

顾聪,朱伟军,周星妍. 2015. BCC\_CSM 气候模式对风暴轴的模拟能力评估. 气象,41(3):304-310.

# BCC\_CSM 气候模式对风暴轴的模拟能力评估<sup>\*</sup>

顾 聪 朱伟军 周星妍

南京信息工程大学气象灾害省部共建教育部重点实验室,南京 210044

**提 要:** 本文利用 NCEP/NCAR 再分析资料从不同角度评估了 BCC\_CSM 气候模式对风暴轴的模拟能力。对于气候态的模拟,BCC\_CSM 气候模式可以准确地模拟出各季节风暴轴主体的强度与位置。对于时空分布的年际变化的模拟,BCC\_CSM 模拟的冬季风暴轴 EOF 分解的第一与第二模态特征向量场同 NCEP 再分析资料对应的特征向量场结构类似,前两个模态分别为全区一致及南北反向型,第三模态则有所不同。对于年内逐月的风暴轴强度和纬度指数变化,BCC\_CSM 有着较好的模拟效果,可以模拟出太平洋风暴轴独有的“深冬抑制”现象,但对经度指数变化的模拟则与再分析资料有着较大差异。对于风暴轴向极移动情况的模拟,太平洋地区的模拟结果没有表现出向极移动,而大西洋地区则模拟出 1970 年以后风暴轴位置向极地偏移的趋势。

**关键词:** 风暴轴, BCC\_CSM1.1, 气候模式, EOF

**中图分类号:** P456                      **文献标志码:** A                      **doi:** 10.7519/j.issn.1000-0526.2015.03.005

## Evaluation on Simulation Capability of Storm Track with BCC\_CSM Model

GU Cong ZHU Weijun ZHOU Xingyan

Key Laboratory of Meteorological Disaster of Ministry of Education,  
Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044

**Abstract:** Using NCEP/NCAR reanalysis data this paper assessed the simulation capability of storm track by BCC\_CSM. The results show that for the simulation of climate state the BCC\_CSM model can simulate the location and intensity of the storm track in different seasons. The EOF results show that, regarding the simulation of the interannual changes of spatial and temporal distribution, eigenvectors of the BCC\_CSM's first mode and second mode are similar with that corresponding to NCEP reanalysis data. The first two modes are both the same in the whole region and north-south reverse, but the third mode is different. For storm track strength and latitude index of each month, the BCC\_CSM model has a nice simulation result and it can simulate the Midwinter Suppression of the Pacific storm track, and ineffective analog longitude index change. Simulations for moving trends of the storm track toward the polar region in the Pacific are not significant, while in the Atlantic Region the trend of storm axis position is simulated being toward the polar region after 1970.

**Key words:** storm track, BCC\_CSM1.1, climate model, EOF

<sup>\*</sup> 公益性行业(气象)科研专项(GYHY201306028)、国家自然科学基金项目(41075070)和国家气候中心气候模式发展专项共同资助  
2013 年 11 月 25 日收稿; 2014 年 9 月 18 日收修定稿  
第一作者:顾聪,主要从事短期气候预测、气候变化方面研究. Email:gucong@nuist.edu.cn

## 引言

北半球天气尺度(2.5~6 d)瞬变扰动方差集中在中纬度北太平洋和北大西洋上空两个纬向拉长的区域,这两个区域被定义为风暴轴。中纬度风暴轴位于气旋与反气旋以及斜压波最频繁出现的地区,通常可以在地面观察到由这些系统带来强风以及有关的天气现象。同时风暴轴区域还有强烈的动量与热量的向极输送,这使得风暴轴在大气环流维持过程中起到了关键的作用。风暴轴是大气环流由纬向对称环流观点转向纬向非对称环流观点的理论研究中最重要发现,具有非常重要的科学意义和研究价值。

世界气候研究计划(WCRP)组织了耦合模式比较计划(CMIP),并在2008年开展了第五阶段试验计划(CMIP5)。由北京气候中心(BCC)发展的气候模式系统(BCC\_CSM)参与到了这次CMIP5试验之中(辛晓歌等,2012;高峰等,2012;Wu et al.,2013),气候模式BCC\_CSM1.1采用的大气模式分量为BCC-AGCM2.1,分辨率为T42,垂直方向为26层。采用了BCC-AVIM、MOM4和SIS的陆面、海洋、海冰分量模式。有关BCC\_CSM1.1模式的具体介绍可以参见Xin等(2013)的介绍。

