

1960—2006年闽江流域径流演变特征

陈莹¹, 陈兴伟¹, 尹义星²

(1. 福建师范大学地理科学学院, 福州 350007; 2. 南京信息工程大学应用水文气象研究院, 南京 210044)

摘要: 基于闽江流域 1960—2006 年逐月径流、降水以及气温等资料, 应用 Mann-Kendall 趋势分析、经验模态分解等方法, 探讨流域径流演变规律及其对气象要素变化的响应特征。结果表明: ①闽江流域年径流呈上升趋势, 其上升主要来自非汛期径流的贡献; 秋季和冬季径流始终以上升趋势为主; 夏季径流 20 世纪 90 年代以来呈上升趋势, 而春季径流则呈现下降趋势。②流域降水和气温均存在上升趋势, 尤以气温上升为显著; 径流的上升趋势比降水显著。③径流和降水变化均存在多尺度特征, 降水变化周期大于径流; 80 年代以来, 径流和降水的年代际变化振荡幅度有所减弱, 而年际变化的波动幅度在加强。分析表明, 闽江流域径流上升趋势较降水显著的原因, 一方面是由于流域蒸发的减少和降水强度的增大; 另一方面是流域下垫面特征改变等因素的影响。

关键词: 径流; Mann-Kendall; 经验模态分解; 闽江流域

中图分类号: P343.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-3037(2011)08-1401-11

随着全球气候变化以及人类活动的加剧, 地表径流正发生着显著的变化。IPCC 认为未来全球将继续变暖, 在此背景下, 探索自然气候变化和人类活动影响下地表径流的演变规律是一个新的水科学问题。目前, 学者们已对近几十年来变化环境下我国河川径流的演变规律做了大量研究, 但研究区域主要侧重于北方河流^[1-2]。而在南方湿润地区, 由于年降水量和径流量较大, 水资源相对丰富, 而且年际间径流量变化也不大, 对人类活动影响不十分敏感, 因此受到的关注较少。然而, 随着社会经济的高速发展, 人类活动影响不断加剧, 在变化环境下重新认识径流的演变规律, 无论在干旱地区还是湿润地区, 都显得极为必要。

闽江是福建省最大的河流, 流域面积约占福建省陆域总面积的一半, 其水资源丰枯直接影响着全省 1/2 地区的水安全, 对全省社会经济的可持续发展乃至生态安全, 具有举足轻重的影响。因此, 本文以闽江流域为研究对象, 运用 Mann-Kendall (M-K) 趋势分析和经验模态分解 (Empirical mode decomposition, EMD) 方法, 分析闽江流域径流过程的年际和年内等变化及周期特征, 并探讨径流演变与气象要素间的联系。

1 研究区和数据

闽江是福建省第一大河, 流经 36 个县(市), 全长 514 km, 流域面积 60 992 km²。闽江

收稿日期: 2010-07-21; 修订日期: 2011-03-16。

基金项目: 教育部博士点基金(20103503110002); 福建省自然科学基金(2010J05092); 福建省教育厅项目(JA10081)。

第一作者简介: 陈莹(1982-), 女, 福建南平人, 讲师, 博士, 主要从事水资源、水环境研究。E-mail: chenying_nju@163.com

在南平以上有建溪、富屯溪和沙溪三大支流,南平以下为闽江干流,自南平到闽江入海口,沿途有吉溪、尤溪、古田溪、梅溪、大樟溪等支流汇入,最后流经福州、长乐出海。流域属于亚热带海洋季风气候区,年平均气温为 $16 \sim 20 \text{ }^{\circ}\text{C}$,多年平均降雨量为 $1\ 617 \text{ mm}$,降雨主要集中在汛期(4—9月),其降水量约占年降水量 $70\% \sim 80\%$ 。

本文选取闽江干流竹岐水文站,以及建溪、富屯溪和沙溪三大支流上的七里街、洋口和沙县水文站的月径流序列进行径流特征变化分析(图1),这4个站点的控制面积分别占闽江流域总面积的 89.6% 、 26.88% 、 22.51% 和 19.33% 。分析其径流演变特征,对于认识闽江流域中上游径流的演变规律具有十分重要的意义。同时,还选用研究区的逐月气温和降水数据,来自21个均匀分布于闽江流域的气象站点。所有数据的序列长度均为1960年1月至2006年12月,且均通过 95% 置信度均一性检验。

为了减少单站记录的片面性,运用算术平均求得全流域降水与气温的平均序列。为了更好地分析季节性变化,结合闽江流域的气候特征,采用4—9月为汛期,10月—次年3月为非汛期,3—6月为春季,7—9月为夏季,10—11月为秋季,12月—次年2月为冬季的划分原则。站点的年和季节性数据采用月数据累加或平均的方法生成。

