

太湖流域 61 年来降水时空演变规律分析

吴浩云¹, 王银堂², 胡庆芳², 刘 勇²

(1. 水利部太湖流域管理局, 上海 200434;

2. 南京水利科学研究院水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 江苏 南京 210029)

摘要: 基于太湖流域 1951~2011 年长系列降水资料, 采用正交函数分解法、Spearman 和 Mann-Kendall 非参数统计检验法、连续小波分析方法等, 从空间分布、趋势性、周期性和突变性等方面系统剖析了 61 年来太湖全流域及各水利分区降水的时空演变规律。结果表明, 太湖流域降水表现为两种空间分布类型, 一类是年降水量振幅高值中心位于以市岭站为中心的浙西山区以及湖西区的长兴~宜兴一线, 第二类表现为年降水量以湖区为分界呈南北相反的分布型态。61 年来, 太湖全流域和各水利分区年降水量、汛期降水量及年最大 30 日降水量均不存在显著的变化趋势, 但具有较明显的丰枯周期。本文研究结果可为流域开展洪水资源利用、制订调度方案、应对气候变化提供科学依据。

关键词: 太湖流域; 降水; 时空演变规律; 经验正交分解; 非参数检验; 小波分析

中图分类号: TV213

文献标识码: A

文章编号: 1000-0852(2013)02-0075-07

流域水文要素演变规律分析是认识流域水文循环的前提和基础, 也是流域防洪调度和水资源管理的重要组成部分, 对于分析流域水资源未来情势变化、制订流域水资源利用的科学管理和决策具有重要意义。

太湖流域地跨苏、浙、沪、皖四省市, 位于长江三角洲核心区域, 流域面积 36 895 km², 是典型的平原河网地区, 也是我国经济社会最发达、城镇化水平最高的地区之一。太湖流域在气候上属于典型的亚热带季风气候区, 年内降水分布极不均匀。夏季受海洋气团控制, 盛行东南季风, 水汽丰沛, 降水丰富, 汛期 5 个月(5~9 月) 多年平均降水量为 710 mm, 约占全年降水量的 60%。发生在 6~7 月的梅雨是导致流域性洪水的主要降水形式, 而台风带来的高强度、集中性降水过程也会给太湖流域防洪安全造成严重威胁^[1]。近年来, 全球气候变化的影响以及快速城镇化进程中强烈的人类活动对流域水文情势的影响越来越显著, 使得流域水资源和防洪调度更为复杂。太湖流域雨量测站网比较密集, 降水观测相对完善, 这是分析太湖流域水文水资源情势的基本依据。依据 60 余年的实际观测数据, 研

究和掌握太湖流域降水的时空分布演变规律, 不仅是评价气候变化和人类活动对流域水资源影响的基础工作, 而且也做好防洪除涝和水资源调度管理的前提^[2-3]。

本文采用太湖流域长系列降水实际观测数据, 通过多种数理统计分析方法, 从空间分布、趋势性、周期性和突变性等方面系统分析全流域及其水利分区降水特征量的时空演变规律, 以更加全面认识太湖流域降水要素变化的事实及今后的可能变化, 为太湖流域水资源综合管理提供科学依据。

1 数据资料与研究方法

1.1 数据资料

本文收集了太湖流域长系列降水资料, 包括全流域 1951~2011 年共 61 年逐日面降水量资料, 7 个水利分区(包括湖西区、武澄锡虞区、阳澄淀泖区、太湖湖区、杭嘉湖区、浙西区、浦东浦西区) 1951~2011 年逐日面降水量资料, 以及 7 个水利分区 98 个雨量代表站 1951~2011 年逐日降水资料, 雨量代表站其中湖西区

收稿日期: 2012-12-21

基金项目: “十二五”国家科技支撑计划项目“沿海地区适应气候变化技术开发与应用”(2012BAC21B00); 水利部公益性行业科研专项经费项目“城镇化背景下的太湖流域水文规律变化研究”(201301075); 水利部科技推广计划项目“太湖流域洪水资源化利用的推广应用”(TG1109)

