

金沙江下游及三峡段水文气象因子演变与响应的分析

杨 璐^{1,2}, 梅亚东^{1,2}, 叶 琰³, 林玉茹⁴

(1. 武汉大学水资源与水电工程科学国家重点实验室, 湖北 武汉 430072;

2. 水资源安全保障湖北省协同创新中心, 湖北 武汉 430072;

3. 西南大学资源环境学院, 重庆 400715; 4. 长江科学院, 湖北 武汉 430010)

摘 要:对金沙江下游及三峡段3个水文站1954~2008年径流序列和2个气象站1951~2008年降雨、气温序列运用滑动平均法和Mann-Kendall法进行趋势性检验,利用有序聚类法、均值检验法分析突变性及小波分析法进行周期性诊断,并应用Pearson法对径流、降雨和气温的相关关系进行研究。研究表明:(1)研究区径流量的年内分配不均匀性和年际变化不显著。(2)金沙江下游段屏山站的径流量呈上升趋势,并在1997年发生突变,但该区域宜宾站的降雨量呈下降趋势并在1991年发生突变;三峡段寸滩站和宜昌站的径流量呈下降趋势,分别在1968年和2005年发生突变,同时该区域沙坪坝站的降雨量呈上升趋势并在1961年和1995年发生突变。(3)径流和降雨时间序列都存在小于10a的主周期以及20a以上的次周期。(4)各水文站夏季径流量受同期降雨量和同期气温的共同影响,而秋季径流量受前期气温的影响最大。

关键词:时间演变分析;水文气象因子;敏感性;金沙江下游及三峡段;

中图分类号:P334

文献标识码:A

文章编号:1000-0852(2016)01-0037-09

气候变化是世界各国政府和科学家共同关注的重要议题,水资源是受气候变化影响最直接和最重要的领域^[1-2]。对于河流而言,流域降雨和气温的变化直接影响到河流径流量的变化^[3-5]。近些年来,各国学者在水文气象因子的时间演变和响应等方面开展了大量研究^[6-14]。金沙江作为我国西南地区最大的江河之一,其径流丰枯特性以及气候变化响应已经有一些研究。宋萌等^[15]和程尊兰等^[16]统计出金沙江流域径流年内分配不均匀,丰枯周期明显,年际变化不大;多年平均降雨量为960mm左右,汛期6~9月的降雨量占全年降雨量的70%以上。岑思弦等^[17]研究指出金沙江流域汛期总体的变化趋势是不显著的。陈媛等^[18]分析出1956~2002年间金沙江流域径流呈现不显著的增加趋势,径流在1966年和1997年发生显著性突变,存在3~5a、9a、17a的周期变化。卓嘎等^[19]指出1960~2004年金沙江流域春季径流量不仅受同期降水量和温度负相关影

响,还与前期气温存在正相关。在对金沙江流域已有的研究中,均未重点分析金沙江下游径流、降水和气温的变化特征,尤其是与下游三峡段水文要素的联系。金沙江下游及三峡梯级包括乌东德、白鹤滩、溪洛渡、向家坝、三峡和葛洲坝六座大型电站,在全国的水电战略中具有举足轻重的作用。因此,对金沙江下游段及三峡段径流、降雨和气温的年内分配特性、年际变化特征、趋势性、突变性、周期性,以及它们之间相关性的研究,对于认识长江上游水文气象因子变化规律具有重要意义。

1 资料与方法

1.1 研究区概况

金沙江下游从攀枝花市到宜宾市全长共768km,区间流域面积 $21.4 \times 10^4 \text{ km}^2$,落差约719m,河床平均比降为0.961‰。该段地处中亚热带,上、中段属西南季风气候区,干湿季节分明,5~10月为雨季,11月至翌年4

收稿日期:2015-02-03

基金项目:国家自然科学基金(51479140);国家自然科学基金(51239004)

作者简介:杨璐(1992-),女,江西南昌人,硕士研究生,主要从事水资源系统规划与管理的研究。E-mail:yang43lu@163.com

通讯作者:梅亚东(1963-),男,湖北黄梅人,教授,博导,主要从事水资源系统规划与管理的研究。E-mail:ydmey@whu.edu.cn

月为干季;下段属东南季风气候区,四季分明,气候较湿润。金沙江下游段多年平均降水量为 600~1 500mm,年平均气温为 12~20℃。三峡段处于海拔 800~2 000m 的高度,形态上呈“V”型,江面狭窄、比降大,河槽深

切。该区属中亚热带季风性湿润气候区,多年平均气温 12~19℃,具有冬暖春早、夏热秋迟的特点。多年平均降雨量为 1 000~1 200mm,雨量充沛但空间分布不均匀。图 1 为研究区域概况图。

