

低空遥感无人机影像反演河道流量

赵长森^{1,2}, 潘旭^{1,3}, 杨胜天^{1,2}, 刘昌明¹, 陈新⁴, 张含明⁵, 潘天力²

(1. 北京师范大学水科学研究院 城市水循环与海绵城市技术北京市重点实验室, 北京 100875; 2. 北京师范大学地理科学学部 遥感科学国家重点实验室, 北京 100875; 3. 山东农业大学水利土木工程学院, 泰安 271018; 4. 济南市水文局, 济南 250013; 5. 东营市水文局, 东营 257000)

摘要: 河道流量在维持水圈系统稳定性、估算国家水能资源可开发量等方面具有重要作用。卫星遥感受其分辨率限制很难准确反演中小河流流量, 近地面遥感流量计算方法及传统水文测流方法技术复杂、设备昂贵、测算效率低, 限制了其在无资料区、灾害突发事件非接触式应急监测等方面的广泛应用。为此, 在充分吸收国内外遥感反演河道流量方法优点的基础上, 基于低空遥感无人机(UAV)影像, 提出了一种适用于各类尺度河流的高效、非接触、简易快速反演河道流量的方法。该方法提供了有、无地面实测大断面两类情况下流量反演途径, 通过无人机影像生成点云和表面高程(DSM), 基于点云和DSM获取水面宽、糙率、水面比降以及水上大断面信息, 采用水力学方法计算河道流量。并根据地面336组野外站点实测数据验证了方法的精度, 进一步分析了无地面实测大断面情况下的流量计算误差。结果表明, 反演流量在高值区略高于实测流量, 可以满足灾害应急监测流量精度需求($R^2 = 0.997$, $RMSE = 4.55 \text{ m}^3/\text{s}$); 无地面实测大断面资料而进行概化时, 流量计算误差随水位升高、河宽增大而减小, 最大累积误差为最大过水流量的8.28%, 误差主要来自于水位低、河宽小、流量小的过水断面底部。考虑到研究区大断面多样性受限, 而人类活动影响下的河底断面复杂多样, 未来尚需进一步研究提高近河底大断面概化精度, 以提高无地面实测大断面情况下的流量反演精度。本文利用无人机遥感影像反演河道流量的思路可为灾害应急监测提供快速流量监测的新途径, 也可为无资料地区遥感水文测站的建立提供重要参考依据。

关键词: 河道流量; 无人机; 水力学; 济南

DOI: 10.11821/dlxb201907009

1 研究背景

河流与人类生存活动、区域生态环境^[1-3]紧密相关, 河道流量对维持水圈系统的稳定性、估算国家水能资源可开发量等起着必不可少的作用。随着科技进步和交叉学科的高速发展, 测算河道流量的方法渐趋多样化^[4-5], 然而, 河道流量测算仍受到地域、经费等因素困扰^[6], 原因主要包括: ① 采用传统定点测算方法人财物耗费大; ② 无法解决偏远无测站地区历史数据空白问题和流量难以测算问题; ③ 针对水文灾害突发事件和开展应急监测等非接触式情况时缺乏有效施测方法^[7-9]。因此, 亟待加强快捷、准确测算河道流量方法的研究。

收稿日期: 2018-05-17; 修订日期: 2019-03-10

基金项目: 国家重点研发计划(2016YFC0402403, 2016YFC0402409) [Foundation: National Key Project for R&D, No.2016YFC0402403, No.2016YFC0402409]

作者简介: 赵长森(1977-), 男, 山东淄博人, 博士, 副教授, 中国地理学会会员(S110010269M), 研究方向为遥感水文与生态水文。E-mail: zhaochangsen@bnu.edu.cn

通讯作者: 杨胜天(1965-), 男, 贵州贵阳人, 博士, 教授, 研究方向为遥感水文。E-mail: yangshengtian@bnu.edu.cn

1392-1408 页

以遥感技术为代表的反演河道流量方法是近年来计算机科学和空间科学深入探究的产物,可在复杂地质条件和外部恶劣条件下,以不接触水体的形式完成流量反演^[10]。到目前为止,很多学者进行了有关流量反演的研究,大致可分为近地遥感反演和卫星遥感反演两类方法。近地遥感反演方法主要包括立体视觉—粒子图像法^[9]、多普勒雷达和探地雷达法^[11-12]、飞机—雷达—水面高程法^[13]、DEM—水位—坡度—水力学法^[14]等;卫星遥感反演可大致分为水面面积(卫星—水面面积)、水面宽度(卫星—水面宽度)、水位(卫星—水位)、水文多参数集合(卫星—多参数)以及卫星数据与水文模型耦合(卫星—水文模型)等5类方法。

卫星—水面面积法主要通过ERS-1雷达卫星图像和同步流场地面测量数据,建立水面面积和流量间的相关关系,反演河道流量^[15-17];卫星—水面宽度法则利用QuickBird-2等卫星图像获取的水面宽度信息,结合现场勘测拟合的宽度—水位、水位—流量、宽度—流量特性曲线反演流量^[18-22];卫星—水位法将由TOPEX/Poseidon卫星数据估算的下垫面水位相关信息转换为“水位”系列值并建立由卫星数据得出的“水位”系列值与相邻水文站实测流量间的关系,实现由TOPEX/Poseidon卫星数据估算河道流量^[6, 23],或者直接利用TOPEX-Poseidon(T-P),ERS-2和ENVISAT等卫星测高数据估算无资料地区河道流量^[24-25];卫星—多参数法包括使用卫星测量水面宽、水力坡度、水位等水力学和水文学参数,进行河宽超过100 m的河道流量反演^[26-35],或通过流域遥感—地面同步观测发展从卫星反演计算水循环分量^[36-37];卫星—水文模型法主要将卫星数据、地面气候资料、水文建模结合测算大型河流流量^[38-39]。

尽管全球学者在遥感反演河道流量的技术方法上取得了很大进展,但通过卫星遥感技术反演流量的方法仅适用大尺度河流,难以应用获取中小河流流量;而当前近地面遥感计算河道流量的方法存在技术复杂、设备昂贵、测算效率低等不足,限制了它们的广泛应用。为此,急需发展一种适用于各类尺度河流的、高效便捷的流量监测方法。

与卫星遥感相比,低空遥感无人机具有灵活、便捷、快速、分辨率高等特点,可利用飞行高度控制其像元大小,适用于各类河流断面监测,是当今主要的低空遥感平台之一^[40-41],在河道地形、土壤侵蚀、地形动态监测^[42-44]、生态参数获取^[45]、灾害应急^[46]等方面得到了广泛应用。

本文在充分吸收国内外遥感反演河道流量方法优点的基础上,基于高分辨率的无人机(Unmanned Aerial Vehicle, UAV)遥感影像,提出了一种适用于各类尺度河流的高效、便捷计算河道流量的方法。方法提供了有、无地面实测大断面两类情况下流量反演途径,通过无人机影像生成地球表面数字高程模型(Digital Surface Model, DSM),基于DSM获取水面宽、糙率、水面比降以及水面以上大断面等信息,采用水力学方法计算河道流量。进一步定量评估了无地面实测资料情况下的流量计算误差,为不依靠地面实测数据获取高精度河道流量提供了新的方向,可用于灾害应急及无资料区的流量快速监测。

2 研究区域概况

研究区包括山东省济南市和小清河水系流域(图1)。济南市(36.0°N~37.5°N、116.2°E~117.7°E)是全国第一个水生态文明城市建设试点城市,位于泰山以南,分属黄河、海河、淮河三大流域,黄河、徒骇马颊河、小清河贯穿其中,其中小清河发源于济南,与黄河平行流入渤海,全长237 km,集水面积10572 km²,覆盖了济南市一半城区面积。气候冬季寒冷干燥、夏季炎热潮湿,属华北暖温带半湿润季风型大陆性气候。多

