



黄河下游河道主河槽萎缩特征及其判别参数研究

胡春宏^{①*}, 张国罡^②

① 中国水利水电科学研究院, 北京 100038;

② 广东省电力设计研究院, 广州 510663

* E-mail: huch@iwhr.com

收稿日期: 2009-06-01; 接受日期: 2009-10-29

国家杰出青年科学基金(批准号: 50725930)和国家自然科学基金创新群体基金(批准号: 50721006)资助项目

摘要 采用时间序列分析方法对黄河下游河道断面形态参数变化趋势及其变异点进行了系统分析, 结果表明: 从 20 世纪 50 年代以来, 断面形态参数发生了趋势性变化, 表现为主河槽呈逐年萎缩的态势, 且这种趋势在未来仍将延续; 黄河下游主河槽萎缩的主要特征是平滩流量和平滩面积的显著下降, 相应的平滩河宽、平均水深、最大水深等出现不同程度的下降, 同时还伴随着平滩水位和宽深比的上升. 提出了黄河下游河道主河槽萎缩的判别参数与判别标准, 分析认为下游河道主河槽在 70 年代开始初步萎缩, 90 年代以后进入严重萎缩期; 提出了三门峡出库水沙过程不协调指数, 表明三门峡水库修建后水沙过程不协调性呈增加的趋势; 建立了下游河道主河槽萎缩参数与三门峡水库出库水沙过程的响应关系, 指出通过水库调控进入下游的水沙过程, 特别是调控出库水沙不协调指数, 可以缓解和改善下游河道主河槽的萎缩状况, 恢复与维持下游基本的输水输沙通道.

关键词

黄河下游
时间序列分析
主河槽萎缩
萎缩判别参数
水沙不协调指数

1 前言

随着人类活动的日益加剧和自然气候的变化, 20 世纪 80 年代中期以来, 黄河下游出现了严重的主河槽淤积萎缩现象, 河道主河槽淤积严重, 滩槽淤积比由 50 年代的 7:3 变成了 90 年代的约 3:7, 平滩流量由 50 年代的 7000~8000 m³/s 减少到 90 年代初期的 3000~4000 m³/s, 到 2002 年局部河段平滩流量不足 2000 m³/s, 河道断面形态也发生了趋势性的变化^[1~5], 导致二级悬河加剧, 小水大灾等新问题, 严重制约了黄河流域社会经济的可持续发展. 以往关于河道萎缩趋势变化一般采用实测资料对比等直观的描述方法分析, 尚未开展趋势性变化的变异点研究. 本文在对黄河下游河道断面形态参数的变化趋势和变异点

进行定量分析的基础上, 提出了黄河下游河道主河槽萎缩判别参数和判别标准, 建立了该判别参数与三门峡水库出库水沙过程的响应关系, 分析了调控进入下游河道水沙过程对改善河道萎缩的作用.

本文采用时间序列分析方法中的趋势分析和变异点分析方法对黄河下游河道断面形态参数进行分析. 时间序列是同一现象在不同时间上的相继观察值排列而成的序列^[6], 黄河下游河道断面形态参数都是按照时间顺序排列的, 可以采用时间序列分析的方法对其进行分析. 在时间序列分析中, 分析序列现有变化趋势采用肯德尔秩相关检验法, 分析序列未来变化趋势采用 *R/S* 分析法, 分析序列变异点采用有序聚类分析法. 采用的资料包括 1951 年以来花园口、高村、艾山及利津四站平滩流量、平滩面积、平滩河

宽、平均水深、最大水深、平滩水位和宽深比等参数。

2 黄河下游河道断面形态参数变化趋势分析

2.1 下游河道断面形态参数现有变化趋势分析

1) 肯德尔秩相关检验法——现有趋势分析方法

肯德尔秩相关检验是一种非常简便有效的非参数检验方法^[7]。通过统计量可以很容易的判断时间序列是否具有明显的变化趋势及其方向。

对于时间序列 $\{x_1, \dots, x_i, \dots, x_j, \dots, x_N\}$, P 为序列中所有对偶观测值 $(x_i, x_j, i < j)$ 中 $x_i < x_j$ 出现的个数, N 为序列长度。若序列有 $x_1 < x_2 < \dots < x_i < \dots < x_j < \dots < x_N$, 序列呈上升趋势且 $P = (N-1) + (N-2) + \dots + 1 = N(N-1)/2$; 反之, 若 $x_1 > x_2 > \dots > x_i > \dots > x_j > \dots > x_N$, 序列呈下降趋势, $P=0$; 对于绝对随机无趋势序列, $P=N(N-1)/4$ 。定义肯德尔统计量 τ 和标准化变量 M 如下:

$$\text{肯德尔统计量: } \tau = \frac{4P}{N(N-1)} - 1; \quad (1)$$

$$\text{标准化变量: } M = \tau \cdot \sqrt{\frac{9N(N-1)}{2(2N+9)}}. \quad (2)$$

当 N 增加时, M 很快收敛于标准正态分布。采用假设检验方法, 原假设为该序列无趋势, 在给定显著性水平 α 以后, 若 $|M| < M_{\alpha/2}$, 接受原假设, 即趋势不显著, 否则趋势显著。

著, 否则趋势显著。

2) 下游河道断面形态参数的现有变化趋势分析

采用肯德尔秩相关检验法对黄河下游各站断面形态特征参数(平滩流量、平滩面积、平滩河宽、平均水深、最大水深、平滩水位和宽深比)进行趋势分析, 其中, 平滩流量资料序列为: 花园口站(1957, 1960~2003), 高村站(1951~2003), 艾山站(1954~1958, 1963~2003), 利津站(1951~1959, 1965~2003); 其他断面形态特征参数资料序列为: 花园口站(1960~2003), 高村站(1951~2003), 艾山站(1968~2003), 利津站(1968~2003)。

表1为花园口站的肯德尔秩相关检验计算结果, 查统计表可得: $M_{0.05/2} = 1.96$, $M_{0.01/2} = 2.576$ 。由表1可见, 花园口站平滩流量、平滩面积、平滩河宽和平均水深序列均有 $|M| > M_{0.01/2}$, 且 $P \rightarrow 0$, 存在显著减少趋势。而平滩水位下最大水深序列有 $M_{0.05/2} < |M| < M_{0.01/2}$ 且 $P \rightarrow 0$, 存在一定减少趋势, 但趋势并不显著。而对于平滩水位和宽深比序列有 $|M| < M_{0.05/2} < M_{0.01/2}$, 不存在显著的趋势变化。其余三站计算分析过程类似。

表2为四站平滩流量和断面形态特征参数趋势分析汇总表, 由表2可见, 花园口、高村、艾山和利津四站的平滩流量和平滩面积均有显著的下降趋势, 除艾山站外, 其余三站的平滩河宽也有显著下降趋势。由于高村站和利津站平均水深没有明显变化趋势, 因此, 这两站平滩面积的下降主要是由于平滩河

