

文章编号:0559-9350(2009)10-1227-06

## 黄河下游河道断面形态参数变化与主河槽萎缩趋势分析

张国罡,胡春宏,陈建国

(中国水利水电科学研究院 泥沙研究所,北京 100048)

**摘要:**采用时间序列分析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分析。结果表明从20世纪50年代以来,特别是90年代以来黄河下游花园口站、高村站、艾山站和利津站断面形态参数发生了趋势性变化,主河槽变化的最显著特征就是断面平滩流量下降,相应的平滩面积、平滩河宽、平均水深、最大水深均出现不同程度的减小,平滩宽深比增大。变异点分析表明黄河下游河道主河槽总体上在1970—1975年开始萎缩,1990年以后进入严重萎缩期。

**关键词:**黄河下游河道;时间序列分析;趋势分析;变异分析;主河槽萎缩

**中图分类号:**TV143

**文献标识码:**A

## 1 研究背景

黄河下游近期出现了较为严重的主河槽萎缩现象,河道断面形态出现了一些趋势性的变化<sup>[1-4]</sup>。以往关于这些趋势变化一般采用图形等直观的描述方法,而关于趋势变化的变异点研究则更为缺乏。本文拟采用时间序列分析的方法对黄河下游河道断面形态进行一些变化趋势和变异点的研究和探讨。

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<sup>[5]</sup>,水文现象是一个随机自然现象,是一个非平稳的时间序列,水文资料只要是按照时间顺序记录的,都可以认为是连续随机过程的离散化观测结果,一般都可以作为时间序列来处理。时间序列分析方法被广泛用于水文领域中各对象随时间变化的规律。朱厚华等基于黄河流域及周边地区1 000多个水文气象站近50年的月降水资料所生成的整个流域及29个三级区的面雨量过程,采用多种时间序列分析方法,研究了黄河流域降水的随机性、趋势性和周期性<sup>[6]</sup>。王盼成、贺松林用时间序列分析方法对长江大通站径流过程和输沙过程进行了详细分析<sup>[7-8]</sup>。胡安焱采用Mann-kendall检验趋势分析方法和线性趋势回归检验方法,对塔里木河源流和干流8个水文站44年的年径流量进行了趋势分析<sup>[9]</sup>。张祥伟用有序聚类分析法对河流水质时间序列的跳跃性成分进行了分析<sup>[10]</sup>。

本文采用时间序列分析方法中的趋势分析以及变异点分析方法对黄河下游河道断面形态参数进行分析,采用的资料包括花园口、小浪底、高村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、平滩水位及宽深比。其中,对于黄河这样一个水沙条件和断面情况都很复杂的河流,平滩流量是比较难以确定的。很多专家学者对此进行了研究,建立了黄河下游平滩流量与不同影响因子之间的关系及计算方法,认为平滩流量与来水来沙条件等有很大关系,并随来水来沙条件变化而变化<sup>[11-13]</sup>。在本文中,平滩流量值采用“塑造黄河下游中水河槽措施研究”成果,其给出的黄河下游四站的平滩流量反映黄河下游平滩流量的平均情况<sup>[11]</sup>。而平滩面积、平滩河宽、平均水深、最大水深、平滩水位及宽深比则根据黄河下游河道大断面实测资料分析得到。

收稿日期:2008-04-17

基金项目:国家杰出青年科学基金项目(50725930);中国水科院科研专项(泥集0920);现代水利科技创新项目(XDS2007-06)

作者简介:张国罡(1984—),男,安徽黄山人,硕士生,主要从事水力学及河流动力学研究。E-mail:zgg19840705@163.com

## 2 时间序列分析方法

时间序列分析就是充分利用现有的方法对时间序列进行处理,挖掘出对研究和解决问题有用的信息量。时间序列分析可以描述系统所处的状态、结构性以及运行规律性,预测及控制系统的未来行为,对理论性模型与数据进行适度检验等。时间序列分析方法主要包括发展水平分析,趋势分析,周期波动分析,变异点分析以及采用随机理论的随机时间序列分析方法等<sup>[16]</sup>。其中,每种分析又都有很多种不同的数学模型及计算方法。本文主要对黄河下游河道断面形态参数进行趋势分析和变异点分析,采用的是趋势分析中分析序列现有趋势的肯德尔秩相关检验法以及变异点分析中分析序列变异点的有序聚类分析法。

