

# 中国日降雨量变化特征分析<sup>\*</sup>

崔茂常 朱海 白学志<sup>\*\*</sup>

(中国科学院大气物理研究所大气科学与地球流体力学数值模拟国家重点实验室, 北京 100029)

(国家海洋局海洋环境科学和数值模拟重点实验室, 青岛 266061)

克劳斯·阿珀 妮迪娅·杜梅莉

(德国马普气象研究所, 汉堡 D-20146)

**摘要** 将旋转主成分分析和复变量莫莱特小波分析应用于 14a 中国境内实测与 ECMWF 再分析日降雨量资料, 研究其年际、季际与季节内变化的时空分布特征和再分析日降雨量资料的有效性。结果表明: 从实测资料中分析的降水特征, 都可以由再分析资料再现出来。除周内振荡大有出入外, 其余频率的振荡二者大致相符或基本吻合。因此, 周内振荡还不能被再分析数据较好地刻画, 但是与旱涝灾害和季风爆发联系密切的周际以上振荡, 在再分析日降雨量中基本上能被正确地表现出来。

**关键词:** 日降雨量; 中国; 再分析数据; 旋转主成分分析; 小波分析

## 1 引言

亚洲夏季风包括印度(或南亚)和东亚夏季风, 二者构成北半球典型的季风系统。后者的强度主要与中国东部的降水相关联。夏季风中期(一周至不足一季)变化的研究<sup>[1~3]</sup>显示, 它与中国的降雨和西太平洋的台风活动强度密切相关。还发现东亚与印度夏季风中存在着 4~5 d、14~19 d 和 40~50 d 振荡。这些振荡存在于低层风场、赤道地区<sup>[4]</sup>、南海中部<sup>[4,5]</sup>以及赤道辐合带表面气压的变化中。季风的季节内变化与许多现象相联系。Gadgil 等<sup>[6]</sup>指出, 季风低压具有 5 和 20 d 的变率, 而季风槽随之南北迁移。季风年际与季节内变化的关系还缺乏足够的理解, 季节内变化有多少是随机的也不清楚。因此, 即使季风的季节平均状态可以预测, 其季节内变化仍有可能具有随机的性质而无法预测。

降雨量是难以预报的气候变量, 涉及微观与宏观物理过程, 与大尺度气候系统及小尺度天气系统密切相关, 经受大气热力学条件和局部地形的影响。降雨量又是重要的气候变量, 对气候变化特别是季风研究具有重要的意义。最近的研究结果表明, 海洋与大气的改变, 相互强化使得海气系统的扰动演变成具有气候学意义的变异<sup>[7]</sup>, 降水过程极

1998-12-31 收到, 2000-01-31 收到再改稿

<sup>\*</sup> 国家自然科学基金资助项目 4975010 和国家重点基础研究发展规划项目 G1998043803 共同资助。中国科学院海洋研究所研究报告第 3688 号

<sup>\*\*</sup> 现在通讯地址: 中国科学院海洋研究所, 山东青岛 260071

有可能在中纬度北太平洋海气系统年代际振荡的形成中起重要作用<sup>[8]</sup>。

由于分析与预报方案的变动,常规的分析方法并不总是适用于检测气候变异。这些变动所导致的某些敏感变量的变化甚至大于气候变异的信息。为此,世界主要气象预报中心采用了固定预报方案的分析方法处理天气预报的历史数据。然而,其中的降雨量资料并不是再分析出来的,而是取自相应的天气预报模式的第一猜测值。这样,关键在于所得到的天气预报再分析数据降雨量资料,究竟在何种程度上反映了降水的真实情况。已经有人使用相关分析方法研究了这个问题并得出结论:如果全球范围和逐日变化均需考虑,ECMWF 再分析降雨量资料是目前可供使用的最好的数据,但仍有改进的余地。

