

黄河下游游荡段河床萎缩的影响因素分析

杨吉山¹, 许炯心², 王兆印¹, 廖建华²

(1 清华大学水利水电工程系, 北京 100084; 2 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101)

摘要: 黄河下游河床萎缩典型地表现为平滩水位下河床断面面积的趋势性减小, 本文根据黄河下游实测断面和水沙资料采用相关分析方法研究了游荡段河床萎缩的主要影响因素。1960~1997 年游荡段河床平滩水位下断面面积经历了 1960~1964 年和 1974~1985 年的扩张时期及 1965~1973 年和 1986~1997 年的萎缩时期, 这种变化是多种因素共同作用的结果。在来水来沙中, 年径流量是主要因素, 洪峰流量和年平均含沙量是较次要的因素; 本文所讨论的其它 4 个因素中, 花园口以上引水量影响最大, 降雨量影响次之, 兰州以上水库的调节作用对河床断面面积的变化也有较明显的影响; 三门峡水库三种不同的使用方式对下游河床有不同的影响, 采取“蓄清排浊”方式后对下游河床的影响较小。

关键词: 黄河下游; 河床萎缩; 平滩水位下断面面积; 流量; 含沙量

文章编号: 1000-0585(2007)05-0915-07

1 引言

黄河流域总面积为 75.2 万 km², 面积广大, 但大部分处于半干旱地区, 在流域内降雨减少及人类活动的影响下, 自上世纪 80 年代中期以后, 下游河床出现了持续的萎缩现象, “小水大灾”、“二级悬河”等现象更加严重, 对防洪安全等构成了严重威胁。黄河下游河道萎缩有多方面的表现, 如过流能力降低、同流量水位抬升、畸形河湾发育、河宽变窄、平滩水位下断面面积减小等。在这些指标中, 平滩水位下河床断面面积较好地反映了河床萎缩与扩张的变化^[1,2]。如果粗略地以河床实测横断面曲线中二滩滩唇所在的位置作为平滩水位, 从图 1 中可以看到 1995 年与 1981 年相比平滩水位下河床萎缩的状况。

我国学者通过实测资料^[2~7]、河工模型^[1]等方法对黄河下游河床萎缩过程及影响因素进行了大量研究, 认为河床萎缩与 1986 年以后连续出现的来水量偏枯、洪峰流量小、高含沙洪水频繁发生等因素直接相关, 另外也受到水库的调

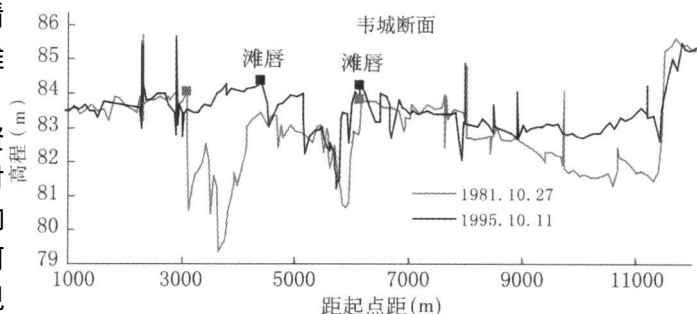


图 1 黄河下游河床萎缩示意图

Fig 1 Sketch map of the channel shrinkage
in the lower Yellow River

收稿日期: 2006-10-08; 修订日期: 2007-03-21

基金项目: 国家科技部中荷合作研究项目 (2004CB720402)

作者简介: 杨吉山 (1969-), 河南开封人, 清华大学在站博士后。主要从事河流地貌与环境、河流动力学等方面的研究。E-mail: yangjs@mail Tsinghua edu cn

节、水土保持措施的拦蓄、引水、降水减少等因素的影响^[8]。由于影响下游河床变化的因素众多,对这一问题的研究一般都着重考虑其中个别因素的影响,本文试图综合考虑影响下游河床变化的多个因素,通过多元回归分析的方法,较为定量地评价多个因素对下游河床萎缩的影响。

