

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2026.02.003

协同 MIKE11-KF 的遥感河道流量数据同化

李 宾^{1,2}, 栾清华¹, 李 涛³, 赵长森⁴, 李毛毛⁴

(1. 河海大学农业科学与工程学院; 2. 西安理工大学旱区水工程生态环境全国重点实验室;
3. 曲周县水利局河长制办公室; 4. 北京师范大学水科学研究院)

摘要: 为提高无资料中小河流流量的模拟精度,通过卫星影像(Sentinel 系列及高分影像)反演河道水面宽度并估算初步流量,将其作为流量观测值,与 MIKE11 模型模拟的流量数据利用卡尔曼滤波算法进行同化,将同化后的流量结果作为 MIKE11 模型的更新输入,形成闭环迭代,从而持续修正 MIKE11 模型误差,提高模拟精度。曲周县黄口闸段的验证结果表明,卡尔曼滤波算法数据同化后 MIKE11 模型模拟流量的 R^2 为 0.820,纳什效率系数 NSE 为 0.813,相对均方根误差 RRMSE 为 0.260,较同化前 R^2 提高了 28.1%,NSE 提升了 27.0%,RRMSE 降低了 43.5%,有效提高了河道流量模拟精度。

关键词: 卡尔曼滤波;MIKE11 模型;遥感数据;河道流量;多源数据同化

Remote sensing river discharge data assimilation with MIKE11-KF

Li Bin^{1,2}, Luan Qinghua¹, Li Tao³, Zhao Changsen⁴, Li Maomao⁴

(1. College of Agricultural Science and Engineering, Hohai University;
2. State Key Laboratory of Water Engineering Ecology and Environment in Arid Area, Xi'an University of Technology;
3. Quzhou County Water Resources Bureau River Chief System Office;
4. College of Water Sciences, Beijing Normal University)

Abstract: To improve the simulation accuracy of flow in ungauged small and medium rivers, river surface widths were inverted, and preliminary discharges were estimated using satellite imagery (Sentinel series and high-resolution images). These estimated values were then used as observed flow data and assimilated with the flow data simulated by the MIKE11 model using the Kalman filter algorithm. The assimilated flow results were fed back as updated inputs to the MIKE11 model, forming a closed-loop iteration that continuously corrected model errors and enhanced simulation accuracy. Validation results from the Huangkou Gate section in Quzhou County show that after data assimilation with the Kalman filter algorithm, the MIKE11 model achieves an R^2 of 0.820, an NSE of 0.813, and an RRMSE of 0.260 for simulated flow. Compared to pre-assimilation results, R^2 increases by 28.1%, NSE improves by 27.0%, and RRMSE decreases by 43.5%, demonstrating effective improvement in river discharge simulation accuracy.

Key words: Kalman filter; MIKE11 model; remote sensing data; river discharge; multi-source data assimilation

河流流量是全球水文循环以及水资源评估和管理的关键变量^[1]。在当前信息数字化背景下,如何在缺乏水文监测的情况下实现对河流流量的精确监测与模拟,已成为水文学研究和水资源管理的重要挑战^[2]。随着遥感数据质量的持续提升,以及卫星传感器在空间、时间与光谱分辨率上的不断突破,河流流量遥感(remote sensing of discharge, RSQ)作为新兴研究方向得以快速发展^[3]。利用卫星遥感技术反演河道水面宽度、水面高程及水面比降,并据此实现河流流量的精准估算,是河流流量遥感领域的核心研究内容^[4-7]。遥感数据获取后,河道信息的提取方法主要分为非监督分类法与监督分类法。非监督分类法无需预先选取训练样本,仅依据影像像素的光谱统计特征进行迭代聚类^[8],通过计算像素在特征空间中的距离实现水体与背景的自动分离。其中,K-均值(K-Means)算法^[9]和迭代自组织数据分析技术(ISODATA)^[10]是应用较为广泛的非监督算法,它们在缺乏地面实测资料的偏远地区具有较好的适用性,但也容易受到阴影和混合像元的干扰。相比之下,监督分类法通过图像分类与识别技术提取水体信息^[11-14]。最大类间方差法(OTSU 法)^[15]作

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(52279004,52379008)

作者简介: 李宾(1999—),男,博士研究生,主要从事水文水资源研究。E-mail:libin199902@163.com

通信作者: 栾清华(1978—),女,教授,博士,主要从事水文水资源研究。E-mail:carol97011202@163.com

为单阈值判定方法,广泛应用于水体信息提取,尤其是在水体与背景光谱特征相似的 SAR 影像中^[16]。归一化差异水体指数(normalized difference water index, NDWI)^[17-18]作为广泛使用的水体特征表征方法,也能够有效描述水体与非水体之间的差异,但在城市环境中存在一定的局限性^[19-20]。为此,徐涵秋^[21]提出修正的归一化差异水体指数(modified normalized difference water index, MNDWI),通过替换波段进一步增强了水体与建筑用地之间的对比。

受卫星对特定区域的重访周期限制及云层遮挡等因素影响,连续时序遥感数据的可获取性较差。在此背景下,融合遥感数据的水文模型模拟研究逐渐成为关注热点。MIKE11 模型凭借算法可靠、计算稳定及前后处理功能便捷的技术优势,被广泛应用于单一河道、叉状河网与环状河网的水文模拟研究,为水资源精细化管理提供了高效的技术支撑^[22]。水动力学模块(HD)是 MIKE11 模型的核心组成部分,该模块基于非恒定流理论,引入专业的追赶解析法,采用 6 点 Abbott-Ionescu 格式对圣维南方程组进行离散化处理,将其转化为更易求解的交替网络,随后按照既定次序对各节点的过流量与水位开展交替迭代计算^[23]。目前已有诸多相关应用研究,例如利用高精度被动微波亮温数据,结合 M/C 信号法探讨河宽、平均流量及水文气象要素对模拟效果的影响^[24];借助 MIKE11 模型开展河道非恒定流模拟研究^[25];通过对河道断面进行概化推导水位-河宽理论关系,并结合遥感数据分析模型反演精度^[26]等。

