

# 结合无人机航空摄影测量的河道流量估算

杨胜天<sup>1</sup>, 王鹏飞<sup>1</sup>, 王娟<sup>2</sup>, 娄和震<sup>1</sup>, 巩同梁<sup>3</sup>

1. 北京师范大学 水科学研究院, 北京 100875;

2. 北京师范大学 地理科学学部, 北京 100875;

3. 西藏自治区水利厅, 拉萨 850000

**摘要:** 河道流量的获取是水资源开发及生态保护的基础。但在缺少资料地区, 如何方便、准确的获取流量资料仍然是一个难题。随着无人机航空摄影测量技术的发展, 为解决该问题提供了新的数据源和思路。本研究利用无人机航空摄影获取的高精度的DOM (Digital Orthophoto Map) 与DSM (Digital Surface Model), 结合经典曼宁公式河道流量算法, 深度挖掘航测数据记录的地表高程信息, 提出了一种河道流量估算的新方法。研究计算了中国西北典型无资料区准格尔盆地的卡赞营、博尔通古、安集海、大河沿子和二叉河等5个典型断面的流量。与实测流量对比分析得出如下结论: 5个计算断面流量平均相对误差为10.74%, 最小相对误差为1.43%, 均方根误差RMSE (Root Mean Squared Error) 为4.82 m<sup>3</sup>/s, 平均百分比误差MPE (Mean Percentage Error) 为0.065, 证明了将无人机数据与曼宁公式相结合的方法在径流估算上的可行性。本研究发挥了无人机航空摄影快速、便捷、高精度获取河道基础信息的优势, 论证了无人机航空摄影测量数据与经典流量公式相结合的可行性, 为缺少资料地区径流资料的获取提供新思路。研究结果为缺少资料区水资源开发和生态保护提供了重要数据, 同时为复杂水文模式的简化处理在缺少资料地区模拟计算提供了重要的验证数据。

**关键词:** 无人机, 曼宁公式, 低空遥感, 河道流量计算, 精度分析, 无资料区

**引用格式:** 杨胜天, 王鹏飞, 王娟, 娄和震, 巩同梁. 2021. 结合无人机航空摄影测量的河道流量估算. 遥感学报, 25(6): 1284-1293  
Yang S T, Wang P F, Wang J, Lou H Z and Gong T L. 2021. River flow estimation method based on UAV aerial photogrammetry. National Remote Sensing Bulletin, 25(6): 1284-1293 [DOI: 10.11834/jrs.20209082]

## 1 引言

河川径流量是表征水循环过程的重要指标, 也是水量平衡的基本要素, 在区域水资源开发利用及河流生态保护中占有主导地位 (芮孝芳, 2004; 杨胜天, 2012)。长期以来, 径流资料的获取主要依靠水文站点的人工观测; 然而, 部分地区由于自然条件恶劣, 社会经济欠发达等原因, 缺乏建立固定水文站的条件, 成为了水文资料缺少地区。为了认清缺少资料流域的水文特征, 国际水文科学协会 (International Association of Hydrological Sciences) 于2003年召开的第23届国际地球物理和大地测量联合会, 明确2003年—2012年开展无观测资料流域水文的预测研究, 即PUB (Prediction of

Ungauged Basins) 计划 (Sivapalan 等, 2003)。该计划已建立了以统计学为基础的回归法 (Young, 2006)、基于相邻流域水文特征相似性的空间近似法 (Oudin 等, 2008) 及水循环过程物理模型 (Bao 等, 2012) 等研究方法。过去的十几年, PUB计划取得了丰厚的成果, 但在流量演算的不确定性研究、流量预报时效性及理论方法上仍需要大量的实践验证。

遥感技术为解决缺少资料地区流量估算的问题提供了新思路 (Bjerklie 等, 2015; Alsdorf 和 Lettenmaier, 2003)。Ling 等 (2012) 利用多源卫星遥感数据, 通过监测长江河心岛屿淹没面积的变化, 建立面积—径流关系曲线进行流量的预报研究。该研究的提出为系列的径流预报提供了新

收稿日期: 2019-03-27; 预印本: 2020-03-28

基金项目: 国家自然科学基金 (编号: U1812401, 41801334, U1303381, 41261090); 清华大学水沙科学与水利水电工程国家重点实验室开放基金 (编号: sklhsc-2021-A-04)

第一作者简介: 杨胜天, 1965年生, 男, 教授, 研究方向为遥感与水文水资源。E-mail: yangshengtian@bnu.edu.cn

通信作者简介: 娄和震, 1987年生, 男, 工程师, 研究方向为遥感水文与环境遥感。E-mail: louhezhen@bnu.edu.cn

的思路，但其在推广与应用方面存在诸多限制：例如干旱区的中小河流难以发育出便于监测的淹没物；卫星影像的分辨率要求淹没物的最小面积等；Garambois和Monnier（2015）研究了SWOT卫星（Surface Water and Ocean Topography）测量水面高程的方式，在一维圣维南近似方程的基础上提出河道流量估算的新方法。与真值相比，径流估算误差小于15%，论证了该方法的可靠性。但其在参数获取可靠性及小流域的推广应用上存在明显不足；Wang等（2017）利用GRACE卫星（Gravity Recovery and Climate Experiment）数据，结合加拿大Mackenzie流域2002年—2014年的径流和气温资料，开展了冰川融雪径流量计算的研究，结果表明引入卫星数据的模型与实测数据相关性系数为0.83，主要流量的峰值预报在许可的误差限度之内，该研究为融雪径流的预报提供了新方法；Gleason和Smith（2014）通过Landsat影像获取河流水面宽度，结合多站水力几何法演算洪水的峰值及过程，研究结果表明该方法的均方根误差RMSE在20%—40%，对于中小流域的径流估算结果误差更大，适用性受到限制。基于卫星遥感数据在估算大型河流流量上已取得一系列的成果，然而由于卫星遥感数据精度低、重访周期长，易受天气状况影响等原因，上述方法难以拓展到中小河流径流估算上。