主成分分析是一种使用特征技术的统计方法,它能够将原始数据中所包含的复杂变化压缩为几个不相关联的分量。其局限性在于:特征向量的空间正交性是一种过强而非所希望的约束条件,其结果依赖于资料复盖的空间范围,除第一主成分外其余皆有人为因素而难以理解。采用旋转主成分分析,可以得到一些简明而易于理解的空间模态<sup>[9]</sup>。自从莫莱特(1982)导出小波变换的公式以来,采用多种子波或母波函数的小波分析技术已广泛地用于信息和图象处理。在气象学界,小波分析被分别用于边界层气象学、降水过程和冷锋研究之中<sup>[10~12]</sup>。其优越性在于:小波分析能够在不同的时间或空间位置上按不同的时间或空间尺度显示变化的时间或空间结构。

中国地处活跃的东亚季风区,是全球气候变化的敏感区和脆弱带。研究其日降雨量的时空变化特征及再分析数据的有效性具有重要的意义。本文旨在应用旋转主成分分析和复变量莫莱特小波变换<sup>[13]</sup>于中国境内实测与 ECMWF 再分析日降雨量资料,研究其年际、季际与季节内变化的时空分布,并通过后者的日降雨量资料的质量评估讨论其可预测性。

## 2 数据与处理

本文所使用的中国境内实测与再分析日降雨量资料如下:

(1) 1980 年至 1993 年(每年 5 月 1 日至 12 月 31 日)中国境内约 600 个气象台站 14 a 日降雨量资料,由国家气象局提供(每年 245 d,共计 3 430 d);

(2) 亚洲季风区分辨率为  $1.125^{\circ} \times 1.125^{\circ}$ , 同期 ECMWF 再分析日降雨量资料由德国马普气象研究所的阿珀博士处理并提供。

首先,基于实测资料的同步空间相关分析表明,中国境内绝大多数气象台站及其邻近台站的降雨量之间的相关系数,明显高于远离台站降雨量之间的相关系数;其次,由天气预报模式按某一方案估算出各格点上的日降雨量,只能视为邻近地区可能降雨量的某种空间平均值;再者,可供使用的实测资料各年度气象台站的数量及位置均略有变动。为此,我们按以下步骤处理实测日降雨量资料:先按再分析数据的网格挑选出与气象台站相邻近的 475 个格点,再计算实测资料按台站位置与相应格点距离的平方成反比的加权平均值。逐点求和取平均,将日降雨量的加权平均值减去 14 a 的日均值再除以相应格点日降雨量的均方差,最后得到标准化日降雨量无量纲距平值。

3 方法与结果

本文采用旋转主成分分析和复变量莫莱特小波变换对中国境内实测与 ECMWF 再分析日降雨量资料进行分析研究, 探讨其年际、季际与季节内的变化规律并对后者在不同时间尺度下的有效性实施质量评估。

图 1 为实测与再分析日降雨量资料 14 a 均值及均方差。二者大致相符, 主要区别发生在四川盆地。四川盆地的日平均再分析降雨量及均方差明显高于实测值, 很可能由于天气预报模式较粗糙的网格无法再现盆地东南部的小尺度山脉, 从而使得夏季风和台风降水过程能够波及这一地区所致。

