•水利与土木工程•
DOI:10.12454/j.jsuese.202600209

本刊网刊

暖湿气候加剧黄河源区弯曲河道演变

郑鑫梦[1],付鸿声[1],李金钊[1],单钰淇[2],林志鹏[1],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:在青藏高原持续暖湿化的背景下,气候变化驱动黄河源区河流演变,影响黄河流域的水利工程安全、泥沙输移过程和高寒湿地稳定性。基于1990—2024年黄河源区遥感影像与实测水文资料,采用修正归一化差异水体指数(MNDWI)法、河道中心线法、Mann–Kendall趋势分析法,定量解析黄河源区弯曲河段的弯曲度(R)、河宽(W_C)和归一化横向迁移率(M_{rn})的变化规律。结果表明:在空间上,支流弯曲度(1.35～1.62)显著高于干流(1.08～1.25);干流河宽沿程递增,干流下游稳定在200～350 m;源区上游多年冻土区河段M_{rn}高(0.08～0.20 a^{-1}),而源区下游季节性冻土区河段M_{rn}较低(0.02～0.09 a^{-1})。在时间上,黄河源区河流自2015年进入演变活跃期,径流的增加驱动河床出现"扩容型"调整,局部河段横向展宽幅度达180 m;多年冻土区呈正向演化,河道归一化横向迁移率随弯曲度增大呈指数型上升,相比之下,季节性冻土区河道归一化横向迁移率较为稳定,其形态演变主要发生在洪水期间。进一步研究分析表明,河宽较小的河段演变更剧烈,同时冻土和植被条件决定河道迁移模式,黄河源区弯曲河流正在从相对稳定状态向更活跃、动力更强的演变阶段过渡。研究成果为高寒地区河流形态演变机理认知和生态系统保护与修复提供了量化依据。

关键词:弯曲河流;黄河流域;横向迁移;时空演变
中图分类号:TV147　　**文献标志码:**A　　**文章编号:**2096-3246(2026)06-0295-11

黄河源区是青藏高原重要的产流区之一,该区域发育有规模大、分布密集的典型高寒弯曲河流[1]。该类河道以单线程展布和高弯曲度为主要形态特征,其演化过程受控于凹岸水流冲刷侵蚀与凸岸泥沙淤积的协同作用,在水沙动力持续驱动下表现出显著的弯道横向迁移[2–3]。同时,受高原特殊地理环境制约,黄河源区河岸普遍发育"冻土–高寒草甸"复合二元结构,使河床边界对外界扰动具有较高敏感性[4–5]。在全球气候变暖背景下,青藏高原高寒河流的河床形态调整与河道演变速率显著加快,高寒地区河流演变问题日益突出[6–8]。河道演化不仅重塑区域河网格局,也深刻影响流域尺度的水文过程[9–10]、泥沙输移[11–12]和生态屏障功能[13]。因此,探究青藏高原弯曲河流的时空演变规律与机制,既能深化气候变化下河流地貌过程的科学认知,亦可为高寒流域生态保护提供科学支撑。

受气候暖湿化影响,高寒河流对气候变化的响应规律及其演变机制已成为国内外研究热点。青藏高原作为中低纬度多年冻土的核心区,其升温速率具有显著的海拔依赖性;多年冻土持续升温(约0.14 ℃/10 a),导致冻土融化、活动层加深,显著改变了河岸的稳定性[14]。此外,Finotello等[13]通过全球长时序遥感监测发现,植被对河道横向迁移具有决定性的调控作用。Ielpi等[15]的研究表明,植被根系固土能显著增强河岸抗冲性,使河道横向迁移速率降低约一个数量级。然而,在冻土环境中,植被的作用更为复杂:关于北极育空地区的研究表明,气候变暖驱动的植被绿化可增加河岸稳定性,在一定程度上抵消了冻土融化带来的负面影响[16];但与之相对,在无植被环境下,多年冻土的冰胶结作用虽能提供独立黏结力,但温度升高引发的热融侵蚀会进一步加速河道的演变[17]。除边界条件外,河流演变亦深刻受控于气候驱动下的水沙动力响应。Li等[18]的研究表明,降水(42%的贡献率)与温升引起的冻融侵蚀(31%的贡献率)共同提高了长江源区的河流输沙量,且解冻期提前(13.5 d/10 a)显著强化了季节性水沙动力,为弯曲河流的侧向

收稿日期:2026－03－23　　**修回日期:**2026－04－14　　**网络出版日期:**2026－04－15
基金项目:国家重点研发计划青年科学家项目(2024YFC3213200);国家自然科学基金项目(52279072;52579072)
作者简介:郑鑫梦(2001—),女,硕士生.研究方向:河流演变学.E-mail:1299950832@qq.com
* **通信作者:**刘　超,研究员,E-mail:liuchaoscu@vip.qq.com

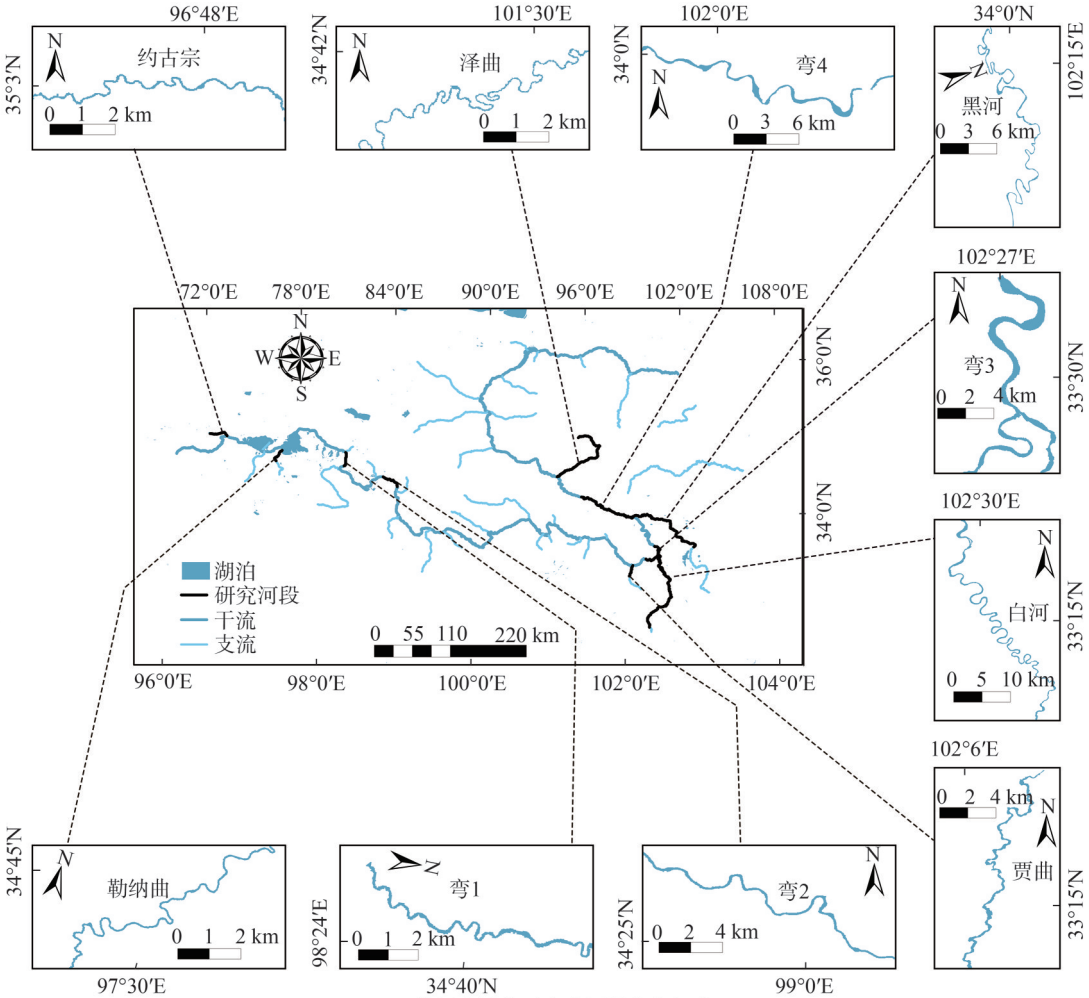
侵蚀扩张和弯曲度演化提供了关键物质与动力基础。同时，气候变化与人类活动共同主导了黄河流域的水沙演变过程：1933—1979年为黄土高原产沙最丰时期，黄河潼关站实测输沙量达 16.2×10^8 t/a，还原坝库拦沙后“天然”输沙量更高至 19.2×10^8 t/a；20世纪80年代以来，黄河水沙呈现“水沙均减”趋势，且坝库拦沙效应衰减对未来水沙调控产生显著影响[19]。然而，黄河源区弯曲河流发育更为密集，其“高寒草甸–多年冻土”复合边界对气候暖湿化的响应更为敏感[20–21]。目前，针对此复杂环境下植被与冻土共同驱动的河岸演变仍缺乏系统性研究。

