

土地利用和气候变化对黄土区典型流域水沙变化的影响

马耘秀¹, 夏露¹, 范毅², 高艳艳²

(1.山西农业大学资源环境学院,山西农业大学农业资源与环境国家级实验教学示范中心,
山西 太谷 030801;2.山西省汾河上游水生态环境管理站,太原 030012)

摘要: 为了探究土地利用和气候变化对黄土高原地区水沙情势的影响,选择生态恢复效果非常显著的汾河上游岚河流域为研究区域,采用 Mann-Kendall 非参数检验法、滑动 t 检验法和 YAMAMOTO 指数法对该流域 1955—2018 年的年降水量、年径流量和年输沙量进行变化趋势分析和突变检验,在此基础上,利用径流/输沙历时曲线分析黄土高原生态恢复背景下流域水沙的演变规律,并根据双累积曲线法定量评价土地利用和气候变化对流域水沙变化的贡献程度。结果表明:岚河流域年降水量在 1955—2018 年期间呈现不显著的增加趋势,而同时期年径流量、年输沙量均呈现极显著的减少趋势,年均减少率分别为 0.65 mm 和 38.95 t/km²,并均在 1983 年和 1999 年附近发生突变,具有较好的水沙变化同步性。与基准期(1955—1982 年)相比,水土保持效应期(1983—1998 年)的年均径流量减少 29.07 mm,年均输沙量减少 5 917.88 t/km²,退耕还林效应期(1999—2018 年)两者相应减少 33.18 mm 和 6 967.34 t/km²,而分析径流和输沙历时曲线发现流域丰水期、平水期和枯水期径流量和输沙量均呈现减少趋势,且输沙量的减少程度大于径流量的减少程度。流域水土保持效应期土地利用变化对减水减沙的贡献率分别为 83.21% 和 83.52%,退耕还林效应期土地利用变化对减水减沙的贡献率分别为 117.88% 和 103.48%。由此可见,各时期土地利用变化是流域水沙变化的主导因素,而气候变化对流域水沙变化影响较小。在全球气候变化的大背景下,通过调整流域土地利用结构、优化土地利用方式,开展以植被恢复为主的水土保持措施,是实现黄土高原水土流失治理及生态保护的根本途径。

关键词: 土地利用; 气候变化; 径流; 输沙; 岚河流域

中图分类号: S157.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2021)02-0038-09

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbx.2021.02.006

Effects of Land-use and Climate Change on Runoff and Sediment Variation in Typical Watershed of the Loess Region

MA Yunxiu¹, XIA Lu¹, FAN Yi², GAO Yanyan²

(1.National Experimental Teaching Demonstration Center of Agricultural Resources and Environment, College of Resources and Environment, Shanxi Agricultural University, Taigu, Shanxi 030801;
2.Shanxi Water Ecological Environment Management Station of Fenhe Upstream, Taiyuan 030012)

Abstract: In order to explore the effects of land-use and climate change on the runoff and sediment of the area in Loess Plateau, the Lanhe River basin in the upper reaches of Fenhe River was selected as the study area, where the ecological restoration effect was very significant. Based on the annual precipitation data, the annual runoff data and the annual sediment data of the Lanhe River from 1955 to 2018, the hydrological trend and the abrupt change were studied by Mann-Kendall test, Sliding t -test, and YAMAMOTO Index method. The law of the runoff and sediment change was analyzed by flow and sediment duration curve method, and the contribution of land-use and climate change to the runoff and sediment variation was quantitatively researched by double accumulation curve method. The results indicated that: From 1955 to 2018, precipitation had insignificant increasing trend, while both runoff and sediment load had significant reduction trends, with average annual change rates of -0.65 mm and -38.95 t/km², respectively. Both of the runoff and sediment changed abruptly in 1983 and 1999 synchronously. Compared to the period 1 of base (1955—1982), the average annual runoff and sediment load in the period 2 of soil and water conservation (1983—1998)

收稿日期: 2020-09-15

资助项目: 山西省水利科学技术研究与推广项目(SZ—2020—24)

第一作者: 马耘秀(1979—),女,硕士,讲师,主要从事资源环境与可持续发展与土地利用研究。E-mail: myx01_01@126.com

decreased by 29.07 mm and 5 917.88 t/km² respectively, and in the period 3 of Grain for Green project (1999—2018), the amount of runoff and sediment load decreased by 33.18 mm and 6 967.34 t/km² respectively. The runoff and sediment load were analyzed by the duration curves, it was found that both of the runoff and sediment load showed a decreasing trend no matter in flood period, mean-flow period or in drought period, and the decreasing degree of sediment load was much greater than the changing degree of runoff. The contribution rates of land-use change to runoff and sediment reduction in the period 2 of soil and water conservation were 83.21% and 83.52% respectively in the basin, and they were 117.88% and 103.48% respectively in the period 3 of Grain for Green project. It can be seen that the change of land-use was the dominant factor of the variation of runoff and sediment in different periods, while climate change had little effect in the basin. Under the background of global climate change, soil and water conservation measures based on vegetation restoration should be carried out by adjusting the land-use structure and optimizing the land use mode in the basin, which is the fundamental approach to soil erosion control and ecological protection on the Loess Plateau.

