

## 近 50 年长江中下游地区降水特征分析

何书樵<sup>1</sup>, 郑有飞<sup>2\*</sup>, 尹继福<sup>3</sup>

1. 南京信息工程大学环境科学与工程学院, 南京 210044;

2. 南京信息工程大学, 江苏省大气环境监测与污染控制高技术研究重点实验室, 南京 210044; 3. 南京信息工程大学大气物理学院, 南京 210044

**摘要:** 极端降水事件是导致长江流域洪涝灾害的主要原因之一, 分析其变化趋势可为该地区的生态建设提供重要的参考信息。利用 1960—2011 年长江中下游地区 (湖北、湖南、江苏、安徽、江西、浙江) 84 个气象站逐日降水资料, 基于线性倾向估计法、Mann-Kendall 法、小波分析法及 EOF 方法, 分析了该地区近 50 年降水时空分布特征。结果表明: 长江中下游地区近 50 年来降水呈上升趋势, 但不显著; 除降水强度外, 各降水指数均呈上升趋势, 其中大雨天数和日最大降水量上升趋势较显著; 在年代际尺度上, 各指数呈 10 年/20 年周期震荡, 在年际尺度上, 各降水指数变化周期差异较大; 降水强度突变现象发生于 2000 年, 其他指数突变主要出现在 1970 年; EOF 前三种模态, 能够较好的表达大雨天数空间分布特征, 其中一致性异常是其主要空间模态。

**关键词:** 降水指数; 时空分布特征; 长江中下游地区

**中图分类号:** X16

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1674-5906 (2013) 07-1187-06

**引用格式:** 何书樵, 郑有飞, 尹继福. 近 50 年长江中下游地区降水特征分析[J]. 生态环境学报, 2013, 22(7): 1187-1192.

ZHENG Youfei, HE Shuqiao, YIN Jifu. An analysis on precipitation characteristics over middle and lower reaches of Yangtze River in the last 50 years [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2013, 22(7): 1187-1192.

20 世纪以来, 在全球气候变暖的大背景下, 干旱、洪水、台风、高温、低温及雨雪冰冻等极端事件频发, 灾害损失加剧, 对社会稳定、经济发展和人民生活等影响非常严重<sup>[1-3]</sup>。IPCC(The Intergovernmental Panel on Climate Change)第四次全球气候评估报告 (AR4) 指出, 1951—2003 年中高纬度地区的强降水事件可能大量增长了, 甚至在总降水量减少的区域也出现了类似变化<sup>[4]</sup>。观测研究也表明, 我国的降水平均强度和降水值都有增加的趋势, 极端降水事件趋于增多<sup>[5]</sup>。极端降水事件强度和频率的变化, 导致气候变化的影响更加明显, 如致使洪水频发、加剧土壤侵蚀等<sup>[6]</sup>。因此, 研究极端降水事件问题, 对一定程度上降低极端降水事件对环境和社会造成的危害, 具有重要的意义。

长江中下游地区是我国重要的工农业基地, 也是经济和科技文化发达地区, 同时也是我国降水异常、旱涝频发的地区之一。长江中下游地区降水事件的变化规律引起了众多学者的广泛关注。Zhai 等<sup>[7]</sup>对我国 50 年来降水和极端降水趋势研究表明, 我国年降水总体呈日数减少而强度增加趋势, 东南地

区包括长江流域呈降水增多趋势, 极端降水事件的变化主要由总的降水天数增加和强度增加引起。部分学者指出<sup>[8]</sup>长江流域中下游地区极端降水量呈现显著增加趋势, 且存在显著的空间分布差异。陈隆勋等<sup>[9-11]</sup>对 20 世纪后半叶年降水量的研究表明, 长江中下游地区年降水量呈波动变化的上升趋势, 其中 60—70 年代为干旱期, 80—90 年代为多雨期, 而 90 年代是长江中下游地区近百年来降水量最多的 10 年。马开玉等<sup>[12]</sup>研究我国长江流域降水事件的变化趋势, 得出: 降水量的增加主要由极端降水量的增加引起, 四季的小雨趋势以减少为主。陈艺敏等<sup>[13]</sup>用 EOF 分解方法确定了降水的相关区域发现上海、南京、汉口、芜湖、九江 5 站可以代表长江中下游的梅雨区内主要降水空间特征。杨宏青等<sup>[14]</sup>研究我国长江流域极端降水频数及日最大降水强度时空分布, 发现长江流域极端降水出现了显著增加的趋势, 突出表现在中下游地区。

