

## 基于多源雷达遥感技术的黄河径流反演研究

闵林<sup>①②③</sup> 王宁<sup>①②④</sup> 毋琳<sup>①②④</sup> 李宁<sup>①②④</sup> 赵建辉\*<sup>①②④</sup>

<sup>①</sup>(河南大学河南省智能技术与应用工程技术研究中心 开封 475004)

<sup>②</sup>(河南大学河南省大数据分析与管理重点实验室 开封 475004)

<sup>③</sup>(河南大学信息化管理办公室 开封 475004)

<sup>④</sup>(河南大学计算机与信息工程学院 开封 475004)

**摘要:** 黄河是我国华北地区重要的水资源,采用雷达遥感方式对其径流进行监测可以便捷地反映出黄河的旱涝变化趋势,具有重要的现实意义。目前,雷达遥感径流反演常用雷达高度计(RA)获取水位信息用以构建水深-径流模型,这种方法忽略了河面变化对径流波动的影响,具有一定的局限性。该文提出一种基于多源雷达遥感技术的径流计算模型(MRRS-RCM),综合应用RA测高技术合成孔径雷达(SAR)信息提取技术,以曼宁公式为基础,构建MRRS-RCM模型实现径流反演。该文选取黄河下游3个研究站点进行径流反演实验,结果证明MRRS-RCM模型径流反演结果的相对均方根误差(RRMSE)达到13.969%,优于传统径流监测15%~20%的精度要求。

**关键词:** 合成孔径雷达; 径流计算模型; 雷达高度计; 关系拟合; 黄河

中图分类号: TN958

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2020)07-1590-09

DOI: [10.11999/JEIT190494](https://doi.org/10.11999/JEIT190494)

## Inversion of Yellow River Runoff Based on Multi-source Radar Remote Sensing Technology

MIN Lin<sup>①②③</sup> WANG Ning<sup>①②④</sup> WU Lin<sup>①②④</sup> LI Ning<sup>①②④</sup> ZHAO Jianhui<sup>①②④</sup>

<sup>①</sup>(Henan Engineering Research Center of Intelligent Technology and Application, Henan University, Kaifeng 475004, China)

<sup>②</sup>(Henan Key Laboratory of Big Data Analysis and Processing, Henan University, Kaifeng 475004, China)

<sup>③</sup>(Network Information Center Office, Henan University, Kaifeng 475004, China)

<sup>④</sup>(College of Computer and Information Engineering, Henan University, Kaifeng 475004, China)

**Abstract:** The Yellow River is an important water resource in China. Using radar remote sensing to monitor the runoff of the Yellow River can conveniently reflect the changing trend of drought and flood, which has important practical significance. At present, Radar Altimeter (RA) commonly is used to construct a water depth-runoff model in runoff inversion. This method ignores the influence of river surface change on runoff fluctuation and has certain limitations. A Multi-source Radar Remote Sensing Runoff Calculation Model (MRRS-RCM) is proposed. In this study, RA technology and Synthetic Aperture Radar (SAR) technology are used to construct MRRS-RCM model on the basis of the Manning's equation to realize runoff inversion. Three stations are selected for experiments in the lower reaches of the Yellow River. The results show that the Relative Root Mean Square Error (RRMSE) of MRRS-RCM runoff inversion reaches 13.969%, which is better than the accuracy requirement of traditional runoff monitoring of 15%~20%.

**Key words:** Synthetic Aperture Radar (SAR); Runoff calculation model; Radar Altimetry (RA); Relationship fitting; Yellow River

收稿日期: 2019-07-03; 改回日期: 2020-01-22; 网络出版: 2020-03-27

\*通信作者: 赵建辉 jhzhao@henu.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金(U1604145, 61871175, 61601437), 河南省高等学校重点科研项目(18B520010, 19A420005), 河南省科技攻关计划项目(182102210233, 192102210082), 河南省青年人才托举工程(2019HYTP006)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (U1604145, 61871175, 61601437), The College Key Research Project of Henan Province (18B520010, 19A420005), The Plan of Science and Technology of Henan Province (182102210233, 192102210082), The Youth Talent Lifting Project of Henan Province (2019HYTP006)

## 1 引言

黄河,是中华民族的母亲河,也是我国华北地区重要的水资源,承担着周边引黄灌区的灌溉用水任务,是我国经济和社会发展的主要制约因素<sup>[1]</sup>。河流径流是陆地上最重要的水文要素之一<sup>[2]</sup>,监测径流可以直接反映黄河的旱涝趋势,有利于保障周边地区人民的安全。雷达遥感具有一定穿透云、雨、雾的能力,可以全天时、全天候观测,不受天气影响<sup>[3]</sup>,其中包括雷达高度计(Radar Altimetry, RA)和合成孔径雷达(Synthetic Aperture Radar, SAR)。

目前,RA已成功应用于内陆水域监测,文献<sup>[4,5]</sup>利用T/P, ERS-2, Envisat和Jason-2卫星RA数据提取水位,拟合实测径流,通过构建水深-径流模型反演了1993~2011年雅鲁藏布江径流。然而,这种模型受输入只有水深的限制,无法表示河面变化与径流波动的关系,因此精度有限。文献<sup>[6]</sup>基于Envisat, Jason-2卫星数据与MODIS光学图像,利用曼宁公式估算了世界上8条主要河流的径流。文献<sup>[7]</sup>基于Jason-2卫星数据和Landsat TM/ETM+光学图像,反演了长江径流。这些研究中的河面由光学图像提取获得,但是,光学遥感受天气影响较大,在极端环境下无法完成河面提取。此外,研究所用的河底高程、水面坡度以及曼宁粗糙系数等参数在实际监测中难以获得。