2 资料与方法

根据黄河水利委员会公布的黄河下游河床横断面实测资料,点绘出各年汛后(一般为10月份)的横断面曲线,从图上确定河床左、右滩唇作为平滩水位的位置,并计算出平滩水位下的河床断面面积。选取花园口至东坝头10个断面(图2),取其算术平均值作为游荡段河床平均横断面面积,以 m^2 计,时间段取1960~1997年。

根据花园口以上雨量站资料,以面积加权平均,计算花园口以上流域各年降雨量(mm)。花园口以上净引水量和花园口站年径流量、汛期流量、洪峰流量、年输沙量、汛期输沙量以及兰州站年径流量、汛期径流量等数据均取自黄河水利委员会公布的资料。

3 平滩水位下河床断面面积的变化

图3中点绘了1960~1997年黄河下游游荡段河床平滩水位下断面面积(A)的变化。可以看到, A 在各年之间较大的改变,从趋势上 A 在该时段内有两次扩大和两次缩小4个阶段的变化,其中1960~1964年是一个迅速扩大的阶段,1965~1972年是一个萎缩的阶段,1973~1984年从总体上看是一个扩大的过程,1985年以后又进入一个萎缩的时期,这种阶段性变化受到多种因素的影响。

4 主要影响因素分析

4.1 降雨

黄河中、上游地区降雨量有一定的周期性,降雨减少是导致下游河床断面面积减小的直接原因之一。从图4可见,1960~1964年是黄河中游流域降雨量(P)最丰沛的时期,游荡段河床断面面积(A)达到了最高值;1965~1972年黄河中游降雨有所减少,同时期 A 迅速下降;1973~1985年中游降雨量较丰富, A 也有所增大;1986年以后降雨有减少的趋势^[9],导致下游河床严重萎缩。

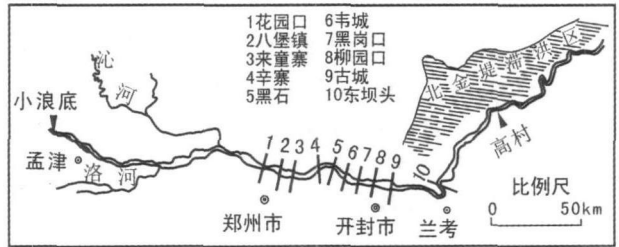


图2 测量断面分布示意图

Fig 2 Sketch map of the locations of the selected cross sections

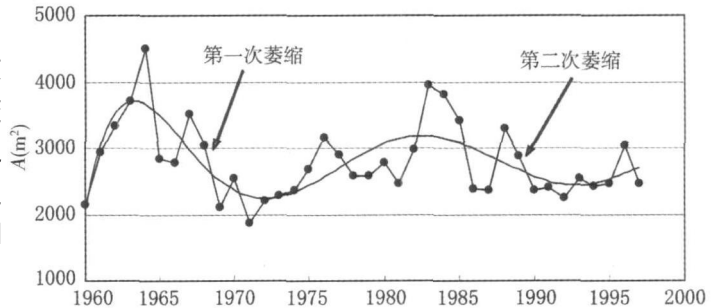


图3 平滩水位下河床断面面积随时间的变化

Fig 3 Temporal variations in the average area of bankfull cross section in the lower Yellow River

4.2 来水来沙

冲积河流河床的发育是水、沙和边界条件等共同作用的结果，河床过水断面的变化反映了河道的来水来沙过程^[3, 10, 11]。图5表示了游荡段河床平滩水位下断面面积(A)及花园口站年径流量(W)、汛期径流量(W_h)、洪峰流量(Q_{max})随时间的变化，可以看到，A、W、W_h和Q_{max}的变化相当一致。计算表明W、W_h和A具有高度相关性，Q_{max}和A的相关系数也达到0.7203，在0.01的水平上也是显著相关的。

