

现代浅水三角洲分流河道宽度自动提取及 沉积模式重构：以赣江三角洲为例^{*}

罗灿莹¹ 张 莉¹ 闫占冬³ 张子尧⁴ 窦鲁星²
邓 帆¹ 刘普鑫¹ 张伟庆² 吴晓明³

1 长江大学地球科学学院, 湖北武汉 430100

2 长江大学资源与环境学院, 湖北武汉 430100

3 中国石油长庆油田分公司第七采油厂, 陕西西安 745000

4 中国石油长庆油田分公司第二采油厂, 甘肃庆城 745100

摘 要 浅水三角洲河道网络结构复杂, 以往分流河道形态表征研究中, 缺乏河宽空间连续性量化数据支撑。作者聚焦于河道形态参数的量化表征, 研究赣江三角洲分流河道宽度的空间连续变化特征, 旨在为储集层构型研究提供河道宽度空间变化的约束条件, 进而完善储集层构型表征方法体系。基于 Google Earth Engine (GEE) 大数据云计算平台, 改进 RivWidthCloud 河宽提取算法, 实现了赣江三角洲分流河道连续宽度数据的自动化提取, 揭示浅水三角洲平原分流河道宽度的空间连续变化规律。结果表明: (1) 算法优化后提取的河宽数据与实测值具有显著相关性 ($R^2=0.84$), 验证了该方法在河道形态监测中的可靠性与适用性; (2) 赣江主支河道宽度季节变幅显著 (旱季平均河宽 444.85 m, 雨季平均河宽 650.75 m, 增幅 46%), 明显高于其他 2 条分流河道; (3) 河道宽度与分汊频率呈显著空间耦合关系: 分汊口上游段宽度急剧增加, 分汊后次级河道宽度显著减小; (4) 根据连续河道宽度曲线 (即连续河宽数据点变化趋势线), 向三角洲下游方向, 分流河道宽度数据有整体降低趋势, 但仍呈多级次波动的震荡变化; (5) 70% 的类心滩发育区呈现 “滩头宽, 滩颈窄, 滩尾较宽” 的宽度变化模式, 对应河道宽度曲线表现为 “高一低一较高” 的三段式特征。连续河宽量化方法为现代三角洲沉积研究提供了新工具, 其揭示的河道尺度变化规律可为分流河道规模的精细表征、储集层构型建模的几何约束及小尺度沉积相图编制提供定量依据。

关键词 Google Earth Engine (GEE) 浅水三角洲 分流河道 RivWidthCloud 算法 储集层构型建模 赣江三角洲

第一作者简介 罗灿莹, 女, 1999 年生, 硕士研究生, 主要从事沉积学研究工作。E-mail: luocanying2823@163.com。

通讯作者简介 张莉, 女, 1988 年生, 副教授, 主要从事沉积学、储层表征与建模研究。E-mail: zhangx0522@qq.com。

中图分类号: P618.13 文献标志码: A

Automatic extraction of distributary channel width and reconstruction of sedimentary patterns in modern shallow-water deltas: a case study of Ganjiang Delta

^{*} 国家自然科学基金青年科学基金项目 (编号: 42202177) 资助。[Financially supported by Youth Science Fund Project of the National Natural Science Foundation of China (No. 42202177)]

收稿日期: 2025-04-03 改回日期: 2025-05-28

LUO Canying¹ ZHANG Li¹ YAN Zhandong³ ZHANG Ziyao⁴ DOU Luxing²
DENG Fan¹ LIU Puxin¹ ZHANG Weiqing² WU Xiaoming³

¹ School of Geosciences, Yangtze University, Wuhan 430100, China

² College of Resources and Environment, Yangtze University, Wuhan 430100, China

³ The Seventh Oil Production Plant of Changqing Oilfield, PetroChina, Xi'an 745000, China

⁴ The Second Oil Production Plant of Changqing Oilfield, PetroChina, Gansu Qingcheng 745100, China

Abstract The channel network structure of shallow delta is complex. In the previous studies on the morphological characterization of distributary channels, there was a lack of quantitative data support for the spatial continuity of river width. This paper focuses on the quantitative characterization of channel morphological parameters and studies the spatial continuous variation characteristics of the width of the distributary channels in the Ganjiang Delta, aiming to provide constraints on the spatial variation of channel width for reservoir configuration research, and then improve the reservoir configuration characterization method system. Based on the Google Earth Engine big data cloud computing platform, this paper improves the RivWidthCloud river width extraction algorithm, realizes the automated extraction of continuous width data of the Ganjiang Delta distributary channel, and reveals the spatial continuous variation law of the width of the distributary channel in the shallow delta plains. The results show that: (1) the river width data extracted after algorithm optimization have significant correlation with the measured values ($R^2=0.84$), which verifies the reliability and applicability of this method in river morphology monitoring; (2) the seasonal variation of the width of the main branch of Gan River is significant (the average river width in the dry season is 444.85 m, and the average river width in the rainy season is 650.75 m, an increase of 46%), which is significantly higher than that of the other two tributary channels; (3) There is a significant spatial coupling relationship between channel width and bifurcation frequency: the width of the upstream section of the bifurcation mouth increases sharply, and the width of the secondary channel decreases significantly after bifurcation; (4) According to the continuous channel width curve (the trend line of continuous river width data points), the width data of the distributary channels has an overall decreasing trend towards the downstream of the delta, but still shows an oscillating change with multiple levels of fluctuations. (5) 70% of the quasi-central-bar development areas present a width variation pattern of “wide beach head, narrow beach neck, and wider beach tail”, and the corresponding river channel width curve shows a three-stage feature of “high-low-higher”. The continuous river width quantification method provides a new tool for the study of modern delta sedimentation. The law of distributary channels scale variation revealed by it can provide a quantitative basis for fine characterization of the scale of distributary channels, geometric constraints for reservoir architecture modeling, compilation of small-scale sedimentary facies maps.

Key words Google Earth Engine (GEE), shallow water delta, distributary channel width, RivWidthCloud, reservoir architecture modeling, Ganjiang Delta

About the first author LUO Canying, born in 1999, is a master degree candidate. She is mainly engaged in sedimentology. E-mail: luocanying2823@163.com.

About the corresponding author ZHANG Li, born in 1988, is an associate professor. She is mainly engaged in sedimentology, reservoir characterization and modelling. E-mail: zhangx0522@qq.com.

浅水三角洲是三角洲沉积体系中一种特殊的三角洲类型,其发育于水体较浅、整体沉降缓慢且稳定、地形相对平缓的湖盆中,是国内外油气勘探的重要油气储集层(楼章华等,1999)。中国大型含油气盆地如渤海湾盆地(李建平,2023)、松辽盆地(王立武,2012)、鄂尔多斯盆地(朱筱敏等,2013)都发育浅水湖盆三角洲沉积,具有巨大的勘探和开发潜力(朱筱敏等,2016)。分流河道作为浅水三角洲的骨架,是浅水三角洲沉积的重要储集砂体(Robertsh,1997;邹才能等,2008;邓庆杰等,2015)。然而浅水三角洲分流河道分布样式复杂,单期砂体宽度小、砂体厚度薄(杨征等,2024),导致地下浅水分流河道砂体的分布规律仍不清晰,相关的研究仍亟待深入。相比于古代浅水三角洲沉积,现代浅水三角洲沉积更为直观,卫星图像资料获取方便,现代浅水三角洲原型沉积模式研究可以克服地下浅水三角洲砂体表征和预测面临的多解性强的问题,能够在现代地貌动力学研究成果和地下复杂储集层构型研究难题之间架起桥梁(张昌民等,2010)。因此现代三角洲沉积研究也被认为是研究分流河道分布样式、内部砂体类型、砂体规模及沉积模式的最佳手段(谢爽慧等,2025)。

现代浅水三角洲的几何形态演变特征与分流河道定量化表征的研究一直备受沉积学家关注(Caldwell and Edmonds,2014)。研究逐渐由定性描述向多元定量化表征方向转变(马世忠和张永清,2012;张昌民等,2024)。在这一过程中,为定量获取和分析分流河道的几何形态参数,卫星图像与遥感影像的应用及普及起到了重要作用,增大了观测尺度,并推动了由局部到整体的研究(张昌民等,2010)。孙廷彬等(2015)根据高清卫星影像量取河道宽度,并统计河道的分汊角度、分汊频率及河道的弯曲度,研究分支河道宽度变化规律,揭示浅水三角洲分支河道砂体储集层平面展布规律。谢爽慧等(2025)对现代三角洲的分支河道形态学参数进行定量研究,根据分支河道形态学差异识别三角洲类型。段冬平等(2014)利用现代三角洲沉积的卫星照片获取分流河道与河口坝的定量数据,并分析其平面分布规律,丰富与完善储集层地质知识库。浅水三角洲河道网络结构复杂,前人测量的范围比较局限,缺少连续河道宽度分析,且工作量较大;测量结果主要是多个局部测量

数据的集合,导致分流河道宽度测量数据不够连续,成果数据在空间上连续性较差。对河道宽度的分布规律认识不够深入,尤其缺乏针对分汊区域的河道宽度空间变化认识。近年来,随着遥感技术和地理信息系统(GIS)的发展,谷歌地球引擎(Google Earth Engine, GEE)作为一个集成全球时空范围的卫星影像数据并提供快捷高效的计算能力的云计算平台(Li *et al.*, 2007; Gilvear and Bryant, 2016),已成为区域尺度长时序河宽动态变化监测和分析的有效技术工具(Apuraba *et al.*, 2012)。借助遥感图像数据,在没有观测数据的流域中提取河宽的替代方法逐渐发展起来,使分支河道的自动提取及其宽度测量成为可能。其中 RivWidthCloud 作为一种基于 Google Earth Engine (GEE) 的自动化算法(Yang *et al.*, 2020),能够从遥感影像中高效提取空间连续河流宽度数据。近几年已经初步应用在分析遥感、水文(谢朝帅等,2024)等领域,但在沉积学领域的应用仍处于起步阶段。