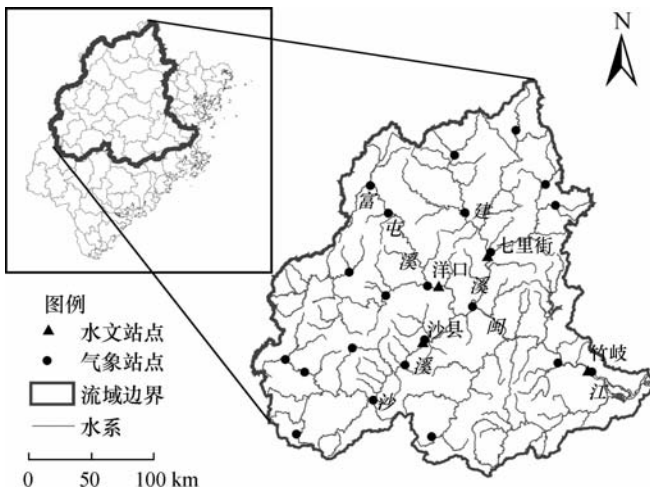


图1 研究区的位置及水文、气象站点分布

Fig. 1 Location of the study area with the distribution of discharge and meteorological stations

2 研究方法

2.1 Mann-Kendall 非参数检验及其改进

M-K 非参数检验法是由世界气象组织推荐的应用于时间序列分析的方法,已经广泛应用于检验水文气象资料的趋势成分。该方法有两个重要的趋势检验参数,一是显著性水平 α ,表示趋势的强弱,给定显著性水平 α ,如果 $-Z_{1-\alpha/2} \leq Z_c \leq Z_{1-\alpha/2}$,则序列没有显著趋势;另一个指标是倾斜度 β ,表示趋势的方向和大小,计算公式为:

$$\beta = \text{Median}\left(\frac{x_j - x_i}{j - i}\right) \quad (1)$$

式中, $1 < i < j < n$, n 为数据资料时间长度。当 $\beta > 0$ 时,表示上升趋势,反之则相反。本文在

计算倾斜度 β 时对数据进行了标准化处理,标准化处理以后得到的序列介于 0 和 1 之间。这样处理的优势在于,可以进行不同序列变化趋势大小的比较。

值得注意的是,水文、气象时间序列常存在一定程度的自相关性,而自相关性的存在往往导致 M-K 方法的检测能力受到影响。Storch^[3]指出,在应用 M-K 方法前应对序列进行预置白处理(Pre-Whitening),以消除序列中的自相关成分。而 Yue 等^[4]证明,对于一个存在趋势项和一阶自相关项的 AR(1) 序列,预置白处理会去掉部分趋势成分,使得原本趋势显著的序列被认为趋势不显著(指正的自相关)。Bayazit 等^[5]则认为,在变差系数非常小、倾斜度 β 值大、以及样本数大($n > 50$)的情况下,应当避免进行预置白处理。

因此,本文进行 M-K 检验时,首先计算序列 X_t 的 1 阶自相关系数 r 、变差系数和倾斜度 β 等指标,判断是否需要预置白处理;继而,采用预置白处理方法移掉序列中的自相关项 AR(1),得到独立的新序列 $X'_t = X_{t+1} - rX_t$;最后,应用 M-K 方法来检验 X'_t 序列趋势的显著性。对不需要进行预置白处理的序列,直接按照传统的 M-K 方法进行检验。

2.2 经验模态分解方法(EMD)

1998 年,Huang 等^[6]提出了一种全新的数据处理方法——经验模态分解方法(EMD),随后又对其进行了改进。EMD 方法是对一个信号进行平稳化处理,将信号中不同尺度(频率)的波动或趋势逐级分解,产生一系列包含了原信号不同时间尺度局部特征信息的本征模态函数(Intrinsic Mode Function, IMF)分量,而最低频率的 IMF 分量通常代表原信号的趋势或均值,即原始数据可由 IMF 分量以及一个均值或趋势项(RES)表示:

$$X(t) = \sum_{j=1}^n IMF_j(t) + r_n(t) \quad (2)$$

式中, $r_n(t)$ 为趋势项。由于比小波方法有更强的局部表现能力,所以在处理非线性、非平稳信号时,EMD 方法是一种更有效的方法。

目前,EMD 方法已经成功应用于水文及大气科学等领域^[7-9]。关于经验模态分解的具体方法,见参考文献[6]。端点延拓是该方法的重要环节,本文用镜像对称延伸方法^[6]较好地解决了边界对于 EMD 分解过程中的上冲和下冲现象。

3 结果与分析

3.1 径流年际变化趋势

闽江流域近 50 a 各水文站点径流时间序列的 M-K 检验结果显示[图 2(a)],竹岐、沙县、七里街和洋口站的年径流序列均表现为增加趋势,其 M-K 检验值 Z 分别为 1.30、0.97、0.81 和 1.23,趋势并不显著。其中,竹岐站近 50 a 的径流变化总体表现为升—降—升,20 世纪 60 年代先升后降,至 70 年代中后期径流开始上升,上升趋势一直持续至 21 世纪初,但均未达到 95% 的置信水平。沙县站径流演变趋势与竹岐站非常相似,差别仅仅是其 60 年代中期至 70 年代中期的下降趋势更明显一些;七里街和洋口站的年径流变化趋势也跟竹岐站比较接近,但它们在 90 年代初曾经有短期的下降(总体演变为升—降—升—降—升)。因此,各站点径流的阶段性演变较为相似,且 4 个站点在 70 年代左右开始至 21 世纪初都主要呈上升趋势,但均未达到 95% 的置信水平。

