

DOI:10.13476/j.cnki.nsbdkj.2019.0101

罗红春,冀鸿兰,牟献友,等. 黄河石嘴山站水沙变化及趋势分析[J]. 南水北调与水利科技, 2019, 17(4):193-201. LUO H C, JI H L, MOU X Y, et al. Water and sediment changes at the Shizuishan hydrologic station in the Yellow River[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2019, 17(4):193-201. (in Chinese)

## 黄河石嘴山站水沙变化及趋势分析

罗红春<sup>1</sup>, 冀鸿兰<sup>1</sup>, 牟献友<sup>1</sup>, 张宝森<sup>2</sup>

(1. 内蒙古农业大学 水利与土木建筑工程学院, 呼和浩特 010018; 2. 黄河水利委员会 黄河水利科学研究院, 郑州 450003)

**摘要:**为探明黄河石嘴山站的来水来沙过程, 便于海勃湾水库的水沙调度, 根据 1951—2016 年的水沙数据, 采用非线性统计等方法分析了黄河石嘴山站的水沙序列变化及发展趋势。结果表明: 石嘴山站水沙年内分配不均匀, 20 世纪 60 年代变化剧烈; 66 a 来年径流量与年输沙量均呈显著性减少趋势, 且具有正持续性, 持续影响时间约 8 a、10 a; 水沙序列分别于 1986、1968 年发生突变, 突变原因与黄河上游大型水库的运用密切相关; 龙羊峡、刘家峡水库分别对径流和泥沙的影响显著, 二者联合运用后, 石嘴山站流量基本处于 2 000 m<sup>3</sup>/s 以下, 水沙分配趋于均匀; 不同时期的水沙关系重新调整, 但均不显著; 石嘴山站多年平均含沙量及多年平均来沙系数均较刘家峡水库运用前明显降低, 但在龙、刘两水库联合运用后基本不变。

**关键词:**石嘴山站; 年径流量; 年输沙量; 水沙变化; 趋势

中图分类号: TV147 文献标志码: A 开放科学(资源服务)标识码(OSID):



### Water and sediment changes at the Shizuishan hydrologic station in the Yellow River

LUO Hongchun<sup>1</sup>, JI Honglan<sup>1</sup>, MOU Xianyou<sup>1</sup>, ZHANG Baosen<sup>2</sup>

(1. College of Water Conservancy and Civil Engineering, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010018, China;  
2. Yellow River Institute of Hydraulic Research, Yellow River Conservancy Commission, Zhengzhou 450003, China)

**Abstract:** In order to explore the water and sediment processes at the Shizuishan hydrologic station in the Yellow River and to provide information for the Haibowan reservoir management, nonlinear statistical techniques were used to investigate the water and sediment changes from 1951 to 2016. The results showed that the temporal distributions of water and sediment at the Shizuishan station was uneven, and the changes during the 1960s were larger. Both annual runoff and annual sediment discharges showed statistically significant decreasing trends, which had a positive continuity and lasted for about 8 and 10 years. The step-changes of streamflow and sediment discharge occurred in 1986 and 1968, respectively, and the main reason for these changes was the construction of large reservoirs in the upper reaches of the Yellow River. Both reservoirs had significant impacts on streamflow and sediment discharge, and the streamflow discharge was always below 2 000 m<sup>3</sup>/s after the operations of these two reservoirs. The intraannual and interannual distributions of streamflow and sediment discharges were also tended to be even. The relationship between water and sediment was re-adjusted in different periods, although its adjustment magnitude was minor. The average annual sediment concentration and average incoming sediment coefficient were significantly lower after the operation of Liujiaxia reservoir, but remained almost the same after the operations of Long and Liu reservoirs.

**Key words:** Shizuishan hydrologic station; annual runoff; annual sediment discharge; water and sediment changes; trend

收稿日期: 2018-12-10 修回日期: 2019-04-12 网络出版时间: 2019-04-22

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20190419.1628.012.html>

基金项目: 国家重点研发计划(2018YFC1508401); 2018 内蒙古自治区应用技术与开发资金项目(201802104); 国家自然科学基金(51569020)

作者简介: 罗红春(1993—), 男, 湖北潜江人, 博士生, 主要从事河道演变研究。E-mail: 643132265@qq.com

通信作者: 冀鸿兰(1970—), 女, 内蒙古呼和浩特人, 博士, 教授, 主要从事河冰研究。E-mail: honglanji@sina.com

黄河作为中国第二大河流,其善淤、善决、善徙,“水少沙多,水沙关系不协调”是黄河难治的症结所在<sup>[1]</sup>。宁蒙河段位于黄河上游,河道摆动频繁,近几十年来,由于人类活动的加剧,又在一定程度上影响了河流的水沙变化<sup>[2]</sup>,特别是受上游大型水库调蓄及沿黄工农业用水增加的影响,宁蒙河段的水沙条件发生了剧烈的变化,水沙变异迅速<sup>[3]</sup>。石嘴山水文站位于宁蒙河道交界,其水沙过程直接影响黄河内蒙古段的水沙调配。前人的研究,如姚文艺等<sup>[4]</sup>、张晓华等<sup>[5]</sup>、彭文昌等<sup>[6]</sup>多是针对黄河某一区段(如宁蒙段、内蒙段)的水沙过程展开研究,而对单个水文站的来水来沙分析较少,近期冉大川等<sup>[7-9]</sup>利用头道拐水文站资料,分析了该站的水沙变化及其主要影响因素,并计算了各因素的贡献率。目前,关于对石嘴山水文站单站的水沙分析报道鲜见。

近年来,关于径流泥沙等水文时间序列的分析是水文研究的一个热点,大多分析序列的趋势性、阶段性、突变性、周期性等,如姚文艺等<sup>[10-11]</sup>、张建云等<sup>[12-13]</sup>、李二辉等<sup>[14]</sup>、赵广举等<sup>[15]</sup>的研究。关于径流泥沙的趋势性分析主要有 Mann-Kendall 趋势检验法、R/S 分析法、线性回归等方法;阶段性分析则主要以累积距平法为主;对周期性的分析则多见于谱分析(如功率谱、最大熵谱等)及小波分析;在突变性的分析中,方法众多,如 Mann-Kendall 突变检验、滑动 T 检验、Petitt 检验、有序聚类法等,但均有其优劣,分析结果也不能保证完全一致,具体可参考文献<sup>[16]</sup>,因此,对水文序列的突变检验需综合多种方法。本文以石嘴山水文站为研究对象,依据该站的基础水文资料,利用多种统计方法,分析该站 1951—2016 年的水沙变化过程及发展趋势,研究结果对下游内蒙古乌海海勃湾水库的水沙调度有一定的借鉴意义。

