

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2023.05.030.

赵江涛, 赵广举, 穆兴民, 等. 罕台川流域水沙变化及其归因[J]. 水土保持研究, 2023, 30(5):169-174.

ZHAO Jiangtao, ZHAO Guangju, MU Xingmin, et al. Runoff and Sediment Load Variation and Driving Factors in the Hantaichuan Basin[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2023, 30(5):169-174.

罕台川流域水沙变化及其归因

赵江涛¹, 赵广举^{1,2}, 穆兴民^{1,2}, 陈朝良¹, 王瑞东³, 张巧兰³

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

水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100; 3.内蒙古自治区鄂尔多斯水文勘测局, 内蒙古自治区 鄂尔多斯 017200)

摘要: [目的]研究孔兑典型支流降水、径流和输沙变化特征,量化气候变化和人类活动对水沙变化的影响,以期揭示孔兑地区水沙演变驱动机制,探究孔兑入黄泥沙减少原因。 [方法]以黄河流域十大孔兑典型支流罕台川流域为研究区,基于该流域1980—2018年的年降水、径流和输沙数据,采用线性趋势法、Mann-Kendall趋势检验、Pettitt突变检验和双累积曲线等方法,探究水沙变化原因。 [结果]罕台川流域降水呈非显著上升趋势,径流量呈非显著下降趋势,输沙量呈显著减小趋势($p < 0.05$)。年径流和年输沙均于1998年发生突变,突变后年均径流量较突变前减少38.61%,而输沙量显著减少,较突变前减少80.61%。 [结论]人类活动是罕台川流域水沙减少的主要因素,其对径流量及输沙量减少的贡献率分别为60.38%和59.73%,而降水变化的贡献率分别为39.62%和40.27%。

关键词: 罕台川流域; 径流量; 输沙量; 水沙关系; 归因分析

中图分类号: S157.1

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2023)05-0169-06

Runoff and Sediment Load Variation and Driving Factors in the Hantaichuan Basin

ZHAO Jiangtao¹, ZHAO Guangju^{1,2}, MU Xingmin^{1,2},
CHEN Zhaoliang¹, WANG Ruidong³, ZHANG Qiaolan³

(1. Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 2. Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences & Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100, China; 3. Erdos Hydrological Survey Bureau of Inner Mongolia Autonomous Region, Erdos, Inner Mongolia 017200, China)

Abstract: [Objective] The aims are to study the characteristics of precipitation, runoff and sediment transport in typical tributaries of Kongdui, quantify the impact of climate change and human activities on water and sediment changes, so as to reveal the driving mechanism of water and sediment evolution in Kongdui area, and to explore the reasons for the reduction of sediment transferring to Yellow River through Kongdui. [Methods] Based on annual precipitation, runoff and sediment discharge data from 1980 to 2018 in the Hantaichuan Basin, a typical tributary of the 10 Kongdui in the Yellow River Basin, the causes of water and sediment changes were investigated by means of linear trend method, Mann-Kendall trend test, Pettitt catastrophe test and double accumulation curve. [Results] Precipitation and runoff in Hantaichuan watershed showed a non-significant upward trend, while sediment discharge showed a significant downward trend ($p < 0.05$). The annual runoff and annual sediment discharge both changed abruptly in 1998. After the abrupt change, the annual average runoff decreased by 38.61% compared with that before the abrupt change, while the sediment discharge significantly decreased by 80.61% compared with that before the abrupt change. [Conclusion] Human activities are the main factors contributing to the decrease of runoff and sediment discharge in the

收稿日期: 2022-04-12

修回日期: 2022-09-15

资助项目: 国家自然科学基金项目(42077076, U2243211)

第一作者: 赵江涛(1991—), 男, 陕西礼泉人, 硕士研究生, 主要从事土壤侵蚀与水土保持研究。E-mail: 361721918@qq.com

通信作者: 赵广举(1980—), 男, 河南驻马店人, 博士, 研究员, 主要从事土壤侵蚀与水土保持研究。E-mail: gjzhao@ms.iswc.ac.cn

<http://stbcyj.paperonce.org>

Hantaichuan Basin, with the contribution rates of 60.38% and 59.73%, respectively, while the contribution rates of precipitation change are 39.62% and 40.27%, respectively.