**2.1 趋势分析方法——肯德尔秩相关检验<sup>[7]</sup>** 定义肯德尔统计量和标准化变量如下:

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

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

式中: $P$ 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。对于序列为无趋势序列, $P = N(N-1)/4$ ;若 $P$ 接近于 $N(N-1)/2$ ,表示有上升趋势;若 $P$ 接近于 $0$ ,则为下降趋势。当 $N$ 增加时, $M$ 很快收敛于标准正态分布。当原假设为该序列无趋势时,一般采用双层检验,在给定显著性水平 $\alpha$ (一般为 $0.05 \sim 0.01$ )以后,若 $|M| < |M|_{\alpha/2}$ ,接受原假设,即趋势不显著,否则趋势显著。

**2.2 变异点分析方法——有序聚类分析法<sup>[14-15]</sup>** 有序聚类分析法是在连续样品段内,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 $\{x_i, \dots, x_j\} (1 \leq i \leq j \leq n)$ ,其类直径为:

$$D(i, j) = \sum_{l=i}^j (x_l - \bar{x}_{ij})^2 \quad (3)$$

假设将总体 $n$ 个样本分为 $m$ 类。用 $x_k$ 表示第 $k$ 类中第一个样本,则分类方法中有一种为 $\{x_{i_1}, x_{i_1+1}, \dots, x_{i_2-1}\} \{x_{i_2}, x_{i_2+1}, \dots, x_{i_3-1}\} \dots \{x_{i_k}, x_{i_k+1}, \dots, x_{i_{k+1}}\} \dots \{x_{i_m}, x_{i_m+1}, \dots, x_n\} (i_1 = 1)$ 。则其误差函数为:

$$\varphi(p(m, n)) = \sum_{k=1}^m D(x_{i_k}, x_{i_{k+1}-1}) \quad (4)$$

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:

$$\varphi(p_0(m, n)) = \min_{m \leq j \leq n} \{ \varphi(p_0(m-1, j-1)) + D(j, n) \} \quad (5)$$

其中, $\varphi(p_0(m-1, n-1))$ 为将前 $j-1$ 个数据聚为 $m-1$ 类的误差函数最小值。

于是,由式(3)、(4),首先计算将前 $n$ 个样本分为2类的最小误差函数值,以及使误差函数取最小值时的分类界限向量 $j$ ,然后按式(5)依次分别求出前 $n$ 个样本分为3,4, ...,  $m$ 类的最小误差函数,同时得出分为 $m$ 类的每一类中第一个向量的序号 $j$ ,由此得出聚类结果。对于分类数 $m$ 的确定,可以采用作图法,做出误差函数 $\varphi(p_0(m, n))$ 随 $m$ 的变化曲线,在曲线的拐点处来确定 $m$ 。

## 3 黄河下游河道断面形态参数变化趋势分析

采用肯德尔秩相关检验法对黄河下游各站平滩流量及断面形态特征量(平滩面积、平滩河宽、平均水深、最大水深、平滩水位及宽深比)进行趋势分析,在下面列出采用的资料序列。平滩流量序列: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:花园口站(1960—2003),高村站(1951—2003),艾山站(1968—2003),利津站(1968—2003)。

表 1 为花园口站的计算结果,由表 1 可得,  $M_{0.052}=1.96, M_{0.012}=2.576$ 。可以看出,花园口站平滩流量,平滩面积,平滩河宽及平均水深序列均有  $|M| > M_{0.012}$ ,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  $M_{0.052} < |M| < M_{0.012}$ 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  $|M| < M_{0.052} < M_{0.012}$ ,不存在显著的趋势变化。其余三站计算分析过程类似。

表 1 花园口站平滩流量及断面形态特征量肯德尔秩相关检验

序列	$N$	$P$	$N(N-1)/4$	$N(N-1)/2$	统计量 $M$
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 为四站平滩流量及断面形态特征量趋势分析汇总。由表 2 可知,花园口、高村、艾山及利津四站平滩流量和平滩面积均有显著的下降趋势,除了艾山站之外,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,那么平滩面积的减小必然是由平均水深的减小引起的。

表 2 四站平滩流量及断面形态特征量趋势分析汇总

序列	花园口站	高村站	艾山站	利津站
平滩流量	//	//	//	//
平滩面积	//	//	//	//
平滩河宽	//	//	++	//
平均水深	//	○	//	○
最大水深	?	//	○	?
平滩水位	○	++	++	○
宽深比	○	○	++	○

