姜江,姜大膀,林一骅. 2015. RCP4.5 情景下中国季风区及降水变化预估 [J]. 大气科学, 39 (5): 901–910. Jiang Jiang, Jiang Dabang, Lin Yihua. 2015. Projection of monsoon area and precipitation in China under the RCP4.5 scenario [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 39 (5): 901–910, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1411.14216.

## RCP4.5 情景下中国季风区及降水变化预估

# 姜江<sup>1,2,3</sup> 姜大膀<sup>1,4</sup> 林一骅<sup>2</sup>

1 中国科学院大气物理研究所竺可桢一南森国际研究中心,北京100029
2 中国科学院大气物理研究所大气科学和地球流体力学数值模拟国家重点实验室,北京100029
3 中国科学院大学,北京100049
4 中国科学院气候变化研究中心,北京100029

**摘要**本文使用国际耦合模式比较计划第五阶段(CMIP5)中共46个全球气候模式的数值试验结果,通过对中国 区域的年、夏季和冬季降水气候态的模拟能力评估,择优选取了18个气候模式用来预估 RCP4.5 情景下 21 世纪中 国季风区范围、季风降水及其强度变化。结果表明,相对于 1986~2004 年参考时段,RCP4.5 情景下多数模式和 所有模式集合平均在不同时段内均模拟出中国季风区面积、季风降水及其强度的增加趋势,最明显的时段出现在 2081~2099 年。其中,季风区面积扩张是导致季风降水增加的主要因素。在机制上,热力与动力条件变化均有利 于季风降水强度的增加以及更多的水汽进入中国东部,从而引起季风区范围的扩大。 关键词 CMIP5 气候模式 季风区 季风降水 RCP4.5 情景 预估

 文章编号
 1006-9895(2015)05-0901-10
 中图分类号
 P467
 文献标识码
 A

 doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1411.14216

 A

 A

## Projection of Monsoon Area and Precipitation in China under the RCP4.5 Scenario

JIANG Jiang<sup>1, 2, 3</sup>, JIANG Dabang<sup>1, 4</sup>, and LIN Yihua<sup>2</sup>

1 Nansen-Zhu International Research Centre, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

2 State Key Laboratory of Numerical Modeling for Atmospheric Sciences and Geophysical Fluid Dynamics, Institute of Atmospheric Physics,

Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

3 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049

4 Climate Change Research Center, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

**Abstract** The capabilities of 46 CMIP5 (the Coupled Model Intercomparison Project Phase five) models for simulating the annual, summer, and winter precipitation climatology over China are first examined using the outputs of these models from historical data for the period 1986–2004. Eighteen models are then chosen to project the changes of monsoon area, monsoon precipitation, and monsoon precipitation intensity over China under the Representative Concentration Pathways 4.5 (RCP4.5) scenario. The results show that the monsoon area, monsoon precipitation, and monsoon precipitation intensity during 2081–2099. The increase in the monsoon precipitation is mainly derived from the increase in the monsoon area. Both thermal and dynamic conditions will be favorable for increased monsoon precipitation intensity and greater water vapor transport into eastern China, resulting in the expansion of the monsoon area in China.

资助项目 国家重点基础研究发展计划项目 2012CB955401,国家自然科学基金项目 41375084

作者简介 姜江,女,1987年出生,博士研究生,主要从事气候变化研究。E-mail: jiangjiang@mail.iap.ac.cn

通讯作者 姜大膀, E-mail: jiangdb@mail.iap.ac.cn

收稿日期 2014-06-27; 网络预出版日期 2014-11-06

Keywords CMIP5, Monsoon area, Monsoon precipitation, RCP4.5 scenario, Projection

### 1 引言

工业化革命以来,地球气候系统正在经历一次 以变暖为主要特征的显著变化,1880~2012 年全球 平均温度升高了 0.65~1.06°C,极有可能的是,观 测到的 1951~2010 年全球平均地表温度升高的一 半以上是由温室气体浓度的人为增加和其他人为 强迫共同导致的(IPCC, 2013)。根据政府间气候 变化专门委员会(IPCC)第五次评估报告,21 世 纪末全球平均温度将会在现有水平上升高 0.3~ 4.8°C(Collins et al., 2013),有关全球和区域尺度气 候未来变化的预估研究已成为气候和全球变化领 域的主题之一。

