Contents lists available at ScienceDirect

Engineering

journal homepage: www.elsevier.com/locate/eng

Research
Climate Change—Review

CMIP5 模式在东亚 - 西北太平洋地区的鲁棒性分析

周天军 *，陈晓龙，吴波，郭准，孙咏，邹立维，满文敏，张丽霞，何超

State Key Laboratory of Numerical Modeling for Atmospheric Sciences and Geophysical Fluid Dynamics, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China

ARTICLE INFO

Article history:
Received 18 February 2016
Revised 19 July 2016
Accepted 3 February 2017
Available online 31 October 2017

关键词
东亚季风
西北太平洋气候
厄尔尼诺 - 南方涛动
过去的气候变化
气候预估
耦合气候模式
区域气候模式

摘要

耦合模式比较计划（CMIP）是气候模拟研究领域的重要国际合作平台，服务于气候模式比较、气候变率、气候预测和气候预估。改善气候模式在东亚和西北太平洋地区的模拟性能，一直是气候模式领域面临的一项挑战。针对第五次耦合模式比较计划（CMIP5）中的气候模式，本文提供了综合鲁棒性分析。本文从气候平均态、年际变率、中上新世（MP）和过去千年的历史气候变化、气候预估的角度，对 CMIP5 模式的优缺点进行了评估。另外，还评估了区域气候模式相对于驱动其运行的全球气候模式带来的模拟增值。从 CMIP3 到 CMIP5，模式的可信度明显提高，气候平均态、年际变率和过去气候变化的模拟情况有所改善，但在 CMIP5 模式中，一些之前已知的偏差，如西北太平洋副热带高压脊线的位置和与之相关的降水偏差等，仍然很明显。对于年际振幅的模拟也存在明显的缺陷，如厄尔尼诺 - 南方涛动（ENSO）与季风的关系。在模拟平均气候态和年际变率时，耦合模式的表现通常优于单独大气模式。多模式比较的结果表明，尽管在克劳修斯 - 克拉珀龙方程约束下模式预估的降水一致增加，但未来气候预估仍存在明显的不确定性。对东亚 - 西北太平洋地区的动力降尺度预估而言，区域海洋 - 大气耦合模式是一个较好的选择。

1. 引言

气候模式是理解气候变率机制和预测、预估未来气候变化的有力工具。受限于当前复杂气候模式对物理过程的模拟能力，模式结果存在不确定性。多模式比较可以有效减少单个模式带来的不确定性。耦合模式比较计划（CMIP）是气候模拟研究领域的重要国际合作平台，服务于气候模式比较和气候变化预估，目前处于第五阶段（CMIP5）[1,2]。近年来，针对CMIP模式的鲁棒性分析引起越来越多的关注。本文旨在基于已发表的文献，概述CMIP5模式在东亚-西北太平洋（EA-WNP）区域的表现。本文评估了模式的优缺点。这份鲁棒性分析旨在为CMIP5的可靠性提供参考，助力模式的研发和改进。

2. 气候平均态的模拟

得益于过去五年气候模式的改进，CMIP5模式能够合理地模拟EA-WNP区域的基本气候特征[3]。例如，CMIP5大气模式能够很好地再现夏季季风降水的空间分布和850 hPa风场。在多模式集合（MME）中，降水模拟的技巧评分略有提高，从0.75（CMIP3）上升到0.77

---

* Corresponding author.
E-mail address: zhoutj@lasg.iap.ac.cn

英文原文: Engineering 2017, 3(5): 773–778
引用本文: Tianjun Zhou, Xiaolong Chen, Bo Wu, Zhun Guo, Yong Sun, Liwei Zou, Wenmin Man, Lixia Zhang, Chao He. A Robustness Analysis of CMIP5 Models over the East Asia-Western North Pacific Domain. *Engineering*, http://dx.doi.org/10.1016/J.ENG.2017.05.018

（CMIP5）[4]。降水模拟的改善与大气环流模拟技巧的提高息息相关。CMIP5大气模式成功再现了东亚地区的低层南风和高层西风急流[5,6]。大尺度环流的模拟存在较大的模式间离差[7]。在几乎所有的CMIP5模式中，西北太平洋副热带高压（WNPSH）都偏北，导致东亚夏季季风（EASM）雨带的模拟出现偏差[4,8]。CMIP5模式对EA-WNP气候的模拟技巧高于CMIP3模式[9]，不过CMIP3和CMIP5模式模拟的降水都略低于观测[10]。这一现象在夏季季风降水、环流、水汽输送、对流层中层水平温度平流[11]以及夏季季风爆发的模拟中十分明显[12,13]。模式低估了东亚季风雨带的延伸现象，高估了副热带西/中太平洋的降水。虽然CMIP3模式中WNPSH脊线北移的偏差也很明显[14]，但通常CMIP5耦合模式比单独大气模式的结果更好[6]。

