

郑鑫梦, 蒋婷婷, 李丽, 等. 长江源当曲流域河道时空演变特征研究[J]. 水利水电技术(中英文), 2026, 57(9): 46-59. DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2026.09.004

ZHENG Xinmeng, JIANG Tingting, LI Li, et al. Spatiotemporal evolution characteristics of river channels of Dangqu River Basin in source region of Yangtze River [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2026, 57(9): 46-59. DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2026.09.004

长江源当曲流域河道时空演变特征研究

郑鑫梦¹, 蒋婷婷¹, 李丽², 单钰淇², 刘超¹

(1. 四川大学 山区河流保护与治理全国重点实验室, 四川 成都 610065; 2. 四川大学 灾后重建与管理学院, 四川 成都 610065)

摘要:【目的】全球气候变暖背景下, 长江源气温与降水均呈增加趋势, 融冰融雪增多, 河流演变加剧。明确高原河道在气候变化下的时空演变规律, 对提升气候变化下高原河流的响应演变特征认知及维护生态环境意义重大。【方法】基于1990—2023年长江源当曲流域的遥感影像及附近三个气象站的气温、降水数据, 采用MNDWI水体指数法、河道中心线法、Mann-Kendall趋势分析法和MVC最大值合成法, 定量研究长江源当曲流域的河道时空演变特征, 分析1990—2023年期间长江源河道弯曲度、河道宽度和河道横向迁移率的年际变化规律。【结果】结果显示: 当曲流域152 km长的河段中, 顺直河道占比约1/3, 弯曲河道占比约2/3。在过去34 a中, 当曲流域河道平均弯曲度为1.14, 34 a间弯曲度仅减小2%。当曲河道河宽持续增大, 河宽平均增幅9.4%, 年均增加0.4 m/a。河道归一化横向迁移率 $[=总横向迁移距离/(迁移对应年份 \times 河宽)]$ 减少48%, 34 a年均减少0.014。【结论】河道河宽与归一化横向迁移率受气温、降水影响显著, 气温升高诱发的融冰融雪增加协同降水增多共同导致河道流量增大、水位上升, 促使当曲流域河道增宽。同时, 上述水文条件的改变有利于植被生长, 植被固岸作用增强, 抑制了河道横向迁移, 归一化横向迁移率呈下降趋势。

关键词: 弯曲河流; 河道演变; 横向迁移; 长江源; 时空演变; 当曲流域; 遥感解译; 气候变化

DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2026.09.004

开放科学(资源服务)标志码(OSID):

中图分类号: TV122

文献标志码: A

文章编号: 1000-0860(2026)09-0046-14



Spatiotemporal evolution characteristics of river channels of Dangqu River Basin in source region of Yangtze River

ZHENG Xinmeng¹, JIANG Tingting¹, LI Li², SHAN Yuqi², LIU Chao¹

(1. State Key Laboratory of Hydraulics and Mountain River Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, Sichuan, China; 2. Institute for Disaster Management and Reconstruction, Sichuan University, Chengdu 610065, Sichuan, China)

收稿日期: 2025-06-09; 修回日期: 2025-07-29; 录用日期: 2025-07-30; 网络出版日期: 2025-09-11

基金项目: 国家重点研发计划政府间国际科技创新合作重点专项(2022YFE0128200); 国家自然科学基金项目(52279072); 四川省科技计划资助(2025ZNSFSC0412)

作者简介: 郑鑫梦(2001—), 女, 硕士研究生, 主要从事河道演变研究。E-mail: 1299950832@qq.com

通信作者: 刘超(1987—), 男, 研究员, 博士研究生导师, 主要从事山区河流水沙动力学研究。E-mail: chaoliu@scu.edu.cn

©Editorial Department of Water Resources and Hydropower Engineering. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license.

Abstract: [Objective] In the context of global climate warming, both temperature and precipitation in the source region of the Yangtze River have shown increasing trends, leading to enhanced glacier melt and snowmelt and intensified river evolution. Clarifying the spatiotemporal evolution patterns of plateau river channels under climate change is of great significance for the enhanced understanding of response and evolutionary characteristics of plateau rivers and for the conservation of ecological environment. [Methods] Based on remote sensing imagery of the Dangqu River Basin in the source region of the Yangtze River and temperature and precipitation data from three nearby meteorological stations from 1990 to 2023, the spatiotemporal evolution patterns of river channels in the Dangqu River Basin were quantitatively investigated. This was achieved by the MNDWI method, channel centerline method, Mann-Kendall trend analysis, and maximum value composite (MVC) method. Additionally, interannual variations in curvature, width, and lateral migration rates of river channels from 1990 to 2023 were analyzed. [Results] The result showed that within the 152 km river section of the Dangqu River Basin, straight channels accounted for approximately one-third, while meandering channels accounted for two-thirds. Over the past 34 years, the average curvature of river channels in the Dangqu River Basin was 1.14, exhibiting only a 2% decrease during this period. The river width of the Dangqu River continued to increase, with an average growth of 9.4% and an annual increase of 0.4 m/a. The normalized lateral migration rate of the river channels $[= \text{total lateral migration distance} / (\text{year of migration} \times \text{river width})]$ decreased by 48%, with an average annual reduction of 0.014 over the 34-year period. [Conclusion] The river width and normalized lateral migration rate are significantly influenced by temperature and precipitation. Increased glacier melt and snowmelt induced by rising temperatures, combined with higher precipitation, jointly lead to higher river discharge and elevated water levels, thereby promoting the widening of river channels in the Dangqu River Basin. In addition, these changes in hydrological conditions are favorable for vegetation growth, which strengthens bank stabilization and suppresses lateral channel migration, resulting in a decreasing trend in the normalized lateral migration rate.

Keywords: meandering river; river channel evolution; lateral migration; source region of Yangtze River; spatiotemporal evolution; Dangqu River Basin; remote sensing interpretation; climate change

0 引言

河流是地球最具活力的地貌之一,除对地质和工程应用至关重要外,其演变过程还影响地球化学循环,调节地球气候使之适宜生命存续^[1]。近几十年来,气候变化和人类活动加剧了全球水文循环过程,改变降水和蒸散发模式,这些变化间接影响了径流,尤其是高原河流的径流总量与过程^[2-4],从而改变河流的地貌形态。河道演变受植被生长^[5]、河床坡度^[6]与气候变暖导致寒冷地区冻土融化^[7]等多方面因素共同影响。这也导致高寒地区的河道演变规律较平原河道更加复杂,其演变规律存在多方面的认知不足,值得深入研究。

青藏高原被誉为地球的“第三极”和“亚洲水塔”,是我国重要的生态安全屏障^[8]。青藏高原因其海拔高、温度低,野外勘探条件艰苦,开展河流演变长时间监测难度极大。近年来,结合遥感技术,高原、高寒地区的河流演变得以逐渐开展。例如,利用遥感技术,在青藏高原拉萨河下游,河流活跃区宽度及总河道宽度呈缩减趋势,辫状指数先增后趋于稳定,此演变受气候与人类活动共同驱动,1991—2005年以气候为主导,2005年后水库修建等人类活动影

响显著增强^[9]。遥感技术也被用于探究青藏高原冻土区的弯曲河道演变,基于动态时间规整算法从1987—2022年Landsat影像中提取河道中心线,以5 a为间隔计算一次河流迁移率;结果发现冻土区河流迁移率上升34.6%,主要受升温、冻土消融及流量增加驱动;季节性冻土区下降11.1%,归因于植被绿化与河岸稳定性提升^[10]。类似的情况也出现在雅鲁藏布江上游弯曲河段,1980—2010年之间的河道平均迁移速率从1.63 m/a提至2.76 m/a,增幅达69%。其中,迁移速率最高的河段展现出特定几何特征,其河宽归一化曲率半径为3.0~5.0,弯曲度处于1.2~1.5^[11]。与此同时,在雅鲁藏布江中游,结合遥感影像与室内水槽试验,深入探究辫状河流的形成及演变机制,发现流量和泥沙条件显著影响辫状强度,且增大流量并加细沙时辫状强度增幅最大^[12]。通过对1990—2020年期间长江源区9条辫状河流域进行研究,发现长江源区气候暖湿化促使水沙通量增加,流域及沙洲植被丰度提升,导致辫状河洪水持续时间延长,河道普遍扩张,河岸侵蚀多发生在分支废弃或剥离的弱约束河岸处,沙洲植被的增加增强了河道的抗侵蚀能力^[13]。这些变化使气候变暖对高寒河流演变的影响预测更具挑战^[14-15]。在气候变暖背景

下, 青藏高原河流平面形态与横向迁移速率的年际变化更加复杂且尚不清楚, 探究青藏高原河流长期演变规律挑战极大。

当前研究多集中于气候变化下河道平面形态或横向迁移的单一演变过程, 缺乏对二者变化的综合深入分析, 因此对青藏高原河流时空演变特征的认识仍存在诸多不足。对比分析黑河 1985 年及 2013 年的遥感影像, 采用拐点法与平均中心线法计算黑河干流及支流连续弯道的形态特征参数, 分析弯道的横向迁移速率。结果显示, 黑河支流麦曲与热曲的横向迁移速率显著高于干流, 泥炭型河岸物质组成在河流横向迁移中至关重要^[16]。基于多期遥感影像与野外采样数据, 分析黄河齐哈玛砾石质网状河 1990—2016 年的演变特征, 河道整体稳定性高, 26 a 间网状带面积仅增加 2.43% (16.89 km² 增至 17.30 km²), 0.1~0.8 km² 范围内河间湿地碎片化显著, 数量增加 62.16% (37 个增至 60 个)^[17]。随气候变暖, 暖湿气候对高原河道演变的影响日渐显著。当曲流域位于长江源南部, 流域广泛分布多年冻土与季节性冻土^[18]。长江源当曲流域河道长时段演变特征尚不明确, 当曲流域河道的弯曲度、横向迁移速率等对植被覆盖、温度、降水、水沙条件等的响应规律尚不清楚。

