

王冰笛,李清泉,沈新勇,等.区域气候模式CWRf对东亚冬季风气候特征的模拟[J].地球科学进展,2020,35(3):319-330.DOI:10.11867/j.issn.1001-8166.2020.025.[Wang Bingdi, Li Qingquan, Shen Xinyong, et al. Climatological characteristics of the East Asian winter monsoon simulated by CWRf regional climate model[J]. Advances in Earth Science, 2020, 35(3): 319-330. DOI: 10.11867/j. issn.1001-8166.2020.025.]

区域气候模式CWRf对东亚冬季风气候特征的模拟*

王冰笛^{1,2},李清泉^{1,2},沈新勇^{1,3*},董李丽²,汪方^{1,2},王涛⁴,梁信忠⁵

(1.南京信息工程大学气象灾害教育部重点实验室/气候与环境变化国际合作联合实验室/气象灾害预报预警与评估协同创新中心,江苏 南京 210044;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.南方海洋科学与工程广东省实验室(珠海),广东 珠海 519082;4.沈阳区域气候中心,辽宁 沈阳 110166;5.Earth System Science Interdisciplinary Center, University of Maryland, MD, USA 20742)

摘要:利用1979—2016年欧洲中期天气预报中心的ERA-Interim大气再分析资料及美国国家海洋和大气管理局的ERSSTv4海表面温度资料驱动区域气候模式CWRf,对东亚冬季风气候特征进行模拟和评估。结果表明:CWRf模式能够较好地再现东亚冬季风环流的平均特征,包括低层大陆冷高压的位置、中心强度以及高低层风场的变化特征,对北风出现区域和频率的模拟也与再分析资料的结果相符。该模式模拟的中国地区的气温、降水分布与观测基本一致,水汽输送也与再分析资料吻合,来自孟加拉湾的水汽为华南降水所需的水分起着至关重要的作用。对视热源和视水汽汇的模拟结果表明,模式较好地模拟出了东亚大陆与邻近海域的热力差异。分析结果均表明,区域气候模式CWRf具备模拟东亚冬季风主要特征的能力。

关键词:区域气候模式;东亚冬季风;数值模拟;CWRf;冬季风指数

中图分类号: P467

文献标志码: A

文章编号: 1001-8166(2020)03-0319-12

1 引言

东亚冬季风是北半球冬季环流最重要的系统之一,也是最活跃的大气环流系统。它们在中国及周边地区的冬季气候中起着重要作用。随着冬季季风的建立,冷空气爆发南下,不仅给中国带来了降温、大风、雪灾和沙尘暴等恶劣天气,还会给东南亚带来强对流和暴雨,甚至可以向南爆发越过赤道对澳大利亚夏季风产生影响^[1-4]。

20世纪70年代“全球大气研究计划的子计划

——冬季风试验”以及随后的研究揭示了有关冬季风、寒潮和冷涌的一些特征和机理,尤其是冷涌发生时中、低纬度大气之间的相互作用^[5,6]。Ding等^[7]利用合成方法计算了西伯利亚高压和冬季风的热收支情况并分析了东亚冬季风和冷空气活动的演变特征,研究了冷高压和冷空气的强化机制。Ding^[8]对东亚冬季风和寒潮演变特征的统计研究表明,东亚冬季风和寒潮的年际变化以及活动特征与近地面的西伯利亚高压活动和强度以及冷涌有密切关系。

收稿日期:2020-01-18;修回日期:2020-02-28.

* 基金项目:中国科学院战略性先导科技专项子课题“青藏高原热源的长期变化及其与亚非季风系统的关系”(编号:XDA20100304);第二次青藏高原综合科学考察研究专题“亚洲水塔变化及其广域效应”(编号:2019QZKK0208)资助。

作者简介:王冰笛(1995-),女,江苏徐州人,硕士研究生,主要从事区域气候模式模拟研究. E-mail: 1209596511@qq.com

* 通信作者:沈新勇(1964-),男,江苏兴化人,教授,主要从事研究中尺度气象学、台风动力学及数值模拟、气溶胶的气候效应等研究. E-mail: shenxy@nuist.edu.cn

相比于全球气候模式,区域气候模式具备较高的水平分辨率、更为完善的物理过程参数化方案,使模式对局地强迫引起的气候特征具有更好的模拟能力^[9-11]。截止目前,大多数区域气候模式是以美国国家大气研究中心(National Center for Atmospheric Research, NCAR)和宾夕法尼亚州立大学共同开发的中尺度模式(Mesoscale Model)MM4或MM5为基础。其中应用发展最广泛的是RegCM(Regional Climate Modeling system)系列模式,目前已经发展到RegCM4,更新了一系列新的参数化方案,RegCM系列同时也是目前中国应用最广的区域气候模式。与此同时,凭借领先的超级计算机技术和软件架构为支撑的NCAR研制出的中尺度预报模式WRF(the Weather Research and Forecasting model)在并行运算上有相当卓越的表现,它采用模块化程序设计,模块程序相互独立,便于使用者再开发^[11,12]。

以往的绝大多数研究主要集中在对夏季极端天气气候事件的个例^[13,14]以及对中国东部地区平均气候场的模拟上^[15-17]。与夏季风相比,对冬季风模拟评估的工作相对较少。同时相关研究表明,模式模拟的冬季风系统优于夏季风,对气温的模拟优于降水^[18-20]。随着区域气候模拟研究的进一步深入,新一代区域气候模式CWRP(Climate-Weather Research and Forecasting model)因其优异性能开始被广泛应用^[11]。Liang等^[21,22]改良了WRF的物理过程并通过大量敏感性试验完成了CWRP的开发。CWRP继承了WRF在数值天气预报上的全部功能且增加了进行气候尺度预报的能力,新增了云—气溶胶—辐射集合系统^[23],针对关键物理过程提供了海量的参数化方案可供选择,使CWRP能最大限度地模拟逼近真实世界的物理过程。近期Liang等^[20]对中国区域进行大量的长期模拟试验,结果表明最新版的CWRP模拟效果依旧比最新的RegCM4.6更精确,尤其是降水的时空分布。

本文利用区域气候模式CWRP对1980—2016年东亚冬季风多年平均特征的模拟结果与多种资料进行评估,考察模式对这一时段东亚冬季风环流特征的模拟能力,为模式的进一步发展、完善及其在东亚冬季风的研究和预测的应用做出贡献。

2 模式、资料和方法

2.1 模式和资料

CWRP模式为每一个关键的物理过程集成了一套参数化方案^[20],采用兰勃特投影,中心点位于

35.18°N, 110°E,垂直方向分为36层,水平分辨率为30 km,纬向和经向格点数分别为232和172^[23]。采用每日4次的ERA-Interim再分析资料^[24]和ERSSTv4海温资料^[25]强迫CWRP模式开展模拟试验,积分时间从1979年10月1日开始至2016年12月31日结束。

作为模式评估的参考,本文选取ERA-Interim再分析资料,物理量包括位势高度、温度、风、地面气压和湿度;采用中国2416站的气温和降水资料与模拟结果进行对比分析。为方便比较,统一将数据以双线性插值方法插值到水平分辨率为0.75°×0.75°的规则网格。

2.2 方法

2.2.1 冬季风指数的定义

为更细致地评估模式对东亚冬季风强度的模拟能力,计算和比较了模式和ERA-Interim的平均冬季风指数。参考乔云亭等^[26]的方法并考虑到冬季东亚地区以北风控制为主,在20°~40°N和100°~140°E范围内,同时考虑面积和强度2个因素,定义了偏北风($v < 0$)的面积和强度的季风指数,具体如下:

$$A_n = N_n / N, I_n = \sum U_n / N_n, \quad (1)$$

式中: A_n 是偏北风面积指数, I_n 是强度指数, N_n 是850 hPa上CWRP模式有效模拟区域范围内(扇形)偏北风的网格点数, U_n 表示偏北风的风速, N 表示CWRP模式有效模拟区域范围内(扇形)总的网格点数。