表1 花园口站平滩流量和断面形态特征参数的肯德尔秩相关检验

参数	N	P	$N(N-1)/4$	$N(N-1)/2$	Statistics/ M
平滩流量	45	161	495	990	-6.4012
平滩面积	44	153	473	946	-6.3383
平滩河宽	44	173	473	946	-5.9421
平均水深	44	214	473	946	-5.13
最大水深	44	360	473	946	-2.2382
平滩水位	44	493	473	946	0.39614
宽深比	44	470	473	946	-0.059421

表2 黄河下游四站平滩流量和断面形态特征参数趋势分析汇总表

参数	花园口站	高村站	艾山站	利津站
平滩流量	显著下降趋势	显著下降趋势	显著下降趋势	显著下降趋势
平滩面积	显著下降趋势	显著下降趋势	显著下降趋势	显著下降趋势
平滩河宽	显著下降趋势	显著下降趋势	显著上升趋势	显著下降趋势
平均水深	显著下降趋势	无趋势	显著下降趋势	无趋势
最大水深	有一定下降趋势	显著下降趋势	无趋势	有一定下降趋势
平滩水位	无趋势	显著上升趋势	显著上升趋势	无趋势
宽深比	无趋势	无趋势	显著上升趋势	无趋势

宽的下降引起的. 而花园口站平滩河宽和平均水深均有明显下降趋势, 其平滩面积下降应当与平滩河宽和平均水深都有关系. 而艾山站平滩河宽有增大的趋势, 平滩面积的减小必然是由平均水深的减小引起的. 各站平滩水位下最大水深时间序列的变化趋势为高村站显著下降, 花园口和利津站有一定下降趋势, 而艾山站无趋势, 与相应各站平均水深序列变化趋势均有一定差异, 说明最大水深序列和平均水深序列并不一定存在相关关系. 另外, 高村站和艾山站的平滩水位有显著的抬高趋势. 除艾山站宽深比有显著增大的趋势外, 其余三站宽深比序列均没有显著变化趋势.

综上所述, 1950 年到 2003 年, 黄河下游河道断面平滩流量和平滩面积均出现了显著的下降趋势, 平滩面积的下降是由于平滩河宽下降或平均水深下降或两者共同下降引起. 最大水深序列总体呈下降趋势, 有的站平滩水位明显上升, 而宽深比基本没有发生趋势性变化. 值得注意的是, 与常规的通过图表观察判断序列趋势性的方法相比, 肯德尔秩相关检验法更具可操作性和定量化, 通过计算可得比较准确客观的结果.

2.2 下游河道断面形态参数未来变化趋势分析

1) R/S 分析法——未来趋势分析方法

R/S 分析法是赫斯特在大量实证研究的基础上提出的一种时间序列统计方法^[8,9], 它在分形理论中有着重要的作用. 借助 R/S 分析中的核心参数赫斯特指数 H 可预测时间序列未来的变化趋势. R/S 分析法基本原理和方法如下.

考虑一个时间序列 $\{\xi(t)\}, t=1,2,\dots$, 对于一个任意正整数 $\tau \geq 1$, 定义如下序列:

$$\text{均值序列: } \langle \xi \rangle_\tau = \frac{1}{\tau} \sum_{t=1}^{\tau} \xi(t), \tau = 1, 2, \dots, n; \quad (3)$$

累计离差 X :

$$X(t, \tau) = \sum_{u=1}^t (\xi(u) - \langle \xi \rangle_\tau), 1 \leq t \leq \tau; \quad (4)$$

极差 R :

$$R(\tau) = \max_{1 \leq t \leq \tau} X(t, \tau) - \min_{1 \leq t \leq \tau} X(t, \tau), \tau = 1, 2, \dots, n; \quad (5)$$

标准差 S :

$$S(\tau) = \left(\frac{1}{\tau} \sum_{t=1}^{\tau} (\xi(t) - \langle \xi \rangle_\tau)^2 \right)^{\frac{1}{2}}, \tau = 1, 2, \dots, n. \quad (6)$$

对于 $\{\xi(t)\}, t=1,2,\dots, n$, 可以证明 $R(\tau)/S(\tau) = (c\tau)^H$ (c 为某常数, H 为赫斯特指数). H 是 R/S 分析法中一个十分稳定有效的统计量 ($0 \leq H \leq 1$), 它是现象的表征参数.

2) 下游河道断面形态参数的未来变化趋势分析

为了解未来黄河下游河道的变化趋势, 采用 R/S 分析法对花园口站、高村站、艾山站和利津站平滩流量及河道断面形态特征参数序列进行分析, 计算出相应的赫斯特指数 H , 如表 3 所示, 由表 3 可见, 四站的平滩流量和河道断面形态特征参数各序列的 H 值均大于 0.5 且接近 1, 可以认为这些序列具有较强的状态持续性, 即未来与过去呈现相同的变化趋势, 在上面趋势分析中得到的现有变化趋势在未来仍将延续. 各站平滩流量序列 H 值较大, 各站均在 0.9 以上, 高村站和利津站甚至达到了 1, 说明平滩流量序列的状态延续性非常强. 而平滩面积和平滩河宽等序列 H 值较平滩流量略小, 未来变化趋势比平滩流量变化趋势更为随机一点, 这是因为平滩流量主要受来水来沙条件的影响, 而平滩面积和平滩河宽等直接反应断面形态特征的参数除了受来水来沙条件影响外, 还受到断面边界约束条件等的影响, 影响因素较多, 故这些参数变化的趋势性相对稍弱.

需要说明的是, 断面形态参数的变化趋势与来水来沙过程的变化趋势密切相关, 我们曾对三门峡水库天然情况下及建库后的进出库水沙序列进行了变化趋势分析, 结果表明: 三门峡水库运行后入库和

表 3 黄河下游四站河道断面形态特征参数序列 R/S 分析法计算的 H 值统计表

参数	花园口站	高村站	艾山站	利津站	序列	花园口站	高村站	艾山站	利津站
平滩流量	0.924	1.00	0.933	1.00	平均水深	0.924	0.729	0.806	0.887
平滩面积	0.777	0.882	0.781	0.884	最大水深	0.629	0.8144	0.742	0.867
平滩河宽	0.935	0.886	0.915	0.822	平滩水位	1.00	0.90153	0.912	0.874
宽深比	0.953	0.85281	0.818	0.779					

出库水沙序列大多出现了较明显的变化趋势, 且该趋势在未来仍将延续^[10]. 以此作为分析黄河下游河道断面形态参数变化趋势的基础, 进入下游来水来沙条件发生趋势性变化, 下游河道必然做出响应, 即来水来沙条件延续趋势性变化, 则下游河道断面形态的趋势性变化也将延续.

