

DOI: 10.5846/stxb201304100658

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.

Liu E J, Zhang X P, Xie M L, Chen N, Zhang T T, Guo M J, Zhang J J. Hydrologic responses to vegetation restoration and their driving forces in a catchment in the Loess hilly-gully area: a case study in the upper Beiluo River. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(3): 622-629.

生态恢复对流域水沙演变趋势的影响 ——以北洛河上游为例

刘二佳^{1,3}, 张晓萍^{1,2,*}, 谢名礼², 陈妮², 张亭亭², 郭敏杰^{1,3}, 张建军^{1,3}

1 中国科学院水利部水土保持研究所, 黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 杨凌 712100

2 西北农林科技大学资源环境学院, 杨凌 712100

3 中国科学院研究生院, 北京 100049

摘要: 黄土高原生态环境恶劣, 水土流失严重。选择退耕还林(草)程度非常显著的陕北吴旗县所在北洛河上游为研究区, 探讨黄土高原丘陵沟壑区水土流失治理及大幅度退耕背景下流域水、沙等生态要素的演变规律, 分析人类活动的影响贡献程度, 为黄土高原生态治理及环境效应分析提供理论依据。结果表明: 在 1963—2009 年期间年降雨量没有显著变化背景下, 同时期流域年径流量和年输沙量均呈现极显著减少趋势, 年均减少率分别为 0.28 mm/a 和 180 t km⁻² a⁻¹, 其突变时间均发生在 1979 和 2002 年, 具有很好的同步性。与 1979 年前相比, 20 世纪 70—80 年代水土流失综合治理以及 1999 年后退耕还林(草)的事件背景, 使汛期和平水期径流量逐时段减少, 而枯水期径流量反而持续增加。输沙量呈持续性大幅度减少态势, 且其减少程度远大于径流量的变化程度。水土流失综合治理和退耕还林(草)工程实施等人类活动, 对流域径流量减少的影响贡献程度分别为 38.2% 和 51.4%, 对输沙量减少的影响程度分别为 74.7% 和 86.7%。研究结果提示, 黄土高原生态环境的大幅度改善在区域尺度上已经表现出一定程度上削洪补枯的水文效应特征, 以及林草措施减水更减沙的良好生物治理效果。

关键词: 径流/输沙演变特征; 生态恢复; 影响贡献率; 黄土丘陵沟壑区

Hydrologic responses to vegetation restoration and their driving forces in a catchment in the Loess hilly-gully area: a case study in the upper Beiluo River

LIU Erjia^{1,3}, ZHANG Xiaoping^{1,2,*}, XIE Mingli², CHEN Ni², ZHANG Tingting², GUO Minjie^{1,3}, ZHANG Jianjun^{1,3}

1 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 Water Resources, Yangling 712100, China

2 College of Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling 712100, China

3 Graduate University of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract: The Loess Plateau in China is characterized by a heavily dissected landscape and severe soil erosion. To fully understand the impacts of soil conservation measures and vegetation restoration on streamflow, sediment load and runoff-sediment behaviors, hydrologic data over 47 years (1963 to 2009) in the upper reaches of the Beiluo River (drainage area of 3408 km²) are assessed. The Beiluo is a secondary tributary of the Yellow River, and has had substantial vegetation restorative effects on the Loess Plateau. Based on the Mann-Kendall trend test, Pettit statistical test and flow duration curve (FDC), the daily streamflow and sediment load at Wuqi hydrological station, which is the maximum control station in the

基金项目: 国家自然科学基金(41101265)

