

水库联合运行对库下汛期河道过水断面 形态参数变化率的影响 ——以黄河内蒙古河段为例

苏 腾^{1,2}, 王随继¹, 梅艳国^{1,2}

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

2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 水库联合运行对于库下河道的影响是河流地貌学近年来的热点问题, 如何定量表征河道的因应调整则是其难点所在。基于同水位河道过水断面形态参数变化率分析方法, 针对黄河内蒙古河段磴口、巴彦高勒、三湖河口、头道拐4个水文站, 利用刘家峡水库、龙羊峡水库联合运行之前的1978-1982年、之后的2008-2012年汛期前后实测断面资料, 计算了相应年份上述各站同水位下的河道断面面积、水面宽、平均水深等特征参数在经历汛期冲刷后的变化率。结果表明, 每年在经历汛期洪水冲刷之后, 上述形态参数总体上以增大为主, 变化率为正值; 大型水库联合运行之前与之后的两个时期相比, 同水位下河道断面面积、水面宽和平均水深的变化率分别减小了3.4、3.5和2.8倍。过水断面形态参数的沿程空间变化也由之前的上凸形曲线变为之后增减相间的“S”形曲线。其原因在于, 大型水库联合运行削减了洪峰流量、降低了汛期最大流速, 从而导致洪水造床能力显著变弱, 河道断面形态参数的变化率因之显著减小。大型水库联合运行使黄河内蒙古河道明显萎缩, 这不利于可能遭遇的极端大洪水的安全行洪, 因此, 需要合理利用这些水库的调节功能, 有效控制汛期总水沙量和洪峰流量, 避免因过度调节而使河道持续萎缩, 为可能出现的极端大洪水的安全行洪创造条件。

关键词: 过水河道断面; 形态参数; 变化率; 水库; 联合运行; 黄河; 内蒙古

DOI: 10.11821/dlxb201503011

1 引言

冲积河流河道形态的沿程变化及其响应不同影响因素的断面变化是河床演变学的核心研究内容。作为黄河上游的主要冲积河段, 宁蒙河段的河道冲淤演变非常复杂^[1]。近年来, 在气候变化、水库调节、灌区引水的共同影响下, 该河流段的水沙条件发生了显著变化^[2-6], 导致部分河段淤积速率增加、主槽萎缩严重、排洪排凌能力降低, 出现了小水大灾的情况, 给沿岸人民的生产和生活活动造成了严重影响^[7-8]。为此, 研究者开展了大量有关该河段河床演变的研究工作。师长兴等利用4期大断面观测资料分析了河床冲淤变化, 认为黄河内蒙古段河道1963-1982年间经历了冲刷过程, 1982年以后经历了淤积过程^[9]。王随继等研究了内蒙古不同河型段对洪水过程的响应特征, 认为在一次洪水过程

收稿日期: 2014-10-28; 修订日期: 2015-01-29

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973项目)(2011CB403305); 国家自然科学基金项目(41271027) [Foundation: National Basic Research Program of China (973 Program), No.2011CB403305; National Natural Science Foundation of China, No.41271027]

作者简介: 苏腾, 男, 山东泰安人, 硕士研究生, 主要研究方向为河流地貌学。E-mail: sut.12s@igsrr.ac.cn

通讯作者: 王随继, 男, 甘肃静宁人, 博士, 副研究员, 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@igsrr.ac.cn

中, 辫状河段河床侵蚀下降, 弯曲河段河床明显抬升, 顺直河段为少量沉积或冲淤平衡^[10]。秦毅等采用横断面冲淤指标跟踪计算法生成横断面冲淤演变时间序列, 分析得到了河床演变的趋势和突变点^[7]。侯素珍等通过同流量水位变化以及输沙量法计算冲淤量来分析冲淤变化^[11]。王随继等^[1]利用4期卫星影像资料估算了宁夏河段河道摆动速率。此外, 还有许多学者针对河道淤积成因^[12-16]、水力几何形态沿程变化特征^[17]、凌汛特征^[18]等方面进行过必要的研究。迄今为止, 涉及洪水期该河段河道形态变化率的定量研究明显欠缺, 而洪水期河道演变速率的量化研究是评估河道稳定性及制定合理治理措施的关键依据。因此, 针对汛期河道演变速率的时间及空间变化开展研究是目前面临的关键科学问题。本文以龙羊峡水库建成之后在黄河上游形成大型水库(龙羊峡水库、刘家峡水库)联合运行初期为时间界限(即20世纪90年代), 利用黄河内蒙古河段长期观测的全部4个水文站(河道断面)在该时限前后各选取连续5年时间的汛期前后断面变化的观测数据, 来定量表征研究区汛期河道过水断面相关参数变化率的差异性, 为更加有效地治理黄河、提高防灾减灾能力提供借鉴。

2 研究区概况

黄河内蒙古冲积河段介于石嘴山和头道拐水文站之间, 是黄河上游的末段, 也是黄河全流域中最靠北的河段(图1), 干流全长673 km。河段沿鄂尔多斯高原的西北边界流动, 河床平缓^[19], 处于东亚季风区边缘, 年均降水量150~400 mm, 由东向西递减, 年内分布极不均匀, 75%左右的降水集中在7-9月, 多年平均径流量为251.6亿 m^3 ^[20]。每年12月到翌年3月, 河面结冰, 在3月中、下旬开河时凌汛严重^[21]。区间较大的山洪沟有拉僧庙沟、麻黄沟、艾来都格沟、伊克布拉格沟、乌兰布拉格沟、滚勒斯台沟、奇盖沟、葫芦素沟、达拉盖沟、磨石沟、沙树沟、巴拉贡沟, 这些山洪沟在汛期受暴雨冲刷, 洪水携带泥沙注入黄河。巴彦高勒—头道拐区间南岸主要有“十大孔兑”等支流, 北岸主要有昆都仑河、五当沟等支流, 汛期暴雨产生的山洪挟带大量泥沙注入黄河, 在交汇处阻塞主河道, 导致主槽摆动、河床淤积抬高、弯曲度越来越大, 河道越来越不通畅^[22]。自20世纪60年代起, 黄河上游陆续修建了三盛公、青铜峡、刘家峡、龙羊峡等水利枢纽, 其中龙羊峡水库和刘家峡水库为大型水库, 龙羊峡水库为多年调节型水库, 其总库容为247亿 m^3 , 刘家峡水库总库容为57亿 m^3 , 青铜峡水库库容较小, 建库后淤积严重, 三盛公枢纽是研究区域内的闸坝工程, 总库容仅有0.8亿 m^3 。