相比于光学遥感,SAR更加适合极端环境下的河面监测任务<sup>[8]</sup>。文献<sup>[9]</sup>利用ERS-1卫星提取了1993年密西西比河洪水爆发时的水面信息。文献<sup>[10]</sup>利用多时序ERS-1卫星监测加拿大辫状冰川河流,将SAR与地面监测同步进行,提取的河宽与地面监测径流的拟合决定系数达到0.89。这些研究选用的SAR图像分辨率较低,若要更准确地提取河流水面,应选择更高分辨率的SAR图像和更高精度的水面提取算法。文献<sup>[11]</sup>提出了一种改进的ACM算法,采用Sentinel-1A数据,提高了对鄱阳湖水域水面的提取精度。文献<sup>[12]</sup>提出了一种基于Otsu和FCM的混合模糊算法,利用Sentinel-1A数据,对丹江口水库水域实现了精分割提取。这些研究为SAR图像提取河流水面提供了理论基础。

综上所述,本文基于RA测高技术技术和SAR信息提取技术,以提取的黄河水位与河宽结果为依据,结合曼宁公式,构建多源雷达遥感径流计算模型(Multi-source Radar Remote Sensing Runoff Calculation Model, MRRS-RCM),反演黄河径流。

## 2 多源雷达遥感径流计算模型

河流径流 $Q$ ,指单位时间内通过河流某一过水

断面的水量。水位为河流水面高程,可由RA测高技术提取,而水深是指水位到河底高程的距离。在计算河流径流时,首先需要将水位换算为水深,再由水深、河宽以及流速,根据式(1)计算径流。

$$Q = D \cdot V \cdot W \quad (1)$$

其中, $D = H_T - H_0$ , $H_T$ 为水位, $H_0$ 为河底高程, $D$ 为水深, $W$ 为河宽, $V$ 为流速。

在常规径流反演的研究中,通常采用水深-径流模型或曼宁公式等传统径流反演模型。本文将两种方法结合,提出了MRRS-RCM模型。

### 2.1 传统径流反演模型

在水深-径流模型方面,文献<sup>[4]</sup>中利用RA数据提取水位信息,根据式(2)拟合水位与实测径流关系,用以反演河流径流。

$$Q = a \cdot D^b \quad (2)$$

其中, $Q$ 为实测径流, $D$ 为水深,由RA数据提取的水位计算所得, $a$ 和 $b$ 为经验参数,由 $D$ 与 $Q$ 拟合得到。由于该模型只有水深一种输入参数,忽略了河面变化带来的影响,因此径流反演的精度不高。

基于曼宁公式的径流反演方法,通常利用RA数据与光学遥感图像分别提取水位与河宽,再使用曼宁公式计算径流。文献<sup>[6]</sup>中指出,当河宽 $W \gg$ 水深 $D$ 时,曼宁公式可表示为式(3)

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

其中, $S$ 为水面坡度, $n$ 为曼宁粗糙系数。这种模型计算所需的水面坡度、曼宁粗糙系数等参量在实际监测中难以获得,并且计算过程复杂。此外,模型中所用光学遥感图像有可能受气候影响而缺失,使得计算无法进行。

### 2.2 MRRS-RCM模型

考虑到黄河下游的河流特性为“水面浅,河道宽”,满足式(3)的应用条件,因此,本文以曼宁公式为基础,以多源雷达遥感技术提取的水位和河宽作为模型输入,构建MRRS-RCM模型。

在未知河底高程的情况下,将近几年实测的历史最低水位为基准,当日最低水位作为相对河底高程,由式(4)计算相对水深,再以当日实测径流作为基础径流,由式(5)表示河流径流与径流波动量以及基础径流的关系

$$D_R = H_T - H_t \quad (4)$$

$$Q = \Delta Q + Q_0 \quad (5)$$

其中, $D_R$ 为相对水深, $H_t$ 为相对河底高程, $\Delta Q$ 为径流波动量, $Q_0$ 为基础径流。

在水面坡度与曼宁粗糙系数未知的条件下，以河流经验系数表示水面坡度与曼宁粗糙系数的数值关系，如式(6)。根据式(3)~式(6)可得到本文提出的MRRS-RCM模型，如式(7)。

$$\text{rep} = \frac{S^{\frac{1}{2}}}{n} \tag{6}$$

$$Q = \text{rep} \cdot W \cdot D_R^{\frac{5}{3}} + Q_0 \tag{7}$$

其中， $W$ 为河宽， $\text{rep}$ 为河流经验系数，可由式(7)拟合 $D_R$ ， $W$ 与实测径流 $Q$ 得到。

MRRS-RCM模型是以水位与河宽作为输入，相较于水深-径流模型，该模型可以反映河面变化与径流波动的关系。与曼宁公式方法相比，MRRS-RCM模型无需水面坡度与曼宁粗糙系数等参数的输入，简化了计算过程。

### 3 基于MRRS-RCM模型的径流反演方法

本文以MRRS-RCM模型为核心，以RA测高和SAR信息提取作为获取水位与河宽的技术手段，提出了一种新型径流反演方法，其流程如图1所示。

#### 3.1 水位提取

利用RA测高技术提取水位，首先对RA数据进行大气校正和地球物理校正，如式(8)所示。采用干对流层校正、湿对流层校正和电离层校正来减少大气延时带来的影响，选用固体潮校正和极潮校正降低物理因素带来的误差。此外，还需减去地球重力模型1996 (EGM96-geoid)高度。

$$R_{\text{Cor}} = R_{\text{dt}} + R_{\text{wt}} + R_i + R_{\text{set}} + R_{\text{pt}} + G_{\text{EGM96}} \tag{8}$$

其中， $R_{\text{Cor}}$ 为校正参量， $R_{\text{dt}}$ 为干对流层校正， $R_{\text{wt}}$ 为湿对流层校正， $R_i$ 为电离层校正， $R_{\text{set}}$ 为固体极潮校正， $R_{\text{pt}}$ 为极潮校正， $G_{\text{EGM96}}$ 为EGM96椭球高。