尽管国内外学者在河道流量遥感反演领域已取得诸多研究成果,但如何更精准、高效地获取河道流量信息,仍是该领域亟待持续探索的关键问题。为此,河道流量数据同化方法应运而生,该方法通过融合多源观测数据与模型模拟结果,大幅提升了河道流量的估算精度与模拟可靠性。卡尔曼滤波(Kalman filter, KF)作为经典的状态估计算法,在河道流量研究领域,学者们通过改进算法形式、优化算法参数等方式,不断提升算法的稳定性与结果的准确性^[27-28]。例如,Milašinović 等^[29]提出了一种适用于一维明渠水工模型的数据同化方法,成功减小了测量水位与模拟水位之间的差异;顾炉华等^[30]采用集合卡尔曼滤波(ensemble Kalman filter, ENKF)构建了太湖流域的河网水量同化模型,研究水位实测数据对流量预测精度的影响,并成功应用于洪水模拟中;刘永伟等^[31]基于 ENKF 构建了 SWAT 分布式水文模型的参数优化方案,成功解决了模型参数演变与过拟合问题。综合现有研究成果来看,数据同化方法在河道流量模拟及水文模型参数优化方面展现出良好的应用潜力。将实测数据同化至水文模型中,可有效融合多源信息、修正模型偏差,显著提升模型的模拟精度与综合演算能力。在数据同化相关实验中,受鲁棒性问题复杂性的影响,相较于各类集成方法,KF 算法的实现流程更为简便易行^[32-33],且在低维简单水文模型中的应用也更为广泛^[34]。综合而言,KF 算法的应用能够精准捕捉河道流量的时空动态变化特征,为深入揭示河道流量的演变规律提供重要技术支撑^[35]。

本文尝试基于多源遥感数据,构建 MIKE11 协同 KF 算法的数据同化方案,并以河北省滏阳河莲花口下游部分河段进行验证,以期为提高中小河流流量监测精度提供新思路。

1 研究方法

为保证多源遥感观测与水动力学模拟在同一技术框架下可衔接,将研究方法分解为水体信息提取、河宽反演、流量估算、数据同化与反馈迭代 4 个环节:①基于光学与 Sentinel-1 影像提取河道水体边界,为河宽测量提供稳定的空间约束;②在 ROI 限定的河道范围内计算水域面积并概化河道几何形态,从而得到时序河宽^[36];③采用关系拟合法将河宽转换为初步流量,作为数据同化所需的观测值;④将该观测值与 MIKE11 模型模拟流量共同输入卡尔曼滤波进行同化,将同化后的结果回馈至 MIKE11 模型形成闭环修正,以提升流量模拟的动态精度。为量化各环节与同化方案的有效性,采用决定系数(R^2)、相对均方根误差(RRMSE)、纳什效率系数(NSE)进行一致性与误差评价。

1.1 水体提取

1.1.1 OTSU 法

OTSU 法是基于全局像元的单阈值确定方法,是一种以观察到的像素值分布自动找到最佳阈值的方法^[37-38]。它将图像分为目标像元和背景像元,并使用单一阈值作为它们之间的分割标准。当类间方差最大时,意味着目标和背景之间的差别最大,此时的阈值被选定为最佳阈值^[39]。

1.1.2 Sentinel-1 影像水体提取

采用 OTSU 法对 Sentinel-1 影像进行水体提取之前,使用 Matlab 编程对 28 幅影像进行像元增强,并提取

其像素值频率分布直方图。采用 Sentinel-1 影像结合 OTSU 法开展水体提取时,因 Sentinel-1 影像中水体的像元值通常表现为低值特征,因此将像元值低于分割阈值的像元判定为水体。而采用光学水体指数法结合 OTSU 法进行水体提取时,判定规则则与之相反,因为该方法以光学影像为基础,依托水体在光学波段的光谱特征完成提取操作,在此前提下,将像元值高于分割阈值的像元界定为水体。

1.1.3 基于 MNDWI 的 OTSU 法提取河道

采用 MNDWI 作为水体提取的指标^[40],结合 Sentinel-2 影像,通过窗口方式在局部范围内提取水体及其背景。为实现精确的局部分割,采用 OTSU 法计算自适应的局部阈值。基于遥感操作平台计算研究区 MNDWI,使用“B3”绿色波段与“B11”短波红外波段计算 MNDWI,共生成 141 景影像,为降低测量误差,选取影像清晰、边界轮廓分明的影像作为实测对象。将 MNDWI 图像分成局部窗口并计算每个窗口内的 OTSU 阈值,实现了基于局部范围的水体与非水体的准确分割。这种方法可考虑图像中不同区域的亮度差异和背景干扰,从而提高水体分割的准确性和适应性。

1.2 遥感河宽反演

对研究河段进行实地踏勘时,发现该段河道断面基本呈现 U 形形态。考虑到研究区河道长度较长且河面接近矩形形状,为了简化计算并减少因复杂地形带来的不确定性,将河道进行矩形化概化处理。通过计算水域面积与河道长度的比值,能够有效消除部分干扰因素的影响,从而获得更为精确的河宽数据^[41]。

提取河道边界后,基于原始影像和基于 MNDWI 提取的水体区域,根据 OTSU 法提取河道边界,建立 ROI 用于限定河道的关注区域,确保后续计算只考虑河道范围内的像素,避免由于背景信息干扰而降低流量估算精度。由于 GF-6 精度相对较低,为提高数据多样性以及完整性,直接对 GF-6 河道进行目视解译获取河宽。

1.3 河道流量计算

关系拟合法是一种基于河宽、水深和流量之间的水力特征关系,构建幂函数模型以实现河道流量的反演^[42]。尽管通过拟合水力特征关系推断未知流量没有直接使用水力梯度和糙率等参数,但对水力特征关系进行分析和拟合,仍然可实现对流量的准确计算。关系拟合法的公式为:

$$Q = \beta B^{8/3}$$

(1)

式中: Q 为河道流量; β 为经验参数; B 为河宽。

1.4 KF 算法数据同化

KF 算法是一类面向线性随机系统的递推最小方差估计方法^[43],其目标是在最小均方误差下融合“模型模拟值”与“观测信息”,获得系统状态的最优估计。KF 算法的核心由状态方程与观测方程构成,并假设过程噪声与观测噪声为高斯白噪声,从而可以通过“预测—更新”的递推框架实现对状态的实时修正^[44-45]。

本文选取河道流量作为系统状态量,将 MIKE11 模型输出的模拟流量作为先验信息,将由遥感河宽计算得到的流量作为观测信息,并在每个遥感观测时刻对模型流量进行校正。具体而言,令时刻 k 的状态为 a_k : (对应流量 Q_k),观测信息为 z_k (遥感河宽计算流量)。过程噪声 w_k 表征模型结构误差、参数不确定性或外界扰动等带来的不确定性;观测噪声 u_k 表征遥感反演误差、影像质量与河宽测量误差等引入的不确定性。将 MIKE11 在时刻 k 的模拟流量视为先验估计 $\hat{x}_k$,并用 KF 算法更新方程将其与遥感观测 z_k 融合得到后验最优估计 a_k 。