2.2.2 视热源和视水汽汇的计算方法

根据Yanai等^[27]描述的方法,采用倒算法计算视热源(Q_1)和视水汽汇(Q_2)。由热力学方程和水汽方程可得:

$$Q_1 = C_p \left[\frac{\partial T}{\partial t} + \vec{V} \cdot \nabla T + \left(\frac{\partial p}{\partial p_0} \right)^k \omega \frac{\partial \theta}{\partial p} \right], \quad (2)$$

$$Q_2 = -L / C_p \left[\frac{\partial q}{\partial t} + \vec{V} \cdot \nabla q + \omega \frac{\partial q}{\partial p} \right], \quad (3)$$

式中: $k=R/C_p$, R 和 C_p 分别为干空气气体常数和定压比热; θ 为位温; T 为气温; p 为气压; t 为时间; q 为比湿; $\vec{V}$ 为水平风向量; ∇T 为温度梯度; ∇q 为水汽梯度; p_0 为1000 hPa; ω 为 p 坐标的垂直速度; L 为凝结潜热; Q_1 表示单位时间内单位质量空气的加热率; Q_2 表示单位时间内单位质量水汽凝结释放热量引起的增温率。对公式(2)和(3)从 p_i (对 Q_1 为100 hPa,对 Q_2 为300 hPa)到 p_s (地面气压)整层垂直积分,公式为:

$$\langle Q_1 \rangle = \frac{1}{g} \int_{p_i}^{p_s} Q_1 dp = \langle Q_R \rangle + SH + LP, \quad (4)$$

$$\langle Q_2 \rangle = \frac{1}{g} \int_{p_i}^{p_s} Q_2 dp = L(P - E), \quad (5)$$

式中:视热源 $\langle Q_1 \rangle$ 表示整层大气中单位面积气柱内 Q_1 的垂直积分,包括大气净辐射 $\langle Q_R \rangle$,地面感热加热 SH 和凝结潜热加热 LP 。视水汽汇 $\langle Q_2 \rangle$ 是整层大气中单位面积气柱内 Q_2 的垂直积分, P 表示降水量, L 表示凝结潜热, E 表示蒸发量,当水汽因凝结或凝华而减少,说明潜热释放,此时视水汽汇为正;反之为负。大气热源 $\langle Q_1 \rangle$ 的变化一定程度上受到了水汽汇 $\langle Q_2 \rangle$ 的影响^[28,29]。

3 冬季平均环流的模拟评估

3.1 高度场和温度场

西伯利亚高压是东亚地区冬季出现的主要天气系统。它与东亚地区的冷空气爆发和冷涌活动密切相关,所以判断模式是否具有模拟东亚冬季风的主要特征的能力,关键在于它是否能准确地模拟

出西伯利亚高压的强度。CWRF模式模拟结果和再分析资料36年冬季平均的1 000 hPa位势高度和850 hPa气温(图1)相比较,2种资料都显示出东亚中高纬地区存在面积、强度都异常大的大陆冷高压。高压中心大体位于中东西伯利亚和蒙古地区(约45°N),最大值约为260 gpm。高压向东南延伸至低纬度地区,且冷高压系统非常浅薄,在近地层较为明显。850 hPa的冬季平均气温(图1中的等值线)表明,低层的冷槽对应于1 000 hPa高度场中冷高压向南延伸脊线的位置。温度梯度由低纬指向高纬,低纬地区较为温暖,是西太平洋副热带高压的活跃区。

36年冬季平均的各层模拟高度场和气温场与ERA-Interim再分析场的空间相关系数均大于0.96,其中相关系数随着高度在1 000~950 hPa略下降、在950~300 hPa增加(图2a)。气温的相关系数在200 hPa下降了约0.03,但空间相关系数仍在0.97以上(图2b)。模拟结果与ERA-Interim的空间高相关性表明模式能够成功模拟东亚区域位势高度和气温空间分布。

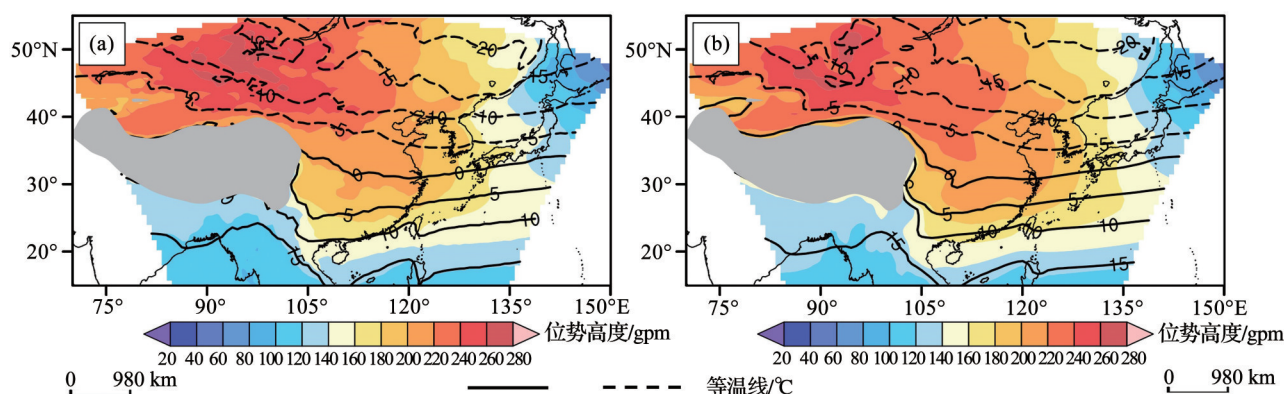


图1 冬季平均1 000 hPa位势高度和850 hPa温度

Fig.1 The mean 1 000 hPa geopotential height and 850 hPa temperature in winter

(a)模拟;(b)ERA-Interim再分析;阴影填色区为位势高度,单位:gpm;灰色阴影表示地形高度高于2 600 m区域;

黑色等值线表示温度,单位:°C,其中虚线表示气温低于0 °C,实线表示气温等于或高于0 °C

(a) Simulation; (b) ERA-Interim reanalysis; Color shadow refers to potential height, unit: gpm; Gray shadow refers to terrain height higher than 2 600 m; Black contour refers to temperature, unit: °C; Dotted line denotes air temperature lower than 0 °C, and solid line denotes air temperature equal to or higher than 0 °C

3.2 风场

东亚冬季风对中国大范围地区的降雨和地面气温的变化有显著影响,它与中国发生的许多恶劣天气密切相关,例如寒潮和沙尘暴。较弱的东亚冬季风仅影响长江流域和中国北部地区,但较强的冬季风可以影响到低纬度地区,有些甚至南下越过赤道对南半球造成影响。因此,在模式中重现东亚

冬季风的分布特征很有必要。

图3给出了1980—2016年冬季平均850和200 hPa模拟与ERA-Interim的风场。从冬季850 hPa风场(图3b,d)可以看出,西伯利亚东部、中国北部和日本海盛行西北风,风速最大达到12 m/s。与此同时,孟加拉湾上空表现为西南风(图1),这与槽前盛行的西南气流相符。模拟的风向和风速均与

ERA-Interim再分析基本吻合,仅在中国东北部和渤海附近模拟出的西北气流略微偏弱。从冬季200 hPa风场(图3a,c)可以看到,东亚地区以强劲的西风为主。ERA-Interim的急流中心位于日本岛东

南海上空,中心最大风速达到75.1 m/s,模拟位置与其相同,最大速度为74.7 m/s。总体来说,冬季年平均急流位置和强度的模拟与ERA-Interim基本一致,模拟的急流中心最大风速偏差小于0.5 m/s。

