纪忠萍, 谷德军, 林爱兰. 2016. 东亚夏季风强度的多尺度统计预测模型 [J]. 大气科学, 40 (2): 227–242. Ji Zhongping, Gu Dejun, Lin Ailan. 2016. A multiscale statistical prediction model of East Asian summer monsoon intensity [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 40 (2): 227–242, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1504.14274.

东亚夏季风强度的多尺度统计预测模型

纪忠萍[1] 谷德军[2] 林爱兰[2]

1 广东省气象台，广州 510080

2 中国气象局广州热带海洋气象研究所/广东省区域数值天气预报重点实验室，广州 510080

摘 要 东亚夏季风强度的变化与中国雨带和旱涝分布密切相关。为了做好东亚夏季风强度的短期气候预测，采用小波分析、Lanczos 滤波器、交叉检验等方法，研究了东亚夏季风强度的多尺度变化特征，在年际与年代际尺度上分别寻找了它在前冬海温场、200 hPa 纬向风场上的前兆信号，并利用最优子集回归建立了东亚夏季风强度的多尺度统计物理预测模型。结果表明：东亚夏季风强度存在准 4 年、准 13 年和准 43 年的周期振荡。年际尺度上，前冬赤道东太平洋（10°N～10°S, 160°W～80°W）海温与东亚夏季风强度有最强的显著负相关，且它与东亚夏季风强度在 200 hPa 纬向风场上的前兆信号有较强的负相关；年代际尺度上，南半球 60°S 与 35°S 附近 200 hPa 纬向风之差与东亚夏季风强度有最强的显著正相关，且它与东亚夏季风强度在热带印度洋、低纬度东南太平洋、低纬度南大西洋的海温及亚洲副热带 200 hPa 纬向风等前兆信号有强的正相关。通过探讨这两个前兆因子对东亚夏季风强度的预测意义，揭示了他们影响东亚夏季风强度年际和年代际变化的可能物理过程。所建立的东亚夏季风强度多尺度最优子集回归预测模型，不仅对东亚夏季风强度的年际变化具有较好的预测能力，而且对异常极值年份也具有一定的预测能力。

关键词 东亚夏季风强度 前兆信号 多尺度最优子集回归 交叉检验

文章编号 1006-9895(2016)02-0227-16 **中图分类号** P466 **文献标识码** A

doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1504.14274

A Multiscale Statistical Prediction Model of East Asian Summer Monsoon Intensity

JI Zhongping[1], GU Dejun[2], and LIN Ailan[2]

1 *Guangdong Meteorological Observatory, Guangzhou* 510080

2 *Guangzhou Institute of Tropical and Marine Meteorology, China Meteorological Administration; Guangdong Provincial Key Laboratory of Regional Numerical Weather Prediction, Guangzhou* 510080

Abstract The intensity of the East Asian Summer Monsoon (EASM) has a close relationship with the distribution of rain bands and drought–flood patterns over China. To better do short-term climate prediction of EASM intensity, its multiscale variation characteristics and relationship with SST and 200 hPa zonal wind at interannual and interdecadal scales were studied using the wavelet transform method, Lanczos filter, and cross-validation. Subsequently, a multiscale

收稿日期 2014-09-24；**网络预出版日期** 2015-04-20

作者简介 纪忠萍，女，1967 年出生，正研级高工，主要从事中期天气预报与短期气候预测研究。E-mail: zhongping_JI@grmc.gov.cn

资助项目 全球变化研究国家重大科学研究计划 2010CB950304、2014CB953901，广东省自然科学基金 S2013010016751，国家自然科学基金项目 41375095、41175071，中国科学院战略性先导科技专项 XDA11010403

Funded by Global Change Research National Major Research Program of China (Grants 2010CB950304 and 2014CB953901), Natural Science Foundation of Guangdong Province, China (Grant S2013010016751), National Natural Science Foundation of China (Grants 41375095 and 41175071), and the "Strategic Priority Research Program" of the Chinese Academy of Sciences (Grant XDA11010403)

statistical physical prediction model for EASM intensity, based on precursor signals, was constructed using the method of optimal subset regression. The results showed that EASM intensity exhibits quasi 4-, 13- and 43-year periodic oscillations. At the interannual scale, the SST in the eastern equatorial Pacific (10°N–10°S, 160°W–80°W) during the previous winter shows the largest significant negative correlation with EASM intensity, and has larger significant negative correlation with precursor signals in the 200 hPa zonal wind field. At interdecadal scales, the difference in 200 hPa zonal wind between approximately 60°S and 35°S has the largest significant positive correlation with EASM intensity. It also has larger significant positive correlation with precursor signals in the SST and 200 hPa zonal wind field, which includes the SST over the tropical Indian Ocean, low-latitude southeastern Pacific, and low-latitude southern Atlantic Ocean, and the 200 hPa zonal wind over the Asian subtropics. The potential of the two above-mentioned precursory factors in predicting EASM intensity was discussed, and the possible physical processes linking the EASM intensity and the two precursory factors at interannual and interdecadal scales explored. The multiscale optimal subset regression prediction model for EASM intensity was constructed with these precursor factors. The model not only showed better prediction ability for the interannual variation of EASM intensity, but also demonstrated certain predictive capability for extreme years.

Keywords East Asian Summer Monsoon (EASM) intensity, Precursor signal, Multiscale optimal subset regression, Cross-validation

1 引言

我国地处东亚夏季风区，东亚夏季风强弱的变化与中国雨带和旱涝分布的变化密切相关（赵汉光和张先恭，1996）。尽管东亚夏季风强度指数的定义有多种（江滢，2005；陈隆勋等，2006；王黎娟等，2008），但多数指数表示的强夏季风年，副高位置偏北，我国华北及华南沿海多雨，江淮流域少雨；弱夏季风年，副高位置偏南，华北和华南沿海地区偏旱，江淮流域偏涝（郭其蕴，1983；孙秀荣等，2002；郭其蕴等，2003；张庆云等，2003；高辉和张芳华，2003）。另外，由于夏季风的年际变率大，特别是夏季风的异常变化是造成严重洪涝灾害的重要原因（陶诗言等，1997），因此，做好东亚夏季风强弱的短期气候预测对于防洪防涝及国民经济和社会发展至关重要。

研究表明，气候系统存在着多时间尺度的变化特征，不同时间尺度上气候变化的物理原因可能不同（陆日宇，2002；Xu and Chan，2002；徐桂玉等，2005；彭京备等，2005；平凡等，2006）。东亚夏季风强度也具有明显的多时间尺度变率，不仅具有明显的季节内时间尺度的变化，而且具有明显的年际和年代际振荡（徐建军等，1997；何金海等，2004；李建平和曾庆存，2005；王会军和范可，2013）。虽然有关东亚夏季风强弱的年际和年代际变化及其影响因子已有很多研究（郭其蕴，1983；施能等，1996；黄刚和严中伟，1999；祝从文等，2000；Wang，2001，2002；孙秀荣等，2002；张庆云等，2003；郭其蕴等，2003；张庆云和王媛，2006；于淑秋等，2008；刘海文等，2012），但关于东亚夏季风强度在不同时间尺度上的前兆信号及其物理统计预测模型研究的相对较少。已有的研究（何诗秀和杨祖芳，1981；何金海等，1991；Xue et al., 2003；薛峰，2005；范可，2006；范可和王会军，2006；范可等，2007；郑菲和李建平，2012；高辉等，2012；林爱兰等，2013）表明，南半球环流变化是影响东亚夏季风活动和气候的主要因子，且南半球环流超前于东亚夏季风的变化，对东亚夏季风的预测具有重要的实用价值。另外已有的研究也表明，印度洋海温对东亚夏季风也有重要作用（徐建军和王东晓，2000；Loschnigg et al., 2003; 张人禾和李强，2004；袁媛和李崇银，2009；陈丽娟等，2013）。哪些因子可能对东亚夏季风强弱有预测意义？尤其是前期南半球大气环流及印度洋海温的变化对东亚夏季风强弱是否具有预测意义？这些在前人的研究中均较少涉及。另外，由于目前通用的各种气候模式，对东亚夏季风活动的模拟和预测能力都还非常有限（王黎娟等，2008）。因此，研究不同时间尺度上东亚夏季风强弱的前兆信号并建立统计预测模型，对进一步提高东亚夏季风的短期气候预测水平非常重要，也有利于防灾减灾。

近 10 多年来，通过多尺度分解法建立的预测方法已经取得较好的预测效果。如，尤卫红等（1999）、杨培才和周秀骥（2005）、钱维宏等（2010），根据一个时间序列本身具有的多时间尺度特征即多层次的结构，通过利用小波分析或经验模态分解（Empirical Mode Decomposition）建立不同时间尺度的气候预测模型并进行预测，取得较好

的预测效果。彭京备等（2005, 2006）分析了青藏高原雪盖和 Niño3 区海温的多尺度变化特征及其对中国夏季降水的可能影响，并以青藏高原积雪和 Niño3 区海温的年际变化、年代际变化和线性趋势三种不同时间尺度的小波分量作为预报因子，建立了我国夏季降水距平的线性回归预测模型，对我国夏季降水具有一定的预报能力。谷德军等（2011，2012）研究了南海夏季风爆发日期、广东开汛日期在不同时间尺度上的前兆信号，建立了多尺度最优子集回归的南海夏季风爆发早晚、广东开汛早晚的预测方法，取得了较好的预测效果。

已有的研究（Webster and Yang, 1992; Yang et al., 1996）表明，冬春季南亚副热带 15°～30°N 地区对流层上部风场变化是夏季南亚季风强、弱变化的强前兆信号，陶诗言和张庆云（1998）对夏季南亚季风变化的前兆信号的物理机制进行了探讨。张庆云和王媛（2006）的研究指出：冬夏东亚夏季风环流隔季韵律关系及其年际变化与赤道东太平洋海面温度异常（SSTA）密切相关。那么，东亚夏季风在不同时间尺度上的前兆信号是否与上述研究结果一致？尤其是它与前冬南半球大气环流及印度洋海温的变化是否有关？本文利用张庆云等（2003）定义的东亚夏季风强度指数，首先分析它的多时间尺度特征，其次研究不同时间尺度上的前兆信号及其之间的关系，并探讨了前兆信号影响东亚夏季风强度变化的可能物理过程，最后采用最优子集回归方法，建立不同时间尺度上的物理统计预测模型，并对该模型进行独立样本检验与交叉检验。

2 资料和方法

使用 1948～2013 年分辨率为 2.5°×2.5°的 NCEP/NCAR 逐月再分析资料（Kalnay et al., 1996）和水平分辨率为 2°×2°的重建海表面温度 ERSST（Extended Reconstructed Sea Surface Temperature）资料（Smith and Reynolds, 2004）。张庆云等（2003）用 6～8 月平均的东亚热带季风槽区（10°～20°N，100°～150°E）与东亚副热带（25°～35°N，100°～150°E）区域平均的 850 hPa 纬向风的距平（U'_{850}）差定义的东亚夏季风强度指数（EASMI）如下：

$$I_{\mathrm{EASM}}=U'_{850[10°\sim20°\mathrm{N},\,100°\sim150°\mathrm{E}]}-U'_{850[25°\sim35°\mathrm{N},100°\sim150°\mathrm{E}]}. \quad (1)$$