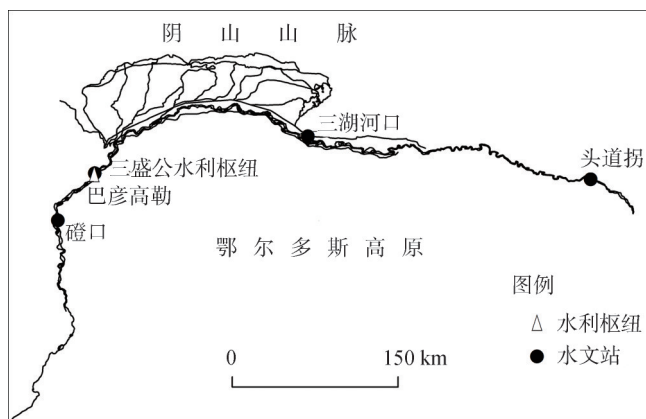


图1 黄河内蒙古段简图

Fig. 1 Sketch of the Inner Mongolian reach of the Yellow River

3 数据来源及研究方法

磴口站、巴彦高勒站、三湖河口站、头道拐站是黄河内蒙古河段进行长期断面观测的4个水文站, 它们沿程分布, 并分别处于顺直、辫状、弯曲和顺直河段, 这些河道断

面的变化可揭示内蒙古不同河型段河道的变化特征,因此本文的研究对象为上述4个河道断面。

龙羊峡水库是黄河上游最大的水库,其于1986年建成后,黄河上游进入了龙羊峡水库、刘家峡水库联合运行时期,这直接导致黄河下游断流在1990年代达到前所未有的程度,可以认为,20世纪90年代是上述两大水库联合运行深刻改变黄河水沙条件的关键时期。然而,这些水库的联合运行对黄河内蒙古河段汛期河道断面参数的变化有何影响,是目前面对的关键科学问题。因此,该研究选取1990年代之前的1978-1982年(后文称前一时期)、之后的2008-2012年(后文称后一时期),分别计算这些年份每个断面在经历整个汛期流水冲淤之后的过水断面形态参数变化率,并对比这两个时期河道参数变化率的差异,以便解答上述科学问题。由于磴口站1979年、1981年实测断面各只有1次,无法比较汛期前后河道断面参数的变化,故磴口站前一时期采用1976-1978年、1980年、1982年的实测断面资料。由于世界上冲积河流平滩流量的平均出现几率为2.33年,因此,连续5年的数据基本包含了可能出现的平滩流量,这是选取连续5年断面数据的原因。上述数据由黄河水利委员会根据国家标准测量所得,记录于黄河流域水文资料^[23]。

文中采用各年汛期前后同水位断面分析方法以计算该水位之下河道断面各要素的数值,以汛期前后实测断面各要素数值资料为基础,进一步计算同水位下断面要素的变化率。所选断面观测年份的汛期前后两次断面测量,其水位不同,因此,进行断面参数计算时所采用的水位为二者之中较低的,所对比的断面参数也是该水位以下的河道部分。河道断面面积通过对选定水位之下的断面进行积分计算得到;水面宽是所选水位线与河道左右两个交点之间的长度;平均水深为所选水位线下河道断面面积除以水面宽所得的数值。

4 研究结果

4.1 汛期前后断面形态参数计算

对上述4个水文站给定年份汛期前后实际断面测量时的水位下河道断面形态参数进行了计算(表1,表2)。每年汛期前后两次河道断面测量时的水位不同,为了使河道参数变化可进行对比,取当年较低的水位作为对比水位(称作同水位),对较高水位的河道断面参数按照同水位下的部分进行计算,其结果同样见表1和表2。这样,同水位条件下的河道断面参数成为对比汛期河道形态变化率的基础。

4.2 河道断面形态参数变化率分析

磴口、巴彦高勒、三湖河口和头道拐4个河道断面在大型水库联合运行前后两个时期每年经历汛期冲淤之后的同水位河道断面面积、水面宽、平均水深以及宽深比的变化率分别如图2-图5所示。

4.2.1 磴口断面 磴口站汛期前后断面参数变化率(图2),所有10个年份的断面面积在汛后均有所增加,但断面面积变化率的最大值和平均值在前一时期分别为152.7%和66.8%;在后一时期分别为48.4%和30.6%。汛期前后水面宽的变化率在前一时期有增有减,其中在1978年和1980年增大且增幅较大,其余3年则表现为汛后减小,但变幅较小;而在后一时期均为增大,其变化率的最大值和平均值分别为9.4%和6.5%。该站同水位条件下平均水深的变化率除在2010年汛后减小外,其余各年份汛后均有所增大;平均水深变化率的最大值和平均值在前一时期分别为99.1%和53.2%,在后一时期分别为43.4%和30.6%。断面宽深比在1980年和2010年汛后有所增大,其余年份在汛后有所减

表1 汛期前后给定水位下磴口和巴彦高勒河道断面形态参数计算值
Tab. 1 Channel cross-section parameters under a given water level before and after the flooding season at Dengkou and Bayangaole stations

磴口							巴彦高勒						
年份	日期	S/m	A/m ²	B/m	H/m	B/H	年份	日期	S/m	A/m ²	B/m	H/m	B/H
1976	6-10	1060.12	648	260	2.5	104.3	1978	5-2	1050.41	622	449	1.4	324.1
	9-19	1060.69	1347	268	5.0	53.3		11-2	1050.16	1325	481	2.8	174.6
	9-19	1060.12*	1199	256	4.7	54.7		5-2	1050.16*	512	426	1.2	354.4
1977	4-21	1060.00	594	258	2.3	112.1	1979	4-25	1050.24	617	439	1.4	312.4
	10-20	1060.24	684	270	2.5	106.6		11-16	1049.66	598	468	1.3	366.3
	10-20	1060.00*	620	255	2.4	104.9		4-25	1049.66*	367	258	1.4	181.4
1978	3-17	1060.14	520	208	2.5	83.2	1980	5-10	1049.42	245	291	0.8	345.6
	9-19	1061.39	1655	288	5.7	50.1		11-20	1049.97	508	384	1.3	290.3
	9-19	1060.14*	1314	264	5.0	53.0		11-20	1049.42*	393	356	1.1	322.5
1980	5-2	1059.71	481	204	2.4	86.5	1981	4-13	1050.36	481	393	1.2	321.1
	10-26	1060.32	838	274	3.1	89.6		11-23	1049.47	1046	426	2.5	173.5
	10-26	1059.71*	682	247	2.8	89.5		4-13	1049.47*	225	250	0.9	277.8
1982	4-21	1059.84	646	278	2.3	119.6	1982	4-26	1049.63	621	373	1.7	224.0
	10-19	1060.48	1143	281	4.1	69.1		11-20	1049.71	603	400	1.5	265.3
	10-19	1059.84*	968	267	3.6	73.6		11-20	1049.63*	551	394	1.4	281.7
2008	4-30	1060.62	374	135	2.8	48.7	2008	4-7	1051.22	484	322	1.5	214.2
	11-1	1060.89	492	148	3.3	44.5		11-11	1050.6	416	361	1.2	313.3
	11-1	1060.62*	453	141	3.2	43.9		4-7	1050.6*	288	310	0.9	333.7
2009	5-16	1060.80	476	166	2.9	57.9	2009	4-1	1051.73	757	434	1.7	248.8
	10-18	1061.24	743	173	4.3	40.3		9-21	1051.2	1264	402	3.1	127.9
	10-18	1060.80*	668	176	3.8	46.4		4-1	1051.2*	533	407	1.3	310.8
2010	6-9	1061.30	620	181	3.4	52.8	2010	4-13	1051.54	739	418	1.8	236.4
	10-19	1060.96	565	197	2.9	68.7		8-11	1051.03	574	421	1.4	308.8
	6-9	1060.96*	558	180	3.1	58.0		4-13	1051.03*	527	413	1.3	323.7
2011	4-24	1060.77	465	172	2.7	63.6	2011	4-12	1050.93	482	321	1.5	213.8
	10-20	1061.19	767	199	3.9	51.6		9-21	1050.85	1036	348	3.0	116.9
	10-20	1060.77*	690	178	3.9	45.9		4-12	1050.85*	537	338	1.6	212.7
2012	4-22	1060.52	510	169	3.0	56.0	2012	3-24	1050.48	573	255	2.2	113.5
	10-24	1060.89	794	189	4.2	45.0		10-3	1051.12	1352	340	4.0	85.5
	10-24	1060.52*	725	184	3.9	46.7		10-3	1050.48*	1137	333	3.4	97.5

