

国家气候中心大气环流模式冬季模式误差特征分析*

王皓¹⁾³⁾ 郑志海^{2)†} 于海鹏¹⁾ 黄建平¹⁾ 季明霞¹⁾

1) (兰州大学大气科学学院, 半干旱气候变化教育部重点实验室, 兰州 730000)

2) (国家气候中心, 中国气象局气候研究开放实验室, 北京 100081)

3) (94195 部队气象台, 临洮 730500)

(2013 年 12 月 18 日收到; 2014 年 1 月 22 日收到修改稿)

本文利用 1982—2010 年国家气候中心第二代月动力延伸预测系统中大气环流模式 (BCC_AGCM) 的回报资料和美国国家环境预测中心和美国国家大气研究中心 (NCEP/NCAR) 再分析资料, 分析了该模式对冬季气温预测的误差特征及其与外强迫的联系. 结果表明模式能够在整体上较好地反映出欧亚区域冬季气温的变化趋势, 能抓住东亚冬季风区气温年际变化的主要空间模态, 对东亚冬季风区冬季气温具有一定的预报能力. 预报误差的空间分布和时间演变特征的结果表明, 误差在陆地大于海洋, 高纬地区大于低纬地区, 同时与海拔高度也有密切关系. 预报误差的主要模态与一些关键区域的海温和海冰存在显著的相关性, 表明模式对外强迫异常的响应能力存在缺陷. 这为结合模式对关键区海温和海冰异常的响应能力, 有针对性地改进模式对东亚冬季风区冬季气温的预测能力提供了依据.

关键词: 月预报, 预报误差, 海温, 北极海冰

PACS: 92.60.Aa

DOI: 10.7498/aps.63.099202

1 引言

近年来, 动力模式的性能得到了显著改进, 在短期气候预测业务中具有越来越重要的地位. 但是无论如何发展, 现代数值模式仍远未达到完美的地步, 会不可避免地存在一定的误差^[1-5], 尤其是对于中期预报和季节预报之间的延伸期预报, 其预报水平还很低^[6-11]. 数值模式的误差主要源于两个方面: 首先, 大气运动过程中具有复杂的多尺度相互作用, 这决定了模式的参数化方案对实际物理过程描述的误差在所难免. 例如, 模式中云过程、辐射过程等参数化方案就具有极大的不确定性; 另一方面, 大气动力学方程组是一个非线性系统, 需要通

过离散化的数值差分计算方法进行求解, 差分格式的不同也会引入一定的误差^[12-14]. 动力模式的预报误差无法规避, 因此对模式误差进行分析, 认识其分布特征和规律, 对改进模式性能、提高预报效果是十分必要的.

模式误差的诊断和订正是改进模式和更好利用模式结果的主要途径. 对此, 国外的学者进行了许多研究. Miyakoda^[15], Smith 和 Livezey^[16] 等通过对模式进行后验订正提高了模式预报技巧; Bennett 和 Leslie^[17] 提出在积分过程中固定间隔反复订正来提高预报技巧, 即对模式进行过程订正, 此后一些学者用此方法取得不错的效果^[18,19]. 我国学者在模式误差订正的研究方面做出了卓有成效的工作: 丑纪范等^[20,21] 提出了利用历史观测资料

* 公益性行业 (气象) 专项 (批准号: GYHY201206009)、国家重点基础研究发展计划 (批准号: 2013CB430204)、国家自然科学基金青年科学基金 (批准号: 41105070, 41005051)、国家重大科学研究计划 (批准号: 2012CB955301) 和长江学者和创新团队发展计划 (批准号: IRT1018) 资助的课题.

† 通讯作者. E-mail: zhengzh@cma.gov.cn

削减模式误差的方法并证明了其有效性,在此基础上,大量成效卓著的理论和方法如雨后春笋般先后被提出和应用^[22-33],并取得了显著的效果.另外,通过对模式误差进行诊断分析,掌握其分布特征和演变规律^[2,34,35],可以为数值模式物理参数化方案的诊断和订正提供一些有用的信息^[36-38],同时也有助于实际业务中数值预报产品的释用^[39].

冬季气温预测一直是短期气候预测中备受关注的预测对象,冬季低温事件会对农业生产和人们的生活产生巨大的影响,近年来,极端低温事件的研究也成为一热点^[40-43].在全球变暖的背景下,成功地对延伸期的气温进行预测显得至关重要,它可以为政府提供正确的决策服务从而减小极端气温事件造成的灾害.影响冬季气温的因子很多,如东亚冬季风、西伯利亚高压及北极涛动等^[44-46].此外,已有研究表明,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有较好的相关性^[47].冬季北极海冰变化对东亚冬季风异常也存在显著影响,其中巴伦支海-喀拉海是影响中国气候年际变化的关键海区^[48].对于月尺度的气候预测,初值的信息不断衰减,气候系统中缓变的外强迫所起的作用则在逐渐显现^[11,49-52],大气环流模式对海冰和海温等外强迫信号的响应程度是模式误差的重要来源,因此模式误差与外强迫的关系值得深入分析.

本文基于国家气候中心提供的BCC_AGCM的回报资料,分析了其对冬季温度预测的年际变化特征,重点探讨了模式预报误差的分布特征.旨在通过对比分析,揭示模式预报误差可能的来源,并结合诊断分析的方法,研究了外强迫异常与模式预报误差之间的联系,为进一步利用外强迫因子异常改进模式提供参考.

2 模式和资料

2.1 模式介绍

第二代月动力延伸预测模式系统目前已于2012年正式投入业务使用.该系统可提供周、旬、月尺度的模式预测信息,主要用于气候预测和气候变化相关研究.数值模式是基于国家气候中心开发的BCC_AGCM,模式水平分辨率为T106波谱截断,全球近110 km分辨率,垂直分为26层,模式大气初值为T639/NCEP一日4次再分析资料,包括风速、海平面气压和温度等变量;海温初值为美

国国家大气和海洋局的最优插值每周再分析资料.模式每次回报选用6个集合样本(分别为每月最后3天每天00,06时大气场),积分时间30天.该模式以NCAR CAM3为基础,改进了其原有的动力框架,使得模式在气候模拟上较CAM3具有更好的表现.有关模式的详细介绍可参见文献^[53,54].

2.2 资料和方法

本文所用的模式资料为BCC_AGCM的回报资料,水平分辨率为 320×160 格点($1.125^\circ \times 1.125^\circ$), x 方向为规则格点, y 方向为高斯格点.为了检验其对冬季气温预测的效果,选取了1982—2010年一月份月平均和逐日的地面2 m温度场资料.

为了与模式预报结果作对比,本文使用与模式资料相对应的NCEP/NCAR再分析资料^[55],包括1982—2010年一月份的月平均和逐日的地面2 m温度场资料,其分辨率为T62高斯格点(192×94).为了便于对比分析,故将资料利用双线性插值方法插值到一致的规则格点上.此外,为了研究外强迫异常与模式误差之间的联系,选取了相同时间段的哈德莱中心月平均的海冰密集度资料(<http://badc.nerc.ac.uk/data/hadisst/>)和美国国家大气和海洋局的最优插值海温资料(<http://www.esrl.noaa.gov/psd/>),其分辨率均为 360×180 格点($1^\circ \times 1^\circ$).