赣江三角洲作为典型的现代浅水三角洲之一,其蕴含的分流河道沉积相关信息较为丰富(黄秀等,2013;段冬平等,2014;金振奎等,2014;李燕等,2014;孙廷彬等,2015),分支河道的形态、分布及其变化特征对于理解沉积过程、预测储集层分布及演变规律具有关键作用。同时,该地区卫星影像资料丰富,开展分流河道宽度定量分析测量的理想研究对象。因此选取赣江三角洲为研究对象,结合基于多时相影像融合 RivWidthCloud 算法对现代典型湖盆三角洲沉积分流河道的河宽数据进行提取,通过对比分析 12 月份(旱季)和 6 月份(雨季)的河道宽度变化,剖析赣江三角洲各分支河道河宽空间变化规律以及季节性变化特征,建立连续河道宽度变化曲线。利用连续河宽曲线,讨论赣江浅水三角洲分流河道及填充沉积单元的定量几何形态特征,分析分支河道平面展布规律及其地质意义,为类似地下储集层的精细解剖研究提供定量数据的指导。

1 研究区概况及数据

1.1 概况

鄱阳湖位于江西省境内,28°24′~29°46′N, 115°49′~116°46′E,是中国面积最大的淡水湖泊,

面积约为 4125 km^2 ，总体呈南北向展布，北部与长江相接。鄱阳湖周围有赣江、饶河、抚河、修水、信江五大河流入湖。以鄱阳湖为中心，形成汇聚状水系特征(图 1)。

赣江三角洲面积为 1544 km^2 ，是鄱阳湖周围规模最大的三角洲。顶点位于鄱阳湖南部凸起，下游不断分汊，末端延伸入鄱阳湖。赣江三角洲可划分为三角洲上平原、三角洲下平原、三角洲前缘 3 个亚相(图 1)，赣江三角洲平面展布广，三角洲上平原位于洪水线以上，是三角洲长期处于水上的部分；三角洲下平原位于枯水线与洪水线之间，每年枯水期暴露，洪水期被淹没。

分流河道构成赣江三角洲的骨架，在平面上呈条带状分布。分流河道在赣江三角洲平原主要有主支、中支、南支 3 支，总体水流为西南到东北走向。鄱阳湖流域地处南方丘陵山区，发生暴雨多，鄱阳湖流域丰水期为每年的 4 月份至 9 月份，4~6 月份降水集中、强度大，到 9 月份月上旬，雨量开始减少，枯水期为每年 10 月份至次年 3 月份。

1.2 数据来源

1.2.1 Landsat 8 卫星数据

本研究基于美国地质勘探院 (USGS) 提供的 Landsat 8 卫星影像提取河道宽度数据。Landsat 8 卫星于 2013 年发射，搭载了 Operational Land Imager (OLI) 和 Thermal Infrared Sensor (TIRS) 2 个传感器，能够提供多光谱遥感数据，空间分辨率为

30 m ，并已全部集成于 GEE 平台中。本研究主要利用 OLI 传感器获取的可见光、近红外和短波红外波段数据，选取影像数据时间范围为 2019—2021 年的 6 月份 (雨季)、12 月份 (旱季) 用于识别河道边界并提取河道形态信息。

1.2.2 其他辅助数据

使用到的辅助数据包括：(1) 实地测量数据。利用高精度 GPS 设备，沿研究区河段布设若干测量断面，测量间隔为 1 km ，并使用测距仪、全站仪等设备精确测量每个断面的河宽，得到实地定点测量数据，获取时间为 2019 年 12 月份。这些实地测量数据作为河宽真值，用于评估基于多时相影像融合 RivWidthCloud 算法自动提取的河宽数据精度。(2) MERIT DEM 数据集。MERIT DEM 是通过消除现有数字高程模型 (NASA SRTM3 DEM、JAXA AW3D DEM、Viewfinder Panoramas DEM) 中的主要误差成分而产生的三角秒分辨率的高精度全球 DEM (赤道上约 90 m)。MERIT DEM 利用多个卫星数据集和过滤技术，分离了绝对偏差、条纹噪声、斑点噪声和树高偏差。去除误差后，以 2 m 或更好的垂直精度测绘的土地面积从 39% 增加到 58%。在高度误差大于地形变化的平坦地区发现了明显的改进，河网和山谷结构等地貌变得清晰可见。(3) 全球河流宽度数据 (Global River Widths from Landsat (GRWL) Database)。GRWL 数据集是付品等 (2015)、Allen 和 Pavelsky (2015, 2018))

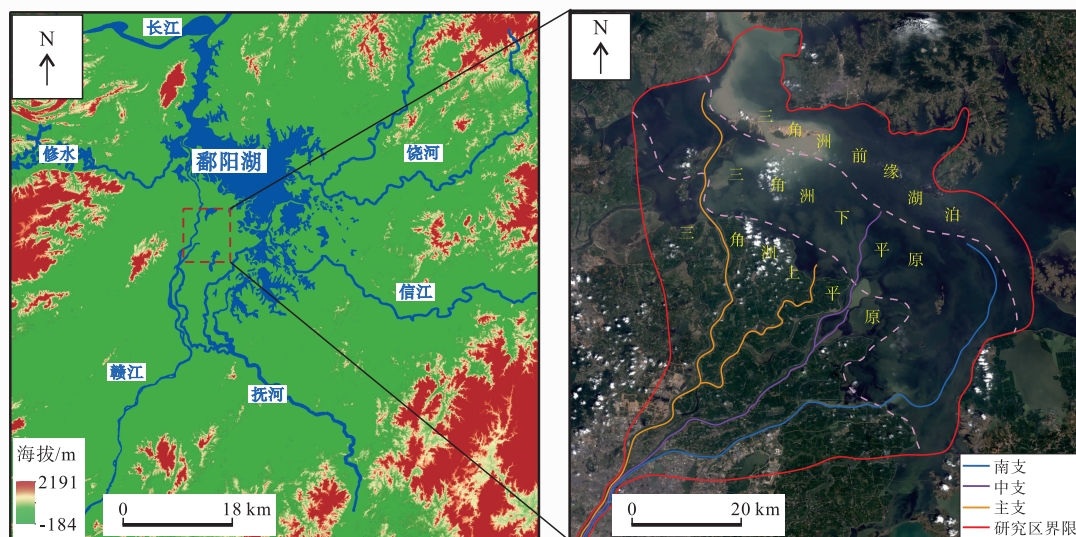


图 1 鄱阳湖赣江三角洲地理位置

Fig. 1 Location of Ganjiang Delta in Poyang Lake

基于 Landsat 8 影像数据和河宽自动提取工具 Riv-Width(Pavelsky and Smith, 2008)进行提取的全球河道宽度数据,包含了与每个中心线位置相关的宽度值,作为先验数据,用于识别全球范围内宽度大于 30 m 的河流。

2 研究方法

2.1 基于多时相影像融合的 RivWidth-Cloud 算法

RivWidthCloud 是一种基于 Google Earth Engine 平台的河宽自动提取算法 (Yang *et al.*, 2020), RivWidthCloud 算法基于单景遥感影像实现河道宽度自动提取,但在去云处理过程中会掩膜云覆盖区域的像素,导致数据缺失。为克服这一局限性,本研究采用多时相影像融合方法,整合 2019 年至 2021 年 12 月份和 6 月份的遥感影像,对于每个像素,按照影像的加载顺序 (2019 年、2020 年、2021 年) 优先使用第 1 个有效值,即某年份的影像在该像素处被掩膜,则使用下 1 个年份的影像值降低了云覆盖对水体提取的干扰。相较于单景影像,融合后的影像数据具有更好的空间连续性,能够更准确地提取大范围水体信息。同时,该方法通过整合多个月份的水体变化特征,为分析河道宽度的季节性变化规律提供了可靠的数据基础。

基于多时相融合后的影像数据提取河道宽度,其主要步骤是从水体掩膜图像中提取河道中心线,再根据河道中心线计算河道宽度。RivWidthCloud 算法计算河道宽度主要包括 3 个步骤:

1) 从多时相融合后的遥感影像中提取水体掩膜图像:首先是从多时相融合后的 landsat 8 影像中提取水体掩膜图像,使用 Zou 等 (2017) 提出的方法提取 Landsat 影像中的水体。通过归一化差异水体指数 (MNDWI)、归一化植被指数 (NDVI) 和增强植被指数 (EVI) 的联合提取研究区水体,得到水体掩膜图像 (Townshend and Justice, 1986; Huete *et al.*, 2002; Xu, 2005)。再基于 Landsat 影像全球河流宽度数据集 (GRWL Database) 中的全球河流宽度区分水体掩膜图像中的河道像元和非河道水像元。除去水体掩膜图像中距离 GRWL 中心线 4 km (该参数可修改) 以外的水体,以获得河道边界 (图 2)。对于河道边界内面积小于 0.3 km² (该参数可修改) 的其他岛屿和水坝进行填充,填

