

方宗义, 覃丹宇, 黄勇, 等. 2014. 梅雨锋云系的模态研究 II: 出现频率及转换特点 [J]. 大气科学, 38 (4): 719–726, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2013.13099. Fang Zongyi, Qin Danyu, Huang Yong, et al. 2014. Modes of Meiyu frontal cloud systems. Part II: Frequencies and transitional characteristics [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 38 (4): 719–726.

梅雨锋云系的模态研究 II: 出现频率及转换特点

方宗义¹ 覃丹宇^{1,2} 黄勇³ 李博^{1,2}

¹ 国家卫星气象中心, 北京 100081

² 中国气象局中国遥感卫星辐射测量和定标重点开放实验室, 北京 100081

³ 安徽省气象科学研究所, 安徽省大气科学与卫星遥感重点实验室, 合肥 230001

摘 要 基于经验正交函数 (EOF) 分解方法提取的 1998~2008 年梅雨活跃期共 16 次过程的梅雨锋云系主导模态, 讨论了这些主导模态的发生频率、维持时间及相互转换特征。结果表明, 在 16 个梅雨活跃期内, 云系的第 1 主导模态正相位出现的频率最高, 并且在 4 个活跃期内作为首次出现模态率先出现; 第 5 模态正位相的出现频率最低, 且该模态多数伴随其他模态一同出现, 为过渡模态。统计发现, 各主导模态的维持时间并不相同, 其中第 2 模态负位相持续时间最长, 为 81 h; 第 5 模态正位相的最大持续时间最短, 仅为 18 h; 第 6 模态负位相的平均持续时间最长。对不同主导模态转换方向和频次的计算表明, 各个位相的模态最多 (最少) 向 9 种 (3 种) (含正负位相) 其他模态进行转换。除第 6 模态负位相和第 5 模态负位相向其他模态的转化具有较好的方向性外, 其他模态间的相互转换多表现出随机性特征。其中, 第 6 模态负位相在超过半数的情况下向第 5 模态负位相转换, 而第 5 模态负位相则多向第 3 模态正位相和第 1 模态负位相进行转换。

关键词 梅雨锋云系 主导模态 频率 模态转换

文章编号 1006-9895(2014)04-0719-08

中图分类号 P405

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2013.13099

Modes of Meiyu Frontal Cloud Systems. Part II: Frequencies and Transitional Characteristics

FANG Zongyi¹, QIN Danyu^{1,2}, HUANG Yong³, and LI Bo^{1,2}

¹ National Satellite Meteorological Center, Beijing 100081

² Key Laboratory of Radiometric Calibration and Validation for Environmental Satellites, China Meteorological Administration, Beijing 100081

³ Key Laboratory of Atmospheric Sciences and Satellite Remote Sensing, Anhui Province Meteorological Science Research Institute, Hefei 230001

Abstract On the basis of the leading modes of the Meiyu frontal cloud system extracted by the empirical orthogonal function (EOF) from the black body temperatures (TBBs) in the active periods of Meiyu during 1998 to 2008, the frequency of occurrence, persistence time, and transitional characteristics are investigated. There are seven independent leading modes for TBB anomalies (EOF1 to EOF7). The statistics show that the positive phase of EOF1 has the highest frequency of occurrence and can explain the first appearance mode in 25% of the total Meiyu processes. The positive phase of EOF5 has the lowest frequency of occurrence of all of these leading modes and is often mixed with other modes as a transition mode. In addition, the longest persistence time of the negative EOF2 is 81 h and is longer than that of the other leading modes, whereas the longest duration time of the positive EOF5 is only 18 h, which is shorter than that of the

收稿日期 2013-07-25, 2013-12-30 收修定稿

资助项目 国家自然科学基金资助项目 40975023, 国家高技术研究发展计划 (863 计划) 2012AA120903, 公益性行业 (气象) 科研专项 GYHY201106044

作者简介 方宗义, 男, 1938 年出生, 研究员, 主要从事卫星气象学研究。E-mail: fangzy@nsmc.cma.gov.cn

通讯作者 覃丹宇, 男, 1968 年出生, 博士, 主要从事卫星气象研究。E-mail: qindy@cma.gov.cn

other leading modes. The negative phase of EOF6 has the longest mean duration time. The conversions between the leading modes are random, whereas only the negative EOF5 and EOF6 show better directionality. Among them, the probability for the transition from the negative phase of EOF6 to the negative phase of EOF5 is 66.67%, whereas the negative phase of EOF5 often transits to the positive phase of EOF3 and the negative phase of EOF1.

