

湟水干流近60年径流变化特征分析

祁文燕¹, 钱鞠¹, 葛雷², 马红亮², 李胜双¹, 陈建龙¹

(1. 兰州大学资源环境学院, 甘肃兰州 730000; 2. 黄河水资源保护科学研究院, 河南郑州 450004)

摘要: 研究流域径流演变特征,对流域水资源可持续开发利用及优化配置具有重要意义。本文基于湟水干流1956-2015年海晏、西宁及民和水文站长系列天然径流资料,采用累积距平、滑动平均、M-K检验和小波分析等方法,分析了湟水干流径流年内年际变化、趋势性、突变特征及其周期性。结果表明:湟水干流径流年内分配不均匀,径流年际变化波动明显,经历了“丰—枯—丰—枯—丰”5个循环交替,目前处于丰水期。湟水干流径流量总体呈上升趋势,3站分别以 0.0011×10^8 、 0.0247×10^8 、 $0.0120 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$ 的幅度增加,变化趋势不明显。小波分析表明湟水干流存在3a、9a及25a左右的振荡周期,其中25a左右的周期振荡最强,为径流量序列第一主周期。

关键词: 径流变化; 累积距平; M-K检验; 小波分析; 湟水干流

中图分类号: TV121

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2018)03-0045-05

Runoff variation analysis on main stream of Huangshui River in recent 60 years

QI Wenyan¹, QIAN Ju¹, GE Lei², MA Hongliang², LI Shengshuang¹, CHEN Jianlong¹

(1. College of Resources and Environmental Sciences, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China;

2. The Yellow River Water Conservation Institution, Zhengzhou 450004, China)

Abstract: The study on the characteristics of runoff evolution in the basin has a significant meaning to the sustainable development and utilization of the water resources in the river basin and its optimal allocation. In this paper, based on the monthly natural runoff data in Haiyan, Xining and Minhe hydrological stations in Huangshui main stream from 1956 to 2015, inter-annual runoff features, tendency, detection for abrupt changes, and periodicity were analysed by using cumulative anomaly, moving average, Mann-Kendall test and Morlet wavelet analysis method. The results show that the distribution of annual runoff is uneven. The inter-annual runoff fluctuated significantly, experiencing "wet year-dry year-wet year-dry year-wet year" five cycles from 1956 to 2015. On the whole, the runoff of Huangshui river showed a rising trend. The flow of the three stations presented linear increase by $0.0011 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$, $0.00247 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$ and $0.0120 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$. The principal periods of the stream-flow were 3 years, 9 years and 25 years. The first principal cycle is 25 years while the second and third principal cycles are 9 years and 3 years.

Key words: runoff variation; accumulated anomaly; Mann-Kendall test; wavelet analysis; mainstream of Huangshui River

1 研究背景

河川径流作为维持区域生态环境及制约社会经济可持续发展的重要因素,其演变过程及特征分析引起了国内外学者的密切关注,许多研究表明,受气候变化和人类活动等因素影响,河川径流演变过程及区域水循环过程出现明显变化^[1-3]。李春辉等^[4]采用Mann-Kendall方法对黄河流域天然径流量进行了趋

势性及持续性检验,结果表明黄河天然径流量出现显著性减少趋势。孙永寿等^[2]研究发现,近10年来青海三江源区径流总体偏丰,年内分布较为均匀。湟水流域位于青海省东部,地处甘青两省交界区,是黄河上游最大的一级支流,主要由湟水干流及其支流大通河组成。流域水资源量相对丰富,河谷深切,水流急、落差大、流量均匀、工程地质条件好,开发水能资源条件优越。流域水能资源开发已成为辐射和带动当地

收稿日期:2017-10-17; 修回日期:2018-02-24

基金项目:水利部中央水资源费项目(126201330003150002)

