

黄河银川平原段河岸摆动速率变化及原因

王随继¹, 李 玲^{1,2}

(1. 中国科学院地理科学与资源研究所陆地水循环及地表过程院重点实验室, 北京 100101;

2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 研究选取黄河银川平原全长 196 km 的河段, 以 1975 年、1990 年、2010 年和 2011 年四个年份的卫星影像数据绘制的左右河岸线, 与设立的平均间隔为 1.3 km 的 153 个河道固定横断面的交点位置的变化, 估算了 1975-1990 年、1990-2010 年和 2010-2011 年三个时期的河岸平均摆动速率。结果表明, 该河段左岸以向右摆动为主, 在上述时期左岸总的平均摆动速率分别为 36.5 m/a、27.8 m/a 和 61.5 m/a; 右岸在 1975-1990 年以向右摆动为主, 此后则以向左摆动为主, 其摆动速率分别为 31.7 m/a、23.1 m/a 和 50.8 m/a。在 1975-2011 全部 36 年间, 左右河岸的年均摆动速率分别为 22.3 m/a 和 14.8 m/a。河岸摆动速率在 A、B、C 三个河段相差悬殊, 在 1975-2011 的 36 年间, 左岸向左和向右的平均摆动速率之比分别为 1:7.6:4.6 和 1:1.7:3.8; 右岸向左和向右的平均摆动速率之比为 1:1.8:1.2 和 1:5.6:17.7。显然, 无论左岸右岸, 它们在 A 段的摆动速率最小, 向左摆动速率最大的出现在 B 段, 而向右摆动速率最大的则是 C 段。河岸摆动速率在时序上的增大现象主要受制于人类筑坝蓄水等引起汛期流量的逐渐减小, 而空间变化主要受制于河岸物质组成的区域差异。

关键词: 河岸; 河岸摆动; 流量; 沉积物组成; 黄河

DOI: 10.11821/dlxb201403011

1 引言

黄河上游(河口镇以上)流域面积为 38.6 万 km², 全长 3472 km, 平均比降为 1.01‰^[1], 呈现玛曲段和宁蒙段两个主要冲积河段。其中宁蒙冲积河段的河道冲淤演变复杂, 泥沙的沉积量及其来源、以及人类活动的影响受到普遍关注。杨根生等^[2]认为黄河内蒙古段淤积泥沙主要来自乌兰布和沙漠和十大孔兑。申冠卿等^[3]认为 1968 年和 1986 年相继投入运行的青铜峡水库、刘家峡水库和龙羊峡水库的削减洪峰的径流调节作用, 给黄河宁蒙河道的演变带来了深刻影响。随着这些大型水利枢纽的建成, 黄河宁蒙河道经历了微淤—冲刷—淤积的演变过程^[4]。Yao 等^[5]通过不同年份卫星影像的对比估算了宁蒙河段河岸区冲淤面积变化, 认为河岸年均侵蚀面积从 1958 年起持续下降。还有研究者从河流熵^[6]和能耗率角度^[7]探讨宁蒙河段的河道调整规律。有关黄河宁蒙河段河道演变的其他研究工作主要针对凌汛过程特征^[8]、河型变化^[9]、河道水力几何形态变化对比^[10]、不同河段的淤积量和河道沉积速率的时空变化^[11]、洪水过程的河道断面响应^[12]及河道演变^[13]等, 也对宁蒙河段河道演变的影响因素进行过必要的探讨^[11-12, 14-16]。无论如何, 有关黄河宁蒙段河岸迁移摆动速率的系统研究尚未见报道。在河势资料十分缺乏的条件下如何获得河岸摆动速率数据, 对于理解河道的变迁至关重要^[17]。本文以黄河银川平原河段(青铜峡—石嘴山水文站之

收稿日期: 2013-07-15; 修订日期: 2013-12-20

基金项目: 国家自然科学基金项目(41271027); 国家重点基础研究发展计划(2011CB403305) [Foundation: National Natural Science Foundation of China, No.41271027; National Basic Research Program of China, No.2011CB403305]

作者简介: 王随继(1966-), 男, 甘肃静宁人, 博士, 副研究员, 中国地理学会会员(S110001472M), 主要研究方向为河流沉积学、地貌学及流域地表过程。E-mail: wangsj@igsnnr.ac.cn

间) 为例, 利用不同年份的卫星影像资料绘制当年的河道形态, 设定 153 条平均间距为 1.3 km 的固定数字横断面, 分析对比不同年份里这些断面与河岸交点的变化, 从而计算不同时期河岸的摆动速率。

2 研究区概况与研究方法

2.1 研究区概况

黄河银川平原河段位于青铜峡水文站与石嘴山水文站之间, 长约 196 km, 河道处于银川平原东缘和鄂尔多斯高原西缘的交接带。该河段河道平均比降为 0.18‰^[18]; 而河型以辫状河流为主, 局部为弯曲河流; 河床质以砂质为主, 河宽 0.2~5.0 km, 水深 2~6 m。紧邻青铜峡大坝的上段为顺直河流段, 河床质由砾质逐渐过渡为砂质; 中下部河段的河床质从砂质逐渐过渡到粉砂质。整个河段入汇支流很少, 较大的支流仅有苦水河, 但其来水来沙微不足道。

2.2 研究方法

不同时期卫星影像资料的对比给河流平面形态变化的研究带来了便利, 成为近年来一种广泛采用的手段^[5, 19-20]。对于实测河道断面很少的河段, 设立固定数字横断面可以为河道演变研究带来便利, 利用不同年份河势图上河岸线与固定数字河道横断面的交点的位置变化可以估算河岸的摆动速率, 这是该研究在方法上的主要创新。

