

DOI: 10.14042/j.cnki.32.1309.2023.02.010

1986—2021年雅江-尼洋河交汇段 辫状河道演变过程

游宇驰¹, 李志威², 余国安³, 胡旭跃¹

(1. 长沙理工大学水利与环境工程学院, 湖南 长沙 410114; 2. 武汉大学水资源工程与调度全国重点实验室, 湖北 武汉 430072; 3. 中国科学院地理科学与资源研究所中国科学院陆地水循环与地表过程重点实验室, 北京 100101)

摘要: 雅鲁藏布江与尼洋河交汇段的辫状河道形态及变化主要受尼洋河入汇、河谷边界条件及滨河植被的影响, 时空变化的差异性和复杂性值得研究。利用1986—2021年遥感数据提取河道-沙洲-植被主要形态参数(主河道迁移率、弯曲率、面积等)分析辫状河道形态的复杂特征与演变过程。结果表明: 主河道迁移率最大为483 m/a, 曲率减小3.43%, 植被面积逐年增加到8.05 km²。米林—派镇段辫状河道受边界条件和水文条件的差异影响, 主河道在尼洋河入汇前呈横向单侧摆动, 入汇后雅鲁藏布江主河道同时发生横向与纵向摆动; 2013年以来该河段的植被仅有11.8%的覆盖区域对河床产生抑冲促淤的正向反馈并促进沙洲的稳定。

关键词: 辫状河道; 河道交汇; 水沙条件; 边界条件; 植被作用

中图分类号: TV147 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-6791(2023)02-0265-12

辫状河道的辫状结构变化通过河道内沙洲的形成、局部冲刷、沉积和分割过程表现出来, 河道和沙洲地形几乎不断被塑造和调整, 尤其是在输沙强度较大或洪水流量较大的水文过程中^[1]。在全球气候变化和干支流的梯级水库运行、河道内人工植树造林等人类活动的多重影响下, 雅鲁藏布江(简称雅江)流域1980年以来水沙情势已发生不同程度的变化^[2-6], 并促进了雅江流域辫状河流演变过程的复杂性。目前, 雅江流域中下游因宽窄相间的河谷约束, 辫状河流的地貌形态演变已引起重大关注与研究^[7-8]。

米林—派镇河段是雅江中游最后一段典型辫状河道, 受两侧峡谷限制, 约束河道横向展宽, 洲滩形态各异。同时, 由于支流尼洋河从左岸汇入, 支流不仅在汇入口挤压主河道, 而且补充较多泥沙, 使得下游辫状河道演变的影响因素更为复杂。与一般河流汇合处相比, 在来沙量较大的汇合处更易发生显著的泥沙淤积, 从而影响下游河道形态演变^[9]。近期针对雅江辫状河道的不稳定状态^[5], 采用野外一手观测资料以及遥感卫星数据开展了河道-沙洲特征及结构变化、局部水动力观测及生态河流动力学应用等方面^[7,10-12]的研究。由于雅江地处青藏高原南部高海拔区域, 野外测量数据获取较困难, 水文数据稀缺, 涉及雅江中游辫状河道形态演变的研究较难开展, 研究成果较少, 尤其对雅江-尼洋河交汇段辫状河道的时空差异以及变化过程中影响因素的作用模式缺少清晰认识。

基于前人对青藏高原辫状河流形成与演变的总结与归纳^[13], 本研究结合野外观测与水沙数据, 筛选多年遥感数据, 通过遥感水体指数提取辫状河流参数, 系统地研究1986—2021年雅江中游米林—派镇段及与尼洋河交汇段的复杂辫状河道形态特征, 以及不同空间的河道-沙洲-植被的协同演变过程, 探讨尼洋河入汇前后的雅江干流河道结构差异性及其主要控制因素, 以期深入认识雅鲁藏布大峡谷上游河段的辫状河道现状及未来演变趋势。

收稿日期: 2022-10-19; 网络出版日期: 2023-03-08

网络出版地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1309.P.20230308.1018.002.html>

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41971010; 51979012)

作者简介: 游宇驰(1993—), 女, 江西南昌人, 博士研究生, 主要从事河流演变方面研究。E-mail: youmandy@163.com

通信作者: 李志威, E-mail: lizw2003@whu.edu.cn

1 研究区域与研究方法

1.1 研究区域

雅江中游的米林—派镇段为辫状冲积河道，河道摆动幅度最宽达 3.57 km，最窄仅为 194 m。如图 1(a)，根据主支流汇流区位置将研究区分为 4 个河段，即雅江汇流段上游(R1)、尼洋河汇流段上游(R2)、主支流交汇段(R3)及雅江汇流段下游(R4)，见图 1(b)—图 1(e)(2022 年 5 月拍摄)。雅江干流由河段 R1、R3 和 R4 组成，其中，R1 河谷长约 29.46 km，宽为 1.42 ~ 3.16 km，面积约 69.32 km²，坡降为 0.19‰；R3 的面积约 11.79 km²，由尼洋河多条汉道形成的尼洋河三角洲和雅江干流组成；R4 河谷长约 37.32 km，面积约 87.58 km²，坡降为 0.15‰，相比于雅江汇流段上游的东北流向，该段河道方向由于地貌条件的限制从东北流向发生 4 次改向，并且有 3 处受峡谷或冲积扇的双重边界限制而形成狭窄的单河道。R2 长 10 km，河谷面积约 32.39 km²，谷宽可达 3 km，落差相对较大，坡降为 1.79‰。

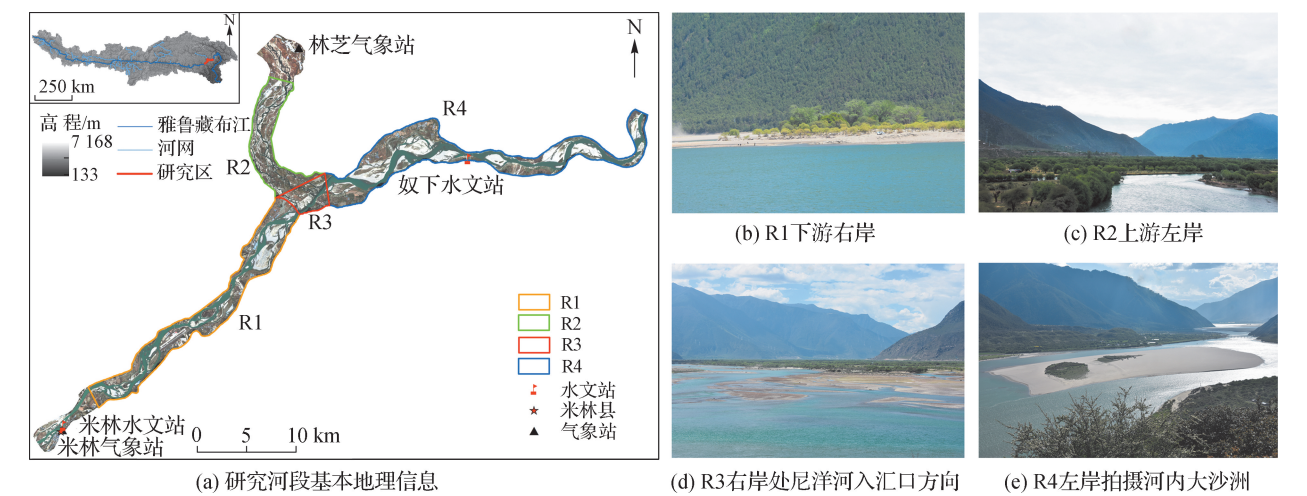


图 1 雅江中游与尼洋河交汇的上下游辫状河道分段概况及野外考察照片

Fig. 1 Study reaches of braided channel of the confluence at the Middle Yarlung Tsangpo River and Nyang River and four photos in different sites by field survey in May 2022