石彦军等(2012)曾就BCC\_CSM模式对于中国区域500 hPa气候要素的模拟能力进行评估,结果表明BCC\_CSM模式对于中国区域500 hPa位势高度场、温度场、相对湿度场、风场等气象要素的模拟效果很好。陈湘雅(2008)曾分析过BCC\_CSM模式对东亚夏季风年际变化的模拟能力,表明BCC\_CSM模式可以较好地模拟东亚夏季环流场。Wu等(2013)检验了BCC\_CSM对工业革命后至今的全球碳排放的模拟情况,模式准确地模拟了全球碳排放量的变化情况。

同时,也有一些学者就CMIP所得结果对风暴轴进行了模拟能力评估并对21世纪风暴轴的变化情况进行了预测。Yin(2005)通过分析CMIP3所得结果,认为直到21世纪末期,风暴轴将表现出持续的向极移动,并且在上层大气中会有涡度动能的增加。Chang等(2013)利用ERA-Interim数据分析了CMIP3所得结果对风暴轴的模拟情况,认为模式可以较好地模拟出气候态的情况,但有个别模式存在一定的偏差。

以上针对BCC\_CSM模拟能力的研究多从年际变化时间尺度的角度考察了BCC\_CSM模式对于一些气象要素的模拟能力,还未见对于天气尺度系统模拟能力的评估和研究。此外针对CMIP5所得结果评估对风暴轴模拟情况的研究还较少。本文将就BCC\_CSM模式对风暴轴的模拟能力进行深入地评估,同时可以为模式的进一步改善提供科学依据,有利于提高短期气候预测的技巧。

## 1 资料及方法

NCEP/NCAR再分析资料是目前时间序列最长的资料,具有较强的可靠性。傅刚等(2009)曾利用该资料研究了北太平洋风暴轴的三维空间结构,发现了“双风暴轴”现象的存在。劳汉琼等(2006)利用NCEP/NCAR再分析资料分析了冬季格陵兰以东区域海冰异常对北大西洋风暴轴的影响。何冬燕等(2009)在研究冬季鄂霍次克海海冰对北太平洋风暴轴年际变化的影响时也采用了该资料。所以本文将此套资料作为对比数据,对BCC\_CSM的模拟能力进行评估。

本文采用1950年1月1日至2011年12月31日的NCEP/NCAR( $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$ )逐日再分析500 hPa高度场作为对比资料。评估资料为BCC\_CSM1.1气候模式在CMIP5计划中提交的historical试验中的1950年1月1日至2011年12月31日的逐日500 hPa高度场资料,该试验是在工业革命前控制试验(piControl)的基础上选取初始场进行积分,积分时间为1850—2012年。由于BCC\_CSM1.1气候模式的输出结果是 $2.815^{\circ} \times 2.815^{\circ}$ ,为与NCEP/NCAR再分析资料保持一致,本文采用线性插值法得到 $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$ 的格点资料以便分析。

对各资料的500 hPa高度场采用Murakami(1979)介绍的带通滤波方法,得到2.5~8 d的高度场 $h'$ 并计算各月的位势高度滤波方差,以此来表征风暴轴。李莹(2010)定义了一种新的风暴轴指数,采用了设定区域阈值的方法。本文采取了动态阈值的方法来获得各月的合理阈值,其中太平洋区域风暴的范围取( $30^{\circ} \sim 60^{\circ} \text{N}$ ,  $120^{\circ} \text{E} \sim 120^{\circ} \text{W}$ ),大西洋区域风暴轴的范围取( $30^{\circ} \sim 65^{\circ} \text{N}$ ,  $80^{\circ} \text{W} \sim 0^{\circ}$ )。取范围内所有格点位势高度滤波方差的中间值为阈值,这样可以保证每次所取的格点数目相同,且不失代

