

基于多站水力几何法的黄河源区河流流量估算研究

白娟^{1,2}, 张亦弛², 甘甫平^{1*}, 郭艺¹, 闫柏琨¹, 杨胜天³, 李和谋¹, 邢乃琛¹, 马燕妮¹, 刘琪¹

(1. 中国自然资源航空物探遥感中心, 北京 100083; 2. 北京师范大学地理科学学部, 北京 100875; 3. 北京师范大学水科学研究院, 北京 100875)

摘要: 河流流量多通过水文观测站获取, 但受复杂地形、恶劣气候等因素限制, 许多地区缺少相关水文观测数据。多站水力几何(AMHG)法仅根据河流宽度的时空变化即可计算出流量, 在本质上扩展了传统的单站水力几何(AHG)法。该文以典型水文资料缺失地区黄河源区为研究对象, 在 GEE 平台上基于 Landsat8 和 Sentinel-2 影像提取河道掩膜, 采用 RivWidth_v04 工具自动提取不同时相影像的河流宽度, 分析 AMHG 方法在研究区的适用性和模拟精度。结果表明: 1) 应用 RivWidth_v04 提取河流宽度精度较高, 使用高分辨率遥感影像可降低河宽误差; 2) 2015—2021 年玛曲、军功河段 AMHG-Landsat 模拟值与实测值的纳什效率系数(NSE)分别为 0.75 和 0.67, 均方根误差(RMSE)分别为 155.66 m³/s 和 225.15 m³/s, 相对均方根误差(RRMSE)分别为 34.04% 和 38.86%, 模拟结果均较好; 3) 结合高分辨率 Sentinel-2 影像可以增加河流流量的估算频次, 更好地反映研究河段的水文过程, 提高 AMHG 方法在河流监测和水资源管理领域的实用性; 4) 最小和最大流量限制对 AMHG 方法模拟结果有很大影响。

关键词: AMHG; 河流宽度; 流量; 黄河源区; Landsat8; Sentinel-2

中图分类号: P333 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-0504(2023)01-0015-08

0 引言

河流流量是水文循环的关键参数之一, 及时掌握河流流量变化对于流域水资源管理、生态修复和气候变化研究等具有重要意义^[1,2]。目前河流流量主要通过水文观测站获取, 受复杂地形和恶劣气候等因素限制, 许多地区水文观测站的建设和维护运营极为困难^[3], 缺少相关的水文观测数据。利用遥感数据估算河流流量可以弥补地面观测站的不足^[4,5], 研究方法主要包括基于水量平衡模型^[6-8]、基于河流断面水位—流量关系曲线^[9-12]、基于河流多水力特征参数^[13-15]、基于河流宽度^[16-21] 4 类反演方法。由于遥感技术对水平方向的信息捕捉能力和分辨率优于垂直方向, 因此, 基于水位信息的单变量模型和多变量模型应用相对较少, 基于河流宽度反演河流流量的方法成为研究热点^[20]。

Gleason 等提出的多站水力几何(At-Many-stations Hydraulic Geometry, AMHG)法连接时空上的河流截面, 本质上扩展了传统的单站水力几何(At-a-station Hydraulic Geometry, AHG)法, 不需要任何地面观测或先验信息, 仅根据河流宽度的时空变化就可以计算得到河流流量^[22-25]。Gleason

等^[23]选取全球 34 条不同地形和气候条件的大型河流分析 AMHG 方法的适用性和精度, 结果表明估算流量与实测流量的相对均方根误差(RRMSE)为 26%~41%; Hagemann 等^[26]将该理论发展为贝叶斯水量平衡径流反演方法(McFLI), 即 BAM(Bayesian AMHG-Manning)算法, 使用 AMHG 方法和曼宁方程以概率的方式估计河流流量; Durga Rao 等^[27]应用 AMHG 方法估算印度 4 条主要河流流量, 纳什效率系数(NSE)均大于 0.8; Mengen 等^[17]采用 Sentinel-1A/1B 数据在湄公河开展 AMHG 方法应用, 将时间分辨率从 16 d 提高至 6 d, RRMSE 为 19.5%。Sentinel-1A/1B 数据不受云和阴影限制, 且具有高空间分辨率, 然而, 这种 C 波段的 SAR 影像在不同水体分类时存在椒盐噪声及反射率差异, 特别是在水体与沉积物或植被相互作用区域。考虑到 AMHG 方法在国内的适用性研究较少, 本研究以典型水文资料缺失地区黄河源区为研究对象, 基于 GEE 平台采用 Landsat8 和 Sentinel-2 影像提取河道掩膜, 结合 RivWidth_v04 工具自动提取不同时相河流宽度, 而后利用 AMHG 方法估算河流流量, 并结合高时空分辨率的 Sentinel-2 影像, 增加河流流量的估算频次, 尽可能反映研究河段的水

收稿日期: 2022-01-22; 修回日期: 2022-04-11

基金项目: 自然资源部航空地球物理与遥感地质重点实验室课题(2020YFL22); 高分专项(民用)项目“高分航空载荷自然资源调查应用示范”(04-H30G01-9001-20/22-01-08)

作者简介: 白娟(1988—), 女, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为水文水资源遥感。* 通讯作者 E-mail: fpgan@aliyun.com