注：*表示与当年另一次断面测定时的相同水位（同水位）；S-水位；B-水面宽；H-平均水深；B/H-同水位下的断面宽深比。

小，其变化率的最大值（绝对值）和平均值在前一时期分别为47.6%和-25.06%，在后一时期分别为27.8%和-11.2%。通过对比可以发现，后一时期断面参数变化率的最大值和平均值均较前一时期明显减小。

4.2.2 巴彦高勒断面 巴彦高勒站汛期断面参数变化率（图3），其断面面积的变化率除1982年外均有所增加，断面面积变化率的最大值和平均值在前一时期分别为364.9%和127.2%，在后一时期分别为137.1%和76.4%。水面宽变化率除2009年外均有所增加，其最大值和平均值在前一时期分别为81.4%和38.5%，在后一时期分别为30.6%和10.1%。平均水深变化率在1979年和1982年略有减小，在其余年份均有所增大，其最大值和平均值在前一时期分别为172.8%和61.4%，在后一时期分别为140.1%和62.1%。断面宽深比

表2 汛期前后给定水位下三湖河口和头道拐河道断面形态参数计算值
Tab. 2 Channel cross-section parameters under a given water level before and after the flooding season
at Sanhuhekou and Toudaoguai stations

三湖河口							头道拐						
年份	日期	S/m	A/m ²	B/m	H/m	B/H	年份	日期	S/m	A/m ²	B/m	H/m	B/H
1978	5-14	1018.27	597	279	2.1	130.4	1978	6-11	985.06	300	185	1.6	114.1
	11-8	1017.61	883	328	2.7	121.8		10-9	988.03	1278	520	2.5	211.6
	5-14	1017.61*	401	255	1.6	162.2		10-9	985.06*	115	247	0.5	530.5
1979	5-19	1016.66	209	213	1.0	217.1	1979	7-17	984.78	224	185	1.2	152.8
	10-20	1017.63	800	203	3.9	51.5		11-26	987.13	738	362	2.0	177.6
	10-20	1016.66*	607	194	3.1	62.0		11-26	984.78*	198	146	1.4	107.7
1980	5-21	1016.57	275	211	1.3	161.9	1980	5-8	986.5	602	353	1.7	207.0
	10-27	1017.79	889	207	4.3	48.2		11-10	985.54	352	254	1.4	183.3
	10-27	1016.57*	655	172	3.8	45.2		5-8	985.54*	345	192	1.8	106.9
1981	5-14	1016.41	290	75	3.9	19.4	1981	5-9	986.03	467	314	1.5	211.1
	12-28	1018.34	1060	353	3.0	117.6		9-28	990.29	3064	727	4.2	172.5
	12-28	1016.41*	492	202	2.4	82.9		9-28	986.03*	1072	300	3.6	84.0
1982	5-7	1016.86	421	268	1.6	170.6	1982	5-19	985.56	370	243	1.5	159.6
	10-16	1018.42	1353	385	3.5	109.6		10-3	988.06	1091	537	2.0	264.3
	10-16	1016.86*	784	315	2.5	126.6		10-3	985.56*	119	245	0.5	504.4
2008	4-4	1019.33	615	224	2.7	81.6	2008	4-6	987.53	900	360	2.5	144.0
	11-10	1018.97	473	212	2.2	95.1		11-3	987.16	637	283	2.3	125.7
	4-4	1018.97*	527	211	2.5	84.5		4-6	987.16*	771	347	2.2	156.2
2009	4-4	1019.75	965	250	3.9	64.8	2009	4-7	987.62	744	335	2.2	150.8
	9-30	1019.04	585	211	2.8	76.1		11-1	986.89	572	306	1.9	163.7
	4-4	1019.04*	810	245	3.3	74.1		4-7	986.89*	515	309	1.7	185.4
2010	4-7	1019.57	796	269	3.0	90.9	2010	4-14	987.62	784	340	2.3	147.4
	10-15	1019.21	601	209	2.9	72.7		10-26	986.68	577	287	2.0	142.7
	4-7	1019.21*	718	264	2.7	97.1		4-14	986.68*	502	271	1.9	146.3
2011	4-8	1019.17	618	205	3.0	68.0	2011	4-5	987.37	635	297	2.1	138.9
	10-16	1019.02	528	210	2.5	83.5		10-23	987.14	737	290	2.5	114.1
	4-8	1019.02*	587	203	2.9	70.2		4-5	987.14*	562	295	1.9	154.8
2012	3-21	1020.46	888	320	2.8	115.3	2012	4-5	987.5	699	300	2.3	128.8
	10-17	1018.83	642	296	2.2	136.5		10-9	987.68	970	324	3.0	108.2
	3-21	1018.83*	442	187	2.4	79.1		10-9	987.5*	300	185	1.6	114.1

注：*表示与当年另一次断面测定时的相同水位（同水位）；S-水位；B-水面宽；H-平均水深；B/H-同水位下的断面宽深比。

变化率在1979年和1982年显著增大，其余年份则有所减小，其最大值和平均值在前一时期分别为101.9%和6.5%，在后一时期分别为-4.6%和-25.7%。上述结果表明，在经历汛期的冲淤后，巴彦高勒水文站的河道过水断面形态参数变化率在前一时期以增大为主，而后一时期以减小为主。

4.2.3 三湖河口断面 三湖河口站断面参数变化率（图4），其断面面积变化率在前一时期每年经历汛期的流水冲淤后均为增大，在后一时期除2012年外均为减小，同时，其最大值和平均值在前一时期分别为190.4%和120.9%，在后一时期则分别为45.2%和-3.8%。水面宽变化率在前后两个时期均为有增有减，其最大值和平均值在前一时期分别为