实时水位的获取由式(9)完成，将RA数据中卫星到地球椭球面距离，减去由Ice-1重跟踪算法回溯获得的卫星到水面距离(Ice-1算法被认为是最适合内陆水体的重跟踪算法<sup>[13]</sup>)和校正参量。

$$H = A - R - R_{\text{Cor}} \tag{9}$$

其中， $H$ 为水位， $A$ 为卫星到地球椭球面距离， $R$ 为卫星到水面距离。

由于我国以青岛港验潮站的黄海平均海面作为水准基面<sup>[14]</sup>，因此将时间序列的水位结果与实测水位拟合得到水准面偏差，用以计算我国标准水位。

#### 3.2 河宽提取

将SAR图像用于提取河宽，首先进行辐射校正、斑点滤波、几何校正、图像拉伸等预处理操作，裁剪所选河段相应的区域。由于河段区域对于局部水面提取的精度要求较高，选用文献[12]中基于最大类间方差算法(Otsu algorithm, Otsu)和模糊C均值算法(Fuzzy C-Means algorithm, FCM)改进的混合模糊算法，对SAR图像进行水陆分割，该算法局部分割精度较好，适用于河流水面的提取。

经过混合模糊算法提取河流水面后，根据式(10)将图像的单位像素面积乘以河流水面像素总数，计算河流水面面积

$$S_{\text{ri}} = S_{\text{pi}} \cdot N \tag{10}$$

其中， $S_{\text{pi}}$ 为单位像素面积， $N$ 为河流水面像素总数， $S_{\text{ri}}$ 为河流水面面积，单位为 $\text{m}^2$ 。

利用Google Earth测距工具测得3处研究站点河段长度，应用式(11)计算河宽

$$W_{\text{ri}} = \frac{S_{\text{ri}}}{L_{\text{ri}}} \tag{11}$$

其中， $L_{\text{ri}}$ 为河段长度， $W_{\text{ri}}$ 为河宽，单位 $\text{m}$ 。

#### 3.3 径流反演

本文拟合雷达遥感提取信息与实测水文数据，构建适合于该河段的MRRS-RCM模型，从而仅以雷达遥感提取的水位与河宽为输入，完成径流反演。

当利用RA测高技术和SAR信息提取技术得到某河段的水位 $H_T$ 和河宽 $W$ 后，首先需要以该河段实测历史最低水位为相对河底高程 $H_t$ ，由式(4)计算相对水深 $D_R$ 。

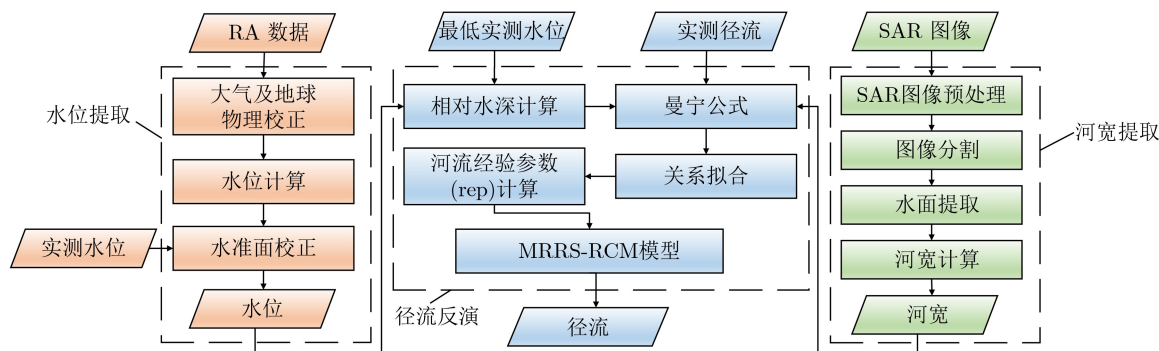


图1 基于MRRS-RCM模型的径流反演方法处理流程

以历史最低水位 $H_t$ 当日的实测径流作为该河段的基础径流 $Q_0$ ，以时间序列下的相对水深 $D_R$ 、河宽 $W$ 以及该河段的实测径流 $Q$ 作为建模数据，根据曼宁公式拟合 $D_R, W, Q$ ，并将拟合得到系数作为河流经验参数 $rep$ 用于建模使用。此时， $rep$ 以及 $Q_0$ 均为已知，由式(7)得到该河段的MRRS-RCM模型。

在MRRS-RCM模型建模完成以后，只需将雷达遥感技术提取的水位及河宽输入MRRS-RCM模型中，即可反演该河段的径流。

#### 4 实验数据及结果分析

本文以RA数据和SAR图像为实验数据，构建适用黄河的MRRS-RCM模型，通过与传统径流反演模型的对比实验，对实验结果精度进行量化评价。

##### 4.1 研究区域概况

根据我国治理黄河关键水利工程——小浪底水库和南水北调中线穿黄工程的核心区域，本文在花园口、夹河滩、高村水文站河段内选择了A, B, C研究站点。图2中紫线为Sentinel-3A卫星轨迹track-095，红线分别为Jason-3卫星轨迹track-001和track-164，绿圆为A, B, C点位置，红三角为水文站位置。表1为研究站点的空间信息。监测这些站点对小浪底水库水量调度、穿黄工程安全保障和黄河下游防洪预警有重要参考意义。

##### 4.2 实验数据概况

本文以Jason-3, Sentinel-3A数据作为RA数据来源，Sentinel-1A数据作为SAR图像数据源，水文数据作为验证数据。

(1) RA数据：Jason-3卫星发射于2016年1月

17日，轨道高度约为1336 km，轨道倾角约为 $66^\circ$ ，重访周期约为10天<sup>[15]</sup>，其最小目标宽度为500 m<sup>[16]</sup>。数据下载地址为：<ftp://avisoftp.cnes.fr/AVISO/pub/>。

Sentinel-3A卫星于2016年2月16日发射，轨道高度约为814 km，轨道倾角约为 $98.6^\circ$ ，重访周期约为27 d<sup>[17]</sup>，在SAR模式下最小目标宽度为300 m<sup>[18]</sup>。地址为：<https://scihub.copernicus.eu/dhus/>。

本文以2018年1月—12月Jason-3卫星001, 164轨道Ku波段数据和2017年1月—2018年12月Sentinel-3A卫星095轨道SAR模式下Ku波段数据为建模数据，以2019年1月—8月RA数据为测试数据，数据信息如表2，时间信息如表3所示。

