

李恺霖, 智海, 白文蓉. 2016. CMIP5 多模式对阿留申低压气候特征的模拟检验与预估 [J]. 气候与环境研究, 21 (5): 533–546. Li Kailin, Zhi Hai, Bai Wenrong. 2016. Evaluation and projection of the climatic characteristics of Aleutian low based on CMIP5 models [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 21 (5): 533–546, doi: 10.3878/j.issn.1006-9585.2016.15161.

CMIP5 多模式对阿留申低压气候特征的模拟 检验与预估

李恺霖^{1,2} 智海² 白文蓉²

¹ 福建省气象信息中心, 福州 350001

² 南京信息工程大学大气科学学院, 南京 210044

摘要 利用观测的海温资料和海平面气压资料, 检验了 CMIP5 (Coupled Model Intercomparison Project 5, CMIP5) 多模式对阿留申低压 (Aleutian Low, AL) 特征指数的时空分布和变化的模拟能力; 从 AL 周期及变化趋势等方面, 分析了 CMIP5 模式预估的未来 AL 的变化特征。结果表明, CMIP5 模式及其集合平均能够很好地模拟 AL 的环流结构, 对 AL 的气候态有着较强的模拟能力, 尤其是模式对于东太平洋海表温度的模拟能力直接影响其对于 AL 的模拟效果。模式的集合平均对变率强度的模拟偏强, 且对于变率的模拟效果逊于对气候态的模拟。22 个模式中的 16 个模式能模拟出 AL 强度指数的年代际变化周期, 对年代际周期有着较好的刻画能力。Historical 试验下对于 AL 的变化趋势存在着较大的不确定性, 而相对于两种不同排放情景, 随着排放的增加, AL 更加偏北, 强度增强, 年际、年代际周期变得更加显著。在两种排放情景下模式的集合平均以及多数模式模拟出 AL 有着向北和增强的趋势。

关键词 CMIP5 阿留申低压 气候特征 全球变暖

文章编号 1006-9585 (2016) 05-0533-14

中图分类号 P467

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2016.15161

Evaluation and Projection of the Climatic Characteristics of Aleutian Low Based on CMIP5 Models

LI Kailin^{1,2}, ZHI Hai², and BAI Wenrong²

¹ Fujian Meteorological Information Center, Fuzhou 350001

² School of Atmospheric Sciences, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044

Abstract The observed sea surface temperature, sea level pressure and multi-model simulations of the Coupled Model Inter-comparison Project 5 (CMIP5) are explored to analyze the temporal and spatial variation of the Aleutian Low (AL) index in the North Pacific. Furthermore, the decadal cycle variability is evaluated and the long-term trend is estimated based on simulations of the CMIP5. Results show that the CMIP5 multi-model simulations can well reproduce the climatology and variability of the AL circulation. Specifically, the simulated AL is sensitive to simulated sea surface temperature in the East Pacific. However, the comparison of the CMIP5 multi-model ensemble results and observations indicates that the intensity of the standard deviation of the ensemble mean is stronger than that of the observation, while the model ability for standard deviation simulation is worse than that for mean climate state simulation. Also, 16 out of

收稿日期 2015-07-07; **网络预出版日期** 2016-06-10

作者简介 李恺霖, 男, 1989 年出生, 硕士, 助理工程师, 主要从事气候变化研究。E-mail: likailing2008@126.com

资助项目 国家自然科学基金项目 41376039、41376019、41475101

Funded by National Natural Science Foundation Project of China (Grants 41376039, 41376019, and 41475101)

the 22 CMIP5 models can reproduce the decadal oscillation cycle of the AL. In the Historical experiment, there is a large disagreement over the long-term trend of AL among the model results. It is suggested that the AL strengthens and extends northward under two typical Representation Concentration Pathway scenarios (i.e. RCP4.5 and RCP8.5), particularly under the RCP8.5 scenario. More significant annual and inter-decadal variations are found under the RCP8.5 scenario. It is also noted that the ensemble mean and most of the models can forecast the AL intensity and its northward extension. However, the reason for the eastward extension of AL is still controversial.

Keywords CMIP5, Aleutian low, Climate characteristics, Global warming

1 引言

大气环流是大气最基本的特征,是天气、气候形成和演变的基本原因之一(任菊章等, 2003)。尤其是近地面的大气环流异常对区域的气候有着直接和重要的影响(龚道溢和王绍武, 1999)。阿留申低压(Aleutian Low, AL)是指在北太平洋阿留申群岛附近的半永久性低压,它是北半球半永久性大气活动中心之一。AL作为大气环流的重要组成部分,它的位置和强度对北太平洋沿岸的天气气候有着重要的影响(Trenberth and Hurrell, 1994; 郭东和孙照渤, 2004)。研究发现AL的强弱、位置变化直接对相邻区域的天气和气候有着重要的影响:其中心东侧和西侧气流的位置、强弱直接影响到极地和温带太平洋之间的热量交换,中心南侧气流的强弱影响着西风漂流的强度(Latif and Barnett, 1994)。同时AL冬季稳定存在于北太平洋对流层下部,是极地海洋气团的源地,它的存在影响着全球的气候变化(Zhu et al., 2007; 王力群等, 2010; 黄小梅, 2013)。

北半球大气活动中心存在着年际和年代际的变化。以往的研究表明冬季AL有着显著的16年和22年周期(任广成, 1991)。王绍武(1962)论证了北半球的气候变率存在着周期性,指出大气环流不仅存在着明显的年际变化,而且还存在着22年甚至更长的周期变化。尤其是北太平洋的变率具有多时间尺度性,其中最明显的周期约为10~20年左右的准20年振荡模态(朱益民和杨修群, 2003)。例如,观测发现最近一次的海平面气压降低发生在1977年以后(Trenberth, 1990; Hanawa et al., 1996),但是在1989年以后海平面气压上升(Tachibana et al., 1996),与此同时却伴随着北极圈内的海平面气压下降(Overland et al., 1999)。

近几年,随着科学技术的发展气候模式成为研究气候变化的有效工具。地球系统模式建立在物

理、化学、生物学等基础上,广泛应用于气候变化研究中。模式结果可以弥补长期资料的缺乏,克服在一些区域观测站点稀疏等不利因素,尤其是近年来对全球变暖的研究中更是起着重要作用。但是,模式作为气候变化模拟和预估的有力工具,其可靠性一直是人们关注的问题,经过之前多次耦合模式比较计划(Coupled Model Intercomparison Project, CMIP),旨在统一的框架下开展多模式比较(郭彦等, 2013)。2008年耦合模拟工作组与国际地学生物圈计划的地球系统积分与模拟计划联合召开会议,决定合作推动新一轮的气候模式比较研究计划CMIP5(Taylor et al., 2012)。新一轮的计划依然是以CMIP3为基础,但是又做了许多改进,特别是改进物理参数化和提高模式分辨率,目前的气候模式已不是单纯比较模式模拟变量的能力,而是发展到进一步深入考察模式对物理过程和因子的模拟能力,即研究模式物理的真实性。许多基于模式对大气环流及涛动的模拟能力的评估,以及对未来的预估工作也就此展开:Zhou et al. (2009a, 2009b)利用联合国政府间气候变化专门委员会第四次报告中13个耦合模式资料分析了其对亚-澳季风的重建能力;Duan et al. (2013)同时利用CMIP5和AMIP下的模式对青藏高原夏季风进行了评估;金晨曦和周天军(2014)使用了参加CMIP5的4个中国气候模式模拟了东亚冬季风的年际变率;Feng et al.(2014)利用CMIP/AMIP模拟了东亚夏季风。这些学者的研究验证了CMIP5模式对不同类型的季风均有一定的模拟能力,且对冬季风的模拟能力较强。Kociuba and Power (2015)模拟了在不同排放情境下Walker环流在未来的变化;Meehl et al. (2013)利用模式分析了所有排放情境下大西洋经向翻转环流的未来变化情况;Chen et al. (2015)分析了在全球变暖的情况下ENSO的变化情况及对海温风应力和经向环流所带来的可能影响;这些学者的研究为我们展示了不同类型的环流未来的变化情况,尤其注重于对环流强度的预估。

本文针对最为重要的北半球环流系统之一的 AL, 利用 CMIP5 多模式进一步评估 AL 对全球变暖条件下的响应, 分析在全球变暖的不同场景下的 AL 强度、位置等的变化。

2 资料与方法

2.1 资料

本文利用 Hadley 中心提供的逐月海平面气压资料, 海平面气压资料 (Sea Level Pressure, SLP) 的时段从 1850 年 1 月至 2013 年 5 月, 分辨率为 5° (纬度) $\times 5^\circ$ (经度) (Allan and Ansell, 2006)。NOAA 提供的改进扩展重建的逐月海表温度资料 (Extended Reconstruction Sea Surface Temperature, ERSST) (Smith and Reynolds, 2004), 海表温度资料的时段从 1854 年 1 月至 2014 年 9 月, 分辨率为 2° (纬度) $\times 2^\circ$ (经度)。利用以上资料作为观测资料, 定义 1 月、2 月、3 月为冬季。

同时本文还利用了 CMIP5 模式的历史试验 (Historical) 和典型浓度路径试验 (Representation Concentration Pathway scenarios, RCPS) 下的 22 个耦合模式 (Taylor et al., 2012)。其中 Historical 试验