该指数天气学意义清楚、计算简单，能够很好地反映东亚风场和中国东部降水场的年际变化特征，是国家气候中心使用的东亚夏季风强度的四种监测指数之一。

采用的研究方法主要包括以墨西哥帽为小波母函数的小波变换（谷德军等，2009）、近年来在大气科学领域得到广泛应用且具有优越性能的 Lanczos 时间滤波器（Duchon, 1979；陈兴跃等，2000）以及相关分析和最优子集回归。首先，用小波变换研究 1948～2010 年东亚夏季风强度蕴含的主要周期；其次采用 Lanczos 低通滤波器，对逐年距平序列进行低通滤波从而得到序列的年代际变化，然后以距平序列减去年代际变化序列，得到年际变化序列；用相关分析分别寻找东亚夏季风强度的年际和年代际变化在海温场和 200 hPa 纬向风场上的前兆信号；用线性回归方法探讨了预测因子影响东亚夏季风强度年际和年代际变化的可能物理过程；最后采用最优子集回归方法建立了不同时间尺度上东亚夏季风强度的物理统计预测模型，并采用独立样本检验及交叉检验对模型的预测效果进行检验。

Lanczos 低通滤波器的具体公式（Duchon, 1979；陈兴跃等, 2000）为

$$y_t=\sum_{k=-n}^{n}w_k x_{t-k}, \quad (2)$$

式中，x_t 是距平序列，t 为时间变量，w_k 是权重函数，y_t 是滤波后的时间序列，n 为时间序列的长度。

$$w_k=\frac{\sin 2\pi f_c k}{\pi k}\frac{\sin \pi k/n}{\pi k/n},\ k=-n,\ldots,0,\ldots,n \quad (3)$$

式中，f_c 为截断频率，即在该频率附近的响应迅速由 1 降至 0（Duchon, 1979）。

另外，在对年际和年代际分量进行回归和相关分析时，根据施能（2002）给出的方法计算了有效自由度，然后根据有效自由度进行相关系数的显著性检验。

3 东亚夏季风强度的多时间尺度特征

计算表明，1948～2010 年东亚夏季风强度指数的平均值为−0.15 m s^{-1}，标准差为 1.94 m s^{-1}。图 1 为 1948～2010 年东亚夏季风强度指数距平的变化及其小波变换系数和平均整体小波功率谱。由图 1a 可见，东亚夏季风强度指数具有弱的增强趋势（增强速度为每年 0.012 m s^{-1}），其线性倾向相关系数为 0.11，未达到 0.10 的显著性水平检验，说明东亚夏季风强度线性增强的趋势不明显。从图 1a 还可

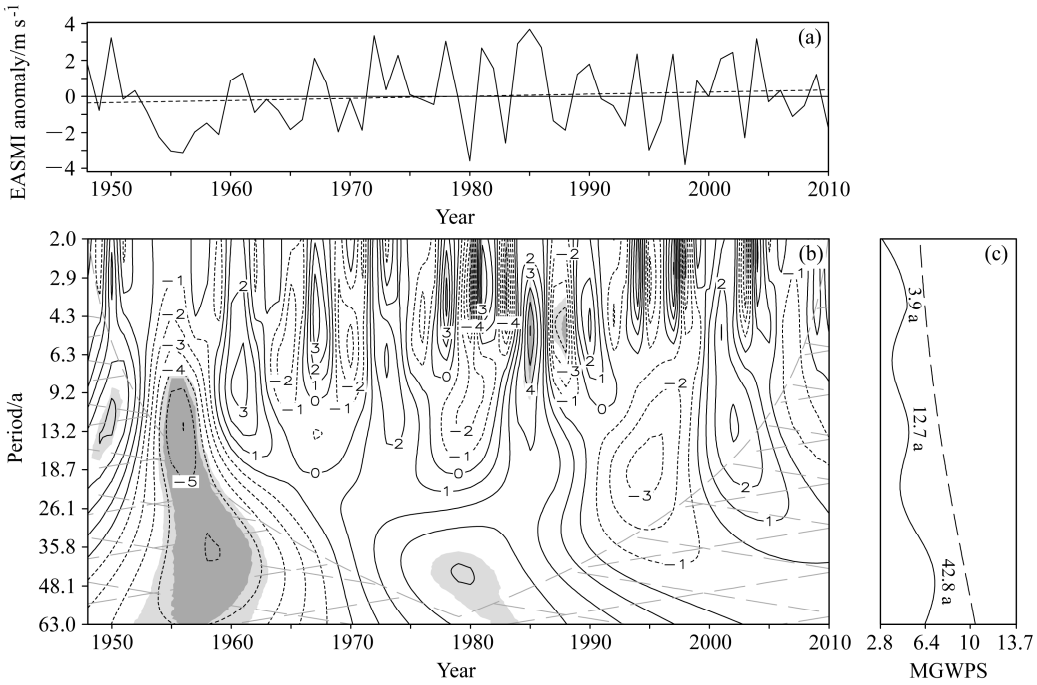

图 1 1948～2010 年（a）东亚夏季风强度距平序列及其（b）小波变换系数和（c）平均整体小波功率谱。图 1a 中虚线表示线性趋势；图 1b 中浅色和深色阴影区分别表示超过 0.10 和 0.05 显著性水平的区域，底部两边的斜线交叉区域表示边界效应的影响域；图 1c 中虚线为 0.10 显著性水平值，显著性检验采用了 Monte-Carlo 方法

Fig. 1 (a) Anomalous EASM (East Asian Summer Monsoon) intensity (EASMI) from 1948 to 2010, (b) its wavelet transform coefficient, based on the Mexican hat wavelet, and (c) its mean global wavelet power spectrum (MGWPS). The dashed line in (a) represents the linear trend. The light and dark shaded areas in (b) represent the regions with statistical significance at 0.10 and 0.05 levels, respectively; the cross-hatched regions at both ends indicate the areas with boundary effects. The dashed line in (c) represents statistical significance at the 0.10 level, based on the Monte-Carlo method

见，最强东亚夏季风出现在 1985 年（比多年平均强 3.70 m s^{-1}），最弱东亚夏季风出现在 1998 年（比多年平均弱 3.80 m s^{-1}），二者极差达 7.50 m s^{-1}，是东亚夏季风强度标准差的 3.87 倍。从小波系数（图 1b）可见，主要存在 2～6 年左右的年际变化、10～18 年及 35～48 年左右的年代际变化，其中 2～6 年左右的年际周期变化主要存在于 1960 年代中期至 21 世纪初、10～18 年的周期变化主要存在于 1948 年到 1950 年代末、1990～2005 年，35～48 年左右的周期变化主要存在于 1950～1990 年且可以通过 0.10 或 0.05 的显著性水平检验。图 1c 的平均整体小波功率谱表明，东亚夏季风强度指数存在 3 个峰值，分别对应 3.9 年、12.7 年和 42.8 年三个主要周期。虽然他们在小波功率谱上均没有通过 0.10 的显著性水平检验，但他们在小波系数图中均明显存在，且有些周期在不同的年代也能达到 0.10 或 0.05 的显著性水平检验。对比前人的研究结果，3.9 年的年际周期与于淑秋等（2008）定义的东亚夏季风指数具有 3～5 年的显著周期比较一致，且该周期主要反映了 ENSO 循环（施能和杨永胜，1998；黄荣辉等，2003；陈隆勋等，2006）；准 13 年周期与李建平和曾庆存（2005）定义的东亚夏季风指数具有 10 年左右年代际振荡比较一致；准 43 年左右的年代际变化周期与郭其蕴等（2004）分析得到东亚夏季风具有 40 年周期也接近。因此，东亚夏季风指数具有准 4 年左右的年际振荡、准 13 年与准 43 年左右的年代际周期振荡，他们较好地反映了东亚季风固有的年际与年代际振荡。

由图 1c 可见，在小波功率谱的两个峰值（3.9 年、12.7 年）之间的 7 年周期处，对应小波功率谱的极小值，即振荡强度最弱，形成一个自然分割点。由于一般在年际与年代际尺度的分离中多采用 5～11 年的滑动平均或带通滤波得到年际、年代际变化（陆日宇，2002；徐桂玉等，2005；平凡等，2006；邓伟涛等，2009；马音等，2012），因此以 7 年作为年际与年代际两种周期变化的分割点，首先采用 Lanczos 低通滤波器，对逐年距平序列进行低通滤波从而得到序列的年代际变化；然后以距平序列减去年代际变化序列，得到年际变化序列；这样就把东亚夏季风强度指数逐年序列客观地分解为年际

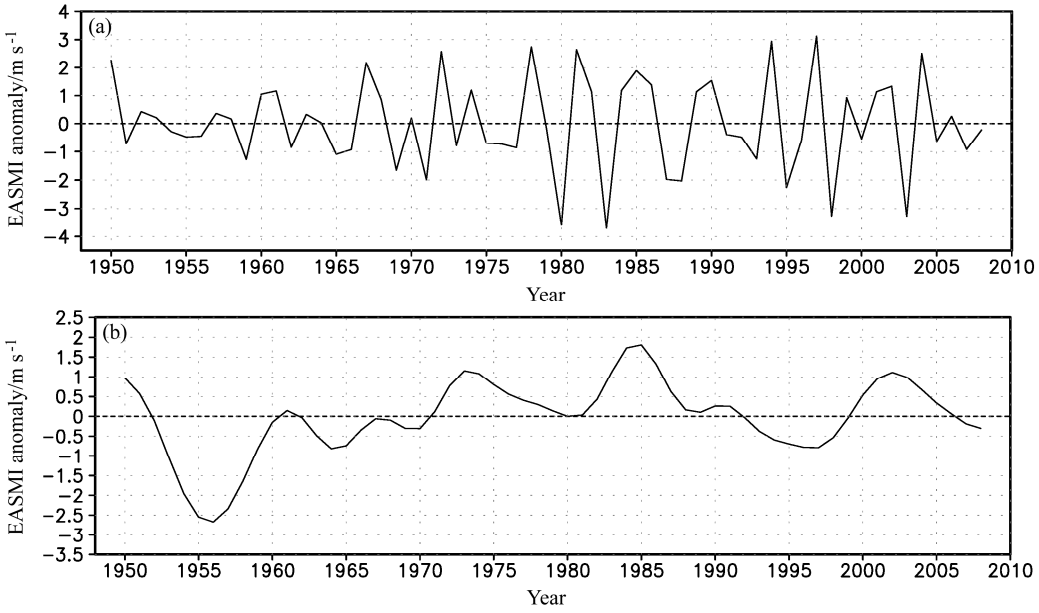

图 2　东亚夏季风强度在（a）年际、（b）年代际尺度上的变化

Fig. 2　The variation of anomalous EASMI at the (a) interannual and (b) interdecadal scales

与年代际变化两个时间尺度上（图 2）。

年际变化较强的阶段主要分布在 1970 年代末到 1980 年代前中期及 1990 年代中后期（图 2a）。1950 年代中期到 1960 年代、1990 年代东亚夏季风强度偏弱、1970 年代前中期到 1980 年代中后期及 21 世纪前期东亚夏季风强度偏强(图 2b)。其中 1970 年代前中期到 1980 年代中后期东亚夏季风强度的偏强、1990 年代东亚夏季风强度的偏弱，这与张人禾等（2008）引用 Wang et al.（2001）定义的西北太平洋—东亚夏季风指数和 Wu et al.（2008）定义的东亚夏季风第一模态复主分量实部的 7 年滑动平均值所反映的年代际变化趋势一致。