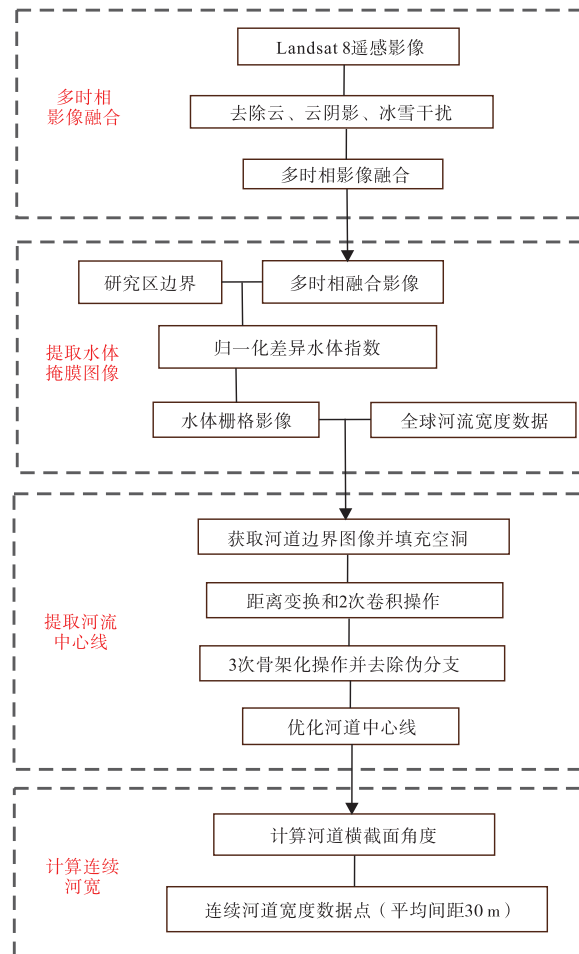


图 2 基于多时相影像融合的 RivWidthCloud 算法河道宽度自动提取过程

Fig. 2 Automatic extraction process of river width using RivWidthCloud algorithm based on multi-temporal image fusion

充后得到河道通道图像。

2) 从河流通道图像中获取河流中心线:河流中心线提取方法采用基于距离变换的形态学算法。首先对二值化河道图像执行欧氏距离变换 (Euclidean Distance Transform), 为每个河道像素赋予其到最近非河道像素的距离值。经距离变换后,河道中心区域像素呈现局部距离最大值特征。随后,采用 Sobel 算子 (3×3 卷积核) 对距离变换图像进行梯度计算,中心线附近像素梯度值趋近于零,形成明显的局部极小值特征。通过设定经验阈值 ($\theta = 0.9$) 进行二值化处理,获得初始中心线。为提高中心线提取精度,采用迭代式骨架化 (Skeletonization) 算法对初始中心线进行 3 次形态学细化处理,最终生成单像素宽的中心线矢量。对于骨架化过程中产生的伪分支,利用基于拓扑分析的修剪算

法进行处理，即从每个中心线分支端点开始，沿分支方向进行追踪，当满足以下任一条件时执行修剪操作：(1) 分支长度 $L \leq 500$ 像素；(2) 至下 1 节点的累计距离 $D < 500$ 像素。经处理后，中心线拓扑结构得到优化，有效消除了伪分支干扰，最终获得符合河道形态学特征的 1 像素宽的中心线网络 (Donchyts *et al.*, 2016)。

3) 沿中心线提取连续河道宽度数值：将河流中心线图像的每个中心线像素与 1 个 9×9 像素核进行卷积，该核除了沿边缘的像素外，其余的值都为零。从逆时针移动的中间位置开始，计算每个中心线像素水平线与连接像素本身和内核中心线之间的角度（以度为单位），得到每个边缘像素的卷积值，该卷积值加上 90° ，除以 2 时，近似于它们的正交方向。获得正交方向后，沿这些正交方向计算每个像素的河流宽度。

2.2 河宽数据测量误差验证

为验证基于多时相影像融合 RivWidthCloud 算法提取河道宽度数据的精度，本研究采用实地测量与影像提取结果对比分析的方法。在研究区域内，以 1 km 为间隔沿河道纵向布设采样点，于枯水期采用高精度测量仪器获取河道宽度的原位观测数据。针对每个实测点位，基于空间最近邻原则提取距离最近的 5 个河宽提取数据，通过算术平均计算获得该测量点位的河道宽度估算值。使用平均绝对百分误差 (MAPE) 和均方根误差 (RMSE) 评估影像提取数据的精度。

$$MAPE = \frac{1}{n} \times \sum_{i=1}^n \left| \frac{W_i - \overline{W}_i}{\overline{W}_i} \right| \times 100\% \quad (1)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (W_i - \overline{W}_i)^2} \quad (2)$$

式中： W_i 为原位测量数据，m； $\overline{W}_i$ 为估算的河道宽度，m。

3 结果与讨论

3.1 基于多时相影像融合 RivWidthCloud 算法河宽数据提取

为深入研究赣江各分支河道宽度的沿程变化规律，本研究基于 GEE 云计算平台，采用基于多时相影像融合 RivWidthCloud 算法连续河宽自动提取

算法，分别对赣江三角洲平原主支、中支及南支 3 条分支河道河宽进行提取。

GEE 平台具有强大的并行计算能力、海量遥感数据存储及高效的数据共享机制，可以实现大范围河道宽度数据的自动化提取与存储。以赣江三角洲分汉口 (图 3-a) 为中心点，获取 3 支分流河道的空间连续河宽数据点共 8900 个，每个数据点均精确表征对应河段的实际宽度，并基于 Landsat 8 卫星影像的 30 m 空间分辨率进行等间距采样，确保相邻数据点的平均间距为 30 m，数据具有空间连续性与代表性特征。

该数据集在 GEE 平台中可实时可视化，并以图层形式直观呈现河道宽度的空间分布特征 (图 3-b)。数据分析表明，河宽数据点序列具有显著的连续性，能够准确反映赣江三角洲分流河道的沿程宽度变化趋势。生成连续河宽曲线，用于指示现代沉积特征，为后续建立浅水三角洲分流河道数据库提供可靠的数据支撑 (图 3-c)。

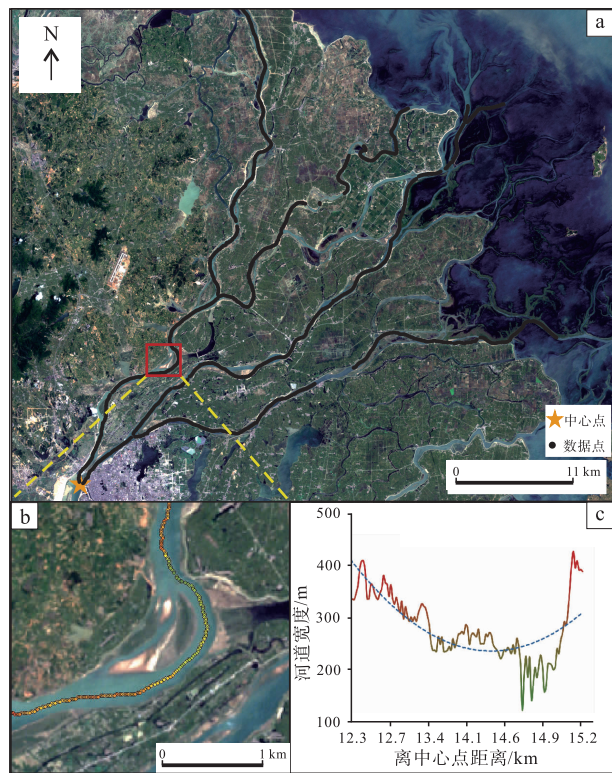
3.2 河宽数据误差验证

Allen 和 Pavelsky (2018) 采用原位实测河宽数据对基于 RivWidthCloud 算法提取的全球河流宽度数据进行验证，结果显示其平均绝对误差 (MAPE) 为 43.1 m，均方根误差 (RMSE) 为 99.2 m。本研究基于相同方法，将赣江三角洲分流河道的影像提取数据与实测值进行系统对比验证。验证结果表明 (图 4)，河宽提取结果与实测数据具有较高的相关性 ($R^2 = 0.84$)，最大平均绝对百分比误差 (MAPE) 约为 16%。具体而言，赣江三角洲主支河道宽度的平均 MAPE 和 RMSE 分别为 8.67% 和 16.57 m；中支河道宽度的平均 MAPE 和 RMSE 分别为 6.14% 和 10.34 m；南支河道宽度的平均 MAPE 和 RMSE 分别为 8.34% 和 12.10 m。相较于全球尺度的验证结果，本研究在赣江三角洲区域的河道宽度提取精度有所提升，表明基于多时相影像融合 RivWidthCloud 算法在区域尺度上能够更准确地表征河流宽度的实际空间变化特征，这一结果进一步验证了该算法在局部河道形态监测中的适用性和可靠性。

3.3 赣江三角洲分支河道的连续河道宽度数据分析

3.3.1 赣江三角洲平原分支河道

赣江三角洲平原的沉积体系以分流河道为骨架



a—分流河道连续河宽数据点分布图；b—距中心点 12.3 km 处局部连续河道宽度数据点；c—距中心点 12.3 km 处局部连续河宽折线图

图 3 赣江三角洲主支连续河宽数据结果

Fig. 3 Results of continuous river width data in Ganjiang Delta

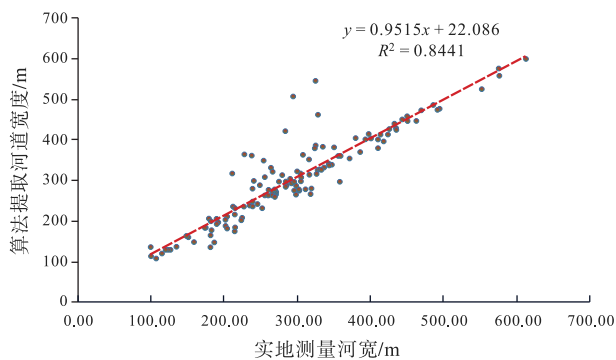


图 4 赣江三角洲连续河宽和原位测定河宽对比验证

Fig. 4 Comparison and verification of continuous river width and in-situ measured river width in Ganjiang Delta