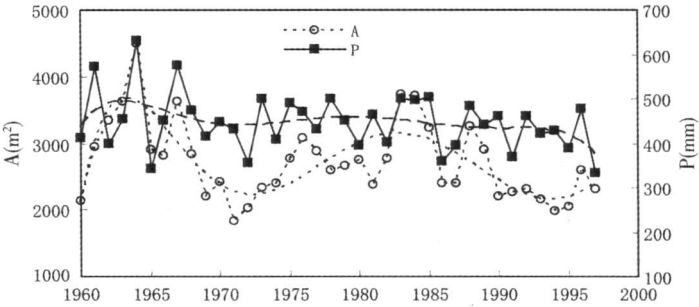


图4 花园口站以上流域平均降水量与平滩水位下断面面积的变化

Fig 4 Temporal variations in the area of bankfull cross section and annual precipitation in the drainage area above Huayankou station

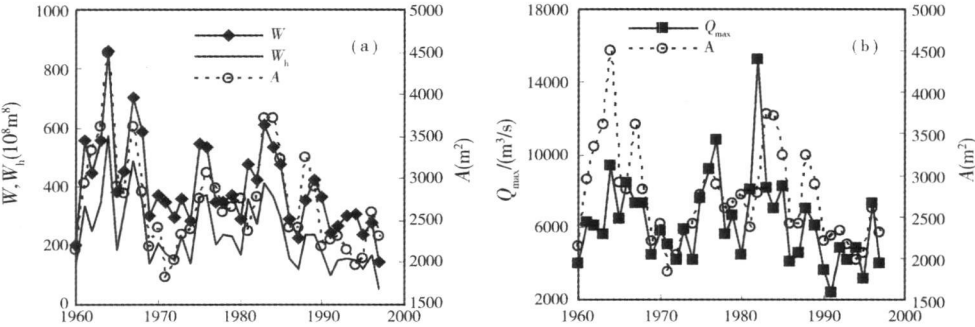


图5 花园口站年径流量及汛期径流量 (a) 及洪峰流量 (b) 与平滩水位下断面面积随时间的变化

Fig 5 Temporal variations in annual runoff and runoff in flood season (a), and peak discharge at Huayankou station (b) with the area of bankfull cross section

从图5可以看出，1960~1997年W、W_h和Q_{max}的变化过程大概也可划分出1960~1964年、1965~1973年、1974~1985年、1986~1997年两升两降4个阶段，与A变化的4个阶段(图1)基本上同步对应。1962、1963、1964、1967、1976、1983、1984年、1985、1988年等是W和W_h较大的年份，A相应也较大，说明W和W_h的变化对A有较大的影响。1977年和1982年花园口站发生了10800m³/s和15300m³/s的洪峰，但这两个年份W不大，分别为349亿m³和427亿m³，A只有2889m²和2774m²，与前一年相比仅略有增大。1996年花园口发生了7310m³/s的洪峰流量，是1990年以后的最大洪峰流量，A在原来严重萎缩的基础上有所扩大，从1995年的2051m²扩大到1996年的2595m²，但是很快又减小到1997年的2310m²，说明虽然洪峰对严重萎缩的河床有一定的作用，但是如果后续流量小，扩大的河槽很快就会重新淤积萎缩。

图6a点绘了A与花园口站年平均含沙量(C_{mean})及汛期含沙量(C_{sh})随时间的变化。可见C_{mean}与A反向变化的趋势很明显，A与C_{sh}的变化趋势不很明确。研究表明，花园口至高村游荡段河床冲淤变化与C_{mean}关系密切，当C_{mean}<35kg/m³时，河床内各粒径泥沙均发生冲刷；当C_{mean}>35kg/m³时，则河床受到淤积^[12]。从图6a可以看到，河床萎缩严重的年份，C_{mean}皆大于35kg/m³；河床横断面面积扩大的年份，C_{mean}皆小于35kg/m³。

