

Numerical Simulations of Arctic Climate with Regional Atmospheric Models Based on Two Different Versions of WRF—Results of Annual Mean*

Tonggui Bai[#], Xiyong Liu, Tao Zhang, Wenjie Wang

Institute of Meteorology, PLA University of Science and Technology, Nanjing
Email: [#]yunlongbai_0@163.com

Received: Dec. 5th, 2012; revised: Dec. 26th, 2012; accepted: Jan. 3rd, 2013

Abstract: Numerical simulation test is made for Arctic climate with regional climate models based on WRF3.2.1 and PWR3.3.1 versions, and simulation capabilities for Arctic climate of two versions are compared and analyzed. According to results: within temperature field, simulation result of climate model based on WRF3.2.1 is relatively low; simulation result within potential height field is also relative low, and zones with larger difference are mainly around Victoria Island; within sea-level pressure field, for simulation based on WRF3.2.1 model, zone with low value is relative large, and it is not as good as simulation based on PWR3.3.1 model; Wind difference of both models exists up to high altitude, wind speed difference will increase with increasing of altitude, and max wind speed difference 40 m/s will be reached at 200 hPa; rainfall simulation results of both models are similar, simulation result for unsteady rainfall is relatively good, simulation result for steady rainfall shows position with northward difference and rainfall is relatively large, and rainfall simulation result in whole is not good. In numerical simulation test, performance of climate model based on PWR3.3.1 is better than one based on WRF3.2.1 in whole.

Keywords: PWR3; WRF; Numerical Simulation; Arctic Climate

基于两个不同版本 WRF 模式的北极区域气候数值模拟——年平均结果*

柏统贵[#], 刘喜迎, 张 涛, 王文杰

中国人民解放军理工大学气象学院, 南京
Email: [#]yunlongbai_0@163.com

收稿日期: 2012 年 12 月 5 日; 修回日期: 2012 年 12 月 26 日; 录用日期: 2013 年 1 月 3 日

摘 要: 用基于 WRF3.2.1 和 PWR3.3.1 的两个版本区域气候模式对北极气候进行了数值模拟试验, 对比分析了两个版本模式对北极气候的模拟能力。结果显示: 在温度场中, 基于 WRF3.2.1 的气候模式模拟的结果偏低; 在位势高度场中, 两者的模拟结果均偏低, 差异性较大的区域主要在维多利亚岛附近; 海平面气压场中, 基于 WRF3.2.1 的模式模拟的低值区域较大, 没有基于 PWR3.3.1 的模式模拟的结果好; 两个模式风场差异伸展到高层并随高度的升高而风速差值增大, 到 200 hPa 时风速差值最大为 40 m/s; 两者的降水模拟结果比较相似, 对流性降水模拟的结果较好, 对稳定性降水模拟的位置偏北且降水量偏大, 对整体降水的模拟结果不好。在数值模拟试验中, 基于 PWR3.3.1 的气候模式整体显示出优于基于 WRF3.2.1 模式的性能。

关键词: PWR3; WRF; 数值模拟; 北极气候

*资助信息: 国家自然科学基金(41276190)资助。

[#]通讯作者。

1. 引言

北极是地球气候系统的重要单元,包含了大气、海洋、陆地、冰雪和生物等多圈层相互作用的全部过程。北极是全球气候变化的冷源、驱动器和敏感器,是地球上的气候敏感地区,制约和影响全球变化,同时也深受全球变化的影响。极地拥有过去地球系统演变的独特信息,对认识地球系统及其与人类活动的相互作用具有重要意义。全球大气是一个相互作用和影响的统一整体,大气环流的形成从根本上说是由极地冷源和赤道热源共同作用的结果。极地冷源和赤道热源一样,对全球气候有着重要的影响。作为与热带地区相对立的一极,北极地区在全球气候系统中的作用日益受到人们的关注,研究该区域的气候变化特点对于研究北半球及全球气候变化的特点和规律都有着重要的意义。我国位于北半球,北极对我们的影响更加直接,比如大家熟知的冷空气活动就是从北极的北冰洋、西伯利亚、北极圈里来的,对我国的气候特别是冬季造成比较大的影响,对我国的军事、农业、交通、生活等都有很大的影响,研究北极区域气候对于我国也具有特别重要的意义。

气候状态及其演变,乃是包括全球大气、海洋、陆面、冰雪甚至生态过程在内的气候系统的复杂表现及其演变。建立基于数学、物理规律基础上的气候系统模式并进行气候模拟,是认识气候形成和演变规律的主要方法之一。数值模拟是研究气候的一种重要的手段,对于气候的数值模拟有全球气候模式和区域气候模式。全球气候模式(Global Climate Model, GCM)是预估未来气候变化的有效方法,能够较好地模拟出大尺度最重要的平均特征,特别是能较好地模拟高层大气场、近地面温度和大气环流。全球气候模式(GCM)是目前研究气候变化机制和进行气候预测的重要手段之一,但由于其水平分辨率较低,难以细致地描述区域气候的具体特点^[1],另外由于物理学和动力学上的限制,使得 GCM 对区域气候的模拟还有很大的局限性和不确定性,无法正确描述出中尺度环流型,难以较细致地模拟出时间空间尺度范围相对较小的区域气候的具体特点,于是需要研究适合于区域气候模拟的气候模式。

区域气候模式(Regional Climatic Model, RCM)具有较高的分辨率和更完善的物理过程,较全球气候模

式(GCM)能够更加细致地描述地形和海陆分布以及地表植被分布等下垫面特征,能够更好地刻画气候的区域性特征,可以模拟出更详尽、更准确的气候场分布,在区域气候模拟方面有很大优势,因此近年来已成为研究区域气候变化的最重要途径。对区域模式进行评估的意义,在于以此检验模式对北极区域气候的模拟能力,并分析北极区域气候的变化特征。而合适的初始场和边界值是影响区域模式结果的重要因素。