## 1 研究区概况

黄河石嘴山水文站地处宁夏石嘴山市惠农区,位于黄河宁夏段出口,距离下游海勃湾水库约 53.3 km,地理坐标东经 106°47'08",北纬 39°14'52",控制流域面积 30.9 万 km<sup>2</sup>,占流域面积的 41%,是国家重要水文站以及黄河水量省界控制站<sup>[17]</sup>。该站地处干旱半干旱地区,年平均降水量约 180 mm,多年平均径流量及输沙量为 272 亿 m<sup>3</sup>、1.14 亿 t,分别占黄河流域多年平均的 51.2%,7.1%。

## 2 资料及方法

### 2.1 数据来源

研究采用的原始数据为黄河宁蒙交界河道

1951—2016 年水沙资料,其中 1951—2013 年的逐日流量与输沙率数据来源于石嘴山水文站,2013—2016 年逐月径流量与输沙量数据来源于《黄河泥沙公报》。

### 2.2 研究方法

统计分析法<sup>[18]</sup>可用来描述水沙的年内和年际分布特征,利用不均匀系数  $C_n$  表征年内流量与输沙率分配的不均匀程度, $C_n$  值越大,表明研究变量分布越不均匀;利用变差系数  $C_v$  与极值比  $K$  描述年径流量与年输沙量变化的离散程度, $C_v$  值或  $K$  值越大,离散程度越大,时序变量变化越剧烈。

R/S 分析法<sup>[19-20]</sup>可用来分析时间序列的分形特征和长期记忆过程,其最初由英国水文学家 Hurst 在研究尼罗河水坝工程时提出,可通过 R/S 法估算 Hurst 指数( $0 < H < 1$ )来预测水文时间序列的未来趋势。

累积距平法<sup>[21-22]</sup>是通过观察差积曲线判断数据点离散程度和变化趋势的一种非线性统计方法,可用来确定序列变化趋势的拐点,进而分辨出序列丰—平—枯的阶段性特征。

Mann-Kendall 法<sup>[23-24]</sup>(M-K)是一种被广泛应用于气象与水文时间序列的趋势和突变分析的非参数检验方法。当 M-K 统计值  $Z$  的绝对值大于等于 1.64 时,表示对应的水文时间序列具有显著性变化,且变化趋势通过了信度为 95% 的显著性检验,当前序序列  $UF$  和后序序列  $UB$  在置信区间内相交,交点即为突变点。

滑动 T 检验法<sup>[25-26]</sup>通过考察两组样本平均值的差异是否显著来检验突变。其基本思想是把一气候序列中两段子序列均值有无显著差异看作来自两个总体均值有无显著差异的问题来检验。如果两段子序列的均值差异超过了一定的显著性水平,可认为发生了突变。

有序聚类法<sup>[27]</sup>分析时间序列突变点时,实质上是以有序聚类的方法来推求最优化分割点,使同类之间离差平方和较小,而类与类之间的离差平方和较大。当总离差和最小时,对应的最优分割点与突变点。

## 3 结果分析

### 3.1 水沙变化特征

#### 3.1.1 水沙年内年际变化

利用黄河上游石嘴山水文站 1951—2016 年的水文序列观测资料,采用统计分析方法分析了水文

序列的年内、年际变化特征。

(1)年内变化

黄河上游石嘴山水文站径流输沙年内指标见表1,年内流量输沙率统计结果见图1。

表1 石嘴山站流量与输沙率特征值

Tab.1 Characteristics of streamflow and sediment at Shizuishan station

变量	不均匀系数 $C_n$	最大值 MAX	最小值 MIN	均值 AVE	极差
流量/( $m^3 \cdot s^{-1}$ )	0.46	4 288	181	859	4 107
输沙率/( $t \cdot s^{-1}$ )	0.96	67.951	0.035	3.593	67.916

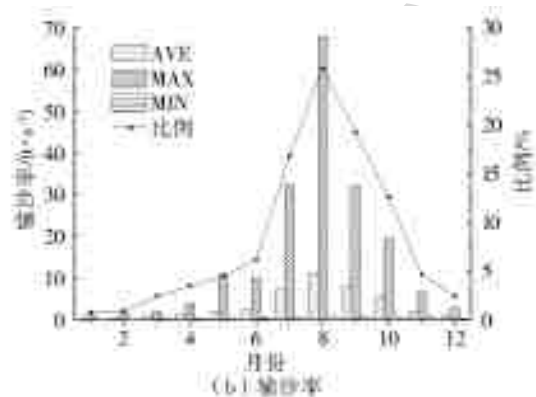
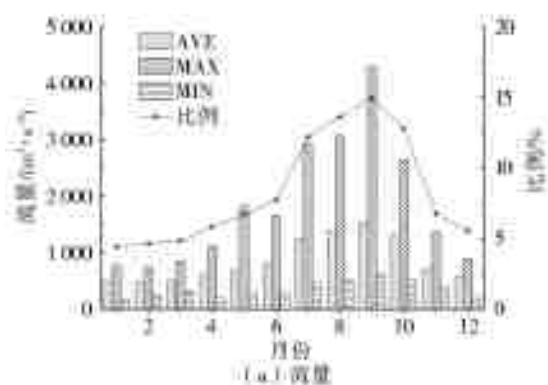


图1 石嘴山站水沙年内分配

Fig.1 Monthly distributions of water and sediment at Shizuishan station

(2)年际变化

石嘴山站年径流量于20世纪60年代达到峰值,且K值与 $C_v$ 值也最大,说明这10年间的径流离散程度最大;年输沙量峰谷值均于20世纪60年代出现,极值比与变差系数也最大,且K值约为其余年代的3.4~7.8倍, $C_v$ 值约为其余年代的1.1~6.2倍,体现了20世纪60年代年输沙量的强烈震

