

长江源通天河段辫状河道形态特征与变化规律

李志威^{1a,1b}, 吴叶舟^{1a,1b}, 胡旭跃^{1a,1b}, 周银军², 闫霞²

(1. 长沙理工大学 a. 水利工程学院; b. 水沙科学与水灾害防治湖南省重点实验室, 长沙 410114;

2. 长江科学院 河流研究所, 武汉 430010)

摘要: 长江源广泛发育辫状河道, 共同组成一个庞大的辫状河群, 在水流泥沙与河床地形数据缺乏的条件下, 长江源辫状河道形态的时空变化尚缺少研究。基于 Landsat 遥感影像解译, 研究长江源通天河局部辫状河段的平面形态特征与分汊强度的时空变化规律。结果表明: 1987—2016 年辫状河段的水域面积与河床面积之比在年内呈现单峰变化过程, 即汛期 4—9 月份逐渐变大, 非汛期 10 月—次年 3 月趋于变小至基本不变, 而且近 30 a 有所增加, 间接反映了长江源径流量增加的趋势。辫状河段的 36 个横断面的汉道数指数和汉道长度指数分别为 4~10 和 5~12, 在 1994、2005、2015 年其均值几乎维持不变, 表明此辫状河段的整体形态具有自相似性且河型不变。

关键词: 辫状河道; 形态变化; 水域面积; 分汊强度; 遥感影像; 长江源; 通天河

中图分类号: TV147 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-5485(2018)09-0006-06

1 研究背景

长江源地处西藏与青海交界的唐古拉山地区, 发育和形成了长江正源沱沱河、通天河、楚玛尔河、当曲、布曲、冬曲、尕尔曲和北麓河共计 8 条规模较大的高原辫状河流。长江源下边界至玉树巴塘河口, 三江源区内长 1 217 km, 面积 15.9 万 km²。长江源区平均海拔 4 500 m 以上, 自然条件恶劣, 交通不便, 因此关于该区域水系分布、平面形态和辫状河群的研究较少^[1-2]。长江源区地势上南高北低、西高东低, 由于受区域地形和新构造运动的强烈影响^[3], 源区具有平行状水系格局, 河谷形态以窄谷和宽谷交替出现^[4-5], 分别对应限制性河道和辫状河道。

目前, 长江源的水文泥沙研究主要以降水量、径流量、生源物质以及气候变化要素的数据分析为主^[6], 缺少对河床演变的观测与研究^[7-8]。长江源的冲积河流类型以辫状河道为主, 如沱沱河、当曲下游、楚玛尔河下游、布曲、尕尔曲、通天河上游段等, 共同组成辫状河群^[1-2]。长江源水系的窄谷与宽谷相间, 窄谷作为一个节点, 不仅影响着河道走向, 而且对上游宽谷段起控制作用, 这种控制作用主要体现在维持上游宽谷辫状河型和阻止宽谷段泥沙下

泄^[2]。宽谷段辫状河道内沙洲林立, 平面形态破碎, 多汉道无规则交织, 冲淤变化强烈, 河道输沙强度高, 特别是通天河的大型辫状河道形态复杂、流路散乱。

辫状河道作为一种不稳定的多汉道河流系统, 在全球广泛分布, 如雅鲁藏布江中游、塔里木河上游、黄河中游、布拉马普特拉河下游、加拿大的 Fraser River、意大利的 Tagliamento River 等。早期, Howard 等^[9]使用汉道数平均数来表示辫状河道分汊强度, 并指出分汊强度随着流量和坡降的乘积增大而增大, 通过辫状河流的形态统计分析后, 发现沿程的大部分汉道数变化都是由局部的流量和泥沙输移波动引起的。通过总结前人提出的表示辫状河道分汊强度的指数, 归类成沙洲指数、汉道数指数、汉道长度指数 3 种分汊强度指数, 并通过水槽实验发现分汊强度与径流量存在正相关的关系^[10]。近期, Bertoldi 等^[11]对辫状河道的平面稳定结构进行量化, 通过辫状河带宽度 (belt width) 和横截面上的汉道数与节点判断一个辫状河道是否达到了“稳定阶段”, 将辫状河道的形态以无量纲流量与无量纲水流功率 (stream power) 进行分类并以相应野外调查验证, 进而又提出了一种新的形态参数 (坡降、流量、泥沙粒径、限制度) 以分析辫状河段尺度的高程分布^[12]。基于长系列航空影像和遥感影像对 Tagliamento River 的辫状河段的解译表