WRF (Weather Research and Forecast)^[2]模式是由美国多个研究部门和科学家共同参与进行开发研究的新一代中尺度预报模式。WRF 模式具有可移植性强、维护容易、可扩充性强、计算效率高及使用方便等诸多特性,在世界许多研究和业务机构的各种项目及数值预报业务中得到了广泛应用。WRF 模式应用了多级并行分解算法、更为先进的数值计算和资料同化技术,多重移动嵌套网格性能以及更为完善的物理过程,可应用于天气预报、大气化学、区域气候等方面,有助于开展针对不同类型、不同地域天气过程的高分辨率数值模拟。WRF 模式是中尺度天气模式,适用于天气过程的模拟研究。如要利用其优点开展气候研究,就需要对 WRF 模式进行改进。本文用两种改进后的气候模式来模拟北极区域气候,并比较两种模式的结果,分析北极气候的特点。以此加深对影响北极气候模拟结果因素的理解,更好地开展研究工作。

2. 模式、资料及试验设计

2.1. 模式介绍

本文将利用基于两个不同版本 WRF 模式的区域气候模式开展北极气候模拟试验。两个区域气候模式分别是在 WRF3.2.1 模式和 PWR3.3.1 (PWR3.3.1 模式是在版本号为 3.3.1 的 WRF 模式基础上发展出的北极区域天气模式)^[3]基础上发展起来的。基于 WRF3.2.1 的气候模式(WRF/PCE (WRF/Polar Climate Extension version))较天气模式 WRF3.2.1 改进之处主要有:增加了下边界更新功能,实现了海冰密集度、海表面温度、植被覆盖度、叶面积指数、地表反照率等物理量的更新;增加了平均结果的计算和输出功能,实现了按月输出模拟结果,既节省了存储空间,又方便了对结果的分析;并且参照中间格式文件的写法,将存储格式为 netCDF 的再分析资料转换为符合 metgrid 要求的无

格式二进制文件, 已达到 WRF 前处理系统中所需中间格式文件的要求^[4,5]。围绕物理过程参数化问题, 利用 WRF/PCE 模式的试验结果表明, 反照率参数化方案对夏季北极区域气温模拟结果影响非常大^[6]。基于 PWRF3.3.1 的气候模式(PWRF/CE(PWRF/Climate Extension)较天气模式 PWRF3.3.1 改进之处与 WRF/PCE 相同。

2.2. 资料介绍

数值试验中采用 1989 年的 ERA-interim 再分析数据集^[7-9]生成初始场、侧边界条件和下边界条件。ERA-interim 再分析资料是欧洲中期天气预报中心在 ERA-40 的基础上发展起来的最新的再分析资料系统, 气压分层为 37 层, 水平分辨率为 $1.5^\circ \times 1.5^\circ$ 。降水资料采用卫星遥感反演降水资料^[10]。分析数值模拟结果时, 使用的是月平均结果。

2.3. 数值试验设计

分别利用 PWRF/CE 和 WRF/PCE 模式进行了北极气候数值模拟试验, 积分时间为 1 年, 模式逐月输出月平均结果。两个试验采用的物理过程方案相同: 微物理过程采用 Morrison 2-moment 方案, 长波辐射采用 rrtmg 方案, 短波辐射采用 rrtmg 方案, 近地面层采用 MYNN 方案, 陆面过程采用 Noah 方案, 边界层采用 MYNN 2.5level TKE 方案, 积云参数化采用 Grell-Devenyi 方案。

数值模式采用极射赤道面地图投影坐标系。水平方向上, 网格距取为 50 km, 计算范围为 160×100 格点, 北极点位于计算范围中心。铅直方向上, 采用 σ 坐标, 模式大气被不等距地分为 27 层, 其中约 8 层位于边界层内, 模式大气上界取为 50 hPa。

3. 模拟结果

3.1. 温度

WRF/PCE 模式模拟的 2 m 温度年平均结果中在格陵兰岛有一冷中心, 中心温度低于 235 K, 在北冰洋中心有中心温度低于 250 K 的冷中心, 在挪威海有一暖舌, 暖舌区域温度高于 275 K(见图 1(a))。与 ERA-interim 资料结果对比, 在北冰洋中心区域温度偏低, 中心差值小于 -9 K, 格陵兰岛温度也偏低, 中心差值

小于 -12 K(图 1(b))。PWRF/CE 模式试验结果分布与图 1(a)相似, 但北冰洋洋面温度比之高 2~3 K, 格陵兰岛低温区覆盖范围也有所缩小(见图 1(c)), 与 ERA-interim 资料结果偏离较小(图 1(d))。

WRF/PCE 模式模拟的 700 hPa 温度年平均结果中在格陵兰岛为冷中心, 中心温度低于 236 K(见图 2(a)), 与 ERA-interim 资料结果对比, 格陵兰岛温度也偏低, 中心差值小于 -14 K(图 2(b))。PWRF/CE 模式试验结果分布与图 2(a)相似, 但格陵兰岛中心温度比之高 4 K, 250 K 曲线覆盖范围有所扩大(见图 2(c)), 与 ERA-interim 资料结果偏离稍小(图 2(d))。

WRF/PCE 模式模拟的 500 hPa 温度年平均结果中在埃尔斯米尔岛北部附近海域有一冷中心, 中心温度低于 238 K(见图 3(a))。与 ERA-interim 资料结果对比, 在格陵兰岛和东西伯利亚海有差值中心, 中心差值分别小于 -2.2 K 和 -1.8 K(图略)。PWRF/CE 模式试验结果分布与图 3a 相似, 只是 238 K 低温曲线覆盖范围有所扩大(见图 3(b)), 与 ERA-interim 资料结果偏离也较小(图略)。