Keywords: Hantaichuan Basin; runoff; sediment load; water-sediment relationship; attribution analysis

黄河是我国含沙量最大的河流,严重威胁着周边区域农业生产,制约生态与经济的发展。近几十年来,黄河的径流量及输沙量均呈现了阶梯式减少的变化特征^[1]。已有研究表明,大规模的水土保持措施,如退耕还林(草)、梯田、淤地坝等是黄河水沙锐减的主要原因。黄河水沙的急剧变化关系到下游悬河治理、湖库淤积,因此研究水沙变化对黄河干支流的水资源利用与流域水沙调控具有重要的参考价值,也为区域合理利用水土资源,改善区域生态环境,建立水沙科学调控体系提供理论依据。

罕台川流域位于黄河上游内蒙古段,属于十大孔兑之一,水土流失十分严重,严重影响当地的生态保护和经济发展^[2]。罕台川流域为季节性河流,大多数降雨不产生径流,严重的水土流失主要由少数几次暴雨或大暴雨所引起^[3]。王平等^[4]分析内蒙古段孔兑的水沙变化,发现孔兑具有径流含沙量高,径流和输沙量年际差异极大,年内分配不均的特点。王云毅^[5]分析罕台川流域 1980—2010 年降雨变化,发现罕台川流域降雨量年际变化较大,年内 70% 以上降雨是季节性降雨。由于该流域地理位置地处草原沙漠交错区,受到的干扰较多,对此区域生态系统影响也较为复杂^[6]。目前,已有大量研究^[7-9]探讨了黄土高原多沙粗沙区水沙的时空分异规律,已明确了气候变化及人类活动是河流水沙变化的主要影响因素^[10],但是对孔兑的水沙变化特征及其驱动机制研究不够深入。因此,本研究利用罕台川流域降水、径流和输沙长时间水文序列,辨析孔兑典型流域侵蚀产沙变化的特征、量化人为因素和自然因素对流域水沙变化的贡献,为揭示黄河水沙演变驱动机制、减少黄河内蒙古河段河道淤积提供指导意义。

1 研究区概况与数据

1.1 研究区概况

罕台川发源于鄂尔多斯北部罕台庙乡,自南向北穿过库布齐沙漠流入黄河。流域面积为 874.7 km²,主河道长 90.4 km,流域水文站为响沙湾水文站,控制面积为 826 km²(图 1)。流域属于温带大陆性气候,年平均气温在 5.3~8.7℃,年内蒸发强烈,平均降水量为 300~400 mm,以暴雨为主,多集中在 7—9 月份,汛期降水占全年 80% 以上。流域多年平均径流量 974 万 m³,多年平均输沙量 157 万 t。流域上游

以裸露的砒砂岩为主,岩性结构松散,易风化,遇水后发生崩解,形成水力侵蚀的主要物源,在重力及水力作用下被搬运到沟道及河道;中游穿越库布齐沙漠,风蚀严重,由于风力侵蚀造成风沙落入沟道、河岸致使汛期洪水含沙量剧增,罕台川内沙带宽 10~20 km,多为半流动、固定沙地;下游平原区地势平坦,土地肥沃,河道淤积严重,形成地上悬河。流域可划分为砒砂岩、黄土、沙化黄土丘陵沟壑区,流域内主要土地利用/覆被类型为草地、耕地、沙地、河道/河滩地,面积分别为 585.7, 103.0, 57.2, 65.1 km²,约占整个流域面积的 93%,剩余 7% 为林地和建设用地等。