收稿日期: 2017-03-14; 修回日期: 2017-04-17

基金项目: 国家自然科学基金项目(91547112, 91647118, 51709020, 51609015); 长江科学院开放研究基金资助项目(CKWV2016369/KY); 湖南省教育厅优秀青年项目(16B010)

作者简介: 李志威(1984-) 男, 湖北云梦人, 副研究员, 博士, 主要从事高原河流动力学研究。E-mail: lzhiwei2009@163.com

通信作者: 胡旭跃(1962-) 男, 湖南长沙人, 教授, 博士, 主要从事河流动力学研究。E-mail: huxuyue62@163.com

明,河道中沙洲与辫状河道的尺寸存在一定几何关系,它们的面积之比保持在约0.08;大部分不稳定的沙洲只能发育或存在约24 a,同时辫状河道的平滩岸线长度(bankfull shoreline)与河道长度之比约为6,而且认为流量、泥沙粒径和植被是维持辫状河道的3个关键因素^[13]。除了研究辫状河道平面形态以外,运用元胞自动模型(cellular model)也可定性模拟辫状河道的形态动力过程^[14-16],并认识辫状河道的不稳定性和复杂性。

辫状河道的河道宽阔,河性散乱,沙洲林立,多汊并行,在不同时空尺度均存在不稳定性及复杂性,河道内的沙洲发育与冲切机制、汇流与分流动力过程、洲滩沉积规律及结构等既是关键科学问题,也是研究难点^[17]。目前,对长江源辫状河道的形态参数表征与复杂性仍缺少定量认识,本文基于长系列的Landsat 遥感影像,量化形态参数,分析通天河典型辫状河段的河床与水域面积变化和不同断面的分汊强度的统计特征,以定量认识长江源辫状河道的平面形态规律及复杂性。

2 研究区域和研究方法

2.1 研究区域

沱沱河与当曲在沱沱河大桥下游60 km的囊极巴陵地区汇合后称为通天河起点(34°05′38″N, 92°54′48″E),终点为青海省玉树藏族自治州附近的巴塘河汇入口(32°58′34″N, 97°14′48″E)。通天河是万里长江源头的干流部分,长约813 km,河床平均比降1.2‰,年径流量130亿m³。通天河左岸有日阿尺曲、北麓河、勒池曲、楚玛尔河、色吾曲和德曲等支流,右岸有莫曲、牙哥曲、科欠曲、宁恰曲、登艾龙曲和叶曲等支流(图1)^[2]。本文的研究河段即为通天河的宽谷辫状河段。为了减少支流汇入的影响,研究河段(图1)选为通天河的勒池曲汇入口(34°44′58.61″N, 94°30′53.29″E)至楚玛尔河汇入口(34°40′28.18″N, 94°55′40.42″E)河段。该河段为典型的辫状河段,河床宽度为2~3 km,宽谷河道整体较顺直,河段长约36 km,河床平均比降1.94‰。

长江源辫状河群的水系密布,空间尺度大小不同,河道形态变化万千,年内与年际的河道演变过程较难以捕捉。而且,长江源只有部分可接近的冲积河段(青藏公路两侧),目前只能依赖卫星遥感影像或低空航空摄影以窥全貌。同时,长江源区缺少长系列的水文数据,更缺少高精度的河床地形数据,野外调查也存在诸多困难(高寒缺氧、交通不便、恶劣

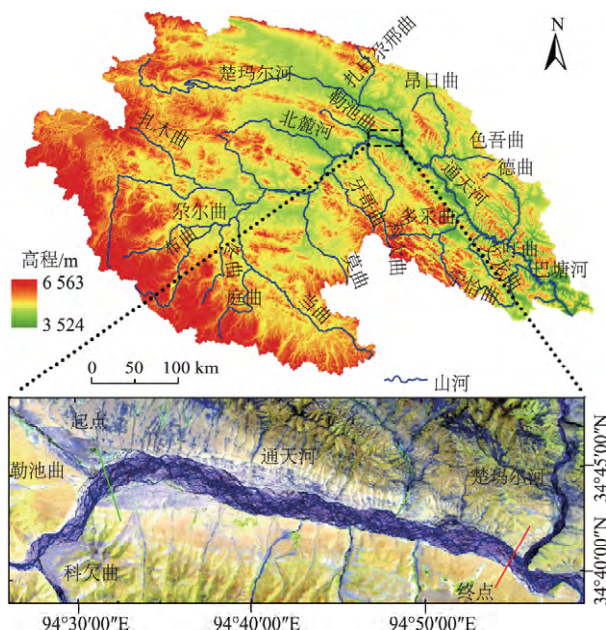


图1 长江源区主要水系分布和通天河研究河段
Fig. 1 Main river networks in Yangtze River source and studied channel reach in the Tongtian River

