

江滢, 罗勇, 赵宗慈. 2010. 全球气候模式对未来中国风速变化预估 [J]. 大气科学, 34 (2): 323–336. Jiang Ying, Luo Yong, Zhao Zongci. 2010. Projection of wind speed changes in China in the 21st century by climate models [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 34 (2): 323–336.

全球气候模式对未来中国风速变化预估

江滢^{1,2,3,4} 罗勇^{1,2,3,4} 赵宗慈^{1,3,4}

1 国家气候中心, 北京 100081

2 南京信息工程大学, 南京 210044

3 中国气象局风能太阳能资源评估中心, 北京 100081

4 中国气象局气候研究开放实验室, 北京 100081

摘 要 利用世界气候研究计划之第三次耦合模式比较计划(WCRP/CMIP3)提供的, 参加 IPCC AR4 的 19 个气候模式和国家气候中心为 IPCC 第五次报告研发的新一代气候模式(BCC_CSM1.0.1)及模式集成, 考虑高排放(A2)、中等排放(A1B)和低排放(B1)三种人类排放情景, 预估 21 世纪中国近地层(离地 10 m)风速变化。预估结果表明: (1) 21 世纪全国平均的年平均风速呈微弱的减小趋势, 且随着预估情景人类排放的增加, 中国年平均风速减小趋势越显著。(2) 冬季(夏季)全国平均风速呈减小(增大)趋势, 人类排放量越多, 冬季(夏季)风速减小(增加)程度越大。21 世纪我国风速夏季(冬季)增大(减小)与全球变暖的背景下未来亚洲夏季风(冬季风)增强(减弱)有一定关系。(3) 与 20 世纪末期(1980~1999 年)相比, 21 世纪初期(2011~2030 年)中国区域年平均风速 A2 情景下略偏小, A1B 和 B1 情景下年平均风速无明显变化; 21 世纪中期(2046~2065 年)和后期(2080~2099 年), 三种排放情景下中国年平均风速均比 20 世纪末期风速小。(4) 21 世纪初期、中期和后期均表现为冬季(夏季)平均风速比 20 世纪末期冬季(夏季)平均小(大)。(5) 夏季中国中北部和东北地区风速偏大, 其余地区风速无明显变化或略偏小; 冬季除了东北北部和西藏东南部外, 中国大部地区风速偏小。绝大部分地区超过 50% 模式一致地预估上述风速变化形式, 具有一定的可信度。

关键词 中国 近地层风速变化 全球气候模式 预估

文章编号 1006-9895 (2010) 02-0323-14

中图分类号 P425

文献标识码 A

Projection of Wind Speed Changes in China in the 21st Century by Climate Models

JIANG Ying^{1,2,3,4}, LUO Yong^{1,2,3,4}, and ZHAO Zongci^{1,3,4}

1 National Climate Center, Beijing 100081

2 Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044

3 Center for Wind and Solar Energy Resources Assessment, Beijing 100081

4 Laboratory for Climate Studies, China Meteorological Administration, Beijing 100081

Abstract 19 IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) AR4 (Fourth Assessment Report) climate models with the human emission of SRES (IPCC Special Report on Emissions Scenarios) A2, A1B and B1 have been em-

收稿日期 2009-02-10, 2009-07-31 收修定稿

资助项目 公益性行业(气象)科研专项 GYHY 200806009, 中华人民共和国国家发展和改革委员会和财政部之“风能详查和评价工作”和欧盟—中国能源和环境项目 Europe Aid/123310/D R/CN

作者简介 江滢, 女, 1972 年出生, 高级工程师, 主要从事风能资源变化、风能资源评估、气候变化监测等研究。E-mail: jiangy@cma.gov.cn

ployed to project the annual, seasonal and monthly wind speeds over the three sub-regions of China and the entire China for 2000 – 2099. The study also adds the projections of a new coupling climate model, BCC_CSM 1.0.1, which was developed for IPCC AR5. Therefore, 20 climate models have been used in this research. As projected by 20 climate models with SRES A2, A1B, and B1, (1) the annual mean wind speeds in China for the 21st century decrease slightly, especially for SRES A2. (2) Among the four seasons, the wind speeds in winter decrease in the whole China and the three sub-regions. It is because the winter monsoon over East Asia weakens due to the global warming. The wind speed in summer over most of China increases as projected by a number of climate models. It is associated with the stronger summer monsoon over East Asia in the 21st century as projected by the climate models with SRES scenarios. (3) Compared with the model simulations for 1980 – 1999, the annual mean wind speeds during 2011 – 2030 decrease slightly for SRES A2 and do not change for SRES A1B and B1, respectively. The wind speeds during 2046 – 2065 and 2080 – 2099 for the three scenarios decrease more obviously than 1980 – 1999 and 2011 – 2030, respectively. (4) The wind speeds in winter (summer) for the three periods decrease (increase) relative to 1980 – 1999. (5) The geographical distributions of wind speed changes are different in winter and summer in comparison with 1980 – 1999. In summer, the increasing wind speeds are found over northeastern, northern, and central China. There are not obvious changes in other regions. In winter, the decreasing wind speeds over most of China are noticed, except for northern Northeast China and southeastern Tibet. More than 50% of the models project the patterns of wind changes conformably. It has a certain reliability.

Key words China, near-surface wind speed change, climate models, projection

1 引言

20 世纪以来,世界经济迅猛发展,能源需求成倍增长。作为主要的可再生能源之一的风能资源,由于其安全、清洁、丰富的特性,在全世界得到广泛应用和快速发展。中国风能储量大、分布广,近年来发展迅速,预计在 2030 或 2040 年前后,中国的风力发电装机容量可望超过 1 亿千瓦,成为继火电和水电之后的第三大发电能源(中华人民共和国国家发展和改革委员会, 2007)。随着中国风电产业的发展,气候变暖背景下风能资源的可持续利用问题倍受关注,中国风气候、风能蕴藏量变化的研究也逐步发展起来。任国玉等(2005)、王遵娅和丁一汇(2006)、Xu et al. (2006)、Jiang et al. (2010) 通过分析气象台站观测资料认为近 50 年来中国年平均风速存在逐年减小的变化趋势。Jiang et al. (2010) 的研究在进一步计算分析各种可能的影响因子后提出,城市化发展、气象台站迁址及测风仪器的变更等对中国年(季)平均风速的长期变化会产生一定影响,但大气环流的变化才是造成中国年平均风速呈显著减小趋势的最可能原因。上述这些研究都没有对未来中国风速变化进行预估,而在全球变暖的背景下合理预估我国风速变化特征和趋势,对我国未来风能利用规划具有重要意义。

近十几年来,我国科学家们对中国气候变化的

模拟和未来预估开展了许多有益的研究。这些研究主要分为两类:一是通过“20 世纪气候模拟”试验或其它模拟试验对 20 世纪全球和中国气候变化如气温、降水和风速的检测和归因分析(徐影等, 2002; Jiang et al., 2005; 许崇海等, 2007; 张莉等, 2008; 周天军等, 2008; 江滢等, 2009), 研究表明,模式对全球和中国的目前气候变化具有较好的模拟能力,近百年全球和中国气温变化与自然和人类活动有明显联系(Guo et al., 2001; 高学杰等, 2003; 姜大膀等, 2004; Luo et al., 2005)。二是未来气候变化预估及原因分析。许多学者(Luo et al., 2005; 江志红等, 2008; 张雪芹等, 2008; 张莉等, 2008; 赵宗慈等, 2008; 周天军等, 2008; 江志红等, 2009) 预估了中国区域气温和降水变化,研究表明到 21 世纪中国年平均气温升高 2.5°C ($0.7\sim 9.2^{\circ}\text{C}$), 全国降水普遍增加。还有学者通过研究认为, 21 世纪若干极端事件发生的频率会增加(高学杰, 2007; IPCC, 2007; 江志红等, 2008; 林彩燕等, 2009)。但很少有关于 21 世纪中国区域风速变化预估方面的研究。

本文利用世界气候研究计划(WCRP)第三次耦合模式比较计划(CMIP3)提供的 19 个气候系统模式和国家气候中心新一代全球气候模式(BCC_CSM1.0.1)在高排放(SRES A2, IPCC Special Report on Emissions Scenarios A2, 简称 A2)、中

等排放（SRES A1B，简称 A1B）和低排放（SRES B1，简称 B1）情景下的模拟结果，预估我国 21 世纪近地层风速变化特征，以加深对全球持续变暖背景下中国区域气候变化的认识，为气候变化的影响评估提供依据，为合理开发利用风能资源提供参考。

