

Hydrological Variation Analysis in Wei River Basin

Hongbo Zhang^{1,2}, Lei Gu²

¹Key Laboratory of Subsurface Hydrology and Ecological Effect in Arid Region of Ministry of Education, Chang'an University, Xi'an

²School of Environmental Science and Engineering, Chang'an University, Xi'an

Email: honeber@126.com

Received: Sep. 30th, 2013; revised: Nov. 20th, 2013; accepted: Nov. 26th, 2013

Copyright © 2014 Hongbo Zhang, Lei Gu. This is an open access article distributed under the Creative Commons Attribution License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited. In accordance of the Creative Commons Attribution License all Copyrights © 2014 are reserved for Hans and the owner of the intellectual property Hongbo Zhang, Lei Gu. All Copyright © 2014 are guarded by law and by Hans as a guardian.

Abstract: Moving Mann-Whitney U test is an excellent method to identify the locations of hydrologic variation points. In this paper, it was used to look for these points from annual runoff series at seven main hydrologic stations in the Wei River basin. Mann-Kendall method was applied here, as a validation method. Moreover, for understanding the more detailed impact from hydrologic variation, Hilbert Huang transform was also introduced to do empirical mode decomposition of annual runoff series on these hydrologic stations. Through the process, several intrinsic mode function (IMF) signals with different time-scale characteristics and trend signal were obtained on every station. Then, by using the moving Mann-Whitney U test to identify the variation or not on IMF signals, we could confirm the impact from hydrologic variation on a certain time-scale. Finally, based on the above hydrologic variation points, the hydrologic series can be divided into two or three stages. Selecting the stage before this variation point as reference, and the stage after it as evaluating series, then we can evaluate the variation scope and level after variation point relative to the before by range of variability approach (RVA). The result indicated that 1) hydrologic variation of annual runoff series in Wei River mainly took place in 1971 and 1994; hydrologic variation in 1971 was mainly driven by human activities, and the variation in 1994 was affected by climate change and human activities. 2) Hydrologic variation mainly affected the trend element of runoff series in the Wei River, and had hydrologic disturbance on 6-year time-scale change at Huaxian station and 4 - 6-year time-scale change at Zhuangtuo station. 3) The strongest hydrologic variation was mainly on the middle reaches of the Wei River, i.e. Linjiacun and Xianyang stations, with a comprehensive variation index exceeding 0.66 which belonged to strong variation. The upstream reaches came second, two tributaries and the downstream took the third place, and they all belonged to medium variation. 4) On the upstream Wei River, the strong hydrological variation indexes mainly concentrated in the dry season monthly runoff, maximum flow and low pulse frequency and duration, the fall rate and reverse, etc.; Hydrologic index field with strong variation on the middle reaches was greatly wide, including monthly runoff in dry and wet seasons, maximum and minimum flow, high pulse frequency, etc.; Some strong variation indexes were reflected in the downstream, such as monthly runoff before flood and in wet season, maximum and minimum flow, fall rate and reverse. In two tributaries of the Wei River, strong hydrologic variation in Jing River was mainly on the minimum and maximum flow, base flow and maximum flow date, while in Beiluo River, they focused on minimum flow, base flow, low pulse duration and reverse, etc. Synthesizing the above results, it can be concluded that hydrological variation in the Wei River is relatively strong, for which human activities and climate change are two important causes. Hydrologic variation index range is greatly wide, with significant difference on the spatial distribution and non-identical variation degree on every district. The strong variation indexes in the whole Wei River mainly concentrated in the dry flow, maximum flow and rate of change, etc. The force driving the hydrological variation would take some disturbance on the runoff cycle change characteristics at Huaxian and Zhuangtuo stations, in addition to mainly an impact on its long-term trend. In the future, these cycle characteristics may alter or disappear because of the variation driving.

