

中国东部季风区夏季降水的时空分布特征

刘笑^a, 邵晓华^a, 王涛^b

(南京信息工程大学 a. 遥感学院; b. 大气科学学院, 南京 210044)

摘要: 采用 EOF 法对中国东部季风区夏季(6月-8月)降水场进行分解,得到三种主要的降水空间分布型,即“总体一致型”、“南北涝(旱)中间旱(涝)型”以及“南涝(旱)北旱(涝)型”。利用 Mann Kendall 检验和功率谱对时间系数做进一步处理,分析各空间分布型的时间演变特征,结果表明:第一、第二时间系数均未检测出突变的发生,第三时间系数存在一次突变,时间开始于 20 世纪 70 年代初期,由之前的“南旱北涝型”转变为“南涝北旱型”;第一时间系数存在 50 年左右的显著周期,第二时间系数存在 2 年左右的显著周期,第三时间系数存在 50 年左右的主周期和 2~3 年左右的次周期。对季风指数和时间系数进行相关分析,发现第二时间系数与东亚、南海季风指数存在正相关关系,揭示了季风强弱对夏季主要降水场的指示作用。

关键词: 东部季风区;夏季降水;时空分布;EOF; Mann Kendall 检验;功率谱

中图分类号: P426 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-1683(2013)06-0010-06

Spatial and Temporal Distribution Characteristics of Summer Precipitation in the Monsoon Region of Eastern China

LIU Xiao^a, SHAO Xiaohua^a, WANG Tao^b

(a. College of Remote Sensing; b. College of Atmospheric Science, Nanjing University
of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China)

Abstract: EOF method was applied to analyze the summer precipitation field (June-August) in the monsoon region of eastern China. Three main spatial distribution types of precipitation were obtained, including the even distribution of flood and drought type, flood (drought) in the north and south while drought (flood) in the center type, and flood (drought) in the south while drought (flood) in the north type. The Mann Kendall test and power spectrum analysis were used to analyze the temporal characteristics of each above type of spatial distribution. The results showed that (1) no mutations are detected for the first and second time coefficients but there is a mutation for the third time coefficient. The mutation occurred in the early 1970s with the type of spatial distribution varying from “southern drought and northern flood” to the opposite; and (2) a cycle of 50 years exists in the first time coefficient, a cycle of two years in the second time coefficient, and two cycles with a main cycle of 50 years and a sub cycle of 2 to 3 years in the third time coefficient. The correlation analysis between monsoon indices and time coefficients showed that there are positive correlations between the second time coefficients and monsoon indices of East Asia and South China Sea, which indicated the intensity of monsoon on summer precipitation.

Key words: Eastern monsoon region; summer precipitation; temporal and spatial distribution; EOF; Mann Kendall test; power spectrum

1 研究背景

气候变化既包括缓慢的、连续性的周期性变化,也包括快速的、不连续的突变。近百年来全球气候最突出的特点是显著的增暖趋势。IPCC(政府间气候变化专门委员会)第四

次评估报告指出,最近 100 年(1906 年-2005 年)全球平均地表温度上升了 0.74 °C^[1]。相关研究表明,中国近百年地面平均气温的变化和线性趋势与北半球大体一致^[2]。但由于受季风影响,我国气候与全球气候的年代际变化有不同之处,降水比气温有更明显的年代际变化^[3]。

收稿日期: 2013-05-19 修回日期: 2013-08-30 网络出版时间: 2013-10-10

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20131010.1027.013.html>

作者简介: 刘笑(1989-),女,江苏南京人,硕士研究生,主要从事全球变化与区域响应的研究。E-mail: liuxiaosmile7@163.com

通讯作者: 邵晓华(1978-),女,江苏常州人,副教授,博士,主要从事全球变化与区域响应的研究。E-mail: xiaohua.shao@163.com

关于中国东部季风区夏季降水的年代际变化问题,近些年来已经成为大气科学研究关注的焦点^[4]:李红梅^[5]等对近40年我国东部盛夏降水变化做分析,发现降水特性的变化,不仅表现为线性趋势,还存在显著的年际和年代际变化;郭其蕴^[6]等、吕俊梅^[7]等、缪启龙^[8]等研究指出,在20世纪70年代中期,东亚夏季风经历了由强到弱的年代际变化,夏季风强时中国东部、华北地区多雨,长江流域少雨,而夏季风弱时情况则相反;丁一汇^[9]等研究发现,从20世纪70年代后期开始,东亚主要异常雨带有不断南移的趋势,造成了南涝北旱的降水分布;周连童^[3]等利用我国夏季降水资料分析得出我国夏季降水在1976年前后发生了一次跃变;黄荣辉^[10-11]等研究认为在90年代末东亚夏季气候可能又发生了一次明显的年代际变化;张永领^[12]等对长江流域夏季降水进行诊断分析,发现长江三角洲和汉水-长江三峡在1974年发生了由少到多的突变;郝立生^[13]等研究发现华北降水近50年表现为减少趋势,特别是从20世纪70年代突变发生以来减少更加明显。

