

吕俊梅, 琚建华, 江剑民. 2009. 近一百年中国东部区域降水的年代际跃变 [J]. 大气科学, 33 (3): 524-536. Lü Junmei, Ju Jianhua, Jiang Jianmin. 2009. Interdecadal regime shifts of regional precipitation over eastern China during the last 100 years [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 33 (3): 524-536.

## 近一百年中国东部区域降水的年代际跃变

吕俊梅<sup>1</sup> 琚建华<sup>2\*</sup> 江剑民<sup>2</sup>

1 中国气象科学研究院, 北京 100081

2 中国气象局培训中心, 北京 100081

**摘要** 采用均生函数方法对 1900~1950 年中国东部测站降水资料进行补插, 通过与英国 Climate Research Unit (CRU) 的网格点降水资料以及王绍武等 (2000) 重建的降水资料的对比分析, 构造 1900~2006 年中国东部华北、长江中下游和华南地区的月平均降水指数序列, 并用一阶矩突变扫描式  $t$  检验对这三个区域降水的多时间尺度跃变特征进行分析。结果表明, 最近一百多年来长江中下游降水发生了 5 次年代际尺度的跃变, 华北以及华南的降水均发生了 4 次年代际尺度的跃变。各区降水同时在 20 世纪 20 年代初期、40 年代中期、60 年代中期以及 70 年代中期发生跃变。具体而言, 20 年代初期长江中下游和华南的降水发生年代际减少, 而此时华北降水年代际增加; 40 年代中期, 三个地区的降水都同时增加; 60 年代中期, 华北降水减少, 相反地长江中下游和华南的降水发生年代际增加; 70 年代中期, 华南和华北地区的降水出现年代际减少, 而长江中下游地区的降水在 80 年代初发生年代际增加。研究还表明, 降水跃变发生的时间尺度范围可以为我们的预测跃变发生以后降水气候平均态的持续时间提供参考。

**关键词** 近一百年 东部区域降水 多时间尺度跃变 气候平均态

**文章编号** 1006-9895 (2009) 03-0524-13

**中图分类号** P426

**文献标识码** A

## Interdecadal Regime Shifts of Regional Precipitation over Eastern China during the Last 100 Years

LÜ Junmei<sup>1</sup>, JU Jianhua<sup>2</sup>, and JIANG Jianmin<sup>2</sup>

1 Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081

2 China Meteorological Administration Training Centre, Beijing 100081

**Abstract** A mean generating function algorithm is used to interpolate the missing precipitation observations over eastern China during the period of 1900-1950. Compared with the grid precipitation of Climate Research Unit (CRU) and the reconstructed precipitation of Wang et al. (2000), the time series (1900-2006) of monthly rainfall indices in North China, the middle-lower reaches of the Yangtze River, and South China of eastern China are constructed. The scanning  $t$ -test detection algorithm is used to analyze and detect multi-scale regime shifts in three time series of regional precipitation. Results indicate that during the last 100 years the precipitation over the middle-lower reaches of the Yangtze River has experienced five interdecadal regime shifts, whereas the precipitation over South

**收稿日期** 2007-09-18, 2008-01-31 收修定稿

**资助项目** 中国气象局气候变化专项项目 CCSF2006-14, 国家自然科学基金资助项目 40705026, 国家重点基础研究发展规划项目 2007CB411505, 公益类行业专项 GYHY200706005

**作者简介** 吕俊梅, 女, 1972 年出生, 博士, 讲师, 研究方向为气候变化、海气相互作用和季风。E-mail: wind-ljm@163.com

\* 通讯作者: E-mail: jujh@cma.gov.cn

China and North China has very likely undergone four interdecadal regime shifts. Furthermore the regime shifts of regional precipitation occurred simultaneously in the early 1920s, the middle 1940s, the middle 1960s and the middle 1970s, respectively. That is to say, the precipitation over the middle-lower reaches of the Yangtze River and South China experienced an interdecadal decrease in the early 1920s. Meantime precipitation over North China underwent an interdecadal increase. The precipitation in the three regions experienced an abrupt increase synchronously in the middle 1940s. In the middle 1960s, the precipitation in North China decreased, on the contrary, the precipitation over South China and the middle-lower reaches of the Yangtze River experienced an interdecadal increase simultaneously. The precipitation over South China and North China experienced an interdecadal decrease in the middle 1970s, while the precipitation over the middle-lower reaches of the Yangtze River underwent an interdecadal increase in the early 1980s. It is also revealed that the time scales of regime shifts in precipitation provide a clue that should be used to predict the duration of climate regime for precipitation after the transition occurs.

**Key words** last 100 years, regional precipitation over eastern China, multi-scale regime shifts, climate regime

## 1 引言

气候系统的耗散性、非线性和非平衡性使得不同气候态之间的转折是突然出现而不是缓慢的变化过程,这意味着气候可能在两个或者更多的准静止态中演变,在此情形下每个气候态可以维持 10 年或者更长时间 (Lorenz, 1963; Charney et al., 1979; Vannitsem et al., 1991; Tsonis et al., 1998; Lockwood, 2001)。海-气过程和水文过程中的突变发生在全球许多地方,例如,太平洋年代际振荡 (PDO) 和北大西洋涛动 (NAO) 在 20 世纪中经历了多次突变 (Mantua et al., 1997; Schwing et al., 2003; 肖栋等, 2007)。太平洋和大西洋上的飓风活动在突变点的前后有不同年代际气候态,从而经历了明显的年代际变化 (Elsner et al., 2004)。Thyer et al. (2000) 给出澳大利亚一些地区年降水量的突变,在这些地区出现了几个降水量持续低于长期平均值的时期。中国气候也具有明显的突变特征,中国的夏季降水在 1965 年前后发生气候跃变,华北干旱化趋势明显 (严中伟等, 1990; 黄荣辉等, 1999); 长江中下游地区的夏季降水在 1979 年左右经历明显变湿的跃变 (Gong et al., 2002; 宇如聪等, 2008); 1980 年代后期西北气候出现由暖干向暖湿转型的信号 (施雅风等, 2002); 通过对近期海温和环流形势的分析,顾薇等 (2005) 指出中国的夏季降水即将开始由“南涝北旱”向“南旱北涝”的转型过程。由于我国在 20 世纪前半期缺少观测

资料,受器测资料长度限制,这些研究只对近 50 年中国的气候跃变进行分析。

然而,也有一些工作利用较长时间的资料来研究中国的气候变化。早在 20 世纪 70 年代,张家诚和张家恭 (1979) 就利用《中国近五百年旱涝等级分布图》(草图)<sup>①</sup> 研究了近五百年我国气候的干湿、冷暖变化。王绍武等根据降水观测记录和气候历史资料,重建 1880 年以来中国东部 35 个站的四季降水量序列 (王绍武等, 2000), 并且研究 19 世纪 80 年代到 20 世纪 90 年代中国年降水量的年代际变化特征 (王绍武等, 2002), 结果表明,1910 年代、1950 年代及 1990 年代全国显著多雨,而 1920 年代全国大旱,1930 年代及 1960 年代中国西部干旱,1980 年代华北的干旱非常显著。陈隆勋等 (2004) 研究近 80 年来中国气候变化特征,得出降水的变化与前面一致的结论;气温的变化表现为,1940 年代和 1990 年代中国出现了两个暖期以及 1950~1960 年代的相对冷期。闻新宇等 (2006) 利用英国东英格兰大学 Climate Research Unit (CRU) 的高分辨率网格点陆地资料研究 20 世纪中国气候变化的特征,结果表明,CRU 资料表现出与重建资料比较一致的中国温度和降水年代际变化的主要特征,并且由于其时间分辨率达到了月,是研究 20 世纪中国气候变化的较好资料选择。张存杰等 (2004) 检验了 CRU 降水资料的可信度,并利用其分析东北亚地区近一百年的降水变化规律。魏凤英等 (2005) 分析了近百年长江中下游梅雨的突变,发

① 此项工作由中央气象局气象科学研究院主持,各省、市、自治区气象局、长江流域规划办公室水文处、中国科学院地理研究所、江苏省地理研究所参加,于 1975、1978 年先后在北京大学和南京大学组织了协作,共同完成。