本文聚焦青藏高原黄河源区10条典型弯曲河段，基于1990—2024年遥感影像、实测水文及植被资料，探究35 a间河道河宽、弯曲度及横向迁移演变规律，揭示“多年冻土–水文–植被”耦合驱动下的河流动态，阐明冻融过程对高寒地区弯曲河流发育的驱动机制。研究成果旨在提高对复合边界下高寒区域河流演变的理论认知，为保护和修复黄河源区生态系统提供科学依据。

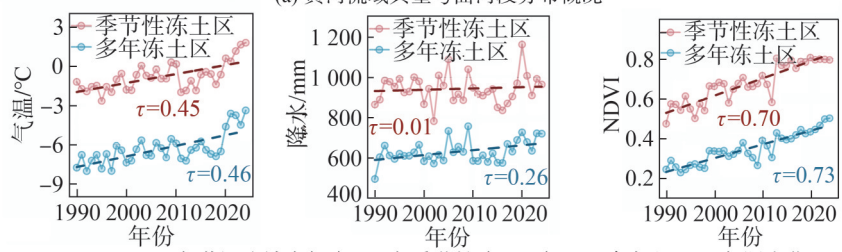
1 研究区域与方法

1.1 研究区域

黄河源区弯曲河段概况如图1所示。图1中，NDVI为归一化植被指数，τ为趋势显著程度。黄河源区地处



(a) 黄河流域典型弯曲河段分布概况



(b) 1990—2024年黄河流域多年冻土区与季节性冻土区气温、降水和NDVI年际变化

图 1 黄河源区弯曲河段地形背景

Fig. 1 Topographic setting of the meandering reachs in the source region of the Yellow River

青藏高原东部，其地理位置介于96°E～104°E、33°N～36°N之间，海拔高度普遍在3 000 m以上。由图1可见，黄河源区地形平坦，河谷开阔，由于地处高海拔地带，发育有广泛的多年冻土与季节性冻土。多年冻土区河段草原植被相对稀疏，年均气温约−5 ℃，年降水量约600 mm；而季节性冻土区气温相对较高（年均约2.2 ℃），降水量相对较高（约900 mm），植被类型以草甸和灌丛为主。过去几十年来，气候暖湿化使黄河源区冻土退化，并加速流域植被绿化进程。此外，黄河源区广泛分布富含有机碳的泥炭地，其物质结构疏松，易在河流横向迁移过程中被侵蚀，对高寒地区弯曲河流演变过程产生了重要影响。受独特的冻土环境、疏松的河床边界组成及平缓的地形坡度影响，黄河源区干支流发育了大量形态典型、演变剧烈的弯曲河流。

本研究综合考虑河道形态特征、遥感影像可用性和数据完整性等因素，对黄河源区的河段进行筛选。筛选原则包括：弯曲特征明显、河宽较大（>50 m，便于遥感影像识别和河道演变分析）、具有连续时间序列影像（可用于长期分析）。基于上述原则，最终选取黄河流域源区具有代表性的10条典型弯曲河段作为研究对象（图1），所选河段主要分布于玛曲、若尔盖、久治等县境内，涵盖不同冻土类型下的干支流，其基础信息见表1（按河流流向排序）。

表1　研究河段基础信息

Table 1　Basic information of study river sections

河段名	干支流	冻土区类型	长度/km
约古宗	支流	多年冻土区	30.2
勒纳曲	支流	多年冻土区	27.1
弯1	干流	多年冻土区	24.7
弯2	干流	多年冻土区	31.0
贾曲	支流	季节性冻土区	25.5
白河	支流	季节性冻土区	208.6
弯3	支流	季节性冻土区	34.1
黑河	干流	季节性冻土区	235.0
弯4	干流	季节性冻土区	101.3
泽曲	支流	季节性冻土区	181.1

1.2　研究方法

1）遥感影像处理

选取青藏高原黄河源弯曲河流1990—2024年Landsat系列遥感影像（空间分辨率30 m、周期16 d）用于时空演变分析。考虑研究区河流冬季封冻、汛期径流集中的水文特征，统一选取7—9月汛期内水位相对稳定、岸线清晰的影像。针对高海拔地区云雪影响导致有效影像数量有限的问题，在保证季节一致性的前提下，优先选取成像日期相近且质量较高的影像，以提高年际对比的可靠性。

河道提取遵循“影像分辨率优于平均河宽30%”的精度控制原则，现有研究已验证该方法在河宽等河道形态参数提取中的可靠性[8,15]。鉴于研究区河道宽度普遍较小（约50 m），为满足弯曲河流平面形态识别的精度要求，对Landsat影像进行空间分辨率提升处理：Landsat 5影像采用双三次插值重采样[1]；Landsat 8影像采用增强型全色锐化（EGS）融合[22]，统一获得15 m空间分辨率影像。

利用GEE（Google Earth Engine）平台对卫星影像进行调取与云掩膜处理，构建修正归一化差异水体指数（MNDWI）影像。在此基础上，首先开发基于Python的图像处理算法，实现河道水体信息的自动化识别与提取，采用15×15像元窗口的局部自适应阈值法进行二值化分割；随后，结合形态学滤波去除面积小于100像元的孤立噪声；最终，获得15 m分辨率的河流水体分布图。为保证结果的可靠性，随机选取典型年份影像对提取结果进行人工校核。