3 黄河下游河道断面形态参数变异点分析

3.1 有序聚类分析法——变异点分析方法

在时间序列分析中, 发现某序列发生了一些趋势性的变化, 为了分析这些趋势性变化的机理, 需要知道序列在何时发生了变化, 即需要对序列进行变异点分析, 找到时间序列在变化过程中的跳跃点. 而变异点分析的实质就是对时间序列进行分类, 类与类之间的分隔点就是序列的变异点. 本文采用的有序聚类分析法是聚类分析法中的一种^[11,12], 它是在连续样品段内, 根据样品间离差大小进行分类的一种方法, 分类原则是使同类间离差平方和最小, 而类与类之间离差平方和相对较大. 有序聚类分析法有多种数学模型, 在此采用最优分段方法, 其数学模型如下.

对于某一连续样品序列 $\{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ 中某一类 $\{x_i,$

$$\dots, x_j\} (1 \leq i < j \leq n), \text{ 其类直径为 } D(i, j) = \sum_{l=i}^j (x_l - \bar{x}_{ij})^2.$$

假设将总体 n 个样本分为 m 类, 用 i_k 表示第 k 类中第一个样本, 则分类方法中有一种为 $\{x_{i_1}, x_{i_1+1}, \dots, x_{i_2-1}\}$

$\{x_{i_2}, x_{i_2+1}, \dots, x_{i_3-1}\} \dots \{x_{i_k}, x_{i_k+1}, \dots, x_{i_{k+1}-1}\} \dots \{x_{i_m}, x_{i_m+1}, \dots, x_n\}$

$$(i_1=1), \text{ 其误差函数为 } \varphi(p(m, n)) = \sum_{k=1}^m D(x_{i_k}, x_{i_{k+1}-1}).$$

当 m, n 为定值时, 误差函数 $\varphi(p(m, n))$ 越小, 分类效果越好. 误差函数的递推公式为 $\varphi(p_0(m, n)) =$

$\min_{m \leq j < n} \{\varphi(p_0(m-1, j-1)) + D(j, n)\}$. 由递推公式, 可得出聚类结果. 由误差函数 $\varphi(p_0(m, n))$ 随 m 的变化曲线, 在曲线拐点处来确定分类数 m 值.

3.2 下游河道断面形态参数变异点确定

采用有序聚类分析法对花园口站、高村站、艾山站和利津站平滩流量及河道断面形态特征参数序列进行变异点分析.

图 1 为利津站平滩流量的误差函数图, 由图 1 可见, 平滩流量在 $m=3$ 时误差函数就出现拐点, 因此, 可以将利津站平滩流量序列分为三类. 其余各序列分类数 m 也用同样方法确定, 结果表明, 各站平滩流量、平滩面积、平滩河宽、平均水深、最大水深、平滩水位和宽深比误差函数拐点基本在 $m=3$ 左右, 为了便于比较和分析, 将各站平滩流量、平滩面积、平滩河宽、平均水深、最大水深、平滩水位和宽深比序列统一分为三类.

表 4 为各序列用有序聚类分析法聚成三类的变异点位置, 各站每个序列参数基本存在两个变异点.

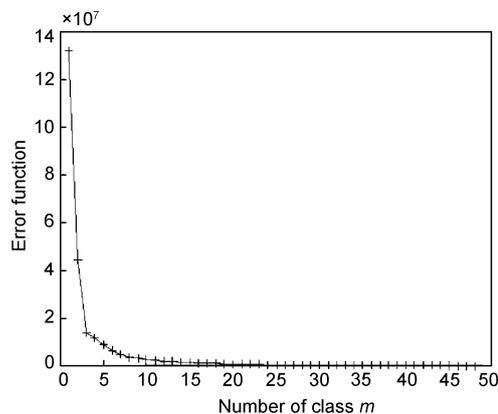


图 1 利津站平滩流量误差函数变化过程

表 4 黄河下游四站平滩流量及河道断面特征量序列变异点统计表

参数	花园口站变异点		高村站变异点		艾山站变异点		利津站变异点	
	1	2	1	2	1	2	1	2
平滩流量	1991	1969	1989	1970	1990	1970	1991	1970
平滩面积	1974	1964	1970	1963	1993	1971	1990	1976
平滩河宽	1974	1965	1971	1965	1991	1976	1993	1976
平均水深	1981	1970	1988	1982	1993	1971	1989	1976
最大水深	1970	1962	1991	1985	1979	1970	1993	1975
平滩水位	1981	1980	1976	1957	1991	1976	2003	1976
宽深比	1974	1968	1988	1973	1993	1972	1993	1990

变异点可以很好反映序列均值的变化, 如图 2 和图 3 所示, 变异点的位置就是平滩流量和平滩面积等序列参数均值的跳跃点。

3.3 下游河道断面形态参数变异点分析

由表 4 可见, 各站平滩流量变异点基本一致, 在序列中, 存在两个变异点, 分别在 1970 年左右和 1990 年左右发生均值变异. 而各站平滩面积、平滩河宽、平均水深、最大水深、平滩水位和宽深比序列变异点有一定差异, 由于资料所限, 各站序列长度不一致, 艾山站和利津站资料系列相对较短, 一些在花园口站和高村站发生变异的点没有包含在艾山站和利津站的资料中. 平滩流量反映河道过流能力, 不仅与断面形态有关, 与来水来沙条件关系也很密切, 我们曾分析了黄河下游平滩流量与花园口站年均径流量之间的关系, 认为它们之间有良好的相关关系^[5], 所以各站平滩流量的变化较为一致. 而平滩面积和平滩河宽等直接反应断面形态特征的参数受各站所在

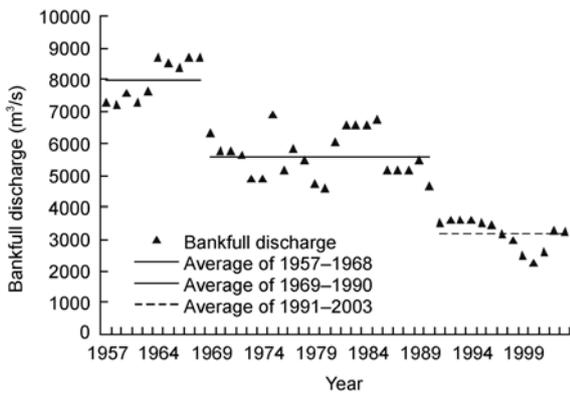


图 2 花园口站平滩流量变化过程

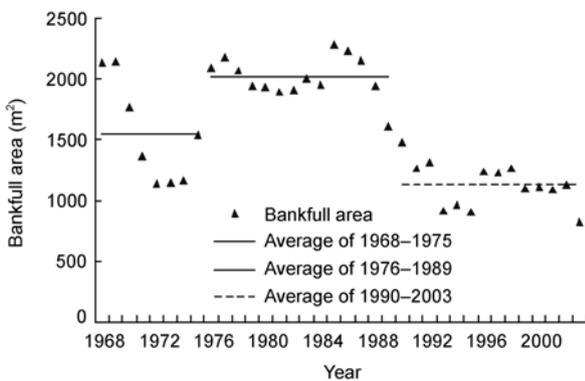


图 3 利津站平滩面积变化过程

位置的边界约束条件影响较大, 其变化趋势和变异点也有一定差异, 如花园口站和高村站处于游荡性河段, 断面宽浅, 两岸约束较弱, 平滩河宽变化幅度较大, 而艾山站两岸约束较强, 河宽变化受限, 平均水深变幅较大。