本文用于诊断分析的方法有经验正交函数分解(EOF)、相关分析等.由于北半球冬季特点最显著的月份是一月份,所以本文的分析都是针对一月份的资料进行.

3 模式预报误差多年平均分布特征

3.1 模式预报误差的平均分布

图1给出了1982—2010年一月份月平均2 m气温模式预报误差的平均分布,模式预报误差由模式回报资料减去NCEP/NCAR再分析资料得到.由图1可以看出,欧亚区域内($10^\circ\text{S}—60^\circ\text{N}$, $40^\circ\text{E}—140^\circ\text{E}$)模式预报误差具有典型的海陆分布特征,表现为在海洋上小(平均在 $\pm 2\text{ K}$ 以上),陆地大(平均在 $\pm 2\text{ K}$ 以上).误差高值分布在青藏高原、南疆盆地、祁连山脉、中西伯利亚高原、里海和大高加索山脉等地区.中国区域内,模式在青藏高原—

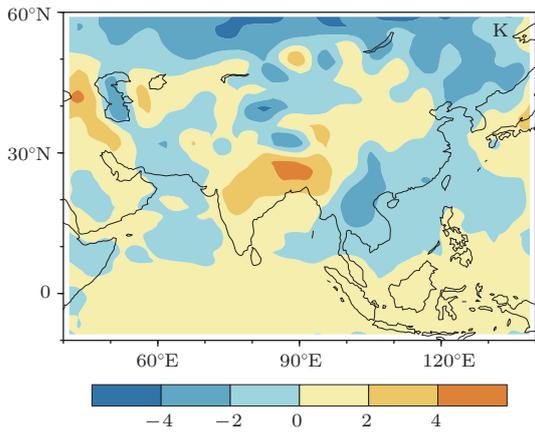


图1 (网刊彩色) 1982—2010年一月份月平均2 m 气温的模式预报误差平均分布(单位: K)

四川—华北带状区域内预测结果较实况偏高, 中心位于青藏高原地区, 最大误差可达 +6 K 以上, 表明模式高估了此区域内的温度. 而模式在华南、东部沿海地区、新疆以及东北等地的预测结果较实况偏低, 中心位于新疆中西部以及西北部地区, 最大误差达到 -6 K 左右, 表明模式对这些区域的气温存在低估. 此外, 模式预报误差具有纬向分布特征, 高纬地区误差较大, 低纬地区较小. 图1也显示出

预报误差与海拔高度存在明显的对应关系, 在高海拔地区误差多为正值, 低海拔地区多为负值.

3.2 模式和再分析资料气温趋势的对比

最近30年来, 欧亚地区冬季气温升高趋势明显, 在月预测的业务模式中, 并没有考虑二氧化碳等外强迫信号影响, 它的信息来源于初始条件, 这种气温升高趋势是否包含在模式初始信息中, 是值得探讨的. 图2(a)为模式模拟1982—2010年一月份2 m月平均气温的趋势, 可以看出, 模式回报的大部分地区气温都呈增暖趋势, 其中在青藏高原地区最为显著, 增暖趋势在0.12 K/a左右. 图2(b)为同时段NCEP/NCAR再分析资料气温的趋势图, 结果表明再分析资料的气温在欧亚区域内大部分地区也表现出增暖的趋势, 增暖最明显的区域分布在青藏高原南部及柴达木盆地地区, 达到了0.18 K/a 以上; 而在新疆北部、西西伯利亚平原地区则出现变冷趋势. 通过对比模式模拟和再分析资料的气温趋势发现, 欧亚区域内(10°S—60°N, 40°E—140°E)两者的趋势大体相同, 但是在增暖(变冷)程度上有所不同. 为了进一步对比两者的趋势, 我们

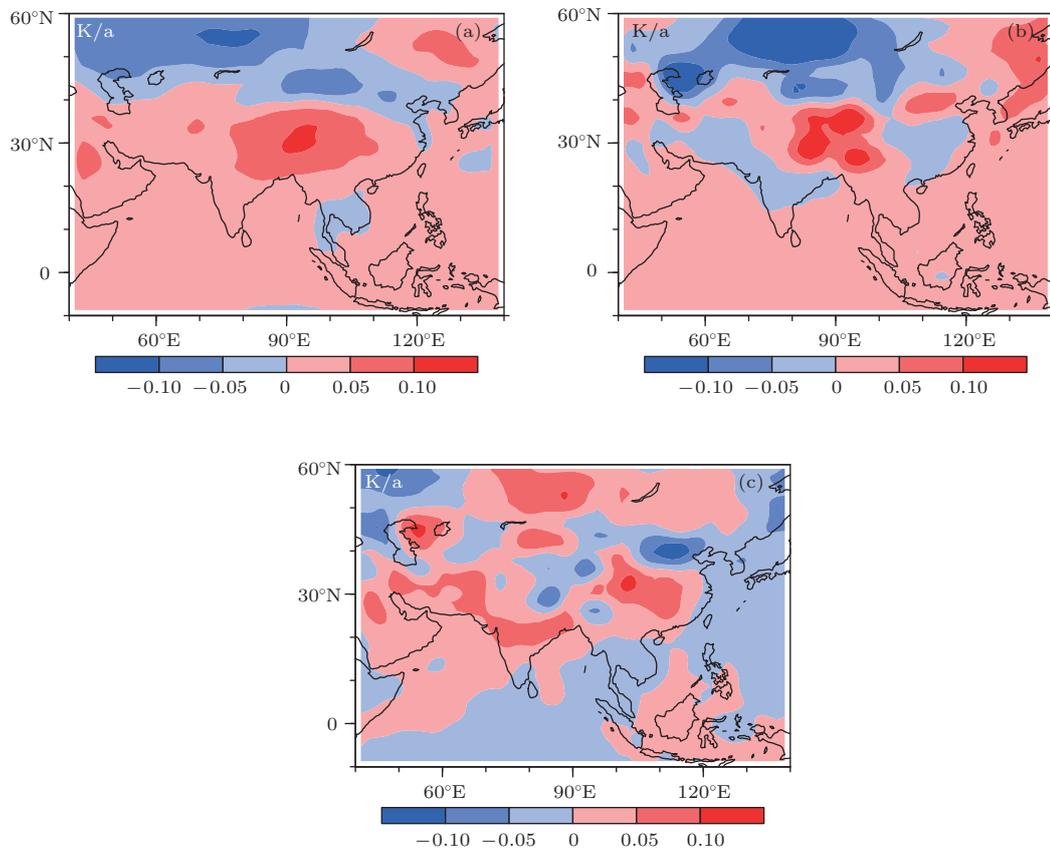


图2 (网刊彩色) 1982—2010年一月份月平均2 m 气温趋势(单位: K/a) (a) 模式预报气温趋势; (b) NCEP/NCAR 再分析资料气温趋势; (c) 模式预报气温与 NCEP/NCAR 再分析资料气温趋势差值

给出了其趋势的差值图(见图2(c)), 在新疆北部、青藏高原西南部、黄土高原中西部及内蒙古东部地区模式模拟的气温趋势与NCEP/NCAR再分析资料气温的趋势有较大的差异, 尤其是在内蒙古东部地区, 差值达到了0.14 K/a以上. 结合之前的分析, 这些地区也是近年来增温较为显著的区域, 表明没有考虑二氧化碳等外强迫信号影响, 会造成模式模拟的气温升高的趋势不明显.

