

刘实, 布和朝鲁, 陶诗言, 等. 2010. 东亚冬季风强度的统计预测方法研究 [J]. 大气科学, 34 (1): 35–44. Liu Shi, Bueh Cholaw, Tao Shiyen, et al. 2010. A study of the statistical prediction method for the East Asian winter monsoon intensity [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 34 (1): 35–44.

# 东亚冬季风强度的统计预测方法研究

刘实<sup>1, 2</sup> 布和朝鲁<sup>3\*</sup> 陶诗言<sup>3</sup> 隋波<sup>1, 2</sup>

1 吉林省气象科学研究所, 长春 130062

2 中高纬度环流系统与东亚季风研究开放实验室, 长春 130062

3 中国科学院大气物理研究所国际气候与环境科学中心 大气科学和地球流体力学数值模拟国家重点实验室, 北京 100029

**摘 要** 利用 1961~2008 年 NCEP 再分析和 NOAA 延长重构的月平均海温资料, 基于海气系统关键区的前期信号分析, 建立了一个东亚冬季风强度的统计预测方法。东亚冬季风强度与前期 (9~10 月) 黑潮及其延伸区和热带西印度洋海温异常 (SSTA) 密切相关。强东亚冬季风活动与黑潮及其延伸区正 SSTA 和热带西印度洋负 SSTA 相对应。东亚冬季风强度还和一个前期 (10 月) 北半球环流型存在显著相关, 其中环流型的活动中心分别位于北太平洋中部、太平洋东北部、北美和北大西洋。文中探讨了这三个预测因子对东亚冬季风强度的预测意义, 并揭示了其影响东亚冬季风活动的可能物理过程。该预测方法的历史拟合率和试报准确率较高, 可用于东亚冬季风强度的定性预测。

**关键词** 东亚冬季风 统计预测方法 环流型 海温异常

**文章编号** 1006-9895 (2010) 01-0035-10

**中图分类号** P462

**文献标识码** A

## A Study of the Statistical Prediction Method for the East Asian Winter Monsoon Intensity

LIU Shi<sup>1, 2</sup>, Bueh Cholaw<sup>3</sup>, TAO Shiyen<sup>3</sup>, and SUI Bo<sup>1, 2</sup>

1 Institute of Meteorological Sciences of Jilin Province, Changchun 130062

2 Laboratory of Research for Middle-High Latitude Circulation System and East Asian Monsoon, Changchun 130062

3 International Center for Climate and Environment Sciences & State Key Laboratory of Numerical Modeling for Atmospheric Sciences and Geophysical Fluid Dynamics, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

**Abstract** With the analysis of the precursory signal observed in the key regions of the air-sea system, this study has developed a statistical prediction method for the East Asian winter monsoon (EAWM) intensity, by using the monthly data of the NCEP reanalysis and NOAA extended reconstructed sea surface temperature (SST). The EAWM intensity is closely associated with the prior September-October SST anomalies in the Kuroshio and its extension region and the tropical western Indian Ocean. A strong EAWM activity corresponds well to the positive SST anomaly in the Kuroshio and its extension region and to the negative anomaly in the tropical western Indian Ocean. On the other hand, the EAWM intensity is also significantly correlated with a prior (October) northern hemispheric circulation pattern, whose action centers are located in the central North Pacific, the Northeastern Pacific, North A-

**收稿日期** 2008-12-04, 2009-05-20 收修定稿

**资助项目** 中国气象局气象新技术推广项目 CMATG2007M28

**作者简介** 刘实, 男, 1963 年出生, 正研级高级工程师, 主要从事气候诊断和预测的研究。E-mail: liushi\_th@sina.com

\* 通讯作者 E-mail: bueh@lasg.iap.ac.cn

merica and the North Atlantic, respectively. The potential of above-mentioned three precursory factors in predicting the EAWM intensity has been discussed and the possible physical linkages between the EAWM intensity and the three precursory factors have also been explored. The fitting analysis and trial predicting examination indicate that the prediction method established here has a high accuracy and is applicable for the qualitative prediction of the East Asian winter monsoon intensity.

**Key words** East Asian winter monsoon, statistical prediction method, circulation pattern, SST anomaly

## 1 引言

东亚冬季风是全球大气环流的重要组成部分,东亚冬季风的强弱对同期和后期海气系统及区域气候都有显著影响(李崇银, 1992; 郭其蕴, 1994; 孙淑清和孙柏民, 1995; 施能, 1996; 纪立人等, 1998; 陈隽和孙淑清, 1999; 布和朝鲁和纪立人, 1999; 王会军和姜大膀, 2004)。因此, 开展东亚冬季风强度预测研究具有十分重要的意义。

关于东亚冬季风预测的前兆信号, 一些专家学者进行了有益探讨, 预测信号主要体现在不同区域海温异常造成的外源强迫方面。龙振夏和李崇银(1999)的研究结果表明, 1~3 月的 El Niño (La Niña) 之后的冬季, 东亚冬季风偏强(弱)。陈海山等(2002a)认为, Niño C 区秋季海温(SST)正(负)异常, 导致偏弱(强)的东亚冬季风活动。梁巧倩等(2004)的研究指出, 冬季之前两个月左右的赤道东太平洋海温异常对后期东亚冬季风的影响最显著。陈海山等(2002b)的数值试验结果显示, 东亚冬季风对秋季海温距平(SSTA)的显著响应区域位于中纬度太平洋地区, 该区域 SST 的持续异常, 能引起东亚冬季风的环流异常。李忠贤和孙照渤(2004)发现, 秋季黑潮区域海温与东亚冬季风指数有明显正相关关系。管成功和孙照渤(2002)认为, 秋季东西伯利亚海海冰偏多(偏少), 东亚冬季风偏强(偏弱)。陈佩燕等(2001)指出, 前期夏、秋季赤道印度洋、赤道东太平洋海温异常与我国东部地区冬季温度异常相关较好, 而后者又与东亚冬季风强弱有很好的对应关系。李东辉等(2006)认为, 前期秋季热带印度洋全区一致型(USB)模态与东亚冬季风为负相关关系。

研究表明, 东亚冬季风活动异常也与同期北大西洋区外强迫信号(海冰、海温异常等)存在密切关系。武炳义等(1999)的研究表明, 冬季喀拉海、巴伦支海海区海冰偏多, 则 500 hPa 高度场容易出

