



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

何毅^{1,2,3,4}, 蒋晓辉^{2,3,4}, 胡希有⁵, 袁璋⁵, 徐新文^{2,3}

(1. 自然资源部矿山地质灾害成灾机理与防控重点实验室, 陕西 西安 710054;
2. 西北大学 城市与环境学院, 陕西 西安 710127; 3. 陕西省地表系统与环境承载力重点实验室, 陕西 西安 710127;
4. 西安市黄河流域环境模拟及生态健康重点实验室, 陕西 西安 710127; 5. 陕西省生态地质调查中心, 陕西 西安 710068)

摘要 黄河流域作为中华文明的重要发源地, 不仅是中国生态安全体系的关键组成部分, 亦是人口聚集和经济活动的重要区域。在国家整体发展格局及社会主义现代化建设进程中, 该流域占据着至关重要的战略地位, 对区域可持续发展和生态安全具有深远影响。气候变化和人类活动对河川径流产生综合影响, 不易区分它们各自对径流变化的贡献。该研究利用 1960—2021 年黄河中游窟野河流域温家川水文站 62 年气候、径流资料, 建立了一种基于相似降水量和潜在蒸散发量配对年组的方法来定量评估人类活动对河川径流的影响。配对年组的相似气候前提由相似的数量(年际差异小于 2.0%)和相似的过程(年内变化显著性水平小于 0.05)来表征。结果表明, 在研究时段内, 径流在 4 个配对年组中, 2 组呈下降趋势, 另外 2 组呈上升趋势。利用研究区土地利用/土地覆被等资料进行分析, 可以很好地定量解释人类活动对窟野河流域径流变化的影响。该方法可与传统的水文研究方法相结合使用, 更好地为流域水资源管理提供理论依据。

关键词 窟野河流域; 人类活动; 相似气候条件; 径流; 土地利用

中图分类号: P333 DOI: 10.16152/j.cnki.xdxbr.2025-04-009

Quantitative attribution of influence of human activities on runoff change in the middle reaches of the Yellow River:

A case study of Kuye River Basin

HE Yi^{1, 2, 3, 4}, JIANG Xiaohui^{2, 3, 4}, HU Xiyou⁵, YUAN Zhang⁵, XU Xinwen^{2, 3}

(1. Key Laboratory of Mine Geological Hazards Mechanism and Control, Ministry of Natural Resources, Xi'an 710054, China;
2. College of Urban and Environmental Sciences, Northwest University, Xi'an 710127, China;
3. Shaanxi Key Laboratory of Earth Surface System and Environmental Carrying Capacity, Xi'an 710127, China;
4. Xi'an Key Laboratory of Environmental Simulation and Ecological Health in the Yellow River Basin, Xi'an 710127, China;
5. Shaanxi Institute of Geological Survey, Ecological Geological Survey Center, Xi'an 710068, China)

Abstract The Yellow River Basin is an important birthplace of the Chinese nation and Chinese civilization, constitutes an important ecological security barrier in China, and is also an important region for population ac-

收稿日期: 2025-05-11

基金项目: 自然资源部矿山地质灾害成灾机理与防控重点实验室开放课题基金(SKF2024-03); 陕西省自然科学基金基础研究计划(2021JQ449)。

第一作者: 何毅, 男, 副教授, 博士, 博士生导师, 从事生态水文和水土保持相关研究, yihe@nwu.edu.cn。

tivities and economic development, and has a pivotal strategic position in the overall situation of national development and socialist modernization. Climate change and human activities have combined effects on runoff, and it is difficult to distinguish their respective contributions to runoff change. Based on 62 years of climate and runoff data from Wenjiachuan hydrology Station in the Kuye River Basin in the middle reaches of the Yellow River from 1960 to 2021, a method based on paired years groups of similar precipitation and potential evapotranspiration was established to quantitatively assess the influence of human activities on runoff. The similar climate premises of the paired year groups were characterized by similar quantities (interannual difference less than 2.0%) and similar processes (significance level of annual change less than 0.05). The results showed that, during the study period, the runoff in 2 groups showed a downward trend and the other 2 groups showed an upward trend. Using land use/land cover analysis, the effects of human activities on runoff change in the Kuye River Basin can be well explained quantitatively. This method can be combined with the traditional hydrological methods to provide a better theoretical basis for water resources management in the basin.

Keywords Kuye River Basin; human activities; paired-periods with similar weather condition; runoff; land use

IPCC AR6 表明,2011—2020 年全球平均地表温度比 1850—1900 年高 1.09℃,比 2003—2012 年 (AR5 评估的时期)高 0.19℃。由于气候变化,人类活动与水文循环之间复杂的相互作用已经显示出全球许多地区径流的显著变化^[1]。作为水循环体系中的关键要素,河川径流是实现水资源高效开发、合理管理及优化调配的重要基础和核心依据^[2]。

随着全球气候变暖的加剧及人类活动强度的提升,流域内河川径流呈现出显著的时空变化,这一变化直接影响了流域水资源的合理配置与高效开发利用^[3-5]。在全球气候变化的影响下,自然因素与人类活动共同作用,使得全球众多河流的径流量与输沙量发生了显著变化^[6-8]。Li 等的研究指出,全球约 24% 的河川径流已出现明显变动,大部分亚洲河流输沙量呈现显著下降趋势^[7]。人类活动通过土地利用、植被覆盖和水土保持措施直接或间接地影响径流的产生和汇流过程^[9]。水作为大气环流与水文循环的核心要素,是全球气候变化研究中最直接且关键的领域。气候变化的影响使陆地水循环过程发生改变,进而影响水文与水资源系统的结构及功能,给人类水资源的合理开发和高效利用带来了严峻挑战。同时,人类活动的加剧已导致水循环要素与过程的变化。因此,探究气候变化与人类活动对水文水资源的影响,既是全球变化研究的重要方向之一,也是推动社会经济可持续发展的关键科学问题^[3]。

