

宁夏清水河流域近 60 年降水量及入黄沙量变化

李颖曼¹, 焦鹏², 张晓华², 杨吉山², 卫午毓³

(1.宁夏大柳树水利枢纽工程前期工作办公室, 银川 750001; 2.黄河水利科学研究院 水利部黄土高原水土流失过程与控制重点实验室, 郑州 450003; 3.华北水利水电大学 测绘与地理信息学院, 郑州 450045)

摘要:为了揭示黄河上游水沙变化成因,根据清水河流域的降雨、径流、输沙等实测资料,采用 Mann-Kendall 趋势及突变检验、“水文法”、“水保法”等方法,分析了不同时段降雨特征值及入黄沙量的变化情况及沙量变化成因。结果表明:1958—2015 年,年雨量、汛期雨量、主汛期雨量未发生显著变化及突变;流域控制站泉眼山的多年平均沙量为 0.248 亿 t,1990—1999 年来沙量最大,2010—2015 年来沙显著减少;流域人类活动减沙量随时间呈先减小后增大的趋势,主要与下垫面的水利水保工程建设及流域坡面治理密切相关;2000 年以来,流域水土保持坡面措施及淤地坝数量大幅增加,减沙效益日益显著,其中 2010—2015 年流域面上的水土保持措施减沙量为 733 万 t,减沙贡献率达 12%。清水河近期入黄沙量减少的主要原因是人类活动导致的下垫面变化,流域自 2000 年起逐步加大水土流失治理力度,2010 年以来减沙效益显著增加。

关键词:清水河; 降雨; 入黄沙量

中图分类号: P333

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2021)02-0184-06

Change of Precipitation and Sediment of Qingshui River Basin of Ningxia in Recent 60 Years

LI Yingman¹, JIAO Peng², ZHANG Xiaohua², YANG Jishan², WEI Wuyu³

(1.Ningxia Daliushu Project Preparatory Work Office, Yinchuan 750001, China;

2.Key Laboratory of Soil and Water Loss Process and Control on the Loess Plateau of MWR,

Yellow River Institute of Hydraulic Research, Zhengzhou 450003, China; 3.College of Surveying and

Geoinformatics, North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou 450045, China)

Abstract: In order to reveal the causes of changes in runoff and sediment in the upper reaches of the Yellow River, according to the measured data such as rainfall, runoff and sediment in the Qingshui River Basin, Mann-Kendall trend and mutation test, hydrological method and water conservation method were used to analyze the characteristic values of rainfall and the amounts of sediment in different periods. The results show that there were no significant change and sudden change in annual rainfall, flood season and main flood season from 1958 to 2015; the average annual amount of sediment in Quanyan Mountain as a watershed control station was 0.024 8 billion tons, and the largest amount of sediment yielded during the period 1990—1999, the sediment decreased significantly during the period 2010—2015; the decrease of sediment caused by human activities in the basin decreased first and then increased with time, which was mainly related to the construction of water conservancy project and warp land dam on the underlying surface and the management of soil and water conservation on watershed slopes; since 2000, the amount of soil and water conservation measures on slopes and silt dam of the basin had increased substantially, and the benefits of sediment reduction had become increasingly significant; the amount of sediment reduction by soil and water conservation measures on slopes of the basin during the period 2010—2015 was 7.33 million tons, and the contribution rate of sediment reduction was 12%. The main reason for the recent decrease in the amount of sediment entering the Yellow River

收稿日期: 2019-08-09

修回日期: 2020-01-13

资助项目: 国家重点研发计划项目(2016YFC0402408); 黄河水利科学研究院基本科研业务费专项(HKY-JBYW-2018-09); 水利部黄土高原水土流失过程与控制重点实验室开放课题(201601)

第一作者: 李颖曼(1966—), 女, 宁夏银川人, 高级工程师, 学士, 主要从事水文泥沙研究。E-mail: 1236lym@163.com

通信作者: 焦鹏(1986—), 男, 河南郑州人, 工程师, 硕士, 主要从事土壤侵蚀与流域水沙研究。E-mail: hnzzjp2010@126.com

by the Qingshui River is the change of the underlying surface caused by human activities. The control of soil erosion has been gradually enhanced since 2000, and the sediment has decreased significantly since 2010.