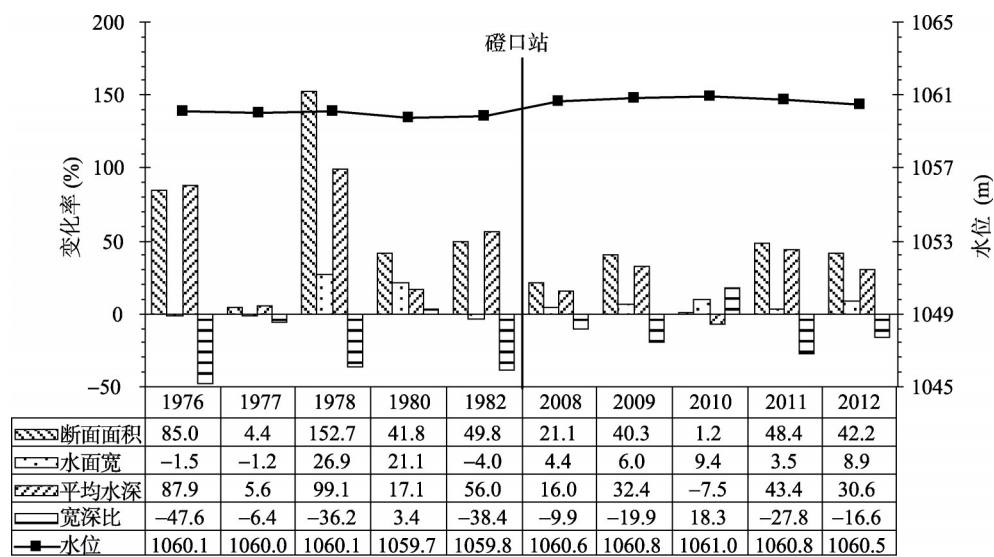


图2 磴口站汛期前后断面参数变化率

Fig. 2 Change ratios of channel cross-section parameters at Dengkou Station after the flooding season

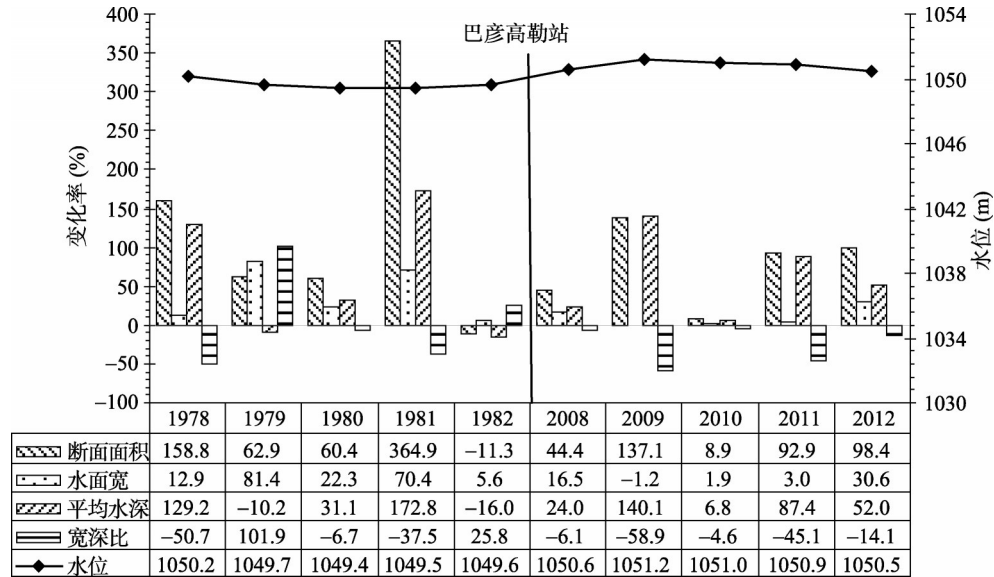


图3 巴彦高勒站汛期前后断面参数变化率

Fig. 3 Change ratios of channel cross-section parameters at Bayangaole Station after the flooding season

169.3%和37.6%，在后一时期分别为58.3%和5.5%。平均水深变化率在前一时期以汛后增加为主，后一时期以汛后减小为主，最大值和平均值在前一时期分别为218.9%和100.7%，在后一时期分别为5.7%和-8.5%。断面宽深比变化率在前一时期以减小为主，其最大值和平均值分别为327.6%和26.7%；在后一时期以增加为主，其最大值和平均值分别为72.5%和16.3%。通过对比可以发现，三湖河口站后一时期各断面参数变化率均较前一时期显著减小。

4.2.4 头道拐断面 头道拐断面参数的变化率（图5），其断面面积变化率在前一时期汛后有增有减，最大值和平均值分别为129.6%和54.5%；在后一时期汛后以增大为主，最

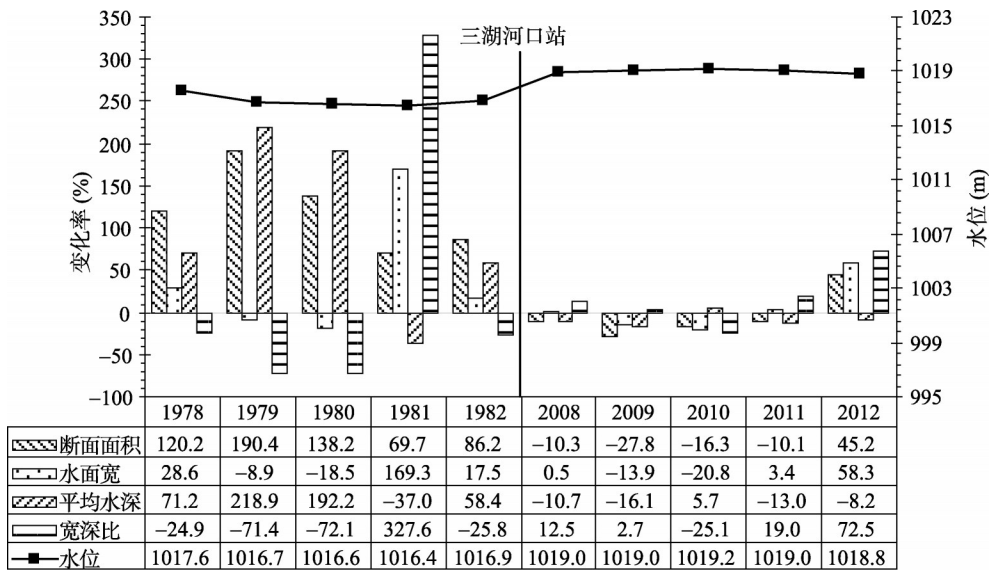


图4 三湖河口站汛期前后断面参数变化率

Fig. 4 Change ratios of channel cross-section parameters at Sanhuhekou Station after the flooding season