2）弯曲度计算

弯曲度作为量化河流平面形态特征的关键指标，其定义为弯曲河段河道中心线沿程实际长度与河段首尾端点直线距离的比值，该指标越大，表征河道的蜿蜒程度越显著，其表达式为：

$$R = \frac{m}{n'} \tag{1}$$

式中，R为弯曲度，m、n'分别为河道中心线沿程实际长度和首尾端点间直线距离。

3）河宽计算

河宽定义为各断面处沿河道中心线作垂线，该垂线与左右河岸边界线交点之间的距离。河宽测量断面的布设以保证河道平面形态完整性为原则，尽量避开支流及沟壑等非主河道要素的干扰。鉴于研究区10条弯曲河道的河宽差异较大（50～360 m），断面间距根据各河道尺度分别设定，保证不同河流河宽提取结果在空间尺度上的合理性与可比性。对于测量河段，以1990年河道中心线作为统一参照，自上游向下游沿河流方向按固定间距布设断面，形成位置固定且不重复的断面体系，并依次编号为1～n号。

4）横向迁移计算

河道横向迁移率作为量化河道位置变化快慢的指标，其定义为河道中心线随时间推移产生的横向位移距离。为量化河道横向迁移率，沿河流流向自上游向下游按固定间距布设断面，并以每年的河道中心线作为参考基准设定横向迁移断面，各断面依次编号为1～m号。

以白河1990—1991年的横向迁移测量为例：以1990年的河道中心线为基准，每隔1 km设定一个点

x_m；在测点处作切线，再沿切线作法线，与1991年河道中心线交于点y_m；点x_m与y_m之间的距离为该时段的横向迁移距离。基于此方法，可计算各断面不同年份间的河道横向迁移率M_r：

$$M_r = \frac{M_d}{\Delta T} \tag{2}$$

式中，M_d为某一时段的横向迁移距离，ΔT为时段。

由于各断面在不同年份发生不同程度的迁移，在1990—2024年间共划分出35套断面（对应35 a），每套包含n个不重复断面。

由于原始横向迁移率M_r会随河宽W_C变化产生系统性偏差（如宽河段迁移率偏高），为更准确反映河道横向摆动的动力机制，本研究引入归一化横向迁移率M_{rn}，以消除河宽对迁移率的影响，其表达式为：

$$M_{rn} = \frac{M_r}{W_C} \tag{3}$$

5）M–K趋势分析

Mann–Kendall（M–K）检验是一种用于识别时间序列单调趋势的非参数方法，因其对缺失值和非正态分布的预测具有较好的准确性，被广泛应用于水文与环境研究中[23]。其基本原理是基于时间序列观测值的秩次比较构建统计量，从而判断趋势及强度。本研究对1990—2024年黄河源区气温、降水及NDVI序列进行趋势检验，并采用Kendall's τ系数表征趋势影响程度，其中：$\tau>0$表示上升趋势，$\tau<0$表示下降趋势；$|\tau|$越大，表明趋势越显著。

1.3 不确定性分析

1）影像分辨率与边界提取误差

采用Landsat影像（分辨率30 m）。研究区最小河宽约50 m，单个像元的大小对边界识别具有显著影响。在河岸边缘，混合像元（一个像元内同时包含水体与陆地）会导致边界线提取产生±15 m的固有波动。

研究通过全色锐化（EGS）和重采样技术将分辨率统一提升至15 m，使河宽跨度内的像元数量由12个提升至34个，显著增强了形态识别的精细度。同时，采用局部自适应阈值法，以便更灵敏地捕获水陆分界线。经人工校核，单一断面的边界提取误差范围通常控制在一个像元（15 m）以内。

2）影像融合与插值算法的一致性

研究跨越1990—2024年，涉及Landsat 5和Landsat 8两种传感器，处理算法存在差异。Landsat 5使用双三次插值（Bicubic）侧重影像平滑，Landsat 8使用全色锐化（EGS）则侧重增强空间细节。这可能导致不同时段提取的岸线在细微上存在系统性差异。为降低影响，统一投影坐标系与空间分辨率，主要分析河道中心线。中心线取自左右岸边界的平均位置，算法差异导致的随机边界误差在求均值过程中得以抵消。

3）水位波动与季节性偏差

尽管统一选取7—9月汛期影像，不同年份采样当天的瞬时水位仍存在差异，流量变化可能导致水面宽度波动，从而产生“伪演变”。为降低影响，本研究采用35 a长历时序列，单一年份水位随机波动对长期趋势（M–K检验）影响较小。此外，在横向迁移率计算中引入河宽归一化处理，可进一步消除流量波动引起的河道整体变化对迁移量统计的干扰。

综上所述，虽然遥感影像处理与计算模型存在一定的技术局限，但通过分辨率提高、算法校核和归一化处理，本研究将综合误差控制在可接受的范围内，能够客观地反映黄河源区河流演变的真实规律。

1.4 数据来源

遥感影像和NDVI（在遥感领域广泛应用，能有效反映植被覆盖度及植被生长状况的参数之一）数据来自GEE平台；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/）。地形数据采用ASTER全球数字高程模型（ASTER GDEM，30 m），为河道形态分析提供基础信息。水沙数据来自黄河源唐乃亥水文站实测资料。

2 结果分析

2.1 弯曲度变化

1990—2024年，黄河源区河流弯曲度整体表现出显著的空间差异性，其河流弯曲度的分布格局呈现“支流高于干流、下游季节性冻土区高于上游多年冻土区”的特征，其弯曲度变化如图2所示。图2中：弯1～4为干流弯曲河道，其余6条为支流弯曲河道；红色表示增大，蓝色表示下降，黄色表示基本稳定。干流河段（弯1～4）弯曲度整体偏低，均值集中于1.08～1.23；相比之下，支流河道弯曲度普遍较高，其中位于中下游季节性冻土区的黑河与白河弯曲度均值分别达到1.61和1.50，为研究区内弯曲度最高的两条河道。从冻土类型角度，上游多年冻土区河段（约古宗、勒纳曲及弯1、2）的弯曲度均值整体低于下游季节性冻土区支流（贾曲、白河、黑河、泽曲及弯3、4），表明不同冻土环境下弯曲河道发育存在明显差异。

在时间尺度上，黄河源区河流弯曲度变化表现为以稳定演化为主、局部河段差异化调整并存的特征（图2）。由图2可见，约古宗、泽曲和多数干流河段（弯1、3、4）弯曲度变化幅度较小，拟合趋势接近稳定（黄色），长期维持相对平衡状态；而支流勒纳曲与白河弯

曲度呈上升趋势（红色），其中白河弯曲度由 1.51 波动增至 1.55，表明河道持续缓慢变弯。相对而言，干流弯 2 河段弯曲度出现缓慢下降（蓝色），表明局部河段存在一定程度的顺直化调整。

