

# 利用 EOF 相空间分析东亚梅雨旱涝 长期过程的初步研究\*

朱抱真

(中国科学院大气物理研究所, 北京 100029)

张瑞雪 林学椿

(中国气象科学研究院, 北京 100081)

**摘要** 利用非线性动力学中的相空间概念, 分析了梅雨旱涝 3~5 年循环的长期过程。对全球热带 850 hPa 的纬向风场距平所作的 EOF, 第 1 特征向量显示了 Walker 环流异常在赤道球圈上的分布; 第 2 特征向量主要显示热带-副热带之间的环流异常的经向分布。在第 1 时间系数和第 2 时间系数所定义的 2 维相空间中, 由相轨线分析, 得到梅雨涝年主要集中于第 2 象限, 而旱年则相对多在第 4 象限, 说明梅雨旱涝年际变异的主导模式和热带大气环流的主要特征向量有着密切的关联。它们显示了以 3~5 年时间尺度的大气环流演变的长期特征性过程。

**关键词:** 经验正交函数; 相空间; 梅雨

## 1 前言

当前长期天气学的研究注重过程分析, 但长期过程拥有庞大数量的讯息, 如何从大量的讯息中抽取主导模式, 并简洁地揭示它们具有的物理意义的特征性过程, 是一个艰巨的任务。目前有关长期过程的分析手段远远不足以完成这一任务, 需要新的研究手段。

东亚梅雨的一个重要的特征性长期变化是它具有鲜明的年际变异<sup>[1,2]</sup>, 有的年份出现丰梅, 有的年份竟然空梅, 形成我国江淮流域气候的旱涝反常。在 20 世纪 80 年代初期到 90 年代初期, 1980、1983、1987、1991 为严重多雨的涝年, 而 1981、1985、1989 为严重少雨的旱年。这就是说干旱和洪涝的出现不仅是单个事件 (event), 而是以 3~5 年时间尺度的年际循环 (cycle)。

热带大气环流最典型的异常是所谓南方涛动现象。按照波谱分析和交叉谱分析, 这种行星尺度气压的年际涛动主要是以 2~7 年的时间尺度重复再现。Yasunari<sup>[3]</sup>利用 18 年 Tahiti 减 Darwin 海面气压差作为南方涛动指数, 经过时间过滤得到了南方涛动呈现 3~5 年的准周期振荡。

本文的主要目的在于引进非线性动力学中的相空间分析, 针对上述 20 世纪 70 年代

2000-06-19 收到, 2000-09-05 收到修改稿

\* 国家自然科学基金资助项目 49675261 和中国科学院 KY 85-10-2 共同资助

末期到 80 年代末期典型旱涝交替出现的时段, 分析热带大气环流 3~5 年时间尺度的演变过程, 研究梅雨旱涝和热带大气环流演变的关系。

这一研究着重天气气候学的形成过程, 而不在于统计关系。我们先利用带通滤波得到月流场异常的滤波天气图序列, 进一步再用经验正交函数 (EOF) 相空间分析的相点运动, 更简洁地揭示演变过程的物理实体。

## 2 资料和分析方法

本文所用的热带环流资料是美国 NMC 的 1973~1987 年 15 年的 850 hPa 热带球圈的格点风资料。它们是由 35°S 至 35°N 共 15 个纬圈,  $5^{\circ} \times 5^{\circ}$  格点的月平均纬向风和经向风。

这些原始资料仍然包括复杂的多时间尺度和多空间尺度演变, 分析的任务是从复杂的演变过程中, 抓住主导模态, 并能简洁地描述它们的变化。因此采用下列 3 个步骤。

首先采用 Murakami<sup>[4]</sup>设计的带通滤波器, 对距平值以 3~5 年为主导响应的滤波函数进行带通滤波<sup>[5]</sup>。得到 15 年系列的描写全球热带大气月流场异常的低频天气图, 作为我们研究的基本资料。

