

荆江河段水沙条件与主流线特征关系研究

刘亚¹, 李义天², 孙昭华², 陈飞³

(1. 长江科学院, 湖北 武汉 430010; 2. 武汉大学 水资源与水电工程科学国家重点实验室, 湖北 武汉 430072; 3. 长江航道规划设计研究院, 湖北 武汉 430011)

摘要: 荆江河段的主流变化主要表现为弯曲分汊段的主支汊交替及单一弯道段深泓半径的变化, 综合考虑两者关系, 提出了能描述荆江分汊段及单一弯道段主流线特点的无量纲常数——弯曲特征数 r , 并针对同一河段分析了汛期平均流量、洪峰变差系数、年输沙量及输沙指数等水沙条件变化与主流线变化的对应关系。结果表明: 汛期平均流量较小、水流相对饱和度低、来水来沙过程较为均匀使得滩槽高差较小, 横断面向宽浅发展, 从而减弱河道对水流的约束, 弯曲特征数较小, 主流顺直; 反之主流向弯曲发展。

关键词: 河床演变; 水沙条件; 水流动力轴线; 荆江河段

中图分类号: TV147

文献标志码: A

文章编号: 1009-640X(2011)02-0077-07

河道主流线是天然河道水流运动的一个重要特征, 与河床演变密切相关, 是决定河势、河型变化的重要因素。对于冲积平原来说, 主流顶冲部位往往出现严重坍岸, 涉及堤防安全, 应特别重视。长江荆江河段洲滩发育, 主流摆动频繁, 航槽位置多变。关于荆江河段的演变研究数量众多, 但多是河道演变现象的描述^[1-3], 且局限于一些重点碍航水道^[4-5], 局部河段的主流线变化作为河道演变现象之一穿插于岸线、洲滩演变中也做了相关说明, 缺乏对整个河段主流变化特点的系统研究。张植堂^[6]、张笃敬^[7]等着眼于单个弯道, 在河床形态差异较小的基础上, 结合荆江河弯实测资料揭示了弯道水流动力轴线“高水取直, 低水坐弯”的年内变化规律, 并各自采用不同的变量给出了相关半经验半理论公式, 但由于表达式基于的河弯实测数据有限, 其适用性受到一定限制。段光磊^[8]、蔡大富^[9]等分别从典型洲滩演变及河弯平面形态方面讨论了荆江河段的演变规律, 认为局部河段的主流线变化主要受制于本河段河床形态、水流动量、上下游河势及人类活动等因素, 而长河段的主流线整体变化, 宏观上看更趋向于河势、河型的变化特点。

多数研究^[10-11]认为广阔深厚的二元结构边界条件、较小的流量变幅及作用时间较长的造床流量、纵向冲淤基本平衡、汛期比降小于枯期等条件是下荆江蜿蜒河型产生与维持的重要因素, 但关于荆江在发展演变过程中河型的调整及其影响因素研究甚少。本文以枯水期河道主流线的变化说明近 50 年来荆江河型的调整趋势, 将其归结为坐弯与取直两大类, 以平滩面积和宽深比表征的断面形态阐述引发主流弯曲程度变化的直接原因, 通过统计相应时段内一些水沙条件特征值的变化, 结合河道演变的平衡趋向性原理分析说明水沙条件与主流曲直变化的内在联系。

1 荆江河段主流变化

荆江河段(图 1)是发育于江汉平原与洞庭湖平原的冲积性河道, 上起枝城, 下至城陵矶, 长约 347 km, 距三峡水利枢纽约 100 km, 以藕池口为界分为上、下荆江。上荆江以微弯分汊段为主, 整体河势稳定少变。下荆江以单一弯道段为主, 主流顺着各弯道凹岸蜿蜒而行, 河势调整较为频繁, 近 50 年发生大的河势变化有

收稿日期: 2010-07-03

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50609018)

作者简介: 刘亚(1987-), 女, 重庆人, 硕士, 主要从事水力学及河流动力学方面的研究。

E-mail: lueyar@163.com

1966—1972年的中洲子、上车湾人工裁弯和沙滩子自然裁弯工程,以及1994年石首河弯的撇滩。由于冲积河流上下游演变之间联系紧密,往往具有“一弯变、弯弯变”的特点。下荆江的裁弯工程主要通过改变长河段比降使得水流动量增加,改变了河段内的水沙条件,从而引起上下游河段主流线的调整变化。

