

大通水文站水沙变化特征分析

王利花¹, 路鹏²

(1. 成都信息工程大学 资源环境学院, 四川 成都 610225; 2. 吉林大学 地球探测科学与技术学院, 吉林 长春 130026)

摘要: [目的] 分析大通水文站水文泥沙的趋势性、突变性和周期性, 揭示其长时间序列的特征, 为河口三角洲的发育及演变研究提供理论依据。[方法] 采用 Mann-Kendall 趋势分析法、有序聚类分析法和小波分析法, 对大通站近 60 a 来径流量和输沙量时间序列进行特征分析。[结果] 大通站年径流量无明显的趋势性变化特征, 年际波动较大, 年内分配极不均匀; 年径流量不存在显著的突变性特征, 但具有 6 和 44 a 的周期性变化特征。年输沙量具有显著的线性下降趋势, 同时年内分配不均; 年输沙量存在显著的三级突变性变化, 2002 年为一级突变, 1984 年为二级突变, 1968 和 1991 年为两个三级突变; 年输沙量还存在明显的 12 和 30 a 周期性变化特征。[结论] 大通站年径流量无明显的趋势性和突变性, 存在一定的周期性; 年输沙量存在显著的下降趋势, 具有明显的突变性和周期性。

关键词: 大通站; 径流量; 输沙量; 趋势性; 突变性; 周期性

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2017)04-0266-05

中图分类号: TV147

文献参数: 王利花, 路鹏. 大通水文站水沙变化特征分析[J]. 水土保持通报, 2017, 37(4): 266-270. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2017.04.045; Wang Lihua, Lu Peng. Analysis of runoff and sediment change characteristics at Datong hydrometric station[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2017, 37(4): 266-270. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2017.04.045

Analysis of Runoff and Sediment Change Characteristics at Datong Hydrometric Station

WANG Lihua¹, LU Peng²

(1. College of Resources and Environment, Chengdu University of Information Technology, Chengdu, Sichuan 610225, China; 2. College of Geoprospection Science and Technology, Jilin University, Changchun, Jilin 130026, China)

Abstract: [Objective] The trend, fluctuation and change cycle of runoff and sediment discharge at Datong hydrometric station were analyzed in order to reveal its characteristics of long time series, which were expected to further provide theoretical basis for the development and evolution of estuarine delta. [Methods] Using Mann-Kendall test, Pettitt change point, Mexican Hat wavelet transform methods, the characteristics of runoff and sediment discharge were analyzed at Datong station in the past 60 years. [Results] The results showed that there was no significant change trend in the mean annual runoff at Datong station, while the inter-annual fluctuation was large and annual distribution was uneven. Repeated periodic oscillations were presented in the runoff series, the major cycle periods of the time series were about 6 and 44 years, respectively. Furthermore, sediment discharge had been declined obviously over the past 60 years and its annual distribution was uneven. There existed significant hopping site in the mean annual sediment discharge. In 2002, the hopping site of step down was first grade, the second grade was in 1984 and the third grades were in 1968 and in 1991. Repeated periodic oscillations also existed in the sediment discharge series, the major cycle periods of the time series were about 12 and 30 years, respectively. [Conclusion] There were no obvious trend and abrupt change of annual runoff at Datong station, but periodicity existed to some extent. There was a significant downward trend of annual sediment transport with obvious periodicity and abrupt change.

Keywords: Datong hydrometric station; runoff; sediment discharge; trend; mutability; periodicity

收稿日期: 2017-01-10

修回日期: 2017-02-05

资助项目: 国家自然科学基金项目“基于 SAR 的浅海水域地形反演研究”(41476151); 成都信息工程大学科研基金项目(KYTZ201513)

第一作者: 王利花(1983—), 女(汉族), 河南省洛阳市人, 博士, 讲师, 主要从事海洋及海岸带水文特征、海洋微波遥感等方面的研究。E-mail: wanglh@cuit.edu.cn.