3. 年际变率的模拟

WNPSH是EASM系统的重要组成部分。在年际时间尺度上它有两种主要模态[15]。两种模态都与西北太平洋的异常反气旋有关，但第二模态中的异常反气旋比第一模式中的偏北[16]。He和Zhou[8]的研究表明，第一模态与热带印度洋和中东太平洋的海表温度（SST）异常有关，第二模态则与局地SST异常有关。CMIP5大气模式比较计划（CMIP5-AMIP）能够很好地再现第一模态，这说明第一模态是强迫模式。然而，CMIP5-AMIP不能完美地模拟第二模态。MME以及大多数单个模式模拟的异常反气旋比观测弱很多。这表明第二模态与热带西北太平洋的海气相互作用有关。WNPSH和北太平洋副热带高压之间有很大的协变性[17]。

通过热带西北太平洋上的一个关键的低层异常反气旋（西北太平洋异常反气旋，WNPAC），EA-WNP季风与厄尔尼诺现象紧密关联[18]。从厄尔尼诺成熟的冬季到衰减的夏季，WNPAC在连续三个季节内维持[19]。模式模拟厄尔尼诺-南方涛动（ENSO）与季风关系的能力，取决于WNPAC的模拟技巧[20]。

在厄尔尼诺成熟的冬季，WNPAC西北侧的异常西南风减弱了东亚冬季季风的气候态东北风[21]。同时，它们将水汽运输到中国东南部，使降水大大增加[22]。大约一半的CMIP5耦合模式（CGCM）可以合理模拟厄尔尼诺成熟冬季的WNPAC。然而，几乎所有模式都低估了中国东南部的降水正异常[20]。

WNPAC不仅影响东亚冬季季风（EAWM），还会影响厄尔尼诺的时间演变。WNPAC南侧的异常东风能够激发海洋中上翻的开尔文波，加速厄尔尼诺现象的衰亡[23,24]。在拉尼娜冬季，出现的是西北太平洋异常气旋（WNPC），它比WNPAC更偏西。相应的，拉尼娜冬季时赤道西太平洋的西风异常比厄尔尼诺冬季时的东风异常弱得多。因此，拉尼娜现象的衰亡要比厄尔尼诺慢得多[24]。CMIP5 CGCM的结果也与这一机制吻合。如果一个模式能（或不能）模拟WNPAC和WNPC之间的不对称性，那么它就能（或不能）模拟厄尔尼诺和拉尼娜现象演化时的不对称性[20]。

在厄尔尼诺衰减年夏季，局地SST冷异常和热带印度洋的遥强迫共同维持了WNPAC[25]。WNPAC和局地SST冷异常能够形成一个衰减的耦合模，可被CMIP5-CGCM的MME结果证实。SST冷异常只能抑制局地对流，从而在初夏时维持WNPAC，最终被局地负反馈完全消耗[20]。夏末，WNPAC的维持主要与热带印度洋遥强迫产生的大气开尔文波有关[25–27]。CMIP5-CGCM MME表明，随着7～8月季风槽的建立，热带印度洋对WNPAC的遥强迫逐渐增强。

Song和Zhou[4]系统地比较了CMIP5-AMIP与CMIP3-AMIP模拟的WNPAC，以及与之相关的西北太平洋降水负异常和从长江中下游到日本的降水正异常。CMIP5-AMIP表现出更高的模拟能力，改善了EASM年际变率模态的模拟（图1）[4]。由于耦合模式中热带印度洋的遥强迫更强，CMIP5-CGCM模拟WNPAC的能力也比相应的AMIP更强。这表明,海气相互作用对于模拟EASM年际变率来说至关重要[6]。

4. 过去气候变化的模拟

过去的气候能够为建立东亚季风（EAM）的演化和动力学约束提供依据。从地质类比来看，与现代气候类似的最近一次温暖期出现在中上新世，其CO_2浓度[(405±50) ppm]比当今稍高。因此，MP被认为是理解未来气候变暖的潜在参考模型。例如，MP时期的哈德莱环流可为未来情景下可能出现的变化提供参考[28–30]。对于华北地区，模拟MP时期的EAM的结果显示EASM增强，EAWM减弱[31–33]，两者都与地质重建结果吻合。海陆热力差异的加强有助于增强MP时期的EASM[33]。增强的EASM环流使得局地定常经向风的辐合增强，加强了东亚的水汽运输，导致大气环流模式（AGCM）和CGCM模拟中MP时期的EASM降水量增加。

EASM在过去千年间的年代际-百年变化已经可被成功模拟[34]。一般而言，EASM在中世纪暖期（MWP）较强，在小冰期（LIA）较弱。这一认识与中国万象洞石笋记录的重建结果相同[35]。比较MWP、LIA和20世纪全球变暖现象（20CW）期间EASM的年际变率模态，发现有类似的降水异常的空间分布。然而，三个典型时期中主导年际变率模态的功率谱不同，并且准两年振荡在暖期最为明显[36]。

火山喷发使我们有机会观测EASM对外部辐射强迫的响应[36–38]。大型火山喷发后，东亚大陆以北风异常为主，对应中国东部夏季降水减少[图2（a）][36]。东亚大陆中高纬度地区的降温比热带海洋更加剧烈[图2（b）]，说明海陆热力差异减小，使EASM环流减弱。强烈的热带火山爆发对EAWM也有重要影响。火山强迫可能导致热带太平洋和北极地区出现变化，对喷发后冬季的EAWM有重要的调节作用[39]。