(2) SAR图像数据：Sentinel-1A发射于2014年4月3日，是基于C波段的成像系统，采用4种成像模式，重访周期约为12 d，具有双极化、短重访周期、快速生产产品的能力<sup>[19]</sup>。在成像过程中，当地物较矮，且具有较强的反射特性时，VV极化的一次反射回波强度大于HH极化，更加适用于水面提取。

由于A, B, C站点在同一景SAR图像下，本文选用2018年1月—12月共28景Sentinel-1A地距多视影像产品(Ground Range Detected High, GRDH)为建模数据，以2019年1月—8月共21景

表 1 研究站点空间信息表

站点	地理坐标	所属河段	水文站距离(km)
A	113.667, 34.915	花园口	2.9
B	114.764, 34.893	夹河滩	2.2
C	115.158, 35.419	高村	9.5

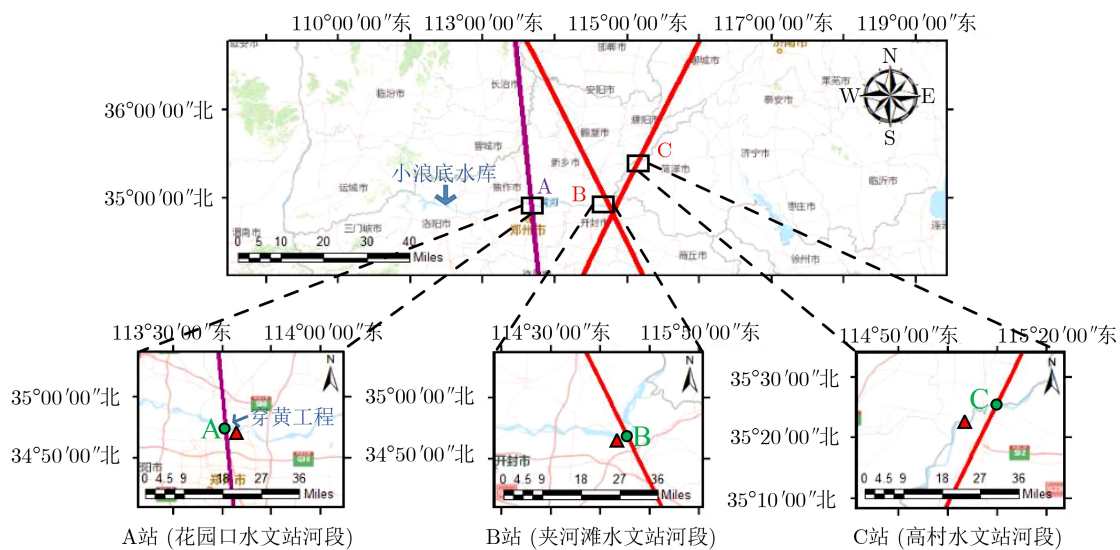


图 2 研究区域

表2 RA数据信息表

站点	数据名称	重访周期(d)	卫星轨道	波段	最小目标宽度(m)	数据级别	数据来源
A	Sentinel-3A	27	095	Ku	300	Level-2	ESA
B	Jason-3	10	164	Ku	500	Level-2	CNES
C	Jason-3	10	001	Ku	500	Level-2	CNES

表3 遥感数据时间表

数据名称	数据类型	建模数据时间	测试数据时间
Sentinel-3A	RA	2017.01-2018.12	2019.01-2019.08
Jason-3	RA	2018.01-2018.12	2019.01-2019.08
Sentinel-1A	SAR	2018.01-2018.12	2019.01-2019.08

SAR数据为测试数据,采用干涉幅宽(Interferometric Wide-swath, IW)成像模式,极化方式为VV极化,分辨率为5 m×20 m,幅宽为250 km。SAR数据时间信息如表3所示,数据下载地址为:<https://scihub.copernicus.eu/dhus/>。

(3) 水文数据:本文以2018年1月—12月花园口、夹河滩、高村水文站实测水位、径流数据为建模数据,以2019年1月—8月的水文数据为模型测试的验证数据。数据来源于水利部黄河水利委员会,数据获取地址:<http://www.yellowriver.gov.cn/>。

### 4.3 实验结果与分析

实验采集了雷达遥感数据同步时间下花园口、夹河滩、高村水文站实测水文数据,用以验证实验结果,再以决定系数(Coefficient of determination, R-square)、均方根误差(Root Mean Squared Error, RMSE)、相对均方根误差(Relative Root Mean Squared Error, RRMSE)分析评价结果精度。

(1) 水位结果验证:图3为实测水位与水位结果的对比,可以看出在各研究时间段内,水位波动明显,且水位结果与实测水位的波动趋势相吻合。黄河冬季为枯水期,当进入春季后随着气温上升,水位也持续上涨,但并不明显。夏季6月—9月进入丰水期,上游凌汛、小浪底水库泄洪、雨量增加等因素使得水位涨势明显,此期间几次较大回落是由于

小浪底水库对下游水量调控所引起的。当进入10月后,黄河将再次进入枯水期,水位也将持续回落。

从表4所示,A、B、C站点水位结果的各项评价指标均表现良好。其中,R-square达到0.949,表明水位结果与实测结果拟合较好,而RMSE表明水位结果与实测水位的误差平均仅有14.71 cm。

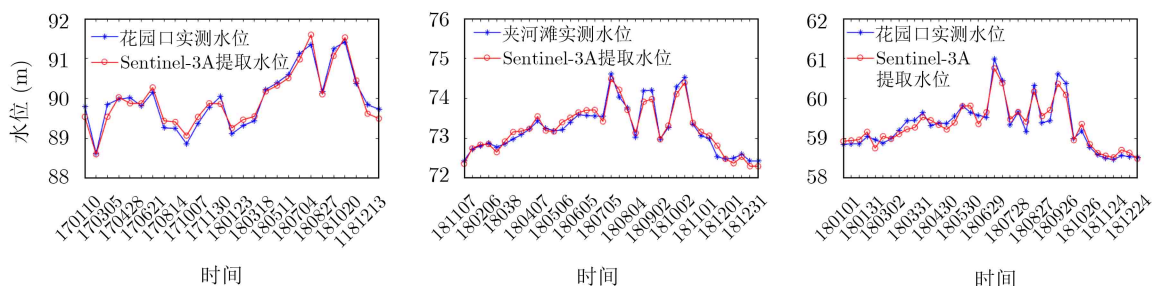
(2) 河宽结果验证:本文利用水面提取算法处理图4(a)所示包含A、B、C站点河面信息的SAR图像,删除红色方框内非河流水面,得到图4(b)所示的河面结果。根据河面结果计算河宽,采用一次多项式拟合河宽结果与同步实测水位,拟合结果如图5(a)—图5(c)。再以式(2)拟合河宽(将河宽视为“D”)与同步实测径流,拟合结果如图5(d)—图5(f)所示。