收稿日期: 2013-04-10; 网络出版日期: 2014-04-03

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

upper reaches of the Beiluo River, was chosen to investigate temporal change and evolution characteristics. Precipitation data and rainfall erosion force were interpolated using tessellation polygons from five representative meteorological stations on the Loess Plateau. A dual mass curve and empirically-based hydrological modeling method were also used to estimate the response of streamflow and sediment load to climate change and human activities. The results indicate that: (1) In the past 50 years, under a background of precipitation with no significant trend, both streamflow and sediment load had significant negative trends ($P < 0.01$), with average annual rates of $-0.28 \text{ mm km}^{-2} \text{ a}^{-1}$ and $-180 \text{ t km}^{-2} \text{ a}^{-1}$, respectively. Under the influence of soil conservation measures that have been applied on the Loess Plateau since the 1960s, there were change points in 1979 and 2002. Thus, the entire study period was divided into a period 1 of base (1963—1979), period 2 of comprehensive harness of soil and water conservation (1980—2002), and period 3 of the Grain for Green project (2003—2009). (2) The FDC showed that, compared with period 1, streamflow in period 2 for 5% and 50% decreased by 17.0% and 5.2%, respectively, while it increased by 94.2% for 95%. Suspended sediment load decreased more significantly, with 34.6% and 40.1% for 5% and 50%, respectively, and no suspended sediment days remained almost constant for 95%. Period 3 saw more remarkable changes in both streamflow and suspended sediment load. For 5% and 50%, streamflow decreased by 40.2% and 26.8%, respectively, while suspended sediment load decreased by 95.7% and 96.8%, respectively. For 95%, streamflow rose by 128.1%, and no sediment days increased. The reduction of sediment load was greater than that of streamflow, with the periods altered and negative changes of sediment load. (3) Compared with period 1, streamflow and sediment load decreased by $0.10 \times 10^8 \text{ m}^3$ (3 mm) and $0.04 \times 10^8 \text{ t}$ ($1408 \text{ t km}^{-2} \text{ a}^{-1}$) in period 2. It was estimated that human activities accounted for 38.2% and 51.4% of the changes of streamflow and sediment load, respectively. In period 3, there was a greater reduction in both streamflow and sediment load, with $0.52 \times 10^8 \text{ m}^3$ (15.2 mm) and $0.33 \times 10^8 \text{ t}$ ($9683.1 \text{ t km}^{-2} \text{ a}^{-1}$), respectively, with effects reaching 74.7% and 86.7%. Great improvement in the ecological environment of the Loess Plateau has already demonstrated the advantages of biological treatments on a regional scale in reducing flood volumes, and compensating streamflow.

Key Words: streamflow and sediment load change; ecological restoration; contribution ratio; loess hill-gully area

黄土高原生态环境脆弱、水土流失严重,深刻影响着区域生态安全和社会经济发展^[1]。为保障生态安全,近 50 多年来持续不断开展了水土流失综合治理,1999 年国家更开始了大规模退耕还林(草)工程。黄土高原植被覆盖经历了持续增加期(1981—1989 年)、相对稳定期(1990—1998 年)、迅速下降期(1999 年—2001 年)、迅速上升期(2002—2006 年),致使 21 世纪初期生态环境大幅改善^[2-3],生态效应正在呈现。在拦蓄地表径流泥沙^[4-5],降低产流次数,增加径流时空分布均匀性,减少高含沙水流发生频率等方面起到了积极作用^[6-8]。另一方面,黄土高原经受着降水量减少、低温上升的干旱化过程^[9-11]。气候变化和人类活动的综合影响,深刻影响着黄土高原地区流域径流汇集和泥沙输移等生态过程^[12-13],径流量和泥沙量均显著减少^[14-15]。由于黄土高原流域土地利用/覆被结构、格局变化对水沙影响的复杂性和多样性,生态恢复背景下的水沙响应机理和规律仍需进一步探讨。

北洛河上游吴旗县域所在地,是典型黄土丘陵沟壑区,也是黄河下游粗泥沙集中来源区。1999 年积极响应国家退耕还林(草)政策,生态环境建设取得了重大成绩,吴旗县成为“全国退耕还林第一县”^[16]。该区水沙变化过程对植被恢复响应的研究具有很好典型性。本文通过分析径流、输沙要素的演变趋势,对比其阶段特征,估算人类活动对径流量和输沙量变化的贡献率,以期服务于区域生态环境效应评价和生态建设合理决策。

1 研究区概况

北洛河(面积 25154 km^2),流经陕、甘两省共 19 个县(市),于陕西大荔县注入渭河,黄河的二级支流,其

上游吴旗水文站控制部分(图1),位于东经 $107^{\circ}38'57''$ — $108^{\circ}32'49''$ 、北纬 $36^{\circ}33'33''$ — $37^{\circ}24'27''$ 之间,总面积为 3408 km^2 ,是黄土高原典型丘陵沟壑区,地形破碎、沟壑纵横,山高坡陡,河长 275 km ,主河道平均比降 1.6% 。暖温带半干旱气候,多年平均降雨 418 mm (1963—2009 年),汛期占年降雨量的 71.8% ,多暴雨。土层深厚,以黄绵土为主要土壤类型,抗蚀性差,是黄河中游产、输沙模数较高的多沙粗沙地区^[6]。为了遏制严重的水土流失,流域从 20 世纪 60 年代开展了大规模的水土流失综合治理,2004 年底,共修建淤地坝 95 座,控制面积为 21.6% ^[17],经过近年来持续开展的生态建设,该区已经形成了以落叶阔叶林及灌木草丛为主的次生植被。

