

雅鲁藏布江干流河宽时空变化遥感监测 及水文气象响应

徐嘉慧¹, 王世东¹, 宋利娟¹, 张大鹏¹, 宋春桥²

(1. 河南理工大学测绘与国土信息工程学院, 焦作 454000;

2. 中国科学院南京地理与湖泊研究所, 南京 210008)

摘要: 河宽作为河流形态的基本参数之一, 对于理解地表水过程和河流生态系统功能至关重要。雅鲁藏布江是全球具有典型地域特色的高原河流, 也是重要的国际河流。雅鲁藏布江地处偏远山区, 其地形环境条件恶劣、测量站分布稀疏, 严重限制了对雅鲁藏布江河流水文动态变化特征的科学理解。遥感卫星通过提供多时相、长时序观测影像数据, 使雅鲁藏布江河宽长期动态变化监测和水文特征分析成为可能。本文基于全球地表水变化数据集 (GLAD), 利用水体边界水淹频率阈值分割法重建了2000—2020年雅鲁藏布江逐月完整的水域范围, 进而提取和解析雅鲁藏布江干流河宽的时空变化特征。研究结果表明: 2000—2020年期间, 受年内气温和降水季节性差异等影响, 雅鲁藏布江干流河宽呈现出显著的季节性变化特征, 中游河段的季节性变幅最大(453.6 m), 下游河段季节性变幅最小(90.3 m); 雅鲁藏布江干流河道受气候和地形的影响, 空间分布差异大, 河道可观察到的最窄处约30 m (即 Landsat 卫星影像的最小空间分辨率), 中下游辫状河流有效河宽最大可达6000 m, 全程约50%长度的河道宽度小于150 m, 仅2.0%的河道宽度大于2000 m; 2000—2020年雅鲁藏布江干流河道的年平均河宽呈现先下降、后上升、再下降的变化特征, 雅鲁藏布江全程平均河宽与降水、气温之间呈现较显著的正相关关系 (通过 $p < 0.01$ 的显著性检验), 相关性系数 R 值均为0.7。此外, 本文利用10 m分辨率 Sentinel-2 影像数据目视解译提取的河宽信息与本文基于GLAD重建的河宽结果进行对比验证, 两者的相对偏差低于2%, 表明本文雅鲁藏布江河宽的提取结果总体可信。

关键词: 河宽; 多时相遥感监测; 季节性变化; 水文气象; 雅鲁藏布江

DOI: 10.11821/dlxb202211011

1 引言

河流作为地表径流主要载体, 在水循环中发挥着不可或缺的作用, 也是人类生活和生态系统的主要水源^[1]。河流水资源在调节区域气候、平衡生态系统和保护生物多样性等

收稿日期: 2022-02-18; 修订日期: 2022-09-28

基金项目: 中国科学院战略性先导科技专项(XDA23100102); 第二次青藏高原综合科学考察研究(2019QZKK0202); 国家自然科学基金项目(41971403); 国家地球系统科学数据中心湖泊一流域分中心和中国科学院“十四五”网络安全和信息化专项(WX145XQ06-04/CAS-WX2021SF-0306) [Foundation: The Strategic Priority Research Program of the Chinese Academy of Sciences, No.XDA23100102; The Second Tibetan Plateau Scientific Expedition and Research, No.2019QZKK0202; National Natural Science Foundation of China, No.41971403; Lake-Watershed Science Data Center, National Earth System Science Data Center and the 14th Five-year Network Security and Informatization Plan of Chinese Academy of Sciences, No.WX145XQ06-04/CAS-WX2021SF-0306]

作者简介: 徐嘉慧(1996-), 女, 江苏徐州人, 硕士生, 主要从事气候变化与河流水文响应关系研究。

E-mail: jiahui_x1996@163.com

通讯作者: 宋春桥(1986-), 男, 湖南衡阳人, 博士, 研究员, 主要从事湖泊一流域水文遥感、资源环境遥感与全球变化等研究。E-mail: cqsong@niglas.ac.cn

方面发挥着至关重要的作用,也广泛应用于水电、灌溉和耕作等人类相关活动^[2]。因此,河流的水文特征(水域范围、河宽、水位和径流量等)的变化越来越受到关注^[3]。河宽是河流水文、水力模拟的基本参数之一^[4-5],精细监测其动态变化对水资源评估及与水相关的灾害(如洪涝、干旱等)预防至关重要。但是,水文站在人口稀少的偏远地区分布稀疏且不均匀,并且大部分只提供基于点位的河流水文观测,仅利用传统的观测手段很难掌握大型河流的河宽及其变化信息。在这种情况下,卫星遥感通过提供多时相观测影像数据,为大尺度流域范围内河流的监测提供了有效而直接的方法,近年来受到了广泛关注^[6],特别是对于缺少实测数据的偏远山区。

Yamazaki等^[7]利用航天飞机雷达地形测绘任务(Shuttle Radar Topography Mission, SRTM)、水体数据(Water Body Data, SWBD)和地形数据(Hydrologic Data and Maps Based on Shuttle Elevation Derivatives at Multiple Scales, HydroSHEDS)通过河流流向数据开发了全球大型河宽数据集(Global Width Database for Large Rivers, GWD-LR);Allen等利用Landsat影像及RivWidth工具通过多年Landsat无云影像计算平均流量(近似估计月份)下河流的宽度,也分别生产了北美河宽数据集(North American River Width, NARWidth)^[8]和全球河流河宽数据产品(Global River Widths from Landsat, GRWL)^[9];此外,Isikdogan等^[10]通过直接从3年的陆地卫星影像合成估算河流中心线和宽度,开发了北美河流的河宽数据,其精度与NARWidth数据集相当。

然而,近年来气候变化和人类活动影响显著改变了全球水循环过程和河流水文规律。比如,全球变暖加速了极地冰川的融化从而带来更多降水,进一步加剧了河流河宽的变化^[11]。河宽的动态变化是区域水资源演变特征的一个重要信号,反映了河流水文形态特征的季节性波动或趋势变化。但现有的河宽数据集大多是在一定的气候或水文条件下提取的遥感观测静态数据。例如,GWD-LR数据集使用SWBD数据作为基线数据,仅覆盖河宽大于300 m的河道,且提供的是SRTM数据采集期间的河宽,NARWidth和GRWL数据集也均是由多年Landsat陆地卫星图像合成无云水体得到的河流平均宽度。目前,由于遥感影像具有良好的时空分辨率,可以更全面地估算不同气候或水文条件下的河宽动态变化。河流宽度的动态变化可以更加深入了解气候、人为活动及河流地貌变化的影响,并且可以为河流形态动力学和水力模拟研究提供重要参考^[12]。然而,目前对雅鲁藏布江河宽的时空动态变化特征的了解十分有限。

雅鲁藏布江自西向东横贯青藏高原南部,河流流量在全球排名第五。其水能蕴藏量丰富,不仅是中国西南地区重要的水资源战略储备,也为不丹、印度与孟加拉等下游国家的发展提供了重要的水资源保障^[13]。雅鲁藏布江水文系统对气候变化响应非常敏感,河道中分布着大量辫状河段和亚稳定河滩州岛,但缺少详细的水文和水力要素信息^[14]。目前,对雅鲁藏布江的河宽动态变化信息掌握仍不完整。开展雅鲁藏布江长时序水文特征遥感监测对于水资源合理配置、水生态环境评估具有重要意义^[15-16]。因此,本文利用遥感影像数据重建雅鲁藏布江干流水域范围,分析其河宽动态变化特征,结合区域水文、气象等因素,加深对实测资料匮乏区域河流的水文循环过程的认识,为水资源合理配置提供有价值的科学信息。

2 研究区概况与数据来源

2.1 研究区概况

雅鲁藏布江(28°00'N~31°16'N, 82°00'E~97°07'E)发源于青藏高原西南部的喜马拉雅山脉北麓,中国境内长度达2057 km,流域面积约为 2.6×10^5 km²,雅鲁藏布江平均海

拔在 4100 m 以上^[17], 是世界上海拔最高的大型河流之一 (图 1)。依据流域自然条件、河谷形态, 雅鲁藏布江干流分为上、中和下游 3 段。干流从杰马央宗冰川的末端至里孜为雅鲁藏布江上游段; 里孜至米林县派镇段划为中游段; 从米林县派镇绕过喜马拉雅山脉最东端的南迦巴瓦峰转向南流至出境处为下游段^[18]。研究区气候复杂, 自西向东跨越半干旱、半湿润和亚热带湿润气候地区, 受喜马拉雅山脉复杂地形与印度洋暖湿气流多重交互作用, 流域内降水空间分布差异大^[19-20]; 自流域上游至下游逐渐增多, 根据 1978—2008 年期间资料记录, 河源及高海拔地区平均年降水约 280 mm, 中下游地带年降水可达 5000 mm^[21]。

