中国科学: 技术科学 2026 年 第 56 卷 第 9 期: 2330 ~ 2332
SCIENTIA SINICA Technologica techcn.scichina.com
《中国科学》杂志社 SCIENCE CHINA PRESS
精选文章导读

雅鲁藏布江中游辫状河段泥沙沉积量计算

李志威[1], 程韵硕[1*], 傅旭东[2], 王绪鹏[3], 何育聪[1], 余国安[4], 姚慰炜[5]

1. 武汉大学水资源工程与调度全国重点实验室, 武汉 430072
2. 清华大学水圈科学与水利工程全国重点实验室, 北京 100084
3. 长沙理工大学水利与海洋工程学院, 长沙 410114
4. 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101
5. 四川大学山区河流保护与治理全国重点实验室, 成都 610065
E-mail: chengyunshuo@whu.edu.cn

1 研究背景

青藏高原被称为“世界屋脊”和“地球第三极”, 不仅是中国和亚洲10多条著名大河的发源地, 还是我国现代冰川集中分布地区, 素有“亚洲水塔”之称. 青藏高原不断隆升和喜马拉雅地块与拉萨地块南北向的挤压, 在高原南部形成了一条呈东西走向的大断裂构造, 即雅鲁藏布缝合带[1]. 青藏高原南部的冰川雪山融水和降水, 沿缝合带向下游低海拔地区流淌, 发育成了雅鲁藏布江(简称“雅江”)上游河谷开阔、中游河谷宽窄相间、下游河谷深切的独特流域地貌, 如图1(a)所示.

构造活动过程中, 喜马拉雅山脉沿东西向的隆升存在显著差异[2], 导致雅江中游流域呈现不均匀的海拔格局, 如图1(b)所示. 其中, 中游峡谷段处于活动断层的上倾侧, 而宽谷段位于下倾侧, 两者在构造抬升速率上的差异导致宽谷段相对滞后抬升. 受此控制, 宽谷段在长期水流输沙作用下形成了巨大的“泥沙蓄积库”. 前人对雅江及支流宽谷河段泥沙沉积量估算, 其大致在9000亿m^3量级[3].

目前, 我国水电开发正逐渐向青藏高原及其周边聚集, 雅江中游干流的加查峡谷现已建成藏木、大古、加查等水电站, 并规划开工兴建多座河床式电站. 2021年雅江下游水电工程已被列为国家重大工程, 并于2025年7月正式开工. 然而, 水库蓄水将大量泥沙滞留于库区, 使下游来沙量显著削减, 进而促使河床形态发生再造床, 并影响河岸与洲滩的整体稳定性. 作为流域长期产沙与输沙过程的主要“信息载体”, 河床沉积物的规模与分布不仅关系到雅江缝合带的地质历史与构造演化重建, 也为认识雅江水沙过程与河床演变提供基础数据, 同时对水电工程坝址选择和深厚覆盖层的坝基处理, 以及流域水沙资源可持续开发具有重要的科学与应用价值.

2 本文工作

本研究围绕雅江中游辫状河段的泥沙沉积量计算问题, 构建了一套以河谷几何形态为基础, 并辅以地球物理探测校正的综合方法. 首先, 通过无人机影像及Google Earth Engine的30 m分辨率DEM数据, 系统提取雅江中游辫状河段的谷底几何特征, 包括谷底宽度、左右岸坡角等关键参数. 为了保持高空间连续性, 几何量以1 km的步长沿河谷逐点获取.

在上述几何参数基础上, 构建了谷底沉积界面的几何外延包络方法(geometric extension envelop, GEE). 该模型基于一个三次多项式$y=ax^3+bx^2+cx$, 通过满足谷缘高程约束及坡角一致性条件, 使其能够拟合理想化的U形沉积界面(如图2(a)所示). 由此, 沉积厚

英文全文见: Li Z, Cheng Y, Fu X, et al. Estimating the sedimentation volume in the braided reaches of the middle Yarlung Zangbo River. Sci China Tech Sci, 2025, 68: 1800504, https://doi.org/10.1007/s11431-024-2784-y

© 2026《中国科学》杂志社

度$D(x)$可由模型沿横断面计算，再积分得到单位河长的沉积体积V.