2 实例验证

2.1 研究河段概况

2022 年启动综合治理的滏阳河,是一条承担防洪排涝、灌溉等功能的重要河道,沿线设有莲花口水文站、黄口闸等水利设施。研究河段位于滏阳河莲花口水文站至鸡泽入邢台边界处,流经经济技术开发区、永年区、曲周县、鸡泽县 4 个县(区)(图 1)。研究河段范围为 $36^{\circ}40'45''N \sim 36^{\circ}58'52''N$ 、 $114^{\circ}45'31''E \sim 114^{\circ}57'48''E$,河长 63.52 km,流域面积为 300 km²。

2.2 研究数据

实测流量数据选取了莲花口水文站与黄口闸水文站 2022 年 1—12 月逐日流量数据(图 2),大断面数据来源于 2022 年曲周段滏阳河综合治理图纸资料。

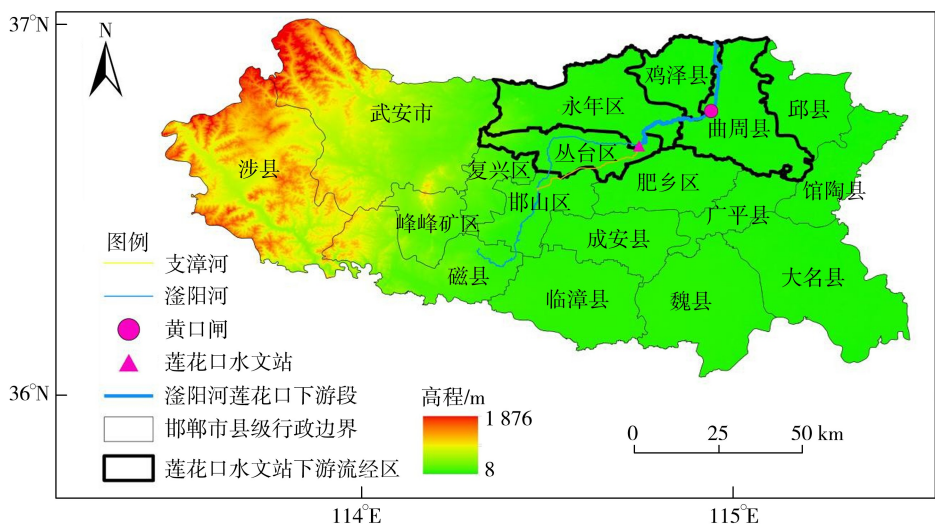


图 1 滏阳河流域概况

Fig. 1 Overview of the Fuyang River Basin

利用影像下载平台 (<https://code.earthengine.google.com/>) 计算 MNDWI 数据 141 景,可用数据 38 景;在欧空局平台下载 Sentinel-2A 数据 36 景, Sentinel-2B 数据 38 景,可用数据 24 景。Sentinel-1 数据来源于欧空局平台中的 VV 极化、传感器为 IW 的 GRD 数据,选取时间为 2022 年 1—12 月的影像,共获取 30 景数据,可用数据 28 景。在中国资源卫星应用中心获取 GF-6 数据共 31 景,可用数据 9 景。综上,经过影像预处理后总共获取数据 276 景,可用数据共 99 景,由于影像之间有时间重合,选取精度较高的数据,用于测量河宽共 68 景。

2.3 结果与分析

2.3.1 河道流量遥感反演结果

采用总体精度与 Kappa 系数评价水体影像分类效果的精确程度^[46]。原始 Sentinel-2 影像总体精度为 93.52%, Kappa 系数为 0.89,以 Sentinel-2 影像计算的 MNDWI 与 NDWI 的总体精度分别为 95.31%、91.97%, Kappa 系数分别为 0.90、0.82,可见, MNDWI 在提取水体信息精度上更好。经过像元增强后的 Sentinel-1 影像的总体精度为 92.54%, Kappa 系数为 0.89。

选取与实测流量数据对应时期的遥感数据进行反演河宽,并计算流量,利用实测流量数据进行精度验证由图 3 可知, Sentinel-1 遥感河宽计算流量的 NSE 为 0.830, R^2 为 0.830, RRMSE 为 0.240; Sentinel-2 遥感河宽计算流量的 NSE 为 0.840, R^2 为 0.840, RRMSE 为 0.20, 由于 Sentinel 系列影像数据为 10 m 精度, 而 GF-6 影像数据精度为 16 m, 因此其遥感河宽计算流量精度相对较低, NSE 为 0.730, R^2 为 0.730, RRMSE 为 0.250。综合来看遥感河宽计算流量精度较高。将遥感数据整合, 并与实测数据比较, NSE 为 0.830, R^2 为 0.830, RRMSE 为 0.250, 整体上反演精度较好。

2.3.2 MIKE11 模型参数率定及验证

采用实测流量数据与遥感反演数据作为输入文件,进行 MIKE11 模型的参数率定与验证。MIKE11 模型模拟所用的流量数据覆盖了 2022 年 1 月 1 日至 12 月 28 日,频率为每日 1 次,共计 362 个数据点。为了确保 MIKE11 模型的可靠性,选择 2022 年 1—7 月的实测流量数据作为率定期,8—12 月的实测流量数据作为验证期。MIKE11 模型初始河流流量为 25 m³/s,初始粗糙度为 0.030,初始水位为 3 m。

通过遥感数据反演获得的河宽计算流量,为模型提供了一种独立的流量估算。与传统的实测流量数据相比,遥感数据在时空一致性方面具有明显优势,特别是在缺乏全面实测数据的区域或时段,遥感数据能够有效填补流量数据的空白。遥感河宽计算流量与实测流量数据相结合,通过误差分析和多数据源的综合调

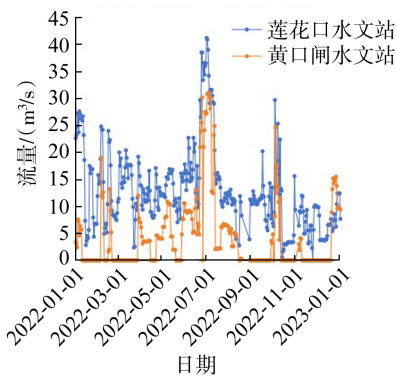


图 2 莲花口、黄口闸水文站 2022 年逐日实测流量过程

Fig. 2 Daily measured flow data for Lanhuakou and Huangkou Gate hydrological stations in 2022

