

清水河流域不同尺度水沙变化归因分析

黄康¹, 鲁克新^{1*}, 申震洲², 张国军³, 任宗萍¹, 李鹏¹

(1.西安理工大学 省部共建西北旱区生态水利国家重点实验室, 西安 710048; 2.黄河水利委员会 黄河水利科学研究院, 郑州 450003; 3.宁夏回族自治区水土保持监测总站, 银川 750002)

摘要:【目的】揭示清水河流域水沙变化的驱动因素, 为黄河上游流域的水土流失治理提供理论依据。【方法】基于1970—2019年清水河流域上、中、下游水文站的实测水沙数据及气象数据, 采用Mann-Kendall检验法和Pettitt检验法对流域内不同尺度的水文气象序列进行趋势性分析和突变检验, 基于Budyko弹性系数法、双累积曲线法和累积量斜率变化率比较法对流域不同尺度水沙变化进行归因分析。【结果】1970—2019年, 清水河流域年径流深呈显著增加趋势, 年输沙模数呈不显著减少趋势, 流域上中游区域的年径流深和年输沙模数呈显著减少趋势; 与突变前相比, 人类活动对上游区、上中游区和全流域的年径流量减少的贡献率分别为99.9%~114.3%、77.5%~104.0%和-117.4%~-74.0%, 对年输沙量减少的贡献率分别为104.7%~116.4%、110.2%~132.2%和113.0%~139.0%。【结论】引黄灌溉、水土保持措施等人类活动是影响清水河流域水沙变化的主要因素。

关键词: 清水河; 水沙变化; 弹性系数法; 双累积曲线法; 累积量斜率变化率比较法

中图分类号: P333.1

文献标志码: A

doi: 10.13522/j.cnki.gggs.2023069

黄康, 鲁克新, 申震洲, 等. 清水河流域不同尺度水沙变化归因分析[J]. 灌溉排水学报, 2023, 42(Supp.1): 93-98.

HUANG Kang, LU Kexin, SHEN Zhenzhou, et al. Attribution Analysis of Runoff and Sediment Changes at Different Scales in the Qingshui River Basin[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2023, 42(Supp.1): 93-98.

0 引言

【研究意义】黄河是世界闻名的多沙河流, 具有沙多水少、水沙异源的特性^[1]。在气候变化和人类活动的影响下, 黄河水沙情况发生了显著变化, 导致河道萎缩、断流等问题^[2]。黄河潼关水文站2000—2021年平均输沙量为2.41亿t/a, 6—9月经流含沙量的年平均值为18.3 kg/m³, 分别相比1919—1959年降低了85%、67%, 黄河水沙变化成因分析成为国内外学者广泛关注的热点问题^[3]。了解不同流域尺度水沙变化背后的驱动因素能更加科学地认识流域水文过程^[4]。清水河是黄河上游右岸的一级支流, 水土流失情况严重, 输入黄河的泥沙量约占宁夏入黄河总沙量的50%^[5], 研究清水河不同尺度水沙变化及归因对于黄河上游水土流失治理具有重要意义。【研究进展】包淑萍等^[6]通过Mann-Kendall检验法得出1985—2012年固原、韩府湾站的水沙变化呈减小趋势, 而泉眼山站水沙变化呈不显著增加趋势; 刘柏君等^[7]通

过双累积曲线法和灰色关联度模型得出径流变化主要受流域气候变化与水土保持治理的影响; 李颖曼等^[8]研究发现, 清水河输沙量减少的主要原因是人类活动的加剧。【切入点】以往研究多以清水河流域的控制水文站的水沙资料作为基础数据, 且水沙归因方法比较单一, 不能反映清水河流域内不同区域的水沙变化情况及其影响因素。【拟解决的关键问题】鉴于此, 本研究从不同时段、不同流域尺度、不同归因方法为切入点, 开展清水河流域的水沙变化及其影响因素分析, 以期为清水河流域的水土流失治理和生态修复提供技术参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