现 20 世纪 40 年代梅雨强度发生突变。这些研究使我们对 20 世纪中国气候的变化特征有了初步的认识,但是对于近一百年中国气候跃变的分析还有待开展。

均值突变能够较好地反映气候基本状况的变化,科学家们通常使用滑动  $t$  检验、Yamamoto 法和 Mann-Kendall 法等方法来检测和识别气候的均值突变(符淙斌等,1992;符淙斌,1994),严格说来这些方法每次计算都只能检测一个突变点,对于结构比较复杂的序列则无法或很难给出较客观的结论。为了检测到更多的突变点,有人使用小波变换来判别气候变化不同时间尺度下的突变点,研究表明用墨西哥帽子波可以正确地得到均值突变点,这种判别具有严格的数理意义,是其他统计方法所不具备的。但是,这种方法不能给出判别突变点的统计显著性检验标准,并且不同的子波变换、不同的时间尺度以及资料序列的噪音等都会对结果造成影响(杨梅学等,2003)。Jiang et al. (2002) 发展了一阶矩突变扫描式  $t$  检验方法,这种新方法既可以精确地检测长时间序列中不同时间尺度上的多次均值突变现象,又能给出判别突变点的统计显著性检验标准,是对小波突变检验方法的一种改进。

如果气候的跃变能够用一种可靠的统计分析方法检验出来,人们期望知道跃变发生在什么时候,即在什么时候气候可能进入一个可以预测它将来变化趋势的平均值时期。因为气候基本态的跃变影响着社会的很多方面,例如农业、水资源和环境,对气候长期变化中多突变点的检测就显得十分重要,这有利于我们加深对气候变化规律的认识以及对未来的气候变化做出预测。本文将插补的器测资料与重建资料和 CRU 高分辨率网格点资料进行对比分析,构造中国东部各区 1900~2006 年的逐月降水指数,对降水指数进行一阶矩突变扫描式  $t$  检验,揭示最近一百多年来中国东部不同区域降水的多时间尺度跃变特征,特别是年代际尺度的跃变,希望获得对 20 世纪至今中国气候跃变的更为全面的认识。

## 2 资料 and 统计方法

### 2.1 资料介绍

使用的资料包括国家气候中心气候预测室整编的 1900~2006 年中国东部测站降水资料,王绍武等(2000)重建的 1880 年以来中国东部 35 站四季降

水量之和,以及 1901~2002 年英国 CRU 的  $0.5^\circ \times 0.5^\circ$  高分辨率网格点陆地降水和气温资料。CRU 整合多套数据集资料,通过空间统计插值方法得到 1901 年以来月平均的全球地面气候要素数据集,这套资料不包括卫星资料、模式同化资料和重建资料(Mitchell et al., 2005) ([http://www.cru.uea.ac.uk/~timm/grid/CRU\\_TS\\_2\\_1.html](http://www.cru.uea.ac.uk/~timm/grid/CRU_TS_2_1.html))。降水和气温为其中 2 个要素。

1950 年以前中国的观测站点主要分布在东部地区,并且站点稀少,资料普遍存在缺测现象。我们收集整理的东部 15 个测站中(见图 1 圆点所示),仅上海和天津 2 个站的数据是完整的,其余测站均存在不同时期的缺测,对于缺测值我们采用插值方法进行插补。1950 年以后东部地区测站数剧增且连续,根据国家气候中心气候预测室对我国华北、长江中下游和华南地区代表测站的选取方法,我们选取这三个地区的测站数在 1950 年以后增加至 50 个(见图 1 圆点和三角所示)。这样,1950 年以前各区代表测站数分别为,华北地区 4 个,长江中下游地区 6 个,华南地区 5 个;1951 年开始各区代表测站在包括前期测站的基础上,增加到华北和长江中下游地区各 17 个站,华南 16 个站。三个地区代表站的选取以及每个测站的降水观测时段详见表 1。

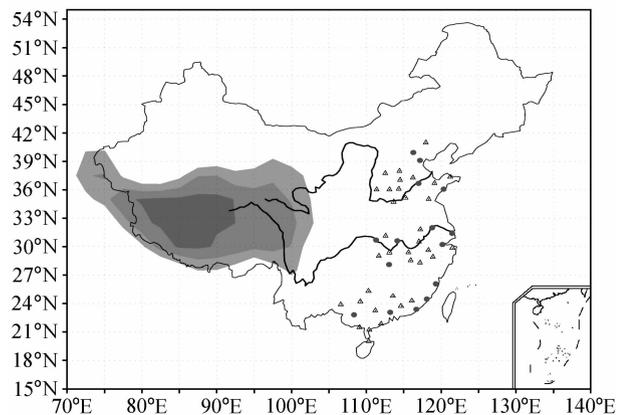


图 1 中国东部地区观测站点分布图。圆点: 20 世纪初至今有降水观测资料的台站; 三角: 降水观测开始于 1951 年的台站; 阴影: 青藏高原的地形(海拔高度  $>3000$  m)

Fig. 1 Distribution of observation stations over eastern China. Closed circles indicate stations where precipitation data started at the beginning of the 20th century. Triangles represent stations where precipitation data started in 1951. The shading indicates the terrain of the Tibetan Plateau (height  $>3000$  m)

表 1 观测台站和降水观测时期

Table 1 Observation stations and periods for precipitation observation

华北地区		长江中下游地区		华南地区	
台站	时段	台站	时段	台站	时段
北京	1905~1908, 1910~1911, 1914~2006	南京	1905~1937, 1940~1944, 1946~2006	福州	1900~1944, 1946~1947, 1949~2006
天津	1900~2006	上海	1900~2006	厦门	1900~1938, 1947, 1949, 1951~2006
青岛	1900~1913, 1915~2006	杭州	1907~1937, 1942, 1946~1948, 1950~2006	汕头	1900~1943, 1951~2006
济南	1916~1936, 1939~2006	汉口	1900~1938, 1947~2006	广州	1908~1945, 1948~2006
承德	1951~2006	宜昌	1900~1938, 1947~2006	南宁	1908~1912, 1914~1915, 1921~1939, 1941~2006
石家庄	1951~2006	长沙	1911~1938, 1940, 1946~2006	梅县	1951~2006
德州	1951~2006	合肥	1951~2006	曲江	1951~2006
邢台	1951~2006	安庆	1951~2006	河源	1951~2006
安阳	1951~2006	屯溪	1951~2006	阳江	1951~2006
烟台	1951~2006	九江	1951~2006	湛江	1951~2006
潍坊	1951~2006	钟祥	1951~2006	海口	1951~2006
临沂	1951~2006	岳阳	1951~2006	桂林	1951~2006
菏泽	1951~2006	常德	1951~2006	柳州	1951~2006
郑州	1951~2006	宁波	1951~2006	梧州	1951~2006
长治	1951~2006	衡县	1951~2006	北海	1951~2006
太原	1951~2006	贵溪	1951~2006	百色	1951~2006
临汾	1951~2006	南昌	1951~2006		

## 2.2 缺测值插值方法

研究 20 世纪中国气候变化需要长时期、均一的标准气候序列, 然而由于战争、测站的变迁及仪器的变更, 造成长期气候资料的间断和非均一性。因此, 较准确地估计并恢复测站缺测资料是研究我国长期气候变化的基础。CRU 资料为了解决这一问题采用空间插值方法, 根据缺测站点周围的站点值对其进行插补, 然而由于 1950 年以前中国东部地区测站稀少, 并且大多数测站的缺测时间均集中于 1938~1945 年期间, 因此空间插值方法给资料的插补带来一定局限性。我们将从另外一个角度出发, 考虑站点资料的时间变化特征, 采用均生函数方法对缺测资料进行插补, 从而获得连续的长时期资料。

均生函数的计算原理是对一个给定的时间序列, 计算其一阶差分和二阶差分序列, 生成原序列及差分序列的均生函数, 视其为预报因子。计算粗选出来的因子的所有可能子集回归, 利用双评分准则确定出最优子集回归作为预报方程, 从而进行序列的缺测插补(张秀芝等, 1996; 魏凤英, 1999)。

## 2.3 均值突变检测方法

Jiang et al. (2002) 将小波变换技术移植到

Student  $t$  检验上, 拓展成一阶矩突变扫描式  $t$  检验, 定义一阶矩突变扫描式  $t$  检验的统计量  $t(n, j)$ :

$$t(n, j) = (\bar{x}_{j2} - \bar{x}_{j1})n^{\frac{1}{2}}(s_{j2}^2 + s_{j1}^2)^{-\frac{1}{2}}, \quad (1)$$