由于中国东部年降水主要来自于夏季(Sui et al., 2013),东亚夏季风和夏季降水变化受到科研人员的广泛重视(Wang, 2001;郭其蕴等, 2004;Yu et al., 2004;钱维宏, 2005;Jiang and Wang, 2005;Ding et al., 2009),相应的未来全球变暖背景下东亚夏季风变化也已成为气候预估领域的主题之一。在大气温室气体浓度增加所引起的全球变暖情景下,有关东亚夏季风变化预估结果之间并不一致,其中主要结论包括夏季风整体增强(Sun and Ding, 2010;Chen, 2013)、夏季风强度无明显变化(Li et al., 2010)、在华南地区有所增强(Ueda et al., 2006)和中国东部地区略有加强(Jiang and Tian, 2013)。

考虑到季风的主要特征是冬季偏干而夏季偏湿,近期有学者采用夏季与冬季降水之差以及夏季降水占年降水的比例来共同定义季风区,得到了合理的全球和区域尺度季风区范围分布(Wang and Ding, 2006),并在全球季风气候研究中得到逐步应用(Wang and Ding, 2008; Hsu et al., 2011; Jiang et al., 2015)。根据国际耦合模式比较计划第三(CMIP3)和第五(CMIP5)阶段的数值模拟试验资料集,科研人员已就全球季风区范围和季风降水进行了预估分析(Hsu et al., 2012, 2013; Lee and Wang, 2014),结果显示了全球季风区环流加强以及全球季风区范围和季风降水的增加。其中全球季风降水的增幅要高于季风区面积的扩大程度,意味着在未来更暖的环境下,季风降水强度将增加,并且指出季风降水强度增加中的 60%~70%贡献率来自

于陆地区域。在上述全球平均变化的大背景下,区 域尺度上的东亚季风区范围和季风降水变化趋势 如何尚不清楚,亟须深入。

已有研究指出在未来更暖的气候背景下,中国 区域降水将显著增加,降水事件趋于极端化,且东 亚夏季风环流会逐步增强(Chen, 2013)。采用高 分辨率降水观测资料的分析表明,1961~2009年中 国季风区面积总体上在减少,季风降水无趋势性 变化而是表现为一定的年际和年代际变率(姜江 等,2015)。鉴于此,在未来气候变暖情景下,中 国季风区范围和季风降水如何变化值得关注。同 时考虑到相比于早期的 CMIP3 模式, CMIP5 模 式在模式分辨率、物理过程和陆面过程等多方面均 得到改进,而且相关预估工作中所用的气候模式 和排放情景以及研究方法均有不同(Xu and Xu, 2012; 姚遥等, 2012; 姜燕敏和吴昊旻, 2013), 加 之其中大部分工作未对气候模式的模拟能力进 行必要的评估。因此,本文利用最新的 CMIP5 全球气候模式试验对 21 世纪中国季风区范 围、季风降水和季风降水强度变化进行了综合预估 研究。

#### 2 资料和方法

为了评估模式对中国降水气候态的模拟能力, 本文选取了 CMIP5 中 46 个模式的历史气候模拟 试验(即 Historical 试验)中的逐月降水资料。评 估时段及未来预估的参考时段均为 1986~2004 年,没有选择 2005 年的原因在于季风区定义过程 中要用到跨年数据,而历史气候模拟试验结束 于 2005 年底。对于 CMIP5 的未来情景模拟试 验,则采用了根据辐射强迫而设定的典型浓度路径 情景,并具体选取了中低端的 RCP4.5 情景(即到 2100 年,温室气体浓度对应辐射强迫为 4.5 W m<sup>-2</sup>) 下的模拟结果,积分时段为 2006~2100 年。有 关模式的具体信息请见表 1,模式数据和相关详 细信息参见 Taylor et al. (2012) 和 PCMDI 网站 (http://pcmdi9.llnl.gov [2013-07-01])。另外,还使 用了 CMIP5 模式中的风场、比湿、温度等逐月资 料进行动力学分析。使用到的观测资料为基于 2416 个台站数据所得的 0.5°×0.5°高分辨率降水资 料(简称 CN05.2)(Xu et al., 2009; 吴佳和高学杰, JIANG Jiang et al. Projection of Monsoon Area and Precipitation in China under the RCP4.5 Scenario

#### 表1 CMIP5 中的 46 个模式及其试验信息

 Table 1
 Information of 46 models from the Coupled Model Intercomparison Project Phase 5 (CMIP5) as well as their experiments

