Chinese rivers[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2020, 237. DOI: 10.1016/j.rse. 2019. 111546
- [4] Li Jiazhen, Guo Xinlei, Gong Tongliang, *et al.* A method estimating natural runoff in regions with none or less data [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2018, 49(11):1420-1428. [李甲振, 郭新蕾, 巩同梁, 等. 无资料或少资料区河流流量监测与定量反演[J]. *水利学报*, 2018, 49(11):1420-1428.]
- [5] Ma Jin, Lu Shanlong, Qi Jianguo, *et al.* Research of river discharge estimation model based on remote sensing in lack of hydrological data area [J]. *Science of Surveying and Mapping*, 2019, 44(5):188-194. [马津, 卢善龙, 齐建国, 等. 水文资料

- 缺乏区河流流量遥感估算模型研究[J].测绘科学,2019,44(5):184-190.]
- [6] Shanlong L U, Bingfang W U, Yan N, *et al.* Progress in river runoff monitoring by remote sensing[J]. *Advances in Earth Science*, 2010, 25(8):820-826.
- [7] Wang Hong, Sun Fubao, Yang Tao, *et al.* Application of Jason_2 satellite altimetry data to water level monitoring in the middle reaches of the Yangtze River[J]. *Ecology and Environmental Monitoring of Three Gorges*, 2018, 3(3):48-54.[王红, 孙福宝, 杨涛, 等. Jason_2 卫星测高数据在长江中游水位监测中的应用[J]. 三峡生态环境监测, 2018, 3(3):48-54.]
- [8] He Fei, Liu Zhaoefei, Yao Zhijun. Evaluation of the monitoring accuracy of lake water level by the Jason-2 Altimeter satellite[J]. *Journal of Geo-Information Science*, 2020, 22(3):164-174.[何飞, 刘兆飞, 姚治君. Jason-2 测高卫星对湖泊水位的监测精度评价[J]. 地球信息科学学报, 2020, 22(3):164-174.]
- [9] Leon J G, Calmant S, F Seyler, *et al.* Rating curves and estimation of average water depth at the upper Negro River based on satellite altimeter data and modeled discharges[J]. *Journal of Hydrology*, 2006, 328(3-4):481-496.
- [10] Guo Jinyun, Chang Xiaotao, Sun Jialong. Waveform retracking of satellite radar altimeter and applications[M]. Beijing: Surveying and Mapping Press, 2013.[郭金运, 常晓涛, 孙佳龙. 卫星雷达测高波形重定及应用[M]. 北京:测绘出版社, 2013.]
- [11] Wingham D J, Rapley C G, Griffiths H D. New Techniques in Satellite Altimeter Tracking Systems[C]// IGARSS 86 Symposium. 1986.
- [12] Jain M, Andersen O B, Dall J, *et al.* Sea surface height determination in the Arctic using Cryosat-2 SAR data from primary peak empirical retracers[J]. *Advances in Space Research*, 2015, 55(1):40-50.
- [13] Hwang C, Guo J, Deng X, *et al.* Coastal gravity anomalies from retracked Geosat/GM altimetry: Improvement, limitation and the role of airborne gravity data[J]. *Journal of Geodesy*, 2006, 80(4):204-216.
- [14] Cretaux J F, Nielsen K, Frappart F, *et al.* Hydrological Applications of Satellite Altimetry Rivers, Lakes, Man-Made Reservoirs, Inundated Areas[M]. CRC Press, 2017.
- [15] Yue H, Liu Y, Wei J. Dynamic change and spatial analysis of Great Lakes in China based on hydroweb and landsat data[J]. *Arabian Journal of Geosciences*, 2021, 14(149). DOI: 10.1007/s12517-021-06518-4
- [16] Keys T A, Scott D T. Monitoring volumetric fluctuations in tropical lakes and reservoirs using satellite remote sensing[J]. *Lake and Reservoir Management*, 2018, 34(2):154-166.
- [17] Dka B, Hla B, Ebc D, *et al.* Estimating discharges for poorly gauged river basin using ensemble learning regression with satellite altimetry data and a hydrologic model[J]. *Advances in Space Research*, 2019, 68(2):607-618.
- [18] Rai A K, Gaurav K. Satellite altimeter to estimate discharge of the Ganga River[C]// EGU General Assembly 2021, 2021.
- [19] Jamro S, Naseer T, Zaidi A, *et al.* A comparative analysis of altimetry derived water levels with in-situ Gauge data on river Indus[C]// IGARSS 2019-2019 IEEE International Geo-science and Remote Sensing Symposium. IEEE, 2019.
- [20] Silva J S D, Calmant S, Seyler F, *et al.* Water levels in the Amazon basin derived from the ERS 2 and ENVISat radar altimetry missions[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2010, 114(10):2160-2181.
- [21] Cretaux J F, Jelinski W, Calmant S, *et al.* SOLS: a lake database to monitor in the Near Real Time water level and storage variations from remote sensing data[J]. *Advances in Space Research*, 2011, 47(9):1497-1507.
- [22] Cassandra N, Frappart Frédéric, Diepkilè Adama Telly, *et al.* Evolution of the performances of radar altimetry missions from ERS-2 to Sentinel-3A over the Inner Niger Delta[J]. *Remote Sensing*, 2018, 10(6):833.doi: 10.3390/rs10060833
- [23] 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[J]. *Hydrology & Earth System Sciences*, 2015, 19(10):4345-4364.
- [24] Kalman R E. A New approach To linear filtering and prediction problems[J]. *Journal of Basic Engineering*, 1960, 82D:35-45.
- [25] Coss S, Durand M, Yi Y, *et al.* Global river radar altimetry time series (GRRATS): new river elevation earth science data records for the hydrologic community[J]. *Earth System Science Data Discussions*, 2020, 12(1):137-150.
- [26] Allen G H, Pavelsky T. Characterizing worldwide patterns of fluvial geomorphology and hydrology with the Global River Widths from Landsat (GRWL) database[C]// American Geophysical Union, Fall Meeting, 2015(1): H41E-1360.
- [27] Allen G H, Pavelsky T M. Global extent of rivers and streams[J]. *Science*, 2018, 361(6402):585-587.
- [28] Hydrology Bureau of the Ministry of Water Resources of the People's Republic of China. Hydrology Yearbook of the People's Republic of China[M]. Beijing: Hydrology Bureau of the Ministry of Water Resources of the People's Republic of China, 2005-2018.[中华人民共和国水利部水文局. 中华人民共和国水文年鉴[M]. 北京:中华人民共和国水利部水文局, 2005-2018.]
- [29] Huang Q, Long D, Du M, *et al.* An improved approach to monitoring Brahmaputra River water levels using retracked altimetry data[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2018, 211:112-128.
- [30] Pekel J F, Cottam A, Gorelick N, *et al.* High-resolution mapping of global surface water and its long-term changes[J]. *Nature*, 2016, 540:418-422
- [31] Kittel C, Jiang L, Tttrup C, *et al.* Sentinel-3 radar altimetry for river monitoring-a catchment-scale evaluation of satellite water surface elevation from Sentinel-3A and Sentinel-3B[J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2020, 25:333-357.