1.2 研究方法

遥感影像数据采用地理空间数据云平台提供的 Landsat 系列数据(<http://www.gscloud.cn>)。考虑到洪峰过程后，辫状河流形态经过高流量冲刷作用可以代表所在年份的河流地貌特征，且枯水期研究河段的河流流量相对较低，这一时期的卫星图像保证了辫状河道和洲滩的大部分出露，便于提取，并尽量减少因水位不同造成的误差。因此，经过筛选遥感影像，本研究根据使用的数据及相应的目的可分为 5 组：

- (1) 筛选 1986—2021 年枯水期(11 月的 15 期影像)遥感影像，用于提取河段有水河道特征数据；
- (2) 筛选 1995-11-07 和 1995-11-23 的遥感影像，对比小差别流量时河道和沙洲形态的差别，2 个日期的河道面积和沙洲面积分别相差 1.57% 和 8.18%；
- (3) 筛选 1995-11-07 和 1996-11-09，以及 2001-05-15 和 2001-11-15 的遥感影像，对比汛期前后及不同汛期流量下的沙洲差异；
- (4) 筛选 1998-09-12、2002-08-06 和 2013-08-04 的遥感影像，用于探讨河道-沙洲-植被结构中植被的作用方式；
- (5) 使用 12.5 m 空间分辨率的 DEM 数据(<https://search.asf.alaska.edu>)提取沙洲及植被分布范围的

高程。

归一化植被指数(I_{NDV})可以反映植被覆盖情况和植物冠层的背景影响,可提取河道、洲滩及植被覆盖情况^[14],计算方法见式(1)。后文中沙洲(或植被)稳定区是将1986—2021年的沙洲(或植被)图层进行叠置得到多年重合范围,即沙洲(或植被)多年一直出露的区域。而其他受影响而变化的沙洲区域为活动区,处理过程为1986—2021年的沙洲数据做合并操作,然后基于该图层选取沙洲稳定区之外的范围,即可得到多年易受冲刷或沉积的活动区。

$$I_{NDV} = \frac{I_{NIR} - I_{RED}}{I_{NIR} + I_{RED}} \quad (1)$$

式中: $I_{NDV} \geq 0$ 为不同植被覆盖程度的非水体, $I_{NDV} < 0$ 为水体; I_{NIR} 为遥感数据中的近红外波段, I_{RED} 为红外波段,在Landsat 5和Landsat 7中分别对应band 4和band 3,在Landsat 8中分别对应band 5和band 4。

野外考察发现,辫状河道即使在高辫状强度的河段,也有一条较明显的主河道,次级河道从中分支。因此,本研究通过遥感数据提取主河道中心线,并将其相邻遥感年份的变化通过迁移率进行量化(图2),即定义河道中心线迁移率的计算公式,如下:

$$M_{ij} = \frac{A_{jn}/L_{ij}}{j-i} \quad (i < j) \quad (2)$$

式中: M_{ij} 为*i*和*j*年主河道变化形成的第*n*个多边形的迁移率; A_{jn} 为*i*和*j*年主河道线相交形成的第*n*个相交多边形面积; L_{ij} 为*i*年主河道中心线形成多边形的长度。

计算各年主河道的平均弯曲率,来对河道形态定量化描述,公式如下:

$$S = l/L \quad (3)$$

式中: S 为平均弯曲率; l 为主河道中心线弯曲长度; L 为河谷弯曲长度。

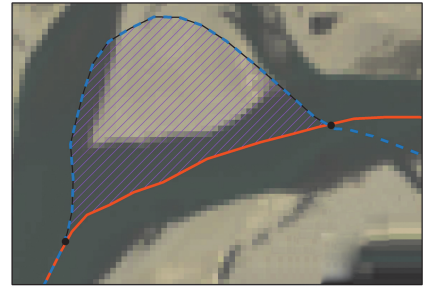


图2 河道中心线迁移率计算示意

Fig.2 Diagram of river centerline migration

2 研究结果

2.1 干流段主河道迁移过程

雅江主河道的河道中心线在1986—2021年摆动变化如图3(a),发生明显摆动变化区域标为S1—S8河段(图3(b)—图3(i))。其中,S1主河道线(图3(b))摆动主要发生在左侧且摆动范围宽约524 m,2013年从河谷左侧摆动到右侧。S2主河道线(图3(c))在1986—1999年靠河谷左侧摆动,摆动范围最宽约354 m;在2000—2001年河道改向为靠右侧摆动,主河道迁移约462 m;而2002—2021年河道又回到左侧摆动,主河道多年最大摆动宽度占谷宽的31.33%。S3主河道线(图3(d))变化形态类似S1,主要在左岸以小于40 m的幅度摆动,仅在2021年向右岸偏移188 m,主河道多年最大摆动宽度占河谷的11.64%。S4(图3(g))为顺直河段,主河道线在3个局部发生小摆动,最大摆动范围约839 m(占谷宽22.68%)。因此,S1—S4的主河道中心线主要是横向摆动,多年摆动范围占谷宽的11.64%~31.33%。

如图3(h),雅江与尼洋河交汇段下游的S5主河道由右岸逐渐往左岸单向迁移,3次迁移距离为65~338 m,2021年迁移到离右岸1/7河谷宽的位置。S6河道中心线(图3(e))迁移过程相对复杂多变,不仅发生左右摆动,并且河道曲线向下游迁移;变化过程中最大横向迁移达3 084 m,最大纵向迁移1 945 m,最终主河道呈现2个凸向左岸的连续弯曲形态。S7主河道(图3(f))迁移方式及过程和S5相似,均是由河谷右侧逐渐迁移到左侧,主河道多年摆动范围约443 m,占河谷宽度的28.61%。S8主河道(图3(i))发生多年左右