序号	模式名称	国家	分辨率(经向格点数×纬向格点数)	历史气候模拟试验(时段)	RCP4.5 试验(时段)
01	ACCESS1.0	澳大利亚	192×145	1850~2005 年	2006~2100 年
02	ACCESS1.3	澳大利亚	192×145	1850~2005 年	2006~2100 年
03	BCC-CSM1.1	中国	128×64	1850~2012 年	2006~2300 年
04**	BCC-CSM1.1(m)	中国	320×160	1850~2012 年	2006~2100 年
05	BNU-ESM	中国	128×64	1850~2005 年	2006~2100 年
06**	CanESM2	加拿大	128×64	1850~2005 年	2006~2300 年
07**	CCSM4	美国	128×192	1850~2005 年	2006~2100 年
08**	CESM1(BGC)	美国	128×192	1850~2005 年	2006~2100 年
09	CESM1(CAM5)	美国	128×192	1850~2005 年	2006~2300 年
10*	CESM1(FASTCHEM)	美国	128×192	1850~2005 年	无
11	CESM1(WACCM)	美国	144×96	1850~2005 年	2006~2100 年
12*	CMCC-CESM	意大利	96×48	1850~2005 年	无
13	CMCC-CM	意大利	$480 \times 240$	1850~2005 年	2006~2100 年
14	CMCC-CMS	意大利	192×96	1850~2005 年	2006~2100 年
15	CNRM-CM5	法国	256×128	1850~2005 年	2006~2300 年
16	CNRM-CM5-2	法国	256×128	1850~2005 年	2006~2100 年
17**	CSIRO-Mk3.6.0	澳大利亚	192×96	1850~2005 年	2006~2300 年
18*	EC-EARTH	欧洲	320×160	1850~2009 年	2006~2009 年
19**	FGOALS-g2	中国	$128 \times 60$	1850~2014 年	2006~2100 年
20	FIO-ESM	中国	128×64	1850~2005 年	2006~2100 年
21*	GFDL-CM2.1	美国	$144 \times 90$	1861~2015 年	2006~2040 年
22**	GFDL-CM3	美国	$144 \times 90$	1860~2005 年	2006~2100 年
23**	GFDL-ESM2G	美国	$144 \times 90$	1861~2005 年	2006~2100 年
24**	GFDL-ESM2M	美国	$144 \times 90$	1861~2005 年	2006~2100 年
25	GISS-E2-H	美国	$144 \times 90$	1850~2005 年	2006~2100 年
26	GISS-E2-H-CC	美国	$144 \times 90$	1850~2010年	2006~2100 年
27	GISS-E2-R	美国	$144 \times 90$	1850~2005 年	2006~2100 年
28	GISS-E2-R-CC	美国	$144 \times 90$	1850~2010 年	2006~2100 年
29*	HadCM3	英国	96×73	1859~2005 年	2006~2035 年
30	HadGEM2-AO	韩国	$192 \times 145$	1860~2005 年	2006~2100 年
31	HadGEM2-CC	英国	192×145	1859~2005 年	2006~2100 年
32	HadGEM2-ES	英国	192×145	1859~2005 年	2006~2100 年
33**	INM-CM4	俄罗斯	$180 \times 120$	1850~2005 年	2006~2100 年
34**	IPSL-CM5A-LR	法国	96×96	1850~2005 年	2006~2100 年
35**	IPSL-CM5A-MR	法国	144×143	1850~2005 年	2006~2100 年
36**	IPSL-CM5B-LR	法国	96×96	1850~2005 年	2006~2100 年
37	MIROC4h	日本	640×320	1950~2005 年	2006~2035 年
38	MIROC5	日本	256×128	1850~2012 年	2006~2100 年
39**	MIROC-ESM	日本	128×64	1850~2005 年	2006~2100 年
40**	MIROC-ESM-CHEM	日本	$128 \times 64$	1850~2005 年	2006~2100 年
41**	MPI-ESM-LR	德国	192×96	1850~2005 年	2006~2100 年
42**	MPI-ESM-MR	德国	192×96	1850~2005 年	2006~2100 年
43*	MPI-ESM-P	德国	$192 \times 96$	1850~2005 年	无
44**	MRI-CGCM3	日本	320×160	1850~2005 年	2006~2100 年
45	NorESM1-M	挪威	$144 \times 96$	1850~2005 年	2006~2100 年
46	NorESM1-ME	挪威	$144 \times 96$	1850~2005 年	2006~2100 年

\* 优选出的 24 个模式。

\*\* 最后预估用的 18 个模式。

904

2013)。

### 3 季风区定义

季风区定义为夏季与冬季降水之差大于 2.0 mm d<sup>-1</sup>,且夏季降水量超过全年降水量 55%的区域,其中夏季为 5~9月,冬季为 11月至次年 3月,年平均为 5月至次年 4月(Wang et al., 2012);季风降水的定义为 5~9月季风区面积与同期季风区内降水量的乘积;季风降水强度的定义为 5~9月中国季风区域内的平均降水率。