4　东亚夏季风强度的年际和年代际变化在海温场和 200 hPa 纬向风场上的前兆信号

4.1　东亚夏季风强度的年际和年代际变化在海温场上的前兆信号

图 3 给出了东亚夏季风强度的年际与前期冬季（12～2 月）、东亚夏季风强度的年代际变化与前一年 3 月至当年 2 月的海温之间的相关系数分布。在年际尺度上，能通过 0.05 的显著性水平检验的显著相关区域基本上都分布在太平洋，其中范围最大的显著负相关区出现在（10°S～10°N, 160°～80°W）的赤道东太平洋，显著的正相关区主要出现在 30°S 附近的东南太平洋、菲律宾以东的热带西太平洋暖池区。这与张庆云和王媛（2006）得到的东亚夏季风指数与前冬 SST 的相关结果一致，也说明若不对东亚夏季风指数进行尺度分离，所得到的相关分布主要反映的是年际变化情况。上面的相关分析结果也表明，强（弱）夏季风年的前冬赤道东太平洋的海温比常年偏低（高），这与陶诗言和张庆云（1998）研究指出的“El Niño 年，亚洲夏季风减弱”一致。因此，我们选取赤道东太平洋上（10°S～10°N, 160°～80°W）SST 作为年际尺度上的一个预测因子，它与东亚夏季风强度年际变化的相关系数为−0.43，远超过 0.01 的显著性水平检验。

从图 3b 可见，年代际尺度上东亚夏季风强度与海温场的主要显著相关区域与年际尺度上具有明显的不同，这也说明了若不对东亚夏季风指数进行尺度分离，所得到的相关系数分布主要反映的是年际变化的情况，而年代际变化尺度上的主要相关区基本上反映不出来。热带印度洋为显著的正相关区，（30°S～10°S, 130°W～90°W）的低纬度东南太平洋及（30°S～0°, 40°W～20°E）的低纬度南大西洋也为显著的正相关区，另外与热带西太平洋、北太平洋还存在范围较小的明显相关区。这些说明热带印度洋、低纬度东南太平洋、低纬度南大西洋的海温异常是东亚夏季风年代际变化的主要前兆信号，具体的机理有待做进一步的分析。因此，我们

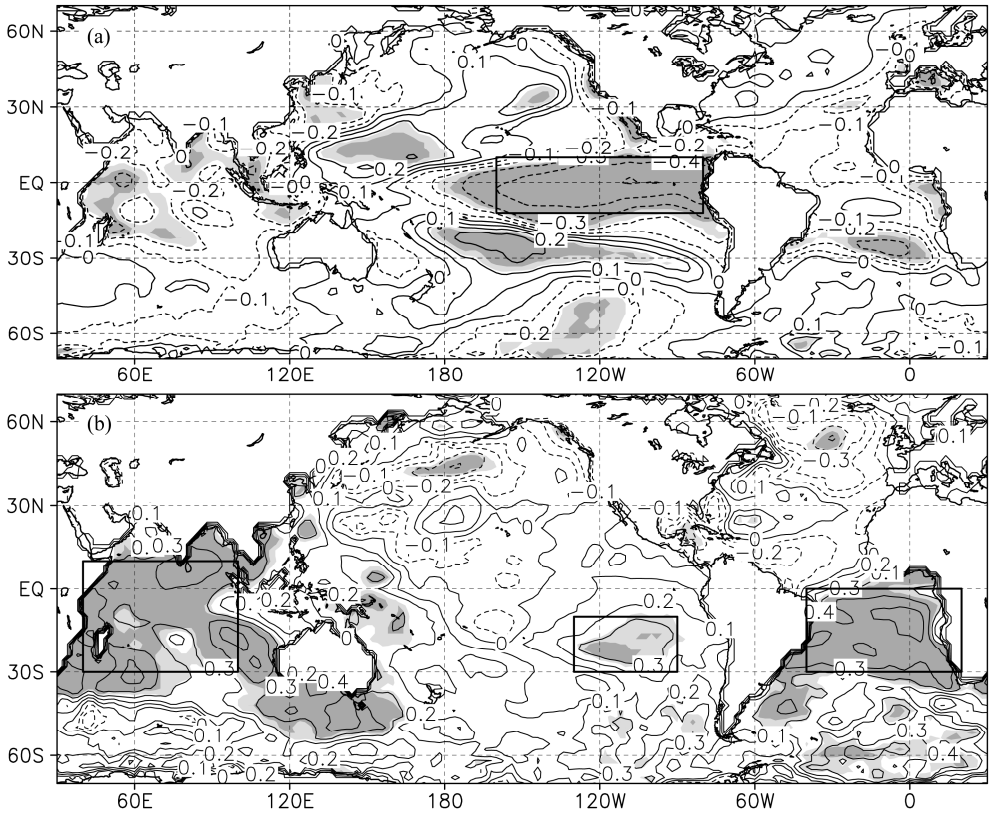

图 3 （a）东亚夏季风强度的年际变化与前期冬季（12～2 月）海温之间的相关系数分布；（b）东亚夏季风强度的年代际变化与前一年 3 月至当年 2 月海温之间的相关系数分布。浅色和深色阴影区分别表示通过 0.1 和 0.05 的显著性水平检验

Fig. 3 Correlation coefficients between (a) interannual variation of EASMI and the preceding winter (Dec–Feb) SST, and (b) interdecadal variation of EASMI and the SST averaged during the previous Mar and simultaneous Feb. The light and dark shaded areas represent regions with statistical significance at 0.10 and 0.05 levels, respectively

选取热带印度洋（30°S～10°N, 40°～100°E）、低纬度东南太平洋（30°S～10°S, 130°W～90°W）及低纬度南大西洋（30°S～0°, 40°W～20°E）SST 作为年代际尺度上的前兆因子，他们与东亚夏季风强度年代际变化的相关系数分别为 0.45、0.39、0.54，分别超过 0.01、0.05、0.01 的显著性水平检验。

4.2 东亚夏季风强度的年际和年代际变化在 200 hPa 纬向风场上的前兆信号

图 4 给出了东亚夏季风强度的年际与前期冬季（12～2 月）、东亚夏季风强度的年代际变化与前一年 3 月至当年 2 月的 200 hPa 纬向风之间的相关系数分布。在年际尺度上（图 4a），能通过 0.05 的显著性水平检验的显著区域，一个主要出现在中低纬度亚洲—热带印度洋—热带西太平洋上空，呈现出南北正、负、正的相间波列分布。另一个显著的相关区出现在 180°～120°W 的热带—副热带南北太平洋上，也呈现出南北负、正、负的相间波列分布，他们反映了东亚夏季风年际变化与副热带西风急流的两个主要模态——东亚地区副热带西风急流（EAJS）模态和 ENSO 相关模态（廖清海等，2004）分布有密切关系。因此，我们选取亚洲副热带（32.5°N～37.5°N，80°～130°E）与热带印度洋—热带西太平洋（27.5°S～27.5°N，80°～130°E）200 hPa 纬向风之差、热带中东太平洋（10°S～10°N，180°～120°W）与副热带中东太平洋（22.5°～32.5°N，180°～120°W）200 hPa 纬向风之差分别作为东亚夏季风强度年际变化的预测因子，他们与东亚夏季风强度年际变化的相关系数分别为 0.39、0.42，均超过 0.01 的显著性水平检验。

年代际尺度上（图 4b），在亚洲中纬度（30°～40°N，60°～120°E）上空的副热带西风急流区仍存在明显的正相关区，即东亚夏季风强弱的年代际变化仍与亚洲上空副热带西风急流的强弱具有明显的正相关。在赤道上空及南半球仍存在范围较大的

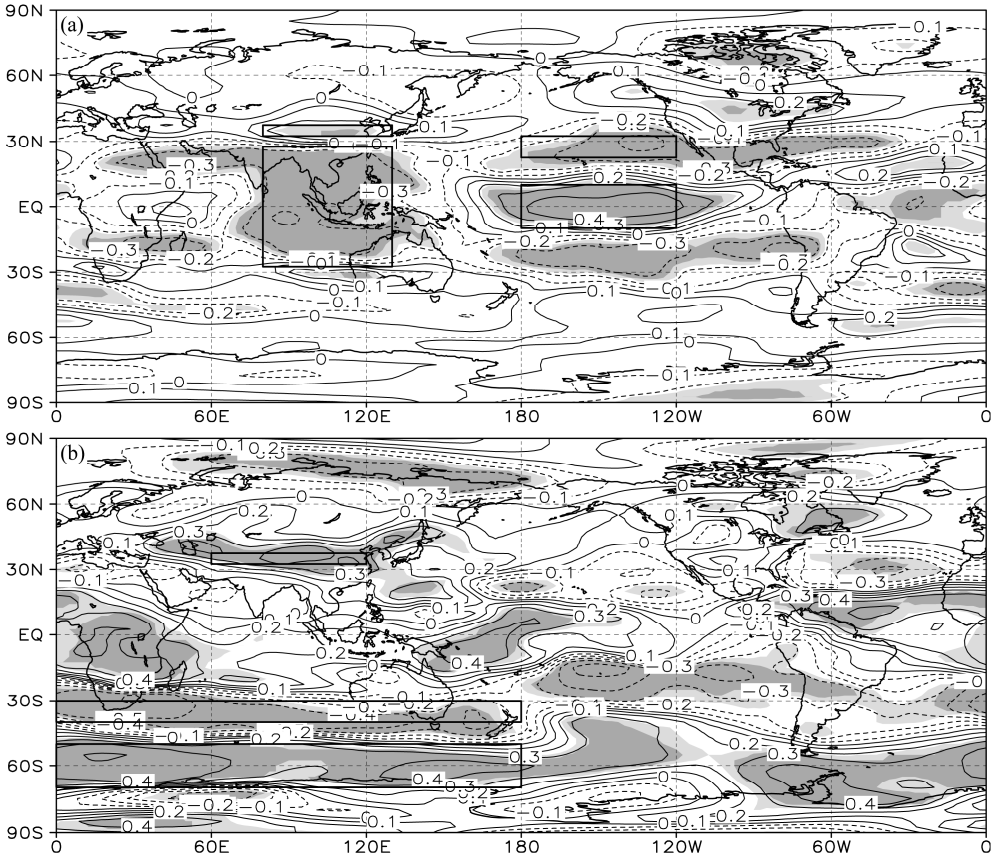

图 4 （a）东亚夏季风强度的年际变化与前期冬季（12～2 月）200 hPa 纬向风之间的相关系数分布；（b）东亚夏季风强度的年代际变化与前一年 3 月至当年 2 月 200 hPa 纬向风之间的相关系数分布。浅色和深色阴影区分别表示通过 0.1 和 0.05 的显著性水平检验

Fig. 4 Correlation coefficients between (a) interannual variation of EASMI and the preceding winter (Dec–Feb) zonal wind at 200 hPa, and (b) interdecadal variation of EASMI and zonal wind at 200 hPa averaged during the previous Mar and simultaneous Feb. The light and dark shaded areas represent regions with statistical significance at 0.10 and 0.05 levels, respectively