其中,

$$\bar{x}_{j1} = \frac{1}{n} \sum_{i=j-n}^{j-1} x(i),$$

$$\bar{x}_{j2} = \frac{1}{n} \sum_{i=j}^{j+n-1} x(i),$$

$$s_{j1}^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=j-n}^{j-1} (x(i) - \bar{x}_{j1})^2,$$

$$s_{j2}^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=j}^{j+n-1} (x(i) - \bar{x}_{j2})^2.$$

(1) 式中  $n$  表示两个相邻子序列的长度,  $n=2, 3, \dots, <N/2$ ,  $j$  为检测突变现象的参考点,  $j=n+1, n+2, \dots, <N-n$ 。显然, 一阶矩突变扫描式  $t$  检验显著性检验的临界值  $t_\alpha$  随着子序列样本数  $n$  和一阶自相关系数  $r(1)$  两者而变化。Storch et al. (1999) 给出了相应的表格可查, 计算时根据其表格进行内插得到随  $n$  变化的显著性检验临界值  $t_\alpha$ , 因此, 我们将它称为“Table-Look-Up 测试”。由于  $t$  检验要求序列是独立的和遵从正态分布的, 采

用“Table-Look-Up 测试”还可以订正子序列的非独立性。本文选用显著性水平为 0.05 的临界值  $t_{0.05}$  作为显著性检验标准, 为了便于比较, 用 0.05 的显著性水平检验临界值  $t_{0.05}$  对  $t$  检验的统计量  $t(n, j)$  进行标准化处理:

$$t_r(n, j) = \frac{t(n, j)}{t_{0.05}}. \quad (2)$$

则当  $|t_r(n, j)| \geq 1.0$  时, 可以判断该突变通过了显著性水平为 0.05 的统计显著性检验。

### 3 近百年中国东部各区降水指数的构造及对比分析

构造 1900~2006 年中国东部华北、长江中下游以及华南地区的月平均降水指数时, 首先根据表 1 中所列的中国东部各区测站降水观测时期, 选取 1950 年以前有降水资料的测站, 采用均生函数方法对缺测资料进行插补, 获得 1900~1950 年的月平均连续资料, 1951 年以后的资料取到 2006 年, 并且增加每个区域的测站数, 再对每个区域的测站资料求平均, 就得到了 1900~2006 年各区域的月平均测站降水指数。

为了验证本文构造的测站降水指数的合理性和可靠性, 下面将分别用 CRU 资料和王绍武等 (2000) 重建的资料 (简称 Wang2000) 来进行对比分析, 重点分析 1901~1950 年期间的情况。CRU 网格点资料分别在 (36.25°N~41.25°N, 111.25°E~123.75°E)、(28.25°N~33.75°N, 111.25°E~123.75°E)、(21.25°N~26.25°N, 106.25°E~118.75°E) 区域求平均, 得到华北、长江中下游和华南地区的 CRU 降水指数。图 2~4 分别给出华北、长江中下游和华南三个区 1901~1950 年逐月的测站降水指数和 CRU 降水指数时间序列。比较两者的变化可以看出, 两套资料的变化趋势较为一致。对于降水极大值的变化, 三个地区又有不同的特征, 在华北地区和长江中下游地区, 尽管测站降水指数的极大值普遍高于 CRU 降水指数, 降水极大值出现的时期在两套资料中是一致的。因此, 两套资料的相关系数 ( $R$ ) 华北最大为 0.96, 长江中下游地区次之为 0.93。华南地区降水极大值出现的时期在两套资料中稍有不同, 但是两者的相关系数还是高达 0.90。三个地区的相关系数均大于 0.90 并且接近于 1.0, 这表明测站降水指数和

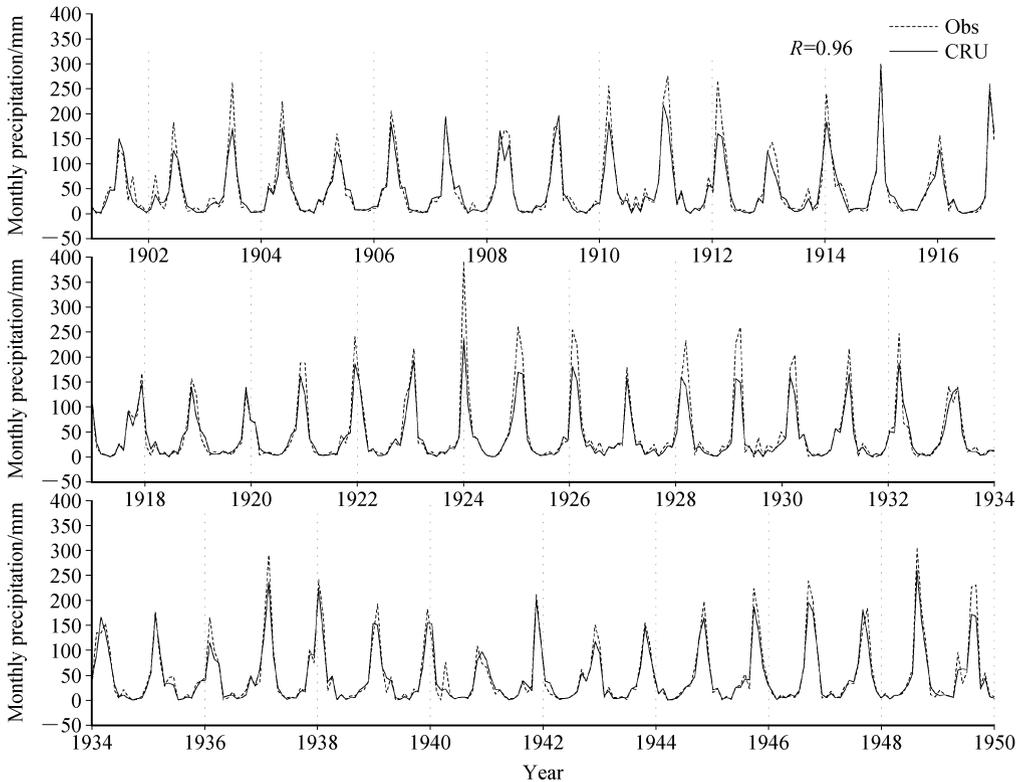


图 2 1901~1950 年华北测站降水指数和 CRU 降水指数序列

Fig. 2 Time series of observation and CRU precipitation index for North China during the period 1901–1950