表性。大于这个阈值的所有格点的平均位势高度滤波方差值,记为风暴轴强度指数  $GII$ 。大于这个阈值的所有格点的平均位置则记为经度指数和纬度指数  $GXI$ 、 $GYI$ 。这样可以用一个相同的准则来表征任意区域和任意时间的风暴轴的指数。

2 BCC\_CSM1.1 气候模式对风暴轴的模拟评估

本节从多年气候态、时空分布的年际变化、年内变化、向极移动等几个方面评估了 BCC\_CSM1.1 气候模式对风暴轴的模拟能力。

2.1 风暴轴气候态模拟评估

图 1 给出了分别由 BCC\_CSM 模式和 NCEP 再分析资料计算得到的 1950—2010 年北半球四季风暴轴的平均位置和强度,我们可以看出在冬季, BCC\_CSM 不仅能够模拟出太平洋和大西洋的两个

风暴轴的主体,并且强度中心的位置也基本一致,但 BCC\_CSM 并没有模拟出位于西伯利亚上的一个高值区,此外 BCC\_CSM 在北美大陆上的风暴轴强度偏弱,而太平洋地区风暴轴的强度偏弱。对于春季风暴轴模拟, BCC\_CSM 模式与 NCEP 再分析资料计算得出的风暴轴的主体区域基本一致,而对于西伯利亚地区的高值区, BCC\_CSM 模拟出了基本位置不过强度仍偏小。对于夏季的风暴轴模拟, BCC\_CSM 模拟出的强度相对较弱,不过整体的位置仍与 NCEP 再分析资料接近。秋季的情况同春季、冬季类似,位于两个大洋上的风暴轴气候态模拟情况不论是位置还是强度都有较好的一致性,对于西伯利亚地区的高值区, BCC\_CSM 模拟出的强度仍是偏弱的,而在北美大陆上模拟出的强度依然偏大。

综上所述,从气候态的情况来看, BCC\_CSM 可以较好地模拟出北半球两个大洋上的风暴轴的强度和位置。对于西伯利亚地区的风暴轴强度模拟偏弱,而在北美大陆上的风暴轴强度则偏强。

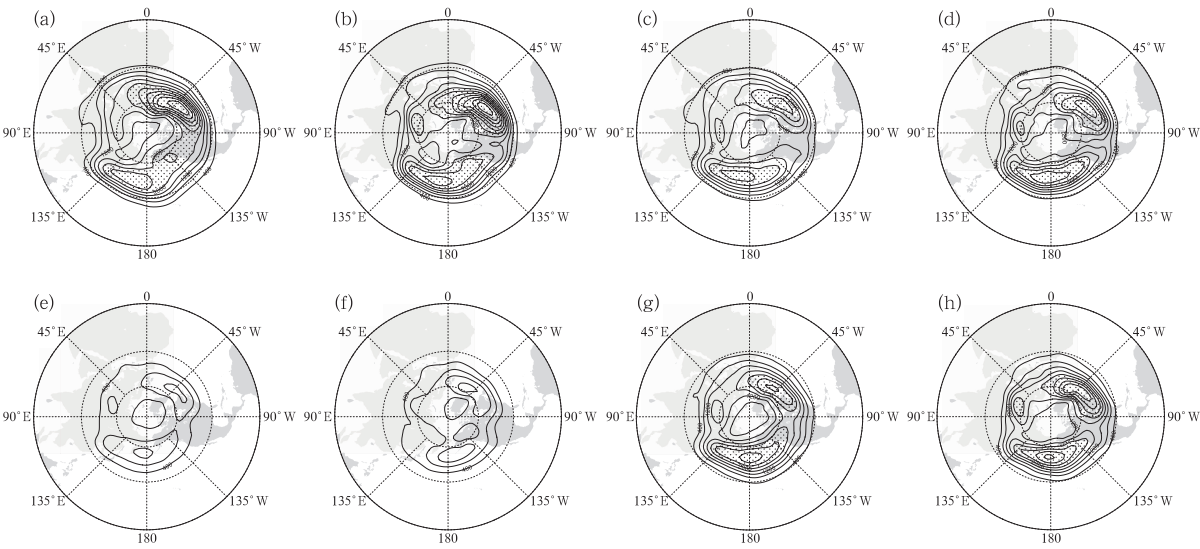


图 1 BCC\_CSM 模拟的 1950—2010 年北半球风暴轴冬(a)、春(c)、夏(e)、秋(g)四季分布及 NCEP 再分析资料的冬(b)、春(d)、夏(f)、秋(h)四季分布 (阴影部分位势高度方差大于 2000 dagpm<sup>2</sup>)