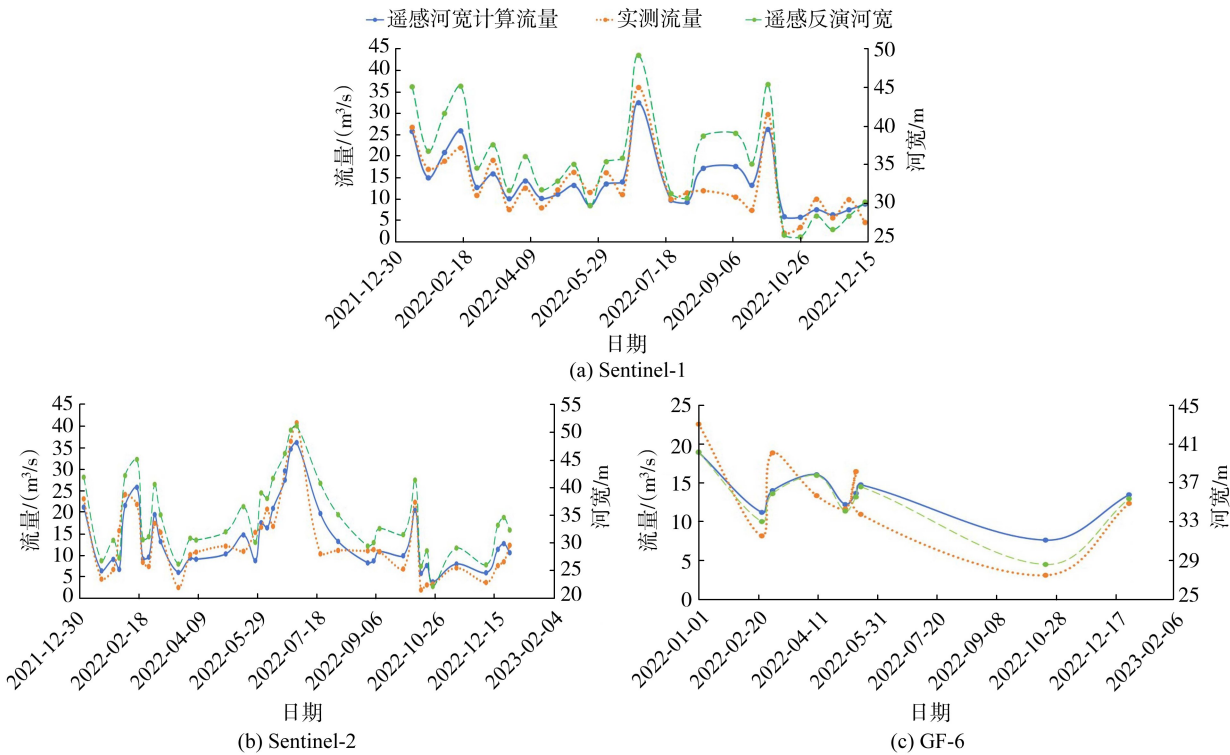


图 3 莲花口水文站遥感河宽计算流量

Fig. 3 Discharge estimated from remotely sensed river width at Lianhuakou Hydrological Station

整,可以显著减少单一数据源可能带来的系统性误差。例如,实测流量数据可能受局部环境条件或测量误差的影响,而遥感河宽计算流量数据则能够提供更为全面和连续的河道特征信息。通过将两者的优势相结合,有助于更精准地校准模型参数,提高模拟结果的可靠性。

在卡尔曼滤波数据同化过程中,结合遥感河宽计算流量数据与实测流量数据进行模型参数率定,可以确保模型在执行同化时,能够充分融合多源数据,从而提高流量估算的精度与稳定性。尤其在缺乏实测数据的情况下,遥感数据能够提供合理的流量动态估计,从而有效支持流量模拟和模型优化。

模拟结果表明,MIKE11 模型对流量模拟的 R^2 达到 0.90 以上,充分验证了其在流量预测方面具备较高的可靠性。据此,本文初步将 MIKE11 模型糙率 n 确定为 0.030。考虑到研究区存在资料匮乏与监测条件受限的现实背景,基于实测流量数据对拟定的糙率参数进行初步校准后,引入遥感河宽计算流量数据作为模型输入,模拟河道流量的动态变化过程,并以此为依据对模型参数开展迭代修正。在综合对比实测流量数据反演的 $n(0.030)$ 、遥感河宽计算流量得到的 $n(0.045)$,以及误差分析结果的基础上,最终确定以实测流量数据为主导的 $n(0.035)$ 作为本文模型校准参数。

2.3.3 KF 算法参数率定

通过调整对比不同情况下过程噪声与观测噪声对精度的影响,选取了多组过程噪声与观测噪声的组合。由表 1 可知,经过 KF 算法数据同化后,流量模拟结果得到明显提升,NSE 范围为 0.890~0.913, R^2 范围为 0.898~0.922,RRMSE 范围为 0.170~0.220,与遥感反演流量数据整合精度对比(NSE 为 0.830, R^2 为 0.830,RRMSE 为 0.250)分别提升了 7.2%~10.0%、8.2%~11.1%,降低了 12.0%~32.0%,同化效果较好。综合对比发现,组号 6 的同化效果相对更好,其中 NSE 为 0.913, R^2 为 0.922,RRMSE 为 0.170。选取 2022 年 1—7 月的实测流量数据作为率定期,2022 年 8—12 月作为验证期,组号 6 的数据同化后模拟结果如图 4 所示。

2.3.4 KF 算法数据同化模拟流量验证

为验证本文方法在无资料地区的适用性,选取曲周段黄口闸入鸡泽边界处作为验证河段。由于 GF-6 影像对应实测流量资料有限,所以选取 Sentinel-1 与 Sentinel-2 遥感卫星作为河宽获取源,其中 Sentinel-1 与 Sentinel-2 分别有 33 景与 28 景,除去重复日期共获取 58 景影像数据。经过 Sen2Cor、ENVI 与 SNAP 等程序预处理后,Sentinel-1 雷达影像数据利用 Matlab 编程实现影像的强化与 OTSU 法水体提取,Sentinel-2 光学影

表 1 不同过程噪声与观测噪声组合情况下 KF 算法同化数据模拟流量精度

Table 1 Simulation accuracy of KF algorithm-assimilated data under different combinations of process noise and observation noise

组号	过程噪声	观测噪声	NSE	RRMSE	R^2
1	1.00	0.10	0.894	0.220	0.898
2	0.10	0.10	0.891	0.200	0.903
3	1.00	0.01	0.894	0.210	0.902
4	0.01	0.01	0.904	0.192	0.909
5	0.01	0.10	0.907	0.190	0.909
6	0.01	1.00	0.913	0.170	0.922
7	0.20	0.10	0.894	0.196	0.908
8	0.10	1.00	0.890	0.200	0.904

