

不同时间尺度岔巴沟流域水沙关系变化

康靖羚¹, 丁文峰^{1,2}, 韩昊宇¹, 郭宜薇¹, 王一帆¹

(1.长江水利委员会长江科学院, 武汉 430010; 2.水利部山洪地质灾害防治工程技术研究中心, 武汉 430010)

摘 要:为探究岔巴沟流域不同时间尺度下水沙关系变化及影响因素,根据岔巴沟流域 1970—2016 年的年降雨量、径流量和输沙量数据,以及 106 场次洪水事件的降雨、径流和输沙数据,采用 Mann-Kendall 检验法对年尺度水沙数据的变化趋势和突变点进行了分析,并通过函数模型回归方法研究年时间尺度以及次洪水时间尺度下的水沙关系。结果表明:流域降雨量显著增加,径流量和输沙量显著下降,分别于 1986 年、1991 年、2001 年以及 1982 年发生突变;将研究时期划分为 3 个阶段,发现次洪水尺度下降雨量和输沙量的变化趋势与年尺度下一致,径流量的变化趋势则相反;输沙量在两种时间尺度下均与洪峰流量和径流深呈显著的幂函数关系;岔巴沟流域水沙关系和影响因素变得复杂,主要与淤地坝和植被恢复等措施产生的水土保持效益以及极端降雨事件频率和强度增加等因素有关。

关键词:水沙关系; 时间尺度; 次洪水事件; 输沙量; 岔巴沟流域

中图分类号:P333

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2021)05-0081-07

Relationship Between Runoff and Sediment on Different Time Scales in Chabagou Watershed

KANG Jingling¹, DING Wenfeng^{1,2}, HAN Haoyu¹, GUO Yiwei¹, WANG Yiran¹

(1.Changjiang River Scientific Research Institute, Wuhan 430010, China; 2.Research Center on Mountain Torrent & Geologic Disaster Prevention of Ministry of Water Resources, Wuhan 430010, China)

Abstract: To further reveal the changes of relationship between runoff and sediment and its influencing factors on different time scales in Chabagou watershed, based on the data of annual precipitation, runoff and sediment discharge, rainfall, runoff and sediment discharges in 106 times floods events from 1970 to 2016, the change trend and abrupt change points of runoff and sediment discharge on inter-annual scale, runoff-sediment relationships on inter-annual scale and on flood event scale were analyzed by using the non-parameter Mann-Kendall test method and functional model regression method. The results showed that annual precipitation in Chabagou watershed increased significantly, while runoff and sediment discharge had decreased significantly from 1970 to 2016, and the abrupt change points were detected in 1986, 1991 and 2001, and 1982, respectively. The change trends of precipitation and sediment discharge on flood event scale were consistent with the change trends of precipitation and sediment discharge on inter-annual scale, while the change trend of runoff on flood event scale was opposite with inter-annual scale. The study period was divided into three different research periods: 1970—1981, 1982—2000 and 2001—2016 according to the abrupt changing points. The relationships of both the flood peak discharge and runoff depth with sediment discharge on two time scales were significantly described by power function. The runoff and sediment relationship and its influencing factors were complexed in Chabagou watershed, which was mainly related to the benefits of soil and water conservation measures such as check dams and vegetation restoration, and the increase of frequency and intensity of extreme rainfall.

Keywords: runoff and sediment relationship; time scale; flood event; sediment discharge; Chabagou watershed

收稿日期:2020-10-24

修回日期:2020-11-16

资助项目:国家重点研发计划项目(2019YFC1510705, 2017YFC1502500);长江科学院中央级公益性科研院所基本科研业务费(CKSF2019185/TB)

第一作者:康靖羚(1996—),女,山西忻州人,硕士研究生,主要从事水土保持及流域侵蚀产沙与调控方面研究。E-mail:411453449@qq.com

通信作者:丁文峰(1975—),男,河南汝州人,教授级高工,主要从事土壤侵蚀与水土保持、土地资源与环境方面的研究。E-mail:dingwf@mail.crsri.cn

黄河是我国的第二大河,华夏民族在此繁衍生息,孕育出了古老灿烂的中华文明。长期以来,强烈的人为活动以及全球气候变化等因素导致出现水少沙多、水沙异源等问题,水沙关系极不协调^[1],黄土高原已成为我国土壤侵蚀最严重的地区^[2]。鉴于水土流失的严重性,自 20 世纪 50 年代以来,我国政府将黄河流域治理作为全国水土保持工作的重点,开展了一系列生态治理工程,合理开发利用土地资源,有效控制水土流失。20 世纪末期,经过治理的黄土高原小流域示范区水土流失治理度由 46.1% 增加至 80.2%,综合治理成效显著^[3]。2000 年,全国陆续启动了“退耕还林”等生态工程,植被覆盖率迅速增加^[4],截至 2015 年,黄河中游的水土流失治理度已达 60%^[5]。潼关控制站实测年均输沙量也从 20 世纪前半叶的 15.92 亿 t 减少到 2000—2018 年的 2.4 亿 t,其中 2015 年实测沙量仅有 0.55 亿 t^[1,6]。