近年来,许多学者致力于量化气候变化和人类活动对河川径流的影响,所采用的研究方法主要可分为 4 类:弹性系数法^[4]、配对流域法^[10]、经

验统计法^[11-13]和水文模型方法^[14]。弹性系数法基于 Budyko 框架,物理机制明确,计算简便且模型输入数据量需求低,但忽略了人类活动与气候变化的相互作用。配对流域法通过比较样地流域与参考流域的水文过程差异,分析人类活动对径流变化的影响。该方法具有明确的物理意义,但仅适用于小流域。水文模型方法能够在不同土地利用条件下,模拟多种气候情景,但其建模过程较为复杂,涉及多类型数据,且参数率定过程繁琐,易出现过拟合现象,从而影响模型的模拟精度。相比之下,经验统计方法因涉及因素较少,具有形式简洁的特点,但该方法通常仅考虑降水与径流之间的双累积曲线或线性关系,缺乏对流域下垫面变化及其他影响径流因素的深入分析,限制了其适用性和预测精度。

黄河是亚洲第二长的河流,以其含沙量大和相对较少的径流而闻名。黄河流域作为中华文明的重要发源地,不仅是中国生态安全体系的关键组成部分,亦是人口聚集和经济活动的重要区域。在国家整体发展格局及社会主义现代化建设进程中,该流域占据着至关重要的战略地位,对区域可持续发展和生态安全具有深远影响^[15]。近年来,人类活动显著地改变了黄河的输沙和径流过程^[16]。窟野河作为黄河中游一条典型支流,位于黄河中游的干旱—半干旱区,由于流域穿越沙漠与黄土塬地区,该区域生态环境较为脆弱,且水土流失问题尤为突出。该流域是高含沙量水流,尤其是高粗沙含量水流频发的区域,同时也是黄河中游洪水的重要汇流区,并对黄河下游河道的严重淤积起到了关键性作用。该流域近年来径流量

显著减少,不少学者对窟野河流域径流变化进行了分析。郭巧玲等人采用统计模型对窟野河流域 3 个水文站的径流变化进行了分析,结果表明,该流域径流减少主要受人类活动影响^[11]。杨智勇等通过 SWAT 模型和 PLUS 模型耦合模拟来分析窟野河流域径流在不同土地利用情景下的变化^[14]。He 等基于 Budyko 假设,综合分析了窟野河流域及其 3 个子流域的年径流量变化及其主控因素,得出人类活动是影响径流变化的主要因素^[17]。这些研究有助于了解窟野河流域径流的变化及其归因,但它们在理论和使用的参数上有很大的不同。例如,降雨径流统计模型在通过人类活动的影响来划分径流时间序列的不同突变点时,仍然存在争议,导致不同的划分时期得到不同的研究结果^[18-19]。因此,很难从这些经验性研究中得出一般性结论。此外,尽管在分布式水文模型中,产汇流的物理机制是明确的^[20-21],但模型参数存在较大的空间差异性,且模型参数的选择过于多变。目前的模式没有全面考虑降水和蒸发量的变化。为深入探讨气候变化与人类活动对河川径流量的影响,并降低模型参数选择的不确定性,从而提升归因评估的精度,需选取一个具有相似气候特征的研究时段。因此,本研究以黄河中游窟野河流域为研究区,基于相似气候前提,筛选出相似气候年组,通过分析流域相似气候年组所对应径流量的变化,结合研究区土地利用变化等来定量归因人类活动对窟野河流域径流变化的影响。

1 数据来源及研究方法

1.1 研究区概况

窟野河流域位于 109°28′ ~ 110°52′E 和 38°23′ ~ 39°52′N 之间,处于黄河中游右岸。干流河长 242 km,温家川水文站控制面积约 8 505 km² (见图 1),为黄河干流右岸的一级支流。流域内地势西北高、东南低,多年平均气温约 7.9 ℃,多年平均降雨量约 400 mm^[17]。流域植被较为稀疏,水土流失极为严重。

1.2 数据来源及预处理

本研究使用的窟野河流域及其周边 11 个气象站 (见图 1) 1960—2021 年的气象资料来自国家气象科学数据中心。这些气象数据涵盖了日降水量(mm)、日最高气温(℃)、日最低气温(℃)以

及日均相对湿度(%)、日均风速(m·s⁻¹)和逐日日照时数(h)。本研究使用的 2000 年和 2010 年土地利用数据来源于资源环境科学数据平台(<https://www.resdc.cn/>),数据的空间分辨率为 30 m。窟野河流域温家川水文站 1960—2021 年径流量资料来自于黄河流域水文年鉴。窟野河流域 1980—2014 年煤矿开采量数据来源于陕西省和内蒙古自治区统计年鉴。研究中使用的 1982—2015 年遥感归一化植被指数(NDVI)来自 GIM-MIS3g (https://daac.ornl.gov/VEGETATION/guides/Global_Veg_Greenness_GIMMS_3G.html),其空间分辨率为 1/12°。窟野河流域 2020 年淤地坝空间分布图来自 Zeng 等利用超高分辨率卫星影像(空间分辨率为 0.3 ~ 1.0 m)和自主开发的人机交互程序所获取(<https://zenodo.org/records/7857443>)^[22]。