注:++表示有显著上升趋势( $|M| > M_{0.012}$ 且  $P \rightarrow N(N-1)/4$ );//表示有显著下降趋势( $|M| > M_{0.012}$ 且  $P \rightarrow 0$ );+有一定上升趋势( $M_{0.052} < |M| < M_{0.012}$ 且  $P \rightarrow N(N-1)/4$ );?有一定下降趋势( $M_{0.052} < |M| < M_{0.012}$ 且  $P \rightarrow 0$ );○无趋势( $|M| < M_{0.052} < M_{0.012}$ )。

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,分析问题不能互相替代。

另外高村站和艾山站的平滩水位有显著的抬高趋势,对防洪有不利影响。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,从 20 世纪 50、60 年代到 2003 年,黄河下游河道平滩流量和平滩面积均出现了显著的下降趋势,其中,视各站不同,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。因此,黄河下游主河槽萎缩的最显著特征就是断面平滩流量和平滩面积的显著下降,然后随各站不同,平滩河宽、平均水深、最大水深出现不同程度的下降,另外可能还伴随着平滩水位的上升和断面宽深比的变化。

#### 4 黄河下游河道断面形态参数变异点与河道萎缩趋势分析

4.1 黄河下游河道断面形态参数变异点 采用和上面的趋势分析相同的资料,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量序列进行变异点分析。

理论上说,误差函数  $\varphi(p_0(m, n))$  越小,分类效果越好,但如果分成太多类没有必要,意义也不大,因此绘制出误差函数随分类数  $m$  的变化图,在曲线的拐点处来确定  $m$ 。图 1 是利津站平滩流量误差函数图,由图可见,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。其余各序列分类数用同样方法确定,结果发现,各站平滩流量、平滩面积、平滩河宽、平均水深、最大水深、平滩水位及宽深比误差函数拐点也基本上在  $m=3$  左右。因此,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、平滩水位及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。

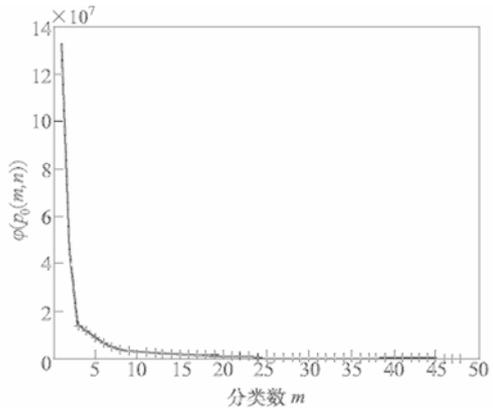


图 1 利津站平滩流量误差函数变化

从表 3 可以看出,各站平滩流量变异点比较一致,而各站平滩面积、平滩河宽、平均水深、最大水深、平滩水位及宽深比序列变异点有一定差异。其中主要原因是受资料所限,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、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。另外由于平滩流量反映河道过流能力,与来水来沙条件关系非常密切,胡春宏等分析了黄河下游平滩流量与花园口年均径流量,认为它们之间有较好相关关系<sup>[11]</sup>,所以,各站平滩流量的变化基本上趋于一致。而平滩面积、平滩河宽、平均水深等直接反应断面形态特征的指标受各站所在位置的边界约束条件影响较大,因此,由于各站边界条件的差异,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,平滩河宽变化幅度就较大,而艾山站两岸约束较强,河宽变化受限,平均水深变幅就较大。

