

黄河临河辫状河段心滩变化及其影响因素分析

梅艳国^{1,2}, 王随继¹

(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重点实验室, 北京 100101; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要:心滩作为辫状河道最主要的微地貌特征,其变化特征的研究对于理解辫状河道的演变具有重要意义。以黄河临河段 213 km 长的辫状河道为研究对象,基于 1988—2013 年的遥感图像绘制了相应日期的河道平面形态图,分析了该河段心滩数量和心滩面积变化;利用 2013 年内 6 幅河道平面图建立了心滩面积与巴彦高勒站水位之间的线性关系式,利用该关系式求取了其他年份 1 050 m 参考水位下的心滩面积并进行心滩冲淤变化对比。结果表明:黄河临河段心滩总个数、心滩总面积、心滩平均面积、中位数心滩面积和最大心滩面积总体上都具有减小的趋势。在 1 050 m 参考水位下,黄河临河段心滩面积在 1988—2013 年具有不同的冲淤变化特征,其中在 2000 年以前的变化幅度大,趋势不明显,2000 年以后则分布较为集中,且有减小的趋势,并在 1990—2000 年大幅减小。在龙羊峡、刘家峡等水库运行影响下汛期黄河临河段水量和输沙量占全年的比例在减小,年内分配趋于均衡化,并且输沙量的减幅要大于水量的减幅,这对于研究区心滩的冲淤有重要影响。同时,上游流域来沙系数的变化也在一定程度上影响着该河段心滩的冲淤变化。

关键词:黄河; 辫状河段; 心滩; 冲淤变化; 影响因素

中图分类号: TV143

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2017)03-0157-07

Variation of Mid-channel Bars in Linhe Braided Channel of the Yellow River and Its Influencing Factors

MEI Yanguo^{1,2}, WANG Suiji¹

(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: As the main micro-geomorphic features of the braided channel, study on variation of the mid-channel bars contributes to understanding the evolution of the braided channel. Taking the braided channel with a channel length of 213 km in Linhe of the Yellow River as an example, we drew the channel planform in different years from 1988 to 2013, furthermore, we analyzed the variation of the numbers and sum area of the mid-channel bars based on the remote sensing images. We fitted a relationship between area of mid-channel bars and the water level of Bayangaole gauging station according to six images and the hydrological data in 2013. Then, the areas of mid-channel bars at the reference water level of 1050 meters in other years during the period from 1988 to 2013 were calculated by the relationship to compare the erosion-deposition of the mid-channel bars. The results show that the total numbers, mean area, total area, median area, and the largest area of the mid-channel bars in the Linhe have the decreasing trend as the whole. At the reference water level of 1 050 meters, the erosion-deposition variations of the mid-channel bars from 1988 to 2013 are different. The variation trend of the mid-channel bars was not obvious before 2000. Their distribution was more concentrated and had a decreasing trend after 2000. The significant decrease of mid-channel bar areas occurred in the period from 1990 to 2000. In the river reach, the proportions of runoff and sediment load in flood season accounting for the whole year decreased. This phenomenon was affected mainly by the joint operation of Longyangxia and Liujiaxia reservoirs. The distribution of runoff and sediment load in a year tends to be equal and the sediment load decreased to a greater extent than runoff. This has an important influence on the erosion-accretion variation of the mid-channel bars in the study reach. At the same time, the

收稿日期: 2016-04-21

修回日期: 2016-05-23

资助项目: 国家自然科学基金(41271027, 41571005); 国家重点基础研究发展计划项目(2011CB403305)

第一作者: 梅艳国(1990—), 男, 山东菏泽人, 硕士研究生, 研究方向为河流地貌学。E-mail: meiyg.13S@igsnrr.ac.cn

通信作者: 王随继(1966—), 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@igsnrr.ac.cn

changes of the sediment delivery coefficient from upstream can affect the erosion-deposition variation of mid-channel bars in this reach to a certain extent.

Keywords: Yellow River; the braided channel; mid-channel bars; erosion-deposition variation; influencing factors

冲积河流针对不同的来水来沙和边界条件具有一定的自动调整作用,表现为特定的形态和变化,使其可以趋向于一种平衡状态^[1]。黄河内蒙古河段作为黄河上游的主要冲积河段之一,近几十年来由于气候变化、沿黄工农业用水增加和水利枢纽工程建设等人类活动的影响,尤其是1986年龙羊峡和刘家峡水库的联合运行,该河流段水沙过程发生了很大的变化^[2-5],河段淤积速率增加,主河槽淤积严重,过流能力逐渐减低,防洪防凌形式严峻,严重威胁了两岸人民的生产和生活^[6-9]。很多研究者针对该河段的淤积成因进行了分析。赵文林等^[6]认为龙羊峡水库运行后宁蒙河段开始淤积。杨根生等^[10]通过对内蒙古河段河道淤积泥沙打钻采样分析认为该段河道泥沙淤积主要来源于乌兰布和沙漠及库布齐沙漠和丘陵沟壑梁地。刘晓燕等^[11]通过分析内蒙古河段1960—2006年断面输沙量资料认为内蒙古河段淤积受十大孔兑洪水、梯级水库的联合运行和汛期降水减少的共同影响。秦毅等^[12]通过横断面面积指标计算方法分析黄河内蒙古河段冲淤演变时发现冰期的低温输沙效应造成巴彦高勒断面淤积加重,十大孔兑来沙淤堵河道也会影响三湖河口河道的冲淤变化。侯素珍等^[13]认为内蒙古河段上段巴彦高勒至三湖河口冲淤变化主要受来流的水沙组合和风沙入黄量影响,下段三湖河口至头道拐主要受孔兑来沙的影响。针对该段冲淤量的计算方法,吴保生等^[14]通过对多沙河流“多来多排”输沙基本公式进行修正,并根据黄河内蒙古河段的实测水沙资料建立了内蒙古河段的年输沙量计算公式和淤积量的计算方法,王彦君等^[15]在此基础上建立了内蒙古河段汛期和非汛期输沙量的计算公式,并通过实测资料进行了验证,效果很好。还有学者从河道横断面形态变化对水沙的响应、水库运行对汛期断面形态参数影响及不同河型对洪水过程的响应等角度对内蒙古河段进行了研究^[16-18]。临河段(巴彦高勒至三湖河口)作为黄河内蒙河段淤积最为严重的河段,也是演变最为复杂的河段,对其微地貌变化特征进行的研究还很少见。黄河临河段作为辫状河流,其心滩是最为典型的微地貌特征。为此,本文利用1988—2013年的遥感影像资料在ArcGIS中绘制河道平面形态图,分析该河段的心滩在不同时期的数量变化、面积变化等,揭示该河段河道冲淤变化规律,对于该河段的河道治理具有一定的参考作用。