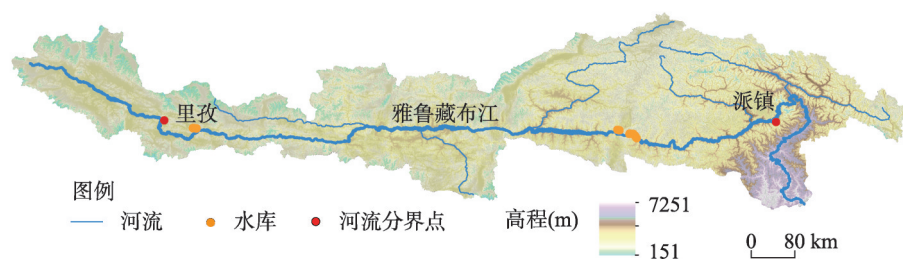


图 1 雅鲁藏布江流域概况

Fig. 1 Overview of the Yarlung Zangbo River Basin

2.2 全球地表水变化数据集

全球地表水变化数据集 (Global Land Analysis and Discovery, GLAD, <https://www.glad.umd.edu/dataset/global-surface-water-dynamics>) 是由 Pickens 等^[22]基于 Landsat-5 TM、Landsat-7 ETM+ 和 Landsat-8 OLI 数据获得的 1999—2019 年 (目前已更新至 2020 年) 历年全球月度水体范围, 数据集的空间分辨率为 30 m。GLAD 地表水数据集是基于谷歌地球引擎 (Google Earth Engine, GEE, <https://earthengine.com>) 使用超过 300 万景 Landsat 影像利用分类树模型^[23]把所有影像上的每个像素分为陆地、水、云、阴影和冰雪等, 根据每个月对给定像素的陆地和水体观测值进行百分比来衡量, 汇总得到每月水淹频率。根据数据产品说明文档显示: 该数据缺失率小于 5%, 人工解译分类程度小于 1%, 该月度数据层的生产者精度 (PA)、用户精度 (UA) 分别为 $(96.0 \pm 1.2)\%$ 和 $(93.7 \pm 1.5)\%$, 具有高精度、长时间覆盖和连续观测的特点^[24]。本文结合 Google Earth 历史影像和 GLAD 地表水数据集, 剔除了雅鲁藏布江周边的小型湖泊、农田和细小水体等, 获得了 2000—2020 年间雅鲁藏布江最大水体边界并借助其进行掩膜约束, 得到雅鲁藏布江 2000—2020 年的逐月水域范围。

2.3 气象数据

本文从中国气象科学数据共享服务网 (<http://cdc.cma.gov.cn>) 获得了 2000—2020 年中国地面气温降水月值 $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ 格点气候资料数据集 (SURF_CLI_CHN_PRE_DAY_GRID_0.5), 数据集通过了严格的质量控制^[25]。本文选取的雅鲁藏布江流域的气象数据主要用于分析雅鲁藏布江河宽对气温和降水的响应关系。

3 研究方法

通过遥感手段可以获取多时相河流水文信息, 由于光学遥感影像存在云雪覆盖, 部分被遮挡的地物信息无法获取。例如, 在 Landsat ETM+ 中, 全球平均约 35% 的陆地表面

被云层覆盖^[26]。而且，2003年5月Landsat-7 ETM+机载扫描行校正器（SLC）故障，使得此后获取的影像出现了数据条带缺失，也很难获取完整的影像数据。目前，通过使用无云影像或组合一段时间内获取的多时相影像生成无云合成影像，可以部分克服云污染问题^[27-29]。尽管进行了图像合成，但全球月度水体分布图的平均云污染率仍然较高^[30]。因此，数据的可用性受到限制，这对后续分析产生负面影响。鉴于地表水体是高度动态变化的，利用水体的时空依赖性可以重建缺失部分的水分类图。通过遥感手段获取雅鲁藏布江完整水域范围是准确估算河宽动态变化的关键。首先对GLAD水体数据集掩膜处理获取雅鲁藏布江干流月度数据；其次对受云污染及其他因素导致河道缺失部分利用水体边界像元的水淹频率阈值分割进行缺失水体重建；最后基于重建后多时相完整的水域估算雅鲁藏布江干流河宽，图2展示了该方法的工作流程图。

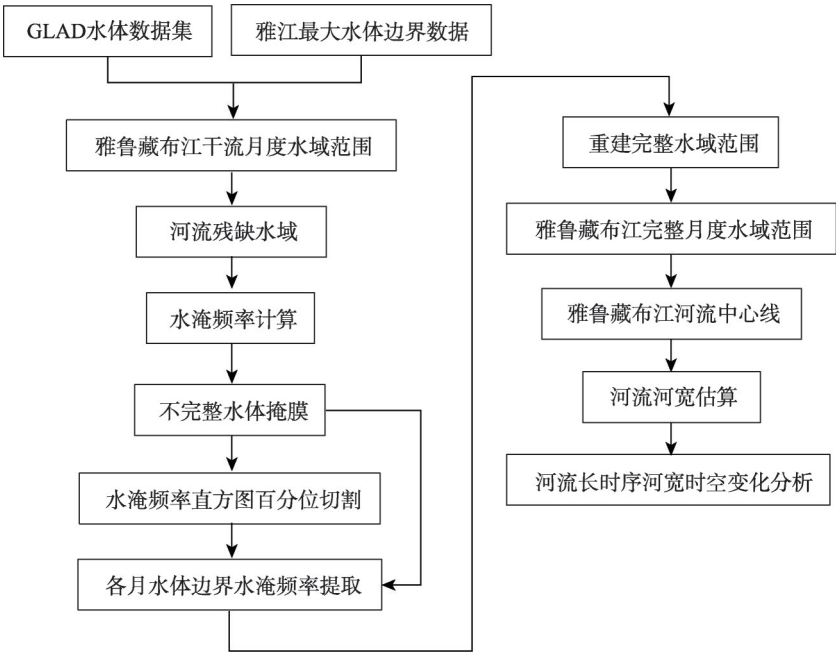


图2 雅鲁藏布江河宽提取流程

Fig. 2 Flow chart of river width extraction of the Yarlung Zangbo River

3.1 雅鲁藏布江初始逐月水域范围生成

本文在确定了雅鲁藏布江干流的空间位置后，进一步结合高分辨Google Earth历史影像和GLAD地表水数据集进行严格的人工检查校正，剔除了雅鲁藏布江周边的小型湖泊、农田和细小水体等非河流干流水体，获得雅鲁藏布江干流最大水体边界数据，并以此边界对GLAD月度地表水数据集进行掩膜，初步生成2000—2020年雅鲁藏布江干流逐月水域范围。

3.2 雅鲁藏布江缺失水体重建

初步生成的雅鲁藏布江干流水域范围受到传感器故障和观测天气条件的影响，提取结果并不完整，数据的可用性有限。直接使用原始数据严重影响河宽时空变化分析结果的精确性。因此，必须对这些明显的不完整区域进行目视判读检查、人工编辑校正和质量控制。由于雅鲁藏布江水域较为宽阔，手动编辑多年的残缺水域耗时长，且人工判读

误差大。因此采用基于水体边界像元的水淹频率阈值分割法,可以较为准确且快速地重建河流完整水域范围。

河流水域范围与水体的季节性密切相关,由于水体出现频率的差异,不同时期河流水域范围变幅较大。水淹频率(Water Occurrence, WO)表示2000—2020年雅鲁藏布江干流内河道被水体淹没的次数占总观测次数的比例。河道内水淹频率的变化一般是连续的,从河道中心到河流边界逐渐降低,某一像元在一定时间范围内的水淹频率可以通过式(1)计算:

$$WO = \frac{WDC}{VOC} \quad (1)$$

式中:WDC(Water Detection Count)表示在一段时间内该像元是水体的次数;VOC(Valid Observation Count)表示对该像元在相应时间内进行有效观测的次数。

