

# 秃尾河流域水土保持措施对河流泥沙变化的影响<sup>\*</sup>

周 旭<sup>1</sup>, 穆兴民<sup>1,2</sup>, 张 鑫<sup>1</sup>, 严宝文<sup>1</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. 中国科学院 水利部 水土保持研究所, 陕西 杨陵 712100)

**摘 要:**水土流失治理的水沙效应研究是水土保持规划与治理实践的重要理论基础。以秃尾河流域降水、径流、泥沙等资料为基础,采用 Mann-Kendall 秩次相关法和距平累积方法分析降水、输沙特征及其变化。结果表明:秃尾河流域输沙量在多年变化中呈明显下降趋势;针对影响流域输沙变化的降水和人类活动因素,结合时间序列对比分析法和降水-输沙双累积曲线,定量计算出不同时段输沙衰减量以及降水变化和水土流失治理导致的减沙量及其所占比重。分析表明:不同时段水土保持措施对秃尾河流域输沙变化的影响差异很大,流域 20 世纪 70 年代之后输沙衰减的主要驱动力是水土保持措施;水土保持措施对秃尾河流域 7 月、8 月输沙量影响最大。

**关键词:**水土流失;水土保持;泥沙;秃尾河;黄土高原

中图分类号:S157;P332.5

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2010)01-0015-05

## Impact of Soil and Water Conservation Measures on the River Sediment Changes in Tuwei River

ZHOU Xu<sup>1</sup>, MU Xing-min<sup>1,2</sup>, ZHANG Xin<sup>1</sup>, YAN Bao-wen<sup>1</sup>

(1. College of Water Resources and Architecture Engineering, Northwest A & F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 2. Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100, China)

**Abstract:** The effect of water and sediment research is an important theoretical foundation for the practice of the soil and water conservation planning and management. Based on the Tuwei river catchment's precipitation, runoff, sediment data, using Mann-Kendall rank correlation method and a total anomaly method to analyze the characteristics of water and sediment and its trends. Contrary to precipitation and human activities factors which affect water and sediment changes, using comparative analysis of time series and precipitation-sediment dual-accumulation curve to calculate sediment attenuation caused by precipitation change and soil erosion control during different times and their proportions. And so determine soil and water conservation measures on the impact of sediment discharge. Analysis showed that soil and water conservation measures on the impact of changes in river basin sediment very different in different time slots. Soil and water conservation measures is the main driving force of sediment attenuation in 20th century 70s. And the most obvious change occurred in July and August.

**Key words:** soil and water erosion; soil and water conservation; sediment; Tuwei river; the Loess Plateau

河流水沙变化是气候和土地利用变化环境效应研究的重要内容<sup>[1-2]</sup>。其研究对黄河流域泥沙治理有重要意义。国际上,在 IHP、WCRP、IGBP、GWSP 等研究计划中都不同程度的涉及土地利用/覆盖变化(LUCC)与水文科学关系方面的工作,相应的水文效应方面也有大量研究成果<sup>[3]</sup>。但因研究

方法和技术的缺陷或不足,立足水文法、水保法及水文模型法的研究成果不能满足水土保持、水资源配置等的决策与建设需要。目前,黄土高原的水土保持工程已达到相当规模,显著地改变了流域的下垫面条件,而近 50 多年来秃尾河流域径流及输沙特征发生了很大的变化,但已有对河龙区间支流的变化

<sup>\*</sup> 收稿日期:2009-08-16

基金项目:中国科学院西部行动项目(KZCX2-XB2-05-03);国家 973 项目(2007CB407203)

作者简介:周旭(1986-),男,硕士研究生,研究方向:水资源与水环境保护。E-mail: yuchengzhou100@163.com

通信作者:穆兴民(1961-),男,博士,研究员,博士生导师,主要研究方向:水土保持、生态水文。E-mail: xmmu@ms.iswc.ac.cn

研究略显不足,不利于以全面评价水土保持工程的作用。本文以地处多沙粗沙区的秃尾河流域为例,依据实测资料,分析了降水、输沙变化趋势以及水沙变化的临界年份,定量计算出不同时段泥沙衰减量以及由于降水的变化和水土保持措施影响导致的减沙量所占比重,从而分离出水土保持措施对输沙量的影响,为水土保持措施扰动下的水文效应评价提供一定的基础。