1 研究区概况

黄河内蒙古河段位于黄河上游的下端,位于 $106^{\circ}10'—112^{\circ}50'E$, $37^{\circ}35'—41^{\circ}50'N$,处于黄河流域的最北端,每年有长达5个月的凌汛^[19]。干流从宁夏的石嘴山到托克托县河口镇(头道拐),长达673 km,其间有石嘴山、巴彦高勒、三湖河口和头道拐4个主要水文站,多种河型共存于该河段。其中临河段位于阴山山脉和鄂尔多斯高原之间,长约213 km,河床平均比降为0.16‰^[16],河床宽浅,河道横向变化幅度大,属于游荡型(辫状)河道^[20],是典型的冲积性河道。由于临河段没有较大支流的汇入,床面物质主要为自上游携带以及风沙入黄沉降而来的细颗粒泥沙^[21],其河床冲淤主要受上游来水来沙的影响^[11],位于三湖河口下游的十大孔兑每年约向黄河输入0.2亿t的泥沙^[22],在来沙大的年份会造成黄河干流拥堵,导致巴三段地方侵蚀基准面抬高进而影响该河段的河床冲淤变化^[12]。

2 数据来源及研究方法

遥感技术因具有宏观、动态、实时、可供系统地进行大尺度调查与监测的优势而在河道变化规律研究方面具有特殊的作用^[23-25]。本文采用1988—2013年汛期22幅遥感影像(其中2013年6幅,个别年份没有数据),全部申请下载于地理空间数据云(<http://www.gscloud.cn/>),其中2001—2003年和2013年遥感数据为分辨率为15 m的ETM数据,其余数据均为分辨率为30 m的TM数据。由于黄河临河段河道宽浅,水位对河道边界和心滩面积影响较大,在选取遥感影像时尽量选取水位较低时期遥感数据,同时考虑到遥感影像分辨率对心滩提取误差的影响,对于面积小于 0.01 km^2 的心滩不予计算。文中采用的水文站的水文泥沙信息由黄河水利委员会根据国家标准测量所得,并记录于黄河流域水文年鉴^[26]。

在WGS84坐标系下,首先在Envi软件中对遥感影像进行波段4,3,2的假彩色合成以突出河道边界及心滩信息;然后选用1:5万地形图作为标准对TM,ETM影像进行配准(误差控制在0.5个像元之内);最后利用ArcGIS软件对不同年份遥感影像的河岸、主流线、边滩及心滩进行数字化,绘制各年份的河道平面形态图(图1),并对河道岸线长度、岸线内河道面积、全部心滩个数及面积等进行统计。

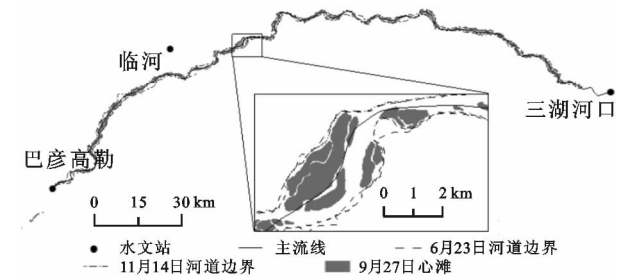


图 1 2013 年部分日期河道边界及心滩提取图

考虑到水位不同对于心滩统计结果的影响,对 2013 年 6 幅 ETM 图像所得心滩面积与图像拍摄日巴彦高勒站水位进行拟合,获得心滩面积与水位的线性关系,利用同水位条件下对其他年份心滩的统计结