2 数据来源与研究方法

2.1 数据来源

采用了吴旗(金佛坪)水文站 1963—2009 年水文站实测日流量、日含沙量数据,其中吴旗站缺 1968 年数据。采用周边定边、吴旗、志丹、华池和环县 5 个气象站点日降雨数据,通过泰森多边形获得流域的面降雨量和降雨侵蚀力^[18]。径流和输沙数据由黄河水利委员会及水文年鉴提供,相应时期的日降雨数据则来源于国家气象局数据共享网站。数据经过严格的反复验证和插补处理。

2.2 研究方法

2.2.1 Pettit 突变检验

采用 Pettit 非参数检验法^[19-21]确定突变发生的确切时间。其原理:利用 Mann-Whitney 的统计量 $U_{t,N}$ 来对同一个总体的两个样本进行检验。统计量 $U_{t,N}$ 的通过下式计算:

$$U_{t,N} = U_{t-1,N} + \sum_{j=1}^N \text{sgn}(x_t - x_j) \quad (1)$$

式中, j 和 $t=2, \dots, N$ 。令 $x_j - x_k = \theta$, 则 $\text{sgn}(\theta)$ 值由下式确定:

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

检验中的统计量 K_t 和相关概率的显著性检验的计算公式分别如下:

$$K_t = \text{Max}_{1 \leq t \leq N} |U_{t,N}| \quad (3)$$

$$p \cong 2 \exp \{ -6(K_N^2) / (N^3 + N^2) \} \quad (4)$$

2.2.2 人类活动对水沙变化影响程度估算

流域所处地理位置不同,导致其所受大气环流模式和气候类型存在一定的差异,最终影响流域的产水产沙量及其时空特征。日益增强的人类活动,通过改变径流组分和能量分布而影响了产水输沙过程。区分这两大因素对流域产水输沙变化量的贡献率,有助于理解黄土高原地区水土保持和退耕还林(草)背景下的生态水文过程,对治理措施进行合理布设和优化。双累积曲线法、修正系数法、水文法是近年来文献中经常使用的估算气候变化和人类活动影响程度的方法。本文使用 3 种方法,便于相互印证估算结果。

(1) 双累积曲线法,要求两变量发生于同一物理过程,具有因果关系。采用累积降雨量(累积降雨侵蚀力)-累积径流深(累积输沙量)的曲线斜率进行判断,曲线斜率发生转折,就认为人类活动改变了流域下垫面的产流和侵蚀产沙水平^[22]。设 ΔQ_T 为前后期实测径流均值变化量,计算式为:

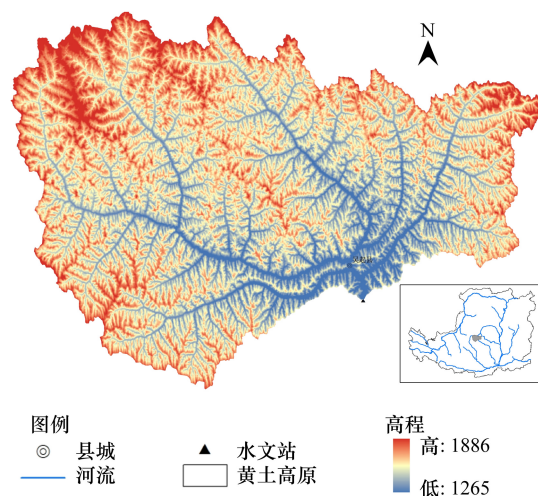


图1 北洛河上游流域位置

Fig.1 The geographic location of the upper reaches of Beiluo River and study area

$$\Delta Q_T = \overline{Q_2} - \overline{Q_1} \quad (5)$$

式中, $\overline{Q_1}$ 、 $\overline{Q_2}$ 分别为前、后期实测径流平均值。

通过双累积曲线方法分析因素影响贡献率时,首先对基准期(第一时期)累积降雨量 $\sum P_1$ 与累积径流量 $\sum Q_1$ 进行回归:

$$\sum Q_1 = k \sum P_1 + b \quad (6)$$

式中, k 、 b 为回归系数。

然后,将措施期(第二时期)的累积降雨量 $\sum P_2$ 代入(6)式,计算下垫面未改变情况下的累积径流量 $\sum Q'_2$,反推逐年理论径流量 Q' ,与同期实测径流量 Q_2 比较,两系列均值之差即为人类活动引起的径流变化量 ΔQ_H ,公式为:

$$\Delta Q_H = Q'_2 - \overline{Q_2} \quad (7)$$

人类活动影响贡献率即为 $\Delta Q_H / \Delta Q_T \times 100\%$,气候变化影响贡献率为 $(1 - \Delta Q_H / \Delta Q_T) \times 100\%$ 。