显著相关区，其中在非洲大陆及赤道中西太平洋上空存在显著的正相关区，在南半球 30°S 附近存在显著的负相关带，而在 60°S 附近为显著的正相关带。东亚夏季风强度与南半球中高纬纬向风之间的这种反向相关分布，说明了东亚夏季风强弱的年代际变化与南半球副热带西风急流带西风的强弱存在显著的负相关，而与 60°S 附近极地急流带西风的强弱存在显著的正相关。王会军和范可（2006）研究了南半球对流层上层纬向风与东亚夏季风环流的关系，结果表明，用 150 hPa 上的 60°S 和 30°S 之间的纬向平均的纬向风差值可以很好地代表南半球纬向风的年际变化，并揭示从南半球到热带区域的纬向风的径向遥相关型（主体在东半球）可能是这种关系的主要内在原因。因此，借鉴王会军和范可（2006）方法，我们选取（70°～50°S, 0°～180°E）与（40°～30°S, 0°～180°E）平均的 200 hPa 纬向风之差来反映南半球对流层上层的纬向风变率，并用他们作为影响东亚夏季风年代际变化的前兆因子，它与东亚夏季风强度年代际变化的相关系数为 0.56，通过 0.01 的显著性水平检验。另外，还选取可反映亚洲中纬度地区上空（32.5°～37.5°N, 60°～120°E）的副热带西风急流强弱 200 hPa 纬向风作为影响东亚夏季风年代际变化的另一个前兆因子，它与东亚夏季风强度年代际变化的相关系数为 0.52，通过 0.01 的显著性水平检验。

根据上面的分析，我们确定了预测东亚夏季风强度年际变化的 3 个前兆因子，他们分别为：赤道东太平洋（10°S～10°N, 160°～80°W）SST（x_{11}）、亚洲副热带（32.5°N～37.5°N, 80°～130°E）与热带印度洋—热带西太平洋（27.5°S～27.5°N, 80°～130°E）平均的 200 hPa 纬向风差（x_{12}）和热带中东太平洋（10°S～10°N, 180°～120°W）与副热带中东

太平洋（22.5°～32.5°N, 180°～120°W）的纬向风差（x_{13}）。年代际尺度上 5 个前兆因子：热带印度洋（30°S～10°N, 40°～100°E）SST（x_{21}）、低纬度东南太平洋（30°S～10°S, 130°W～90°W）SST（x_{22}）、低纬度南大西洋（30°S～0°, 40°W～20°E）SST（x_{23}）、亚洲副热带（32.5°～37.5°N, 60°～120°E）平均的 200 hPa 纬向风（x_{24}）及（70°～50°S, 0°～180°E）与（40°～30°S, 0°～180°E）平均的 200 hPa 的纬向风之差（x_{25}）。

4.3 影响东亚夏季风强度年际与年代际变化的重要前兆因子

由上面的分析可知，东亚夏季风强度的年际与年代际变化均受多个前兆因子影响，那么这些因子之间的关系如何？哪个因子是影响东亚夏季风强度的年际与年代际尺变化的重要前兆因子？

表 1 年际尺度上东亚夏季风强度指数（EASMI）与各前兆因子及各因子之间的相关系数

Table 1 Correlation coefficients between EASMI and various precursor factors at the interannual scale

	与各因子及 EASMI 之间的相关系数		
	x_{11}	x_{12}	x_{13}
x_{12}	−0.51▲		
x_{13}	−0.84▲	0.56▲	
东亚夏季风指数	−0.43▲	0.39▲	0.42▲

注：▲为通过 0.01 显著性水平检验。

表 1 给出了年际尺度上东亚夏季风指数与各前兆因子及各前兆因子之间的相关系数。可见，年际尺度上前冬赤道东太平洋 SST 与东亚夏季风指数之间的相关系数高于其余 2 个因子，且与其他 2 个因子尤其是热带与副热带中东太平洋 200 hPa 纬向风之差存在高负相关。廖清海等（2004）的研究表明，副热带西风急流年际变化的两个主要模态——东亚地区副热带西风急流（EAJS）模态和 ENSO 相关模态与赤道中东太平洋的海温异常均有密切联系；陶诗言和张庆云（1998）指出，El Niño 年赤道印度洋地区也是暖的 SST，赤道印度洋 SST 的年际变化是对赤道东太平洋 SST 年际异常的响应。由于冬季 ENSO 所引起的赤道印度洋 SST 异常能产生印度洋—亚洲遥相型（IA），从而使 El Niño 年冬春季南亚上空有强西风出现，即南亚上空冬春季西风带位置比正常位置偏南，南支西风扰动较强，南亚大陆冬春降水或降雪偏多，土壤水分比正常情况增多，使得在晚春和初夏南亚加热较慢，导致夏季海陆的热力对比小，因而出现弱夏季风。因此，以上说明前冬赤道东太平洋 SST 变化不仅是夏季东亚环流年际变化的一个重要外强迫因子（张庆云和王媛，2006），而且还携带前冬亚洲中纬度与热带印度洋、热带中东太平洋与副热带中东太平洋 200 hPa 纬向风的异常信号，它是影响东亚夏季风强度年际变化的重要前兆因子。

表 2 分别给出了年代际尺度上东亚夏季风指数与各前兆因子及各前兆因子之间的相关系数。年代际尺度上南半球 60°S 与 35°S 附近 200 hPa 纬向风之差与东亚夏季风指数之间的相关系数高于其余 4 个因子，且与其他 4 个因子均存在高相关。因此，南半球 60°S 与 35°S 附近 200 hPa 纬向风之差为影响东亚夏季风指数年代际变化的重要前兆因子。

表 2 年代际尺度上东亚夏季风强度指数与各前兆因子及各因子之间的相关系数

Table 2 Correlation coefficients between EASMI and various precursor factors at the interdecadal scale

	与各因子及 EASMI 之间的相关系数				
	x_{21}	x_{22}	x_{23}	x_{24}	x_{25}
x_{22}	0.78△				
x_{23}	0.79△	0.62△			
x_{24}	0.52*	0.42	0.62△		
x_{25}	0.77△	0.65*	0.70△	0.62△	
东亚夏季风指数	0.45▲	0.39△	0.54▲	0.52▲	0.56▲

注：*、△、▲分别为通过 0.10、0.05、0.01 显著性水平检验。

5 重要前兆因子影响东亚夏季风强度的物理过程

前冬赤道东太平洋 SST 为东亚夏季风指数年际尺度上的重要前兆因子，它影响东亚夏季风的物理过程已有不少研究。如，张人禾和李强（2004）对 ENSO 影响东亚气候物理过程的分析表明，在 El Niño 盛期，热带太平洋上空异常加热场的纬向分布具有明显的偶极型分布，即在热带中东太平洋上空有对流异常加热，而在热带西太平洋海洋性大陆上空有明显的对流异常冷却。热带西太平洋海洋性大陆上空的对流异常冷却使得热带大气在对流层低层产生 Rossby 波响应，在海洋性大陆以北产生异常反气旋性环流。海洋性大陆以北的异常反气旋环流使得东亚沿岸出现西南风异常，使得东亚冬季风减弱。Wang et al.（2000）的分析也指出，在 El Niño 的极端位相时出现在海洋性大陆以北的反气旋异常环流是连接 ENSO 暖位相与弱东亚冬季风的

“桥梁”，并且这个反气旋异常可以持续到夏季，对东亚夏季风产生影响。张庆云和王媛（2006）的分析结果也表明，冬季赤道东太平洋出现 El Niño（La Niña）型的 SST 分布，有利冬、夏东亚季风环流减弱（加强），其影响过程通过赤道 Walker 环流变弱（强）以及东亚地区 Hadley 环流变弱（强）过程完成。

南半球 60°S 与 35°S 附近 200 hPa 纬向风之差是引起东亚夏季风年代际变化的重要前兆因子，为了说明它影响东亚夏季风年代际变化的物理过程，我们分别计算了它与春季和夏季 200 hPa 风场、850 hPa 风场的线性回归。结果表明，春季和夏季的回归场基本一致，说明南半球 60°S 与 35°S 附近 200 hPa 纬向风异常所激发的年代际环流变化从春季到夏季具有很好的持续性。图 5 给出了南半球 60°S 与 35°S 附近 200 hPa 纬向风之差与夏季 200 hPa 风场、850 hPa 风场的线性回归。可见，在夏季 200 hPa 风场回归场上（图 5a），由南半球 60°S 与 35°S 附近 200 hPa 纬向风异常在南半球与北半球均激发出明显的遥相关波列：在南半球（65°～40°S, 20°～70°E)、（30°～10°S, 0°～100°E）分别为反气旋、气旋性距平环流，他们对应南半球 50°S 附近极地急

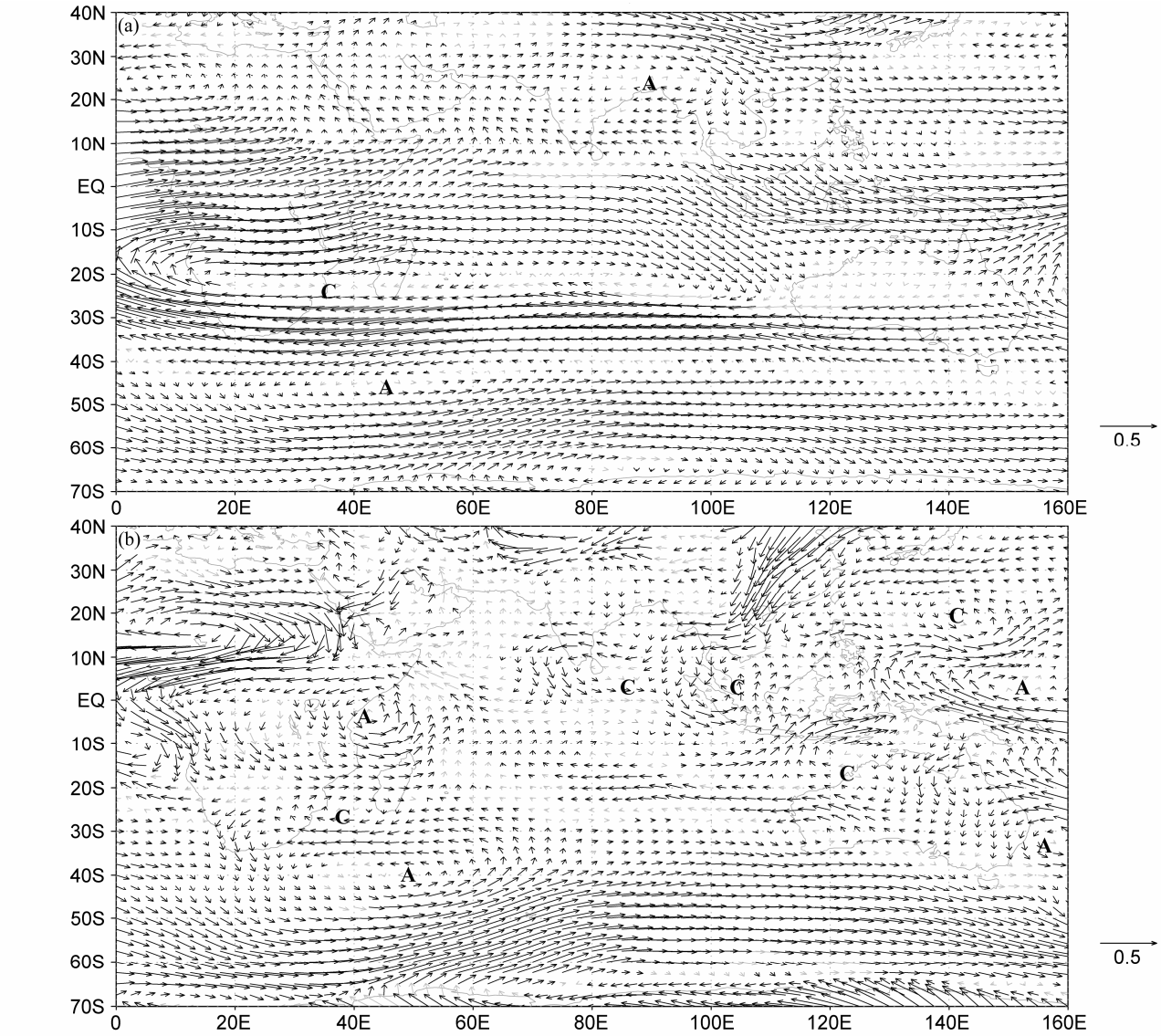

图 5　南半球 60°S 与 35°S 附近 200 hPa 纬向风之差与夏季（a）200 hPa 风场、（b）850 hPa 风场的回归。纬向箭头与经向箭头分别代表与 *u*、*v* 分量的回归系数。图中“A”和“C”分别表示反气旋和气旋性距平环流