考虑到实际沉积界面可能偏离理想的U形假设，本研究进一步引入EH4电磁探测结果对GEE模型进行校正. 研究区共布设14条EH4测线(图1), 每条测线由多点电阻率反演组成. 沉积层与基岩界面的划分依据电阻率绝对值及其梯度特征，如图2(b)所示. 通过比较EH4实测厚度与GEE估算值，识别出二者误差与谷底宽度的系统性关系：窄谷段倾向形成V形界面导致GEE模型高估，而宽谷段则呈现相反偏差. 据此构建

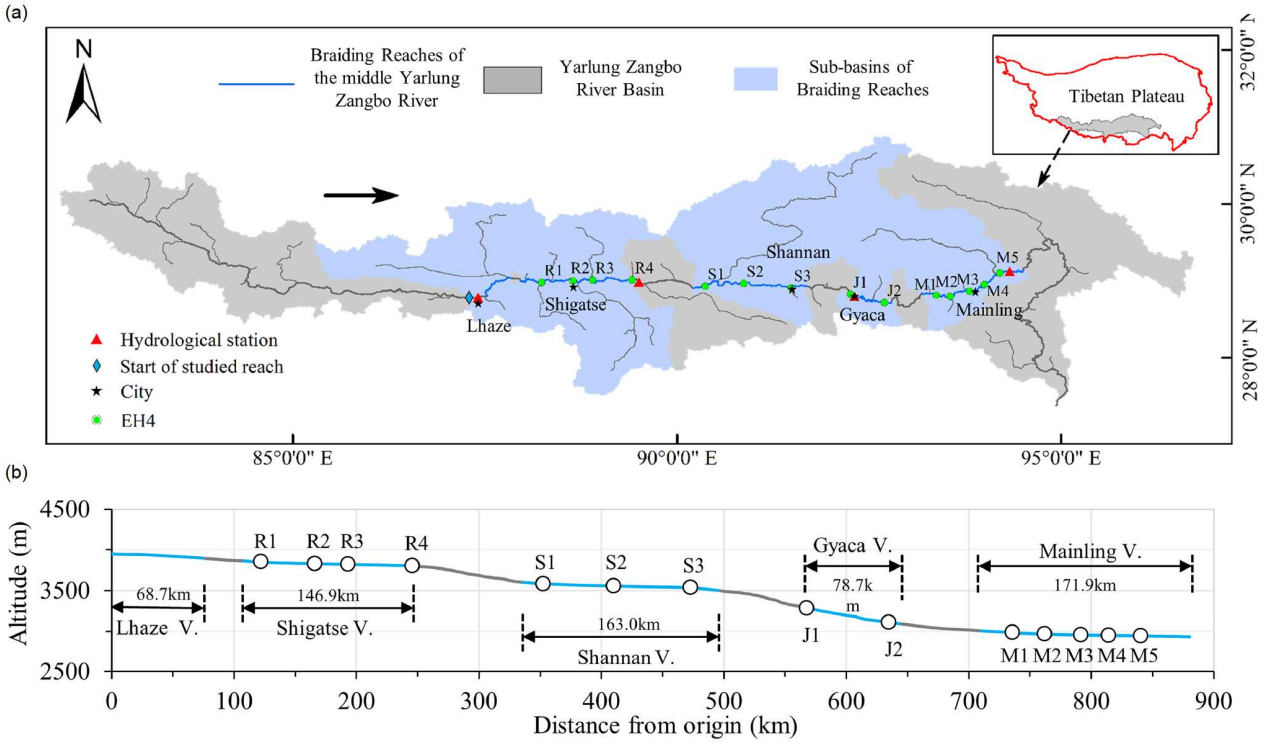


图 1　(网络版彩图)研究区概况. (a) 青藏高原南部雅鲁藏布江流域中游的宽谷河段示意图; (b) 雅鲁藏布江沿程高程分布及EH4探测测线的位置分布

Figure 1　(Color online) An overview for the studied area. (a) Wide valley reaches of the present study along the midstream of the Yarlung Zangbo River basin at the southern Tibetan Plateau; (b) altitude distribution for the study reaches along the Yarlung Zangbo River and the specific location of EH4 survey.