全球变暖是一个长时间尺度的还在继续的过程^[14],由此引起季风环流变化,导致我国东部各地区在不同阶段表现出不同的降水特征,因此有必要利用更长时间尺度的降水资料,来探讨降水的年代际变化。由于EOF法在提取物理量场时空变化的信息特征方面具有明显的优点,多年来一直广泛应用于大气及地球科学各领域^[15]。但在相关研究中,鲜有对分解出的时间系数做进一步处理后再分析讨论的。因此,本文以中国东部季风区夏季(6月-8月)降水量为研究对象,选取更长时间尺度(1951年-2012年)的降水序列,运用EOF法详细探讨了我国东部季风区夏季降水的主要空间分布型,再用Mann-Kendall检验和功率谱法对时间系数做进一步处理,分析各分布型的时间演变特征,并揭示其与季风指数的关系,为预测未来我国夏季降水空间分布型的变化趋势提供参考依据。

2 数据来源与研究方法

2.1 数据来源

本文以中国东部季风区1951年-2012年夏季(6月-8月)降水作为研究对象,降水数据来源于国家气候中心所提供的东部季风区138个气象站点的逐月(6月-8月)降水资

表1 前5个特征向量对应的特征值及其方差贡献率

Table 1 The characteristic values corresponding to the first five eigenvectors and their variance contribution rates

特征向量	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5
特征值	2 032 136 399	31 463 799	21 758 529	14 928 368	12 866 556
方差贡献率/(%)	90.63	1.40	0.97	0.67	0.57
累计方差贡献率/(%)	90.63	92.03	93.00	93.67	94.24

把方差贡献率作为衡量逼近原始场程度的指标^[19],第一经验正交函数的方差贡献率最大,具有与展开资料矩阵的 n 个样本最相似的特征^[20];第二经验正交函数的方差贡献率次之,具有与展开资料矩阵的 n 个样本第二相似的特征,以此类推。因此,只需选取前几个方差贡献率足够大的经验正交函数,就能够概括原始场的主要特征。

如何选取经验正交函数?分离出的经验正交函数究竟

料。各气象站点的地理分布范围(图1)为 $100^{\circ}\text{E}-132^{\circ}\text{E}$, $20^{\circ}\text{N}-49.2^{\circ}\text{N}$ 。

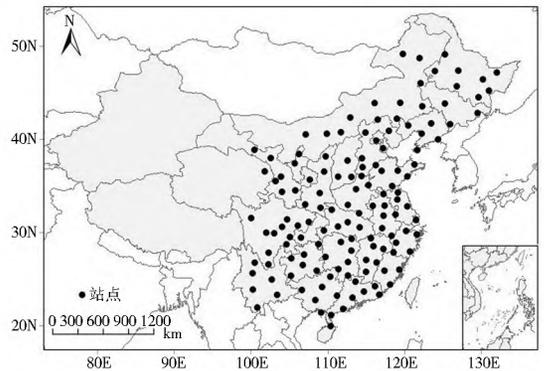


图1 中国东部季风区138个气象站点分布

Fig. 1 Distribution of 138 meteorological stations in the monsoon region of Eastern China

2.2 研究方法

本文主要采用EOF法对夏季降水场进行分解,再对得到的时间系数做突变检测和周期分析,探讨各分布型的时间演变特征。EOF法^[16]即经验正交函数分解法,是气候统计诊断中应用最为普遍的方法,其基本原理^[17]是把原变量场分解为正交函数的线性组合,构成为数很少的互不相关的典型模态,每个典型模态都含有尽量多的原始场的信息。EOF法没有固定的函数,能在有限区域对不规则分布的站点进行分解,展开的收敛速度快,并且分离出的空间结构具有一定的物理意义。

如果把一个气象要素场看成时间和空间的函数,EOF方法可将气象场分解为只与时间或空间有关的两部分,与空间有关的部分由正交函数组成,称为特征向量,表示原始场的空间典型结构,对应特征值大小表示该空间典型场的权重;与时间有关的部分表示各正交函数随时间的变化,称为时间系数,表示该典型场随时间的变化^[18]。

