

疏勒河流域水沙变化特征及其归因分析

王昱^{1,2}, 任伟龙¹, 牛晓宇³,
刘开清⁴, 张宝泉⁴, 张晓龙¹, 胡飞燕¹, 尉小珍¹

(1. 兰州理工大学土木与水利工程学院, 甘肃 兰州 730050;

2. 西北低碳城镇支撑技术省部共建协同创新中心, 甘肃 兰州 730050;

3. 甘肃省水环境监测中心, 甘肃 兰州 730000; 4. 甘肃省水利厅讨赖河流域水资源利用中心, 甘肃 酒泉 735000)

摘要: [目的] 分析疏勒河流域水沙变化特征及其驱动因素, 为该流域水资源有效利用和生态保护提供理论依据。[方法] 收集疏勒河干流(昌马堡、潘家庄)及党河(党城湾)3处代表性水文站从建站至2023年近70 a的实测径流、输沙和降水资料及邻近的酒泉、玉门和肃北3个气象站的气象数据, 运用数理统计、Mann-Kendall非参数检验、贝叶斯检验等方法, 分析疏勒河流域水沙关系变化特征, 并结合回归分析和累积量斜率变化率法量化气候变化和人类活动对径流和输沙变化的影响。[结果] 疏勒河流域径流量和输沙量在年内及年际尺度上分配不均, 具有明显的时空变异性, 3个水文站的径流量均呈显著增加趋势, 昌马堡水文站的输沙量呈显著上升趋势, 而潘家庄水文站和党城湾水文站的输沙量变化趋势则不显著。[结论] 气候变化是影响疏勒河干流上游和支流党河上游径流和输沙变化的主要原因, 其中疏勒河干流上游昌马堡站径流和输沙过程受降水、气温和人类活动的共同作用驱动, 降水变化是影响党河上游党城湾站径流和输沙变化的主导因素; 人类活动干扰是影响疏勒河干流中游潘家庄站径流和输沙的主导因素, 且随着人类活动的不断增强而持续扩大。

关键词: 水沙关系; 气候变化; 人类活动; 疏勒河流域

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2026)01-0202-12

中图分类号: TV141.3

文献参数: 王昱, 任伟龙, 牛晓宇, 等. 疏勒河流域水沙变化特征及其归因分析[J]. 水土保持通报, 2026, 46(1): 202-213. Wang Yu, Ren Weilong, Niu Xiaoyu, et al. Characteristics and attribution analysis of runoff-sediment variations in Shule River basin [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2026, 46(1): 202-213.

DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2026.01.030

CSTR: 32312.14.stbctb.2026.01.030

Characteristics and attribution analysis of runoff-sediment variations in Shule River basin

Wang Yu^{1,2}, Ren Weilong¹, Niu Xiaoyu³, Liu Kaiqing⁴,
Zhang Baoquan⁴, Zhang Xiaolong¹, Hu Feiyan¹, Wei Xiaozhen¹

(1. School of Civil and Hydraulic Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou,

Gansu 730050, China; 2. Collaborative Innovation Center for Supporting Technology of Northwest Low-Carbon

Towns, Lanzhou, Gansu 730050, China; 3. Gansu Provincial Water Environment Monitoring Center, Lanzhou, Gansu 730000, China; 4. Gansu Provincial Water Resources Utilization Center of Taolai River Basin, Jiuquan, Gansu 735000, China)

Abstract: [Objective] The characteristics and driving factors of runoff-sediment variations in the Shule River basin were analyzed in order to provide a theoretical basis for the efficient utilization of water resources and ecological conservation in the basin. [Methods] Measured runoff, sediment transport, and precipitation data spanning from the time of built station to nearly 70 years by 2023 were collected from three representative hydrological stations—Changmabao and Panjiashuang on the Shule River main stream, and Dangchengwan on the Dang River—together with meteorological data from three nearby meteorological stations (Jiuquan, Yumen, and Subei). Methods such

收稿日期: 2025-09-26

修回日期: 2025-10-20

采用日期: 2025-10-20

资助项目: 国家自然科学基金项目“梯级筑坝对高寒内陆河流重金属迁移转化机制研究”(52169015); 甘肃省重大专项“高原夏菜废弃物规模化处置与循环利用关键技术研发”(24ZDNA004); 甘肃省2025年水利科研与技术推广项目(24GSLK030; 25GSLK105)

第一作者: 王昱(1979—), 男(汉族), 甘肃省永昌县人, 博士, 教授, 主要从事河流水生态与水环境研究。Email: wangyu-mike@163.com。

as mathematical statistics, the Mann-Kendall non-parametric test, and Bayesian analysis were applied to analyze the variation characteristics of the runoff-sediment relationship in the Shule River basin. In addition, regression analysis and the cumulative slope change rate method were used to quantify the impacts of climate change and human activities on variations in runoff and sediment transport. [Results] Runoff and sediment transport in the Shule River basin were unevenly distributed at both intra-annual and interannual scales, exhibiting pronounced spatiotemporal variability. Runoff at all three hydrological stations showed a significant increasing trend. Sediment transport at Changmabao station increased significantly, while no significant trends were observed at Panjiazhuang and Dangchengwan stations. [Conclusion] Climate change is the primary factor influencing the variations in runoff and sediment transport in the upper reaches of the Shule River main stream and the upper reaches of its tributary, the Dang River. Specifically, the runoff and sediment transport processes at the Changmabao station in the upper reaches of the Shule River main stream are driven by the combined effects of precipitation, temperature, and human activities. Precipitation variation is the dominant factor affecting the variations in runoff and sediment transport at the Dangchengwan station in the upper reaches of the Dang River. Human activities are the main driving force influencing runoff and sediment transport at the Panjiazhuang station in the middle reaches of the Shule River main stream, and their influence continues to increase with the intensification of human activities.

Keywords: runoff-sediment relationship; climate change; human activities; Shule River basin

径流和输沙之间的相互关系及其变化特征因其在维系流域生态系统稳定等方面具有重要作用而受到学界广泛关注^[1-3]。径流量的动态变化不仅体现了流域水循环过程的时序特征,还对水资源配置和生态系统稳定性产生深远影响,是维系区域水安全与生态功能的核心要素。输沙量的变化不仅能够反映流域水土流失的强度^[4-6],也直接影响了河道形态演变及水质状况,是保障河流生态与水环境安全的关键因素^[7]。径流和输沙过程受到流域内气候变异、下垫面条件、土壤类型和植被覆盖等自然条件和人类干预的共同影响^[8-9]。近年来,在全球气候变暖和水电梯级开发及大规模引调水工程等人类活动的共同影响下,河流系统原有的水沙平衡遭到破坏,水沙通量发生改变,对流域生态系统稳定和经济社会协调发展构成了重要挑战^[10]。对全球 145 条河流的长期监测数据显示,约 50% 的河流输沙量有显著变化趋势,其中大多数表现为下降趋势;约 30% 的河流径流量亦存在显著变化^[11];在中国,以长江、黄河等为代表的 10 条主要入海河流的年输沙量已减少至 20 世纪后半叶多年平均水平值的 1/2^[12];相较于外流河,干旱区内陆河受气候条件和地形地貌制约,多为季节性河流,其径流与输沙高度集中于汛期,河道宽浅促使径流以股流形式汇集,致使汛期流速和携沙能力骤增,泥沙输移量显著且以中粗颗粒为主^[10],显著区别于外流河的细颗粒悬移特征。此外,截水灌溉、水库调蓄与梯级开发等工程活动对内陆河水沙输移过程的干扰更为突出,不仅加剧了径流与输沙过程的波动性,还削弱了河流系统的稳定性。这种自然与人类活动的深度耦合,致使内陆河水沙关系呈现

出更强的非线性响应与脆弱性。陈吉平等^[13]研究发现石羊河出山径流呈下降趋势,而黑河和疏勒河出山径流呈增长趋势;武建等^[14]研究发现降水是导致讨赖河径流和输沙增长的主要驱动因素;黄星^[15]研究发现塔里木河径流呈显著下降趋势;马俊秀等^[16]研究发现石羊河输沙量减少主要受人类活动的影响。总体来看,内陆河不同流域的水沙变化规律与驱动机制存在显著的地域特征,但准确识别影响河流水沙关系的主导驱动因子对维护区域生态与社会稳定具有重要意义。