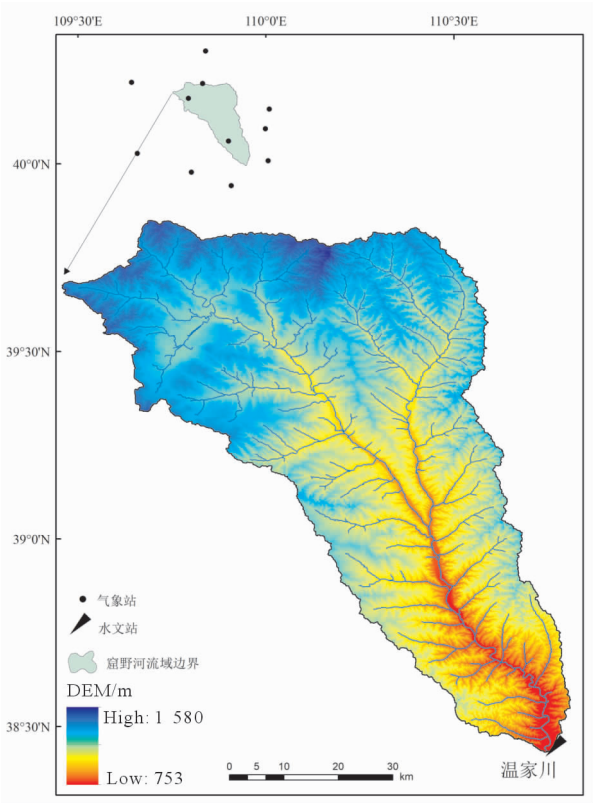


图 1 窟野河流域研究区位图

Fig. 1 Location of the study area

基于反距离加权插值方法,利用窟野河流域及其周边 11 个气象站点计算得出温家川水文控制面积的面平均降水量和潜在蒸散发量。

1.3 研究方法

1.3.1 基本原理

对于一个流域,流域的水量平衡可以表示为

$P + W_i = R + W_g + W_s + ET_c + \Delta W$ (1)

式中: P 表示降水量; W_i 表示其他流域输入本流域水量; R 表示流域内地表径流量; W_g 表示地下径流量; W_s 表示流域土壤储水量; ET_c 表示实际蒸散发量。考虑到研究区具体的水文地质条件: ① 研究区内无其他水量输入, 则 W_i 可以忽略不计; ② 由于研究区内土层较厚, 地下水位较深, 有限入渗的水源补给地下径流较少, 地下水的开采量以及研究区中由于煤矿开采对于 W_g 的影响都可视为人类活动的影响, 故 W_g 近似为 0; ③ 窟野河流域植被覆盖低, 表层土壤入渗能力弱, 超渗产流所产生的地表径流主要表现为短历时、高强度的降水, 因此 W_s 可以忽略不计; ④ 流域水库中的水主要供应人们日常生活需要, 故 ΔW 可以考虑为人类活动的影响。因此, 在一个长时间尺度中, 公式(1) 可以简化为

$$P = R + ET_c$$

式中: P 表示降水量; R 表示流域内地表径流量, ET_c 表示实际蒸散发量。

$$ET_c = k \times ET_0$$

式中: ET_c 为实际蒸散量; k 为系数; ET_0 为潜在蒸散量。当供水充足时, $k = 1$, $ET_c = ET_0$ 假设相同土地利用上 k 不变^[23-24]。

1.3.2 FAO Penman-Monteith 方法

在本研究中, 采用了联合国粮农组织 (FAO-56 报告) 推荐的 Penman-Monteith 方法^[25], 用于计算潜在蒸散发量 (ET_0), 该方法的 ET_0 计算公式为

$$ET_0 = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{t + 273}u_2(e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)}$$

式中: ET_0 表示潜在蒸散发量 ($\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$); R_n 为净辐射 ($\text{MJ}/\text{m}^2 \cdot \text{d}$); 而 G 则为土壤热通量密度 ($\text{MJ}/\text{m}^2 \cdot \text{d}$), 相对于 R_n 取值很小, 故可忽略不计; γ 为空气湿度常数 ($\text{kPa} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$); t 为 2 m 高度处日平均气温 ($^\circ\text{C}$); u_2 为 2 m 高处风速 ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$); e_a 为实际水气压 (kPa); e_s 为饱和水气压 (kPa); Δ 为水气压曲线斜率 ($\text{kPa} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$)。

1.3.3 相似年组的确定

基于已有的研究^[23-24]和研究区的特点, 相似年组的配对需要满足以下条件: ① 年降水量的差

异小于 2%; ② 年潜在蒸散量的差异也小于 2%; ③ 配对年组两期的时间间隔应在 5 年以上。这是由于自然地貌和植被的演化过程较为缓慢, 径流的变化主要是由人类活动引起的。

1.3.4 土地利用变化分析

通过地理信息系统 (GIS) 计算两期土地利用中每一地类的面积, 以显示若干区段的土地利用变化过程。本研究中, 利用土地利用/土地覆被转移矩阵对 2000—2010 年窟野河流域的土地利用/土地覆被变化进行分析。

2 结果

2.1 水文要素统计分析

窟野河流域年径流量在研究时段内呈现显著下降趋势 (见图 2)。1960—2021 年, 多年平均径流量为 4 806 亿 m^3 (见表 1)。年径流量的最大值和最小值之间的差异较大, 1961 年的径流量是 2009 年径流量的 1 012 倍。径流量的变差系数为 0.57, 表明窟野河流域的径流变化具有高度不稳定性。