河流输沙量作为水土流失的集中反映,已成为全球水沙关系研究的重要内容,也是间接研究流域土壤侵蚀产沙的主要手段。由于大理河地处黄河中游粗泥沙集中来源区^[7],作为大理河的一级支流,岔巴沟流域成为研究黄土丘陵沟壑区土壤侵蚀以及水沙关系的理想区域^[8],此地区长期的观测数据也为研究提供了良好基础,了解岔巴沟流域水沙关系及其变化趋势和影响因素对治理黄土丘陵沟壑区乃至黄土高原的水土流失具有重要意义。对岔巴沟流域的相关研究从 20 世纪 80 年代就已经开始,目前为止许多学者在此流域对输沙量变化展开研究,并在流域面积与水沙关系的空间变异性^[9-11]、不同空间尺度下的泥沙量或泥沙浓度^[12-14]、各类流域产沙模型^[15-19]以及泥沙动力学等^[20-21]方面取得许多成果。但大多数研究侧重于不同空间尺度下的水沙关系及模型建立,对不同时间尺度下的流域水沙关系研究较少。本文通过分析岔巴沟流域 1970—2016 年的径流泥沙变化规律,探讨年时间尺度以及次洪水时间尺度下流域水沙关系变化趋势和影响因素,以期为流域水沙模型建立提供依据。

1 研究区概况

岔巴沟流域位于陕西省子洲县,属于黄土高原丘陵沟壑区第一副区,地处东经 109°47′,北纬 37°31′。流域面积 205 km²,沟壑密度 1.05 km/km²,主沟比降 7.57‰,海拔高度 900~1 100 m^[22]。属半干旱区,为温带大陆性季风气候,干燥少雨,降雨年内分配不均,大部分集中于 6—9 月,且多是高强度短历时暴雨^[23]。

岔巴沟流域土壤由黄土发育而成,结构疏松,易受侵蚀^[21]。早在 1959 年,岔巴沟流域的水土流失治理工作就已开始,70 年代后,流域内大量水库、淤地坝建成,并逐渐发挥效益,至 1977 年末,所修建库坝数量达 444 座,总库容 2 651 万 m³。至 1980 年,岔巴沟流域治理面积已达 30.7 km²,占总面积的 15%^[23]。截至 1993 年,水土保持治理程度已达到 70% 以上^[19]。90 年代后期,岔巴沟流域响应国家号召,开展了大规模的水土保持工作,生态环境明显好转^[24]。

2 数据来源及处理

2.1 数据来源

本文所用数据资料出自《黄河流域水文年鉴》,包括雨量站降水数据以及水文站径流和泥沙数据(1970—2016 年)。本次研究选择 4 个测站,分别为和民塬站、刘家峁站、姬家硷站和曹坪站,具体信息见表 1。

表 1 测站信息

站名	类别	位置		集水面积
		东经	北纬	
曹坪	水文站	109°59′	37°39′	187 km ²
	雨量站			
和民塬	雨量站	109°48′	37°46′	—
刘家峁	雨量站	109°51′	37°46′	—
姬家硷	雨量站	109°58′	37°43′	—

2.2 数据处理

2.2.1 次洪水数据处理 一次完整的洪水事件是指从径流量增加至基流以上,到仅基流构成径流量为止^[25],故采用数字滤波法^[26-27]去除基流,得到新的洪峰流量和径流量。研究变量包括次洪水输沙量(ESY),采用式(1)计算;洪峰流量(Q_w , m³/s),径流过程的最大值;径流深(H , mm),即径流量与流域面积之比;次降雨量(P , mm),即一次降雨总量;降雨历时(D , h),次降雨持续时长;平均降雨强度(I , mm/h),即降雨量与降雨历时之比以及径流系数(R_c),即径流深和降雨量之比。

$$ESY = \sum Sq\Delta t \tag{1}$$

式中:ESY 为次洪水输沙量(万 t); Δt 为水文站水文观测的时间间隔(s); q 为 Δt 时间间隔内的流量(m³/s); S 为 Δt 时间间隔内的径流含沙量(t/m³)。