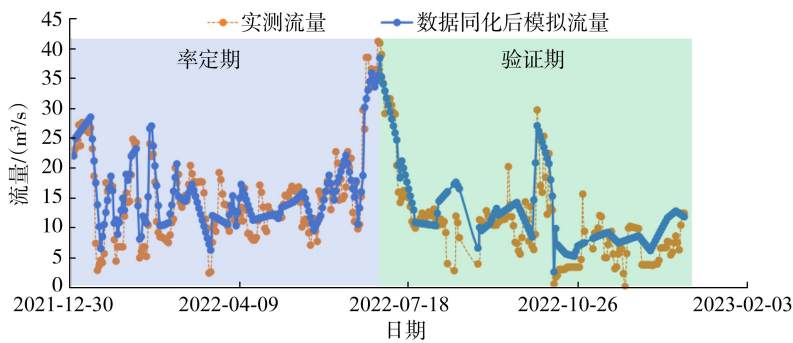


图 4 KF 算法数据同化后莲花口水文站模拟流量

Fig. 4 Simulated flow at Lianhuakou Hydrological Station using KF algorithm for data assimilation

像数据利用影像操作云平台计算 MNDWI 并利用 OTSU 法提取水体。

2.3.4.1 遥感河宽测量及流量计算

通过概化河道面积,测量河道中心线长度,计算河道平均宽度,并利用关系拟合法(β 取 0.001)计算河道流量,结果如图 5 所示。由图 5 可知,遥感河宽计算流量 R^2 为 0.790,NSE 为 0.773,RRMSE 为 0.330。

2.3.4.2 KF 算法数据同化

利用 KF 算法对黄口闸进行数据同化,将 MIKE11 模型模拟的莲花口水文站下游流量数据与遥感河宽计算流量数据作为 KF 算法(过程噪声为 0.01,观测噪声为 1.00)输入数据,进行验证。

由图 6 可知,遥感模拟流量与实测流量整体趋势较为一致,特别是在 2022 年 7 月中旬和 11 月末的高峰期,二者均能较好反映流量波动。然而,在某些时段,遥感模拟流量与实测流量存在显著偏差:3 月和 7 月中旬,遥感模拟流量较实测值偏大,这是因为模型未能准确考虑局部环境因素或流量突变等情况。此外,误差主要集中在流量峰值和稳定期。在高峰期,遥感模拟流量通常高于实测流量,如 2022 年 5 月和 6 月末,这是由于极端天气下对水面反射率或其他参数估算不准所致。而在枯水期,遥感模拟流量表现为低估,尤其是 2022 年 1 月、2 月和 12 月,因低水位条件下遥感数据的有效信息不足,导致误差加大。2022 年 7 月,受强降雨事件影响,流量波动剧烈,遥感模拟流量亦出现较大波动,此时遥感反演受降水影响,水体边界识别出现偏差。相比之下,春秋季节较为干燥的时段,实测流量和遥感模拟流量均存在一定低估。

KF 算法数据同化后模拟流量(以下简称“KF 算法模拟流量”)与实测流量在大多数时段保持较高的一致性,尤其是在 5 月底、7 月中旬和 11 月底的流量峰值时期,较好地反映了流量的波动情况。这表明 KF 数据同化过程有效提升了模拟精度。在 1 月、2 月及 9 月中下旬等河流稳定时期,KF 算法模拟流量与实测流量接近,进一步验证了其在稳定流量条件下的良好拟合能力,较好地避免了遥感模拟流量中常见的低估现

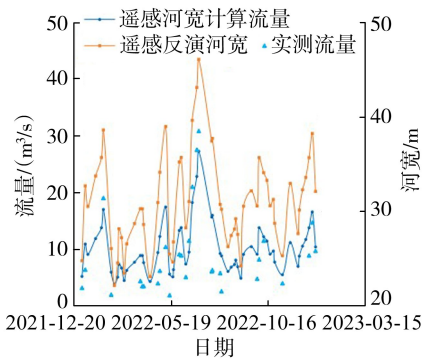


图 5 黄口闸水文站遥感河宽与流量反演

Fig. 5 Remotely sensed river width and discharge inversion of Huangkou Gate Hydrological Station

象。尽管 KF 算法模拟流量在多数高流量时期表现出较好的拟合度,但在 7 月中旬的流量峰值阶段,模拟峰值略有滞后且峰值偏低,是模型未能充分捕捉洪水等快速变化的水文过程所致。特别是在 7 月和 10 月,尽管模拟值与实测值趋势总体一致,细节上仍存在一定波动,显示出 KF 算法在处理非线性水文过程时的局限性。2022 年 7 月中旬至 8 月初的流量峰值由强降雨引发,KF 算法模拟流量较好地捕捉了降雨事件后的流量上升趋势,但由于突发天气影响了数据同化,导致峰值低于实测值。在枯水期如 1 月、2 月及 9 月,KF 算法模拟流量表现优异,能将实测值与模型模拟值较好地融合,尤其是在降雨较少的稳定时期。KF 算法通过结合模型模拟与实测数据,持续更新流量模拟值,即便在数据稀缺或存在噪声的情况下,仍能提高模拟精度。由图 6 可知,即使在实测数据较稀疏的 5 月和 9 月,KF 算法模拟流量仍能较好地捕捉流量变化趋势,证明了其抗噪能力及动态修正模型误差的能力。然而,部分流量峰值的滞后和低估表明 KF 算法在处理快速变化的流量时需进一步优化滤波器参数。

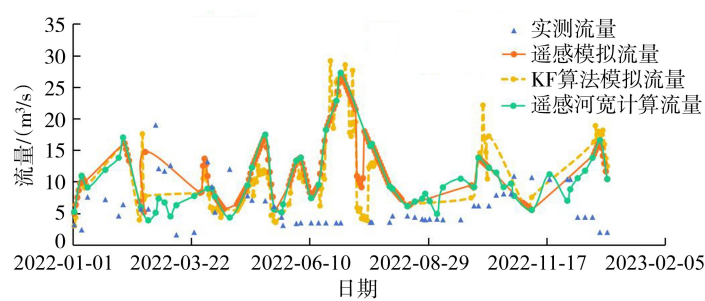


图 6 不同来源流量数据对比

Fig. 6 Comparison of flow data from different sources

峰值时期,KF 算法模拟流量对流量变化的响应整体表现较好,但滞后也偶有发生。由于实测流量数据为日尺度过程,在极值过程,特别出现次洪过程的反映上需进一步刻画,并最终提高率定验证后模型针对快速变化事件响应的时效性。此外,在水文条件复杂或极端天气频发的区域,增加 MIKE11 模型物理参数有助于提升 KF 算法对复杂水文过程的模拟能力。KF 算法性能依赖于过程噪声和观测噪声协方差矩阵的合理设定,未来可通过历史数据校准滤波器参数,优化噪声平衡,进一步有效提高极值时段的精度。