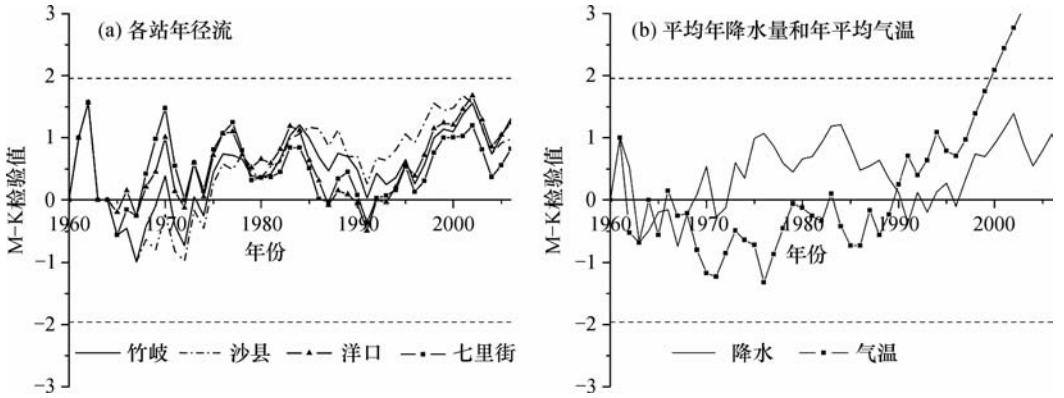


图2 研究区年均径流、年均降水及年均气温的 M-K 检验结果

Fig. 2 Results of M-K test for annual average runoff, precipitation and temperature in the study area

3.2 径流年内变化趋势

在 M-K 趋势分析前,分析各序列的自相关特征,结果表明,沙县站 8 月和七里街的 2 月径流 1 阶自相关均达到显著性水平,其自相关系数分别为 0.288 和 -0.32。由于这两个序列长度小于 50,且 β 小于 0.01,因此均进行了预置白处理,表 2 为处理后的结果。

表 1 和表 2 分别为各季节和月份径流的 M-K 趋势检验结果。可见,各站点汛期和非汛期径流均呈上升趋势,但汛期上升均不显著,而非汛期上升趋势均达到了 5% 的显著性水平,其中洋口站达到了 1% 的显著性水平。就季节而言,春季除洋口水文站以外,各站点径流主要表现为下降的趋势,但均不显著;夏季和秋季,各站点径流均呈上升趋势,但仅洋口站夏季径流的上升趋势达到了 10% 的显著性水平;冬季,各站点的径流量均呈上升趋势,且竹岐站、沙县站和洋口站的上升趋势达到了 1% 的显著性水平。分析各站点各月径流 M-K 趋势检验结果,可以看出,各站径流序列增加比较显著的月份,一般为冬季的 12—2 月和夏季的 9 月,从 β 系数来看,月份径流上升幅度最大为洋口站的 9 月(0.0071)和 1 月(0.0045),因此流域径流上升的趋势主要表现在夏季和冬季。而径流序列减少的月份主要集中在 4—6 月,这也是春季各站点径流多数呈下降趋势的主要原因。

表 1 闽江流域各站季节径流及气象要素 M-K 趋势检验结果

Table 1 Results of M-K trend test for seasonal runoff and meteorological elements in the Minjiang River Basin

	竹岐		沙县		七里街		洋口		降水		气温	
	Z	β	Z	β	Z	β	Z	β	Z	β	Z	β
汛期	0.55	0.0017	0.28	0.0007	0.35	0.0013	0.44	0.0013	0.73	0.0023	2.00	0.0026
非汛期	2.57	0.0040	2.33	0.0035	2.05	0.0031	2.84	0.0047	1.34	0.0031	2.75	0.0084
春	-0.04	-0.0001	-0.22	-0.0005	-0.09	-0.0001	0.00	0.0001	0.13	0.0006	1.06	0.0029
夏	1.16	0.0024	1.15	0.0021	0.66	0.0018	1.65	0.0034	0.77	0.0013	-0.26	-0.0006
秋	0.83	0.0020	0.76	0.0012	0.96	0.0020	1.53	0.0034	-0.26	-0.0009	1.84	0.0041
冬	2.81	0.0030	3.23	0.0036	1.77	0.0025	3.12	0.0037	0.94	0.0024	2.60	0.0079

注: *、**、*** 分别表示达到表示 0.1、0.05、0.01 显著性水平。下同。

表 2 闽江流域各月份径流和气象要素 M-K 趋势检验结果

Table 2 Results of M-K trend test for monthly runoff and meteorological elements in the Miniang River Basin

