

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2024.04.037.

胡作龙, 高鹏, 李双江, 等. 渭河径流输沙变化及其对降水和人类活动的响应[J]. 水土保持研究, 2024, 31(4): 28-33.

Hu Zuolong, Gao Peng, Li Shuangjiang, et al. Changes of Runoff and Sediment Load and Its Response to Precipitation and Human Activities in the Weihe River Basin[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2024, 31(4): 28-33.

渭河径流输沙变化及其对降水和人类活动的响应

胡作龙¹, 高鹏², 李双江¹, 穆兴民²

(1. 河南水环境勘测设计有限公司, 河南 三门峡 472000; 2. 西北农林科技大学 水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100)

摘要: [目的] 探究渭河径流量与输沙量的变化特征及其驱动因素, 为渭河流域水资源管理和生态环境建设提供科学依据。[方法] 利用渭河流域降水量数据以及华县和状头两个控制水文站 1957—2019 年实测径流量及输沙量资料, 采用现代数理统计方法, 分析渭河流域年降水量、径流量和输沙量的变化趋势, 检测水文要素的突变年份, 计算了渭河径流量和输沙量变化的驱动因素贡献率, 最后探讨了人类活动对渭河径流、输沙变化的主要影响因素。[结果] 渭河 1957—2019 年径流量和输沙量都呈现出极显著的减少趋势 ($p < 0.01$); 年降水量随机波动, 没有明显的变化趋势。年径流量在 1990 年发生突变 ($p < 0.01$), 年输沙量在 1996 年发生突变 ($p < 0.01$)。降水因素对渭河流域径流量减少贡献率为 19%, 对输沙量减少贡献率为 17%; 人类活动对径流量减少的贡献率为 81%, 对输沙量减少的贡献率为 83%。[结论] 人类活动在渭河径流和输沙的变化过程中具有决定性的影响, 是导致渭河径流、输沙减少的主要原因。

关键词: 径流; 输沙量; 人类活动; 渭河

中图分类号: P333.5

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2024)04-0028-06

Changes of Runoff and Sediment Load and Its Response to Precipitation and Human Activities in the Weihe River Basin

Hu Zuolong¹, Gao Peng², Li Shuangjiang¹, Mu Xingmin²

(1. Henan Water Environment Survey and Design Co., Ltd., Sanmenxia, Henan 472000, China;

2. Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: [Objective] The aims of this study are to explore the change characteristics and driving factors of runoff and sediment load in the Weihe River Basin, and to provide scientific basis for water resource management and ecological environment construction in the Weihe River Basin. [Methods] Based on the measured precipitation, runoff and sediment load data of Huaxian and Zhuangtou hydrological stations in the Weihe River Basin from 1957 to 2019, the trend and the change-point year of annual precipitation, runoff and sediment load were analyzed by modern mathematical statistical. The contribution rates of runoff and sediment load reduction in Weihe River Basin were calculated. The main influencing factors of human activities on runoff and sediment load changes in the Weihe River were discussed. [Results] There was a strong decreasing trend in runoff and sediment load of Weihe River Basin from 1957 to 2019 ($p < 0.01$), and the annual precipitation fluctuated randomly and had no obvious change trend. Abrupt year analyses showed that more rapid declines for runoff began in 1990 ($p < 0.01$), and sediment load began in 1996 ($p < 0.01$). The contribution rates of precipitation to the reduction of runoff and sediment load were 19% and 17%, respectively. The contribution rates of runoff and sediment load reduction caused by human activities were 81% and 83%, respectively. [Conclusion] Human activities are the main reason for the significant reduction of runoff and sediment load in the Weihe River Basin.

收稿日期: 2023-04-23

修回日期: 2023-09-18

资助项目: 国家自然科学基金(U2243211, 42277354)

第一作者: 胡作龙(1975—), 男, 甘肃泾川人, 学士, 高级工程师, 主要从事水利工程规划设计工作。E-mail: 531565936@qq.com

通信作者: 高鹏(1976—), 男, 陕西扶风人, 博士, 研究员, 主要从事水土保持和流域生态水文研究。E-mail: gaopeng@ms.iswc.ac.cn