根据季风区的定义,使用 CN05.2 资料所得的 1986~2004 年参考时段内中国季风区降水气候态 呈现西南至东北向分布,季风区内的夏季降水总体 上表现为从东南向西北方向递减,这与传统的认识 一致(图1)。总体上讲,中国季风区的西北部边界 主要由季风区定义的指标之一,即夏季与冬季降水 率之差大于  $2.0 \text{ mm d}^{-1}$ 来确定;中国东南部地区出 现的空白区域显示这一地区不属于季风区,主要是 因为该区域内除夏季外其他月份的降水量也很大, 夏季降水量并没有达到全年降水量 55%这一季风 区判定标准。研究已表明,每年 3~4 月该空白区 域的江南春雨具有副热带季风性质,并指出东亚副 热带季风于3月中旬已开始建立,是早于而且独立 于热带夏季风的 (何金海等, 2007; Qi et al., 2008)。 如若将该空白区内3至4月份降水纳入季风降水考 虑范围,该区域是可以满足季风降水占全年降水量 比例超过 55%的这一判定标准,这也说明热带和副

热带季风系统共同决定着中国季风区域内不同性 质降水的时空分布特征。就 1986~2004 年气候态 而言,基于 CN05.2 资料得到的季风区总面积占中 国陆地总面积的 59%,这与其他几套观测和再分析 数据结果具有很好的一致性,而且在季风区范围和 季风区内降水空间分布形态以及降水量级上彼此 之间也较为吻合(姜江等, 2015)。

### 4 CMIP5 模式能力评估和优选

为了客观衡量气候模式对中国区域降水气候 态的模拟能力,首先将所有模式数据全部统一双线 性插值到了与CN05.2资料相同的0.5°×0.5°分辨率 上,并利用泰勒图(Taylor, 2001)对46个CMIP5 全球气候模式进行了评估和优选。首先,根据 46 个模式的历史模拟试验与 CN05.2 的年、夏季、冬 季降水在参考时段内的对比,选择了两者之间空 间相关系数通过 99%信度检验、均一化标准差在 0.5~1.5 之间且中心化均方根误差小于 1.5 的模式 (图 2),有 25 个模式通过了初筛。其次,选择与 年、夏季、冬季季风区域内平均降水全部相差在 100%范围内的模式,发现多数模式均表现出了高 估,特别是在冬季,FIO-ESM 模式在夏季和冬季降 水均超出了设定的优选范围而予以剔除。最终,选 出了 24 个 CMIP5 模式用于分析,并通过等权重的 算术平均方式得到多模式集合平均结果,相关具体 信息请见表1。



通过进一步比较 CN05.2 与 24 个模式集合平均

Fig. 1 Monsoon area and spatial distribution of summer precipitation for the period of 1986–2004 based on data CN05.2. Units: mm d<sup>-1</sup>

图 1 基于 CN05.2 的 1986~2004 年中国季风区范围及区域内夏季降水的空间分布。单位: mm d<sup>-1</sup>



图 2 1986~2004 年(a) 年、(b) 夏季、(c) 冬季平均降水量泰勒图 (Taylor, 2001)。图中"REF"为 CN05.2 观测资料,数字"01~46" 对应表 1 中每个模式序号

Fig. 2 Taylor diagram (Taylor, 2001) of (a) annual, (b) summer, and (c) winter precipitation averaged for 1986–2004. "REF" represents data CN05.2, and "01–46" represent the 46 models listed in Table 1

的 1986~2004 年的年、夏季、冬季降水气候态, 表明优选后的多模式集合平均结果与 CN05.2 观测 资料较为一致,可以合理地反映出年、夏季、冬季的中国降水空间分布,即东南向西北递减趋势。同时,多模式集合平均结果得到的降水量级也与观测资料一致;模式普遍表现为对年和夏季降水的模拟结果要好于冬季;多数模式及模式集合平均结果均表现为对中国区域年、夏季、冬季降水模拟偏多,时间上突出表现在冬季,空间上特别表现在东北东部、青海以及西藏东南区域出现的虚假降水大值中心。依据上述模式评估结果,并考虑统一的研究时段以及未来预估试验 RCP4.5 情景下数据的可利用性,共选择了 24 个模式中的时段统一且数据完整的18个模式进行了预估研究,所选的模式请见表1。