4 黄河下游河道主河槽萎缩趋势分析与主河槽萎缩的判别参数

4.1 下游河道主河槽萎缩趋势分析

黄河下游主河槽萎缩的主要特征是断面平滩流量和平滩面积的显著减小, 各站的平滩河宽、平均水深和最大水深也随之出现不同程度的减小, 可能还伴随着平滩水位的上升和断面宽深比的变化. 尽管由于资料长短及各站边界条件等的差异, 各站的断面形态参数变异点存在一定差异, 但可以看出在 1970~1975 年左右和 1990 年左右存在两个重要的转折点, 大部分序列都在 1970~1975 年左右发生变异, 而所有序列都在 1990 年附近发生了变异. 由这两个变异点分析黄河下游河道断面形态参数的变异方向可以发现, 这两次变异都是向河道断面萎缩的方向发展, 即平滩流量和平滩面积减小, 平滩河宽、平均水深和最大水深也出现不同程度的减小, 平滩水位和宽深比则有所抬高和增加。

由于 70 年代黄河下游河道的萎缩还不是非常严重, 各站平滩流量与 50, 60 年代均值相比, 下降了 30% 左右, 与 1950 年至 2003 年长序列的均值基本相当; 各站平滩面积、平滩河宽、平均水深、最大水深、平滩水位和宽深比也大都向萎缩方向变化, 但仍有某些断面呈现出与萎缩相反的变化趋势, 如利津站平滩面积在 70 年代中期到 80 年代末反而有所增加, 因此, 这一时期黄河下游河道主河槽萎缩情势尚不严重, 也没有扩展到全河段。

90 年代以后, 下游各站平滩流量和平滩面积均大幅度减小, 其均值下降到长序列年均值的 50%~60% 左右, 只有 50, 60 年代均值的 30%~40%, 平滩河宽、平均水深和最大水深出现不同程度的减小, 平滩水位和宽深比则有所抬高和增加, 黄河下游河道进入全面和严重的萎缩期。

4.2 下游河道主河槽萎缩的判别参数

下游主河槽萎缩是在变异的水沙条件下, 河床

演变脱离了在长期水文学意义下水沙过程中所建立的“相对平衡”状态, 出现泄洪输沙能力降低、同流量下水位不断升高等河道基本功能衰退的演变过程^[3]. 河道萎缩是一系列断面形态参数萎缩的综合反映, 单一的断面形态参数难以全面的反映河道萎缩的程度. 因此, 不妨以长期水文学意义下的河道平滩流量和河道断面形态特征参数作为基准, 以某年度河道平滩流量和河道断面形态特征参数与长期河道平滩流量和河道断面形态特征参数均值的比值来衡量相应年度的河道主河槽萎缩程度.

黄河下游河道主河槽的萎缩是多个断面形态参数萎缩的综合反映, 主河槽萎缩时, 平滩流量、平滩面积、平滩河宽、平均水深、最大水深、平滩水位和宽深比均发生相应变化, 且随各站边界条件等的差异, 各参数的变化程度存在一定差异, 用一个单独的断面形态参数来反映黄河下游河道主河槽的萎缩程度是不全面的. 较为合理的方法是将这些参数组合起来, 组成一个综合参数来判别主河槽萎缩程度. 当河道主河槽向萎缩方向发展时, 平滩流量、平滩面积、平滩河宽、平均水深和最大水深均朝减小的方向发展, 而平滩水位和宽深比向增加的方向发展, 因此, 将发展方向相同的参数(平滩流量、平滩面积、平滩河宽、平均水深和最大水深)相乘除以与它们发展方向相反的参数(平滩水位和宽深比), 然后每个参数再比上各自的长序列均值, 就可以构造出一个反映河道断面主河槽萎缩程度的参数 ϕ :

$$\phi = \frac{Q_{PT} AB\bar{H}\bar{H}_{max}}{Z\lambda} \bigg/ \frac{\bar{Q}_{PT} \bar{A}\bar{B}\bar{H}\bar{H}_{max}}{\bar{Z}\bar{\lambda}} = \frac{Q_{PT} AB\bar{H}\bar{H}_{max} \bar{Z}\bar{\lambda}}{\bar{Q}_{PT} \bar{A}\bar{B}\bar{H}\bar{H}_{max} Z\lambda}, \quad (7)$$

式中 Q_{PT} 为平滩流量、 A 为平滩面积、 B 为平滩河宽、 \bar{H} 为平均水深、 H_{max} 为最大水深、 Z 为平滩水位、 λ 为宽深比, \bar{Q}_{PT} 为平滩流量均值、 \bar{A} 为平滩面积均值、 \bar{B} 为平滩河宽均值、 \bar{H} 为平均水深均值、 \bar{H}_{max} 为最大水深均值、 \bar{Z} 为平滩水位均值、 $\bar{\lambda}$ 为宽深比均值. 需要说明的是, 作为探索性的定量研究, 为全面反映黄河下游河道主河槽的萎缩程度, 本文将各种参数均考虑在内, 今后尚需对参数做优化选择.

4.3 下游河道主河槽萎缩参数变化过程分析

主河槽萎缩参数 ϕ 是平滩流量和各断面形态参

数年度值与长系列均值比值的乘积, 为无量纲的参数, 可以反映河道主河槽的萎缩程度, 随着平滩流量、平滩面积、平滩河宽、平均水深和最大水深的减小而减小, 随平滩水位和宽深比的增大而减小, ϕ 值越小, 主河槽萎缩程度越严重. 由实测资料我们得到了花园口、高村、艾山和利津四站主河槽萎缩参数 ϕ 随时间变化过程. 图 4 和图 5 给出了花园口和利津站的 ϕ 值变化过程图, 可见, 花园口站在三门峡水库蓄水拦沙期(1960~1964 年) ϕ 值逐年增大, 而从 1964 年以后 ϕ 值大致呈逐年降低趋势, 其中, 1968 年、1969 年、1972 年、1976 年和 1980 年略有增大, 但总体上降低的趋势仍是十分明显的, 尤其是 80 年代以后 ϕ 值更是降到 1.0 以下. 高村站 ϕ 值在 50 年代初较小, 在 50 年代中期有所增大, 在 1960~1964 年三门峡水库蓄水拦沙期急剧增大, 1964 年到 1970 年又急剧减小, 而 1971~1974 年 ϕ 值更是降到 0.5 以下, 70 年代中期 ϕ 值有所上升, 到 1980 年又降到局部最低值, 80 年代初期到中期逐年恢复到 4.0 以上, 从 1986 年以后 ϕ 值又开始急剧下降, 1991 以后更是维持在 0.5 以下. 艾山站 ϕ 值从 1968 年至 1973 年逐年下降, 然后又逐渐恢复, 70 年代中期到 80 年代中期都维持在 1.0 以上,