- [32] Villadsen H, Deng X, Andersen O B, *et al.* Improved inland water levels from SAR altimetry using novel empirical and physical retracers[J]. *Journal of Hydrology*, 2016, 537: 234–247.
- [33] Gao Xiang, Pang Xiaoping, Ji Qing. Spatiotemporal variation of sea ice freeboard in the antarctic weddell sea based on CryoSat-2 altimeter data [J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2021, 46(1): 125–132. [高翔, 庞小平, 季青. 利用 CryoSat-2 测高数据研究南极威德尔海海冰出水高度时空变化[J]. *武汉大学学报·信息科学版*, 2021, 46(1): 125–132.]
- [34] Jin Xiang, Hui Li, Jiayang Zhao, *et. al.* Inland water level measurement from spaceborne laser altimetry: Validation and comparison of three missions over the Great Lakes and lower Mississippi River[J]. *Journal of Hydrology*, 2021. DOI:10.1016/j.jhydrol.2021.126312.
- [35] Sorkhabi O M, Asgari J, Amiri-Simkooei A. Wavelet decomposition and deep learning of altimetry waveform retracking for Lake Urmia water level survey [J]. *Marine Georesources & Geotechnology*, 2021: 1–11.
- [36] Bogning S, Frappart F, Paris A, *et al.* Hydro-climatology study of the Ogooué River basin using hydrological modeling and satellite altimetry[J]. *Advances in Space Research*, 2021: 672–690.

Evaluation of River Water Level Monitoring from Satellite Radar Altimetry Datasets over Chinese Rivers

Lei Xiao, Ke Linghong, Yong Bin, Zhang Jinshan, Cao Qianyi

(College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: The water surface level is essential for the assessment of fresh water resources, disaster prevention, and highly related to the understanding and response to climate change and its impact on water cycle. With the development of remote sensing technology, observation of water level based on satellite platforms provides an alternative way of river water level monitoring featured by automated, long-time, and low-cost river monitoring solution. The principle, characteristics and accuracy of satellite-based river observations are the basis for applications. In this paper, the characteristics and accuracy of three major satellite river water level datasets, Hydroweb, DAHITI, GRRATS are summarized verified with in-situ water level measurements from gauge stations in China. Taking water level time series derived from the Jason mission, we evaluated the accuracy of different water level retrieval algorithms employed by the three datasets. The global accuracy of the Hydroweb dataset (average RMSE 0.70 m) is higher than the other two sources (average RMSE 1.29 m and 3.21 m for the DAHITI and GRRATS), and that is owing to the usage of a large number of Sentinel-3 observations which are characterized by smaller footprints and Synthetic Aperture Radar (SAR) and the on-board tracking system in open-loop. The accuracy of river water level derived from the Sentinel-3 mission (with average RMSE of 0.51 m) is significantly higher than that of ENVISAT (with average RMSE 3.34 m) and Jason (with average RMSE 1.69 m for Hydroweb and 2.96 m for GRRATS). Generally, the three datasets can capture reliable river water level changes at some stations (with $RMSE < 1.2$ m and $R^2 > 0.8$), but their performances vary considerably among different stations (with $RMSE > 2$ m for majority of the evaluated stations). Among all the stations, the Gaocun virtual station from the DAHITI dataset shows the highest accuracy (RMSE 0.22 m). In addition, the variation of river water level in dry and wet seasons and the small lakes, ponds and seasonal water around rivers pose significant influences on the accuracy of retrieved water level. This study provides guidance for future applications of relevant data sets, and also highlights the challenges of accurate water level retrieval over land surface conditions in China as well as the necessity of algorithm improvement in the future.

Key words: Stage of river; Radar altimetry; Altimetry data set; Accuracy evaluation