Keywords: Hydrologic Characteristics; Variation Point; HHT; IHA

渭河流域水文变异识别与初步解析

张洪波^{1,2}, 顾磊²

¹长安大学旱区地下水文与生态效应教育部重点实验室, 西安

²长安大学环境科学与工程学院, 西安

Email: honeber@126.com

收稿日期: 2013年9月30日; 修回日期: 2013年11月20日; 录用日期: 2013年11月26日

摘要:应用滑动秩和检验法与 Mann-Kendall 方法对渭河干支流主要的 7 个水文站点的水文序列变异点的位置进行诊断与识别。结合 Hilbert-Huang 变换, 对各水文站点数据进行 EMD 多尺度分解, 获得不同时间尺度的 IMF 信号和趋势过程, 然后采用滑动秩和检验法对各分解信号进行变异识别, 确定变异的响应尺度。最后, 结合水文变异指标(IHA), 以变异点位置为依据, 进行阶段划分, 识别变异前后水文序列的变异领域, 对水文情势变异进行细节解析, 找出发生强烈变异的水文指标。结果表明: 1) 渭河干流水文站点年径流序列的变异点主要发生在 1971 年和 1994 年, 1971 年的水文变异主要由人类活动驱动, 而 1994 年的水文变异则由气候变化与人类活动共同影响。2) 水文变异主要影响渭河干支流径流序列的趋势过程, 只有华县站 6 年时间尺度变化及状头站 4~6 年时间尺度变化过程受到水文变异的扰动。3) 发生变异最强烈的地方主要是渭河的中游, 即林家村和咸阳站, 综合变异指数超过 0.66, 属强变异; 上游次之, 下游与两条支流更次, 皆属于中等变异。4) 渭河上游的强水文变异范围主要集中在枯水季月径流、最大流量、低脉冲次数与延时、下降率与逆转次数等方面, 中游强变异领域较宽, 包括丰枯月径流、最大最小流量、高脉冲次数、上升下降率等, 下游则反映在汛前以及丰水期月径流、最大最小流量以及下降率与逆转次数方面。渭河支流中, 泾河的水文强变异主要在最小流量、最大流量、基流以及最大流量发生时间, 而北洛河则侧重于最小流量、基流、低脉冲延时与逆转次数等方面。综合以上结果, 可得出如下结论, 渭河干支流在水文变异较为强烈, 人类活动和气候变化是其重要致因。水文变异范围较宽, 空间分布的差异性大, 变异程度也各不相同, 主要集中于枯季径流、最大流量、变化率等方面。渭河水文变异的驱动力除在长程趋势上对年径流量产生向上或向下的扰动外, 对华县和状头站径流的周期变化特征也产生了影响, 未来某一些周期变化特征可能会因为变异驱动而改变或消失。

关键词: 水文特征; 变异点; HHT; IHA

1. 引言

水文序列的“一致性”是以物理成因一致且观测较长时间的样本序列为假设前提的, 然而, 由于全球气候变化、高强度人类活动以及流域下垫面变化等因素, 流域水文循环和水资源形成过程的物理成因发生变化, 无法再满足工程水文学中水文序列的一致性要求, 给水利工程的设计、运行和管理带来了很大的风险。为了识别这种非一致性水文序列, 常需要对其进行水文变异的识别与诊断^[1,2]。水文变异的种类主要包

作者简介: 张洪波(1979-), 男, 辽宁人, 博士, 副教授, 主要研究方向是水资源系统工程。

括跳跃变异和趋势变异。对于跳跃变异, 在传统工程水文计算中常通过分段还原与频率分析相结合的方法进行处理, 以保持水文序列的一致性。而对于趋势性变异, 则在传统水文学方法中较少涉及, 且近些年逐渐成为学者们研究的热点^[1-5]。目前有关水文变异的研究成果中, 多以变异点检测方法、变异趋势走向、变异驱动与成因分析等为主^[3-6], 对于水文变异的变异尺度、水文情势变异解析以及变异的时空累积机制则缺乏进一步的延续性研究。本文以渭河干支流 7 个站点的水文序列为研究对象, 从水文变异点的位置、变异尺度、变异域等几个方面展开深入剖析, 从更多的

层面解析渭河水文变异的影响机制问题。

2. 研究区概况与数据来源

2.1. 研究站点选取

渭河发源于甘肃省渭源县西南的鸟鼠山北侧, 是黄河第一大支流, 于潼关处流入黄河, 全长 818 km, 流域面积 13.48 万 km²。流域地形差异较大, 表现为西高东低, 最高、最低程处相差 3000 m 以上。流域属大陆性气候, 降雨量和气温从南向西逐步递减, 年均气温 10℃左右, 年均降雨量 550 mm, 年蒸发量 1100 mm 左右, 径流量年内分配极不均匀。近几十年来, 渭河流域径流异常、干旱频繁、洪灾出现的频次加大, 发生时间集中、强度高, 成为我国洪、旱的重灾区之一。因此, 迫切的需要研究水文要素变异的致灾机理, 为渭河和类似流域防灾减灾提供科学依据。