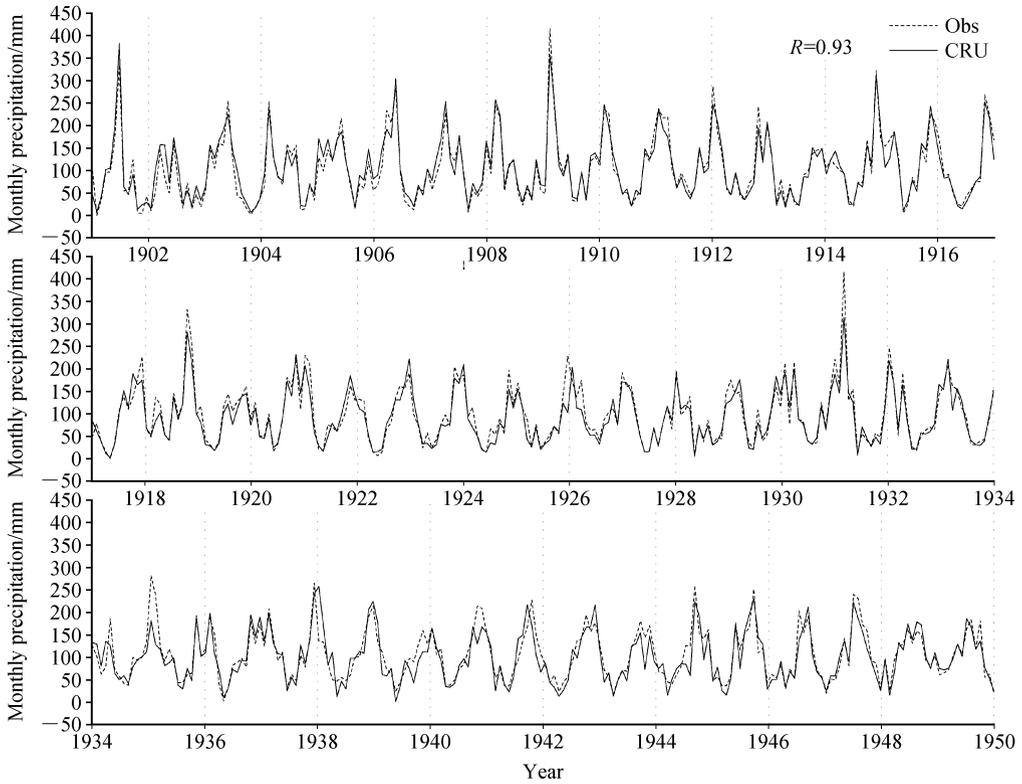


图3 同图2，但为长江中下游

Fig. 3 Same as Fig. 2, but for the middle and lower reaches of the Yangtze River

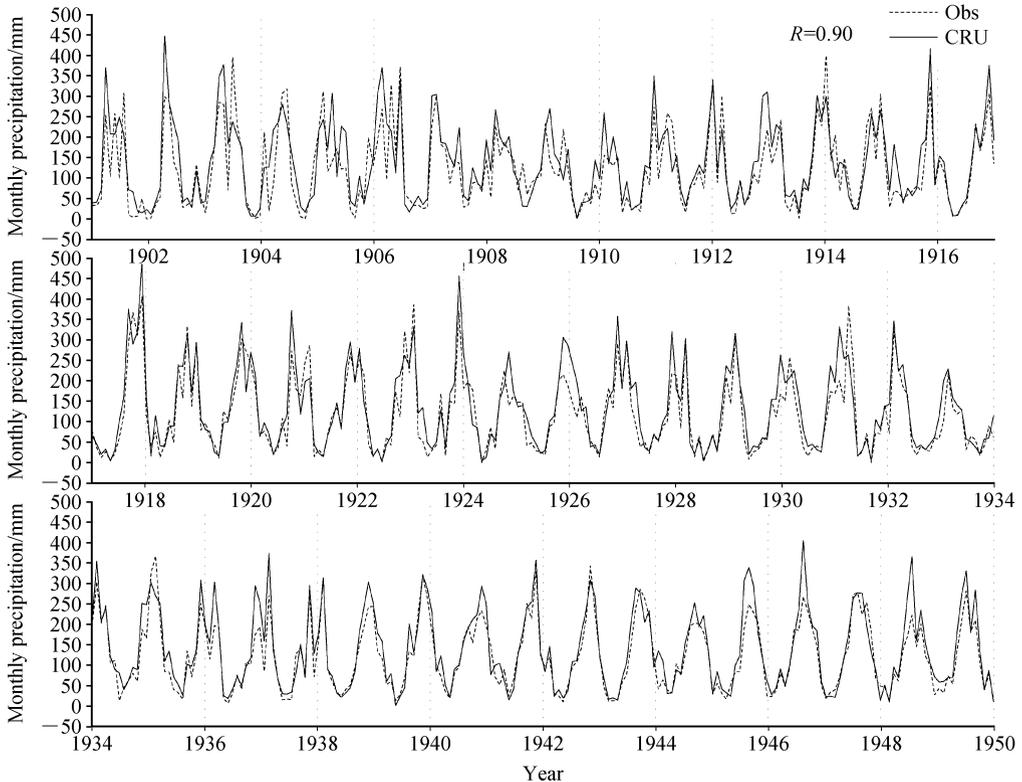


图4 同图2，但为华南

Fig. 4 Same as Fig. 2, but for South China

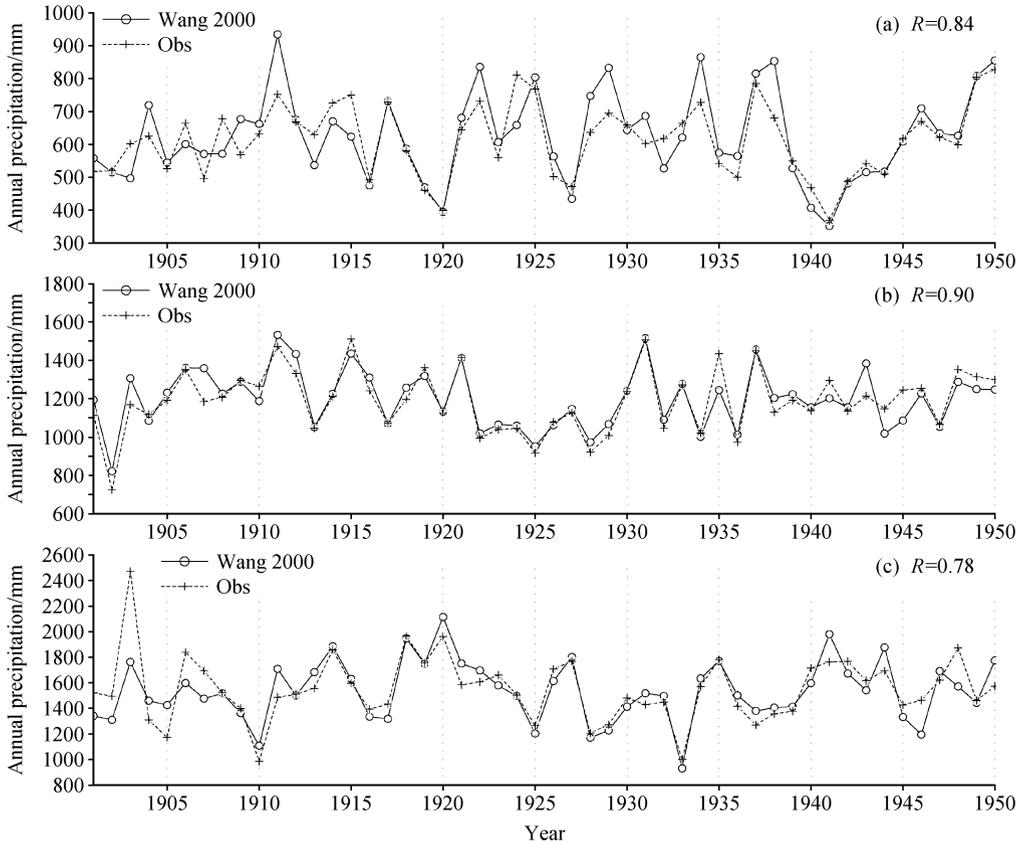


图5 1901~1950年中国东部各区 Wang2000 和测站年降水量的时间演变: (a) 华北; (b) 长江中下游; (c) 华南

Fig. 5 Time series of Wang2000 and observation annual rainfall during the period 1901–1950 for (a) North China, (b) the middle and lower reaches of the Yangtze River, and (c) South China

CRU 降水指数在描述 20 世纪前半期中国东部各区降水的变化时具有较好的一致性。

Wang2000 重建资料给出四个季节的降水量之和, 将四季降水量相加得到年降水量, 我们从 Wang2000 重建的 35 个测站中选取与构造测站降水指数相同的测站, 计算得到 1901~1950 年华北、长江中下游和华南的年降水量序列, 结果如图 5 所示。两套资料所描述的 20 世纪前半期东部各区年降水量的变化趋势是一致的, 两个时间序列的相关系数在长江中下游地区高达 0.90, 华北和华南分别为 0.84 和 0.78, 均超过了 0.01 的显著性水平。

不同资料的对比分析表明, 本文所构造的东部各区测站降水指数是较为合理可信的。在构造东部各区降水指数的过程中, 1950 年前后不同时期各区代表测站数的选取有不同, 但是经过不同资料的对比分析可知, 这并不影响我们构造的三个区降水指数序列的均一性, 并且在 1951 年以后选取更多的测站可以使降水指数更具有代表性, 分析表明这