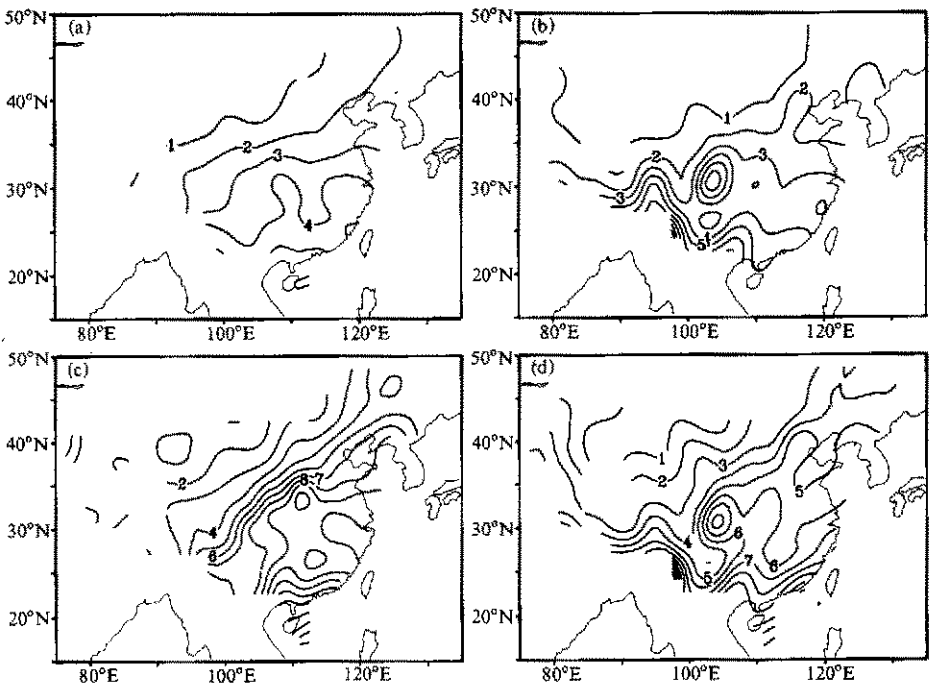


图 1 中国日降雨量均值和标准偏差 (单位: mm/d)  
(a) 实测日降雨量均值; (b) 再分析日降雨量均值; (c) 实测标准偏差; (d) 再分析标准偏差

图 2、图 3 分别为由实测资料和再分析数据计算出来的前 4 个旋转模态及其相应的时间序列, 图 4 为第四旋转模态相应的时间序列按周期 2、7、14、20、60、122.5、245 和 490 d 做小波变换的结果。按同一周期展开所得时间序列的相关系数列入表 1。

表 1 按同一周期作小波展开所得时间序列的相关系数

实测资料	2 d	7 d	14 d	20 d	60 d	0.5 a	1 a	2 a	再分析资料
第一模态	0.13	0.69	0.74	0.83	0.72	0.58	0.90	0.67	第二模态
第二模态	0.28	0.63	0.72	0.69	0.68	0.72	0.68	0.73	第三模态
第三模态	0.30	0.67	0.68	0.70	0.85	0.90	0.80	0.89	第一模态
第四模态	0.15	0.68	0.69	0.76	0.74	0.82	0.83	0.85	第四模态