## 1 研究区概况

秃尾河发源于陕西神木县瑶镇乡宫泊海子<sup>[4]</sup>,自西北向东南流经瑶镇、甘草湾、古今滩、高家堡,在万镇的河口岔村注入黄河,是黄河中游河口镇至龙门区间水土流失最严重的多沙支流之一。干流全长 139.6 km,流域面积 3 295 km<sup>2</sup>,地势总体呈东南低,西北高;流域地处干旱、半干旱地区,属大陆性气候,冬季干冷,夏季炎热,其多年平均降水量 417.4 mm(1956 - 2000 年),区域内植被稀少。流域分为 4 个地貌类型区<sup>[5]</sup>:草滩区,流动风沙区,盖沙区,黄土丘陵区。秃尾河流域较大规模治理始于 20 世纪 70 年代初,至 1996 年底,流域水土保持措施总保存面积占水文站以上流域面积的 35.1%,均是以植被措施为主的治理类型区。流域内资源丰富,经济发展迅速,总人口约 5 万人,人口密度为 45.17 人/km<sup>2</sup>;经济结构以传统农业为主,改革开放以来,煤炭开采业得到了迅猛发展,同时也带动了本区运输、建筑、原材料加工及服务性行业的发展。有在建、规划的 2 片大型工业园区,秃尾河将成为当地发展的重要水源<sup>[6]</sup>。

## 2 资料与方法

### 2.1 资料情况

采用的秃尾河流域 1956 - 2007 年降水、径流、泥沙资料来自于黄河流域水文年鉴;流域面平均降雨量采用甘草湾、高家堡、高家川三站算术平均值<sup>[7]</sup>,其中 1996 - 2007 年面降雨量根据榆林站雨量资料延展得到。高家堡 1967 年设站,其缺少泥沙资料按照高家堡 - 高家川输沙相关线插补展延得到的。降雨和输沙年内变化特征依据 1956 - 1990 年相应序列分析,年际变化分析时选择相应序列为 1956 - 2007 年。高家堡站位于流域的中游,高家川位于流域的下游,是秃尾河流域的把口站。

### 2.2 研究方法

2.2.1 Mann-Kendall 秩相关分析方法 降水及泥沙的变化趋势和突变点分析采用 Mann-Kendall 秩

相关分析方法进行统计分析。该方法是一种非参数统计检验方法,由于其不要求所分析数据服从某一概率分布,同时也不受个别异常值的干扰,能够客观地表征样本序列的整体变化趋势,且其趋势检测能力与参数趋势检测方法相同,因而被广泛应用于气候参数和水文序列的分析中。这一方法的核心是通过统计学方法检验时间序列要素均值变化的确切时间来确定跃变变化的确切时间。

2.2.2 时间序列的对比分析法 对比分析法是依据治理和非治理期集水区的实测资料,分析不同水土流失治理情况下的水文效应,它包括集水区对比分析和时间序列对比分析法。时间序列对比分析法主要以同一流域为研究对象,根据相同水文站实测资料,通过分析实行治理前后水文要素的变化,评价水土保持对流域水沙的影响。应用时间序列对比分析的技术关键是确定治理前后临界年份<sup>[8]</sup>。

## 3 结果与分析

### 3.1 降水特性

3.1.1 降水量年内分配 秃尾河流域降水量年内分配不均,6 - 9 月面平均降水量占年值 76.4%;汛期降水量集中于 7 - 8 月,其多年平均降水量为 213.6 mm,占多年均值的 51.6%,占汛期多年均值的 67.6%。最大月降水量发生在 8 月,最小月降水在 12 月。流域面平均降水量季节分配如图 1 所示。

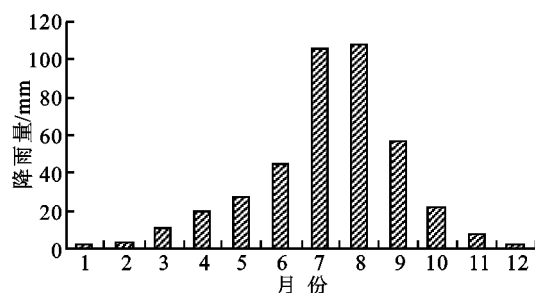


图1 秃尾河流域面平均降雨量季节分配

3.1.2 降水量年际变化 秃尾河流域多年平均降水量 413.9 mm,在 20 世纪 70 年代以前年际变化比较大,最大年降水量 694.7 mm(1958 年),最小年 128.7 mm(1965 年),极值比为 5.4。各年代降水量中,20 世纪 50 年代降水量最大为 536.5 mm,其次是 60 年代为 456.0 mm,之后亦逐渐减小,70,80 年代比较接近,2000 年以后降水又有所增加,如图 2 所示。