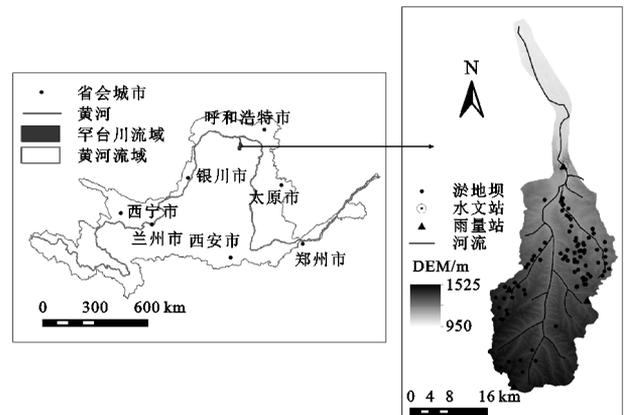


图 1 研究区位置

1.2 数据来源

本研究的雨量数据源于国家气象站东胜站和黄河水利委员会设立的罕台庙、青达门和耳子壕 3 个雨量站,搜集获取 1980—2018 年的日降雨量。水文数据为流域控制站响沙湾水文站 1980—2018 年径流和输沙序列资料,源于黄河流域水文年鉴和黄河流域泥沙公报数据集。

2 研究方法

2.1 水文序列变化趋势分析

采用线性回归和 Mann-Kendall(MK)^[11]趋势检验法分析罕台川流域的降水量、径流量、输沙量的年际变化趋势。MK 方法被世界粮农组织推荐并广泛应用于水文、气象要素变化的研究中。该方法要求数据样本必须遵从一定的分布特征,针对某一水文序列 x_1, x_2, \dots, x_n , 其统计值 S 计算方法:

$$S = \sum_{k=1}^{n-1} \sum_{j=k+1}^n \text{sgn}(x_j - x_k), k < j < n \quad (1)$$

$$\text{sgn}(x_j - x_k) = \begin{cases} 1 & (x_k - x_j) > 0 \\ 0 & (x_k - x_j) = 0 \\ -1 & (x_k - x_j) < 0 \end{cases} \quad (2)$$

式中:sgn 是符号函数; n 是水文时间数据序列长度值; x_j 和 x_k 分别是变量数据实测值。

S 的方差计算为:

$$\text{var}(S) = \frac{n(n-1)(2n+5)}{18} \quad (3)$$

标准化统计量:

$$Z = \frac{S}{[\text{var}(S)]^{0.5}} \quad (4)$$

MK 检验得到的统计量 Z 值的正负表征其变化趋势,在给定的置信水平下,若 Z 值为正,表明有上升趋势;若 Z 值为负,则为下降趋势。若 Z 值的绝对值大于置信水平下的阈值,表明这一系列数据趋势性显著。

2.2 突变点检验

采用 Pettitt 突变检验法判断水沙变化转折点。Pettitt^[12] 是一种非参数检验法,要求被检验样本序列存在趋势性的变化。此方法通过检验时间序列均值变化的时间来确定序列突变时间。该检验方法基于 Mann-Whitney 的统计量 $U_{t,N}$,公式如下^[13]:

$$U_{t,N} = U_{t-1,N} + \sum_{i=1}^N \text{sgn}(x_t - x_i) \quad (t=2,3,4,\dots,N) \quad (5)$$

式中:sgn($x_t - x_i$) 根据 x_t 与 x_i 的差值正负分别取值 1, 0, -1。进一步计算统计量 $K_{t,N}$ 和相关概率的显著性检验公式如下:

$$K_{t,N} = \max |U_{t,N}| \quad (1 \leq t \leq N) \quad (6)$$

$$p = 2 \exp\{-6(K_{t,N})/N^3 + N^2\} \quad (7)$$

式中:如果 $p \leq 0.05$,则判定突变点 t 在 95% 置信水平上呈显著水平。将 t 视为一级突变点,然后以该点为界,进而将原始序列分割为两个新序列用以上方法重新检测是否存在新的界,因此可能会有多个变点产生,最终需结合实际情况分析来确定突变点。此法对端点位置的均值变点具有较好的检验效果。

