

DOI:10.7522/j.issn.1000-0240.2020.0070

HUANG Chenlu, CHEN Junwu, HUANG Weidong, et al. Analysis of water and sediment reducing effects of water conservation measures in the upstream of the Weihe River[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2020, 42(3):965–973. [黄晨璐, 陈军武, 黄维东, 等. 渭河上游水利水保措施的减水减沙效应分析[J]. 冰川冻土, 2020, 42(3):965–973.]

## 渭河上游水利水保措施的减水减沙效应分析

黄晨璐<sup>1</sup>, 陈军武<sup>2</sup>, 黄维东<sup>3,4</sup>, 孙超<sup>3</sup>, 郭西峰<sup>3</sup>

(1. 西北大学, 陕西 西安 710127; 2. 甘肃省水利水电学校, 甘肃 兰州 730050; 3. 甘肃省水文水资源局, 甘肃 兰州 730000; 4. 甘肃农业大学, 甘肃 兰州 730070)

**摘 要:** 依据渭河上游实测水文资料和水利水保措施统计数据, 分析了流域水文要素和水利水保措施的变化规律。根据双累积曲线、有序聚类、Lee-Heghinan、滑动  $T$  检验等方法, 结合流域内水利水保措施的变化, 将研究期分为基准期(1956–1981年)和措施期(1982–2016年)。采用水量平衡法, 分析还原了河流天然径流量和输沙量, 评价了水利工程取用耗水的减水减沙作用; 分别建立拟合了基准期和措施期年径流量、年输沙量与年降水量的相关公式, 分析计算了措施期的减水减沙效应。结果表明: 基准期主要为水利工程减水减沙, 分别减水6.8%, 减沙3.9%; 措施期综合减水效应42.9%, 综合减沙效应76.5%, 水保措施减水减沙效应大于水利工程减水减沙效应, 综合减沙效应大于综合减水效应。

**关键词:** 降水量; 径流量; 输沙量; 水利水保措施; 减水减沙效应; 渭河流域

**中图分类号:** S157.2    **文献标志码:** A    **文章编号:** 1000-0240(2020)03-0965-09

### 0 引言

受气候变化和人类活动的影响, 流域水文要素的循环过程发生了很大变化。特别是随着经济社会的发展, 加大了区域水资源的开发利用和水土保持治理, 对河流径流和泥沙的影响日趋显著<sup>[1]</sup>。20世纪70年代以来, 渭河流域开展了大规模的农田基本建设, 水平梯田、淤地坝等规模大幅增加, 80年代后又大力开展种草种树和小流域治理, 这些水保措施改变了流域下垫面条件, 对流域产汇流和土壤侵蚀条件产生深刻影响。同时, 流域内兴修水库、塘坝、引水等水利工程, 增加了水面蒸发、水量消耗、泥沙淤积, 使水沙的时空分布规律发生重大变化。

水利水保措施的减水减沙作用一直是黄土高原地区研究的科学问题, 王宏等<sup>[2]</sup>采用水保法和水文法分析了1970–1996年渭河流域水土保持措施的年均减水量和减洪水量。冉大川等<sup>[3]</sup>研究了

1997–2006年黄河中游水沙变化对人类活动的响应, 分析计算了渭河等主要支流的减水减沙效应。刘晓燕等<sup>[4]</sup>引入了林草地比例、梯田比和减沙幅度等概念, 揭示了黄土高原近年水沙大幅减少的原因。高鹏等<sup>[5]</sup>量化了无定河流域径流量与输沙量的减少量, 明确了人类活动对无定河径流及输沙量的影响。张守红等<sup>[6]</sup>根据M-K-S检验选取径流和侵蚀产沙序列的突变点, 并研究分析了无定河流域降雨变化与水保措施对径流和产沙量变化的影响。上述文献主要研究了1996年或2006年以前黄河中游水保措施的减水减少效应, 近二三十年来, 区域水保措施又发生了很大变化, 而且之前的研究大都采用实测径流和泥沙数据进行分析。本文选用水资源紧缺、用水矛盾突出、水沙减少趋势显著的渭河上游地区, 基于20世纪50年代以来最新水文资料系列, 对实测径流和泥沙数据进行了还原计算, 结合水利水保措施数据, 分析了水文要素的变化规律, 分别提出了水利工程与水保措施的减水减沙效

收稿日期: 2019-06-01; 修订日期: 2020-04-13

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(41771084); 水利部公益性行业科研专项经费项目(201301083)资助

作者简介: 黄晨璐(1993–), 女, 甘肃榆中人, 2015年在南阳师范学院获学士学位, 现为西北大学在读博士研究生, 从事自然地理与水土保持研究工作. E-mail: 374785751@qq.com

通信作者: 陈军武, 正高级讲师, 从事水利方面的教学与研究工作. E-mail: 869139603@qq.com.