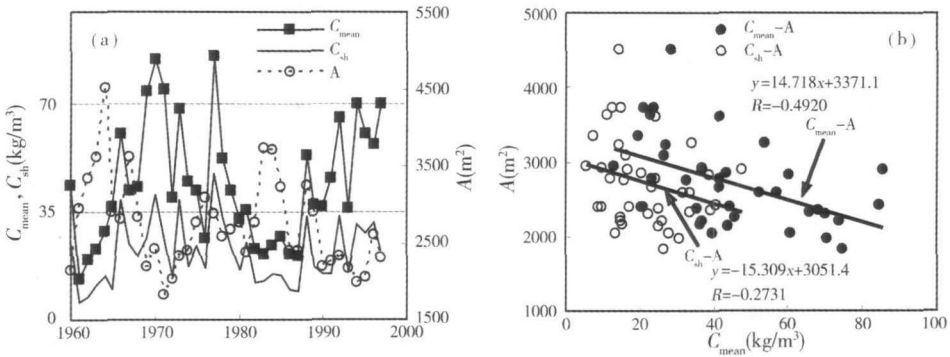


图 6 平滩水位下河床断面面积与花园口站年平均含沙量及汛期平均含沙量
随时间的变化 (a) 及相关关系 (b)

Fig 6 (a) Temporal variations in the area of bankfull cross section (a) and average sediment concentration (C_{mean}) and mean sediment concentration in flood season (C_{sh}), and (b) correlations between $A-C_{mean}$ and $A-C_{sh}$

图 6b 点绘了 A 与 C_{mean} 及 C_{sh} 的相关关系, 显示 A 与 C_{mean} 及 C_{sh} 均呈负相关, 其中 A 与 C_{mean} 负相关关系在 0.01 水平上显著, A 与 C_{sh} 关系不显著。

4.3 水库调节

黄河是我国水能开发程度较高的大河之一, 黄河干流修建的多座水利枢纽和水电站对黄河径流具有较强的调节能力。兰州以上清水区是黄河下游径流的主要来源, 来自该区的清水径流可使中游的多沙洪水得到稀释, 上游水库对径流的调节削减了下游的洪峰流量, 增大了高含沙洪水发生的机会^[13]。根据陆俭益的研究, 在龙羊峡和刘家峡水库联合调度的条件下, 可导致下游年均增淤 0.62 亿 t ^[14]。

黄河干流水库的调节作用可分为上游水库的调节作用与中游三门峡水库的调节作用, 分别以兰州站和三门峡站汛期 (以 6~10 月代表) 径流量占全年径流量的百分比 (R_L 和 R_S) 来表示。刘家峡水库和龙羊峡水库分别于 1967 年和 1986 年建成使用, 汛期拦截了大量的径流, 使汛期进入下游的清水径流显著减少。1960~1986 年平均兰州站汛期占年径流量的比例为 64.9%, 1987~1997 年平均则减少为 52%。三门峡水库自 1960 年建成使用之后经历了 3 种运用方式, 对下游河床的影响也不相同, 1960~1964 年“蓄水拦沙”下泄清水时期造成下游河道的冲刷, 1965~1973 年“滞洪排沙”期间造成下游河道的大量淤积, 而 1973 年“蓄清排淤”以后对汛期径流的调节作用减弱。

图 7a 显示了 A 、 R_L 和 R_S 随时间的变化, 可以看到三者的变化趋势比较一致。图 6b 中点绘了 A 与 R_L 及 R_S 的相关关系, 均呈显著的正相关。

4.4 中上游引水

中上游大量引水降低了下游水流的挟沙能力, 同时由于引走的水流含沙量较低, 加重了下游河道的淤积及河床萎缩。图 8 中点绘了 A 与花园口以上流域历年净引水量 (W_{div}) 和净引水量占天然径流量的比例 (R_{div}) 随时间的变化。从趋势上, 引水量及引水比例都是持续增加的, 引水量从 1962 年的 111.8 亿 m^3 增加到了 1997 年的 205.8 亿 m^3 , 引水量占径流量的比例从 1964 年最低的 12.89% 增长到 1997 年最高点的 59.07%。从图 8 可以看到, W_{div} 及 R_{div} 与 A 呈反向变化的趋势很明显, 计算表明 A 与 W_{div} 及 R_{div} 在 0.01 水平上呈显著负相关, 说明下游河床的萎缩与中、上游大量引水有明确的关系。