4 模式预报月误差与NCEP/NCAR再分析资料距平方差的比较

模式预报误差的方差衡量了模式预报值与再分析资料之间的离散度, 反映了模式预报误差的变率. 观测的方差则在一定程度上反映了大气受外界强迫引起的变率. 为了检验这两种变率是否存在显著的差异, 我们计算了模式预报误差的方差与观测资料方差的比值, 并对其进行了显著性检验^[56,57]. 如果方差的比值比较小, 表明模式误差的年际变率较小, 更多地体现了系统性误差的影响, 而方差比较大则表明仅通过系统性误差订正是明显不够的. 图3给出了模式预报误差与观测资料方差的比值图, 黑色加号标注区域代表通过置信水平为95%的区域, 结果表明, 在东欧平原、西西伯利亚平原西侧、天山山脉、伊朗高原、印度半岛、青藏高原西南部及我国中东部等地区模式预报误差的方差均大于再分析资料距平的方差, 在蒙古高原、黄土高原及青藏高原等部分地区的置信水平均达到了95%以上, 尤其是在青藏高原西南部, 模式预报误差的方差甚至是再分析资料距平的方差的4倍以上, 这表明模式预报误差的信息掩盖了气候态异常的信息, 说明模式在这些区域的预报水平较低.

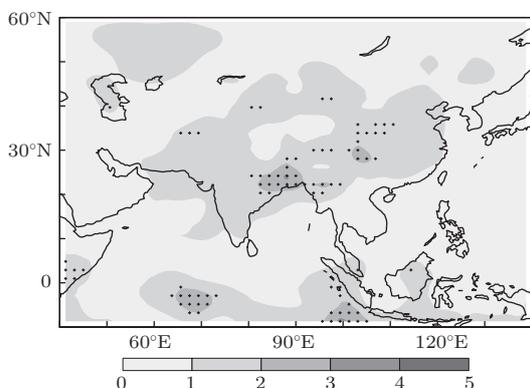


图3 1982—2010年一月份月平均2 m气温的模式预报误差方差与NCEP/NCAR再分析资料距平方差比值(黑色加号标注区域为置信水平达到95%的区域)

5 NCEP/NCAR再分析资料气温距平、模式距平及模式预报月误差EOF分解的主要模态

5.1 模式模拟和再分析资料的气温距平的空间分布型及其年际变化

为了探讨模式误差的来源, 我们分别对东亚冬季风区(0° — 60° N, 100° — 140° E)模式一月份月平均的地面2m温度距平、相应的NCEP/NCAR再分析资料距平以及模式的月平均误差场进行了EOF分解, 重点关注了他们的空间模态. 图4给出了再分析资料和模式预报的月平均气温距平的前三个模态, 其中再分析资料气温的前三个主模态分别解释了总方差的52.8%, 16.7%, 9.8%, 方差累积量占总方差的79.3%. 由其第一个模态(图4(a))可以看出, 东亚冬季风区冬季气温变化的最主要模态表现出显著的纬向分布特点, 高纬地区较低纬地区有较大变率, 气温的最大变化中心出现在 60° N附近, 且温度的变化幅度从北向南递减. 这一模态反映了北方的冷空气向东亚地区侵袭的路径, 称为气温变化的高纬模态, 这与Wang等^[46]的研究结果类似. 与第一模态相比, 第二模态(见图4(b))则表现为东亚冬季风区北部东西向的变化, 气温的最大变化中心位于内蒙古高原和鄂霍次克海附近, 第三个主分量的空间模态(见图4(c))与前两个模态不同, 表现为东亚冬季风区中部的变化, 气温的最大变化中心出现在内蒙古高原西部及我国华南部分地区附近. 以上是再分析资料一月份气温距平的主要模态, 可以看作是真实场气温变化的空间模态. 图4(e)—(f)给出了模式模拟的一月份月平均气温变化的前三个模态, 它们分别解释了总方差的52.5%, 16.0%, 10.9%, 方差累积量占总方差的79.4%. 通过对比可以发现, 其空间模态与NCEP/NCAR再分析资料气温距平的空间模态非常相似, 经过计算, 二者第一模态的相关系数高达0.98, 表明模式抓住了东亚冬季风区冬季气温变化的大尺度分布型. 二者在第二和第三模态略有差别, 其相关系数分别为0.78和0.70, 差异主要集中在我国中东部沿海地区, 说明模式对这些地区气温变化的模拟存在不足, 但整体上二者的空间分布具有很好的一致性, 这也从一定程度上表明模式较好地模拟了东亚冬季风区冬季气温变化.