3.2. 位势高度场

WRF/PCE 模式模拟的 700 hPa 位势高度场年平均结果中在北地群岛附近有一低值中心(见图 4(a))。与 ERA-interim 资料结果相比, 维多利亚岛附近中心差值小于 -21 gpm, 北冰洋中心模拟的结果较好, 中心差值在 0 gpm 附近(见图 4(b))。PWRF/CE 模式实验结果与图 4(a)相似, 只是低值中心偏移至北冰洋中心附近(见图 4(c)), 与 ERA-interim 资料结果对比, 模式模拟的位势高度偏低, 在帕里群岛附近中心差值小于 -30 gpm, 在欧亚大陆的迪克森附近模拟的结果较好(图略)。

WRF/PCE 模式模拟的 500 hPa 位势高度场年平均结果中在北地群岛附近形成一个小范围的低值中心(见图 5(a))。与 ERA-interim 资料结果相比, 模拟结果偏低, 在帕里群岛附近中心差值小于 -39 gpm, 格陵兰岛的中心差值小于 -42 gpm, 巴伦支海附近的中心差值小于 -36 gpm(见图 5(b))。PWRF/CE 模式模拟结果与图 5(a)相似, 只是低值中心移到埃尔斯米尔岛附近海域, 且覆盖范围有所扩大(见图 5(c))。与 ERA-interim 资料结果对比, 在帕里群岛有一差值中心,

基于两个不同版本 WRF 模式的北极区域气候数值模拟——年平均结果

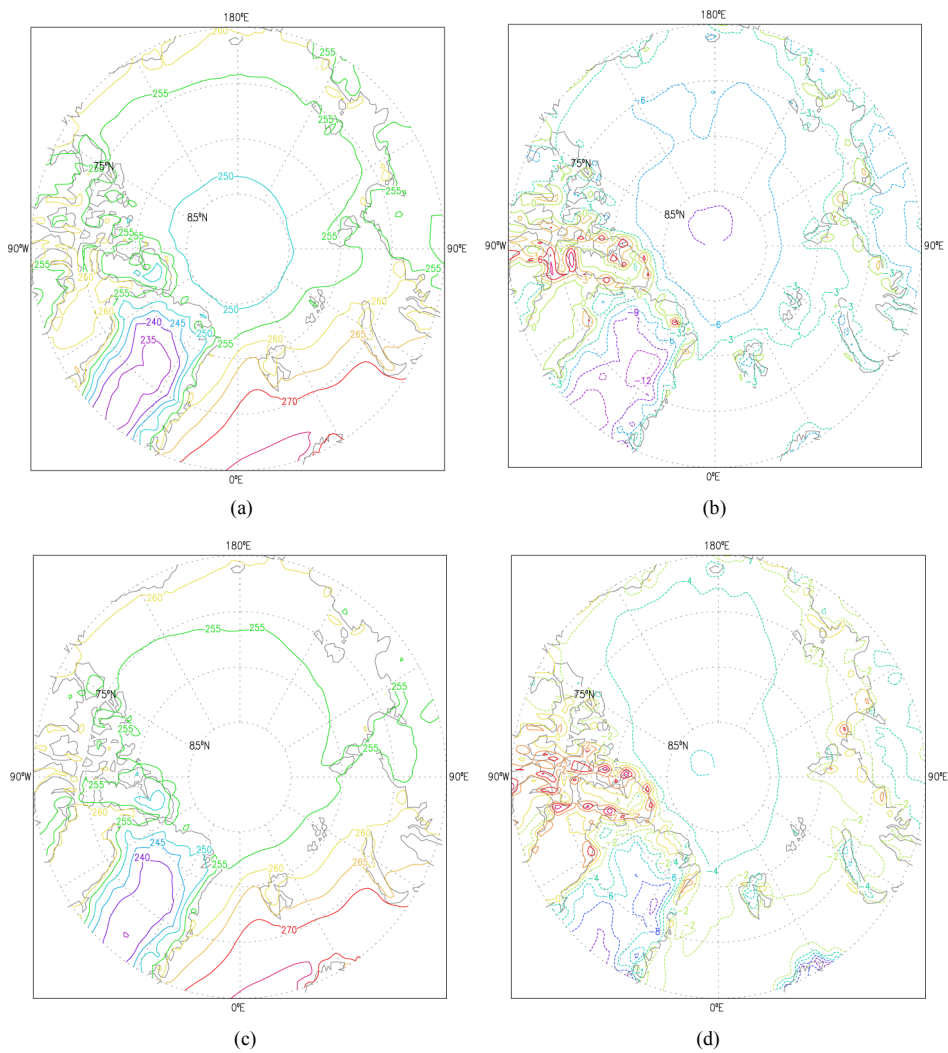
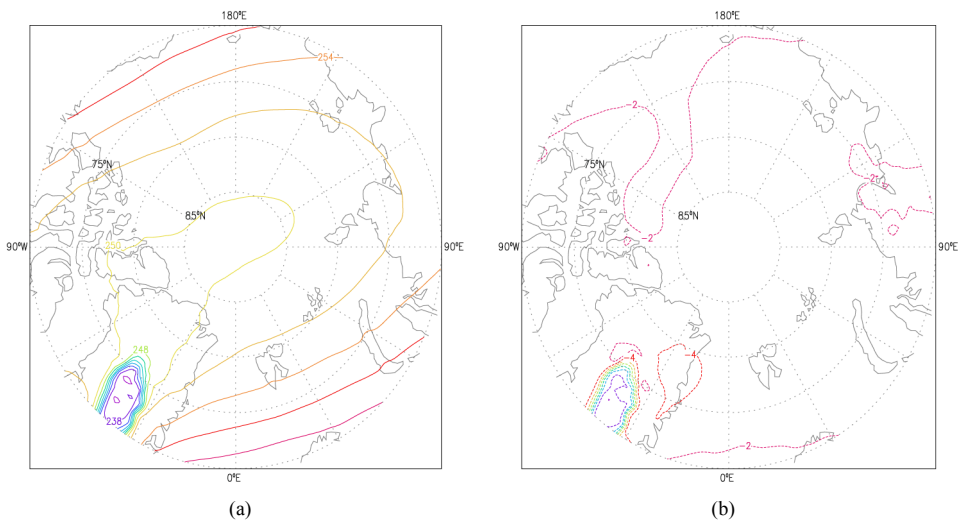