清水河是宁夏回族自治区境内直入黄河的第一大支流, 其流域面积为1 1481 km², 主沟道长度为320 km, 河道平均纵比降为1.49%^[9]。清水河流域地处黄土高原西北边缘, 地貌以黄土丘陵沟壑区为主, 地势南高北低, 河源海拔高程为2 489 m, 入黄口海拔高程为1 190 m, 相对高差为1 299 m^[10]。泉眼山站为清水河流域的出口控制站, 韩府湾站控制流域上中游区, 固原站控制流域上游区(图1)。清水河流域年平均降水量为349 mm^[8], 年平均日照时间为2 500 h, 年无霜期介于120~140 d^[11]。年平均径流量为1.07×10⁸ m³, 年平均输沙量为0.23×10⁸ t。

收稿日期: 2023-02-28 修回日期: 2023-05-16

基金项目: 宁夏流域水土保持生态—经济协同治理技术与发展模式研究(GZ4-21-05-069/-ZC-F); 节水护水保水耦合机理及应用研究(2021slkj-10)

作者简介: 黄康(1998-), 男, 硕士研究生, 主要从事水文学及水资源研究。

E-mail: 2210421227@stu.xaut.edu.cn

通信作者: 鲁克新(1974-), 男, 副教授, 硕士生导师, 博士, 主要从事水文学及水资源研究。E-mail: lkx2942@xaut.edu.cn

©《灌溉排水学报》编辑部, 开放获取 CC BY-NC-ND 协议

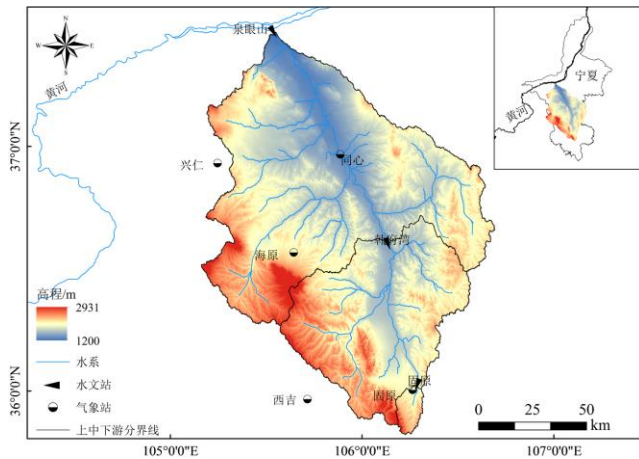


图1 研究区位置

Fig.1 Location of the study area

1.2 数据来源与处理

1970—1988 年泉眼山站、韩府湾站和固原站的径流量、输沙量来源于黄河流域水文年鉴，1989—2019 年径流量、输沙量来源于宁夏水土保持监测中心。5 个气象站（固原、西吉、海原、兴仁、同心）1970—2019 年的逐日气象资料由宁夏水土保持监测中心提供；空间分辨率为 1 km 的土地利用数据来源于中国科学院资源环境科学与数据中心（<https://www.resdc.cn/Default.aspx>）；梯田、淤地坝资料由宁夏回族自治区水土保持监测总站提供。

清水河全流域、上中游区和上游区的平均年降水量由 5 个气象站的降水数据通过泰森多边形法求得；年平均潜在蒸散发量通过 Penman-Monteith 方程和泰森多边形法求得；年输沙模数和年径流深为年输沙量和年径流量除以流域面积获得。

1.3 研究方法

Mann-Kendall (M-K) 检验法被广泛用于分析气

表 1 1970—2019 年清水河全流域、上中游区、上游区水文气象年代特征值

Table 1 Hydrological and meteorological chronological characteristic values for the whole basin, upper and middle reaches, and upper reaches of the Qingshui River Basin from 1970 to 2019