其次利用简单的 EOF 进一步抽取最主导的模态来显示大气环流的主要变动。

从 15 年的 850 hPa 环流异常低频天气图, 可以看到低空热带风场的主要分量是纬向风。因此本文先对纬向风场进行正交分析, 在正交分析前, 先对变量进行无因次化。

这样我们在本文中利用全球圈热带大气的纬向风场头两个模态 EOF-1 和 EOF-2 所构成的二维相空间中的相轨线变化, 简洁地描写整个热带大气环流的主要变化。

## 3 结果

### 3.1 热带大气环流 3~5 年循环的相空间分析

850 hPa 纬向风场的 EOF 第 1 主分量 (EOF-1) 的空间分布如图 1a。它的主要特征是集中表现在赤道区纬向不均匀性: 在赤道中太平洋-东太平洋是一个强大的负区, 中心位于 150°W; 在赤道西太平洋-印度洋为一片正值区, 中心位于 90°E。还有一个弱的正值区在南美洲东岸。注意这些正值区代表西风 (或东风) 异常, 负值区代表东风 (或西风) 异常, 决定于时间系数变化的符号为正 (或负)。EOF-1 的这一特征表明它的物理意义是和 Walker 环流相联系的实体。注意中太平洋的风速梯度最大, 当时间系数为正时, 中太平洋西部有大尺度辐合, 伴随着 Walker 环流的上升支, 相当南方涛动指数为正; 当时间系数为负时, 西太平洋为大尺度辐散, Walker 环流的上升支移到中太平洋东部, 这时南方涛动指数为负。当时间系数为负时, 情况相反。

EOF 的第 2 主分量 (EOF-2) 纬向风扰动如图 1b。它的主要分布特征是经向的不均匀性: 在赤道区盛行东风 (或西风), 在南北半球的副热带盛行西风 (或东风), 按其相应的时间系数为正 (或负) 而定。这种纬向风的经向切变集中在西太平洋的副热带区。它的物理意义表示这一海域的纬向风扰动具有反气旋性或气旋性水平切变, 可以和局地 Hadley 环流相联系。当时间系数为正时, 这时太平洋, 特别是西太平洋, 赤道区

盛行东风, 而副热带海上盛行西风, 反气旋经向切变伴随着正的 Hadley 环流, 赤道区上升, 副热带下沉。当时间系数为负时情况相反。

以上是 EOF 头两个主分量的空间分布, 但它们并不是确定的, 它们必须和时间系数的时间分布联系在一起, 才是确定的。本文用头两个主分量的时间系数作二维坐标所构成的相轨线, 表示 EOF 时间变化如图 2。

1973~1987 年 15 年的相轨线反映了状态相点在相空间中的复杂运动 (参看图 5), 相轨线清楚地揭示了长期过程的准周期性。这 15 年包括 5 次准 3 年周期的近似闭轨