如表5所示,河宽-径流拟合的R-square平均达到0.915。而河宽-水位拟合的R-square平均达到0.874,这是由于河床形状的不规则,一定程度上影响了河宽与水位之间的变化规律,因此河宽变化对径流波动的影响尤为重要。

(3) 径流结果验证:为比较MRRS-RCM模型径流反演结果的精度,本文将水深-径流模型应用于研究站点用于对比,由式(4)将水位换算为相对水深,根据式(12)拟合相对水深与实测径流,拟合结果如图6所示。

$$Q = a \cdot D_R^b + Q_0 \quad (12)$$

在A、B、C站点MRRS-RCM模型建模过程中,A站点RA数据重访周期为27 d,B和C站点RA数据重访周期为10 d,SAR数据重访周期为12 d。本文以准同步方式,选择相近时间内RA和SAR数据用以建模。在A站点建模中,选用实测水位进行插值补充,降低RA数据重访周期长的影响。



(a) A站卫星提取水位与实测水位

(b) B站卫星提取水位与实测水位

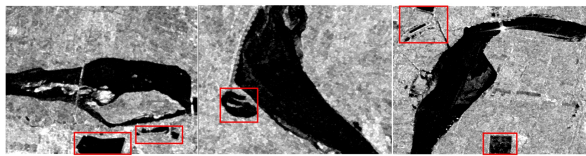
(c) C站卫星提取水位与实测水位

图3 研究站点卫星提取水位与实测水位对比

如图7所示，拟合相对水深、河宽以及实测径流，

表 4 水位提取结果精度评价表

站点	R-square	RMSE(m)	RRMSE(%)
A	0.9474	0.1639	0.182
B	0.9507	0.1244	0.170
C	0.9481	0.1532	0.258



(a) A,B,C站点河面SAR图像



(b) A,B,C站点河面提取结果

图 4 河面提取结果

得到A, B, C站点的河流经验系数 $rep$ ，将 $rep$ 代入MRRS-RCM模型，分别得到式(13)–式(15)。

$$Q_{HYK} = 0.9305 \cdot W \cdot D_R^{\frac{5}{3}} + Q_0 \quad (13)$$

$$Q_{JHT} = 1.042 \cdot W \cdot D_R^{\frac{5}{3}} + Q_0 \quad (14)$$

$$Q_{GC} = 1.332 \cdot W \cdot D_R^{\frac{5}{3}} + Q_0 \quad (15)$$

本文使用2019年1月–8月的RA数据和SAR数据作为模型的测试数据，分别计算A,B,C站点下水深-径流模型和MRRS-RCM模型的反演径流结果，并以相同时间下的实测径流验证两种模型的反演结果，验证过程如图8所示。

如图8(a)–图8(c)所示，MRRS-RCM模型反演径流结果与实测径流较为吻合，且波动明显。根据查证，2019年6月21日黄河小浪底水库开闸泄洪<sup>[20]</sup>，这是导致黄河下游径流迅速上涨的主要原因。此外，夏季是暴雨多发季，降雨量增加也是径流上涨的重要原因。图8(d)–图8(f)为实测径流验证水深-径流模型反演径流结果，径流结果误差较大。