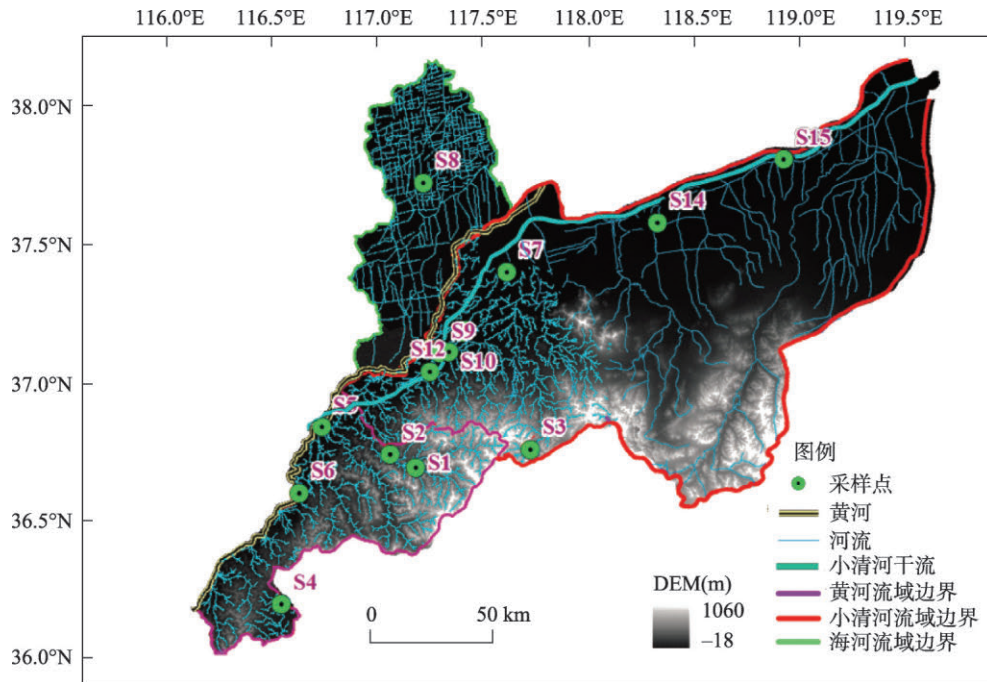


图1 济南—小清河研究区

Fig. 1 Study Area consisting of Jinan City and Xiaoqing River basin

年平均气温 12.6 °C，多年平均降水量为 619.7 mm。降水量年际变化较大，降水量年内分配不均，主要集中在汛期的 7-9 月，占全年降水量的 50%~70%^[26]，降雨是河道径流的主要来源。非汛期降雨稀少和持续水资源利用常常导致零流量，汛期流量急剧增加、洪水肆虐，对当地社会和经济的可持续发展造成了前所未有的威胁。同时小清河作为鲁中地区一条重要的排水河道，兼顾两岸农田灌溉、内河航运、生态等，也是全国 5 条重要的国防战备河道之一，对沿线经济社会的发展发挥了不可替代的作用。自 20 世纪 70 年代以来，由于流域内经济的快速发展，导致河道侵占严重，水源减少，生态环境日益恶化，严重影响了沿河地区社会经济的发展^[47]。为此，本文以淮河流域小清河为主，兼顾研究区其他流域河流。位于小清河上的控制水文站岔河站属于国家报汛站，承担着区域防洪安全的流量测报任务，是本文重点对比验证的站点之一。

3 数据与方法

3.1 数据来源

3.1.1 无人机(UAV)影像数据 无人机影像数据主要取自于 2014-2016 年 10 次大规模的水文—水质—水生态野外调查资料，每次调查 60 个左右站点，每个站点现场施测河宽、水深、大断面、流量等水文数据，同步进行无人机飞行摄影，使用控制飞行的方法对每个站点附近河道拍摄 200~300 张影像，设置照片拍摄重叠率为 90%，以保证后续软件生成立体相对、点云及数字高程模型 (DSM) 等数据集的精度，生成的 DSM 空间分辨率为 2.22 cm (飞行高度 50 m) ~4.23 cm (飞行高度 100 m)。

无人机采用大疆 Phantom-3-pro 小型无人机 (图 2)，其具有重量轻、低成本、灵活、便携、快速等优势，搭载 DJI FC300X 普通相机，视场角为 94°，图像大小为 4000 像素 ×

3000像素,基本参数如图2所示。控制飞行软件选用PIX4D公司的飞控软件PIX4Dcapture (<https://pix4d.com/>)。

为进行有效误差分析,无人机影像选用2014-2016年调查期间与表1中地面站点施测时间对应的的影像,岔河、石村两站无无人机飞行数据,直接用地面照片和实测资料代替无人机影像确定河宽、糙率、比降等水力学参数,利用其丰富的地面实测流量和大断面资料验证本文提出的方法。

3.1.2 地面数据 地面数据用于无人机反演流量的验证和误差评估。结合2014-2016年10次大规模的水文—水质—水生态野外调查以及地面水文站历史资料,共收集到地面实测流量271组、大断面65组,如表1所示。

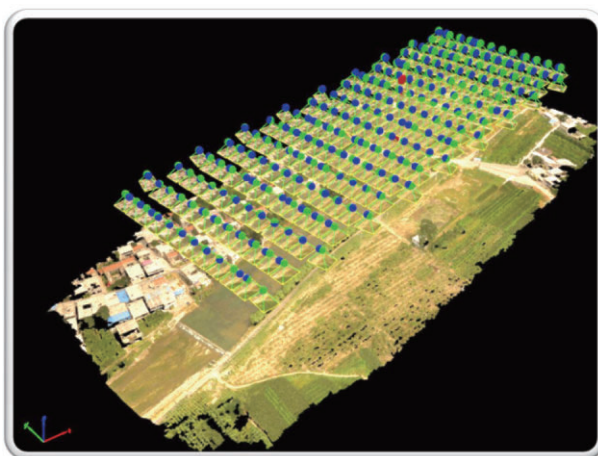


图2 PIX4Dmapper数据处理(上层是沿河道的控制飞行与拍摄轨迹,下层为生成的河段点云)

Fig. 2 PIX4Dmapper data processing (the upper layer being the controlled flight and shooting trajectory along the river, and the lower layer being the generated point cloud)

表1 地面实测数据

Tab. 1 Ground measured data

流域水系	站点名称	资料类型	资料获取时间	
黄河流域	顾小庄浮桥(S6)	流量(3组)、大断面(3组)	201509-201611	
	陈屯桥(S4)	流量(1组)、大断面(1组)	201501	
	宅科(S2)	流量(2组)、大断面(2组)	201509-201609	
	并渡口(上)(S1-1)	流量(2组)、大断面(2组)	201609-201611	
	并渡口(中)(S1-2)	流量(3组)、大断面(3组)	201509-201611	
	并渡口(下)(S1-3)	流量(3组)、大断面(3组)	201510-201611	
	北大沙河入黄河口(上)(S1-1)	流量(2组)、大断面(2组)	201609	
	北大沙河入黄河口(中)(S1-2)	流量(1组)、大断面(1组)	201609	
	北大沙河入黄河口(下)(S1-3)	流量(1组)、大断面(1组)	201609	
淮河流域小清河	巨野河(上)(S11-1)	流量(2组)、大断面(2组)	201609-201611	
	巨野河(中)(S11-2)	流量(1组)、大断面(1组)	201611	
	巨野河(下)(S11-3)	流量(2组)、大断面(2组)	201609-201611	
	岔河(S14)	流量(198组)、大断面(3组)	201101-201312	
	石村(S15)	流量(21组)、大断面(1组)	201301-201312	
	五龙堂(S7)	流量(21组)、大断面(2组)	201606-201708	
	大辛庄(S12)	流量(1组)、大断面(1组)	201609	
	鸭旺口(S13)	流量(1组)、大断面(2组)	201609	
	垛庄水库(S3)	流量(1组)、大断面(3组)	201609	
	石河(S10)	流量(1组)、大断面(4组)	201609	
	龙脊河(S9)	流量(1组)、大断面(5组)	201609	
	海河流域徒骇马颊河	张公南邻(上)(S8-1)	流量(1组)、大断面(6组)	201609
		张公南邻(中)(S8-2)	流量(1组)、大断面(7组)	201609
张公南邻(下)(S8-3)		流量(1组)、大断面(8组)	201609	

3.2 研究方法

3.2.1 UAV水面以上河流形态获取 水面宽、糙率、比降、河道大断面是水力学计算流量的关键参数，人工测量方法获取，费时费力、效率低，而UAV可快速获取野外高重叠度立体像对，生成监测站点所在的1 km×1 km范围内河道及其缓冲带的高清影像，基于此可人工判读快速确定水面宽和糙率；高清影像进一步处理可得到高分辨率DSM，基于此计算河道水面比降；最后基于DSM利用ArcGIS中3D Analyst模块，生成监测点的河道大断面形状。相比人工测量，应用UAV技术可快速确定水力学参数，大大降低了人力、财力、物力等成本，明显提高了生产效率^[49]。

