

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2024.04.031.

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(4): 95-104.

Lan Zefan, Geng ren, Zhao Guangju, et al. Runoff and Sediment Load Variation and Driving Factors in the Kuye River Basin[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2024, 31(4): 95-104.

窟野河流域水沙变化及其驱动因素

兰泽凡¹, 耿韧², 赵广举^{1,2,3}, 穆兴民^{1,3}, 田小靖¹, 张鹏⁴

(1.西北农林科技大学 水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100; 2.水利部

交通运输部 国家能源局 南京水利科学研究院, 南京 210029; 3.中国科学院 水利部

水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100; 4.鄂尔多斯水文水资源分中心, 内蒙古 鄂尔多斯 010020)

摘要: [目的]探究窟野河流域径流和输沙变化特征,量化气候变化及人类活动对流域水沙变化的贡献,以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。[方法]基于窟野河流域新庙、王道恒塔、神木和温家川水文站 1960—2020 年径流、输沙及降雨资料,采用线性趋势法、Mann-Kendall 趋势检验和 Pettitt 突变检验法分析了流域径流输沙时空变化特征,结合双累积曲线法定量分析了不同时期气候变化与人类活动对河流水沙变化的贡献。[结果]窟野河流域 1960—2020 年径流输沙均呈现极显著减少趋势($p < 0.01$),新庙、王道恒塔、神木和温家川 4 站径流量减少速率分别为 0.024 亿 m^3/a , 0.034 亿 m^3/a , 0.081 亿 m^3/a , 0.106 亿 m^3/a , 输沙量减少速率分别为 43.8 万 t/a , 69.3 万 t/a , 160.3 万 t/a , 272.1 万 t/a , 且各水文站年径流量和输沙量均在 1979 年、1996 年发生突变,由此可将径流输沙序列划分为基准期(1960—1979 年, P_1 期)和变化期(1980—1996 年, P_2 期; 1997—2020 年, P_3 期)。研究时段内不同子流域多年平均径流深和输沙模数均呈减小趋势,但在空间上存在差异。[结论]流域不断增强的人类活动(水利水保措施与煤矿开采等)是窟野河流域水沙变化的主导因素,相较基准期,各水文站径流输沙量在 P_2 期、 P_3 期均减少,且 P_3 期减少幅度更剧烈,不同水文站在 P_2 和 P_3 期内,人类活动对径流输沙减少的贡献高于降雨变化。

关键词: 径流量; 输沙量; 窟野河流域; 时空变化; 驱动因素

中图分类号: P333.4

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2024)04-0095-10

Runoff and Sediment Load Variation and Driving Factors in the Kuye River Basin

Lan Zefan¹, Geng Ren², Zhao Guangju^{1,2,3}, Mu Xingmin^{1,3}, Tian Xiaojing¹, Zhang Peng⁴

(1. Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100,

China; 2. Nanjing Hydraulic Research Institute, National Energy Administration, Ministry of

Transport, Ministry of Water Resources, Nanjing 210029, China; 3. Institute of Soil and Water

Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100,

China; 4. Erdos Hydrological and Water Resources Sub-Center, Erdos, Inner Mongolia 010020, China)

Abstract: [Objective] The aims of this study are to investigate the spatial and temporal changes of runoff and sediment load in the Kuye River Basin, to quantify the contribution of climate change and human activities to variation of runoff and sediment load, and to provide scientific basis for the rational use of water resources and the optimal allocation of soil and water conservation measures in the Kuye River Basin. [Methods] Based on the runoff, sediment load and rainfall data of Xinmiao, Wangdaohengta, Shenmu and Wenjiachuan hydrological stations in Kuye River Basin from 1960 to 2020, the spatial and temporal variation characteristics of runoff and sediment load were analyzed by the linear trend method, Mann-Kendall trend test and Pettitt mutation test, and the double mass curve was used to quantitatively analyze the contribution

收稿日期: 2023-07-12

修回日期: 2023-09-25

资助项目: 内蒙古自治区科技兴蒙行动重点专项(KJXM-EEDS-2020005-01); 国家自然科学基金(U2243211, 42077076, 42077075)

第一作者: 兰泽凡(1997—), 男, 江西宜春人, 硕士研究生, 研究方向为土壤侵蚀与水土保持。E-mail: lyl@nwafu.edu.cn

通信作者: 赵广举(1980—), 男, 河南驻马店人, 博士, 研究员, 主要从事流域水沙过程与水土保持研究。E-mail: gjzhao@ms.iswc.ac.cn

<http://stbcjy.paperonce.org>

rate of climate change and human activities to runoff and sediment load variation in different periods. [Results] Annual runoff and sediment load in the Kuye River Basin showed a significant decreasing trend from 1960 to 2020 ($p < 0.01$). The runoff reduction rates of Xinmiao, Wangdaohengta, Shenmu and Wenjiachuan hydrological stations were 2.4 million m^3/a , 3.4 million m^3/a , 8.1 million m^3/a , 10.6 million m^3/a , the reduction rates of sediment load were 0.438 million t/a , 0.693 million t/a , 1.603 million t/a and 2.721 million t/a , respectively. The annual runoff and sediment load of each hydrological station changed abruptly both in 1979 and 1996, so the runoff and sediment load sequences could be divided into the reference period (1960—1979, P_1) and the change period (1980—1996, P_2 ; 1997—2020, P_3). During the study period, the average annual runoff depth and sediment load modulus of different sub-basins showed a decreasing trend, but there were differences in space. [Conclusion] The increasing human activities (water conservancy and soil conservation measures, coal mining, etc.) are the dominant factors on variation of runoff and sediment load in the Kuye River Basin. Compared with the base period, the runoff and sediment load of each hydrological station decreased in both P_2 and P_3 periods, and reduction was more intense in P_3 period. In the P_2 and P_3 periods, the contribution of human activities to the reduction of runoff sediment transport was higher than that of rainfall changes.

Keywords: runoff; sediment load; Kuye River Basin; spatial-temporal change; driving factors

河流水沙是地表水循环、物质迁移和能量流动的载体,受流域气候、植被、土壤和地形地貌等自然条件与人类活动影响显著。河流水沙变化不仅影响河道演化、河流生态系统与生物地球化学循环,还会对流域水资源供给和水利工程的运行产生重要的影响^[1-3]。

近年来,受气候变化和人类活动(如水土保持措施、生态工程和水利工程等)的共同作用,中国许多河流的径流量和输沙量发生了显著变化,直接影响水利工程规划和水资源开发利用^[4-5]。黄河以高含沙量著称,然而大规模的人类活动,包括梯田、淤地坝等水土保持措施、水库等水利工程、退耕还林(草)生态修复工程、工农业及生活用水增加等,使得黄河水沙发生急剧锐减^[6-7]。目前许多学者开展了大量关于黄河水沙变化及其驱动因素的研究工作。赵阳等^[8]分析了1950—2016年黄河干流的水沙锐减成因,发现人类活动对黄河中游水沙锐减占据主导作用,平均贡献率达到90%以上,而上游年均径流量受气候影响较大,贡献率达到66.57%。赵广举等^[9]分析了皇甫川流域1955—2010年水沙变化特征,发现人类活动是流域水沙锐减的主要影响因素,贡献率约为70%。Liang等^[10]基于Budyko弹性系数法量化了无定河流域径流对气候变化和人类活动的响应,结果表明人类活动对径流变化贡献率为65%。窟野河是黄河中游河口镇—龙门区间的一级支流,已有研究深入分析了流域植被、土地利用、降雨、河川径流、输沙量的变化趋势,探讨了大规模水土保持措施实施、城市化及矿产开发对河流水沙变化的影响。研究表明,流域水文情势发生显著变