应,揭示了人类活动对流域径流和泥沙的影响规律,可为今后区域水资源管理、流域综合治理、生态环境保护提供重要依据。

## 1 研究区域、数据来源及研究方法

### 1.1 研究区概况

渭河发源于甘肃省渭源县的鸟鼠山,至天水市麦积区东岔乡牛脊村入陕西境内。本次分析主要选取渭河上游甘肃段作为研究区,地理位置介于 $104^{\circ}00' \sim 106^{\circ}43' \text{ E}$ 、 $34^{\circ}12' \sim 35^{\circ}50' \text{ N}$ 之间,东与陕西相连,北与宁夏接壤,境内干流长360 km,

流域面积 $2.6 \times 10^4 \text{ km}^2$ ,占整个渭河流域面积 $13.5 \times 10^4 \text{ km}^2$ 的19.1%。南岸支流水量较丰,北岸支流水量较贫。多年平均径流量大于 $1.0 \times 10^8 \text{ m}^3$ 的支流有榜沙河、大南河、葫芦河、藉河、牛头河共5条。流域多年平均径流量 $17.73 \times 10^8 \text{ m}^3$ ,折合径流深68.7 mm,其中渭河南岸径流深50~200 mm,北岸径流深25~50 mm。上游控制站北道水文站实测多年平均年径流量 $10.71 \times 10^8 \text{ m}^3$ ,年输沙量 $0.85 \times 10^8 \text{ t}$ ,年平均含沙量 $79.4 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ 。流域内设有水文站10处,雨量站68处,水系分布见图1。

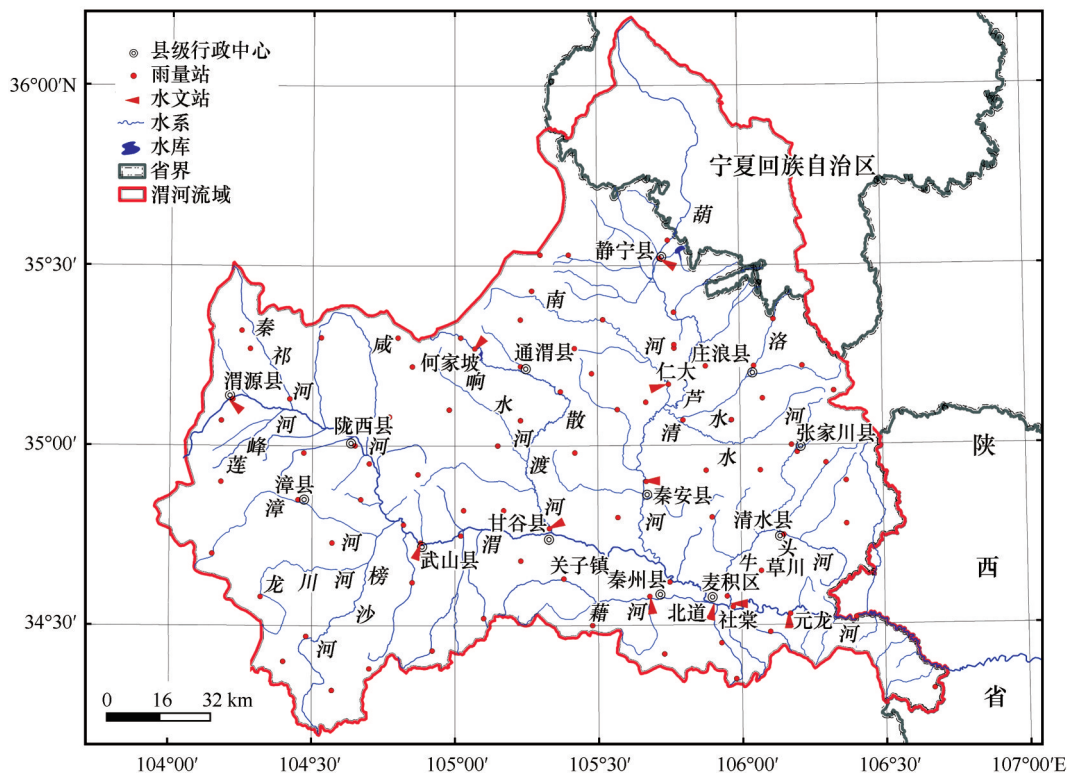


图1 渭河上游水系分布

Fig. 1 The distribution of hydrological observation stations and water systems in the upper Weihe River

流域地形地貌分属西秦岭山地和陇西黄土高原。北岸黄土高原区土体疏松,沟壑发育,植被覆盖率低,暴雨集中,洪水暴涨暴落,水土流失严重,多年平均侵蚀模数最高达 $8\,600 \text{ t} \cdot \text{km}^{-2}$ ,是渭河泥沙的主要来源区;南岸西秦岭山地为土石山区,森林茂盛,雨量充沛,水土流失轻微,河水清澈,年侵蚀模数约 $750 \text{ t} \cdot \text{km}^{-2}$ ,是渭河的主要水源涵养区。渭河北岸及上游区气候较干旱,属温带半干旱区;南岸及下游气候属温带半湿润区,降水量较多,气候温和。流域年降水量400~600 mm,东南部多于西北部;潜在蒸发量较大,在1 270~1 660 mm

之间;年平均气温 $4 \sim 10^{\circ}\text{C}$ ,光照充足,年日照时数2 030~2 420 h;年平均风速 $1.3 \sim 2.9 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ,无霜期138~206 d,适宜农作物生长。干旱、暴雨、山洪、霜冻和冰雹是流域内的主要灾害性天气。

### 1.2 数据来源

本文主要采用渭河流域甘肃境内历年实测水文资料 and 水利水保统计数据进行分析,主要包括:1)渭河流域35处雨量站1956~2016年降水量观测资料;2)流域控制站北道和社棠水文站1956~2016年径流量、输沙量实测资料,第三次甘肃省水资源调查评价成果资料;3)1956~2016年修建水库资料

和水资源开发利用数据;4)1956—2016年渭河流域水土保持措施面积,主要有工程措施(梯田、淤地坝),林草措施(林地、草地、封禁治理),以及2011年水利普查甘肃省水土保持普查成果资料。

以上资料中,降水、径流、泥沙等历年水文资料为水文部门实测并依据国家标准规范整编成果,数据真实可靠,精度较高。历年径流、泥沙资料齐全,对个别雨量站部分缺测资料采用相邻站点资料进行了相关分析和插补延长。水资源开发利用数据采用第三次甘肃省水资源调查评价成果,水利工程规模和水保措施面积为水利部门统计资料,并结合2011年水利普查成果,对个别年份的突出数据,根据前后年的趋势变化进行了修正,资料基本可靠。