Keywords: land use; climate change; runoff; sediment transport; Lanhe River basin

黄土高原是世界上水土流失最严重的地区,是我国生态问题集中体现的地区,也是我国水土保持和生态建设的重点地区^[1]。20 世纪 70 年代以来,黄河流域潼关以上干支流水沙量持续减少,2000 年以后减少更多,尤其是 2008 年以来急剧下降。黄土高原地区水沙演变规律及其成因分析越来越受到广泛关注。随着全球气候变暖,黄土高原地区气候也出现暖干化趋势^[2-4]。20 世纪 50 年代起,我国在黄土高原地区实施了大量的生物措施与工程措施,如防护林建设、退耕还林还草、小流域治理、坡耕地整治等,黄土高原地区的土地利用与土地覆被发生了显著变化。除流域取用水外,土地利用/覆被与气候变化是造成黄河流域水沙变化的重要原因。因此,在全球气候变化背景下,探究黄土高原径流泥沙对土地利用变化和气候变化的响应并分析其贡献程度,可以为区域生态恢复和适应性管理提供理论依据,为构建合理的流域土地利用方式、实施科学的水土流失治理措施提供参考。

目前,许多学者对黄河干支流水沙变化特征及其驱动因素进行大量的研究。冯家豪等^[5]对 1957—2018 年黄河中游 11 条典型支流径流时空变化特征及其驱动因素进行研究发现,坝库工程、引水灌溉、梯田林草等水利水保工程措施是黄河中游径流锐减的主要驱动力;刘二佳等^[6]通过对北洛河上游 1963—2009 年流域水沙演变趋势进行分析认为,水土流失综合治理和退耕还林还草工程实施等人类活动使流域出现一定程度上削洪补枯的水文效应特征;赵广举等^[7]对黄河中游皇甫川流域 1955—2010 年水沙变化特征进行分析认为,大规模的水土保持措施(如退耕还林还草、梯田建设、水库、淤地坝等工程)等人类活动是流域水沙锐减的主要影响因素;另外,蒋凯鑫等^[8]、姜泓旭等^[9]、马静等^[10]、孙倩等^[11]、赵阳等^[12]也分别对黄河中游干(支)流水沙变化进行归因分析,大部分研究结果均表明人类活

动是流域水沙变化的主控因素。

综上所述,人类活动对黄河流域水文情势变化起到较大的影响作用。人类活动主要是通过修建水利工程、生活生产取用水工程以及改变土地利用等方式改变流域产汇流和侵蚀产沙机制,但以往的相关研究对土地利用变化引起的水沙变化研究较少,仅有少量学者就土地利用变化对流域水文情势的影响进行研究^[13],例如,唐丽霞等^[14]对清水河流域 1959—2005 年径流变化进行分析认为,潜在蒸散发增加和乔木林地面积增加是该流域径流减少的重要原因,另外大部分研究多集中关注黄河中游右岸的干支流水文情势变化,而有关黄河中游左岸的干支流研究比较少见,且不同时空尺度下的水沙演变规律仍需进一步探讨。

汾河是黄河的第二大支流,也是黄河中游左岸最大的入黄支流,因此,汾河入黄水沙通量对黄河的水沙变化起着重要的作用。但是近 60 年来汾河流域水沙急剧减少,这不仅加剧汾河流域水资源的供需矛盾,而且也使黄河中下游可分配水资源显著减少^[15],那么汾河流域水沙变化的驱动机制究竟如何?这是亟待回答的问题,但是目前有关汾河流域水沙变化成因的研究还较为少见。位于汾河黄土区的岚河流域,土壤侵蚀严重,生态环境恶劣,是汾河流域主要的泥沙来源。岚河流域自上世纪 80 年代开始被选定为汾河重点治理区域,开展了近 40 年的以生态恢复为主的水土保持综合治理工作,目前岚河流域输沙情势得到有效的控制,但是径流量也出现大幅度减少的现象。因此,在该流域开展水沙变化驱动机制的研究对于揭示汾河流域水沙剧变乃至黄河流域的水沙变化具有很好的典型性和代表性。本文基于岚河流域 1955—2018 年水文气象及土地利用数据,分析降水、径流和泥沙的多年变化趋势和演变程度,定量评价土地利用和气候变化对水沙变化的影响,为流域生态恢

复与水资源开发利用提供合理的科学依据。

1 研究区概况

岚河,亦名岚州河,是汾河的一级支流,位于山西省岚县东南部(111°21′—111°25′ E,38°05′—38°31′ N),主源始于山西省岚县河口乡北马头山脚下,在下静游村汇入汾河,主河道长 57.6 km,平均比降 4.05‰。岚河流域面积 1 141 km²,属亚热带半干旱季风气候,多年平均降水量为 474 mm,多集中在 6—8 月,占年降水总量的 72%,且多以暴雨的形式出现,多年平均气温为 6.89 ℃。岚河流域地面海拔高度为 1 137~2 250 m,地形四周高中间低。流域按照地貌和土壤侵蚀特点可划分为 3 大类型区:黄土丘陵沟壑区、河川阶地区区和土石山区。其中黄土丘陵沟壑区占流域总面积的 47.9%,该区域内地形破碎,沟壑纵横,土壤侵蚀强烈,导致水土流失现象严重,是主要的产沙区;土石山区占流域总面积的 39.2%,而河川阶地区面积仅占 12.9%。

岚河流域水土保持治理大体可分为 4 个阶段:1983—1986 年,岚河流域水土流失治理进入初步治理阶段。1983 年岚县被列为省重点治理区域,岚河流域开始进行水土流失治理,主要措施有:兴修梯田、种植水保林、营造经济林和发展沟坝地等。1987—1997 年,第 1 期治汾工程实施。1987 年,山西省政府审议通过《汾河水库上游水土保持综合治理规划纲要》,决定从 1988 年开始对汾河水库上游水土流失进行综合治理,至 1997 年底,岚河流域通过机修梯田、植树造林等水土保持措施进行综合治理,治理面积达到 385.4 km²。1998—2007 年,第 2 期治汾工程实施。岚河流域在此期间,加大沟川地建设,不断优化调整沟川地种植结构,大面积开展坡耕地退耕还林,共完成水土保持治理面积 372.67 km²。2008 年至今,第 3 期治汾工程实施。岚河流域不断巩固退耕还林成果,并对滩地、沟坝地进行整治,改善基本农田。目前,岚河流域水土保持治理程度已达到 56%。

2 数据来源与研究方法

2.1 数据来源

2.1.1 降水数据 流域内共有普明、闫家沟、坪上、东土峪、白家庄、楼子、草城、上静游 8 个雨量站,各雨量站位置分布见图 1。上静游站是岚河流域出口的控制性水文站,建于 1954 年。其余 7 个雨量站均匀分布在该流域,且建站时间均在 20 世纪 50、60 年代,数据的时间长度满足分析所需。本文采用 8 个雨量站自建站以来的多年日降水量数据,由于这些雨量站均匀分布于岚河流域内,因此流域面降水数据通过各雨量站数据进行算术平均而推求。