月份	竹岐		沙县		七里街		洋口		降水		气温	
	Z	β	Z	β	Z	β	Z	β	Z	β	Z	β
1	2.13 **	0.003 2	1.76 *	0.003 4	1.57	0.001 8	2.68 ***	0.004 5	1.12	0.002 6	2.15 **	0.004 9
2	1.95 *	0.002 1	2.81 ***	0.002 5	1.19	0.001 4	2.42 **	0.002 7	1.45	0.003 3	1.84 *	0.004 2
3	1.38	0.002 5	0.99	0.001 3	0.97	0.001 9	1.24	0.002 1	0.9	0.002 2	-0.07	-0.000 2
4	0.5	0.001 6	0.83	0.001 3	0.00	0.000 0	-0.11	-0.000 3	-0.26	-0.001 1	1.07	0.002 5
5	0.18	0.000 4	0.45	0.001 0	-0.33	-0.000 7	-0.43	-0.001 1	-0.51	-0.001 3	0.91	0.001 6
6	-0.86	-0.002 6	-1.46	-0.003 5	-0.75	-0.001 5	-0.53	-0.001 7	-0.53	-0.001 4	2.16 **	0.005 5
7	0.08	0.000 3	0.02	0.000 0	0.22	0.000 4	0.61	0.001 6	0.17	0.000 3	0.36	0.000 8
8	1.07	0.002 3	0.84	0.001 4	1.24	0.002 1	1.97 **	0.002 7	1.16	0.002 8	0.51	0.001 2
9	2.58 ***	0.004 4	2.24 **	0.004 2	1.84 *	0.004 1	3.21 ***	0.007 1	-0.61	-0.001 2	-0.79	-0.002 0
10	0.35	0.001 1	0.00	0.000 0	0.03	0.000 0	1.31	0.003 1	-0.80	-0.001 5	1.4	0.003 8
11	0.93	0.002 4	1.64	0.003 3	1.11	0.002 1	1.63	0.004 1	-0.13	-0.000 2	1.23	0.003 1
12	1.51	0.003 0	2.72 ***	0.005 2	1.37	0.002 2	1.7 *	0.002 9	-0.04	-0.000 1	0.8	0.002 2

这里以流域控制站点竹岐站为代表,进一步分析其径流的年际和年内演变关系。竹岐站近 50 a 汛期与非汛期径流序列的 M-K 检验结果显示,二者 M-K 曲线形状均与年径流比较相似[图 3(a)],但是汛期 M-K 曲线 20 世纪 70 年代中期以后的上升弱于年径流,且在 80 年代末和 90 年代初发生下降;而非汛期 M-K 曲线 80 年代以来的上升趋势较年径流显著,在 80 年代末以后一直超过 5% 显著性水平。从四季来看[图 3(b)],春季径流 90 年代末以来为下降状态;夏季径流在 90 年代中期后呈上升趋势;秋季径流除了 60 年代末和 70 年代

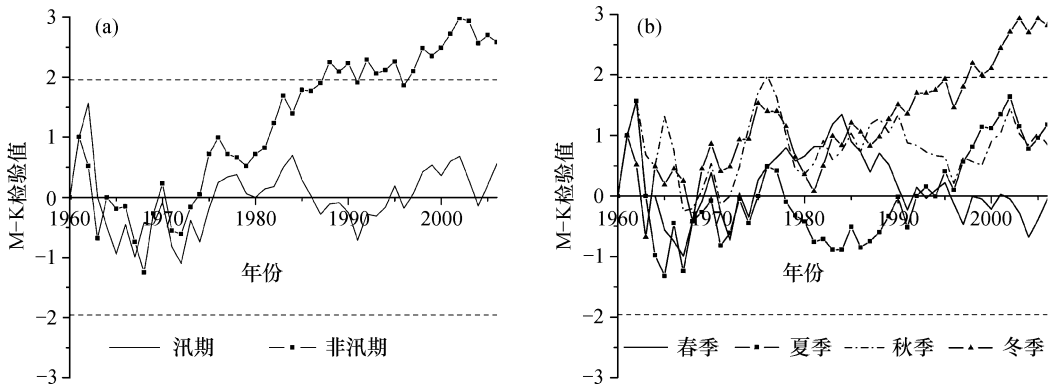


图 3 竹岐站年内径流的 M-K 检验结果

Fig. 3 Results of M-K test for seasonal runoff in the Zhuqi Station

初有短期的下降外,一直为上升趋势,70年代中期的上升达到5%显著性水平;冬季径流的上升最为明显,M-K曲线基本为正的位相值,其上升过程在90年代末达到5%显著性水平。综合上述分析,竹岐站年径流上升的贡献应该主要来自非汛期的径流上升;秋季和冬季径流长期以来以上升趋势为主,造成了非汛期径流的显著上升;90年代以来夏季径流呈上升趋势,然而春季径流则呈现下降趋势,造成汛期径流上升的趋势不显著。

3.3 气象要素趋势变化

河川径流演变是区域气候和自然地理条件等要素变化的综合反映,反映了地表对降水等气象要素的响应特征。这里重点探讨在区域气候变暖背景下,闽江流域径流演变与降水变化之间的关系,因此选择降水和气温两个气象要素与径流进行对比分析,揭示不同时期内气候与径流变化趋势的一致性关系。

1960—2006年闽江流域年平均降水量总体上有上升,其M-K检验值 Z 为1.06,即上升并不显著。从图2可以发现,年平均降水量和径流的M-K曲线变化十分相似,即它们的阶段性演变趋势非常接近。图2(b)中,年平均降水量总体变化表现为升—降—升—降—升,其变化过程为,60年代雨量先升后降,70年代以后为上升,在90年代初曾有短暂的下降,此后转为上升。

