

# 皇甫川流域水沙变化特点及其趋势分析<sup>\*</sup>

王小军<sup>1</sup>, 蔡焕杰<sup>1</sup>, 张鑫<sup>1</sup>, 王健<sup>1</sup>, 翟俊峰<sup>2</sup>

(1. 西北农林科技大学 水利与建筑工程学院, 陕西 杨陵 712100; 2. 内蒙古自治区水文总局, 呼和浩特 010010)

**摘要:**以地处多沙粗沙区的皇甫川流域为例, 采用实测资料, 对其水沙量进行了统计分析。采用滑动平均法、Mann-Kendall 非参数秩次相关检验法, 对控制站皇甫站水沙变化趋势进行了研究。结果表明: 在一定显著性水平下, 皇甫川流域径流与泥沙在多年变化中均呈明显下降趋势。最后, 针对影响水沙变化的降水与人类活动因素, 应用不同时间段的雨-水-沙关系, 结合双累积曲线的变化过程, 定量计算了不同时段的水沙衰减量以及由于雨水衰减影响和水土保持影响的减沙量所占比重。

**关键词:**皇甫川流域; 水沙变化; 趋势分析; Mann-Kendall 检验

中图分类号: P332.4; P332.5

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2009)01-0222-05

## Analysis of Changing Characteristics and Tendency of Runoff and Sediment Transport in Huangfuchuan River Watershed

WANG Xiao-jun<sup>1</sup>, CAI Huan-jie<sup>1</sup>, ZHANG Xin<sup>1</sup>, WANG Jian<sup>1</sup>, ZHAI Jun-feng<sup>2</sup>

(1. College of Water Resources and Architecture Engineering, Northwest A & F University, Yangling, Shaanxi 712100; China; 2. The Hydrology and Water Resource Survey Bureau of Inner Mongolia; Hohhot 010010; China)

**Abstract:** This paper statistically analyzes the runoff and sediment transport of the Huangfuchuan river watershed in more sediment and coarse sediment region of the Yellow River, through Several non-parameter statistical methods such as the moving average check, the Mann-Kendall test. The paper concludes that the trend of runoff evolvement and sediment transport at the Huangfu station decreased are very distinct. The major factors correlated with the runoff and sediment transport changes such as the rainfall, soil conservation. With the relationships between rainfall, water and sediment, and the accumulation curves of the mass runoff and mass sediment transport at Huangfu station. The sediment descending proportions caused by the reduction of rainfall and soil conservancy are respectively evaluated.

**Key words:** Huangfuchuan river watershed; changes of runoff and sediment; tendency analysis; Mann-Kendall test

黄土高原是世界上黄土分布面积最广、厚度最大的地区, 同时也是世界上水土流失最严重的地区之一, 位于中游的多沙粗沙区更是水土流失的重中之重<sup>[1]</sup>。长期以来, 有关部门对黄河的治理与研究已经取得了很大成就, 但随着时间的推移, 流域水沙条件发生了显著变化。为此, 必须结合新的情况, 对流域水沙变化进行研究。本文以地处多沙粗沙区的皇甫川流域为例, 以实测资料为依据, 对其水沙变化的特点、原因以及未来变化趋势进行了分析。

## 1 皇甫川流域概况

皇甫川流域位于黄河中游河口镇至龙门区间的右岸上段, 是黄河流域主要的多沙粗沙区, 多年平均(1956 - 2005年)输沙量4 609万t。皇甫川发源于内蒙古自治区达拉特旗南部敖包梁和准格尔旗西北部的点畔沟一带, 在陕西省府谷县巴兔坪汇入黄河, 干流长137 km, 流域面积3 246 km<sup>2</sup>, 皇甫川流域水系主要由干流纳林川和支流长川组成。干流沙圪堵

<sup>\*</sup> 收稿日期: 2008-06-28

基金项目: 高校青年教师奖资助项目

作者简介: 王小军(1983 - ), 男, 陕西西安人, 在读硕士, 主要从事水资源高效利用以及水土环境保护方面的研究。E-mail: jun501 @126.com