Keywords Meiyu frontal cloud systems, Leading modes, Frequency, Mode transition

1 引言

作为东亚夏季风系统带来的典型天气和气候现象,梅雨控制范围大,持续时间长,降水次数频繁,对从我国江淮流域一直到日本南部每年夏季的天气和气候有重要影响,长期以来,一直是气象研究的重要对象,在气候学、天气学和中尺度气象学上均取得了丰硕成果(Ninomiya, 1984; 斯公望, 1989; 郑永光等, 2008; 梁萍等, 2010)。

梅雨锋是一片包含有强对流降水与云团的近于纬向的宽广云雨区,并且锋区以南为强的低空偏南急流,锋前是具有高假相当位温的高湿空气柱(丁一汇等, 2007)。早在 20 世纪 70 年代末期,就有科学家利用静止气象卫星的云图来解释梅雨期间的云系特征(Asakura, 1979)。在卫星云图上,与梅雨锋相关的 TBB(云顶亮温)低值带从华南和长江流域一直向东北延伸到日本列岛,并与北太平洋上的极地锋面云系相连接(Nagata and Ogura, 1991),是西南水汽输送的大值带,且云量的大值中心与对流层中层的西风轴有很好的对应关系(Asakura, 1979)。

对于梅雨锋云系的基本形态(姚秀萍等, 2005; 覃丹宇等, 2006; 郑永光等, 2008)、结构特征(王建捷和陶诗言, 2002; 柳俊杰等, 2003; Higashi et al., 2010; 赵玉春等, 2011)和中尺度对流系统(Yasunari and Miwa, 2006; Sun et al., 2010; Takahashi and Suzuki, 2010; 傅慎明等, 2011)的研究一直以来不断取得新的进展,但关于梅雨期间云系演变的专门研究相对较少,仅有部分研究涉及云系形态和强弱变化、云系之间的转化合并(项续康等, 1994; Ninomiya, 1984, 2001; Ninomiya and Muraki, 1986; Ninomiya and Shibagaki, 2003; 覃丹宇等, 2006)。

众所周知,梅雨锋的环流系统包含多个成员。研究表明,梅雨的阶段性变化与高层西风、行星锋区、高层东风急流和西太平洋副热带高压的变动有密切联系,来自西南方的水汽输送也是影响梅雨雨带位置的重要因子(丁一汇等, 2007; 刘丹妮等,

2011)。雨带位于江南的南部和北部时,中纬度低槽和鄂霍次克阻塞高压是中纬度波列的组成部分,二者的位置变动决定梅雨锋所在的位置(宗海锋等, 2006)。梅雨期降水多寡还与南半球环流中高纬环流尤其是极涡的强弱紧密相关(鲍学俊, 2004)。梅雨锋环流系统的这些成员强度和位置的互相配置和变化,直接导致梅雨锋云系形态位置和强度的变化,即梅雨锋云系的重构和系统的演变,伴随着梅雨锋云系主导模态的转化。Qin et al. (2014)就曾详细讨论了梅雨锋第一主导模态向其他主导模态转化伴随的环流配置。梅雨期强降水具有持续性,梅雨锋云系在生消演变的过程中会进行重建,重建的过程主要受西太平洋副高、高空槽、阻高、锋面/切变线和急流等主导天气系统的共同影响。因此,研究梅雨锋云系形态和强度演变,还可以帮助我们了解云系重建的特点。

为了了解梅雨锋云系具有哪些主要模态,以及与之对应的天气系统和环流特征,覃丹宇等(2014)利用 EOF 分析方法,获得了梅雨锋云系的气候态和主导模态,并对其空间分布、时间系数特征及对应的环流配置进行了分析研究。结果表明,梅雨锋云系的主导模态共有 7 个,分别反映了梅雨期间云系主要的异常特征,揭示了梅雨锋云系随主导天气环流系统的演变而发生断裂、减弱、消散和重建的具体过程。显然,这 7 个主导模态在梅雨活跃期的重要性是不一样的,有一些是典型梅雨锋云系的主导模态,而另外一些则是梅雨锋云系重建过程中的过渡模态。

为了弄清哪些是典型梅雨锋云系的模态,需要进一步研究其出现频率、持续时间和相互转换的特点。本文的目的就是在梅雨锋云系主导模态的研究基础上,统计分析各主导模态的出现频率、持续时间和相互转换情况,了解梅雨锋云系主导模态的活跃程度,便于进一步研究导致模态影响差异的天气系统相互作用关系,深入理解梅雨锋云系建立、演变和重建的特点。