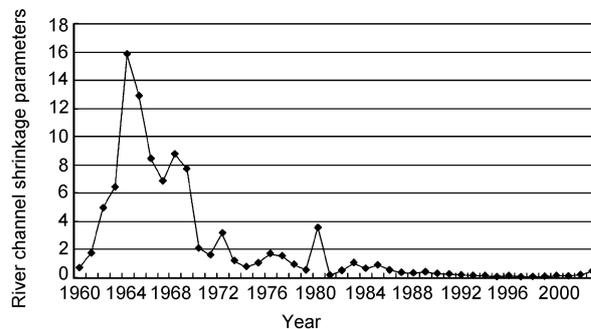


图 4 花园口站主河槽萎缩参数变化过程

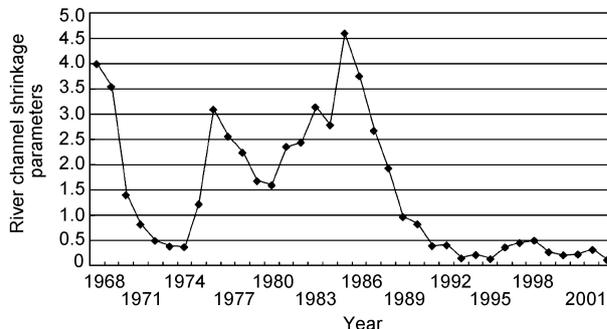


图 5 利津站主河槽萎缩参数变化过程

1988 年以后又开始下降, 除 1992 年稍高之外, ϕ 值均在 1.0 以下. 利津站 ϕ 值震荡较大, 从 1968 年到 1974 年逐年下降, 1971 到 1974 年 ϕ 值小于 1.0, 1975~1988 年 ϕ 值维持在 1.0 以上, 但其中经历了 1975~1976 和 1980~1985 年的两次上升及 1976~1980 和 1985~1988 年的两次下降过程, 1989 年后利津站 ϕ 值降低到了 1.0 以下.

分别采用肯德尔秩相关检验法、R/S 分析法和有序聚类分析法对四站 ϕ 值进行变化趋势和变异点分析, 结果如表 5 和表 6 所示. 查统计表得, $M_{0.05/2}=1.96$, $M_{0.01/2}=2.576$. 由表 5 可见, 四站 ϕ 值序列均有 $|M| > M_{0.01/2}$ 且 $P < N(N-1)/4$, 存在显著降低趋势, 表明四站河道主河槽均有显著的萎缩趋势; 四站主河槽萎缩参数的 H 值均大于 0.5, 趋近于 1, 说明这种萎缩趋势在未来仍将延续下去.

由表 6 可见, 由于各站序列长度及变化过程有差异, 变异点位置和数目也有一定差异. 为了明确 ϕ 值随萎缩过程阶段的变化, 以得到的变异点为界限, 对各站各时段 ϕ 的均值进行统计如表 7 所示.

综合表 6 和表 7 分析可知, 下游主河槽萎缩参数

ϕ 值主要发生了两次重要的变异, 存在两个显著的变异点, 一个是下游各站 ϕ 值均在 1970 年左右发生了变异, ϕ 的均值比前一个时段均大幅度下降, 高村站和利津站更是降到了 1.0 以下; 而 1990 年左右是另一个重要变异点, 各站 ϕ 值均大幅度降到 0.5 以下(花园口站在 1981 年后降到 0.5 以下).

对于下游各站而言, 由于边界条件等的差异, 主河槽萎缩状况和进程则略有差异. 花园口站在 1981 年以后就进入严重的主河槽萎缩阶段; 高村站 70 年代开始萎缩, 但 80 年代有一段时间有所恢复, 1988 年以后进入严重萎缩期; 艾山站则从 1986 年开始萎缩, 1993 年以后进入严重萎缩期; 利津站类似于高村站, 70 年代开始萎缩, 但 70 年代中期到 80 年代末有所恢复, 1989 年以后进入严重萎缩期.

需要指出的是, 黄河三门峡水库 1960 年建成, 刘家峡水库 1968 年建成, 龙羊峡水库 1986 年建成, 小浪底水库 1999 年建成, 可见黄河下游河道主河槽萎缩时间和水库的建成时间有较好的对应关系. 由于水库的修建使下游河道的来水来沙条件发生变异, 导致河道发生相应的响应, 下游河道也相应发生变

表 5 黄河下游四站主河槽萎缩参数肯德尔秩相关检验和 R/S 分析赫斯特指数 H 值统计表

站名	数据量 N	P	$N(N-1)/4$	$N(N-1)/2$	统计量/ M	赫斯特指数/ H
花园口站	44	138	495	990	-6.6354	0.91617
高村站	53	388	689	1378	-4.5367	0.84076
艾山站	36	120	315	630	-6.6354	0.75872
利津站	36	181	315	630	-3.5591	0.80736

表 6 黄河下游四站主河槽萎缩参数的变异点统计表

站名	变异点 1	变异点 2	变异点 3	变异点 4
花园口站	1965	1970	1981	
高村站	1964	1970	1983	1988
艾山站	1972	1986	1993	
利津站	1970	1976	1989	

表 7 黄河下游四站主河槽萎缩参数 ϕ 各时段均值统计表

序号	花园口站		高村站		艾山站		利津站	
	时段	ϕ	时段	ϕ	时段	ϕ	时段	ϕ
1	1960~1964	5.9345	1951~1963	2.0731	1968~1971	2.9429	1968~1969	2.9897
2	1965~1969	8.9399	1964~1969	6.4867	1972~1985	1.3763	1970~1975	0.7919
3	1970~1980	1.6368	1970~1982	0.7360	1986~1992	0.9564	1976~1988	2.6904
4	1981~2003	0.3003	1983~1987	2.8220	1993~2003	0.4350	1989~2003	0.3797
5			1988~2003	0.2679				

异. 但河道对来水来沙条件的响应需要一定的时间, 因此河道的变异点要滞后于水沙条件的变异点, 如三门峡水库和刘家峡水库修建后在 1970 年左右发生明显变异, 龙羊峡水库修建后在 1990 年左右发生明显变异, 小浪底水库修建后通过调水调沙运用, 对下游断面形态的萎缩趋势有明显改善. 为了说明水沙条件变异与河床形态变异的关系, 下节将对下游河道主河槽萎缩与三门峡出库水沙过程的响应关系做进一步的研究.