通信作者: 蔡焕杰(1962 - ), 男, 教授, 博导, 从事节水农业与水资源高效利用研究。E-mail: huanjie @tom.com

以上(纳林川)河道长 70 km,面积 1 351 km<sup>2</sup>,占流域总面积的 41.6%;长川河道长 75 km,流域面积 702 km<sup>2</sup>,占流域总面积的 21.6%。皇甫川流域地处鄂尔多斯高原的东南部,黄土高原的北部边缘。根据侵蚀程度和表土层覆盖的差异,流域可分为 3 个地貌类型区:(1)砒砂岩丘陵沟壑区;(2)黄土丘陵沟壑区;(3)沙化黄土丘陵沟壑区<sup>[2]</sup>。

表 1 皇甫川流域水文泥沙特征值统计

项 目	时段						
	1956 - 1959	1960 - 1969	1970 - 1979	1980 - 1989	1990 - 1999	2000 - 2005	1956 - 2005
平均降水量/mm	478.6	395.1	385.4	359.0	360.0	388.4	384.8
平均径流量/万 m <sup>3</sup>	24160.0	17230.6	17576.8	12713.0	9031.3	4298.7	13759.0
平均输沙量/万 t	9088.0	5669.6	6243.0	4239.9	2542.4	1195.6	4609.5

注:雨量为面雨量,径流量与输沙量为单站实测值

2.1 降雨特性

多沙粗沙区的降水受纬度、水汽来源以及地形变化的综合影响,故流域降水量变化比较复杂。皇甫川流域多年平均(1956 - 2005 年)降水量 384.8 mm,流域西北部一带雨量偏多,自刘家塔至皇甫川干流一带也偏多,乌兰沟、乌拉素以及长川上游一带雨量偏少。由表 1 可知各年代皇甫川流域雨量变化较为明显。其中 50 - 80 年代降雨呈递减趋势,80 年代全年雨量比 50 年代减少 119.7 mm,下降幅度达 25%;而 80 年代以后则呈微弱递增趋势,2000 - 2005 年,流域年平均降水量为 388.4 mm,比 80 年代增加 25.8 mm。

2.2 径流特性

皇甫水文站多年平均(1956 - 2005 年)径流量 13 759 万 m<sup>3</sup>,折合径流深 42.4 mm。皇甫川流域径流的特点是:蒸发旺盛,径流量小,产流不均匀,年际变化大,年内分配很不均匀,径流泥沙多集中在几次大洪水。与降水不同,皇甫川流域径流从 50 年代至今一直呈递减趋势,50 年代流域径流量达 24 160 万 m<sup>3</sup>,至 90 年代已减至 9 031.3 万 m<sup>3</sup>。2000 - 2005 年流域年平均径流量仅 4 298 万 m<sup>3</sup>,比 50 年代下降 19 862 万 m<sup>3</sup>,下降幅度达 82.2%。

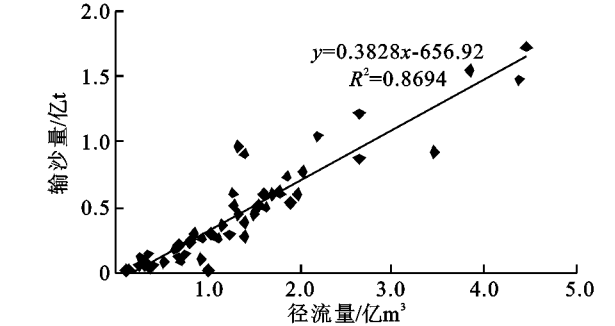


图 1 皇甫站历年径流量 - 输沙量相关图

2 降雨、径流、泥沙特性

为研究皇甫川流域多年来水来沙条件的变化,选取其主要控制站皇甫水文站进行水沙基本特征分析<sup>[3]</sup>。皇甫水文站设于 1953 年 7 月 12 日,现变动为皇甫水文(三)站,控制面积 3 175 km<sup>2</sup>,占流域面积的 98%。皇甫川流域水文泥沙特征值统计见表 1。

2.3 泥沙特性

皇甫川流域泥沙特点是,产区集中,侵蚀强度大,洪水含沙量高。流域经常出现高含沙水流,基岩风化和黄土区是皇甫川流域泥沙的主要产区,其中基岩风化壳则是粗泥沙的主要来源区,而黄土和深度风化的页岩提供了一定数量的细颗粒泥沙,从而形成了产生高含沙水流的有利条件。从历年变化情况看,流域输沙量与径流量变化趋势基本一致,流域输沙量也一直呈下降趋势。50 年代流域输沙量达 9 088 万 t,至 90 年代已减至 2 542 万 t,2000 - 2005 年流域平均输沙量仅 1 195 万 t;与 50 年代相比,流域输沙量减少 7 892 万 t,降幅高达 86.8%。