2 资料和方法

覃丹宇等(2014)利用 EOF 分析方法,获得了

1998~2008 年的梅雨活跃期内梅雨锋云系的气候态和 7 个主导模态、以及各主导模态主分量时间序列的解释方差。在研究梅雨锋云系主导模态的出现频率时,以各模态主分量的标准差是否大于 1.8 (小于 1.8) 来作为判断各模态正位相(负位相)是否出现的标准,即:若当前时刻某一主导模态的主分量大于 1.8 个标准差,则我们称当前时刻出现了这个模态。这样做既能挑选出模态最显著的时次,也能够使得到的样本数满足分析需要。在判断主导模态是否出现的过程中,若同一时次有两个或多个主导模态的时间系数同时满足判断的阈值条件,我们即认为该时刻有多个模态同时出现,称之为混合模态。

在 1998~2008 年 10 年(2004 年因资料质量控制被剔除)共 16 次梅雨活跃期中,我们将每个梅雨过程第一次出现的模态称为“首次出现模态”。据此可以统计所有梅雨过程中首次出现的模态。另外,梅雨锋云系主导模态的转化过程中随着云系的发展演变,往往伴随着梅雨过程的衰减或重建,以及不同类型梅雨锋活动系统的演变。假设有两种模态 a 和 b,如果当前时刻主分量大于 1.8 个标准差的模态是 a 并持续若干个时次,之后其主分量标准差小于 1.8,同时模态 b 的标准差开始大于 1.8,则我们把这个过程当作是模态 a 向模态 b 的转化过程。以此类推,可以统计所有梅雨过程中主导模态的转化情况。

3 梅雨锋云系主导模态的出现频率和持续时间

3.1 出现频率

从统计结果(图 1)来看,在所有的 1728 个梅雨时次中,有 48.73% (842 个时次)的样本中出现了前 7 个模态的正负位相,其中包含 8.26% (141 个时次)的混合模态。在所有模态中,第 1 模态正位相出现的频率最高,达 6.37%;第 5 模态正位相出现的频率最低,仅为 1.27%。其余各模态根据出现频率的大小可以划分为三类:平均型(与出现频率的平均值相比,偏差不超过 10%,即出现频率在 2.78%~4.28%之间)、偏多型(出现频率大于 4.28%)和偏少型(出现频率小于 2.78%)。其中,第 1 模态正位相(出现频率为 6.37%)、第 3 模态正位相(出现频率为 4.40%)和第 6 模态正位相(出现频率为 4.57%)属于偏多型,第 1 模态负位相(出现频率为 1.68%)、第 3 模态负位相(出现频率为 2.31%)、

第 5 模态正位相(出现频率为 1.27%)、第 6 模态负位相(出现频率为 1.97%)和第 7 模态正位相(出现频率为 2.72%)属于偏少型,其他模态属于平均型。此外,从统计中还发现第 2 模态正位相和负位相的出现频率相同,均为 3.82%。

为寻找梅雨过程中通常最先出现的云系主导模态,对所研究的 16 次梅雨过程中首次出现的模态进行统计(图 1 右)。结果发现,第 1 模态正位相作为首次出现模态的比重最高,达 25%。研究指出,第 1 模态正位相的天气学意义是:梅雨锋云系主要位于江南和华南的广大地区,这里也是低层切变线和低涡活跃的区域,同时,副高位置偏南,强度偏弱,冷空气主体偏北(覃丹宇等, 2012)。其次为第 2 模态负位相和第 3 模态正位相,均为 12.5%。而第 5 模态正、负位相在这 16 次过程中,均没有以首次出现模态的方式出现过。除此之外的其他模态作为首次出现模态的几率均为 6.25% (1 次)。

在所有梅雨过程中,共有 141 个时次出现了混合模态。统计结果表明(图 2),第 1 模态正位相与其他模态混合出现的次数最多,为 41 次,占第 1 模态出现总次数的 37.27%。从出现混合模态次数占该模态出现总次数的比重(简称混合模态占比)来看,第 5 模态正位相作为混合模态出现的比重最高,为 68.18%。另外,第 3 模态负位相和第 7 模态负位相也有半数以上(超过 50%)的时次以混合模态的方式出现。计算表明,混合模态占比的平均数为 36.93%。与平均数相比,第 1 模态负位相、第 2 模态正/负位相以及第 4 模态正位相和第 7 模态正位相的占比均偏小,分别为 27.59%、15.15%、27.27%、19.18%、14.89%。

通过以上分析发现,第 1 模态正位相在所有梅雨时次中出现的频率最高,而且也有 25%的梅雨活跃过程中梅雨锋云系首先出现第 1 模态正位相的空间分布类型。在所有梅雨时次中,出现频率最低的是第 5 模态正位相,并且该模态出现时多半伴随着其他模态一同出现(混合模态占比为 68.18%)。

3.2 持续时间

由于使用的卫星 TBB 资料为 3 h 的时间间隔,因此将各主导模态持续的次数乘以 3,就得到各模态出现的持续小时数。对所研究的 16 次梅雨过程中第 1~7 云系主导模态正位相和负位相持续时间(持续小时数)的最大值、最小值和平均值进行统计。从结果(图 3)看,第 2 模态负位相持续时间