综上所述, 可以认为黄河下游河道主河槽从 70 年代开始初步萎缩, 90 年代以后进入严重萎缩期.

5 黄河下游河道主河槽萎缩参数与三门峡出库水沙过程的响应关系

5.1 下游河道主河槽萎缩参数与三门峡出库水沙过程的响应关系

黄河下游属于冲积型河道, 河床形态与上游来水来沙关系密切. 进入下游河道的水沙条件是影响该河段河床演变的决定性因素. 目前小浪底水库是进入下游河道的控制性工程, 但小浪底水库运用至今只有不到十年, 水沙系列较短, 而三门峡水库控制进入下游的水沙过程近 40 年, 对下游河床演变作用显著, 因此, 本文通过建立三门峡水库出库水沙过程和下游河道主河槽萎缩参数的响应关系, 以便研究出库水沙过程对下游河道萎缩的影响, 探索恢复和维持下游河道基本输水输沙通道的水沙过程. 我们首先分别分析了下游四站主河槽萎缩参数与三门峡水库出库水沙参数的关系, 图 6 为高村站的关系图, 采用多元回归分析方法可得到下游四站两者的关系如下:

$$\text{花园口: } \phi = 1 \times 10^{-5} \frac{\bar{Q}^{-2.214} N_s^{1.527}}{e^{2.665} \alpha_s^{2.144}} (R=0.828); \quad (8)$$

高村:

$$\phi = 0.0002 \frac{\bar{Q}^{-1.226}}{N_s^{1.255} \bar{\xi}^{0.511} e^{0.375} \alpha_s^{0.823}} (R=0.788); \quad (9)$$

$$\text{艾山站: } \phi = 0.0876 \frac{\bar{Q}^{-0.732}}{N_s^{0.089} e^{1.005}} (R=0.747); \quad (10)$$

$$\text{利津站: } \phi = 0.0037 \frac{\bar{Q}^{-1.103}}{N_s^{0.695} e^{0.450}} (R=0.577), \quad (11)$$

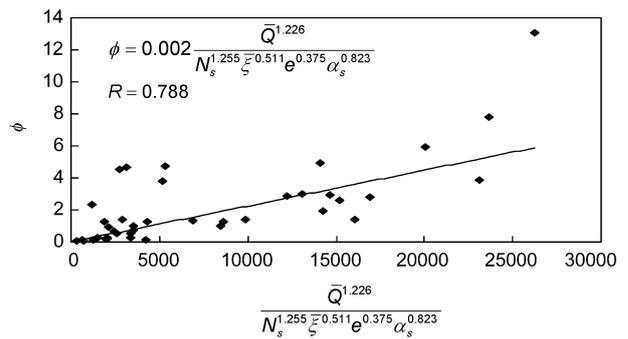


图 6 高村站主河槽萎缩参数与三门峡出库水沙综合参数关系

式中 ϕ 为主河槽萎缩参数, \bar{Q} 为三门峡出库年平均流量, N_s 为三门峡出库年最大月平均含沙量与年平均含沙量比值, e 为三门峡出库水沙年水沙不协调指数, α_s 为三门峡出库汛期沙量比例, $\bar{\xi}$ 为三门峡出库年平均来沙系数.

需要说明的是, 在进入下游河道的水沙参数中, 我们引入了水沙不协调指数 e , 它是一个用来表征年内水沙过程协调性的指标. 如果年内水沙搭配不协调的话, 即使年均含沙量很低, 也可能出现小水带大沙等不利的水沙搭配, 提出一个表征年内水沙过程协调性的指标是十分必要的. 如以月为单位, 计算每月输水量和输沙量占全年输水量和输沙量的比例, 显然每月输水输沙量占全年输水输沙量比例越接近, 年内水沙分配过程越协调. 将一年中流量和含沙量月平均值除以年平均值, 得到各月流量相对百分比与含沙量相对百分比, 然后将各月流量和含沙量相对百分比之差的绝对值相加, 可得到水沙不协调指数 e 的计算方法如下:

$$e = \sum_{i=1}^{12} \left| \frac{Q_i}{Q_{\text{年均}}} - \frac{S_i}{S_{\text{年均}}} \right|, \quad (12)$$

式中 $Q_{\text{年均}}$ 和 $S_{\text{年均}}$ 为年平均流量和含沙量, Q_i 和 S_i 为年内月平均流量和含沙量. e 值越大, 相应水沙过程越不协调. 需要说明的是, (12) 式采用的月平均与年平均流量和含沙量是较为粗略的分析, 尚需进一步细化, 特别是对于洪水过程的描述.

图 7 为 1956~1998 年三门峡出库水沙不协调指数 e 变化过程, 由图 7 可见, 三门峡出库水沙过程不协调性呈增加的趋势, 1960 年前天然状况下水沙过程比较协调, 三门峡水库修建后水沙过程朝着相对不协调

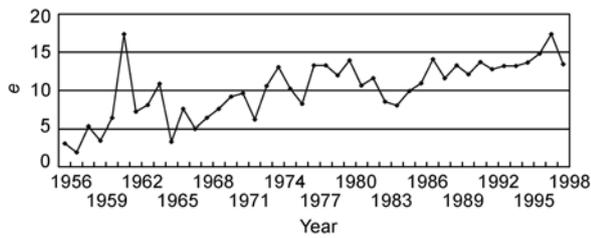


图7 三门峡出库水沙不协调指数变化过程

的方向发展,特别是1986年龙羊峡水库建成后水沙过程相对来说更为不协调,表明水库的修建极大地影响了下游河道的来水来沙条件,而这种来水来沙条件的改变使得下游河道主河槽向萎缩的方向发展。

由(8)~(11)式可见,除利津站关系相对稍差外,其余三站主河槽萎缩参数与三门峡站水沙参数关系均良好,相关系数从上游到下游逐步降低.由于三门峡水库出库水沙过程在河道中会经过一定程度的调整,加上支流汇入及引水引沙等因素的影响,到达下游各断面的水沙过程与三门峡水库出库水沙过程已有相当的差异,距三门峡水库越远,差异越大,因此,下站回归的相关系数会明显低于上站,使得各站 N_s 的相关性不同.另外主河槽萎缩参数 ϕ 除了和来水来沙条件有关外,很大程度上受断面边界约束条件的影响,使各站萎缩参数 ϕ 对水沙参数的响应也有差异.影响各站 ϕ 值的主要因素包括:三门峡出库年平均流量 \bar{Q} , 年最大月平均含沙量与年平均含沙量比值 N_s 和年水沙不协调指数 e 等.各站 ϕ 值均随三门峡出库年均流量增大而增大,随年水沙不协调指数 e 增大而减小;而随年最大月平均含沙量与年平均含沙量比值 N_s 的增大,高村、艾山和利津三站 ϕ 值均减小,但花园口站 ϕ 值增大.另外,花园口站和高村站 ϕ 值还会随着汛期沙量比例 α_s 增大而减小,高村站 ϕ 值与年均来沙系数 $\bar{\xi}$ 成反比。