震荡摆动, 1986—2002 年基本靠河谷左侧流动, 主河道弯曲形态沿着河谷边界形状分布; 2008—2021 年河道则改道流向河谷右侧, 被右岸山体限制后再流回左侧, 并在下游仍靠左侧摆动。

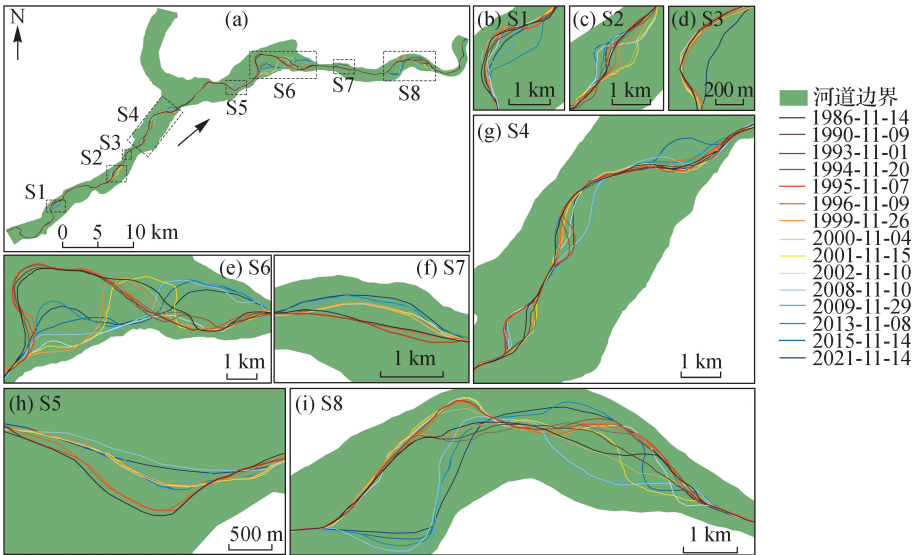


图 3 1986—2021 年干流主河道 8 个局部河段迁移过程

Fig. 3 Migration processes of eight local reaches of the main channel from 1986 to 2021

图 4(a) 是相邻年份河道中心线迁移率 (M) 变化过程, 横轴时段 1—14 是根据已获取的 15 期遥感数据设定的年限代号, 即时段 1 为 1986—1990 年, 时段 2 为 1990—1993 年, 以此类推。1986—1993 年(时段 1 和时段 2)主河道迁移率较小, $M = 21.0 \text{ m/a}$ 。1993—2002 年主河道平均迁移率达 82.2 m/a , 其中 2001—2002 年时段河道整体摆动速率达 148.1 m/a , S6 以 $M = 483.0 \text{ m/a}$ 发生最强烈的主河道迁移过程。2002—2021 年河道迁移速率为中等程度 ($M = 42.7 \text{ m/a}$), 该阶段最大迁移率仍然发生在 2008—2009 年的 S6。图 4(b) 表明主河道曲率 (S) 随时间呈 2 段阶梯式减小趋势。阶段一为 1986—2001 年, 曲率先增后减, 平均曲率为 1.15; 其中 1994—1995 年达到峰值 ($S = 1.17$), 2000 年河道因高流量被淹没而扩宽或合并, 从而弯曲程度减小到 1.13。阶段二 2002—2021 年的曲率变化趋势类似, 平均曲率为 1.13, 低于阶段一的曲率, 并在 2013 年达到最大曲率 ($S = 1.14$), 2021 年主河道曲率减小至 1.11, 达到近 40 a 最低。因此, 主河道的曲率呈阶梯式减小趋势, 曲率减小 3.48%, 主河道形态逐渐扁平化, 河道结构呈现由复杂到简单的变化趋势。

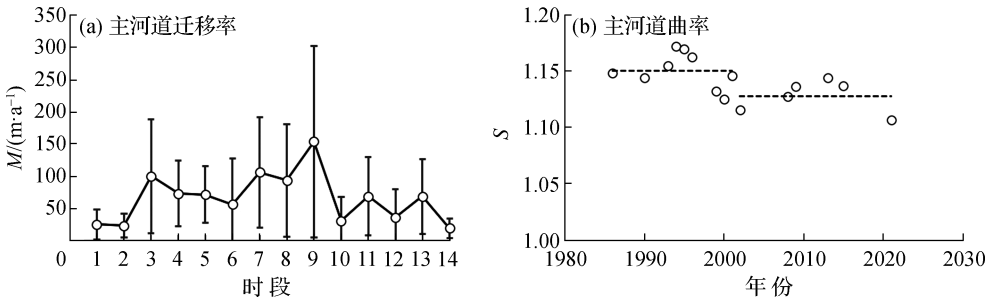


图 4 干流主河道迁移率及曲率变化

Fig. 4 Migration rate and sinuosity change of the mainstream over year

河段 S1—S8 中, 每个河段的上下端点均是河谷收窄的地形节点。为综合对比局部河段, 将各段的特征及参数进行汇总, 见表 1。边界面积相对较小的是 S1—S3 和 S7, 这 4 个局部河谷均较顺直, 沙洲较小, 中心线仅沿着左右岸横向摆动; 边界面积较大的 S4—S6 和 S8 河段内的沙洲形态均较大, 其中 S4 河谷顺直,

S5、S6 和 S8 河谷呈弯曲形态。对比主河道平均曲率(表 1), S1 河段内的主河道平均曲率最大(1.33), 但其曲率多年标准差和其他低弯曲程度的河段均低于 0.1。而 S6 河段主河道平均曲率不仅大(1.3), 且多年平均曲率标准差达 0.14。各河段内的沙洲形态参数长宽比(R)均在 2.5 以上, 因此沙洲整体为长条形, 其中 S3 河段中沙洲较大, 即该段沙洲更为细长。对 1986—2021 年提取的沙洲空间分布数据进行矢量图层运算, 得到沙洲稳定区和活动区。S1、S2、S4、S5 的沙洲稳定面积占河道面积均大于 10%, S3、S6—S8 则低于 10%, 尤其是 S6 的多年稳定沙洲面积(0.53 km^2)仅占河段面积的 2.03%。相反地, S1—S5 沙洲活动面积低于 40%, 其中 S3 的比例最小, 仅有 10% 的沙洲活动区; S6—S8 的沙洲活动面积均大于 50%, S6 的沙洲活动面积最大, 达到 63.55%。因此, 雅江汇流区下游整体河段变化幅度大于上游, 且河道及沙洲相比上游更不稳定。