采用 Mann-Kendall 秩相关分析方法检验(如图 3),表明:秃尾河流域自 1956 年以来降水量随机变化剧烈,且整体有下降的趋势,但没有达到 0.05 信度的显著性水平。

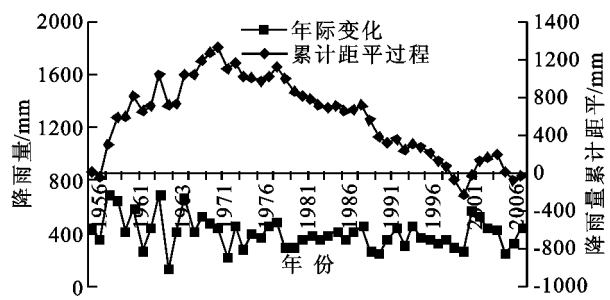


图2 秃尾河流域降雨量累计距平及实测降雨年际变化过程

3.2 泥沙特性分析

3.2.1 输沙量的年内变化 秃尾河年均输沙量 2 380 万 t,年内分配主要集中于汛期(6 - 9 月),尤其是 7 - 8 月(见表 1)。汛期平均输沙量占全年输沙量的 89.7 %,其中 7 - 8 月输沙量占 81.2 %。最

表 1 秃尾河流域主要测站输沙量年内特征

站名	年输沙量/万 t	连续最大 4 个月输沙量/万 t	占年值/ %	最大月输沙量/万 t	占全年百分比/ %	月份	最小月输沙量/万 t	占年值/ %	月份	最大最小月输沙量比
高家川	2380	2136.7	90.0	975.73	41.5	7 月	4.91	0.1	1 月	198.7
高家堡	910	765.7	84.1	56.10	55.6	8 月	0.78	0.1	1 月	648.9

3.2.2 输沙量的年际变化 秃尾河输沙量的年际变化剧烈,把口站多年平均输沙量 1 872.4 万 t,最大年 7 250 万 t(1959 年),最小年 210 万 t(1965 年),极值比达 34。该流域在 20 世纪 50 年代输沙量最大,年均输沙量为 4 061 万 t,到了 60 年代输沙量下降到了 3 115.4 万 t,80 年代减到了最小值 996.5 万 t,在 90 年代初由于降水量的增加,导致输沙量减小幅度减弱,2000 年之后尽管降雨量仍在增加,但输沙量显著减小,查阅相关文献<sup>[4]</sup>,至 1996 年底,秃尾河流域水土保持措施总保存面积已占水文站以上流域面积的 35.1 %,说明水土保持工程发挥了很大的拦沙作用(见图 4)。

计算出高家堡和高家川站的径流变差系数,综合比较径流与输沙的年际变化差异,详见表 2。可

表 2 秃尾河流域各代表站年输沙量变化特征

站名	泥沙均值/ 万 t	泥沙		径流		$C_{v,s}/C_{v,q}$
		$C_{v,s}$	$C_{s,s}/C_{v,s}$	$C_{v,q}$	$C_{s,q}/C_{v,q}$	
高家堡	698.2	1.1	2.5	0.26	2.9	3.7
高家川	1872.4	1.0	2.5	0.28	3.0	3.3
高家堡 - 高家川区间	1174.3	1.0	2.2	0.43	0.7	2.5

3.3 水土保持措施对流域输沙的影响

影响流域泥沙变化的因素主要包括气候条件、流域下垫面条件及人类活动等 3 个方面<sup>[10]</sup>。就同一流域而言,年际间流域面积是相对稳定的,变化的是降雨因素和人类活动。流域降水是地表产沙的动力条件,其时空分布对流域水产沙有直接影响,而水土保持,土地利用等人类活动改变了流域下垫面

大月输沙量(7 月)占全年输沙量的 41.5 %,最小月输沙量(1 月)占全年输沙量的 0.1 %。可以看出秃尾河流域输沙量年内分配极不均匀。这种变化可能受暴雨洪水影响所致,因为输沙量的大小变化与暴雨洪水的关系密切相关,而暴雨洪水大都发生于汛期,所以输沙量的年内分配主要集中于汛期。