Fig. 1 The storm tracks in the Northern Hemisphere during 1950—2010 in winter (a), spring (c), summer (e) and autumn (g) simulated by BCC\_CSM and in winter (b), spring (d), summer (f) and autumn (h) calculated by NCEP reanalysis data (The shaded area means the geopotential height variance being larger than 2000 dagpm<sup>2</sup>)

2.2 时空分布年际变化模拟评估

对冬季北太平洋区域的风暴轴做 EOF 分析,其

中 BCC\_CSM 模式前 3 个模态的累计方差贡献分别为 38.453%、51.802%和 60.982%, NCEP 再分析资料前 3 个模态的累计方差贡献分别为 29.728%、

48.443%和 56.66%。由图 2、图 3 我们可以看出，  
对于 EOF 的第一模态特征向量(图 2a、图 3a),BCC

\_CSM 模式和 NCEP 再分析资料都表现为全区一致  
型,并且特征向量的正值中心都位于50°N、180°E

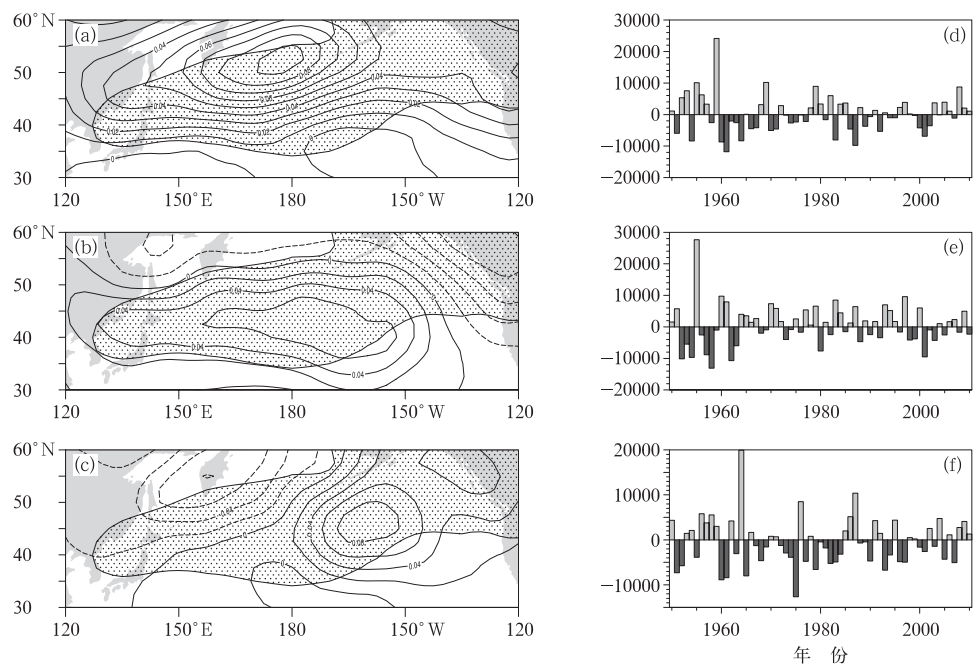


图 2  1950—2010 年冬季 BCC\_CSM 模拟太平洋风暴轴 EOF  
(a, b, c)前三模态的特征向量,(d, e, f)对应的时间系数  
(阴影区为风暴轴气候态主体位置)

Fig. 2  The EOF of winter Pacific storm track during 1950—2010 simulated by BCC\_CSM  
(a, b, c) the first three eigenvectors, (d, e, f) the corresponding temporal coefficients  
(The shaded area is the main position of storm track)

