



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

张健康, 王计平, 石建省

Attribution analysis of water-sediment variation under the influence of climate change and human activities in the Kuye River Basin

ZHANG Jiankang, WANG Jiping, and SHI Jiansheng

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202312053>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于MODIS蒸散量数据的淮河流域蒸散发时空变化及影响因素分析

Spatio-temporal change and influencing factors of evapotranspiration in the Huaihe River Basin based on MODIS evapotranspiration data
郭晓彤, 孟丹, 蒋博武, 朱琳, 龚建师 水文地质工程地质. 2021, 48(3): 45–52

基于Landsat遥感影像的围场县植被覆盖时空格局变化

Change in temporal-spatial pattern of vegetation coverage in Weichang County based on Landsat remote sensing image
周智勇 水文地质工程地质. 2020, 47(6): 81–90

内蒙古西辽河平原植被指数时空变化及其影响因素研究

Spatial and temporal variations in vegetation index and its impact factors in the West Liaohe Plain in Inner Mongolia
高萌萌, 刘琼, 王轶, 李小磊, 石鹏 水文地质工程地质. 2022, 49(1): 175–182

格尔木河流域水面蒸发特征及影响因素分析

Characteristics of evaporation and its effect factors in the Golmud River catchment
黄金廷, 李宗泽, 王文科, 宋歌, 王嘉玮 水文地质工程地质. 2021, 48(3): 31–37

粒度指标指示的坝上御道口地区8 000 a B.P.环境变化

Environment Changes revealed by grain size from Yudaokou in Bashang area since 8000 a B.P.
黄劭康, 贾红娟, 武俊叶, 张昊, 殷志强 水文地质工程地质. 2020, 47(6): 74–80

人类活动对全球淡水循环影响与水行星边界评估研究进展

Research progress of the anthropogenic influences on global freshwater cycle and the water planetary boundary assessment
杨建锋, 左力艳, 姚晓峰, 马腾 水文地质工程地质. 2022, 49(4): 1–9



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: [10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202312053](https://doi.org/10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202312053)

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(6): 47-59.

ZHANG Jiankang, WANG Jiping, SHI Jiansheng. Attribution analysis of water-sediment variation under the influence of climate change and human activities in the Kuye River Basin[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2024, 51(6): 47-59.

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

张健康¹, 王计平², 石建省¹

(1. 中国地质科学院水文地质环境地质研究所, 河北 石家庄 050061;
2. 中国林业科学研究院生态保护与修复研究所, 北京 100091)

摘要: 流域水沙情势演变归因是水文地质学的研究重点之一。为了深入理解窟野河流域水沙变化规律, 并为水资源管理和生态保护提供科学依据, 以应对气候变化和人类活动的影响, 基于水文、气象、归一化植被指数、土地利用等数据信息, 运用累积量斜率变化率分析法、Mann-Kendall 非参数检验法、双累积曲线法、累积距平法、滑动秩和检验法等方法, 定量研究气候变化和人类活动综合作用下流域水沙变化趋势及其影响归因。结果表明: (1)窟野河流域 1956—2019 年的年径流量、年输沙量呈显著减少趋势, 年径流量和年输沙量平均每年减少约 $0.104 \times 10^8 \text{ m}^3$ 和 $0.027 \times 10^8 \text{ t}$, 突变年为 1997 年, 通过了 5% 显著性水平检验; (2)1998—2011 年间, 气候变化和人类活动对流域年径流量减少的贡献率分别为 36.06% 和 63.94%, 对年输沙量减少的贡献率分别为 26.11% 和 73.89%, 其中径流量减少主要与退耕还林还草工程导致的植被、土地利用/覆被变化有关; (3)以 1998—2011 年为基准期, 2012—2019 年累积径流量斜率变化率高达 109%, 径流量反弹明显, 可能与矿井封存水外溢有关, 同时, 累积输沙量斜率接近零, 输沙量无显著变化, 说明研究区土壤侵蚀得到有效控制。研究成果为窟野河流域水文预测与管理提供科学依据, 未来需重点关注生态恢复和煤炭开采活动对水资源变化的复合影响。

关键词: 累积量斜率变化率; 水沙变化; 气候变化; 人类活动; 归一化植被指数

中图分类号: P641.69

文献标志码: A

文章编号: 1000-3665(2024)06-0047-13

Attribution analysis of water-sediment variation under the influence of climate change and human activities in the Kuye River Basin

ZHANG Jiankang¹, WANG Jiping², SHI Jiansheng¹

(1. Institute of Hydrogeology and Environmental Geology, CAGS, Shijiazhuang, Hebei 050061, China;
2. Institute of Ecological Conservation and Restoration, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China)

Abstract: The attribution of the evolution of water and sediment in a river basin is an important theoretical issue in hydrogeology. To understand the change patterns of water and sediment in the Kuye River Basin and provide scientific basis for water resources management and ecological protection under the impacts of climate change and

收稿日期: 2023-12-05; 修定日期: 2024-02-17

投稿网址: www.swdzgcdz.com

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(41871195); 中国林科院生态保护与修复研究所科技项目(STSTC2023008)

第一作者: 张健康(1984—), 女, 博士, 高级工程师, 主要从事生态水文地质研究。E-mail: jiankangzhang@88.com

通讯作者: 王计平(1978—), 男, 博士, 副研究员, 主要从事景观格局与过程评价相关研究。E-mail: wang_jp@caf.ac.cn

human activities, based on hydrological and meteorological observation data, NDVI (normalized difference vegetation index), and land use change data, this study quantitatively analyzed the trends of water and sediment changes in the basin and their attributed influences using the Mann-Kendall non-parametric test, double mass curve method, cumulative anomaly analysis, sliding rank-sum test, and cumulative quantity slope change rate analysis. The results indicate that from 1956 to 2019, the annual runoff and sediment yield in the Kuye River Basin showed a significant decreasing trend, with an average annual decrease of approximately 10.4 million m^3 and 2.7 million tons. The abrupt change year was 1997, verified by the 95% significance level test. From 1998 to 2011, the contribution rates of climate change and human activities to the decrease in annual runoff were 36.06% and 63.94%, respectively. The contribution rates to the decrease in sediment transport were 26.11% and 73.89%, respectively. The decrease in runoff is mainly related to vegetation and land use/cover changes caused by the Grain for Green Program. Using 1998—2011 as the base period, the cumulative slope change rate of runoff reached 109% during 2012—2019. It indicates a significant rebound in runoff, possibly related to the overflow of mine sealing water. The cumulative slope of sediment yield approached 0, indicating no significant change in sediment yield and effective control of soil erosion in the study area. The analysis method of slope change rate of cumulative quantity has good applicability and provides scientific basis for hydrological prediction and management in the Kuye River basin. In the future. It is necessary to pay more attention to the combined effects of ecological restoration and coal mining activities on water resources change.

Keywords: slope change rate of cumulative quantity; water and sand changes; climate change; human activity; NDVI

随着气候暖化和人类活动加剧,水资源问题日益成为全球面临的重大挑战之一^[1-2]。在气候变化和人类活动综合影响下,埃及尼罗河^[3]、美国科罗拉多河^[4]、中国长江与黄河^[5]、柬埔寨湄公河^[2]等许多大型河流的水沙过程发生了明显变化^[1-2]。由于其独特的地理环境和生态特征,黄土高原受到气候变化和人类活动的影响更加显著。流域水土流失以及由此引发的水沙问题是制约地区生态和经济社会可持续发展的重要因素^[6]。气候变化引起了广泛的影响,其中包括气温升高、降水分布不均、极端天气事件增加等。这些变化对水资源系统产生了直接的影响。此外,大规模人类活动的影响,如农业生产、退耕还林还草工程、水土保持措施的实施以及水资源的开发利用,对地表径流和河流水沙输送的变化产生了显著的影响。科学认识流域水沙变化趋势,准确量化和辨识影响因素,可以为合理规划水资源、优化土壤侵蚀治理策略、提升生态环境质量提供重要支撑。

径流量可以反映流域内雨水和融雪等降水径流入河流的情况,输沙量用来反映河流对悬移质的输送质量,同时也是土壤侵蚀和河床演变的重要指标,二者联系及变化通常指示流域内降水、土壤侵蚀、植被覆盖、人类活动等因素对水文和泥沙过程的影响。运用科学方法准确评价径流输沙变化的程度,量化人类活动和气候变化的影响,是厘清流域水文过程变化机

