

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2014.04.002

1956—2011年金沙江下游梯级水电开发区降水变化特征分析

姚治君¹, 姜丽光^{1,2}, 吴珊珊¹, 刘兆飞¹, 王蕊^{1,2}

(1. 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101; 2. 中国科学院大学资源与环境学院, 北京 100049)

摘要: 基于金沙江下游梯级水电开发区 10 个气象站 1956—2011 年的逐月降水资料, 运用线性倾向估计法、Morlet 小波分析法和 R/S 分析法对多年降水和季节降水变化及其趋势、周期和持续性特征进行分析。结果表明: 研究区 1956—2011 年降水量呈波动式下降趋势, 降水倾向率为 -1.338 mm/a ; 季节降水中除春季呈微小上升趋势外, 夏、秋和冬季均呈下降趋势, 且空间差异明显; 夏、秋季的降水量占全年的 81.1%, 尤以夏季为主导, 占 57.4%; 年降水存在 1~2 a、4 a、8 a、14 a 和 31 a 的周期变化规律, 其中 8 a 的周期尤为明显, 通过 90% 置信水平检验; 研究区降水序列总体上存在明显的 Hurst 现象, 具有持续性特征, 未来降水仍会维持减少趋势。

关键词: 金沙江下游梯级水电开发区; 降水量时空分布; 线性倾向估计; 小波分析; R/S 分析

中图分类号: P426

文献标志码: A

文章编号: 1000-1980(2014)04-0289-08

Analysis of characteristics of precipitation variation in cascade hydropower development zone in lower reaches of Jinsha River during period from 1956 to 2011

YAO Zhijun¹, JIANG Liguang^{1,2}, WU Shanshan¹, LIU Zhao-fei¹, Wang Rui^{1,2}

(1. Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China;

2. College of Resources and Environment, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: This study focused on the spatio-temporal variation of precipitation in the cascade hydropower development zone in the lower reaches of the Jinsha River. The changing trends, periodic oscillation, and duration characteristics of multi-annual and seasonal precipitation were analyzed using linear trend analysis, Morlet wavelet analysis, and R/S analysis methods, based on monthly precipitation data of ten meteorological stations in the study area during the period from 1956 to 2011. The results show that the annual precipitation in the study area during the period from 1956 to 2011 has shown a fluctuant downward trend at a tendency rate of $-1.338 \text{ mm per year}$. The precipitation increased slightly in spring and decreased in summer, autumn, and winter, with significant spatial differences. The precipitation in summer and autumn accounted for 81.1% of the annual precipitation, especially the precipitation in summer, which was the leading factor accounting for 57.4% of the annual precipitation. The periodic oscillation of annual precipitation was concentrated in one to two years, expectant four years, eight years, 14 years, and 31 years, and especially in expectant eight years, which was verified by a 90% confidence level test. There was an obvious Hurst effect of the precipitation series in the study area, with a feature of persistence in general, and the precipitation will maintain a decreasing trend in the future.

Key words: cascade hydropower development zone in lower reaches of Jinsha River; spatio-temporal variation of precipitation; linear trend estimation; wavelet analysis; R/S analysis

在全球气候变化背景下,一方面气候变暖加速了水循环过程,导致降水量的时空分布变化^[1-2],另一方面

收稿日期: 2013-03-15

基金项目: “十二五”国家科技支撑计划(2012BAC06B02)

作者简介: 姚治君(1959—),男,辽宁沈阳人,研究员,主要从事水文、水资源研究。E-mail: yaozj@igsrr.ac.cn

人类活动造成的下垫面变化也极大地改变了水循环过程。降水是水循环过程中的一个重要因素,降水量大小及其分布特征是水资源规划配置和开发利用的基本依据^[3]。一般来讲,降水量与水资源量是正相关的,即降水多则水资源丰富,降水少则水资源相对贫乏^[4]。因此,研究降水的时空演变特征对区域水资源的合理评估及利用具有重要意义。

金沙江下游水电站分布密集,库区来水流量直接受到流域降水的影响,研究流域降水特征对于提高发电效益、维持库区水热资源的可持续开发利用意义重大^[5]。电站入库径流的影响因素很多,但流域降水量及其时空分布是影响库区产汇流的重要因素^[6]。研究区生态环境脆弱,降水集中且降雨强度大,加之诸多不合理的土地开发利用活动,导致近年来金沙江下游流域生态环境恶化、水土流失严重^[7]。强降水也是暴发泥石流的激发因素,对控制泥石流活动起着控制作用^[8]。近年来金沙江下游流域暴雨、大暴雨出现频率增加,由于该区域生态环境的脆弱性,这样的大气降水形势导致了流域地质灾害的频繁发生,水土流失灾害毁坏的耕地数量呈逐年增加趋势,值得引起重视^[9-10]。因此,对开发区降水的演变规律及其持续性进行研究具有重要意义。