### 1.3 研究方法

采用水量平衡法,分析还原了河流天然径流,评价了水利工程取用耗水的减水减沙作用;流域面平均降水量采用泰森多边形法计算;采用双累积曲线法,并结合历年水利工程和水保措施面积的变化情况,对流域径流量、输沙量进行了突变点分析,采用有序聚类、Lee-Heghinan、滑动 $T$ 检验等方法对突变点进行检验,最终将时间序列划分为基准期和措施期;采用相关公式法,估算了水保措施的减水减沙效应<sup>[7-8]</sup>。

#### 1.3.1 水量平衡法

为了使河川径流计算成果能较准确反映天然变化状态,需对水利工程取用而损耗的河川径流量进行还原计算。水量还原平衡计算公式如下:

$$W_{\text{天然}} = W_{\text{实测}} + W_{\text{农业}} + W_{\text{工业}} + W_{\text{生活}} + W_{\text{生态}} \pm W_{\text{蓄水}} \quad (1)$$

式中: $W_{\text{天然}}$ 为天然河川径流量; $W_{\text{实测}}$ 为实测河川径流量; $W_{\text{农业}}$ 为农业灌溉耗损量; $W_{\text{工业}}$ 为工业用水耗损量; $W_{\text{生活}}$ 为城镇生活用水耗损量; $W_{\text{生态}}$ 为城市生态环境用水耗损量; $W_{\text{蓄水}}$ 为水库蓄水变量,增加为正,减少为负;以上变量单位均为 $10^8 \text{ m}^3$ 。

#### 1.3.2 双累积曲线法

双累积曲线法是检验两个变量间关系一致性、分析变量的变化趋势以及判断突变点的常用方法,主要是绘制同一时期内两个变量的连续累积值的关系曲线。在黄河流域的水沙研究中,常根据曲线转折和流域治理进展的实际情况,确定流域的水沙转折点<sup>[9]</sup>。

#### 1.3.3 相关公式法

分析流域水土保持措施的减水减沙效应,通常

分别建立基准期和措施期的径流量与降水量、输沙量与降水量的相关公式,将措施期的降水量分别代入基准期和措施期公式,其对应的差值即为水保措施的减水减沙量,再除以基准期公式计算出的天然值,即可得到水保措施的减水减沙效应。在选取降水量作为自变量时,分别考虑年降水量、汛期降水量、24 h最大降水量等因子,经对比分析,渭河流域选用年降水量与径流量、输沙量建立的关系最好。基准期的径流量与降水量、输沙量与降水量相关公式如下:

$$W = f_1(P) \quad (2)$$

$$Ws = f_2(P) \quad (3)$$

式中: $W$ 为年径流量,单位 $10^8 \text{ m}^3$ ;  $Ws$ 为年输沙量,单位 $10^8 \text{ t}$ ;  $P$ 为年降水量,单位 $\text{mm}$ 。

## 2 水文要素年际变化过程

采用第三次甘肃省水资源调查评价成果中渭河甘肃境内面降水量、径流量、输沙量系列资料,其中径流量、输沙量为水量沙量还原后的天然值,分年代水文要素特征值和历年变化过程线分别见表1和图2。1956—2016年流域面平均年降水量为512 mm,年径流量为 $17.73 \times 10^8 \text{ m}^3$ ,年输沙量为 $1.07 \times 10^8 \text{ t}$ 。其中,年降水量在20世纪60年代为丰水,70年代和80年代偏丰,90年代为枯水,2000年以后持平;年径流量的丰枯变化基本与降水量一致,但总体呈减少趋势;年输沙量持续减少。年降水量变化相对较小,变差系数 $C_v$ 值在0.04~0.17之间;年径流量变化较大, $C_v$ 值在0.18~0.55之间;年输沙量变化最大, $C_v$ 值在0.29~0.94之间<sup>[10-11]</sup>。

## 3 现有水利工程与水保措施

### 3.1 水利工程

截止2016年,流域内已建成水库34座,其中Ⅲ型2座,Ⅳ型22座,Ⅴ型10座。控制流域面积 $1.67 \times 10^4 \text{ km}^2$ ,总库容 $1.84 \times 10^8 \text{ m}^3$ ,设计年供水量 $0.65 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。各水利工程总供水量 $4.03 \times 10^8 \text{ m}^3$ ,其中蓄水量 $0.44 \times 10^8 \text{ m}^3$ ,引水量 $2.44 \times 10^8 \text{ m}^3$ ,提水量 $1.16 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。已建成引水式水电站10座,总装机容量7 980 kW。流域内已建成水库累计库容和水电站累计装机容量变化情况见图3,水库修建主要在20世纪70年代,水电站在2007—2013年期间增加迅速。



表1 不同年代水文要素特征值

Table 1 Characteristic values of hydrological elements in different decades

系列	面平均降水量		径流量		输沙量	
	平均/mm	变差系数 $C_v$	平均/( $10^8\text{ m}^3$ )	变差系数 $C_v$	平均/( $10^8\text{ t}$ )	变差系数 $C_v$
多年平均	512.2	0.14	17.73	0.46	1.07	0.84
1956 – 1959 年	508.6	0.04	18.93	0.18	1.72	0.56
1960 – 1969 年	538.5	0.12	25.90	0.38	1.71	0.35
1970 – 1979 年	520.5	0.10	19.18	0.38	1.58	0.75
1980 – 1989 年	521.8	0.14	20.06	0.30	1.10	0.34
1990 – 1999 年	476.2	0.16	13.11	0.55	0.74	0.65
2000 – 2009 年	510.0	0.17	12.19	0.38	0.41	0.29
2010 – 2016 年	506.1	0.15	14.51	0.46	0.42	0.94

