

柘溪水库流域降水特征及旱涝成因分析

郭海峰^{1,3}, 刘瑞琪¹, 刘祥², 廖春花¹

(1. 湖南省气象服务中心, 湖南 长沙 410118; 2. 重庆市气象服务中心, 重庆 401147;
3. 气象防灾减灾湖南省重点实验室, 湖南 长沙 410118)

摘要:利用 CIMISS 平台提供的降水资料以及 ERA-Interim 再分析资料,通过趋势分析、滑动 t 检验、小波分析、EOF 分解等方法,对 1971—2016 年柘溪流域降水时空变化特征以及旱涝年降水差异的成因进行了分析。结果表明:柘溪水库流域月平均降水量以 4、5、6 月为最多;年平均降水量呈现逐渐增加的趋势,其中夏季降水增加较快,而春季降水则呈现出下降的趋势;20 世纪 90 年代初有一个降水增多的突变;柘溪水库流域降水空间分布不均,西北多、东南少,年平均大雨日数也呈现出同样的分布形态。在涝年,西太平洋副高偏西、偏北,东亚大槽偏强,我国南方地区存在异常的西南气流,低纬地区东风系统异常活跃,水汽输送较强。在旱年,情况与之相反。

关键词:流域;降水特征;小波分析;滑动 t 检验

中图分类号: P461

文献标识码: A

文章编号: 1000-0852(2022)02-0096-06

0 引言

在全球变暖的背景下,许多地区长久以来较为稳定的气候特征正在发生着变化,极端天气事件不断增多。黄荣辉等^[1]利用观测资料研究发现,1976 年后华北夏季降水明显减少,持续性干旱灾害增加,而长江和江淮流域夏季降水增多,洪涝灾害频发,这与赤道中、东太平洋海温异常升高出现“类似厄尔尼诺型”分布有关。相对于全国平均的气候变化,水库流域的降水变化与国计民生的关系更为紧密,水库在防洪、发电、灌溉等方面都扮演着重要角色,而了解不同水库所在流域的降水特征以及变化趋势,对水库调度、拦洪蓄洪以及电力保障等方面都有重要作用,很多学者针对不同流域,研究了其气候变化趋势^[2-3]。张硕等^[4]、刘俊萍等^[5]利用滑动 t 检验分别对漠河市及渭河流域宝鸡段的气温及降水进行了突变分析,得到了不同研究区域年平均气温及年降水量近年来的突变情况,印证了全球气候变化对局地气候的影响。

柘溪水库位于湖南省安化县资水中游,随着近年

极端气候事件频发,柘溪水库上游的降雨、径流变化也随之加剧,通过柘溪水库适时拦蓄洪水,大大降低了洪水对国民经济和人民生活财产造成的威胁,可见柘溪水库在防洪、发电、灌溉等方面的日益突出作用。本文利用 1971—2016 年湖南省 97 站降水资料,从中挑选出柘溪水库流域代表站,结合 ERA-Interim 在分析资料,对流域降水的时空分布进行以及旱、涝年降水差异成因进行分析,以期对未来雨情预报提供可靠依据,给水资源合理利用提供支撑。

1 资料与分析方法

1.1 资料

采用中国气象局全国综合气象信息共享平台(CIMISS)提供的 1971—2016 年共 46 年降水资料,提取出湖南省柘溪水库所在地及上游的 11 个国家级观测站作为代表站,分析该流域近 46 年来的降水特征及其变化趋势,具体流域位置及站点分布见图 1;同时采用同期的欧洲中心提供的 ERA-Interim 的月平均再分析资料,水平分辨率为 $1^{\circ} \times 1^{\circ}$,垂直方向上有 700 和 500