制及其影响规律的重要途径。目前常用的方法包括水文模型、遥感监测技术、河流水沙关联分析、弹性系数法等。水文模型可以实现不同尺度的模拟和评估^[7-12],但是对数据的要求很严格,参数估计存在不确定性,尤其与遥感监测技术的结合,通常受限于复杂地貌和植被条件。水沙关联分析可根据已有数据通过关联模型较容易实现泥沙过程的监测和评估,但对非线性关系和季节变化的处理存在一定的挑战。基于Budyko假设的弹性系数法可分离气候变化和人类活动的影响,在近些年的研究中应用较为广泛^[12-14],但是需要准确的数据和较为稳定的水文和泥沙模型作为支持。少数学者采用多种方法开展研究,可以提高研究的准确性和信息丰富度。例如,Cheng等^[15-17]采用双累积曲线、累积量斜率变化、基于Budyko假设的Choudhury-Yang方程等多种方法对中国西北地区黑河流域的径流变化特征进行了研究。然而,这种做法也会增加数据要求、时间和资源成本,并且在模型选择和比较方面可能具有一定的挑战。相比而言,累积量斜率变化率分析法作为一种估算降水、气温等因子对径流变化贡献的统计方法^[15],具有简单易懂、较好地处理非线性变化、适用范围广等特点,善于揭示长时间尺度水沙演变的变化趋势及主导因素,可用于分析和比较不同时间尺度、不同空间尺度和不同区域的水沙过程,已在辽河、松花江、黄河、黄甫川、鄂毕河

等多个流域成功实施^[15-18]，能为流域管理和决策提供重要依据。

黄河中游地区水土流失严重,一直是我国生态治理的重点。针对黄河中游地区的水沙变化问题,在区域、中小流域尺度上已经开展了一系列的研究^[19-24],取得了一定的成果和治理经验,为流域治理提供了理论和实践指导。但对黄河中游河口龙门区间段第二大支流、以多沙粗沙侵蚀为特点的窟野河流域来说,这一地区作为国家大型煤炭基地,煤矿采煤活动较其他人类活动影响更为强烈;同时,由于该流域位于毛乌素沙漠东南角,位置特殊,土壤水蚀和风蚀共存,人与自然对流域水沙过程的复合影响备受学者关注。

目前,对窟野河流域径流量演变的研究较多,如:不同学者采用多尺度水文模型^[8-10]、弹性系数法^[1, 12, 25-27]等方法开展过相关研究,但是,综合开展水沙演变的研究相对欠缺,尤其是对近十年水沙变化跟踪研究及可量化的水沙变化归因研究更少。本研究基于1956年以来的长时间尺度的水文资料、1969年以来的长时间尺度气象资料,结合1982年以来的归一化植被指数(normalized difference vegetation index, NDVI)数据集,运用突变检测、累积量斜率变化率分析等方法,定量研究气候变化和人类活动综合作用下窟野河流域水沙变化趋势及影响归因,旨在进一步理解窟野河水沙变化机制,准确评估人类活动和气候变化的影响,为制定生态治理措施以及保护黄河流域生态环境提供了重要的科学依据。

1 研究区概况

窟野河是黄河一级支流,面积8706 km²,跨越陕西省、内蒙古自治区(图1)。窟野河发源于内蒙古巴定沟,干流长242 km,水系结构简单,两岸支流短小,较大支流主要有乌兰木伦河、悖牛川河等。下游最远的水文测量站为温家川水文站,位于窟野河与黄河汇合处上游6.9 km处。自西北向东南流入黄河,上游主要支流为乌兰木伦河和悖牛川河。气候类型属于温带大陆性气候,多年平均降水量为386 mm,年内降水量分布不均,呈现明显的季节性变化,夏季多雨,冬季较为干燥。夏季和冬季之间的温差很大。流域属于干旱半干旱区。地势西北高、东南低,神木县城以北地貌类型主要为沙丘和流沙覆盖区,地处毛乌素沙漠的东南边缘,地面平坦,植被以沙地植物、荒漠植被为主。神木县城以南区域为黄土丘陵沟壑区,占流域面积的31.2%,地面相对破碎,植被覆盖度低,以灌木和

草地为主^[28]。61.8% 的流域被裸露的软基岩覆盖^[29-30]，水土流失极为严重，河流含沙量大，是黄河中游洪水的重要来源区，也是造成黄河下游河道严重淤积的主要来源。1958 年，实测含沙量最大值达 $1\,700\text{ kg/m}^3$ ，是高含沙水流、高粗沙含量水流的多发区。

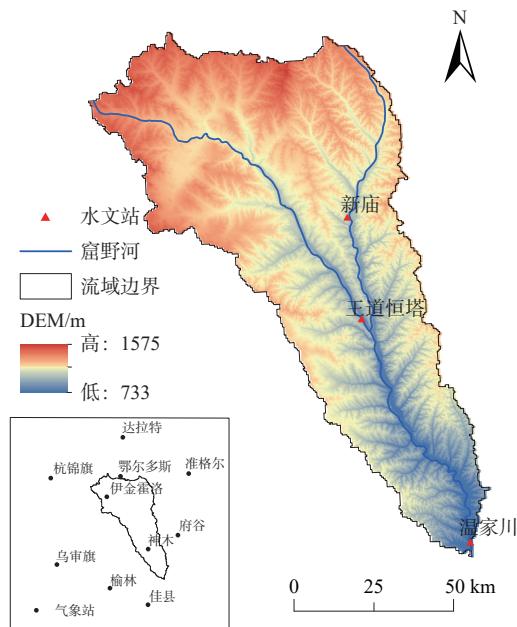


图 1 研究区位置图

2 数据及方法

2.1 数据来源与处理

研究数据包括水文、气象、NDVI、数字地形模型(digital elevation model, DEM)、土地利用类型数据等。其中,水文数据来源于中国水文统计年鉴,水文指标为月平均径流量、月平均输沙率,时间为1956—2019年,窟野河流域水文站有新庙、王道恒塔、温家川。气象数据来源于中国气象数据网(<http://data.cma.cn>),涉及陕西榆林市、内蒙古鄂尔多斯市两地的佳县、府谷、榆林、神木、乌审旗、伊金霍洛、准格尔、杭锦旗、鄂尔多斯、达拉特站等10个气象站,指标为地面累积月降水量和月平均气温,时间为1969—2019年。植被NDVI数据来源于NOAA数据的官方网站,时间序列为1982—2020年,空间分辨率为 $0.05^\circ \times 0.05^\circ$,时间分辨率为1 d。DEM数据来源于地理空间数据云网站,ASTER GDEM 30M数据源。土地利用数据年份包括1980、1990、1995、2000、2010、2020年,由中科院地理科学与资源中心提供,数据源包括Landsat-MSS、Landsat-TM/ETM、Landsat 8等遥感影像数据^[31]。

数据处理包括: 水文数据是由月度数据累加的年度数据, 包括年径流量和年输沙量数据; 气象站点数据是基于克里金插值法插值生成的年平均气温、年降水量栅格数据; 基于 GIS 空间统计对研究区生长季(4—10月)的月NDVI数据进行均值计算, 然后采用最大值复合(maximum value compositing, MVC)方法对月NDVI数据进行重构^[30]; 基于DEM数据进行镶嵌和水文分析, 提取地形信息及各级流域边界矢量范围; 基于GIS进行土地利用转移矩阵分析。数据处理和分析软件有: ArcGIS10.8、ENVI 5.2、Python3.10、Excel 2007 和 Origin 2022 等。

2.2 研究方法

2.2.1 Mann-Kendall 非参数检验法

基于年径流量、输沙量和年降水量、年均气温等站点观测数据, 利用 Mann-Kendall 非参数检验方法进行水文、气象变化趋势分析, 计算公式为^[32]:

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

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{k=i+1}^n \operatorname{sgn}(x_k - x_i) \quad (2)$$

式中: Z —标准化的检验统计量;

S —检验的统计量;

x_k 、 x_i —序列数据值;

n —序列长度;

$\operatorname{sgn}(x)$ —阶跃函数。

当 $x_k > x_i$ 时, $\operatorname{sgn}(x)$ 值为 1; 当 $x_k < x_i$ 时, $\operatorname{sgn}(x)$ 值为 -1; $x_k = x_i$ 时, $\operatorname{sgn}(x)$ 值为 0。 $Z > 0$ 为上升趋势, $Z < 0$ 为下降趋势, 在给定的 α 置信水平上, 如果 $|Z| \geq Z_{(1-\alpha/2)}$, 则时间序列数据的上升或下降趋势显著。

设要素时间序列 $X_1, X_2, \dots, X_n, S_k$ 表示第 j 个样本 $X_j > X_i$ ($1 \leq i \leq j$) 的累计数, 定义统计量 S_k :

$$S_k = \sum_{j=1}^k r_j, \quad r_j = \begin{cases} 1 & X_j > X_i \quad (i = 1, 2, \dots, j; k = 1, 2, \dots, n) \\ 0 & X_j \leq X_i \end{cases} \quad (3)$$