但是这些研究大多采用极端性较强的指标进行分析。鉴于此, 本文利用 WMO-CCL/CLIVAR 发布的 5 种降水指标<sup>[15-17]</sup>, 这些指数均具有较弱的极端性、噪声低、显著性强的特点, 对降水事件能进

**基金项目:** 国家科技支撑计划项目 (2007BAC29B05); 江苏省研究生培养创新工程项目 (CXZZ12\_0499); 江苏省气象灾害重点实验室项目 (KLME05005)

**作者简介:** 何书樵 (1989 年生), 女, 硕士研究生, 主要从事环境气象学方面的研究。E-mail: heshuqiao@126.com

\*通信作者: 郑有飞 (1959 年生), 男, 教授, 博士, 博士生导师, 主要从事环境气象学方面的研究。E-mail: zhengyf@nuist.edu.cn

**收稿日期:** 2013-04-09

行比较全面的描述<sup>[18]</sup>,且在中国地区具有较强的适用性。以期为进一步研究长江中下游地区降水的时空变化特征提供了理论依据。

## 1 资料与方法

### 1.1 资料

本文采用中国气象局整编的1960—2011年长江中下游地区84个气象观测站(图1)分析该地区(湖北、湖南、江西、安徽、江苏、浙江)降水时空分布特征。由于所选区域站点分布均匀且空间分布较密集,因此本文使用了简单的算术平均,并未采用Jones等<sup>[19]</sup>提出的面积平均的方法,以避免插值所产生的误差。

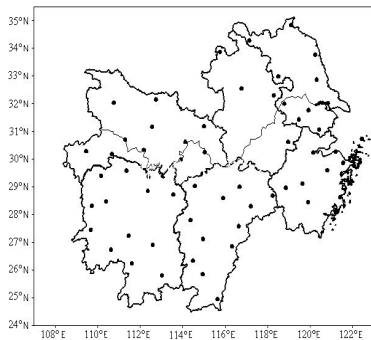


图1 长江中下游地区气象观测站空间分布图

Fig.1 Spatial distribution of precipitation extremes in the Mid-Lower Yangtze River valley

### 1.2 方法

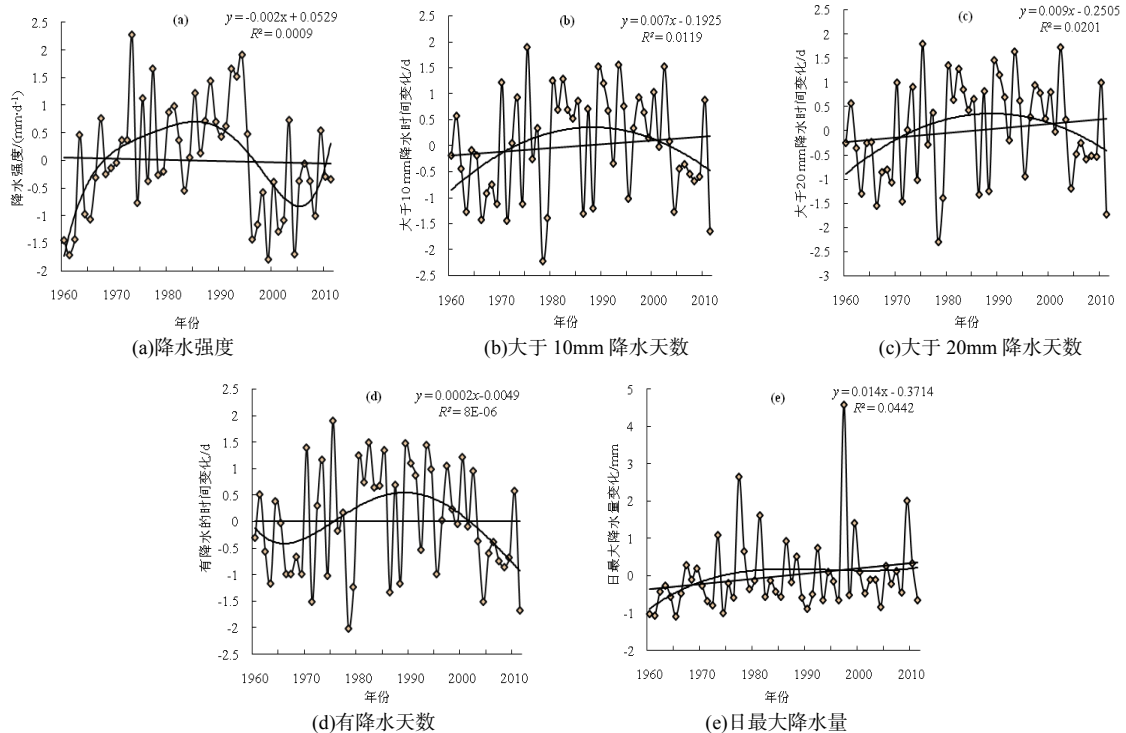
本文选取了世界气象组织的气候变化和气候监测计划WMO-CCL/CLIVAR发布的5种降水指数,具体定义见表1。