作者简介:祁文燕(1993-),女,甘肃兰州人,硕士研究生,主要从事水文水资源方面研究。

通讯作者:钱鞠(1973-),男,甘肃武威人,博士,副教授,硕士生导师,主要从事干旱区水文学及水资源方面的研究。

经济发展、农民脱贫致富的着力点和地方新的经济增长点。随着流域水资源开发利用率的逐步提高,水能资源开发力度的加大,土地退化、生物多样性破坏、水环境恶化等生态环境问题日益呈现,逐步成为制约湟水流域经济社会可持续发展的重要因素。赫晓慧等^[5]、张调风等^[6]分析了径流对气候变化和人类活动的响应,指出湟水径流量总体呈减少趋势且人类活动对径流的减少起主导作用。徐晓梅等^[7]统计分析了湟水流域干流降水、蒸发、径流、泥沙在地区上的分布规律以及年内年际间的变化规律等。

分析湟水干流径流变化规律及趋势,对湟水流域水资源开发利用具有重要现实意义,目前关于湟水干流径流特征的研究未对整个干流进行全面分析,因此本文选用湟水干流海晏、西宁和民和水文站1956-2015年60a长系列天然径流基础资料,采用累计距平、滑动平均、M-K秩次检验和小波分析等方法,对湟水干流径流年内年际变化特征、趋势、突变状况及周期进行分析,旨在为湟水干流水资源持续开发利用提供科学参考。

2 研究区概况

湟水干流发源于青海省海晏县大坂山南麓,自西向东流经青海省的海晏、湟源、湟中、大通、平安、互助、乐都、民和等县(市)和甘肃省兰州市红古区、永靖县,于永靖县上车村汇入黄河(图1)。流域位于东经 $100^{\circ}42' \sim 103^{\circ}01'$,北纬 $36^{\circ}02' \sim 37^{\circ}28'$ 之间,呈树叶状。干流全长374 km,流域面积17 733 km^2 ,其中青海省境内16 120 km^2 ,甘肃省境内1 613 km^2 ^[8-9]。湟水干流河川径流年内分配变化较大。河川径流主要集中于7-10月,这一时期径流量占全年径流量的50%左右,1-3月份径流占全年径流10%左右^[10]。

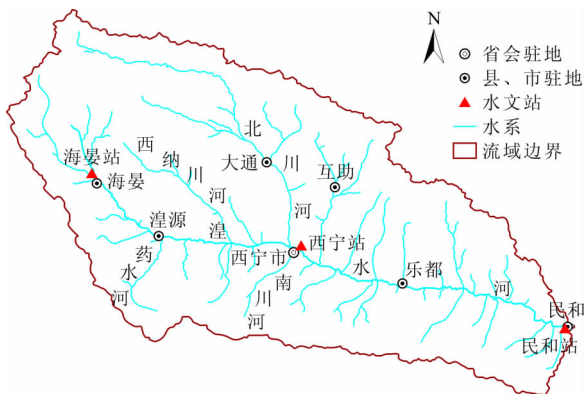


图1 湟水流域示意图

3 数据来源及分析方法

3.1 数据来源

根据水文站控制情况,本文选取上游海晏、中游西宁、下游民和水文站作为湟水干流水文分析计算的站,采用各水文站1956-2015年60a长系列天然径流资料进行分析预测。资料具有良好的代表性和可靠性。

3.2 分析方法

3.2.1 基于Mann-Kendall的突变检验 Mann-Kendall检验法是一种非参数检验方法,可分析长时间序列的趋势与突变,有样本不必遵从某一特定分布、结果不受少数异常值干扰的优点^[11-12]。使用Mann-Kendal检验序列突变时,将 n 个样本量 x_i ($i = 1, 2, \dots, n$)构成一秩序列:

$$S_k = \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^{i-1} a_{ij} \quad (k = 2, 3, \dots, n) \quad (1)$$

