DOI:10.20040/j.cnki.1000-7709.2025.20250132

基于无人机多源遥感的河道流量估算方法研究

赵文举[1,2],李 星[1,2],张永明[3],郝永伟[1,2]

(1. 兰州理工大学能源与动力工程学院,甘肃 兰州 730050;2. 农业农村部智慧农业节水灌溉装备重点实验室,甘肃 兰州 730050;3. 甘肃省水利科学研究院,甘肃 兰州 730000)

摘要:针对水文资料缺失地区河道流量数据获取困难、时效性差等问题,基于无人机激光雷达(LiDAR)和多光谱(MSI)影像数据,通过三维重建算法重建2.09 cm/px地面分辨率的LiDAR影像,获取高精度的正射影像(DOM)和地表高程(DSM)数据,在此基础上采用支持向量机(SVM)构建基于MSI影像的水体提取方法,提取水面宽、糙率、水面比降等水力学参数,构建基于曼宁公式的河道流量估算方法;采用均方根误差、平均百分比误差和相对精度进行误差分析,以洮河流域为典型研究区,确定水文资料缺失地区河道流量估算方法。结果表明,基于无人机多源遥感的河道流量估算方法可快速、高效获取河道流量,将计算结果与实测数据对比验证,均方根误差为4.16 m^3/s,平均百分比误差为0.053,三个典型断面流量计算的相对精度分别为6.71%、12.63%、3.35%,研究结果可为水文资料缺失地区河道流量实时获取和估算提供理论依据。

关键词:流量估算;多源遥感;三维重建;水体提取;曼宁公式

中图分类号:TV214 **文献标志码**:A **文章编号**:1000-7709(2025)11-0047-05

1 引言

河道流量对河流生态系统、生物多样性及人类社会经济活动至关重要,准确有效获取河道流量是水体监测、水资源高效利用等领域的关键[1-2]。传统水文数据采集依赖站点监测,获取数据精度高但较为耗时耗力,尤其在环境恶劣、站点稀少区域困难重重[3]。目前,遥感技术成为水文监测的主要技术手段,其中无人机(UAV)遥感分辨率高、适应性强,可快速精准获取下垫面地形信息[4-5],在水力学参数测定中优势显著。如ZHAO C S等[6]通过遥感地形信息重构河道形态,用UAV高分辨率立体影像计算河道横断面反演径流量,为径流量反演提供了新思路;李甲振等[7]构建河道断面模型,运用河宽—流量幂函数关系,通过实测河宽反演径流量,提升了少资料区域的流量监测能力;赵长森等[8]运用UAV遥感技术进行径流量估算,结合曼宁公式开发"耦合遥感与地面数据的河道流量计算程序"对济南小清河流域65组河流断面进行径流量反演,验证了将无人机资料与曼宁公式相结合进行径流估算的可行性,但其反演精度仍有待提升。因此,本文以洮河流域为研究区,基于三维重建的LiDAR影像与同时期地面真实河道数据,获取高精度的数字正射影像图DOM和数字地表模型DSM,并采用支持向量机SVM构建多光谱遥感影像的水体提取方法,获取水面宽度、粗糙系数及水面坡度等参数,深入分析遥感数据中的地形高程信息,绘制河流横截面图,运用曼宁公式构建流量估算模型,确定水文资料缺失地区河道流量估算方法,以期为水文资料缺失地区快速、准确地获取河道流量数据提供理论依据。

2 材料与方法

2.1 研究区概况

选取洮河的一级支流广通河河段的干流部分、八仙口、三甲集3个典型断面估算流量(图1),广通河发源于太子山中部南麓的凯卡,海拔3 940 m,由西南向北东,流经和政县与广河县,最终于广河县三甲集镇高家崖汇入洮河,河口海拔

收稿日期:2025-01-17,**修回日期**:2025-02-20

基金项目:国家自然科学基金项目(52379042);甘肃省重点研发计划项目(23YFFA0019,24YFFA033)