疏勒河是中国第三大内陆河,作为连接祁连山冰川水源区与河西走廊绿洲农业区的关键生态廊道,其径流和输沙过程不仅直接影响下游 $3.00 \times 10^5 \text{ hm}^2$ 灌溉农业的可持续发展,更关系国家西部生态安全战略实施及区域生态文明建设全局。近年来,人类活动的持续增强以及气候变暖引发的上游冰川加速消融,进一步推动了流域水沙通量的显著变化。疏勒河作为典型的干旱区内陆河,其径流与输沙变化主要受气候变化和人类活动的共同影响,其中气候变化主要包括降水与气温变化。然而,现有关于疏勒河流域水沙关系的研究多侧重于水沙变化特征与趋势分析^[17-18],对其驱动机制的探讨相对薄弱,且多集中于上游^[19-20],对气候变化与人类活动耦合作用下的水沙变化缺乏系统性研究。因此开展疏勒河流域水沙关系及其时空变化特征研究,并量化评估降水变化、气温变化和人类活动对水沙通量的影响,不仅有助于深化对河流水沙演变规律的认识,还可为流域水资源优化调度、水土保持工程规划及生态综合治理提供科学支撑。

1 研究区概况

疏勒河流域地处亚欧大陆腹部,是我国河西走廊第二大内陆河水系,流域地跨青海、甘肃两省,流域范围介于北纬 $38^{\circ}00'$ — $42^{\circ}48'$,东经 $92^{\circ}11'$ — $98^{\circ}30'$,流域总面积约 $1.29 \times 10^5 \text{ km}^2$ 。疏勒河干流发源于祁连山脉西段的沙果林那穆吉木岭,穿行肃北蒙古族自治县、玉门市、瓜州县及敦煌市,最终在瓜州县敦煌闸附近由北河口水利枢纽引入灌渠。流域水系在昌马峡以上称为昌马河,出山口后转称疏勒河。在水系划分上,流域水系主要有昌马河(上游干流)、小昌马河、石油河-赤金河、白杨河、踏实河-榆林河及党河组成,其中石油河-赤金河、白杨河并不汇入干流^[21-22]。疏勒河最大的一级支流党河发源于肃北蒙古族自治县东南部的盐池湾国家级自然保护区,流经肃北蒙古族自治县和敦煌市,最终注入党河水库,全长 390 km,汇水面积 $16\,970 \text{ km}^2$ 。目前党河与疏勒河的水力连通性仅通过下游部分地下水径流维持。流域水系及水文气象站空间分布如图 1 所示。

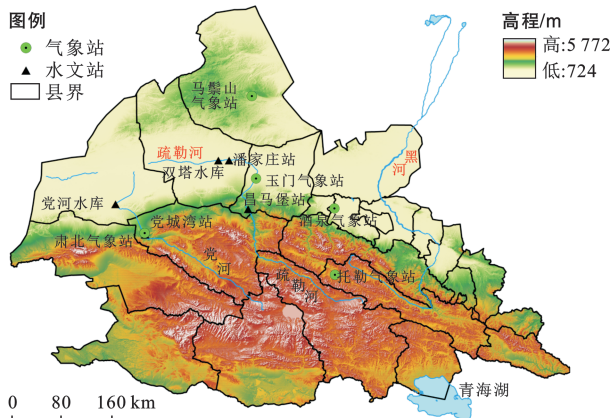


图 1 疏勒河流域水系及水文气象站空间分布

Fig.1 Spatial distribution of river system and hydro-meteorological stations in Shule River basin

流域自东南向西北贯穿 3 大地貌单元,上游祁连山区海拔高程在 $3\,000 \sim 5\,500 \text{ m}$,人类活动少,发育有现代冰川且植被稀疏,地表抗侵蚀能力弱,是流域内径流和输沙的主要形成区;中游走廊平原区海拔高度在 $1\,200 \sim 3\,000 \text{ m}$,分布着玉门、瓜州等重要绿洲,是人类聚居与农业生产的核心区;下游荒漠区海拔高程在 $800 \sim 1\,200 \text{ m}$,以戈壁沙漠为主,生态环境脆弱,易受风力和河流的侵蚀。流域深居亚欧大陆腹地,气候极端干旱,年均降水量从祁连山南部山区的 170 mm 骤降至下游不足 70 mm ,水面蒸发量呈现反向变化趋势,从高山区约 $1\,000 \text{ mm}$ 递增至走廊平原区 $2\,000 \text{ mm}$ 以上,而潜在蒸发量高达 $2\,500 \sim 3\,000 \text{ mm}$ 。近 20 a

来疏勒河流域受西部大开发战略驱动,农业与旅游业高速发展,耕地面积扩张 52.73% ,其中 70.22% 由草地和荒地转化;灌溉用水比例长期超流域总用水量的 70% ,进一步加剧了区域水资源供需矛盾。为满足经济社会发展和生态治理需求,流域内先后修建各类引蓄水工程 82 处,累计设计库容规模达 $7.30 \times 10^8 \text{ m}^3$,同时完成水土流失治理面积 $1.29 \times 10^6 \text{ hm}^2$ ^[17,23]。

2 数据来源与研究方法

2.1 数据来源

选取疏勒河干流上游出山口的昌马堡站、中游的潘家庄站以及党河出山口的党城湾站和下游的沙枣园站自建站以来至 2023 年近 70 a 的实测径流、输沙和降水长序列数据,并结合敦煌市、肃北蒙古族自治县、玉门市和瓜州县 1995, 2005, 2015 和 2020 年 4 期土地利用矢量数据开展综合分析(土地利用矢量数据来源于中国科学院资源环境科学数据中心(<https://www.resdc.cn/>)中国多时期土地覆盖遥感监测数据库)。由于水文站本身未设置气象观测点,且研究区内多为荒漠戈壁,气象站稀少。本文补充利用国家气象数据网提供的邻近昌马堡、潘家庄和党城湾 3 座水文站的酒泉、玉门和肃北 3 个气象站多年气温数据,以增强水文气象条件的对比与分析。本研究以 3 个水文站为界,将疏勒河干流划分为上游和下游两段,同时将党河划分为上下游两段。其中党河下游沙枣园水文站原设于 1954 年,1974 年党河水库修建后撤销,后续分析主要以昌马堡、潘家庄和党城湾 3 个代表性水文站为主。各水文站详细资料详见表 1。其中潘家庄和昌马堡径流、输沙和降水采用 1956—2023 年的实测数据序列;党城湾水文站对径流和输沙观测分别开始于 1956 和 1972 年,在后续水沙年内变化分析中,党城湾径流和输沙数据均采用 1972—2023 年序列;而在水沙年际变化分析和归因分析中,为保证数据序列的完整性与长度,径流序列采用 1956—2023 年。

2.2 研究方法

2.2.1 水沙年内年际变化特征计算

对径流与输沙的年内变化特征通过年内变异系数(C_v)、年内完全调节系数(C_r)和极差(ΔC)等指标,从非均匀性和变幅两个维度进行综合量化分析研究^[24-25],各指标计算方法参见郭巧玲等^[25]研究。年际特征采用年际变差系数(C_{vy}),年际极值比(K_y)来分析。

2.2.2 水沙序列突变检验方法

已有研究^[26]表明,在对水沙序列进行突变检验时,各类突变检验方法的数学基础、对序列长度及数

值分布的适用性各不相同。因此,当不同方法应用于同一数据序列时,得出的检验结果可能存在显著差异。为避免单一检验方法识别序列突变点可能存在的缺陷,结合张媛等^[26]研究选取 Mann-Kendall 非参数检验法、累计距平法、贝叶斯检验法、滑动 T 检验法、Pettitt 检验法以及有序类聚法对水沙序列进行趋势和突变性分析并确定径流量(输沙量)序列突变点年份。其中 Mann-Kendall 非参数检验法通过评估时间序列的秩次变化来检测序列突变点,无需假设样本

服从特定分布;累计距平法通过判断不同时段累积距平曲线的波动特征来判断序列的突变点;贝叶斯检验法通过计算序列在不同假设下的后验概率来判断序列的突变点;滑动 T 检验法通过将时间序列划分为相邻两组样本,并比较其均值差异的显著性,来判定序列的突变点;Pettitt 检验法是通过分析序列中趋势性变化的显著性来判定序列的突变点;有序类聚法是通过最小化同类内部离差平方和,同时最大化不同类间离差平方和,以此来判定序列的突变点。

表 1 疏勒河流域 3 个水文站特征值

Table 1 Characteristic values of three hydrological stations in Shule River basin

站名	经度	纬度	集水面积/ km ²	年降水量/ mm	降水数据 年份	年径流量/ 10 ⁸ m ³	径流数据 年份	年输沙量/ 10 ⁴ t	输沙数据 年份
昌马堡	96°51'00"	39°49'27"	10 961	94.8	1956—2023	10.43	1956—2023	355.16	1956—2023
潘家庄	96°31'33"	40°33'02"	18 496	50.8	1956—2023	2.94	1956—2023	203.74	1956—2023
党城湾	94°53'00"	39°30'00"	14 325	145.8	1956—2023	3.58	1956—2023	72.02	1972—2023
沙枣园	94°21'14"	39°54'47"	16 958	—	—	2.905	1954—1974	121.30	1954—1974