表 3 花园口站、高村站、艾山站、利津站平滩流量及河道断面特征量序列变异点统计

序列	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

有序聚类分析法得到的变异点很好的体现了序列均值的变化,如图 2—5 所示,变异点的位置就是平滩流量、平滩面积或宽深比的均值跳跃点。

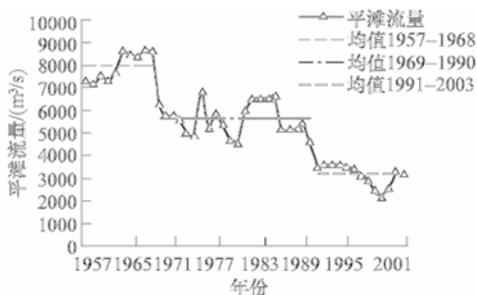


图 2 花园口站平滩流量变化

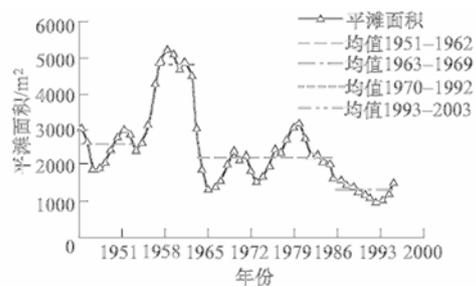


图 3 高村站平滩面积变化

#### 4.2 黄河下游河道断面形态参数变异点结果分析

从表 3 可以看出,各站平滩流量变异点比较一致,



图4 利津站平滩面积变化

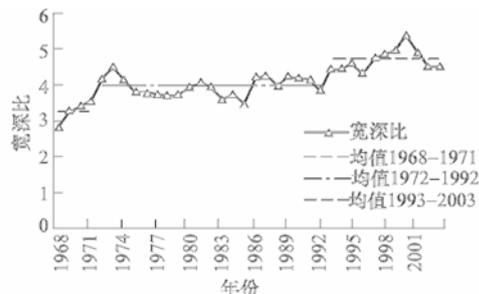


图5 艾山站宽深比变化

分别在1970年左右和1990年左右发生均值变异。在这两个变异点,序列均值均出现了跳跃性的下降。以花园口站平滩流量变化为例,如图2所示,花园口站平滩流量均值:1957—1968年均值为 $7\,991.8\text{m}^3/\text{s}$ ;1969—1990年均值降为 $5\,629.8\text{m}^3/\text{s}$ ,为1957—1968年均值的70.4%;1991—2003年均值则降到 $3\,174.5\text{m}^3/\text{s}$ ,为1969—1990年均值的56.4%,更是只占1957—1968年均值的39.7%,下降幅度非常大。其余三站平滩流量变化规律和幅度与花园口站基本相同。

综合四站变异点,可以认为平滩面积的变异点发生在1963年、1970年、1975年及1990年左右。图3为高村站平滩面积变化图:1951—1962年平滩面积均值 $2\,558.4\text{m}^2$ ;1963—1969年增加到 $4\,804.1\text{m}^2$ ;1970—1990年减少到 $2\,221.9\text{m}^2$ ;1991—2003年继续减少到 $1\,462.9\text{m}^2$ ,减少幅度较大。可见与平滩流量的变化不同,平滩面积的变化经历了一个先增大然后持续减小的过程。花园口和艾山两站平滩面积变化也基本呈现相同规律,60~70年代平滩面积较大,70年代以后开始减少,而到了90年代以后,出现大幅度的平滩面积的减小。但利津站平滩面积变化则略有不同,如图4所示,在70年代初减小后,70年代中期到80年代末反而有所增加,到了90年代以后再大幅度减少。

由变化趋势分析可知,平滩河宽、平均水深、平滩水位及宽深比序列中某些序列没有明显变化趋势,则认为其没有发生变异,因此,在这里只考虑有明显变化趋势的序列变异点。那么,综合来说,平滩河宽变异点在1965年、1971年、1975年和1991年左右(四站均有明显变化趋势),而平均水深变异点在1970年、1981年和1993年左右(花园口站和艾山站明显下降)。其中,花园口站、高村站及利津站平滩面积变异点和平滩河宽变异点基本一致,艾山站平滩面积、平均水深变异点一致。说明花园口、高村和利津三站平滩面积与平滩河宽关系比较密切,而艾山站平滩面积主要受平均水深影响,这与上面趋势分析的结论也基本一致。且平滩河宽和平均水深的变化过程也基本和平滩面积保持一致,70年代开始减小,90年代大幅度减小。

只有高村站最大水深序列有明显下降趋势,其变异点在1985年和1991年:1951—1984年最大水深均值为 $5.51\text{m}$ ,1985—1990年为 $7.15\text{m}$ ,而1991—2003年为 $3.26\text{m}$ ,90年代以后显著下降。另外高村站和艾山站平滩水位明显升高,变异点在1957年、1976年和1991年,艾山站宽深比明显升高,变异点在1972年和1993年,平滩水位和宽深比在变异点处均升高(如图5)。

**4.3 黄河下游河道主河槽萎缩趋势分析** 从上面的分析,由于资料长短及各站边界条件等的差异,各站平滩流量、平滩面积、平滩河宽、平均水深、最大水深、平滩水位及宽深比序列变异点存在一定差异。但是可以看出1970—1975年左右和1990年左右是两个重要的转折点,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。

