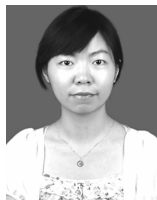


· 航道及通航建筑物 ·



## 长江上游叙渝段弯道平面形态及碍航特征\*

王梅力<sup>1</sup>, 陈秀万<sup>2</sup>, 王平义<sup>1,3</sup>, 林孝松<sup>1</sup>

(1. 重庆交通大学 河海学院, 重庆 400074; 2. 北京大学遥感与地理信息系统研究所, 北京 100871;  
3. 国家内河航道整治工程技术研究中心, 重庆 400074)

**摘要:** 基于对长江上游宜宾至重庆主城区河段 25 个主要弯道平面形态特征的统计分析, 研究弯曲河段扩宽率、收缩率、弯曲度、弯道中心角、曲颈河宽与平均河宽比、弯顶中心半径与平均河宽比等特征值的变化规律。结果表明: 在平面形态上, 大部分弯道呈现两头窄、中间宽的形态特征, 部分弯道急剧弯曲、展宽凹陷非常明显; 弯道中心角一般在  $60^\circ \sim 130^\circ$  范围内, 且大部分弯道中心角  $\geq 90^\circ$ ; 大部分河湾的弯曲度  $> 1.2$ 。分析弯道平面形态的形成机理和碍航特点。研究成果对港航工程、水利工程、市政工程和生态环境工程等的规划和建设具有参考价值。

**关键词:** 长江上游; 弯道平面形态; 弯道浅滩; 碍航特性

中图分类号: TV 147

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2015)06-0087-06

### Plane configuration and navigation-obstructing characteristics of curved channels in Yibin-Chongqing reach of upper Yangtze River

WANG Mei-li<sup>1</sup>, CHEN Xiu-wan<sup>2</sup>, WANG Ping-yi<sup>1,3</sup>, LIN Xiao-song<sup>1</sup>

(1. School of River and Ocean, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China;  
2. RS and GIS Institute of Peking University, Beijing 100871, China;  
3. National Engineering Research Center for Inland Waterway Regulation, Chongqing 400074, China)

**Abstract:** Based on the analysis of the plane configuration characteristics of 25 main curved channels in Yibin-Chongqing reach of the upper Yangtze River, we probes into the changing rules of characteristic parameters as follows: the curved reach expanding rate, shrinkage rate, bending, bend angle at centre, ratio between swan river width and average river width, ratio between radius of center at curved top and average river width of characteristic value change rule. The results show that most curved channels are narrow at both ends and wide in the middle part, some curved channels are sharp bend and very apparent broadening and sag; the bend angles in the centre are between  $60^\circ$  and  $130^\circ$ , and most bends' central angle is greater than or equal to  $90^\circ$ ; the sinuosity of most curved channels is over 1.20. The navigation-obstructing characteristics and forming mechanism of the bend plane morphology are also analyzed. The above results may serve as reference for the planning and construction of port and waterway engineering, hydraulic engineering, municipal engineering and ecological engineering, etc.

**Keywords:** upper Yangtze River; curved channel plane configuration; bend shoals; navigation-obstructing characteristics

自然条件下稳定的天然河流大多呈弯曲形态<sup>[1]</sup>。长江上游自宜宾至重庆长 384 km 的河段

(简称叙渝段), 是沟通西南三省一市与长江中下游及沿海各省市的重要黄金水道, 为典型的山区

收稿日期: 2014-10-24

\*基金项目: 国家自然科学基金 (51079165, 51479015)

作者简介: 王梅力 (1991—) 女, 硕士研究生, 从事 GIS 与数字航道研究。

河流。该河段呈迂回曲折的平面形态，河道弯曲狭窄、洲滩众多、坡陡流急、河床冲淤复杂，一直是航道整治、河道防洪、市政建设、环境保护等工程的重点和难点河段。因此，系统深入地研究长江上游弯曲河道的平面形态及碍航特征，对相关工程的规划、设计、建设和管理均具有巨大的指导价值。