3 结果与讨论

3.1 中国东部季风区夏季降水的空间分布特征

对中国东部季风区138个气象站点1951年-2012年夏季(6月-8月)降水总量的原始场作EOF分解,得到前5个特征向量的特征值及其方差贡献率,见表1。

是有物理意义的信号还是毫无意义的噪音?要回答此类问题,就需要进行显著性检验^[16]。本文采用North等(1982)提出的计算特征值误差范围的方法来进行显著性检验。经计算发现,只有前三个特征值通过了检验,并且前三个特征向量的累计方差贡献率高达93%,足以表征东部季风区夏季降水场的变率分布结构。图2为前三个特征向量的空间分布图。

3.1.1 第一空间分布型

由图 2(a)可知,第一特征向量的各分量全区均为正数,而且夏季降水有四个正的高值中心,分别位于西南地区、华南地区、东南沿海和东北平原。所以第一特征向量反映了我国东部季风区夏季降水具有一致的变化趋势,一致偏多或一致偏少,即“总体一致型”,空间分布型的特征为自东南向西北逐渐递减。这主要是由于夏季我国大陆受来自太平洋的东南季风和来自印度洋的西南季风的影响,季风带来大量的海洋水汽,降水沿着季风输送方向逐渐减少,越靠近水汽发源地降水越多,所以形成了自沿海向内陆逐渐递减的降水空间分布格局。

3.1.2 第二空间分布型

第二特征向量代表的是我国东部季风区夏季降水第二常见的雨型。图 2(b)中显示夏季降水从南到北呈现出“+ - +”交替分布的空间分布特征,即“南北涝(旱)中间旱(涝)型”。总体看来,等值线大致呈南北向纬度地带性分布,江淮流域大范围地区为负值,并依次向南北两侧递增,以南的华南地区和以北的黄河流域均为正值。这一特征向量代表的是江淮流域的降水趋势与黄河流域、华南地区相反的空间分布类型,即若江淮流域降水多,则黄河流域、华南地区降水少,反之亦然。这一分布型主要是由于西太平洋副高每年夏季的南北季节性移动所造成的。每年 7 月中旬,副高移到 25°N-30°N 附近,长江流域因受其控制而炎热少雨,进入伏旱期,而此时黄河流域正处于雨带,华南地区则不受副高控制,加上台风等热带气旋活动频繁,因此降水也较多。

3.1.3 第三空间分布型

由图 2(c)可见,我国东部季风区夏季降水的第三大雨型大致以长江流域为界,呈现南正北负的分佈格局,即“南涝(旱)北旱(涝)型”。其正的高值中心分别位于长江流域中下游和珠江流域北部,负的高值中心位于华北平原、辽东半岛以及四川盆地。关于“南涝(旱)北旱(涝)”的形成原因,有专家认为与东亚夏季风的强弱有关,夏季风强时,中国东部、华北地区多雨,长江、华南地区少雨,形成南旱北涝;夏季风弱时则相反,形成南涝北旱。

由以上分析可知,我国东部季风区夏季降水主要有三种空间分布类型,分别是“总体一致型”、“南北涝(旱)中间旱(涝)型”以及“南涝(旱)北旱(涝)型”。

3.2 中国东部季风区夏季降水的时间演变特征

3.2.1 趋势分析

我国东部季风区夏季降水每一种空间分布型的特征向量都对应一种时间系数,反映了该降水分布型随着时间的变化趋势:若某年时间系数为负数,表明当年降水与所对应的空间分布型相反;时间系数绝对值越大,表明该分布型越典型。图 3 为前 3 个特征向量所对应的标准化时间系数与其 10 年滑动平均曲线,分析如下。

图 3(a)为“总体一致型”所对应的时间系数,1951 年-2012 年期间均为正数。第一时间系数作为第一经验正交函数的权重,反映了我国大尺度的旱涝年的分布,时间系数大对应的是涝年,反之对应旱年。由图可知,第一时间系数的数值大部分在 0.12 附近振荡,其中高于 0.14 的年份为 1954

