

雅鲁藏布江流域径流特性变化分析

李占玲¹, 徐宗学^{1,*}, 巩同梁^{2,3}

(1. 北京师范大学水科学研究院, 水沙科学教育部重点实验室, 北京 100875;

2. 清华大学水利系, 北京 100084; 3. 西藏自治区水利规划勘测设计研究院, 拉萨 850000)

摘要: 本文采用 Morlet 小波对 1956~2000 年雅鲁藏布江流域 6 个站点的径流序列进行了分析, 揭示了不同时间尺度下四个季节以及年平均径流量的丰枯交替特性、突变性和周期性, 通过小波方差确定各序列存在的主要周期。结果表明: 在 15 年时间尺度上, 雅江流域四个季节的径流变化趋势基本一致; 发生突变的年份主要在 1957、1967、1976、1983、1992 年; 径流序列第一主周期主要以 15 年长周期和 2 年短周期为主, 第二主周期以 15、6、2~3 年的长、中、短周期为主; 秋季和冬季径流序列的周期空间分布基本一致, 年平均径流序列的周期分布与夏季最为接近; 除拉萨河子流域春季在 2~3 年尺度上处于枯水期外, 其他子流域其他时段在任何时间尺度上未来几年里都将处于丰水期。

关键词: 径流; 小波分析; 雅鲁藏布江

文章编号: 1000-0585(2008)02-0353-09

1 引言

雅鲁藏布江发源并流经青藏高原, 是世界上海拔最高的大河, 全长 2229 km, 流域面积 23.9 万 km²。该流域径流的年际间变化小, 年内分配不均匀。径流补给主要来源于大气降水、融雪和地下水补给^[1]。雅鲁藏布江中游流域水利灌溉和机械化条件优越, 是西藏最主要和最富庶的农业区, 也是主要的粮食作物基地和高产稳产农田的发展场所。了解和掌握雅鲁藏布江流域径流的时空动态和发展趋势, 对搞好该地区的农业生产具有十分重要的意义, 也是进行水资源合理配置和开发、实现区域水资源可持续利用的前提之一。

径流时间序列具有尺度特征和突变特征, 不同时间尺度隐含着不同的水资源变化规律和丰枯变化趋势。小波分析是一种信号的时间—尺度分析方法, 具有多分辨率分析的特点, 借助小波变换的时频局部化优势可以准确地找到时间序列的大小时间尺度(周期)和突变点所在的位置, 从而为水文系统分析、预测提供重要依据^[2~4]。自从 1993 年 Kumar 等^[5]将小波分析介绍到水文以来, 小波分析在水科学研究中也已取得了一定的研究成果。Margriet 采用 Morlet 小波, 分析了澳大利亚 Bogan 河流域上游 Peak 山脉和 Neurie 平原的降雨径流时间序列, 将“自然的”气候变化和人类活动对水循环的影响区别开来, 着重探讨了气候因素引起的降雨径流特性的改变^[6]。杨志峰、蒋晓辉、邵晓梅和宗海锋等采用小波分析方法对黄河流域和长江流域水文要素变化的周期性和突变性作了详细的分析

收稿日期: 2007-04-25; 修订日期: 2007-11-28

基金项目: 国家科技攻关计划项目(2005BA901A11)和北京师范大学“京师学者”特聘教授启动经费资助

作者简介: 李占玲(1980), 女, 内蒙古赤峰人, 在读博士研究生。研究方向水文水资源。

E-mail: lizhanling2005@163.com

* 通讯作者: 徐宗学, 教授, 博士。主要从事水文学及水资源研究。E-mail: zxxu@bnu.edu.cn

和讨论^[3, 7~9]。张军涛等采用小波分析方法分析了 20 世纪 50 年代以来东北农牧交错区典型站点温度和降水变化的多尺度特征和规律^[10]。

河流径流受气候、地貌、土壤、植被等自然条件以及人类活动的耦合作用,其演变过程存在确定性规律,同时也表现出强烈的随机性。分析河流径流特征,认识其演化规律和趋势,不仅有助于深入了解流域水循环与水平衡以及流域的结构和功能,而且对流域内水资源合理开发与利用等具有重要意义。本文选用 Morlet 小波分析方法分析雅鲁藏布江流域(以下简称雅江流域)6 个站点径流序列的多时间尺度特征,分析不同时间尺度下径流变化的周期和突变点以及存在的主要周期,在此基础上,探讨径流要素周期的空间分布特征,以为该流域水资源评价、开发、利用和管理提供依据。