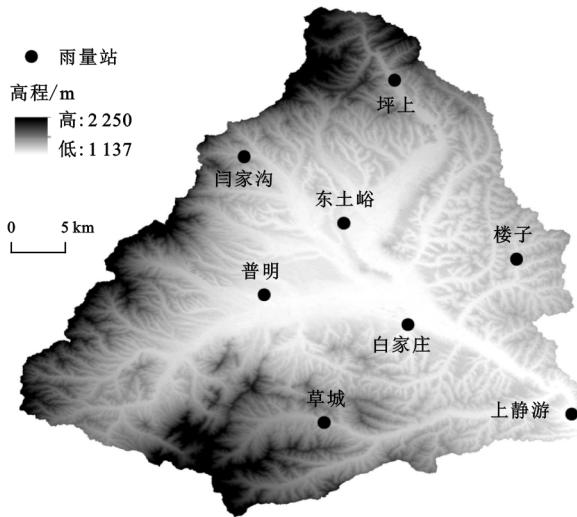


图 1 岚河流域水系及雨量站地理位置

2.1.2 径流、泥沙数据 上静游水文站是岚河流域下游的控制性水文站,位于东经 111°48′59″,北纬 38°09′59″。研究采用该站 1955—2018 年水文站实测日径流量、日输沙量数据。

以上降水、径流和泥沙数据均由山西省水文水资源勘测局及水文年鉴提供,并经过严格的反复验证和插补处理。

2.1.3 土地利用数据 为准确反映研究区土地利用变化,并与水文数据序列相结合,分别选择流域 1980 年、1990 年、2000 年、2010 年和 2018 年共 5 期土地利用数据(来源于国家地球系统科学数据共享服务平台),其中 1980 年和 1990 年数据分别代表流域水土保持治理前及初步治理后的土地利用状况,2000 年和 2010 年数据分别代表退耕还林开始年份及工程实施后的土地利用状况,2018 年数据代表现状土地利用情况。土地利用数据由 Landsat MSS/TM/OLI_TIRS 影像提取,采用监督分类的办法,通过室内解译与野外调查相结合的办法对遥感影像进行图像解译,最终将流域土地利用类型分为耕地、林地、草地、水域和建设用地 5 类。

2.2 研究方法

2.2.1 水文序列变化趋势分析 采用 Mann—Kendall 非参数趋势检验法评估流域径流输沙变化趋势。M—K 检验法的优点在于不需要样本遵循一定的分布特征,不受少量异常值的干扰,且计算较简便、量化程度高,是目前水文气象研究中常用的一种时间序列检验方法^[9]。

假设样本 $H(X_1, X_2, \dots, X_n)$ 为独立随机同分布的时间序列数据样本,定义 S 为 M—K 的检验统计量:

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

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

式中: $\operatorname{sgn}(x)$ 为符号函数,统计量 x 在样本容量 >10 的情况下假定为渐进正态, $\operatorname{var}(S)=n(n-1)(2n+5)/18$ 。标准正态统计量 Z :

$$Z=\begin{cases} (S-1)/\operatorname{var} & S>0 \\ 0 & S=0 \\ (S+1)/\operatorname{var} & S<0 \end{cases} \quad (3)$$

$Z>0$,表示序列有增加趋势; $Z<0$,则序列有减少趋势,当 Z 的绝对值 $\geq 1.28, 1.96, 2.32$ 时,序列趋势通过 90%,95%,99% 的显著性检验^[16]。

2.2.2 水文序列突变分析 采用滑动 t 检验、YAMAMOTO 指数法 2 种方法对岚河流域 1955—2018 年的年径流量和年输沙量进行突变检验,进行相互验证。

(1)滑动 t 检验。这种方法通过考察 2 组样本平均值的差异是否显著来检验突变,实质上是利用 t 检验法的原理,对序列逐点进行 t 检验。对于样本容量为 n 的某一序列 x ,如果其前后两端子序列 x_1 和 x_2 的均值差异 t 超过一定的显著性水平 t_α ,则认为序列前后发生突变^[14]。

令 μ, S_i^2 和 n_i 分别代表 x_i 的平均值、方差和样本长度,定义统计量 t :

$$t=\frac{(\bar{x}_1-\bar{x}_2)}{S_p\left(\frac{1}{n_1}+\frac{1}{n_2}\right)^{\frac{1}{2}}} \quad (4)$$

$$S_p^2=\frac{(n_1-1)S_1^2+(n_2-1)S_2^2}{n_1+n_2-2} \quad (5)$$

式中: S_p^2 是联合样本方差。

(2)YAMAMOTO 指数法。对于某一时间序列 X (样本容量为 n),通过设定某一基准点,则形成了 2 个前后子序列 X_1 (样本容量为 n_1)和 X_2 (样本容量为 n_2),令 $\bar{x}_i$ 和 s_i 分别代表 X_i 的平均值和标准差,信号和噪音比定义为^[17]:

$$R_{SN}=\frac{|\bar{x}_1-\bar{x}_2|}{s_1+s_2} \quad (6)$$

当 $R_{SN}>1.0$ 时,说明该样本序列在基准点发生了显著突变; $R_{SN}>2.0$ 时,说明该样本序列在基准点发生了强突变。

2.2.3 水沙变化的贡献率分析 采用双累积曲线法计算岚河流域 1955—2018 年的水沙变化主要驱动因素的贡献率。双累积曲线法是日前定量评价人类活动和气候变化对流域产水产沙的影响研究中最常用的科学方法之一^[8]。其通过对流域历史产水产沙过程(该历史时期人类的水土流失治理工程尚未开展)

进行分析,得出天然条件下流域的产水产沙规律,依此规律计算未受人类活动干扰情况下流域产水产沙模拟量,与流域产水产沙实测值(受到人类活动影响)进行比较,其差值即为人类活动对流域产水产沙的影响量。其步骤为:

设 ΔQ_T 为实测径流均值变化量,计算式为:

$$\Delta Q_T=\bar{Q}_2-\bar{Q}_1 \quad (7)$$

式中: $\bar{Q}_1$ 为基准期实测径流平均值; $\bar{Q}_2$ 为人类活动影响期实测径流平均值。

首先建立基准期累积径流量 ΣQ_1 与累积降水量 ΣP_1 的线性回归方程:

$$\Sigma Q_1=a \Sigma P_1+b \quad (8)$$

式中: a, b 为回归系数。

将人类活动影响期的 ΣP_2 代入式(8),计算天然条件下的累积径流量 $\Sigma Q'_2$,与同期实测累积径流量 ΣQ_2 进行对比,则可推求出由人类活动引起的径流变化量及相应的贡献率,最终可推求出由气候变化引起的径流变化量及相应的贡献率。

岚河流域由于水利工程较少,人类取用水量也较小,流域内的人类活动主要是通过土地利用变化对水沙过程产生重要影响,因此本研究直接利用双累积曲线法定量评价土地利用变化和气候变化对岚河流域水沙变化的影响。

3 结果与分析

3.1 流域土地利用变化分析

在整个研究期内,耕地、林地和草地是岚河流域主要的土地利用类型,这三者面积之和占流域总面积的 95%以上(表 1)。1980 年耕地占总面积的 35.81%,草地占 37.30%,林地占 25.96%。1980—2018 年期间,岚河流域耕地面积减少 19.32%,草地减少 7.41%,而林地增加 21.70%,建设用地增加 497.51%。从不同阶段来看,1980—2000 年,流域耕地减少 2.08%,草地减少 4.81%,林地增加 7.87%,建设用地增加 68.04%;2000—2018 年,耕地减少 17.61%,草地减少 2.73%,而林地增加 12.83%,建设用地增加 255.58%。综上可见,岚河流域土地利用总体变化规律为:耕地和草地面积日趋减少,而林地和建设用地面积逐年增加,且 2000 年后流域土地利用变化幅度较大。

岚河流域土地利用变化的驱动原因主要是流域内实施大规模的水土保持综合治理。1988 年以来,岚河流域先后实施皇姑梁水土保持综合治理、岚河整治工程、龙凤水土保持综合治理、白龙山流域水土保持综合治理、扣锅峁水土保持综合治理、茅龙山水土保持综合治理等项目,流域水土保持措施主要是以植被恢复为主的生物措施,包括植树造林、封

禁治理、退耕还林等,另外工程措施主要包括修建水平梯田。这些项目的实施,改变流域土地利用结构,导致土地利用覆被发生变化,从而对流域的水沙情势产生重要影响。

表 1 岚河流域不同时期土地利用变化

土地利用 类型	面积/km ²					面积变化率/%		
	1980 年	1990 年	2000 年	2010 年	2018 年	1980—2018 年	1980—2000 年	2000—2018 年
耕地	408.62	408.73	400.13	359.03	329.68	-19.32	-2.08	-17.61
林地	296.20	312.73	319.50	348.03	360.48	21.70	7.87	12.83
草地	425.63	407.59	405.16	408.57	394.08	-7.41	-4.81	-2.73
水域	1.32	0.90	0.70	1.85	1.62	22.73	-46.97	131.43
建设用地	9.23	11.05	15.51	23.52	55.15	497.51	68.04	255.58

3.2 流域水文要素变化趋势与突变分析

图 2 为岚河流域 1955—2018 年降水量、径流量和输沙量的变化趋势图。根据流域 1955—2018 年水文统计分析结果,流域多年平均径流量为 42.86 mm,其中,1955—1999 年期间年径流量均值为 49.45 mm,2000 年后年均值为 27.25 mm。1955—2018 年期间多年输沙模数均值为 3 368.77 t/km²,其中,1955—1999 年期间年输沙模数均值为 4 773.49 t/km²,2000 年后均值为 27.25 t/km²。另外,根据 M—K 检验结果,近 60 年来流域年降水量 Z 值为 0.776 3,表明降水量在研究期内存在着不显著的增加趋势,年均增加 4.31 mm;径流量和输沙量 Z 统计值分别为-4.623 3,-7.010 3,均呈现极显著减少趋势($P<0.01$),年均分别减少 0.65 mm 和 38.3 t/km²。在年降水量增加的趋势下,年径流量和输沙量

不减反降,可能的原因是因为流域实施了多年的水土保持治理,减小了流域产水产沙量。

滑动 t 检验分析结果见图 3。流域年径流量可能于 1982 年和 1998 年发生 2 次突变,而年输沙量于 1984 年和 1999 年发生 2 次突变,水沙突变的时间非常一致。另外,YAMAMOTO 指数法检验结果(图 4)表明,年径流量的突变时间出现在 1983 年和 1998 年左右,年输沙量的突变时间出现在 1984 年和 1999 年左右,这 2 种方法的检验结果非常接近。上世纪 80 年代初,岚河流域开始进行大规模的水土流失综合治理;1999 年,退耕还林工程开始实施,进一步加快了流域治理步伐。岚河流域治理阶段与其年径流量和输沙量的 2 个突变时间相对应,这进一步验证了岚河流域年径流量和年输沙量在 1983 年和 1999 年附近发生突变的可靠性。

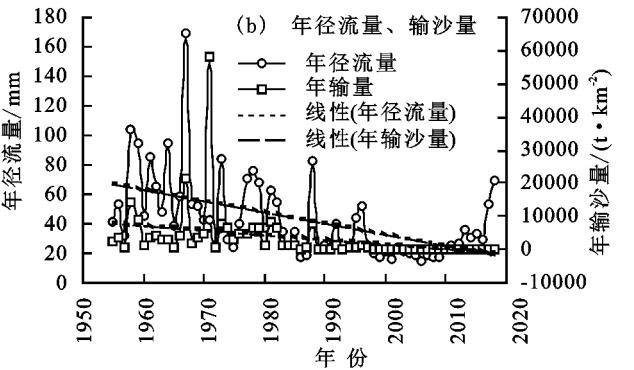
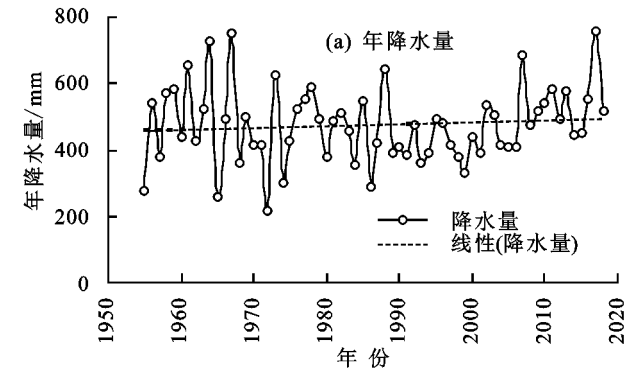


