

胡伯彦, 汤剑平, 王淑瑜. MM5V3 模式对 IPCC A1B 情景下中国地区极端事件的模拟和预估. 地球物理学报, 2013, 56(7): 2195-2206, doi:10.6038/cjg20130707.

Hu B Y, Tang J P, Wang S Y. Evaluation and projection of extreme events over China under IPCC A1B scenario by MM5V3 model. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2013, 56(7):2195-2206, doi:10.6038/cjg20130707.

MM5V3 模式对 IPCC A1B 情景下中国地区 极端事件的模拟和预估

胡伯彦^{1,3}, 汤剑平^{1,2*}, 王淑瑜^{1,2}

1 南京大学大气科学学院, 南京 210093

2 南京大学气候与全球变化研究院, 南京 210093

3 民航华东空管局气象中心, 上海 200335

摘 要 利用 MM5V3 区域气候模式单向嵌套 ECHAM5 全球环流模式, 对中国地区 1978—2000 年及 IPCC A1B 情景下 2038—2070 年气候分别进行了水平分辨率为 50 km 的模拟试验. 文章首先检验了模式模拟的当代极端气候结果, 在此基础上对 6 个极端温度指数和 6 个极端降水指数的未来变化进行了预估. 检验结果表明: MM5V3 模式对中国地区当代日最高、最低温度及强降水(大雨和暴雨)日数的空间分布和概率特征均具有一定的模拟能力, 但模拟的日最高温度在大部分地区偏低, 日最低温度在南方地区偏低、西北地区偏高. 概率统计结果显示日最高温度向低值频段偏移, 日最低温度在 0 °C 的峰值附近明显偏高. 模式对大雨和暴雨年平均日数的模拟在东部地区偏多, 概率统计结果则为一致偏大. 未来中国地区极端气候预估结果表明: 极端高温、极端低温和相对高温在全国范围内都将升高, 且线性趋势均为上升; 霜日日数则为减少, 并具有下降趋势; 暖日日数和相对低温在青藏高原和新疆部分地区有所减少, 其它地区均为增加, 且线性趋势暖日日数为上升, 相对低温不明显. 极端降水指数的变化具有区域特征, 其中单日最大降水、连续五日最大降水、最长无雨期、强降水日数、简单降水强度和极端降水总量均在江淮、华南及西南地区有所增多, 而在东北及内蒙古地区有所减少, 未来中国南方地区降水的极端化趋势将更加显著. 极端降水指数的线性趋势除最长无雨期外其它均为上升.

关键词 区域气候模式, 极端温度, 极端降水, 气候变化

doi:10.6038/cjg20130707

中图分类号 P467

收稿日期 2012-05-03, 2013-05-30 收修定稿

Evaluation and projection of extreme events over China under IPCC A1B scenario by MM5V3 model

HU Bo-Yan^{1,3}, TANG Jian-Ping^{1,2*}, WANG Shu-Yu^{1,2}

1 School of Atmospheric Sciences, Nanjing University, Nanjing 210093, China

2 Institute for Climate and Global Change Research, Nanjing University, Nanjing 210093, China

3 Meteorological Center of East China Regional Air Traffic Management Bureau of Civil Aviation, Shanghai 200335, China

Abstract Based on the regional climate model MM5V3 nesting in one-way mode within the general circulation model ECHAM5, two sets of the 50 km grid spacing simulation for present climate (1978—2000) and future climate (2038—2070) over China are conducted. Results for present extreme climate show that MM5V3 model can simulate reasonably well the spatial and

基金项目 国家重点基础研究发展计划(973)项目(2011CB95204)资助.