结构。赣江三角洲平原地区分支河道内主要发育边滩、水道、汉口滩和并口滩 4 种类型沉积砂体。而类心滩（李燕等，2014）是改造早期沉积的边滩形成的，是边滩类型之一，其形成是在靠近分流河道的凸岸，边滩与凸岸的河岸之间冲刷形成浅水道，平面上呈新月形，看上去像是发育在分流河道

中部的“心滩”，但是仍具有边滩的沉积特征（图 5）。其形成机制是受到河道单向环流的影响，在类心滩滩头（图 6-a）处出现分汊，凹岸发生侵蚀，凸岸发生沉积，滩尾处两条浅河道合并，砂体逐渐朝下游方向延伸（图 6-b）。由于水动力强弱的差异，在类心滩处形成 2 条浅水道，1 条为水动力强、河道发育相对于较宽的主河道，1 条为水动力弱、河道发育相对于窄的次级河道（图 6）。

沿河道推进方向，主支河道内发育 7 个类心滩，在三角洲上平原地区有 2 次分汊，首次分汊位置在港下村附近，分汊角度为 92° ，右汊仍为主体部分，左汊为赣北支，赣北支在下堡附近再次进行分汊，分汊角度为 54° ，分汊之后向东部与中支分流河道汇合（图 5）。

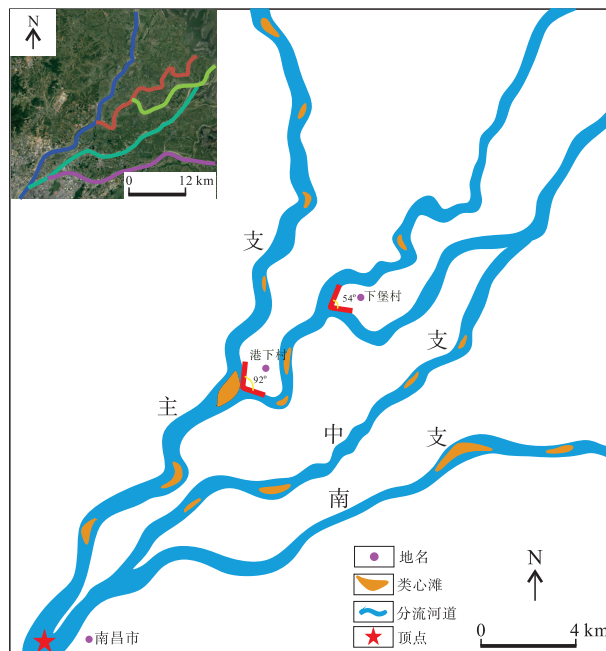


图 5 赣江三角洲平原分支河道

Fig. 5 Location of tributary channels in Ganjiang Delta

中支整体河道宽度范围在 300 ~ 500 m 之间，在上平原地区首次分汊后，河道的宽度为 320 m，河道较为顺直，平均河道弯曲度为 1.02，其河道宽度较上级变化幅度小，河道宽度范围在 200 ~ 400 m 之间，河道向下游方向没有分汊，分流河道内发育 4 个类心滩沉积，类心滩的规模相对于主支发育的类心滩规模小。

南支分流河道与中支部分分流河道发育特征类似，在上平原地区分流河道较为顺直，河道整体宽

度范围与主支分流河道宽度范围差距大，河道宽度整体范围集中在 60~450 m，分流河道内部发育 2 个类心滩(图 5)。

3.3.2 河道宽度的季节性变化特征

基于 Landsat 8 遥感影像数据，提取了主支河道、中支河道和南支河道 3 条分流河道在 12 月份(旱季)和 6 月份(雨季)的河道宽度数据，得到河道宽度沿干流距离增加的变化，分析了其季节性变化规律。季节性变化对赣江三角洲的河道连通性和分支河道形态具有显著影响。雨季来水量增加导致河道拓宽，而旱季水量减少则可能诱发局部河道的退化或淤积。

研究表明，3 条分流河道的宽度在旱季和雨季之间存在显著差异。其中，中支河道旱季平均宽度为 556.27 m(图 7-d)，雨季增加至平均宽度 590.13 m(图 7-c)，增幅为 6.09%；南支河道旱季平均宽度为 356.11 m(图 7-f)，雨季增加至平均宽度 419.66 m(图 7-e)，增幅为 17.84%；主支河道旱季平均宽度为 444.85 m(图 7-b)，雨季增加至平均宽度 650.75 m(图 7-a)，增幅为 46%，是 3 条分流河道中变化幅度最大的 1 条，主支河道由于坡度较大、汇水速度快，其季节性变化尤为显著。整体而言，雨季来水量的增加是河道宽度变化的主要驱动因素。此外，河道形态和局部地形对宽度变化有一定影响。降雨量是影响河道宽度的主要因素之一，其季节性变化对河道形态具有显著影响。6 月份通常为研究区的丰水期，降雨量充沛，河流径流量较大，河道宽度相对较宽；而 12 月份

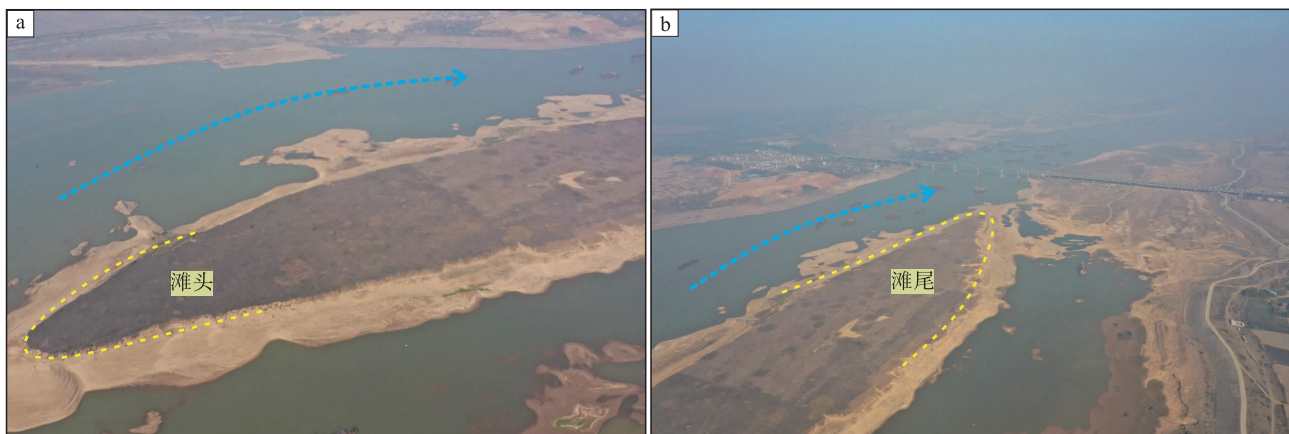
为枯水期，降雨量减少，河流径流量显著下降，河道宽度相对较窄。

3.3.3 赣江三角洲平原分支河道连续宽度变化

定量表征分支河道砂体形态是现代沉积学研究的重要内容，对预测地下储集层砂体规模、非均质性及连通性具有重要指导意义。本研究以赣江三角洲顶点为中心点(图 3-a)，采用基于多时相影像融合 RivWidthCloud 算法沿河道延伸方向提取不同距离节点的河道宽度数据。研究结果表明，赣江三角洲主支河道整体宽度范围介于 80~600 m 之间。沿鄱阳湖三角洲推进方向，河道宽度总体呈递减趋势，分支河道在流动过程中，受河道侵蚀和阻力作用，能量损耗，逐渐降低，导致河道变窄，河道的径流量呈下降趋势。此外，在 5~21 km 区段内，分支河道宽度变化幅度大，河宽最高值为 557 m，河宽最低值为 143 m。在距中心点 21 km 后，河道发生分汊，次级分支河道共享上级分支河道的径流量，导致分汊后河道宽度变化幅度较上游地区小，河宽最高值为 433 m，河宽最低值为 87 m，低值区域位于距中心点 47 km 附近，此时，河道入湖，河流的径流量降到最低(图 8)。

中支河道宽度范围介于 80~650 m 之间。相对主支，中支的分汊频数较少，河道宽度总体呈减小幅比主支河道宽度小。在距中心点 7 km 后，河道发生分汊，河道宽度迅速下降，河道宽度最高值为 545 m，河宽最低值为 97 m(图 9)。

