

# 基于 HHT 的雅鲁藏布江径流变化周期及趋势分析\*

邵 骏<sup>1</sup>, 袁 鹏<sup>1,2</sup>, 颜志衡<sup>1</sup>, 张文江<sup>3</sup>

1. 四川大学水利水电学院, 四川 成都 610065;
2. 四川大学水力学与山区河流开发保护国家重点实验室, 四川 成都 610065;
3. 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101)

**摘 要:** 采用 Hilbert-Huang 变换对雅鲁藏布江干支流上的 10 个水文站 1956-2000 年天然径流资料进行分析, 探讨了雅鲁藏布江流域年径流变化的近似周期及其演变趋势。研究表明, 雅鲁藏布江全流域范围内存在约 3、6~8、9、11~13、16~17 及 22~24 a 的近似周期。同时研究还发现, 雅鲁藏布江干支流在 20 世纪 60 年代左右径流量较大, 但在进入 60 年代中后期之后, 年径流量呈逐渐减小的趋势, 这种趋势在 80 年代附近达到极小值, 此后径流量逐渐回升, 并在 90 年代后逐渐进入相对丰水期。

**关键词:** 雅鲁藏布江; Hilbert-Huang 变换; 径流; 周期分析; 变化趋势

**中图分类号:** P333, TV211 **文献标志码:** A **文章编号:** 0529-6579 (2010) 01-0125-06

## Analysis on Periodic Variations and Trend of Annual Runoff in the Yarlung Zangbo River with Hilbert-Huang Transform

SHAO Jun<sup>1</sup>, YUAN Peng<sup>1,2</sup>, YAN Zhiheng<sup>1</sup>, ZHANG Wenjiang<sup>3</sup>

1. School of Water Resource and Hydropower, Sichuan University, Chengdu 610065, China;
2. State Key Laboratory of Hydraulics and Mountain River Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China;
3. Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China)

**Abstract:** This study applied the Hilbert-Huang Transform (HHT) in the multiple-time-scales analysis of annual runoff series in the Yarlung Zangbo River. With the measured annual runoff data from 1956 to 2000 in the Yarlung Zangbo River, the Intrinsic Mode Function (IMF) and Hilbert spectrum were used to extract hydrological time series periods and the evolution trends of the natural annual runoff. The results showed that the annual runoff periods of the Yarlung Zangbo River include 3, 6~8, 9, 11~13, 16~17 and 22~24 years, respectively. It indicated that the annual runoff of the main and tributary of the Yarlung Zangbo river had an obvious decline trend during 1960s and reached the minimum in 1980s. since then, the annual runoff increased and a relatively wet season occurred in 1990s.

**Key words:** the Yarlung Zangbo River; Hilbert-Huang Transform; runoff; periodic variation; evolution trend

受全球气候变暖等多种因素的影响, 河川径流在过去几十年中发生了极大变化。对于有着大量冰川分布的青藏高原, 其河川径流补给以降水、融雪

为主, 因而径流变化过程受气温周期性影响甚为明显。雅鲁藏布江是西藏最大的河流, 其径流变化对青藏高原及其周围地区国民经济及人民生活有着重

\* 收稿日期: 2009-03-10

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (40801175); 水利部西藏“一江两河”地区水资源管理专题研究基金资助项目 (200784)

作者简介: 邵骏 (1982 生), 男, 博士研究生; 通讯作者: 袁鹏; E-mail: yuanp@scu.edu.cn

大的影响。分析雅鲁藏布江河川径流的变化过程和规律,有助于深入了解高寒地区水文循环与水资源演变规律,对合理开发利用高原地区水资源具有重要的借鉴意义。

在径流演变的过程中,其基本特征是统计性的,如何从这些随机成分中分析出其规律,即周期成分和趋势成分,对合理解释、预测径流变化是十分重要的。周期成分与趋势成分同属隐含分量,与随机成分混合在一起,需应用有效的周期检验方法来提取。常用的水文周期分析方法有周期图法、方差分析、傅立叶变换、小波变换等,然而这些方法都存在某些缺陷,如不能处理周期的位相突变、分辨率不高或方差性能不好等。以小波变换为例,由于其良好的时频局部化特征和多分辨分析能力,近年来被广泛应用于水文水资源系统多时间尺度分析中。但小波变换实质上并未摆脱傅立叶变换的局限,其小波窗口内的信号必须是平稳的,否则将产生虚假的谐波<sup>[1]</sup>。然而受气候、植被、流域下垫面及人类活动等多种因素影响,河川径流序列呈现出复杂的非平稳、非线性特征,采用小波变换对其进行分析必然会产生一定的误差。同时小波分析属于一种先验分析方法,其结果依赖于所选择的小波基函数<sup>[2]</sup>,即对同一个水文现象,选择不同的小波基函数会得到不同的解释。