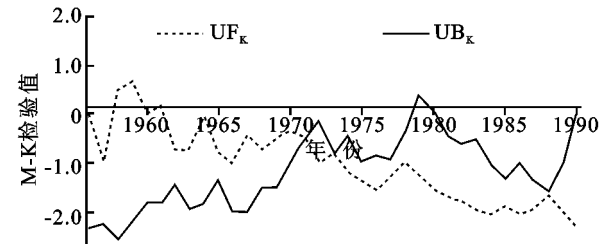


图 3 秃尾河流域降水量趋势变化分析

以看出,各站泥沙的  $C_{v,s}$  值均大于对应径流的  $C_{v,q}$  值,  $C_{v,s}/C_{v,q}$  的比值在 2.5 ~ 3.7 之间变化。即说明秃尾河流域泥沙的年际变化远远大于径流的年际变化。其中泥沙的  $C_{v,s}$  值从上游向下游逐渐减小,各站  $C_{v,s}$  值介于 0.84 ~ 0.95 之间;而径流的  $C_{v,q}$  值则是逐渐增加的。

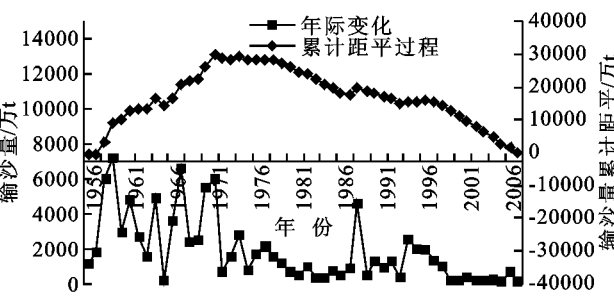


图 4 秃尾河流域输沙量累计距平及输沙年际变化过程

条件,使产汇流机制发生了变化,故人类活动和降雨的变化是导致水沙量变化的根本和直接原因。

秃尾河流域受人类活动影响因素比较单一,流域水土流失治理程度较高,较大规模治理始于 20 世纪 70 年代初,此前可基本视为天然状态。20 世纪 80 年代初秃尾河流域累计治理面积占流域面积的比例达到 10 % 以上。到 1996 年底,秃尾河流域水

水土保持措施总保存面积已占水文站以上流域面积的 35.1%。秃尾河梯田和坝地的面积比例很小,而林草措施面积比例较高,它代表了以植被措施为主的治理类型区。流域内水利工程如水库等<sup>[4-5]</sup>,都是小型水库,相对于林草工程措施面积而言,所占比重不大,因此,本文认为秃尾河流域泥沙变化的主要影响因素为水土保持措施和降水的变化。

3.3.1 流域输沙量变化的临界年份 流域输沙量发生趋势性跃变的临界年份如图 5 所示。分析表明:在 95% 信度水平下,秃尾河流域输沙量在多年变化中呈明显下降趋势,且从 1977 年开始发生突变。临界年份前后平均输沙量分别为 3 170 万 t、1 050 万 t。与前期相比,在面平均降水量减小 15% 的情况下,流域输沙量减小幅度达 66.9%,汛期输沙量减少了 2 024.82 万 t,减小幅度为 69.7%。所以初步认为流域水土流失治理对输沙量的趋势性减少起主要作用。

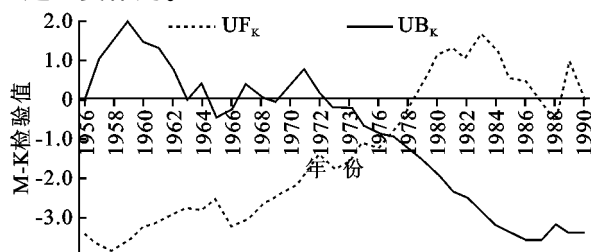


图 5 秃尾河流域多年平均输沙量趋势变化分析

为了更好地量化水土流失治理前后输沙量的变化情况,结合降水-输沙双累积曲线进行分析,见图 6。可以看出,在 1965 年曲线斜率发生较小变化,经分析,高家川站自 1965 年迁站,控制面积由原来 3 295 km<sup>2</sup> 变为 3 250 km<sup>2</sup>,输沙量的微小变化可能与流域面积变化有关;1977 年开始曲线斜率明显减小,这与 20 世纪 70 年代大规模水土流失有密切关系;1989 年曲线斜率有所增加,到 2000 年又开始减小。故将流域水沙变化时段划分为 5 个,即: (1956 - 1964 年)、(1965 - 1976 年)、(1977 - 1988 年)、(1989 - 1999 年)、(2000 - 2007 年)。