由图 6 可知,KF 数据同化可显著提升流量模拟精度,尤其是在水文过程平稳期及多数时段表现出较好的拟合度。相比初始遥感输入 MIKE11 模型的结果(NSE 为 0.640, R^2 为 0.640,RRMSE 为 0.460),KF 数据同化后, R^2 提高至 0.820,NSE 提升至 0.813,RRMSE 降低至 0.260,分别提高了 28.1%、27.0%和降低了 43.5%,上述结果表明,多源遥感数据与 KF 同化结合 MIKE11 模型在河道流量模拟中具有较好的适用性。

图 6 对比了遥感河宽计算流量、遥感模拟流量与 KF 算法模拟流量与实测流量的差异。总体上,河宽计算流量能够表征流量变化趋势,但在丰水期洪峰阶段(如 5 月底至 7 月中旬)受河宽-流量关系非线性放大影响,峰值偏差明显并表现为系统性高估;在枯水或相对平稳阶段(如 9 月初)偏差较小,适用性更好。遥感模拟流量在一定程度上平滑了过程并改善了与实测流量整体一致性,但在洪峰及快速涨落阶段仍存在高估与响应滞后。KF 同化通过融合观测信息与模型预报,有效抑制了高流量阶段的高估偏差并提升序列稳定性,相较于遥感模拟流量,整体精度显著改善。

3 结 论

a. 基于 Sentinel 与 GF-6 多源遥感影像,结合 MNDWI 与 OTSU 法实现河道水体提取,并通过河宽-流量关系反演流量,在莲花口断面取得较好精度,NSE 为 0.830, R^2 约为 0.830,RRMSE 约为 0.250,表明遥感反演结果能够有效表征河道流量变化特征。在模型参数率定过程中,综合实测与遥感反演结果确定糙率 n 为 0.035;通过多组过程噪声与观测噪声组合对 KF 参数进行优化,最优组合显著提升模拟精度。同化后模型 NSE 提高 7.2%~10.0%, R^2 提高 8.2%~11.1%,RRMSE 降低 12.0%~32.0%,同化效果较好。

a. 以曲周黄口闸段为验证河段,基于 Sentinel-1 与 Sentinel-2 影像反演河宽并计算流量,其精度为 $R^2 = 0.790$ 、NSE=0.773、RRMSE=0.330,整体能够较好反映流量变化过程,但在复杂水文条件下仍存在一定偏差。引入 MIKE11-KF 数据同化后,曲周段流量模拟精度显著提升,NSE 达 0.813, R^2 达 0.820,RRMSE 降至 0.260;相较同化前, R^2 提高 28.1%,NSE 提升 27.0%,RRMSE 降低 43.5%,验证了该方法在无资料或资料稀

缺区域的有效性 with 适用性。

参考文献：

[1] 徐嘉慧,王世东,宋利娟,等. 雅鲁藏布江干流河宽时空变化遥感监测及水文气象响应[J]. 地理学报,2022,77(11):2862-2877. (Xu Jiahui,Wang Shidong,Song Lijuan,et al. Mapping spatio-temporal variation of river width from satellite remote sensing data and hydrometeorological response in the Yarlung Zangbo River[J]. Acta Geographica Sinica,2022,77(11):2862-2877. (in Chinese))

[2] 朱德军,李浩博,王晓明. GNSS 遥感技术在智慧水利建设中的应用展望[J]. 水利水电技术(中英文),2022,53(10):33-57. (Zhu Dejun,Li Haobo,Wang Xiaoming. Application prospects of GNSS remote sensing technology in smart water conservancy construction[J]. Water Resources and Hydropower Engineering (Chinese-English),2022,53(10):33-57. (in Chinese))

[3] 李和谋,白娟,甘甫平,等. 遥感估算河道流量研究进展[J]. 自然资源遥感,2023,35(2):16-24. (Li Hemou,Bai Juan,Gan Fuping,et al. River discharge estimation based on remote sensing[J]. Remote Sensing for Natural Resources,2023,35(2):16-24. (in Chinese))

[4] Lin P,Feng D,Gleason C J,et al. Inversion of river discharge from remotely sensed river widths:a critical assessment at three-thousand global river gauges[J]. Remote Sensing of Environment,2023,287: 113489.

[5] Rao K D,Shravya A,Dadhwal V. A novel method of satellite based river discharge estimation using river hydraulic geometry through genetic algorithm technique [J]. Journal of Hydrology,2020,589: 125361.

[6] 赵长森,潘旭,杨胜天,等. 低空遥感无人机影像反演河道流量[J]. 地理学报,2019,74(7):1392-1408. (Zhao Changsen,Pan Xu,Yang Shengtian,et al. Measuring streamflow with low-altitude UAV imagery[J]. Acta Geographica Sinica,2019,74(7):1392-1408. (in Chinese))

[7] 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. (Yang Shengtian,Wang Pengfei,Wang Juan,et al. River flow estimation method based on UAV aerial photogrammetry[J]. Journal of Remote Sensing,2021,25(6):1284-1293. (in Chinese))

[8] 周承乐,石茜,李军,等. 光谱—频域属性模式融合的高光谱遥感图像变化检测[J]. 遥感学报,2024,28(1): 105-120. (Zhou Chengle,Shi Qian,Li Jun,et al. Spectral-frequency domain attribute pattern fusion for hyperspectral image change detection[J],National Remote Sensing Bulletin,2024,28(1):105-120. (in Chinese))

[9] 张祺祺,孙文义,穆兴民,等. 基于 K-means 聚类的黄河流域气候-生态-水文综合分区[J]. 节水灌溉,2025(7):59-65. (Zhang Qiqi,Sun Wenyi,Mu Xingmin,et al. Comprehensive climate-ecological-hydrological zoning of the Yellow River Basin using K-means clustering[J]. Water Saving Irrigation,2025(7):59-65. (in Chinese))

[10] 李倩楠,张杜娟,潘耀忠,等. MPSPNet 和 UNet 网络下山东省高分辨耕地遥感提取[J]. 遥感学报,2023,27(2): 471-491. (Li Qiannan,Zhang Dujuan,Pan Yaozhong ,et al. High-resolution cropland extraction in Shandong province using MPSPNet and UNet network[J]. National Remote Sensing Bulletin,2023,27(2):471-491. (in Chinese))

[11] Sharifi A. Flood mapping using relevance vector machine and SAR data:a case study from Aqqala, Iran [J]. Journal of the Indian Society of Remote Sensing,2020,48(9): 1289-1296.