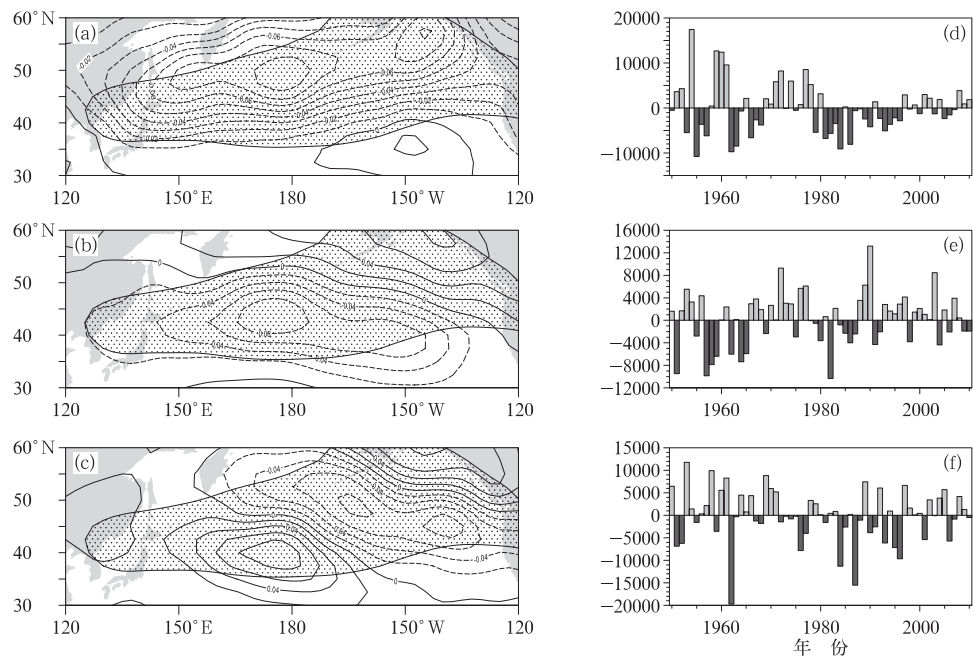


图 3  同图 2,但为 NCEP 再分析资料计算的 EOF 结果  
Fig. 3  Same as Fig. 2, but calculated by NCEP reanalysis data

附近。EOF 第二模态特征向量(图 2b、图 3b),BCC\_CSM 模式和 NCEP 再分析资料都表现为南北反向型并且 0 线位置在 50°N 附近。EOF 第三模态的特征向量,两者则有所不同。BCC\_CSM 模式的模拟结果为东西反向型,而 NCEP 再分析资料的结果则为从东北到西南方向的正一负一正形态。

综上所述,BCC\_CSM 模式与 NCEP 再分析资料计算出的风暴轴分别做 EOF 分析,前两个模态的特征向量形态一致。据此可认为 BCC\_CSM 模式可以较好地模拟出冬季北太平洋风暴轴的年际变化,其主要的时空变化型为全区一致变化和南北移动。大西洋地区风暴轴也有类似的结论,这里不再赘述。

2.3 风暴轴年内变化模拟评估

本小节计算了 1950—2011 年各月的风暴轴平均指数。包括太平洋地区和大西洋地区的风暴轴强度指数、经度指数和纬度指数。图 4a 给出了大西洋各月的风暴轴强度指数,BCC\_CSM 模式除 1 和 2

月外,其余各月的强度均小于 NCEP 再分析资料。图 4b 中给出了太平洋各月的风暴轴强度指数,BCC\_CSM 模式在 7—10 月的强度要大于 NCEP 再分析资料,其余各月均相对较小。并且,BCC\_CSM 模式成功模拟出了太平洋风暴轴独有的“深冬抑制”现象。从图 5a、5b 中我们可以看出,BCC\_CSM 模式各月模拟出的大西洋风暴轴位置均偏东。而在太平洋地区则相对偏西,尤其是 5—9 月更为明显。由图 5c、5d,对于风暴轴的纬度指数,大西洋地区 BCC\_CSM 模拟的各月结果都相对偏南,太平洋地区 BCC\_CSM 的模拟结果同 NCEP 再分析资料结果基本一致。

总体而言,BCC\_CSM 模拟的结果还是与 NCEP 再分析资料有很好的一致性的。大西洋和太平洋风暴轴强度指数的相关系数分别为 0.977、0.971,经度指数的相关系数分别为-0.102、0.01,纬度指数的相关系数分别为 0.716、0.993。强度和纬度指数均通过了  $\alpha=0.01$  的显著性水平检验。经