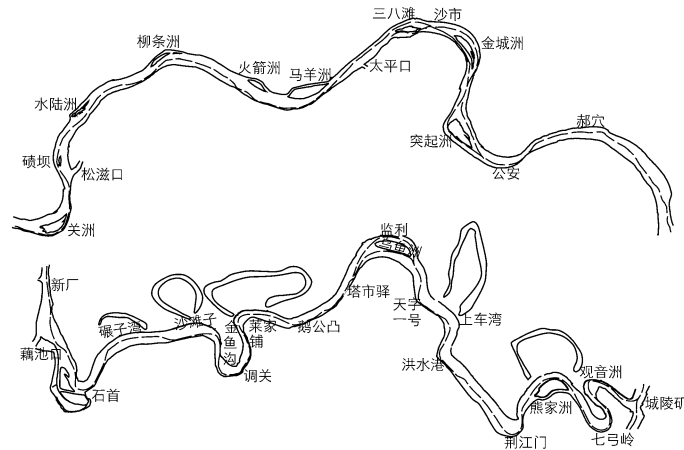


图1 荆江河段主流线

Fig. 1 Main streamline of Jingjiang reach

1.1 弯曲分汉段

按主流变化特点可将荆江弯曲分汉段分为主流位置较稳定和不稳定的汉道。主流位置不稳定的汉道,其主流随不同水文系列年在左右汉间摆动,或在主汉内大幅度的坐弯取直(如三八滩、金城洲、突起洲、乌龟洲),本文研究重点为后者。统计了不同时间段各河道深泓弯曲系数 k ($k = L/H$, H 为分汉段分、汇流点的直线距离; L 为分、汇流点深泓线长度),具体数值见表1。

表1 弯曲分汉段深泓弯曲系数

Tab. 1 Sinuosity coefficient of thalweg in bifurcated reaches

三八滩		金城洲		突起洲		乌龟洲	
年份	弯曲系数	年份	弯曲系数	年份	弯曲系数	年份	弯曲系数
1963	1.152	1965	1.425	1970	1.083	1962	1.878
1985	1.268	1970	1.25	1980	1.292	1973	1.253
1993	1.089	1980	1.475	1987	1.146	1980	1.796
1995	1.107	1987	1.15	1993	1.063	1985	1.932
1997	1.393	1994	1.134	2000	1.313	1996	1.212
均值	1.202	均值	1.287	均值	1.179	均值	1.614

由表1可见,荆江各汉道段弯曲系数有大有小,下荆江乌龟洲汉道段弯曲系数较大,且变化幅度也大。由于各汉道段实测资料年限不一致,为了避免各汉道弯曲系数绝对值大小而引起的权重误差,本文计算了各分汉段深泓弯曲系数的相对变化率,并计算其5年平均值。计算结果表明,20世纪70年代初期及90年代中期平均弯曲系数达最小值,主流顺直;60年代及80年代中期达最大值,主流坐弯。

1.2 单一弯道段

单一弯道段主流变化表现为深泓弯曲半径的增大或减小,根据段文忠^[3]等统计的下荆江15个河弯特征值,并结合实测资料统计出荆江17个河弯的平均深泓半径见表2。可见,自20世纪60年代中期开始,深泓半径增大,70年代初期达到极大值,而后逐渐下降,80年代中期达到极小值,而后开始上升,90年代中期,深泓弯曲半径增加约700 m,即在70年代初、90年代中期弯道深泓半径较大,主流较为顺直,而80年代中期深泓弯曲半径较小,主流弯曲。

表 2 单一弯道段深泓半径
Tab.2 Radius of thalweg in bifurcated reaches

河 弯	年 份					
	1966	1970	1975	1980	1987	1994 ^[12]
公安 ^[12]	2 800	2 920	2 852	2 875	2 950	2 882
郝穴 ^[12]	7 500	7 956	7 800	7 230	7 540	8 200
石首弯道	1 950	2 400	1 600	700	640	2 850
碾子湾	3 050	9 750	10 800	5 925	5 910	7 800
沙滩子	3 300	3 400	-	-	-	-
金鱼沟	-	-	1 270	1 740	2 550	2 640
调关	3 500	3 625	3 525	3 630	3 000	3 640
莱家铺	-	2 500	2 620	2 500	2 525	2 630
鹅公凸	8 500	9 500	2 650	2 600	3 400	5 200
塔市驿	7 800	7 950	4 750	1 625	4 550	7 750
天字一号	1 800	1 380	3 270	4 650	3 350	4 000
上车湾	1 000	1 075	-	-	-	-
洪水港	4 800	2 500	2 650	2 929	3 300	3 500
荆江门	1 500	2 050	2 125	1 500	2 725	2 800
七弓岭	1 200	1 520	1 250	1 430	1 700	1 650
熊家洲	5 400	3 675	4 000	2 450	4 275	-
观音洲	1 200	1 500	2 675	1 800	1 650	1 400
均值	3 631	3 923	3 661	2 943	3 398	4 116