现欧亚(EU)遥相关型(Wallace and Gutzler, 1981), 亚洲大陆上的冷高压减弱, 致使东亚冬季风偏弱; 反之亦然。曾刚等(2001)的研究也表明, 冬季戴维斯海峡海冰偏多, 在欧亚大陆易于出现 EU 型遥相关, 西伯利亚高压减弱, 致使东亚冬季风偏弱; 反之亦然。王会军和姜大膀(2004)也指出, 强东亚冬季风年份北大西洋东部大部分海域和挪威海域海表温度显著偏低, 北大西洋西部局部海域海表温度偏高, 此外, 北太平洋北部大部分海域海表温度偏低。在东亚冬季风预测方面, 有关北大西洋区前期信号的研究则较少, 需要进一步探索。

一些研究表明, 东亚冬季风活动受北大西洋/欧洲气候异常的影响。Watanabe(2004)的研究表明, 年际尺度上的北大西洋涛动(NAO)信号既可以局限在大西洋/欧洲地区, 也可以向东亚和北太平洋地区延伸。当 NAO 具有一个更宽的水平尺度的情况下, 其年际变率就和东亚气候变率联系在一起, 正位相的 NAO 就趋向于使东亚地区地面升温。武炳义和黄荣辉(1999)发现, 冬季 NAO 指数偏高(低), 冬季西伯利亚高压和东亚冬季风减弱(增强)。对东亚冬季风的预测而言, 除了这些同期的环流异常信号外, 是否存在一些前期环流信号, 这值得进一步尝试和深入探索。

上述研究对开展冬季风预测奠定了很好的基础。但预测实践表明, 仅仅根据海温异常信号预测冬季风强度, 准确率不是很理想, 这可能与对前期中高纬度环流形势及其随后的演变等大气内动力过程的考虑不充分有关。秋季后期的热带外北半球环流的异常信号可反映冬季大气环流的初始状态, 它与外强迫匹配, 提供有利于预测东亚冬季风强度的前期信号。甚至在外强迫信号不显著的情况下, 它可提供有利于预测东亚冬季风强度的前期信号(后文将给出依据)。目前, 依据前期外强迫与环流信号相结合的综合预测方法研究较为鲜见, 值得深入探讨。基于这样一个基本思路, 本文对影响东亚冬

季风强度的、海气系统关键区的前期信号进行分析，探讨诸因子影响的可能物理过程，并在确定预测信号的基础上建立一个东亚冬季风强度的预测方法。

2 资料与方法

利用 1961~2008 年 NCEP 再分析  $2.5^{\circ}\times 2.5^{\circ}$  分辨率月平均资料和 NOAA 延长重构的  $2^{\circ}\times 2^{\circ}$  分辨率月平均海表温度场资料，分析东亚冬季风强度在前期海平面气压、500 hPa 高度、表面气温以及海表温度场的相关关键区，寻找东亚冬季风强度的预测信息。需要指出的是，本文的 1961 年冬季系指 1961 年 12 月~1962 年 2 月，依此类推。

文中东亚冬季风强度指数选用刘实（2007）的定义，这一指数体现了在亚-澳季风系统内东西向的海陆热力差异和南北向的海陆热力差异共同造成的冬季风现象。图 1 给出了该指数与冬季（12~2 月）平均地表温度（中国区域）与海平面气压的相关场。由图 1 清晰可见，该指数（正位相）反映了

冷空气沿青藏高原东麓大范围南下的特征，也恰好对应着冬季欧亚大陆的海平面气压的大范围增强。

3 前期海气系统关键区

为寻找东亚冬季风强度的前期影响因子，这里计算了 1961~2000 年东亚冬季风强度指数与前期 SST 和 500 hPa 位势高度的相关场。

3.1 SST 关键区

在前秋（9~10 月）的相关场上（图略），通过 0.01 显著性水平检验的相关区分布如下。黑潮及其延伸区、巴伦支海呈正相关，热带西印度洋为负相关。此外，通过 0.05 显著性水平检验的负相关区分布在 Niño3 区。

10 月的相关场与 9~10 月的相关场较为相似，有所差异的是，冰岛和英国附近有一对正、负相关的偶极子，均通过了 0.05 显著性水平检验（图 2a）。

3.2 500 hPa 位势高度关键区

500 hPa 位势高度的相关场上，赤道附近为较宽阔的显著负相关带。在北半球中高纬度，我们注意到，通过 0.05 显著性水平检验的区域主要分布在：北太平洋中部、东北太平洋、加拿大中北部及北大西洋，4 个相关区呈“+、-、+、-”分布（图 2b）。根据其活动中心分别位于北太平洋-北美-北大西洋的特点，我们将这一异常环流型称之为 PAA 型。为了分析 10 月份 PAA 型与东亚冬季风强度的关系，这里定义了一个 PAA 型指数： $I_{PAA} = (H_{G1} + H_{G2} - H_{D1} - H_{D2})^*$ ，其中  $H$  为 500 hPa 高度距平，“\*”表示进行了标准化，构成指数的各关键区列在表 1 中。

我们计算了  $I_{PAA}$  与冬季各个月份（12、1、2 月）500 hPa 高度的相关场（图略）。12 月，在南欧-地中海西部和东亚大槽区出现显著负相关（ $\alpha = 0.01$ ）。1 月，东亚大槽异常直接受欧洲一侧异常环流的影响，其相关场在北欧-乌拉尔山-东亚大槽

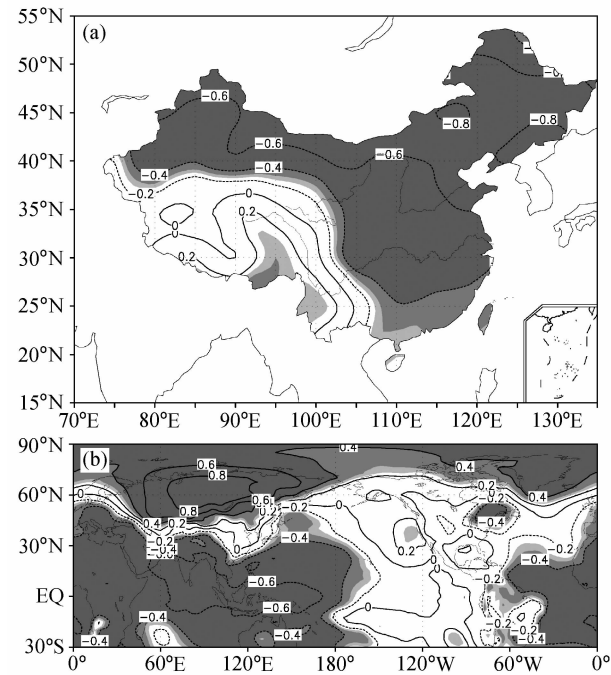


图 1 东亚冬季风强度指数与冬季中国区域平均地表温度（a）及海平面气压（b）的相关分布。阴影：由浅到深分别表示通过 0.1、0.05 和 0.01 显著性水平检验的区域  
Fig.1 Correlation coefficients between the East Asian winter monsoon index (EAWM) and (a) surface air temperature over China and (b) sea level pressure in winter (DJF), respectively. The shadings in light to dark colors mark the regions where the significance levels exceed 0.1, 0.05, and 0.01, respectively