文过程,对及时掌握径流变化和开展黄河流域水资源管理及气候变化研究均具有重要意义。

1 研究区域与数据

1.1 研究区概况

黄河源区指黄河流域唐乃亥水文站以上区域,位于青藏高原东北部,面积约 12.2 万 km^2 ,海拔 2 664~6 277 m^[28],属典型内陆高原气候,年均气温 -1.6°C ,年均降水量 457 mm,5—10 月降水量占全年降水量的 90.4%^[29];黄河源区约占黄河流域面积的 15.3%,多年平均径流量却占全流域的 34.1%,是黄河流域重要的水源涵养区和产水区^[30],同时也是典型的水文资料缺失地区,其水文站网平均密度为 9 380 km^2 /站。达日—玛曲—军功一带是黄河源区的重点产流区,本文选取位于干流的玛曲水文站(33.97°N , 102.08°E ,集水面积 86 048 km^2)、军功水文站(34.7°N , 100.65°E ,集水面积 98 414 km^2)所在河段为研究对象(图 1),两河段流量与河宽变化明显相关,满足 AMHG 方法的适用条件。

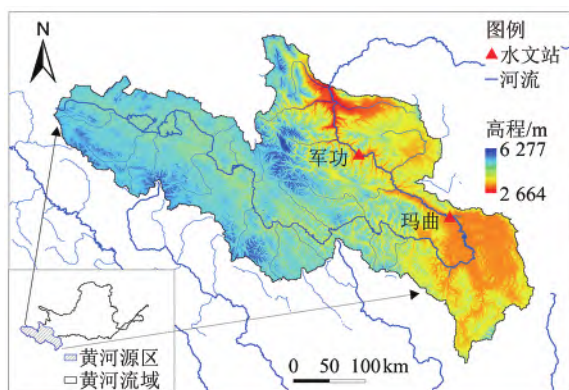


图 1 研究区位置
Fig. 1 Location of the study area

1.2 数据来源

研究数据包括:1) Landsat8 OLI 数据(<https://search.earthdata.nasa.gov/>)和 Sentinel-2 数据(<https://scihub.copernicus.eu/dhus/#/home>), Landsat8 数据重访周期为 16 d,剔除研究河段被云遮挡的影像后,可用影像较少,故补充重访周期为 5 d 的 Sentinel-2 影像(空间分辨率为 10 m),用于提取水体,两颗卫星互补重访周期为 5 d;2) GRWL(Global River Widths from Landsat)数据,用于剔除水体提取结果中的非河道水体(<https://zenodo.org/record/1297434/>)^[31];3) 径流实测资料,用于验证估算流量精度,来源于水利部公布的水文站逐日平均流量数据。由于本文收集到的部分径流实测数据仅涵盖 2015 年、2017 年和 2021 年,故模拟时段选择 2015

— 2021 年,其中,20210422、20210711、20211001、20211113 缺少实测资料,取前后两天径流实测均值替代,不参与模拟精度评价。

2 研究方法

研究区河流流量估算流程(图 2)为:1) 河流宽度提取。采用 Zou 等的水体提取方法^[32],在 GEE 平台上基于 Landsat8/Sentinel-2 影像将 $\text{MNDWI} > \text{EVI}$ 或 $\text{MNDWI} > \text{NDVI}$ 的像元划分为水体,并去除 $\text{EVI} < 0.1$ 的水体和植被混合像元,得到研究区水体掩膜,在此基础上,结合 GRWL 数据剔除非河流水体信息,得到河道掩膜后代入 RivWidth_v04 工具,得到河流宽度信息。2) 河流流量估算。首先,根据实测数据和河流宽度判断研究河段是否满足参数 a 和 b 呈对数—线性关系,若满足,则采用河流宽度信息建立 AMHG RS Slope 回归关系,近似得到 a - b 对数—线性方程,而后判断是否可以利用 AMHG 方法估算河流流量,若可以则代入遗传算法(GA)估算河流流量,否则不能用 AMHG 方法估算河流流量。

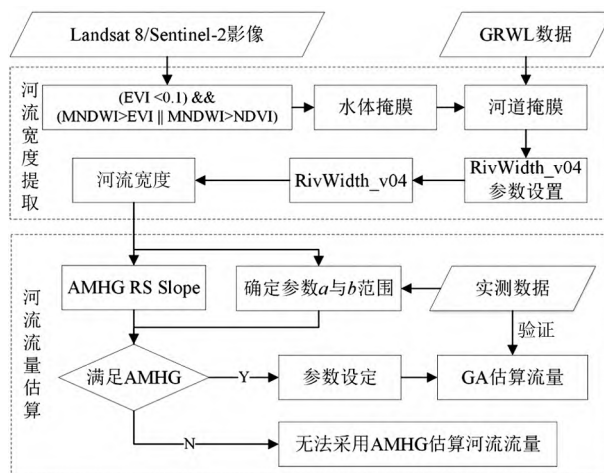


图 2 河流流量估算流程
Fig. 2 Workflow of river discharge estimation

2.1 AMHG 方法原理

根据单站水力几何(AHG)方程,河流断面宽度 w 与河流断面流量 Q 存在指数关系(式(1)),将等式两边分别取对数可得式(2),多站水力几何(AMHG)方法证明 AHG 方程中参数 a 和 b 呈对数—线性关系(式(3)),可通过对同一河段内多个固定断面的河宽进行多次测量以估算河道的特定常数 E ,斜率 $1/\log E$ 可由式(4)中的经验回归参数 y 近似表示^[31]。本文利用遥感影像提取的河流断面宽度和式(3)进行回归分析,据此计算得到式(3)中的截距 $1/\log E \times \log(w_{\text{glob}})$,进而确定 AHG 中 b 和 $\log a$ 的线性相关关系,即 RS Slope 回归关系。

$$w = aQ^b \quad (1)$$

$$\log Q = (\log w - \log a) / b \quad (2)$$

$$b_x = -\frac{1}{\log E} \times \log(a_x) + \frac{1}{\log E} \times \log(w_{\text{glob}}) \quad (3)$$

式中: x 为河流断面编号; w_{glob} 为所有断面宽度的平均值,由遥感影像获得。

$$\max(w_{x_1, x_2, \dots, x_n}) = p(\max(w_{x_1, x_2, \dots, x_n})^2 - \min(w_{x_1, x_2, \dots, x_n})^2)^y \quad (4)$$