从所有筛选出的数据中,选取洪峰流量大于 1 m³/s、有对应降雨记录的洪水过程进行分析,共计 106 场洪水事件。

2.2.2 年尺度洪水数据处理 为研究年时间尺度下降雨、径流和泥沙变量之间的关系,采用年平均输沙

量(ESY_a , 万 t)、年最大洪峰流量(Q_{wa} , m^3/s),即一年中全部洪水事件中的最大洪峰流量值、年平均径流深(H_a , mm)、年平均降雨量(P_a , mm)、年平均径流系数(R_{ca})以及年最大 24 h 雨强(I_{24h} , mm/h)等研究变量进行分析。采用 Mann-Kendall 检验法^[28-30]对年尺度研究变量进行趋势分析和突变点检测。数据处理均采用 Excel 2016 以及 SPSS 25, 图像绘制采用 ArcGIS 10.2 以及 Origin 2019。

表 2 岔巴沟流域年降雨量、径流量和输沙量统计

特征值	平均值	最大值 (年份)	最小值 (年份)	70s 平均值	80s 平均值	90s 平均值	2000—2016 年 平均值
降雨量/mm	396.95	636.61(1978)	206.12(1997)	366.43	387.42	346.57	450.15
径流量/万 m ³	691.84	1840(1978)	212.2(2010)	856.78	694.69	767.37	553.15
输沙量/万 t	103.21	501(1970)	0.016(2007)	159.88	78.07	224.31	20.14

3.1.1 年降雨量趋势分析 根据实测降雨资料,在 ArcGIS 10.2 中采用泰森多边形法计算流域面降雨量,并绘制年降雨量变化过程线,见图 1。M-K 检验曲线见图 2。

统计量 $Z = 2.75$, $|Z| > 2.32$,表明年降雨量在

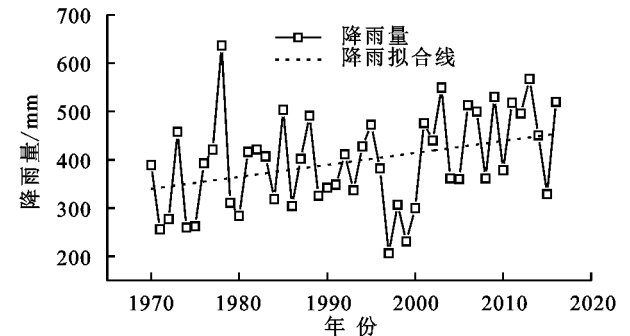


图 1 年降雨量变化过程

3.1.2 年径流量变化分析 图 3 即流域年径流量变化过程线,M-K 检验曲线见图 4,统计量 $Z = -2.18$, $|Z| > 1.96$,表明年径流量在 95%置信水平上呈显著

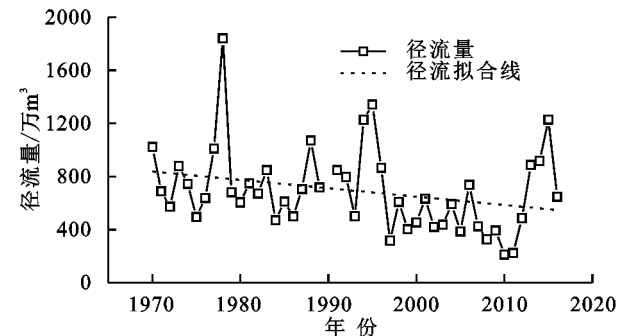


图 3 年径流量变化过程

3.1.3 年输沙量变化分析 流域年输沙量变化过程线见图 5,M-K 检验曲线见图 6,统计量 $Z = -3.13$, $|Z| > 2.32$,表明年输沙量在 99%置信水平上呈显著减少趋势。显著水平临界线内出现一个交点,位于 1982—1983 年,故 1982 年是年输沙量的突变点。

3 结果与分析

3.1 年尺度研究变量分析

表 2 显示了岔巴沟流域降雨量、径流量和输沙量的年际变化,可以看出降雨量呈增加趋势,径流量与输沙量呈减小趋势,降雨量、径流量和输沙量的最大值分别大于平均值 13%,23%和 117%,最小值分别比平均值小 13%,20%和 80%,年际变化较大。

99%置信水平上呈显著增加趋势。显著水平临界线内出现的交点分别位于 1972—1973 年与 1986—1987 年,但 1972—1973 年无前期研究数据,无法确定在此时间段内发生突变,所以将第 2 个交点作为突变点,即降雨量于 1986 年出现突变。