作者简介: 吴浩云(1963-), 男, 江苏丹阳人, 教高, 博士, 主要从事太湖流域水资源管理与研究工作。E-mail: hywu@tba.gov.cn

17个,武澄锡虞区12个,阳澄淀泖区12个,太湖湖区8个,杭嘉湖区17个,浙西区20个,浦东浦西区9个。代表性雨量站分布见图1。

全流域及各水利分区面降水系列资料采用太湖流域综合规划修编成果,雨量代表站降水资料来源于水文年鉴及太湖流域管理局整编资料。在资料分析中,对长系列降水观测资料进行了质量控制,包括一致性分析处理、可靠性分析、特异值处理和代表性分析,同时对部分测站中缺测的资料进行了插补延长。

1.2 研究方法

本文采用经验正交函数(Empirical orthogonal function, EOF)分解^[4]、Spearman和Mann-Kendall两种秩次相关统计方法^[5]、Morlet连续小波分析^[6]对太湖流域降水要素的时空演变规律进行分析。EOF分解又称为主分量分析,是数理统计学中多变量分析的一种有效方法,本文用于分析太湖流域降水的空间分布模态;Spearman和Mann-Kendall是目前得到广泛应用的非参数统计检验方法,本文用于检验太湖流域降水的长期变化趋势;小波分析是一种时间-频率分析方法,在时频两域能反映出序列的振幅、位相和功率的局部变化特征,近年来广泛应用于多尺度水文分析研究中,并取得了良好的效果,本文采用Morlet小波分析方法对太湖流域降水系列的周期性及突变性进行诊断。上述

这些方法的具体原理和步骤可详见相关文献,此处不再赘述。

2 太湖流域降水空间分布规律

分析太湖流域降水的空间分布规律,选用的降水系列为太湖流域98个雨量代表站的年降水量和年最大1d降水量,资料系列为1951~2011年。

对这两个统计系列进行经验正交函数(EOF)分解,得到方差贡献率较大的模态空间分布图(见图2),其能够反映太湖流域年降水量和年最大1d降水量具有的空间分布类型(见图3)。从分析结果可以看出,在流域年降水量空间分布中,第一模态(见图2a)占主导地位,表现为年降水量振幅高值中心(年降水分布中心)主要位于以市岭站为中心的浙西山区以及湖西区的长兴~宜兴一线;第二模态(见图2b)则表现为年降水量以湖区为分界呈南北相反的分布型态,即南部多、北部少,或者北部多、南部少的分布型式,反映出流域南部地区年降水量的空间差异。而从流域年最大1d降水量的空间分布可以看出,方差贡献率较大的两个模态的空间分布几乎相同,都呈现南高北低的分布形式,最大1d降水中心主要位于浙西山区。

图4为年降水量模态时间系数,表达了降水空间



图1 太湖流域代表性雨量站分布图

Fig.1 Distribution of the representative rainfall stations in the Taihu Lake basin

分布类型的时间变化特征,系数绝对值越大,表明这一时段内这种降水空间分布类型越典型。从太湖流域年降水量第一模态时间系数变化来看,20 世纪 80、90 年代第一类型降水空间分布出现次数最多,而从系数绝对值的变化可以看出,1999 年降水空间分布(见图 5)是非常典型的第一类型降水空间分布,其降水中心主要位于浙西山区及长兴平原一带。

3 太湖流域降水时程特征分析

3.1 降水长期演变趋势分析

分析太湖流域降水的长期演变趋势,选用的降水统计特征系列包括全流域和 7 个水利分区的年最大 1d 降水量、年最大 3d 降水量、汛期降水量和年降水量,资料系列为 1951~2011 年共 61 年。图 6 给出了全流域面降水量变化趋势图,其它水利分区的雨量变化趋势图从略。