收稿日期:2020-12-23

作者简介:郭海峰(1975—),男,湖南衡阳人,正高级工程师,主要从事气象服务方面的工作。E-mail: 7443086@qq.com

通信作者:刘瑞琪(1962—),男,湖南邵阳人,高级工程师,主要从事公共气象服务方面的工作。E-mail: 939931912@qq.com

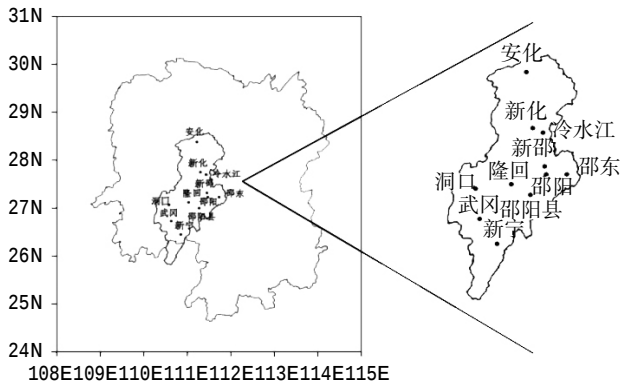


图1 柘溪水库流域位置及所选国家级气象站分布

Fig.1 The location of Zhexi reservoir basin and the distribution of selected national weather stations

hPa 等压面层上的位势高度、水平风矢量等常规气象要素,分析该流域旱涝年对应环流场的差异。

1.2 方法

1.2.1 滑动 t 检验

滑动 t 检验是通过考察两组样本平均值的差异是否显著来检验突变。给定显著性水平 α ,根据 t 分布表得到临界值 t_α ,若 $|t| < t_\alpha$,则认为在基准点前后的两序列均值无显著变化,否则则认为在该基准点时刻出现了突变。

1.2.2 Morlet 小波分析

小波分析实际是是将一维时间序列分为时域和频域并在两个方向上展开的一种统计学方法^[6],可以应用于对气象和气候系统的时频结构进行详细分析并提取有价值信息。气象中常用的母小波分析为两种,分别是 Morlet 小波和墨西哥帽(Mexican hat)小波。本文选用 Morlet 小波。

1.2.3 经验正交函数分解(EOF)

主成分分析方法应用到气象领域中后被称之为经验正交函数(Empirical Orthogonal Function, EOF)方法^[7],能对各种分布不规则的气象要素场进行时空场分解,分解后的变量场的信息能够很容易的集中在前几个模态上,可有效反映气象要素时空场的变化特征。目前,EOF 方法已经广泛应用在大气科学领域的各项研究工作中。

2 柘溪水库流域降水时空分布特征分析

2.1 时间分布特征

柘溪水库流域位于亚热带季风区,降水随季节变化明显,将 1971—2016 年逐月最大降水量、平均降水

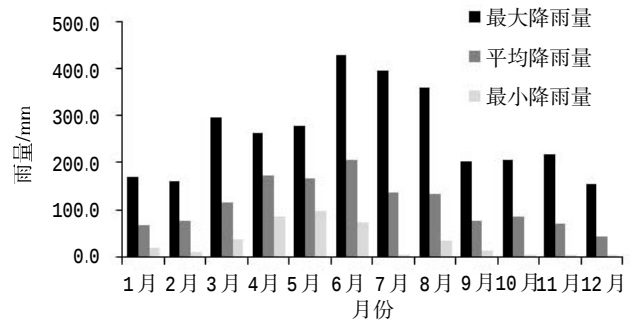


图2 1971—2016 年柘溪水库流域逐月降水量分布特征

Fig.2 The distribution characteristics of monthly precipitation in Zhexi reservoir basin during 1971—2016

量、最小降水量进行统计(见图 2),发现全年降水主要集中在 3—8 月,累计降水量占全年总降水量的 68.8%,其中 4、5、6 月为降水最多的三个月,占全年总降水量的 40.2%,降水最少的三个月为 11、12 和 1 月,只占全年总降水量的 13.5%。