表 1 PAA 型的各个关键区  
Table 1 The key areas of the PAA pattern

| 区域代码 | 区域位置   | 区域范围                        |
|------|--------|-----------------------------|
| G1   | 北太平洋中部 | (32.5°N~37.5°N, 180°~170°W) |
| G2   | 加拿大中北部 | (65°N~70°N, 95°W~85°W)      |
| D1   | 东北太平洋  | (45°N~55°N, 150°W~135°W)    |
| D2   | 北大西洋   | (50°N~55°N, 40°W~30°W)      |

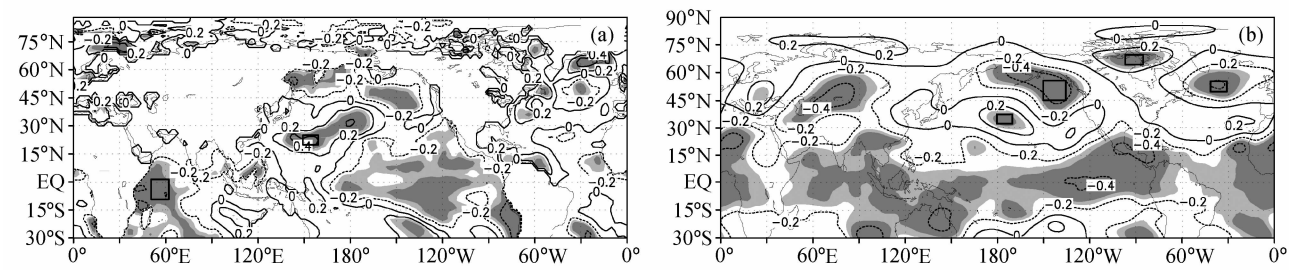


图2 东亚冬季风指数与10月(超前)海表温度场(a)及500 hPa位势高度场(b)的相关分布。浅、深阴影:通过0.1、0.05显著性水平检验的区域

Fig. 2 Correlation coefficients between the East Asian winter monsoon index and (a) sea surface temperature and (b) 500-hPa geopotential height in the preceding Oct. The dark (light) shading represents the region where the significance level exceeds 0.1 (0.05)

表2 东亚冬季风指数及各因子之间的相关系数

Table 2 Correlation coefficients between the East Asian winter monsoon intensity index and various factors

|                     | 巴伦支海 SST | 黑潮及其延伸区 SST | 热带西印度洋 SST | Niño3 区 SST | SST 偶极子指数 $D_{IE}$ | 环流型指数 $I_{PAA}$ |
|---------------------|----------|-------------|------------|-------------|--------------------|-----------------|
| 黑潮及其延伸区 SST         | 0.31     |             |            |             |                    |                 |
| 热带西印度洋 SST          | -0.17    | 0.02        |            |             |                    |                 |
| Niño3 区 SST         | -0.23    | -0.24       | 0.48**     |             |                    |                 |
| 偶极子 SST 指数 $D_{IE}$ | 0.42**   | 0.40*       | 0.13       | -0.18       |                    |                 |
| 环流型指数 $I_{PAA}$     | 0.27     | 0.10        | -0.26      | -0.23       | 0.33*              |                 |
| 东亚冬季风指数             | 0.45**   | 0.45**      | -0.40*     | -0.32*      | 0.40*              | 0.58***         |

注:巴伦支海、黑潮及其延伸区、热带西印度洋、Niño3 区的 SST 为 9~10 月,其余因子为 10 月; \*、\*\*、\*\*\*: 相关系数通过 0.05、0.01、0.001 显著性检验。

区呈现“一、十、一”分布。2月,原在乌拉尔山以东的正相关区(1月)向东北方向发展,从乌拉尔山至东西伯利亚的欧亚大陆大范围地区均为显著正相关区。概括起来,10月份的PAA型环流与东亚地区冬季冷空气活动密切联系,但这种联系在各个月份存在一些差异。另外,10月PAA环流型的分布与冬季北半球500 hPa高度场EOF分析的第一模态(陈丽芳和黎伟标,2009)较为相似,只是中心位置有所差异。

3.3 预测因子与冬季风指数的关系

经选择各关键区的范围计算,黑潮及其延伸区[ (22°N~26°N, 150°E~160°E), 简称黑潮区]、巴伦支海(70°N~74°N, 24°E~36°E)、热带西印度洋(50°E~62°E, 8°S~2°N)及Niño3区海表温度与东亚冬季风强度指数的相关系数分别为:0.45、0.45、-0.40和-0.32。我们还定义了一个冰岛/英格兰SST偶极子指数:  $D_{IE}=A_1-A_2$ , 其中  $A_1$  和  $A_2$  分别为(28°W~22°W, 64°N~66°N)和(30°W~26°W, 50°N~52°N)区域平均海温距平值,  $D_{IE}$ 与东亚冬季风强度指数的相关系数为0.40。  $I_{PAA}$ 与东亚

冬季风强度指数的相关系数达0.58(表2)。

4 东亚冬季风强度预测前兆因子的影响过程

为保证所建预测方法有较可靠的物理基础,这里从影响东亚冬季风强度的前期海气系统关键区中筛选出一组前兆因子,利用1961~2000年的资料,对前兆因子影响东亚冬季风强度的可能物理过程进行分析。