式中:当 $x_i > x_j$ 时, $a_{ij} = 1$;当 $x_i \leq x_j$ 时, $a_{ij} = 0$ ($j = 1, 2, \dots, i$)。

定义统计量:

$$UF_k = [S_k - E(S_k)] / [\text{Var}(S_k)] \quad (2)$$

$(k = 1, 2, \dots, n)$

式中: $E(S_k) = n(n-1)/4$; $\text{Var}(S_k) = n(n-1)(2n+5)/72$; UF_k 是根据时间序列 x_i 计算出的统计序列,为标准正态分布, $UF_1 = 0$ 。再按照时间序列逆序 x_n, x_{n-1}, \dots, x_1 ,重复上述步骤,得 UB_k 统计序列,同时令 $UB_k = -UB_k$ ($k = n, n-1, \dots, 1$), $UB_1 = 0$ 。给定显著水平 α ,若 $|UF_i| > U_{\alpha/2}$,则表明序列存在明显的趋势变化。通过分析统计序列 UF_k 和 UB_k ,可得到分析序列 x_i 的变化趋势和明确突变的起始时间。当 UF_k 大于0时,序列呈上升趋势,反之呈下降趋势,若 UF_k 超过临界值时,则说明上升或下降的趋势显著。当 UF_k 曲线与 UB_k 曲线出现交点且交点在临界值中间时,则交点所对应的时间即突变开始的时间。

3.2.2 基于小波分析的周期识别 小波分析方法是一种信号处理方法,具有时频多分辨功能,能够提取出径流序列中反映其变化规律的成分^[13-14]。因此,本文选用Morlet复小波对研究区径流序列进行周期性分析。Morlet基本小波函数形式如下:

$$\psi(t) = \exp(-t^2/2) \exp(i\omega t) \quad (3)$$

将基本小波函数(t)经过伸缩和平移得到一族函数:

$$\psi_{a,b}(t) = |a|^{-1/2} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) \quad a, b \in R, a \neq 0 \quad (4)$$

式中: $\psi_{a,b}(t)$ 为分析小波或连接小波函数; a 为尺度因子,反映频域特性; b 为时间因子,反映时域特性。将时间域上关于尺度 a 的所有小波系数的平方进行积分,即得到小波方差:

$$\text{Var}(a) = \int_{-\infty}^{+\infty} |W_f(a,b)|^2 db \quad (5)$$

在一定尺度下, $\text{Var}(a)$ 表示时间序列中该尺度周期波动的强弱和能量的大小。

4 结果与分析

4.1 径流年内变化特征分析

湟水干流径流主要来源于大气降水,其中以雨水补给为主,雪水补给为辅。图 2 为湟水干流海晏站、西宁站、民和站径流年内分配曲线。

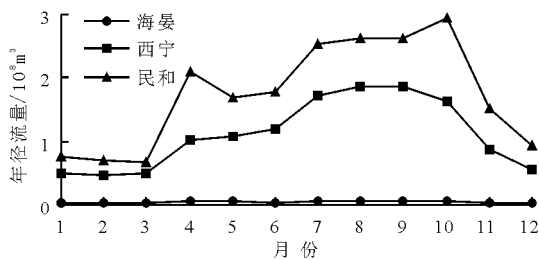


图 2 湟水干流海晏站、西宁站、民和站径流年内分配曲线

由图 2 可知,湟水干流兼受上游冰雪融水和降雨补给影响,有春、夏两个汛期,年径流过程线呈双峰。春汛主要集中在 4 月份,占全年径流量的比例约为 10%,夏汛主要集中在 7-10 月份,占全年径

流量的比例约为 50%,最小流量出现在 1-3 月份。

湟水干流代表水文站径流量各月分配比例如表 1,由表 1 可知,径流量年内分配极不均匀,径流主要集中在 7-10 月份,占多年平均径流量的 40.2%~53.4%。各水文站径流量季节分配规律基本一致,均为:夏季径流量 > 秋季径流量 > 春季径流量 > 冬季径流量。