石嘴山站流量多年均值为859  $m^3/s$ , $C_n$ 值0.46,年内分布较不均匀,主要集中在汛期(7—10月),占全年的53.56%,流量峰值出现在9月(图1(a)),非汛期流量分布较为一致(各月占全年的4.42%~7.75%);输沙率多年均值为3.593  $t/s$ , $C_n$ 值达0.96,年内分布体现出强烈的不均匀性,输沙率年内分布呈明显的单峰形(图1(b)),8月达到峰值,汛期输沙率在全年的占比大,约74.50%,非汛期输沙率分布仍较为分散(各月占全年的0.77%~6.20%)。整体上水沙在年内的变化趋势较为一致,但分配比例差异较大。

荡特征。20世纪80年代,石嘴山站年径流量与年输沙量的K值与 $C_v$ 值屈居第二,说明这段时期的水沙变化也比较明显(表2)。

1951—2016年,石嘴山站年径流量 $C_v$ 值0.27,年际变化较小,年输沙量 $C_v$ 值达0.70,离散程度大,极值比16,为年径流量K值的5倍多,水沙变化程度差异较大(表2)。

表2 石嘴山站年径流量与年输沙量的特征值

Tab.2 Characteristics of annual runoff and sediment at Shizuishan station

年份	最大值 MAX		最小值 MIN		均值 AVE		极值比 K		变差系数 $C_v$	
	年径流量	年输沙量	年径流量	年输沙量	年径流量	年输沙量	年径流量	年输沙量	年径流量	年输沙量
1951—1959	389	3.743	212	1.152	294	2.217	1.8	3.2	0.18	0.42
1960—1969	493	3.820	179	0.247	329	0.719	2.7	15.5	0.28	1.31
1970—1979	399	1.600	228	0.600	289	0.284	1.8	2.7	0.20	1.12
1980—1989	393	1.561	190	0.336	301	0.312	2.1	4.6	0.23	1.17
1990—1999	278	1.318	163	0.521	222	0.931	1.7	2.5	0.16	0.29
2000—2009	245	0.897	173	0.441	208	0.617	1.4	2.0	0.13	0.21
2010—2016	354	0.713	181	0.239	255	0.434	2.0	3.0	0.20	0.33
1951—2016	493	3.820	163	0.239	272	1.141	3.0	16.0	0.27	0.70

注:表中最大值、最小值、均值年径流量均以亿  $m^3$  计、年输沙量以亿 t 计。

由线性趋势结果可知,石嘴山站年径流量66年来为下降趋势,降幅16.8亿  $m^3/(10a)$ ,5年滑动平均也体现年径流量的震荡变化,但总的趋势

仍为下降,且自20世纪80年代后期起,年径流量常年低于多年平均(272亿  $m^3$ );年输沙量多年平均1.141亿 t,变化趋势同年径流量,降幅0.27

亿 t/(10a),自 20 世纪 60 年代末起,年输沙量仅有少数年份达到多年平均水平(图 2),可见水沙明

显变化的分割时期分别为 20 世纪 80 年代和 60 年代。

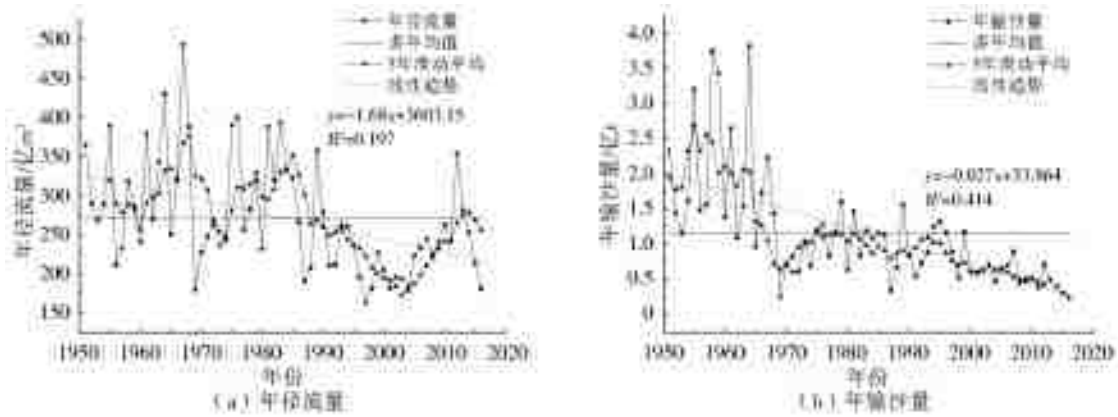


图 2 石嘴山站水沙年际变化过程

Fig. 2 Time series of annual streamflow and sediment at Shizuishan station

1951—2016 年水沙均呈下降趋势,但二者又有区别,年输沙量开始出现明显减少的时间(1967 年)早于年径流量(1985 年),这可能与上游龙刘(龙羊峡、刘家峡)大型水库的运用密切相关,水沙开始出现显著变化的时间基本与两大型水库的建库时间基本同步。水库的运用,拦蓄了大量的水沙,因此年径流量和年输沙量能在短期内出现明显变化。

### 3.1.2 水沙过程的趋势分析

对石嘴山站的水沙序列进行 M-K 趋势检验,结果表明:年径流量与年输沙量的 Z 值分别为-3.581,

-6.184,二者绝对值均大于 1.96,通过了置信度为 95%的显著性检验,检验结果说明流域年径流量与年输沙量均显著减少。由 R/S 分析法计算得到水沙序列的 Hurst 指数(图 3(a)、3(b)方程斜率)分别为 0.76、0.98,均大于 0.5,表明未来石嘴山站的年径流输沙量减少趋势具有正持续性,且年输沙量减少的持续性更强。通过 V 统计量结果可知,年径流量与年输沙量的 V 统计量曲线分别于 2.079、2.303 出现拐点,则对应的时间长度依次为  $e^{2.07} \approx 8$ 、 $e^{2.303} \approx 10$ ,即水沙减少趋势在未来的影响时间分别为 8 a、10 a 左右。