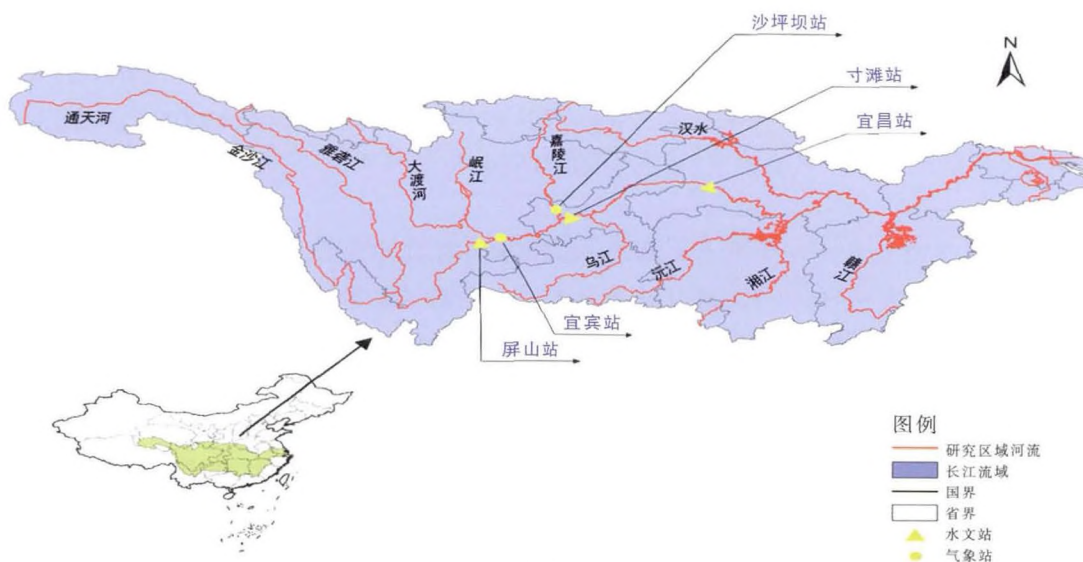


图 1 金沙江下游及三峡段流域水系、水文站、气象站分布

Fig.1 The distribution of river systems, hydrology and meteorology stations in the downstream of the Jinshajiang River basin

1.2 资料与方法

以研究区域内屏山、寸滩、宜昌 3 个水文站 1954~2008 年的月均径流序列以及宜宾、沙坪坝 2 个气象站 1951~2008 年的月均降雨序列和月均气温序列为研究对象,其中屏山站和宜宾站代表金沙江下游段,寸滩、宜昌站和沙坪坝站代表三峡段。气象资料来源于中国气象科学数据共享服务网,径流资料来源于 3 个水文站点。

采用年内分配不均匀系数 C_y 和年内分配完全调节系数 C_r 来描述流域径流年内分配的不均匀性^[18]。利用极值比 K_m 和变差系数 C_v 研究径流的年际变化。

$$C_y \text{ 的定义: } C_y = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{12} (k_i/\bar{k} - 1)^2}{12}} \quad (1)$$

式中: k_i 为第 i 月径流量占全年径流量的百分比, $\bar{k}$ 为 $k_i (i=1, 2, \dots, 12)$ 的均值。当年内径流均匀分配时, $C_y=0$; C_y 值越大,表明各月平均流量相差悬殊,即年内分配越不均匀。

$$C_r \text{ 的定义: } C_r = \sum_{i=1}^{12} \phi_i [Q_i - \bar{Q}] \sum_{i=1}^{12} Q_i \quad (2)$$

其中,当 $Q_i < \bar{Q}$ 时, ϕ_i 为 0;反之为 1。式中: Q_i 为年内第 i 月平均流量; $\bar{Q}$ 为年平均流量。 C_r 值越大,径流年内分配越不均匀。

Mann-Kendall 非参数统计检验法(下文简称 M-K

法)是由世界气象组织推荐的应用于环境数据时间序列趋势分析的方法,已广泛用于水文气象时间序列的趋势分析^[10,12-14]。有序聚类分析法利用“物以类聚”思想推求时间序列最可能的干扰点,该方法使用较为普遍,检验效果较好^[20]。小波变换是一种信号的时间-频率分析方法,由于该方法是采用逐步精细的时域和频域取样,从而可以聚焦到变换对象的任意细节变化,可以较准确地检测信号的突变,因此,小波变换被广泛应用于气候的诊断中^[20]。对径流、降雨和气温序列的时间演变采用滑动平均法^[20-21]和 M-K 法^[20-21]进行趋势变化显著性检验,利用有序聚类分析法^[20, 21]和均值检验法进行时间序列突变成分分析,应用 Morlet 小波分析法^[22]进行周期性诊断,并采用 Pearson 相关分析法研究径流、降雨和气温的相关关系。

2 径流、降雨和气温的演变分析

2.1 径流年内分配与年际变化分析

由表 1 知, C_y 在 0.56~0.79 之间变化, C_r 在 0.48~0.62 之间变化, C_y 和 C_r 存在波动区间表明各个水文站径流量年内分配存在一定程度的不均匀性并且各年代区间的相近性说明年内分配的不均匀性随时间变化不大。不管是历年还是在不同年代,屏山站的 C_y 和 C_r 都比寸滩站和宜昌站大,变化最小的是宜昌站,说明屏山

站的年内分配不均匀性最大,造成这种现象的原因是
因为屏山站径流的控制面积远远小于寸滩站和宜昌站
所造成的。

从表 1 看出,流域内 3 个水文站的 C_v 在 0.65~
0.79 之间,而 K_m 在 1.25~2.01 之间波动,但是 C_v 和 K_m
都偏小,说明各个水文站的年径流量的年际变化较小,

在空间呈现一致性。不同年代的 C_v 和 K_m 取值比较接
近,表明径流量年际变化在时间演变过程中不显著。不
管是历年还是年代际间,屏山站的 C_v 基本都大于寸滩
站和宜昌站,并且宜昌站的 C_v 最小,说明金沙江下游
段屏山站的年际分配不均匀性最大,这与径流年内分
配不均匀性结果一致。

表1 流域各水文站年径流不同年代的 C_y 、 C_r 、 C_v 和 K_m 计算成果
Table1 The C_y , C_r , C_v and K_m calculated results of the runoff at the stations in the various decades