年代	统计指标	年潜在蒸散发量/mm			年降水量/mm			年径流深/mm			年输沙模数/(t km ⁻²)		
		全流域	上中游	上游区	全流域	上中游	上游区	全流域	上中游	上游区	全流域	上中游	上游区
1970s	最小值	1 078.2	938.2	899.2	235.6	284.4	290.5	2.0	3.8	8.7	380.1	225.1	196.8
	平均值	1 119.1	999.0	974.4	337.5	422.0	446.0	5.4	11.3	42.5	1 322.5	2 104.9	2 661.6
	最大值	1 187.6	1 059.4	1 045.2	456.9	533.0	560.4	15.8	30.1	89.5	5 130.8	7 486.2	11 412
1980s	最小值	1 024.4	882.0	857.8	188.6	263.0	282.1	2.5	4.0	15.0	467.5	609.9	244.6
	平均值	1 093.8	964.8	942.2	318.5	401.9	427.6	5.1	9.3	36.3	1 239.9	2 316.5	1 434.1
	最大值	1 192.9	1 057.1	1 030.6	505.3	538.1	523.9	8.8	13.1	79.5	2 610.3	4 802.4	4 633.3
1990s	最小值	1 062.3	929.2	915.5	262.3	321.9	313.9	5.5	5.2	15.9	576.0	1 337.1	211.8
	平均值	1 117.9	993.6	977.0	347.1	418.3	434.6	9.6	12.3	36.3	3 070.2	4 590.7	1 931.4
	最大值	1 201.4	1 059.2	1 031.2	447.0	548.0	591.0	17.1	29.8	105.8	7 181.0	13 861	10 005
2000s	最小值	1 097.4	954.4	932.2	230.6	321.5	350.6	4.6	2.0	1.7	23.4	212.5	1.1
	平均值	1 142.6	1 018.0	1 011.9	300.3	384.8	408.3	7.7	4.9	18.7	1 721.0	1 852.8	301.6
	最大值	1 178.4	1 053.1	1 048.7	400.5	540.6	605.1	10.7	9.8	35.9	3 256.1	4 445.0	1 118.5
2010s	最小值	1 076.8	943.8	936.4	291.9	369.0	377.6	5.3	1.7	5.3	135.1	107.9	9.0
	平均值	1 123.5	986.4	997.0	378.7	498.6	531.4	9.0	5.2	20.9	705.3	641.9	95.1
	最大值	1 196.7	1 045.0	1 044.0	477.6	650.7	710.1	12.2	9.0	54.4	1 444.8	1 418.4	189.5

象要素、径流随时间的变化趋势^[12]。Pettitt 非参数检验法^[13]可以对水文气象要素序列进行突变分析。采用傅抱璞^[14]提出的 Budyko 假设的解析表达式及水量平衡式来计算各因素对年径流深及年输沙模数变化的贡献率^[15]。双累积曲线是检验 2 个变量关系一致性的常用方法^[16]，可用于水文气象要素一致性的检验、缺值的插补或校正，以及水文气象要素的趋势性变化及其强度分析^[17]，在分析流域水沙关系时，横坐标通常是降水量，由于降水变化趋势相对稳定，径流或输沙量则为被检验变量。累积量斜率变化率比较法通过计算在突变点前、后 2 个时期的累积年径流量与年份线性关系式的斜率、累积降水量与年份线性关系式的斜率来定量评估气候变化和人类活动对水文过程变化的贡献率^[18]。

2 结果与分析

2.1 水文气象要素变化趋势分析

由表 1 可知，1970—2019 年，清水河全流域、上中游区和上游区的年平均潜在蒸散发量分别为 1 119.4、992.4 mm 和 980.5 mm，年平均降水量分别为 336.4、425.1 mm 和 449.6 mm；M-K 检验结果表明，3 个研究尺度的年潜在蒸散发量和年降水量呈增加趋势，仅上游区年潜在蒸散发量呈显著增加趋势（表 2）。相同时段内，清水河全流域、上中游区和上游区的年平均径流深分别为 7.4、8.6 mm 和 30.9 mm，年平均输沙模数分别为 1 611.8、2 301.4 t/km² 和 1 284.8 t/km²；清水河全流域年径流深和年输沙模数分别呈显著增加、不显著减少趋势，上中游区和上游区的年径流深和年输沙模数呈显著减少趋势。