Keywords: Qingshui River; rainfall; sediment

黄河流域的水沙情势近年来发生了剧烈变化,潼关水文站年输沙量由 1919—1959 年的 16 亿 t 减少至 2010 年以来的 1.5 亿 t,减少约 90.6%^[1]。目前的黄河水沙变化成因研究多聚焦于黄河上中游干流及河龙区间主要支流,分析降雨和人类活动对径流、泥沙及水沙关系的影响^[2-6],但是对黄河上游典型支流的研究较少涉及。由于黄河具有“水沙异源”这一显著的空间分异特征,径流主要来自上游地区、泥沙主要来自中游地区,因此研究黄河上游主要支流降水特征的变化规律及其趋势,对揭示黄河水沙变化成因具有十分重要的意义。

清水河是黄河宁夏段最大的一级支流,也是宁夏水土流失最严重的河流,每年输入黄河的泥沙约占宁夏入黄总沙量的 49%,目前的研究工作主要集中于径流量、输沙量及水沙关系的变化情况^[7],对长系列降水量变化及水沙变化成因的研究尚未涉及。本文通过清水河流域 1958—2015 年的降水量、径流量、输沙量等资料,采用 Mann-kendall 趋势及突变检验、“水文法”、“水保法”等方法,揭示清水河降水量及入黄沙量变化情况,能够为黄河宁夏段水沙情势研究提供支撑。

1 研究区概况

清水河长 320 km,流域面积 14 481 km²,流经原州区、海原县、西吉县、同心县、红寺堡区、中宁县、沙坡头 7 县区,由中宁县泉眼山(37°29′12.78″N, 105°32′30.53″E)汇入黄河。流域地势南高北低,地貌以黄土丘陵沟壑区为主,左岸主要支流有东至河、中河、苋麻河、西河、金鸡儿沟、长沙河等,右岸主要支流有杨达子沟、大红沟、双井子沟、折死沟、洪泉沟等^[7](图 1)。清水河流域年降水量由上游的 600 mm 至下游的 200 mm,相差 2 倍,流域平均降水量 349 mm;固原的七营、苋麻河以南为 400~600 mm 的半干旱区,以北为 400~200 mm 的干旱区。

2 材料与方法

2.1 资料来源与处理

降水量方面,统计了清水河流域 1958—2015 年共计 93 个雨量站的逐日降水量,使用泰森多边形法逐年计算年降水量、汛期降水量、主汛期降水量等流域降雨特征值。径流量与输沙量使用清水河流域出口控制站泉眼山水文站的实测资料。

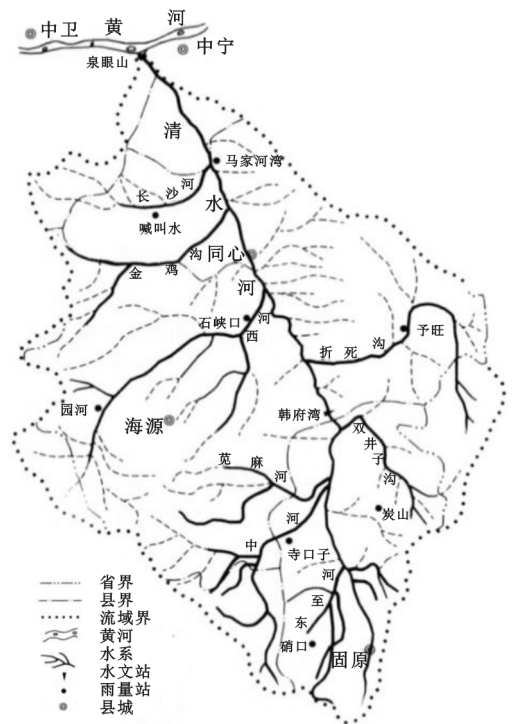


图 1 清水河流域水系

水土保持措施面积数据主要来自宁夏回族自治区的年报统计资料及 2011 年全国水利普查资料。以 2011 年第一次全国水利普查数据为基础,结合清水河典型小流域与样区的调查勘测、遥感影像解译、样区核查分析和专家咨询等多种方法,最终确定 1954—2015 年清水河流域各项水土保持措施的保存面积。