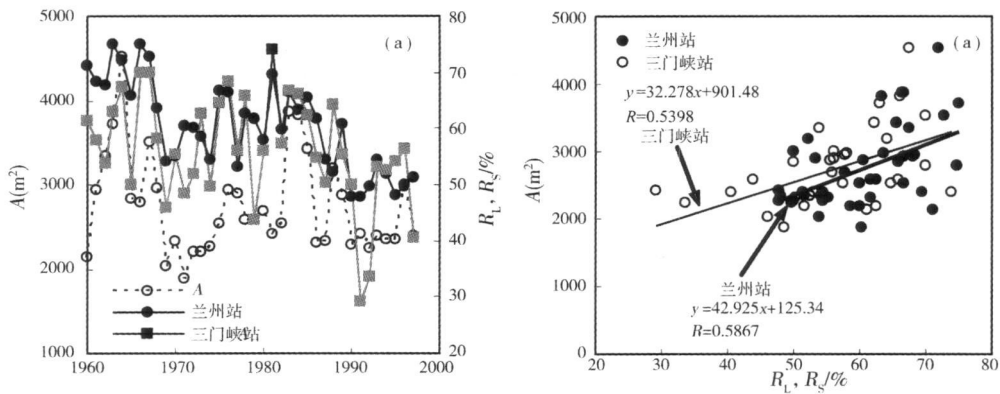


图7 水库调节与平滩水位下断面面积变化的关系
(a) 河床断面面积与兰州站、三门峡站汛期径流量占全年径流量百分比随时间的变化
(b) 河床断面面积与兰州站、三门峡站汛期径流量占全年径流量百分比的相关关系

Fig. 7 Impact of reservoirs on the area of bankfull cross section (a)
Temporal variations in A and the percentages of the runoff in flood season to annual runoff at Lanzhou (R_L) and Sanmenxia (R_S) stations, and (b) correlations between A - R_L and A - R_S

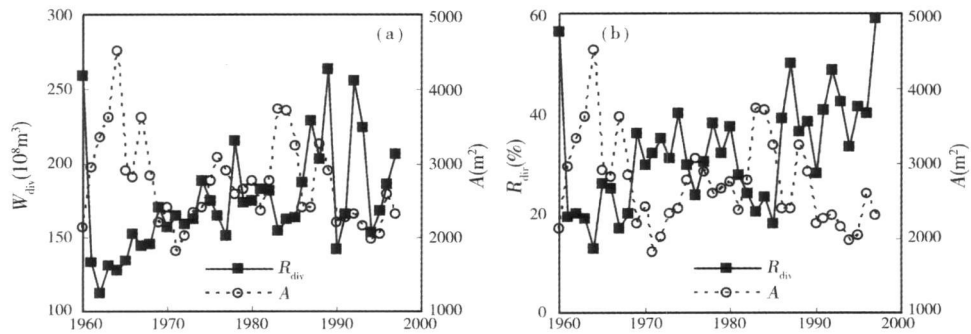


图8 平滩水位下断面面积与花园口站以上引水量(a)及引水量占天然径流量的比例(b)随时间的变化
Fig. 8 Temporal variations in the area of bankfull cross section with annual water diversion from above Huayuankou station (a), and the percentage of water diversion (b)

5 河床断面面积与影响因子间的回归分析

表1列出了游荡段河床断面面积(A)与部分影响因子间的相关矩阵。包括花园口站天然径流量(W_n)、花园口站年径流量(W)、花园口站汛期径流量(Q_{wh})、花园口站洪峰流量(Q_{max})、花园口站年均含沙量(C_{mean})、花园口站汛期平均含沙量(C_{sh})、花园口以上流域平均雨量(P)、花园口站以上人类净引水占天然径流百分比(R_{div})、三门峡汛期径流量占全年径流量百分比(R_s)、兰州站汛期径流量占全年径流量百分比(R_L)等因素。水土保持无疑也是重要的影响因素,但是由于没有得到可匹配的资料,故暂时不作讨论。

从表中可见, A 除了与 C_{sh} 相关性不显著外,与其他因素都有显著的相关性。 A 与 W 、 W_h 、 W_n 等径流因素相关性最高,与 P 、 R_{div} 、 R_s 、 R_L 等因素之间的相关性较低,与 C_{mean} 、 C_{sh} 等含沙量因素间的相关性最低。