2 资料与方法

2.1 资料来源及数据处理

雅鲁藏布江支流众多,集水面积大于 1 万 km²的有多雄藏布、年楚河、拉萨河、尼洋河和帕隆藏布。考虑该流域地形地貌特点,以及水文站点资料的完整性、一致性和代表性,本文选取了流域上具有 1956~2000 年实测月平均径流量资料的 6 个站点,具体包括干流的奴各沙、羊村、奴下水文站,支流拉萨河的唐加、拉萨水文站,年楚河の日喀则水文站。由于所选水文站控制断面以上流域内的人类用水较少,因此水文站点的实测流量基本反映了河流的天然径流状况。由于尼洋河水文站点 1956~1978 年径流资料短缺,而尼洋河的主要水文站点工布江达站的径流量在 6、7、8 月份与奴下站径流量呈良好的相关关系,相关系数分别为 0.81、0.86、0.85,因此未选取尼洋河上的水文站点,而是根据奴下站分析雅江中下游和尼洋河流域的径流特性。站点分布如图 1 所示。数据由西藏自治区水文局提供。这些站点分布均匀,基本能反映该流域的径流变化特征。

在数据处理方面,首先将各站点实测径流量的逐月数据进行统计,得到春季(3~5 月份)、夏季(6~8 月份)、秋季(9~11 月份)、冬季(12~次年 2 月份)和全年平均径流量。以此为数据源进行分析。



图 1 雅鲁藏布江流域各站点示意图

Fig 1 Distributions of meteorological stations in the Yarlung Zangbo River basin

2.2 研究方法

对于任意函数 $f(x) \in L^2(R)$, 以小波母函数 $\varphi(x)$ 为基的连续小波变换 (continuous wavelet transform, CWT) 为 $f(x)$ 和 $\varphi_{a,b}(x)$ 的内积,

$$W_f(a, b) = \langle f(x), \varphi_{a,b}(x) \rangle = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_R f(x) \varphi\left(\frac{x-b}{a}\right) dx \quad (1)$$

其中, a 为尺度因子, b 为平移因子。CWT 变换的结果得到许多小波系数 $W_f(a, b)$, 该系数表示该部分信号与小波的近似程度^[11~13]。

Morlet 小波与径流时间序列的波形很相近，且在时频域局部性都较好^[14]，所以本文采用 Morlet 小波对该流域径流序列进行小波分析。Morlet 小波的表达式为：

$$\varphi(x) = e^{iw_0x} e^{-x^2/2} \tag{2}$$

式中， w_0 为常数， i 为虚数。其傅立叶变换为 $\varphi(w) = \sqrt{2\pi} e^{-(w-w_0)^2/2}$ ，在 $w_0 \gg 5$ 时，近似满足容许条件。Morlet 小波的时间尺度 a 与周期 T 存在以下关系：

$$T = \frac{4\pi}{w_0 + \sqrt{2 + w_0^2}} \times a \tag{3}$$

当 $w_0 = 6.2$ 时， $T \approx a$ 。因此，Morlet 小波可用于周期分析。本文采用 $w_0 = 6.2$ ，在分析中尺度 a 和周期 T 在数量上视为同等^[14]。

Morlet 小波的连续小波变换为：

$$W_f(a, b) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{\infty} f(x) e^{iw_0 \left(\frac{x-b}{a}\right)} e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{x-b}{a}\right)^2} dx \tag{4}$$

通过小波变换，将 $f(x)$ 一维要素序列转换成以 a 、 b 为坐标的小波系数图。每年的小波特征通过垂直截取系数图来考察，每种周期的小波随时间的变化通过水平向系数图来考察。

年径流在小波变化域中的波动特性用小波系数 $W_f(a, b)$ 来刻画。类似能量曲面的分析方法，把反映年径流在小波变化域中的波动曲面以等值线的形式投影到 (a, b) 平面上，等值线上的每一点值都对应于波动曲面上点的值，其大小用小波系数 $W_f(a, b)$ 来反映，而波动曲面上凹凸顶点是其极值点，也是波动曲面上的特征点，它在 (a, b) 平面上的投影为一点。由于选定的基准面是以年径流多年平均值为代表的平面，则 $W_f(a, b)$ 在 (a, b) 平面等值线上的正或负的量值，表示年径流在小波变化域中以基准面上下起伏的波动情况，进而反映年径流在时间域上丰、枯变化的特性。即在小波系数图中，等值线的闭合中心对应于径流变化中心，正值表示径流量增多，负值表示径流量减少，小波系数的零点对应于径流量突变点。