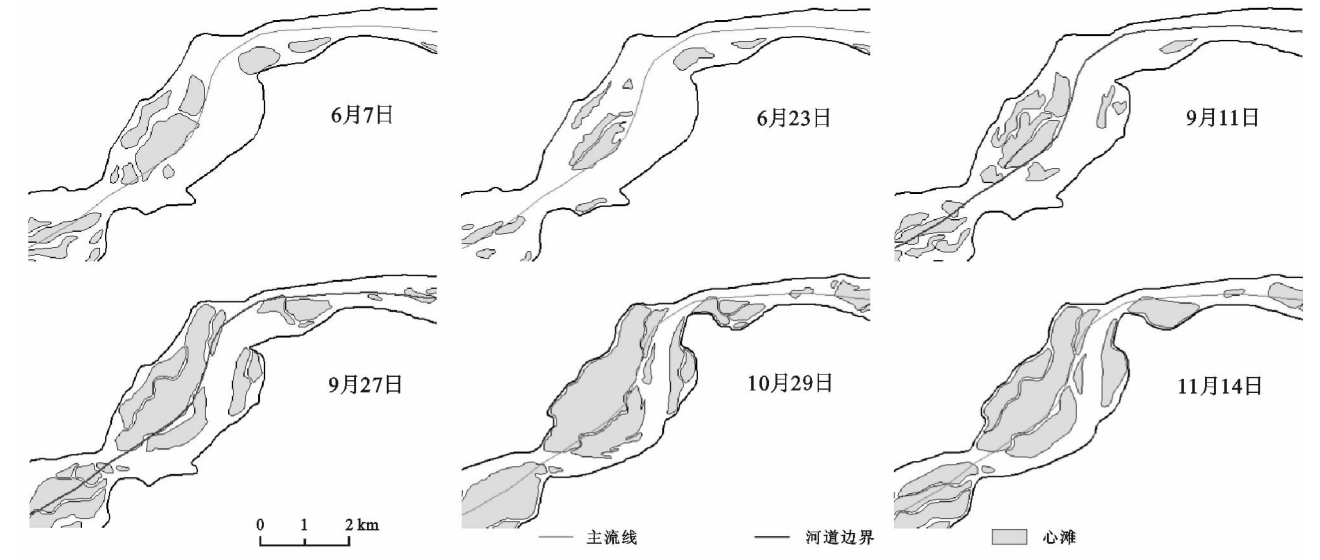


图 2 2013 年临河段局部河段河道平面形态放大图

表 1 为黄河临河段 1988—2013 年 25 a 间心滩的统计特征,其中对其心滩面积按照 $0.01 \sim 0.05 \text{ km}^2$, $0.05 \sim 0.1 \text{ km}^2$, $0.1 \sim 0.5 \text{ km}^2$, $0.5 \sim 1.0 \text{ km}^2$, $1.0 \sim 3.0 \text{ km}^2$, $>3 \text{ km}^2$ 共 6 个区间段进行分区间统计其在不同区间面积的心滩个数。从心滩面积分区间统计特征值可以看出,位于 $0.1 \sim 0.5 \text{ km}^2$ 区间的心滩个数最多,往两边逐渐减少,其中 $>3 \text{ km}^2$ 的个数是最少的,且在 2000 年之后大于 3 km^2 的心滩面积仅为 1~2 个,要远小于 2000 年之前大于 3 km^2 的心滩个数。其中 1989 年 8 月 24 日临河段处于汛期水位下,无论其心滩总面积、心滩总个数、各区间段的心滩个数,还是其最大心滩面积,都要小于其他年份心滩的统计特征值,足以看出水位高低对于心滩面积的影响。

临河段心滩总个数最小超过了 175 个(除 1989 年外),最大个数不超过 325 个,且 20 世纪 90 年代心滩个数要明显大于 2000 年之后的心滩个数。在 90 年代,临河段心滩个数最小为 228,基本维持在 300 个左右,而在 2000 年之后除个别年份超过了 250 个,其他年份基本在 200 个左右。临河段心滩总数在 25 a 间整

果进行拟合,进而得到黄河临河段河道心滩的冲淤变化,具有更强说服力。

3 结果与分析

3.1 临河段心滩统计特征变化

基于 2013 年 6 幅遥感影像绘制了黄河临河段的河道平面形态(图 1),为了清晰起见,将局部河段放大见图 2,可以看出不同时期心滩的大小相差较大,显然,水位高低不同对心滩有很大影响。同样,基于 1988—2013 年汛期 17 幅影像进行了河道平面形态绘制,并计算出黄河临河段相应影像的心滩特征值(表 1)。

体上呈减少的趋势,变化趋势不是很明显,在 2000 年之后具有略微增加的趋势。图 3A,3B 表明,1995 年之前心滩总面积和平均心滩面积都要大于 2000 年之后的(除 1989 年外),且整体上都具有减小的趋势,平均心滩面积的变化趋势更为明显。在 2000 年之前,平均心滩面积最小也达到了 0.5 km^2 ,最大为 0.75 km^2 ,分布比较分散;2000 年之后其平均心滩面积都不超过 0.5 km^2 ,最小为 0.25 km^2 ,分布也比较分散。心滩总面积在 2000 年前后的差距较大,心滩总面积在 2000 年之前在 $120 \sim 230 \text{ km}^2$ 波动,分布比较散,而 2000 年之后心滩总面积集中在 $60 \sim 100 \text{ km}^2$ 。

图 3C 表明,中位数心滩面积总体上具有减小的趋势,但 2000 年之前在 $0.25 \sim 0.30 \text{ km}^2$ 波动,变化趋势不明显;2000 年之后的变化范围为 $0.125 \sim 0.30 \text{ km}^2$,有明显减小趋势。对比临河段平均心滩面积可以发现,中位数心滩面积要小于平均心滩面积,两者之间的差距基本在 $0.2 \sim 0.3 \text{ km}^2$,说明大于中位数心滩面积的心滩个数及其总面积多于小于中位数心滩面积的心滩个数。图 3D 为临河段 1988—2013 年

历年最大心滩面积,其整体上变化趋势不大,在 2000 年之前其分布更为分散,最大值超过 7.5 km²,最小值仅为 2.5 km²;在 2000 年之后,其最大心滩面积变