4.1 黑潮区海温

经与后期海温场的相关分析发现,前秋(9~10月、11月)至冬季黑潮区SST具有较好的持续性,高相关区域中心( $r>0.60$ ,  $\alpha=0.001$ )持续稳定在黑潮区,但随着时间推移,通过显著性检验的高相关区逐渐南扩,到冬季时移至北赤道暖流区以北至西风漂流区以南的区域(图略),与东亚冬季风强度的同期海温相关关键区(刘实,2007)相一致。由此可见,前秋黑潮区SST异常可能因其较好的持续性影响东亚冬季风的强度。

为进一步探讨因子对东亚冬季风强度的影响,

选取标准化的黑潮区平均 SST 的绝对值大于 0.90 为异常年份, 正异常年有 1964、1966、1969、1973、1985、1995、1999、2000 年共 8 年, 负异常年有 1972、1977、1981、1982、1984、1987、1992、1996 年共 8 年, 对正、负异常年冬季北半球海平面气压和 500 hPa 位势高度场进行合成分析。

图 3a 显示, 黑潮区前秋 SST 为正异常年份, 冬季海平面气压在乌拉尔山附近及西伯利亚大部分地区显著增强。显著负异常区位于热带西印度洋至西太平洋附近 (均通过 0.05 显著性的检验), 这与强冬季风活动引起的热带气旋式异常环流一致 (Ji and Sun, 1997)。该合成结果与图 1b 的相关场相当一致。可见, 黑潮区前秋 SST 的正 (负) 异常, 在冬季有利于欧亚大陆较大范围的海平面气压的加强 (减弱), 特别是西伯利亚高压, 进而有利于东亚冬季风的增强 (减弱)。

在黑潮区前秋 SST 为正异常年份, 冬季 500 hPa 高度场主要表现为乌拉尔山及整个西伯利亚西北部正异常, 以及东亚大槽加深 (图 3b)。可见, 黑潮区前秋 SST 的正 (负) 异常有利于东亚冬季风活动的加强 (减弱)。上述结果与过去研究结果 (陈海山等, 2002b; 李忠贤和孙照渤, 2004) 基本一致。

#### 4.2 热带西印度洋海温

经与后期海温场的相关分析发现, 前秋至冬季热带西印度洋 SST 同样具有较好的持续性, 高相关区域中心 ( $r > 0.70$ ,  $\alpha = 0.001$ ) 持续稳定在热带西印度洋区域 (图略), 也与东亚冬季风强度的同期海温相关关键区 (刘实, 2007) 相一致。由此可见, 持续性较好的前秋热带西印度洋 SST 可以作为预测东亚冬季风强度的前期信号。

选取标准化的热带西印度洋平均 SST 大于 0.90 为正异常年 (1972、1982、1987、1988、1997、1998、2000 年) 共 7 年, 小于 -1.00 为负异常年 (1964、1971、1975、1976、1984、1996 年) 共 6 年, 进行合成分析。

由图 4a 可见, 热带西印度洋前秋 SST 显著负异常年份, 冬季海平面气压场在亚欧中高纬大部分为正异常区, 特别是亚洲部分; 显著负异常区位于除东太平洋以外的热带和副热带区域 (均通过 0.05 显著性检验)。图 1b 和图 4a 的一致性表明, 热带西印度洋前秋 SST 的负 (正) 异常有利于东亚冬季风强度的加强 (减弱)。与此对应, 冬季 500 hPa 高度场主要表现为在亚欧中高纬地区/北冰洋区域反气旋式环流的加强和东亚大槽的加深 (图 4b)。这一结果也印证了中国学者 (管成功和孙照渤, 2002; 陈佩燕等, 2001) 所得出的结论。Lau et al. (2006) 的数值试验结果进一步证实, 热带印度洋 SSTA 的确能够强迫出类似于图 4b 的东亚大槽异常。此外, 秋季热带印度洋负 SSTA 与冬季负位相 NAO 相对应 (图 4b)。上述秋季热带印度洋 SSTA - 东亚冬季风 - NAO 间的关系和过去研究结果 (武炳义和黄荣辉, 1999; 李东辉等, 2006) 相吻合。

#### 4.3 500 hPa PAA 环流型

选取 500 hPa PAA 环流型指数  $I_{PAA}$  (标准化) 的绝对值大于等于 0.7 为异常年份, 正异常年 8 年 (1963、1967、1968、1973、1975、1977、1980、1982 年), 负异常年 8 年 (1961、1972、1974、1978、1991、1992、1993、1997 年), 同样进行合成分析。

由图 5a 可见, 在  $I_{PAA}$  正异常年份, 冬季海平面气压场主要表现为西伯利亚高压的大范围加强和扩张。与此对应, 冬季 500 hPa 高度场上乌拉尔山及

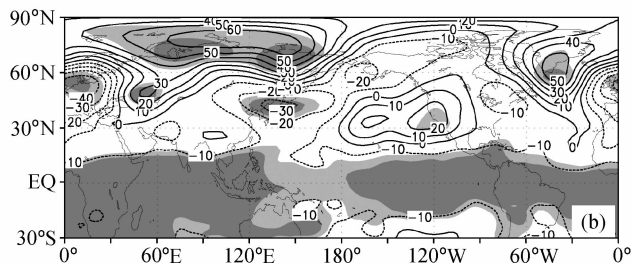
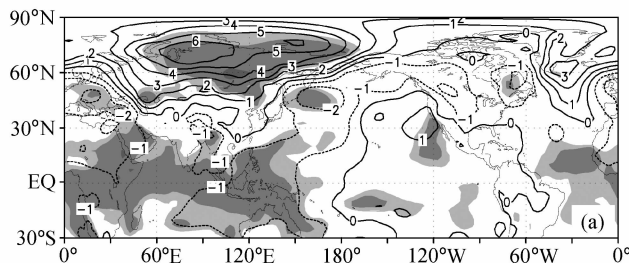


图 3 与前秋黑潮区正和负 SST 异常所对应的冬季 (a) 海平面气压场 (单位: hPa) 以及 (b) 500 hPa 位势高度场 (单位: gpm) 之间合成差异。阴影同图 2

Fig. 3 Composite differences of winter (a) sea level pressure (hPa) and (b) 500-hPa geopotential height (gpm) based on the positive and negative SST anomalies in the Kuroshio and its extension region in the preceding Sep–Oct. The shading convention is the same as in Fig. 2

