

DOI: 10.5846/stxb202012103146

薛帆, 晁智龙, 何亮, 易海杰, 许小明, 邹亚东, 贺洁, 吕渡, 张晓萍. 近 70 年来不同地貌和植被类型区水沙特征演变及其对生态恢复的响应. 生态学报, 2023, 43(8): 3247-3260.

Xue F, Chao Z L, He L, Yi H J, Xu X M, Zou Y D, He J, Lü D, Zhang X P. Hydrologic and sediment responses to ecological restoration in different geomorphological and vegetation type areas in past 70 years. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(8): 3247-3260.

近 70 年来不同地貌和植被类型区水沙特征演变及其对生态恢复的响应

薛帆¹, 晁智龙², 何亮¹, 易海杰³, 许小明¹, 邹亚东¹, 贺洁¹, 吕渡³, 张晓萍^{1,*}

1 西北农林科技大学, 水土保持研究所, 黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 杨陵 712100

2 陕西省水文水资源勘测局, 西安 710068

3 中国科学院教育部水土保持与生态环境研究中心, 杨陵 712100

摘要:黄土高原水土流失治理和退耕还林(草)等生态环境建设, 对不同植被类型区和治理度下的水沙过程均产生了深刻的影响。以北洛河流域为例, 基于 1952—2019 年实测水文数据, 采用水文统计法, 对比分析了上、中、下游等不同地貌和植被类型区生态恢复对水沙数量、径流调节、影响因素贡献等的影响及其差异。结果显示: (1) 上、中、下游年均径流深分别为 30、23、21 mm, 产沙量为 0.6、0.05、-0.02 亿 t。中游年均产流量占流域总水量的 51%, 上游年均产沙量占流域总沙量的 90% 以上。(2) 上、中、下游径流深极显著减少, 减少率分别为 -0.28、-0.16、-0.43 mm/a; 上游产沙量以 0.02 亿 t/a 速度极显著降低, 中、下游产沙量不显著减少。(3) 上、中、下游的削洪、补枯程度逐年代增加, 与 20 世纪 60 年代比, 21 世纪 10 年代洪水期流量(Q_5)分别减少了 63%、45%、60%, 上游枯水期流量(Q_{95})增加了 68%, 中游 20 世纪 80 年代枯水期开始产流。(4) 与 20 世纪 60 年代比, 上、中、下游 21 世纪 10 年代人类活动对产流量减少的贡献率分别为 94.7%、26.7%、60.7%, 而对产沙量减少的贡献率均大于 85%。结果表明, 植被盖度低但生态恢复程度大的上游, 主要受人类活动因素影响, 产流产沙量极显著减少, 径流调节程度较高, 产沙量越集中于暴雨过程; 植被覆盖程度高但生态恢复程度小的中游, 主要受气候因素主导, 产流量明显减少, 产沙量微弱降低, 径流调节程度弱。水沙数量变化大小及径流调节功能程度, 不仅受植被恢复程度的影响, 还决定于区域植被盖度的大小。研究可为理解黄土高原的生态水文过程提供理论支撑。

关键词:水沙特征; 生态恢复; 水土保持; 不同地貌和植被类型区; 北洛河

Hydrologic and sediment responses to ecological restoration in different geomorphological and vegetation type areas in past 70 years

XUE Fan¹, CHAO Zhilong², HE Liang¹, YI Haijie³, XU Xiaoming¹, ZOU Yadong¹, HE Jie¹, LÜ Du³, ZHANG Xiaoping^{1,*}

1 State Key Laboratory of Soil Erosion and Dry Land Farming on the Loess Plateau, Northwest A&F University, Yangling 712100, China

2 The Survey Bureau of Hydrology and Water Resources of Shaanxi Province, Xi'an 710068, China

3 State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Education, Yangling 712100, China

Abstract: The purpose of this study was to reveal the effects of ecological environment construction such as soil and water conservation and the Grain for Green Program on hydrological processes in different vegetation type areas on the Loess

基金项目: 国家自然科学基金项目(41877083, 41440012, 41230852)

收稿日期: 2020-12-10; 网络出版日期: 2022-12-22

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zhangxp@ms.iswc.ac.cn

Plateau. This work took the Beiluo River Basin as an example to investigate the hydrological responses and the variety in the regions with various landforms and vegetation zones in the basin. The results showed that: (1) the average annual streamflow depth in the upper, middle, and lower reaches was 30, 23, and 21 mm, respectively, while the correspondingly average annual sediment was 60, 5, and -2 million tons from 1952 to 2019. The average annual streamflow volume of the middle reaches accounted for 51% of the total volume in the whole basin. However, the average annual sediment delivery in the upper reaches accounted for over 90% of the total sediment in the basin. (2) All the streamflow depths in the three regions showed a significantly decreasing trend with the changing rates of -0.28, -0.16 and -0.43 mm/a in past 70 years, respectively. While the sediment delivery of the upper reaches demonstrated a significant downward trend at a rate of 2 million t/a, and in the middle and lower reaches it was only a slight reduction. (3) The function of runoff regulation was more and more enhanced with the time. Compared with 1960s, the high flow (Q_5) decreased by 63%, 45% and 60% in the 2010s, respectively, in the three regions. While the low flow (Q_{95}) increased by 68% in the upper reaches, and in the middle reaches it began to increase in 1980s. (4) Compared with 1960s, human activities contributed the reduction of streamflow by 94.7%, 26.7%, and 60.7% in 2010s, respectively, which dominated the reduction of sediment delivery of over 85% in the three regions. The results suggest that in the upper reaches with low vegetation cover but high speedy conservation measures, human activities dominated the significant reduction of streamflow and sediment, with runoff highly regulated and soil erosion more and more concentrated in several rainstorms. In the middle reaches, which had high vegetation cover but low speedy conservation measures, climate change dominated the hydrology with the runoff evidently decreased and slightly regulated. It implied that the responses of streamflow and sediment not only controlled by vegetation cover but also the restoration speed. It was expected to be helpful in understanding the ecohydrological processes in the Loess Plateau.

Key Words: characteristics of streamflow and sediment; ecological restoration; Soil and Water Conservation; different landforms and vegetation type areas; Beiluo River Basin

土壤侵蚀和水土流失是全球面临的重要生态环境问题之一^[1]。20 世纪以来世界各国开展的广泛的生态恢复工程,对流域水资源的配置、开发、利用,流域地貌演变、海岸生态系统及全球生物地球化学循环产生了重要影响^[2-3]。水沙演变及归因分析是全球变化研究中的热点之一,对水沙变化过程和驱动机制的深入理解和认识有助于区域生态环境管理和可持续发展^[4]。

黄土高原自然条件复杂,地形破碎,土质疏松,年降水量少而集中,植被破坏后极易发生水土流失,黄河年均输沙量曾达到 16 亿 t(陕县水文站,1919—1960 年),其中 90%来源于黄土高原^[5-6]。为改善黄土高原生态环境,自 20 世纪 50 年代开始,国家开展了大规模的生态建设和水土流失综合治理^[7],1999 年后又实施了大规模的退耕还林(草)工程,土地利用和地表覆被发生了剧烈变化^[8]。同时,黄土高原降水量减少、低温显著上升^[9]。剧烈的人类活动和明显的干旱化过程对黄土高原地区流域水循环和侵蚀产沙产生了深刻的影响,对其水沙变化和区间差异的研究显得尤为重要。

北洛河流域地处黄土高原腹地,其上游地区是黄河下游多砂粗沙的主要策源地,也是全国重点进行水土流失治理和退耕还林(草)的地区之一。2012 年,流域累计治理水土流失面积 90.36 万 hm^2 ,水土流失治理度达 46.7%,2019 年,流域植被盖度达 78.26%^[10]。开展该区生态环境变化对水沙特征演变的影响具有很好典型性。刘二佳^[10]、葛芬莉^[11]、崔文艺等^[12]和秦伟等^[13]分析了北洛河丘陵区生态建设的水沙调控效应;蔺鹏飞等^[14]研究了上游丘陵区退耕还林(草)对次洪水径流、输沙的影响;于艺鹏等^[15]探究了上游基流对植被恢复的响应;谢敏等^[16]分析了湫头的水沙在土地利用变化过程中的演变;张亭亭等^[17]初步分析了流域不同地貌类型区的径流变化特征和控制因素;Zhang 等^[18]主要研究了流域水沙的空间变化特征及影响因素。这些研究集中在北洛河上游和水文站控制区,对流域干流不同植被类型区的水沙变化分析和对比还不够细致和深入。基于此,本文针对北洛河流域,基于干流水文站分布和上、中、下游区间划分,分析不同地貌-植被类型区