将时间域上关于尺度 a 的所有小波系数的平方进行积分，即为小波方差：

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

$Var(a)$ 表示时间序列在某一尺度下周期波动的强弱。可以用来确定序列中各种尺度扰动的相对强度，小波方差图对应峰值处的尺度称为该序列的主要时间尺度，即主要周期^[8, 14, 15]。

3 结果与分析

通过对雅江流域 6 个站点长时间径流序列的小波分析，可以得到四季以及年平均径流量的小波系数图和小波方差图，以此来进行流域径流序列多时间尺度特征的分析。

由于篇幅有限，本文仅以雅江中下游及尼洋河子流域的奴下站为例进行解释说明。其他子流域将只给出分析结果。

3.1 雅江中下游及尼洋河流域径流特征分析——以奴下站为例

3.1.1 径流序列的长期变化趋势及突变特性 奴下站春、夏、秋、冬四季及年平均径流量的小波系数图如图 2 所示，图中横坐标表示年份，纵坐标表示时间尺度；该站不同时间尺度（以 $a = 15, 12, 3$ 为例）的小波系数曲线如图 3 所示，横坐标表示年份，纵坐标表

示小波系数; 图 4 表示该站径流序列的小波方差图, 横坐标表示时间尺度, 纵坐标表示经过正规化处理的小波方差。

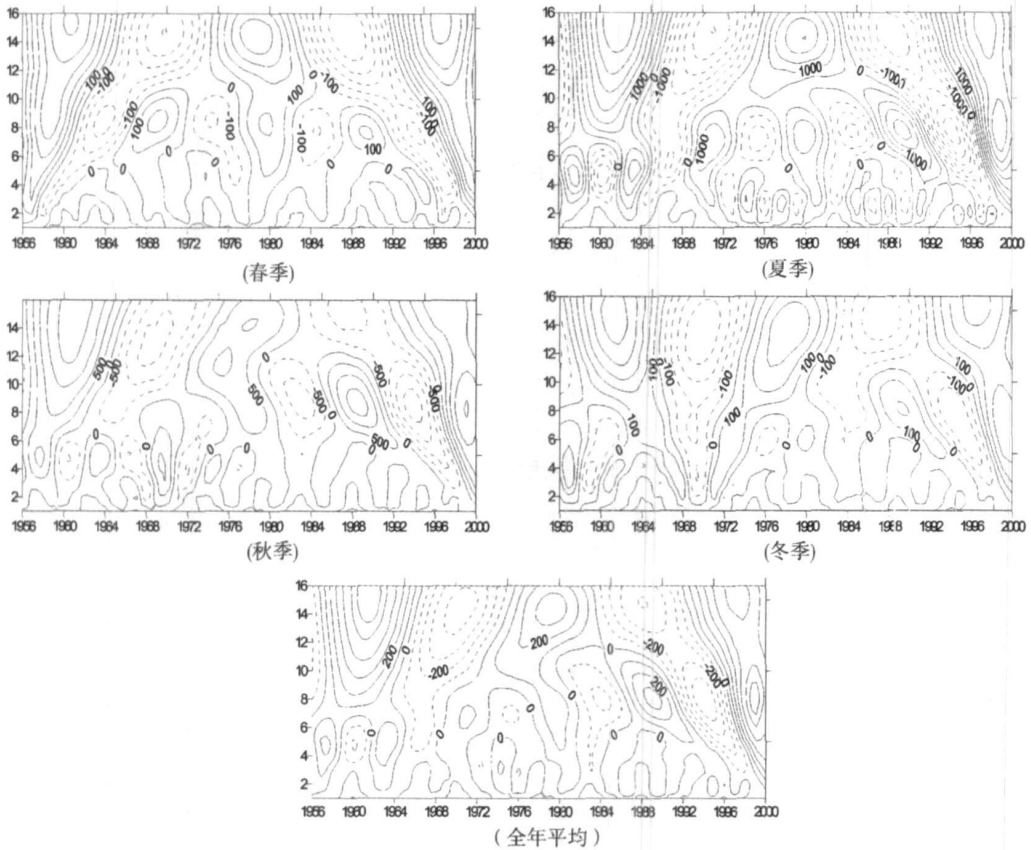


图 2 奴下站四季和年平均径流量的小波系数图 (实线表示丰水期, 虚线表示枯水期)