化,河川基流量显著增加,地表径流显著减少,河流泥沙锐减更为剧烈^[11]。同时研究发现:人类活动改变流域下垫面是该流域水沙变化的主要原因,人类活动对流域水沙减少的贡献远大于气候变化^[12]。

针对窟野河流域水沙过程的剧烈变化,本文采用线性趋势法、Mann-Kendall检验、Pettitt检验和双累积曲线法分析窟野河流域温家川、神木、王道恒塔以及新庙水文站近60年来径流量和输沙量的时空演变特征,探讨流域水沙时空变化及其驱动因素,并定量分析降雨及人类活动对流域水沙变化的贡献率,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 数据与方法

1.1 研究区概况

窟野河(109°28′—110°52′E, 38°23′—39°52′N)属黄河一级支流,发源于内蒙古自治区东胜市巴定沟,自西北流向东南,流经内蒙古伊金霍洛旗、东胜市、准格尔旗和陕西省府谷县、神木县,于神木县沙峁头村注入黄河,干流全长242 km(其中内蒙古自治区境内长83.9 km,陕西省境内长158.1 km),流域总面积为8 706 km^2 ,支流饴牛川与干流的交汇口以上为乌兰木伦河,交汇口以下称窟野河。流域地貌类型复杂多样,包括北部风沙区和南部黄土丘陵沟壑区两大类。土壤瘠薄,结构松散,地表植被稀少,主要植被类型为干草原落叶阔叶灌丛和沙生植物,植被分布具有明显的地带性。流域气候类型属北温带干旱、半干旱

大陆性季风气候,降雨时空分布极不均匀,整体上呈东多西少、南多北少,汛期降雨量大且多暴雨,多年平均气温 7.9℃,平均降雨量 418.7 mm^[11-12]。

1.2 数据来源

本研究收集整理窟野河流域新庙、王道恒塔、神木和温家川 4 个水文站 1960—2020 年实测年径流和输沙资料(表 1),同时选取流域内 48 个雨量站降雨数据,并结合泰森多边形法计算得到研究区域内的平均降雨量。年径流和输沙资料来源于《黄河流域水文资料》,降雨数据来源于国家气象信息中心(<http://data.cma.cn/>)和《黄河流域水文资料》,30 m 分辨率的 DEM 数据来源于地理空间数据云(<http://www.gscloud.cn/>)。

表 1 窟野河流域主要水文站信息

Table 1 Basic information of Kuye River Basin

水文站	控制面积/ 万 km ²	年均值			数据年限
		径流量/ 亿 m ³	输沙量/ 亿 t	降雨量/ mm	
新庙	1527	0.797	0.106	417.30	1966—2020
王道恒塔	3839	1.642	0.164	422.29	1960—2020
神木	7298	3.881	0.396	434.61	1960—2020
温家川	8515	4.792	0.652	440.96	1960—2020

1.3 方法

1.3.1 Mann-Kendall 趋势检验 Mann-Kendall 非参数统计检验(M-K 检验)^[13-14]是对水文时间序列数据进行趋势性分析的统计方法,其广泛应用于水文气象等领域。该方法假设一个稳定的时间序列,并且要求时间序列具有随机独立性,能够通过统计数据序列的秩对变量进行相关性检验并确定变量序列在时间上是否存在变化规律。Mann-Kendall 检验统计值为正表明呈递增趋势,反之则呈现递减的统计趋势,在水文研究中可应用于判定数据是否存在统计学上的变化趋势及显著性水平^[15]。

对于时间序列 $X(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n)$,其统计量为:

$$S = \sum_{i=2}^n \sum_{j=1}^{i-1} \text{sgn}(x_i - x_j) \quad (1)$$

式中:sgn($x_i - x_j$)为符号函数; n 为时间序列长度; x_i 和 x_j 分别为序列上第 i 年和第 j 年的数据值。当 ($x_i - x_j$) 小于、等于或者大于 0 时,sgn($x_i - x_j$)取值分别为 -1, 0, 1, 则 M-K 趋势检验的统计结果为:

$$Z = \begin{cases} \frac{S-1}{\sqrt{n(n-1)(2n+5)/18}} & (S > 0) \\ 0 & (S = 0) \\ \frac{S+1}{\sqrt{n(n-1)(2n+5)/18}} & (S < 0) \end{cases} \quad (2)$$

若 Z 为正值则表明序列呈现增加趋势,若为负值则呈现减少趋势。若 $|Z|$ 大于等于 1.64, 1.96, 2.58 时,表示序列趋势分别通过 90%, 95%, 99% 的显著检验。

1.3.2 Pettitt 突变检验 Pettitt 作为一种非参数检验方法^[16],其前提是被检验序列存在趋势性变化,该方法通过时间序列均值变化进而确定序列突变时间。根据 Pettitt 检验结果确定径流输沙量突变年份,将序列分为基准期和人类活动影响期,分析其阶段性变化特征。对于时间序列,构造统计量:

$$U_{t,n} = U_{t-1,n} + \sum_{i=1}^n \text{sgn}(x_t - x_i) \quad (3)$$

式中: t 和 $i=2, \dots, n$ 。同理 sgn($x_t - x_i$)在 ($x_t - x_i$) 满足相应条件时,分别取值为 -1, 0, 1。

根据统计量 U 可计算得到以下关系式,并判断得出时间序列的突变时间:

$$K_{t,n} = \max |U_{t,n}|, \quad (1 \leq t \leq n) \quad (4)$$

1.3.3 径流深和输沙模数计算 径流深与输沙模数能够用于量化不同子流域区间的产流产沙空间分异特征。为研究窟野河流域产流和产沙空间变化,根据流域水文站的位置将其划分为 4 个子流域,分别为新庙、王道恒塔、新庙—王道恒塔—神木以及神木—温家川子流域。单一水文站实测径流量和输沙量即该区间的径流量和输沙量,相邻水文站间流域的径流量和输沙量为下游水文站与上游水文站实测径流量和输沙量之差,并根据区间面积计算相应的径流深和输沙模数^[17]。

1.3.4 双累积曲线 双累积曲线是基于两个变量在直角坐标系中连续累积值的关系曲线,常用来反映流域水沙系统变化特征,若关系曲线的斜率在某一点发生变化,则该点所对应的年份即为突变的时间,可用于定量区分气候变化和人类活动对流域水沙变化的影响^[18]。

2 结果与分析

2.1 径流量、输沙量年际变化特征

2.1.1 径流输沙变化趋势 窟野河流域 4 个水文站 1960—2020 年径流量均呈极显著下降趋势(图 1 和表 2)。其中新庙、王道恒塔和神木站年径流量表现出显著下降趋势($p < 0.01$),多年平均径流量分别为 0.797 亿 m³, 1.642 亿 m³, 3.881 亿 m³, 年均减少量分别为 0.024 亿 m³, 0.034 亿 m³, 0.081 亿 m³; 1979 年以后径流量减少剧烈,分别由 1960—1979 年的 1.332 亿 m³, 2.450 亿 m³, 5.717 亿 m³, 减少至 1999—2011 年的 0.240 亿 m³, 0.642 亿 m³, 1.462 亿 m³, 减幅分别达到 81.97%, 73.79%, 74.43%。流域把口站温家