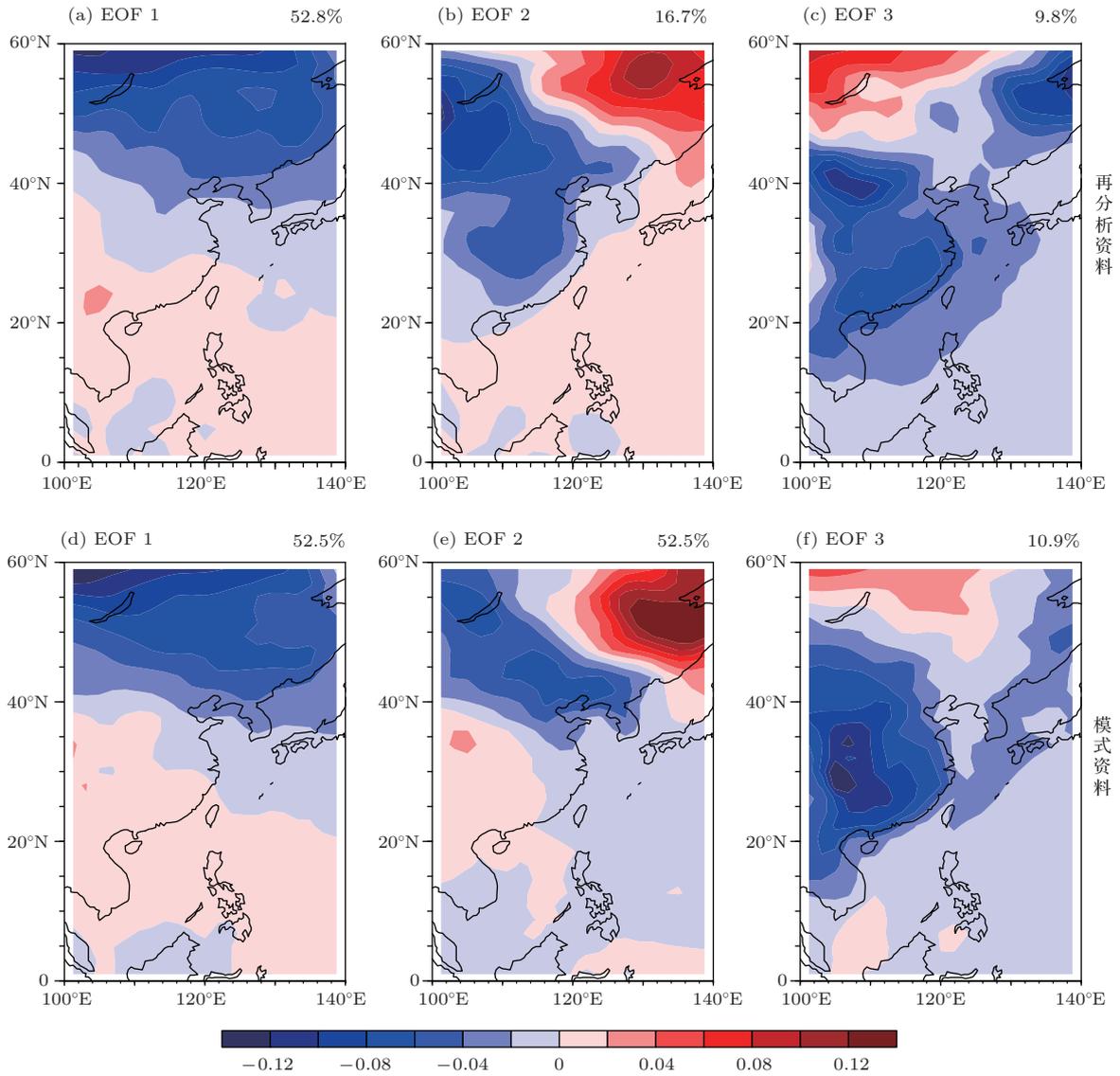


图4 (网刊彩色) 1982—2010年东亚冬季风区(0°N—60°N, 100°E—140°E)一月份月平均气温距平的前三个分量的空间模态 (a)—(c)再分析资料; (d)—(f)模式预报值

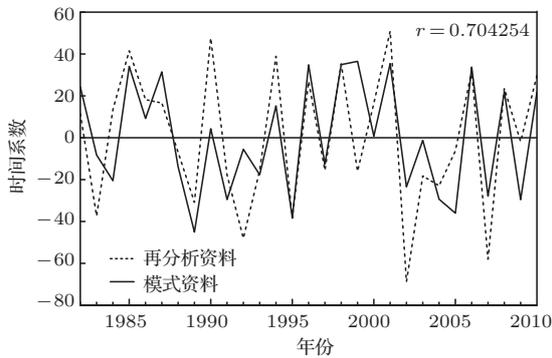


图5 1982—2010年东亚冬季风区(0°N—60°N, 100°E—140°E)再分析资料和模式预报一月份月平均气温距平第一模态时间系数的对比及其相关系数(图中实线为模式模拟, 虚线为再分析资料, r 为其相关系数)

为了进一步探究模式对每个模态的年际预报能力, 我们给出二者每个模态对应的时间系数的年际变化, 并计算了二者的相关系数. 图5即为二者第一模态时间系数的年际变化对比图, r 为相应的相关系数. 由图5可以看出, 二者的年际变化表现出高度一致性, 其相关系数达到了0.7以上, 远高于95%的置信水平. 结合上面的分析, 无论在空间分布还是年际变化, 模式都很好地展现了东亚冬季风区冬季气温变化最主要的模态. 与第一模态相比, 第二、三模态二者的一致性稍差(图略), 其相关系数分别为0.35和0.45左右. 综合以上分析, 模式能够抓住东亚季风区冬季气温变化的大尺度分布型, 可以较好地模拟其冬季气温变化的最主要模态.

5.2 模式预报误差的空间分布型

为了具体考察模式模拟与观测存在的差异,我们进一步研究了模式的月平均误差场的空间模态.图6给出了1982—2010年东亚冬季风区一月份月平均气温的预报误差场前三个主分量的空间模态,前三个模态分别解释了总方差的40.8%,19.6%,7.4%,方差累积量占总方差的67.8%.预报误差前三个模态的空间分布与实际温度前三个模态的分布型基本一致,说明模式预报虽然能较好地反映温度实际的分布形态,但在具体量值上与实况有较大

的差异.模式预报误差的第一模态反映了模式对东亚冬季风区的北部区域的气温有系统性的高估(低估);第二模态表现为在东亚冬季风区大陆上东北西南向的分布,意味着模式对以内蒙古南部区域为中心的气温高估(低估)时,对黑龙江北部外兴安岭地区的气温低估(高估);第三模态则表现为在东亚冬季风区西北东南向的分布.整体来看,模式预报误差的三个模态均呈现出海陆分布的差异,即在大陆上的信号强,而在海洋上的信号则非常弱.这也再次印证了之前关于模式预报误差具有的典型海陆分布特征的结论.

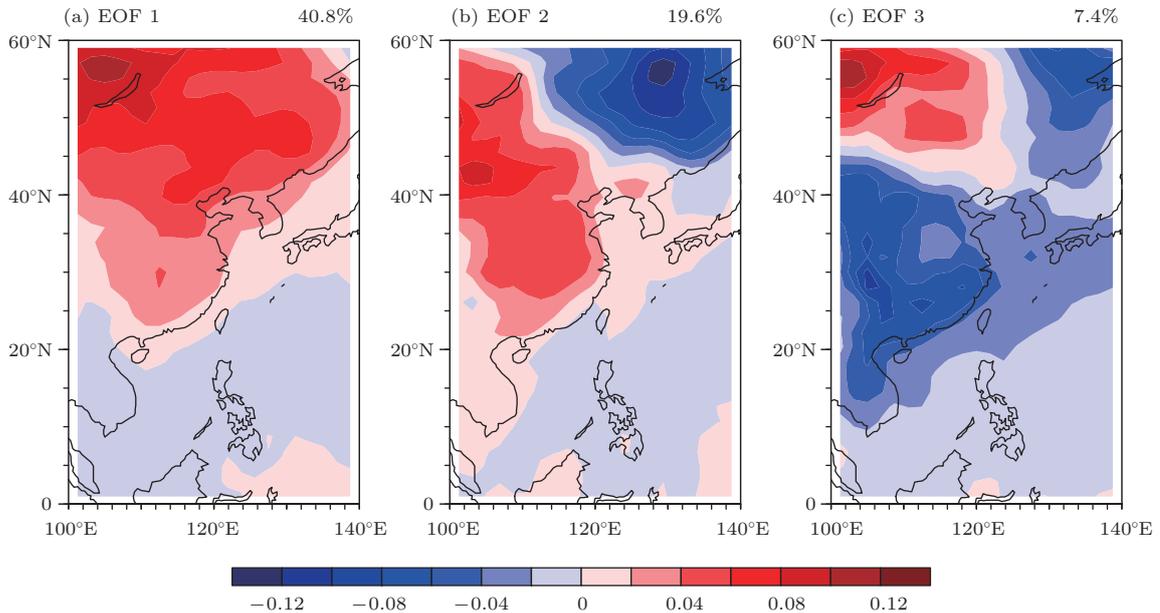


图6 (网刊彩色) 1982—2010年东亚冬季风区(0°N—60°N, 100°E—140°E)一月份月平均2 m 气温模式预报误差场 EOF 分解后的前三个模态

