

陈红. 2014. CMIP5 气候模式对中国东部夏季降水年代际变化的模拟性能评估 [J]. 气候与环境研究, 19 (6): 773–786, doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2014.13174. Chen Hong. 2014. Validation of the CMIP5 climate models in simulating decadal variations of summer rainfall in eastern China [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 19 (6): 773–786.

CMIP5 气候模式对中国东部夏季降水年代际变化的模拟性能评估

陈红

中国科学院大气物理研究所国际气候与环境科学中心, 北京 100029

摘 要 使用分类集合的方法评估了第五次耦合模式比较计划 (CMIP5) 多个耦合模式对中国东部夏季降水年代际变化的模拟性能。结果表明, 在评估的 38 个模式中, 仅有 6 个模式 (第 1 类模式) 可以成功再现 1970 年代末中国东部夏季降水年代际变化的主要特征, 即长江流域降水偏多、而华北和华南偏少。这些模式模拟的成功归因于它们能较好再现 1970 年代末东亚夏季风的年代际减弱及相关的环流场的变化, 包括东亚沿海的偏北风异常以及西太平洋副热带高压的偏向西南、强度增强等。而对降水年代际变化模拟很差的第 2 类模式, 则模拟出不出东亚夏季风的这种减弱特征。进一步的分析表明, 两类 CMIP5 模式对太平洋年代际振荡 (PDO) 空间分布特征都有较好的再现能力, 但对 PDO 年代际转变特征的模拟能力则差异较大。第 1 类模式能很好地模拟出 1970 年代末热带海洋的增暖和相关的 PDO 位相由负到正的转换, 而第 2 类模式所模拟的 PDO 位相转变与观测完全相反, 且也不能模拟出热带中东太平洋海洋的年代际增暖及江淮流域夏季的变冷, 因此导致该类模式对 1970 年代末东亚夏季风的减弱和中国东部夏季雨型的年代际转变没有模拟能力。由此也表明, 对耦合模式来说, 中国夏季降水年代际变化的模拟能力在很大程度上取决于模式对海洋年代际变化信号的模拟。

关键词 年代际变化 夏季降水 耦合模式 太平洋年代际振荡

文章编号 1006-9585 (2014) 06-0773-14

中图分类号 P461

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2014.13174

Validation of the CMIP5 Climate Models in Simulating Decadal Variations of Summer Rainfall in Eastern China

CHEN Hong

International Center for Climate and Environment Sciences, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

Abstract The categorization method was used to evaluate the performance of the Coupled Model Inter-comparison Program Phase 5 (CMIP5) climate models in simulating the decadal variation of summer monsoon rainfall in eastern China. Out of the 38 models that were examined, only six (category-1 models) captured the decadal variation of summer rainfall in eastern China in the late 1970s, i.e., increased rainfall in the Yangtze River basin and decreased rainfall in North and South China. The category-1 models simulate the decadal variation of summer rainfall in eastern China well because they are able to capture the decadal weakening of the East Asian Summer Monsoon (EASM) along with the northerly anomaly in the coast of East Asia and changes in the western Pacific subtropical high in the late 1970s. In contrast, the category-2 models, which poorly simulate the decadal variation of summer rainfall in eastern China, fail to reproduce the decadal weakening of the EASM. Further analysis indicates that while most models can reproduce the spatial distribution

收稿日期 2013-10-16 收到, 2014-02-18 收到修定稿

资助项目 中国科学院战略性先导科技专项 XDA05110201, 国家重点基础研究发展计划项目 2009CB421407

作者简介 陈红, 女, 1972 年出生, 博士, 副研究员, 从事气候预测和可预报性研究。E-mail: chh@mail.iap.ac.cn

of the Pacific Decadal Oscillation (PDO), their accuracy at reproducing the decadal variation of the PDO varies. Category-1 models can reproduce the tropical ocean warming in the late 1970s and the relative phase transition of the PDO. Category-2 models fail to capture the phase transition of the PDO, the tropical ocean warming in the central-eastern Pacific Ocean, and the cooling trend in the Yangtze River basin, which results in low accuracy of these models for reproducing the weakened EASM and the decadal variation of summer rainfall in eastern China after the late 1970s. This indicates that the accuracy of climate models for simulating the decadal variations of sea surface temperature plays an important role in the accuracy of the models' simulation of the decadal variation of summer rainfall.

Keywords Decadal variation, Summer rainfall, Coupled climate models, Pacific decadal oscillation

1 引言

中国地处东亚季风区,东亚夏季风是影响东亚夏季气候的重要系统。在它的影响下,中国东部夏季降水呈现出从季节内到年代际的多时间尺度的复杂变化(如,郭其蕴,1985;张庆云等,2003),其中降水的年代际变化问题已受到广泛的关注。研究表明,东亚夏季风气候具有显著的年代际变化特征。1970年代末东亚夏季风发生明显的年代际衰减,中国东部夏季盛行的西南季风减弱,西太平洋副热带高压强度增强且偏向西南,导致长江流域降水增多,华北降水减少,中国东部雨型形成了所谓的“南多北少”型分布(Wang, 2001; Yu et al., 2004; 黄荣辉等, 2006)。关于这次年代际变化机制的研究目前已经有了许多工作,不少研究认为此次东亚夏季风环流和降水的变化与热带海洋的变暖及北太平洋年代际振荡(PDO)的位相转换有密切关系(Xue, 2001; Gong and Ho, 2002; 朱益民和杨修群, 2003; 杨修群等, 2004; 张庆云等, 2007)。除海温强迫外,其他一些研究则表明,陆面过程、温室气体、气溶胶、火山爆发以及太阳活动等外强迫因子的影响也可能对东亚夏季风气候的年代际变化起一定的作用,如朱玉祥等(2007)指出20世纪70年代后期青藏高原冬春季积雪的显著增多,导致夏季海陆温差减弱和东亚夏季风的减弱; Menon et al. (2002)通过数值模拟证明,中国东部地区北旱南涝的年代际变化是由于城市空气黑碳气溶胶持续增长大量吸收太阳光线导致区域性大气环流异常所致;等等。

近些年,针对东亚夏季风降水年代际变化的模拟评估方面,中国学者开展了一些工作,取得了一些有意义的结果。如, Bao and Huang (2005)利用政府间气候变化专门委员会(IPCC)第3次评估报告(IPCC AR3)中5个耦合模式的模拟结果,分析

了中国东部夏季降水年代际变化的模拟情况,发现有个别模式可以模拟出20世纪70年代中期前后降水发生的突变;也有研究者利用IPCC第4次评估报告(IPCC AR4)中多个耦合模式的结果,着重分析耦合模式对20世纪70年代中后期夏季降水突变这一现象的再现能力,发现仅有少数模式可以较好地东亚夏季风降水的年代际变化作出模拟(孙颖和丁一汇, 2008; 顾薇和李崇银, 2010)。全面评估气候模式对东亚夏季风气候的模拟能力,是开展东亚夏季气候预测和评估的基础性工作,但上述对东亚夏季降水年代际变化的模拟评估研究都是基于IPCC AR3和AR4耦合模式模拟结果。最近,CMIP5耦合模式模拟结果已陆续对外发布,这些模式代表了当前国际主要先进模式的最新版本,较之前参与第四次评估报告的模式有了较大的改进,情景试验设计也更加合理。因此,为了更好地了解现有耦合模式对东亚夏季降水年代际变化的模拟能力,本文利用CMIP5多个耦合模式模拟结果,通过与观测资料对比分析,着重评估耦合模式对20世纪70年代中后期中国东部夏季降水年代际变化这一现象的模拟情况;并通过分类集合方法研究不同类的模式集合对中国东部夏季降水年代际变化模拟的差异,以及这种差异产生的可能原因,从而对模式需要改进和完善的方面有深入的认识,为东亚气候的年代际变化预估提供依据。

2 资料和计算方法

本文使用的观测资料包括:大气环流资料为ECMWF (European Centre for Medium-range Weather Forecast)提供的1958~1999年月平均再分析资料,资料的水平分辨率为 2.5° (纬度) $\times 2.5^{\circ}$ (经度)(Uppala et al., 2005);海温资料为NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration)重建的长时间序列海温资料(<http://www.esrl.noaa.gov/psd/>)

data/gridded/data.noaa.ersst.html [2012-08-12]), 分辨率为 2° (纬度) $\times 2^{\circ}$ (经度)。本文还利用 CRU (Climate Research Unit at the University of East Anglia) 提供的月平均陆地降水和气温资料, 分辨率为 0.5° (纬度) $\times 0.5^{\circ}$ (经度) (New et al., 2002)。