2.3 归因分析

本文采用双累积曲线法量化气候变化及人类活动对流域水沙变化的贡献。该方法能够直观判断水文气象要素的一致性,已被广泛地应用于水文气象研究中^[14]。该方法设定 X 和 Y 两个变量,基准变量 X ,检验变 Y ,假设观测期为 N 年, X_i 和 Y_i 为对应观测值,其中 $i=1, 2, 3, \dots, N$ 。首先按年序分别计算变量 X 和变量 Y 的累积值,对应得到 X'_i 和 Y'_i 逐年累积序列,其中 $i=1, 2, 3, \dots, N$,即:

$$X'_i = \sum_{j=1}^i X_j \quad (8)$$

$$Y'_i = \sum_{j=1}^i Y_j \quad (9)$$

然后,根据累积序列 X'_i 和 Y'_i 的累积值在直角坐标

系中各个对应点绘制关系曲线。在绘制的曲线图一般以参考变量或基准变量为 X ,被检验的变量为 Y 轴。分析径流量及输沙量的变化时,降雨量一般作为 X 轴称为基准变量,径流量和输沙量一般作为 Y 称为被检验变量。如果绘制出的关系曲线的各点的斜率不变,则可以看到累积曲线是一条直线,说明人类活动对河川的径流量和输沙量无显著影响。如果发生偏离,向上偏离表示增加,向下偏离表示减小。例如,绘制河川输沙量与降雨量的双累积曲线时,需检验曲线的斜率是否发生变化,如果曲线斜率没有明显偏离,说明人类活动对河川输沙量无显著影响。如果斜率发生变化,则说明人类活动对河川输沙量存在一定的影响,斜率变化越大说明影响越显著。曲线上斜率发现变化的点代表着对应输沙量发生变化的年份。如果曲线向上偏离,表明人类活动使河川输沙量增大;如果向下偏离,表明人类活动使输沙量减小。与基准期的延长线偏离越大,则表明人类活动影响越显著。

3 结果与分析

3.1 降水及水沙趋势变化

分析罕台川流域年降雨、径流和输沙变化趋势可知,该流域内 1980—2018 年降雨量在 MK 检验中统计量 Z 值为 0.63,结果呈不显著增加趋势,增加速率为 1.39 mm/a,多年平均降雨量为 352.79 mm,最大降水量为 645.2 mm(2012 年),最小降雨量为 154.9 mm(2000 年)(图 2)。1980—2018 年径流量在 MK 检验中统计量 Z 值为 -0.77,结果呈现不显著减少趋势,变化速率为 -19.44 万 m^3/a ,多年平均径流量为 974.32 万 m^3 ,最大径流量为 4 640.31 万 m^3 (1981 年),最小径流量为 19.13 万 m^3 (1993 年)。1980—2018 年输沙量在 MK 检验中统计量 Z 值为 -2.54,结果呈显著减少趋势($p < 0.05$),变化速率为 -11.69 万 t/a,多年平均输沙量为 157.37 万 t,1981 年输沙量最大,为 2 182.28 万 t,最小输沙量仅 0.06 万 t,出现在 2011 年。

3.2 径流量和输沙量阶段性变化特征

采用 Pettitt 突变检验法识别罕台川流域 1980—2018 年径流和输沙突变年份,结果(图 3)显示径流量和输沙量分别在 1986 年、1989 年和 1998 年出现了突变点。1986 年径流量和输沙量出现的突变点可能与该年的极端气候有关,因为 1986 年是该地区近 65 年最干旱年之一,河道干枯,径流量和输沙量几乎为零。1989 年径流量和输沙量出现的突变点可能与降雨强度有关,该年份发生了极端暴雨,径流量和输沙量显著高于平均值。1998 年以后尽管降雨量波动幅

度不大,但径流量和输沙量均发生持续下降。该突变点的发生主要受水土保持措施影响。流域自20世纪90年代以来实施了大量水土流失治理措施,包括淤地坝、谷坊、沟头防护等工程措施等,这些措施有效的改变了地表水文过程,降低了输沙能力,进而导致输沙量显著减少。鉴于此,本研究将流域年径流和输沙