Hilbert-Huang 变换 (Hilbert-Huang Transform, HHT) 是由 Huang 等<sup>[2-4]</sup>于 1998 年提出的一种新的非线性、非平稳数据的时频分析方法,其基本思想是将时间序列通过经验模态分解 (Empirical

Mode Decomposition, EMD) 得到若干个固有模态函数 (Intrinsic Mode Function, IMF), 然后利用 Hilbert 变换构造解析信号, 得出时间序列的瞬时频率和振幅, 进而得到包含时间—频率—振幅信息的 Hilbert 谱。HHT 变换是依赖数据本身的时间尺度特征来进行的, 没有先验基底, 比傅立叶变换及小波变换更适合处理非线性、非平稳数据。同时经过 Hilbert 变换得到的 Hilbert 谱在时域和频域内的分辨率都远远高于小波谱, 依此得到的分析结果能够准确的反映出非平稳序列原有的物理特性<sup>[2]</sup>。因此本文利用 HHT 变换对雅鲁藏布江天然径流演变的周期性规律与变化趋势进行研究。

## 1 研究区域及资料预处理

雅鲁藏布江发源于西藏自治区南部喜马拉雅山北麓的杰马央宗冰川, 流域面积 24.2 万 km<sup>2</sup>, 其中较大支流有帕隆藏布、多雄藏布、年楚河、拉萨河、尼洋河等。为充分反映整个流域河川径流变化规律, 本文选取了雅鲁藏布江干支流上的拉孜、日喀则等 10 个水文站实测径流资料, 并将其插补延长至 1956—2000 年。这 10 个水文站基本上控制了雅鲁藏布江整个干支流的水文情势, 具有一定的代表性。各站地理位置如图 1 所示。为保证径流序列的一致性, 在计算前首先采用分项调查法对原始数据进行还原处理。主要的还原计算是农业灌溉耗水量、冰湖蒸发、水库水渠引水等, 并对可收集到的水库调蓄及所占比重不大的沼泽蒸发、人畜用水量进行了还原。

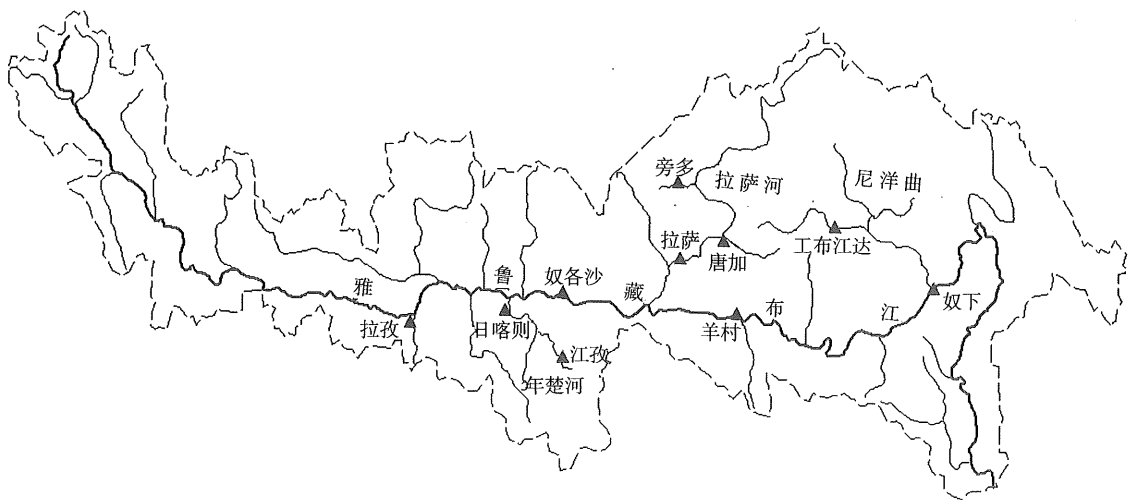


图 1 雅鲁藏布江流域水系图

Fig. 1 Drainage map of the Yarlung Zangbo River basin

## 2 研究方法 with 计算步骤

### 2.1 方法概述

采用 HHT 变换分解序列  $x(t)$  的具体步骤如下:

(1) 计算序列  $x(t)$  的所有极大值点和极小值点, 用插值法连接这些点得到序列  $x(t)$  的上包络和下包络, 从而求出均值包络  $m_1$ , 用序列  $x(t)$  减去均值包络  $m_1$  得到新的序列  $h_1$ 。多次重复上述过程, 使得平均包络趋近于零, 得到原序列  $x(t)$  的第一个 IMF 分量  $c_1$ , 代表原始序列中最高频的分量。

(2) 用  $x(t)$  减去  $c_1$ , 得到去掉高频成分的残余序列  $r_1$ ; 同理可得到  $c_2, c_3, \dots$ , 直到  $r_n$  满足预先给定的终止准则, 分解终止。此时原始序列可表示为  $x(t) = \sum_{i=1}^n c_i + r_n$ , 其中  $c_i$  表示第  $i$  个 IMF 分量, 代表  $x(t)$  中不同特征的时间尺度分量;  $r_n$  表示残余分量, 反映了原序列  $x(t)$  的平均趋势。

(3) 对各 IMF 分量分别作 Hilbert 变换, 最终得到 IMF 分量的振幅函数  $a_j(t) = c_j^2(t) + s_j^2(t)^{1/2}$ , 相位函数  $\theta_j(t) = \arctan\left(\frac{s_j(t)}{c_j(t)}\right)$ , 以及相应的瞬时频率  $f_j(t) = \frac{1}{2\pi} \frac{d\theta_j(t)}{dt}$ 。

### 2.2 基于 EMD 的周期分析

若  $x(t)$  是周期为  $T$  的离散序列, 通过瞬时频率可求得  $x(t)$  的主频  $f$ , 定义  $f$  与  $1/T$  之间的偏差为主频漂移。现有研究表明, EMD 分解有助于消除低频含量的非线性变形<sup>[5]</sup>。当序列在每一个时间局部都有足够多的高频含量时, 主频含有的非线性变形将得到一定程度的减少, 从而减小主频漂移。因此对于周期为  $T$  的序列, 可通过 EMD 分

解除低频含量的非线性变形, 减少主频漂移程度, 使得主频近似等于  $1/T$ , 即序列的周期可表示为  $1/f$ 。

### 2.3 局部正交性与边界效应

应当指出, HHT 方法本身还存在一些问题亟待解决。首先与小波分析相比, HHT 方法没有完备的理论基础, 它是一种物理上的方法, 具有一定的经验性和近似性。比如 IMF 分量的正交性问题, 在 EMD 分解过程中, 每个 IMF 分量都是上次分解的剩余信号与其均值曲线的差, 从实际意义上讲这个 IMF 分量与均值曲线是局部正交的<sup>[6]</sup>, 但并没有获得理论上的证明, Huang 只是用数据加以验证<sup>[2]</sup>。其次数据边界效应也是应用 EMD 分解时应注重的问题。如果不进行处理, 在拟合包络线时将会引起误差导致数据失真。尤其对于水文时间序列, 由于序列长度通常较短, 边界效应将会影响到序列的内部, 使得 IMF 分解出的结果无法准确的表现出水文序列的真实演变规律。本文采用 Flandrin 等人提出的镜像延拓的方法<sup>[7]</sup>对数据进行处理。

## 3 径流变化周期分析

采用 HHT 变换对雅鲁藏布江流域拉孜、日喀则等 10 个水文站 1956 - 2000 年年均径流序列进行分析, 得到各站的 IMF 分量及 Hilbert 谱。将 IMF 分量的振幅以灰度级的形式表现在时间—频率—振幅图上。振幅用灰度级表示, 即点越亮振幅越大, 点越暗振幅越小。以年楚河日喀则水文站为例, 如图 2 所示, 图中第一行为原始年径流量序列, 该序列经过 EMD 分解后可得到 4 个 IMF 分量和一个趋势分量。

