

黄河流域陕北矿区段水沙运移规律及预测分析

魏婧

榆林学院 建筑工程学院, 中国·陕西 榆林 719000

摘要: 本研究以黄河一级支流窟野河流域为研究对象, 基于1960-2020年水文气象数据, 综合运用Mann-Kendall趋势检验、Pettitt突变点检验、双累积曲线等多种方法, 分析了流域水沙变化的趋势、突变特征及驱动因素, 并构建社会水文耦合模型进行未来预测。结果表明: (1) 窟野河流域径流量与输沙量均呈极显著下降趋势, 并在1979年(大规模水土保持)和1996年(大规模煤矿开采)发生显著突变, 突变后减幅分别达61.56%和94.87%。(2) 归因分析表明, 气候变化(降雨)与人类活动共同导致水沙减少, 但人类活动是主导因素, 其贡献率在后期显著增加, 最高超过105%。(3) 模型预测显示, 维持现状模式将导致未来水沙持续处于低水平, 而推行可持续发展模式(节水、产业转型等)则有助于增加径流并稳定输沙。研究为窟野河流域水资源管理与生态保护提供了科学依据。

关键词: 水沙变化; 趋势分析; 人类活动; 驱动因素; 社会水文耦合模型

Analysis of Water and Sediment Transport Patterns and Prediction in the Northern Shaanxi Mining Area Section of the Yellow River Basin

Wei Jing

Institute of Architecture and Civil Engineering, Yulin University, China Shaanxi Yulin 719000

Abstract: An analysis of water-sediment variation was conducted in the Kuye River basin, a primary tributary of the Yellow River. Utilizing hydro-meteorological data from 1960 to 2020, the study applied methods such as the Mann-Kendall trend test, Pettitt test, and double mass curve to investigate trends, abrupt-change points, and driving factors. A coupled socio-hydrological model was subsequently developed to project future conditions. The results indicate that: (1) Both the runoff and sediment transport in the Kuye River Basin showed a highly significant decreasing trend, with significant abrupt changes occurring in 1979 (corresponding to large-scale soil and water conservation measures) and 1996 (corresponding to large-scale coal mining). Following these changes, the reduction rates reached 61.56% and 94.87%, respectively. (2) Attribution analysis reveals that while both climate change (precipitation) and human activities contributed to the reduction in water and sediment, human activities were the dominant factor. Their contribution increased significantly in the later period, exceeding 105% at its peak. (3) Model predictions suggest that maintaining the current development would lead to persistently low levels of water and sediment in the future. In contrast, implementing a sustainable development (including water conservation, industrial transformation, etc.) would help increase runoff and stabilize sediment transport. This study provides a scientific basis for water resource management and ecological protection in the Kuye River Basin.

Keywords: Water-sediment variation; Trend analysis; Human activities; Driving factors; Coupled socio-hydrological model

0 引言

在过去半个多世纪, 全球人口增长与科技经济发展加剧了水资源危机。河流水沙作为水循环与物质迁移的载体, 深受自然条件与人类活动的双重影响。以黄河为例, 高强度人类活动(如不合理土地利用与大规模能源开采)导致严重水土流失、河床演变及水资源短缺^[1]。陕北榆神府矿区因煤矿开采与水资源过度开发, 造成窟野河等河流

断流、地下水位骤降, 不仅制约能源可持续开发, 更危及民生与黄河生态健康, 凸显了该区域水沙研究的紧迫性^[2]。本项目以窟野河水文站控制流域为对象, 基于水文、气象、NDVI等数据和GIS技术, 运用多种趋势分析法, 分析水沙及相关因子时变规律, 定量估算了气候变化和人类活动对水沙演变的影响, 借助Vensim软件构建河道的滞后响应模型, 为窟野河流域水资源合理利用和水土保持措施的优

化配置提供科学依据。

1 研究区概况

窟野河属黄河一级支流，干流全长 242km，流域总面积为 8706km²。流域地貌以北部的风沙区和南部的黄土丘陵沟壑区为主，土壤瘠薄，植被稀疏，属典型的干旱、半干旱大陆性季风气候，降雨不均且多集中于汛期暴雨^[1]。流域所在的鄂尔多斯市与榆林市矿产资源极其丰富，是中国重要的能源基地。