3 皇甫川流域水沙关系分析

3.1 水沙相关分析

从流域控制站皇甫水文站历年水沙量的相关关系(见图 1)可以看出,皇甫水文站大部分输沙量与径流量的关系点均密集在相关线附近,各年代点据在相关线两侧均有分布,说明水沙关系未出现系统偏离。但近期的(1996 - 2005 年)相关点据大多在相关线下侧,说明近期较其他年代同水量下沙量明显地减少。

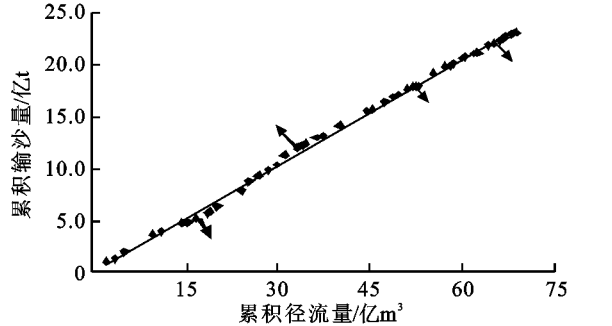


图 2 皇甫站年径流量 - 年输沙量双累积曲线图

### 3.2 累积水沙量关系

为了更准确地反映水沙关系的变化,笔者建立了年径流量和年输沙量的双累积曲线<sup>[4]</sup>。

$$S_{R_i} = \sum_{i=1}^i R_i \quad (1)$$

$$S_{W_i} = \sum_{i=1}^i W_i \quad (2)$$

式中:  $S_{R_i}$ ,  $R_{W_i}$  ——前  $i$  年的累积径流量和累积输沙量(万  $\text{m}^3$ , 万 t);  $R_i$ ,  $W_i$  ——第  $i$  年的径流量和输沙量(万  $\text{m}^3$ , 万 t)。

流域水沙特性如发生系统变化,在水沙量双累积曲线图上将表现出明显的转折,即累积曲线斜率明显变大或减小。从皇甫水文站水沙量双累积曲线(图 2)看出基本呈一直线。但随着时间序列的变化,也表现出一定的波动,大致分为 4 个阶段:(1) 1956 - 1967 年,斜率减小(向径流轴偏转),此时段内沙量也有所减少,为下降段;(2) 1968 - 1978 年,斜率增大(向输沙量轴偏转),说明自 1968 年以

后,输沙量明显增加,为上升段;(3) 1979 - 1995 年,至 1979 年以后,斜率又有所减少,沙量增加的趋势已有所缓解,直至 1995 年,流域水沙关系均呈相对稳定关系,此时段为平滑段;(4) 1996 - 2005 年,随着退耕还林等水土保持工作的开展,使得流域沙量有所减少,故斜率再次减小,此时段称下降段。

## 4 皇甫川流域水沙变化趋势初步分析

水沙序列特征值随时间呈一定的变化趋势。采用滑动平均法、Mann-Kendall 非参数秩次相关检验法对皇甫水文站水沙变化趋势进行统计分析<sup>[5-6]</sup>。

### 4.1 滑动平均法

对于皇甫水文站的径流量和输沙量取 5 a 进行滑动平均,使序列高频震荡(水沙特别年份)对水沙变化趋势分析的影响得以弱化,结果见图 3。可以看出皇甫站水沙变化过程基本对应,二者均呈明显的下降趋势。