降水的演变趋势与各站径流变化既比较一致,也存在差异。从年序列来看,径流和降水的上升均未达到显著性水平(图2);从季节变化来看,各站非汛期和冬季的径流上升均达到了显著性水平,而降水在非汛期和各季节的上升均未达到显著性水平(表1);从月份来看,大多数站点径流12月—次年2月和9月的上升达到了显著性水平,而降水增加的月份均未达到显著性水平(表2)。因此,流域降水与径流的演变在趋势上基本一致,但降水的上升趋势弱于径流。

年平均气温上升趋势非常显著,M-K检验值 Z 为2.71,通过了99%的置信度检验。图2(b)中,年平均气温在60年代初表现为上升状态,此后即进入下降阶段,至90年代初转为上升趋势,在21世纪初上升趋势大大超过5%的显著性水平。表1显示,汛期和非汛期气温的上升趋势均达到了5%的显著性水平,其中非汛期的 β 系数为各序列中最大(0.0084);在季节上,除了夏季表现为微弱的下降趋势外,其余各季节均为上升趋势,且以冬季最为显著,达到了1%的显著性水平,其 β 系数居各序列中第二位(0.0079)。

3.4 周期变化

EMD方法具有两个优势,第一,可以对序列不同层次上的周期进行分析,探求其形成机制;第二,分析得到的趋势项可反映序列长期演化的趋势。图4是对竹岐站年径流序列和研究区年平均降水序列进行EMD分解得到的3个IMF分量及其趋势分量RES,这些IMF分量,分别代表了47a中不同周期和振幅的信息。研究区其它水文站点和年平均气温序列,进行EMD分解后也分别得到了3个或4个IMF分量以及残余的趋势项(表3)。龚志强等^[10]提出EMD分解有可能产生虚假分量,并认为相关系数较大、图像相似性较好的分量才是最主要的分量。本文计算了各序列EMD分解得出的IMF分量和原序列的相关系数,并以最大相关系数(原序列与IMF1)值的1/10为门限值,低于该值的相关系数值所对应的IMF分量被认定为虚假分量。结果表明,各相关系数均大于门限值,因此,本文EMD分解的结果是比较理想的。

表 3 EMD 分解各模态的平均周期和方差贡献率

Table 3 Average periods of IMFs and Res components and contribution rates of variance explained them

模态	IMF1	IMF2	IMF3	IMF4	RES		
平均周期/a	竹岐站径流	3.0	6.5	17.1			
	沙县站径流	2.7	5.8	12.5			
	七里街站径流	3.2	7.7	17.4	44.8		
	洋口站径流	3.1	5.8	12.2	28.5		
	降水	3.2	7.1	26.9			
	气温	3.4	6.8	12.4	42.7		
方差贡献率/%	竹岐站径流	57.01	30.79	5.12		7.09	
	沙县站径流	66.38	14.41	7.67		5.79	
	七里街站径流	52.67	29.38	12.82		3.70	1.44
	洋口站径流	57.03	23.11	6.20		4.29	9.39
	降水	63.16	30.51	5.23			1.10
	气温	40.86	14.03	0.79		20.64	23.67

从表 3 可以看出,竹岐站年径流序列各 IMF 分量的平均周期为 3.0、6.5 和 17.1 a;年降水序列的平均周期则分别为 3.2、7.6 和 26.9 a,与径流周期对应关系很好,且均大于径流的周期。严华生等^[11]发现我国近百年的降水量变化有较明显的小于 3.5、3.5~7、7~14 a 的周期变化,同时还包括 14~28 a 的周期变化。因此,闽江流域降水和径流的变化周期与我国近百年降水量演变周期是比较一致的。方差贡献率可以反映各模态所包含的原序列信息量。各站点径流、降水和气温序列变化被分为年际信号(IMF1、IMF2)、年代际信号(IMF3)和几十年际信号(IMF4),则各信号的方差贡献率基本上是递减的,且年际信号(前两个分量)包括了最主要的方差贡献率,表 3 中各序列的年际信号方差贡献率依次合计分别达 87.8%、80.79%、82.05%、82.05%、93.67%和 54.89%。气温序列由于上升的趋势十分显著,所以趋势项的方差贡献率比较高。

EMD 分解的趋势项可以很好地获取大尺度的行为。从图 4 中可以看到,径流趋势项除了在 20 世纪 70 年代初略有下降外,基本是上升的,反映了 1960—2006 年这 47 a 间,径流是以上升为主的。降水序列的 EMD 分解趋势项也是波动中上升的,而气温的趋势项则始终为上升(图略)。此外,从图 4 中趋势项可以看到,竹岐站径流和流域降水在未来一段时间均可能继续保持高值状态。