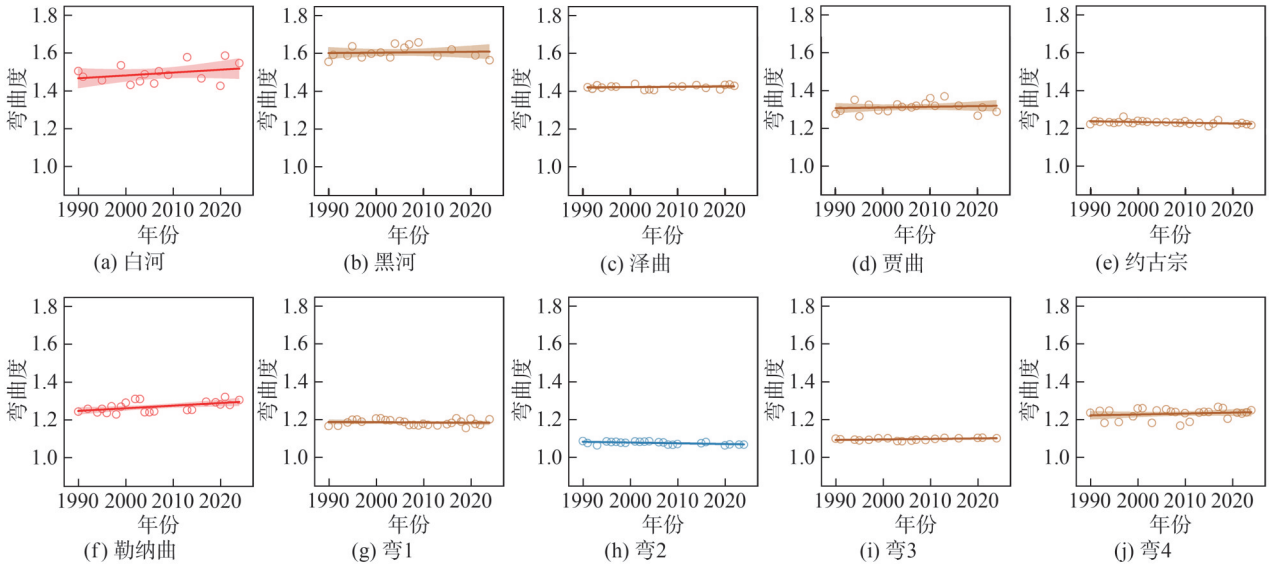


图 2　1990—2024 年黄河源区弯曲度变化

Fig. 2　Curvature changes of the Yellow River Source Region during 1990—2024

2.2　河宽变化

黄河源区河道宽度表现出显著的沿程累积展宽特征（图 3），受支流汇入与冻土岸坡边界的协同调控。本研究依据河宽数据将 6 条主要支流划分为两级：第一级支流（图 3 红色方框）白河与贾曲河宽为 90～168 m，河道尺度显著大于其他支流，是干流下游的重要径流来源；第二级支流约古宗、勒纳曲、黑河和泽曲河宽主要集中于 50～90 m，整体形态规模相对受限。干流河宽沿流程呈现阶梯式增大特征（图 3 中绿色线头），自上游弯 1（≈80 m）起随支流逐级汇入而持续展宽，并在进入季节性冻土区后出现非线性增长。受边界条件差异影响，多年冻土区河段（如弯 1、2）河宽普遍小于 125 m，河道形态相对稳定；而季节性冻土区弯 3 河段河宽跃升至 200～350 m，其最大测值达 360 m，局部尺度甚至超过下游弯 4，是全流域河床展宽最为显著的河段。

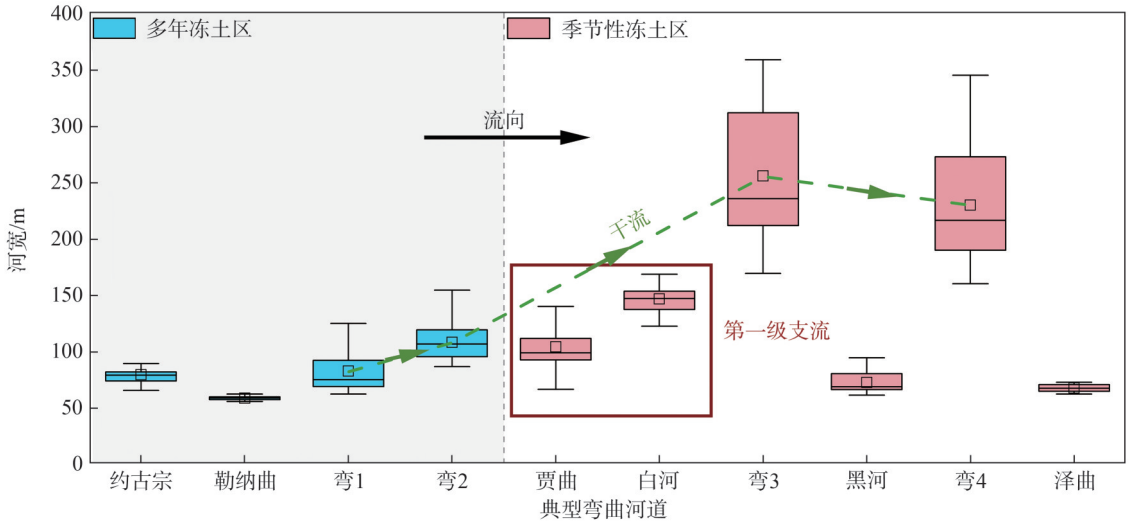


图 3　黄河源 10 条典型弯曲河道的年均河宽差异

Fig. 3　Annual channel width differences of 10 typical meandering rivers in the Yellow River Source

全流域河宽演化在时间尺度上表现出较强的同步性，但不同冻土区段的演化强度差异显著，如图 4 所示。图 4 中，纵轴红色标注河段为永久冻土区河段，黑色标注河段为季节性冻土区河段。长时序监测结果显示，干流下游河段（弯 3、4）与第一等级支流（白河、贾曲）的河宽波动高度一致，说明流域水文过程对河道形态的影响具有一致性。在演化幅度上，上游多年冻土区河段（如约古宗、勒纳曲）河宽年际波动较小，35 a

内保持相对稳定；而季节性冻土区河段河宽年际波动明显增强，尤其是弯 3 河段，其该河段河宽年际变化幅度接近 180 m。图 4 表明，1993 年、2004 年和 2010 年后的多年内，干流下游及部分支流河段普遍出现同步展宽现象，表明弯曲河道河宽对水文和气候变化响应明显。

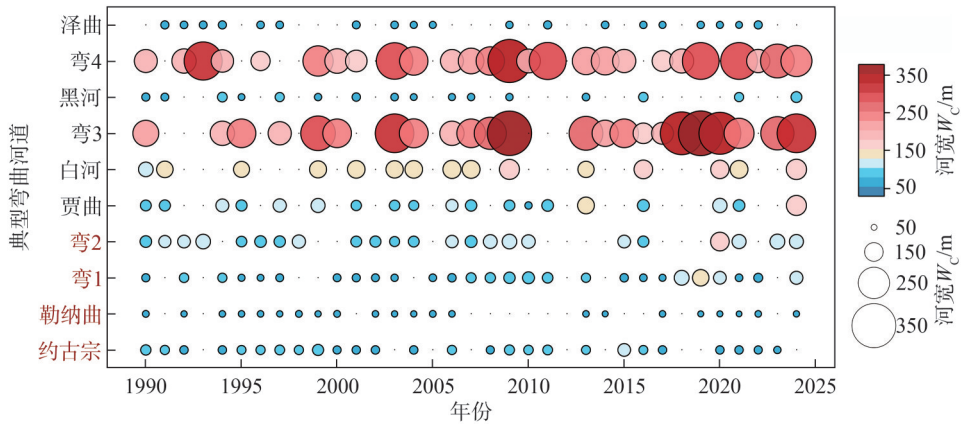


图 4　1990—2024 年黄河源弯曲河道河宽变化

Fig. 4　Channel width changes of meandering rivers in the Yellow River Source during 1990—2024