的水沙演变特征,揭示不同年代气候变化和人类活动的影响贡献程度,理解生态建设下不同区间的水文过程,为黄土高原区水土流失治理提供理论支撑和参考。

1 研究区概况

北洛河是渭河的一级支流,黄河的二级支流,流经陕西省榆林、延安、铜川、渭南及甘肃省庆阳 5 个地(市)的 18 个县(区),于大荔县东南注入渭河,地处 $E107^{\circ}33'—110^{\circ}10'$, $N34^{\circ}42'—37^{\circ}19'$,流域面积 26905 km^2 ,长 680 km,落差 1588 m,平均比降 2.34‰。流域属暖温带大陆性气候,年平均降水量 512 mm,其中 5—9 月降水量占全年的 76.2%,多以暴雨出现。流域自上游至下游分布有黄土丘陵沟壑区、黄土高原沟壑区、土石山林区和阶地平原区等地貌类型。上游黄土丘陵沟壑区占流域约 1/4 面积,植被稀疏,土层深厚,主要土壤类型为黄绵土,是北洛河流域的主要产沙区,也是黄河中游粗泥沙集中来源区^[12,19];中游高原沟壑区和土石山林区占流域面积约 2/5,属落叶阔叶林区,植被盖度高,水土流失轻微;下游一半面积为渭河阶地平原区,地面平缓开阔,土层较厚,沟壑密度小,侵蚀轻微^[20]。干流刘家河、交口河、湫头 3 个水文站,基本控制了上、中、下游产水产沙范围,其位置和自然状况如表 1 和图 1 所示。

表 1 流域水文站及区间自然和水文概况

Table 1 General Situation of Nature and hydrology of hydrological station in Basin

水文站及区间 Hydrological stations and regions	控制面积 Control area/ km^2	地貌类型 Geomorphologic type	降雨量 Precipitation/ mm	潜在蒸发量 Potential evapotranspiration/ mm	植被盖 度 ^[20] Vegetation coverage/%	径流量 Runoff/mm	输沙模数 Sediment/ ($t\ km^{-2}\ a^{-1}$)	数据系列 Data series/ Year
上游(刘家河) Uptream(Liujiahe)	7325	黄土丘陵 沟壑区	466	951	46.0	30	7751	1958—2019
中游(刘家河-交口河) Midstream (Liujiahe-Jiaokouhe)	9855	高原沟壑及 土石山区	536	997	93.8	23	521	1958—2019
下游(交口河-湫头) Downstream (Jiaokouhe-Zhuangtou)	8465	高原沟壑、 土石山区及阶 地平原区	565	1020	59.8	22	-204	1952—2019

中游的控制面积;交口河与刘家河控制面积的差值;下游的控制面积;湫头与交口河控制面积的差值。中游水文数据序列长度与刘家河一致,下游的水文数据序列长度与交口河一致

自 20 世纪 50 年代以来,国家提出水土流失综合治理,如造林种草、修建淤地坝和梯田,1999 年又推行退耕还林(草)工程政策,已经在北洛河流域广泛实施。近 70 年北洛河上、中、下游各项水土措施面积数量见表 2。

2 数据与方法

2.1 数据来源及处理

本文收集了北洛河流域干流 3 个水文站建站至 2019 年实测逐日径流量和输沙量,如表 1 所示,同时收集北洛河流域范围及周边 15 个气象站(图 1)1957—2018 年日降雨量、温度、气压、风速、热辐射和湿度等资料。参考了第一次全国水利普查水土保持情况普查水力侵蚀普查中提出的冷暖季日雨量估算模型^[22]计算站点降雨侵蚀力,用 Penman-Monteith 公式(彭曼公式)^[23]估算站点蒸散发量,通过 Kriging 插值(克里金插值法)获得流域面降雨量、面降雨侵蚀力及面蒸散发量,获取上、中、下游区间的面降雨量、降雨侵蚀力及蒸散发量数据。

水文数据来源于黄河中游水文资料及水文年鉴,降雨量、温度、气压、风速、热辐射和湿度数据来源于中国气象局共享网站,水文数据及气象数据均经过质量检验。湫头站数据序列中 6 年采用了河渠合的数据,其余为河道水文数据。文章按年代划分时间序列,如 1970—1979 年,即 20 世纪 70 年代,为方便表述,本文记作 1970s,依此类推。20 世纪 50 年代、20 世纪 60 年代、20 世纪 70 年代、20 世纪 80 年代、20 世纪 90 年代、21 世纪 00 年代、21 世纪 10 年代分别记作 1950s、1960s、1970s、1980s、1990s、2000s、2010s。(由于上游和中游 1950s

的水文数据只能追溯到 1958 年,而 1958 和 1959 年的数据无法代表 1950s 的整体状况,因此将上游和中游 1958 和 1959 年的数据合并到 1960s 进行研究;下游 1950s 缺 1950 和 1951 年的数据)。中游和下游的径流、输沙数据,从同日期水文站数据相减得到,若为负值,表示区间不产流产沙。在流量—频率分析中将负值作为 0 处理。

2.2 趋势检验

Mann-Kendall 检验法(曼-肯德尔法)是世界气象组织推荐的广泛应用于水文气象领域的一种非参数检验法。通过计算统计量 S 值对序列趋势变化的显著性进行双边检验,当数据序列长度 $n > 10$,统计量 S 大致接近正态分布;用来检验有序数据趋势变化程度的重要参考是显著水平 (Z 和 P),在给定的置信水平 α 下,如果 $|Z| \leq Z_{1-\alpha/2}$,则可以认为所分析的时间序列数据在统计意义上存在显著性变化趋势。其中 Z 的绝对值大小体现了变化趋势的大小, Z 值的正、负号分别表示上升、下降趋势。采用 Sen 斜率 β 表示水文要素时间序列上的变化程度。以上统计量 S 、趋势显著水平 Z 和 P 计算过程详见参考文献^[24]。

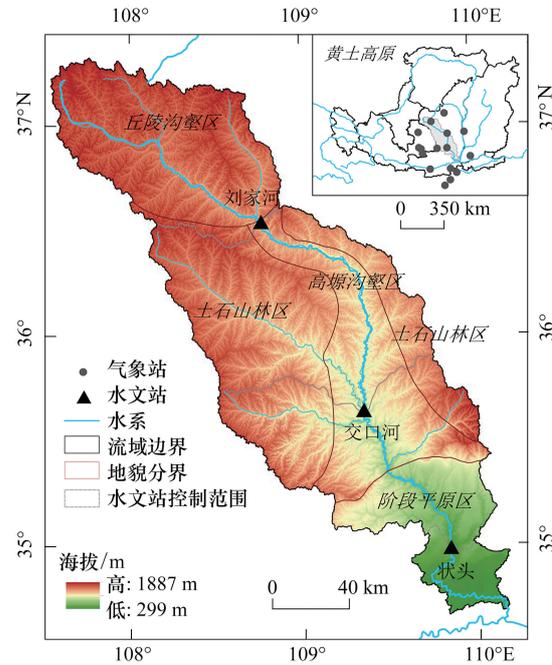


图 1 北洛河流域、气象站及干流水文站分布

Fig.1 The geographic location of the Beiluo River Basin, meteorological stations and mainstream hydrological stations

表 2 流域时期水土保持措施累积面积^[21]

Table 2 Area of soil and water conservation measures of Beiluo River Basin in the period