2 资料和模式简介

2.1 模式介绍

由世界气候研究计划（WCRP）第三次耦合模式比较计划（CMIP3）提供，参加 IPCC AR4 的 23 模式中有 19 个模式给出了近地层（离地 10 m）经向和纬向风在 A2、A1B 和 B1 情景下的预估结果（见表 1）。这些模式来自 11 个国家，中国有 1 个模式，即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的模式。此外，

国家气候中心为 IPCC 第五次评估报告研发的新一代气候模式（BCC_CSM1.0.1）也给出了近地层经向和纬向风在 A2、A1B 和 B1 情景下的预估结果（表 1）。BCC_CSM1.0.1 模式是基于美国国家大气研究中心（National Center for Atmospheric Research, NCAR）的气候系统模式 CCSM2.0（Kiehl and Gent, 2004）发展而来的，独立于国家气候中心参与 IPCC AR4 的前一代耦合模式版本 BCC_CM1。BCC_CSM1.0.1 模式包括四个分量模式：大气、陆面、海冰和海洋。其中，大气模式使用的是 BCC_AGCM2.0.1 代替常用的 CAM3，陆面模式为 CLM3（Community Land Surface Model version3）（Dickinson et al., 2006）代替 CLM2，海冰模式是 CSIM4（Community Sea Ice Model version 4）（Brigleb et al., 2004），海洋模式为 POP（Parallel Ocean Program）^①（Wu et al., 2008）。

表 1 全球气候模式 21 世纪预估试验设计简述
Table 1 Brief description of global climate models and the design of the 21st century experiments

	模式名	国家	大气分辨率	海洋分辨率	试验设计	集合数
1	BCC_CSM1.0.1	中国	T42L26	1×1L30	A2 A1B B1	1 1 1
2	BCCR_BCM2	挪威	T63L31	0.5/1.5L35	A2 A1B B1	1 1 1
3	CCCMA_CGCM3	加拿大	T47L31	0.9×1.4L29	A2 A1B B1	5 5 6
4	CNRM_CM3	法国	T63L45	0.5/2.0L31	A2 A1B B1	1 1 1
5	CSIRO_MK3	澳大利亚	T63L18	0.8×1.9L31	A2 A1B B1	1 1 1
6	GFDL_CM2_0	美国	2.0×2.5L24	0.3/1.0L24	A2 A1B B1	1 1 1
7	GFDL_CM2_1	美国	2.0×2.5L24	0.3/1.0L24	A2 A1B B1	1 1 1
8	GISS_AOM	美国	3.0×4.0L12	3.0×4.0L16	A1B B1	2 2
9	GISS_E_H	美国	4.0×5.0L20	2.0×2.0L16	A1B	4
10	GISS_E_R	美国	4.0×5.0L20	4.0×5.0L20	A2 A1B B1	1 5 1
11	IAP_FGOALS1	中国	T42L26	1.0×1.0L16	A1B B1	3 3
12	INMCM3	俄罗斯	4.0×5.0L21	2.0×2.5L33	A2 A1B B1	1 1 1
13	IPSL_CM4	法国	2.5×3.8L19	1.2×2.0L31	A2 A1B B1	1 1 1
14	MIROC3_H	日本	T106L56	0.2×0.3L47	A1B B1	1 1
15	MIROC3_M	日本	T42L20	0.5/1.4L43	A2 A1B B1	3 3 3
16	MIUB_ECHO_G	德国	T30L19	0.5/2.8L20	A2 A1B B1	3 3 3
17	MPI_ECHAM5	德国	T63L31	1.5×1.5L40	A2 A1B B1	3 4 3
18	MRI_CGCM2	日本	T42L30	0.5/2.5L23	A2 A1B B1	5 5 5
19	UKMO_HADCM	英国	2.5×3.8L19	1.5×1.5L20	A2 A1B B1	1 1 1
20	UKMO_HADGM	英国	1.3×1.9L38	0.3/1.0L40	A2 A1B	1 1
合计	20 个模式				16 20 18	30 45 36

注：表中内容引自 IPCC（2007）、赵宗慈和罗勇（2007）和辛晓歌等（2008）。

① Smith R D, Gent P R. 2002. In Reference Manual for the Parallel Ocean Program (POP): Ocean Component of the Community Climate System Model (CCSM-2). (Available at <http://www.cesm.ucar.edu/models/ccsm2.0.1/pop/>)

本文所用的所有模式都是全球气候系统模式,包括了 4~5 个圈层模式分量,且绝大部分模式中海冰部分都不仅考虑了海冰的热力学,而且还考虑了海冰的动力学,使结果更接近实际观测。另一方面,多数模式的陆面和积雪部分都考虑多层和更多的物理和生物学过程,且不再在耦合过程中使用通量调整,以减少了误差(赵宗慈,2006;赵宗慈和罗勇,2007)。考虑到这些模式“20 世纪气候模拟”试验对近 50 年中国近地层风速检验中,基本上都能模拟出目前(1956~1999 年)中国多年年(或季)平均风速分布状况,也在一定程度上模拟出近 50 年中国近地层风速变化(江滢等,2009),本文利用所有模式及某些模式集成对 21 世纪中国近地层风速变化进行预估。

2.2 预估情景介绍

为了对未来社会、经济、技术的方方面面各种可能的发展状况加以定性或定量的描述(Covey et al., 2000),IPCC 构建了一系列人类排放情景(IPCC, 2007)。2000 年,IPCC 第三次评估报告公布了《排放情景特别报告》,即 SRES 情景(Nakićenovic et al., 2001),其中 A1 情景描述的是一个高排放的情景,经济快速发展,世界人口趋于稳定;A2 情景假设了一个不平衡的世界,人口持续增长,生产技术发展缓慢,经济发展主要面向区域,各区域间人口增长和生产力发展不平衡;B1 情景假设全球人口数量趋于稳定,社会和环境可持续发展,清洁能源高效技术合理利用;B2 情景是一个中低排放情景,假设未来世界人口以略低 A2 的速度增长,社会和环境可持续发展。其中,A1 根据能源系统的不同发展方向可分成 3 个情景组:高强度的矿物燃料使用(A1F I)、非矿物能源(A1T)、各种能源的平衡发展(A1B)。本文在 SRES A2(高排放)、A1B(中等排放)和 B1(低排放)三种情景下,预估 21 世纪中国近地层风速变化特征。

2.3 资料处理和预估方法

考虑到各个气候模式的分辨率不同,为了便于比较,利用距离加权反比插值法(靳国栋等,2003)将模式输出结果插值为 $1^\circ \times 1^\circ$ 网格。

预估方法主要采用每个模式预估 21 世纪结果与对应模式 20C3M 试验模拟 1980~1999 年值进行对比,计算其平均值、差值等。在对平均风速等要素的长期变化特征进行预估时,主要采用了线性回

归的趋势分析方法(魏凤英,1999),并利用时间与空间变化之间的相关系数对变化趋势进行显著性检验。

同时,由于有些模式的模拟试验只有 1 个,而有些模式的模拟试验分别有 2~6 个不等(见表 1 最右列),因此,首先计算了单个模式的集合(即某个模式所有试验的等权重集合平均),然后计算所有模式的集成(每个模式集合后,再进行等权重集成平均;即每个模式在集成结果中是等权重的,称为所有模式集成),以及模式模拟多年平均(1956~1999 年)与观测同时段多年平均风速相关关系较好的模式(BCC_CSM1.0.1、CNRM_CM3、CSIRO_MK3、GFDL_CM2_0、IPSL_CM4 和 MIROC3_M)集成(称为“好模式分布集成”,简称为 PATTERN_ENS),模式模拟与观测同时段全国平均历年(1956~1999 年)年平均风速变化特征相似的模式(BCC_CSM 1.0.1、CCCMA_CGCM3、CNRM_CM3、MIUB_ECHO_G、MRI_CGCM2 和 UKMO_HADGEM)集成(称为“好模式变化集成”,简称 MY_EVOL_ENS),其中“好模式分布集成”和“好模式变化集成”的模式挑选方法和集成方法详见江滢等(2009)。需要说明的是:虽然在江滢等(2009)中,IAP_FGOALS1 和 MIROC3_H 多年平均风速与观测同时段多年平均风速相关关系较好,但由于 IAP_FGOALS1 和 MIROC3_H 没有提供 A2 情景的近地层风速结果,同时考虑到预估风速变化在三种不同排放情景下的可比较性,本文在所有人类排放情景下的进行“好模式分布集成”时,都没有使用这两个模式的预估结果。

考虑到本研究应与其他研究具有可比较性,本文根据 IPCC AR4 的建议用 2011~2030 年、2046~2065 年和 2080~2099 年分别代表 21 世纪初期、中期和后期,用气候模式模拟的 1980~1999 年平均场作为气候背景场,代表 20 世纪末期状况。