2.3　横向迁移变化

图 5 展示了 1990—2024 年黄河源区 10 条弯曲河段河宽和归一化横向迁移率的均值分布情况，图 6 展示了同期各河段归一化横向迁移率的原始数据。在数据处理方法上，图 5 采用均值统计，而图 6 基于原始数据，因此两者在数值范围上存在差异，颜色标尺也相应不同。

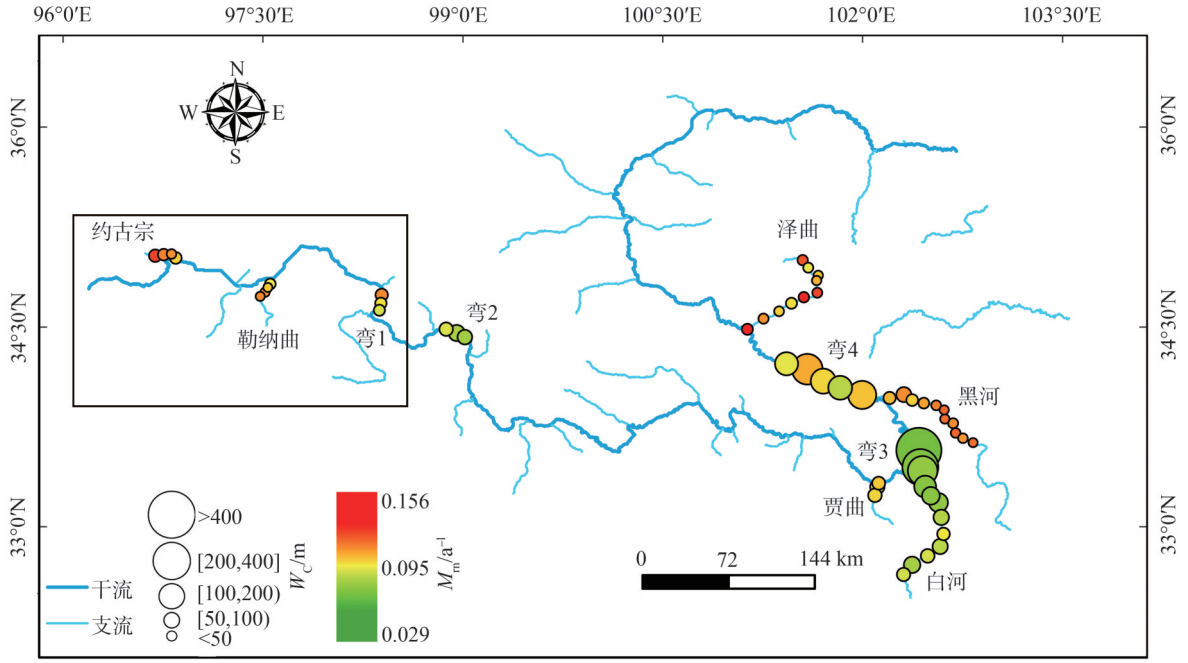


图 5　黄河流域弯曲河段河宽 W_C、归一化横向迁移率 M_{rn} 概况

Fig. 5　Overview of channel width (W_C) and normalized lateral migration rate (M_{rn}) of meandering river segments in the Yellow River Basin

黄河源区弯曲河段的横向迁移强度随着河道尺度增大而显著降低，呈现“小尺度活跃、大尺度趋稳”的空间分异格局（图 5）。总体上，河宽越小，其相对摆动强度越高，表明河道尺度是控制横向迁移强度的关键因素。空间分布结果显示，归一化横向迁移率 M_{rn} 沿河网由源头向下游总体递减。在河宽 W_C<50 m 的河段（如约古宗、勒纳曲，图 5 方框内的暖色点），横向迁移强度处于全域高值区；随着河道拓宽至 W_C>200 m（如弯 3、4），M_{rn} 呈现明显下降趋势后趋于稳定。局部支流河段（如白河）在研究期内迁移幅度较低，表现出较强稳定性（图 5）。

1990—2024 年，全流域横向迁移强度在时间尺度上表现出明显的冻土分区差异，自 2015 年后进入高频活跃的同步演化阶段（图 6）。图 6 中，纵轴红色标注河段为永久冻土区河段，黑色标注河段为季节性冻土区河段。其中，源头河段（约古宗、勒纳曲、弯 1）河宽整体

较小，且波动较为频繁，其归一化横向迁移率M_{rn}长期分布于0.08～0.20 a^{-1}之间，约古宗段在2016年达到全流域最大值(0.20 a^{-1})。需要指出的是，虽然弯2位于多年冻土区，但其所在的唐贡玛峡河谷段较为狭窄，两岸紧邻基岩或阶地，河道横向迁移受限。岸坡以碎石、卵石为主，抗冲蚀能力强。受地形和岸坡材质的共同约束，该河段M_{rn}在多数年份维持在相对较低水平。

相比之下，季节性冻土区河段整体迁移幅度较小，但在个别年份会出现显著的变化(图6)。其中：白河段在整个观测期内始终低于0.04 a^{-1}，呈现出较强的稳定性；而弯4等干流弯道的稳定性在个别年份显著增强，如弯4的横向迁移率于2021年达到0.17 a^{-1}，突破其历史均值，这与个别年份出现的极端降水与径流量有关。

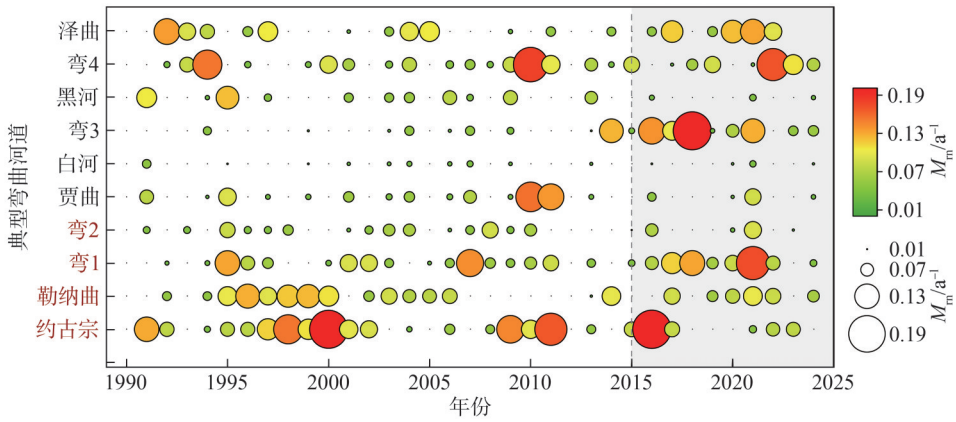


图 6　1990—2024 年黄河流域弯曲河段归一化横向迁移率(M_{rn})概况

Fig. 6　Normalized lateral migration rates (M_{rn}) of meandering river segments in the Yellow River Basin during 1990—2024

3　讨　论

3.1　气温、降水和植被对河流演变的影响

多年冻土区弯曲河道整体出现“增温、增湿”驱动下的持续活跃的横向迁移(图5)。位于黄河源头的多年冻土区河段(如约古宗、勒纳曲等)，其河道演化主要受控于气温升高引发的冻土融化与径流量增大的协同作用。M–K检验结果表明，该区域气温(τ=0.46)与降水(τ=0.26)均呈显著上升的趋势(图1中蓝色点)。持续增温导致多年冻土活动层不断加深，原本由冰结构支撑的岸滩在融化后松散，水流对河岸侵蚀显著增强[24–25]；同时，降水增加也会提升河道径流量与水流冲刷能力(图1中蓝色点)。在河流岸滩植被方面(图1中蓝色点)，尽管NDVI值显著上升(τ=0.73)，但其均值仍长期处于较低水平(<0.5)，且植被类型以高原草甸为主，根系发育浅，提升岸坡稳定的作用有限。植被较弱的固岸效应难以抵消冻土退化带来的岸滩稳定性降低，导致河道在水动力扰动下频繁发生横向迁移。