对 1971—2016 年柘溪流域 11 个观测站总的年平均降水量进行统计(见图 3),发现与湖南省的年平均降水变化类似(邝美娟等^[8]),二者相关系数达到了 0.877,超过了 0.01 的显著性水平。柘溪水库流域降水也存在比较明显的年际变化特征,降水最少的年份为 2011 年,年降水量 944.2 mm,最多的年份为 1994 年,年降水量 1975.3 mm。对年平均降水序列进行线性拟合,发现近 46a 来,年降水量呈现逐渐增加的趋势,线性增加率为 5.8 mm/10a。从五年滑动平均来看,前 20 年降水相对平稳,20 世纪 90 年代开始呈现增加的趋势,到 21 世纪初又呈现下降的趋势,近年来,年降水以增加的趋势为主。分别对四季(春季:3—5 月;夏季 6—8 月;秋季 9—11 月;冬季:12—次年 2 月)降水

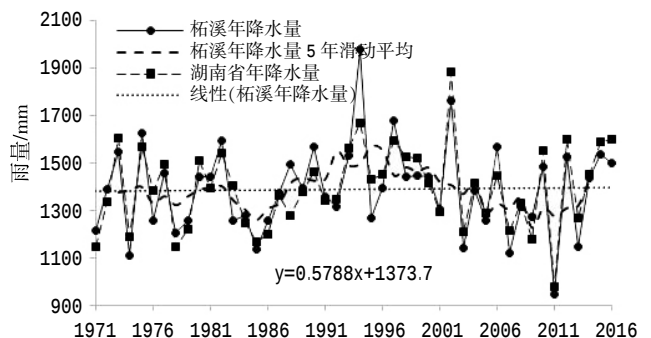


图3 1971—2016 年柘溪水库流域年平均降水量统计

Fig.3 The statistics of annual average precipitation in Zhexi reservoir basin during 1971—2016

的时间序列进行分析(图略),发现夏季、秋季、冬季逐年线均呈现增加的趋势,而春季降水则呈现相反的趋势。

用滑动 t 检验方法对 1971—2016 年柘溪水库流域年平均降水变化序列进行突变检验及显著性分析(见图 4),根据图 3 中 5 年滑动平均的分布特征,分别取子序列长度 $n_1=n_2=5$,自由度为 $n_1+n_2-2=8$,确定显著性水平 $\alpha=0.01$,查表得 $t_{0.01}=\pm 3.36$,由图 4 可知,1975 年以来, t 统计量在 20 世纪 90 年代初超过了 0.01 显著性水平,说明 46 年来柘溪水库流域年降水量在该时段出现了明显的突变,且此处 t 统计量为正值,说明降水出现了由少变多的突变。

由上述分析可知,柘溪水库流域降水存在一定的年际和年代际变化特征,为了分析该流域年降水量的周期变化特征,采用 Morlet 小波变换法对近 46 年来柘溪水库流域降水进行分析(见图 5),柘溪水库流域年降水量的小尺度变化周期嵌套在大尺度变化周期内,周期变化较为复杂,可将其分为 2 个时段,1993 年之前主要表现为 2 个特征时间尺度,分别为 7 年以及 21 年,在 7 年的时间尺度上,经历了降水偏少-偏多-偏少-偏多-偏少-偏多这样三个周期的变化,在 23 年时间尺度上经历了年降水量由多到少的变化;1993 年之后同样表现为 2 个特征时间尺度,分别为 2—3 年以及 21 年左右,在 2—3 年的时间尺度上,经历了偏多-

偏少这样 7 个变换周期,在 23 年时间尺度上经历了年降水量由多到少再到多的变化。

2.2 空间分布特征

对近 46 年来柘溪流域年平均降水量空间分布进行统计(见图 6(a)),发现柘溪流域年平均降水量空间分布不均,流域中部偏南邵阳市附近降水较少,北部安化县附近降水较多,二者年平均降水量之差在 400 mm 左右。通过对年平均大雨日数(24 h 降水量超过 25 mm)的统计来看(见图 6(b)),与年平均降水量有相似分布特征,北部大雨日数多、南部大雨日数少,说明西北地区降水过程较多、雨强较强。柘溪水库位于益阳市安化县境内(坝址位置如图 6“▲”所示),恰是流域的降水中心区,水库的蓄水发电有着天然的优势,但同时暴雨洪涝出现的频次也较多,所以精细化的降水预报以及相关气象服务对保障水库及下游城市居民安全有着重要的意义。