此外,从竹岐站径流 EMD 分解结果(图 4)来看,80 年代以来其年代际变化(IMF3)的振幅在减小,而年际变化(IMF1、IMF2)的振幅在加大。降水序列也有类似的特点。年代际尺度的变化决定了径流或降水丰与枯的时间段,径流和降水序列的年代际变化振荡幅度有所减弱,即在年代际的尺度上,二者的振荡在衰减。年际变化的振幅加大,因此二者年际波动的幅度在加深,预示着洪涝干旱等极值事件的发生几率增加,这对于流域防洪抗旱和水资源利用是不利的。考虑到径流和降水年际变化的贡献率更高,因此这样的变化值得引起重视。平凡等^[12]发现影响长江流域汛期降水量以及旱涝的变化,需要将年代际变化和年际变化这两种时间尺度进行分离,深入认识控制或影响各时间尺度的物理因素。闽江流域径流和降水在年际和年代际尺度上具有不同的演变特征,其各自的物理机制是什么,年代际变化对年际变化的调制作用是怎样的?这样的问题还需要进一步深入研究。

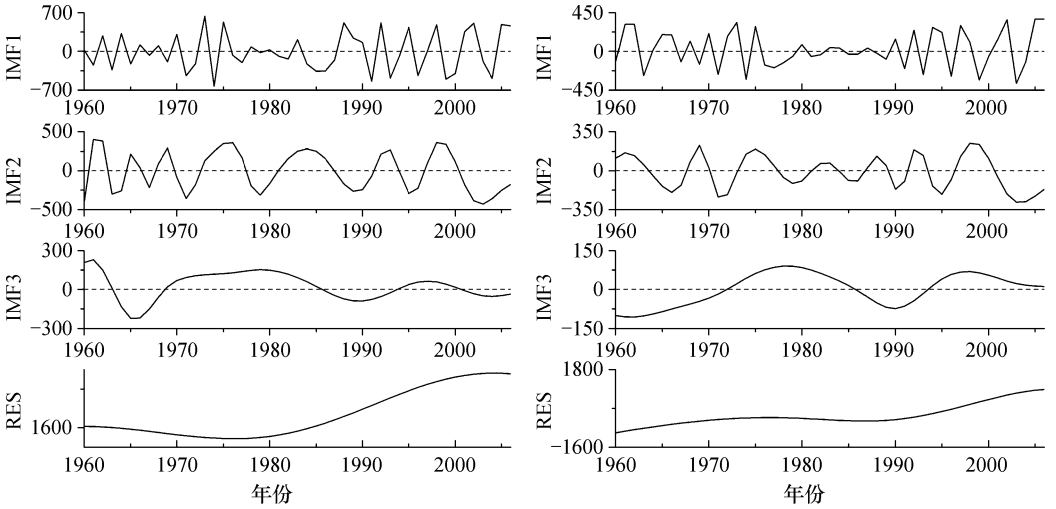


图4 竹岐站径流(左)和研究区年平均降水(右)的EMD分解结果

Fig. 4 Results of EMD for runoff in Zhuqi Station (left) and annual precipitation in the study area (right)

4 径流演变影响因素

上文分析表明,1960—2006年闽江流域降水和径流的总体演变趋势是比较一致的,但径流增加趋势强于降水。分析认为,一个重要原因在于流域蒸发特征发生了改变。吴传明^[13]通过对福建省29个蒸发站观测资料的分析,得出近30a来全省绝大多数站点的蒸发量呈现下降趋势,90年代比80年代、70年代平均值小。闽江流域90年代的蒸发下降,从而导致在同样降水条件下径流增加,对径流的增加产生重要影响。此外,吴滨等^[14]的研究结果表明1961—2005年福建省暴雨日数和暴雨过程都有一定增加趋势,尤其自90年代以后暴雨日数增加明显,90年代中期以后过程性暴雨也显著增加,导致降水强度增加。同时,相关研究表明^[15],雨强对产流影响具有显著正效应,且呈负指数函数的变化趋势。大雨或暴雨时,降水历时短,蒸发量小,产流量会增大,即造成流域径流量偏大。因此,在区域气候变暖的背景下,闽江流域的暴雨日数和暴雨过程增加,有助于产流,从而也促使流域的径流增加趋势比降水增加显著。

人类活动通过改变流域下垫面的特征,对流域水文过程产生影响,进而影响流域径流量的变化。首先是流域森林植被变化的影响。据闽江流域森林资源“七五”、“八五”和“九五”连续清查的结果^[16],流域森林面积持续增长,但是林分质量总体下降,天然林比重减少,针叶林化趋势上升,林分呈现低龄化、稀疏化。相关研究表明^[17-18],针叶林阔叶林比例、人工林天然林比例以及龄组结构等指标对森林的水土保持能力具有重要的影响。闽江流域不同类型的林冠持水率大小顺序为:硬阔叶类>杉木>软阔叶类>松柏类和竹类;此外,近成过熟林的持水能力大于幼林,天然林的水土保持功能强于人工林。因此,尽管闽江流域森林覆盖率在不断提高,然而森林资源的结构性矛盾严重削弱了其保持水土、涵养水分的功能,在一定程度上对流域的径流量起到增加的作用。其次是流域城镇化的影响,随着闽江流域经济实力的快速增长,流域人口迅速增加,城镇化水平的不断提高,导致流域城镇规模不断扩张,不透水面积大量增加,进而造成径流量增加。因此,城市化过程所带来的城市用地面积大幅度提高,是该流域径流增加幅度超过降水的一个重要原因。

