

基于多源遥感数据的河流断面提取进展与展望

薛源^{1,2,3}, 覃超^{1,2,3}, 徐梦珍^{1,2,3}, 傅旭东^{1,2,3}, 李丹⁴,
吴保生^{1,2,3}, 王光谦^{1,2,3}

1. 清华大学 水圈科学与水利工程全国重点实验室, 北京 100084;

2. 清华大学 水利部水圈科学重点实验室, 北京 100084;

3. 清华大学 水利水电工程系, 北京 100084;

4. 中国煤炭科工集团有限公司 煤炭科学研究总院有限公司, 应急科学研究院 北京 100013

摘要: 河流断面形态是开展河流水文过程、物质通量等研究的基础。断面形态的获取多基于现场量测, 制约了难以抵达地区的断面获取及全流域、大范围河段的断面提取。随着多源遥感观测及水面、水下无人观测等智能技术的发展, 融合有限的地面观测数据, 建立与河流特征相适应的多源遥感自动化提取方法, 成为获取河流断面形态的重要途径和新方向。本文系统梳理了近20年来河流断面形态提取的相关研究进展, 提出并展望了适用于缺资料地区或大范围流域断面形态提取的“空—天—地”一体化观测方案, 结合技术进步, 探讨了方案的可行性及未来发展趋势。

关键词: 河流断面形态, 多源遥感, “空—天—地”一体化观测, 自动提取

中图分类号: TV211/P2

引用格式: 薛源, 覃超, 徐梦珍, 傅旭东, 李丹, 吴保生, 王光谦. 2024. 基于多源遥感数据的河流断面提取进展与展望. 遥感学报, 28(11): 2719–2738

Xue Y, Qin C, Xu M Z, Fu X D, Li D, Wu B S and Wang G Q. 2024. Progress and Prospects in River Cross Section Extraction Based on Multi-Source Multisource Remote Sensing. National Remote Sensing Bulletin, 28(11): 2719–2738 [DOI:10.11834/jrs.20243315]

1 引言

河流水系, 自江河源区发育以一定的边界形态承载着水流和物质输移, 是水文循环的主要路径, 也是物质进入湖泊、海洋的重要通道。河流边界较易通过断面形态(横断面、纵剖面)描述(郑珊等, 2014), 是研究、描述河流形态及类型、河床演变的关键参数(王彦君等, 2020), 也是开展流域水文水动力过程、物质通量研究的基础(胡春宏等, 2022; Huai等, 2021; 倪晋仁, 2016)。通过关键河段断面或多个断面的组合, 即可开展相关研究甚至构建河道地形, 其关键参数及代表性应用见表1。目前, 对河流断面的提取, 仍多基于现场量测(姚檀栋等, 2022), 导致地势险要、

难以到达的江河源区、山区、峡谷或自然灾害频发区等, 成为典型的缺资料地区。随着遥感技术的发展, 利用遥感技术提取河流表面信息、断面形态、河谷地形等, 已在水资源监测、环境保护、自然灾害预报等领域得到广泛应用(Kucharczyk和Hugenholtz, 2021; 李丹等, 2020)。利用多源遥感优势, 依据河流实际情况, 发展水下、低空遥感及天基卫星遥感与现场测量相结合的观测技术, 直接提取缺资料地区河流断面, 或提取反应断面形态的关键参数概化、简化复杂断面, 可大幅提升数据丰度, 但现有提取方法未见梳理、提取精度和效果缺乏评估。

以中国知网平台和Web of Science核心集合并源文献数据库, 分别以与主题相关的“河道地形”、

收稿日期: 2023-07-24; 预印本: 2024-01-03

基金项目: 国家自然科学基金联合基金(编号: U2243218, U2243222); 清华大学水沙科学与水利水电工程国家重点实验室课题(编号: sklhse-TD-2024-E01, sklhse-2023-B-03, sklhse-2024-B-01)

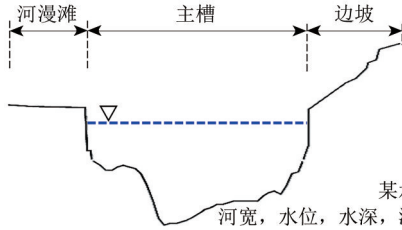
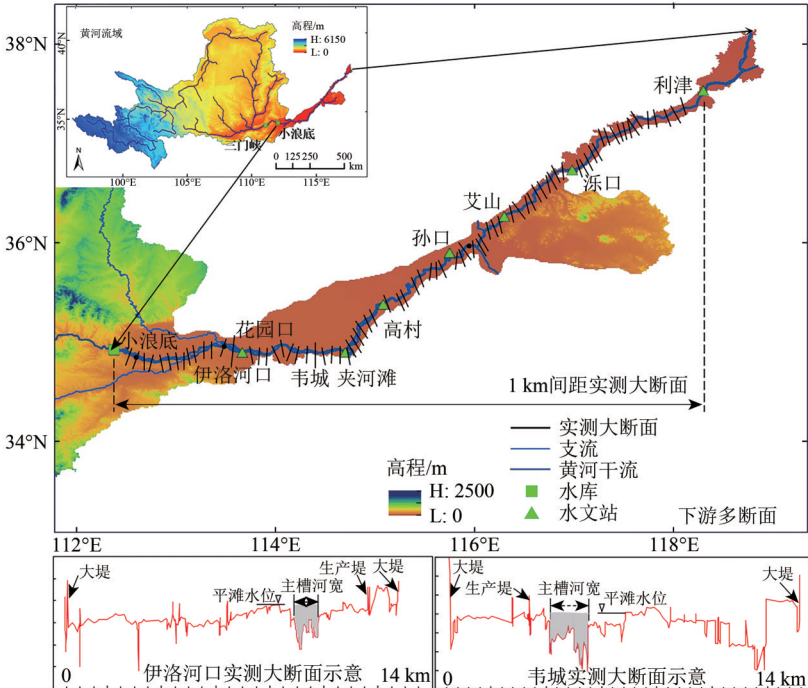
第一作者简介: 薛源, 研究方向为遥感水文学、环境遥感、河流动力学。E-mail: xueyuan_thu@163.com

通信作者简介: 覃超, 研究方向为河流动力学、水土保持。E-mail: glqinchao@nwsuaf.edu.cn

“断面形态”、“测绘”、“遥感”、“river channel topography”、“river cross section”、“remote sensing”为中、英文主题词，检索2000年以来的4700余篇文献。文献近5年引用次数平均超万次/年，热度居高不下、影响力越来越大。在涉及河道地形测

绘、河流断面提取的强相关文献中，超半数应用遥感技术（图1），足见基于遥感数据观测提取这类河流几何信息正成为主要方法，应开展综述研究并展望未来发展方向。

表1 断面类型及应用简介
Table 1 Types of cross sections and applications

类型	断面关键参数及示意	应用
单一断面	 <p>某水文站实测断面 河宽，水位，水深，湿周，过水面积</p>	断面河相关系， 阻力估算(Ma等,2022)， 流量估算(Huang等,2018a)
多断面	 <p>下游多断面</p>	河道冲淤计算 (韩其为和何明民,1987)， 河势(张红武等,2011)、 河道演变,防洪, 沿程河相关系 (Gleason和Smith,2014)， 多断面河相关系 (Qin等,2021)， 河道地形重构

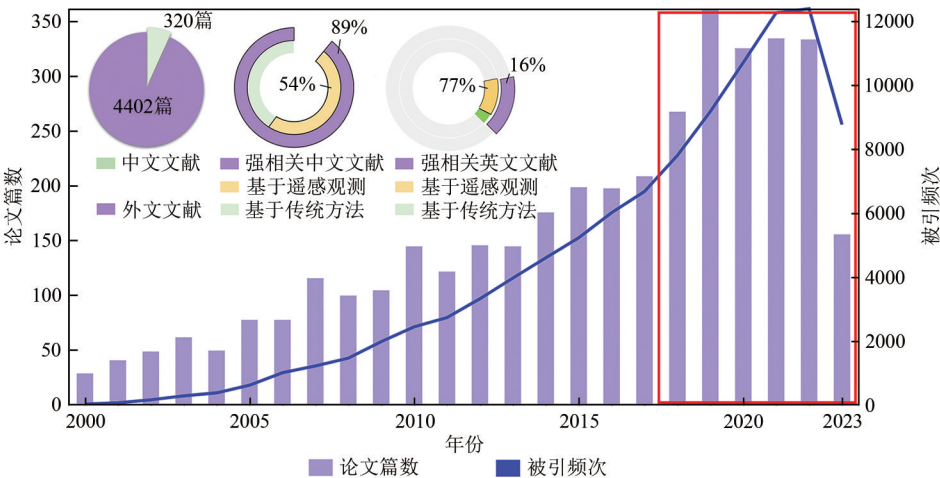


图1 河流断面及河道地形提取相关文献计量分析
Fig. 1 Bibliometric analysis of river cross section extraction and river topography

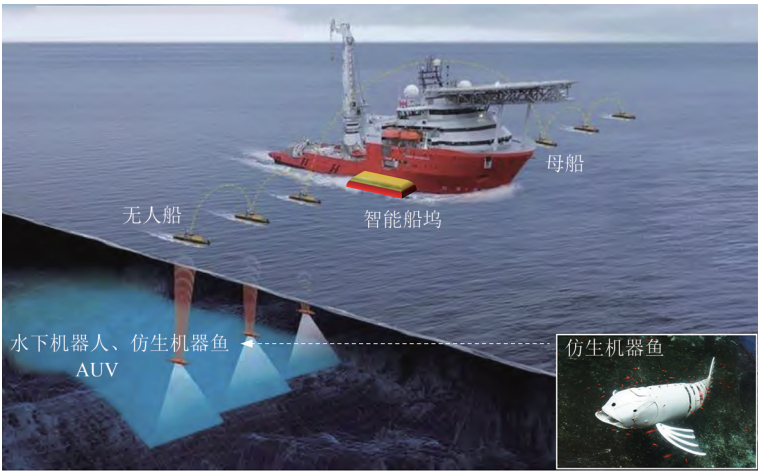
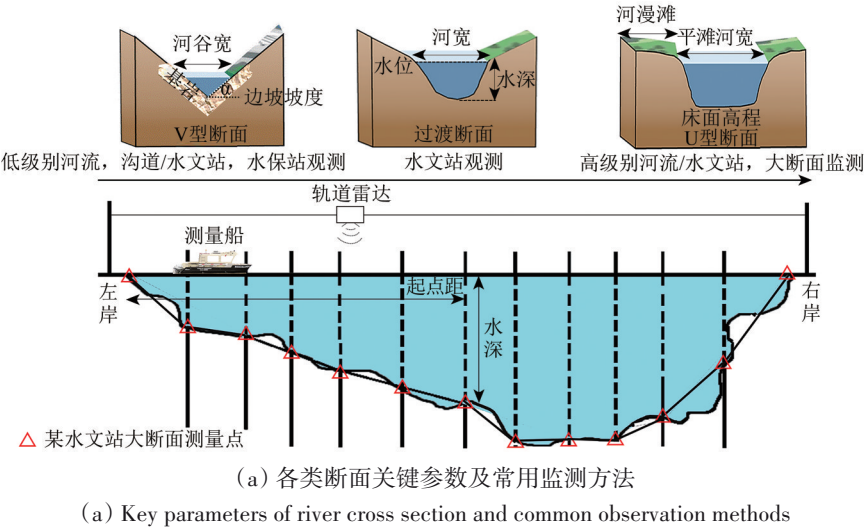
本文梳理了近 20 年的研究成果，综述了基于水下、水面无人智能观测，低空无人机及多源卫星观测与现场量测相结合的断面提取方法，评估了方法效果。文中提及的“空一地”协同观测，即如今较常见的水下、水面、低空遥感与传统现场量测的组合；“空一天一地”协同观测是“空一地”协同观测面向流域大尺度的发展，即与多源卫星遥感观测的组合。本文为基于“空一天一地”协同观测技术开展流域尺度观测，提供可借鉴的规划方案和评价标准，为基于多源遥感数据提取缺资料地区连续变化的河流断面形态提供方法参考和发展思路。

2 现场量测提取河流断面概述

河流断面的现场量测，主要基于多种测量仪器量测目标断面的关键参数，包含直接测量和间

接测量两种方法 (Chanson, 2004)。

直接测量法多选取施测断面上的若干测点，通过 GPS、激光测距仪、船载测深仪等设备，测量测点上用于绘制断面形态的关键参数，如河岸起点距、水深，获得断面形态 (Macdonell 等, 2023; Rowland 等, 2012)。这类方法所得断面精度高、易实施，被水文站、水保站等传统观测站点广泛采用 (图 2 (a))。近年来，测量设备不断进步，从传统的测深杆 (小流速)、铅鱼 (大流速) 测量，发展为测量船搭载多波束声呐、浅地层剖面仪等 (Powers 等, 2018; 阳凡林 等, 2008)；同时，流速、水面宽度和水位的测量现多使用轨道雷达；床面形态或水下地形的测量也可逐步由无人船、水下机器人 AUV (Autonomous Underwater Vehicle)、仿生机器鱼 (康帅 等, 2023; Gorma 等, 2021) 等智能设备完成 (图 2 (b))，测量能力和操作性均快速提升。