6 模式月平均预报误差与关键外强迫可能的联系

对于月尺度的气候预测,气候系统中缓变的外强迫所起的作用则在逐渐显现^[11,49–52],海温和海冰作为气候系统重要的外强迫因子,对冬季气温的预测有着非常重要的影响.延伸期预测模式对外强迫异常的响应能力影响着模式性能,分析模式预报误差与外强迫异常之间的联系可以为减小误差提供一定的信息.从前面的分析可以看出,模式预报误差的分布型和实际观测的分布型有较好的一致性,而这样的分布型与外强迫有明显的联系^[46],因此,模式预报误差的空间分布型与外强迫是否有显著的关系值得进一步分析.

6.1 模式预报误差的主要模态与北极海冰的联系

近期一些研究表明,北极海冰对冬季风有明显影响,尤其是和近年来北半球中高纬度冷事件的发生频次也有显著的相关性^[58,59],因此本文分析了北极海冰与东亚冬季风区气温月平均预报误差前三个模态之间的关系.图7(a)给出了北极海冰与模式预报误差第一模态时间系数的相关系数分布.可以看出,显著的相关区域主要分布在北半球高纬度的海面上,其中在东西伯利亚海,拉普捷夫海及北美洲北部的北冰洋面上有显著的正相关,表明在这些区域海冰的异常与预报误差存在很好的相关性.图7(b)为第二模态与北极海冰相关系数的分布,显著相关区域主要分布在欧亚大陆西北部的洋

面上, 其相关系数达到了0.6以上. 第三模态的误差与海冰场的相关程度最高(图7(c)), 显著的相关区域主要分布在北半球高纬度的洋面上, 当这些区域的海冰异常增加或者减少时, 会较大程度地影响模式预报误差的第三模态. 值得注意的是, 近期的研究表明, 冬季西伯利亚高压的强度与秋冬季北冰洋东部、欧亚大陆北部边缘海区海冰密集度呈现显著的负相关关系, 这些区域的海冰密集度减少, 会通过大气环流影响冬季西伯利亚高压和东亚冬季风的强度进而导致严冬频发^[60]. 而通过以上分析,

这些海区的海冰密集度也和模式预报误差之间存在显著的相关关系. 由此推测, 可能是由于模式对北极海冰异常的响应存在缺陷, 进而影响到模式对于冬季西伯利亚高压及其所导致的天气过程的模拟能力, 所以当北极海冰异常增加或减少时, 会使得模式对东亚季风区月平均气温的预报误差增大. 因此, 通过调整模式对这些海区海冰密集度异常的响应能力, 很可能会提高模式对东亚冬季风区冬季气温的预报能力.

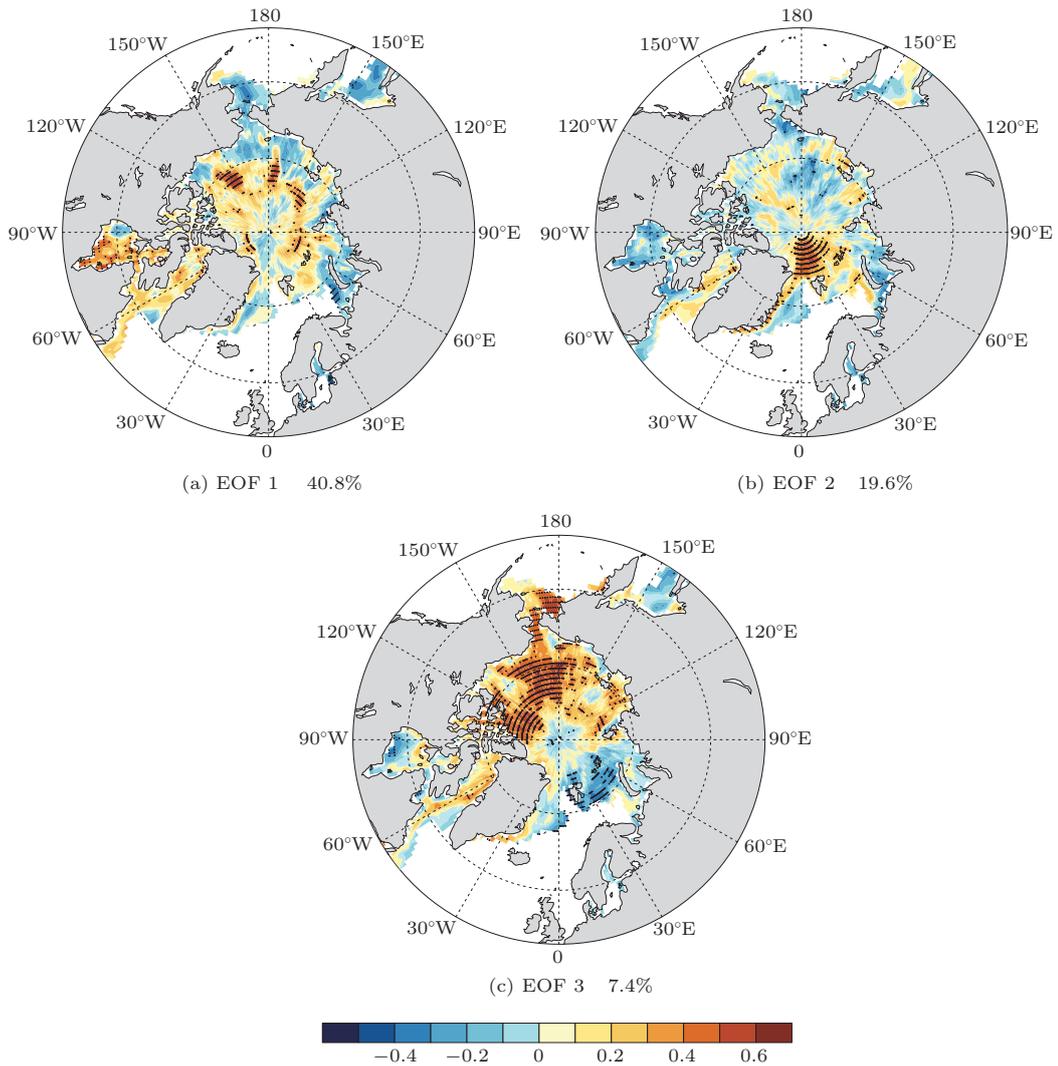


图7 (网刊彩色) 一月份月平均东亚冬季风区(0°N—60°N, 100°E—140°E) 模式预报误差 EOF 分解后前三个模态的时间系数与海冰场的相关系数分布(黑色加号标注区域为置信水平达到95%的区域)

6.2 模式预报误差的主要模态与海温的联系

已有研究表明, 太平洋、大西洋和印度洋的海温异常对东亚冬季风均有明显的关系, 它们通过海气相互作用影响着大气环流, 从而造成气温异常.