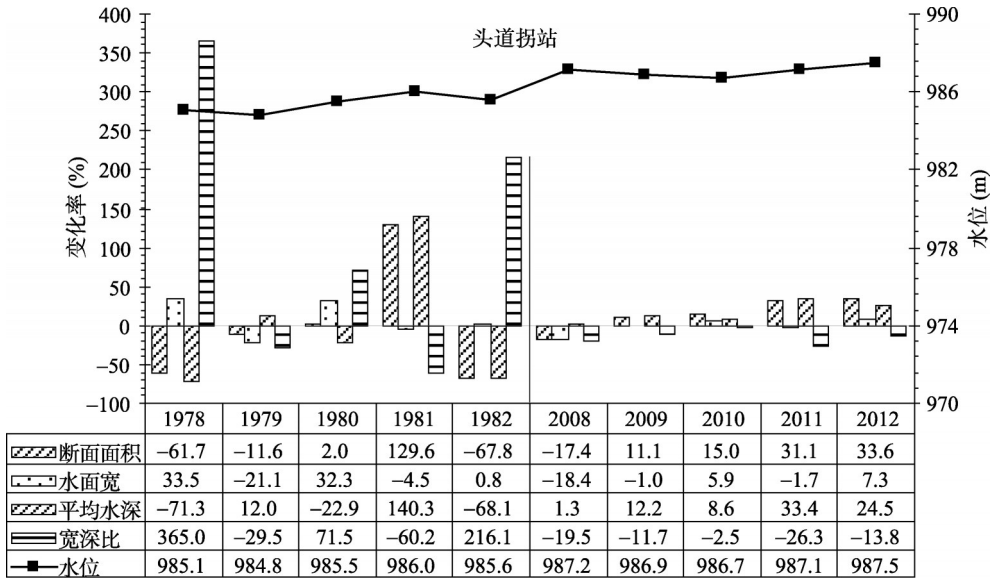


图5 头道拐站汛期前后断面参数变化率

Fig. 5 Change ratios of channel cross-section parameters at Toudaoguai Station after the flooding season

大值和平均值分别为33.6%和21.6%。水面宽变化率在前一时期的最大值和平均值分别为33.5%和18.4%，在后一时期分别为18.4%和6.9%。平均水深变化率在前一时期汛后有增有减，其最大值和平均值分别为140.3%和62.9%；在后一时期均有所增大，最大值和平均值分别为33.4%和16.0%。断面宽深比变化率在前一时期汛后有增有减，其最大值和平均值分别为365.0%和148.5%；在后一时期汛后均为减小，其最大值和平均值分别为-2.5%和-14.7%。通过对比可以发现，头道拐站在后一时期断面参数的变化率较前一时期的显著减小。

4.3 河道断面形态参数变化率空间差异分析

以磴口、巴彦高勒、三湖河口和头道拐4个断面为代表的黄河内蒙古河段河道过水断面参数在大型水库联合运行前后两个时期的汛期平均变化率(图6)。其中断面面积变化率(图6a)和水面宽变化率(图6b)在前一时期沿程呈现上凸曲线特征,并且自巴彦高勒站起沿程呈现减小趋势;在后一时期沿程呈现“S”形变化趋势,二者的最大值均出现在巴彦高勒站,而最小值出现在三湖河口站。平均水深变化率(图6c)和平均宽深比变化率(图6d)在前一时期沿程具有增大趋势(除了头道拐站的平均水深外);在后一时期大致呈现“S”形变化趋势,不同之处是前者的最大值和最小值分别出现在巴彦高勒和三湖河口站,后者则分别出现在三湖河口和巴彦高勒站。宽深比变化率由沿程增大趋势变为增减相间的趋势。同时,4类断面参数的平均变化率在后一时期总体上都小于前一时期。

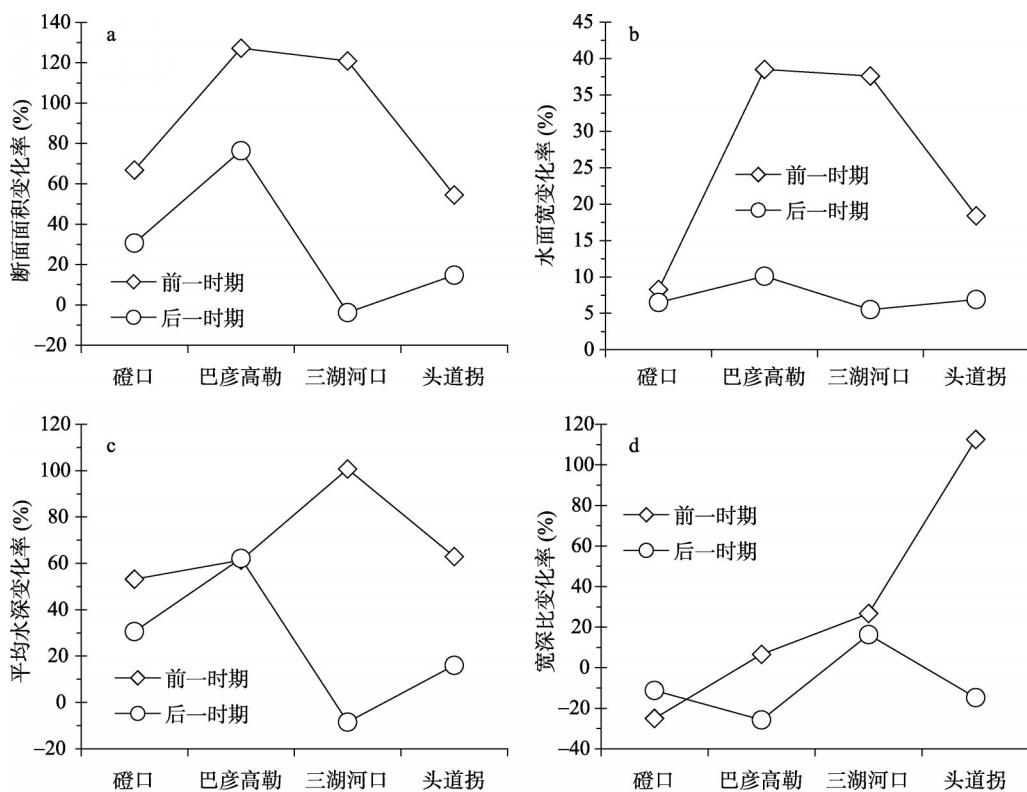


图6 黄河内蒙古河段前后两个时期断面参数平均变化率

Fig. 6 Comparison of change ratios of channel cross-section parameters between the earlier period (1978-1982) and the later period (2008-2012)

5 讨论

5.1 汛期水沙总量变化及对河道过水断面参数调整的影响

造床(平滩)流量是最大限度影响河道调整的因素,任何河流的造床流量都发生在汛期。胡春宏等针对黄河口尾间河道横断面形态变化的研究中指出,河道平滩断面面积随汛期水沙过程的变化最为灵敏,同时,平滩断面面积与汛期来水量成正相关关系^[24]。余明辉等认为,河湾平面形态变化与水库运用后造床流量的减小密切相关^[25]。显然,分