化不大,基本维持在 3 km² 上下。且从表 1 中可以发现 2000 年之前大于 3 km² 的心滩个数明显要大于 2000 年之后的。

表 1 1988—2013 年黄河临河段心滩统计特征值

影像拍摄日期 (年-月-日)	心滩个数/个						心滩 总数/个	总面积/ km ²	平均 面积/km ²	中位数/ km ²	最大 面积/km ²
	0.01~0.05	0.05~0.1	0.1~0.5	0.5~1.0	1.0~3.0	>3					
	km ²	km ²	km ²	km ²	km ²	km ²					
1988-05-01	8	36	143	45	49	10	291	196.88	0.68	0.30	5.64
1989-08-24	10	26	58	20	10	0	124	47.66	0.38	0.15	2.82
1990-07-10	5	35	137	40	33	1	251	125.89	0.50	0.26	3.09
1991-08-30	27	51	126	56	40	15	315	213.67	0.68	0.28	7.66
1992-09-17	25	40	139	47	44	7	302	177.79	0.59	0.29	4.01
1993-06-16	13	33	122	62	62	9	301	226.55	0.75	0.41	5.65
1995-09-10	2	36	118	39	31	2	228	119.91	0.53	0.28	3.72
2001-10-04	14	27	103	36	14	1	195	79.40	0.41	0.23	3.12
2002-09-29	6	23	99	40	10	1	179	73.56	0.41	0.28	3.94
2004-09-18	16	37	122	16	8	1	200	55.04	0.28	0.17	3.14
2005-08-04	62	40	121	41	21	2	287	96.28	0.34	0.16	3.31
2006-10-10	22	21	84	37	25	1	190	92.72	0.49	0.27	3.15
2007-07-09	21	27	100	33	17	0	198	77.13	0.39	0.25	2.56
2009-07-30	49	37	98	36	37	2	259	125.93	0.49	0.46	4.46
2010-07-01	33	33	86	28	14	1	195	71.92	0.37	0.17	3.54
2011-06-18	34	32	96	22	16	1	201	72.20	0.36	0.16	3.55
2013-10-29	57	44	103	25	17	3	249	79.21	0.32	0.13	4.10

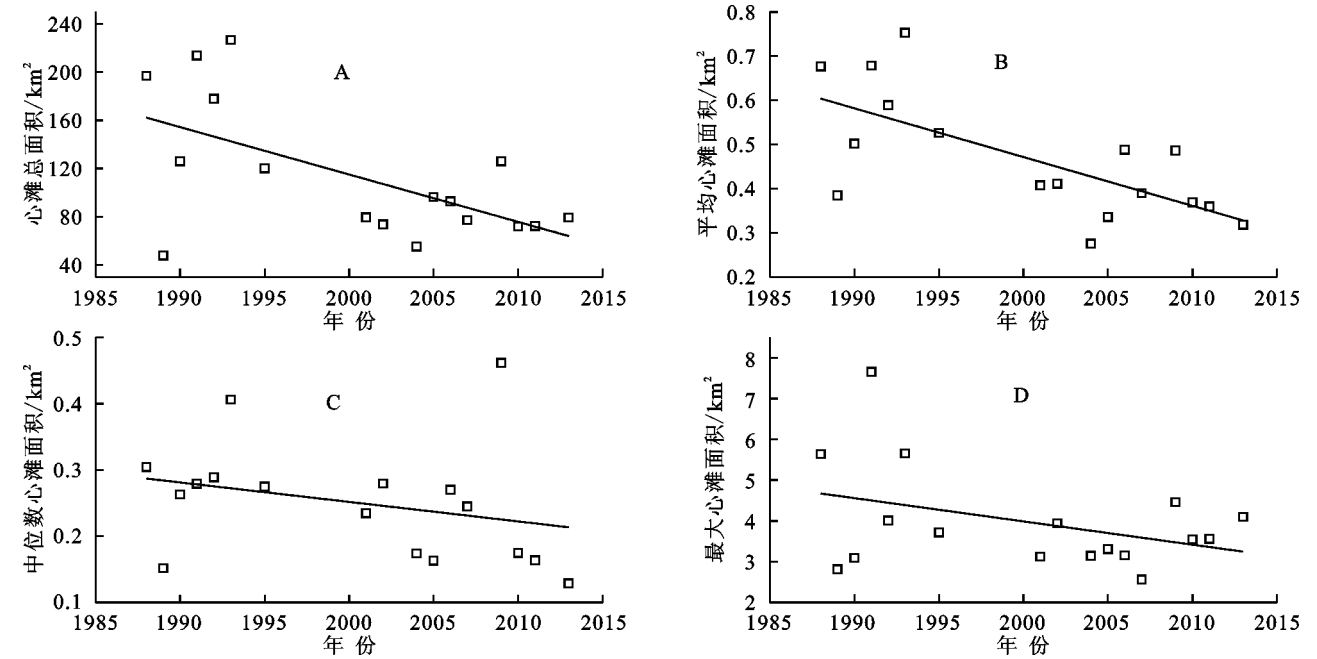


图 3 临河段年心滩总面积、平均面积、中位数面积和最大面积变化趋势

从临河段心滩统计特征值的变化趋势可以发现,心滩总个数、心滩总面积、心滩平均面积、中位数心滩面积和最大心滩面积在 2000 年之前都大于 2000 年之后,总体上具有减小的趋势,且除了心滩总个数和中位数心滩面积外,其他几项的统计特征值在 2000 年之前的变化幅度范围都是要大于 2000 年之后的,尤其是心滩总面积和最大心滩面积。

3.2 临河段心滩冲淤变化

分析心滩冲淤变化最理想的方法就是对其水上和水下部分都进行精准的地形测量,但地形测量成本

高且数据较难获得,因此,采用遥感数据通过统计心滩面积变化来反映心滩冲淤变化就比较简单。李志威等^[27]在对三峡水库运行前后长江中下游江心洲的演变进行研究时指出江心洲面积变化除了受洲体冲刷和淤积影响外,对河道水体面积变化更加敏感。心滩面积变化对水位变化尤其敏感。只要想办法消除水位变化对心滩面积变化的影响,就可以通过心滩面积变化来估算心滩的冲淤面积变化。

选取研究区 2013 年的 6 幅 ETM 遥感数据对其心滩面积进行统计,所得结果见表 2。当巴彦高勒站水位介于 1 049.73~1 051.25 m 时,随着水位的增加,临河段心滩个数及心滩总面积在减少、而河道内水体面积在增加,其中心滩个数的最大值和最小值之间可以相差 1 倍,最大心滩面积是最小心滩面积的 4 倍之多。而当年