式中: x_1, x_2, \dots, x_n 为每个河流断面的编号; p 和 y 为由河流断面宽度变化决定的经验参数。

根据参数 a, b 的取值范围以及 $a-b$ 对数—线性方程,给定一对 $a-b$ 的值和河流宽度则可计算得到任意断面的流量。对此,AMHG 方法采用遗传算法(GA)估算河流流量,以不同断面的流量差值最小化为率定目标,同时保证估算出的流量值位于合理范围,最后取所有流量值的均值作为该段河流的流量。

2.2 RivWidth_v04 工具

RivWidth_v04 工具用于测量栅格图像中连续河流宽度^[33],由 ITT 可视化信息解决方案(ITTVIS)IDL 语言开发而成(<http://uncglobalhydrology.org/rivwidth/>)。该工具的输入文件为 ENVI 格式的二值水体掩膜数据,其中水体像素值为 1,非水体像素值为 0,主要步骤包括:提取河流掩膜、提取

河流中心线和沿中线测量河流宽度。

2.3 精度评价

基于日均流量观测数据,选取纳什效率系数 NSE (式(5))、均方根误差 $RMSE$ (式(6))和相对均方根误差 $RRMSE$ (式(7))对 AMHG 方法模拟结果进行精度评价, NSE 值越大, $RMSE$ 和 $RRMSE$ 值越小,模拟效果越好。

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{\text{obs}} - Q_{\text{sim}})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{\text{obs}} - \overline{Q_{\text{obs}}})^2} \quad (5)$$

$$RMSE = \sqrt{\sum_{i=1}^n (Q_{\text{obs}} - Q_{\text{sim}})^2 / n} \quad (6)$$

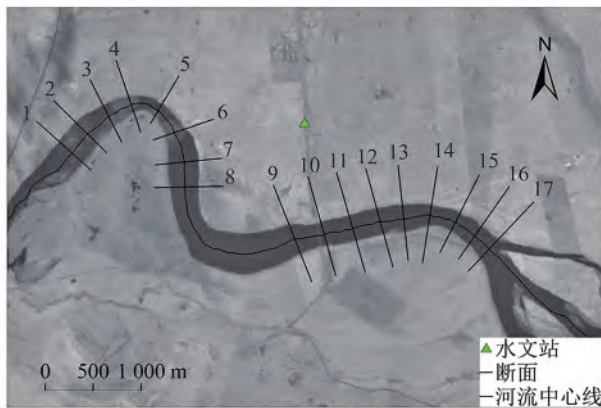
$$RRMSE = RMSE / \overline{Q_{\text{obs}}} \cdot 100\% \quad (7)$$

式中: Q_{obs} 、 Q_{sim} 、 $\overline{Q_{\text{obs}}}$ 分别为径流观测值、估计值和观测均值,单位为 m^3/s ; n 为记录总数。

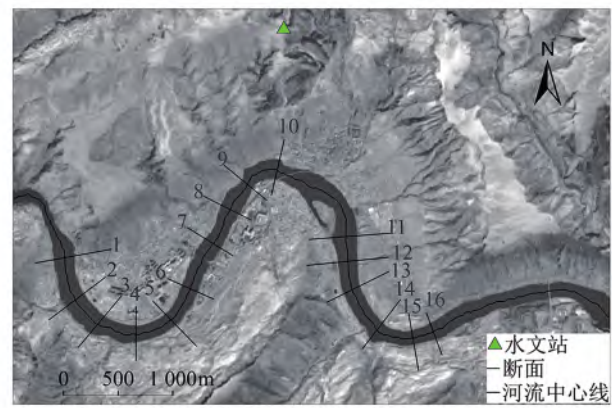
3 结果分析

3.1 河流宽度提取及精度验证

AMHG 方法要求研究河段应选在无支流汇入或流出的地区,以满足水量守恒条件;此外,由于该方法对于辫状河道模拟效果较差,需要在选取断面的过程中避开河道中间季节性出露的心滩。因此,本研究在玛曲站附近沿河道选取 17 个断面,在军功站附近选取 16 个断面(图 3),保持断面空间位置不变,将利用遥感影像提取的河道掩膜信息代入 RivWidth_v04 工具计算各断面宽度。



(a) 玛曲河段



(b) 军功河段

图 3 玛曲、军功河段断面位置

Fig. 3 Location of river cross-sections in Maqu and Jungong reaches

将 RivWidth_v04 的输出值与使用 ArcMap 测量工具手动测量的河流断面宽度进行比较(图 4),可以看出:对于 Landsat8 影像,玛曲河段二者决定系数 R^2 为 0.87、 $RMSE$ 为 32.07 m,军功河段 R^2 为 0.62、 $RMSE$ 为 29.22 m;对于 Sentinel-2 影像,玛曲河段 R^2 为 0.97、 $RMSE$ 为 19.68 m,军功河段 R^2 为 0.87、 $RMSE$ 为 14.23 m。对比发现,使用高分辨率水体掩膜数据可以降低河宽误差。

3.2 AMHG RS Slope 回归关系求解

利用实测流量和多时相 Landsat 影像提取的河流断面宽度进行拟合得到玛曲河段和军功河段 AMHG RS Slope 回归关系(图 5)。由图 5 可以看出,玛曲河段 AMHG 的回归方程为 $y = -0.26x + 0.64$, R^2 为 0.92,军功河段 AMHG 的回归方程为 $y = -0.35x + 0.75$, R^2 为 0.96,表明玛曲和军功河流断面宽度满足 AMHG 中参数 a 和 b 的对数—线性