渭河汇入支流众多, 流域地形、地貌条件复杂, 人类活动扰动强烈, 为了更好地反映渭河流域地形地貌以及所属行政区域的差异, 本次研究主要选择渭河干流的 5 个水文站: 武山站(上游, 黄土梁峁沟壑区, 甘肃)、

北道(上游, 黄土梁峁沟壑区, 甘肃)、林家村站(中游, 关中冲积平原, 陕西)、咸阳站(中游, 关中冲积平原, 陕西)、华县站(下游, 关中冲积平原, 陕西); 支流 2 个水文站(黄土塬区与黄土丘陵区): 张家山(泾河, 陕西)、状头(北洛河, 陕西)。其空间位置分布如图 1。

2.2. 数据资料

本次研究的基本数据主要来源于黄河水利委员会水文局和陕西省渭河流域管理局。由于历史原因, 部分站点的水文序列不完整, 鉴于研究需要, 对于序列中缺测的部分资料采用水量平衡法进行差补延长, 最终获得渭河流域重要水文站点的日尺度连续水文序列, 如表 1。

3. 研究方法

3.1. 水文变异点诊断方法

水文变异点位置诊断或分析的方法较多, 其中常用水文序列变异点检验方法包括 10 种: 基于贝叶斯理论的里海哈林法、基于 Mann-Whitney 非参数检验

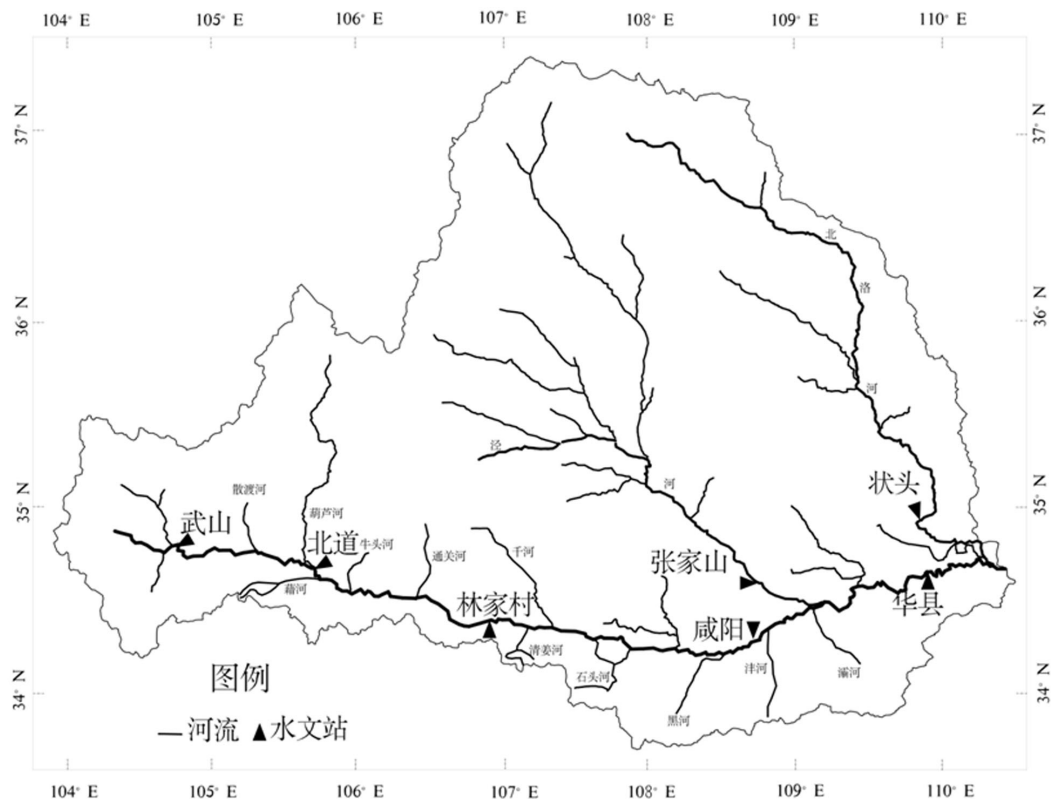


Figure 1. Sketch map of the Wei River basin
图 1. 渭河流域图

Table 1. Hydrological data catalog at some key stations in Wei River basin
表 1. 渭河流域重要水文站点水文资料长度