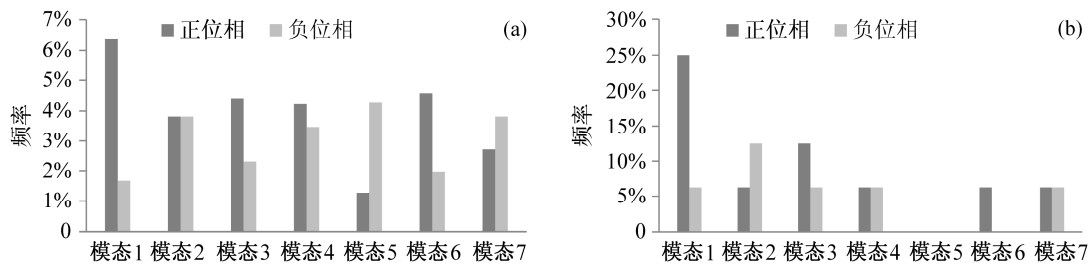


图1 各模态出现的频率(左)及在16次过程中作为首次出现模态的频率(右)
Fig. 1 The frequencies for each of the first seven leading modes of TBB anomalies (left) and the frequencies for the modes appearing earliest in one active MeiYu phase (right)

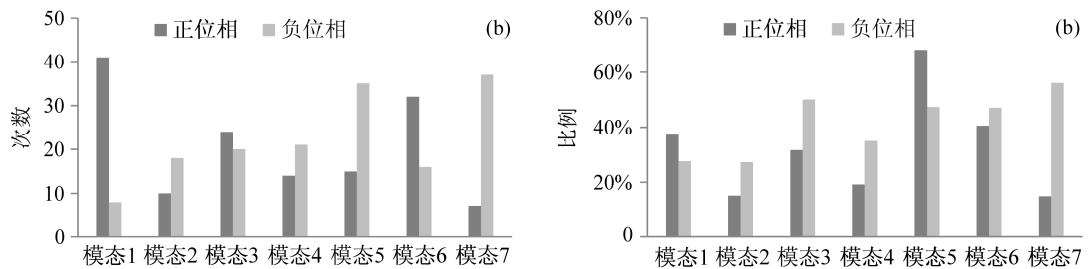


图2 混合模态中第1~7模态出现的次数(左)及其对应模态出现总次数的比例(右)
Fig. 2 The total numbers for the first seven leading modes in all the mixed modes (left) and their corresponding ratios to the total appearance numbers (right)

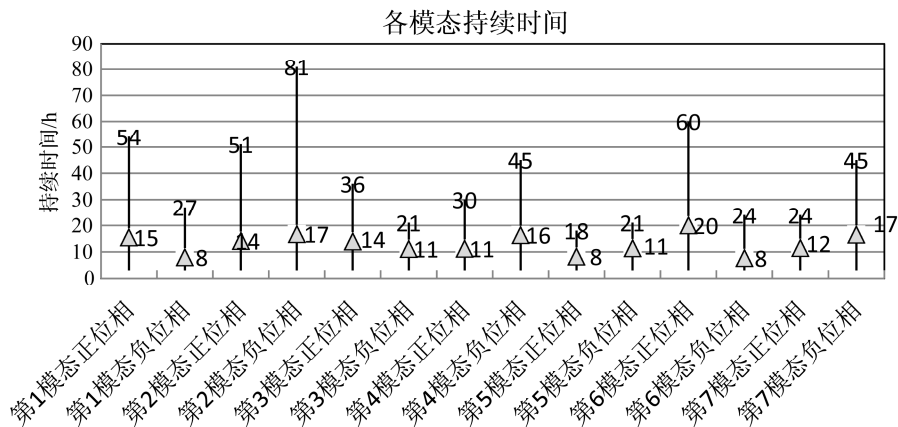


图3 各模态持续时间(竖线的上下位置分别表示模态的最大和最小持续时间,灰色三角表示各正负位相的平均持续时间)
Fig. 3 The persistence time for each of the first seven leading modes (The top and bottom of the line denotes respectively the maximum and minimum persistence time for each mode. The grey marks denote the mean persistence time for each positive and negative modes)

的最大值要高于其他模态,达到了81 h。第5模态正位相的最大持续时间最短,仅为18 h。平均持续时间最长的是第6模态负位相,为20 h;而第1模态负位相、第5模态负位相和第6模态负位相的平均持续时间最短,均只有8 h。另外,第1~7模态正、负位相均出现仅维持1个时次的情况,即最短持续时间为3 h(将卫星资料的时间间隔3 h作为最短持续时间)。