Figure 1. Annual mean temperature at 2 m in simulation area. (a) Result of the WRF/PCE model test, contour interval 5 K; (b) Result of the WRF/PCE model test minus ERA-interim, contour interval 3 K; (c) Result of the PWRf/CE model test, contour interval 5 K; (d) Result of the PWRf/CE model test minus ERA-interim, contour interval 2 K

图 1. 模拟区域 2 m 温度场年平均分布。(a) WRF/PCE 模式试验结果年平均分布；(b) WRF/PCE 模式试验结果与 ERA-interim 资料的年平均差值分布；(c) PWRf/CE 模式试验结果年平均分布；(d) PWRf/CE 模式试验结果与 ERA-interim 资料的年平均差值分布



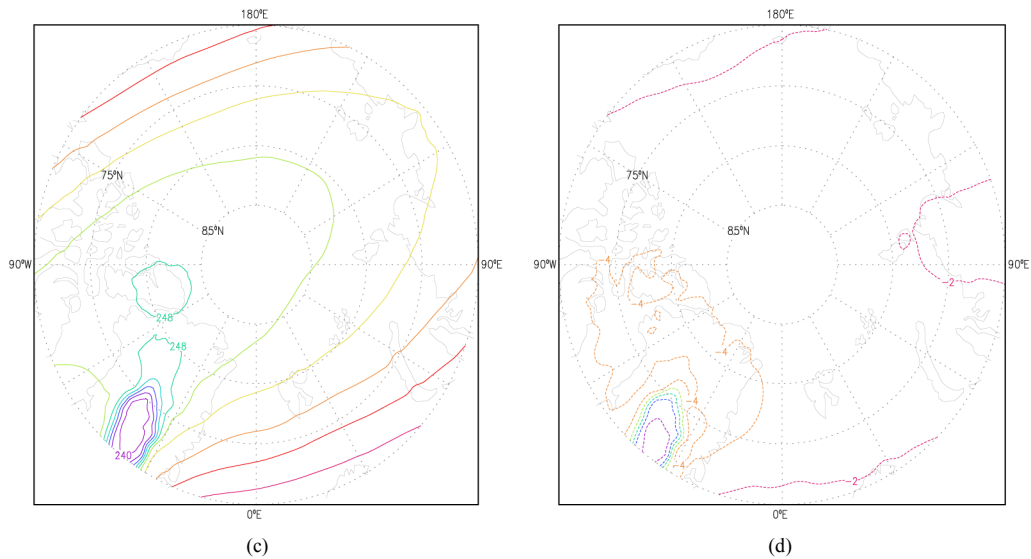


Figure 2. Annual mean temperature at 700 hPa in simulation area. (a) Result of the WRF/PCE model test, contour interval 2 K; (b) Result of the WRF/PCE model test minus ERA-interim, contour interval 2 K; (c) Result of the PWRF/CE model test, contour interval 2 K; (d) Result of the PWRF/CE model test minus ERA-interim, contour interval 2 K
 图 2. 模拟区域 700 hPa 温度场年平均分布。(a) WRF/PCE 模式试验结果年平均分布；(b) WRF/PCE 模式试验结果与 ERA-interim 资料的年平均差值分布；(c) PWRF/CE 模式试验结果年平均分布；(d) PWRF/CE 模式试验结果与 ERA-interim 资料的年平均差值分布