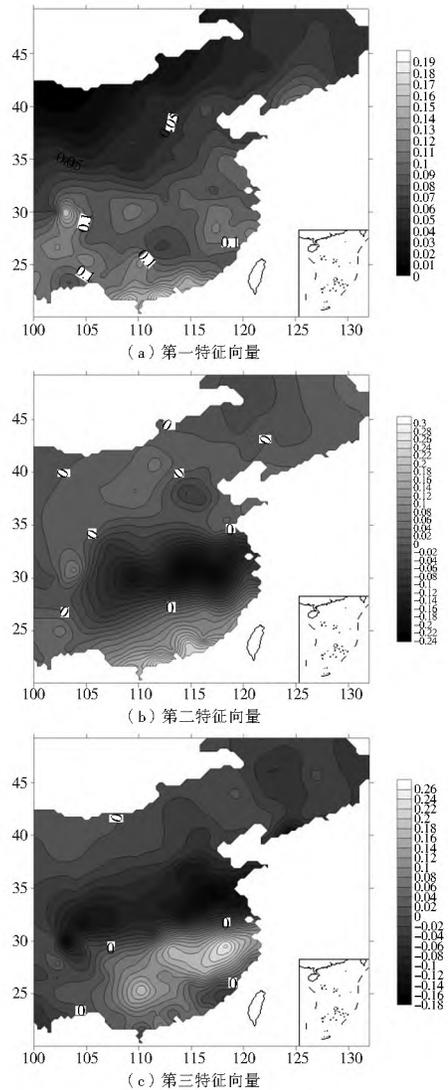


图 2 前三个特征向量的空间分布

Fig. 2 The spatial distribution of the first three eigen vectors

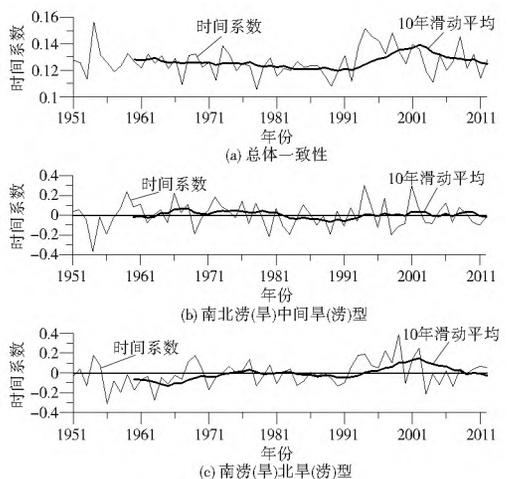


图 3 时间系数与其 10 年滑动平均曲线

Fig. 3 Time coefficients and their 10-year moving average curves

年、1995 年、1998 年和 2008 年,为我国夏季降水的涝年;低于 0.11 的年份为 1967 年、1978 年和 1989 年,为我国夏季降水的旱年;20 世纪 50-90 年代东部季风区夏季降水变化一直平缓,到了 90 年代后,有明显的上升趋势,并且连续出现了几个大尺度的涝年,最近几年又有趋于稳定的趋势。

图 3(b) 为“南北涝(旱)中间旱(涝)型”所对应的时间系数。由图可知, 20 世纪 50 年代中期前后时间系数为负。60-70 年代为正, 从 80 年代开始由正变为负, 说明降水类型由 70 年代之前的“南北涝中间旱型”转变为之后的“南北旱中间涝型”。直到 90 年代中期后, 降水类型开始在“南北旱中间涝型”和“南北涝中间旱型”之间转换, 但大多数年份的时间系数在 0 值附近正负振荡, 其绝对值较小, 说明无论是“南北涝中间旱型”还是“南北旱中间涝型”, 都不典型。

图 3(c) 为“南涝(旱)北旱(涝)型”所对应的时间系数。由图可知, 在 20 世纪 70 年代初期之前, 时间系数大多数为负, 此时对应的我国夏季降水场为典型的“南早北涝型”; 70 年代初到 80 年代末, 时间系数有所上升, 但幅度较小, 徘徊在 0 值附近, 呈现较弱的“南涝北旱型”特征; 90 年代后出现了明显的增长趋势, 一直持续到 2010 年前后, 表明 20 世纪 90 年代后, 我国夏季降水呈现出典型的南涝北旱特征; 最近几年该时间系数逐渐减小, 南涝北旱的特征有所减弱, 并且有转变为南早北涝的趋势。

综合以上分析可以得出, 中国东部季风区夏季降水总量从 20 世纪 90 年代开始有明显的上升趋势; 50 年代到 60 年代“南早北涝型”比较典型; 60 年代到 70 年代末, 降水类型为“南北涝中间旱型”; 80 年代到 90 年代转变为“南北旱中间涝型”, 到了 90 年代之后, “南北涝(旱)中间旱(涝)型”逐渐不典型, 之前不显著的“南涝北旱型”降水特征则重新开始变得典型; 最近几年该空间分布型又有减弱并转变为“南早北涝型”的趋势。

3.2.2 突变分析

Manr Kendall 检验法^[16]是一种非参数统计检验方法, 不需要样本遵从一定的分布, 也不受少数异常值的干扰, 更适用于类型变量和顺序变量, 计算也比较简便, 可以明确突变开始的时间。