因此本文分析了模式东亚冬季风区一月份气温月误差的主要模态与海温场之间的关系. 图8(a)给出了海温场与模式预报误差第一模态相联系的相关系数分布, 可以看出, 第一模态与海温场显著的正相关区域在太平洋东北部及赤道中东部太平洋,

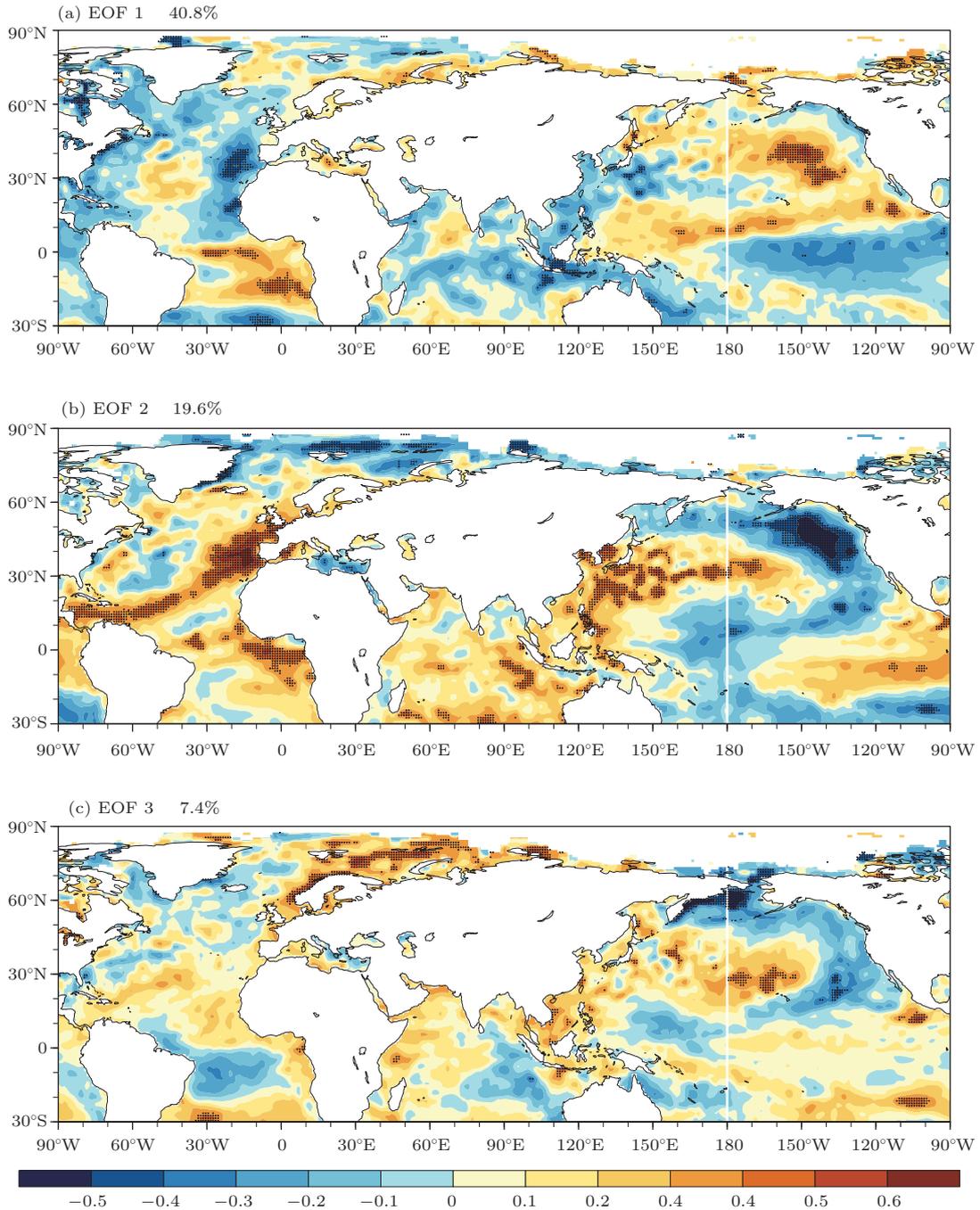


图8 (网刊彩色) 一月份东亚冬季风区(0°N—60°N, 100°E—140°E)模式月平均预报误差EOF分解后前三个模态的时间系数与海温场的相关系数分布(黑色加号标注区域为置信水平达到95%的区域)

相关系数最高达到0.5以上;显著的负相关区域在直布罗陀海峡附近的大西洋上,相关系数达到-0.4以上,表明这些区域的海温场异常和模式预报误差的第一模态之间具有很好的相关性.这是由于这些海区的海温会通过大气环流影响东亚冬季风,而模式对于这些海区海温异常的响应能力不足,进而造成模式对东亚冬季风区冬季气温模拟的误差.由图8(b)可以看出,第二模态与海温场的相关程度

较高,显著相关的区域广泛地分布在太平洋、大西洋及印度洋的部分海区,其中在直布罗陀海峡附近的大西洋和西北太平洋的洋面上有显著的正相关区域,相关系数达到0.5以上;此外在东北太平洋,欧亚大陆西北侧的洋面上有显著的负相关区域.第三模态与海温场的显著相关区域主要分布在东北太平洋及欧亚大陆北部及西北部的洋面上(图8(c)),这些区域是模式预报误差的第三模态与

海温场异常相关的关键区域. 值得注意的是, 已有研究表明, 北冰洋东部、太平洋东北部和中部海区是影响东亚区域极端低温事件频次异常的关键海区, 赤道东太平洋和北大西洋是影响东亚冬季极端高温频数异常的关键海区^[61]. 而根据本文的研究, 上述区域也是与模式预报误差相关性较高的关键海区, 这说明模式对东亚冬季气温的极端事件的预测存在一定的不足, 通过调整模式对上述关键区外强迫异常的响应, 可能在一定程度上减小模式预报误差.

7 结论和讨论

基于与NCEP/NCAR再分析资料的比较, 本文研究了BCC_AGCM对冬季气温预测误差的特征及其与外强迫之间的联系. 主要结论如下:

模式在整体上能够较为真实地模拟出欧亚地区近年来冬季气温的变化趋势, 但在数值上存在差异, 尤其是在内蒙古东部和青藏高原的部分地区差异明显. 模式的预报误差与纬度和海陆分布密切相关, 表现为在陆地大于海洋, 高纬地区大于低纬地区; 此外误差与海拔高度也有明显的对应关系, 高海拔地区多为正值, 低海拔地区多为负值. 另外, 在东亚冬季风区, 模式虽然能抓住东亚冬季风区冬季气温年际变化的主要空间模态, 但在具体的量值上与实况仍有较大的差异.