4.2 径流年际变化特征分析

4.2.1 径流年际变化 海晏、西宁、民和站多年平均径流量分别为 1.27×10^8 、 13.23×10^8 、 $20.86 \times 10^8 \text{ m}^3$;3 站年径流量最大值出现在 1989 年,分别为 2.28×10^8 、 25.29×10^8 、 $34.47 \times 10^8 \text{ m}^3$;海晏、西宁和民和站年径流量最小值分别为 0.78×10^8 (1980 年)、 7.75×10^8 (1973 年)、 $12.65 \times 10^8 \text{ m}^3$ (1991 年)。3 站年径流量极值比分别为 2.92、3.26、2.72,变差系数 C_v 分别为 0.20、0.25、0.21,年径流量序列离散程度较小。

4.2.2 径流趋势变化 采用累积距平法绘制近 60 年来湟水干流逐年径流距平累计曲线^[15-17],见图 3。由图 3 可知,海晏、西宁、民和 3 站变化趋势基本一致,1956-1968 年,累计距平值持续增加,表明时段距平值持续为正,处于丰水期;1969 年开始累计距平值呈减小趋势,表明时段距平值持续为负,处于枯水期;1982-1990 年径流量又不断增加,处于丰水期;1991-2004 年,径流量波动频繁,呈下降趋势;2005-2015 年径流量又不断增加,处于丰水期。

表 1 湟水干流海晏站、西宁站、民和站各月平均径流量占多年平均径流量的百分比

水文站	月 份												%
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
海晏站	4.67	4.89	8.72	10.29	9.51	8.86	9.67	9.84	9.88	10.80	7.66	5.21	
西宁站	3.63	3.41	3.81	7.79	8.18	8.92	12.88	14.08	14.04	12.39	6.61	4.26	
民和站	3.62	3.35	3.24	10.11	8.08	8.56	12.13	12.62	12.56	14.10	7.20	4.43	

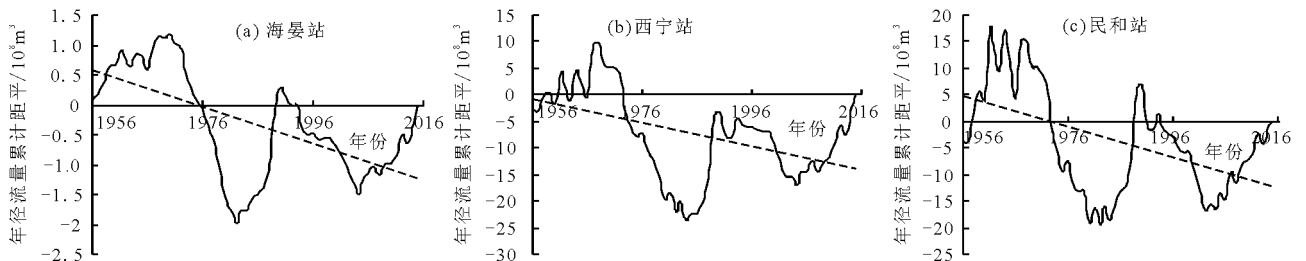


图 3 1956-2015 年湟水干流海晏站、西宁站、民和站年径流序列累计距平曲线

对 3 站年径流量序列进行 5 年滑动平均处理,并绘制滑动平均值过程线^[18-19],结果如图 4 所示。

由图 4 可知 3 站变化趋势基本相似,1956-1971 年年径流量呈增加趋势,1972-1982 年呈减少趋势,

1983 - 1992 年呈增加趋势,1992 - 2015 年年径流量变化不大。海晏、西宁、民和 3 站分别以 $0.0011 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$ (线性方程 $y = 0.0011x - 0.9152, R^2 = 0.0058$,其中 y 为年径流量, x 为年份,下同)、 $0.0247 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$ (线性方程 $y = 0.0247x - 35.803, R^2 = 0.0167$)和 $0.012 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$ (线性方程 $y = 0.012x - 3.054, R^2 = 0.0022$)的幅度增加。总体上,流域年径流量呈增加趋势,但趋势不明显。由于相关系数较小,在统计意义上不显著,因此对 3 站年径流量进行突变及周期性分析。