此外,用 1、4、7、10 月平均风速状况分别表示春、夏、秋、冬四个季节风速状况。

2.4 区域划分

本文除了着重预估全国整体特征外,还进一步分析了气候模式对区域近地层风速的预估结果。考虑到使用的是全球气候模式,区域的尺度不能够太小,因此在分析中,参照江滢等(2009)将中国地区分为北部、西南部和东南—南部三个区域(图

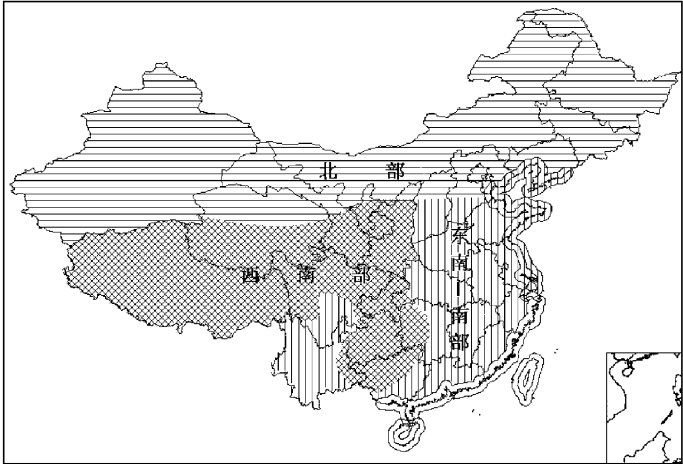


图1 全国分区示意图
Fig. 1 Sketch map of the three sub-regions in China

1), 分别加以讨论。

3 21 世纪平均风速变化预估

3.1 年平均风速变化预估

表 2、3 给出各个模式以及模式集成在 A2、A1B 和 B1 排放情景下, 对 21 世纪中国区域近地层年平均风速线性变化趋势的预估结果。结果表明, 三种情景下中国年平均风速均呈微弱的减小趋势。值得注意的是, 随着 B1、A1B 和 A2 情景人类排放量依次增加, 中国年平均风速减小趋势依次显著, 预估风速呈减小趋势的模式数依次增多(表 2), 即风速呈减小趋势变化的可信度也依次增大。也就是说, 模式预估 21 世纪中国年平均风速呈微弱的减小趋势 $[-0.04 \sim -0.02 \text{ (m/s)}/100 \text{ a}]$, 且随着人类排放量的增加, 风速减小的幅度越大, 预估风速呈减小趋势的模式数越多, 该预估结论的可信度越高。

从模式集成(图 2)来看, 各种模式集成都表

明未来中国风速呈微弱的减小趋势(相对于模式气候背景场为 1980~1999 年(下同), 考虑到部分模式没有提供 2000~2010 年之间的风场资料, 变化趋势计算时段为 2011~2099 年)。除了 BCC_CSM1.0.1 模式与 CCCMA_CGCM3 模式集成预估未来风速的减小趋势在三种情景下无明显差别外, 好模式分布集成、好模式变化集成和所有模式集成都表现出 A2 情景下预估风速的减小趋势比 A1B 和 B1 下风速减小趋势明显。

三种情景下, 不同模式模拟不同区域的未来风速变化也不尽相同(表 2、3), 但对于所有模式集成和好模式分布集成来说, A2 和 A1B 情景下, 未来中国北部风速偏小幅度略大于其它两个区域。

3.2 季平均风速变化预估

从全国平均来看, 三种人类排放情景下, 全国平均风速在夏季呈略增大趋势, 冬、春、秋季风速都略呈减小趋势。相对而言, 人类排放量越多, 冬季风速减小程度越大, 夏季风速增大程度也越大

表 2 A2、A1B 和 B1 情景下全国和分区 21 世纪年平均风速变化趋势 [2011~2099, 单位: (m/s)/100 a]

Table 2 Trends of the annual mean wind speed changes for SRES A2, A1B and B1 in the 21st century in the three sub-regions and entire China [2011 - 2099, units: (m/s)/100 a]

情景/模式个数	北部区	西南部区	东南-南部区	全国
A2/16	-0.05 (6/0), -0.3~0.0	-0.03 (6/4), -0.2~0.2	-0.05 (8/2), -0.3~0.1	-0.04 (7/0), -0.1~0.0
A1B/20	-0.04 (8/0), -0.2~0.0	-0.02 (5/4), -0.2~0.2	-0.03 (7/4), -0.2~0.1	-0.03 (5/1), -0.2~0.1
B1/18	-0.01 (3/1), -0.1~0.1	-0.03 (5/2), -0.3~0.1	-0.02 (4/1), -0.2~0.1	-0.02 (4/0), -0.1~0.0

注: 逗号前的数据表示平均趋势, 括号内为预估负/正趋势的模式数 [变化趋势在 $-0.05 \sim 0.05 \text{ (m/s)}/100 \text{ a}$ 之间认为无明显变化]; 逗号后的数据表示变化趋势范围。

表 3 模式(模式集成)A2、A1B 和 B1 排放情景下预估 21 世纪中国和三个分区年平均风速变化趋势[2011~2099 年,单位:(m/s)/100a]

Table 3 Trends of annual mean wind speed changes for SRES A2, A1B and B1 in the three sub-regions and China [2011 - 2099, unit: (m/s)/100 a] for each model and multi-model ensembles													
序号	模式名称	A2				A1B				B1			
		北部	西南部	东南-南部	全国	北部	西南部	东南-南部	全国	北部	西南部	东南-南部	全国
1	BCC_CSM1.0.1	-0.26	0.08	-0.06	-0.12	-0.14	0.04	-0.04	-0.07	-0.04	-0.29	-0.11	-0.13
2	BCCR-BCM2	0.03	0.01	0.02	0.02	0.0	0.0	0.03	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
3	CCCMA_CGCM3	0.03	-0.24	-0.27	-0.11	0.04	-0.12	-0.13	-0.05	0.02	0.01	-0.02	0.01
4	CNRM_CM3	0.01	-0.02	0.02	0.0	-0.02	-0.02	0.00	-0.01	0.0	0.0	0.03	0.01
5	CSIRO_MK3	-0.03	-0.19	-0.13	-0.10	-0.08	-0.20	-0.09	-0.12	-0.01	-0.14	-0.05	-0.05
6	GFDL_CM2_0	-0.04	-0.01	-0.05	-0.03	-0.05	-0.03	-0.05	-0.05	-0.01	-0.01	-0.03	-0.02
7	GFDL_CM2_1	-0.08	-0.02	0.01	-0.04	-0.06	-0.02	0.03	-0.03	0.01	0.06	0.05	0.04
8	GISS_AOM	/	/	/	/	0.03	0.04	0.07	0.04	0.07	0.02	0.03	0.05
9	GISS_E_H	/	/	/	/	-0.03	0.05	-0.04	-0.01	/	/	/	/
10	GISS_E_R	-0.06	-0.01	-0.09	-0.06	-0.02	0.0	-0.05	-0.02	0.01	0.02	0.04	0.02
11	IAP_FGOALS1	/	/	/	/	-0.09	-0.10	-0.06	-0.09	-0.02	-0.05	-0.05	-0.03
12	INMCM3	-0.03	0.07	0.02	0.01	-0.02	0.10	0.04	0.03	0.02	-0.03	-0.02	0.00
13	IPSL_CM4	-0.04	0.01	-0.01	-0.02	-0.04	0.0	-0.02	-0.03	-0.01	0.01	-0.01	-0.01
14	MIROC3_H	/	/	/	/	-0.02	0.19	0.05	0.06	-0.06	0.03	-0.01	-0.02
15	MIROC3_M	-0.10	0.17	0.09	0.02	-0.07	0.06	0.06	0.00	-0.03	0.07	0.02	0.01
16	MIUB_ECHO_G	-0.12	-0.15	-0.11	-0.13	-0.17	-0.19	-0.16	-0.17	-0.08	-0.08	-0.07	-0.08
17	MPI_ECHAM5	0.02	-0.06	-0.02	-0.01	0.02	-0.03	0.00	0.00	0.0	-0.03	0.0	-0.01
18	MRI_CGCM2	-0.04	-0.08	-0.07	-0.06	-0.01	-0.04	-0.05	-0.03	-0.02	-0.01	-0.02	-0.02
19	UKMO_HADCM	-0.12	-0.06	-0.15	-0.11	-0.10	-0.20	-0.17	-0.15	-0.06	-0.18	-0.21	-0.13
20	UKMO_HADGM	0.00	0.06	0.06	0.03	0.04	0.05	0.07	0.05	/	/	/	/
21	所有模式集成	-0.10	-0.05	-0.06	-0.07	-0.08	-0.05	-0.04	-0.06	-0.07	-0.07	-0.05	-0.06
22	好模式分布集成	-0.08	0.0	-0.03	-0.04	-0.07	-0.03	-0.03	-0.05	-0.03	-0.07	-0.04	-0.04
23	好模式变化集成	-0.08	-0.10	-0.10	-0.09	-0.06	-0.07	-0.07	-0.07	-0.03	-0.08	-0.04	-0.04