<http://stbcj.paperonce.org>

Keywords: runoff; sediment load; human activity; Weihe River

河流是地球上物质输送和水循环的重要路径^[1],河流水沙为流域土壤侵蚀和河道泥沙输移提供了重要信息^[2]。在全球气候变化不断加剧的今天,深入探究河流水文演变规律及其对气候和人类活动的响应具有重要的科学和现实意义^[3]。渭河作为陕西的母亲河和黄河最大的支流,其径流、输沙变化研究引起了社会广泛关注。胡安焱等^[4]分析了1950—2000年渭河流域径流输沙的变化过程及其对降水和人类活动的响应,研究结果显示2003年以后渭河流域会迎来一个10 a左右的丰水期,输沙量也将持续增长。王宏等^[5]利用“水保法”和“水文法”分别计算分析了渭河流域1996年以前水保措施对径流输沙的变化贡献率。魏红义等^[6]的研究结果显示,气候因素和人类活动对渭河水量的影响基本相同。这些研究很少对基准期的划分进行详细的研究,一般只是认为从20世纪70年代开始进行较大规模的水土保持工作,进而主观推断1970年之前的渭河流域为人类活动影响较少的天然状态,但这种划分缺乏一定的科学判定依据。其次,相关研究可能也高估了气候因素对渭河水沙的影响。另外相关研究大多针对渭河流域2000年以前的水文时间序列数据,而对于退耕还林等大规模生态环境建设后的流域水沙研究较少,缺乏新时期渭河流域径流和输沙的最新情势。本研究从水文时序的统计学分析入手,分析渭河流域1957—2019年的降水及水沙变化趋势,精确判定渭河水沙变化基准期,量化计算渭河径流、输沙变化驱动因素的贡献率,探讨渭河水沙减少的人类活动驱动因素。本研究可为渭河流域生态环境恢复和高质量发展提供科学依据。

1 材料和方法

1.1 流域概况

渭河是陕西的母亲河,也是黄河最大的一级支流,发源于甘肃省定西市渭源县的鸟鼠山。渭河自西向东流经甘肃省后,进入陕西,横贯关中地区,至渭南市潼关县汇流入黄河干流。渭河位于中国黄土高原的东南部,经纬度范围为北纬104°00′—110°20′,东经33°50′—37°18′。渭河干流长度为818 km,流域面积包括泾河、北洛河为13.48万km²。渭河水系呈扇形分布,南岸支流数量众多,但流域面积较小;比较大的支流如北洛河、泾河等都位于北岸。

1.2 数据

本研究选择渭河干流华县水文观测站以及支流

北洛河状头水文观测站实测径流输沙数据。1957—2019年逐年实测径流量和输沙量数据来自《黄河流域水文资料》。文中使用的水沙数据为华县和状头两个水文站相加之和。降水数据选用位于渭河流域内外的22个站点的逐年降水量数据,数据来自国家气象科学数据中心的“中国气象数据网”。这里采用算术平均法来计算渭河流域面平均年降水量。

1.3 趋势及突变年份检验

在本研究中,Spearman和Mann-Kendall相关分析方法^[7]被用来对长时间水文要素数据进行趋势检验。Pettitt方法^[8]用于水文要素突变年份的统计检验。

1.4 历时曲线法

流量历时曲线^[9]反映了特定流量在特定时间段内超过所有历史记录的发生频率,是反映整个研究时段径流变化特征的一种方法。本研究采用此方法计算流域年径流量和年输沙量突变年份前后在特定频率下的变化量值。

1.5 双累积曲线法

双累积曲线早期被用于两个关联变量之间的一致性检验,后来被我国学者拓展用于流域水沙变化的效益计算^[10-12]。本研究使用该方法计算降水和人类活动对流域水沙变化的贡献率。

2 结果与分析

2.1 水文要素的变化过程及趋势

渭河流域3个水文要素不同年代的特征值见表1。渭河流域1957—2019年降水量过程及其变化如图1A所示,实测径流量、输沙量过程及变化见图1B—C。渭河流域年均降水量为569.10 mm,年均径流量为74.52亿m³,年均输沙量为3.95亿t。从年代变化来看,年降水量在1950年、1960年代较大,之后呈现小幅随机变化。年径流量在1960年代最大,1970年代减少,1980年代曾出现小幅度增加,之后持续减少,维持在50亿m³/a左右。流域年输沙量在1950年代最大,达到6.63亿t,之后持续大幅度减少,进入21世纪后,年均输沙量降至不足2亿t。