4.2.3 径流突变分析 运用 Mann - Kendall 检验

法对湟水干流年径流量进行突变检验,假定径流变化稳定、时间序列相互独立且保持相同连续分布,给定显著水平 $\alpha = 0.05$,通过正态分布表得临界值 $u_{0.05} = \pm 1.96$,得湟水干流海晏站、西宁站、民和站年径流突变分析图如图 5 所示。从图 5 可以看出,海晏、西宁、民和 3 站年径流量变化趋势基本一致,突变发生在 1960 年左右,之后径流量呈下降趋势;海晏、西宁两站 2010 年左右出现突变,径流量呈增加趋势,增加趋势不明显。民和站 2003 年左右出现突变,径流量呈增加趋势,增加趋势不明显。结果与 5 年滑动平均基本一致。

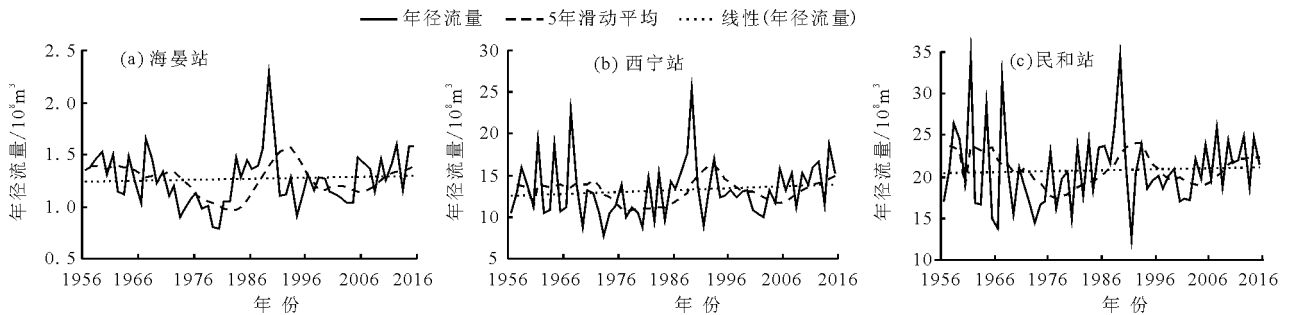


图 4 1956 - 2015 年湟水干流海晏站、西宁站、民和站年径流序列 5 年滑动平均值过程线

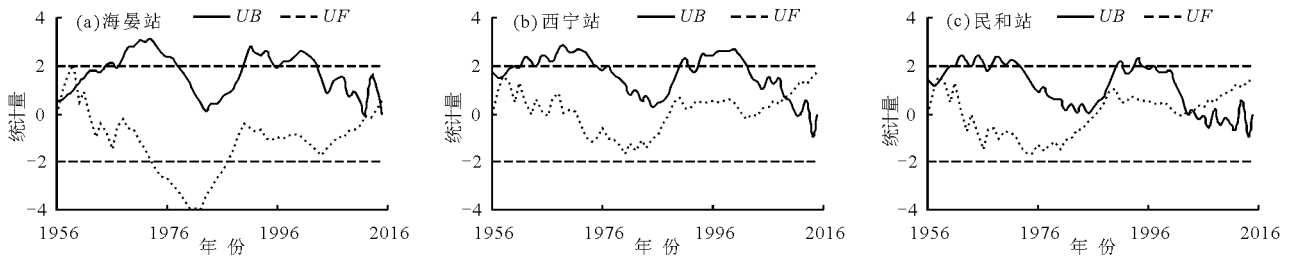


图 5 湟水干流海晏站、西宁站、民和站年径流突变分析

4.2.4 径流周期分析 采用 Morlet 小波分析对 3 站 1956 - 2015 年年径流量序列进行周期性分析,通过小波方差检验,湟水干流年径流量存在 3、9 及 25 a 左右的振荡周期,3 站径流序列最大峰值均出现在