本文采用 1975 年的 MSS 数据 (分辨率 60 m), 1990、2010 及 2011 年的 TM 数据 (分辨率 30 m), 这些遥感图像向美国地质调查局申请使用并下载于其官方网站^[21]。上述各年份的图像均为当年汛期采集 (6-9 月)。仅根据水面来勾画河道边线位置则会出现较大误差, 因为汛期的流量也有很大变化 (表 1), 为了消除该河段水位涨落引起的河宽变化, 我们采用河道两边的植被边界作为河道边界, 因为银川平原的黄河滨岸带地下水丰富, 如果没有流水的冲蚀, 则在一个生长季就会发育丰茂的草本植被, 而流水波及的地方则难以生长植被, 用植被边界来确定河道边界是被广泛证明的一种有效方法^[22-25]。采用 WGS84 坐标系, 对上述遥感图像进行如下处理: (1) 选用 1:50000 地形图作为标准, 对 MSS 和 TM 遥感影像进行配准。(2) 以 1975 年的河道作为基准, 设立需要对比的固定数字河道横断面计 153 个 (图 1a), 断面编号为 S114~S266, 其平均间距约 1.3 km, 断面密度很高。这些断面线与 1975 年的河道大体垂直, 且为矢量, 维持其位置在后续年份保持不变, 以便计算河岸位置变动值。(3) 利用 ArcGIS 软件, 对遥感图像河岸进行数字化, 绘制上述各年份的河道平面形态及不同年份河道套绘图 (图 1a, b)。(4) 在 FME 软件中, 提取不同年份河道的左、右岸线数据及与各个断面的交点坐标值。

四期遥感图像采集日的流量及当年最大日均流量见表 1。以河道两侧植被边界来勾绘河道其精度决定于图像分辨率, 分辨率的大小主要影响到近岸处的勾绘精度, 而对河道两岸内部远离分辨率长度之间的河宽几乎没有影响, 因此, 图像配准及河道勾绘可能存在的误差为河道宽度除以 2 倍分辨率。据此方法我们计算图像配准和河道勾绘时的相对误差

表 1 图像采集日青铜峡站的流量、年最大流量及河道边界勾绘误差
Tab. 1 The discharge on the date when remote sensing images were obtained, the largest discharge in the year and the relative error in protracting channel banks

卫片时间	当日流量 /m ³ /s	当年最大流量 m ³ /s	图像分辨率 /m	全河段平均河宽 /m	相对误差 /%
1975-09-15	2580	2740	60	1354	8.86
1990-08-30	944	1410	30	1386	4.33
2010-08-18	905	1520	30	749	8.01
2011-06-18	1134	1990	30	688	8.72

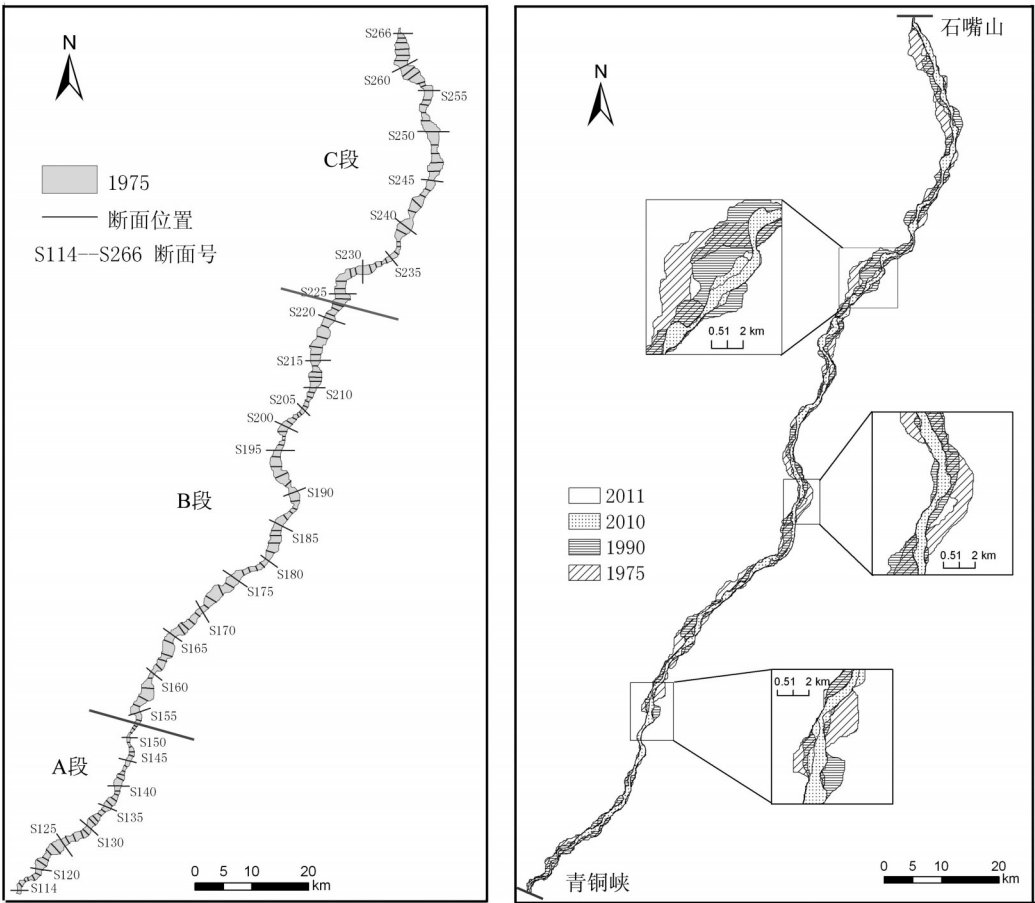


图1 黄河银川平原河段 153 个河道断面位置图 (a) 和不同年份河道套绘及局部特征 (b)
Fig. 1 Locations of the 153 cross-channel sections (a), and channel platform changes and local characteristics (b) in the Yinchuan Plain reach of the Yellow River