渭河流域年降水量、径流量和输沙量3个水文要素时间序列变化的统计分析结果见表2。结果显示年径流量和输沙量都表现出极显著的减小趋势($p < 0.01$),降水量呈现不明显的下降趋势。径流量的年均减少率为0.86亿m³/a,输沙量的年均减少率为0.09亿t/a。

渭河流域年降水量、年径流量和年输沙量3个水文要素的突变年份Pettitt统计分析如图2所示。可

以看出,在 99%信度水平下,1957—2019 年渭河流域年径流量和年输沙量的突变年份分别为 1990 年和 1996 年。年均径流量在 1990 年前后分别为 87.83 亿 m³, 53.56 亿 m³。年均输沙量在 1996 年前后分别为 4.56 亿 t,1.36 亿 t。渭河流域的年降雨量并未达到任何信度水平的阈值标准,降水量未发生突变。

表 1 渭河流域 3 个水文要素不同年代特征值

| 项目 | 面平均降水/(mm·a ⁻¹) | | | 径流量/(亿 m ³ ·a ⁻¹) | | | 输沙量/(亿 t·a ⁻¹) | | |
|-------|-----------------------------|------|------|--|------|------|----------------------------|-------|------|
| | 平均 | 极值比 | 变差系数 | 平均 | 极值比 | 变差系数 | 平均 | 极值比 | 变差系数 |
| 多年平均 | 569.10 | 2.17 | 0.16 | 74.52 | 9.89 | 0.47 | 3.95 | 53.46 | 0.82 |
| 1950s | 609.67 | 1.43 | 0.20 | 91.56 | 1.82 | 0.34 | 6.63 | 2.92 | 0.47 |
| 1960s | 621.08 | 1.98 | 0.20 | 111.58 | 3.54 | 0.40 | 5.65 | 6.51 | 0.71 |
| 1970s | 565.88 | 1.48 | 0.13 | 67.77 | 3.34 | 0.42 | 4.73 | 10.09 | 0.61 |
| 1980s | 587.96 | 1.77 | 0.17 | 88.35 | 3.08 | 0.39 | 3.26 | 4.33 | 0.51 |
| 1990s | 520.33 | 1.68 | 0.16 | 50.89 | 4.16 | 0.41 | 3.65 | 3.31 | 0.46 |
| 2000s | 548.85 | 1.55 | 0.14 | 51.26 | 3.19 | 0.43 | 1.60 | 5.48 | 0.56 |
| 2010s | 592.95 | 1.33 | 0.09 | 52.35 | 2.78 | 0.26 | 1.58 | 7.26 | 0.72 |

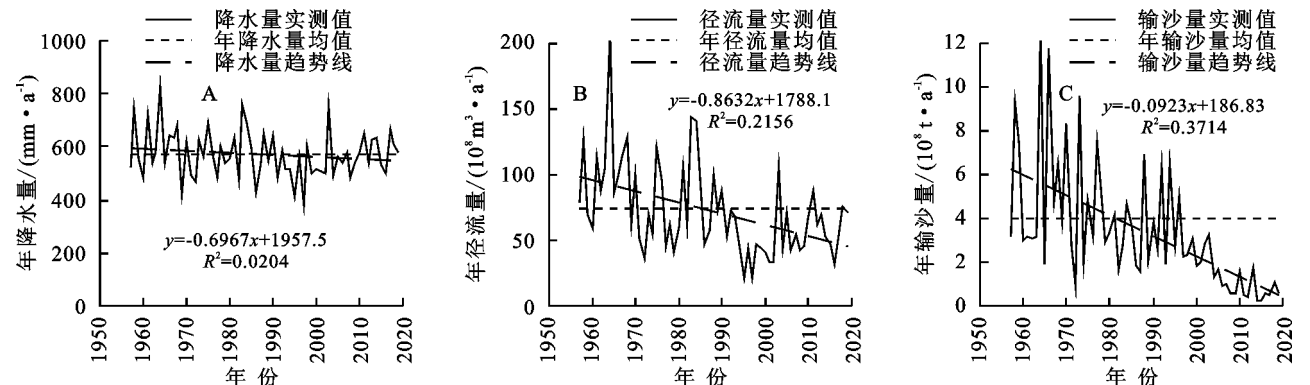


图 1 渭河流域 1957—2019 年降水量、实测径流量、输沙量过程线

Fig. 1 Observed precipitation, annual runoff and annual sediment load during 1957—2019 in the Weihe River basin