前文提到,柘溪流域年降水量分布主要集中在 4、5、6 三个月,为进一步分析其空间变化特征,对逐年 4、5、6 三个月的累计降水量进行 EOF 分解,表 1 为 4、5、6 月累计降水量进行 EOF 分解后各模态的方差贡献及累计方差贡献,可以看到前 10 个模态的累计方差贡

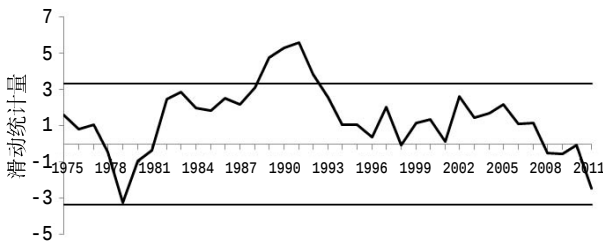


图 4 柘溪水库流域年平均降水滑动 t 统计量曲线
Fig.4 The moving t -test statistics curve of annual average precipitation in Zhexi reservoir basin

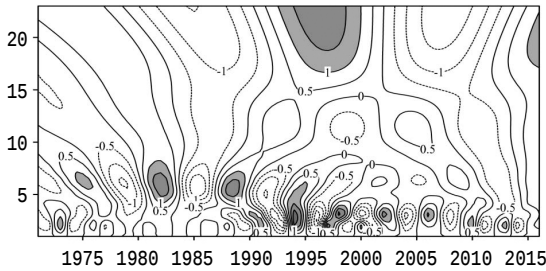


图 5 柘溪水库流域年平均降水量的 Morlet 小波系数实部等值线
Fig.5 The real contour of Morlet wavelet coefficients of annual average precipitation in Zhexi reservoir basin

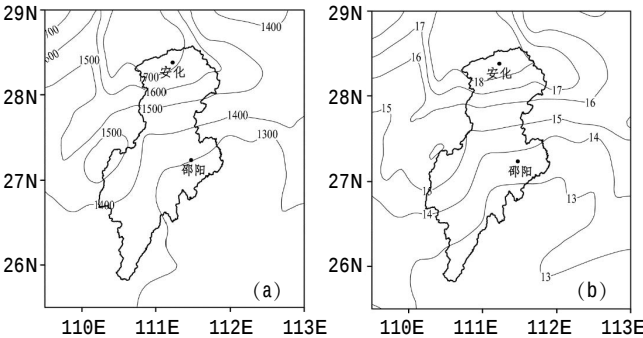


图 6 1971—2016 年柘溪流域空间分布特征统计
Fig.6 The statistics of spatial distribution characteristics in Zhexi reservoir basin during 1971-2016

表 1 前 10 个模态方差贡献及累计方差贡献百分比
Table1 The percentage of variance contribution and cumulative variance contribution in the first ten modes

模态	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
个别方差贡献/%	58.7	18.6	6.3	4.3	3.6	2.5	1.8	1.4	1.1	1.1
累计方差贡献/%	58.7	77.3	83.5	87.9	91.4	93.9	95.7	97.1	98.2	99.3

献达 99.3%, 其中第一模态为 58.7%, 第二模态为 18.6%, 前 2 个模态累计方差贡献占 77.3%, 所以柘溪流域 4、5、6 月累计降水的空间分布以前 2 个模态为主。