表 2 1970—2019 年清水河全流域、上中游区、上游区水文气象要素的 M-K 检验结果

Table 2 M-K test results of hydro-meteorological elements in the whole basin, upper and middle reaches and upper reaches of the Qingshui River Basin from 1970 to 2019

区域	年潜在蒸散发量		年降水量		年径流深		年输沙模数	
	Z	P	Z	P	Z	P	Z	P
全流域	1.17	0.24	0.83	0.40	3.93	0.00	-0.48	0.63
上中游区	0.30	0.76	0.94	0.35	-3.23	0.00	-2.2	0.03
上游区	2.21	0.03	0.79	0.43	-3.05	0.00	-5.04	0.00

2.2 流域水沙突变年份分析

通过 Pettitt 非参数检验法对清水河流域水沙突变年份进行分析, 如表 3 所示。

表 3 1970—2019 年清水河全流域、上中游区、上游区年径流深和输沙模数的 Pettitt 检验结果

Table 3 Annual runoff depth series and sand transport modulus series Pettitt test results for the whole watershed, upper and middle reaches, and upper reaches of the Qingshui River Basin from 1970 to 2019

研究区域	年径流深		年输沙模数	
	突变年份	显著性	突变年份	显著性
全流域	1987	***	2007	*
上中游区	1996	***	2004	**
上游区	1996	**	2001	***

注 *, **, ***分别代表 95%, 99%, 99.9%置信水平。

清水河全流域的年径流量突变年份为 1987 年, 上中游区和上游区的年径流量突变年份均为 1996 年。根据突变年份, 将全流域、上中游区、上游区的年径流量划分为基准期和变化期。与基准期相比, 1988—2019 年清水河全流域的年平均径流深增加了 72.4%, 1997—2019 年上中游区的年平均径流深减少了 54.6%, 1997—2019 年下游区的年平均径流深减少了 50.6%。

清水河全流域、上中游区和上游区的年输沙模数的突变年份分别为 2007、2004 年和 2001 年。与基准期相比, 2008—2019 年清水河全流域的年平均输沙模数减少了 67.4%, 2005—2019 年上中游区的年平均输沙模数减少了 74.9%, 2002—2019 年上游区的年平均输沙模数减少了 93.8%。

2.3 流域水沙变化归因分析

人类活动是指为了实现生态和社会的和谐发展, 而采取的兴修梯田、筑坝、退耕还林等水土保持措施, 气候变化主要体现在降水量变化和弹性系数法中的潜在蒸散发量的变化。基于 Budyko 假设的弹性系数法、双累积曲线法和累积量斜率变化率比较法对气候变化和人类活动对年径流深和年输沙模数变化的贡献率进行了定量分析。与突变年以前相比, 突变年份以后基于弹性系数法计算得出人类活动对清水河上

游区、上中游区和全流域的年径流深减少的贡献率分别为 100.8%、104.0%和-74.0%, 对年输沙模数减少的贡献率分别为 116.4%、132.2%和 139.0%; 基于双累积曲线法计算得出人类活动对清水河上游区、上中游区和全流域的年径流深减少的贡献率分别为 114.3%、77.5%和-117.4%, 对年输沙模数减少的贡献率分别为 111.2%、113.2%和 113.0%; 基于累积量斜率变化率比较法计算得出人类活动对上游区、上中游区和全流域的年径流深减少的贡献率分别为 99.9%、99.1%和-101.9%, 对年输沙模数减少的贡献率分别为 104.7%、110.2%和 115.7% (表 4)。上述 3 种研究方法的结果表明, 人类活动是影响清水河全流域、上中游区和上游区水沙变化比重最大的因素, 且只对全流域的年径流深减少呈负贡献。