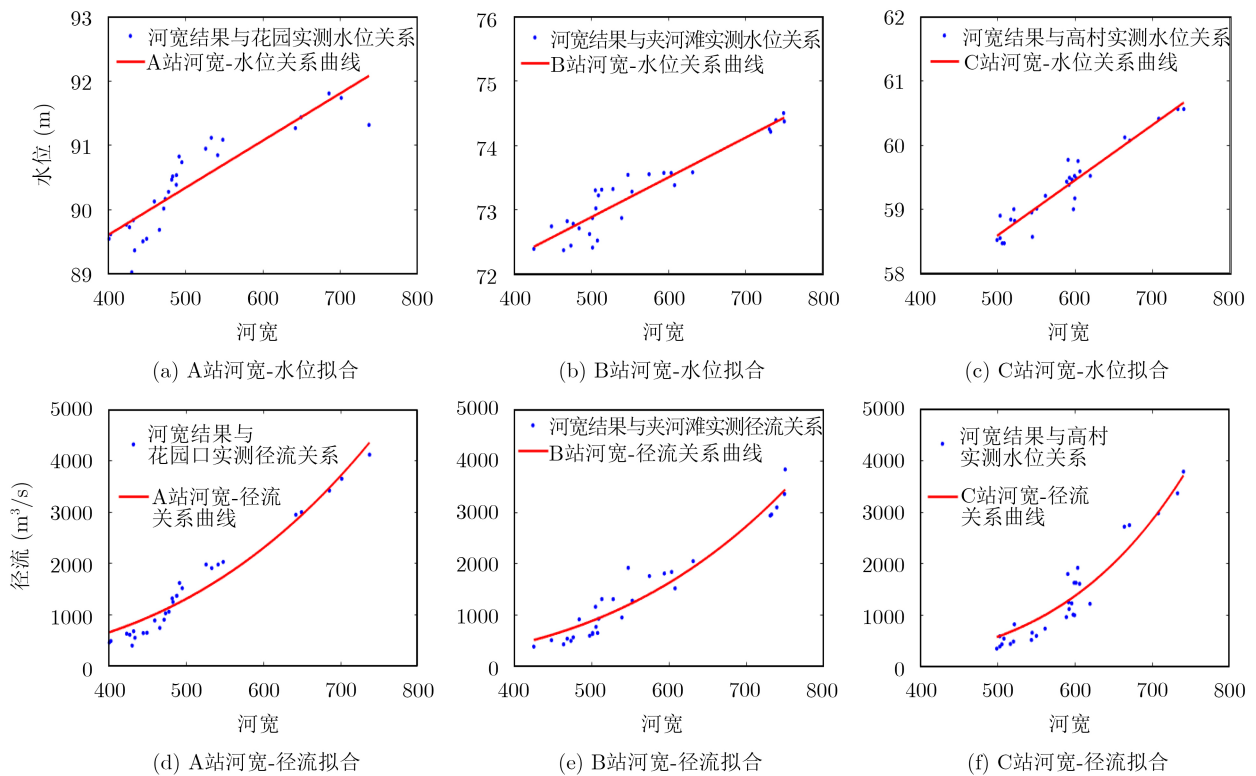


图 5 研究站点河宽拟合结果

表 5 河宽拟合结果精度评价表

站点	河宽-水位R-square	河宽-径流R-square
A	0.834	0.906
B	0.879	0.921
C	0.908	0.917

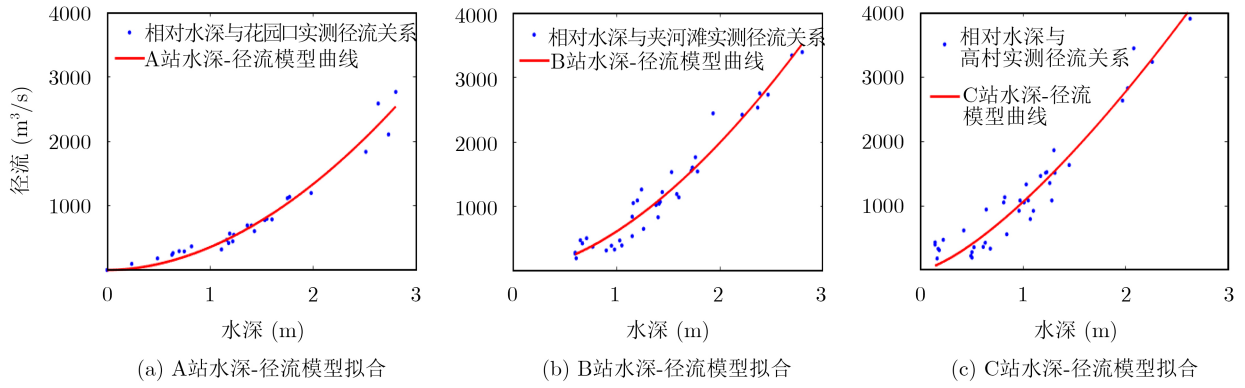


图6 研究站点水深-径流模型拟合结果

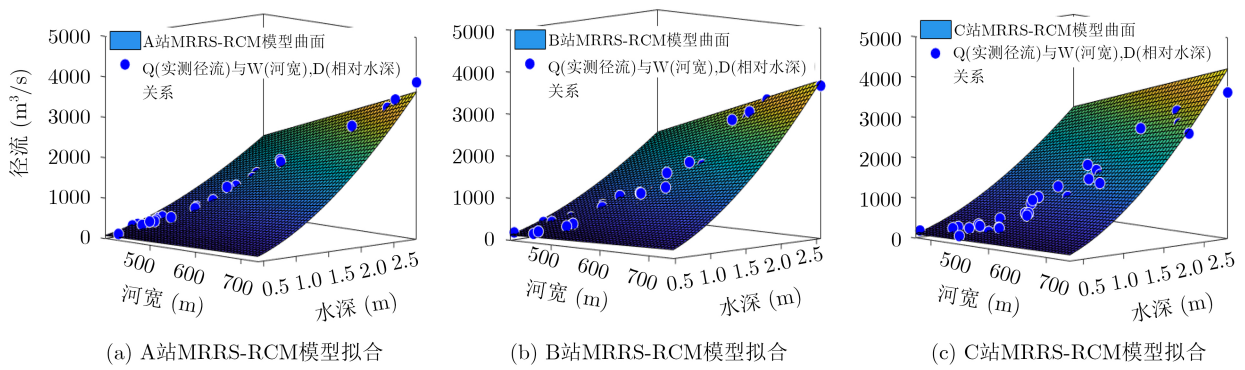


图7 研究站点MRRS-RCM模型拟合结果

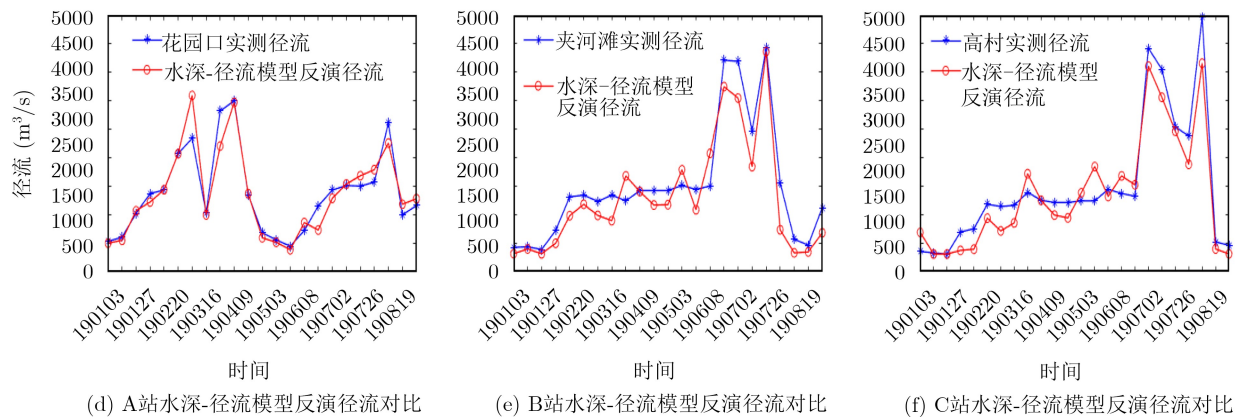
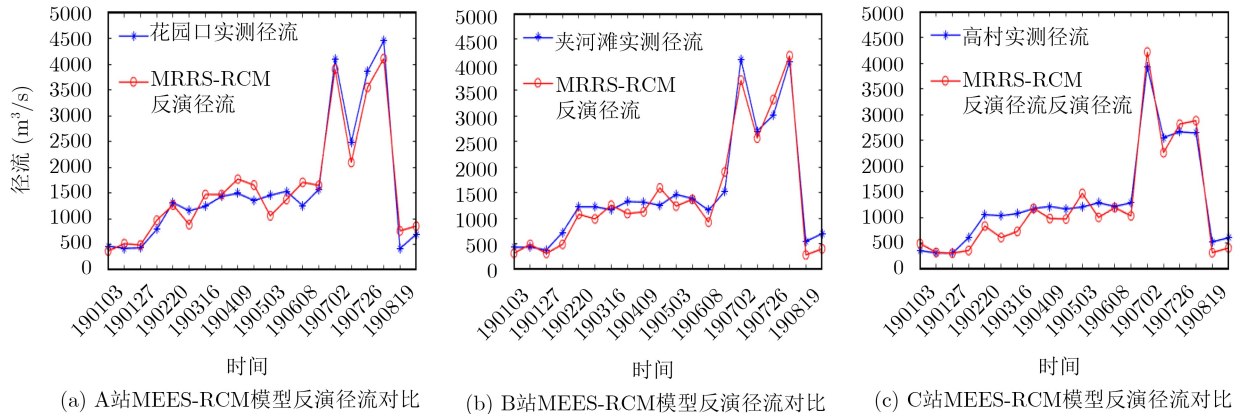


图8 研究站点模型反演径流与实测径流对比

表6为MRRS-RCM模型和水深-径流模型反演径流的精度评价。在黄河下游含泥沙量高的情况下,使径流对于河宽变化更为敏感。因此MRRS-RCM模型更加适用于黄河下游的径流反演,反演

结果的R-square达到0.96,与实测径流拟合较好,而RMSE平均为204.5 m<sup>3</sup>,RRMSE分别达到了12.622%,14.546%和14.739%,证明了该模型精度优于传统径流监测要求的15%~20%。

表 6 径流结果精度评价表

站点	R-square		RMSE(m <sup>3</sup> )		RRMSE(%)	
	MRRS-RCM模型	水深-径流模型	MRRS-RCM模型	水深-径流模型	MRRS-RCM模型	水深-径流模型
A	0.9694	0.8647	201.2	287.9	12.622	20.773
B	0.9564	0.8902	218.6	291.6	14.546	19.801
C	0.9537	0.8874	193.8	296.2	14.739	20.393

## 5 结束语

本文提出了一种基于多源雷达遥感技术的河流径流反演模型(MRRS-RCM),利用RA数据和SAR图像,分别在黄河花园口、夹河滩、高村水文站河段进行了径流反演研究。相比于传统径流反演模型,MRRS-RCM模型输入增加了河宽,能够直接反映黄河河面变化对径流的影响,并且不考虑水面坡度、曼宁粗糙系数等条件下反演黄河径流,且不受天气影响。

实验结果表明,MRRS-RCM模型径流反演结果精度高于水深-径流模型,反演结果的RRMSE平均达到13.969%,优于传统径流监测15%~20%的精度要求。另外,该模型计算过程简便,不仅适用于黄河,也可以进一步推广到其他大型河流径流反演的工作当中。未来的研究将考虑引入更高分辨率的雷达遥感数据源,选择精度更高的算法完成径流计算。

## 参 考 文 献

- [1] 张少文. 黄河流域天然年径流变化特性分析及其预测[D]. [博士学位论文], 四川大学, 2005.  
ZHANG Shaowen. Yellow River annual runoff analysis and its forecast[D]. [Ph.D. dissertation], Sichuan University, 2005.
- [2] HUNDECHA Y and BÁRDOSSY A. Modeling of the effect of land use changes on the runoff generation of a river basin through parameter regionalization of a watershed model[J]. *Journal of Hydrology*, 2004, 292(1/4): 281–295. doi: 10.1016/j.jhydrol.2004.01.002.
- [3] TONG Xiaohua, PAN Haiyan, XIE Huan, et al. Estimating water volume variations in Lake Victoria over the past 22 years using multi-mission altimetry and remotely sensed images[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2016, 187: 400–413. doi: 10.1016/j.rse.2016.10.012.
