

DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2019.01.045

湟水输沙量演变特征分析

时 璐, 汪清旭

(青海省水文水资源局勘测局, 青海 西宁 810001)

摘 要: 运用 MANN-KENDALL 检验法和均值差异 T 检验法对民和站 1956 年—2013 年的输沙量和径流量进行趋势分析和突变分析。得出的主要结论有: 水沙线性关系较差, 降水径流相关关系较好; 泥沙年际变化剧烈与人类活动有较大关系, 降水径流变化幅度较稳定; 泥沙有显著的下降趋势且在 1999 年发生突变; 降水径流没有明显的变化趋势和突变点; 人类活动对河流泥沙含量影响较大, 泥沙减少主要是因为水利工程拦蓄和水土保持措施造成。

关键词: Mann-Kendall; 湟水; 输沙量; 趋势分析

中图分类号: TV143

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2019)01-0248-05

Analysis of Sediment Discharge Change Characteristics in Huangshui River

SHI Lu, WANG Qingxu

(Bureau of Hydrology and Water Resources of Qinghai Province, Xining, Qinghai 810001, China)

Abstract: Trend analysis and point of abrupt change analysis of sediment discharge and runoff at Minhe station from 1956 to 2013 are carried out by Mann-Kendall test and mean difference T test. The results mainly are: the linear relationship between water and sediment is poor, while rainfall and runoff correlation are better; interannual variation of sediment is strongly correlated to human activities, the change of precipitation runoff is stable; there was a significant decrease in sediment and 1999 is a point of abrupt change; there was no obvious change trend and abrupt change point of rainfall and runoff; human activities have great influence on the s river sediment, which is decreased mainly because of the water conservancy and conservation of water and soil interception.

Keywords: Mann-Kendall; Huangshui River; sediment discharge; trend analysis

泥沙是指在土壤侵蚀过程中, 随水流输移和沉积的土体、矿物岩石等固体颗粒。对流域而言, 河流泥沙不仅反映水土流失状况, 还是流域内降水、径流、土壤、地形地貌植被等流域特性的体现。

湟水谷地是青海省工农业发展基地, 农业资源优越, 流域面积 1.61 km², 仅占青海全省面积的 2.2%, 耕地面积却相当于全省的 56%, 并养育了全省人口的 61%, 但湟水流域水土流失严重, 这与高原地区气候特征、生态环境和人类活动有非常大的关系。湟水谷地属黄土高原山地区, 地表植被条件差, 受水力侵蚀严重, 大量黄土受到降水侵蚀汇流到河流中, 造成河道淤积, 过洪断面减小, 给河道防洪带来很大压力, 也严重影响到沿岸人民生活 and 工农业发展, 因此研究泥沙的演变特征具有重要的意义。

掌握河流的水沙特性可以为合理有效地开发和利用湟水流域水土资源提供服务以及对水资源利用的有效调控提供依据^[1-5]。

1 流域概况

湟水河又名西宁河, 指流经西宁城北的黄河重要支流。位于中国青海省东部。发源于海晏县包呼图山。东南流经西宁市, 到甘肃省兰州市西面的达家川入黄河。河长 349 km, 由于流域有不同的岩性与构造区, 因而发育成峡谷和盆地形态。湟水河两侧沟壑发育, 支流较多, 水系发育, 呈树枝状和羽状。

民和水文站系湟水主要控制站, 位于东经 102°48', 北纬 36°20', 集水面积 15 342 km², 水文站控制流域内河道平均比降 5.3‰, 是青海省境内湟水

干流上最后一个控制站(见图 1),其径流量、输沙量通常用于作为研究青海境内湟水径流量、输沙量以及进入甘肃的径流量和输沙量的重要依据。本文通过对民和站 1956 年—2013 年的径流泥沙资料分析湟水的泥沙演变特征。



图 1 民和站控制流域图

20 世纪 90 年代以来,由于气候变暖,使冰川面积减小、雪线上抬,极端天气出现频繁,对于本就脆弱的高原生态环境而言无疑是雪上加霜,农牧业生产环境恶化,直接影响了全省的粮食生产和经济发展^[6]。

探究民和站径流泥沙演变特征了解湟水流域(不包含大通河流域)径流泥沙变化趋势,为湟水流域的水资源开发利用、农业工业发展和防洪抗旱提供依据。

2 研究方法

本文中对径流量和输沙量的趋势分析和突变分析采用 Mann - Kendall 非参数统计方法(M - K)^[7-12]。M - K 能够检验出水文序列是否具有趋势和突变,并且判断出趋势是否明显和检查出序列突变的时间点。