根据空间依赖原理^[31],一个像元的水淹频率值与其相邻像元的水淹频率值相关联,同一时段河流边界的水淹频率值是基本相似的。河流边界的水淹频率是小于河流中心的,对于残缺河段的每个无效像元,计算其邻域内的相邻有效像素水淹频率值,利用河流残缺河段的月度水体对该区域的水淹频率数据进行掩膜,得到残缺河段的水淹频率变化情况。此时残缺河段的水淹频率最小值即为河流边界的水淹频率,对于水淹频率等于或大于水体边界最小值的区域赋值为1视为水体像元,其余区域赋值为0视为陆地像元,从而得到雅鲁藏布江完整的月度水域范围(图3)。依照此方法对逐月缺失水体进行重建,填充雅鲁藏布江月度数据中所有缺失像元;但对于少量时相缺失严重的河段,无法构建河段水淹频率直方图,我们根据该时相前后月份或相邻年份同月份的重建结果及河流多年水淹频率图进行人工编辑和修正。依照此方法对逐月缺失水体进行重建,填充雅鲁藏布江月度数据中所有缺失像元,最终得到了整个研究期间雅鲁藏布江面积月度时间序列。

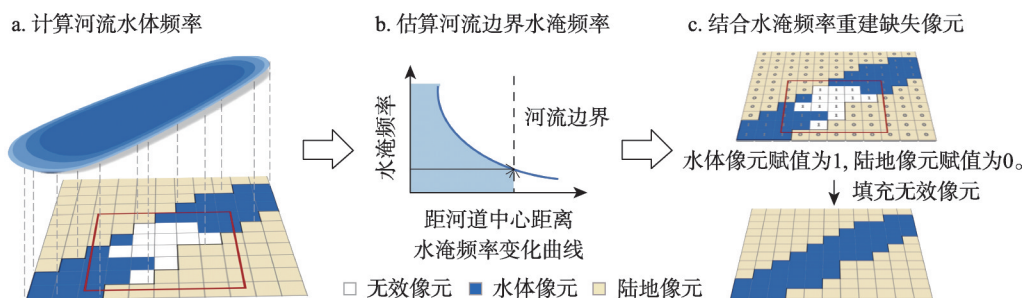


图3 结合河流边界水淹频率阈值分割重建河流缺失区域

Fig. 3 Reconstruction of river missing area with river boundary frequency threshold segmentation

3.3 估算雅鲁藏布江多时相河宽

基于河流边界水淹频率阈值分割法,重建得到雅鲁藏布江2000—2020年完整的月度水域范围,进一步从河流影像上数字化测得雅鲁藏布江水体面积变化情况。选取雅鲁藏布江2000—2020年的最大水体范围作为基础数据,对于分汊及辫状河段部分填充了河道内一些河滩州岛,多通道河流聚合为一条河流,在此基础上通过ArcGIS 10.6提取雅鲁藏布江河流中心线。通过计算给定的河流区域然后除以适当的河流长度,是河流断面上测量河流宽度的一种有效方法^[32-33]。中国境内雅鲁藏布江长达2057 km,为了获得较为精确的河宽结果,将雅鲁藏布江主干河段以1 km等间距进行河道断面分割。将雅鲁藏布江主干水体面积(A)除以河段长度(L),分段计算得到雅鲁藏布江河宽(W),如式(2):

$$W = \frac{A}{L} \quad (2)$$

3.4 精度评定

为了验证基于河流边界水淹频率阈值分割法得到雅鲁藏布江重建后水域范围的数据精度,通过目视解译10 m分辨率Sentinel-2影像提取的河流水体范围作为地面“真实”对比数据^[34-35]。由分类图的交叉对照样本数和参考数据组成的混淆矩阵验证重建后雅鲁藏布江水域分类的准确性^[36]。本文选取4个归一化系数进行水体重建结果进行精度评估,分别是生产者精度(PA)、总体分类精度(OA)、用户精度(UA)和Kappa系数。

4 结果与分析

4.1 雅鲁藏布江水域遥感重建结果及评价

基于河流边界水淹频率阈值分割法,重建得到了雅鲁藏布江缺失区域的水体范围(图4),无论是在丰水期(6—10月)还是在枯水期(11—次年5月),该方法均可实现对受云污染或条带影响导致的缺失水体的填补。

为了评估雅鲁藏布江水域范围重建的可靠性,选取了逐月提取完整的河段,随机对一些时段结果利用其相邻年份同月份数据或者相邻月份数据插值,并与原数据结果进行比较,结果表明:插值得到的水域范围与本文基于GLAD数据集提取的水域范围相对偏差约为0.6%~8.9%,说明利用插值方法可以判断不同时段河流面积的变化情况,对大范围缺失数据进行补充。

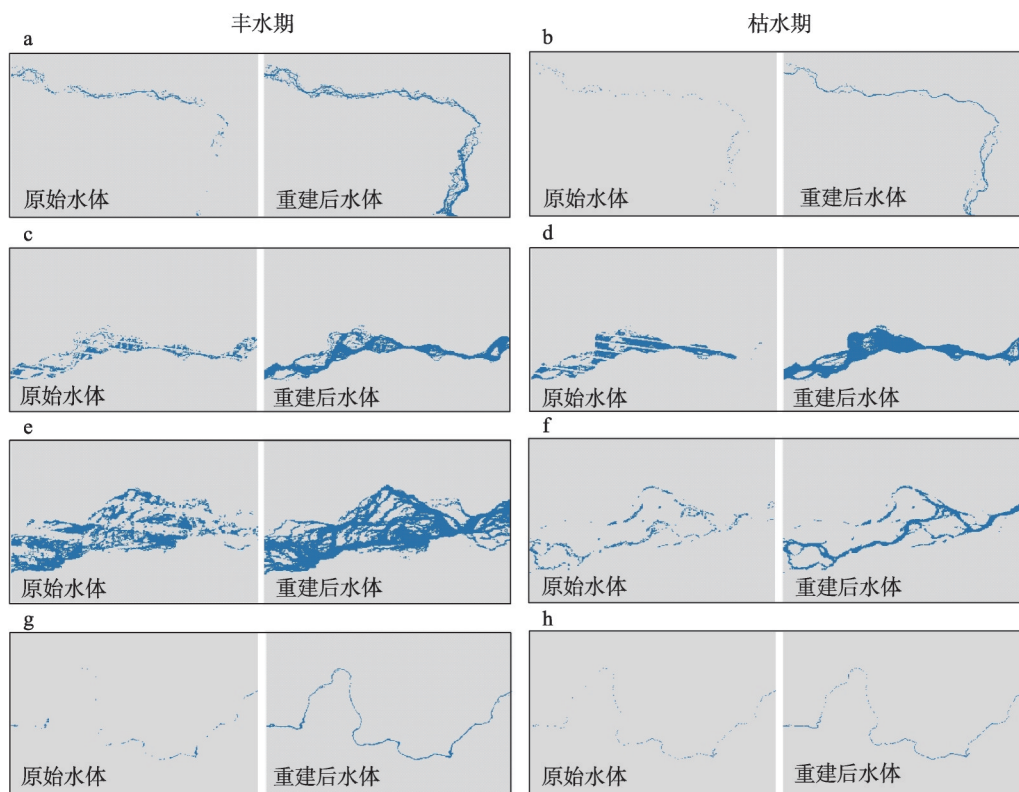


图4 雅鲁藏布江不同区域残缺水域重建结果

Fig. 4 Reconstruction results of incomplete water body of the Yarlung Zangbo River

并在雅鲁藏布江主干上生成 1000 个随机样本点，利用 Sentinel-2 人工解译结果（2019 年 3 月、7 月和 10 月的月度数据）对水体重建结果进行精度验证（表 1）。不同时段的重建水体分类的 PA、OA 和 UA 值均在 82.0% 以上，3 个时段水体重建结果的 Kappa 系数均在 0.8 以上，水体重建结果的偏差主要发生在辫状河流的细碎支流处。评价结果表明，重建后雅鲁藏布江水域范围结果可以用于分析河宽的时空动态特征。

表 1 重建水体混淆矩阵精度评价

Tab. 1 Accuracy evaluation of the confusion matrix applied to the reconstructed water body				
日期	PA(%)	OA(%)	UA(%)	Kappa 系数
2019 年 3 月	86.9	82.2	82.5	0.9
2019 年 7 月	82.6	85.0	84.2	0.8
2019 年 10 月	89.0	88.4	88.2	0.9