2.2 气象要素统计分析

窟野河流域年降水量和年潜在蒸散发量在研究时段内均呈现上升趋势 (见图 3), 但上升趋势均不显著。1960—2021 年, 多年平均降水量和潜在蒸散发量分别为 4 052 mm 和 1 081.3 mm (见表 1)。年降水量的最大值和最小值之间的差异较大, 1967 年的降水量是 1965 年降水量的 4.38 倍, 降水量的变差系数为 0.26, 表明流域降水量变化相对稳定。年潜在蒸散发量的最大值和最小值之间的差异相对较小, 1965 年的潜在蒸散发量仅是 2003 年的 129 倍, 潜在蒸散发量的变差系数为 0.05 (见表 1), 表明窟野河流域年潜在蒸散发量变化相对年径流量和年降水量变化更为稳定。

2.3 相似气候配对年组特征分析

在研究时段内 (1960—2021 年间), 共有 4 组配对年份具有相似的气候条件 (见表 2), 每组年份之间的年数相差从 6 年至 18 年不等。就 4 组配对年组的绝对值而言, 降水和 ET 的差值分别为 $-0.2 \sim 45 \text{ mm}$ 和 $-16.1 \sim 17.8 \text{ mm}$ (见表 2), 就配对年组的相对百分比而言, 降水和 ET_0 的差值分别为 0.06% ~ 115% 和 1.47% ~ 1.99%。

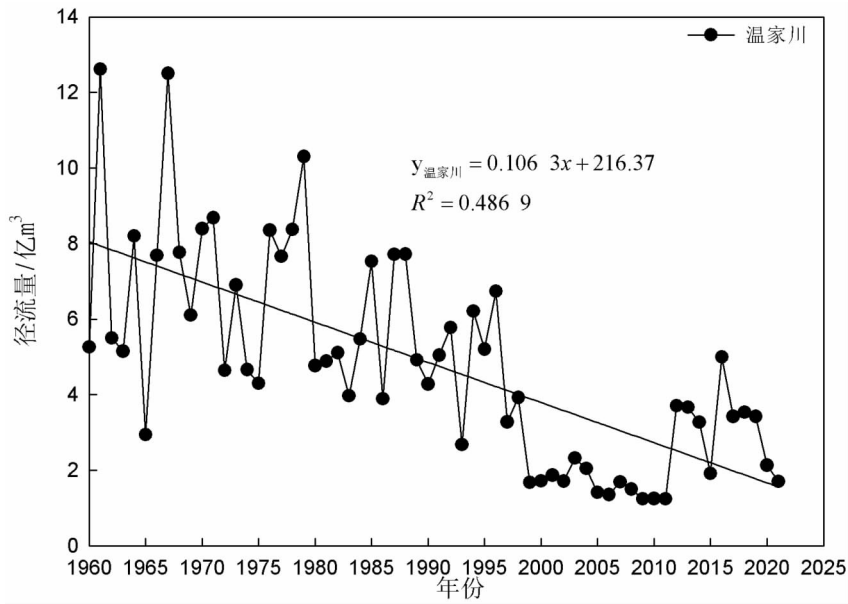


图 2 窟野河流域 1960—2021 年径流量变化趋势

Fig. 2 Variation trend of runoff in Kuye River Basin during 1960—2021

表 1 1960—2021 年窟野河流域径流量、潜在蒸散量和降水量统计特征

Tab. 1 Statistical characteristics of runoff, precipitation and potential evapotranspiration (ET) of the Kuye River Basin during 1960—2021

统计量	径流量/亿 m ³	降水量/mm	潜在蒸散发/mm
均值	4 806	405. 2	1 081. 3
最小值	1. 246	155. 5	966. 1
(年份)	2009	1965	2003
最大值	12. 61	680. 7	1 247. 5
(年份)	1961	1967	1965
变差系数	0. 57	0. 26	0. 05

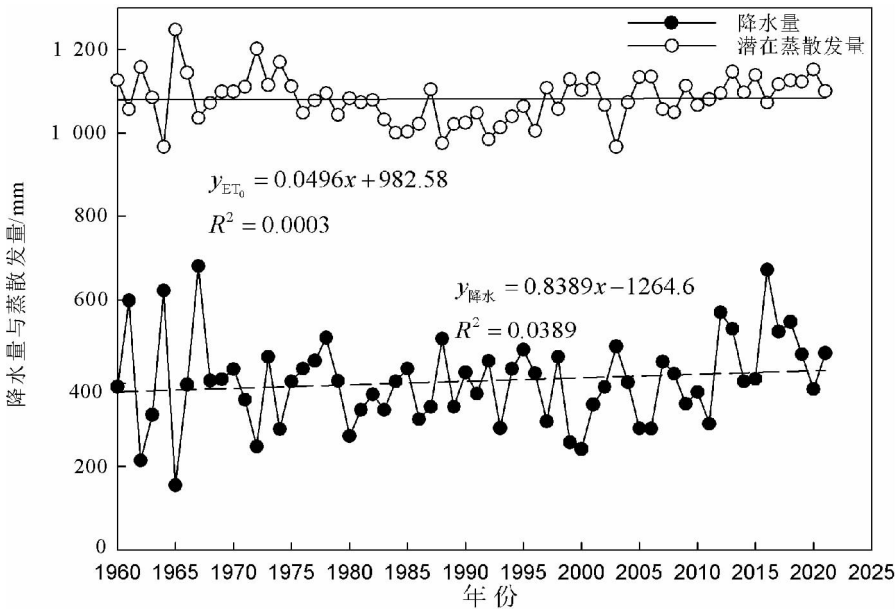


图 3 1960—2021 年窟野河流域年降水量和年潜在蒸散发量变化趋势

Fig. 3 Variation of ET and precipitation in Kuye River Basin during 1960—2021

表2 窟野河流域降水量和潜在蒸发量相似年组
Tab.2 Precipitation and *ET* of paired years in Kuye River Basin