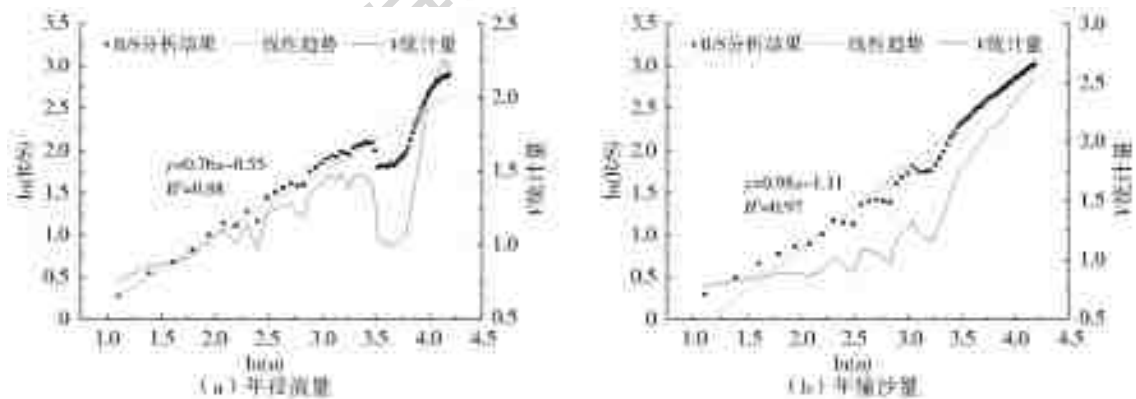


图 3 石嘴山站年径流量、年输沙量 R/S 分析

Fig. 3 R/S analysis of annual streamflow and sediment at Shizuishan station

### 3.1.3 水沙过程的突变检验

对年径流量的突变检验(图 4(a)),UF 曲线基本在零水平线以下,年径流量在整体上呈减少趋势,UB 和 UF 曲线相交于 1986—1987 年,表明年径流量在 1986 年左右发生了突变,突变时间与龙羊峡 1986 年 10 月下闸蓄水时间一致,表明水库运用是造成来流量突变的一大主因。1951—1996 年,UF 统计量数值基本为负,但均处于置信区间内,故认为这期间年

径流量减少不显著,自 1997 年起,UF 统计量突破了 0.05 水平的显著性检验,可以认为从 1997 年开始,年径流量开始显著下降。年径流量累积距平曲线中,存在 2 个明显的转折点,分别对应 1968 年与 1986 年,表明年径流量经历了“丰—枯—丰—枯”的阶段性过程。经滑动 T 检验与有序聚类法分析,结果表明:年径流量分别在 1985、1986 年发生了跃变,且均通过了置信度为 99%的显著性检验(表 3)。

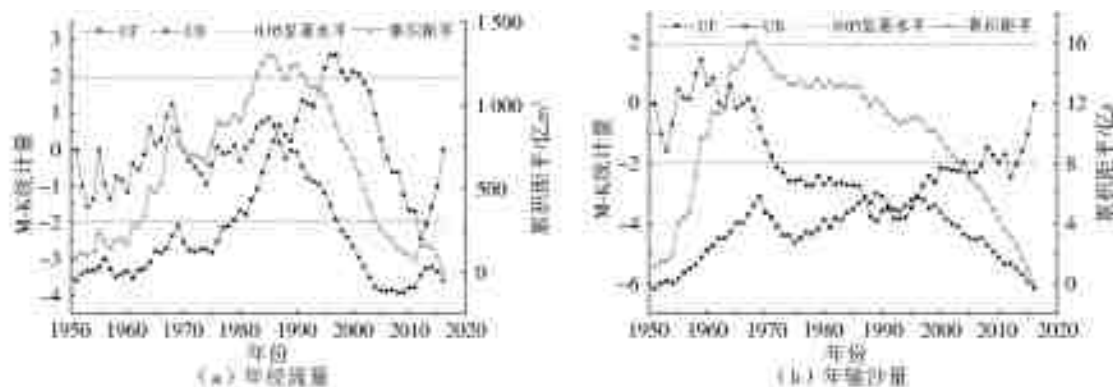


图4 石嘴山站水沙 M-K 突变检验及累积距平曲线

Fig. 4 Accumulative anomaly curves and M-K test of step-changes of annual streamflow and sediment at Shizuishan station

同理,对年输沙量的突变检验(图 4(b)),从 1968 年起,UF 统计量处于零水平线以下,且呈逐年下降趋势,从 1972 年开始,年输沙量显著下降,UF 曲线与 UB 曲线交于 1996 年,但交点未处于置信区间内,不认为其于 1996 年发生突变。年输沙量累积距平曲线中,仅有一明显的转折点(1968 年),且曲线从 1974 年开始平稳变化,1986 年后,曲线明显下降,表明年输沙量经历了“丰—平—枯”的阶段过程,出现转折点的原因一方面与大型水库的运用有关,水土保持措施引起的支流产沙减小等也是造成来沙量持续下降的影响因素<sup>[9]</sup>,1968 年年输沙量开始降低是受刘家峡水库的拦沙影响。M-K 检验未能识别出年输沙量的突变点,引入滑动 T 检验与有序聚类法,结果表明:年输沙量均在 1968 年通过置信度为 99% 的显著性检验(表 3)。

表 3 石嘴山站水沙突变检验结果

Tab. 3 Results of step-changes for annual streamflow and sediment at Shizuishan station

统计量	检验方法			突变年
	M-K 检验	有序聚类	滑动 T 检验	
年径流量	1986 ***	1986 ***	1985 ***	1986
年输沙量	—	1968 ***	1968 ***	1968

注:表中 \*\*\* 表示通过了 99% 的置信度检验。

综合 M-K 突变检验、滑动 T 检验与有序聚类法的检验结果,得到年径流量与年输沙量的突变时间,见表 3。年径流量于 1986 年突变,年输沙量于 1968 年突变,分别对应于龙羊峡水库、刘家峡水库

的投入运用时间。

检验结果说明:石嘴山站的年径流输沙突变与上游大型水库的运用密切相关。径流输沙的突变时间并不同步,年输沙量突变时间早于年径流量突变时间,且年输沙量并未在 1986 年出现明显变化,此突变现象与龙、刘水库的基本属性有关,刘家峡水库为年调节水库,龙羊峡为多年调节水库,龙羊峡水库位于黄河上游梯级电站群上部,总库容 247 亿 m<sup>3</sup>,明显大于刘家峡水库,其对径流的调节同样要明显强于刘家峡水库<sup>[28]</sup>。刘家峡水库位于梯级电站群中部,其建库时间早于龙羊峡水库,水库建成初期具备强大的拦蓄作用,对泥沙的拦截效果明显,而龙羊峡水库建成后,输沙量并未明显改变,原因是刘家峡水库运用的十多年间,库区内已淤积大量泥沙,水库有效库容减少,拦沙效果大大降低<sup>[28]</sup>。此外,因黄河水沙异源,龙羊峡水库上游基流多为清流,含沙量低,因此,其拦沙效果远不及刘家峡水库,有研究表明<sup>[29]</sup>,2000 年前,龙羊峡水库共淤积 0.06 亿 t,而刘家峡水库共淤积 0.53 亿 t,约为龙羊峡水库淤积量的 9 倍。可见石嘴山站的水沙变异与大型水库的运用密不可分。