国内外对弯曲河道水沙特性与演变规律的研究较多<sup>[2]</sup>，对弯曲河道平面形态特征的研究也取得了一些成果<sup>[3]</sup>。近年来，Perucca等<sup>[4]</sup>、白玉川等<sup>[5]</sup>将分形理论引入河湾形态的研究，对天然河流的弯曲性和不规则形进行了较好的几何分形分析；张斌等<sup>[6]</sup>根据 Google Earth 的卫星图像信息对嘉陵江河湾的形态特征进行了系统分析并给出影响嘉陵江河湾发育的主要因素；Nicoll等<sup>[7]</sup>分析了加拿大草原上 23 处河湾的平面形态和河道蠕动速率；李志威等<sup>[8-9]</sup>基于 Google Earth 的遥感卫星图像对国内一些河流河湾的几何形态进行了统计分析，并研究了黄河源区典型弯曲河流的几何形态特征；付中敏<sup>[10]</sup>采用试验和计算的方法研究了长江上游叙渝段弯曲干流型汇合口的水沙运动。但对于长江上游弯曲河道平面形态及碍航特征，目前缺少系统深入的研究。本文选取长江上游叙渝段 25 个主要弯曲河道，根据 Google Earth 遥感卫星图判别提取河道地理特征信息，利用 1999 年 12 月实测的 1:15 000 河道地形图进行几何精准测量，采用 ArcGIS9.3 和 AutoCAD 等数据处理平台软件系统读取所需要的数据，对所选取的弯道平面几何形态参数和河道特征进行统计分析，探讨弯道平面形态的内在规律和碍航特点。

## 1 河道基本形态

长江上游叙渝段自西向东流经四川盆地的东南边缘，江津以上两岸为低山丘陵，山势平缓，无高山峡谷，多呈单面山及方山地貌；经江津后，

山势起伏增大，并有小型峡谷。河道两岸常有岩嘴、石梁和乱石堆伸入江中，造成岸线极不规则，特别是枯水河岸线更是异常曲折复杂。与同流量下的平原河流相比，河道狭窄，洪水期河宽 500 ~ 1 000 m，枯水期河宽约 400 m<sup>[11]</sup>。由于沿途地形、地质构造及岩性的差异，峡谷河段和宽谷河段往往相间出现，河道突宽、突窄，卡口、窄槽、汉浩较多，同一个河段内扩宽与收缩并存，常呈“藕节状”、“大肚子”等特征。河床基本上由砂卵石组成，间有部分基岩，比较稳定，江心洲、边滩等地貌发育。虽然河床多由卵石或基岩组成，抗冲性较强，但在地壳构造运动和水流侵蚀及水沙动力作用的影响下，河道弯曲特征明显，形成了一些典型的弯曲河道。图 1 为茜草坝弯道和太安场弯道的平面形态，显示了上述主要形态特征。

## 2 基本参数

天然弯曲河道是指从弯道进口位置算起，沿水流方向经过弯顶，直至出口位置的整个弯曲的流路（图 2）。表征河湾平面形态特征的主要参数有：进口宽度  $B_j$ 、弯顶宽度  $B_d$ 、出口宽度  $B_c$ 、平均河宽  $B_p$ 、曲颈河宽  $B_m$ 、中心线曲线长度  $L$ 、弯道中心角  $\alpha$  和弯道中心半径  $R$  等<sup>[12]</sup>。其中，曲颈河宽为弯道进口和出口河道中心点连线的长度；弯道中心角为弯道进出口断面之间的夹角。由于山区天然弯曲河流的平面形态大多是不规则的，弯曲半径沿程变化，实际测量确定某一弯道的弯曲半径很困难，故这里选取弯顶处的中心半径  $R_d$  作为弯曲半径参数。由于山区河流两岸相对稳定，河湾发育比较成熟，河湾平面形态也相对稳定。因此，实际统计的弯道基本处于相同的发育阶段。选取长江上游叙渝段 25 个典型弯道，进行上述参数的测量统计，结果如表 1 所示。