大通水文站距离入海口 624 km, 位于长江河口潮区界, 是长江干流下游河段最后一个具有长时间序列观测资料的关键控制站。因此大通站的径流量和输沙量基本可以代表长江进入河口地区的水量和沙量, 其变化趋势和特征直接影响着长江河口及邻近海域的泥沙时空分布特征、河口三角洲的生长发育和入海物质通量的变化, 对长江河口乃至邻近海域的生态环境等产生重要影响^[1]。长江水文情况本身复杂多变, 叠加自然因素和人类活动综合作用的影响, 其变化特征具有不确定性和复杂性, 单一分析方法难以对其变化趋势和发展规律有清晰的了解和准确的认识, 因此本文依据 Mann-Kendall (M-K) 趋势分析法、有序聚类分析法和 Mexican Hat 小波分析法, 深入分析大通站水文泥沙的趋势性、突变性和周期性, 以揭示其长时间序列的特征。

1 数据及方法

采用大通水文观测站年输沙量 (1953—2010 年)、年径流量 (1951—2010 年)、月输沙量 (2001—2010 年) 和月径流量 (1950—2010 年) 长时间时序数据, 基于 M-K 趋势分析法、有序聚类分析法和 Mexican Hat 小波分析法等方法, 对大通站输沙量、径流量分别做趋势性、突变性和周期性的全面分析。

1.1 趋势性分析方法

1.1.1 M-K 方法 M-K 方法是基于秩的趋势性非参数统计检验方法, 用于提取时间序列变化趋势, 适用范围广。该方法对样本的分布没有要求, 同时不受个别异常值干扰, 人为参与少, 并且定量化程度较高, 因此受到国际水文组织的认可, 是世界气象组织推荐的非参数检验方法之一。M-K 方法具体内容可参考^[2]。

1.1.2 累积曲线 累积曲线可反映长时间序列中的地理要素的阶段性变化^[3-4]。为了深入分析河流水文站径流量、输沙量及降水量的变化过程, 采用累计值进行分析。即假定河流水文站总输沙量随时间变化过程可以通过以下函数表示:

$$V = f(t) \quad (1)$$

则一阶导数 $\partial V / \partial t$ 代表总输沙量随时间的变化率, 即累积曲线的切线斜率。当 $\partial V / \partial t$ 随时间变化基本保持不变时, 则二阶导数 $\partial^2 V / \partial t^2 \approx 0$, 累积曲线为一直线, 表明输沙量随时间没有明显的上升或下降的趋势; 当 $\partial V / \partial t$ 随时间变化逐渐增大, $\partial^2 V / \partial t^2 > 0$, 输沙量累积曲线呈上凹状态, 表明输沙量有上升趋势; 相反, 当 $\partial V / \partial t$ 随时间变化逐渐减小, 输沙量累积曲线呈上凸状态, 表明输沙量有下降趋势。

1.2 突变性分析方法

1.2.1 有序聚类分析法 有序聚类分析法用于寻找突变点, 即求最优分割点。对于时间序列 x_1, x_2, \dots, x_n , 设分割点为 p , 要求同类之间的离差平方和 $V_p = \sum_{i=1}^p (x_i - \bar{x}_p)^2$ 最小, 而类与类之间 $V_{n-p} = \sum_{i=p+1}^n (x_i - \bar{x}_{n-p})^2$ 为最大^[5]。实际表现为分割点前后平均值发生陡升或陡降。样本总离差平方和即为: $S_n + V_p + V_{n-p}$, 则最优分割满足: $S_n^* = \min_{1 \leq p < n-1} [S_n(p)]$, 此时 p 即为最可能的分割点。

1.2.2 突变检验法 通过有序聚类分析和累积曲线确定最有可能的突变点。借由信噪比来验证突变点的计算是否正确^[6]。信噪比公式为:

$$S/N = |x_1 - x_2| / (s_1 + s_2) / 2 \quad (2)$$

x_1, x_2 表示两个阶段的均值; s_1, s_2 表示标准差。当 $S/N > 1$ 时, 表明两个阶段均值的变化超过正常波动范围 (标准差), 即该点为突变点。

1.3 周期性分析方法

小波分析可以把一个时间序列分解成时域和频域两种形式, 能够展现复杂时间序列的变化规律, 分析其内在层次结构, 从而获取时间序列的多尺度演变特征^[7-9]。选用 Mexican Hat 小波函数对大通站输沙量时间序列进行连续小波变化, 其母函数形式为^[10]:

$$\varphi(t) = (1 - t^2) e^{-t^2/2} \quad (3)$$

小波变换得到的是一个尺度时间函数, 计算小波方差可准确解释其过程, 从而确定周期。小波方差的对应峰值处即为主要周期, 计算公式为:

$$V(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} |\omega_f(a, t)| dt \quad (4)$$