### 3.2 大型水库建成前后的水沙变化

#### 3.2.1 水沙分配变化

经突变检验结果,将水沙序列分为基准期(1951—1968 年),研究期 I (1969—1986 年),研究期 II (1987—2016 年)。统计各时段的各项指标见表 4。

表 4 石嘴山站年径流量、年输沙量各时段特征值

Tab. 4 Characteristics of annual streamflow and sediment in different periods at Shizuishan station

时段	径流量/亿 m <sup>3</sup>			输沙量/亿 t			极值比 K		C <sub>v</sub>		汛期占比/%	
	均值	最大值	最小值	均值	最大值	最小值	径流量	输沙量	径流量	输沙量	径流量	输沙量
基准期(1951—1968 年)	320	493	212	2.044	3.820	0.965	2.3	4.0	0.24	0.46	62.86	79.59
研究期 I (1969—1986 年)	295	400	179	0.969	1.598	0.247	2.2	6.5	0.22	0.36	53.77	71.54
研究期 II (1987—2016 年)	228	357	163	0.702	1.561	0.239	2.2	6.5	0.21	0.45	43.63	61.19

石嘴山站年径流量均值从基准期到两个研究期呈依次递减趋势,减幅依次为 7.81%、22.71%,研究期 II 相对于基准期减少了 28.12%(约为 7.81% 的 3.6 倍),也说明了龙羊峡水库对径流的调节作用要强于刘家峡水库。三期的年径流量最大值、最小值均呈现一定程度的降低,但极值比与变差系数基本保持不变,说明龙、刘水库的运用虽然降低了年径流量的量级,但径流的年际分配过程基本不变。受水库调节等因素影响,汛期径流占全年的比例逐期递减,研究期 I 相对于基准期减少约 14.5%,研究期 II 在研究期 I 的基础上再减少 18.8%。径流量(汛期)减少的部分大多由水库蓄水调节产生,径流量在年内分配中趋于均匀。

石嘴山站年输沙量的变化趋势同年径流量,均值在两个阶段的变幅分别为-52.59%,-27.55%,由基准期到研究期 I,年输沙量最大值、最小值明显降低,降幅 58.17%、74.40%。两个研究期中,年输沙量最大值、最小值基本不变。刘家峡水库对泥沙的调节作用大,水库使用一定年限后,死库容逐渐淤满,拦沙作用削弱<sup>[28]</sup>,而龙羊峡水库对泥沙的调节作用小,因此出现上述现象。三个阶段的年输沙量极值比呈“增-平”变化,同样也说明输沙量变化主要是受刘家峡水库的影响;年输沙量变差系数呈“减-增”变化,且具有逐渐恢复至基准期的态势,间接说明水库的调沙作用随时间的延长正在慢慢减弱。

汛期沙量在全年中占比同样呈递减趋势,研究期 I 相对于基准期减少约 10.1%,研究期 II 在研究期 I 的基础上再减少 14.5%。龙、刘水库联合调度以来,水量调节明显,汛期水量占不到全年的一半,而汛期沙量虽经水库拦截削减了一部分,但平均占比仍高于 50%,泥沙可能由河道补充。

### 3.2.2 水沙指标变化

#### (1) 流量变化(汛期)

龙、刘水库未运用前,小流量( $\leq 1000 \text{ m}^3/\text{s}$ )出现频次较低,在汛期出现 11 d,约占汛期的 8.8%;中流量( $1000 \sim 2000 \text{ m}^3/\text{s}$ )和大流量( $2000 \sim 3000 \text{ m}^3/\text{s}$ )占主要部分,约占汛期的 77.5%;超大流量( $\geq 3000 \text{ m}^3/\text{s}$ )在汛期也占一定比例,约 13.7%。刘家峡水库建成后,小流量和中流量占优,大流量和超大流量得到一定程度的削减,减幅分别达 53.7%、42.6%。龙、刘联合运用后,2000  $\text{m}^3/\text{s}$  以上流量的出现几率大幅下降,占不到汛期的 2%。大型水库(特别是龙羊峡水库)的运用,极大的削减了洪峰,汛期的来水基本以小、中流量为主的形势发展(图 5)。

#### (2) 水沙函数变化

依据前文划分时段,对各时期水沙量进行了统计(图 6),并进行相关性分析(表 5)。基准期(1951—1968)年径流量与年输沙量点群分散,相关性较差,水沙关系不显著( $P > 0.05$ );刘家峡水库建成后,年

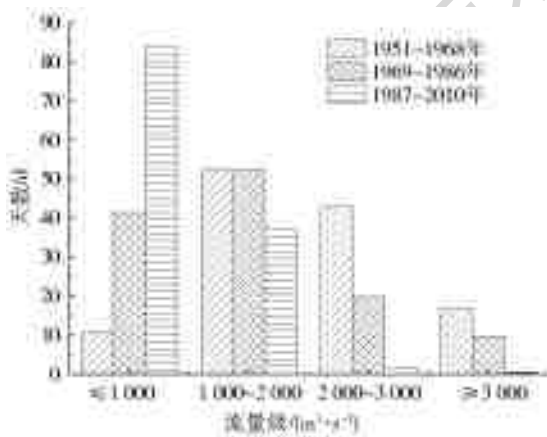


图 5 石嘴山站流量级出现天数

Fig. 5 Days of streamflow in Shizuishan station

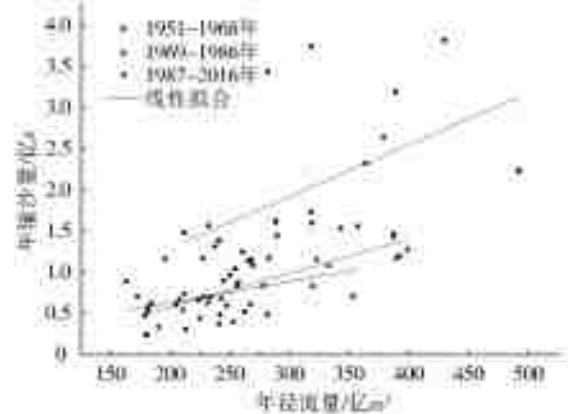


图 6 石嘴山站年水沙关系

Fig. 6 Relationship between annual streamflow and sediment at Shizuishan station

表 5 石嘴山站各时段水沙关系参数值

Tab. 5 Parameters of linear relationship between streamflow and sediment in different periods at Shizuishan station

