

引 用 格 式: Shi Yimeng, Liu Xisheng, Zhu Wenbin, *et al.* Research on Inversion of River Discharge in High Mountain Region based on GEE Platform[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2022, 37(1): 186–195. [史宜梦, 刘希胜, 朱文彬, 等. 基于 GEE 云平台的黄河源区河流径流量遥感反演研究[J]. 遥感技术与应用, 2022, 37(1): 186–195.]

DOI: 10.11873/j.issn.1004-0323.2022.1.0186

基于 GEE 云平台的黄河源区河流径流量 遥感反演研究

史宜梦^{1,3}, 刘希胜², 朱文彬³, 宋宏利¹

(1. 河北工程大学 地球科学与工程学院, 河北 邯郸 056038;

2. 青海省水文水资源测报中心, 青海 西宁 810001;

3. 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101)

摘要: 河流径流量是陆地上最重要的水文要素之一, 准确获取径流信息对于区域的水资源评价和生态修复方面都具有重要作用。研究基于 Google Earth Engine (GEE) 云平台提供的 Sentinel-1、Sentinel-2 影像数据, 结合数字高程模型 (DEM) 对河长、河宽、糙率、比降、河深和流速等水力学参数进行遥感估算, 进而采用关系拟合法与改进的曼宁公式法对黄河源区唐乃亥站点附近河段进行径流量反演研究, 探讨了河段长度差异对径流量反演精度的影响, 并通过建立站点河段与上下游河段之间的河宽关系, 实现了对站点河段径流量监测时间序列的扩展补充。结果表明, 两种模型均能有效进行径流量的模拟估算, 其纳什效率系数 (NSE) 均在 0.80 以上; 关系拟合法与改进的曼宁公式法径流反演的均方根误差 (RMSE) 分别为 $233.431 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ 和 $271.704 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, 相对均方根误差 (RRMSE) 分别为 16% 和 24%, 关系拟合法反演精度总体优于改进的曼宁公式法。通过对不同长度河段径流量的反演结果对比分析发现, 辫状河心滩的河宽估算在汛期存在较大的不确定性, 进而影响径流反演精度, 在河段选择时应予以规避; 站点河段与上下游河段的平均河宽之间具有强烈的相关性, 相关系数均在 0.96 以上, 因此上下游河段的影像数据可为站点河段径流量反演提供重要补充, 实现目标河段径流量的加密监测。

关 键 词: 径流量反演; GEE 云平台; 水体指数; Sentinel-1; Sentinel-2

中图分类号: P332; TP79 **文献标志码:** A **文章编号:** 1004-0323(2022)01-0186-10

1 引 言

径流量是重要的水文参数之一, 在洪水预测、水资源管理等方面具有重要作用^[1-2]。一些地区因受环境、交通与经济等因素的限制, 难以获得长时间监测信息, 从而造成区域径流资料的稀缺与匮乏^[3]。与传统方法相比, 遥感数据具有受地面限制少、覆盖范围广和易于获得等优点, 因此可为河流

径流量的监测与估算提供重要的数据补充。

水体信息的遥感提取是河流径流量反演的重要前提^[4]。水体提取的遥感手段主要分为光学遥感和微波遥感^[5]。如王一帆等^[6]基于 Sentinel-2 与 Landsat 8 数据对比分析了不同水体指数在不同水体类型下的精度差异。刘垚焱等^[7]基于 Joint Research Centre (JRC) 全球地表水数据集和 Landsat 遥感影像, 利用改进的归一化差异水体指数 (MND-

收稿日期: 2021-01-25; 修订日期: 2021-12-27

基金项目: 青海三江源生态保护和建设二期工程科研和推广项目 (2018-S-3), 中国科学院青年创新促进会资助项目 (2020056)。

作者简介: 史宜梦 (1995—), 女, 河北石家庄人, 硕士研究生, 主要从事水文遥感研究。E-mail: 657880480@qq.com

通讯作者: 朱文彬 (1987—), 男, 山东青岛人, 副研究员, 主要从事遥感水文与水资源管理研究。E-mail: zhuwb@igsrr.ac.cn

WI)对太湖水域变化特征进行研究。黄萍等^[8]提出了一种基于 Sentinel-1A 数据的洪水淹没范围提取方法,并运用该方法分析了鄱阳湖区的暴雨灾情。总体上来说,光学遥感与微波遥感在水体提取方面各有优缺点:光学遥感波段信息丰富,其水体指数的计算方法已经较为成熟,但数据质量易受云和恶劣天气影响,从而减少目标水体的监测样本;相比之下,微波遥感能够穿透云层,受天气状况影响较小^[9],因此成为近年来水体信息遥感提取的研究热点之一。

在水体信息遥感提取的基础上,国内外学者在河流径流量遥感反演方面已取得较多成果。如 Bjerklie 等^[10]以流速、河宽与水深作为输入参数提出径流量估算模型;Sichangi 等^[11]基于多源卫星遥感数据估测了河宽和水深等参数,利用改进的曼宁公式法反演了亚马逊和尼罗河径流量;Kebede 等^[12]基于 Landsat 系列数据,通过改进的曼宁公式法、经验公式法及关系拟合法对青藏高原高山地区河流径流量进行了估算;陈思宇等^[13]基于 Sentinel-1 数据,采用人工阈值分割法提取平均河宽,进而实现漓江流域径流量的遥感反演。

近年来,新开发的地理空间数据分析云平台(Google Earth Engine, GEE)提供了全球范围内 Sentinel-1/2 等多源遥感数据,改变了传统的遥感数据处理方法,具有快速处理大量数据的能力,为国内外学者在水体提取研究方面提供了极大的便利^[14]。黄河源区自然条件恶劣、交通不便,导致了该地区径流资料较为匮乏,因此基于多源数据开展黄河源区径流量的遥感反演研究,具有非常重要的现实意义。唐乃亥以上流域被称为黄河源区,是黄河流域重要的产流区和水源涵养区^[15]。在此背景下,本研究以黄河源区唐乃亥水文站上下游河段为研究区,基于 GEE 云平台提供的 Sentinel-1/2 遥感数据,综合利用光学与微波影像进行目标水体的提取研究,进而通过关系拟合法与改进的曼宁公式法进行径流量反演对比分析,以期在无资料或资料匮乏地区的径流量监测提供借鉴参考。