年代	描述值	年内分配			描述值	年际变化		
		屏山	寸滩	宜昌		屏山	寸滩	宜昌
1950s	C_y	0.78	0.67	0.63	C_v	0.78	0.77	0.73
	C_r	0.56	0.57	0.55	K_m	1.58	1.50	1.57
1960s	C_y	0.79	0.68	0.60	C_v	0.79	0.78	0.71
	C_r	0.61	0.62	0.57	K_m	1.62	1.47	1.42
1970s	C_y	0.73	0.59	0.56	C_v	0.73	0.71	0.66
	C_r	0.53	0.52	0.50	K_m	1.59	1.48	1.40
1980s	C_y	0.76	0.65	0.61	C_v	0.76	0.78	0.73
	C_r	0.54	0.59	0.56	K_m	1.33	1.29	1.25
1990s	C_y	0.77	0.63	0.60	C_v	0.77	0.74	0.70
	C_r	0.57	0.54	0.52	K_m	1.84	1.53	1.50
2000s	C_y	0.72	0.60	0.56	C_v	0.72	0.70	0.65
	C_r	0.59	0.54	0.48	K_m	1.56	1.57	1.65
1954~2008	C_y	0.76	0.64	0.59	C_v	0.76	0.74	0.69
	C_r	0.57	0.56	0.53	K_m	1.84	1.77	2.01

2.2 趋势性分析

为了更好地反映水文气象因子在各季节的变化情
况,将 3~5 月代表春季,6~8 月代表夏季,9~11 月代表
秋季,12 月至翌年 2 月代表冬季进一步分析趋势性。

2.2.1 径流

5a 滑动平均过程可反映时间序列平均状态的长
期变化,从图 2 发现各站点的径流序列在 55a 间出现
若干次波动。通过 M-K 法分析得到的成果表 2,表明
寸滩站和宜昌站年径流量有下降趋势,且前者通过了
90%的显著性检验,而屏山站的年径流量呈不显著上
升趋势。此外,各水文站年径流量趋势的不一致,表明
长江上游的径流还可能受到其它支流的影响。

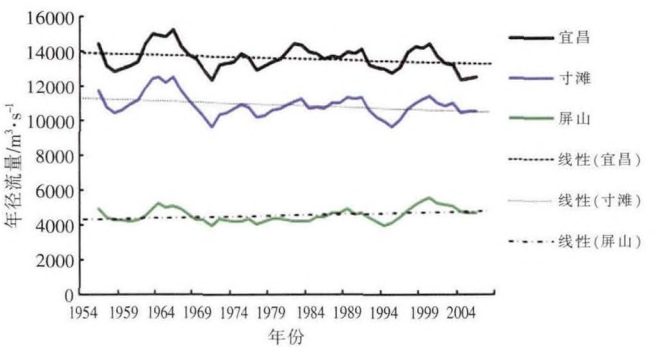


图 2 年径流滑动平均后的变化
Fig.2 The changes of the annual runoff by moving average

表2 径流、降雨和气温M-K法的检验结果
Table2 The test results of the runoff, precipitation and temperature based on M-K

全年 /季节	径流			降雨		气温	
	屏山	寸滩	宜昌	宜宾	沙坪坝	宜宾	沙坪坝
年	0.97	-1.29*	-1.21	-3.75**	0.36	0.83	1.97**
春季	2.88**	0.01	0.43	0.93	0.93	0.61	1.67**
夏季	-0.43	-2.16**	-1.2	-2.03**	0.8	0.84	0.1
秋季	0.52	-0.36	-1.5*	-2.95**	-1.82**	1.58*	1.98**
冬季	2.49**	1.55*	1.33*	-1.52*	0.95	-0.65	1.43*

* 和 ** 分别表示通过了置信水平为 90%和 95%的显著性检验。

从表2可知,径流量季节变化存在一定时空分布差异。各水文站的夏季径流量都呈下降趋势,其中寸滩站夏季径流量的减少通过了95%的显著性检验,而夏季径流量的变化对全年径流量具有主导作用,这是寸滩站年径流量下降的主要原因。三个站点的春季和冬季径流量都呈上升状态,但由于春季和冬季径流量占全年比例不大,所以两季径流量的变化对全年径流量变化趋势影响不大。整体来看,三峡段站点的四季径流量减小趋势更为显著,而金沙江下游段站点的四季径流量基本表现为增加趋势,这就决定了水文站年径流量的趋势性,并与上面分析结果一致。

2.2.2 降雨

宜宾站和沙坪坝站年降雨量在58a的水文序列中呈明显的相反变化(图略)。经过M-K法分析,宜宾站年降雨量通过了95%的显著性检验,表明宜宾站的降雨序列是呈显著的减小趋势,而沙坪坝站的年降雨量上升趋势不显著。

从季节变化看,宜宾站夏季降雨量的减少通过了95%的显著性检验,而夏季降雨量的变化将会直接影响全年降雨量的变化,相应解释了宜宾站年降雨量呈下降趋势而沙坪坝站年降雨量呈不显著的上升趋势。宜宾站和沙坪坝站春季降雨量M-K法的检验值都是0.93,说明两个站点春季降雨量都呈增加的一致性,而春季降雨量的增加则直接导致金沙江下游及三峡段春季径流量增加,这与表2的检验结果相吻合。从表2还发现,在降雨量呈上升趋势时,径流量有时为下降趋势,这表明径流量不仅受到降雨量的影响,还可能受到其他因子的作用。

2.2.3 气温

宜宾站和沙坪坝站气温经滑动平均后都呈上升趋势(图略)。自1951年到1995年期间,宜宾站气温总体表现为下降趋势,所以在58a的气温序列中的增幅并不显著,这与M-K法的检验结果一致,但沙坪坝站M-K法的检验值通过了95%的显著性检验。