2.2.3 累积量斜率变化率法

为量化评估气候变化(降水和气温)和人类活动对径流量(输沙量)变化的影响,采用累积量斜率变化率法(SCRCQ)进行分析^[27]。首先利用 Mann-Kendall 非参数检验法、累计距平法、贝叶斯检验法、滑动 T 检验法、Pettitt 检验法以及有序类聚法对水沙序列进行趋势和突变性分析并确定径流量(输沙量)序列突变点年份,基于确定的突变年份,对两个时期的累积降水量、累积气温和累积径流量(输沙量)进行回归分析,得到累积径流量(输沙量)斜率变化率(R_{SR})、累积降水量斜率变化率(R_{SP})和累积气温斜率变化率(R_{ST}),进而计算降水和其他因素对径流量(输沙量)的影响。其计算公式为

$$C_P = \frac{R_{SP}}{R_{SR}} \times 100\% = \frac{\left(\frac{S_{Pa}}{S_{Pb}} - 1\right) \times 100\%}{\left(\frac{S_{Ra}}{S_{Rb}} - 1\right) \times 100\%} \times 100\% \quad (1)$$

$$C_T = \frac{R_{ST}}{R_{SR}} \times 100\% = \frac{\left(\frac{S_{Ta}}{S_{Tb}} - 1\right) \times 100\%}{\left(\frac{S_{Ra}}{S_{Rb}} - 1\right) \times 100\%} \times 100\% \quad (2)$$

$$C_H = 1 - C_P - C_T \quad (3)$$

式中: S_{Ra}, S_{Rb} 分别为累积径流量(输沙量)一年份线性关系式在突变点前后两个时期的斜率; S_{Pa}, S_{Pb} 分别为累积降水量一年份线性关系式在突变点前后两个时期的斜率; S_{Ta}, S_{Tb} 分别为累积气温一年份线性

关系式在突变点前后两个时期的斜率; C_P 表示为降水对径流量(输沙量)变化的贡献率; C_T 表示为气温对径流量(输沙量)变化的贡献率; C_H 表示为人类活动对径流(输沙量)变化的贡献率。

3 结果与分析

3.1 疏勒河流域水沙变化特征

3.1.1 水沙空间变化

由表 1 可知,疏勒河干流的径流量和输沙量在空间分布上具有明显空间差异性,径流量和输沙量表现为:上游 > 中游,干流 > 支流。昌马堡站年均径流量和输沙量分别为 $1.04 \times 10^9 \text{ m}^3$, $3.55 \times 10^6 \text{ t}$,至下游潘家庄站则减少至 $2.94 \times 10^8 \text{ m}^3$, $2.04 \times 10^6 \text{ t}$,径流和泥沙量表现出明显的衰减趋势。其原因是干流自山区进入中游平原后,因大规模水利设施建设和引水灌溉,水流被分散引走,既减少了河道径流量,也降低了水流速度,致使大量泥沙在灌区(渠道与农田)中淤积,最终导致中游河道的径流量与输沙量大幅降低,再经由下游双塔堡水库截流,进一步削弱了下游的输沙过程。相较之下,疏勒河支流党河在党城湾站年均输沙量为 $7.20 \times 10^5 \text{ t}$ 至下游沙枣园站则升至 $1.21 \times 10^6 \text{ t}$,这是由于党城湾至下游党河水库段四周均为戈壁和沙漠,植被稀疏、风沙肆虐、水土流失严重,导致下游河流含沙量增加,呈现“下游增沙”特征。此外,疏勒河干流与党河均表现为含沙量由上游向下游递增的趋势,下游含沙量约为上游的两

倍,反映出下游地区生态环境脆弱、人类活动强度大。整体来看,疏勒河干流年降水偏少、下垫面条件较差,使得其年平均含沙量与输沙模数普遍高于党河流域,水沙空间分布不均显著。

3.1.2 水沙年内变化

表 2 为 3 个水文站在不同时期的径流与输沙年内分配特征值。由表 2 可知,3 个水文站 1956—2023 年径流和输沙的年内分配特征差异显著。昌马堡、潘家庄和党城湾 3 个水文站径流年内分配不均匀系数分别为 0.95, 0.66 和 0.38, 年内分配完全调节系数分别为 0.36, 0.24, 0.15; 各站输沙年内分配不均匀系数分别为 2.09, 1.92 和 1.55, 年内分配完全调节系数分别为 0.70, 0.62, 0.53。这表明疏勒河径流和输沙年

内分配不均匀性在空间上呈现“上游高于中游、干流大于支流”的梯度特征。从径流和输沙年内分配不均匀性来看,径流和输沙年内分配不均匀系数和年内分配完全调节系数变化趋势基本一致,其中昌马堡站径流和输沙年内分配不均匀性整体增强,潘家庄站径流和输沙年内分配不均匀性呈先增后减趋势,党城湾站径流年内分配不均匀性增强而输沙趋于均衡。总体而言,干流上游年内分配不均匀性加剧,中游受调蓄作用影响分配趋于均衡。径流与输沙系数变化趋势基本一致,表明径流过程对输沙年内分配具有主导作用,且在空间传递过程中表现出由上游向中游逐渐平缓的趋势,体现出流域内水文过程的自上而下调节特征。

表 2 疏勒河流域 3 个水文站径流、输沙年内分配特征值
Table 2 Characteristic values of intra-annual distribution of runoff and sediment transport at three hydrological stations in Shule River basin

站名	统计年份	径流			输沙		
		不均匀系数 ($C_{v水}$)	完全调节系数 ($C_{r水}$)	极差(ΔC)/ ($m^3 \cdot s^{-1}$)	不均匀系数 ($C_{v沙}$)	完全调节系数 ($C_{r沙}$)	极差(ΔC)/ ($10^4 t$)
昌 马 堡	1956—1975	1.00	0.37	81.65	2.06	0.70	160.23
	1976—1995	0.90	0.34	75.71	1.99	0.68	141.70
	1996—2015	0.96	0.35	113.97	2.15	0.72	254.79
	2016—2023	0.96	0.36	140.59	2.31	0.74	353.82
	1956—2023	0.95	0.36	96.34	2.09	0.70	205.37
潘 家 庄	1956—1975	0.55	0.19	16.64	1.82	0.58	193.93
	1976—1995	0.62	0.23	15.67	1.87	0.63	185.63
	1996—2015	0.82	0.30	26.36	2.11	0.65	190.25
	2016—2023	0.72	0.27	32.38	1.86	0.61	89.20
	1956—2023	0.66	0.24	20.97	1.92	0.62	130.57
党 城 湾	1972—1995	0.33	0.13	11.2	1.51	0.53	28.65
	1996—2015	0.41	0.17	14.1	1.58	0.53	32.67
	2016—2023	0.46	0.18	18.3	1.57	0.51	37.49
	1972—2023	0.38	0.15	14.41	1.55	0.53	33.31

图 2 为昌马堡、潘家庄、党城湾水文站实测多年月平均径流量和输沙率变化曲线。由图 2 可知,3 个水文站的径流和输沙年内变化过程基本对应。其中昌马堡水文站径流和输沙年内分配呈现出明显的“单峰型”特征,主要集中在 4—10 月;潘家庄水文站径流年内分配相对均衡,但输沙主要集中在 6—9 月;支流党河党城湾水文站径流量和输沙量年内分配则相对均衡。

3.1.3 水沙年际变化

表 3 为 3 个水文站的径流、输沙年际分配特征值。由表 3 可知,昌马堡、潘家庄和党城湾 3 个水文

站径流年际变差系数分别为 0.31, 0.28 和 0.16, 年际极值比分别为 4.22, 2.75, 1.83; 各站输沙年际变差系数分别为 0.70, 1.04 和 0.70, 年际极值比分别为 36.21, 96.15, 21.35。3 个水文站径流年际变差系数和极值比呈现出“上游高于中游, 支流大于干流”的特征, 表明径流年际变化稳定性中游强于上游, 而支流强于干流; 3 个水文站输沙量年际变差系数和极值比均较高, 表明疏勒河流域输沙量年际变化剧烈, 其中潘家庄输沙量年际变差系数和极值比均远高于昌马堡和党城湾, 说明疏勒河干流中游段输沙年际变化不稳定性大于干流上游和支流。