表 2 渭河流域 3 个水文要素秩相关分析结果

| 变量 | Mann-Kendall | | Spearman | |
|------|--------------|------|----------|------|
| | Z-检验 | 显著性 | t-检验 | 显著性 |
| | 统计量 | 水平 | 统计量 | 水平 |
| 年降水量 | -0.759 | — | -0.753 | — |
| 年径流量 | -3.511 | 0.01 | -3.577 | 0.01 |
| 年输沙量 | -5.979 | 0.01 | -5.521 | 0.01 |

注:“—”代表不显著。

2.2 径流量和输沙量在突变年份前后的差异

为了尽最大可能消除不同时期因为降水量的不同导致的水沙差异,我们用相同时期的年均降水量除以年均径流量和年均输沙量进行标准化处理。1990 年前后的标准化年径流量和 1996 年前后的标准化年输沙量历时曲线见图 3。在相同的频率之下,标准化年径流量与标准化年输沙量的历时曲线都向下平移,说明相对于突变年份之前,突变年份之后的径流量和输沙都是显著减少的。

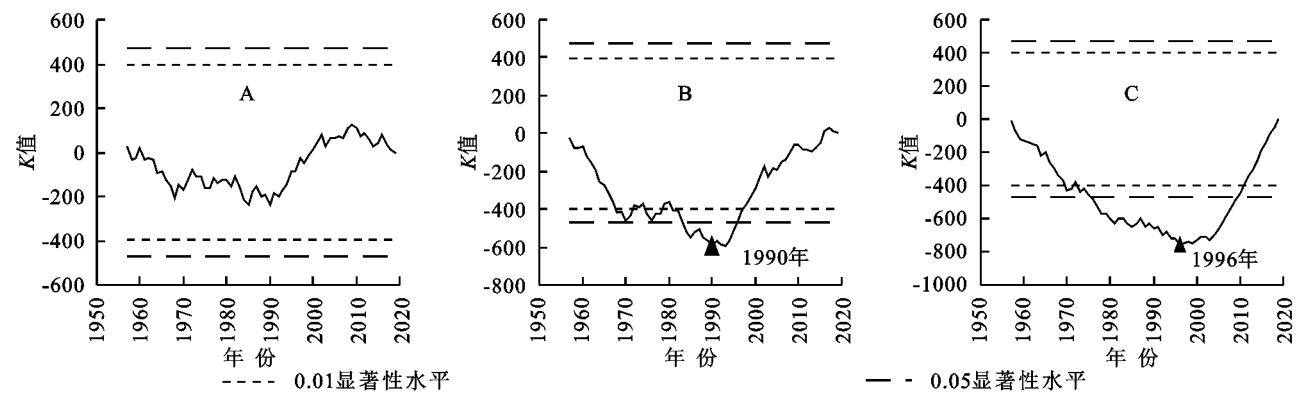


图 2 渭河流域年降水量、年径流量、年输沙量突变年份 Pettitt's 检验

Fig. 2 Pettitt's test for detecting changes of annual precipitation, runoff and sediment load in the Weihe River basin

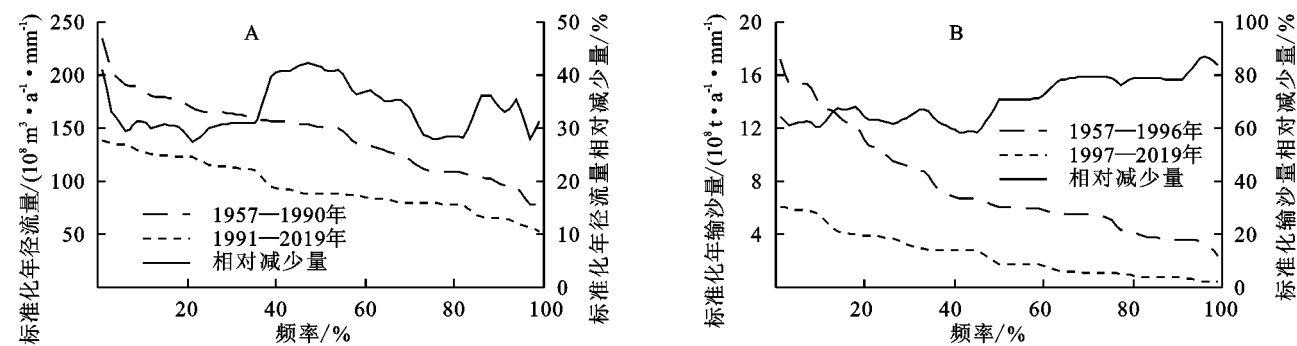


图 3 突变年份前后标准化年径流量、年输沙量历时曲线

Fig. 3 Flow duration curves of annual standardized runoff, sediment load before and after change-point year in the Weihe River basin