注: 黑体表示通过 99% 显著性检验。

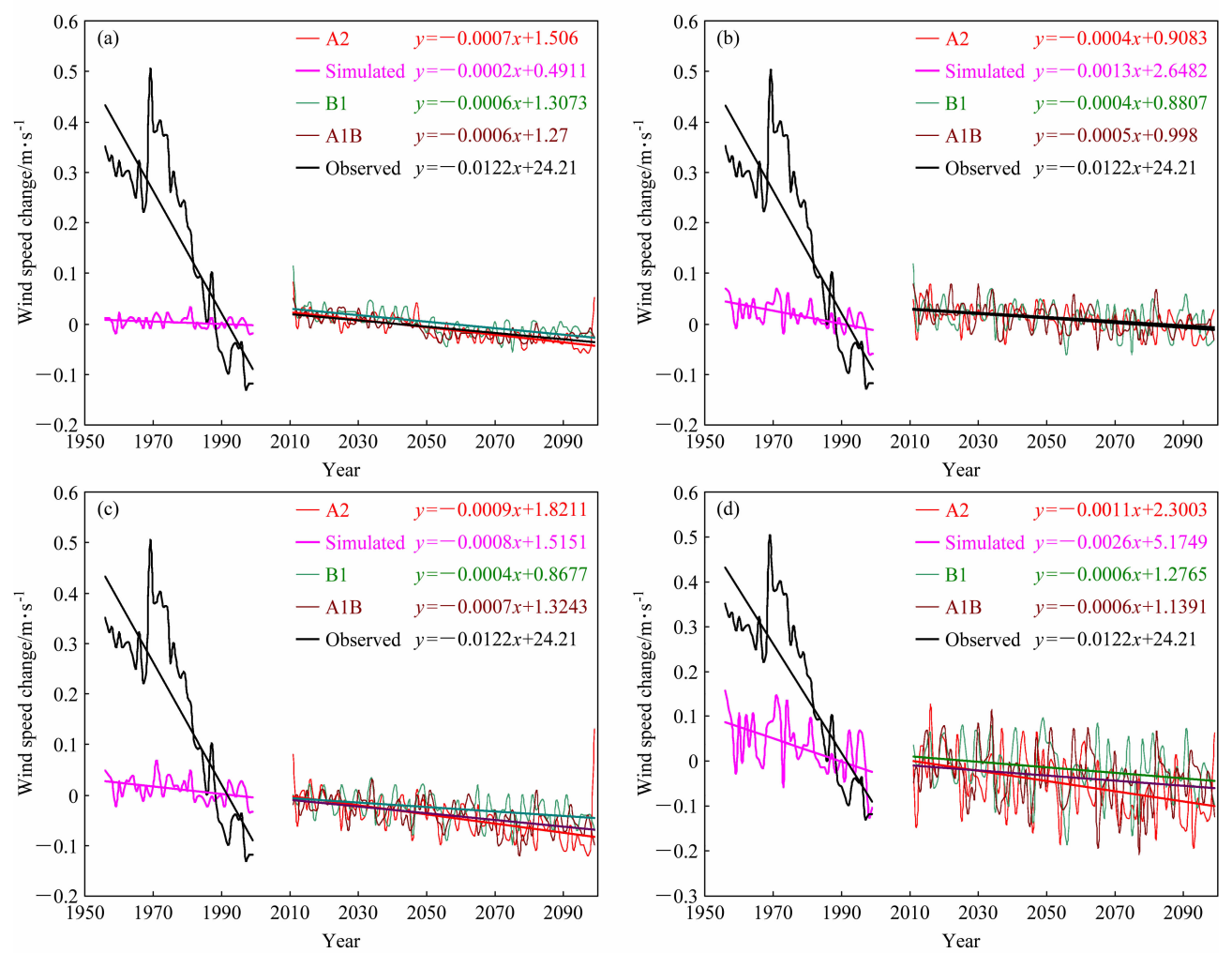


图2 A2、A1B、B1 情景下模式集成预估年平均风速距平演变图：(a) 所有模式集成；(b) 好模式分布集成；(c) 好模式变化集成；(d) BCC_CSM1.0.1 和 CCCMA_CGCM3 平均值

Fig. 2 Evolutions of annual mean wind speed changes during 2011–2099: (a) All models ensemble; (b) ensemble of the models with good patterns; (c) ensemble of the models with good change trends; (d) mean of BCC_CSM1.0.1 and CCCMA_CGCM3

表 4 同表 2，但为各季平均风速变化趋势

Table 4 Same as Table 2, except for the four seasons

情景/模式个数	季节	北部	西南部	东南—南部	全国
A2/16	1 月	−0.06(6/3), −0.4~0.1	0.0(8/6), −0.2~0.4	−0.02(6/5), −0.3~0.2	−0.04(4/1), −0.2~0.1
A2/16	4 月	−0.11(11/3), −0.5~0.2	−0.01(6/6), −0.5~0.3	0.01(3/4), −0.2~0.3	−0.05(6/3), −0.4~0.1
A2/16	7 月	0.05(5/8), −0.1~0.3	0.02(6/6), −0.3~0.7	0.15(4/10), −0.4~0.9	0.06(3/7), −0.2~0.5
A2/16	10 月	−0.09(10/2), −0.4~0.2	−0.09(9/2), −0.3~0.1	−0.06(9/4), −0.5~0.4	−0.09(13/0), −0.2~0.0
A1B/20	1 月	−0.05(10/5), −0.4~0.1	−0.03(5/6), −0.5~0.2	−0.06(12/3), −0.4~0.3	−0.04(9/3), −0.3~0.1
A1B/20	4 月	−0.02(9/3), −0.2~0.4	−0.02(7/4), −0.3~0.4	−0.01(6/9), −0.4~0.3	−0.02(8/4), −0.2~0.2
A1B/20	7 月	0.03(3/7), −0.1~0.2	0.01(7/5), −0.3~0.6	0.17(5/11), −0.2~1.0	0.06(3/6), −0.2~0.4
A1B/20	10 月	−0.06(11/3), −0.3~0.2	−0.03(7/3), −0.3~0.5	0.06(2/11), −0.1~0.4	−0.03(5/5), −0.2~0.1
B1/18	1 月	−0.05(10/3), −0.2~0.2	−0.04(8/5), −0.3~0.1	−0.05(6/3), −0.4~0.1	−0.04(7/2), −0.2~0.1
B1/18	4 月	0.0(6/4), −0.1~0.4	−0.01(4/4), −0.2~0.1	0.03(5/9), −0.1~0.2	0.0(4/4), −0.1~0.2
B1/18	7 月	0.01(3/5), −0.1~0.1	−0.01(6/3), −0.4~0.3	0.12(3/9), −0.1~0.7	0.03(4/6), −0.1~0.2
B1/18	10 月	−0.02(8/3), −0.1~0.3	−0.04(6/4), −0.3~0.2	0.06(3/10), −0.1~0.1	−0.01(5/1), −0.1~0.1

注：数据说明同表 2；黑体表示平均值为正值。

(表 4)。分区域来看,各区域比较一致:冬季风速减小、夏季风速增大。冬季北部风速减小程度略大于其它区域,夏季东南—南部地区风速增大程度明显大于其它两个区域。

我国属于明显季风区,未来季风强弱变化直接影响未来中国风速的变化。已有研究表明,在全球变暖的背景下,未来亚洲季风环流在夏季加强、冬季减弱(布和朝鲁和林永辉,2003;Bueh Cholaw,2003;姜大膀和王会军,2005;IPCC,2007)。未来亚洲夏季风(冬季风)的加强(减弱)与我国夏季(冬季)近地层风速略呈增大(减小)趋势存在一定的关系。

4 21 世纪分时段预估

考虑到与其他研究成果的可比较性,本文根据 IPCC AR4 建议分别用 2011~2030 年、2046~2065 年和 2080~2099 年代表 21 世纪初期、中期和后期,预估未来中国区域近地层风速变化特征。三个时段分别与气候模式模拟的 1980~1999 年时段作对比。