本文采用的模式资料来自耦合模式比较计划 CMIP5 的 38 个耦合模式对 20 世纪历史气候模拟试验的模拟结果, 选取的气象要素包括降水、大气环流场及海温场。历史模拟试验中在 1850~2005 年随时间变化的外强迫场包括太阳活动、温室气体、气溶胶、火山活动和臭氧, 强迫数据均采用 CMIP5 建议的统一资料。为了研究方便, 所有模式环流场资料均被插值到与 ECMWF 资料相同的格点上 [2.5° (纬度) $\times 2.5^{\circ}$ (经度)]。观测和模拟的降水资料则同时插值到 1° (纬度) $\times 1^{\circ}$ (经度) 格点上。

本文中对模式资料的分析方法采用分类模式集合评估, 研究不同类的模式集合对东亚夏季风年代际变化模拟的差异。基本的思路是: 以中国东部地区 (105°E 以东) 夏季 (6~8 月) 平均降水作为分类的基本变量, 进行模式对降水年代际变化场的模拟性能的检验, 从中挑选模拟较好和模拟较差的两类模式, 分别进行分类集合, 评估产生这种差异的原因。

首先, 我们分析了本文中 38 个耦合模式对中国当代夏季降水气候态的模拟性能, 发现多数模式

对中国地区东部夏季降水量的空间分布特征有一定的模拟能力, 能基本再现降水由南向北减少的分布形态 (图略), 与观测的空间相关为 $0.38\sim 0.88$ (501 个格点), 因此可将这些模式用于下面年代际变化的研究。

根据前人的研究结果, 以 1978 年为 1970 年代后期这次年代际变化的分界点, 并以 1979~1999 年和 1958~1978 年气候平均值的差值表示年代际变化。表 1 给出了 CMIP5 38 个耦合模式模拟的中国东部地区夏季降水年代际变化与观测间的相关和同号率。从表中可以看到, 从年代际变化的模拟来看, 许多模式的模拟性能是较差的, 有一半以上模式模拟结果与实况的相关为负值。相关超过 0.1 的只有 8 个模式 (1~8 号), 但其中 7、8 号模式模拟结果与实况的同号率小于 50%, 也基本不能再现降水年代际变化的主要特征 (图略)。在此我们以模式对降水年代际变化的模拟性能为标准进行分类, 第 1 类为能基本再现降水年代际变化主要特征的模式, 即模拟相关超过 0.1, 同号率大于 55% 的模式, 第 2 类为模拟较差的模式, 模拟相关小于 -0.10 , 同号率小于 45%, 这些模式模拟的降水变化分布和实况基本是相反的。根据这一标准, 第 1 类模式有 6 个 (1~6 号): HadCM3、CMCC-CESM、GFDL-ESM2M、inmcm4、CNRM-CM5 和 ACCESS1-3, 第 2 类模式有 9 个 (30~38 号), 由于 30、31

表 1 中国东部夏季降水年代际变化模拟技巧

Table 1 Predictive skill for the decadal variation of summer rainfall in Eastern China

序号	模式名称	相关系数	同号率	序号	模式名称	相关系数	同号率
1	HadCM3	0.37	66%	20	MIROC-ESM-CHEM	-0.04	51%
2	CMCC-CESM	0.36	63%	21	bcc-csm1-1-m	-0.05	47%
3	GFDL-ESM2M	0.32	55%	22	GFDL-ESM2G	-0.06	45%
4	inmcm4	0.30	65%	23	MRI-CGCM3	-0.07	42%
5	CNRM-CM5	0.26	57%	24	CMCC-CM	-0.11	52%
6	ACCESS1-3	0.23	58%	25	CanESM2	-0.10	50%
7	HADGEM2-ES	0.16	48%	26	IPSL-CM5B-LR	-0.14	53%
8	MIROC4h	0.15	49%	27	FIO-ESM	-0.15	54%
9	GISS-E2-R-CC	0.08	56%	28	MIROC5	-0.17	53%
10	CESM1-WACCM	0.08	53%	29	MPI-ESM-MR	-0.17	53%
11	MIROC-ESM	0.07	54%	30	CESM1-FASTCHEM	-0.34	43%
12	CESM1-BGC	0.04	55%	31	CESM1-CAM5	-0.29	43%
13	HADGEM2-AO	0.04	54%	32	NorESM1-M	-0.26	36%
14	CCSM4	0.04	54%	33	bcc-csm1-1	-0.29	36%
15	CSIRO-MK3-6-0	0.03	45%	34	NorESM1-ME	-0.33	33%
16	MPI-ESM-LR	0.03	56%	35	FGOALS-g2	-0.34	42%
17	IPSL-CM5A-LR	0.02	50%	36	CMCC-CMS	-0.40	37%
18	IPSL-CM5A-MR	0.02	49%	37	ACCESS1-0	-0.53	26%
19	HADGEM2-CC	-0.03	43%	38	BNU-ESM	-0.61	40%

号模式环流资料不完整,集合的时候不包含这两个模式的信息。对这两类模式分别进行集合,评估产生这种模拟性能差异的原因,以进一步揭示东亚夏季风降水年代际变化的机理。

3 结果分析

3.1 降水和环流场模拟性能评估

图 1 给出观测和两类模式集合模拟的中国东部夏季降水年代际变化。观测表明(图 1a),相对于 1958~1978 年,1979~1999 年中国夏季雨型发生了明显变化,主要表现为长江流域降水明显增加,特别是长江中下游地区,中心超过 2 mm/d,而华北和华南降水则减少,中国东部夏季雨型由所谓的“北多南少”转变为“南多北少”。第 1 类模式能基本模拟出上述雨型的年代际变化分布(图 1b),即华北的降水减少,长江流域的降水增加,而华南一带的降水略有减少。但与观测相比,模拟的降水量变化明显低于观测。第 2 类模式(图 1c)的集合显示了与实况场相反的分布,即长江流域的降水减少,而华北和华南的降水增多。

东亚夏季风环流的变化影响中国东部夏季雨型的变化,下面从大尺度环流角度讨论引起两类模式模拟显著差异的原因。图 2 给出了 ECMWF 再分析资料和两类模式分类集合的 850 hPa 风场年代际变化图。图 2a 显示,与 1958~1978 年相比,1979~1999 年东亚沿海出现明显的偏北风异常,不利于水汽向华北地区的输送,而孟加拉湾和印度半岛地区均为异常的东北气流,这说明东亚季风和印度季风环流都减弱。此外,长江流域到日本一带为气旋性异常环流,有利于长江流域降水增多,从而形成“南多北少”的夏季降水分布。第 1 类模式集合能较好模拟出东亚沿海的偏北风异常以及长江流域到日本一带的气旋性环流异常(图 2b),孟加拉湾和印度半岛地区异常的偏东气流也能模拟出来,这些与该类模式能模拟出中国东部夏季雨型的转变有直接关系。而第 2 类模式模拟的环流与观测场有很大差异,孟加拉湾和印度半岛地区均为异常的偏西气流,印度季风加强,华南南部及以东海域为气旋性环流异常,长江流域则为异常辐散气流控制,使该区降水减少,华北则为异常的南风气流,有利于降水的增多,进而形成“南少北多”的夏季降水分布,与实况相反。