时段	$y=ax+b$		$R^2$	$P$ -value	备注
	$a$	$b$			
1951—1968 年	0.006 3	0.038 2	0.254 9	0.479	$x, y$ 分别为年径流量、年输沙量; $a, b$ 分别为系数和常数
1969—1986 年	0.004 1	-0.245 2	0.605 8	0.487	
1987—2016 年	0.002 6	0.113 4	0.143 1	0.489	

径流输沙量重分配,年水沙关系一致性较好,相关性增强,但水沙关系仍不显著( $P>0.05$ );龙羊峡水库建成后,年水沙过程再次调整,年水沙关系不一致,相关性明显降低,且低于基准期,水沙关系不显著( $P>0.05$ ),但点群分布集中,受控区间明显(年径流量基本处于(150亿、350亿 $m^3$ )、年输沙量基本处于(0亿、1.5亿t))。建立汛期及非汛期水沙关系,发现水沙关系在3个时段的显著性及相关性仍然较差,分析其原因,可能是受区间的来水来沙影响,如清水河、苦水河等支流的汇入、乌兰布和沙漠的风沙入黄、龙羊峡水库下游中小型梯级电站的蓄水拦沙、支流水利水保措施的减水减沙等<sup>[29]</sup>。在不同时段,平均含沙量的变化较为明显,1951—1968年,石嘴

山站汛期平均含沙量约为全年平均含沙量的1.8倍,约为非汛期平均含沙量的3.1倍。刘家峡水库运用以来,石嘴山水文站处实测的含沙量多年均值由 $4.38\text{ kg}/m^3$ 降为 $2.52\text{ kg}/m^3$ ,约减少42.5%,汛期平均含沙量相对于基准期减少了近一半。龙、刘联合运用后,多年平均含沙量由 $2.52\text{ kg}/m^3$ 增加到 $2.74\text{ kg}/m^3$ ,汛期和非汛期的平均含沙量也有所增加,但增幅不明显(表6)。结果说明,刘家峡水库的拦沙效果明显,对泥沙的调节作用强于龙羊峡水库,而龙、刘联合运用后,水库拦沙效果却并未再提升,一方面,水库长期运用,拦沙效果减弱;另外,含沙量的增加也可能是由河道泥沙的补给作用导致。

表6 石嘴山站各时段平均含沙量及平均来沙系数

Tab. 6 Average sediment concentration and incoming sediment coefficient in different periods at Shizuishan station

时段	平均含沙量/( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ )			平均来沙系数/( $\text{kg}\cdot\text{s}\cdot\text{m}^{-6}$ )		
	汛期	非汛期	全年	汛期	非汛期	全年
1951—1968年	7.97	2.58	4.38	0.0045	0.0045	0.0045
1969—1986年	4.15	1.71	2.52	0.0031	0.0026	0.0027
1987—2016年	4.41	1.90	2.74	0.0051	0.0032	0.0028

### (3) 来沙系数变化

三个时段的来沙系数<sup>[30-31]</sup>变化也较为明显,与含沙量的变化趋势基本一致。在基准期,汛期、非汛期及全年的平均来沙系数均为 $0.0045\text{ kg}\cdot\text{s}/\text{m}^6$ (表6),龙羊峡、刘家峡水库相继运用以来,全年的平均来沙系数基本维持在 $0.0028\text{ kg}\cdot\text{s}/\text{m}^6$ 左右,相对于基准期降低了37.8%,来沙系数降低,说明同流量下的含沙量减少,水沙关系趋好,河道淤积减轻。

## 4 结 论

(1)黄河石嘴山水文站的水沙年内分配不均匀,泥沙的不均匀程度远大于径流,水沙主要集中于汛期;在年际上,年径流量和年输沙量于20世纪60年代变化最为强烈,年输沙量的震荡程度强于年径流量。

(2)石嘴山站年径流量和年输沙量在1951—2016年分别出现“丰—枯—丰—枯”、“丰—平—枯”的阶段性变化,但整体均呈显著下降趋势,且下降趋势具有正持续性,未来该站的水沙下降趋势的影响时间分别为8年、10年左右。

(3)年径流量与年输沙量分别于1986、1968年发生突变,突变原因与龙、刘水库运用有关,龙羊峡水库主要影响径流、刘家峡水库主要影响泥沙,大型水库的调蓄是造成水沙变化的一大因素。

(4)龙、刘水库的联合运用,通过削峰拦沙作用,改变了河道的水沙分配格局,石嘴山站的流量基本

维持在 $2000\text{ m}^3/\text{s}$ 以下,水沙分配趋于均匀。水库运用前后,石嘴山站的水沙函数关系不显著。

(5)石嘴山站的平均含沙量与平均来沙系数变化趋势一致,二者对刘家峡水库的运用响应明显(降幅显著);龙、刘水库联合运用后,多年平均含沙量与多年平均来沙系数基本不变。

### 参考文献(References):

- [1] 胡春宏. 黄河水沙变化与治理方略研究[J]. 水力发电学报, 2016, 35(10): 1-11. (HU C H. Changes in runoff and sediment loads of the Yellow River and its management strategies[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2016, 35(10): 1-11. (in Chinese)) DOI: 10.11660/slfdbx.20161001.
- [2] 侯素珍, 王平, 楚卫斌. 黄河上游水沙变化及成因分析[J]. 泥沙研究, 2012(4): 46-52. (HOU S Z, WANG P, CHU W B. Analysis of water and sediment changes in upper Yellow River[J]. Journal of Sediment Research, 2012(4): 46-52. (in Chinese)) DOI: 10.16239/j.cnki.0468-155x.2012.04.007.
- [3] 范小黎, 师长兴, 白建斌, 等. 黄河宁蒙段河道输沙率研究[J]. 泥沙研究, 2015(6): 27-33. (FAN X L, SHI C X, BAI J B, et al. Study on sediment delivery rate in the Ningxia-Inner Mongolia reaches of the upper Yellow River[J]. Journal of Sediment Research, 2015(6): 27-33. (in Chinese)) DOI: 10.16239/j.cnki.0468-155x.