年份 Year	上游 Upstream							
	造林 Afforestation		种草 Pasture		梯田 Terraced		坝地 Dams	
	A	AR	A	AR	A	AR	A	AR
1959	0.56	0.77	0.01	0.02	0.03	0.04	0.01	0.01
1969	1.78	2.43	0.14	0.19	0.38	0.52	0.11	0.15
1979	3.09	4.22	0.39	0.53	0.92	1.26	0.21	0.29
1989	5.96	8.14	1.81	2.47	1.45	1.98	0.21	0.29
1996	9.05	12.35	2.89	3.95	2.19	2.99	0.21	0.29
2006	16.22	22.14	7.37	10.06	2.84	3.88-	-0.21	0.29
年份 Year	中游 Midstream							
	造林 Afforestation		种草 Pasture		梯田 Terraced		坝地 Dams	
	A	AR	A	AR	A	AR	A	AR
1959	0.55	0.01	0.00	0.00	0.02	0.00	0.01	0.00
1969	1.73	0.02	0.05	0.001	0.31	0.003	0.18	0.002
1979	2.99	0.03	0.14	0.001	0.92	0.01	0.20	0.002
1989	5.77	0.06	0.65	0.007	1.23	0.01	0.20	0.002
1996	8.75	0.09	1.02	0.01	1.85	0.02	0.20	0.002
2006	15.69	0.16	2.58	0.03	2.38	0.02	0.20	0.002
年份 Year	下游 Downstream							
	造林 Afforestation		种草 Pasture		梯田 Terraced		坝地 Dams	
	A	AR	A	AR	A	AR	A	AR
1959	0.01	0.00	0.01	0.00	0.03	0.00	0.01	0.00
1969	0.09	0.001	0.02	0.0002	0.11	0.001	0.07	0.001
1979	0.15	0.002	0.02	0.0002	0.11	0.001	0.02	0.0003
1989	0.29	0.003	0.03	0.0004	0.40	0.005	0.02	0.0003
1996	12.46	0.15	0.57	0.01	8.20	0.10	0.02	0.0003
2006	22.36	0.26	1.44	0.02	10.63	0.13	0.02	0.0003

A: 面积 Area/万 hm²; AR: 措施面积占区间面积百分比 Area ratio/%; 坝地面积: 淤地坝拦沙所形成的面积

2.3 流量历时曲线(FDC)

FDC^[25]是一种频率累积曲线, Q_i 表示给定时期内大于或等于某一累积频率(i)时的流量,充分反映了符合流域水文特征的累积频率从低到高的统计流量状态谱。不同年代谱特征的变化可以清晰地反映降雨和人类活动对流域不同发生概率水文事件的影响。绘制步骤:首先将各区间各年代的日流量按从大到小顺序排列,分为若干组;统计每组流量出现次数,计算累积频率 i ;建立 Q_i-i 图。

本文选取 Q_5 、 Q_{95} ,分别表示累积频率为5%、95%时的径流量,也即丰水期、枯水期径流量。

同理,根据逐日输沙率数据,制作输沙历时曲线。本文选取 S_5 、 S_{95} 来表示累积频率为5%、95%时的输沙量。

2.4 水沙变化影响因素贡献率

流域径流输沙变化受多种因素的影响,在众多影响因素中,地形和土壤是长期地质作用为主产生的结果,在短期内变化不大,而降雨等气候条件和人类活动是影响流域径流输沙的两大因素。本文使用3种方法,来分析降雨和人类活动对水沙变化的贡献率。

(1)双累积曲线^[26],根据基准期的降雨-输沙量双累积曲线建立回归方程:

$$\sum Q_1 = k \sum R_1 + b \quad (1)$$

式中: $\sum Q_1$ 为基准期累积径流量, $\sum R_1$ 为基准期累积降雨量。

将措施期年累积降雨量代入(1)式,得到措施期理论累积径流量($\sum Q_2'$);措施期理论累积径流量均值($\overline{Q_2'}$)与实测值均值($\overline{Q_2}$)之差,即为人类活动的影响量 ΔQ_h :

$$\Delta Q_h = \overline{Q_2'} - \overline{Q_2} \quad (2)$$

措施期降雨变化的影响量 ΔQ_c :

$$\Delta Q_c = \overline{Q_1} - \overline{Q_2'} \quad (3)$$

式中: $\overline{Q_1}$ 为基准期实测径流量均值。人类活动影响贡献率 η 即为:

$$\eta = \Delta Q_h / (\overline{Q_1} - \overline{Q_2'}) \quad (4)$$

降雨变化影响贡献率为 $1-\eta$ 。同理,可以进行降雨侵蚀力-输沙量变化的驱动力分析。

(2)修正系数法^[27],建立基准期和措施期的降雨径流关系式:

$$Q_1 = f_1(R_1) \quad (5)$$

$$Q_2 = f_2(R_2) \quad (6)$$

式中: Q_1 、 Q_2 分别为基准期和措施期的实测径流量, R_1 、 R_2 分别为基准期和措施期的实测降雨量。

措施期某降雨条件下的修正系数 α ,是该降雨条件下通过(5)、(6)两式得到的基准期和措施期计算径流量之比: $\alpha = f_1(R_2) / f_2(R_2)$ 。建立 $R_2-\alpha$ 关系,就可以得到对应措施期平均降雨量和实测平均径流量下的理论径流量均值($\overline{Q_2'}$)。该值与措施期实测径流量均值之差即为措施期人类活动影响下的径流变化量(ΔQ_h)。基准期实测径流量均值与措施期实测径流量均值之差为总径流变化量(ΔQ)。由此可得人类活动影响贡献率(η),降雨变化影响贡献率为 $1-\eta$ 。同理,可以进行降雨侵蚀力-输沙量变化的驱动力分析。

(3)经验公式法^[10],以基准期降雨、径流数据为基础,建立降雨-径流量经验关系式,把措施期降雨数据代入关系式,估算下垫面条件不变时的理论径流量。理论值与实测值的均值之差即为人类活动影响量,与基准期和措施期径流量变化量的比例为人类活动贡献率。同理,可以进行降雨侵蚀力-输沙量变化的驱动力分析。

3 结果与分析

3.1 北洛河干流区间产流产沙量变化

对北洛河上、中、下游产流量和产沙量进行分析,如图2所示。上、中、下游近70年来年均径流深分别为

30、23、21 mm, 年均产沙量为 0.60、0.05、-0.02 亿 t, 相应侵蚀模数分别是 7751、521、-204 t km⁻² a⁻¹。

上游 1960s-2010s 各年代年均径流深分别为 35、34、30、38、23 和 19 mm, 年均产沙量分别为 0.99、0.74、0.47、0.85、0.23 和 0.10 亿 t, 从侵蚀角度, 年均输沙模数分别为 13537、10075、6407、11585、3161 和 1241 t km⁻² a⁻¹。与 1960s 比, 上游 2010s 产流量、产沙量分别减少了约 1/2 和 9/10。M-K 检验表明, 上游径流深极显著减少 ($P < 0.01$), 年均变率为 -0.28 mm/a, 产沙量极显著降低 ($P < 0.01$), 年均变率为 -0.02 亿 t/a。