5. 气候变化预估

已有研究致力于通过全球和区域耦合气候模式，预测从未来几十年直到21世纪末的EA-WNP气候[40–46]。在CMIP5的两个典型情景，RCP4.5和RCP8.5中，到21世纪末，中国的年平均地表温度预计分别上升（2.58±0.78）℃和（5.19±1.10）℃。在EA-WNP的大部分区域，主要由季风贡献的夏季降水量也明显增加，原因是依据克劳修斯-克拉珀龙方程，变暖条件下水汽

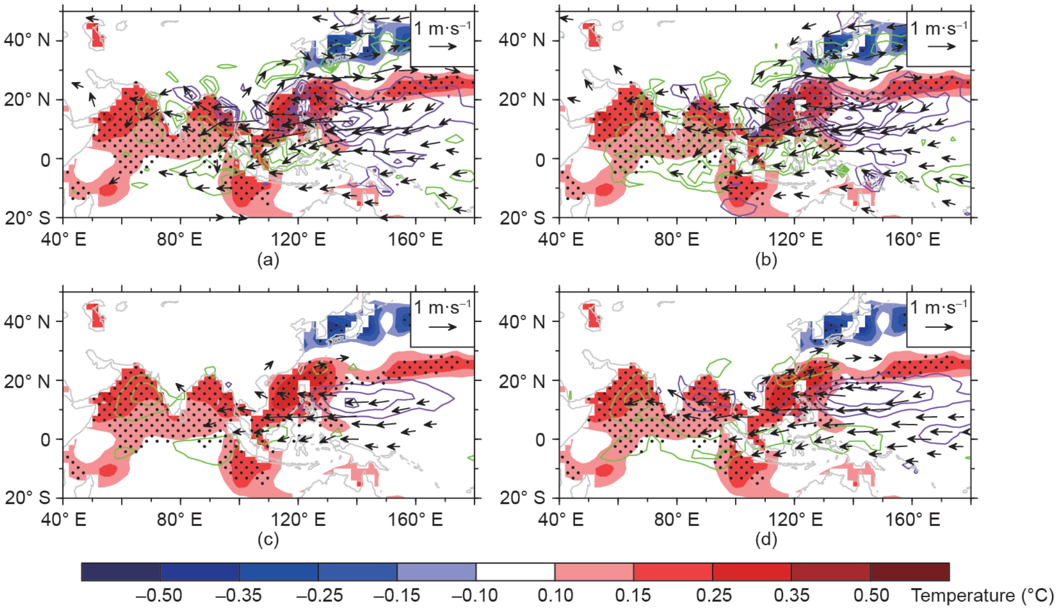

图1. 回归到观测EASM指数（使用NCEP2数据）的观测SST（填色；单位：℃）、观测或模拟的降水（等值线；单位：mm·d^{-1}）、850 hPa风场（箭头；单位：m·s^{-1}）。（a）GPCP和NCEP-2；（b）CMAP和ERA-40；（c）CMIP3 MME；（d）CMIP5 MME。NCEP-2和ERA-40是两套再分析资料，GPCP和CMAP是两套降水观测资料，详见参考资料[4]。绿色（紫色）线表示降水异常增加（减少），每条等值线之间差值为0.35 mm·d^{-1}。忽略小于0.45 m·s^{-1}的风。黑色圆点表示t检验中的SST异常超过10%显著性水平。NCEP：美国国家环境预报中心；ERA-40：欧洲中短期天气预报中心45年再分析数据；GPCP：全球降水气候态计划；CMAP：气候预报中心降水耦合分析。（参考文献[4]）

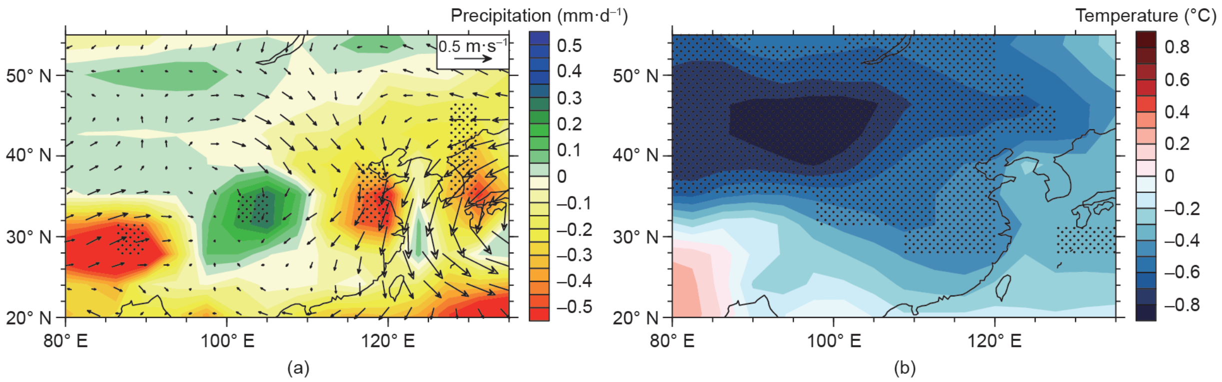

图2. 大型火山喷发后第一个夏季的（a）降水（填色；单位：mm·d^{-1}）及850 hPa风场（箭头；单位：m·s^{-1}）；（b）地表温度（SAT）（单位：℃）的合成的平均值。（参考文献[36]）