季节性冻土区河段的NDVI值较高，弯曲河道形态总体处于植被约束下的相对稳定状态，但在洪水扰动下弯曲河道形态会发生显著调整。若尔盖盆地等季节性冻土区河段NDVI值较高并呈现显著增加趋势(τ=0.70，图1中红色点)。具体来讲，近年来白河流域出现的植被灌木化趋势使根系由浅层草本结构向更深、更粗壮的灌木结构转变，显著增强了河岸抗冲刷能力[26]，这直接导致弯曲河道横向迁移速率保持在较低水平。水文条件方面，季节性冻土区降水未表现出显著长期变化趋势(τ=0.01)，但年际波动幅度较大(图1中红色点)。该区域显著增温(τ=0.45)，使岸滩土体在冻融交替作用下趋于疏松，但深根植被对边岸的加固效应有效抑制了河道持续性侧蚀[16]。通常只有在极端降水引发特大洪水时，水流侧向侵蚀短时间内突破岸坡稳定条件后，才会引起局部崩塌和河势调整，呈现出非汛期相对稳定、汛期剧烈变化的演变特征。

3.2　径流量和输沙量对河流演变的影响

1990—2024年研究区径流量Q和输沙量Q_S变化如图7所示。

1990—2024年，唐乃亥站径流量呈递增趋势(τ=0.29，图7(a)绿色点)，并在2015年后长期维持于高值区间。结合第2.2节中弯曲河道河宽W_C整体增大且向季节性冻土区河流连续展宽的结果可知，黄河源区河道正在经历一种以过水断面扩展为特征的系统性“河床扩容型”调整过程[27]。从水力几何关系分析，径流量Q的持续增加并未完全转化为流速的同步提升，而是通过边岸侵蚀、河道展宽等方式扩大过水断面[28]，以耗散增强的水动力能量，因此表现为W_C增大，这也合理解释了2015年后全流域归一化横向迁移率M_{rn}同步活跃的现象(图6)，即径流量Q增大驱动河床横向扩张与迁移，以适应更高流量条件下水力输沙造床的平衡需求。

1990—2024年，唐乃亥站年输沙量整体变化不大(τ=0.08，图7(b)橙色点)，未随径流增加而明显波动。

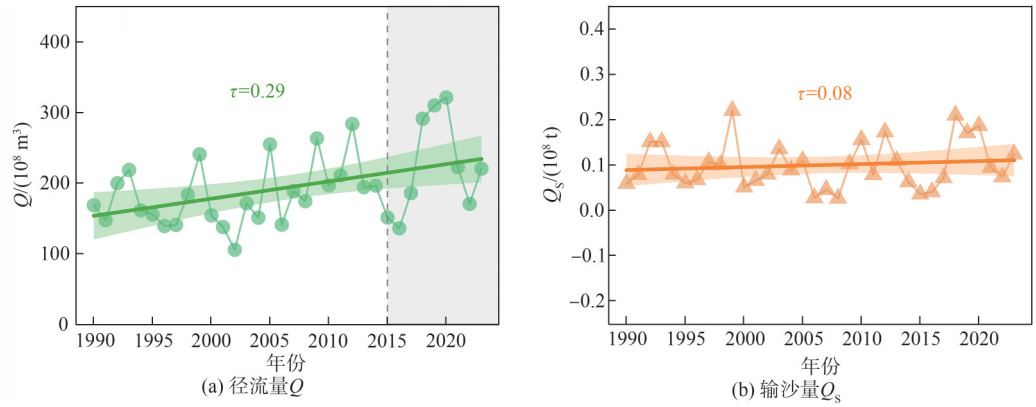


图 7　1990—2024 年研究区径流量 Q 和输沙量 Q_S 变化

Fig. 7　Changes in runoff (Q) and sediment discharge (Q_S) in the study area during 1990—2024

这一特征表明，黄河源区弯曲河流在演变过程中可能存在弯道局部冲淤相对平衡的现象：径流增加虽加强凹岸冲刷并推动河道横向迁移，但侵蚀产生的泥沙多在邻近凸岸沉积，未被大量输运至下游[29]。因此，水动力增强主要表现为河道形态的调整（如河道展宽、弯曲度增加），而非输沙量的显著增加。

综合水沙序列与河道形态演化特征可知，黄河源区径流量持续性增大为弯曲河道演变调整提供了持续动力输入，而河宽 W_C 同步增加则是河道通过形态重构耗散能量、重建水力平衡的直接体现。总体而言，“径流扩容—边岸退化”的演化模式主导了黄河源区弯曲河段的河势调整过程，使其在“变暖、变湿”的气候背景下呈现弯曲形态调整加剧的演变特征。

3.3　横向迁移与弯曲度、河宽的关系

1990—2024 年黄河源区弯曲河道归一化横向迁移率 M_{rn} 与河宽 W_C 的关系如图 8 所示，M_{rn} 与 W_C 在不同冻土区均呈显著负相关关系。两类河段拟合公式中幂指数一致（−0.45），说明河道通过变宽来增大过水断面与水力半径，从而耗散单位宽度水流能量、削弱边岸所承受的水流冲刷强度。然而，多年冻土区的拟合系数（0.54）明显高于季节性冻土区（0.11），意味着在相同河宽条件下，多年冻土区河段仍表现出相对更高的横向迁移速率。原因可能是：随着气候暖湿化，多年冻土活动层融化导致河岸抗剪强度降低，河道边岸对水动力扰动高度敏感[30]；而季节性冻土区受植被灌木化形成的深根锚固作用约束[31]，边岸抗冲阈值显著提高，有效抑制了河道横向迁移。

不同冻土区域条件的弯曲河道归一化横向迁移率 M_{rn} 与弯曲度呈现出“正反馈增大（多年冻土区）”与“负反馈减小（季节性冻土区）”的显著对立关系，揭示了河道演化逻辑的根本差异（图 9）。在多年冻土区，M_{rn} 随着弯曲度呈指数级增长（$M_{rn}=0.04R^{3.28}$），说明弯道离心力

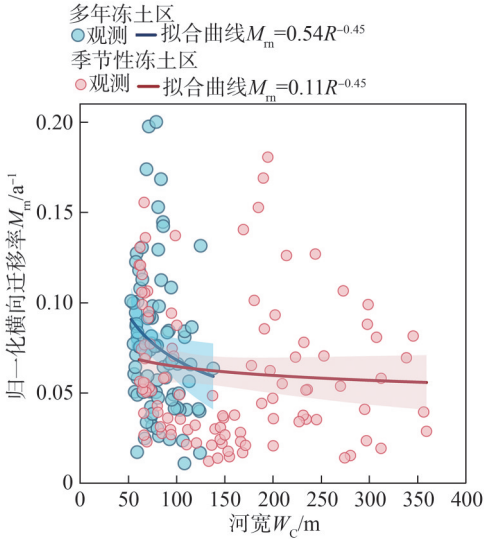


图 8　1990—2024 年黄河源区弯曲河道归一化横向迁移率 M_{rn} 与河宽 W_C 的关系

Fig. 8　Relationship between normalized lateral migration rates (M_{rn}) and channel width (W_C) of meandering rivers in the Yellow River Source during 1990—2024