此外,20 世纪 50 年代后期至今,闽江流域中上游的干流和支流修建了大型水库 7 处,中型水库 60 多处,其中大型水库的情况如表 4。至今这些大中型水库相继建成蓄水,主要用于发电、防洪与灌溉^[19],重在调节年内径流,对径流的年际变化影响可能较小。然而,水利工程建设对区域径流序列变异的影响还有待进一步研究。

表 4 闽江流域主要水利工程统计

Table 4 Statistics of the main hydraulic engineering in Minjiang River Basin

工程项目	所在河流	控制面积/km ²	总库容/10 ⁸ m ³	建成时间
水口水库	闽江	52 438	26.00	1993—1996 年
池潭水库	闽江金溪	4 766	8.53	1980 年
安砂水库	闽江沙溪	5 184	7.40	1978 年
古田溪水库*	闽江古田溪	1 325	6.25	1959—1971 年
沙溪口水库	闽江沙溪	25 562	1.64	1989 年
水东水库	闽江尤溪	3 784.5	1.10	1994 年
东溪水库	闽江崇阳溪	554	1.02	1986 年

注: * 古田溪水库分 4 个阶段建设,第一阶段建成是 1959 年,最终完成是在 1971 年。

5 结论

(1) 闽江流域 1960—2006 年年径流呈上升趋势,其上升的贡献主要来自非汛期的径流上升;秋季和冬季径流长期以来以上升趋势为主,造成了非汛期径流的显著上升;20 世纪 90 年代以来夏季径流呈上升趋势,然而春季径流则呈现下降趋势,造成汛期径流上升的趋势不显著。

(2) 流域降水和气温均存在上升趋势,从年序列来看,降水上升没有达到显著性水平,而气温上升达到显著性水平;从季节来看,降水和气温增加比较显著的主要是非汛期的季节或月份,且气温上升更为显著。

(3) 闽江流域径流和降水变化均存在多尺度特征,二者周期对应关系良好,且降水变化周期大于径流周期。20 世纪 80 年代以来,径流和降水的年代际变化振荡幅度有所减弱,即在年代际尺度上的振荡在衰减;而从年际变化来看,径流和降水的波动幅度在加深,预示着洪涝干旱等极值事件的发生几率增加。

(4) 闽江流域降水与径流的演变趋势基本一致,但径流的上升趋势比降水显著。其原因之一是由于流域蒸发的减少以及降水强度的增加;其次,流域下垫面特征改变,如森林植被变化和城镇建设用地面积的增加,也造成径流量的增加。

闽江流域径流的年际、年内和周期变化是流域气候、土地利用/覆被等多种因素共同作用的结果。未来需要进一步定量区分各因素对流域径流变化影响的贡献,这有待于更深入的模拟和分析。

参考文献 (References):

- [1] 宋小燕,穆兴民,高鹏,等. 松花江哈尔滨站近 100 年来径流量变化趋势[J]. 自然资源学报,2009,24(10):1803-1809. [SONG Xiao-yan, MU Xing-min, GAO Peng, et al. Trends of runoff variation from 1900 to 2005 at Harbin Station of Songhua River. *Journal of Natural Resources*, 2009, 24(10): 1803-1809.]
- [2] 王雁林,王文科,钱云平,等. 黄河河川基流量演化规律及其驱动因子探讨[J]. 自然资源学报,2008,23(3):479-486. [WANG Yan-lin, WANG Wen-ke, QIAN Yun-ping, et al. Change characteristics and driving forces of base flow of Yellow River Basin. *Journal of Natural Resources*, 2008, 23(3):479-486.]