的巴彦高勒站水位对于河道面积(即河道边界内面积)和河道主流线长度的影响微乎其微,因此,河道宽度变化不大,河道的水体平均宽度和 W/W_{tot} (水体宽度与河道宽度比值)对巴彦高勒水位的响应和河道水体面积相一致。临河段心滩个数和面积都与巴彦高勒站水位呈负的线性关系,其 R^2 达到 0.87。水体平均宽度和 W/W_{tot} 与巴彦高勒站水位呈正的线性关系, R^2 也都达到了 0.85 以上。其中,心滩个数、心滩面积、河道水体平均宽度、 W/W_{tot} 与巴彦高勒水文站水位之间的关系如下:

$$y_1 = -86.558x + 91143 \qquad y_2 = -47.862x + 50340$$
$$y_3 = 0.2886x - 302.24 \qquad y_4 = 0.2011x - 201.46$$

式中: x 表示水位; y_1 表示心滩个数; y_2 表示心滩面积; y_3 表示河道水体平均宽度; y_4 表示 W/W_{tot} ;其决定系数 R^2 分别为 0.848 2,0.876 8,0.883 8,0.869 2。

表 2 黄河临河段 2013 年河道特征值统计及巴彦高勒站水位

成像日期 (月-日)	水位/ m	心滩 个数/个	河道 面积/km ²	洲滩 面积/km ²	水体 面积/km ²	主流线 长度/km	河道 宽度/km	河道水体 宽度/km	W/ W _{tot}
06-07	1050.88	216	248.76	48.61	200.15	203.35	1.22	0.98	0.80
03-26	1051.25	119	248.76	21.89	226.88	200.28	1.24	1.13	0.91
09-11	1051.22	152	255.14	30.01	225.13	201.83	1.26	1.12	0.88
09-27	1050.07	276	255.14	70.45	184.69	206.18	1.24	0.90	0.72
10-29	1049.84	249	238.63	79.21	159.43	210.06	1.14	0.76	0.67
11-14	1049.73	274	240.19	118.52	121.67	210.07	1.14	0.58	0.51

为了估算其他年份临河段心滩冲淤,基于 2013 年数据建立的相关关系式,设定水位为 1 050 m 时,分析不同年份心滩面积的变化趋势。利用 2013 年黄河临河段心滩面积与巴彦高勒站水位的拟合关系式将 1988—2013 年 8 个年份的心滩面积换算到 1 050 m 水位时的面积(表 3,图 4),由于部分年份难以收集到水位资料,故只计算了其中 8 个年份的心滩面积。

由图 4 可知,临河段心滩面积在这 25 a 间整体上呈现减小趋势,在 2000 年之前,其心滩面积分布比较分散,变化趋势不明显;在 2000 年之后其心滩面积的减小趋势更为明显,变化更为集中。

表 3 根据拟合公式换算后的临河段心滩面积

影像日期 (年-月-日)	巴彦高勒 水位/m	心滩 面积/km ²	换算 水位/m	换算后心 滩面积/km ²
1988-05-01	1049.18	196.88	1050	157.63
1989-08-24	1051.19	47.66	1050	104.62
1990-07-10	1050.29	125.89	1050	139.77
2006-10-10	1050.35	92.72	1050	109.47
2009-07-30	1049.94	125.93	1050	123.06
2010-07-01	1050.17	71.92	1050	80.05
2011-06-18	1050.27	72.20	1050	85.13
2013-09-27	1050.07	70.45	1050	73.80

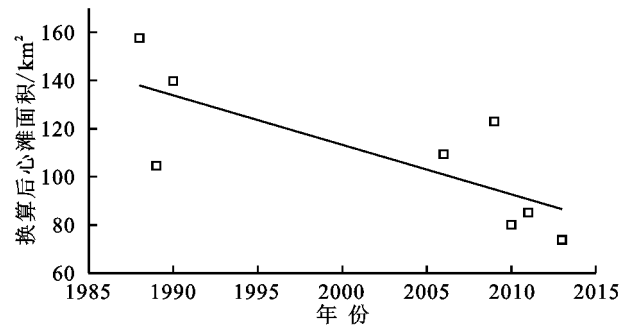


图 4 黄河临河段在给定水位 1 050 m 时的心滩面积变化趋势

4 讨论

冲积性河流河道泥沙输移及河道冲淤过程影响因素众多,一方面与河道水动力条件即河道来水来沙条件有关,另一方面与河岸及河床组成物质密切相关^[14];同时,地方侵蚀基准面的抬高或降低也会对上中游河道的冲淤变化造成一定的影响。近年来由于气候变化和人类活动的影响,尤其是水库和水坝的建设,改变了河流的来水来沙关系进而对河道的冲淤变化产生了比较大的影响。

4.1 临河段来水来沙及冲淤变化情况

20 世纪 50,60 年代黄河上游陆续修建了一系列的水利枢纽工程,其中 1968 年建成的刘家峡水库

和 1986 年建成的龙羊峡水库对黄河宁蒙河段的水沙变化及河道冲淤变化产生了较大的影响,此外,1961 年建成的三盛公水利枢纽、盐锅峡水库和 1968 年开始投入使用的青铜峡水库对黄河内蒙古河段

也有很大影响。巴彦高勒站和三湖河口站作为研究河段的进出口站,区间没有支流的汇入,巴彦高勒站的水沙变化可以反映临河段的来水来沙变化情况(表 4)。

表 4 巴彦高勒水文站各时段年均水沙量

时段 (年-月)	年均水量/亿 m ³			汛期水量占 全年比/%	年均输沙量/亿 t			汛期输沙量占 全年比/%
	汛期	非汛期	全年		汛期	非汛期	全年	
1950-06—1961-05	195.10	85.92	281.02	69.4	1.90	0.20	2.10	90.4
1961-06—1968-05	205.82	92.13	297.96	69.1	1.40	0.22	1.62	86.4
1968-06—1986-05	136.44	98.14	234.58	58.2	0.65	0.18	0.84	78.1
1986-06—2013-05	71.79	92.24	164.03	43.8	0.36	0.23	0.59	60.7
1950-06—2013-05	127.20	93.00	220.20	57.8	0.84	0.21	1.06	79.8