图 2 岚河流域年降水量、径流量和输沙量变化趋势

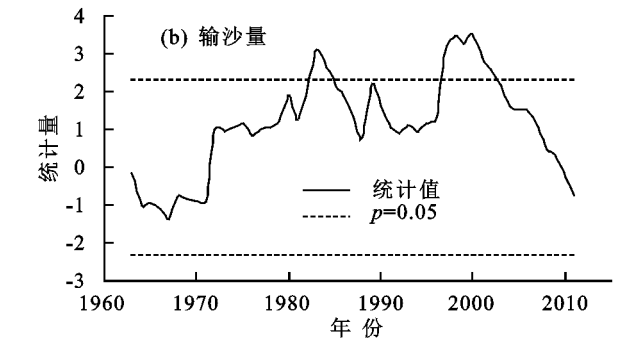
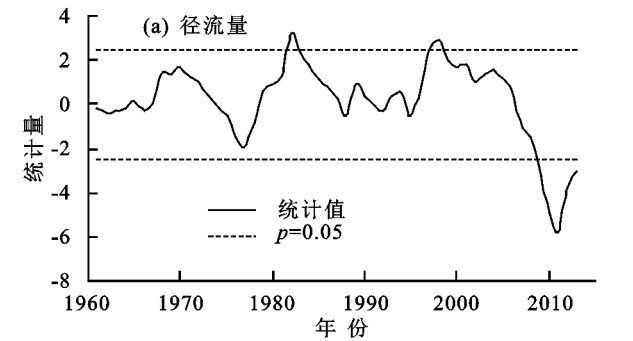


图 3 岚河流域年尺度的径流量、输沙量滑动 t 检验

3.3 水文要素演变程度分析

根据 3.2 节的水沙突变分析结果,本研究将岚河流域水沙序列分为基准期(1955—1982 年)、水土保持

持效应期(1983—1998 年)和退耕还林效应期(1999—2018 年)3 个阶段来分析其演变程度,不同时段的水文特征值见表 2。与基准期比,水土保持效应期年降水量均值、极值比和离散系数分别降低 11.26%, 37.04%和 28.57%,退耕还林效应期降水量均值增加 6.65%,但极值比和离散系数进一步减少 45.30%和 35.71%。总体来看,流域年径流量和年输沙模数的均值、极值比和离散系数 3 个统计特征值基本呈现出逐阶段下降趋势。其中,基准期年径流量均值为

60.43 mm,而水土保持效应期和退耕还林效应期年径流量均值分别下降到 31.36,27.25 mm。1955—1982 年期间年输沙模数均值为 7 009.13 t/km², 1983—1998 年期间该值下降为 1 091.25 t/km²,而 1999 年后年输沙模数均值仅为 41.79 t/km²。另外,年输沙模数在退耕还林效应期出现较大的极值比,这是因为流域 2014 年输沙模数仅为 0.30 t/km²,尽管退耕还林效应期年输沙模数处于较低的一个状态,但由于该输沙极小值过小,导致该阶段极值比过大。

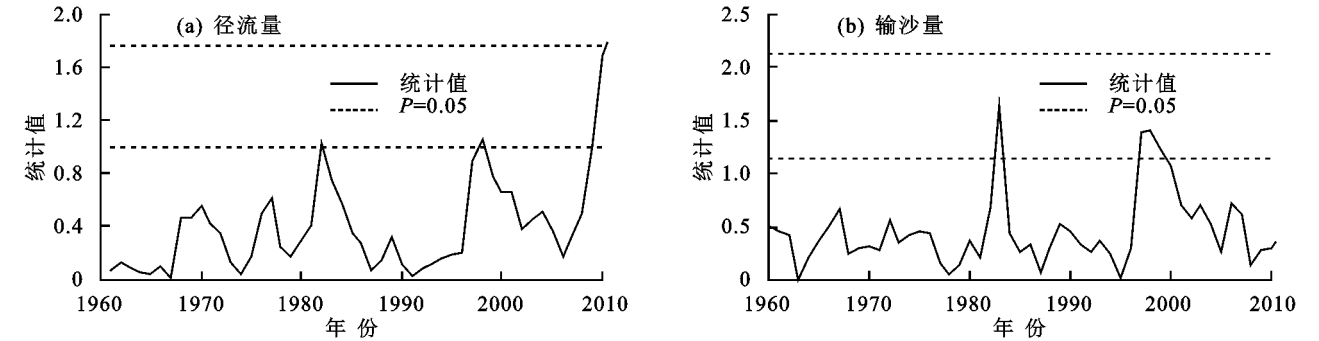


图 4 岚河流域年尺度的径流量、输沙量 YAMAMOTO 突变检验

表 2 流域水文气象要素的年际统计特征值

水文要素	基准期(1955—1982 年)			水土保持效应期(1983—1998 年)			退耕还林效应期(1999—2018 年)		
	均值	极值比	离散系数	均值	极值比	离散系数	均值	极值比	离散系数
年降水量/mm	478.88	3.51	0.28	424.94	2.21	0.20	510.72	1.92	0.18
年径流深/mm	60.43	6.94	0.50	31.36	4.79	0.52	27.25	4.81	0.50
年输沙模数/(10 ³ t·km ⁻²)	7.01	129.26	1.56	1.09	67.90	1.60	0.04	490.00	1.04