2 数据来源及研究方法

2.1 数据来源

本研究基于 1960-2020 年期间窟野河流域的实测水文与气象资料展开分析。所用数据包括研究区内新庙、王道恒塔、神木和温家川四个水文站的年径流与年输沙量资料，均摘自《黄河流域水文资料》。同时，研究选取了流域内多个雨量站的降雨观测数据，其中降雨数据来源于国家气象信息中心及《黄河流域水文资料》。

2.2 研究方法

2.2.1 Mann-Kendall 检验法

Mann-Kendall 检验法是一种十分常见的非参数检验方法，经常用作趋势分析和变异点的分析。通过分析序列 UFk 和 UBk 的正负大小变化，就可以分析时间序列的突变性。

2.2.2 双累积曲线法

双累积曲线法用于分析水文、气象要素的长期演变趋势和突变特征。双累积曲线由自变量和因变量分别累加得到，若累积曲线的斜率发生显著变化，对应的年份即为突变时间。

2.2.3 累积距平值法

距平值指的是时间序列中各变量值与平均值的差值，累积距平值即为距平值按年序的累加^[4]。

2.2.4 累积量斜率变化率分析法

累积量斜率变化率分析法是一种定量评估气候变化和人类活动对径流变化影响的方法。假设流域某一时间段内只受降水的影响，时间与累积径流量线性关系的斜率变化率等于时间与累积降水量线性关系的斜率变化率，故降水对径流变化的贡献率为 100%；如果时间与累积径流量线性关系的斜率发生变化，而时间与累积降水量线性关系的斜率不变，则降水对径流变化的贡献为零^[4]。

2.2.5 小波分析

小波分析是一种将信号在时域和频域上同时进行分析的方法，它可以提取信号的局部特征和周期性。

3 结果与分析

3.1 不同尺度窟野河流域水沙变化趋势分析

(1) 依据窟野河流域的气候要素对不同尺度研究区水沙变化趋势进行了分析，结果表明：降水方面，流域多年平均降水量为 446.7 mm，整体呈显著下降趋势。年降水量序列存在 8 年和 3 年的主要周期。降水年内分布不均，呈单峰型分布，7-8 月降水量最大，12-1 月最小，汛期降水量占全年 87% 以上（如图 1 所示）。气温方面，流域多年平均气温为 9.3℃，呈显著上升趋势。年均气温序列在 2-7 年、11-23 年和 25-35 年等多个时间尺度上存在波动，主要周期为 31 年和 15 年。气温年内也呈单峰型曲线，最高月平均气温出现在 7 月，最低在 1 月，整体呈下抛物线形（如图 2 所示）。蒸发方面，流域多年平均蒸发量为 1022 mm，年蒸发量序列呈显著下降趋势。其变化存在 2-5 年、7-17 年和 21-36 年等多时间尺度的周期，主要周期为 10 年和 27 年。蒸发量年内分布也为单峰型，峰值出现在 5-7 月，6 月最高，1 月最低，形态呈下抛物线形，（如图 3 所示）。