如果三门峡站出库年均流量增大或者出库水沙过程更加协调,下游河道的萎缩状况会趋于好转;如果某一年出现了较大的沙峰过程,即年最大月平均含沙量与年平均含沙量比值较大,花园口站萎缩状态会好转,但高村、艾山和利津三站萎缩均会加剧;提高非汛期输沙比例会使花园口和高村站萎缩状况好转,来沙系数的降低也会缓解高村站的萎缩状况。

因此,要缓解和改善黄河下游河道近期严重萎缩的状况,需要上游水库下泄更多的水量,使出库水

沙搭配过程协调,沙量不能过于集中在汛期下泄,并需要上中游大力发展水利水保工程,拦蓄泥沙,降低来沙系数。

5.2 黄河下游四站统一的主河槽萎缩参数与三门峡站出库水沙过程的响应关系

上述四站主河槽萎缩参数与三门峡站出库水沙参数关系良好,进一步可将下游各站主河槽萎缩参数综合统一起来与三门峡水库出库水沙过程建立响应关系,这样即可扩大了样本范围,又可完整地反映黄河下游河道主河槽萎缩的情况.图8为黄河下游四站统一的主河槽萎缩参数与三门峡水库水沙综合参数的关系,采用多元回归分析得到黄河下游四站综合的响应关系:

$$\phi = 0.0022 \frac{\bar{Q}^{1.083} \alpha_w^{0.790}}{N_s^{0.204} \bar{\xi}^{0.222} e^{0.704} \alpha_s^{1.700}}, (R=0.690), (13)$$

式中各参数定义如前。

由(13)式可知,黄河主河槽萎缩参数与三门峡出库年平均流量及出库汛期水量比例成正比,与三门峡出库年最大月平均含沙量与年平均含沙量比值、出库年平均来沙系数、出库水沙年水沙不协调指数和出库汛期沙量比例成反比.表明要改善黄河下游主河槽萎缩状况,就需要增大主河槽萎缩参数,可以通过增加三门峡出库流量、提高汛期泄水比例、降低汛期输沙比例、降低出库来沙系数和使出库水沙过程更协调等方式实现;大沙峰过程会使黄河下游主河槽萎缩状况更加严重。

此外,我们在分析下游四站平滩流量与三门峡出库水沙参数关系的基础上,建立了下游四站统一的平滩流量 Q_{PT} 与三门峡出库水沙参数的关系如图9

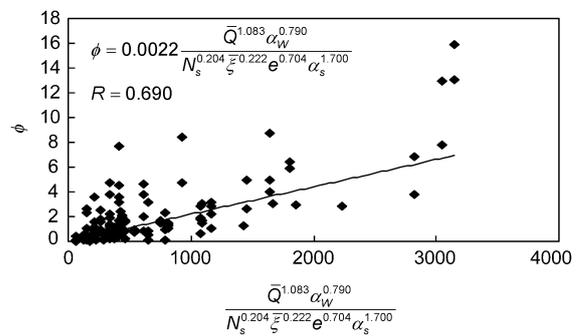


图8 黄河下游四站主河槽萎缩参数与三门峡站出库水沙综合参数关系

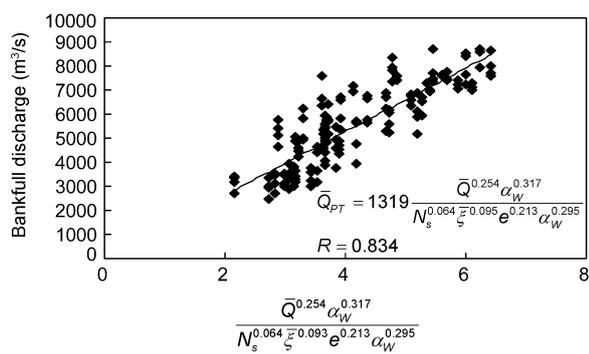


图9 黄河下游四站平滩流量与三门峡出库水沙综合参数关系

和下式所示:

$$Q_{PT} = 1319 \frac{\bar{Q}^{0.254} \alpha_w^{0.317}}{N_s^{0.064} \bar{\xi}^{0.095} e^{0.213} \alpha_s^{0.295}}, (R=0.834), \quad (14)$$

式中各参数定义如前。

由图9和(14)式可见,要增大下游河道平滩流量,可以调控的三门峡出库水沙参数与主河槽萎缩参数的(13)式是一致的,即(13)和(14)式左侧的水沙参数均为影响主河槽萎缩的重要因素。

5.3 黄河下游主河槽萎缩的临界判别条件

如前述分析,可采用主河槽萎缩参数 $\phi=1.0$ 和 $\phi=0.5$ 作为河道萎缩程度的两个临界判别值, $\phi \leq 1.0$ 时,表明主河槽开始萎缩; $\phi \leq 0.5$,表明主河槽进入严重萎缩期,进而得到黄河下游河道主河槽萎缩的临界水沙条件为

$$\phi = 0.0022 \frac{\bar{Q}^{-1.083} \alpha_w^{0.790}}{N_s^{0.204} \bar{\xi}^{-0.222} e^{0.704} \alpha_s^{1.700}} \leq 1.0,$$

主河槽开始萎缩, (15)

$$\phi = 0.0022 \frac{\bar{Q}^{-1.083} \alpha_w^{0.790}}{N_s^{0.204} \bar{\xi}^{-0.222} e^{0.704} \alpha_s^{1.700}} \leq 0.5,$$

主河槽进入严重萎缩期. (16)

图10为1956~1998年三门峡站综合水沙参数的变化过程图与主河槽萎缩的临界水沙条件判别图,由图10可见,1969年以前点子都落在萎缩区之外;1969年以后点子开始落入萎缩区,但还没有全面进入萎缩区,有的年份还在萎缩区外;1986年以后,点子开始完全进入萎缩区,其中,1987,1992和1994~1998年的点子进入了严重萎缩期。