表1 降水指数定义

Table 1 The definition of precipitation index

指数	定义	指数缩写
降水强度	总降水量/降水天数	mm/d
有降水天数	日降水量>0 mm 天数	d
日最大降水	日最大降水量	mm
中雨天数	日降水量>10 mm 天数	d
大雨天数	日降水量>20 mm 天数	d

运用线性倾向估计法分析各指数的长期变化趋势,运用Mann-Kendall方法(简称M-K法)分析降水指数的突变特征,小波分析法分析降水指数的周期变化,并利用经验正交函数(EOF)分解法对趋势变化显著的降水指数的时空变化特征进行分析。M-K法是一种非参数方法,适用于具有任何分布的样本,且不受少数异常值的干扰,因此被广泛运用于降水、径流、气温和水质等要素时间序列的趋势变化的分析;小波分析不仅可给出气候变化的尺度,还可显示变化的时间位置,因此被广泛用于气候诊断和预测;EOF在提取气象场优势信号,反映气象场空间分布特征等方面有其独到之处。四种方法的原理参见文献[20]。



其中斜线代表线性回归趋势线,折线代表各降水指数曲线代表滑动平均曲线

图2 长江中下游各降水指数的时间变化及线性趋势

Fig.2 Time variation trend of precipitation index in the Mid-Lower Yangtze River valley

## 2 长江中下游降水时间分布特征

### 2.1 长江中下游降水指数的长期变化趋势

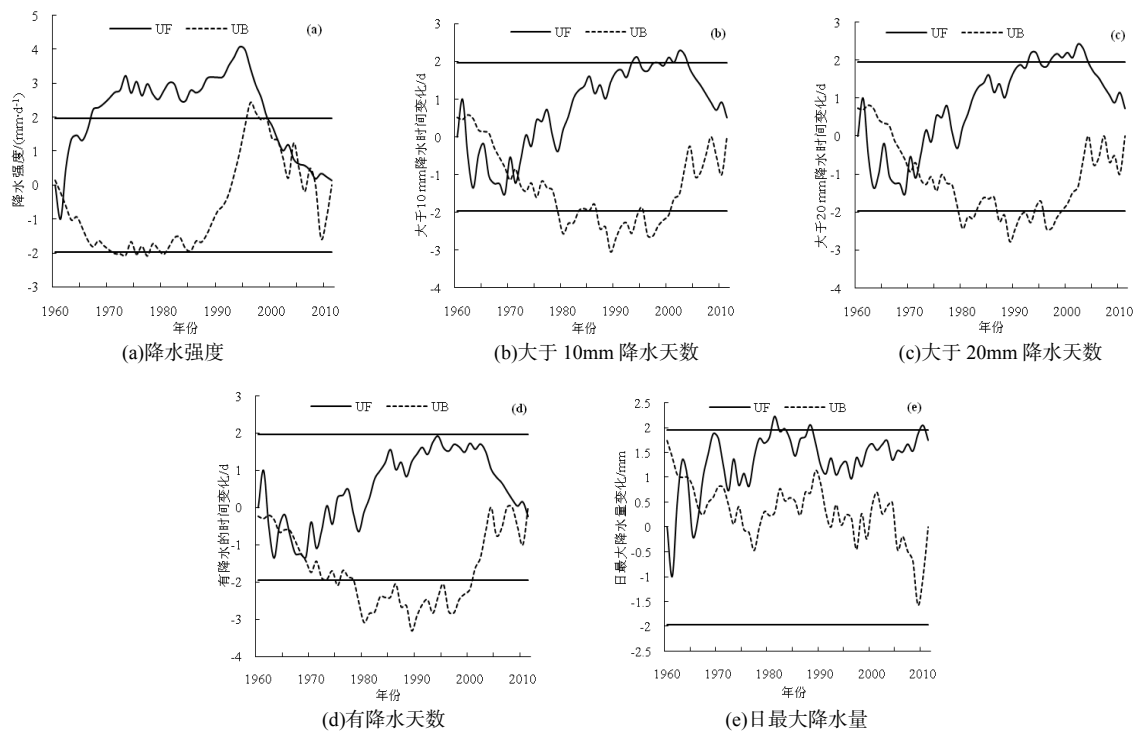
图 2 是长江中下游各降水指数的时间变化及线性趋势。结果表明:近 50 年来长江中下游地区降水整体是呈上升趋势的,但上升趋势不太明显;各降水指数除了降水强度呈微弱下降趋势外,其他指数均呈上升趋势,其中日最大降水量上升趋势最明显,线性趋势倾向率为  $0.14 \text{ mm} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$ ,大于 10 mm 降水天数和大于 20 mm 降水天数的上升趋势比较接近,分别为  $0.073 \text{ d} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$ 、 $0.095 \text{ d} \cdot (10 \text{ a})^{-1}$ ,而有降水天数虽也是上升趋势,但上升趋势不明显;各降水指数的自相关系数均没有通过显著性水平检验(显著水平  $\alpha = 0.05$  时,相关系数为 0.273 2)。