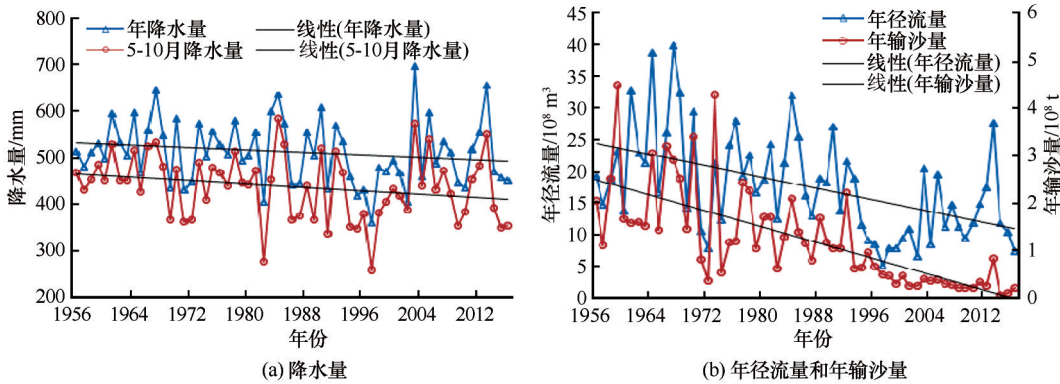


图2 主要水文要素历年变化过程

Fig. 2 Annual variations of precipitation (a) and runoff, sediment runoff (b)

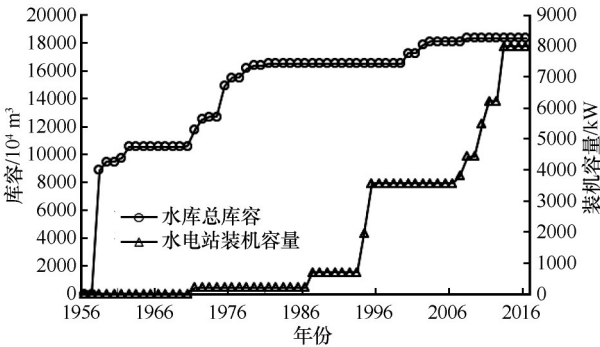


图3 流域内已建成水库库容和水电站装机容量变化情况  
Fig. 3 Variations of built reservoirs capacity and hydropower stations in the basin

3.2 水保措施

渭河上游水土保持措施面积变化如图4。20世纪50年代到70年代,流域内水土保持措施面积很小,从70年代末80年代初开始,通过大力开展农田基本建设,兴修水平梯田,种树种草,实施封禁治理,修建淤地坝等措施,水土流失面积得到有效控制。截止2016年底,流域内梯田面积增加到 $679\times10^3\text{ hm}^2$ ,林地面积增加到 $493\times10^3\text{ hm}^2$ ,草地面积增加到

$120\times10^3\text{ hm}^2$ ,封禁治理面积增加到 $111\times10^3\text{ hm}^2$ ,淤地坝控制面积增加到 $106\times10^3\text{ hm}^2$ 。

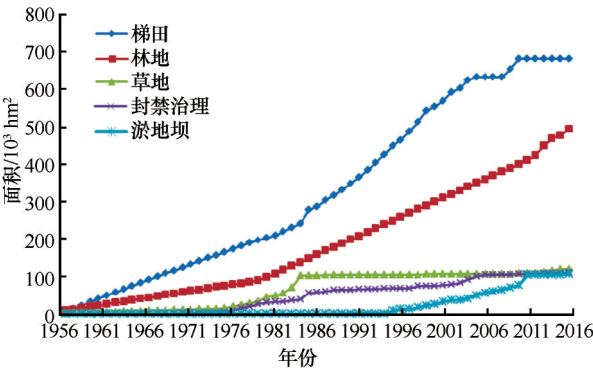


图4 渭河上游水土保持措施面积历年变化过程

Fig. 4 Annual variations of terrace area, forestland area, grassland area, closed control area and check dam for farmland forming in the upper Weihe River

4 突变年份分析

分别点绘流域年径流量 $W$ 、年输沙量 $W_s$ 与年降水量 $P$ 的累积值相关曲线,见图5,可见年径流量、年输沙量在1981年后发生了明显转折。采用

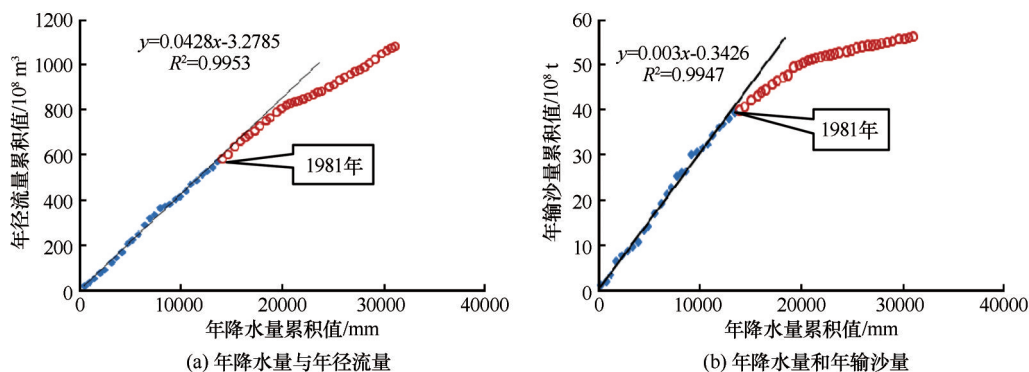


图5 年径流量、年输沙量与年降水量累积值相关曲线

Fig. 5 Correlation curves between accumulative annual runoff and accumulative annual precipitation (a) and between accumulative annual sediment transport and accumulative annual precipitation (b)