4.2 雅鲁藏布江河宽时空变化分析

计算得到 2000—2020 年雅鲁藏布江上中下游的平均河宽变化情况（图 5），2000—2020 年期间，雅鲁藏布江干流的平均河流宽度为增加态势，增长率为 2.5 m/a，雅鲁藏布江全程平均河宽呈现先下降后上升再下降的趋势，上流河宽年均变化较为显著。2000—2020 年间，雅鲁藏布江上、中、下游的河宽分别在 120.5~472.9 m、173.9~872.6 m 和 84.0~256.6 m 之间波动，多年平均河宽分别约为 243.0 m、463.6 m 和 180.0 m。雅鲁藏布江的河宽年内季节性变化显著，上中下游年均季节性变化幅度分别为 190.1 m，453.6 m 和 90.3 m，中游的季节变幅最大，下游的季节变幅最小，说明中游较宽的河段河宽绝对值变化较大（图 5b）。

根据不同时期（季节或年份）雅鲁藏布江干流不同空间位置的河宽信息，比较分析雅鲁藏布江河宽变化空间上特点和规律发现，受地形地势和气候的影响，雅鲁藏布江干流上河宽变化存在空间差异。受限于 Landsat 卫星分辨率（30 m×30 m），雅鲁藏布江干流可观察到河道最窄处为 30m。雅鲁藏布江约 50% 以上的河道宽度小于 150 m，仅 2.0% 的河道宽度大于 2000 m（图 6）。相对于地形地势和气候对河宽变化的影响，雅鲁藏布江干流河宽变化受支流汇合口的影响较小，通过参考高分辨率 Google Earth 影像在汇流处上下河段河宽变化没有显著差异。

根据文献资料记载，雅鲁藏布江中游区域发育典型的风沙地貌^[37]，地势相对平缓，泥沙存储量大，河流流速较为缓慢，河道中水流不断交汇和分汊，发育着大量辫状河

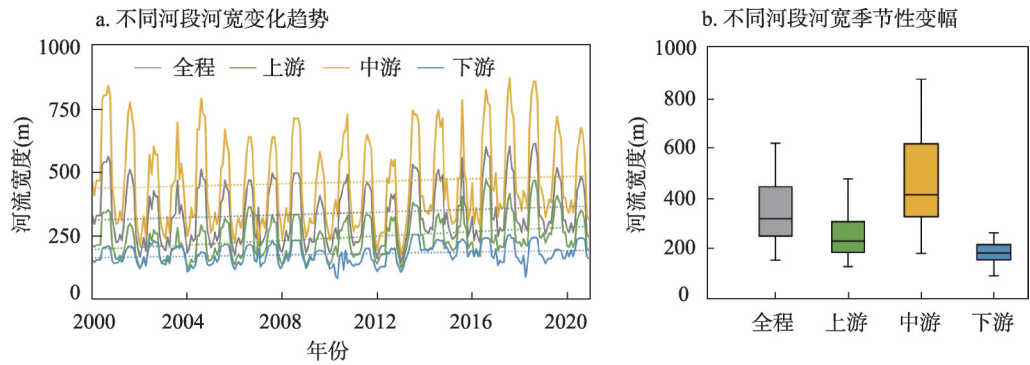


图 5 2000—2020 年雅鲁藏布江河宽变化

Fig. 5 Variations of river width of the Yarlung Zangbo River from 2000 to 2020

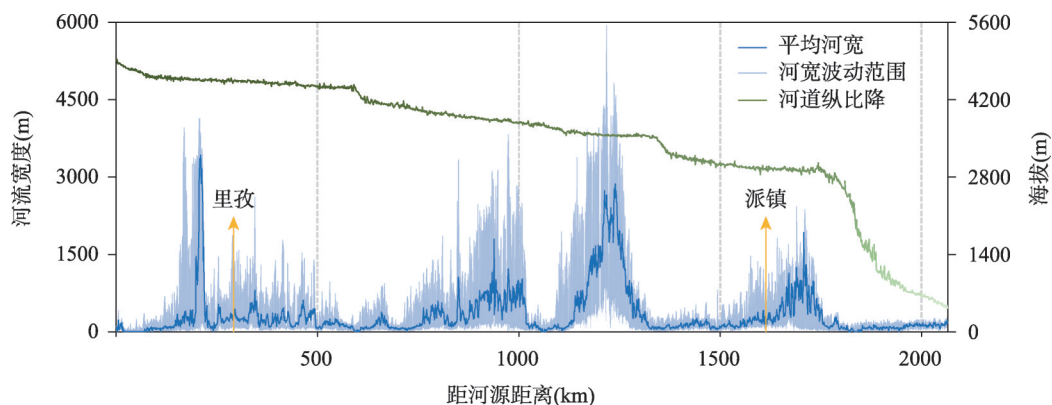


图6 雅鲁藏布江流向方向的河宽变化与河道纵比降

Fig. 6 Variation in river width and longitudinal gradient of the Yarlung Zangbo River

流，河道宽浅，水位变化明显，河岸抗冲性差^[38]。因此，2000—2020年以雅鲁藏布江的最大水域数据为边界，利用GSW (Global Surface Water) 数据集^[39]中变化强度数据 (Water Occurrence Change Intensity, OCI) 对自1984年以来雅鲁藏布江中游河谷地区辫状河流的形态变化特征进行量化发现：辫状河流部分有21.9%的水域未发生显著调整，约1.7%的水域消失，新增1.1%的水域，河谷地区辫状河流的平均有效河宽约1696.3 m，变幅为2971.8 m (最大值为3306.3 m，最小值为388.4 m)，说明辫状河流的有效河宽季节性变化较大；下游河道绕过喜马拉雅山脉最东端的南迦巴瓦峰转向南流，大部分河道位于山谷深处，水流湍急且河道狭窄，受地形影响河宽季节性变化也较小。雅鲁藏布江不同河段在丰水期和枯水期的河流水域范围存在差异，提取的有效河宽也可以清晰地反映出不同河段河宽随时间的变化特征 (图7)。

5 讨论

5.1 雅鲁藏布江河宽遥感重建结果及评价

雅鲁藏布江位于偏远的山区，缺少实测河宽数据。为了评估本文估算河宽的准确性，利用更高空间分辨率的Sentinel-2获取雅鲁藏布江部分河段无云遥感影像，通过人工解译获得雅鲁藏布江部分河段河宽结果 (图8)。利用Google Earth测距工具，测得雅鲁藏布江主干上3处河段不同时期的河流宽度，并与本文提取结果进行比较 (表2)，结果表明：由于Sentinel-2数据的空间分辨率高，估算的雅鲁藏布江河宽相对于本文基于GLAD数据集估算的河宽结果偏大，但不同时段河宽变化规律是一致的，相对偏差均小于2%，说明本文得到的雅鲁藏布江河宽结果是总体可靠的。

5.2 雅鲁藏布江河宽动态变化的水文气象响应

已有研究表明，降水和气温是影响河流水文特征的主要因素^[40-41]。雅鲁藏布江流域位于青藏高原南部，具有独特的高原气候，是气候变化的敏感区^[42]。流域内气候在空间上和季节性特征差异明显，河流不同时期水域范围变化大，河宽变化剧烈。雅鲁藏布江河宽的动态变化受到气温和降水的共同作用^[43]，本文选取雅鲁藏布江流域2000—2020年的气象观测资料进行分析，对雅鲁藏布江上中下游不同区域的平均河宽和气候因素 (降水和温度) 进行皮尔逊相关性分析 (图9)。雅鲁藏布江全程平均河宽与降水、气温之间呈