作者简介 胡伯彦, 男, 硕士研究生, 主要从事区域气候变化和模拟的研究. E-mail: huboyan1986@sina.com

* 通讯作者 汤剑平, 男, 副教授, E-mail: jptang@nju.edu.cn

probability distributions of daily maximum / minimum temperature and annual mean heavy and torrential rainy days when compared with observations. But the simulated maximum temperatures biased to cold over most part of China and the minimum temperatures biased to warm in northwestern China and to cold in southern China. Simulated probability distributions move to the lower frequency range for maximum case and significantly higher around the peak of 0 °C for minimum case. The heavy and torrential rainy days are overestimated obviously over eastern China and the probability distributions are both larger than observations. Under IPCC A1B Scenario, the results for climate change show that there would be increasing amplitudes in maximum 1d temperature, minimum 1d temperature, average temperature above 95th percentile of daily maximum temperature climosequence, but decreasing amplitudes in total number of frost days. The total number of hot days and average temperature under 5th percentile of daily minimum temperature climosequence would also increase over most part of China except the Tibetan Plateau and Xinjiang areas. Linear trends of extreme temperature indices would overall increase except the frost-days and average temperature under 5th percentile of daily minimum temperature climosequence. The changes for extreme precipitation indices indicate the regional characteristics. There would be the increasing amplitudes over Yangtze-Huaihe River Basin, southeast China, southwest China as well as decreasing amplitudes over Northeast China, Inner Mongolia areas for all analysis indices (maximum 1d precipitation, maximum 5d precipitation total, maximum number of consecutive dry days, No. of days with precipitation ≥ 25 mm/day, simple daily intensity index and total precipitation above 95th percentile of daily precipitation climosequence). The precipitation over southern China would become more "extreme" in future. Meanwhile, the linear trends for extreme precipitation indices would also increase except the maximum number of consecutive dry days.

Keywords Regional climate model, Extreme temperature, Extreme precipitation, Climate change

1 引言

自 20 世纪末期开始,人为排放温室气体增加所引发的气候变化已给全球社会、经济与环境带来了巨大影响. 政府间气候变化专门委员会 (Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC) 在第四次评估报告 (The Fourth Assessment Report, AR4)^[1] 中指出: 1906—2005 年全球平均器测地面温度上升了 0.74 ± 0.18 °C, 到 21 世纪末期由温室效应引发的全球平均升温将达 $1.1 \sim 6.4$ °C. 相对于平均气候, 极端气候变化带来的影响更为显著. 报告进一步指出: 20 世纪后期以来热带及亚热带地区的干旱强度及持续时间均有所增大, 强降水事件发生的频率也有所上升. 在温室效应影响下, 21 世纪的极端高温和强降水事件发生频率有可能不断增大.

对未来极端气候进行预估需要用到数值模拟技术. 全球环流模式 (General Circulation Model, GCM) 虽然可以有效描述大尺度环流的变化特征,

但其水平分辨率较低 (200~400 km), 对由区域性强迫引起的中尺度过程和相互作用的模拟能力有限, 在区域气候模拟中存在较大偏差^[2]. 与之相对, 区域气候模式 (Regional Climate Model, RCM)^[3-4] 具有较高的时空分辨, 能够描述各种复杂类型的下垫面特征及物理过程, 利用其对全球模式结果进行降尺度分析被认为是获得高分辨率区域气候变化信息的有效手段.

为了能够对极端气候变化进行定量分析, Frich 等^[5] 引入 10 个极端气候指数作为衡量标准, 它们分别是: 霜日、年际极端温度差、生长季长度、热浪指数、大于日最低温度第 95 百分位的次数、日降水量 ≥ 10 mm 的天数、最长无雨期、连续五日最大降水、简单降水强度以及大于第 95 百分位降水占年总降水的百分比. 这些指数具有极端性低、显著性强等特点, 目前已被世界各国科学家广泛应用于极端气候的预估工作中. Frei 等^[6] 利用多个区域模式分别嵌套 HadAM3H 全球环流模式, 对欧洲地区 1961—1990 年及 IPCC A2 情景下 2071—2100 年气候分别

进行了水平分辨率为 50 km 的模拟,并分析了未来极端降水事件的可能变化;Marengo 等^[7]利用区域气候模式系统 PRECIS 嵌套全球环流模式 HadAM3P,在相同时段和分辨率条件下对南美地区气候进行了模拟,并对 6 个极端气候指数进行了预估;Im 等^[8]使用 RegCM3 区域模式嵌套 ECHAM5/MPI-OM 全球环流模式,对朝鲜半岛及周边地区进行了 IPCC A1B 情景下 1971—2100 年的高分辨率(20 km)气候变化模拟试验,分析了该地区 10 个极端气候指数的未来变化结果.类似的工作还有很多^[9-14].