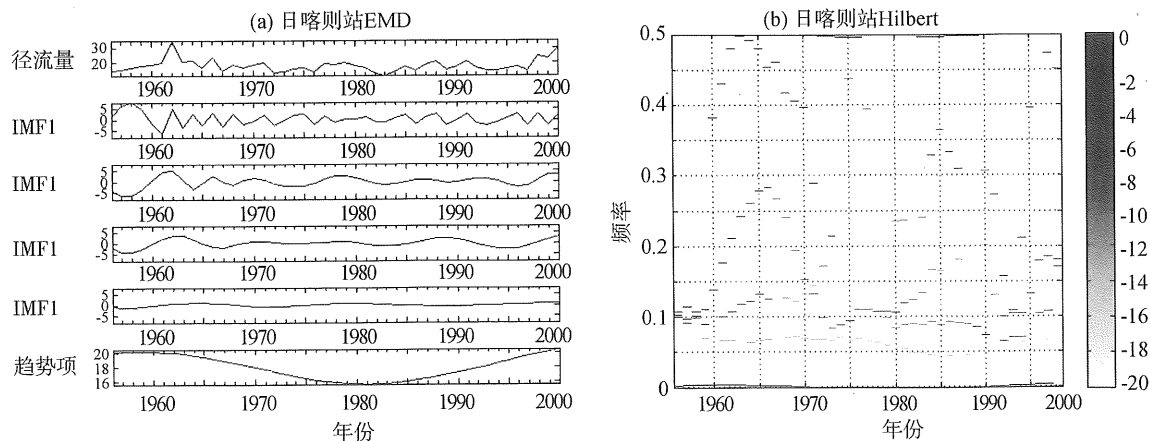


图 2 日喀则站年径流量 IMF 分量及其 Hilbert 谱

Fig. 2 The IMF and Hilbert spectrum of annual runoff series at Xigaze station

图 2 (a) 日喀则站中,  $IMF_1 - IMF_4$  平均周期约 3.1、6.4、9.4、16.1a, 中心频率为 0.32、0.16、0.11、0.06, 平均振幅为 3.41、2.70、2.12、0.81 亿  $m^3$ 。其中  $IMF_1$  振幅较大, 频率较高, 对应的 Hilbert 谱点据散乱,  $IMF_2 - IMF_4$  曲线逐渐平滑, 频谱图的点据分布规律性也逐渐明显。

采用同样的方法对其余各站进行 HHT 分析, 可以分别得到各站的年径流系列 IMF 分量及对应的振荡周期。从表 1 看出, 除雅鲁藏布江干流中下游的奴各沙、羊村和奴下站, 由于受干支流径流变化的综合作用, 使得部分周期分辨率降低, 得到 3 个周期分量以外, 其余站点均可得到 4 个周期分量。

表 1 雅鲁藏布江流域年径流量 Hilbert 变换后的统计特征值

Table 1 Statistics of IMF of annual runoff series transformed by HHT in the Yarlung Zangbo River

站名	模态	平均幅值 亿 $m^3$	中心频率 $a^{-1}$	平均周期 a	站名	模态	平均幅值 亿 $m^3$	中心频率 $a^{-1}$	平均周期 a
日喀则	IMF1	3.41	0.32	3.1	拉孜	IMF1	8.67	0.30	3.4
	IMF2	2.70	0.16	6.4		IMF2	4.26	0.19	5.2
	IMF3	2.12	0.11	9.4		IMF3	4.05	0.08	11.9
	IMF4	0.81	0.06	16.1		IMF4	1.01	0.06	16.0
奴各沙	IMF1	53.81	0.26	3.8	旁多	IMF1	12.24	0.33	3.1
	IMF2	26.58	0.12	8.0		IMF2	6.27	0.16	6.3
	IMF3	16.98	0.04	22.8		IMF3	6.39	0.11	9.3
				IMF4		4.64	0.07	14.7	
羊村	IMF1	81.51	0.27	3.6	唐加	IMF1	16.54	0.33	3.1
	IMF2	49.51	0.13	7.9		IMF2	6.75	0.16	6.3
	IMF3	22.88	0.06	17.2		IMF3	8.01	0.11	9.3
				IMF4		5.91	0.08	12.6	
奴下	IMF1	92.27	0.34	2.9	拉萨	IMF1	21.65	0.33	3.0
	IMF2	78.77	0.13	7.6		IMF2	12.11	0.14	7.3
	IMF3	53.43	0.08	13.2		IMF3	7.55	0.15	6.9
				IMF4		9.83	0.06	16.2	
江孜	IMF1	1.58	0.27	3.7	工布江达	IMF1	5.78	0.33	3.0
	IMF2	1.26	0.16	6.4		IMF2	3.59	0.13	7.5
	IMF3	0.85	0.11	9.3		IMF3	1.81	0.08	13.1
	IMF4	0.89	0.06	17.1		IMF4	0.50	0.04	24.3