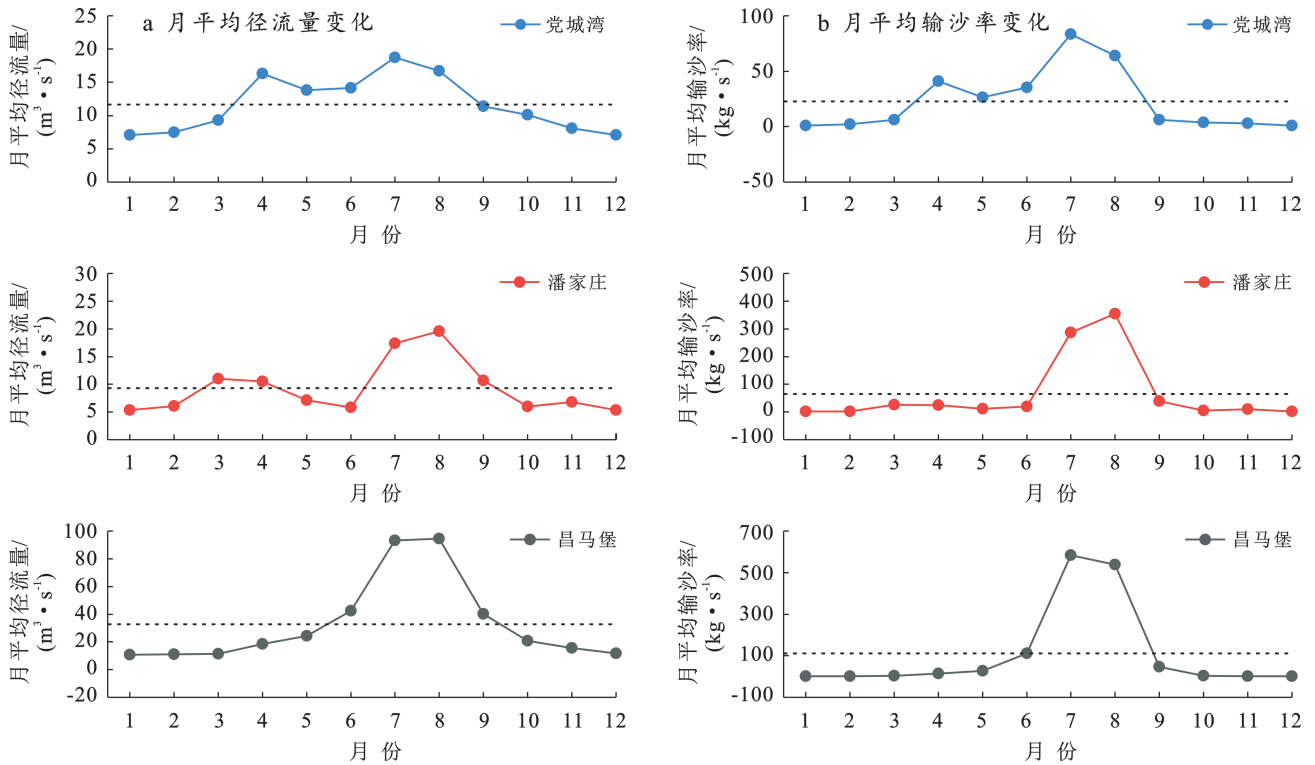


图 2 疏勒河 3 个水文站多年平均月径流量和输沙率变化曲线

Fig.2 Variation curves of multi-year average monthly runoff and sediment transport rate at three hydrological stations in Shule River basin

表 3 疏勒河 3 个水文站径流、输沙年际分配特征值

Table 3 Characteristic values of interannual distribution of runoff and sediment transport at three hydrological stations in Shule River basin

站名	径流		输沙	
	变差系数 ($C_{vy水}$)	极值比 (K_s)	变差系数 ($C_{vy沙}$)	极值比 (K_s)
昌马堡	0.31	4.22	0.70	36.21
潘家庄	0.28	2.75	1.04	96.15
党城湾	0.16	1.83	0.70	21.35

图 3 为 3 个水文站实测径流量、输沙量历年变化过程。由图 3 可知,3 个水文站径流量、输沙量均呈增大趋势,其中昌马堡径流量和输沙量增长趋势更加显著,潘家庄和党城湾输沙量变化趋势并不明显。

3.2 水沙变化特征趋势分析

采用 Mann-Kendall (MK) 趋势检验方法 ($\alpha=0.05$),分析了疏勒河流域 3 个水文站(昌马堡、潘家庄和党城湾)的年径流量与输沙量序列,检验结果详见表 4。根据表 4 可以看出,疏勒河流域 3 个水文站的年径流量 Mann-Kendall 统计量分别为 6.304, 3.197 和 7.072,均远远大于显著性水平 $\alpha=0.05$ 对应的临界值 1.96,表明疏勒河流域年径流量呈显著增加趋势;对 3 个水文站输沙量序列检验结果则不尽相同,潘家庄和党城湾站的统计量分别为 0.917 和 -0.718,绝对

值均未超过临界值,变化趋势不显著;而昌马堡站的统计量为 2.864,绝对值超过 $\alpha=0.05$ 的临界值 1.96,说明其年输沙量呈现出明显增加趋势。

3.3 水沙变化特征突变分析

通过 M-K 突变检验法 (T_1)、Pettitt 检验 (T_2)、滑动 T 检验 (T_3)、贝叶斯检验法 (T_4)、累计距平法 (T_5) 和有序类聚法 (T_6) 这 6 种方法对 3 个水文站的年径流序列和年输沙序列进行突变分析,检验结果如图 4 所示。为确保突变检测结果的稳健性与可靠性,本文参考张媛等^[26]研究依据众数原理,将被多数方法同时识别出的年份确定为真实突变点。综合各方法对 3 个水文站水沙通量的突变分析结果确定昌马堡、潘家庄和党城湾 3 个水文站年径流量突变点分别为 1998, 2004 和 1981 年;年输沙量突变点分别为 1998, 1980 和 1998 年。结合所确定的水沙通量的突变点对各水文站水沙通量阶段划分详见表 5(将突变点前设为基准期,将突变点后设为变异期)。本研究对各水文站年径流量和年输沙量突变年份的确定可能与已有研究存在异同,究其原因是所采用径流和输沙序列不同的缘故。以昌马堡水文站径流量为例,在 1998 年前,流域受人类活动干扰较弱,径流序列未表现出显著突变,故将此时期界定为基准期,其径流变化主要由自然因素(降水与气温)驱动。自 1998 年

起,区域开发强度明显提升,人类活动显著增强,径流量开始受到自然因素与人为干扰的共同作用,该阶段被定义为变异期。

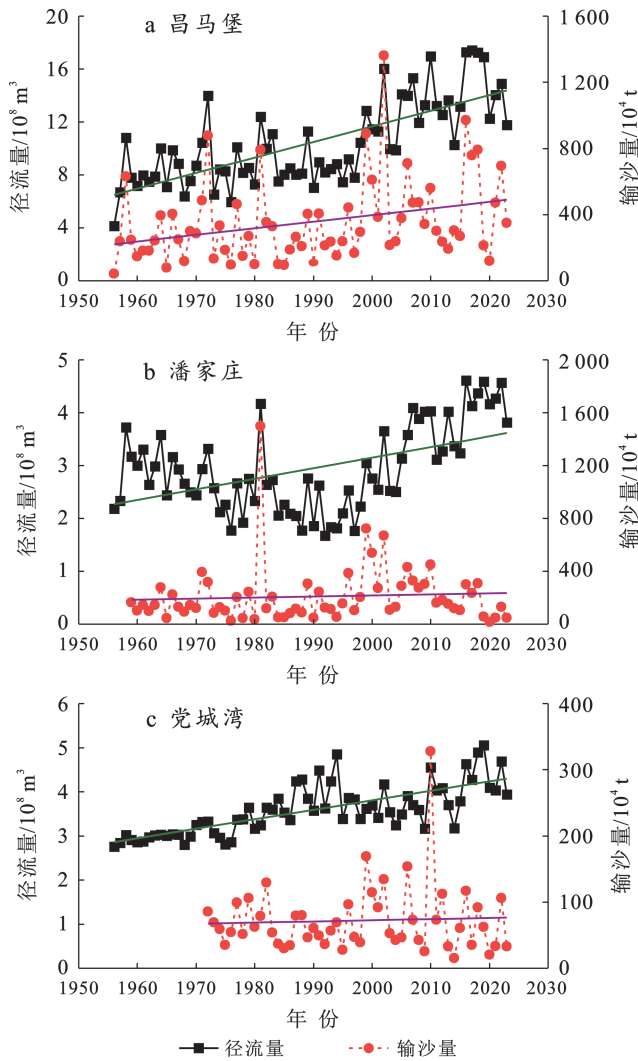


图3 疏勒河3个水文站多年径流量、输沙量年际分配过程线
Fig.3 Interannual distribution curves of multi-year runoff and sediment transport at three hydrological stations in Shule River basin