2015. 06. 005.
- [4] 姚文艺,冉大川,陈江南. 黄河流域近期水沙变化及其趋势预测[J]. 水科学进展, 2013, 24(5): 607-616. (YAO W Y, RAN D C, CHEN J N. Recent changes in runoff and sediment regimes and future projections in the Yellow River basin[J]. Advances in Water Science, 2013, 24(5): 607-616. (in Chinese)) DOI: 10. 14042/j. cnki. 32. 1309. 2013. 05. 013.
- [5] 张晓华,苏晓慧,郑艳爽,等. 黄河上游沙漠宽谷河段近期水沙变化特点及趋势[J]. 泥沙研究, 2013(2): 44-51. (ZHANG X H, SU X H, ZHENG Y S, et al. Features and trends of recent changes in runoff and sediment regimes in wide-valleyed desert reach of upper Yellow River [J]. Journal of Sediment Research, 2013(2): 44-51. (in Chinese)) DOI: 10. 16239/j. cnki. 0468-155x. 2013. 02. 008.
- [6] 彭文昌,李永山. 黄河内蒙古段异源水沙输移特性[J]. 中国沙漠, 2016, 36(3): 805-813. (PENG W C, LI Y S. Transport Characteristics of water and sediment from different sources in Inner Mongolia reach of the Yellow River[J]. Journal of Desert Research, 2016, 36(3): 805-813. (in Chinese)) DOI: 10. 7522/j. issn. 1000-694X. 2016. 00059.
- [7] 冉大川,姚文艺,焦鹏,等. 黄河上游头道拐站年径流输沙系列突变点识别与综合诊断[J]. 干旱区研究, 2014, 31(5): 928-936. (RAN D C, YAO W Y, JIAO P, et al. Identification and comprehensive diagnosis of sharp change of annual runoff volume and silt discharge series at Toudaoguai Hydrometric Station in the upper reaches of the Yellow River[J]. Arid Zone Research, 2014, 31(5): 928-936. (in Chinese)) DOI: 10. 13866/j. azr. 2014. 05. 22.
- [8] 冉大川,姚文艺,张攀,等. 黄河头道拐站水沙来源空间分布及其影响因素[J]. 泥沙研究, 2015(1): 42-48. (RAN D C, YAO W Y, ZHANG P, et al. Spatial distribution of water and sediment sources and its influence factors at Toudaoguai hydrological station on the Yellow River[J]. Journal of Sediment Research, 2015(1): 42-48. (in Chinese)) DOI: 10. 16239/j. cnki. 0468-155x. 2015. 01. 008.
- [9] 冉大川,姚文艺,申震洲,等. 黄河头道拐水沙变化多元驱动因子贡献率分析[J]. 水科学进展, 2015, 26(6): 769-778. (RAN D C, YAO W Y, SHEN Z Z, et al. Analysis on the contribution rate of driving factors for the annual water and sediment variations at the Toudaoguai hydrological station in the Yellow River[J]. Advances in Water Science, 2015, 26(6): 769-778. (in Chinese)) DOI: 10. 14042/j. cnki. 32. 1309. 2015. 06. 002.
- [10] 姚文艺,张晓华,高亚军,等. 黄河沙漠宽谷段水沙变化特征及驱动因素[J]. 中国沙漠, 2017, 37(2): 361-371. (YAO W Y, ZHANG X H, GAO Y J, et al. Features of runoff and sediment variations in wide-valleyed desert reach of upper Yellow River and contribution rate of driving factors for the variations[J]. Journal of Desert Research, 2017, 37(2): 361-371. (in Chinese)) DOI: 10. 7552/j. issn. 1000-694X. 2016. 00183.
- [11] 姚文艺,高亚军,安催花,等. 百年尺度黄河上中游水沙变化趋势分析[J]. 水利水电科技进展, 2015, 35(5): 112-120. (YAO W Y, GAO Y J, AN C H, et al. Analysis of trend of runoff and sediment load in upper and middle reaches of Yellow River at century scale [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2015, 35(5): 112-120. (in Chinese)) DOI: 10. 3880/j. issn. 1006-7647. 2015. 05. 015.
- [12] 张建云,章四龙,王金星,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. (ZHANG J Y, ZHANG S L, WANG J X, et al. Study on runoff trends of the six larger basins in China over the past 50 years[J]. Advances in Water Science, 2007, 18(2): 230-234. (in Chinese)) DOI: 10. 14042/j. cnki. 32. 1309. 2007. 02. 013.
- [13] 张建云,王国庆,贺瑞敏,等. 黄河中游水文变化趋势及其对气候变化的响应[J]. 水科学进展, 2009, 20(2): 153-158. (ZHANG J Y, WANG G Q, HE R M, et al. Variation trends of runoffs in the Middle Yellow River basin and its response to climate change[J]. Advances in Water Science, 2009, 20(2): 153-158. (in Chinese)) DOI: 10. 14042/j. cnki. 32. 1309. 2009. 02. 003.
- [14] 李二辉,穆兴民,赵广举. 1919—2010 年黄河上中游区径流量变化分析[J]. 水科学进展, 2014, 25(2): 155-163. (LI E H, MU X M, ZHAO G J. Temporal changes in annual runoff and influential factors in the upper and middle reaches of Yellow River from 1919—2010[J]. Advances in Water Science, 2014, 25(2): 155-163. (in Chinese)) DOI: 10. 14042/j. cnki. 32. 1309. 2014. 02. 004.
- [15] 赵广举,穆兴民,田鹏,等. 近 60 年黄河中游水沙变化趋势及其影响因素分析[J]. 资源科学, 2012, 34(6): 1070-1078. (ZHAO G J, MU X M, TIAN P, et al. The variation trend of stream flow and sediment flux in the middle reaches of Yellow River over the past 60 years and the influencing factors[J]. Resources Science, 2012, 34(6): 1070-1078. (in Chinese))
- [16] 黄强,孔波,樊晶晶. 水文要素变异综合诊断[J]. 人民黄河, 2016, 38(10): 18-23. (HUANG Q, KONG B, FAN J J. Hydrological elements comprehensive detecting variation[J]. Yellow River, 2016, 38(10): 18-23. (in Chinese)) DOI: 10. 3969 /j. issn. 1000-1379. 2016. 10. 004.