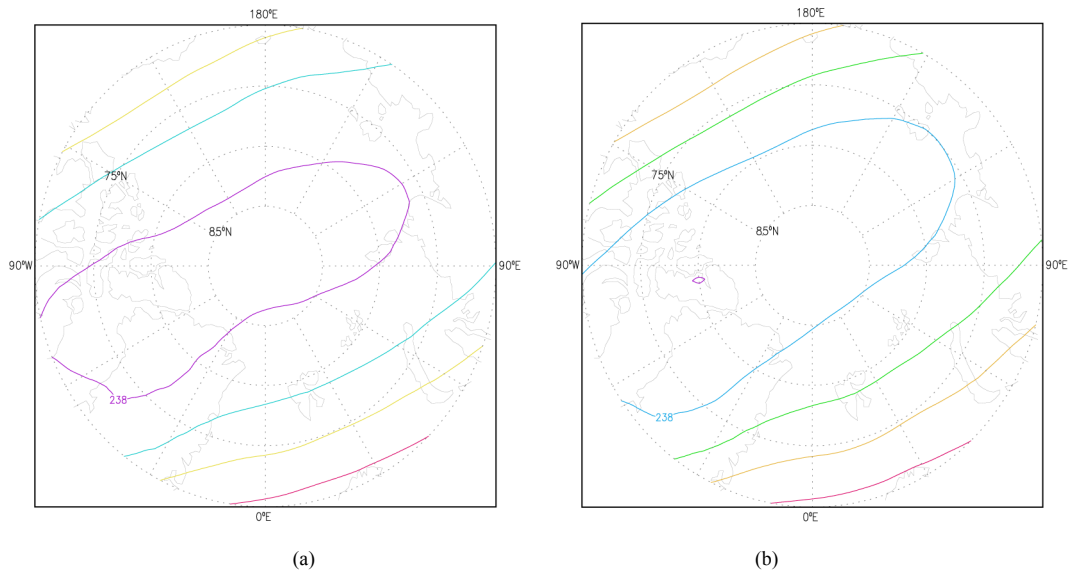


Figure 3. Annual mean temperature at 500 hPa in simulation area. (a) Result of the WRF/PCE model test, contour interval 2 K; (b) Result of the PWRF/CE model test, contour interval 2 K
 图 3. 模拟区域 500 hPa 温度场年平均分布。(a) WRF/PCE 模式试验结果年平均分布；(b) PWRF/CE 模式试验结果年平均分布

中心差值小于-60 gpm, 格陵兰岛的中心差值小于-55 gpm(图略)。

3.3. 海平面气压场

WRF/PCE 模式模拟的海平面气压的年平均差值分布结果中, 格陵兰岛的模拟结果偏低, 中心差值小于-9 hPa, 北冰洋中心有一小范围的差值中心, 中心

差值大于 0 hPa, 格陵兰海区域的差值大于 1 hPa(见图 6(a))。PWRF/CE 模式实验结果与图 6(a)相似, 格陵兰岛的中心差值也小于-9 hPa, 北冰洋中心的模拟效果较好, 中心差值大于 0 hPa 附近且覆盖范围较大, 格陵兰海区域的差值大于 0 hPa(见图 6(b))。格陵兰岛的模拟结果偏低是由地形因素造成的, 两者比较下, PWRF/CE 模式模拟结果稍好。

基于两个不同版本 WRF 模式的北极区域气候数值模拟——年平均结果

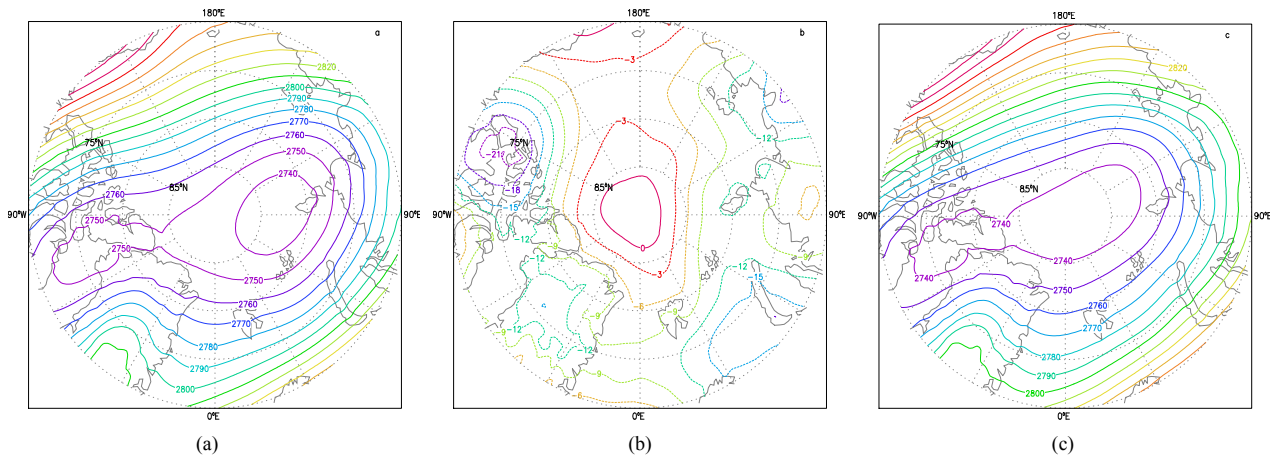


Figure 4. Annual mean geopotential height at 700 hPa in simulation area. (a) Result of the WRF/PCE model test, contour interval 10 gpm; (b) Result of the WRF/PCE model test minus ERA-interim, contour interval 3 gpm; (c) Result of the PWRF/CE model test, contour interval 10 gpm

图 4. 模拟区域 700 hPa 位势高度场年平均分布。(a) WRF/PCE 模式试验结果年平均分布；(b) WRF/PCE 模式试验结果与 ERA-interim 资料的年平均差值分布；(c) PWRF/CE 模式试验结果年平均分布