3 讨论

3.1 清水河流域水沙变化归因分析

清水河流域的水库主要分布在流域上游, 建库数量由上游向下游递减, 水库建设始于 1956 年, 至 2012 年已建成 13 座中型水库、87 座小型水库, 其中 5 座中型水库在 1960 年建立, 1970s 共建成中型水库 5 座、小型水库 43 座, 其余年代的建库数量相对稳定, 因此全流域和上中游区 1970s 的年平均输沙模数呈现低值^[19]; 截至 2012 年, 清水河流域已建成淤地坝 306 座, 其中小型坝 126 座、中型坝 100 座、骨干坝 80 座。清水河流域淤地坝始建于 1971 年, 2000s 是流域内淤地坝建坝数量最多的年代, 2000—2012 年共建成 256 座淤地坝, 这与本文分析得到的全流域、上中游区和上游区的年输沙模数序列的突变年份都在 2000 年以后以及 1990s—2010s 的多年平均输沙模数持续下降等统计分析结果相符。

清水河流域土地利用面积变化如表 5 所示。自 1999 年实施退耕还林工程以来, 清水河流域内的草地面积由减少趋势转变为增加趋势, 耕地面积由增加趋势转变为减少趋势, 林地面积则一直保持稳定增长趋势, 这也是 1999 年后清水河流域年径流量和年输沙量减少的主要原因之一。

表 4 1970—2019 年清水河全流域、上中游区和上游区年径流深和年输沙模数变化的归因分析

Table 4 Attribution analysis of changes in annual runoff depth and annual sand transport modulus in the whole watershed, upper and middle reaches and upper reaches of the Qingshui River from 1970 to 2019

水文要素	研究区域	研究时段/年	时段平均值	减少量	人类活动贡献率/%			气候变化贡献率/%			
					ECM	DMC	SCRAQ	年降水量		年潜在蒸散量	
								ECM	DMC	SCRAQ	ECM
年径流深/ mm	全流域	1970—1987	5.0								
		1988—2019	8.7	-3.6	-74.0	-117.4	-101.9	-29.0	17.4	1.9	3.0
	上中游区	1970—1996	11.5								
		1997—2019	5.2	6.3	104.0	77.5	99.1	-14.0	22.5	0.9	10.0
	上游区	1970—1996	40.3								
		1997—2019	19.9	20.4	100.8	114.3	99.9	-14.0	-14.3	0.1	13.2
年输 沙模数/ (t km ⁻²)	全流域	1970—2007	1 922.8								
		2008—2019	626.8	1 295.9	139	113.0	115.7	-42.0	-13.0	-15.7	3.0
	上中游区	1970—2004	2 968.6								
		2005—2019	744.5	2 224.0	132.2	113.2	110.2	-33.2	-13.2	-10.2	1.0
	上游区	1970—2001	1 939.7								
		2002—2019	120.4	1 819.3	116.4	111.2	104.7	-21.5	-11.2	-4.7	5.1

注 ECM 为弹性系数法；DMC 为双累积曲线法；SCRAQ 为累积量斜率变化法。

表 5 清水河流域不同土地利用类型面积年际变化

Fig.5 Interannual variation of different land use types in the Qingshui River Basin

年份	耕地/ km ²	林地/ km ²	草地/ km ²	水域/ km ²	建设用 地/km ²	未利用 土地/ km ²
1980	5 226	386	7 535	185	156	162
1990	5 245	386	7 523	187	156	153
2000	5 597	447	7 108	164	169	165
2010	5 367	484	7 173	167	193	266
2018	5 084	550	7 250	167	341	258