析汛期水沙变化特征是揭示河道形变的关键。黄河内蒙古河段在大型水库联合运行前后,其汛期河道断面形态参数的变化率存在极大的差异性,必然与汛期的水沙过程变化相关。因此,将黄河内蒙古河道上述4个水文站汛期径流量和输沙量绘制于图7,以寻求刘家峡、龙羊峡等大型水库联合运行对汛期水沙过程的影响,从而分析河道断面形态参数变化率的响应。

从图7可见,4个水文站汛期径流量和输沙量在80年代末显著减小,在大型水库联合运行之前的5年中,其平均汛期径流量分别为195.03亿 m^3 、153.0亿 m^3 、164.09亿 m^3 、158.75亿 m^3 ;而之后的5年中分别为147.10亿 m^3 、107.07亿 m^3 、114.93亿 m^3 、108.93亿 m^3 ,并且分别减小了24.58%、30.05%、29.96%、31.38%。各水文站平均汛期输沙量在前一时期分别为0.76亿t、0.80亿t、0.91亿t、0.96亿t,而在后一时期分别为0.26亿t、0.23亿t、0.44亿t、0.34亿t,较前一时期分别减小了66.20%、70.67%、51.84%、64.67%。同期的降水量在黄河上游变化不明显,因此,导致汛期水沙明显降低是水库调节的影响。显然在大型水库联合运行后,汛期径流量与输沙量均较前一时期明显减小,从而使河道在汛期经受的水流冲刷减弱,反映在河道断面形态参数的变化率明显降低。

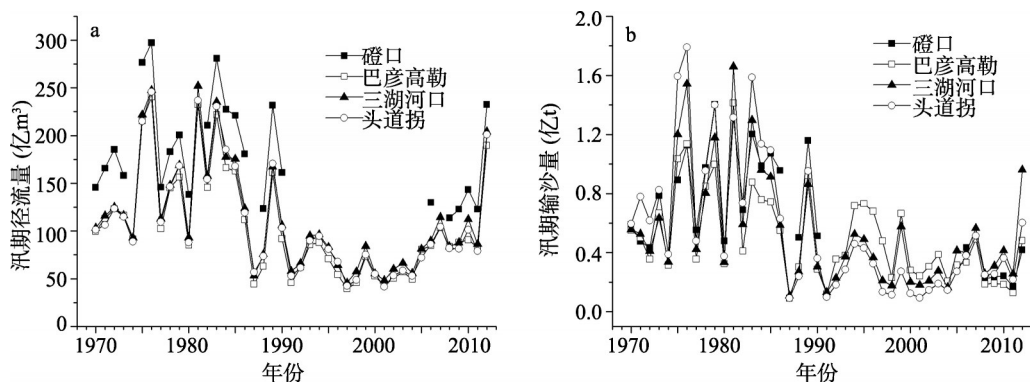


图7 汛期径流量与输沙量年际变化

Fig. 7 Annual variations of runoff and sediment load in the flooding season

5.2 汛期洪峰流量及最大流速对过水河道断面参数调整的影响

大型水库的联合运行不仅通过汛期的蓄水拦沙改变了径流量和输沙量的年内分配,而且也对洪水特性产生了影响。与大型水库联合运行前期相比,黄河内蒙古河段洪水过程在大型水库联合运行之后的特点是洪峰低,历时长^[8],实际上使汛期的洪水流速显著减小,从而使得洪水对河道的冲刷能力显著减小,使得河道断面形态的变化能力减小。Richard et al指出汛期最大流量是影响Rio Grande河道横向移动的因素^[26]。胡春宏等指出,黄河下游河道断面平滩面积随最大洪峰流量的增加而增大^[27]。而最大洪峰流量对应着水流最大流速,因此,有必要对水库运行前后洪峰流量及最大流速的变化进行分析,以探求它们对河道断面形态参数变化率的影响。

图8a表明,黄河内蒙古河段上述4个水文站最大洪峰流量自80年代末明显减小。在大型水库联合运行之前的5年中(前一时期),4个水文站的最大洪峰流量分别为2964 m^3/s 、3322 m^3/s 、3502 m^3/s 、3298 m^3/s ,而在大型水库联合运行之后的5年中(后一时期)分别为1674 m^3/s 、1698 m^3/s 、1836 m^3/s 、1836 m^3/s ,分别较前一时期减小了43.52%、48.89%、47.57%、44.33%,几乎减小了一半。图8b表明,4站汛期最大流速在前一时期分别为3.27 m/s、2.54 m/s、2.87 m/s、3.05 m/s,在后一时期分别为2.83 m/s、2.61 m/s、2.50 m/s、2.64 m/s,除巴彦高勒站变化不大外,其余三站后一时期分别较前一时期减小

了14%、13%、14%。汛期最大流速必然对应汛期最大流量,最大流量表示洪水可以影响的河道断面范围最大,而最大流速则反映了水流改造河道的最大能力。可见,大型水库联合运行不仅减小了汛期最大流量,而且显著减小了汛期最大流速,这必然使汛期河道断面的形变能力减小,这与后一时期汛期断面参数的变化率较前一时期显著减小相一致。因此,汛期最大流量及最大流速是河道断面参数调整的另一影响因素。

5.3 断面参数变化率空间差异的原因

对于黄河内蒙古河段而言,上述4个水文站沿程分布,在大型水库联合运行前后两个时期中这些水文站每年汛期的总流量及最大流量(图8a)相差不大,因此,上述两个时期其河道过水断面形态参数变化率的空间差异性与流量关系不大,但与水动力及河岸物质组成等条件有关。黄河内蒙古河段河型复杂,磴口站位于顺直河段,巴彦高勒站位于辫状河段,三湖河口站位于弯曲河段,而头道拐站位于顺直河段^[28]。这些不同河型段的河道具有不同的稳定性,其中辫状河型段水动力相对较强、河岸组成物质抗冲性差、河道最不稳定,这是巴彦高勒断面面积变化率和水面宽变化率在大型水库联合运行前后两个时期都呈现最大值的主要原因。但是,大型水库联合运行导致了弯曲河段的三湖河口断面的上述形态参数变化率由前一时期的次大值变为后一时期的最小值,这是对水库运行导致汛期流量及最大流速显著减小的明确响应。同理,大型水库联合运行使位于弯曲河段的三湖河口断面的平均水深变化率由前一时期的沿程最大值变为后一时期的沿程最小值,显然,水库运行引起汛期流量和最大流速减小导致后一时期弯曲河段河床冲淤幅度减小,从而反映在过水断面水深的波动性显著变小。总体上看,大型水库联合运行对弯曲河段的三湖河口断面的变化率影响最大,其次为辫状河段的巴彦高勒断面,而影响最小的则是顺直河段的磴口断面。