的突变年份定为1998年($p < 0.05$),由此可将水文序列划分为基准期(1980—1997年)和变化期(1998—2018年)。对比分析不同时期罕台川流域年径流和输沙特征值发现,变化期的年均径流和输沙量分别为755.15万 m^3 ,53.91万t,较基准期(1230.01万 m^3 ,278.07万t)分别减少了38.61%和80.61%。

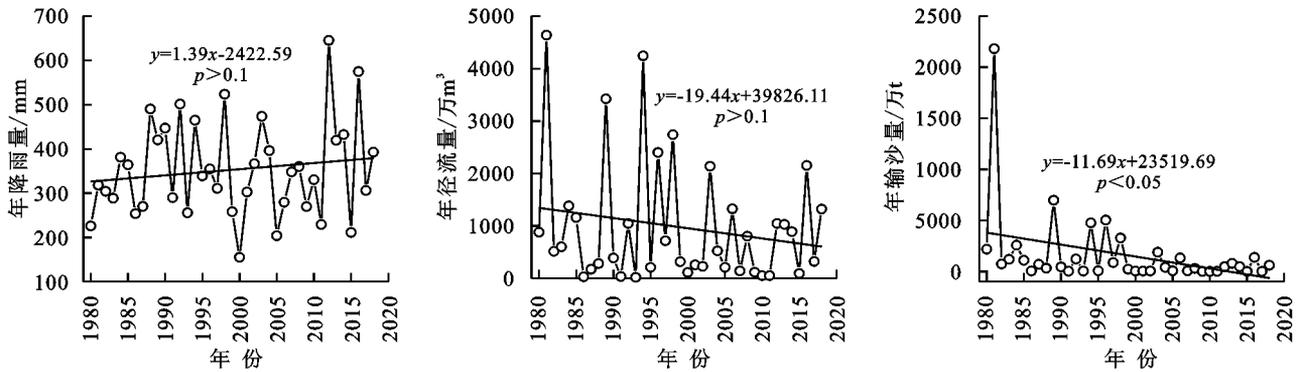


图2 罕台川流域1980—2018年降水、径流和输沙变化趋势

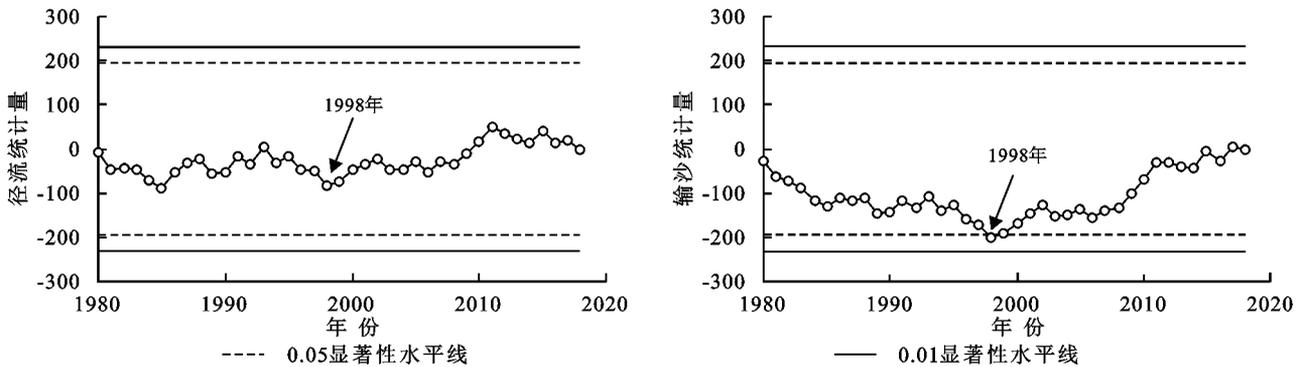


图3 罕台川流域1980—2018年径流输沙Pettitt突变点检验结果

表1显示了年径流和输沙在基准期和变化期极值比与变差系数变化较为明显,年径流极值比明显下降,表明流域年径流量的变异程度下降趋势显著;变差系数下降,但幅度小,说明径流年际变化波动较小。年输沙量极值比显著升高,说明流域年输沙量变异程度上升,变差系数显著下降,表明年际变化显著。