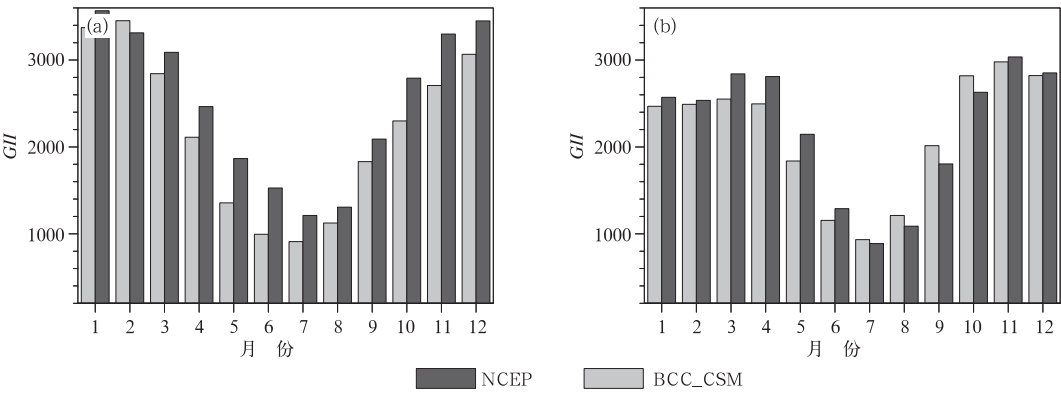


图 4 风暴轴各月强度指数 (a)大西洋强度,(b)太平洋强度  
Fig. 4 The intensity index of monthly storm tracks  
(a) the Atlantic *GII*, (b) the Pacific *GII*

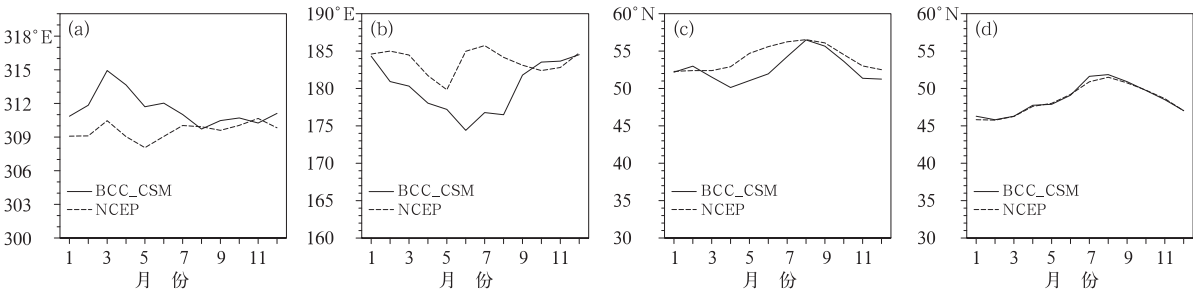


图 5 风暴轴各月位置指数  
(a)大西洋经度,(b)太平洋经度,(c)大西洋纬度,(d)太平洋纬度  
Fig. 5 The location index of monthly storm tracks  
(a) Atlantic *GXI*, (b) Pacific *GXI*, (c) Atlantic *GYI*, (d) Pacific *GYI*



度指数的相关系数未通过显著性水平检验,则表明 BCC\_CSM 模拟的风暴轴东西位置变化情况与再分析资料有差异。

2.4 风暴轴向极移动模拟评估

近几十年来,不少研究都表明北半球风暴路径存在北移的变化趋势。其中,Mccabe 等(2001)认为 1970 年以后北半球冬季气旋频数在高纬度增加,而在中纬度明显减少,这意味着风暴轴有向极地偏移的趋势,而全球变暖很可能是造成温带气旋频数和强度变化的主要原因。不过张颖娴等(2012a; 2012b)也指出虽然不少研究者对整个北半球的温带气旋和风暴路径的研究都得到了活动区域北移、风暴轴北移、副热带向极地扩张的结论,但不能笼统地应用于所有北半球地区,个别地区可能会存在不