本研究选择 5%,50%,95% 分别表示丰、平、枯 3 种不同的典型水平年,对标准化年径流量和标准化年输沙量的减少幅度进行量化分析(表 3)。相对于突变年份之前,标准化年径流量在丰、平、枯 3 种典型水平年的减少幅度分别为 30.86%,41.44%,33.28%;标准化年输沙量的减少幅度分别为 61.90%,70.94%,86.37%。结果表明,在消除了降水因素的影响之后,人类活动等其他因素对于径流、输沙的减少效应非常显著。

表 3 渭河流域突变年份前后典型水平年标准化径流量与标准化输沙量变化

Table 3 Annual standardized runoff and sediment load with frequency of 5%, 50% and 95% before and after change-point year in the Weihe River basin

| 水平年 | 突变年份前 | | 突变年份后 | | 变化百分数 | |
|----------------|---|--|---|--|--------------|--------------|
| | 标准化径流量/ (10 ⁵ m ³ · mm ⁻¹) | 标准化输沙量/ (10 ⁵ t · mm ⁻¹) | 标准化径流量/ (10 ⁵ m ³ · mm ⁻¹) | 标准化输沙量/ (10 ⁵ t · mm ⁻¹) | 标准化 径流量/% | 标准化 输沙量/% |
| 丰年($p=5\%$) | 194.72 | 15.32 | 134.64 | 5.84 | 30.86 | 61.90 |
| 平年($p=50\%$) | 150.96 | 6.11 | 88.40 | 1.77 | 41.44 | 70.94 |
| 枯年($p=95\%$) | 89.31 | 3.49 | 59.59 | 0.48 | 33.28 | 86.37 |

2.3 渭河水沙减少量计算

渭河流域累积降水量与累积径流量、累积输沙量的点绘曲线见图 4。结合突变年份分析结果,可以从趋势线中看出,两条双累积曲线都发生了比较明显的偏离。通过突变年份前的拟合回归方程,可以计算出

突变年份后的累积径流量和累积输沙量的变化量。相较于回归方程模拟计算的累积径流量与输沙量,实测的累积径流量减少了 822.21 亿 m³,减少幅度为 15.34%,实测的累积输沙量减少了 73.11 亿 t,减少幅度为 25.49%(表 4)。

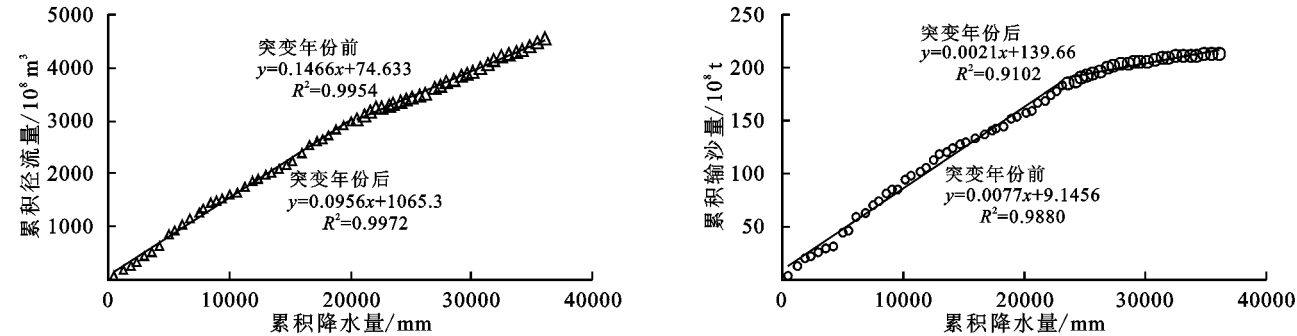


图 4 1957—2019 年渭河流域降水量-径流量、降水量-输沙量双累积曲线

Fig. 4 Double mass curve of precipitation-runoff and precipitation-sediment load during 1957-2019 in the Weihe River basin