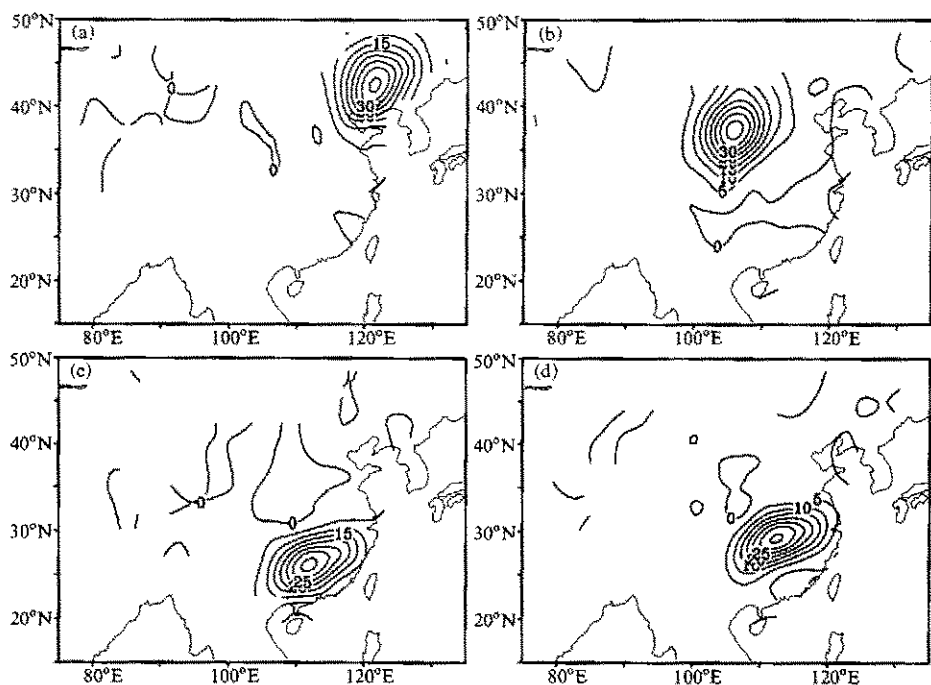


图 2 前 4 个实测日降雨量旋转模态

(a) 第一模态; (b) 第二模态; (c) 第三模态; (d) 第四模态

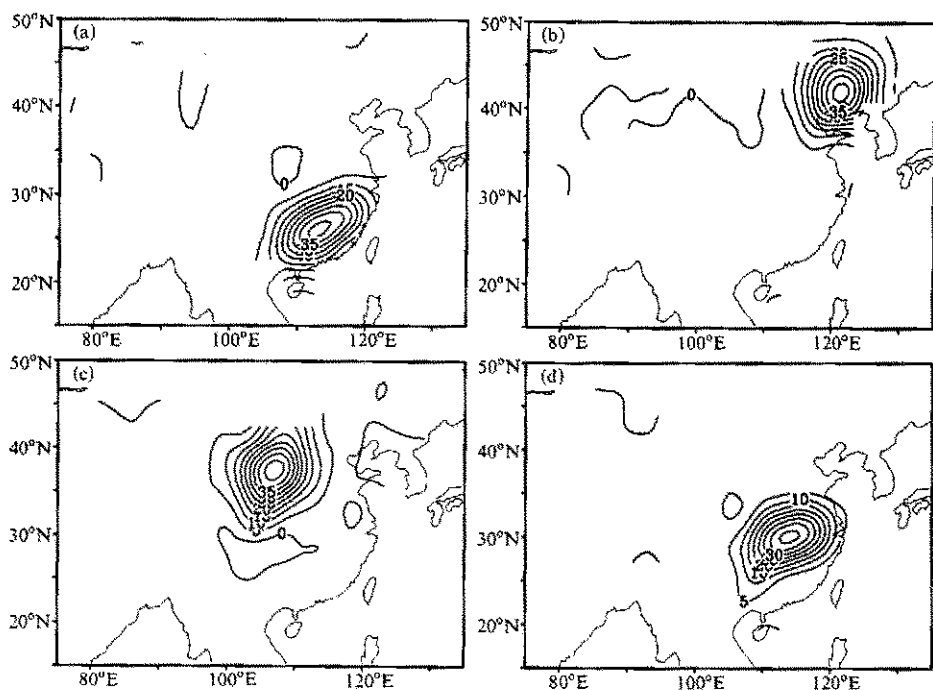


图 3 前 4 个再分析日降雨量旋转模态

(a) 第一模态; (b) 第二模态; (c) 第三模态; (d) 第四模态

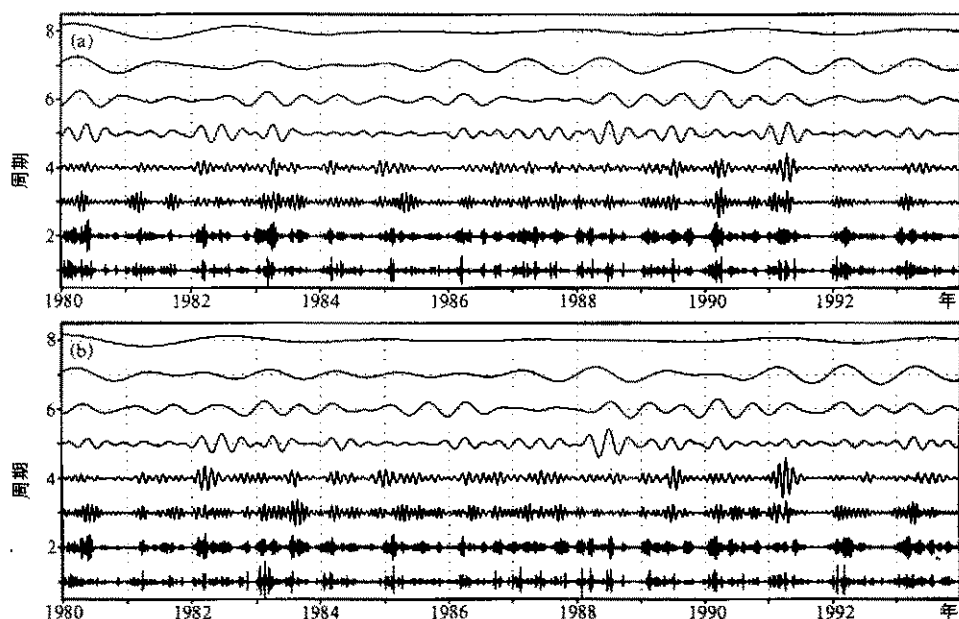


图4 前4个实测日降雨量旋转模态所对应的时间序列

(a) 对应第四个实测旋转模态; (b) 对应第四个再分析旋转模态

横坐标为年份, 每年 245 d, 共计 3 430 d; 纵坐标对应于小波变换所使用的 8 个周期序号, 时间序列曲线的振幅已无量纲化

由实测资料和再分析数据计算出来的前 4 个旋转模态所解释的变化率 2.9%、2.6%、2.6%和 2.3%分别占总变化率的 3.9%、3.8%、3.6%和 3.5%。明显低于非旋转模态所解释的变化率(尤其是第一模态, 后者约为前者的 4 倍), 但旋转模态具有简明的空间结构和清晰的物理意义。

由实测资料计算出来的第一个旋转模态(图 2a)主要描述东北地区的降雨特征, 对应于由再分析资料计算出来的第二个旋转模态(图 3b)。相应的时间序列按上述 8 周期作小波变换的结果表明: 实测资料中最强的信号为 2~14 d 振荡(图略), 再分析资料中最强的信号也为 2~14 d 振荡(图略)。二者相关系数依次为 0.13、0.69 和 0.74, 周内振荡出入较大, 但周际振荡大致相符。