弯曲系数与深泓半径同为衡量主流曲直程度的特征值,主流越弯曲,弯曲系数越大,深泓半径越小.但因两者数量级及量纲不一致,不便于统一比较分析.因此,本文定义了相对弯曲特征常数 r ,统一描述弯曲分汉段与单一弯道段主流曲直变化特点.

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (k_i - \bar{k})/\bar{k} + \sum_{j=1}^m \left(\frac{1}{R_j} - \frac{1}{R}\right) / \frac{1}{R}}{n_1 + n_2} \quad (1)$$

式中: k_i 为弯曲分汉段的弯曲系数; R_j 为单一弯道段深泓弯曲半径(km); n_1, n_2 分别为统计弯曲分汉及单一弯道的河段数. $r < 0$ 表示某一时段主流弯曲程度小于统计时段的平均值,据此认为主流取直; $r > 0$ 表示某一时段主流弯曲程度大于统计时段的平均值,据此认为主流坐弯, r 越大,主流越弯曲.

计算近 50 年荆江河段的弯曲特征数见图 2. 可见,60 年代后期以前,70 年代末期至 80 年代后期,弯曲特征数大于 0,主流坐弯;其他时间小于 0,主流取直.

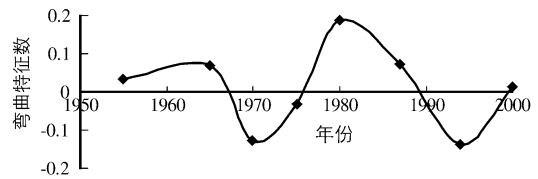


图 2 荆江河段主流弯曲特征数变化
Fig.2 Sinuosity eigenvalue of mainstream in Jingjiang reach

2 水沙条件与主流特征的对应关系

水沙条件是塑造河床的直接动力和物质条件,因而也是影响河道演变最活跃的因素.鉴于天然水文过程存在随机波动,本文采用移动平均的方法,使序列高频振荡(水沙特别年份)对水沙变化趋势的影响得以弱化.同时河床的调整通常要滞后于水流条件的变化,已有研究成果^[13]表明,在移动平均年数为 4~5 a 时,水沙条件与河床形态相关系数达到最大值,因此本文以 5 a 移动平均值变化分析水沙条件的变化趋势.

2.1 流量与主流弯曲特征对应关系

统计了荆江河段典型水文站年内流量离势系数 C_v 、汛期平均流量及其洪峰变系数的移动平均趋势

线,且对比于前文所述弯曲特征数 r 的变化,以此初步说明近 50 年来流量的变化与主流弯曲特征变化的关系(见图 3~5).

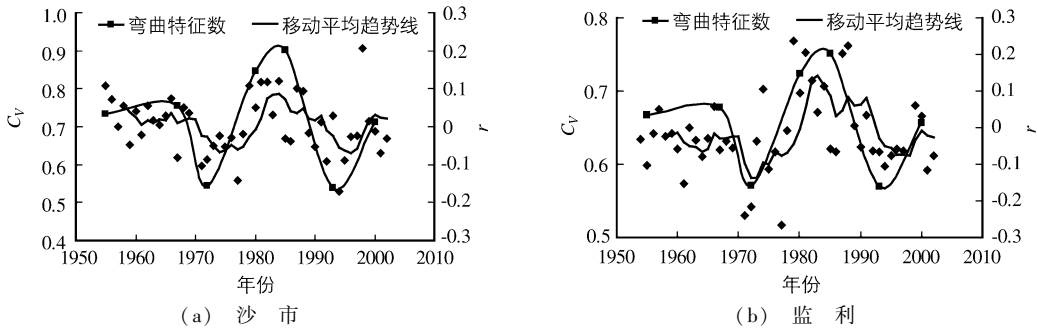


图 3 典型站流量离势系数与弯曲特征数

Fig. 3 Correlation between sinuosity eigenvalue and coefficient of dispersion of discharge