近年来，无人机航空摄影测量的发展使得精准获取下垫面地形信息变得便捷、可靠。Zhao等（2017）利用低空摄影测量获取的地形数据对河道形状进行拟合，在获取河道过水断面面积、湿周长度、水面宽度等信息的基础上，进行生态需水量的计算；Lewin和Gibbard（2010）应用无人机数据对河道阶地发育的过程展开研究，借助高精度的遥感数据分析河道的阶地变化，同时研究流水的侵蚀与搬运过程对平原河流的影响。具有航空摄影测量能力的小型无人机具有分辨率高、适应性强、灵活飞行等特征，相比卫星数据和人工测量，在河道流量信息的获取成本、数据精度及可靠性上都具有一定的优势（Neitzel和Klonowski，2011；Xiang和Tian，2011；Harder等，2016）。

虽然最新的研究已经将无人机航空摄影测量的数据应用于河道断面获取上，但和径流估算相关的研究仍然不足（Zhao等，2017）。本文在分析总结国内外通过遥感影像估算径流方法的基础上，

发挥无人机数据精度高、易获取的优势，将航测数据与经典的水文公式相结合进行径流估算的研究，为缺少资料地区获取径流数据提供一种新的思路。研究中无人机将作为河道地形信息的采集平台，用于获取研究区河道的DSM数据与DOM数据。本研究将上述数据结合必要的实测资料，选择在流量计算中广泛使用的曼宁公式开展3个方面的研究：（1）利用无人机获取的航空测量数据计算河流断面参数；（2）依据曼宁公式的参数要求，将DOM与DSM影像处理得到的信息带入公式进行流量计算；（3）选择相对精度RA（Relative Accuracy）、均方根误差RMSE（Root Mean Squared Error）和平均百分比误差MPE（Mean Percentage Error）作为误差评价方法，分析利用无人机驱动的传统水文水利公式进行河道流量计算的可行性，为缺少资料地区河道流量数据的获取提供一种新的方法。

## 2 方法原理

### 2.1 曼宁公式

曼宁公式是计算无压水流的经验性公式，其建立基础是法国工程师A.de Chezy（1796）提出的谢才公式，如式（1）所示：

$$v = CR^{1/2}J^{1/2} \quad (1)$$

式中， $v$ 为断面平均流速， $R$ 为水力半径，与断面形状有关； $J$ 为水力梯度； $C$ 为谢才系数，反应边界条件对水流影响的综合效果， $m^{1/2}/s$ 。

天然河道水流大多是阻力平方区的紊流，谢才系数常用计算方法为曼宁法，如式（2）所示，应用于断面流量估算的曼宁公式即如式（3）所示（孙东坡和丁新求，2009）：

$$C = \frac{1}{n} R^{1/6} \quad (2)$$

$$Q = v \times A = \frac{1}{n} R^{2/3} J^{1/2} A \quad (3)$$

式中， $n$ 为糙率，无因次项，衡量河道表面粗糙情况的指标； $A$ 为过水断面面积（单位为 $m^2$ ）。

### 2.2 流量计算所需参数及获取方法

曼宁公式中涉及断面面积、糙率、水力梯度和水力半径等4个参数，根据参数特性与意义，将其分为实测参数与航测参数两类。

实测的参数包括断面面积与水力半径。断面

面积是计算时期水面以下, 被淹没范围的河道横断面面积; 水力半径是表征断面形状的系数, 是断面面积与湿周的比值。在本研究中, 二者将通过实测的水下地形数据获取。

航测的参数包括糙率与水力梯度。其中糙率反应了河道对水流的阻力; 水力梯度是指沿水流方向河道的水头损失量与距离的比值, 自然河流的水头损失表现为水面高程的变化。在本研究中, 计算水力梯度所需的地形及水面的变化数据可由无人机获取的 DOM 影像提取; 判断糙率取值的信息通过分析 DSM 影像与 DOM 影像, 分析河道岸边类型、河底卵石粒径及分布和滩涂地植被等信息获得取值。

### 2.3 无人机性能参数及数据处理

本研究选用的无人机设备为大疆 PHANTOM 4 型, 其参数如表 1 所示。野外获取的河道断面影像使用 Pix4D 软件 (www.pix4d.com [2019-03-27]) 进行拼接处理, 得到研究区合成影像。本研究使用无人机获取研究区河道高分辨率影像的流程包括: (1) 无人机航线规划: 依据河道宽度、流向、位置及周围地形布设飞行航线, 使研究区位于飞行区域中心位置; (2) 无人机数据整理: 对分幅的无人机影像数据进行分类整理编号; (3) 河道信息提取: 将分幅的无人机图像导入 Pix4D 软件, 经过影像拼接、点云加密、质量分析等步骤导出完整河道断面影像。

表 1 无人机关键参数

Table 1 Key parameters of the applied UAV in this study

参数	数值
无人机型号	Phantom-4-pro
相机型号	FC300X
影像传感器	Sony Exmor R CMOS
相机像素	1200 万 (4000*3000)
最大光圈	f/2.8
相机焦距	20 mm
视场角	94°
最大航高	500 m
起飞重量	1280 g
最大平飞速度	16 m/s
工作环境温度	0—40 °C

本研究使用的无人机精度验证已在研究组前期研究中进行了论证 (张纯斌等, 2018)。结果表明, 在 5 个不同航高条件下的垂直与水平方向的平

均误差分别为  $\pm 4.39$  cm、 $\pm 0.51$  cm, RMSE 分别为  $\pm 9.98$  cm、 $\pm 2.79$  cm, 达到了厘米级别的精度, 因此将同类无人机应用于河道地形信息的获取上是可行的。

### 2.4 评价方法

为评价该方法在径流估算上和合理性与可靠性, 本文选用 RA、RMSE 和 MPE 作为精度的评价方法, 计算公式如 (4)—(6) 所示:

$$RA = \frac{|Q_e - Q_m|}{Q_m} \quad (4)$$

$$RMSE = \sqrt{\left(\frac{\sum(Q_e - Q_m)^2}{n}\right)} \quad (5)$$

$$MPE = \frac{1}{n} \sum Q_e - Q_m \quad (6)$$

式中,  $Q_e$  为估算径流,  $Q_m$  为实测径流,  $n$  为计算次数。对于 RA, 按照中国水利部门针对流量预报及计算标准颁布的《水文情报预报规范》(GB/T 22482-2008), 取实测值的 20% 作为允许误差的范围。RA 将用来评价单断面估算流量与实测流量之间的差值, RMSE 与 MPE 将用来分析该方法的整体可靠性。

