

DOI: CNKI: 32. 1309. P. 20110911. 1135. 017

天然河湾几何形态统计分析

李志威^{1,2}, 秦小华³, 方春明²

(1. 清华大学水沙科学与水利水电工程国家重点实验室, 北京 100084; 2. 中国水利水电科学研究院 泥沙研究所, 北京 100048;
3. 中国水电建设集团国际工程有限公司, 北京 100048)

摘要:天然河湾是弯曲河流重要的地貌组成单元, 研究河湾的几何形态和演变规律具有较高的理论价值。运用 Google Earth 卫星图像和 AutoCAD 软件相结合的方法, 选取不同区域的 8 条河流的 136 个山区河湾和 325 个冲积河湾作为统计样本, 定义和测量河湾几何形态参数。统计分析表明, 山区河湾弯曲度变化区间为 $[1.7, 14.8]$, 冲积河湾弯曲度变化区间为 $[1.6, 38.5]$ 。冲积河湾的弯曲度均值和标准方差都大于山区河湾。山区河湾的弯顶偏向角无明显的趋向性, 弯顶向上游发育和向下游发育的机率基本是相同的。冲积河湾的弯顶偏向角大于 85° 的河湾占 65.5%, 表明大多数冲积河湾的弯顶是偏向上游发育的。冲积河湾平均河宽与弯顶河宽成较好的线性关系, 平均河宽与颈口宽度具有一定程度的正相关关系。天然河湾的横向相对偏移度与弯曲度成较好的线性关系, 两者表征河湾平面弯曲形态具有一致性。

关键词:天然河湾; 几何形态; 平均河宽; 弯曲度; 统计分析

中图分类号: TV147

文献标志码: A

文章编号: 1001-6791(2011)05-0638-07

天然河湾是指曲折迂回的河道, 它是河流不可或缺的地貌组成单元, 山区河流和冲积河流的河湾随处可见。河湾的显著特点是具有曲折迂回的几何形态和蜿蜒蠕动的动态特征, 河湾形态不仅是山区河流地貌过程的历史记录, 还是弯曲型河流在冲积平原上演变的直观表现。针对冲积河湾的观测与研究, 可以追溯到 1908 年, Fargue 根据对法国加隆河的长期观测, 提出了冲积河湾的 5 条著名定律^[1], 为航道整治指明了方向。近十多年以来, 冲积河湾的几何形态、形成原因和演变规律再度引发国内外学者的研究兴趣。Stølum^[2]认为河湾演化是一种自组织过程, 当河湾处在有序状态时, 裁弯破坏这种有序; 当河湾处在混沌状态时, 裁弯产生新的有序。汪富泉等^[3]运用自组织理论建立了河湾演化方程, 研究了多个天然河湾演变的自组织规律及其稳定性。Swamee 等^[4]利用不同时期恒河的平面形态数据, 分析认为控制恒河平面弯曲度的因素是地质构造、水沙条件、边界条件和新构造活动。张斌等^[5]基于 Google Earth 的卫星图像研究了嘉陵江的河湾形态, 通过定义河湾的形态参数和测算, 认为嘉陵江河湾是最不规则和最弯曲的河湾之一。Constantine 等^[6]运用 Google Earth TM 卫星图像测算了 30 条弯曲河流的河湾和牛轭湖形态特征, 研究表明弯曲度小于 2.2 的牛轭湖弯曲度与平均湖长成指数关系, 建立了牛轭湖生成速率与河道长度及弯曲度的表达式。Güneralp 等^[7]分析了弯曲河流的平面曲率和演变速率的关系, 表明两者关系成很高的非线性且随空间位置变化, 平面曲率的空间位置对演变速率的影响取决于河湾几何形态的复杂性。姚文艺等^[8]基于能量守恒原理, 提出了运用“动能自补偿”的观点并用于解释河流弯曲机理。Nicoll 等^[9]研究了加拿大草原上 23 处限制性河湾的平面几何形态和河道演变速率, 认为限制性河湾与自由河湾的几何形态规律具有一致性, 但形态参数的数值却有差别, 限制性河湾一般不发生裁弯, 不同的河湾向下游移动速率相差很大。前人对河湾形态与演变规律的研究较为深入, 但多限于单条或几条河流的河湾, 缺少对于大范围 and 较全面的河湾几何形态统计分析。