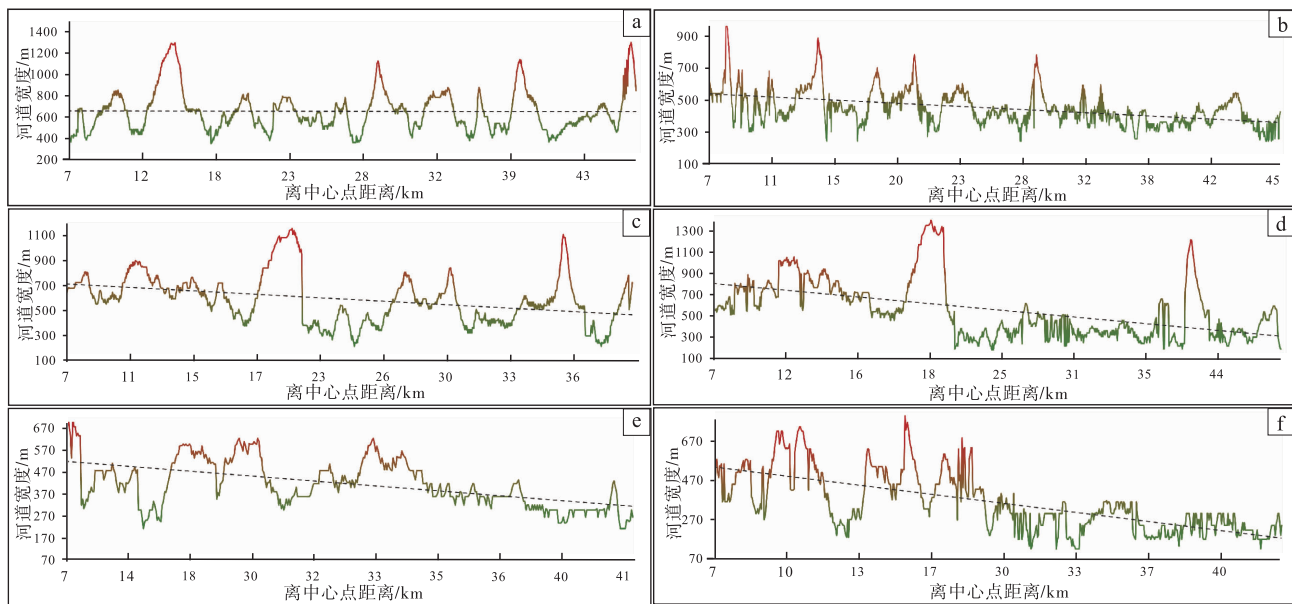
南支河道宽度范围在 60~650 m 之间，河道较为顺直，在与中支河道分开后，河道宽度迅速减



a—类心滩滩头；b—类心滩滩尾

图 6 赣江三角洲类心滩沉积特征

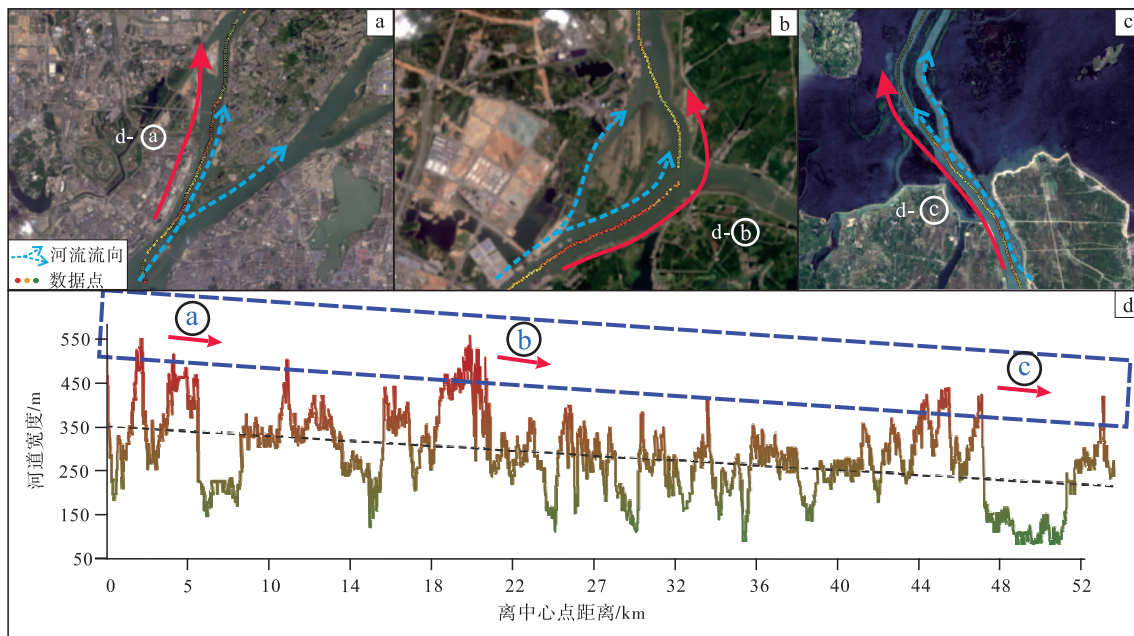
Fig. 6 Sedimentary characteristics of channel bars in Ganjiang Delta



a—主支河道雨季连续河宽变化；b—主支河道旱季连续河宽变化；c—中支河道雨季连续河宽变化；d—中支河道旱季连续河宽变化；
e—南支河道雨季连续河宽变化；f—南支河道旱季连续河宽变化

图 7 赣江三角洲分支河道连续河宽季节性变化

Fig. 7 Seasonal variations in continuous river width of tributary channels in Ganjiang Delta



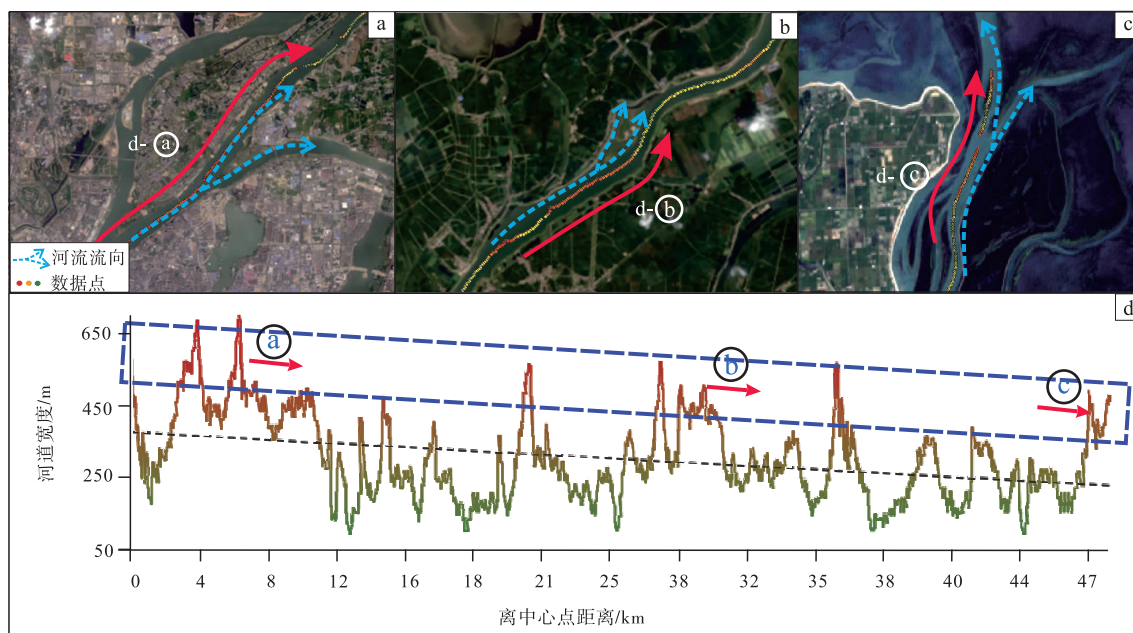
a—距中心点 2.5 km 处局部连续河宽数据点；b—距中心点 20 km 处局部连续河宽数据点；
c—距中心点 46 km 处局部连续河宽数据点；d—河宽变化

图 8 赣江三角洲主支河道连续河宽变化

Fig. 8 Continuous river width changes in main distributary channel in Ganjiang Delta

小，且河道宽度较其他 2 条河道宽度整体偏小。此外，在分汊前，距中线点 6 km 附近，分支河道宽度增大，达到最大值 650 m，增幅为 55%。在下游地区，没有分汊形成，所以河道宽度的变化幅度

小，河道宽度值变化减缓，分布较集中，变化范围介于 165 ~ 500 m 之间。低值区域位于距中心点 37 km 附近，此时，河道入湖，河流的径流量降到最低，河宽最低值为 64 m (图 10)。

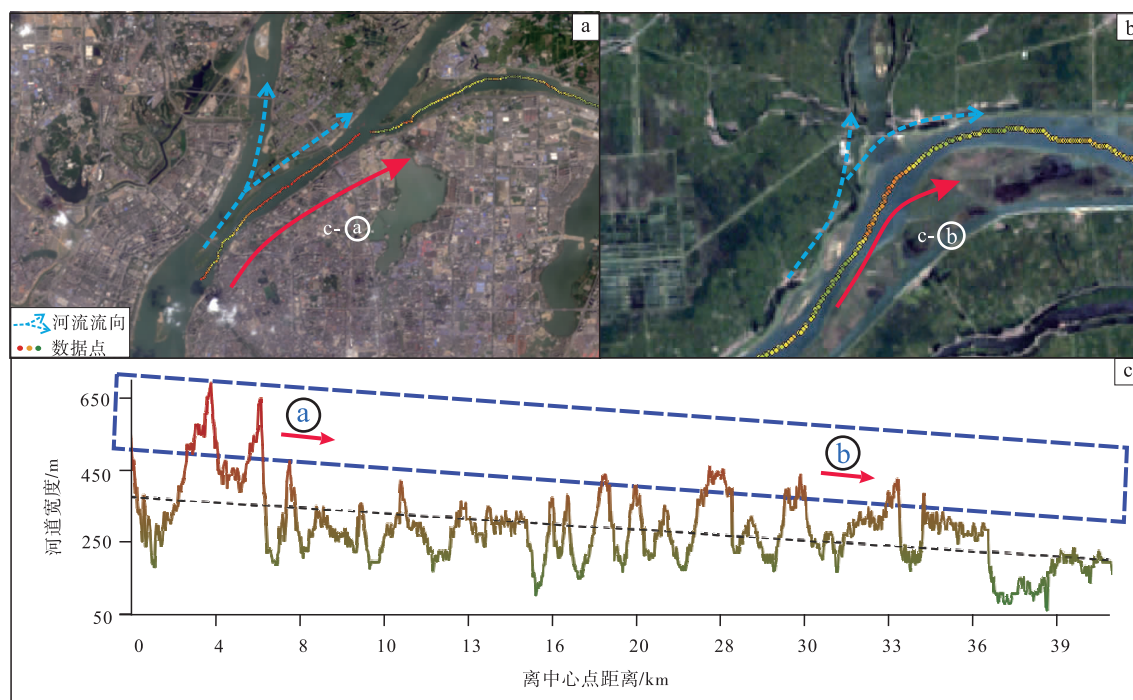


a—距中心点 7 km 处局部连续河宽数据点；b—距中心点 29 km 处局部连续河宽数据点；

c—距中心点 47 km 处局部连续河宽数据点；d—河宽变化

图 9 赣江三角洲中支河道连续河宽变化

Fig. 9 Continuous river width changes in middle distributary channel in Ganjiang Delta



a—距中心点 7 km 处局部连续河宽数据点；b—距中心点 30 km 处局部连续河宽数据点；c—河宽变化

图 10 赣江三角洲南支河道连续河宽变化

Fig. 10 Continuous river width changes in south distributary channel in Ganjiang Delta