张斌等^[11-12]对元谋干热河谷的年降水和季节降水变化趋势、多尺度变化特征及持续性进行了研究;张方伟等^[13]、廖宇等^[14]、陈媛等^[15]对金沙江全流域的降水变化特征进行了研究。也有不少学者对金沙江下游不同城市(如楚雄^[16]、宜宾^[17]、昆明^[18])的降水特征进行了研究。尽管金沙江流域不同区域降水变化的研究成果已较为丰富,但对梯级水电开发区在全球气候变化背景下的多年降水变化特征研究相对较少,侧重点亦有所不同。笔者采用线性倾向估计、小波分析和 R/S 分析法,对金沙江下游梯级水电集中开发区的降水特征进行分析,从时空不同角度对降水的趋势、周期、空间分布结构及其持续性进行细致研究,旨在认知金沙江下游降水的演变规律及持续性,为金沙江下游梯级水电开发区水资源综合开发利用及生态环境保护提供参考依据。

1 研究区概况

研究区域为雅砻江注入金沙江的汇口处至岷江注入金沙江的汇口处之间的金沙江段,地处东经 100°50′~105°、北纬 24°25′~29°,呈西南向东北倾斜的狭长形。地势由西南向东北降低,干流长约 782 km,主要流经云南、四川、贵州 3 个省 10 个地(市、州) 58 个县(市、区),土地总面积约为 8.8 万 km²^[19]。研究区多年平均降水量为 893 mm,水量丰沛稳定,地形落差大,水能蕴含量极大,水电站分布密集,向家坝、溪洛渡、白鹤滩、乌东德四大水电站(图 1)均分布在这一区域。开展该河段流域内降水的长期变化趋势、周期和时空分布特征等分析,对开发和管理金沙江流域水能资源及开展水电站建设的水情服务具有重要参考价值。

2 资料和方法

2.1 资料

选取中国气象科学数据共享服务网(<http://cdc.cma.gov.cn/home.do>)提供的宜宾、昭觉、昭通、雷波、会理、会泽、威宁、元谋、楚雄、昆明 10 个国家气象站(图 1) 1956—2011 年(共 56 年)的月降水资料作为基础资料,缺失值用 56 年对应的月平均值代替。

2.2 研究方法

采用线性倾向估计法研究降水的历史变化趋势、小波分析研究年平均降水的周期性、R/S 分析法研究降水的持续性特征并预测未来降水的变化情形。

2.2.1 线性倾向估计法

用 x_i 表示样本量为 n 的某一变量,用 t_i 表示 x_i 对应的时间,建立 x_i 与 t_i 间的一元线性回归方程:

$$x_i = a_1 + b_1 t_i \quad (i = 1, 2, \cdots, n) \quad (1)$$

式中: a_1 、 b_1 ——回归常数和系数,10 b_1 称为气候倾向率,

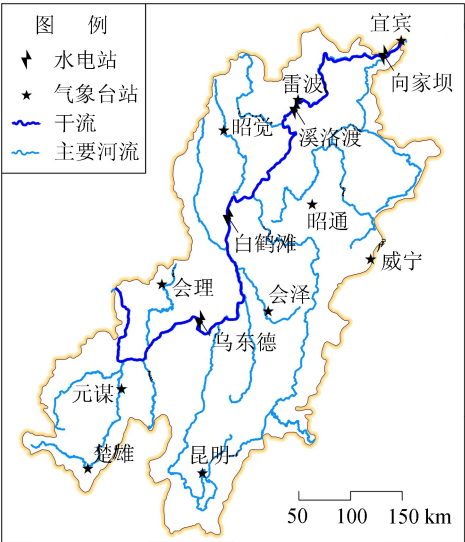


图 1 研究区流域概况及气象站分布

Fig. 1 Basin profile and distribution of meteorological stations in study area

a_1 和 b_1 可以用最小二乘法进行估计。利用 b_1 与相关系数 r 之间的关系,可以得到 x_i 与 t_i 的相关系数(亦称趋势系数) r :

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(t_i - \bar{t})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (t_i - \bar{t})^2}}$$

(2)

b_1 若为正值,说明 x 随 t 的增加呈上升趋势; b_1 若为负值,说明 x 随 t 的增加呈下降趋势。 b_1 值的大小反映了上升或下降的速率,即表示上升或下降的倾向程度。要判读变化趋势的程度是否显著,就要对 r 进行显著性检验。由于 r 的概率密度函数正好是 t 分布的密度函数,因此可以用 t 检验来做显著性检验,统计量为

$$T = \frac{r\sqrt{n-2}}{\sqrt{1-r^2}}$$

(3)

T 遵从自由度为 $n-2$ 的 t 分布。给定显著性水平 α ,若 $|r| > |r_\alpha|$,则认为变化趋势是显著的^[20-22]。

2.2.2 小波分析法

利用小波变换提取降水序列周期。给定母小波函数 $\psi(t)$,时间序列 $f(t)$ 的小波变换的离散形式为

$$\omega_f(a,b) = |a|^{-\frac{1}{2}} \Delta t \sum_{i=1}^n f(i\Delta t) \psi\left(\frac{i\Delta t - b}{a}\right)$$

(4)

式中: $\omega_f(a,b)$ ——小波系数; Δt ——取样间隔; a ——频率参数,表示波动的周期; b ——时间参数,表示波动在时间上的平移。

小波方差为

$$v(a) = \sum_{i=1}^n (\omega_f(a,b))^2$$

(5)