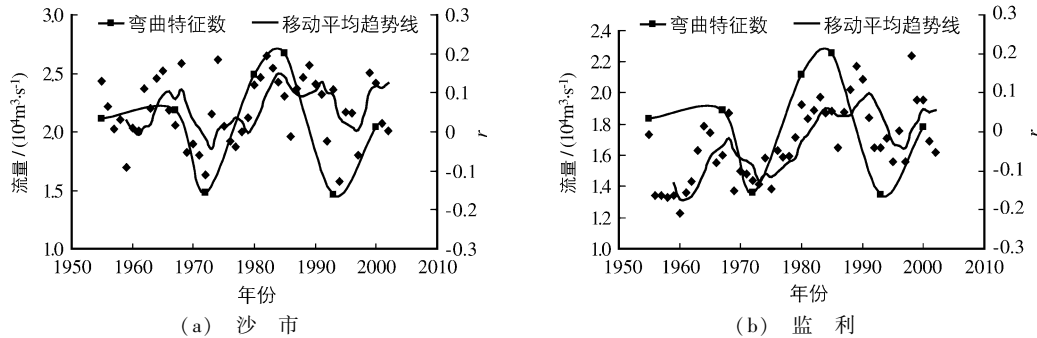


图 4 典型站汛期平均流量

Fig. 4 Correlation between sinuosity eigenvalue and averaged flood discharge

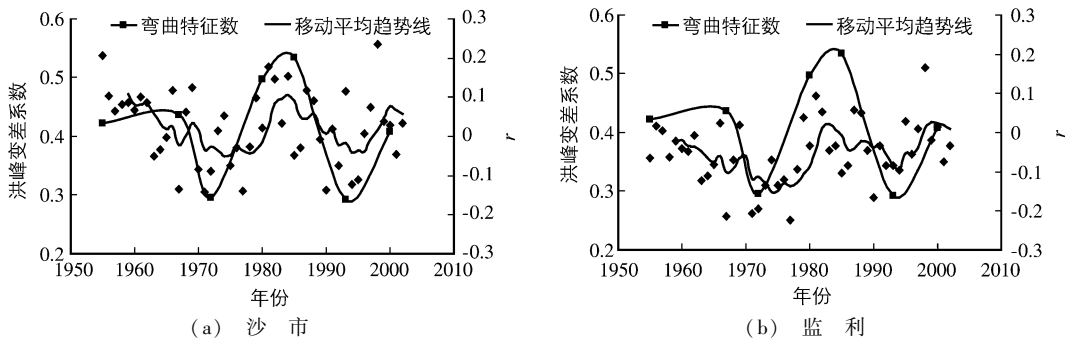


图 5 典型站洪峰变差系数

Fig. 5 Correlation between sinuosity eigenvalue and coefficient of dispersion of flood flow

总体看来,沙市和监利站的年内流量离势系数、汛期平均流量与洪峰变差系数变化趋势较一致,自 20 世纪 60 年代开始下降,于 70 年代初期达到极小值,而后呈上升趋势,80 年代中期达到极大值,随后下降并于 90 年代中期达到第 2 个极小值.同时,各特征值变化与主流弯曲特征数变化呈良好的对应关系,主流取直时段,年内流量离势系数、汛期平均流量及洪峰变差系数减小,流量年内分配较为均匀;主流坐弯时段,年内流量离势系数、汛期平均流量及洪峰变差系数增大,流量年内分配较为集中,洪峰尖瘦,洪水陡涨陡落特征明显.