站点	武山	北道	林家村	咸阳	华县	张家山	状头
水文序列	1975~2009	1973~2009	1959~2009	1959~2009	1959~2009	1932~2010	1937~2008

法、有序聚类分析法、逐时段滑动分割比较序列法和有序聚类最优二分割比较序列法、R/S 分析法、Brown-Forsythe 检验法、滑动 F 检验法、滑动 T 检验法、滑动秩和检验法、Mann-Kendall 检验法、贝叶斯法^[7]。为了更好地反映水文序列的在不同层面的变异特性, 本文选择变异点诊断适应性强且效率高(均值和 Cv、Cs)的滑动秩和检验法以及应用较为广泛的 Mann-Kendall 检验法, 进行水文变异点的识别。

(1) 滑动秩和检验法

秩和检验法, 即 Mann-Whitney U 检验法, 属非参数统计方法, 其特点在于不依赖于总体分布类型, 也不需要推断总体参数, 适于检验两种或两种以上的变量分布有无显著差异。滑动秩和检验法主要通过秩和检验法对序列逐点进行检验, 找出伴随概率 $p \leq \alpha$ 或满足 $|z| > Z_{\alpha/2} = 1.96$ 的所有可能变异点, 再从中筛选出选 p 最小或 z 计算值达到最大值的点, 作为所求的水文变异点。经研究, 该方法对水文学列的均值和 Cv、Cs 均有较好的校验效果^[7]。

(2) Mann-Kendall 非参数检验法

Mann-Kendall 法是世界气象组织推荐的一种非参数检验方法, 常广泛用于降水、径流和气温等要素时间序列的趋势变化研究。除了趋势检验, Mann-Kendall 方法也可用于突变点的检验分析。由于其不需要遵从一定的分布, 不受少数异常值的干扰, 且结构简单, 计算方便, 使其也成为水文序列的变异点分析中常用方法之一^[8]。

3.2. 水文变异的时间尺度分析方法

水文变异的时间尺度分析, 采用 Hilbert-Huang 变换与滑动秩和检验法相结合的方法。即首先应用 Hilbert-Huang 变换, 对各水文站点年径流数据进行 EMD 多尺度分解, 获得不同时间尺度的 IMF 信号和趋势过程, 然后采用滑动秩和检验法对各分解信号进行变异识别, 确定变异的响应尺度。

Hilbert-Huang 变换方法(HHT)是一种适用于非线性和非平稳性数据的处理方法, 主要分为经验模态分

解法(EMD)及 Hilbert 变换两部分^[9]。

经验模态分解(EMD)的基本思想是基于序列的局部特征时间尺度, 将信号中不同尺度(频率)的波动或趋势逐级分解, 形成一系列包含了原信号不同时间尺度局部特征信息的 IMF 分量(固有模态函数)和单一的残余量^[10,11]。

Hilbert 变换即将 EMD 分解得到的多个固有模态函数(IMF)进行变换处理, 解析信号中不同的幅值函数和相位函数, 对相位函数求导, 即可得每个 IMF 分量的瞬时频率。再基于幅值函数、瞬时频率与 t 的关系, 作出时频图, 遂得到相应的 Hilbert 谱^[9]。

3.3. 水文变异的影响域识别方法

水文变异的影响域识别, 主要是应用水文变异法(RVA), 以变异点位置为依据, 进行水文阶段划分, 结合水文变异指标(IHA), 识别变异前后水文序列的变异领域, 对水文变异进行细节解析, 找出发生强烈变异的水文指标。

水文变异法是对扰动河流进行水文情势变异评估的一种方法, 其以与生态相关的流量特征的统计分析为基础, 从量、时间、频率、延时和变化率 5 个方面对 33 个河流水文特征(指标)进行提取(表 2)。以参考序列的提取结果, 作为扰动阈值, 通过对比评价序列的河流水文特征落入扰动阈值的数量, 来反映河流流量受扰动的影响程度, 一般以 33 个 IHA 指标以及综合影响程度的等级来表示^[12]。

4 结果与讨论

4.1. 变异点识别

鉴于变异点检验的特殊性和复杂性, 选取滑动秩和检验、Mann-Kendall 变异点检验两种方法分别对渭河干支流 7 个水文站点的实测年径流序列进行变异点研究, 具体计算结果如表 3 所示。分析表 3 数据, 不难发现三种分析方法的结果基本一致。整个渭河干支流站点水文序列的突变点基本上集中发生在三个时间段, (1) 1970~1971, 主要发生在渭河干流的林家村、