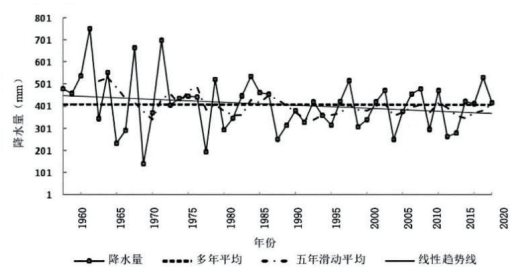


图1 窟野河流域年降水量变化过程线

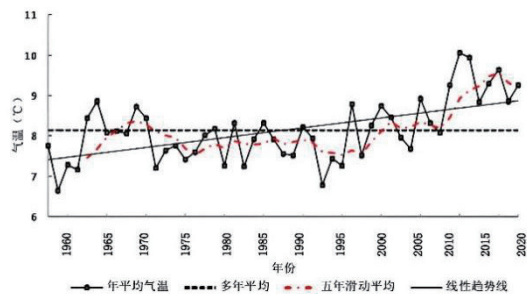


图2 窟野河流域年际平均气温变化过程线

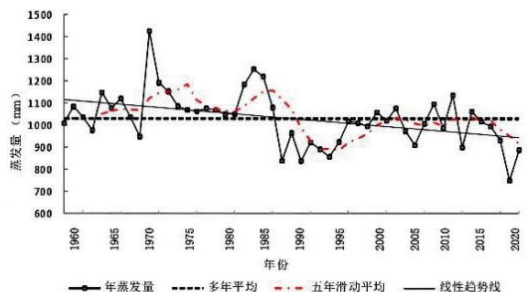


图3 窟野河流域年际蒸发量变化过程线

(2) 对窟野河流域4个水文站(1960-2020年)的分析表明,其年径流量均存在极显著下降趋势(如图4所示)。各站具体情况如下:新庙站:多年平均径流量0.785亿 m^3 ,年均减少0.013亿 m^3 。1999-2011年平均值(0.199亿 m^3)较1960-1979年(1.308亿 m^3)下降84.78%,降幅最为显著。王道恒塔站:多年平均径流量1.593亿 m^3 ,年均减少0.027亿 m^3 。相同时段比较,径流量从2.388亿 m^3 降至0.633亿 m^3 ,降幅73.49%。神木站:多年平均径流量3.799亿 m^3 ,年均减少0.063亿 m^3 。径流量从5.420亿 m^3 降至1.458亿 m^3 ,降幅73.09%。温家川站:多年平均径流量4.802亿 m^3 (变幅1.279-12.58亿 m^3),年均减少0.104亿 m^3 。1999年后径流量较1979年前下降67.76%,降幅相对最小。

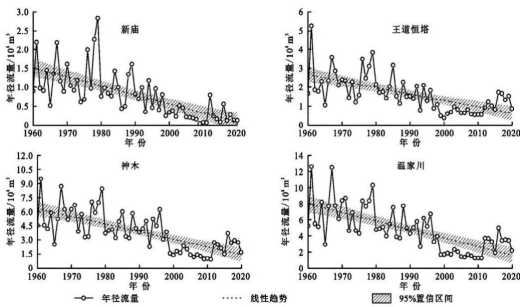


图4 窟野河流域1960-2020年径流量变化过程线及线性趋势

(3) 如图5所示,窟野河流域四个水文站的年均输沙量均呈现显著下降趋势,与径流变化规律一致。具体来看,上游三站(新庙、王道恒塔和神木站)的年输沙量分别以每年41.9万吨、70.3万吨和159.9万吨的速率减少。2000-2020年期间,三站的平均输沙量分别为0.011亿吨、0.002亿吨和0.033亿吨,较1960-1979年阶段分别大幅下降了94.4%、98.2%和96.0%。作为流域出口控制站,温家川站的多年平均输沙量为0.661亿吨,其下降趋势尤为显著,年均减少速率达281.3万吨,并在1979年与1996年发生了两次突变性减少。该站输沙量从1960-1969年的1.200亿吨急剧下降至2010-2020年的0.016亿吨,减幅高达98.67%;与1960-1979年阶段相比,1996年后的年均输沙量减少了1.199亿吨,降幅为96.01%。从年均减少速率来看,温家川站最大,新庙站最小。

窟野河流域水文要素的Mann-Kendall趋势检验统计结果揭示了一致的变化模式:所有站点的径流量和输沙量均存在统计上显著的下降趋势,尤以新庙站最为突出。然而,降雨量的变化趋势则相对较弱且空间异质性明显,除温家川站($p < 0.05$)和王道恒塔站、新庙站($p < 0.1$)表现为微弱的增加趋势外,神木站的降雨量变化未呈现统计