实测和再分析资料中较强的信号有 20 d、60 d、半年和年际振荡, 二者相关系数依次为 0.83、0.72、0.58 和 0.90。60 d 和半年振荡大致相符, 20 d 和年际振荡基本吻合(图略)。实测和再分析资料中较弱的信号均为两年振荡(图略), 二者的相关系数为 0.67, 大体一致。

由实测资料计算出来的第二个旋转模态(图 2b)主要描述陕北和内蒙中部地区的降雨特征, 对应于由再分析资料计算出来的第三个旋转模态(图 3c)。相应时间序列作小波变换的结果表明: 实测资料中最强的信号为 2~7 d 振荡(图略), 再分析资料中最强的信号也为 2~7 d 振荡(图略)。二者相关系数依次为 0.28 和 0.63, 周内振荡出入较大, 但周际振荡大致相符。实测和再分析资料中较强信号有 14 d、20 d、60 d、半年、年际和两年振荡, 二者相关系数依次为 0.72、0.69、0.68、0.72、0.68 和 0.73, 大

体一致。

由实测资料算出的第三个旋转模态(图 2c)主要描述华南地区的降雨特征,对应于由再分析资料算出的第一个旋转模态(图 3a)。相应时间序列作小波变换的结果表明:实测与再分析资料中最强的信号均为年际振荡(图略),二者相关系数为 0.80,基本吻合。实测和再分析资料中较强信号有 2 d、7 d、14 d、20 d、60 d 和半年振荡(图略),二者相关系数依次为 0.30、0.67、0.68、0.70、0.85 和 0.90。除周内振荡出入较大外,周际和 20 d 振荡大体一致,60 d 和季节振荡基本吻合。实测和再分析资料中较弱的信号为两年振荡(图略),二者相关系数为 0.89,基本吻合。