Table 2. Parameter character of IHA Index
表 2. 水文变异指标参数

内容	指标序号	单位	IHA	指标简写
各月流量	1~12	m ³ /s	各月份流量平均值	Jan, Feb, Mar, Apr, May, Jun, Ju, Aug, Sep, Oct, Nov, Dec
年极端流量	13~22	m ³ /s	年最大、最小 1、3、7、30、90 日流量平均值	1d min, 3d min, 7d min, 30d min, 90d min, 1d max, 3d max, 7d max, 30d max, 90d max, Zero days, Base flow
	23~24	m ³ /s	断流天数, 基流	
年极端流量发生时间	25~26	Julian day	年最大、最小 1 日流量发生时间	Date min, Date max
高、低流量的频率及延时	27~28	time	每年发生低流量、高流量的次数	Lo pulse fre, Lo pulse dur
	29~30	d	低流量、高流量平均延时	Hi pulse fre, Hi pulse dur
流量变化改变率及频率	31~32	%	流量平均减少率、增加率	Rise rate, Fall rate
	33	time	每年流量逆转次数	Reversals

Table 3. Change point test result by Mann-Kendall and Mann-Whitney U test
表 3. 滑动秩和检验与 Mann-Kendall 法变异点检验结果

方法	武山	北道	林家村	咸阳	华县	张家山	状头
秩和检验	1986~1994	1986~1994	1971, 1986~1994	1971, 1986~1994	1971, 1986~1994	1997~2004	不显著
M-K 检验	1990	1993	1986	1985	1989	1997	不显著
变异点	1994	1994	1971, 1994	1971, 1994	1971, 1994	1997	1995

咸阳以及华县站; (2) 1986~1994, 变异空间分布广泛, 7个站点中5站都在该时段发生变异; (3) 1997~2004, 只发生在张家山站, 即泾河流域。综合以上结果, 对比分析与交叉验证, 采用以滑动秩和检验结果为主, 1986~1994年时间段内, 选取最低点为原则, 最终确定各站水文序列变异的时间点。

从水文变异的分布上看, 1971年的变异点主要发生在林家村、咸阳、华县, 发生位置点存在空间上的顺承关系, 故认为1971年的干流变异点, 应该主要由林家村上游的人类活动影响所驱动, 初步推定与宝鸡峡灌区1971年建成通水相关。1994年的变异点在流域内的7个水文站点均有发生, 即这种变异具有流域性, 应该主要是由气候变化所推动。这一推论与渭河流域90年代后期降水量减少的事实是相符的^[13]。当然人类活动在1994年变异点的驱动过程中, 肯定是发挥作用的。90年代后期, 渭河流域进入水利水保建设的活跃期, 大量相关的灌区改造、加闸加坝、水土保持、傍河取水等工程陆续在渭河沿岸建成, 投入使用。这些人类活动变化通过河道取水或改变产汇流条件等方式影响着河川径流, 成为径流变异的致因之一。因此, 1994年变异点应是由人类活动与气候因

素共同驱动, 其中气候因素中的降水的减少是主因, 河道取水、水土保持活动、水库调蓄等人类活动的影响为次因^[14]。

4.2. 水文变异的时间尺度

应用HHT的EMD和时频变换功能分别对渭河干支流7个水文站点的年径流序列进行EMD多尺度分解和HHT时频变化, 获得不同时间尺度的IMF信号、趋势项以及不同IMF信号所对应的时间尺度特征(表4)。结果显示, 渭河干支流站点的水文序列, 存在2、4~6、10~13、20~22、38年的周期变化, 这与文献[15]中关于黄河的周期分析结果是基本一致的。

采用滑动秩和检验法对不同站点EMD分解得到的信号进行变异点识别, 得到不同站点分解信号的变异特征(表5)。由下表可见, 渭河干支流的7个水文站点, 变异主要发生在趋势项, 只有林家村站和状头站的水文变异影响到IMF分解项, 即水文变异对华县站6年时间尺度变化及状头站4~6年时间尺度变化过程产生扰动。也就是说, 水文变异的驱动力除了在长程趋势上对年径流量产生向上或向下的扰动外, 还有可能对径流的周期变化特征产生影响, 即某一些周期变化

Table 4. Result at 7 hydrologic stations by Hilbert-Huang Transform**表 4. 不同站点的 HHT 时频变换结果**