表4 疏勒河流域3个水文站径流、输沙变化 Mann-Kendall趋势检验

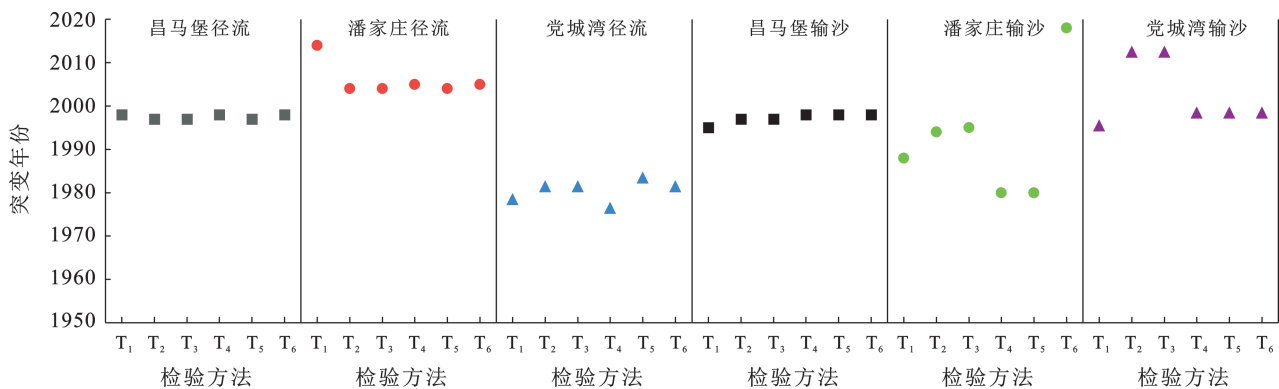
Table 4 Mann-Kendall trend test of runoff and sediment transport changes at three hydrological stations in Shule River basin

类别	项目	昌马堡	潘家庄	党城湾
径流量	检验统计量	6.304	3.197	7.072
	检验临界值	1.96	1.96	1.96
	变化趋势	显著增加	显著增加	显著增加
输沙量	检验统计量	2.864	0.917	-0.718
	检验临界值	1.96	1.96	1.96
	变化趋势	显著增加	增加不显著	减小不显著

3.4 相关性分析法对径流和泥沙的影响分析

3.4.1 年径流量和输沙量与年降水量相关性分析

对3个水文站1956—2023年年径流量和输沙量与年降水量序列进行相关性分析,相关性分析结果显示,3个水文站年径流量与年降水量相关系数分别为0.416 ($p < 0.05$), 0.152 ($p > 0.05$)和0.496 ($p < 0.05$),年输沙量与年降水量相关系数分别为0.256 ($p < 0.05$), 0.203 ($p > 0.05$)和0.302 ($p < 0.05$),年径流量和输沙量与年降水量相关系数均表现为:党城湾 > 昌马堡 > 潘家庄,且回归关系 R^2 均较低。经过分析发现径流量和输沙量与降水量相关系数关系与3个地区降水量大小分布一致,说明降水量的多少对河流径流量和输沙量的影响显著。年径流量和输沙量与年降水量序列相关系数均不高,经过分析发现,疏勒河流域位于西北干旱区,河道宽浅,其径流补给主要来源于冰雪融水,同时年降水量稀少且主要集中在汛期,致使汛期流速和携沙能力骤增。这种稳定的补给类型和特殊的地理气候条件将对河历年径流量和输沙量与年降水量的相关性分析结果产生影响。



注: T_1 为M-K突变检验法, T_2 为Pettitt检验, T_3 为滑动T检验, T_4 为贝叶斯检验法, T_5 为累计距平法, T_6 为有序类聚法。

图4 疏勒河3个水文站径流量和输沙量突变检验结果

Fig.4 Abrupt change detection results of runoff and sediment transport at three hydrological stations in Shule River basin

表 5 疏勒河 3 个水文站年径流量和输沙量阶段划分

Table 5 Stage division of annual runoff and sediment transport at three hydrological stations in Shule River basin

站名	年径流序列				年输沙序列			
	时段	突变点年份	基准期	变异期	时段	突变点年份	基准期	变异期
昌马堡	1956—2023年	1998	1956—1998年	1999—2023年	1956—2023年	1998	1956—1998年	1999—2023年
潘家庄	1956—2023年	2004	1956—2004年	2005—2023年	1959—2023年	1980	1959—1980年	1981—2023年
党城湾	1956—2023年	1981	1956—1981年	1982—2023年	1972—2023年	1998	1972—1998年	1999—2023年

3.4.2 年径流量和输沙量与年降水量回归分析

根据所划分的基准期和变异期,分段对疏勒河流域 3 个水文站多年径流量和输沙量与降水量序列进行回归分析,回归分析结果如图 5—6 所示。由图 5—6 回归结果显示,变异期的回归系数均小于基准

期,说明相较于基准期,变异期内降水对径流和输沙的影响减小。

经过分析发现,变异期内气温变化和人类活动明显增强,显著改变了原有的水沙关系,使得水沙响应过程呈现出更加复杂的变化趋势。

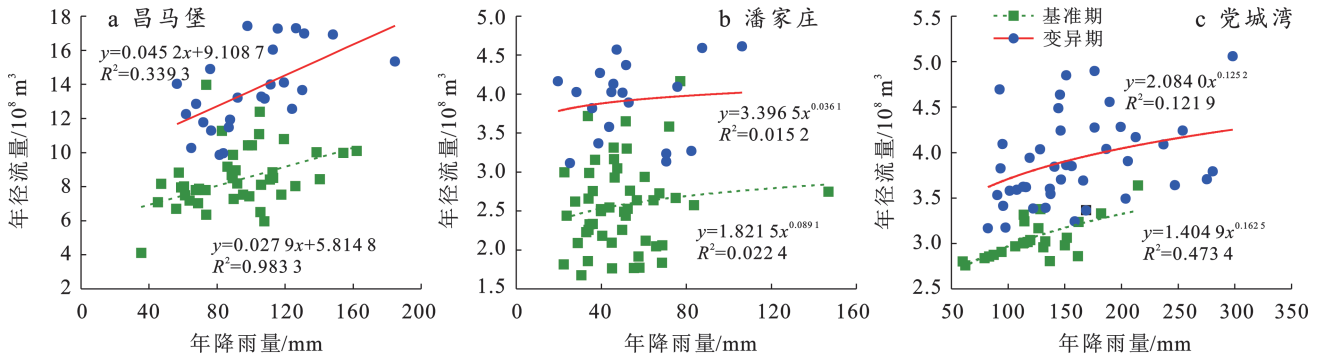


图 5 疏勒河流域 3 个水文站径流量和降水量回归关系

Fig.5 Regression relationship between runoff and precipitation at three hydrological stations in Shule River basin

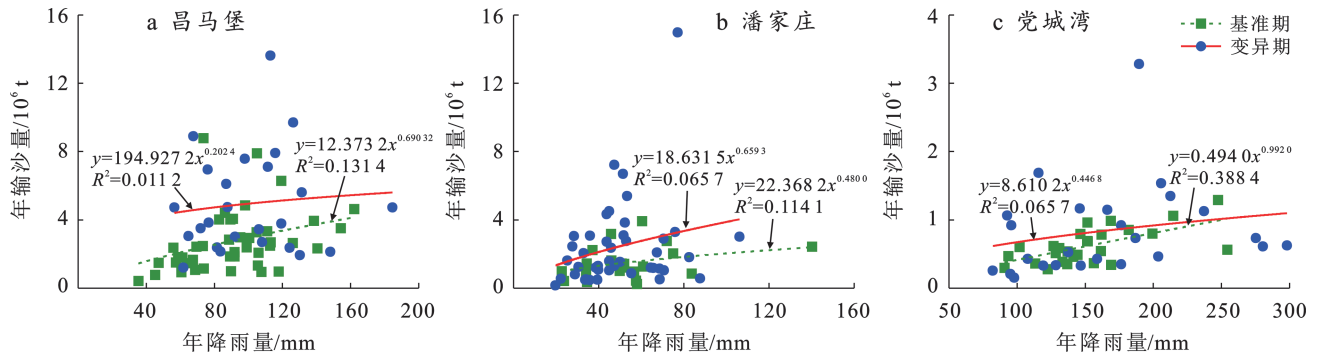


图 6 疏勒河流域 3 个水文站输沙量和降水量回归关系

Fig.6 Regression relationship between sediment transport and precipitation at three hydrological stations in Shule River basin

3.5 累积量斜率变化率法对径流和泥沙的影响分析

流域来水与输沙过程主要受气候变化和人类活动的双重影响,而降水变化和气温变化作为气候变化的重要表现形式,起着关键作用。疏勒河干流上中游及支流党河流域降水变化、气温变化和人类活动对径流和输沙的影响存在显著差异,为量化评估降水变化、气温变化和人类活动对水沙变化的影响,本研究采用累积量斜率变化率法(SCRCQ)进行分析(径流、输沙和降水数据采用 3 座水文站的多年实测数据,气

温数据分别采用邻近昌马堡、潘家庄和党城湾 3 座水文站的酒泉、玉门和肃北 3 个气象站同时间序列数据)。图 7 为 3 个水文站累积径流量和输沙量与年份的线性回归结果,各变量的相关系数均高于 0.95,表明回归效果良好,所得贡献率具有较强可信度。

当径流增加而同期降水减少时,降水对径流变化的影响为负值,此时气温变化和人类活动的影响将超过 100%。采用累积量斜率变化率法对不同阶段降水变化、气温变化和人类活动对径流和输沙的