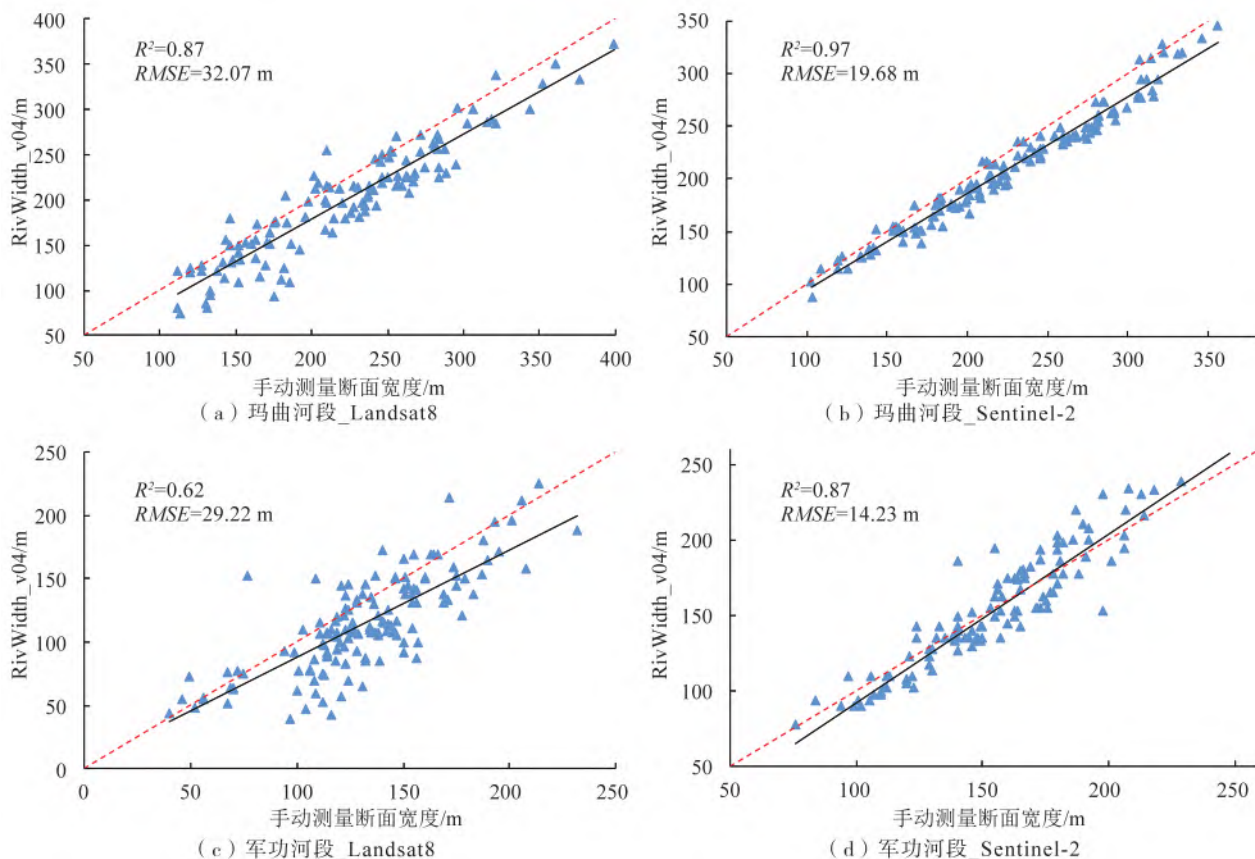


图 4 RivWidth_v04 提取河流宽度精度
Fig. 4 Accuracy of river width extracted by RivWidth_v04

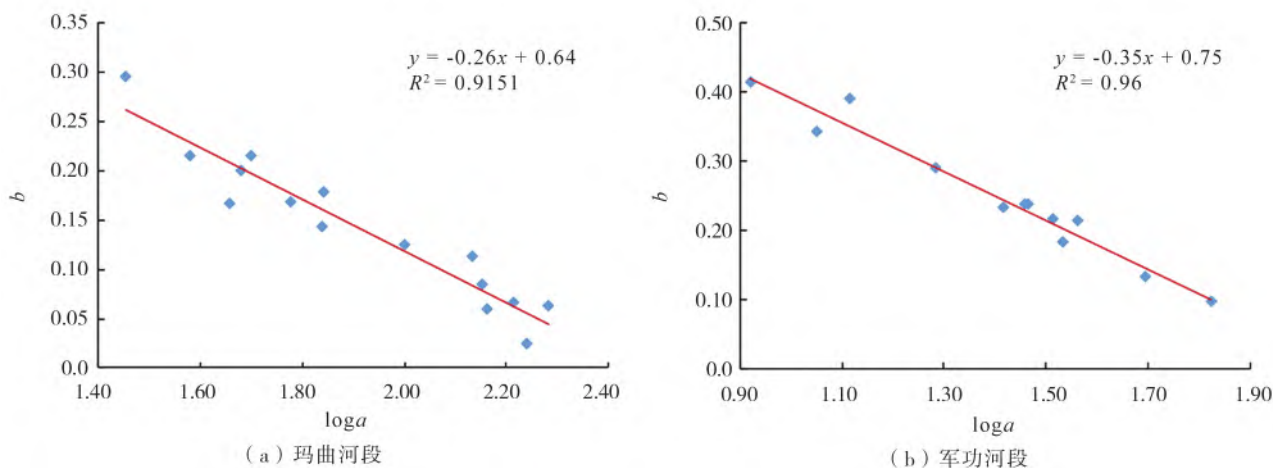


图 5 玛曲河段和军功河段 AMHG 回归关系
Fig. 5 Regression relationships of AMHG for Maqu and Jungong reaches