4 梅雨锋云系主导模态间的转换特点

梅雨锋云系的分布形态随主导天气系统的演

变而改变,表现为各主导模态之间会发生相互转换。本节统计梅雨期云系主导模态之间转化的方向和频率,以求为今后研究梅雨锋云系的重建和演变提供研究基础,对导致云系模态转化的大气环流配置本文暂不作过多讨论。

在16次梅雨过程中,第1模态正位相(图4a)共计向9种其他的模态进行了转换。其中,向第2模态正位相、第5模态负位相和第7模态负位相进行转换的比例最高,均为15%。第1模态负位相(图4b)出现了向其他8种模态进行转换的过程,比例最高的是向第3模态负位相和第4模态正位相,均

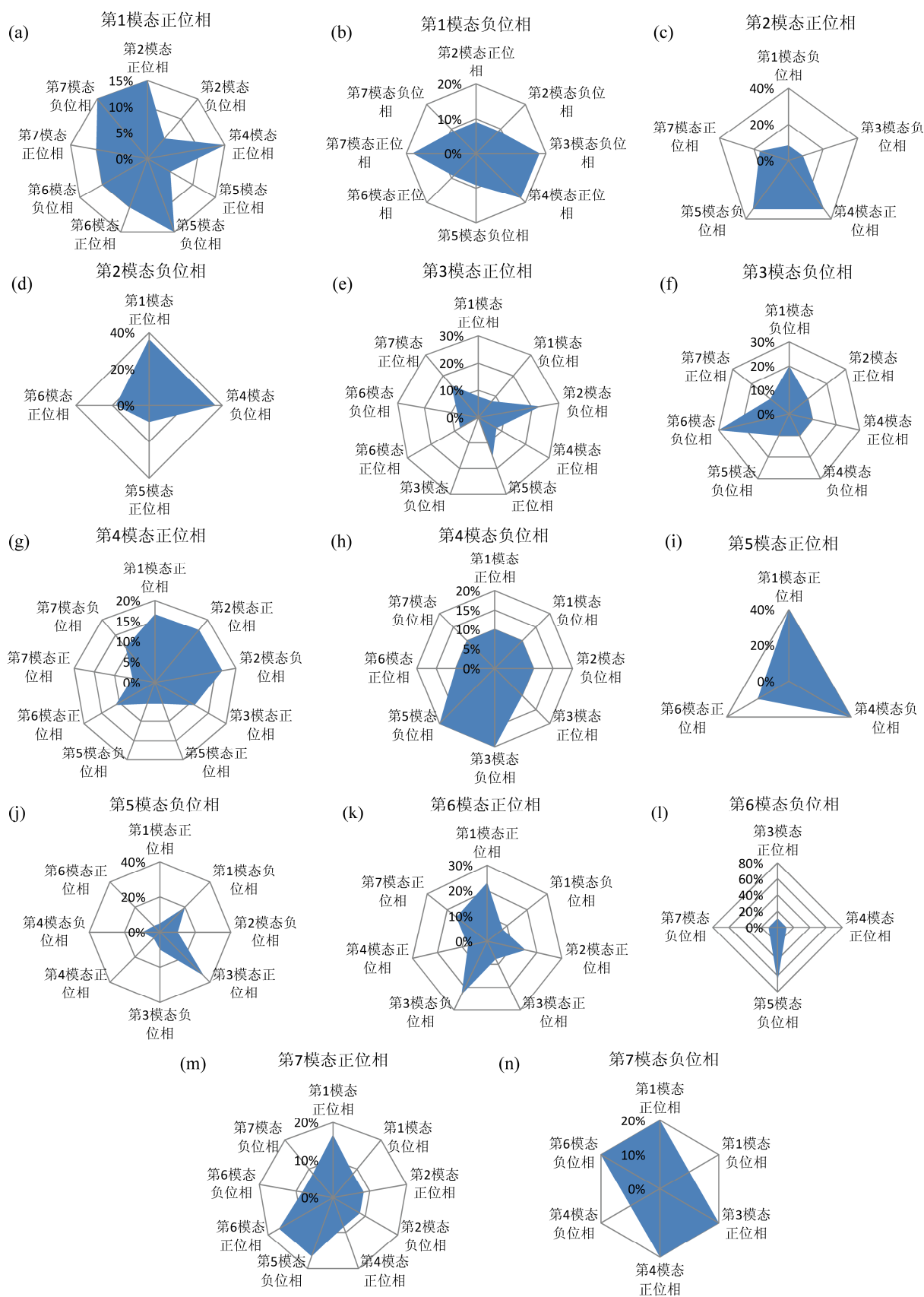


图 4 各模态向其他模态转换比例分布图

Fig. 4 The proportion transition diagrams for each of the first seven leading modes