1970—2019 年清水河流域上游区和上中游区的年径流量均呈减少趋势，而全流域的年径流量呈增加趋势。1959—2012 年清水河流域的年降水量相差不大，说明年降水量并不是导致全流域年径流量增加的主要因素。引黄灌溉可能是引起清水河流域泉眼山站

年径流量增加的主要原因。农田灌溉引起平原区地下水水位持续上升，灌溉入渗水量一部分转化为含水层地下水储量，一部分以地下径流侧向排入清水河^[20]。主要影响泉眼山站年径流量的灌区为固海灌区。1959—1982 年泉眼山站的年平均径流量和年平均 1—4 月基流流量分别为 2 162 万 m³ 和 0.22 m³/s。以黄河干流地表水为水源的固海扬水工程于 1982 年投入运行，随着固海灌区的灌溉水量和灌溉面积的不断增长，泉眼山站的年径流量和年基流量也不断增加，2009—2012 年多年平均年径流量和多年平均基流流量与 1959—1982 年相比分别增加了 270.9% 和 804.5%（表 6），而降水量并没有显著增加，说明灌溉水量极大影响了基流量。

表 6 不同研究时段清水河下游区年降水量、年径流量、年基流量、固海灌区年灌溉水量和年灌溉面积的多年平均值^[20]Table 6 Multi-year average statistics of annual precipitation, annual runoff, annual baseflow, annual irrigation water and annual irrigated area in the Lower Qinghai River area for different study periods^[20]

年份	年平均 降水量/mm	年平均径 流量/万 m ³	1—4 月基流平均 流量/(m ³ s ⁻¹)	固海灌区年平均灌溉 水量/万 m ³	固海灌区年平均灌溉 面积/万亩
1959—1982	262.3	2 162	0.22	-	-
1983—1997	281.5	5 643	0.77	12 738	31.97
1998—2002	272.1	9 996	1.76	30 714	49.35
2003—2008	239.5	8 084	1.98	38 798	64.51
2009—2012	250.4	8 018	1.99	43 392	79.95

3.2 不同归因方法对计算结果的影响

3 种归因方法的结果均表明，人类活动是影响 1970—2019 年清水河流域水沙变化的主要因素，但上述 3 种归因方法得出的人类活动和气候变化对流

域水沙变化的贡献率的数值有一定差别。例如，弹性系数法分析得出的人类活动贡献率数值要比其它 2 种方法的结果数值更大，而弹性系数法分析得出的年降水量变化的贡献率数值要比其它 2 种方法的数值

更小。在气候变化贡献率方面,弹性系数法得出的年降水量对清水河全流域、上中游区和上游区的水沙减少的贡献率均为负值,而年潜在蒸散发量对清水河全流域、上中游区和上游区的水沙减少的贡献率均为正值;双累积曲线法和累积量斜率变化率比较法得出的年降水量的贡献率的正负值情况在全流域和上中游区保持一致,即年降水量对年径流深减少的贡献率为负值,而其对年输沙模数减少的贡献率为正值。

李凌程等^[21]采用敏感性分析法、双累积曲线法和累积量斜率变化率比较法对汉江上游流域和滦河流域的径流量变化进行了归因分析,结果也表明双累积曲线法和累积量斜率变化率比较法的计算结果比较接近。双累积曲线法和累积量斜率变化率比较法都忽略了气候因素中的潜在蒸散发量对于径流和输沙的影响,将被忽略的部分归入了人类活动之中,而弹性系数法充分考虑了水热关系及流域下垫面变化对于径流的影响,定量得到了气候条件中的降水量和潜在蒸散发量以及以人类活动引起的流域下垫面变化对于径流变化的贡献率^[22],且基于Budyko水热平衡耦合理论和水量平衡方程分析径流对于降水和潜在蒸散发的敏感性,与真实水循环过程更接近^[23],这也是结果存在差异的原因之一。不同归因方法都有一定的适用性和优缺点,在定量分析流域水沙变化归因时,应科学选择合适的研究方法。本研究所用归因方法未考虑土壤、植被等因素的影响,下一步应在分布式水文模型耦合其他因素的基础上进行归因分析,进而展开深入研究。