关系,可以运用 AMHG 方法计算河流流量。

根据多时相 Landsat8 影像提取的河流断面宽度建立 RS Slope 回归关系(图 6),可以看出,玛曲河段 RS Slope 的回归方程为 $y=0.29x+1.09$, R^2 为 0.35,代入式(3)计算的截距为 0.66,军功河段 RS Slope 的回归方程为 $y=0.34x+0.74$, R^2 为 0.78,代入式(3)计算的截距为 0.70,两个回归方程斜率的绝对值和截距与 AMHG 回归方程的斜率绝对值和截距均较接近,该结果进一步表明可以利用 AMHG

方法估算河流流量。

3.3 AMHG-Landsat8/Sentinel-2 估算河道流量

利用 AMHG 方法估算河流流量时,GA 共包括 8 个参数:河流流量范围($lowfilter, hi filter$)、AHG 方程中参数 a 和 b 的取值范围($a_{min}, a_{max}, b_{min}, b_{max}$)、遗传算法参数($numGen, numGA$)。本研究中参数 a 和 b 的取值范围以及遗传算法参数均采用默认值,河流流量范围根据河道附近径流实测资料设置,具体参数设置如表 1 所示。

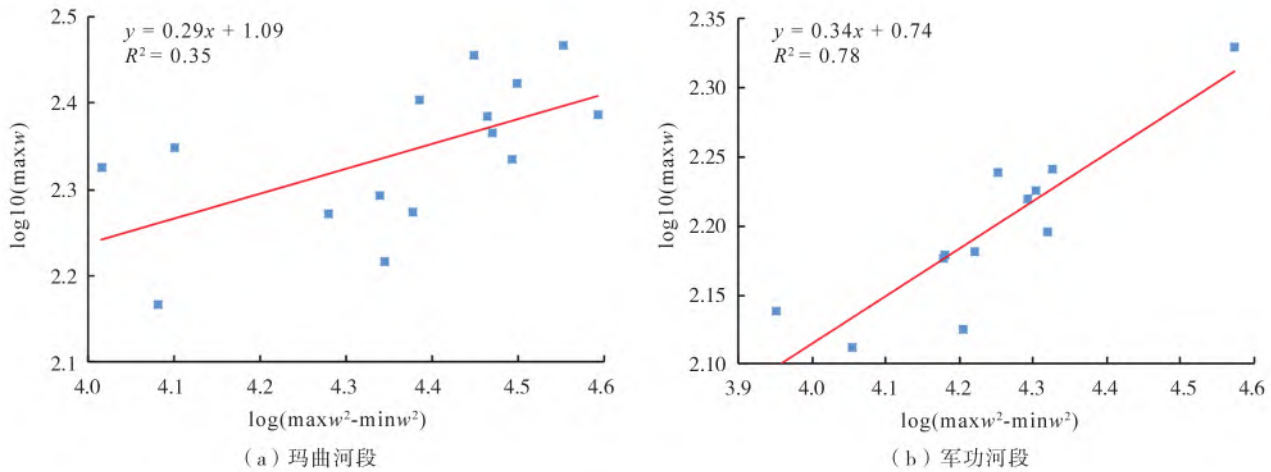


图 6 玛曲河段和军功河段 RS Slope 回归关系
Fig. 6 Regression relationships of RS slope for Maqu and Jungong reaches

表 1 研究区 GA 算法参数设置

Table 1 Parameterization of the genetic algorithm for the study area

参数	推荐取值	玛曲参数取值	军功参数取值
<i>numGen</i>	10	10	10
<i>numGA</i>	10	10	10
<i>a_{min}</i>	1	1	1
<i>a_{max}</i>	500	500	500
<i>b_{min}</i>	0.01	0.01	0.01
<i>b_{max}</i>	0.80	0.80	0.80
<i>lowfilter</i>	$w_{\min} \times 0.5 \text{ m} \times 0.1 \text{ m/s}$	100	400
<i>hifilter</i>	$w_{\max} \times 10 \text{ m} \times 5 \text{ m/s}$	2 000	2 000

注: w_{\min} 和 w_{\max} 分别为河流断面宽度的最小值和最大值。

2015—2021 年玛曲、军功河段 AMHG-Landsat8 估算流量与实测流量如图 7 所示。由于 GA 算法缺乏稳定性,本研究在两个河段分别进行 10 次模拟,图 7 中红色区间表示 10 次模拟的估算结果取值范围,本文对 10 次模拟结果取平均值作为最终估算结果与实测数据进行对比。结果表明,玛曲河段河流流量估算值与实测值的 *NSE* 为 0.75、*RMSE* 为 155.66 m³/s、*RRMSE* 为 34.04%,军功河段河流流量估算值与实测值的 *NSE* 值为 0.67、*RMSE* 为 225.15 m³/s、*RRMSE* 为 38.86%,总体上,两个河段的模拟结果均较好。为分析河流流量范围参数取值对估算结果的影响,采用表 1 中 *lowfilter*, *hifilter* 推荐取值(玛曲河段取值分别为 7.5 和 13 000,军功河段取值分别为 4.6 和 7 754)进行模拟,其余参数保持不变。由图 7 可知,河流流量范围取值对模拟结果有很大影响,采用推荐取值的河流流量范围在两个河段的模拟结果均存在严重低估,与 Gleason 等^[34]的结论一致,因此,利用 AMHG 方法估算河流流量时应考虑河流的实际最小和最大流量限制。

采用相同的 GA 算法参数设置,对比两个河段 AMHG-Landsat8、AMHG-Sentinel-2 估算流量的模拟效果。2021 年玛曲河段 AMHG-Landsat8 估算流