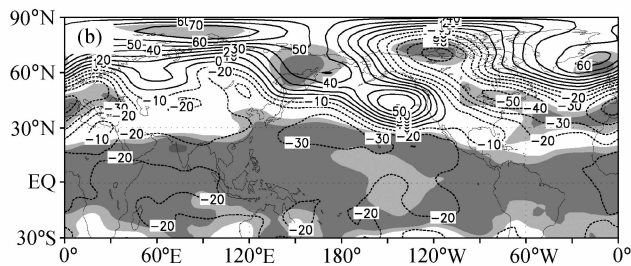
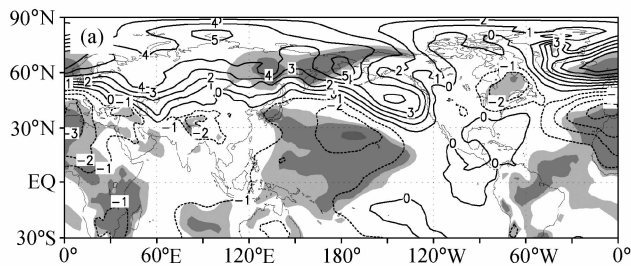


图 4 同图 3, 但为前秋热带西印度洋负和正 SST 异常年的差异

Fig. 4 Same as in Fig. 3, but for the differences between negative and positive SST anomalies years (negative minus positive) in the tropical western Indian Ocean

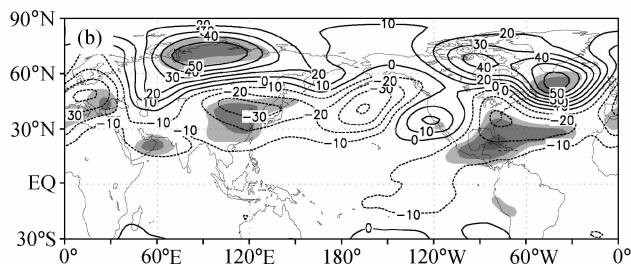
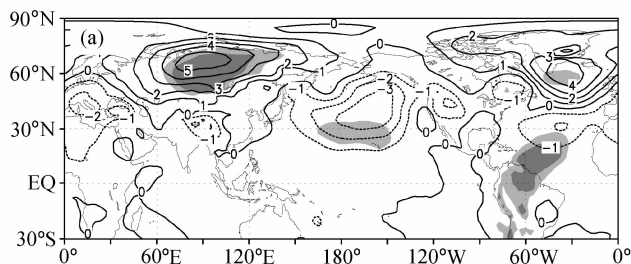


图 5 与 10 月份 PAA 环流型指数正和负异常所对应的冬季 (a) 海平面气压场 (单位: hPa) 以及 (b) 500 hPa 位势高度场 (单位: gpm) 之间合成差异。阴影同图 2

Fig. 5 Composite differences of winter (a) sea level pressure (hPa) and (b) 500-hPa geopotential height (gpm) based on the positive and negative PAA pattern indices in Oct. The shading convention is the same as in Fig. 2

以东、西伯利亚北部为正异常, 同时东亚大槽西部加深 (图 5b)。这之前讨论的 500 hPa 高度异常的逐月演变特征是一致的。在大西洋/欧洲一侧, 500 hPa 环流异常显出负位相 NAO 的特征。但与图 4b 相比, 它与 NAO 北部活动中心 (冰岛/格陵兰附近) 的对应关系变得更加显著。可见, 10 月 500 hPa PAA 环流型指数的正 (负) 异常与随后的东亚冬季风活动的强 (弱) 存在很好的对应关系。

## 5 东亚冬季风强度的统计预测方法

### 5.1 预测因子的挑选

由表 2 可见, 东亚冬季风指数与诸多因子存在显著相关。本文按照以下两个约束条件进行预测因子的筛选: (1) 利用尽量少的因子进行预测; (2) 因子间尽量不存在显著的线性关系。

黑潮区 SST 异常与热带西印度洋 SST、Niño3 区 SST 以及  $I_{PAA}$  均不存在显著线性关系 (表 2), 因此可以作为一个预测因子。 $I_{PAA}$  与东亚冬季风指数的相关最高, 并与 10 月份冰岛和英国附近的 SST 偶极子指数  $D_E$  ( $\alpha=0.05$ ) 及 9~10 月巴伦支海海温异常 ( $\alpha=0.1$ ) 存在显著相关 (表 2)。因此,

它不仅代表与东亚冬季风活动密切相关的 10 月份北半球环流状态, 而且携带着上述海区的秋季 SST 异常强迫信号, 我们可以将其作为一个重要预测因子。另外, 热带西印度洋 SST 异常也与东亚冬季风指数存在显著相关, 其相关系数比 Niño3 区 SST 与东亚冬季风指数间的相关系数高, 尽管东亚冬季风对 ENSO 事件有较好的响应 (何溪澄等, 2008), 因此可以将其作为另一个预测因子。从表 2 可知, 这 3 个预测因子间的相关系数均未通过 0.1 的显著性检验, 相互间基本不存在线性关系, 因此可以在同一个预测方法得以应用。

### 5.2 预测因子的准确率分析

为建立东亚冬季风强度预测方法, 首先对前兆因子的拟合率及试报准确率进行了分析。1961~2000 年标准化后的各因子拟合率 (图 6a): 因子 1 (500 hPa PAA 环流型指数) 为 65.00%, 因子 2 (黑潮及其延伸区海温) 为 70.00%, 因子 3 (热带西印度洋海温) 为 62.50%。各因子的符号拟合率在 62.5%~70.0%, 效果基本令人满意。