图 7、图 8 为 1971—2016 年柘溪流域 4、5、6 月累计降水量 EOF 分解第一模态与第二模态空间向量场和对应的标准化时间序列。第一模态的空间向量场(见图 7(a))反映出柘溪流域全区降水一致的特征, 在湖南省汛期降水全区一致^[9]的大背景下, 柘溪流域降水也主要表现出全区一致偏多或一致偏少的特征, 对其时间序列进行标准化处理(见图 8(a)), 所得序列绝对值越大说明越典型, 史霖等^[10]选取 1 作为临界值, 为得到较突出的典型年份, 本文亦选取 1 作为临界值, 将

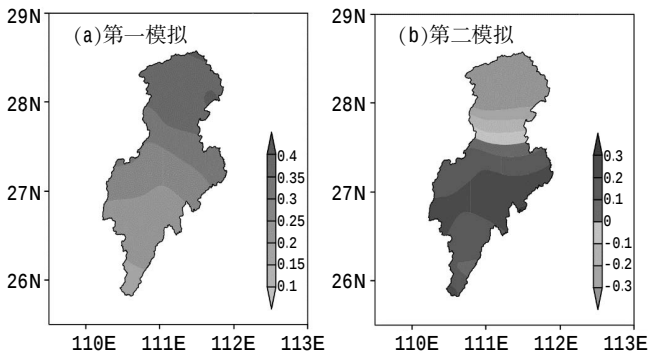


图 7 1971—2016 年柘溪流域 4—6 月空间向量场

Fig.7 The spatial vector fields in Zhexi reservoir basin during 1971—2016 from April to June

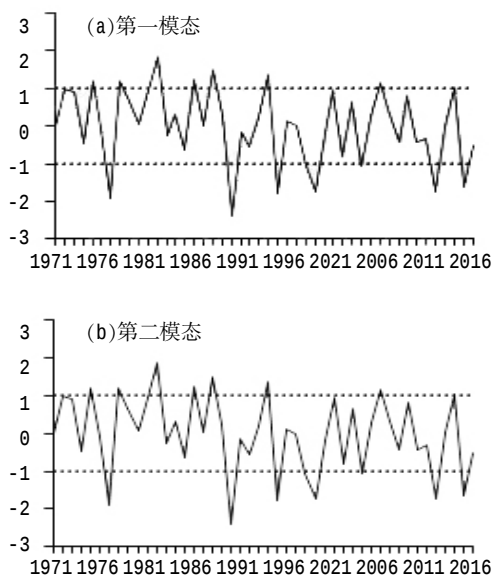


图 8 1971—2016 年柘溪流域 4—6 月标准化时间序列

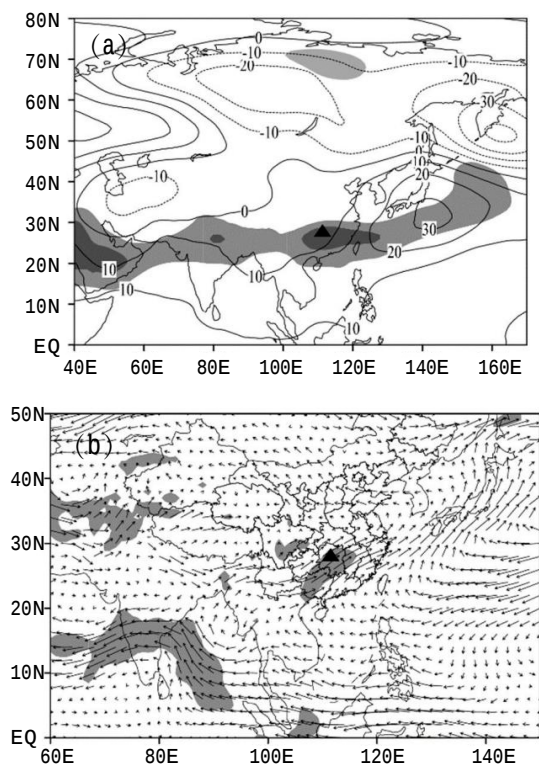
Fig.8 The standardized time series in Zhexi reservoir basin during 1971—2016 from April to June