2.2 含沙量与主流弯曲特征对应关系

泥沙是塑造河床的主要因素之一,输沙量反映了河段进出口泥沙的变化,从荆江河段典型水文站年输沙

量的变化(图6)来看,自1950年以来,沙市、监利站均呈现升-降-升-降的过程,出现2个极大、极小值,且与主流位置变化一致,70年代初及90年代中期输沙量达到极小值,主流取直,60年代中期及80年代中期输沙量达到极大值,主流坐弯。

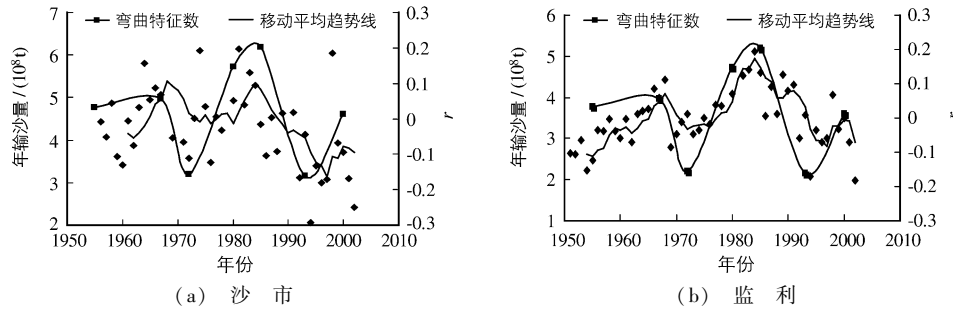


图6 典型站年输沙量变化

Fig.6 Correlation between sinuosity eigenvalue and sediment runoff

来沙过程对河床塑造作用的影响尤为重要.来沙过程指来沙量的年内分配,本质上是指水沙的搭配关系.由输沙量-流量关系式 $Q_s = kQ^m$ 可得: $\frac{dQ_s}{dQ} = kmQ^{m-1}$, m 为系数.可见,当 Q 一定时, m 越大,则含沙量随流量的增加率越大,水沙搭配所表现出的“大水带大沙、小水带小沙”的特征就越明显,来沙年内分配越不均匀; m 越小,来沙量随流量的增加率越小,来沙年内分配过程较均匀,大、小水含沙量差别相对较小,枯水期含沙量次饱和与洪水期含沙量超饱和程度较低.根据新厂、监利水文站水沙资料,用最小二乘法拟合出日均输沙率与流量的乘幂关系,指数 m 随时间的变化见图7.水沙搭配关系的变化与主流弯曲特征数呈现良好的对应关系,60年代及80年代中期 m 值较大,来沙相对集中,年内大水带大沙、小水带小沙的特征明显,弯曲特征数较大,主流坐弯;70年代初及90年代中期来沙年内分配较为均匀,大小水含沙量差别相对较小,弯曲特征数较小,主流取直.

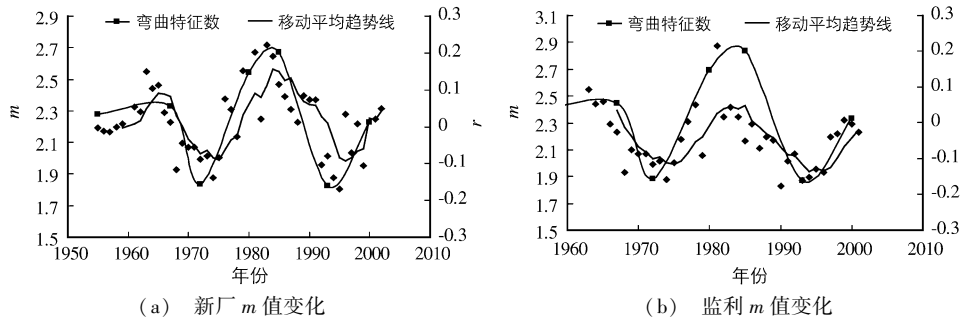


图7 水沙搭配关系变化

Fig.7 Correlation between sinuosity eigenvalue and sediment transport index

2.3 水沙条件影响主流变化机理分析

对于冲积性河道来说,来水来沙条件是影响河床演变最主要的因素,河流通过调整河床边界条件与来水来沙相适应,流量过程的均匀化,尤其是漫滩洪水出现几率的减小,使得凸岸边滩淤积减少,导致河床宽深比增大.年内水沙搭配关系的变化也会影响主流的发展,大水大沙有利于淤滩,小水小沙有利于刷槽,如此易形成较大的滩槽差,有利于岸滩的稳定;反之,大水小沙,岸滩淤积较少,小水时来沙相对饱和,使得河槽的冲刷也较少,综合作用下使得河床宽浅,不利于岸滩的稳定,最终导致主流取直.即水沙过程的趋势性变化是主流变化的根本原因,而断面形态的变化则是直接原因.