收稿日期: 2010-10-21; **网络出版时间:** 2011-09-11

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/32.1309.P.20110911.1135.017.html>

基金项目: 清华大学自主科研计划课题 (2009THZ02234); 国家自然科学基金资助项目 (10772201)

作者简介: 李志威 (1984 -), 男, 湖北云梦人, 博士研究生, 主要从事弯曲河流动力学研究。

E-mail: lzhiwei2009@163.com

本文旨在通过选取国内外不同区域的 8 条河流的天然河湾, 定义几何形态参数, 进行形态统计分析。考虑到山区河湾是限制性河湾, 其边界条件与冲积河湾的边界条件完全不同, 但两者的演变规律基本趋同^[9], 实际统计分析时冲积河湾数量居多, 故分析以冲积河湾的几何形态为主, 山区河湾作为对照。基于大量河湾几何形态统计, 探讨河湾形态的内在规律, 有助于进一步认识河湾演变过程的形态特征, 有利于对天然河湾的景观开发和保护。

1 河湾形态统计

天然河湾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 1)。河湾形态集中体现在它具有曲折迂回的平面形态, 它的类型一般包括鹅头型、V 型、U 型、Ω 型, 其中鹅头型和 V 型是天然河湾发育的前期阶段, U 型是发育的中间阶段, Ω 型是发育晚期阶段, 而天然河湾的几何形态多为不规则。为了体现冲积河湾的广泛性和代表性, 选取不同地域和不同河流的河湾, 如长江、额尔齐斯河、黑龙江、黄河、嘉陵江、密西西比河、亚马逊河支流的普鲁斯河和茹鲁阿河作为天然河湾统计区间, 通过 Google Earth 卫星地图软件和 AutoCAD 软件相结合的方法, 测量所选河湾的几何形态参数。本次河湾统计为全河段, 选取以图像清晰为准, 在尽可能保证测量精度的提前下, 从河流出口位置开始, 逆向上游选取河湾, 直至河湾尺寸较小, 测量精度难以保证为止。需要说明的是, 由于 U 型和 Ω 型的冲积河湾代表河湾发育成熟的标志, 为了使得统计的河湾处在基本相同的发育阶段, 实际选取过程中, 绝大部分河湾均为 U 型和 Ω 型。因此, 本次全河段的河湾统计是不完全统计, 并没有逐一测量所有河湾。笔者统计了 8 条典型河流的共计 325 个冲积河湾和 136 个山区河湾, 作为探究天然河湾几何形态的统计样本(表 1)。