(b) 无人船—水下机器人编队

(b) Formation measurement of unmanned Boat-AUV

图 2 水文站测量断面及无人船—水下机器人编队遥感测量概念

Fig. 2 Hydrological station measurement cross sections and concept of unmanned Boat-AUV remote sensing measurement

间接测量法指通过少量较易获得的参数,如水位、流速等,根据一定假设或经验公式,如河相关式式(Qin等,2021)、谢才公式(Bjerklie等,2005)、曼宁公式(Ferguson,2010)、水流阻力公式(Ma等,2022)及其变式等,推求水深分布或断面宽、深信息。

断面河相关式:

$$\begin{cases} w = aQ^b \\ h = cQ^d \\ v = eQ^f \end{cases} \quad (1)$$

式中, w 为河宽, h 为水深, v 为流速。

谢才公式:

$$\begin{cases} v = C \sqrt{R \cdot J} \\ R = A/\chi \end{cases} \quad (2)$$

式中, C 为谢才系数,可由曼宁公式估算, A 为断面面积, χ 为断面湿周。

水流阻力公式:

$$h = (C_f/gS)^{\frac{1}{3}} \cdot Q^{\frac{2}{3}} \quad (3)$$

式中, C_f 为阻力系数。

例如沿断面方向,等间距的选取若干测点,通过流速仪(粒子图像测速仪、多普勒测速仪等)测量流速分布,进而建立流速—水深经验关系(Yang等,2019; Kim等,2008; 卢金友等,2005)获得水深;或通过PIV(Particle Image Velocimetry)

观测等方法建立流场,推求水流的紊动结构,根据湍流指数估算水深(Chadwick等,2023; Detert等,2017; Johnson和Cowen,2016)。结合水深分布、GPS、水位计位置、高程及水位数据,绘制浅水河流水下地形或断面。

总体上,现场量测受交通、设备限制较大,人工成本高,即便有具备较先进技术的AUV配合,也难以满足山区河流的量测需求。间接法虽常作为直接法的补充,成本较低,但多依赖经验,得到的断面形态也较为简单、规则,且精度浮动大、可靠性、普适性均较差。

3 多源遥感数据提取河流断面

江河源区、高山深涧等人类难以抵达,或建立、维护测站成本极高地区,几乎无法通过现场量测提取河流断面,因此基于多源遥感数据提取河流断面形态展现出优势。多类已发布的DEM(Digital Elevation Model)数据(曹斌等,2018),基于星载、机载雷达(梁栋等,2022; Li等,2016)、轨道雷达(陈荣和郑永伟,2018)、无人船、AUV生成的地形数据及其他卫星产品,常用于河流断面关键参数的提取。提取方法包括从DEM等地形数据中提取和基于关键参数概化断面形态两种,方法简介见图3。

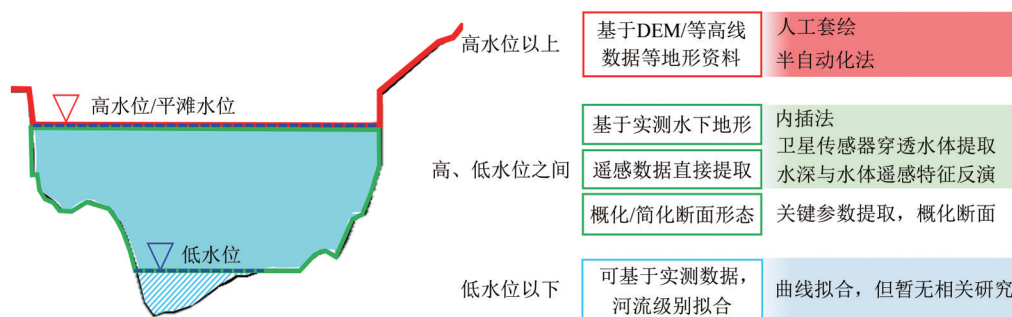


图3 基于多源遥感数据提取河流断面方法简介

Fig. 3 Brief introduction of river cross section extraction methods based on multi-source remote sensing

3.1 基于地形数据提取河流断面

3.1.1 基于DEM数据提取河流断面

DEM数据种类繁多(表2),多通过星载或机载激光雷达LiDAR(Light Detection And Ranging)、合成孔径雷达SAR(Synthetic Aperture Radar)以及光学传感器立体像对生成(Lakshmi和Yarrakula,2019;李振洪等,2018)。由于DEM数据具备全

球覆盖的特点,基于DEM数据提取河流断面拥有获得任意河流、任意断面的潜力,也是目前最常用的方法。方法常使用CAD、ArcGIS、ENVI等软件,通过河流边界、河流中心线或水流方向线数据,从DEM中人工套绘或半自动量取、输出河流断面。如基于DEM识别水流方向的原理(Wu等,2019)建立垂直于水流方向,即断面方向的自动识别算法,读取断面方向上等间距点的高程,得

到断面形态 (Petikas 等, 2020); 与之相似的, 以河流中心线替换水流方向线提取断面 (Verma 等, 2021); 或基于米级高分辨率 DEM 数据, 分析河谷谷底与谷坡坡度, 按坡度突变点提取河谷轮廓, 再依据河流中心线或水流方向线, 自动读取河谷断面形态 (Zhao 等, 2019)。方法示意图 4, 其

中水流方向线的提取, 常用于表征线状河流, 赋予拓扑关系后, 即可建立传统 DEM 河网 (Tarboton, 1997), 发展至今已较为成熟, 不依赖高分辨率数据, 较河谷轮廓线、河流中心线的提取适用面更广, 但精度稍差。

表 2 最新开源 DEM 数据简介
Table 2 Overview of the latest free DEM data

名称	发布时间	分辨率/m	精度/m	范围	荷载/技术	下载地址
GDEM_2022 (Zhang 等, 2022a)	2022 年	90	10	全球	GEBCO_2021& SRTM DEM v4.1; InSAR	https://cloud.tsinghua.edu.cn/d/695ed43696564904980f
ALOS World 3D v3.2 (Takaku 等, 2016)	2021 年	12.5/30	5	全球	光学传感器, SAR	https://www.eorc.jaxa.jp/ALOS/en/aw3d30/index.htm ; https://search.asf.alaska.edu/#
ASTER GDEM v3 (Abrams 和 Crippen, 2019)	2019 年	30	12.1	83°N—83°S	光学传感器	https://lpdaac.usgs.gov/products/astgtmv003
SRTM DEM v4.1 (Jarvis 等, 2008)	2019 年	30/90	10	60°N—56°S	InSAR	https://lpdaac.usgs.gov/products/nasadem_hgtv001
REMA v1.1 (Howat 等, 2019)	2018 年	2/8	1	南极	光学传感器	https://data.pgc.umn.edu/elev/dem/setsm/REMA/mosaic/v1.1/8m
TanDEM-X v1.0 (李振洪 等, 2018)	2016 年	12/30/90	4	全球	InSAR	https://geoservice.dlr.de/web/dataguide/tdm90



图 4 基于 DEM 自动提取河流断面方法示意
Fig. 4 Schematic of automatic river cross section extraction method based on DEM data

总体来说, 这些方法可视化程度高、直观, 但需依托软件对目标断面进行人工设置、调参及修正。提取精度受限于 DEM 数据的分辨率, 如表 2 中 DEM 数据精度多劣于 4 m, 在高原、山地更差, 难以提取细小河流。同时, 从 DEM 数据中读取河床高程 (Hou 等, 2022), 忽略了水体难以被

雷达波、可见光穿透的事实 (吴桂平和刘元波, 2016), 导致此类方法在常流水河流中提取的断面, 不能反映真实、完整的河床形态。

3.1.2 基于水下地形数据提取河流断面
水下地形指水面以下的河床形态, 获得较准

确的水下地形数据，与现有DEM反映的水面以上地形结合，即可提取高精度的河流断面。基于多源遥感观测获得河流水下地形的方法与获取浅海、湖泊地形的方 法（Luo 等，2022；Gonçalves 和 Henriques，2015）类似，需借助一定的现场量测。如利用有限的实测河床高程数据结合地面 DEM，基于不规则三角形内插法 TIN（Triangulated Irregular Network）等插值方法（Qin 和 Dai，2023；Zhang 等，2016），获得局部河段水下地形（Sarhadi 等，2012），该方法因加入了实测床面数据，拟合、修正了仅反映水面高程的 DEM 数据，提升了断面提取的精度，常用于解决工程实际问题（Gonzalez 等，2023；Ibrahim 等，2023）。如表 1 所示，工程上进行黄河下游冲淤计算时，常使用 1 km 间隔实测断面与开源 DEM 数据的 TIN 河道形态；又如，基于可移动轨道的多视点立体运动结构 SFM（Structure From Motion with Multi View Stereo），测绘清水、缓流条件下的河床形态（Chen 等，2022；Zhang 等，2022b）；还可以利用无人机机载 LiDAR（徐梦溪 等，2021）穿透力强等优点，在低水位时通过激光辐射传输模型（Monfort 和 Lippmann，2011；Collin 等，2010）、多波段对数模型（Pacheco 等，2015）等，反演并提取局部河段的断面形态（秦海明 等，2016）。在提取大范围流域、河宽相

对较大的河流断面形态时，可基于河流枯水期的卫星数据或河流浅水、清水时期建立的经验关系（Brêda 等，2019；Legleiter 和 Harrison，2019），如基于光学卫星数据结合少量实测数据，建立水深与光谱、水体中物质的浓度、水体温度（常使用热红外遥感数据表征或基于统计回归方法反演获得）的相关关系，反演浅水地形（祝新明 等，2021；Fassoni-Andrade 等，2020；方勇 等，2020；Teodoro 等，2010）；或基于单一、多源 SAR 卫星数据分析水流重力波的折射效应（Alpers 和 Hennings，1984）和浅水效应（Lee 等，2018），结合实测数据反演水深，进而获得水下地形（Huang 等，2022；Musa 等，2015）；可在河流的枯水期，通过高分辨率 LiDAR、SAR 卫星数据如 ICESat-2 或 TerraSAR-X、TanDEM-X 等，建立河道 DEM，进而提取断面形态（Tian 和 Shan，2021；Zwenzner 和 Voigt，2009）；还可以基于上述方法取得的有限水下地形，按有限元思路输入一维、二维水动力学模型中模拟河床的起伏变化，提取断面形态（Xiao 等，2022；Cobby 等，2003）。

目前，现有方法（表 3）仅适用于场景简单、水深较浅、水质清澈、流速较小或河床干涸河段，应用范围有限、尚未验证推广性。

表 3 常用河流水下地形提取方法及对比
Table 3 Common methods and comparison for river submerged topography extraction

数据源	提取方法	精度	最大水下测深	应用范围
河床高程&常用 DEM 数据	TIN	优于开源 DEM	依赖河床高程数据及 DEM	具备河床高程数据河段
光学传感器、机载 LiDAR、 Green-LiDAR 数据	立体摄影、直接观测	厘米级	2.3 m(穿透)(MacDonell 等,2023) 7.5 m(反演)(Legleiter 和 Fosness,2019)	间歇性河流河干期； 水质较清,流速较小
无人船、AUV 声学测绘	直接观测	厘米级	—	流速较小、深水段
光学、SAR 卫星数据	直接观测、反演	分米级	2 m*(穿透)(Abdallah 等,2013) 20 m(反演)(Kabiri,2023)	间歇性河流河干期； 清水,河口,水库,静水

注：*测深可靠性约 53%。

3.2 提取断面关键参数概化断面形态

缺资料地区常路险水急，实测数据匮乏，河流水下地形不论通过何种方式均较难获取，其他高分辨率数据也少之又少，难以提取断面形态。为应对这一难题，可参考水文站测量断面时选取若干点测量并代表断面形态以及分布式水文模型概化断面形态的思路（图 2（a）），基于一定的假设简化断面形态，减少提取所需数据量（Huang

等，2020；王光谦 等，2005；Yang 等，2002）。
一般来说，河流断面自江河源区的“V”型逐步演化为下游的“U”型（钱宁 等，1987），因此梯形（表 4）是常用的断面概化形状（三角形为底宽为 0 的梯形；矩形为上下底相等的梯形），其断面关键参数对应为河宽、水深（Huang 等，2018a）。其中，水深可由水位求得，故关键参数转化为了河宽与水位。常用的概化断面形状及优劣见表 4。