2.2 研究方法

2.2.1 Mann-Kendall 趋势及突变检验 Mann-Kendall 检验法是对时间序列的变化趋势进行显著性检验的一种非参数统计检验方法,被广泛应用于评估气候要素和水文序列趋势分析及突变检测。

在趋势检验中,对于具有 n 个样本量的时间序列 X ,原假设 H_0 表示数据集 X 的数据样本独立同分布且无趋势存在,可选假设 H_1 表示数据集 X 存在一个单调趋势。对于 Mann-Kendall 统计量 Z_c ,如果 $-Z_{1-\alpha/2} \leq Z_c \leq Z_{1-\alpha/2}$,原假设 H_0 即被接受,反之则 H_1 被接受。倾斜度 β 能够量化单调趋势,当 $\beta > 0$ 时,反映上升的趋势,反之则反映下降的趋势。

在突变检测中,统计量 UF_k 为时间序列 X 按照顺序计算的秩序列标准化参数, UF_k 为标准正态分布,对于给定的显著性水平 α ,若 $|UF_k| > U_\alpha$,表明序列存在明显的趋势变化。 UB_k 为按照时间序列 X 逆序计算的秩序列标准化参数。若统计量 UF_k 大于 0,则表明序

列呈上升趋势,小于 0 则表明呈下降趋势。当 UF_k 超过临界值,表明上升或下降趋势显著,超过临界值的范围确定为出现突变的时间区域。若 UF_k 和 UB_k 两条曲线存在交点,且交点位于临界线之间,则交点对应的时刻为突变开始的时刻,即为突变点。

2.2.2 水文法 “水文分析法”简称“水文法”,就是利用基准期实测的水文泥沙资料,建立降雨产流产沙数学模型,然后将评价期的降雨因子代入所建模型,计算出评价期的产流产沙量,与基准期的相比,即可评估出因降雨变化所引起的水沙变化量;再与评价期的实测水沙量比较,其差值即为水利水土保持综合治理等人类活动减少的水量和沙量。

2.2.3 水保法 “水保法”也称“成因分析法”,通过对不同地区水土保持径流试验小区观测的水土保持措施减水减沙资料统计分析,确定各单项措施在单位面积上的减水减沙量,即减水减沙指标,并按一定方法进行尺度转换后再推到流域面上;再根据各单项水土保持措施减水减沙指标和单项措施面积,二者相乘即得到分项水土保持措施减水减沙量。

3 结果与分析

3.1 降水量变化

3.1.1 降水量时段变化 清水河流域的各降雨特征不同时段值较多年平均值变化情况见图 2,年降水量、汛期降水量、主汛期降水量在 1958—1969 年、1980—1989 年、1990—1999 年、2000—2009 年等时段内保持同增同减,雨量较多年均值的增大或减小变化趋势一致。1970—1979 年,年降水量、主汛期降水量较多年均值增大,汛期降水量较多年均值减小;2010—2015 年,年降水量、汛期降水量较多年均值增大、主汛期降水量较多年均值减小。就降雨特征参数的增减幅度而言,汛期降雨量在不同时段的变化幅度最大。