如表 4 所示,1950—2013 年巴彦高勒站年均水量和年均输沙量分别为 220.2 亿 m³,1.06 亿 t,汛期水量和输沙量分别占到了全年的 57.8%和 79.8%。天然状态下的 1950—1961 年年均水量和年均输沙量分别为 281.02 亿 m³,2.10 亿 t,其中汛期水量和输沙量分别占到了全年的 69.4%和 90.4%。1961—1968 年受盐锅峡水库拦沙的影响年均输沙量降到了 1.62 亿 t,输沙量减少了 22.8%,减少量全部来自于汛期,汛期输沙量仅为前一时期的 73.8%,这一期间来水量有所增加。1968—1986 年主要受刘家峡水库蓄水拦沙的影响年均水量和年均输沙量仅为天然状态下的 83.5%和 39.8%,减少量基本来自汛期,汛期来水量和来沙量为天然状态下的 70%和 34.3%。

随着刘家峡和龙羊峡水库的联合运行,1986—2013 年年均水量和年均输沙量分别减少到 164.03 亿 m³,0.59 亿 t,为 1950—1961 年天然状态下的 58.4%和 28.2%,其中汛期来水量和来沙量为天然状态下的 36.8%和 20%,非汛期的来水量和输沙量略有增加。天然状态下巴彦高勒站汛期来水量占全年来水量的 69.4%,后 3 个时期逐渐减少到 69.1%,58.2%和 43.8%,来沙量占全年的比例也由天然状态下的 90.4%降到了 1986—2013 年期间的 60.7%。总之,水库联合运行使得汛期水量和输沙量占全年的比例在减小,年内分配趋于均衡化,输沙量的减少幅度要大于水量。

来水来沙条件及其组合的变化情况会对河道泥沙输移及冲淤变化造成影响,从图 5A 可以看出,临河段非汛期冲淤量要小于汛期的冲淤量(正值代表淤积,负值代表冲刷),且其变化波动很小,在 1972 年之前非汛期以冲刷为主,之后转为淤积,并在 1986 年之后有所增加,到 2004 年后基本以冲刷为主。汛期冲淤量变化和全年冲淤量变化基本具有相同的变化趋势,即全年的冲淤量变化基本都发生在汛期。对于全年来说,在天然状态下的 1960 年之前临河段以淤积为主,年均淤积量达到了 0.48 亿 t/a;1960—1986 年除个别年份淤积外整体以冲刷为主;1986 年之后又

转为淤积,并在 1996 年达到最大,之后淤积量开始不断减小,在 2004 年由淤积转为冲刷,之后一直到 2013 年不断冲刷,且冲刷量在不断增加。

来沙系数(定义为 S/Q ,其中 S 为悬沙含沙量, Q 为流量)是表示来水来沙条件协调性的一个重要参数,其大小和变化情况决定了泥沙输移和河道冲淤的变化特性^[14]。近六十几年临河段来水来沙的变化主要体现在汛期,且其冲淤变化也基本发生在汛期,因此对巴彦高勒站汛期来沙系数进行计算(图 5B)。从图中可以看出,汛期来沙系数的变化基本对应冲淤量变化趋势。1950—2013 年巴彦高勒站汛期来沙系数的均值为 0.006 7 (kg·s)/m⁶,1960 年以前,汛期来沙系数偏大,且具有不断增加的趋势,水沙关系不大协调,1961—1986 年汛期来沙系数变小,整体波动性不大,水沙关系比较协调;1986 年之后汛期来沙系数剧烈波动,不断增大,到 1996 年达到了 0.024 (kg·s)/m⁶,是均值的 3 倍以上,水沙关系比较恶劣;2005 年之后汛期来沙系数降到了平均值以下,之后不断减小,水沙关系转为协调。

4.2 漫滩水流的流量及频次持续减小

临河段的心滩是辫状河道沉积作用的产物,基于不同的流量和水位,它们的表面平均高程是有差别的。一些面积较大、表面高程较高、相对稳定的大型心滩要保持淤积状态,必须在汛期有漫滩的挟沙水流,这样,其表层会沉积一些泥沙。如果长期没有漫滩水流,则其表层不会持续沉积,而其周边则在水动力相对较强的水流作用下发生侵蚀,长此以往,则其面积就会明显变小。显然,研究区河段心滩总面积变小的趋势,与汛期高水位流量的减少相一致,而这些汛期高水位流量的减小则是人工大坝建设及运行方式改变的结果。

图 6 为巴彦高勒站 1950 年以来最大日平均流量的变化趋势图。由于受梯级水库的运行以及沿黄工农业用水增加的共同影响,除个别年份(如 1989 年、2012 年)外,最大日均流量在 1987 年之后小于 2 000 m³/s,而在 2003 年之后更是小于 1 500 m³/s。大流

量级的洪峰天数也在减少,1990年之前洪峰流量大于 $2\,000\text{ m}^3/\text{s}$ 的天数平均超过了60 d,而1990年之后很少出现大于 $1\,500\text{ m}^3/\text{s}$ 的洪峰流量。1990年之