天气、交通成本等),难以长期坚持。由于以上诸多原因,本文采用遥感图像技术对长江源的通天河段辫状河道开展平面形态及复杂性研究。

2.2 研究方法

2.2.1 数据获取

为研究楚玛尔河汇入通天河处的辫状河段,从Landsat的TM/ETM/OLI_TRIS遥感影像中选出研究河段无云雾遮挡且不处于结冰期的多期多光谱遥感图像,获取1987—2016年间共56期影像数据。

2.2.2 数据处理

利用ENVI和ArcGIS等软件对遥感影像进行裁剪、分类提取、河道简化等处理。裁剪是将研究河段从原图像中截取出来,排除了非研究区域的影响;分类提取是利用各种地物的光谱特性的区别对地物进行分类,将需要研究的水体部分提取出来,经过对比选用了水体提取效果较好的改进归一化差异水体指数MNDWI^[18],对这些多光谱图像进行分类提取;将裁剪出来的河道区域的地物分类成水域和非水域2部分(图2),再将每幅图像的水域面积进行统计分析。

定量辫状形态参数时,需要对河道形态进行简化,即不考虑辫状河道的河道宽度将其简化成线条,以便得到辫状河道的分汊强度。为了表示辫状河道的分汊强度,已经有很多分汊强度指数被提出来^[9-10],在总结前人的基础上将其归类为3类分汊强度指数,本文选取河道数指数BI_{T3}和河道长度指数P_T研究本河段的分汊强度。河道数指数BI_{T3}表

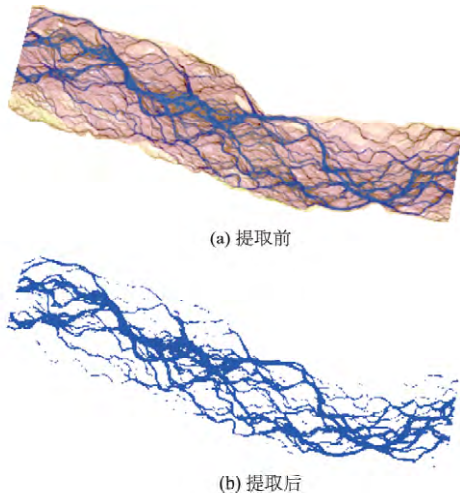


图2 通天河辫状河段水体提取前后对比
(Landsat 遥感影像 2016 年 6 月 16 日)

Fig.2 Water boundary of local braided reach in the Tongtian River before and after extraction
(Landsat images , June 16 , 2016)

示河段内各横截面 (XS) 上汉道数 (N_L) 的平均值, 如图 3 (a); 汉道长度指数 $P_T = \sum L_L / L_r$ 表示河段内汉道总长与单位河段长度之比, 其中 L_L 为河段内汉道总长度, L_r 为单位河段长度, 见图 3 (b)。分汉强度指数是相对一个河段来说, 而且与汉道宽度与面积无关。本研究需要先将研究河段分成中心线等长的若干段, 并将汉道简化为线条, 再研究每段的分汉强度(图 4)。

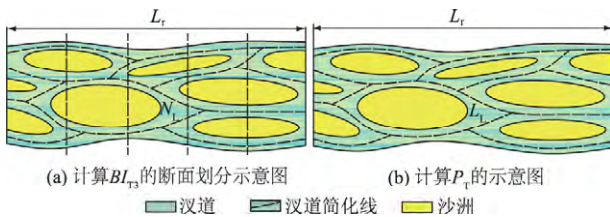


图3 分汉强度指数的形态参数示意图

Fig.3 Morphological parameters of branching intensity index

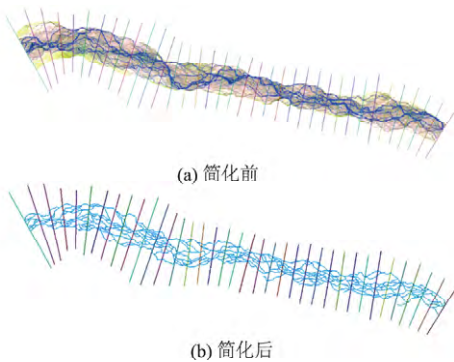


图4 研究河段的辫状河道每 1 km 等距分段
(Landsat ,1994 年 9 月 24 日)