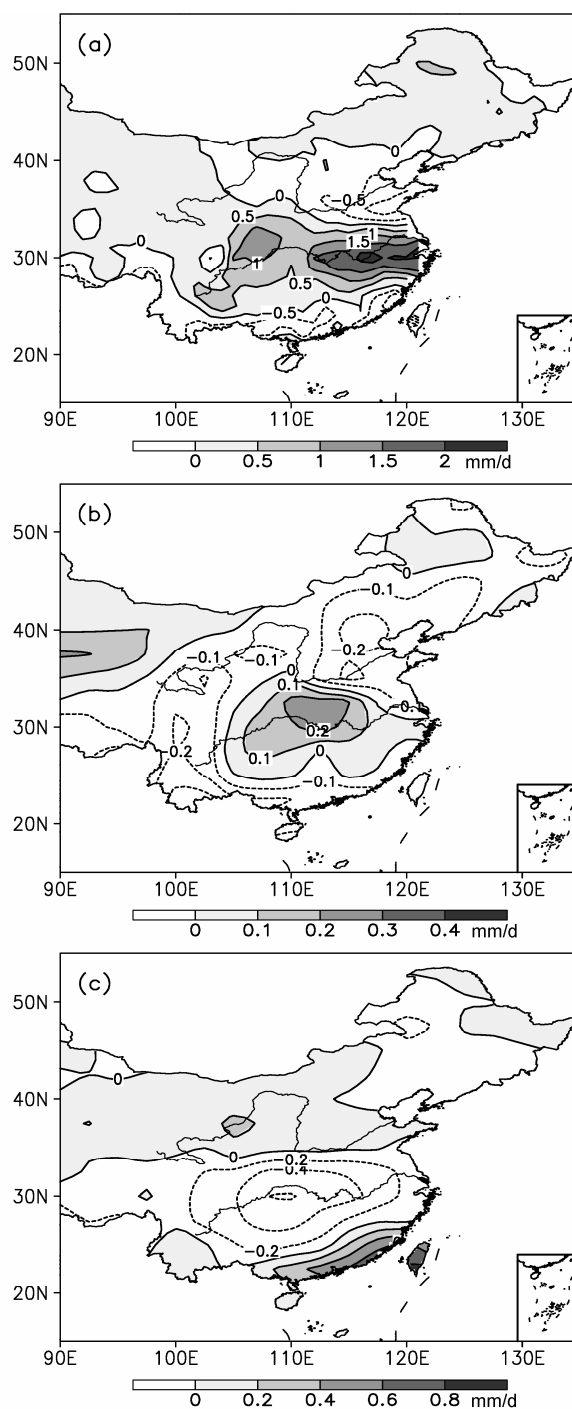


图 1 中国东部夏季降水的年代际变化(单位: mm/d): (a) 观测; (b) 第 1 类模式集合; (c) 第 2 类模式集合

Fig. 1 The decadal variation of summer rainfall in eastern China (mm/d): (a) Observation; (b) category-1 model ensemble mean; (c) category-2 model ensemble mean

图 3 给出了 ECMWF 再分析资料和两类模式分类集合的 500 hPa 高度场年代际变化图。在观测中,从蒙古国到日本上空为高度场负距平,说明这些区域位势高度降低。两类模式都基本不能再现这种位

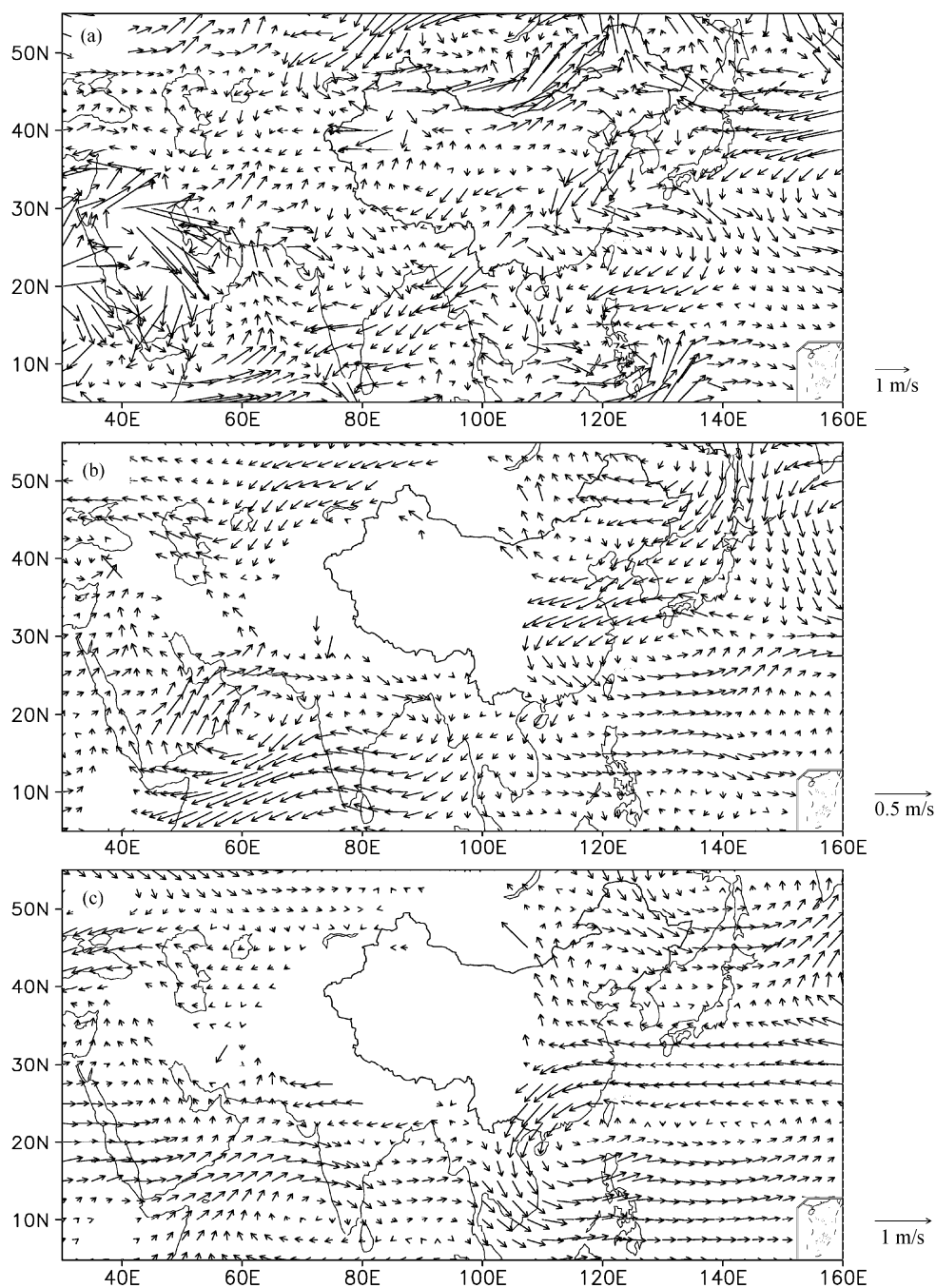


图2 夏季 850 hPa 风场的年代际变化 (单位: m/s): (a) ECMWF 再分析资料; (b) 第 1 类模式集合; (c) 第 2 类模式集合

Fig. 2 The decadal variation of summer 850-hPa wind (m/s): (a) ECMWF reanalysis; (b) category-1 model ensemble mean; (c) category-2 model ensemble mean

势高度减弱的情形,都为位势高度的增加,这表明模式对中高纬环流场变化的模拟能力是比较差的,基本没有再现能力。作为东亚夏季风的一个主要环流系统,西太平洋副热带高压(副高)的形态变化尤其是其脊线的南北变化对中国夏季降水的分布有重要影响(苏同华和薛峰,2010)。图3中还给出年代际变化前后观测和CMIP5两类模式模拟的

500 hPa 副高分布,观测通常以 5880 gpm 等值线代表,但CMIP5模式模拟的副高较观测偏弱,因而模式中副高以 5860 gpm 等值线表示。观测表明,相对于 1958~1978 年,1979~1999 年副高明显偏向西南,且强度增强。两类模式集合都能模拟出副高位置的偏西和强度的增强(图3)。为分析副高脊线位置的南北变化,图4给出了副高脊线的位置图,