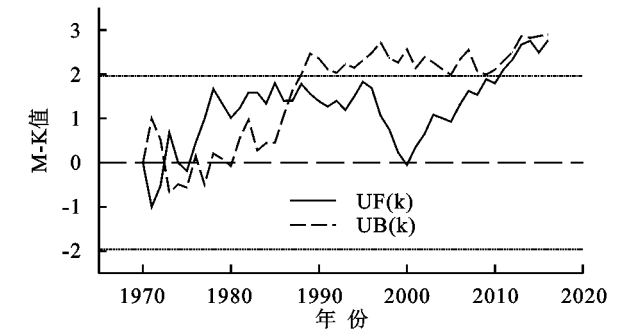


图 2 年降雨量 M-K 检验曲线

减少趋势。显著水平临界线内出现的两个交点分别位于 1991—1992 年和 2001—2002 年,即年径流量突变点为 1991 年、2001 年。

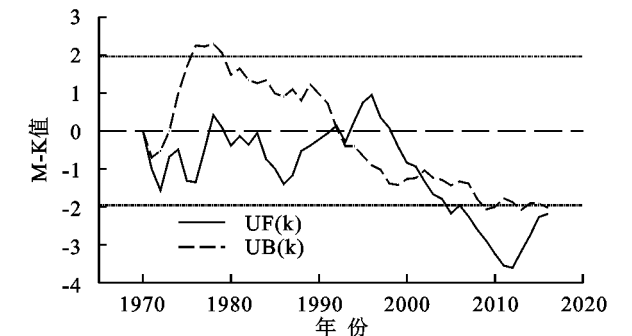


图 4 年径流量 M-K 检验曲线

年降雨量的突变不受人为因素控制,但年输沙量在 1982 年发生突变的原因是 70 年代大量修建的淤地坝在这个时期产生效用,从而大幅减少水土流失。通过调查岔巴沟流域水土保持措施得知^[31],1991 年后,岔巴沟流域再无新建淤地坝,同时岔巴沟流域 Landsat MSS/TM

遥感资料^[32]显示,近年来植被恢复措施也在大力推进,植被覆盖率逐渐由中低覆盖度向中高覆盖度转化,至 2007 年,中覆盖度、中高覆盖度及高覆盖度分别为 51.33%,26.95%和 20.65%。这就是年径流量产生突

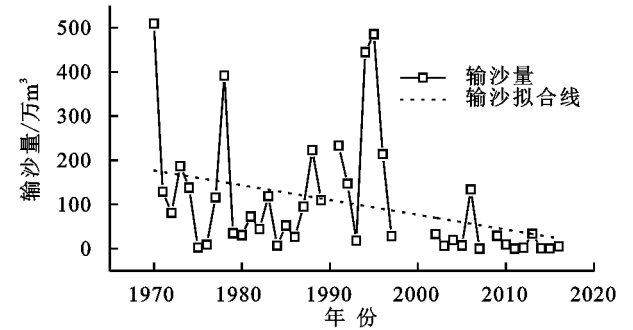


图 5 年输沙量变化过程

3.2 次洪水研究变量趋势分析

采用年输沙量突变点 1982 年将研究时段划分为两个时期,第一时期是 1970—1981 年,共 60 场洪水,考虑到剩余时期时间序列过长,将其划分为第二时期

在 1991 年后短暂上升后又下降的原因。通过 M-K 检验得知,年降雨量呈增加趋势,而径流量和输沙量却始终呈现减少趋势,这也印证了淤地坝建设以及植被恢复等水土保持措施对控制流域水土流失所起的积极作用。

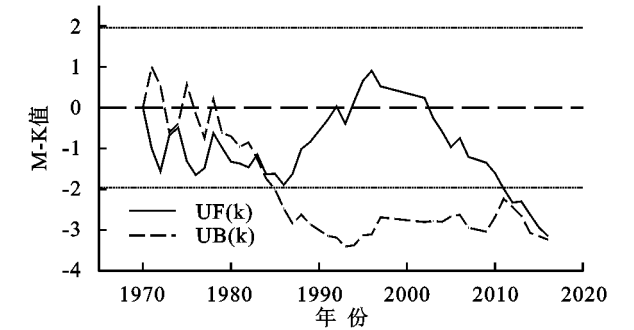


图 6 年输沙量 M-K 检验曲线

表 3 研究变量平均值

时期/ 研究变量	洪峰流量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	径流深/ mm	降雨量/ mm	降雨 历时/h	降雨强度/ ($\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$)	输沙量/ 万 t	径流 系数
1970—1981	63.48	2.53	27.13	8.51	4.66	21.65	0.30
1982—2000	52.04	2.17	25.15	5.78	6.95	17.07	0.13
2001—2016	54.95	3.55	45.93	13.22	3.56	7.04	0.05

由表 3 可知,输沙量和径流系数呈减小趋势,且减小幅度较大,与 1970—1981 年相比,2001—2016 年输沙量和径流系数分别减少了约 67%和 83%;洪峰流量、径流深、降雨量、降雨历时在 1982—2000 年降低,后在 2001—2016 年又增加,但洪峰流量仍低于 1970—1981 年均值,约减少 13%,径流深、降雨量、降雨历时均大于 1970—1981 年均值,分别增加了约 40%,69%和 55%。