针对上述问题, 我们选择长江源当曲流域河道开展研究, 通过 Landsat 卫星影像提取当曲流域的河道形态, 运用水文实测数据与流量、泥沙遥感反演数据,

结合 ENVI、ArcGIS、AutoCAD 软件处理遥感影像、提取河道形貌特征, 计算河道中心线和河岸横向迁移距离以定量探究当曲流域河道 1990—2023 年的年际演变规律; 辨析当曲流域植被、气候、水沙等因素对河道弯曲度、河宽和横向迁移率的影响。研究结果将丰富气候暖湿条件下青藏高原河流演变理论, 对维护高原脆弱生态条件下的河流系统及生态环境意义重大。

1 研究区概况

长江源地处青藏高原腹地, 对气候变化十分敏感。长江源主要包括当曲、布曲、尕尔曲和沱沱河。当曲长度为 331 km^[19], 地处长江源东南部, 面积广阔、水流丰沛, 上源且曲发源于青藏高原唐古拉山脉东段北支, 源头海拔超 5 000 m, 下游在囊极巴陇处与沱沱河交汇, 并入通天河, 平均海拔 4 600 m 以上(见图 1)。当曲流域属高原大陆性气候, 冬寒夏凉, 干湿分明, 雨热同季, 每年 7—9 月温度相对较高, 其他月份气温较低。当曲流域因高海拔、地势相对平缓以及稀疏的高山草甸植被而独特, 保有原始自然环境, 人口稀少, 人类活动影响几乎可忽略。自然状态下, 当曲大部分河段为弯曲河道, 其形貌随时间发生演变。当曲流域源头河宽较窄, 水体难以提取; 而下游河道在与沱沱河交汇处逐渐过渡为辫状河段^[20]。本文选择当曲除源头和汇流段的长 152 km 主河道作为研究对象。研究区域为 92.73°E—93.65°E, 33°N—33.73°N。

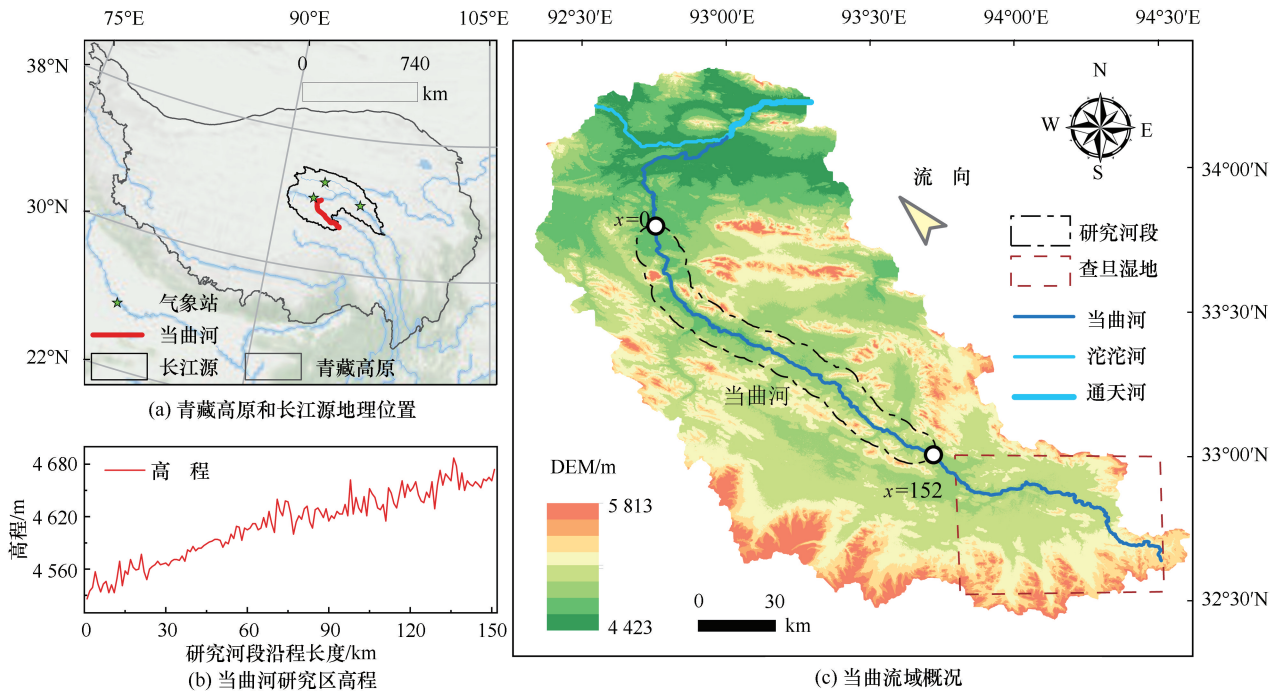


图 1 长江源当曲流域概况

Fig. 1 Overview of Dangqu River Basin in source region of Yangtze River

2 数据来源与方法

2.1 遥感图像处理

根据 Landsat 遥感影像, 追踪 1990—2023 年期间河道形貌变化历史。长江源河流具有显著的季节性流量波动特性, 并在冬季有河面结冰情况出现。在进行河床形态变化的同期对比时, 本文选取汛期(7—9月)遥感数据(具体影像选取时间见表 1)。这一时期云层覆盖少、河流水位高、岸线清晰, 有利于准确测量河流宽度与形态特征。另外, 汛期河流水文活动相对稳定, 研究河段水文周期和条件相似度高, 能极大降低不同年份水文参数差异, 增强研究结果的可比性与说服力。在满足云层、积雪不遮挡河道等基本情况下, 大多数情况下当曲流域每年汛期仅有 1~2 张可使用的遥感影像, 少数年份有多张可用, 无法保证一定能选取到最大河宽时刻的照片, 但汛期的遥感影像基本反映了当曲流域较大流量下的真实河宽。选择影像时, 我们优先考虑与其他年份日期接近的影像, 每年选取一张遥感图像而后采用遥感分析和地理信息系统(GIS)技术, 定量对比当曲流域河道形态变化。本文使用的遥感影像包括 Landsat 4-5TM 和 Landsat 8OLI 卫星, 都采用 UTM 45 N 区投影和 WGS 84 基准进行预先地理参考, 然后经辐射定标和大气校正处理, 以消除大气散射与地形等因素影响, Landsat 8OLI 影像再经过增强型 Gram-Schmidt 全色锐化(EGS)方法融合处理, 生成 15 m 空间分辨率的遥感影像^[21]。为确保河流测量数据的精确度, 本研究采用地面图像分辨率不超过河流平均宽度 30% 的图像进行河流数据提取。这一方法已被其他学者成功用于研究河道演变, 并验证了该方法在提取河宽等数据时的准确性^[1,11]。因此, 本文沿用上述思路和方法提取当曲流域的河道数据。

(1)水体提取。采用 MNDWI 水体指数法提取当曲流域河道水体。MNDWI 方法利用影像绿波段和短波近红外波段进行计算, 生成灰度影像, 再通过人工

设定最优阈值将水体与其他山体、建筑等加以区分, 生成二值影像, 最后通过人工设定阈值提取水体^[22]。选取合适的阈值将水体和非水体分开, 将 MNDWI 值大于阈值的像素点标记为水体, 小于阈值的像素点标记为非水体。将卫星影像导入 ArcGIS, 在 ArcGIS 中对河岸边界和河道中心线进行数字化处理, 并将二值图像转换为多边形图像。删除多余和不连接的组件。根据沿河道识别的水体边界确定河岸线, 依据河岸线描绘河道中心线, 最后通过河道中心线确定河道弯曲度。计算公式为

$$MNDWI = \frac{(Green - SWIR)}{(Green + SWIR)} \tag{1}$$

式中, *Green* 为绿色波段; *SWIR* 为短波近红外波段。

(2)弯曲度。河道弯曲度是根据两个相邻点之间的流向距离和笛卡尔距离之间的比率计算为

$$R = \frac{m}{n} \tag{2}$$

式中, *R* 为弯曲度; *m*、*n* 分别为两个相邻点之间的流向距离和直线距离。

(3)河宽断面选取遵循形态完整性及避免支流(沟壑)干扰的原则。具体操作为: 以 1990 年河道中心线作为参照基准, 沿河自西北向东南方向, 每隔 1 km 提取一个断面, 共划分 152 个不重复且位置固定的断面。沿此方向, 各断面依次被编号为 1—152 号。为量化河宽, 沿河道中心线在每个断面处作垂线, 该垂线与左右河岸边界线交点之间的距离定义为河宽。

(4)河道横向迁移。河岸迁移是河道横向位置变化的直接结果, 河道横向迁移率能够具体反映河道横向位置变化的快慢(见图 2)。横向迁移率特指河道中心线在时间推移下所发生的位置变动距离^[1]。为量化这一变动, 沿河自西北向东南每隔 1 km 划分 1 个断面, 以每年的河道中心线作为基准来设定横向迁移断面。沿此方向, 各断面依次被编号为 1—152 号。由于每个断面均发生不同程度的横向迁移, 在

表 1 遥感数据采用情况
Table 1 Utilization of remote sensing data

序 号	影像时间/年-月-日	数据源	序 号	影像时间/年-月-日	数据源	序 号	影像时间/年-月-日	数据源
1	1990-08-03	Landsat 5	7	1998-08-09	Landsat 5	13	2015-07-23	Landsat 8
2	1991-08-22	Landsat 5	8	2000-08-30	Landsat 5	14	2019-10-06	Landsat 8
3	1993-06-24	Landsat 5	9	2005-06-25	Landsat 5	15	2020-09-22	Landsat 8
4	1994-08-14	Landsat 5	10	2006-07-14	Landsat 5	16	2022-08-27	Landsat 8
5	1995-08-17	Landsat 5	11	2007-08-02	Landsat 5	17	2023-09-15	Landsat 8
6	1997-08-22	Landsat 5	12	2011-09-14	Landsat 5			