表4 常见概化断面形状简介
Table 4 Commonly used generalized cross section morphology

断面形状	示意图	优点	缺点
一般梯形 (Huang 等, 2018a)		数据需求量少;推广性强; 为一维水文模型、水动力学模型 提供河道边界条件	忽略边岸、 河床的高低起伏; 忽略最低水位以下 断面形态
复合梯形 (Legleiter 等, 2014; 杜献梅 等, 2013)		适用大江大河、水库、湖泊; 多源遥感获取 A-B 点对; 多期遥感数据叠加可得	较难推广至细小河流; 参数提取算法较复杂; 忽略最低水位以下 断面形态; 实测数据需求量大
抛物线形 (Easa, 2016; Lawrence, 2007)		常用于河流工程模型;较真实的 反应断面形态的起伏变化; 可反应最低水位以下断面形态;	实测数据需求量大; 常以 DEM 数据代替 水下地形
多形状组合		可反应最低水位以下断面形态; 为二维水文模型、水动力学模型 提供河道边界条件	断面形态对称、较简单; 实测数据需求量大

3.2.1 基于多源遥感数据的河宽提取

目前, 暂无直接从遥感数据中提取缺资料地区河宽的方法, 需先识别河流表面信息, 再从中提取河宽。识别遥感数据中的河流表面信息的思路源于土地利用/覆盖制图研究(王卷乐 等, 2023), 主要分两步, 提取水体表面信息和去除水体中的非河流噪声(水库、湿地、水塘等非河流水体)(李丹 等, 2020)。数据源主要为雷达卫星数据和光学卫星数据两类, 雷达卫星数据幅宽大、不易受云雨雾气干扰, 但波段有限、噪点较多, 在山区极易与非河流地物混淆, 也暂无大尺度河流产品, 多用于监测局部地区洪水和其他数据源提取结果的补充, 因此涌现出了多种融合算法, 融合 SAR 与多光谱/全色数据以发挥 SAR 数据优势(Kulkarni 和 Rege, 2020)。基于雷达卫星数据的河流表面信息识别方法分为阈值分割法和模式分类法。光学卫星数据时间序列长、光谱信息丰富, 较 SAR 数据更直观, 因而应用广泛, 较多作为数据融合的本底。识别方法包括阈值法(MNDWI等水体指数阈值等)、分类

器法(决策树法、面向对象的自适应分割法等)和自动化法(机器学习、深度学习等)(Xue 等, 2022), 其中阈值法最简易, 自动化法应用前景最广。现较知名的河流表面信息数据集见表5, 应用于河流场景的多模态融合数据集也渐渐出现(Yang 等, 2022; 李树涛 等, 2021)。

河宽自动提取算法中代表性较强的是由 Pavelsky 等建立的 RW (RivWidth) 算法(Pavelsky 和 Smith, 2008); 由 RW 算法改进而来、基于 GEE 平台的 RWC (RivWidthCloud)(Yang 等, 2020b) 算法及其他算法(Yang 等, 2020a); ARWE (Automated River Width Extraction method) 算法(Li 等, 2022)。这些学者基于以上算法, 分别建立了北美河宽数据集 NARWidth (Allen 和 Pavelsky, 2015)、全球河宽数据集 GRWL (Allen 和 Pavelsky, 2018) 及其修正版本 SWORD (Altenau 等, 2021) 和 GLOW (Feng 等, 2022)、反映中国每5年河宽变化的 MCRW (Yang 等, 2020a) 和青藏高原平滩河宽数据集 QTP-BGD (Li 等, 2022) 等。然而, 即便是最新

发射的SWOT卫星，也仅能监测河宽大于100 m、全球约60%的河流（Altenau等，2021），无法识别分布广泛、数量庞大的细小河流（河宽<30 m）。代表性方法及其优劣见图5。这些方法（Li等，2022；Wang等，2022；Yang等，2020b；Zhao等，2019；Isikdogan等，2017；Pavelsky和Smith，2008）受限于高空间分辨率影像的时间分辨率、覆盖

能力、获取成本等因素，多基于30 m分辨率的Landsat系列卫星建立，暂未考虑对10 m及更高分辨率影像的推广性；ARWE虽验证了对米级及以上影像的普适性，但算法编译环境局限，预处理成本较高；所有方法在确定河宽检索范围或河宽方向等过程时，均需一定程度的人工操作（Li等，2022），未实现“一键式”提取。

表5 代表性河流表面信息数据集简介
Table 5 Introduction of representative river surfaces datasets

名称	数据时长	数据范围	数据源	提取方法	空间分辨率/m	时间分辨率/d
SinoLC-1 DOI, 10.5281/zenodo.7707461	2021年	中国	Multi-source high-resolution GEE remote sensing, 美国	分类器法, 自动化法	1	—
Dynamic World (Brown等, 2022)	2015年— 2022年	全球	Sentinel-2, 欧洲	自动化法	10	10
QTP-BGD (Li等, 2022)	2010年— 2020年	青藏高原	Sentinel-2&Landsat, 美国&欧洲	阈值法, 分类器法	10—30	—
Global Water Bodies database (Verpoorter等, 2014)	2014年	全球	Landsat & SRTM, 美国	自动化法	15	—
Global Surface Water (Pekel等, 2016)	1984年— 2021年	全球	Landsat 5/7/8, 美国	阈值法	30	30
SSWMF (Yang等, 2022)	2018年— 2020年	中国	MODIS, Landsat 8, Sentinel-1&2, 美国&欧洲	阈值法	30	30
GCB map (Nyberg等, 2023)	1984年— 2020年	全球	Landsat, 美国	自动化法	30	365
DSWE (Jones, 2019)	2019年	美国	Landsat 4—8, 美国	自动化法	30	—
Global 3 arc-second Water Body Map (Yamazaki等, 2015)	2010年	全球	Global Land Survey & Landsat, 美国	阈值法	90	—
Daily Water (Ji等, 2018)	2001年— 2016年	全球	MODIS, 美国	分类器法	500	1
PreSWOT Hydro (Tortini等, 2020)	1992年— 2018年	全球	TOPEX/Poseidon, Jason-1/2/3, Envisat; MODIS, 美国	自动化法	500	8

3.2.2 基于多源遥感数据的河流水位提取

用来概化断面形态的另一个关键参数是水位，如表4复合梯形断面所示，通过匹配平滩、枯水期流量下的河宽及水位，便能以平滩、最枯流量时期的河宽为上、下底，建立梯形断面。基于多源遥感数据提取河流水位，源于对海洋水位观测研究的推广（Yuan等，2017），其原理为卫星高度计的发射装置主动向河流发射一定频率的微波或激光脉冲，经河流反射，通过接收装置接收返回脉冲，记录脉冲传播的双程时间和返回波形信息，进而获取卫星至河流的平均距离，卫星轨道高度减去卫星观测的距离即可得水面相对于参考椭球面的高度即水位（Calmant等，2008；Morris和Gill，1994）。

卫星雷达高度计种类繁多（表6），按工作原理可分为星载微波和LiDAR两类，如今除ICESat系列、国产CM-1卫星外，均为微波雷达。在观测河流水位时，雷达波易受陆地、洲滩和潮汐等因素干扰，需进行波形重定。目前主要有基于物理模型和基于统计关系两类波形重定方法，后者因易于实施、鲁棒性强，极少出现不收敛的情景，多用于内陆水体，如公认性能较优的算法ICE-1（Frappart等，2006）及其改进算法（Huang等，2018b）。目前，虽然不少研究能从重定后的雷达波中较精确的提取水位数据，但针对某一类卫星的波形重定方法区域局限性较强，且较难推广应用至其他卫星波形，致使现有数据库均存在一定限制。

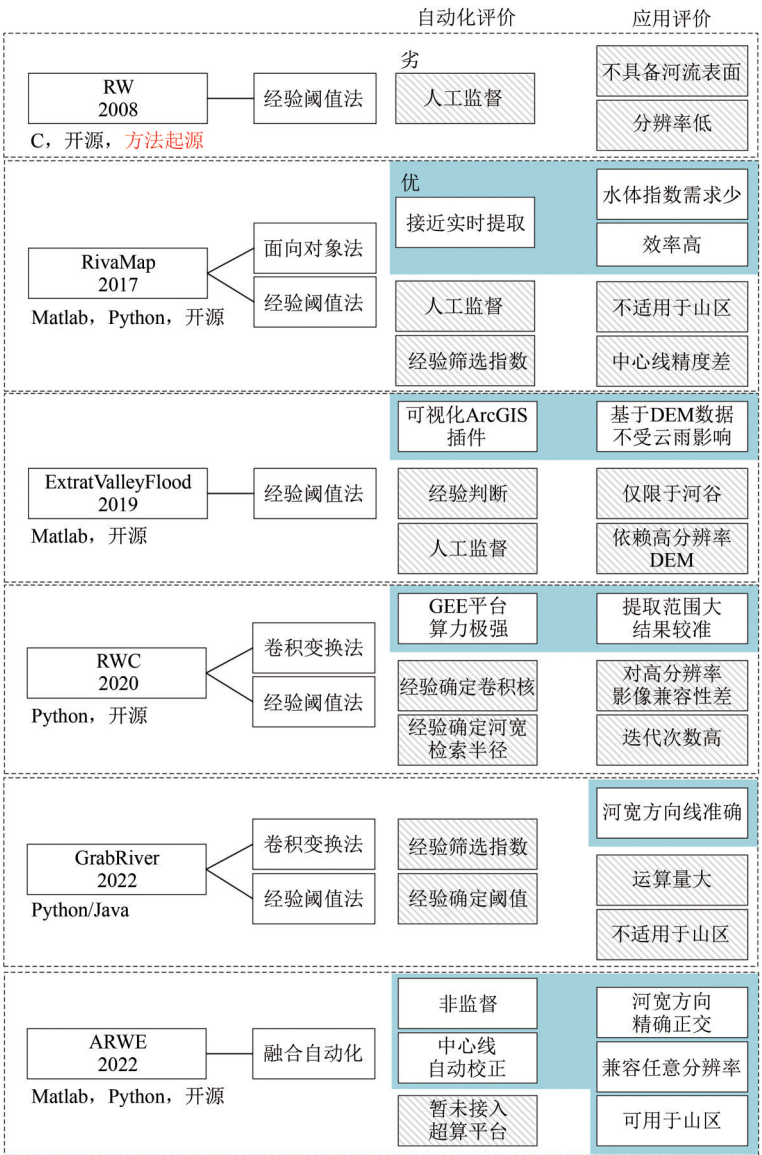


图5 代表性河宽自动提取方法简介及评价

Fig. 5 Introduction and evaluation of representative automated river width extraction methods

表6 常用测高卫星简介

Table 6 Introduction of common altitude measurement satellites

卫星	国家(地区)	发射时间*	精度(cm)**	重访周期/d
ERS 系列	欧盟	1991-07	10	35
TOPEX/Poseidon	美国/法国	1992-08	6	10
Jason 系列	美国/法国	2001-12	3.3—4.2	10
Envisat	欧盟	2002-03	2.5	35
ICESat 系列	美国	2003-01	10	91
Cryosat-2	欧盟	2010-04	1—3	369
SARAL/AltiKa	印度/法国	2013-02	1	35
Sentinel-3	欧盟	2016-02	3.5	27
ZY-3 02 星	中国	2016-05	85	3
GF-7	中国	2019-11	10	60
ZY-3 03 星	中国	2020-07	30	3
Sentinel-6A	欧盟/美国	2020-11	3.3	10
CM-1 陆地生态系统碳监测卫星	中国	2022-08	5	59
SWOT 卫星	美国/法国	2022-12	30	21

注：*数据可获取时间一般晚于发射时间；**精度范围,代表系列中含多颗卫星且精度各有不同。

如较知名的3大全球河流水位数据库：法国 Hydroweb (<http://hydroweb.theia-land.fr> [2023-07-24])、德国 DAHITI (<https://dahiti.dgfi.tum.de/en> [2023-07-24]) 和美国 GRRATS 数据集 (<https://doi.org/10.5067/PSGRA-SA2V1> [2023-07-24])，因波形重定算法、去噪方法的限制 (Li 等, 2019)，即便联合使用了 Envisat、Jason 系列、Sentinel-3/6 等主流数据交互优化，测量足迹能覆盖许多河流，却只能提取江河干流或宽度大于 900 m 河流的水位 (雷逍 等, 2022; 史卓琳和黄昌, 2020)，能够提取得到的山区河流和细小河流 (<90 m) 极少。

3.2.3 概化断面形态的提取

当河宽、水位等断面关键参数提取完毕后，即可按 Xue 等 (2023) 建议的方法，叠加关键参数得到概化断面形态，效果示意见图 6。以现有数据库暂缺数据的黄河一级支流皇甫川流域为例，仅使用 Jason 系列卫星轨道与河网数据 (图 7)，便能确定超过 10 个虚拟水位站，但虚拟水位站所在目标断面宽度均小于 100 m，即便以提取能力接近百米级宽度的河流水位提取方法 (Huang 等, 2018a)