通过分析模式预报误差的空间分布型与外强迫因子之间的联系发现, 在东亚冬季风区, 冬季气温的预报误差与一些关键区域的海温和海冰密切相关. 其中北冰洋和欧亚大陆北部边缘的海冰密集度和预报误差之间显著相关; 海温和误差之间存在显著相关的区域主要分布于太平洋东北和西北部、大西洋及欧亚大陆西北部的海区. 这反映出模式对这些关键区海温和海冰异常的响应能力存在缺陷, 影响了模式对东亚冬季风区冬季气温的预报能力. 因此, 通过调整模式对这些关键区海温和海冰异常的响应能力, 可能在一定程度上能够提高模式对东亚冬季风区冬季气温的预报能力.

本文主要对BCC_AGCM冬季气温的模拟结果进行了评估分析, 找出了外强迫因子影响模式预报水平的关键区域, 可以为其他变量预报水平的分析提供参考, 并为进一步结合外强迫因子改进模式提供依据. 但是本文仅初步分析了模式预报误差的统计特征和分布型, 尚无法区分影响模式预报误差

的具体物理过程; 同时, 如何利用外强迫因子改进模式值得进一步探究.

感谢国家气候中心吴统文研究员、李巧萍研究员提供的BCC_AGCM回报资料.

参考文献

- [1] Lorenz E N 1963 *J. Atmos. Sci.* **20** 130
- [2] Chen M X, Ji L R 1989 *Acta Meteorol. Sin.* **47** 147 (in Chinese)[陈明行, 纪立人 1989 气象学报 **47** 147]
- [3] Feng G L, Dong W J 2003 *Acta Phys. Sin.* **52** 2347 (in Chinese)[封国林, 董文杰 2003 物理学报 **52** 2347]
- [4] He W P, Feng G L, Dong W J, Li J P 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 969 (in Chinese)[何文平, 封国林, 董文杰, 李建平 2006 物理学报 **55** 969]
- [5] Dai X G, Pu Y F, Wang P 2011 *Adv. Meteor. Sci. Technol.* **1** 26 (in Chinese) [戴新刚, 浦一芬, 汪萍 2011 气象科技进展 **1** 26]
- [6] Tibaldi S, Palmer T N, Brankovic C, U Cubasch 1990 *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.* **116** 835
- [7] Anderson J L, Van den Dool H M 1994 *Mon. Wea. Rev.* **122** 507
- [8] Vitart F 2004 *Mon. Wea. Rev.* **132** 2761
- [9] Seo K H, Schemm J K E, Jones C, Moorthi S 2005 *Climate Dyn.* **25** 265
- [10] He W P, Wang L, Wan S Q, Liao L J, He T 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 119201 (in Chinese)[何文平, 王柳, 万仕全, 廖乐建, 何涛 2012 物理学报 **61** 119201]
- [11] Zheng Z H 2013 *Adv. Meteor. Sci. Technol.* **3** 25 (in Chinese)[郑志海 2013 气象科技进展 **3** 25]
- [12] Feng G L, Dong W J, Li J P, Chou J F 2004 *Acta Phys. Sin.* **53** 2389 (in Chinese)[封国林, 董文杰, 李建平, 丑纪范 2004 物理学报 **53** 2389]
- [13] He W P, Feng G L, Dong W J, Li J P 2004 *Acta Phys. Sin.* **53** 3258 (in Chinese)[何文平, 封国林, 董文杰, 李建平 2004 物理学报 **53** 3258]
- [14] Feng G L, Dai X G, Wang A H, Chou J F 2001 *Acta Phys. Sin.* **50** 606 (in Chinese)[封国林, 戴新刚, 王爱慧, 丑纪范 2001 物理学报 **50** 606]
- [15] Miyakoda K, Sirutis J, Ploshay J 1986 *Mon. Wea. Rev.* **114** 2363
- [16] Smith T M, Livezey R E 1999 *J. Climate* **12** 273
- [17] Bennett A F, Leslie L M 1981 *Mon. Wea. Rev.* **109** 453
- [18] Schemm J E, Faller A J 1986 *Mon. Wea. Rev.* **114** 2402
- [19] Saha S 1992 *Mon. Wea. Rev.* **120** 345
- [20] Chou J F 1974 *Sci. China A* **6** 635 (in Chinese) [丑纪范 1974 中国科学 **6** 635]
- [21] Qiu C J, Chou J F 1989 *Chin. J. Atmosph. Sci.* **13** 22 (in Chinese) [邱崇践, 丑纪范 1989 大气科学 **13** 22]
- [22] Huang J P, Chou J F, Yi Y H 1989 *Acta Meteorol. Sin.* **47** 483 (in Chinese)[黄建平, 丑纪范, 衣育红 1989 气象学报 **47** 483]