1990—2023 年期间, 总共划分出 152×34 个不重复的断面。

以 1990—2023 年的横向迁移距离为例, 具体测量方法如下: 首先, 以 1990 年的河道中心线为基准, 每隔 1 km 设定一个点 a_n 。然后在点 a_n 处先作切线, 后沿切线作出其法线; 这条法线与 1991 年河道中心线相交于点 b_n ; 最后, 定义点 a_n 与点 b_n 之间的距离为这一时段的横向迁移距离。上述方法能直观反映不同年份间的河道横向迁移率 M_r , 即

$$M_r = \frac{M_d}{\Delta T} \tag{3}$$

式中, M_d 为某一时段的横向迁移距离; ΔT 为时段。

由于河道横向迁移率(M_r)会随河宽(W_c)变化而呈现系统性偏差(例如宽河道迁移率虚高), 为揭示河道横向摆动的真实动力机制, 本研究提出归一化横向迁移率, 以避免河宽影响。由式(3)可计算出每个断面的 M_r , 在此基础上除以对应河宽, 即可得到 M_m , 即

$$M_m = \frac{M_r}{W_c} \tag{4}$$

式中, M_m 为归一化横向迁移率; M_r 为横向迁移率; W_c 为河宽。

(5)趋势分析。采用 Mann-Kendall(M-K)趋势检验分析当曲流域河道 1990—2023 年河宽与横向迁移变化趋势。M-K 检验是提取序列变化趋势的有效工具, 适用于非线性关系, 被广泛应用于分析长时间序列数据。本研究将每个断面 1990—2023 年的河宽与横向迁移数据运用 M-K 趋势检验方法分析, 计算每个断面的 *Kendall's tau* 值。给定两个排名序列 $X=[x_1, x_2, \dots, x_n]$ 和 $Y=[y_1, y_2, \dots, y_n]$,

Kendall's tau 公式为

$$Kendall's\ tau = \frac{C - D}{\frac{1}{2}n(n - 1)} \tag{5}$$

式中, C 为一致对的数量, 即 $x_i < x_j, y_i < y_j$, 或 $x_i > x_j, y_i > y_j$; D 为不一致对的数量, 即 $x_i < x_j, y_i > y_j$, 或 $x_i > x_j, y_i < y_j$; n 为样本数量。

当 X 、 Y 排名完全一致时, 所有对都是一致对 $\left[C = \frac{1}{2}n(n-1), D=0 \right]$, 则 $\tau = 1$; 当 X 、 Y 排名完全相反时, 所有对都是不一致对 $\left(C=0, D=-\frac{1}{2}n(n-1) \right)$, 则 $\tau = -1$; 如果 X 、 Y 排名无关, 则 τ 值接近 0。

以河宽为例, 序列 $X=[x_1, x_2, \dots, x_n]$ 表示 1990—2023 年(按年份由远及近排列), 序列 $Y=[y_1, y_2, \dots, y_n]$ 为对应年份的河宽数据。 τ 值用于衡量河宽随时间的变化趋势: τ 值大于 0 表示河宽随时间增大, 小于 0 则表示河宽随时间减小。 τ 值的绝对值越接近 1, 表示河宽增大或减小的趋势越显著。

(6)MVC 最大值合成法。计算河道周围的归一化植被指数(*NDVI*)以评估植被丰度及抗侵蚀能力。*NDVI* 与植被密度呈线性正相关, 数据源于 Landsat 等卫星影像。通过最大值合成法(MVC)处理 1990—2023 年影像, 消除云、雨、雪等低值噪声影响, 并采用 1 a 期合成以更准确反映植被丰度。为避免沙洲植被与云 *NDVI* 值相近导致的误判, 提前进行云遮蔽处理, 同时为减少河岸外植被干扰, 在河道区域设置 100 m 缓冲区。所有计算均在 GEE 平台完成, 计算公式为

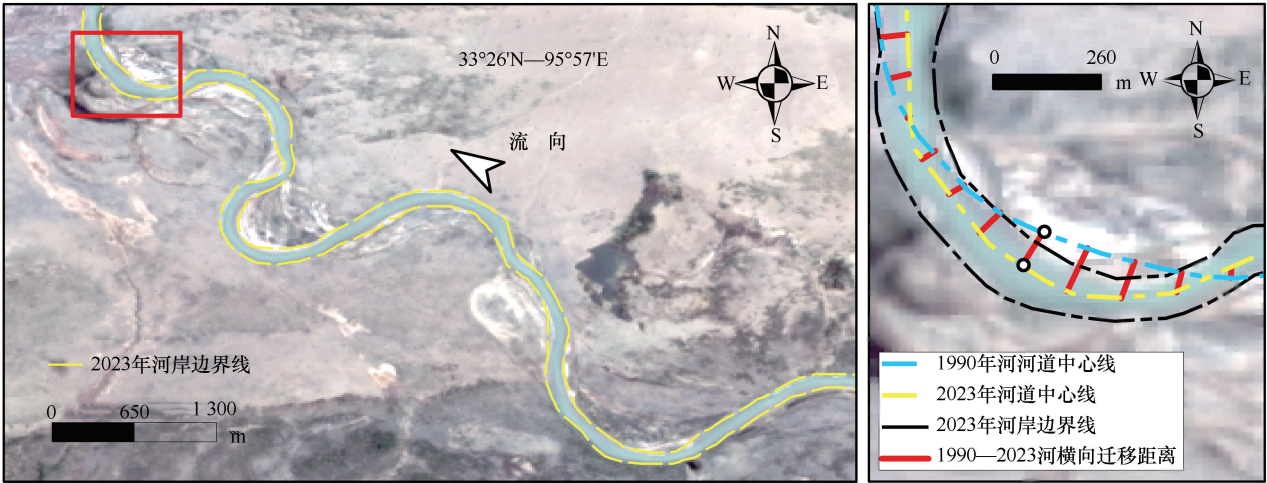


图2 弯曲河道横向迁移示意

Fig. 2 Schematic diagram of lateral migration of meandering river channels

$$NDVI = \frac{NIR - Red}{NIR + Red} \quad (6)$$

式中, *Red* 代表红色波段; *NIR* 代表近红外波段。

2.2 数据来源

本研究使用的 Landsat 系列影像集可通过美国地质调查局 (USGS) 的 Earth Explorer 平台 (<https://earthexplorer.usgs.gov/>) 获取。研究范围为 Landsat 场景 (路径: 136, 行: 36), 选择在夏季汛期水位较高且云层覆盖较低时段, 可清楚识别当曲流域河道。为最大限度显示河道, 只采用云层覆盖率小于 30% 的遥感图像。本分析中使用的气象数据来自美国国家海洋和大气管理局 (NOAA) 下设的国家环境信息中心 (NCEI) (<https://www.ncei.noaa.gov/data/global-summary-of-the-day/archive/>)。所使用的数据是 1990—2023 年期间在当曲流域附近的 3 个气象站 (五道梁, 曲麻莱和沱沱河) 收集的年平均温度和降水量。

2.3 区域划分

本文研究重点是当曲流域河道 1990—2023 年间的河宽与横向迁移变化规律, 所涉河段共包含 152 个断面, 总长达 152 km。由于河道绵长, 不同河段的河宽与横向迁移变化的主导因素各异。基于对各断面区域生态特征与地形条件综合分析, 将研究河段划分为 3 个区域, 其中 1—34 号断面为区域 1, 35—111 号断面为区域 2, 112—152 号断面为区域 3 (见图 3)。112—152 号断面区域紧邻查旦湿地, 生态环境优越, 苔草-嵩草沼泽与嵩草沼泽草甸生长繁茂^[23]。量化分析显示, 该区域归一化差异植被指数 (*NDVI*) 显著高于其他区域 (见表 2)。基于其独特生态特征, 将此区域划定为区域 3。1—111 号断面区域整体 *NDVI* 值较低。其中, 1—34 号断面流经巴茸巴空峡谷, 地形复杂, 对河道演变的横向约束显著, 形成限制性峡谷河段。基于其独特地形地貌, 将该段划为区域 1。35—111 号断面植被稀疏且无地形限制, 将其划分为区域 2。

3 结果

3.1 弯曲度变化

当曲流域研究区的 152 km 河

道呈现顺直和弯曲两种状态。具体来讲, 研究河道 152 个河段中的 48 个 (占比 31.6%) 弯曲度小于 1.05, 为顺直河道; 其余 104 个河段弯曲度大于 1.05, 为弯曲河段 (占比 68.4%), 其中, 22 个河段的弯曲度大于 1.2 (占比 14.5%)。因此, 当曲流域约 1/3 为顺直河道, 2/3 为弯曲河道。

进一步研究当曲流域河道弯曲度在 1990—2023 年期间的变化时, 为降低个别丰枯年流量的影响, 对比了 1990—1994 年与 2019—2023 年的弯曲河道弯曲度均值 (见图 4), 结果表明: 当曲流域河道弯曲度基本保持不变。具体来讲, 1990—1994 年的河道弯曲度均值为 1.15, 而 2019—2023 年的河道弯曲度均值降低为 1.12, 年均降幅仅 0.08%, 这表明当曲流域的河道弯曲度变化可忽略不计。从区域来看, 1990—1994 年区域 1、区域 2 和区域 3 的弯曲度分别为 1.102、1.117 和 1.174。与 2019—2023 年相比, 区域 1 和区域 2 的弯曲度分别增加 0.003 ($\approx 0.3\%$), 而区域 3 则减少了 0.012 ($\approx 1.2\%$)。上述分析说明河道弯曲度变化在 3 个区域均可忽略。