Fig.4 Equidistant sections (each 1 km) of braided river reach (Landsat images , September 24 , 1994)

3 辫状河段水域面积变化规律

研究河段缺乏水文数据, 无法直接得到径流量数据, 所以本文计算水域面积变化未与水位波动建立联系。56 幅图像中有部分图像并不是全河段且有云遮挡, 所以从研究河段中又选取了其中一段河道作水域面积分析, 河道中心线长度约为 12 km。通过对图像进行分类提取, 可得到 56 个时间点的河道水域面积。

为了减少夏季水位波动的影响, 从 56 幅图像中选取某一年的冬季至翌年冬季, 即 2014 年 11 月到 2015 年 11 月内(表 1) 的图像, 从而获得年内水域面积变化。为了便于比较, 将水域面积数据无量纲化为水域面积与河床面积比(图 5), 此处河床面积是指整个辫状河道的面积, 包括了水域加上洲滩。而且对 56 幅图像进行对比发现, 河床近 30 a 都没有变化。水域面积与河床面积之比在 0.087 ~ 0.241 之间, 水域面积夏天大, 冬天小, 间接反映年内水位波动情况。

表 1 2014—2015 年的水域面积与河床面积比

Table 1 Ratio of water area to riverbed area in 2014 - 2015

日期	水域面积与河床面积之比	日期	水域面积与河床面积之比
2014 - 11 - 18	0.137	2015 - 10 - 04	0.196
2014 - 12 - 04	0.110	2015 - 10 - 20	0.170
2015 - 05 - 13	0.193	2015 - 11 - 21	0.087
2015 - 08 - 01	0.241		

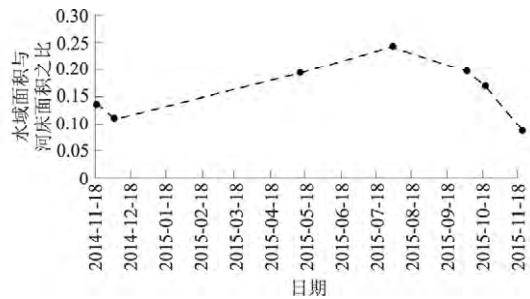


图5 1 a 内水域面积与河床面积比的变化(2014—2015)

Fig.5 Change of ratio of water area to riverbed area within one year (2014 - 2015)

除了以上方法, 也可通过将 56 幅图像按月份区分, 并分别求出各个月份图像的水域面积与河床面积比平均值(图 6), 来进一步说明水域面积的年内变化。除 1—3 月份处于结冰期未选取图像之外, 从以上 2 种水域面积年内变化分析中可知, 1 a 中, 7—9 月份水域面积最大, 11—12 月份水域面积最小, 年内水域面积基本呈现单峰单谷的周期性波动形式。

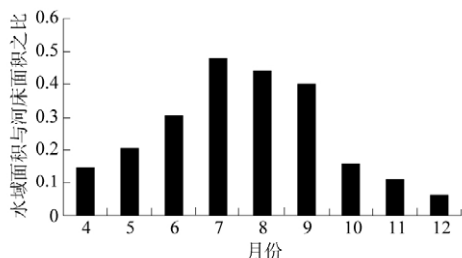
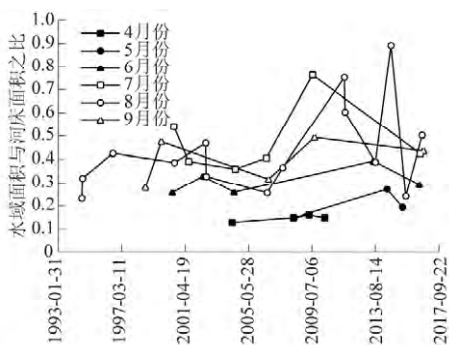