并不影响突变点检验的结果。

#### 4 东部各区降水突变检验分析

运用本文构造的 1900~2006 年华北、长江中下游和华南的月平均测站降水指数进行突变分析之前, 首先对降水指数进行离散功率谱分析 (黄嘉佑, 2000), 获得东部各区降水变化的显著周期 (图 6), 为降水的突变检验分析提供不同地区降水显著变化周期的信息。由于样本长度为 107 年, 因此周期分析中得到的 107 年显著周期为虚假周期, 须将其略去。这样得到, 华北降水的显著周期为 21.4 a、13.4 a、2.6 a、1.5 a, 长江中下游降水的显著周期为 35.7 a、21.4 a、3.6 a、2.6 a、2.1 a、1.5 a, 华南降水的显著周期为 4.1 a、3.0 a、1.9 a、1.3 a。由此可见, 长江中下游和华北的降水变化同时具有年际和年代际尺度的显著周期。然而, 华南地区仅具有年际尺度的显著变化周期, 年代际尺度变化在华南降水中并不显著。中国东部不同地区降水变化

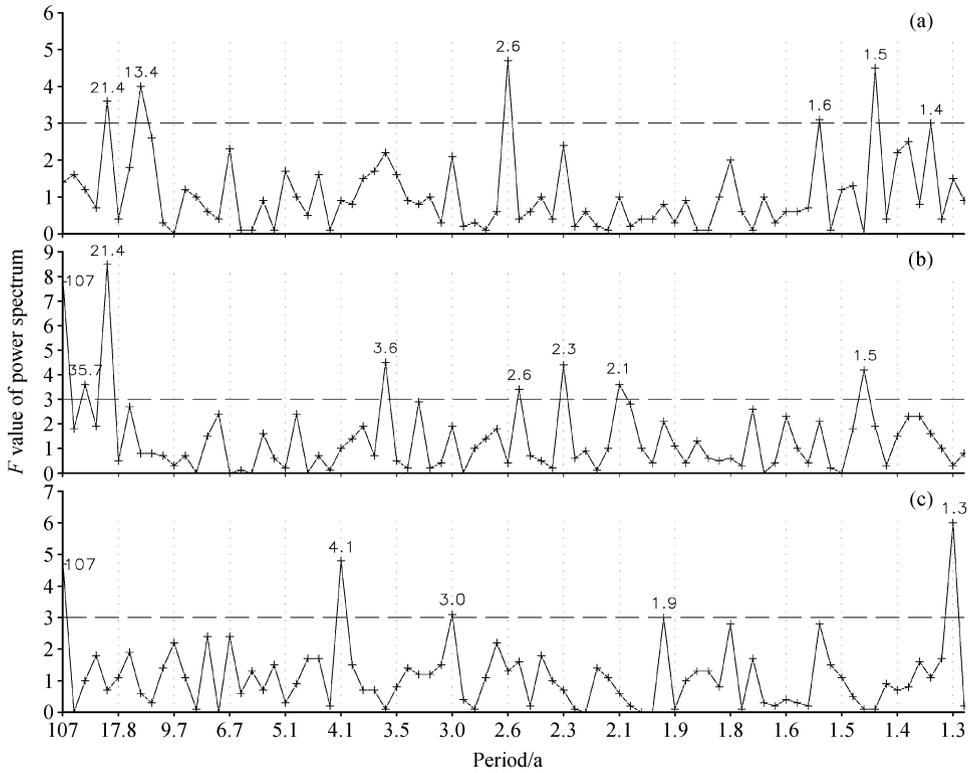


图6 中国东部各区测站降水指数的离散功率谱分析：(a) 华北；(b) 长江中下游；(c) 华南。水平虚线为 0.05 的显著性水平；标注的数值为显著周期（单位：a）

Fig. 6 The discrete power spectrum of observed precipitation index over eastern China, including (a) North China, (b) the middle and lower reaches of the Yangtze River, and (c) South China. Horizontal dashed line indicates 0.05 significance level. The values marked on the lines represent the significant periods (a)

的周期具有不同的特征，因此将各个区域分开来分析降水的跃变是很有必要的。

根据中国东部三个地区 1900~2006 年的月平均测站降水指数序列，按照公式 (1) 和 (2) 进行计算，得到一百多年来三个地区降水的一阶矩突变扫描式  $t_r$  检验结果。首先分析华北地区降水的多时间尺度跃变特征，图 7a 中横坐标为时间，以年代标记，纵坐标为子样本的大小，即时间尺度，单位为月，以对数尺度标记。根据前面对  $t_r(n, j)$  的定义可知，当  $|t_r(n, j)| > 1.0$  时，表示突变通过显著性水平为 0.05 的统计显著性检验， $t_r(n, j)$  的正极值和负极值中心分别表示降水的突然增加和减少。我们将图 7a 中挑选出来的华北降水跃变时期和相应的时间尺度归纳于表 2 中，一百多年来，华北降水经历了 7 次跃变，其中有 4 次跃变发生在年代际时间尺度上 (1921、1945、1968、1977 年)。最显著的跃变发生于 1977 年 8 月，降水突然减少，中心极值达到 -1.7，对应的跃变时间尺度为 304 月，并且

在 54~304 月的时间尺度上跃变均通过显著性检验；1945 年 8 月降水发生显著增加的跃变，中心极值达到 1.6，而且在 32~362 月的时间尺度上跃变均显著，此外，1965 年 5 月华北降水在 32~431 月的时间尺度上出现减少的跃变，中心极值达到 -1.5。这种发生在从年际到年代际的宽广时间尺度上的跃变，也印证了华北降水同时具有显著的年际和年代际的变化。需要注意的是，1965 (1960 年代中期) 和 1977 (1970 年代中期) 这两次跃变是我们所熟知的，因为发生于这两个时期的跃变在全球气候系统的很多变化中都可以被检测到 (Thyer et al., 2000; Gong et al., 2002; Elsner et al., 2004; 顾薇等, 2005; Wu, 2005)。

按照检验得到的突变点，每两个相邻中心划分为一个相对的降水多、少的时段，再计算出每个时段距平化降水指数 (气候平均取 1961~1990 年) 的平均值，如图 7b 中粗实线所示，并且给出由 31 个点构成的高斯滤波器处理过的距平化降水指数的

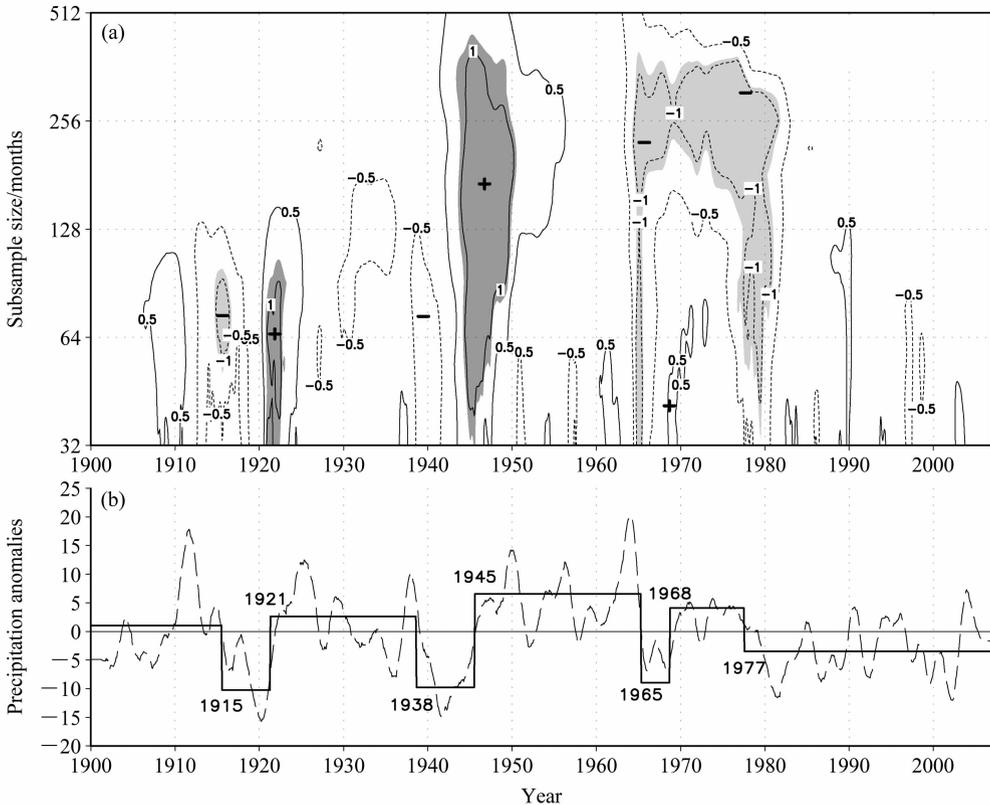


图7 (a) 华北地区测站降水指数的一阶矩扫描式  $t$  检验结果的等值线图, 阴影为通过 0.05 显著性水平检验的时期, 图中标注的正、负号表示发生突变的极值中心; (b) 华北地区各降水多、少时段平均降水量(粗实线)和降水低通滤波曲线(虚线), 标注的数值为降水发生突变的年份