依据 CMIP5 计划提供的历史时期 (1850~2005 年) 太阳常数、温室气体浓度年变化序列、气溶胶浓度、臭氧浓度 (Cionni et al., 2011)、火山爆发等观测及反演获得的强迫资料驱动模式, 以工业革命前控制试验 (pre-industrial control, piControl) 1850 年结果为模式初始场, 从 1850 年积分至 2005 年, 共计 156 年。该试验主要目的是通过与历史时期气候观测资料比对来评估模式水平。RCP 试验以 Historical 试验最后一年为初始场, 对应 3 种排放浓度 (吴其重等, 2013)。本文所选用的 Historical 试验的时段为 1972~2005 年。选用中排放 (RCP4.5) 和高排放 (RCP8.5) 进行预估。预估的时段为 2006~2100 年。表 1 给出了所选模式的基本信息。

2.2 方法

大气环流在演变的过程中有着形态的变化, 这些形态及变化可进行强度、位置量化。这些变化集中表现为随着季节交替的年变化。在大气环流异常的研究中, 经常采用环流指数来简洁、定量地描述重要环流系统的性质。本文利用王盘兴等 (2007, 2008) 给出了闭合气压系统的 3 项指数为面积指数 S 、强度指数 P 、中心位置指数 (λ_c, φ_c)。通过如上的定义, 进一步把 1008 hPa 等值线作为 AL 的特征等

表 1 本文所使用的 22 个 CMIP5 模式信息

Table 1 Description of the 22 coupled climate models participating in the CMIP5

序号	模式名称	研究机构	海洋模式分辨率	大气模式分辨率
1	ACCESS1.0	澳大利亚 CSIRO-BOM (Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation and Bureau of Meteorology)	360 × 300	192 × 145
2	ACCESS1.3	澳大利亚 CSIRO-BOM	360 × 300	192 × 145
3	BCC-CSM1.1	中国北京气候中心	360 × 300	128 × 64
4	CanESM2	加拿大 Centre for Climate Modelling and Analysis	256 × 192	128 × 64
5	CCSM4	NCAR	384 × 320	288 × 192
6	CESM1(BGC)	NCAR	384 × 320	288 × 192
7	CESM1(CAM5)	NCAR	384 × 320	288 × 192
8	CMCC-CMS	NCAR	182 × 149	192 × 96
9	CNRM-CM5	法国 Centre National de Recherches Meteorologiques	362 × 292	256 × 128
10	FIO-ESM	中国海洋局第一海洋研究所	384 × 320	128 × 64
11	GFDL-CM3	美国 GFDL (Geophysical Fluid Dynamics Laboratory)	360 × 200	144 × 90
12	GFDL-ESM2G	美国 GFDL	360 × 210	144 × 90
13	GFDL-ESM2M	美国 GFDL	360 × 200	144 × 90
14	HadGEM2-AO	英国 Hadley Center for Climate Prediction and Research, Met Office	360 × 216	192 × 145
15	HadGEM2-ES	英国 Hadley Center for Climate Prediction and Research, Met Office	360 × 216	192 × 145
16	INM-CM4	俄罗斯 Institute for Numerical Mathematics	360 × 340	180 × 120
17	IPSL-CM5A-LR	法国 IPSL (Institute Pierre-Simon Laplace)	182 × 149	96 × 96
18	IPSL-CM5A-MR	法国 IPSL	182 × 149	144 × 143
19	IPSL-CM5B-LR	法国 IPSL	182 × 149	96 × 96
20	MPI-ESM-LR	德国 Max Planck Institute for Meteorology (MPI)	256 × 220	192 × 96
21	NorESM1-M	挪威 Norwegian Climate Centre	384 × 320	144 × 96
22	NorESM1-ME	挪威 Norwegian Climate Centre	384 × 320	144 × 96

值线。下面对这 3 个指数进行简要的说明：阿留申低压的面积(S)定义为该月阿留申低压的特征等高线 $f_0(t_m)$ 在单位半径球面上围成的 $f \geq f_0(t_m)$ 的区域面积；强度(P)定义为该区域上 $f(t, t_m) - f_0(t_m)$ 的面积分；而中心位置(λ_c, φ_c)即其重心所在的位置。进一步利用这些指数对 AL 进行分析，其中 AL 的强度指数与面积指数等效(王玉昆, 2009)，因此本文只分析 AL 强度指数和中心位置指数。

模式对气候态的模拟在一定程度上表征了模式在一定时间尺度下对气候背景的刻画能力，在本文中气候态的评估方法为 Taylor 图评估方法(Taylor, 2001)。对年际变率的模拟能力是模式模拟能力的另一个重要体现，本文中所使用的对年际变率的评估方法为标准差分析和功率谱分析。

3 气候特征的模拟评估

3.1 气候平均态

北半球的副极地低压带由阿留申低压和冰岛

低压组成，冬季位于阿留申群岛地区的大范围低气压(气旋)中心，冬季向南移动形成 AL，同时也是极地海洋气团的源地，这种气团影响全球的大气环流和区域气候。目前全球海—气耦合模式对整个大气环流的模拟均存在不同程度的系统性误差(亦称模式的气候漂移)(孙颖和丁一汇, 2008；黄刚和屈侠, 2009；冯娟和李建平, 2012)。通过计算，22 个模式中有 21 个模式以及模式的集合平均以 1008 hPa 作为特征等值线能在北太平洋模拟出闭合的低压中心。仅有 GFDL-ESM2G 存在着较为明显的系统性误差，对环流的模拟偏强，无法模拟出闭合的低压中心，为了参与比较对其进行了订正，将其特征等值线修正为 1012 hPa，但是这样的调整并不改变该模式的气候变率和气候特征。从图 1 看出，对于观测来说，AL 是一个位于北太平洋的闭合环流系统，AL 的中心在阿留申群岛以西的洋面上，近中心的气压值为 1002 hPa。而且发现 AL 的特征等值线 1008 hPa 的范围向东一直延伸到东太平洋和阿拉斯加部分地区。同时，向南气压逐渐增大。

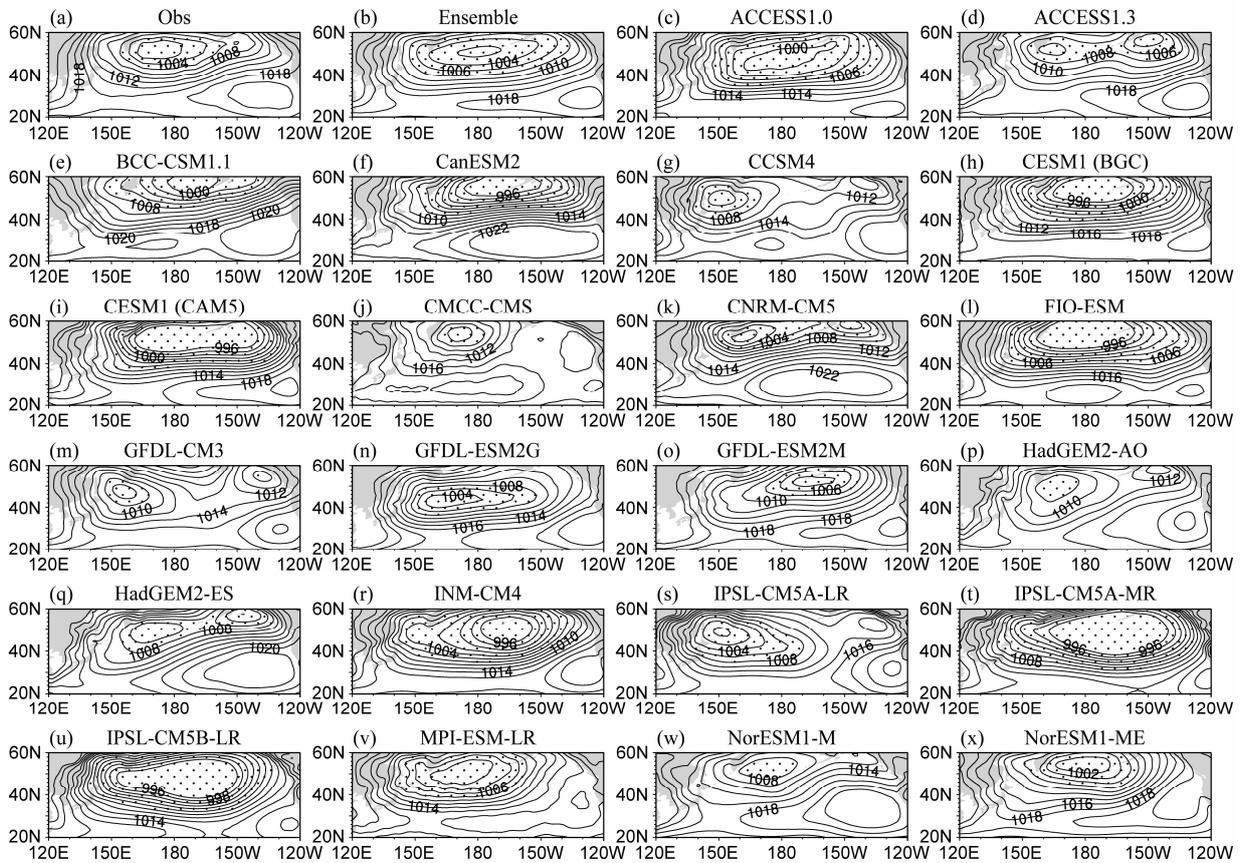


图 1 1979~2012 年多年平均的观测 (Hadley 再分析资料) 和 CMIP5 模式及其集合平均的冬季海平面气压 (单位: hPa) 分布 (带点部分为其特征等值线所包围的范围)