小波方差随频率参数 a 的变化过程称为小波方差图。在小波方差图中,可以清晰地看出某一时段的主导周期成分^[21, 23-27]。

2.2.3 R/S 分析法

R/S 分析法最早是由英国科学家 Hurst 在研究尼罗河多年水文观测资料时提出的一种时间序列统计方法。R/S 分析就是重新标度的极差分析(rescaled range analysis),通过改变研究对象的时间尺度大小,研究其统计特性变化规律,通常被用来分析时间序列的分形特征和长期记忆过程^[28-30]。

R/S 分析法的基本原理见文献[29, 31-33]。不同的 Hurst 指数 H 有不同的意义:(a)当 $H=0.5$ 时,表明时间序列相互独立,完全随机,前后的变化无关;(b)当 $0.5 < H < 1$ 时,表明时间序列存在正相关关系,即系统发展具有持久性或长程相关性:过去的一个增量意味着未来的一个增量,过去的一个减量意味着未来的一个减量,反映在降水因子上则表明未来的降水量整体变化趋势与过去的变化相一致, H 越接近 1,持续性越强;(c)当 $0 < H < 0.5$ 时,表明时间序列存在负相关关系,这暗示系统具有反持续性,且 H 越接近 0,反持续性越强,在这种情况下,过去的增加趋势预示着未来的减少趋势,而过去的减少趋势则使未来可能出现增加的趋势。

3 结果与分析

3.1 降水时空变化特征

3.1.1 降水序列时间变化特征

图 2 为研究区降水量逐年变化趋势。研究区年降水量多年平均为 893 mm,呈不显著下降趋势($r=-0.2, r_{0.1}=0.222$,未通过置信度为 90%的显著性检验)。从 5 a 滑动平均变化曲线看,研究区降水具有明显的阶段性变化特征:1964—1968 年、1982—1987 年和 1993—2002 年呈明显的上升阶段;1969—1981 年、1988—1992 年和 2003—2011 年为下降阶段。总体来看,20 世纪 60 年代末期、

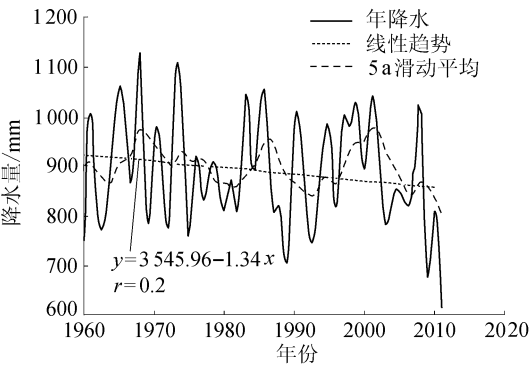


图 2 研究区多年降水变化趋势

Fig. 2 Changing trend of multi-annual precipitation of study area

80 年代中期和2000年前后为多雨期;20世纪80年代初期、90年代初期处于少雨期,降水量存在着年际变化。

四季的降水趋势(图3)中,除春季呈轻微上升趋势外,其他3个季节均呈现出下降趋势。在 $\alpha=0.1$ 显著性水平下检验,四季的变化趋势均不显著(r 分别为0.08, -0.19, -0.21, -0.04),降水的季节变化差异明显。春季(图3(a))降水量为四季中唯一呈上升趋势的季节,但上升趋势不显著,变化较小,气候倾向率为0.21 mm/a。夏季(图3(b))降水量变化与年降水量趋势(图2)基本一致,呈下降趋势,倾向率为-0.94 mm/a,多年平均值为512.9 mm,占全年降水量的57.4%(表1)。5 a滑动平均的阶段性地基本相同,峰值点均在1968年、1987年和2002年左右。秋季(图3(c))降水量除1956—1968年呈上升趋势外,基本呈稳步下降趋势,气候倾向率为-0.61 mm/a,降水量多年平均值为211.5 mm,占全年降水的23.7%。冬季(图3(d))降水量为四季中变化幅度最小的季节,气候倾向率为-0.03 mm/a,降水量多年平均值为32 mm,仅占年降水的3.6%。综合来说,降水的下降趋势占主导地位。