4.1 2011~2030 年风速预估

从全国平均来看(表 5),21 世纪初期(2011~2030 年)中国区域年平均风速 A2 情景下略偏小,

A1B 和 B1 情景下年平均风速无明显变化。除了 CCCMA CGCM3 模式外,所有模式均预估 21 世纪初期中国区域内风速变化不大,变化范围在-1.0~1.0 m/s(图 3)。从分布来看(图 3、4),三种情景下均存在北方部分地区风速增大、南方大部风速减小的格局。详细分析好模式分布集成、好模式变化集成和所有模式集成(图略)预估风速变化的分布情况,可以看到三种模式集成在三种预估情景下,比较一致地预估中国东北北部、黄河中游附近和西藏西南部 21 世纪初期风速稍偏大,其余大部地区风速略偏小。这种预估风速变化的分布状况,在大部分地区超过 50%模式,具有一致的预估结果(图 5),具有较高的可信度。

分析四季风速变化可知,在 A2、A1B 和 B1 情景下非常一致地预估 21 世纪初期夏、秋季平均风速略偏大,冬、春季平均风速偏小(见表 5)。夏、秋季风速偏大的区域主要位于中国中北部和东北地区,且超过 50%模式预估结果一致,具有较高的可信度;冬、春季风速偏小的区域主要位于除了西藏西南和东北部分地区以外的大部地区,且超过 50%模式预估结果一致。

4.2 2046~2065 年风速预估

与 20 世纪末期相比,21 世纪中期中国年平均

表 5 所有模式预估 2011~2030 年中国风速平均变化(单位: m/s)
Table 5 Mean wind speed changes projected by all models (units: m/s)

	A2	A1B	B1
1 月	-0.05 (0.04~-0.29)	-0.06 (0.08~-0.51)	-0.06 (0.24~-0.54)
4 月	-0.04 (0.27~-0.51)	-0.04 (0.10~-0.48)	-0.05 (0.07~-0.51)
7 月	0.06 (0.78~-0.06)	0.02 (0.83~-0.55)	0.02 (0.74~-0.53)
10 月	0.01 (0.25~-0.11)	0.02 (0.61~-0.17)	0.04 (0.67~-0.16)
年	-0.01 (0.12~-0.04)	0.0 (0.16~-0.05)	0.0 (0.16~-0.05)

注:平均风速为 2011~2030 年减 1980~1999 年;括号内数据为变化范围。

表 6 同表 5, 但为预估 2046~2065 年
Table 6 Same as Table 5, except for 2046~2065

	A2	A1B	B1
1 月	-0.05 (0.06~-0.27)	-0.08 (0.05~-0.54)	-0.10 (0.06~-0.61)
4 月	-0.04 (0.35~-0.52)	-0.05 (0.07~-0.49)	-0.02 (0.25~-0.49)
7 月	0.06 (0.76~-0.13)	0.05 (0.77~-0.43)	0.02 (0.84~-0.44)
10 月	-0.01 (0.22~-0.11)	0.01 (0.56~-0.16)	0.01 (0.62~-0.17)
年	-0.02 (0.13~-0.09)	-0.02 (0.11~-0.10)	-0.01 (0.13~-0.09)

注:平均风速为 2046~2065 年减 1980~1999 年;其余同表 5。

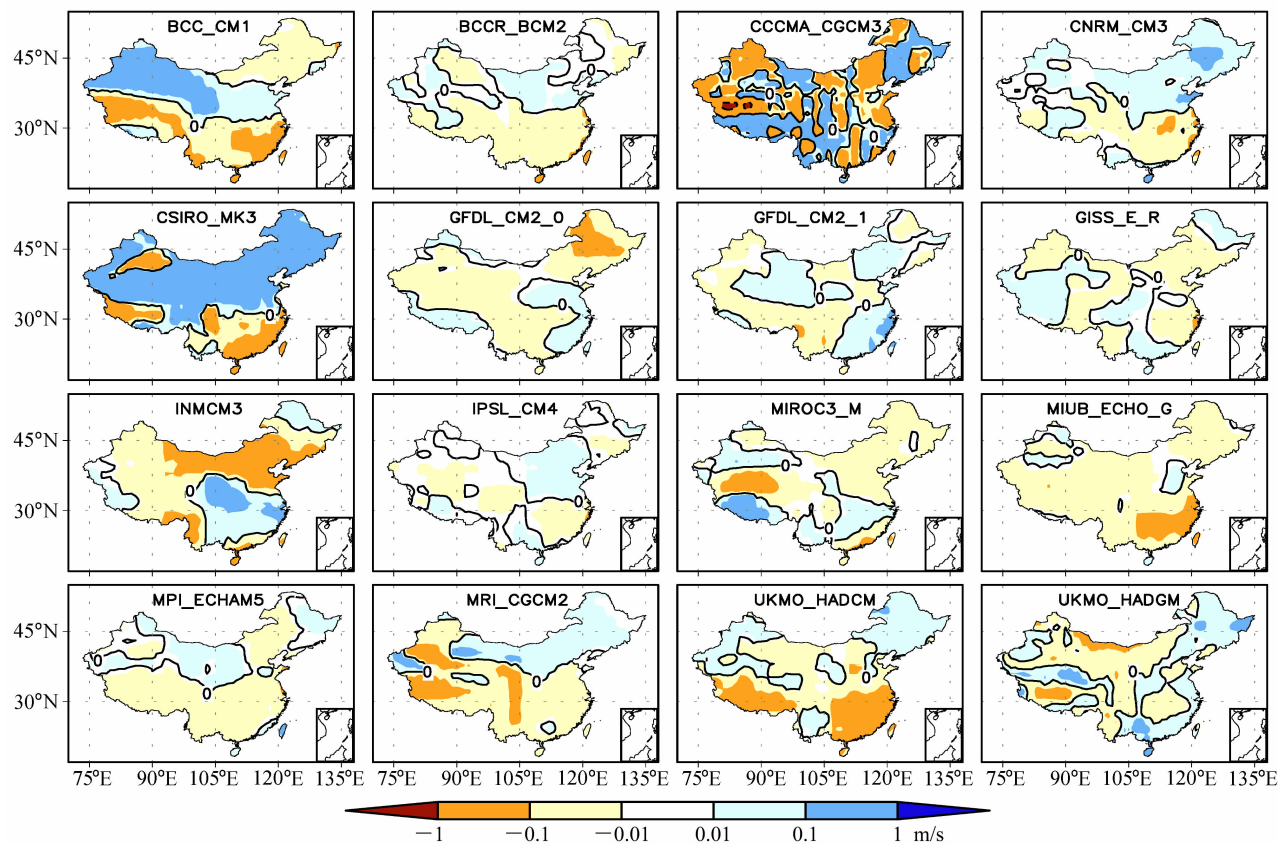


图 3 预估 A2 情景下 2011~2030 年中国年平均风速差值（相对于 1980~1999）分布（单位：m/s）
Fig. 3 Geographical distributions of annual mean wind speed changes during 2011 – 2030 relative to 1980 – 1999 projected by each model for SRES A2

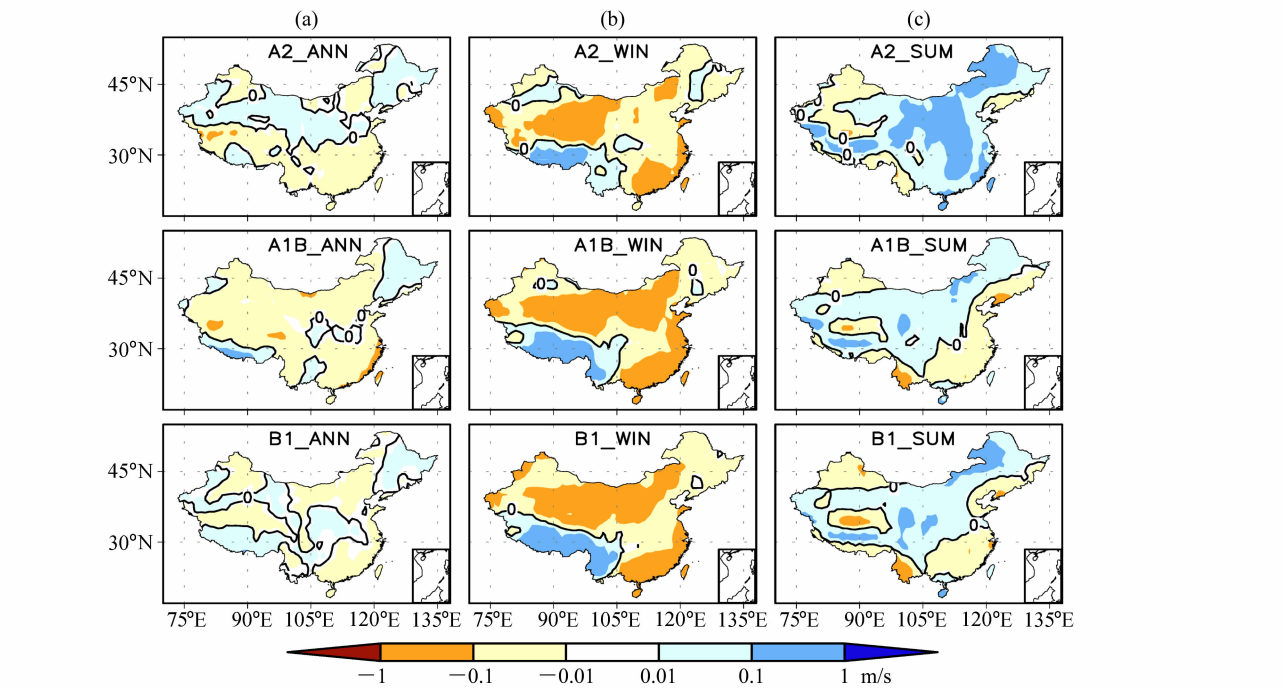


图 4 所有模式集成预估 2011~2030 年中国年、季平均风速差值分布（单位：m/s）：(a) 年；(b) 冬（1 月）；(c) 夏（7 月）
Fig. 4 Geographical distributions of annual and seasonal mean wind speed changes during 2011 – 2030 relative to 1980 – 1999 projected by all models ensemble for SRES A2, A1B, and B1: (a) Annual; (b) winter (Jan); (c) summer (Jul)