### 5 模式预估分析

#### 5.1 季风区范围

在 RCP4.5 情景下, 18 个 CMIP5 模式集合平均 结果在不同时段内均表现出中国季风区面积的增 加(图3)。在40°N以北地区,季风区面积在各个 时段内变化不明显,而在 40°N 以南,季风面积在 各个时段内都表现出较明显的增加。特别是在 2081~2099年,相较于参考时段,季风区面积扩大 最为明显,在整个边界呈现出西进。历史气候模拟 试验以及 RCP4.5 情景下的多模式集合平均结果均 显示东北、华北、东南及西南大部分地区属于季风 区。相比于参考时段,多模式集合平均的季风区面 积变化的百分比在 2016~2035、2046~2065、 2081~2099 年时段分别增加了 1%、2%、3%。尽 管未来季风区面积增加程度并不十分明显, 但仍表 现为在未来 RCP4.5 情景下随着地表温度的持续上 升,季风区面积的持续增加。在未来 2006~2099 年整个时段季风区面积平均增加了 2%,线性趋势 为  $0.003 \times 10^6$  km<sup>2</sup> (10a)<sup>-1</sup>。虽然模式之间略有差异, 但多数模式模拟结果以季风区面积增加为主,18个 模式中在 2016~2035、2046~2065、2081~2099 年时段分别有 10、12、13 个模式表现出季风区面 积的增加(图 4a)。18个模式的季风区面积变化的 百分比在 2016~2035、2046~2065、2081~2099 年时段相比于参考时段分别变化-4%~11%、 -5%~19%、-13%~25%,增加幅度最大的时段同 样为 2081~2099 年。

为理解中国季风区面积的增加趋势,进一步分 析了季风区定义的两个指标变化,即夏季与冬季降 水量之差以及夏季占全年降水量的比重。结果表明



图 3 RCP4.5 情景下 (a) 2016~2035、(b) 2046~2065、(c) 2081~ 2099 年时段内 18 个模式集合平均的中国季风边界(实线)及历史气候 模拟试验下的 1986~2004 年模式集合平均的中国季风边界(虚线) Fig. 3 The boundaries of monsoon area from 18-model ensemble mean for the periods of (a) 2016–2035, (b) 2046–2065, and (c) 2081–2099 under RCP4.5 scenario (solid line), and for the period of 1986–2004 under historical experiments (dotted line)

多数模式以及多模式集合平均结果的夏季与冬季 降水量之差均呈现统计显著的增加趋势,多模式集 合平均的变化趋势为 0.02 mm d<sup>-1</sup> (10a)<sup>-1</sup>。多数模式 以及多模式集合平均的夏季占全年降水量比重的 趋势变化统计上不显著,多模式集合平均的变化趋 势仅为-0.0003% (10a)<sup>-1</sup>。另外,夏季与冬季降水量 之差的变化与中国季风区面积变化相符,在 2016~ 2035、2046~2065、2081~2099 年三个时段亦如此。 由此可见,夏季与冬季降水量之差的增加是中国季 风区面积扩大的主要因素。



图 4 相对于 1986~2004 年参考时段, RCP4.5 情景下不同时段各模式 及其集合平均的 (a) 中国季风区面积变化百分比、(b) 季风降水强度 变化百分比和 (c) 季风降水量变化百分比

Fig. 4 Compared to the reference period 1986–2004, percentage changes in (a) monsoon-region area, (b) monsoon precipitation intensity, and (c) monsoon precipitation in China as derived from 18 models and their ensemble mean for the different periods under the Representative Concentration Pathways 4.5 (RCP4.5) scenario

#### 5.2 季风降水及强度

图 4b 为各个时段相对于 1986~2004 年季风降 水强度变化的百分比值。各模式及其集合平均的季 风降水强度变化百分比在 2016~2035、2046~ 2065、2081~2099 年相比于参考时段分别为-2%~ 4%、1%~14%、2%~17%以及 3%、6%、8%,其 中增加最为明显的时段是 2081~2099 年。2016~ 2035 年季风降水强度增加幅度较其他时段偏小,且 有 3 个模式表现出减少。与此同时,季风降水变化 主要表现为增加(图 4c),在 2016~2035、2046~ 2065、2081~2099 年各模式及其集合平均分别变化 ~2%~14%、-4%~36%、-11%~47%以及 2%、8%、 10%。季风降水增加最为明显的时段同样是在 2081~2099 年,增加幅度最小的时段为 2016~2035 年。