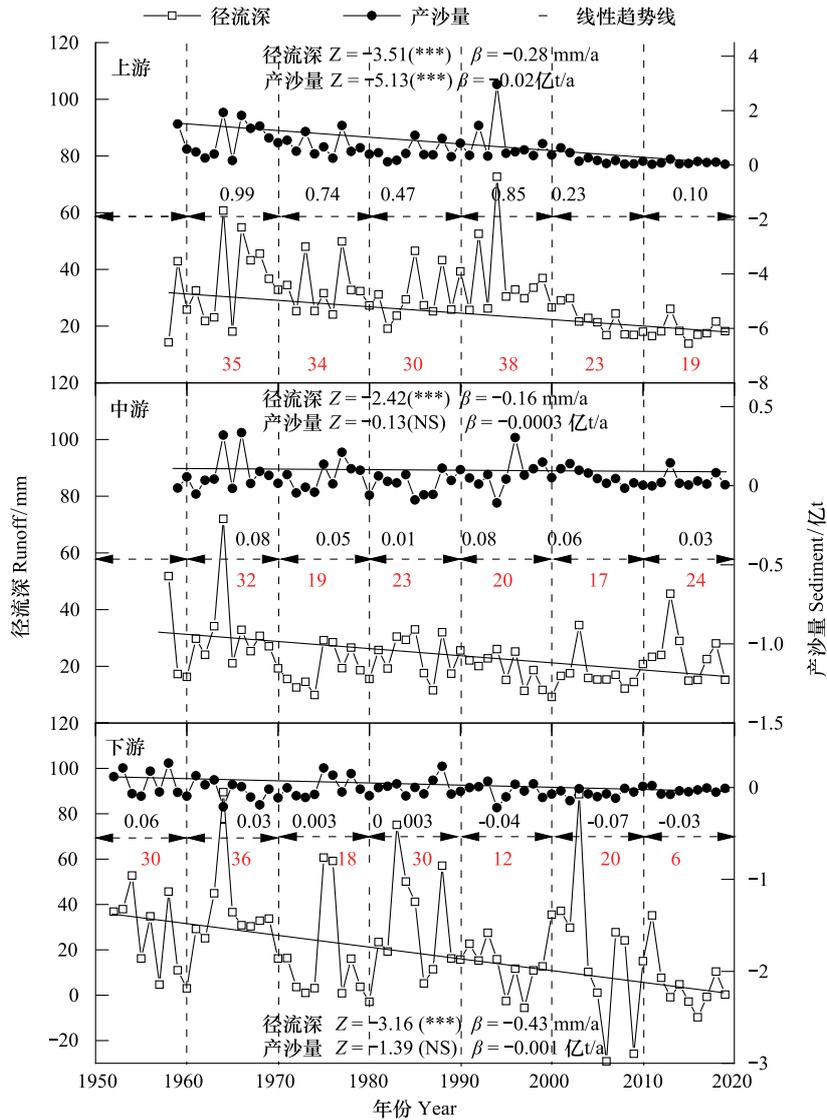


图 2 北洛河干流各区间径流深和产沙量年际变化趋势

Fig.2 Annual variation trend of runoff depth and sediment yield modulus in the regions of the main stream of Beiluo River Basin

Z: Mann-Kendall (曼-肯德尔法) 标准化的检验统计量 Mann-Kendall standardized test statistics; NS: 不显著 Non-significant; β: 斜率 Slope; Z < 0, 表示序列呈下降趋势; ***, 表示序列趋势变化 ($P < 0.01$) 极显著; NS, 表示序列趋势变化 ($P > 0.05$) 不显著; 虚线下方红色数字表示区间各年代年均径流深/mm, 虚线上方黑色数字表示区间各年代年均产沙量/亿 t

中游各年代年均径流深分别为 32、19、23、20、17 和 24 mm, 年均产沙量分别为 0.08、0.05、0.01、0.08、0.06、0.03 亿 t, 年均输沙模数相应为 799、552、52、797、587 和 310 t km⁻² a⁻¹。与 1960s 比, 中游 2010s 产流量、产沙量分别减少了约 1/4 和 3/5。中游径流深极显著减少 ($P < 0.01$), 年均变率为 -0.16 mm/a, 产沙量为不显著降低 ($P > 0.05$)。

下游 1950s-2010s 年均径流深分别为 30、36、18、30、12、20 和 6 mm, 年均产沙量分别为 0.06、-0.04、0.003、

0.003、-0.04、-0.07、-0.03 亿 t, 年均输沙模数为 739、-414、30、32、-453、-819 和 -357 t km⁻² a⁻¹。与 1950s 相比, 下游 2010s 产流量减少了约 4/5, 区间侵蚀出现沉积现象。径流深极显著减少 ($P < 0.01$), 年均变率为 -0.43 mm/a, 产沙量不显著降低 ($P > 0.05$)。

总体来看, 流域上、中、下游产流产沙量均明显下降, 其中植被恢复程度大的上游产流量减少幅度大于植被恢复程度弱的中游, 而下游产流量的减少主要受到渠道引水灌溉的影响。流域产沙量的下降以上游为主, 中、下游微弱降低。

从图 2 还可以看出, 近 70 年来流域各区间产流量和产沙量变化均逐渐趋于平稳, 尤其是 2000s 后各区间的产沙量波动幅度明显减小, 这与水土保持措施和退耕还林(草)的实施有关。下游洛惠渠大量引水用于工业生产和农业灌溉, 致使产流量出现负值, 且年值波动很大。值得注意的是, 上、中游 1990s 产流、产沙量均显著增大, 其极值比明显增大, 这是由于 1994 年上中游地区遭遇千年一遇暴雨, 暴雨洪水造成了剧烈侵蚀和水土流失, 同时对 1990s 统计特征值产生影响。

3.2 干流区间水沙量年际 FDC 变化特征

对上、中、下游不同地貌和植被类型区各年代累积频率下的日径流深、输沙量进行分析(图 3)。与 1960s 相比, 上游 1970s-2010s 逐年代 Q_3 流量呈减少趋势, 分别减少了 29%、22%、26%、45% 和 63%, 而 Q_{95} 流量呈增加趋势, 增加了 34%、52%、63%、76% 和 68%; S_3 沙量极显著降低, 减少了 57%、68%、58%、92% 和 97%, 甚至不再有 S_{95} 沙量, 其变化量为 -100%、60%、-100%、-100% 和 -100%。年序列上, 上游丰水期至 60% 累积概率径流量均表现为显著减少趋势, 而大于 85% 累积频率上的径流量表现为显著增加趋势, 各频率下的输沙量均呈显著下降趋势, 表现出下垫面对径流过程具有的明显的削洪和补枯作用, 同时对输沙极显著的控制效果。

与上游产流产沙变化格局不同, 与 1960s 相比, 中游 1970s-2010s 逐年代 Q_3 减少程度平稳, 分别减少了 42%、37%、42%、53% 和 45%, 而 Q_{95} 从 1980s 开始出现径流量; 而 S_3 表现出逐年代显著减少趋势, 分别减少了 54%、56%、26%、79% 和 89%。近 60 年来, 中游绝大多数频率下的产流量为减少趋势, 其中丰水期至 45% 累积频率上的径流量呈显著降低趋势, 95% 频率枯水径流显著增加; 累积频率小于 15% 丰水期输沙显著减少, 而累积频率大于 30% 时, 输沙量表现出不同程度增加趋势。

与 1960s 相比, 下游 1970s-2010s Q_3 分别减少了 38%、23%、47%、47% 和 60%, S_3 减少了 34%、44%、70%、84% 和 96%。近 60 年来, 下游各频率下的径流输沙呈不同程度的降低趋势, 丰水期的径流输沙均显著减少。

从时间来看, 上、中、下游 1960s-2010s Q_3 均呈明显下降趋势, 上游和中游 Q_{95} 逐阶段上升; 上、中、下游 S_3 逐阶段均呈大幅度下降趋势, 上游 S_{95} 显著减少, 而下游和中游无输沙日逐年代增加。说明 1950s 以来一系列水土保持措施和生态措施的实施, 对流域产流产沙过程产生了深刻影响, 产生了削洪补枯的良好生态效应, 且削弱侵蚀和减少输沙的效果越来越明显。中游平水至枯水期的输沙不同程度的增加, 可能与城镇建设等其他人类活动的增沙负效应有关。

从区间来看, 上游径流削洪补枯的调节程度最高, 主要因为上游为黄土丘陵沟壑区, 水土流失剧烈, 各项治理措施实施力度较大; 中游调节程度较低, 是由于中游的次生林区植被盖度较高, 水土流失程度较轻, 改善力度相对上游较弱。下游的径流变化程度, 受到植被影响, 同时也受下游阶地平原区渠道引水灌溉的影响。

3.3 干流区间产水产沙量占流域总水沙量比例变化

各区间的年产流量占流域年总径流量(即淤头站的年径流量)的比例为该区间的年产水比例; 同理, 各区间的年产沙量占流域年总输沙量(即淤头站的年输沙量)的比例为该区间的年产沙比例。

图 4 表明, 近 70 年来, 中游的年均产水比例为 51%, 说明流域的水量主要来源于中游的次生林/高塬沟壑区。1960s—1980s 期间, 上、中、下游区间年均产水比例基本持平, 各约占比 1/3, 1990s 后出现波动, 上、中游区间产水比例增加, 下游区间迅速减少。M-K 检验结果表明, 上、中游年产水比例微弱上升, 而下游产水比例极显著下降, 说明, 下游区间产流量对流域总水量份额贡献急剧降低, 上、中游区间产流量对流域总水量贡献比较平稳。