会增加。基于CMIP5多模式结果，在RCP4.5和RCP8.5情景下，21世纪末中国年降水量预计分别增加（0.17±0.10）$\mathrm{mm \cdot d^{-1}}$和（0.25±0.12）$\mathrm{mm \cdot d^{-1}}$，分别是当前降水量的8%和11%。

与地表温度和降水量相比，预估的环流对温室气体（GHG）强迫的敏感性更低。由于近地面海陆热力差异增大以及北半球变暖比南半球更快[45,47–49]，在MME中EASM南风略有增强，但季风区域的高层风场辐合减弱[50]。根据500 hPa风场，涡动位势高度和涡动流函数（图3）的多模式结果，预估对流层中层的WNPSH会减弱东退[51]。WNPSH的东退伴随着东亚副热带雨带的东扩[51]。根据多模式结果平均值，与WNPSH相关的低层环流似乎不变[41,45,51,52]。然而，副热带地区的低层西风在增暖的条件下可能增强[53]。EASM环流和降水的年际变率则预计在21世纪有所增加[54]。

随着地表平均温度的上升，降水增强，包括热浪和强降水在内的极端气候事件也表现出相类似的趋势，仅部分更小的区域除外[42,43,55–58]。即使在中等的排放情景中，中国遭受炎热夏季的概率也明显上升[59,60]。东北地区和青藏高原的极端降水增加，东南地区的降水减少；极端事件增加的现象在全球和区域气候模式中都很明显[43]。RCP8.5情景下的帕尔默干旱严重度指数在这些地区表现出类似的趋势[61]。

预估的EA-WNP气候变化有很大的不确定性，这些不确定性来自未知的排放情景、内部变率、模式的气候敏感性和参数的不确定性。东亚升温的幅度主要取决于全球变暖的平均值，而这一平均值受到不同反馈过程的控制[62]。在区域尺度的极端降水方面，内部变率对不确定性的影响可高达30%，但具体大小因地区而异[63]。不同的参数化对流方案可能会改变热力学约束条件，从而改变温度和降水之间的联系，使其远离克劳修斯-克拉珀龙关系，导致更大的不确定性[64]。WNPSH预估的巨大不确定性可能与印度洋和西太平洋之间SST的纬向梯度变化有关[52]。太平洋变暖情况的不同可能是导致EASM爆发预估不确定的重要原因[13,65]。

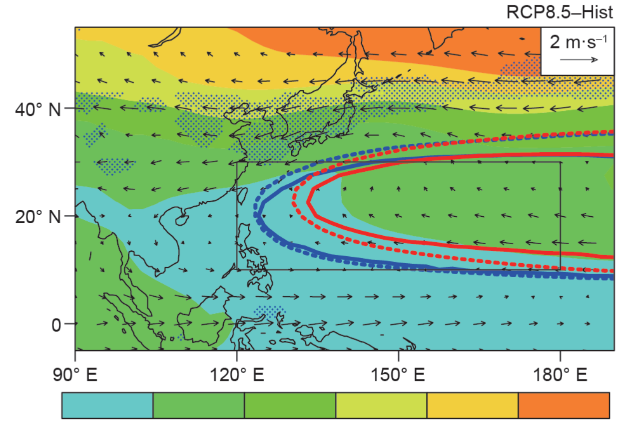

图3. 未来西北太平洋夏季500 hPa平均态的预估变化。阴影表示位势高度的变化，箭头表示风的变化。打点部分表示风的变化有75%以上的模式同号率。涡动位势高度的零线（实线）和涡动流函数的零线（虚线）表示20世纪（蓝线）和21世纪（红线）副热带高压的边界。Hist：历史情景。（参考文献[51]）

6. 区域气候模式的增值

为了评估气候变化对人类和自然系统的影响，获取高分辨率的区域气候变化信息很有必要。国际协同区域气候降尺度试验计划（CORDEX）是一个类似CMIP的多模式比较项目，旨在提供有效的区域气候变化信息†。就参与CORDEX且重点关注东亚‡（CORDEX-EA）的区域气候模式（RCM）而言，几乎所有模式都受给定的来自全球耦合模式SST的驱动[66–68]。这一动力降尺度过程不包括区域海气耦合过程。最近的研究进展表明，与单独RCM相比，包含区域海气耦合过程的RCM在气候态和年际变率方面对于亚洲夏季风降水和环流的模拟都有很大改善[69–77]。