Fig 2 Wavelet coefficient for spring, summer, autumn, winter and annual runoff at Nuxia station

从图 2 中可以发现: 在 12~16 年时间尺度上, 该子流域春季经历了“丰-枯-丰-枯-丰”的交替径流变化, 1956 年以前的几年是枯水期, 1956 年以后的几年是丰水期; 夏、秋、冬季和年平均径流经历了“枯-丰-枯-丰-枯-丰”的交替变化, 第一个枯水期对应的是 1956~1957 年的枯水期, 1957 年以后的几年处于丰水期。在 8~10 年时间尺度上, 秋季和冬季的径流变化趋势一致, 经历了“丰-枯-丰-枯-丰-枯-丰”交替, 含有 4 个相对丰水期和 3 个相对枯水期, 但每一阶段的持续时间并不一致; 春季径流含有 5 个相对丰水期和 4 个相对枯水期; 夏季径流含有 5 个相对丰水期和 5 个枯水期; 年平均径流含有 4 个相对丰水期和 4 个相对枯水期。每个丰枯交替都对应着径流量的突变。

根据图 3 所示, 15 年时间尺度上, 所有径流序列基本都经历了 3 个丰水期: 春季径流在 1956~1966 年、1975~1983 年、1992~2000 年为丰水期; 1956、1966、1975、1983、1992 年为突变年份; 夏、秋、冬季及年平均径流变化大体相同, 在 1957~1967 年、1975~1984 年、1992~2000 年为丰水期; 1957、1967、1975、1984、1992 年为突变年份, 分析结果与通过图 2 得到的结果一致。在 12 年时间尺度上, 所有径流序列也基本经历了 3 个丰水期: 春季径流大致在 1965、1973、1984、1994 年发生突变; 夏、冬及年

平均径流较春季多存在 1957 年这个突变年份；秋季径流的突变稍有差异，存在 1957、1965、1973、1979、1986、1995 年 6 个突变年份。

3.1.2 径流序列的周期特性

从图 2、3 中均可发现，春、夏、秋、冬及年平均径流序列都具有明显的以 15 年为主的周期特征，且分布于整个时间序列；此外，对于春季径流序列，从 60 年代中期至 90 年代中后期，以 8 年为主的周期变化非常显著；对于夏季径流序列，50 年代中期至 60 年代后期，5 年周期较显著；70 年代初期至 90 年代后期 7~8 年周期显著；对于秋季径流序列，50 年代中期至 70 年代后期，5 年周期显著；80 年代初期至 90 年代后期，9 年周期显著；对于冬季径流序列，50 年代中期至 60 年代中期，3~4 年周期显著；80 年代后期至 90 年代后期，9 年周期显著；对于年平均径流序列，50 年代中期至 60 年代中期，5 年周期显著；80 年代中期至 90 年代后期，8~9 年周期显著。