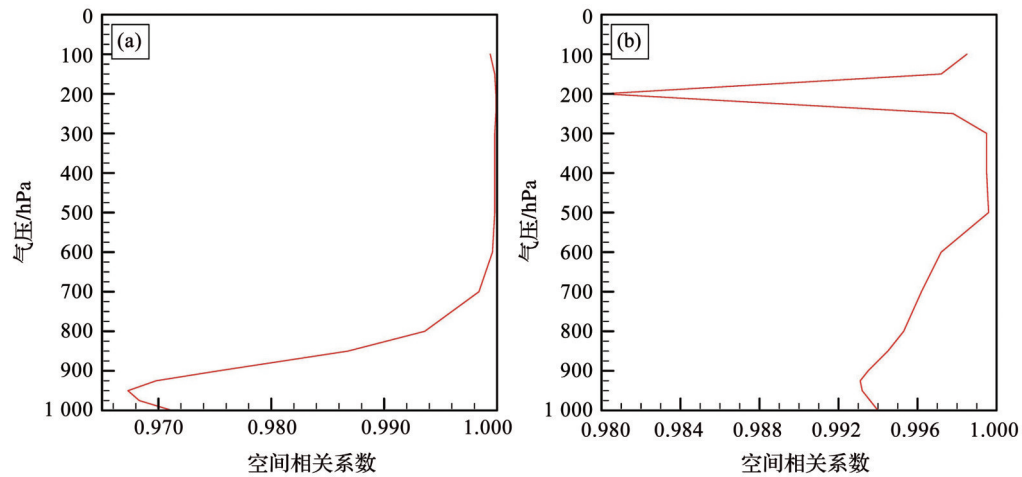


图2 冬季平均模拟结果与ERA-Interim再分析资料的空间相关系数垂直分布
Fig.2 Vertical distribution of spatial correlation coefficients between winter average simulation results and ERA-Interim reanalysis data

(a)位势高度; (b)气温

(a) Geopotential height; (b) Temperature

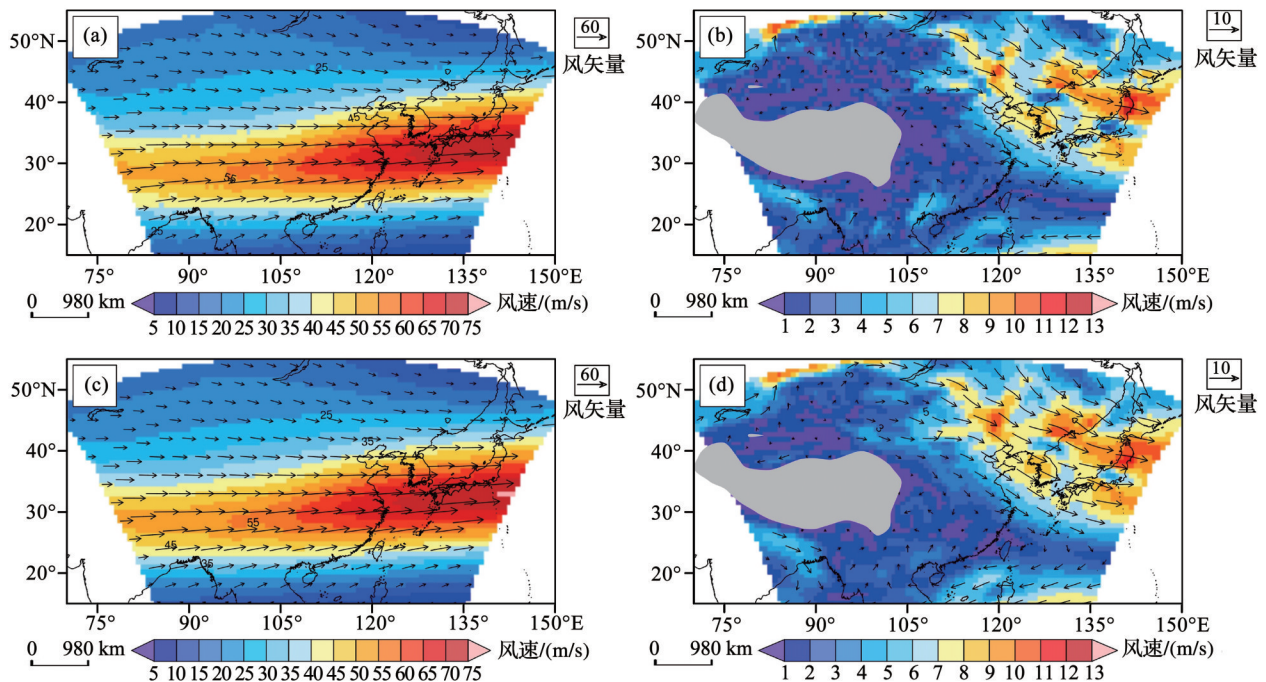


图3 冬季平均风场

Fig.3 Winter mean wind

(a)200 hPa的模拟; (b)850 hPa的模拟; (c)200 hPa的ERA-Interim再分析; (d)850 hPa的ERA-Interim再分析;

彩色阴影表示风速,单位: m/s; 灰色阴影表示地形高度高于2 600 m的区域

(a) Simulation at 200 hPa; (b) Simulation at 850 hPa; (c) ERA-Interim reanalysis at 200 hPa; (d) ERA-Interim reanalysis at 850 hPa;

Color shadow refers to wind speed, unit: m/s; Gray shadow denotes terrain height higher than 2 600 m

3.3 水汽输送

与东亚冬季风相关联的水汽输送对中国地区的气温和降水起着重要的作用。水汽输送伴随动量和热量的转移,从而导致沿途的气温、气压等其他气象因子发生改变,是水循环过程的重要环节,也是影响当地天气过程和气候的重要原因^[30]。因此,判断模式是否具备模拟东亚冬季风主要特征的能力,进行水汽输送的评估是必要的。

从冬季平均的模拟和再分析的整层积分水汽输送(图4)可见,东亚地区冬季的水汽输送呈纬向型分布,其大值区主要分布在低纬。东亚地区有两个水汽丰富而稳定的区域,分别位于菲律宾海和东海。中国华南地区的丰富的水汽输送大多数

来自孟加拉湾上空处于槽前脊后的强西南气流,其携带着孟加拉湾的水汽输送至中国的华南地区,成为华南降水的主要原因之一。除此之外,华南地区另一个水汽输送来自近赤道西太平洋地区沿东风的转向气流。这两股水汽输送的分支在华南地区汇聚,保证了冬季中国华南有稳定充沛的水汽来源(由于模拟区域有限,图4中无法全部显示)。模拟场(图4a)与ERA-Interim(图4b)对比可见,除中国西部高原地区和西北部部分区域以及南海水汽输送模拟相比再分析略小之外,整层积分水汽输送的方向和分布特征都与再分析场一致,故该模式很好地模拟出东亚冬季风水汽输送的特征。

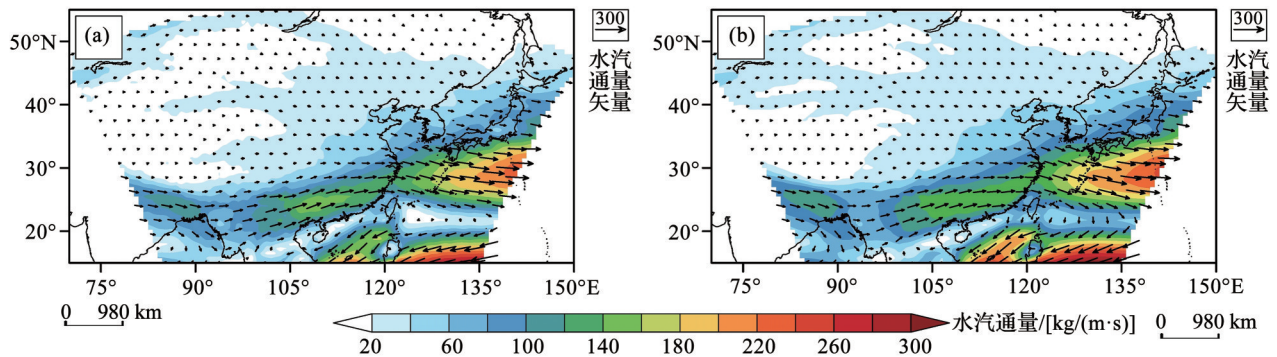


图4 冬季平均整层积分的水汽通量和大小

Fig.4 Winter mean vertically integrated vapor transport and its magnitude

(a)模拟;(b)ERA-Interim再分析;箭头表示水汽通量,阴影填色区表示水汽通量大小

(a) Simulation; (b) ERA-Interim reanalysis; Shadow represents vapor transport magnitude