当曲流域 2/3 的河道为弯曲河道且长时间未发生明显变化的原因可总结为两方面: 首先, 研究河段除下游少量峡谷河段外, 78% 河段的周围无高山峡谷约束, 地势平坦, 为弯曲河道形成提供了足够空间, 使其发展几乎不受地形限制, 可保持弯曲河道形态; 其次, 河道两岸沿途有植被生长, 河道水

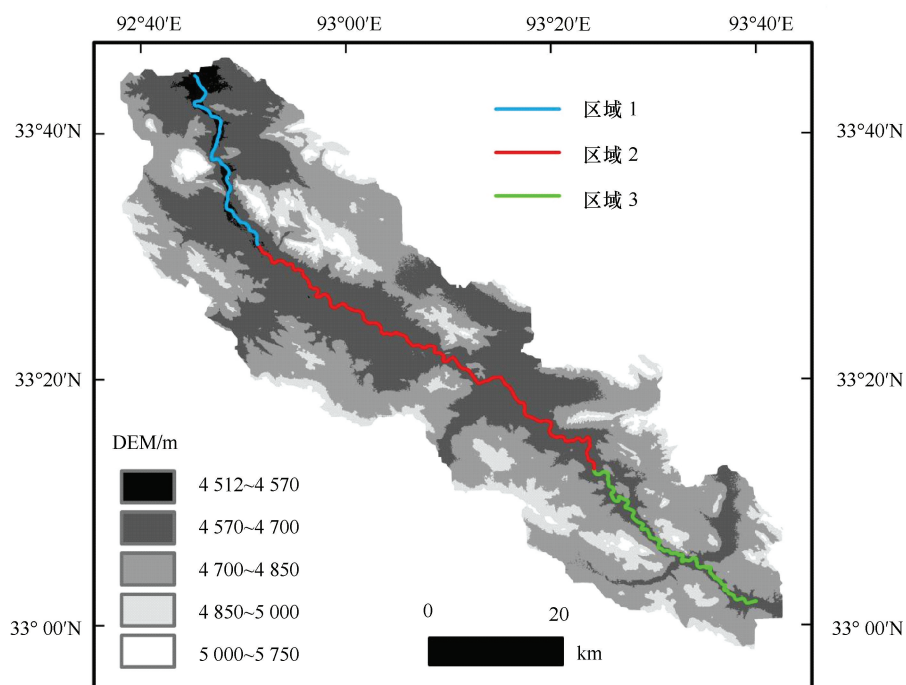


图 3 当曲流域河道区域划分

Fig. 3 Division of river channel zones in Dangqu River Basin

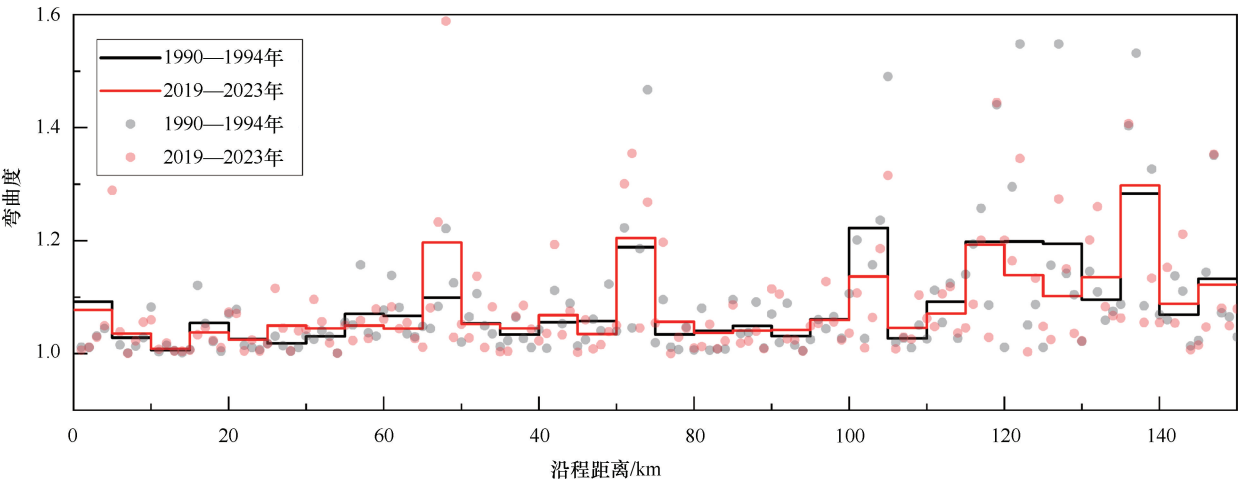


图4 1990—1994 年和 2019—2023 年弯曲度均值对比
Fig. 4 Comparison of mean curvature between 1990—1994 and 2019—2023

沙变化不剧烈，尤其上游河段途经查旦湿地，其植被相对丰茂，沿岸植被一定程度上限制了河道弯曲度的进一步增大。

3.2 河宽变化

分析当曲流域河道河宽随时间的变化趋势，发现1990—2023 年期间当曲流域河宽呈线性增长趋势(见图5)。为减少个别丰枯年流量波动对整体趋势的影响，对比了1990—1994 年与2019—2023 年这两个5 a 时间段的河宽平均值(见图6)。结果表明，河道沿程152 个断面的河宽几乎全部增大，仅少数断面不变或略微减小。具体来讲，1990—1994 年和2019—2023 年河宽年平均值分别为153 m 和167.3 m，增加了14.3 m，年均增加0.4 m/a，34 a 间的增幅为9.4%。为定量表征不同区域河宽变化，细致分析三个区域的河宽变化规律，区域1、2 和3 在34 a 间的河宽分别增大9.6 m、17.6 m 和11.9 m。弯道沿程152 个断面1990—2023 年期间年均河宽的 τ 值(定量表征趋势变化的统计参数)如图7 所示，以定量表征过去34 a 当曲流域河道河宽的变化趋势。数据表明：在152 个断面中，76%的断面河宽增大，进一步证明了当曲流域河道普遍变宽的趋势。

3.3 河道横向迁移

3.3.1 横向迁移率

1990—2023 年期间，当曲流域河道横向迁移速率(M_r)显著下降。研究结果表明1990—2023 年期间，研究区河段的 M_r 值介于0.63~5.80 m/a，年均值为2.9 m/a[见图8(a)]。对比1990—1994 年与2019—2023 年两个时段， M_r 年均值从4.53 m/a 下降

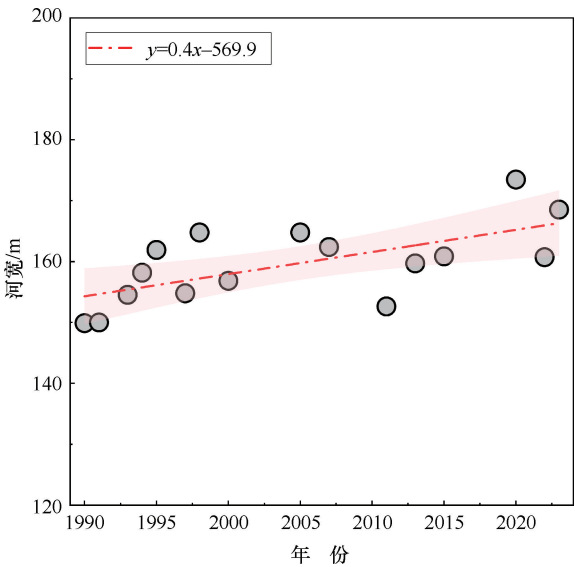


图5 当曲流域河宽年际变化
Fig. 5 Interannual variation of river width in Dangqu River Basin

至1.93 m/a，减少了2.6 m/a，降幅高达57.4%[见图8(b)]。此外，沿河将断面1~152 每5 个断面分为一组，计算 M_r 近34 a 的变化趋势。结果显示，所有组别的 τ 值均小于0，且围绕-0.15 上下波动[见图8(c)]。分区域来看，区域1、区域2 和区域3 的 M_r 年平均值分别为2.89 m/a、2.92 m/a 和2.28 m/a，相应的 τ 值依次为-0.22、-0.17 和-0.21(见表2)。就三个区域 M_r 的时间变化趋势而言，区域1 的 τ 绝对值最大，表明其下降趋势最为显著，区域3 次之，而区域2 的下降趋势则相对平缓。

3.3.2 归一化横向迁移率

当曲流域区域1、2、3 的平均河宽存在显著差异，特别是区域1 的平均河宽为区域3 的2.4 倍，河

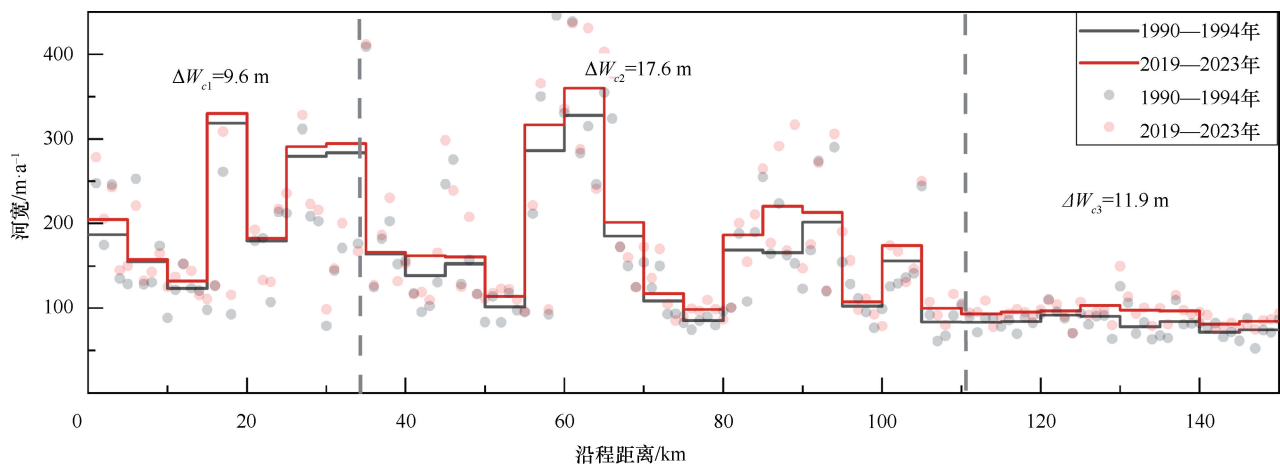


图 6 1990—1994 年和 2019—2023 年期间当曲流域河道河宽均值对比

Fig. 6 Comparison of average river width in Dangqu River Basin between 1990—1994 and 2019—2023