序号	相似气候配对年组			降水量/mm		潜在蒸散发/mm	
	时段 1	时段 2	年差	时段 1	时段 2	时段 1	时段 2
1	1960	1966	6	391.7	396.2	1 126.0	1 143.8
2	1976	1994	18	434.5	434.3	1 047.7	1 039.0
3	1990	1996	6	425.9	423.6	1 024.0	1 004.0
4	2001	2009	8	348.7	350.4	1 129.0	1 112.9

2.4 相似气候配对年组中的径流量变化

基于相似气候前提,在研究时段内,共筛选出4组配对年组,在这些配对年组中,由于气候相似,因此,若径流量不同,则可归因于人类活动。这4组配对年组均呈现出径流量显著变化,其中,两组配对年组的径流表现出增加(时段2径流量

大于时段1径流量),另外两组配对年组的径流表现出减少(时段1径流量大于时段2径流量)。4组配对年组的径流量的变化为25.65%~57.37%(见表3),径流量变化幅度最大为1990年和1996年的57.37%,径流量变化幅度最小为1976年和1994年的25.65%。

表3 窟野河流域相似气候年组径流量变化
Tab.3 Variation of runoff in paired years of the Kuye River Basin

序号	相似气候配对年组			年径流量/亿 m ³		变化幅度/%
	时段 1	时段 2	年差	时段 1	时段 2	
1	1960	1966	6	5.263	7.686	46.04
2	1976	1994	18	5.263	6.21	25.65
3	1990	1996	6	4.283	6.74	57.37
4	2001	2009	8	1.872	1.246	33.44

2.5 径流量变化归因(以配对年组4为例)

2.5.1 窟野河流域土地利用变化

由于降水量和潜在蒸散量在配对年组中是相似的,因此,对河川径流的影响主要归因于人类活动。以表3中径流量变化幅值为33.44%的年组4(即2001年和2009年)为例,应用2000年和2010年两期土地利用数据,进一步验证相似气候前提方法在分析人类活动对河川径流影响方面的适用性。土地利用/土地覆盖变化是全球环境变化的重要因素之一,是人类活动最为直接的表现形式,也是导致全球环境变化的主要原因。土地利用变化可以直接影响地表径流量。在窟野河流域(见图4、表4),随着1999年起在黄土高原退耕还林、还草工程的实施:耕地面积从2000年的1 665.9 km²减少到2010年的1 459.0 km²;林地覆盖面积从2000年的362.5 km²增加到2010年的479.4 km²;草地面积从2000年的5 436.1 km²

增加到2010年的5 482.7 km²;城镇居民地面积从2000年的76.5 km²增加到2010年的253.5 km²。由此可见,人类活动所造成的土地利用/土地覆被变化是造成河川径流变化的主要原因之一。

2.5.2 窟野河流域矿区煤矿开采

窟野河流域的煤矿开采也导致了河川径流的减少。位于窟野河流域上游的倮牛川流域以及中游的乌兰木伦河流域是该区域的主要煤炭开采区。1985年之前,这两个流域的煤炭开采量较少,年产量未超过100万吨。从1996年起,煤炭开采量出现了显著增长,截至2014年底,窟野河流域年采煤量达到近3亿吨(见图5)。煤炭开采量的迅速增加导致了大量地下采空区的形成以及水流裂隙的出现,这对地下水系统造成了严重的破坏。随之而来的是流域下垫面条件的变化,进而影响了产流过程和河川径流。