25 a 左右,表明 25 a 左右的周期振荡最强,为径流量序列的第一主周期;9、3 a 时间尺度为径流量变化的第二和第三主周期,小波变换时频分布结果如图 6 所示。

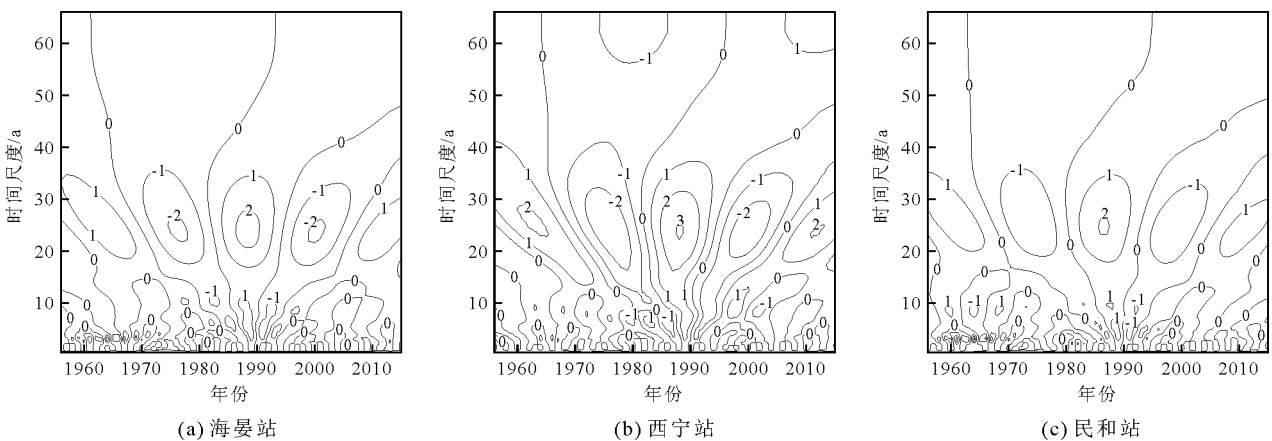


图 6 湟水干流海晏站、西宁站、民和站年径流周期性分析

流域海晏、西宁、民和3站周期性变化特征基本一致,在25 a时间尺度下,正负相位震荡变化最明显,经历了“丰—枯—丰—枯—丰”5个循环交替,其中1956—1965年、1983—1992年、2005—2015年为正相位,为丰水年;1966—1982、1993—2004为负相位,为枯水年。在9 a时间尺度下,经历了3个“丰—枯”转换期。根据上述分析,不同时间尺度下的径流量丰枯交替变化不同,径流量周期变化以第一周期为主,第二周期为辅。截至2015年,径流量等值线均未封闭,表明研究区径流量仍将继续增加。按照最强震荡尺度25 a的周期特征推算,径流量增加趋势将持续到2025年左右,在9 a时间尺度下,2016—2025年年径流量将呈减少趋势。

5 结论

本文采用累计距平、滑动平均、小波分析法和M—K秩次检验方法,对湟水干流海晏、西宁、民和水文站1956—2015年60 a长系列实测年径流资料进行了分析,结果表明:

(1)湟水干流径流年际变化波动明显,经历了“丰—枯—丰—枯—丰”5个循环交替,目前处于丰水期。

(2)海晏、西宁、民和3站径流突变点都出现在1960s初,之后径流量呈下降趋势;海晏、西宁两站2010年左右出现突变、民和站2003年左右出现突变,径流量呈增加趋势,增加趋势不明显,湟水干流径流量总体呈上升降趋势。海晏、西宁、民和3站分别以 0.0011×10^8 、 0.0247×10^8 、 $0.0120 \times 10^8 \text{ m}^3/\text{a}$ 的幅度增加,变化趋势不明显。