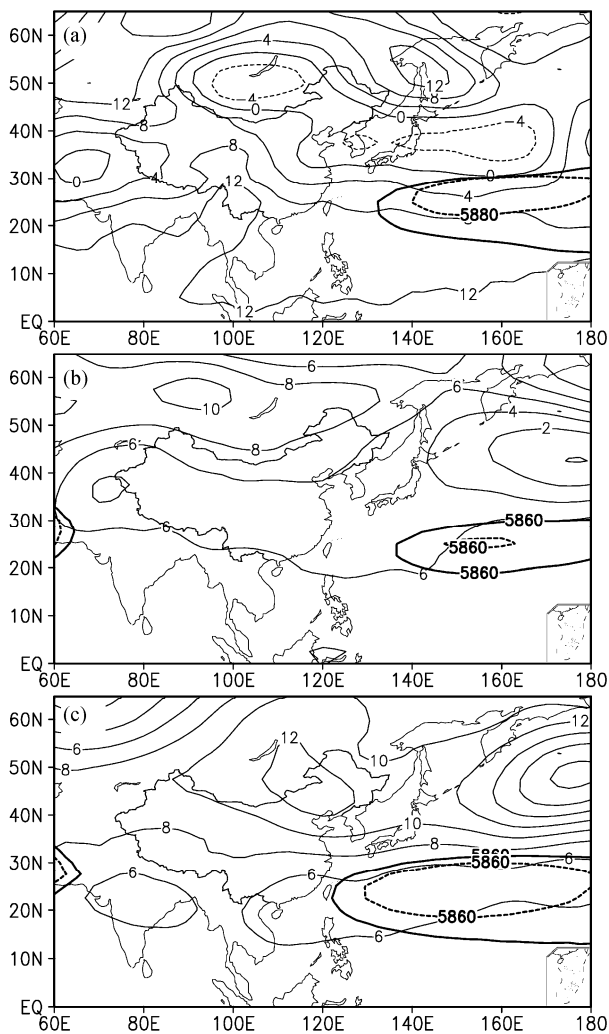


图3 夏季 500 hPa 高度场的年代际变化 (单位: gpm): (a) ECMWF 再分析资料; (b) 第 1 类模式集合; (c) 第 2 类模式集合。图中粗实线、虚线分别为 1979~1999 年平均和 1958~1978 年平均的西太平洋副高的分布

Fig. 3 The decadal variation of summer 500-hPa geopotential high (gpm): (a) ECMWF reanalysis; (b) category-1 model ensemble mean; (c) category-2 model ensemble mean. The thick solid and dashed contours represent the climatological mean western Pacific subtropical highs during 1979-1999 and 1958-1978, respectively

此处副高脊线位置定义为西太平洋区 500 hPa 东西风交界面, 即纬向风的零线 (宋振鑫等, 2001; 祁莉等, 2008)。图 4a 表明, 1978 年后观测副高脊线位置偏南, 这有利于我国东部雨带偏南, 长江流域降水增多。第 1 类模式集合能模拟出副高脊线位置的偏南, 只是偏南幅度低于观测, 而第 2 类模式集合模拟副高脊线位置则为正常略偏北, 导致了我国东部雨带的偏北。

东亚副热带高空西风急流位置的南北移动和

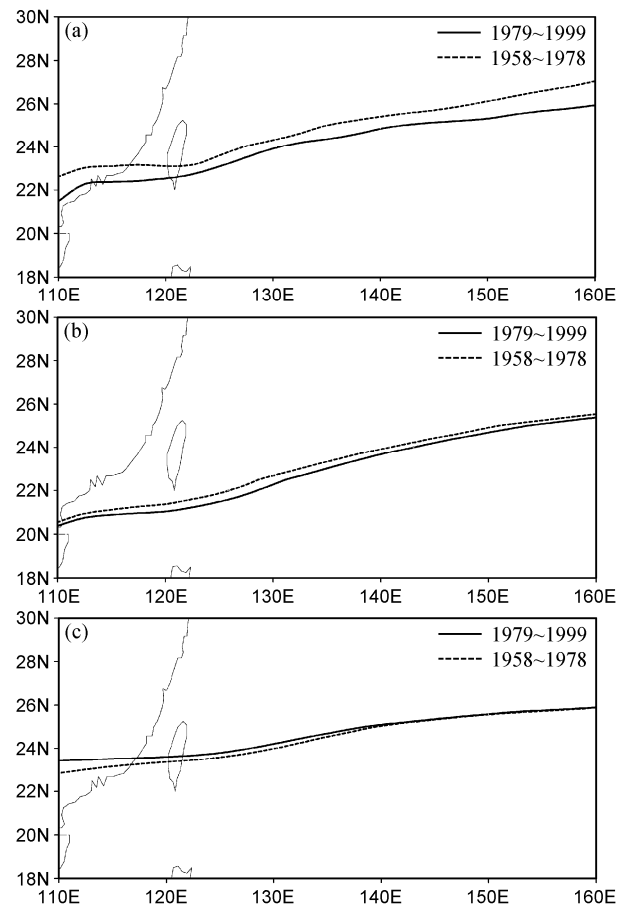


图4 夏季 500 hPa 西太平洋副高脊线位置, 实线为 1979~1999 年平均, 虚线为 1958~1978 年平均。(a) ECMWF 再分析资料; (b) 第 1 类模式集合; (c) 第 2 类模式集合

Fig. 4 Distribution of summer 500-hPa western Pacific subtropical high ridge line, the solid and dashed contours represent the climatological means during 1979-1999 and 1958-1978, respectively. (a) ECMWF reanalysis; (b) category-1 model ensemble mean; (c) category-2 model ensemble mean

强度变化与我国长江流域和华北旱涝趋势变化有着密切关系。20 世纪 70 年代末副热带西风急流向南偏移, 25°N~35°N 西风增强, 42°N~50°N 西风减弱, 与此相对应, 华北夏季降水减少、长江中下游降水呈现增加的变化趋势 (张凤华等, 2009)。图 5 给出了 ECMWF 再分析资料和两类模式分类集合的 200 hPa 纬向风年代际变化图。观测显示, 25°N~35°N 西风增强, 45°N~50°N 西风减弱, 西风异常的这种分布有利于急流轴的向南偏移。第 1 类模式集合能模拟出 40°N 以北西风的减弱及 25°N~35°N 的西风增强, 只是强度与实况相比偏弱。而第 2 类模式则模拟 25°N~35°N 西风减弱, 45°N 以北西风增强, 与实况相反。为反映东亚副热带西风急流的南北变动, 本文还计算了急流轴的位置