为了进一步揭示流域不同阶段的水沙情势变化规律,本研究利用岚河流域 1955—2018 年逐日径流输沙数据绘制日径流历时曲线和日输沙历时曲线(图 5)。结果表明,无论是丰水期(5%)、平水期(50%)还是枯水期(95%),流域径流量均逐阶段减少。与基准期相比,水土保持效应期使径流量减少程度分别达 61.7%,42.9%和 25.5%,而退耕还林生态建设则使径流量分别减少 61.0%,31.9%和 20.5%。

另外,流域输沙量在不同频率条件下也呈现显著减少的趋势。与基准期相比,水土保持效应期使得流域输沙模数在丰水期、平水期、枯水期分别减少 89.3%,100%和 100%,而退耕还林生态建设使流域输沙模数进一步分别减少 95.5%,100%以及 100%。这表明流域水土保持治理在本流域产生了一定的削洪效应,同时降低了流域侵蚀产沙能力,且效果越来越明显。

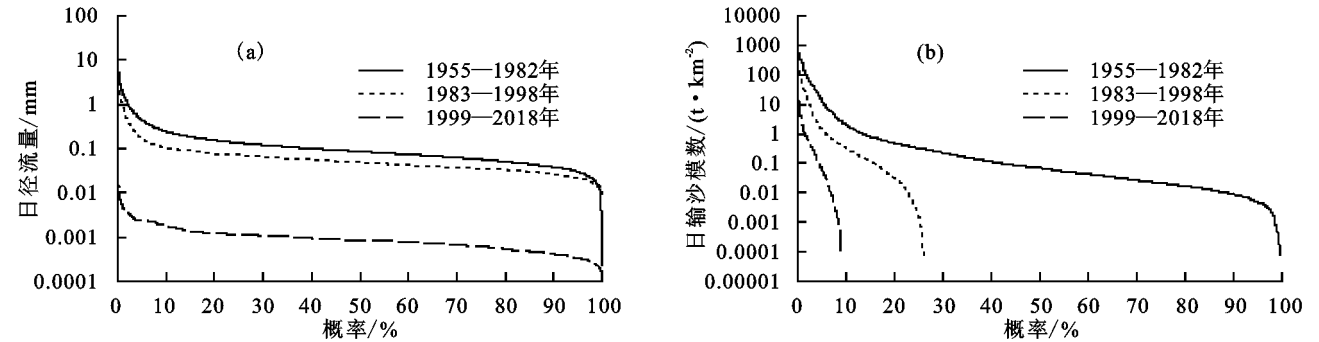


图 5 岚河流域上静游水文控制站不同时段日径流量、日输沙模数历时曲线

3.4 气候和土地利用变化影响水沙变化的定量分析

通过构建相应的双累积曲线,拟合年降水量—年径流深和年降水量—年输沙模数关系(图 6),并计算气候变化和土地利用变化对岚河流域水沙变化的贡献率。由表 3 可知,水土保持效应期土地利用变化的

减水减沙贡献率分别为 83.21%和 83.52%,气候变化的贡献率分别为 16.79%和 16.48%;退耕还林效应期土地利用的减水减沙贡献率分别为 117.88%和 103.48%,气候变化的贡献率分别为 -17.88%和 -3.48%,说明气候变化对水沙减少起到负作用。综上所述,各时期

土地利用变化是流域水沙变化的主导因素,而气候变

化对流域减水减沙的影响较小。

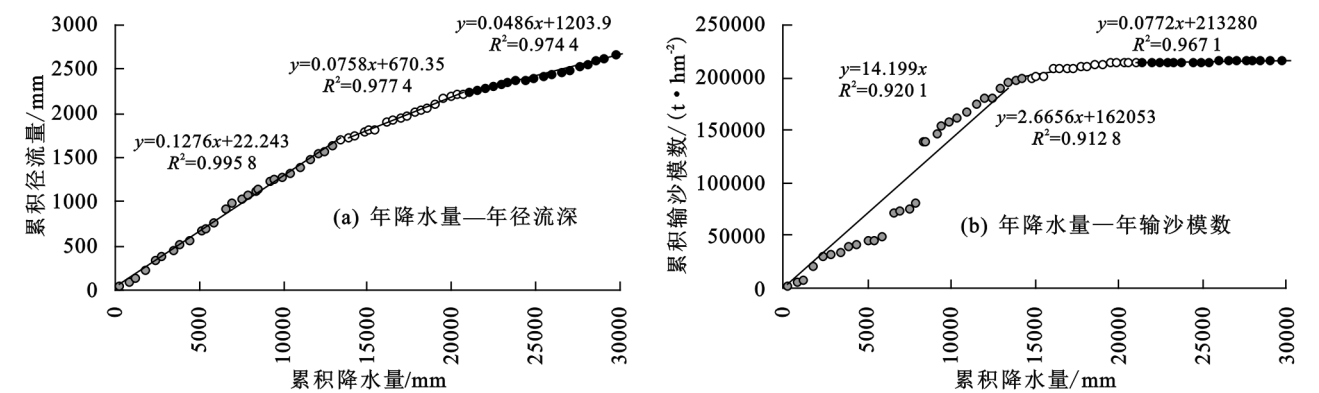


图 6 年降水量与年径流深、年输沙模数双累积曲线

表 3 气候变化和土地利用变化对岚河流域径流量、输沙量的影响

时段	径流量				输沙模数			
	实测值/	模拟值/	降水	土地利用变化	实测值/	模拟值/	降水	土地利用
	mm	mm	影响/%	影响/%	(10 ³ t·km ⁻²)	(10 ³ t·km ⁻²)	影响/%	变化影响/%
基准期	60.43				7.01			
水土保持效应期	31.36	55.55	16.79	83.21	1.09	6.03	16.48	83.52
退耕还林效应期	27.25	66.36	-17.88	117.88	0.04	7.25	-3.48	103.48