(表1), 河岸摆动速率的计算误差主要体现在上述方面, 不同时期的计算误差等于表1中相应的误差数值。

3 研究结果

对比不同时期河道左岸和右岸摆动速率变化特征及其沿程演变特征, 并计算了不同时期不同区段的河岸平均摆动速率。其中正数表示河道沿断面线向右摆动, 负数表示河道向左摆动。在计算某河段的平均摆动速率时, 由于存在正负数, 因此将这些数据简单相加再计算平均值, 将会使计算值严重偏小, 因此, 分别计算了向左及向右摆动的平均值, 即将正负数分别进行考虑, 这样可以得到上述两个方向的平均摆动速率数据。根据河道左右岸的摆动特征, 可以将整个研究区河道划分为三个河段 (图 1a): (1) A 段 (断面 S114~S153), 是河岸摆动速率最小的河段; (2) B 段 (断面 S154~S223), 研究区中段为摆动速率中等的河段; (3) C 段 (断面 S224~S266), 其摆动速率最大。

3.1 左右河岸的摆动幅度

(1) 最大摆幅 不同时期左、右河岸最大摆动幅度见表2。以 1975-2011 年间左右岸最大摆动幅度为例加以说明: A 段河道左岸向左和向右累计最大摆动幅度分别为 191.4 m 和

1286.7 m; 右岸向左和向右累计最大摆动幅度分别为 806.3 m 和 160.3 m。B 段河道左岸向左和向右累计最大摆动幅度分别为 1476.9 m 和 2225.8 m; 右岸向左和向右累计最大摆动幅度分别为 1915.6 m 和 1691.5 m。C 段河道左岸向左和向右累计最大摆动幅度分别为 700.8 m 和 5114.7 m; 右岸向左和向右累计最大摆动幅度分别为 1462.5 m 和 4218.7 m。无论是河道左岸还是右岸, 其向右摆动的最大幅度远大于向左的, 而在 A、B、C 三个河段, 其最大摆动幅度呈现增大的趋势。

(2) 平均摆幅 不同时期不同河段左岸、右岸的平均摆幅见表 3。以 1975-2011 年间左右岸平均摆动幅度为例加以说明: A 段河道左岸 13 个断面向左平均摆动 63.0 m, 27 个断面向右平均摆动 451.4 m; 右岸 32 个断面向左平均摆动 285.2 m, 8 个断面向右平均摆动 78.5 m。B 段河道左岸 20 个断面向左平均摆动 491.8 m, 50 个断面向右平均摆动 784.0 m; 右岸 53 个断面向左平均摆动 511.3 m, 17 个断面向右平均摆动 446.8 m。C 段河道左岸 9 个断面向左平均摆动 298.7 m, 34 个断面向右平均摆动 1703.2 m; 右岸 22 个断面向左平均摆动 336.3 m, 21 个断面向右平均摆动 1404.9 m。向左摆动幅度最大的河岸在 B 段, 向右摆动幅度最大的在 C 段。总体上左岸以向右摆动为主、右岸向左摆动为主, 显示河道总体上在萎缩, 并有向右迁移之趋势。

3.2 左岸的摆动速率及其变化趋势

从黄河银川平原段河道左岸在不同时期的摆动速率及其沿程变化特征 (图 2) 可见, 左岸摆动速率最大的河段主要是 C 段, 而最小的为 A 段。对于不同时期全部河段 153 个河道断面处左岸的平均摆动速率分述如下。

表 2 不同区间特定时期河岸最大摆动幅度 (m)
Tab. 2 Maximum shift extent of channel banks in the three reaches in certain time period (m)

河段	位置	1975-1990	1990-2010	2010-2011	1975-2011
A 段	左岸	-627.8	-152.1	-375.8	-191.4
		763.5	961.1	162.6	1286.7
	右岸	-411.6	-982.4	-97.4	-806.3
		185.1	216.7	306.1	160.3
B 段	左岸	-1476.2	-1873.9	-577.3	-1476.9
		2059.3	1694.0	431.0	2225.8
	右岸	-1427.3	-1881.5	-771.8	-1915.6
		1780.0	1069.0	251.0	1691.5
C 段	左岸	-1733.5	-930.8	-42.9	-700.8
		3182.9	3467.7	1051.6	5114.7
	右岸	-1087.8	-3398.7	-498.8	-1462.5
		4143.7	4198.8	40.5	4218.7

表 3 不同区间特定时期河岸平均摆动幅度 (m)
Tab. 3 Average shift extent of channel banks in the three reaches in certain time period (m)

河段	位置	1975-1990		1990-2010		2010-2011		1975-2011	
		平均	断面数	平均	断面数	平均	断面数	平均	断面数
A 段	左岸	-134.4	20	-58.8	7	-46.5	10	-63.0	13
		183.5	20	310.4	33	33.9	30	451.4	27
	右岸	-102.6	27	-283.3	33	-29.7	18	-285.2	32
		71.5	13	98.5	7	39.7	22	78.5	8
B 段	左岸	-416.5	38	-197.8	20	-68.0	21	-491.8	20
		535.6	32	607.0	50	63.0	49	784.0	50
	右岸	-424.3	40	-538.9	51	-81.1	46	-511.3	53
		343.5	30	283.3	19	34.9	24	446.8	17
C 段	左岸	-737.8	18	-415.2	7	-16.0	12	-298.7	9
		1248.7	25	1032.1	36	104.1	31	1703.2	34
	右岸	-291.0	14	-723.9	25	-53.6	31	-336.3	22
		1298.6	29	606.9	18	11.5	12	1404.9	21
全河段	左岸	-418.3	76	-224.0	34	-48.5	43	-317.7	42
		675.7	77	649.9	119	66.6	110	984.6	111
	右岸	-294.0	81	-515.4	109	-62.4	95	-407.7	107
		679.1	72	329.5	44	31.9	58	820.1	46