将各站平均周期点绘成图 3, 可以看出整个雅鲁藏布江流域的周期变化趋势。由于各站处于不同的地理位置、海拔高度, 其各自的气候气象条件、下垫面条件等有所不同, 进而影响到 HHT 变换边界条件的不同, 使得计算的 IMF 分量及主要周期大小上有一定的差别, 但是整个雅鲁藏布江流域基本上存在共同的变化周期, 在不同尺度范围内存在约 3、6~8、9、11~13、16~17 及 22~24 a 左右的近似周期, 可能与大气环流、厄尔尼诺—拉尼娜现象的周期性有关, 以及太阳黑子活动等多种因素相关。现有研究表明, 3、6~8 a 周期与 ENSO 现象 3.5 和 5~6 a 的变化周期是一致的<sup>[8]</sup>; 9、11~13、16、22 a 周期与太阳黑子活动<sup>[9]</sup>、海—气相互

作用<sup>[10]</sup>的强弱变化周期一致。

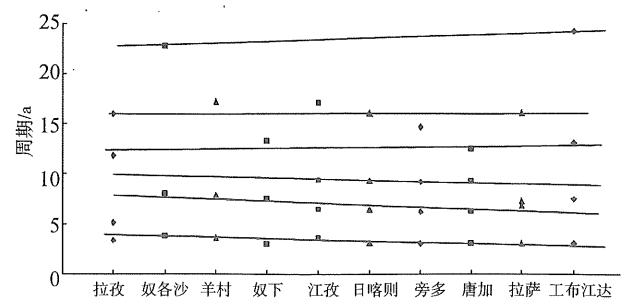


图 3 雅鲁藏布江干支流年径流量变化周期图

Fig. 3 Annual runoff variation period of main and tributary rivers in the Yarlung Zangbo River

### 4 径流变化趋势分析

对年径流量序列进行 EMD 分解, 除了可以得到不同特征的时间尺度分量以外, 还可以得到一项趋势分量, 该分量表示径流的变化趋势 (图 4)。从图中可以看出, 除尼洋河工布江达站以外, 整个流域包括干支流基本上都经历了 20 世纪 60 年代末至 80 年代初径流减少的过程, 在 80 年代末至 90 年代, 整个流域内的径流量又有不同程度的增加。

为了检验 EMD 分解出的趋势项是否合理, 采用 Mann-Kendall 法进行趋势检验。表 2 中 Mann-

Kendall 统计检验值为正值时表明径流量呈上升趋势, 负值表明有下降趋势。从表中上升趋势。从图 5 的 Mann-Kendall 趋势图中可以清晰的看出各站在 20 世纪 70 年代以前呈现正增长的趋势, 70 年代以后开始出现减少的趋势, 在 80 年和 90 年前后出现了短暂的增加趋势, 90 年代末径流量仍为减少趋势, 但幅度较之前略为减缓, 其中拉萨河的旁多站、唐加站、拉萨站径流量在 90 年代末还出现了正值, 因此在 EMD 趋势图 (图 5) 中就表现为 90 年代后期趋势曲线的单调增加。