图 2 中各降水指数的滑动平均曲线表明降水指数均在不同时间段存在着偏多和偏少时期,且各降水指数偏多和偏少时期并不一致。其中降水强度的降水呈先上升后下降再上升的趋势,从 1960 年到 1990 年是呈上升趋势,但上升趋势不明显,1990 年到 2005 年呈下降趋势,趋势明显,2005 年到 2010 年以后又呈现明显地上升趋势,降水强度存在明显的干湿时段,从降水的年际变化上看,1973、1977、1993 年降水偏多,1966、1974、1998、2005 年降水偏少;大于 10 mm 降水天数和大于 20 mm 降水天数两个降水指数偏多和偏少时期基本一致,均是 20 世纪 60、70 年代及 2000 年以后为相对偏少阶段,20 世纪 80、90 年代为相对偏多阶段;有降水天数

指数的偏少时期为 20 世纪 60、70 年代及 2005 年以后,偏多时期为 20 世纪 80、90 年代;日最大降水量指数的偏少时期为 20 世纪 60、80 年代及 2000 年以后,偏多时期为 20 世纪 70、90 年代。

### 2.2 长江中下游降水指数的突变分析和年代变化特征

图 3 是长江中下游各降水指数的 M-K 统计量曲线。通过 M-K 突变检验法结合图 3 可知:各指数的曲线 UF 和曲线 UB 在  $\pm 1.96$  临界值之间(通过了  $\alpha = 0.05$  的显著性水平检验)均有一个显著的交点(此交点对应的时刻为突变开始的时间)。其中降水强度显示 60 年代中期以后降水一直呈上升趋势,90 年代以后上升趋势明显,突变点位于 2000 年前后,表明 2000 年以后,降水强度明显增加;大于 10 mm 降水天数和大于 20 mm 降水天数两个降水指数的突变情况基本一致,自 20 世纪 70 年代以后,两降水指数均一直呈上升趋势,且上升趋势明显(通过了  $\alpha = 0.05$  的显著性水平检验),具体突变是从 1972 年开始的,表明 1972 年以后,降水大于 10 mm/20 mm 的天数明显增加;有降水天数指数显示自 20 世纪 70 年代以后呈上升趋势,1970 年前后上升趋势明显,突变点位于 1969 年前后,表明从 1969 年以后,有降水天数明显增加;日最大降水量指数则是自 20 世纪 60 年代中期以后呈上升趋势,其中 1965 年后上升趋势明显突变点位于 1967 年前后,表明自 1967 年以后日最大降水量明显增



其中两直线为 95% 的显著水平临界值

图 3 长江中下游各降水指数的 M-K 统计量曲线

Fig.3 Curve of the statistics of precipitation index in the Mid-Lower Yangtze River valley