同的甚至相反的情况,如北太平洋地区。

图 6 给出了 1970—2010 逐年的冬季风暴轴纬度指数和趋势线,我们可以看出在太平洋地区,BCC\_CSM 模拟结果为向北移动  $0.001^{\circ} \cdot a^{-1}$ ,偏移趋势并不明显;而 NCEP 再分析资料则以  $0.013^{\circ} \cdot a^{-1}$  的趋势向南偏移,这与张颖娴等(2012)的研究结果一致。在大西洋地区,BCC\_CSM 模拟与 NCEP 再分析资料则都表现出了向北偏移的倾向,其中 BCC\_CSM 的倾向( $0.009^{\circ} \cdot a^{-1}$ )要弱于 NCEP 再分析资料( $0.018^{\circ} \cdot a^{-1}$ )。

由上述分析可以看出,BCC\_CSM 在大西洋地区可以模拟出风暴轴北移的趋势,不过相对 NCEP 再分析资料结果表现的较弱;在太平洋地区则没有模拟出风暴轴向极移动的趋势。

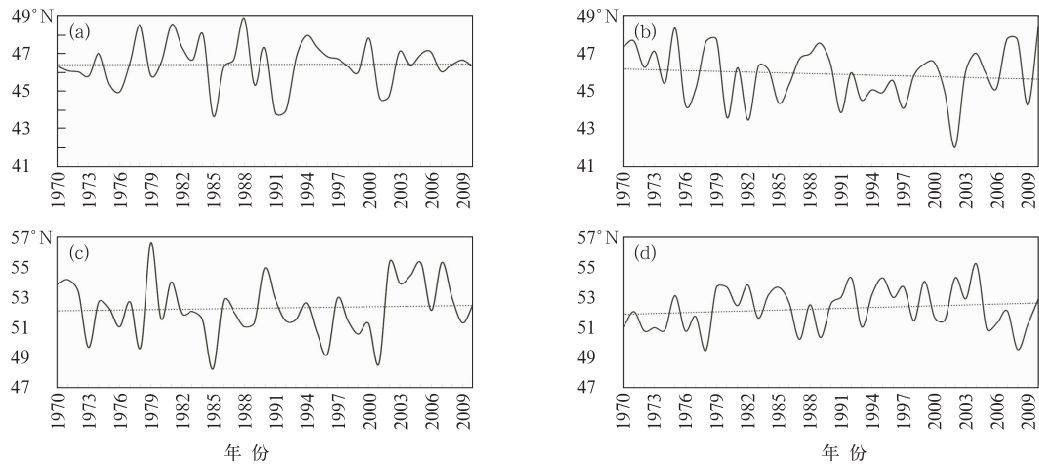


图 6 1950—2010 冬季风暴轴纬度指数  
(a)BCC\_CSM 太平洋, (b)NCEP 太平洋, (c) BCC\_CSM 大西洋, (d) NCEP 大西洋  
(虚线为趋势线)

Fig. 6 The GYI of winter storm tracks from 1950 to 2010  
(a) Pacific by BCC\_CSM, (b) Pacific by NCEP, (c) Atlantic by BCC\_CSM,  
(d) Atlantic by NCEP  
(Dashed line means the trend of index)

3 结论与讨论

本文通过气候态状况、时空分布的年际变化、强度和位置指数的年内变化、向极移动等几个方面评估 BCC\_CSM 模式对于风暴轴的模拟能力。结果表明,从 1950—2010 年的多年平均来看,BCC\_CSM 模式可以很好地模拟出两个大洋上四季的风暴轴的

位置和强度;模拟出的西伯利亚地区的风暴轴强度偏弱而在北美大陆地区的风暴轴强度偏强。EOF 分解的结果表明,BCC\_CSM 模拟的风暴轴的第一模态与第二模态的特征向量同 NCEP 再分析资料形态相同,均为全区一致及南北反向型,第三模态有所不同;据此可认为 BCC\_CSM 可以较好地模拟出冬季太平洋风暴轴的年际变化情况。通过分析各月的风暴轴强度指数和位置指数,可以看出对于各月