为 18.18%。

第 2 模态正位相 (图 4c) 出现了向第 1 模态负位相、第 3 模态负位相、第 4 模态正位相、第 5 模态负位相以及第 7 模态正位相等 5 种模态的转换。其中向第 4 模态正位相和第 5 模态负位相进行转换的比例最高, 达到了 33.33%。第 2 模态负位相 (图 4d) 则向第 1 模态正位相、第 4 模态负位相、第 5 模态正位相和第 6 模态正位相的转换, 而且以向第 1 模态正位相和第 4 模态负位相转换为主, 两种转换的比例均占到了 36.36%。

第 3 模态正位相 (图 4e) 可向 9 种其他的模态发生转换, 其中, 向第 2 模态负位相转换的比例最高, 达到了 23.08%。其次, 为向第 5 模态正位相转换, 比例为 15.38%。第 3 模态负位相 (图 4f) 共计向 7 种其他模态进行转换, 其中有一半是向第 6 模态负位相和第 1 模态负位相进行转换, 所占比例分别为 30% 和 20%。

第 4 模态正位相 (图 4g) 发生了向其他 9 种模态的转换, 其中向第 1 模态正位相、第 2 模态正位相和负位相进行转换的比例最高, 均为 16.67%。第 4 模态负位相 (图 4h) 共计向其他 8 种模态发生了转换, 其中向第 3 模态负位相和第 5 模态负位相进行转换的比例最高, 均为 20%。

第 5 模态正位相 (图 4i) 可向第 1 模态正位相、第 4 模态负位相和第 6 模态正位相进行转换, 三种转换过程的比例分别为 40%、40% 和 20%。第 5 模态负位相 (图 4j) 则会向其他 8 种模态进行转换, 但是以向第 3 模态正位相和第 1 模态负位相进行转换的比例最高, 分别为 35% 和 20%。

第 6 模态正位相 (图 4k) 向其他 7 种模态进行转换, 其中以向第 1 模态正位相和第 3 模态负位相进行转换的比例最高, 占到 23.08%。第 6 模态负位相 (图 4l) 可向第 3 模态正位相、第 4 模态正位相、第 5 模态负位相和第 7 模态负位相进行转换, 并且以向第 5 模态负位相进行转换为主, 所占比例高达 66.67%。

第 7 模态正位相 (图 4m) 共计向 9 种其他模态进行转换, 其中向第 1 模态正位相、第 5 模态负位相和第 6 模态正位相进行转换的比例最高, 为 16.67%, 而向其余 6 种模态进行转换的比例均为 8.33%。第 7 模态负位相 (图 4n) 共计向 6 种其他模态进行转换, 所占比例分别为 20% 和 10%。

从模态间转换的情况来看, 各个相位的模态最

多向 9 种其他模态进行转换, 而最少的也能向 3 种其他的模态进行转换。为考察不同模态向其他模态转换的方向性, 我们计算了各模态向其他模态转换次数的标准偏差。结果表明, 第 6 模态负位相和第 5 模态负位相的数值最大, 分别为 2.89 次和 2.07 次。而标准偏差小于 0.5 次的有第 1 模态正、负位相, 第 3 模态正、负位相、第 4 模态正、负位相、第 5 模态正位相、第 6 模态正位相、第 7 模态正、负位相; 其中第 4 模态负位相的数值最低, 仅为 0.4 次。这说明, 模态间的相互转换多数表现出了随机性, 而只有第 6 模态负位相和第 5 模态负位相具有较好的确定性。从转换比例的分布来看, 第 6 模态负位相的确定性最强, 向第 5 模态负位相进行转换的比例高达 66.67%。与此成鲜明对比, 第 4 模态负位相的随机性最强。

5 结论

基于利用 EOF 分析方法提取的 1998~2008 年梅雨活跃期内的卫星 TBB 距平的前 7 个主导模态, 本文统计了这些模态的出现频率和持续时间特征, 计算了各梅雨过程的首次出现模态频率和混合模态次数, 并总结了不同模态向其他模态的转化情况。得到的主要结论如下:

(1) 在 16 个梅雨活跃期内, 云系的第 1 主导模态正相位出现的频率最高, 并且作为首次出现模态的比重也最高, 在其中的 4 个活跃期内率先出现。第 5 模态正位相的出现频率最低, 但作为混合模态出现的比重最高, 说明该模态多数伴随其他模态一同出现, 为过渡模态。

(2) 对模态持续时间的统计表明, 各主导模态的持续时间差别较大, 其中, 第 2 模态负位相持续时间的最长, 为 81 h。第 5 模态正位相的最大持续时间最短, 仅为 18 h。