同理,使用降雨侵蚀力,可以估算气候变化和人类活动对输沙量变化程度的贡献率。

(2)修正系数法,核心是基于降雨量-产流量关系曲线,确定选定降雨量下基准期和措施期径流深的比值^[23]。基准期和措施期降雨产流关系式如下:

$$Q_1 = k_1 P_1 + b_1 \quad (8)$$

$$Q_2 = k_2 P_2 + b_2 \quad (9)$$

通过(8—9)式,某降雨条件下的修正系数 α_Q ,是该降水量下基准期和措施期的径流量之比:

$$\alpha_Q = Q'_1 / Q'_2 \quad (10)$$

建立 P - α_Q 曲线,查措施期降雨量对应的修正系数,与对应的实测径流量之积,为人类活动未改变条件下的年径流量理论值。措施期实测径流量均值与理论均值之差即认为是人类活动造成的径流变化量(ΔQ_H),与实测径流均值变化量(ΔQ_T)之比,即为人类活动影响贡献率。

同理可以估算出人类活动对输沙变化影响贡献率。

(3)水文法,即经验公式法,是水土保持减水减沙效应计算中常用的方法^[24]。

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径流量。估算值和实测值的均值之差即为人类活动引起的变化量,占基准期和措施期径流均值变化量的比例,即为人类活动影响贡献程度。

同理,采用降雨侵蚀力-输沙量关系式,可以估算人类活动对输沙变化影响贡献率。

3 结果分析

3.1 流域水文气象要素变化趋势性及阶段性

北洛河上游流域的降雨量、径流量和输沙量变化趋势如图 2 所示,趋势检验结果如表 1 所示。近 50 年来,流域降雨量存在着不显著的减少趋势,径流量和输沙量则呈现 0.01 水平的极显著减少趋势,20 世纪 60 年代径流量均值为 34.3 mm,2000 年后径流量均值为 18.9 mm。年输沙模数 20 世纪 60 年代均值为 $13.9 \times 10^3 \text{ t/km}^2$,2000 年后为 $3.5 \times 10^3 \text{ t/km}^2$ 。M-K 检验表明,1963—2009 年的年降雨量年均变率为 -1.23 mm/a ,径流量和输沙模数年均变率分别为 -0.28 mm/a 、 $180 \text{ t km}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 。

Pettit 分析表明,95%置信水平上,年降水量无突变发生。年径流量和输沙量的突变时间均发生于 2002 年,且分别达到 0.05 和 0.01 的显著水平,如图 3 所示。Man-Kendall 的突变分析结果如图 4 所示,从图上可以看出径流量在 1981 年和 2002 年左右发生了两次明显的减少性突变,而输沙量于 1979 年和 2004 年发生了突变。从这两个要素的突变趋势来看,流域输沙量的突变时间与径流量基本保持了高度一致性。

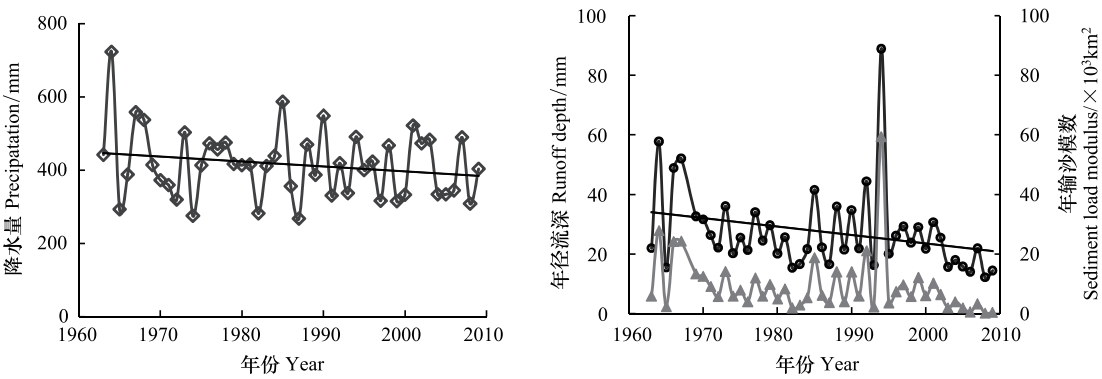


图 2 北洛河上游吴旗站控制区年降水量、径流量、输沙量变化趋势
Fig.2 The trend of annual precipitation, runoff and sediment