与不同时段内季风区面积的增加表现一致,在 未来 RCP4.5 情景下随着地表温度的持续上升,季 风降水和季风降水强度也持续增加。根据季风降水 的定义可知其变化源于季风区面积和季风降水共 同作用。因此,为分析影响季风降水的主导因素, 需计算并给出 RCP4.5 情景下各个时段内各模式及 其集合平均相对于参考时段的季风区面积、季风降 水和降水强度的差异(图5)。计算结果表明,各个 模式及其集合平均结果在季风降水的增加上,基本 与其相对应的季风区面积、季风降水的增加上,基本 与其相对应的季风区面积、季风降水的增加/减少保 持一致。但相较于季风降水强度,多数模式与模式 集合平均结果表现出在季风区面积与季风降水更 为一致的变化。同时结果也显示各个模式间的结果 存在着差异,但模式之间表现出来的季风降水强度 变化差异相对于季风区面积要小。

#### 5.3 季风区和季风降水变化的动力学分析

相对于参考时段,在 RCP4.5 情景下多模式集 合平均结果中夏季地表温度增加,但存在着明显的 区域性差别,其中中国中部变暖明显高于东部且陆 地变暖高于海洋(图6)。变暖幅度以及陆地与海洋 温度差异最大的时段为 2081~2099 年,其次为 2046~2065 年,最小的为 2016~2035 年,变暖幅 度与中国季风面积和季风降水的增幅大体对应。中 国陆地区域的增温与临近海洋的变暖存在差异,将 导致夏季海陆温度差异有所扩大,进而加强海陆间 的季风环流,有利于更多的水汽进入中国东部地 区。更进一步, RCP4.5 情景下多模式集合平均的水 汽通量及其散度变化显示,在中国东部沿岸地区和



图 5 相对于 1986~2004 年参考时段, RCP4.5 情景下 (a) 2016~2035、
 (b) 2046~2065、(c) 2081~2099 年 18 个模式及其集合平均的中国
 季风区面积 (MA)、季风降水 (MP)及其强度 (MPI) 变化 (ΔMA、
 ΔMP、ΔMPI)。ΔMA 单位: 10<sup>6</sup> km<sup>2</sup>; ΔMPI 单位: mm d<sup>-1</sup>; ΔMP 单位: 10<sup>6</sup> km<sup>2</sup> mm d<sup>-1</sup>

Fig. 5 Compared to the reference period 1986–2004, changes in monsoon-region area (MA) ( $\Delta$ MA), monsoon precipitation (MP) ( $\Delta$ MP), and monsoon precipitation intensity (MPI) ( $\Delta$ MPI) for 18 models and their ensemble mean for the periods of (a) 2016–2035, (b) 2046–2065, and (c) 2081–2099 under RCP4.5 scenario.  $\Delta$ MA units: 10<sup>6</sup> km<sup>2</sup>;  $\Delta$ MPI units: mm d<sup>-1</sup>;  $\Delta$ MP units: 10<sup>6</sup> km<sup>2</sup> mm d<sup>-1</sup>

东北东部整层水汽通量变化以辐合为主(图7)。其 中,水汽增加主要源于通过孟加拉湾和中印半岛的 西南季风所携带的水汽。由此可见,热力场、环流 场、水汽通量及其散度场均有利于未来中国东部地



图 6 相对于 1986~2004 年参考时段, RCP4.5 情景下(a)2016~2035、 (b) 2046~2065、(c) 2081~2099 年 18 个模式集合平均的地表气温 的变化。单位: ℃

Fig. 6 Changes in surface air temperature from 18-model ensemble mean for the periods of (a) 2016–2035, (b) 2046–2065, and (c) 2081–2099 under RCP4.5 scenario relative to 1986–2004. Units: °C

区夏季降水增加以及季风区范围的扩大。

### 6 结论与讨论

根据择优选取的 18 个 CMIP5 全球气候模式的 试验数据,本文预估研究了中低端典型浓度路径 ——RCP4.5 情景下的中国季风区和季风降水变化。 相对于 1986~2004 年参考时段:(1)多数模式和



图 7 相对于 1986~2004 年参考时段, RCP4.5 情景下(a)2016~2035、 (b) 2046~2065、(c) 2081~2099 年 18 个模式集合平均的水汽通量 (kg m<sup>-1</sup> s<sup>-1</sup>)及其散度 (mm d<sup>-1</sup>)变化。其中垂直水汽通量从地表积 分到 300 hPa,同时考虑了地形因素的影响,期间假设水的密度为 l g cm<sup>-3</sup>