Fig. 1 Climatological mean of sea level pressure (hPa) in winter from the CMIP5 model simulations and their ensemble mean and the observation (the Hadley reanalysis data) (dotted areas indicate the character contour)

同时,本文列出的 22 个 CMIP5 模式均能模拟出 AL 的环流形式。而对于模式的集合平均来说,AL 中心的位置与观测基本相当,都位于阿留申群岛附近,特征等值线所包围的范围也与观测基本相似。ACCESS1.3、CCSM4、CNRM-CM5、GFDL-CM3、HadGEM2-AO、HadGEM2-ES、IPSL-CM5A-LR 这 7 个模式模拟出了双低压中心。CMCC-CMS 所模拟出的中心位置和特征等值线范围都较观测偏小较多。GFDL-ESM2G 所模拟出的中心位置最偏南。

图 2 给出了 AL 气候态 Taylor 图,图中,所有的模式相关系数都达到了 0.9 以上,其中集合平均 (Ensemble) 的相关系数更是达到了 0.99, Ensemble 对于 AL 的形态模拟效果很好。模式标准差的范围在 0.7~1.5 之间,表明不同模式的位势高度的空间振幅与观测资料有着较大差异。CMCC-CMS、HadGEM2-AO、HadGEM2-ES 最接近参考点 (REF 线),说明这 3 个模式对 AL 气候态的模拟效果最

好。

以往的研究表明,AL 的强度和北太平洋的海温有着很密切的相关 (Wang et al., 2012),当北太平洋的海温出现负异常时,AL 加强并且向东移动。因此 AL 来说,其强度与空间分布受下垫面的热力差异影响较大,模式对于海温的模拟的差异会影响到对 AL 的模拟能力。图 3 给出了同时段的太平洋年海表面温度气候态的等值线图及模式与实际观测偏差的阴影分布图。从整体上来看,SST 呈现出很明显的南暖北冷的分布形式。对于模式的集合平均来说,最显现的模拟偏差高区域出现在黑潮延伸体和东太平洋北美沿岸。图中,GFDL-CM3、INM-CM4、IPSL-CM5A-LR、IPSL-CM5B-LR 这 4 个模式在气候态上的差异与观测差异较大,这也在 Taylor 图中得到了反映,这些模式往往与 REF 线相距较远。而对气候态模拟较好的 CMCC-CMS、HadGEM2-AO、HadGEM2-ES 三个模式,正因为很好地控制了东太平洋海温与实际观测之间的误差,

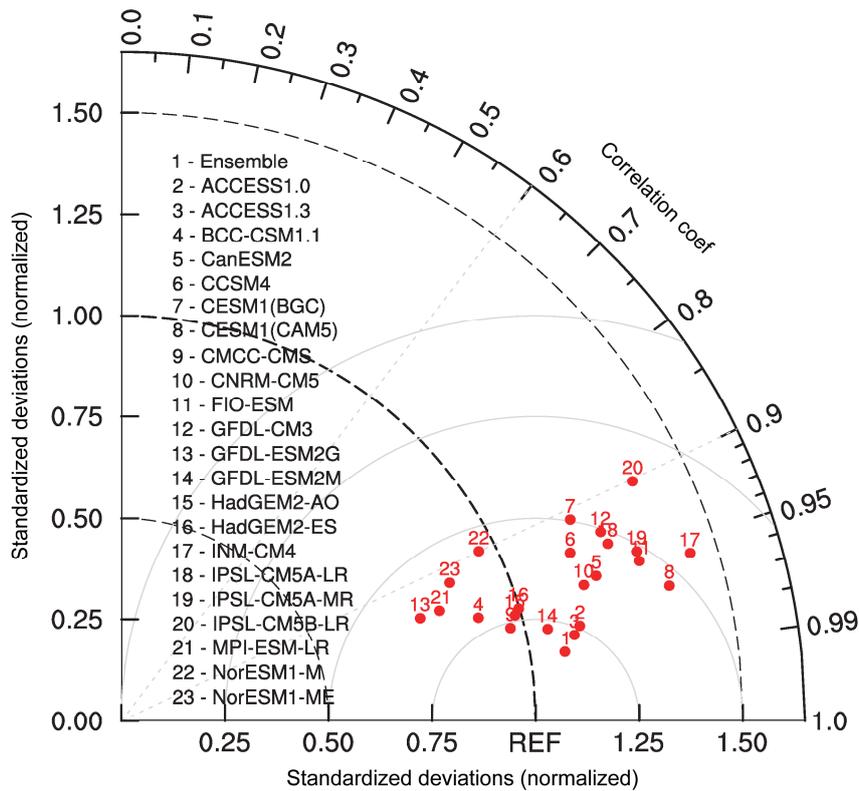


图 2 CMIP5 模式的阿留申群岛地区的冬季平均海平面气压场与观测资料的 Taylor 图 (REF 参考点代表观测资料,各模式到原点的半径代表其相对于观测值的标准差,模式在图中的方位角的余弦代表模式场与观测值的相关系数,模式到参考点的距离代表其均方根误差)

Fig. 2 Taylor diagram of the simulated climatological sea level pressure over the Aleutian Island region in winter compared to the observation (REF indicates the reference value of 1. The radial distance from the model code point to the origin is the standardized deviation ratio of the model outputs relative to the observation. The spatial correlation coefficient between the model output and the observation is shown by the cosine of the azimuthal angle of model code point, and the root-mean-square error is given by the distance from the model code point to REF)

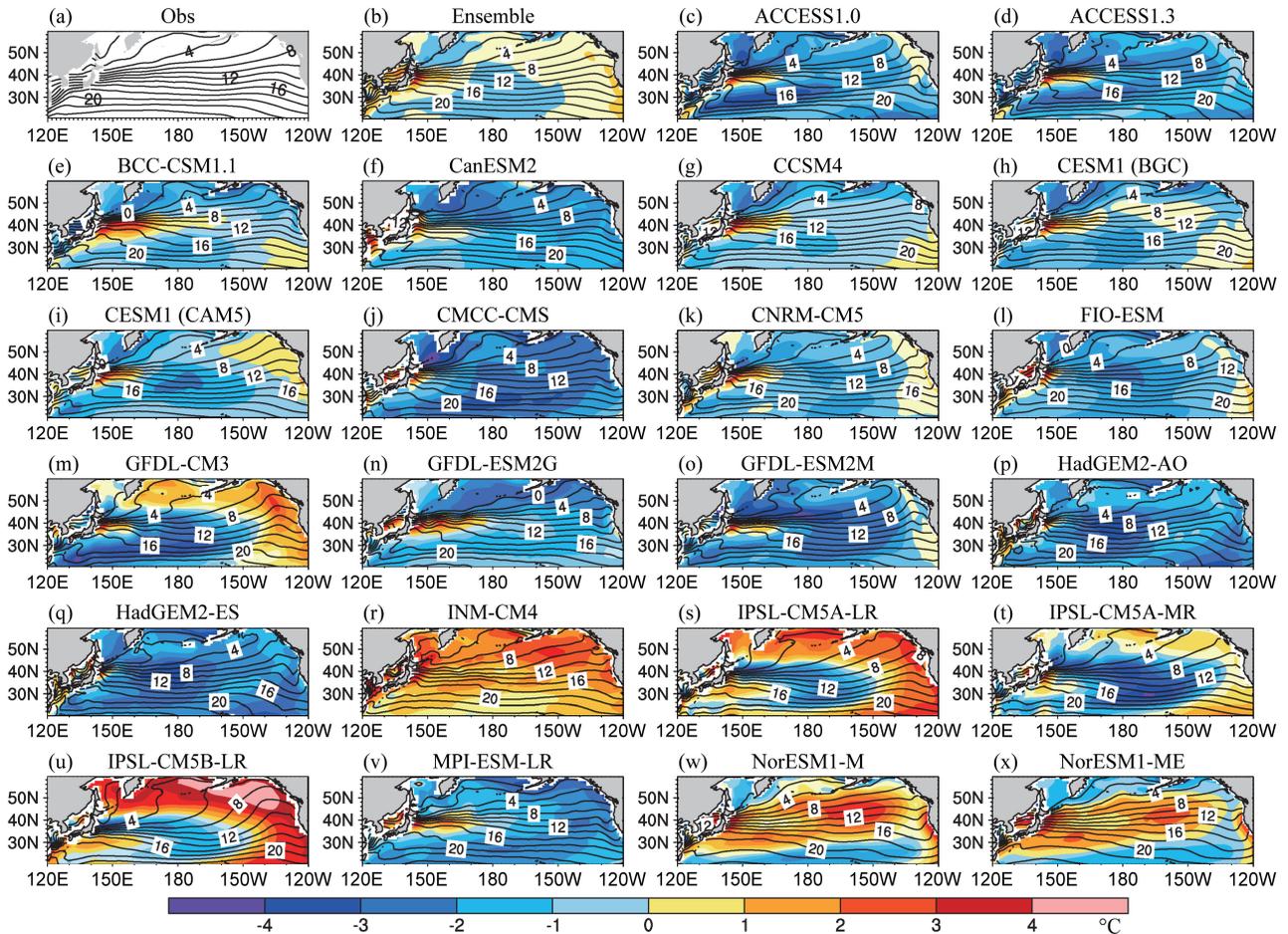


图3 太平洋年海表面温度气候态(等值线, 单位: $^{\circ}\text{C}$)及模式与实际观测偏差(阴影)的分布

Fig. 3 Climatological mean of annual sea surface temperature ($^{\circ}\text{C}$) in the Pacific and the difference between simulations and observations (color shaded)