## 3 研究区与数据获取

### 3.1 研究区

准格尔盆地位于中国新疆维吾尔自治区西北部, 是中国第二大内陆盆地, 主体部分位于天山及阿尔泰山之间, 是新疆西北部绿洲的主要集中地, 盆地内拥有完整的内流河系统。由于该地区深居内陆, 地理位置偏僻、交通闭塞, 也是主要的水文资料缺少地区。本研究通过实地调查, 对该区域水系分布情况进行分析, 选取位于准格尔盆地东—西轴线上的博尔塔拉河流域、大河沿子河流域、安集海河流域、博尔通古河流域为研究对象, 截取卡赞营、博尔通古、安集海、大河沿子和二叉河等 5 个代表断面进行径流估算的研究。所选流域涵盖了盆地内的主要河流, 截取的 5 个断面类型为该地区的典型代表, 断面流量等级包括了盆地内流量的主要分布区间。其中卡赞营断面位于博尔塔拉河上游地区, 距离河源 15 km; 二叉河断面位于博尔塔拉河下游地区, 距离河流终点 10 km; 其余 3 个断面均位于对应河流中游的不同位置: 博尔通古断面、大

河沿子断面、安集海断面控制流域内河流分别占河流全长的37%、50%、64%。研究区断面位置及流域内河流分布如图1所示。

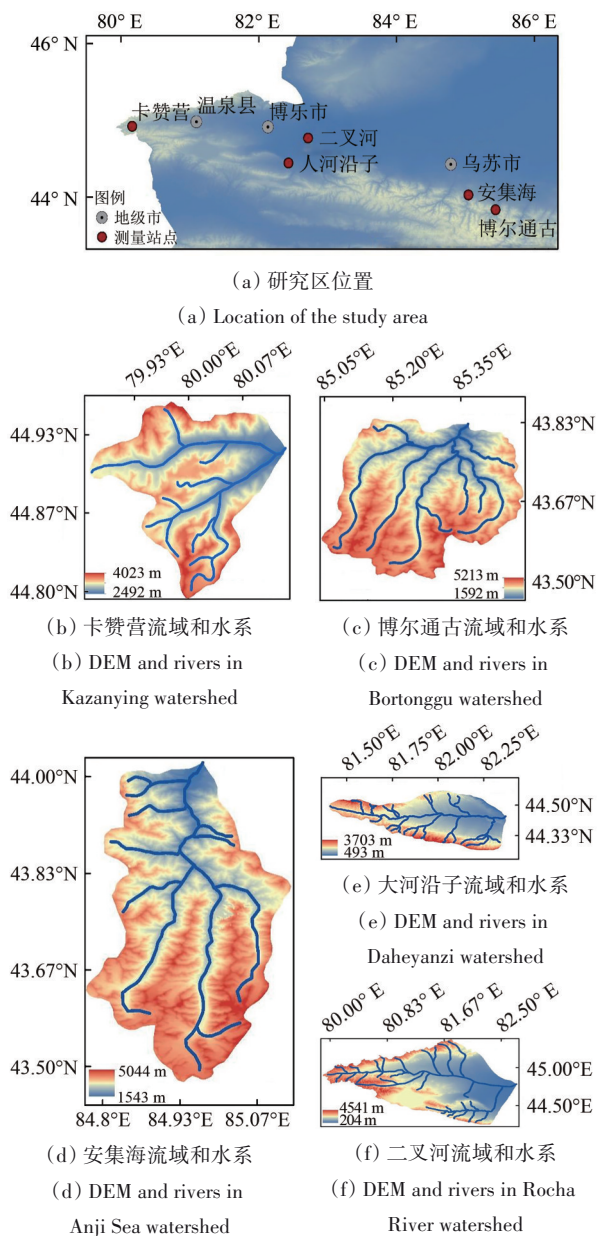


图1 研究区位置及流域水系

Fig.1 Location of the study area in China and river systems in each watershed

### 3.2 数据获取

#### 3.2.1 实测数据

由于研究采用的无人机只能携带3通道可见光传感器，无法直接测量水下地形 (Kerr 和 Purkis, 2018)，此次研究过程补充了必要的实测数据。为获取可靠的水下地形数据，依据《水道观测规范》

(SL 257-2000)，《水文普通测量规范》(SL 58-93)对河流横断面测量的要求，确定采用“流速-面积法”获取横断面信息，并采用“一点法”合成断面平均流速 (谢悦波, 2009)，如图2所示。

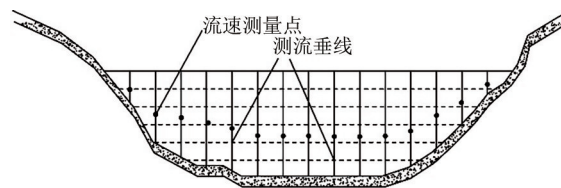


图2 横断面信息采集方法

Fig.2 Method of the data collection for cross-section

实测断面面积、断面平均流速及实测流量如表2所示。卡赞营、博尔通古、安集海和大河沿子四个断面处于对应河流的中上游地区，断面所在河段比降较大，实测流速均大于1 m/s；二叉河断面位于博尔塔拉河下游地区，地势平坦，河道蜿蜒，实测流速较小。

表2 横断面实测数据

Table 2 Measured data of cross-sections

参数	断面				
	卡赞营	博尔通古	安集海	大河沿子	二叉河
平均流速/(m/s)	1.30	1.27	1.10	1.24	0.70
断面面积/m <sup>2</sup>	19.99	28.37	96.69	15.33	10.75
实测流量/(m <sup>3</sup> /s)	25.98	36.03	106.36	19.01	7.53

#### 3.2.2 无人机数据

在该研究中，选择中国大疆公司生产的PHANTOM 4型 (www.dji.com/cn/phantom-4 [2019-03-27]) 四旋翼无人机作为研究区下垫面信息的采集设备。在气温25℃晴朗无风的状态下，该款无人机在海拔2000 m的地区仍然有25 min左右的工作时间，最大飞行面积360000 m<sup>2</sup> (600 m×600 m)。在获取无人机数据的过程中，根据所选断面位置及周围山体、树木高度等情况设置飞控参数，如表3所示。其中卡赞营断面位于博尔塔拉河上游高山峡谷区。为避免碰撞山体，飞行高度设置了较高的100 m，避开两岸山崖；安集海断面、大河沿子断面由于河流形态多变，出现较大弯道。为获取足够的河段信息设置了90 m的飞行高度；博尔通古断面与二叉河断面所在区域较为平缓，河流顺直，飞行高度设置为常规的70 m。