Fig. 5　The (a) 200 hPa and (b) 850 hPa summer wind regression patterns associated with the difference in 200 hPa zonal wind between approximately 60°S and 35°S. The zonal and meridional arrows represent regression coefficients of *u* and *v* components, respectively. “A” and “C” represent anticyclonic and cyclonic anomalous circulation, respectively

流的加强和副热带西风急流的减弱及赤道附近明显的西风异常，在北半球（10°～35°N，60°～100°E）为反气旋性距平环流，对应南压高压中心强度偏强、脊线以南强度偏弱。在夏季 850 hPa 风场回归场上（图 5b），南半球 60°S 与 35°S 附近 200 hPa 纬向风异常在南半球与北半球也分别激发出明显的遥相关波列：在南半球 20°～60°E 范围内 40°S、25°S、赤道及澳大利亚西北部附近分别为反气旋、气旋、反气旋、气旋性距平环流，孟加拉湾—南海—东亚—西太平洋地区为气旋性距平环流，他们对应马斯克林高压和澳大利亚高压偏弱、索马里越赤道气流偏弱、印缅槽和南海季风槽偏强及菲律宾东北的热带西太平洋区域的异常辐合。热带西太平洋区域的异常辐合，有利于菲律宾周围热带对流活动的加强，从而通过东亚—太平洋型（EAP 型）遥相关波列使副高位置偏北（黄荣辉和孙凤英，1994），东亚季风强度偏强（张庆云等，2003；张庆云和王媛，2006）。这种年代际尺度上的遥相关波列对应的大尺度环流异常与高辉（2004）研究年际尺度上 4～5 月南极涛动的强（弱）对东亚夏季风弱（强）的影响所对应的环流异常特征基本一致。因此，东亚夏季风强弱的年代际变化与南半球 60°S 与 35°S 附近 200 hPa 纬向风异常激发的遥相关波列有密切关系，这种遥相关从春季一直延续到夏季，他们通过影响东亚夏季风系统成员的年代际变化，从而影响东亚夏季风强弱的年代际变化。

6 东亚夏季风强度的多尺度统计预测模型

6.1 多尺度预测模型的建立及预测效果

利用前面分析得到的东亚夏季风强度年际尺度上 3 个前兆因子（x_{11}, x_{12}, x_{13}）、年代际尺度上 5 个前兆因子（$x_{21}, x_{22}, x_{23}, x_{24}, x_{25}$），采用最优子集回归方法，利用 1951～2004 年的资料分别建立东亚季风强度年际、年代际尺度上的预测方程，并用 2005～2013 年资料进行独立样本检验。

本文选择最优子集回归的准则是 C_p 准则（即综合考虑子集回归的残差平方和、方差及自变量个数），C_p 越小越好（魏凤英，1999），且最优子集中的每一个自变量的作用都要通过 0.05 的显著性水平检验。若初选最优子集中有某个自变量的作用不能达到 0.05 的显著性水平检验，则把相应的自变量数量减少 1 个作为新的最优子集自变量数。

东亚夏季风强度年际和年代际尺度上的最优子集回归方程分别为

$$y_1=25.95-0.99x_{11}\text{（年际），} \quad (4)$$

$$y_2=-3.86+0.15x_{24}+0.093x_{25}\text{（年代际）。} \quad (5)$$

将年际变化距平 y_1 和年代际变化距平 y_2 的回归方程结果相加，就得到东亚夏季风指数距平序列，即总体距平序列 $y=y_1+y_2$。上述年际、年代际尺度上回归方程的复相关系数分别为 0.435、0.627，总体序列的拟合值与实况值之间的相关系数为 0.53，他们均通过了 0.01 的显著性水平检验。

利用上述回归方程对 1951～2004 年的东亚夏季风强度指数年际、年代际序列进行了拟合，并对 2005～2013 年进行了独立样本检验，见图 6。

从图 6a 对年际变化的拟合可见，虽然拟合与实况存在一定的误差，但对大多数年份的拟合值与实况值的升降趋势基本一致，特别是对多数峰、谷的预测与实际吻合，说明所建方程具有一定的预测极值能力，但对极值年份的振幅拟合偏小。拟合值与实况值同为正或负的同号率为 33/54=61.1%，平均绝对误差为 1.22 m s^{-1}，误差序列的标准差为 1.5 m s^{-1}，小于年际变化本身的标准差 1.67 m s^{-1}。从对 2005～2013 年逐年的预测可见，除 2009 年外，预测值与实况值的升降趋势完全一致，特别是对峰、谷的预测也与实际吻合。

从图 6b 年代际变化的拟合可见，虽然所建方程对 1950 年代中期、1990 年代中期的拟合与实况有较大差异，但对其余年代际变化趋势的拟合仍较好，尤其对 1950 年代中期到 1970 年代初、1980 年代前中期、1990 年代末到 21 世纪初、2000 年代中后期到 2010 年代初的升降趋势具有较好的拟合。拟合值与实况值同为正或负的同号率为 41/54=75.9%，平均绝对误差为 0.59 m s^{-1}，误差序列的标准差为 0.75 m s^{-1}，小于年代际变化本身的标准差 0.96 m s^{-1}。从对 2005～2013 年年代际变化的趋势预测可见，其升降趋势与实况基本一致。

图 7 给出了对 1951～2004 年的东亚夏季风强度指数总体序列的拟合及对 2005～2013 年的预测结果。从对 1951～2004 年东亚夏季风总体序列的拟合结果可见，由于年代际变化的加入，对东亚夏季风指数年际变化的振幅拟合值的大小有所改变，对异常极值的拟合能力也有所提高（如 1969、1985、1994、1997 和 2004 年）。拟合值与实况值同为正或负的同号率（42/54=77.8%）有所提高，平均绝对误

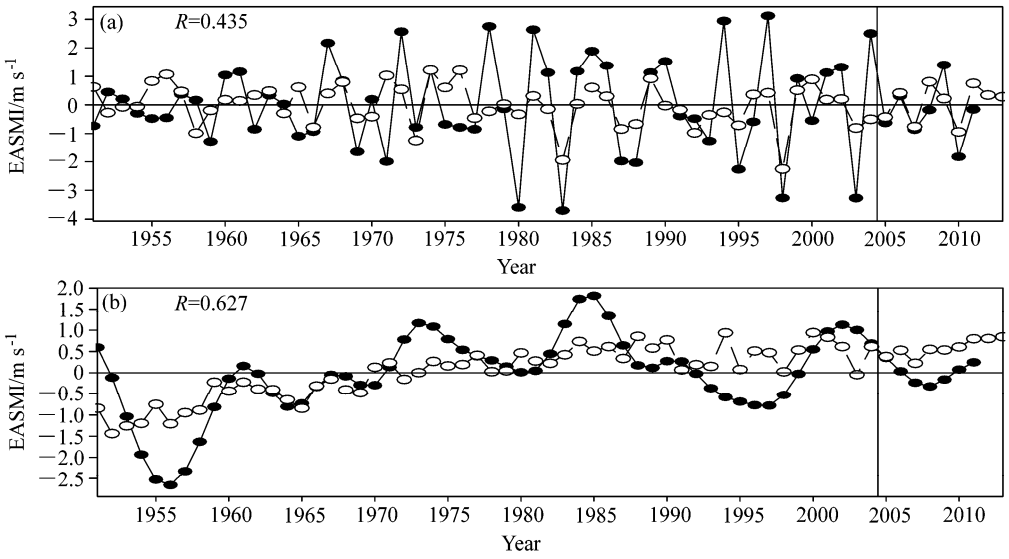

图 6　最优子集回归对东亚夏季风强度在（a）年际尺度、（b）年代际尺度的拟合（1951～2004 年）及预测（2005～2013 年）与实况（1951～2013 年）对比。空心圆（○）表示拟合/预测，实心圆（●）表示观测；“*R*”表示相关系数

Fig. 6　The observed (filled circles) and fitted (open circles) EASMI during 1951–2004, and the observed (filled circles) and predicted (open circles) EASMI during 2005–2013, at the (a) interannual and (b) interdecadal scales, based on multi-scale optimal subset regression. “*R*” represents the correlation coefficient

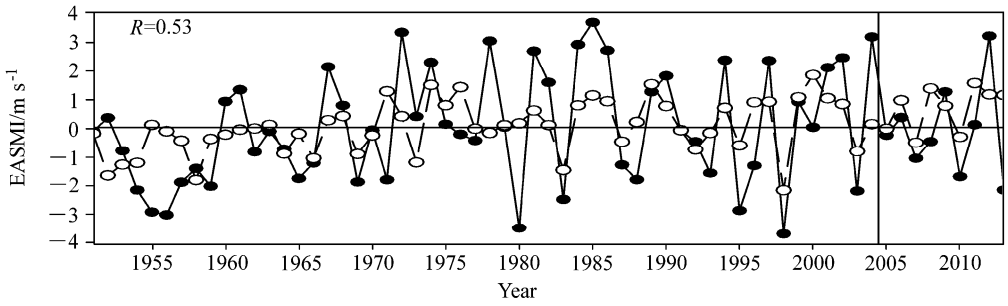

图 7　东亚夏季风强度的拟合（1951～2004 年）及预测（2005～2013 年）与实况（1951～2013 年）对比。空心圆（○）表示拟合/预测，实心圆（●）表示观测

Fig. 7　The observed (filled circles) and fitted (open circles) EASMI during 1951–2004, and the observed (filled circles) and predicted (open circles) EASMI during 2005–2013

差为 1.41 m s^{-1}，误差序列的标准差为 1.7 m s^{-1}，小于东亚夏季风强度本身的标准差 1.96 m s^{-1}。从 2005～2013 年独立样本预测检验来看，在 9 年独立样本的预测中，该模型对东亚夏季风强度的逐年升降趋势进行了较好的预测，除 2008 年、2013 年预测值与实况值的符号不一致外，其余年份均一致，预测值与实况值同为正或负的同号率为 7/9=77.8%，对 2005、2006、2007、2010、2012 年极值年份的升降趋势也进行了较好的预测，说明所建立东亚夏季风强度的多尺度统计预测模型具有较好的预测能力，对异常极值年份也具有一定的预测能力。