Fig. 7 (a) Contours of the scanning  $t$ -test value for observed precipitation index in North China, shaded areas indicate significant periods at 0.05 significance level, plus (minus) signs denote time when statistically significant abrupt increase (decrease) occurs; (b) the average rainfall (solid line) during the increased and decreased rainfall periods and the lower pass filtered curve (dashed line) of rainfall, the marked values indicate the years when the abrupt changes of precipitation occur

低通滤波曲线(虚线)。可以看出, 根据突变点划分的降水多、少时段与降水的实际变化趋势比较吻合, 近一百年华北多雨的时段为 1900~1914、1921~1937、1945~1964、1968~1976 年, 华北少雨的时期为 1915~1920、1938~1944、1965~1967、1977~2006。由华北多雨、少雨时期可以看出, 1965 年华北降水减少, 但仅持续了 3 年, 此后 1968~1976 年降水偏多, 直到 1977 年再次发生跃变以后, 华北的降水持续减少至今。因此, 尽管在 1965 年华北降水就已经发生了减少的变化, 但是其后却出现了一个短时间的波动, 直到 1977 年的跃变发生以后, 华北降水才持续稳定在偏少的气候平均状态下, 从而导致了最近 20 多年来华北持续干旱, 并且 1990 年代后期以来华北干旱化加剧。本文得到的结论, 对于严中伟等(1990)研究指出的 1965 年中国气

候发生跃变后华北干旱化趋势明显的结论, 是一个新的补充。

类似的, 分析长江中下游地区降水的多时间尺度跃变特征(图 8a)发现, 一百多年中发生了 7 次跃变, 除了 2 次跃变外, 其余 5 次跃变的极值中心都出现在年代际尺度上(1920、1947、1959、1968、1980 年), 这与长江中下游地区降水以年代际尺度变化为主有关。该地区最显著的降水突然增加出现在 1947 年 11 月, 中心极值达到 1.5 (表 2), 对应的时间尺度为 362 月, 此时发生显著跃变的时间尺度跨越 108~512 月, 属于年代际时间尺度范围。另外几次跃变, 例如 1920、1959、1968、1977 和 1980 年的跃变也很显著, 中心极大值达到和超过了  $\pm 1.1$ , 其中我们所熟知的 1968 和 1977 年的跃变也被检测出来。

同样, 根据突变点划分得到长江中下游地区多雨和少雨时期(图 8b), 这些时期的距平化降水指数平均值与低通滤波值的变化趋势也比较一致, 多雨的时期有 1947~1958、1968~1976 和 1980~2006 年, 少雨的时期有 1900~1905、1920~1946、1959~1967、1977~1979 年。值得注意的是, 1977 年长江中下游地区的降水减少, 并持续到 1979 年; 1980 年跃变发生以后该区域的降水才开始持续偏

多, 即 1970 年代中期长江中下游地区的降水发生一个小波动以后, 于 1980 年代初期开始至今持续偏多。这与过去研究指出的 1970 年代中期长江中下游开始进入降水偏多的年代际时期略有不同(Gong et al., 2002; 顾薇等, 2005)。

华南地区降水在过去 100 多年间发生的 7 次跃变中(图 9a), 有 4 次跃变发生在年代际的时间尺度上(1925、1946、1963、1992 年)。最显著的跃变是

表 2 突变时间和时间尺度

Table 2 Abrupt change time and timescales

华北			长江中下游			华南		
突变时间	$t_{r \max} / t_{scale}$	时间尺度/月	突变时间	$t_{r \max} / t_{scale}$	时间尺度/月	突变时间	$t_{r \max} / t_{scale}$	时间尺度/月
1915 年 8 月	-1.5/64	54~91	1906 年 5 月	1.2/76	64~76	1918 年 5 月	1.3/32	32~64
1921 年 5 月	1.2/76	32~128	1920 年 4 月	-1.2/128	108~181	1925 年 5 月	-1.3/108	54~181
1938 年 9 月	-1.0/76	45~76	1947 年 11 月	1.5/362	108~512	1946 年 12 月	1.3/512	181~512
1945 年 8 月	1.6/76	32~362	1959 年 7 月	-1.2/108	91~108	1954 年 5 月	-1.3/32	32~54
1965 年 5 月	-1.5/215	32~431	1968 年 11 月	1.2/108	64~108	1963 年 11 月	1.6/512	431~512
1968 年 10 月	1.1/38	38~45	1977 年 9 月	-1.1/32	32~45	1976 年 10 月	-1.0/54	38~54
1977 年 8 月	-1.7/304	54~304	1980 年 1 月	1.1/256	256~304	1992 年 2 月	1.2/76	76~91