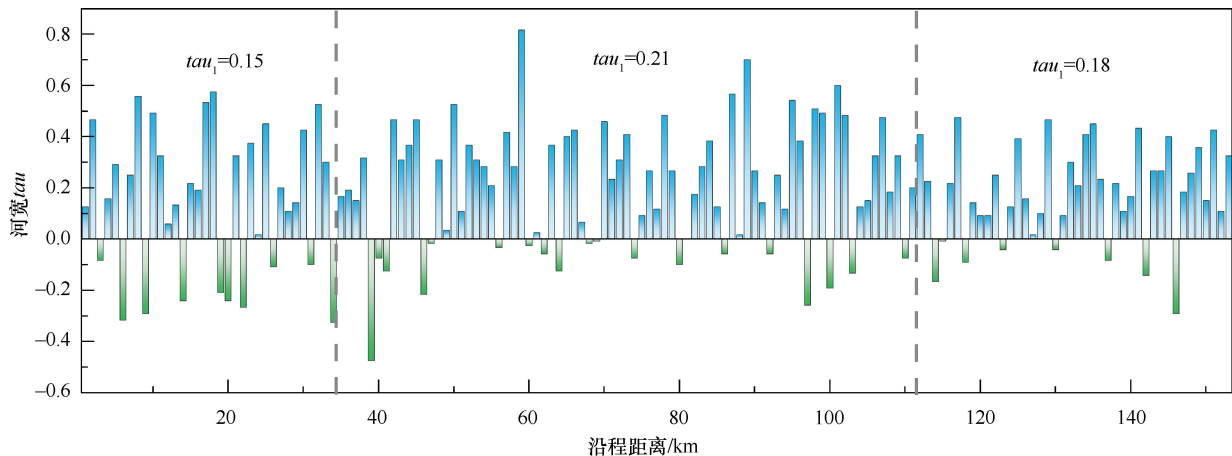


图 7 1990—2023 年当曲流域弯曲河道河宽变化 τ 值

Fig. 7 τ values of river width changes in meandering rivers of Dangqu River Basin (1990—2023)

表 2 1990—2023 年当曲流域河道弯曲度、河宽、横向迁移率

Table 2 River channel curvature, river width, and lateral migration rate in Dangqu River Basin (1990—2023)

研究区域	弯曲度	河宽/m	$M_r/\text{m} \cdot \text{a}^{-1}$	M_{rn}/a^{-1}	NDVI	河宽 τ	$M_r \tau$	$M_{rn} \tau$
区域 1(断面 1—34)	1.10	209.3	2.9	0.017	0.24	0.15	-0.22	-0.22
区域 2(断面 35—111)	1.11	172.5	2.9	0.019	0.25	0.20	-0.17	-0.18
区域 3(断面 112—152)	1.17	87.3	2.3	0.027	0.35	0.18	-0.21	-0.23
全程(断面 1—152)	1.14	159.5	2.8	0.021	0.27	0.19	-0.19	-0.20

宽差异与河道横向迁移率直接相关。为消除河宽对河道横向迁移率的影响，本文引入归一化横向迁移率(=横向迁移率/河宽)以定量比较不同河宽的横向迁移特征。

1990—2023 年期间，当曲流域的归一化横向迁移速率(M_{rn})呈显著下降趋势。为探究当曲流域河道 M_{rn} 的变化特征，本文计算了该河道过去 34 a 间的归一化年均迁移率。通过每 5 个断面计算一次 τ 值的方式，分析各断面 M_{rn} 在 34 a 间的具体变化趋势。结

果发现：自 1990 年以来，当曲流域河道的 M_{rn} 减少了 48%，平均每十年递减 14%，下降趋势明显[见图 9(a)]。在 1990—1994 年期间，河岸的 M_{rn} 范围为 $[0.012 \text{ a}^{-1}, 0.056 \text{ a}^{-1}]$ ，平均值为 0.033 a^{-1} 。而 2019—2023 年，这一范围缩小为 $[0.01 \text{ a}^{-1}, 0.029 \text{ a}^{-1}]$ ，平均值也下降至 0.019 a^{-1} [见图 9(b)]。分区域来看，区域 1、2 和 3 的 M_{rn} 分别为 0.017 a^{-1} 、 0.019 a^{-1} 和 0.027 a^{-1} ， τ 值分别为 -0.22、-0.18 和 -0.23[见图 9(c)]，区域 3 的 τ 绝对值最大，其

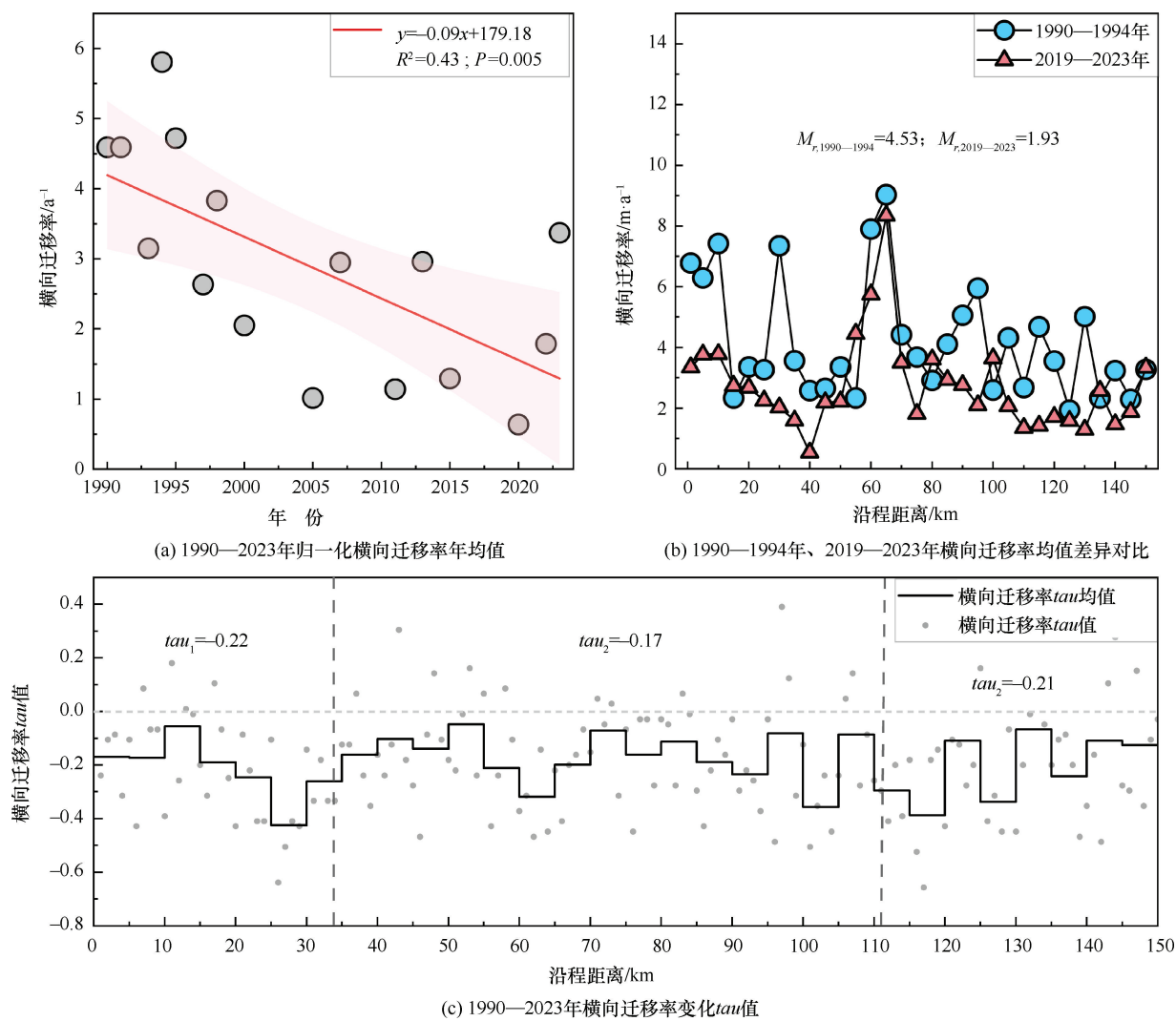


图 8 当曲流域河道横向迁移速率及 τ 值

Fig. 8 Lateral migration rates and τ values of river channels in Dangqu River Basin

次是区域 1，区域 2 最小。区域 1 与区域 2 的 M_m 值较为接近，相比之下，区域 3 明显大于其他两个区域。主要原因是三个区域的横向迁移率基本相当，但区域 3 的河宽明显小于区域 1 和区域 2（见图 6），导致区域 3 的归一化横向迁移率较其他两个区域更大。