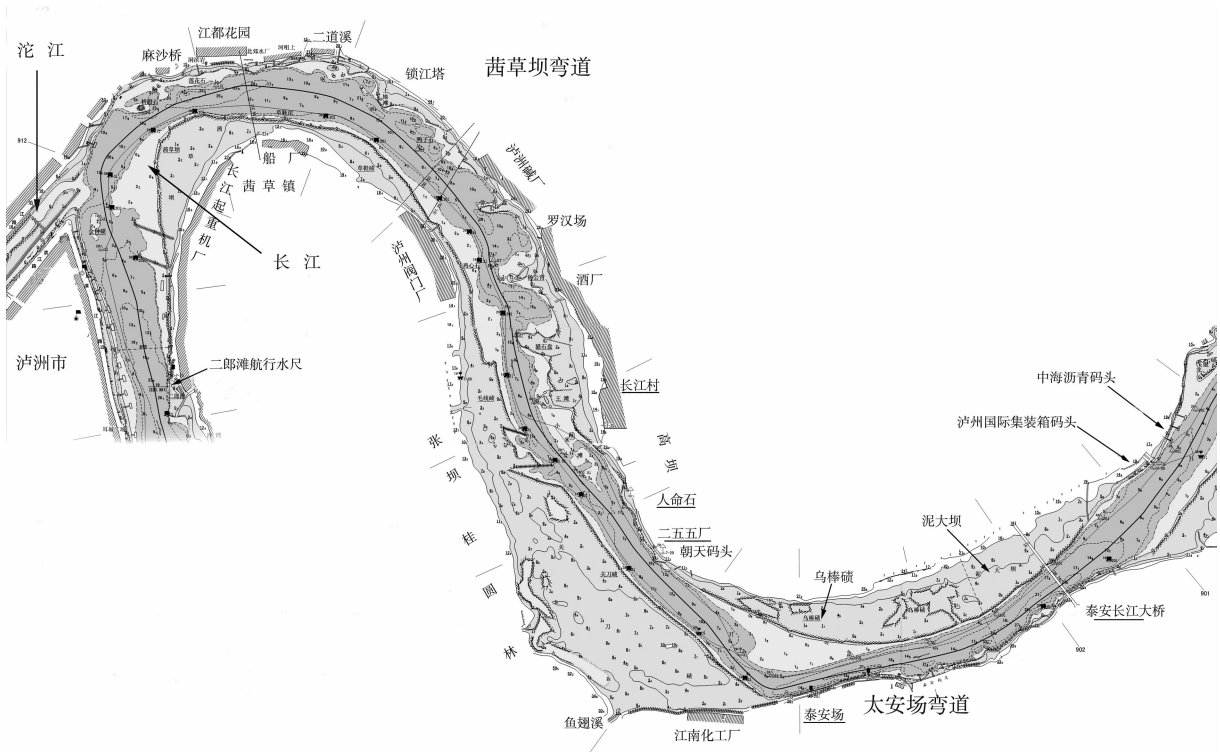


图 1 茜草坝弯道和太安场弯道的平面形态

表 1 弯道几何形态参数

弯道名称	$B_j/m$	$B_d/m$	$B_c/m$	$B_p/m$	$B_m/m$	$L/m$	$\alpha/(^\circ)$	$R_d/m$
白沙湾	390	550	420	455	1 230	1 480	70	1 095
红燕碛	450	675	525	540	1 675	2 020	75	2 100
瞌睡坝	600	870	450	672	3 150	3 500	70	2 550
龙船碛	645	1 050	675	759	2 025	2 350	80	1 545
黄岩子	800	825	825	726	1 830	3 300	125	1 050
赵坝	645	810	600	693	2 850	3 000	60	2 880
黄家碛	525	810	570	639	2 550	3 100	90	1 905
茜草坝	600	975	810	790	2 075	3 100	120	1 350
太安场	1 050	1 410	825	1 011	3 150	3 630	80	2 925
神背嘴	750	850	1 950	1 183	2 100	3 200	125	1 215
双线子	600	855	750	729	2 250	2 600	75	1 650
界石盘	750	1 005	675	846	3 055	3 750	100	2 325
王背碛	810	825	720	780	2 400	2 750	85	1 755
东溪口	1 095	1 545	660	1 132	3 600	4 300	65	2 505
羊猫碛	975	990	615	840	2 025	2 600	110	1 290
罗弯子	615	900	450	678	2 460	2 950	105	1 830
关刀碛	870	1 095	720	927	3 925	4 800	90	2 850
葫芦碛	705	1 005	660	804	3 300	4 000	65	3 450
红珠碛	555	915	525	708	3 000	3 600	80	2 475
龙门滩	720	1 350	600	1 184	3 200	4 600	115	2 400
干坝子	630	975	645	702	2 230	2 550	65	1 875
苦竹碛	750	750	915	805	3 375	4 000	115	2 100
鱼洞溪	825	900	725	865	2 300	3 800	130	1 800
倒钩碛	615	1 100	690	841	2 775	3 500	100	1 950
粗炳碛	900	1 050	900	950	2 825	3 850	105	2 475