因此模拟的结果较为准确。可见, 模式能否准确地刻画东太平洋海表温度将直接影响其对 AL 系统的模拟能力。

3.2 AL 变率的模拟

AL 指数的标准差能够衡量模式对 AL 指数逐年变化振幅的模拟能力。图 4a 给出了 AL 经度指数的标准差, 对于观测来说标准差的数值接近 8, GFDL-CM3、IPSL-CM5A-MR 这两个模式与观测是数值最为接近的。图 4b 给出了 AL 纬度指数的标准差, 对于观测来说标准差的数值为 2.7, IPSL-M5A-MR 与观测是数值最为接近的。图 4b 给出了 AL 经度指数的标准差, 对于观测来说标准差的数值为 0.8, GFDL-ESM2G、NorESM1-M 与观测是数值最为接近的。对于集合平均来说, 3 个指数的标准差均比实际观测的标准差的数值大, 变率较强, 说明模式普遍上对于 AL 变率的模拟偏强。

图 5 给出了 CMIP5 模式及其集合平均海平面

气压标准差分布图, 对于观测, 近 34 年来 AL 的最大变率中心在阿拉斯加以南, 变率的大小达到 4 hPa 以上, 并且变率向南逐渐减小。变率大值区的范围和 AL 特征等值线的范围基本相当, 但是变率的中心与低压中心不完全重合。从集合平均上来看, 变率的中心在阿拉斯加以南, 变率的中心范围和强度明显比观测强, 且 CCSM4 模式的变率强度最强、范围最大, 这个特征也在 AL 强度指数标准差中得到了体现。

从图 6 中看出, 23 个模式中 19 个的模式相关系数在 0.9 以上, 模式的集合平均的相关系数为 0.96, 相关系数最高的模式为 NorESM1-M (相关系数达到 0.97), 相关系数最低的模式为 MPI-ESM-LR (相关系数只有 0.85 左右)。但是各个模式与观测的标准差之比相差较大, 23 个模式中 22 个标准差之比都在 1 以上, 集合平均的标准差之比在 1.3 左右, 其中 CCSM4 的标准差之比更是超过了 2.5,

标准差之比大说明模式对 AL 变率的强度模拟差异大, 模拟能力低。其中 IPSL-CM5B-LR 模式最接近 REF 线, 对 AL 变率的模拟效果好。而集合平均在对于标准差的模拟中的模拟能力甚至比不上某一

个单一模式。

模式对于年际、年代际周期的模拟也是评估模式能否真实反映气候特征的一个重要指标。图 7 中给出了利用观测资料和 CMIP5 模式及其集合平均

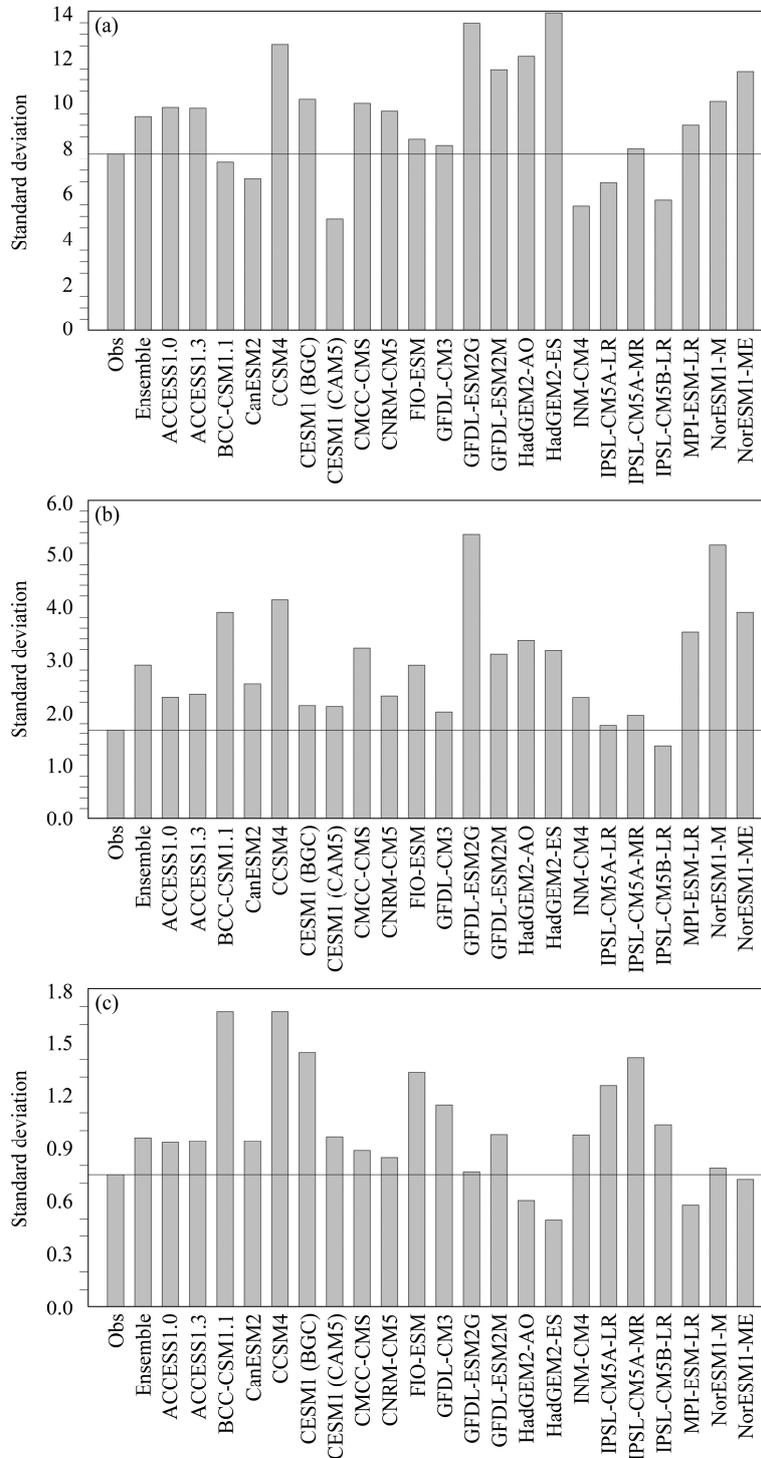


图 4 基于观测的 AL 指数标准差与 CMIP5 模式下 AL 指数标准差: (a) 经度指数; (b) 纬度指数; (c) 强度指数

Fig. 4 Standard deviations of AL indices based on the observation and CMIP5 model simulations and their ensemble mean: (a) Longitude index; (b) latitude index; (c) intensity index