对以上数据进行标准化处理,并进行多元线性回归,可得到标准化系数的回归方程,

表 1 影响游荡段河床平滩水位下断面面积的各因子间的相关关系矩阵

Tab 1	Correlation matrix among the area of bankfull cross section and the influencing factors										
	<i>A</i>	<i>W_n</i>	<i>W</i>	<i>W_h</i>	<i>Q_{max}</i>	<i>C_{mean}</i>	<i>C_{sh}</i>	<i>P</i>	<i>R_{div}</i>	<i>R_S</i>	<i>R_L</i>
<i>A</i>	1										
<i>W_n</i>	0.7906	1									
<i>W</i>	0.8191	0.9051	1								
<i>W_h</i>	0.8186	0.9019	0.9770	1							
<i>Q_{max}</i>	0.5270	0.6446	0.5547	0.6010	1						
<i>C_{mean}</i>	-0.492	-0.481	-0.428	-0.417	-0.169	1					
<i>C_{sh}</i>	-0.273	-0.256	-0.226	-0.141	0.0863	0.8704	1				
<i>P</i>	0.6147	0.7509	0.7783	0.8062	0.3905	-0.162	0.1142	1			
<i>R_{div}</i>	-0.681	-0.782	-0.871	-0.814	-0.568	0.3688	0.2173	-0.590	1		
<i>R_S</i>	0.540	0.6184	0.6413	0.7393	0.5197	-0.292	0.0761	0.5827	-0.548	1	
<i>R_L</i>	0.5867	0.6566	0.7007	0.7366	0.3963	-0.486	-0.264	0.4264	-0.590	0.6850	1

各变量系数的大小大略地反映了该因子对 *A* 影响的大小。取花园口站年径流量 (*W*)、花园口站洪峰流量 (*Q_{max}*)、花园口站年平均含沙量(*C_{mean}*) 三个因素与 *A* 作线性回归计算, 可得到以下方程:

$$A = 0.672W + 0.123Q_{\max} - 0.184C_{\text{mean}} \tag{1}$$

上式 *R*= 0.8402。可见 *W*、*Q_{max}*、*C_{mean}* 三因素中, *W* 对 *A* 的影响最大, 是主要因素, 经流量增大则河床断面面积明显增大; *Q_{max}* 和 *C_{mean}* 对 *A* 的变化也有一定的影响, 但相对于年径流量而言是较次要的因素, 其中花园口站洪峰流量增大在一定程度上促进河床断面面积的增大, 年均含沙量的增大导致河床面积减小。

另外, 取花园口以上流域平均雨量 *P*(mm)、花园口站以上年引水占天然径流量的百分比 (*R_{div}*)、三门峡站汛期水量占全年径流量百分比 (*R_S*)、兰州站汛期水量占全年径流量百分比 (*R_L*) 四个因素与 *A* 作一元线性回归, 可得到以下回归方程:

$$A = 0.296P - 0.406R_{\text{div}} + 0.024R_{\text{S}} + 0.214R_{\text{L}} \tag{2}$$

上式 *R*= 0.757。从 (2) 式可见, 在四个因素中, *R_{div}* 对 *A* 的影响最大, 引水量的大量增加导致游荡段河床断面面积显著减小; *P* 及 *R_L* 的变化对 *A* 影响相对较小; 三门峡水库不同的使用方式对下游河床的调整有直接的影响, 但是“蓄清排浊”之后对下游河床的影响减小, 从 1960~ 1997 年的整个时段看, 与 *A* 的关系比较小。

6 结论

黄河下游游荡段河床断面面积 1960~ 1997 年间经历了扩张和萎缩交替的四个阶段, 这种变化是流域内多种因素共同作用的结果, 如降水量、来水来沙、中上游引水及干流水库调节等都对其有重要影响。在来水来沙因素中, 年径流量的影响最显著, 洪峰流量和年均含沙量是相对次要的因素。比较花园口以上年降水量及引水量、兰州以上及三门峡水库的调节作用四个因素的影响, 以人类引水的影响最为显著, 降雨量次之, 兰州以上干流水库对河床断面面积的变化也有较显著的影响; 三门峡水库对游荡段河床断面面积变化的影响较大的时段在 1960~ 1973 年, 采取“蓄清排浊”方式后对下游河床的影响较小。