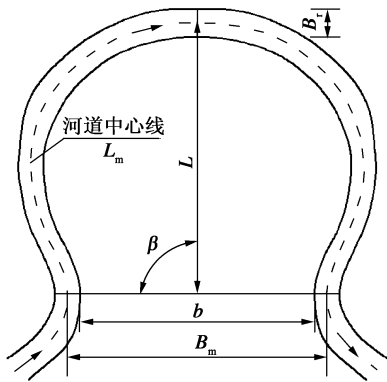


图 1 河湾形态参数定义
Fig. 1 Definition of shape parameters in meander

表 1 河湾选取与统计
Table 1 Selection and statistics of river meanders

河流名称	起止经纬度	河湾数量	山区河湾数量	冲积河湾数量	弯曲度 ($C \leq 5$)	弯曲度 ($5 < C < 10$)	弯曲度 ($C \geq 10$)
长江	33°51'29"N, 95°57' 22"E	57	51	6	43	12	2
	30°12'20"N, 113°55'46"E						
额尔齐斯河	52°12'11"N, 76°55' 17"E	54	0	54	32	16	6
	60°54'58"N, 69°23'04"E						
黑龙江	52°09'36"N, 121°52'10"E	19	0	19	11	6	2
	47°43'33"N, 131°35'56"E						
黄河	33°38'12"N, 100°02'14"E	62	57	5	52	5	5
	36°30'26"N, 116°38'23"E						
嘉陵江	32°24'20"N, 107°13'28"E	28	28	0	20	7	1
	29°41'12"N, 106°27'46"E						
密西西比河	36°59'56"N, 89°15'02"W	15	0	15	12	2	1
	29°55'58"N, 90°02'15"W						
普鲁斯河	09°00'46"S, 68°31'39"W	92	0	92	48	31	13
	04°20'11"S, 61°50'23"W						
茹鲁阿河	06°58'53"S, 71°26'24"W	134	0	134	59	47	28
	02°28'30"S, 65°46'33"W						

为了尽可能的减少误差和保证数据的可靠性, 所有测量均是在同一测量工具和相同方法下进行, 但受卫星图像分辨率和测量误差的影响, 测算的参数值仍是近似的。本文测量数据与前人公布的数据相差较小, 如

本次测算长江中游簪洲湾的弯道中心线长度 55 km, 曲颈河宽为 3.4 km, 与文献[12]给出簪洲湾的弯道中心线长度约 60 km, 曲颈河宽约 4 km, 两组数据相差 10% 左右, 造成差别的原因可能与测量工具和方法、卫星图像分辨率及河湾进出口位置的选取有关。

河湾平面形态的定量参数是描述河湾几何外形的主要指标, 本次选取河湾形态参数包括平均河宽 B 、颈口宽度 b 、曲颈河宽 B_m 、弯顶宽度 B_r 、曲流轴长 L 、河湾偏向角 β 和河道中心线曲线长度 L_m (图 1)。由于天然河湾的平面形态基本都是不规则的, 实际测量弯道中心角和弯道曲率半径是很困难的, 故未选取这两个常见形态参数。平均河宽 B 是整个河湾的河宽平均值, 实际测量是多次测量取平均得到。颈口宽度 b 是河湾颈口进口和出口河岸边线的连线长度。曲颈河宽 B_m 是河湾进口和出口河道中心点的连线长度。弯顶宽度 B_r 是河湾弯顶的河道宽度。曲流轴长 L 是河湾弯顶的河道中心点到颈口进口与出口连线的长度。

弯曲度是表征天然河湾的弯曲程度最直观的参数, 定义弯曲度有两种方法: 一是定义为河道中心线的曲线波长与河谷平均方向的直线长度比值, 这种方法适合连续河湾且形态规则, 多用于弯曲河段的弯曲程度表征, 由于天然河湾绝大多数不规则, 实际测量时曲线波长起点和终点较难确定, 单个河湾测量更为不便, 这种方法适合计算河段弯曲度, 容易忽略局部单个河湾的弯曲细节^[11]。二是定义为河道中心线曲线长度与曲颈河宽的比值, 这种方法简单易行, 直观可靠, 可准确反映单个河湾的弯曲程度。本文采用第二种弯曲度 (C) 定义方法计算 $C = L_m/B_m$, 它表示单个河湾的弯曲度, 弯曲度 C 数值越大表示单个河湾弯曲变形越强烈。河湾横向相对偏移度 P 是指河湾通过凹岸侵蚀和凸岸淤积, 使得河道横向运动而偏移原来河道方向的相对程度, 用 $P = L/B_m$ 表示, P 值越大表示该河湾横向偏移程度越大。河湾偏向角 β 表示河湾演变过程中弯顶发育方向, 它是河湾进出口的连线与曲流轴长的夹角, 理论上, 当 $\beta < 90^\circ$ 表示河湾弯顶逆水流向上游发育, 当 $\beta > 90^\circ$ 表示河湾弯顶顺水流向下游发育, 当 $\beta \approx 90^\circ$ 表示河湾的平面形态基本对称。