在时间序列随即独立的假定下, S_k 的均值 $E[S_k]$ 和方差 $\operatorname{Var}[S_k]$ 分别为:

$$E[S_k] = \frac{k(k-1)}{4}, \quad \operatorname{Var}[S_k] = \frac{k(k-1)(2k+5)}{72}$$

将 S_k 标准化 (UF_k) 表示为:

$$UF_k = \frac{S_k - E[S_k]}{\sqrt{\operatorname{Var}[S_k]}} \quad (4)$$

其中, $UF_1 = 0$, 给定显著性水平 α , 若 $|UF_k| > U_\alpha$, 表明序列存在明显的趋势变化, 所有 UF_k 可组成一条曲线。给定显著性水平 $\alpha = 0.05$, 那么临界值为 ± 1.96 ; 如果显著性水平 $\alpha = 0.01$, 则临界值为 ± 2.32 。若 $UF_k > 0$, 则表明序列呈上升趋势; $UF_k < 0$ 表明呈下降趋势。当超过临界值时, 表明上升或下降趋势显著, 超过临界值的时间范围确定为出现突变的时间段。

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^[33-34]。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^[35]。

2.2.3 累积距平法

累积距平法是一种直观反映水文、气象突变位置的方法^[36]。假设一组无规律的水文、气象序列 m_1, m_2, \dots, m_n , 某某一时刻 t 的累积距平值为:

$$m = \sum_{i=1}^t (m_i - \bar{m}) \quad (t = 1, 2, \dots, n) \quad (5)$$

式中: m_i —第 i 时刻的水文、气象要素的值;

\bar{m} —水文、气象要素的多年平均值。

根据累积距平值绘制累积距平曲线, 极值对应的时间即为水文、气象要素的大致突变时间^[37]。

2.2.4 滑动秩和检验

秩和检验是一种用样本秩代替样本值的非参数检验法^[38]。将一个序列 $x(t)$ 分成 2 个样本序列 n_1, n_2 , 样本数较小的为 n_1 , 较大的为 n_2 , 即 $n_1 < n_2$, 构造秩统计量 (U):

$$U = \frac{W - n_1(n_1 + n_2 + 1)/2}{\sqrt{\frac{n_1 n_2 (n_1 + n_2)}{12}}} \quad (6)$$

式中: n —样本容量;

$W = n_1$ 中各数值的秩之和。

U 服从标准正态分布, 若 $|U| > 1.96$, 即通过了 5% 显著性检验, 则变异点明显, 否则变异点不明显。

滑动秩和检验法即对时间序列的水文、气象数据逐点进行秩和检验, 找出满足 $|U| > 1.96$ 的变异点中使得统计量 U 计算值达到最大所对应的时间点, 为最有可能的变异点^[39]。

2.2.5 累积量斜率变化率分析法

累积量斜率变化率分析法是 Wang 等^[16] 提出的一

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。在不考虑其他因素的情况下,降水对径流变化的贡献始终等于时间与累积降水量的线性关系斜率变化率除以时间与累积径流量的线性关系斜率变化率。在利用此方法计算降水对径流变化的贡献后,可进一步分析其他因子的贡献。

本文采用累积量斜率变化率分析法计算降水、气温等因素对径流、输沙变化的贡献及其影响。建立各个水文气象要素(y)与时间(t)的线性相关方程 $y=S_t t+a$ (S_t 为斜率; a 为截距),分时段求出各关系式的斜率。

将突变前的时期即“基准期”定为a时期,突变后的时期即“影响期”定为b时期。以降水量对径流量的影响为例,累积径流量、累积降水量与年份的关系式斜率在a时期分别为 S_{Ra} 、 S_{Pa} ,在b时期分别为 S_{Rb} 、 S_{Pb} 。

累积径流量和累积降水量在变异性相对于基准期的斜率变化率 R_{SR} 、 R_{SP} 分别定义为:

$$R_{SR} = (S_{Rb} - S_{Ra})/S_{Ra} \times 100\% \quad (7)$$

$$R_{SP} = (S_{Pb} - S_{Pa})/S_{Pa} \times 100\% \quad (8)$$

通常,降水量与径流量、输沙量呈正相关关系,年均气温、年最大NDVI与径流量、输沙量呈负相关关系^[40]。

年降水量对径流量的贡献率(C_{PR})定义为:

$$C_{PR} = (R_{SP}/R_{SR}) \times 100\% \quad (9)$$

同理可以计算出其他因素对径流量和输沙量的贡献率。

综合考虑水、热要素,气候变化对年径流量变化的贡献率(C_{RC})为:

$$C_{RC} = C_{PR} + C_{TR} \quad (10)$$

式中: C_{TR} —年均气温对年径流的贡献率。

在只考虑气候变化和人类活动对径流变化的影响的情况下,除去气候变化的影响,人类活动对年径流量变化的贡献率(C_{RH})为:

$$C_{RH} = 1 - C_{RC} \quad (11)$$

3 结果

3.1 年径流量、输沙量、降水量和年均气温、最大NDVI变化趋势

1956—2019年,温家川水文站实测的年径流量和年输沙量的平均值分别为 $5.02 \times 10^8 \text{ m}^3$ 、 $0.72 \times 10^8 \text{ t}$,呈下降趋势(图2a),年径流量和年输沙量平均每年减少约 $0.104 \times 10^8 \text{ m}^3$ 和 $0.027 \times 10^8 \text{ t}$;1969—2019年,窟野河流域的年降水量和年均气温分别为391.29 mm、 0.71°C ,年降水量和年均气温总体均呈上升趋势(图2b),其中降水量和年均气温平均每年上升约1.65 mm和 0.42°C ;1982—2019年,年最大NDVI总体呈增加趋势

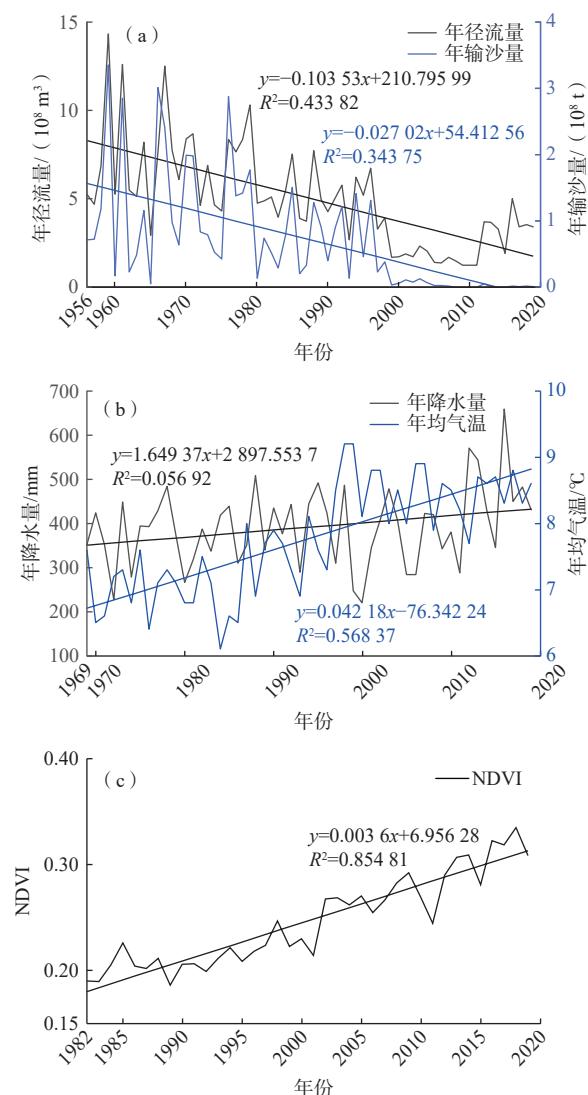


图2 年径流量、年输沙量、年降水量、年均气温和年最大NDVI变化

Fig. 2 Changes in annual runoff, annual sediment load, annual rainfall, average annual temperature, and maximum annual NDVI

(图 2c)。

运用 Mann-Kendall 检验法对温家川水文站 1956—2019 年的年径流量、输沙量的变化趋势进行检测(图 3), 分析表明: 1956—1980 年, 窟野河最大控制流域范围的温家川水文站实测年径流量 UF 值介于 0~1.96 之间, 处于增加阶段, 趋势不显著; 1981—1996 年, 年径流量 UF 值介于 -1.96~1 之间, 处于减少阶段, 趋势不显著; 1998 年起, UF 值开始小于 -2.32, 进入到 1% 显著减少阶段。