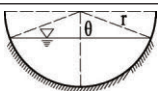
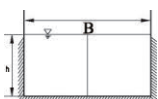
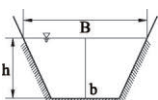
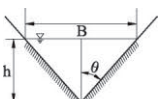
通过UAV野外获取高重叠度立体像对，经Pix4Dmapper (<https://pix4d.com/>) 专业软件处理得到高分辨率地形数据，Pix4Dmapper能够快速、全自动处理UAV影像数据(图2)。其处理流程包括数据导入、初始化处理、点云加密等，先生成数字表面模型和正射影像图，再生成高精度的数字正射影像图(DOM)、DSM及影像点云。

3.2.2 水下、水上断面耦合 由于UAV航片只能获取陆上地形变化趋势，难以获取水下地形变化信息，为得到完整的大断面数据，水上地形使用UAV实测得到河段DSM，然后结合ArcGIS空间分析工具3D Analyst模块确定水面以上的河流大断面。在有实测水下大断面的站点，可以基于水面高程和起点距，耦合上述UAV确定的水上大断面和实测的水下大断面，形成完整的河流大断面。

在没有实测水下大断面的站点，可根据UAV确定的水上大断面的变化趋势，采用Zhao等的方法^[49]基于表2拟合水下大断面，从而形成完整的河流大断面。根据刘昌明等的早期研究^[49-50](表2)，一般自然界河道的断面形状可概化为圆弧形、箱涵形、梯形及“V”型4种断面。

表2 自然界河流大断面概化及断面水力学参数计算

Tab. 2 Generalization of river cross-sections and calculation of the hydraulic parameters

过水断面形状	过水断面面积A	过水断面湿周P	水力半径R
 <p>抛物线形断面</p>	$A = \frac{1}{2}(\theta - \sin 2\theta) \times r^2$	$P = 2\theta \times r$	$R = \frac{A}{P} = \frac{1}{2} \left[1 - \frac{\sin 2\theta}{\theta} \right] \times r$
 <p>箱涵形断面</p>	$A = B \times h$	$P = B + 2h$	$R = \frac{B \times h}{B + 2h}$
 <p>梯形断面</p>	$A = \frac{1}{2}(B + b) \times h$	$P = b + \sqrt{(B - b)^2 + 4h^2}$	$R = \frac{(B + b) \times h}{2b + 2\sqrt{(B - b)^2 + 4h^2}}$
 <p>“V”型断面</p>	$A = \frac{1}{2}B \times h$	$P = \sqrt{B^2 + 4h^2}$	$R = \frac{B \times h}{2\sqrt{B^2 + 4h^2}}$

3.2.3 水力学参数获取 根据无人机影像获取河宽、比降、糙率等水力参数。首先利用无人机对每个站点附近河道拍摄200~300张低空遥感影像，生成正射影像、影像点云以及DSM。在选取的河道的大断面上，用3D Analyst模块标注一条垂直于河道的直线，沿直

线生成河流大断面,直接量取大断面水面宽度;在生成的大断面上游、下游各300 m用同样的方式生成大断面,根据两个大断面的水面高程高差与河段距离计算得到河道比降,为计算准确,可计算河段多个比降取其均值。糙率计算需要目视解译,根据完整的遥感影像,辨别河岸两侧植被、护坡状况、土壤类型、水面宽度,参考孙东坡等^[51]的糙率查找表人工渠道、天然河道确定相应糙率。受篇幅限制,本文只列出天然河道糙率查找表(表3)。

表3 天然河道糙率 n 值
Tab. 3 Roughness (n) for natural rivers

河槽类型及特征	糙率		
	最小值	正常值	最大值
一、小河(洪水期的水面宽度小于30 m)			
1.平原河流			
(1) 清洁、顺直、无浅滩深潭	0.025	0.030	0.033
(2) 同上,但石块多、杂草多	0.030	0.035	0.040
(3) 清洁、弯曲、有浅滩和深潭	0.033	0.040	0.045
(4) 同上,但有石块杂草	0.035	0.045	0.050
(5) 同上,水深较浅,河底坡度多变,平面上回流区较多	0.040	0.048	0.055
(6) 同(4),但石块多	0.045	0.050	0.060
(7) 多杂草、有深潭、流动缓慢的河流	0.050	0.070	0.080
(8) 多杂草的河段、深潭多或林木滩地上过洪	0.075	0.100	0.150
2.山区河流(河槽无草树、河岸较陡,岸坡树丛过洪时淹没)			
(1) 河底为砾石、卵石、间有孤石	0.030	0.040	0.050
(2) 河底为卵石和大孤石	0.040	0.050	0.070
二、大河(洪水期的水面宽度大于30 m)			
相应于上述小河的各种情况,由于河岸阻力相对较小, n 值略小			
1.断面比较规则整齐,无孤石或林木	0.025		0.060
2.断面不规则不整齐,床面粗糙	0.035		0.100
三、洪水时期滩地漫流			
1.草地、无树丛			
(1) 短草	0.025	0.030	0.035
(2) 长草	0.030	0.035	0.050
2.耕地			
(1) 未熟庄稼	0.020	0.030	0.040
(2) 已熟成行庄稼	0.025	0.035	0.045
(3) 已熟密植庄稼	0.030	0.040	0.050
3.矮树丛			
(1) 稀疏、多杂草	0.035	0.050	0.070
(2) 不密、夏季情况	0.040	0.060	0.080
(3) 茂密、夏季情况	0.070	0.100	0.160
4.树木			
(1) 平整田地、干树无枝	0.030	0.040	0.050
(2) 平整田地、干树多新枝	0.050	0.060	0.080
(3) 密林、树下植物少、洪水位在枝下	0.080	0.100	0.120
(4) 密林、树下植物少、洪水位淹没树枝	0.100	0.120	0.160

3.2.4 UAV 遥感影像反演河道流量 根据是否有地面实测大断面资料, 分为2种情景分别计算:

情景1: 有地面实测大断面资料: 对于自然或近自然大断面(三角形、梯形、抛物线): 基于无人机影像确定糙率、比降、河宽, 使用研发团队开发的“耦合遥感与地面数据的河道流量计算程序”计算河道流量; 对于人工大断面(矩形), 先用无人机确定糙率、比降、河宽, 再基于实测大断面和曼宁公式生成“水位—流量关系曲线”, 根据无人机遥感影像显示的水面升降推算水位, 基于曲线计算流量。

情景2: 无地面实测大断面资料: 基于无人机测量所得出露在水面以上的大断面, 利用表2所列河流形态拟合水下大断面, 再根据情景1中思路展开流量计算。

为了计算方便, 本文开发了“耦合遥感与地面数据的河道流量计算程序”, 程序以水力学曼宁公式为基础, 基于Excel开发, 简单易用, 只需输入一个“遥感河宽”数据即可计算任意不规则大断面以及分叉多槽河道流量。程序界面如图3所示。

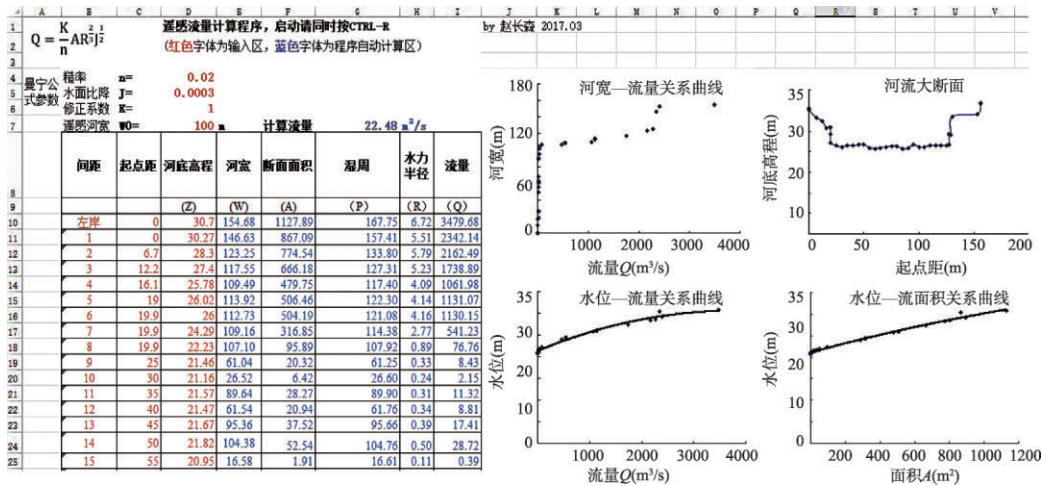


图3 耦合遥感与地面数据的河道流量计算程序界面

Fig. 3 Stream-flow calculation coupling remotely-sensed and ground-measured data

图3中, 河宽(W)、断面面积(A)、湿周(P)、水力半径(R)、流量(Q)5列为程序自动计算区, 其他位置为数据输入区。首先输入完整的大断面数据(起点距、河床高程), 从左岸输至右岸; 然后输入糙率、水面比降、修正系数、卫星遥感或无人机遥感测得的河宽, 修正系数默认为1; 最后按“Ctrl+R”触发启动计算, 程序会自动计算出不同河床高程下对应的河宽、断面面积、湿周、水力半径及相应流量, 生成水文—水力参数库, 最后根据“遥感河宽”计算对应的流量。启动程序之后, 输入起始行(即左岸所在单元格行号)、截止行(右岸对应的单元格行号)即可开始自动计算。计算完毕会自动生成水文常用曲线, 包括“水位—流量关系曲线”“水位—面积关系曲线”“河流大断面曲线”“河宽—流量关系曲线”等。程序可在EcoHAT软件网站(<http://ecohat.bnu.edu.cn/>)免费下载使用。