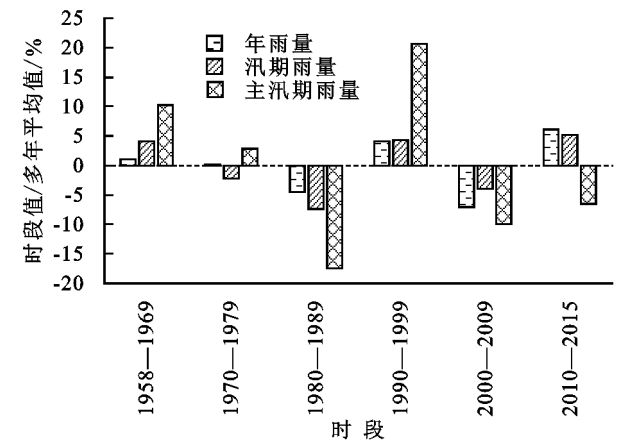


图 2 年降水量、汛期降水量、主汛期降水量各时段变化值

3.1.2 降水量趋势及突变点检测 清水河流域 1958—2015 年的年降水量、汛期降水量、主汛期降水量等的 Mann-Kendall 趋势检验统计值 Z 和倾斜度 β 见表 1。年降水量、汛期降水量的 Z 值与 β 值均为正值,二者均呈增大趋势,但变化趋势并不显著,汛期降水量的增大速率大于年降水量;主汛期降水量的 Z 值与 β 值为负值,呈减小趋势,其变化趋势亦不显著。综上所述,各降雨特征值均无显著的变化趋势(显著性水平 $\alpha=0.05$, $|Z_{0.05}|=1.64$)。

表 1 降水特征值趋势检验

统计量	年降水量	汛期降水量	主汛期降水量
Z 值	0.2012	0.3488	-0.6440
斜率	0.1228	0.2108	-0.2929

清水河流域 1958—2015 年的年降水量、汛期降水量、主汛期降水量的 Mann-Kendall 突变检验分别见图 3—5。年降水量、汛期降水量、主汛期降水量等的统计量 UF 与 UB 虽有若干交点,但因 UF 均未超过临界值(1.96),故三者均无显著变化趋势和突变点。

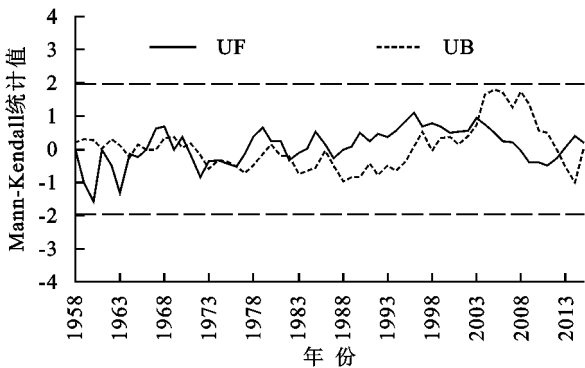


图 3 年降水量 Mann-Kendall 突变检验

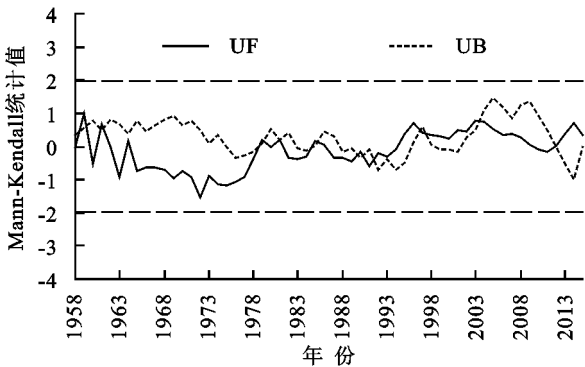


图 4 汛期降水量 Mann-Kendall 突变检验

3.2 沙量变化与成因分析

3.2.1 沙量变化情况 泉眼山水文站位于清水河流域下游,是入黄控制站,控制面积为 $14\,480\text{ km}^2$,不同时段年均沙量见图 6。泉眼山站 1957—2015 年的多年平均沙量为 0.248 亿 t ,1957—1969 年、1990—1999 年、2000—2009 年这 3 个时期的沙量较长时期

均值偏多 0.5%~79.2%,其中 1990—1999 年的沙量增幅最大为 79.3%;1970—1979 年、1980—1989 年、2010—2015 年这 3 个时期的沙量较长时期均值偏少 22.8%~64.3%,尤其是 2010—2015 年减少最多。