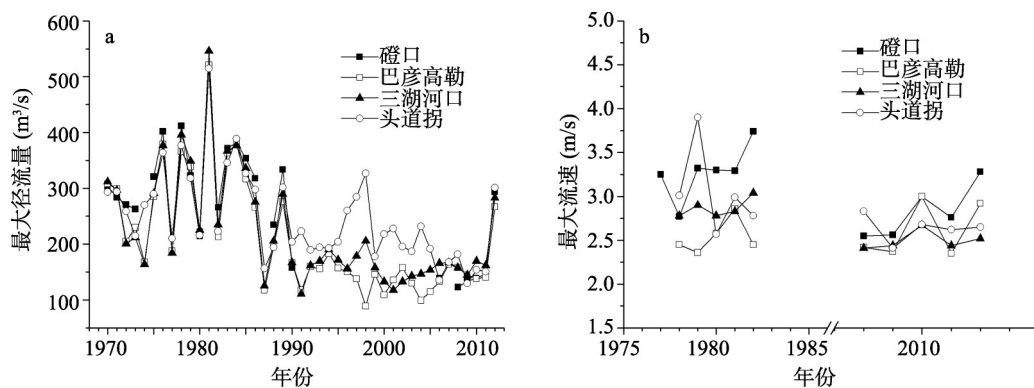


图8 汛期最大流量及最大流速年际变化

Fig. 8 Annual variations of peak discharge and maximum flow velocity in the flooding season

6 结论

应用同水位断面分析方法分析了黄河内蒙古河段磴口、巴彦高勒、三湖河口和头道拐4个主要测站在大型水库联合运行前后各给定5年的汛期断面形态参数的变化率及其原因(大型水库不包括三盛公和青铜峡,因为它们库容均较小)。主要结论如下:

(1) 在大型水库联合运行前后两个时段的任意一年,在经历汛期洪水冲刷之后,同水位下河道断面面积、水面宽、平均水深及宽深比总体上以增大为主,变化率为正值;只有个别形态参数有所减小,变化率则为负数。

(2) 这些断面的汛期同水位河道断面形态参数的变化率在大型水库联合运行之前的5个年份较大,之后的5个年份则明显减小。同时,比较全部断面同水位下同类形态参数的平均变化率可以发现,断面面积变化率减小了3.4倍(由大型水库联合运行之前的92.4%变为之后的27.5%);水面宽变化率减小了3.5倍(由之前的25.7%变为之后的7.3%);平均水深减小了2.8倍(由之前的69.6%变为之后的25.1%)。

(3) 大型水库联合运行使黄河内蒙古弯曲河段的三湖河口断面的形态参数变化率由之前的次大值或者最大值变为最小值,从而使研究区4个河道断面形态参数变化率的沿程分布模式由之前的上凸曲线变为增减相间的“S”形曲线。

(4) 由于大型水库联合运行的首要任务是削减洪峰流量、增补枯水期流量,这在显著削减研究河段汛期的总径流量和总输沙量的同时,也明显降低了汛期最大流量和最大流速。导致大型水库联合运行之后的洪水冲刷造床的能力显著变弱,河道断面形态参数的变化率相应显著减小。显然,大型水库的联合运行使黄河内蒙古河道与之前相比明显萎缩,面临的重要风险是不利于可能遭遇的极端大洪水的安全行洪。

(5) 因应黄河内蒙古河段由于大型水库联合运行所引起的河道萎缩、不利于极端洪水安全行洪的风险,需要合理利用水库的调节功能,有效控制汛期总水沙量和洪峰流量,避免因过度调节而使河道持续萎缩,为可能出现的极端大洪水的安全行洪创造条件。

参考文献(References)

- [1] Wang Suiji, Li Ling. Lateral shift rate variation of the river banks in the Yinchuan Plain reach of the Yellow River and its causes. *Acta Geographica Sinica*, 2014, 69(3): 399-408. [王随继, 李玲. 黄河银川平原段河岸摆动速率变化及原因. *地理学报*, 2014, 69(3): 399-408.]
- [2] 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.]
- [3] 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*, 2007, 92: 30-37.
- [4] Shi Changxing, Shao Wenwei, Fan Xiaoli et al. A study on characteristics and sediment rating curves of floods in the Inner Mongolian reach of the Yellow River. *Progress in Geography*. 2012, 31(9): 1124-1132. [师长兴, 邵文伟, 范小黎等. 黄河内蒙古段洪峰特征及水沙关系变化. *地理科学进展*, 2012, 31(9): 1124-1132.]
- [5] Zhou Liyan, Cui Zhenhua, Luo Qiushi. Water and sediment variation and characteristics of scouring and deposition of Ningxia-Inner Mongolia reach of the Yellow River. *Yellow River*, 2012, 34(1): 25-26. [周丽艳, 崔振华, 罗秋实. 黄河宁夏宁蒙河道水沙变化及冲淤特性. *人民黄河*, 2012, 34(1): 25-26.]
- [6] Zhang Xiaohua, Su Xiaohui, Zheng Yanshuang et al. Features and trends of recent changes in runoff and sediment regimes in wide-valleyed desert reach of upper Yellow River. *Journal of Sediment Research*, 2013, (2): 44-51. [张晓华, 苏晓慧, 郑艳爽等. 黄河上游沙漠宽谷河段近期水沙变化特点及趋势. *泥沙研究*, 2013, (2): 44-51.]
- [7] Qin Yi, Zhang Xiaofang, Wang Fenglong et al. Scour and silting evolution and its influencing factors in Inner Mongolia reach. *Acta Geographica Sinica*, 2011, 66(3): 324-330. [秦毅, 张晓芳, 王凤龙等. 黄河内蒙古河段冲淤演变及其影响因素. *地理学报*, 2011, 66(3): 324-330.]
- [8] 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. 黄河宁夏段洪水过程变化特点. *资源科学*, 2012, 34(1): 65-73.]
- [9] Shi Changxing, Fan Xiaoli, Shao Wenwei et al. Channel change of the Inner Mongolian reach of the Yellow River and its causes. *Geographical Research*, 2013, 32(5): 787-796. [师长兴, 范小黎, 邵文伟等. 黄河内蒙古河段河床冲淤演变特征及原因. *地理研究*, 2013, 32(5): 787-796.]
- [10] 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.]