(3)采用Morlet小波分析对3站1956—2015年年径流量序列进行周期性分析,结果表明湟水干流径流量存在3、9及25 a左右的振荡周期,其中25 a时间尺度为第一主周期,控制着湟水干流径流量主要周期演变情况。按照最强震荡尺度25 a的周期特征推算,径流量增加趋势将持续到2025年左右,在9 a时间尺度下,2016—2025年年径流量将呈减少趋势。

参考文献:

[1] 王国庆,金君良,林锦,等. 山西省中西河流域降水径流演变特征及响应关系[J]. 水资源与水工程学报,2017,

28(3):1—4.

- [2] 孙永寿,段水强,李燕,等. 近年来青海三江源区河川径流变化特征及趋势分析[J]. 水资源与水工程学报,2015,26(1):52—57.
- [3] 黄晓荣,奚圆圆,李晶晶,等. 柴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.
- [4] 李春晖,杨志峰. 黄河流域分区天然径流量趋势性与持续性特征[J]. 水文,2005,25(1):13—17.
- [5] 赫晓慧,王芳,龚家国,等. 气候变化下湟水河西宁段区域水文变化研究[J]. 人民黄河,2015,37(9):11—13+16.
- [6] 张调风,朱西德,王永剑,等. 气候变化和人类活动对湟水河流域径流量影响的定量评估[J]. 资源科学,2014,36(11):2256—2262.
- [7] 徐晓梅,朱晓峰. 青海省湟水流域水文特性分析[J]. 南水北调与水利科技,2012,10(A2):65—66.
- [8] 孙照东. 引大济湟跨流域调水工程总干渠水资源论证研究[M]. 郑州:黄河水利出版社,2009.
- [9] 程艳红,王红. 湟水大通河流域防汛组织管理问题及建议[J]. 中国防汛抗旱,2013,23(4):64—66.
- [10] 甘肃省湟水河下游河段水能梯级电站开发方案优化报告[R]. 兰州:甘肃省水利水电勘测设计研究,2005.
- [11] 陈中平,徐强. Mann—Kendall检验法分析降水量时程变化特征[J]. 科技通报,2016,32(6):47—50.
- [12] 鲁凤,钱鹏,胡秀芳,等. 基于小波分析与Mann—Kendall法的上海市近12年空气质量变化[J]. 长江流域资源与环境,2013,22(12):1614—1620.
- [13] 刘笑彤,蔡运龙. 基于小波分析的径流特性和影响因素多尺度分析——以通天河为例[J]. 北京大学学报(自然科学版),2014,50(3):549—556.
- [14] 张洪波,俞奇骏,陈克宇,等. 基于小波变换的径流周期与ENSO事件响应关系研究[J]. 华北水利水电大学学报(自然科学版),2016,37(4):59—66.
- [15] 叶磊,周建中,曾小凡,等. 水文多变量趋势分析的应用研究[J]. 水文,2014,34(6):33—39.
- [16] 刘赛艳,黄强,解阳阳,等. 大通河流域上游径流变化特征与突变分析[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版),2016,44(3):219—226.
- [17] 康玲玲,刘红梅,董飞飞,等. 黄河兰州以上地区近期天然径流量变化分析[J]. 水力发电,2006,32(8):8—10+78.
- [18] 秦鹏,赵成义,盛钰,等. 近54年渭干河流域径流变化特征及影响因素分析[J]. 水文,2016,36(2):85—91.
- [19] 高云明,魏琳,万思成,等. 漳河流域近60年径流变化分析[J]. 水文,2016,36(3):91—95.