式中: $V(t)$ 为——小波方差; $\omega_f(a, t)$ ——小波系数。

2 近 60 a 来大通站入海水沙变化特征

2.1 趋势性分析

2.1.1 年际变化 采用 M-K 趋势分析法, 对近 60 a 来径流量的长时间序列数据进行分析, $Z_s = -0.34$, $|Z_s| < 1.96$, 所以大通站年径流量未通过置信水平为 0.05 的显著性检验, 不具有明显的年际变化趋势。采用回归分析方法对年径流量进行线性拟合, 结果也显示年径流量随时间变化基本保持稳定, 不存在明显的趋势变化 (图 1)。但大通站径流量年际波动大, 最大径流量出现在 1954 年, 达 $1.36 \times 10^{12} \text{ m}^3$; 2006 年最小, 仅为 1954 年的 $1/2$ ^[1]。

同样, 对输沙量时序资料进行 M-K 趋势检验分析, $Z_s = -6.69$, $|Z_s| > 2.65$, 大通站年输沙量通过 0.01 的显著性水平检验, 具有显著下降的趋势; 对其进行线性拟合, 并判断其显著性, 在置信水平 0.01 下

$F_{0.01}(1,56) = 7.08$ 。 $F_0 > F_{0.01}(1,56)$ ，即大通站近 60 a 输沙量存在显著的线性关系^[1]。因此，近 60 a 来大通站输沙量有显著的线性下降趋势，并且通过置信水平为 0.01 的显著性检验，平均每年下降约 5.77×10^6 t。1962—1968 年的年输沙量在回归线上方，说明为丰沙年；同理 1979—1984 年为丰沙年；1986—1997 年对应曲线在回归线附近有微小波动，属平沙年；2002—2010 年输沙量持续位于在拟合线以下，表现为显著的下降趋势，且下降速度加快，平均每年输沙量锐减 1.88×10^7 t 左右(图 1)。

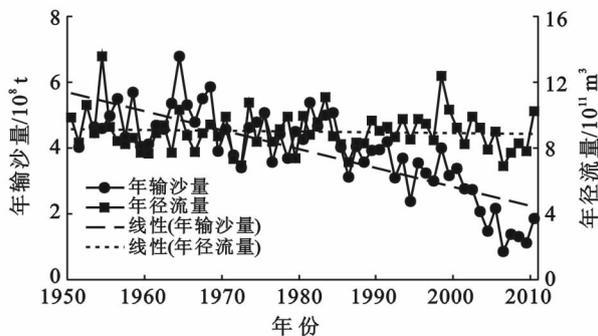


图 1 大通站年径流量与输沙量变化过程

由表 1 可知，20 世纪 50 年代大通站年均径流量为 9.14×10^{11} m³，70 年代和 90 年代分别为 8.82×10^{11} m³ 和 9.59×10^{11} m³，2001—2010 为 8.52×10^{11} m³，都在近 60 a 的均值附近波动。

累计输沙量变化曲线为上凸型(图 2)，与 M-K 检验结果一致，即 60 a 来输沙量呈现显著的减小趋势。具体地表现为：1970 年以前累计输沙量变化曲线基本为直线，说明 1970 年以前输沙量相对稳定；1970 年以后曲线开始偏离原趋势，向右向下偏移，表明年输沙量逐渐减少，与统计结果一致(表 1)。具体地自 50 年代到 70 年代到 90 年代，平均输沙量由 4.59×10^8 t 依次减少到 4.21×10^8 t 到 3.37×10^8 t；自 2001 年后，输沙量加速减少，平均输沙量仅为 1.77×10^8 t，远小于近 60 a 来的平均值 3.89×10^8 t，减小幅度高达 55%(表 1)。

表 1 大通站输沙量和径流量 10 a 平均值变化表

年份	平均径流量/ 10 ⁸ m ³	平均输沙量/ 10 ⁸ t	平均含沙量/ (kg·m ⁻³)
1951—1960	9 142.29	4.59	0.50
1961—1970	8 984.61	5.13	0.57
1971—1980	8 823.77	4.21	0.48
1981—1990	8 890.00	4.28	0.48
1991—2000	9 591.77	3.37	0.35
2001—2010	8 524.90	1.77	0.21
多年平均	8 992.89	3.89	0.43