的风暴轴强度和纬度变化, BCC\_CSM 有着较好的模拟效果, 并且可以模拟出太平洋风暴轴独有的“深冬抑制”现象, 而对经度指数的变化则不能很好地模拟出来。最后讨论了对于风暴轴向极移动的模拟情况, 太平洋地区的向极移动趋势不明显, 而大西洋地区则可以模拟出 1970 年以后风暴轴位置向极地偏移的趋势。

综上所述, BCC\_CSM 对于风暴轴年际变化以及经度变化的模拟能力仍有不足之处。可能的原因是对于天气尺度波动的模拟能力仍不够强, 模拟出的气旋与反气旋过程次数和强度都小于 NCEP 再分析资料。同时可能是由模式的分辨率造成的, 采用高分辨率的模式或许可以改善这一问题。此外, 模式对流参数化方案和云辐射方案也可能对风暴轴模拟能力造成影响。

那么不同的辐射强迫对于未来风暴轴的强度以及位置有何影响? 以后的工作将就 BCC\_CSM 模拟出的 2006—2099 年的未来风暴轴的变化情况作进一步探讨。由于影响风暴轴变化的因素很多, 究竟是什么因素导致年际变化的模拟效果不佳, 这一点仍值得我们思考, 并从中找到进一步提高模式的模拟能力的方法。

# 参考文献

陈湘雅. 2008. 东亚夏季风年际变化及 BCC\_CSM 模拟分析. 南京: 南京信息工程大学气象灾害省部共建教育部重点实验室, 48-59.  
傅刚, 毕玮, 郭敬天. 2009. 北太平洋风暴轴的三维空间结构. 气象学报, 67(2): 189-200.  
高峰, 辛晓歌, 吴统文. 2012. BCC\_CSM1.1 对 10 年尺度全球及区域

温度的预测研究. 大气科学, 36(6): 1165-1179.  
何冬燕, 邓学良, 朱伟军. 2009. 冬季鄂霍次克海海冰对北太平洋风暴轴年际变化的影响. 海洋通报(英文版), 11(1): 1-12.  
劳汉琼, 朱伟军, 张唯. 2006. 冬季格陵兰以东区域海冰异常对北大西洋风暴轴的影响研究. 气象与减灾研究, 29(4): 6-11.  
李莹, 朱伟军, 魏建苏. 2010. 冬季北太平洋风暴轴指数的评估及其改进. 大气科学, 34(5): 1001-1010.  
石彦军, 任余龙, 张宇, 等. 2012. BCC\_CSM 气候模式对中国区域 500 hPa 气候要素模拟能力的检验. 兰州大学学报(自然科学版), (6): 54-62.  
辛晓歌, 吴统文, 张洁. 2012. BCC 气候系统模式开展的 CMIP5 试验介绍. 气候变化研究进展, (5): 69-73.  
张颖娴, 丁一汇, 李巧萍. 2012a. 北半球温带气旋活动和风暴路径的年代际变化. 大气科学, 36(5): 912-928.  
张颖娴, 丁一汇, 李巧萍. 2012b. ERA40 再分析资料揭示的北半球和东亚地区温带气旋生成频率变化. 气象, 38(6): 646-656.  
Chang E K M, Guo Y, Xia X, et al. 2013. Storm-track activity in IPCC AR4/CMIP3 Model simulations. J Climate, 26(1): 246-260.  
Mccabe G J, Clark M P, Serreze M C. 2001. Trends in Northern Hemisphere surface cyclone frequency and intensity. J Climate, 14(12): 2763-2768.  
Murakami M. 1979. Large-scale aspects of deep convective activity over the GATE area. Mon Wea Rev, 107: 994-1013.  
Wu T, Li W P, Ji J J, et al. 2013. Global carbon budgets simulated by the Beijing Climate Center Climate System Model for the last century. Geophys Res Atmos, 118, 4326-4347.  
Xin Xiaoge, Wu Tongwen, Li Jianglong, et al. 2013. How well does BCC\_CSM1.1 reproduce the 20th century climate change over China? Atmos Oceanic Sci Lett, 6(1): 21-26.  
Yin J H. 2005. A consistent poleward shift of the storm tracks in simulations of 21st century climate. Geophys Res Lett, 32(18), doi:10.1029/2005GL023684.