作者简介:赵文举(1981-),男,博士、教授、博导,研究方向为寒旱区生态水利、智慧灌区和水资源等,E-mail:wenjuzhao@126.com

中国知网 https://www.cnki.net

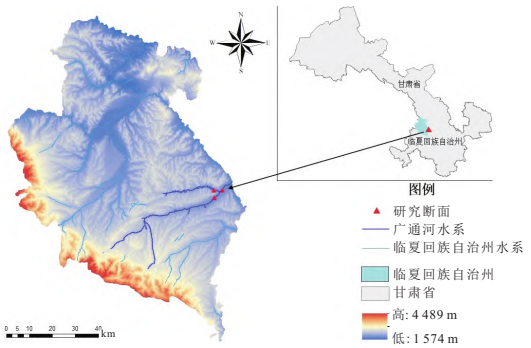


图 1 研究区概况图

Fig. 1 Study area overview map

1 799 m。广通河全长 85.03 km,流域面积 1 579 km^2,年平均降水量为 400～800 mm,现仅在广通河干流入洮河口建有三甲集水文站,为典型的水文资料缺失地区。

2.2 数据来源与预处理

2.2.1 无人机 LiDAR 遥感影像

使用 DJI 公司的 DJI L1 和 Phantom 4 Multispectral无人机获取高精度的低空遥感地形数据,同时记录位置坐标。DJI L1 搭载 Livox 激光雷达系统,结合精密惯导与测绘镜头,配合 M300 RTK 平台,可全天候快速获取三维信息,在复杂环境中实现精准点云采集。使用 DJI L1(表 1)获取目标河段低空遥感数据(图 2),基于三维重建算法构建三维河道模型,并生成高精度的点云、DOM、DSM 数据。

表 1 DJI 无人机参数

Tab. 1 Basic parameters of DJI drones

参数	取值	参数	取值
支持机型	经纬 M300RTK	精度	高程精度 5 cm、平面精度 10 cm
传感器尺寸	1 英寸	有效点云数据率	240 000 点/s
相机像素	2 000 万	起飞重量	(930±10 g)
最大光圈	f/11	测量距离	450 m
相机焦距	24 mm	工作环境温度	0～50 ℃

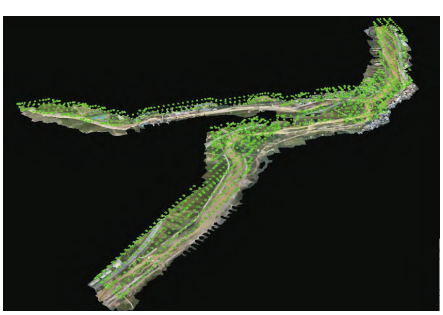


图 2 DJI L1 数据处理

Fig. 2 DJI L1 data processing

2.2.2 无人机多光谱遥感影像

选择 DJI 公司 Phantom 4 Multispectral 无人机,搭载 6 个 1/2.9 英寸 CMOS 影像传感器,包含 1 个彩色 RGB 传感器和 5 个单色光谱传感器,详细波段参数见表 2。

表 2 机载光谱仪波段参数

Tab. 2 Multispectral parameters of UAV

光谱	波段	参数	取值
蓝光	450 nm(±16)	图片分辨率	1 600×1 300
绿光	560 nm(±16)	飞行高度	40 m
红光	650 nm(±16)	航线重叠率	70%
红边	730 nm(±16)	RGB 旁像重叠率	65%
近红外	840 nm(±26)	平均速度	4 m/s

2.2.3 野外实测采样

野外采集工作于 2023 年 10 月在广通河流域开展,选取其干流段、八仙口、三甲集 3 个典型断面作为研究采样区域。每个采样区域选取 5 个样点,分别用手持式电波流速仪和浮标法进行五点取样法取样,最后取五点的均值作为该采样点河流流速,断面平均流速及实测流量见表 3。

表 3 横断面实测数据

Tab. 3 Measured data of cross-sections

断面	平均流速 /(m·s^{-1})	断面面积 /m^2	实测流量 /(m^3·s^{-1})
广通河干流	1.34	79.30	106.26
八仙口	0.69	10.26	7.08
三甲集	1.52	12.56	19.09