因此，Zou等[78]将灵活的区域海气耦合模式（FROALS）应用于CORDEX-EA区域。这个模式由GCM的历史模拟和未来气候预估结果驱动。使用FROALS模拟当前气候，证明了其模拟1981—2005年间中国东部夏季降水的气候态和年际变率均比对应的单独RCM模式表现好[78]。预估RCP8.5情景下的气候变化时，由于预估环流变化情况相似，FROALS模式得出的降水变化空间分布在大尺度上与作为驱动场的GCM结果基本一致。中国东部增强的南风加强了华南地区的水汽辐散和华北地区的水汽平流。然而，只有单独大气的RCM模式对SST变暖的响应异常剧烈，导致南海北部地区出现异常气旋，使得华南地区（或华中地区）的总降水和极端降水量有所上升（或下降）[79]。这些结果表明，相对于给定海温的RCM，区域海气耦合模式中的大气能够与下垫面的海温处于更好的平衡状态。这表明，在CORDEX-EA区域当前和未来的气候变化的动力

---

† http://www.cordex.org/

‡ https://cordex-ea.climate.go.kr/main/modelsPage.do

降尺度中，FROALS有其独特优势[78,79]。结果还表明，FROALS是CORDEX-EA区域气候变化动力降尺度的有效工具[78,79]。

7. 总结

CMIP5是一个气候模拟研究领域的重要国际合作平台，服务于气候变化和气候变率的研究。这篇综述针对EA-WNP区域的CMIP5模式进行鲁棒性分析，主要结论如下。

（1）在模拟EA-WNP区域的环流和降水时，CMIP5模式比CMIP3表现更好。通常，耦合模式的结果优于单独大气模式。一些系统偏差，例如，WNPSH偏北和与之相关的偏差仍然很明显，是气候模拟领域面临的挑战。

（2）通过西北太平洋低层的异常反气旋（即WNPAC），EA-WNP区域季风的年际变率与厄尔尼诺现象紧密关联。大约一半的CMIP5-CGCM模式能够合理模拟厄尔尼诺成熟冬季期间的WNPAC，但几乎所有模式都低估了中国东南部异常增加的降水。在厄尔尼诺衰减年夏季，WNPAC受到局地冷海温异常和热带印度洋遥强迫的共同影响。CMIP5-CGCM MME结果支持WNPAC和局地冷海温异常所形成的衰减耦合模。在模拟WNPAC时，CMIP5-CGCM MME的能力优于CMIP5-AGCM MME，这表明海气相互作用起了重要作用。

（3）MP和过去千年的气候都是衡量气候模式性能的有用指标。基于上新世模式比较计划（PlioMIP），模式能够模拟MP期间华北地区EASM加强和EAWM减弱的现象，与地质重建结果一致。模拟结果中，MWP期间较强的EASM与LIA期间较弱的EASM与石笋记录一致。

（4）虽然存在不确定性，但根据克劳修斯-克拉珀龙方程，在RCP4.5和RCP8.5两个CMIP5情景中，由于增暖下湿度增加，在WA-WNP大部分地区，预估降水量有所增加。根据多模式平均结果，预估WNPSH在对流层中层会减弱，而近地面的环流似乎没有变化。随着地表温度平均值上升、降水量增加，包括热浪和强降水在内的极端事件也表现出相似增加趋势。

（5）针对CORDEX-EA模式的分析体现出模拟极端降水事件的重要附加增值。证据表明，有必要在CORDEX-EA区域的当前和未来的气候变化动力降尺度中，引入区域海气耦合模式。

致谢

本研究由国家自然科学基金（编号：41420104006和41330423）以及公益性行业（气象）科研专项项目（编号：GYHY201506012）共同资助。

Acknowledgements

This work is jointly supported by the National Natural Science Foundation of China (41420104006 and 41330423), and by the R&D Special Fund for Public Welfare Industry (Meteorology) (GYHY201506012).

Compliance with ethics guidelines

Tianjun Zhou, Xiaolong Chen, Bo Wu, Zhun Guo, Yong Sun, Liwei Zou, Wenmin Man, Lixia Zhang, and Chao He declare that they have no conflict of interest or financial conflicts to disclose.

References

[1] Taylor KE, Stouffer RJ, Meehl GA. An overview of CMIP5 and the experiment design. B Am Meteorol Soc 2012;93(4):485–98.

[2] Zhou T, Zou L, Wu B, Jin C, Song F, Chen X, et al. Development of earth/climate system models in China: A review from the Coupled Model Intercomparison Project perspective. J Meteorol Res 2014;28(5):762–79.

[3] Jiang D, Tian Z, Lang X. Reliability of climate models for China through the IPCC Third to Fifth Assessment Reports. Int J Climatol 2016;36(3):1114–33.

[4] Song F, Zhou T. Interannual variability of East Asian summer monsoon simulated by CMIP3 and CMIP5 AGCMs: Skill dependence on Indian Ocean–western Pacific anticyclone teleconnection. J Clim 2014;27(4):1679–97.

[5] Song F, Zhou T, Wang L. Two modes of the Silk Road pattern and their interannual variability simulated by LASG/IAP AGCM SAMIL2.0. Adv Atmos Sci 2013;30(3):908–21.

[6] Song F, Zhou T. The climatology and interannual variability of East Asian summer monsoon in CMIP5 coupled models: Does air-sea coupling improve the simulations? J Clim 2014;27(23):8761–77.

[7] Huang DQ, Zhu J, Zhang YC, Huang AN. Uncertainties on the simulated summer precipitation over eastern China from the CMIP5 models. J Geophys Res–Atmos 2013;118(16):9035–47.