从表2发现,宜宾站和沙坪坝站夏季气温上升趋势的不显著性,而气温不显著的增幅对流域蒸发量的变化也不会有较大的影响,间接作用了金沙江下游段及三峡段的夏季径流量不会有显著的减少,这与前面屏山站和宜昌站夏季径流量减小趋势不明显的结果一致,却与寸滩站有矛盾,表明河川径流是气

候条件与流域下垫面综合作用的产物,径流量的增加或减少不仅受到流域气温的影响,还与其他因子有关。沙坪坝站冬季气温的检验值通过90%的显著性检验,而气温的上升会产生因融雪而带来的多余冬季径流量的现象,这与前面分析三峡段冬季径流量呈增加的结果一致。总体来看,四季气温的变化趋势直接导致金沙江下游及三峡段升温的必然性,且这种状态在近20a中仍明显的持续,这也同时响应了全球变暖现象。

2.3 突变性分析

2.3.1 径流

从图3可知,寸滩站的径流量在55a的水文序列中存在突变性,突变点是1968年。为进一步分析突变的显著性,采用均值年检验法进行验证,在1968年前后两阶段,寸滩站年径流序列差异的 t 值大于显著性水平为0.05时的临界值,由此可认为寸滩站径流序列在1968年发生了极显著变异,同理检验确定屏山站径流序列在1997年发生显著变异。由于采用有序聚类法分析所得到的突变点在接近水文序列端点时,会存在很大的误差,根据离差平方和最小的原理,发现宜昌站第三小的 S_n 值出现在2005年,且通过均值年检验,因此有理由相信宜昌站的径流序列在2005年发生了显著变异。

结合径流量的滑动平均图发现,金沙江下游及三峡段径流量在1968年以前呈增加趋势,随后直到1997年径流都表现为轻微减少趋势并在1997年开始显著的减少。总体来看,研究河段大体上经历了“丰-平-枯”3个变化阶段,其时间分界点约在1968年和1997年。

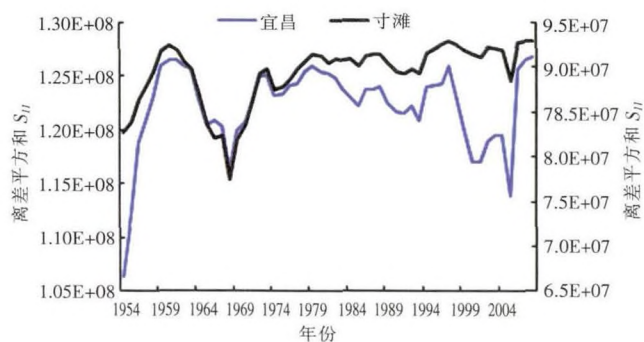


图3 寸滩站和宜昌站径流序列有序聚类分析 S_n 图
Fig.3 Sequential clustering analysis S_n process of runoff series at the Cuntan and Yichang stations

2.3.2 降雨

沙坪坝站在 58a 的降雨序列中存在明显的 S_n 最小值(图略),宜宾站的显著性不明显。通过检验,宜宾站年降雨量序列在 1991 年发生了显著变异。经计算,沙坪坝站在 1961 年和 1995 年的离差平方和分别是最小值和第二小值,进一步验证其可靠性,发现检验 t 值都大于显著性水平是 0.05 的临界值,表明沙坪坝站年降雨序列在 1961 年和 1995 年发生了极显著的变异。

2.3.3 气温

宜宾站的 S_n 最小值和第二小值在突变年份和值得大小上都非常接近(图略),通过进一步验证,该站的假设突变点 1997 年和 2000 年的检验 t 值都没有通过检验,由此可认为宜宾站气温在 58a 的时间序列中保持了资料的一致性。经计算,沙坪坝站的年平均气温序列在 1996 年和 2005 年发生了极显著的变异。

通过对径流、降雨、气温的有序聚类分析图和均值检验表(见表 3)观察,可知金沙江下游段的降雨量在 1991 年发生突变时,相应的径流量在 1997 年也发生了显著性变异,表明金沙江下游段径流序列变异的可能原因是降雨突变,并且径流量的变化可能是作为降雨变化的滞后效应。三峡段的降雨量在 1961 年以及气温在 2005 年发生突变时,相应的径流量在 1968 年和 2005 年发生变化,表明三峡段径流量的变化受气温变化的影响更大。对于研究区径流量和降雨量的变化之间存在的时滞,这种差异性可能是径流量对降雨量响应程度不明显的表现,也可能是由于水文站和气象站

个数较少不能反映全流域水文气象情况。

2.4 周期性分析

为了消除年际与月份之间的影响,通过对径流和降雨的距平分析得到以下结论。

2.4.1 径流

通过 Morlet 小波变化发现,研究区年径流量序列存在多时间尺度变化特征。从图 4 看出,寸滩站的径流量存在明显的以 9a 为主周期和次周期为 14a 的时间尺度,但有研究^[23]得到寸滩站的径流量是以 14a 为主周期和 9a 为第三周期的结果,两个分析结果都表明寸滩站存在 9a 和 14a 的振荡周期,也说明小波方差周期和主周期系数的变化受诸多因素影响。观察宜昌站的小波方差图 4 发现,年径流序列的主周期是 8a,次周期是 14a,第三周期则为 25a。屏山站小波方差图表明该站径流序列分别存在 9a 和 38a 的周期。此外,小波方差图是反映了波动的能量随尺度的分布,宜昌站的小波方差图从 20 世纪 70 年代中期开始衰减,可能受长江流域兴建水库导致波段的滞后以及主周期和次周期波动能量的变化影响。