鉴于所用无人机无法直接探测水下地形,本次采样额外补充了关键实测数据。依据《水道观测规范》(SL 257-2017)[9]与《水文测量规范》(SL 58-2014)[10]规范要求,运用流速—面积法开展河道断面测量测绘,保障水下地形信息的精确性。

2.3 研究方法

2.3.1 三维重建与评价

三维重建算法为 KULAWIAK M 等[11]针对 LiDAR 影像提出的一种利用 3D 光栅化技术,创建和处理一个对象的三维规则网格表示,在此基础上应用泊松表面重建技术构建三维网络模型的方法。本文在平均飞行高度为 75 m,地面分辨率为 2.09 cm/px 的 LiDAR 影像数据基础上利用三维重建算法构建三维重建影像,并生成高精度的 DOM 和 DSM 数据。采用重投影误差(RMS)[12]和地理配准均方根误差定量分析三维重建地理配准后的模型或影像中的位置与实际位置之间的差异波情况。

2.3.2 水体提取方法构建与评价

SVM 作为监督式学习算法[12]的一种,通过核函数映射将高维数据降维处理,结合遥感图像的空间与光谱特征,在二元分类任务中展现出优异性能,尤其在水体识别领域具有较高的分类精度。其优于归一化水体指数(NDWI)等方法,可以利用多维特征进行分类,自动学习最佳的分类

中国知网 https://www.cnki.net

边界,并适应于不同影像条件和地形环境,在处理多光谱影像方面具有强大的潜力。故选取 SVM 算法对多光谱遥感影像进行水体提取,并采用总体精度(OA)和 Kappa 系数进行精度评价。

2.3.3　流量估算方法构建与评价

在天然河道中,水流多呈现湍流特征,其阻力特性可用曼宁公式表征,即:

$$C = R^{1/6}/n \tag{1}$$

断面流量 Q 的计算公式为:

$$Q = R^{2/3} J^{1/2} A/n \tag{2}$$

式中,C 为谢才系数;R 为水力半径;J 为水力梯度;A 为过水断面面积;n 为糙率。

采用相对精度(R_{RA})、均方根误差(R_{RMSE})和平均百分比误差(M_{MPE})三个评价指标,对径流量反演结果的精确性进行验证[11]。R_{RMSE} 用于描述估算流量与实测值之间的偏差,M_{MPE} 作为误差评估手段,用于验证预测值是否处于可接受偏差区间,这两种指标综合评估了流量测算的准确性。作为补充,添加 R_{RA} 对单次估算结果进行精度评价,依据《水文情报预报规范》(GB/T 22482-2008)[13],实测数据误差限值不得超过 20%。