通过系统的控制飞行，可获得研究区河道高精度的航测影像。采用Pix4D软件对影像进行拼接与

点云加密, 进而得到研究河段高精度的 DOM 和 DSM 数据 (图3)。DOM 数据为后期研究河道类型、分离水岸边界、河滩地植被生长及大块卵石分布情况提供信息支持; 高精度的 DSM 数据替代了原有的人工测量高程, 可以快捷方便的获取横断面及纵断面高程变化, 用于计算水力半径及水力梯度。

表3 研究河段飞行控制参数

Table 3 UAV flight control parameters of the researched river reaches

参数	断面				
	卡赞营	博尔通古	安集海	大河沿子	二叉河
飞行高度/m	100	70	90	90	70
重叠率/%	90	90	90	90	90
飞行面积/m <sup>2</sup>	196035	56207	226547	192850	165346

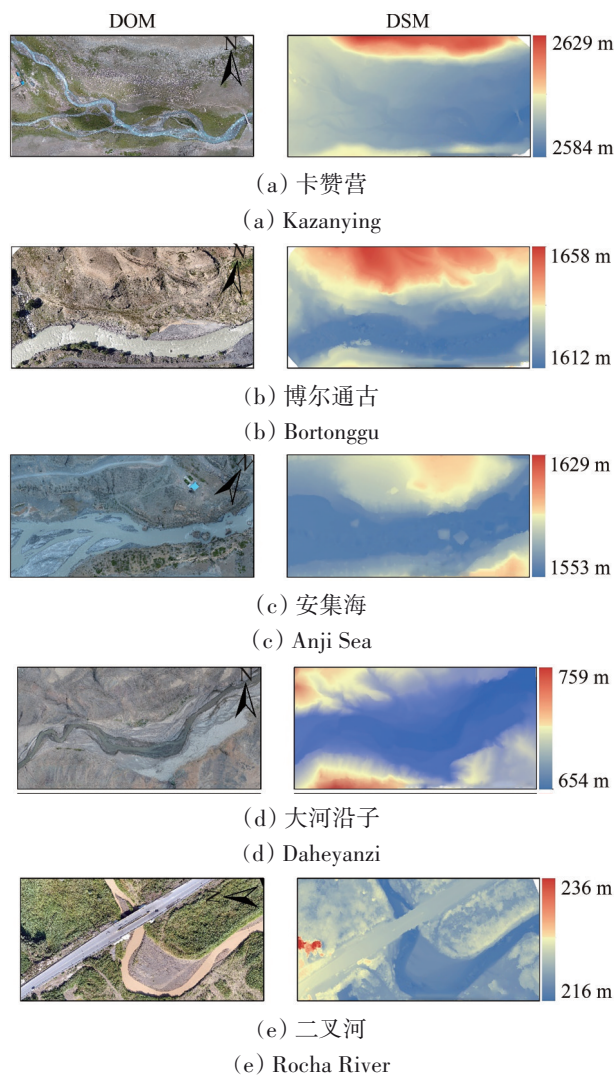


图3 研究河段 DOM 及 DSM 数据

Fig.3 DOM and DSM of the study river reaches

## 4 计算结果

### 4.1 水力梯度计算结果

水力梯度的计算对高程变化较为敏感, 而无人机数据对地形信息的准确记录可以捕捉河道纵断面的细微变化。本研究依次提取了研究河段纵向高程数值并计算其差值, 高程差与对应上、下游距离的比值将作为水力梯度结果。研究河段上、下游高程、水力梯度如表4所示。其中卡赞营断面、博尔通古断面更为靠近河流上游, 水力梯度较大; 安集海断面、大河沿子断面位于出山口下游, 水力梯度适中, 二叉河断面位于博尔塔拉河下游, 地势平缓, 水力梯度较小。

表4 研究河段水力梯度

Table 4 Hydraulic gradient of researched river reaches

参数	断面				
	卡赞营	博尔通古	安集海	大河沿子	二叉河
上游高程/m	660.82	2594.61	1562.32	1619.24	297.53
下游高程/m	659.37	2591.00	1561.14	1618.22	295.55
水力梯度	0.014	0.013	0.007	0.007	0.003

### 4.2 水力半径计算结果

水力半径反应了过流断面的输水能力, 与断面的形状密切相关。在本研究中, 实测的水下数据结合无人机航测的水上地形数据拼接得到完整的横断面形状, 如图4所示。其中阴影部分为实际过水断面。

由完整的断面形状 (图4) 可获取横断面面积与湿周。二者的比值将作为水力半径的结果, 如表5所示。

### 4.3 糙率取值结果

糙率反应了河道对水流的阻碍作用, 在现有研究中, 糙率的取值还是经验性的 (Beven 和 Binley, 1992; Simons 等, 1979)。在此次研究中, 依据无人机获取的研究区影像, 分析研究河段的周围地形、植被信息、河底卵石粒径、滩涂地植被生长情况和岸边护坡类型, 对照《天然河道糙率取值表》(赵振兴和何建京, 2010) 及随水文工作者的建议获取糙率取值。

所选断面均属山区中小型河流, 除河底卵石、岸生植被等对糙率的影响外, 人类活动同样是不

可忽略的重要因素。准格尔盆地内畜牧业发达，村镇级别存在大量散养牛羊。如图5所示，牛羊蹄印广泛存在于河滩地及河底，该现象在一定程度上会加大河床对水流的阻碍作用，因此在糙率取

值上比一般情况下偏大。综上所述，本研究中卡赞营断面、博尔通古断面、安集海断面、大河沿子断面及二叉河断面糙率取值分别为0.08、0.1、0.15、0.07和0.06。