Fig. 7 Compared to the reference period 1986–2004, changes in water vapor flux (kg m<sup>-1</sup> s<sup>-1</sup>) integration and its divergence (mm d<sup>-1</sup>) from 18-model ensemble mean for the periods of (a) 2016–2035, (b) 2046–2065, and (c) 2081–2099 under RCP4.5 scenario. Vertical water vapor flux is integrated from the surface to 300 hPa considering the topographic factor, in which the density of water is taken as 1 g cm<sup>-3</sup>

18 个模式集合平均结果表明,21 世纪中国季风区 面积增加,较为明显的区域主要位于 40°N 以南, 特别是在 2081~2099 年时段,夏季与冬季降水量 之差的增加是中国季风区面积扩大的主因;(2)21 世纪季风降水及其强度有所增加,2081~2099年是 增加最为显著的时段,季风区面积变化对季风降水 的影响相比于季风降水强度的作用更大;(3)在 RCP4.5情景下,中国陆地区域增温明显要高于附近 的海域,导致夏季海陆温度差异加大,季风环流趋 于加强;与此同时,中国东部出现了明显的水汽通 量增加和水汽辐合;热力和动力因素均有利于季风 强度的增加和水汽输送,合理地解释了中国季风范 围和季风降水的增加。

作为气候变化研究的重要手段之一,多模式集 合结果对于未来气候变化具有一定的借鉴意义。鉴 于全球气候模式在物理及参数化过程等诸多方面 仍存在着不确定性,下一步将继续深入探讨全球气 候模式对中国区域气温和降水预估的不确定性来 源以及模式本身、排放情景以及内部自然变率对不 确定性的贡献。

**致谢** 感谢国家气候中心提供 CN05.2 数据,感谢国际耦合模式比较计 划第五阶段(CMIP5)模式组提供数值试验结果。

#### 参考文献 (References)

- Chen H P. 2013. Projected change in extreme rainfall events in China by the end of the 21st century using CMIP5 models [J]. Chinese Sci. Bull., 58: 1462–1472.
- Collins M R, Knutti J, Arblaster J L, et al. 2013. Long-term climate change: Projections, commitments, and irreversibility [M]//Stocker T F, Qin D, Plattner G K, et al. Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, UK and New York, USA: Cambridge University Press.
- Ding Y H, Sun Y, Wang Z Y, et al. 2009. Inter-decadal variation of the summer precipitation in China and its association with decreasing Asian summer monsoon. Part II: Possible causes [J]. Int. J. Climatol., 29: 1926–1944.
- 郭其蕴, 蔡静宁, 邵雪梅, 等. 2004. 1873~2000 年东亚夏季风变化的研究 [J]. 大气科学, 28 (2): 206-215. Guo Qiyun, Cai Jingning, Shao Xuemei, et al. 2004. Studies on the variations of East-Asian summer monsoon during A D 1873-2000 [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 28 (2): 206-215.
- 何金海,祁莉,韦晋,等. 2007. 关于东亚副热带季风和热带季风的再认识 [J]. 大气科学, 31: 1257-1265. He Jinhai, Qi Li, Wei Jin, et al. 2007. Reinvestigations on the East Asian subtropical monsoon and tropical monsoon [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 31: 1257-1265.
- Hsu P C, Li T, Wang B. 2011. Trends in global monsoon area and precipitation over the past 30 years [J]. Geophys. Res. Lett., 38: L08701, doi:10.1029/2011GL046893.