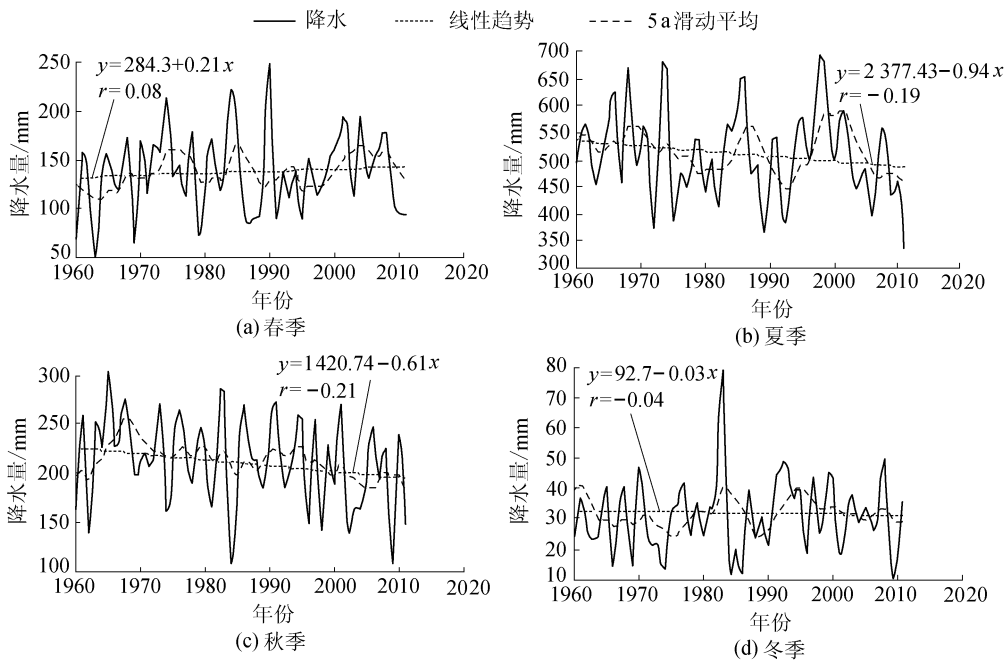


图3 季节降水变化趋势

Fig. 3 Changing trends of precipitation of four seasons

综合分析图2、图3及表1可知,研究区1956—2011年降水量呈下降趋势,主要是夏、秋季降水的减少导致了年降水呈波动式下降过程。虽然春季呈微弱上升趋势,但对年降水的贡献不大。

表1 1956—2011年季节降水的年代分布

季节	降水量平均值							1956—2011年
	1956—1959年	1960—1969年	1970—1979年	1980—1989年	1990—1999年	2000—2009年	2010—2011年	
春季	139.4	117.4	146.3	136.6	134.9	157.5	94.9	137.0
夏季	543.6	538.2	504.6	504.2	533.6	494.5	396.9	512.9
秋季	204.9	229.1	221.5	208.2	215.2	189.7	192.6	211.5
冬季	43.6	27.7	30.2	31.6	35.5	31.2	26.1	31.9

3.1.2 降水序列空间分布特征

研究区年平均降水总体呈下降趋势,趋势系数和倾向率的空间分布基本一致,均从上游向下游递减,但不同地区降水趋势系数和倾向率并不一致,存在一定的空间差异(图4)。由图4可知,除了元谋、楚雄外,其余各站均呈下降趋势,其中宜宾、昭通和威宁下降趋势十分显著,趋势系数超过了0.01显著性水平。宜宾地区的下降趋势最显著,趋势系数为-0.54,降水倾向率为-6.8 mm/a。

应用ANUSPLIN进行年降水的空间插值(图5),为使边界插值合理,插值过程中增加了周边地区一些台站数据,共使用23个站点数据进行插值。从图5可以看出,研究区多年平均降水量空间差异较大,左岸明显高于右岸(沿河流方向为准)。降水量的高值位于西北部昭觉一带,最大降水量为1526.5 mm;低值位于以元

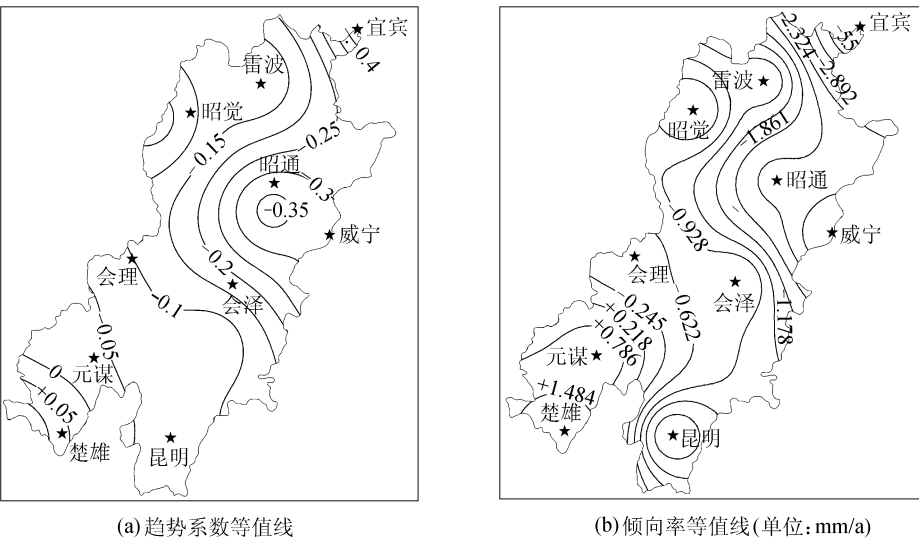


图 4 降水量变化趋势空间分布

Fig. 4 Spatial distribution of precipitation trends

谋和昭通为中心的附近地区,年降水量不足 800 mm,元谋站年降水量仅 636.5 mm。

从图 4 和图 5 可以看出,降水量的空间分布与倾向率的空间分布差异较大。元谋虽然平均降水量少,但呈增长趋势;宜宾、昭觉虽然年降水量较大,但呈下降趋势。说明研究区降水的区域差异性比较大。

3.2 小波周期分析

为识别降水序列的周期成分及其在时域上的分布特征,利用 Morlet 小波^[21, 24, 34-36]对年降水进行周期分析。为便于分析,降水量经过了标准化距平处理,然后计算小波系数。Morlet 小波系数实部表示了降水量的时间尺度特征,图 6 清晰地显示了不同时间尺度上年降水的周期振荡和突变特征。其中等值线为正表示降水较多时期,20 世纪 60 年代后期、80 年代中期以及 2000 年前后为降水较多时期;等值线为负则表示降水偏少时期,主要出现在 20 世纪 60 年代初期、70 年代后期、90 年代初期以及 2010 年左右。从图中可以看出,在年际尺度上,主要存在 3~4 a 和 7~9 a 的周期振荡;在年代际上,主要存在 14~16 a 和 30 a 左右的周期振荡。在不同的时间尺度上,周期振荡均比较强烈,正负相位交替变化明显。