[12] Benoudjit A,Guida R. A novel fully automated mapping of the flood extent on SAR images using a supervised classifier[J]. Remote Sensing,2019,11(7): 779.

[13] Skakun S. A neural network approach to flood mapping using satellite imagery [J]. Computing and Informatics,2010,29: 1013-1024.

[14] 赵恒谦,贾梁,尹政然,等. 基于多源遥感数据的北京市通州区土地利用/覆盖与生态环境变化监测研究[J]. 地理与地理信息科学,2019,35(1):38-43. (Zhao Hengqian,Jia Liang,Yin Zhengran,et al. Dynamic monitoring of land use and ecological environment based on multiple remote sensing data;a case study of Tongzhou District, Beijing [J]. Geography and Geo-Information Science,2019,35(1):38-43. (in Chinese))

[15] Otsu N. A thresholding selection method from gray-level histogram[J]. IEEE,1978,11(8): 62-66.

[16] 李玉,杨蕴,赵泉华. 结合改进的降斑各向异性扩散和最大类间方差的 SAR 图像水体提取[J]. 地球信息科学学报,2019,21(6):907-917. (Li Yu,Yang Yun,Zhao Quanhua. Waterbody extraction from sar imagery based on improved speckle reducing anisotropic diffusion and maximum between-cluster variance[J]. Journal of Geo-information Science,2019,21(6):907-917. (in Chinese))

[17] 谷鑫志,曾庆伟,湛华,等. 高分三号影像水体信息提取[J]. 遥感学报,2019,23(3):555-565. (Gu Xinzhi,Zeng Qingwei,Chen Hua,et al. Study on water information extraction using domestic GF-3 image[J]. Journal of Remote Sensing,2019,23(3):555-565. (in Chinese))

- [18] 梁顺林,白瑞,陈晓娜,等. 2019 年中国陆表定量遥感发展综述[J]. 遥感学报,2020,24(6):618-671. (Liang Shunlin, Bai Rui, Chen Xiaona, et al. Review of China's land surface quantitative remote sensing development in 2019[J]. Journal of Remote Sensing, 2020, 24(6): 618-671. (in Chinese))
- [19] 徐涵秋. 水体遥感指数研究进展[J]. 福州大学学报(自然科学版), 2021, 49(5): 613-625. (Xu Hanqiu. Development of remote sensing water indices: a review[J]. Journal of Fuzhou University (Natural Science Edition), 2021, 49(5): 613-625. (in Chinese))
- [20] 刘宏洁,宋文龙,刘昌军,等. 基于归一化水体指数及其阈值自适应算法的水体遥感反演效果分析[J]. 中国水利水电科学研究院学报(中英文), 2022, 20(3): 251-261. (Liu Hongjie, Song Wenlong, Liu Changjun, et al. Analysis of water remote sensing inversion effect of Normalized Difference Water Index and its adaptive threshold correction algorithm[J]. Journal of China Institute of Water Resources and Hydropower Research, 2022, 20(3): 251-261. (in Chinese))
- [21] 徐涵秋. 利用改进的归一化差异水体指数(MNDWI)提取水体信息的研究[J]. 遥感学报, 2005, 9(5): 589-595. (Xu Hanqiu. A Study on Information Extraction of Water Body with the Modified Normalized Difference Water Index (MNDWI)[J]. Journal of Remote Sensing, 2005, 9(5): 589-595. (in Chinese))
- [22] Yan Q, Jing Z, Xia Z, et al. Flood control capacity of the Three Gorges Project for different frequency floods[J]. Environmental Engineering Science, 2021, 38(12): 1195-1205.
- [23] 牛瑶瑶. 基于 MIKE11(HD)的农用灌排水非恒定流算例分析[J]. 水利技术监督, 2020(3): 204-209. (Niu Yaoyao. Analysis of unsteady flow for farmland irrigation and drainage based on MIKE11 (HD)[J]. Technical Supervision in Water Resources, 2020(3): 204-209. (in Chinese))
- [24] 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. (Xu Jijun, Qu Xing, Zeng Ziyue, et al. River runoff simulation analysis of typical basins based on high-precision remote sensing brightness temperature[J]. Advances in Water Science, 2021, 32(6): 877-889. (in Chinese))
- [25] Parvaze S, Jain M K, Allaie S P. Integrated hydrologic and hydraulic flood modelling for a scarcely gauged inter-montane basin: a case study of Jhelum Basin in Kashmir Valley[J]. Indian Academy of Sciences, Sādhanā, 2023, 48(1): 15.
- [26] 吴剑平,杜洪波,李文杰,等. 基于遥感数据的山区河流测深反演方法与应用[J]. 水科学进展, 2023, 34(10): 1-10. (Wu Jianping, Du Hongbo, Li Wenjie, et al. Inversion method and application of mountain river bathymetry based on remote sensing data[J]. Advances in Water Science, 2023, 34(10): 1-10. (in Chinese))
- [27] 刘永伟,王文,刘元波,等. 水文模型模拟预报的多源数据同化方法及应用研究进展[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2021, 49(6): 483-491. (Liu Yongwei, Wang Wen, Liu Yuanbo, et al. Advances in multi-source data assimilation approach and application in simulation and forecast of hydrological model[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2021, 49(6): 483-491. (in Chinese))
- [28] 李新,刘丰,方苗. 模型与观测的和弦:地球系统科学中的数据同化[J]. 中国科学:地球科学, 2020, 50(9): 1185-1194. (Li Xin, Liu Feng, Fang Miao. Harmonizing models and observations: data assimilation in Earth system science[J]. Scientia Sinica (Terrae), 2020, 50(9): 1185-1194. (in Chinese))
- [29] Milašinović M, Prodanovic D, Zindovic B, et al. Fast data assimilation for open channel hydrodynamic models using control theory approach[J]. Journal of Hydrology, 2020, 584: 124661.
- [30] 顾炉华,赖锡军. 基于 EnKF 算法的大型河网水量数据同化研究[J]. 水力发电学报, 2021, 40(3): 64-75. (Gu Luhua, Lai Xijun. Influence of field observation on effectiveness of data assimilation using EnKF algorithm for large-scale river network[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2021, 40(3): 64-75. (in Chinese))
- [31] 刘永伟,王文,刘元波,等. 基于 EnKF 法的径流数据同化对 SWAT 模型参数优化效果评估[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2022, 50(2): 1-10. (Liu Yongwei, Wang Wen, Liu Yuanbo, et al. Evaluation of the optimization effect of streamflow data assimilation on SWAT model parameters based on the EnKF approach[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2022, 50(2): 1-10. (in Chinese))
- [32] Francois C, Quesney A, Ottle C. Sequential assimilation of ERS-1 SAR data into a coupled land surface-hydrological model using an extended Kalman filter[J]. Journal of Hydrometeorology, 2003, 4(2): 473-487.
- [33] Muluye G Y. Improving long-range hydrological forecasts with extended Kalman filters[J]. Hydrological Sciences Journal, 2011, 56(7): 1118-1128.
- [34] Khodarahmi M, Maihami V. A review on Kalman filter models[J]. Archives of Computational Methods in Engineering, 2023, 30(1): 727-747.
- [35] 张力,赵自阳,王红瑞,等. 气候变化下水文模拟不确定性若干问题讨论[J]. 水资源保护, 2023, 39(1): 109-118. (Zhang Li, Zhao Ziyang, Wang Hongrui, et al. Discussion on several issues of uncertainty in hydrological simulation under climate change [J]. Water Resources Protection, 2023, 39(1): 109-118. (in Chinese))
- [36] 栾清华,谷鹏程,兰凤,等. 一种基于卫星影像的河道宽度计算方法和系统:中国,ZL202310082229.3[P]. 2023-08-11.