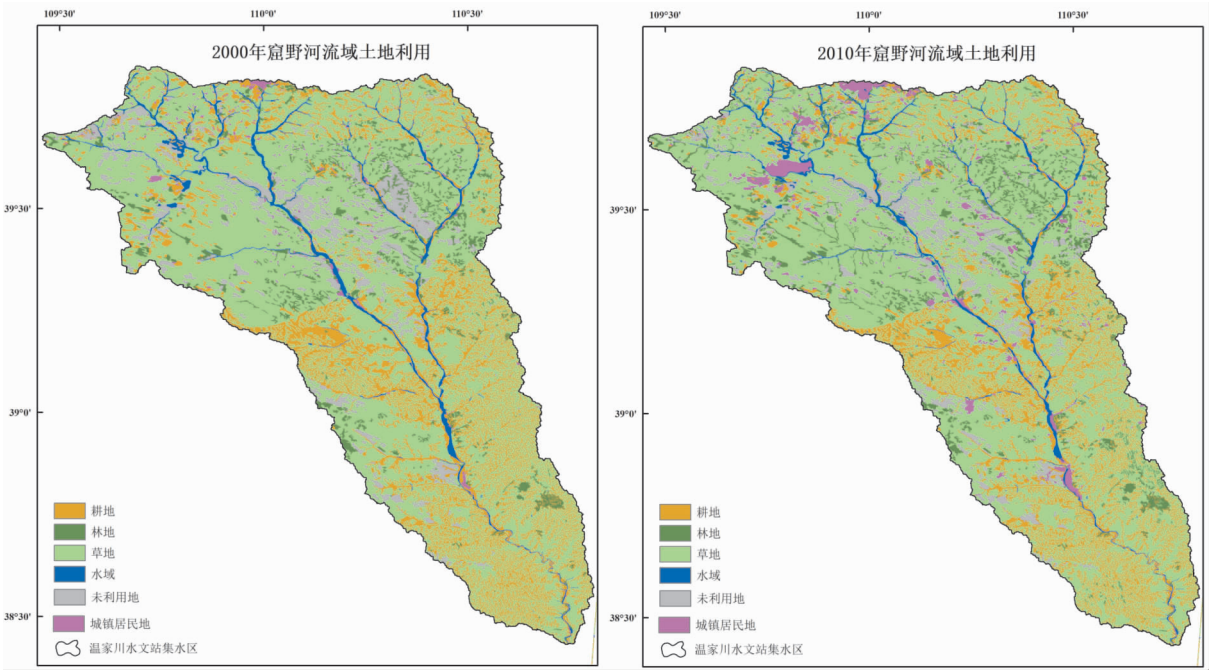


图 4 2000 年和 2010 年窟野河流域土地利用

Fig. 4 Land use of the Kuye River Basin from 2000 to 2010

表 4 2000—2010 年窟野河流域土地利用转移矩阵

Tab. 4 Land use matrix of Kuye River Basin from 2000 to 2010

单位:hm²

年份	土地利用类型	2010 年						2000 年 总计
		耕地	林地	草地	水域	城镇居民地	未利用地	
2000 年	耕地	1 408.2	61.6	146.4	2.9	42.5	4.4	1 665.9
	林地	1.5	328.5	19.4	2.1	9.4	1.6	362.5
	草地	44.3	73.8	5 143.1	3.9	108.4	62.5	5 436.1
	水域	2.6	7.8	16.5	217.3	5.4	5.7	255.3
	城镇居民地	0.2	0.1	1.0	—	75.2	—	76.5
	未利用地	2.2	7.6	156.4	1.8	12.7	401.2	581.9
2010 年	总计	1459.0	479.4	5482.7	228.1	253.5	475.4	8 378.1

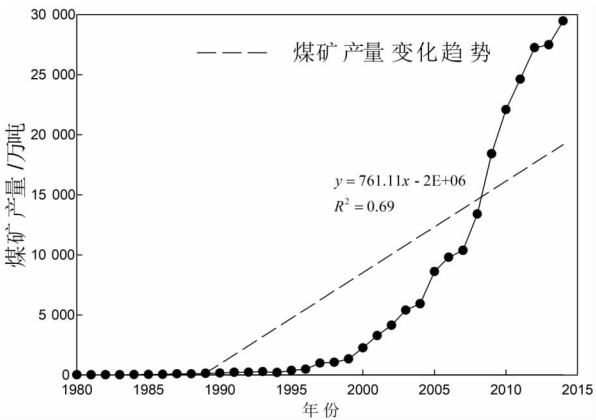


图 5 窟野河流域 1980—2014 年煤矿产量

Fig. 5 Coal production in the Kuye River Basin during 1980—2014

2.5.3 窟野河流域 NDVI 变化特征

NDVI 是表征绿色植被的有效指标,是一个区域植被覆盖的指示器,它直接影响着窟野河流域的地表产水量。考虑到 NDVI 数据的可获得性,分析了 1982—2015 年窟野河流域 NDVI 变化特征发现,在研究时段内,流域 NDVI 呈现显著上升趋势(见图 6)。2001 年和 2009 年平均 NDVI 分别为 0.302 和 0.403。随着 1999 年在黄土高原实施的“退耕还林还草”工程,窟野河流域地表 NDVI 呈增加趋势,植被覆盖增加会影响地表的产汇流,这可能是该流域径流减少的主要原因之一。

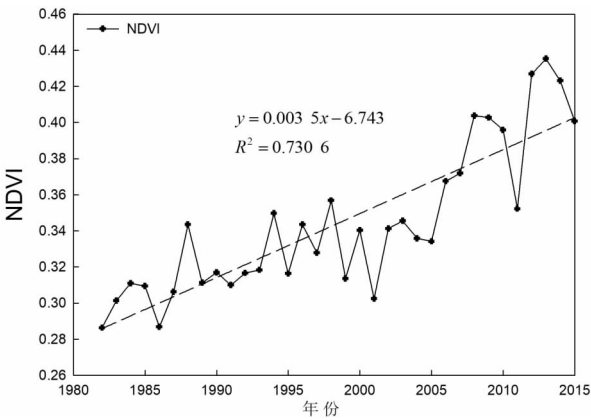


图 6 窟野河流域 1982—2015 年 NDVI 变化特征
Fig.6 NDVI in the Kuye River Basin during 1982—2015

3 讨论

本研究选取相似气候条件下的离散时段,分析人类活动对河川径流的影响。这种方法确保了数据分析的客观性和准确性,从而提高了结果的可靠性。与传统水文分析方法相比,该方法不使用水文序列的突变点来划分研究时段,从而避免了因“未受影响”水文序列时段划分的不同而产生的分歧^[18-19]。该方法还减少了分布式水文模型中关键参数率定的影响,使得研究结果更为客观。此外,该方法的结果可以与分布式水文模型的结果进行比较和验证,并增强学者对于人类活动对河川径流影响的理解。