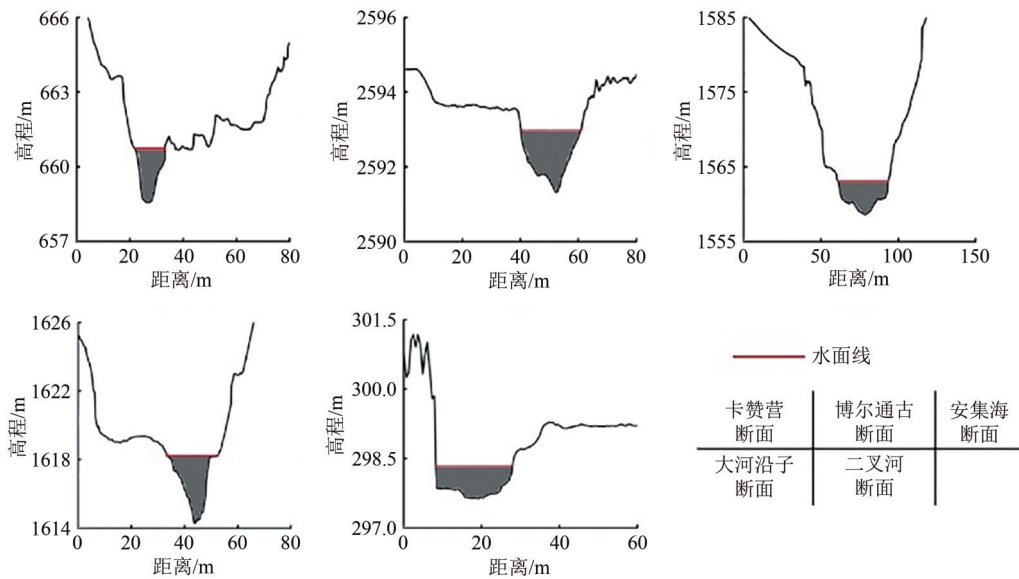


图4 研究河段横断面

Fig.4 Cross-sections of the researched river reaches

表5 研究河段横断面信息及水力半径计算结果

Table 5 Cross-section information and the results of the hydraulic radius about the researched river reaches

参数	断面				
	卡赞营	博尔通古	安集海	大河沿子	二叉河
面积/m <sup>2</sup>	19.99	28.37	96.69	15.33	10.75
湿周/m	21.25	16.97	35.45	12.97	20.34
水力半径/m	0.94	1.67	2.73	1.18	0.53

表6 河道流量计算结果

Table 6 Discharge of the researched river reaches

参数	断面				
	卡赞营	博尔通古	安集海	大河沿子	二叉河
水力梯度	0.014	0.013	0.007	0.007	0.003
水力半径/m	0.94	1.67	2.73	1.18	0.53
糙率	0.08	0.1	0.15	0.07	0.06
曼宁流量/(m <sup>3</sup> /s)	28.73	46.29	104.84	19.77	6.83



牲畜蹄印区

图5 河底及滩地牲畜蹄印

Fig.5 Hoof prints in the river bottom and beach

4.4 流量计算结果

曼宁公式估算流量所需的参数在4.1—4.3节中已分步取得。基于曼宁公式的无人机航空测量河道流量计算结果如表6所示。

4.5 精度分析结果

以实测流量的20%作为许可误差设置此次研究的上限与下限。表7记录了5个断面实测流量、曼宁流量、绝对误差和相对精度。由表7可知，5个断面的计算中，卡赞营、安集海、大河沿子、二叉河四个断面的相对精度均小于预设的20%精度标准，视为合格的计算结果，分别为10.58%、1.43%、3.98%、9.21%；但博尔通古断面曼宁流量超出许可误差28.48%。总体来说，结合了无人机数据的流量计算结果良好，平均合格率达到80%。

博尔通古断面超出许可误差的可能原因是糙率取值偏低。该河段两岸陡峭且水体浑浊，难以探查河底砾石情况；其次是曼宁公式作为一种经

验公式, 缺乏必要的物理意义和基础, 在河道流量的计算过程中产生难以预估的结果, 存在不稳定的误差 (贾界峰等, 2010)。

表7 实测流量与估算流量精度分析

Table 7 Validation of the calculated discharges

参数	断面				
	卡赞营	博尔通古	安集海	大河沿子	二叉河
实测流量/(m <sup>3</sup> /s)	25.98	36.03	106.36	19.01	7.53
曼宁流量/(m <sup>3</sup> /s)	28.73	46.29	104.84	19.77	6.83
绝对误差/(m <sup>3</sup> /s)	2.75	10.26	-1.52	0.76	-0.69
相对精度/%	10.58	28.48	1.43	3.98	9.21

RMSE用来反映实测径流与估算径流之间的偏差, 对极值较为敏感。经过计算, 该方法的RMSE为4.82 m<sup>3</sup>/s, 估算径流与实测径流之间的偏差较小, 优于同类研究的结果 (Sichangi等, 2016; Huang等, 2018)。在该研究的数据系列中, 极大值 (安集海断面) 与极小值 (二叉河断面) 在相差一个数量级的情况下, RMSE表现出的误差结果仍然是可接受的。

MPE同样是一个整体性的评价标准, 用来表示估测值是否会被过高或过低的估计。此次研究中MPE为0.065, 同样显示出该方法在径流估算上是可靠的, 与相似研究中精度等级相近 (Huang等, 2018)。MPE在计算上可以认为是相对精度的评价标准。由表7可知, 五个断面的合格率为80%, 但博尔通古断面的相对精度超出许可误差范围, 计算效果不理想, 其余四个断面的评价结果较好。在综合比较之下, MPE呈现出了0.065的结果, 说明整体效果是可靠的。

## 5 讨论

### 5.1 研究结果的国内外对比分析

近年来, 众多学者尝试利用各类遥感数据进行径流估算的相关研究并取得了大量的成果, 但将无人机航测数据直接和径流估算方法相结合的研究仍存在空白领域。Huang等 (2018) 利用多源遥感卫星数据和无人机获取的水面形状数据, 监测了雅江上游段2000年—2017年间的水面宽度、水深的变化, 进行了不同数据源下的径流估算, 估算结果的纳什效率系数在0.68—0.98, 对于高山峡谷区的河流径流估算具有一定的应用价值。该