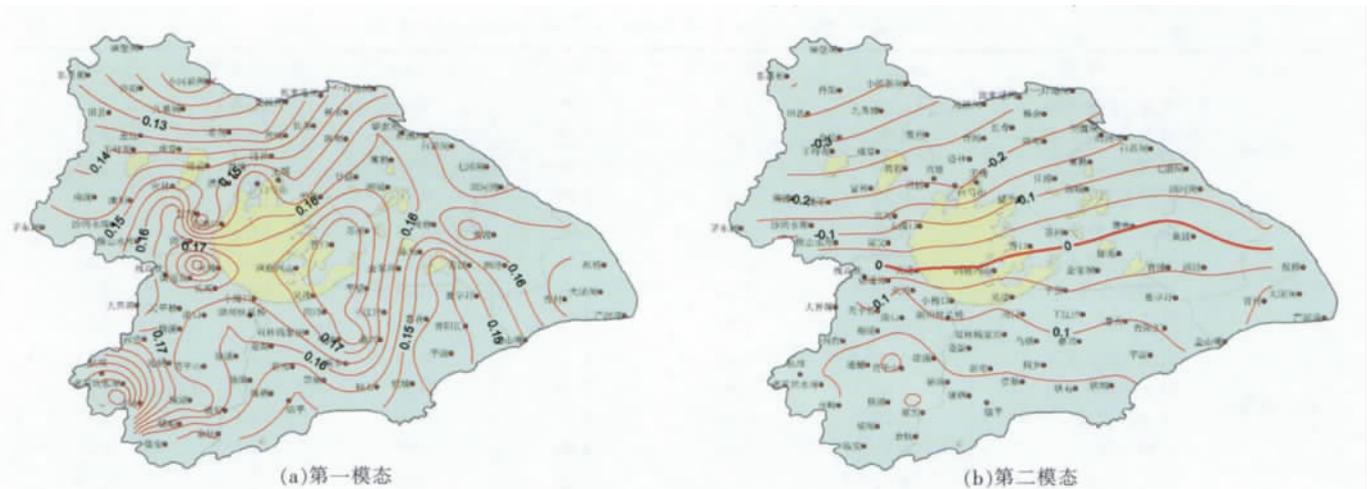
采用 Spearman 和 Mann-Kendall 秩次相关检验方法,对全流域及各水利分区年最大 1d、年最大 3d、汛期和年降水量系列的变化趋势进行了显著性检验,结果如表 1 所示。从图 6 和表 1 可以看出,尽管在 1951~2011 年 61 年期间,降水统计特征系列呈现一定下降态势,但其秩次相关系数未超过 90%和 95%置信度下的临界值,这表明 61 年来,太湖全流域及各水利分区降水未发生显著的变化趋势。

3.2 降水周期性和变异特征分析

3.2.1 年降水量系列的周期性和变异特征分析

采用 Morlet 连续小波分析方法对全流域及各水利分区年降水量的周期演化及丰枯变异特征进行分析。年降水量的连续小波系数等值线图和小波方差图如图 7 所示,其它水利分区的连续小波系数等值线图和小波方差图限于篇幅从略。由图 7 分析可知:

- (1)在 29a 的时间尺度上,太湖流域年降水量周



(a)第一模态

(b)第二模态

图 2 太湖流域年降水量 EOF 空间分布模态

Fig.2 EOF modes spatial distribution of the annual precipitation in the Taihu Lake basin.



(a)第一模态

(b)第二模态

图 3 太湖流域年最大 1d 降水空间分布类型

Fig.3 EOF modes spatial distribution of the maximum daily precipitation in the Taihu Lake basin.

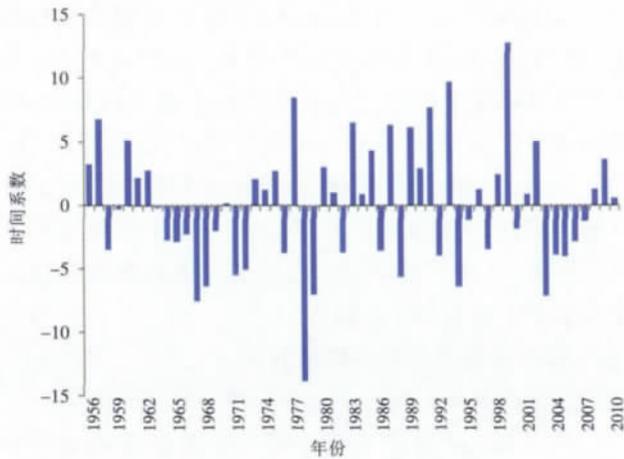


图4 太湖流域年降水量第一模态时间系数

Fig.4 The time coefficient of the first EOF mode for the annual precipitation in the Taihu Lake basin



图5 1999年太湖流域年降水空间分布

Fig.5 Spatial distribution of annual precipitation in the Taihu Lake basin in 1999