影响进行量化分析,计算结果详见表6。由表6可知,与基准期相比,昌马堡站变异期内气候变化对径流量和输沙量的影响分别为65.01%和64.90%,人类活动对径流量和输沙量的影响分别为34.99%和35.10%。这说明在变异期内疏勒河上游山区径流和输沙变化主要受气候变化的影响。其中降水、气温和人类活动对径流和输沙的贡献率比例相当,对径流的贡献率分别为29.38%,35.63%和34.99%;对输沙的贡献率分别为29.70%,35.20%和35.10%。与基准期相比,潘家庄站变异期内气候变化对径流量

和输沙量的影响分别为39.66%和16.05%,人类活动对径流量和输沙量的影响分别为60.34%和83.95%。这说明在变异期内疏勒河中游径流和输沙变化主要受人类活动的影响。与基准期相比,党城湾站变异期内气候变化对径流量和输沙量的影响分别为165.51%和106.95%,人类活动对径流量和输沙量的影响分别为-65.51%和-6.95%。这说明在变异期党河上游径流和输沙变化主要受气候变化的影响,其中降水变化占据主导地位,降水变化对径流量和输沙量的影响分别为103.10%和76.85%。

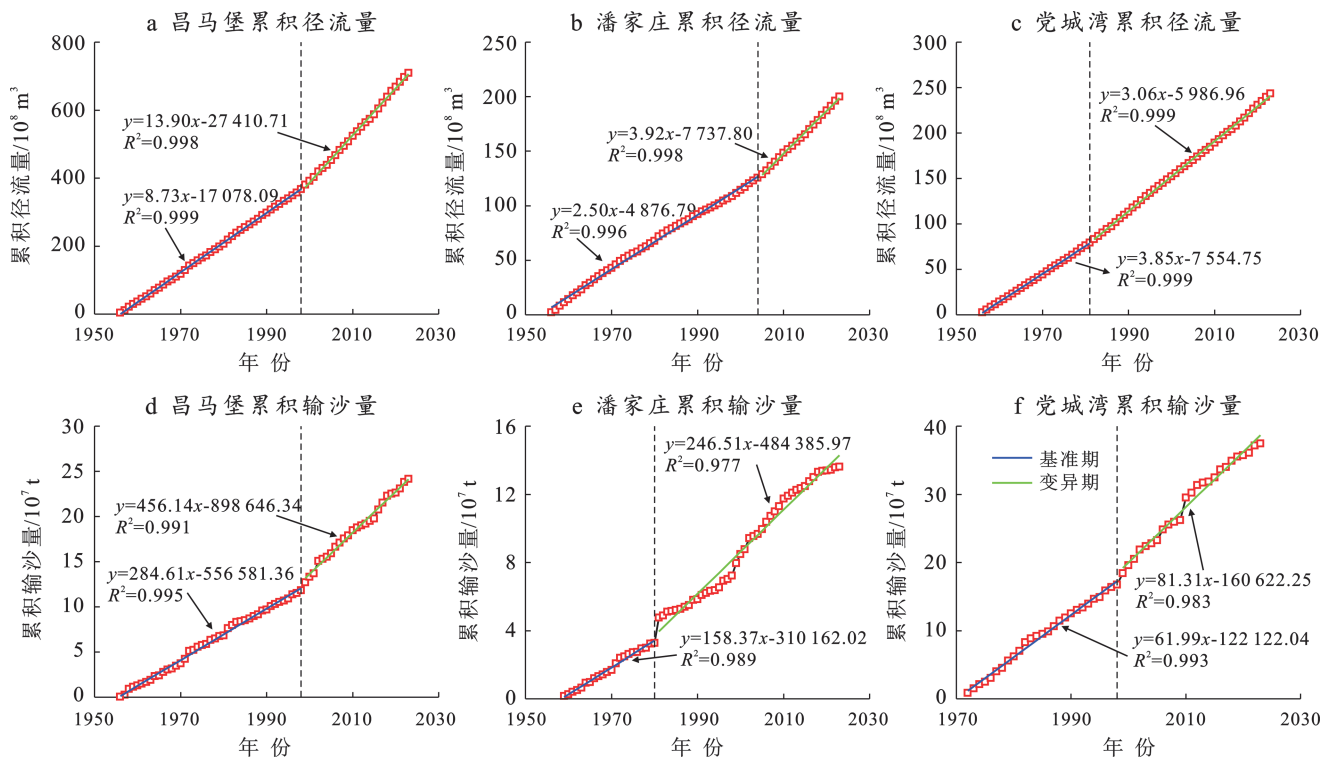


图7 疏勒河流域各水文站历年累积径流量和输沙量过程

Fig.7 Cumulative runoff and sediment transport processes over years at hydrological stations in Shule River basin

表6 疏勒河3个水文站不同时段累积量斜率及气候变化和人类活动的贡献率

Table 6 Slopes of cumulative quantities at three hydrological stations in Shule River basin during different periods and contribution rates of climate change and human activities

站名	年径流序列							年输沙序列						
	时段	降水量 S_p	气温 S_T	径流量 S_R	气候变化		人类活动 $C_H/\%$	时段	降水量 S_p	气温 S_T	输沙量 S_R	气候变化		人类活动 $C_H/\%$
					降水 $C_p/\%$	气温 $C_T/\%$						降水 $C_p/\%$	气温 $C_T/\%$	
昌马堡	1956—1998年	96.11	7.27	8.73	29.38	35.63	34.99	1956—1998年	96.11	7.27	284.61	29.70	35.20	35.10
	1999—2023年	107.90	8.38	13.90				1999—2023年	107.90	8.38	456.14			
潘家庄	1956—2004年	53.13	7.05	2.50	9.03	30.63	60.34	1959—2023年	51.56	6.84	158.37	-16.79	32.84	83.95
	2005—2023年	54.91	7.93	3.92				1981—2023年	48.64	7.75	246.51			
党城湾	1956—1981年	126.45	6.39	3.06	103.01	62.50	-65.51	1972—1998年	142.40	6.75	61.99	76.85	30.10	-6.95
	1982—2023年	160.34	7.33	3.85				1999—2023年	174.21	7.27	81.31			

4 讨论

4.1 疏勒河流域土地利用变化情况

利用 ArcGIS 软件对研究区进行分析与裁剪。图 8 为敦煌市、肃北蒙古族自治县、玉门市和瓜州县 4 个主要人类活动区域在 1995, 2005, 2015 和 2020 年的土地利用分布图。根据土地利用类型分级情况, 将土地利用类型划分为耕地、林地、草地、水域、建设用地和未利用地 6 类, 对比图 1 和图 8 可知, 人类活动所占的耕地和建设用地等主要集中在疏勒河流域中游区域, 且多沿河流分布。利用 ArcGIS 对 1995, 2005, 2015 和 2020 年 4 期土地利用类型进行了分析(表 7), 由分析结果可知, 该区域土地利用格局以草地和未

利用地为绝对主体, 占总面积的 97% 以上; 耕地、林地、水域及建设用地合计不足 3%。通过对 1995, 2005, 2015 和 2020 年 4 期土地利用情况对比分析可以发现, 除未利用地外其他类型土地面积均有不同程度增长。其中耕地和建设用地增长最为显著。这是由于在西部大开发政策的推动下, 农业结构不断优化升级和旅游业快速发展带动了耕地和建设用地扩张。1995—2020 年未利用地占地面积减小 1.64%, 其中大部分转化为耕地和建设用地, 其余小部分转化为林地、草地和水域。整体来看, 在人类活动的不断影响下, 疏勒河流域内的土地利用情况呈现出耕地和建设用地面积快速扩张, 林地、草地和水域面积同步拓展, 而未利用地则持续萎缩的格局。

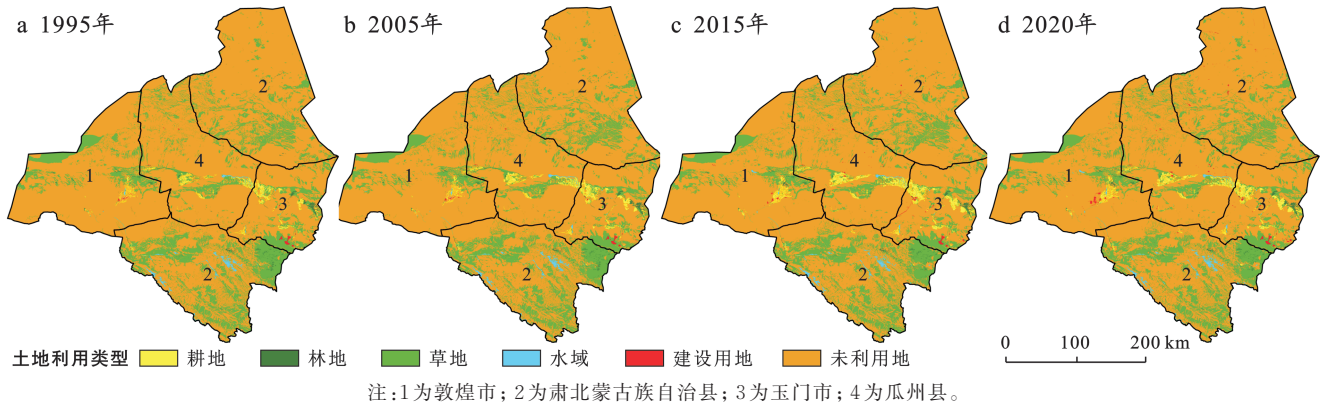


图 8 敦煌市、肃北蒙古族自治县、玉门市和瓜州县 1995—2020 年土地利用状况
Fig.8 Land use types in Dunhuang City, Subei Mongolian Autonomous County, Yumen City and Guazhou County from 1995 to 2020