通过统计1975—2002年荆江河段大埠街以下河道近70个断面的平滩面积及宽深比,绘其平均值见图8

(上、下荆江计算水位分别在黄海高程 44.3 ~ 41.4 m 及 30 m 以下)。

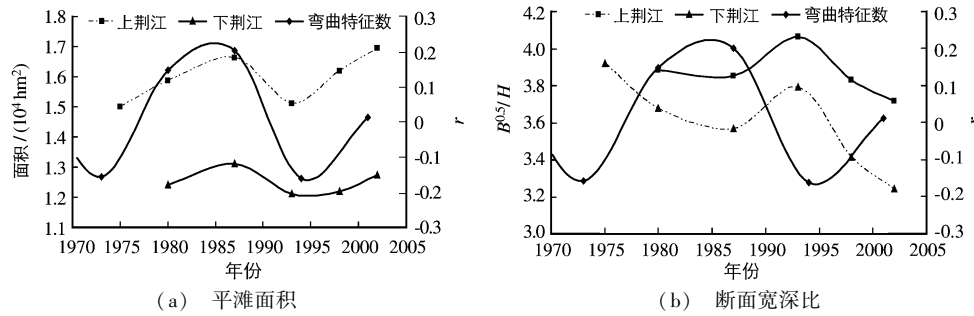


图8 断面形态变化

Fig.8 Correlation between sinuosity eigenvalue and configuration of cross-section

综合河段主流弯曲特征数变化及前述水沙条件来看,三者有着良好的对应关系,70年代中期至80年代中期汛期平均流量及洪峰变差系数较大,来水来沙过程较不均匀,年输沙量较大,大水带大沙、小水带小沙的特征明显,平滩面积增大,宽深比减小,主流坐弯;80年代中后期至90年代中期平均流量及洪峰变差系数较小,来水来沙过程较为均匀,年输沙量较小,平滩面积减小,宽深比增大,主流取直。

3 结 语

在总结已有研究成果的基础上,结合实测资料,提出了统一描述分汉段及单一弯道段主流曲直程度的弯曲特征数 r 。同时采取滑动平均法统计了水库蓄水前天然情况下荆江河段水沙条件的变化,总结出水沙条件的改变与河段主流位置变化呈现很好的对应关系;20世纪60年代及80年代中期,来水来沙较为集中,年输沙量较大,弯曲特征数较大,主流坐弯;70年代初期及90年代中期,来水来沙年内分配较为均匀,年输沙量较小,使得汛淤枯冲的荆江河段滩槽高差降低,宽深比加大,从而河道制约水流作用较弱,主流易于取直。

参 考 文 献:

- [1] 王维国, 阳华芳, 熊法堂, 等. 近期长江荆江河道演变特点[J]. 人民长江, 2003, 34(11): 19-21. (WANG Wei-guo, YANG Hua-fang, XIONG Fa-tang, et al. Fluvial process of Jingjiang[J]. Yangtze River, 2003, 34(11): 19-21. (in Chinese))
- [2] 吴文胜, 何广水. 下荆江河道演变特性研究[J]. 湖南水利水电, 2005(6): 33-36. (WU Wen-sheng, HE Guang-shui. Study on fluvial process of lower Jingjiang[J]. Hunan Hydro & Power, 2005(6): 33-36. (in Chinese))
- [3] 段文忠, 詹义正. 下荆江河势演变分析[J]. 水利电力科技, 1993, 20(1): 12-23. (DUAN Wen-zhong, ZHAN Yi-zheng. Variation of river regime in lower Jingjiang[J]. Water Resources and Electric Power, 1993, 20(1): 12-23. (in Chinese))
- [4] 李旺生, 朱玉德. 长江中游沙市河段河床演变分析及趋势预测[J]. 水道港口, 2006, 27(5): 294-299. (LI Wang-sheng, ZHU Yu-de. Analysis of river bend evolution and prediction of its trend for Shashi section in middle reach of the Yangtze River[J]. Journal of Waterway and Harbour, 2006, 27(5): 294-299. (in Chinese))
- [5] 彭玉明, 高志斌. 长江监利河段近期河道演变分析[J]. 人民长江, 2006, 37(12): 78-81. (PENG Yu-ming, GAO Zhi-bing. Fluvial process of Jianli reach[J]. Yangtze River, 2006, 37(12): 78-81. (in Chinese))
- [6] 张植堂, 林万泉, 沈勇健. 天然河弯水流动力轴线的研究[J]. 长江水利水电科学研究院院报, 1984(1): 47-57. (ZHANG Zhi-tang, LIN Wan-quan, SHEN Yong-jian. An approach on the main current belt of stream flow in river bend[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 1984(1): 47-57. (in Chinese))
- [7] 张笃敬, 孙汉珍. 弯道水力条件的变化对形成上下荆江河型影响的探讨[J]. 泥沙研究, 1983(1): 14-24. (ZHANG Du-jing, SUN Han-zhen. A preliminary study on the effect of the changes of the hydraulic conditions in bends on the river pattern of upper and lower Jingjiang stretches of the Yangtze River[J]. Journal of Sediment Research, 1983(1): 14-24. (in Chinese))