4 讨论

4.1 气候变化对流域水沙的影响

通常情况下,气候变化主要通过降水、气温等因素的变化导致水沙情势发生相应改变,降水量的变化可直接改变径流的补给来源,从而引起流域径流量发生变化,而气温的变化则通过影响蒸发量间接影响径流量。本文主要通过分析降水变化来反映气候变化对岚河流域水沙变化的影响,结果表明,岚河流域 1983—1998 年期间,降水变化对年径流量和年输沙量的影响呈正效应,其贡献率分别为 16.79% 和 16.48%,即降水量的减少在一定程度上带来径流量和输沙量的减小,这是因为黄河中游河川径流的补给来源主要来自于降水,流域内降水减少直接作用于产流过程,而产沙量也由于降水侵蚀力及径流输沙能力的减弱而减少;1999—2018 年期间,降水变化对流域年径流量和年输沙模数的影响呈负效应,其贡献率分别为 -17.88% 和 -3.48%,这并非说明降水量与径流量和输沙量呈反比关系,而是由于这一时期岚河流域降水量呈不显著增加趋势,而降水量的增加导致流域径流量和输沙量的增加,对于径流输沙总体减少的趋势呈现负贡献作用。本文在分析气候变化对流域水沙的影响中,仅将降水量作为气候变化的表征因子,没有考虑气温、潜在蒸散发等气象因子的影响。因此,在未来的研究中将进一步综合分析各气象因素变化对水沙变化的影响。

4.2 土地利用变化对流域水沙的影响

人类活动如水利工程、取用水工程、土地利用变

化等,会对流域水沙变化产生重要影响。水利工程如水库、坝体等对流域径流泥沙有直接的拦蓄调节作用,而日益增长的人类需水量也极大地影响着流域的水沙情势。岚河流域自上世纪 80 年代初即开展大规模的植树造林、机修梯田等水土流失综合治理,导致下垫面土地利用和覆被发生较大的变化,而流域水利工程措施较少,取用水量也很小。根据水文突变分析结果,流域年径流量和年输沙量的 2 个突变时间(1983 年和 1999 年)和流域的 2 个生态恢复阶段相对应,因此可以认为岚河流域人类活动主要是通过土地利用变化对水沙过程产生影响。

根据水沙变化归因分析结果,1983—1998 年期间流域土地利用变化导致年径流量、年输沙模数减少,其贡献率分别为 83.21% 和 83.52%。这一时期,流域土地利用变化主要是通过造林、机修梯田等措施,较大幅度地影响流域产水输沙过程。1999—2018 年期间,土地利用变化对减少年径流量的贡献率为 117.88%,对减少年输沙模数的贡献率为 103.48%,贡献率均超过 1,而同期气候变化对水沙的贡献率为负值,意味着降水量的增加对流域径流量和输沙量减少产生负效应,而土地利用变化消除了这种负效应,并进一步对流域径流量和输沙量减少产生巨大影响。这一时期,流域土地利用变化主要是通过退耕还林、封禁治理等生态恢复措施,改变降水分配条件,使更多的降水资源转化为绿水(蒸散发),而剩下较少的部分则转化成蓝水(径流)^[18],从而进一步影响流域产水输沙过程。

4.3 与其他水沙变化归因研究结果的对比

根据本文研究结果,岚河流域水文情势突变年份为 1983 年和 1999 年,土地利用变化是岚河流域水沙锐减的主要原因。近年来,关于黄河流域水文情势变化归因分析的研究成果大多也表明人类活动越来越成为流域水沙变化的主导因素(表 4),但其贡献率结果由于学者方法、数据年限的不同也存在着一定差异。目前,有学者也开展有关汾河上游径流变化规律的研究,胡彩虹等^[19]对汾河水库上游 1956—2004 年

径流变化进行分析发现,汾河水库上游径流在 1982 年发生突变,且水土保持措施对径流减少的贡献率为 87.1%,这与本文结论较一致,但可能由于该研究径流数据时间序列仅到 2004 年,数据时间序列较短,并未发现 1999 年这一突变年份;王国庆等^[20]对岚河流域 1955—2015 年径流变化归因进行识别认为,人类活动是岚河流域径流减少(突变年份为 2000 年)的主要影响因素,其贡献率为 76.1%,其突变及归因分析结果与本文的研究结果均非常接近。

表 4 人类活动与气候变化对汾河流域径流量变化贡献率部分研究成果

引用文献	研究区	时段/a	突变年份	减水贡献比例		减沙贡献比例	
				气候变化 贡献/%	人类活动/土地利用 变化贡献/%	气候变化 贡献/%	人类活动/土地利用 变化贡献/%
王国庆等 ^[20]	岚河流域	1969—2015	2000	23.90	76.10	—	—
王登等 ^[15]	汾河流域	1956—2012	1971	16.29	88.57	—	—
胡彩虹等 ^[19]	汾河水库上游	1956—2004	1982	12.90	87.10	—	—
亢小语等 ^[21]	昕水河流域	1955—2015	1985	25.89	74.11	—	—
			2001	0.37	99.63	—	—
冷曼曼等 ^[22]	昕水河流域	1985—2015	1974	73.14	26.86	—	—
			2000	—3.81	103.81	—	—
刘二佳等 ^[6]	北洛河上游	1963—2009	1979	61.80	38.20	48.60	51.40
			2002	25.30	74.70	13.30	86.70
赵广举等 ^[7]	皇甫川流域 河口—龙门区间	1955—2010	1979	25.80	74.20	32.30	67.70
姜泓旭等 ^[9]	孤山川	1965—2014	1979	21.88	79.12	13.55	86.45
	河口—龙门区间		1996	14.52	85.48	12.55	87.45
冯家豪等 ^[5]	头道拐—龙门区间 龙门—潼关区间	1957—2018	1969	51.88	48.12	—	—
			1987	22.78	77.22	—	—
			1969	25.77	74.23	—	—
			1987	14.55	85.45	—	—

5 结 论

(1)通过分析岚河流域多年土地利用变化特征可知,该流域耕地和草地面积总体呈减少趋势,而林地面积呈明显增加趋势,这主要是由于流域内大规模的水土保持生态建设改变了流域下垫面的土地利用格局。