4 结果分析

4.1 河宽与横向迁移率变化原因分析

区域 1、2、3 的河道宽度及归一化横向迁移率因地形和植被条件的差异而展现出不同特征，具体分析如下。区域 1 弯曲河道宽度仅增大 5%（9.6 m），河道横向摆动与迁移相对较弱。区域 1 的弯曲河段河床比降达到 1.1‰，高于区域 2 和区域 3，因此水流更湍急，对河床的冲刷作用更大。由于河道穿越巴茸巴空峡谷，受两岸山地峡谷紧束，河床的冲刷主要集中在河道中央，而对河道边岸的侵蚀作用

（河宽增加）并不显著^[24]。此外，区域 1 的河道受峡谷地形限制较为显著，使河道稳定性相对增强，从而减弱了河道横向迁移作用。区域 2 弯曲河道的河宽增加约 20%（17.6 m），与区域 1 相比，横向迁移特征更显著。区域 2 河段周围地势平坦，无两侧高山峡谷限制，植被覆盖低，其 $NDVI$ （归一化植被指数）仅 0.25，河道沿两岸横向侵蚀^[25]，既促进河宽增加^[26]也使横向迁移特征更明显。区域 3 的弯曲河道平均河宽最小，仅相当于区域 1 的 40% 和区域 2 的 50%。然而，其河宽的平均增长（11.9 m）却超过了区域 1。这是因为该区域地势相对平坦，河道经过查旦湿地，植被生长相对茂密（ $NDVI$ 为 0.35），加强了河道两岸稳定性，对弯曲河道横向扩张、左右摆动有一定约束作用。因此，区域 3 河宽增加小于区域 2 且归一化横向迁移率下降趋势显著。

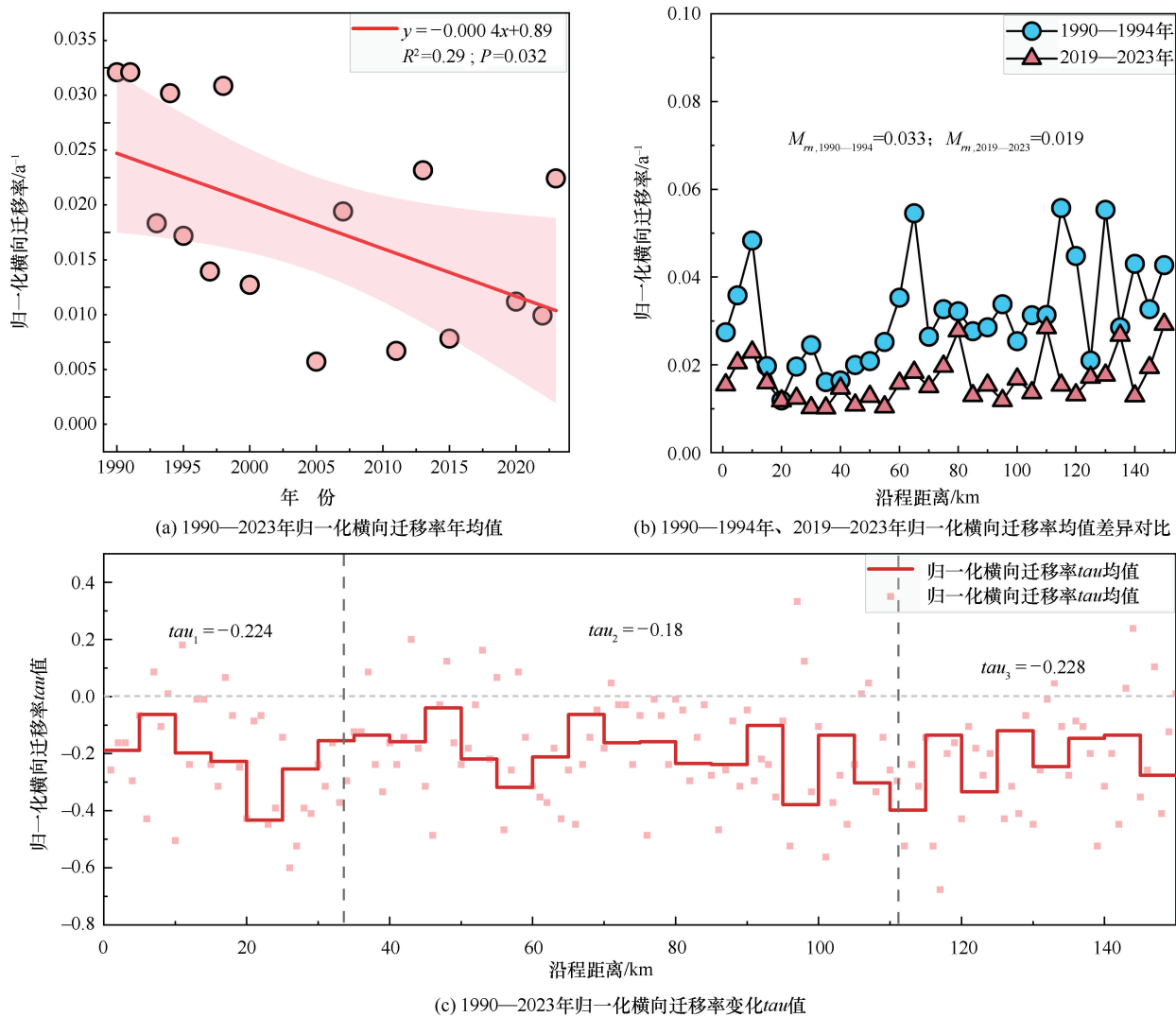


图9 当曲流域河道归一化横向迁移速率及 τ 值

Fig. 9 Normalized lateral migration rates and τ values of river channels in Dangqu River Basin

4.2 温度上升和降水增加对河宽与归一化横向迁移变化的影响

数据显示，1990—2023 年期间，当曲流域的年平均气温有所上升(见图 10)。在此期间，其年平均温度为 $-2.58\text{ }^{\circ}\text{C}$ ，平均每年上升 $0.05\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。与此同时，当曲流域的年降水量也呈增加趋势(见图 10)，年平均降水量为 405.33 mm ，直线增长率为 4.7 mm/a 。结果表明，当曲河流河宽、 M_m 对温度、降水的响应不同。河宽与气温、降水量呈显著正相关($p<0.01$)，与 $NDVI$ 无关(见图 11)。与此同时，当曲河流的 M_m 与气温、降水和 $NDVI$ 呈显著负相关($p<0.01$) (见图 11)。

气候变暖加速了多年冻土层中冰的融化，致使土壤含冰量降低、融化期延长。降水量增多改变了地面水文过程^[27]，二者共同作用使河道水位上升，河岸

向两侧扩张，河宽随之增大^[28-29]。与此同时，这些变化促进了河道四周植被生长。河岸植被具有稳定河岸、减缓河道迁移速率的作用。从植被生长角度看，气温升高、降水及冰雪融水增多，为植被生长提供了有利条件，表现为归一化植被指数($NDVI$ 值)增大。从稳定河岸机制而言，冻土融化使活动层加深，根系渗透范围得以扩大，抑制外岸侵蚀，进而稳定河岸^[30]。

4.3 流量和悬移质泥沙量对河宽与横向迁移变化的影响

当曲流域无水文站，流量与悬移质泥沙量分别从国家青藏高原数据中心和遥感反演获得^[31-32]。分析发现流量过程在 1998—2017 年呈缓慢增加趋势[见图 12(a)]，这与气候变暖导致冰川积雪融化加剧^[33]、流量增加的趋势一致^[34]。对应地，河道水位上升，

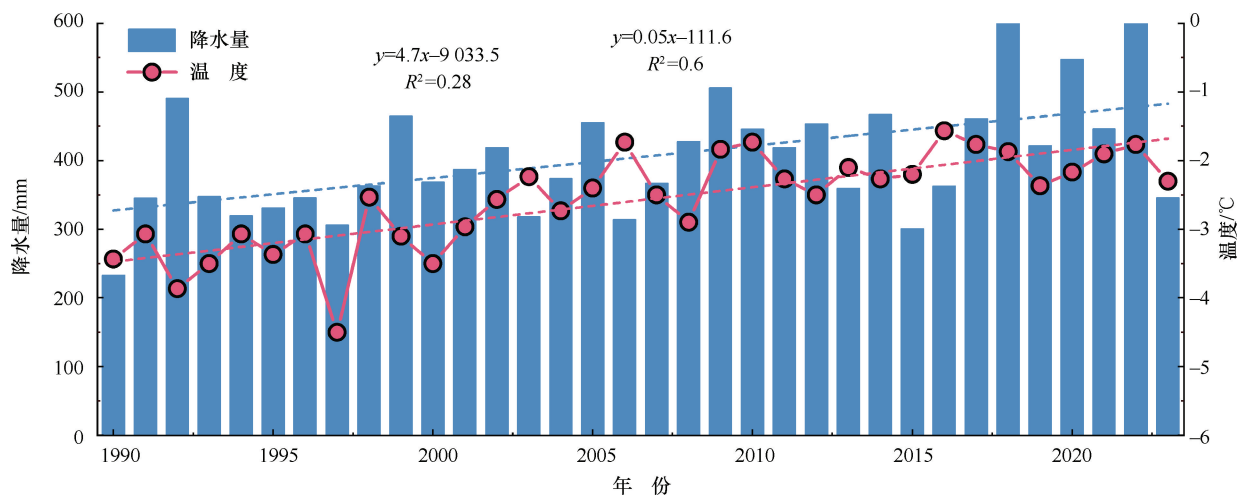


图 10 当曲流域内的温度和降水变化
Fig. 10 Changes in temperature and precipitation in Dangqu River Basin