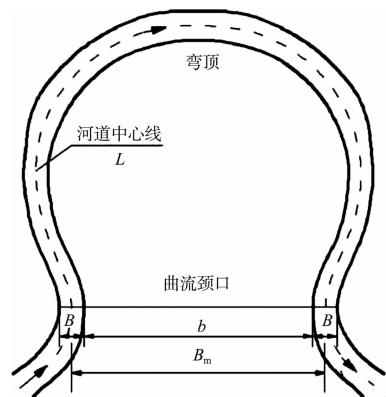


图 2 弯曲河道平面形态

### 3 弯道平面形态特征

#### 3.1 弯道扩宽率和收缩率

山区河流常呈宽窄相间的形态, 弯曲河道也具有这一特点, 一般从弯道进口到弯顶扩宽, 从弯顶到弯道出口则出现收缩, 如图 1 中的茜草坝弯道和太安场弯道。这里, 定义弯道的扩宽率  $K$  为弯顶宽度与进口宽度的比值, 即:  $K = B_d/B_j$ ; 收缩率  $S$  为出口宽度与弯顶宽度的比值, 即:  $S = B_c/B_d$ 。根据表 1 中的数据进行计算, 得到各个弯道的扩宽率和收缩率 (表 2)。

表2 弯道几何形态参数计算及弯曲特点

弯道名称	$K = B_d / B_j$	$S = B_c / B_d$	$C = B_m / B_p$	$Z = R_d / B_p$	$M = L / B_m$	弯曲平面形态特点
白沙湾	1.41	0.76	2.70	2.41	1.20	中等弯曲,两头窄、中间较宽
红燕碛	1.50	0.78	3.10	3.89	1.21	中等弯曲,两头窄、中间较宽
瞌睡坝	1.45	0.52	4.69	3.79	1.11	微型弯曲,两头窄、中间较宽
龙船碛	1.63	0.64	2.67	2.04	1.16	微型弯曲,两头窄、中间特宽
黄岩子	1.02	1.00	2.52	1.45	1.38	中等弯曲,河宽沿程比较均匀
赵坝	1.26	0.74	4.11	4.16	1.05	微型弯曲,两头窄、中间较宽
黄家碛	1.54	0.70	3.99	2.98	1.21	中等弯曲,两头窄、中间特宽
茜草坝	1.63	0.83	2.63	1.71	1.49	急剧弯曲,两头窄、中间特宽
太安场	1.34	0.59	3.12	2.89	1.15	微型弯曲,两头窄、中间较宽
神背嘴	1.13	2.29	1.77	1.03	1.52	急剧弯曲,上段窄、下段特宽
双线子	1.43	0.88	3.09	2.26	1.16	微型弯曲,两头窄、中间较宽
界石盘	1.34	0.67	3.58	2.75	1.23	中等弯曲,两头窄、中间较宽
王背碛	1.00	0.89	3.07	2.25	1.15	微型弯曲,上段宽、下段稍窄
东溪口	1.41	0.43	3.18	2.21	1.19	微型弯曲,两头窄、中间较宽
羊猫碛	1.01	0.62	2.41	1.54	1.28	中等弯曲,上段较宽、下段窄
罗弯子	1.46	0.50	3.63	2.70	1.20	中等弯曲,两头窄、中间特宽
关刀碛	1.26	0.66	4.23	3.07	1.22	中等弯曲,两头窄、中间较宽
葫芦碛	1.43	0.66	4.10	4.29	1.21	中等弯曲,两头窄、中间特宽
红珠碛	1.65	0.57	4.24	3.50	1.20	中等弯曲,两头窄、中间特宽
龙门滩	1.88	0.44	2.70	2.03	1.44	急剧弯曲,两头窄、中间特宽
干坝子	1.55	0.66	3.18	2.67	1.14	微型弯曲,两头窄、中间特宽
苦竹碛	1.00	1.22	4.19	2.61	1.19	微型弯曲,上段窄、下段较宽
鱼洞溪	1.09	0.81	2.66	2.08	1.65	急剧弯曲,上段较下段稍微宽
倒钩碛	1.41	0.79	3.30	2.32	1.26	中等弯曲,两头窄、中间较宽
粗炳碛	1.17	0.86	2.97	2.61	1.36	中等弯曲,两头窄、中间稍宽