川站多年平均径流量为 4.792 亿 m^3 , 最大值为 12.61 亿 m^3 (1961 年), 最小值为 1.246 亿 m^3 (2009 年); 年径流量以每年 0.106 亿 m^3 的速率显著减少, 在 1999 年以

后急剧减少, 较 1979 年之前, 径流量减少 68.16%。4 个水文站中, 新庙站径流量减少幅度最大, 温家川站最小。

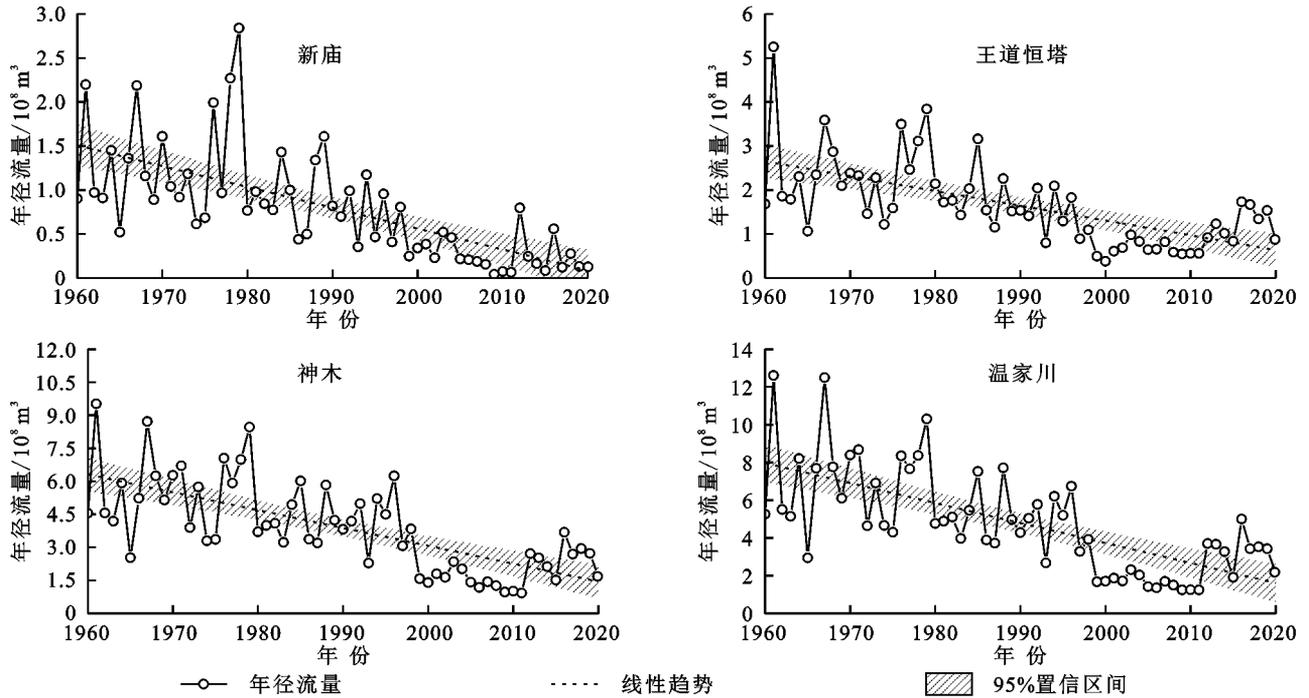


图 1 窟野河流域 1960—2020 年径流量年际变化及线性趋势

Fig. 1 Interannual variations of runoff in the Kuye River Basin from 1960—2020

流域内 4 个水文站年均输沙量的线性变化趋势同径流量变化一致, 均表现为显著减少趋势 ($p < 0.01$) (图 2 和表 2)。新庙、王道恒塔和神木站年输沙量分别以每年 43.8 万 t, 69.3 万 t, 160.3 万 t 的速率减少, 2000—2020 年 3 个站的年均输沙量分别为 0.010 亿 t, 0.002 亿 t, 0.031 亿 t, 较 1960—1979 年分别锐减 95.2%, 99.3%, 95.9%。温家川站多年平均输沙量为 0.653 亿 t, 输沙量最大值为 3.01 亿 t (1966 年), 最小值为 3.16 万 t (2020 年); 流域年输沙量下降显著, 以每年 272.1 万 t 的速率减少, 分别在 1979 年和 1996 年发生显著性减少, 尤其是 1996 年以后, 年均输沙量相较于 1960—1979 年阶段减少了 1.245 亿 t, 减幅为 95.89%。温家川站输沙量平均值从 1960—1969 年的 1.199 亿 t 锐减至 2010—2020 年的 0.011 亿 t, 减幅达到 99.12%。4 个水文站中温家川站输沙量年均减少速率最大, 新庙站最小。流域输沙量的减少主要与 20 世纪 70 年代的水保措施有关, 大面积的退耕还林(草), 淤地坝及水库等水利工程改变了流域坡面及沟道内的土壤侵蚀以及泥沙输移过程, 极大地减少了输送进入河流的泥沙^[9,15]。

表 2 为窟野河流域 4 个水文站径流量、输沙量及降雨量 M-K 趋势检验统计值表。由 M-K 的检验值可知, 各站点径流量和输沙量均呈显著减少的趋势

($p < 0.01$), 其中新庙站径流输沙量减少趋势最为显著, 各站降雨量呈现增加趋势, 温家川站、王道恒塔站和新庙站降雨量增加趋势分别达到 0.05, 0.1, 0.1 置信水平, 神木站降雨量增加趋势不显著。

2.1.2 径流输沙突变特征 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 (图 3)。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 ($p < 0.01$), 降雨量则均未发生突变。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%。

2.2 流域径流深、输沙模数的时空分布特征

窟野河流域年均径流深为 51.35 mm/a, 采用 M-K 趋势检验法分析窟野河流域 4 个子流域区间径流深, 结果表明新庙—王道恒塔—神木区间、王道恒塔及新庙子流域径流深呈极显著减小趋势 ($p < 0.01$), 其 M-K 趋势检验 Z 值分别为 -4.18, -5.98, -5.45, 神木—温家川呈不显著减少趋势 ($|Z| < 1.96$)。对比窟野河流域不同年代径流深的空间变化 (图 4), 发现神木—温家

川子流域径流深由 1960—1969 年的 39.59 mm/a 减少到 2000s 的 11.21 mm/a,但在 2010 年以后径流深出现明显反弹。王道恒塔和新庙子流域不同年代径