3.2.5 缺大断面资料情景流量误差分析 当缺大断面资料时, 根据3.2.1节的方法, 基于遥感影像生成的高分辨率DSM生成水面以上河道大断面。遥感图像只能采集水面以上的地形信息, 很难获得水下地形。为了获得完整的大断面, 需根据遥感影像生成的水面以上大断面的发展趋势, 从表2中选择相应概化模型, 根据Zhao等的方法^[49]拟合水下大断面, 与无人机生成的水上大断面耦合在一起生成完整的河流大断面。基于该大断面使用

3.2.4 流量计算方法计算相应流量。为了分析水下大断面概化引起的误差,设计了误差传递分析模型:

$$\Delta Q = Q_0[(1 + \varepsilon_1)(1 + \varepsilon_2)^{\frac{2}{3}} - 1] \quad (1)$$

$$Q_0 = \frac{K}{n} AR^{\frac{2}{3}} J^{\frac{1}{2}} \quad (2)$$

$$\frac{\Delta Q}{Q_0} = (1 + \varepsilon_1)(1 + \varepsilon_2)^{\frac{2}{3}} - 1 \quad (3)$$

式中: ΔQ 为流量计算误差 (m^3/s); ε_1 为拟合断面与实测断面之间断面面积误差 (m^2); ε_2 为拟合断面与实测断面之间水力半径误差 (m); Q_0 为实测流量 (m^3/s); K 为修正系数; n 为糙率; J 为水面比降 ($\%$); A 为断面面积 (m^2); R 为水力半径 (m)。

4 结果与讨论

4.1 基于 UAV 遥感影像生成完整河流大断面

根据 3.2 小节的方法,通过表 1 各站点对应的 UAV 影像生成正射影像 DOM、影像点云、DSM、出露水面的河流大断面。图 4 列出了并渡口中断面、北大沙河入黄河口下断面、张公南邻中断面、巨野河中断面等基于 UAV 影像的 4 个典型站点的结果。影像点云可 360° 前后左右旋转,并可移动位置,辅助确定河道糙率;生成的 DSM 可用于确定河道比降与水面宽度;河流干涸时基于 DSM 生成的河流大断面即为完整河流大断面,有水时则需要与水下大断面进行拼接耦合。

有历史水下大断面资料时,基于水上、水下共同的水面高程与河宽,将两者拼接生成完整的河流大断面;无历史水下大断面资料时,则首先基于表 2 概化水下大断面,然后再按上述方法生成完整大断面。后者可有效解决水下地形难以快速、灵活获取的难题,节省大量人财物力,为缺少地面数据条件下获取河道大断面提供了有效途径。生成的典型站点完整大断面如图 4 所示。

4.2 水力学参数获取

表 4 为基于无人机影像获取的河宽、比降、糙率等水力学参数,济南市地势较平缓,河道平均比降约为 0.005,因此无人机水面比降略小。为了提高流量计算精度,在有历史流量资料和影像的站点,选用历史资料对糙率进一步率定计算修正系数,用于后续流量计算。对于缺少无人机飞行数据的岔河、石村两站,直接根据地面资料确定水力学参数,一起列入表 4。就河道糙率来说,黄河流域干、支流糙率较小,在 0.05~0.08 之间;小清河流域最高,多数站点在 0.08 左右,最高时可达 0.1。水面比降变化随时空变异较大,总体上平原站点比降小于山区站点,非汛期小于汛期。

4.3 基于水面宽的河道流量反演

基于表 4 列出的济南市三大流域河流典型站水力学参数,根据 3.2.4 的方法利用 UAV 影像反演得到各站点流量,为了分析结果的精度,进一步与对应的地面实测流量点绘“实测流量—反演流量”关系(图 5)。针对 271 次流量比较发现:反演流量和实测流量呈线性关系,相关性高 ($R^2 = 0.997$),但反演流量在高值区略高于实测流量(趋势线略高于 1:1 线)。总体上,济南市多数河流站点流量偏小,多集中在图中小于 $100 \text{ m}^3/\text{s}$ 的区域。 $100 \text{ m}^3/\text{s}$ 以上的流量点多来自于汛期或黄河干流(顾小庄浮桥)。淮河流域小清河在济南市河道发育较成熟,集水面积较广,在关系图中占比例最大,下面进一步对小清河上站点进行分析。