大于 1 的年份作为典型涝年, 小于 -1 的年份作为典型旱年, 可以得出近 46 年来典型涝年有: 1973 年、1975 年、1977 年、1995 年、1998 年、1999 年、2002 年、2010 年; 典型旱年有: 1985 年、1991 年、1996 年、2007 年、2008 年、2011 年、2013 年。第二模态的空间向量场(见图 7(b))反映出流域降水南北反向的特征, 流域北部临近雪峰山脉, 多为山地丘陵地形, 南部连接衡邵盆地, 地势相对平坦, 地形因素对降水的分布有一定影响, 所以造成了降水南北反向的特征。

3 柘溪水库流域旱涝年成因分析

根据第一模态的时间序列, 分别选取 5 个涝年与 5 个旱年对比其 500 hPa 高度场, 所选涝年为 1995 年、1998 年、1999 年、2002 年、2010 年, 所选旱年为 1985 年、2007 年、2008 年、2011 年、2013 年。将所选涝年与旱年 4、5、6 月 500 hPa 高度场合成之后做差(见图 9(a)), 发现在东亚地区由中低纬到中高纬呈现“+”的分布, 中低纬地区, 相比于旱年, 涝年副高偏西、偏北, 强度偏强, 有利于副高边缘的气流将水汽向我国南方地区输送, 也有利于引导台风西行, 使得流域降水整体偏多; 中高纬地区, 相比于旱年, 涝年东亚中高纬整体高度场偏低, 在鄂霍茨克海附近有负差值中心, 说明涝年中高纬地区高度场偏低, 东亚大槽偏强, 冷空气较活跃, 有利于冷空气南下与暖空气结合使得降水增多。同时在我国南方地区, 这种高度场的差异通过了置信度为 0.05 的显著性检验, 部分地区甚至通过了置信度为 0.01 的显著性检验, 说明这种差异在我国南方地区是显著可信的。

将所选涝年与旱年 4、5、6 月 700 hPa 风场合成之后做差(见图 9(b)), 发现在我国长江以南的大部分地区存在异常的西南气流, 说明涝年对应 700 hPa 西南气流较旱年更为强盛, 有利于西南急流的建立和维持, 为对流层中低层输送充足的水汽并为降水的发生发展提供动力条件, 同时在我国南海到华南沿海有异常的东风气流, 说明涝年较旱年东风带系统更为活跃, 柘溪水库流域所在位置亦会收到东风带系统影响, 导致降水偏多。利用 F 统计量, 根据施能等^[14]提出的合成风差值场统计检验的方法对旱、涝年差值风场进行检验, 结果表明在长江以南到华南西部大部分地区都通过了置信度为 0.05 的 F 检验, 说明这种差异在柘溪水库流域(坝址位置如图 6“▲”所示)上空是显著存在的。



注:a:浅色和深色阴影分别表示通过了置信度为0.05和0.01的t检验,单位:gpm;b:阴影表示通过了置信度为0.05的F检验,单位: $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。

图9 涝年与旱年500hPa高度差值场及700hPa风场差值场

Fig.9 The 500hPa difference height field and 700hPa difference wind field in flood and drought years

4 小结与讨论

本文统计了柘溪水库流域近46年以来的降水特征,得到了其降水趋势以及分布情况,通过EOF分解,选出旱、涝年各5年,将涝年与旱年500hPa高度场与700hPa风场的差值场进行分析,简要讨论了其降水差异的成因,主要结论如下:

(1)柘溪水库流域月平均降水量以4、5、6月为最多;近46年来,柘溪水库流域年降水量呈现逐渐增加的趋势;20世纪90年代初期,有一个降水增多的突变,且这种增加的趋势是显著的;近46年来流域降水存在准21年、准7年以及准2~3年的降水周期变化,从准21年的周期变化来看,该流域正处于降水偏多的时段。