- [23] Huang J P, Wang S W 1991 *Sci. China B* **2** 216 (in Chinese)[黄建平, 王绍武 1991 中国科学 **2** 216]
- [24] Huang J P, Yi Y H 1991 *Sci. China B* **3** 331 (in Chinese)[黄建平, 衣育红 1991 中国科学 **3** 331]
- [25] Huang J P, Yi Y H, Wang S W, Chou J F 1993 *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.* **119** 547
- [26] Bao M, Ni Y Q, Chou J F 2004 *Chin. Sci. Bull.* **49** 1112 (in Chinese)[鲍名, 倪允琪, 丑纪范 2004 科学通报 **49** 1112]
- [27] Ren H L, Chou J F 2006 *Acta Meteorol. Sin.* **64** 315 (in Chinese)[任宏利, 丑纪范 2006 气象学报 **64** 315]
- [28] Zheng Z H, Ren H L, Huang J P 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 7359 (in Chinese)[郑志海, 任宏利, 黄建平 2009 物理学报 **58** 7359]
- [29] Chou J F, Zheng Z H, Sun S P 2010 *Scientia Meteor. Sinica* **10** 569 (in Chinese) [丑纪范, 郑志海, 孙树鹏 2010 气象科学 **10** 569]
- [30] Zheng Z H, Feng G L, Chou J, Ren H L 2010 *J. Appl. Meteor. Sci.* **21** 139 (in Chinese) [郑志海, 封国林, 丑纪范, 任宏利 2010 应用气象学报 **21** 139]
- [31] Zheng Z H, Feng G L, Huang J P, Chou J F 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 199203 (in Chinese) [郑志海, 封国林, 黄建平, 丑纪范 2012 物理学报 **61** 199203]
- [32] Zheng Z H, Huang J P, Feng G L, Chou J F 2013 *Sci. China A* **6** 878
- [33] Yu H, Huang J P, Chou J F 2013 *Mon. Wea. Rev.* (in press)
- [34] Barker T W, Horel J D 1989 *Mon. Wea. Rev.* **117** 2835
- [35] Jung T 2005 *Quart. J. Roy Meteor. Soc.* **131** 1045
- [36] Zhang D M, Ji L R, Li J L 1997 *Chin. J. Atmosph. Sci.* **21** 141 (in Chinese)[张道民, 纪立人, 李金龙 1997 大气科学 **21** 141]
- [37] Liu H Z, Teng Q B 1999 *Acta Meteorol. Sin.* **57** 143 (in Chinese)[刘还珠, 滕俏彬 1999 气象学报 **57** 143]
- [38] Zhong J, Huang Si X, Fei J F Du H D 2011 *Chin. J. Atmosph. Sci.* **35** 1169 (in Chinese)[钟剑, 黄思训, 费建芳, 杜华栋 2011 大气科学 **35** 1169]
- [39] Qiu X X, Wang D Y, Chen B F 2012 *Meteor. Mon.* **8** 526 (in Chinese)[邱学兴, 王东勇, 陈宝峰 2012 气象 **8** 526]
- [40] Hou W, Zhang D Q, Zhou Y, Yang P 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 109202 (in Chinese)[侯威, 章大全, 周云, 杨萍 2011 物理学报 **60** 109202]
- [41] Hou W, Zhang D Q, Qian Z H, Feng G L 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 109203 (in Chinese)[侯威, 章大全, 钱忠华, 封国林 2011 物理学报 **60** 109203]
- [42] Qian Z H, Hou W, Yang P, Feng G L 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 109204 (in Chinese)[钱忠华, 侯威, 杨萍, 封国林 2011 物理学报 **60** 109204]
- [43] Zhang Z J, Qian W H 2012 *Chin. J. Atmosph. Sci.* **36** 1269 (in Chinese)[张宗婕, 钱维宏 2012 大气科学 **36** 1269]
- [44] Gong D Y, Wang S W 2003 *Acta Geographica Sinica* **58** 559 (in Chinese)[龚道溢, 王绍武 2003 地理学报 **58** 559]
- [45] Li Y, Lu R Y, He J H 2007 *Chin. J. Atmosph. Sci.* **31** 505 (in Chinese)[李勇, 陆日宇, 何金海 2007 大气科学 **31** 505]
- [46] Wang B, Wu Z W, Chang C P, Liu J 2010 *J. Climate* **23** 1495
- [47] Chen P Y, Ni Y Q, Yin Y H 2001 *J. Trop. Meteor.* **17** 371 (in Chinese) [陈佩燕, 倪允琪, 殷永红 2001 热带气象学报 **17** 371]
- [48] Wu B Y, Bian L G, Zhang R H 2004 *Chinese Journal of Polar Research* **16** 211 (in Chinese)[武炳义, 卞林根, 张人禾 2004 极地研究 **16** 211]
- [49] Huang J P, Chou J F 1988 *Plateau Meteor.* **7** 264 (in Chinese) [黄建平, 丑纪范 1988 高原气象 **7** 264]
- [50] Huang J P, Gao J D, Chou J F 1990 *Plateau Meteor.* **9** 88 (in Chinese) [黄建平, 郜吉东, 丑纪范 1990 高原气象 **9** 88]
- [51] Huang J P, Chou J F 1990 *Sci. China B* **33** 851
- [52] Reichler T J, Roads J O 2003 *Nonlinear Processes in Geophysics* **10** 211
- [53] Wu T W, Yu R C, Zhang F 2008 *J. Atmos. Sci.* **65** 2235
- [54] Wu T W, Yu R C, Zhang F, Wang Z Z, Dong M, Wang L N Jin X, Chen D L, Li L 2010 *Climate Dyn.* **32** 123
- [55] Kalnay E, Kanamitsu M, Kistler R, Collins W, Deaven D, Gandin L, Iredell M, Saha S, White G, Woollen J, Zhu Y, Chelliah M, Ebisuzaki W, Higgins W, Janowiak J, Mo K C, Ropelewski C, Wang J, Leetmaa A, Reynolds R, Jenne R, Joseph D 1996 *Bull. Amer. Meteor. Soc.* **77** 437
- [56] Huang J Y 1989 *Meteor. Mon.* **15** 3 (in Chinese) [黄嘉佑 1989 气象 **15** 3]
- [57] Shi N 2009 *Meteorological statistical forecast*(Beijing: China Meteorological Press) pp247–251 (in Chinese) [施能 2009 气象统计预报 (北京: 气象出版社) 第 247—251 页]
- [58] Wu Z W, Li J P, Jiang Z H, He J H 2011 *Climate Dyn.* **37** 1661
- [59] Liu J P, Curry J A, Wang H J, Song M R, Horton R M 2012 *Proc. Natl. Acad. Sci.* **109** 4074
- [60] Wu B Y, Su J Z, Zhang R H 2011 *Chin. Sci. Bull.* **56** 235 (in Chinese) [武炳义, 苏京志, 张人禾 2011 科学通报 **56** 235]
- [61] Yang L N 2013 *M. S. Thesis* (Beijing: Chinese Academy Meteorological Sciences) (in Chinese) [杨柳妮 2013 硕士学位论文 (北京: 中国气象科学研究院)]

Characteristics of forecast errors in the National Climate Center atmospheric general circulation model in winter*

Wang Hao¹⁾³⁾ Zheng Zhi-Hai^{2)†} Yu Hai-Peng¹⁾ Huang Jian-Ping¹⁾ Ji Ming-Xia¹⁾

1) (*Key laboratory for Semi-Arid Climate Change of the Ministry of Education, College of Atmospheric Sciences, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China*)

2) (*Laboratory for Climate Studies of China Meteorological Administration, National Climate Center, Beijing 100081, China*)

3) (*Meteorology Department of 94195 PLA, Lintao 730500, China*)

(Received 18 December 2013; revised manuscript received 22 January 2014)

Abstract

By using the National Climate Center atmospheric general circulation model (BCC_AGCM) for the second generation monthly dynamic extended range system and the NCEP/NCAR reanalysis data accumulated during 1982–2010, the model forecast errors in winter temperature prediction and their relationship with external forcing factors are analyzed. Result indicates that the model can well reproduce the variation trends of winter temperature over Eurasia region, and the main interannual variability pattern of winter temperature over East Asian monsoon domain can be successfully presented. It reveals that the model has acceptable performances in winter temperature prediction over East Asian monsoon domain, while the forecast errors are still considerable. In spatial distribution, the forecast errors over lands are larger than those over oceans. Meanwhile, the errors at high latitudes are larger than at low latitudes, and they are also closely related to altitude. The principal components of forecast errors have significant association with the sea surface temperature and the sea ice concentration over some key regions, it is shown that the response capability to external forcings is insufficient. This may provide a valuable reference for improving the prediction skill of winter temperature for East Asian monsoon domain, in combination with the model response to external forcings.

Keywords: monthly forecast, forecast errors, sea surface temperature, the Arctic sea ice concentration

PACS: 92.60.Aa

DOI: 10.7498/aps.63.099202

* Project supported by the Special Scientific Research Project for Public Interest (Grant No. GYHY201206009), the National Basic Research Program of China (Grant No. 2013CB430204), the Young Scientists Fund of the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 41105070, 41005051), the National Basic Research Program of China (Grant No. 2012CB955301), and the Program for Changjiang Scholars and Innovative Research Team in University of Ministry of Education of China (Grant No. IRT1018).

† Corresponding author. E-mail: zhengzh@cma.gov.cn