由前面的分析可知,黄河下游主河槽萎缩的最显著特征就是断面平滩流量和平滩面积的显著下降,然后随各站不同,平滩河宽、平均水深、最大水深出现不同程度的下降,另外可能还伴随着平滩水位的上升和断面宽深比的变化。那么分析1970—1975年左右和1990年左右这两个变异点的黄河下游河道断面形态参数的变异方向,发现这两次变异都是向萎缩的方向发展——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下降,平滩水位和宽深比则有所抬高和增加。

但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,但与50年代到2003年长序列均值基本相当;各站平滩面积、平滩河宽、平均水深、最大水深、

平滩水位及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。

而到了 90 年代以后,各站平滩流量和平滩面积均大幅度减小,其均值下降到常年均值的 50%~60%左右,更是只有 50、60 年代均值的 30%~40%,平滩河宽、平均水深和最大水深也出现不同程度的下降,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萎缩期。

因此,综上所述,认为黄河下游河道主河槽在 70 年代开始初步萎缩,而到了 90 年代以后进入严重萎缩期。

## 5 结论

本文采用时间序列分析方法对黄河下游河道断面形态参数进行了趋势及变异点分析,得到如下认识:(1)各站平滩流量和平滩面积均有显著的下降趋势;高村站和利津站平滩面积的下降主要是由于平滩河宽的下降引起的,花园口站平滩面积下降与平滩河宽和平均水深都有关系,而艾山站平滩面积的下降是由平均水深的减小引起的;高村站最大水深序列显著下降;高村站和艾山站的平滩水位有显著的抬高趋势,艾山站的宽深比有显著增大的趋势;(2)黄河下游主河槽萎缩的最显著特征就是断面平滩流量和平滩面积的显著下降,然后平滩河宽、平均水深、最大水深出现不同程度的下降,还可能伴随着平滩水位的上升和断面宽深比的变化;(3)各站平滩流量的变异点均出现在 1970 年和 1990 年左右;平滩面积的变异点发生在 1963 年、1970 年、1975 年及 1990 年左右;平滩河宽变异点:1965 年、1971 年、1975 年和 1991 年左右;平均水深变异点:1970 年、1981 年和 1993 年左右、最大水深序列变异点 1985 年和 1991 年,平滩水位变异点:1957 年、1976 年、和 1991 年左右;宽深比变异点,1972 年和 1993 年左右;(4)综合分析认为黄河下游河道主河槽在 70 年代开始初步萎缩,而到了 90 年代以后进入严重萎缩期。

## 参 考 文 献:

- [1] 陈建国,等.黄河下游河道萎缩的特点及其水文学背景[J].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[J].水利学报,2002(2):22—28.
- [3] 姚文艺,等.黄河下游河道萎缩致灾机理探讨[J].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[J].水文,2007,22(6):21—23.
- [5] 张善文,雷英杰,冯有前.MATLAB 在时间序列分析中的应用[M].西安:西安电子科技大学出版社,2007.
- [6] 朱厚华,等.黄河流域降水演变规律研究[J].人民黄河,2005,27(11):17—21.
- [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[J].华东师范大学学报(自然科学版),2004,(2):72—80.
- [8] 贺松林,王盼成.长江大通站水沙过程的基本特征 II.输沙过程分析[J].华东师范大学学报(自然科学版),2004,(2):81—86.
- [9] 胡安焱.塔里木河年径流量时间序列趋势分析[J].人民黄河,2006,28(10):31—32.
- [10] 张建云,等.近 50 年来中国六大流域年际径流变化趋势研究[J].水科学进展,2007,18(2):230—234.
- [11] 胡春宏,等.黄河水沙调控与下游河道中水河槽塑造[M].北京:科学出版社,2007.
- [11] 张红武,张清,江恩惠.黄河下游河道造床流量的计算方法[J].泥沙研究,1994(4):50—55.
- [12] 吴保生,夏军强,张原锋.黄河下游平滩流量对来水来沙变化的响应[J].水利学报,2007,38(7):886—892.
- [13] 李俊,等.有序聚类法在土壤水分垂直分层中的应用[J].北京林业大学学报,2007,29(1):98—101.
- [14] 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[J].工程勘察,2007,(8):73—75.

(下转第 1239 页)