趋势分析^[11]: 假设时间序列(X_1, X_2, \dots, X_n), 定义统计量 S :

$$S = \sum_{i=2}^n \sum_{j=1}^{i-1} \text{sign}(X_i - X_j) \quad (1)$$

其中 sign 为符号函数。当 $X_i - X_j$ 小于、等于或大于零时, $\text{sign}(X_i - X_j)$ 分别为 $-1, 0, 1$ 。 S 为正态分布,其均值为 0。

方差:

$$\text{Var}(S) = n(n-1)(2n+5)/18 \quad (2)$$

检验值:

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

在双边趋势检验中,对于给定的置信水平 α ,若 $|Z| \geq Z_{1-\alpha/2}$,则原假设 H_0 是不可接受的,即在置信水平 α 上,时间序列数据存在明显的上升或下降趋势。 Z 为正值表示增加趋势,负值表示减少趋势。

突变分析^[12]: 设输沙序列 X_1, X_2, \dots, X_n , S 表示第 i 个样本 $X_i > X_j$ 的累计数,定义统计量:

$$S = \sum_{i=1}^k C_i, C_i = \begin{cases} 1, X_i > X_j \\ 0, X_i < X_j \end{cases} (j = 1, 2, \dots, i; k = 1, 2, \dots, n) \quad (4)$$

在时间序列随机独立的假定下, S 的均值和方差分别为:

$$E(S) = \frac{k(k-1)}{4}, \text{Var}(S) = \frac{k(k-1)(2k+5)}{72}, \quad 1 \leq k \leq n \quad (5)$$

将 S 标准化:

$$UF(k) = \frac{S - E(S)}{\sqrt{\text{Var}(S)}} \quad (6)$$

给定显著性水平 α ,若 $UF(k)$ 的绝对值大于 U_α ,则表明序列存在明显的趋势变化。所有 $UF(k)$ 可组成一条曲线。将此方法引用到反序列以同样的方法计算 $UB(k)$ 得到一条曲线,两条曲线的交点位于置信线之间,则此点可能就是突变点的开始。Mann - Kendall 非参数秩次检验在数据趋势检测中极为有用,其特点表现为:(1) 无需对数据系列进行特定的分布检验,对于极端值也可参与趋势检验;(2) 允许系列有缺失值;(3) 主要分析相对数量级而不是数字本身,这使得微量值或低于检测范围的值也可以参与分析;(4) 在时间序列分析中,无需指定是否是线性趋势^[13]。

3 泥沙演变特征

3.1 水沙的年际变化

径流量和输沙量的年际变化幅度一般通过离势系数 C_v 和绝对比率 K 来反映^[14]。 C_v 值反映水文要素整体序列的离散程度, C_v 值越大,离散度越大,说明年际变化越剧烈;反之亦然。 C_v 值越小,说明水沙的年际变化小这种情况有利于流域内水沙资源的利用^[15]; K 值体现水文要素的年际绝对变化, K 值越大,年际变化幅度越大。

将整个时间序列分成三部分进行分析 1956 年

—1979 年、1980 年—1999 年、2000 年—2013 年各序 列水文特征值见表 1。

表 1 各水文要素的水文特征值

年份	年输沙量均值 /万 t	C_v 年输沙量	K 年输沙量	年径流量均值 /亿 m^3	C_v 年径流量	K 年径流量	面平均降水量均值 /mm	C_v 面平均降水量	K 面平均降水量	输沙模数均值 / $(t \cdot km^{-2} \cdot a^{-1})$
全序列	1349.6	0.89	40.87	20.78	0.21	2.72	399.9	0.16	2.13	879.7
1956—1979	2161.2	0.65	14.92	20.30	0.26	2.45	400.0	0.20	2.03	1408.7
1980—1999	1081.1	0.43	5.68	21.23	0.21	2.72	394.9	0.14	1.75	704.6
2000—2013	341.8	0.48	5.43	20.95	0.14	1.52	406.8	0.11	1.42	222.8

通过表 1 可知在全部时间序列中输沙量年际变化剧烈, C_v 值达到 0.89, 在 1980 年后 C_v 降低到 0.43, 从整个系列来看输沙量的年际变化趋于稳定且均值不断减少; 径流量的年际变化一直很稳定, 总体 C_v 不超过 0.26, 到 21 世纪后 C_v 大幅度减小; 通过输沙模数可得 1979 年前流域内水土流失严重, 自 2000 年以来输沙模数明显减小。