表1 罕台川流域年径流和输沙在基准期与变化期的变化特征分析

指标名称	时段	平均值	极值比	变差系数
径流	1980—1997	1230.01	242.58	1.16
	1998—2018	755.15	53.59	1.00
输沙	1980—1997	278.07	804.61	1.80
	1998—2018	53.91	5490.36	1.49

注:径流平均值单位为万 m^3 ;输沙平均值单位为万t。

3.3 降水及人类活动对流域水沙变化的量化分析

采用双累积曲线法量化降水和人类活动对径流和输沙变化的贡献。对累积降水量与累积径流量和累积降水量与累积输沙量均进行线性拟合,其决定系数均超过0.84,拟合效果较好。如图4所示,罕台川流域1980—2018年降雨—径流和降雨—输沙双累积

曲线均在1998年发生偏移。进一步根据双累积曲线偏移前后的拟合方程量化降雨和人类活动对径流和输沙变化的贡献(表2)。结果表明,罕台川流域变化期(1998—2018)年均径流和年均输沙实测值分别为755.15万 m^3 ,53.91万t,较计算值(1041.88万 m^3 ,187.79万t)分别减少了38.61%和80.61%。其中降水对年径流量和年输沙量变化贡献率分别为39.62%和40.27%,人类活动的贡献率分别为60.38%和59.73%。由此可见,人类活动是引起罕台川流域径流和输沙减少的主要因素。

4 讨论

本研究分析了十大孔兑的罕台川河川径流输沙的变化趋势,结果表明径流量呈不显著减少趋势,输沙呈现显著减少的特点。研究发现罕台川流域年降雨总量在1998年前后两个时段基本保持稳定,径流呈现下降趋势,说明研究区大规模的退耕还林还草工程及各类水利工程建设,对降水形成径流起到一定的拦截作用,是导致径流减小的原因之一,其次水库、

植被等通过增加蒸散发和下渗量而导致径流减小。由于径流是泥沙运动的主要动力,流域径流减少从而导致水流挟沙能力显著降低,是该流域输沙减少的原因之一。淤地坝及退耕还林还草措施使土壤侵蚀强度得到有效改善,且拦蓄坡面及沟道泥沙,使该流域泥沙发生锐减。流域土地利用变化及大规模的水利水

保工程措施是该流域输沙减少的主要原因。研究发现人类活动对该流域输沙的贡献率为 59.73%,与已有研究结果基本一致^[15],但气候变化和人类活动泥沙变化的贡献率存在一定差异,这主要是由于所采用的输沙数据序列不一致,同时水利水保工程与降水时空分布差异也会对计算结果产生影响。

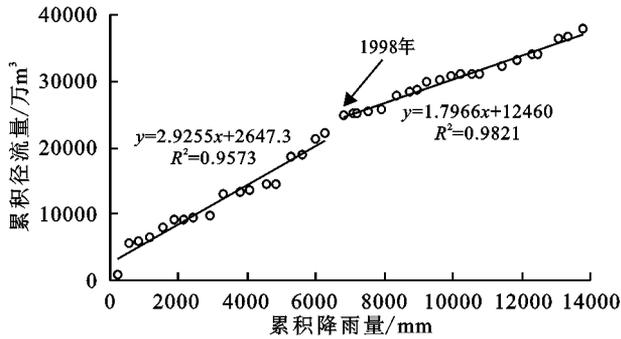


图 4 罕台川流域 1980—2018 年降水—径流和降雨—输沙双累积曲线

表 2 罕台川流域 1980—2018 年径流输沙变化归因分析

指标名称	年份	实测 年均值	计算 年均值	减少量	减少率 %	降水影响		人类活动影响	
						减少量	百分比 %	减少量	百分比 %
径流	1980—1997	1230.01	1167.75	—	—	—	—	—	—
	1998—2018	755.15	1041.88	474.86	38.61	188.13	39.62	286.73	60.38
输沙	1980—1997	278.07	277.7	—	—	—	—	—	—
	1998—2018	53.91	187.79	224.16	80.61	90.28	40.27	133.88	59.73