窟野河流域年径流量在研究时段内呈显著下降趋势,这与前人的研究结果一致^[11, 17]。该流域主要土地利用的变化相对较大,这些结果与已有的研究结果相一致^[14, 26],这也可以解释河川径流减少的原因。在众多下垫面水土保持措施中,淤地坝作为防治土壤侵蚀的重要水土保持工程措施,广泛应用于中国黄土高原。近几十年来,淤地坝协同植被恢复等水土保持措施发挥了积极的减水、减沙作用,黄河中游地区径流量和输沙量显著下降^[27]。截至 2020 年,窟野河流域内已有 980 座淤地坝,分布在流域不同部位(见图 7),淤地坝建设使流域出口多年平均径流量显著减少,这也与已有研究结果相一致^[28-29]。这些发现对流域综合管理具有重要意义。

黄土高原的地表径流主要是由短历时、高强度的暴雨所引起的。在数据尺度允许的情况下,相似气候前提方法也可以扩展应用于日尺度或场次降雨分析。此外,相似气候前提阈值(本研究

中选取 2% 为阈值)的选择是灵活的,阈值越小,配对年组越少,结果的准确性就越好。如果有更多的水文数据,例如土壤储水量和地下水等,将提高该方法结果的准确性。由于地学过程的复杂性,本研究所采用的方法也存在一些缺点,例如在描述地学变化时缺乏相应的物理机制。

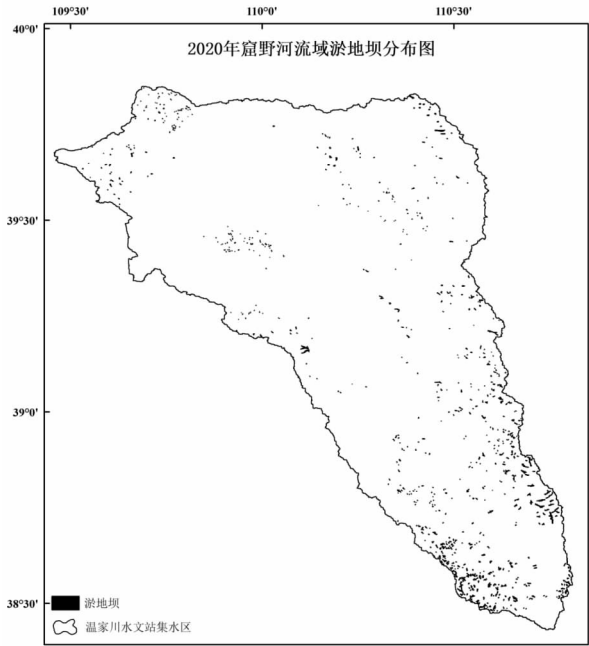


图 7 窟野河流域 2020 年淤地坝空间分布图
Fig.7 Spatial distribution of check dams in Kuye River Basin in 2020

4 结论与展望

1) 在 1960—2021 年,窟野河流域年径流量呈显著下降趋势。使用相似气候前提方法筛选出了从 1960 年代到 2000 年代的 4 组配对年组。其中,2 组呈下降趋势,另外 2 组呈上升趋势。利用 2000 年和 2010 年两期土地利用/土地覆被数据和该流域煤矿开采量进行分析,可以很好地定量解释人类活动对窟野河流域径流变化的影响,从而验证了该方法的适用性。

2) 窟野河流域中,人类活动对下垫面产生重要影响。流域 NDVI 在 1982—2015 年呈现显著上升趋势,2020 年有淤地坝 980 座。

3) 相似气候前提方法有助于揭示气候、人类活动、径流之间的非线性关系。与传统方法(例如水文方法)相比,它能够得到更好的研究结果。这种方法是可扩展的,也可用于不同的区域或尺度研究。