[37] 张成才,彭凯,杨峰,等. 基于 SGD 和分类区域阈值结合的水库流域覆被变化遥感检测方法[J]. 水利水电技术(中英文), 2021,52(11):164-172. (Zhang Chengcai, Peng Kai, Yang Feng, et al. Remote sensing detection method for reservoir watershed cover change based on SGD and classification area threshold [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2021,52(11): 164-172. (in Chinese))

[38] Otsu N. A threshold selection method from gray-level histograms[J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, 1979, 9(1): 62-66.

[39] Martinis S, Tweie A, Voigt S. Unsupervised extraction of flood-induced backscatter changes in SAR data using Markov image modeling on irregular graphs[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2010,49(1): 251-263.

[40] 周聂,陈华,胡朝阳,等. 遥感影像空间分辨率对河道水体识别影响[J]. 中国农村水利电, 2023(8):82-94. (Zhou Nie, Chen Hua, Hu Chaoyang, et al. The Influence of Spatial Resolution of Remote Sensing Image on River Water Identification[J]. China Rural Water and Hydropower, 2023(8):82-94. (in Chinese))

[41] Smith L C, Lsacks 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.

[42] 姜磊鹏,丁建丽,包青岭,等. 低空遥感结合卫星影像的河道流量反演[J]. 干旱区地理, 2023,46(3): 385-396. (Jiang Leipeng, Ding Jianli, Bao Qingling, et al. Runoff estimation with low altitude remote sensing and satellite images[J]. Arid Land Geography, 2023,46(3):385-396. (in Chinese))

[43] Kurahashi T, Ikarashi K, Kenchi T, et al. Data Assimilation of water elevation in shallow water flow based on the extended kalman filter FEM using measurement data from image analysis[J]. International Journal of Computational Fluid Dynamics, 2022,36(2): 103-111.

[44] 徐恩松,陆文华,刘云飞,等. 基于卡尔曼滤波的数据融合算法与应用研究[J]. 计算机技术与发展, 2020,30(5):143-147. (Xu Ensong, Lu Wenhua, Liu Yunfei, et al. Research on data fusion algorithm and application based on Kalman filter[J]. Computer Technology and Development, 2020,30(5):143-147. (in Chinese))

[45] 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, 2014,50(12): 9604-9619.

[46] 李龙杰,杨永辉. 基于 Landsat 8 OLI 影像的常用水体指数法分类精度对比[J]. 中国科学院大学学报(中英文), 2024,41(6):755-765. (Li Longjie, Yang Yonghui. Comparison study on classification accuracy of 11 common water indices based on Landsat 8 OLI images[J]. Journal of University of Chinese Academy of Sciences, 2024,41(6):755-765. (in Chinese))

(收稿日期:2024 - 10 - 28 编辑:刘晓艳)

(上接第 8 页)

[16] 朱雅敏,陈子燊. 珠江口内伶仃洋河口湾盐度运输机理[J]. 海洋通报, 2008,27(1):29-34. (Zhu Yamin, Chen Zishen. Salinity transport of mechanism in Internal Lingdingyang Firth of the Pearl River Mouth[J]. Marine Science Bulletin, 2008,27(1):29-34. (in Chinese))

[17] 赵焕庭. 珠江三角洲的水文特征[J]. 热带海洋, 1983,2(2):108-117. (Zhao Huaning. Hydrological characteristics of the Zhujiang (Pearl River) Delta[J]. Journal of Tropical Oceanography, 1983,2(2):108-117. (in Chinese))

[18] 罗肇森. 珠江口伶仃洋深水航道开发方案的回淤研究[J]. 水利水运科学研究, 1995(2):110-118. (Luo Zhaosen. Study of siltation for development of deep water navigation channel of Lingdingyang in Pearl River Estuary [J]. Hydro-Science and Engineering, 1995(2):110-118. (in Chinese))

[19] 欧素英. 珠江三角洲咸潮活动的空间差异性分析[J]. 地理科学, 2009,29(1):89-92. (Ou Suying. Spatial difference about activity of saline water intrusion in the Pearl (Zhujiang) River Delta[J]. Scientia Geographica Sinica, 2009,29(1):89-92. (in Chinese))

[20] 陈晖,黄广灵. 东江咸潮上溯特征及盐度运输机理浅析[J]. 水资源保护, 2023,39(6):195-203. (Chen Hui, Huang Guangling. Analysis of saltwater intrusion characteristics and salinity transport mechanism in the Dongjiang River[J]. Water Resources Protection, 2023,39(6):195-203. (in Chinese))

[21] 吴志勇,林青霞. 西江流域水文干旱时空特征分析[J]. 水资源保护, 2016,32(1):51-56. (Wu Zhiyong, Lin Qingxia. Analysis on spatial and temporal characteristics of hydrological drought in Xijiang River Basin[J]. Water Resources Protection, 2016,32(1):51-56. (in Chinese))

[22] 谢凌峰,申其国,徐治中. 20 世纪 80 年代以来珠江三角洲网河区河性演变[J]. 水利水电科技进展, 2015,35(4):10-13. (Xie Lingfeng, Shen Qiguo, Xu Zhizhong. Evolution of river characteristics in river network of Pearl River Delta since [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2015,35(4):10-13. (in Chinese))

(收稿日期:2024 - 11 - 28 编辑:刘晓艳)