为检验所选因子的实际应用效果, 对各因子在 2001~2007 年试报情况进行了分析 (表 3)。东亚

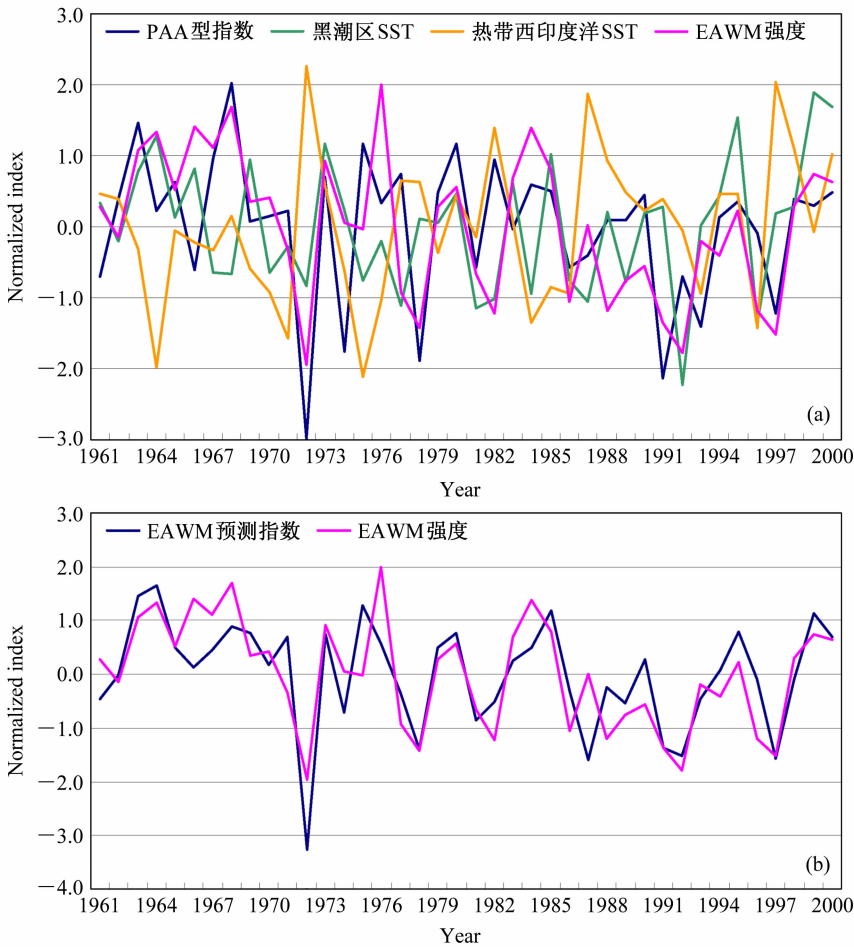


图 6 冬季风指数与三个预测因子指数 (a) 及冬季风预测指数 (b) 的对比 (标准化)  
Fig. 6 Normalized indices of (a) three independent factors and (b) the observed and predicted EAWM

表 3 基于三个前兆因子的东亚冬季风强度试报结果 (2001 ~ 2007 年)

Table 3 Test for predicting the EAWM intensity (2001 - 2007) on the basis of the three precursory factors

|        | 试报结果   |        |        | 冬季风指数     |
|--------|--------|--------|--------|-----------|
|        | 因子 1   | 因子 2   | 因子 3   |           |
| 2001 年 | 强      | 弱      | 弱      | -0.43 (弱) |
| 2002 年 | 弱      | 强      | 弱      | -0.73 (弱) |
| 2003 年 | 弱      | 强      | 弱      | -0.74 (弱) |
| 2004 年 | 弱      | 强      | 弱      | 1.64 (强)  |
| 2005 年 | 强      | 强      | 弱      | 2.12 (强)  |
| 2006 年 | 弱      | 弱      | 弱      | -1.56 (弱) |
| 2007 年 | 强      | 强      | 弱      | 0.60 (强)  |
| 试报准确率  | 71.43% | 71.43% | 57.14% |           |

冬季风强度的实况由表 3 中的冬季风指数给出。3 项因子的平均试报准确率为 66.67%，因子的试报

效果也令人接受，可用于建立东亚冬季风强度预测方法。

5.3 预测方法

依据前面的关键区分析及因子影响物理过程的分析，选取前述 3 项预测因子，构造了一个冬季风预测指数： $I_f = [(r_1 I_1 + r_2 I_2 + r_3 I_3) / (r_1 + r_2 + r_3)]^*$ ，以此作为东亚冬季风强度的预测方法，其中， $I_1$ 、 $I_2$ 、 $I_3$ 和  $r_1$ 、 $r_2$ 、 $r_3$  分别为三个预测因子指数 (标准化) 和与东亚冬季风指数的相关系数，“\*”表示标准化。

为检验预测方法效果，这里确定了评分办法。若  $I_f$  与东亚冬季风强度符号一致，计为 100 分，反之为 0 分；统计检验时段的平均得分并以百分率表示拟合 (或试报) 准确率。

对预测方法在 1961~2000 年的拟合分析可知：  
(1) 东亚冬季风显著异常年份 (指数绝对值大于等

于 1) 的拟合准确率为 100%，16 年无一失误；(2) 东亚冬季风强度偏强或偏弱年份（指数绝对值大于等于 0.5）拟合准确率为 96.30%，27 年中仅 1990 年 1 年拟合失误，实况为 -0.56，预测指数为 0.04；(3) 对整个 40 年而言，两者的相关系数达到 0.76，通过 0.001 的显著性检验，只有 8 年出现反号，拟合准确率为 80%。可见，预测方法的拟合效果较好，反映了东亚冬季风的年际变化趋势（图 6b）。

为检验预测方法的应用效果，这里对 2001~2007 年的试报情况（表 4）进行了分析。分析可知，试报的 7 年中，有 5 年正确，2003、2004 年反号，平均试报准确率为 71.43%；偏强或偏弱年份试报准确率为 66.67%；3 个异常年份（2004、2005、2006 年）有 1 年试报失误。可见预测方法的总体试报效果比较好，可用于东亚冬季风强弱的定性预测。

我们也注意到热带西印度洋海温这一因子，其拟合率和试报准确率相对较低。分析可知，这是一个年代际变化很强的因子，它更多地影响着东亚冬季风的年代际变化，两者相关系数达 -0.81 ( $\alpha=0.001$ )；PAA 环流型指数和黑潮区海温这两个因子在体现东亚冬季风的年际变化方面表现较好，当然也部分体现了其年代际变化。但缺少了热带西印度洋海温因子，预测方法在对东亚冬季风年代际变化方面体现不够充分，会造成拟合率降低。

为更客观地考查该方法的普适性，我们在不同两个时段（1961~1990 年和 1971~2000 年）计算了东亚冬季风强度与 3 个预测因子间的相关系数，其结果两个时段的相关关系基本一致。若在这两个