注:  $t_{r \max}$  和  $t_{scale}$  (单位: 月) 分别表示  $t_r(n, j)$  的极值和相应的时间尺度

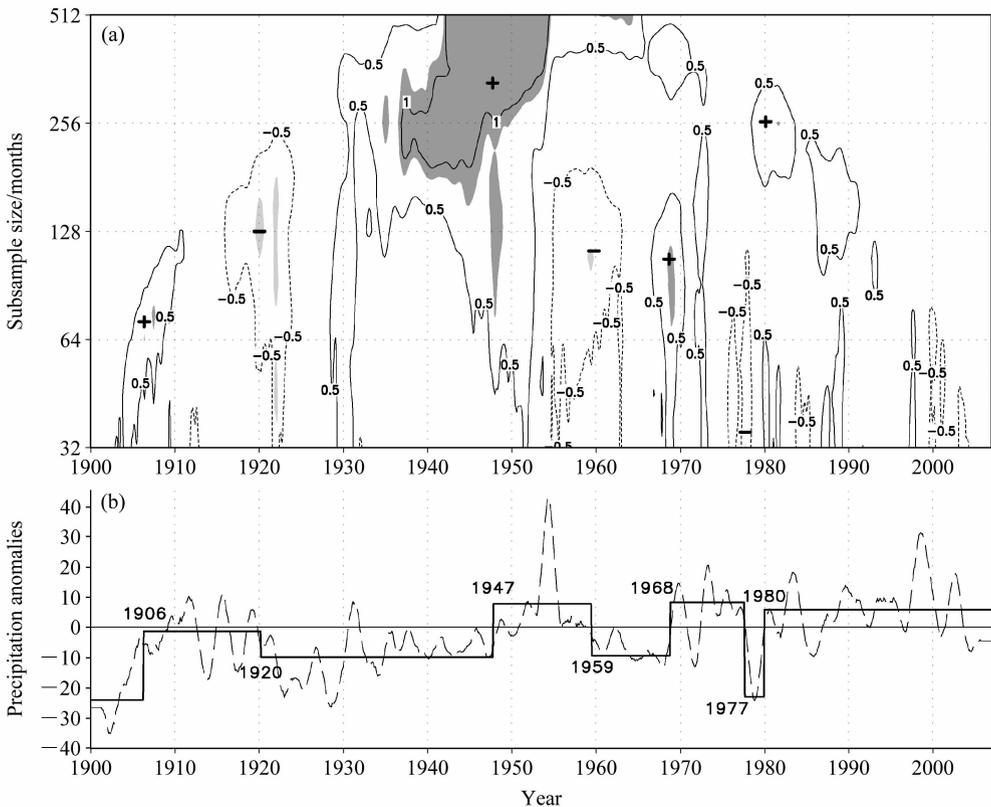


图 8 同图 7, 但为长江中下游地区

Fig. 8 Same as Fig. 7, but for the middle and lower reaches of the Yangtze River

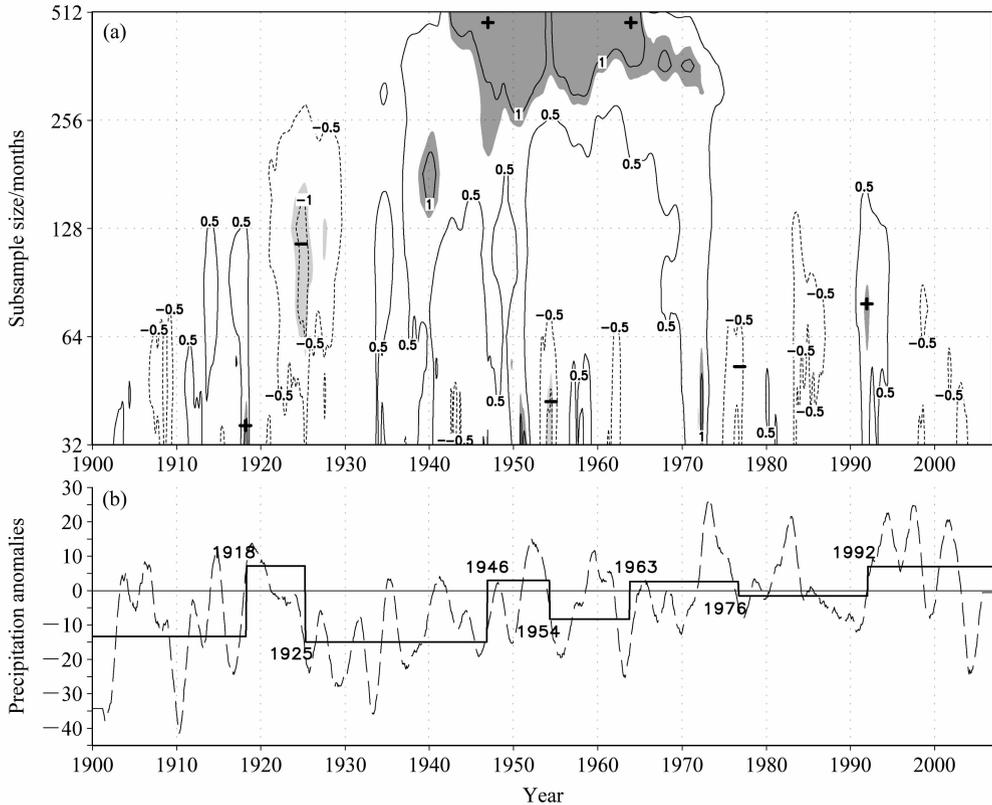


图9 同图7, 但为华南地区

Fig. 9 Same as Fig. 7, but for South China

1963年11月降水的突然增加,发生在431~512个月的时间尺度上,中心极值达到1.6(表2),降水偏多的平均状态持续了13年。此外,发生于1925、1946和1954年的跃变也很显著。1976和1992年的跃变同样值得我们注意,前者是大家都比较公认的气候跃变时期,后者表明华南的降水在1992年发生了年代际增加的变化。分析图9b发现,对于华南地区,根据突变点划分得到的多雨、少雨时期的距平化降水指数平均值与低通滤波后得到的降水实际变化趋势在某些时期不是很一致,这可能是因为华南降水的显著变化周期较小,主要为年际尺度的变化,变化频率较高,因此多雨、少雨时期的平均值仅仅为其变化提供了一个平均气候背景,而不像另外两个区域一样两者变化趋势吻合较好。华南降水偏多的时期有1918~1924、1946~1953、1963~1975和1992~2006年,而在1900~1917、1925~1945、1954~1962和1976~1991年期间华南降水偏少。

## 5 讨论和结论

本文经过多套资料的对比分析,构造较为客观

的中国东部三个地区1900~2006年月平均的降水指数序列,据此分析过去一百多年来中国东部三个不同地区降水的多时间尺度跃变。综合本文的研究可以得到以下结论,中国东部三个地区降水的显著变化周期存在差异,长江中下游地区和华北具有年际和年代际尺度的显著变化周期,然而华南地区仅具有年际尺度的显著变化周期。相应的,各区降水的多时间尺度跃变具有不同特征。在过去一百多年中,长江中下游地区的降水发生了5次年代际跃变,华南和华北的降水均发生了4次年代际跃变。各区降水发生跃变的时期既有不同,但是也有几个比较一致的时期,例如,1920年代初期,华北降水发生了年代际的增加,几乎与此同时,长江中下游地区以及华南地区的降水发生年代际的减少,而且后面两个地区降水减少的趋势一直持续到1940年代中期。华北、华南和长江中下游地区的降水在1940年代中期均发生了年代际的增加。1960年代中期,华北降水减少,而此时长江中下游和华南地区的降水年代际增加。1970年代中期华北和华南

地区的降水均发生了年代际减少, 此后 20 年华北持续干旱; 华南地区降水持续偏少 16 年以后, 1992 年发生年代际增多的跃变。长江中下游地区降水在经过 1970 年代中期的小波动以后, 1980 年开始进入降水偏多的年代际变化时期。

由于本文进行的是多时间尺度的降水跃变分析, 结果中也就不可避免地包含 10 年以下的年际尺度跃变, 即气候年代际跃变的小波动。我们认为这些小的波动严格来讲不属于气候跃变。如果将发生于 1960 年代末期华北降水跃变的小波动以及发生于 1970 年代中期长江中下游降水跃变的小波动略去不考虑, 就会发现, 在过去一百年间中国东部三个区域降水的年代际跃变主要发生在 1920 年代初期、1940 年代中期、以及 1960 年代中期。与此对应, 1920 年代初至 1940 年代中期, 长江中下游地区和华南处于降水偏少的年代际时期, 华北从 1920 年代初至 1960 年代中期基本处于降水偏多的年代际时期。1960 年代中期东部区域降水气候平均态发生明显的年代际转型, 华北降水进入偏少的年代际时期, 而长江中下游降水进入偏多的年代际时期。华南降水在 1960 年代中期至 1970 年代中期偏多, 此后转为偏少, 1990 年代初又进入偏多的时期。

仔细分析表 2 中的第 3、6、9 列, 发现在三个地区中, 当跃变发生在年际至年代际的较为宽广的时间尺度上时, 突变发生后, 降水将在偏多或者偏少的平均状态下持续 10 年或以上, 也即此时降水发生了年代际的跃变。相反, 当跃变出现在较短的年际时间尺度上时, 平均状态仅能持续几年时间。因此, 我们可以根据降水发生跃变的时间尺度范围来对跃变发生以后平均状态的持续时间进行预测, 这为气候变化的可预测性提供了一定借鉴。

**致谢** 感谢国家气候中心气候预测室提供 1950 年以前的测站降水资料, 王绍武教授提供中国东部重建降水资料, 英国东英格兰大学提供 CRU 数据集。感谢张秀芝研究员和魏凤英研究员与本文作者的讨论。

## 参考文献 (References)

Charney J G, DeVore J G. 1979. Multiple flow equilibria in the atmosphere and blocking [J]. *J. Atmos. Sci.*, 36: 1205 - 1216.  
陈隆勋, 周秀骥, 李维亮, 等. 2004. 中国近 80 年来气候变化特征及其形成机制 [J]. *气象学报*, 62 (5): 634 - 645. Chen Longx-