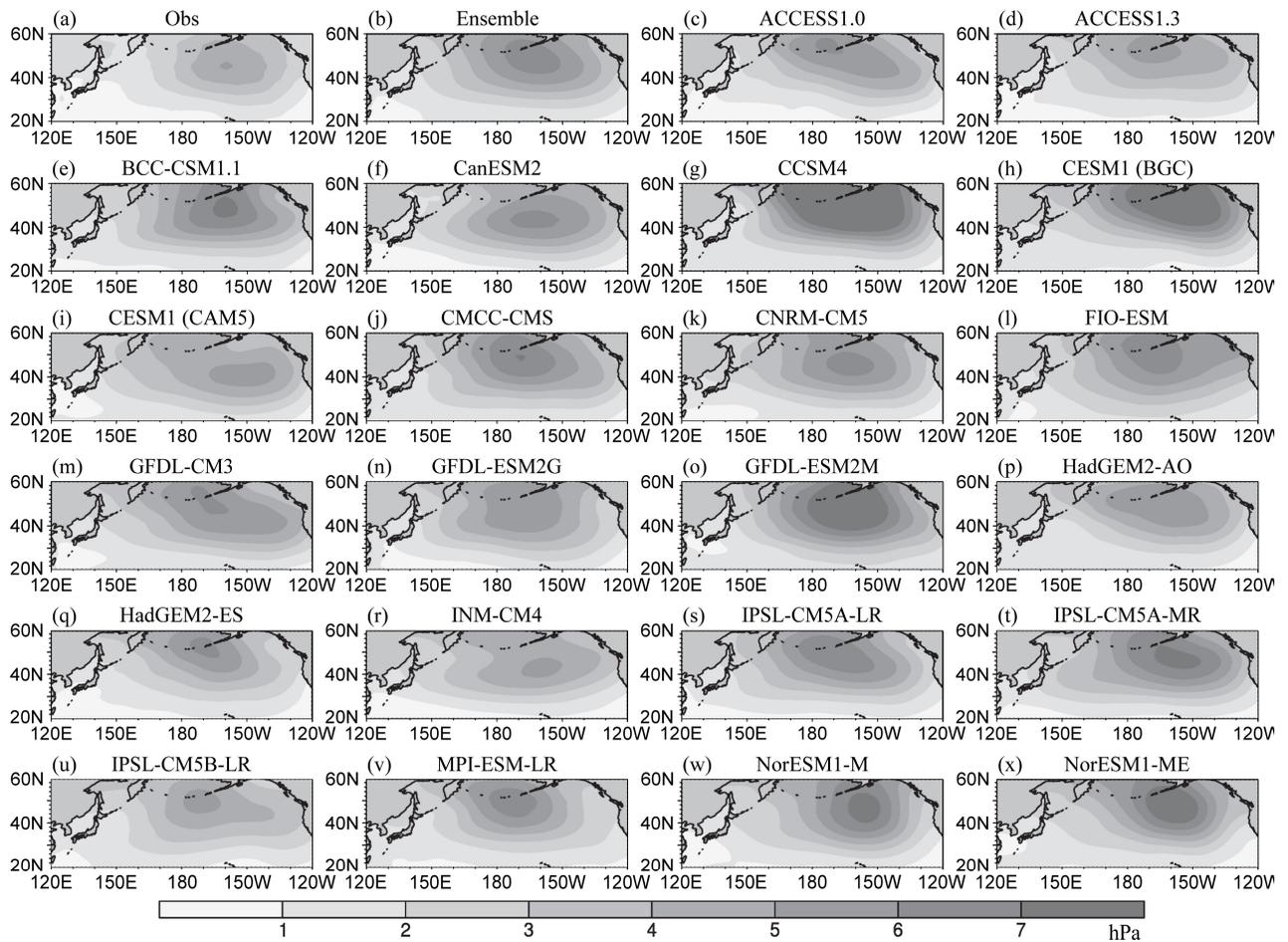


图5 CMIP5 模式及其集合平均海平面气压标准差分布
Fig. 5 The standard deviations of sea level pressure from the CMIP5 simulations and their ensemble mean

所计算出的 AL 强度指数功率谱分析。对于观测来说有着显著的年际变化，周期在 3、5 年左右，同时有着 12 年以上的显著的年代际周期。而对于模式的集合平均，有着 5 年以下的显著的年际周期，和 10 年左右的年代际周期。对于剩下的 22 个模式来说，所有的模式都有着显著的年际周期，有 16 个模式有着显著的年代际周期。模式均能较为准确地描述 AL 强度指数的年际周期，但是对于 AL 强度指数的年代际周期的模拟能力显然比不上对于年际周期的模拟能力。

为了定量评估 CMIP5 模式对于 AL 的模拟能力，进一步计算了观测资料 and 各个模式的 AL 指数线性趋势系数。图 8 给出了 AL 近 34 年来的趋势图，通过显著性检验，把趋势不明显的模式进行剔除。由于经度指数没有通过 0.1 的显著性检验，因此不做讨论。对于纬度指数来说，从观测上，AL 有着较为明显的向北移动的趋势，模式的集合平均没有

通过显著性检验，仅有两个模式通过了显著性检验，且都与观测所得到的趋势相反。而对于强度指数来说，从观测上 AL 有着减弱的趋势，模式的集合平均通过了检验，但是与观测所得到的趋势相反，仅有的两个通过显著性检验的模式同样模拟出了和观测完全相反的趋势。

4 未来情景下 AL 可能的变化趋势

RCP 试验的全称为典型浓度路径试验，以历史试验的最后一年的输出结果作为初始场，着重研究在不同 CO₂ 不同排放情景下对未来的预估。本文着重考虑在中排放 (RCP4.5) 和高排放 (RCP8.5) 两种典型浓度路径下 21 世纪 AL 可能的变化趋势。从表 2 看出在与历史试验相比，AL 的经度指数逐渐向西、向北移动，且在高排放的情景下，向西、向北移动得更加显著。而对于强度指数来说，随着排

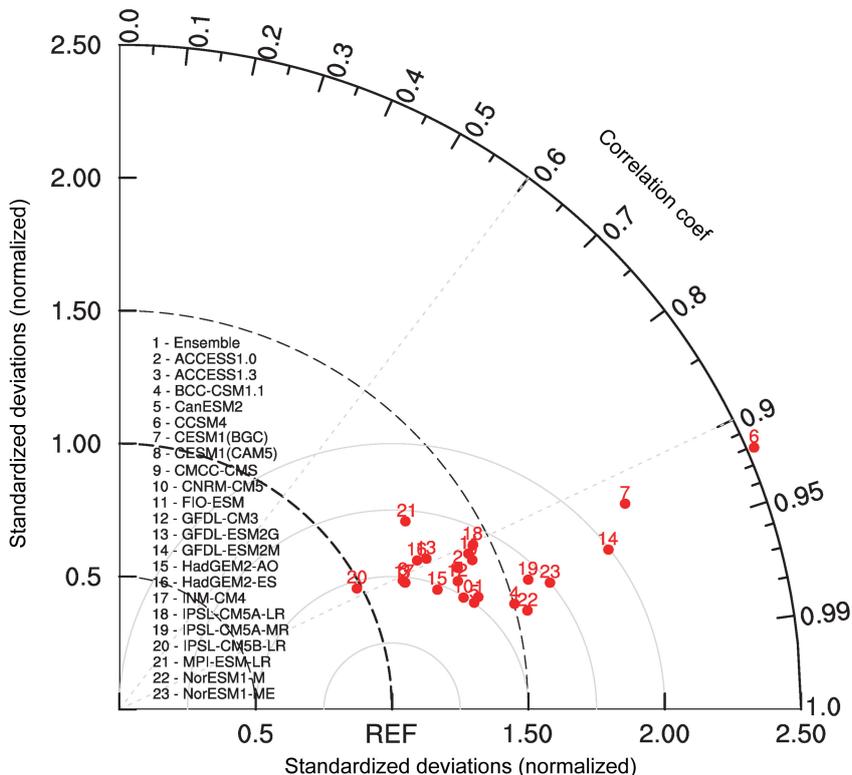


图 6 CMIP5 模式的阿留申低压群岛地区的冬季海平面气压场标准差与观测资料的 Taylor 图

Fig. 6 Taylor diagram of the CMIP5 simulated sea level pressure standard deviations over the Aleutian Island region in the winter compared to the observations

放的增加, 强度逐渐加强, 在高排放的情景下排放增加显著。

表 2 22 个模式集合平均在 Historical 试验下以及在 RCP4.5 和 RCP8.5 两种不同排放情景下所对应的 AL 指数

Table 2 Ensemble means of the longitude index, latitude index, and intensity index simulated in the Historical experiment under different RCP scenarios by 22 CMIP5 models

	经度指数	纬度指数	强度指数
Historical 试验	181.31	52.10	-1.01
RCP4.5 排放情景	180.69	52.99	-1.44
RCP8.5 排放情景	180.77	53.46	-1.62

注: Historical 试验和 RCP4.5、RCP8.5 情景下均选取了模式所模拟时段的最后 30 年。

图 9 给出了 22 个模式的集合平均在两种不同排放情景下 AL 强度指数的功率谱分析。在 RCP4.5 的情景下, AL 强度指数有着年际、年代际变化, 并以 5 年左右的年际变化最为显著。而在 RCP8.5 的情景下, 强度指数同样有着年代际变化, 并以 20

年左右的年代际变化最为显著。相比于观测所得到的强度指数周期, 在 RCP4.5 和 RCP8.5 的情景下 AL 强度指数的周期以年际变化为主, 并且随着排放的增加 AL 强度指数的年代际周期越发明显, 年际周期依旧显著。

图 10 给出了在 RCP4.5 情景下 AL 指数的线性趋势。对于经度指数来说, 所有的模式都没有通过显著性检验, 因此不做讨论。对于纬度指数来说, 模式的集合平均通过了显著性检验, 有着明显的向北移动的趋势。共有 4 个模式通过显著性检验, 且这 4 个模式全部都有着向北移动的趋势。而对于强度指数来说, 模式的集合平均通过了显著性检验, 有着显著增强的趋势。有 7 个模式通过了显著性检验, 且所有通过显著性检验的模式都有着增强的趋势。

图 11 给出了在 RCP8.5 情景下 AL 指数的线性趋势。对于经度指数来说, 所有的模式均未通过显著性检验, 在这里不做讨论。对于纬度指数来说, 模式的集合平均有着显著的向北移动的趋势, 有 13 个模式通过了显著性检验, 所有通过检验的模式均