站点	T _{IMF1}	T _{IMF2}	T _{IMF3}	T _{IMF4}	T _{IMF5}
武山	2.11	4.70	12.94	17.53	
北道	2.09	5.04	11.64	22.68	
林三	2.40	3.81	4.65	12.85	
咸阳	2.25	4.37	6.80	22.40	38.34
华县	2.28	3.89	5.55	12.66	
张家山	2.43	3.67	9.96	19.48	
状头	2.53	4.39	5.88	19.51	

Table 5. Impact of hydrologic variation on flow multi-timescales characteristics**表 5. 水文变异对不同站点时间尺度特征的影响**

站点	武山	北道	林家村	咸阳	华县	张家山	状头
IMF1							
IMF2							★
IMF3					★		★
IMF4							
IMF5							
Trend	★	★	★	★	★	★	★

特征会因为变异驱动而改变或消失。

4.3. 水文变异的影响域

采用渭河干支流 7 个站点的日径流数据, 应用水文变异法(RVA), 以 3.1 中识别的变异点位置为依据, 进行水文阶段划分, 划定参考序列和评价序列。对于出现 1971 和 1994 两个变异点的情况, 处理方法为 1971 年以前作为参考序列, 1994 年以后作为评价序列, 即重点获得 1994 年以后的变异情况, 以便各站点在同一个时间范围内进行比较。代入不同站点的参考与评价序列, 应用 RVA 方法对 33 个水文变异指标(IHA)进行评价, 统计不同指标的变异等级与综合变异程度如表 6。

表 6 表示了渭河干支流 7 个站点的 RVA 评估结果。从整体上看, 发生变异最强烈的地方主要是渭河的中游, 即林家村和咸阳站, 综合变异指数超过 0.66, 属强变异; 上游次之, 变异指数基本维持在 0.5~0.6 之间, 而下游与两条支流则大致处于第三层次, 变异指数皆低于 0.5。从变异的指标分布上看, 渭河干流上游段的强水文变异主要集中在枯水季月径流、最大

流量、低脉冲次数与延时、下降率与逆转次数等方面, 中游强变异领域较宽, 包括丰枯月径流、最大最小流量、高脉冲次数、上升下降率等, 而下游则反映在汛前以及丰水期月径流、最大最小流量以及下降率与逆转次数方面。两条支流中, 泾河的强水文变异主要在最小流量、最大流量、基流以及最大流量发生时间, 而北洛河则侧重于最小流量、基流、低脉冲延时与逆转次数等方面。

纵观水文变异空间分布, 不难发现整个渭河流域内水文变异的领域差异性较大, 变异程度也各不相同, 综合来看, 1994 年以后, 渭河流域的水文情势的变异主要集中在枯季径流、最大流量、变化率等方面。

5. 结论

通过对渭河干支流 7 个水文站点的水文序列变异点、变异尺度以及变异域的识别与分析, 可得出如下结论:

(1) 变异点位置: 渭河干支流在变异的时间位置上基本趋同, 主要分为两点: 1) 1971 年, 变异发生地位于林家村、咸阳以及华县站, 其主要由以宝鸡峡灌区引水工程为代表的人类活动的影响所致。2) 1994 年, 属全流域水文变异, 该变异由人类活动与气候因素共同驱动, 其中气候因素中的降水的减少是主因, 河道取水、水土保持活动、水库调蓄等人类活动的影响为次因。

(2) 变异强度与变异域: 渭河干支流的 7 个水文站点中, 林家村和咸阳站变异最为强烈, 属强变异, 而其他站点多为中等变异。在空间分布上, 表现为中游变异最为显著, 上游次之, 下游与两条支流变异程度最小。在变异域上, 水文变异的的空间分布差异性较大, 变异程度也各不相同, 综合来看, 渭河流域的水文情势的变异主要集中在枯季径流、最大流量、变化率等方面。

(3) 变异时间尺度: 水文变异主要发生在趋势项, 只有华县站和状头站的水文变异影响到 IMF 分解项, 即水文变异对华县站 6 年时间尺度变化及状头站 4~6 年时间尺度变化过程产生扰动。也就是说, 水文变异的驱动力除了在长程趋势上对年径流量产生向上或向下的扰动外, 还有可能对径流的周期变化特征产生影响, 即某一些周期变化特征会因为变异驱动而改变或

Table 6. Statistical analysis of IHA variation on different stations
表 6. 不同站点水文序列的 RVA 评价结果