2 研究区与数据预处理

2.1 研究区概况

唐乃亥水文站位于青藏高原东北部,流域面积为 12.2 万 km²,占黄河流域面积的 16%,根据唐乃亥水文站 1950~2015 年资料统计,其多年平均径流量

为 200.6 亿立方米,是黄河流域主要的产流区和水源涵养区^[16-18]。流域内地势西高东低,海拔多在 3 000 m 以上,属高原大陆性气候类型,区域内水系较为发达,年降水量总体在 250~800 mm 之间。研究区概况如图 1 所示。

2.2 数据来源与预处理

2.2.1 遥感数据

研究所用的遥感数据为 GEE 云平台提供的哨兵 1(Sentinel-1)和哨兵 2(Sentinel-2)卫星数据。Sentinel 系列是欧洲全球环境与安全监测系统项目(即“哥白尼计划”的成员)。

Sentinel-1 由 Sentinel-1A 与 Sentinel-1B 双星组成,单颗卫星的重访周期为 12 d,双星提高到 6 d。其成像方式包括条带(Strip Map Mode, SM)、超宽幅(Extra Wide Swath, EW)、干涉宽幅(Interferometric Wide Swath, IW)和波模式(Wave Mode, WV)^[19]。研究使用数据为 IW 成像方式提供的 VV 与 VH 极化方式影像。GEE 云平台提供的 Sentinel-1 数据为经过预处理的 GRD(ground range detected)产品,该产品将原数据转换成后向散射系数(Backscatter coefficient)进行存储。除了在 GEE 平台完成标准的预处理(包括轨道校正、热噪声去除、辐射定标和地形校正),还利用 Refined Lee 滤波方法对 Sentinel-1 数据进行了去噪处理。

Sentinel-2 也是由 A、B 双星组成,单颗卫星重访周期为 10 d,双星重访日期可达 5 d。共包括 13 个波段,其空间分辨率如下:B2、B3、B4 和 B8 波段分辨率为 10 m;B5、B6、B7、B8a、B11 和 B12 波段分辨率为 20 m;B1、B9 和 B10 波段分辨率为 60 m。研究使用的是在 GEE 平台经过辐射校正、几何校正和正射校正的 Level-1C 产品。Sentinel-2 在提取水体时,利用 B3 与 B11 波段来计算 MNDWI,两个波段具有不同的分辨率,因此将 B3 波段分辨率重采样为 20 m。除此之外,考虑到光学遥感数据受云影响较大,基于研究区的实际云量对影像数据进行了筛选,筛选指标为研究区内云像元数与总像元数的比值^[20]。因为整幅影像的云量并不能反映研究区的实际云量,云指数较大的影像在研究区内的实际云量也可能较小。因此,选择了 Sentinel-2 的 QA60 波段来计算研究区内实际云量,筛选标准为实际云量低于 20% 的影像。

2.2.2 实测数据

实测数据来自 2016~2019 年唐乃亥水文站的

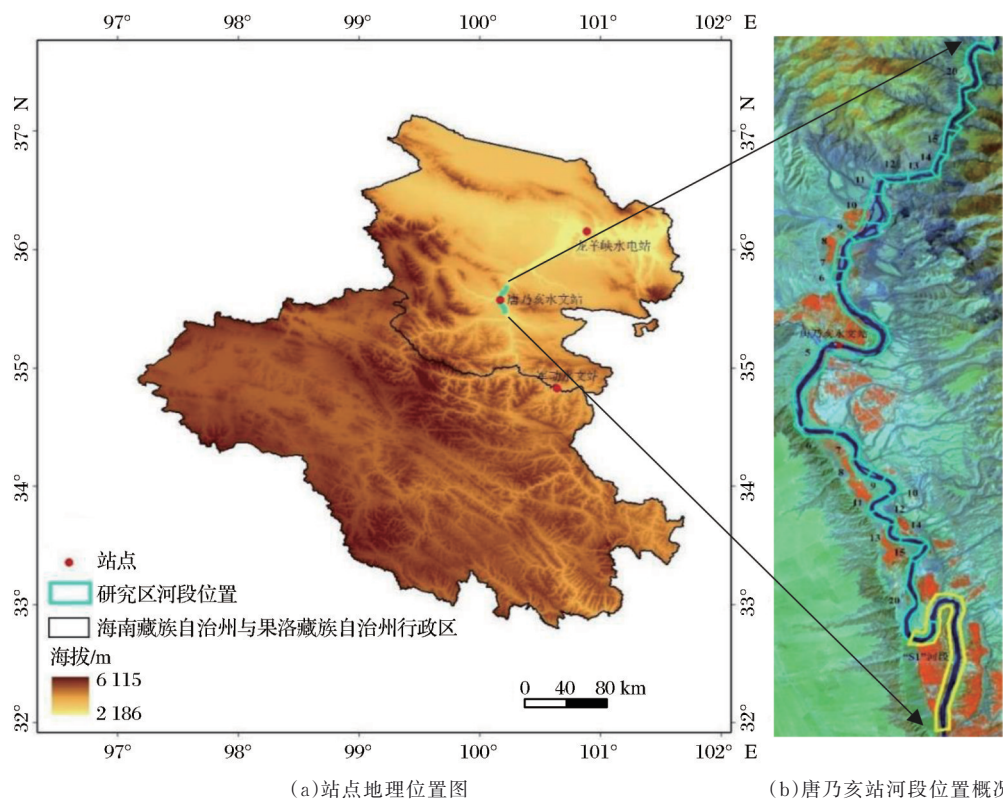


图 1 研究区概况

Fig.1 General situation of the study area

逐日径流观测数据,用于关系拟合法模型的率定和反演精度的验证。为了去除冰情对河宽提取的影响,仅对每年4~10月份的数据进行整理分析。与改进的曼宁公式法不同,关系拟合法需要径流实测数据的率定,因此将径流实测数据分为两个部分,2016~2018年每年4~10月的数据为率定数据,2019年4~10月的数据为验证数据。

3 研究方法

研究的技术路线如图2所示,主要包括两个方面的内容:一是基于GEE云平台的Sentinel-1/2数据预处理及目标水体的遥感提取,其中水体指数的计算及阈值分割是该部分的关键;二是利用多元遥感数据对水力学参数进行估算,进而基于关系拟合法和改进的曼宁公式法进行河道径流量反演,通过对比分析完成精度评价。