表 1 交汇段的上下游 S1—S8 局部河段的基本特征

Table 1 Basic characteristics of S1—S8 local reach in the confluence channel

河段	特点	边界面积/ km^2	主河道多年曲率		长宽比	沙洲稳定区		沙洲活动区	
			平均曲率	标准差		面积/ km^2	占比/%	面积/ km^2	占比/%
S1	宽谷自由沙洲	6.25	1.33	0.04	2.84	1.01	16.16	2.15	34.35
S2	顺直散乱洲滩	11.70	1.13	0.03	2.90	1.41	12.37	3.55	30.31
S3	峡谷江心洲	2.49	1.16	0.03	3.70	0.18	7.23	0.25	10.09
S4	顺直散乱洲滩	24.21	1.12	0.01	2.66	3.33	13.75	8.85	36.54
S5	伪弯道	24.75	1.13	0.07	2.67	4.74	19.15	7.75	31.30
S6	弯道散乱洲滩	26.15	1.30	0.14	2.26	0.53	2.03	16.62	63.55
S7	峡谷江心洲	4.79	1.07	0.03	2.78	0.26	5.43	2.53	52.93
S8	伪弯道	14.98	1.17	0.07	2.55	0.91	6.07	9.19	61.33

注: 边界面积指 S1—S8 各区域上下端范围的河谷边界面积。

2.2 汇流区上下游形态对比

选取研究时段的代表年份(1986 年、2000 年、2021 年)对比雅江汇流段上游和雅江汇流段下游的河道形态, 如图 5 所示。整体上, 河道面积变化趋势不明显, 多年平均河道面积为 45.34 km^2 ; 多年平均沙洲面积为 42.44 km^2 , 且局部结构变化较大; 洲内的植被面积由 1986 年的 4.47 km^2 增加到 2021 年的 8.05 km^2 。R1

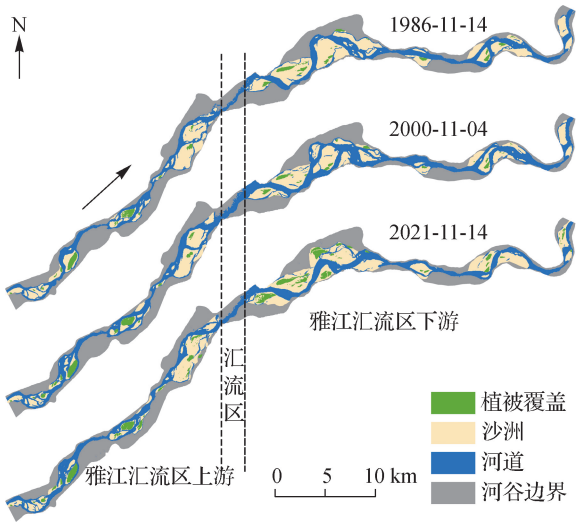


图 5 1986 年、2000 年和 2021 年雅江干流河道结构对比

Fig. 5 Comparison of channel morphology in the mainstream Yarlung Tsangpo River in 1986, 2000 and 2021

河谷较为顺直且走向稳定，植被覆盖程度基本不变，河道形态在 1986—2021 年变化不大，摆动幅度较小，沙洲以小面积的心滩为主，形态变化较小。R4 河谷宽窄相间，走向发生 4 次改变，河道的局部迁移和沙洲形态也随之显著变化，且该河段内植被面积逐渐增加，尤其在 R4 河段的 S5—S6，主河道弯曲程度由高弯曲 ($S=1.52$) 逐渐变的平坦 ($S=1.17$)，曲率减小了 23%。且 R4 段内沙洲型体较大，S5 右岸沙洲面积自 1986 年逐渐扩大，S6 左岸沙洲在 2021 年因河道退化而与 S5 左岸沙洲合并形成更大型的沙洲，1986 年 S6 右岸沙洲体型较大，在 2000 年受洪水斜槽切割破碎成 4 个沙洲，到 2021 年该部分沙洲的形态和分布完全改变。因此，R4 段河道形态变化及差异性大于 R1 河段。

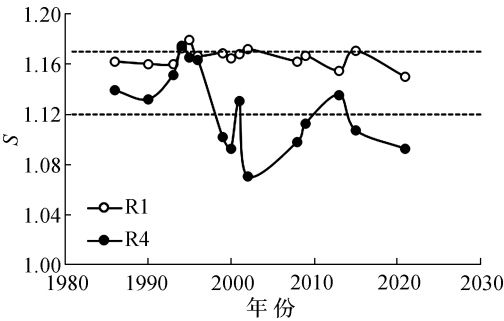


图 6 汇流段上下游河道主河道中心线曲率变化
Fig. 6 Sinuosity change of main channel centerline
in reach R1 and R4

R1 和 R4 分别代表雅江未受尼洋河汇流影响和受影响河段，R1 和 R4 段的主河道弯曲度及变化过程差异较大。如图 6(虚线为多年平均值线)，R1 段曲率多年平均值为 1.17 ± 0.007 ，在 1995 年曲率达到相对较大的峰值， $S=1.18$ ，因此 R1 曲率变化较平稳。R4 段主河道的曲率变化起伏较显著，曲率多年平均值为 1.12 ± 0.03 ，其标准差是 R1 段的 4 倍。1994 年 R4 的曲率为多年最大值， $S=1.17$ ，随后曲率变化幅度较大并逐渐减小；在 2000 年减小到第 1 个低值， $S=1.09$ ；2001 年 S 增加到 1.13；2002 年的曲率则减小到多年最低值，仅有 1.07，主河道形态达到最平坦；2002 年后河道摆动幅度变大，曲率逐渐增加到 2013 年的 1.14，高于多年平均曲率；2021 年主河道曲率低于

平均值， $S=1.09$ 。因此，河段 R4 的辫状河道的活动比 R2 段更为活跃，R1 的主河道曲率大于 R4，其中 R1 曲率多年变化不大，R4 曲率在 1996 年之后变化波动较大。

通过对比图 7 的 R1 和 R4 沙洲面积分布情况可知，整体上 R4 段沙洲面积、沙洲面积差异以及面积变化程度均大于 R1 段的沙洲。1986—2021 年 R1 段多年平均沙洲面积为 0.44 km^2 ，且各沙洲的面积差异不大，主要集中在 $0 \sim 1 \text{ km}^2$ 。1986—2015 年均有 1~3 个大沙洲面积远大于沙洲平均面积，尤其是 2002 年最大沙洲面积达 8.43 km^2 ，该沙洲的形成是由于河道淤积未连通而使相邻沙洲合并成为 1 个沙洲。而在 2021 年则没有异常大面积沙洲，河道内沙洲面积均在 1 km^2 内。R4 段沙洲面积普遍比 R1 段大，1986—2021 年该段沙洲平均面积为 0.73 km^2 。各年份均分布着 1~4 个相对大型沙洲，沙洲面积分布范围相对分散，分布在 $0 \sim 4 \text{ km}^2$ ，尤其在 2008—2021 年沙洲面积分布范围主要因面积高值逐渐变大而进一步扩大，到 2021 年沙洲面积上限达 4.03 km^2 ，特大沙洲面积为 8.09 km^2 ，是其他年份沙洲面积上限的 1.22~9.83 倍。尤其在 1993 年、1995 年和 2002 年沙洲面积分布集中，除了 3~4 个大于 1 km^2 的大沙洲，其他沙洲面积均集中在 $0 \sim 0.7 \text{ km}^2$ 。