3.2 水沙的趋势和突变分析

3.2.1 水沙趋势分析

根据对民和站 1956 年—2013 年的实测资料进行 M-K 分析结果见表 2。

表 2 M-K 统计量

检验类型	输沙量 /万 t	径流量 /亿 m^3	面降水量 /mm
统计量 S	-725	294	309
检验值 Z	-4.86	0.35	0.37

由表 2 可得输沙量时间序列通过置信水平为 99% 的趋势检验, 表现为明显的下降趋势; 径流量与降水量变化趋势一致, 呈上升趋势但都没有通过 90% 的显著性检验, 所以径流量与降水量有不显著的上升趋势。输沙量最大出现年份与降水量最大同年都为 1961 年, 值分别为 5 640 万 t 和 570.5 mm, 年径流量最大值 34.47 亿 m^3 , 出现在 1989 年; 最小值年径流量与面平均降水量都为 1991 年分别为 12.65 亿 m^3 和 267.6 mm, 年输沙量最小值为 138 万 t 在 2005 年出现。

3.2.2 水沙突变分析

使用 M-K 突变分析得出图 2、图 3、图 4。

通过分析图 2 可得: 1956 年—1962 年不显著的上升趋势, 1963 年—1997 年不显著的下降趋势, 1998 年—2013 年显著的下降趋势, 与趋势分析结果一致; 图中两条曲线的交点从 1997 年—1999 年, 说明这是突变开始的范围。

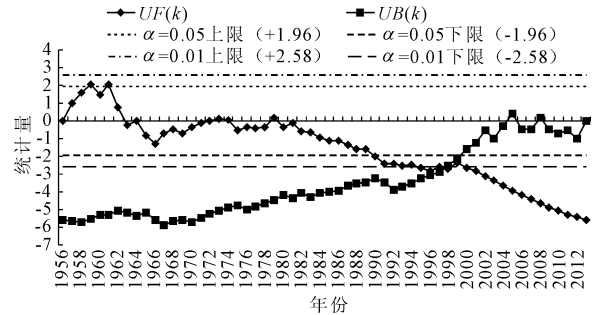


图 2 民和站年输沙量突变分析

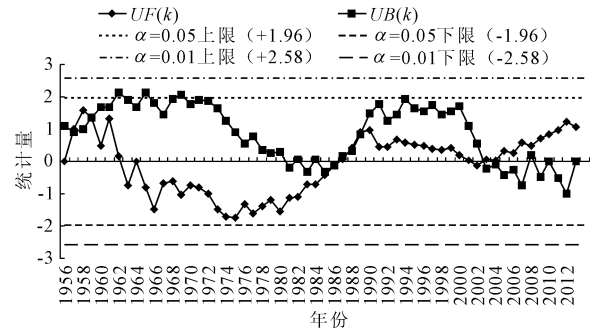


图 3 民和站年径流量突变分析图

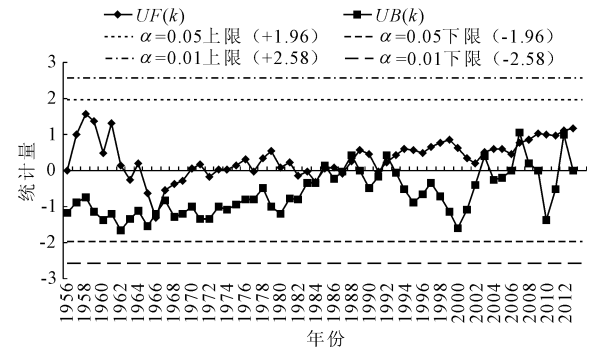


图 4 民和站年降水量突变分析

从图 2、图 3 和图 4 中分析可以得出结论见表 3。

从表 3 可以得出径流、泥沙和降水的变化趋势和突变时间点, 但此时我们还需要确认突变现象的产生是因为丰枯年际变化而产生, 而不是单纯的气象突变。

表 3 M-K 检验结论表

年份类型	输沙量情况	年径流量情况	面平均降水量情况
变化趋势	1956~1962 上升	1956~1961 上升	1965~1962 上升
	1963~1972 下降	1962~1986 下降	1963~1970 下降
	1973~2013 显著下降	1987~2001 上升	1971~1982 上升
		2002~2013 上升	1988~2013 上升
突变点	1997~1999	1957、1959、1986~1989、2002	1967、1984~1989、1992、2007