4 冬季风指数和北风的模拟评估

根据本文2.2节介绍的冬季风指数定义分别计算出1980—2016年逐年冬季和36年平均冬季逐月的偏北风面积和强度指数作为东亚冬季风指数。表1和表2分别给出了模拟和ERA-Interim再分析36年冬季和逐月平均的偏北风的面积和强度指数(表1)及其时间相关系数(表2)。模拟的偏北风面积和强度指数略小于ERA-Interim,其相关系数超过0.89,通过99%的置信度检验,说明CWRF模式具有成功模拟冬季风的能力。

图5给出了模拟和ERA-Interim偏北风面积和强度指数的时间序列,可以看出CWRF模拟结果的时间变化特征都与ERA-Interim基本一致,但是与东亚冬季风指数模拟类似,模拟的面积指数和强度指数整体偏小。尽管如此,时间相关系数表明CWRF模式能够很好地模拟出东亚冬季风的年际

表1 模拟与ERA-Interim再分析的东亚冬季风指数

Table 1 The East Asian winter monsoon index of simulation and ERA-Interim reanalysis

	月份	CWRF	ERA-Interim
面积指数(A_n)	1	0.6037	0.6636
	2	0.5653	0.6331
	12	0.5972	0.6752
	平均	0.5887	0.6573
强度指数(I_n)	1	2.3332	2.3557
	2	2.1434	2.4626
	12	2.1670	2.4626
	平均	2.2145	2.4777

变化特征(表1,2)。

在冬季风出现期间,冷空气从中高纬度大陆向南爆发导致低层南海和西太平洋地区的偏北风迅速增强,地面气温骤然下降,考察模式对北风的模拟能力是必不可少的。1 000 hPa冬季偏北风发生

频率的平均分布(图6填色部分)非常清楚地表明了冬季风的基本状况。较高的北风出现频率(>80%)位于日本海、东海、南海和菲律宾海等沿海和海上地区,模式很好地模拟出这些特征。1 000 hPa 冬季偏北风大于 5 m/s 的空间分布(图6中蓝色等值线)清楚地显示了出现强北风的位置。强北风的最高频率区位于南海地区(图6中只显示出南海北部地区)。东海和日本海等地也是强北风的高发区。与再分析场比较,CWRF 区域气候模式成功地

模拟出强北风发生的主要区域,模拟的强北风频率也与 ERA-Interim 基本一致。

表 2 模拟与 ERA-Interim 再分析的东亚冬季风指数的时间相关系数

Table 2 Temporal correlation coefficient between the East Asian winter monsoon index of simulation and ERA-Interim reanalysis		
	面积指数(A_n)	强度指数(I_n)
CWRF 与 ERA-Interim	0.8942	0.9638

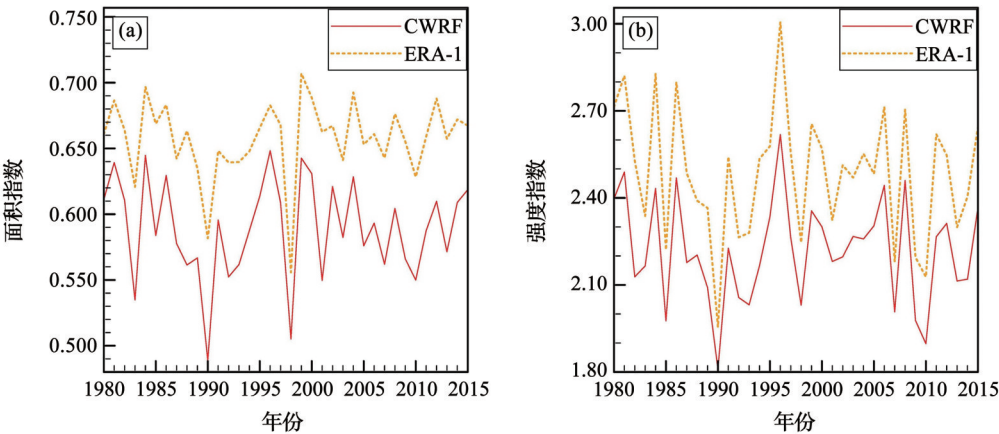


图5 东亚冬季风指数逐年变化曲线

Fig.5 Annual evolution curve of the East Asian winter monsoon index

(a) 偏北季风面积指数; (b) 偏北季风强度指数
(a) Northern monsoon area index; (b) Northern monsoon intensity index

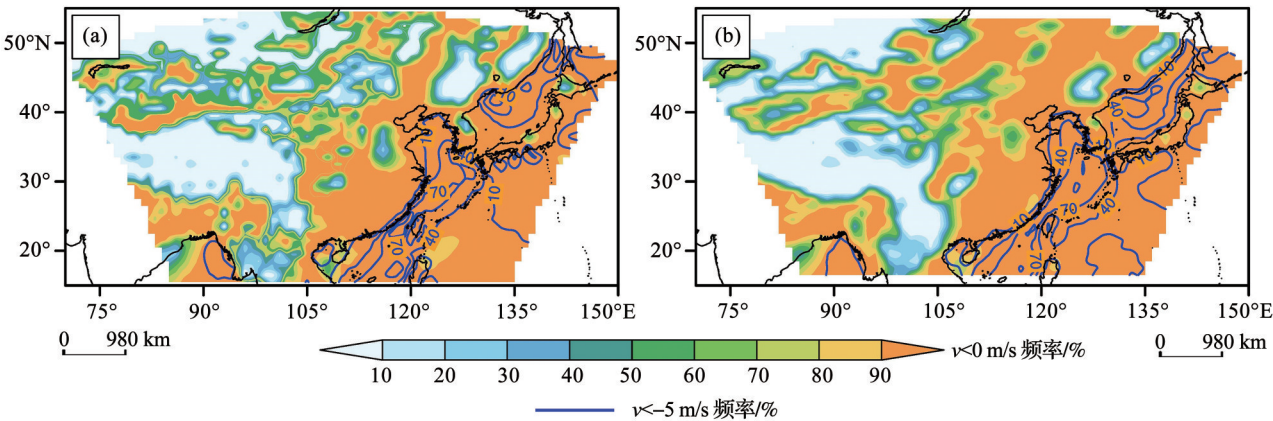


图6 冬季 1 000 hPa 偏北风频率分布

Fig.6 Distribution of northerly wind frequency at 1 000 hPa in winter

(a) 模拟; (b) ERA-Interim 再分析; 阴影填色区表示 $v < 0$ m/s 的频率, 蓝色等值线表示 $v < -5$ m/s 的频率, 单位: %
(a) Simulation; (b) ERA-Interim reanalysis; Color shadow represents the frequency of $v < 0$ m/s, blue contour represents the frequency of $v < -5$ m/s, unit: %

5 冬季地面气温和降水的模拟评估

5.1 地面气温

如前所述, 冬季风的强度变化和水汽输送对东

亚大陆, 特别是中国的气温和降水变化有着显著的影响, 图7和图8分别给出了36年冬季我国地表平均气温和累计降雨量的模拟结果与同期2 416站观测结果的时间相关和差值分布。中国冬季的陆地