显著性。

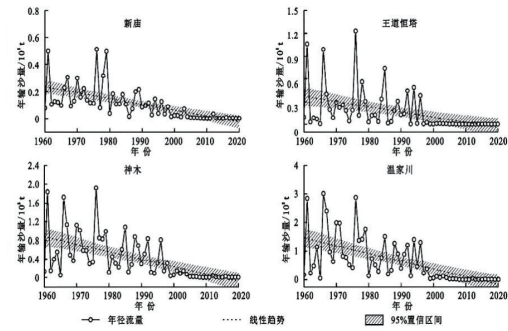


图5 窟野河流域1960-2020年输沙量变化过程线及线性趋势

3.2 不同尺度窟野河流域水沙突变特征分析

Pettitt 检验法对窟野河流域 1960-2020 年径流量、输沙量和降雨量进行突变年份检验。结果表明窟野河流域温家川站年径流量和输沙量均在 1979 年、1996 年发生显著性变化 ($p < 0.01$), 流域年降雨量在研究时段内未发生显著性突变; 其他 3 个水文站年径流量、输沙量均在 1996 年发生显著性突变 ($p < 0.01$), 降雨量均未发生突变。温家川站 1960-1996 年多年平均径流量为 6.323 亿 m^3 , 而 1997-2020 年为 2.431 亿 m^3 , 减幅为 61.56%。多年平均输沙量也从 1960-1996 年的 1.041 亿 t 降低至 1997-2020 年的 0.053 亿 t, 减幅为 94.87%。窟野河流域王道恒塔站和温家川站的年径流量和年输沙量表现出明显的正相关关系。来沙系数同样呈下降趋势, 其中位于温家川站单位流量的含沙量很大, 河床基本处于冲淤状态^[5]。

3.3 窟野河流域水沙演变驱动因素分析

3.3.1 气候变化对水沙变化的贡献率

为量化气候与人类活动对水沙变化的贡献, 本研究以温家川站为案例, 采用双累积曲线法识别出 1960-1979 年为基准期, 并划分出 1980-1996 年(变化 I 期)和 1997-2020 年(变化 II 期)两个变化期。基于基准期的数据建立降雨-径流和降雨-输沙回归方程, 将变化期的实测降雨数据代入上述方程, 分别计算出变化期在基准期下垫面条件下的理论径流/输沙量。最后进行归因计算: 基准期实测值与变化期理论值之差, 归因于降雨变化的贡献; 变化期理论值与实测值之差, 则归因于人类活动的贡献。二者占水沙总变化量的百分比, 即为其贡献率。

3.3.2 人类活动对水沙变化的贡献率

(1) 归因分析结果显示, 研究区流域水沙关系在 1979 年与 1996 年发生显著突变, 这两次突变分别与 1970 年代末期大规模水土保持工程的实施以及 1990 年代中期神府东胜煤矿的开采活动在时间上高度吻合。与基准期(1960-

1979年)相比,四个水文站在变化Ⅰ期(1980-1996年)和变化Ⅱ期(1997-2020年)的径流量均持续减少,且减少幅度在变化Ⅱ期更为剧烈。在变化Ⅰ期,人类活动已成为径流减少的主导因素(除王道恒塔站外,其余三站贡献率均超过50%)。至变化Ⅱ期,人类活动的贡献率进一步大幅提升,神木站和新庙站均超过92.57%,王道恒塔站也达到81.01%。值得注意的是,在变化Ⅱ期,温家川站年均降雨量较变化Ⅰ期增加了约78毫米,降雨变化理论上应导致径流量增加(计算值为-0.065亿m³),但实测径流仍显著减少,这一矛盾现象确凿地证明,人类活动是变化Ⅱ期径流减少的决定性因素。

(2) 输沙量变化的归因分析结果表明,人类活动对窟野河流域输沙量减少起着决定性作用,且其相对贡献随时间推移持续增强。具体表现为:新庙站和神木站人类活动的贡献率从变化Ⅰ期的72.91%和79.82%,显著上升至变化Ⅱ期的96.13%和98.85%。王道恒塔站的主导因素也从变化Ⅰ期的降雨影响转变为变化Ⅱ期的人类活动主导。尤为重要的是,温家川站人类活动的贡献率在变化Ⅱ期达到106.23%,这明确表示人类活动不仅完全解释了输沙量的减少,甚至超额抵消了其他可能有利于产沙的条件(如降雨)。综上所述,人类活动是窟野河流域输沙量减少的首要驱动因素。