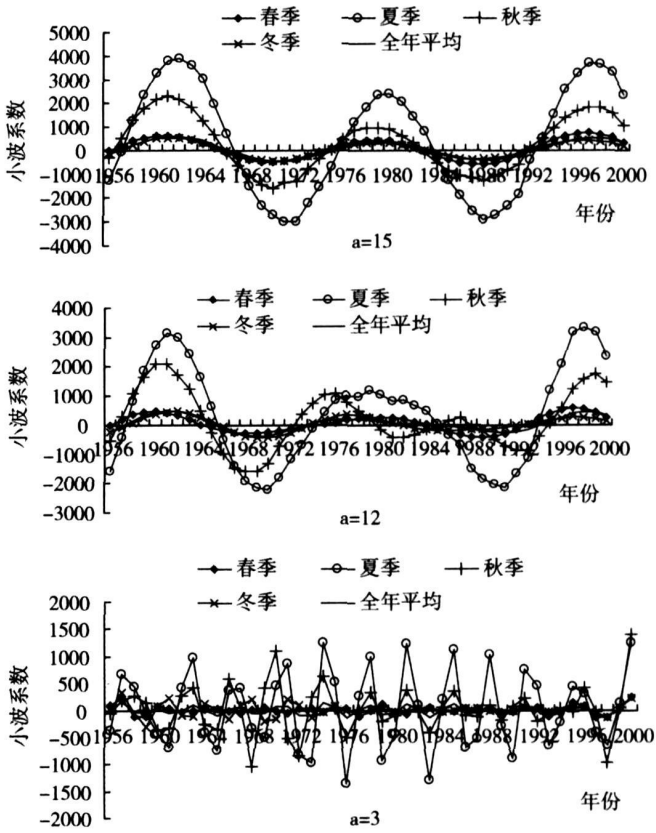


图 3 奴下站四季和年平均径流量不同时间尺度小波系数曲线图
Fig 3 Wavelet coefficient with different scales for spring, summer, autumn, winter and annual runoff at Nuxia station

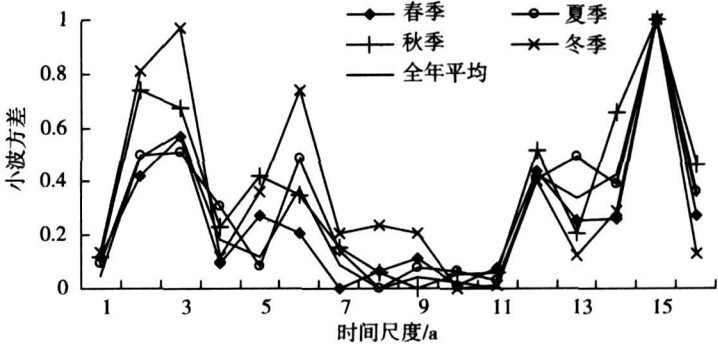


图 4 奴下站四季和年平均径流量的小波方差图

Fig 4 Wavelet variance for spring, summer, autumn, winter and annual runoff at Nuxia station

根据图 4，该子流域四季及年平均径流序列都存在明显的 15 年周期特征，且该周期震荡最为强烈，为第一主周期；此外，分别对应于春、夏、秋、冬四季及年平均径流序列

的还有 3 年、3 年、2 年、3 年、3 年的周期震荡，为第二主周期。

观察图 2、3，无论是四季径流序列还是年平均径流序列，无论是 15 年、12 年、3 年还是其他时间尺度，奴下站最后一组等值线都没有闭合，小波系数曲线都是实线，且位于正半轴，由此判断，无论是从大时间尺度还是小时间尺度来看，雅江中下游及尼洋河子流域在未来的几年径流量将继续保持偏多的趋势。

3 2 雅江流域径流特征分析

3 2 1 径流序列的长期变化趋势及突变特性 从表 1 可见，在 15 年时间尺度上，雅江中游、年楚河和拉萨河下游春夏秋冬四季的径流更替表现一致，均经历了“枯- 丰- 枯- 丰- 枯- 丰”的交替变化；雅江中游、中下游的夏季、秋季、冬季以及年平均径流量也都经历了“枯- 丰- 枯- 丰- 枯- 丰”的交替变化，在春季中下游较中游提早进入了丰水期。

表 1 雅江流域 15 年尺度上的径流量长期变化趋势

Tab 1 Long-term trend of runoff variation at the scale of 15 years in the Yarlung Zangbo River basin						
流域	站点	春季	夏季	秋季	冬季	全年平均
雅江中游	奴各沙	枯丰枯丰枯丰	枯丰枯丰枯丰	枯丰枯丰枯丰	枯丰枯丰枯丰	枯丰枯丰枯丰
	羊村	枯丰枯丰枯丰	枯丰枯丰枯丰	枯丰枯丰枯丰	枯丰枯丰枯丰	枯丰枯丰枯丰
拉萨河	唐加	枯丰枯丰枯丰	丰枯丰枯丰	丰枯丰枯丰	枯丰枯丰枯丰	枯丰枯丰枯丰
	拉萨	枯丰枯丰枯丰	枯丰枯丰枯丰	枯丰枯丰枯丰	枯丰枯丰枯丰	枯丰枯丰枯丰
年楚河	日喀则	枯丰枯丰枯丰	枯丰枯丰枯丰	枯丰枯丰枯丰	枯丰枯丰枯丰	枯丰枯丰枯丰
雅江中下游及尼洋河	奴下	丰枯丰枯丰	枯丰枯丰枯丰	枯丰枯丰枯丰	枯丰枯丰枯丰	枯丰枯丰枯丰