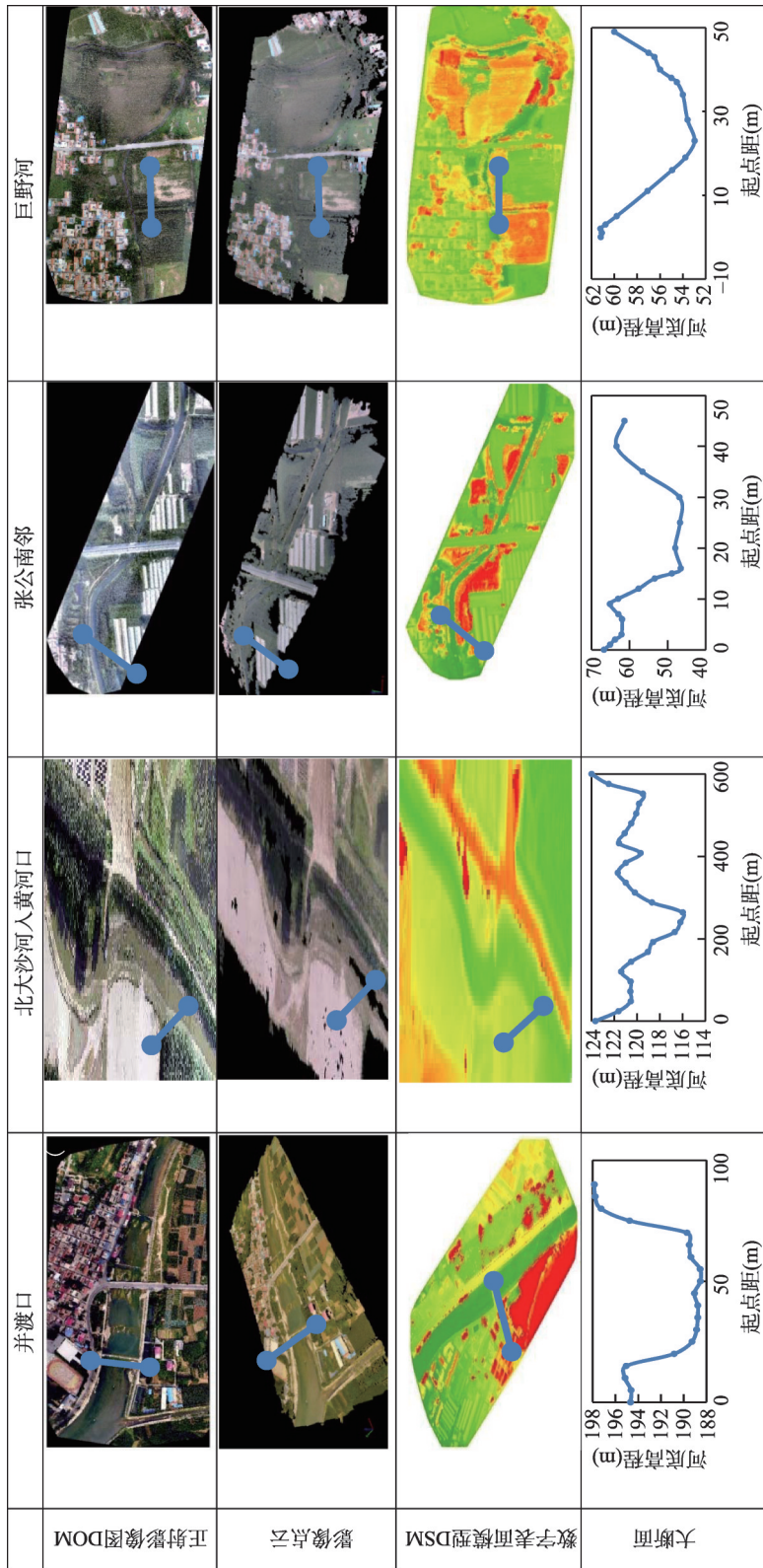


图4 各站点无人机影像生成大断面
Fig. 4 Cross-section produced with UAV images

表4 各站点水力学参数
Tab. 4 Hydraulic parameters

流域水系	站点名称	糙率 n	水面比降 $J(\%)$	水面宽 $W_0(m)$	资料获取时间	无人机飞行次数
黄河流域	顾小庄浮桥	0.08	7.8~8.8	117~261	201509-201611	3
	陈屯桥	0.08	0.58	24	201501	1
	宅科	0.08	0.2~0.9	6.2~43.1	201509-201609	2
	并渡口(上)	0.08	10~120	6.2~53	201609-201611	2
	并渡口(中)	0.08	4~25	9.2~16.4	201509-201611	3
	并渡口(下)	0.08	13~28	4.1~28.6	201510-201611	3
	北大沙河入黄河口(上)	0.05~0.08	0.7~1.6	11	201609	2
	北大沙河入黄河口(中)	0.05	0.7	12.6	201609	1
	北大沙河入黄河口(下)	0.05	2.4	4.2	201609	1
淮河流域小清河	巨野河(上)	0.08	1.5~7.8	4.4~5.1	201609-201611	2
	巨野河(中)	0.08	4.8	3.2	201611	1
	巨野河(下)	0.08	1.26~21	4.8~5.4	201609-201611	2
	岔河	0.06~0.1	0.1~1.0	37~75	201101-201312	0
	石村	0.1	0.001~0.7	62~92	201301-201312	0
	五龙堂	0.06~0.1	1.9~2.0	13~54	201606-201708	21
	大辛庄	0.08	5	25.7	201609	1
	鸭旺口	0.08	6.7	3.8	201609	1
	垛庄水库	0.08	0.2	34.2	201609	1
	石河	0.08	0.55	5.5	201609	1
海河流域徒骇马颊河	张公南邻(上)	0.08	0.25	22	201609	1
	张公南邻(中)	0.08	0.2	21	201609	1
	张公南邻(下)	0.08	0.23	22.1	201609	1

图6为淮河流域小清河实测和反演流量数据关系,淮河流域关系图数据点均匀度明显高于图1,且于10~100 m³/s区间内分布较集中。小流量数据相对较少,岔河实测流量大多集中于6-8月且站点数据占淮河流域数据比较高(79.2%)。随着实测流量的增加,断面面积和水力半径误差增大,使大流量数据比小流量数据反演精度低。

图5与图6趋势线公式一次项系数均大于1且趋势线以上部分数据点略多,可能因遥感反演时水下大断面未知,致使湿周偏小,进而引起反演流量偏大。

以实测流量为标准,得到反演流量决定系数 R^2 、平均相对误差RD、均方根误差RMSE等精度参数(表5)。

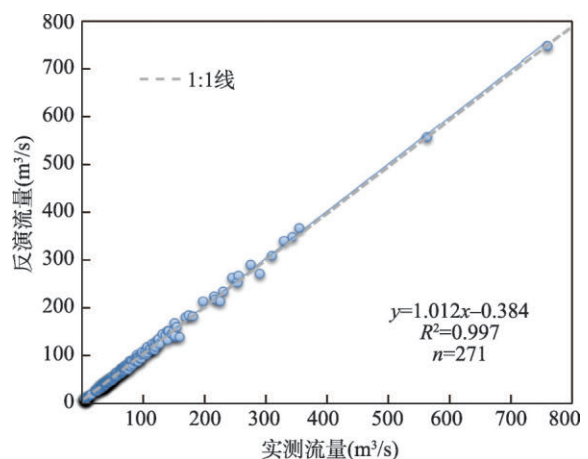


图5 研究区三流域反演与实测流量关系图
Fig. 5 Retrieved and measured stream flows in the three basins of the study area (Gray dotted line slope is 1)

表5精度分析结果说明基于无人机影像可以较高精度地反演河道流量。RD和 R^2 表明反演流量和实测流量具有较高的密切度和准确率: RD均小于0.05(即5%),海河流域最低(0.59%),淮河流域最高(4.47%); RMSE均小于 $5\text{ m}^3/\text{s}$,也是海河流域最小,淮河流域最高;其原因可能是由于淮河流域监测数据(250个)远多于黄河、海河流域(共21个)造成的。

4.4 缺大断面资料情景误差分析

为了评估本方法提出的大断面概化引起的流量计算误差,利用误差传递分析模型,采用累积误差的形式进行误差分析(累积误差即随横坐标增加 $|\frac{\Delta Q}{Q_0}|$ 的累计值),分别围绕三角形断面(北大沙河入黄河口下断面)、梯形断面(顾小庄)、抛物线(宅科)3类典型断面展开(图7)。矩形断面大断面概化基本不会存在误差,在此不做讨论。

将3类典型站实测水下大断面(实线)分别进行概化(虚线),分别基于实测、概化两类大断面利用本研究开发的“耦合遥感与地面数据的河道流量计算程序”计算不同河宽情况下的流量、断面面积和水力半径,计算概化后引起不同水面宽情况下的流量变化值,统计计算误差,绘制“河宽—累积误差”与“流量—累积误差”关系图(图7)。

“河宽—累积误差”关系图中,累积误差随河宽迅速上升,出现拐点,然后趋于平缓。北大沙河拐点出现在河宽为6 m的地方:当河宽低于6 m时,同一河宽条件下,因“V”型断面坡面斜率高于实测断面,水深大于实测断面(图7a),使“V”型断面在小河宽、低流量时断面面积和水力半径远高于实测断面;当河宽高于6 m,实测断面断面面积增加速率高于“V”型断面速率,实测断面面积和水力半径逐渐接近“V”型断面面积和水力半径,使 $\Delta Q/Q_0$ 逐渐降低。顾小庄拐点出现在河宽为60 m的地方:使用梯形断面概化实测断面时,断面底部被概化为一条水平直线,实际河宽60 m以下的实际断面低于概化断面(图7b),计算得到的断面面积和水力半径数据偏差较大;当河宽高于60 m时,概化后的数据点接近实际边坡,拟合精度较高,使 $\Delta Q/Q_0$ 迅速降低。宅科出现两个拐点,第1个拐点出现在河宽10 m处:10 m河宽以内,概化断面低于实际断面导致误差为负值;河宽大于10 m后,概化断面高于实测断面(图7c),误差为正,并且随着河底高程增加,概化断面逐渐接近实际断面,误差减小,到河宽30 m处两者基本吻合,导致误差迅速减小,出现第2个拐点。

“流量—累积误差”关系图中,北大沙河在流量大于 $0.1\text{ m}^3/\text{s}$ 后(最大过水流量的4.22%)概化断面引起的流量计算误差出现拐点,迅速减小(图7g);顾小庄的拐点出现在流量 $5\text{ m}^3/\text{s}$ 左右(最大过水流量的1.6%),在此之后,流量增加,概化误差基本不再增加(图7h);宅科的拐点出现在流量 $0.025\text{ m}^3/\text{s}$ (最大过水流量的8.28%),在此之后,流

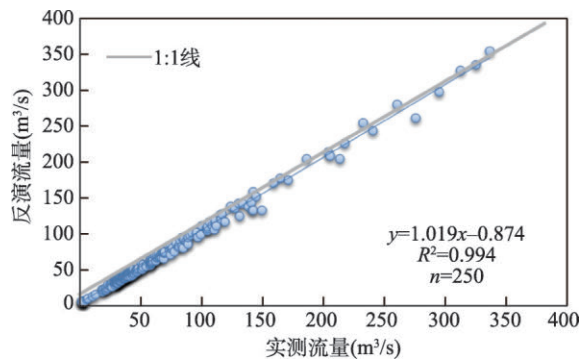


图6 淮河流域小清河反演与实测流量关系图

Fig. 6 Retrieved and measured stream flows for the Xiaoqing River (Gray line slope is 1)