(3) 从模态间转换的情况来看, 各个位相的模态最多向 9 种 (含正负位相) 其他的模态进行转换, 而最少的也能向 3 种其他的模态进行转换。模态间的相互转换多数表现出了随机性, 而只有第 6 模态负位相和第 5 模态负位相具有较好的方向性。第 6 模态负位相超过半数 (66.67%) 的可能是向第 5 模态负位相进行转换, 而第 5 模态负位相向第 3 模态正位相和第 1 模态负位相进行转换的可能性最大。

总的来看, 研究梅雨锋云系的主导模态的维持

时间以及相互转化规律,可帮助我们了解与之密切相关的天气系统的变化以及天气系统之间相互作用和转化的情况。通过统计各种云系主导模态的出现频率,还可以帮助我们了解梅雨期不同降水类型发生的地点以及出现持续性降水的可能性。

参考文献 (References)

- Asakura T. 1979. Cloud distribution over East Asia during the summer monsoon season interpreted through satellite pictures [J]. *Geo. Journal*, 3 (2): 147–152.
- 鲍学俊. 2004. 梅雨过程及其与环流关系的初步研究 [D]. 南京气象学院硕士学位论文, 1–69.
- Bao Xuejun. 2004. Study on the process of the Meiyu and its relationships with the circulation [D]. M. S. thesis (in Chinese), Nanjing Institute of Meteorology, 1–69.
- 丁一汇, 柳俊杰, 孙颖, 等. 2007. 东亚梅雨系统的天气—气候学研究 [J]. *大气科学*, 31 (6): 1082–1101.
- Ding Yihui, Liu Junjie, Sun Ying, et al. 2007. A study of the synoptic-climatology of the Meiyu system in East Asia [J]. *Chin. J. Atmos. Sci. (in Chinese)*, 31 (6): 1082–1101.
- 傅慎明, 孙建华, 赵思雄, 等. 2011. 梅雨期青藏高原东移对流系统影响江淮流域降水的研究 [J]. *气象学报*, 69 (4): 581–600.
- Fu Shenming, Sun Jianhua, Zhao Sixiong, et al. 2011. A study of the impacts of the eastern propagation of convective cloud systems over the Tibetan Plateau on the rainfall of the Yangtze–Huai River basin [J]. *Acta Meteor. Sinica (in Chinese)*, 69 (4): 581–600.
- Higashi K, Kiyohara Y, Yamanaka M, et al. 2010. Multiscale features of line-shaped precipitation system generation in central Japan during late Baiu season [J]. *J. Meteor. Soc. Japan*, 88 (6): 909–930.
- 梁萍, 丁一汇, 何金海, 等. 2010. 江淮区域梅雨的划分指标研究 [J]. *大气科学*, 34 (2): 418–428.
- Liang Ping, Ding Yihui, He Jinhai, et al. 2010. A study of determining index of regional Meiyu over the Yangtze–Huaihe basin [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 34 (2): 418–428.
- 柳俊杰, 丁一汇, 何金海. 2003. 一次典型梅雨锋面结构分析 [J]. *气象学报*, 61 (3): 291–302.
- Liu Junjie, Ding Yihui, He Jinhai. 2003. The structure analysis of a typical Meiyu front [J]. *Acta Meteor. Sinica (in Chinese)*, 61 (3): 291–302.
- 刘丹妮, 何金海, 姚永红, 等. 2011. 江淮流域梅雨环流结构特征及其演变分析 [J]. *热带气象学报*, 27 (4): 465–474.
- Liu Danni, He Jinhai, Yao Yonghong, et al. 2011. Analysis of the circulation structure during Meiyu and its evolution characteristics [J]. *J. Tropic. Meteor. (in Chinese)*, 27 (4): 465–474.
- Nagata M, Ogura Y. 1991. A modeling case study of interaction between heavy precipitation and a low-level jet over Japan in the Baiu season [J]. *Mon. Wea. Rev.*, 119: 1309–1336.
- Ninomiya K. 1984. Characteristics of Baiu front as a predominant subtropical front in the summer Northern Hemisphere [J]. *J. Meteor. Soc. Japan*, 62: 880–893.
- Ninomiya K. 2001. Large λ -shaped cloud zone formed around July 6, 1991 with pole-ward moisture transport from intense rainfall area in Meiyu-Baiu front [J]. *J. Meteor. Soc. Japan*, 79 (3): 805–813.
- Ninomiya K, Muraki H. 1986. Large-scale circulation over East Asia during Baiu period of 1979 [J]. *J. Meteor. Soc. Japan*, 64: 409–429.
- Ninomiya K, Shibagaki Y. 2003. Cloud system families in the Meiyu-Baiu front observed during 1–10 July 1991 [J]. *J. Meteor. Soc. Japan*, 81: 193–209.
- 覃丹宇, 方宗义, 江吉喜. 2006. 典型梅雨暴雨系统的云系及其相互作用 [J]. *大气科学*, 30 (4): 578–586.