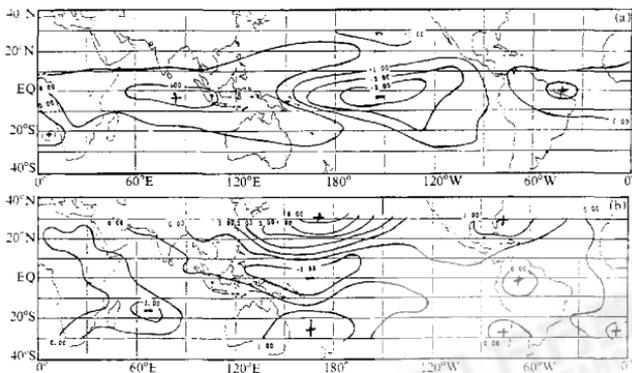


图 1 850 hPa 热带纬向风 EOF 的空间分布  
(a) EOF-1; (b) EOF-2

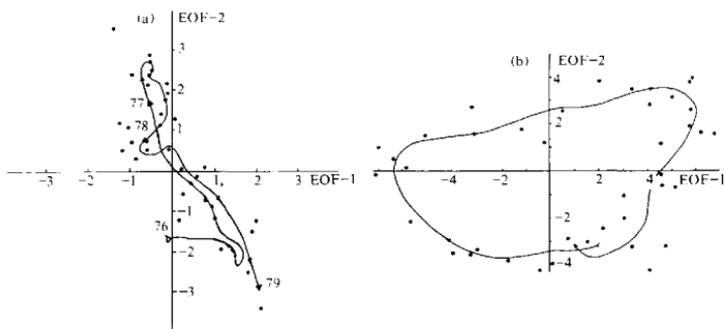


图 2 850 hPa 热带纬向风 EOF-1 和 EOF-2 的时间系数的相轨线  
(a) 1976 年 1 月~1978 年 10 月; (b) 1982 年 5 月~1985 年 7 月

线, 虽然最后一段的相点运动尚未完成一个周期。

近似闭轨线反映的热带大气 3~5 年振荡长期过程, 基本上包括两种运动, 一种是双叶形的环轨线, 如图 2a 是 1976 年 1 月~1978 年 10 月的环轨线, 图中的黑点表示相点的原有位置, 曲线表示 5 年滑动平均结果。在这种相轨线中, EOF-1 变动小而 EOF-2 变动大, 相点在第 2 和第 4 象限振荡。这种相点运动实质上表示长期过程是一种“跷跷板”式的驻波振荡。相点经常在一定的相空间领域中密集在一起, 位移很小, 振幅变化不大, 呈现准定常性。

准定常相点的分布在相空间中是比较集中的, 主要位于第 2 象限。这时赤道大气盛行 Walker 反环流, 副热带盛行反气旋性异常环流。这种持续性定常流对东亚和东南亚长期的天气异常有很大的影响。

另一种是沿着接近椭圆形轨道移动的类似行波的传播, 如图 2b 是 1982 年 5 月~1985 年 7 月的环轨线。注意图 1 的 EOF-2 的赤道负中心比 EOF-1 偏西 45°, 由它们组成的相轨线如图中箭头所表示的顺时针旋转, 相当于低空西风扰动向东传播。

关于南方涛动的学说, 传统的古典理论认为其特征是一种全球尺度的驻波。但近年来 Barnett<sup>[7]</sup>提出, 它是自印度洋向东传播的类似大尺度行波的一个部分。从本文所得的结果看, 热带大气 3~5 年南方涛动的振荡过程并非单态的, 表现了双态性: 一是在固定区域振荡的驻波, 另一是由西向东传播的类似行波 (参看图 6)。

为了进一步揭示这两种运动的实体, 我们作出图 3, 它是根据前述的历史低频天气图作出的。图中圆点表示反气旋性环流异常的中心, 圆圈表示气旋性环流异常的中心。图 3a 表示 1977 年 1 月~12 月的系统活动情况, 由图 2a 可知这时 EOF 相点处于第 2 象限。正如图 3a 所反映的整个由赤道 30°N 的纬度带上盛行反气旋异常, 而图 3b (1978 年 1~12 月), 当运动相点处于第 4 象限时 (图 2b) 则盛行气旋性环流异常, 由