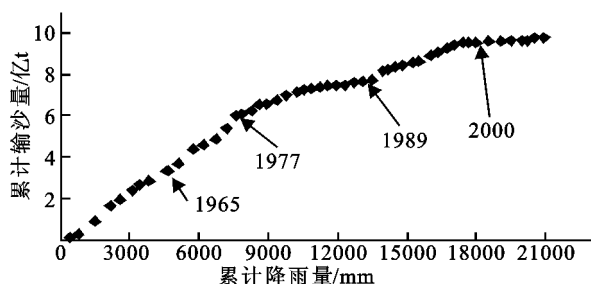


图 6 秃尾河流域降水量-输沙量双累积曲线

3.3.2 水土保持措施对不同时段流域输沙变化的影响 为了消除雨量影响<sup>[13]</sup>,令

$$E = \frac{W_s}{P} \quad (1)$$

式中:  $E$ ——侵蚀率(或产沙系数) (t/mm), 则

$$W_s = E \times P \quad (2)$$

令相邻时段的平均值各为  $W_{s1}$ ,  $W_{s2}$ ,  $P_1$ ,  $P_2$  及  $E_1$ ,  $E_2$ 。对  $W_s = E \times P$  取全微分, 并以差分式表示为

$$W_s = W_{s1} - W_{s2} = \frac{(P_1 + P_2)}{2} \times (E_1 - E_2) + \frac{(E_1 + E_2)}{2} \times (P_1 - P_2) \quad (3)$$

式(3)也可写成  $W_s = \bar{P} E + \bar{E} P$  的形式。

结合降水-输沙累计曲线和式(3), 计算得秃尾河流域输沙量各阶段的变化量(见表 3)。

在治理前期, 即第 (1956 - 1964 年) 至第 (1965 - 1976 年) 阶段, 降雨对输沙衰减量的影响为 775.3 万 t, 水土保持影响为 50.1 万 t, 雨量影响和水土保持影响分别占 93.9%、6.1%, 说明秃尾河流域在 20 世纪 70 年代以前受人类活动影响较弱, 泥沙变化主要是由降水变化引起的; 而在第 (1965 - 1976 年) 至第 (1977 - 1988 年) 阶段, 降雨影响为 68.4 万 t, 水土保持影响高达 1 602.5 万 t, 二者所占比例分别为 4.1%、95.9%。可以看出, 在这一阶段输沙量衰减水土保持措施起了主导作用, 降雨影响明显减弱。

在第 (1977 - 1988 年) 至第 (1989 - 1999 年) 阶段, 降雨影响为 144.2 万 t, 水土保持影响为 161.1 万 t, 由于这一阶段降雨量的增加, 使得二者所占比例分别变为 47.2%、52.8%, 也说明该阶段输沙的少量增加是受降雨影响所致。在第 (1989 - 1999 年) 至第 (2000 - 2007 年) 阶段, 降雨影响为 137.17 万 t, 水土保持影响为 1 073.57 万 t, 二者所占比例分别为 11.3%、88.7%。这一阶段, 尽管降雨量仍在增加, 但水土保持对泥沙影响程度仍占很大比重, 说明秃尾河流域 20 世纪 70 年代输沙衰减的主要驱动力是水土保持措施, 这也肯定了近年来水土流失治理取得的成效。

3.3.3 水土保持措施对流域输沙年内变化的影响

利用中的  $P$  项对临界年份之后的输沙序列修正, 分离出降水对输沙的影响, 以此来反映前后期水土保持措施对流域输沙年内变化的影响, 结果见表 4。分析表明, 水土流失综合治理使月输沙量减少, 但不同月份输沙减少程度差异较大。与前期相比, 7 - 8 月输沙减少幅度为 25.5%, 6 - 9 月输沙减少幅度为 24.4%, 而枯水期(10 月 - 翌年 5 月) 仅为 4.9%。说明水土保持措施对流域 7、8 月份输沙量影响最大, 对其它月份减沙作用不是很显著。