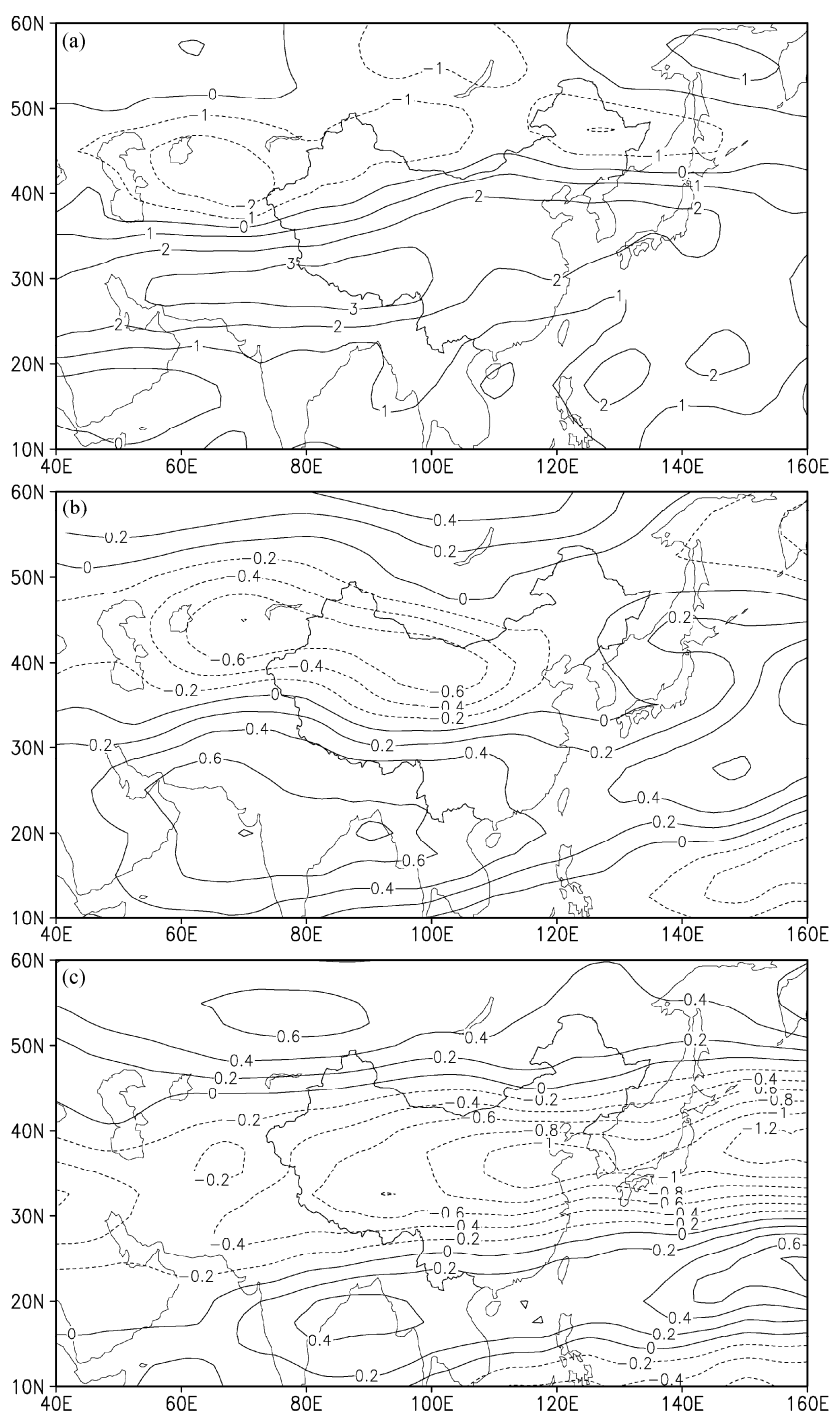


图5 同图2, 但为夏季 200 hPa 纬向风的年代际变化 (单位: m/s)

Fig. 5 Same as Fig. 2, but for the decadal variation of summer 200-hPa zonal wind (m/s)

置, 使用的是况雪源和张耀存 (2006) 定义的东亚副热带西风急流轴指数: 200 hPa 等压面上 (30°N~50°N, 70°E~120°E) 区域内最大西风所在纬度的平均值。计算发现, 就观测而言, 1958~1978 年急流轴的平均位置在 40.6°N, 1979~1999 年急流轴的平均位置在 40.4°N。相对于 1958~1978 年, 1979~

1999 年急流轴位置偏南。第 1 类模式模拟 1958~1978 年急流轴的平均位置在 41.4°N, 1979~1999 年急流轴的平均位置在 41.3°N, 比 1958~1978 年略偏南。第 2 类模式则模拟 1958~1978 年急流轴的平均位置在 41.2°N, 而 1979~1999 年急流轴的平均位置在 41.3°N, 比 1958~1978 年略偏北。所

以, 总体而言, 第 1 类模式能基本再现东亚副热带西风急流的年代际变化特征, 而第 2 类模式则模拟不出观测的这种变化。

以上分析表明, 我国东部夏季降水的年代际变化与亚洲季风环流的转变存在密切的联系。第 1 类模式对降水年代际变化模拟的成功在环流场上归因于它们能较好地再现了东亚夏季风环流的年代际减弱, 包括东亚沿海地区明显的偏北风异常, 西太平洋副高的偏向西南、强度增强, 及东亚副热带高空西风急流的偏南。

3.2 海温和近地面气温场模拟性能评估

不少研究指出, 海温变化可能是影响我国东部夏季降水年代际变化的重要因子。陈红和薛峰 (2013) 的研究也证实了在年代际时间尺度上, 中国东部夏季雨型的变化与热带海洋的变暖及相关的 PDO 位相转换有密切关系。下面将通过两类模式集合对比分析, 揭示 SST 变化在东亚气候年代际变化中的作用。

图 6 给出观测及两类模式集合的夏季 SST 年代际变化。相对于 1958~1978 年, 1979~1999 年整个赤道太平洋上海温出现增暖现象, 尤其是赤道东南太平洋增暖的强度及范围最为显著, 一些气象学家称之为“年代际 ENSO”现象。周连童和黄荣辉 (2003) 指出热带中东太平洋所发生的“年代际 ENSO 循环现象”对于我国夏季气候年代际变化起了相当重要的作用。此外, 图 6a 还表明, 赤道西太平洋暖池到我国东部沿海也存在大范围增温现象, 而北太平洋中纬度地区则出现负偏差, 即存在变冷现象。对两类模式模拟结果的分析表明, 第 1 类模式能再现 SST 年代际变化, 即热带中东太平洋增暖, 北太平洋变冷, 只是变冷幅度远低于观测。第 2 类模式集合结果也能模拟出热带的增暖, 但对于观测中的赤道中东太平洋区域增暖模式模拟结果则显著偏弱, 部分地区还出现了变冷, 此外模式也模拟不出北太平洋的变冷。就单个模式而言, 第 2 类模式中有 4 个模式模拟热带中东太平洋变冷, 而所有 7 个模式模拟北太平洋异常增暖, 增暖中心强度超过 0.6 K。

上述观测 SST 年代际变化分布类似于 PDO 海温异常的分布特征, 即北太平洋 SST 异常与热带东太平洋呈反位相变化。对于可能引起我国东部夏季降水年代际变化的重要因子 PDO, 在此我们也进行了模式的分类对比分析。PDO 指数是指北太平

洋地区 (20°N 以北) SST 正交函数分解 (EOF 分解) 的第一模态时间系数。观测 PDO 指数取自网站 (<http://jisao.washington.edu/pdo/PDO.latest> [2012-08-05]), 为得到年代际分量, 对其进行了 9 年滑动平均。用观测和模式模拟的海温资料计算得到的北太平洋海温异常的第 1 模态显示, 在两类模式中, 除第 2 类模式中的 bcc-csm1-1 和 BNU-ESM 模式外, 其余模式均能模拟出 PDO 这一北太平洋海温的主要模态。为了比较模式与观测中 PDO 随时间的变化情况, 计算了 9 年平滑后观测的 PDO 指数与模式模拟的 PDO 指数在 1958~1999 年的相关(表 2)。可以看到, 第 1 类模式中除 ACCESS1-3 模式外, 其它 5 个模式模拟的 PDO 指数与观测的相关均为正值, 6 个模式集合后结果与实况相关高达 0.8, 因此在年代际尺度上, 第 1 类模式模拟集合的 PDO 与实况非常接近; 而对第 2 类模式中能模拟出 PDO 模态的 5 个模式, 其模拟的 PDO 指数年代际变化与实况呈现反相关, 集合后模式与实况的相关为 -0.84。图 7 进一步给出了观测及两类模式集合后的 PDO 指数年代际变化。由图可见, 第一类模式集合结果与观测资料在年代际尺度上的变化趋势非常相似, 模式集合结果能再现 PDO 在 1970 年代末的由负转正的位相变化, 只是转折年份与实况相比略偏迟。而第二类模式集合结果则不能再现观测 PDO 在 1970 年代末的这种转变, 模拟结果与实况基本反位相。

表 2 观测与模式模拟 PDO 指数年代际分量的相关系数
Table 2 Interdecadal correlation coefficients of the PDO indexes between observation and simulation

	模式名称	相关系数
第 1 类模式	HADCM3	0.52
	CMCC-CESM	0.76
	GFDL-ESM2M	0.35
	Inmcm4	0.31
	CNRM-CM5	0.88
	ACCESS1-3	-0.35
	集合	0.80
第 2 类模式	NorESM1-M	-0.85
	NorESM1-ME	-0.37
	FGOALS-g2	-0.88
	CMCC-CMS	-0.57
	ACCESS1-0	-0.52
	集合	-0.84