温度梯度非常大,温度最高的地区是海南,平均温度可达24~28℃,而最北方地区平均温度低至-28℃。除青藏高原外,等温线基本呈纬向分布

(图7a,b)。模式很好地模拟出我国冬季平均气温随纬度的阶梯分布的特征。但从差值场中可见(图7e),中国大部分区域模拟的地表气温比观测值偏

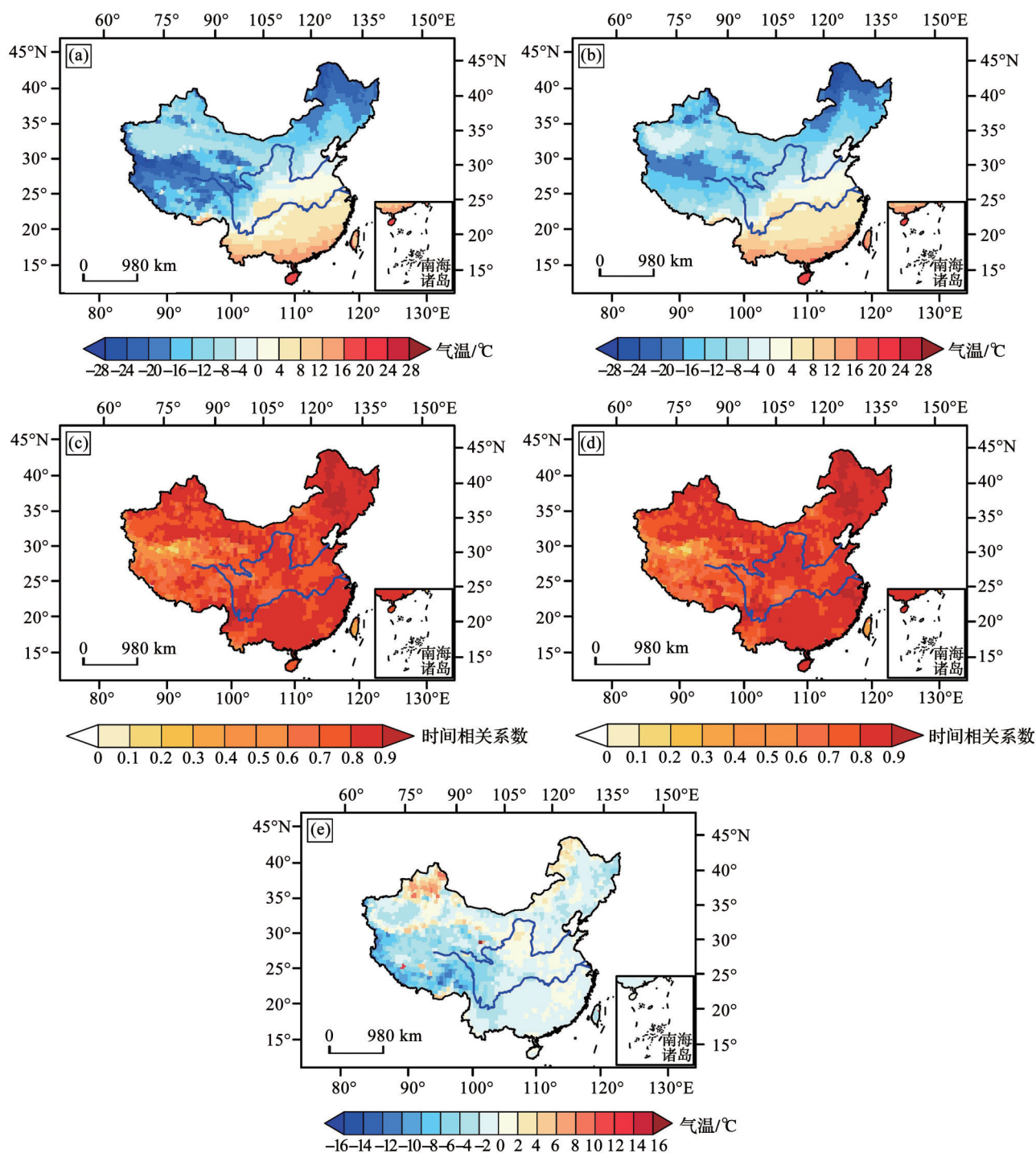


图7 冬季平均气温及模拟与观测的相关系数

Fig.7 Winter average surface air temperature and correlation coefficient between simulation and observation

(a)模拟气温;(b)观测气温;(c)未去趋势的模拟与观测气温的时间相关系数;(d)去趋势的模拟与观测气温的时间相关系数;(e)模拟和观测的差值场

(a) Simulation; (b) Observation; (c) Time correlation coefficient of un-detrended simulation and observed air temperature; (d) Time correlation coefficient of detrended simulation and observed air temperature; (e) Difference between simulation and observation

低,冬季模拟温度的整体冷偏差现象在其他模式中普遍存在^[31]。由于在中国西部尤其是青藏高原地区观测站点稀疏,插值计算存在着很大的不确定性,因此模式评估以观测台站较多的中国东部区域为主^[20]。由模拟与观测气温的时间相关系数的分布(图 7c,d)可以看出,除去青藏高原地区,无论是否去趋势,相关系数都在 0.7 以上,中国东北和华南的相关系数高达 0.8,东北部分地区更是达到了 0.9,通过 99% 的置信度检验,去趋势的相关系数较未去趋势大,说明模式对温度内部变率的成功模拟。同时,中国区域的模拟与观测气温的空间相关系数高达 0.96,说明该模式能够成功模拟出中国多年冬季平均地表气温的分布特征。

5.2 降水

从时间相关系数的分布(图 8c,d)可见模式对降水的模拟没有气温的理想,其他区域气候模式同样存在这种情况^[20,31]。但是模式仍然较好地模拟出了中国冬季雨带的分布,中国部分地区的模拟与观测的空间相关系数达到 0.90,雨带位于华南的广东、江西、福建、浙江一带,与前文水汽输送的分析相符。模拟的冬季雨带平均位置与观测较为一致(图 8a,b),由差值图(图 8c)可以看出,除中国西部部分地区外,模拟的降雨量普遍偏多。正如李巧萍等^[32]指出的,模式产生的模拟误差的可能原因是多方面的,如模式中对地形的处理、选择不同物理参数化方案的影响等,特别是降水、地面气温的模拟还受到陆面过程、大尺度强迫场等多方面的影响。因此,为了取得更好的模拟效果,对模式进行多方案、多影响因子的敏感性试验很有必要,从而不断改进和优化该模式在东亚区域的模拟性能。

6 冬季视热源和视水汽汇

一直以来,许多学者致力于计算和分析亚洲季风区的大气热源的变化及其对大气环流的影响,已经有不少研究表明,印度洋和西太平洋两大洋与亚洲大陆之间显著的经向热力差异和纬向热力差异是亚洲季风形成和维持的最主要原因之一^[29]。大气热源能影响大气环流,是引起大尺度环流变化的关键。此外,大气热源异常还影响着大气遥相关型的形成和维持^[33,34]。因此,模式能否成功模拟出冬季大气整层积分的视热源和视水汽汇的强度和分布特征,是判断该模式是否具备模拟东亚冬季风主要特点的关键因子之一。