由图 4(a) 和图 4(b) 的 UF 曲线可见, 第一和第二时间系数均未检测出突变的发生。

由图 4(c) 中第三时间系数的 UF 曲线可见, 1951 年-1956 年和 1970 年-2012 年 UF 的值大于 0, 时间系数为上升阶段; 1957 年-1969 年 UF 的值小于 0, 时间系数为下降阶段。在 1973 年前后 UF 曲线和 UB 曲线有一交点, 位于信度值 1.96 之间, 随后 UF 曲线开始做小幅波动, 到 1991 年后持续上升, 并于 1997 年前后显著上升, 超过了显著性水平的临界线, 通过了显著性检验, 说明时间系数的这次上升趋势是一次突变, 时间开始于 1973 年前后。这与前面第三时间系数的趋势分析结果大致相同, 即我国夏季降水第三空间分布型在 20 世纪 70 年代初期之前为“南早北涝型”, 70 年代初期之后为“南涝北旱型”, 这一空间分布型的转变为突变。从 90 年代开始, 该空间分布型变得比以前更加典型。

3.2.3 周期分析

功率谱分析^[19]是应用极为广泛的一种分析周期的方法, 它以傅立叶变换为基础, 将时间序列的总能量分解到不同频率上的分量, 根据不同频率的波的能量贡献诊断出序列的主要周期, 从而确定出周期的主要频率, 即序列所隐含的显著周期。

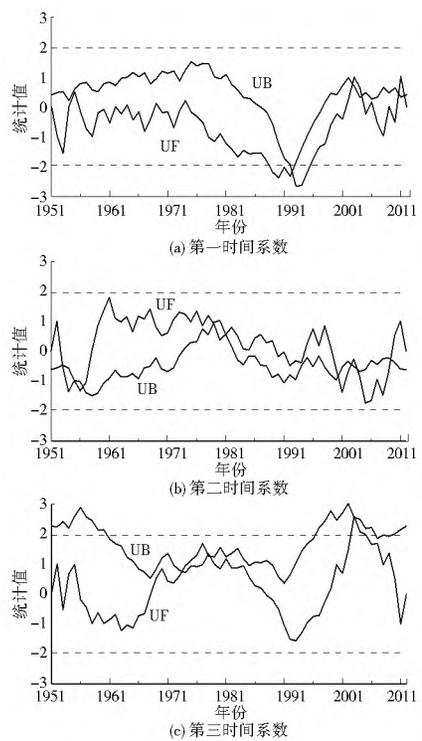


图 4 时间系数 M-K 突变检验曲线

Fig. 4 The Manr Kendall mutation test curves of time coefficients

对我国东部季风区夏季降水 EOF 分析中前 3 个特征向量的时间系数做功率谱分析, 得到结果见图 5。可以看出, 第一时间系数存在 50 年左右的显著周期(峰点超过 99% 红噪音标准谱); 第二时间系数存在 2.2 年左右的显著周期(峰点超过 99% 红噪音标准谱); 第三时间系数存在 50 年左右的主周

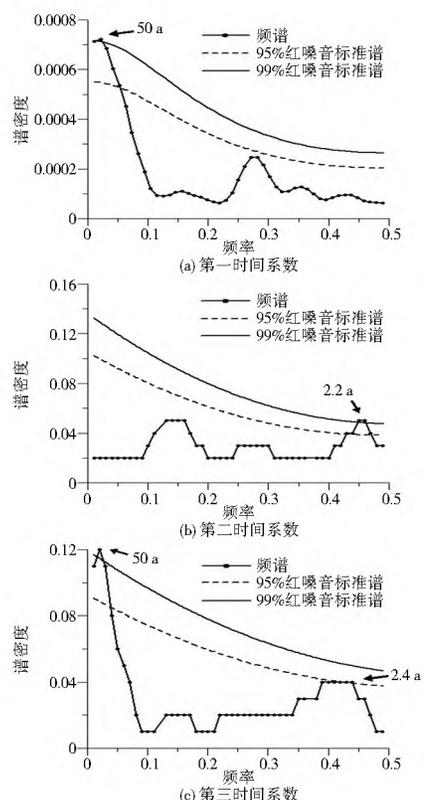


图 5 前 3 个时间系数功率谱分析

Fig. 5 The power spectrum analysis of the first three time coefficients

期(峰点超过 99% 红噪音标准谱)和 2~3 年左右的次周期(峰点超过 95% 红噪音标准谱)。

4 季风强弱对我国夏季主要降水场的指示作用

我国夏季降水的多寡、雨带的起讫及移动均与季风活动密切相关。近 10 年来,为了尽可能地反应季风的物理实质,许多学者从不同方面定义了不同的季风指数。本文采用李建平等^[21]所提出的动态标准化季节变率指数来探讨季风强弱对我国夏季主要降水场的指示作用。该指数不仅能够描述不同季风区的季节变化和年际变率及其与雨量的关系,而且还可以用来划分全球季风系统的地理分布^[22-23]。