3.1 水体提取方法

3.1.1 Sentinel-2提取水体方法

光学遥感数据提取水体的常用方法包括单波段阈值法、多光谱波段法、水体指数法和光谱匹配法^[21]。在水体指数法方面,McFeeters^[22]提出了归一

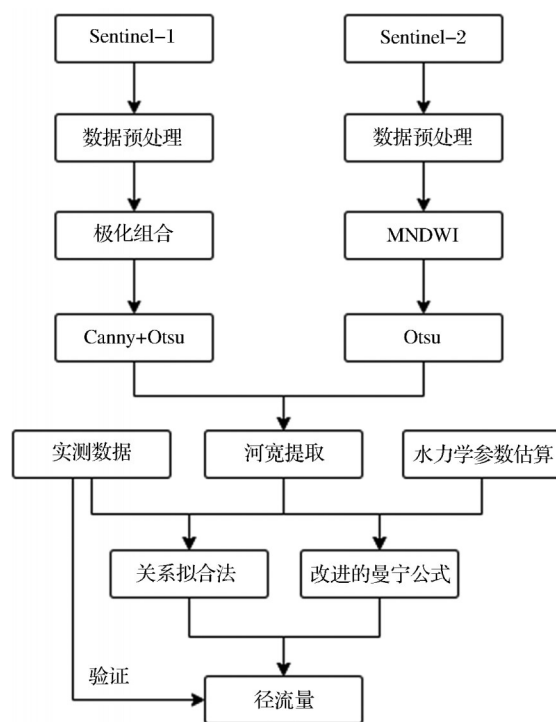


图 2 技术路线图

Fig.2 Technology road map

化差异水体指数(NDWI),该方法是基于近红、绿波段建立的归一化比值指数。在NDWI方法的基础

上, Xu^[23] 提出了改进的归一化差异水体指数 (MNDWI), 与 NDWI 相比, 这种方法具有更广泛的适用性, 能较好地揭示水体细微特征, 识别阴影对水体的影响。MNDWI 计算公式可表示为:

$$\text{MNDWI} = \frac{\rho_{\text{Green}} - \rho_{\text{MIR}}}{\rho_{\text{Green}} + \rho_{\text{MIR}}} \quad (1)$$

其中: ρ_{Green} 和 ρ_{MIR} 分别代表绿色和中红外波段的反射率, 与 Sentinel-2 数据中的 B3 和 B11 波段相对应。

在 Sentinel-2 卫星遥感影像计算 MNDWI 的基础上, 研究利用大津法对目标河段进行二值化处理^[24], 以便计算水体面积。该方法的基本思想是根据图像灰度特性, 设定一个阈值将图像分为背景和目标两部分, 使这两部分的类内方差最小, 类间方差最大。

3.1.2 Sentinel-1 提取水体方法

雷达影像波段信息较少, 主要是根据地物的后向散射系数、纹理特征等进行地物分类, 主要的水体信息提取方法有阈值分割和模式分类^[25]。本研究利用 VV 和 VH 极化影像相乘得到的影像提取水体, 并利用 Canny 边缘检测与 Otsu 结合方法对影像进行二值化处理^[26]。该方法操作步骤为使用 Canny 边缘检测器计算影像边缘, 利用形态学膨胀建立缓冲区, 在缓冲区内使用大津法对影像进行二值化处理。

3.2 径流量反演方法

3.2.1 关系拟合法

径流量是指在某一时段内通过河流某一过水断面的水量, 可用河宽、河深、与流速进行计算。其

公式如式(2)所示。Leopold 等^[27] 提出天然河道断面上径流量与其他水力要素之间存在幂函数关系, 其中河宽与径流量的关系可用式(3)来表示。

$$Q = W \cdot D \cdot V \quad (2)$$

$$W = aQ^b \quad (3)$$

其中: Q 、 W 、 D 与 V 分别为径流量、河宽、河深和流速; a 和 b 是经验参数。

3.2.2 改进的曼宁公式

常见的河流断面有矩形断面、梯形断面和弧形断面。可参考图 3 给出的断面示意图, 三者的径流量计算分别见公式(4)~(6)^[11,28]。

$$Q_a = \frac{S^{\frac{1}{2}}}{n} \frac{(W \cdot D)^{\frac{5}{3}}}{(W + 2D)^{\frac{2}{3}}} \quad (4)$$

$$Q_b = \frac{S^{\frac{1}{2}}}{n} \frac{(W \cdot D - D^2 \tan^2 \theta)^{\frac{5}{3}}}{W + 2D \frac{1 - \cos \theta}{\sin \theta}} \quad (5)$$

$$Q_c = \frac{S^{\frac{1}{2}}}{n} \frac{W \cdot D^{\frac{5}{3}} \left(\frac{1}{2} \left(\pi \cdot \frac{\alpha}{180^\circ} - \sin \alpha \cdot \cos \alpha \right) \right)^{\frac{5}{3}}}{\sin \alpha \cdot \left(\pi \cdot \frac{\alpha}{180^\circ} \right)^{\frac{2}{3}} (1 - \cos \alpha)^{\frac{5}{3}}} \quad (6)$$

对于较宽的河流 ($W \gg D$), 公式(4)~(6)可以进一步转换为公式(7), 具体如下:

$$Q \approx \frac{S^{\frac{1}{2}}}{n} W \cdot D^{\frac{5}{3}} \quad (7)$$

其中: Q_a 、 Q_b 、 Q_c 分别为矩形断面、梯形断面和弧形断面径流量; S 为比降; n 为糙率; W 为河宽; D 为水深。

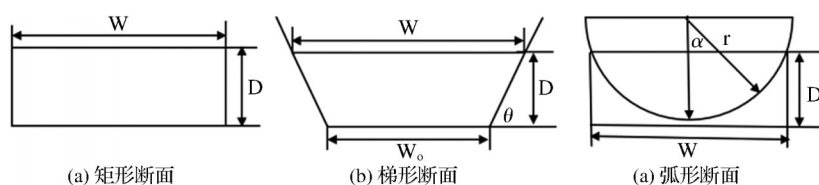


图 3 河流断面示意图

Fig.3 Schematic diagram of river section

3.3 水力学参数计算

3.3.1 平均河宽

利用遥感数据可以直接测量河宽, 但这种方法易受到植被、湿润地面等因素的影响, 因此通过计算水体面积获得平均河宽的方法比直接测量河宽的方法精度更高。具体来说, 在河道水体提取的基础上, 水体面积的计算公式如下:

$$A_w = \frac{P_w A_{\text{total}}}{P_{\text{total}}} \quad (8)$$

其中: P_w 和 P_{total} 分别代表研究区内水体像素个数和

研究区内所有像素个数; A_w 与 A_{total} 分别代表研究区内水体面积和整个研究区影像总面积。在此基础上, 水体面积除以给定河段的长度即可求得相应河宽^[29], 公式如下:

$$W = \frac{A_w}{L} \quad (9)$$

其中: A_w 为水体面积; L 为给定河段的长度。研究区位于唐乃亥水文站附近河段, 该站点上下游 1 km 处为“S”型弯曲形状。考虑到弯曲河道河宽计算的不确定性, 并参考 Smith 等^[30] 研究选择 10 km 河段