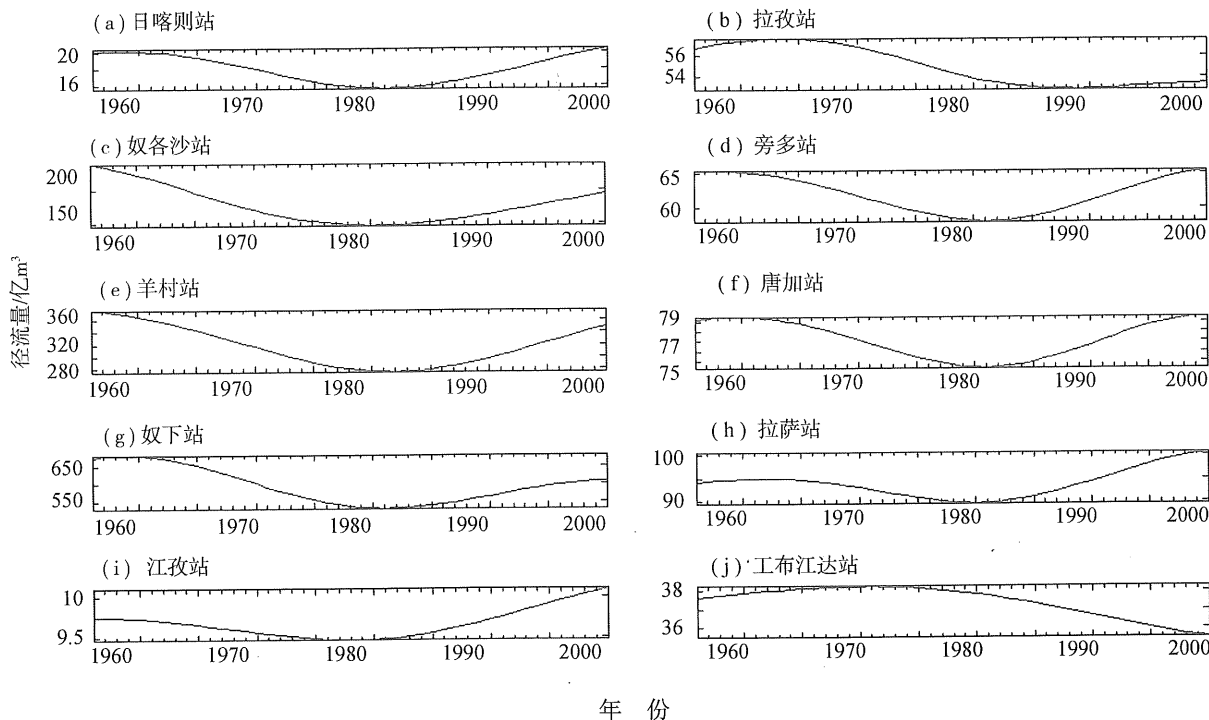


图 4 雅鲁藏布江干支流年径流量变化 EMD 趋势图  
Fig. 4 EMD annual runoff trend of the Yarlung Zangbo River

表 2 雅鲁藏布江流域年径流变化趋势的 Mann-Kendall 检验

Table 2 Mann-Kendall test for annual discharge series of the Yarlung Zangbo River

站名	M-K 统计 检验值 $Z_c$	显著 水平	站名	M-K 统计 检验值 $Z_c$	显著 水平
拉孜	-0.14	不显著	日喀则	-0.13	不显著
奴各沙	-0.68	不显著	旁多	0.03	不显著
羊村	-0.02	不显著	唐加	0.13	不显著
奴下	-0.51	不显著	拉萨	0.81	不显著
江孜	0.20	不显著	工布江达	0.16	不显著

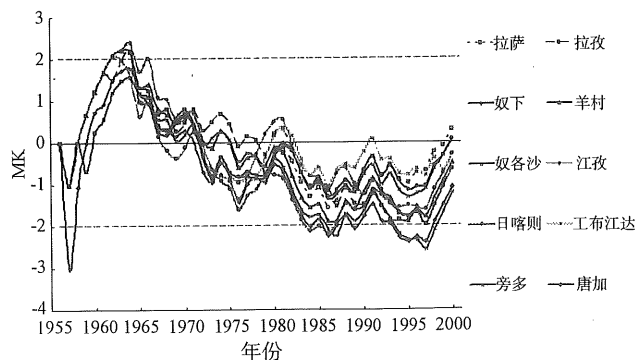


图 5 雅鲁藏布江干支流年径流量 Mann-Kendall 趋势图  
Fig. 5 Annual runoff trend of the Yarlung Zangbo River

综上所述,不管是从径流量的 EMD 分解,还是 Mann-Kendall 趋势检验,均表明在 20 世纪 90 年代以后,雅鲁藏布江的径流量出现了一定程度的增加趋势。现有研究表明 20 世纪 60 年代末至 70 年代初全球范围内发生了气候的突变<sup>[11-12]</sup>,青藏高原也在 60 年代中期和 80 年代初发生了气候突变<sup>[13]</sup>,即在上世纪 60 年代中期青藏高原气候由暖变冷,在 80 年代初从冷变到暖。进入 90 年代后,全球气候变暖及青藏高原冰川消融加剧<sup>[14-15]</sup>使得雅鲁藏布江径流量呈现出增加的趋势。雅鲁藏布江流域径流的变化趋势与上述研究结果基本吻合,由此可见雅鲁藏布江年径流不同模态和不同周期的演化模式在一定程度上揭示了不同时间尺度气候波动对流域水文循环的影响,进一步说明了径流变化是气候、植被、流域下垫面和人类活动等因素共同作用的综合输出。