李建平将全球对流层季风系统按纬度分为热带季风系统、副热带季风系统和温寒带中的季风区三类。我国东部季风区主要受热带季风系统中的南亚季风、南海季风,以及副热带季风系统中的东亚季风影响。图 6 从上到下依次为东亚季风指数(EAMI)、南亚季风指数(SAMI)、南海季风指数(SCSMI)、EOF1 时间系数、EOF2 时间系数及 EOF3 时间系数对比图。表 2 为上述季风指数与 EOF 各时间系数的相关系数。

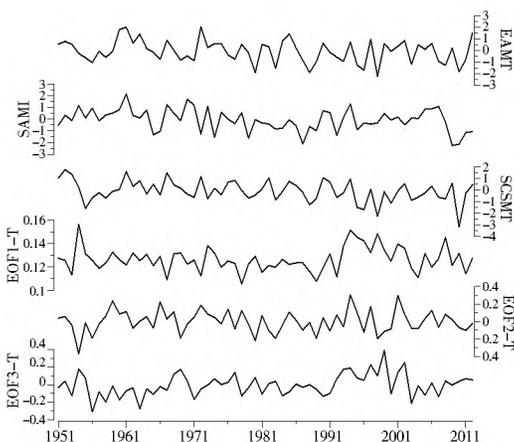


图 6 各季风指数与各时间系数对比

Fig. 6 Comparison of three monsoon indices and three time coefficients

从表 2 中可以看出只有第二特征向量的时间系数与季风指数存在一定的正相关关系,其中与东亚季风指数的相关系数为 0.461,通过了 99% 的显著性检验,与南海季风指数的相关系数为 0.277,通过了 95% 的显著性检验。第二特征向量所代表的空间分布型为“南北涝(旱)中间旱(涝)型”,说

表 2 各季风指数与各时间系数的相关系数

Table 2 Correlation coefficients between EAMI, SAMI, SCSMI, EOF1 time series (T1), EOF2 time series (T2), and EOF3 time series (T3)

	EAMI	SAMI	SCSMI	T1	T2	T3
EAMI	1.000					
SAMI	0.228	1.000				
SCSMI	0.722**	0.241	1.000			
T1	-0.211	0.162	-0.234	1.000		
T2	0.461**	0.112	0.277*	-0.003	1.000	
T3	-0.101	-0.130	-0.040	0.473**	0.000	1.000

* Correlation is significant at the 0.05 level. ** Correlation is significant at the 0.01 level.

明当东亚季风高指数或南海季风高指数时期,第二特征向量的时间系数值偏大,我国东部季风区“南北涝中间旱”的降水格局比较明显,即黄河流域、华北地区以及华南地区降水偏多,而江淮流域降水则偏少,反之亦然。反映东亚季风及南海季风的强弱对我国东部季风区夏季第二降水场有一定的指示作用,因此二者的季风指数对降水场有一定的指示作用。

5 结论

(1) 中国东部季风区夏季(6月-8月)降水主要有三种空间分布类型,分别是“总体一致型”、“南北涝(旱)中间旱(涝)型”以及“南涝(旱)北旱(涝)型”。

(2) 第一空间分布型反映了我国东部季风区夏季降水的平均场,第一时间系数反映了大尺度的旱涝年。其中 1954 年、1995 年、1998 年和 2008 年,为我国夏季降水的涝年;1967 年、1978 年和 1989 年,为我国夏季降水的旱年。20 世纪 50 年代到 90 年代中国东部季风区夏季降水量一直趋于平缓,90 年代后有明显的上升趋势,最近几年降水量又趋于平缓。对其时间系数作 M-K 突变检验和功率谱分析,未检测出突变的发生,但发现其存在 50 年左右的显著周期。

(3) 第二空间分布型在 20 世纪 50 年代中期为典型的“南北旱中间涝型”,60 年代初至 70 年代末为“南北涝中间旱型”,70 年代末后转变为“南北旱中间涝型”,90 年代以后该降水空间分布型无论是“南北旱中间涝型”还是“南北涝中间旱型”均不再典型。对其时间系数作 M-K 突变检验和功率谱分析,未检测出突变的发生,发现其存在 2 年左右的显著周期。

(4) 第三空间分布型在 20 世纪 70 年代初之前为典型的“南旱北涝型”,70 年代初到 80 年代末转变为较弱的“南涝北旱型”,90 年代开始一直持续到 2010 年前后呈现出典型的“南涝北旱型”,最近几年时间系数逐渐减小,南涝北旱的降水特征有所减弱,并有转变为南旱北涝的趋势。对其时间系数作 M-K 突变检验和功率谱分析,发现 70 年代初空间分布型的转变是一次突变,并且该分布型存在 50 年左右的主周期和 2~3 年左右的次周期。