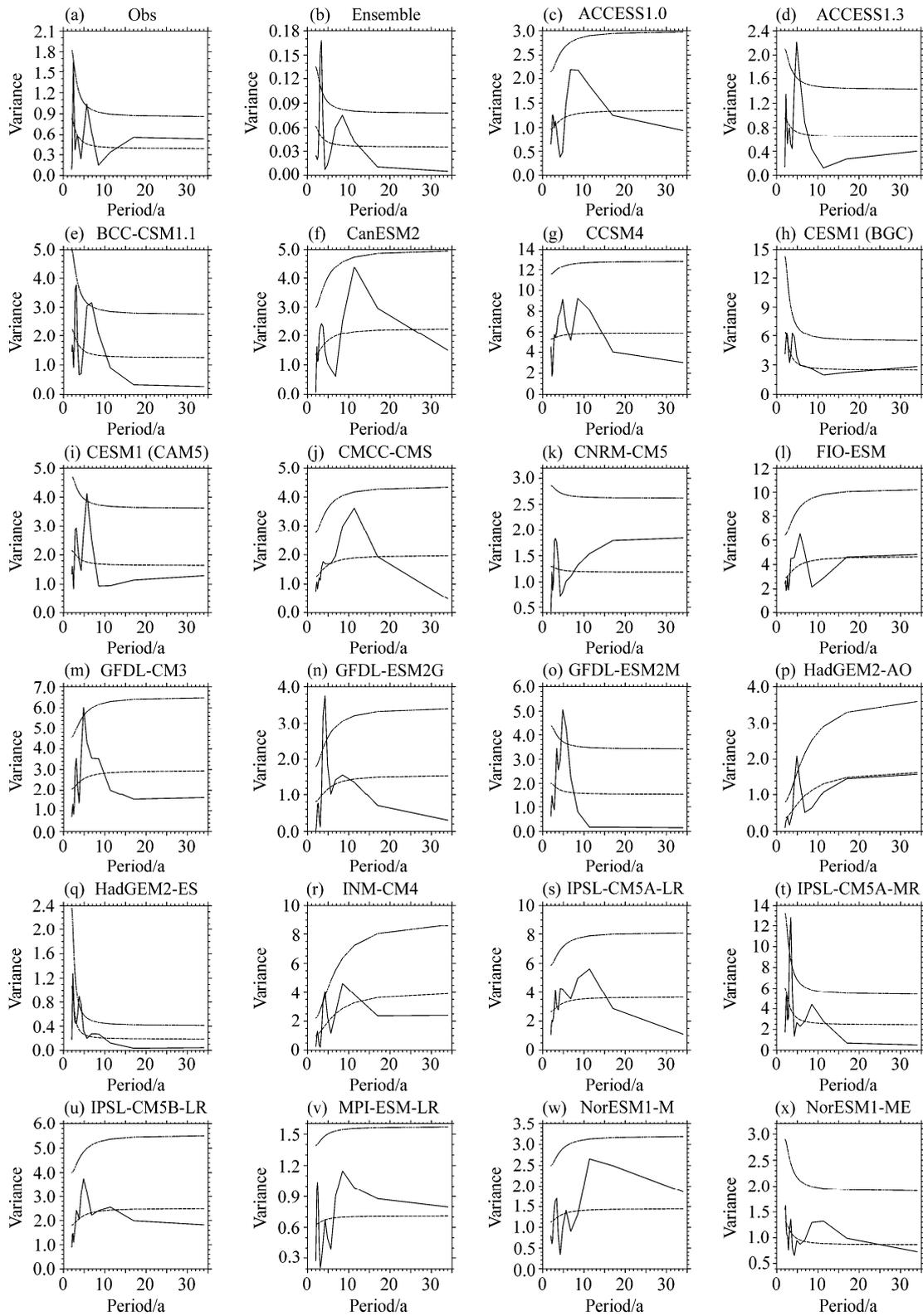


图7 观测资料和CMIP5模式及其集合平均所计算出的AL强度指数功率谱分析(两条虚线分别表示0.9和0.95置信线)

Fig. 7 Power spectra of the AL intensity indices from the observation and CMIP5 simulations and their ensemble mean (two dotted lines represent the 0.9 and 0.95 confidence level, respectively)

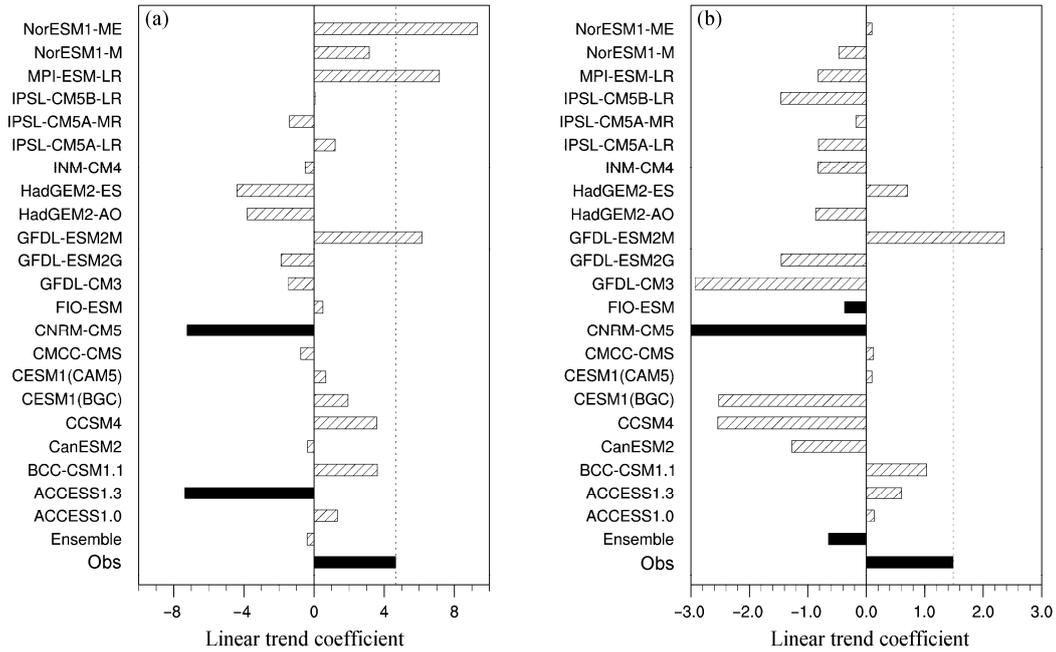


图 8 1979~2012 年观测资料和 CMIP5 模式及其集合平均的冬季阿留申低压指数的线性趋势系数: (a) 纬度指数; (b) 强度指数 (实心柱体表示该资料通过了 0.1 的显著性检验)

Fig. 8 Linear trend coefficients of the AL indices in the winter from observations, CMIP5 model simulations and their ensemble mean for the period from 1979 to 2012: (a) Latitude index; (b) intensity index (the solid cylinder indicates that it is significant at the 0.1 significance level)

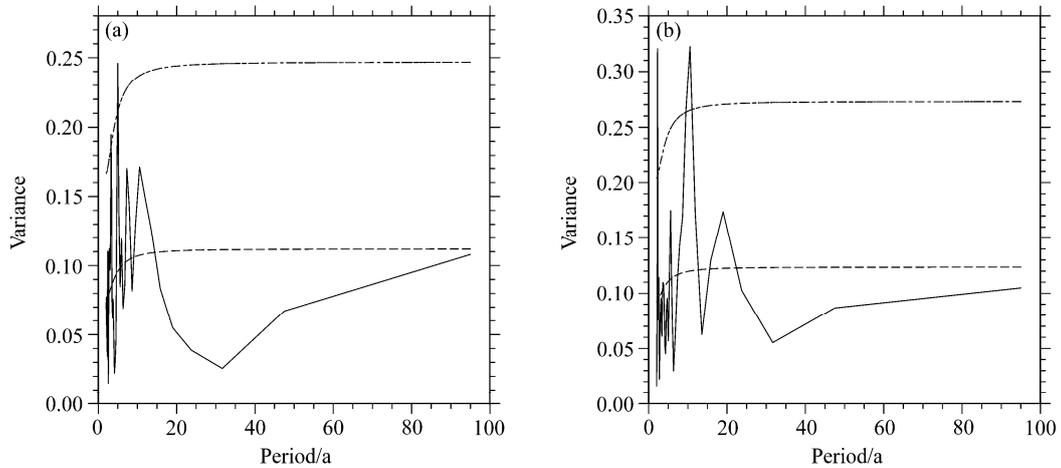


图 9 22 个模式集合平均 (a) RCP4.5 和 (b) RCP8.5 两种不同排放路径下的 AL 强度指数功率谱分析 (两条虚线分别表示 0.9 和 0.95 置信线)

Fig. 9 Power spectra of the AL indices derived from ensemble means of the 22 CMIP5 models under (a) RCP4.5 and (b) RCP8.5 scenarios (dotted lines represent the 0.9 and 0.95 confidence line, respectively)

有着向北移动的趋势。而对于强度指数来说,模式的集合平均有着显著的增强趋势,有 8 个模式通过了显著性检验,通过显著性检验的模式全都存在着增强的趋势。

5 结论与讨论

利用国际耦合模式比较计划第 5 阶段 (CMIP5)

22 个耦合模式及其集合平均的模拟结果,从时空变化、年际年代际周期及变化趋势等方面评估了 CMIP5 模式对于 AL 的模拟能力。在此基础上,还对未来的中排放、高排放这两种典型浓度路径下 AL 可能的变化做了定性的预估,结果发现:

(1) CMIP5 模式及其集合平均可以很好地模拟 AL 的环流结构,对 AL 的气候态有着较强的模拟能力。形态上,以 Ensemble 对 AL 形态的模拟最好,