长度计算辫状河段的平均河宽,除此之外,Bjerkile等^[29]在2005年提出河段长度应至少为河宽的10倍以上。基于此,研究最终选定的河段长度为10 km,即唐乃亥水文站上下游各5 km的长度。除此之外,还对河段长度变化引起河道径流量反演精度差异进行了河段长度敏感性分析。

3.3.2 糙率

糙率是参与水力计算较为灵敏的参数,与植被、河渠材料、阻水物、河道弯曲程度以及河道的不规则程度有关^[31]。在缺少实测数据的情况下,可根据目标河段相关条件进行选值计算,计算公式如下^[32-33]:

$$n = (n_0 + n_1 + n_2 + n_3 + n_4) \cdot n_5 \quad (10)$$

其中: n_0 为天然顺直、光滑、均匀渠道的基本糙率; n_1 代表了水面不规则的影响; n_2 为考虑河道横断面形状和尺寸变化的影响; n_3 为阻水物的影响; n_4 代表了植被的影响; n_5 为河道曲折变化的影响。关于 n_0 - n_5 的具体取值可以参考徐慧敏^[33]关于糙率的研究,本研究计算糙率值为0.039。

3.3.3 比降

比降为河段上下游落差与河段总长度的比值,其计算公式如式(11)。研究采用30 m分辨率的SRTM DEM数据计算河段落差。为了降低DEM数据对河道高度模拟的不确定性,已有研究均建议采用长距离河段计算河道比降^[12,34]。本研究从唐乃亥站上游军功站到下游龙羊峡水电站方向选择了一段约为200 km的河段进行比降计算。在ArcGIS软件中,以30 m河段间隔提取河流中心线上的高程值进行比降计算,高程随距离变化的情况如图4所示。通过线性拟合求得该河段的平均比降为 0.0024 mm^{-1} 。

$$S = \frac{(H_U - H_D)}{D} \quad (11)$$

式中: H_U 是上游断面的高程, H_D 是下游断面的高程, D 是上下游断面之间河段总长度。

3.3.4 流速

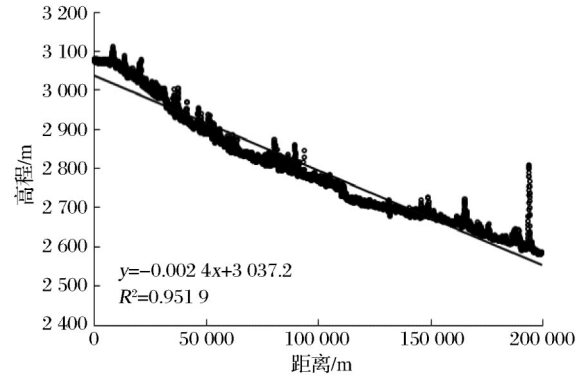
流速是指河流中水质点单位时间内移动的距离。Tourian等^[35]提出一个利用河宽和比降估算流速的公式,如公式(12)所示:

$$V = 1.48 W^{0.8} S^{0.6} \quad (12)$$

其中: W 是平均河宽, S 为比降。

3.3.5 河深

根据径流量计算公式(2)与(7),Sichangle等^[36]推导出了一个估算河流水深的公式(13):



(黑色点为利用DEM提取的河流中心线上点的高程值)

图4 唐乃亥站点高程-距离散点图

Fig.4 Scatter plot of elevation-distance of Tangnaihai station

$$D = \frac{Vn^{\frac{3}{2}}}{S^{\frac{1}{2}}} \quad (13)$$

其中: V 是流速, n 为糙率, S 为比降。

3.4 精度评价

径流量反演模型评价指标包括纳什效率系数(Nash and Sutcliffe coefficient, NSE),均方根误差(Root Mean Squared Error, RMSE),相对均方根误差(Relative Root Mean Squared Error, RRMSE)。其计算公式分别为:

$$NSE = 1 - \frac{(Q_m - Q_c)^2}{(Q_m - \bar{Q}_c)^2} \quad (14)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum (Q_m - Q_c)^2}{n}} \quad (15)$$

$$RRMSE = \frac{RMSE}{\bar{Q}_m} \cdot 100\% \quad (16)$$

其中: Q_m 是实测径流量, Q_c 模型反演径流量的估测值, \bar{Q}_m 是实测径流量的平均值, n 为数据量。

4 结果与分析

4.1 径流量反演精度评价

利用Sentinel-1数据提取水体时,山体阴影对水体提取精度有一定的影响,因此选择了唐乃亥站上游附近山体阴影较小区域(下称“S1”河段)提取水体,河段位置概况如图1所示。通过Sentinel-2数据建立“S1”河段与站点河段之间的平均河宽关系,实现对站点河段径流量的反演,河段之间平均河宽关系如图5所示,从图中可以看出二者具有良好的相关性。

在利用关系拟合法反演径流量时,选取了率定期平均河宽与站点实测数据建模,验证期数据进行模型

验证,平均河宽-径流量模型拟合结果如图 6 所示。

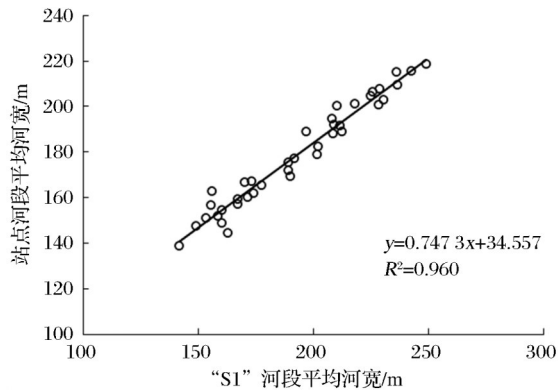


图 5 唐乃亥站点河段与“S1”河段平均河宽相关关系散点图

Fig.5 Scatter plot of average river width correlation between Tangnaihai station reach and “S1” reach