流深同样表现出相似的变化趋势,新庙—王道恒塔—神木子流域 20 世纪 60 年代至 90 年代变化较小,至 21 世纪初急剧减少至 31.07 mm/a。

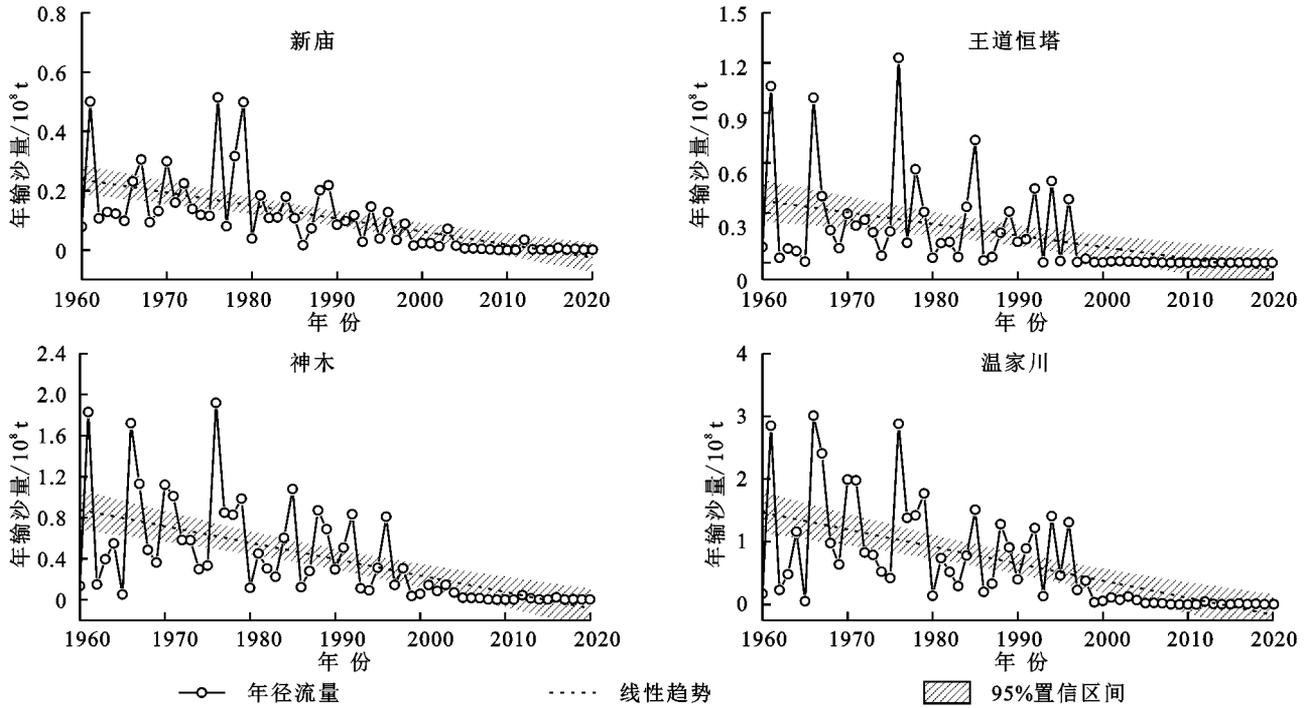


图 2 窟野河流域 1960—2020 年输沙量年际变化及线性趋势

Fig. 2 Interannual variations of sediment load in the Kuye River Basin from 1960—2020

表 2 窟野河流域水文站点径流量、输沙量与降雨量变化趋势检验

Table 2 Trend test of runoff, sediment load and rainfall in Kuye Basin

站点	径流量	输沙量	降雨量
	M-K(Z 值)	M-K(Z 值)	M-K(Z 值)
新庙	-6.48*	-6.99*	1.85***
王道恒塔	-5.30*	-6.29*	1.67***
神木	-5.66*	-6.59*	1.21
温家川	-5.83*	-6.57*	2.01**

注:*, **, *** 分别表示在 0.01, 0.05, 0.1 的置信水平上显著。

窟野河流域年均输沙模数为 6 838 t/km²,且流域输沙模数表现为南高北低(图 5)。不同子流域上,

王道恒塔、新庙、新庙—王道恒塔—神木以及神木—温家川区间输沙模数 M-K 趋势检验 Z 值分别为 -6.53, -6.27, -4.59, -4.47,表明不同子流域年输沙模数均呈极显著减小趋势($p < 0.01$)。20 世纪 60 年代除新庙子流域输沙模数为 7 869 t/km²外,其余子流域均大于 10 000 t/km²。与 60 年代相比,70 年代王道恒塔子流域输沙模数减小,其他区间输沙模数则在增加,尤其是神木—温家川区间增幅明显,增加至大于 30 000 t/km²。80 年代后 4 个子流域输沙模数均大幅减小,其中新庙、王道恒塔及新庙—王道恒塔—神木子流域输沙模数自 80 年代以后一直减小至 500 t/km²以下。