3.3.4 分支河道连续河宽曲线与分流河道充填的关系

1) 赣江三角洲类心滩几何特征

河道经过类心滩时,分汊为2条河道,河道较宽的为主河道,河道发育窄的为次级河道。主支分流河道内部发育7个类心滩,滩长度介于0.82~2.83 km之间,宽度介于0.15~1.04 km之间,长宽比介于2.70~6.55之间(图11)。中支河道上游内部发育6个砂质类心滩,滩长度介于0.47~3.96 km之间,宽度介于0.15~1.15 km之间,长宽比介于3.25~6.07之间。南支河道内部发育3个砂质类心滩,滩长度介于0.73~3.19 km之间,宽度介于0.12~0.78 km之间,长宽比介于4.06~6.50之间。南支分流河道宽度相对小,河道内发育的类心滩数量较其他两支少。总体上,三角洲上平原河道内发育的类心滩规模较大,位于三角洲下平原的类心滩规模相对较小。原因主要是,三角洲下平原分流河道的径流量相比于三角洲上平原分流河道径流量小,其河道宽度小,河道稳定性差,发育的类心滩规模较小。根据连续河道宽度数据分析,取赣江三角洲平原分流河道发育的类心滩中主、次河道宽度的平均值,其中次河道宽度与主河道宽度的占比最大值为93%,最小值为20%。主河道平均宽度占滩头处河道宽度的60%,占滩尾处河道宽度66%,而次河道平均宽度平均占滩头处河道宽度的30%,占滩尾处河道宽度33%。75%的类心滩在滩尾处的河宽比滩头处的河道宽度窄。

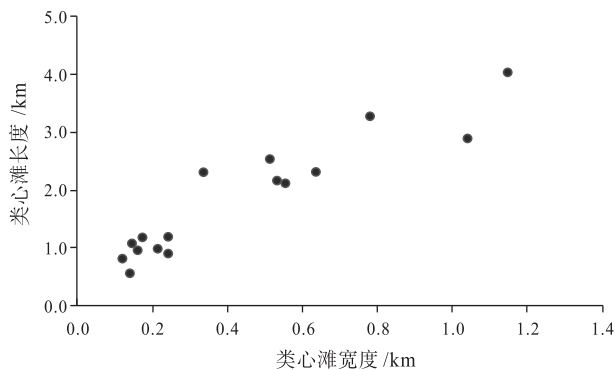


图 11 赣江三角洲类心滩规模

Fig. 11 Scale of channel bars in Ganjiang delta

2) 连续河宽与类心滩关系

距赣江三角洲中心点4.9 km处的类心滩(图12-a, 12-b, 12-c),其滩宽度为0.56 km,滩长

度为2.03 km,长宽比为3.64。分流河道在心滩前为466 m,在经类心滩后分汊,河道分流为2个次级河道,分支河道宽度分别为128~284 m和147~253 m。汇流后,河道宽度为350 m,与分汊前河道宽度相比有所减小。

距赣江三角洲中心点12.3 km处的类心滩(图12-d, 12-e, 12-f),其滩宽度为0.52 km,滩长度为2.46 km,长宽比为4.73 km。分流河道在心滩前为420 m,在经类心滩后分汊,河道分流为2个次级河道,分支河道宽度分别为122~335 m和97~180 m。汇流后,河道宽度为439 m。

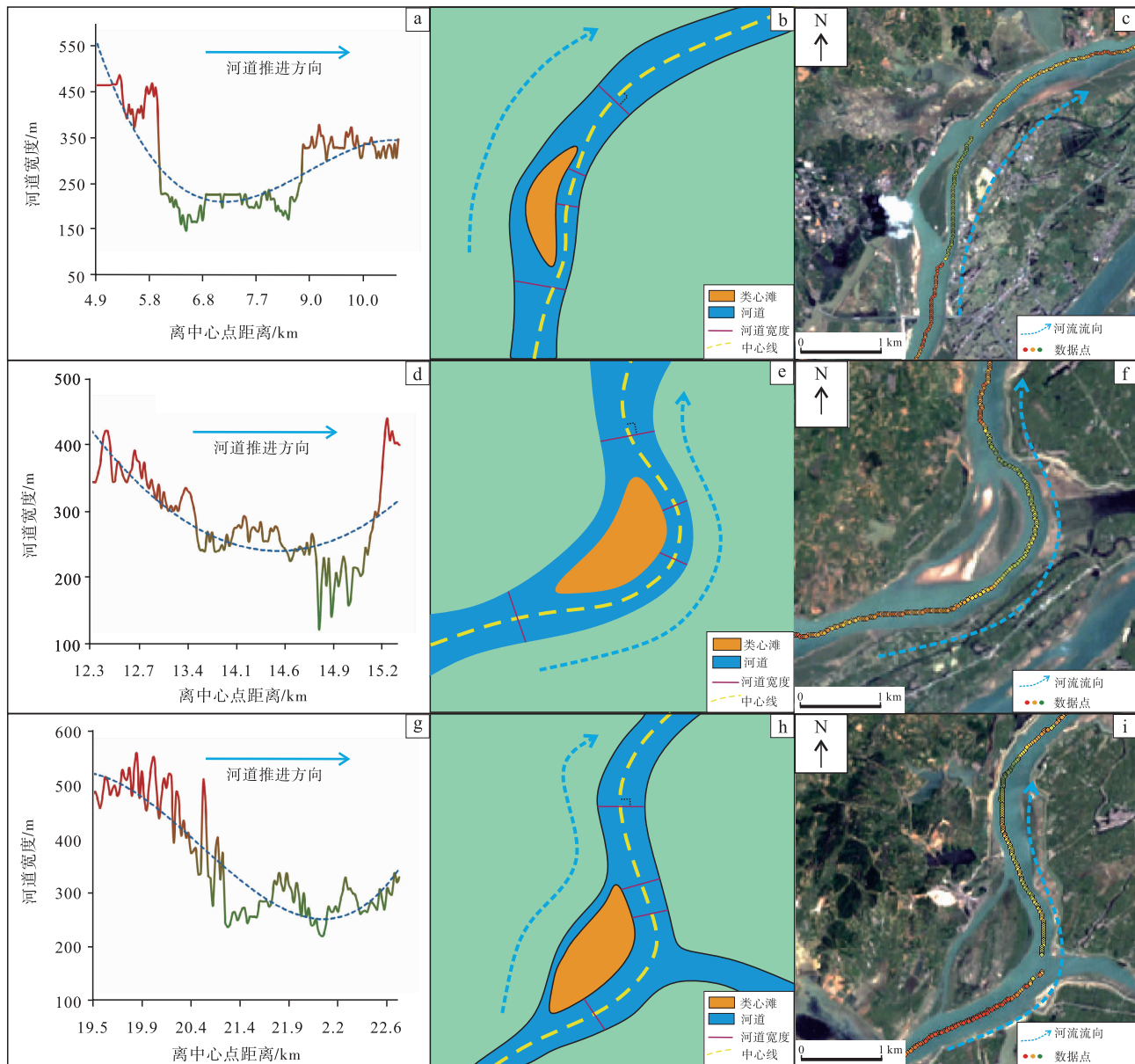
距赣江三角洲中心点19.5 km处的类心滩(图12-g, 12-h, 12-i),其滩宽度为1.04 km,滩长度为2.82 km,长宽比为2.7。分流河道在心滩前为557 m,在经类心滩后分汊的2个分支河道宽度分别为87~120 m和221~328 m。汇流后,河道宽度为368 m,与分汊前河道宽度相比有所减小。因此,河道宽度在经类心滩前呈增长趋势,遇类心滩分汊后,河道宽度迅速减小。

通过统计赣江三角洲平原分流河道中发育的16个类心滩两端河道宽度,研究表明,沿河道推进方向,位于类心滩前端的河道比位于类心滩尾部的河道宽,且占比为80%。在连续河道宽度曲线上呈现“高一低一较高”的趋势。连续河宽曲线对于指导地下储层砂体的精细刻画具有重要意义。

3.4 基于河道宽度连续变化指导的浅水三角洲沉积模式重构

河道宽度是现代沉积定量研究的关键参数之一。在以往研究中,对于浅水三角洲分流河道宽度数据点的获取主要是通过等距测线法以及特殊点位测距法(如分汊点)(段冬平等,2014;孙廷彬等,2015),离散采样导致河道宽度沿程变化被简化为线性递减模型,无法识别微相控制的非线性波动,难以捕捉汉口滩、并口滩及类心滩等微相区引发的周期性宽度震荡,宏观趋势与局部变异的耦合机制尚未明确。