表 7 敦煌市、肃北蒙古族自治县、玉门市和瓜州县 1995—2020 年土地利用分析
Table 7 Analysis of land use types in Dunhuang City, Subei Mongolian Autonomous County, Yumen City and Guazhou County from 1995 to 2020

土地利用类型	1995 年		2005 年		2015 年		2020 年	
	面积/km ²	比例/%	面积/km ²	比例/%	面积/km ²	比例/%	面积/km ²	比例/%
耕地	1 060.82	0.89	1 524.87	1.28	2 007.70	1.69	1 811.61	1.52
林地	572.28	0.48	613.71	0.52	594.66	0.50	620.66	0.52
草地	20 913.85	17.59	21 872.82	18.40	21 602.96	18.17	21 827.06	18.36
水域	652.94	0.55	628.19	0.53	638.86	0.54	733.35	0.62
建设用地	142.12	0.12	221.91	0.19	265.51	0.22	333.85	0.28
未利用地	95 536.81	80.36	94 017.30	79.09	93 769.12	78.88	93 552.27	78.70

4.2 疏勒河流域水沙变化影响因素分析

影响疏勒河流域径流和输沙变化的气候因素主要是降水及气温升高引起的冰雪融水增加, 人类活动主要包括森林砍伐、水土保持、水库建设和土地利用类型变化等。目前针对疏勒河流域水沙关系归因分析主要集中在径流影响因素的探讨上。徐浩杰等^[18]研究了 1961—2010 年气候变化对疏勒河上游径流变化的影响; 杨毅梦^[28]通过对昌马堡和双塔堡两

个水文站 1980—2016 年的数据分析得出降水变化是影响出疏勒河上游径流变化的主要因素, 人类活动是影响疏勒河中游径流变化的主导因素; 方春爽^[29]研究了 1990—2020 年疏勒河流域上游冰川积雪变化对疏勒河流域径流的影响。随着全球气候变化和人类活动不断加剧, 影响河流水沙关系的主导因素也在发生改变, 同时由于选取数据序列的长度不同, 不同阶段所得的结论也各有异同。对于疏勒河干流上

游而言,径流和输沙变化受气候变化(降水和气温)和人类活动的共同驱动,其中气候因素起主导作用。根据计算结果显示,变异期降水、气温和人类活动对径流变化的贡献率分别为29.38%,35.63%和34.99%;对输沙变化的贡献率分别为29.70%,35.20%和35.10%。3类因素对径流和输沙变化的贡献率相近,表明上游水沙过程受多因素综合影响,但总体上气候变化(降水和气温)对径流与输沙变化的控制作用更为显著,这是由于疏勒河干流上游区域为山区,人类活动干扰有限所致;对于疏勒河干流中游而言,径流和输沙变化主要受人类活动影响,计算结果表明,变异期人类活动对径流和输沙变化的贡献率分别为60.34%和83.95%,这是由于疏勒河干流中游为主要的聚居区,随着农业结构不断优化升级和旅游业发展,人类活动不断增强所致;对于党河上游而言,径流和输沙变化主要受气候变化的影响,其中降水占据主导地位。根据计算结果显示,变异期降水对径流和输沙变化的贡献率分别为103.01%和76.85%,这是由于党河上游流域面积较小,且以山地为主,人类活动干扰有限,同时降水量远远高于疏勒河干流,因此径流和输沙受降水的影响更加显著。

5 结论

(1) 疏勒河流域径流和输沙的年内年际分配不均匀,且不均匀度呈现出“上游大于中游,干流大于支流”的空间分布格局。在趋势变化上,3个水文站的径流量呈显著增大趋势;而输沙量变化趋势则不尽相同,昌马堡站输沙量呈显著增大趋势,潘家庄和党城湾站输沙量变化趋势则不明显;

(2) 突变检验结果表明,昌马堡站径流量和输沙量均在1998年发生突变;潘家庄站径流量和输沙量发生突变年份分别为2004年和1981年;党城湾站径流量和输沙量发生突变年份分别为1981年和1998年。

(3) 疏勒河流域不同河段在不同时段影响径流量和输沙量的主导因素不同。根据累积量斜率变化率法分析结果显示,气候变化是影响疏勒河干流上游和支流党河上游径流和输沙变化的主要原因,人类活动是主导疏勒河干流中游径流与输沙变化的核心因素。其中,降水是影响党河上游径流和输沙变化的主导因素;而疏勒河干流上游径流和输沙过程受降水、气温和人类活动的共同作用驱动。

参考文献(References)

[1] Fu Bojie, Wang Shuai, Liu Yu, et al. Hydrogeomorphic

ecosystem responses to natural and anthropogenic changes in the Loess Plateau of China [J]. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 2017, 45: 223-243.

[2] 连运涛,王昱,郑健,等.黑河流域上游水沙输移趋势及其成因分析[J].干旱区资源与环境,2019,33(3):98-104.

Lian Yuntao, Wang Yu, Zheng Jian, et al. The trend of runoff and sediment transport in the upper reaches of Heihe basin and its cause analysis [J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2019, 33(3):98-104.

[3] Sivakumar B. Global climate change and its impacts on water resources planning and management: Assessment and challenges [J]. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 2011, 25(4):583-600.

[4] Dai Aiguo, Qian Taotao, Trenberth K E, et al. Changes in continental freshwater discharge from 1948 to 2004 [J]. *Journal of Climate*, 2009, 22(10):2773-2792.

[5] Liu Xingcai, Liu Wenfeng, Yang Hong, et al. Multi-model assessments of human and climate impacts on mean annual streamflow in China [J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2019, 23(3):1245-1261.

[6] Wu Yiping, Chen Ji. Modeling of soil erosion and sediment transport in the East River basin in southern China [J]. *Science of the Total Environment*, 2012, 441: 159-168.

[7] 魏霞,杨正华,张振鹏,等.疏勒河流域径流量和输沙量变化规律[J].水土保持研究,2024,31(1):144-150.

Wei Xia, Yang Zhenghua, Zhang Zhenpeng, et al. Study on the variation characteristics of runoff and sediment in Shule River basin [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2024, 31(1):144-150.

[8] 姚章民.珠江流域主要河流泥沙变化分析[J].水文,2013,33(4):80-83.

Yao Zhangmin. Study on variation of main rivers sediment in Pearl River basin [J]. *Journal of China Hydrology*, 2013, 33(4):80-83.

[9] Bussi G, Darby S E, Whitehead P G, et al. Impact of dams and climate change on suspended sediment flux to the Mekong Delta [J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 755:142468.

[10] 卢晗,王昱,李小宁,等.黑河流域水沙通量多尺度变化特征及影响因素[J].泥沙研究,2023,48(2):59-66.

Lu Han, Wang Yu, Li Xiaoning, et al. Multi-scale variation characteristics and influence factors of water and sediment fluxes in the Heihe River watershed [J]. *Journal of Sediment Research*, 2023, 48(2):59-66.