本文使用均值差异 T 检验的方法确定突变现象^[16]。定义样本长度为 N 的序列的突变指数为:

$$I_j = \frac{|\bar{X}_1 - \bar{X}_2|}{S_1 + S_2} \quad (7)$$

式中: X_1 和 S_1 基准年前的时段 M_1 的平均值和标准差; X_2 和 S_2 为基准年后时段面 M_2 的平均值和标准

差。
定义统计量:

$$\tau = \frac{\bar{X}_1 - \bar{X}_2}{S_p \left(\frac{1}{M_1} + \frac{1}{M_2} \right)^{1/2}} \quad (8)$$

式中: M_1 和 M_2 分别为前后两段序列的样本长度; S_p 为联合样本差即:

$$S_p^2 = \frac{(M_1 - 1)S_1^2 + (M_2 - 1)S_2^2}{M_1 + M_2 - 2} \quad (9)$$

式中: S_1 和 S_2 分别为前后两个时段序列的方差。该统计量 τ 给出一定的显著水平,如 $\tau > \tau_\alpha$ 则在 α 的显著水平上基准点两侧有明显差异,取这一区间中最大 I_j 的年份作为突发时间点。

对 1996 年—1999 年进行均值 T 检验,结果见表 4。

表 4 各项 T 检验统计表

项目	M_i	突变指数 I_j	统计量 τ	显著水平 α	临界值 τ_α	判别	突变年份
年输沙量	41	0.625	3.538	0.01	2.667	$\tau > \tau_\alpha$	1996
	42	0.723	3.800	0.01	2.667	$\tau > \tau_\alpha$	1997
	43	0.732	3.739	0.01	2.667	$\tau > \tau_\alpha$	1998
	44	0.967	4.066	0.01	2.667	$\tau > \tau_\alpha$	1999
	45	0.956	3.878	0.01	2.667	$\tau > \tau_\alpha$	2000
年径流量	2	0.274	-0.548	0.10	1.673	$ \tau < \tau_\alpha$	1957
	4	0.197	0.683	0.10	1.673	$ \tau < \tau_\alpha$	1969
	31	0.083	-0.623	0.10	1.673	$ \tau < \tau_\alpha$	1986
	32	0.076	-0.569	0.10	1.673	$ \tau < \tau_\alpha$	1987
	33	0.037	-0.273	0.10	1.673	$ \tau < \tau_\alpha$	1988
	34	0.077	0.529	0.10	1.673	$ \tau < \tau_\alpha$	1989
	47	0.034	-0.171	0.10	1.673	$ \tau < \tau_\alpha$	2002
面平均降水量	12	0.025	0.219	0.10	1.673	$ \tau < \tau_\alpha$	1967
	29	0.057	-1.052	0.10	1.673	$ \tau < \tau_\alpha$	1984
	30	0.110	-0.286	0.10	1.673	$ \tau < \tau_\alpha$	1985
	31	0.100	-0.857	0.10	1.673	$ \tau < \tau_\alpha$	1986
	32	0.118	-0.812	0.10	1.673	$ \tau < \tau_\alpha$	1987
	33	0.116	-0.731	0.10	1.673	$ \tau < \tau_\alpha$	1988
	34	0.080	-0.713	0.10	1.673	$ \tau < \tau_\alpha$	1989
	37	0.133	-0.712	0.10	1.673	$ \tau < \tau_\alpha$	1992
	52	0.193	-0.730	0.10	1.673	$ \tau < \tau_\alpha$	2007

通过表 4 中的各统计量得年输沙量有明显的突变点位突变指数最大的一年为 1999 年,年径流量和面平均降水量虽然在 Kendall 趋势检验中表现出有不同时间段上升下降的趋势但在 T 检验中没有通过突变检验。年径流量和面降水量的突变只是气候因素引起的。

4 水沙关系

将全部时间序列分为三部分 1956 年—1979 年、1980 年—1999 年、2000 年—2013 年,分别绘出三个阶段和全部系列的相关图见图 5,并绘制 1956—2013 系列降水径流双累积关系线图见图 6。