比较不同时间尺度下研究变量的变化趋势,发现降雨量和输沙量在年尺度和次洪水尺度下表现一致,

和第三时期,第二时期是 1982—2000 年,共 28 场洪水,第三时期是 2001—2016 年,共 18 场洪水。3 个时期研究变量的平均值见表 3。

但径流深却在次洪水尺度下呈增加趋势,究其原因,虽近年来径流总量减少,但洪水发生次数也在减少,2001—2016 年径流总量约占 70 年代径流总量的 3/4,而发生的洪水次数仅为 70 年代的 1/3,其减小幅度远大于径流总量的减小幅度。

3.3 不同时间尺度水沙关系回归分析

3.3.1 次洪水时间尺度回归分析 构建岔巴沟流域各研究时期次洪水降雨、径流和泥沙变量的皮尔逊相关系数矩阵,1970—1981 年的计算结果详见表 4。

表 4 1970—1981 年次洪水研究变量的相关系数矩阵

参数	Q_w	H	P	D	I	ESY	R_c
Q_w	1	0.771**	0.330*	0.054	0.225	0.877**	0.066
H		1	0.580**	0.424**	0.130	0.942**	-0.018
P			1	0.715**	0.190	0.464**	-0.209
D				1	-0.318*	0.280*	-0.150
I					1	0.137	-0.213
ESY						1	0.010
R_c							1

注: ** 表示在 $p < 0.01$ 水平上显著相关, * 表示在 $p < 0.05$ 水平上显著相关。

1970—1981 年 ESY 与 Q_w , H 和 P 具有极显著的相关性,与 D 呈显著相关性,表明 Q_w , H , P 以及 D 在此研究时期是 ESY 的主要影响因素。1982—2000 年 ESY 与 Q_w , H 和 P 具有极显著的相关性,2001—2016

年 ESY 仅与 Q_w 和 H 具有极显著的相关性,与 P 呈显著相关性,选择上述与输沙量具有显著相关性的研究变量进行回归分析,回归结果见表 5。

ESY 在 3 个时期均与 Q_w , H 以及 P 具有显著

的相关性,但整体来看,ESY 与 Q_w 和 H 的相关关系最为显著和稳定,虽然决定系数有所浮动,但始终在 $p<0.01$ 水平上呈显著相关性。从而建立 ESY 与 Q_w 和 H 的回归方程,回归模型的确定系数均大于 0.9,说明 ESY 始终与 Q_w 和 H 存在良好的幂函数关系。 H 和 Q_w 可以很好的反映输沙能力,这在许多学者的研究成果中已经体现,但与 Zhang^[11]、Zheng 等^[15]分析单个因素与输沙量呈线性关系或比例关系不同,本文研究得出洪峰流量和径流深与输沙量呈幂函数关系,这与肖学年等人^[10]的分析一致。考虑到本文采用 H 作为影响因素分析,与 P 、 D 同为次降雨指标,它们之间具有相关性,故未将 P 和 D 作为回归因子进行分析。

表 5 研究变量与次洪水输沙量的回归方程

时期	回归方程	决定系数
1970—1981	$ESY=1.573Q_w^{0.385}H^{0.878}$	$R^2=0.967$
1982—2000	$ESY=3.505Q_w^{0.227}H^{0.877}$	$R^2=0.959$
2001—2016	$ESY=0.013Q_w^{1.203}H^{0.973}$	$R^2=0.909$

回归方程中,回归系数代表研究变量对输沙量的影响程度,回归系数在 1982—2000 年最大,在 2001—2016 年最小,表明上述研究变量在 3 个时期对输沙量的影响整体呈先增大后减小的趋势;变量所对应的指数越大,表明它对输沙量的影响越大,前两个时期径流深对输沙量的影响大于洪峰流量,然而 2001—2016 年洪峰流量的指数明显增大,径流深则无显著变化,表明洪峰流量对输沙量的影响更大。同时,回归模型的确定系数逐时期下降,说明岔巴沟流域的水沙关系逐渐变的复杂,而在上述影响输沙量的相关变量的研究中,并未将水土保持因子考虑在内,尤其是随着时间推移,淤地坝与植被恢复工程发挥的水土保持效益应呈现相反态势,这也使得 2001—2016 年回归模型的确定系数低于前两个时期。