注:径流实测年均值、计算年均值、减少量单位均为万 m³;输沙实测年均值、计算年均值、减少量单位均为万 t。

自 20 世纪 80 年代以来,十大孔兑流域先后实施了小流域综合治理、退耕还林还草、防沙治沙、封山禁牧、淤地坝亮点工程、砒砂岩沙棘生态减沙等一系列水土保持生态建设工程。2000 年开始实施全域禁牧。截至 2018 年,十大孔兑流域水土流失治理面积已达到 2 845.66 km²,其中梯田面积达 16.51 km²,造林种草面积达 2 733.36 km²,封禁 95.79 km²,孔兑流域已累积修建淤地坝 382 座,谷坊 1 839 座,小型水库 19 座,水平沟/鱼鳞坑 125.95 km²,引洪造地工程 119 处。从空间分布来看罕台川流域谷坊(813 座)和水平沟/鱼鳞坑(75.24 km²)建设最多,淤地坝(86 座)和引洪造地(61 处)建设排名第二,治理措施配置较齐全,累计拦沙量达 827.93 万 t,区域植被覆盖度由 20 世纪 80 年代的 14%增加至 2018 年的 35%(图 5)。流域生态环境得到显著改善,水土保持措施有效的减少了坡面水土流失和入黄泥沙^[16]。

积,大量风沙直接进入河道或通过河岸侵蚀而进入河道,较细的物质直接成为悬移质泥沙来源,使得输沙量大大增加。由于造成风力侵蚀和流水侵蚀的外营力在季节分配上存在差异,风力侵蚀为流水侵蚀提供了丰富的物源,汛期的洪水携带大量泥沙进入河道形成高含沙水流,进入黄河干流易形成沙坝截断干流,造成洪涝灾害。因此,针对该流域水土流失治理应重点关注上游的砒砂岩区和中游的风蚀区,在有限的降水条件下合理配置坡面植被措施,加强沟道工程措施治理,降低坡面侵蚀与入黄泥沙。

罕台川流域侵蚀在空间分布上具有明显差异,上游为砒砂岩区,中游为风沙区,下游为冲积平原,由于其特殊的地貌环境和物质来源分布,风水复合侵蚀是该区域的主要侵蚀方式。该区域在冬、春季节盛行西北风,风力所挟带的粗颗粒泥沙进入沟道后发生堆

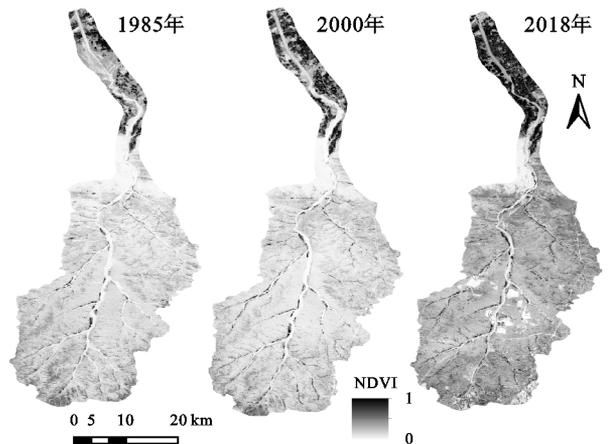


图 5 罕台川流域 1985—2018 年 NDVI 空间分布变化

5 结论

(1) 1980—2018年,罕台川年径流量呈不显著减少趋势(-19.44 万 m^3/a , $p > 0.1$)。年输沙量显著减少(-11.69 万 t/a , $p < 0.05$)。采用Pettitt对径流量和输沙量的突变检验发现,径流量和输沙量于1998年由丰转为枯。

(2) 较基准期(1980—1997年),流域变化期(1998—2018年)年均径流量和输沙量分别减少38.61%和80.61%。以淤地坝工程为主的人类活动是造成罕台川流域水沙减少的主要影响因素,其对径流和输沙的贡献率分别为60.38%和59.73%,而降水变化的贡献率为39.62%和40.27%。