表 2 雅江流域 15 年尺度上径流序列的突变分析

Tab 2 The abrupt change of runoff at the scale of 15 years in the Yarlung Zangbo River basin						
流域	站点	春季	夏季	秋季	冬季	全年平均
雅江中游	奴各沙	1956、1966、 1974、1982、1992	1957、1967、 1976、1984、1992	1957、1966、 1975、1983、1992	1956、1966、 1974、1982、1991	1957、1966、 1975、1983、1992
		1957、1966、 1975、1983、1992	1957、1967、 1976、1984、1992	1957、1966、 1975、1982、1992	1957、1966、 1975、1983、1992	1957、1967、 1975、1983、1992
拉萨河	唐加	1958、1968、 1976、1984、1993	1956、1966、 1975、1983、1992	1965、1974、 1983、1991	1956、1966、 1975、1983、1992	1957、1967、 1976、1984、1992
		1957、1967、 1976、1984、1993	1957、1966、 1975、1983、1991	1957、1967、 1976、1983、1991	1957、1966、 1975、1983、1991	1957、1967、 1976、1983、1992
年楚河	日喀则	1956、1966、 1974、1982、1991	1956、1966、 1974、1982、1991	1957、1966、 1975、1983、1992	1956、1966、 1974、1982、1991	1957、1966、 1975、1983、1992
		1956、1966、 1975、1983、1992	1957、1967、 1975、1984、1992	1957、1967、 1975、1984、1992	1957、1967、 1975、1984、1992	1957、1967、 1975、1984、1992

结合表 2 可以看出，在研究时段内，雅江流域径流量发生突变的年份是 1956 或 1957 年，1956 年或 1957 年以前的几年处于枯水期。由于拉萨河中游在 1956 年的夏季已完成由枯水期到丰水期的转变，同年秋季已过渡到丰水期，因此拉萨河中游夏季和秋季从 1956 年开始便进入了丰水期；本文未考虑 1956 年以前的径流变化特征，因此在 1956~2000 年径流时间序列上，拉萨河中游的夏季和秋季都经历了“丰- 枯- 丰- 枯- 丰”的交替变化；而其他同样在 1956 年发生突变的子流域之所以还存在着 1956 年这一枯水期是因为在 1956 年还未完成从枯水向丰水的转变。中下游的第一个丰水期（1956~ 1965 年）

与中游及各支流的第一个丰水期（1956~ 1966、1957~ 1966、1958~ 1968、1957~ 1967）是相对应的。总体来看，15 年尺度上雅江流域的径流变化趋势基本一致。各子流域径流发生突变的年份主要在 1957、1967、1976、1983、1992 年等年份，不同子流域或不同季节发生突变的时间最多相差 1 年左右。

通过读取 6 个站点的小波系数图（图略）可以发现：无论是在长时间尺度还是短时间尺度上，雅江中游、年楚河、雅江中下游及尼洋河子流域四季以及年平均径流量在未来几年都将保持丰水状态；拉萨河子流域夏季、秋季、冬季、年平均径流量在未来几年也将保持丰水状态，但该子流域春季平均径流量的变化趋势稍有不同：在 12~ 15 年、8~ 10 年、4~ 6 年时间尺度上，继续处于丰水期；在 2~ 3 年较短的时间尺度上，将处于枯水期。

3.2.2 径流序列的周期特性及周期的时空分布 读取 6 个站点不同时段的小波方差图（图略），得到径流序列存在的前两个主要周期，如表 3 所示（表中前后数字分别表示第一、二主周期）。总体来看，第一主周期成分较为单一，主要以长周期 15 年和短周期 2 年为主；长、短周期所占比重差别很大，主要以 15 年长周期为主；第二主周期成分稍加复杂，既包含 15 年长周期、2~ 3 年短周期，又包含 6 年中周期，短周期所占比例较大；周期分布与季节有关，只有羊村、拉萨、奴下三个站点的四季及年平均径流序列的第一主周期完全一致，其余站点不同季节周期分布有所差异。