[8] He C, Zhou T. The two interannual variability modes of the western North Pacific subtropical high simulated by 28 CMIP5-AMIP models. Clim Dynam 2014;43(9–10):2455–69.

[9] Sperber KR, Annamalai H, Kang IS, Kitoh A, Moise A, Turner A, et al. The Asian summer monsoon: An intercomparison of CMIP5 vs. CMIP3 simulations of the late 20th century. Clim Dynam 2013;41(9–10):2711–44.

[10] Seo KH, Ok J, Son JH, Cha DH. Assessing future changes in the East Asian summer monsoon using CMIP5 coupled models. J Clim 2013;26(19):7662–75.

[11] Qu X, Huang G, Zhou W. Consistent responses of East Asian summer mean rainfall to global warming in CMIP5 simulations. Theor Appl Climatol 2014;117(1–2):123–31.

[12] Kitoh A, Uchiyama T. Changes in onset and withdrawal of the East Asian summer rainy season by multi-model global warming experiments. J Meteorol Soc Jpn 2006;84(2):247–58.

[13] Zou L, Zhou T. Asian summer monsoon onset in simulations and CMIP5 projections using four Chinese climate models. Adv Atmos Sci 2015;32(6):794–806.

[14] Inoue T, Ueda H. Evaluation for the seasonal evolution of the summer monsoon over the Asian and western North Pacific sector in the WCRP CMIP3 multi-model experiments. J Meteorol Soc Jpn 2009;87(3):539–60.

[15] Park JY, Jhun JG, Yim SY, Kim WM. Decadal changes in two types of the western North Pacific subtropical high in boreal summer associated with Asian summer monsoon/El Niño-Southern Oscillation connections. J Geophys Res–

Atmos 2010;115(D21):D21129.

[16] He C, Zhou T, Zou L, Zhang L. Two interannual variability modes of the Northwestern Pacific subtropical anticyclone in boreal summer. Sci China Earth Sci 2013;56(7):1254–65.

[17] Yun KS, Yeh SW, Ha KJ. Covariability of western tropical Pacific-North Pacific atmospheric circulation during summer. Sci Rep 2015;5:16980.

[18] Wang B, Wu R, Fu X. Pacific-East Asian teleconnection: How does ENSO affect East Asian climate? J Clim 2000;13(9):1517–36.

[19] Wang B, Wu R, Li T. Atmosphere-warm ocean interaction and its impacts on Asian-Australian monsoon variation. J Clim 2003;16(8):1195–211.

[20] Wu B, Zhou T. Relationships between ENSO and the East Asian–western North Pacific monsoon: Observations versus 18 CMIP5 models. Clim Dynam 2016;46(3–4):729–43.

[21] Wang B, Wu Z, Chang CP, Liu J, Li J, Zhou T. Another look at interannual-to-interdecadal variations of the East Asian winter monsoon: The northern and southern temperature modes. J Clim 2010;23(6):1495–512.

[22] Zhang R, Sumi A, Kimoto M. A diagnostic study of the impact of El Niño on the precipitation in China. Adv Atmos Sci 1999;16(2):229–41.

[23] Wang B, Wu RG, Lukas R, An SI. A possible mechanism for ENSO turnabout. In: IAP/Academia Sinica, editor Dynamics of atmospheric general circulation and climate. Beijing: China Meteorological Press; 2001. p. 552–78.

[24] Wu B, Li T, Zhou T. Asymmetry of atmospheric circulation anomalies over the western North Pacific between El Niño and La Niña. J Clim 2010;23(18):4807–22.

[25] Wu B, Li T, Zhou T. Relative contributions of the Indian Ocean and local SST anomalies to the maintenance of the western North Pacific anomalous anticyclone during the El Niño decaying summer. J Clim 2010;23(11):2974–86.

[26] Wu B, Zhou T, Li T. Seasonally evolving dominant interannual variability modes of East Asian climate. J Clim 2009;22(11):2992–3005.

[27] Xie SP, Hu K, Hafner J, Tokinaga H, Du Y, Huang G, et al. Indian Ocean capacitor effect on Indo-western Pacific climate during the summer following El Niño. J Clim 2009;22(3):730–47.

[28] Kamae Y, Ueda H, Kitoh A. Hadley and Walker circulations in the mid-Pliocene warm period simulated by an atmospheric general circulation model. J Meteorol Soc Jpn 2011;89(5):475–93.

[29] Sun Y, Ramstein G, Contoux C, Zhou T. A comparative study of large-scale atmospheric circulation in the context of a future scenario (RCP4.5) and past warmth (mid-Pliocene). Clim Past 2013;9(4):1613–27.

[30] Seo KH, Frierson DMW, Son JH. A mechanism for future changes in Hadley circulation strength in CMIP5 climate change simulations. Geophys Res Lett 2014;41(14):5251–8.

[31] Jiang D, Wang H, Ding Z, Lang X, Drange H. Modeling the middle Pliocene climate with a global atmospheric general circulation model. J Geophys Res–Atmos 2005;110(D14):D14107.

[32] Zhang R, Yan Q, Zhang ZS, Jiang D, Otto-Bliesner BL, Haywood AM, et al. Mid-Pliocene East Asian monsoon climate simulated in the PlioMIP. Clim Past 2013;9(5):2085–99.