在1975-1990年间(图2与表4),有76处向左摆动,平均速率为-27.9 m/a,77处向右摆动,平均速率为45.0 m/a,以153个断面进行平均则分别为-13.9 m/a和22.6 m/a,那么左岸总的平均摆动速率为36.5 m/a。A、B、C三段河道左岸向左和向右的平均摆动速率之比分别为1:3.1:5.5和1:2.9:6.8,显然,左岸的平均摆动速率沿上述河段明显递增。

1990-2010年间(图2与表4),有34个断面向左摆动,平均速率为-11.2 m/a,119处向右摆动,平均速率为32.5 m/a,以153个断面进行平均则分别为-2.5 m/a和25.3 m/a,左岸总的平均摆动速率为27.8 m/a。显然,无论是从断面数还是实际摆动速率来看,该时期河道左岸以向右摆动为主。A、B、C三段左岸向左和向右的平均摆动速率之比分别为1:3.4:

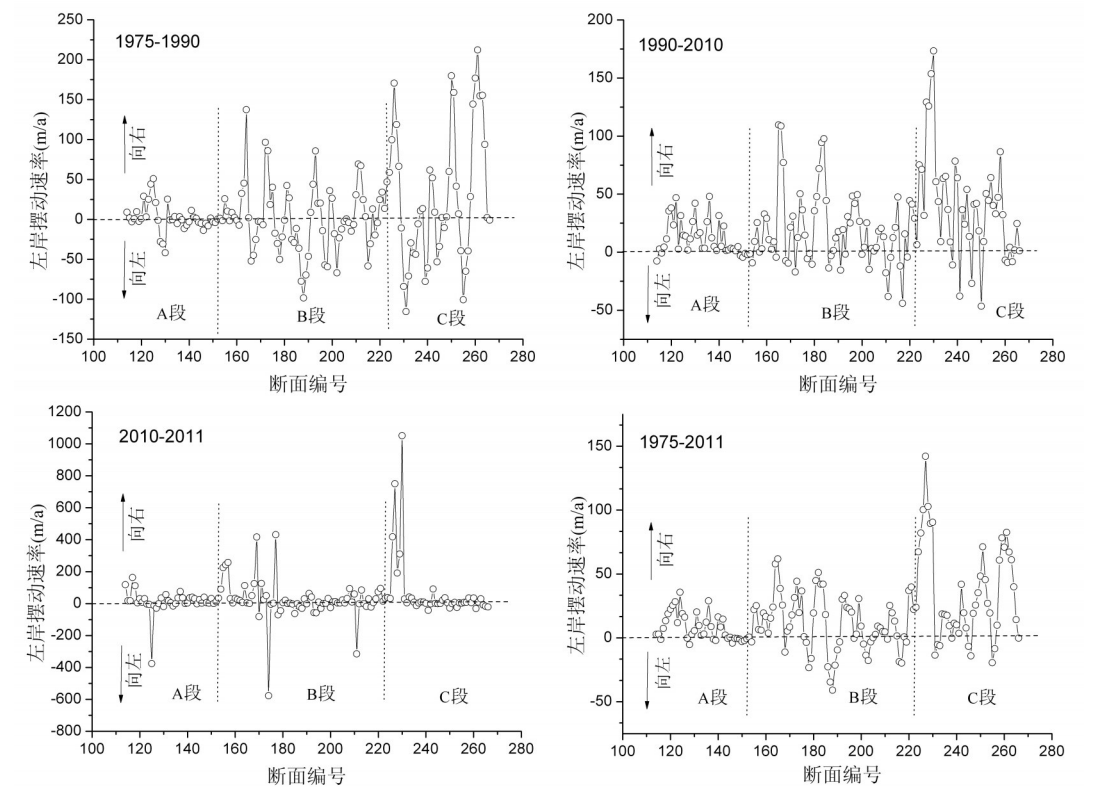


图2 黄河银川平原段不同时期河道左岸摆动速率沿程变化特征 (m/a)

Fig. 2 Downstream variation of the shift rate of the left bank in the Yinchuan plain reach in certain time period (m/a)

表4 不同区间特定时期左岸摆动速率 (m/a)

Tab. 4 Shift rate of the left bank in the three reaches in certain time period (m/a)

河段	位置	1975-1990		1990-2010		2010-2011		1975-2011	
		速率	断面数	速率	断面数	速率	断面数	速率	断面数
A段	左岸	-9.0	20	-2.9	7	-46.5	10	-1.8	13
		12.3	20	15.5	33	33.9	30	12.5	27
B段	左岸	-27.8	38	-9.9	20	-68.0	21	-13.7	20
		35.7	32	30.4	50	63.0	49	21.8	50
C段	左岸	-49.2	18	-20.8	7	-16.0	12	-8.3	9
		83.3	25	51.6	36	104.1	31	47.3	34
全河段	左岸	-27.9	76	-11.2	34	-48.5	43	-8.8	42
		45.0	77	32.5	119	66.6	110	27.4	111
全河段平均	左岸	-13.9	153	-2.5	153	-13.6	153	-2.4	153
		22.6	153	25.3	153	47.9	153	19.9	153
总摆动速率	左岸	36.5	153	27.8	153	61.5	153	22.3	153

7.2和1:2.0:3.3。该时期左岸的平均摆动速率沿上述河段同样具有递增趋势。

2010-2011年间(图2与表4),有43处向左摆动,平均速率为-48.5 m/a,110处向右摆动,平均速率为66.6 m/a,以153个断面进行平均则分别为-13.6 m/a和47.9 m/a,左岸总的平均摆动速率为61.5 m/a。在这一年中,河道左岸仍然以向右摆动为主。A、B、C三段,左岸向左的平均摆动速率之比为1:1.5:0.3,与前一时段相同,最大摆动速率在B段;向右的为1:1.9:3.1,同样具有沿程递增趋势。