对 3 个水文站径流量序列小波分析发现金沙江下游及三峡段存在明显的 8~9a 的主周期变化,表明了长江上游流域各站点在空间与时间上的一致性。即金沙江下游的年径流量的变化周期受到金沙江干流中上游及支流的影响,是对金沙江干流中下游以及支流振荡周期 8~16a 的响应^[17]。

2.4.2 降雨

由于时间序列的长度限制,宜宾站主周期为 50a 以上的大时间尺度无法确定,其次是 10a 和 22a 的时间尺度比较明显。观察沙坪坝小波方差图 4 看出年降雨序列存在非常显著的 4a 和 2a 的主周期,其次还存在 6a、12a 和 22a 的次周期,但是 4a 和 2a 的小波能量远远高于其他周期,表明主周期存在且显著。

通过对年降雨序列的小波分析发现,两个区域都存在 4~6a 的小时间尺度和 20a 以上的大时间尺度,表明宜宾站和沙坪坝在空间和时间上的一致性,说明金沙江下游段与三峡段之间有密切联系。由以上分析可知研究区年降雨序列具有多时间尺度变化特征,各种年际及年代际时间尺度的周期信号在时域上分布不均,具有很强的局部化特征,同时宜宾站出现了影响到全时域的振荡周期,这可能是由于流域下游四个大型水库的兴建所带来主周期的波动变化造成的。

表3 径流、降雨和气温均值检验法的结果
Table3 The test results of the runoff, precipitation and temperature based on mean value test method

水文气象因子	站点	突变年份	t	检验结果
径流	屏山	1997	4.29	显著
	寸滩	1968	14.32	显著
	宜昌	1954	21.86	舍去
		2005	4.12	显著
	宜宾	1991	3.33	显著
降雨	沙坪坝	1961	13.35	显著
		1995	7.36	显著
	宜宾	2000	1.21	不显著
气温	沙坪坝	1996	11.42	显著
		2005	2.86	显著

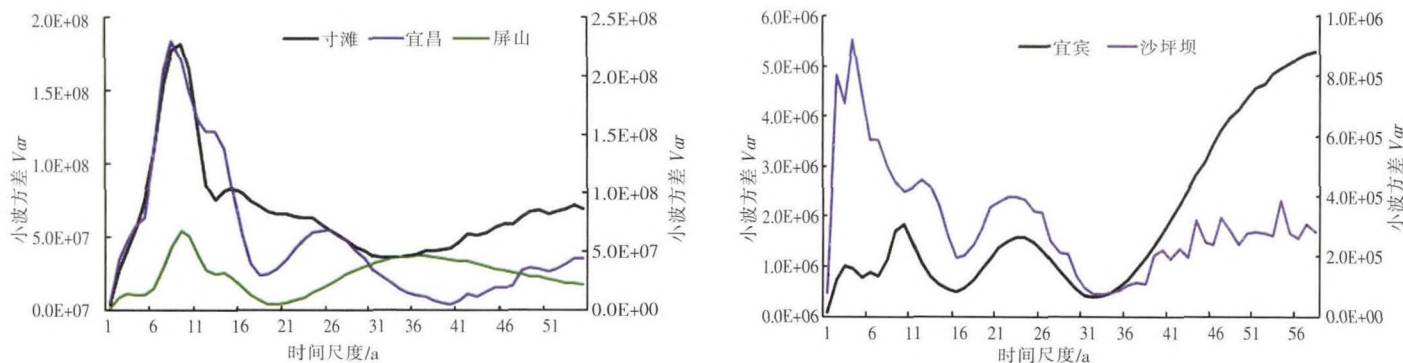


图4 年径流和年降雨小波方差图
Fig.4 The wavelet variance of the annual runoff and precipitation

2.4.3 主汛期径流与降雨集中期

由于主汛期的径流与降雨集中期的关系比起径流和降雨的年序列关系更为密切,进一步做了以下分析。通过前面分析发现各水文站的主汛期都集中在7~9月,而宜宾站和沙坪坝站的降雨集中期分别是6~8月和5~7月,发现径流量是降雨量的滞后效应。

对各水文站主汛期的径流序列做出小波方差图(图略),得出各站点主汛期径流都存在8~9a的小时间尺度以及20a以上的大时间尺度,这与前面分析年径流序列的周期结果一致,表明主汛期径流量的多少直接决定年径流量。此外,降雨集中期在宜宾站的12a尺度和沙坪坝站的6a尺度与各站点年降雨量主要周期十分接近,表明降雨集中期与年降雨量在时域上的分布存在很大的相似性。还发现宜宾站和沙坪坝站降雨集中期都非常显著的存在4~6a的时间尺度,而4~6a的周期与ENSO事件的5~7a准周期相联系,说明ENSO

事件一定程度上影响金沙江下游及三峡段的降雨过程。对于径流和降雨都存在10a和20a左右的周期与太阳活动的准周期11a和22a接近,同时表明金沙江下游与三峡段流域受太阳活动影响明显,这一结果与Li等^[24]研究长江流域夏季降雨的变化与太阳活动有显著的正相关相吻合。

2.5 径流与降雨、气温的相关性分析

2.5.1 年序列分析

采用Pearson相关法分析水文站径流与气象站降雨和气温的相关性,结果如表4所示。从表中看出,长江上游流域的各水文站间年径流量紧密相关,尤以寸滩站和宜昌站关系最密切。对于宜宾站和沙坪坝站的年降雨量分析,发现站点间的相关系数没有通过0.05的显著性水平检验,表明流域两个站点的降雨过程会受到太阳活动及厄尔尼诺现象等多种因素的共同影响。