表 4 渭河流域累积水沙量变化估算

Table 4 Estimation of accumulated runoff and sediment load in the Weihe River Basin

| 回归方程 | 计算累积值 | 实测累积值 | 累积减少量 | 减少百分数/% |
|--|---------|---------|--------|---------|
| $\Sigma R=0.1466 \Sigma P+74.633 \quad (R^2=0.9954, N=34)$ | 5361.49 | 4539.28 | 822.21 | 15.34 |
| $\Sigma S=0.0077 \Sigma P+9.1456 \quad (R^2=0.9880, N=40)$ | 286.83 | 213.73 | 73.11 | 25.49 |

注:R 为年径流量(亿 m³/a);S 为年输沙量(亿 t/a);P 为年降水量(mm/a)。

2.4 人类活动对渭河水沙的影响分析

通过双累积曲线方法计算的降水和人类活动对

渭河流域水沙变化的贡献率结果见表 5—6。1990 年之后,人类活动等非降水因素对渭河流域径流量减少

的平均贡献率达到了 81%；1996 年之后，人类活动等非降水因素对输沙量减少的平均贡献率高达 83%。从结果可以看出来，自从 2000 年后退耕还林等大规模生态环境建设以来，人类活动的减水减沙贡献率不

断提高，2000 年后人类活动减水减沙贡献率平均分别为 88%，93%，说明人类活动对渭河流域径流量和输沙量变化具有决定性的影响，是驱动流域水沙变化的主要原因。

表 5 渭河流域突变年份后年径流量减少贡献率计算结果

Table 5 Factors affecting annual runoff after change-point year in the Wei River basin

| 时段 | 实测年径流量/ (亿 $\text{m}^3 \cdot \text{a}^{-1}$) | 计算年径流量/ (亿 $\text{m}^3 \cdot \text{a}^{-1}$) | 实测年减水量 | | 降水影响 | | 人类活动影响 | |
|-----------|--|--|---|-------|---|-------|---|-------|
| | | | 减少量/ (亿 $\text{m}^3 \cdot \text{a}^{-1}$) | 贡献率/% | 减少量/ (亿 $\text{m}^3 \cdot \text{a}^{-1}$) | 贡献率/% | 减少量/ (亿 $\text{m}^3 \cdot \text{a}^{-1}$) | 贡献率/% |
| 1990 年前 | 87.83 | 88.79 | | | | | | |
| 1991—1999 | 46.84 | 74.31 | 40.99 | 46.67 | 13.52 | 32.98 | 27.47 | 67.02 |
| 2000—2009 | 51.26 | 80.46 | 36.57 | 41.64 | 7.37 | 20.15 | 29.20 | 79.85 |
| 2010—2019 | 61.90 | 86.93 | 25.93 | 29.52 | 0.90 | 3.48 | 25.03 | 96.52 |

表 6 渭河流域突变年份后年输沙量减少贡献率计算结果

Table 6 Factors affecting annual sediment load after change-point year in the Wei River basin

| 时段 | 实测年输沙量/ (亿 $\text{t} \cdot \text{a}^{-1}$) | 计算年输沙量/ (亿 $\text{t} \cdot \text{a}^{-1}$) | 实测年减沙量 | | 降水影响 | | 人类活动影响 | |
|-----------|--|--|---|-------|---|-------|---|-------|
| | | | 减少量/ (亿 $\text{t} \cdot \text{a}^{-1}$) | 贡献率/% | 减少量/ (亿 $\text{t} \cdot \text{a}^{-1}$) | 贡献率/% | 减少量/ (亿 $\text{t} \cdot \text{a}^{-1}$) | 贡献率/% |
| 1996 年前 | 4.56 | 4.69 | | | | | | |
| 1997—1999 | 2.56 | 3.81 | 2.00 | 43.90 | 0.76 | 37.83 | 1.25 | 62.17 |
| 2000—2009 | 1.60 | 4.23 | 2.96 | 64.92 | 0.34 | 11.38 | 2.63 | 88.62 |
| 2010—2019 | 0.75 | 4.57 | 3.81 | 83.53 | 0.07 | 1.88 | 3.74 | 98.12 |