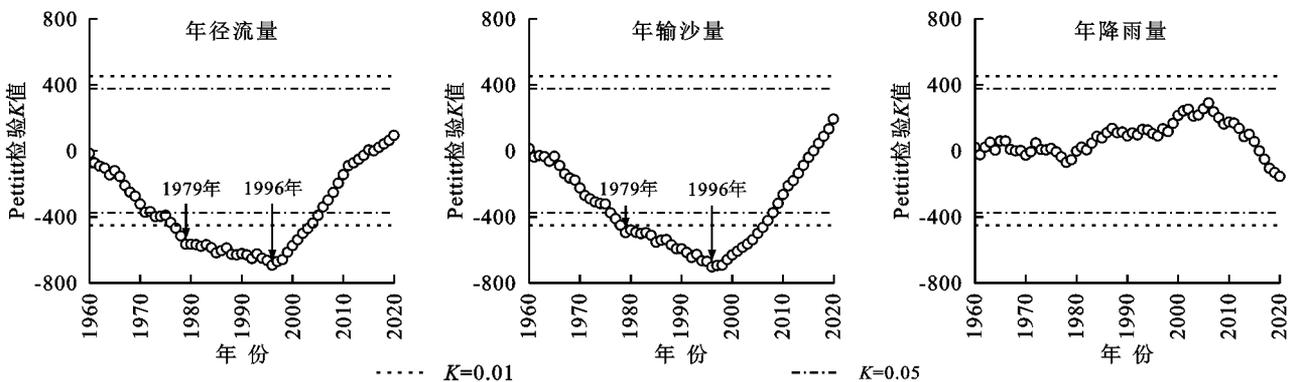


图 3 窟野河流域年径流量、输沙量和降雨量 Pettitt 突变检验

Fig. 3 Pettitt test in runoff, sediment load, rainfall in the Kuye River Basin

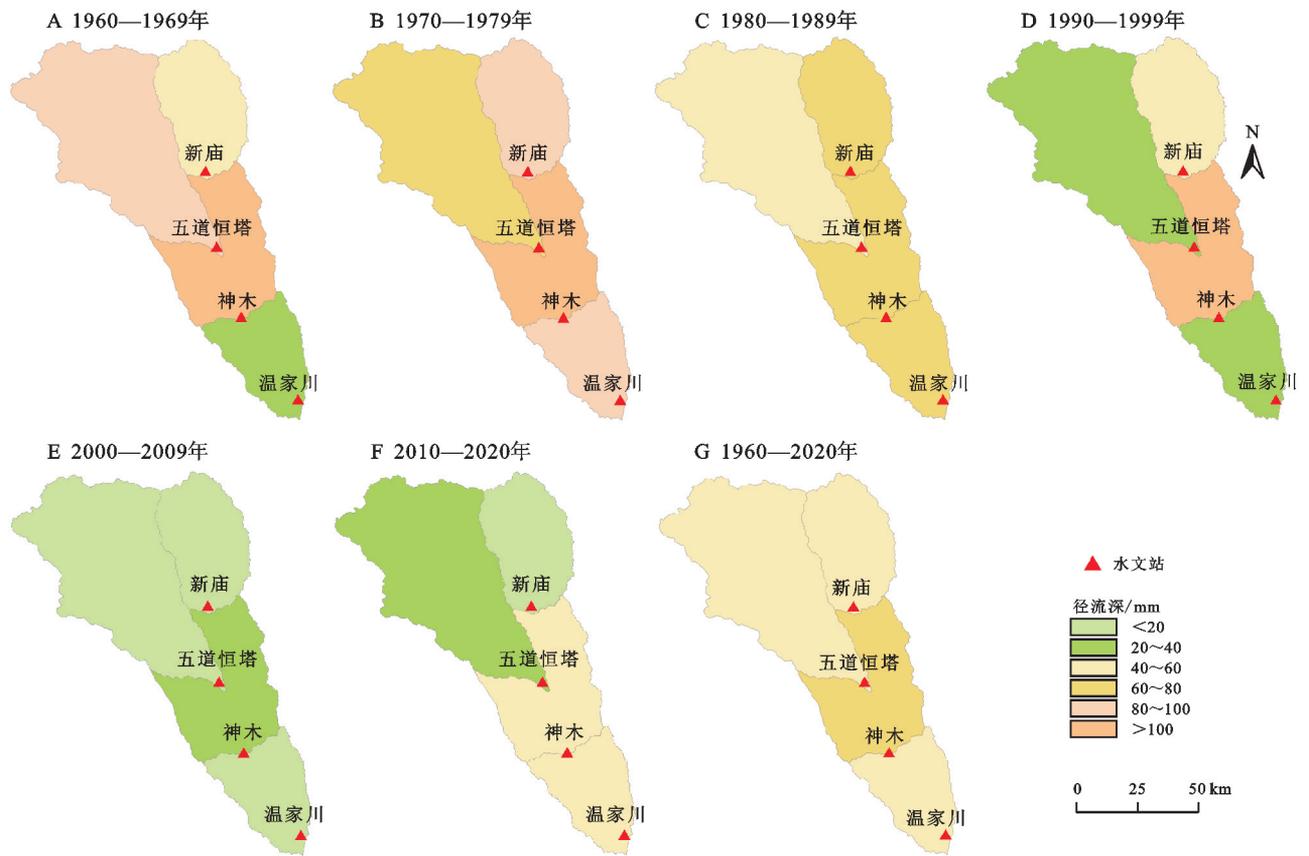


图 4 窟野河流域不同年代径流深空间分布

Fig. 4 Spatial distribution of runoff depth in different decades in the Kuye River Basin.

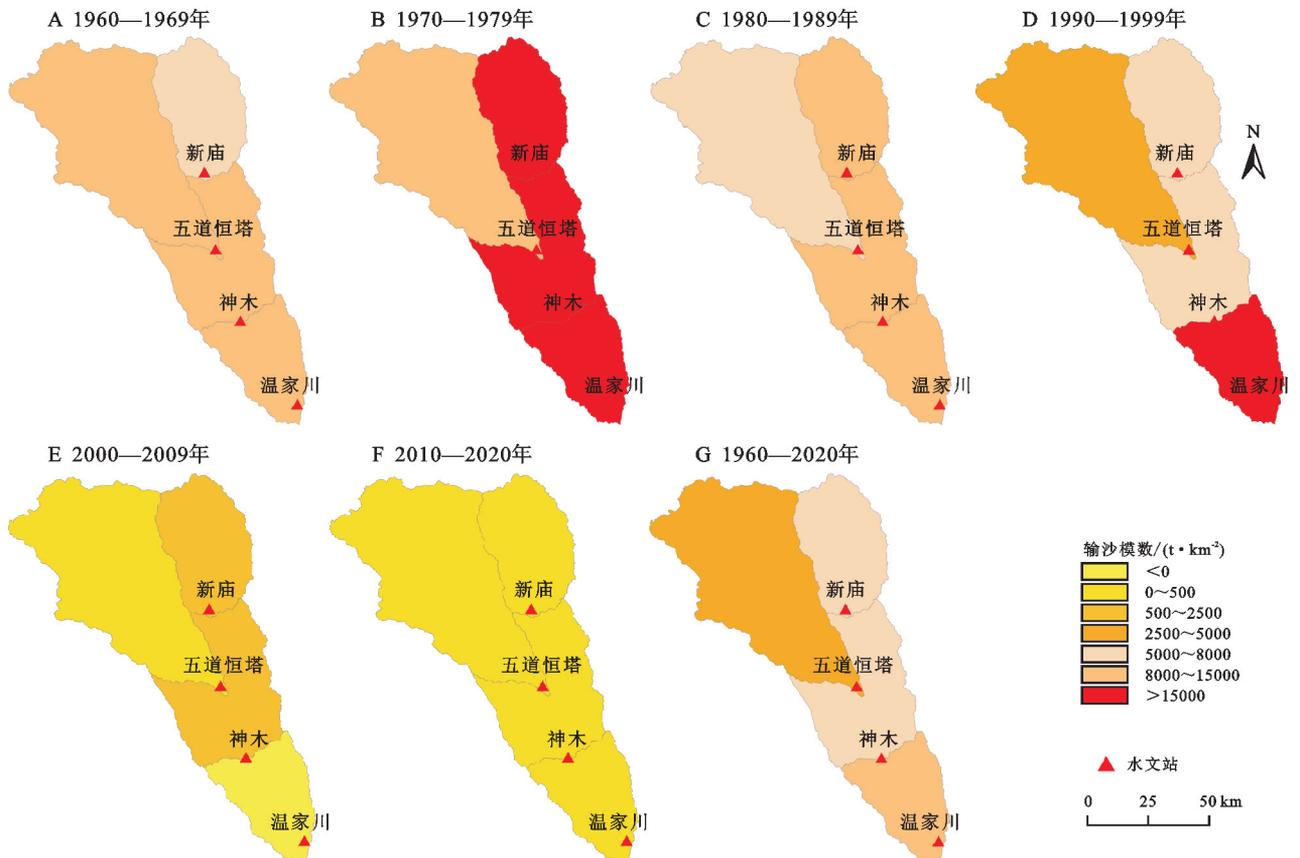


图 5 窟野河流域不同年代输沙模数空间分布

Fig. 5 Spatial distribution of sediment transport modulus in different decades in the Kuye River Basin

2.3 径流输沙变化驱动因素分析

为定量分析窟野河流域各水文站水沙量锐减成因,结合各站点年径流和年输沙量序列的突变分析,采用年降雨量-年径流量和年降雨量-年输沙量双累积曲线对径流输沙量变化进行归因分析(图 6)。各站径流量、输沙量与降雨量的累积关系均在 1979 年和 1996 年前后发生两次偏移,依据突变点将研究期分为 3 个阶段,基准期 1960—1979 年(P₁)、变化 I 期

1980—1996 年(P₂)和变化 II 期 1997—2020 年(P₃)。将变化期实测降雨资料分别代入基准期的降雨-径流、降雨-输沙回归方程可得到变化期年均径流量和输沙量的计算值,基准期实测值与变化期计算值之差为降水量变化对水沙量变化的贡献值,同一时期计算值与实测值之差为人类活动对水沙量变化的贡献值,二者与实际径流输沙变化量的比值即为降水量和人类活动对径流输沙变化的贡献率^[19]。