(2)岚河流域 1955—2018 年间多年平均径流深为 42.86 mm,多年输沙模数均值为 3 368.77 t/km²。近 60 年来,流域年降水量呈现不显著的增加趋势,而径流量和输沙量呈现极显著减少趋势,表明流域水沙变化应该受到土地利用变化的较大影响。根据突变分析结果,流域年径流量和年输沙量均在 1983 年和 1999 年附近发生 2 次突变,这与流域实施的大规模生态恢复治理的 2 个阶段非常吻合。

(3)流域不同阶段日径流量和日输沙量历时曲线表明,与基准期(1955—1982 年)相比,水土保持效应

期(1983—1998 年)和退耕还林效应期(1999—2018 年)均表现出良好的削洪效应,同时降低了流域侵蚀产沙能力。但各治理措施均未表现出一定的补枯效应,未来需要进一步探索流域流量补给机制,为解决季节性河流枯水期干涸问题提供理论依据。

(4)岚河流域水土保持效应期土地利用变化的减水减沙贡献率分别为 83.21%和 83.52%,退耕还林效应期土地利用的减水减沙贡献率分别为 117.88%和 103.48%。气候变化对流域减水减沙的影响较小,而各时期土地利用变化是流域水沙变化的主导因素。

参考文献:

[1] 刘国彬,上官周平,姚文艺,等.黄土高原生态工程的生态成效[J].中国科学院院刊,2017,32(1):11-19.
[2] 姚玉璧,王毅荣,李耀辉,等.中国黄土高原气候暖干化及其对生态环境的影响[J].资源科学,2005,27(5):146-152.

- [3] 徐宗学,隋彩虹.黄河流域平均气温变化趋势分析[J].气象,2005,31(11):7-10.
- [4] 刘晓清,赵景波,于学峰.黄土高原气候暖干化趋势及应对策略[J].干旱区研究,2006,23(4):627-631.
- [5] 冯家豪,赵广举,穆兴民,等.黄河中游区干支流径流变化特征与归因分析[J].水利水电学报,2020,39(8):90-103.
- [6] 刘二佳,张晓萍,谢名礼,等.生态恢复对流域水沙演变趋势的影响:以北洛河上游为例[J].生态学报,2015,35(3):622-629.
- [7] 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.
- [8] 蒋凯鑫,于坤霞,曹文洪,等.黄土高原典型流域水沙变化归因对比分析[J].农业工程学报,2020,36(4):143-149.
- [9] 姜泓旭,田鹏,穆兴民,等.不同时间尺度孤山川流域水沙关系变化及驱动因素[J].水土保持学报,2020,34(2):86-92,215.
- [10] 马静,顾志刚,孙一,等.秃尾河流域水沙突变及其驱动因素[J].中国农村水利水电,2020(2):11-15,22.
- [11] 孙倩,于坤霞,李占斌,等.黄河中游多沙粗沙区水沙变化趋势及其主控因素的贡献率[J].地理学报,2018,73(5):945-956.
- [12] 赵阳,胡春宏,张晓明,等.近 70 年黄河流域水沙情势及其成因分析[J].农业工程学报,2018,34(21):112-119.
- [13] 郭军庭,张志强,王盛萍,等.气候和土地利用变化对潮河流域产流产沙的影响[J].农业工程学报,2012,28(14):236-243.
- [14] 唐丽霞,张志强,王新杰,等.晋西黄土高原丘陵沟壑区清水河流域径流对土地利用与气候变化的响应[J].植物生态学报,2010,34(7):800-810.
- [15] 王登,荐圣淇,胡彩虹.气候变化和人类活动对汾河流域径流情势影响分析[J].干旱区地理,2018,41(1):25-31.
- [16] 张盛霖,邓高燕,黄勇奇.Mann-Kendall 检验法在 Excel 中的实现与应用[EB/OL].(2014-06-27).http://www.paper.edu.cn/releasepaper/content/201406-448.
- [17] 陈立华,冷刚,王焰,等.西江流域控制站洪峰洪量极值特征变化分析[J].水利水电技术,2020,51(6):30-39.
- [18] 夏露,宋孝玉,符娜,等.黄土高原沟壑区绿水对土地利用和气候变化的响应研究:以南小河流域为例[J].水利学报,2017,48(6):678-688.
- [19] 胡彩虹,管新建,吴泽宁,等.水土保持措施和气候变化对汾河水库入库径流贡献定量分析[J].水土保持学报,2011,25(5):12-16.
- [20] 王国庆,张建云,鲍振鑫,等.人类活动和气候变化对岚河流域河川径流的影响[J].灌溉排水学报,2019,38(6):113-118.
- [21] 亢小语,张志强,陈立欣,等.黄土高原中尺度流域基流变化驱动因素分析[J].自然资源学报,2019,34(3):563-572.
- [22] 冷曼曼,张志强,于洋,等.昕水河流域径流变化及其对气候和人类活动的响应[J].水土保持学报,2020,34(3):113-119,128.
- [26] 林慧龙,郑舒婷,王雪璐.基于 RUSLE 模型的三江源高寒草地土壤侵蚀评价[J].草业学报,2017,26(7):11-22.
- [27] Li C B, Wang L M, Wang W R, et al. An analytical approach to separate climate and human contributions to basin streamflow variability[J].Journal of Hydrology,2018,559:30-42.
- [28] 康琳琦.青藏高原 1980—2009 年土壤侵蚀量的估算与比较[D].成都:四川农业大学,2017.
- [29] 李元寿,王根绪,王军德,等.¹³⁷Cs 示踪法研究青藏高原草甸土的土壤侵蚀[J].山地学报,2007,25(1):114-121.

(上接第 37 页)

- [22] 蔡崇法,丁树文,史志华,等.应用 USLE 模型与地理信息系统 IDRISI 预测小流域土壤侵蚀量的研究[J].水土保持学报,2000,14(2):19-24.
- [23] 王万忠,焦菊英.中国的土壤侵蚀因子定量评价研究[J].水土保持通报,1996,16(5):1-20.
- [24] 曹巍,刘璐璐,吴丹.三江源区土壤侵蚀变化及驱动因素分析[J].草业学报,2018,27(6):10-22.
- [25] 甄英,李永飞,何静.川西北高原甘孜州地区降水变化特征及旱涝研究[J].水土保持研究,2019,26(6):191-197.