站点	高变异指标(指标数)	中变异指标(指标数)	低变异指标(指标数)	无变异指标(指标数)	综合改变度
武山	Mar, Jul, Nov, Dec, 3d max, 90d max, Lo pulse fre, Lo pulse dur, Fall rate, Reversals (10)	Feb, Apr, May, Jun, Oct, 7d min, 90d min, 7d max, 30d max, Date min, Hi pulse dur, Rise rate (12)	Jan, Aug, Sep, 1d min, 3d min, 30d min, 1d max, Zero days, Base flow, Date max, Hi pulse fre (11)		中(0.52)
北道	Mar, May, Jun, Jul, Sep, Oct, Dec, 30d min, 90d min, 3d max, 7d max, 30d max, 90d max, Hi pulse fre, Rise rate, Fall rate (16)	Feb, Aug, Nov, 1d min, 3d min, 7d min, 1d max, Lo pulse dur, Reversals (9)	Jan, Apr, Zero days, Base flow, Date min, Date max, Lo pulse fre, Hi pulse dur (8)		中(0.58)
林家村	Feb, Mar, Apr, May, Jul, Aug, Sep, Nov, Dec, 1d min, 3d min, 7d min, 30d min, 90d min, 1d max, 3d max, 30d max, 90d max, Base flow, Hi pulse fre, Rise rate, Fall rate (22)	Jan, Jun, Oct, 7d max, Lo pulse fre, Lo pulse dur, Hi pulse dur, Reversals (8)	Date min, Date max (2)	Zero days (1)	高(0.75)
咸阳	Jan, Feb, Mar, Apr, Jul, Aug, Sep, Oct, Nov, Dec, 1d min, 3d min, 7d min, 30d min, 90d min, 1d max, 3d max, 7d max, 30d max, 90d max, Hi pulse fre, Rise rate, Fall rate (23)	May, Jul, Base flow, Date min, Date max, Reversals (6)	Lo pulse fre, Lo pulse dur, Hi pulse dur (3)	Zero days (1)	高(0.68)
华县	Apr, Jun, Jul, Sep, 1d min, 3d min, 1d max, 3d max, 7d max, 30d max, 90d max, Fall rate, Reversals (13)	Aug, Oct, Nov, 7d min, Base flow, Hi pulse fre, Rise rate (7)	Jan, Feb, Mar, May, Dec, 30d min, 90d min, Date min, Date max, Lo pulse fre, Lo pulse dur, Hi pulse dur (12)	Zero days (1)	中(0.46)
张家山	Jul, Nov, 1d min, 3d min, 7d min, 30d min, 90d min, 30d max, 90d max, Base flow, Date max (11)	Jan, Feb, Apr, Aug, Sep, 7d max, Date min, Lo pulse fre, Lo pulse dur, Hi pulse dur, Hi pulse fre, Rise rate, Reversals (13)	Mar, May, Jun, Oct, Dec, 1d max, 3d max, Fall rate (8)	Zero days (1)	中(0.49)
状头	Mar, Dec, 1d min, 3d min, 7d min, 30d min, 90d min, Base flow, Lo pulse dur, Reversals (10)	Jan, Apr, Jul, Aug, Sep, Nov, 1d max, 7d max, 90d max, Date min (10)	Feb, May, Jun, Oct, 3d max, 30d max, Zero days, Date max, Lo pulse fre, Hi pulse fre, Hi pulse dur, Rise rate, Fall rate (13)		中(0.46)

消失。

致谢

感谢第十一届中国水论坛推荐。

基金项目

国家自然科学基金(51009009, 51379014)。

参考文献 (References)