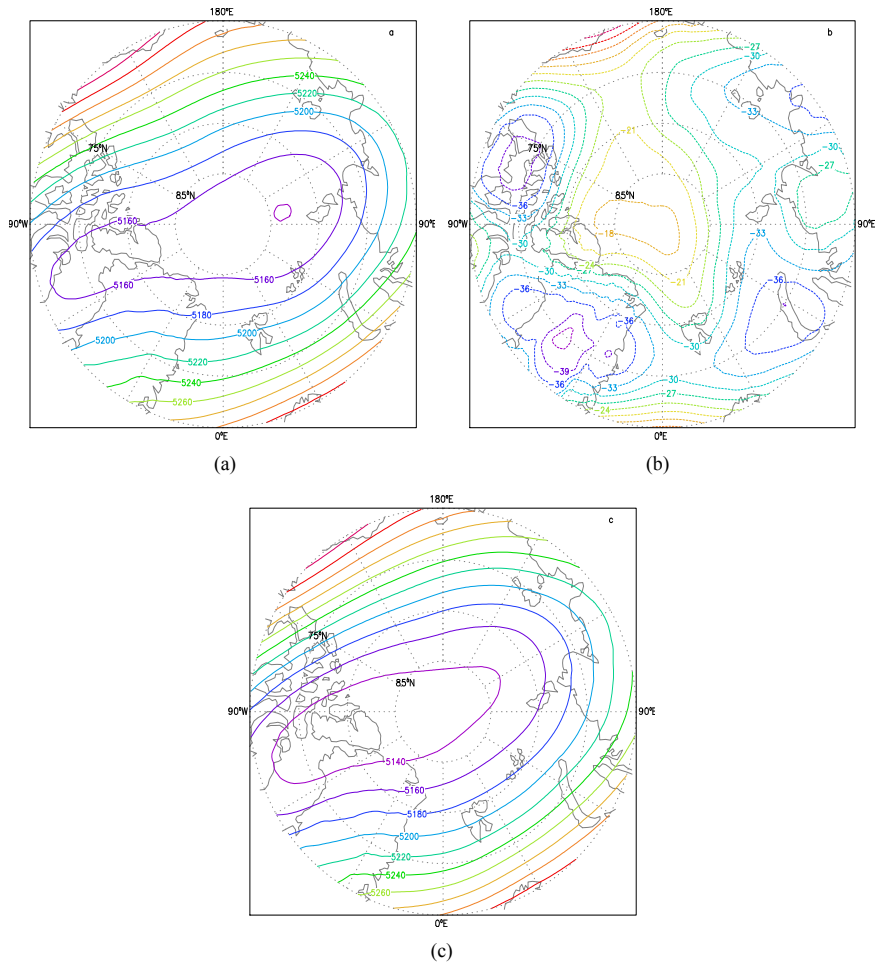


Figure 5. Annual mean geopotential height at 500 hPa in simulation area. (a) Result of the WRF/PCE model test, contour interval 20 gpm; (b) Result of the WRF/PCE model test minus ERA-interim, contour interval 3 gpm; (c) Result of the PWRF/CE mode test, contour interval 20 gpm

图 5. 模拟区域 500 hPa 位势高度场年平均分布。(a) WRF/PCE 模式试验结果年平均分布；(b) WRF/PCE 模式试验结果与 ERA-interim 资料的年平均差值分布；(c) PWRF/CE 模式试验结果年平均分布

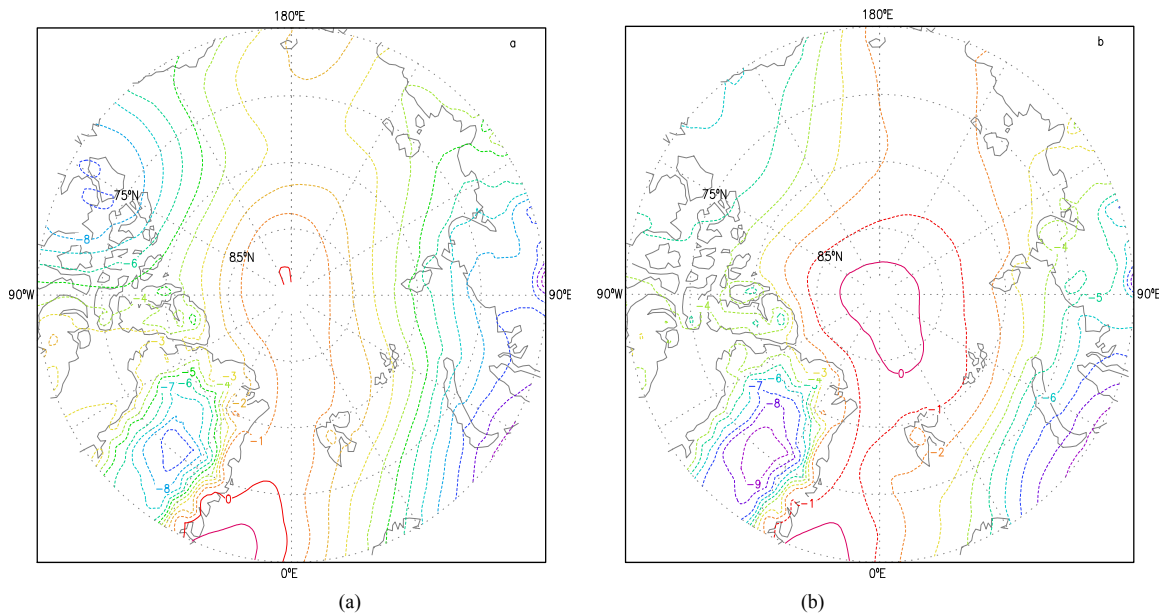


Figure 6. Annual mean sea-level pressure over ocean in simulation area. (a) Result of the WRF/PCE model test minus ERA-interim, contour interval 1 hPa; (b) Result of the PWRP/CE model test minus ERA-interim, contour interval 1 hPa
图 6. 模拟区域海平面气压年平均差值分布。(a) WRF/PCE 模式实验结果与 ERA-interim 资料的差值分布; (b) PWRP/CE 模式实验结果与 ERA-interim 资料的差值分布

3.4. 风场

WRF/PCE 模式模拟的 700 hPa 的风场的年平均差值分布结果中风从巴伦支海、喀拉海吹向拉普捷夫海，而拉普捷夫海、东西伯利亚海的风穿过北冰洋吹向波弗特海，最大风速差值为 10 m/s(见图 7(a))。PWRP/CE 模式试验结果分布与图 7(a)相似，最大风速差值也相同(图略)。

WRF/PCE 模式模拟的 500 hPa 的风场的年平均差值分布结果中整体情况与 700 hPa 相似，风速差值增大到 20 m/s(见图 7(b))。PWRP/CE 模式试验结果分布与图 7(b)相似，最大风速差值也相同(图略)。