有序聚类法、Lee-Heghinan法、滑动  $T$  检验法等方法对年径流量、年输沙量进行突变分析检验,结果表明,流域径流量、输沙量均发生显著突变,突变点为1981年、1992年。综合以上方法结果,结合流域内水利水保措施变化主要在20世纪70年代末80年代初以后,最后确定径流量、输沙量突变点为1981年,据此,可将径流量、输沙量系列划分为基准期1956–1981年和措施期1982–2016年。措施期与基准期相比较,年径流量由  $21.90 \times 10^8 \text{ m}^3$  减小到  $14.64 \times 10^8 \text{ m}^3$ , 减少了33.2%;年输沙量由  $1.53 \times 10^8 \text{ t}$  减小到  $0.49 \times 10^8 \text{ t}$ , 减少了68.0%。

## 5 水利水保措施的减水减沙效应

### 5.1 水利工程取用耗水减水减沙作用

本次分析采用的天然径流量根据式(1)计算,区域工农业生产、生活、生态等水利工程取用耗水调查还原值及天然径流量计算见表2,可见渭河上游农业灌溉用水占比较大,其次为生活用水,工业和生态环境用水很少。1956–2016年耗水量  $1.97 \times 10^8 \text{ m}^3 \cdot \text{a}^{-1}$ , 占天然径流量的11.1%,其中基准期1956–1981年耗水量较少,为  $1.49 \times 10^8 \text{ m}^3 \cdot \text{a}^{-1}$ , 占

天然径流量的6.8%,措施期1982–2016年耗水量增加为  $2.33 \times 10^8 \text{ m}^3 \cdot \text{a}^{-1}$ , 占天然径流量的15.9%。在年代变化上,水利工程取用耗水一直在持续增加。

天然输沙量包括实测值和水利工程取用耗水减沙量,一般认为,将河道水量引至河道外使用的同时,也将一部分泥沙引至河道外,致使河道泥沙量减少。由于各引水口的泥沙监测资料较少,减少泥沙的比例较难确定,本次分析参考文献[3]关于黄河中游各支流水沙变化对人类活动的响应研究成果,其中渭河北道以上水利工程1997–2006年减少水量  $2.25 \times 10^8 \text{ m}^3 \cdot \text{a}^{-1}$ , 减少输沙量  $0.09 \times 10^8 \text{ t} \cdot \text{a}^{-1}$ , 减沙与减水的比例为  $0.04 \text{ t} \cdot \text{m}^{-3}$ , 据此比例推算还原渭河上游天然输沙量。经分析计算,1956–2016年水利工程取水减少泥沙  $0.08 \times 10^8 \text{ t} \cdot \text{a}^{-1}$ , 占天然输沙量的8.5%,其中基准期1956–1981年减少沙量  $0.06 \times 10^8 \text{ t} \cdot \text{a}^{-1}$ , 占天然输沙量的3.9%,措施期1982–2016年减少沙量  $0.09 \times 10^8 \text{ t} \cdot \text{a}^{-1}$ , 占天然输沙量的19.2%。在年代变化上,水利工程取用耗水减少泥沙占天然输沙量的比例在持续增加。水利工程取用耗水减水减沙作用分析见表3。

表2 径流还原计算表(单位:  $10^8 \text{ m}^3$ )Table 2 The reduced runoff and original runoff within the three periods (unit:  $10^8 \text{ m}^3$ )

时段	还原量						实测径流量 $W_{\text{实测}}$	天然径流量 $W_{\text{天然}}$
	$W_{\text{农业}}$	$W_{\text{工业}}$	$W_{\text{生活}}$	$W_{\text{生态}}$	$W_{\text{蓄水}}$	小计		
1956–1981年	1.36	0.02	0.10	0.01	0	1.49	20.41	21.90
1982–2016年	1.99	0.03	0.29	0.02	0	2.33	12.31	14.64
1956–2016年	1.72	0.03	0.21	0.02	0	1.97	15.76	17.73

### 5.2 水土保持措施减水减沙效应

再无其他人类活动影响的情况下,经过水量还

原后的天然径流量和输沙量与降水量的关系应该为较好的正相关关系,但从径流量和输沙量与降水

表3 水利工程取用耗水减水减沙作用分析

时段		径流量				输沙量			
		实测值/ (10 <sup>8</sup> m <sup>3</sup> )	还原量/ (10 <sup>8</sup> m <sup>3</sup> )	天然值/ (10 <sup>8</sup> m <sup>3</sup> )	还原量占 天然值/%	实测值/ (10 <sup>8</sup> t)	水利工程减 沙/(10 <sup>8</sup> t)	天然值/ (10 <sup>8</sup> t)	水利工程减沙 占天然值/%
按转折点分	1956—1981年	20.41	1.49	21.90	6.8	1.47	0.06	1.53	3.9
	1982—2016年	12.31	2.33	14.64	15.9	0.39	0.09	0.49	19.2
按年代分	1956—1959年	18.19	0.74	18.93	3.9	1.64	0.03	1.67	1.8
	1960—1969年	24.84	1.06	25.90	4.1	1.59	0.04	1.63	2.6
	1970—1979年	17.10	2.08	19.18	10.8	1.35	0.08	1.44	5.8
	1980—1989年	17.80	2.26	20.06	11.3	0.85	0.09	0.94	9.6
	1990—1999年	10.75	2.36	13.11	18.0	0.48	0.09	0.57	16.5
	2000—2009年	9.88	2.31	12.19	18.9	0.16	0.09	0.25	37.0
	2010—2016年	12.10	2.41	14.51	16.6	0.15	0.10	0.24	39.7
	1956—2016年	15.76	1.97	17.73	11.1	0.85	0.08	0.93	8.5