表4 年径流、年降雨和年气温的Pearson相关性分析结果
Table4 The correlation analysis results of the annual runoff, precipitation and temperature

因子	站点	分析特征	径流			降雨		气温	
			屏山	寸滩	宜昌	宜宾	沙坪坝	宜宾	沙坪坝
径流	屏山	相关性							
	寸滩	相关性	.752**						
	宜昌	相关性	.650**	.925**					
降雨	宜宾	相关性	0.12	.468**	.462**				
	沙坪坝	相关性	0.262	0.24	.311*	0.148			
气温	宜宾	相关性	0.146	-0.175	-.292*	-.300*	-0.023		
	沙坪坝	相关性	-0.028	-.276*	-.399**	-0.237	-0.23	.845**	

*表示在0.05的显著性水平下,进行双侧T检验,相关性显著;**表示在0.01的显著性水平下,进行双侧T检验,相关性显著。

分析屏山站径流与宜宾站降雨、气温年序列相关性时,发现径流量与降雨量、气温的线性相关性不显著。一方面,河川径流是气候条件与流域下垫面综合作用的产物,不仅受人类活动强度影响显著,而且对气候变幅响应敏感。另一方面,由于气温与蒸发密切相关,而二者之间是非线性关系,使得描述水文情势与气候变化的因子之间的关系更多表现为非线性关系。表4结果显示寸滩站和宜昌站的径流量与各站点的气象因子均有显著的相关性这一结果与多项研究^[9, 13]中分析得出同一流域的径流量随降雨量的增加而增大,随气温的升高而减小的结论一致。此外,宜宾站的降雨量与寸滩站和宜昌站的径流量都通过了0.01的置信度检验,表明下游的径流量更大程度上受到上游的降雨量的影响,同时上游气温的变化对下游径流量的显著性不明显,说明上游气温相对降雨量对下游径流量的影响较小。

2.5.2 主汛期径流与降雨集中期分析

表5是进一步分析研究区主汛期径流和降雨集中期相关性的成果表。从表中看出屏山、寸滩和宜昌站主汛期的径流量之间存在显著的相关性,这与前面年径流量的分析结果一致,进一步说明了水文站点的年径流量与主汛期径流量存在密切联系。观察表5,发现宜

宾站降雨集中期与各水文站的主汛期径流的正相关性显著,但这种显著性并没有在沙坪坝站中发现,而在表4中沙坪坝站年降雨量仅与宜昌站年径流量的相关性通过了0.05显著性水平检验,一方面说明主汛期的径流和集中期的降雨与全年径流和降雨是有差异,另一方面也说明该站的水文气象因子受到了人类活动等因素的影响。

2.5.3 季节序列分析

为了更深刻分析径流、降雨和气温之间的关系,探讨了不同季节降雨量、气温对同期和后期径流量的作用。具体来说,径流量与其前期气象因子的对应为:春季径流量对应冬季气象因子,夏季径流量对应春季气象因子,以此类推。

由表6可见,各水文站的夏季径流量与相应气象站的同期降雨量和同期气温存在显著相关性,同时屏山站夏季径流量还与前期降雨量呈正相关。三个水文站各季节的径流量受同期降雨量和前期气温的影响最大,其中各水文站的秋季径流量与前期气温都通过了0.01的显著性水平检验。屏山站的冬季径流量与宜宾站的同期气温和前期气温的正相关性显著,说明该地区秋季和冬季的气温上升有利于冰雪融化,导致屏山站冬季径流量的增加。此外,寸滩站和宜昌站各季节的径流量与水文因子的相关性基本一致,却与屏山站有差异,这与相应的气象站数据来源不一致有关。总体来说,不仅各季节径流量对气象因子敏感性有差异,而且上游与下游河段径流量受影响程度也有区别。

3 结论与讨论

(1) 各水文站径流量的年内分配和年际变化在时间的演变过程中并不显著,相较而言屏山站年内和年际变化的不均匀性较大。

表5 主汛期径流与降雨集中期的Pearson相关性分析结果
Table5 The correlation analysis results of the runoff in main flood period and precipitation in concentration period

站点	分析特征	屏山	寸滩	宜昌	宜宾	沙坪坝
屏山	相关性					
寸滩	相关性	.825**				
宜昌	相关性	.801**	.955**			
宜宾	相关性	.367**	.546**	.553**		
沙坪坝	相关性	0.205	0.142	0.18	0.101	

**表示在0.01的显著性水平下,进行双侧T检验,相关性显著。

表6 径流、降雨和气温季节序列的Pearson相关性分析结果
Table6 The correlation analysis results of the seasonal runoff, precipitation and temperature

因子	屏山-径流量				寸滩-径流量				宜昌-径流量			
	春季	夏季	秋季	冬季	春季	夏季	秋季	冬季	春季	夏季	秋季	冬季
同期降雨量	.132	0.319*	-.128	-.131	.343*	.375**	.217	.244	.351**	.479**	.276*	.333*
前期降雨量	.025	0.283*	.269*	-.114	.111	.159	.054	-.106	.197	.137	.052	-.047
同期气温	.162	-.325*	.052	.408**	-.107	-.356**	-.055	-.056	-.187	-.499**	-.140	-.131
前期气温	.004	.129	-.478**	.338*	-.461**	-.082	-.484**	.229	-.456**	-.146	-.516**	.244