在1975-2011的36年间(图2与表4),有42处向左摆动,平均速率为-8.8 m/a,111处向右摆动,平均速率为27.4 m/a,以153个断面进行平均则分别为-2.4 m/a和19.9 m/a,左岸总的平均摆动速率为22.3 m/a。显然,36年间河道左岸总体上向右摆动。A、B、C三段向左的平均摆动速率之比为1:7.6:4.6;向右的为1:1.7:3.8。显然,36年间,左岸向左和向右的最大摆动速率分别在B段和C段。

3.3 右岸的摆动速率及其变化趋势

从黄河银川平原段河道右岸在不同时期的摆动速率及其沿程变化特征(图3)可见,右岸摆动速率最大的河段是C段,B段少见,A段最小。对于不同时期全部河段153个河道断面处右岸的平均摆动速率分述如下。

在1975-1990年间(图3与表5),有81处向左摆动,平均速率为-19.6 m/a,72处向右摆动,平均速率为45.3 m/a,以153个断面进行平均则分别为-10.4 m/a和21.3 m/a,右岸总的平均摆动速率为31.7 m/a。A、B、C三段,向左的平均摆动速率之比为1:4.2:2.9;向右的为1:4.8:18.0。向左的最大平均摆动速率出现在B段,而向右的平均摆动速率在上述三个河段明显递增,其中B段和C段分别约是A段的5倍和17倍。

1990-2010年间(图3与表5),有109处向左摆动、44向右摆动,其平均摆动速率分别

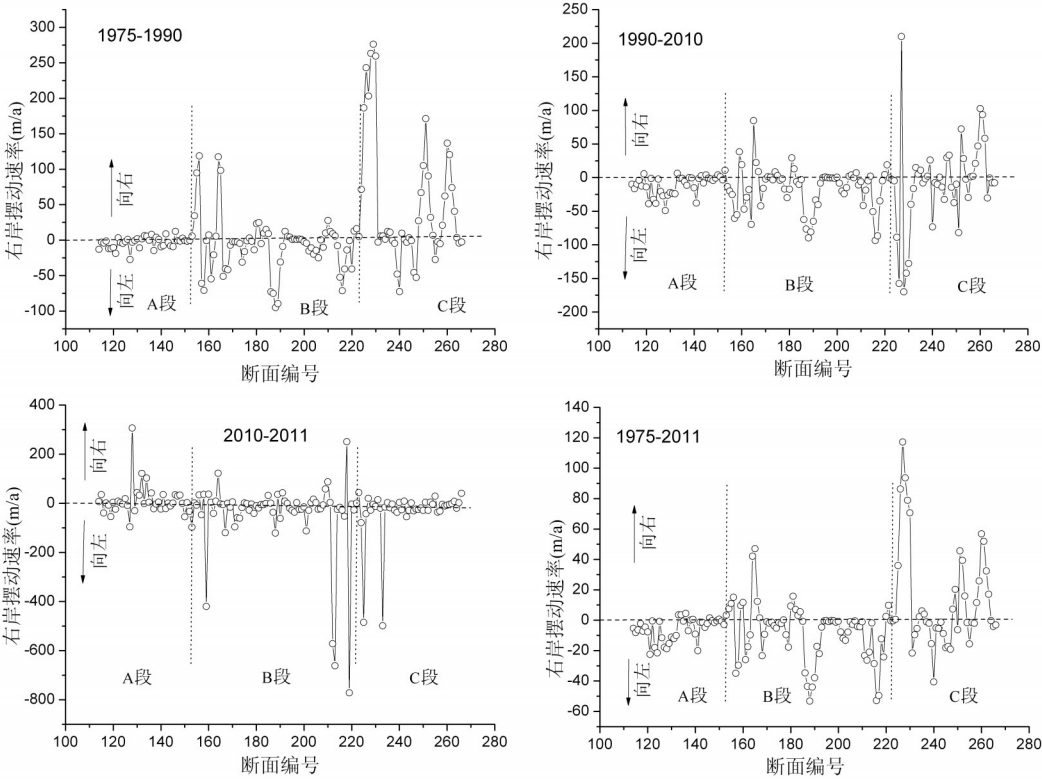


图3 黄河银川平原段不同时期河道右岸摆动速率沿程变化特征 (m/a)

Fig. 3 Downstream variation of the shift rate of the right bank in the Yinchuan plain reach in certain time period (m/a)

表5 不同区间特定时期右岸平均摆动速率 (m/a)
Tab. 5 Shift rate of the right bank in the three reaches in certain time period (m/a)

河段	位置	1975-1990		1990-2010		2010-2011		1975-2011	
		速率	断面数	速率	断面数	速率	断面数	速率	断面数
A段	右岸	-6.8	27	-14.2	33	-29.7	18	-7.9	32
		4.8	13	4.9	7	39.7	22	2.2	8
B段	右岸	-28.3	40	-27.0	51	-81.1	46	-14.2	53
		22.9	30	14.2	19	34.9	24	12.4	17
C段	右岸	-19.4	14	-36.2	25	-53.6	31	-9.3	22
		86.6	29	30.4	18	11.5	12	39.0	21
全河段	右岸	-19.6	81	-25.8	109	-62.4	95	-11.3	107
		45.3	72	16.5	44	31.9	58	22.8	46
加权平均	右岸	-10.4	153	-18.4	153	-38.7	153	-7.9	153
		21.3	153	4.7	153	12.1	153	6.9	153
总摆动速率	右岸	31.7	153	23.1	153	50.8	153	14.8	153

为-25.8 m/a 和 16.5 m/a，以 153 个断面进行平均则分别为-18.4 m/a 和 4.7 m/a，右岸总的平均摆动速率为 23.1 m/a。A、B、C 三段，向左和向右的平均摆动速率之比分别为 1:1.9:2.5 和 1:2.9:6.2，都具有沿程明显增大之趋势。