(5) 通过建立东亚季风指数、南亚季风指数、南海季风指数和 EOF 各时间系数之间的联系,发现第二特征向量的时间系数与东亚季风指数和南海季风指数存在一定的正相关关系,表明东亚季风及南海季风的强弱对我国东部季风区夏季第二降水场有一定的指示作用。

参考文献(References):

[1] IPCC. Summary for Policymakers of the Synthesis Report of the IPCC Fourth Assessment Report [M]. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2007.

[2] 任国玉, 初子莹, 周雅清, 等. 中国气温变化研究最新进展[J]. 气候与环境研究, 2005, 10(4): 701-716. (REN Guo yu, CHU Zi ying, ZHOU Ya qing, et al. Recent Progresses in Studies of Regional Temperature Changes in China[J]. Climatic and Environmental Research, 2005, 10(4): 701-716. (in Chinese))

[3] 周连童, 黄荣辉. 关于我国夏季气候年代际变化特征及其可能成因的研究[J]. 气候与环境研究, 2003, 8(3): 274-290. (ZHOU Lian tong, HU ANG Rong hui. Research on the Characteristics of Interdecadal Variability of Summer Climate in

- China and Its Possible Cause[J]. Climatic and Environmental Research, 2003, 8(3): 274-290. (in Chinese)
- [4] 施小英, 施晓晖, 毛嘉富. 夏季东亚地区水汽输送年代际变化特征及其对中国东部降水的影响[J]. 地理学报, 2009, 64(7): 861-870. (SHI Xiaoying, SHI Xiaohui, MAO Jiāfu. Interdecadal Variation of Water Vapor Transport over East Asia and Its Impacts on Rainfall over Eastern China in Summer[J]. Acta Geographica Sinica, 2009, 64(7): 861-870. (in Chinese))
- [5] 李红梅, 周天军, 宇如聪. 近四十年我国东部盛夏日降水特性变化分析[J]. 大气科学, 2008, 32(2): 358-370. (LI Hongmei, ZHOU Tianjun, YU Rucong. Analysis of July-August Daily Precipitation Characteristics Variation in Eastern China during 1958-2000[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2008, 32(2): 358-370. (in Chinese))
- [6] 郭其蕴, 蔡静宁, 邵雪梅, 等. 东亚夏季风的年代际变率对中国气候的影响[J]. 地理学报, 2003, 58(4): 569-576. (GUO Qiyun, CAI Jingning, SHAO Xuemei, et al. Interdecadal Variability of East Asian Summer Monsoon and Its Impact on the Climate of China[J]. Acta Geographica Sinica, 2003, 58(4): 569-576. (in Chinese))
- [7] 吕俊梅, 任菊章, 琚建华. 东亚夏季风的年代际变化对中国降水的影响[J]. 热带气象学报, 2004, 20(1): 73-80. (LU Junmei, REN Juchang, JU Jianhua. The Interdecadal Variability of East Asia Monsoon and Its Effect on the Rainfall over China[J]. Journal of Tropical Meteorology, 2004, 20(1): 73-80. (in Chinese))
- [8] 缪启龙, 张磊, 丁斌. 青藏高原近40年的降水变化及水汽输送分析[J]. 气象与减灾研究, 2007, 30(1): 14-18. (MIAO Qilong, ZHANG Lei, DING Bin. Analysis of Precipitation Changes and Water Vapor in the Tibetan Plateau during the Last Four Decades[J]. Meteorology and Disaster Reduction Research, 2007, 30(1): 14-18. (in Chinese))
- [9] 丁一汇, 孙颖, 刘芸芸, 等. 亚洲夏季风的年际和年代际变化及其未来预测[J]. 大气科学, 2013, 37(2): 253-280. (DING Yihui, SUN Ying, LIU Yunyun, et al. Interdecadal and Interannual Variabilities of the Asian Summer Monsoon and Its Projection of Future Change[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2013, 37(2): 253-280. (in Chinese))
- [10] 黄荣辉, 陈际龙, 刘永. 我国东部夏季降水主模态的年代际变化及其与东亚水汽输送的关系[J]. 大气科学, 2011, 35(4): 589-606. (HUANG Ronghui, CHEN Jilong, LIU Yong. Interdecadal Variation of the Leading Modes of Summertime Precipitation Anomalies over Eastern China and Its Association with Water Vapor Transport over East Asia[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2011, 35(4): 589-606. (in Chinese))