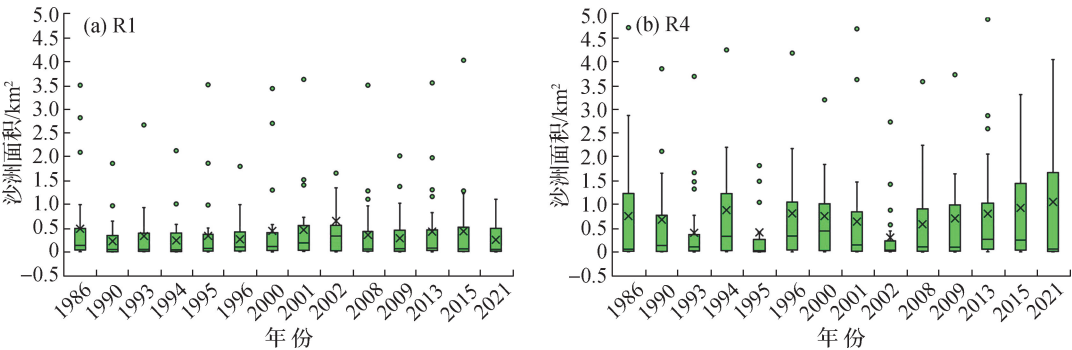


图 7 R1 和 R4 沙洲面积离散程度
Fig. 7 Dispersion of bar area

2.3 尼洋河段及汇流区形态变化

尼洋河汇流区上游的辫状形态较为复杂，且河道汇入雅江干流的角度近乎垂直，因此尼洋河来水来沙直接影响着汇流区的形态变化。图 8 是尼洋河汇流段上游辫状河道和主流交汇段不同年份的对比。空间形态上，R3 河谷呈弯曲弧形，主河道先靠左岸，受右岸山体限制后转向左岸流去，随着尼洋河逐渐靠近雅江干流，尼洋河辫状形态发育显著，主河道特征逐渐减弱，由 1 股逐渐演变为 3 股，最后通过多条河道汇入雅江干流。在雅江中上游和尼洋河来水来沙变化条件下，汇流区的尼洋河三角洲淤积状态发生变化，并对汇流区河道产生不同程度的挤压。1986 年汇流区的沙洲分布左右宽为 4.45 km，2000 年两侧沙洲因河道未连通而与边滩合并导致河道内沙洲宽为 3.84 km，2021 年沙洲更趋于合并，汇流区两侧河道进一步断连，沙洲范围仅宽 3.06 km。

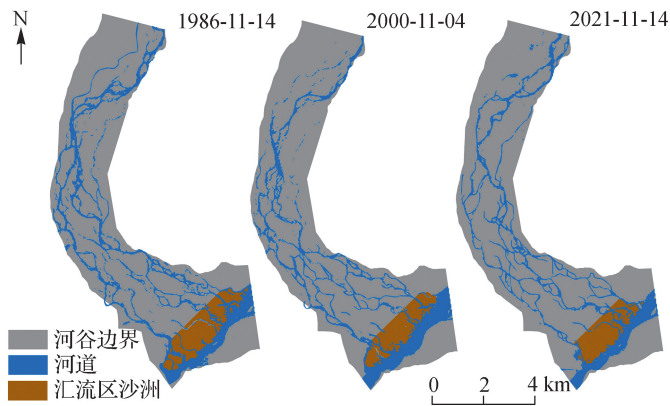


图 8 尼洋河 R2 段辫状河道形态变化及对主河道 R3 的挤压过程
Fig. 8 Morphology change of R2 and pushing process by the Niyang River

1986—2021 年尼洋河汇流段上游和主流交汇段河道面积分别在 6 km² 和 2 km² 上下波动，并未呈现趋势变化(图 9(a))。R2 河道面积在 1994 年和 2015 年相对较大，分别为 6.41 km² 和 7.20 km²。R3 河道面积在 2000 年为 2.76 km²，主河道平均宽 569 m，明显宽于 1986 年的 419 m 和 2021 年的 362 m，且 2021 年河道因沙洲挤压致使宽度最小。如图 9(b)，尼洋河入汇雅江干流的连通河道与未连通河道均呈波形减小趋势，连通河道数总体大于未连通河道数。连通河道数由 1986 年的 8 条减少到 2021 年的 4 条，未连通河道由 6 条减少到 3 条。因此，整体上尼洋河下游汇入雅江的辫状河道数量减少，河道淤积使得河道两侧沙洲与边滩合并，河道内沙洲与沙洲合并或扩大，从而挤压 R3 内的主河道。

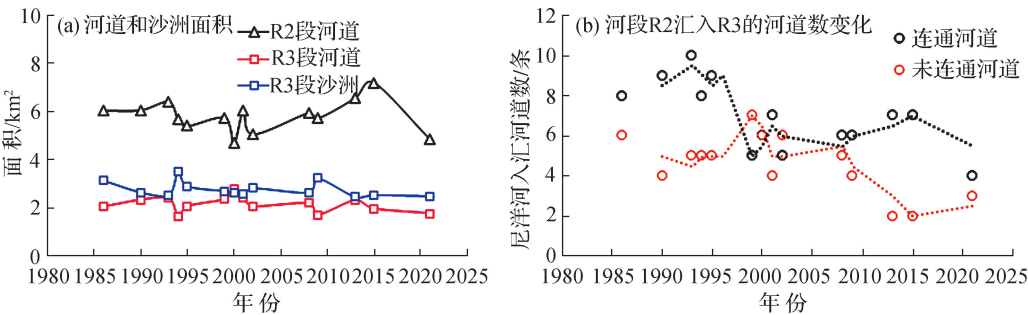


图 9 R2 和 R3 河道形态变化
Fig. 9 River morphology change of R2 and R3

3 洲滩形态变化的主要影响因素

3.1 边界条件

雅江中游米林—派镇段的两侧山体是河道横向迁移的边界限制，河道流向改变主要发生在山体凸面或凹面基点处，如 S5、S6、S8 等局部河段。图 10 为 S5 的左岸大型沙洲在 1986—2021 年受径流冲刷及边界限制的变化过程，图 10(a)底图为 1986 年 11 月 14 日，图 10(b)为 2021 年 11 月 14 日，点 A 和 B 是右岸边界与水流相互顶冲的 2 个作用点。Yuan 等^[11]研究表明 S5 入水口断面的流速分布均匀且水下地形左高右低，因此，S5 的沙洲靠左侧分布，而河道流向因右岸山体边界限制由东北转为东南流向，偏转约 38° 。同时水流与点 A 和 B 对冲后，冲击沙洲西南角该区域边界从红色逐渐消退至绿线处。沿着冲刷方向，1986—1995 年洲体被冲刷 219 m，1995—2002 年沙洲向后移动 357 m，2002—2021 年沙洲边界后移 274 m，最终沙洲面积损失 0.95 km^2 。而点 A 所在的凹面逐渐淤积，1986—2021 年新增 0.31 km^2 边滩。