1956—1980 年间年输沙量的变化趋势与同期径流量相似, 1981—1999 年输沙 UF 值介于 -1.96~0 之间, 呈不显著减少趋势, 从 2001 年起, UF 值开始小于 -2.32, 进入 1% 显著减少阶段。年径流量和输沙量分别在 1998 年和 2001 年进入显著减少阶段, 年输沙量的变化与年径流量相比呈现出滞后性。温家川水文

表 1 年径流量、输沙量、降水量和年均气温、年最大 NDVI 值的 Mann-Kendall 趋势检验结果
Table 1 Mann-Kendall trend test results of annual runoff, sediment transport, precipitation, air temperature, and NDVI

水文站	年径流量Z值	年输沙量Z值	年降水量Z值	年均气温Z值	年最大NDVI的Z值
温家川	-5.887	-6.471	1.606	5.179	6.587

窟野河流域的年降水量、年均气温和年最大 NDVI 的 Z 统计值均大于零, 说明年降水量、年均气温和年最大 NDVI 值在年际尺度上均呈上升趋势。其中, 年降水量未通过 $\alpha=0.05$ 的 Mann-Kendall 趋势检验, 上升趋势不显著, 年均气温和年最大 NDVI 通过了 $\alpha=0.05$ 的 Mann-Kendall 趋势检验, 上升趋势显著。

窟野河流域的年降水量、年均气温和年最大 NDVI 趋势的相似性和一致性反映了气候变化对水沙过程变化的影响, 同时水沙过程变化也可能受到人类活动和土地利用变化的影响。

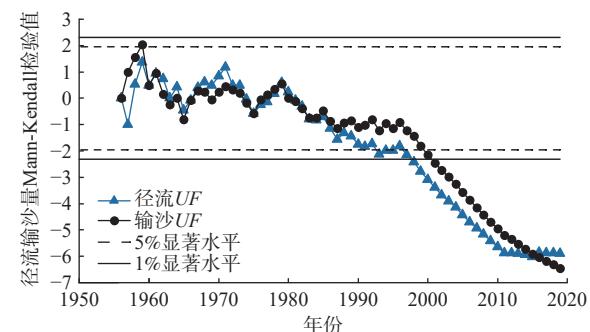


图 3 温家川水文站年径流量、年输沙量 Mann-Kendall 检验结果

Fig. 3 Mann-kendall test results of annual runoff and sediment discharge at the Wenjiachuan hydrological station

站径流和输沙的 Z 统计值均小于零(表 1), 且通过了 $\alpha=0.05$ 的 Mann-Kendall 趋势检验, 表明径流量和输沙量在年际尺度上均表现出显著的下降趋势。

表 1 年径流量、输沙量、降水量和年均气温、年最大 NDVI 值的 Mann-Kendall 趋势检验结果

Table 1 Mann-Kendall trend test results of annual runoff, sediment transport, precipitation, air temperature, and NDVI

3.2 流域水沙关系突变特征

由于气象数据始于 1969 年, 水文数据始于 1956 年, 基于数据完整性和时间对应性, 选择 1969 年作为研究起始时间。通过分析 1969—2019 年间降水量-径流量、降水量-输沙量双累积曲线(图 4), 发现曲线斜率在 1997 年均发生明显变化, 说明窟野河流域年径流量、输沙量在 1997 年左右发生了突变。同时, 降水量-径流量双累积曲线(图 4a)在 2012 年斜率显著增大, 说明年径流量在这一年显著增加; 而降水量-输沙量双累积曲线图(图 4b)在 2012 年前后斜率约为零,

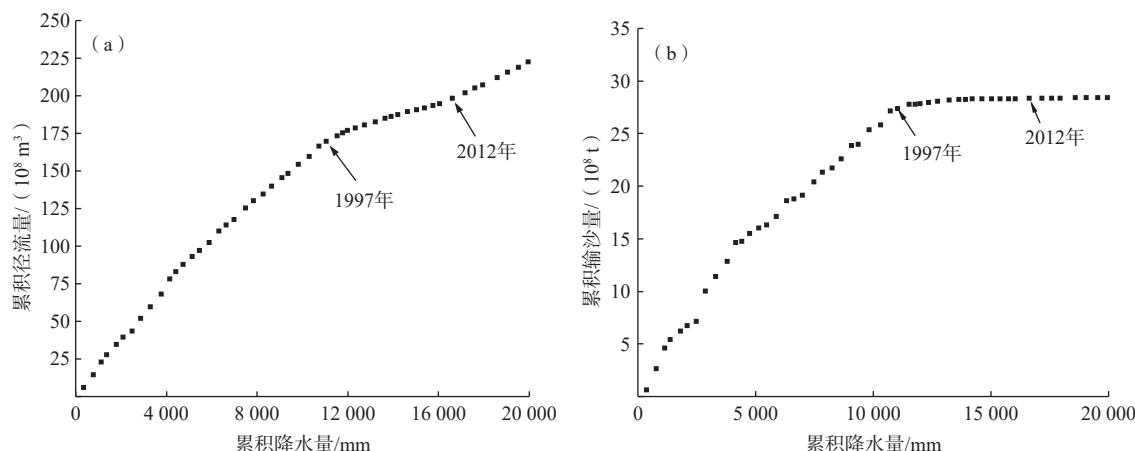


图 4 双累积曲线图

Fig. 4 Double accumulated curves

说明输沙量无显著变化。

由此可将研究区水沙数据划分为3个时段:1969—1997年(A)、1998—2011年(B)、2012—2019年(C)。考虑到区域植被年最大NDVI(1982—2020年)和土地利用类型(1980—2020)的时间序列较短,为了提高不同数据时间序列的一致性,将A时段进一步划分为1969—1997年(A1)和1980—1997年(A2)。

由于只采用一种方法检测突变年份及所划分研究时段的特征可能存在偏差,为了提高检测结果的准确度^[15],本文采用多种方法进行检测分析与校验。采用累积距平法和滑动秩和检验法两种方法分别分析了1969—2019年的年径流量、输沙量变化。累积距

平法检验显示,年径流量在1956—1997年呈上升趋势,而1997年之后,开始呈下降趋势,1997年为突变年份(图5)。滑动秩和检验法的检验结果显示(图6),年径流量发生突变的年份为1997年,检验值 $|U|>1.96$,通过了5%显著性检验。两种方法检测到的输沙量的突变结果与径流量一致,突变年份均为1997年。因此,综合多种方法可以判断1997年为流域水沙变化的突变年份。另外,这两种方法确定的径流量曲线斜率在2012—2019年发生了显著变化,分析值均有明显增加趋势,而年输沙量在这一时期的曲线斜率约为零,无明显变化,这与双累积曲线法的检验结果一致。