量频次为 7 次,与实测流量的 *NSE* 为 0.86、*RMSE* 为 162.34 m³/s、*RRMSE* 为 31.06%,AMHG-Sentinel-2 估算流量频次为 34 次,与实测流量的 *NSE* 为 0.81、*RMSE* 为 126.59 m³/s、*RRMSE* 为 21.96% (图 8a),模拟结果均较好。2021 年军功河段 AMHG-Landsat8 估算流量频次为 6 次,与实测流量的 *NSE* 为 0.74、*RMSE* 为 250.1 m³/s、*RRMSE* 为 33.48%,AMHG-Sentinel-2 估算流量频次为 14 次,与实测流量的 *NSE* 为 0.68、*RMSE* 为 145.9 m³/s、*RRMSE* 为 22.02% (图 8b),表明采用 Sentinel-2 影像可显著增加河流流量估算频次和精度。对比图 8 中玛曲河段和军功河段 AMHG 方法估算流量模拟效果,发现非汛期模拟效果较好,汛期估算流量低于实测流量,该结果与 Durga Rao 等^[27]在印度 4 条主要河流应用 AMHG 方法的研究结论相同。分析原因,可能是由于当汛期河流水量超过河岸时,AMHG 幂律行为遭到破坏^[24],也可能是由于基于卫星影像的 AMHG 方法估算的河流流量反映的是卫星影像过境时的瞬时流量,与日径流实测值存在一定偏差。

4 结论

本文通过自动提取不同时相 Landsat8 影像的河流断面系列宽度信息,分析了 AMHG-Landsat8 在黄河源区的适用性,在此基础上,结合高时空分辨率 Sentinel-2 影像增加河流流量的估算频次,以反映研究河段的水文过程。结论如下:1)应用 RivWidth_v04 工具提取河流断面宽度精度较高,使用高分辨率遥感影像可降低河宽误差;2)2015—2021 年玛曲、军功河段 AMHG-Landsat8 模拟值与实测值的 *NSE* 分别为 0.75 和 0.67、*RMSE* 分别为 155.66 m³/s 和 225.15 m³/s、*RRMSE* 分别为 34.04% 和 38.86%,

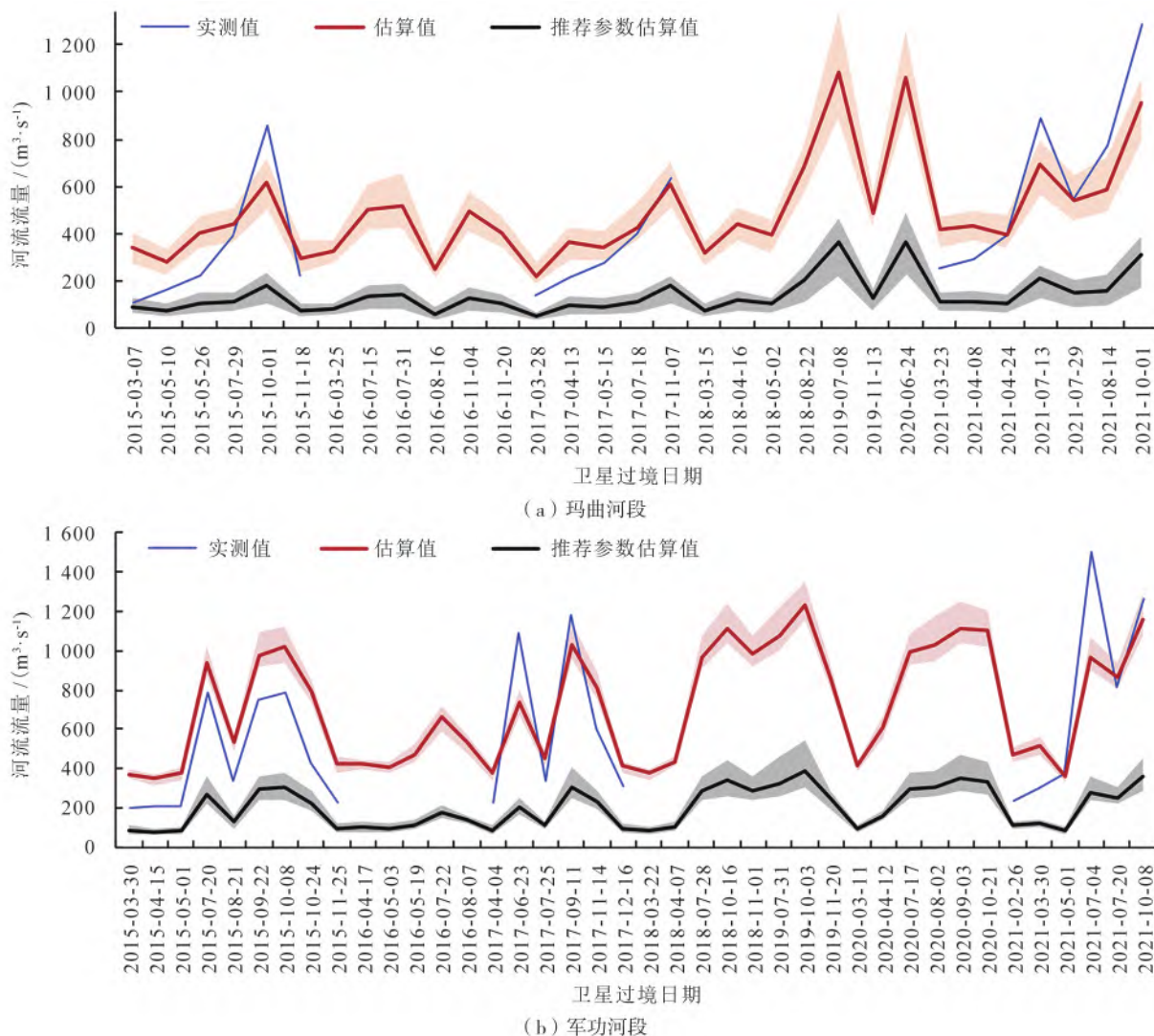


图 7 2015—2021 年玛曲和军功河段 AMHG 估算流量和实测流量
Fig. 7 Estimated discharge based on AMHG and measured discharge of Maqu and Jungong reaches from 2015 to 2021