测试，仍难以提取，需继续针对细小河流的水位开发足迹及波形重定算法，提升水位提取能力。为解决足迹提取方法多采用河流中心有限个足迹点提取水位，数据量难以满足细小河流水位提取的缺点，建立了基于河流表面信息、河流中心线缓冲区的足迹筛选方法。其中，基于河流表面信息筛选得到的足迹适用于百米内宽度较宽河流；基于河流中心线缓冲区筛选得到的足迹更适用于宽度更小河流，但因其为了保证得到足够的参考足迹而引入了非水面数据，精度较前者稍低 (Xue 等, 2023)，流域各级河流中心线缓冲区范围可由 Xue 等 (2022) 建议的方法得到。本文按筛选后的两类足迹，提取到了测试区域内细小河流 (河宽约 50 m) 的水位数据，I、III 目标断面基于河流中心线缓冲区 (5 级河流断面，缓冲区 150 m 宽) 筛选足迹，II 断面基于河流表面信息 (89.4 m 宽) 筛选足迹。目标断面位置见图 7，提取结果见表 7。提取结果较 Xue 等 (2023) 基于无人机采集 DEM 和水文站实测数据概化所得断面，左右岸边坡误差分别小于 8%、7%，较为准确。

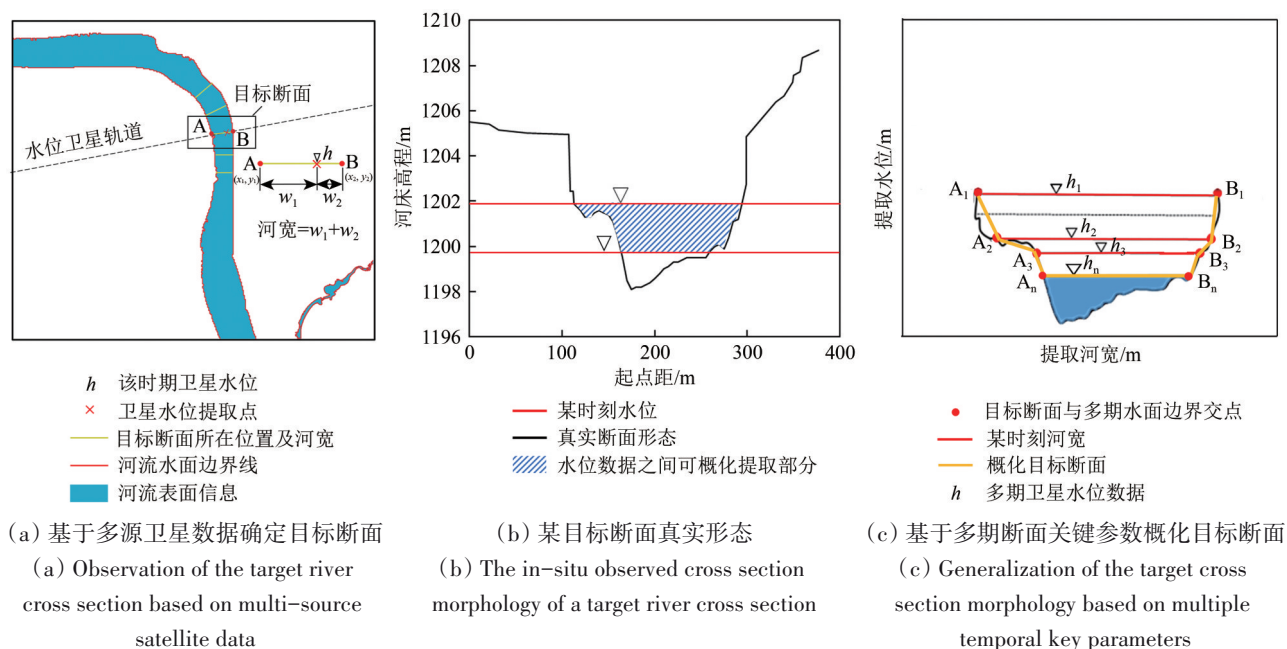


图 6 基于断面关键参数概化河流断面步骤及效果示意

Fig. 6 The process and effect of extraction of generalized river cross sections using key parameters

随着针对多源测高卫星的足迹筛选方法及波形重定算法的发展，缺资料地区细小河流的水位数据丰度将显著提升 (Scherer 等, 2023)，配合相应的河宽、水面边界数据，更多、更难到达流域的目标

断面可随之提取 (Zhou 等, 2023)。如图 8，基于多源卫星数据，按多期水位数据等叠加思路 (Scherer 等, 2022)，获取 10 期水位及河宽，得到雅鲁藏布大峡谷中人类难以抵达河段的高分辨率断面形态。

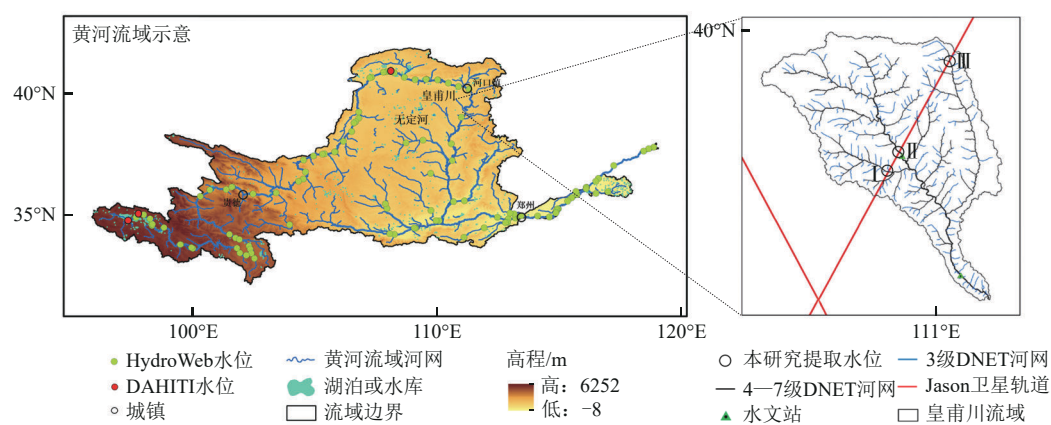


图7 黄河流域卫星水位数据分布及皇甫川流域Jason卫星轨道示意
Fig. 7 Satellite water level data distribution in the Yellow River Basin and Jason satellite orbit in the Huangfuchuan River Basin

表 7 概化断面关键参数提取结果

Table 7 Extraction results of key parameters of the generalized river cross sections

序号	经度	纬度	平滩河宽,水位/m	最小河宽,水位/m
I	110°48'09"E	39°35'37"N	70.5, 1022.7	40.7, 1018.4
II	110°51'17"E	39°38'51"N	89.4, 994.4	53.1, 991.15
III	111°02'54"E	39°55'41"N	66.9, 1201.1	46.1, 1196.3

注：平滩河宽提取时期为高水位,最小河宽提取时期为低水位。

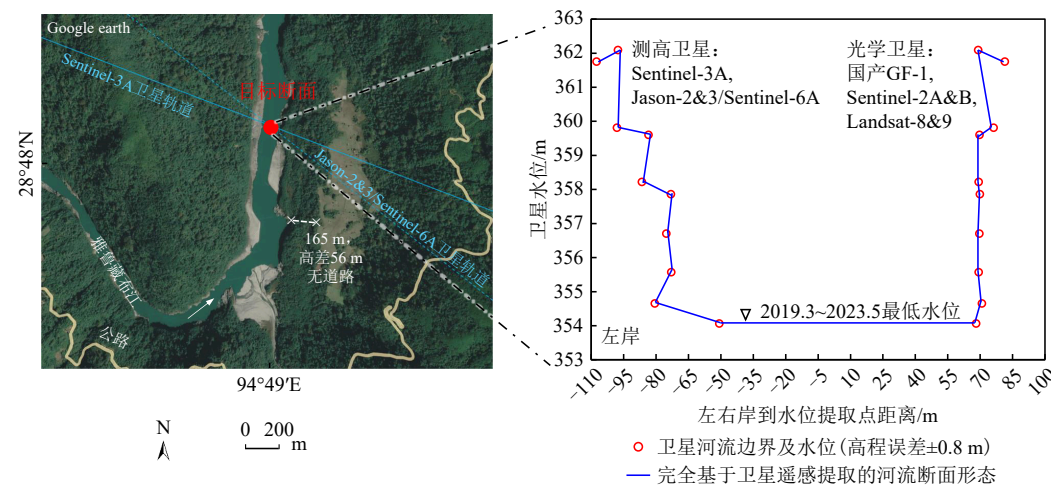


图8 难以抵达河段断面提取效果示意
Fig. 8 Cross section extraction results of difficulty in accessing river based on multisource remote sensing

4 展 望

4.1 最低水位以下断面形态提取

由图6、图8及前述研究基础可知，针对缺失资料地区提取断面关键参数概化断面或基于开源DEM数据直接提取断面的方法，均难以获取最低水位以下的断面形态。最低水位以下断面作为完整断面形态的一部分不应忽略，且在常流水河流中即便是最低水位时期，仍可能具有较大水深，

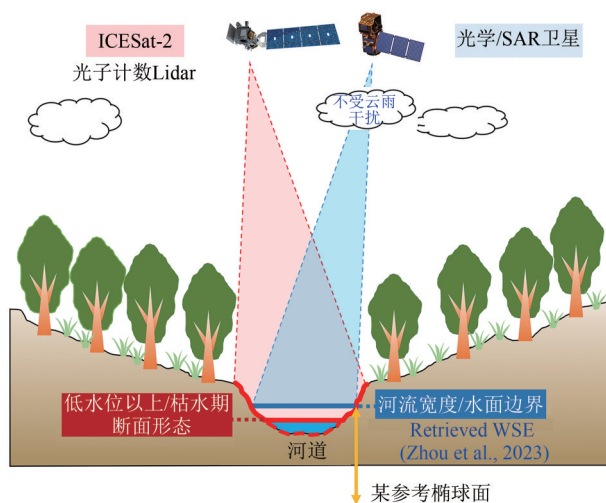
如常流水河流上游的峡谷段及下游河段。应对这一难题，可行的解决方法分为两类：

(1) 基于实测资料及河流类型拟合及推广。如图2，在江河源区、山区，河流断面形态往往呈现“V”型，即可假定最低水位以下部分仍呈“V”型，反向延伸最低水位以上部分，得到断面形态(表4)。在中、下游河段，则可基于有限的水文站实测断面，以抛物线形或矩形拟合，再按河流下垫面条件、河流级别推广至由遥感观测河宽、水

位确定的相似断面。拟合效果的评价需依据实测资料,由拟合点 R^2 、湿周、过水断面面积等数学、水力学指标评价。拟合形状的选择也可根据实际,选用非对称、非线性方案。

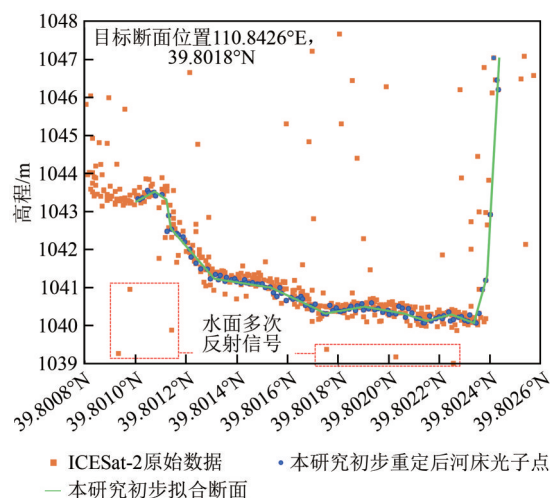
(2) 基于光子计数LiDAR数据直接提取河流断面。目前,卫星光子计数LiDAR数据(ICESat1/2卫星)在测绘浅海、湖泊地形方面应用较多,因其穿透力强、光子点云密度高等优势,在河流测深、断面形态测绘方面展现出了巨大潜力(Urban等, 2008),更适用于无法使用拟合方法的缺实测资料地区及其他测高卫星轨迹暂未覆盖区域,但

相应的挑战也更多(Coppo Frias等, 2023)。首先,应考虑建立应对更复杂背景噪声、适用于不同下垫面条件的自适应光子点云滤波聚类去噪算法,将规则窗口改进为不规则窗口,高效率、高精度获取河段三维点云;针对降噪后的地面信号光子,建立自调节重叠窗口,重定河流水下地形光子,提取缺资料地区河流断面形态或为(1)中拟合方法提供参考。如图9所示,经初步改进后的方法,虽然仍有较大的提升空间,但能够通过有资料区域测试后,推广、提取无资料河段的河床高程点云数据。



(a) 完全基于卫星遥感提取的河流断面形态示意

(a) River cross section extracted entirely based on altimetry satellite data



(b) 难以抵达区域目标断面位置示意

(b) The location of the target cross section in the data deficiency area

图9 基于ICESat-2数据提取无资料河段断面效果示意

Fig. 9 Schematic diagram of cross section extraction in data-scarce river using ICESat-2 data