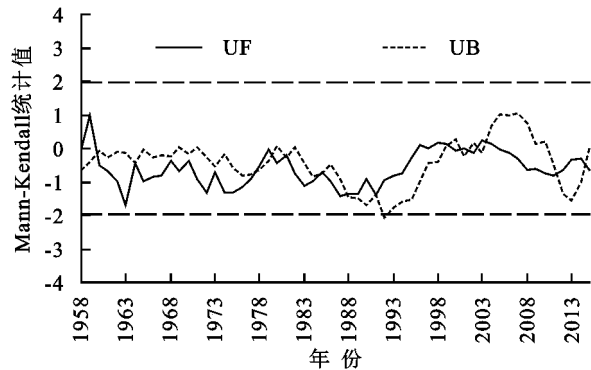


图 5 主汛期降水量 Mann-Kendall 突变检验

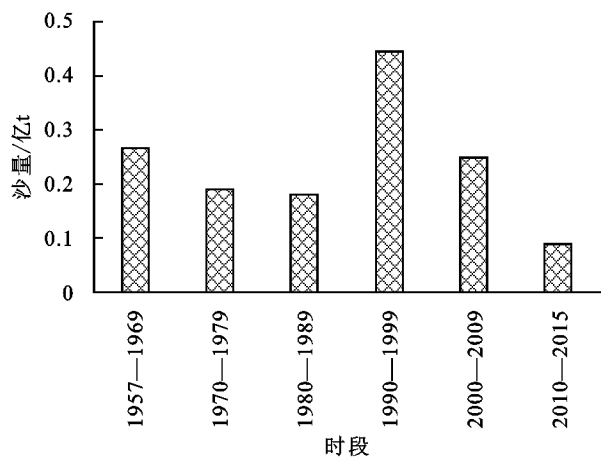


图 6 泉眼山站不同时段年均沙量

3.2.2 沙量变化成因 影响入黄沙量变化的主要因素包括气候、水利工程、水土保持措施和经济社会发

展 4 类。其中,气候因素属自然因素,主要指降水,其余 3 类均为人类活动因素。本文利用“水文法”能够定量计算各时期降雨变化与人类活动对流域沙量的影响,通过“水保法”能够求得流域面上各单项水土保持措施的减沙量及减沙贡献率。由于资料限制,未考虑水利水保工程及经济社会发展等因素对于流域沙量的影响。

(1) 降水与人类活动减沙量。本次建模对 1958—1969 年清水河流域各降雨特征值与天然产沙量进行相关分析,按照相关系数最大以及相互独立的原则,初步筛选出模型因变量,后使用不同类型模型进行适配,将决定系数最大的模型确定为该建模系列条件下的最优经验模型,进而逐年计算 1970—2015 年的“天然产沙量”,与 1958—1969 年基准期相比,得到各时段因人类活动和降雨变化所引起的泥沙减少量。

由相关矩阵分析知,“天然产沙量”与“主汛期降雨量”的相关系数最大为 0.939 4,且 p 值小于 0.01,二者的相关性显著。因此,建立以“主汛期降雨量”为自变量、以“天然产沙量”为因变量的模型。

$$S=0.2335P_{7-8}^{1.931} \tag{1}$$

式中: S 为天然产沙量(万 t); P_{7-8} 为主汛期降雨量(mm)。

使用该模型逐年计算 1970—2015 年的天然年产沙量,人类活动年减沙量为同时段天然年产沙量与实测年输沙量的差值,降雨年减沙量为基准期天然年产沙量与基准期外各时段天然年产沙量的差值,计算结果见表 2。其中,1958—1969 年的天然年产沙量为还原沙量,引自黄河水沙变化研究资助项目的相关成果^[8]。

表 2 清水河各时段沙量及较基准期天然沙量减少值

时间段	实测年输沙量/万 t	天然年产沙量/万 t	人类活动年减沙量		降雨年减沙量	
			量值/万 t	减幅/%	量值/万 t	减幅/%
1958—1969	2768	6031	3263	54.1		
1970—1979	1914	4641	2728	45.2	1390	23.0
1980—1989	1796	3017	1221	20.2	3014	50.0
1990—1999	4448	6209	1761	29.2	—178	—3.0
2000—2009	2494	3525	1032	17.1	2506	41.5
2010—2015	886	3726	2840	47.1	2305	38.2

各时段实测年输沙量、天然年产沙量、人类活动年减沙量、降雨年减沙量等的变化总体呈波动状态,无明显趋势。2000—2009 年、2010—2015 年的人类活动年减沙量与基准期天然年产沙量相比,分别减少了 17.1%,47.1%;2000—2009 年、2010—2015 年的降雨年减沙量与基准期天然年产沙量相比,分别减少了 41.5%,38.2%。2010 年以来,泉眼山站实测年输沙量大幅降低,人类活动年减沙量大幅增加。