un, Zhou Xiuji, Li Weiliang, et al. 2004. Characteristics of the climate change and its formation mechanism in China in last 80 years [J]. *Acta. Meteor. Sinica (in Chinese)*, 62 (5): 634 - 645.  
Elsner J B, Niu X F, Jagger T H. 2004. Detecting shifts in hurricane rates using a Markov Chain Monte Carlo approach [J]. *J. Climate*, 17: 2652 - 2666.  
符淙斌, 王强. 1992. 气候突变的定义和检测方法 [J]. *大气科学*, 6 (4): 482 - 493. Fu Congbin, Wang Qiang. 1992. The definition and detection of the abrupt climatic change [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (Scientia Atmospherica Sinica) (in Chinese)*, 6 (4): 482 - 493.  
符淙斌. 1994. 气候突变现象研究 [J]. *大气科学*, 18 (3): 373 - 383. Fu Congbin. 1994. Studies on the observed abrupt climatic change [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (Scientia Atmospherica Sinica) (in Chinese)*, 18 (3): 373 - 383.  
Gong D Y, Ho C H. 2002. Shift in the summer rainfall over the Yangtze River valley in the late 1970s [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 29 (10), doi: 10.1029/2001GL014523.  
顾薇, 李崇银, 杨辉. 2005. 中国东部夏季主要降水型的年代际变化及趋势分析 [J]. *气象学报*, 63 (5): 728 - 739. Gu Wei, Li Chongyin, Yang Hui. 2005. Analysis on interdecadal variation of summer rainfall and its trend in East China [J]. *Acta. Meteor. Sinica (in Chinese)*, 63 (5): 728 - 739.  
黄嘉佑. 2000. 气象统计分析与预报方法 [M]. 北京: 气象出版社, 225 - 233. Huang Jiayou. 2000. *Meteorological Statistic Analysis and Forecast Method (in Chinese) [M]*. Beijing: China Meteorological Press, 225 - 233.  
黄荣辉, 徐予红, 周连童. 1999. 中国夏季降水的年代际变化及华北干旱化趋势 [J]. *高原气象*, 18 (4): 465 - 476. Huang Ronghui, Xu Yuhong, Zhou Liantong. 1999. The interdecadal variation of summer precipitation in China and the drought trend in North China [J]. *Plateau Meteorology (in Chinese)*, 18 (4): 465 - 476.  
Jiang J, Mendelsohn R, Schwing F B, et al. 2002. Coherency detection of multiscale abrupt changes in historic Nile flood levels [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 29 (8): 1121 - 1124.  
Lockwood J G. 2001. Abrupt and sudden climatic transitions and fluctuations: A review [J]. *Int. J. Climatol.*, 21: 1153 - 1179.  
Lorenz E N. 1963. Deterministic nonperiodic flow [J]. *J. Atmos. Sci.*, 20: 130 - 141.  
Mantua N, Hare S, Zhang Y, et al. 1997. A Pacific interdecadal climate oscillation with impacts on salmon production [J]. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 78: 1069 - 1079.  
Mitchell T D, Jones P D. 2005. An improved method of constructing a database of monthly climate observations and associated high resolution grids [J]. *Int. J. Climatol.*, 25: 693 - 712.  
Schwing F B, Jiang J, Mendelsohn R. 2003. Coherency of multiscale abrupt changes between the NAO, NPI, and PDO [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 30 (7): 1406, doi: 10.1029/2002GL

016535.

- 施雅风, 沈永平, 胡汝骥. 2002. 西北气候由暖干向暖湿转型的信号、影响和前景初步探讨 [J]. 冰川冻土, 24 (3): 219 - 226.
- Shi Yafeng, Shen Yongping, Hu Ruji. 2002. Preliminary study on signal, impact and foreground of climatic shift from warm-dry to warm-humid in Northwest China [J]. Journal of Glaciology and Geocryology (in Chinese), 24 (3): 219 - 226.
- Storch H V, Zwiers F. 1999. Statistical Analysis in Climate Research [M]. Cambridge, United Kingdom: Cambridge University Press, 116.
- Thyer M, Kuczera G. 2000. Modeling long term persistence in hydroclimatic time series using a hidden state Markov model [J]. Water Resour. Res., 36: 3301 - 3310.
- Tsonis A A, Roebber P J, Elsner J B. 1998. A characteristic time scale in the global temperature record [J]. Geophys. Res. Lett., 25: 2821 - 2823.
- Vannitsem S, Nicolis C. 1991. Detecting climatic transitions: Statistical and dynamical aspects [J]. Atmos. Phys., 64: 245 - 254.
- 王绍武, 龚道溢, 叶瑾琳, 等. 2000. 1880 年以来中国东部四季降水量序列及其变率 [J]. 地理学报, 55 (3): 281 - 293. Wang Shaowu, Gong Daoyi, Ye Jinlin, et al. 2000. Seasonal precipitation series of eastern China since 1880 and the variability [J]. Acta Geographica Sinica (in Chinese), 55 (3): 281 - 293.
- 王绍武, 蔡静宁, 朱锦红. 2002. 19 世纪 80 年代到 20 世纪 90 年代中国年降水量的年代际变化 [J]. 气象学报, 60 (5): 637 - 639. Wang Shaowu, Cai Jingning, Zhu Jinhong. 2002. The interdecadal variations of annual precipitation in China during 1880's - 1990's [J]. Acta. Meteor. Sinica (in Chinese), 60 (5): 637 - 639.
- 魏凤英. 1999. 现代气候统计诊断与预测技术 [M]. 北京: 气象出版社, 214 - 228. Wei Fengying. 1999. Statistical Diagnose and Forecast Method in Present Climate Research (in Chinese) [M]. Beijing: China Meteorological Press, 214 - 228.
- 魏凤英, 谢宇. 2005. 近百年长江中下游梅雨的年际及年代际振荡 [J]. 应用气象学报, 16 (4): 492 - 499. Wei Fengying, Xie Yu. 2005. Interannual and interdecadal oscillations of Meiyu over the middle-lower reaches of the Changjiang River for 1885 - 2000 [J]. J. Appl. Meteor. Sci., 16 (4): 492 - 499.
- 闻新宇, 王绍武, 朱锦红, 等. 2006. 英国 CRU 高分辨率格点资料揭示的 20 世纪中国气候变化 [J]. 大气科学, 30 (5): 894 - 904. Wen Xinyu, Wang Shaowu, Zhu Jinhong, et al. 2006. An overview of China climate change over the 20th century using UK UEA/CRU high resolution grid data [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 30 (5): 894 - 904.
- Wu B Y. 2005. Weakening of Indian summer monsoon in recent decades [J]. Adv. Atmos. Sci., 22 (1): 21 - 29.
- 肖栋, 李建平. 2007. 全球海表温度场中主要的年代际突变及其模态 [J]. 大气科学, 31 (5): 839 - 854. Xiao Dong, Li Jianping. 2007. Main decadal abrupt changes and decadal modes in global sea surface temperature field [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 31 (5): 839 - 854.
- 严中伟, 季劲均, 叶笃正. 1990. 60 年代北半球夏季气候跃变 I: 降水和温度变化 [J]. 中国科学 (B 辑), 20 (1): 97 - 103. Yan Zhongwei, Ji Jinjun, Ye Duzheng. 1990. The climate regime shift in Northern Hemisphere summer during 1960's. I The variation of precipitation and temperature [J]. Science in China (Series B) (in Chinese), (1): 97 - 103.
- 杨梅学, 姚檀栋. 2003. 小波气候突变的检测: 应用范围及应注意的问题 [J]. 海洋地质与第四纪地质, 23 (4): 73 - 76. Yang Meixue, Yao Tandong. 2003. Abrupt climate change detection using wavelet analysis: Application and problems [J]. Marine Geology & Quaternary Geology (in Chinese), 23 (4): 73 - 76.
- 宇如聪, 周天军, 李建, 等. 2008. 中国东部气候年代际变化三维特征的研究进展 [J]. 大气科学, 32 (4): 893 - 905. Yu Rucong, Zhou Tianjun, Li Jian, et al. 2008. Progress in the studies of three-dimensional structure of interdecadal climate change over eastern China [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 32 (4): 893 - 905.
- 张存杰, 李栋梁, 王小平. 2004. 东北亚近 100 年降水变化及未来 10~15 年预测研究 [J]. 高原气象, 23 (6): 919 - 929. Zhang Cunjie, Li Dongliang, Wang Xiaoping. 2004. Study on precipitation variability in last 100 years and trend prediction in Northeast Asia in future 10 - 15 years [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 23 (6): 919 - 929.
- 张家诚, 张先恭. 1979. 近五百年我国气候的几种振动及其相互关系 [J]. 气象学报, 37 (2): 49 - 57. Zhang Jiacheng, Zhang Xiangong. 1979. Climatic fluctuations during the last 500-year in China and their interdependence [J]. Acta. Meteor. Sinica (in Chinese), 37 (2): 49 - 57.
- 张秀芝, 孙安健. 1996. 气象资料缺测插补方法的对比研究 [J]. 气象学报, 54 (5): 625 - 632. Zhang Xiuzhi, Sun Anjian. 1996. Study of interpolation methods of missing annual precipitation data for long-term series [J]. Acta. Meteor. Sinica (in Chinese), 54 (5): 625 - 632.