- [3] Storch H V. Misuses of statistical analysis in climate research[M]//Analysis of Climate Variability: Applications of Statistical Techniques. Springer-Verlag, Berlin, Germany,1995.
- [4] Yue S, Wang C. Applicability of prewhitening to eliminate the influence of serial correlation on the Mann-Kendall test [J]. *Water Resources Research*,2002,38(6):1068, doi:10.1029/2001WR000861.
- [5] Bayazit M, Onoz B. To prewhiten or not to prewhiten in trend analysis? [J] *Hydrological Sciences Journal*,2007,52(4):611-624.
- [6] Huang N E, Shen Z, Long S R, et al. The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis [J]. *Proceedings of the Royal Society of London, Series A*,1998,454:899-955.
- [7] 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. [ZHENG Hong-xing, LIU Chang-ming. On evolution modes of water resources in the Yellow River Basin. *Acta Geographica Sinica*,2004,59(2):267-273.]
- [8] 王宗志,王银堂,胡四一. 流域水资源演化模式识别与分析[J]. 水利学报,2007(增刊1):388-392. [WANG Zong-zhi, WANG Yin-tang, HU Si-yi. Identify and analyze water resources evolution modes of the drainage basin. *Journal of Hydraulic Engineering*,2007(Supp 1):388-392.]
- [9] 林振山,汪曙光. 近四百年北半球气温变化的分析:EMD 方法的应用[J]. 热带气象学报,2004,20(1):90-96. [LIN Zhen-shan, WANG Shu-guang. EMD analysis of Northern Hemisphere temperature variability during last 4 centuries. *Journal of Tropical Meteorology*,2004,20(1):90-96.]
- [10] 龚志强,邹明玮,高新全,等. 基于非线性时间序列分析经验模态分解和小波分解异同性的研究[J]. 物理学报,2005,54(8):3947-3957. [GONG Zhi-qiang, ZOU Ming-wei, GAO Xin-quan, et al. On the difference between empirical mode decomposition and wavelet decomposition in the nonlinear time series. *Acta Physica Sinica*,2005,54(8):3947-3957.]
- [11] 严华生,万云霞,邓自旺,等. 用正交小波分析近百年来中国降水气候变化[J]. 大气科学,2004,28(1):151-157. [YAN Hua-sheng, WAN Yun-xia, DENG Zi-wang, et al. Orthogonal wavelet analysis of the variations of the recent 100-years precipitation in China. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*,2004,28(1):151-157.]
- [12] Ping F, Luo Z H, Ju J H. Differences between dynamics factors for interannual and decadal variations of rainfall over the Yangtze River valley during flood seasons [J]. *Chinese Science Bulletin*,2006,51(8):994-999.
- [13] 吴天明. 福建省蒸发量时空分布及年际变化分析[J]. 水利科技,2004(2):3-5. [WU Chuan-ming. Spatial and temporal distribution of evapotranspiration and its annual changes. *Hydraulic Science and Technology*,2004(2):3-5.]
- [14] 吴滨,李玲. 福建省降水量的趋势变化对旱涝灾害的影响研究[J]. 热带气象学报,2009,25(1):103-109. [WU Bin, LI-Ling. Study on the effect of precipitation tendency change on drought/flood in Fujian Province. *Journal of Tropical Meteorology*,2009,25(1):103-109.]
- [15] 李广,黄高宝. 雨强和土地利用对黄土丘陵区径流系数及蓄积系数的影响[J]. 生态学杂志,2009,28(10):2014-2019. [LI-Guang, HUANG Gao-bao. Effects of rainfall intensity and land use on rainfall runoff and storage in loess hilly region. *Chinese Journal of Ecology*,2009,28(10):2014-2019.]
- [16] 朱秀端,蔡国隆. 闽江流域水土保持与生态安全[J]. 亚热带水土保持,2007,19(1):10-12. [ZHU Xiu-duan, CAI Guo-long. Soil and water conservation and ecological safety in the Minjiang River Basin. *Subtropical Soil and Water Conservation*,2007,19(1):10-12.]
- [17] 苏时鹏,张春霞. 闽江流域森林资源与环境关系的动态分析[J]. 国土与自然资源研究,2004(3):47-49. [SU Shi-peng, ZHANG Chun-xia. Dynamic analyzing of relationships between forest and environment in Minjiang Drainage Basin. *Territory & Natural Resources Study*,2004(3):47-49.]
- [18] 黄清麟,李元红. 福建中亚热带天然阔叶林与人工林对比评价 I. 水土资源的保持与维护[J]. 山地学报,2000,18(1):69-75. [HUANG Qing-lin, LI Yuan-hong. Comparison between natural broad-leaved forest and man-made forest in Fujian Province I. Conservation and maintenance of soil and water resources. *Journal of Mountain Research*,2000,18(1):69-75.]
- [19] 徐在民. 概论福建水资源[J]. 水利科技,2000(2):1-6. [XU Zai-min. Introduction to water resources in Fujian Province. *Hydraulic Science and Technology*,2000(2):1-6.]

Characteristics of Runoff Changes in the Minjiang River Basin from 1960 to 2006

CHEN Ying¹, CHEN Xing-wei¹, YIN Yi-xing²

(1. College of Geographic Sciences, Fujian Normal University, Fuzhou 350007, China; 2. Applied Hydrometeorological Research Institute, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China)

Abstract: In this paper, the runoff change in the Minjiang River Basin is investigated and its response to main meteorological elements is explored based on the monthly runoff, precipitation and temperature data from 1960 to 2006. The adopted methods include Mann-Kendall trend analysis and empirical mode decomposition. The results are as follows: First, the annual runoff in the Minjiang River Basin is on the increase, and the runoff in the non-flood season contributes a lot to this increase. The trend of autumn and winter runoff is upward for most of the time. The runoff in summer has been on the increase while the runoff in spring on the decrease since the 1990s. Second, both precipitation and temperature of the basin increased for the study period, especially for temperature series. And the upward trend of runoff is more evident than that of precipitation. Third, multi-scale characteristics of runoff and precipitation have been detected and the periods of precipitation are longer than those of the runoff. The amplitude of decadal variability in the precipitation and runoff series has been weakened while the amplitude of inter-annual variability has been intensified since the 1980s. The paper revealed that the reason for runoff increase to be more evident than precipitation increase is that the evapotranspiration is on the decrease and precipitation intensity is on the increase in the basin. What's more, the influences of underlying surface also contribute to runoff increase.

Key words: runoff; Mann-Kendall; empirical mode decomposition; Minjiang River Basin