表 3 秃尾河流域不同时段输沙量衰减原因分析

阶段	(1956 - 1964 年)	(1965 - 1976 年)	(1977 - 1988 年)	(1989 - 1999 年)	(2000 - 2007 年)
$W_s$ / 万 t	3688.9	2863.5	1192.7	1209.60	273.20
$P$ / mm	506.0	398.8	385.5	342.00	407.20
$E$ / (万 t ·mm <sup>-1</sup> )	7.3	7.2	3.1	3.54	0.67
$W_s$		825.4	1670.8	- 16.90	936.40
$P$		107.2	13.3	43.50	- 65.20
$E$		0.1	4.1	- 0.44	2.87
$E P$		775.3	68.4	144.22	- 137.17
$P E$		50.1	1602.5	- 161.12	1073.57
$E P + P E$		825.4	1670.8	305.34	1210.75

表 4 修正前后后期流域输沙量年内变化

项目	汛期输 沙量/ 万 t	枯水期 输沙量/ 万 t	7、8 月份 输沙量/ 万 t	年值
前期	2906.2	263.9	2669.4	3170.0
后期	2196.8	250.9	1988.3	2447.0
变幅/ %	24.4	4.9	25.5	22.8

4 结 论

(1) 秃尾河流域面平均降水量趋势性变化不显著,降水年内分配不均。流域输沙年际变化很大,输沙量变差系数为 0.84~0.95,泥沙的年际变化远远大于径流的年际变化。输沙量发生突变的临界年份为 1977 年。

(2) 不同时段水土保持措施对流域输沙变化的影响差异很大。采用降雨-输沙量双累计曲线,定量计算了 5 个时段降水变化和水土流失治理导致的减沙量及其所占比重,结果表明水土保持措施是秃尾河流域 20 世纪 70 年代输沙衰减的主要驱动力。

(3) 水土流失综合治理使月输沙量减少,但不同月份输沙减少程度差异较大。与前期相比,7、8 月份输沙减少幅度为 25.5%,6-9 月输沙减少幅度为 24.4%,而枯水期(10 月-翌年 5 月)仅为 4.9%。说明水土保持措施对流域 7、8 月份输沙量影响最大,对其它月份减沙作用不是很显著。

参考文献:

[1] 穆兴民,王飞,李靖,等.水土保持措施对河川径流影响的评价方法研究进展[J].水土保持通报,2004,24(3):73-78.

[2] 穆兴民,王飞,李锐,等.水土保持是解决黄河水资源问题的根本措施[N].中国水利报,2005-11-5.

[3] 李丽娟,姜德娟,李九一,等.土地利用/覆被变化的水文

效应研究进展[J].自然资源学报,2007,22(2):211-224.

[4] 李占斌,符素华,鲁克新.秃尾河流域暴雨洪水产沙特性的研究[J].水土保持学报,2001,15(2):88-91.

[5] 高亚军,赫晓慧,徐建华.秃尾河流域水沙特性变化分析[J].水资源与水工程学报,2006,17(3):40-41.

[6] 范念念.秃尾河水沙冲淤特征与变化趋势分析[J].西北水电,2008(3):1-3.

[7] 汪丽娜,张晓萍,穆兴民,等.黄土高原粗泥沙集中来源区水沙变化特征及趋势性分析[J].水土保持通报,2008,28(2):190-195.

[8] 穆兴民.黄土高原水土保持对河川径流及土壤水文的影响[D].陕西杨陵:西北农林科技大学,2002.

[9] 叶守泽,詹道江.工程水文学[M].北京:中国水利水电出版社,2007.

[10] 孙长江,孙瑶,王磊.人类活动对柳河水沙影响分析[J].水资源与水工程学报,2007,18(3):99-100.

[11] 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):20-21.

[12] 王飞.人类活动对区域水土流失影响的定量评价[D].陕西杨陵:西北农林科技大学,2004:15-20.

[13] 王小军,蔡焕杰,张鑫,等.皇甫川流域水沙变化特点及趋势分析[J].水土保持研究,2009,16(1):222-225.

[14] 邓贤贵,黄川友.金沙江泥沙输移特性及人类活动影响分析[J].泥沙研究,1997(4):40-41.

[15] 王双银,宋孝玉.水资源评价[M].郑州:黄河水利出版社,2008:53-54.

[16] 何娟娟.延河洪水预报研究及水土保持对洪水的影响分析[D].西安:西安理工大学,2005:65-69.

[17] 穆兴民,李靖,王飞,等.黄河天然径流量年际变化过程分析[J].干旱区资源与环境,2003,17(2):1-4.

[18] 郭文永.基于 Mann-Kendall 检验的生态足迹时间序列趋势性分析[J].云南地理环境研究,2008,20(5):33-34.