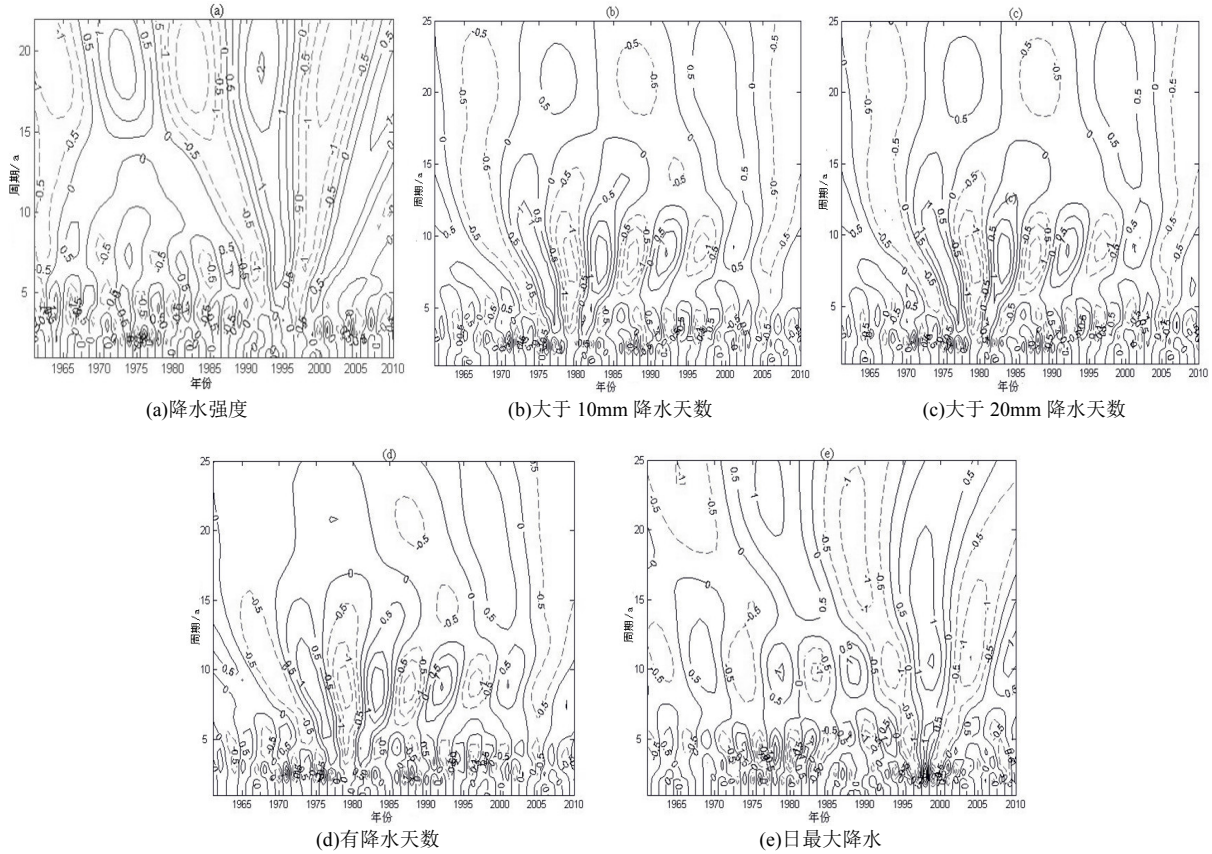


图4 长江中下游各降水指数的小波变换系数(实部)分布图

Fig.4 wavelet transform coefficient profile of the precipitation indices in Mid-Lower Yangtze River valley

加。由以上分析得出：降水强度晚于其他指数，发生在 2000 年左右；其他四种指数的突变时间均较接近，发生在 1970 年左右，表明 1970 年前后，降水指数明显增加。

图 4 为长江中下游降水指数的小波变换系数(实数)分布图。整体而言，各降水指数在年代际尺度上，均存在着 10 年和 20 年左右的周期振荡，在年际尺度上，不同的指数存在不同的变化周期。其中降水强度指数在年代际尺度上，20 年左右的周期振荡非常明显，期间降水经历了少→多→少→多→少→多 6 个循环交替，且 2005 年以后降水偏多，直到 2010 年等值线未闭合，说明 2010 年以后一段时间内降水仍偏多；在年际尺度上，20 世纪 90 年代中期以前存在 5、8 年左右的周期变化，其中从 20 世纪 70 年代到 80 年代间还存在 2 年左右的短周期变化，20 世纪 90 年代中期以后还存在 4 年左右的短周期振荡；大于 10 mm 降水天数和大于 20 mm 降水天数两个降水指数的周期变化基本一致，在年代际尺度上主要存在 70 年左右的周期振荡，在年际尺度上，20 世纪 70 年代中期以前存在 3、5 年左右的短周期变化，20 世纪 70 年代中期以后还存在 5、10 年左右的短周期振荡；有降水天数指数在年代际尺度上，存在明显地 10 年左右的周期振荡，在年际尺度上，从 1960—1970 年及 1980—2010 年