图 9 给出了冬季模拟与 ERA-Interim $\langle Q_1 \rangle$ 和 $\langle Q_2 \rangle$ 的空间分布。从 $\langle Q_1 \rangle$ (图 9a,c)可见,西北太平洋上 30°~53°N 的中纬度地区为正值,其中心值达 300 W/m²以上,是东亚冬季风期间最强的大气热源区,该热源可能与冬季黑潮暖流和东亚冬季风的强弱有关。另外,在孟加拉湾中北部、高原南侧、亚洲大陆的大部分地区和西北太平洋上副热带地区是 $\langle Q_1 \rangle$ 的负值区。对比可见,模拟场在青藏高原等个别区域的计算值误差较大但整体分布特征基本一致。从 $\langle Q_2 \rangle$ 的分布(图 9b,d)可以看出,显著的正中心位于中国的华南地区,这表明空气柱水汽释放凝结潜热,水汽净辐合,与前文提到的在华南地区存在的明显降雨区相对应。此外,在西北太平洋上空尤其是日本南部存在 $\langle Q_2 \rangle$ 的负中心,水汽辐散不利于降水事件的出现。模拟和再分析资料得到的 $\langle Q_1 \rangle$ 和 $\langle Q_2 \rangle$ 的比较表明,尽管模拟结果计算出的量值不能与 ERA-Interim 各个区域的热收支完全相符,但该模式可以很好地揭示热量和水汽的分布特征。

7 结论与讨论

本文利用新一代区域气候模式 CWRP1980—2016 年冬季的模拟结果和同期 ERA-Interim 再分析资料及中国台站气温和降水观测资料着重评估了该模式对东亚冬季风的模拟能力,得到的主要结论如下:

(1)CWRP 模式能较好地模拟出东亚地区冬季平均环流强度以及分布特征。较为成功地模拟了近地面西伯利亚冷高压以及与其南伸脊线相叠加的低层温度冷槽的位置和强度。冬季风的模拟强度与观测结果相一致,该模式模拟的冬季风面积指数和强度指数与再分析场基本一致,其较高的时间相关性也表明该模式可以很好地模拟出东亚冬季风的强度。

(2)CWRP 模式较好地模拟了偏北风的发生频率和区域。在近地面层,东海、南海和日本海是高频区。模拟的地面气温和降雨量与中国台站观测场一致,模式不仅成功地模拟出中国冬季平均地表气温的分布特征,对气温内部变率的成功模拟,但模拟的气温普遍偏低,大部分地区模拟降水量偏多。模拟和观测结果均表明华南发生降水的前提条件是孟加拉湾和西太平洋两个重要的水汽输送分支,它们在华南汇合,为华南持续降水带来丰富而稳定的水汽。

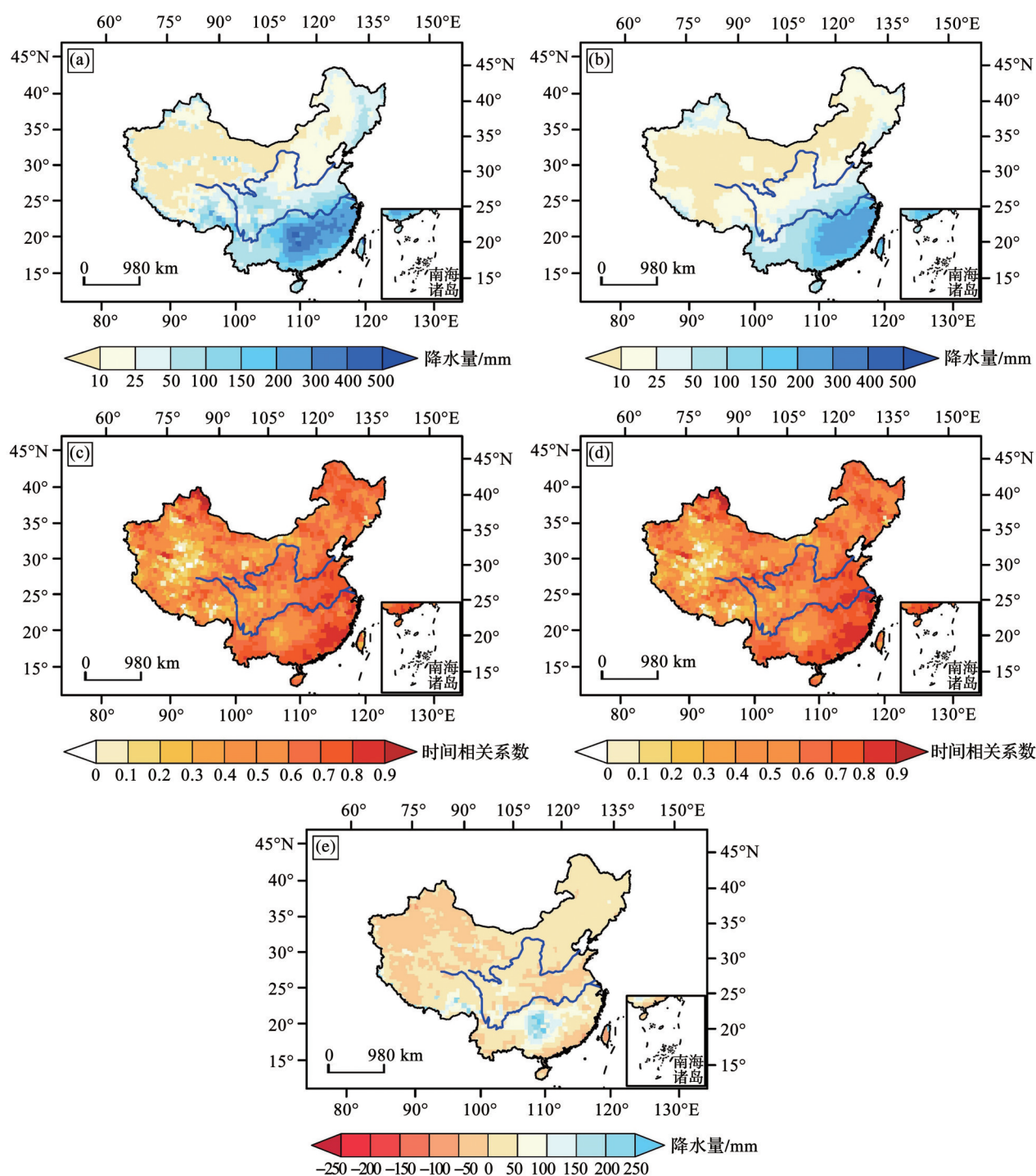


图8 冬季累积降水量及模拟与观测的相关系数

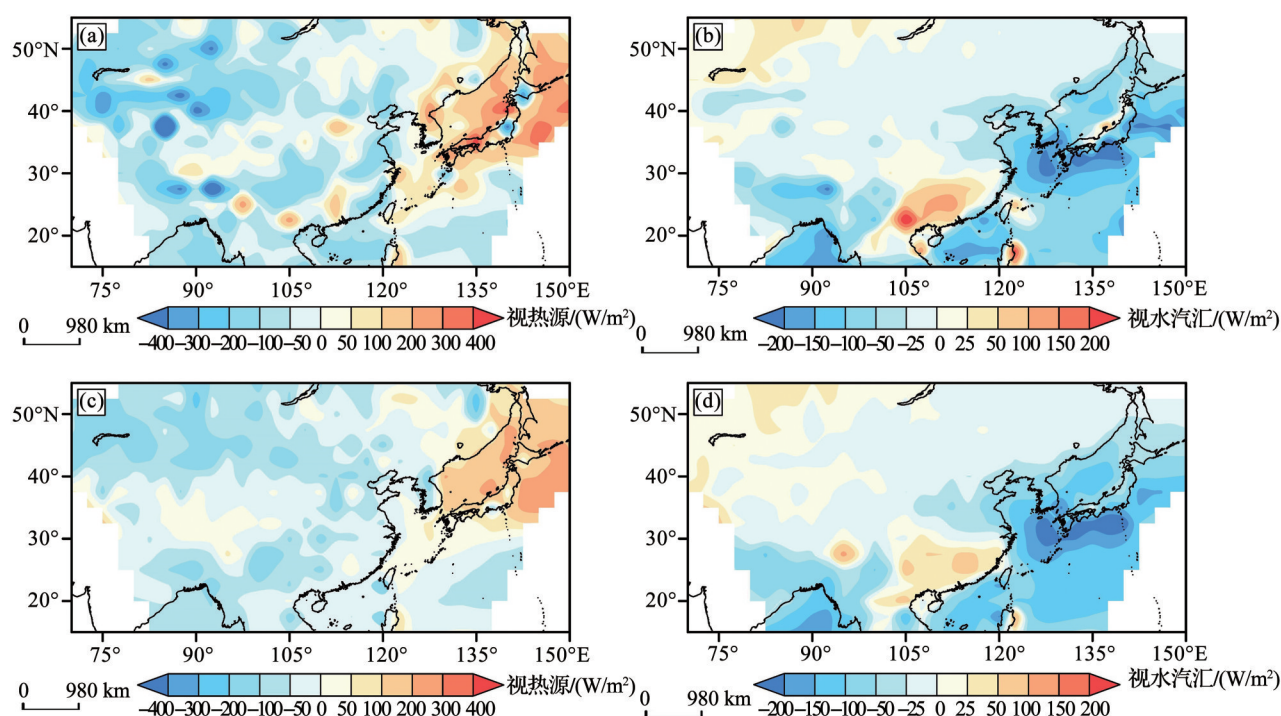
Fig.8 Winter accumulated precipitation and correlation coefficient between simulation and observation