2010-2011 年间 (图 3 与表 5)，有 95 处向左摆动、58 处向右摆动，其平均速率分别为-62.4 m/a 和 31.9 m/a，以 153 个断面进行平均则分别为-38.7 m/a 和 12.1 m/a，右岸总的平均摆动速率为 50.8 m/a。在 A、B、C 三段，向左的平均摆动速率之比分别为 1:2.7:1.8，B 段最大、C 段次之；向右的为 1:0.9:0.3，明显递减。

在 1975-2011 的 36 年间 (图 3 与表 5)，有 107 处向左摆动，平均速率为-11.3 m/a，46 处向右摆动，平均速率为 22.8 m/a，以 153 个断面进行平均则分别为-7.9 m/a 和 6.9 m/a，右岸总的平均摆动速率为 14.8 m/a。A、B、C 三段右岸向左的平均摆动速率之比为 1:1.8:1.2，A 段最小，B 点最大；向右的为 1:5.6:17.7，明显递增。

4 讨论和结论

4.1 讨论

河岸的摆动速率大小反映了河道的侧向可动性能力，是河道演变研究的重要内容，而河道演变是含沙水流与河床相互作用过程中所必然产生的形变现象，其中水流是动力因子，为河道演变的冲淤提供动力作用，而河床和河岸的组成物质则是响应水动力的从属因素，其抗冲性大小影响到河道的形变，常常可见水动力相差不大的水流在抗冲性悬殊的河段会引起悬殊的河道形变。

如前所述，黄河银川平原段的河岸摆动速率在不同时期、不同河段都有明显的差异。同一河段不同时期的差异形变主要决定于流量的大小变化，尤其是汛期流量的变化，同时还与所对比的河势的间隔时间有关。由于青铜峡水库、刘家峡水库分别于 1964 年 1968 年建成、龙羊峡水库于 1986 年建成，它们的联合运行，使得研究河段的汛期日均最大流量大幅度减小 (图 4)，从 1975-1986 年间的平均值 3105.8 m³/s 减小到 1987-1990 年间的平均值 2136.7 m³/s，即河道的造床流量明显减小，使得河道逐渐萎缩，这引起河道左岸和右岸在 1975-1990 年间的年均 4.8 m (左岸摆动速率减右岸摆动速率) 的相向趋近摆动成为必然趋势，当然，该时期河道总体上以年均 31.7 m/a 的速率向右摆动，这与河道右岸相对较弱的抗冲性密切相关。

青铜峡站最大流量在 1990 年为 1410 m³/s，在 2010 年为 1520 m³/s (图 4)，显然，最大日均流量差别不大，另外，尽管 1990 年 8 月 30 日和 2010 年 8 月 18 日的实测流量分别为

944 m³/s 和 905 m³/s, 非常接近 (表 1), 但是, 该时期该河段河道年均收缩 4.7 m/a (左岸摆动速率减右岸摆动速率), 整个河段平均向右年均摆动 23.1 m/a。在 2010-2011 的一年期间, 河道收缩 10.7 m (左岸摆动速率减右岸摆动速率), 整个河段向右平均摆动 50.8 m。在上述三个不同时间尺度上, 黄河银川平原段河道的河岸总体上以向右摆动为主, 反映了右岸物质的抗冲性小于左岸物质的抗冲性。实际上, 以粉砂质河岸为主的黄河银川平原河段, 其河岸摆动速率在短期的变化未必小于多年的累积变化, 因为, 河岸摆动在多年间可能出现往复, 从而使计算所得的平均摆动速率数值明显偏小, 本文长时间尺度和短时间尺度的摆动速率数值则可证明。

黄河银川平原河段河岸摆动速率在不同河段的差别, 其主要控制因素则是河岸及冲积平原区的物质组成不同, 而流量则为次要因素, 因为该河段四期影像拍摄日期的流量除了 1975 年较大外, 其他日期的流量差别不大 (表 1)。根据 Hudson^[26]报道, 在 1877-1924 年间密西西比河上游弯曲带的平均摆动速率为 45.2 m/a, 因为该河段冲积平原区有较多的黏土节点, 而在其下游则增大至 59.1 m/a, 因为这里粘土节点相对很少。显然, 河道弯曲段的摆动速率与冲积平原区的不同沉积相关联。该研究区的 A 段位于银川平原的上段, 地下沉积物以冲积扇的粗粒物质为主, 河床质由卵石逐渐过渡到砾石和粗砂, 该河段的河岸物质较粗, 难以被水流侵蚀冲刷, 同时, 该河段的比降较大, 河道不易于弯曲, 而弯曲是增大摆动速率的主要方式。B 段河岸主要以下层中细砂质和上层泥质沉积物构成, 水流通过淘蚀下部细砂层、使上部泥质层崩塌的方式而使河岸发生明显的摆动, 因此, 在该河段, 其河岸的摆动速率明显比 A 段的大, 尤其是河岸向左摆动的速率是全河段最大的。C 段位于银川平原的下游地区, 无论是河岸组成物质还是河床质都比 B 段明显变细, 其中河岸物质以上部泥质层和下部细砂粉砂质层组成的二元沉积结构, 但是, 细砂粉砂质相对于 B 段中细砂质层更易于被水流侵蚀, 这是该段河岸摆动速率最大的根本原因。

4.2 结论

(1) 在 1975-1990、1990-2010、2010-2011 三个不同尺度的时期内, 黄河银川平原河段 153 个数字河道横断面上, 河道左岸发生向左摆动的断面分别有为 76、34 和 43 个, 其平均摆动速率分别为 -27.9 m/a、-11.2 m/a 和 -48.5 m/a; 左岸发生向右摆动的断面分别有 77、119 和 110 个, 其平均摆动速率分别为 45.0 m/a、32.5 m/a 和 66.6 m/a。右岸发生向左摆动的断面分别有 81、109 和 95 个, 其平均摆动速率分别为 -19.6 m/a、-25.8 m/a 和 -62.4 m/a; 右岸发生向右摆动的断面分别有 72、44 和 58 个, 其平均摆动速率分别为 45.3 m/a、16.5 m/a 和 31.9 m/a。