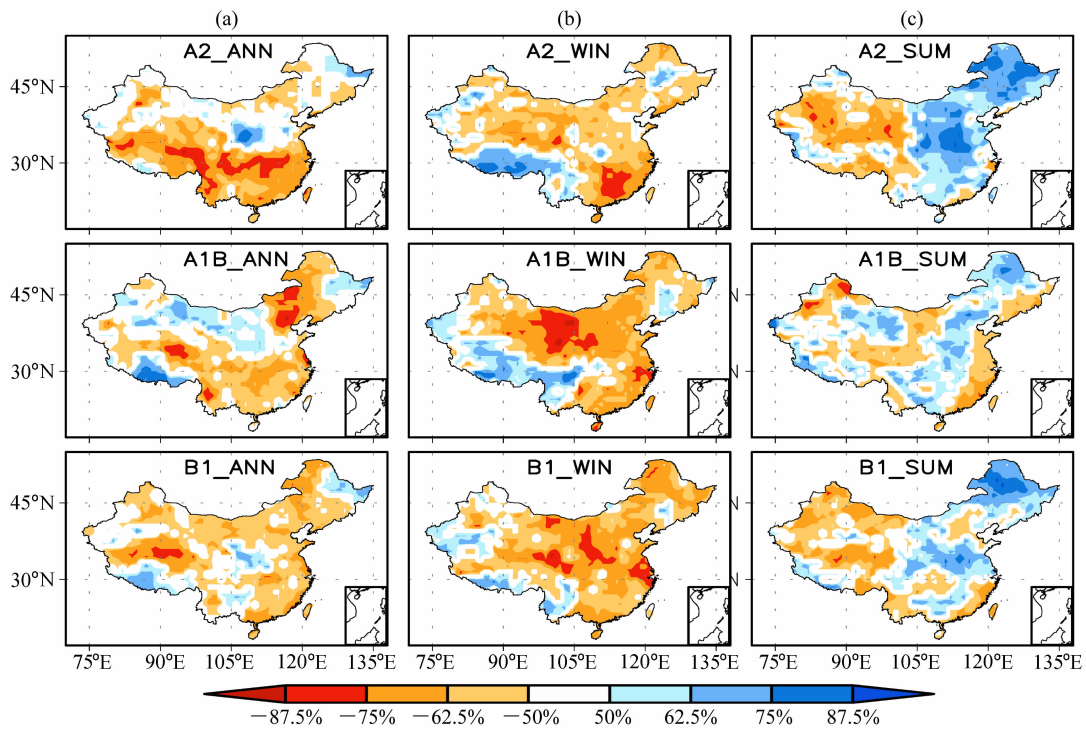


图 5 预估 2011~2030 年对于各情景平均风速正(负)差值的模式数百分率分布图: (a) 年; (b) 冬(1 月); (c) 夏(7 月)。正值: 预估未来风速差值为正的模式数超过 50% 的区域; 负值: 预估未来风速差值为负的模式数超过 50% 的区域

Fig. 5 Geographical distributions of percentages of model numbers with positive and negative changes of annual and seasonal mean wind speeds during 2011–2030 for SRES A2, A1B, and B1: (a) Annual; (b) winter (Jan); (c) summer (Jul). Positive (negative) values indicate that the model numbers with the positive (negative) wind speed changes exceed 50% of the total model numbers

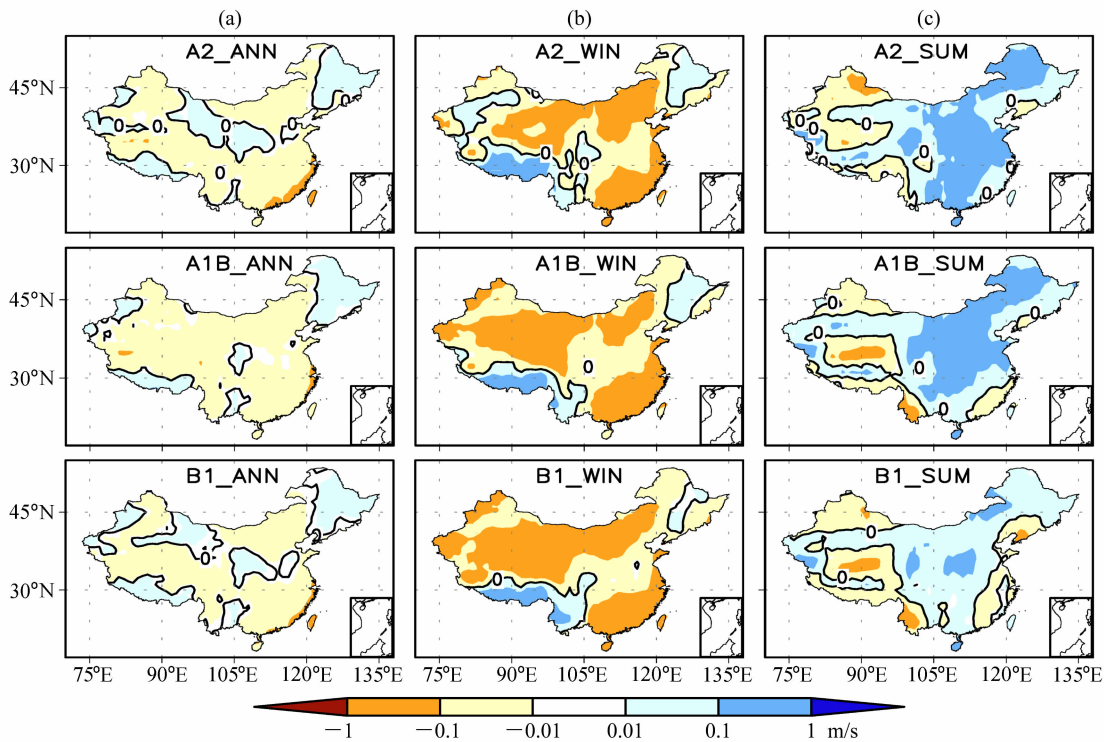


图 6 同图 4, 但为预估 2046~2065 年

Fig. 6 Same as Fig. 4, except for 2046–2065

表 7 同表 5, 但为预估 2080~2099 年
Table 7 Same as Table 5, except for 2080 - 2099

	A2	A1B	B1
1 月	-0.07 (0.04~-0.31)	-0.09 (0.07~-0.60)	-0.09 (0.08~-0.54)
4 月	-0.07 (0.05~-0.61)	-0.04 (0.28~-0.55)	-0.04 (0.22~-0.51)
7 月	0.10 (0.74~-0.22)	0.05 (0.79~-0.36)	0.04 (0.70~-0.47)
10 月	-0.05 (0.13~-0.21)	0.0 (0.54~-0.14)	0.04 (0.62~-0.13)
年	-0.03 (0.07~-0.13)	-0.02 (0.07~-0.16)	-0.01 (0.13~-0.10)

注：平均风速为 2080~2099 年减 1980~1999 年；其余同表 5。

风速在三种情景下均偏小，且比 21 世纪初期偏小程度略大（见表 5、6）。从模式集成分布（图 6）来看，东北北部、黄河中游附近和西藏西南部风速偏大，其余大部地区风速偏小。超过 50% 模式预估 21 世纪中期年平均风速变化分布特征相似（图略），因此，21 世纪中期，东北北部、黄河中游附近和西藏西南部风速偏大，其余大部地区风速偏小的分布形式具有一定的可信度（图略）。