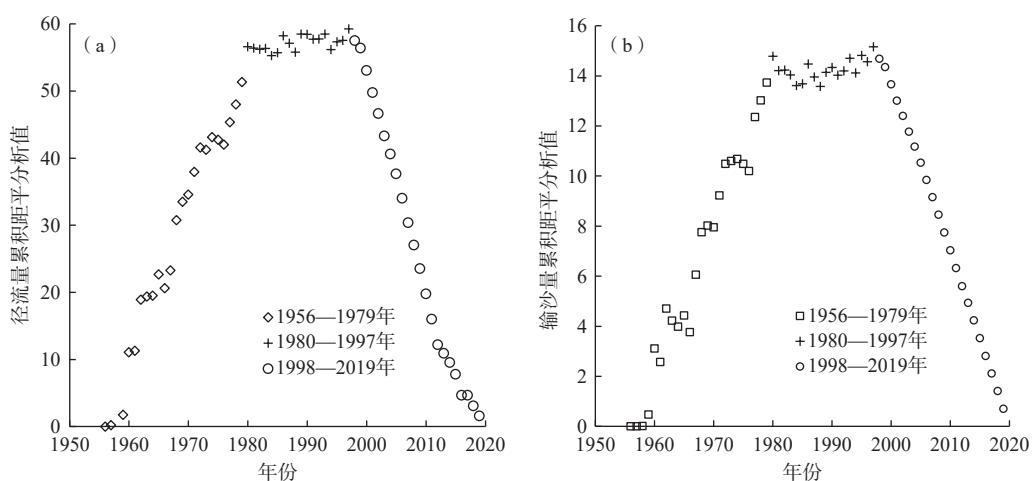


图5 径流量、输沙量累积距平分析图

Fig. 5 Accumulated anomaly analysis of runoff and sediment load

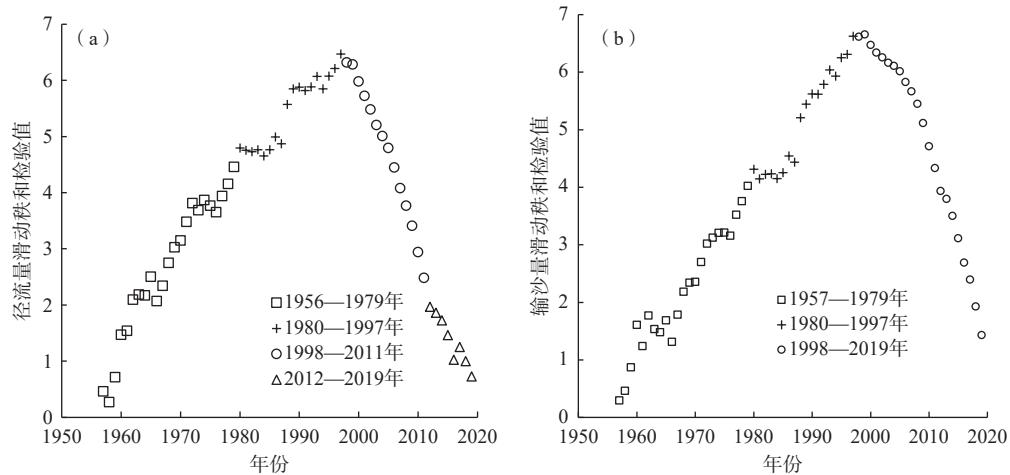


图6 径流量、输沙量滑动秩和检验图

Fig. 6 Sliding rank sum tests of runoff and sediment load

3.3 流域水沙演变期间土地利用变化特征

在接近窟野河流域水沙关系发生突变的2000年

之前,流域土地利用整体类型变化幅度较小(图7)。结构上中低覆盖度草地的面积占比最大,在2000—2010

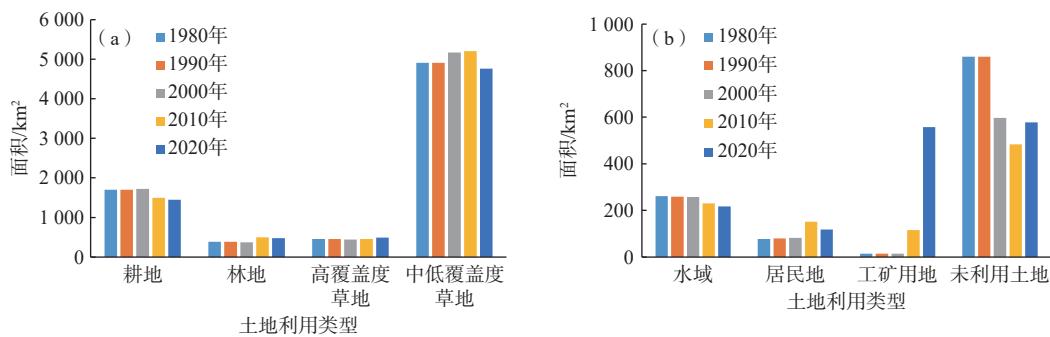


图 7 1980—2020 年窟野河流域土地利用面积变化趋势图

Fig. 7 Change trends of land use area in the Kuye River Basin from 1980 to 2020

年面积明显增加, 2020 年出现回落。2000—2010 年耕地和未利用土地面积显著减少, 水域面积呈微下降趋势, 林地面积呈增加趋势, 高覆盖度草地面积无显著变化; 工矿用地在 2000 年前面积较小, 2000—2010 年开始缓慢增加, 2010—2020 年增加趋势明显。

根据土地利用在 2000 年后出现明显变化这一特征, 选择 1995—2010 年和 2010—2020 进行土地利用转移矩阵分析(表 2)。结果表明, 1995—2010 年工矿用地的主要转入类型为中低覆盖度草地、高覆盖度草地和耕地, 面积分别为 68.26, 18.17, 11.85 km²; 2010—

2020 年工矿用地的主要转入类型为中低覆盖度草地、耕地和未利用土地, 面积分别为 324.93, 66.92, 33.56 km²。窟野河流域煤炭资源丰富, 煤炭开采及相关产业的快速发展, 并占用草地、未利用土地等, 可能导致矿业用地急剧扩张和增加。1995—2010 年未利用土地主要转出类型为中低覆盖度草地、水域和林地, 2010—2020 年未利用土地主要转出类型为工矿用地、中低覆盖度草地和水域。同时, 在 1995—2010 年和 2010—2020 年, 草地和林地的主要转入类型均为耕地。

表 2 1995—2020 年土地利用类型转移矩阵

Table 2 Land-use transfer matrix from 1995 to 2020

/km²

时间	土地利用类型	高覆盖度草地	耕地	工矿用地	居民地	林地	水域	未利用土地	中低覆盖度草地
1995—2010年	高覆盖度草地	325.44	76.87	0.00	0.16	10.19	1.63	2.45	40.48
	耕地	5.57	1 411.23	0.00	1.17	3.13	7.57	2.47	67.98
	工矿用地	18.17	11.85	1.54	0.77	6.57	2.95	5.43	68.26
	居民地	6.16	36.61	0.01	76.81	4.96	4.18	1.53	21.29
	林地	28.45	67.27	0.00	0.16	282.60	9.65	5.56	105.25
	水域	2.48	3.03	0.07	0.10	2.56	193.41	7.62	21.37
	未利用土地	7.99	10.25	0.01	0.04	1.55	10.10	270.93	182.93
2010—2020年	中低覆盖度草地	323.57	133.90	0.21	1.17	21.67	27.10	66.42	4 630.83
	高覆盖度草地	407.07	4.40	4.38	6.95	6.86	0.56	1.25	55.93
	耕地	2.74	1 323.52	6.94	19.61	5.36	3.89	1.88	81.66
	工矿用地	18.31	66.92	59.43	6.68	25.66	22.10	33.56	324.93
	居民地	5.39	2.47	0.82	98.63	1.34	0.46	0.33	9.01
	林地	2.27	3.84	3.41	3.03	434.47	1.27	1.53	25.61
	水域	0.77	3.60	1.08	2.71	1.38	196.18	3.36	8.18
	未利用土地	1.27	2.03	5.02	0.66	2.89	1.28	421.18	143.57
	中低覆盖度草地	19.21	91.82	34.43	13.18	20.79	4.70	20.61	4 554.07

3.4 气候变化和人类活动对流域水沙变化的影响

根据式(7)(8)分别计算累积序列各变化期的斜率变化率(图 8、表 3)。流域累积年径流量、累积年降水量的斜率变化率在 B 时段均为负, C 时段均为正, 说明流域径流和降水在 B 时段呈下降趋势, C 时段呈上升趋势; 累积年平均气温、累积年最大 NDVI 在 B、

C 时段的斜率变化率均为正, 说明流域内气温、NDVI 序列分别呈持续上升趋势; 年输沙量在 B 时段呈下降趋势, C 时段无显著变化。

由式(9)–(11)分别计算气候因子变化(年降水量和年均气温)和人类活动(年最大 NDVI)对水沙变化的贡献率(表 4)。可以发现, 以 A1 时段(1969—1997 年)