表5 各流域精度分析表

Tab. 5 Accuracy for streamflow calculation in three basins

流域范围	精度参数		
	R^2	RD	RMSE(m^3/s)
所有流域	0.997	0.043	4.552
淮河流域	0.995	0.045	4.636
黄河流域	1.000	0.020	3.337
海河流域	0.997	0.006	0.0424

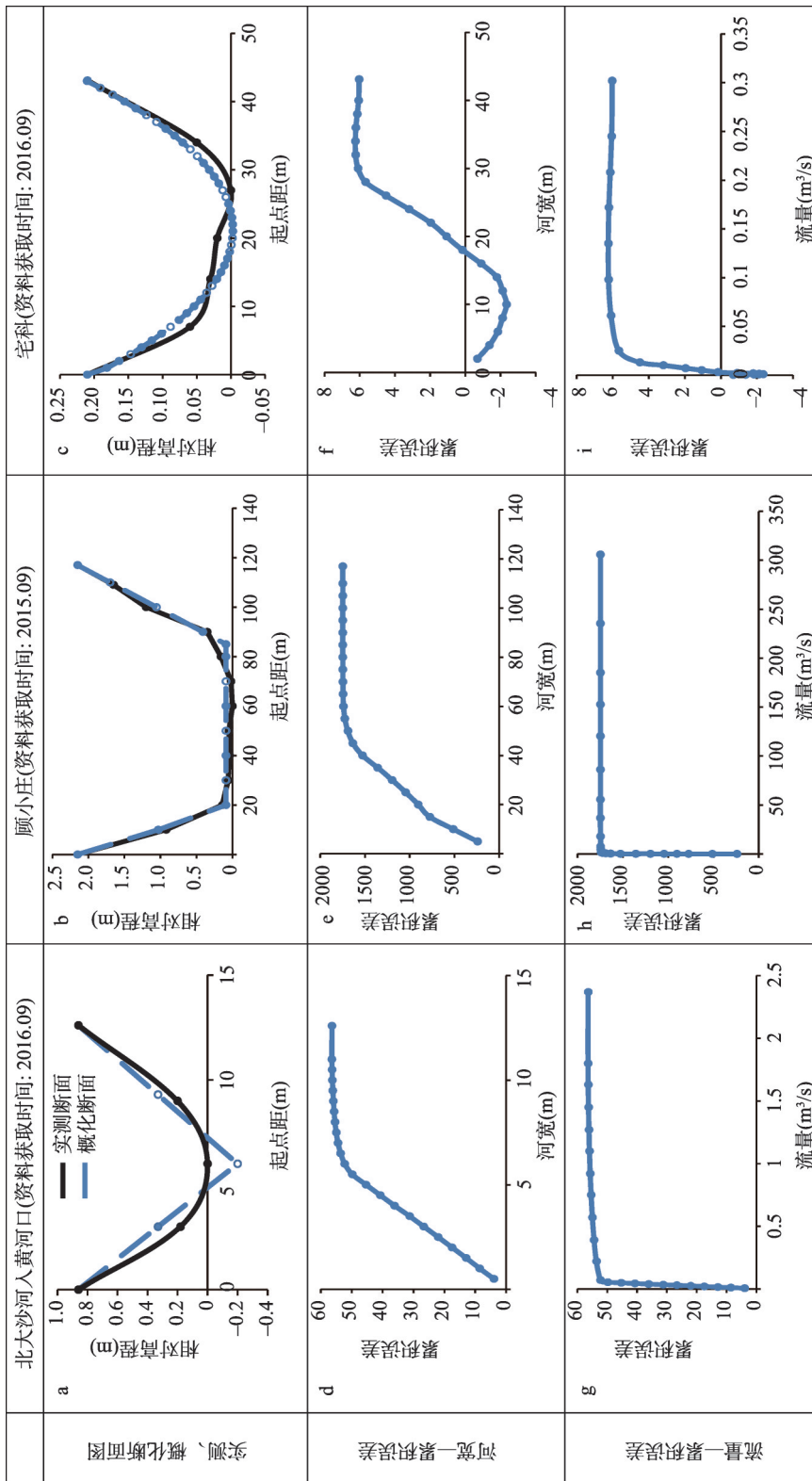


图7 河宽与流量累积误差关系图

Fig. 7 Relationship among river width, streamflow and accumulated errors

量增加, 概化误差增加变缓, 甚至在 $0.098 \text{ m}^3/\text{s}$ 之后, 误差为负值导致累积误差减小 (图 7i), 这是因宅科断面左上角相对高程大于 0.2 m 以后, 概化断面由先前的高于实测断面变为低于实测断面所致 (图 7c)。

总体上, 在典型站实测河宽 (水位位于实线最高点) 条件下, 河道水下部分概化断面与实测断面拟合效果较好 (表 6, 流量计算相对误差 $\Delta Q/Q_0$ 为 $0.9\% \sim 3\%$), 充分验证了本研究提出的在缺大断面资料情景下由概化断面替

代水下大断面方法是可行的。当然, 由于研究区范围受限, 大断面多样性不足, 而人类活动影响下的河底断面复杂多样, 本文结果只能反映研究区状况, 未来尚需扩大研究范围, 寻找更加多样化的水下大断面, 进一步研究提高近河底处大断面概化精度, 以提高全国范围内无地面实测资料情况下的流量反演精度。

4.5 方法优势

利用低空遥感无人机方便、快捷、影像分辨率高等特点, 可大大提高河道流量测算效率、可在无资料区、环境恶劣区域、突发灾害非接触式应急监测等条件下快速反演河道流量。与传统方法相比, 该方法具有以下 3 个方面的优势:

(1) 高效、低成本: 本文提出的方法可将传统水文行业流量测算时间缩短至 $1/2$ 或更短, 河流越宽, 效率越高、成本越低。与传统流速仪测流相比, 走航式声学多普勒流速剖面仪 (Acoustic Doppler Current Profile, ADCP) 因其较高的测流效率在水文行业得到广泛应用, 但缺点是价格昂贵、走航速度相对较慢 ($2 \sim 2.5 \text{ m/s}$)^[52], 而本文使用小型无人机飞行速度最快可达 10 m/s , 且成本不足走航式 ADCP 成本的 $1/20$, 相比而言效率更高、成本更低; 另外, 采用 ADCP 技术由于两次测量的路线可能不同, 数据的准确性有待提高, 当含沙量超过 10 kg/m^3 时, 准确性将进一步降低^[53], 而无人机测流方法有效克服了 ADCP 的上述缺点。虽然受糙率确定的人为影响, 其准确度如 ADCP 一样仍待研究提高, 但相比之下, 本文提出的方法效率更高、成本更低。

(2) 跨尺度: 飞行高度决定了其影像的空间分辨率: 50 m 高度下为 $\sim 2 \text{ cm}$ 而 100 m 高度下则为 $\sim 4 \text{ cm}$, 高度越高, 分辨率越低, 而监测范围越大^[48], 可根据研究河段的宽度确定飞行高度, 因此该方法可适用于大、中、小不同宽度河流。

(3) 非接触: 在灾害应急流量监测等特殊情况下, 外界环境复杂^[54-55], 接触式测量如 ADCP 会受到水质及含沙量的影响^[53], 而本文提出的方法属于非接触式测流, 对外界环境要求更低, 更适用于人迹罕至无资料区或突发性污染恶劣环境等特殊情况下进行非接触式流量测验。

5 结论

本文基于低空遥感 UAV 遥感影像, 提出了一种适用于各类河流的高效、非接触、简易快速反演河道流量的方法。基于 UAV 遥感影像生成完整河流大断面, 提供了有、无地面历史实测大断面两类情况下流量反演途径, 利用低空遥感技术获取水上河道断面, 结

表 6 实测河宽下概化与实测断面河道参数

Tab. 6 Generalized and measured river parameters corresponding to measured river width

计算结果	站点名称		
	北大沙河入黄河口	顾小庄	宅科
实测河宽(m)	2.370	117.000	43.100
实测断面面积(m ²)	6.800	189.375	6.213
概化断面面积(m ²)	6.680	188.360	6.161
实测水力半径(m)	0.530	1.616	0.144
概化水力半径(m)	0.520	1.608	0.140
$\Delta Q(\text{m}^3/\text{s})$	-0.071	-2.729	-0.008
$\Delta Q/Q_0$	-0.030	-0.009	-0.027

合实测或概化水下断面,为缺少地面数据条件下获取准确河道大断面提供了有效途径。结果表明:

(1)通过UAV影像生成点云和DSM,基于点云和DSM获取水面宽、糙率、水面比降等水力学参数。以耦合遥感与地面数据的河道流量计算程序为基础,利用曼宁公式反演河道流量,在测算中小型河道流量中具有较高精度。