表 1 流域水文气象要素趋势检验

Table 1 Results of trend tests for precipitation, runoff depth, sediment load modulus in catchment

方法 Mean	降雨量 Precipitation		径流深 Runoff depth		输沙模数 Sediment load modulus	
	统计值 Statistic	显著性 Significance	统计值 Statistic	显著性 Significance	统计值 Statistic	显著性 Significance
Spearman	-0.151	NS	-0.39	**	-0.45	**
Mann-Kendall	-1.12	NS	-2.78	**	-3.09	**

NS: 不显著; **: $P < 0.01$ 的显著性

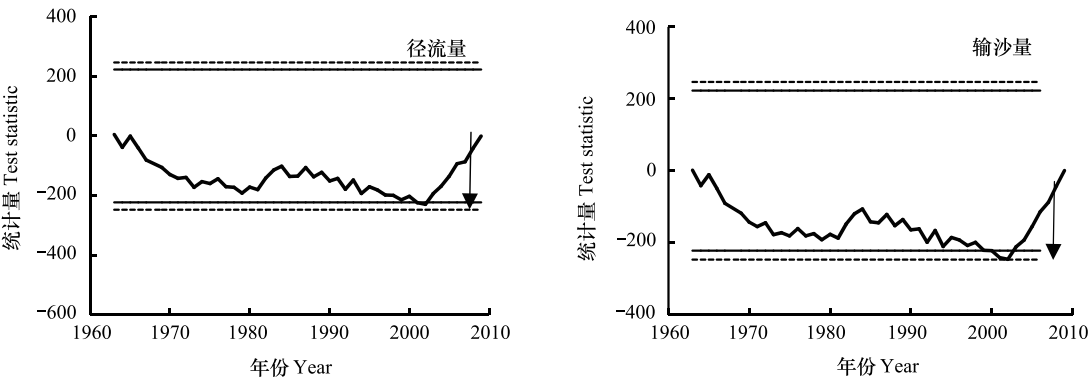


图 3 北洛河上游吴旗控制区径流量和输沙量 Pettit 突变性检验
Fig.3 Pettit test for detecting changes of annual runoff and sediment

“---”表示 5%显著性,“—”表示 10%显著性

—— UB - - - - UF - - - - 0.05信度线

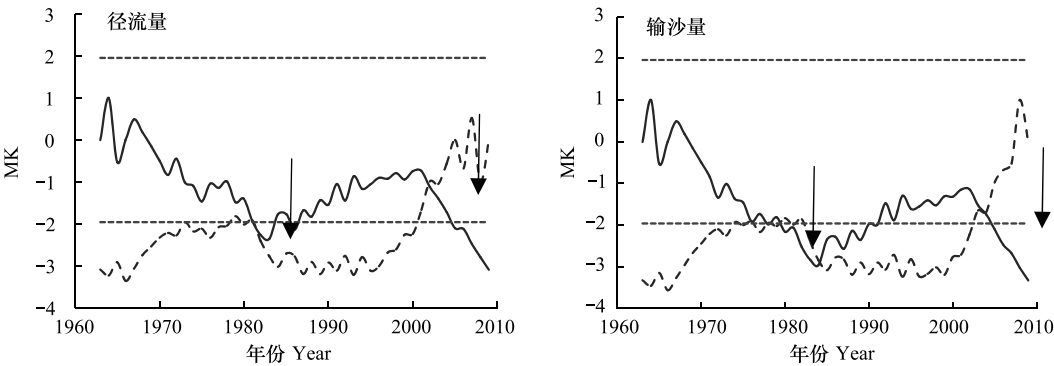


图 4 北洛河上游吴旗控制区径流量和输沙量 Mann-Kendall 突变性检验
Fig.4 Mann-Kendall abrupt change of annual runoff and sediment

3.2 水文气象要素演变程度

参考黄土高原地区水土流失治理进程,考察流域径流量和输沙量原序列分布特征,以及其他研究结果^[25-27],将本研究数据序列分为基准期(1963—1979),水土保持效应期(1980—2002)和退耕还林效应期(2003—2009)三时段来分析其演变程度。

三阶段年降水量、年径流深和年输沙模数变异程度如表 2 所示。与基准期比,年降水量均值、极值比和离散系数在 1980—2002 年的水土保持效应期减少或减弱了 5.0%、16.5%和 18.5%,退耕还林期进一步减少了 10.4%、39.8%和 23.5%。相应地,年径流量和年输沙模数均值呈逐阶段下降趋势,而其极值比和离散系数却在第二阶段的水土保持效应期表现最大。这是由于 1994 年 8 月 30—31 日吴旗、志丹地区受到百年一遇暴雨的影响,虽然年降水量仅为 490 mm,年径流深却高达 88 mm,输沙模数达到 59325 t/km²,对阶段极值比和离散系数统计产生了极大影响。