(2)柘溪水库流域降水空间分布不均,西北多、东南少,年平均大雨日数也呈现出同样的分布形态,说明西北部地区降水过程较多、雨强较强,有利于柘溪水库的蓄水;对流域46年来4、5、6月累计降水进行EOF分解,得到以第一模态全区一致型为主,第一模态方差

贡献占58.7%。

(3)根据第一模态的空间场和时间序列的关系,选出涝年与旱年各5年,对其500hPa高度场和700hPa风场做差,发现在500hPa高度场上涝年副高偏强、偏西、偏北,东亚大槽偏强,有利于冷暖空气交汇产生降水,在700hPa风场上涝年我国南方地区存在异常的西南气流,有利于水汽的输送,同时低纬地区东风系统异常活跃,对流域降水的增多亦有一定影响。

以上主要分析了柘溪水库流域近46年以来降水的时空分布特征,为该流域的气象服务提供了大的降水背景,有利于在此基础上制作更精确的降水预报和预测,但对其旱涝年差异的分析还较简单,没有深入研究造成该流域降水的天气系统的变化,其降水成因的分析还需要接下来更为细致的分析和研究。

参考文献:

- [1] 黄荣辉,蔡榕硕,陈际龙,等. 我国旱涝气候灾害的年代际变化及其与东亚气候系统变化的关系[J]. 大气科学, 2006,30(5):730-743. (HUANG Ronghui, CAI Rongshuo, CHEN Jilong, et al. Interdecadal variations of drought and flooding disasters in China and their association with the East Asian climate system [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2006,30(5):730-743. (in Chinese))
- [2] 张庆云, 郭恒. 夏季长江淮河流域异常降水事件环流差异及机理研究[J]. 大气科学, 2014,38(4):656-669. (ZHANG Qingyun, GUO Heng. Circulation differences in anomalous rainfall over the Yangtze River and Huaihe River valleys in Summer [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2014,38(4):656-669. (in Chinese))
- [3] 李春梅,李双成,王红亚. 贵州麦岗水库小流域降水变化特征的小波分析[J]. 地理科学进展, 2012,31(1):32-39. (LI Chunmei, LI Shuangcheng, WANG Hongya. Wavelet analysis of rainfall variations in Maigang reservoir catchment, Guizhou Province [J]. Progress in Geography, 2012,31(1):32-39. (in Chinese))
- [4] 张硕,邓博文,许瑶瑶,等. 1958~2019年漠河市气温及降水突变分析[J]. 气候与环境研究, 2020,25(6):667-676. (ZHANG Shuo, DENG Bowen, Xu Yaoyao, et al. Abrupt change of temperature and precipitation in Mohe of China from 1958 to 2019 [J]. Climatic and Environmental Research, 2020,25(6):667-676. (in Chinese))
- [5] 刘俊萍,周俊杰,邹先柏. 渭河流域宝鸡段气温及降水突变分析[J]. 浙江工业大学学报, 2018,46(4):423-428,472. (LIU Junping, ZHOU Junjie, ZOU Xianbai. Mutation analysis of temperature and precipitation of Weihe river basin in Baoji section [J]. Journal of Zhejiang University of Technology, 2018,46(4):423-428,472. (in Chinese))
- [6] WENG H, LAU K M. Wavelets period doubling and time frequency localization with application to organization of convection over the tropical western Pacific [J]. Journal of Atmospheric Sciences, 1994,51(17):2523-2541.