4.2 沿程连续变化的断面形态提取

获取流域内多个河流断面形态,需基于“空—天—地”协同观测技术,获取相应的数据源,再以适用于各数据源的解译、提取方法,提取全流域范围内的多个实测河流断面形态(“空—地”协同观测提取获得)、概化断面形态(多源卫星数据提取获得)及拟合断面形态(“空—天—地”协同观测提取获得)等信息,是目前针对流域大尺度或缺资料地区最有效的方案。以位于黄土高原的无定河及雅鲁藏布江为例(图10),依据工程实际中无人机安全飞程及水文站网、路网、水网数据,基于“空—地”协同观测技术估算的极限观测范围约占无定河流域面积的14%,超85%的

范围需基于卫星遥感或航天飞机观测;雅鲁藏布江“空—地”协同观测,也因道路艰险、风大水急,不能覆盖雅江干流、大部分支流,冰川、冰湖下游重要河流及缺测干流的断面形态等信息,仍将依赖卫星遥感观测。

即便如此,多个断面依然不能代表连续的断面形态,应寻求合适推广方法或串联要素,使有限个断面能在流域尺度上合理串联,反映沿程变化的断面形态。河流表面信息,既能沿程连续变化,又是提取断面的关键参数,基于高分辨率卫星数据可以提取米级分辨率的河流表面,若依据能反应河流自身演变拓扑关系的河流级别,充分利用流域发育的自相似性,将拟合的最低水位以下断面形态、最低水位以上两岸边坡坡度与河流

级别匹配，即可以沿程连续变化的河流表面信息为底座，构建各级河流的一般梯形、抛物线形组合断面（表4），实现断面形态的沿程变化；或基

于多断面河相关系与多频率沿程河相关系理论，以河相系数（如河流宽深比）、指数为串联要素，实现断面形态的沿程变化。

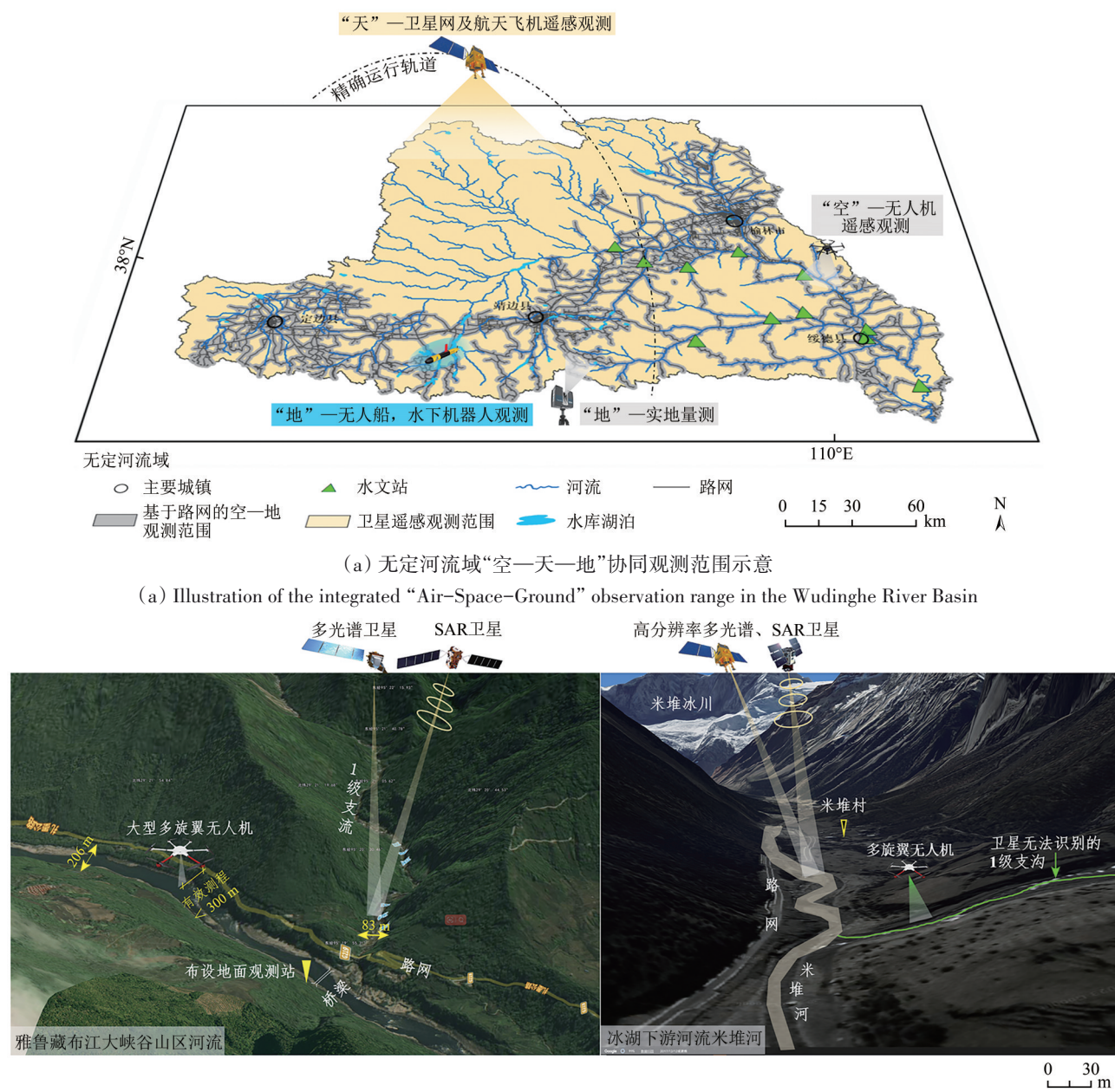


图 10 缺资料地区“空—天—地”协同观测示意

Fig. 10 Concept of integrated “Air-Space-Ground” observation in data-scarce areas

新方法的探究和建立不可或缺，但现场量测作为最基础的断面提取方法，其设备及测量方法的进步，以提供愈发丰富的实测资料也尤为重要。未来，“空—地”协同观测技术、设备都将迎来突破，如现有的单个无人机智能机场将向着依托乡镇的、多个智能机场联网的一键式测量发展（图 11），

这一趋势及相应推广，已经在较易实施、便于管理的城市实景三维测绘中体现，如东莞实景三维建设和实景三维广东等工程。对于浅水、清水、流速较小河段的水下地形、床面形态及更精细的床沙级配信息，则可尝试通过无人机等低空遥感技术或无人船、AUV 观测提取。对水流场复杂、

流速较大、多沙浑浊,难以使用“空一天”遥感技术的河流,应继续发展潜行速度更快,抗干扰能力更强的水下智能设备及相应的传感器。随着物联网、一键式技术的继续进步,定位信息、路网、水网数据的输入对齐,可规划的水上、水下

观测路线由统一的观测系统自动生成。观测设备也将从智能机场、智能船坞一键启程,突破基于现场、依赖多个操作平台的“空一地”协同观测,且更智能的“空一地”一体化观测技术将会实现。

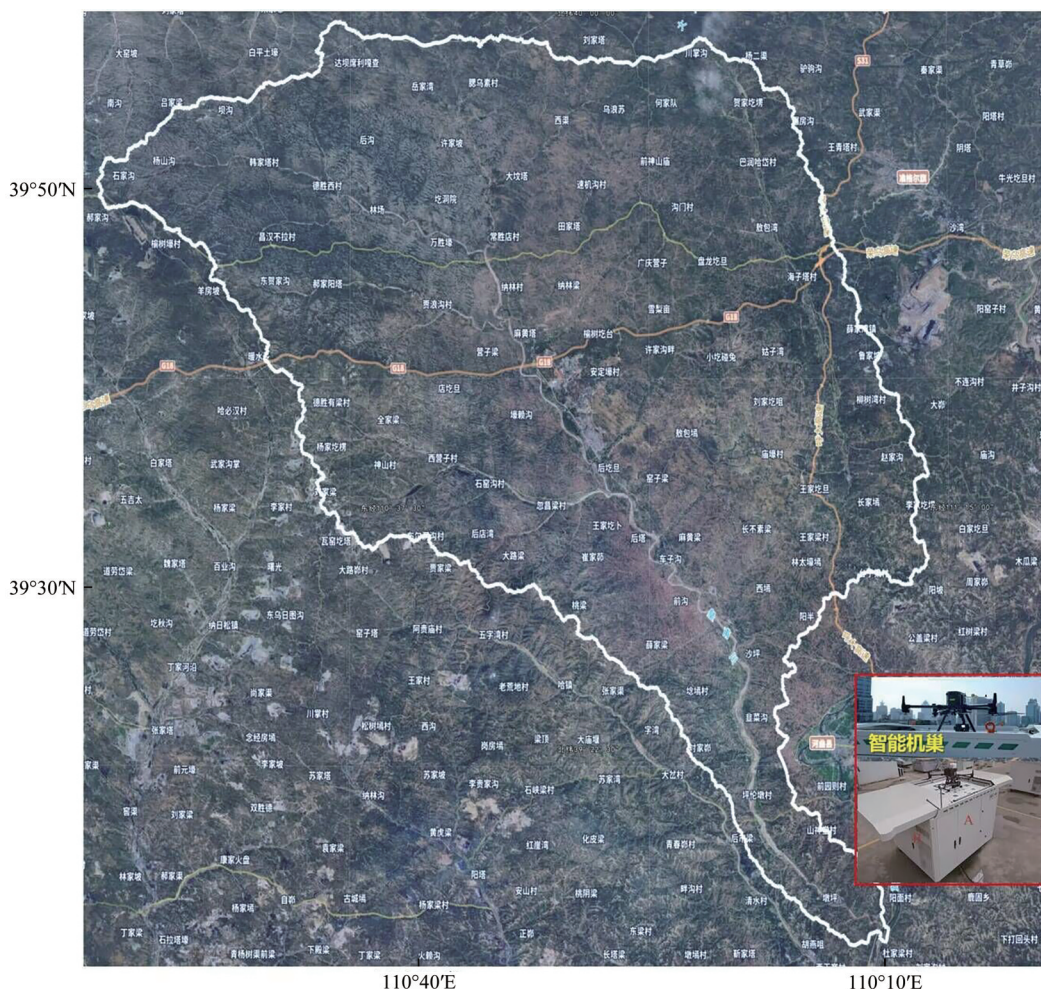


图 11 一键式无人机智能机场遥感网概念图

Fig. 11 Conceptual diagram of one-click UAV intelligent airport remote sensing network

卫星观测方面,计划2025年实现的国产女娲星座(44颗雷达卫星及10颗光学卫星)、于2022年逐步实施的国产天仙星座(96颗SAR卫星)等大量国产卫星的发射任务正在进行或立项、计划当中。未来,卫星数据将更加丰富、重访周期也将缩小到1 d以内,其数据获取平台也将更为集总、开放。应进一步建立高分辨率光学卫星、雷达卫星等多模态数据的融合方法和高精度河流信息自动提取方法,克服云、雨等极端天气的干扰,实现流域全天时、全天候、高精度观测,以及河流表面信息、断面形态的近实时提取。进而成为大尺度数据底座,由“空一地”一体化观测精细刻

画与集成,实现流域尺度的“空一天一地”一体化观测技术。

5 结 语

随着多源遥感观测及无人观测技术的不断成熟,结合日益先进的现场量测设备,发展“空一天一地”一体化观测方案,提取全流域尺度或缺资料地区的河流基础信息,融合有限的实测数据,结合数学模型或经验假设,获取能一定程度上反映真实河道特点、连续变化的断面形态,极具发展潜力和应用价值,是解决河流基础数据匮乏的重要方法。本文通过梳理现场量测、多源遥感观

测提取河流断面形态的传统方法及研究现状,总结了近20年来各类方法的优缺点及适用范围,以全流域基于水文站网、“路网”、“水网”的“空—地”一体化观测方法,结合其他无法到达区域的多源卫星观测,呈现并展望了“空—天—地”一体化方案。本文为进行针对缺资料地区或大面积流域自动化、系统化、精细化河流断面形态等河流信息的提取、数字孪生流域的建立,提供了研究思路和技术支撑。

参考文献(References)