3 讨论

河流水沙变化与气候和人类活动有着密切的关系。降水是径流的主要来源，也是土壤侵蚀及河流泥沙来源的主要驱动因素。而人类活动通过诸如水资源利用、水利工程建设以及水土保持与生态环境建设等各种方式影响着河流水沙的变化^[13]。从研究结果可以看出，人类活动在渭河水沙变化中占据了主导地位。人类活动影响渭河径流、输沙主要有以下几个方面。

其一，由于社会经济发展，对渭河水资源的需求增加。渭河流经关中天水经济区，是甘肃、陕西两省经济增长最快的地区。随着经济的快速发展，急剧增长的水资源需求加剧了渭河径流的减少。20 世纪 50 年代，渭河流域年均取引水量为 5.0 亿 m^3 ，到 90 年代已增至 19.7 亿 m^3 ，占整个渭河年均流量的 30% 左右^[14]。截至 1996 年底，渭河流域引水灌区达 339 663 hm^2 ，而引水导致的间接引沙也同时减少了河流的输沙量^[15]。

其二，各种类型水利工程对河流水沙的影响。水库大量的泥沙淤积减少了向下游地区的泥沙输移，另外巨大的库区水面蒸发和河道渗漏增加了径流损失。1960 年投入运行的三门峡水库抬升了潼关水位，导致渭河下游泥沙淤积严重^[16]。1960—2002 年，渭河下游累积淤积泥沙量 13.22 亿 m^3 ^[17]。自 1996 年以来，陕西、甘肃两省渭河流域实施的雨水集流工程已建成约 200 万眼水窖，每年蓄集约 0.06 亿 m^3 的雨水

资源用于农村饮水和农业生产^[18]。

其三，水土保持与生态环境建设也直接影响了渭河水沙的变化。渭河是黄河最大的支流，向黄河输送了最多的径流量和输沙量。渭河流域水土流失总面积 10.36 万 km^2 ，占渭河流域的 76.9%。自 20 世纪 50 年代以来，渭河流域实施了一系列水土保持措施用于生态环境建设。到 2000 年底，水土流失综合治理面积累计达 3.65 万 km^2 。其中兴修基本农田 2 465 km^2 ，营造水土保持林草 2 776 万 km^2 。建设淤地坝 4 367 座，其中骨干坝 186 座，中小型淤地坝 4 181 座。塘坝、水窖、蓄水池等小型蓄水保土工程 13.4 多万处。1999 年开始实施的退耕还林工程以及 2005 年批复实施的《渭河流域重点治理规划》，使得流域内的水土保持与生态环境建设不断加强，导致渭河的水沙量进一步减少^[19]。

4 结论

(1) 渭河流域年径流量和年输沙量在 1957—2019 年表现出了显著的减少趋势；年径流量的突变年份为 1990 年，年输沙量的突变年份为 1996 年。年降水量呈随机变化，没有明显的趋势性变化。

(2) 通过历时曲线分析表明，在丰、平、枯不同典型水平年，即使消除了降雨因素的影响，人类活动的减水减沙效应也是非常显著。

(3) 计算了渭河流域累积径流量与累积输沙量的变化。截至 2019 年，实测的累积径流量减少了

822.21 亿 m^3 , 相比回归计算累积径流量减少幅度为 15.34%; 实测的累积输沙量减少了 73.11 亿 t, 相比回归计算累积输沙量减少幅度为 25.49%。

(4) 人类活动对渭河流域径流、输沙减少的贡献率分别为 81%, 83%, 远高于降水对径流、输沙减少的贡献率 19%, 17%。人类活动在渭河径流和输沙的变化过程中具有决定性的影响, 是导致渭河流域径流、输沙减少的主要驱动因素。

参考文献(References):