基于多时相影像融合 RivWidthCloud 算法提取的高分辨率河宽数据具有显著的空间连续性优势,为浅水三角洲分流河道形态演化研究提供了全新的数据支撑。该算法获取的河宽数据具有显著的空间连续性优势(平均采样间隔30 m),能够精细揭示



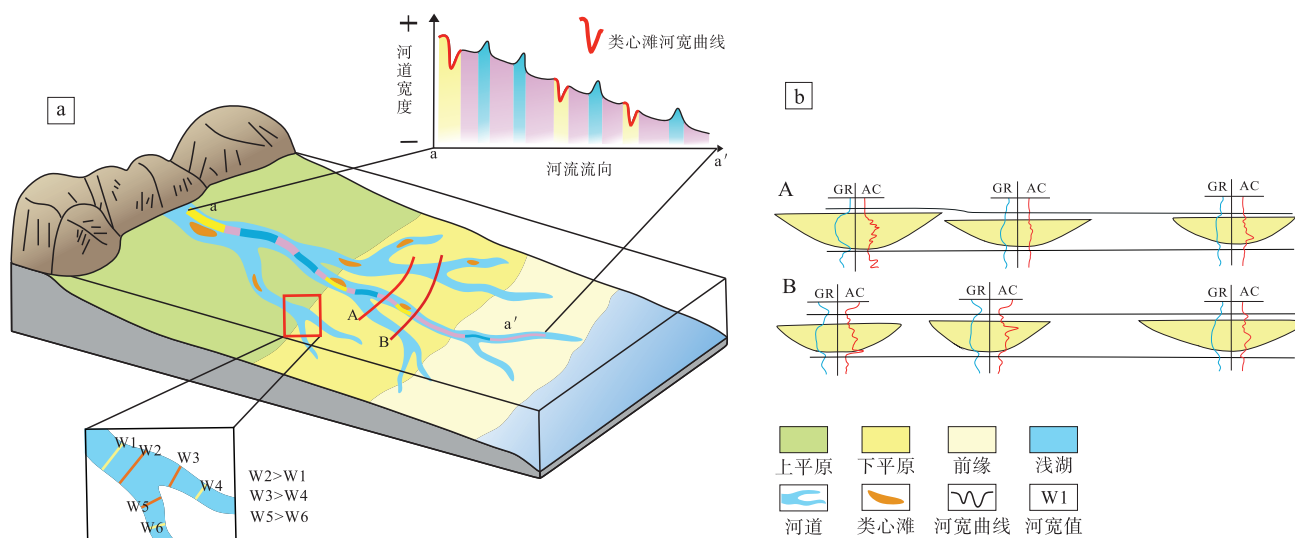
a—连续河宽曲线（距中心点 4.9 km）；b—数据点采样轨迹（距中心点 4.9 km）；c—连续河宽数据点结果（距中心点 4.9 km）；d—连续河宽曲线（距中心点 12.3 km）；e—数据点采样轨迹（距中心点 12.3 km）；f—连续河宽数据点结果（距中心点 12.3 km）；g—连续河宽曲线（距中心点 19.5 km）；h—数据点采样轨迹（距中心点 19.5 km）；i—连续河宽数据点结果（距中心点 19.5 km）

图 12 赣江三角洲局部河道宽度数据点及连续变化曲线

Fig. 12 Local river width data points and continuous change curve in Ganjiang Delta

分汊口附近的河道宽度动态变化特征(图 3)。研究表明,浅水三角洲分支河道在分汊前呈现典型的“浅化—拓宽”演化模式:由河道主干速降低导致的沉积物堆积,形成不稳定的浅水河道;随着河道推进,类心滩的持续发育缩减了有效过水断面,迫使水流向河道两侧分流并增强侧向侵蚀作用。这一过程中,高流速条件、易侵蚀的粉砂质基底以及大

型河口坝的发育,共同导致分汊前河道出现 40%~50%的宽度增量。分汊后河道的宽度调整则主要受控于类心滩的几何特征(长宽比等),这些参数通过调节分流比影响着各分支河道的能量分配(孙廷彬等, 2015)。定量分析表明,连续河宽数据不仅能准确识别分汊位置(定位误差<50 m),还可用于建立分汊强度的量化指标(如宽度突变系



a—浅水三角洲分流河道模式；b—分流河道分汊区域砂体剖面结构概念模式

图 13 浅水三角洲连续河宽变化规律模式

Fig. 13 Pattern diagram of continuous river width variation in a shallow-water delta

数), 为分析分流河道空间分布规律提供了新的研究维度。

古代浅水三角洲分流河道储集层的精细表征亟需量化数据支撑, 而现代沉积体系的精细测量为构建地质知识库提供了关键依据。当前地下储集层建模中, 分流河道砂体构型刻画常因缺乏与现代沉积体系的定量对比而存在偏差。基于赣江三角洲平原分流河道的连续河宽定量分析, 本研究建立了具有明确参数约束的构型模式(图 13): 沿入湖方向, 河道宽度呈递减趋势, 分汊口附近出现明显的宽度突变(增幅>45%), 即 $W1 > W2$ 、 $W3 > W4$ 、 $W5 > W6$ (图 13-a), 途径类心滩的主河道宽度曲线呈现特征性的“高一低一较高”宽度规律(类心滩长宽比为 2.7~6.55)。该模式通过整合现代沉积的连续河宽变化规律, 实现了局部构型特征与宏观分布规律的有机结合, 为建立高精度沉积原型模型提供了定量依据, 途经分汊口, 砂体宽度在剖面呈现明显的变化, 即在接近分汊口的位置, 河道宽度相对较宽, 整体随河道分级减小, 对井间砂体预测和小尺度沉积编图具有重要指导价值(图 13-b)。

4 结论

1) 本研究基于多时相 Landsat 8 影像数据, 结合改进的 RivWidthCloud 算法, 实现了赣江三角洲平原分流河道连续宽度的精确提取。数据点的空间

采样间隔与影像分辨率(30 m)一致, 确保了河宽数据的空间连续性。精度验证结果表明该方法能够有效表征河道宽度的实际变化趋势。

2) 赣江三角洲平原的分流河道宽度呈现显著的空间分异性, 赣江三角洲平原分支河道宽度沿河流推进方向整体呈减小趋势, 且南支河道宽度相对于其他两条河道宽度的减幅小。在接近分汊口时, 河道宽度迅速扩张, 而分汊后次级河道宽度则大幅收缩, 河道的逐级分汊进一步加剧了宽度递减趋势。此外, 赣江三角洲平原的分流河道宽度具有显著的季节性差异, 主支河道由于坡度较大、汇水速度快, 其季节性变化尤为显著。

3) 本研究提出的连续河宽曲线方法, 通过高密度数据点拟合的趋势线, 突破了传统离散测量的局限。河道流经类心滩时, 连续宽度曲线呈现“高一低一较高”的三段式特征, 该方法不仅可通过特征曲线形态识别砂体边界, 还能建立宽度—沉积相关关系以完善地质知识库, 为储层建模提供几何约束。相较于传统方法, 连续河宽曲线在浅水三角洲体系的储层表征中展现出显著优势, 其揭示的现代过程规律还可为地下沉积类比提供参考依据, 具有重要的理论价值和实践意义。

致谢 衷心感谢审稿专家及编辑为本文提出的宝贵意见。

参考文献 (References)