国内学者在相关领域也取得了一些成果. Gao 等^[15]利用 RegCM2 区域模式对中国地区极端气候进行预估,结果表明:未来日最高、最低温度均将显著升高,导致夏季热浪增加、冬季低温日数减少;降水日数则在北方地区显著增多,南方地区大雨日数增多明显. 许吟隆等^[16]利用区域气候模式系统 PRECIS 进行的模拟表明: B2 情景下极端高温事件由当代(1961—1990)的 3% 增加到未来(2071—2100)的 4.5%,极端低温事件则由当代的 8.5% 减少到未来的 6.5%,极端降水事件的发生频率明显上升. Zhang 等^[17]利用 PRECIS 模式对未来极端气候进行进一步预估并指出:中国地区夏日日数和生长季长度都将有所增加,其中青藏高原和北部地区增幅最大,大雨日数、连续五日最大降水和简单降水强度等指数也有不同程度增大,霜日日数则将减少,

并以青藏高原、东北及西北地区减幅最明显. 高学杰^[18]曾针对已有工作进行了简要回顾,但总体来说国内对极端气候变化的预估工作仍较少.

本文使用 MM5V3 区域气候模式单向嵌套 ECHAM5 全球环流模式的输出结果,对中国地区当代及未来气候进行模拟,并已针对气候平均态结果进行了初步分析^[19],结果表明:地面温度在中国大部分地区模拟偏低,降水量模拟偏多,降水位置模拟偏北;各季节地面温度在未来均将有所升高,升温幅度北方大于南方、冬季大于夏季;降水则在秋季和冬季有所增加,春季和夏季呈现“北方减少、南方增多”的分布. 本文将首先检验模式对中国地区当代极端气候的模拟能力,在此基础上对 IPCC A1B 情景下 21 世纪中期 6 个极端温度指数和 6 个极端降水指数的变化进行预估,最后给出总结和讨论.

2 模式和资料简介

本文选用的区域模式为美国宾州大学(Pennsylvania State University, PSU)和美国国家大气研究中心(National Center for Atmospheric Research, NCAR)共同研发的第五代中尺度模式的第三版 MM5V3 (Fifth-generation Penn. State/NCAR Mesoscale Model Version 3)^[20-21]. 模式模拟中心为 35°N、105°E,经纬向格点数分别为 92 和 111,水平分辨率为 50 km,模拟区域包括了整个中

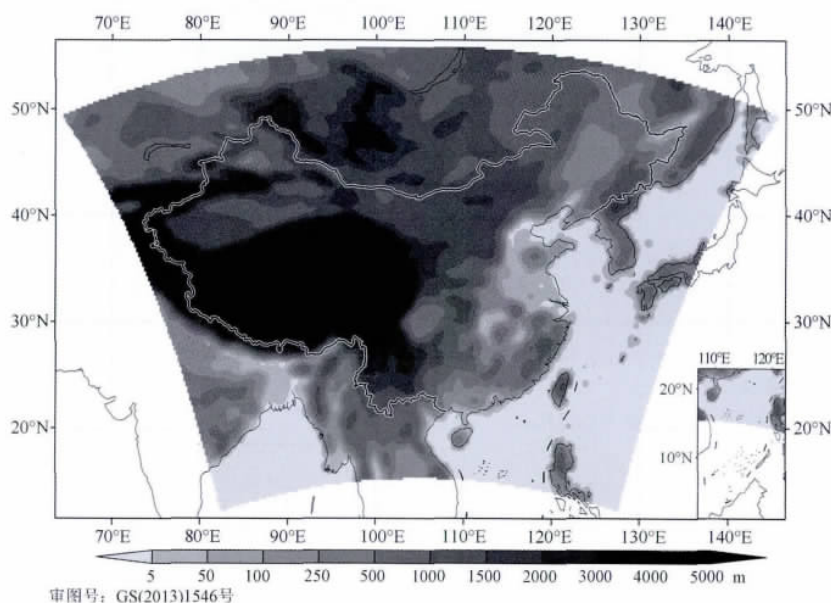


图 1 模式的模拟区域及地形高度

Fig. 1 Simulation domain (shaded area) and topographic height

国地区(图 1). 模式垂直方向分为 23 层,顶层气压为 100 hPa. 试验过程中采用的主要物理参数化方案包括 Kain-Fritsch 积云对流方案^[22]、CCM2 辐射方案^[23]及 NOAH 陆面过程方案^[24]. 模式积分采用松弛边界条件,以 15 个格点做为侧边界缓冲区.

用于驱动区域模式的初始场和边界场资料来自 IPCC 数据分发中心提供的 ECHAM5 全球环流模式结果^[25]. 模拟试验分为两个部分:实际温室气体浓度下的当代控制试验(20C)和 IPCC A1B 温室气体排放情景^[26]下的未来气候变化试验(A1B). 控制实验的积分时段为 1978-01-01 至 2000-12-31,气候变化试验的积分时段为 2038-01-01 至 2070-12-31. 在后文中分别将两组试验的前 3 年结果作为模式积分的初始化时间,本文仅选取 1981—2000 年和 2041—2060 年两个 20 年的模拟结果进行分析.