研究中对于无人机的使用仅在于验证了卫星数据的精度及水面范围提取算法的可靠性, 并未直接参与到径流的估算中。本研究所提出的方法则充分发挥了无人机在数据获取上方便、快捷、高精度的特性, 深度挖掘航测数据中的地形信息并参与到径流计算, 论证了基于无人机航测数据的径流估算方法的可行性。Zhao等 (2017) 在生态需水的研究中利用无人机数据提出了快速反演河流大断面的方法, 与实测地形数据对比, 基于无人机数据获取的河道大断面均方误差小于0.25 cm。该研究为本文在河流断面的获取方法上提供以一定的参考, 但其仍未进行直接的径流估算。本文在该研究获取河道断面的基础上尝试了径流的估算, 扩展了无人机航测数据的应用类型。取得的径流估算结果在生态需水量、河流水资源规划管理和水灾害监测预报等方面都将得到应用。

### 5.2 研究方法的时空拓展

本研究所提方法的时空拓展性主要和利用卫星遥感开展径流估算的方法进行比较与说明。

在已有研究中, 众多学者论证了基于卫星影像获取序列径流的可行性, 证明了基于遥感信息的径流估算方法具有合理的时间拓展性 (Bjerklie等, 2015; Ling等, 2012)。但是卫星数据受制于自身传感器、拍摄区气象条件、重访周期等原因, 空间扩展性不足。特别是对于中、小型河流的径流估算, 空间拓展性主要受制于分辨率的不足 (Watson等, 2018; Huang等, 2018)。

由于无人机的控制距离局限在10 km内, 且每次采集数据都需要到达研究河段附近, 这些限制了本方法的时空拓展应用。但本研究利用无人机航测数据建立起高精度的3维河道模型, 探索了稳定的径流估算方法, 在此基础上如何连接到卫星数据, 完成长时间序列径流资料的监测是下一步研究的重点, 因此该方法存在了时间拓展上的可能性。无人机航测数据的采集不受云雾影像, 在空间上具有灵活、方便的优势, 高精度的数据特征可以精细的记录分析中、小型河流的河道及水流特征, 弥补了卫星数据在这方面的不足。

### 5.3 主要影响因素及敏感性分析

影响本研究精度的因素主要来自下垫面数据的获取和估算过程。

首先在研究区下垫面数据的获取上,即影响无人机航测数据精度的因素。在先前的研究中,通过将无人机航测影像与北京市延庆县水土保持园标准实验场内地面控制点的三维坐标相比,论证了该系列无人机在系统控制飞行下的水平误差为 $\pm 0.51$  cm,垂直误差为 $\pm 4.39$  cm,总体数据精度在厘米级别,在获取河道断面形状及分辨地面物体上具有优势(张纯斌等,2018)。影响合成影像精度的主要因素在于数据获取时的气象条件,例如在风力大于4级的条件下,由于飞行姿态的改变造成单张航片质量受损,用于合成影像的有效航片减少10%左右。同时在径流估算中,河滩植被对水流的阻碍作用、河床沙砾的粒径分布、水下信息探取仍是无人机航测影像难以解决的问题。

其次是曼宁公式本身对径流估算的影响因素及敏感参数。在已有成果中,均认为糙率的取值具有一定主观性,在水力梯度、水力半径可计算的条件下,糙率的取值对于结果的影响是主要的(Einstein, 1944; 钱宁等, 1959)。

#### 5.4 实测数据的必要性及水下地形测量的解决方法

本研究的实测资料主要是横断面的水下地形数据与流速。一方面,这些信息将被用来计算各断面的实际流量值,用以评价估算流量的精度;另一方面,由于目前无人机对于水下地形探测的不足,水体对探测信号的吸收作用(Kerr和Purkis, 2018),实测数据还将用来计算过流面积与水力半径。

但是实测地形数据并不会从根本上影响本研究的可行性。目前有多种方法支持着水下地形的模拟,这些方法拟合的水下断面同样可以计算过流面积与水力半径,进而参与到径流的估算中(刘昌明等, 2007; 李甲振等, 2018)。同时在中国主要的缺少资料地区,枯季河流呈现全干或半干状态,在该时间之内利用无人机对河道地形进行精确的记录,也可避免涉水测量的问题。

## 6 结论

为了解决缺少资料地区径流资料难获取的问题,扩展利用遥感影像在中、小河流上进行径流估算的研究,本研究尝试在无人机航空摄影数据的支持下对传统河道流量计算方法进行创新,提

出一种高效便捷的径流估算方法。该研究深度挖掘了无人机航测的地形数据,得到径流估算所需的参数,使无人机数据可直接参与径流估算。为评价该方法估算流量的可靠性,根据实测河道流量,选取了相对精度(RA)、均方根误差(RMSE)、平均百分比误差(MPE)作为误差评价方法,分别对单断面的径流估算及该方法的综合可靠性做出分析。结果表明,在相对精度的评价标准下,计算流量平均误差为10.74%,最小误差为1.43%,最大误差为28.48%,RMSE为4.82 m<sup>3</sup>/s, MPE为0.065,证明了该方法在所选断面上的可行性。本研究对于发挥无人机在流量测量上的优势是一次新的尝试,填补了通过遥感影像对中小河流径流估算领域的空白,为快速、方便的获取缺少资料地区河道径流数据提供一种新的方法。同时该方法的高效性及便携性对该地区开展精细化的水资源管理、水灾害监测及预报工作具有独特的优势,为合理开发利用该地区水资源、建设水生态文明等做出支持。

**志 谢** 此次野外研究的无人机数据获取平台采用了大疆公司的四旋翼无人机产品,航线规划及后期数据处理使用到Pix4D公司的产品,在此表示衷心的感谢。

#### 参考文献(References)

- Alsdorf D E and Lettenmaier D P. 2003. Tracking fresh water from space. *Science*, 301(5639): 1491-1494 [DOI: 10.1126/science.1089802]
- Bao Z X, Zhang J Y, Liu J F, Fu G B, Wang G Q, He R M, Yan X L, Jin J L and Liu H W. 2012. Comparison of regionalization approaches based on regression and similarity for predictions in ungauged catchments under multiple hydro-climatic conditions. *Journal of Hydrology*, 466-467: 37-46 [DOI: 10.1016/j.jhydrol.2012.07.048]
- Beven K and Binley A. 1992. The future of distributed models: model calibration and uncertainty prediction. *Hydrological Processes*, 6 (3): 279-298 [DOI: 10.1002/hyp.3360060305]
- Bjerklie D M, Ayotte J D and Cahillane M J. 2015. Simulating hydrologic response to climate change scenarios in four selected watersheds of New Hampshire. *Scientific Investigations Report*
- Einstein H A. 1944. *Bed-Load Transportation in Mountain Creek*. Clemson, S.C.: Greenville Sediment Load Laboratory
- Garambois P A and Monnier J. 2015. Inference of effective river properties from remotely sensed observations of water surface. *Ad-*