(2) 各项水土保持坡面措施减沙量。随着清水

河流域治理力度的加大,流域面上水土保持措施对流域沙量的影响逐步增大,“水保法”能够定量评估其减沙作用:以 1958—2015 年的长系列年汛期降雨量为丰平枯评判标准,根据每年汛期降雨量的丰平枯情况和各单项水土保持措施的质量等级选取对应指标,各单项水土保持措施不同质量等级的面积按该年的措施质量等级占比进行面积估算,将选取的各单项水土保持措施减沙指标与对应面积相乘即得该年各单项水土保持措施的减沙量。各单项水土保持措施减沙

指标根据“泥沙模数还原法”推求^[9]。

清水河流域不同时段各项水土保持坡面措施减沙量见表 3,各项水土保持坡面措施减沙贡献率为减沙量与基准期天然沙量的比值百分数,见表 4。流域水土保持措施减沙量随时间呈增大趋势,2000 年以来的减沙量增幅尤为显著,2000—2009 年、2010—2015 年的措施年均减沙量分别为 425.86 万 t,733.77 万 t,减沙贡献率分别为 7.1%,12.2%。其中,年减沙量在 2010—2015 年取得最大值,各项措施年均共计减沙 733.77 万 t,减沙贡献率达 12.2%;该时段内各项措施的减沙量均取得最大值,其中人工造林减沙量最大,减沙 274.03 万 t,减沙贡献率为 4.5%。

表 3 不同时段水土保持坡面措施年减沙量 万 t					
时间段	梯田 减沙量	造林 减沙量	种草 减沙量	封禁 减沙量	合计
1958—1969	10.99	13.81	5.72	21.75	52.27
1970—1979	20.53	25.16	10.40	39.52	95.61
1980—1989	28.12	33.68	13.88	52.75	128.43
1990—1999	67.24	73.77	29.97	109.49	280.47
2000—2009	89.96	161.12	42.06	132.72	425.86
2010—2015	141.71	274.03	66.46	251.58	733.77

表 4 不同时段水土保持坡面措施年减沙贡献率 %					
时间段	梯田 贡献率	造林 贡献率	种草 贡献率	封禁 贡献率	合计
1958—1969	0.2	0.2	0.1	0.4	0.9
1970—1979	0.3	0.4	0.2	0.7	1.6
1980—1989	0.5	0.6	0.2	0.9	2.1
1990—1999	1.1	1.2	0.5	1.8	4.7
2000—2009	1.5	2.7	0.7	2.2	7.1
2010—2015	2.3	4.5	1.1	4.2	12.2

1958—2015 年,清水河流域各时段的坡面水土保持措施减沙量见图 7。各项坡面水土保持措施的减沙量均随时间增大;1999 年以前,各项措施减沙量在各时段内的增大趋势与速率基本保持一致,措施减沙量由大到小依次为封禁治理、人工林、梯田、人工草;2000 年以来,人工林、封禁治理的减沙量增速明显高于梯田与人工草,其中人工林减沙量最大,措施减沙量由大到小依次为人工林、封禁治理、梯田、人工草。

(3) 水库及淤地坝拦沙量。根据现有资料统计,截至 2012 年清水河流域共有水库 108 座,水库总库容为 12.35 亿 m³(表 5)。1956—1979 年是水库建设最多的时期,座数占水库总数的 67%,库容占水库总库容的 86%。截至 2012 年清水河流域共有淤地坝 302 座,淤地坝总库容 1.23 亿 m³,淤积库容 0.53 亿 m³。2000 年以来开展了大规模淤地坝建设,2000—2012 年建设淤地坝 261 座,数量与库容约占总数的 91%。