WRF/PCE 模式模拟的 200 hPa 的风场的年平均差值分布结果中，风速差值最大为 40 m/s(见图 7(c))。PWRP/CE 模式试验结果分布与之相似(图略)。

3.5. 降水

WRF/PCE 模式模拟的降水年平均分布结果中对流性降水的降水量较小，最大只有 0.6 mm，且比较靠南，这说明对流性降水在北极高纬度地区影响较小(图略)，这是比较合理的，也是与卫星遥感反演降水资料吻合的，稳定性降水在挪威海北部有超过 10 mm 的降水中心(图略)。总的降水模拟结果与卫星遥感反演降

水资料相比，降水中心位置偏北且降水量较大，这说明稳定性降水占降水的主要因素，模式对稳定性降水模拟的位置偏北且降水量偏大，模式对降水模拟的效果不好(见图 8(a)，图 8(b))。PWRP/CE 模式试验结果分布与之相似(图略)。

4. 结论

本文用 WRF/PCE 和 PWRP/CE 两种区域气候模式对北极气候进行了数值模拟，限于篇幅本文只给出年平均结果的分析描述。通过分析得到以下结论：在温度场中，基于 WRF3.2.1 的气候模式模拟的结果偏低；在位势高度场中，两者的模拟结果均偏低，差异性较大的区域主要在维多利亚岛附近；海平面气压场中，基于 WRF3.2.1 的模式模拟的低值区域较大，没有基于 PWRP3.3.1 的模式模拟的结果好；两个模式风场差异伸展到高层并随高度的升高而风速差值增大，到 200 hPa 时风速差值最大为 40 m/s；两者的降水模拟结果比较相似，对流性降水模拟的结果较好，对稳定性降水模拟的位置偏北且降水量偏大，对整体降水的模拟结果不好。在数值模拟试验中，基于 PWRP3.3.1 的气候模式整体显示出优于基于 WRF3.2.1 模式的性能。

基于两个不同版本 WRF 模式的北极区域气候数值模拟——年平均结果

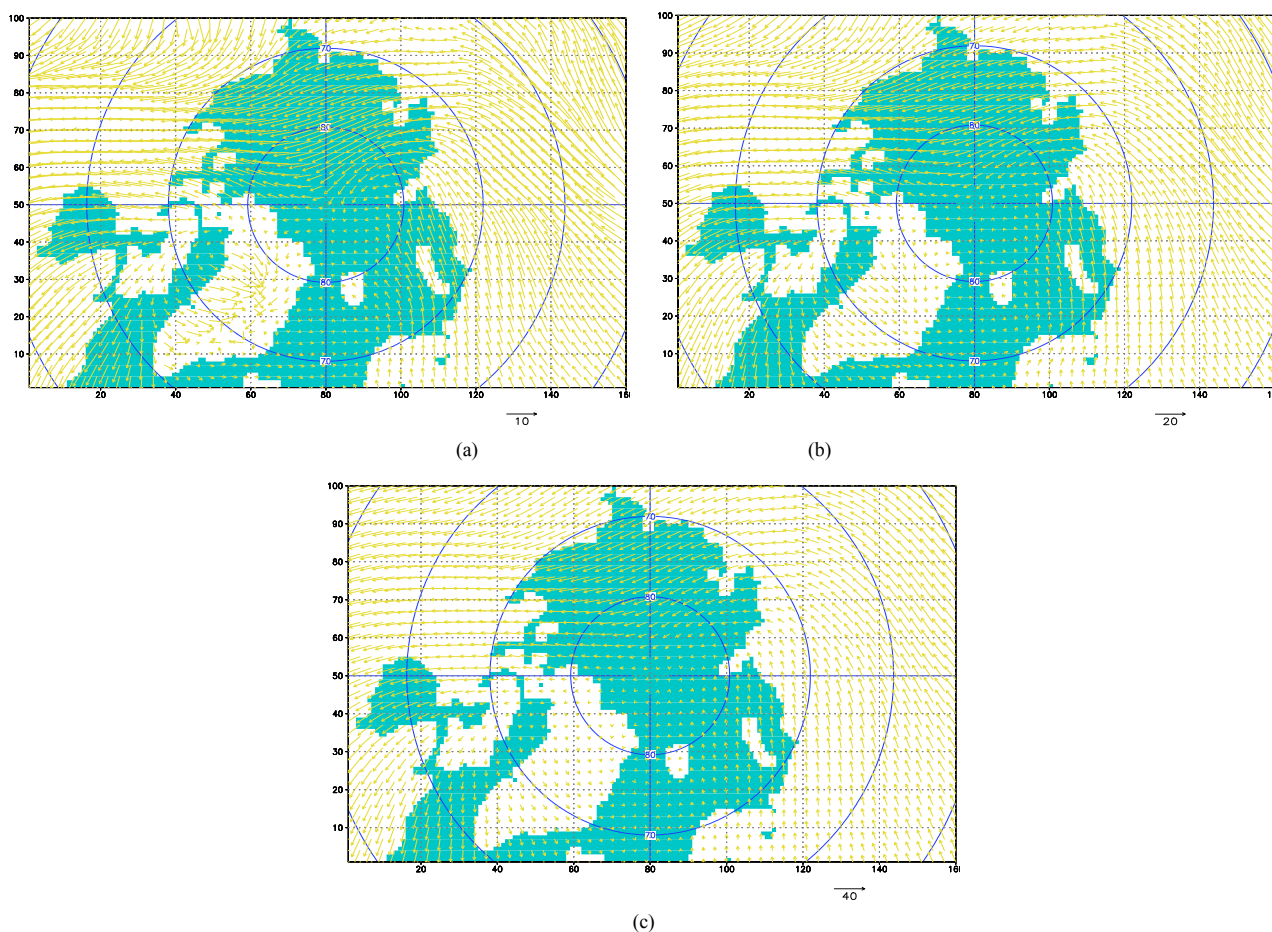


Figure 7. Annual mean wind field in simulation area. Result of the WRF/PCE model test minus ERA-interim. (a) The result at 700 hPa; (b) The result at 500 hPa; (c) The result at 200 hPa