6.2　多尺度统计预测模型的交叉检验

由于不能根据几年的预测效果好坏来确定一种预测方法的预测能力，因此我们采用交叉验证（Cross Validation）和概率密度分布方法来进一步检验多尺度统计预测模型的预测效果。交叉验证是用来验证模式实际预报技巧的一种统计分析方法，基本思想是在某种意义下将原始数据进行分组，一部分作为训练集，另一部分作为验证集，首先用训练集对模式进行训练,再利用验证集来测试训练得到的模型，以此作为模式预报技巧的性能指标。

交叉检验的具体做法（Michaelsen, 1987; 范丽

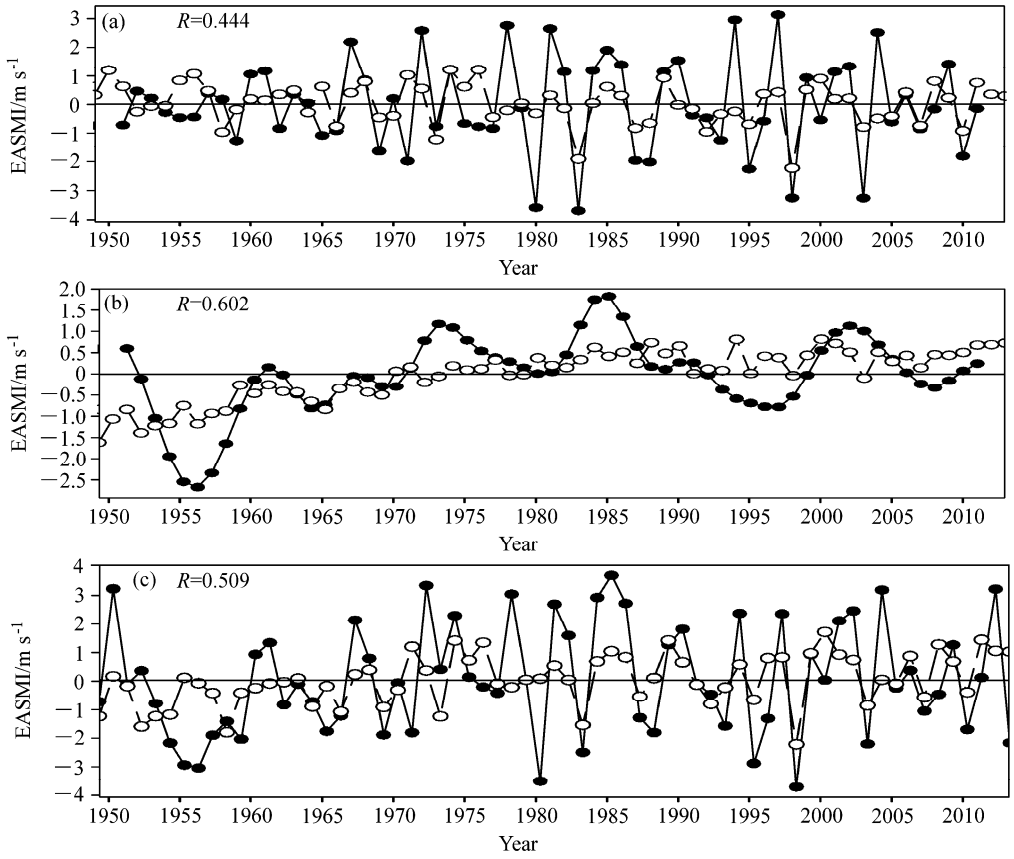

图 8 交叉检验对 1949～2013 年东亚夏季风强度在（a）年际尺度、（b）年代际尺度及（c）总体序列预测与实况对比。空心圆（○）表示预测，实心圆（●）表示观测

Fig. 8 The observed (filled circles) and predicted (open circles) EASMI during 1949–2013 on the (a) interannual and (b) interdecadal scales, and (c) their sum, based on cross-validation method

军等，2007）为：首先选择一个观测样本，用其余 $N-1$ 个样本建立预测模型，然后对选择的一个观测样本进行预报，这个过程重复 N 次，直到 N 个样本都被选择，最后得到对应于 N 个观测样本的 N 个预报值，然后对 N 个观测值序列与 N 个预报值序列求相关，最后用相关系数来检验所建模型的预测性能。

图 8 给出了交叉检验方法对 1949～2013 年东亚季风强度预测与实况的对比。计算表明，在年际尺度上，预测值与实况值之间的相关系数为 0.444，通过了 0.01 的显著性水平检验，预测值与实况值同为正或负的同号率为 62.3%，平均绝对误差为 1.15 m s^{-1}，误差序列的标准差为 1.43 m s^{-1}，小于年际变化本身的标准差 1.67 m s^{-1}；在年代际尺度上，预测值与实况值之间的相关系数为 0.602，通过了 0.01 的显著性水平检验，二者同号率为 70.5%，平均绝对误差为 0.58 m s^{-1}，误差序列的标准差为 0.73 m s^{-1}，小于年代际变化本身的标准差 0.96 m s^{-1}。东亚季风强度预测值与实况值之间的相关系数为 0.509，通过了 0.01 的显著性水平检验，二者同号率为 78.7%，平均绝对误差为 1.35 m s^{-1}，误差序列的标准差为 1.65 m s^{-1}，小于东亚季风强度本身的标准差 1.96 m s^{-1}。

计算表明，交叉检验误差（实况值与预测值之差）序列的标准差 s=1.65 m s^{-1}，小于观测序列的标准差 1.96 m s^{-1}。把[$-3s$, $3s$]间隔 s/4 等分成 24 份，共有 25 个点；计算每个点左右各 s/8 构成的区间上的频率密度和累计频率，得到误差序列的频率密度和累计频率分布（图 9）。可见，最大频率密度为 13.8%，出现在实况值与预测值之差接近于零处。实况值与预测值之差在 0.5 倍观测序列标准差（即 0.98 m s^{-1}）以内的事件命中率为 36.9%，实况值与预测值之差在 1 倍观测序列标准差（即 1.96 m s^{-1}）以内的事件命中率为 75.4%。因此，交叉检验的结

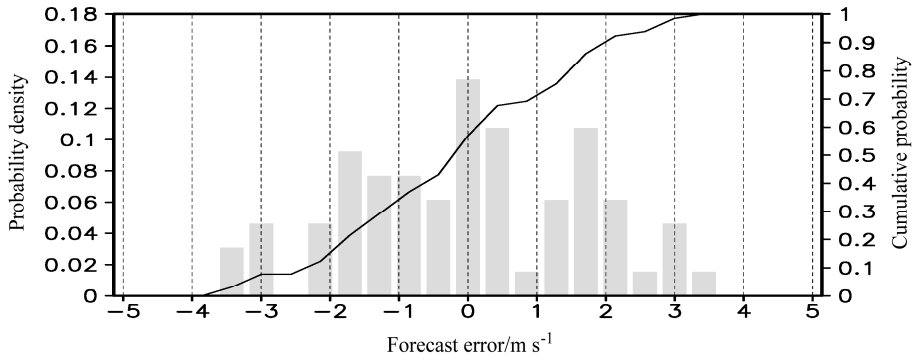

图 9 交叉检验方法对 1949～2013 年东亚夏季风强度预测误差（单位：m s^{-1}）的频率密度（左轴，柱状）和累计频率（右轴，实线）分布

Fig. 9 The probability density (bars, left axis) and cumulative probability (solid line, right axis) distribution of the forecast error (units: m s^{-1}), based on the cross-validation method, for EASMI during 1949–2013

果也表明，所建立东亚夏季风强度的多尺度统计预测模型具有较好的预测能力。

7 结论

通过研究东亚夏季风强度指数的多尺度变化特征及其不同尺度上变化与前冬及前一年 3 月至当年 2 月海温、200 hPa 纬向风的关系，选取了东亚夏季风强度在不同尺度上的前期物理因子，并探讨了他们影响东亚夏季风强度年际和年代际变化的可能物理过程，建立了东亚夏季风强度的多尺度物理统计预测模型并对模型的效果进行了检验。主要得到以下结论：

（1）东亚夏季风强度具有准 4 年的年际变化、准 13 年和准 43 年左右的年代际周期变化。

（2）年际尺度上，前冬赤道东太平洋（10°S～10°N，160°～80°W）海温为影响东亚夏季风强度年际变化的重要前兆因子，它与东亚夏季风强度有最强的显著负相关，且它与 200 hPa 纬向风场上的两个前兆信号（亚洲副热带与热带印度洋—热带西太平洋平均的 200 hPa 纬向风差、热带与副热带中东太平洋 200 hPa 纬向风差）有较强的负相关。

（3）年代际尺度上，南半球（50°～70°S，0°～180°E）与（30°～40°S，0°～180°E）200 hPa 纬向风之差为影响东亚夏季风强度年代际变化的重要前兆因子，它与东亚夏季风强度有最强的显著正相关，且它与另外 4 个前兆信号[热带印度洋（30°S～10°N，40°～100°E）SST、低纬度东南太平洋（30°S～10°S，130°W～90°W）SST、低纬度南大西洋（30°S～0，40°W～20°E）SST 及亚洲副热带（32.5～37.5°N, 60～120°E）200 hPa 纬向风存在显著的正相关。

（4）通过探讨年际和年代际尺度上两个重要前兆因子影响东亚夏季风的可能物理过程，利用最优子集回归方法，建立了东亚夏季风强度的多尺度最优子集回归预测模型并进行了独立样本检验。它不仅具有较好的拟合效果，而且对东亚夏季风强度具有较好的预测能力，尤其对异常极值年份也具有一定的预测能力。1949～2013 年交叉检验的结果也表明，所建立东亚夏季风强度的多尺度统计预测模型具有较好的预测能力。

致谢 衷心感谢两位审稿专家对本文提出的宝贵修改意见！

参考文献（References）

陈兴跃, 王会军, 曾庆存. 2000. 大气季节内振荡及其年际变化 [M]. 北京: 气象出版社, 142–144. Chen Xingyue, Wang Huijun, Zeng Qingcun. 2000. Atmospheric Intraseasonal Oscillation and Its Interannual Variation (in Chinese) [M]. Beijing: China Meteorological Press, 142–144.

陈隆勋, 张博, 张瑛. 2006. 东亚季风研究的进展 [J]. 应用气象学报, 17 (6): 711–724. Chen Longxun, Zhang Bo, Zhang Ying. 2006. Progress in research on the East Asian monsoon [J]. Journal of Applied Meteorological Science (in Chinese), 17 (6): 711–724.

陈丽娟, 袁媛, 杨明珠, 等. 2013. 海温异常对东亚夏季风影响机理的研究进展 [J]. 应用气象学报, 24 (5): 521–532. Chen Lijuan, Yuan Yuan, Yang Mingzhu, et al. A review of physical mechanisms of the global SSTA impact on EASM [J]. Journal of Applied Meteorological Science (in Chinese), 24 (5): 521–532.