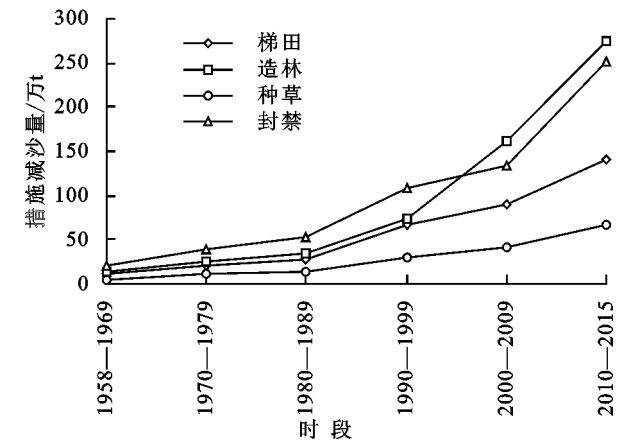


图 7 清水河不同时段各单项坡面水土保持措施减沙量

表 5 不同时期水库及淤地坝建设数量 座						
时间段	水库			淤地坝		
	中型	小型	合计	骨干坝	中小型坝	合计
1956—1969	5	16	21	0	0	0
1970—1979	3	43	46	0	6	6
1980—1989	0	9	9	2	16	18
1990—1999	2	12	14	3	10	13
2000—2009	3	7	10	66	173	239
2010—2012	0	0	0	14	12	26

清水河流域 100 座水库(不包括 8 座清水库)中有 31 座在 1974—2012 年进行过 3~4 次淤积量测量,水库淤积量约为 3.17 亿 m³。清水河流域于 2012 年对 302 座淤地坝的淤积量开展过 1 次系统测量,淤积量为 1 742 万 m³。根据杨吉山等^[10]提出的水库与淤地坝拦沙量逐渐推算方法,使用实测资料计算不同时段的坝库年拦沙量,见表 6。流域坝库拦沙量与水库、淤地坝建设密切相关,其中水库起主要拦沙作用,淤地坝拦沙量自 2000 年以来大幅增加。

表 6 不同时期水库及淤地坝年拦沙量 万 t			
时间段	水库 拦沙量	淤地坝 拦沙量	坝库 合计
1959—1969	3443.0	0.0	3443.0
1970—1979	2134.8	0.8	2135.6
1980—1989	560.5	8.9	569.4
1990—1999	1018.3	28.5	1046.8
2000—2009	705.8	162.1	867.8
2010—2012	334.7	117.0	451.7

4 结 论

(1) 流域降雨的年内分配在不同时期存在较大差异,汛期降雨量在不同时期的变化幅度最大。Mann-Kendall 趋势及突变检验表明,1958—2015 年,年雨量、汛期雨量、主汛期雨量未发生显著变化及突变。

(2) 流域控制站泉眼山站 1957—2015 年的多年平均沙量为 0.248 亿 t,各时段来沙量与降雨及人类活动密切相关,其中人类活动减沙量随时间呈先减小后增大的趋势。1990—1999 年的来沙量最多,主要

由于该时期降雨量偏大,尤其是汛期雨量为各时期最大值,故天然产沙量较多,且 1980 年以后流域水利水保工程及坡面水土保持措施量增幅缓慢,前期坝库已严重淤积,拦沙作用有限;2010—2015 年的来沙量最少,主要原因为汛期雨量偏小,自 2000 年以来流域开展了较大规模的淤地坝与水土保持坡面措施建设,同期建成水库 10 余座,沟道工程拦沙及水保坡面措施减沙作用均大幅增加。

(3) 清水河流域自开展坡面水土流失治理以来,治理成效逐渐显现。2000 年以来,各项坡面水土保持措施减沙量及淤地坝拦沙量均呈较快增大趋势,其中人工林与封禁治理的成效尤为显著。

参考文献:

- [1] 胡春宏,张晓明.论黄河水沙变化趋势预测研究的若干问题[J].水利学报,2018,49(9):1028-1039.
- [2] 姚文艺,高亚军,安催花,等.百年尺度黄河上中游水沙变化趋势分析[J].水利水电科技进展,2015,35(5):112-120.
- [3] Yao W Y, Xiao P Q, Shen Z Z, et al. Analysis of the contribution of multiple factors to the recent decrease in discharge and sediment yield in the Yellow River Basin, China[J]. Journal of Geographical Sciences, 2016, 26(9):1289-1304.
- [4] 鲁俊,安催花,吴晓杨.黄河宁蒙河段水沙变化特性与成因研究[J].泥沙研究,2018,43(6):40-46.
- [5] 姚文艺,侯素珍,丁赞.龙羊峡、刘家峡水库运用对黄河上游水沙关系的调控机制[J].水科学进展,2017,28(1):1-13.
- [6] 史红玲,胡春宏,王延贵,等.黄河流域水沙变化趋势分析及原因探讨[J].人民黄河,2014,36(4):1-5.
- [7] 包淑萍,王生鑫.清水河流域水沙变化分析[J].人民黄河,2014,36(4):1-5.
- [8] 汪岗,范昭.黄河水沙变化研究[M].郑州:黄河水利出版社,2002.
- [9] 冉大川,柳林旺,赵力仪,等.黄河中游河口镇至龙门区间水土保持与水沙变化[M].郑州:黄河水利出版社,2000.
- [10] 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):170-174.
- ~~~~~
- (上接第 183 页)
- [15] Brutsaert W, Parlange M B. Hydrologic cycle explains the evaporation paradox [J]. Nature, 1998, 396(6706):30.
- [16] Stanhill G, Cohen S. Global dimming: a review of the evidence for a widespread and significant reduction in global radiation with discussion of its probable causes and possible agricultural consequences[J]. Agricultural & Forest Meteorology, 2001,107(4):255-278.
- [17] Cohen S, Ianetz A, Stanhill G. Evaporative climate changes at Bet Dagan, Israel, 1964—1998[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2002,111(2):83-91.
- [18] Chattopadhyay N, Hulme M. Evaporation and potential evapotranspiration in India under conditions of recent and future climate change[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 1997,87(1):55-73.
- [19] Cohen S, Stanhill G. Evaporative climate changes at BetDagan, Israel, 1964—1998 [J]. Agri Forest Meteor, 2002,111(2):83-91.
- [20] Zuo H C, Li D L, Hu Y Q. Climate change trendand its relationship to change of pan evaporation in China in recent 40 years[J]. Chinese Sci Bull, 2005, 50(11): 1125-1130.
- [21] 邱新法,刘昌明,曾燕.黄河流域近 40 年蒸发皿蒸发量的气候变化特征[J].自然资源学报,2003,18(4):437-447.
- [22] 郭军,任国玉.黄淮海流域蒸发量的变化及其原因分析[J].水科学进展,2005,16(5):666-672.
- [23] 韩松俊,刘群昌,杨书君.黑河流域上中下游潜在蒸散发变化及其影响因素的差异[J].武汉大学学报:工学版,2009,29(6):734-737.
- [24] 王艳君,姜彤,许崇育.长江流域 20 cm 蒸发皿蒸发量的时空变化[J].水科学进展,2006,17(6):830-833.
- [25] 罗玉峰,缴锡云,彭世彰,等.海河流域参考作物腾发量长期变化趋势分析[J].灌溉排水学报,2009,28(1):10-13.
- [26] 廉毅,安刚,王琪,等.吉林省 40 年来气温和降水的变化[J].应用气象学报,1997,8(2):197-204.
- [27] 任芝花,黎明琴,张纬敏.小型蒸发器对 E2601B 蒸发器的折算系数[J].应用气象学报,2002,13(4):508-512.
- [28] 刘玉英,韦小丽,李宇凡.1961—2012 年吉林省日照时数的变化特征及影响因素[J].自然资源学报,2015,30(8):1367-1377.
- [29] 施晓晖,徐祥德,谢立安.暖季中国东部气溶胶“影响显著区”的气候变化特征[J].中国科学 D 辑:地球科学,2008,38(4):519-528.
- [30] 谢今范,刘玉英,李宇凡.吉林地面和高空风速变化特征及成因分析[J].高原气象,2015,34(5):1424-1434.
- [31] 王亚平,黄耀,张稳.中国东北三省 1960—2005 年地表干燥度变化趋势[J].地球科学进展,2008,23(6):619-627.
- [32] 孙力,沈柏竹,安刚.中国东北地区地表干湿状况的变化及趋势分析[J].应用气象学报,2003,14(5):542-552.
- [33] 马柱国,符淙斌.中国北方干旱区地表湿润状况的趋势分析[J].气象学报,2001,59(6):737-746.
- [34] 赵福年,赵铭,王莺,等.石羊河流域 1960—2009 年参考蒸散量与蒸发皿蒸发量变化特征[J].干旱气象 2014,32(4):560-568.