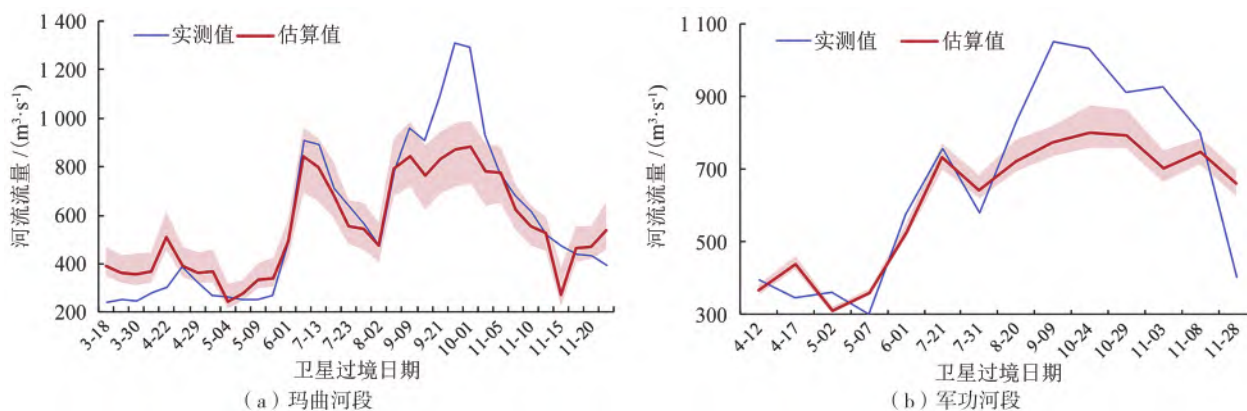


图 8 2021 年玛曲和军功河段 AMHG 估算流量和实测流量
Fig. 8 Estimated discharge based on AMHG and measured discharge of Maqu and Jungong reaches in 2021

模拟结果均较好;3)结合高时空分辨率 Sentinel-2 影像可显著增加河流流量的估算频次,更好地反映研究河段的水文过程;4)河流流量范围取值对 AMHG 模拟结果有很大影响,应用 AMHG 方法时需考虑河流实际的最小和最大流量限制。

本文采用 Sentinel-2 影像一定程度上提高了 AMHG 方法在河流监测和水资源管理领域的实用性,但影像易受天气影响,导致观测频次不足。下一步拟尝试联合 Sentinel-1 SAR 数据,实现不受云和天气影响的连续河流宽度测量和长时间序列的河流

流量观测,满足水资源管理要求,并将其应用于其他河流系统。

参考文献:

- [1] 许继军,屈星,曾子悦,等. 基于高精度遥感亮温的典型流域河道径流模拟分析[J]. 水科学进展,2021,32(6):877—889.
- [2] 杨胜天,王鹏飞,王娟,等. 结合无人机航空摄影测量的河道流量估算[J]. 遥感学报,2021,25(6):1284—1293.
- [3] 岩腊,龙笛,白亮亮,等. 基于多源信息的水资源立体监测研究综述[J]. 遥感学报,2020,24(7):787—803.
- [4] 周启鸣,李剑锋,崔爱红,等. 中亚干旱区陆地水资源评估方法与挑战[J]. 水文,2021,41(1):15—21.
- [5] ALLEN G H, YANG X, GARDNER J, et al. Timing of Landsat overpasses effectively captures flow conditions of large rivers[J]. Remote Sensing,2020,12(9):1510.
- [6] LI Q, ZHONG B, LUO Z C, et al. GRACE-based estimates of water discharge over the Yellow River basin[J]. Geodesy and Geodynamics,2016,7(3):187—193.
- [7] GIJS S, WIM B, LE N, et al. Integrating global satellite-derived data products as a pre-analysis for hydrological modelling studies: a case study for the Red River Basin[J]. Remote Sensing,2016,8(4):279.
- [8] LIU G, SCHWARTZ F W, TSENG K H, et al. Discharge and water-depth estimates for ungauged rivers: combining hydrologic, hydraulic, and inverse modeling with stage and water-area measurements from satellites[J]. Water Resources Research,2015,51(8):6017—6035.
- [9] ZAKHAROVA E A, KOURAEV A V, CAZENAVE A, et al. Amazon River discharge estimated from TOPEX/Poseidon altimetry[J]. Comptes Rendus Geoscience,2006,338(3):188—196.
- [10] BIRKINSHAW S J, O'DONNELL G M, MOORE P, et al. Using satellite altimetry data to augment flow estimation techniques on the Mekong River[J]. Hydrological Processes,2010,24(26):3811—3825.
- [11] ZAKHAROVA E A, KRYLENKO I N, KOURAEV A V. Use of non-polar orbiting satellite radar altimeters of the Jason series for estimation of river input to the Arctic Ocean[J]. Journal of Hydrology,2019,568:322—333.
- [12] AMJA B, FENG M C, TSGM D, et al. Estimation of river flow using CubeSats remote sensing[J]. Science of the Total Environment,2021,788,147762.
- [13] BJERKLIE D M, DINGMAN S L, VOROSMARTY C J, et al. Evaluating the potential for measuring river discharge from space[J]. Journal of Hydrology,2003,278(1):17—38.
- [14] BJERKLIE D M, BIRKETT C M, JONES J W, et al. Satellite remote sensing estimation of river discharge: application to the Yukon River Alaska[J]. Journal of Hydrology,2018,561:1000—1018.
- [15] KEBEDE M G, WANG L, YANG K, et al. Discharge estimates for ungauged rivers flowing over complex high-mountainous regions based solely on remote sensing-derived datasets[J]. Remote Sensing,2020,12(7):1064.
- [16] LI H J, LI H Y, WANG J, et al. Extending the ability of near-infrared images to monitor small river discharge on the north-eastern Tibetan Plateau[J]. Water Resources Research,2019,55:8404—8421.
- [17] MENG D, OTTINGER M, LEINENKUGEL P, et al. Modeling river discharge using automated river width measurements derived from Sentinel-1 time series[J]. Remote Sensing,2020,12(19):3236.
- [18] PAVELSKY T M. Using width-based rating curves from spatially discontinuous satellite imagery to monitor river discharge[J]. Hydrological Processes,2014,28(6):3035—3040.
- [19] TARPANELLI A, AMARNATH G, BROCCA L, et al. Discharge estimation and forecasting by MODIS and altimetry data in Niger-Benue River[J]. Remote Sensing of Environment,2017,195:96—106.
- [20] 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.
- [21] 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.
- [22] GLEASON C J, WADA Y, WANG J. A hybrid of optical remote sensing and hydrological modeling improves water balance estimation[J]. Journal of Advances in Modeling Earth Systems,2018,10:2—17.
- [23] GLEASON C J, SMITH L C, LEE J. Retrieval of river discharge solely from satellite imagery and at-many-stations hydraulic geometry: sensitivity to river form and optimization parameters[J]. Water Resources Research,2015,50(12):9604—9619.
- [24] GLEASON C J, SMITH L C. Toward global mapping of river discharge using satellite images and at-many-stations hydraulic geometry[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America,2014,111(13):4788.
- [25] QIN C, WU B S, WANG G Q, et al. Spatial distributions of at-many-stations hydraulic geometry for mountain rivers originated from the Qinghai-Tibet Plateau[J]. Water Resources Research,2021,57:1—19.
- [26] HAGEMANN M W, GLEASON C J, DURAND M T. BAM: Bayesian AMHG-Manning inference of discharge using remotely sensed stream width, slope, and height[J]. Water Resources Research,2017,53(11):9692—9707.
- [27] DURGA RAO K H V, SHRAVYA A, DADHWAL V K. A novel method of satellite based river discharge estimation using river hydraulic geometry through genetic algorithm technique[J]. Journal of Hydrology,2020,589,125361.
- [28] 孙璐,张友静,张滔. 黄河源区土地利用/覆盖生态服务功能价值评价及时空预测[J]. 地理与地理信息科学,2014,30(5):99—104.
- [29] 叶红,张廷斌,易桂花,等. 2000—2014 年黄河源区 ET 时空特征及其与气候因子关系[J]. 地理学报,2018,73(11):2117—2134.
- [30] 王道席,田世民,蒋思奇,等. 黄河源区径流演变研究进展[J].