*表示在0.05的显著性水平下,进行双侧T检验,相关性显著;**表示在0.01的显著性水平下,进行双侧T检验,相关性显著。

(2) 金沙江下游段屏山站的径流量上升趋势不显著,同时该区域宜宾站的降雨量表现为下降趋势;三峡段水文站的径流量呈减少趋势,同期沙坪坝站的降雨量呈增多趋势;研究区的气温都表现为上升趋势。

(3) 金沙江下游段屏山站的径流量在 1997 年发生变异,而该区域宜宾站的降雨量在 1991 年发生突变,气温并未发现异常;三峡段寸滩站和宜昌站的径流量分别在 1968 年和 2005 年发生突变,并且该区域沙坪坝站的降雨量在 1961 年和 1995 年发生突变,气温则在 1996 年和 2005 年发生突变。

(4) 研究区径流序列存在明显的 8~9a 的主周期和 20a 以上的次周期变化,而降雨序列则存在 4~6a 的小时间尺度和 20a 以上的大时间尺度的周期变化。

(5) 各水文站夏季径流量受同期降雨量和同期气温的共同影响,而秋季径流量受前期气温的影响最大;此外,三峡段宜昌站的径流量与沙坪坝站的降雨量和气温分别存在正相关性和负相关性。

由于各站点的原始数据为月均值,所以在分析径流降雨的相关性时,无法检验日径流和日降雨特别是径流与最大 1d、最大 3d 和最大 7d 降雨量的相关性。此外,对于金沙江下游段水文气象因子相关性不显著的原因并没有进一步探讨。

参考文献:

- [1] IPCC. Climate Change 2007: Synthesis Report [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2007.
- [2] 气候变化国家评估报告编写委员会. 气候变化国家评估报告[M]. 北京:科学出版社, 2007.(Committee for National Assessment Report on Climate Change. National Assessment Report on Climate Change[M]. Beijing: Science Press, 2007. (in Chinese))
- [3] 张建云,王国庆. 气候变化对水文水资源影响研究[M]. 北京:科学出版社, 2007.(ZHANG Jianyun, WANG Guoqing. Impact of Climate Change on Hydrology and Water Resources[M]. Beijing: Science Press, 2007. (in Chinese))
- [4] 王国庆,张建云,刘九夫,等. 中国不同气候区河川径流对气候变化的敏感性[J]. 水科学进展, 2011, (3):307-314. (WANG Guoqing, ZHANG Jianyun, LIU Jiufu, et al. The sensitivity of runoff to climate change in different climatic regions in China [J]. Advances in Water Science, 2011,(3):307-314. (in Chinese))
- [5] 秦大河. 中国气候与环境演变 [M]. 北京:气象出版社, 2012. (QIN Dahe. Climate and Environmental Change in China [M]. Beijing: China Meteorological Press, 2012. (in Chinese))
- [6] Berezovskaya S. Compatibility analysis of precipitation and runoff trends over the large Siberian watersheds [J]. Geophysical Research Letters, 2004,31(21).
- [7] J C, W T, David. The impact of climate change on the water resources of the Amu Darya basin in Central Asia[J]. Water Resources Management, 2014,28(15):5267-5281.
- [8] 王振龙,陈玺,郝振纯,等. 淮河干流径流量长期变化趋势及周期分析[J]. 水文,2011,(6):79-85.(WANG Zhenlong, CHEN Xi, HAO Zhenchun, et al. Long-term trends and periodic analysis of runoff at Lutaizi station on Huaihe river [J]. Journal of China Hydrology, 2011,(6):79-85. (in Chinese))
- [9] 朱颖洁,郭纯青,黄夏坤. 气候变化和人类活动影响下西江梧州站降水径流演变研究 [J]. 水文, 2010,(3):50-55. (ZHU Yingjie, GUO Chunqing, HUANG Xiakun. Chang of precipitation and runoff at Wuzhou station on Xijiang river under influence of climate changes and human activities [J]. Journal of China Hydrology, 2010,(3):50-55. (in Chinese))
- [10] 张晓龙,黄领梅,沈冰. 秦岭南北典型流域径流特征及其降水变化响应 [J]. 水电能源科学, 2015,(1):11-14.(ZHANG Xiaolong, HUANG Lingmei, SHEN Bing. Characteristics of runoff and its response to rainfall change in typical basins of northern and southern regions of Qinling mountains [J]. Water Resources and Power, 2015,(1):11-14. (in Chinese))
- [11] 於凡,张光辉,柳玉梅. 全球气候变化对黄河流域水资源影响分析[J]. 水文, 2008,28(5):52-56. (YU Fan, ZHANG Guanghui, LIU Yumei. Analysis on effects of global climate change on water resource in the Yellow river basin [J]. Journal of China Hydrology, 2008,28(5):52-56. (in Chinese))
- [12] 雍斌,朱磊,任立良,等. 人类活动对老哈河流域近 50 年径流变化影响的定量评估[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2014,(2):101-106. (YONG Bin, ZHU Lei, REN Liliang, et al. Quantitative evaluation of effects of human activities on runoff variation over past 50 years in Laohahe basin [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2014,(2):101-106. (in Chinese))
- [13] 徐宗学,李占玲,史晓崑. 石羊河流域主要气象要素及径流变化趋势分析[J]. 资源科学, 2007,(5):121-128. (XU Zongxue, LI Zhanling, SHI Xiaokun. Long-term trends of major climatic variables and runoff in Shiyang river basin [J]. Resource Science, 2007,(5):121-128. (in Chinese))
- [14] 孙甲岚,雷晓辉,蒋云钟,等. 长江流域上游气温、降水及径流变化趋势分析 [J]. 水电能源科学, 2012, 30 (5):1-4. (SUN Jialan, LEI Xiaohui, JIANG Yunzhong, et al. Variation trend analysis of meteorological variables and runoff in upper reaches of Yangtze river[J]. Water Resources and Power, 2012,30(5):1-4. (in Chinese))
- [15] 宋萌勃,李太星,陈吉琴. 金沙江流域降水径流特性初步分析[J]. 长江工程职业技术学院学报, 2012,29(1):1-4. (SONG Mengbo, LI Taixing, CHEN Jiqin. Preliminary analysis on rainfall runoff features of Jinsha river watershed [J]. Journal of Changjiang Engineering Vocational College, 2012,29(1):1-4. (in Chinese))
- [16] 程尊兰,朱平一,刘雷激. 金沙江下游地区水文特征[J]. 山地研究, 1997,15(3):201-204. (CHENG Zunlan, ZHU Pingyi, LIU Leiji.