从表2可知:

1) 在25个弯道中有23个(占92%)从进口到弯顶呈不同程度的扩宽现象,  $K$  值在1~2之间, 平均为1.36。其中,  $K \geq 1.5$  的弯道有7个, 占28%, 表示弯道上段扩宽特别明显;  $1.2 < K < 1.5$  的弯道有11个, 占44%, 属扩宽较明显;  $1.0 < K \leq 1.2$  的弯道有5个, 占20%, 属扩宽不明显。最大的是龙门滩弯道,  $K = 1.88$ ; 最小的是王背碛弯道和苦竹碛弯道,  $K = 1.0$ , 未出现扩宽现象。

2) 在25个弯道中有22个(占88%)从弯顶到出口呈不同程度的收缩现象。只有黄岩子、神背嘴和苦竹碛3个弯道的  $S$  值大于1, 即这些弯道的下段不存在明显收缩, 尤其是神背嘴弯顶以下扩宽特别严重。其余22个弯道的平均收缩率为0.68, 收缩比较明显, 其中瞌睡坝、东溪口、罗弯子、龙门滩等弯道的  $S$  值在0.5左右, 收缩特别明显。

### 3.2 曲颈宽度与平均河宽的关系

曲颈宽度  $B_m$  与平均河宽  $B_p$  之比可表示河湾向自然裁弯发育的程度, 用  $C$  表示。该比值越小, 表示河湾趋向裁弯的可能性就越大。虽然山区河流裁弯的可能性极小, 但是根据曲颈宽度与平均河宽的比值, 可了解弯道的弯曲程度, 用于指导水利水运工程的规划设计。由表2中  $C = B_m / B_p$  的大小可知,  $C$  值在1.5~5之间变化, 平均大小为3.27。其中, 神背嘴、黄岩子、茜草坝、羊猫碛、龙门滩、鱼洞溪等弯道的  $C$  值比较小, 特别是神背嘴弯道的  $C$  值最小, 为1.77, 河道急剧弯曲, 表现为“回头弯”的形态特征。

### 3.3 弯顶中心半径与平均河宽的关系

山区河流在地壳构造运动和长期的水流侵蚀作用的影响下, 在弯曲段仍存在凹岸冲刷、凸岸淤积且向横向展宽凹陷的河流演变特点, 相比冲

积性弯曲河流,这一演变过程可能时间会更长。本文用弯顶中心半径 $R_d$ 与平均河宽 $B_p$ 之比表示河湾向横向展宽凹陷的程度,用 $Z$ 表示。该比值越小,说明河湾向横向发展且凹陷的程度越明显。根据表2中 $Z=R_d/B_p$ 的计算结果可知, $Z$ 值在1~4.5之间变化,即: $R_d=(1\sim 4.5)B_p$ ,平均 $Z$ 值为2.61。其中,龙船碛、黄岩子、茜草坝、神背嘴、羊猫碛、龙门滩等弯道的 $Z$ 比较小,横向展宽凹陷非常明显。

### 3.4 弯曲度(曲折系数)

河流的弯曲度(曲折系数)是标志弯道形态特征的重要指标,从宏观上反映河道平面弯曲的程度和河湾横向变形的大小,从微观上间接反映水流三维结构、泥沙输移和河床演变的复杂程度。曲折系数 $M$ ,常用弯道进出口两端点间沿河道中心线轴线长度 $L$ 与进出口两端中心点直线距离 $B_m$ 之比表示,即: $M=L/B_m$ 。根据河床演变学中对河型的一般分类方法,这里取曲折系数 $M<1.2$ 时为微弯型河道, $1.2\leq M\leq 1.4$ 为中等弯曲型河道, $M>1.4$ 为急弯型河道。一般河流的弯曲度沿程变化幅度很大,当河湾接近裁弯取值时,弯曲度将趋近于无穷大;而当河道为顺直时,弯曲度接近于1。根据表2中的计算结果可知,25个弯曲河道的平均弯曲度为1.25,大部分(64%)河湾的弯曲度 $>1.2$ ,属于中等以上的弯曲型河道。其中,茜草坝、神背嘴、龙门滩、鱼洞溪等弯道的 $M$ 值 $>1.4$ ,为急剧弯曲型河道。