图 7. 模拟区域风场年平均差值分布。图为 WRF/PCE 模式试验结果与 ERA-interim 资料的差值分布：(a) 700hPa；(b) 500hPa；(c) 200hPa

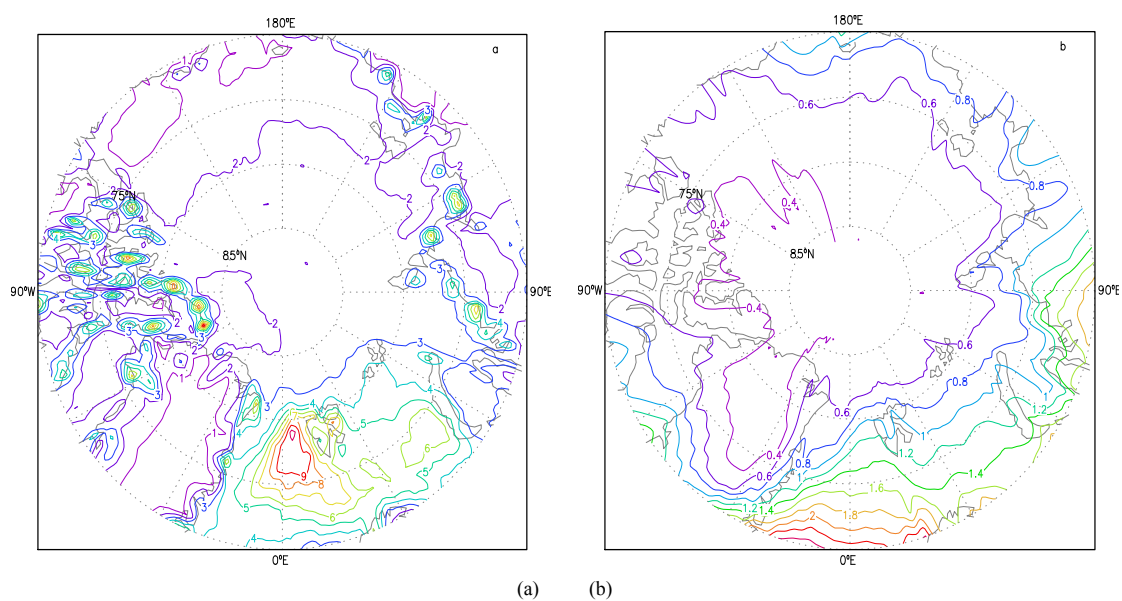


Figure 8. Annual mean precipitation in simulation area. (a) Result of the WRF/PCE model test, contour interval 1 mm; (b) The inversion of satellite remote sensing precipitation data, contour interval 0.2 mm

图 8. 模拟区域降水年平均分布。(a) WRF/PCE 模式年平均降水分布；(b) 卫星遥感反演降水资料

5. 致谢

本文受国家自然科学基金项目(41276190)资助; 本文所用 ERA-interim 资料是来自欧洲中期天气预报中心(ECMWF)数据服务网站。

参考文献 (References)

- [1] 马艳, 刘洪芝, 靳立亚. 区域气候模式的发展及研究进展[J]. 甘肃科技, 2006, 22(12): 137-139.
- [2] W. C. Skamarock, J. B. Dudhia, D. O. Gill, et al. A description of the advanced research WRF version 3. NCAR Technical Note, Boulder: National Center for Atmospheric Research, 2008.
- [3] D. H. Bromwich, K. M. Hines and L. S. Bai. Development and testing of polar weather research and forecasting model: 2. Arctic ocean. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2009, 114(D8).
- [4] H. S. Xia, X. Y. Liu. Numerical simulation of Arctic climate with the improved WRF model. *Proceedings of 2010 International Conference on Remote Sensing*, IEEE Inc., 2010, 3: 577-582. (In Chinese with English abstract)
- [5] H. S. Xia. Numerical simulations of the impact of sea ice and external atmospheric changes on the Arctic climate. Nanjing: PLA University of Science and Technology, 2011. (In Chinese with English abstract)
- [6] X. Y. Liu, J. H. Zhao, H. S. Xia, et al. Temperature biases in modeled polar climate and adoption of physical parameterization schemes. *Advances in Polar Science*, 2012, 23(1): 30-40.
- [7] S. Uppala, D. Dee, S. Kobayashi, et al. Towards a climate data assimilation system: Status update of ERA-interim, *ECMWF Newsletter No. 115*. 2008: 12-18.
- [8] A. Simmons, S. Uppala, D. Dee, et al. ERA-Interim: New ECMWF reanalysis products from 1989 onwards, *ECMWF Newsletter No. 110*. 2006/2007: 25-35.
- [9] D. P. Dee, S. Uppala. Variational bias correction of satellite radiance data in the ERA-Interim reanalysis. *Quarterly Journal of Royal Meteorology Society*, 2009, 135(644): 1830-1841.
- [10] G. J. Huffman, R. F. Adler, M. Morrissey, D. T. Bolvin, S. Curtis, J. Janowiak, B. McGavock and J. Susskind. Global precipitation at one-degree daily resolution from multi-satellite observations. *Journal of Hydrometeorology*, 2001, 2(1): 36-50.