表 3 雅江流域长时间径流序列的主要变化周期

Tab 3 Main periods of runoff time series in the Yarlung Zangbo River basin						
流域	站点	春季	夏季	秋季	冬季	全年平均
雅江中游	奴各沙	2, 15	15, 2	15, 3	15, 2	15, 2
	羊村	15, 3	15, 6	15, 2	15, 2	15, 12
拉萨河	唐加	15, 13	15, 6	2, 15	2, 15	15, 2
	拉萨	15, 13	15, 6	15, 2	15, 3	15, 6
年楚河	日喀则	2, 15	15, 2	15, 2	15, 2	15, 2
雅江中下游及尼洋河	奴下	15, 3	15, 3	15, 2	15, 3	15, 3

径流序列周期的时空分布具有以下特点：（1）雅江中游、年楚河子流域春季平均径流量时间序列的第一主周期以 2 年短周期为主，其他子流域的第一主周期以 15 年长周期为主；雅江中下游流域的第二主周期以 3 年短周期为主，其他子流域的第二主周期以 15 年或 13 年长周期为主；（2）各子流域夏季平均径流量时间序列的周期分布基本一致，第一主周期以 15 年长周期为主，第二主周期以 6 年和 2 年中、短周期为主；（3）秋季和冬季径流序列的周期空间分布大体相同：除拉萨河中游以外，其他子流域第一主周期为 15 年长周期，第二主周期为 2 年短周期；拉萨河中游的周期分布与之恰好相反；（4）全年平均径流量时间序列的周期分布与夏季最为接近：

除羊村站附近流域的两个主要周期均是长周期外，其他子流域第一主周期以长周期为主，第二主周期以中、短周期为主。

作者还探讨了雅江流域降水时间序列特征，由于篇幅所限，文中只列出年楚河流域 1956~ 2000 降水时间序列特征，如表 4 所示。年楚河流域的年平均降水也经历

表 4 年楚河流域降水时间序列变化特征

Tab 4 Features of precipitation time series in the Nyangqu River basin	
变化特征	全年平均
15 年尺度降水变化趋势	少多少多少多
15 年尺度降水变化突变点	1956、1966、1974、1983、1992
主要周期	15, 2

了“少-多-少-多-少-多”的交替变化,与该流域的径流变化“枯-丰-枯-丰-枯-丰”相一致;降水突变点发生在1956、1966、1974、1983和1992年,个别年份提前于径流序列的突变;同时,该流域降水的主要周期同径流周期一致,也是15年和2年。即降水序列的年际变化趋势、突变年份以及周期特征等与径流变化基本保持一致。这与张顺利等^[16]的研究成果相吻合。

4 结论

本文采用Morlet小波分析方法对雅江流域1956~2000年径流序列的时空演变规律进行了研究和探讨。主要结论包括:在15年时间尺度上,雅江流域的春、夏、秋、冬四季的径流变化趋势基本一致,除拉萨河中游的夏季、秋季、雅江中下游的春季经历“丰-枯-丰-枯-丰”径流交替变化外,其他子流域其他时段均具有“枯-丰-枯-丰-枯-丰”的径流更替特征。径流序列发生突变的年份主要集中在1957、1967、1976、1983、1992年等年份。径流序列第一主周期主要以15年和2年为主,15年长周期所占比重较大;第二主周期包含15、6、2~3年的长、中、短周期,短周期比重较大。秋季和冬季径流序列的周期空间分布基本一致,全年平均径流量时间序列的周期分布与夏季最为接近。拉萨河子流域春季平均径流量在12~15年、8~10年、4~6年时间尺度上,在未来几年继续保持丰水期;但在2~3年较小的时间尺度上,将处于枯水期。其他子流域其他时段任何时间尺度上的平均径流量在未来几年都将处于丰水期。

径流时间序列的长期演变既有确定性的一面,又有不确定性的一面,本文仅识别了径流序列的周期特性和突变特性,对于其他特性,如趋势性、跳跃性、随机成分的识别,还有待于进一步研究。此外,由于气候变暖将加速水文循环,直接影响径流这一重要水文要素,人类活动包括修建水利工程、水土保持等也对径流有重要影响,因此气候变化和人类活动影响下的径流演变时空分布特征也是需要进一步探讨的问题之一。

参考文献:

- [1] 刘天仇. 雅鲁藏布江水文特征. 地理学报, 1999, 54(增刊): 157~164
- [2] 王文圣, 丁晶, 向红莲. 小波分析在水文学中的应用研究及展望. 水科学进展, 2002, 13(4): 515~520
- [3] 杨志峰, 李春晖. 黄河流域天然径流量突变性与周期性特征. 山地学报, 2004, 22(2): 140~146
- [4] Farge M. Wavelet transform and their application to turbulence. Annu. Rev. Fluid Mech., 1992, 24, 395~457
- [5] Kumar P, Foufoulas Georgiou E. A multicomponent decomposition of spatial rainfall fields: 1. Segregation of large- and small-scale features using wavelet transforms. Water Resources Research, 1993, 29(8): 2515~2532
- [6] Margriet N. Wavelet analysis of rainfall-runoff variability isolating climatic from anthropogenic patterns. Environmental Modelling & Software, 1999, 14: 283~295
- [7] 蒋晓辉, 刘昌明, 黄强. 黄河上中游天然径流多时间尺度变化及动因分析. 自然资源学报, 2003, 18(2): 142~148
- [8] 邵晓梅, 许月卿, 严昌荣. 黄河流域降水序列变化的小波分析. 北京大学学报(自然科学版), 2006, 42(4): 503~510
- [9] 宗海锋, 张庆云, 彭京备. 长江流域梅雨的多尺度特征及其与全球海温的关系. 气候与环境研究, 2005, 10(1): 101~114
- [10] 张军涛, 李哲, 郑度. 温度与降水变化的小波分析及其环境效应解释—以东北农牧交错区为例. 地理研究, 2002, 21(1): 54~60
- [11] Torrence C, Compo GP. A practical guide to wavelet analysis. Bulletin of American Meteorological Society, 1998, 79, 61~78
- [12] 林勇, 刘世荣, 李崇巍, 等. 小波变换在岷江上游杂古脑流域径流时间序列分析中的应用. 应用生态学报, 2005, 16(9): 1645~1649

- [13] 路云阁, 李双成, 蔡运龙. 近 40 年气候变化及其空间分异的多尺度研究——以内蒙古自治区为例. 地理科学, 2004, 24(4): 433~ 439
- [14] 张少文, 王文圣, 丁晶, 等. 黄河天然年径流超长期变化特性研究. 人民黄河, 2004, 26(8): 10~ 12
- [15] 刘会玉, 林振山, 张明阳. 建国以来中国洪涝灾害成灾面积变化的小波分析. 地理科学, 2005, 25(1): 43~ 48
- [16] 张顺利, 陶诗言. 雅鲁藏布江流域地-气系统的水平衡. 水科学进展, 2001, 12(4): 509~ 515

Characteristics of runoff variation in the Yarlung Zangbo River basin

LI Zhan-ling¹, XU Zong-xue¹, GONG Tong-liang^{2,3}

(1 Key Laboratory of Water and Sediment Sciences, Ministry of Education, College of Water Sciences, Beijing Normal University, Beijing 100875, China;

2 Department of Hydraulic Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

3 Institute of Water Resources Planning, Surveying, Design and Research,
Tibet Autonomous Region, Lhasa 850000, China)

Abstract: In order to analyze the spatial structure and multi-scale characteristics of runoff time series in the Yarlung Tsangpo Zanggo River basin, the monthly runoff data at 6 meteorological stations in the study area from 1956 to 2000 are investigated. The periodic oscillation of runoff variation and the points of abrupt change at different time scales are investigated by using wavelet method in this study. At the same time, the main periods of each time series are identified by estimating wavelet variance, which is helpful to determine the spatial distributions of periodicity. Application of the Morlet wavelet function for the runoff time series has shown that the seasonal and annual trends of runoff change in the last 44 years were consistent at the scale of 15 years, and the abrupt change occurred mostly in 1957, 1967, 1976, 1983 and 1992. There are more points of abrupt and more numbers of alternation between low flow and ample flow at the smaller scales. There is an obvious periodic oscillation of 15 and 2 years for the first main periods for the seasonal and annual runoff variation, and 15, 6 and 2~ 3 years for the second main periods. The spatial distributions of periodicity for autumn and annual runoff time series are similar to some degree with those of winter and summer runoff, respectively. Both seasonal and annual runoff at any scales in the Yarlung Zangbo River basin will increase in the near future except the spring runoff in the Lhasa River basin at the scale of 2~ 3 years. The characteristics of runoff time series such as long-term trends, points of abrupt and periodic oscillation are consistent well with those of precipitation time series in the study area. It has been shown that the runoff recharge is mainly from precipitation in the Yarlung Zangbo River basin.

Key words: runoff; wavelet method; the Yarlung Zangbo River