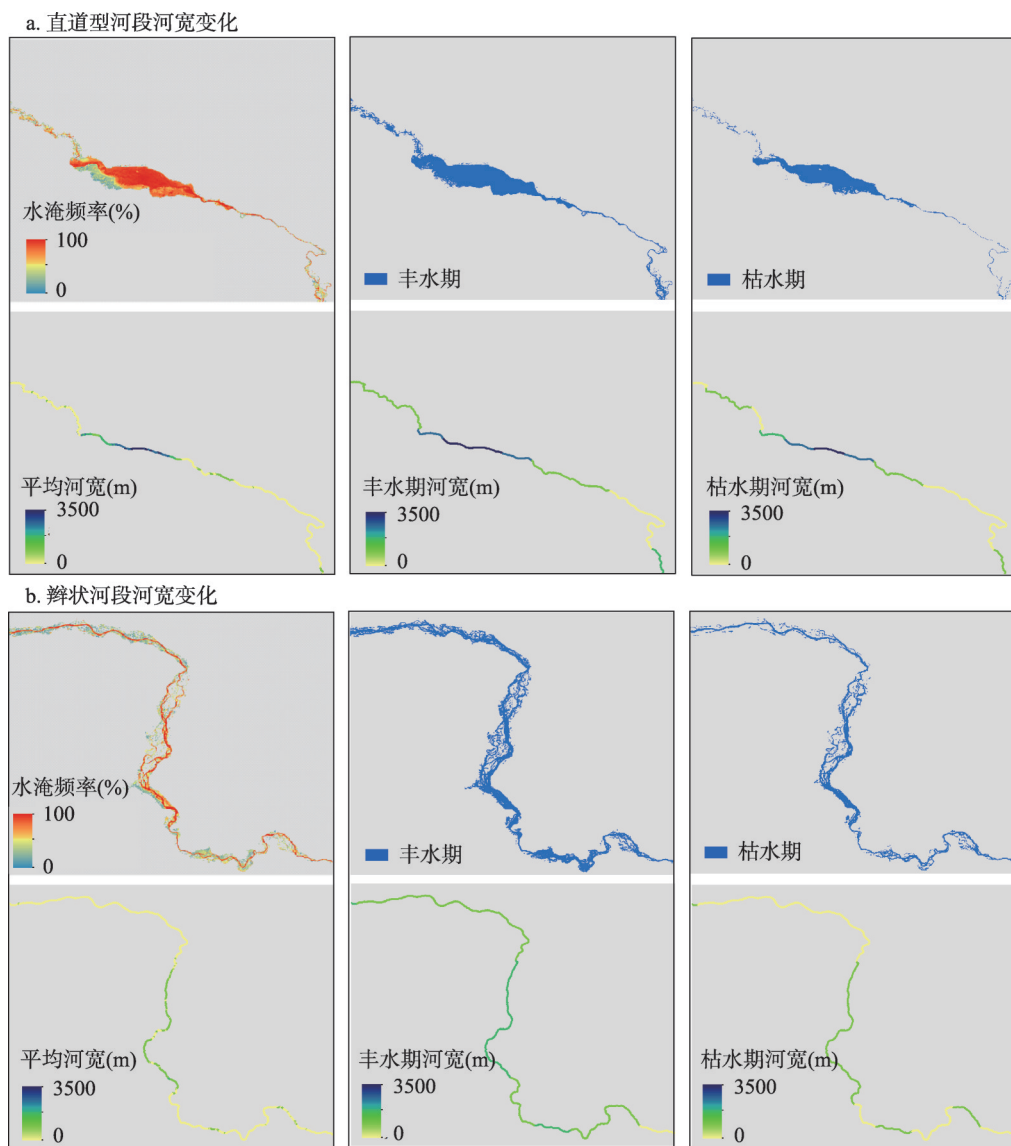


图7 雅鲁藏布江不同河段河宽动态变化

Fig. 7 Dynamic changes of river width in different reaches of the Yarlung Zangbo River

现非常显著的正相关关系, 相关性系数 R 值均为0.7, 且通过了0.01的置信度检验。其中雅鲁藏布江中游河段平均河宽最宽, 中游河宽变化和降水气温的拟合关系最高, R 值均为0.7, 上游、下游降水和河宽的相关性相对较弱, R 值均为0.5。

2000—2020年雅鲁藏布江河宽呈现明显的周期性和季节性变化, 这与降水气温的变化是相似的(图10)。2000—2020年雅鲁藏布江流域平均气温为 1.4°C , 年降水量在408.2~607.7 mm之间波动, 多年平均降水为486.7 mm, 高降水一般对应着河宽的快速增加。2000—2020年雅鲁藏布江流域气候变得更加湿润。全流域年降水量呈增加趋势, 年降水量的增加趋势主要是由于7—9月的丰水期降水量增加, 在此期间降水量约占年降水量的47%以上。不同区域的降水趋势在空间上存在异质性, 上中下游的多年平均降水量分别约为254.5 mm、484.3 mm和845.9 mm。雅鲁藏布江中游和下游地区年降水量呈增

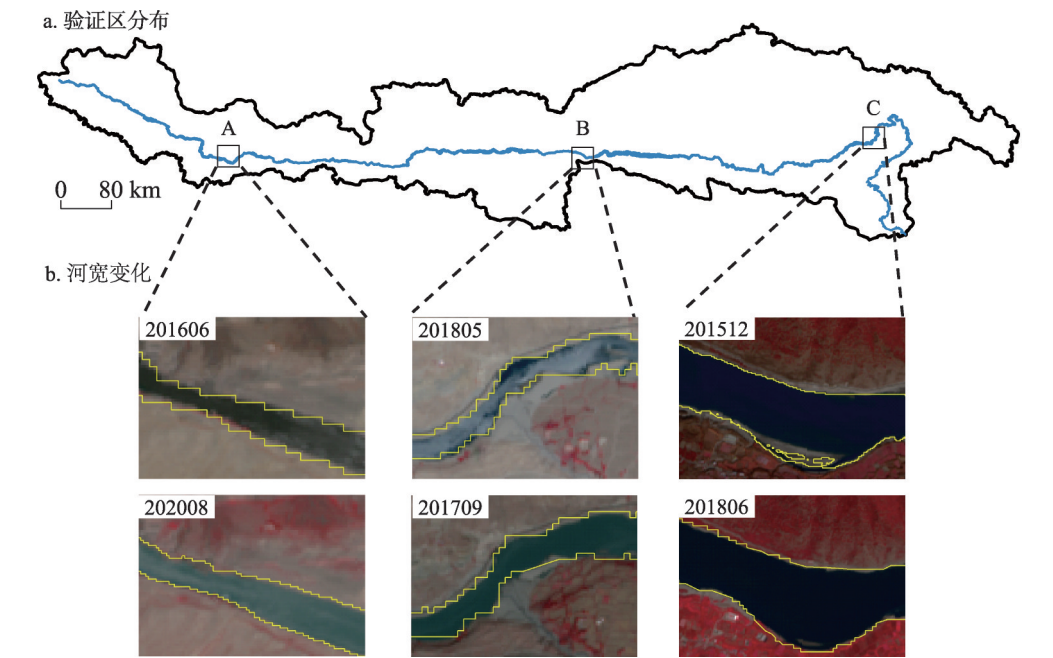


图8 雅鲁藏布江不同区域河宽变化

Fig. 8 Variation of river width in different parts of Yarlung Zangbo River

表2 河宽变化结果精度评价表

Tab. 2 Reconstruction results of incomplete water body of the Yarlung Zangbo River				
位置	时间	基于GLAD估算(m)	基于Sentinel-2估算河宽(m)	相对偏差(%)
A	2016年6月	119.6	121.4	1.5
	2020年8月	137.9	139.3	1.0
B	2017年9月	144.4	147.0	1.8
	2018年5月	131.5	131.8	0.2
C	2015年12月	452.0	453.2	0.3
	2018年6月	391.1	393.5	0.6

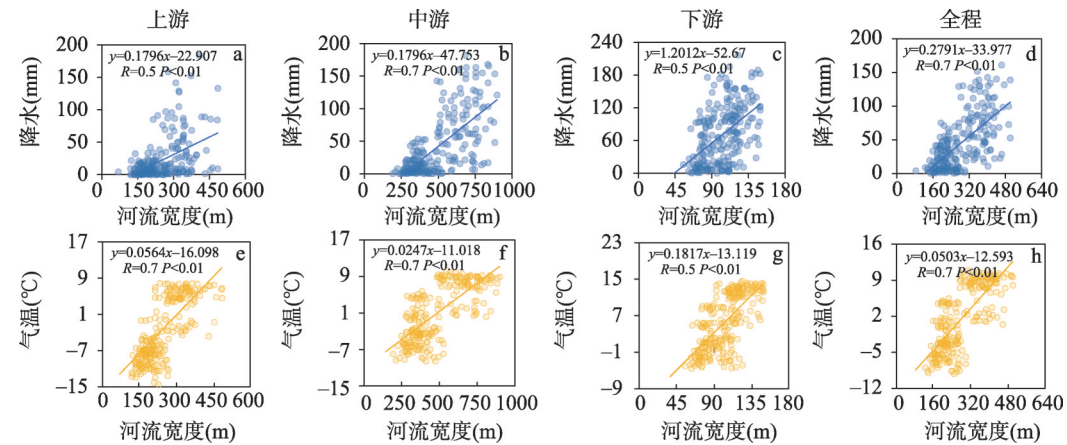


图9 降水气温与雅鲁藏布江不同区域河宽的相关关系

Fig. 9 Correlation between hydro-meteorological factors and river width in different parts of the Yarlung Zangbo River