- [8] 段光磊, 彭严波, 肖虎程, 等. 长江荆江河段典型洲滩演变机理初探[J]. 水利水运工程学报, 2008(2): 10-15. (DUAN Guang-lei, PENG Yan-bo, XIAO Hu-cheng, et al. Preliminary probe into evolvement mechanism of typical shoals at Jingjiang of Yangtze River[J]. Hydro-Science and Engineering, 2008(2): 10-15. (in Chinese))
- [9] 蔡大富, 曾庆云, 段文忠. 长江荆江河段河弯平面形态变化规律研究[J]. 水道港口, 2006, 27(2): 84-88. (CAI Da-fu, ZENG Qing-yun, DUAN Wen-zhong. Study on evolution patterns in bend planforms of Jingjiang stretch of the Yangtze River[J]. Journal of Waterway and Harbour, 2006, 27(2): 84-88. (in Chinese))
- [10] 谢鉴衡. 下荆江蜿蜒型河段成因及发展前景初探[C]//谢鉴衡论文选集. 武汉: 武汉水利电力大学出版社, 1995: 100-108. (XIE Jian-heng. Preliminary study on forming condition of lower Jingjiang meandering channels and its evolution[C]// Florilegium of Xie Jianheng. Wuhan: Publishing House of Wuhan University of Hydraulic and Electrical Engineering, 1995: 100-108. (in Chinese))
- [11] 余文畴. 长江中游下荆江蜿蜒型河道成因初步研究[J]. 长江科学院院报, 2006, 23(6): 9-13. (YU Wen-chou. Preliminary study on forming condition of lower Jingjiang meandering channels of middle Yangtze River[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2006, 23(6): 9-13. (in Chinese))
- [12] 长江科学院. 宜昌-城陵矶河段航道整治工程防洪评价报告[R]. 武汉: 长江科学院, 2009. (Changjiang River Scientific Research Institute. Flood protection assessment of Yichang-Chenglingji waterway regulation[R]. Wuhan: Changjiang River Scientific Research Institute, 2009. (in Chinese))
- [13] 吴保生, 夏军强, 张原锋. 黄河下游平滩流量对来水来沙变化的响应[J]. 水利学报, 2007, 38(7): 886-892. (WU Bao-sheng, XIA Jun-qiang, ZHANG Yuan-feng. Response of bankfull discharge to variation of flow discharge and sediment load in lower reaches of Yellow River[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2007, 38(7): 886-892. (in Chinese))

Relationship between flow and sediment regime and changes of main streamline in Jingjiang reach

LIU Ya¹, LI Yi-tian², SUN Zhao-hua², CHEN Fei³

(1. Changjiang River Scientific Research Institute, Wuhan 430010, China; 2. State Key Laboratory of Water Resources and Hydropower Engineering Science, Wuhan University, Wuhan 430072, China; 3. Changjiang Waterway Planning, Design and Research Institute, Wuhan 430011, China)

Abstract: The main streamline of Jingjiang reach changes in the form of alternation of main & tributary branches and radius of thalweg in bends. To describe the characteristics of mainstream line in bifurcated and curved reaches, this paper presents a dimensionless coefficient: sinuosity eigenvalue r . Correlation between r and other eigenvalues (such as dispersion of flood flow, sediment transport index, etc.) obtained by hydrological statistics reveals that less of average flood, uniformity of flow and incoming sediment will lead to less difference of elevation between bottomland and trough, and when the cross-section becomes wide-shallow, it will weaken the capability of water binding and minish the sinuosity eigenvalue, thereby, the main streamline becomes straight, otherwise curved.

Key words: fluvial process; flow and sediment regime; main streamline; Jingjiang reach