上述分析表明, 第 1 类模式集合由于能较好地模拟出 1970 年代末热带海洋的变暖及相关的 PDO

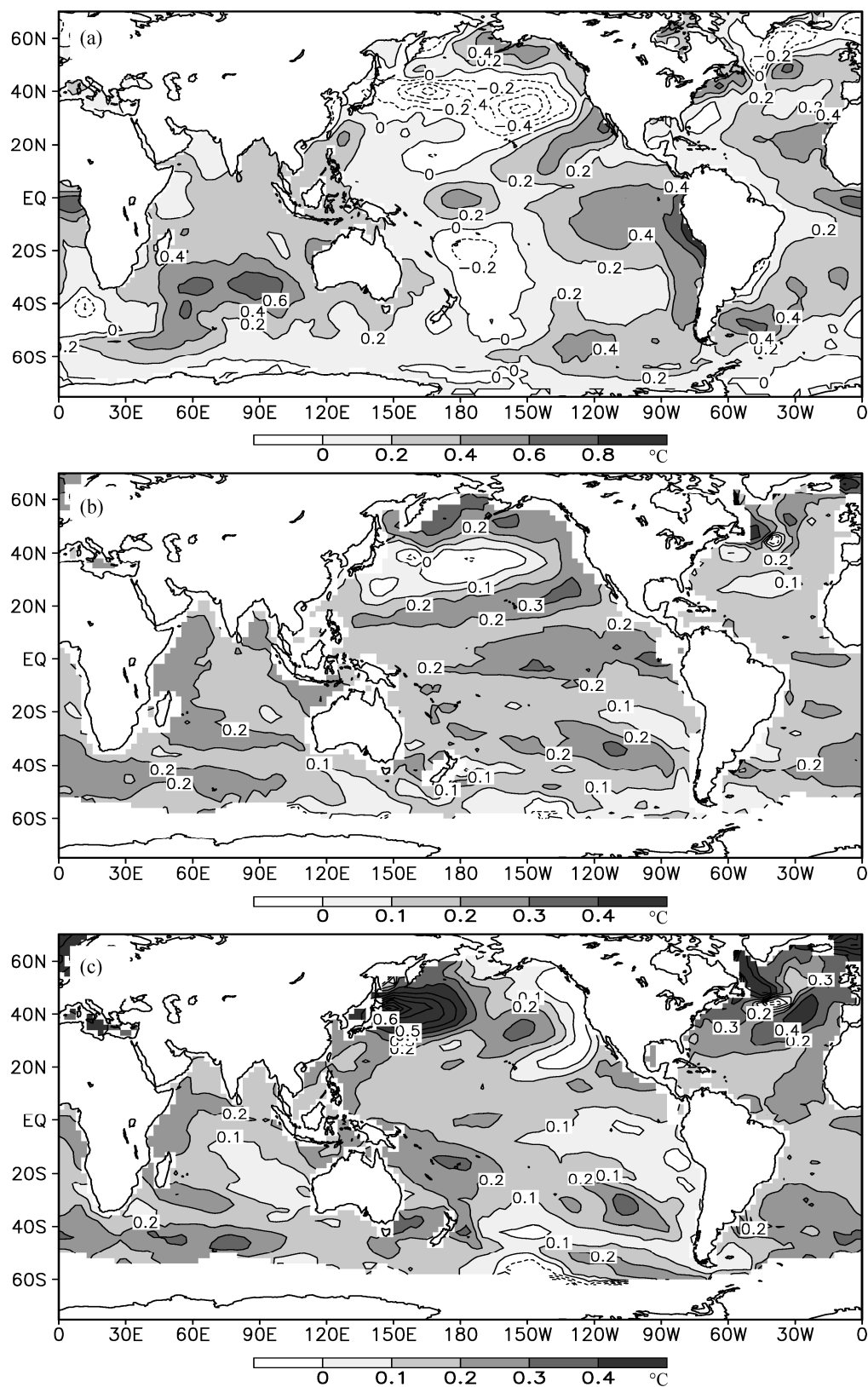


图6 夏季海温年代际变化(单位: K): (a) NOAA 观测; (b) 第1类模式集合; (c) 第2类模式集合

Fig. 6 The decadal variation of summer sea surface temperature (K): (a) Observation from NOAA; (b) category-1 model ensemble mean; (c) category-2 model ensemble mean

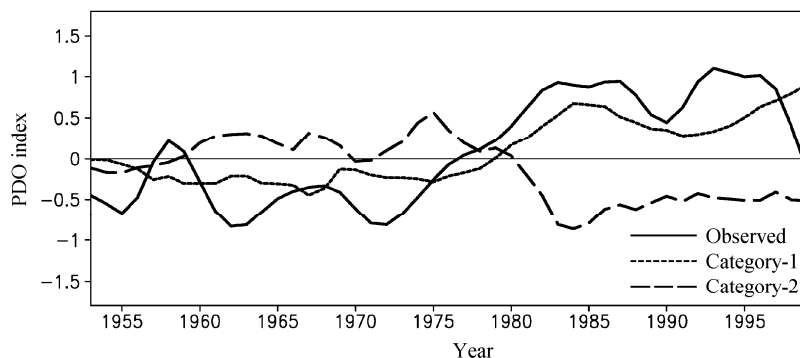


图7 观测和分类集合的 PDO 指数年代际变化

Fig. 7 The decadal variation of PDO (Pacific Decadal Oscillation) index

位相的转换,因此它们能再现东亚夏季风和中国东部夏季雨型的变化;而第2类模式则反之。这也进一步证实了热带海洋的变暖及相关的 PDO 位相转换在 1970 年代末我国东部雨型年代际变化中的作用。因此对海气耦合模式来说,海洋年代际变化的预测准确度对降水年代际变化的成功模拟非常关键。

图 8 为观测和模拟的地表气温的年代际变化。图 8a 显示,在 1970 年代末期之后,虽然全球变暖的趋势非常明显,但东亚局部地区却是变冷的,其中变冷比较显著的是江淮流域,中心变冷超过 0.5°C 。由于海洋变暖而陆地变冷,导致海陆温差减弱,东亚夏季风强度变弱。第 1 类模式集合在我国东部沿海出现了相对较弱的变冷区,但没有看到实际观测中的大范围变冷区(图 8b),而第 2 类模式则在江淮流域出现了高于 0.3 K 的增温区(图 8c)。在单个模式的结果中,第 1 类模式中除 HadCM3 和 ACCESS1-3 模式外,其余 4 个模式均在江淮流域或略北区域出现较大范围的变冷区(图 9),而第 2 类模式都没有在江淮流域出现这种变冷的情形。这表明,虽然第 1 类模式集合结果没有模拟出江淮流域大范围的变冷,但相对来讲,第 1 类模式的结果还是要远优于第 2 类模式。另外,图 8a 显示 1970 年代末之后,亚洲中高纬度明显变暖,最大值超过 0.6°C 。两类模式模拟结果也均为变暖(图 8b、8c),与观测一致。也就是说,不管海温模拟效果如何,对亚洲中高纬度的增暖两类模式都能模拟出来,这是因为 CMIP5 模式历史模拟试验中考虑了能引起全球变暖的温室气体的作用,而全球变暖的信号在北半球高纬度最明显,因此两类模

式都能模拟出亚洲高纬地区的变暖。

4 结论和讨论

本文使用多种观测资料和分类集合的方法评估了 CMIP5 多个耦合模式对东亚夏季风降水年代际变化的模拟性能。结果表明,在评估的 38 个模式中,有 6 个模式(第 1 类模式): HadCM3、CMCC-CESM、GFDL-ESM2M、inmcm4、CNRM-CM5 和 ACCESS1-3,可以成功再现 1970 年代末中国东部夏季降水年代际变化的主要特征,即长江流域降水的年代际增加、而华北和华南降水的年代际减少。这些模式模拟的成功在环流场上归因于它们能较好地再现了东亚夏季风环流的年代际减弱,包括东亚沿海地区明显的偏北风异常,西太平洋副高的偏向西南、强度增强等;而对降水年代际变化模拟很差的第 2 类模式,则模拟出不出东亚夏季风的这种减弱特征,模拟的东亚夏季风反而是加强的。

对应于中国东部夏季雨型的年代际变化,夏季海温年代际变化的分布为:热带太平洋和印度洋为大范围增暖,而北太平洋为变冷。观测海温年代际变化的这种分布特征与 PDO 位相转变有关,1970 年代后期开始, PDO 由负位相转变为正位相,对应热带中东太平洋变暖,而北太平洋变冷。两类 CMIP5 模式对 PDO 空间分布特征有较好的模拟能力,但对 PDO 年代际转变特征的模拟性能则差异较大。第 1 类模式集合能很好地模拟出 1970 年代末相关的 PDO 位相的转换,因此该类模式能很好地再现东亚夏季风的年代际减弱和 1970 年代末我