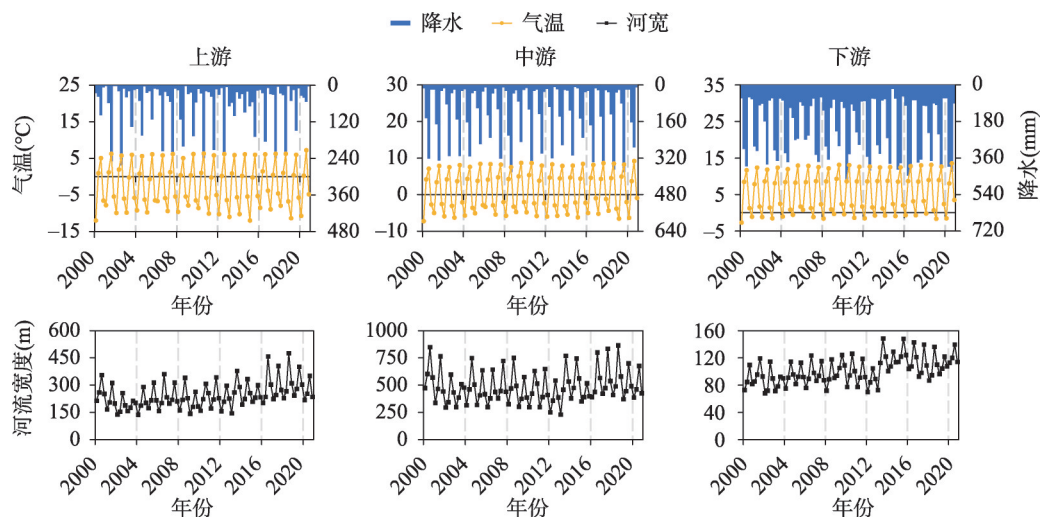


图 10 雅鲁藏布江上中下流域气温、降水和河宽时间序列

Fig. 10 Time series of temperature, precipitation and river width in the Yarlung Zangbo River Basin

加趋势，下游降水量变化幅度最大 5.5 mm/a ，中游变化幅度 0.4 mm/a ，但上游呈下降趋势，幅度约为 -0.7 mm/a 。雅鲁藏布江流域气温也在 2000—2020 年期间呈现变暖趋势。观察到流域所有区域的年平均温度都有上升趋势，气温幅度从 $0.01 \text{ }^{\circ}\text{C/a}$ （上游）变化到 $0.04 \text{ }^{\circ}\text{C/a}$ （下游）。中游和下游受季风气候的影响，气温上升趋势比上游更明显。2018—2020 年雅鲁藏布江河宽的减少可能与青藏高原南部降水量减少及气温增加导致的径流减少有关^[44]。此外，中游段也是藏区人民聚居的区域，河宽的减少也可能与人类生活及农业用水需求的增加有关^[45]。

2000—2020 年雅鲁藏布江干流平均河宽约为 339.9 m ，在 2013 年 1 月时最小 (146.8 m)，2018 年 8 月时达到最大 (615.3 m)。雅鲁藏布江干流的平均河宽在西南季风的影响下呈现显著的季节性变化，年内波动较为强烈，但整体相对稳定，河宽季节性变化幅度约为 297.4 m 。

受西南季风影响增强^[46]，降水增多补给河流，河流水量越来越大，在夏季风带来的持续降水和上游冰雪融水补给共同作用下，雅鲁藏布江水位上升，河宽增加^[47]。雅鲁藏布江流域降雨多集中于 6—8 月（图 11d），2000—2020 年平均降水在 $72.5 \sim 115.2 \text{ mm}$ 之间波动，雅鲁藏布江干流河宽在 7—10 月相对较宽，每年雅鲁藏布江河宽峰值出现的时间相对于都表现出一定程度的滞后，造成这种差异的原因可能是雅鲁藏布江河宽的变化是一个复杂的过程（包括土地表和地下径流、降水、蒸发和渗透），需要相对较长的时间才能达到峰值。在 3 月份也可以观察到雅鲁藏布江河宽较快的上升情况，主要是由于雅鲁藏布江河流径流受冰雪融水和地下水的共同影响，在早春 3 月雅鲁藏布江上游冰雪解冻，带来大量的水流，也是 3 月时雅鲁藏布江有更宽河道的原因（图 11a）。

除了气候变化对河流宽度的影响外，部分河段的河流宽度可能也受到其他因素的影响。比如，雅鲁藏布江沿线正在建设或规划的一些水电站，大坝的运行将改变水文状况，从而改变水文过程^[48]；此外，径流量不发生剧烈变化的条件下，泥沙减少会加剧横向侵蚀，从而增加河流宽度^[49]。雅鲁藏布江干流河宽有明显的上升趋势（约 2 m/a ），与该流域水电站数量的增长可能存在部分关联^[50]。

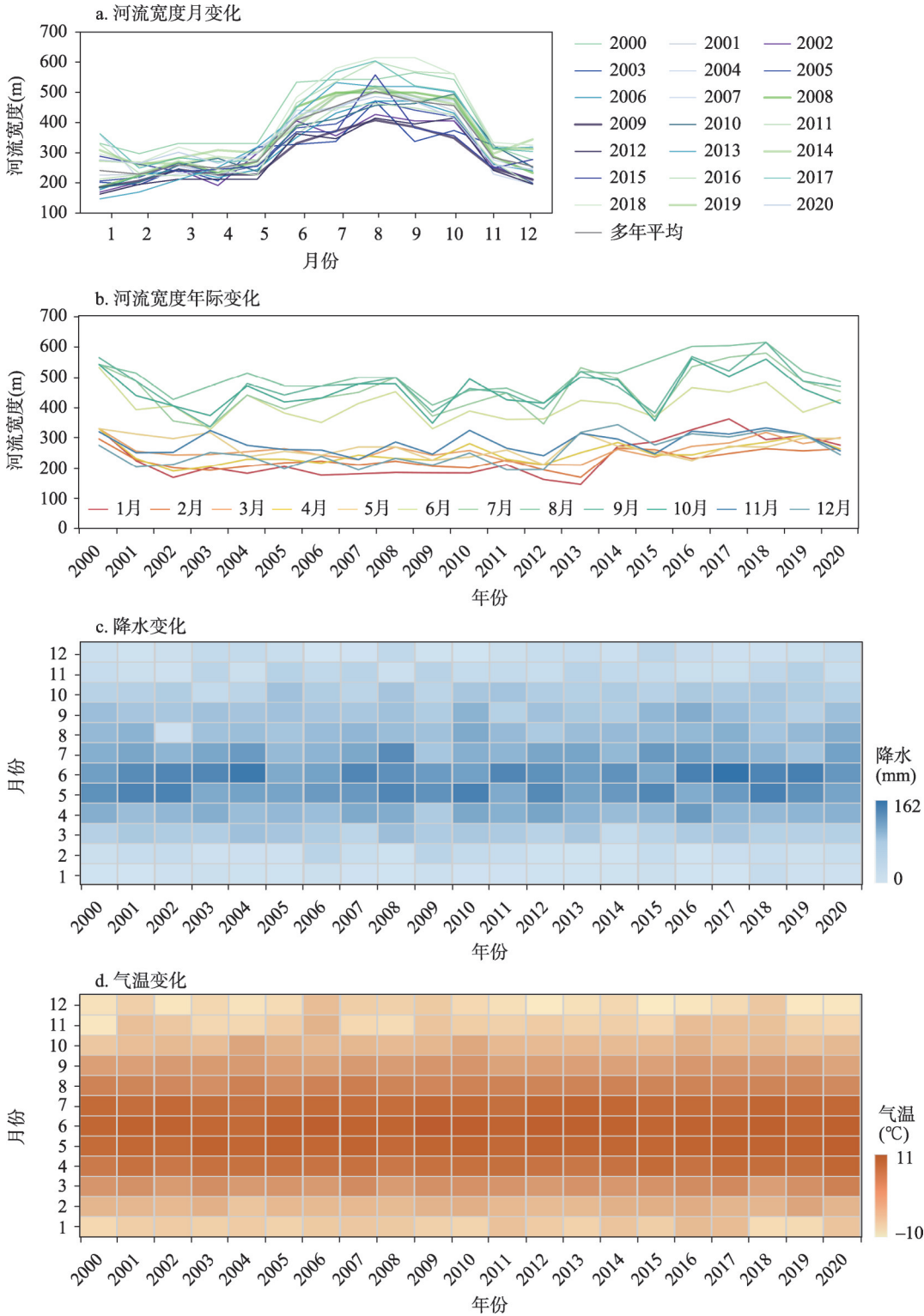


图 11 2000—2020 年雅鲁藏布江平均河宽与降水、气温的动态变化

Fig. 11 Dynamic change of average river width and precipitation/temperature in the Yarlung Zangbo River