- [1] 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.
- [2] Siakeu J, Oguchi T, Aoki T, et al. Change in riverine suspended sediment concentration in central Japan in response to late 20th century human activities [J]. *Catena*, 2004, 55(2): 231-254.
- [3] 夏军, 孙雪涛, 谈戈. 中国西部流域水循环研究进展与展望 [J]. *地球科学进展*, 2003, 18(1): 58-67.
Xia J, Sun X T, Tan G. The progress and prospect of water cycle study in western China [J]. *Advance in Earth Sciences*, 2003, 18(1): 58-67.
- [4] 胡安焱, 刘燕, 郭生练, 等. 渭河流域水沙多年变化及趋势分析 [J]. *人民黄河*, 2007, 29(2): 39-41.
Hu A Y, Liu Y, Guo S L, et al. Variation and trend analysis of water and sediment in Weihe River Basin for many years [J]. *Yellow River*, 2007, 29(2): 39-41.
- [5] 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, 23(2): 18-20.
Wang H, Qin B S, Ma Y, et al. Analysis of water and sediment reduction effect of soil and water conservation measures in Weihe River Basin [J]. *Yellow River*, 2001, 23(2): 18-20.
- [6] 魏红义, 李靖, 王江, 等. 渭河流域径流变化趋势及其影响因素分析 [J]. *水土保持通报*, 2008, 28(1): 76-80.
Wei H Y, Li J, Wang J, et al. Analysis on runoff trend and influence factors in Weihe River Basin [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2008, 28(1): 76-80.
- [7] Mann H B. Nonparametric tests against trend [J]. *Econometrica*, 1945, 13(3): 245-259.
- [8] Pettitt A N. A non-parametric approach to the change-point problem [J]. *Applied Statistics*, 1979, 28(2): 126-135.
- [9] Vogel R M, Fennessey N M. Flow-duration curves. I: New interpretation and confidence intervals [J]. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 1994, 120(4): 485-504.
- [10] Gao P, Li P F, Zhao B L, et al. Use of double mass curves in hydrologic benefit evaluations [J]. *Hydrological Processes*, 2017, 31(26): 4639-4646.
- [11] 穆兴民, 张秀勤, 高鹏, 等. 双累积曲线方法理论及在水文气象领域应用中应注意的问题 [J]. *水文*, 2010, 30(4): 47-51.
- Mu X M, Zhang X Q, Gao P, et al. Theory of double mass curves and its applications in hydrology and meteorology [J]. *Journal of China Hydrology*, 2010, 30(4): 47-51.
- [12] 冉大川, 刘斌, 付良勇, 等. 双累积曲线计算水土保持减水减沙效益方法探讨 [J]. *人民黄河*, 1996, 18(6): 24-25.
Ran D C, Liu B, Fu L Y, et al. Discussion on calculation method of water and sediment reduction benefit of soil and water conservation by double accumulation curve [J]. *Yellow River*, 1996, 18(6): 24-25.
- [13] Gao P, Geissen V, Ritsema C J, et al. Impact of climate change and anthropogenic activities on stream flow and sediment discharge in the Wei River Basin, China [J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2013, 17(3): 961-972.
- [14] 王生雄, 魏红义, 王志勇. 渭河径流序列趋势及突变分析 [J]. *人民黄河*, 2008, 30(9): 26-27, 29.
Wang S X, Wei H Y, Wang Z Y. Trend and mutation analysis of Weihe River runoff series [J]. *Yellow River*, 2008, 30(9): 26-27, 29.
- [15] 赵俊侠, 王宏, 马勇, 等. 1990—1996 年渭河流域水沙变化原因初步分析 [J]. *水土保持学报*, 2001, 15(6): 136-139.
Zhao J X, Wang H, Ma Y, et al. Preliminary analysis on cause of water and sediment variation from 1990—1996 in Weihe watershed [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2001, 15(6): 136-139.
- [16] Wang G Q, Wu B S, Wang Z Y. Sedimentation problems and management strategies of Sanmenxia Reservoir, Yellow River, China [J]. *Water Resources Research*, 2005, 41(9): W09417.
- [17] 石长伟, 张智, 王亚梅, 等. 潼关高程变化及其对渭河下游的影响分析 [J]. *水资源与水工程学报*, 2016, 27(6): 125-129.
Shi C W, Zhang Z, Wang Y M, et al. Change of Tongguan elevation and its influence on the lower reaches of Weihe River [J]. *Journal of Water Resources & Water Engineering*, 2016, 27(6): 125-129.
- [18] 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.
Su X L, Kang S Z, Wei X M, et al. Impact of climate change and human activity on the runoff of Wei River Basin to the Yellow River [J]. *Journal of Northwest A&F University: Natural Science Edition*, 2007, 35(2): 153-159.
- [19] 徐瑞瑞, 高鹏, 穆兴民, 等. 渭河流域水沙时空变化及其对人类活动的响应 [J]. *人民黄河*, 2020, 42(3): 17-24.
Xu R R, Gao P, Mu X M, et al. Dynamic of stream-flow and sediment load and its response to human activities in the Weihe River Basin [J]. *Yellow River*, 2020, 42(3): 17-24.