为准确识别降水的周期,利用式(5)计算小波方差,并绘制小波方差图(图 7)。利用小波方差图可以更准确地诊断出多长周期的振荡最强^[21],可以对小波变换得出的周期进行校验。从图 7 可以看出:在年际尺度上,确实存在着 1.2 a、4.1 a 和 7.8 a 的周期,以准 8 a 周期为主导,振荡最强烈;在年代际尺度上,有 13.9 a 和 31.2 a 这 2 个主要周期,且以准 14 a 为主导。

根据图 6,2011 年以后研究区正处于 3~4 a、7~8 a 短振荡周期的少降水期;1956—2011 年之间,14 a 的振荡周期经历了少→多→少→多→少→多→少 7 个循环交替,2011 年处于少降水期的末期;30 a 的周期振荡则经历了多→少→多→少 4 个周期交替,而且第 4 个周期的等值线刚开始,说明在该周期上降水量偏少的趋势仍将维持一段时间。

综合小波变化(图 6)和小波方差图(图 7)可知,研究区年降水存在多重时间周期尺度上的嵌套复杂结构,

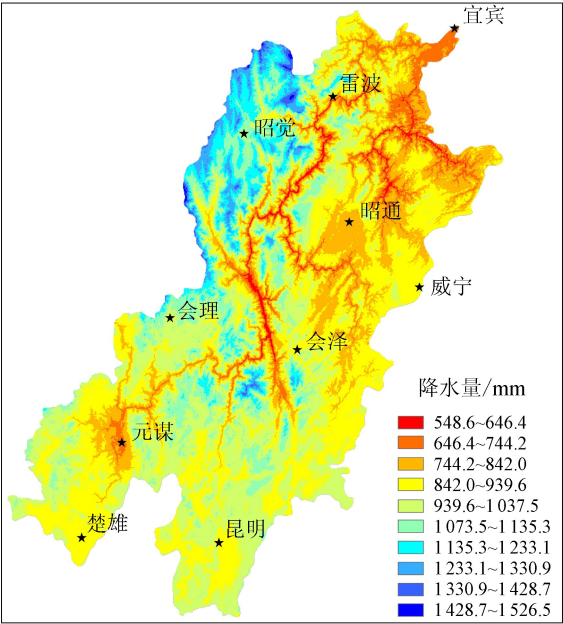


图 5 多年平均降水量空间分布

Fig. 5 Spatial distribution of multi-annual average precipitation

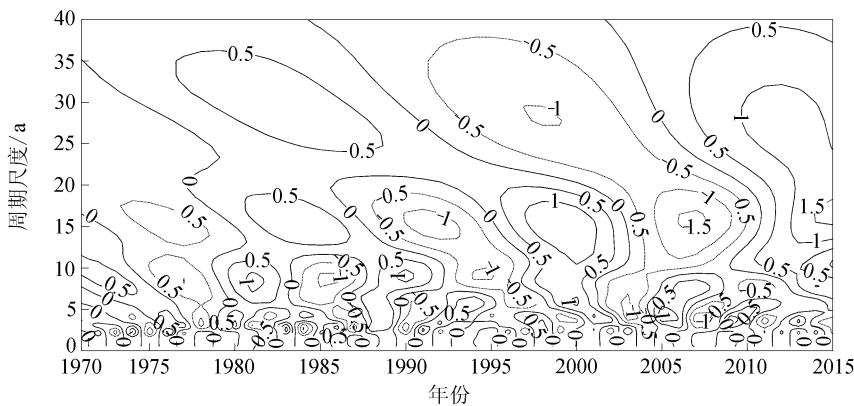


图6 年降水量小波变换系数实部等值线

Fig. 6 Contour of real part of wavelet transform coefficients of annual precipitation

受多重周期规律控制。从振荡强度来看,准 8 a 的周期是年降水的主要控制周期,同时准 4 a 和准 14 a 的周期对年降水量也有较大的影响。为识别上述周期是否具有统计意义,采用白噪声谱对小波方差进行检验^[37-38],结果表明,只有准 8 a 的周期超过了 90% 置信水平检验,说明降水序列真正的主周期为准 8 a。

3.3 降水持续性特征分析

基于全区及各气象站年降水量的历史变化趋势,依据 Hurst 指数 H 值判读降水的持续性,即未来降水量的变化趋势。由表 2 可知,除雷波外其他站点降水序列的 H 值均大于 0.5,尤其楚雄、会泽、威宁、宜宾、昭通的 H 值达到 0.7 以上,说明这些站点的年均降水量具有“长程记忆性”,即未来降水变化趋势延续历史降水变化趋势的可能性较大,具有持续性特征。雷波的降水量时间序列的 H 值小于 0.5,说明该序列具有反持续性特征。