前巴彦高勒站最大日平均流量的波动幅度要远大于1990年之后的,这些也是临河段心滩面积在2000年之前分布较分散、波动比较大的主要原因。

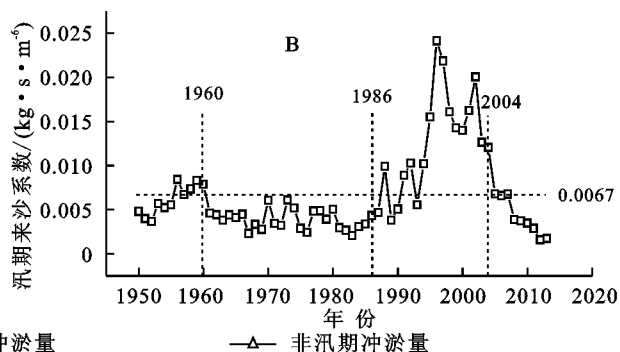
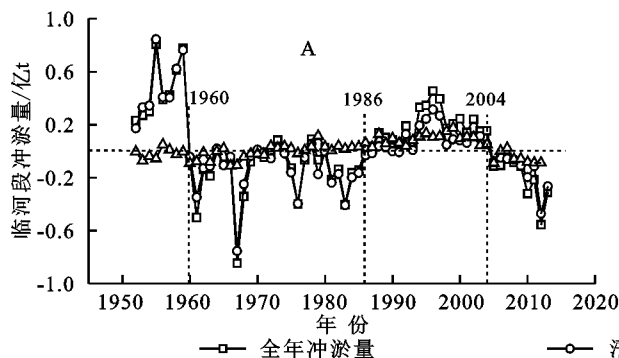


图5 临河段冲淤量变化趋势及巴彦高勒站汛期来沙系数变化趋势

黄河临河段属于典型的辫状河道,该段河岸由砂质泥沙组成,心滩发育,而心滩对于来水来沙条件的改变也是最为敏感的。1986年以后由于龙羊峡水库和刘家峡水库的联合运行一方面使进入内蒙古河段的年均来水量减少,一方面使洪峰流量及持续时间减少,洪水漫滩机会减少,进入河道水流的含沙量又相对偏大,导致河床淤积、主河槽萎缩、水流携沙能力下降^[12,28]。同时,由于漫滩水流大量减小,一些大型心滩表层难以持续淤积。其结果使得河床与心滩表面的高差逐渐减小,平时时心滩总面积势必减小。这是造成临河段心滩面积近几十年上述变化的主要原因。

的趋势,并在1990—2000年大幅减小。

(3) 黄河临河段辫状河道心滩的上述变化主要是受上游梯级水库联合运行,黄河上游降水量和来沙系数减小,以及灌溉引水量的增加导致临河段汛期洪峰流量和出现天数明显减小,来流量趋于均衡化,从而在新的水沙条件下河流冲淤调整导致的结果。

参考文献:

- [1] 钱宁,张仁,周志德.河床演变学[M].北京:科学出版社,1987.
- [2] 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[J].泥沙研究,2007(1):67-75.
- [3] Wang S, Yan Y, Li Y. Spatial and temporal variations of suspended sediment deposition in the alluvial reach of the upper Yellow River from 1952 to 2007[J]. Catena, 2012,92:30-37.
- [4] 王彦成,王伦平.黄河上游干流水库对内蒙古河段的影响[J].人民黄河,1996,18(1):5-10.
- [5] 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[J].地理科学进展,2012,31(9):1124-1132.
- [6] 赵文林,李红良.黄河上游宁蒙河道冲淤变化分析[J].人民黄河,1999,21(6):11-14.
- [7] 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[J].泥沙研究,2010(4):61-67.
- [8] 杨忠敏,任宏斌.黄河水沙浅析及宁蒙河段冲淤与水沙关系初步研究[J].西北水电,2004(3):50-55.
- [9] 冯国华,高瑞忠,闫新光.黄河内蒙古段防凌对策研究[J].水文,2009,29(1):47-49.
- [10] 杨根生,拓万全.风沙对黄河内蒙古河段河道淤积泥沙的影响[J].西北水电,2004(3):44-49.
- [11] 刘晓燕,侯素珍,常温花.黄河内蒙古河段主槽萎缩原因和对策[J].水利学报,2009,40(9):1048-1054.
- [12] 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[J].地理学报,2011,66(3):324-330.
- [13] 侯素珍,王平,郭秀吉,等.黄河内蒙古河段河道冲淤对水沙的响应[J].泥沙研究,2015(1):61-66.

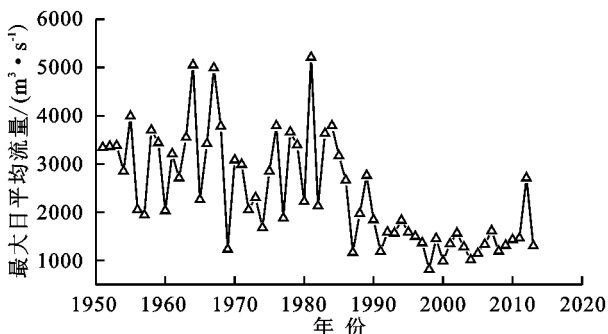


图6 巴彦高勒站最大日平均流量变化趋势

5 结论

(1) 对临河段心滩特征值的统计及其变化趋势可以发现,自1986年以来,研究区心滩总个数、心滩总面积、心滩平均面积、中位数心滩面积和最大心滩面积总体上都具有减小的趋势,这是该时期临河辫状河道演变的主要特征之一。

(2) 为了消除水位变化对心滩数量及面积等计算的影响,以2013年临河段心滩面积和巴彦高勒站水位之间的拟合关系为基础,将1988—2013年心滩面积换算到1050 m这一参考水位下,可以发现其变化趋势在2000年前后有所不同,之前心滩面积变化幅度大,趋势不明显,之后则分布较为集中,且有减小