表 4 东亚冬季风强度预测指数的试报结果（2001~2007 年）

Table 4 Test for the predicted EAWM index in predicting the EAWM intensity (2001 - 2007)

|        | 冬季风预测指数   | 冬季风指数     |
|--------|-----------|-----------|
| 2001 年 | -0.70 (弱) | -0.43 (弱) |
| 2002 年 | -0.60 (弱) | -0.73 (弱) |
| 2003 年 | 0.33 (强)  | -0.74 (弱) |
| 2004 年 | -0.69 (弱) | 1.64 (强)  |
| 2005 年 | 1.83 (强)  | 2.12 (强)  |
| 2006 年 | -1.08 (弱) | -1.56 (弱) |
| 2007 年 | 0.30 (强)  | 0.60 (强)  |
| 试报准确率  | 71.43%    |           |

时段分别建立类似的预测方法，则其拟合率分别为 80% 和 76.67%，试报准确率均为 71.43%，总体效果与现在的预测方法基本一致。

需要说明的是，本文是在东亚冬季风强度符号一致性的基础上对预测方法的准确率做了检验，因此，预测指数仅作为强度趋势定性的依据，还不等于实际的冬季风强度。

6 总结与讨论

通过对前期海气系统关键区预测信号的分析，得出以下主要结论：(1) 发现了预测东亚冬季风强度的一个前期环流信号，即 10 月 500 hPa PAA 环流型指数；(2) 确定了 9~10 月黑潮及其延伸区、热带西印度洋海温异常是影响东亚冬季风活动的主要外强迫信号，这两个关键区 SST 异常由秋至冬具有较好的持续性；(3) 揭示了三个前期信号与东亚冬季风强度间的可能物理链接，如西伯利亚高压、东亚大槽和 NAO 等的时滞变化；(4) 建立了基于 3 个前期信号的东亚冬季风强度统计预测方法，其拟合率和试报准确率分别可达 80.00% 和 71.43%，因此可以将其作为东亚冬季风强度的定性预测方法。

选取 10 月附近的因子进行东亚冬季风强弱的预测，主要考虑以下两点：一方面 10 月是距冬季最近的预测月份（因 11 月难以满足预测时效），相关分析显示这一时段各关键区信号也较为显著（包括 9~10 月）；另一方面是因为 10 月是东亚和北美大气环流季节突变的关键月份（叶笃正等，1958），各关键区海气系统异常变化特征及强弱势必会对冬季环流特征产生重要影响，这一点在本文的分析中也有明显体现。

对于东亚冬季风强度预测而言，如果大气环流调整的时段在不同年份差异较大，可能会有一定的强信号损失。由于不确定（或不可知）的原因，如果 10 月份之后的大气环流发生剧烈变化，它对东亚冬季风强度的预测可能带来影响。本文的预测方法与 11 月份的环流异常联系起来使用效果可能会更好。同理，如果 10 月份之后的关键区 SST 发生剧烈变化，它也会对东亚冬季风强度的预测带来影响。

致谢：感谢两位匿名审稿人对原稿的建设性修改意见。

## 参考文献 (References)

- 布和朝鲁, 纪立人. 1999. 东亚冬季风活动异常与热带太平洋海温异常 [J]. 科学通报, 44 (3): 252–259. Bueh Cholaw, Ji Liren. 1999. Eastern Asian winter monsoon activity anomaly and sea surface temperature anomaly in the tropical Pacific [J]. Chinese Science Bulletin (in Chinese), 44 (3): 252–259.
- 陈芳丽, 黎伟标. 2009. 北半球大气遥相关型冬夏差异及其与温度场关系的探讨 [J]. 大气科学, 33 (3): 513–523. Chen Fangli, Li Weibiao. 2009. Difference of the atmospheric teleconnection patterns between winter and summer over the Northern Hemisphere and its relation with the air temperature fields [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 33 (3): 513–523.
- 陈海山, 孙照渤, 倪东鸿. 2002a. Niño C 区秋季海温异常对东亚冬季大气环流的影响 [J]. 热带气象学报, 18 (2): 54–62. Chen Haishan, Sun Zhaobo, Ni Donghong. 2002a. Possible impacts of Niño C SSTA on winter atmospheric general circulation over East Asia [J]. Journal of Tropical Meteorology (in Chinese), 18 (2): 54–62.
- 陈海山, 孙照渤, 倪东鸿, 等. 2002b. 东亚冬季风对秋、冬季 SSTA 响应的数值试验 [J]. 南京气象学院学报, 25 (6): 721–730. Chen Haishan, Sun Zhaobo, Ni Donghong, et al. 2002b. Numerical experiments on the responses of East Asian winter monsoon to autumn and winter SSTA [J]. Journal of Nanjing Institute of Meteorology (in Chinese), 25 (6): 721–730.
- 陈隽, 孙淑清. 1999. 东亚冬季风异常与全球大气环流变化 I. 强弱冬季风影响的对比研究 [J]. 大气科学, 23 (1): 101–111. Chen Jun, Sun Shuqing. 1999. Eastern Asian winter monsoon anomaly and variation of global circulation. Part I: A comparison study on strong and weak winter monsoon [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 23 (1): 101–111.
- 陈佩燕, 倪允琪, 殷永红. 2001. 近 50 年来全球海温异常对我国东部地区冬季温度异常影响的诊断研究 [J]. 热带气象学报, 17 (4): 371–380. Chen Peiyan, Ni Yunqi, Yin Yonghong. 2001. Diagnostic study on the impact of the global sea surface temperature anomalies on the winter temperature anomalies in Eastern China in past 50 years [J]. Journal of Tropical Meteorology (in Chinese), 17 (4): 371–380.
- 管成功, 孙照渤. 2002. 秋季区域海冰面积异常与冬季大气环流及东亚区域气候的关系 [J]. 南京气象学院学报, 25 (1): 14–20. Guan Chenggong, Sun Zhaobo. 2002. Relationship of East Siberian autumn sea ice anomaly with winter atmospheric circulation and East Asia climate [J]. Journal of Nanjing Institute of Meteorology (in Chinese), 25 (1): 14–20.
- 郭其蕴. 1994. 东亚冬季风的变化与中国气温异常的关系 [J]. 应用气象学报, 5 (2): 218–224. Guo Qiyun. 1994. Relationship between the variations of East Asian winter monsoon and temperature anomalies in China [J]. Quarterly Journal of Applied Meteorology (in Chinese), 5 (2): 218–224.
- 何溪澄, 丁一汇, 何金海. 2008. 东亚冬季风对 ENSO 事件的响应特征 [J]. 大气科学, 32 (2): 335–344. He Xicheng, Ding Yihui, He Jinhai. 2008. Response characteristics of the East Asian winter monsoon to ENSO events [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 32 (2): 335–344.
- Ji Liren, Sun Shuqing, Arpe K, et al. 1997. Model study on the interannual variability of Asian winter monsoon and its influence [J]. Advances in Atmospheric Sciences, 14 (1): 1–22.
- 纪立人, 布和朝鲁, 孙淑清. 1998. EAWM 流型域——一种与东亚冬季风异常相联系的海-气耦合流型域 [J]. 大气科学, 22 (4): 491–502. Ji Liren, Bueh Cholaw, Sun Shuqing. 1998. EAWM regime—An ocean-atmosphere coupled regime related to East Asian winter monsoon activity [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (Scientia Atmospherica Sinica) (in Chinese), 22 (4): 491–502.
- Lau N C, Leetmaa A, Nath M J. 2006. Attribution of atmospheric variances in the 1997–2003 period to SST anomalies in the Pacific and Indian Ocean basins [J]. J. Climate, 19: 3607–3628.
- 李崇银. 1992. 东亚冬季风异常与 ENSO [M]// 李崇银. 气候变化若干问题研究. 北京: 科学出版社, 87–97. Li Chongyin. 1992. Eastern Asian winter monsoon anomaly and ENSO [M]// Li Chongyin. The Study on Some Problems of the Climate Change (in Chinese). Beijing: Science Press, 87–97.
- 李东辉, 谭言科, 张瑰, 等. 2006. 东亚冬夏季风对热带印度洋秋季海温异常的响应 [J]. 热带海洋学报, 25 (4): 6–13. Li Donghui, Tan Yanke, Zhang Gui, et al. 2006. Responses of East Asian winter and summer monsoons to autumn sea surface temperature anomalies in tropical Indian Ocean [J]. Journal of Tropical Oceanography (in Chinese), 25 (4): 6–13.
- 李忠贤, 孙照渤. 2004. 秋季黑潮海温与东亚冬季风的相关联系 [J]. 南京气象学院学报, 27 (2): 145–152. Li Zhongxian, Sun Zhaobo. 2004. Relationship between autumn Kuroshio SST and East Asian winter monsoon [J]. Journal of Nanjing Institute of Meteorology (in Chinese), 27 (2): 145–152.
- 梁巧倩, 简茂球, 罗会邦. 2004. 东亚冬季风与海温在年际尺度上的耦合关系分析 [J]. 热带海洋学报, 23 (2): 19–27. Liang Qiaoqian, Jian Maoqiu, Luo Huibang. 2004. Analysis of coupling relationship between East Asian winter monsoon and SST in interannual scale [J]. Journal of Tropical Oceanography (in Chinese), 23 (2): 19–27.
- 刘实. 2007. 确定东亚冬季风强度指数的一种方法探讨 [J]. 地理科学, 27 (增刊): 10–18. Liu Shi. 2007. A method for determining intensity index of East Asian winter monsoon [J]. Scientia Geographica Sinica (in Chinese), 27 (Suppl.): 10–18.
- 龙振夏, 李崇银. 1999. ENSO 对其后东亚季风活动影响的 GCM 模拟研究 [J]. 气象学报, 57 (6): 651–661. Long Zhenxia, Li Chongyin. 1999. Numerical simulation of the ENSO influences on East Asian monsoon activities afterwards [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 57 (6): 651–661.