- vances in Water Resources, 79: 103-120 [DOI: 10.1016/j.advwaters.2015.02.007]
- Gleason C J and Smith L C. 2014. Toward global mapping of river discharge using satellite images and at-many-stations hydraulic geometry. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 111(13): 4788-4791 [DOI: 10.1073/pnas.1317606111]
- Harder P, Schirmer M, Pomeroy J and Helgason W. 2016. Accuracy of snow depth estimation in mountain and prairie environments by an unmanned aerial vehicle. *The Cryosphere*, 10(6): 2559-2571 [DOI: 10.5194/tc-10-2559-2016]
- Huang Q, Long D, Du M D, Zeng C, Qiao G, Li X D, Hou A Z and Hong Y. 2018. Discharge estimation in high-mountain regions with improved methods using multisource remote sensing: a case study of the Upper Brahmaputra River. *Remote Sensing of Environment*, 219: 115-134 [DOI: 10.1016/j.rse.2018.10.008]
- Jia J F, Zhao J W and Chen K X. 2010. Manning's formula and error analysis. *Shanxi Architecture*, 36(7): 313-314 (贾界峰, 赵井卫, 陈客贤). 2010. 曼宁公式及其误差分析. *山西建筑*, 36(7): 313-314
- Kerr J M and Purkis S. 2018. An algorithm for optically-deriving water depth from multispectral imagery in coral reef landscapes in the absence of ground-truth data. *Remote Sensing of Environment*, 210: 307-324 [DOI: 10.1016/j.rse.2018.03.024]
- Lewin J and Gibbard P L. 2010. Quaternary river terraces in England: forms, sediments and processes. *Geomorphology*, 120(3/4): 293-311 [DOI: 10.1016/j.geomorph.2010.04.002]
- Li J Z, Guo X L, Gong T L, Wang J, Wang T and Li H. 2018. A method estimating natural runoff in regions with none or less data. *Journal of Hydraulic Engineering*, 49(11): 1420-1428 (李甲振, 郭新蕾, 巩同梁, 王静, 王涛, 李慧). 2018. 无资料或少资料区河流量监测与定量反演. *水利学报*, 49(11): 1420-1428 [DOI: 10.13243/j.cnki.slxb.20180149]
- Ling F, Cai X B, Li W B, Xiao F, Li X D and Du Y. 2012. Monitoring river discharge with remotely sensed imagery using river island area as an indicator. *Journal of Applied Remote Sensing*, 6(1): 063564 [DOI: 10.1117/1.JRS.6.063564]
- Liu C M, Men B H and Song J X. 2007. Ecological hydraulic radius method for estimating ecological water demand in river. *Progress in Natural Science*, 17(1): 42-48 (刘昌明, 门宝辉, 宋进喜). 2007. 河道内生态需水量估算的生态水力半径法. *自然科学进展*, 17(1): 42-48 [DOI: 10.3321/j.issn:1002-008X.2007.01.007]
- Neitzel F and Klonowski J. 2011. Mobile 3D mapping with a low-cost UAV system. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XXXVIII-1/C22: 39-44 [DOI: 10.5194/isprsarchives-XXXVIII-1-C22-39-2011]
- Oudin L, Andréassian V, Perrin C, Michel C and Le Moine N. 2008. Spatial proximity, physical similarity, regression and ungauged catchments: a comparison of regionalization approaches based on 913 French catchments. *Water Resources Research*, 44(3): W03413 [DOI: 10.1029/2007WR006240]
- Qian N, Hong R J, Mai Q W and Bi C F. 1959. Channel roughness of Lower Yellow River. *Journal of Sediment Research*, 4(1): 3-17 (钱宁, 洪柔嘉, 麦乔威, 毕慈芬). 1959. 黄河下游的糙率问题. *泥沙研究*, 4(1): 3-17
- Rui X F. 2004. *Hydrology Principle*. Beijing: China Water and Power Press: 9-12 (芮孝芳). 2004. *水文学原理*. 北京: 中国水利水电出版社: 9-12
- Sichangi A W, Wang L, Yang K, Chen D L, Wang Z J, Li X P, Zhou J, Liu W B and Kuria D. 2016. Estimating continental river basin discharges using multiple remote sensing data sets. *Remote Sensing of Environment*, 179: 36-53 [DOI: 10.1016/j.rse.2016.03.019]
- Simons D B, Li R M and Al-Shaikh-Ali K S. 1979. Flow resistance in cobble and boulder riverbeds. *Journal of the Hydraulics Division*, 105(5): 477-488
- Sivapalan M, Takeuchi K, Franks S W, Gupta V K, Karambiri H, Lakshmi V, Liang X, McDonnell J J, Mendiondo E M, O'Connell P E, Oki T, Pomeroy J W, Schertzer D, Uhlenbrook S and Zehe E. 2003. IAHS Decade on Predictions in Ungauged Basins (PUB), 2003~2012: shaping an exciting future for the hydrological sciences. *Hydrological Sciences Journal*, 48(6): 857-880 [DOI: 10.1623/hysj.48.6.857.51421]
- Sun D P and Ding X Q. 2009. *Hydraulics*. Zhengzhou: The Yellow River Water Conservancy Press: 175-177 (孙东坡, 丁新求). 2009. *水力学*. 郑州: 黄河水利出版社: 175-177
- Wang S S, Zhou F Q and Russell H. 2017. Estimating snow mass and Peak River flows for the Mackenzie River basin using GRACE satellite observations. *Remote Sensing*, 9(3): 256 [DOI: 10.3390/rs9030256]
- Watson C S, King O, Miles E S and Quincey D J. 2018. Optimising NDWI supraglacial pond classification on Himalayan debris-covered glaciers. *Remote Sensing of Environment*, 217: 414-425 [DOI: 10.1016/j.rse.2018.08.020]
- Xiang H T and Tian L. 2011. Development of a low-cost agricultural remote sensing system based on an autonomous unmanned aerial vehicle (UAV). *Biosystems Engineering*, 108(2): 174-190 [DOI: 10.1016/j.biosystemseng.2010.11.010]
- Xie Y B. 2009. *Water Information and Technology*. Beijing: China Water and Power Press: 69-72 (谢悦波). 2009. *水信息技术*. 北京: 中国水利水电出版社: 69-72
- Yang S T. 2012. *Ecohydrological Models: Introduction and Application*. Beijing: Science Press: 1-17 (杨胜天). 2012. *生态水文模型与应用*. 北京: 科学出版社: 1-17
- Young A R. 2006. Stream flow simulation within UK ungauged catchments using a daily rainfall-runoff model. *Journal of Hydrology*, 320(1/2): 155-172 [DOI: 10.1016/j.jhydrol.2005.07.017]
- Zhang C B, Yang S T, Zhao C S, Lou H Z, Zhang Y C, Bai J, Wang Z W, Guan Y B and Zhang Y. 2018. Topographic data accuracy verification of small consumer UAV. *Journal of Remote Sensing*, 22