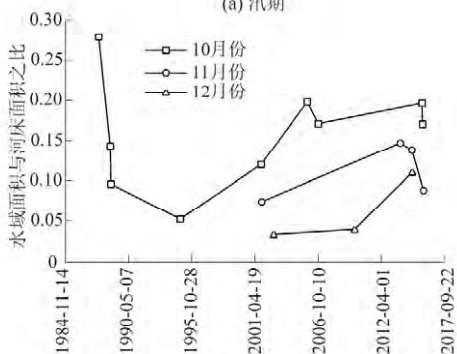
图 6 各月份水域面积与河床面积之比

Fig.6 Ratio of water area to riverbed area in each month

为了研究径流量在最近 30 a 的变化,将 56 幅图像按月份区分,分别作出汛期与非汛期水域面积与河床面积之比随时间的变化图(图 7)。



(a) 汛期



(b) 非汛期

图 7 1987—2016 年不同月份水域面积与河床面积比变化

Fig.7 Change of ratio of water area to riverbed area in different months (1987-2016)

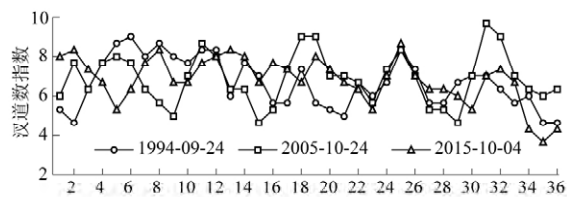
从图 7 可以看出,汛期的水域面积在 2005 年前逐渐减小,2005 年之后显著增加,到 2009—2013 年间除 8 月份以外的其他月份水域面积达到最大值后又逐渐减小。分析 8 月份折线波动很大的原因可能是 8 月份水域面积变化范围较大。非汛期 10 月份水域面积经历了一个先下降再上升的过程,在 1994 年左右达到最小值,其他几个月份(1—3 月份处于结冰期,没有选择遥感图像进行水域面积计算)的图像全都在 2001 年以后,且水域面积逐渐增加。另外,对各月份的水域面积变化进行线性回归分析后的结果表明各

月份水域面积都呈增长趋势。根据前人对长江源径流量变化的研究结果^[19-21] 2005 年前长江源区年径流量持续下降,2005 年之后持续增加,总体呈增长趋势。可以看出,研究河段水域面积与长江源径流量的变化趋势存在比较强的相似性,所以利用水域面积来反映径流量变化的设想是可行的。

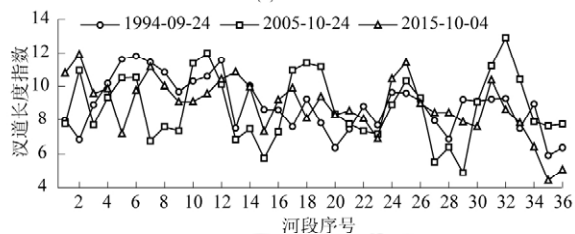
4 辫状河段分汊强度变化规律

对辫状河道的分汊强度分析着眼于其在时间上和沿河道的纵向变化。在时间上,从 56 幅图像中选取水域面积非常接近且时期相近的 1994 年 9 月 24 日、2005 年 10 月 24 日、2015 年 10 月 4 日 3 个时间点的图像。由于在一定流量变化范围内分汊强度与流量存在正相关关系^[10],为排除流量对分汊强度的影响,选择水域面积相近的时间点。在沿河道纵向上,将整个研究河段分成中心线 1 km 等距的 36 段,即可分析分汊强度沿河道的变化特征。而且在获得河道数指数的同时,又将 36 个等分河段再次 3 等分,将每个河段的 3 个横截面上的平均河道数作为该河段的河道数指数。

对辫状河道进行分段和简化后,统计每个河段的河道数指数,得到各河段的分汊强度指数(图 8)。同时,对 3 个时间点的分汊指数进行平均值的特征数计算,如图 9。



(a) 河道数指数



(b) 河道长度指数

图 8 研究河段分汊强度指数沿河道变化

Fig.8 Changes of branching intensity indexes along the channel of studied reach

图 8 和图 9 给出的 2 种分汊强度指数结果相近,都表明分汊强度沿河道在一定范围内不断波动,即河道数指数 $BI_{T3} \in [4, 10]$,均值为 6.79,河道长度指数 $P_T \in [5, 12]$,均值为 8.87。在 1994—2015 年的 21 a 间,分汊强度在研究河段的上游部分变化明