河岸对河道的相对约束性是河道形态变化的重要影响因素，而河道的变化与沙洲的变化相辅相成，S5 左岸沙洲正是因河岸的约束性作用使河道方向和水流结构发生变化，从而使得沙洲受到冲刷并与水沙变化过程协同演变，达到新的稳定状况。根据以上分析的边界特点，即河谷两侧的山体凹凸特点使得洲体淤积或被冲刷，统计全河段，类似于 A-B 的边界基点共有 9 处，改变河流走向的边界长度约占河谷边界长度的 6.38%。

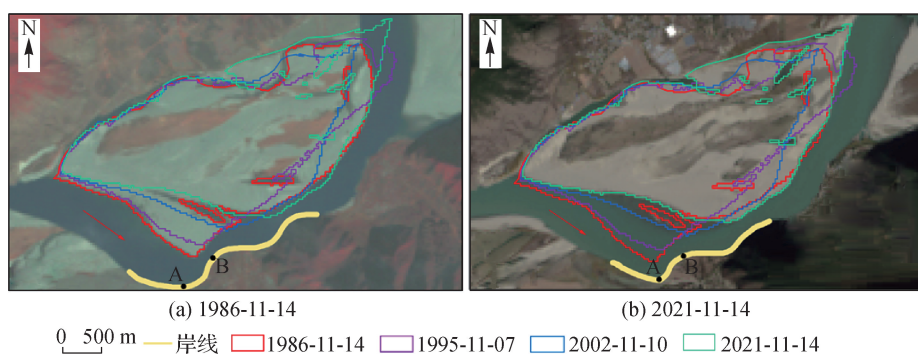


图 10 S5 左侧沙洲变化受边界限制

Fig. 10 Bar change of S5 constrained by boundary condition

3.2 水文条件

为探讨河道-沙洲形态在枯水期—洪水期—枯水期的水文周期中的变化程度，选择水沙数据与遥感数据匹配的 1996 年为代表年，使用 1995 年 11 月和 1996 年 11 月遥感数据对比 1996 年洪水前后的沙洲结构变化，并增加 2001 年 5 月和 2001 年 11 月的对比数据。1995 年 11 月和 1996 年 11 月的河道面积分别为 47.69 km^2 和 46.95 km^2 ，差别仅为 1.5%，说明这 2 个日期的流量接近，则 2 个日期的沙洲形态差异可进行对比。如图 11，沙洲未变区域表示沙洲在 1995 年 11 月和 1996 年 11 月均出露的区域；沙洲冲刷区域代表该区域在 1995 年 11 月存在，在 1996 年 11 月不存在或未出露；相反地，沙洲沉积区域表示该区域在 1995 年 11 月不存在或未出露，而 1996 年 11 月存在。

结果表明，1996 年沙洲未变区域面积为 33.48 km^2 ，冲刷区域面积为 4.21 km^2 ，沉积区域面积为 5.25 km^2 。因此，在 1996 年 11 月 9 日之前日平均含沙量为 0.14 kg/m^3 ，日平均流量为 $2010 \text{ m}^3/\text{s}$ ，且洪峰流量是 11 月 9 日流量的 6 倍的来水来沙条件下，沙洲净增加面积仅为未变区域面积的 3.11%。类似地，2001 年 5 月 15 日和 2001 年 11 月 15 日是汛期前后 2 个径流相似的日期，且汛期最大流量是该日期的 8 倍，沙洲净增加面积为未变区域面积的 6.1%，该比例是 1996 年的 2 倍。这些沙洲的淤积或者被冲刷过程是来水

来沙与河道相互作用的反映^[15], 更大的汛期来水来沙量对沙洲的改造和塑造能力更强^[16-17]。从而导致在枯水期与上一个枯水期的对比中沙洲发生结构变化, 即 1995 年的沙洲边缘在 1996 年被小幅度冲刷, 且 1996 年新生成小面积沙洲, 并且原有相邻的沙洲连接在一起。

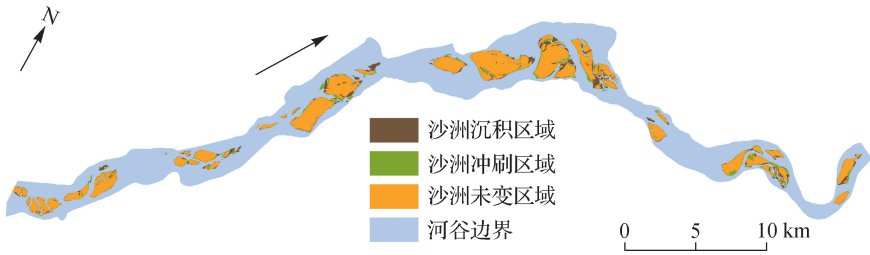


图 11 1996 年汛期前后沙洲变化

Fig. 11 Change of sandbar before and after flood period in 1996

3.3 植被条件

雅江米林—派镇段河道内的大型沙洲较多, 植被多分布于沙洲内部或侧边(图 12)。多年未变动的稳定沙洲面积总计 15.55 km², 平均面积为 0.17 km², 其中最大沙洲稳定区在 S6, 达 3.45 km²。沙洲多年活动变化面积为 54.71 km², 活动变化最大的仍然在 S6(21.15 km²)。同理, 植被长期稳定面积约 2.72 km², 均分布在沙洲稳定区内, 其中 R1 和 R4 河段的稳定植被面积各占河谷面积的 2.57% 和 1.34%。根据以上 3 类分布情况叠加 DEM 数据, 可以发现沙洲稳定区平均高程为 2 891 m, 沙洲活动区平均高程为 2 886 m, 植被稳定区平均高程为 2 897 m。因此, 河段内植被主要基于较高的沙洲生长扩张, 且尼洋河汇入雅江前的河道稳定植被的占比与分布更高。