6 结论

本文基于全球地表水数据集 GLAD 结合河流边界水淹频率阈值分割方法重建 2000—2020 年雅鲁藏布江间逐月完整水域范围,在此基础上提取并分析河宽的时空变化特征,结果表明:

(1) 雅鲁藏布江干流河宽空间变化差异大,河道可观察到最窄处约 30 m,雅鲁藏布江中游辫状河流区域有效河宽最大可达 5935.7 m,全程约 50% 以上的河道窄于 150 m,仅 2.0% 的河道宽于 2000 m。

(2) 2000—2020 年雅鲁藏布江干流河宽呈先下降、后上升、再下降的变化特征,年均变化率约为 2.3 m/a,上游、中游及下游的河宽年均变化率分别为 4.1 m/a、1.8 m/a 和 1.3 m/a。

(3) 受气温和降水的影响,雅鲁藏布江河宽年内变化呈显著的季节性差异特点,夏季河宽一般比冬季河宽宽,中游的季节变化幅度最大,下游的季节变化幅度最小,说明较宽的河段河流宽度绝对变化大,中游的河宽变化和气温降水的拟合关系最高,呈显著正相关,在 99% 的统计置信水平下,相关系数 R 值均约为 0.7。

雅鲁藏布江河宽的动态情况对其水力建模研究提供重要参考。但受制于全球地表水数据 GLAD 空间分辨率较低 (Landsat 空间分辨率 30 m),雅鲁藏布江一些狭窄河道的宽度可能无法检测或存在一定的偏差,例如雅鲁藏布江源头区域。后续研究可考虑采用更高分辨率的 Sentinel-2 影像和即将发射的 SWOT 卫星数据对雅鲁藏布江开展更高精度河宽的时空监测研究。

参考文献(References)

- [1] Wohl E. Rivers in the Critical Zone. *Developments in Earth Surface Processes*. Amsterdam: Elsevier, 2015, 19: 267-293.
- [2] Sichangi A W, Wang L, Yang K, et al. Estimating continental river basin discharges using multiple remote sensing data sets. *Remote Sensing of Environment*, 2016, 179: 36-53.
- [3] Durand M, Gleason C J, Garambois P A, et al. An intercomparison of remote sensing river discharge estimation algorithms from measurements of river height, width, and slope. *Water Resources Research*, 2016, 52(6): 4527-4549.
- [4] Shi Zhuolin, Huang Chang. Recent advances in remote sensing of river characteristics. *Progress in Geography*, 2020, 39(4): 670-684. [史卓琳, 黄昌. 河流水情要素遥感研究进展. *地理科学进展*, 2020, 39(4): 670-684.]
- [5] Zhang Siteng, Lu Xin, Lu Yao, et al. Tracking dynamic river networks in the Tibetan Plateau with high-resolution CubeSat imagery. *National Remote Sensing Bulletin*, 2021, 25(10): 2142-2152. [章斯腾, 陆欣, 陆瑶, 等. 青藏高原河流网络高分 CubeSat 遥感监测. *遥感学报*, 2021, 25(10): 2142-2152.]
- [6] Song C Q, 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.
- [7] Yamazaki D, O'Loughlin F, Trigg M A, et al. Development of the global width database for large rivers. *Water Resources Research*, 2014, 50(4): 3467-3480.
- [8] Allen G H, Pavelsky T M. Patterns of river width and surface area revealed by the satellite-derived North American river width data set. *Geophysical Research Letters*, 2015, 42(2): 395-402.
- [9] Allen G H, Pavelsky T M. Global extent of rivers and streams. *Science*, 2018, 361(6402): 585-588.
- [10] Isikdogan F, Bovik A, Passalacqua P. RivaMap: An automated river analysis and mapping engine. *Remote Sensing of Environment*, 2017, 202: 88-97.
- [11] Burn D H. Perceptions of flood risk: A case study of the Red River Flood of 1997. *Water Resources Research*, 1999, 35(11): 3451-3458.
- [12] Yang X, Pavelsky T M, Allen G H, et al. RivWidthCloud: An automated google earth engine algorithm for river width extraction from remotely sensed imagery. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2020, 17(2): 217-221.
- [13] Jiang Ke. Runoff composition of the Yarlung Zangbo River and its response to climate change [D]. Harbin: Harbin

- Institute of Technology, 2020. [江科. 雅鲁藏布江流域径流组成及其对气候变化的响应[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2020.]
- [14] Wang L, Yao T D, Chai C H, et al. TP-river: Monitoring and quantifying total river runoff from the Third Pole. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2021, 102(5): E948-E965.
- [15] Liu Jiyan, Kuang Wenhui, Zhang Zengxiang, et al. Spatiotemporal characteristics, patterns and causes of land use changes in China since the late 1980s. *Acta Geographica Sinica*, 2014, 69(1): 3-14. [刘纪远, 匡文慧, 张增祥, 等. 20世纪80年代末以来中国土地利用变化的基本特征与空间格局. *地理学报*, 2014, 69(1): 3-14.]
- [16] He Daming, Liu Changming, Feng Yan, et al. Progress and perspective of international river researches in China. *Acta Geographica Sinica*, 2014, 69(9): 1284-1294. [何大明, 刘昌明, 冯彦, 等. 中国国际河流研究进展及展望. *地理学报*, 2014, 69(9): 1284-1294.]
- [17] Zhang H, Zhang L L, Li J, et al. Monitoring the spatiotemporal terrestrial water storage changes in the Yarlung Zangbo River Basin by applying the P-LSA and EOF methods to GRACE data. *Science of the Total Environment*, 2020, 713: 136274. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2019.136274.
- [18] Zhang H, Zhang L, Li J, et al. Climate and hydrological change characteristics and applicability of GLDAS data in the Yarlung Zangbo River Basin, China. *Water*, 2018, 10(3): 254. DOI: 10.3390/w10030254.
- [19] Xue Pengfei, Yu Zhongbo, Gu Huanghe. Accuracy evaluation of GPM and TRMM remote sensing precipitation products in Yarlung Zangbo River Basin. *Water Resources and Power*, 2020, 38(11): 13-16. [薛鹏飞, 余钟波, 谷黄河. 雅鲁藏布江流域GPM和TRMM遥感降水产品精度评估. *水电能源科学*, 2020, 38(11): 13-16.]
- [20] Zhang Ru, Yong Bin, Zeng Suikang. Evaluation of GPM satellite precipitation products over China's mainland. *Yangtze River*, 2021, 52(5): 50-59. [张茹, 雍斌, 曾岁康. GPM卫星降水产品在中国大陆的精度评估. *人民长江*, 2021, 52(5): 50-59.]
- [21] Lu Yang, Yang Shengtian, Cai Mingyong, et al. The applicability analysis of TRMM precipitation data in the Yarlung Zangbo River Basin. *Journal of Natural Resources*, 2013, 28(8): 1414-1425. [吕洋, 杨胜天, 蔡明勇, 等. TRMM卫星降水数据在雅鲁藏布江流域的适用性分析. *自然资源学报*, 2013, 28(8): 1414-1425.]
- [22] Pickens A H, Hansen M C, Hancher M, et al. Mapping and sampling to characterize global inland water dynamics from 1999 to 2018 with full Landsat time-series. *Remote Sensing of Environment*, 2020, 243: 111792. DOI: 10.1016/j.rse.2020.111792.
- [23] Potapov P V, Turubanova S A, Tyukavina A, et al. Eastern Europe's forest cover dynamics from 1985 to 2012 quantified from the full Landsat archive. *Remote Sensing of Environment*, 2015, 159: 28-43.
- [24] Messenger M L, Lehner B, Cockburn C, et al. Global prevalence of non-perennial rivers and streams. *Nature*, 2021, 594 (7863): 391-397.
- [25] Liu Zhihong, McVicar T R, Niel V, et al. Introduction of the professional interpolation software for meteorology data: ANUSPLIN. *Meteorological Monthly*, 2008, 34(2): 92-100. [刘志红, McVicar T R, Niel V, 等. 专用气候数据空间插值软件ANUSPLIN及其应用. *气象*, 2008, 34(2): 92-100.]
- [26] Li X Y, Ling F, Cai X B, et al. Mapping water bodies under cloud cover using remotely sensed optical images and a spatiotemporal dependence model. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2021, 103: 102470. DOI: 10.1016/j.jag.2021.102470.
- [27] Yamazaki D, Trigg M A, Ikeshima D. Development of a global ~90 m water body map using multi-temporal Landsat images. *Remote Sensing of Environment*, 2015, 171: 337-351.
- [28] Feng M, Sexton J O, Channan S, et al. A global, high-resolution (30-m) inland water body dataset for 2000: First results of a topographic-spectral classification algorithm. *International Journal of Digital Earth*, 2016, 9(2): 113-133.
- [29] Tulbure M G, Broich M. Spatiotemporal dynamic of surface water bodies using Landsat time-series data from 1999 to 2011. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2013, 79: 44-52.
- [30] Ke L H, Xu J H, Fan C Y, et al. Remote sensing reconstruction of long-term water level and storage variations of a poorly-gauged river in the Tibetan Plateau. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 2022, 40: 101020. DOI: 10.1016/j.jeh.2022.101020.
- [31] Anselin L, Getis A. Spatial statistical analysis and geographic information systems. *The Annals of Regional Science*, 1992, 26(1): 19-33.
- [32] Smith L C, Isacks B L, Bloom A L, et al. Estimation of discharge from three braided rivers using synthetic aperture radar satellite imagery: Potential application to ungaged basins. *Water Resources Research*, 1996, 32(7): 2021-2034.
- [33] Kebede M G, Wang L, Li X P, et al. Remote sensing-based river discharge estimation for a small river flowing over the