- (1): 185-195 (张纯斌, 杨胜天, 赵长森, 姜和震, 张亦弛, 白娟, 王志伟, 管亚兵, 张远). 2018. 小型消费级无人机地形数据精度验证. 遥感学报, 22(1): 185-195 [DOI: 10.11834/jrs.20186483]
- Zhao C S, Zhang C B, Yang S T, Liu C M, Xiang H, Sun Y, Yang Z Y, Zhang Y, Yu X Y, Shao N F and Yu Q. 2017. Calculating e-flow using UAV and ground monitoring. Journal of Hydrology, 552: 351-365 [DOI: 10.1016/j.jhydrol.2017.06.047]
- Zhao Z X and He J J. 2010. Hydraulics. 2nd ed. Beijing: TsingHua University Press: 176-177 (赵振兴, 何建京. 2010. 水力学. 3版. 北京: 清华大学出版社: 176-177)

## River flow estimation method based on UAV aerial photogrammetry

YANG Shengtian<sup>1</sup>, WANG Pengfei<sup>1</sup>, WANG Juan<sup>2</sup>, LOU Hezhen<sup>1</sup>, GONG Tongliang<sup>3</sup>

1. College of Water Science, Beijing Normal University, Beijing 100875, China;
2. Faculty of Geographical Science, Beijing Normal University, Beijing 100875, China;
3. Water Resources Department of Tibet, Lhasa 850000, China

**Abstract:** River discharge is the basis for water resources and ecological protection, and it is an essential part of the hydrological cycle. However, some large areas in the world lack hydrological data. How to obtain river hydrological data conveniently and accurately remains a hot topic in the prediction of ungauged basins, especially in small and medium rivers. Solving the problem of data acquisition in areas lacking traditional hydrological data is beneficial for the management of water resources and rapid prediction of water disasters. Remote sensing technology, which is a non-contact data acquisition method, has been applied in many fields. This technology breaks the limits of space in acquiring river discharge, especially in areas where obtaining basic data is difficult, and has become a preferred method of data acquisition.

Therefore, this study tries to take advantage of low-altitude remote sensing in obtaining terrain data. The study combines high-density terrain data with classical Manning-Strickler formula to estimate the river discharge. This study is based on representative rivers in the Junggar Basin, which is the second largest inland basin in China. The Kazanying section, Bortonggu section, Anji Sea section, Daheyanzi section, and Rocha River section are selected as study sections. Combined with the Manning-Strickler formula, Digital Orthophoto Map (DOM) and Digital Surface Model (DSM) image data obtained by an Unmanned Aerial Vehicle (UAV) are used to calculate the theoretical river discharge. The Manning-Strickler formula needs four parameters to calculate discharge: cross-section area, hydraulic radius, hydraulic gradient, and roughness. Cross-section area and hydraulic radius are extracted in cross-section, which is combined with DSM and measured data; hydraulic radius reflects the slope of the river, which is calculated with DSM and DOM in Arc GIS; roughness, an empirical value that measures the level of obstruction of water flow in the river bed and embankment, is obtained by using DOM. On the basis of the values of these parameters, we calculated the discharge in Kazanying section, Bortonggu section, Anji Sea section, Daheyanzi section, and Rocha River section. Their calculated values are 28.73 m<sup>3</sup>/s, 46.29 m<sup>3</sup>/s, 104.84 m<sup>3</sup>/s, 19.77 m<sup>3</sup>/s, and 6.83 m<sup>3</sup>/s, respectively. To verify the effectiveness and accuracy of the low-altitude remote sensing method in river flow calculation, we used traditional measurements to record the measured values of river discharge. This study selected 20% of the allowable error as the standard of Relative Accuracy (RA) and used the measured value to evaluate the calculated value. Root Mean Squared Error (RMSE) and Mean Percentage Error (MPE) are important methods of evaluating accuracy, which are used as criteria for evaluating overall reliability.

According to the established evaluation method, the results in the five sections show that the average error is 10.74%, the maximum value is 28.48%, the minimum value is 1.43%, the RMSE is 4.82 m<sup>3</sup>/s, and the MPE is 0.065. The reason why the maximum relative error occurs in the Bortonggu section is because the value of roughness is too small. The results of the accuracy analysis indicate that the method used in this study is reasonable and has a well applicability in the study area. Moreover, the results prove that the classic Manning-Strickler formula can be combined with low-altitude remote sensing data.

To resolve the problem of river discharge monitoring in ungauged areas, this study developed a new method that integrates classic river discharge algorithms with low-altitude remote sensing. The advantages of UAV are fully exploited in this study, and the use of UAV complements the research gap in the acquisition of small and medium-sized river discharge through remote sensing data. Research results have significant values for the application of flow simulation methods in ungauged regions and also provide a new solution for rapid and convenient collection of hydrological information. This study has unique advantages for water resources management and water disaster monitoring in key areas.

**Key words:** UAV, Manning-Strickler formula, low-altitude remote sensing, river discharge calculation, accuracy analysis, ungauged basins

**Supported by** National Natural Science Foundation of China (No. U1812401, 41801334, U1303381, 41261090); Open Research Fund Program of State Key Laboratory of Hydrosience and Engineering (No. sklhse-2021-A-04)