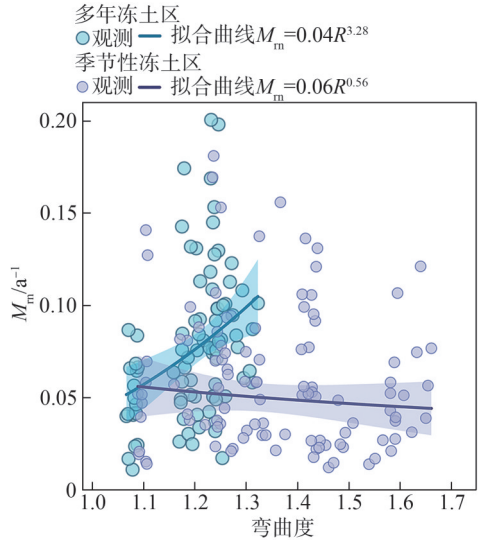


图 9　1990—2024 年研究区弯曲河段归一化横向迁移率 M_{rn} 与弯曲度关系

Fig. 9　Relationship between normalized lateral migration rates (M_{rn}) and curvature of meandering river segments in the study area during 1990—2024

加强水流侵蚀河岸能力、降低边岸稳定性，弯道演变呈现“越弯越快”的正反馈加速特征。相比之下，季节性冻土区则表现为随河道弯曲度增加而趋稳的负反馈特征，高弯曲度河段（如白河）在长期灌木根系约束下形成相对稳定的弯曲河道[3]，植被增强河道边岸的抗冲能力，河道保持“高弯度、低摆动”的相对稳态。

4　结　论

本文基于遥感与水文数据，研究了1990—2024年黄河源区10条典型弯曲河道形貌演变规律，揭示了不同冻土区河道弯曲度、河宽 W_C 和归一化横向迁移率 M_m 的演变规律及其响应机制。结论如下：

1）1990—2024年，黄河源区弯曲河道在多年冻土与季节性冻土区表现出明显的形貌差异。支流弯曲度（1.35～1.62）整体高于干流（1.08～1.25），河宽 W_C 沿程分级展宽，干流下游稳定在200～350 m；2015年后，全流域河道形态进入同步活跃期，河道横向迁移显著增强。

2）在黄河源的多年冻土区，弯曲河道因冻土消融导致岸滩抗冲刷能力下降，表现出频繁且剧烈的横向迁移。气候暖湿化使该区域弯道呈现“河型越弯曲摆动越快”的突出特征，年均迁移距离达河宽的8%～20%，归一化横向迁移率 M_m 随河道弯曲度增加呈指数型上升。

3）在黄河源的季节性冻土区，弯曲河道受河宽增加与灌木化深根锚固的共同约束，呈现“高弯曲、低摆动”的特征，M_m 大多处于0.02～0.09 a^{-1}，仅在极端洪水条件下出现较大波动。

参考文献：

[1] Sha Anmeng,Li Dongfeng,Walling D,et al.Accelerated river meander migration on the Tibetan Plateau caused by permafrost thaw[J].Geophysical Research Letters,2025,52(1):e2024GL111536.

[2] Wu C,Wonsuck K,Ryan H,et al.The sinuosity patterns of lowland meandering rivers on Earth and Mars[J]. Nature Geoscience,2023,16(8):667–668.

[3] 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.

[4] Yang Zhaoping,Gao Jixi,Zhou Caiping,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.

[5] Li Dongfeng,Zhang Ting,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.

[6] Yang Meixue,Wang Xuejia,Pang Guojin,et al.The Tibetan Plateau cryosphere: Observations and model simulations for current status and recent changes[J].Earth–Science Reviews,2019,190:353–369.

[7] Chen Huai,Ju Peijun,Zhu Qiuan,et al.Carbon and nitrogen cycling on the Qinghai–Tibetan Plateau[J].Nature Reviews Earth & Environment,2022,3(10):701–716.

[8] Lin Zhipeng,Han Zhongpeng,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.

[9] Feng Dongmei,Gleason C J,Yang Xiao,et al.How have global river widths changed over time?[J].Water Resources Research,2022,58(8):e2021WR031712.

[10] Bosmans J,Wanders N,Bierkens M F P,et al.Future Streams,a global dataset of future streamflow and water temperature[J].Scientific Data,2022,9:307.

[11] Li Dongfeng,Li Zhiwei,Zhou Yinjun,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:e2020GL087745.

[12] Dethier E N,Renshaw C E,Magilligan F J.Rapid changes to global river suspended sediment flux by humans[J].Science,2022,376(6600):1447–1452.

[13] Finotello A,Ielpi A,Lapôtre M G A,et al.Vegetation enhances curvature-driven dynamics in meandering rivers[J].Nature Communications,2024,15:1968.

[14] Wang Xuejia,Ran Youhua,Pang Guojin,et al.Contrasting characteristics,changes,and linkages of permafrost between the Arctic and the Third Pole[J].Earth–Science Reviews,2022,230:104042.

[15] 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.

[16] 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.

[17] Levy J S,Cvijanovich B.Meandering river evolution in an unvegetated permafrost environment[J]. Geomorphology,2023,432:108705.

[18] Li Jinlong,Wang Genxu,Li Kai,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.

[19] Liu Xiaoyan,Wang Peng,Dang Suzhen.Variations in water and sediment of the Yellow River:Historical perspectives,current status,and future outlook[J].Journal of Hydraulic Engineering,2024,55(10):1135–1145.[刘晓燕,王鹏,党素

珍.黄河水沙变化:历史、现状与未来[J].水利学报,2024,55(10):1135–1145.]

[20] Chen Bang,Li Zhiwei,Hu Xuyue,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.[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.]

[21] Hu Xuyue, Guo Nan, Li Zhiwei, et al. Study on bank collapse mechanism of Zoige peat-type curved river[J]. Advanced Engineering Sciences,2017,49(S1):1–7.[胡旭跃,郭楠,李志威,等.若尔盖泥炭型弯曲河流的崩岸机理研究[J].工程科学与技术,2017,49(S1):1–7.]

[22] Sun Y Q,Di B G,Xing Y,et al.Comparative study of image fusion methods for WorldView-3 data[C]//Proceedings of the International Conference on Remote Sensing, Surveying, and Mapping(RSSM 2024). Bellingham: SPIE, 2024: 131701Q.

[23] Bari S H, Rahman M T U, Hoque M A, et al. Analysis of seasonal and annual rainfall trends in the northern region of Bangladesh[J].Atmospheric Research,2016,176:148–158.

[24] Douglas M M, Miller K L, Schmeer M N, et al. Ablation-limited erosion rates of permafrost riverbanks[J]. Journal of Geophysical Research:Earth Surface,2023,128(8): e2023JF007098.

[25] Tananaev N,Lotsari E.Defrosting northern catchments:Fluvial effects of permafrost degradation[J].Earth–Science Reviews,2022,228:103996.