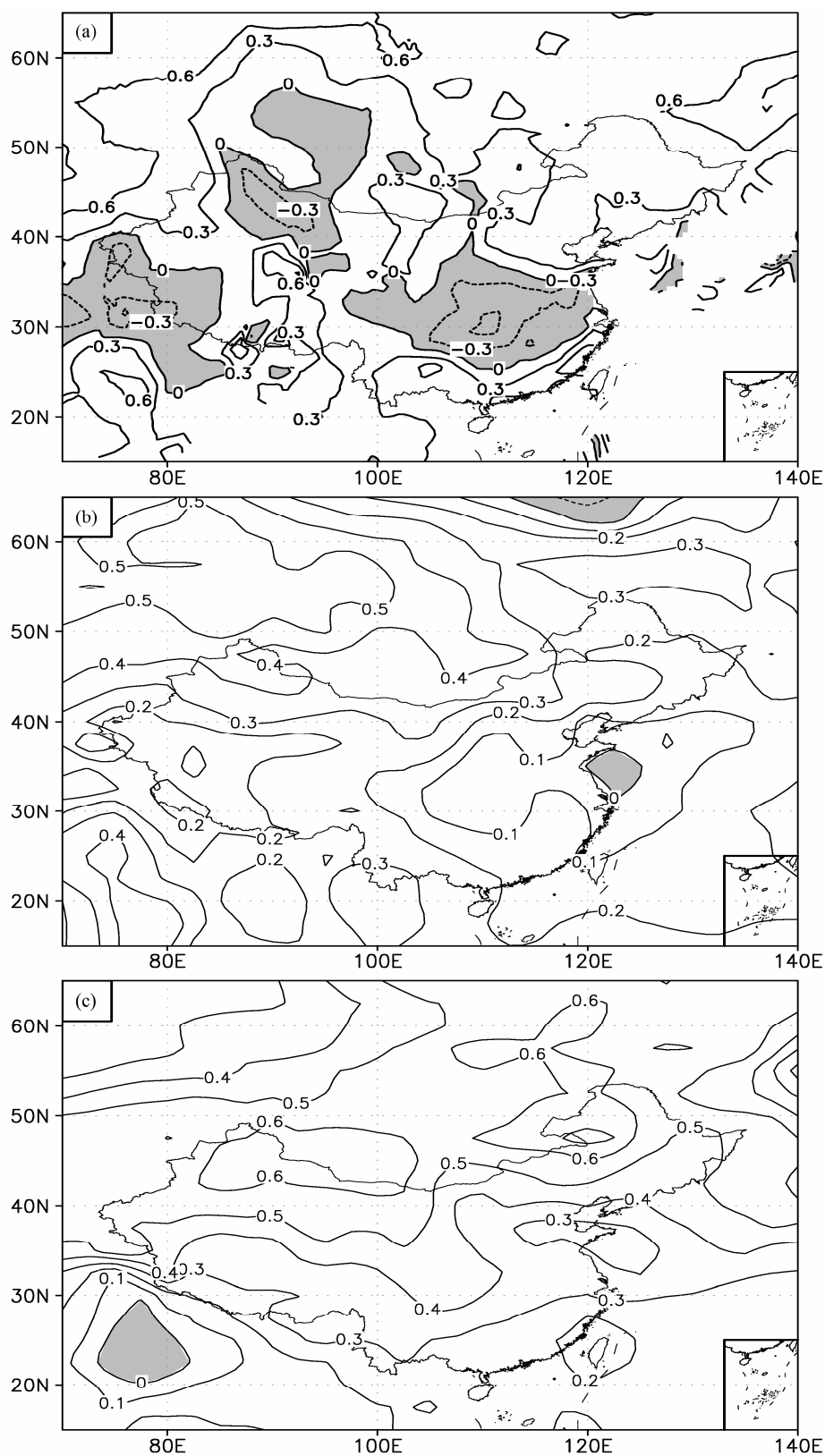


图 8 亚洲夏季地表气温的的年代际变化 (单位: K): (a) CRU 观测; (b) 第 1 类模式集合; (c) 第 2 类模式集合。阴影区为负值

Fig. 8 The decadal variation of near surface temperature (K) in summer in Asia: (a) Observation; (b) category-1 model ensemble mean; (c) category-2 model ensemble mean. Shaded areas represent negative values

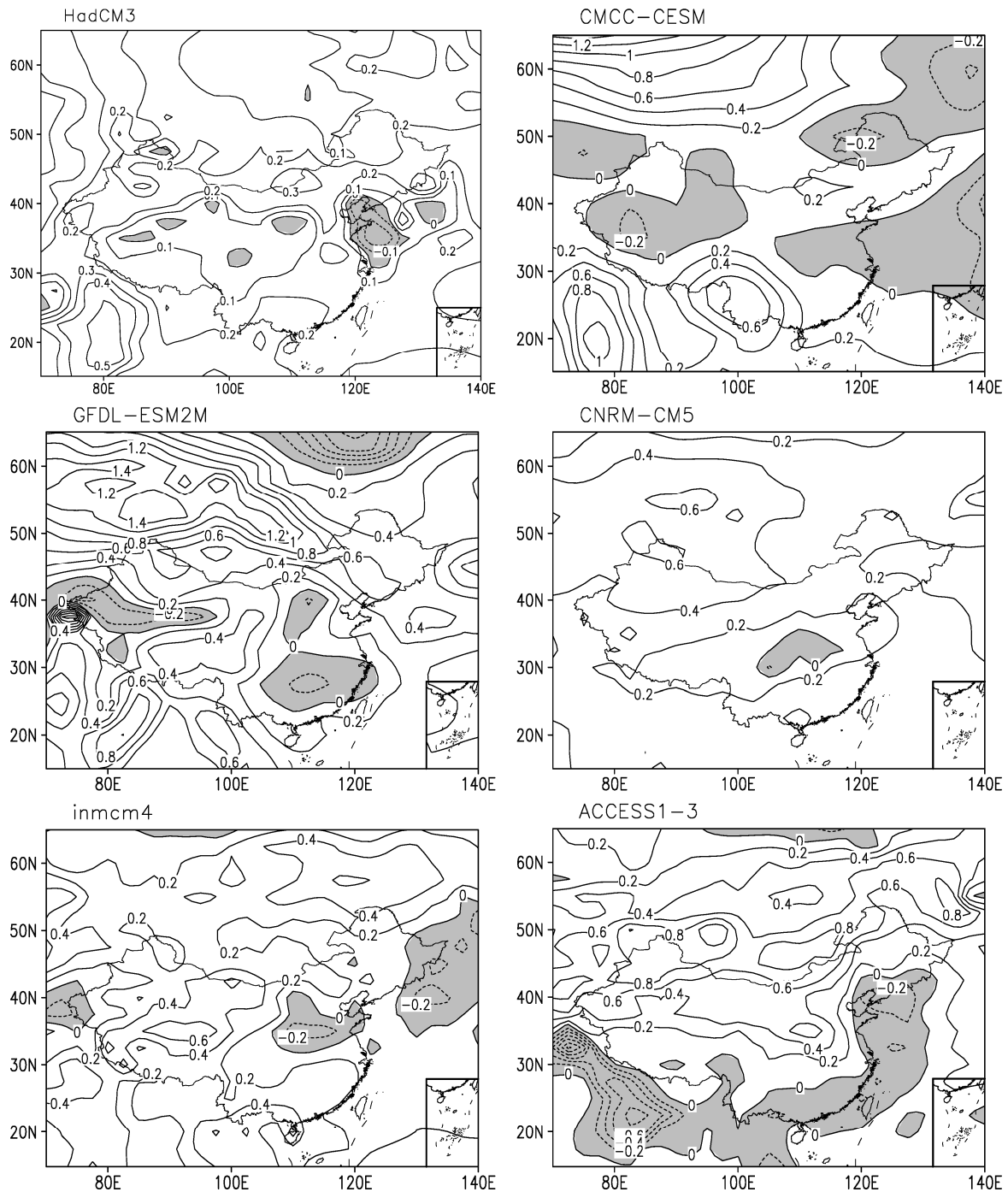


图9 第1类6个模式模拟的亚洲夏季地表气温的年际变化(单位: K), 阴影区为负值

Fig. 9 The decadal variation of near surface temperature (K) for category-1 models, shaded areas represent negative values in summer in Asia

国东部雨型的年代际转变。而第2类模式则不能模拟出热带中东太平洋的显著增暖和PDO年代际转变特征,且也不能模拟出江淮流域夏季的变冷,因此导致模式对1970年代末雨型的年代际转变没有模拟能力。这些结果表明,对海气耦合模式来说,海洋年代际变化的预测准确度对降水年代际变化