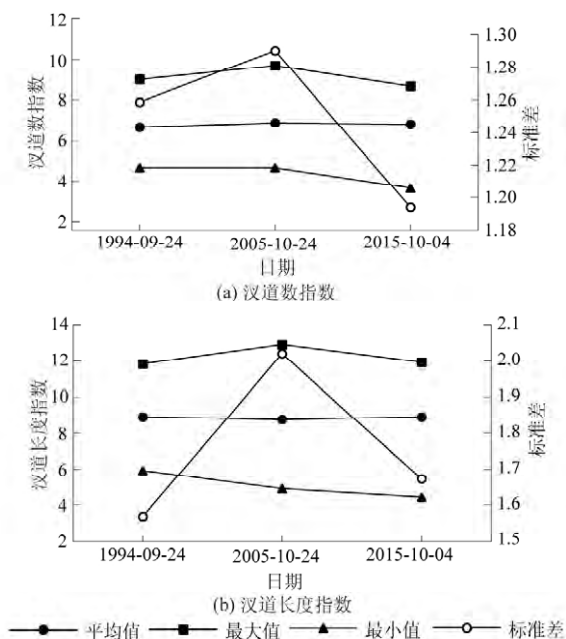


图9 1 km 等距分段的分汉强度指数特征数

Fig.9 Characteristic number of branching intensity index in 1 km isometric segmented reach

显,在下游部分则变化较小,特别是在第22—27河段,分汉强度变化很小。分汉强度指数在3个时间点的平均值、最大值和最小值几乎相同,这在一定程度上验证了Egozi等^[10]关于分汉强度与流量存在正相关关系的结论。分汉强度指数的标准差在2种指数上的变化趋势相同,都是先增大后减小,且数值都较小,说明研究河段内的分汉强度变化较小,整个河段具有整体相似性。

5 结论与展望

长江源辫状河道的形态动力过程是来水来沙条件与河床相互作用的结果,其单个、群体和辫状河段的洲滩发育、冲刷切割与淤积合并,以及多汉道系统此消彼长,既在短时间尺度和局部河段具有复杂性、不规则性和不稳定性,又在长时间尺度和整体河段具有周期性、自相似性和亚稳定性。

通天河局部辫状河段的年内水域面积与河床面积之比在汛期变大,非汛期变小,与年内水文周期同步。由于近30 a江源区径流量增加,水域面积与河床面积之比呈增加趋势。辫状河段内36个等距横断面的汉道数指数和汉道长度指数变化分别为4~10和5~12,而且时期、水域面积相近的1994年9月24日、2005年10月24日、2015年10月4日3个时间点的汉道数指数和汉道长度指数的均值变化和标准差都较小,说明辫状河道的多汉道系统具有整体相似性且河性维持不变。

下一步工作仍将基于不同分辨率的遥感影像,以及沱沱河的日径流量和直门达的月径流量数据,研究长江源不同空间尺度下形态动力过程及其与径流量周期变化的对应关系,特别关注未来在径流量减少条件下,局部辫状河道有无可能向网状或分汉转化及其临界条件,回答这个问题将促进对长江源辫状河道演变的科学认识。

参考文献:

- [1] 李志威,余国安,徐梦珍,等. 青藏高原河流演变研究进展[J]. 水科学进展, 2016, 27(4): 617-628.
- [2] 李志威. 三江源河床演变与湿地退化机制研究[D]. 北京: 清华大学, 2013.
- [3] ZHENG H, CLIFT P D, WANG P, *et al.* Pre-miocene Birth of the Yangtze River[J]. PANS, 2013, 110(19): 7556-7561.
- [4] 李亚林,王成善,王 谋,等. 藏北长江源地区河流地貌特征及其对新构造运动的响应[J]. 中国地质, 2006, 33(2): 374-382.
- [5] 赵洪菊,贾小龙,王永贵,等. 长江源区新构造运动特征分析[J]. 西北地质, 2010, 43(1): 60-65.
- [6] 李志晶,金中武,周银军,等. 长江南源当曲源头水沙特性初步分析[J]. 长江科学院院报, 2016, 33(3): 35-37.
- [7] YU Guo-an, BRIERLEY G, HUANG H Q, *et al.* An Environmental Gradient of Vegetative Controls upon Channel Planform in the Source Region of the Yangtze and Yellow Rivers[J]. Catena, 2014, 119(1): 143-153.
- [8] YU Guo-an, LIU Le, LI Zhi-wei, *et al.* Fluvial Diversity in Relation to Valley Setting in the Source Region of the Yangtze and Yellow Rivers[J]. Journal of Geographical Sciences, 2013, 23(5): 817-832.
- [9] HOWARD A D, KEETCH M E, VINCENT C L. Topological and Geometrical Properties of Braided Streams[J]. Water Resources Research, 1970, 6(6): 1674-1688.
- [10] EGOZI R, ASHMORE P. Defining and Measuring Braiding Intensity[J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2008, 33(14): 2121-2138.
- [11] BERTOLDI W, ZANONI L, TUBINO M. Planform Dynamics of Braided Streams[J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2009, 34(4): 547-557.
- [12] REDOLFI M, TUBINO M, BERTOLDI W, *et al.* Analysis of Reach-scale Elevation Distribution in Braided Rivers: Definition of a New Morphologic Indicator and Estimation of Mean Quantities[J]. Water Resources Research, 2016, 52(8): 5951-5970.
- [13] ZANONI L, GURNELL A, NICK DRAKE N, *et al.* Island Dynamics in a Braided River from Analysis of His-