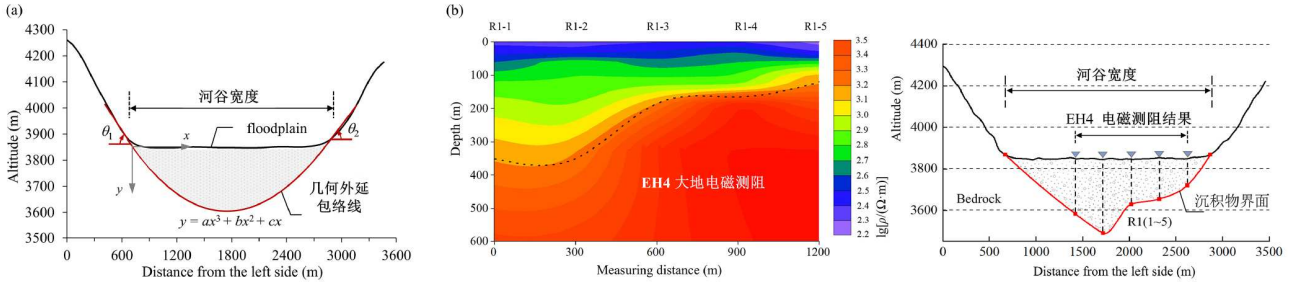


图 2　(网络版彩图)几何延拓包络法与EH4电磁探测结果对比. (a) 采用几何延拓包络法得到的沉积厚度分布; (b) 在日喀则宽谷河段依据电阻率等值线反演得到的沉积厚度估算

Figure 2　(Color online) Comparisons between geometric extension envelop method and EH4 electromagnetic depth sounder. (a) Geometric extension envelop method; (b) estimated deposition depth by electrical resistivity contour plot at the wide valley reach of Shigatse.

表 1 雅江中游5个研究河段的沉积物体积总量

Table 1 Total deposition volume for the five reaches along the middle Yarlung Zangbo River

河段	平均谷宽 (km)	平均谷深 (km)	河段长度 (km)	总沉积量 (亿km^3)	占比 (%)
拉孜	2.53	0.32	68.8	363	5.1
日喀则	4.76	0.47	146.9	2136	38.3
山南	4.85	0.58	163.0	2822	46.5
加查	0.82	0.22	78.7	71	0.7
米林	1.88	0.41	171.9	791	9.5
总量	–	–	629.3	6183	100

了宽度依赖的经验修正函数$\varphi(W)$, 并将其纳入最终沉积厚度公式, 实现了几何模型与地球物理数据的综合校正.

3 本文结论

本研究结果明确了雅鲁藏布江中游辫状河段的沉积物规模与空间分布特征, 并验证了几何外延包络法(GEE)在该流域的适用性与精度. 校正后的GEE方法与EH4电磁探测厚度表现出良好一致性, 其中72%的样本在30%误差范围内, 残差无系统性偏移, 证明两者之间具有稳定对应关系. 进一步与雅江河床钻孔实测数据[4]对比表明, 沉积厚度的估算平均误差为10.4%.

基于校正后的GEE模型, 对雅江中游5个辫状河段(拉孜、日喀则、山南、加查、米林)进行了系统计算. 结果表明, 泥沙总沉积量约为6183亿m^3, 与采用EH4数据的以往估算结果(约5183亿m^3)只有12.3%的差异, 证明该方法具有较高稳定性与跨区段适用性. 其中, 沉积物主要集中于河谷最为开阔的日喀则段(占比38.3%)与山南段 (占比46.5%), 而谷宽较小的加查段则贡献最小(占比0.7%). 沉积物体积的空间分布与谷底宽度、河段长度及构造抬升背景高度相关, 印证了不均匀构造隆升对宽谷-峡谷交替格局的重要控制作用.

计算结果进一步揭示了雅江中游宽谷区在数百万年的构造-沉积作用下形成了巨大的泥沙库容, 其规模对区域水沙过程、地貌演化和水电工程建设具有重要影响. 雅江中游沉积物主要来自近域物源而非上游或源区输入, 这与泥沙源汇分析及现有水文泥沙记录一致, 进一步强化了宽谷段作为“泥沙沉积仓库”的功能.

参考文献

1 Royden L H, Burchfiel B C, van der Hilst R D. The geological evolution of the Tibetan Plateau. Science, 2008, 321: 1054–1058

2 Zhang P Z, Shen Z, Wang M, et al. Continuous deformation of the Tibetan Plateau from global positioning system data. Geology, 2004, 32: 809–812

3 Wang Z Y, Yu G A, Wang X Z, et al. Sediment storage and morphology of the Yalu Tsangpo valley due to uneven uplift of the Himalaya. Sci China Earth Sci, 2015, 58: 1440–1445

4 Wang P, Scherler D, Liu-Zeng J, et al. Tectonic control of Yarlung Tsangpo Gorge revealed by a buried canyon in Southern Tibet. Science, 2014, 346: 978–981