由实测资料算出的第四个旋转模态(图 2d)主要描述长江中下游的降雨特征,对应于由再分析资料算出的第四个旋转模态(图 3d)。相应的时间序列作小波变换的结果表明:实测与再分析资料中两年振荡较弱(图 4a、b),二者相关系数为 0.85,基本吻合。其余 2~60 d 振荡、半年和年际振荡的强度大致相当(图 4a、b),二者相关系数依次为 0.15、0.68、0.69、0.76、0.74、0.82 和 0.83。周内振荡出入较大,但周际振荡、季节内振荡大致相符,季节振荡和年际振荡基本吻合。特别是与 1991 年 5 月中旬到 7 月中旬长江中下游 3 次特大暴雨相对应的 20 d 振荡<sup>[14]</sup>(图 4a)在再分析资料中也清晰的再现(图 4b)。

此外,由实测资料算出的第五个和第六个旋转模态分别反映黄淮流域和大兴安岭南部地区的降雨特征,分别与再分析资料算出的第六个和第五个旋转模态相对应。

## 4 讨论与结论

日降雨量资料按观测台站位置与邻近格点距离的平方成反比加权平均的处理方法是合理的,因为绝大多数地区相邻台站上日降雨量实测值之间的相关系数为 0.4~0.7,明显大于远离台站实测值之间的相关系数。它也是对实测与再分析资料实施统计分析或质量评估所必须的,因为天气预报模式的输出数据只能理解为相应变量在邻近地区所可能取值的某种空间平均,而且实测资料观测台站的数量及位置又逐年有所变动。

采用旋转主成分分析,可以得到一些简明而易于理解的空间模态。其相应的时间序列具有实测日降雨量资料距平的特征,正距平远大于负距平(图略)。这种特征在非旋转主成分分析中,只出现在第一个模态所对应的时间序列中,因此这些简明而易于理解的旋转空间模态相当于某个子空间中的第一个非旋转模态。尽管它们所解释的变化率在原空间中不足 3%,但在相应的子空间中却可以高达 10%左右。由实测和再分析数据所得到前 4 个旋转模态除顺序有所不同外,二者惊人地相似。

旋转主成分和小波分析的结果表明前 4 个旋转模态描述地区性降雨的主要特征:东北地区周内和周际振荡最强,季节内振荡、季节振荡和年际振荡居中,两年振荡最弱;陕北和内蒙中部地区周内和周际振荡最强,其余季节内振荡、季节振荡、年际振荡和两年振荡的强度大致相当;华南地区年际振荡最强,两年振荡最弱,余者居中;长江中下游地区两年振荡较弱,余者大致相当。这些从实测资料中分析出来的特征,都可以由再分析资料再现。除周内振荡大有出入外,其余频率的振荡二者大致相符(相关系数约为 70%),或者基本吻合(相关系数大于 80%)(表 1)。尽管 ECMWF 再分析日降雨量

资料还有改进的余地(如:四川盆地影响的模拟需要加强,日降雨量估计值频数有余而强度不足),但它是目前复盖全球并包括逐日变化的最好的资料。

迄今为止,世界上仍有许多人迹罕至地带(诸如大洋中部、高原和山区)几乎没有什么气象观测资料,然而这些地区可能对气候变化的研究具有重要的意义。为此,世界气象组织会同各大气预报中心,采用较为统一的预测方案对天气预报的历史资料进行再分析形成“再分析数据”作为补充。本文的研究结果表明:除周内振荡外,ECMWF再分析资料所再现的日降雨量时空变化特征在中国境内与实测资料大致相符或基本吻合。