## 5 结论与展望

本文采用 HHT 方法对雅鲁藏布江流域 10 个水文站 1956-2000 年天然河川径流序列进行分析,结果表明:

(1) 雅鲁藏布江流域存在不同时间尺度的近似周期演变,通过对各站年径流量 IMF 分量分析可以得知,整个流域范围内存在 3、6~8、9、11~13、16~17 及 22~24 a 左右的近似周期。

(2) 雅鲁藏布江干支流在 20 世纪 60 年代左右径流量较大,但在进入 60 年代中后期之后,年径流量呈逐渐减小的趋势,这种趋势在 80 年代附近达到极小值,此后径流量逐渐回升,并在 90 年代后逐渐进入相对丰水期。现有研究表明,上世纪 60 年代中期青藏高原气候出现出由暖变冷的趋势,80 年代初从冷变到暖,并在 90 年代后持续增温。雅鲁藏布江流域径流的变化趋势与气候变化趋势基本吻合,在一定程度上揭示了气候波动对流域水文循环的影响。

(3) 水文时间序列变化规律极为复杂,本文研究表明 HHT 方法在水文时间序列周期分析及趋势变化方面具有较好的效果。但目前对其应用的研究只是初步的,大量的研究工作尚需开展。一方面需进一步完善 HHT 方法本身的理论基础及其所得结果的物理意义,另一方面开拓 HHT 方法在水文水资源方面的应用领域。

## 参考文献:

- [1] 石教智,陈晓宏,黎坤. 基于 HHT 方法的宜昌近百年径流演化模式分析[J]. 人民长江, 2005, 36(11):34-36.
- [2] HUANG N E, SHEN Z, LONG SR, et al. The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis[J]. Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 1998, 454: 903-995.
- [3] HUANG N E, SHEN Z, LONG SR. A new view of nonlinear water waves: the Hilbert spectrum[J]. Annual Review of Fluid Mechanics, 1999, 31: 417-457.
- [4] ZHAO H W, HUANG N E. A study of the characteristics of white noise using the empirical mode decomposition method[J]. Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 2004, 460: 1597-1611.
- [5] 杨志华,齐东旭,杨力华,等. 一种基于 HHT 的信号周期性分析方法及应用[J]. 中山大学学报:自然科学版, 2005, 44(2): 14-18.
- [6] 王扬圣,陈子燊,刘萌伟. 基于希尔伯特-黄变换的海滩碎波带水体波动特征分析[J]. 中山大学学报:自然科学版, 2008, 47(1):112-115.
- [7] FLANDRIN P, RILLING G, GONCALVES P. Empirical Mode Decomposition as a filter bank[J]. IEEE Signal Processing Letters, 2004, 11(2):112-114.
- [8] 郑红星,刘昌明. 黄河流域水资源演化模式分析[J]. 地理学报, 2004, 59(2):267-273.
- [9] 郝志新,郑景云,葛全胜. 黄河中下游地区降水变化的周期分析[J]. 地理学报, 2007, 62(5): 537-544.
- [10] 杨建平,丁永建,陈仁升. 长江黄河源区水文和气象序列周期变化分析[J]. 中国沙漠, 2005, 25(3): 351-355.
- [11] 蔺学东,张懿锂,姚治君,等. 拉萨河流域近 50 年来径流变化趋势分析[J]. 地理科学进展, 2007, 26(3):58-67.
- [12] ROWAN F, JOHN S. Detection of a possible change point in atmospheric variability in the North Atlantic and its effect on Scandinavian glacier mass balance[J]. International Journal of Climatology, 2005, 25: 1819-1833.
- [13] 汤懋苍,白重瑗,冯松,等. 本世纪青藏高原气候的三次突变及与天文因素的相关[J]. 高原气象, 1998, 17(3):250-257.
- [14] 赖祖铭. 气候变化对青藏高原大江河径流的影响[J]. 冰川冻土, 1996, 18(s): 314-320.
- [15] 刘剑,姚治君,陈传友. 雅鲁藏布江径流变化趋势及原因分析[J]. 自然资源学报, 2007, 22(3):471-477.