量的累积值关系看,径流量和输沙量在转折点后还在持续减少(图5),正是流域水土保持措施的实施,改变了产水产沙的下垫面条件,将大量的雨水拦蓄、蒸发消耗,使泥沙拦截、淤积。

根据基准期1956—1981年的年降水量、径流量、输沙量数据拟合式(2)和式(3),结果见图6。将各年代的年降水量分别代入拟合公式,分别计算得到基准期和措施期下垫面条件的径流量、输沙量,对照分析得到水保措施的减水减沙

效应见表4。措施期的1982—2016年,水保措施减水 $5.32\times10^8\text{ m}^3$ ,减沙 $0.78\times10^8\text{ t}$ ,减水与减沙效应分别为27.0%、57.3%,减沙效应是减水效应的2倍多。从年代分析看,20世纪90年代减水减沙相对较小,分别为22.7%、52.5%,其它时段基本稳定,减水在27.2%~28.9%之间,减沙在57.6%~59.5%之间,主要是90年代为枯水段,也反映出,流域来水越多,减水减沙的效果越明显<sup>[12-13]</sup>。

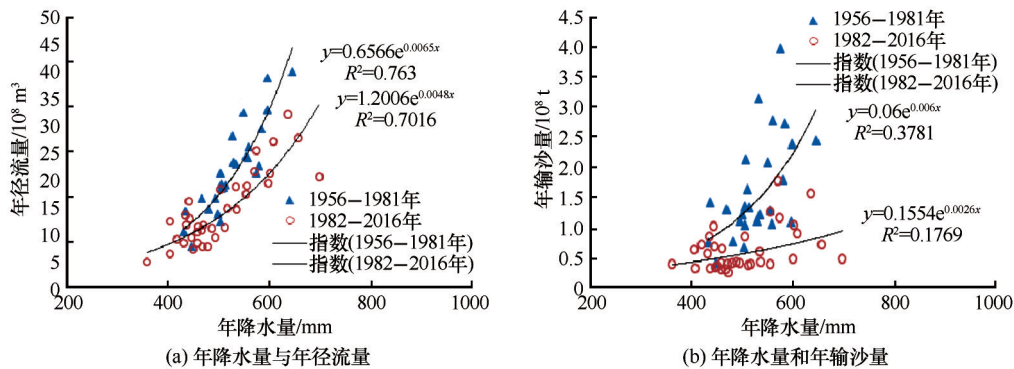


图6 年径流量、年输沙量与年降水量相关曲线

Fig. 6 Correlation curves between annual runoff and annual precipitation (a) and between annual sediment transport and annual precipitation (b)

5.3 减水减沙综合效应分析

将水利工程取用耗水与水保措施减少的径流量和输沙量分别加起来,得到不同时段水利水保措施的减水减沙综合效应,见表5。水保措施前的1956—1981年,主要为水利工程减水减沙,分别减水6.8%,减沙3.9%。水保措施后的1982—2016年,减水综合效应42.9%,其中水利工程减水15.9%,水

保措施减水27.0%;减沙综合效应76.5%,其中水利工程减沙19.2%,水保措施减沙57.3%,可见,水保措施减水减沙效应大于水利工程耗水减水减沙效应,减沙综合效应大于减水综合效应。从年代变化看,除2010—2016年减水效应有所减小外,其他时段减水减沙综合效应持续在增大,可见随着人类活动的加剧,渭河上游区域河川径流和泥沙在不断减少。

表4 水保措施减水减沙效应分析表

Table 4 Runoff and sediment runoff in the five periods

时段	年径流量			年输沙量		
	基准期公式计算值/ (10 <sup>8</sup> m <sup>3</sup> )	措施期公式计算值/ (10 <sup>8</sup> m <sup>3</sup> )	减水效应/%	基准期公式计算值/ (10 <sup>8</sup> t)	措施期公式计算值/ (10 <sup>8</sup> t)	减沙效应/%
1982－1989年	21.86	15.61	28.6	1.51	0.61	59.5
1990－1999年	16.23	12.54	22.7	1.15	0.55	52.5
2000－2009年	21.22	15.10	28.9	1.47	0.60	59.1
2010－2016年	20.01	14.57	27.2	1.39	0.59	57.6
1982－2016年	19.70	14.38	27.0	1.37	0.59	57.3

表5 减水减沙综合效应分析表

Table 5 Comprehensive effect analyses of water and sediment reducing

时段	减水效应/%			减沙效应/%		
	水利工程减水效应	水保减水效应	综合效应	水利工程减沙效应	水保减沙效应	综合效应
按转折点分	1956－1981年	6.8	6.8	3.9		3.9
	1982－2016年	15.9	27.0	42.9	19.2	57.3
按年代分	1956－1959年	3.9	3.9	1.8		1.8
	1960－1969年	4.1	4.1	2.6		2.6
	1970－1979年	10.8	10.8	5.8		5.8
	1980－1989年	11.3	28.6	39.9	9.6	59.5
	1990－1999年	18.0	22.7	40.7	16.5	52.5
	2000－2009年	18.9	28.9	47.8	37.0	59.1
	2010－2016年	16.6	27.2	43.8	39.7	57.6
	1956－2016年	11.1		8.5		8.5