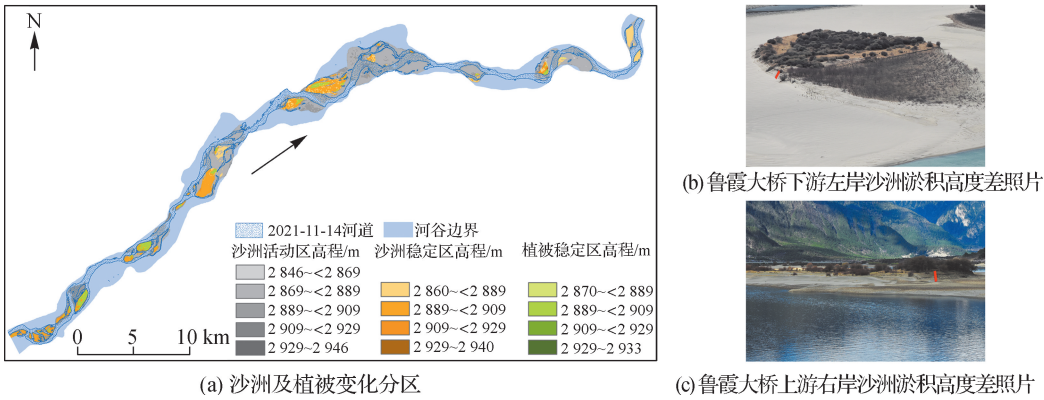


图 12 沙洲及植被的分布

Fig. 12 Distribution of bars and vegetation

植被根系固着于沉积物之上, 可抵抗洪水期的水流冲刷, 降低水流速度, 有助于泥沙沉积, 为植被创造更加稳定的生长环境, 从而进一步利于泥沙加积和沙洲稳定。筛选汛期 1998-09-12、2002-08-06 和 2013-08-04 的遥感数据探讨河段内植被—河道关系。如图 13, 洪水期河道面积约 79 ~ 85 km², 是同年 11 月的 1.66 ~ 2.01 倍, 且沙洲面积比同年 11 月减少了 66.8% ~ 79.1%。洪水期植被面积呈增加趋势, 分别为 1.89、3.39 和 5.77 km²。与各年枯水期的植被面积相比, 2002 年 11 月植被面积比 8 月增加了 46.7%, 而 2013 年 11 月与 8 月的植被面积仅相差 3%。这说明在洪水期植被增加对水沙缓冲拦截并稳固沙洲的作用在生效, 如 S6 区域左岸在 2013-08-04 有 3 个植被斑块, 由 1998 年的洪水淹没状态发展到植被覆盖而稳定在洪水河道中(图 13)。这种作用模式的植被占 2013-08-04 植被面积的 11.8%, 主要分布在 R4 河段。该比例较小, 可能

是由于尼洋河汇入雅江后，增大了来水来沙，并受限于弯曲的边界，使得水沙的运动方向及分布更加复杂多变，从而沙洲变化幅度较大，不利于植被和沙洲的稳定。

S1—S3 的河道-沙洲-植被结构中沙洲边界主要与植被边界接近，如 S1 区域，该区域高程为 2 897 ~ 2 905 m，沙洲淤积高度较高，同时植被范围自 1985 年一直属于沙洲稳定区。这种作用模式的植被在 2013 年 8 月 4 日的河段植被中占 88.2%，主要分布在 R1 河段。因此，R1 河段的植被对来水来沙的阻力作用非常有限，主要因河段较大的沉积量^[5]形成的大沙洲，反过来为植被提供稳定的生长环境。S4—S7 的植被主要在未淹没的沙洲内逐渐扩张。

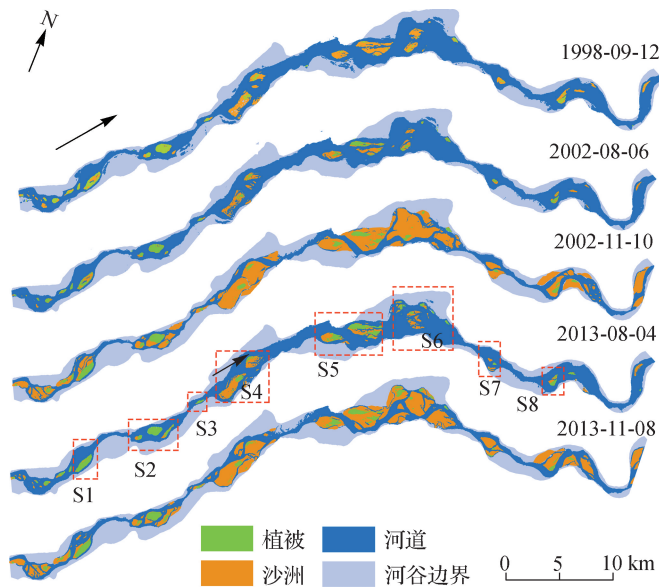


图 13 汛期河道结构与植被覆盖的关系

Fig. 13 Relationship between river structure and vegetation cover in flood seasons

综上可知，雅江米林—派镇段的河道-植被-沙洲的协同作用包括 2 种过程：① 沙洲自身已发育至具有一定高度和规模后，一般洪水仅能淹没沙洲的低滩处，而沙洲内部不易受到洪水干扰，进一步促进植被发育，这种模式主要发生在 R1 河段；② 植被的促淤维稳效果使得沙洲边缘稳定沉积，这种模式主要发生在 R4 河段。

4 结 论

本文基于野外调查和遥感影像数据，通过遥感处理技术分析雅江与尼洋河交汇段上下游辫状河道的变化特征，主要结论如下：

(1) 雅江中游米林—派镇段的主河道曲率呈一定程度的减小趋势且趋于扁平化。6.38% 的边界长度限制并主导该辫状河道的基本走向，下游河道受尼洋河水沙汇入以及山体边界限制，形态变化比上游更为活跃，主河道曲率及变化幅度、沙洲面积及离散度均大于上游河道。

(2) 尼洋河下游辫状河道复杂多变，但面积变化不明显，汇入雅江干流的连通河道数量由 8 条减少到 4 条，汇流区的主河道在枯水期受洲滩淤积而挤压，汛期则被洪水淹没，即河宽及洲滩面积在不同来水条件下波动变化。

(3) 米林—派镇段辫状河道形态变化的动力主要是汛期的水沙过程，且水沙活动以沉积为主，更大的来水来沙会增加新出露的沙洲或者连接相近出露沙洲。未来雅鲁藏布江下游水电开发在该河段修建梯级水库等

工程将会进一步减小河段的水沙流速,促进泥沙沉积过程,沙洲形态可能持续变大。

(4) 米林—派镇段辫状河道内河道-沙洲-植被结构变化主要有2种模式:一是较大或地形较高的沙洲形态在汛期基本不被洪水影响,给植被提供生长及扩张空间,并可能进一步向低地形的枯水期出露沙洲部分扩张,在以后洪水期逐渐对水沙产生抑冲促淤的反馈,该模式的植被覆盖占88.2%;二是新生植被在枯水期裸露的沙洲上逐步扎根稳定,在洪水期拦截水沙的能力逐渐加强,并可促进沙洲的稳定,从而新生植被逐渐伴生新生沙洲的形成,该模式的植被覆盖仅占11.8%。

未来需继续对雅江辫状河流持续关注研究,并加强完善野外测量数据,如河道的实测地形和水沙实测等数据等,进一步探讨全要素对河道-沙洲-植被综合影响的理论基础和过程。

参考文献:

- [1] LI W, COLOMBERA L, YUE D L, et al. Controls on the morphology of braided rivers and braid bars: an empirical characterization of numerical models[J]. *Sedimentology*, 2023, 70(1): 259-279.
- [2] SHI X N, ZHANG F, LU X X, et al. The response of the suspended sediment load of the headwaters of the Brahmaputra River to climate change: quantitative attribution to the effects of hydrological, cryospheric and vegetation controls[J]. *Global and Planetary Change*, 2022, 210: 103753.
- [3] YOU Y C, LI Z W, GAO P, et al. Impacts of dams and land-use changes on hydromorphology of braided channels in the Lhasa River of the Qinghai-Tibet Plateau, China[J]. *International Journal of Sediment Research*, 2022, 37(2): 214-228.
- [4] WU X Y, LI Z W, GAO P, et al. Response of the downstream braided channel to Zhikong Reservoir on Lhasa River[J]. *Water*, 2018, 10(9): 1144.
- [5] SHI X N, ZHANG F, LU X X, et al. Spatiotemporal variations of suspended sediment transport in the upstream and midstream of the Yarlung Tsangpo River (the Upper Brahmaputra), China[J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2018, 43(2): 432-443.
- [6] 徐宗学,班春广,张瑞. 雅鲁藏布江流域径流演变规律与归因分析[J]. *水科学进展*, 2022, 33(4): 519-530. (XU Z X, BAN C G, ZHANG R. Evolution laws and attribution analysis in the Yarlung Zangbo River basin[J]. *Advances in Water Science*, 2022, 33(4): 519-530. (in Chinese))
- [7] 游宇驰,李志威,胡旭跃. 雅鲁藏布江中游人工林对辫状河道洲滩稳定性的影响[J]. *泥沙研究*, 2023, 48(1): 26-32. (YOU Y C, LI Z W, HU X Y. Impacts of artificial plantation encroachment on bar stability of braided channel in the Middle Yarlung Tsangpo River[J]. *Journal of Sediment Research*, 2023, 48(1): 26-32. (in Chinese))
- [8] 胡春宏,郑春苗,王光谦,等. “西南河流域径流变化和适应性利用”重大研究计划进展综述[J]. *水科学进展*, 2022, 33(3): 337-359. (HU C H, ZHENG C M, WANG G Q, et al. Reviews of the major research plan 'runoff change and its adaptive management in the source region of major rivers in Southwestern China' [J]. *Advances in Water Science*, 2022, 33(3): 337-359. (in Chinese))
- [9] ZHANG T, FENG M Q, CHEN K L. Hydrodynamic characteristics and channel morphodynamics at a large asymmetrical confluence with a high sediment-load main channel[J]. *Geomorphology*, 2020, 356: 107066.
- [10] 徐嘉慧,王世东,宋利娟,等. 雅鲁藏布江干流河宽时空变化遥感监测及水文气象响应[J]. *地理学报*, 2022, 77(11): 2862-2877. (XU J H, WANG S D, SONG L J, et al. Mapping spatio-temporal variation of river width from satellite remote sensing data and hydrometeorological response in the Yarlung Zangbo River[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2022, 77(11): 2862-2877. (in Chinese))
- [11] YUAN S Y, ZHU Y Q, TANG H W, et al. Planform evolution and hydrodynamics near the multi-channel confluence between the Yarlung Zangbo River and the delta of the Niyang River[J]. *Geomorphology*, 2022, 402: 108157.
- [12] HE G J, FANG H W, WANG J Y, et al. From fluvial dynamics to eco-fluvial dynamics[J]. *International Journal of Sediment Research*, 2019, 34(6): 531-536.
- [13] 李志威,鲁瀚友,陈帮,等. 辫状河流演变过程与机理的研究进展[J]. *水科学进展*, 2021, 32(6): 957-968. (LI Z W, LU H Y, CHEN B, et al. A review on morphodynamic processes and mechanism of braided rivers[J]. *Advances in Water Science*, 2021, 32(6): 957-968. (in Chinese))

- [14] 苏龙飞, 李振轩, 高飞, 等. 遥感影像水体提取研究综述[J]. 国土资源遥感, 2021, 33(1): 9-19. (SU L F, LI Z X, GAO F, et al. A review of remote sensing image water extraction[J]. Remote Sensing for Land & Resources, 2021, 33(1): 9-19. (in Chinese))
- [15] 蒋昌波, 冉韶华, 李志威. 长江源典型辫状河道边滩变化及与径流量的关系[J]. 水力发电学报, 2019, 38(12): 1-10. (JIANG C B, RAN S H, LI Z W. Spatiotemporal variations in side bars related to runoff in two typical braided reaches in the Yangtze River source region[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2019, 38(12): 1-10. (in Chinese))
- [16] SHAMPA, ALI M M. Interaction between the braided bar and adjacent channel during flood: a case study of a sand-bed braided river, Brahmaputra-Jamuna[J]. Sustainable Water Resources Management, 2019, 5(2): 947-960.
- [17] CROISSANT T, LAGUE D, DAVY P. Channel widening downstream of valley gorges influenced by flood frequency and floodplain roughness[J]. Journal of Geophysical Research: Earth Surface, 2019, 124(1): 154-174.

Evolution of braided channels at the confluence of Yarlung Tsangpo and Niyang River from 1986—2021 *

YOU Yuchi¹, LI Zhiwei², YU Guo'an³, HU Xuyue¹

(1. School of Hydraulic and Environmental Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China;

2. State Key Laboratory of Water Resources Engineering and Management, Wuhan University, Wuhan 430072, China;

3. Key Laboratory of Water Cycle and Related Land Surface Processes, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China)

Abstract: The morphology and variation of braided channel at the confluence reach of Yarlung Tsangpo River (YTR) and Niyang River are affected by the inflow of Niyang River, valley boundary and vegetation conditions. The spatio-temporal variation and complexity of the braided river are of importance to further study. The remote sensing images from 1986 to 2021 were used to extract the morphological features of braided channels, sandbar and vegetation (channel migration rate, sinuosity, area, et al). We further analyze the morphological characteristics and evolution processes of complex braided channels. The results show that maximum migration rate of the main channel is 483 m/a, the sinuosity reduces by 3.43%, and the vegetation cover area increases up to 8.05 km². Owing to the difference of boundary conditions and hydrological conditions, the main channel of the Milin-Paizhen reach oscillates laterally before the Niyang River flows into the YRT, and migrates laterally and longitudinally after Niyang River flows into the channel. Since 2013, 11.8% of the vegetation coverage in the river channel has a positive feedback of erosion inhibition and deposition promotion, and enhanced the stability of the sandbars.

Key words: braided channel; channel confluence; flow and sediment condition; boundary conditions; vegetation effect

* The study is financially supported by the National Natural Science Foundation of China (No.41971010; No.51979012).