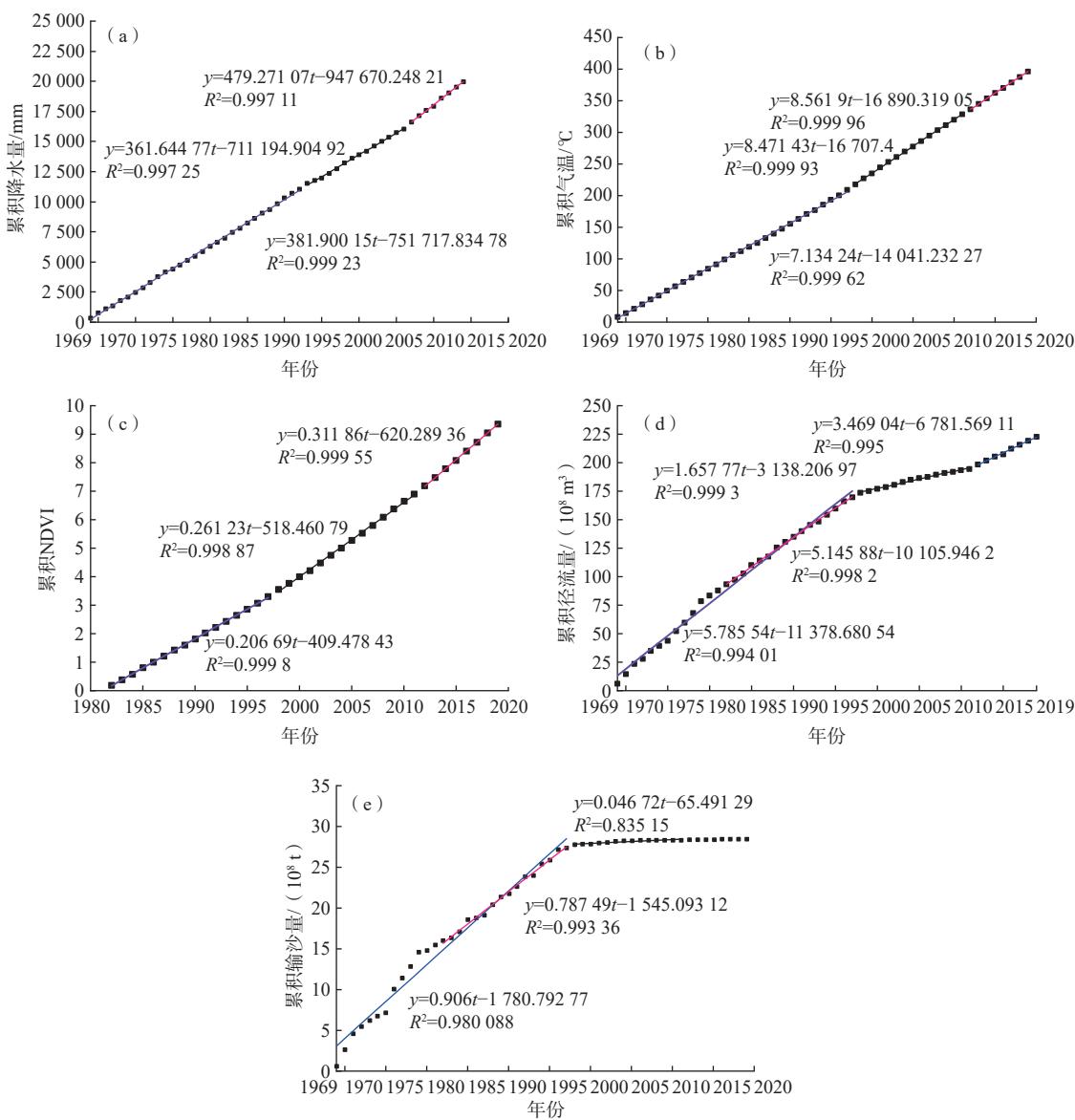


图 8 窟野河流域年径流量、年输沙量、年降水量、年均气温、NDVI 的累积曲线

Fig. 8 Cumulative curves of annual runoff, sediment transport, rainfall, average temperature, and NDVI in the Kuye River Basin

表 3 窟野河流域各变化期累积年径流量、年输沙量、年降水量、年平均气温、年最大NDVI的斜率及变化率

Table 3 Accumulated annual runoff, sediment load, precipitation, air temperature, and NDVI slope change rate in each variation period of the Kuye River Basin

时期	时段	年累积径流量			年累积输沙量			累积年降水量			累积年平均气温			累积年最大NDVI		
		S	ΔS	$\Delta S/S$	S	ΔS	$\Delta S/S$	S	ΔS	$\Delta S/S$	S	ΔS	$\Delta S/S$	S	ΔS	$\Delta S/S$
A1—B	A1(1969—1997年)	5.79	-4.13	-0.71	0.91	-0.86	-0.95	381.90	-20.26	-0.05	7.13	1.34	0.19	0.21	0.05	0.24
	B(1998—2011年)	1.66	0.05	0.03	361.64			8.47			0.26			0.26		
A2—B	A2(1980—1997年)	5.14	-3.48	-0.68	0.77	-0.72	-0.94	394.76	-33.12	-0.08	7.30	1.17	0.16	0.21	0.05	0.26
	B—C	C(2012—2019年)	3.47	1.81	1.09	0.00			479.27	117.63	0.33	8.56	0.09	0.01	0.31	0.05

注: S为斜率; ΔS 为斜率变化量; $\Delta S/S$ 为斜率变化率。

为基准期, B时段(1998—2011年)(以下简写为A1—B时期)在仅考虑降水影响的情况下,气候变化、人类活动对窟野河流域年径流量减少的贡献率分别为7.44%

和92.56%,对年输沙量减少的贡献率分别为5.60%和94.40%;在综合考虑降水和气温因素的情况下,气候变化、人类活动对窟野河流域年径流量减少的贡献率

分别为 33.79% 和 66.21%, 对年输沙量减少的贡献率分别为 25.42% 和 74.58%。以 A2 时段(1980—1997 年)为基准期, B 时段(1998—2011 年)(以下简写为 A2—B 时期)在仅考虑降水影响的情况下, 气候变化、人类活动对窟野河流域年径流量减少的贡献率分别为 12.39% 和 87.61%, 对年输沙量减少的贡献率分别为

8.97% 和 91.03%; 在综合考虑降水和气温因素的情况下, 气候变化、人类活动对年径流量减少的贡献率分别为 36.06% 和 63.94%, 对年输沙量减少的贡献率分别为 26.11% 和 73.89%。以 B 时段为基准期, C 时段(以下简写为 B—C 时期)气候变化、人类活动对流域年径流量增加的贡献率分别为 28.86% 和 71.14%。

表 4 窟野河流域气候变化和人类活动对径流量和输沙量变化的贡献率

Table 4 Contribution rates of climate change and human activities to changes in runoff and sediment load in the Kuye River Basin

计算方案	年径流量						年输沙量			
	仅考虑降水/%			综合考虑降水和气温/%			仅考虑降水/%		综合考虑降水和气温/%	
	A1—B时期	A2—B时期	B—C时期	A1—B时期	A2—B时期	B—C时期	A1—B时期	A2—B时期	A1—B时期	A2—B时期
气候变化	7.44	12.39	29.83	33.79	36.06	28.86	5.60	8.97	25.42	26.11
年降水量	7.44	12.39	29.83	7.44	12.39	29.83	5.60	8.97	5.60	8.97
年平均气温	—	—	—	26.35	23.67	-0.97	—	—	19.82	17.14
人类活动	92.56	87.61	70.17	66.21	63.94	71.14	94.40	91.03	74.58	73.89
年最大NDVI	33.38	38.97	-17.78	33.38	38.97	-17.78	25.11	25.46	25.11	25.46

由表 4 可见, A1—B 时期流域年最大 NDVI 对年径流量和年输沙量的贡献率, 要小于 A2—B 时期的贡献率。在 A2—B 时期, 由于退耕还林还草工程的实施, NDVI 变化对流域径流减少起到了主导作用, 其贡献率为 38.97%, 对于年输沙量变化, 在不同情景下, 两个时期年最大 NDVI 的贡献率为 25.46%。

由表 3 可见, C 时期(2012—2019 年)窟野河流域的累积径流量较 B 时段(1998—2011 年)斜率增加 1.81, 斜率变化率高达 109%, 出现了明显反弹, 而累积输沙量斜率接近零, 无显著变化。综合考虑降水和气温, 以 B 时段(1998—2011 年)为基准期, C 时段(2012—2019 年)年降水量对流域径流量增加的贡献率为 29.83%, 年平均气温对流域径流量增加的贡献率为 -0.97%, 年最大 NDVI 对流域径流量增加的贡献率为 -17.78%(表 4)。

4 讨论

4.1 水沙变化特征分析

本文采用 Mann-Kendall 非参数检验法判断在 1956—2019 年长时间尺度上, 窟野河流域年径流量和输沙量均表现出显著的下降趋势, 1969—2019 年窟野河流域年降水量、年平均气温和 1980 年以来的年最大 NDVI 均呈现上升趋势, 其中年降水量呈不显著的增加趋势, 年平均气温和 NDVI 的增加趋势明显, 这与相关研究结果一致, 也符合黄河中游区生态治理下流域水沙变化规律。

综合多种突变分析方法判断 1997 年为流域水沙变化的突变年份, 这一结果与以往研究相符^[1, 8—10, 25—27]。几种方法确定年径流量在 2012—2019 年均有明显增加趋势, 而年输沙量在这一时期无显著变化, 这与 Li 等^[1]和刘晓燕等^[27]的研究结果相符。