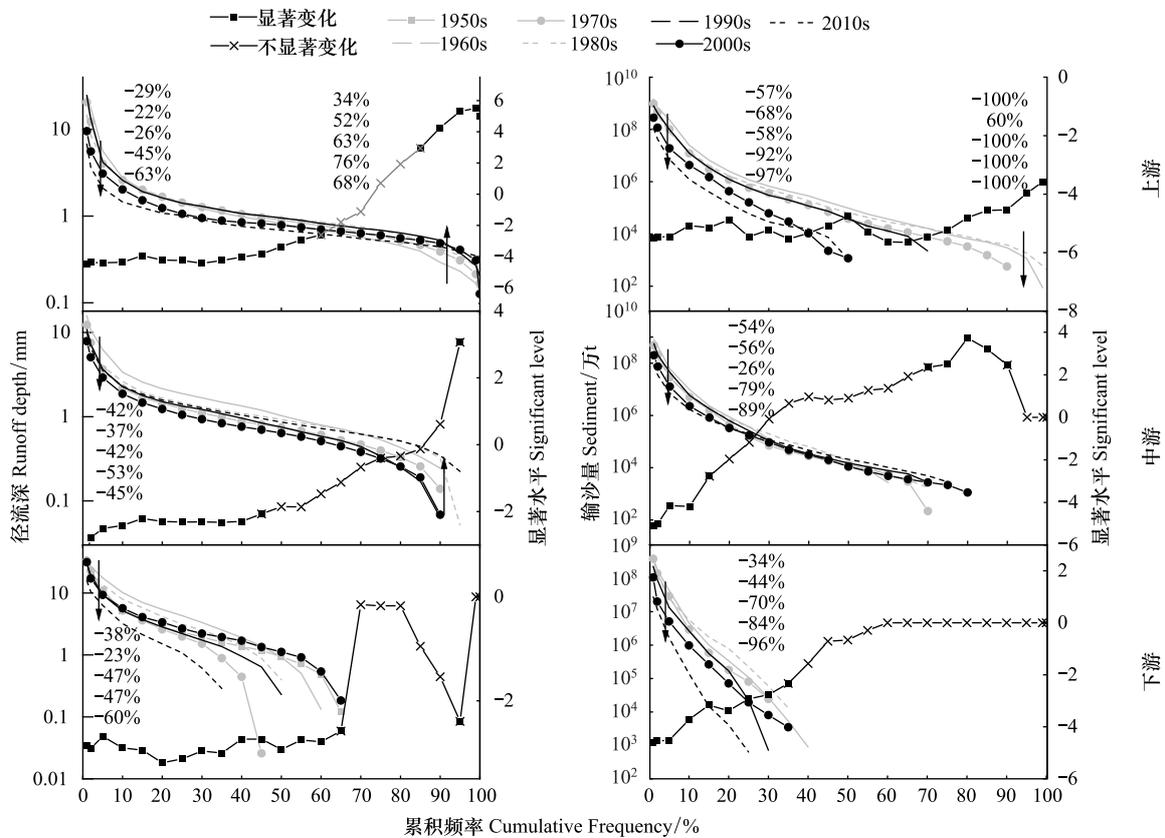


图3 北洛河干流各区间日径流深及输沙量流量历时(FDC)曲线

Fig.3 Flow duration curves of runoff and sediment in the regions of the main stream of Beiluo River Basin

以右纵坐标轴为基准的点曲线是整个时间序列各百分位下的径流(输沙)序列的趋势及显著性;显著水平>0,表示序列呈上升趋势,反之,表示序列呈下降趋势;在给定置信水平 $\alpha=0.05$,显著水平的检验统计量临界值为 ± 1.96 ;|显著水平| > 1.96,表示序列趋势变化显著,反之,表示序列趋势变化不显著;图中箭头,表示该累积频率下各年代的径流深(或输沙量)与基准期(1960s)相比的变化方向,向上为增加,向下为减小,数字从上到下依次表示该频率下各年代的径流深(或输沙量)与基准期(1960s)相比的变化程度

从图4还可以看出,上游区间产沙量占比始终在90%以上,且该份额在60年间几乎不变,说明上游黄土丘陵沟壑区始终是北洛河流域输沙量的集中来源地,中、下游区间的产沙份额在极低水平上变动。

总体来看,北洛河下游产水产沙比例均呈极显著减少趋势,这是因为该区有一半面积为阶地平原区,人口的增加、经济的发展,导致工农业用水量需求增加;上、中游产水产沙比例均呈增加趋势,这与各区间1960s以来不同程度的人类活动引起的土地利用/覆被变化有很大关系。2000年以后上、中游产水、产沙比例有部分年份出现异常大值,与该时段淤头径流量、输沙量较小导致,而产流量较小会加剧下游河道内泥沙淤积,导致水资源匮乏、生态环境恶化。

3.4 干流区间水沙变化驱动力分析

影响流域水沙变化的原因主要包括降雨等气候条件变化和人类活动引起的下垫面变化,以1960s为基准期,建立降雨量-径流量和降雨侵蚀力-输沙量关系,采用双累积曲线、修正系数法和经验公式法三种方法分别量化降雨和人类活动对区间水沙变化的影响程度,三种方法各有优缺点,估算结果可相互印证,结果如表3所示。根据定义,贡献率的符号反映了气候和人类活动对产流量、产沙量总变化的影响方向,“+”表示与总变化方向一致,“-”表示与总变化方向相反。气候和人类活动复杂多变,极端干旱(暴雨)天气对减水减沙有积极(消极)影响;对人类活动而言,不合理的耕作、淤地坝溃坝,对减水减沙有负面影响;引水灌溉对减水减沙有积极影响。如,由于上游1994年出现极端暴雨(千年一遇),与1960s相比,上游1990s产流量明显增加