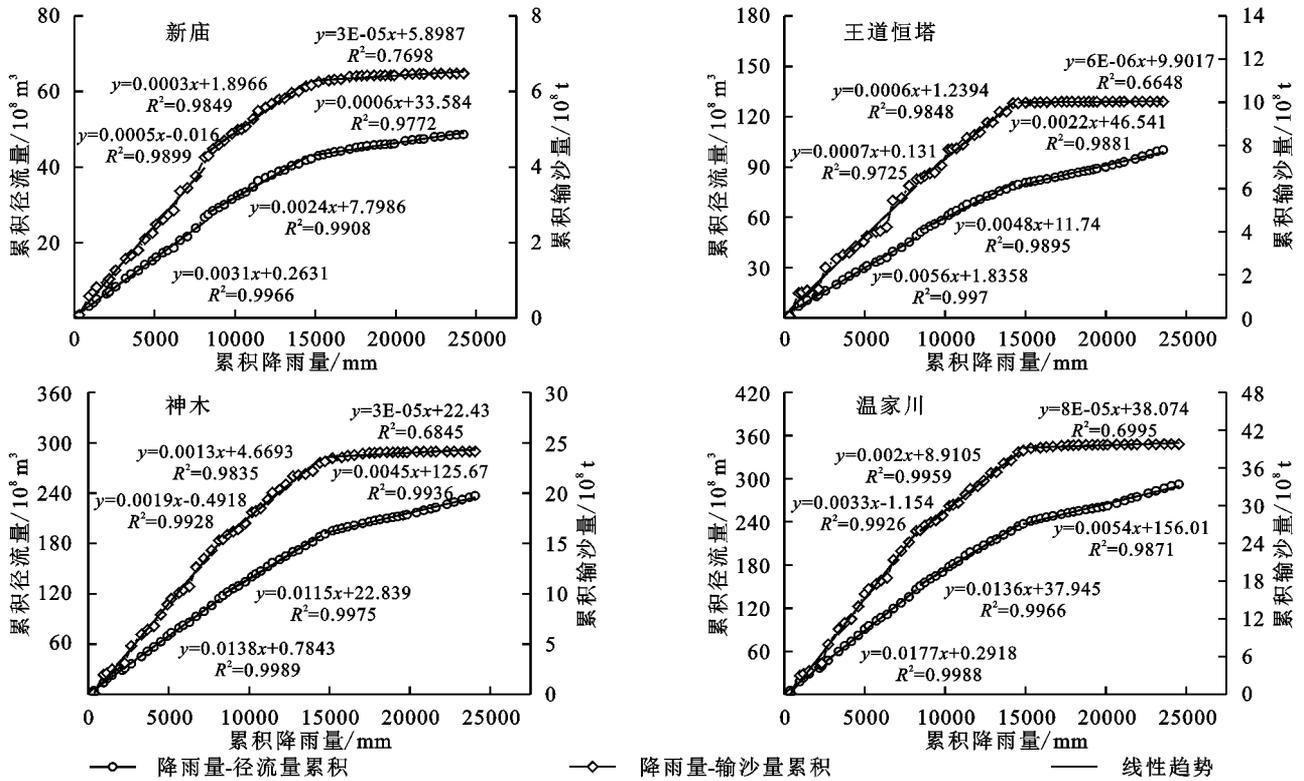


图 6 窟野河流域降雨量-径流量与降雨量-输沙量双累积曲线

Fig. 6 Double mass curves of rainfall-runoff and rainfall-sediment load in the Kuye River Basin

由表 3 可知,与 P₁ 时期相比,新庙、王道恒塔、神木和温家川站径流量在 P₂ 时期、P₃ 时期均呈减少趋势,且 P₃ 时期减少幅度都比 P₂ 时期大。P₂ 时期,降雨量变化引起新庙、王道恒塔、神木和温家川站径流量分别减少了 0.184 亿 m³, 0.474 亿 m³, 0.623 亿 m³, 0.682 亿 m³, 人类活动引起的径流减少量则分别为 0.259 亿 m³, 0.230 亿 m³, 0.748 亿 m³, 1.442 亿 m³, 除王道恒塔站外,其他 3 个水文站人类活动的贡献率均高于降雨变化的贡献率。相较于 P₂ 时期,P₃ 时期各水文站人类活动的贡献率大幅度增加,且远大于降雨变化的贡献率;神木站和新庙站人类活动的贡献率均超过 93%,王道恒塔站则为 82.52%。温家川站在 P₃ 时期降雨变化导致的径流量为-0.066 亿 m³,而在这阶段年均降雨量相较于 P₂ 时期也增加了近 80 mm,表明 P₃ 时期降雨量的增加导致该站径流量增加,由此可见人类活动在这一时期对径流量减少占主导地位。

由表 4 可知,P₂ 时期,新庙和神木站人类活动对输沙量变化的贡献率从 73.17%, 79.46% 增加至 P₃ 时期的 95.61%, 99.84%, 说明人类活动的影响在逐渐增加。王道恒塔站在 P₂ 时期降雨量对输沙量减少的贡献率大于人类活动的贡献率,但在 P₃ 时期人类活动的贡献率远远大于降雨量。温家川站人类活动对输沙量变化的贡献率则由 P₂ 时期的 88.43% 增加至 P₃ 时期的 105.98%, 表明 P₃ 时期输沙量的减少完全是由人类活动引起的。由此看出,人类活动是窟野河流域输沙量减少的主要因素。

3 讨论

河流水沙变化受气候变化与人类活动共同影响。20 世纪 70 年代初,窟野河流域开始实施大规模的水土保持综合治理,主要措施包括造林、种草、梯田和淤地坝建设等^[12]。90 年代末期,由于退耕还林(草)

工程的实施,流域林草地面积明显增加,截至 2010 年林草覆盖率高达 46%。林草植被在减少径流泥沙方面发挥着重要作用,能够通过林冠层和枯枝落叶层对降水进行截留再分配,增加降水的入渗和蒸发,削减洪峰流量,同时还能改变微地形,减少雨滴击溅侵蚀,在一定程度上减少坡面侵蚀,从而有效减少入河泥沙^[11,20]。刘晓燕等^[21]通过研究植被变化对水沙的影响发现,窟野河流域随着植被改善,其减水减沙作用逐渐增大,与 1979 年以前相比,1997—2011 年和 2012—2019 年植被状况下的流域产水能力分别降低了 37.1%,58.1%,减沙量则分别为 3 313 万 t/a,

13 014 万 t/a。淤地坝等工程措施能够改变地表产汇流机制和水文循环,改善流域内下垫面状况及生态环境,是最有效的拦泥措施^[22-23]。截至 2016 年,窟野河流域内有两座中型水库和 11 座小型水库,淤地坝 1 574 座,其中大中型淤地坝 699 座、小型淤地坝 875 座,总控制面积 1 798 km²,因此流域内淤地坝的建设与运行能拦蓄大量泥沙,使入黄泥沙大幅减少。各子流域输沙模数在 20 世纪 70—80 年代急剧下降,尤其是神木-温家川子流域输沙模数下降超过 20 000 t/km²,表明淤地坝等工程措施确能有效地拦截进入河流的泥沙。