表1 太湖流域及各水利分区降水量趋势显著性检验结果

Table1 The time variation tendency substantiality analysis results by non-parametric tests for the annual precipitation in the Taihu Lake basin and its seven sub-areas

分区	变量	Kendall 值	90%临界值	95%临界值	Spearman 值	90%临界值	95%临界值
全流域	最大 1d 降水量	0.60	1.64	1.96	0.56	1.67	2.23
	最大 3d 降水量	0.09	1.64	1.96	0.05	1.67	2.23
	汛期降水量	0.50	1.64	1.96	0.51	1.67	2.23
	年降水量	0.35	1.64	1.96	0.45	1.67	2.23
湖西区	最大 1d 降水量	0.26	1.64	1.96	0.24	1.67	2.23
	最大 3d 降水量	0.12	1.64	1.96	0.13	1.67	2.23
	汛期降水量	0.12	1.64	1.96	0.03	1.67	2.23
武澄锡虞区	最大 1d 降水量	0.05	1.64	1.96	0.13	1.67	2.23
	最大 3d 降水量	0.50	1.64	1.96	0.38	1.67	2.23
	汛期降水量	0.45	1.64	1.96	0.40	1.67	2.23
阳澄淀泖区	最大 1d 降水量	0.52	1.64	1.96	0.38	1.67	2.23
	最大 3d 降水量	0.07	1.64	1.96	0.12	1.67	2.23
	汛期降水量	0.19	1.64	1.96	0.05	1.67	2.23
太湖湖区	最大 1d 降水量	0.30	1.64	1.96	0.22	1.67	2.23
	最大 3d 降水量	0.63	1.64	1.96	0.67	1.67	2.23
	汛期降水量	0.60	1.64	1.96	0.74	1.67	2.23
杭嘉湖区	最大 1d 降水量	0.78	1.64	1.96	0.70	1.67	2.23
	最大 3d 降水量	0.26	1.64	1.96	0.26	1.67	2.23
	汛期降水量	1.05	1.64	1.96	1.10	1.67	2.23
浙西区	最大 1d 降水量	0.15	1.64	1.96	0.22	1.67	2.23
	最大 3d 降水量	0.42	1.64	1.96	0.39	1.67	2.23
	汛期降水量	1.46	1.64	1.96	1.28	1.67	2.23
浦东浦西区	最大 1d 降水量	0.96	1.64	1.96	0.84	1.67	2.23
	最大 3d 降水量	0.71	1.64	1.96	0.60	1.67	2.23
	汛期降水量	0.20	1.64	1.96	0.32	1.67	2.23
	年降水量	0.29	1.64	1.96	0.25	1.67	2.23

期变化的振幅最大。在这一时间尺度上,太湖流域年降水量系列经历了4个演变阶段,相应变异节点分别为1962年、1982年、1999年和2011年。第1阶段(1951~1962年),平均年降水量为1279mm,该时段降水总体偏丰,最大值1633mm(1954年);第2阶段(1963~1982年),平均年降水量为1096mm,降水总

体略偏枯,最小值682mm(1978年);第3阶段(1983~1999年),平均年降水量为1237mm,该时段降水又呈偏丰状态,最大值1616mm(1999年);第4阶段(2000~2011年),平均年降水量为1150mm,降水总体呈偏枯,最小值935mm(2003年)。