2 河湾形态统计分析

2.1 河湾弯曲度统计

天然河湾形态的显著特征是弯曲变形, 弯曲度恰好表征天然河湾的平面弯曲程度。通过分析天然河湾的弯曲度随时间的变化规律, 可以论证河湾演变的复杂性、自组织和多样性^[12], 尽管弯曲度在描述某一个长河段的弯曲程度时会忽略河段内的某些细节^[11], 但作为对于单个河湾的弯曲形态描述, 弯曲度仍是最合适的参数。

统计表明 (图 2), 山区河湾弯曲度变化区间为 [1.7, 14.8], 冲积河湾弯曲度变化区间为 [1.6, 38.5]。为了保证统计的河湾处在相近的发育阶段, 表 1 统计的河湾绝大多数是 U 型和 Ω 型。以图像清晰为准, 从河流下游到上游, 采用逐一的统计方法, 一般不会遗漏弯曲度大于 1.5 的河湾。冲积河湾的弯曲度分散在一个

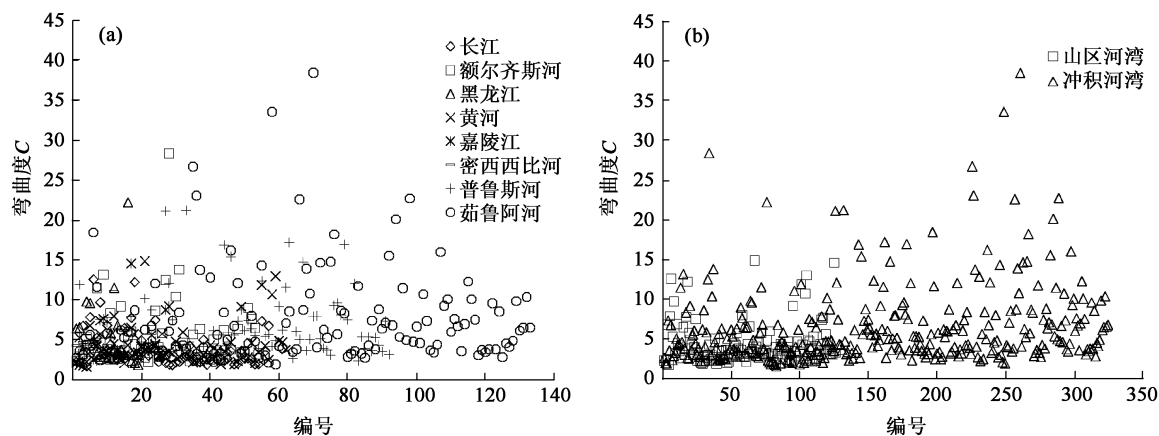


图 2 河湾弯曲度统计

Fig. 2 Statistics of river meanders curvature

相当宽幅的区间,即使遇上极弯曲的河湾,弯曲度也未突破40(图2)。根据计算河湾弯曲度统计直方图,可知山区河湾弯曲度的均值 $\mu=4.31$,标准方差 $\sigma=2.26$,冲积河湾弯曲度的均值 $\mu=4.31$,标准方差 $\sigma=2.26$ 。可见,冲积河湾的弯曲度均值和标准方差都大于山区河湾,这与冲积河湾和山区河湾所处边界条件有关。因为冲积河湾位于冲积平原上,河岸是泥沙沉积物组成的二元结构,河湾的横向展宽能力要强些,而山区河湾的边界条件是山体岩石且受区域地质构造影响。冲积河湾的弯曲度大说明冲积河湾的平面弯曲程度强烈,当弯曲度达到某一极大值时,将发生自然裁弯,而山区河湾弯曲程度相对小,一般也不会发生自然裁弯^[9]。