大通站总径流量和输沙量的双累积曲线(图 2)在 20 世纪 50 年代基本为直线，60 年代年曲线略微偏向输沙量，表明输沙量略有增加，但增加幅度很小，对应的平均含沙量(表 1)仅增加了 0.07 kg/m³；70—90 年代输沙量基本保持不变；自 90 年代以后双累积曲线开始偏向径流量，呈上凸趋势，表明输沙量开始呈现下降趋势，相应的平均含沙量(表 1)从 20 世纪 80 年代到 90 年代到 21 世纪依次从 0.48 kg/m³ 减小到 0.35 kg/m³ 至到 0.21 kg/m³。

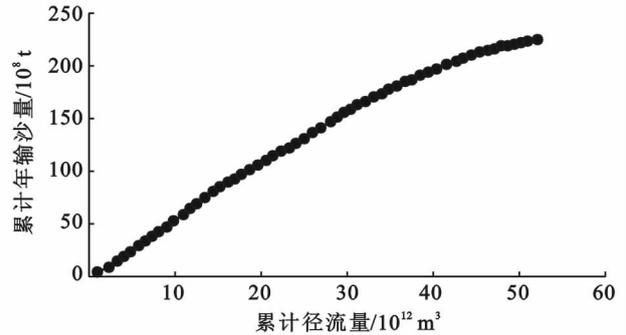


图 2 大通站径流量与输沙量双累积曲线

2.1.2 年内分配 大通站径流量和输沙量年内分配不均(图 3)，洪季 5—10 月径流量合计占全年径流量的 61.1%；最大和最小月径流量分别出现在 7 月和 1、2 月份，分别占全年径流量的 14.9%，3.3%，3.3%。大通站最大月输沙量同样出现在洪季，合计占全年输沙量的 81.9%；8 和 1 月分别为最大和最小月输沙量，分别占全年输沙量的 18.9%和 1.6%。

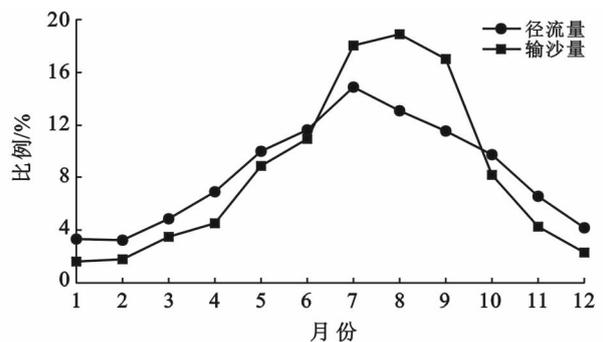


图 3 大通站各月平均径流量(1950—2010 年)和输沙量(2000—2010 年)年内分配

进一步分析 1950—2010 年各月平均径流量的趋势性(图 4)，1 月份月均径流量通过置信水平为 0.01 的显著性检验，表明 1 月份月均径流量存在显著的增加趋势；2、3 和 10 月月均径流量通过置信水平为 0.05 的显著性检验，表明这 3 个月份存在明显的趋势性变化，其中，2、3 月为增加趋势，10 月有减小趋势；其他月份无明显的趋势变化。

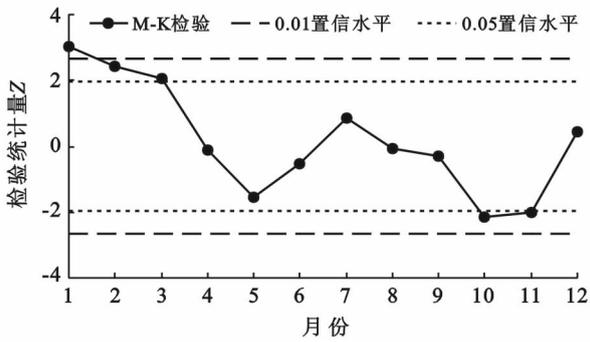


图 4 大通站月均径流量 M-K 趋势检验

2.2 突变性分析

大通站 1953—2010 年 58 a 径流量时间序列期间 S_n 最小值不明显,最优分割点不明显(图 5)。在 1954 年出现极大值是由于 1954 年为洪水年,径流量很大($1.359 \times 10^{12} \text{ m}^3/\text{a}$)导致的方差极值。