- [4] PAPA F, DURAND F, ROSSOW W B, et al. Satellite

- altimeter-derived monthly discharge of the Ganga-Brahmaputra River and its seasonal to interannual variations from 1993 to 2008[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2010, 115(C12): C12013. doi: 10.1029/2009JC006075.
- [5] PAPA F, BALA S K, PANDEY R K, et al. Ganga - Brahmaputra river discharge from Jason-2 radar altimetry: An update to the long-term satellite-derived estimates of continental freshwater forcing flux into the Bay of Bengal[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2012, 117(C11): C11021. doi: 10.1029/2012JC008158.
- [6] SICHANGI A W, WANG Lei, YANG Kun, et al. Estimating continental river basin discharges using multiple remote sensing data sets[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2016, 179: 36–53. doi: 10.1016/j.rse.2016.03.019.
- [7] 袁翠. 基于雷达高度计的内陆水体应用研究[D]. [硕士学位论文], 中国科学院大学(中国科学院遥感与数字地球研究所), 2017.  
YUAN Cui. Applied research on radar altimetry over inland waters[D]. [Master dissertation], University of Chinese Academy of Sciences (Institute of Remote Sensing and Digital Earth, Chinese Academy of Sciences), 2017.
- [8] WU Lin, WANG Le, MIN Lin, et al. Discrimination of algal-bloom using spaceborne SAR observations of great lakes in China[J]. *Remote Sensing*, 2018, 10(5): 767. doi: 10.3390/rs10050767.
- [9] BRAKENRIDGE G R, KNOX J C, PAYLOR II E D, et al. Radar remote sensing aids study of the Great Flood of 1993[J]. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 1994, 75(45): 521–527. doi: 10.1029/EO075i045p00521.
- [10] SMITH L C, ISACKS B L, FORSTER R R, et al. Estimation of discharge from braided glacial rivers using ERS 1 synthetic aperture radar: First results[J]. *Water Resources Research*, 1995, 31(5): 1325–1329. doi: 10.1029/95wr00145.
- [11] 冷英, 刘忠玲, 张衡, 等. 一种改进的ACM算法及其在鄱阳湖水域监测中的应用[J]. *电子与信息学报*, 2017, 39(5): 1064–1070. doi: 10.11999/JEIT160870.