邓伟涛, 孙照渤, 曾刚, 等. 2009. 中国东部夏季降水型的年代际变化及其与北太平洋海温的关系 [J]. 大气科学, 33 (4): 835–846. Deng Weitao, Sun Zhaobo, Zeng Gang, et al. 2009. Interdecadal variation of summer precipitation pattern over eastern China and its relationship with the North Pacific SST [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 33 (4): 835–846.

Duchon C E. 1979. Lanczos filtering in one and two dimensions [J]. J.

Appl. Meteor., 18 (8): 1016–1022.

范可. 2006. 南半球环流异常与长江中下游夏季旱涝的关系 [J]. 地球物理学报, 49 (3): 672–679. Fan K. Atmospheric circulation anomalies in the Southern Hemisphere and summer rainfall over Yangtze River valley [J]. Chinese J. Geophys. (in Chinese), 49 (3): 672–679.

范可, 王会军. 2006. 有关南半球大气环流与东亚气候的关系研究的若干新进展 [J]. 大气科学, 30 (3): 402–412. Fan Ke, Wang Huijun. 2006. Studies of the relationship between Southern Hemispheric atmospheric circulation and climate over East Asia [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 30 (3): 402–412.

范可, 王会军, Choi Y J. 2007. 一个长江中下游夏季降水的物理统计预测模型 [J]. 科学通报, 52 (24): 2900–2905. Fan Ke, Wang Huijun, Choi Y J. A physically-based statistical forecast model for the middle–lower reaches of the Yangtze River valley summer rainfall [J]. Chinese Science Bulletin, 53 (4): 602–609.

范丽军, 符淙斌, 陈德亮. 2007. 统计降尺度法对华北地区未来区域气温变化情景的预估 [J]. 大气科学, 31 (5): 887–897. Fan Lijun, Fu Congbin, Chen Deliang. Estimation of local temperature change scenarios in North China using statistical downscaling method [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 31 (5): 887–897.

高辉, 张芳华. 2003. 关于东亚夏季风指数的比较 [J]. 热带气象学报, 19 (1): 79–86. Gao Hui, Zhang Fanghua. 2003. Discussion and comparison of East Asia summer monsoon index [J]. Journal of Tropical Meteorology (in Chinese), 19 (1): 79–86.

高辉. 2004. 南半球大气环流的季节和年际变化及其对东亚夏季风的影响 [D]. 南京气象学院博士学位论文, 125–132. Gao Hui. 2004. Seasonal and interannual variations of the Southern Hemisphere circulation and their influences on East Asian summer monsoon [D]. Ph. D. dissertation (in Chinese), Nanjing Institute of Meteorology, 125–132.

高辉, 刘芸芸, 王永光, 等. 2012. 亚洲夏季风爆发早晚的新前兆信号：冬季南极涛动 [J]. 科学通报, 57 (36): 3516–3521. Gao Hui, Liu Yunyun, Wang Yongguang, et al. 2013. Precursory influence of the Antarctic oscillation on the onset of Asian summer monsoon [J]. Chinese Science Bulletin, 58 (6): 678–683.

谷德军, 王东晓, 纪忠萍, 等. 2009. 墨西哥帽小波变换的影响域和计算方案新探讨 [J]. 应用气象学报, 20 (1): 62–69. Gu Dejun, Wang Dongxiao, Ji Zhongping, et al. 2009. New research on cone of influence and computing scheme of Mexican hat wavelet transform [J]. Journal of Applied Meteorological Science (in Chinese), 20 (1): 62–69.

谷德军, 纪忠萍, 李春晖. 2011. 南海夏季风爆发日期与海温的多尺度关系及最优子集回归预测 [J]. 海洋学报, 33 (6): 55–63. Gu Dejun, Ji Zhongping, Li Chunhui. 2011. Multi-scale correlation of onset date of South China Sea summer monsoon with sea surface temperature and optimal subset regression prediction [J]. Acta Oceanologica Sinaca (in Chinese), 33 (6): 55–63.

谷德军, 高晓容, 纪忠萍, 等. 2012. 广东开汛日期的多尺度物理统计预测模型 [J]. 高原气象, 31 (3): 768–776. Gu Dejun, Gao Xiaorong, Ji Zhongping, et al. 2012. Multi-scale physical statistic prediction model for rain season onset date in Guangdong Province [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 31 (3): 768–776.

郭其蕴. 1983. 东亚夏季风强度指数及其变化的分析 [J]. 地理学报, 38(3): 207–217. Guo Qiyun. 1983. The summer monsoon intensity index in East Asia and its variation [J]. Acta Geographica Sinica (in Chinese), 38 (3): 207–217.

郭其蕴, 蔡静宁, 邵雪梅, 等. 2003. 东亚夏季风的年代际变率对中国气候的影响 [J]. 地理学报, 58 (4): 569–576. Guo Qiyun, Cai Jingning, Shao Xuemei, et al. 2003. Interdecadal variability of East Asian summer monsoon and its impact on the climate of China [J]. Acta Geographica Sinica (in Chinese), 58 (4): 569–576.

郭其蕴, 蔡静宁, 邵雪梅, 等. 2004. 1873～2000 年东亚夏季风变化的研究 [J]. 大气科学, 28 (2): 206–215. Guo Qiyun, Cai Jingning, Shao Xuemei, et al. 2004. Studies on the variations of East Asian summer monsoon during AD 1873–2000 [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 28 (2): 206–215.

何诗秀, 杨祖芳. 1981. 北半球夏季西北太平洋热带地区西南季风强弱变化与南半球环流型的关系 [J]. 大气科学, 5 (1): 50–59. He Shixiu, Yang Zufang. 1981. The relationship between the intensity of summer southwest monsoon over northwest Pacific and the circulation patterns of the Southern Hemisphere [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 5 (1): 50–59.

何金海, 李俊, 李永平. 1991. 澳大利亚冷空气活动影响东亚夏季风的过程——数值试验 [J]. 气象学报, 49 (2): 162–169. He Jinhai, Li Jun, Li Yongping. 1991. Numerical experiment with processes for effect of Australian cold air activity on East Asian summer monsoon [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 49 (2): 162–169.

何金海, 宇婧婧, 沈新勇, 等. 2004. 有关东亚季风的形成及其变率的研究 [J]. 热带气象学报, 20 (5): 449–459. He Jinhai, Yu Jingjing, Shen Xinyong, et al. 2004. Research on mechanism and variability of East Asian monsoon [J]. Journal of Tropical Meteorology (in Chinese), 20 (5): 449–459.

黄刚, 严中伟. 1999. 东亚夏季风环流异常指数及其年际变化 [J]. 科学通报, 44 (4): 421–424. Huang Gang, Yan Zhongwei. 1999. The East Asian summer monsoon circulation anomaly index and its interannual variations [J]. Chinese Science Bulletin, 44 (14): 1325–1329.

黄荣辉, 孙凤英. 1994. 热带西太平洋暖池的热状态及其上空的对流活动对东亚夏季气候异常的影响 [J]. 大气科学, 18 (2): 141–151. Huang Ronghui, Sun Fengying. 1994. Impacts of the thermal state and the convective activities in the tropical western warm pool on the summer climate anomalies in East Asia [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 18 (2): 141–151.

黄荣辉, 陈文, 丁一汇, 等. 2003. 关于季风动力学以及季风与 ENSO 循环相互作用的研究 [J]. 大气科学, 27 (4): 484–502. Huang Ronghui, Chen Wen, Ding Yihui, et al. 2003. Studies on the monsoon dynamics and the interaction between monsoon and ENSO cycle [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 27 (4): 484–502.

江滢. 2005. 东亚季风指数分类初析 [J]. 气象, 31(5): 3–7. Jiang Ying. 2005. On classification of East Asian monsoon indices [J]. Meteorological Monthly (in Chinese), 31 (5): 3–7.

Kalnay E, Kanamitsu M, Kistler R, et al. 1996. The NCEP/ NCAR 40-year reanalysis project [J]. Bull. Amer. Meteor. Soc., 77 (3): 437–471.

李建平, 曾庆存. 2005. 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, 10 (3): 351–365. Li Jianping, Zeng

Qingcun. 2005. A new monsoon index, its interannual variability and relation with monsoon precipitation [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 10 (3): 351–365.

廖清海, 高守亭, 王会军, 等. 2004. 北半球夏季副热带西风急流变异及其对东亚夏季风气候异常的影响 [J]. 地球物理学报, 47 (1): 10–18. Liao Qinghai, Gao Shouting, Wang Huijun, et al. 2004. Anomalies of the extratropical westerly jet in the North Hemisphere and their impacts on East Asian summer monsoon climate anomalies [J]. Chinese J. Geophys. (in Chinese), 47 (1): 10–18.

林爱兰, 谷德军, 郑彬, 等. 2013. 南海夏季风爆发与南大洋海温变化之间的联系 [J]. 地球物理学报, 56 (2): 383–391. Lin Ailan, Gu Dejun, Zheng Bin, et al. 2013. Relationship between South China Sea summer monsoon onset and Southern Ocean sea surface temperature variation [J]. Chinese J. Geophys. (in Chinese), 56 (2): 383–391.

刘海文, 周天军, 朱玉祥, 等. 2012. 东亚夏季风自20世纪90年代初开始恢复增强 [J]. 科学通报, 57 (9): 765–769. Liu Haiwen, Zhou Tianjun, Zhu Yuxiang, et al. 2012. The strengthening East Asia summer monsoon since the early 1990s [J]. Chinese Science Bulletin, 57 (13): 1553–1558.

陆日宇. 2002. 华北汛期降水量变化中年代际和年际尺度的分离 [J]. 大气科学, 26 (5): 611–624. Lu Riyu. 2002. Separation of interannual and interdecadal variations of rainfall in North China [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 26 (5): 611–624.

Loschnigg J, Meehl G A, Webster P J, et al. 2003. The Asian monsoon, the tropospheric biennial oscillation, and the Indian Ocean zonal mode in the NCAR CSM [J]. J. Climate, 16 (11): 1617–1642.

马音, 陈文, 冯瑞权, 等. 2012. 我国东部梅雨期降水的年际和年代际变化特征及其与大气环流和海温的关系 [J]. 大气科学, 36 (2): 397–410. Ma Yin, Chen Wen, Feng Ruiquan, et al. 2012. Interannual and interdecadal variations of precipitation over eastern China during Meiyu season and their relationships with the atmospheric circulation and SST [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 36 (2): 397–410.

Michaelsen J. 1987. Cross-validation in statistical climate forecast models [J]. J. Climate Appl. Meteor., 26 (11): 1589–1600.

彭京备, 陈烈庭, 张庆云. 2005. 青藏高原异常雪盖和 ENSO 的多尺度变化及其与中国夏季降水的关系 [J]. 高原气象, 24 (3): 366–377. Peng Jingbei, Chen Lieting, Zhang Qingyun. 2005. Multi-scale variations of snow cover over QXP and tropical Pacific SST and their influences on summer rainfall in China [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 24 (3): 366–377.

彭京备, 陈烈庭, 张庆云. 2006. 多因子和多尺度合成中国夏季降水预测模型及预报试验 [J]. 大气科学, 30 (4): 596–608. Peng Jingbei, Chen Lieting, Zhang Qingyun. 2006. The statistic prediction model and prediction experiments of the summer rain over China by multiple factors and multi-scale variations [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 30 (4): 596–608.