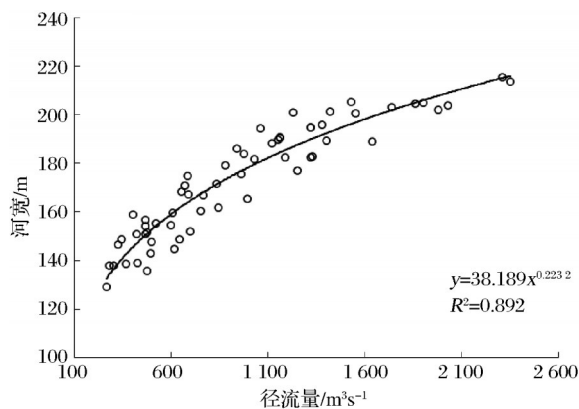


图 6 Sentinel-1/2 数据平均河宽与实测径流量相关关系散点图

Fig.6 Scatter plot of correlation between average river width and measured runoff of sentinel-1/2 data

从图中可看出,利用 Sentinel-1/2 数据在唐乃亥水文站建立的平均河宽-径流模型效果较好, R^2 超过了 0.89。利用平均河宽与站点实测数据通过模型一进行径流量反演,平均河宽与估算的水力学参数通过模型二进行径流量反演研究,其精度评价如表 1 所示。

可以看出,两种模型反演径流量的结果均较好,NSE 值均超过了 0.80;模型一、二的 RMSE 值分别为 $233.431 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ 、 $271.704 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$,RRMSE 的值分别

表 1 关系拟合法精度评价

Table 1 Precision evaluation table of relation fitting

	method		
	NSE	RMSE/ m^3s^{-1}	RRMSE/%
模型 1(验证期)	0.855	233.431	16
模型 2	0.809	271.704	24

为 16%、24%,表明采用关系拟合法反演径流量结果优于改进的曼宁公式法。

4.2 河段长度敏感性分析

在利用 10 km 河段对唐乃亥站点径流量进行反演的基础上,讨论了河段长度的差异对反演精度的影响。基于 GEE 平台提供的 2016~2019 年 Sentinel-2 数据,根据河段内实际云量对数据进行筛选,计算不同长度河段的平均河宽,通过建立平均河宽-径流模型与改进的曼宁公式两种方法对比分析了河段长度的差异对反演精度的影响。河段长度从站点上下游各 5 km 的长度开始递增,至上下游各 20 km 的长度结束,河段概况如图 1 所示。从图中可以看出,站点上下游各 7 km、8 km、9 km、10 km 河道末端均存在辫状河心滩。将重复日期下不同河段的平均河宽以归一化计算结果显示,如图 7 所示。不同长度河段通过云量筛选后影像数量和重复日期下利用两种模型反演径流量的精度评价如表 2 所示。

从图 7 可以看出,在汛情期间,辫状河心滩河段如站点上下游各 10 km、11 km、12 km、13 km、9 km、7 km 河段提取的河宽明显高于其他长度河段。而非汛情期间,辫状河段和非辫状河段提取平均河宽结果差异不大。这是因为,汛情期间河心滩被淹没,导致提取的平均河宽变宽。在整个研究时间段内,站点上下游 15 km 和 20 km 河段的平均河宽随着下游河道变窄均小于其他长度河段平均河宽。

从表 2 中可以看出,随着河段长度的增加,影像幅数在逐渐减少,从上下游 5 km 河段的 49 幅影像减少到上下游 20 km 河段的 35 幅影像。从不同长度河段分别建立的平均河宽-径流量模型结果中可以看出,模型精度虽有波动,但精度均较高,其 NSE

表 2 Sentinel-2 数据不同长度河段的数据量与重复日期下径流量模型反演精度结果

Table 2 The number of sentinel-2 of different length river sections and the inversion accuracy results of runoff model under repeated date

河段长度/km	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	20
数据量/幅	49	48	46	46	46	44	44	42	41	41	39	35
模型一NSE/-	0.915	0.931	0.947	0.940	0.906	0.950	0.958	0.913	0.877	0.884	0.881	0.842
模型二NSE/-	0.892	0.843	0.885	0.838	0.928	0.622	0.854	0.952	0.955	0.910	0.854	0.774

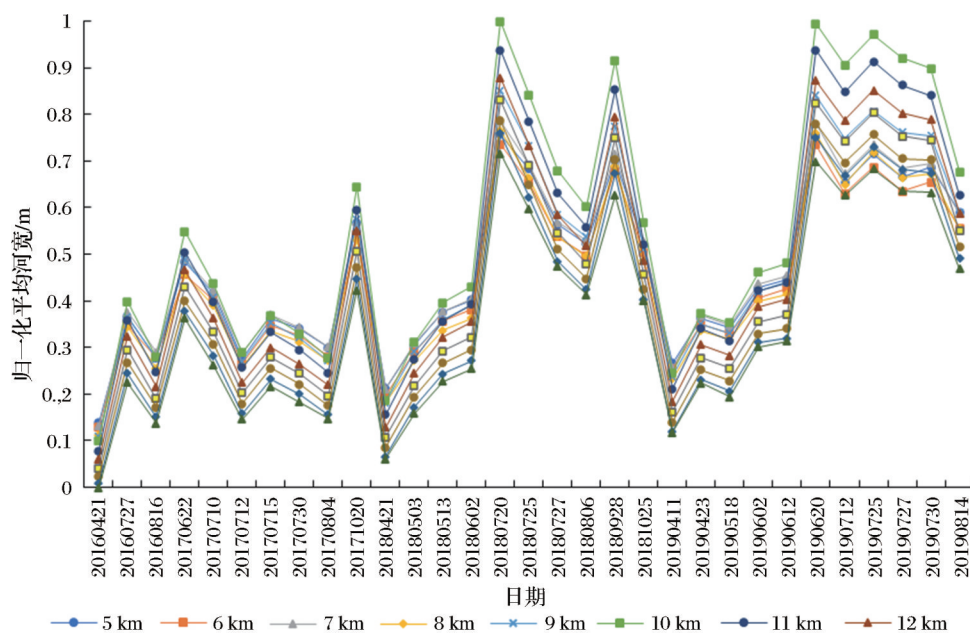


图7 不同长度河段的重复日期的归一化河宽计算结果

Fig.7 Calculation results of normalized river width of different length river sections under repeated dates