- LENG Ying, LIU Zhongling, ZHANG Heng, *et al.* Improved ACM algorithm for Poyang lake monitoring[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2017, 39(5): 1064–1070. doi: [10.11999/JEIT160870](https://doi.org/10.11999/JEIT160870).
- [12] 郭拯危, 王乐, 宋国磊. 基于混合模糊的SAR图像水陆分割算法[J]. *国土资源遥感*, 2018, 30(4): 62–67. doi: [10.6046/gtzyyg.2018.04.10](https://doi.org/10.6046/gtzyyg.2018.04.10).
- GUO Zhengwei, WANG Le, and SONG Guolei. SAR image land and water segmentation algorithm based on hybrid fuzzy[J]. *Remote Sensing for Land & Resources*, 2018, 30(4): 62–67. doi: [10.6046/gtzyyg.2018.04.10](https://doi.org/10.6046/gtzyyg.2018.04.10).
- [13] FRAPPART F, CALMANT S, CAUHOPÉ M, *et al.* Preliminary results of ENVISAT RA-2-derived water levels validation over the Amazon basin[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2006, 100(2): 252–264. doi: [10.1016/j.rse.2005.10.027](https://doi.org/10.1016/j.rse.2005.10.027).
- [14] 张胜军, 金涛勇, 褚永海, 等. Cryosat-2数据的大地水准面分辨能力研究[J]. *武汉大学学报: 信息科学版*, 2016, 41(6): 759–764. doi: [10.13203/j.whugis20140829](https://doi.org/10.13203/j.whugis20140829).
- ZHANG Shengjun, JIN Taoyong, CHU Yonghai, *et al.* Estimation of the resolution capability of the cryosat-2 altimeter[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2016, 41(6): 759–764. doi: [10.13203/j.whugis20140829](https://doi.org/10.13203/j.whugis20140829).
- [15] BIANCAMARIA S, SCHAEDELE T, BLUMSTEIN D, *et al.* Validation of Jason-3 tracking modes over French rivers[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2018, 209: 77–89. doi: [10.1016/j.rse.2018.02.037](https://doi.org/10.1016/j.rse.2018.02.037).
- [16] CRÉTAUX J F and BIRKETT C. Lake studies from satellite radar altimetry[J]. *Comptes Rendus Geoscience*, 2006, 338(14/15): 1098–1112. doi: [10.1016/j.crte.2006.08.002](https://doi.org/10.1016/j.crte.2006.08.002).
- [17] ZAWADZKI L and ABLAIN M. Accuracy of the mean sea level continuous record with future altimetric missions: Jason-3 vs. Sentinel-3a[J]. *Ocean Science*, 2016, 12(1): 9–18. doi: [10.5194/os-12-9-2016](https://doi.org/10.5194/os-12-9-2016).
- [18] 谌华, 郭伟, 杨双宝, 等. 一种合成孔径雷达高度计定标方法[J]. *电子与信息学报*, 2017, 39(9): 2232–2237. doi: [10.11999/JEIT161363](https://doi.org/10.11999/JEIT161363).
- CHEN Hua, GUO Wei, YANG Shuangbao, *et al.* A method of calibration of SAR altimeter[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2017, 39(9): 2232–2237. doi: [10.11999/JEIT161363](https://doi.org/10.11999/JEIT161363).
- [19] 汤玲英, 刘雯, 杨东, 等. 基于面向对象方法的Sentinel-1A SAR在洪水监测中的应用[J]. *地球信息科学学报*, 2018, 20(3): 377–384. doi: [10.12082/dqxxkx.2018.170599](https://doi.org/10.12082/dqxxkx.2018.170599).
- TANG Lingying, LIU Wen, YANG Dong, *et al.* Flooding monitoring application based on the object-oriented method and Sentinel-1A SAR data[J]. *Journal of Geo-Information Science*, 2018, 20(3): 377–384. doi: [10.12082/dqxxkx.2018.170599](https://doi.org/10.12082/dqxxkx.2018.170599).
- [20] 张运国, 周爱春, 王爱丽. 黄河第1号洪水形成小浪底水库开闸泄洪[EB/OL]. [http://www.cma.gov.cn/2011xwzx/2011xqxxw/2011xqxxyw/201907/t20190702\\_528794.html](http://www.cma.gov.cn/2011xwzx/2011xqxxw/2011xqxxyw/201907/t20190702_528794.html), 2019.
- ZHANG Yunguo, ZHOU Aichun and WANG Aili. The formation of No.1 flood in the Yellow River - Opening of Xiaolangdi reservoir to discharge flood[EB/OL]. [http://www.cma.gov.cn/2011xwzx/2011xqxxw/2011xqxxyw/201907/t20190702\\_528794.html](http://www.cma.gov.cn/2011xwzx/2011xqxxw/2011xqxxyw/201907/t20190702_528794.html), 2019.
- 闵 林: 男, 1963年生, 教授, 研究方向为SAR图像处理.
- 王 宁: 男, 1995年生, 硕士生, 研究方向为SAR图像处理.
- 毋 琳: 女, 1978年生, 副教授, 研究方向为SAR图像处理.
- 李 宁: 男, 1987年生, 教授, 研究方向为多模式合成孔径雷达成像及其应用技术方面的研究.
- 赵建辉: 男, 1980年生, 副教授, 研究方向为SAR图像处理.

责任编辑: 马秀强