4.2 土地利用变化分析

从土地利用变化的数据可以看出, 近 40 年来研究区土地利用类型发生了较大变化, 尤其是工矿用地, 从 2000 年到 2020 年工矿用地面积激增。由土地利用类型转移矩阵的数据可以看出, 研究区通过实施退耕还林还草工程, 发生了生态退耕。综上可见, 在流域水沙变化过程中, 土地利用类型、数量、结构均发生了明显变化。与水沙变化相结合可见, 随着林草地面积的增加, 植被的水土保持效应加强, 携沙水流减少, 流域径流量、输沙量均呈减少趋势。根据相关研究, 影响流域径流的人类活动因素通常包括退耕还林(草)、坡改梯、淤地坝以及水库等工程措施。窟野河流域的水土保持措施主要包括梯田、造林、种草和修筑淤地坝, 各项措施在二十世纪七八十年代投入居多, 这些措施通过改变流域下垫面特征影响水量平衡, 从而影响径流在时空上的分配和变化^[41—42]。2000 年以后, 煤田开发规模逐渐增大, 工矿用地面积激增, 加上退耕还林还草工程的实施, 导致煤矿开采成为影响土地利用及水沙过程的最主要的人类活动因素, 尤其是 2012 年以来, 在降水量略微增加的基础上, 矿井封存水外溢和升井未利用水排放可能对河流径流增加产生了重要影响^[12, 27]。

4.3 气候变化和人类活动对水沙变化影响的贡献率分析

考虑到 A1 时段始于 1969 年, A2 时段始于 1980 年, A2 时段与区域植被年最大 NDVI(1982—2020 年)、土地利用类型(1980—2020 年)数据时间序列一致性更高, 基于 A2 时段的分析结果更加具有参考意义, 所以, 采用基于 A2 时段的分析结果进行讨论。

通过分析气候变化和人类活动对水沙变化影响的贡献率数据可以看出, 在仅考虑降水影响的情况下, A2—B 时期人类活动对窟野河流域年径流量和输沙量减少的贡献率分别为 87.61% 和 91.03%, 这与 Li 等^[1]研究结果相近; 在综合考虑降水和气温因素的情况下, 人类活动对年径流量和年输沙量减少的贡献率分别为 63.94% 和 73.89%, 人类活动影响的贡献率较其他研究偏小, 说明气温变化对流域年径流减少的影响不可忽略; B—C 时期, 人类活动对流域年径流量增加的贡献率为 71.14%。综上可见, 人类活动对水沙减少的影响占据主导作用, 人类活动包括引起植被及土地利用覆被变化的退耕还林还草工程(以 NDVI 为衡量指标)以及煤炭矿业发展等其他因素, 由于未能完全收集每项指标的年度数据^[43], 本研究只计算了数据序列较为齐全的 NDVI 对径流变化的复合影响的贡献率, 比较一致的观点是, 随着植被覆盖的增加, 流域年径流量和输沙量会减少。另外, 采矿活动对流域水沙变化影响的正负效应同时存在。由研究结果数据可以看出, 在 B—C 时期, 除植被变化外的其他人类活动因素对流域径流变化的影响起主导作用, 年降水量增加对径流反弹也起到了一定的正向作用。

5 结论

(1) 在 1956—2019 年长时间尺度上, 窟野河流域年径流量和输沙量均表现出显著的下降趋势, 突变年份为 1997 年, 从影响因素看, 1969—2019 年间窟野河流域年降水量、年平均气温和 1980 年以来的年最大 NDVI 均呈现上升趋势, 其中年降水量呈不显著的增加趋势, 年平均气温和 NDVI 的增加趋势明显。

(2) 通过对不同时期气候、植被、水沙等因子的變化检测分析可见, 1969—2019 年间人类活动对研究区水沙减少的影响在各个时期内均占据主导作用。以 1969—1997 年为基准期, 1998—2011 年人类活动对径流量和输沙量变化的贡献率分别为 66.21% 和 74.58%, 以 1980—1997 年为基准期, 1998—2011 年人类活动对径流量和输沙量变化的贡献率分别为 63.94% 和 73.89%; 以 1998—2011 年为基准期, 2012—2019 年人类活动对

径流量增加的贡献率为 74.14%。

(3) 随着窟野河流域水土保持、生态治理等工程的推动, 尤其是在 1982 年之后退耕还林还草工程的实施, 通过最大 NDVI 反映出的综合植被变化因素对研究区径流减少起主导作用, 贡献率达 38.97%; 窟野河流域内气温比降水对水沙变化的影响要大, 气温的影响不可忽略。

(4) 在 2012—2019 年流域出现了径流反弹现象, 降水量增加对径流的增加起到一定的作用, 其贡献率为 29.83%, 相比而言, 人类活动对径流增加的贡献率为 71.14%, 占主导作用, 其中可能包括矿井封存水缓慢溢出、升井未利用水的排放等, 还有待进一步深入观测研究。

参考文献 (References) :

- [1] LI Huijuan, SHI Changxing, ZHANG Yusheng, et al. Using the Budyko hypothesis for detecting and attributing changes in runoff to climate and vegetation change in the soft sandstone area of the middle Yellow River Basin, China[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 703: 135588.
- [2] PARK E, HO H L, VAN BINH D, et al. Impacts of agricultural expansion on floodplain water and sediment budgets in the Mekong River[J]. *Journal of Hydrology*, 2022, 605: 127296.
- [3] FANOS A M. The impact of human activities on the erosion and accretion of the Nile delta coast[J]. *Journal of Coastal Research*, 1995, 11(3): 821—833.
- [4] CARRIQUIRY J D, SÁNCHEZ A. Sedimentation in the Colorado River delta and upper gulf of California after nearly a century of discharge loss[J]. *Marine Geology*, 1999, 158(1/2/3/4): 125—145.
- [5] 赵芳芳, 徐宗学. 黄河源区未来气候变化的水文响应 [J]. *资源科学*, 2009, 31(5): 722—730. [ZHAO Fangfang, XU Zongxue. Hydrological response to climate change in headwater catchment of the Yellow River Basin[J]. *Resources Science*, 2009, 31(5): 722—730. (in Chinese with English abstract)]
- [6] FANG Haiyan. Water erosion research in China: A review[J]. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*, 2020: 1-53.
- [7] CHANG Jianxia, WANG Yimin, ISTANBULLUOGLU E, et al. Impact of climate change and human activities on runoff in the Weihe River Basin, China[J]. *Quaternary International*, 2015, 380: 169—179.
- [8] GUO Qiaoling, YANG Yunsong, XIONG Xinzhi. Using hydrologic simulation to identify contributions of climate change and human activity to runoff changes in the Kuye River Basin, China[J]. *Environmental Earth Sciences*,