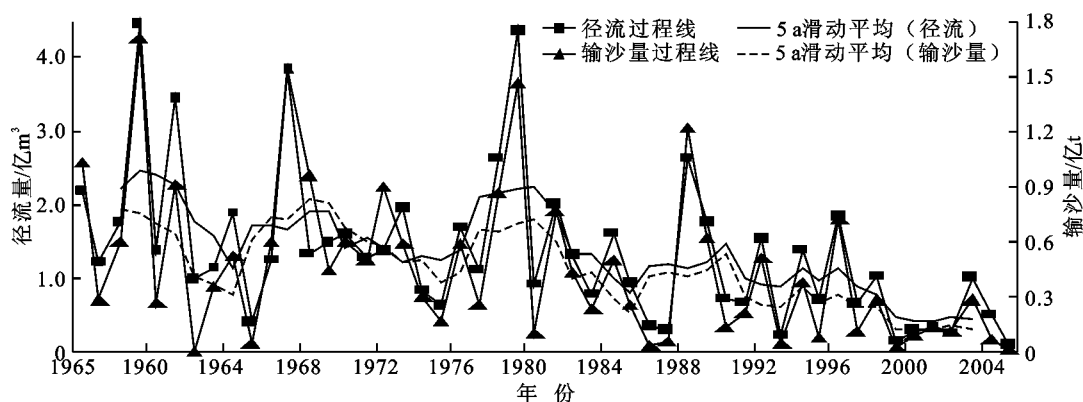


图 3 皇甫水文站年径流量和输沙量滑动平均图

### 4.2 Mann-Kendall (M-K) 趋势分析检验

Mann-Kendall 非参数秩次相关检验法已被广泛应用于检验水文气象资料的趋势成分。其基本原理如下:

对序列  $X_t = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ , 其趋势检验的统计量为

$$U(d_i) = \frac{[d_i - E(d_i)]}{[Var(d_i)]^{1/2}} \quad (3)$$

式中:

$$d_i = \sum_{j=1}^{i-1} a_{ij} \quad a_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{当 } i < j \text{ 时, } x_i < x_j \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (4)$$

$$E(d_i) = \frac{I(I-1)}{4} \quad (5)$$

$$Var(d_i) = \frac{I(I-1)(2I+5)}{72} \quad (6)$$

当  $n$  增加时,  $U(d_i)$  很快收敛于标准化正态分布,在给定显著性水平  $\alpha$  下,在正态分布表中查得临界值  $U_{\alpha/2}$ ,当  $|U(d_i)| < U_{\alpha/2}$  时,接受原假设,即趋势

不显著;若  $|U(d_i)| > U_{\alpha/2}$ ,则拒绝原假设,即认为趋势显著。当统计量  $U(d_i)$  为正值,说明序列有上升趋势; $U(d_i)$  为负值,则表示有下降趋势。对于显著水平  $\alpha = 0.05$ ,  $U(d_i)$  的临界检验值为  $\pm 1.96$ 。

通过对皇甫水文站径流系列与输沙量系列的 Mann-Kendall (M-K) 检验,可得径流、输沙量的统计量  $U(R_i)$ 、 $U(W_i)$  分别为 -4.32, -3.95,二者均满足  $|U(d_i)| > 1.95$ 。因此,在一定显著性水平下,皇甫川流域径流与泥沙在多年变化中均呈明显下降趋势。

## 5 皇甫川流域水沙变化原因分析

影响流域产流产沙的主要因素包括降雨、流域下垫面条件以及人类活动等 3 大方面,另外,流域面积大,水沙量也大。就同一流域而言,由于地质地貌条件相对稳定,年际间流域面积也相对稳定,故产水产沙量的多少主要取决于降水和人类活动影响。流域降水是地表产沙的动力条件,其时空(包括时间、

落区、强度、历时等)分布,对流域产水产沙有直接影响;而水土保持、雨水集蓄、土地利用等人类活动改变了流域下垫面,使产流机制发生了变化<sup>[7-8]</sup>。因此,水土保持和降雨的变化是导致水沙量变化的根本和直接原因。

为了消除降雨的影响,令

$$E=W_s/P$$

(7)

式中:  $E$  称为侵蚀率(或产沙系数) ( $t/mm$ ), 则  $W_s = E \cdot P$ 。令相邻时段的平均值分别为  $W_{s1}$ ,  $W_{s2}$ ,  $P_1$ ,  $P_2$  及  $E_1$ ,  $E_2$ 。对  $W_s = E \cdot P$  取全微分,并以差分形式表示为

$$W_s=W_{s1}-W_{s2}=\frac{(P_1+P_2)}{2}(E_1-E_2)+\frac{(E_1+E_2)}{2}(P_1-P_2)=P \cdot E+E \cdot P$$

(8)

若  $P$  不变,则  $W_s = P \cdot E$  计为水土保持影

响;若  $E$  不变,则  $W_s = E \cdot P$  计为雨量影响<sup>[9]</sup>。

同理,令

$$D=W/P$$

(9)