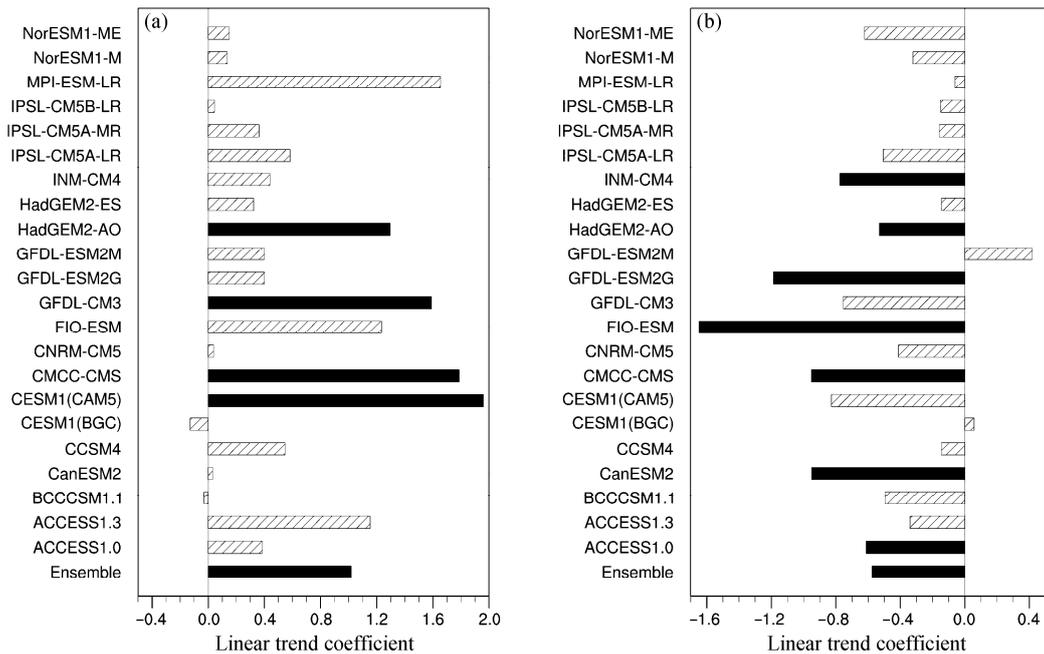


图 10 RCP4.5 情景下预估 2006~2100 年冬季阿留申低压指数 (实心柱体表示该资料通过了 0.1 的显著性检验) 的线性趋势系数: (a) 纬度指数; (b) 强度指数

Fig. 10 Linear trend coefficients of the AL indices in the winter from CMIP5 model simulations for the period from 2006 to 2100 under the RCP4.5 scenario: (a) Latitude index; (b) intensity index (solid cylinder indicates that it is significant at the 0.90 confidence level)

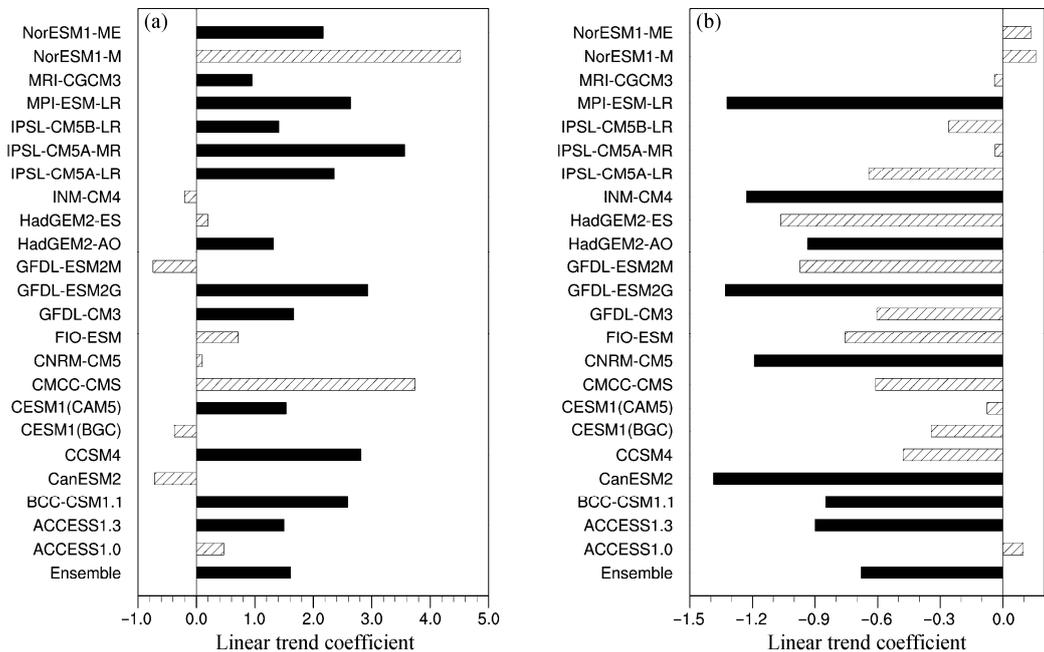


图 11 同图 10, 但为 RCP8.5 情景

Fig. 11 Same as Fig. 10, but for RCP8.5 scenario

中心位置、特征等值线所包围的范围也与观测基本相似。HadGEM2-CC、HadGEM2-ES 对 AL 气候态的模拟效果最好。模式对于东太平洋海表温度的模拟能力将直接影响其对 AL 系统的模拟能力。

(2) 在针对 AL 指数的计算中, Ensemble 标准差的数值总大于观测, 即模式对于 AL 变率的模拟普遍偏强。即便同一模式对指数的模拟, 模拟效果也存在着差异。IPSL-CM5B-LR 对变率的模拟效果

好。相对而言模式对气候态的模拟要好于对变率的模拟。模式对 AL 强度指数的年代际周期有着很好的刻画能力, 22 个模式中的 16 个能模拟出 AL 的强度指数年代际变化。

(3) 通过观测资料, 近 34 年来 AL 显著的向北的移动趋势, 同时强度减弱。而在 Historical 试验下, AL 纬度与强度指数的趋势与观测所得到的趋势完全相反。通过对 RCP4.5 和 RCP8.5 试验对未来的预估表明, 随着排放的增加, 年代际周期越发显著。所有的经度指数没有通过显著性检验, AL 的东西移动趋势不显著。但是, 不论是 RCP4.5 试验还是 RCP8.5 试验, 通过显著性检验的模式的纬度指数和强度指数都反映出十分一致的趋势, 即: AL 有着显著的向北移动的趋势, 同时强度有着增强的趋势。

本文在考虑模式评估指标的时候, 主要考虑了空间场和年际变率, 但是对于很多影响 AL 的因素并没有做更加深入的评估。并且本文中只使用了一种定义 AL 的指数方法, 而不同的学者从不同的角度对 AL 的指数有着诸多的定义, 而对于利用哪一种指数能够更加准确完整全面的评估 AL 本文中并没有进行充分的论证。因此, 本文中所利用的指数定义是否完全合适需要讨论, 这对评估结果会产生一定的不确定性, 这在以后的工作需要加以细化。

参考文献 (References)