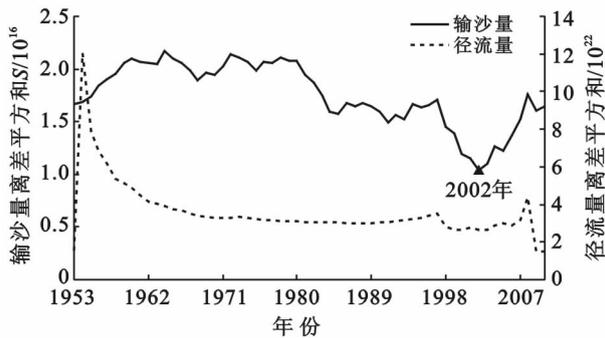


图 5 大通站径流量和输沙量离差平方和曲线

大通站 1953—2010 年 58 a 输沙量时间序列期间,当 $p=50$ 时, S_n 有最小值(图 5),满足最优分割,表明第 50 a 即 2002 年为最优分割点。因此将 1953—2002 年划分为突变前期,2003—2010 年为突变后期。同理,将 1953—2002,2003—2010 两个阶段进行次级聚类分析,得到 1953—2002 年间的最佳分割点 1984 年,而 2003—2010 年 S_n 整体变化不大,最佳分割点不明显;同样进行三级聚类分析,得到 1953—1984 年最佳分割点 1968 年,1985—2002 年最佳分割点 1991 年。进一步采用信噪比法对突变点的准确性进行检验,分别计算两个相邻阶段(1953—2002 年,2003—2010 年)的信噪比为 5.51;同理计算二级和三级突变点 1984,1968 和 1991 年的信噪比,结果分别为 3.32,1.53,4.10,表明大通站入海泥沙在 2003,1984,1968 和 1991 年确实发生了突变。同样,采用信噪比法对同期径流量进行计算,分别为 $5.54 \times 10^{-4} \text{ m}^3$, $9.43 \times 10^{-5} \text{ m}^3$, $5.11 \times 10^{-5} \text{ m}^3$, $1.03 \times 10^{-3} \text{ m}^3$,表明径流量时间序列数据未发生突变。图 6 显示了大通站输沙量的突变情况。2002 年

为一级突变,输沙量的突变幅度最大,达到了 64.3%,1984 年二级突变的突变幅度为 27.3%,1968 年和 1991 年两个三级突变的突变幅度分别为 12.5% 和 16.9%,远不如一级突变点 2003 年和二级突变点 1984 年。对于二级突变点 1984 年,1984 年之后的平均输沙量为 $3.37 \times 10^8 \text{ t}$,最大值为 $4.19 \times 10^8 \text{ t}$,还未达到 1984 年前的平均输沙量($4.73 \times 10^8 \text{ t}$),表明 1984 年后大通站的输沙量发生了质的变化,输沙过程进入不同于 1984 年的新一轮动态格局;自 2003 年开始,输沙量除 2005 年有较小的增长外,连续 7 a 均大幅度下降,2003 年之后的年平均输沙量仅为 $1.45 \times 10^8 \text{ t}$,最大值也仅为 $2.16 \times 10^8 \text{ t}$,还未达到 2003 年前的平均输沙量($4.22 \times 10^8 \text{ t}$),因此我们认为 2003 年后大通站的输沙量发生了新的质变,进入新一轮的泥沙输移过程状态。

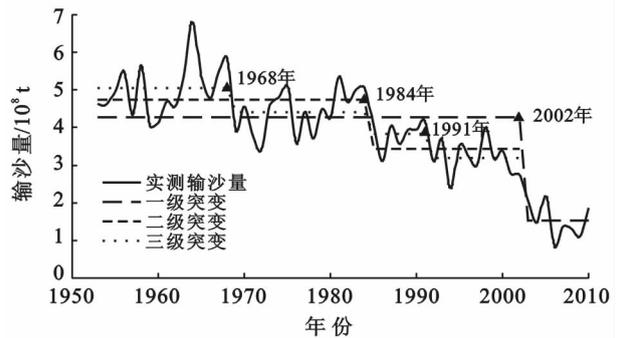


图 6 大通站突变阶段平均输沙量

2.3 周期性变化分析

根据大通站年径流量和输沙量时间序列,采用 Mexican Hat 小波进行连续小波变换,得到小波变换等值线。径流量存在 5~8 a 时间尺度的年际周期性变化规律,经历了高—低—高—低—高—低—高—低—高 9 个循环交替,周期变化整体相对稳定,有全域性特点;其它尺度周期性特征不明显。鉴于从小波变换得到的是一个尺度时间函数,通过小波方差可准确解释时间序列的周期性特征(图 7),明显峰值出现在 6 和 44 a,其它峰值相对不明显,同时可能存在 57 a 的周期性变化。因此,径流量第一周期为 6 a,第二周期为 44 a。大通站年输沙量存在明显的年际变化规律,分别是大尺度 30~33 a,中尺度 18~22 a,小尺度 10~14 a 3 个尺度的周期变化。从 30~33 a 分析,输沙量经历了低—高—低—高—低 5 个循环交替,至 2002 年后输沙量一直处于较低状态。从尺度 18~22 a 分析,输沙量经历了低—高—低—高—低—高—低 7 个循环交替。在 10~14 a 尺度上,循环交替更多。因此,30~33 a 和 18~22 a 的尺度上,周期