**致谢:** 陶诗言、黄荣辉、吴国雄院士和孙淑芬研究员及徐建军、丁敏芳博士对本文的撰写给予了热情的鼓励并提出了有益的建议,在此一并表示由衷的谢意。

## 参 考 文 献

- 1 陶诗言、徐淑英、郭其蕴,夏季东亚热带和副热带地区经向和纬向环流型的特征,气象学报,1962,32,91~134.
- 2 陈隆勋、罗绍华,北太平洋西部地区强和弱热带辐合带时期低纬大气环流的分析,中国科学院大气物理所集刊,第8号,北京:科学出版社,1979,77~85.
- 3 陈隆勋、罗绍华、沈如桂,夏季亚洲季风环流系统的结构及其与大气环流季节变化的关系,1980热带天气会议论文集,北京:科学出版社,1982,82~92.
- 4 陈隆勋、金祖辉,夏季东亚季风环流系统中期变化的南北半球相互作用,全国热带夏季风会议论文集,昆明:云南人民出版社,1982,218~231.
- 5 陶利文、王晓东,南海夏季季风系统的中期变动,全国热带夏季风会议论文集,昆明:云南人民出版社,1982,374~374.
- 6 Gadgil, S., A. Guruprasad, D. R. Sikka and D. K. Paul, Intraseasonal variation of the summer monsoon. I: Observational aspects, *J. Meteor. Soc. Japan*, 1992, 70, 517~527.
- 7 Latif, M., Dynamics of interdecadal variability in coupled ocean-atmosphere models, *MPI for Meteorology Report*, 1997, No. 239, 1~75.
- 8 Cui, M. et al., Coast sea level and Asian monsoon system: a downscaling exercise for Chinese coast, *Chinese Journal of Oceanology and Limnology*, 1998, 16(2), 108~121.
- 9 Horel, John D., A rotated principal component analysis of the interannual variability of the northern hemisphere 500 mb high field, *Mon. Wea. Rev.*, 1981, 109, 2080~2092.
- 10 Marhrt, L., Eddy asymmetry in the sheared heated boundary layer, *J. Atmos. Sci.*, 1991, 48, 472~492.
- 11 Kumar, P. and E. Foufoula-Georgiou, A new look at rainfall fluctuations and scaling properties of spatial rainfall using orthogonal wavelets, *J. Appl. Meteor.*, 1993, 32, 209~222.
- 12 Gamage, N. and W. Blumen, Comparative analysis of low-level cold fronts: wavelet, Fourier and empirical orthogonal function decomposition, *Mon. Wea. Rev.*, 1993, 121, 2867~2878.
- 13 Spedding, G. R., F. K. Browand, N. K. Huang and S. R. Long, A 2-D complex wavelet analysis of an unsteady wind-generated surface wave field, *Dyn. Atmos. Oceans*, 1993, 20, 55~77.
- 14 叶笃正、黄荣辉,长江黄河流域旱涝规律和成因研究,济南:山东科学技术出版社,1996.

## An Analysis of Daily Rainfall Variability in China

Cui Maochang, Zhu Hai and Bai Xuezhì

*(State Key Laboratory of Numerical Modeling for Atmospheric Sciences and Geophysical Fluid Dynamics,  
Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029)*

*(Key Laboratory of Marine Science and Numerical Modeling, State Oceanic Administration, Qingdao 266061)*

Klaus Arpe and Lydia Dumenil

*(Max-Planck Institute for Meteorology, Hamburg D-20146, Germany)*

**Abstract** In this study, rotated principal component analysis (PCA) and complex Morlet wavelet transform are used with observed and ECMWF reanalyzed daily rainfall data of 14 years in China to study their temporal and spatial variation features and evaluate the validation of reanalyzed precipitation. It is shown that the first four rotated modes can describe the major rainfall fluctuation features in some local regions: intraweekly and interweekly fluctuations are stronger, biannual ones is weaker and intraseasonal, interseasonal and interannual ones are moderate in the northeastern China; intraweekly and interweekly fluctuations are stronger but others are moderate in the northern Shaanxi and the middle of Inner Mongolia; interweekly fluctuations are stronger, biannual fluctuations are weaker and others are moderate in the southern China; biannual fluctuations are weaker but others are moderate in the Changjiang Valley. Except intraweekly fluctuations, these observed features can be well represented by the ECMWF reanalyses.

**Key words:** daily rainfall; China; reanalysis; rotated principal component analysis; wavelet analysis