参考文献

- [1] LIU J G, WANG H, LAI H X. Deciphering the response mechanism of global river flow seasonality to climate change[J]. Chinese Science Bulletin, 2024, 69(25): 3686-3688.
- [2] BLOSCHL G, BIERKENS P, CHAMBEL A, et al. Twenty-three unsolved problems in hydrology (UPH)-a community perspective[J]. Hydrological Sciences Journal, 2019, 64(10): 1141-1158.
- [3] HADDELAND I, HEINKE J, BIEMANS H, et al. Global water resources affected by human interventions and climate change[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2014, 111(9): 3251-3256.
- [4] HE Y, QIU H J, SONG J X, et al. Quantitative contribution of climate change and human activities to runoff changes in the Bahe River watershed of the Qinling Mountains, China[J]. Sustainable Cities and Society, 2019, 51(1/2/3): 101729.
- [5] ZHANG Y R, HE Y, SONG J X. Effects of climate change and land use on runoff in the Huangfuchuan Basin, China[J]. Journal of Hydrology, 2023, 626: 130195.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] HE Y, WANG F, MU X M, et al. An assessment of human versus climatic impacts on Jing River Basin, Loess Plateau, China [J]. Advances in Meteorology, 2015, 2015(1): 478739.
- [9] HE Y, WANG F, MU X M, et al. Human activity and climate variability impacts on sediment discharge and runoff in the Yellow River of China[J]. Theoretical and Applied Climatology, 2016, 129: 1-10.
- [10] BROWN A E, ZHANG L, MCMAHON T A, et al. A review of paired catchment studies for determining changes in water yield resulting from alterations in vegetation[J]. Journal of Hydrology, 2005, 310(1/2/3/4): 28-61.
- [11] 郭巧玲, 陈新华, 窦春峰, 等. 近 60 年来窟野河全流域年径流变化及其影响因素分析研究[J]. 水土保持学报, 2016, 30(3): 90-95.
- GUO Q L, CHEN X H, DOU C F, et al. Study on the variation of annual runoff and influencing factors in Kuye River during the past 60 years[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2016, 30(3): 90-95.
- [12] 王飞, 穆兴民, 李锐, 等. 相似性降水条件下北洛河水沙变化特征[J]. 水资源与水工程学报, 2008, 19(6): 36-40.
- WANG F, MU X M, LI R, et al. Change characteristic of the runoff and sediment under the similar precipitation condition in the Beiluohe River[J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2008, 19(6): 36-40.
- [13] 燕慧婷, 王飞, 何毅, 等. 人类活动对黄河河源区水沙变化影响评价[J]. 泥沙研究, 2015, 40(2): 40-46.
- YAN H T, WANG F, HE Y, et al. Impact assessment of human activities on runoff and sediment between paired years with similar weather condition in the source of the Yellow River[J]. Journal of Sediment Research, 2015, 40(2): 40-46.
- [14] 杨智勇, 牛健植, 樊登星, 等. 基于 SWAT 和 PLUS 模型的窟野河流域径流对土地利用变化的响应及预测[J]. 水土保持学报, 2024, 38(1): 289-299.
- YANG Z Y, NIU J Z, FAN D X, et al. Response and prediction of runoff to land use change in Kuye River Basin based on SWAT and PLUS model [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2024, 38(1): 289-299.
- [15] 刘彦随, 夏军, 王永生, 等. 黄河流域人地系统协调与高质量发展[J]. 西北大学学报(自然科学版), 2022, 52(3): 357-370.
- LIU Y S, XIA J, WANG Y S, et al. Coordinated human-earth system and high-quality development in Yellow River Basin [J]. Journal of Northwest University (Natural Science Edition), 2022, 52(3): 357-370.
- [16] 何毅. 黄河河口镇至潼关区间降雨变化及其水沙效应[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2016.
- [17] HE Y, MU X M, JIANG X H, 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.
- [18] 张淑兰, 王彦辉, 于澎涛, 等. 定量区分人类活动和降水量变化对泾河上游径流变化的影响[J]. 水土保持学报, 2010, 24(4): 53-58.
- ZHANG S L, WANG Y H, YU P T, et al. Study for separating the impact of precipitation variation and human activities on runoff change of the upper reaches of Jing River[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2010, 24(4): 53-58.

- [19] 冉大川, 刘斌, 罗全华, 等. 泾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): 6-8.
- RAN D C, LIU B, LUO Q H, et al. Hydrological analysis on the variability of runoff and sediment in Jinghe watershed[J]. Yellow River, 2001, 23(2): 6-8.
- [20] 邱国玉, 尹婧, 熊育久, 等. 北方干旱化和土地利用变化对泾河流域径流的影响[J]. 自然资源学报, 2008, 23(2): 211-218.
- QIU G Y, YIN J, XIONG Y J, et al. Studies on the effects of climatic warming-drying trend and land use change on the runoff in the Jinghe River Basin[J]. Journal of Natural Resources, 2008, 23(2): 211-218.
- [21] 刘昌明, 郑红星, 王中根, 等. 基于 HIMS 的水文过程多尺度综合模拟[J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 2010, 46(3): 268-273.
- LIU C M, ZHENG H X, WANG Z G, et al. Multi-scale integrated simulation of hydrological processes using HIMS with verified case studies[J]. Journal of Beijing Normal University (Natural Science), 2010, 46(3): 268-273.
- [22] ZENG Y, JING T, XU B, et al. Vectorized dataset of silted land formed by check dams on the Chinese Loess Plateau [J]. Scientific Data, 2024, 11(1): 348.
- [23] 王群星. 基于相似气候特征分析的人类活动对延河流域水沙变化的影响[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2010.
- [24] WANG F, MU X M, HESSEL R, et al. Runoff and sediment load of the Yan River, China: Changes over the last 60 yr[J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2013, 17(7): 2515-2527.
- [25] ALLEN R G, PEREIRA L S, RAES D, et al. Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements, FAO Irrigation and Drainage Paper 56 [M] Rome: FAO, 1998: 1-300.
- [26] 蒋晓辉, 高昊祺, 雷宇昕. 近40年来窟野河流域土地利用类型变化及驱动因素[J]. 南水北调与水利科技, 2020, 18(4): 17-38.
- JIANG X H, GAO H Q, LEI Y X. Changes and driving factors of land use types in Kuye River Basin in recent 40 years [J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2020, 18(4): 17-38.
- [27] 张永强, 李聪聪. 植被变化对中国北方水文过程影响的研究进展探讨[J]. 西北大学学报(自然科学版), 2020, 50(3): 420-426.
- ZHANG Y Q, LI C C. The research progress on the influence of vegetation change on regional hydrological processes in Northern China [J]. Journal of Northwest University (Natural Science Edition), 2020, 50(3): 420-426.
- [28] 张红娟, 延军平, 周立花, 等. 黄土高原淤地坝对水资源影响: 以绥德县韭园沟典型坝地为例[J]. 西北大学学报(自然科学版), 2007, 37(3): 475-478.
- ZHANG H J, YAN J P, ZHOU L H, et al. The influence of loess plateau soil-saving dam on water resources: An example of typical soil-saving dam of Jiuyuangou in suide county [J]. Journal of Northwest University (Natural Science Edition), 2007, 37(3): 475-478.
- [29] 郭嘉嘉. 淤地坝建设对流域下垫面特征及水沙效应的影响[D]. 西安: 西安理工大学, 2023.

(编辑 雷雁林)