- high mountain regions of the Tibetan Plateau. *International Journal of Remote Sensing*, 2020, 41(9): 3322-3345.
- [34] Tian H F, Li W, Wu M Q, et al. Dynamic monitoring of the largest freshwater lake in China using a new water index derived from high spatiotemporal resolution Sentinel-1A data. *Remote Sensing*, 2017, 9(6): 521. DOI: 10.3390/rs9060521.
- [35] Deng Y, Jiang W G, Tang Z H, et al. Spatio-Temporal change of lake water extent in Wuhan urban agglomeration based on Landsat images from 1987 to 2015. *Remote Sensing*, 2017, 9(3): 270. DOI: 10.3390/rs9030270.
- [36] Haas E M, Bartholomé E, Lambin E F, et al. Remotely sensed surface water extent as an indicator of short-term changes in ecohydrological processes in sub-Saharan Western Africa. *Remote Sensing of Environment*, 2011, 115(12): 3436-3445.
- [37] Zhou N, Li Q, Zhang C L, et al. Grain size characteristics of aeolian sands and their implications for the aeolian dynamics of dunefields within a river valley on the southern Tibet Plateau: A case study from the Yarlung Zangbo River valley. *CATENA*, 2021, 196: 104794. DOI: 10.1016/j.catena.2020.104794.
- [38] Li Zhi. Investigation on braided river geomorphology in Yarlung-Zangbo river [D]. Beijing: Tsinghua University, 2019. [李治. 雅鲁藏布江宽谷河段辫状河地貌特征与演变规律研究[D]. 北京: 清华大学, 2019.]
- [39] Pekel J F, Cottam A, Gorelick N, et al. High-resolution mapping of global surface water and its long-term changes. *Nature*, 2016, 540(7633): 418-422.
- [40] Ndehedehe C E, Awange J L, Agutu N O, et al. Changes in hydro-meteorological conditions over tropical West Africa (1980-2015) and links to global climate. *Global and Planetary Change*, 2018, 162: 321-341.
- [41] Reager J T, Thomas B F, Famiglietti J S. River basin flood potential inferred using GRACE gravity observations at several months lead time. *Nature Geoscience*, 2014, 7(8): 588-592.
- [42] Zhang G Q, Yao T D, Xie H J, et al. Response of Tibetan Plateau lakes to climate change: Trends, patterns, and mechanisms. *Earth-Science Reviews*, 2020, 208: 103269. DOI: 10.1016/j.earscirev.2020.103269.
- [43] Sun H, Su F G. Precipitation correction and reconstruction for streamflow simulation based on 262 rain gauges in the upper Brahmaputra of southern Tibetan Plateau. *Journal of Hydrology*, 2020, 590: 125484. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2020.125484.
- [44] Xuan W D, Xu Y P, Fu Q, et al. Hydrological responses to climate change in Yarlung Zangbo River Basin, Southwest China. *Journal of Hydrology*, 2021, 597: 125761. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2020.125761.
- [45] Yang Y C E, Wi S, Ray P A, et al. The future nexus of the Brahmaputra River Basin: Climate, water, energy and food trajectories. *Global Environmental Change*, 2016, 37: 16-30.
- [46] Zhan P F, Song C Q, Wang J D, et al. Recent abnormal hydrologic behavior of Tibetan lakes observed by multi-mission altimeters. *Remote Sensing*, 2020, 12(18): 2986. DOI: 10.3390/rs12182986.
- [47] Huang Q, Li X D, Han P F, et al. Validation and application of water levels derived from Sentinel-3A for the Brahmaputra River. *Science China: Technological Sciences*, 2019, 62(10): 1760-1772.
- [48] Hu W W, Wang G X, Deng W, et al. The influence of dams on ecohydrological conditions in the Huaihe River Basin, China. *Ecological Engineering*, 2008, 33(3/4): 233-241.
- [49] Hou Ji, Zhou Qin, Zhang Chunze, et al. Riverbed evolution characteristics and trend prediction of the wandering channels in the middle of Yarlung Zangbo River. *Science Technology and Engineering*, 2018, 18(28): 143-150. [侯杰, 周勤, 张春泽, 等. 雅鲁藏布江中游游荡型河道演变规律及趋势预测. *科学技术与工程*, 2018, 18(28): 143-150.]
- [50] Zeng C, Zhang F, Lu X X, et al. Improving sediment load estimations: The case of the Yarlung Zangbo River (the upper Brahmaputra, Tibet Plateau). *CATENA*, 2018, 160: 201-211.

Mapping spatio-temporal variation of river width from satellite remote sensing data and hydrometeorological response in the Yarlung Zangbo River

XU Jiahui¹, WANG Shidong¹, SONG Lijuan¹, ZHANG Dapeng¹, SONG Chunqiao²

(1. School of Surveying and Land Information Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454000, Henan, China; 2. Key Laboratory of Watershed Geographic Sciences, Nanjing Institute of Geography and Limnology, CAS, Nanjing 210008, China)

Abstract: River width, as one of the basic parameters of river morphology, is very important to understand the hydrological process and ecosystem function on Earth. The Yarlung Zangbo River is not only a global plateau river with typical regional characteristics, but also an important international river. However, due to its remote location, mountainous terrains, and harsh environmental conditions, the gauge stations are sparsely distributed in the Yarlung Zangbo River, which greatly impedes a better understanding of its hydrological dynamic characteristics. Satellite remote sensing makes it possible to monitor and analyze the wide and long-term dynamic changes and to examine the hydrological characteristics of the Yarlung Zangbo River by providing multi-temporal image data. Based on the Global Land Analysis and Discovery (GLAD) dataset and the threshold segmentation method of water boundary inundation frequency, this study reconstructed the complete monthly water area of the study area, and then estimated the spatial and temporal distribution of the river width from 2000 to 2020. The results indicate that due to the seasonal differences in temperature and precipitation, the width of the river showed a significant seasonal variation from 2000 to 2020. The seasonal variation in the middle reaches was the largest (453.6 m), while that of the downstream was the smallest (90.3 m). Influenced by climate and topography, the spatial distribution of river width in the whole course of the Yarlung Zangbo River varies greatly. The narrowest part of the observed river channel is about 30 m, i.e., a spatial resolution of Landsat images. The maximum river width in the middle and lower reaches of braided rivers can reach 5935.7 m. About 50% of the river segments of the Yarlung Zangbo River are narrower than 150 m, and only 2.0% of the river segments are wider than 2000 m. From 2000 to 2020, the average river width of the main stream first decreased, then increased and finally decreased. There was a very significant positive correlation between the mean river width of the mainstream and precipitation and air temperature, and the correlation coefficient R was 0.7, which passed the confidence test of 0.01. In addition, the monthly river width based on GLAD was also evaluated by the river width results derived from 10 m resolution Sentinel-2 data. The results showed that both of the relative deviations were less than 2%, indicating that the estimation results were relatively reliable in general.

Keywords: river width; multi-temporal remote sensing monitoring; seasonal variation; Yarlung Zangbo River