3　结果与分析

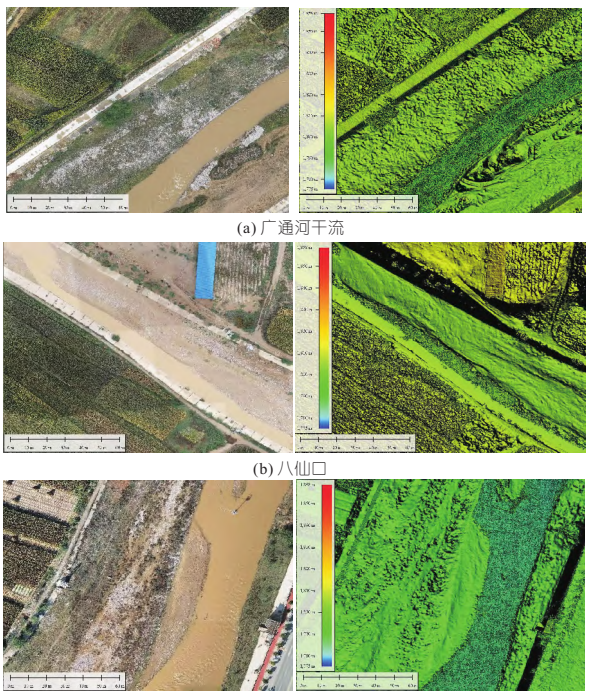
3.1　基于三维重建技术的 LiDAR 遥感影像重构与评价

3.1.1　影像重构

LiDAR 遥感影像预处理阶段,采用去噪、滤波算法去除噪声和异常值,确保点云数据的质量,并通过点云配准、坐标转换,将不同视角、不同时间采集的点云数据转换至统一的 CGCS2000 坐标系统,为后续分析提供标准化基础。利用迭代最近点(ICP)算法最小化点云间的距离,实现精确配准从而实现二维构建。之后结合三维重建算法,选用农田场景,构建集群计算模式结合 POS 解算、点云与可见光数据融合进行泊松表面重建,结合 DJI Modify 进行细节处理,建立高精度的三维河道模型。获取高精度的河段 DOM 与 DSM(图 3)。DOM 为后续河道形态分析、水陆边界识别、河滩植被分布及卵石群定位提供了重要依据;DSM 取代了传统人工测量方式,可快速提取横纵断面高程信息,为水力半径与水力梯度的计算提供了便利。

3.1.2　三维重构评价

三维重建后,重建影像与原始影像对比结果表明:无人机平均飞行高度为 75 m,正射影像地面采样距离(GSD)为 2.06 cm/px,重投影误差 RMS 为 0.88 px,地理配准均方根误差为 0.023 m,重建质量较好。在保留原始影像固有信息的基础上,增强了原始影像分辨率(2.09 cm/px),提高了影像清晰度,减少了影像噪声,重建影像各波段反射率与原始影像反射率之间存在极高的一致性,且误差较小,可以在保证影像可靠性的前提下将三维重建影像代替原始影像应用于科学探究与工程实践,提高研究精度。



(a)广通河干流　(b)八仙口　(c)三甲集

图 3　研究河段 DOM 及 DSM 影像

Fig. 3　Research on DOM and DSM images of river sections

3.2　基于 SVM 算法的多光谱遥感影像水体提取与评价

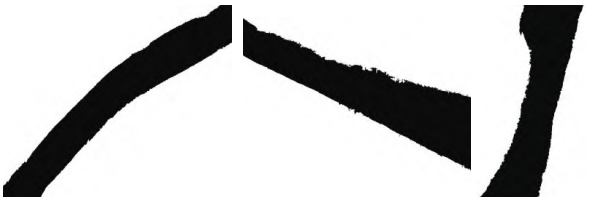
为便于对比水体提取结果,对水体提取影像进行二值化处理,将水体像元赋值 1,非水体像元赋值 0,选取广通河干流段、八仙口、三甲集 3 个典型断面影像进行可视化处理,放大展示水体提取结果(图 4)。基于 SVM 算法构建水体提取方法,其总体精度为 97.21%,Kappa 系数为 0.93,水体提取效果较好,可用于提取研究区所选断面水面范围,在此基础上计算水面面积、水面宽度和水深对前期计算的水下断面信息加以验证。

3.3　基于遥感影像的河道流量计算与评价

3.3.1　水力学参数提取

(1)水力梯度。高程变化对水力梯度的测算影响显著,而无人机采集的地形数据能精确反映河道纵剖面的微小起伏。通过提取河道纵向高程值并求取差值,将高程差与上下游间距之比作为水力梯度值,见表 4。

中国知网　https://www.cnki.net



(a) 广通河干流 (b) 八仙口 (c) 三甲集

图 4 研究河段水体提取图

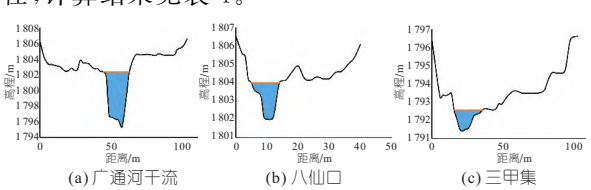
Fig. 4 Study on water extraction map of river section

表 4 水力学参数提取及河道流量计算与评价结果

Tab. 4 The extraction of hydraulic parameters and the calculation and evaluation results of river discharge