分析四季风速变化可知，A2、A1B 和 B1 情景下，21 世纪中期中国大部地区夏季平均风速略偏大，冬、春季风速偏小（见表 6 和图 6），秋季风速变化不明显。与 21 世纪初期不同的特征是在 21 世纪中期冬季（夏季）平均风速减小（增大）幅度增大。

21 世纪中期冬、夏季风速变化的分布情况与 21 世纪初期类似，夏季中国中北部和东北地区风速偏大，其余地区风速无明显变化或略偏小；冬季除了东北北部和西藏东南部外，中国大部地区风速偏小（图 6、表 6）。在中国绝大部分地区超过 50% 模式一致地预估上述风速变化形式，具有一定的可信度（图略）。

4.3 2080~2099 年风速预估

21 世纪后期与 21 世纪中期相类似，三种情景下全国年平均风速比 20 世纪末期年平均风速偏小（表 7）。同样，21 世纪后期风速变化分布状况与 21 世纪中期类似，东北北部、黄河中游附近和西藏西南部风速偏大，其余大部地区风速偏小。这种分布具有较高可信度（图略）。

与 21 世纪初期和中期相似，21 世纪后期，三种情景下均表现为夏季平均风速偏大，冬季平均风速偏小的特征（图略）。但值得注意的是，21 世纪后期夏季（冬季）风速偏大（偏小）幅度比 21 世纪初期和中期风速变化幅度大。各模式预估结论也趋

于一致，具有较高可信度（图略）。

5 结论和讨论

（1）对于全国平均来说，三种情景下年平均风速均呈微弱的减小趋势，且随着预估情景人类排放量的增加，中国年平均风速减小趋势越显著，风速减小的幅度越大。

（2）三种情景下，冬季（夏季）全国平均风速呈减小（增大）趋势。冬季北部地区风速减小程度略大于其他地区，夏季东南—南部地区风速增大程度略大于其他区域。人类排放量越多，冬季（夏季）风速减小（增加）程度越大。

（3）21 世纪初期（2011~2030 年），中国区域年平均风速 A2 情景下略偏小，A1B 和 B1 情景下年平均风速无明显变化。与 20 世纪末期相比，A2、A1B 和 B1 情景下非常一致地预估 21 世纪初期夏、秋季平均风速略偏大，冬、春季平均风速偏小。

（4）21 世纪中期（2046~2065）和后期（2080~2099），A2、A1B 和 B1 情景下，中国年平均风速均比 20 世纪末期风速小，冬季（夏季）平均风速比 20 世纪末期冬季（夏季）平均风速偏小（大）。与 21 世纪初期不同的是：在 21 世纪中期和后期冬季（夏季）平均风速减小（增大）幅度增大。

（5）对于风速变化的分布来说，21 世纪初期、中期和后期有着相似的风速变化分布：夏季中国中北部和东北地区风速偏大，其余地区风速无明显变化或略偏小；冬季除了东北北部和西藏东南部外，中国大部地区风速偏小。在中国绝大部分地区超过 50% 模式一致预估上述风速变化形式，具有一定的可信度。

（6）值得注意的是，模拟近 50 年中国区域风速变化较好的全球气候模式（CCCMA_CGCM3 和 MRI_CGCM2）（江滢等，2009），预估 21 世纪中国

表 8 CCCMA_CGCM3 和 MRI_CGCM2 模式预估 21 世纪中国 700 hPa 风速平均变化 (背景场为 1956~1999; 单位: m/s)

Table 8 Annual and seasonal mean 700-hPa wind speed changes (units: m/s) projected by CCMA_CGCM3 and MRI_CGCM2 (base value is 1956 - 1999 mean)

预估时段	CCCMA_CGCM3			MRI_CGCM2			CCCMA_CGCM3+MRI_CGCM2		
	夏半年	冬半年	年	夏半年	冬半年	年	夏半年	冬半年	年
2011~2030 年	-0.54	-0.71	-0.64	1.28	-1.18	0.02	0.37	-0.94	-0.31
2046~2065 年	-0.73	-0.55	-0.61	1.22	-1.06	0.12	0.24	-0.80	-0.25
2081~2100 年	-0.86	-0.60	-0.62	1.08	-1.04	-0.01	0.11	-0.82	-0.32

注: 黑体为负值, 即预估 21 世纪风速比 20 世纪末期风速小。

区域对流层中下层风速变化与近地层风速变化存在相似的变化规律, 即模式预估 21 世纪 700 hPa 冬季风速比 20 世纪末期小、夏季风速比 20 世纪末期风速大 (表 8)。这在一定程度上说明 21 世纪中国区域近地层风速变化是受到对流层中下层风速变化的影响。此外, 有些研究预估亚洲夏季风指数将可能明显增强, 而亚洲冬季风指数将可能明显减弱 (Hu et al., 2000a, 2000b; 布和朝鲁和林永辉, 2003; Bueh et al., 2003; 姜大膀和王会军, 2005; IPCC AR4, 2007), 且 Hu et al. (2000a, 2000b) 的研究还表明随着温室气体的增加, 预估亚洲夏 (冬) 季风指数增强 (减弱) 可能越明显。这从另一个角度佐证预估的 21 世纪中国冬半年风速将减弱, 夏季风速可能略增强。当然近地层风速变化与对流层中下层风速变化关系, 以及与东亚冬夏季风变化的关系较为复杂, 尚需作进一步的分析。

作为对未来气候变化进行定量预估的有效工具之一, 气候模式在近几十年里取得了突飞猛进的发展。但是, 气候的复杂特性和资料的有限决定了气候模拟中必然存在缺陷。此外, 物理过程参数化的不确定性, 对地球生物化学过程等反馈机制认识上的不确定性以及排放情景的不确定性都对气候模式预估产生不确定性。利用气候模式对未来气候变化进行定量预估的不确定性是客观存在的, 但其预估趋势和大范围的平均状况仍有较高的信度 (IPCC, 2007)。

需要说明的是, 对 21 世纪风速的预估只考虑了人类活动的影响, 并没有考虑风速未来的自然变化, 此外, 风速受局地的影响也是重要的因素, 这些问题有待未来作进一步的深入分析。

参考文献 (References)

Briegleb B P, Hunke E C, Bitz C M, et al. 2004. The sea-ice simu-

lation of the Community Climate System Model version two [R]. NCAR Tech. Note NCAR/TN-451STR, 34pp.

布和朝鲁, 林永辉. 2003. ECHAM4/ OPYC3 海气耦合模式对东亚季风年循环及其未来变化的模拟 [J]. 气候与环境研究, 8 (4): 402 - 416. Bueh Cholaw, Lin Yonghui. 2003. A simulation of the annual cycle and future change of the East Asian Monsoon with the ECHAM4/ OPYC3 CGCM model [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 8 (4): 402 - 416.

Bueh Cholaw. 2003. Simulation of the future change of East Asia monsoon climate using the IPCC SRES A2 and B2 scenarios [J]. Chinese Science Bulletin, 48 (10): 1024 - 1030.

Covey C, AchutaRao K M, Lambert S J, et al. 2000. Intercomparison of present and future climates simulated by coupled ocean-atmosphere GCMs [R]. PCMDL Report No 66, Program for Climate Model Diagnosis and Intercomparison, Lawrence Livermore National Laboratory, University of California, Livermore, CA.

Dickinson R E, Oleson K W, Bonan G, et al. 2006. The Community Land Model and its climate statistics as a component of the community climate system model [J]. J. Climate, 19: 2302 - 2324.

高学杰, 赵宗慈, 丁一汇, 等. 2003. 温室效应引起的中国区域气候变化的数值模拟 II: 中国区域气候的可能变化 [J]. 气象学报, 61 (1): 29 - 38. Gao Xuejie, Zhao Zongci, Ding Yihui, et al. 2003. Climate change due to greenhouse effects in China as simulated by a regional climate model. Part II: Climate change [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 61 (1): 29 - 38.

高学杰. 2007. 中国地区极端事件预估研究 [J]. 气候变化研究进展, 3 (3): 162 - 165. Gao Xuejie. 2007. Researches in projection of extreme events in China [J]. Advances in Climate Change Research (in Chinese), 3 (3): 162 - 165.

Guo Yufu, Yu Yongqiang, Liu Xiyang, et al. 2001. Simulation of climate change induced by CO₂ increasing for East Asia with IAP/ LASG GOALS model [J]. Adv. Atmos. Sci., 18 (1): 53 - 661.

Hu Z Z, Bengtsson L, Arpe K. 2000a. Impact of the global warming on the Asian winter monsoon in a coupled GCM [J]. J. Geophys. Res., 105: 4607 - 4624.