值都超过了 0.84;从改进的曼宁公式反演结果可以看出,不同长度河段计算的平均河宽对径流量反演结果有较大影响,因此研究分析了重复日期下河段波动区平均河宽与改进的曼宁公式法反演精度之间的关系^[4],相关关系如图 8 所示。波动区平均河宽计算如式(17)。

$$W_c = \frac{A_{max} - A_{min}}{L} \quad (17)$$

其中: W_c 为河段的波动区平均河宽, A_{max} 为河段的最大水面范围面积, A_{min} 为河段的最小水面范围面积, L 为河段的长度。

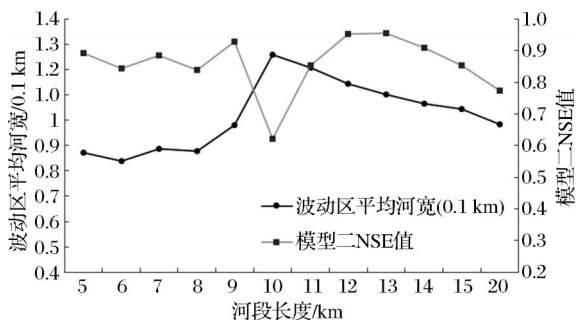


图8 波动区平均河宽与模型二精度相关关系图

Fig.8 Correlation between the average river width in the fluctuation area and the precision of the second model

从图 8 可以看出,在波动区平均河宽变化不大时,模型二的精度变化也较小,随着汛期河心滩被淹没,波动区平均河宽的急剧增加,模型精度也随之下降。因此在利用模型二进行径流量反演监测

时,选择非辫状河段可以提高径流量反演精度。

4.3 河段径流量数据补充

由于本文根据研究区实际云量对 Sentinel-2 数据进行筛选,不同河段具有不同的数据量。为了增加监测日期样本量,本文研究了站点河段与上下游河段的平均河宽关系,并通过二者线性相关关系以达到对站点河段径流量反演数据的补充。上游河段考虑从唐乃亥站到军功站方向的河段,下游河段为唐乃亥站到龙羊峡水电站方向河段,每隔 10 km 建立一个河段,直到无数据补充。图 9 为唐乃亥站点河段与上下游河段重复日期下归一化平均河宽的对比图。

从图 9 可以看出河段之间平均河宽的变化具有相似性,在汛期平均河宽升高,非汛期平均河宽降低。下游 10 km 河段的平均河宽在汛期期间波动较大,原因可能为河段内河心滩被淹没,增加了平均河宽计算的不确定性。为了进一步比较上下游河段与唐乃亥站点河段的河宽关系,研究绘制了站点河段与上下游河段平均河宽的相关关系。根据二者之间的线性相关关系,对补充的监测日期数据进行径流量反演与精度评价,其精度评价如表 3 所示。从表中可以看出,站点河段与上下游河段平均河宽之间具有强烈的相关性,相关系数均超过了 0.96;模型一的 NSE 值都在 0.80 以上,模型二在距离较远的上游 60 km 与上游 70 km 河段精度有所下降,NSE 值分别为 0.762 与 0.793。总体来说利用上下游河

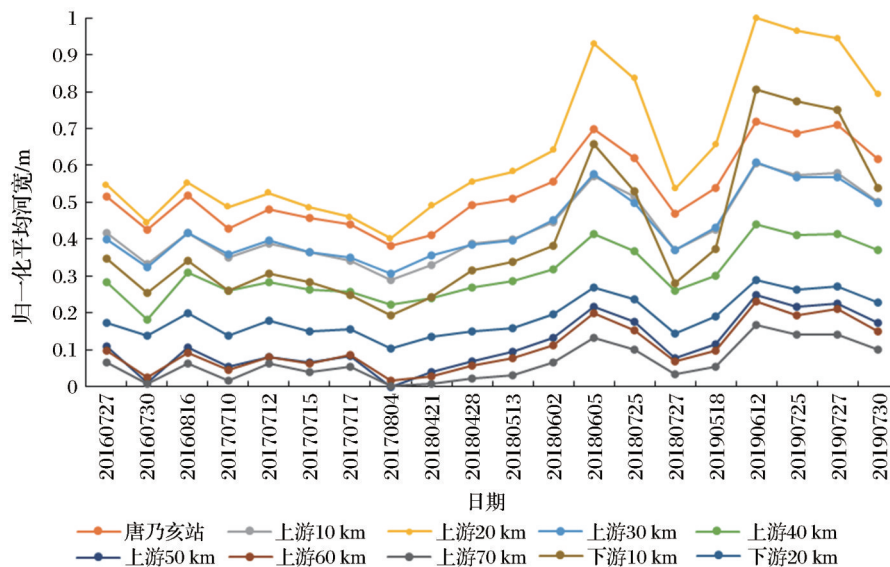


图 9 唐乃亥站点河段与上下游河段归一化平均河宽对比图

Fig. 9 Comparison of normalized average river width between Tangnaihai station and upper and lower reaches

表 3 上下游河段径流量反演精度评价表

Table 3 Evaluation table for runoff inversion accuracy of upper and lower reaches

	上游 10 km	上游 20 km	上游 30 km	上游 40 km	上游 50 km	上游 60 km	上游 70 km	下游 10 km	下游 20 km
相关系数(-)	0.996	0.981	0.985	0.984	0.988	0.980	0.965	0.969	0.988
模型一 NSE(-)	0.913	0.869	0.894	0.840	0.822	0.801	0.808	0.906	0.847
模型二 NSE(-)	0.846	0.877	0.860	0.859	0.821	0.762	0.793	0.808	0.808
补充数据量/幅	36	44	42	37	36	36	40	22	17
去除重复数据量/幅	36	9	3	2	4	3	4	5	2

段补充的监测数据精度较好,补充数据达到 68 幅, Sentinel-2 数据量最终达到 117 幅影像,实现了对站点监测日期的加密补充。

5 结 论

研究基于 GEE 云平台,利用 Sentinel-1/2 数据提取水体,估算了水力学参数,利用两种模型实现了河流径流量反演,讨论了河段长度的改变对径流量反演结果的影响,并分析了站点河段与上下游河段平均河宽之间的线性相关关系,得到以下主要结论:

(1)关系拟合法与改进的曼宁公式法在唐乃亥站点河段径流量反演时均表现出良好的效果,NSE 值均超过了 0.80,证明其在反演径流量方面的可行性。其中改进的曼宁公式法通过完全遥感的手段估算了水力学参数,实现了河流径流量的反演,可为缺少或缺失水文资料地区的径流量反演提供参考。

(2)从波动区平均河宽与模型二模型精度的相关关系中可以看出,辫状河道的平均河宽在汛期波动较大,影响反演精度。因此在利用模型二进行径流量反演监测时,可选择非辫状河段以提高反演精度。

(3)站点河段与上下游河段平均河宽之间具有强烈的线性相关关系,相关系数均超过了 0.96,利用相关关系补充的径流量监测数据,也具有较好反演精度,模型一的 NSE 值都在 0.80 以上,模型二的 NSE 值随着上下游河段与站点河段距离变远精度有所下降,但均超过 0.76。总体来说,利用上下游河段补充的数据具有较好的精度,补充数据达到 68 幅,实现了对站点径流量监测日期的补充。因此,在接下来的工作中可以利用多源遥感数据,如 Landsat 系列数据进行径流量反演,实现河流径流量的密集监测。

参考文献 (References):

- [1] 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.
- [2] Yu Qiying, Zhang Jianghui, Bai Yungang, *et al.* Evolution characteristics of the headstream of the Hotan River headstream from 1957 to 2018 [J]. Arid Zone Research, 2021, 38(2): 494-503. [余其鹰, 张江辉, 白云岗, 等. 1957~2018 年和田河源流径流演变特征 [J]. 干旱区研究, 2021, 38(2): 494-503.]

- [3] Wang Pengfei, Yang Shengtian, Wang Juan, *et al.* Discharge estimation with hydraulic geometry using unmanned aerial vehicle[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2020, 51(4): 492-504.[王鹏飞, 杨胜天, 王娟, 等. 星-机一体的水力几何形态流量估算方法[J]. 水利学报, 2020, 51(4): 492-504.]
- [4] Chang Haoxue. River discharge derived from Sentinel-1 SAR data: a case-study in the Gan River[D]. Wuhan: Wuhan University, 2018.[常好雪. 结合 Sentinel-1 SAR 影像的河川径流量反演研究—以赣江为例[D]. 武汉: 武汉大学, 2018.]
- [5] Shi Zhuolin, Huang Chang. Recent advances in remote sensing of river characteristics [J]. 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[J]. 地理科学进展, 2020, 39(4): 670-684.]
- [6] Wang Yifan, Xu Hanqiu. Comparison of remote sensing water indices based on objective threshold value and the random forest Gini Coefficient[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2020, 35(5): 1089-1098.[王一帆, 徐涵秋. 基于客观阈值与随机森林 Gini 指标的水体遥感指数对比[J]. 遥感技术与应用, 2020, 35(5): 1089-1098.]
- [7] Liu Yaoyi, Tian Tian, Zeng Peng, *et al.* Surface water change characteristics of Taihu Lake from 1984~2018 based on Google Earth Engine[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2020, 31(9): 3163-3172.[刘垚磊, 田恬, 曾鹏, 等. 基于 Google Earth Engine 平台的 1984~2018 年太湖水域变化特征[J]. 应用生态学报, 2020, 31(9): 3163-3172.]
- [8] Huang Ping, Xu Xiaohua, Li Delong. Rapid extraction of water area in Poyang Lake based on Sentinel-1 satellite Images[J]. Journal of Water Resources Research, 2018, 7(5): 483-491.[黄萍, 许小华, 李德龙. 基于 Sentinel-1 卫星数据快速提取鄱阳湖水体面积[J]. 水资源研究, 2018, 7(5): 483-491.]
- [9] Sun Yayong, Li Xiaotao, Yang Fengjie, *et al.* Study on the mountain water extraction method of the space-borne SAR Image[J]. Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2014, 12(3): 258-263.[孙亚勇, 李小涛, 杨锋杰, 等. 基于星载 SAR 数据的山区水体提取方法研究[J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2014, 12(3): 258-263.]
- [10] Bjerkle 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.
- [11] Sichangi A W, Wang L, Yang K, *et al.* Estimating continental river basin discharges using multiple remote sensing data sets [J]. Remote Sensing of Environment, 2016, 179: 36-53.
- [12] Kebede M G, Wang L, Li X, *et al.* Remote sensing-based river discharge estimation for a small river flowing over the high mountain regions of the Tibetan Plateau[J]. International Journal of Remote Sensing, 2020, 41(9): 3322-3345.
- [13] Chen Siyü, Li Jiqing, Xie Yutao. River discharge derived of Li-jiang River basin based on Sentinel-1 SAR data[J]. Pearl River, 2020, 41(5): 116-122.[陈思雨, 李继清, 谢宇韬, 等. 基于 Sentinel-1 SAR 遥感影像的漓江流域径流反演[J]. 人民珠江, 2020, 41(5): 116-122.]
- [14] Hao Binfei, Han Xujun, Ma Mingguo, *et al.* Research process on the application of Google Earth Engine in geoscience and environmental sciences [J]. Remote Sensing Technology and Application, 2018, 33(4): 600-611.[郝斌飞, 韩旭军, 马明国, 等. Google Earth Engine 在地球科学与环境科学中的应用研究进展[J]. 遥感技术与应用, 2018, 33(4): 600-611.]
- [15] Wang Daoxi, Tian Shimin, Jiang Siqi, *et al.* Research progress of the evolution of runoff in the source area of the Yellow River [J]. Yellow River, 2020, 42(9): 90-95.[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.]
- [16] Meng F, Su F, Yang D, *et al.* Impacts of recent climate change on the hydrology in the source region of the Yellow River basin [J]. Journal of Hydrology Regional Studies, 2016(6): 66-81.
- [17] Liu Zhenxi, Liu Qiang, Zhang Shijun. Analysis about the causes of decreasing runoff of Tangnaihai in the Yellow River source region [J]. Gansu Water Resources and Hydropower Technology, 2008, 44(1): 13-14.[刘振西, 刘强, 张世军. 黄河源区唐乃亥站径流持续减少的原因分析[J]. 甘肃水利水电技术, 2008, 44(1): 13-14.]
- [18] Ye Peilong, Zhang Qiang, Wang Ying, *et al.* Climate change in the upper Yellow River basin and its impact on ecological vegetation and runoff from 1980 to 2018[J]. Transactions of Atmospheric Sciences, 2020, 43(6): 967-979.[叶培龙, 张强, 王莺, 等. 1980~2018 年黄河上游气候变化及其对生态植被和径流量的影响[J]. 大气科学学报, 2020, 43(6): 967-979.]
- [19] Yang Kui, Yang Jianbing, Jiang Bingru. Sentinel-1 satellite overview [J]. Urban Geotechnical Investigation & surveying, 2015(2): 24-27.[杨魁, 杨建兵, 江冰茹. Sentinel-1 卫星综述[J]. 城市勘测, 2015(2): 24-27.]
- [20] Huang Q, Long D, Du M, *et al.* Discharge estimation in high-mountain regions with improved methods using multisource remote sensing: a case study of the Upper Brahmaputra River [J]. Remote Sensing of Environment, 2018, 219: 115-134.
- [21] Song Wenlong, Lu Jingxuan, Yang Kun, *et al.* Research progress of surface water remote sensing monitoring [J]. Satellite Applications, 2019(11): 41-47.[宋文龙, 路京选, 杨昆, 等. 地表水体遥感监测研究进展[J]. 卫星应用, 2019(11): 41-47.]
- [22] McFeeters S K. The use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features [J]. International Journal of Remote Sensing, 1996, 17(7): 1425-1432.
- [23] Xu H Q. Modification of Normalised Difference Water Index (NDWI) to enhance open water features in remotely sensed imagery [J]. International Journal of Remote Sensing, 2006, 27(14): 3025-3033.
- [24] Otsu N. A Threshold selection method from gray-level histogram [J]. Automatica, 1975, 11(23): 285-296.
- [25] Chen Zhiguo. Flooded area classification by high-resolution SAR images [D]. Wuhan: Wuhan University, 2017.[陈志国. 高分辨率 SAR 卫星影像洪水区域提取应用研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2017.]
- [26] Gennadii D, Jaap S, Hessel W, *et al.* A 30 m resolution surface water mask including estimation of positional and thematic differences using Landsat 8, SRTM and OpenStreetMap: a case study in the Murray-Darling Basin, Australia [J]. Remote Sensing, 2016, 8(5): 386. DOI: 10.3390/rs8050386.
- [27] Leopold L B, Maddock T. The hydraulic geometry of stream channels and some physiographic implications [R]. US Geological Professional Paper, 1953, 252: 1-57.
- [28] Wang Ning. Research and implementation of river runoff moni-