式中:  $D$  ——径流率;  $W$  ——径流量;  $P$  ——降雨量。则  $W = D \cdot P$ 。令相邻时段的平均值各为  $W_1$ ,  $W_2$ ,  $P_1$ ,  $P_2$  及  $D_1$ ,  $D_2$ 。对  $W = D \cdot P$  取全微分,并以差分形式表示为

$$W=W_1-W_2=\frac{(P_1+P_2)}{2}(D_1-D_2)+\frac{(D_1+D_2)}{2}(P_1-P_2)=P \cdot D+D \cdot P$$

(10)

若  $P$  不变,则  $W = P \cdot D$  计为水土保持影响;若  $D$  不变,则  $W = D \cdot P$  计为雨量影响。

结合皇甫水文站年径流量-年输沙量双累积曲线,应用式(8),(10)对前述的 4 个变化阶段的各项变化量计算见表 2 和表 3。

表 2 皇甫川流域泥沙衰减分析

项 目	1956 - 1967(下降段 )	1968 - 1978(上升段)	1979 - 1995(平滑段)	1996 - 2005(下降段 )
输沙量/ 万 t	6584.3	5615.2	4171.8	1877.5
雨量/ mm	424.4	380.1	377.6	354.7
$E=W_s/P/(t \cdot mm^{-1})$	15.5	14.8	11.0	5.3
$W_s$ / 万 t	969.1	1443.3	2294.3	
$P$ / mm	44.3	2.5	22.9	
$E/(t \cdot mm^{-1})$	0.7	3.7	5.8	
$\overline{E} \cdot P$ / 万 t	687.6	37.2	253.1	
$\overline{P} \cdot E$ / 万 t	314.3	1415.5	2173.1	
$W_s=\overline{P} \cdot E+\overline{E} \cdot P$ / 万 t	1001.9	1452.7	2426.1	

表 3 皇甫川流域径流衰减分析

项 目	1956 - 1967(下降段 )	1968 - 1978(上升段)	1979 - 1995(平滑段)	1996 - 2005(下降段 )
径流量/ 万 m <sup>3</sup>	20053.8	14578.9	13182.4	6283.5
雨量/ mm	424.4	380.1	377.6	354.7
$D=W/P$ / 万 m <sup>3</sup>	47.3	38.4	34.9	17.7
$W$ / 万 m <sup>3</sup>	5474.9	1396.6	6898.9	
$P$ / mm	44.3	2.5	22.9	
$D$ / 万 m <sup>3</sup>	8.9	3.4	17.2	
$\overline{D} \cdot P$ / 万 m <sup>3</sup>	2094.2	96.7	799.6	
$\overline{P} \cdot D$ / 万 m <sup>3</sup>	3774.9	1308.6	6493.1	
$W=\overline{P} \cdot D+\overline{D} \cdot P$ / 万 m <sup>3</sup>	5869.1	1405.2	7292.7	

由表 2,3 可知,流域 1956 - 2005 年水沙变化过程中,各时段的影响因素也有异同。表现为:

(1) 下降段 (1956 - 1967) 至上升段 (1968 - 1978): 此时段内输沙量的降雨影响为 687.6 万 t、水土保持影响为 314.3 万 t,二者之和为 1 001.9 万 t,降雨影响和水土保持影响各占 68.6 %和 31.4 %。

而对于此时段内的径流,降雨影响为 2 094.2 万 m<sup>3</sup>、水土保持影响为 3 774.9 万 m<sup>3</sup>,二者之和为 5 869.1 万 m<sup>3</sup>,降雨影响和水土保持影响分别占 35.7 %和 64.3 %。

可以看出,在 70 年代以前,由于皇甫川流域开发利用率低,受人类活动影响较弱,故流域此时段内

水沙的变化主要因降水的多寡而异。

(2) 上升段(1968 - 1978 年)至平滑段(1979 - 1995 年):对于输沙量,此时段内降雨影响明显减弱,仅为 37.2 万 t,而水土保持影响则高达 1 415.5 万 t,二者所占比例分别为 2.6 %和 97.4 %。而对于同时期的径流量,降雨影响也明显减弱,仅为 96.7 万 m<sup>3</sup>,而水土保持影响则高达 1 308.6 万 m<sup>3</sup>,二者所占比例分别为 6.9 %和 93.1 %。