(a)模拟;(b)观测;(c)未去趋势的模拟与观测降水量的时间相关系数;(d)去趋势的模拟与观测降水量的时间相关系数;(e)模拟和观测的差值场

(a) Simulation; (b) Observation; (c) Time correlation coefficient of un-detrended simulation and observed precipitation; (d) Time correlation coefficient of detrended simulation and observed precipitation; (e) Difference between simulation and observation

(3)热量收支分析表明东亚大陆和海洋之间的热量差异明显,在东亚大陆的大部分地区存在 $\langle Q_1 \rangle$ 的负值区,即大气热汇,在日本附近的海洋上则为热

源,中心值可达 300 W/m^2 ,是东亚冬季风期间最强的大气热源区。长江以南地区存在 $\langle Q_2 \rangle$ 的显著高值中心,这使得该地区冬季一般会出现较多的降水。

图9 $\langle Q_1 \rangle$ 和 $\langle Q_2 \rangle$ 的空间分布Fig.9 Spatial distribution of $\langle Q_1 \rangle$ and $\langle Q_2 \rangle$ (a)模拟 $\langle Q_1 \rangle$; (b)模拟 $\langle Q_2 \rangle$; (c)ERA-Interim 再分析 $\langle Q_1 \rangle$; (d)ERA-Interim再分析 $\langle Q_2 \rangle$ (a) Simulation $\langle Q_1 \rangle$; (b) Simulation $\langle Q_2 \rangle$; (c) ERA-Interim reanalysis $\langle Q_1 \rangle$; (d) ERA-Interim reanalysis $\langle Q_2 \rangle$

综上所述,新一代区域气候模式CWRf具有较好的模拟东亚冬季平均气候的能力。它可以成为研究东亚气候的有力工具。但仍存在不足之处,从时间和空间相关系数看出,模式对降水的模拟还存在着一些缺陷。本文仅分析了东亚地区冬季平均的特征,模式对冬季重要天气个例等的模拟结果仍有待进一步分析。今后还可以通过各种物理参数化方案的嵌套选择和进行多方案、多影响因子的敏感性试验,使该区域气候模式得到进一步完善。

参考文献(References):

- [1] Ding Yihui. Monsoons over China [M]. Netherlands: Springer, 1994.
- [2] Wang Bin, Wu Renguang, Fu Xiouhua. Pacific-East Asian teleconnection: How does ENSO affect East Asian climate? [J]. *Journal of Climate*, 2000, 13(9): 1517-1536.
- [3] Wang Lin, Chen Wen. How well do existing indices measure the strength of the East Asian winter monsoon? [J]. *Advances in Atmospheric Science*, 2010, 27(4): 855-870.
- [4] Liu Yanzhi, Zuo Ruiting, Peng Jun, et al. Research progress on the change and impact of the East Asian winter monsoon [J]. *Science and Fortune*, 2011, (1): 91-92. [刘言志, 左瑞亭, 彭军, 等. 东亚冬季风的变化及其影响的研究进展[J]. 科学与财富, 2011, (1): 91-92.]
- [5] Chang C P, Lau K M. Northeasterly cold surges and near equatorial disturbances over the winter MONEX area during December 1974, Part II: Planetary-scale aspect [J]. *Monthly Weather Review*, 1980, 108(3): 298-312.
- [6] Chang C P, Lau K M. Short-term planetary-scale interactions over the Tropics and midlatitudes during northern winter, Part I: Contrasts between active and inactive periods [J]. *Monthly Weather Review*, 1982, 110(8): 933-946.
- [7] Ding Yihui, Krishnamurti T N. Heat budget of the siberian high and the winter monsoon [J]. *Monthly Weather Review*, 1987, 115(10): 2428-2449.
- [8] Ding Yihui. A statistical study of winter monsoons in East Asia [J]. *Journal of Tropical Meteorology*, 1990, 6(2): 119-128.
- [9] Liu Shuyan. Application of CWRf in the Monsoon Region of Eastern China [D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science & Technology, 2006. [刘术艳. CWRf在中国东部季风区的应用[D].南京:南京信息工程大学, 2006.]
- [10] Liu Shuyan, Liang Xinzong, Gao Wei. Application of CWRf in China: Regional optimization [J]. *Chinese Atmospheric Science*, 2008, 32(3/4): 457-468. [刘术艳, 梁信忠, 高伟. 气候—天气研究及预报模式(CWRf)在中国的应用: 区域优化[J]. 大气科学, 2008, 32(3): 457-468.]
- [11] Liu Guanzhou, Liang Xinzong. Progress of the Climate extension of Weather Research and Forecast (CWRf) model application in China [J]. *Advances in Earth Science*, 2017, 32(7): 781-787. [刘冠州, 梁信忠. 新一代区域气候模式(CWRf)国内应