[26] Yu Shuhan, Liu Xiaolong, Chen Xueling, et al. Effects of shrub encroachment on grassland community and soil nutrients among three typical shrubby grasslands in the Alpine subhumid region of the Qinghai–Tibet Plateau, China [J].Frontiers in Ecology and Evolution,2022,10:1068200.

[27] Zhao Qiudong, Ding Yongjian, Wang Jian, 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] Guo Qianyue,Jiang Tingting,Li Jinpo,et al.A warming and wetting climate increases the width and intensity of braided channels in the Yangtze River source region: A case study of the Beilu River[J].Environmental Fluid Mechanics,2025,26(1):1.

[29] Qiu Zhiqiang, Liu Dong, Duan Mengwei, et al. Four-decades of sediment transport variations in the Yellow River on the Loess Plateau using Landsat imagery[J]. Remote Sensing of Environment,2024,306:114147.

[30] Perucca E,Camporeale C,Ridolfi L.Significance of the riparian vegetation dynamics on meandering river morphodynamics[J].Water Resources Research,2007,43(3):2006WR005234.

[31] Zhu Lekui,Chen Dong,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.

Climate Change Enhances the Evolution of Meandering Rivers in the Yellow River Source Region

ZHENG Xinmeng[1], *FU Hongsheng*[1], *LI Jinpo*[1], *SHAN Yuqi*[2], *LIN Zhipeng*[1], *LIU Chao*[1*]

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

Abstract:

Objective The spatiotemporal evolution of meandering rivers in high-altitude regions remains insufficiently quantified under the combined influences of climate change, permafrost degradation, and hydrological variability. Existing studies have primarily relied on individual morphological indicators or single-river cases, limiting the understanding of channel adjustment processes and their driving mechanisms. In this study, the Dangqu River and ten representative meandering rivers in the Yellow River Source Region (YRSR) were investigated to quantify channel evolution using integrated morphological indicators and identify the dominant controls under multiple interacting factors. Particular emphasis was placed on the combined analysis of channel sinuosity, channel width, and normalized lateral migration rate (M_{rn}), defined as the ratio of lateral migration distance to channel width, to improve the comparability of channel dynamics across different spatial scales.

Methods Multi-temporal Landsat imagery acquired between 1990 and 2024 was analyzed to characterize long-term channel planform evolution. To ensure interannual comparability, only images acquired during the flood season (July—September) were selected, when water levels were relatively high and channel boundaries were clearly defined. Water bodies were extracted using the modified normalized difference water index, combined with local adaptive threshold segmentation to improve classification accuracy under heterogeneous surface conditions. To ensure reliable parameter extraction, only images with a pixel size not exceeding 30% of the mean channel width were used. Landsat 5 images were resampled using bicubic interpolation, and Landsat 8 images were processed using enhanced Gram–Schmidt pan-sharpening, resulting in a unified spatial resolution of 15 m. Water masks were generated using a Python-based automated workflow and converted into vector polygons in ArcGIS, in which non-channel water bodies were removed and channel centerlines were extracted. Channel sinuosity was calculated as the ratio of centerline

length to the straight-line distance between the endpoints. Channel width was measured along cross-sections perpendicular to the centerline, established at fixed intervals and referenced to the 1990 channel centerline to ensure spatial consistency across years. Lateral migration distance was calculated from the displacement of channel centerlines between consecutive years along fixed cross-sections, and the lateral migration rate (M_r) was derived accordingly. To eliminate scale dependence, the normalized lateral migration rate (M_{rn}) was calculated by dividing M_r by the corresponding channel width. Temporal trends in channel width and migration were evaluated using the Mann–Kendall (M–K) trend test, and Kendall's tau coefficient was used to quantify trend direction and significance. Multi-source datasets, including air temperature, precipitation, runoff, and vegetation coverage, were incorporated to assess the coupled effects of climatic, hydrological, and surface conditions on channel evolution.

Results and Discussions Meandering rivers in the YRSR exhibited a clear transition from a relatively stable state to an increasingly active evolutionary stage during 1990—2024. Channel dynamics showed strong spatial heterogeneity associated with river hierarchy and permafrost conditions. Tributary channels displayed higher sinuosity values (1.35–1.62) than main channels (1.08–1.25), indicating more pronounced planform development. Main channels, characterized by higher discharge and wider valleys, maintained relatively straight or weakly sinuous patterns, whereas tributaries developed dense and continuous meanders. Channel width increased downstream, from approximately 80 m in upstream reaches to 200–350 m in downstream sections. This increase was not linear but exhibited stepwise expansion across permafrost transition zones, reflecting the combined influence of tributary inflow and bank boundary constraints. Narrower channels showed greater variability in width and migration, indicating greater sensitivity to external forcing. Lateral migration rates were strongly associated with permafrost conditions. In continuous permafrost regions, normalized migration rates ranged from 0.08 to 0.20 a^{-1}, whereas in seasonal permafrost regions, values were significantly lower (0.02–0.09 a^{-1}). These differences suggest that permafrost degradation may reduce bank stability and enhance lateral erosion. Temporal analysis showed a marked increase in channel activity after 2015, coinciding with increased runoff. During this period, channel widening reached up to 180 m in some reaches, indicating intensified geomorphic adjustment. A clear quantitative relationship was identified between channel sinuosity and migration intensity. In permafrost regions, M_{rn} increased exponentially with increasing sinuosity, suggesting that highly sinuous channels experienced disproportionately greater lateral migration. In contrast, channels in seasonal permafrost regions exhibited high sinuosity but relatively low migration rates, potentially reflecting the stabilizing effects of greater channel width and vegetation anchoring. Migration in these regions was generally limited to episodic responses under extreme flood conditions. The combined effects of hydrological variability, permafrost degradation, and vegetation coverage were associated with distinct channel evolution patterns. Increased runoff enhanced channel expansion, whereas permafrost thaw may have weakened bank resistance. Vegetation played a stabilizing role by increasing bank cohesion, particularly in seasonal permafrost regions. These interacting factors produced distinct spatial patterns of channel adjustment across the study area.

Conclusions Meandering rivers in the YRSR have undergone a significant shift toward increased geomorphic activity over the past three decades. Channel evolution was jointly influenced by hydrological changes, permafrost conditions, and channel morphology, with continuous permafrost regions exhibiting higher mobility than seasonal permafrost regions. The introduction of the normalized lateral migration rate (M_{rn}) enabled consistent comparison of migration intensity across channels of different scales and revealed a strong exponential relationship between sinuosity and migration in permafrost regions. Increased runoff after 2015 was associated with accelerated channel adjustment, leading to pronounced lateral expansion in multiple reaches. These findings provide quantitative evidence of river morphodynamic responses to climate-related changes in high-altitude environments and improve the understanding of the multiple interacting controls on channel evolution. The results provide a basis for assessing future channel dynamics and support river management, ecological restoration, and infrastructure planning in alpine regions.

Key words: meandering rivers; the Yellow River Basin; lateral migration; spatiotemporal evolution

（编辑　周　璇）

引用格式: Zheng Xinmeng,Fu Hongsheng,Li Jinpo,et al.Climate change enhances the evolution of meandering rivers in the Yellow River source region[J].Advanced Engineering Sciences,2026,58(6):295–305.[郑鑫梦,付鸿声,李金钋,等.暖湿气候加剧黄河源区弯曲河道演变[J].工程科学与技术,2026,58(6):295–305.]