这充分说明在这一阶段中,水土保持(包括水利工程)发挥了很大的减水拦沙作用。经调查流域水利工程建设情况可知,仅 1974 年,皇甫川流域陕西境内就修建了打虎沟水库、胖老婆沟水库和园则沟水库,加之 1983 年皇甫川又开始大规模治理,一系列水土保持工程的实施,产生了明显的效益,发挥了很大的作用。

(3) 平滑段(1979 - 1995)至下降段(1996 - 2005),此时段泥沙、径流衰减总量均明显增大,分别为 2 426.1 万 t 和 7 292.7 万 m<sup>3</sup>,降雨和水土保持影响数量上相对前一阶段也呈增大趋势。对于输沙量,水土保持影响高达 2 173.1 万 t,降水影响为 253.1 万 t,二者所占比例分别为 89.6 %,10.4 %,对于径流量,水土保持影响高达 6 393.1 万 m<sup>3</sup>,降水影响为 799.6 万 m<sup>3</sup>,二者所占比例分别为 89.1 %和 10.9 %,相比上一阶段水土保持对水沙影响程度均有所增大,但所占比例有所下降。这一方面肯定了近年来的水土保持工作的成效,但同时也说明随着时间的推移,原有水保措施已不能满足新的要求,必须结合新的形势,实施流域综合治理。

## 6 结 论

(1) 皇甫川流域多年平均(1956 - 2005 年)降水量 384.8 mm;多年平均径流量 13 759 万 m<sup>3</sup>,折合径流深 42.4 mm;多年平均输沙量 4 609.5 万 t。流域径流与泥沙近 50 a 来均呈下降趋势。

(2) 应用水沙相关分析和年径流量 - 年输沙量双累积曲线,从整体上表明流域水沙关系没有出现系统偏离。但随着时间的变化,流域水沙关系也呈现出一定的规律性,大致可分为下降段(1956 -

1967)、上升段(1968 - 1978)、平滑段(1979 - 1995)、下降段(1996 - 2005)4 个阶段。

(3) 对皇甫站水文系列应用滑动平均法、Mann-Kendall 非参数秩次相关检验法表明,在一定显著性水平下,皇甫川流域径流与泥沙在多年变化中均呈明显下降趋势。

(4) 针对影响流域水沙变化的降水和人类活动两大因素,应用不同时段的雨 - 水 - 沙关系,结合双累积曲线,定量计算了 4 个时段的水沙衰减量以及由于降水衰减影响和水土保持影响的减沙量所占比重,分析了不同时段水沙变化的原因,结果表明,近年来水土保持是水沙衰减的主要原因。针对皇甫川的实际情况,应继续加强水土保持工作,实施流域综合治理。

### 参考文献:

- [1] 景可,李钜章,李凤新,等.黄河多沙粗沙区产水产沙对中游来水来沙的贡献率[J].水土保持学报,1999,5(1):13-18.
- [2] 冉大川,高健翎,赵安成,等.皇甫川流域水沙特性分析及其治理对策[J].水利学报,2003,34(2):122-127.
- [3] 汪岗,范昭.黄河水沙变化研究[M].郑州:黄河水利出版社,2000.
- [4] 许全喜,石国钰,陈泽方.长江上游近期水沙变化特点及其趋势分析[J].水科学进展,2004,15(4):420-426.
- [5] Gan T Y. Hydro-climatic trends and possible climatic warming in the Canadian Prairies[J]. Water Resource Research, 1998,34(11):3009-3015.
- [6] Douglas E M, Vogel R M, Kroll C N. Trends in floods and low flows in the United States: impact of spatial correlation[J]. Journal of Hydrology, 2000, 240: 90-105.
- [7] 许炯心,孙季.近 50 年来降水变化和人类活动对黄河入海通量的影响[J].水科学进展,2003,14(6):690-695.
- [8] 栗晓玲,康绍忠,魏晓妹,等.气候变化和人类活动对渭河流域入黄径流的影响[J].西北农林科技大学学报:自然科学版,2007,35(2):153-159.
- [9] 陈小红,刘美南,胡荣轩.黄河中游区水沙时空分布及衰减分析[J].水文,1997(1):19-23.