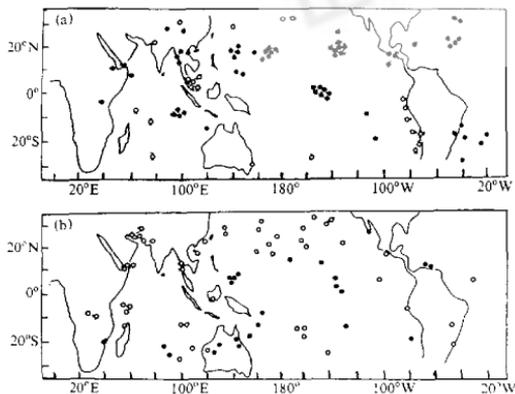


图 3 和图 2a 相对应的环流异常中心的分布  
(a) 1977 年 1~12 月; (b) 1978 年 1~12 月

于在图 2a 中, EOF-2 的强度比 EOF-1 大得多, 在由图 3a 到图 3b 的振荡中, 热带环流异常由反气旋活动为主变为气旋性活动为主。

图 4 表示另一类运动的情况。图 4a 为 1982 年 11 月~1984 年 1 月相点主要处于第 2 象限, 这时西太平洋主要是反气旋性环流异常, 而东太平洋基本上是气旋性环流异常。到 1984 年 2 月~1985 年 7 月则位相相反, 相点处于第 1 和第 4 象限(图 3b), 这时西太平洋几乎是气旋性环流异常, 而东太平洋几乎全转为反气旋性环流异常。反映了系统由西向东的移动。

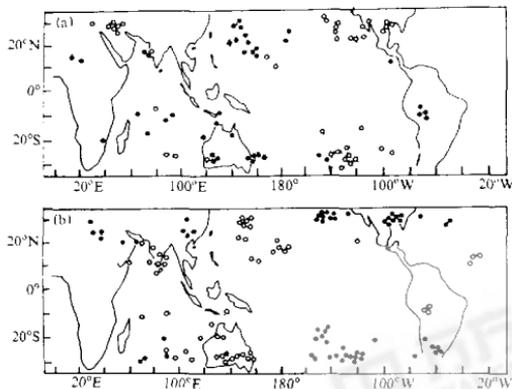


图 4 和图 2b 相对应的环流异常中心的分布

(a) 1982 年 11 月~1984 年 1 月; (b) 1984 年 2 月~1985 年 7 月

### 3.2 梅雨旱涝循环和热带环流 3~5 年循环的关系

为了探讨上述热带环流 3~5 年低频振荡和我国梅雨变异的关系, 我们选取了我国东部分布比较均匀的 42 个台站, 以每个台站 6~7 月降水的距平, 作 3~5 年的带通滤波, 然后再作经验正交分析。

我们得到的 EOF 第 1 主分量的空间分布正好是典型的梅雨型式。这个 EOF 空间分布型和 EOF 时间系数变率合在一起, 确定了梅雨的旱涝变化。如果我们以降水偏差的 EOF 第 1 主分量在 75 mm 以上定为旱涝年份, 则近 40 年来江淮流域的旱涝年份如表 1 所示。其中著名的大旱大涝年份用黑体字表示。可见 EOF 分析结果和观测的事实是一致的。

表 1 由 EOF 第 1 主分量定出的近 40 年来的梅雨旱涝年份

旱年	<b>1952</b>	1953	<b>1958</b>	1967	1968	1975	<b>1978</b>	<b>1981</b>	<b>1985</b>	<b>1989</b>
涝年	<b>1954</b>	1956	1966	<b>1969</b>	1974	1977	<b>1980</b>	<b>1983</b>	1986	<b>1991</b>

上述梅雨旱涝以 3~5 年低频振荡为特征的年际差异是怎样形成的,无疑是一个很复杂的问题。这里只就它和热带大气环流的关系作一初步的探讨。

我们在上节中,曾分析了全球热带 850 hPa 环流异常的头两个 EOF 主分量。它们的空分布型式如图 1,它们的时间系数组成一个二维的相空间。相点在相空间中的轨线表明由 1973 年到 1987 年热带环流有 5 次以 3 年多为周期的低频振荡。我们现将 1976~1987 年的相轨线制成图 5,并把表 1 中这一段所发生的旱涝年月,分别以空心圆和实心圆标在图上。由此讨论梅雨旱涝和热带环流低频振荡的关系。

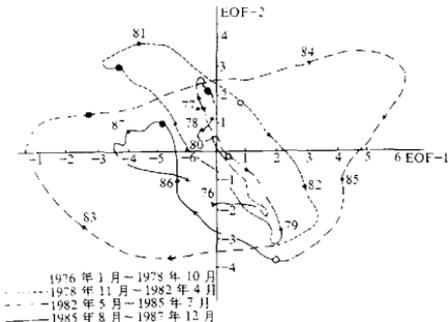


图 5 1976~1987 年 850 hPa 环流头两个 EOF 主分量时间系数所组成的相轨线  
年份和小三角表示该年起始相点(1月)的位置。  
实心圆表示出现梅雨涝年,空心圆表示出现旱年