两个时期均存在 5 年左右的周期振荡，其中从 1970—1990 年间还存在 2 年左右的短周期振荡；日最大降水量指数在年代际尺度上，主要存在显著的 10 年左右的周期振荡，其中在 20 世纪 90 年代中期以前还存在 25 周年左右的周期振荡，20 世纪 90 年代中期以后存在 15 年左右的周期振荡，在年际尺度上，存在显著的 5 年左右的周期振荡，其中在 1975—1985 年及 1995—2005 年间还存在 2 年左右的短周期变化。

### 3 长江中下游降水空间分布特征

为了进一步了解长江中下游降水指数的时空演变特征，选取趋势变化显著的日降水量超过 20 mm 降水天数这一指数作为研究对象，对这 84 个站点从 1960 年到 2011 年的大于 20 mm 的日数的变量场进行 EOF 展开。表 2 给出了 EOF 展开的前三个模态的方差贡献。

表 2 EOF 展开前 3 个模态的方差贡献和积累贡献 (%)  
Table 2 contribution and accumulated contribution of front 3 EOF with total square error

主要模态	1	2	3
方差贡献	44.9	17.5	7.8
积累方差贡献	44.9	62.4	70.3

从表中可以看出，仅前三个模态的积累方差贡

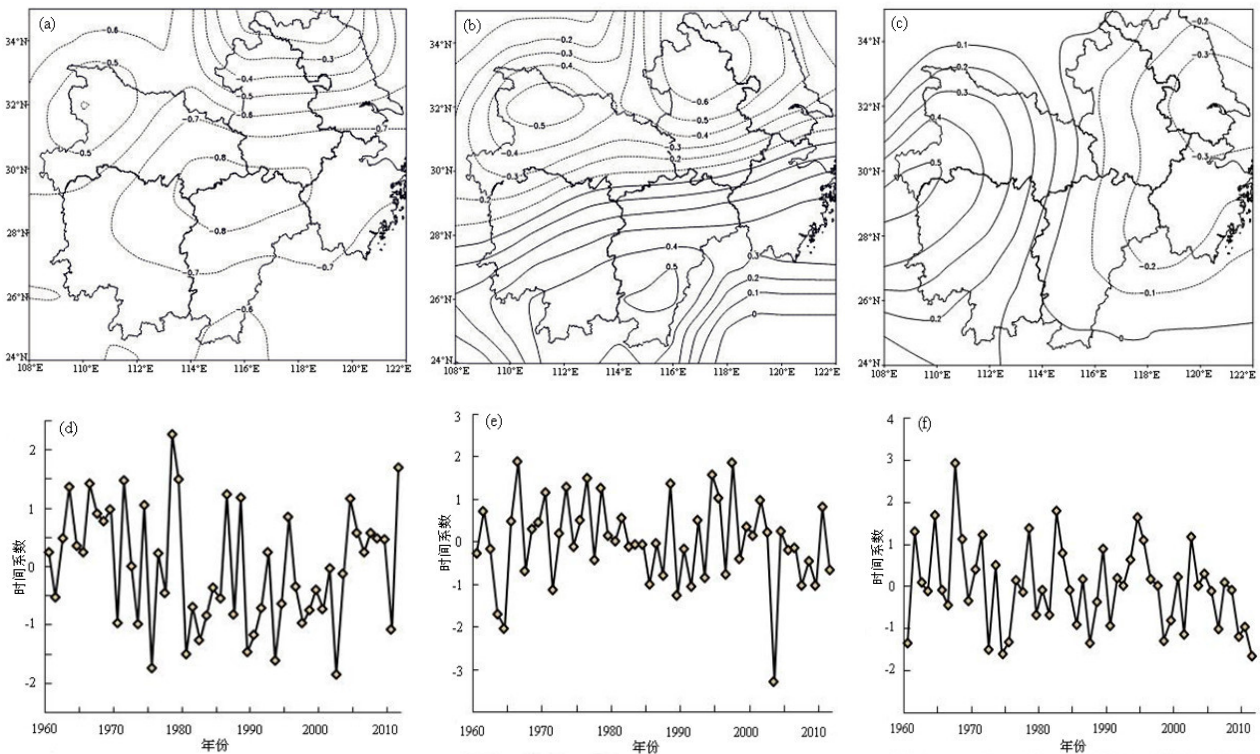


图 5 EOF 分析的第 1(a)、第 2(b)和第 3(c)空间模态及对应的第 1(d)、第 2(e)和第 3(f)空间模态的时间系数演变曲线

Fig.5 The spatial distribution(a, b, c) and time coefficient(d, e, f) of the three eigenvector

献率就高达 70.3%，因此这三个模态是长江中下游地区降水大于 20 mm 降水日数的最主要空间模态。

第一模态的方差贡献率为 44.9%，相应的荷载场空间分布图如图 5(a)所示，全区所有荷载均为负值，表明全区为降水大于 20 mm 的大雨日数偏少的一致性同位相分布，高荷载中心位于湖北北部和江西北部，即为长江中下游地区降水大于 20 mm 日数的主要分布特征。从对应的第一模态的时间系数图 5(d)分析并结、合空间分布图看出，20 世纪 60 年代、20 世纪 80 年代后期及 2004 年以后，湖北北部和江西北部的大雨日数偏少，20 世纪 80 年代中前期及 20 世纪 90 年代大雨日数相对偏多。