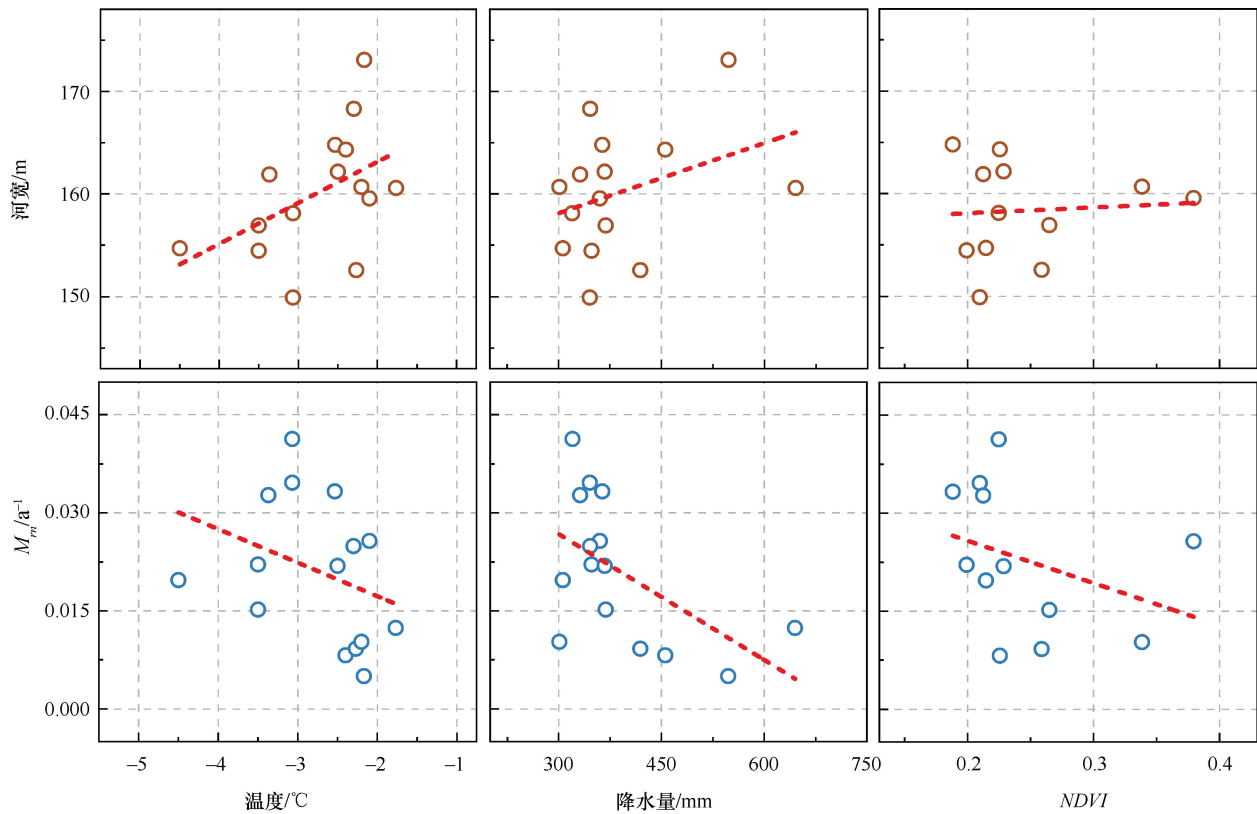


图 11 当曲流域内 M_m 、河宽与温度、降水、NDVI 关系
Fig. 11 Relationships of M_m and river width with temperature, precipitation, and NDVI in Dangqu River Basin

河宽增大，与 3.2 节的结论一致。由于河宽变化与横向迁移和河流中的泥沙条件有关，故分析了河宽与横向迁移率和悬移质泥沙量的关系，发现河宽[见图 12 (b)]和横向迁移变化[见图 12(c)]与悬移质泥沙浓度没有直接关联。这可能是因为当曲流域河道的悬移质泥沙浓度增加是冰川积雪及冻土融化后形成的径流携带泥沙进入河道所致，而非主要来源于河床冲刷或

河岸侵蚀。

5 讨论

本研究利用遥感影像，深入分析了当曲流域 34 a 来河道弯曲度、河宽及横向迁移的动态变化过程。该方法能获得大尺度影像资料，实时性强，空间分辨率多样，但影像质量易受云层遮挡、大气干扰，且难以

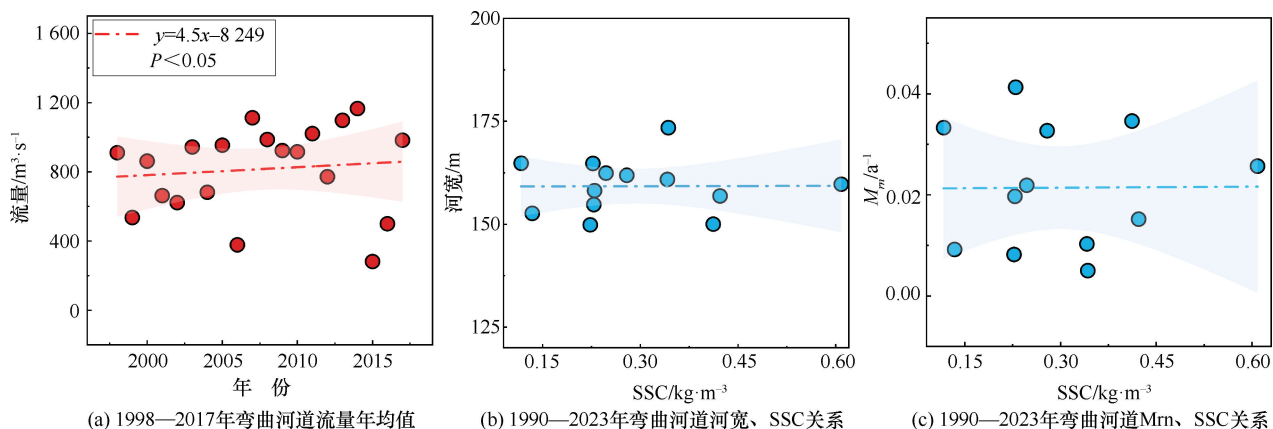


图 12 当曲流域河道流量变化、河宽和横向迁移率与悬移质泥沙量的关系

Fig. 12 Relationships of river discharge variation, river width, and lateral migration rate with suspended sediment load in Dangqu River Basin

获取河道垂直信息,需结合实地测量。通过文献综述与调研可知,探究河流平面形态和横向迁移的时空演变规律还可通过野外考察^[23]、水槽试验与数值模拟^[12]、光释光测年^[35]等方法。例如,野外考察可直接获取河流形态、沉积物分布等一手资料,为研究提供真实信息。但依赖工具,测量周期长、精度易受人员因素影响;复杂地形区劳动强度大,耗费人力、物力、财力多,如青藏高原偏远河流考察面临诸多困难^[23]。室内试验可精确控制参数,排除外界干扰以探究机理,重复操作便于验证结果,数值模拟前瞻性强可预测河流演变,还能对比优化不同治理方案,但试验和建模的结果通常由现场测量数据和特定弯曲河流的平面形态支持,导致较大的局限性,研究结果难以真实还原野外实际情况^[12]。光释光测年能测定河床沉积物等地形事件的形成时代,从时间和影响因素角度重构河流地形发展历史,预测其宏观演变趋势,然而该方法需采集样品并开展复杂实验室分析,操作繁琐且对实验条件与技术要求高;测年结果受样品保存状态、测年技术选择等因素制约,样品受污染或技术选用不当会导致数据偏差,影响对河流演变历史的准确判断^[35]。综上,遥感影像解译是当前开展大尺度河流演变研究较为行之有效的方法。

运用遥感技术,本文研究发现 1990—2023 年期间,当曲河道河宽呈增大趋势,年均增加 0.4 m/a。HE 等^[13]分析长江源辫状河流得到 2000—2020 年间,河道平均展宽率为 0.07 ~ 1.88 m/a,与本文研究结论量级一致,但结果在数值上相差较大。这可能是二者河道类型和研究范围均不同所导致。另外,本文研究还发现,气温升高、降水及冰雪融水增多,为植被生长创造有利条件;同时冻土融化加深活动层,扩大

了植物根系渗透范围,进而抑制外岸侵蚀,使河道横向迁移率降低。IELPI 等^[34]分析北极地区河流发现,过去 50 多年河流横向迁移率减少了约 20%,气温升高促进了河岸植物生长,其根系加固了河岸土壤,减少了侵蚀,从而降低了河流的横向迁移能力。PERUCCA 等^[36]对一组全球河流样本分析表明,植被通过根系加固河岸,并影响水流结构与泥沙输移,显著降低了河流横向迁移率。上述研究结论与本研究结果总体一致。由此可知,冻土区河道河流,特别是中(高)纬度、高海拔地区,可能存在相似的时空演变规律。本研究结果可为纬度、海拔相近的冻土区相关研究提供理论和数据支撑。

6 结 论

本文利用 Landsat 遥感影像提取 1990—2023 年当曲流域河道形态特征,探究气候变化下当曲流域河道弯曲度、河宽和横向迁移的变化。主要结论如下。

(1)当曲流域 1/3 为顺直河道、2/3 为弯曲河道。河道弯曲度整体较小并保持不变。1990—2023 年,当曲流域河道平均弯曲度为 1.14。当曲流域弯道的弯曲度仅降低 2%。

(2)当曲流域河道河宽总体呈增加趋势。1990—2023 年,河道河宽共增加 14.3 m,增幅为 9.4%。其中,下游河宽增幅最小(区域 1, 9.6 m),中游最大(区域 2, 17.6 m),上游位于二者之间(区域 3, 11.9 m)。降水量增多与气候变暖,使当曲流域冻土消融、冰雪融水加剧,流量、河道水位随之上升,河宽增加。

(3)当曲流域河道横向迁移率持续减少。过去 34 a 间河道归一化横向迁移率(M_{rn})总体减小 48%。

其中, 区域 1、2、3 的归一化横向迁移率 τ 值分别为-0.22、-0.18 和-0.23。流域下游河道(区域 1)受峡谷地形限制, 不易发生横向摆动; 流域中游河道(区域 2)地势平坦、植被稀少, 河道横向迁移幅度最大; 流域上游河道(区域 3)地处查旦湿地、植被丰茂、河岸相对稳定, 对河道横向迁移约束作用明显。这表明植被能稳固岸滩, 对河道稳定至关重要。

参考文献 (References):

[1] IELPI A, LAPÔTRE M G A. A tenfold slowdown in river meander migration driven by plant life[J]. Nature Geoscience, 2020, 13(1): 82-86.