Hu Z Z, Latif M, Roeckner E, et al. 2000b. Intensified Asian summer monsoon and its variability in a coupled model forced by increasing greenhouse gas concentrations [J]. Geophys. Res. Lett.,

- 27: 2681–2684.
- IPCC. 2007. Climate Change 2007: The Physical Science Basis [M]. Solomon S, Qin D, Manning M, et al., Eds. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press, 748–845.
- 姜大膀, 王会军, 郎咸梅. 2004. 全球变暖背景下东亚气候变化的最新情景预测 [J]. 地球物理学报, 47 (4): 590–596. Jiang Dabang, Wang Huijun, Lang Xianmei. 2004. East Asian climate change trend under global warming background [J]. Chinese Journal of Geophysics (in Chinese), 47 (4): 590–596.
- Jiang D, Wang H J, Lang X. 2005. Evaluation of East Asian climatology as simulated by seven coupled models [J]. Advances in Atmospheric Sciences, 22: 479–495.
- 姜大膀, 王会军. 2005. 20 世纪后期东亚夏季风年代际减弱的自然属性 [J]. 科学通报, 50 (20): 2256–2262. Jiang Dabang, Wang Huijun. 2005. Natural interdecadal weakening of East Asian summer monsoon in the late 20th century [J]. Chinese Science Bulletin (in Chinese), 50 (20): 2256–2262.
- 江滢, 罗勇, 赵宗慈. 2009. 近 50 年中国风速变化多气候模式模拟检验 [J]. 气象学报, 67 (6): 1020–1029. Jiang Ying, Luo Yong, Zhao Zongci. 2009. Evaluation of wind speeds in China as simulated by global climate models [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 67 (6): 1020–1029.
- Jiang Ying, Luo Yong, Zhao Zongci, et al. 2010. Changes in wind speed over China during 1956–2004 [J]. Theoretical and Applied Climatology, 99 (3): 421–430.
- 江志红, 张霞, 王翼. 2008. IPCC-AR4 模式对中国 21 世纪气候变化的情景预估 [J]. 地理研究, 27 (4): 787–799. Jiang Z H, Zhang X, Wang Y. 2008. Projection of climate change in China in the 21st century by IPCC-AR4 models [J]. Geographical Research, 27 (4): 787–799.
- 江志红, 陈威霖, 宋洁, 等. 2009. 7 个 IPCC AR4 模式对中国地区极端降水指数模拟能力的评估及其未来情景预估 [J]. 大气科学, 33 (1): 109–120. Jiang Z H, Chen W L, Song J, et al. 2009. Projection and evaluation of the precipitation extremes indices over China based on seven IPCC AR4 coupled climate models [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 33 (1): 109–120.
- 靳国栋, 刘衍聪, 牛文杰. 2003. 距离加权反比插值法和克里金插值法的比较 [J]. 长春工业大学学报 (自然科学版), 24 (3): 53–57. Jin Guodong, Liu Yancong, Niu Wenjie. 2003. Comparison between inverse distance weighting method and Kriging [J]. Journal of Changchun University of Technology (in Chinese), 24 (3): 53–57.
- 林彩燕, 朱江, 王自发. 2009. 沙尘输送模式的不确定性分析 [J]. 大气科学, 33 (2): 232–240. Lin C Y, Zhu J, Wang Z F. 2009. Uncertainty analysis of a dust-transport model [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 33 (2): 232–240.
- Luo Yong, Zhao Zongci, Xu Ying, et al. 2005. Projections of climate change over China for the 21st century [J]. Acta Meteorologica Sinica, 19 (4): 401–4061.
- Nakicenovic N, Alcamo J, Davis G, et al. 2001. IPCC Special Report on Emission Scenarios [M]. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 425pp.
- Kiehl J T, Gent P R. 2004. The community climate system model, version 2 [J]. J. Climate, 17: 3666–3682.
- 任国玉, 郭军, 徐铭志, 等. 2005. 近 50 年中国地面气候变化基本特征 [J]. 气象学报, 63 (6): 942–956. Ren Guoyu, Guo Jun, Xu Mingzhi, et al. 2005. Climate changes of China's mainland over the past half century [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 63 (6): 942–956.
- 王遵娅, 丁一汇. 2006. 近 53 年中国寒潮的变化特征及其可能原因 [J]. 大气科学, 30 (6): 1068–1076. Wang Zunya, Ding Yihui. 2006. Climate change of the cold wave frequency of China in the last 53 years and possible reasons [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 30 (6): 1068–1076.
- 魏凤英. 1999. 现代气候统计诊断与预测技术 [M]. 气象出版社, 269pp. Wei Fengying. 1999. The Technologies of Statistics Diagnosis and Forecast in Modern Climate (in Chinese) [M]. Beijing: China Meteorological Press, 269pp.
- Wu Tongwen, Yu Rucong, Zhang Fang. 2008. A modified dynamic framework for the atmospheric spectral model and its application [J]. J. Atmos. Sci., 65 (7): 2235–2253.
- 辛晓歌, 周天军, 宇如聪. 2008. 气候系统模式对北极涛动的模拟 [J]. 地球物理学报, 51 (2): 337–351. Xin Xiaoge, Zhou Tianjun, Yu Rucong. 2008. The Arctic Oscillation in coupled climate models [J]. Chinese J. Geophys. (in Chinese), 51 (2): 337–351.
- 许崇海, 沈新勇, 徐影. 2007. IPCC AR4 模式对东亚地区气候模拟能力的分析 [J]. 气候变化研究进展, 3 (5): 287–291. Xu Chonghai, Shen Xinyong, Xu Ying. 2007. An analysis of climate change in East Asia by using the IPCC AR4 simulations [J]. Advances in Climate Change Research (in Chinese), 3 (5): 287–291.
- Xu Ming, Chang Chih-Pei, Fu Congbin, et al. 2006. Steady decline of East Asian monsoon winds, 1969–2000: Evidence from direct ground measurements of wind speed [J]. J. Geophys. Res., 111: 1–8, doi: 10.1029/2006JD007337.
- 徐影, 丁一汇, 赵宗慈. 2002. 近 30 年人类活动对东亚地区气候变化影响的检测与评估 [J]. 应用气象学报, 13 (5): 513–525.
- Xu Ying, Ding Yihui, Zhao Zongci. 2002. Detection and evaluation of effect of human activities on climatic change in East Asia in recent 30 years [J]. Journal of Applied Meteorological Science (in Chinese), 13 (5): 513–525.
- 张莉, 丁一汇, 孙颖. 2008. 全球海气耦合模式对东亚季风降水模拟的检验 [J]. 大气科学, 32 (2): 261–276. Zhang Li, Ding Yihui, Sun Ying. 2008. Evaluation of precipitation simulation in East Asian monsoon areas by coupled ocean-atmosphere general circulation models [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 32 (2): 261–276.

- 张雪芹, 彭莉莉, 林朝晖. 2008. 未来不同排放情景下气候变化预估研究进展 [J]. 地球科学进展, 23 (2): 174 - 185. Zhang Xueqin, Peng Lili, Lin Zhaohui. 2008. Progress on the projections of future climate change with various emission scenarios [J]. Advances in Earth Science (in Chinese), 23 (2): 174 - 185.
- 赵宗慈. 2006. 全球气候变化预估最新研究进展 [J]. 气候变化研究进展, 2 (2): 68 - 71. Zhao Zongci. 2006. Latest advances in global climate projections [J]. Advances in Climate Change Research (in Chinese), 2 (2): 68 - 71.
- 赵宗慈, 罗勇. 2007. 21 世纪中国东北地区气候变化预估 [J]. 气象与环境学报, 23 (3): 1 - 4. Zhao Zongci, Luo Yong. 2007. Projections of climate change over northeastern China for the 21st century [J]. Journal of Meteorology and Environment (in Chinese), 23 (3): 1 - 4.
- 赵宗慈, 罗勇, 江滢, 等. 2008. 未来 20 年中国气温变化预估 [J]. 气象与环境学报, 24 (5): 1 - 5. Zhao Zongci, Luo Yong, Jiang Ying, et al. 2008. Projections of surface air temperature change in China for the next two decades [J]. Journal of Meteorology and Environment (in Chinese), 24 (5): 1 - 5.
- 中华人民共和国国家发展和改革委员会. 2007. 可再生能源中长期发展规划 [R]. 32pp. National Development and Reform Commission. 2007. Middle and long term program of renewable energy development [R]. 32pp.
- 周天军, 李立娟, 李红梅, 等. 2008. 气候变化的归因和预估模拟研究 [J]. 大气科学, 32 (4): 906 - 922. Zhou Tianjun, Li Lijuan, Li Hongmei, et al. 2008. Progress in climate change attribution and projection studies [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 32 (4): 906 - 922.