流量或输沙历时曲线,可以用图示方法全面展示阶段流量或输沙的情势特征。用日径流量和日输沙量构建流域不同阶段流量历时曲线和输沙历时曲线,如图 5 所示。与基准期相比,丰水期(5%)和平水期(50%)径流量呈逐阶段减少趋势,且减少程度逐渐增大。水土流失治理结果使径流量分别减少了 17.0%、5.2%,而退耕还林效应则使径流量减少程度分别达 40.2%、26.8%。枯水期(95%)径流量则表现出相反效应,与基准期比较,水土流失的治理,使枯水径流量增加了 94.2%,而退耕还林建设则使枯水径流量进一步增大了 128.1%。同时输沙量呈逐阶段显著减少趋势。与基准期比,水土保持综合治理使得丰水期、平水期、枯水期年输沙模数分别减少了 34.6%、40.1%和 100%,而退耕还林生态建设使其进一步分别减少了 95.7%、96.8%以及 100%。上述结果表明,水土保持措施及生态措施治理,在本流域逐步表现出了削洪和补枯的良好生态效应,同时减少了流域侵蚀和河道输沙,且效果越来越明显。

表 2 流域水文气象要素的年际统计特征值

Table 2 Annual statistical values of hydrological and meteorological factors during 1963—1979, 1980—2002, 2003—2009

水文要素 Hydrological factors	第一阶段(1963—1979) Period 1			第二阶段(1980—2002) Period 2			第三阶段(2003—2009) Period 3		
	均值 Mean value	极值比 Extremes ratio	离散系数 Dispersion coefficient	均值 Mean value	极值比 Extremes ratio	离散系数 Dispersion coefficient	均值 Mean value	极值比 Extremes ratio	离散系数 Dispersion coefficient
	年降水量/mm	430.1	2.6	0.25	408.8	2.2	0.21	385.3	1.6
年径流深/mm	31.2	3.7	0.39	28.2	5.8	0.54	16.0	1.8	0.20
年输沙模数/(10 ³ t/km ²)	11.5	12	0.67	10.1	32	1.17	1.7	23	0.85

第一阶段:基准期;第二阶段:水土保持效应期;第三阶段:退耕还林效应期

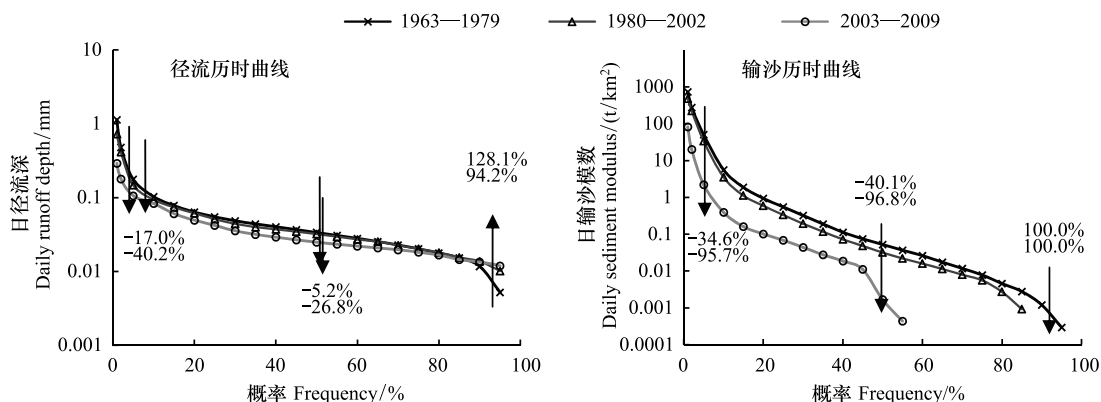


图 5 北洛河上游吴旗水文控制站不同时段日径流深、日输沙模数历时曲线

Fig.5 Duration curves of runoff and sediment during 1963—1979, 1980—2002, 2003—2009