根据 Li 等^[33]研究,暴雨是造成黄土高原水土流失的主要原因,一场严重暴雨造成的土壤流失可占年土壤流失的 60%~90%。采用极端降雨阈值^[34]评估岔巴沟流域 3 个时期的降雨量,具体而言,就是将研究时段内降雨量大于 0.1 mm 的降雨事件升序排列,将第 90 个百分点数值认定为该站点研究时段内极端降雨的阈值,当次降水量超过此阈值时,便认为此次降雨为极端降雨事件。极端降雨事件在 3 个研究时期的发生频率分别为 10%,10.7%和 11.1%,相关特征值见表 6。

对比不同时期相似的极端降雨条件下的径流量和输沙量,如降雨事件 2009-07-19 与 1987-08-26,以及 2006-08-29 与 1978-08-07,发现 2001—2016 年极端降雨事件所产生的径流量和输沙量明显减少,表明水土保

持措施对减少径流泥沙起着重要作用,但输沙量占总输沙量的比例却明显增多,分别为 7%,18%和 43%。在发生频率大致相同的情况下,输沙量占总输沙量的比例远大于前两个时期,这表明极端降雨事件在 2001—2016 年内对流域水沙关系的影响明显变大,导致水沙关系发生了显著变化,极大的增加了水沙关系预估的不确定性,这与 Zhao 等^[34]研究所得结论一致。

表 6 极端降雨事件特征值

极端降雨事件	降雨量/mm	径流量/万 m ³	输沙量/万 t
2009-07-19	72.2	45.16	12.80
1987-08-26	75.1	100.60	58.97
1974-07-31	77.1	104.27	109.35
1981-06-19	82.2	20.79	6.23
1977-08-04	82.5	12.25	8.57
1982-07-08	84.1	12.98	6.84
1982-07-29	95.4	25.38	20.38
1972-08-17	96.8	15.78	1.33
1978-07-12	98.2	26.57	19.73
2006-08-29	100.8	118.74	41.33
1978-08-07	104.3	140.01	178.69

3.3.2 年时间尺度回归分析 构建岔巴沟流域各研究时期年降雨、径流和泥沙变量的皮尔逊相关系数矩阵,1970—1981 年的计算结果详见表 7。

表 7 1970—1981 年研究变量的相关系数矩阵

参数	ESY	H	Q_{wa}	P_a	$I_{24\text{ h}}$	R_{ca}
ESY	1	0.882 **	0.762 **	0.558	-0.16	0.631 *
H		1	0.485	0.842 **	-0.177	0.574
Q_{wa}			1	0.02	0.174	0.654 *
P_a				1	-0.189	0.139
$I_{24\text{ h}}$					1	0.027
R_{ca}						1

注: ** 表示在 $p<0.01$ 水平上显著相关, * 表示在 $p<0.05$ 水平上显著相关。

1970—1981 年输沙量与 H 和 Q_{wa} 具有极显著的相关性,与 R_{ca} 呈显著相关性,表明 H 、 Q_{wa} 和 R_{ca} 在此研究时期是输沙的主要影响因素。1982—2000 年输沙量与 H 呈极显著的相关性,与 R_{ca} 呈显著相关性,2001—2016 年输沙量与 Q_{wa} 呈极显著的相关性,与 $I_{24\text{ h}}$ 呈显著相关性。对 3 个时期的年尺度水沙关系分别建立回归函数模型,结果见表 8。

表 8 研究变量与年平均输沙量的回归方程

时期	回归方程	决定系数
1970—1981	$ESY_a=0.095Q_{wa}^{0.503}H_a^{1.423}$	$R^2=0.963$
1982—2000	$ESY_a=0.066Q_{wa}^{0.199}H_a^{1.977}$	$R^2=0.974$
2001—2016	$ESY_a=0.011Q_{wa}^{2.153}H_a^{0.93}$	$R^2=0.991$

考虑到 P_a 、 R_{ca} 与 H 同为次降雨指标,故未将 P_a 和 R_{ca} 作为回归因子进行分析。回归方程中决定

系数均大于 0.96,说明 ESY_a 始终与 Q_{wa} 和 H_a 存在良好的多元幂函数关系。与目前 Zheng 等^[15]在年时间尺度上通过单因素分析得出的线性关系相比,研究变量为径流深和最大洪峰流量时回归方程的决定系数更大,回归效果更好,同时回归模型也与次洪水尺度下相同,均为幂函数。然而回归系数整体呈降低趋势,表明研究变量对输沙量的影响越来越小;在前两个时期中径流深的指数大于最大洪峰流量的指数,表明径流深对输沙量的影响更大,而 2001—2016 年回归关系发生改变,最大洪峰流量的指数远大于径流深的指数,此时最大洪峰流量对输沙量的影响更大。