- Allan R, Ansell T. 2006. A new globally complete monthly historical gridded mean sea level pressure dataset (HadSLP2): 1850–2004 [J]. *J. Climate*, 19 (22): 5816, doi: 10.1175/JCLI3937.1.
- Chen L, Li T, Yu Y Q. 2015. Causes of strengthening and weakening of ENSO amplitude under global warming in four CMIP5 models [J]. *J. Climate*, 28 (8): 3250–3274, doi: 10.1175/JCLI-D-14-00439.1.
- Cionni I, Eyring V, Lamarque J F, et al. 2011. Ozone database in support of CMIP5 simulations: Results and corresponding radiative forcing [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 11 (21): 11267–11292, doi: 10.5194/acpd-11-10875-2011.
- Duan A M, Hu J, Xiao Z X. 2013. The Tibetan Plateau summer monsoon in the CMIP5 simulations [J]. *J. Climate*, 26 (19): 7747–7766, doi: 10.1175/JCLI-D-12-00685.1.
- 冯娟, 李建平. 2012. IPCC AMIP 模式对西南澳类季风环流的模拟 [J]. *气候与环境研究*, 17(4): 409–421. Feng Juan, Li Jianping. 2012. Evaluation of IPCC AMIP models in simulating monsoon-like Southwest Australian circulation [J]. *Climatic and Environmental Research (in Chinese)*, 17 (4): 409–421, doi: 10.3878/j.issn.1006-9585.2011.10110.
- Feng J M, Wei T, Dong W J, et al. 2014. CMIP5/AMIP GCM simulations of East Asian summer monsoon [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 31 (4): 836–850, doi: 10.1007/s00376-013-3131-y.
- 龚道溢, 王绍武. 1999. 大气环流因子对北半球气温变化影响的研究 [J]. *地理研究*, 18 (1): 31–38. Gong Daoyi, Wang Shaowu. 1999. Influence of atmospheric oscillations on Northern Hemispheric temperature [J]. *Geographical Research (in Chinese)*, 18 (1): 31–38, doi: 10.3321/j.issn:1000-0585.1999.01.005.
- 郭冬, 孙照渤. 2004. 冬季北太平洋涛动异常与东亚冬季风和我国天气气候的关系 [J]. *南京气象学院学报*, 27 (4): 461–470. Guo Dong, Sun Zhaobo. 2004. Relationships of winter North Pacific oscillation anomalies with the East Asian winter monsoon and the weather and climate in China [J]. *Journal of Nanjing Institute of Meteorology (in Chinese)*, 27 (4): 461–470, doi:10.3969/j.issn.1674-7097.2004.04.004.
- 郭彦, 董文杰, 任福民, 等. 2013. CMIP5 模式对中国年平均气温模拟及其与 CMIP3 模式的比较 [J]. *气候变化研究进展*, 9 (3): 181–186. Guo Yan, Dong Wenjie, Ren Fumin, et al. 2013. Assessment of CMIP5 simulations for China annual average surface temperature and its comparison with CMIP3 simulations [J]. *Progressus Inquisitiones de Mutatione Climatis (in Chinese)*, 9 (3): 181–186, doi: 10.3969/j.issn.1673-1719.2013.03.004.
- Hanawa K, Ishizaki S, Tanimoto Y. 1996. Examination of the strengthening of wintertime mid-latitude westerlies over the North Pacific in the 1970s [J]. *J. Meteor. Soc. Japan*, 74 (5): 715–721.
- 黄刚, 屈侠. 2009. IPCC AR4 模式中夏季西太平洋副高南北位置特征的模拟 [J]. *大气科学学报*, 32 (3): 351–359. Huang Gang, Qu Xia. 2009. Meridional location of West Pacific subtropical high in summer in IPCC AR4 simulation [J]. *Journal of Nanjing Institute of Meteorology (in Chinese)*, 32 (3): 351–359, doi: 10.3969/j.issn.1674-7097.2009.03.002.
- 黄小梅. 2013. 冬季东亚大槽年际变化及其与中国气候联系的再分析 [D]. 南京信息工程大学硕士学位论文. Huang Xiaomei. 2013. A further look at the interannual variations of East Asian trough and their impacts on winter climate of China [D]. M. S. thesis (in Chinese), Nanjing University of Information Science and Technology.
- 金晨曦, 周天军. 2014. 参加 CMIP5 的四个中国气候模式模拟的东亚冬季风年际变率 [J]. *大气科学*, 38 (3): 453–468. Jin Chenxi, Zhou Tianjun. 2014. Analysis of the interannual variations of the East Asian winter monsoon simulation by four CMIP5 GCMs [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 38 (3): 453–468, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2013.13180.
- Kociuba G, Power S B. 2015. Inability of CMIP5 models to simulate recent strengthening of the Walker circulation: Implications for projections [J]. *J. Climate*, 28(1): 20–35, doi: 10.1175/JCLI-D-13-00752.1.
- Latif M, Barnett T P. 1994. Causes of decadal climate variability over the North Pacific and North America [J]. *Science*, 266 (5185): 634–637.
- Meehl G A, Washington W M, Arblaster J M, et al. 2013. Climate change projections in CESM1 (CAM5) compared to CCSM4 [J]. *J. Climate*, 26 (17): 6287–6308, doi: 10.1175/JCLI-D-12-00572.1.
- Overland J E, Adams J M, Bond N A. 1999. Decadal variability of the Aleutian low and its relation to high-latitude circulation [J]. *J. Climate*, 12 (5): 1542–1548.
- 任广成. 1991. 太平洋海温对冬季阿留申低压的影响 [J]. *气象学报*, 49 (2): 249–252. Ren Guangchen. 1991. The effects of sea temperature in Pacific on Aleutian low in winter [J]. *Acta Meteorologica Sinica (in Chinese)*, 49 (2): 249–252.

- Chinese), 49 (2): 249–252, doi: 10.11676/qxxb1991.035.
- 任菊章, 据建华, 赵刚. 2003. 亚洲冬季地表气温与北半球海平面气压场的关系 [J]. 气候与环境研究, 8 (4): 436–442. Ren Juzhang, Ju Jianhua, Zhan Gang. 2003. Relation between the winter surface air temperature fields in Asia and the Northern Hemisphere sea level pressure [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 8 (4): 436–442.
- Smith T M, Reynolds R W. 2004. Improved extended reconstruction of SST (1854–1997) [J]. J. Climate, 17 (12): 2466–2477, doi: 10.1175/1520-0442(2004)017<2466:IEROS>2.0.CO;2.
- 孙颖, 丁一汇. 2008. IPCC AR4 气候模式对东亚夏季风年代际变化的模拟性能评估 [J]. 气象学报, 66 (5): 765–780. Sun Ying, Ding Yihui. 2008. Validation of IPCC AR4 climate models in simulating interdecadal change of East Asian summer monsoon [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 66 (5): 765–780, doi: 10.3321/j.issn:0577-6619.2008.05.010.
- Tachibana Y, Honda M, Takeuchi K. 1996. The abrupt decrease of the sea ice over the southern part of the Sea of Okhotsk in 1989 and its relation to the recent weakening of the Aleutian low [J]. J. Meteor. Soc. Japan, 74 (4): 579–584.
- Taylor K E. 2001. Summarizing multiple aspects of model performance in a single diagram [J]. J. Geophys. Res., 106 (D7): 7183–7192, doi: 10.1029/2000JD900719.
- Taylor K E, Stouffer R J, Meehl G A. 2012. An overview of CMIP5 and the experiment design [J]. Bull. Amer. Meteor. Soc., 93 (4): 485–498, doi: 10.1175/BAMS-D-11-00094.1.
- Trenberth K E. 1990. Recent observed interdecadal climate changes in the Northern Hemisphere [J]. Bull. Amer. Meteor. Soc., 71 (7): 988–993, doi: 10.1175/1520-0477(1990)071<0988:ROICCI>2.0.CO;2.
- Trenberth K E, Hurrell J W. 1994. Decadal atmosphere–ocean variations in the Pacific [J]. Climate Dyn., 9 (6): 303–319, doi: 10.1007/BF00204745.
- 王力群, 李崇银, 谭言科, 等. 2010. 冬季蒙古高压的时空变化和突变特征研究 [J]. 高原气象, 29 (1): 23–32. Wang Liqun, Li Chongyin, Tan Yanke, et al. 2010. Study on time–spacial changes and sudden characteristic of winter Mongolia high [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 29 (1): 23–32.
- 王盘兴, 卢楚翰, 管兆勇, 等. 2007. 闭合气压系统环流指数的定义及计算 [J]. 南京气象学院学报, 30 (6): 730–735. Wang Panxing, Lu Chuhan, Guan Zhaoyong, et al. 2007. Definition and calculation of three circulation indices for closed pressure systems [J]. Journal of Nanjing Institute of Meteorology (in Chinese), 30 (6): 730–735, doi: 10.3969/j.issn.1674-7097.2007.06.002.
- 王盘兴, 陈延聪, 卢楚翰, 等. 2008. 闭合气压系统中心分布特征量及应用 [J]. 南京气象学报, 31 (6): 758–766. Wang Panxing, Chen Yancong, Lu Chuhan, et al. 2008. Characteristic quantities of closed pressure system centers distribution and its application [J]. Journal of Nanjing Institute of Meteorology (in Chinese), 30 (6): 758–766, doi: 10.3969/j.issn.1674-7097.2008.06.002.
- Wang P X, Wang J X L, Zhi H, et al. 2012. Circulation indices of the aleutian low pressure system: Definitions and relationships to climate anomalies in the Northern Hemisphere [J]. Advance in Atmospheric Sciences, 29 (5): 1111–1118, doi: 10.1007/s00376-012-1196-7.
- 王绍武. 1962. 东亚大气活动中心的多年变化与我国的气候振动 [J]. 气象学报, 32 (1): 19–36. Wang Shaowu. 1962. Long-term changes of atmospheric action centers on the East Asia and climate variability in China [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 32 (1): 19–36, doi:10.11676/qxxb1962.003.
- 王玉昆. 2009. 阿留申低压异常的气候统计学分析 [D]. 南京信息工程大学硕士学位论文. Wang Yukun. 2009. Statistical analysis of climate anomalies in the Aleutian low [D]. M. S. thesis (in Chinese), Nanjing University of Information Science and Technology, doi: 10.7666/d.y1462321.
- 吴其重, 冯锦明, 董文杰, 等. 2013. BNU-ESM 模式及其开展的 CMIP5 试验介绍 [J]. 气候变化研究进展, 9 (4): 291–294. Wu Qizhong, Feng Jinming, Dong Wenjie, et al. 2013. Introduction of the CMIP5 experiments carried out by BNU-ESM [J]. Progressus Inquisitiones de Mutatione Climatis (in Chinese), 9 (4): 291–294, doi: 10.3969/j.issn.1673-1719.2013.04.008.
- Zhou T J, Wu B, Scaife A A, et al. 2009a. The CLIVAR C20C project: Which components of the Asian–Australian monsoon circulation variations are forced and reproducible? [J]. Climate Dyn., 33 (7–8): 1051–1068, doi: 10.1007/s00382-008-0501-8.
- Zhou T J, Wu B, Wang B. 2009b. How well do atmospheric general circulation models capture the leading modes of the interannual variability of the Asian–Australian monsoon? [J]. J. Climate, 22 (5): 1159–1173, doi: 10.1175/2008JCLI2245.1.
- Zhu X J, Sun J L, Liu Z Y, et al. 2007. A synoptic analysis of the interannual variability of winter cyclone activity in the Aleutian low region [J]. J. Climate, 20 (8): 1523–1538, doi: 10.1175/JCLI4077.1.
- 朱益民, 杨修群. 2003. 太平洋年代际振荡与中国气候变率的联系 [J]. 气象学报, 61 (6): 641–654. Zhu Yimin, Yang Xiuqun. 2003. Relationships between Pacific decadal oscillation (PDO) and climate variabilities in China [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 61 (6): 641–654, doi: 10.3321/j.issn:0577-6619.2003.06.001.