(2)在济南一小清河研究区中,针对黄河、淮河、海河三流域水系的实测流量和反演流量进行对比检验和精度计算,发现反演流量在高值区略高于实测流量,可满足灾害应急监测流量精度需求($R^2 = 0.997$, $RMSE = 4.55 \text{ m}^3/\text{s}$)。但遥感反演时水下大断面未知会对结果产生影响,如何排除大断面未知以及河道流量季节性变化对结果的影响,仍有待进一步研究。

(3)无地面历史实测大断面资料而进行断面概化后,流量计算误差随水位升高、河宽增大而减小,最大累积误差为最大过水流量的8.28%,认为概化误差主要来自于水位低、河宽小、流量小时的过水断面底部,于非枯水期河宽、流量下表现出较高的精度值。

由于济南一小清河研究区空间尺度较小,大断面多样性不足,虽然本文无人机反演流量结果具有较高的精度,但这些结果不足以反映全国的情况,未来尚需扩大研究范围,寻找更加多样化的水下大断面,进一步研究提高近河底处大断面概化精度的方法,以提高全国范围内无地面实测资料情况下基于无人机影像的流量反演精度。

参考文献(References)

- [1] Wei Zhen, Jia Haifeng, Jiang Qigui, et al. Simulation experiment of phytoplankton growth induced by flow velocity in rivers replenished with reclaimed water. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2017, 11(12): 6540-6546. [魏桢, 贾海峰, 姜其贵, 等. 再生水补水河道中流速对浮游藻类生长影响的模拟实验. *环境工程学报*, 2017, 11(12): 6540-6546.]
- [2] Ruiz J, Macías D, Peters F. Turbulence increases the average settling velocity of phytoplankton cells. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2004, 101(51): 17720-17724.
- [3] Escartin J, Aubrey D G. Flow structure and dispersion within algal mats. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 1995, 40(4): 451-472.
- [4] Deng Xiaoxue, Ye Aizhong, Tong Hongfu. The study of measurement and calculation method on river discharge. *China Rural Water and Hydropower*, 2015(6): 18. [邓数学, 叶爱中, 童洪福, 等. 河道流量测量与计算方法研究. *中国农村水利水电*, 2015(6): 18.]
- [5] Wang Ping. Research on the measurement method of siltation river flow based on visual analysis [D]. Jinan: Shandong University, 2006. [王平. 基于视觉分析的淤积河道流量测量方法的研究[D]. 济南: 山东大学, 2006.]
- [6] Zhang Jiqun, Xu Kaiqin, KAMEYAMA, et al. Estimation of river discharge using TOPEX/Poseidon Altimeter data. *Acta Geographica Sinica*, 2004, 59(1): 95-100. [张继群, 徐开钦, 龟山哲, 等. 基于 TOPEX/Poseidon 卫星数据的江河流域流量测算. *地理学报*, 2004, 59(1): 95-100.]
- [7] Jiang Hui. Retrieval and analysis water quality parameters in Poyang Lake based on multi-source remote sensing data [D]. Nanchang: Nanchang University, 2011. [江辉. 基于多源遥感的鄱阳湖水质参数反演与分析[D]. 南昌: 南昌大学, 2011.]
- [8] Li Zili. Research on surface current detection and deep current inversion by using ground wave radar [D]. Wuhan: Wuhan University, 2010. [李自立. 地波雷达表面流探测与深层流反演算法研究[D]. 武汉: 武汉大学, 2010.]
- [9] Li Wei. Near-field remote sensing of riverine hydrodynamic processes with 3D large scale particle image velocimetry [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2016. [李蔚. 基于立体视觉与 LSPIV 的河流水动力过程近距遥感测量系统[D]. 杭州: 浙江大学, 2016.]
- [10] Hirpa F A, Hopson T M, De Groeve T, et al. Upstream satellite remote sensing for river discharge forecasting: Application to major rivers in South Asia. *Remote Sensing of Environment*, 2013, 131: 140-151.
- [11] Costa J E, Cheng R T, Haeni F P, et al. Use of radars to monitor stream discharge by noncontact methods. *Water Resources Research*, 2006, 42(7): 27-42.

- [12] Costa J E, Spicer K R, Cheng R T, et al. Measuring stream discharge by non-contact methods: A Proof-of-Concept Experiment. *Geophysical Research Letters*, 2000, 27(4): 553-556.
- [13] LeFavour G, Alsdorf D. Water slope and discharge in the Amazon River estimated using the shuttle radar topography mission digital elevation model. *Geophysical Research Letters*, 2005, 32(17): 404-405.
- [14] Jung H C, Hamski J, Durand M, et al. Characterization of complex fluvial systems using remote sensing of spatial and temporal water level variations in the Amazon, Congo, and Brahmaputra rivers. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2010, 35(3): 294-304.
- [15] 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. *Water Resources Research*, 1995, 31(5): 1325-1329.
- [16] 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 ungauged basins. *Water Resources Research*, 1996, 32(7): 2021-2034.
- [17] Song Ping, Liu Yuanbo, Liu Yanchun. Advances in satellite retrieval of terrestrial surface water parameters. *Advances in Earth Science*, 2011, 26(7): 731-740. [宋平, 刘元波, 刘燕春. 陆地水体参数的卫星遥感反演研究进展. *地球科学进展*, 2011, 26(7): 731-740.]
- [18] Xu K, Zhang J, Watanabe M, et al. Estimating river discharge from very high-resolution satellite data: A case study in the Yangtze River, China. *Hydrological Processes*, 2004, 18(10): 1927-1939.
- [19] Leopold L B, Maddock T. The hydraulic geometry of stream channels and some physiographic implications. US Government Printing Office, 1953, 252: 22-53.
- [20] Pavelsky T M. Using width - based rating curves from spatially discontinuous satellite imagery to monitor river discharge. *Hydrological Processes*, 2014, 28(6): 3035-3040.
- [21] Gleason C J, Smith L C. Toward global mapping of river discharge using satellite images and at-many-stations hydraulic geometry. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2014, 111(13): 4788-4791.
- [22] Gleason C J, Wang J. Theoretical basis for at-many-stations hydraulic geometry. *Geophysical Research Letters*, 2015, 42(17): 7107-7114.
- [23] Zhang J Q, Xu K Q, Watanabe M. Estimation of river discharge using very high-resolution satellite data in Yangtze River//*Proceedings of International Symposium on Remote Sensing*, October 30-November 1, 2002, Sokcho, Korea, 728-733.
- [24] Getirana A C V, Peters-Lidard C. Estimating water discharge from large radar altimetry datasets. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2013, 17(3): 923.
- [25] 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. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 2010, 115(C12): 13.
- [26] Biancamaria S, Lettenmaier D P, Pavelsky T M. The SWOT mission and its capabilities for land hydrology. *Surveys in Geophysics*, 2016, 37(2): 307-337.
- [27] Pavelsky T M, Durand M T, Andreadis K M, et al. Assessing the potential global extent of SWOT river discharge observations. *Journal of Hydrology*, 2014, 519: 1516-1525.
- [28] Gosling S N, Arnell N W. Simulating current global river runoff with a global hydrological model: model revisions, validation, and sensitivity analysis. *Hydrological Processes*, 2011, 25(7): 1129-1145.
- [29] Widén-Nilsson E, Halldin S, Xu C. Global water-balance modelling with WASMOD- M: Parameter estimation and regionalisation. *Journal of Hydrology*, 2007, 340(1/2): 105-118.
- [30] Rawlins M A, Lammers R B, Froking S, et al. Simulating pan-Arctic runoff with a macro-scale terrestrial water balance model. *Hydrological Processes*, 2003, 17(13): 2521-2539.
- [31] Oki T, Nishimura T, Dirmeyer P. Assessment of annual runoff from land surface models using Total Runoff Integrating Pathways (TRIP). *Journal of the Meteorological Society of Japan. Ser. II*, 1999, 77(1B): 235-255.
- [32] Durand M, Gleason C J, Garambois P A, et al. An intercomparison of remote sensing river discharge estimation algorithms from measurements of river height, width, and slope. *Water Resources Research*, 2016, 52(6): 4527-4549.
- [33] Birkinshaw S J, Moore P, Kilsby C G, et al. Daily discharge estimation at ungauged river sites using remote sensing. *Hydrological Processes*, 2014, 28(3): 1043-1054.
- [34] Birkinshaw S J, O'donnell G M, Moore P, et al. Using satellite altimetry data to augment flow estimation techniques on the Mekong River. *Hydrological Processes*, 2010, 24(26): 3811-3825.
- [35] Gleason C, Garambois P A, Durand M. Tracking river flows from space. *Earth & Space Science News*, 2017, 7(26): 98.