上述回归分析表明,不同时间尺度下水沙关系变化趋势不同。在年尺度下回归方程的决定系数呈增加态势,而次洪水尺度下呈降低趋势。这种差异主要是由于研究数据和变量的时间尺度不同而导致的,年尺度回归分析中采用的研究事件除已选取的次洪水事件之外,还包含其他因洪峰流量小、降雨历时短以及缺乏降雨资料等原因未定义为一次洪水事件的径流过程。统计所选取的次洪水事件,发现 3 个研究时期中次洪水事件的总输沙量占年平均输沙量的比例分别为 76%,71%和 59%。由此可见,年尺度回归分析同次洪水回归分析相比,关于流域输沙过程研究的全面性和普遍性逐时期递增,所以年尺度回归分析的决定系数逐渐增加并大于次洪水回归分析的决定系数。然而年尺度回归分析无法细致的表征洪水事件的相关特征变量,这从回归系数数值较低且逐时期减小的趋势也可以看出,表明年尺度分析对流域水沙关系的研究无法深入,故目前的研究多集中于次洪水尺度下的水沙关系分析。

4 结论

(1) 岔巴沟流域 1970—2016 年降雨量呈显著增加趋势,年径流量和年输沙量呈显著下降趋势,年输沙量、年降雨量和年径流量分别于 1982 年、1986 年、1991 年、2001 年发生突变,106 场次洪水事件分析结果表明降雨量和输沙量的变化趋势与年尺度上表现一致,但径流深呈增加趋势,主要是洪水次数大幅减少所致。

(2) 在次洪水时间尺度上,输沙量与洪峰流量和径流深始终呈现显著相关关系,其中洪峰流量对输沙量的影响逐渐增大,径流深则无显著变化。

(3) 在年时间尺度上,输沙量整体与最大洪峰流量以及径流深关系显著,前期径流深对输沙量的影响较大,后期最大洪峰流量对输沙量的影响较大。

参考文献:

- [1] 胡春宏.黄河水沙变化与治理方略研究[J].水力发电学报,2016,35(10):1-11.
- [2] 宁珍,高光耀,傅伯杰.黄土高原流域水沙变化研究进展[J].生态学报,2020,40(1):2-9.
- [3] 李锐.黄土高原水土保持工作 70 年回顾与启示[J].水土保持通报,2019,39(6):298-301.
- [4] Miao C Y, Yang L, Chen X H, et al. The vegetation cover dynamics (1982-2006) in different erosion regions of the Yellow River Basin, China[J]. Land Degradation & Development, 2012,23(1):62-71.
- [5] 李敏,张长印,王海燕.黄土高原水土保持治理阶段研究[J].中国水土保持,2019(2):1-4.
- [6] 胡春宏,张晓明,赵阳.黄河泥沙百年演变特征与近期波动变化成因解析[J].水科学进展,2020,31(5):725-733.
- [7] 高亚军,徐十锋,吕文星,等.黄河粗泥沙集中来源区洪水泥沙阶段变化研究[J].中国水土保持,2020(9):80-83.
- [8] Fang H Y, Cai Q G, Chen H, et al. Temporal changes in suspended sediment transport in a gullied loess basin: the lower Chabagou Creek on the Loess Plateau in China [J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2008,33(13):1977-1992.
- [9] 崔灵周.岔巴沟流域次降雨水沙耦合关系空间变异研究[J].温州师范学院学报:自然科学版,2003,24(5):11-15.
- [10] 肖学年,崔灵周,李占斌.黄土高原小流域水沙关系空间变异研究[J].水土保持研究,2004,11(2):140-142.
- [11] Zhang L T, Li Z B, Wang S S. Spatial scale effect on sediment dynamics in basin-wide floods within a typical agro-watershed: A case study in the hilly loess region of the Chinese Loess Plateau[J]. Science of the Total Environment, 2016,572:476-486.
- [12] Fang H Y, Chen H, Cai Q G, et al. Effect of spatial scale on suspended sediment concentration in flood season in hilly loess region on the Loess Plateau in China [J]. Environmental Geology, 2008,54(6):1261-1269.
- [13] Fang H Y, Chen H, Cai Q G, et al. Scale effect on sediment yield from sloping surfaces to basins in hilly loess region on the Loess Plateau in China[J]. Environmental Geology, 2007,52(4):753-760.
- [14] Zheng M G, Li R K, He J J. Sediment concentrations in run-off varying with spatial scale in an agricultural subwatershed of the Chinese Loess Plateau[J]. Hydrological Processes, 2015,29(26):5414-5423.
- [15] Zheng M G, Yang J S, Qi D L, et al. Flow-sediment relationship as functions of spatial and temporal scales in hilly areas of the Chinese Loess Plateau[J]. Catena,

2012,98:29-40.

[16] Zheng M G, Qin F, Yang J S, et al. The spatio-temporal invariability of sediment concentration and the flow-sediment relationship for hilly areas of the Chinese Loess Plateau[J]. Catena, 2013,109:164-176.