- [11] Hou Suzhen, Wang Ping, Chang Wenhua et al. Evaluation on the volume of scour and fill of Inner Mongolia section of the Yellow River. *Yellow River*, 2007, 29(4): 21-23. [侯素珍, 王平, 常温花 等. 黄河内蒙古河段冲淤量评估. *人民黄河*, 2007, 29(4): 21-23.]
- [12] Petts G E. Complex response of river channel morphology subsequent to reservoir construction. *Progress in Physical Geography*, 1979, 3(3): 329-362.
- [13] Ta W, Xiao H, Dong Z. Long-term morphodynamic changes of a desert reach of the Yellow River following upstream large reservoirs' operation. *Geomorphology*, 2008, 97(3): 249-259.
- [14] Zhao Wenlin, Cheng Xiuwen, Hou Suzhen et al. Analysis of scouring and sedimentation in the channel from Ningxia to Inner Mongolia in the upper Yellow River. *Yellow River*, 1999, 21(6): 11-14. [赵文林, 程秀文, 侯素珍 等. 黄河上游宁夏河段冲淤变化分析. *人民黄河*, 1999, 21(6): 11-14.]
- [15] 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.]
- [16] Wang H, Yang Z, Saito Y et al. Stepwise decreases of the Huanghe (Yellow River) sediment load (1950-2005): Impacts of climate change and human activities. *Global and Planetary Change*, 2007, 57(3): 331-354.
- [17] Ran Lishan, Wang Suiji. Study on channel evolution and hydraulic geometry in the Inner Mongolia reach of the Yellow River. *Journal of Sediment Research*, 2010, (4): 61-67. [冉立山, 王随继. 黄河内蒙古河段河道演变及水力几何形态研究. *泥沙研究*, 2010, (4): 61-67.]
- [18] Feng Guohua, ChaoLun Bagen, Gao Ruizhong et al. Research on ice flood control strategy for Inner Mongolia reach of Yellow River. *Hydrology*, 2009, 29(1): 47-49. [冯国华, 朝伦巴根, 高瑞忠 等. 黄河内蒙古段防凌对策研究. *水文*, 2009, 29(1): 47-49.]
- [19] Hu Xinglin, Wang Jing, Lan Yongchao et al. Relationship between channel scouring/silting amount and water-sediment transport process in Inner Mongolia reach of Yellow River. *Journal of China Hydrology*, 2012, 32(2): 44-48. [胡兴林, 王静, 蓝永超 等. 黄河内蒙古段河道冲淤量与泥沙输移过程的关系分析. *水文*, 2012, 32(2): 44-48.]
- [20] Wang Hongfang, Jia Xiaopeng, Wang Haibing. Effect of flood scouring channel deposits in Inner Mongolia reach of the Yellow River. *Journal of Desert Research*, 2014, 34(4): 1143-1149. [汪宏芳, 贾晓鹏, 王海兵. 黄河内蒙古段淤积泥沙洪水冲刷效应. *中国沙漠*, 2014, 34(4): 1143-1149.]
- [21] Yao Huiming, Qin Fuxing, Shen Guochang et al. Ice regime characteristics in the Ningxia-Inner Mongolia reach of Yellow River. *Advances in Water Science*, 2007, 18(6): 893-899. [姚惠明, 秦福兴, 沈国昌 等. 黄河宁夏河段凌情特性研究. *水科学进展*, 2007, 18(6): 893-899.]
- [22] Xu Jiongxin. Temporal and spatial variations in erosion and sediment yield and the cause in the ten small tributaries to the Inner Mongolia reach of the Yellow River. *Journal of Desert Research*, 2014, 34(6): 1-9. [许炯心. 黄河内蒙古段支流“十大孔兑”侵蚀产沙的时空变化及其成因. *中国沙漠*, 2014, 34(6): 1-9.]
- [23] Yellow River Conservancy Commission. The hydrological data in the Yellow River Basin, 1976-1982, 2008-2012. [黄河水利委员会. 黄河流域水文资料, 1976-1982, 2008-2012.]
- [24] Hu Chunhong, Zhang Zhihao. Relationship between adjustment of section configuration and flow-sediment of tail channels in the Yellow River estuary. *Journal of Basic Science and Engineering*, 2011, 19(4): 543-553. [胡春宏, 张治昊. 黄河口尾闾河道横断面形态调整及其与水沙过程的响应关系. *应用基础与工程科学学报*, 2011, 19(4): 543-553.]
- [25] Yu Minghui, Dou Shentang, Kong Fanhui et al. Investigation on the variation of meandering channels downstream reservoirs. *Journal of Sediment Research*, 2006, (2): 77-81. [余明辉, 窦身堂, 孔凡辉 等. 水库下游河湾平面形态变化规律研究. *泥沙研究*, 2006, (2): 77-81.]
- [26] Richard G A, Julien P Y, Baird D C. Statistical analysis of lateral migration of the Rio Grande, New Mexico. *Geomorphology*, 2005, 71(1): 139-155.
- [27] Hu Chunhong, Chen Jianguo, Liu Dabin et al. Studies on the features of cross section's profile in lower Yellow River under the conditions of variable incoming water and sediment. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2006, 37(11): 1283-1289. [胡春宏, 陈建国, 刘大滨 等. 水沙变异条件下黄河下游河道横断面形态特征研究. *水利学报*, 2006, 37(11): 1283-1289.]
- [28] 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.]

Impact of joint operation of reservoirs on the change ratio of downstream cross-sectional geometry parameters: A case study of the Inner Mongolian reach of the Yellow River

SU Teng^{1,2}, WANG Suiji¹, MEI Yanguo^{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: Studies of the impacts of reservoir operation on downstream channel changes have been a hot spot in fluvial geomorphology in the last decades. However, it remains unknown on how to quantitatively express channel adjustments induced by the joint operation of upstream reservoir systems. The joint operation of the Liujiaxia and Longyangxia reservoirs on the upper Yellow River since 1986 has significantly influenced downstream channel variations. The objective of the paper is to analyze the channel cross-section changes at Dengkou, Bayangaole, Sanhuhekou, and Toudaoguai gauge stations located in the Inner Mongolian reach of the upper Yellow River in the period 1978-1982 (the earlier period, before the joint operation) and the period 2008-2012 (the later period, after the joint operation). As for the four gauge stations, we calculated the change ratios of cross-sectional geometry parameters, including channel cross-section area, water width, mean water depth, and the ratio of width to depth, at a given water level after the flooding season. The results show that most of the change ratios of the geometry parameters increased remarkably after the flooding season. Furthermore, the change ratio of each parameter at all the channel cross-sections decreased significantly in the later period compared with that during the earlier period. The change ratio of the cross-section area decreased 3.4 times while that of the water width and mean water depth decreased 3.5 times and 2.8 times, respectively. Spatially, the downstream variations of the change ratio of the geometry parameters evolved from a convex curve in the earlier period to an "S"-shaped curve in the later period. The observed decreases of the change ratios of channel geometry parameters are due to the joint operation of large upstream reservoirs. These reservoirs stored a large amount of flood water and reduced the peak discharge and maximum flow velocity in the flooding season; as a result, the erosion ability of the floods decreased. With the joint operation of the large reservoirs, the Inner Mongolian reach of the Yellow River shrunk significantly in recent years and the channel is faced with a great risk of extreme floods. Therefore, it is necessary to reasonably utilize the dam's adjustment functions for a better control of runoff and sediment export in the flooding season. With effective measures taken, the channel can avoid further shrinkage and is thus ready for extreme floods.

Keywords: channel cross-section; geometry parameters; change ratio; reservoir; joint operation; Yellow River; Inner Mongolia