- Qin Danyu, Fang Zongyi, Jiang Jixi. 2006. The cloud system of heavy rainfall in the typical Meiyu period and their interactions [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 30(4): 578–586.
- 覃丹宇, 黄勇, 李博. 2012. 一种典型的梅雨锋云系 [C]// 2012 年全国卫星应用技术交流会. 南宁.
- Qin Danyu, Huang Yong, Li Bo. 2012. A dominant mode of Meiyu [C]// The national conference of satellite conference 2012 (in Chinese). Nanning.
- Qin Danyu, Li Bo, Huang Yong. 2014. Transition from the Southern Mode of the Mei-yu Front Cloud System to other Leading Modes [J]. *Adv. Atmos. Sci.*, 31 (4): 1–14.
- 覃丹宇, 黄勇, 李博, 等. 2014. 梅雨锋云系的模态研究 I: 主导模态 [J]. *大气科学*, 38 (4): .
- Qin Danyu, Huang Yong, Li Bo, et al. 2014. modes of Meiyu frontal cloud systems. Part I: The dominant modes [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 38 (4): accepted.
- 斯公望. 1989. 论东亚梅雨的大尺度环流及其中尺度扰动 [J]. *气象学报*, 47 (3): 312–323.
- Si Gongwang. 1989. Large scale circulation of East Asian Meiyu and the meso-scale disturbance [J]. *Acta Meteor. Sinica (in Chinese)*, 47 (3): 312–323.
- Sun Jianhua, Zhao Sixiong, Xu Guangkuo, et al. 2010. Study on a mesoscale convective vortex causing heavy rainfall during the Mei-yu season in 2003 [J]. *Adv. Atmos. Sci.*, 27 (5): 1193–1209.
- Takahashi T, Suzuki K. 2010. Development of negative dipoles in a stratiform cloud layer in a Okinawa “Baiu” MCS system [J]. *Atmos. Res.*, 98 (2): 317–326.
- 王建捷, 陶诗言. 2002. 1998 梅雨锋的结构特征及形成与维持 [J]. *应用气象学报*, 13 (5): 526–534.
- Wang Jianjie, Tao Shiyan. 2002. Structure and formation of Mei-yu front in 1998 [J]. *J. Appl. Meteor. Sci. (in Chinese)*, 13 (5): 526–534.
- 项续康, 马岚, 王大昌. 1994. 1991 年梅雨锋云系分析 [J]. *应用气象学报*, 5 (3): 326–332.
- Xiang Xukang, Ma Lan, Wang Dachang. 1994. The analysis of the Mei-yu front cloud system in 1991 [J]. *J. Appl. Meteor. Sci. (in Chinese)*, 5 (3): 326–332.
- 赵秀萍, 于玉斌, 赵兵科. 2005. 梅雨锋云系的结构特征及其成因分析 [J]. *高原气象*, 24 (6): 1002–1011.
- Yao Xiuping, Yu Yubin, Zhao Bingke. 2005. Structural characteristic of Meiyu frontal cloud system and its probable causes [J]. *Plateau Meteorology (in Chinese)*, 24 (6): 1002–1011.
- Yasunari T, Miwa T. 2006. Convective cloud systems over the Tibetan Plateau and their impact on meso-scale disturbances in the Meiyu/Baiu frontal zone: A case study in 1998 [J]. *J. Meteor. Soc. Japan*, 84 (4): 783–803.
- 赵玉春, 王叶红, 崔春光. 2011. 一次典型梅雨锋暴雨过程的多尺度结构特征 [J]. *大气科学学报*, 34 (1): 14–27.
- Zhao Yuchun, Wang Yehong, Cui Chunguang. 2011. Multi-scale structure features of a typical Mei-yu frontal rainstorm process [J]. *Trans. Atmos. Sci. (in Chinese)*, 34 (1): 14–27.

郑永光, 陈炯, 葛国庆, 等. 2008. 梅雨锋的天气尺度研究综述及其天气学定义 [J]. 北京大学学报 (自然科学版), 44 (1): 157–164. Zheng Yongguang, Chen Jiong, Ge Guoqing, et al. 2008. Review of the synoptic scale Meiyu front system and its synoptics' definition [J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis (in Chinese), 44 (1): 157–164.

宗海锋, 张庆云, 陈烈庭. 2006. 梅雨期中国东部降水的时空变化及其与大气环流、海温的关系 [J]. 大气科学, 30 (6): 1189–1197. Zong Haifeng, Zhang Qingyun, Chen Lieting. 2006. Temporal and spatial variations of precipitation in eastern China during the Meiyu period and their relationships with circulation and sea surface temperature [J]. Chin. J. Atmos. Sci. (in Chinese), 30 (6): 1189–1197.