同时,研究区四季降水序列的 R/S 分析表明,除冬季呈反持续性外,其他 3 个季度均具有持续性($H_{\text{春}} = 0.573\,0$, $H_{\text{夏}} = 0.689\,5$, $H_{\text{秋}} = 0.650\,3$, $H_{\text{冬}} = 0.491\,1$)。结合趋势分析结果可知,春、冬季未来降水量将呈上升趋势,而夏、秋季仍然保持下降趋势。由于年降水主要集中在夏、秋季,春、冬季的轻微增加并不能改变研究区年降水量的下降趋势。由 R/S 分析结果可知,研究区年降水序列 H 值为 0.5986,降水具有持续性,即保持下降趋势,与前述小波分析结果一致。

从总体情况来看,整个研究区年降水量具有明显的 Hurst 现象,年降水序列以延续历史变化为主,未来一段时间降水仍呈下降趋势。

4 结 论

a. 1956—2011 年金沙江流域梯级水电开发区年降水量呈波动式下降趋势,年降水线性倾向率为 1.338 mm/a。个别地区下降趋势显著,如宜宾、昭通、威宁,降水量倾向率分别为 6.794 mm/a、2.49 mm/a 和 3.573 mm/a。多年降水空间分布差异较大,区域变异明显。

b. 研究区四季降水中,春季呈微小上升趋势,夏、秋和冬季均呈下降趋势,与年降水变化趋势相同。年内分配不均、降水集中,夏、秋季降水量占全年的 81.1%,这也是年降水呈下降趋势的主要原因。

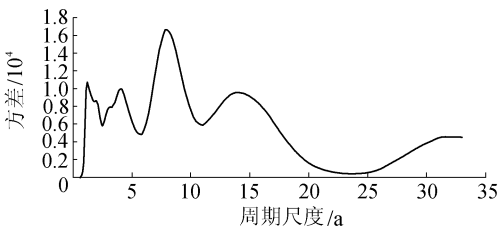


图7 年降水量小波方差

Fig. 7 Wavelet variance of annual precipitation

表2 年降水序列的 R/S 分析结果

Table 2 Results of R/S analysis of annual precipitation series

站点	Hurst 指数 H	相关系数 R^2	历史变化趋势	未来变化趋势
楚雄	0.725 5	0.894 1	增加	增加
会理	0.598 1	0.967 4	减少	减少
会泽	0.820 8	0.942 6	减少	减少
昆明	0.644 1	0.948 0	减少	减少
雷波	0.497 2	0.899 5	减少	增加
威宁	0.702 9	0.862 5	减少	减少
宜宾	0.749 1	0.938 8	减少	减少
元谋	0.634 6	0.961 0	增加	增加
昭觉	0.521 3	0.927 8	减少	减少
昭通	0.718 8	0.904 8	减少	减少

c. 小波分析结果揭示出研究区年降水量的变化存在着多个振荡周期,年际尺度上主要存在1~2 a、准4 a和准8 a的周期变化规律;年代尺度上主要存在准14 a和准31 a的长周期。其中,以准8 a的周期为主导,周期振荡最为突出。

d. 研究区站点(除雷波外)降水序列和季节(除冬季外)降水序列均具有长程相关性和持续性,也就是说,未来的降水量变化趋势与历史变化趋势有一定的相关性,仍然保持原来的减少趋势。

参考文献:

- [1] 郝成元, 赵伟, 赵同谦. 全球气候变化背景下中国敏感区区域响应比较[J]. 地域研究与开发, 2011, 30(3): 56-61. (HAO Chengyuan, ZHAO Wei, ZHAO Tongqian. Comparative research on regional respond to global climate change in China [J]. Areal Research and Development, 2011, 30(3): 56-61. (in Chinese))
- [2] 王英, 曹明奎, 陶波, 等. 全球气候变化背景下中国降水量空间格局的变化特征[J]. 地理研究, 2006, 25(6): 1031-1040. (WANG Ying, CAO Mingkui, TAO Bo, et al. The characteristics of spatio-temporal patterns in precipitation in China under the background of global climate change[J]. Geographical Research, 2006, 25(6): 1031-1040. (in Chinese))
- [3] 唐蕴, 王浩, 严登华, 等. 近50年来东北地区降水的时空分异研究[J]. 地理科学, 2005, 25(2): 172-176. (TANG Yun, WANG Hao, YAN Denghua, et al. Research on the spatial-temporal differentiation of precipitation in northeast China in recent 50 years[J]. Scientia Geographica Sinica, 2005, 25(2): 172-176. (in Chinese))
- [4] 俞烜, 张明珠, 严登华, 等. 南水北调西线工程水源区降水时空特征[J]. 长江流域资源与环境, 2008, 17(增刊1): 41-45. (YU Xuan, ZHANG Mingzhu, YAN Denghua, et al. On the spatial and temporal distribution of precipitation in the Western-Route of South-to-North Water Transfer Project [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2008, 17 (Sup1): 41-45. (in Chinese))
- [5] 施晓晖, 徐祥德. 三峡库区来水流量与长江流域上游前期降水的关系研究[J]. 长江流域资源与环境, 2011, 20(9): 1062-1066. (SHI Xiaohui, XU Xiangde. Relationship between runoff of the Three Gorges Reservoir area and anterior precipitation in upstream of the Yangtze River valley [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2011, 20(9): 1062-1066. (in Chinese))
- [6] 黄力坚, 贺春江. 区间降水对电站入库径流的影响[J]. 云南地理环境研究, 2008, 20(增刊): 46-49. (HUANG Lijian, HE Chunjinag. The influence of regional precipitation on inflow runoff of hydropower stations [J]. Yunnan Geographic Environment Research, 2008, 20(Sup): 46-49. (in Chinese))
- [7] 孔令强, 施国庆, 张峻荣. 金沙江中下游水能资源开发与农村移民安置[J]. 人民长江, 2007, 38(5): 104-107. (KONG Lingqiang, SHI Guoqing, ZHANG Junrong. Development of water resource and settlement of countryside migration in middle and lower reaches of the Jinsha river [J]. Yangtze River, 2007, 38(5): 104-107. (in Chinese))
- [8] 张远瞩. 金沙江白鹤滩水电站库区大寨沟、海子沟流域泥石流形成环境与流量研究[D]. 重庆: 西南师范大学, 2001.
- [9] 周长艳, 王顺久, 彭骏. 金沙江流域及邻近地区空中水资源的的气候特征分析[J]. 资源科学, 2010, 32(12): 2433-2440. (ZHOU Changyan, WANG Shunjiu, PENG Jun. Climatic characteristics of water vapor resources over the Jinsha river reaches and its surroundings [J]. Resources Science, 2010, 32(12): 2433-2440. (in Chinese))
- [10] 贺一梅, 杨子生, 李云辉, 等. 云南金沙江流域水土流失灾害毁坏耕地调查与分析[J]. 山地学报, 2002, 20(增刊): 31-35. (HE Yimei, YANG Zisheng, LI Yunhui, et al. The survey and analysis on farmland devastated by soil and water loss disaster in Jinsha river basin of Yunnan province [J]. Mountain Research, 2002, 20(Sup): 31-35. (in Chinese))
- [11] 张斌, 史凯, 刘春琼, 等. 元谋干热河谷近50年分季节降水变化的DFA分析[J]. 地理科学, 2009, 29(4): 561-566. (ZHANG Bin, SHI Kai, LIU Chunqiong, et al. Changes of seasonal precipitation of Yuanmou dry-hot valley in recent 50 years based on method of DFA [J]. Scientia Geographica Sinica, 2009, 29(4): 561-566. (in Chinese))
- [12] 张斌, 雷金荣, 刘刚才, 等. 元谋干热河谷近50 a降水变化的多时间尺度分析[J]. 山地学报, 2010, 28(6): 680-686. (ZHANG Bin, LEI Jinrong, LIU Gangcai, et al. Multiple scales variations of precipitation in Yuanmou dry-hot valley in the past 50 years [J]. Mountain Research, 2010, 28(6): 680-686. (in Chinese))
- [13] 张方伟, 李春龙, 訾丽. 金沙江流域降水特征分析[J]. 人民长江, 2011, 42(6): 94-97. (ZHANG Fangwei, LI Chunlong, ZI Li. Analysis of precipitation characteristics of Jinsha river basin [J]. Yangtze River, 2011, 42(6): 94-97. (in Chinese))
- [14] 廖宇, 倪长健. 金沙江流域近47年降水特征分析[J]. 人民长江, 2011, 42(5): 55-58. (LIAO Yu, NI Changjian. Analysis on characteristics of precipitation in Jinsha river basin in recent 47 years [J]. Yangtze River, 2011, 42(5): 55-58. (in Chinese))
- [15] 陈媛, 王文圣, 王国庆, 等. 金沙江流域气温降水变化特性分析[J]. 高原山地气象研究, 2010, 30(4): 51-56. (CHEN Yuan, WANG Wensheng, WANG Guoqing, et al. Characteristics analysis on temperature and precipitation variation in Jinsha river [J]. Plateau and Mountain Meteorology Research, 2010, 30(4): 51-56. (in Chinese))
- [16] 何萍, 李宏波, 黄惠. 1960—2009年云南高原楚雄市气候年代际变化特征及城市气候分析[J]. 地理科学进展, 2011, 30(1): 65-72. (HE Ping, LI Hongbo, HUANG hui. The analysis of climate decadal change characteristics and urban climate about Chuxiong city of Yunnan plateau during 1960—2009 [J]. Progress in Geography, 2011, 30(1): 65-72. (in Chinese))