- 2016, 75(5): 417.
- [9] LUAN Jinkai, ZHANG Yongqiang, TIAN Jing, et al. Coal mining impacts on catchment runoff[J]. *Journal of Hydrology*, 2020, 589: 125101.
- [10] 鲍振鑫, 张建云, 王国庆, 等. 基于水文模型与机器学习集合模拟的水沙变异归因定量识别——以黄河中游窟野河流域为例 [J]. 水科学进展, 2021, 32(4): 485 – 496. [BAO Zhenxin, ZHANG Jianyun, WANG Guoqing, et al. Quantitative assessment of the attribution of runoff and sediment changes based on hydrologic model and machine learning: A case study of the Kuye River in the Middle Yellow River Basin[J]. *Advances in Water Science*, 2021, 32(4): 485 – 496. (in Chinese with English abstract)]
- [11] LOTFIRAD M, ADIB A, SALEHPOOR J, et al. Simulation of the impact of climate change on runoff and drought in an arid and semiarid basin (the Hablehroud, Iran) [J]. *Applied Water Science*, 2021, 11(10): 168.
- [12] 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 Huijuan, SHI Changxing, MA Xiaoqing, 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. (in Chinese with English abstract)]
- [13] 韩双宝, 王赛, 赵敏敏, 等. 北洛河流域生态环境变迁及对水资源和水沙关系的影响 [J]. 水文地质工程地质, 2023, 50(6): 14 – 24. [HAN Shuangbao, WANG Sai, ZHAO Minmin, et al. Ecological environmental changes and its impact on water resources and water-sediments relationship in Beiluo River Basin[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2023, 50(6): 14 – 24. (in Chinese with English abstract)]
- [14] 赵娜娜, 王贺年, 于一雷, 等. 基于 Budyko 假设的若尔盖流域径流变化归因分析 [J]. 南水北调与水利科技, 2018, 16(6): 21 – 26. [ZHAO Nana, WANG Henian, YU Yilei, et al. The attribution analysis of streamflow changes in the Zoige Basin based on the Budyko hypothesis[J]. *South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology*, 2018, 16(6): 21 – 26. (in Chinese with English abstract)]
- [15] WANG Suiji, YAN Ming, YAN Yunxia, et al. Contributions of climate change and human activities to the changes in runoff increment in different sections of the Yellow River[J]. *Quaternary International*, 2012, 282: 66 – 77.
- [16] WANG Suiji, YAN Yunxia, YAN Ming, et al. Quantitative estimation of the impact of precipitation and human activities on runoff change of the Huangfuchuan River Basin[J]. *Journal of Geographical Sciences*, 2012, 22(5): 906 – 918.
- [17] CHENG Qingping, ZUO Xiaoan, ZHONG Fanglei, et al. Runoff variation characteristics, association with large-scale circulation and dominant causes in the Heihe River Basin, Northwest China[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 688: 361 – 379.
- [18] HU Didi, XU Min, KANG Shichang, et al. Impacts of climate change and human activities on runoff changes in the Ob River Basin of the Arctic region from 1980 to 2017[J]. *Theoretical and Applied Climatology*, 2022, 148(3): 1663 – 1674.
- [19] MIAO Chiyuan, NI Jinren, BORTHWICK A G L, et al. A preliminary estimate of human and natural contributions to the changes in water discharge and sediment load in the Yellow River[J]. *Global and Planetary Change*, 2011, 76(3/4): 196 – 205.
- [20] SHI Hongling, HU Chunhong, WANG Yangui, et al. Analyses of trends and causes for variations in runoff and sediment load of the Yellow River[J]. *International Journal of Sediment Research*, 2017, 32(2): 171 – 179.
- [21] GU Chaojun, MU Xxingmin, GAO Peng, et al. Changes in run-off and sediment load in the three parts of the Yellow River basin, in response to climate change and human activities[J]. *Hydrological Processes*, 2019, 33(4): 585 – 601.
- [22] LIU Yu, SONG Huiming, AN Zhisheng, et al. Recent anthropogenic curtailing of Yellow River runoff and sediment load is unprecedented over the past 500 y[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2020, 117(31): 18251 – 18257.
- [23] WANG Hong, SUN Fubao. Variability of annual sediment load and runoff in the Yellow River for the last 100 years (1919–2018) [J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 758: 143715.
- [24] WANG Junjie, SHI Bing, ZHAO Enjin, et al. The long-term spatial and temporal variations of sediment loads and their causes of the Yellow River Basin[J]. *Catena*, 2022, 209: 105850.
- [25] HE Yi, MU Xingmin, JIANG Xiaohui, et al. Runoff variation and influencing factors in the Kuye River basin of the middle Yellow River[J]. *Frontiers in Environmental Science*, 2022, 10: 877535.
- [26] HUANG Tingting, WANG Zhihui, WU Zhiyong, et al. Attribution analysis of runoff evolution in Kuye River Basin based on the time-varying budyko framework[J]. *Frontiers in Earth Science*, 2023, 10: 1092409.
- [27] 刘晓燕, 李皓冰, 李晓宇, 等. 黄河流域窟野河入黄河水沙锐减成因分析 [J]. 水利学报, 2022, 53(3): 296 – 305. [LIU Xiaoyan, LI Haobing, LI Xiaoyu, et al. Analysis on the cause of sharp decrease of runoff and sediment from Kuye River in Loess Plateau[J]. *Journal of*

- [28] Hydraulic Engineering, 2022, 53(3): 296 – 305. (in Chinese with English abstract)]
- [29] GUO Qiaoling, SU Ning, YANG Yunsong, et al. Using hydrological simulation to identify contribution of coal mining to runoff change in the Kuye River Basin, China[J]. *Water Resources*, 2017, 44(4): 586 – 594.
- [30] ZHANG Jiankang, DONG Hua, CHENG Yanpei et al. Compilation of hydrogeological map of China[J]. *Journal of Groundwater Science and Engineering*, 2020, 8(4): 381 – 395.
- [31] WANG Zhaosheng. Satellite-observed effects from ozone pollution and climate change on growing-season vegetation activity over China during 1982–2020[J]. *Atmosphere*, 2021, 12(11): 1390.
- [32] LIU Jiyuan, KUANG Wenhui, ZHANG Zengxiang, et al. Spatiotemporal characteristics, patterns, and causes of land-use changes in China since the late 1980s[J]. *Journal of Geographical Sciences*, 2014, 24(2): 195 – 210.
- [33] YUE Sheng, PILON P, PHINNEY B, et al. The influence of autocorrelation on the ability to detect trend in hydrological series[J]. *Hydrological Processes*, 2002, 16(9): 1807 – 1829.
- [34] 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 Xingmin, ZHANG Xiuqin, GAO Peng, et al. Theory of double mass curves and its applications in hydrology and meteorology[J]. *Journal of China Hydrology*, 2010, 30(4): 47 – 51. (in Chinese with English abstract)]
- [35] 刘强, 李苗苗, 罗霞飞, 等. 黄河中游河龙区间水沙变化特征及其对降雨和人类活动的响应[J]. 天水师范学院学报, 2021, 41(5): 22 – 28. [LIU Qiang, LI Miaomiao, LUO Xiafei, et al. Variation characteristics of runoff and sediment in the Helong Region of the middle Yellow River and its response to climate change and human activities[J]. *Journal of Tianshui Normal University*, 2021, 41(5): 22 – 28. (in Chinese with English abstract)]
- [36] 赵溦, 王向东, 张晓明, 等. 窟野河流域水沙演变的尺度效应驱动因素研究[J]. *水文*, 2016, 36(2): 56 – 61. [ZHAO Wei, WANG Xiangdong, ZHANG Xiaoming, et al. Scale effect driving factors of runoff and sediment evolution in Kuye River basin[J]. *Journal of China Hydrology*, 2016, 36(2): 56 – 61. (in Chinese with English abstract)]
- [37] 魏宣, 王宁, 周明通, 等. 气候变化和人类活动对克里雅河径流变化影响定量研究[J]. 灌溉排水学报, 2022, 41(8): 80 – 86. [WEI Xuan, WANG Ning, ZHOU Mingtong, et al. Combined impact of climate change and human activities on runoff in the Kriya river[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2022, 41(8): 80 – 86. (in Chinese with English abstract)]
- [38] 田甜, 黄强, 郭爱军, 等. 基于标准化降雨蒸散指数的渭河流域干旱演变特征分析[J]. *水力发电学报*, 2016, 35(2): 16 – 27. [TIAN Tian, HUANG Qiang, GUO Ajun, et al. Drought evolution characteristics in Wei River Basin based on standardized precipitation evapotranspiration index[J]. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2016, 35(2): 16 – 27. (in Chinese with English abstract)]
- [39] MANN H B, WHITNEY D R. On a test of whether one of two random variables is stochastically larger than the other[J]. *The Annals of Mathematical Statistics*, 1947, 18(1): 50 – 60.
- [40] 姚惠明, 秦福兴, 沈国昌, 等. 黄河宁蒙河段凌情特性研究[J]. *水科学进展*, 2007, 18(6): 893 – 899. [YAO Huiming, QIN Fuxing, SHEN Guochang, et al. Ice regime characteristics in the Ningxia-Inner Mongolia reach of Yellow River[J]. *Advances in Water Science*, 2007, 18(6): 893 – 899. (in Chinese with English abstract)]
- [41] 赵益平, 王文圣, 张丹, 等. 累积量斜率变化分析法及其在径流变化归因中的应用[J]. *水电能源科学*, 2019, 37(10): 17 – 20. [ZHAO Yiping, WANG Wensheng, ZHANG Dan, et al. Slope change analysis method of cumulative quantity and its application in runoff change attribution[J]. *Water Resources and Power*, 2019, 37(10): 17 – 20. (in Chinese with English abstract)]
- [42] 赵晓坤, 王随继, 范小黎. 1954—1993年间窟野河径流量变化趋势及其影响因素分析[J]. *水资源与水工程学报*, 2010, 21(5): 32 – 36. [ZHAO Xiaokun, WANG Suiji, FAN Xiaoli. Analysis on the change trend of runoff and influence factors in Kuye River Basin from 1954 to 1993[J]. *Journal of Water Resources and Water Engineering*, 2010, 21(5): 32 – 36. (in Chinese with English abstract)]
- [43] 杨洁, 金继明, 邵进, 等. 黄土高原中部典型流域植被恢复对径流的影响[J]. *农业机械学报*, 2021, 52(5): 258 – 266. [YANG Jie, JIN Jiming, SHAO Jin, et al. Vegetation restoration and its impact on runoff in typical areas of middle Loess Plateau[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2021, 52(5): 258 – 266. (in Chinese with English abstract)]
- [44] 陈国光, 刘红樱, 陈进全, 等. 福建长汀县水土流失的地质影响因素及防治对策[J]. *水文地质工程地质*, 2020, 47(6): 26 – 35. [CHEN Guoguang, LIU Hongying, CHEN Jinquan, et al. Geological influence factors of soil erosion in Changting County, Fujian Province and the countermeasures to prevent and control[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2020, 47(6): 26 – 35. (in Chinese with English abstract)]