- toring system based on multi-source radar remote sensing technology[D]. Kaifeng: Henan University, 2019.[王宁. 基于多源雷达遥感技术的河流径流监测系统研究与实现[D]. 开封: 河南大学, 2019.]
- [29] Bjerklie D M, Moller D, Smith L C, *et al.* Estimating discharge in rivers using remotely sensed hydraulic information[J]. *Journal of Hydrology*, 2005, 309(1-4): 191-209.
- [30] 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[J]. *Water Resources Research*, 1996, 32(7): 2021-2034.
- [31] Coon W F. Estimation of roughness coefficients for natural stream channels with vegetated banks[R]. United States Geological Survey Water Supply Paper, 1998: 2441. DOI: 10.3133/wsp2441.
- [32] Chow V T. Open channel hydraulics[M]. New York: McGraw-Hill College, 1959.
- [33] Xu Huimin. Research on river roughness in water conservancy projects[J]. *Water Conservancy Science and Technology and Economy*, 2010, 16(11): 1253-1256.[徐慧敏. 关于水利工程中河道糙率的研究[J]. *水利科技与经济*, 2010, 16(11): 1253-1256.]
- [34] LeFavour G, Alsdorf D. Water slope and discharge in the Amazon River estimated using the shuttle radar topography mission digital elevation model[J]. *Geophysical Research Letters*, 2005, 32(17): L17404. DOI: 10.1029/2005GL023491.
- [35] Tourian M J, Tarpanelli A, Elmi O, *et al.* Spatiotemporal densification of river water level time series by multimission satellite altimetry[J]. *Water Resources Research*, 2016, 52(2): 1140-1159.
- [36] Sichangi A, Wang L, Hu Z. Estimation of river discharge solely from remote-sensing derived data: an onital study over the Yangtze River[J]. *Remote Sensing*, 2018, 10(9): 1385. DOI: 10.3390/rs10091385.

Research on Inversion of River Discharge in High Mountain Region based on GEE Platform

Shi Yimeng^{1,3}, Liu Xisheng², Zhu Wenbin³, Song Hongli¹

(1.School of Earth Science and Engineering, Hebei University of Engineering, Handan 056038, China;

2.Hydrology and Water Resources Forecast Center of Qinghai Province, Xining 810001, China;

3.Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Beijing 100101, China)

Abstract: River runoff is one of the most important hydrological elements on land. Accurate access to runoff information plays an important role in regional water resources evaluation and ecological restoration. Based on the Sentinel-1 data and Sentinel-2 data provided by the Google Earth Engine cloud platform, combined with digital elevation model, the hydraulic parameters such as river length, river width, roughness, slope, river depth and velocity were estimated by remote sensing. Then, the relationship fitting method and improved Manning formula method were used to inverse the runoff of the reach near Tangnaihai station in the source area of the Yellow River. The influence of the length difference of the reach on the runoff inversion accuracy is discussed. By establishing the river width relationship between the station reach and the upper and lower reaches, the runoff monitoring time series of the station reach can be extended and supplemented. The results show that the two models can effectively simulate and estimate the runoff, and the Nash efficiency coefficient is above 0.80; the root mean square error of the relationship fitting method and the improved Manning formula method are $233.431 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ and $271.704 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ respectively, and the relative root mean square error are 16% and 24% respectively. The inversion accuracy of relationship fitting method is better than that of the improved Manning formula method. Through the comparative analysis of runoff inversion results of different lengths of river reaches, it is found that the river width estimation of braided river core beach has great uncertainty in flood season, which affects the accuracy of runoff inversion, and should be avoided in the selection of river reach; there is a strong correlation between the average river width of the station reach and the upstream and downstream reaches, and the correlation coefficient is above 0.96. The data can provide an important supplement for the runoff inversion of the station reach and realize the intensive monitoring of the runoff of the target river section.

Key words: Discharge retrieval; GEE cloud platform; Water index; Sentinel-1; Sentinel-2