类别	参数	不同断面取值		
		广通河干流断面	八仙口断面	三甲集断面
水力梯度计算	上游高程/m	1 802.89	1 804.24	1 792.65
	下游高程/m	1 801.05	1 803.22	1 791.40
	水力梯度	0.006 5	0.003 0	0.005 0
水力半径计算	面积/m^2	79.30	10.26	12.56
	湿周/m	46.83	10.37	20.41
	水力半径/m	1.69	0.99	0.62
河道流量计算	糙率	0.080	0.070	0.035
	曼宁流量/($m^3 \cdot s^{-1}$)	113.39	7.97	18.45
精度分析	实测流量/($m^3 \cdot s^{-1}$)	106.26	7.08	19.09
	曼宁流量/($m^3 \cdot s^{-1}$)	113.39	7.97	18.45
	绝对误差/($m^3 \cdot s^{-1}$)	7.13	0.89	0.64
	相对精度/%	6.71	12.63	3.35

(2)水力半径。水力半径作为衡量过流断面输水能力的重要指标,其大小与断面几何特征密切相关。综合运用水体测量数据与无人机航拍获取的地表信息,建立完整的断面几何模型(图 5)。模型中的蓝色区域表示实际过流断面,通过该几何模型,可分别求得断面面积、湿周长度和水力半径,计算结果见表 4。



(a) 广通河干流 (b) 八仙口 (c) 三甲集

图 5 研究河段横断面

Fig. 5 Research on cross-sections of river sections

(3)粗糙率。河道阻力特性主要通过糙率体现,本文基于实地考察,结合赵振兴等[14]提出的天然河道糙率参考表,并采纳水文专家的专业意见,最终确定糙率参数。研究断面均为位于山区的中小河流,糙率除受岸边植被、河床卵石影响外,人类活动也是重要因素。较大石块堆积、人脚印广泛存在于河滩地及河底,参考较大的河床对水流的阻碍作用,广通河干流断面、八仙口断面、三甲集断面糙率取值分别为 0.08、0.07、0.035。

3.3.2 流量计算与精度评价

无人机航测的河道流量计算及精度分析结果见表 4。分析表明,广通河干流、八仙口及三甲集三个监测点的计算精度均优于 20%的预设标准,分别为 6.71%、12.63%、3.35%。八仙口断面精度较高或源于糙率估值偏小,因两岸多石且水浊致河底探测存在偏差。综合可知,结合无人机多源遥感数据的流量计算结果良好。

4 结论

a. 利用三维重建算法处理 LiDAR 影像,无人机平均飞行高度为 75 m 时,GSD 达到 2.06 cm/px,重投影误差 RMS 为 0.88 px,地理配准均方根误差为 0.023 m,生成的 DOM 和 DSM 数据精度高,能够为河道形态分析和水力学参数提取提供可靠基础。

b. 基于多光谱影像数据构建了 SVM 水体提取方法,水体提取总体精度为 97.21%,Kappa 系数为 0.93,能够准确提取水面范围,为进一步流量估算提供关键参数。

c. 结合曼宁公式,利用无人机多源遥感数据估算的河道流量相对精度分别为 6.71%、12.63%、3.35%,均方根误差为 4.16 m^3/s,平均百分比误差为 0.053,表明该方法在流量估算中具有较高的准确性,可为水文资料缺失地区的中小型河道流量估算提供有效的技术手段。

参考文献:

[1] 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.

[2] 孙文超, 王星灿, 徐宗学. 河道流量遥感估算研究进展与展望[J]. 地理学报, 2024, 79(3): 565-583.

[3] 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.

[4] 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.

[5] 张纯斌, 杨胜天, 赵长森, 等. 小型消费级无人机地形数据精度验证[J]. 遥感学报, 2018, 22(1): 185-195.

[6] ZHAO C S, ZHANG C B, YANG S T, et al. Calculating e-flow using UAV and ground monitoring [J]. Journal of hydrology, 2017, 552: 351-365.

[7] 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.