平凡, 罗哲贤, 琚建华. 2006. 长江流域汛期降水年代际和年际尺度变化影响因子的差异 [J]. 科学通报, 51 (1): 104–109. Ping Fan, Luo Zhexian, Ju Jianhua. 2006. Differences between dynamics factors for interannual and decadal variations of rainfall over the Yangtze River valley during flood seasons [J]. Chinese Science Bulletin, 51 (8): 994–999.

钱维宏, 陆波, 祝从文. 2010. 全球平均温度在21世纪将怎样变化? [J]. 科学通报, 55 (16): 1532–1537. Qian Weihong, Lu Bo, Zhu Congwen. 2010. How would global mean temperature change in the 21st century? [J]. Chinese Science Bulletin, 55 (19): 1963–1967.

施能, 鲁建军, 朱乾根. 1996. 东亚冬、夏季风百年强度指数及其气候变化 [J]. 南京气象学院学报, 19 (2): 168–177. Shi Neng, Lu Jianjun, Zhu Qiangen. 1996. East Asian winter/summer monsoon intensity indices with their climatic change in 1873–1989 [J]. Journal of Nanjing Institute of Meteorology (in Chinese), 19 (2): 168–177.

施能, 杨永胜. 1998. 1873～1996年东亚冬、夏季风强度指数及其主要特征 [J]. 南京气象学院学报, 21 (2): 208–214. Shi Neng, Yang Yongsheng. Main characteristics of East Asian summer/winter monsoon index for 1873–1996 [J]. Journal of Nanjing Institute of Meteorology (in Chinese), 21 (2): 208–214.

施能. 2002. 气象科研与预报中的多元分析方法 [M]. (第二版). 北京: 气象出版社, 25–27. Shi Neng. 2002. Multianalysis in Meteorological Research and Prediction (in Chinese) [M]. (2nd ed.). Beijing: China Meteorological Press, 25–27.

Smith T M, Reynolds R W. 2004. Improved extended reconstruction of SST (1854–1997) [J]. J. Climate, 17 (12): 2466–2477.

孙秀荣, 陈隆勋, 何金海. 2002. 东亚海陆热力差指数及其与环流和降水的年际变化关系 [J]. 气象学报, 60 (2): 164–172. Sun Xiurong, Chen Longxun, He Jinhai. 2002. Index of land–sea thermal difference and its relation to interannual variation of summer circulation and rainfall over East Asian [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 60 (2): 164–172.

陶诗言, 李吉顺, 王昂生. 1997. 东亚季风与我国洪涝灾害 [J]. 中国减灾, 7 (4): 17–20, 24. Tao Shiyan, Li Jishun, Wang Angsheng. 1997. East Asian monsoon and flood disaster in China [J]. Disaster Reduction in China (in Chinese), 7 (4): 17–20, 24.

陶诗言, 张庆云. 1998. 亚洲冬夏季风对 ENSO 事件的响应 [J]. 大气科学, 22 (4): 399–407. Tao Shiyan, Zhang Qingyun. 1998. Response of the Asian winter and summer monsoon to ENSO events [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 22 (4): 399–407.

王会军, 范可. 2006. 南半球对流层上层纬向风与东亚夏季风环流 [J]. 科学通报, 51 (13): 1595–1600. Wang Huijun, Fan Ke. 2006. Southern Hemisphere mean zonal wind in upper troposphere and East Asian summer monsoon circulation [J]. Chinese Science Bulletin, 51 (12): 1508–1514.

王会军, 范可. 2013. 东亚季风近几十年来的主要变化特征 [J]. 大气科学, 37 (2): 313–318. Wang Huijun, Fan Ke. 2013. Recent changes in the East Asian monsoon [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 37 (2): 313–318.

王黎娟, 何金海, 管兆勇, 等. 2008. 国内东亚热带—副热带季风的研究进展 [J]. 热带气象学报, 24 (6): 724–731. Wang Lijuan, He Jinhai, Guan Zhaoyong, et al. 2008. Review of the Chinese research on the East Asian tropical and subtropical monsoons [J]. Journal of Tropical Meteorology (in Chinese), 24 (6): 724–731.

Wang H J. 2001. The weakening of the Asian monsoon circulation after the end of 1970s [J]. Adv. Atmos. Sci., 18 (3): 376–386.

Wang H J. 2002. The instability of the East Asian summer monsoon–

ENSO relations [J]. Adv. Atmos. Sci., 19 (1): 1–11.

Wang B, Wu R G, Fu X H. 2000. Pacific–East Asian teleconnection: How does ENSO affect East Asian climate? [J]. J. Climate, 13 (9): 1517–1536.

Wang B, Wu R G, Lau K M. 2001. Interannual variability of the Asian summer monsoon: Contrasts between the Indian and the western North Pacific–East Asian monsoons [J]. J. Climate, 14 (20): 4073–4090.

Webster P J, Yang S. 1992. Monsoon and ENSO: Selectively interactive systems [J]. Quart. J. Roy. Meteor. Soc., 118 (507): 877–926.

魏凤英. 1999. 现代气候统计诊断预测技术 [M] 北京: 气象出版社, 194–201. Wei Fengying. 1999. Technology of Statistical Diagnosis and Prediction of Modern Climate (in Chinese) [M]. Beijing: China Meteorological Press, 194–201.

Wu B Y, Zhang R H, Ding Y H, et al. 2008. Distinct modes of the East Asian summer monsoon [J]. J. Climate, 21(5): 1122–1138.

徐建军, 朱乾根, 施能. 1997. 近百年东亚季风长期变化中主周期振荡的奇异谱分析 [J]. 气象学报, 55 (5): 620–627. Xu Jianjun, Zhu Qiangen, Shi Neng. 1997. The singular spectral analysis of periodic oscillation in long-term variation of East-Asian monsoon in recent century [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 55 (5): 620–627.

徐建军, 王东晓. 2000. 印度洋—太平洋海温的年际、年代际异常及其对亚洲季风的影响 [J]. 海洋学报, 22 (3): 34–43. Xu Jianjun, Wang Dongxiao. 2000. Diagnosis of interannual and interdecadal variation in SST over Indian–Pacific Ocean and numerical simulation of their effect on Asian summer monsoon [J]. Acta Oceanologica Sinica (in Chinese), 22 (3): 34–43.

徐桂玉, 杨修群, 孙旭光. 2005. 华北降水年代际、年际变化特征与北半球大气环流的联系 [J]. 地球物理学报, 48 (3): 511–518. Xu Guiyu, Yang Xiuqun, Sun Xuguang. 2005. Interdecadal and interannual variation characteristics of rainfall in north China and its relation with the Northern Hemisphere atmospheric circulations [J]. Chinese J. Geophys. (in Chinese), 48 (3): 511–518.

Xu J J, Chan J C L. 2002. Interannual and interdecadal variability of winter precipitation over China in relation to global sea level pressure anomalies [J]. Adv. Atmos. Sci., 19 (5): 914–926.

薛峰. 2005. 南半球环流变化对东亚夏季风的影响 [J]. 气候与环境研究, 10 (3): 401–408. Xue Feng. 2005. Influence of the southern circulation on East Asian summer monsoon [J]. Climatic and Environmental Research, 10 (3): 401–408.

Xue F, Jiang D B, Lang X M, et al. 2003. Influence of the Mascarene high and Australian high on the summer monsoon in East Asia: Ensemble simulation [J]. Adv. Atmos. Sci., 20 (5): 799–809.

杨培才, 周秀骥. 2005. 气候系统的非平稳行为和预测理论 [J]. 气象学报, 63 (5): 556–570. Yang Peicai, Zhou Xiuji. 2005. On nonstationary behaviors and prediction theory of climate systems [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 63 (5): 556–570.

Yang S, Lau K M, Sankar-Rao M. 1996. Precursory signals associated with the interannual variability of the Asian summer monsoon [J]. J. Climate, 9 (5): 949–964.

于淑秋, 林学椿, 施晓晖. 2008. 东亚夏季风的年际变化及其与环流和降水的关系 [J]. 地理学报, 63 (7): 751–760. Yu Shuqiu, Lin Xuechun, Shi Xiaohui. 2008. Interannual variation of East Asian summer monsoon and the relationship with atmospheric circulation and rainfall [J]. Acta Geographica Sinica (in Chinese), 63 (7): 751–760.

袁媛, 李崇银. 2009. 热带印度洋海温异常不同模态对南海夏季风爆发的可能影响 [J]. 大气科学, 33 (2): 325–336. Yuan Yuan, Li Chongyin. 2009. Possible impacts of the tropical Indian Ocean SST anomaly modes on the South China Sea summer monsoon onset [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 33 (2): 325–336.

尤卫红, 杞明辉, 段旭. 1999. 小波变换在短期气候预测模型研究中的应用 [J]. 高原气象, 18 (1): 39–46. You Weihong, Qi Minghui, Duan Xu. 1999. Wavelet transforms' applications to researches on model of short range climate forecast [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 18 (1): 39–46.

赵汉光, 张先恭. 1996. 东亚季风和我国夏季雨带的关系 [J]. 气象, 22 (4): 8–12. Zhao Hanguang, Zhang Xiangong. 1996. The relationship between the summer rain belt in China and the East Asia monsoon [J]. Meteorological Monthly (in Chinese), 22 (4): 8–12.

张庆云, 陶诗言, 陈烈庭. 2003. 东亚夏季风指数的年际变化与东亚大气环流 [J]. 气象学报, 61 (4): 559–568. Zhang Qingyun, Tao Shiyan, Chen Lieting. 2003. The interannual variability of East Asian summer monsoon indices and its association with the pattern of general circulation over East Asia [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 61 (4): 559–568.

张庆云, 王媛. 2006. 冬夏东亚季风环流对太平洋热状况的响应 [J]. 气候与环境研究, 11 (4): 487–498. Zhang Qingyun, Wang Yuan. 2006. The response of East Asian monsoon circulation between winter and summer to sea surface temperature over the Pacific Ocean [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 11 (4): 487–498.

张人禾, 李强. 2004. 热带海洋变异对东亚季风的影响 [J]. 气象, 30 (12): 22–26. Zhang Renhe, Li Qiang. 2004. Impact of sea temperature variability of tropical oceans on East Asian monsoon [J]. Meteorological Monthly (in Chinese), 30 (12): 22–26.

张人禾, 武炳义, 赵平, 等. 2008. 中国东部夏季气候20世纪80年代后期的年代际转型及其可能成因 [J]. 气象学报, 66 (5): 697–706. Zhang Renhe, Wu Bingyi, Zhao Ping, et al. 2008. The decadal shift of the summer climate in the late 1980s over East China and its possible causes [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 66 (5): 697–706.

郑菲, 李建平. 2012. 前冬南半球环状模对春季华南降水的影响及其机理 [J]. 地球物理学报, 55 (11): 3542–3557. Zheng Fei, Li Jianping. 2012. Impact of preceding boreal winter Southern Hemisphere annular mode on spring precipitation over South China and related mechanism [J]. Chinese J. Geophys. (in Chinese), 55 (11): 3542–3557.

祝从文, 何金海, 吴国雄. 2000. 东亚季风指数及其与大尺度热力环流年际变化关系 [J]. 气象学报, 58 (4): 391–402. Zhu Congwen, He Jinhai, Wu Guoxiong. 2000. East Asian monsoon index and its inter-annual relationship with large scale thermal dynamic circulation [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 58 (4): 91–402.