由图 5 可以清楚地看到在这一时期的梅雨涝年如 1977、1980、1983 和 1986 年,相点集中于第 2 象限,这里 EOF-1 的时间系数为负,而 EOF-2 为正;梅雨旱年如 1978 和 1985 相点,落于第 4 象限,这里 EOF-1 的时间系数为正,而 EOF-2 为负。我们知道 EOF-1 空间特征显示了纬向风异常在纬圈上的不均匀分布, EOF-2 的则主要表示了纬向风异常在经圈上的不均匀分布。前者主要表示赤道区 Walker 环流异常的情况,后者则显示热带区出现反气旋(或气旋)性异常流。

当梅雨季节落于第 2 象限时,所对应的热带环流形势是负的 Walker 环流异常和副热带的反气旋性经向切变。这时在赤道中太平洋低空盛行西风,赤道西太平洋盛行东风,而副热带西太平洋盛行西风。这种形势有利于西太平洋副热带高压脊西伸到我国东南沿海,维持长江流域降水,形成涝年。当梅雨季节落于第 4 象限时,情况相反,这时赤道西太平洋盛行西风,副热带西太平洋盛行东风,气旋性切变流使得我国东南沿海出现偏北的异常流,不利于梅雨降水,形成旱年。

为了进一步揭示这种热带大气环流演变和梅雨旱涝的关系,我们给出对应图 2 所包括的一部分低频天气图。

图 6 表示 1977 年 1 月~1978 年 7 月的 850 hPa 经过滤波的异常风场的演变。这是一次中,西太平洋低空由反气旋性环流异常转变为气旋性环流异常,我国梅雨由涝年转变为旱年的过程。在这年年初由东亚大陆向东一直到东太平洋的低空盛行较强的偏西风,较弱的反气旋中心分布在 20°N 纬圈上(参见图 3),赤道区是很弱的东风,以后赤道东风不断加强,到 1977 年夏季由东亚经西太平洋到东太平洋都是反气旋环流,我国副热带盛行偏西风,有利于梅雨降水。到 1977 年末,太平洋区的气旋性环流异常开始发展,年初西、中太平洋均改为强大的气旋性环流,到 1978 年 7 月相点位于第 4 象

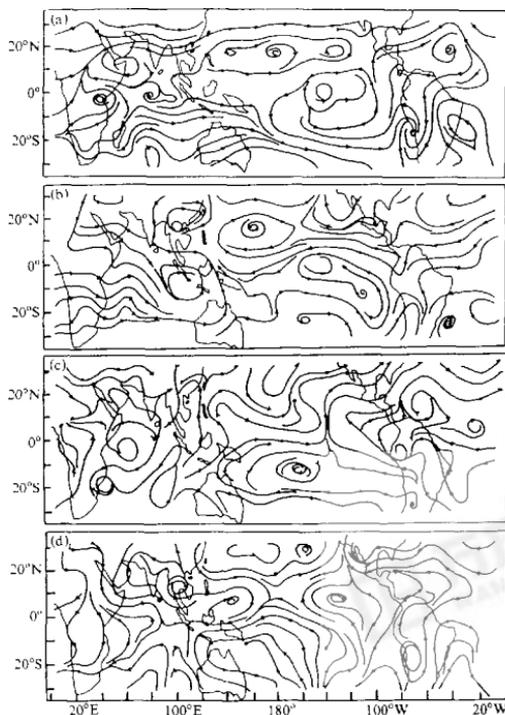


图6 1977年1月~1978年7月850 hPa 滤波异常风场  
(a) 1977年1月; (b) 1977年8月; (c) 1978年1月; (d) 1978年7月