- [17] 周小明, 况源, 梁富强. 宜宾市近 50 年气温降水变化特征分析[J]. 科学与财富, 2012(6):16-17. (ZHOU Xiaoming, KUANG Yuan, LIANG Fuqiang. Characteristics analysis on temperature and precipitation variation about Yibin city in recent 50 years[J]. Sciences & Wealth, 2012(6):16-17. (in Chinese))
- [18] 华立敏, 杨绍琼. 昆明市主城区降水特征及变化趋势分析[J]. 人民珠江, 2010(3):6-8. (HUA Limin, YANG Shaoqiong. Characteristics of precipitation in downtown area of Kunming city and variation trend analysis[J]. Pearl River, 2010(3):6-8. (in Chinese))
- [19] 李冰, 唐亚. 金沙江下游地区人类活动对土壤侵蚀的影响[J]. 山地学报, 2012, 30(3): 299-307. (LI Bing, TANG Ya. Impacts of human activities on soil erosion in the lower Jinsha river basin[J]. Mountain Research, 2012, 30(3): 299-307. (in Chinese))
- [20] 施能, 陈家其, 屠其璞. 中国近 100 年来 4 个年代际的气候变化特征[J]. 气象学报, 1995, 53(4): 431-439. (SHI Neng, CHEN Jiaqi, TU Qipu. 4-phase climate change features in the last 100 years over China[J]. Acta Meteorologica Sinica, 1995, 53(4): 431-439. (in Chinese))
- [21] 魏凤英. 现代气候统计诊断与预测技术[M]. 北京: 气象出版社, 2007.
- [22] 王顺久. 长江上游川江段气温、降水及径流变化趋势分析[J]. 资源科学, 2009, 31(7): 1142-1149. (WANG Shunjiu. Changing pattern of the temperature, precipitation and runoff in Chuanjiang section of the Yangtze river[J]. Resources Science, 2009, 31(7): 1142-1149. (in Chinese))
- [23] 吴洪宝, 吴蕾. 气候变率诊断和预测方法[M]. 北京: 气象出版社, 2005.
- [24] 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.
- [25] TORRENCE C, COMPO G P. A practical guide to wavelet analysis[J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 1998, 79(1):61-78.
- [26] 杨富程, 夏自强, 黄峰, 等. 额尔齐斯河流域降水变化特征[J]. 河海大学学报:自然科学版, 2012, 40(4): 432-437. (YANG Fucheng, XIA Ziqiang, HUANG Feng, et al. Variation characteristics of precipitation over Irtysh River Basin[J]. Journal of Hohai University: Natural Sciences, 2012, 40(4): 432-437. (in Chinese))
- [27] 刘健, 林琳, 陈学群, 等. 黄河三角洲地区降水时序变化特征研究[J]. 水资源保护, 2012, 28(1): 22-28. (LIU Jian, LIN Lin, CHEN Xuequn, et al. Characteristics of variation of precipitation time series in Yellow River Delta[J]. Water Resources Protection, 2012, 28(1): 22-28. (in Chinese))
- [28] 孙霞, 吴自勤, 黄昀, 分形原理及其应用[M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2003.
- [29] 陈彦光. 基于 Matlab 的地理数据分析[M]. 北京: 高等教育出版社, 2012.
- [30] 潘雅婧, 王仰麟, 彭建, 等. 基于小波与 R/S 方法的汉江中下游流域降水量时间序列分析[J]. 地理研究, 2012, 31(5): 811-820. (PAN Yajing, WANG Yanglin, PENG Jian, et al. Precipitation change in middle and lower reaches of Hanjiang river: based on wavelet analysis and R/S analysis[J]. Geographical Research, 2012, 31(5): 811-820. (in Chinese))
- [31] 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:工学报, 2002, 35(2): 10-12. (WANG Xiaoli, HU Baoqing, XIA Jun. R/S analysis method of trend and aberrance point on hydrological time series[J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2002, 35(2): 10-12. (in Chinese))
- [32] HURST H E. Long-term storage of reservoirs[J]. Trans Am Soc Civ Eng, 1951, 116:772-785.
- [33] 江田汉, 邓莲堂. Hurst 指数估计中存在的若干问题:以在气候变化研究中的应用为例[J]. 地理科学, 2004, 24(2): 177-181. (JIANG Tianhan, DENG Liantang. Some problems in estimating a Hurst exponent: a case study of applicatings to climatic change[J]. Scientia Geographic Sinica, 2004, 24(2): 177-181. (in Chinese))
- [34] 刘宇峰, 孙虎, 原志华. 基于小波分析的汾河河津站径流与输沙的多时间尺度特征[J]. 地理科学, 2012, 32(6): 764-770. (LIU Yufeng, SUN Hu, YUAN Zhihua. Multitime scale features of runoff and sediment discharge on wavelet analysis at Hejin station of Fenhe river basin[J]. Scientia Geographic Sinica, 2012, 32(6): 764-770. (in Chinese))
- [35] 邵晓梅, 许月卿, 严昌荣. 黄河流域降水序列变化的小波分析[J]. 北京大学学报:自然科学版, 2006, 42(4): 503-509. (SHAO Xiaomei, XU Yueqing, YANG Changrong. Wavelet analysis of rainfall variation in the Yellow river basin[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 2006, 42(4): 503-509. (in Chinese))
- [36] de JONGH I L M, VERHOEST N E C, de TROCH F P. Analysis of a 105-year time series of precipitation observed at Uccle, Belgium[J]. International Journal of Climatology, 2006, 26(14):2023-2039.
- [37] 刘东, 付强. 基于小波变换的三江平原低湿地井灌区年降水序列变化趋势分析[J]. 地理科学, 2008, 28(3): 380-384. (LIU Dong, FU Qiang. Variation trend analysis of annual precipitation series based on wavelet transform in well-irrigation area of low-lying wetland in Sanjiang plain[J]. Scientia Geographica Sinica, 2008, 28(3): 380-384. (in Chinese))
- [38] 王兆礼, 陈晓宏, 黄国如, 等. 东江流域汛期降水序列的小波分析[J]. 人民长江, 2010, 41(2): 52-55. (WANG Zhaoli, CHEN Xiaohong, HUANG Guoru, et al. Wavelet analysis of rainfall series during flood season in Dongjiang river basin[J]. Yangtze River, 2010, 41(2): 52-55. (in Chinese))