(2)太湖全流域年降水量显著的准周期为29a、7a

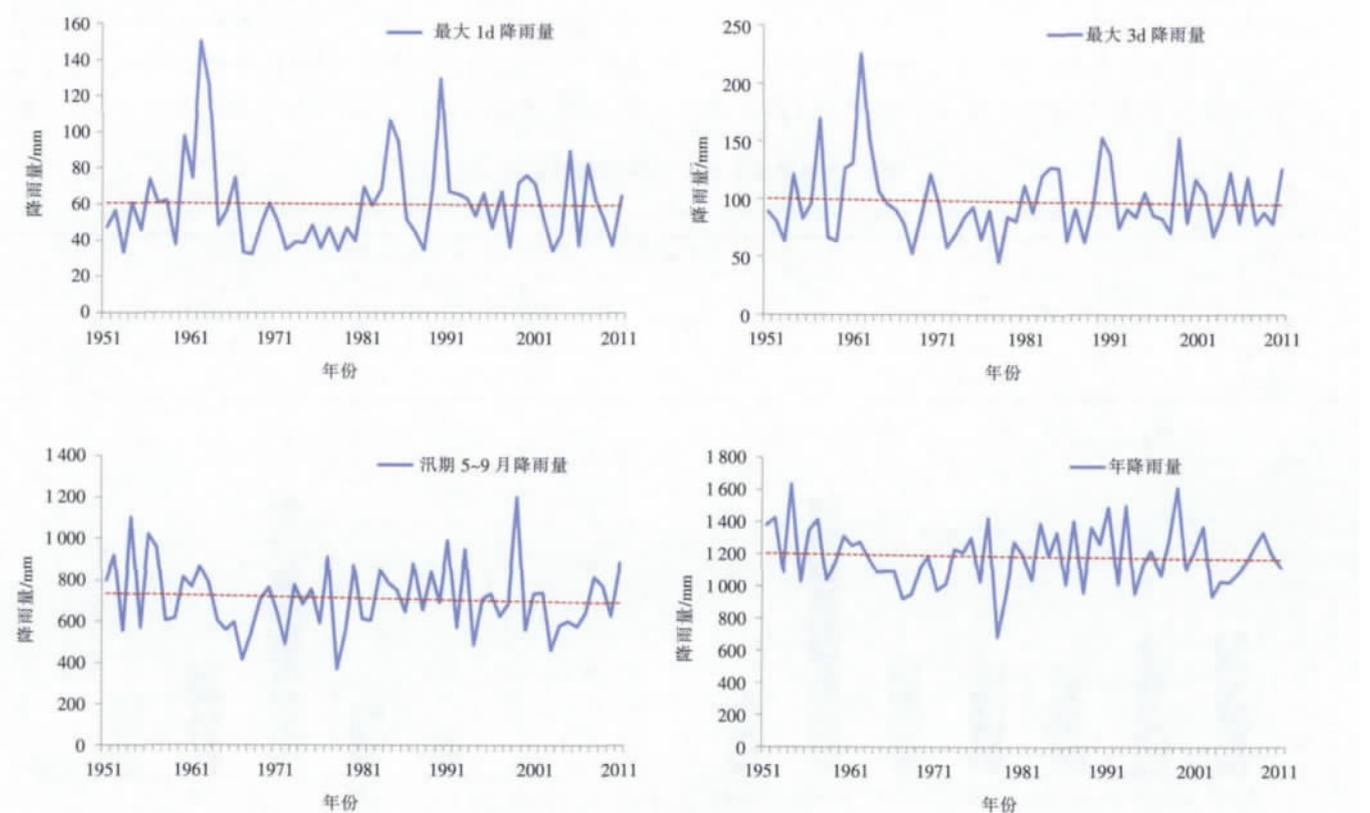
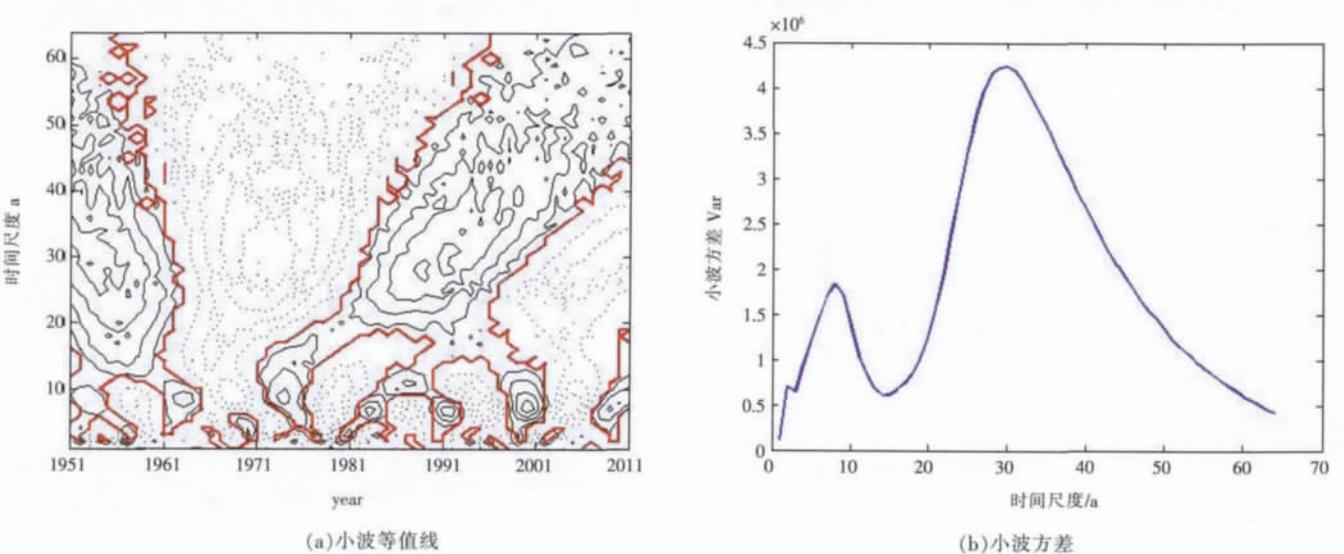