变化基本稳定,有全域性特点。小波方差(图 7)中存在 4 个峰值,分别对应 12,20,30 和 46 a 的时间尺度,30 和 12 a 周期震荡最强,为输沙量变化的第一周期,第二周期为 20,46 a。

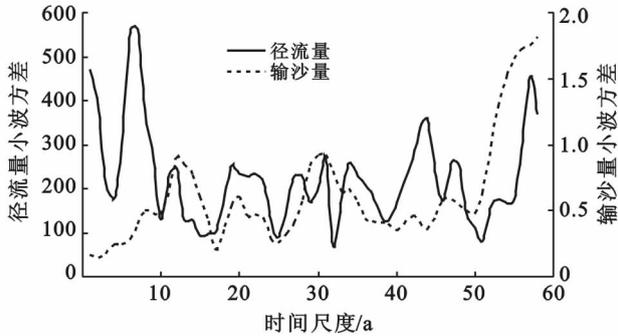


图 7 大通站年径流量距平小波方差

3 结论

(1) 大通站年径流量无明显的趋势性变化特征,输沙量年际变化呈现显著的线性下降趋势,平均每年下降 5.77×10^6 t,自 21 世纪以来,输沙量下降速度明显加快,平均每年下降约 1.88×10^7 t;径流量和输沙量年际波动都比较大,年内分配很不均匀。

(2) 大通站年径流量不存在显著的突变性特征。输沙量近 60 a 来下降趋势存在突变性,2002 年为显著的一级突变点,输沙量的突变幅度达到了 64.3%,1984 年为二级突变点,1968 年和 1991 年为三级突变点。对于二级突变点 1984 年,1984 年后大通站的输沙量发生了质的变化,输沙过程进入不同于 1984 年前的动态格局;对于一级突变点 2002 年,认为随着 2003 年三峡大坝开始蓄水,大通站的输沙量又一次

发生了质的变化,进入新一轮的输沙过程状态。

(3) 大通站年径流量具有 6 和 44 a 的周期性变化特征,输沙量具有 12,20,30 和 46 a 的时间尺度变化,其中 30 和 12 a 时间尺度周期震荡最强。

[参 考 文 献]

- [1] 王利花. 长江河口及邻近海域表层水体关键动力参数的遥感反演研究及应用[D]. 上海:华东师范大学,2014.
- [2] Serrano A, Mateos V L, Garcia J A. Trend analysis of monthly precipitation over the Iberian Peninsula for the period 1921—1995 [J]. *Physics and Chemistry of the Earth (Part B): hydrology Oceans and Atmosphere*, 1999, 24(1/2): 85-90.
- [3] Walling D E, Fang D. Recent trends in the suspended sediment loads of the world's rivers [J]. *Global and Planetary Change*, 2003, 39(1/2): 111-126.
- [4] 胡春宏,王延贵,张燕菁,等. 中国江河泥沙变化趋势与主要影响因素[J]. *水科学进展*, 2010, 21(4): 524-532.
- [5] 丁晶,邓育人. 随机水文学[M]. 四川 成都:成都科技大学出版社,1988.
- [6] 符淙斌,王强. 气候突变的定义和检测方法[J]. *大气科学*, 1992, 16(4): 482-493.
- [7] 邴龙飞,邵全琴,刘纪远,等. 基于小波分析的长江和黄河源区汛期、枯水期径流特征[J]. *地理科学*, 2011, 31(2): 232-238.
- [8] 许月卿,李双成,蔡运龙. 基于小波分析的河北平原降水变化规律研究[J]. *中国科学(D): 地球科学*, 2004, 34(12): 1176-1183.
- [9] 管玲玲,柳忠校,张善心. 基于小波的信号分析[J]. *计算机与现代化*, 2011, (3): 150-152.
- [10] 谷德军,王东晓,纪忠萍,等. 墨西哥帽小波变换的影响域和计算方案新探讨[J]. *应用气象学报*, 2009, 20(1): 62-69.