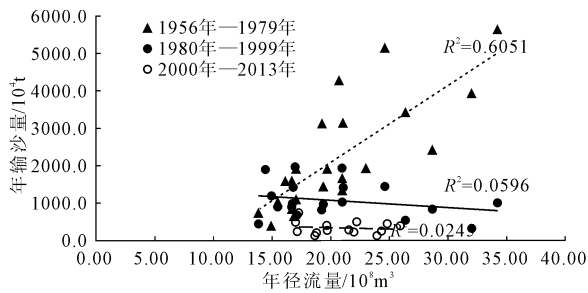


图 5 湟水径流输沙关系图

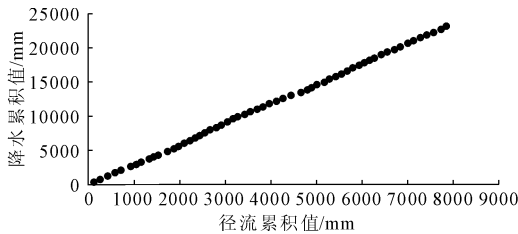


图 6 湟水流域降水径流双累积关系线图

由图 5 可得,在 1956 年—1979 年之间输沙与径流的关系较好线性相关系数达 0.78,也就是说沙随水走,水多沙多,水少沙少,而 1980 年以后线性关系越来越差,且输沙与径流的关系由正比趋势逐渐向反比转变,径流量和输沙量的相关关系由 0.78 变为 0.17,在降水与径流关系保持一致的状态下,说明了人类活动对流域内产沙影响很大,我们在进行分析或应用时需要将径流和输沙分别计算。

5 结果与分析

在进行了水沙年际变化和水沙趋势分析得出:

(1) 降水量与径流量相关性较好,说明河流的主要补给来源还是降水;降水流量年际变化 C_v 值较小分别为 0.16 和 0.21,表明流域气候条件比较稳定,年际变化较小。在气候条件变化较小的环境下,输沙量在整个时间序列中变化剧烈,且与径流量关系较差,说明人类活动是造成输沙量减少的主要因素。

(2) 从民和站观测的输沙量来分析得湟水的输沙量随时间序列有显著的下降趋势且在 1999 年有明显的突变,从水沙相关性来分析近十年水沙相关性较差且输沙量明显减小,可能与长期的河道治理

和水土保持工作有关,但也可能与上游修建水库和水电站及小型的私人河砂开采有关。

参考文献:

- [1] 胡春宏.我国江河治理与泥沙研究展望[J].水利水电技术,2001,32(1):50-52.
- [2] 李景保,王克林,秦建新,等.洞庭湖年径流泥沙的演变特征及其动因[J].地理学报,2005,60(3):503-510.
- [3] 王巧焕,何春锋.抚河流域泥沙变化特征分析[J].吉林水利,2011(7):42-44.
- [4] 黄晓荣,奚圆圆,李晶晶,等.荣经河流域径流变化过程分析[J].华北水利水电大学学报(自然科学版),2016,37(4):67-70.
- [5] 徐建新,张伟杰,赵尚飞,等.贵州省径流变化特征分析[J].华北水利水电大学学报(自然科学版),2017,38(1):30-35.
- [6] 戴升,秦宁生,申红艳.湟水河流域气候变化特征及其影响[J].青海环境,2006,16(3):99-101.
- [7] 董德元.试验研究的数理统计方法[M].北京:中国计量出版社,1987.
- [8] 胡光伟,毛德华,李正最,等.1951—2011年湘江径流泥沙演变过程与特征分析[J].水土保持通报,2014,34(1):166-172.
- [9] 李丽娟,郑红星.华北典型河流年径流演变规律及其驱动力分析[J].地理学报,2000,55(3):309-317.
- [10] 刘宇峰,孙虎,原志华.近60年来汾河入黄河水沙演变特征及驱动因素[J].山地学报,2010,28(6):668-673.
- [11] 罗先香,邓伟,何岩,等.三江平原沼泽性河流径流演变的驱动力分析[J].地理学报,2002,57(5):603-609.
- [12] 周芬.Kendall检验在水文序列趋势分析中的比较研究[J].人民珠江,2005,26(S1):35-37.
- [13] 宋世凯.全球变暖背景下1960—2014年中国降水时空变化特征[D].乌鲁木齐:新疆大学,2017.
- [14] 黄振平.水文统计学[M].南京:河海大学出版社,2012:123.
- [15] 余果.近60年洞庭湖水沙演变特征及其影响因素[D].长沙:湖南师范大学,2012.
- [16] 符淙斌,王强.气候突变的定义和检验方法[J].大气科学,1992,16(4):482-493.