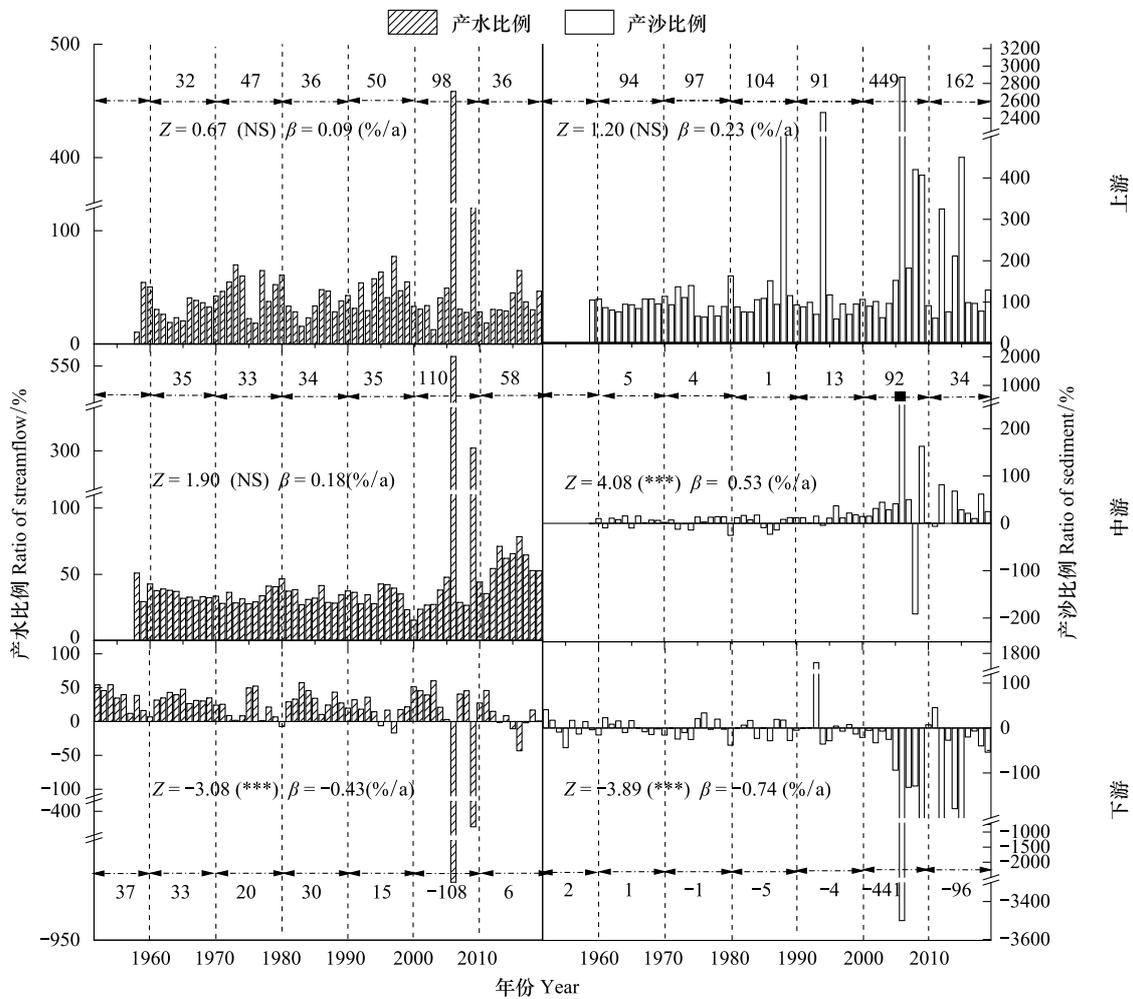


图 4 北洛河干流各区间产水产沙量占流域上中游总水沙量比例年际变化

Fig.4 Annual variation of the ratio of runoff and sediment to total runoff and sediment in the upper and middle reaches of Beiluo River Basin

图中数字表示区间各年代年均产水比例、产沙比例

(图 2),表 3 显示,1990s 降雨对上游产流量变化的贡献率为 >100 的正值,而人类活动贡献率为负值,即表明了因素对下垫面生态要素变化的影响方向和强度大小。

与 1960s 相比,1970s—2010s 各年代人类活动对上游径流量变化的贡献率分别为 -110.2%、14.7%、-84.4%、65.2%和 94.7%;人类活动对中游径流量变化的贡献率分别为 34.9%、37.0%、12.7%、40.1%和 26.7%,对下游径流量变化的贡献率为 48.6%、58.2%、-19.5%、39.2%和 60.7%。

可以看出,对上游径流量的变化,人类活动的影响逐年代增强,2000 年之后,成为影响径流量变化的主要控制因素,2010s 期间人类活动影响程度达到 94.7%。中游植被覆盖较好,水土保持措施和退耕还林生态治理强度弱于上游,年代降雨量的变化始终主导着中游径流量的变化程度,2010s 期间,降雨变化影响程度为 73.3%。下游反映出受林区径流量稳定和阶地平原区工、农业用水增加(图 4)的综合影响,降雨和人类活动影响程度在各年代表现出比较平均的状态,2010s 期间人类活动贡献率为 60.7%。

与 1960s 相比,1970s—2010s 各年代人类活动对上游输沙量变化的贡献率分别为 -36.1%、60.2%、-38.8%、84.5%和 109.8%;人类活动对中游输沙量变化的贡献率分别为 -4.6%、50.9%、-179.2%、60.1%和 86.4%,对下游输沙量变化的贡献率为 50.4%、51.9%、-19.3%、116.7%和 159.0%。

表 3 降雨和人类活动对北洛河流域干流区间产流产沙变化贡献分析

区间 Region	时段 Period	影响因子对径流的贡献率 The impacts of rainfall and human activities on runoff/%						影响因子对输沙的贡献率 The impacts of rainfall and human activities on sediment/%									
		双累积曲线 Dual mass curve		修正系数法 Correcting coefficient		经验公式法 Experience formula method		双累积曲线 Dual mass curve		修正系数法 Correcting coefficient		经验公式法 Experience formula method					
		R	H	R	H	R	H	R	H	R	H	R	H				
上游 Upstream	1970s	138.7	-38.7	174	-74.0	317.8	-217.8	210.2	-110.2	59.2	40.8	76.5	23.5	55.9	44.1	63.9	36.1
	1980s	78.4	21.6	89.3	10.7	88.3	11.7	85.3	14.7	48.7	51.3	33.2	66.8	37.5	62.5	39.8	60.2
	1990s	162.8	-62.8	218.3	-118.3	172.1	-72.1	184.4	-84.4	89.2	10.8	196.5	-96.5	130.8	-30.8	138.8	-38.8
	2000s	22.9	71.1	41.7	58.3	33.8	66.2	34.8	65.2	20.7	79.3	9.3	90.7	13.8	86.2	14.6	84.5
	2010s	-0.1	100.1	7.4	92.6	8.5	91.5	5.3	94.7	8.4	91.6	-39.3	139.3	1.4	98.6	-9.8	109.8
中游 Midstream	1970s	54.5	45.5	88.3	11.7	52.6	47.4	65.1	34.9	44.2	55.8	37.9	62.1	231.6	-131.6	104.6	-4.6
	1980s	52.7	47.3	85.0	15.0	51.4	48.6	63.0	37.0	35.2	64.7	21.7	78.3	90.3	9.7	49.1	50.9
	1990s	62.6	37.4	102.1	-2.1	97.2	2.8	87.3	12.7	93.8	6.2	200.7	-100.7	543.2	-443.2	279.2	-179.2
	2000s	53.4	46.6	80.6	19.4	45.8	54.2	59.9	40.1	32.2	67.8	14.9	85.1	36.9	63.1	29.4	60.1
	2010s	55.1	44.9	96.6	3.4	68.1	31.9	73.3	26.7	35.4	64.6	-7.8	107.8	13.3	86.7	13.6	86.4
下游 Downstream	1970s	48.0	52.0	41.4	58.6	64.7	35.3	51.4	48.6	15.1	84.9	80.1	19.9	53.5	46.5	49.6	50.4
	1980s	33.5	66.5	39.2	60.8	52.7	47.3	41.8	58.2	13.1	86.9	83.3	16.7	47.8	52.2	48.1	51.9
	1990s	51.9	48.1	227.6	-127.6	79.1	20.9	119.5	-19.5	100.6	-0.6	148.2	-48.2	109.2	-9.2	119.3	-19.3
	2000s	47.9	52.1	58.7	41.3	75.8	24.2	60.8	39.2	-7.6	107.6	-71.7	171.7	29.2	70.8	-16.7	116.7
	2010s	49.3	50.7	33.2	66.8	35.5	64.5	39.3	60.7	-72.6	172.6	-48.3	148.3	-56.1	156.1	-59.0	159.0

R: 降雨 Rainfall; H: 人类活动 Human activities

从表 3 看出,对于上游丘陵沟壑区的产沙量显著减少而言(图 2),尽管从 1980s 后降雨侵蚀力为增加趋势,人类活动却逐渐成为产沙量减少的绝对控制因素。虽然中、下游区间产沙量下降趋势不显著,但人类活动仍发挥着主导作用。

总体来看,1970s—1980s,人类活动对上、中、下游水沙减少的贡献率均有增强态势,原因可能是北洛河流域该时期实施了一系列的水土保持措施,改变了水文过程^[18,28]。1980s—1990s,人类活动对各区间水沙减少的贡献率明显降低,这与 1994 年流域发生千年一遇的极端暴雨有关^[29],且 1970s 建设的部分淤地坝,1980s 末被损坏或完全填满^[30],其拦沙效益大为降低。与 1990s 相比,2000s 后人类活动影响程度显著增加,表明退耕还林(草)工程措施发挥了重大作用^[10]。除上述措施外,大量的灌溉和水利工程、生活和工业用水、河床采砂也是减少水沙的重要因素^[2]。

4 讨论

4.1 阶段人类活动对生态环境的影响

研究表明,历史时期的黄土高原森林覆盖率曾超过 50%,然而,过度的毁林开荒导致植被受到严重破坏,黄土高原水土流失愈发剧烈^[31]。子午岭长期观测发现,相比于耕地,林地、草地、荒地、撂荒地等土壤抗侵蚀能力相对较强^[32],植被破坏前后侵蚀速率成千倍增加^[28],表明植被是影响侵蚀的决定性因素。为黄土高原的生态恢复提供了科学依据。