- [11] 黄荣辉, 刘永, 冯涛. 20世纪90年代末中国东部夏季降水和环流的年代际变化特征及其内动力成因[J]. 科学通报, 2013, 58(8): 617-628. (HUANG Ronghui, LIU Yong, FENG Tao. Interdecadal Change of Summer Precipitation over Eastern China around the Late 1990s and Associated Circulation Anomalies, Internal Dynamical Causes[J]. Chinese Science Bulletin, 2013, 58(8): 617-628. (in Chinese))
- [12] 张永领, 高全洲, 丁裕国, 等. 长江流域夏季降水的时空特征及演变趋势分析[J]. 热带气象学报, 2006, 22(3): 161-168. (ZHANG Yongling, GAO Quanzhou, DING Yuguo, et al. Analysis of Time-spatial Characteristics and Evolutional Trends of Summer Precipitation in the Yangtze River Catchment[J]. Journal of Tropical Meteorology, 2006, 22(3): 161-168. (in Chinese))
- [13] 郝立生, 丁一汇. 华北降水变化研究进展[J]. 地理科学进展, 2012, 31(5): 593-601. (HAO Lisheng, DING Yihui. Progress of Precipitation Research in North China[J]. Progress in Geography, 2012, 31(5): 593-601. (in Chinese))
- [14] 赵平, 周秀骥. 近40年我国东部降水持续时间和雨带移动的年代际变化[J]. 应用气象学报, 2006, 17(5): 548-556. (ZHAO Ping, ZHOU Xiurui. Decadal Variability of Rainfall Persistence Time and Rainbelt Shift over Eastern China in Recent 40 Years[J]. Journal of Applied Meteorological Science, 2006, 17(5): 548-556. (in Chinese))
- [15] 丁裕国, 梁建茵, 刘吉峰. EOF/PCA诊断气象变量场问题的新探讨[J]. 大气科学, 2005, 29(2): 307-313. (DING Yuguo, LIANG Jianyin, LIU Jifeng. New Research on Diagnoses of Meteorological Variable Fields Using EOF/PCA[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2005, 29(2): 307-313. (in Chinese))
- [16] 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: 105-113. (WEI Fengying. Modern Climatic Statistical Diagnosis and Prediction Technology[M]. Beijing: Meteorological Press, 2007: 105-113. (in Chinese))
- [17] 李欣欣, 邵雪梅. 东亚夏季风影响下的中国东部降雨空间特征格局分析[J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 2010, 46(6): 729-732. (LI Xinxin, SHAO Xuemei. East Asian Summer Monsoon Rainfall in Eastern China Under the Influence of Spatial Characteristics of the Pattern Analysis[J]. Journal of Beijing Normal University (Natural Science), 2010, 46(6): 729-732. (in Chinese))
- [18] 舒廷飞, 罗会邦. 晚春初夏西太平洋副高突变特征及其年际变化[J]. 热带气象学报, 2003, 19(1): 17-26. (SHU Tingfei, LUO Hui bang. Abrupt Change of the West Pacific Subtropical High and Its Interannual Variation During the Later Spring and Early Summer[J]. Journal of Tropical Meteorology, 2003, 19(1): 17-26. (in Chinese))
- [19] 高留喜, 刘秦玉, 吴洁晶, 等. 山东春季降水的时空分布特征[J]. 山东师范大学学报(自然科学版), 2003, 18(4): 50-54. (GAO Liuxi, LIU Qinyu, WU Jiejing, et al. Spatial and Temporal Characteristics of Spring Precipitation in Shandong Province[J]. Journal of Shandong Normal University (Natural Science), 2003, 18(4): 50-54. (in Chinese))
- [20] 施能. 气象统计预报[M]. 北京: 气象出版社, 2009: 133-134. (SHI Neng. Meteorological Statistical Forecast[M]. Beijing: Meteorological Press, 2009: 133-134. (in Chinese))
- [21] 李建平, 曾庆存. 一个新的季风指数及其年际变化和与雨量的关系[J]. 气候与环境研究, 2005, 10(3): 351-365. (LI Jianping, ZENG Qingcun. A New Monsoon Index, Its Interannual Variability and Relation with Monsoon Precipitation[J]. Climatic and Environmental Research, 2005, 10(3): 351-365. (in Chinese))
- [22] LI Jianping, ZENG Qingcun. A New Monsoon Index and the Geographical Distribution of the Global Monsoons[J]. Adv Atmos Sci, 2003, 20(2): 299-302.
- [23] LI Jianping, ZENG Qingcun. A Unified Monsoon Index[J]. Geophys Res Lett, 2003, 29(8): 1151-1154.