- [9] 石瑞香. 锡林郭勒草原牧草长势和第一性生产力的动态监测研究[D]. 北京:中国农业科学院, 2005:4-30.
- [10] 张连义. 锡林郭勒草地牧草产量遥感监测模型的研究[D]. 呼和浩特:内蒙古农业大学, 2006:21-72.
- [11] 杭玉玲, 包刚, 包玉海, 等. 2000—2010年锡林郭勒草原植被覆盖时空变化格局及其气候响应[J]. 草地学报, 2014, 22(6):1194-1204.
- [12] 张圣微, 赵鸿彬, 张发, 等. 基于 MODIS NDVI 的锡林郭勒草原近 10 年的时空动态[J]. 草业科学, 2014, 31(8):1416-1423.
- [13] Wang K, Dickinson R E. A review of global terrestrial evapotranspiration: Observation, modeling, climatology, and climatic variability[J]. Reviews of Geophysics, 2012, 50(RG2005):1-54.
- [14] Trenberth K E, Fasullo J T, Kiehl J. Earth's global energy budget[J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 2009, 90(3):311-323.
- [15] Jung M, Reichstein M, Ciais P, et al. Recent decline in the global land evapotranspiration trend due to limited moisture supply[J]. Nature, 2010, 467(7318):951-954.
- [16] Li Z, Tang R, Wan Z, et al. A Review of Current Methodologies for Regional Evapotranspiration Estimation from Remotely Sensed Data[J]. Sensors, 2009, 9(5):3801-3853.
- [17] 高彦春, 龙笛. 遥感蒸散发模型研究进展[J]. 遥感学报, 2008, 12(3):515-528.
- [18] 吴桂平, 刘元波, 赵晓松, 等. 基于 MOD16 产品的鄱阳湖流域地表蒸散量时空分布特征[J]. 地理研究, 2013, 32(4):617-627.
- [19] 范建忠, 李登科, 高茂盛. 基于 MOD16 的陕西省蒸散量时空分布特征[J]. 生态环境学报, 2014, 23(9):1536-1543.
- [20] Huang J, Ma H, Liu J, et al. Regional winter wheat yield estimation by assimilating MODIS ET and LAI products into SWAP model[C]// 2013 Second International Conference on Agro-Geoinformatics. IEEE, 2013:454-459.
- [21] 张巧凤, 刘桂香, 于红博, 等. 基于 MOD16A2 的锡林郭勒草原近 14 年的蒸散发时空动态[J]. 草地学报, 2016, 24(2):286-293.
- [22] 蒙古学百科全书地理卷编辑委员会. 蒙古学百科全书. 地理卷[M]. 呼和浩特:内蒙古人民出版社, 2012:830-832.
- [23] 锡林郭勒盟志编纂委员会. 锡林郭勒盟志[M]. 呼和浩特:内蒙古人民出版社, 1996:229-283.
- [24] 于红博, 包玉海, 李和平, 等. 锡林河流域蒸散量遥感反演[J]. 水土保持研究, 2014, 21(1):224-228.
- [25] 郭晓寅. 黑河流域蒸散发分布的遥感研究[J]. 自然科学进展, 2005, 15(10):116-120.
- [26] 潘竟虎, 刘春雨. 黄土丘陵沟壑区小流域蒸散发的遥感估算:以静宁县魏沟流域为例[J]. 西北师范大学学报:自然科学版, 2008, 44(5):88-93.
- [27] 宋文献, 江善虎, 杨春生, 等. 基于 SEBS 模型的老哈河流域蒸散发研究[J]. 水资源与水工程学报, 2012, 23(5):115-118.
- [28] 冯晓曦, 秦作栋, 郑秀清, 等. 基于 SEBS 模型的柳林泉域蒸散发研究[J]. 太原理工大学学报, 2014, 45(2):259-264.
- [29] 倪猛, 陈波, 岳建华, 等. 洛河流域蒸散发遥感反演及其与各参数的相关性分析[J]. 地理与地理信息科学, 2007, 23(6):34-37.

(上接第 163 页)

- [14] 吴保生, 刘可晶, 申红彬, 等. 黄河内蒙古河段输沙量与淤积量计算方法[J]. 水科学进展, 2015, 26(3):311-321.
- [15] 王彦君, 吴保生, 王永强, 等. 黄河内蒙古河段非汛期和汛期冲淤量计算方法[J]. 地理学报, 2015, 70(7):1137-1148.
- [16] 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[J]. 地理学报, 2009, 64(5).
- [17] 苏腾, 王随继, 梅艳国. 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[J]. 地理学报, 2015, 70(3):488-500.
- [18] 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[J]. 地理科学进展, 2010, 29(4):501-506.
- [19] 杨赉斐. 黄河宁夏河段凌汛洪水流量分析研究[J]. 泥沙研究, 1992(6):62-68.
- [20] 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[J]. 地理研究, 2013, 32(5):789-796.
- [21] Ta W, Xiao H, Dong Z. Long-term morphodynamic changes of a desert reach of the Yellow River following upstream large reservoirs' operation[J]. Geomorphology, 2008, 97(3):249-259.
- [22] 林秀芳, 郭彦, 侯素玲. 内蒙古十大孔兑输沙量估算[J]. 泥沙研究, 2014(2):15-20.
- [23] 亢庆, 王兴玲. 河道演变的遥感研究方法及应用[J]. 中山大学学报:自然科学版, 1999, 38(5):109-113.
- [24] 钟凯文, 刘万侠, 黄建明. 河道演变的遥感分析研究[J]. 国土资源遥感, 2006(3):69-73.
- [25] Winterbottom S J. Medium and short-term channel planform changes on the Rivers Tay and Tummel, Scotland[J]. Geomorphology, 2000, 34(3):195-208.
- [26] 黄河水利委员会. 黄河流域水文资料[M]. 郑州:黄河水利委员会.
- [27] 李志威, 王兆印, 贾艳红, 等. 三峡水库蓄水前后长江中下游江心洲的演变及其机理分析[J]. 长江流域资源与环境, 2015, 24(1):65-73.
- [28] 董占地, 胡海华, 吉祖稳, 等. 黄河上游宁蒙河段河道横断面形态对水沙变化的响应[J]. 泥沙研究, 2015(4):20-25.