冉大川等<sup>[14]</sup>对黄河中游水沙变化的研究表明,渭河流域 1997－2006 年减少径流 43.5%,介于本次分析的 20 世纪 90 年代 40.7% 和 21 世纪 00 年代的 47.8% 之间;减少泥沙 73.5%,介于本次分析的 20 世纪 90 年代 69.0% 和 21 世纪 00 年代的 96.1% 之间。根据《甘肃省河流泥沙公报》2014 年、2015 年、2016 年三年数据,渭河上游控制站北道水文站实测年径流量比多年平均减少了 67%、36%、44%,实测年输沙量比多年平均减少了 89%、94%、97%,与本次分析的 2010－2016 年综合减水效应 43.8%、减沙效应 97.3% 基本接近,说明结果可靠。

## 6 结论

受气候变化和水利水保措施等人类活动的影响,渭河上游的水沙大量减少,应用流域内较为完善的水文资料,结合水利工程和水土保持数据,定量定性分析水利水保措施的减水减沙效应,主要得出如下结论:

(1) 1956－2016 年期间,渭河上游多年平均降水量 512 mm,年径流量  $17.73\times10^8\text{ m}^3$ ,年输沙量

$1.07\times10^8\text{ t}$ ;年降水量变化相对较小,年径流量和年输沙量持续减少,确定 1981 年为年径流量和输沙量的突变点年份,措施期 1982－2016 年与基准期 1956－1981 年相比较,年径流量由  $21.90\times10^8\text{ m}^3$  减小到  $14.64\times10^8\text{ m}^3$ ,减少了 33.2%,年输沙量由  $1.53\times10^8\text{ t}$  减小到  $0.49\times10^8\text{ t}$ ,减少了 68.0%。

(2) 1956－2016 年渭河上游工农业生产、生活、生态等耗水量  $1.97\times10^8\text{ m}^3\cdot\text{a}^{-1}$ ,占天然径流量的 11.1%,其中基准期 1956－1981 年耗水量较少,为  $1.49\times10^8\text{ m}^3\cdot\text{a}^{-1}$ ,占天然径流量的 6.8%,措施期 1982－2016 年耗水量增加为  $2.33\times10^8\text{ m}^3\cdot\text{a}^{-1}$ ,占天然径流量的 15.9%。在年代变化上,水利工程取用耗水一直在持续增加。

(3) 1956－2016 年渭河上游工农业生产、生活、生态等取水减少泥沙  $0.08\times10^8\text{ t}\cdot\text{a}^{-1}$ ,占天然输沙量的 8.5%,其中基准期 1956－1981 年减少沙量  $0.06\times10^8\text{ t}\cdot\text{a}^{-1}$ ,占天然输沙量的 3.9%,措施期 1982－2016 年减少沙量  $0.09\times10^8\text{ t}\cdot\text{a}^{-1}$ ,占天然输沙量的 19.2%。

(4) 1982－2016 年渭河上游水保措施减水



5.32×10<sup>8</sup> m<sup>3</sup>, 减沙 0.78×10<sup>8</sup> t, 减水与减沙效应分别为 27.0%、57.3%, 减沙效应是减水效应的 2 倍多。水保措施前的 1956–1981 年, 主要为水利工程减水减沙, 水保措施后的 1982–2016 年, 主要为水利工程和水保措施综合减水减沙, 减水综合效应 42.9%, 减沙综合效应 76.5%, 减沙效应大于减水效应。

(5) 与以往研究成果相比, 本文考虑了渭河上游水利工程取水对径流和泥沙的影响, 在对 20 世纪 50 年代以来实测径流和泥沙数据进行还原计算的基础上, 采用天然径流和泥沙数据, 分析了水保措施的减水减沙效应, 结果更为符合流域实际。今后需要在流域气候变化和人类活动的减水减沙贡献率及不同水保措施的优化布局方面做进一步的分析研究。