- Abdallah H, Bailly J S, Baghdadi N N, Saint-Geours N and Fabre F. 2013. Potential of space-borne LiDAR sensors for global bathymetry in coastal and inland waters. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 6(1): 202-216 [DOI: 10.1109/JSTARS.2012.2209864]
- Abrams M and Crippen R. 2019. Aster GDEM V3 (ASTER Global DEM). Los Angeles: California Institute of Technology
- Allen G H and Pavelsky T M. 2015. Patterns of river width and surface area revealed by the satellite-derived North American River Width data set. *Geophysical Research Letters*, 42(2): 395-402 [DOI: 10.1002/2014GL062764]
- Allen G H and Pavelsky T M. 2018. Global extent of rivers and streams. *Science*, 361(6402): 585-588 [DOI: 10.1126/science.aat0636]
- Alpers W and Hennings I. 1984. A theory of the imaging mechanism of underwater bottom topography by real and synthetic aperture radar. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 89(C6): 10529-10546 [DOI: 10.1029/JC089iC06p10529]
- Altenau E H, Pavelsky T M, Durand M T, Yang X, de Moraes Frasson R P and Bendezu L. 2021. The surface water and ocean topography (SWOT) mission river database (SWORD): a global river network for satellite data products. *Water Resources Research*, 57(7): e2021WR030054 [DOI: 10.1029/2021WR030054]
- Bjerklie D M, Dingman S L and Bolster C H. 2005. Comparison of constitutive flow resistance equations based on the manning and chezy equations applied to natural rivers. *Water Resources Research*, 41(11): W11502 [DOI: 10.1029/2004WR003776]
- Brêda J P L F, Paiva R C D, Bravo J M, Passaia O A and Moreira D M. 2019. Assimilation of satellite altimetry data for effective river bathymetry. *Water Resources Research*, 55(9): 7441-7463 [DOI: 10.1029/2018WR024010]
- Brown C F, Brumby S P, Guzder-Williams B, Birch T, Hyde S B, Mazzariello J, Czerwinski W, Pasquarella V J, Haertel R, Ilyushchenko S, Schwehr K, Weisse M, Stolle F, Hanson C, Guinan O, Moore R and Tait A M. 2022. Dynamic world, near real-time global 10 m land use land cover mapping. *Scientific Data*, 9(1): 251 [DOI: 10.1038/S41597-022-01307-4]
- Calmant S, Seyler F and Cretaux J F. 2008. Monitoring continental surface waters by satellite altimetry. *Surveys in Geophysics*, 29(4/5): 247-269 [DOI: 10.1007/s10712-008-9051-1]
- Cao B, Zhu S L, Qiu Z G and Cao B C. 2018. Experiments in shallow seafloor surveying using WorldView-2 images and two-media stereophotogrammetry. *National Remote Sensing Bulletin*, 22(5): 745-757 (曹斌, 朱述龙, 邱振戈, 曹彬才. 2018. Worldview-2影像双介质摄影测量的浅海地形测绘试验. *遥感学报*, 22(5): 745-757) [DOI: 10.11834/jrs.20187066]
- Chanson H. 2004. *Hydraulics of Open Channel Flow: An Introduction Basic Principles, Sediment Motion, Hydraulic Modelling, Design of Hydraulic Structures*. 2nd ed. Oxford: Elsevier Butterworth-Heinemann [doi: 10.1016/B978-0-7506-5978-9.X5000-4]
- Chen R and Zheng Y W. 2018. Coefficient calibration analysis on flow measured by dual-track radar wave automatic flow measurement system. *Yangtze River*, 49(S2): 62-65, 102 (陈荣, 郑永伟. 2018. 双轨式雷达波自动测流系统流量系数率定分析. *人民长江*, 49(S2): 62-65, 102) [DOI: 10.16232/j.cnki.1001-4179.2018.S2.017]
- Chen X Y, Hassan M A and Fu X D. 2022. Convolutional neural networks for image-based sediment detection applied to a large terrestrial and airborne dataset. *Earth Surface Dynamics*, 10(2): 349-366 [DOI: 10.5194/esurf-10-349-2022]
- Collin A, Long B and Archambault P. 2010. Salt-marsh characterization, zonation assessment and mapping through a dual-wavelength LiDAR. *Remote Sensing of Environment*, 114(3): 520-530 [DOI: 10.1016/j.rse.2009.10.011]
- Chadwick A J, Greenberg E and Ganti V. 2023. Remote sensing of riverbank migration using particle image velocimetry. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 128(7): e2023JF007177 [DOI: 10.1029/2023JF007177]
- Cobby D M, Mason D C, Horritt M S and Bates P D. 2003. Two-dimensional hydraulic flood modelling using a finite-element mesh decomposed according to vegetation and topographic features derived from airborne scanning laser altimetry. *Hydrological Processes*, 17(10): 1979-2000 [DOI: 10.1002/hyp.1201]
- Coppo Frias M, Liu S X, Mo X G, Nielsen K, Rannald H, Jiang L G, Ma J and Bauer-Gottwein P. 2023. River hydraulic modeling with ICE-Sat-2 land and water surface elevation. *Hydrology and Earth System Sciences*, 27(5): 1011-1032 [DOI: 10.5194/hess-27-1011-2023]
- Detert M, Johnson E D and Weitbrecht V. 2017. Proof-of-concept for low-cost and non-contact synoptic airborne river flow measurements. *International Journal of Remote Sensing*, 38(8/10): 2780-2807 [DOI: 10.1080/01431161.2017.1294782]
- Du X M, Zhao K Y and Feng M Q. 2013. Simulation of flood routing with compound cross-section in middle reach of the Qin River. *Journal of Northwest A and F University (Natural Science Edition)*, 41(2): 222-228, 234 (杜献梅, 赵克玉, 冯民权. 2013. 沁河中游复式断面洪水演进模拟. *西北农林科技大学学报(自然科学版)*, 41(2): 222-228, 234) [DOI: 10.13207/j.cnki.jnwafu.2013.02.011]
- Easa S M. 2016. Versatile general elliptic open channel cross section. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 20(4): 1572-1581 [DOI: 10.1007/s12205-015-0494-x]
- Fang Y, Cao B C, Gao L, Hu H Y and Jiang Z Z. 2020. Development and application of LiDAR mapping satellite. *Infrared and Laser*

- Engineering, 49(11): 20201044 (方勇, 曹彬才, 高力, 胡海彦, 江振治. 2020. 激光雷达测绘卫星发展及应用. 红外与激光工程, 49(11): 20201044) [DOI: 10.3788/IRLA20201044]
- Fassoni-Andrade A C, Paiva R C D D, Rudorff C D M, Barbosa C C F and Novo E M L D M. 2020. High-resolution mapping of floodplain topography from space: a case study in the amazon. *Remote Sensing of Environment*, 251: 112065 [DOI: 10.1016/j.rse.2020.112065]
- Ferguson R. 2010. Time to abandon the Manning equation? *Earth Surface Processes and Landforms*, 35(15): 1873-1876 [DOI: 10.1002/esp.2091]
- Feng D M, Gleason C J, Yang X, Allen G H and Pavelsky T M. 2022. How have global river widths changed over time? *Water Resources Research*, 58(8): e2021WR031712 [DOI: 10.1029/2021WR031712]
- Frappart F, Calmant S, Cauhopé M, Seyler F and Cazenave A. 2006. Preliminary results of ENVISAT RA-2-derived water levels validation over the amazon basin. *Remote Sensing of Environment*, 100(2): 252-264 [DOI: 10.1016/j.rse.2005.10.027]
- 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]
- Gonçalves J A and Henriques R. 2015. UAV photogrammetry for topographic monitoring of coastal areas. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 104: 101-111 [DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2015.02.009]
- Gonzalez M O, Preetha P, Kumar M and Clement T P. 2023. Comparison of data-driven groundwater recharge estimates with a process-based model for a river basin in the southeastern USA. *Journal of Hydrologic Engineering*, 28(7): 04023019 [DOI: 10.1061/JHY-EFF.HEENG-5882]
- Gorma W, Post M A, White J, Gardner J, Luo Y, Kim J, Mitchell P D, Morozs N, Wright M and Xiao Q. 2021. Development of modular bio-inspired autonomous underwater vehicle for close subsea asset inspection. *Applied Sciences*, 11(12): 5401 [DOI: 10.3390/app11125401]
- Han Q W and He M M. 1987. Mathematical modeling of reservoir sedimentation and fluvial process. *Journal of Sediment Research*, (3): 14-29 (韩其为, 何明民. 1987. 水库淤积与河床演变的(一维)数学模型. 泥沙研究, (3): 14-29) [DOI: 10.16239/j.cnki.0468-155x.1987.03.002]
- Hou J W, Van Dijk A I J M and Renzullo L J. 2022. Merging Landsat and airborne LiDAR observations for continuous monitoring of floodplain water extent, depth and volume. *Journal of Hydrology*, 609: 127684 [DOI: 10.1016/j.jhydrol.2022.127684]
- Howat I M, Porter C, Smith B E, Noh M J and Morin P. 2019. The reference elevation model of Antarctica. *The Cryosphere*, 13(2): 665-674 [DOI: 10.5194/tc-13-665-2019]
- Hu C H, Zheng C M, Wang G Q, Zhang J Y, Wang C, Yao T D, Wang Y X, Lai M Y, Ni G H, Wang Y C, Zhang C and Tian F Q. 2022. Reviews of the major research plan “runoff change and its adaptive management in the source region of major rivers in Southwestern China. *Advances in Water Science*, 33(3): 337-359 (胡春宏, 郑春苗, 王光谦, 张建云, 王超, 姚檀栋, 王焰新, 赖明勇, 倪广恒, 王雨春, 张弛, 田富强. 2022. “西南河流源区径流变化和适应性利用”重大研究计划进展综述. 水科学进展, 33(3): 337-359) [DOI: 10.14042/j.cnki.32.1309.2022.03.001]
- Huai W X, Li S L, Katul G G, Liu M Y and Yang Z H. 2021. Flow dynamics and sediment transport in vegetated rivers: a review. *Journal of Hydrodynamics*, 33(3): 400-420 [DOI: 10.1007/S42241-021-0043-7]
- Huang L Y, Fan C Q, Meng J M and Zhang J. 2022. Retrieval of underwater topography based on multi-source SAR images//*Proceedings of 2022 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*. Kuala Lumpur: IEEE: 6939-6942 [DOI: 10.1109/IGARSS46834.2022.988453]
- Huang Q, Long D, Du M D, Zeng C, Li X D, Hou A Z and Hong Y. 2018b. An improved approach to monitoring Brahmaputra River water levels using retracked altimetry data. *Remote Sensing of Environment*, 211: 112-128 [DOI: 10.1016/j.rse.2018.04.018]
- Huang Q, Long D, Du M D, Han Z Y and Han P F. 2020. Daily continuous river discharge estimation for ungauged basins using a hydrologic model calibrated by satellite altimetry: implications for the SWOT mission. *Water Resources Research*, 56(7): e2020WR027309 [DOI: 10.1029/2020WR027309]
- Huang Q, Long D, Du M D, Zeng C, Qiao G, Li X D, Hou A Z and Hong Y. 2018a. 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]
- Ibrahim P O, Sternberg H, Samaila-Ija H A, Adgidzi D and Nwadior I J. 2023. Modelling topo-bathymetric surface using a triangulation irregular network (TIN) of Tunga Dam in Nigeria. *Applied Geomatics*, 15(1): 281-293 [DOI: 10.1007/s12518-022-00438-y]
- Isikdogan F, Bovik A and Passalacqua P. 2017. RivaMap: an automated river analysis and mapping engine. *Remote Sensing of Environment*, 202: 88-97 [DOI: 10.1016/j.rse.2017.03.044]
- Jarvis A, Reuter H I, Nelson A and Guevara E. 2008. SRTM 90m DEM digital elevation database[EB/OL]. <http://srtm.csi.cgiar.org/>
- Johnson E D and Cowen E A. 2016. Remote monitoring of volumetric discharge employing bathymetry determined from surface turbulence metrics. *Water Resources Research*, 52(3): 2178-2193 [DOI: 10.1002/2015WR017736]
- Jones J W. 2019. Improved automated detection of subpixel-scale inundation—revised dynamic surface water extent (DSWE) partial surface water tests. *Remote Sensing*, 11(4): 374 [DOI: 10.3390/rs11040374]
- Ji L Y, Gong P, Wang J, Shi J C and Zhu Z L. 2018. Construction of the 500-m resolution daily global surface water change database (2001—2016). *Water Resources Research*, 54(12): 10 [DOI: 10.1029/2018WR023060]
- Kabiri K. 2023. Retrieval and validation of the Secchi disk depth values (Z_{sd}) from the sentinel-3/OLCI satellite data in the Persian