的成功模拟非常关键,可以说,我国东部夏季降水年代际变化的模拟能力在很大程度上取决于模式对海洋年代际变化的模拟。至于CMIP5不同模式在PDO的模拟中存在差异的原因则需要下一步进行深入的分析。

本文及已有的研究表明,海气耦合模式对东亚

夏季风年代际变化的模拟效果较差, IPCC AR4 和 CMIP5 中仅有少数模式能模拟出东亚夏季风降水的年代际变化特征, 可见气候模式的发展任重道远。当然, 降水年代际变化受多种因素制约, 关于 20 世纪 70 年代中后期东亚夏季风年代际减弱的原因目前也还处在进一步的研究之中, 只有在更好地理解气候变化物理机制, 并进一步对模式性能进行完善之后, 东亚夏季风年代际变化的预测能力才能得到提高。由本文的分析也可发现, 现有的耦合模式对东亚夏季风年代际变化的模拟效果显示出较大的差异, 有很强的不确定性, 因此我们在利用模式进行年代际变化机制的分析和年代际预估时, 要首先考虑选取那些模拟性能较好的模式, 如本文中的第 1 类模式, 这样也才会提高未来预估的可信度。

参考文献 (References)

- Bao M, Huang R H. 2005. Intercomparison of the interdecadal variations of summer precipitation in China simulated by AOGCMS from the IPCC-DDC [J]. *Journal of Tropical Meteorology*, 11 (1): 10–22.
- 陈红, 薛峰. 2013. 东亚夏季风和中国东部夏季降水年代际变化的模拟 [J]. *大气科学*, 37 (5): 1143–1153. Chen Hong, Xue Feng. 2013. Numerical simulation of decadal variations in the East Asian summer monsoon and summer rainfall in eastern China [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 37 (5): 1143–1153.
- Gong D Y, Ho C H. 2002. Shift in the summer rainfall over the Yangtze River valley in the late 1970s [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 29: 78–1–78–4, doi: 10.1029/2001GL014523.
- 顾薇, 李崇银. 2010. IPCC AR4 中海气耦合模式对中国东部夏季降水及 PDO、NAO 年代际变化的模拟能力分析 [J]. *大气科学学报*, 33 (4): 401–411. Gu Wei, Li Chongyin. 2010. Evaluation of the IPCC AR4 climate models in simulating the interdecadal variations of the East China summer precipitation, PDO, and NAO [J]. *Transactions of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 33 (4): 401–411.
- 郭其蕴. 1985. 东亚夏季风的变化与中国降水 [J]. *热带气象*, 1 (1): 44–52. Guo Qiyun. 1985. The variations of summer monsoon in East Asia and the rainfall over China [J]. *Journal of Tropical Meteorology (in Chinese)*, 1 (1): 44–52.
- 黄荣辉, 蔡榕硕, 陈际龙, 等. 2006. 我国旱涝气候灾害的年代际变化及其与东亚气候系统变化的关系 [J]. *大气科学*, 30 (5): 730–743. Huang Ronghui, Cai Rongshuo, Chen Jilong, et al. 2006. Interdecadal variations of drought and flooding disasters in China and their association with the East Asian climate system [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 30 (5): 730–743.
- 况雪源, 张耀存. 2006. 东亚副热带西风急流位置异常对长江中下游夏季降水的影响 [J]. *高原气象*, 25 (3): 382–389. Kuang Xueyuan, Zhang Yaocun. 2006. Impact of the position abnormalities of East Asian subtropical westerly jet on summer precipitation in middle-lower reaches of Yangtze River [J]. *Plateau Meteorology (in Chinese)*, 25 (3): 382–389.
- Menon S, Hansen J, Nazarenko L, et al. 2002. Climate effects of black carbon aerosols in China and India [J]. *Science*, 297: 2250–2253.
- New M, Lister D, Hulme M, et al. 2002. A high resolution data set of surface climate over global land areas [J]. *Climate Research*, 21: 1–25.
- 祁莉, 管兆勇, 张祖强, 等. 2008. 气候平均场中的西太平洋副热带高压双脊线特征及其与季风槽准 10 天振荡的关系 [J]. *大气科学*, 32 (1): 165–174. Qi Li, Guan Zhaoyong, Zhang Zuqiang, et al. 2008. Climatological view on double ridges process of the western Pacific subtropical high and its relation to quasi-10-day oscillation of monsoon trough [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 32 (1): 165–174.
- 宋振鑫, 张培群, 丑纪范, 等. 2001. 副热带高压脊线移动的三维结构特征 [J]. *气象学报*, 59 (4): 472–479. Song Zhenxin, Zhang Peiqun, Chou Jifan, et al. 2001. Three-dimensional structural characteristics on the movement of subtropical ridge line [J]. *Acta Meteorologica Sinica (in Chinese)*, 59 (4): 472–479.
- 苏同华, 薛峰. 2010. 东亚夏季风环流和雨带的季节内变化 [J]. *大气科学*, 34 (3): 611–628. Su Tonghua, Xue Feng. 2010. The intraseasonal variation of summer monsoon circulation and rainfall in East Asia [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 34 (3): 611–628.
- 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.
- Uppala S M, Kalberg P W, Simmons A J, et al. 2005. The ERA-40 re-analysis [J]. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 131: 2961–3012.
- Wang H J. 2001. The weakening of the Asian monsoon circulation after the end of 1970's [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 18: 376–386.
- Xue F. 2001. Interannual to interdecadal variation of East Asian summer monsoon and its association with the global atmospheric circulation and sea surface temperature [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 18: 567–575.
- 杨修群, 朱益民, 谢倩, 等. 2004. 太平洋年代际振荡的研究进展 [J]. *大气科学*, 28 (6): 979–992. Yang Xiuqun, Zhu Yimin, Xie Qian, et al. 2004. Advances in studies of Pacific decadal oscillation [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 28 (6): 979–992.
- Yu R C, Wang B, Zhou T J. 2004. Tropospheric cooling and summer monsoon weakening trend over East Asia [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 31, L22212, doi: 10.1029/2004GL021270.
- 张风华, 张耀存, 郭兰丽. 2009. 中国东部夏季降水与同期东亚副热带急流年代际异常的关系 [J]. *高原气象*, 28 (6): 1308–1315. Sun Fenghua, Zhang Yaocun, Guo Lanli. 2009. Relationship between the East Asia subtropical westerly jet anomaly and summer precipitation over Eastern China [J]. *Plateau Meteorology (in Chinese)*, 28(6): 1308–1315.
- 张庆云, 陶诗言, 陈烈庭. 2003. 东亚夏季风指数的年际变化与东亚大气环流 [J]. *气象学报*, 61 (4): 559–568. Zhang Qingyun, Tao Shiyan, Chen Leiting. 2003. The inter-annual variability of East Asian summer monsoon indices and its association with the pattern of general circulation over East Asia [J]. *Acta Meteorologica Sinica (in Chinese)*, 61 (4): 559–568.
- 张庆云, 吕俊梅, 杨莲梅, 等. 2007. 夏季中国降水型的年代际变化与大

- 气内部动力过程及外强迫因子关系 [J]. 大气科学, 30 (6): 1290–1300.
- Zhang Qingyun, Lü Junmei, Yang Lianmei, et al. 2007. The interdecadal variation of precipitation pattern over China during summer and its relationship with the atmospheric internal dynamic processes and extra-forcing factors [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 30 (6): 1290–1300.
- 周连童, 黄荣辉. 2003. 关于我国夏季气候年代际变化特征及其可能成因的研究 [J]. 气候与环境研究, 8 (3): 274–290. Zhou Liantong, Huang Ronghui. 2003. Research on the characteristics of interdecadal variability of summer climate in China and its possible cause [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 8 (3): 274–290.
- 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.
- 朱玉祥, 丁一汇, 徐怀刚. 2007. 青藏高原大气热源和冬春积雪与中国东部降水的年代际变化关系 [J]. 气象学报, 65 (6): 946–958. Zhu Yuxiang, Ding Yihui, Xu Huaigang. 2007. The decadal relationship between atmospheric heat source of winter and spring snow over Tibetan Plateau and rainfall in East China [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 65 (6): 946–958.