限, 气旋性环流异常控制了东亚大陆, 我国东部的偏北风形成了当年的旱年。以后梅雨经1980年的涝年到1981年的旱年, 完成了一次循环。

图7表示1982年12月~1985年7月的情况。这是一次强大的环流异常系统由印度洋东移向东太平洋传播, 造成江淮流域梅雨从涝年转变为旱年的过程。早在1982年夏季由西太平洋到中太平洋赤道区就形成一股强大的西风异常, 到1982年底, 这股西风异常东移至东太平洋(图7a), 到1983年7月相点位于第2象限, 原在印度洋的反气旋异常环流东移到西太平洋并且强度加强, 这个反气旋环流形成我国东部强大的西南风, 造成著名的梅雨强盛的涝年(图7b), 后来西太平洋的这一强大的反气旋异常连续东移, 到1984年夏中, 东太平洋的赤道海域盛行偏东风, 到1985年7月, 相点位于第

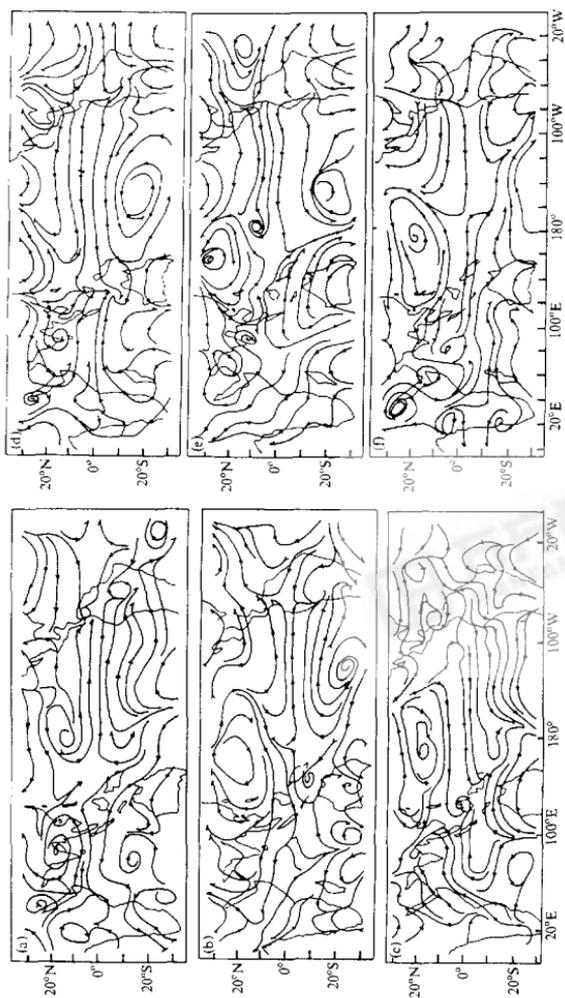


图 7 1982 年 12 月~1985 年 7 月的 850 hPa 扰动异常场

(a) 1982 年 12 月; (b) 1983 年 7 月; (c) 1988 年 12 月; (d) 1984 年 7 月; (e) 1985 年 7 月; (f) 1988 年 7 月

4 象限, 西太平洋改为气旋性环流异常, 我国东部改受偏北风异常的控制, 形成著名的梅雨旱年。(图 7e~f) 以后经过 1987 年的涝年到 1989 年的旱年完成了又一次梅雨循环。

图 5 包括 7 个典型的旱涝年, 其中 4 个涝年的相点都是集中在第 2 象限, 但 3 个旱年只有两个位于第 4 象限, 1981 旱年则位于第 1 象限, 反映 7 个旱涝年中有 6 个符合上述规律, 这一方面说明多数的旱涝年符合本文揭示的规律; 另一方面可能表示梅雨涝年的流型比较集中, 而旱年则更为复杂多样。