(2) 加权平均结果表明, 左右岸总体上都在向右摆动, 在上述三个时期, 整个河段左岸平均向右摆动速率分别为 36.5 m/a、27.8 m/a 和 61.5 m/a, 右岸平均向右摆动速率分别为 31.7 m/a、23.1 m/a 和 50.85 m/a; 同时, 河道收缩速率分别为 4.8 m、4.7 m 和 10.7 m。2010-2011 年的年际变化表明, 考察较长时间尺度的河道摆动速率时, 不可避免地包含了河道往复摆动的影响。

(3) 河岸摆动速率在空间上也表现出明显的变化趋势。对于 A、B、C 三个河段来说, 在 1975-2011 的 36 年间, 左岸向左和向右的平均摆动速率之比分别为 1:7.6:4.6 和 1:1.7:

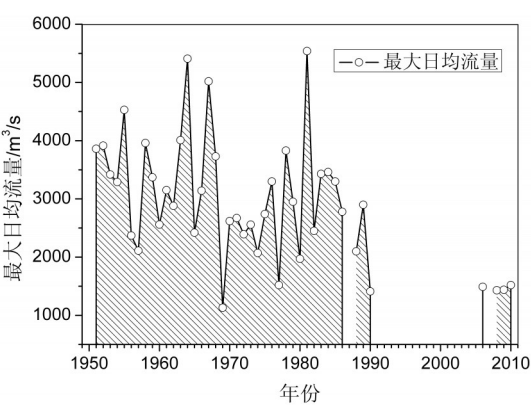


图4 青铜峡站日均最大流量
Fig. 4 Maximum daily mean discharge
at Qingtongxia Station

3.8; 右岸向左和向右的平均摆动速率之比为 1:1.8:1.2 和 1:5.6:17.7。显然, 无论左岸右岸, 它们在 A 段的摆动速率最小, 向左摆动速率最大的出现在 B 段, 而向右摆动速率最大的则是 C 段。这与左右岸组成物质的粒度的空间分布有关、也与二元河岸物质结构中泥质层厚度相关。至于河岸粒度与河岸摆动速率之间的潜在统计关系, 还需要进一步研究。

参考文献 (References)

- [1] Zhao Wenlin. The Water Conservancy Technology Series of the Yellow River: Sediment of the Yellow River. Zhengzhou: Yellow River Water Conservancy Press, 1996. [赵文林. 黄河水利科学技术丛书: 黄河泥沙. 郑州: 黄河水利出版社, 1996.]
- [2] Yang Gensheng, Ta Wanquan, Dai Fengnian et al. Contribution of sand sources to the silting of riverbed in Inner Mongolia section of Huanghe River. Journal of Desert Research, 2003, 23(2): 152-159. [杨根生, 拓万全, 戴丰年 等. 风沙对黄河内蒙古河段河道泥沙淤积的影响. 中国沙漠, 2003, 23(2): 152-159.]
- [3] Shen Guanqing, Zhang Yuanfeng, Hou Suzhen et al. Impact of water and sediment regulation by reservoirs in the upper Yellow River on Inner-Mongolia reaches. Journal of Sediment Research, 2007, (1): 67-75. [申冠卿, 张原锋, 侯素珍 等. 黄河上游干流水库调节水沙对宁蒙河道的影响. 泥沙研究, 2007, (1): 67-75.]
- [4] Zhang Xiaohua, Pei Mingsheng, Pan Xiandi et al. Adjustment of alluvial reach in the Yellow River. Journal of Sediment Research, 2002, (3): 1-8. [张晓华, 裴明胜, 潘贤娣 等. 黄河冲积性河道的调整. 泥沙研究, 2002, (3): 1-8.]
- [5] Yao Z Y, Ta W Q, Jia X P et al. Bank erosion and accretion along the Ningxia-Inner Mongolia reaches of the Yellow River from 1958 to 2008. Geomorphology, 2011, 127: 99-106.
- [6] Sun Dongpo. Analysis on energy distribution-dissipation relation on river system. Journal of Hydraulic Engineering, 1999, (3): 49-53. [孙东坡. 河流系统能量分配耗散关系分析. 水利学报, 1999, (3): 49-53.]
- [7] Sun Dongpo, Yang Zhenzhen, Zhang Li et al. Analysis of riverbed form adjustment based on energy dissipation in the Inner Mongolia reach of Yellow River. Advances in Water Science, 2011, 22(5): 653-661. [孙东坡, 杨真真, 张立 等. 基于能量耗散关系的黄河内蒙古段河床形态调整分析. 水科学进展, 2011, 22(5): 653-661.]
- [8] Yang Leifei. Analysis of the thaw flood discharge in the Ningxia-Neimenggu reach of the Yellow River. Journal of Sediment Research, 1992, (6): 62-68. [杨赉斐. 黄河宁夏蒙河段凌汛洪水流量分析研究. 泥沙研究, 1992, (6): 62-68.]
- [9] Wang Suiji. Analysis of river pattern transformations in the Yellow River Basin. Progress in Geography, 2008, 27(2): 10-17. [王随继. 黄河流域河型转化现象初探. 地理科学进展, 2008, 27(2): 10-17.]
- [10] Ran L S, Wang S J, Lu X X. Hydraulic geometry change of a large river: A case study of the upper Yellow River. Environmental Earth Sciences, 2012, 66: 1247-1257.
- [11] Wang S J, Yan Y X, Li Y K. Spatial and temporal variations of suspended sediment deposition in the alluvial reach of the upper Yellow River from 1952 to 2007. Catena, 2012, 92: 30-37.
- [12] Wang Suiji, Fan Xiaoli. Flood processes and channel responses in typical years of the different channel patterns in Neimenggu reaches of the upper Yellow River. Progress in Geography, 2010, 29(4): 501-506. [王随继, 范小黎. 黄河内蒙古不同河型段对洪水过程的响应特征. 地理科学进展, 2010, 29(4): 501-506.]
- [13] Fan Xiaoli, Shi Changxing, Zhou Yuanyuan et al. Characteristics of flood regime in Ningxia-Inner Mongolia reaches of the upper Yellow River. Resources Science, 2012, 34(1): 65-73. [范小黎, 师长兴, 周园园 等. 黄河宁夏蒙段洪水过程变化特点. 资源科学, 2012, 34(1): 65-73.]
- [14] Fan Xiaoli, Wang Suiji, Ran Lishan. Analysis of the channel evolution and influence factors in Ningxia reach of the Yellow River. Journal of Water Resources & Water Engineering, 2010, 21(1): 5-11. [范小黎, 王随继, 冉立山. 黄河宁夏河段河道演变及其影响因素分析. 水资源与水工程学报, 2010, 21(1): 5-11.]
- [15] Hou Suzhen, Chang Wenhua, Wang Ping et al. The characteristics of the channel shrinkage and reasons in the Neimenggu reach of the Yellow River. Yellow River, 2007, 29(1): 24-26. [侯素珍, 常温花, 王平 等. 黄河内蒙古段河道萎缩特征及成因. 人民黄河, 2007, 29(1): 24-26.]
- [16] Ran Lishan, Wang Suiji, Fan Xiaoli. River channel change at Toudaoguai Section and its response to water and sediment supply of the upper Yellow River. Acta Geographica Sinica, 2009, 64(5): 531-540. [冉立山, 王随继, 范小黎 等. 黄河内蒙古头道拐断面形态变化及其对水沙的响应. 地理学报, 2009, 64(5): 531-540.]
- [17] Petts G E. Changing river channels: The geographical tradition//Gurnell A, Petts G. Changing River Channels. New York: John Wiley & Sons, 1995: 1-23.
- [18] Wang Suiji. Variations of the channel sedimentation rate in the Yinchuan Plain reach of the Yellow River. Acta Sedimentologica Sinica, 2012, 30(3): 565-571. [王随继. 黄河银川平原段河床沉积速率变化特征. 沉积学报, 2012, 30(3): 565-571.]