1950s—1960s,人口增加而生产力低下,黄土高原经历了第一次开荒高峰,耕地面积不断扩大^[31],森林经历着扫荡性的砍伐,森林面积缩小,林区孔状破坏^[33],土壤抗蚀性减弱,河道年均沙量可达上亿吨^[34]。

为改善黄土高原的生态环境,国家 1970s 通过实施水土保持措施,一定程度上减少了水沙^[35],上、中、下游 1979 年水土保持措施面积达 4.61、4.25、0.3 万 hm^2 (表 2)。但因人口持续增长,黄土丘陵沟壑区 1970s 经历了第二次开荒高峰^[31],耕地面积增加,林草植被破坏,这可能是人类活动对上游丘陵沟壑区水沙减少的贡献较小甚至为负贡献(表 3)的原因。

1980s,上、中、下游水土保持措施面积分别增加 4.82、3.60、0.44 万 hm^2 (表 2),表现出良好的减水减沙效果(图 2),因此,与 1970s 相比,1980s 人类活动对各地貌和植被类型区水沙减少的贡献率均增强(表 3)。但受人口、经济压力的影响,土壤侵蚀依然严重(图 2)。

1990s 年上、中、下游水土保持措施面积均扩大(表 2)。但是流域 1994 年发生千年一遇的暴雨^[29],淤满或受损的水坝成为泥沙再活化的来源^[30],不仅如此,流域子午岭森林植被遭严重破坏,森林边界线以 0.5 km/a 的速度后退^[36],这可能与当时以重工业为主导的经济增长方式有关,很多地区毁林开荒,致使 1990s 的水土流失愈发严峻(图 2)。

1999 年以来大规模地实施退耕还林(草)工程,不同地貌区的植被盖度均增加^[20],与 1996 年相比,上、中、下游 2006 年造林种草面积几乎翻倍增长(表 2)。近 20 年,上游丘陵沟壑区的植被盖度年均增长率达 1.18%/a^[20],植被恢复以人工林和灌草地为主^[37],经长时间的群落演替,植被多样性已经建立,生态功能多样性逐步发挥;中游土石山林/高原沟壑区-次生林区植被增加比率为 0.49%/a^[20],植被种植以林灌为主^[17],同时封禁使子午岭林区的森林植被结构和功能逐渐恢复;下游基本为林区和阶地平原区,生态恢复力度相比上中游较弱^[20];上述不同地貌和植被类型区生态恢复下的水沙演变差异明显,表现为上游径流削洪补枯的程度最大,产沙越来越集中于洪水时期,而中游对径流的调节程度较弱,而下游产流产沙主要受工农业用水的影响(图 3)。

由此可见,北洛河流域生态环境明显改善,森林的涵养水源、水土保持等生态系统服务功能已初步显现^[33]。但是水土保持措施、植被恢复和地形土壤等因子对水沙变化的影响具有很强的空间异质性,气候变化下的分布式降雨-径流-输沙模型和耦合地表覆被动态特征研究还需进一步加强。

4.2 驱动力分析方法

采用双累积曲线法、修正系数法和经验公式法估算降雨和人类活动对北洛河上、中、下游水沙变化的影响

程度,三种方法都是以设定某时期(下垫面变化较小)为基准期,推求随后时期降雨等自然因素和人类活动对径流量变化的贡献程度,但是估算结果存在明显差异,如,与 1960s 相比,双累积曲线法、修正系数法和经验公式法估算 1970s 人类活动对上游径流量变化的贡献率分别为 -38.7% 、 -74.0% 和 -218.7% (表 3)。但是真实状况复杂多变,对于估算水沙变化影响因素贡献率,一般无法判别哪种方法更接近真实状况,通过和以往研究结果对比,结合方法的理论和模拟算式,可以判断哪种方法估算的贡献率更为合理。

双累积曲线法反映的是流域降雨因素外,包括人类活动和其他因素对水沙减少的综合影响。理论上讲,与修正系数法和经验公式法相比,该方法能更好地消除极端天气,如气候干旱引起的径流量偏少的影响^[26]。然而降雨在时间序列上存在周期性的变化规律,这种规律性变化会反映在曲线斜率上,把这种斜率的变化认为是人类活动引起的是不准确的;同时双累积曲线有一个统计模型所共同存在的问题,即不能预测的随机误差,即降雨-径流或降雨侵蚀力-输沙量的关系并不完全遵从正比关系误差^[38]。故计算所得的人类活动对水沙减少的贡献率的计算结果一般都偏大。

修正系数法也能够一定程度上消除气候因素波动的影响,但在建立 $R-\alpha$ 关系时,尤其在对输沙量的计算上,仍会受到异常值的强烈影响,使 $R-\alpha$ 的相关系数降低,影响到计算结果^[27]。

经验公式法^[10]实际上是各种简单的经验相关图(如散点图)的数学模拟,大多是降雨量-径流量或降雨侵蚀力-输沙量的直接回归统计和计算,其计算精度有所减小。

以上三种方法所得降雨和人类活动对水沙变化的贡献率的变化规律大体上是一致的(表 3),但从因素、过程和结果来考虑,双累积曲线估算结果精度优于修正系数法和经验公式法,且三种方法中各因素的多重相关系数以双累积曲线法最高,所以双累积曲线法的估算结果较合理^[39-40]。

4.3 人类活动的多样性对水沙特征演变的影响

湫头站的径流量、输沙量主要以河道数据为主。1950 年修建的洛惠渠,直接从河道引水用于灌溉,经统计,渠道年用水量在河渠合水量的 15%—45%间,多年平均为 25%,也即河道水量仅反映出断面 75%的水量。因此湫头站的径流量、输沙量以及下游区间产流、产沙量偏小,出现负值现象。影响了本文的分析结果,如:FDC 曲线绘制时,下游表现为低流量的产流、产沙量偏小或者负值(图 3);计算各区间产水比例时,上、中游的产水、产沙比例计算结果偏大(图 4);贡献率分析时,人类活动对下游产流量减少的贡献率估算结果偏小(表 3)。

FDC 分析时,中游和下游的产流、产沙量在平水期、枯水期会表现为负值(图 3)。这可能是因为林区面积增加致使出现负产流,这是由于森林的叶面积更大和根系更深,导致更高的截持和蒸腾及蒸散损失,几乎消耗了平水期和枯水期的大部分降水^[41],以及某累积频率下的产流、产沙量需要用于满足工业用水、农业灌溉和河床采砂等^[42]。

5 结论

本文根据北洛河流域干流 3 个水文站,划分成上游丘陵沟壑区-森林草原区、中游土石山林/高原沟壑区-次生林区、下游土石山林-次生林区/阶地平原区-农区,分析不同区间水沙演变对生态恢复的响应,结果表明:

(1)上、中、下游径流深均极显著下降,减少率分别为 -0.28 、 -0.16 、 0.43 mm/a,植被恢复力度大的上游径流深减小幅度大于植被恢复力度弱的中游和下游,此外,下游还受到渠道引水影响;上游产沙量以 0.02 亿 t/a 速度极显著降低,中、下游产沙量不显著减少。

(2)上、中、下游的削洪、补枯程度逐年代增加,与 1960s 比,2010s 洪水量分别减少了 63%、45%、60%,上游枯水量增加了 68%,中游 1980s 枯水期开始产流。植被盖度低,改善程度大的上游森林草原区削洪补枯的程度最高,产沙越来越集中于小概率的暴雨洪水过程;植被盖度高,改善程度小的中游次生林区对洪水调节程度稍低;下游因渠道引水灌溉,高流量明显降低,枯水期基本无产流。

(3)相比湫头站的径流量、输沙量,中游产水比例多年平均 51%,上游产沙比例各年代始终为 90%以上。

表明流域水量主要来源于中游,而泥沙几乎来源于上游。上、中游的产水、产沙比例呈增加趋势,下游产水、产沙比例呈减少趋势,说明下游用水量相对增加,产沙比例也相应降低。

(4) 与 1960s 相比,人类活动对上游产流量的影响逐年代增强,2010s 为 94.7%;中游产流量变化主要受气候影响,2010s 降雨贡献率为 73.3%;降雨和人类活动对下游产流量的影响较为平均,2010s 人类活动贡献率为 60.7%,人类活动对各区间产沙量的减少始终占主导地位,2010s 贡献率均大于 85%。