图6 太湖全流域面降水量变化趋势图

Fig.6 The variation tendency of the annual precipitation in the Taihu Lake basin



(a)小波等值线

(b)小波方差

图7 太湖流域年降水量小波系数等值线和小波方差图

Fig.7 Continuous wavelet coefficients (a) and variance (b) contour map for the annual precipitation in the Taihu Lake basin

和 2a,各水利分区的年降水量也具有相似的周期变化规律。

(3)根据 29a 的主周期,可以初步预估太湖流域及各水利分区年降水量未来一段时间的变化趋势。在近期,太湖流域及各水利分区年降水量仍可能处于相对枯水期,持续至 2016 年左右,而在之后年降水量可能会进入相对偏丰期。

3.2.2 致洪降水量系列的周期及变异特征分析

根据历年的统计资料可知,年最大 30d 降水量

是太湖流域致灾洪水的重要表征指标,其极端值是导致太湖流域严重洪涝的重要因素。利用 1951~2011 年逐日降水量资料,对全流域及各水利分区年最大 30d 降水量的变化特征进行分析,结果见表 2 和图 8、图 9。

由表 2 和图 8、9 可知,太湖流域年最大 30d 降水量均值在 284.5 mm 左右,占多年平均汛期降水量的 40%。在各水利分区中,浙西区年最大 30d 降水量最大,浦东浦西区最小,其余各分区相差不大。极值比能

表2 太湖流域年最大30d降水量特征值(mm)

Table2 The maximum 30-day precipitation characteristics in the Taihu Lake basin and its seven sub-areas(mm)

指标	湖西区	浙西区	太湖湖区	武澄锡虞区	阳澄淀泖区	杭嘉湖区	浦东浦西区	全流域
均值	295.5	338.3	286.9	293.6	285.8	288.7	274.4	284.5
最大值	698.6	752.5	729.7	680.8	595.3	642.3	699.9	621.1
最小值	86.8	169.2	128.0	99.7	103.7	142.3	123.6	127.6
极值比	8.0	4.4	5.7	6.8	5.7	4.5	5.7	4.9

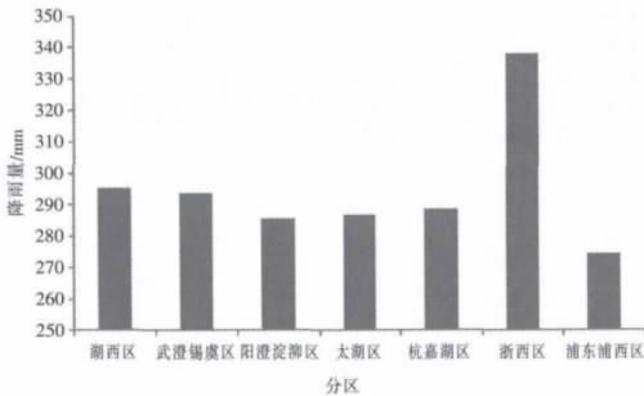


图 8 年最大 30d 降水量空间分布

Fig.8 Spatial distribution of the maximum 30-day precipitation in the Taihu Lake basin and its seven sub areas