- 施能. 1996. 近 40 年东亚冬季风强度的多时间尺度变化特征及其与气候的关系 [J]. 应用气象学报, 7 (2): 175–182. Shi Neng. 1996. Features of the East Asian winter monsoon intensity on multiple time scale in recent 40 years and their relation to climate [J]. Quarterly Journal of Applied Meteorology (in Chinese), 7 (2): 175–182.
- 孙淑清, 孙柏民. 1995. 东亚冬季风环流异常与中国江淮流域夏季旱涝天气的关系 [J]. 气象学报, 53 (4): 440–450. Sun Shuqing, Sun Bomin. 1995. The relationship between the anomalous winter monsoon circulation over East Asia and summer drought/flooding in the Yangtze and Huaihe River valley [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 53 (4): 440–450.
- Wallace J M, Gutzler D S. 1981. Teleconnections in the geopotential height field during the Northern Hemisphere winter [J]. Mon. Wea. Rev., 109: 784–812.
- 王会军, 姜大膀. 2004. 一个新的东亚冬季风强度指数及其强弱变化之大气环流场差异 [J]. 第四纪研究, 24 (1): 19–27. Wang Huijun, Jiang Dabang. 2004. A new East Asian winter monsoon intensity index and atmospheric circulation comparison between strong and weak composite [J]. Quaternary Sciences (in Chinese), 24 (1): 19–27.
- Watanabe M. 2004. Asian jet waveguide and a downstream extension of the North Atlantic Oscillation [J]. J. Climate, 17: 4674–4691.
- 武炳义, 黄荣辉, 高登义. 1999. 冬季北极喀拉海、巴伦支海海冰面积变化对东亚冬季风的影响 [J]. 大气科学, 23 (3): 267–275. Wu Bingyi, Huang Ronghui, Gao Dengyi. 1999. The impact of variation of sea-ice extent in the Kara Sea and the Barents Seas in winter on the winter monsoon over East Asia [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 23 (3): 267–275.
- 武炳义, 黄荣辉. 1999. 冬季北大西洋涛动极端异常变化与东亚冬季风 [J]. 大气科学, 23 (6): 641–651. Wu Bingyi, Huang Ronghui. 1999. Effects of the extremes in the North Atlantic Oscillation on East Asia winter monsoon [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 23 (6): 641–651.
- 叶笃正, 陶诗言, 李麦村. 1958. 在六月和十月大气环流的突变现象 [J]. 气象学报, 29 (4): 249–263. Yeh Tucheng, Dao Shihyen, Li Meitsun. 1958. The abrupt change of circulation over Northern Hemisphere during June and October [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 29 (4): 249–263.
- 曾刚, 孙照渤, 闵锦忠. 2001. 冬季戴维斯海峡的海冰面积年际变化与东亚气候关系研究 [J]. 南京气象学院学报, 24 (4): 476–482. Zeng Gang, Sun Zhaobo, Min Jinzhong. 2001. Relationship between interannual variation of Davis Straits winter sea ice extent and East Asia climate [J]. Journal of Nanjing Institute of Meteorology (in Chinese), 24 (4): 476–482.