2.2 弯顶偏向角统计

天然河湾形态演变可分为横向变形或向下游蠕动这两个过程,经历“微弯-强弯-裁弯”周期性的演变模式。河湾在横向发展过程中,弯顶发育的偏向性问题,即弯顶到底是向上游移动还是下游移动,尚未见报道。通过定义河湾偏向角 β 表示河湾演变过程中弯顶发育方向,它是河湾进出口的连线与曲流轴长的夹角(图1),来反映河湾弯顶的发育方向。考虑实际弯顶选点偏差和测量误差,本次统计认为当 $\beta<85^\circ$ 表示河湾弯顶逆水流向上游发育,当 $85^\circ\leq\beta\leq90^\circ$ 表示河湾的平面形态基本对称,当 $\beta>95^\circ$ 表示河湾弯顶顺水流向下游发育。

本文统计表明(图3),绝大多数的弯顶偏向角处在区间 $[30^\circ, 120^\circ]$,山区河湾的弯顶偏向角 $\beta<85^\circ$ 占38.2%, $85^\circ\leq\beta\leq95^\circ$ 占31.6%, $\beta>95^\circ$ 占30.2%;冲积河湾的弯顶偏向角 $\beta<85^\circ$ 占65.5%, $85^\circ\leq\beta\leq95^\circ$ 占27.8%, $\beta>95^\circ$ 占11.7%。这说明了山区河湾的弯顶偏向上游和偏向下游的机率基本是相同的,山区河湾的平面对称性要强于冲积河湾。冲积河湾弯顶向上游发育的机率明显高于向下游,表明大多数冲积河湾的弯顶是向上游发育的,从卫星图像也可以容易地发现冲积河湾弯顶向上游发育的普遍现象。只有在遇到坚固的边界条件(如险工、抛石、护岸工程),或者多个河湾并行相互影响时,冲积河湾才会被动的向下游发育,这类现象一般较少见。从冲积河湾演变的角度来看,进入弯道的水流由于惯性作用将顶冲着弯顶稍偏向上游的河岸,造成凹岸区域不断冲刷,崩岸蚀退,在凸岸区域持续淤积下,引起弯顶转向上游,从而带动整个河湾向上游扭曲变形。山区河湾由于边界岩性基本一致,水流的冲刷作用不足改变弯顶发育方向,弯顶向上游或向下游取决于边界岩性的强弱,故弯顶发育方向没有明显方向性。

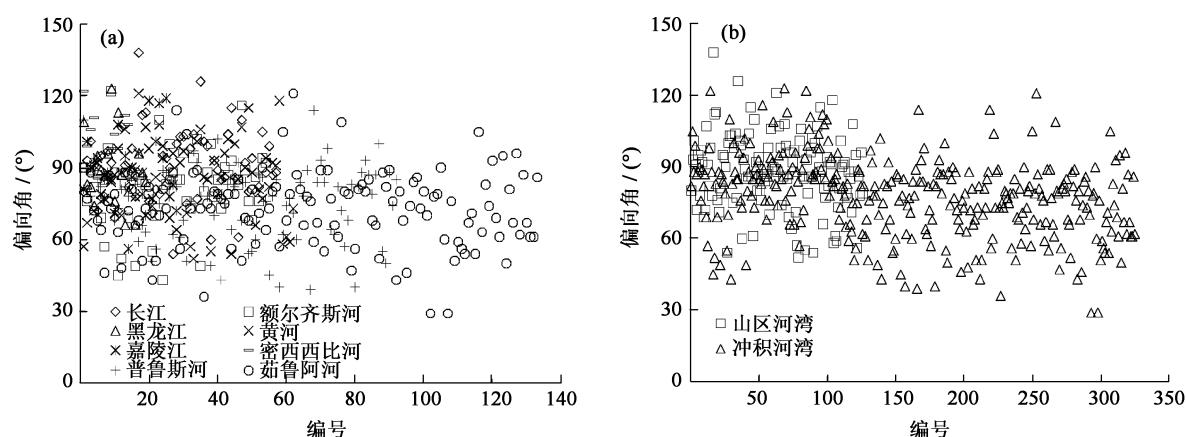


图3 河湾偏向角统计

Fig. 3 Statistics of meanders skew angles

2.3 平均河宽与其它宽度的关系

由于山区河湾两岸均是山体,河宽测量实际是河谷的宽度,故对于山区河湾的真实河宽,本文测量的方法是误差较大。然而,冲积河湾两岸是平原,河岸容易辨识,河宽的测量较准确,故对平均河宽与其它宽度的关系,只分析冲积河湾的河宽数据。从7条河流冲积河段的325个冲积河湾统计表明(图4),河湾平均河