第二模态的方差贡献为 17.5%，其荷载场空间分布如图 5(b)所示，零线将长江中下游地区分为了南北两部分，反映的是全区降水大于 20 mm 天数呈南北型的反位相分布，北部为负荷载区，南部为正荷载区。负荷载区中心主要位于湖北北部、北部的安徽和江苏省的交界处，正荷载区中心主要位于江西南部。结合相应第二模态的时间系数图 5(e)可看出，20 世纪 60 年代中期以后到 70 年代、20 世纪 90 年代中期以后到 2000 年，北部大雨日数减少，南部大雨日数增多；20 世纪 60 年代中期以前、20 世纪 80 年代到 90 年代初及 2000 年以后，北部的大雨日数增多，南部的大雨日数减少。

第三模态的方差贡献仅为 7.8%，图 5(c)为其荷载场空间分布图，表现为全区东部和西部呈反位相

的特点，即西部多(少)与东部少(多)的分布型。正荷载中心位于湖北西部与湖南的交界处，负荷载中心位于江苏的东南部地区。结合相应的第三模态的时间演变曲线图 5(f)来分析，20 世纪 80 年代中期以前，西部的大雨日数增加，东部相对减少，20 世纪 80 年代中期以后，西部大雨日数相对减少，东部的增加。

#### 4 结论

通过 1960—2011 年长江中下游地区各站点的逐日降水资料，对长江中下游地区降水特征进行了分析，得出以下结论。

1) 近 50 年来长江中下游地区降水整体是呈上升趋势的，上升趋势不太明显。长江中下游地区各降水指数与总降水量相关较好，对长江中下游降水的时空变化特征有很好的指示作用。

2) 长江中下游极端降水指数除降水强度呈微弱下降趋势，其他指数均呈上升趋势，上升趋势不明显。

3) 各降水指数在年代际尺度上，均存在着 10 年和 20 年左右的周期振荡，在年际尺度上，不同的指数存在不同的变化周期。

4) 各降水指数都有突变现象发生，降水强度的突变时间发生在 2000 年左右，其他的降水指数的突变时间均比较接近，发生在 1970 年左右。

5) 利用 EOF 方法分析长江中下游地区大雨天数的时空演变特征，分别对 84 个站点近 52 年大于

20 mm 降水日数序列场作 EOF 展开。前三种模态基本代表了大雨天数指数的空间分布特征。一致性偏多(少)的同位相分布特征是长江中下游地区极端降水的最主要的空间模态,而南北反向变化模态也是比较重要的。