3.4 窟野河流域社会水文耦合模型的建立与预测

为深入理解窟野河流域复杂的人水关系,本研究基于系统动力学原理,利用Vensim平台开发了窟野河流域社会水文耦合模型,该模型能够表征自然水文过程与经济社会活动之间的互动反馈。通过对现状延续和可持续发展两种模式的模拟预测发现:前者将导致未来径流与输沙量进一步衰减并维持在低水平;后者则有望使径流量得到一定恢复,同时将输沙量控制在稳定状态(图6,图7)。据此提出,保障流域可持续发展需采取多管齐下的策略:首要的是实施严格的节水制度并革新农业灌溉模式,以提升水资源利用效率;关键在于推动煤炭这一主导产业的低碳绿色转型;长远之计则需依靠持续的环境教育,从根本上提升公众的环境保护意识^[5]。

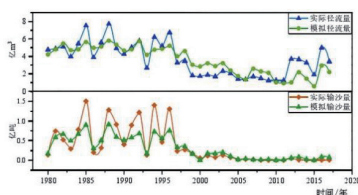


图6 社会水文耦合模型实际值与模拟值对比图

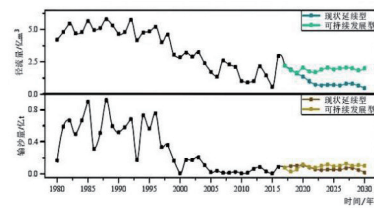


图7 不同情况下径流量输沙量未来变化趋势对比图

4 结语

本文系统分析了窟野河流域1960-2020年的水沙演变规律及其驱动机制,主要结论可归纳为三点:

(1) 流域水文序列发生了极显著($p < 0.01$)的协同性衰减,并检测到1979年和1996年两个关键突变点。至1997-2020年,流域出口控制站(温家川站)的径流量和输沙量较突变前基准状态分别下降了61.56%与94.87%。

(2) 定量归因揭示,人类活动是水沙锐减的首要驱动因子。其在变化Ⅱ期(1997-2020)的贡献率较变化Ⅰ期(1980-1996)大幅提升,凸显了水土保持工程、矿产资源开发等人类活动影响的持续增强,其效应已主导了流域水沙格局的重塑。

(3) 基于系统动力学模型的模拟预测警示,若延续当前发展模式,流域水沙量将维持低位运行;而实施可持续发展策略,则可有效促进径流恢复并控制输沙量稳定,此为流域生态系统的良性演替提供了科学路径。

参考文献:

[1] 胡春宏,王延贵,张燕菁等.中国江河水沙变化趋势与主要影响因素[J].水科学进展,2010,21(04):524-532.

[2] 刘强,蔡学娅,刘君怡等.黄河中游窟野河流域水沙关系变化特征及其成因分析[J].水土保持研究,2022,29(04):68-74.

[3] 李慧娟,师长兴,马小晴等.黄河中游窟野河流域水沙变化影响因素定量评估[J].资源科学,2020,42(03):499-507.

[4] 张健康,王计平,石建省.气候变化和人类活动影响下窟野河流域水沙变化归因分析[J].水文地质工程地质,2024,51(06):47-59.

[5] 兰泽凡,耿韧,赵广举等.窟野河流域水沙变化及其驱动因素[J].水土保持研究,2024,31(04):95-104.

[6] 何毅,蒋晓辉,胡希有等.人类活动对黄河中游径流变化影响的定量归因——以窟野河流域为例[J].西北大学学报(自然科学版),2025,55(04):798-807.

基金项目:陕西省教育厅专项科研计划项目(23JK0756);陕西省科技厅自然科学基金基础研究计划项目

(2023-JC-QN-0594)；榆林市科协青年人才计划托举项目(20240605)。

作者简介：魏婧（1990-），女，陕西榆林人，副教授，硕士，研究方向：水文水资源。