- gulf and the gulf of Oman. *Environmental Science and Pollution Research*, 30(29): 73649-73661 [DOI: 10.1007/s11356-023-27625-7]
- Kang S, Yu J C and Zhang J. 2023. Research status of micro autonomous underwater vehicle. *Robot*, 45(2): 218-237 (康帅, 俞建成, 张进. 2023. 微小型自主水下机器人研究现状. *机器人*, 45(2): 218-237) [DOI: 10.13973/j.cnki.robot.210360]
- Kim Y, Muste M, Hauet A, Krajewski W F, Kruger A and Bradley A. 2008. Stream discharge using mobile large-scale particle image velocimetry: a proof of concept. *Water Resources Research*, 44(9): 554-559 [DOI: 10.1029/2006WR005441]
- Kucharczyk M and Hugenholtz C H. 2021. Remote sensing of natural hazard-related disasters with small drones: global trends, biases, and research opportunities. *Remote Sensing of Environment*, 264: 112577 [DOI: 10.1016/j.rse.2021.112577]
- Kulkarni S C and Rege P P. 2020. Pixel level fusion techniques for SAR and optical images: a review. *Information Fusion*, 59: 13-29 [DOI: 10.1016/j.inffus.2020.01.003]
- Lakshmi S E and Yarrakula K. 2019. Review and critical analysis on digital elevation models. *Geofizika*, 35(2): 129-157 [DOI: 10.15233/gfz.2018.35.7]
- Lawrence D S. 2007. Analytical derivation of at-a-station hydraulic-geometry relations. *Journal of Hydrology*, 334(1/2): 17-27 [DOI: 10.1016/j.jhydrol.2006.09.021]
- Lee J, Ghorbanidehno H, Farthing M W, Hesser T J, Darve E F and Kitanidis P K. 2018. Riverine bathymetry imaging with indirect observations. *Water Resources Research*, 54(5): 3704-3727 [DOI: 10.1029/2017WR021649]
- Legleiter C J and Fosness R L. 2019. Defining the limits of spectrally based bathymetric mapping on a large river. *Remote Sensing*, 11(6): 665 [DOI: 10.3390/rs11060665]
- Legleiter C J and Harrison L R. 2019. Remote sensing of river bathymetry: evaluating a range of sensors, platforms, and algorithms on the upper Sacramento River, California, USA. *Water Resources Research*, 55(3): 2142-2169 [DOI: 10.1029/2018WR023586]
- Legleiter C J, Tedesco M, Smith L C, Behar A E and Overstreet B T. 2014. Mapping the bathymetry of supraglacial lakes and streams on the Greenland ice sheet using field measurements and high-resolution satellite images. *The Cryosphere*, 8(1): 215-228 [DOI: 10.5194/tc-8-215-2014]
- Lei X, Ke L H, Yong B, Zhang J S and Cao Q Y. 2022. Evaluation of river water level monitoring from satellite radar altimetry datasets over Chinese rivers. *Remote Sensing Technology and Application*, 37(1): 61-72 (雷逍, 柯灵红, 雍斌, 张金山, 曹倩怡. 2022. 卫星雷达测高水位数据产品在中国区河流的监测精度评价. *遥感技术与应用*, 37(1): 61-72) [DOI: 10.11873/j.issn.1004-0323.2022.1.0061]
- Leopold L B and Maddock Jr T. 1953. *The Hydraulic Geometry of Stream Channels and Some Physiographic Implications*. Washington: United States Government Printing Office
- Li D, Wu B S, Chen B W, Xue Y and Zhang Y. 2020. Review of water body information extraction based on satellite remote sensing. *Journal of Tsinghua University (Science and Technology)*, 60(2): 147-161 (李丹, 吴保生, 陈博伟, 薛源, 张翼. 2020. 基于卫星遥感的水体信息提取研究进展与展望. *清华大学学报(自然科学版)*, 60(2): 147-161) [DOI: 10.16511/j.cnki.qhdxxb.2019.22.038]
- Li D, Xue Y, Qin C, Wu B S, Chen B W and Wang G. 2022. A bankfull geometry dataset for major exorheic rivers on the Qinghai-Tibet Plateau. *Scientific Data*, 9(1): 498 [DOI: 10.1038/s41597-022-01614-w]
- Li Q H, Degnan J, Barrett T and Shan J. 2016. First evaluation on single photon-sensitive LiDAR data. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 82(7): 455-463 [DOI: 10.14358/PERS.82.7.455]
- Li S T, Li C Y and Kang X D. 2021. Development status and future prospects of multi-source remote sensing image fusion. *National Remote Sensing Bulletin*, 25(1): 148-166 (李树涛, 李聪好, 康旭东. 2021. 多源遥感图像融合发展现状与未来展望. *遥感学报*, 25(1): 148-166) [DOI: 10.11834/jrs.20210259]
- Li X D, Long D, Huang Q, Han P F, Zhao F Y and Wada Y. 2019. High-temporal-resolution water level and storage change data sets for lakes on the Tibetan Plateau during 2000—2017 using multiple Altimetric missions and Landsat-derived lake shoreline positions. *Earth System Science Data*, 11(4): 1603-1627 [DOI: 10.5194/essd-11-1603-2019]
- Li Z H, Li P, Ding D and Wang H J. 2018. Research progress of global high resolution digital elevation models. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 43(12): 1927-1942 (李振洪, 李鹏, 丁咚, 王厚杰. 2018. 全球高分辨率数字高程模型研究进展与展望. *武汉大学学报(信息科学版)*, 43(12): 1927-1942) [DOI: 10.13203/j.whugis20180295]
- Liang D, Li Y H, Wang Z and Gong B S. 2022. Rapid terrain measurement using UAV-based LiDAR and unmanned boat bathymetric system: a case study of Wujia Bridge survey in Sinan County, China//*Proceedings of 2022 China Water Conservancy Academic Conference Volume 4*. Beijing: Yellow River Water Conservancy Publishing House: 9 (梁栋, 李亚虎, 王志, 龚秉生. 2022. 基于无人机机载LiDAR和无人船测深系统的快速地形测量应用——以思南县文家店乌江大桥勘测为例//2022中国水利学术大会论文集(第四分册). 北京: 黄河水利出版社: 9) [DOI: 10.26914/c.cnkihy.2022.059378]
- Lu J Y, Xu H T and Yao S M. 2005. Turbulent characteristics of flow in river. *Journal of Hydraulic Engineering*, 36(9): 1029-1034 (卢金友, 徐海涛, 姚仕明. 2005. 天然河道水流紊动特性分析. *水利学报*, 36(9): 1029-1034) [DOI: 10.3321/j.issn.0559-9350.2005.09.002]
- Luo S X, Song C Q, Ke L H, Zhan P F, Fan C Y, Liu K, Chen T, Wang J D and Zhu J Y. 2022. Satellite laser altimetry reveals a net water mass gain in global lakes with spatial heterogeneity in the early 21st century. *Geophysical Research Letters*, 49(3): e2021GL096676 [DOI: 10.1029/2021GL096676]
- Ma H B, Nittrouer J A, Fu X D, Parker G, Zhang Y F, Wang Y J, Wang Y J, Lamb M P, Cisneros J, Best J, Parsons D R and Wu B S. 2022. Amplification of downstream flood stage due to damming of fine-grained rivers. *Nature Communications*, 13(1): 3054 [DOI: 10.1038/S41467-022-30730-9]

- MacDonell C J, Williams R D, Maniatis G, Roberts K and Naylor M. 2023. Consumer-grade UAV solid-state LiDAR accurately quantifies topography in a vegetated fluvial environment. *Earth Surface Processes and Landforms*, 48(11): 2211-2229 [DOI: 10.1002/esp.5608]
- Monfort C L and Lippmann T C. 2011. Assimilation of airborne imagery with a wave model for bathymetric estimation. *Journal of Coastal Research*, 62: 40-49 [DOI: 10.2112/SI_62_5]
- Morris C S and Gill S K. 1994. Evaluation of the TOPEX/POSEIDON altimeter system over the great lakes. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 99(C12): 24527-24539 [DOI: 10.1029/94JC01642]
- Musa Z N, Popescu I and Mynett A. 2015. A review of applications of satellite SAR, optical, altimetry and DEM data for surface water modelling, mapping and parameter estimation. *Hydrology and Earth System Sciences*, 19(9): 3755-3769 [DOI: 10.5194/hess-19-3755-2015]
- Ni J R. 2016. Research on the total material flux in rivers//Proceedings of the 18th Academician Assembly of the Chinese Academy of Sciences and the 5th Academic Annual Meeting of the Branches. Beijing: Department of Chinese Academy of Sciences: 583-589 (倪晋仁. 2016. 河流全物质通量研究//中国科学院第十八次院士大会暨第五届学部学术年会. 北京: 中国科学院学部: 583-589)
- Nyberg B, Henstra G, Gawthorpe R L, Ravnås R and Ahokas J. 2023. Global scale analysis on the extent of river channel belts. *Nature Communications*, 14(1): 2163 [DOI: 10.1038/s41467-023-37852-8]
- Pacheco A, Horta J, Loureiro C and Ferreira Ó. 2015. Retrieval of nearshore bathymetry from landsat 8 images: a tool for coastal monitoring in shallow waters. *Remote Sensing of Environment*, 159: 102-116 [DOI: 10.1016/j.rse.2014.12.004]
- Pavelsky T M and Smith L C. 2008. RivWidth: a software tool for the calculation of river widths from remotely sensed imagery. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 5(1): 70-73 [DOI: 10.1109/LGRS.2007.908305]
- Pekel J F, Cottam A, Gorelick N and Belward A S. 2016. High-resolution mapping of global surface water and its long-term changes. *Nature*, 540(7633): 418-422 [DOI: 10.1038/nature20584]
- Petikas I, Keramaris E and Kanakoudis V. 2020. A novel method for the automatic extraction of quality non-planar river cross-sections from digital elevation models. *Water*, 12(12): 3553 [DOI: 10.3390/w12123553]
- Powers C, Hanlon R and Schmale D G. 2018. Tracking of a fluorescent dye in a freshwater lake with an unmanned surface vehicle and an unmanned aircraft system. *Remote Sensing*, 10(1): 81 [DOI: 10.3390/rs10010081]
- Qian N, Zhang R and Zhou Z D. 1987. Riverbed Morphology Evolution. Beijing: China Science Publishing and Media Ltd. (钱宁, 张仁, 周志德. 1987. 河床演变学. 北京: 科学出版社)
- Qin C, Wu B S, Wang G Q and Wang G. 2021. Spatial distributions of at-many-stations hydraulic geometry for Mountain Rivers originated from the Qinghai-Tibet Plateau. *Water Resources Research*, 57(6): e2020WR029090 [DOI: 10.1029/2020WR029090]
- Qin H M, Wang C, Xi X H and Nie S. 2016. Development of airborne laser bathymetric technology and applications. *Remote Sensing Technology and Application*, 31(4): 617-624 (秦海明, 王成, 习晓环, 聂胜. 2016. 机载激光雷达测深技术与应用研究进展. 遥感技术与应用, 31(4): 617-624) [DOI: 10.11873/j.issn.1004-0323.2016.4.0617]
- Qin S W and Dai Z L. 2023. Interpolation technique for the underwater DEM generated by an unmanned surface vessel. *Computer Modeling in Engineering and Sciences*, 136(3): 3157-3172 [DOI: 10.32604/cmescs.2023.026874]
- Rowland J E, Dietrich A C and DeWalt S J. 2012. River cross-sectional measurement: a review. *Journal of Hydrology*, 4: 423-442
- Sarhadi A, Soltani S and Modarres R. 2012. Probabilistic flood inundation mapping of ungauged rivers: linking GIS techniques and frequency analysis. *Journal of Hydrology*, 458-459: 68-86 [DOI: 10.1016/j.jhydrol.2012.06.039]
- Scherer D, Schwatke C, Dettmering D and Seitz F. 2023. ICESat-2 river surface slope (IRIS): a global reach-scale water surface slope dataset. *Scientific Data*, 10(1): 359 [DOI: 10.1038/s41597-023-02215-x]
- Scherer D, Schwatke C, Dettmering D and Seitz F. 2022. ICESat-2 based river surface slope and its impact on water level time series from satellite altimetry. *Water Resources Research*, 58(11): e2022WR032842 [DOI: 10.1029/2022WR032842]
- Shi Z L and Huang C. 2020. Recent advances in remote sensing of river characteristics. *Progress in Geography*, 39(4): 670-684 (史卓琳, 黄昌. 2020. 河流水情要素遥感研究进展. 地理科学进展, 39(4): 670-684) [DOI: 10.18306/dlkxjz.2020.04.014]
- Takaku J, Tadono T, Tsutsui K and Ichikawa M. 2016. Validation of 'aw3d' global DSM generated from ALOS prism//Proceedings of XXIII ISPRS Congress. Prague: 25-31 [DOI: 10.5194/isprsannals-III-4-25-2016]
- Tarboton D G. 1997. A new method for the determination of flow directions and upslope areas in grid digital elevation models. *Water Resources Research*, 33(2): 309-319 [DOI: 10.1029/96WR03137]
- Teodoro A, Gonçalves H and Pais-Barbosa J. 2010. Bathymetric estimation through principal components analysis using IKONOS2 data//Proceedings Volume 7824, Remote Sensing for Agriculture, Ecosystems, and Hydrology XII. Toulouse: SPIE: 782419-782419 [DOI: 10.1117/12.864565]
- Tian X X and Shan J. 2021. Comprehensive evaluation of the icesat-2 ATL08 terrain product. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 59(10): 8195-8209 [DOI: 10.1109/TGRS.2021.3051086]
- Tortini R, Noujdina N, Yeo S, Ricko M, Birkett C M, Khandelwal A, Kumar V, Marlier M E and Lettenmaier D P. 2020. Satellite-based remote sensing data set of global surface water storage change from 1992 to 2018. *Earth System Science Data*, 12(2): 1141-1151 [DOI: 10.5194/essd-12-1141-2020]
- Urban T J, Schutz B E and Neuenschwander A L. 2008. A survey of ICESat coastal altimetry applications: continental coast, open ocean island, and Inland River. *Terrestrial, Atmospheric and Oceanic Sciences*, 19(1/2): 1 [DOI: 10.3319/TAO.2008.19.1-2.1(SA)]
- Verma R K, Ashwini K and Singh A. 2021. Channel morphology and