#### 参考文献:

- [1] IPCC. Climate Changes 1995: The Science of Climate Change [M]. New York: Cambridge University Press, 1996: 141-193.
- [2] 田红,李春,张士洋. 近 50 年我国江淮流域气候变化[J].中国海洋大学学报,2005,35(4): 539-544.
- [3] Li Xiao dong, Zhu Yafen, Qian Weihong. Spatiotemporal variations of summer rain fall over Eastern China[M]. Journal of climate, 2006, 18: 1880-1999.
- [4] IPCC. Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change[M]. Cambridge University Press, 2007: 246-293.
- [5] 汪方,田红. 淮河流域1960—2007年极端降水事件特征[J]. 气候变化研究进展, 2010, 6(3): 228-229.
- [6] IPCC. Climate Change 2011: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change[M]. Cambridge University Press, 2011: 173-202.
- [7] Zhai Panmao, Trends in total precipitation and frequency of daily precipitation extremes over China[J]. Journal of climate, 2005, 18: 1096-1108.
- [8] 刘小宁. 我国暴雨极端事件的气候变化特征[J]. 灾害学, 1999, 14(1): 54-59.
- [9] 陈隆勋,朱文琴,王文,等. 中国近45年来气候变化的研究[J]. 气象学报, 1998, 56(3):122-126.
- [10] 龚道溢,王绍武,朱锦红. 1990年代长江中下游地区多雨的机制分析[J]. 地理学报, 2002,55(5):567-573.
- [11] 黄荣辉,徐子红,周连童. 我国夏季降水的年代际变化及华北干旱化趋势[J]. 高原气象, 1999,18(4):465-476.
- [12] 马开玉,李北群,曾庆云. 长江中下游强降水非均匀特征[J]. 气象科学, 2010,29(3):251-257.
- [13] 陈艺敏,钱勇甫. 长江中下游气候的长期变化及基本态特征[J]. 南京气象学院学报, 2004,27(1):65-72.
- [14] 杨宏青,陈正洪. 长江流域近40年强降水的变化趋势[J]. 气象, 2011, 31(3): 66-88.
- [15] 吕军,江志红,魏建苏,等. 南京和镇江最高水位与长江中下游地区可利用降水的统计分析[J]. 气象科学, 2007, 27(1):82-87.
- [16] 王冀,江志红,严明良,等. 1960—2005年长江中下游极端降水指数变化特征分析[J]. 气象科学, 2008,28(4):384-388.
- [17] 王冀,江志红. 近40年长江中下游极端降水变化特征[J]. 气象科学, 2006, 26(2):160-162.
- [18] North G R, Bell T L, Cahalan R F. Sampling errors in the estimation of empirical orthogonal function[J]. Mon Wea Rev, 1982, 110(7): 699-706.
- [19] Jones P D, Raper S C B, Bradley R S. Northern Hemisphere surface air temperature variations: 1851-1984[J]. J. of Climate and Applied Meteorology, 1986, 25:161-179.
- [20] 魏凤英. 现代气候统计诊断与预测技术[M]. 北京: 气象出版社, 1999: 124-198.

## An analysis on precipitation characteristics over middle and lower reaches of Yangtze River in the last 50 years

ZHENG Youfei<sup>1</sup>, HE Shuqiao<sup>2\*</sup>, YIN Jifu<sup>3</sup>

1. Jiangsu Key Laboratory of Atmospheric Environment Monitoring and Pollution Control, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China;

2. College of Environmental Science and Engineering, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China;

3. College of Atmospheric physics, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China

**Abstract:** Extreme climate events often cause damages to society and ecosystems, and the impacts of extreme precipitation events are of the most critical reasons causing devastating floods of the Yangtze Basin. Therefore, variations trends in extreme precipitation events need to be reasonably assessed, which can provide meaningful information on regional ecological conservation. Based on the daily precipitation data derived from 84 gauge stations over the middle and lower reaches of Yangtze River from 1960 to 2011, The spatial and temporal characteristics of precipitation are investigated according to tendency analysis, Morlet wavelet analysis, Mann-Kendall test and Empirical Orthogonal Function (EOF) method. The results show that, in past 50 years, all of precipitation indices present increasing tendency except precipitation intensity, and both of the number of heavy precipitation days and maximum 1-day precipitation increase obviously; on the inter-decadal timescale, it significantly demonstrates a 10-year/20-year oscillation period; the mutations mainly appear in 1970 except that for precipitation intensity happened in 2000; the first, second and third modal of EOF can perfectly present the spatial distribution characteristics of the number of heavy precipitation days; the consistent anomaly distribution is the main spatial model over the middle and lower reaches of Yangtze River.

**Key words:** precipitation indices; spatial and temporal distribution characteristic; middle and lower reaches of Yangtze River