[33] Sun Y, Zhou T, Ramstein G, Contoux C, Zhang Z. Drivers and mechanisms for enhanced summer monsoon precipitation over East Asia during the mid-Pliocene in the IPSL-CM5A. Clim Dynam 2016;46(5–6):1437–57. Erratum in: Clim Dynam 2016;46(5–6):2027.

[34] Man W, Zhou T, Jungclaus JH. Simulation of the East Asian summer monsoon during the last millennium with the MPI earth system model. J Clim 2012;25(22):7852–66.

[35] Zhang P, Cheng H, Edwards RL, Chen F, Wang Y, Yang X, et al. A test of climate, sun, and culture relationships from an 1810-year Chinese cave record. Science 2008;322(5903):940–2.

[36] Man W, Zhou T. Regional-scale surface air temperature and East Asian summer monsoon changes during the last millennium simulated by the FGOALS-gl climate system model. Adv Atmos Sci 2014;31(4):765–78.

[37] Man W, Zhou T. Response of the East Asian summer monsoon to large volcanic eruptions during the last millennium. Chin Sci Bull 2014;59(31):4123–9.

[38] Cui X, Gao Y, Sun J. The response of the East Asian summer monsoon to strong tropical volcanic eruptions. Adv Atmos Sci 2014;31(6):1245–55.

[39] Miao J, Wang T, Zhu Y, Min J, Wang H, Guo D. Response of the East Asian winter monsoon to strong tropical volcanic eruptions. J Clim 2016;29(13):5041–57.

[40] Min SK, Park EH, Kwon WT. Future projections of East Asian climate change from multi-AOGCM ensembles of IPCC SRES scenario simulations. J Meteorol Soc Jpn 2004;82(4):1187–211.

[41] Sun Y, Ding Y. A projection of future changes in summer precipitation and monsoon in East Asia. Sci China Earth Sci 2010;53(2):284–300.

[42] Li H, Feng L, Zhou T. Multi-model projection of July-August climate extreme changes over China under CO_2 doubling. Part I: Precipitation. Adv Atmos Sci 2011;28(2):433–47.

[43] Zou L, Zhou T. Near future (2016–40) summer precipitation changes over China as projected by a regional climate model (RCM) under the RCP8.5 emissions scenario: Comparison between RCM downscaling and the driving GCM. Adv Atmos Sci 2013;30(3):806–18..

[44] Xin X, Zhang L, Zhang J, Wu T, Fang Y. Climate change projections over East Asia with BCC_CSM1.1 climate model under RCP scenarios. J Meteor Soc Jpn 2013;91(4):413–29.

[45] Christensen JH, Krishna Kumar K, Aldrian E, An SI, Cavalcanti IFA, de Castro M, et al. Climate phenomena and their relevance for future regional climate change. In: Stocker TF, Qin D, Plattner GK, Tignor M, Allen SK, Boschung J, et al., editors Climate change 2013: The physical science basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Changes. New York: Cambridge University Press; 2013. p. 1217–308.

[46] Zhou B, Xu Y, Shi Y. Present and future connection of Asian-Pacific Oscillation to large-scale atmospheric circulations and East Asian rainfall: Results of CMIP5. Clim Dynam 2017. In press.

[47] Jiang DB, Tian ZP. East Asian monsoon change for the 21st century: Results of CMIP3 and CMIP5 models. Chin Sci Bull 2013;58(12):1427–35.

[48] Wang B, Yim SY, Lee JY, Liu J, Ha KJ. Future change of Asian-Australian monsoon under RCP4.5 anthropogenic warming scenario. Clim Dynam 2014;42(1–2):83–100.

[49] Lee JY, Wang B. Future change of global monsoon in the CMIP5. Clim Dynam 2014;42(1–2):101–19.

[50] Kitoh A, Endo H, Krishna Kumar K, Cavalcanti IFA, Goswami P, Zhou T. Monsoons in a changing world: A regional perspective in a global context. J Geophys Res–Atmos 2013;118(8):3053–65.

[51] He C, Zhou T, Lin A, Wu B, Gu D, Li C, et al. Enhanced or weakened western North Pacific subtropical high under global warming? Sci Rep 2015;5:16771.

[52] He C, Zhou T. Responses of the western North Pacific subtropical high to global warming under RCP4.5 and RCP8.5 scenarios projected by 33 CMIP5 models: The dominance of tropical Indian Ocean-tropical western Pacific SST gradient. J Clim 2015;28(1):365–80.

[53] Ogata T, Ueda H, Inoue T, Hayasaki M, Yoshida A, Watanabe S, et al. Projected future changes in the Asian monsoon: A comparison of CMIP3 and CMIP5 model results. J Meteorol Soc Jpn 2014;92(3):207–25.

[54] Ren Y, Zhou B, Song L, Xiao Y. Interannual variability of western North Pacific subtropical high, East Asian jet and East Asian summer precipitation: CMIP5 simulation and projection. Quatern Int 2017;440(Part B):64–70.