[11] 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.
- [12] 刘成,王兆印,隋觉义.我国主要入海河流水沙变化分析[J].水利学报,2007,38(12):1444-1452.
Liu Cheng, Wang Zhaoyin, Sui Jueyi. Analysis on variation of seagoing water and sediment load in main rivers of China [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2007, 38(12):1444-1452.
- [13] 陈吉平,牛最荣,黄维东,等.甘肃省河西内陆河实测出山径流量变化及其影响因素分析[J].中国农村水利水电,2024(10):7-14.
Chen Jiping, Niu Zuirong, Huang Weidong, et al. Analysis of the variation and influencing factors of measured mountain runoff in the inland river of Hexi, Gansu Province [J]. China Rural Water and Hydropower, 2024(10):7-14.
- [14] 武建,王昱,刘开清,等.讨赖河流域泥沙输移规律及其成因分析[J].泥沙研究,2022,47(3):31-37.
Wu Jian, Wang Yu, Liu Kaiqing, et al. Patterns of the sediment transport in the Taolai River basin [J]. Journal of Sediment Research, 2022, 47(3):31-37.
- [15] 黄星.基于集对分析法的塔里木河干流变化及气候因素特征分析[J].水利科学与寒区工程,2024,7(10):79-84.
Huang Xing. Analysis on change of Tarim River main stream and climate factors based on set pair [J]. Hydro Science and Cold Zone Engineering, 2024, 7(10):79-84.
- [16] 马俊秀,曾建军.石羊河流域不同时间尺度水沙变化研究[J].水利发展研究,2024,24(10):106-116.
Ma Junxiu, Zeng Jianjun. Study on variation of water and sediment at different time scales in Shiyang River basin [J]. Water Resources Development Research, 2024, 24(10):106-116.
- [17] 严宇红,黄维东,吴锦奎,等.疏勒河流域泥沙分布规律及水沙关系研究[J].干旱区地理,2019,42(1):47-55.
Yan Yuhong, Huang Weidong, Wu Jinkui, et al. Sediment distribution and runoff-sediment relationship in the Shule River basin [J]. Arid Land Geography, 2019, 42(1):47-55.
- [18] 徐浩杰,杨太保,张晓晓.近50年来疏勒河上游气候变化及其对地表径流的影响[J].水土保持通报,2014,34(4):39-45.
Xu Haojie, Yang Taibao, Zhang Xiaoxiao. Climate change in upstream area of Shule River and its effects on runoff-yield in last 50 years [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2014, 34(4):39-45.
- [19] 贾玲,张百祖,牛最荣,等.疏勒河上游径流变化与预测分析[J].干旱区研究,2022,39(5):1588-1597.
Jia Ling, Zhang Baizu, Niu Zuirong, et al. Analysis of runoff variation and forecast in the upper reaches of the Shule River [J]. Arid Zone Research, 2022, 39(5):1588-1597.
- [20] 张鹏,张钰,罗颖,等.疏勒河出山口径流对上游气候变化的响应[J].水资源与水工程学报,2013,24(5):165-172.
Zhang Peng, Zhang Yu, Luo Ying, et al. Response of runoff at mountainous area of Shule River to climate change of upstream [J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2013, 24(5):165-172.
- [21] 王合创.基于水流产权确权试点改革的甘肃省疏勒河流域干流河道水域岸线功能区划分研究[J].水利发展研究,2021,21(4):45-49.
Wang Hechuang. Study on functional zoning of shoreline in the main river channel of Shule River basin, Gansu Province based on pilot reform of water flow property rights confirmation [J]. Water Resources Development Research, 2021, 21(4):45-49.
- [22] 刘鑫,刘建军.甘肃省疏勒河水域岸线空间管控方法与经验探讨[J].水利发展研究,2020,20(6):40-43.
Liu Xin, Liu Jianjun. Discussion on the methods and experience of spatial control of shoreline in Shule River basin, Gansu Province [J]. Water Resources Development Research, 2020, 20(6):40-43.
- [23] 杨静.疏勒河流域水土资源时空匹配及驱动力分析[D].甘肃兰州:甘肃农业大学,2023.
Yang Jing. Spatio-temporal matching and driving force analysis of water footprint and land resources in the Shule River basin [D]. Lanzhou, Gansu: Gansu Agricultural University, 2023.
- [24] Yin Zuotang, Chang Jun, Huang Yu, et al. Multiscale spatiotemporal characteristics of soil erosion and its influencing factors in the Yellow River basin [J]. Water, 2022, 14(17):2658.
- [25] 郭巧玲,杨云松,畅祥生,等.1957—2008年黑河流域径流年内分配变化[J].地理科学进展,2011,30(5):550-556.
Guo Qiaoling, Yang Yunsong, Chang Xiangsheng, et al. Annual variation of Heihe River runoff during 1957-2008 [J]. Progress in Geography, 2011, 30(5):550-556.
- [26] 张媛,李常斌,王刘明,等.几种河川径流序列突变检验方法的对比[J].水利水电技术,2020,51(2):38-47.
Zhang Yuan, Li Changbin, Wang Liuming, et al. Application and comparison of several test methods for changepoints diagnosis in streamflow variations [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2020, 51(2):38-47.

- tal study on erosion behavior of sand dust on photovoltaic modules [J]. *Renewable Energy Resources*, 2020, 38(1):19-23.
- [6] 赵明智,张旭,苗一鸣,等.沙漠环境沙尘覆盖下的光伏组件输出特性研究[J].*太阳能学报*,2018,39(3):744-748.
Zhao Mingzhi, Zhang Xu, Miao Yiming, et al. Study on output characteristics of PV module under cover of dust in desert environment [J]. *Acta Energetica Solaris Sinica*, 2018,39(3):744-748.
- [7] 蒲鸥,吴红华,李正农,等.风沙对结构冲击作用的研究进展与展望[J].*地震工程与工程振动*,2021,41(2):146-161.
Pu Ou, Wu Honghua, Li Zhengnong, et al. State of the progress and prospect of research on the impact behavior and affection of wind-driven sand flow on structure [J]. *Earthquake Engineering and Engineering Dynamics*, 2021,41(2):146-161.
- [8] 高一帆,李寿英,刘佳琪,等.基于气弹模型风洞试验的柔性光伏支架阵列风致响应及抑振措施研究[J].*太阳能学报*,2025,46(3):394-403.
Gao Yifan, Li Shouying, Liu Jiaqi, et al. Wind-induced response and vibration suppression measures of flexible photovoltaic support array based on aeroelastic model wind tunnel test [J]. *Acta Energetica Solaris Sinica*, 2025, 46(3):394-403.
- [9] Jubayer C M, Hangan H. A numerical approach to the investigation of wind loading on an array of ground mounted solar photovoltaic (PV) panels [J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2016, 153:60-70.
- [10] 王浩,李生宇,王海峰,等.沙漠光伏电站地表蚀积发生机制实验研究[J].*干旱区研究*,2025,42(2):349-359.
Wang Hao, Li Shengyu, Wang Haifeng, et al. Wind tunnel experiment and numerical simulation of surface erosion and accumulation in desert photovoltaic power stations [J]. *Arid Zone Research*, 2025, 42(2):349-359.
- [11] 王建勃,朱锐,何惧.光伏电站阵列风荷载衰减特性数值模拟[J].*太阳能*,2013(15):20-22.
Wang Jianbo, Zhu Rui, He Ju. Numerical simulation of wind load attenuation characteristics in photovoltaic power station arrays [J]. *Solar Energy*, 2013(15):20-22.
- [12] Yao Jianfeng, Tu Zhibin, Xu Haiwei. Experimental investigation of wind pressures on photovoltaic (PV) array mounted on a hilly terrain [J]. *Solar Energy*, 2025,291:113256.
- [13] Xu Ang, Ma Wenyong, Yuan Huanxin, et al. The effects of row spacing and ground clearance on the wind load of photovoltaic (PV) arrays [J]. *Renewable Energy*, 2024,220:119627.
- [14] Zhang Kai, Wang Zhenghui, Wang Tao, et al. Numerical simulation of flow field deposition and erosion characteristics around bridge-road transition section [J]. *Journal of Mountain Science*, 2024,21(5):1491-1508.
- [15] 廖承贤,王海兵,刘茜雅,等.以计算流体动力学模型(CFD)模拟的戈壁地表风沙两相流运动特征[J].*中国沙漠*,2023,43(6):71-78.
Liao Chengxian, Wang Haibing, Liu Xiya, et al. Simulation of movement characteristics of wind and sand two-phase flow on the Gobi surface based on CFD technology [J]. *Journal of Desert Research*, 2023, 43(6):71-78.
- [16] Zhang Kai, Zhang Hailong, Tian Jianjin, et al. Flow field, sedimentation, and erosion characteristics around folded linear HDPE sheet sand fence: Numerical simulation study [J]. *Journal of Mountain Science*, 2024, 21(1):113-130.

(上接第213页)

- [27] 王随继,闫云霞,颜明,等.皇甫川流域降水和人类活动对径流量变化的贡献率分析:累积量斜率变化率比较方法的提出及应用[J].*地理学报*,2012,67(3):388-397.
Wang Suiji, Yan Yunxia, Yan Ming, et al. Contributions of precipitation and human activities to the runoff change of the Huangfuchuan drainage basin: Application of comparative method of the slope changing ratio of cumulative quantity [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2012,67(3):388-397.
- [28] 杨毅梦.气候变化和人类活动对疏勒河流域水资源影响研究[D].河北 石家庄:河北地质大学,2024.
Yang Yimeng. The Impact of climate change and human activities on water resources in the Shule River basin [D]. Shijiazhuang, Hebei: Hebei GEO University, 2024.
- [29] 方春爽.冰川补给型流域径流变化及其对环境的响应[D].甘肃 兰州:兰州交通大学,2024.
Fang Chunshuang. Glacier-fed basin runoff changes and their response to environmental factors [D]. Lanzhou, Gansu: Lanzhou Jiatong University, 2024.