[2] LORENZO-LACRUZ J, MORÁN-TEJEDA E, VICENTE-SERRANO S M, et al. Streamflow frequency changes across western Europe and interactions with North Atlantic atmospheric circulation patterns[J]. Global and Planetary Change, 2022, 212: 103797.

[3] TAIKAN OKI S K. Global hydrological cycles and world water resources[J]. Science, 2006, 313(5790, Freshwater Resources): 1068-1072.

[4] LIU C L, ALLAN R P. Observed and simulated precipitation responses in wet and dry regions 1850—2100[J]. Environmental Research Letters, 2013, 8(3): 034002.

[5] YANG Z P, GAO J X, ZHOU C P, et al. Spatio-temporal changes of NDVI and its relation with climatic variables in the source regions of the Yangtze and Yellow Rivers[J]. Journal of Geographical Sciences, 2011, 21(6): 979-993.

[6] LIMAYE A B S, LAMB M P. Numerical simulations of bedrock valley evolution by meandering rivers with variable bank material[J]. Journal of Geophysical Research: Earth Surface, 2014, 119(4): 927-950.

[7] CHASSIOT L, LAJEUNESSE P, BERNIER J F. Riverbank erosion in cold environments: Review and outlook [J]. Earth-Science Reviews, 2020, 207: 103231.

[8] CHEN H, JU P J, ZHU Q A, et al. Carbon and nitrogen cycling on the Qinghai-Tibetan Plateau [J]. Nature Reviews Earth & Environment, 2022, 3(10): 701-716.

[9] 何飞. 拉萨河下游河流地貌形态演变及其影响因素[D]. 兰州: 兰州大学, 2024. HE F. River geomorphic planform evolution and influencing factors in the lower reaches of Lhasa River. Lanzhou: Lanzhou University, 2024.

[10] SHA A M, LI D F, WALLING D, et al. Accelerated river meander migration on the Tibetan Plateau caused by permafrost thaw [J]. Geophysical Research Letters, 2025, 52(1): e2024GL11536.

[11] LIN Z P, HAN Z P, UL HUSSAN W, et al. Upland river planform morphodynamics and associated riverbank erosion: Insights from channel migration of the upper Yarlung Tsangpo river[J]. Catena, 2023, 231: 107280.

[12] 余倩, 安瑞冬, 李嘉, 等. 辫状河流形态形成及演变机制分析[J]. 水电能源科学, 2019, 37(6): 40-43.

YU Q, AN R D, LI J, et al. Analysis of formation and evolution mechanism of braided river[J]. Water Resources and Power, 2019, 37(6): 40-43.

[13] HE Y C, LI Z W, XIA J Q, et al. Channel morphological characteristics and morphodynamic processes of large braided rivers in response to climate-driven water and sediment flux change in the Qinghai-Tibet Plateau [J]. Water Resources Research, 2024, 60(9): e2023WR036126.

[14] LI D F, LI Z W, ZHOU Y J, et al. Substantial increases in the water and sediment fluxes in the headwater region of the Tibetan Plateau in response to global warming[J]. Geophysical Research Letters, 2020, 47(11): e2020GL087745.

[15] IMMERZEEL W W, LUTZ A F, ANDRADE M, et al. Importance and vulnerability of the world's water towers[J]. Nature, 2020, 577(7790): 364-369.

[16] 陈帮, 李志威, 胡旭跃, 等. 黑河高曲率弯道形态特征时空变化与横向迁移速率[J]. 水科学进展, 2023, 34(4): 622-634. CHEN B, LI Z W, HU X Y, et al. Spatiotemporal morphological change and lateral migration of high-sinuosity bends in the Black River [J]. Advances in Water Science, 2023, 34(4): 622-634.

[17] 高超, 王随继. 1990 年以来黄河第一湾齐哈玛河段砾质网状河的演变特征[J]. 地理学报, 2018, 73(7): 1352-1364. GAO C, WANG S J. Evolution characteristics of the gravel-bedded anastomosing river at the Qihama reach in the First Great Bend of the Yellow River since 1990 [J]. Acta Geographica Sinica, 2018, 73(7): 1352-1364.

[18] LI D F, ZHANG T, WALLING D E, et al. The competing controls of glaciers, precipitation, and vegetation on high-mountain fluvial sediment yields[J]. Science Advances, 2024, 10(48): eads6196.

[19] 赵云轩, 杜际增, 郭超, 等. 近 40 年长江流域水体面积时空变化分析[J]. 水利发展研究, 2026, 26(2): 61-70. ZHAO Yunxuan, DU Jizeng, GUO Chao, et al. Spatiotemporal assessment of water area changes within the Yangtze River Basin over the past four decades[J]. Water Resources Development Research, 2026, 26(2): 61-70.

[20] 闫霞, 周银军, 姚仕明. 长江源区河流地貌及水沙特性[J]. 长江科学院院报, 2019, 36(12): 10-15. YAN X, ZHOU Y J, YAO S M. Landform and characteristics of flow and sediment of rivers in source region of Yangtze River[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2019, 36(12): 10-15.

[21] 董旺, 闫磊, 谢笑添, 等. 城市化背景下京津冀极端降水时空演变规律[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2025, 23(5): 1113-1126. DONG Wang, YAN Lei, XIE Xiaotian, et al. Spatial and temporal evolution patterns of extreme precipitation in Beijing-Tianjin-Hebei in the context of urbanization[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2025, 23(5): 1113-1126.

[22] ÖZELKAN E. Water body detection analysis using NDWI indices derived from Landsat-8 OLI [J]. Polish Journal of Environmental Studies, 2020, 29(2): 1759-1769.

- [23] ZHAO Z L, LIU L S, WANG Z F, et al. Dynamic changes of plateau wetlands in the damqu river basin, Yangtze River source region, China, 1988—2015[J]. *Wetlands*, 2020, 40(5): 1409-1424.
- [24] 卢金友. 长江河道水流流速分布研究[J]. *长江科学院院报*, 1990, 7(1): 40-49.
- LU J Y. Review of velocity distribution and study on velocity distribution of Yangtze River flow [J]. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 1990, 7(1): 40-49.
- [25] YANG M X, WANG X J, PANG G J, et al. The Tibetan Plateau cryosphere: Observations and model simulations for current status and recent changes[J]. *Earth-Science Reviews*, 2019, 190: 353-369.
- [26] IELPI A, LAPÔTRE M G A, GIBLING M R, et al. The impact of vegetation on meandering rivers [J]. *Nature Reviews Earth & Environment*, 2022, 3(3): 165-178.
- [27] ZHAO Q D, DING Y J, WANG J, et al. Projecting climate change impacts on hydrological processes on the Tibetan Plateau with model calibration against the glacier inventory data and observed streamflow [J]. *Journal of Hydrology*, 2019, 573: 60-81.
- [28] BOSMANS J, WANDERS N, BIERKENS M F P, et al. FutureStreams, a global dataset of future streamflow and water temperature[J]. *Scientific Data*, 2022, 9: 307.
- [29] FENG D M, GLEASON C J, YANG X, et al. How have global river widths changed over time? [J]. *Water Resources Research*, 2022, 58(8): e2021WR031712.
- [30] ZHU L K, CHEN D, HASSAN M A, et al. The influence of riparian vegetation on the sinuosity and lateral stability of meandering channels [J]. *Geophysical Research Letters*, 2022, 49(2): e2021GL096346.
- [31] MIAO C Y, GOU J J. CNRDv1.0: The China Natural Runoff Dataset Version 1.0 (1961—2018). National Tibetan Plateau / Third Pole Environment Data Center, 2022.
- [32] LI J L, WANG G X, LI K, et al. Impacts of climate change and freeze-thaw cycles on water and sediment fluxes in the headwater region of the Yangtze River, Qinghai-Tibet Plateau [J]. *Catena*, 2023, 227: 107112.
- [33] LI J L, WANG G X, SUN S Q, et al. Mapping and reconstruct suspended sediment dynamics (1986—2021) in the source region of the Yangtze River, Qinghai-Tibet Plateau using Google Earth Engine [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2025, 317: 114533.
- [34] IELPI A, LAPÔTRE M G A, FINOTELLO A, et al. Large sinuous rivers are slowing down in a warming Arctic [J]. *Nature Climate Change*, 2023, 13(4): 375-381.
- [35] FAN N N, CHU Z X, JIANG L G, et al. Abrupt drainage basin reorganization following a Pleistocene river capture [J]. *Nature Communications*, 2018, 9: 3756.
- [36] PERUCCA E, CAMPOREALE C, RIDOLFI L. Significance of the riparian vegetation dynamics on meandering river morphodynamics [J]. *Water Resources Research*, 2007, 43(3): 2006WR005234.

(责任编辑 王璐)