[55] Li H, Feng L, Zhou T. Multi-model projection of July-August climate extreme changes over China under CO_2 doubling. Part II: Temperature. Adv Atmos Sci 2011;28(2):448–63.

[56] Chen HP. Projected change in extreme rainfall events in China by the end of the 21st century using CMIP5 models. Chin Sci Bull 2013;58(12):1462–72.

[57] Wu J, Zhou BT, Xu Y. Response of precipitation and its extremes over China to warming: CMIP5 simulation and projection. Chin J Geophys 2015;58(5):461–73.

[58] Wang Y, Zhou B, Qin D, Wu J, Gao R, Song L. Changes in mean and extreme temperature and precipitation over the arid region of northwestern China: Observation and projection. Adv Atmos Sci 2017;34(3):289–305.

[59] Sun Y, Zhang X, Zwiers FW, Song L, Wan H, Hu T, et al. Rapid increase in the risk of extreme summer heat in eastern China. Nat Clim Chang 2014;4(12):1082–5.

[60] Zhou B, Wen QH, Xu Y, Song L, Zhang X. Projected changes in temperature and precipitation extremes in China by the CMIP5 multimodel ensembles. J Clim 2014;27(17):6591–611.

[61] Zhou T, Hong T. Projected changes of palmer drought severity index under an RCP8.5 scenario. Atmos Ocean Sci Lett 2013;6(5):273–8.

[62] Chen X, Zhou T, Guo Z. Climate sensitivities of two versions of FGOALS model to idealized radiative forcing. Sci China Earth Sci 2014;57(6):1363–73.

[63] Van Pelt SC, Beersma JJ, Buishand TA, van den Hurk BJJM, Schellekens J. Uncertainty in the future change of extreme precipitation over the Rhine basin: The role of internal climate variability. Clim Dynam 2015;44(7–8):1789–800.

[64] Turner AG, Slingo JM. Uncertainties in future projections of extreme precipitation in the Indian monsoon region. Atmos Sci Lett 2009;10(3):152–8.

[65] Chen X, Zhou T. Distinct effects of global mean warming and regional sea surface warming pattern on projected uncertainty in the South Asian summer monsoon. Geophys Res Lett 2015;42(21):9433–9.

[66] Oh SG, Park JH, Lee SH, Suh MS. Assessment of the RegCM4 over East Asia and future precipitation change adapted to the RCP scenarios. J Geophys Res–Atmos 2014;119(6):2913–27.

[67] Park C, Min SK, Lee D, Cha DH, Suh MS, Kang HS, et al. Evaluation of multiple regional climate models for summer climate extremes over East Asia. Clim Dynam 2016;46(7–8):2469–86.

[68] Niu X, Wang S, Tang J, Lee DK, Gutowski W, Dairaku K, et al. Projection of Indian summer monsoon climate in 2041–2060 by multiregional and global climate models. J Geophys Res–Atmos 2015;120(5):1776–93.

[69] Yao S, Zhang Y. Simulation of China summer precipitation using a regional air-sea coupled model. Acta Meteorol Sin 2010;24(2):203–14.

[70] Li T, Zhou G. Preliminary results of a regional air-sea coupled model over East Asia. Chin Sci Bull 2010;55(21):2295–305.

[71] Fang Y, Zhang Y. Impacts of regional air-sea coupling on the simulation of summer precipitation over eastern China in the RIEMS model. Chin J Atmos Sci 2011;35(1):16–28. Chinese.

[72] Wang HJ, Sun JQ, Chen HP, Zhu YL, Zhang Y, Jiang DB, et al. Extreme climate in China: Facts, simulation and projection. Meteorol Z 2012;21(3):279–304.

[73] Zou L, Zhou T. Development and evaluation of a regional ocean-atmosphere coupled model with focus on the western North Pacific summer monsoon simulation: Impacts of different atmospheric components. Sci China Earth Sci 2012;55(5):802–15.

[74] Zou L, Zhou T. Can a regional ocean-atmosphere coupled model improve the simulation of the interannual variability of the western North Pacific summer monsoon? J Clim 2013;26(7):2353–67.

[75] Zou L, Zhou T. Simulation of the western North Pacific summer monsoon by regional ocean-atmosphere coupled model: Impacts of oceanic components. Chin Sci Bull 2014;59(7):662–73.
[76] Cha DH, Jin CS, Moon JH, Lee DK. Improvement of regional climate simulation of East Asian summer monsoon by coupled air-sea interaction and large-scale nudging. Int J Climatol 2016;36(1):334–45.
[77] Ham S, Yoshimura K, Li H. Historical dynamical downscaling for East Asia with the atmosphere and ocean coupled regional model. J Meteorol Soc Jpn 2016;94A:199–208.
[78] Zou L, Zhou T, Peng D. Dynamical downscaling of historical climate over CORDEX East Asia domain: A comparison of regional ocean atmosphere coupled model to stand-alone RCM simulations. J Geophys Res–Atmos 2016;121(4):1442–58.
[79] Zou L, Zhou T. Future summer precipitation changes over CORDEX-East Asia domain downscaled by a regional ocean-atmosphere coupled model: A comparison to the stand-alone RCM. J Geophys Res–Atmos 2016;121(6):2691–704.