- [17] 马凯,吴冬,马煜冬,等.石嘴山水文站短期洪水预报方法分析[J].内蒙古水利,2018(6):17-19. (MA K, WU D, MA Y D, et al. Analysis on short-term flood forecasting methods of Shizuishan hydrological station [J]. Inner Mongolia Water Conservancy, 2018(6): 17-19. (in Chinese))
- [18] 张莹莹,胡亚朋,张范平.黄河上游天然径流变化特性分析[J].干旱区资源与环境,2017,31(2):104-109. (ZHANG Y Y, HU Y P, ZHANG F P. The characteristics of natural stream flow in the upstream of the Yellow River[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2017, 31(2): 104-109. (in Chinese)) DOI: 10.13448/j.cnki.jalre.2017.052.
- [19] 潘雅婧,王仰麟,彭建,等.基于小波与R/S方法的汉江中下游流域降水量时间序列分析[J].地理研究,2012,31(5):811-820. (PAN Y J, WANG Y L, PENG J, et al. Precipitation change in middle and lower reaches of Hanjiang River: Based on wavelet analysis and R/S analysis[J]. Geographical Research, 2012, 31(5): 811-820. (in Chinese)) DOI: 1000-0585(2012)05-0811-10.
- [20] XU J H, CHEN Y N, LI W H, et al. Long-term trend and fractal of annual runoff process in mainstream of Tarim River[J]. Chinese Geographical Science, 2008, 18(1): 77-84. DOI: 10.1007/s11769-008-0077-6.
- [21] 赵路伟,徐刚.河南省1961年—2014年气温和降水量的时空变化特征[J].南水北调与水利科技,2016,14(3):17-23. (ZHAO L W, XU G. Temporal-spatial variation characteristics of temperature and precipitation in Henan Province from 1961 to 2014[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2016, 14(3): 17-23. (in Chinese)) DOI: 10.13476/j.cnki.nsbj.2016.03.004.
- [22] 焦玮,朱仲元,宋小园,等.近50年气候和人类活动对锡林河流域径流的影响[J].中国水土保持科学,2015,13(6):12-19. (JIAO W, ZHU Z Y, SONG X Y, et al. Impacts of climate change and human activities on runoff yield of the Xilin River basin over nearly 50 years[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2015, 13(6): 12-19. (in Chinese)) DOI: 10.16843/j.sswc.2015.06.003.
- [23] 章诞武,丛振涛,倪广恒.基于中国气象资料的趋势检验方法对比分析[J].水科学进展,2013,24(4):490-496. (ZHANG D W, CONG Z T, NI G H. Comparison of three Mann-Kendall methods based on the China's meteorological data[J]. Advances in Water Science, 2013, 24(4): 490-496. (in Chinese)) DOI: 10.14042/j.cnki.32.1309.2013.04.019.
- [24] ONOZ B, BATAZIT M. Block bootstrap for Mann-Kendall trend test of serially dependent data[J]. Hydrological Processes, 2012, 26(23): 3552-3560. DOI: 10.1002/hyp.8438.
- [25] 燕明达,宋孝玉,李怀有.砚瓦川流域1981—2012年降水特性及趋势分析[J].水资源与水工程学报,2014,25(3):116-119,124. (YAN M D, SONG X Y, LI H Y. Analysis of rainfall characteristics and its tendency in Yanwachuan basin from 1981 to 2012[J]. Journal of Water Resources & Water Engineering, 2014, 25(3): 116-119, 124. (in Chinese)) DOI: 10.11705/j.issn.1672-643X.2014.03.23.
- [26] 向亮,郝立生,安月改,等.51 a河北省降水时空分布及变化特征[J].干旱区地理,2014,37(1):56-65. (XIANG L, HAO L S, AN Y G, et al. Time-spatial distribution and variational characteristics of rainfall in Hebei Province in 51 years[J]. Arid Land Geography, 2014, 37(1): 56-65. (in Chinese)) DOI: 10.13826/j.cnki.cn65-1103/x.2014.01.008.
- [27] 朱学思,陈翠琴,乔光建.治河流域枯季径流量趋势特性及演化规律研究[J].南水北调与水利科技,2010,8(4):91-94,137. (ZHU X S, CHEN C Q, QIAO G J. Trend characteristics and evolution law of runoff during dry season of the Yehe River basin[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2010, 8(4): 91-94, 137. (in Chinese)) DOI: 10.3724/SP.J.1201.2010.04091.
- [28] 姚文艺,侯素珍,丁赞.龙羊峡、刘家峡水库运用对黄河上游水沙关系的调控机制[J].水科学进展,2017,28(1):1-13. (YAO W Y, HOU S Z, DING Y. Effects on flow and sediment in the upper Yellow River by operation of Longyangxia reservoir and Liujiata reservoir[J]. Advances in Water Science, 2017, 28(1): 1-13. (in Chinese)) DOI: 10.14042/j.cnki.32.1309.2017.01.001.
- [29] 鲁俊,安催花,吴晓杨.黄河宁蒙河段水沙变化特性与成因研究[J].泥沙研究,2018,43(6):40-46. (LU J, AN C H, WU X Y. Study on processes of water and sediment in the Ning-Meng Reach of the Yellow River[J]. Journal of Sediment Research, 2018, 43(6): 40-46. (in Chinese)) DOI: 10.16239/j.cnki.0468-155x.2018.06.007.
- [30] 姚文艺,焦鹏.黄河水沙变化及研究展望[J].中国水土保持 SWCC, 2016(9):55-63,93. (YAO W Y, JIAO P. Prospects in runoff and sediment variation and study of the Yellow River[J]. Soil and Water Conservation in China, 2016(9): 55-63, 93. (in Chinese)) DOI: 10.14123/j.cnki.swcc.2016.0244.
- [31] 吴保生,申冠卿.来沙系数物理意义的探讨[J].人民黄河,2008,30(4):15-16. (WU B S, SHEN G Q. Approach to physical meaning of coming sediment coefficients[J]. Yellow River, 2008, 30(4): 15-16. (in Chinese)) DOI: 10.3969/j.issn.1000-1379.2008.04.008.