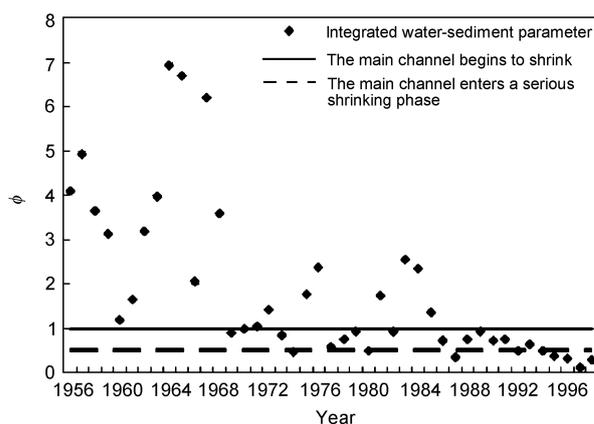


图10 黄河下游河道主河槽萎缩过程判别图

取完全进入萎缩区以后的1986~1998年水沙过程进行计算,1986~1998年三门峡出库年平均流量 $\bar{Q}=817.67 \text{ m}^3/\text{s}$,年最大月平均含沙量与年均含沙量比值 $N_s=3.938$,年平均来沙系数 $\bar{\xi}=0.03975$,年水沙不协调指数 $e=13.3765$,汛期水量比例 $\alpha_w=0.4503$,汛期沙量比例 $\alpha_s=0.9278$,由(13)式计算得到主河槽萎缩参数为 $\phi=0.4714$,表明主河槽严重萎缩。

由此可见,按照上述河道萎缩的临界判别条件分析,进一步说明黄河下游主河槽在70年代开始初步萎缩,90年代以后进入严重萎缩期。

需要指出的是,(13)式表明通过出库水沙过程的调控是可以缓解和改善下游河道严重萎缩的状况,可做如下简单的分析:假设短期内黄河流域来水来沙状况不会发生很大改变,仍维持现状,取1986~1998年序列均值,则三门峡出库年平均流量 $\bar{Q}=817.67 \text{ m}^3/\text{s}$,年最大月平均含沙量与年平均含沙量比值 $N_s=3.938$,年平均来沙系数 $\bar{\xi}=0.03975$,这些参数的数值是固定的,而汛期输水输沙比例和年水沙不协调指数是可以通过水库调控的,若通过水库调控,使汛期输水输沙比例均达到1956~1998年的多年平均值,则汛期水量比例为 $\alpha_w=0.5261$,汛期沙量比例为 $\alpha_s=0.8806$,要使主河槽不萎缩,按(13)式需有 $\phi \geq 1$,则需要年水沙不协调指数 $e \leq 6.62$,而天然状况下来水来沙较丰的1956~1960年期间年水沙不协调指数 $e=3.99$,表明年水沙不协调指数 $e \leq 6.62$ 的目标是可以达到的。因此,通过水库对出库水沙过程的调节和控制,提高汛期输水比例,降低汛期输沙比例,降低年水沙不协调指数,黄河下游河道主河槽严重

萎缩的状况有可能缓解和改善. 特别是 2002 年小浪底水库开展调水调沙运用以来, 对控制进入下游河道的水沙条件已积累了一定的经验, 通过调控出库水沙过程, 加大出库流量和含沙量, 使下游河道主河槽发生了明显冲刷, 下游河道平滩流量由 2002 年的局部河段不足 $2000 \text{ m}^3/\text{s}$, 已达到 2010 年的最小平滩流量约 $4000 \text{ m}^3/\text{s}$, 大大改善了下游河道的萎缩状况. 表明通过水库的水沙调控, 使出库水沙过程更加协调, 缓解和改善黄河下游河道的萎缩状况是可以做到的. 通过上中游水库对出库水沙过程的调控, 特别是调控出库水沙不协调指数, 配合上中游的水土保持等措施有效减少入黄泥沙, 降低来沙系数, 可以恢复与维持黄河下游河道基本的输水输沙通道.

6 结论

本文采用时间序列分析的方法对黄河下游河道断面形态特征参数进行了变化趋势和变异点分析, 提出了黄河下游主河槽萎缩判别参数与判别标准, 建立了黄河下游河道主河槽萎缩参数与三门峡水库出库水沙过程的响应关系. 得到如下主要认识.

1) 从 20 世纪 50 年代以来, 黄河下游河道主河槽呈逐年萎缩的态势, 且萎缩趋势在未来仍将延续. 黄河下游各站形态特征参数变异点分析表明, 在

1970 年左右和 1990 年左右存在两个河道萎缩的变异点. 黄河下游河道主河槽萎缩最主要的特征就是断面平滩流量和平滩面积的显著下降, 相应的平滩河宽、平均水深和最大水深出现不同程度的下降, 并伴随着平滩水位和断面宽深比的上升.

2) 通过引入三门峡出库水沙过程不协调指数 e , 用以反映三门峡出库水沙过程的不协调性, 表明三门峡水库修建后水沙过程不协调性呈增加的趋势. 建立了黄河下游河道主河槽萎缩参数与三门峡出库水沙过程的响应关系, 并分析了影响主河槽萎缩的因素.

3) 黄河下游河道主河槽萎缩参数 ϕ 是判别黄河下游河道主河槽萎缩的有效参数, 下游主河槽萎缩的临界判别条件为: $\phi \leq 1.0$ 时, 主河槽开始萎缩; $\phi \leq 0.5$, 主河槽进入严重萎缩期. 黄河下游河道主河槽在 70 年代开始初步萎缩, 90 年代以后进入严重萎缩期.

4) 通过水库调控出库水沙过程是可以缓解和改善下游河道主河槽萎缩的局面, 其措施是增大主河槽萎缩参数 ϕ 的取值, 可通过增大出库流量, 提高汛期出库水量比例, 降低出库来沙系数、汛期出库沙量比例和协调出库水沙搭配过程来实现. 特别是调控出库水沙不协调指数 e , 可以恢复与维持下游河道基本的输水输沙通道.

参考文献

- 1 陈建国. 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
- 2 陈东, 曹文洪, 胡春宏. 河床枯萎的临界阈研究. 水利学报, 2002, 2: 22—28
- 3 姚文艺. 黄河下游河道萎缩致灾机理探讨. 水利学报, 2005, 3: 257—264
- 4 陈界仁, 夏爱平. 黄河下游主河槽萎缩与水沙条件关系初步分析. 水文, 2007, 22: 21—23
- 5 胡春宏. 黄河水沙调控与下游河道中水河槽塑造. 北京: 科学出版社, 2007. 74—75
- 6 张善文, 雷英杰, 冯有前. MATLAB 在时间序列分析中的应用. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2007. 1—2
- 7 王盼成, 贺松林. 长江大通站水沙过程的基本特征 I 径流过程分析. 华东师范大学学报(自然科学版), 2004, 2: 72—80
- 8 王孝礼, 胡宝清, 夏军. 水文时序趋势与变点的 R/S 分析法. 武汉大学学报(工学版), 2002, 35: 10—12
- 9 燕爱玲. R/S 法的径流时序复杂性分析. 应用科学学报, 2007, 25: 214—217
- 10 张国罡, 胡春宏, 赵海镜. 三门峡水库进出库水沙过程变化趋势及变异点分析. 水利水电技术, 2008, 39: 24—28
- 11 李俊. 有序聚类法在土壤水分垂直分层中的应用. 北京林业大学学报, 2007, 29: 98—101
- 12 李广场, 李江林. 有序聚类分析在声波测井自动分层中的应用. 工程勘察, 2007, 8: 73—75