- [36] Lu Shanlong, Wu Bingfang, Yan Nana. Progress in river runoff monitoring by remote sensing. *Advances in Earth Science*, 2010, 25(8): 820-826. [卢善龙, 吴炳方, 闫娜娜, 等. 河川径流遥感监测研究进展. *地球科学进展*, 2010, 25(8): 820-826.]
- [37] Li Xin, Liu Shaomin, Ma Mingguo, et al. Overall design of combined remote sensing observations for eco-hydrological process in Heihe River Basin. *Advances in Earth Science*, 2012, 27(5): 481-498. [李新, 刘绍民, 马明国, 等. 黑河流域生态—水文过程综合遥感观测联合试验总体设计. *地球科学进展*, 2012, 27(5): 481-498.]
- [38] Andreadis K M, Clark E A, Lettenmaier D P, et al. Prospects for river discharge and depth estimation through assimilation of swath-altimetry into a raster-based hydrodynamics model. *Geophysical Research Letters*, 2007, 34(10): 403.
- [39] Vörösmarty C J, Willmott C J, Choudhury B J, et al. Analyzing the discharge regime of a large tropical river through remote sensing, ground-based climatic data, and modeling. *Water Resources Research*, 1996, 32(10): 3137-3150.
- [40] Watts A C, Ambrosia V G, Hinkley E A. Unmanned aircraft systems in remote sensing and scientific research: Classification and considerations of use. *Remote Sensing*, 2012, 4(6): 1671-1692.
- [41] Colomina I, Molina P. Unmanned aerial systems for photogrammetry and remote sensing: A review. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2014, 92: 79-97.
- [42] Lee S, Choi Y. Topographic survey at small-scale open-pit mines using a popular rotary-wing unmanned aerial vehicle (drone). *Tunnel and Underground Space*, 2015, 25(5): 462-469.
- [43] Cho S J, Bang E S, Kang I M. Construction of precise digital terrain model for nonmetal open-pit mine by using unmanned aerial photograph. *Economic and Environmental Geology*, 2015, 48(3): 205-212.
- [44] Neugirg F, Stark M, Kaiser A, et al. Erosion processes in Calanchi in the Upper Orcia Valley, Southern Tuscany, Italy based on multitemporal high-resolution terrestrial LiDAR and UAV surveys. *Geomorphology*, 2016, 269: 8-22.
- [45] Vivoni E R, Rango A, Anderson C A, et al. Ecohydrology with unmanned aerial vehicles. *Ecosphere*, 2014, 5(10): 1-14.
- [46] Li Deren, Chen Xiaoling, Cai Xiaobin. Spatial information techniques in rapid response to Wenchuan Earthquake. *Journal of Remote Sensing*, 2008, 12(6): 841-851. [李德仁, 陈晓玲, 蔡晓斌. 空间信息技术用于汶川地震救灾. *遥感学报*, 2008, 12(6): 841-851.]
- [47] Zhang Yuan, Zhao Changsen, Yang Shengtian, et al. A method to calculate ecological flow base by coupling multi-species flow velocity requirement. *Journal of Beijing Normal University (Natural Science)*, 2017, 53(3): 337-343. [张远, 赵长森, 杨胜天, 等. 耦合多物种生态流速的生态需水计算方法. *北京师范大学学报: 自然科学版*, 2017, 53(3): 337-343.]
- [48] Zhang Chunbin, Yang Shengtian, Zhao Changsen, et al. Topographic data accuracy verification of small consumer UAV. *Journal of Remote Sensing*, 2018, 22(1): 185-195. [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. *遥感学报*, 2018, 22(1): 185-195.]
- [49] Zhao C S, Zhang C B, Yang S T, et al. Calculating e-flow using UAV and ground monitoring. *Journal of Hydrology*, 2017, 552: 351-365.
- [50] Liu Changming, gabbro, Song Jinxi. Ecological hydraulic radius method for estimating ecological water requirement in river channels. *Progress in Natural Science*, 2007, 17(1): 42-48. [刘昌明, 门宝辉, 宋进喜. 河道内生态需水量估算的生态水力半径法. *自然科学进展*, 2007, 17(1): 42-48.]
- [51] Sun Dongpo, Ding Xin. National Planning Textbook of "11th Five-Year" in General Higher Education: Hydraulics. Zhengzhou: Zhengzhou University Press, 2007. [孙东坡, 丁新求. 普通高等教育“十一五”国家级规划教材: 水力学. 郑州: 郑州大学出版社, 2007.]
- [52] Yao Zhigang, Bao Xianwen, Li Na, et al. Analysis of tidal and residual currents across Kemen Channel based on shipboard ADCP measurements. *Acta Oceanologica Sinica*, 2012, 34(6): 1-10. [姚志刚, 鲍献文, 李娜, 等. 基于船载ADCP观测对罗源湾湾口断面潮流及余流的分析. *海洋学报(中文版)*, 2012, 34(6): 1-10.]
- [53] Zhang Daichao, Wan Hong, Wang Minhua. Application analysis of ADCP technology in hydrological discharge test. *Water Conservancy Science and Technology and Economy*, 2015, 21(1): 73-74. [张代超, 万红, 汪敏华. 水文流量测验中走航式ADCP技术的应用分析. *水利科技与经济*, 2015, 21(1): 73-74.]
- [54] Zhao Yanmin, Qin Yanwen, Zheng Binghui, et al. Emergency health risk assessment of water pollution accident. *China Environmental Science*, 2014, 34(5): 1328-1335. [赵艳民, 秦延文, 郑丙辉, 等. 突发性水污染事故应急健康风险评估. *中国环境科学*, 2014, 34(5): 1328-1335.]
- [55] Ai Hengyu, Liu Tongwei. Statistical review of the major unexpected water contamination incidents at home in the period from 2000 to 2011. *Journal of Safety and Environment*, 2013, 13(4): 284-288. [艾恒雨, 刘同威. 2000-2011年国内重大突发性水污染事件统计分析. *安全与环境学报*, 2013, 13(4): 284-288.]

Measuring streamflow with low-altitude UAV imagery

ZHAO Changsen^{1,2}, PAN Xu^{1,3}, YANG Shengtian^{1,2}, LIU Changming¹,
CHEN Xin⁴, ZHANG Hanming⁵, PAN Tianli²

(1. College of Water Sciences, Beijing Normal University, Beijing Key Laboratory of Urban Hydrological Cycle and Sponge City Technology, Beijing 100875, China; 2. School of Geography, Faculty of Geographical Science, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 3. College of Water Conservancy and Civil Engineering, Shandong Agricultural University, Tai'an 271018, Shandong, China; 4. Jinan Survey Bureau of Hydrology and Water Resources, Jinan 250013, China; 5. Dongying Bureau of Hydrology and Water Resources, Dongying 257000, Shandong, China)

Abstract: Stream flows are of great importance in maintaining a stable hydrosphere and assessing available water resources of a nation. However, previous satellite-methods are difficult to retrieve stream flows for middle- or small-scale rivers due to the satellite coarse spatial resolution whereas near-ground measuring methods have too complex procedure, requirement of expensive apparatus, or low-efficiency. These shortcomings hindered them to be used widely in non-gauged areas and situations needing non-contact measurement, e.g., accidental pollution events. This paper presented a novel, non-contact, fast method to calculate streamflow using UAV images which can be easily applied to rivers with different scales of width. Using this method, stream flows can be calculated with or without ground-measured cross-section data. With UAV images it produced point-cloud and DSM (digital surface model) which were then used to calculate values of river-width, roughness, longitudinal water-surface slope and cross-section above water surface. With all these values, the hydraulic method was finally adopted to calculate stream flows. Results show that the method has a satisfactory performance with modelled streamflow values slightly higher than observed ones at high-flow periods ($R^2 = 0.997$, RMSE = 4.55 m³/s) with ground-observed cross-section data. When the cross-section data were absent, the cross-section under water can be generalized with the UAV measured above-water cross-section data. Errors in estimating stream flows induced by cross-section generalization decreased with increment of water-level and water-width. The maximum accumulated errors accounted for 8.28% of the bankfull streamflow. The errors were resulted from the generalization of river bottom with un-regular cross-sections. All the results and methodologies could be of great help in streamflow measurement in accidental pollution events and in ungauged areas across the globe.

Keywords: streamflow; UAV; hydraulics; Jinan