宽与弯顶河宽成线性关系,数据趋势明显,弯顶河宽越大,相应地平均河宽也越大。颈口宽度表示河湾演变过程中颈口宽度。当颈口宽度 $b < 4000$ 和平均河宽 $B < 700$ 时,颈口宽度与平均河宽反映出较好的规律性,曲颈宽度随着弯顶河宽变大而变大,两者近似成正相关关系(图 5);当颈口宽度 $b > 4000$ 和平均河宽 $B > 700$ 时,数据出现分散,即颈口宽度变大,但平均河宽基本不变,表明少数河湾的几何形态具有特殊性。由上可知,平均河宽是全弯道段河宽的平均量度,弯顶河宽和颈口宽度的统计平均量度,平均河宽与其它宽度具有较好的相关性。

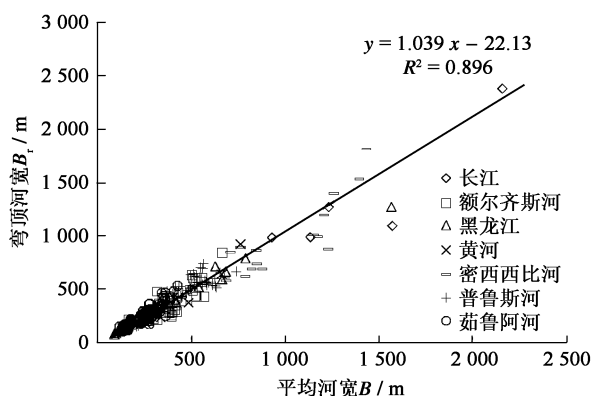


图 4 平均河宽与弯顶河宽

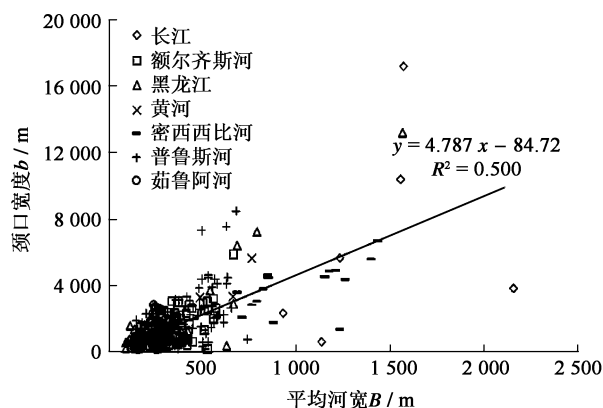
Fig. 4 Relationship between B and B_t 

图 5 平均河宽与颈口宽度

Fig. 5 Relationship between B and b

3 量纲一形态参数之间的关系

弯曲度 C 是表征单个河湾形态最直观最重要的量纲一形态参数,弯曲度 C 的大小与河湾演变过程和速率存在紧密关系^[7,12],探讨弯曲度与其它量纲一形态参数之间的关系,可加深对河湾几何形态规律的认识。

横向相对偏移度反映河湾横向移动的幅度,是河湾变形的一个相对测度,而弯曲度表征河湾平面弯曲程度,从图 6 表明,除少数几个数值点偏离外,横向相对偏移度与弯曲度成较好的线性关系,表明两者反映河湾平面弯曲形态具有一致性,即河湾形态越弯曲,也使得横向相对偏移度和弯曲度都变大。