### 3.5 弯道中心角

弯道中心角是反映河湾弯曲程度的又一重要指标,决定着河湾经历微弯、急弯直至裁弯的横向变形演变形态:弯道中心角越大,表示河道弯曲程度越明显。虽然山区河流由于河岸边界比较稳定,不易冲刷改变弯顶的发育方向,但是其弯曲程度对行洪和航运安全等至关重要。表1中,25个弯道的中心角 $\alpha$ 的变化范围为 $60^\circ\sim 130^\circ$ 。其中,黄岩子、茜草坝、神背嘴、界石盘、羊猫碛、罗弯子、龙门滩、苦竹碛、鱼洞溪、倒钩碛和粗炳碛等11个弯道的中心角 $>90^\circ$ ,属弯曲线

度特别明显的河道。

## 4 碍航特点

### 4.1 形成机理

形成长江上游叙渝段弯曲平面形态特征的主要原因是地壳构造运动和水流与河床、河岸长期相互作用的结果。长江上游叙渝段自上而下流经四川盆地边缘的丘陵地区,从原始雏形,历经漫长地质年代的演变,形成了现今的河道形态和地质地貌特征。

从地质结构上看,叙渝段处在华夏系第三沉降带,地壳较稳定,断裂少,规模小。主要岩石为侏罗系红色砂岩、泥岩和页岩,在背斜核部为三叠系灰岩。河床覆盖层薄,一般在10 m左右,主要由沙卵石推移质组成,推移质强度大、粒径粗、输移时间长。统计分析叙渝段铜鼓滩、金钟碛、朱沱、小南海等河段河床泥沙组成,河床质平均粒径在8 cm左右。河谷阶地的组成物质,上层多为黏性土,下部为砂砾石。两岸基本由岩石组成,岩石裸露,质地坚硬。从河流地貌上看,叙渝段两岸山势平缓,河谷阶地较为发育,河槽内多边滩和江心洲滩,且大都为卵石碛坝。

与地质地貌相联系,一般情况下当水流流向斜层时形成宽谷,穿过背斜层时形成峡谷。虽然叙渝段不同河段的河道形态有所差异,但总体上宽谷较多。在宽谷河段,由于有岸边石梁、石嘴或河心石梁、碛坝的存在,枯、中、洪水期的主流流向不一,往往导致枯水主槽过分弯曲,乃至急剧缩窄,形成局部急流或乱水。在峡谷河段,由于两岸岸壁陡峻,汛期断面面积的增加率大大小于流量的增加率,常常导致洪水期峡内水流混乱。在水流的长期作用下,长江上游叙渝段河道形成了目前的迂回曲折、宽窄相间的总平面形态特征,大部分弯曲河段则呈两头窄、中间宽的“大肚子”形态,个别弯曲河段为出口收缩的卡口形态或出口扩宽的放宽形态。

### 4.2 碍航特点

受弯道环流的作用和河道突然放宽或收缩的

影响,推移质泥沙在弯道的凸岸和宽谷段形成大量淤积,因而卵石边滩和心滩颇为发育,浅滩分布较多、急滩分布较少,造成中枯水期航道尺度不足、滩段比降陡、流速急,汛期峡谷段比降陡、流态乱,急弯段横流强、弯曲半径小、船舶航行通视差等严重影响通航的现象。

叙渝段碍航的浅滩有40处、急滩有6处。统计的25个弯道中的碍航滩险基本上属于弯道浅滩或过渡段浅滩,如比较著名的位于龙船碛弯道的铜鼓滩浅滩、黄岩子弯道的风簸碛浅滩、茜草坝弯道的金钟碛浅滩、太安场弯道的小米滩浅险滩、神背嘴弯道的神背嘴浅险滩、东溪口弯道的东溪口浅滩和斗笠子急滩、龙门滩弯道的甄炳碛浅滩和粗炳碛弯道的砖灶子浅险滩等。