#### 参考文献(References):

- [1] Yan Qinghong, Yuan Cuiping, Lei Tingwu, et al. Effects of precipitation and erosion control practices on the rainfall-runoff-sediment delivery relationships of typical watersheds in the hilly-gully region on the Loess Plateau[J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2013, 11(4): 9–16. [晏清洪, 原翠萍, 雷廷武, 等. 降水和水土保持对黄土区流域水沙关系的影响[J]. *中国水土保持科学*, 2013, 11(4): 9–16.]
- [2] Wang Hong, Qin Baishun, Ma Yong, et al. Analysis of water and sediment reduction effect of soil and water conservation measures in Weihe River basin[J]. *Yellow River*, 2001(2): 18–20. [王宏, 秦百顺, 马勇, 等. 渭河流域水土保持措施减水减沙作用分析[J]. *人民黄河*, 2001(2): 18–20.]
- [3] Ran Dachuan, Zuo Zhongguo, Wu Yonghong, et al. Responses of recent water and sediment changes in the middle Yellow River to human activities[M]. Beijing: Science Press, 2012: 71–98. [冉大川, 左仲国, 吴永红, 等. 黄河中游近期水沙变化对人类活动的响应[M]. 北京: 科学出版社, 2012: 71–98.]
- [4] Liu Xiaoyan, Wang Fugui, Yang Shengtian, et al. Sediment reduction effect of level terrace in the hilly-gully region in the Loess Plateau[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2014, 45(7): 793–800. [刘晓燕, 王富贵, 杨胜天, 等. 黄土丘陵沟壑区水平梯田减沙作用研究[J]. *水利学报*, 2014, 45(7): 793–800.]
- [5] Gao Peng, Mu Xingmin, Li Rui, et al. Analyses on trend and driving force of runoff and sediment load in the Wuding River[J]. *Journal of Sediment Research*, 2009(5): 22–28. [高鹏, 穆兴民, 李锐, 等. 黄河支流无定河水沙变化趋势及其驱动因素[J]. *泥沙研究*, 2009(5): 22–28.]
- [6] Zhang Shouhong, Liu Suxia, Mo Xingguo, et al. Impacts of precipitation variation and soil and water conservation measures on runoff and sediment yield in the Wuding River basin[J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2010, 32(4): 161–168. [张守红, 刘苏峡, 莫兴国, 等. 降雨和水保措施对无定河流域径流和产沙量影响[J]. *北京林业大学学报*, 2010, 32(4): 161–168.]
- [7] Li Jisheng, Hu Xinglin, Huang Weidong, et al. Variation and trend prediction of the mountain runoffs of the trunk streams of the Shule River basin, Hexi Corridor[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2015, 37(3): 803–810. [李计生, 胡兴林, 黄维东, 等. 河西走廊疏勒河流域出山径流变化规律及趋势预测[J]. *冰川冻土*, 2015, 37(3): 803–810.]
- [8] Zhao Yang, Yu Xinxiao. Effects of climate variation and land use change on runoff-sediment yield in typical watershed of loess hilly-gully region[J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2013, 35(3): 39–45. [赵阳, 余新晓. 黄土丘陵沟壑区典型流域气候和土地利用变化对径流泥沙产量的影响[J]. *北京林业大学学报*, 2013, 35(3): 39–45.]
- [9] Huang Chenlu, Yang Qinke, Huang Weidong, et al. Hydrological Response to Precipitation and Human Activities: A Case Study in the Zuli River Basin, China[J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2018, 15(12): 1–18.
- [10] Wang Huan, Li Dongliang, Jiang Yuanchun. Characteristics and reasons of the runoff variation in source regions of the Yellow River during 1956–2012[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2014, 36(2): 403–412. [王欢, 李栋梁, 蒋元春. 1956–2012 年黄河源区流量演变的新特征及其成因[J]. *冰川冻土*, 2014, 36(2): 403–412.]
- [11] Sun Yue, Li Dongliang. Features and response to climate-driven factors of the runoff in the upper reaches of the Weihe River during 1975–2011[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2014, 36(2): 413–423. [孙悦, 李栋梁. 1975–2011 年渭河上游径流演变规律及对气候驱动因子的响应[J]. *冰川冻土*, 2014, 36(2): 413–423.]
- [12] Wang Shijun. Study on variation and regularity of water and sediment characteristics in the upper reaches of Weihe River[J]. *Water Resources Planning and Design*, 2013(9): 8–10. [王世钧. 渭河上游水沙特性变化及其规律研究[J]. *水利规划与设计*, 2013(9): 8–10.]
- [13] Shi Guangyu, Zhao Hong. The Yellow River silt erosion in ShaanXi change analysis[J]. *Journal of China Hydrology*, 2006, 26(2): 91–94. [师光玉, 赵红. 陕西省黄河流域泥沙流失变化分析[J]. *水文*, 2006, 26(2): 91–94.]
- [14] Ran Dachuan. Water and sediment variation and ecological protection measures in the middle reach of the Yellow River[J]. *Resources Science*, 2006, 28(1): 93–100. [冉大川. 黄河中游水土保持措施的减水减沙作用研究[J]. *资源科学*, 2006, 28(1): 93–100.]



## Analysis of water and sediment reducing effects of water conservation measures in the upstream of the Weihe River

HUANG Chenlu<sup>1</sup>, CHEN Junwu<sup>2</sup>, HUANG Weidong<sup>3,4</sup>, SUN Chao<sup>3</sup>, GUO Xifeng<sup>3</sup>

(1. Northwest University, Xi'an 710127, China; 2. Gansu Province Water Conservancy and Hydropower School, Lanzhou 730050,

China; 3. Hydrology and Water Resources Bureau of Gansu Province, Lanzhou 730000, China;

4. Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, China)

**Abstract:** Based on the measured hydrological data and the statistical data of water conservancy and water conservation measures in the upper reaches of the Weihe River, the variations of hydrological factors and water conservancy and water conservation measures in the basin are analyzed. According to the double cumulative curve, ordered clustering, Lee-Heghinan, sliding  $T$  test and other methods, the study period was divided into base period (1956 – 1981) and measure period (1982 – 2016) according to the changes of water conservancy and water conservation measures in the basin. By using the water balance method, the runoff and sediment runoff of rivers are analyzed and restored, and water and sediment reducing effects of taking water on water conservancy project are evaluated. The correlation formulas of annual runoff, annual sediment runoff and annual precipitation in the base period and the measure period are established, respectively, and the effect of water and sediment reducing in the measure period is analyzed and calculated. The basic period is mainly water and sediment reducing for water conservancy projects, water and sediment are reduced by 6.8% and 3.9%, respectively; for the measure period the comprehensive water reducing effects are 42.9%, and the comprehensive sediment reducing effects are 76.5%, the water-reducing and sediment-reducing effects of water conservation measures is larger than that of water conservancy projects, and the comprehensive sediment-reducing effect is much larger than the comprehensive water-reducing effect. Analyzing and studying the influence of human activities on runoff and sediment in the river basins can provide important basis for future regional water resources management, comprehensive river basin management and ecological environment protection.

**Key words:** precipitation; runoff; sediment runoff; water conservation measures; water and sediment reducing effects; Weihe River basin

(责任编辑：周成林；编辑：周成林)