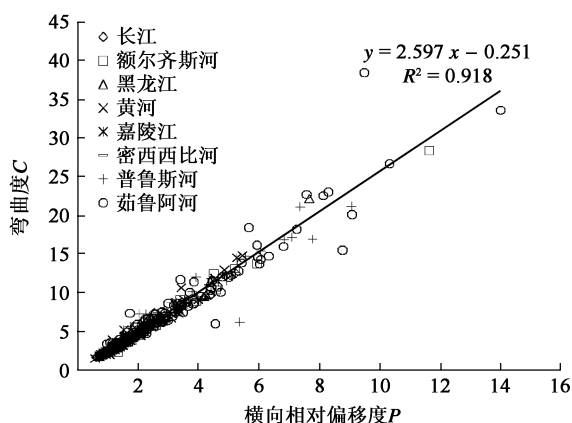
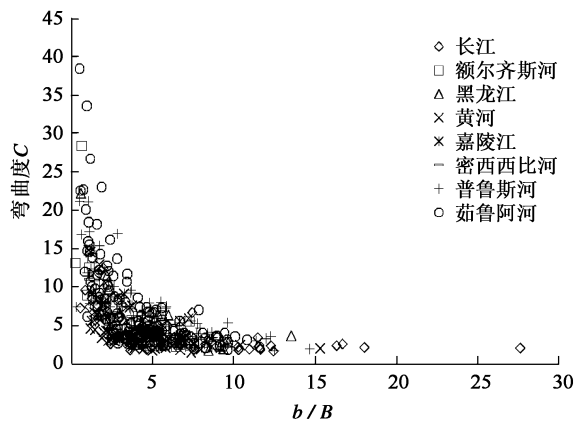


图 6 弯曲度与横向相对偏移度

Fig. 6 Relationship between C and P 图 7 弯曲度与 b/B Fig. 7 Relationship between C and b/B

颈口宽度与平均河宽之比 b/B 可表示河湾向自然裁弯发育的程度, b/B 越小表示河湾趋向裁弯的可能性越大。弯曲度 b/B 基本呈“L”型的定量关系(图 7),随 b/B 变大,弯曲度分布先快速变小,后变化幅度较小。

数据点位多集中于“L”型的转折处,中间密集,两头稀疏,越大的弯曲度对应着越小的 b/B ,而 b/B 变大时,弯曲度基本维持不变,这与河湾选取的样本有关,若 b/B 继续变大,实际上弯曲度还会适当变小,此时河湾可能是鹅头型或V型。

4 结 论

通过计算325个冲积河湾和136个山区河湾的弯曲度,统计表明山区河湾弯曲度变化区间为[1.7, 14.8],冲积河湾弯曲度变化区间为[1.6, 38.5]。冲积河湾的弯曲度均值和标准方差都大于山区河湾,反映边界条件对河湾形态演变的影响,冲积河湾的平面形态一般更为弯曲,形态的复杂性更高。山区河湾的弯顶偏向角无趋向性,顶弯偏向下流和偏向下流发育的机率基本是相同的,山区河湾平面的对称性要强于冲积河湾。然而,冲积河湾的弯顶向上游发育的机率明显高于向下流发育,表明大多数冲积河湾的弯顶是向上游发育的。冲积河湾平均河宽与弯顶河宽成较好的线性关系,平均河宽与颈口宽度近似正相关关系。天然河湾的横向相对偏移度与弯曲度成较好的线性关系,表明两者反映河湾平面弯曲形态具有一致性。

河湾几何形态的一般规律以及裁弯的临界突变,需要从河湾演变的整个过程去探索,后续将通过野外调查天然河湾的演变遗迹(牛轭湖),和运用河湾模拟去捕捉裁弯的临界形态突变,进一步研究河湾几何形态在河湾演变过程中所呈现的复杂性和多变性。

参考文献:

- [1] WILLI H H. Fargue, founder of experimental river engineering[J]. Journal of Hydraulic Research, 2003, 41(3): 227-233.
- [2] STØLUM H H. River meandering as a self-organization process [J]. Science, 1996, 271(22): 1710-1712.
- [3] 汪富泉,曹叔尤,丁晶. 河流网络的分形与自组织及其物理机制[J]. 水科学进展, 2001, 12(1): 7-16. (WANG Fu-quan, CAO Shu-you, DING Jing. Self-organization and stability of form evolution of river bends [J]. Advances in Water Science, 2001, 12(1): 7-16. (in Chinese))
- [4] SWAMEE P K, PAKKASH B, THOMAS J V, et al. Changes in channel pattern of river Ganga between Mustafabad and Rajmahal, Gangetic Plains since 18th century [J]. International Journal of Sediment Research, 2003, 18(3): 219-231.
- [5] 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): 2671-2682. (ZHANG Bin, AI Nan-shang, HUANG Zheng-wen, et al. Meanders of the Jialing River in China: Morphology and formation [J]. Chinese Science Bulletin, 2007, 52(22): 2671-2682. (in Chinese))
- [6] CONSTANTINE J A, DUNE T. Meander cutoff and the controls on the production of oxbow lakes [J]. Geology, 2008, 36(1): 23-26.
- [7] GUNERALP I, Rhoads B L. Empirical analysis of the planform curvature-migration relation of meandering rivers [J]. Water Resources Research, 2009, 45, W09424: 1-15.
- [8] 姚文艺,郑艳爽,张敏. 论河流的弯曲机理[J]. 水科学进展, 2010, 21(4): 231-240. (YAO Wen-yi, ZHENG Yan-shuang, ZHANG Min. Discussion on the mechanism of river meandering [J]. Advances in Water Science, 2010, 21(4): 231-240. (in Chinese))
- [9] 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.
- [10] 殷瑞兰,车子刚,张细兵. 觥洲湾演变机理及预测[J]. 长江科学院院报, 2002, 19(5): 13-15. (YIN Rui-lan, CHE Zhi-gang, ZHANG Xi-bing. Mechanism of evolution and forecast for Paizhouwan reach [J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2002, 19(5): 13-15. (in Chinese))
- [11] 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): 1052-1056. (BAI Yu-chuan, HUANG Tao, XU Dong. Fractal and statistic analysis of planar shape of meandering rivers [J]. Journal of Tianjin University, 2008, 41(9): 1052-1056. (in Chinese))
- [12] HOOKE J M. Complexity, self-organization and variation in behavior in meandering rivers [J]. Geomorphology, 2007, 91: 236-258.

Statistical analysis of the geometrical form of natural rivers meanders^{*}

LI Zhi-wei^{1,2}, QIN Xiao-hua³, FANG Chun-ming²

(1. State Key Laboratory of Hydrosience and Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

2. Department of Sediment Research, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100048, China;

3. Sinohydro Corporation Limited, Beijing 100048, China)

Abstract: The river meander is an important geomorphologic component of meandering rivers. Study of the evolution of geometrical form and channel migration of river meanders possesses high academic values. Using an integrated platform of Google Earth satellite images and AutoCAD software, a total of 136 mountain meanders and 325 alluvial meanders in eight rivers from different areas are chosen as statistical samples to define and measure geomorphologic parameters of the samples. The statistical result shows that the meander radius of curvatures in mountainous rivers is in the interval $[1.7, 14.8]$, and the value of the curvature radius for alluvial rivers is $[1.6, 38.5]$. Statistically, the mean value and standard deviation of the curvature radius in alluvial rivers are much greater than those in mountainous rivers. There is not obvious skew angle tendency at bend apex in mountainous rivers, showing almost equal opportunity for both upstream and downstream development of bend apex. The number of meanders with 85 degree skew angle and greater in alluvial rivers can account for 65.5% of the total river meanders, indicating a tendency for bend apexes to grow in the upstream direction. There is a good liner relationship between the average width and the width of bend apex in alluvial rivers. A certain extent of positive correlation is found between the average river width and the meander neck width. The relationship between the relative transverse skewness and the curvature appears is also linear. These characters manifest the consistency of the shape of a planer cure in river meanders.

Key words: natural river meanders; geometrical form; average river width; curvature; statistic analysis

* The study is financially supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 10772201).