3.3 气候变化和人类活动的影响程度分析

采用双累积曲线法、修正系数法、水文法估算的人类活动对流域径流、输沙变化的贡献程度如表 3 所示。三种方法都是在建立基准期(受人类活动影响较小的时期)降雨量-径流量和降雨侵蚀力-输沙量关系基础上,通过措施期实测的水沙量与实际气候条件对应的估算水沙量的差异,来推求水土保持措施和退耕还林(草)工程实施对水沙变化的影响幅度,从而反映了人类活动对水沙变化的贡献率。3 种方法相互印证,使获取结果更加可靠。人类活动对水沙变化影响程度的估算以修正系数法最大,而后一时期则以双累积曲线法估算结果最大,原因可能是拟合方程函数的差异导致。

表 3 人类活动对流域径流量、输沙量变化的影响程度估算

Table 3 The impacts of climate change and human activities on runoff and sediment

时段 Period	人类活动对径流的影响/% The impacts of human activities on runoff				人类活动对输沙的影响/% The impacts of human activities on sediment			
	修正系数法 Correcting coefficient	双累积曲线 Dual mass curve	水文法 hydrological modeling	平均 Mean	修正系数法 Correcting coefficient	双累积曲线 Dual mass curve	水文法 hydrological modeling	平均 Mean
1980—2002	46.9	35.7	31.9	38.2	78.8	48.6	26.8	51.4
2003—2009	76.0	76.3	71.8	74.7	87.7	94.3	78.2	86.7

1963—1979 年,年均径流量为 $1.06 \times 10^8 \text{ m}^3$ (31.2mm),年均输沙量为 $0.39 \times 10^8 \text{ t}$ ($11540 \text{ t km}^{-2} \text{ a}^{-1}$)。1980—2002 年水土保持措施实施,多年平均径流量为 $0.96 \times 10^8 \text{ m}^3$ (28.2mm),年均输沙量为 $0.35 \times 10^8 \text{ t}$ ($10132 \text{ t km}^{-2} \text{ a}^{-2}$)。20 多年水土流失综合治理结果,使年均径流量减少了 $0.10 \times 10^8 \text{ m}^3$ (3 mm),其中人类活动对其贡献程度为 38.2%。年均输沙量减少了 $0.04 \times 10^8 \text{ t}$ ($1408 \text{ t km}^{-2} \text{ a}^{-1}$),其中人类活动对其贡献了 51.4%。

2003—2009 年,退耕还林(草)工程措施对环境改善发挥重大作用,多年平均径流量为 $0.54 \times 10^8 \text{ m}^3$ (16.0mm),年均输沙量为 $0.06 \times 10^8 \text{ t}$ ($1731 \text{ t km}^{-2} \text{ a}^{-1}$)。6a 中生态治理效应显著,较 1963—1979 年的基准期年均径流量减少了 $0.52 \times 10^8 \text{ m}^3$ (15.2mm),其中人类活动对其贡献程度为 74.7%。年均输沙量减少了 $0.33 \times 10^8 \text{ t}$ ($9683.1 \text{ t km}^{-2} \text{ a}^{-1}$),其中人类活动对其贡献了 86.7%。

虽然人口的增加,城镇化的发展,以及大规模的开采资源是径流量和输沙量增加的重要原因,但是大面积的植被恢复对流域产流过程中的削洪补枯以及大幅度减少侵蚀和河道输沙应该起到了关键作用。

4 结果与讨论

本文以黄土丘陵沟壑区退耕还林程度最大的北洛河上游为研究对象,利用该流域 1963—2009 年的降雨量、流量、输沙率数据,对流域的径流量及输沙量的变化规律进行了分析,结果表明:

(1) Mann-Kendal 趋势检验法和 Pettit 突变检验表明,1963—2009 年降水量未呈现显著的趋势性变化,径流、输沙从 1979 年和 2002 年开始突变性减少。

(2) 历时曲线分析结果可知,径流量在高流量减少幅度大,分别为 17.0% 和 40.2%,输沙量在常流量降低幅度大,分别减少 40.1% 和 96.8%。在人类活动的综合作用下,2003—2009 年减少的幅度大于 1980—2002 年。

(3) 水土保持效应气候变化和人类活动均引起的径流量减少,但是贡献率不同,各占 61.8% 和 38.2%,在减沙方面,气候变化和人类活动的影响分别占 25.3% 和 74.7%;退耕还林期的径流量衰减中气候变化和人类活动的影响各占 48.6% 和 51.4%。对于此时段输沙量的减少,气候变化和人类活动的影响各占 13.3% 和 86.7%。

上述的 3 种方法只是分离了降水与非降水要素的减水减沙效应,并未考虑温度升高而引起的蒸散发的增加,最终结果可能高估了人类活动的贡献率。同时,在现实情况中,降雨等气候条件具有周期性变化,前期人