- [1] 谢平, 陈广才, 雷红富等. 变化环境下地表水资源评价方法[M]. 科学出版社, 北京, 2009.
XIE Ping, CHEN Guangcai, LEI Hongfu, et al. The assessment methods of surface water resources in changing environments. Science Press, Beijing, 2009. (in Chinese)
- [2] 谢平, 陈广才, 夏军. 变化环境下非一致性年径流序列的水文频率计算原理[J]. 武汉大学学报(工学版), 2005, 38(6): 6-9.
XIE Ping, CHEN Guangcai and XIA Jun. Hydrological frequency calculation principle of inconsistent annual runoff series under changing environments. Engineering Journal of Wuhan University, 2005, 38 (6): 6-9. (in Chinese)
- [3] 王孝礼, 胡宝清, 夏军. 水文时序趋势与变异点的R/S分析法[J]. 武汉大学学报(工学版), 2002, 35(2): 10-12.
WANG Xiaoli, HU Baoqing and XIA Jun. R/S analysis method of trend and aberrance point on hydrological time series. Engineering Journal of Wuhan University, 2002, 35(2): 10-12. (in Chinese)
- [4] 谢平, 陈广才, 雷红富, 武方圆. 水文变异诊断系统[J]. 水力发电学报, 2010, 29(1): 82-91.
XIE Ping, CHEN Guangcai, LEI Hongfu and WU Fangyuan. Hydrological alteration diagnosis system. Journal of Hydroelectric Engineering, 2010, 29(1): 82-91. (in Chinese)
- [5] 张一驰, 周成虎, 李宝林. 基于 Brown-Forsythe 检验的水文序列变异点识别[J]. 地理研究, 2005, 24(5): 741-748.
ZHANG Yichi, ZHOU Chenghu and LI Baolin. Brown-Forsythe based method for detecting change points in hydrological time series. Geographical Research, 2005, 24(5): 741-748. (in Chinese)
- [6] HONG H., HU B. Q., et al. Change-point analysis of hydrological time series using grey relational method. Journal of Hydrology, 2006, 324(1-4): 323-338.
- [7] 雷红富, 谢平, 陈广才等. 水文序列变异点检验方法的性能比较分析[J]. 水电能源科学, 2007, 25(4): 36-40.
LEI Hongfu, XIE Ping, CHEN Guangcai, et al. Comparison and analysis on the performance of hydrological time series change point testing methods. Water Resources and Power, 2007, 25(4): 36-40. (in Chinese)
- [8] 魏风英. 现代气候统计诊断与预测技术[M]. 气象出版社, 北

- 京, 1999.
Wei Fengying. Technology of statistical diagnosis and prediction of modern climate. Meteorological Press, Beijing, 1999.
- [9] 张珏. 基于非线性理论的石泉和安康水文站径流及洪水规律挖掘[D]. 西安理工大学, 2008.
ZHANG Jue. Runoff and flood law mining based on nonlinear theory in Shiquan and Ankang hydrological stations. Xi'an University of Technology, 2008. (in Chinese)
- [10] 冯平, 丁志宏, 韩瑞光. 基于 EMD 的洮河年径流量变化多时间尺度分析[J]. 干旱区资源与环境, 2008, 22(12): 73-76.
FENG Ping, DING Zhihong and HAN Ruiguang. Time-scale analysis on annual runoff time series of the Taohe River based on EMD. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2008, 22(12): 73-76. (in Chinese)
- [11] 刘莉红, 郑祖光, 琚建华. 基于 EMD 方法的我国年气温和东部年降水量序列的振荡模态分析[J]. 高原气象, 2008, 27(5): 1061-1065.
LIU Lihong, ZHENG Zhuaguang and JU Jianhua. Vacillations of the time series of annual temperature and precipitation in China based on EMD method. Plateau Meteorology, 2008, 27(5): 1061-1065. (in Chinese)
- [12] RICHTER, B. D., BAUMGARTNER, J. V., BRANN, D. P. and POWELL, J. A spatial assessment of hydrologic alteration within a river network. Regulated River: Research and Management, 1998, 14(4): 329-340.
- [13] 刘燕, 李小龙, 胡安焱. 河川径流对降水变化的响应研究——以渭河为例[J]. 干旱区地理, 2007, 30(1): 49-52.
LIU Yan, LI Xiaolong and HU Anyan. Response of runoff to precipitation changes—Taking a case of Weihe. Arid Land Geography, 2007, 30(1): 49-52. (in Chinese)
- [14] 粟晓玲, 康绍忠, 魏晓妹等. 气候变化和人类活动对渭河流域入黄径流的影响[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2007, 35(2): 153-159.
SU Xiaoling, KANG Shaozhong, WEI Xiaomei, et al. Impact of climate change and human activity on the runoff of Wei River basin to the Yellow River. Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition), 2007, 35(2): 153-159. (in Chinese)
- [15] 刘俊萍, 田峰巍, 黄强等. 基于小波分析的黄河河川径流变化规律研究[J]. 自然科学进展, 2003, 13(4): 383-387.
LIU Junping, TIAN Fengwei, HUANG Qiang, et al. The change rule of run-off the Yellow River based on wavelet transform. Progress in Nature Science, 2003, 13(4): 383-387. (in Chinese)