- Hydrological characteristics in the lower reach area of Jinsha river[J]. Mountain Research, 1997,15(3):201–204. (in Chinese))
- [17] 岑思弦,秦宁生,李媛媛. 金沙江流域汛期径流量变化的气候特征分析[J]. 资源科学, 2012, 34(8):1538–1545. (CEN Sixian, QIN Ningsheng, LI Yuanyuan. Climatic characteristics of runoff variation in flood season in Jinsha river basin [J]. Resources Science, 2012,34(8): 1538–1545. (in Chinese))
- [18] 陈媛,王顺久,王国庆,等. 金沙江流域径流变化特性分析[J]. 高原山地气象研究,2010,(2):26–30.(CHEN Yuan, WANG Shunjiu, WANG Guoqing, et al. Runoff variation characteristics analysis on Jinsha River [J]. Plateau and Mountain Meteorology Research, 2010,(2): 26–30. (in Chinese))
- [19] 卓嘎,建军,边巴次仁. 1960–2004 年金沙江径流量特征及其对气候变化的响应[J]. 冰川冻土, 2011,33(2):405–415. (ZHUO Ga, JIAN Jun, BIANBA Ciren. Runoff of the Jinsha river: characteristics and its response to climate change[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2011,33(2):405–415. (in Chinese))
- [20] 谢平,许斌,刘静君,等. 变化环境下区域水资源变异问题研究[M]. 北京: 科学出版社, 2012.(XIE Ping, XU Bing, LIU Jingjun, et al. Alteration Study of Regional Surface Water Resources in the Changing Environment [M]. Beijing: Science Press, 2012. (in Chinese))
- [21] 丁晶,邓育仁. 随机水文学[M]. 成都: 成都科技大学出版社, 1988. (DING Jing, DENG Yuren. Stochastic Hydrology[M]. Chengdu: University of Science and Technology of Chengdu Press, 1988. (in Chinese))
- [22] 王文圣,丁晶,李跃清. 水文小波分析[M]. 北京: 化学工业出版社, 2005. (WANG Wensheng, DING Jin, LI Yueqing. Hydrology Wavelet Analysis [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2005. (in Chinese))
- [23] 张存暖,卞伟明. 寸滩站近 50 年流量的小波周期分析 [J]. 吉林水利, 2009,9(8):5–8. (ZHANG Cunnuan, BIAN Weiming. Analysis for the wavelet cycle of recent 50–years flow of Cuntan gauge[J]. Jilin Water Resources, 2009,9(8):5–8. (in Chinese))
- [24] Xiaodong L, Yafen Z, Weihong Q. Spatiotemporal variations of summer rainfall over eastern China during 1880 – 1999[J]. Advances in Atmospheric Sciences, 2002,19(6):1055–1068.

Temporal Analysis of Hydrological and Meteorological Factors in Downstream of Jinsha River and Three Gorges Reach of Yangtze River

YANG Lu^{1,2}, MEI Yadong^{1,2}, YE Yan³, LIN Yuru⁴

(1. State Key Laboratory of Water Resources and Hydropower Engineering Science, Wuhan University, Wuhan 430072, China;

2. Hubei Collaborative Innovation Center for Water Resources Security, Wuhan 430072, China;

3. College of Resources and Environment, Southwest University, Chongqing 400715, China;

4. Changjiang River Scientific Research Institute, Wuhan 430010, China)

Abstract: Using the mean monthly runoff at the 3 hydrology stations from 1954 to 2008 as well as the precipitation and temperature series at the 2 meteorology stations from 1951 to 2008 in the downstream of the Jinshajiang River and Three Gorges Reach, this paper investigated the change tendency of hydrological and meteorological factors with moving average method and Mann–Kendall rank correlation test, and examined the mutability and periodicity with sequential clustering analysis, mean value test method and wavelet analysis. In addition, the sensitivity of runoff to precipitation and temperature change was analyzed. The results show that: (1) Inner–annual distribution and inter–annual variation of runoff in the study area is not significant. (2) The runoff at the Pingshan Station in the downstream of the Jinshajiang River indicates an uptrend and an abrupt change in 1997, meanwhile, the precipitation at the Yibin Station reflects the opposite trend with a mutation point in 1991. Similarly, the annual runoff at the hydrology stations in the Three Gorges Reach presents a downtrend and abrupt changes in 1968 and 2005, while the precipitation at the Shapingba Station shows an increasing trend with obviously mutation points in 1961 and 1995. (3) Series of runoff and precipitation all show main cycles less than 10 years and secondary cycles over 20 years. (4) Runoff in summer is jointly influenced by precipitation and temperature in the corresponding period, and foregoing temperature mostly impacts runoff in autumn.

Key words: temporal analysis; hydrological and meteorological factors; sensitivity; downstream of the Jinshajiang River and the Three Gorges Reach of the Yangtze River