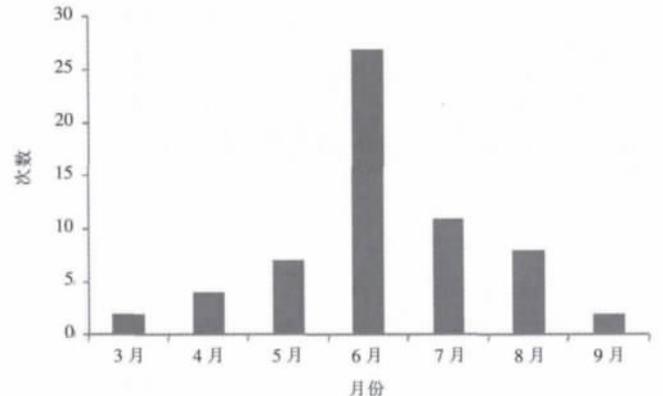
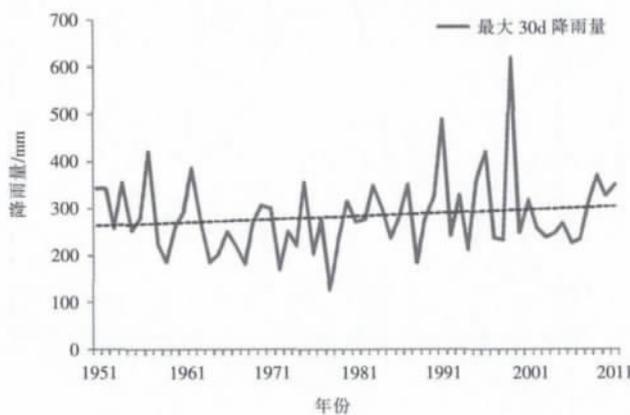
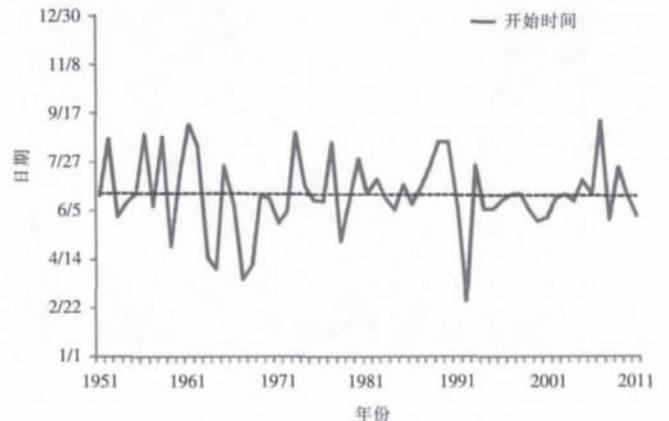


图 9 年最大 30d 降水量出现时间分布

Fig. 9 The occurrence times in different months of the maximum 30-day precipitation in the Taihu Lake basin



(a)年最大 30d 降水量



(b)统计开始时间

图 10 太湖流域年最大 30d 降水量及开始时间变化趋势图

Fig.10 The time variation tendency of the maximum 30-day precipitation and its beginning time for the Taihu Lake basin

够反映出降水量的丰枯变化,太湖全流域的极值比较大为 4.9,而在各水利分区中,湖西区最大为 8.0,而浙西区最小为 4.4。

在时程统计分析中,年最大 30d 降水量主要出现时间在每年 5~8 月,占 87%,其中 6 月最多,达 27 次,占 44%,其次 7 月有 11 次,占 18%。

太湖流域年最大 30d 降水量统计特征呈现一定的上升态势(图 10(a)),其起始时间也存在提前趋势(图 10(b)),但其秩次相关系数(从略)未超过 90%和 95%置信度下的临界值,这表明 60 余年以来,太湖全流域及各水利分区的年最大 30d 降水量未发生显著变化趋势。

根据 Morlet 小波等值线图和小波方差图(从略)可以得出,太湖全流域年最大 30d 降水量在 42a 时间尺度上的周期振荡幅度最大。在该时间尺度上,最大 30d 降水量分为丰枯两个阶段,变异点为 1983 年。1951~1982 年和 1983~2011 年,两个阶段的均值分别为 256mm 和 304mm。20 世纪 80 年代前后,太湖流域最大 30d 降水量的丰枯对比比较明显,但在 2009 年左右,小波系数为零的等值线已出现,因此可以推测,近期年最大 30d 最大降水量将可能转入偏枯期。