- prediction of mid-line channel migration in the reach of Ganga River using GIS and ARIMA modeling during 1975—2020. *H₂Open Journal*, 4(1): 321-335 [DOI: 10.2166/h2oj.2021.124]
- Verpoorter C, Kutser T, Seekell D A and Tranvik L J. 2014. A global inventory of lakes based on high-resolution satellite imagery. *Geophysical Research Letters*, 41(18): 6396-6402 [DOI: 10.1002/2014GL060641]
- Wang G Q, Liu J H and Li T J. 2005. Digital watershed model of yellow river. *Journal of Basic Science and Engineering*, 13(1): 1-8 (王光谦, 刘家宏, 李铁键. 2005. 黄河数字流域模型原理. 应用基础与工程科学学报, 13(1): 1-8) [DOI: 10.3969/j.issn.1005-0930.2005.01.001]
- Wang J L, Li K, Yan X R, Zheng L and Han X H. 2023. Development and prospects of machine learning methods in geographic elements classification. *National Remote Sensing Bulletin*, 27(8): 1757-1768 (王卷乐, 李凯, 严欣荣, 郑莉, 韩雪华. 2023. 地理要素分类机器学习方法发展与前景. 遥感学报, 27(8): 1757-1768) [DOI: 10.11834/jrs.20232299]
- Wang Y J, Wu B S and Zhong D Y. 2020. Simulation of the main-channel cross-section geometry of the lower Yellow River in response to water and sediment changes. *Acta Geographica Sinica*, 75(7): 1494-1511 (王彦君, 吴保生, 钟德钰. 2020. 黄河下游主槽断面形态对水沙变化响应过程的模拟. 地理学报, 75(7): 1494-1511) [DOI: 10.11821/dlxb202007012]
- Wang Z F, Li J B, Lin Y, Meng Y and Liu J G. 2022. GrabRiver: graph-theory-based river width extraction from remote sensing imagery. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 19: 1500505 [DOI: 10.1109/LGRS.2020.3023043]
- Wu G P and Liu Y B. 2016. Satellite retrieval of important ocean hydrological parameters: an overview. *Advances in Water Science*, 27(1): 139-151 (吴桂平, 刘元波. 2016. 海洋重要水文参数的卫星遥感反演研究综述. 水科学进展, 27(1): 139-151) [DOI: 10.14042/j.cnki.32.1309.2016.01.015]
- Wu T, Li J Y, Li T J, Sivakumar B, Zhang G and Wang G Q. 2019. High-efficient extraction of drainage networks from digital elevation models constrained by enhanced flow enforcement from known river maps. *Geomorphology*, 340: 184-201 [DOI: 10.1016/j.geomorph.2019.04.022]
- Xiao Y, Liu J, Qin C C and Xu F. 2022. Two-dimensional numerical modeling of flow pattern and bed topography in channel bend. *Environmental Modeling and Assessment*, 27(4): 715-726 [DOI: 10.1007/s10666-022-09818-5]
- Xu M X, Lu Y Y, Tan X S and Shi J Q. 2021. Solid-state LiDAR sensor technology and bathymetry application of UAV. *Electronic Measurement Technology*, 44(15): 89-96 (徐梦溪, 陆云扬, 谈晓珊, 施建强. 2021. 固态激光雷达传感器技术及无人机载测深应用. 电子测量技术, 44(15): 89-96) [DOI: 10.19651/j.cnki.emt.2106247]
- Xue Y, Qin C, Wu B S, Li D and Fu X D. 2022. Automatic extraction of mountain river surface and width based on multisource high-resolution satellite images. *Remote Sensing*, 14(10): 2370 [DOI: 10.3390/rs14102370]
- Xue Y, Qin C, Wu B S, Zhang G, Fu X D, Ma H B, Li D and Wang B J. 2023. Simulation of runoff process based on the 3-D river network. *Journal of Hydrology*, 626: 130192 [DOI: 10.1016/j.jhydrol.2023.130192]
- Yamazaki D, Trigg M A and Ikeshima D. 2015. Development of a global ~90 m water body map using multi-temporal landsat images. *Remote Sensing of Environment*, 171: 337-351 [DOI: 10.1016/j.rse.2015.10.014]
- Yang D W, Herath S and Musiak K. 2002. A hillslope-based hydrological model using catchment area and width functions. *Hydrological Sciences Journal*, 47(1): 49-65 [DOI: 10.1080/02626660209492907]
- Yang F L, Li J B, Wu Z Y, Jin X L and Chu F Y. 2008. The methods of high quality post-processing for shallow Multibeam data. *Acta Geodaetica et Cartographica Sinica*, 37(4): 444-450, 457 (阳凡林, 李家彪, 吴自银, 金翔龙, 初凤友. 2008. 浅水多波束勘测数据精细处理方法. 测绘学报, 37(4): 444-450, 457) [DOI: 10.3321/j.issn:1001-1595.2008.04.008]
- Yang J, Huang X and Tang Q H. 2020a. Satellite-derived river width and its spatiotemporal patterns in China during 1990—2015. *Remote Sensing of Environment*, 247: 111918 [DOI: 10.1016/j.rse.2020.111918]
- Yang X, Pavelsky T M, Allen G H and Donchyts G. 2020b. RivWidth-Cloud: an automated Google earth engine algorithm for river width extraction from remotely sensed imagery. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 17(2): 217-221 [DOI: 10.1109/LGRS.2019.2920225]
- Yang Y H, Wen B Y, Wang C J and Hou Y D. 2019. Two-dimensional velocity distribution modeling for natural river based on uhf radar surface current. *Journal of Hydrology*, 577: 123930 [DOI: 10.1016/j.jhydrol.2019.123930]
- Yang Y M, Huang S F, Qiu J X, Liu C J and Jiang W. 2022. A surface water mapping framework combining optical and radar remote sensing and its application in China. *Geocarto International*, 37(27): 17547-17564 [DOI: 10.1080/10106049.2022.2129836]
- Yao T D, Wang W C, An B S, Piao S L and Chen F H. 2022. The scientific expedition and research activities on the Tibetan Plateau in 1949-2017. *Acta Geographica Sinica*, 77(7): 1586-1602 (姚檀栋, 王伟财, 安宝晟, 朴世龙, 陈发虎. 2022. 1949-2017年青藏高原科学考察研究历程. 地理学报, 77(7): 1586-1602) [DOI: 10.11821/dlxb202207002]
- Yuan C, Gong P, Zhang H, Guo H and Pan B Z. 2017. Monitoring water level changes from retracked jason-2 altimetry data: a case study in the Yangtze River, China. *Remote Sensing Letters*, 8(5): 399-408 [DOI: 10.1080/2150704X.2016.1278309]
- Zhang B, Xiong W, Ma M Y, Wang M Q, Wang D, Huang X, Yu L, Zhang Q, Lu H, Hong D F, Yu F, Wang Z D, Wang J, Li X L, Gong P and Huang X M. 2022a. Super-resolution reconstruction of a 3 arc-second global DEM dataset. *Science Bulletin*, 67(24): 2526-2530 [DOI: 10.1016/j.scib.2022.11.021]
- Zhang C D, Sun A R, Hassan M A and Qin C. 2022b. Assessing through-water structure-from-motion photogrammetry in gravel-

- bed rivers under controlled conditions. *Remote Sensing*, 14(21): 5351 [DOI: 10.3390/rs14215351]
- Zhang H W, Zhang J H, Zhong D Y and Bu H L. 2011. Regulation strategies for wandering reaches of Lower Yellow River. *Journal of Hydraulic Engineering*, 42(1): 8-13 (张红武, 张俊华, 钟德钰, 卜海磊. 2011. 黄河下游游荡型河段的治理方略. *水利学报*, 42(1): 8-13) [DOI: 10.13243/j.cnki.slxb.2011.01.005]
- Zhang Y J, Xian C L, Chen H, Grieneisen M L, Liu J M and Zhang M H. 2016. Spatial interpolation of river channel topography using the shortest temporal distance. *Journal of Hydrology*, 542: 450-462 [DOI: 10.1016/j.jhydrol.2016.09.022]
- Zhao Y J, Wu P F, Li J X, Lin Q and Lu Y. 2019. A new algorithm for the automatic extraction of valley floor width. *Geomorphology*, 335: 37-47 [DOI: 10.1016/j.geomorph.2019.03.015]
- Zheng S, Wu B S and Tan G M. 2014. Review on the self-adjustment behavior of alluvial rivers based on the concept of macro system. *Journal of Sediment Research*, (5): 73-80 (郑珊, 吴保生, 谈广鸣. 2014. 基于宏观系统的冲积河流自动调整研究评述. *泥沙研究*, (5): 73-80) [DOI: 10.16239/j.cnki.0468-155x.2014.05.003]
- Zhou H W, Liu S X, Mo X G, Hu S, Zhang L, Ma J, Bandini F, Grosen H and Bauer-Gottwein P. 2023. Calibrating a hydrodynamic model using water surface elevation determined from icesat-2 derived cross-section and sentinel-2 retrieved sub-pixel river width. *Remote Sensing of Environment*, 298: 113796 [DOI: 10.1016/J.RSE.2023.113796]
- Zhu X, Song X, Leng P and Hu R. 2021. Spatial downscaling of land surface temperature with the multi-scale geographically weighted regression. *National Remote Sensing Bulletin*, 25(8): 1749-1766 (祝新明, 宋小宁, 冷佩, 胡容海. 2021. 多尺度地理加权回归的地表温度降尺度研究. *遥感学报*, 25(8): 1749-1766) [DOI: 10.11834/jrs.20211202]
- Zwenzner H and Voigt S. 2009. Improved estimation of flood parameters by combining space based SAR data with very high resolution digital elevation data. *Hydrology and Earth System Sciences*, 13(5): 567-576 [DOI: 10.5194/hess-13-567-2009]

Progress and prospects in river cross section extraction based on multi-source multisource remote sensing

XUE Yuan^{1,2,3}, QIN Chao^{1,2,3}, XU Mengzhen^{1,2,3}, FU Xudong^{1,2,3}, LI Dan⁴,
WU Baosheng^{1,2,3}, WANG Guangqian^{1,2,3}

1. State Key Laboratory of Hydrosience and Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

2. Key Laboratory of Hydrosphere Sciences of the Ministry of Water Resources, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

3. Department of Hydraulic Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

4. Emergency Science Research Academy, China Coal Research Institute, China Coal Technology & Engineering Group Co., Ltd., Beijing 100013, China

Abstract: Natural rivers carry water and materials within a certain boundary geometry. Research on rivers often frequently involves extracting the geometric information of river surfaces and boundaries or hydraulic characteristics, such as flow velocity and discharge. Among these hydraulic attributes, geometric data that pertaining to river cross sections and other river features, which are easier to observe than the dynamic flow characteristics, are indispensable for conducting research on hydrological processes and material fluxes within a river system. Traditionally, the extraction of such data has relied heavily on field measurements, posing challenges in obtaining data for from inaccessible areas, such as mountainous regions, canyons, disaster-prone regions, or expansive river basins. With the continuous advancement of multi-source remote sensing technology, which encompassing includes underwater remote sensing, near-earth Earth remote sensing, and satellite remote sensing, it has become possible to addressing the data scarcity in mountainous regions, canyons, and other areas has become possible by integrating multi-source remote sensing observations with limited ground measurements and establishing automatic extraction methods. Building upon the advancements made in the extraction of river cross section morphology over the past two decades, this paper study examines the strengths and limitations of current methods. This study presents an integrated “air-space-ground” remote sensing data observation scheme, amalgamated combined with the corresponding automatic extraction methodologies, such as river surfaces extraction method, river width, extraction method and river water level extraction methods, to extract river information, particularly cross section morphology, in data-scarce or large-scale river basins. Furthermore, this study offered offers valuable insights into the future development trends by considering the existing technical progress in the field.

Key words: cross section morphology, multi-source remote sensing, integrated “air-space-ground” observation, automated extraction

Supported by National Natural Science Foundation of China (No. U2243218, U2243222); Fund Program of State Key Laboratory of Hydrosience and Engineering (No. sklhse-TD-2024-E01, sklhse-2023-B-03, sklhse-2024-B-01)