参考文献(References):

- [1] 郑粉莉,唐克丽,张科利,查轩,白红英. 自然侵蚀和人为加速侵蚀与生态环境演变. 生态学报, 1995, 15(3): 251-259.
- [2] Zhao G J, Li E H, Mu X M, Wen Z M, Rayburg S, Tian P. Changing trends and regime shift of streamflow in the Yellow River basin. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 2015, 29(5): 1331-1343.
- [3] Milliman J D, Farnsworth K L, Jones P D, Xu K H, Smith L C. Climatic and anthropogenic factors affecting river discharge to the global ocean, 1951-2000. *Global and Planetary Change*, 2008, 62(3/4): 187-194.
- [4] 唐克丽,张仲子,孔晓玲,史瑞云,黄少燕. 黄土高原水土流失与土壤退化研究初报. 环境科学, 1984, 5(6): 5-10.
- [5] 任美镠. 黄河的输沙量:过去、现在和将来—距今 15 万年以来的黄河泥沙收支表. 地球科学进展, 2006, 21(6): 551-563.
- [6] 程天文,赵楚年. 我国主要河流入海径流量、输沙量及对沿岸的影响. 海洋学报, 1985, 7(4): 460-471.
- [7] 宁珍,高光耀,傅伯杰. 黄土高原流域水沙变化研究进展. 生态学报, 2020, 40(1): 2-9.
- [8] 周德成,赵淑清,朱超. 退耕还林工程对黄土高原土地利用/覆被变化的影响——以陕西省安塞县为例. 自然资源学报, 2011, 26(11): 1866-1878.
- [9] Zhang B Q, He C S. A modified water demand estimation method for drought identification over arid and semiarid regions. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2016, 230-231: 58-66.
- [10] 刘二佳,张晓萍,谢名礼,陈妮,张亭亭,郭敏杰,张建军. 生态恢复对流域水沙演变趋势的影响—以北洛河上游为例. 生态学报, 2015, 35(3): 622-629.
- [11] 葛芬莉. 北洛河上游区水沙特性变化分析研究. 水资源与水工程学报, 2013, 24(4): 145-150.
- [12] 崔文艺,王武成. 北洛河流域中上游水文特性分析及防洪减灾对策. 陕西水利, 2009, (3): 43-44.
- [13] 秦伟,朱清科,刘广全,张岩. 北洛河上游生态建设的水沙调控效应. 水利学报, 2010, 41(11): 1325-1332.
- [14] 蔺鹏飞,张晓萍,刘二佳,张亭亭,张建军. 黄土高原典型流域水沙关系对退耕还林(草)的响应. 水土保持学报, 2015, 29(1): 1-6.
- [15] 于艺鹏,杨亚辉,蔺鹏飞,赵文慧,张亭亭,张晓萍. 自动基流分割法在北洛河流域的适宜性对比. 水土保持研究, 2016, 23(2): 302-307.
- [16] 谢敏,张晓明,赵阳,王昭艳. 北洛河流域水沙变化对降雨和土地利用的响应. 中国水利水电科学研究院学报, 2019, 17(1): 39-44.
- [17] 张亭亭,张建军,郭敏杰,陈利利,张晓萍. 北洛河流域不同地貌和植被类型区径流演变特征及控制因素. 水土保持学报, 2014, 28(4): 78-84.
- [18] Zhang J J, Zhang X P, Li R, Chen L L, Lin P F. Did streamflow or suspended sediment concentration changes reduce sediment load in the middle reaches of the Yellow River?. *Journal of Hydrology*, 2017, 546: 357-369.
- [19] 古明兴. 北洛河流域水沙演变情势分析. 水资源与水工程学报, 2008, 19(5): 120-122.
- [20] 何亮,吕渡,郭晋伟,雷斯越,贺洁,张晓萍,杨希华. 基于 MODIS 的北洛河流域植被盖度变化研究. 人民黄河, 2020, 42(2): 67-71, 76-76.
- [21] 刘斌,冉大川,罗全华,张志萍,王存荣. 北洛河流域水土保持措施减水减沙作用分析. 人民黄河, 2001, 23(2): 12-14.
- [22] 刘宝元,郭索彦,李智广,谢云,张科利,刘宪春. 中国水力侵蚀抽样调查. 中国水土保持, 2013, (10): 26-34.
- [23] 刘钰,蔡林根. 参照腾发量的新定义及计算方法对比. 水利学报, 1997, (6): 27-33.
- [24] 于延胜,陈兴伟. 基于 Mann-Kendall 法的水文序列趋势成分比重研究. 自然资源学报, 2011, 26(9): 1585-1591.
- [25] Vogel R M, Member J, Fennessey N M. Flow Duration Curves I: A New Interpretation and Confidence Intervals. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 1994, 120(4): 485-504.
- [26] 冉大川,刘斌,付良勇,王鸿斌. 双累积曲线计算水土保持减水减沙效益方法探讨. 人民黄河, 1996, (6): 24-25.
- [27] 张守红,刘苏峡,莫兴国,舒畅,郑超磊,侯博. 降雨和水保措施对无定河流域径流和产沙量影响. 北京林业大学学报, 2010, 32(4): 161-168.
- [28] 杨媛媛,李占斌,任宗萍,高海东. 人类活动对无定河流域不同地貌区水沙变化的影响. 泥沙研究, 2017, 42(5): 50-56.
- [29] 景效礼,宋志林. 陕西省北洛河“94·8”暴雨洪水分析. 水文, 2000, (1): 56-59.

- [30] 马宁, 朱首军, 王盼. 陕北大、中型淤地坝现状调查与分析. 水土保持通报, 2011, 31(3): 155-160.
- [31] 刘晓燕, 高云飞, 王略. 黄河主要产沙区近百年产沙环境变化. 人民黄河, 2016, 38(5): 1-5, 9-9.
- [32] 陈洪松, 邵明安, 李占斌. NaCl 对细颗粒泥沙静水絮凝沉降影响初探. 土壤学报, 2001, 38(1): 131-134.
- [33] 樊宝敏, 董源. 中国历代森林覆盖率的探讨. 北京林业大学学报, 2001, 23(4): 60-65.
- [34] 李宗善, 杨磊, 王国梁, 侯建, 信忠保, 刘国华, 傅伯杰. 黄土高原水土流失治理现状、问题及对策. 生态学报, 2019, 39(20): 7398-7409.
- [35] Zhu H X, Fu B J, Wang S, Zhu L H, Zhang L W, Jiao L, Wang C. Reducing soil erosion by improving community functional diversity in semi-arid grasslands. *Journal of Applied Ecology*, 2015, 52(4): 1063-1072.
- [36] Wang G Q, Wu B S, Wang Z Y. Sedimentation problems and management strategies of Sanmenxia Reservoir, Yellow River, China. *Water Resources Research*, 2005, 41(9): W09417.
- [37] 秦伟, 朱清科, 刘中奇, 卜楠, 安彦川. 黄土丘陵沟壑区退耕地植被自然演替系列及其植物物种多样性特征. 干旱区研究, 2008, 25(4): 507-513.
- [38] 李志, 刘文兆, 郑粉莉, 胡宏昌. 黄土塬区气候变化和人类活动对径流的影响. 生态学报, 2010, 30(9): 2379-2386.
- [39] Wang S J, Yan Y X, Yan M, Zhao X K. Quantitative estimation of the impact of precipitation and human activities on runoff change of the Huangfuchuan River Basin. *Journal of Geographical Sciences*, 2012, 22(5): 906-918.
- [40] Zhao G J, Mu X M, Jiao J Y, Gao P, Sun W Y, Li E H, Wei Y H, Huang J C. Assessing response of sediment load variation to climate change and human activities with six different approaches. *Science of The Total Environment*, 2018, 639: 773-784.
- [41] 王彦辉, 于澎涛, 张淑兰, 熊伟, 徐丽宏, 左海军, 王晓. 黄土高原和六盘山区森林面积增加对产水量的影响. 林业科学研究, 2018, 31(1): 15-26.
- [42] 师光玉, 赵红. 陕西省黄河流域泥沙流失变化分析. 水文, 2006, 26(2): 91-94.