参考文献:

- [1] 穆兴民,赵广举,高鹏,等.黄河未来输沙量态势及其适用性对策[J].水土保持通报,2020,40(5):328-332.
- [2] 王慧.黄河内蒙古段十大孔兑生态脆弱性演变及驱动力分析[D].呼和浩特:内蒙古农业大学,2020.
- [3] 阳辉,师长兴.黄河上游十大孔兑冲积扇泥沙运动和沉积环境研究[J].泥沙研究,2020,45(4):33-38.
- [4] 王平,田勇,侯素珍,等.黄河内蒙古段孔兑水沙特点分析[J].人民黄河,2012,34(11):39-42.
- [5] 王云毅.罕台川流域上游水土保持措施减水减沙效益研究[D].呼和浩特:内蒙古农业大学,2015.
- [6] 白雪莲,王理想,季树新,等.鄂尔多斯草原沙漠交错区生态系统健康评价:以十大孔兑为例[J].中国沙漠,2020,40(1):187-194.
- [7] 冯家豪,赵广举,穆兴民,等.黄河中游区间干支流径流变化特征与归因分析[J].水力发电学报,2020,39(8):90-103.
- [8] 田小靖,赵广举,穆兴民,等.水文序列突变点识别方法比较研究[J].泥沙研究,2019,44(2):33-40.
- [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.
- [10] 穆兴民,王万忠,高鹏,等.黄河泥沙变化研究现状与问题[J].人民黄河,2014,36(12):1-7.
- [11] Kendall M G. Rank correlation methods[J]. British Journal of Psychology, 1990,25(1):86-91.
- [12] Mann H B. Nonparametric test against trend[J]. Econometrica, 1945,13(3):245-259.
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] 姚海芳,师长兴,顾珍逵.气候变化和人类活动对黄河上游十大孔兑水沙过程的影响[J].干旱区地理,2018,41(3):472-479.
- [16] 白雪莲.十大孔兑复合地貌区水土侵蚀时空异质性[D].山东烟台:鲁东大学,2020.
- [17] Wang Q, Xiao J, Ding J, et al. Differences in root exudate inputs and rhizosphere effects on soil N transformation between deciduous and evergreen trees [J]. Plant and Soil, 2019,458:277-289.
- [18] 李静,蔚晓燕,唐明.黄土高原纸坊沟流域不同植物对土壤微生物生物量和土壤酶活性的影响[J].西北植物学报,2013,33(2):387-393.
- [19] 杨万勤,钟章成,韩玉萍.缙云山森林土壤酶活性的分布特征,季节动态及其与四川大头茶的关系研究[J].西南师范大学学报:自然科学版,1999,24(3):318-324.
- [20] Liu X, Guo K, Huang L, et al. Responses of absolute and specific enzyme activity to consecutive application of composted sewage sludge in a Fluventic Ustochrept [J]. Plos One,2017,12(5):e0177796.
- [21] 李茜,孙亚男,林丽,等.放牧高寒嵩草草地不同演替阶段土壤酶活性及养分演变特征[J].应用生态学报,2019,30(7):2267-2274.
- [22] Knelman J E, Graham E B, Ferrenberg S, et al. Rapid shifts in soil nutrients and decomposition enzyme activity in early succession following forest fire [J]. Forests, 2017,8(9),347,doi.org/10.3390/f8090347
- [23] Dutta R K, Agrawal M. Restoration of opencast coal mine spoil by planting exotic tree species: a case study in dry tropical region [J]. Ecological Engineering, 2003,21:143-151.
- [24] Singh J S, Kashyap A K. Dynamics of viable nitrifier community, N-mineralization and nitrification in seasonally dry tropical forests and savanna [J]. Microbiological Research, 2006,161(2):169-179.
- [25] Waldrop M P, Zak D R, Sinsabaugh R L, et al. Nitrogen deposition modifies soil carbon storage through changes in microbial enzymatic activity [J]. Ecological Applications, 2004,14:1172-1177.

(上接第168页)