- 人民黄河, 2020, 42(9): 90—95.
- [31] ALLEN G H, PAVELSKY T M. Global extent of rivers and streams[J]. Science, 2018, 361(6402): 585—588.
- [32] ZOU Z H, XIAO X M, DONG J W, et al. Divergent trends of open-surface water body area in the contiguous United States from 1984 to 2016[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2018, 115(15): 3810—3815.
- [33] PAVELSKY T M, SMITH L C. RivWidth: a software tool for the calculation of river widths from remotely sensed imagery [J]. IEEE Geoscience Remote Sensing Letters, 2008, 5(1): 70—73.
- [34] GLEASON C J, WANG J D. Theoretical basis for at-many-stations hydraulic geometry[J]. Geophysical Research Letters, 2015, 42: 7107—7114.

Estimation of River Discharge in the Source Region of the Yellow River Based on Multi-station Hydraulic Geometry Method

BAI Juan^{1,2}, ZHANG Yi-chi², GAN Fu-ping¹, GUO Yi¹, YAN Bo-kun¹, YANG Sheng-tian³, LI He-mou¹,
XING Nai-chen¹, MA Yan-ni¹, LIU Qi¹

(1. China Aerospace Geophysical and Remote Sensing Center for Natural Resources, Beijing 100083; 2. Faculty of Geographical Science, Beijing Normal University, Beijing 100875; 3. College of Water Sciences, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

Abstract: River discharge is one of the key parameters of water cycle. Due to the limitations of complex terrain, severe weather conditions, etc., many regions in the world lack relevant hydrological observation data. The development of remote sensing technology provides new technical means for river runoff monitoring. Among them, the at-many-stations hydraulic geometry (AMHG) method can estimate the river discharge only through the temporal and spatial variation of river width, enables river discharge estimation using solely remote sensing data. This method essentially extends the traditional at-a-station hydraulic geometry (AHG) and lays the foundation for space monitoring stations. Taking the source region of the Yellow River, a typical data-deficient region, as the study area, this paper extracted river masks from Landsat8 and Sentinel-2 images in different phases on GEE platform, used the software tool RivWidth_v04 automatically measure the river width, and analyzed the applicability and estimation accuracy of AMHG. The results show that: 1) The accuracy of river width extracted by RivWidth_v04 is relatively high, and the remote sensing image with high spatial resolution could reduce the error of river width. 2) The NSE coefficients of the estimated discharge based on AMHG-Landsat and the measured values are 0.75 and 0.67, RMSE are 155.66 m³/s and 225.15 m³/s, and RRMSE are 34.04% and 38.86%, respectively, in the Maqu and Jungong reaches from 2015 to 2021, with good estimation results. 3) Combined with Sentinel-2 images with high temporal resolution, the estimation frequency of river discharge is supplemented to better reflect the hydrological process of the studied reaches and improve the availability of AMHG method in river monitoring and water resources management. 4) Minimum and maximum discharge constraints have great impact on discharge estimation based on AMHG.

Key words: AMHG; river width; discharge; the source region of the Yellow River; Landsat8; Sentinel-2