4 结 论

1) 1970—2019年清水河流域泉眼山站的年径流量呈显著增加趋势,年输沙量呈不显著的减少趋势,而韩府湾站和固原站的年径流量和年输沙量均呈显著减少趋势。

2) 采用弹性系数法、双累积曲线法和累积量斜率变化率比较法对水沙变化进行归因分析,3种方法结果均表明人类活动为影响水沙变化最主要的因素,后2种归因方法计算结果更为一致。

3) 水库快速建设是韩府湾站和泉眼山站1970 s年多年平均输沙量出现低值的重要原因;退耕还林还草工程的实施对清水河流域1999年后的年径流量、年输沙量减少具有促进作用;流域内大量的淤地坝建设是三站输沙量序列的突变年份均出现在2000 s的重要原因,而固海灌区引黄灌溉是引起泉眼山站年径流量增加及其年径流量序列突变年份与固原站和韩

府湾站的年径流量序列突变年份不一致的主要原因。

(作者声明本文无实际或潜在利益冲突)

参考文献:

- [1] ZHANG Jinliang, SHANG Yizi, LIU Jinyong, et al. Optimisation of reservoir operation mode to improve sediment transport capacity of silt-laden rivers[J]. *Journal of Hydrology*, 2021, 594: 125-131.
- [2] 刘慰, 王随继, 王彦君. 黄河下游河道断面形态参数变化及其水沙过程响应[J]. *地理科学*, 2020, 40(9): 1563-1572.
- [3] 孙一, 刘晓燕, 田勇, 等. 坡面植被覆盖度对泥沙输移的影响特性[J]. *工程科学与技术*, 2022, 54(5): 12-18.
- [4] JARAMILLO F, DESTOUNI G. Developing water change spectra and distinguishing change drivers worldwide[J]. *Geophysical Research Letters*, 2014, 41(23): 8377-8386.
- [5] 吴岳玲, 李世龙, 邱小琼, 等. 清水河流域水质综合分析与评价[J]. *环境监测管理与技术*, 2021, 33(2): 40-45.
- [6] 包淑萍, 王生鑫. 清水河流域水沙变化分析[J]. *人民黄河*, 2016, 38(3): 25-29.
- [7] 刘柏君, 贺丽媛, 李红艳. 干旱区河流径流演变及成因分析[J]. *水电能源科学*, 2022, 40(9): 40-43.
- [8] 李颖曼, 焦鹏, 张晓华, 等. 宁夏清水河流域近60年降水量及入黄沙量变化[J]. *水土保持研究*, 2021, 28(2): 184-189.
- [9] 艾成, 丁环. 宁夏清水河流域水文特性分析[J]. *宁夏农林科技*, 2010(3): 71-72.
- [10] 杨光, 鲁克新, 李鹏, 等. 基于SWAT模型的清水河流域年径流侵蚀功率空间分布[J]. *水土保持研究*, 2022, 29(6): 90-96, 103.
- [11] 包淑萍, 马云, 王生鑫. 宁夏清水河流域水资源评价分析[J]. *宁夏农林科技*, 2015, 56(3): 43-46, 50.
- [12] ZHAO Qiaoqiao, WANG Li, Liu Hao, et al. Runoff and sediment variation and attribution over 60 years in typical Loess Plateau Basins[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2019, 19(10): 3631-3647.
- [13] PETTITT A N. A non-parametric approach to the change-point problem[J]. *Journal of the Royal Statistical Society*, 1979, 28(2): 126-135.
- [14] 傅抱璞. 论陆面蒸发的计算[J]. *大气科学*, 1981, 5(1): 23-31.
- [15] 夏露, 马耘秀, 宋孝玉, 等. 黄河中游昕水河流域水沙变化及归因研究[J]. *水土保持学报*, 2021, 35(6): 109-115.
- [16] GAO Peng, LI Pengfei, ZHAO Baili, et al. Use of double mass curves in hydrologic benefit evaluations[J]. *Hydrological Processes*, 2017, 31(26): 4639-4646.
- [17] 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.
- [18] 王随继, 闫云霞, 颜明, 等. 皇甫川流域降水和人类活动对径流量变化的贡献率分析—累积量斜率变化率比较方法的提出及应用[J]. *地理学报*, 2012, 67(3): 388-397.
- [19] 杨吉山, 张晓华, 宋天华, 等. 宁夏清水河流域水库拦沙量分析[J]. *水土保持学报*, 2019, 33(6): 170-175.
- [20] 张华, 陈玉春, 汪文浩. 扬黄灌溉对宁夏清水河流域下游水资源影响分析[J]. *中国水利*, 2015(9): 44-46.
- [21] 李凌程, 张利平, 夏军, 等. 气候波动和人类活动对南水北调中线工程典型流域径流影响的定量评估[J]. *气候变化研究进展*, 2014, 10(2): 118-126.
- [22] 王陇, 宋孝玉, 李蓝君, 等. 黄土高原沟壑区典型小流域径流变化趋势及归因分析[J]. *水土保持研究*, 2021, 28(4): 48-53, 69.
- [23] 张艳霞, 于瑞宏, 薛浩, 等. 锡林河流域径流量变化对气候变化与人类活动的响应[J]. *干旱区研究*, 2019, 36(1): 67-76.