## 4 结语

本文在 EOF 相空间中, 分析了热带大气 3~5 年低频振荡这一长期过程的循环特征。初步结果表明相轨线分析是很有力的手段, 因为它具有高度的概括能力, 从复杂的大气环流长期观测数据中, 抓住重要模态的演变, 简洁地表示在一张二维相空间图中, 并且可以识别流型的移动和改变, 以及主导模态的作用, 物理意义比较清楚。

利用我国多年的月降水资料, 由带通滤波和经验正交分析方法所得到的以 3~5 年为主周期的 EOF 第 1 主分量, 和梅雨旱涝年际变异的观测事实是一致的, 反映分析方法的合理性。

梅雨主导模态和全球热带大气环流有着密切的关联。在后者的带通滤波 EOF 的头两个时间系数所组成的相空间中, 相点运动和梅雨旱涝的有规律的联系, 反映梅雨旱涝的循环和赤道 Walker 环流异常以及西太平洋副热带反气旋环流异常的循环有关。

梅雨循环从涝年到旱年再到涝年的整个循环一般要 3~5 年时间, 在两者之间有一或二个过渡年。降水或者偏多, 或者偏少。有时旱年和涝年之间的转变是直接的, 没有过渡年。因此每次旱涝振荡是很复杂的年际变动, 我们认为本文所分析的 20 世纪 70 年代末期到 80 年代末期的 3~5 年准周期梅雨循环只是梅雨长期变化的一种过程, 梅雨的年际变动可能还有其他过程, 例如非周期循环和单个旱(涝)事件等。我们将在进一步的研究中应用更长的资料进行分析。

## 参 考 文 献

- 1 竺可桢, 东南季风与中国之雨量, 地理学报, 1934, 1, 1~27.
- 2 陶诗言, 朱文妹, 赵卫, 论梅雨的年际变异, 大气科学(特刊), 1988, 13~21.
- 3 Yasunari, Tetsuzo, Global structure of the El Niño Southern Oscillation. Part I, El Niño composites, *J Meteor. Soc. Japan*, 1987, 65, 67~80.
- 4 Murakami, Takuo and T. Nakazawa, Tropical 45 day oscillations during the 1979 Northern Hemisphere Summer, *J Atmos. Sci.*, 1985, 42, 1107~1122.
- 5 张瑞雪, 林学椿, 热带风场低频振荡的研究, 章基嘉主编: 长期天气值报论文集, 北京: 海洋出版社, 1992, 36~41
- 6 Lorenz, E. N., The predictability of hydrodynamic flow, *Trans. N. Y. A. S.*, 1963, 25, 409~432.
- 7 Barnett, T. P., Interaction of the monsoon and Pacific trade wind system at interannual time scales, *Mon. Wea. Rev.*, 1984, 112, 2388~2400.

## A Preliminary Study of the Meiyu Long-Range Processes in EOF Phase Space

Zhu Baozhen

(*Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029*)

Zhang Ruixue and Lin Xuechun

(*Chinese Academy of Meteorological Science, Beijing 100081*)

**Abstract** By using the EOF phase space analysis, the long-range processes of the circulation cycle over the global tropical belt are studied and the relationship between them and Meiyu cycle is emphasized. The monthly zonal wind anomalies are represented by the normalized expansion coefficients of EOFs, and a 2-dimensional phase space is constructed by the 2 leading EOFs. The phase points successively finish closed loop during each cycle of the 3~5 year oscillation. The 1st leading term  $E_1$  shows a distinct zonal nonuniform distribution, a strong negative center is located in the central-eastern Pacific and a positive center over the equatorial Indian Ocean, the  $E_2$  mode mainly exhibits a meridional nonuniform distribution. When the phase points are located at the 2nd octangle,  $E_1 < 0$ ,  $E_2 > 0$ , these dates are characterized by westerlies over subtropical western Pacific, leading to large amount of Meiyu precipitation. Conversely, drought summer may be favoured for the 4th octangle,  $E_1 > 0$ ,  $E_2 < 0$ .

**Key words:** empirical orthogonal function (EOF); phase space; Meiyu