表 3 降雨和人类活动对窟野河流域各水文站径流量的影响

Table 3 Influence of rainfall and human activities on runoff in the Kuye River basin

水文站	时段	实测值/ 亿 m ³	计算值/ 亿 m ³	实测径流量变化		降水影响		人类活动	
				变化量/ 亿 m ³	占比/ %	变化量/ 亿 m ³	占比/ %	变化量/ 亿 m ³	占比/ %
新庙	P ₁	1.333	1.272						
	P ₂	0.890	1.149	0.443	33.20	0.184	41.52	0.259	58.48
	P ₃	0.285	1.266	1.048	78.63	0.067	6.38	0.981	93.62
王道恒塔	P ₁	2.451	2.323						
	P ₂	1.747	1.977	0.704	28.72	0.474	67.30	0.230	32.70
	P ₃	0.894	2.179	1.557	63.52	0.272	17.48	1.285	82.52
神木	P ₁	5.716	5.649						
	P ₂	4.346	5.093	1.371	23.98	0.623	45.46	0.748	54.54
	P ₃	2.022	5.551	3.694	64.62	0.165	4.48	3.529	95.52
温家川	P ₁	7.299	7.295						
	P ₂	5.176	6.617	2.123	29.09	0.682	32.10	1.442	67.90
	P ₃	2.431	7.365	4.868	66.69	-0.066	-1.36	4.934	101.36

表 4 降雨和人类活动对窟野河流域各水文站输沙量的影响

Table 4 Influence of rainfall and human activities on sediment load in the Kuye River basin

水文站	时段	实测值/ 亿 t	计算值/ 亿 t	实测输沙量变化		降水影响		人类活动	
				变化量/ 亿 t	占比/ %	变化量/ 亿 t	占比/ %	变化量/ 亿 t	占比/ %
新庙	P ₁	0.213	0.205						
	P ₂	0.110	0.185	0.103	48.25	0.028	26.83	0.075	73.17
	P ₃	0.014	0.204	0.199	93.22	0.009	4.39	0.190	95.61
王道恒塔	P ₁	0.322	0.291						
	P ₂	0.207	0.247	0.115	35.63	0.074	64.96	0.040	35.04
	P ₃	0.003	0.272	0.318	98.95	0.049	15.48	0.269	84.52
神木	P ₁	0.765	0.778						
	P ₂	0.453	0.701	0.313	40.82	0.064	20.54	0.248	79.46
	P ₃	0.047	0.764	0.718	93.80	0.001	0.16	0.717	99.84
温家川	P ₁	1.299	1.360						
	P ₂	0.737	1.233	0.561	43.22	0.065	11.57	0.496	88.43
	P ₃	0.053	1.373	1.245	95.89	-0.075	-5.98	1.320	105.98

近几十年来,煤炭开采等人类活动成为窟野河流域径流输沙减少的主要因素之一。窟野河流域是我国著名的能源基地,流域内矿区面积高达 2 482 km²。大规模的煤炭开采破坏地层结构,形成采空区,极易造成地表裂缝、沉陷;同时破坏含水层结构,导致大量导水裂隙形成,降低地下水位,使区域地

表水、地下水资源枯竭,从而影响进入河流汇流量^[21,24]。此外,流域内大规模的煤炭开采及相关工业耗水量不断增加,改变了流域水循环路径,延长汇流时间,使洪水过程坦化,进而使得河流径流量减少^[21]。随着流域中上游煤炭开采量大幅度增加,窟野河断流现象日趋严重,据资料统计,2000 年断流 75 d,2001 年断流 106 d,2002 年

断流 220 d, 2003—2005 年每年断流都超过 100 d^[25]。众多研究认为以采煤为主的人类活动是径流减少的主要原因, 蒋晓辉等^[26] 研究表明流域煤炭开采量 1996 年后急剧增加, 与水沙突变点时间相一致, 1997—2006 年采煤年均减水贡献率为 54.8%。刘二佳等^[27] 认为煤炭开采对多年平均径流量的减少贡献 52.27% (1997—2005 年)。煤矿开采不仅会对径流产生影响, 也对输沙量的变化产生影响。流域内矿区大多分布在多沙粗沙区, 且有砒砂岩出露, 在高强度降雨条件下, 产沙量集中, 往往容易形成高含沙洪水; 但在径流量和洪峰流量大幅减小的影响下, 径流的挟沙力下降, 泥沙难以输送至河道中^[28-29]。

综上所述, 窟野河流域径流输沙受到人类活动影响发生突变的时间为 1979 年和 1996 年。1960—1979 年窟野河流域各水文站径流量与降水量相关性较好, 1979 年以前径流量变化主要受降水量影响。20 世纪 70 年代后期, 水土保持措施等人类活动对窟野河流域径流输沙量的变化产生较大的影响, 淤地坝等工程措施较好地拦截进入河流的泥沙, 减沙效益显著。流域内大规模的煤炭开采, 尤其是 1996 年后, 使得流域径流输沙量进一步减少。

4 结论

(1) 窟野河流域各水文站年径流输沙量均呈极显著减少趋势 ($p < 0.01$), 温家川站径流、输沙年均减少速率最大, 新庙站最小; 王道恒塔站输沙量减幅最大, 新庙站径流量减幅最大。窟野河流域温家川站年径流量和输沙量于 1979 年和 1996 年发生突变。较 1960—1996 年, 1996—2020 年径流量和输沙量分别减少了 61.56%, 94.87%。

(3) 窟野河流域多年平均径流深和输沙模数在空间上表现为南高北低, 年均径流深和输沙模数分别为 51.35 mm/a, 6 838 t/km²。流域不同区间输沙模数自 1960—2020 年均呈极显著减小趋势 ($p < 0.01$), 径流深除神木—温家川子流域呈不显著减少趋势外, 其余子流域亦呈现极显著减小趋势 ($p < 0.01$)。

(4) 较基准期而言, 各水文站径流输沙量在 P₂ 期、P₃ 期均减少, 且 P₃ 时期减少幅度更剧烈。不同水文站在 P₂ 和 P₃ 时期内, 人类活动对径流输沙的贡献高于降雨变化, 且在 P₃ 时期人类活动的贡献率显著增加。由此表明, 流域不断增强的人类活动 (水利水保措施与煤矿开采等) 是窟野河流域水沙变化的主导因素。

参考文献 (References):