- [7] 吴洪宝. 气候变率诊断和预测方法[M]. 北京: 气象出版社, 2005. (WU Hongbao. Methods for Diagnosing and Forecasting Climate Variability [M]. Beijing: China Meteorological Press, 2005. (in Chinese))
- [8] 邝美娟, 谢红霞, 隋兵, 等. 湖南省近 50 年降水特征分析[J]. 水土保持研究, 2013,20(5):145-149. (KUANG Meijuan, XIE Hongxia, SUI Bing. Analysis on spatiotemporal characteristics of precipitation in Hu'nan Province from 1961 to 2010 [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2013,20(5):145-149. (in Chinese))
- [9] 刘会玉, 林振山, 张明阳. 湖南汛期降水异常的时空分布特征研究[J]. 热带气象学报, 2004,20(4):409-418. (LIU Huiyu, LIN Zhenshan, ZHANG Mingyang. Space-time characteristics of precipitation anomaly during the raining season in Hunan [J]. Journal of Tropical Meteorology, 2004,20(4):409-418. (in Chinese))
- [10] 史霖, 陈丽娟, 李维京, 等. 2015 年汛期我国南方季节内东西反相旱涝型及环流特征[J]. 气象, 2017,43(6):705-715. (SHI Lin, CHEN Lijuan, LI Weijing, et al. The west-east reverse pattern of intraseasonal rainfall and corresponding circulations in the 2015 flood season [J]. Meteorological Monthly, 2017,43(6):705-715. (in Chinese))
- [11] 施能, 顾骏强, 黄先香, 等. 合成风场的统计检验和蒙特卡洛检验[J]. 大气科学, 2004,28(6):950-956. (SHI Neng, GU Junqiang, HUANG Xianxiang, et al. Significance test and Monte Carlo test used in composite analysis of window field and applications [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2004,28(6):950-956. (in Chinese))

Analysis of Precipitation Characteristics and Causes of Drought & Flood in Zhexi Reservoir Basin

GUO Haifeng^{1,3}, LIU Ruiqi¹, LIU Xiang², LIAO Chunhua¹

(1. Hunan Meteorological Service Center, Changsha 410118, China; 2. Chongqing Meteorological Service Center, Chongqing 401147, China; 3. Hunan Province Key Laboratory of Preventing-diminishing Meteorological Disasters, Changsha 410118, China)

Abstract: Based on precipitation data from China integrated meteorological information service system and ERA-Interim reanalysis data, this paper analyzed the precipitation characteristics and causes of drought & flood in Zhexi reservoir basin during 1971-2016 by using trend analysis, moving t-test, wavelet analysis and empirical orthogonal function. The results show that the average monthly precipitation of the basin reached the maximum point during April-June. The average annual precipitation showed an upward trend, with a rapid increase in summer and a downward trend in spring. There was an abrupt increase of precipitation in the early 1990s. The spatial distribution of precipitation was uneven with the northwestern part witnessing more precipitation than the northwestern part. The same distribution pattern was observed in the annual average number of days of heavy rain. In flood years, the position of western Pacific subtropical high tended to be more westward and northward, and the East Asia major trough was stronger. There was an abnormal southwesterly airflow in southern China and an unusually strong easterly wind burst in the low latitude area. Meanwhile, the water vapor transport was stronger. In drought years, circulation anomalies in the opposite sense occurred.

Keywords: basin; precipitation characteristics; wavelet analysis; moving t-test

(上接第 95 页)

Analysis of Drought Variation Characteristics and Causes in Jinzhong Area Based on Z-index

WU Weiwei

(Jinzhong Water Conservancy Bureau, Jinzhong 030600, China)

Abstract: In order to reveal the formation mechanism and development trend of drought in Jinzhong area, by sorting out the drought years recorded in historical documents, this paper analyzed the frequency of severe drought and the drought chain in more than 100 years, and then explained the seasonal, interannual and decadal drought changes by applying linear regression, Z-index method and wavelet analysis based on the monthly precipitation data of each rainfall station in Jinzhong region from 1958 to 2020, and analyzed the characteristics and laws of drought in three key periods of agriculture when combined with the disaster area and yield reduction over the years. Finally, the causes of drought were analyzed by the factors of topography, climate characteristics, atmospheric circulation and river network density, which can provide reference for drought relief and disaster reduction.

Keywords: Jinzhong; drought; Z index; wavelet analysis; atmospheric circulation