- [19] Khan N I, Islam A. Quantification of erosion patterns in the Brahmaputra-Jamuna River using geographical information system and remote sensing techniques. *Hydrol. Process.*, 2003, 17: 959-966.
- [20] Yang Shuwen, Li Mingyong, Liu Tao et al. A method of alluvial fan automatic extraction from TM image. *Remote Sensing for Land & Resources*, 2011, (2): 65-69. [杨树文, 李名勇, 刘涛 等. 一种利用TM 图像自动提取洪积扇的方法. *国土资源遥感*, 2011, (2): 65-69.]
- [21] U.S. Geological Survey. <http://earthexplorer.usgs.gov/>. 2012. [美国地质调查局. <http://earthexplorer.usgs.gov/>. 2012.]
- [22] Gurnell A M. Channel change on the River Dee meanders, 1946-1992, from the analysis of air photographs. *Regul Rivers Res. Manag.*, 1997, 12: 13-26.
- [23] Winterbottom S. Medium and short-term channel planform changes of the Rivers Tay and Tummel, Scotland. *Geomorphology*, 2000, 34: 195-208.
- [24] Richard G A, Julien P Y, Baird D C. Statistical analysis of lateral migration of the Rio Grande, New Mexico. *Geomorphology*, 2005, 71: 139-155.
- [25] Yao Z, Xiao J, Ta W et al. Planform channel dynamics along the Ningxia-Inner Mongolia reaches of the Yellow River from 1958 to 2008: Analysis using Landsat images and topographic maps. *Environ. Earth Sci.*, 2013, 70: 97-106.
- [26] Hudson P F, Kesel R H. Channel migration and meander-bend curvature in the lower Mississippi River prior to major human modification. *Geology*, 2000, 28(6): 531-534.

Lateral shift rate variation of the river banks in the Yinchuan Plain reach of the Yellow River and its causes

WANG Suiji¹, LI Ling^{1,2}

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

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: It is important to examine the lateral shift rate variation of river banks in different periods. One of the challenges in this regard is how to obtain the shift rate of river banks, as gauging stations are deficient for the study of river reaches. The present study selected the Yinchuan Plain reach of the Yellow River with a length of 196 km as a case study, and searched each point of intersection of 153 cross-sections (interval between two adjacent cross-sections was 1.3 km) and river banks in 1975, 1990, 2010 and 2011, which were plotted according to remote sensing images in those years. Then the shift rates for the points of intersection during 1975-1990, 1990-2010 and 2010-2011 were calculated, as well as the average shift rates for different sections and different periods. The results show that the left bank of the river reach shifts mostly to the right, with the average shift rates being 36.5 m/a, 27.8 m/a and 61.5 m/a in the three periods, respectively. Contemporarily, the right bank shifts mostly to the right in the first period, while it shifts to the left in the second and third periods, with the average shift rates being 31.7 m/a, 23.1 m/a and 50.8 m/a in the three periods, respectively. The average shift rates for the left and right banks during the period 1975-2011 are 22.3 m/a and 14.8 m/a, respectively. The bank shift rates for sections A, B and C are different. The shift rate ratio of the left bank in the three sections is 1:7.6:4.6 for shift to the left and 1:1.7:3.8 for shift to the right, while that of the right bank is 1:1.8:1.2 for shift to the left and 1:5.6:17.7 for shift to the right during the period 1975-2011. Obviously, the average shift rate is the least in section A, while it reaches the maximum in section B for shift to the left and in section C for shift to the right. The temporal variation of the shift rate is influenced by human activities, while the spatial variation is controlled by the local difference in bank materials.

Key words: river bank; river shift; discharge; sediment structure; Yellow River