4 结语

本文基于 1951~2011 年太湖流域长系列降水资料,对流域降水的时空分布规律进行了系统分析研究。结果表明,太湖流域降水表现为两种空间分布类型,一类是年降水量振幅高值中心位于以市岭站为中心的浙西山区以及湖西区的长兴~宜兴一线,第二类表现为年降水量以湖区为分界呈南北相反分布型态。经 Mann-Kendall 和 Spearman 秩次相关检验,61 年来,太

湖全流域和各水利分区年降水量、汛期降水量及年最大 1d、最大 3d 降水量均不存在显著的变化趋势,但 Morlet 小波分析表明,太湖流域降水具有比较明显的丰枯周期变化,年降水量存在 29a 的准周期;近期流域年降水量及汛期降水量可能仍处在偏枯期,但推测至 2016 年左右可能会进入偏丰期。61 年来,太湖全流域及各水利分区致洪降水量(年最大 30d 降水量)不存在显著的趋势变化,但存在 42a 时间尺度上的周期振荡。

参考文献:

- [1] 欧炎伦,吴浩云.1999 年太湖流域洪水[M].北京:中国水利水电出版社,2001. (OU Yanlun, WU Haoyun. The 1999 Flood in the Taihu Basin[M]. Beijing:China WaterPower Press,2001. (in Chinese))
- [2] 王同生.太湖流域防洪与水资源管理[M].北京:中国水利水电出版社,2006. (WANG Tongsheng. Flood Control and Water Resources Management in the Taihu Basin [M]. Beijing:China WaterPower Press,2006. (in Chinese))
- [3] 吴浩云,孙海涛.太湖流域洪水与水量调度方案的制定和认识[J].中国防汛抗旱,2012,22(2): 5-7. (WU Haoyun, SUN Haitao. Formulation and understanding of flood and water regulation scheme in the Taihu Basin [J]. China Flood & Drought Management,2012,22(2): 5-7. (in Chinese))
- [4] 施能.气象统计预报[M].北京:气象出版社,2009:128-170. (SHI Neng. Meteorological Statistical Prediction [M]. Beijing: China Meteorological Press, 2009: 128-170. (in Chinese))
- [5] 丁晶,邓育仁.随机水文学[M].成都:成都科技大学出版社,1988: 10-95. (DING Jing, DENG Yuren. Stochastic Hydrology [M]. Chengdu: University of Science and Technology Press,1988. (in Chinese))
- [6] 王文圣,丁晶,李跃清.水文小波分析[M].北京:化学工业出版社,2005:115-140. (WANG Wensheng, DING Jing, LI Yueqing. Wavelet Analysis in Hydrology. Beijing: Chemistry Industry Press, 2005: 115-140. (in Chinese))

Tempo-spatial Change of Precipitation in Taihu Lake Basin during Recent 61 Years

WU Haoyun¹, WANG Yintang², HU Qingfang², LIU Yong²

(1. Taihu Basin Authority of Ministry of Water Resources, Shanghai 200434 China; 2. State Key Laboratory of Hydrology Water Resources and Hydraulic Engineering, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029 China)

Abstract: Based on precipitation observation in the Taihu Lake Basin during 1951~2011, the tempo-spatial changes of the precipitation over this area were systematically analyzed in spatial distribution, time trends, periodicity and mutation, by using the methods of empirical orthogonal function decomposition (EOF), Mann-Kendall and Sperman's test and wavelet analysis. By EOF, the annual precipitation fields in the study area were of two main spatial modes, namely the west-east and south-north modes. In the last 61 years, the flood season precipitation and maximum precipitation within continuous 30 days over the whole basin and its seven sub-areas had no substantial trends. However, their periodicity is remarkable. The results of this paper provide important references for flood utilization, flood regulation scheme development and climate change adoption for the Taihu Lake Basin.

Key words: Taihu Lake Basin; precipitation; space-time evolution law; empirical orthogonal function; non-parametric test; wavelet analysis