- torical Maps and Air Photographs [J]. *River Research and Applications*, 2008, 24(8): 1141–1159.
- [14] MURRAY A B, PAOLO C. Properties of a Cellular Braided-stream Model [J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 1997, 22(11): 1001–1025.
- [15] DOESCHL-WILSON A B, ASHMORE P E. Assessing a Numerical Cellular Braided-stream Model with a Physical Model [J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2005, 30(5): 519–540.
- [16] THOMAS R, NICHOLAS A P, QUINE T A. Cellular Modelling as a Tool for Interpreting Historic Braided River Evolution [J]. *Geomorphology*, 2007, 90(3/4): 302–317.
- [17] BRISTOW C S, BEST J L. Braided Rivers: Perspectives and Problems [J]. *Geological Society London Special Publications*, 1993, 75(1): 1–11.
- [18] 徐涵秋. 利用改进的归一化差异水体指数(MNDWI)提取水体信息的研究[J]. *遥感学报*, 2005, 9(5): 589–595.
- [19] 曹建廷, 秦大河, 罗勇, 等. 长江源区1956—2000年径流量变化分析[J]. *水科学进展*, 2007, 18(1): 29–33.
- [20] 朱延龙, 陈进, 陈广才. 长江源区近32年径流变化及影响因素分析[J]. *长江科学院院报*, 2011, 28(6): 1–4, 9.
- [21] 齐冬梅, 李跃清, 陈永仁, 等. 气候变化背景下长江源区径流变化特征及其成因分析[J]. *冰川冻土*, 2015, 37(4): 1075–1086.

(编辑: 陈敏)

Morphological Features and Spatial-temporal Change of Braided Reach of Tongtian River in the Yangtze River Source Region

LI Zhi-wei^{1,2}, WU Ye-zhou^{1,2}, HU Xu-yue^{1,2}, ZHOU Yin-jun³, YAN Xia³

(1. School of Hydraulic Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China; 2. Key Laboratory of Water-Sediment Sciences and Water Disaster Prevention of Hunan Province, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China; 3. River Department, Yangtze River Scientific Research Institute, Wuhan 430010, China)

Abstract: Braided rivers widely develop in the Yangtze River source, forming a huge cluster of braided rivers. Yet, the spatial-temporal variation of the braided channel morphology remains unclear owing to the shortage of flow, sediment, and riverbed topography data. In the present paper, braided channel morphology and branching intensity in the local braided channel of Tongtian River were studied using the Landsat remote sensing images in 1987–2016 to extract water area. The ratio of water area to riverbed area above water changed periodically associated with the hydrological cycle in a year, i. e., the ratio in flood season (April–September) gradually increased, while in non-flood season (October to next March) decreased and eventually remained unchanged. In the past three decades, the ratio of water area to riverbed area displayed a trend of increasing, which implies the increasing trend of runoff in the source region of the Yangtze River. Of the 36 cross sections of braided river reach, the index of branch number and index of branching length ranged in 4–10, and 5–12, respectively; but the mean values of the two indexes in 1994, 2005, and 2015 almost remained unchanged, indicating that the braided river reach is of holistic self-similarity and invariant river pattern.

Key words: braided river; morphological change; water area; branching intensity; remote sensing image; Yangtze River source; Tongtian River

本刊电子信箱: cjkb@163.net