- [1] Li L, Ni J R, Chang F, et al. Global trends in water and sediment fluxes of the world's large rivers[J]. Science Bulletin, 2020, 65(1): 62-69.
- [2] Wang S, Fu B J, Piao S L, et al. Reduced sediment transport in the Yellow River due to anthropogenic changes[J]. Nature Geoscience, 2016, 9: 38-41.
- [3] Liang W, Bai D, Wang F Y, et al. Quantifying the impacts of climate change and ecological restoration on streamflow changes based on a Budyko hydrological model in China's Loess Plateau[J]. Water Resources Research, 2015, 51(8): 6500-6519.
- [4] 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(4): 524-532. Hu C H, Wang Y G, Zhang Y J, et al. Variation tendency of runoff and sediment load in China major rivers and its causes[J]. Advances in Water Science, 2010, 21(4): 524-532.
- [5] 姚文艺, 冉大川, 陈江南. 黄河流域近期水沙变化及其趋势预测[J]. 水科学进展, 2013, 24(5): 607-616. Yao W Y, Ran D C, Chen J N. Recent changes in runoff and sediment regimes and future projections in the Yellow River basin[J]. Advances in Water Science, 2013, 24(5): 607-616.
- [6] 胡春宏, 张晓明. 黄土高原水土流失治理与黄河水沙变化[J]. 水利水电技术, 2020, 51(1): 1-11. Hu C H, Zhang X M. Loess Plateau soil erosion governance and runoff-sediment variation of Yellow River[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2020, 51(1): 1-11.
- [7] Zhao G J, Tian P, Mu X M, et al. Quantifying the impact of climate variability and human activities on streamflow in the middle reaches of the Yellow River basin, China[J]. Journal of Hydrology, 2014, 519: 387-398.
- [8] 赵阳, 胡春宏, 张晓明, 等. 近 70 年黄河流域水沙情势及其成因分析[J]. 农业工程学报, 2018, 34(21): 112-119. Zhao Y, Hu C H, Zhang X M, et al. Analysis on runoff and sediment regimes and its causes of the Yellow River in recent 70 years[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2018, 34(21): 112-119.
- [9] 赵广举, 穆兴民, 温仲明, 等. 皇甫川流域降水和人类活动对水沙变化的定量分析[J]. 中国水土保持科学, 2013, 11(4): 1-8. Zhao G J, Mu X M, Wen Z M, et al. Impacts of precipitation and human activities on streamflow and sediment load in the Huangfuchuan Watershed[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2013, 11(4): 1-8.
- [10] Liang W, Bai D, Jin Z, et al. A study on the streamflow change and its relationship with climate change and ecological restoration measures in a sediment concentrated region in the Loess Plateau, China[J]. Water Resources Management, 2015, 29(11): 4045-4060.
- [11] 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(3): 499-507. Li H J, Shi C X, Ma X Q, et al. Quantification of the

- influencing factors of runoff and sediment discharge changes of the Kuye River catchment in the middle reaches of the Yellow River[J]. Resources Science, 2020,42(3):499-507.
- [12] 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(4):68-74.
Liu Q, Cai X Y, Liu J Y, et al. Variation characteristics and causes of runoff-sediment relationship in Kuye River Basin in the middle reaches of the Yellow River [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2022,29(4):68-74.
- [13] Mann H B. Nonparametric tests against trend [J]. Econometrica: Journal of the econometric society, 1945,13(3):245-259.
- [14] Kendall M G. Rank correlation methods [J]. British Journal of Psychology, 1990,25(1):86-91.
- [15] 赵广举,穆兴民,田鹏,等.近60年黄河中游水沙变化趋势及其影响因素分析[J].资源科学,2012,34(6):1070-1078.
Zhao G J, Mu X M, Tian P, et al. The Variation trend of streamflow and sediment flux in the middle reaches of Yellow River over the past 60 years and the influencing factors[J]. Resources Science, 2012,34(6):1070-1078.
- [16] Pettitt A N. A non-parametric approach to the change-point problem[J]. Journal of the Royal Statistical Society Series C: Applied Statistics, 1979,28(2):126-135.
- [17] 田小靖.黄土高原流域侵蚀产沙变化及其驱动因素[D].陕西杨凌:西北农林科技大学,2020.
Tian X J. Sediement Yield Changes and Their Controlling Factors in the Loess Plateau Catchments[D]. Yangling, Shaanxi: Northwest A&F University, 2020.
- [18] 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.
- [19] 李二辉,穆兴民,赵广举.1919—2010年黄河上中游区径流量变化分析[J].水科学进展,2014,25(2):155-163.
Li E H, Mu X M, Zhao G J. Temporal changes in annual runoff and influential factors in the upper and middle reaches of Yellow River from 1919—2010[J]. Advances in Water Science, 2014,25(2):155-163.
- [20] 王国庆,张建云,李岩,等.窟野河流域径流演变及其驱动因素分析[J].水资源与水工程学报,2014,25(2):7-11,16.
Wang G Q, Zhang J Y, Li Y, et al. Analysis of runoff evolution and factor of driving force in Kuye River catchment[J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2014,25(2):7-11,16.
- [21] 刘晓燕,李皓冰,李晓宇,等.黄河流域窟野河入黄水沙锐减成因分析[J].水利学报,2022,53(3):296-305.
Liu X Y, Li H B, Li X Y, et al. Analysis on the cause of sharp decrease of runoff and sediment from Kuye River in Loess Plateau[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2022,53(3):296-305.
- [22] 穆兴民,巴桑赤烈,Zhang Lu,等.黄河河口镇至龙门区间来水来沙变化及其对水利水保措施的响应[J].泥沙研究,2007(2):36-41.
Mu X M, Basang C L, Zhang L, et al. Impact of soil conservation measures on runoff and sediment in Hekou-Longmen region of the Yellow River [J]. Journal of Sediment Research, 2007(2):36-41.
- [23] 蒋凯鑫,于坤霞,曹文洪,等.黄土高原典型流域水沙变化归因对比分析[J].农业工程学报,2020,36(4):143-149.
Jiang K X, Yu K X, Cao W H, et al. Attributional comparative analysis of runoff and sediment change in typical basin of Loess Plateau[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2020,36(4):143-149.
- [24] 雷泳南,张晓萍,张建军,等.窟野河流域河川基流量变化趋势及其驱动因素[J].生态学报,2013,33(5):1559-1568.
Lei Y N, Zhang X P, Zhang J J, et al. Change trends and driving factors of base flow in Kuye River Catchment[J]. Acta Ecologica Sinica, 2013,33(5):1559-1568.
- [25] 白乐,李怀恩,何宏谋.窟野河径流变化检测及归因研究[J].水力发电学报,2015,34(2):15-22.
Bai L, Li H E, He H M. Analysis on detection and attribution of runoff change in Kuye River Basin[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2015,34(2):15-22.
- [26] 蒋晓辉,谷晓伟,何宏谋.窟野河流域煤炭开采对水循环的影响研究[J].自然资源学报,2010,25(2):300-307.
Jiang X H, Gu X W, He H M. The influence of coal mining on water resources in the Kuye River Basin[J]. Journal of Natural Resources, 2010,25(2):300-307.
- [27] 刘二佳,张晓萍,张建军,等.1956—2005年窟野河径流变化及人类活动对径流的影响分析[J].自然资源学报,2013,28(7):1159-1168.
Liu E J, Zhang X P, Zhang J J, et al. Variation of annual streamflow and the effect of human activity in the Kuye River during 1956 to 2005 [J]. Journal of Natural Resources, 2013,28(7):1159-1168.
- [28] 郭巧玲,陈新华,孙斌.窟野河水沙变化及驱动力分析[J].水土保持学报,2015,29(1):17-20.
Guo Q L, Chen X H, Sun B. Analysis of water and sediment changes and related driving forces in Kuye River Basin[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2015,29(1):17-20.
- [29] 高文永,高亚军,徐建华.采矿塌陷对窟野河流域水沙的影响[J].人民黄河,2017,39(11):76-80,102.
Gao W Y, Gao Y J, Xu J H. Influences of mining collapse on water and sediment of Kuye River Basin[J]. Yellow River, 2017,39(11):76-80,102.