根据各个滩险的碍航特征,可采取相应的航道整治措施。一般弯道浅滩是由于弯道环流所造成的,可通过布置整治建筑物、挖槽和疏浚来调整弯道的流速、流向,扩大航道尺度,改善通航水流条件;弯道过渡段浅滩主要源于河道展宽,水流扩散,流速缓慢,弯道环流消失,汛期挟沙力减弱,卵石推移质在滩段淤积,汛后冲刷不及,以致出浅碍航,可通过筑坝束水攻沙,以促进浅区冲刷,达到满足通航水流条件的目的。

## 5 结语

1) 长江上游河道在地壳构造运动和水流侵蚀及水沙动力作用的影响下,弯曲特征明显。统计的25个弯道中绝大部分上段扩宽和下段收缩较明显,平均扩宽率为1.36、平均收缩率为0.68,呈两头窄、中间宽的形态特征。

2) 曲颈宽度与平均河宽的比值 $C$ 在1.5~5之间变化,平均大小为3.27。其中,神背嘴、黄岩子、茜草坝、羊猫碛、龙门滩、鱼洞溪等弯道的 $C$ 值比较小,表现为“回头弯”的形态特征。

3) 弯顶中心半径与平均河宽的比值 $Z$ 在1~4.5之间变化,平均大小为2.61。其中,龙船碛、黄岩子、茜草坝、神背嘴、羊猫碛、龙门滩等弯道的 $Z$ 值比较小,横向展宽凹陷非常明显。

4) 从整体来看,长江上游弯道的平均弯曲度为1.25,大部分河湾的弯曲度 $>1.2$ ,属于典型的弯曲型河道。其中,茜草坝、神背嘴、龙门滩、鱼洞溪等弯道的 $M$ 值 $>1.4$ ,为典型的急剧弯曲型河道。

5) 统计的25个弯道的中心角的变化范围为 $60^\circ \sim 130^\circ$ 。其中,黄岩子、茜草坝、神背嘴、界石盘、羊猫碛、罗弯子、龙门滩、苦竹碛、鱼洞溪、倒钩碛和粗炳碛等弯道的中心角 $>90^\circ$ ,弯曲程度特别明显。

6) 地壳构造运动和水流与河床、河岸的长期相互作用是形成长江上游叙渝段弯曲平面形态特征的主要原因。统计的弯道中的碍航滩险基本上属于弯道浅滩或过渡段浅滩。

## 参考文献:

- [1] 倪晋仁,马蔼乃. 河流动力地貌学[M]. 北京: 北京大学出版社, 1998: 276-281.
- [2] 王平义. 弯曲河道动力学[M]. 成都: 成都科技大学出版社, 1995: 1-11.
- [3] 万强,江恩惠,张林忠. 河湾平面形态及河湾流路方程研究综述[J]. 人民黄河, 2009, 31(12): 43-44.
- [4] Perucca E, Camporeale C, Ridolfi L. Nonlinear analysis of the geometry of meandering rivers [J]. Geophysical Research Letters, 2005, 32(3): 30-42.
- [5] 白玉川,黄涛,许栋. 蜿蜒河流平面形态的几何分形及统计分析[J]. 天津大学学报, 2008, 41(9): 1 052-1 056.
- [6] 张斌,艾南山,黄正文,等. 中国嘉陵江河曲的形态与成因[J]. 科学通报, 2007, 52(22): 2 671-2 682.
- [7] Nicoll T J, Hickin E J. Planform geometry and channel migration of confined meandering rivers on the Canadian prairies[J]. Geomorphology, 2010, 116: 37-47.
- [8] 李志威,秦小华,方春明. 天然河湾几何形态统计分析[J]. 水科学进展, 2011, 22(5): 44-50.
- [9] 李志威,王兆印,李艳富,等. 黄河源区典型弯曲河流的几何形态特征[J]. 泥沙研究, 2012(4): 11-16.
- [10] 付中敏. 山区河流弯曲干流型汇口水沙运动试验及数值模拟研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2012.
- [11] 长江航道局. 川江航道整治[M]. 北京: 人民交通出版社, 1998: 70-82.
- [12] 钱宁,张仁,周志德. 河床演变学[M]. 北京: 科学出版社, 1987: 156-160. (本文编辑 郭雪珍)