- 段冬平, 侯加根, 刘钰铭, 王成刚, 高建. 2014. 河控三角洲前缘沉积体系定量研究: 以鄱阳湖三角洲为例. 沉积学报, 32(2): 270–277. [Duan D P, Hou J G, Liu Y M, Wang C G, Gao J. 2014. Quantitative research of fluvial-dominated delta front sedimentary system: a case study of Poyang Lake delta. *Acta Sedimentologica Sinica*, 32(2): 270–277]
- 邓庆杰, 胡明毅, 胡忠贵, 吴玉坤. 2015. 浅水三角洲分流河道砂体沉积特征: 以松辽盆地三肇凹陷扶Ⅱ–Ⅰ组为例. 石油与天然气地质, 36(1): 118–127. [Deng Q J, Hu M Y, Hu Z G, Wu Y K., 2015. Sedimentary characteristics of shallow-water delta distributary channel sand bodies: a case from Ⅱ–Ⅰ Fortnation of Fuyu oil layer in the Sanzhao Depression, Songliao Basin. *Oil and Gas Geology*, 36(1): 118–127]
- 付晶, 吴胜和, 王哲, 刘钰铭. 2015. 湖盆浅水三角洲分流河道储层构型模式: 以鄂尔多斯盆地东缘延长组野外露头为例. 中南大学学报: 自然科学版, 46(11): 4174–4182. [Fu J, Wu S H, Wang Z, Liu Y M. 2015. Architecture model of shallow-water delta distributary channel in lake basin: a case study of the Yanchang Formation Outcrops in the eastern margin of Ordos Basin. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 46(11): 4174–4182]
- 黄秀, 刘可禹, 邹才能, 桂丽黎, 袁选俊, 秦雁群. 2013. 鄱阳湖浅水三角洲沉积体系三维定量正演模拟. 地球科学, 38(5): 1005–1013. [Huang X, Liu K Y, Zou C N, Gui L L, Yuan X J, Qin Y Q., 2013. Forward stratigraphic modelling of the depositional process and evolution of shallow water deltas in the Poyang Lake, Southern China. *Earth Science*, 38(5): 1005–1013]
- 金振奎, 李燕, 高白水, 宋宝全, 何宇航, 石良, 李桂仔. 2014. 现代缓坡三角洲沉积模式: 以鄱阳湖赣江三角洲为例. 沉积学报, 32(4): 710–723. [Jin Z K, Li Y, Gao B S, Song B Q, He Y H, Shi L, Li G Z. 2014. Depositional model of modern gentle-slope delta: a case study from Ganjiang delta in Poyang Lake. *Acta Sedimentologica Sinica*, 32(4): 710–723]
- 楼章华, 兰翔, 卢庆梅, 蔡希源. 1999. 地形、气候与湖面波动对浅水三角洲沉积环境的控制作用: 以松辽盆地北部东区葡萄花油层为例. 地质学报, 73(1): 83–92. [Lou Z H, Lan X, Lu Q M, Cai X Y. 1999. Controls of the topography, climate and lake level fluctuation on the depositional environment of a shallow-water delta: a case study of the Cretaceous Putaohua Reservoir in the northern part of Songliao Basin. *Acta Geologica Sinica*, 73(1): 83–92]
- 李建平, 刘子玉, 陈莹, 韩雅坤. 2023. 浅水三角洲基本特征、形成条件及沉积模式: 以渤海新近系为例. 地质科学, 58(4): 1340–1353. [Li J P, Liu Z Y, Chen Y, Han Y K. 2023. Basic characteristics, formation conditions and depositional models of shallow water deltas: a case study of Neogene in Bohai Sea. *Scientia Geologica Sinica*, 58(4): 1340–1353]
- 李燕, 金振奎, 李桂仔, 高白水, 石良. 2014. 江西省鄱阳湖信江决口三角洲沉积特征及模式. 古地理学报, 16(2): 274–284. [Li Y, Jin Z K, Li G Z, Gao B S, Shi L. 2014. Depositional characteristics and model for crevasse delta of Xinjiang River in Poyang Lake Area, Jiangxi Province. *Journal of Palaeogeography (Chinese Edition)*, 16(2): 274–284]
- 马世忠, 张永清. 2012. 应用遥感信息图像研究现代水下分流河道河流类型. 地质前缘, 19(2): 24–31. [Ma S Z, Zhang Y Q. 2012. Research on the channel pattern of present subaqueous distributary channel by remote sensing image. *Earth Science Frontiers*, 19(2): 24–31]
- 孙廷彬, 国殿斌, 李中超, 王玲, 尹楠鑫, 李胜玉. 2015. 鄱阳湖浅水三角洲分支河道分布特征. 岩性油气藏, 27(5): 144–148. [Sun T B, Guo D B, Li Z C, Wang L, Yin N X, Li S Y. 2015. Distribution characteristics of branch channel of shallow delta in Poyang Lake. *Lithologic Reservoirs*, 27(5): 144–148]
- 王立武. 2012. 拗陷湖盆浅水三角洲的沉积特征: 以松辽盆地南部姚一段为例. 沉积学报, 30(6): 1053–1060. [Wang L W. 2012. Forming conditions and depositional characteristics of shallow-water deltas in Depression Basins: a case study of K2y1 in the south of Songliao Basin. *Acta Sedimentologica Sinica*, 30(6): 1053–1060]
- 谢朝帅, 刘苏峡, 周浩伟, 莫兴国. 2024. 黄河源区河宽的高效提取算法及年内变化特征. 地理学报, 79(5): 1146–1160. [Xie C S, Liu S X, Zhou H W, Mo X G. 2024. An efficient river width extraction algorithm for analyzing the annual variation of the river width in the upper reaches of the Yellow River. *Acta Geographica Sinica*, 79(5): 1146–1160]
- 谢爽慧, 朱筱敏, 叶蕾, 黄捍东. 2025. 湖盆浅水三角洲河道砂体定量表征与控制因素探究及霸县凹陷实例. 古地理学报, 27(2): 446–467. [Xie S H, Zhu X M, Ye L, Huang H D. 2025. Quantitative characterization and controlling factors of channel sand bodies of shallow-water deltas in lacustrine basins, and an example from Baxian sag, Bohai Bay Basin, China. *Journal of Palaeogeography (Chinese Edition)*, 27(2): 446–467]
- 杨征, 吴胜和, 段冬平, 徐振华, 熊绮聪, 张玉飞. 2024. 西湖凹陷花港组浅水三角洲平原分流河道沉积构型. 古地理学报, 26(3): 525–544. [Yang Z, Wu S H, Duan D P, Xu Z H, Xiong Y C, Zhang Y F. 2024. Architecture characteristics of distributary channels in shallow water delta plain of the Huagang Formation in Xihu sag, East China Sea. *Journal of Palaeogeography (Chinese Edition)*, 26(3): 525–544]
- 张昌民, 尹太举, 朱永进, 柯兰梅. 2010. 浅水三角洲沉积模式. 沉积学报, 28(5): 933–944. [Zhang C M, Yin T J, Zhu Y J, Ke L M. 2010. Shallow-water deltas and models. *Acta Sedimentologica Sinica*, 28(5): 933–944]
- 张昌民, 张祥辉, 王庆, 冯文杰, 李少华, 易雪斐. 2024. 分支河流体系沉积学工作框架与流程. 岩性油气藏, 36(1): 1–13. [Zhang C M, Zhang X H, Wang Q, Feng W J, Li S H, Yi X F. 2024. Research framework for distributive fluvial system. *Lithologic Reservoirs*, 36(1): 1–13]
- 朱筱敏, 邓秀芹, 刘自亮, 孙勃, 廖纪佳, 惠潇. 2013. 大型拗陷湖盆浅水辫状河三角洲沉积特征及模式: 以鄂尔多斯盆地陇东地区延

- 长组为例. 地学前缘, 20(2): 19–28. [Zhu X M, Deng X Q, Liu Z L, Sun B, Liao J J, Hui X. 2013. Sedimentary characteristics and model of shallow braided delta in large-scale lacustrine: an example from triassic Yanchang Formation in Ordos Basin. *Earth Science Frontiers*, 20(2): 19–28]
- 朱筱敏, 钟大康, 袁选俊, 张惠良, 朱世发, 孙海涛, 高志勇, 鲜本忠. 2016. 中国含油气盆地沉积地质学进展. 石油勘探与开发, 43(5): 820–829. [Zhu X M, Zhong D K, Yuan X J, Zhang H L, Zhu S F, Sun H T, Gao Z Y, Xian B Z. 2016. Development of sedimentary geology of petroliferous basins in China. *Petroleum Exploration and Development*, 43(5): 820–829]
- 邹才能, 赵文智, 张兴阳, 罗平, 王岚, 刘柳红, 薛叔浩, 袁选俊, 朱如凯, 陶士振. 2008. 大型敞流坳陷湖盆浅水三角洲与湖盆中心砂体的形成与分布. 地质学报, 82(6): 813–825. [Zou C N, Zhao W Z, Zhang X Y, Luo P, Wang F, Liu L H, Xue S H, Yuan X J, Zhu R K, Tao S Z. 2008. Formation and distribution of shallow-water deltas and central-basin sandbodies in large open depression lake basins. *Acta Geologica Sinica*, 82(6): 813–825]
- Allen G H, Pavelsky T M. 2015. Patterns of river width and surface area revealed by the satellite-derived North American River Width (NAREidh) dataset. *Geophysical Research Letters*, 42(2): 395–402.
- Allen G H, Pavelsky T M. 2018. Global extent of rivers and streams. *Science*, 361(6402): 585–588.
- Apuraba K D, Rajesh K S, Nabajit H. 2012. Bankline change and the facets of riverine hazards in the floodplain of Subansiri-Ranganadi Doab, Brahmaputra Valley, India. *Natural Hazards*, 64(2): 1015–1028.
- Caldwell R L, Edmonds D A. 2014. The effects of sediment properties on deltaic processes and morphologies: a numerical modeling study. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 119(5): 961–982.
- Donchyts G, Schellekens J, Winsemius H, Eisemann E. 2016. A 30 m resolution surface water mask including estimation of positional and thematic differences using Landsat 8, SRTM and OpenStreetMap: a case study in the Murray–Darling Basin, Australia. *Remote Sensing*, 8: 386.
- Gilvear D, Bryant R. 2016. Analysis of Remotely Sensed Data for Fluvial Geomorphology and River Science. *Tools in Fluvial Geomorphology*, England: John Wiley & Sons.
- Huete A, Didan K, Miura T, Rodriguez E P, Gao X, Ferreira L G. 2002. Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices. *Remote Sensing Environment*, 83: 195–213.
- Li L Q, Lu X X, Chen Z Y. 2007. River channel change during the last 50 years in the middle Yangtze River, the Jianli reach. *Geomorphology*, 85(3/4): 185–196.
- Pavelsky T M, 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: 70–73.
- Robertsh H H. 1997. Dynamic changes of the Holocene Mississippi River delta plain: the delta cycle. *Journal of Coastal Research*, 13(3): 605–627.
- Townshend J R G, Justice C O. 1986. Analysis of the dynamics of african vegetation using the normalized difference vegetation index. *International Journal of Remote Sensing*, 7: 1435–1445.
- Xu H. 2005. A study on information extraction of water body with the modified normalized difference water index (MNDWI). *Journal of Remote Sensing*, 9: 589–595.
- Yang X, Pavelsky M T, Allen H G, Donchyts G. 2020. RivWidthCloud: an automated Google Earth Engine algorithm for river width extraction from remotely sensed imagery. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 17(2): 217–221.
- Zou Z H, Dong J W, Menarguez M A, Xiao X M, Qin Y W, Doughty R B, Hooker K V, Hambright K D. 2017. Continued decrease of open surface water body area in Oklahoma during 1984–2015. *Science of the Total Environment*, 595: 451–460.

(责任编辑 王绍华)