- Hsu P C, Li T, Luo J J, et al. 2012. Increase of global monsoon area and precipitation under global warming: A robust signal? [J]. Geophys. Res. Lett., 39: L0670, doi:10.1029/2012GL051037.
- Hsu P C, Li T, Luo J J, et al. 2013. Future change of the global monsoon revealed from 19 CMIP5 models [J]. Geophys. Res. Lett., 118: 1247–1260.
- IPCC. 2013. Summary for policymakers [M]// Stocker T F, Qin D, Plattner G K, et al, Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, UK and New York, USA: Cambridge University Press.
- Jiang D, Wang H. 2005. Natural interdecadal weakening of East Asian summer monsoon in the late 20th century [J]. Chinese Sci. Bull., 50: 1923–1929.
- Jiang D, Tian Z. 2013. East Asian monsoon change for the 21st century: Results of CMIP3 and CMIP5 models [J]. Chinese Sci. Bull., 58: 1427–1435.
- Jiang D B, Tian Z P, Lang X M. 2015. Mid-Holocene global monsoon area and precipitation from PMIP simulations [J]. Climate Dyn., 44: 2493–2512, doi:10.1007/s00382-014-2175-8.
- 姜江,姜大膀,林一骅. 2015. 1961~2009 年中国季风区范围和季风降水变化 [J]. 大气科学, 39 (4): 722-730. Jiang Jiang, Jiang Dabang, Lin Yihua. 2015. Monsoon area and precipitation over China for 1961–2009 [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 39 (4): 722-730, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1410.14195.
- 姜燕敏, 吴昊旻. 2013. 20 个 CMIP5 模式对中亚地区年平均气温模拟能 力评估 [J]. 气候变化研究进展, 9 (2): 110–116. Jiang Yanmin, Wu Haomin. 2013. Simulation capabilities of 20 CMIP5 models for annual mean air temperatures in central Asia [J]. Advances in Climate Change Research (in Chinese), 9 (2): 110–116.
- Lee J Y, Wang B. 2014. Future change of global monsoon in the CMIP5 [J]. Climate Dyn., 42: 101–119.
- Li J P, Wu Z W, Jiang Z H, et al. 2010. Can global warming strengthen the East Asian summer monsoon? [J]. J. Climate, 23: 6696–6705.
- Qi L, He J H, Zhang Z Q, et al. 2008. Seasonal cycle of the zonal land–sea thermal contrast and East Asian subtropical monsoon circulation [J]. Chinese Sci. Bull., 53: 131–136.
- 钱维宏. 2005. 季风的季节、年际和年代际变化 [J]. 热带气象学报, 21 (2): 199-206. Qian Weihong. 2005. Review of variations of the summer monsoon from seasonal to interannual and interdecadal scales [J]. Journal of Tropical Meteorology (in Chinese), 21 (2): 199-206.
- Sui Y, Jiang D B, Tian Z P. 2013. Latest update of the climatology and changes in the seasonal distribution of precipitation over China [J]. Theor. Appl. Climatol., 113: 599–610.
- Sun Y, Ding Y H. 2010. A projection of future changes in summer precipitation and monsoon in East Asia [J]. Science in China (Series D: Earth Sciences), 53: 284–300.
- Taylor K E. 2001. Summarizing multiple aspects of model performance in a single diagram [J]. J. Geophys. Res., 106 (D7): 7183–7192.
- Taylor K E, Stouffer R J, Meehl G A. 2012. An overview of CMIP5 and the experiment design [J]. Bull. Amer. Meteor. Soc., 93: 485–498.
- Ueda H, Iwai A, Kuwako K, et al. 2006. Impact of anthropogenic forcing on

the Asian summer monsoon as simulated by eight GCMs [J]. Geophys. Res. Lett., 33: L06703, doi:10.1029/2005GL025336.

- Wang B, Ding Q H. 2006. Changes in global monsoon precipitation over the past 56 years [J]. Geophys. Res. Lett., 33: L06711, doi:10.1029/ 2005GL025347.
- Wang B, Ding Q H. 2008. Global monsoon: Dominant mode of annual variation in the tropics [J]. Dyn. Atmos. Oceans., 44: 165–183.
- Wang B, Liu J, Kim H J, et al. 2012. Recent change of the global monsoon precipitation (1979–2008) [J]. Climate Dyn., 39: 1123–1135.
- Wang H J. 2001. The weakening of the Asian monsoon circulation after the end of 1970s [J]. Adv. Atmos. Sci., 18: 376–386.
- 吴佳,高学杰. 2013. 一套格点化的中国区域逐日观测资料及与其它资料的对比 [J]. 地球物理学报,56:1102-1111. Wu Jia, Gao Xuejie.
  2013. A gridded daily observation dataset over China region and comparison with the other datasets [J]. Chinese Journal of Geophysics (in

Chinese), 56: 1102-1111.

- Xu C H, Xu Y. 2012. The projection of temperature and precipitation over China under RCP scenarios using a CMIP5 multi-model ensemble [J]. Atmos. Oceanic Sci. Lett., 5: 527–533.
- Xu Y, Gao X J, Shen Y, et al. 2009. A daily temperature dataset over China and its application in validating a RCM simulation [J]. Adv. Atmos. Sci., 26: 763–772.
- 姚遥, 罗勇, 黄建斌. 2012. 8 个 CMIP5 模式对中国极端气温的模拟和预 估 [J]. 气候变化研究进展, 8 (4): 250-256. Yao Yao, Luo Yong, Huang Jianbin. 2012. Evaluation and projection of temperature extremes over China based on 8 modeling data from CMIP5 [J]. Advances Climate Change Research (in Chinese), 8 (4): 250-256.
- 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.