- 用进展[J].地球科学进展,2017,32(7):781-787.]
- [12] Giorgi F. Thirty years of regional climate modeling: Where are we and where we are we going next? [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2019, 124(11): 5 696-5 723.
- [13] Li Linchao. Temporal and Spatial Evolution of Extreme Temperature, Precipitation and Drought Events and Its Multi-model Prediction [D]. Yangling: Northwest A&F University, 2019. [李林超. 极端气温、降水和干旱事件的时空演变规律及其多模式预测[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2019.]
- [14] Zhang Yujing. High Resolution Numerical Simulation and Prediction of Precipitation on Regional Extreme Climate Events in China [D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2017. [张玉静. PRECIS对中国区域极端气候事件的高分辨率数值模拟与预估[D]. 北京: 中国农业科学院, 2017.]
- [15] Sun Qingfei. Simulation and Evaluation of the Influence of Mid-high Latitude and Low-latitude Circulation on Summer Precipitation in East China [D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science & Technology, 2017 [孙庆飞. 中高纬与低纬环流对我国东部夏季降水影响的模拟与评估[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2017.]
- [16] Han Zhenyu, Wang Yuxing, Nie Yu. Radiation budget analysis of RegCM4 for regional climate simulation in eastern China [J]. *Journal of Atmospheric Science*, 2016, 39(5): 683-691. [韩振宇, 王宇星, 聂羽. RegCM4对中国东部区域气候模拟的辐射收支分析[J]. 大气科学学报, 2016, 39(5): 683-691.]
- [17] Wang Tao, Wang Yishu, Cui Yan, et al. Assessment and prediction of rainfall simulation capacity of three northeastern provinces by climate model [J]. *Journal of Meteorology and environment*, 2016, 32(5): 52-60. [王涛, 王乙舒, 崔妍, 等. 气候模式对东北三省降水模拟能力评估及预估[J]. 气象与环境学报, 2016, 32(5): 52-60.]
- [18] Ding Y, Liu Y, Shi X, et al. Multi-year simulations and experimental seasonal predictions for rainy seasons in China by using a nested regional climate model (RegCM_NCC) Part II: The experimental seasonal prediction [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2006, 23(4): 487-503.
- [19] Liang X-Z, Xu M, Yuan X, et al. Regional climate-weather research and forecasting model [J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2012, 93(9): 1 363-1 387.
- [20] Liang X Z, Sun C, Zheng X, et al. CWRF performance at downscaling China climate characteristics [J]. *Climate Dynamics*, 2018, 52(3): 2 159-2 184.
- [21] Liang X Z, Choi H I, Kunkel K E, et al. Surface boundary conditions for mesoscale regional climate models [J]. *Earth Interactions*, 2005, 9(12): 305-319.
- [22] Liang X Z, Xu M, Gao W, et al. Development of land surface albedo parameterization based on Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) data [J]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 2005, 110(D11): 1 341-1 355.
- [23] Liu S, Liang X Z, Gao W. Climate-Weather Research and Forecasting model (CWRF) application in China: Domain optimization [J]. *Chinese Atmospheric Science*, 2008, 32: 457-468.
- [24] Dee D, Uppala S M, Simmons A J, et al. The ERA-Interim reanalysis: Configuration and performance of the data assimilation system [J]. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 2011, 137(656): 553-597.
- [25] Huang B, Banzon V F, Freeman E, et al. Extended Reconstructed Sea Surface Temperature Version 4 (ERSST.v4). Part I: Upgrades and intercomparisons [J]. *Journal of Climate*, 2015, 28(3): 911-930.
- [26] Qiao Yunting, Chen Lieting, Zhang Qingyun. The definition of East Asian Monsoon Indices and their relationship to climate in China [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2002, 26(1): 69-82. [乔云亭, 陈烈庭, 张庆云. 东亚季风指数的定义及其与中国气候的关系[J]. 大气科学, 2002, 26(1): 69-82.]
- [27] Yanai M, Esbensen S, Chu J H. Determination of bulk properties of tropical cloud clusters from large-scale heat and moisture budgets [J]. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 1973, 30(4): 611-627.
- [28] Jian Maoqiu, Luo Huibang. Time variation of atmospheric heat source and water vapor sink in South China [J]. *Tropical Ocean*, 1996, 15(1): 60-67. [简茂球, 罗会邦. 华南大气热源和水汽汇的时间变化[J]. 热带海洋, 1996, 15(1): 60-67.]
- [29] Jiang Ningbo, Luo Huibang. The seasonal variation of atmospheric heat source and water vapor sink in Asian monsoon area II. The seasonal variation of water vapor sink [J]. *Journal of tropical Meteorology*, 1994, 10(1): 1-8. [江宁波, 罗会邦. 亚洲季风区大气热源和水汽汇的季节内变化II. 水汽汇的季节内变化[J]. 热带气象学报, 1994, 10(1): 1-8.]
- [30] Liang Zhonghui, Huang Liyuan, Huang Jing, et al. Analysis of climate change characteristics of summer wind water vapor transport in the northern South China Sea [J]. *Brand Research*, 2018, 15(3): 212-215. [梁中惠, 黄丽元, 黄静, 等. 南海北部夏季风水汽输送的气候变化特征分析[J]. 品牌研究, 2018, 15(3): 212-215.]
- [31] Zhang Y, Sperber K R, Boyle J S. Climatology and interannual variation of the east asian winter monsoon: Results from the 1979-95 NCEP/NCAR Reanalysis [J]. *Monthly Weather Review*, 1997, 125(10): 2 605-2 619.
- [32] Li Qiaoping, Ding Yihui. Simulation of annual mean characteristics of East Asian Winter Monsoon by regional climate model [J]. *Journal of Applied Meteorology*, 2005, (Suppl.1): 30-40. [李巧萍, 丁一汇. 区域气候模式对东亚冬季风多年平均特征的模拟[J]. 应用气象学报, 2005, (增刊1): 30-40.]
- [33] Zhao Xuan, Xu Haiming, Xu Mimi, et al. The influence of the abnormal atmospheric heat source in the Kuroshio area of the East China Sea in spring on the precipitation in the East China Sea [J]. *Journal of Meteorology*, 2015, 73(2): 263-275. [赵焯, 徐海明, 徐蜜蜜, 等. 春季中国东海黑潮区大气热源异常对中国东部降水的影响[J]. 气象学报, 2015, 73(2): 263-275.]
- [34] Gong Yuanfa. Study on Low Frequency Oscillation of Atmospheric Heat Sources over the Tibetan Plateau and East Asia and Drought and Flood in Eastern China [D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science & Technology, 2008. [巩远发. 青藏高原及东亚大气热源低频振荡与我国东部旱涝的研究[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2008.]

Climatological Characteristics of the East Asian Winter Monsoon Simulated by CWRF Regional Climate Model*

Wang Bingdi^{1,2}, Li Qingquan^{1,2}, Shen Xinyong^{1,3*}, Dong Lili²,
Wang Fang^{1,2}, Wang Tao⁴, Liang Xinzhong⁵

(1. Key Laboratory of Meteorological Disaster, Ministry of Education / Joint International Research Laboratory of Climate and Environment Change / Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disasters, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China; 2. National Climate Center / Climate Research Open Laboratory of China Meteorological Administration, Beijing 100081, China; 3. Southern Marine Science and Engineering Guangdong Laboratory (Zhuhai), Guangdong Province, Zhuhai 519082, China; 4. Shenyang Regional Climate Center, Shenyang 110166, China; 5. Earth System Science Interdisciplinary Center, University of Maryland, Maryland 20742, USA)

Abstract: Based on the ERA-Interim atmospheric reanalysis data from the European Medium-Term Weather Forecast Center from 1979 to 2016 and the ERSSTv4 sea surface temperature data from the US National Oceanic and Atmospheric Administration, the regional climate model CWRF was used to simulate the climate characteristics in East Asia. The results show that the CWRF model can well reproduce the average characteristics of the East Asian winter monsoon circulation, including the location and intensity of the low-level continental cold high pressure and variation characteristics of wind field in high and low levels. The occurrence area and frequency of the north wind in the simulation and the reanalysis data were further calculated and compared. It is shown that they are basically consistent. The distribution of air temperature and precipitation over China are well represented by the model. The water vapor transport is also in good agreement with the reanalysis data. The water vapor from the Bay of Bengal plays a vital role in the precipitation over South China. The simulation results of apparent heat source and apparent moisture sink show that the model can well simulate the thermal difference between the East Asian continent and the adjacent sea area. The analysis results indicate that CWRF model has the ability to simulate the main characteristics of the East Asian winter monsoon.

Key words: Regional climate model; East Asian winter monsoon; Numerical simulation; CWRF; Winter monsoon index.

* **Foundation item:** Project supported by the Strategic Priority Research Program of Chinese Academy of Science's Sub-project "Long-term changes of heat sources over the Qinghai-Tibet Plateau and their relationship with the Asian-African Monsoon System" (No. XDA20100304); The Second Tibetan Plateau Scientific Expedition and Research Program "The change of Asian water tower and its wide effect" (No. 2019QZKK0208).

First author: Wang Bingdi (1995-), female, Xuzhou City, Jiangsu Province, Master student. Research areas include regional climate modeling research. **E-mail:** 1209596511@qq.com

* **Corresponding author:** Shen Xinyong (1964-), male, Xinghua City, Jiangsu Province, Professor. Research areas include research of meso-scale meteorology, typhoon dynamics and numerical simulation, aerosol climate effect. **E-mail:** shenxy@nuist.edu.cn