中国知网 https://www.cnki.net

[8] 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.
[9] 中华人民共和国水利部. 水道观测规范：SL257-2017[S]. 北京：中国水利水电出版社，2017.
[10] 中华人民共和国水利部. 水文测量规范：SL58-2014[S]. 北京：中国水利水电出版社，2014.
[11] KULAWIAK M，LUBNIEWSKI Z. Improving the accuracy of automatic reconstruction of 3D complex buildings models from airborne lidar point clouds [J]. Remote sensing，2020，12(10)：1643.
[12] MEYER OLIVEIRA A，FLEISCHMANN A S，PAIVA R C D. On the contribution of remote sensing-based calibration to model hydrological and hydraulic processes in tropical regions[J]. Journal of hydrology，2021，597：126184.
[13] 中华人民共和国水利部. 水文情报预测规范：GB/T 22482-2008[S]. 北京：中国标准出版社，2009.
[14] 赵振兴，何建京，王忖. 水力学[M]. 3 版. 北京：清华大学出版社，2021.

Research on River Flow Estimation Methods Based on Multi-source Unmanned Aerial Vehicle Remote Sensing

ZHAO Wen-ju[1,2]，LI Xing[1,2]，ZHANG Yong-ming[3]，HAO Yong-wei[1,2]
(1. College of Energy and Power Engineering，Lanzhou University of Technology，Lanzhou 730050，China；
2. Key Laboratory of Smart Agriculture Irrigation Equipment，Ministry of Agriculture and Rural Affairs，Lanzhou 730050，China；3. Gansu Provincial Institute of Water Conservancy Science，Lanzhou 730000，China)

Abstract：In response to the challenges of acquiring river flow data in regions with scarce hydrological information，characterized by difficulties and poor timeliness，this study proposes a method for estimating river discharge using UAV-mounted LiDAR and MSI data. By applying three-dimensional reconstruction algorithm to the LiDAR imagery，a ground resolution of 2.09 cm/pixel is achieved，resulting in high-precision digital orthophoto maps (DOM) and digital surface models (DSM). A support vector machine (SVM) is used to develop a water body extraction method based on MSI data，which allows for the extraction of hydraulic parameters such as water surface width，roughness，and water surface gradient. A river discharge estimation method based the Manning formula is constructed. The accuracy of the estimation is assessed using root mean squared Error (RMSE)，mean percentage error (MPE)，and relative accuracy (RA). The Taohe River basin is selected as a typical study area to develop a method for estimating river discharge in regions with limited hydrological data. The results show that the UAV-based multi-source remote sensing approach for river discharge estimation is rapid and efficient. Validation against measured data revealed an RMSE of 4.16 m^3/s，an MPE of 0.053，and RAs of 6.71%，12.63%，and 3.35% for three typical cross-sections，respectively. These findings provide a theoretical basis for the real-time acquisition and estimation of river discharge in areas with limited hydrological data.

Key words：discharge estimation；multi-source remote sensing；three-dimensional reconstruction；water body extraction；Manning formula

(上接第 137 页)

Study on Urban Multi-source Water Supply Zoning in Hilly Areas

LU Tan[1]，FENG Jing-wei[1]，SU Kui-zu[1]，XU De-qian[1]，ZHANG Dong-xiu[2]，LIU Hong-wei[2]
(1. School of Civil and Hydraulic Engineering，Hefei University of Technology，Hefei 230009，China；
2. Hefei University of Technology Design Institute(Group)Co.，Ltd.，Hefei 230051，China)

Abstract：Based on the demand of zoning management of multi-source urban water supply system，combined with the characteristics of large elevation difference of urban terrain in hilly areas，a more adaptable zoning method for multi-source water supply system is discussed. Considering the influence of water supply，pipeline head loss and node height difference on the energy consumption of the secondary pumping station，the generalized shortest path method is proposed. The sum of node height difference and pipeline head loss is taken as the generalized pipe length，and the generalized pipe length of the generalized shortest path from the water supply node to each water node is calculated. The product of the generalized pipe length and the water supply of each water plant is used as the energy consumption index，and the equal incremental rate method is used to divide the multi-source water supply. The calculation results of the example show that the energy consumption of the secondary pumping station is lower and the pressure distribution of the pipe network is improved compared with the comparison scheme at the highest time and the highest day. Therefore，this method has good economy and is conducive to reducing the leakage of the pipe network.

Key words：hilly area；multiple sources of water supply；generalized shortest route method；zoning

中国知网　https://www.cnki.net