类活动对降雨-径流(输沙)之间关系的扰动可能导致计算结果不够精确。

参考文献(References):

- [1] 饶素秋, 霍世青, 薛建国, 张永平, 孙艾芳. 黄河上中游水沙变化特点分析及未来趋势展望. 泥沙研究, 2001, (2): 74-77.
- [2] 张宝庆, 吴普特, 赵西宁. 近 30a 黄土高原植被覆盖时空演变监测与分析. 农业工程学报, 2011, 27(4): 287-293.
- [3] 信忠保, 许炯心. 黄土高原地区植被覆盖时空演变对气候的响应. 自然科学进展, 2007, 17(6): 770-778.
- [4] 刘成, 王兆印, 隋觉义. 黄河干流沿程水沙变化及其影响因素分析. 水利水电科技进展, 2008, 28(3): 1-7.
- [5] 高成德, 余新晓. 水源涵养林研究综述. 北京林业大学学报, 2000, 22(5): 78-82.
- [6] 冉大川, 柳林旺. 黄河中游河口镇至龙门区间水土保持与水沙变化. 郑州: 黄河水利出版社, 2000: 105-200.
- [7] 廖建华, 许炯心, 杨永红. 黄土高原区高含沙水流发生频率空间分异及其影响因素. 水科学进展, 2008, 19(2): 160-170.
- [8] 傅伯杰, 邱扬, 王军, 陈利顶. 黄土丘陵小流域土地利用变化对水土流失的影响. 地理学报, 2002, 57(6): 717-722.
- [9] 李振朝, 韦志刚, 文军, 符睿. 近 50 年黄土高原气候变化特征分析. 干旱区资源与环境, 2008, 22(3): 57-62.
- [10] 姚玉璧, 王毅荣, 李耀辉, 张秀云. 中国黄土高原气候暖干化及其对生态环境的影响. 资源科学, 2005, 27(5): 146-152.
- [11] 陈隆勋, 朱文琴, 王文, 周秀骥, 李维亮. 中国近 45 年来气候变化的研究. 气象学报, 1998, 56(3): 257-271.
- [12] 翟禄新. 近 50a 来中国西北气候变化及其水文响应分析 [D]. 兰州: 兰州大学, 2008.
- [13] 许炯心, 孙季. 水土保持措施对流域泥沙输移比的影响. 水科学进展, 2004, 15(1): 29-34.
- [14] 穆兴民, 巴桑赤烈, Zhang L, 高鹏, 王飞, 张晓萍. 黄河河口镇至龙门区间来水来沙变化及其对水利水保措施的响应. 泥沙研究, 2007, (2): 36-41.
- [15] 付艳玲. 近 50 年来黄河中游典型流域水沙变化趋势分析 [D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2010.
- [16] 杨光, 丁国栋, 赵廷宁, 孙保平. 黄土丘陵沟壑区退耕还林的水土保持效益研究——以陕西省吴旗县为例. 水土保持通报, 2005, 26(2): 20-23.
- [17] 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, 47(11): 1325-1332.
- [18] 章文波, 谢云, 刘宝元. 利用日雨量计算降雨侵蚀力的方法研究. 地理科学, 2002, 22(6): 705-711.
- [19] Yue S, Cavadias G. Power of the Mann-Kendall and Spearman's RHO tests for detecting monotonic trends in hydrological series. Journal of Hydrology, 2002, 259(1): 254-271.
- [20] Pettit A N. A non-parametric approach to the change-point problem. Applied Statistics, 1979, 28(2): 126-135.
- [21] 符淙斌, 王强. 气候突变的定义和检测方法. 大气科学, 1992, 16(4): 482-493.
- [22] 张守红, 刘苏霞, 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): 161-169.
- [23] Smakhtin V U. A Concept of Pragmatic Hydrological Time Series Modeling and Its Application in South African Context // Proceedings of the Ninth South African National Hydrology Symposium. Pretoria, 1999: 1-11.
- [24] 陈小红, 刘美南, 胡荣轩. 黄河中游区水沙时空分布及衰减分析. 水文, 1997, (1): 19-23.
- [25] 袁希平, 雷廷武. 水土保持措施及其减水减沙效益分析. 农业工程学报, 2004, 20(2): 296-300.
- [26] 高鹏, 穆兴民, 李锐, 王伟. 黄河支流无定河水沙变化趋势及其驱动因素. 泥沙研究, 2009, (5): 22-28.
- [27] 张晓萍, 张槽, 王勇, 穆兴民. 黄河中游地区年径流对土地利用变化时空响应分析. 中国水土保持科学, 2009, 7(1): 19-26.