参考文献:

[1] 姚文艺, 王德昌, 侯志军. 黄河下游河道萎缩模式研究. 泥沙研究, 2004, (5): 8~ 14
[2] 陈建国, 邓安军, 戴清, 周文浩. 黄河下游河道萎缩的特点及其水文学背景. 泥沙研究, 2003, (4): 1~ 7

- [3] 申冠卿, 张晓华, 李勇, 等. 1986 年以来黄河下游水沙变化及河道演变分析. 人民黄河, 2000, 22(9): 10~ 16.
- [4] 许炯心, 孙季. 黄河下游游荡河道萎缩过程中的河床演变趋势. 泥沙研究, 2003, (1): 10~ 17.
- [5] 陈界仁, 夏爱平. 黄河下游河槽萎缩与水沙条件关系初步分析. 水文, 2002, 22(6): 19~ 21.
- [6] 黄金池. 黄河下游河槽萎缩与防洪. 泥沙研究, 2001, (4): 7~ 11.
- [7] Liansheng Yu. The Huanghe (Yellow) River: Recent changes and its countermeasures Continental Shelf Research. 2006, 26: 2281~ 2298.
- [8] 许炯心. 黄河下游河道输沙功能的时间变化及其原因. 地理研究, 2006, 25(2): 276~ 284.
- [9] 钱宁, 周文浩. 黄河下游河床演变. 北京: 科学出版社, 1965 8~ 30.
- [10] Leopold L B, Wolman M G, Miller J P. Fluvial Processes in Geomorphology. San Francisco: W. H. Freeman and Co, 1964. 215~ 218.
- [11] 康玲玲, 王昌高, 张永兰, 等. 近 50 年黄河中降降水变化及其对径流的影响. 人民黄河, 2004, (8): 26~ 28.
- [12] 赵业安, 周文浩, 费祥俊, 等. 黄河下游河道演变基本规律. 郑州: 黄河水利出版社, 1998. 13~ 14.
- [13] 叶青超 主编. 黄河流域环境演变与水沙运行规律研究. 济南: 山东科学技术出版社, 1994 15.
- [14] 陆俭益. 黄河大型水利工程改变水沙运行和小浪底水库水沙调节初探. 人民黄河, 1994, (2): 27~ 30.

Influencing factors of the shrinkage of the braided reach of the lower Yellow River

YANG Ji-shan¹, XU Jiong-xin², WANG Zhao-yin¹, LIAO Jian-hua²

(1 Department of Hydraulic Engineering Tsinghua University, Beijing 100084, China;

2 Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China)

Abstract: The Yellow River has a vast expanse of drainage basin, but most of which is in arid and semi-arid areas. The influencing factors, such as increasing water demand, flow regulations by reservoirs, water diversion, and climate change impose intense effect on the channel. Based on field data in 1960-1997, the relations of several influencing factors with the wet area at full-bank stage of the wandering reach in the lower Yellow River are discussed, and linear multiple regression functions have been found.

The bankfull cross-section area of the lower Yellow River experienced four alternating periods with expansion and shrinkage from 1960 to 1997, i. e. 1960-1964 expansion, 1965-1973 shrinkage, 1974-1985 expansion and 1986-1997 shrinkage. The variation was caused by many factors. Among them annual runoff was most important and annual sediment load was minor important. The peak discharge in flood season and annual average sediment concentration have also influence. Moreover, water diversion is an important factor affecting the bankfull wet area. Flow regulation by the reservoirs upstream of Lanzhou station exerted a remarkable influence on bankfull wet area. Different operation modes of the Sanmenxia reservoir had a direct effect on the channel of the lower Yellow River, but the influence became limited after 1973 when the reservoir began the operation mode of "storing clear water and releasing flood".

Key words: lower Yellow River; channel shrinkage; bankfull cross-section area; runoff; sediment concentration