[17] 孙昭敏,吴志勇,何海,等.基于改进 VIC 模型的岔巴沟流域水沙耦合模拟研究[J].水电能源科学,2020,38(3):30-33,97.

[18] 张霞,李鹏,李占斌,等.黄土高原丘陵沟壑区临界地貌侵蚀产沙特征[J].农业工程学报,2015,31(4):129-136.

[19] 鲁克新,李占斌,李鹏,等.基于径流侵蚀功率的流域次暴雨输沙模型研究:以岔巴沟流域为例[J].长江科学院院报,2008,25(3):31-34.

[20] 方海燕,蔡强国,陈浩,等.黄土丘陵沟壑区岔巴沟下游泥沙传输时间尺度动态研究[J].地理科学进展,2007,26(5):77-87.

[21] Fang H Y, Li Q Y, Cai Q G, et al. Spatial scale dependence of sediment dynamics in a gullied rolling loess region on the Loess Plateau in China[J]. Environmental Earth Sciences, 2011,64(3):693-705.

[22] Zhang L T, Li Z B, Wang H, et al. Influence of intra-event-based flood regime on sediment flow behavior from a typical agro-catchment of the Chinese Loess Plateau[J]. Journal of Hydrology, 2016,538:71-81.

[23] 綦俊谕,蔡强国,方海燕,等.岔巴沟流域水土保持减水减沙作用[J].中国水土保持科学,2010,8(1):28-33,39.

[24] 闫丹丹.大理河流域植被变化对洪峰流量影响分析[D].西安:西安理工大学,2018.

[25] Hu J, Gao P, Mu X, et al. Runoff-sediment dynamics under different flood patterns in a Loess Plateau catchment, China[J]. Catena, 2019,173:234-245.

[26] 王燕,赵雪花,张永波,等.不同基流分割方法在渭河流域的应用对比分析[J].水力发电,2017,43(2):15-17,80.

[27] 亢小语,张志强,陈立欣,等.自动基流分割方法在黄土高原听水河流域适用性分析[J].北京林业大学学报,2019,41(1):92-101.

[28] Shi H L, Hu C H, Wang Y G, et al. Analyses of trends and causes for variations in runoff and sediment load of the Yellow River[J]. International Journal of Sediment Research, 2017,32(2):171-179.

[29] 晏清洪,原翠萍,雷廷武,等.黄土丘陵沟壑区吕二沟流域水沙关系变化分析[J].中国水土保持科学,2013,11(5):1-8.

[30] 颜明,郑明国,舒畅,等.泾河流域径流—泥沙的尺度效应研究[J].水土保持通报,2016,36(6):184-188,194.

[31] 李洁.大理河流域洪水径流变化特性研究[D].西安:西安理工大学,2017.

[32] 冯鑫伟.基于多种组合模型的半干旱区次洪量预测[D].西安:西安理工大学,2018.

[33] Li Z, Zheng F L, Liu W Z, et al. Spatially downscaling GCMs outputs to project changes in extreme precipitation and temperature events on the Loess Plateau of China during the 21st Century[J]. Global and Planetary Change, 2012,82:65-73.

[34] Zhao Y, Cao W H, Hu C H, et al. Analysis of changes in characteristics of flood and sediment yield in typical basins of the Yellow River under extreme rainfall events[J]. Catena, 2019,177:31-40.



(上接第 80 页)

[30] Saggat S, Yeates G W, Shepherd T G. Cultivation effects on soil biological properties, microfauna and organic matter dynamics in Eutric Gleysol and Gleyic Luvisol soils in New Zealand[J]. Soil and Tillage Research, 2001,58(1/2):55-68.

[31] 纪文婧.山西太岳山不同林龄华北落叶松人工林养分特征研究[D].北京:北京林业大学,2016.

[32] 白军红,王庆改,黄来斌,等.内陆碱化湿地土壤有机质和全磷的时空分布特征[J].海洋湖沼通报,2010,4(7):34-40.

[33] 艾尤尔·亥热提,王勇辉,海米提·依米提.艾比湖湿地土壤碱解氮的空间变异性分析[J].土壤,2014,46(5):819-824.

[34] 何贵永,孙浩智,史小明,等.青藏高原高寒湿地不同季节土壤理化性质对放牧模式的响应[J].草业学报,2015,24(4):12-20.

[35] 娄淑兰,刘目兴,易军,等.三峡山地不同类型植被和坡位对土壤水文功能的影响[J].生态学报,2019,39(13):4844-4854.

[36] 魏婷婷.淮南煤矿复垦区土壤肥力空间分析与评价[D].安徽淮南:安徽理工大学,2011.