Attribution Analysis of Runoff and Sediment Changes at Different Scales in the Qingshui River Basin

HUANG Kang¹, LU Kexin^{1*}, SHEN Zhenzhou², ZHANG Guojun³, REN Zongping¹, LI Peng¹

(1. State Key Laboratory of Eco-hydraulics in Northwest Arid Region, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China;

2. Yellow River Institute of Hydraulic Research, YRCC, Zhengzhou 450003, China;

3. NingXia Soil and Water Conservation Monitoring Station, Yinchuan 750002, China)

Abstract: 【Objective】 Quantify the driving factors of runoff and sediment changes in the Qingshui River basin, and provide a theoretical basis for soil erosion control in the upper Yellow River basin. 【Method】 Based on the measured runoff and sediment data from three hydrological stations in the upper, middle and lower reaches of the Ningxia Qingshui River basin from 1970 to 2019 and meteorological data from meteorological stations in the basin, the Mann-Kendall test method and Pettitt test method were used to analyze the trend and abrupt change of hydro-meteorological series at different scales in the basin, and the Budyko hypothesis-based The elasticity coefficient method, the double cumulative curve method and the comparison of the slope rate of change of cumulative volume method were used for attribution analysis of water and sand variation at different scales in the basin. 【Result】 During the period from 1970 to 2019, the annual runoff depth of the whole Qingshui River basin shows a significant increase trend, and the annual sediment transport modulus shows no significant decrease trend. The annual runoff depth and annual sediment transport modulus of the upper, middle and upper reaches of the basin show a significant decrease trend, but the annual precipitation and annual potential evapotranspiration have not changed significantly; Compared with that before the abrupt change, the contribution rate of human activities to the reduction of annual runoff in the upstream, upper and middle reaches and the whole basin is 99.9%-114.3%, 77.5%-104.0% and -117.4% - -74.0% respectively, and the contribution rate to the reduction of annual sediment transport is 104.7%-116.4%, 110.2%-132.2% and 113.0%-139.0% respectively. 【Conclusion】 Human activities, such as irrigation by yellow diversion and soil and water conservation measures, are the main factors influencing the water and sand changes in the Qingshui River basin in the last 50 years.

Key words: Qingshui River; runoff and sediment change; elastic coefficient method; double cumulative curve method; cumulative slope rate of change comparison method

责任编辑: 韩 洋