表 1 极端温度指数和极端降水指数的定义

Table 1 Definition of indices based on temperature extremes and precipitation extremes

指数名称	缩写	指数定义	单位
极端温度			
极端高温	TX1D	日最高温度的年最大值	℃
极端低温	TN1D	日最低温度的年最小值	℃
暖日日数	HD	一年中日最高温度>25℃的天数	d
霜日日数	FD	一年中日最低温度<0℃的天数	d
相对高温	TX95t	日最高温度按升序排列大于 1981—2000 年逐年温度序列第 95 百分位均值的年平均温度	℃
相对低温	TN5t	日最低温度按升序排列小于 1981—2000 年逐年温度序列第 5 百分位均值的年平均温度	℃
极端降水			
单日最大降水	RX1D	单日降水量的年最大值	mm
连续五日最大降水	RX5D	连续五日降水量之和的年最大值	mm
最长无雨期	MDRY	一年中无雨日(日降水量<1.0 mm)的最长持续天数	d
强降水日数	R25	一年中日降水量≥25.0 mm 的天数	d
简单降水强度	SDII	有雨日(日降水量≥1.0 mm)年降水总量/有雨日数	mm/d
极端降水总量	R95t	一年中有雨日降水量按升序排列大于 1981—2000 年降水序列第 95 百分位的降水总量	mm

为了能够对中国地区未来极端温度和降水事件的变化做出较为全面的预估,本文在综合参考前人工作的基础上选取了 12 个能够展现极端气候不同层面变化特征的指数. 6 个极端温度指数分别为:极端高温(TX1D)、极端低温(TN1D)、暖日日数(HD)、

霜日日数(FD)、相对高温(TX95t)、相对低温(TN5t); 6 个极端降水指数分别为:单日最大降水(RX1D)、连续五日最大降水(RX5D)、最长无雨期(MDRY)、强降水日数(R25)、简单降水强度(SDII)、极端降水总量(R95t). 所有指数的定义在表 1 中给出.

用于检验当代极端气候模拟能力的实测资料:逐日最高、最低温度采用了 Xu 等^[27]制作的中国地区同期格点资料,水平分辨率为 $0.5^{\circ}\times 0.5^{\circ}$;逐日降水采用了日本综合地球环境学研究所(Research Institute for Humanity and Nature, RIHN)和日本气象厅气象研究所(Meteorological Research Institute/Japan Meteorological Agency, MRI/JMA)制作的东亚地区同期格点资料^[28],水平分辨率为 $0.25^{\circ}\times 0.25^{\circ}$.

3 中国地区当代极端气候的模拟和检验

3.1 极端温度

图 2 给出了中国地区 1981—2000 年日最高、最低温度的观测和模拟结果. 从观测结果可以看出(图 2a、2c),日最高、最低温度在中国东部地区均具有明显的纬向分布形式,其中江淮和华南地区温度较高,东北地区温度较低;西部地区温度受地形影响分布较为复杂,塔里木盆地、柴达木盆地及四川盆地区域温度较高,青藏高原及祁连山地区温度较低. MM5V3 模式基本能够模拟出日最高、最低温度的上述空间分布特征,但也存在一定的模拟偏差. 日最高温度(图 2b)在中国大部分地区模拟偏低 2℃以上,偏差较大的区域主要集中在东北、华北、长江中下游及青藏高原地区,在四川盆地及新疆局部地区则存在一定的温度模拟暖偏差. 日最低温度(图 2d)在中国中部及南部也存在模拟偏低的情况,但偏差幅度整体小于日最高温度,且在东北局部及西北大部分地区模拟结果偏高明显. 日最高、最低温度的偏差可能由模式的系统性误差引起^[29].

图 3 给出了中国地区 1981—2000 年日最高、最低温度的概率统计结果,总体来看 MM5V3 模式能够较好地再现两种温度的概率分布特征. 如图 3a 所示,观测和模拟的日最高温度概率均呈“双峰”型分布,模拟结果较观测向低值频段有所偏移,特别在 $-15\sim 0^{\circ}\text{C}$ 区间及峰值附近偏移明显;模拟结果与实际观测之间的相关系数为 0.96. 日最低温度概率的观测和模拟结果(图 3b)则均显示为“单峰”型,且

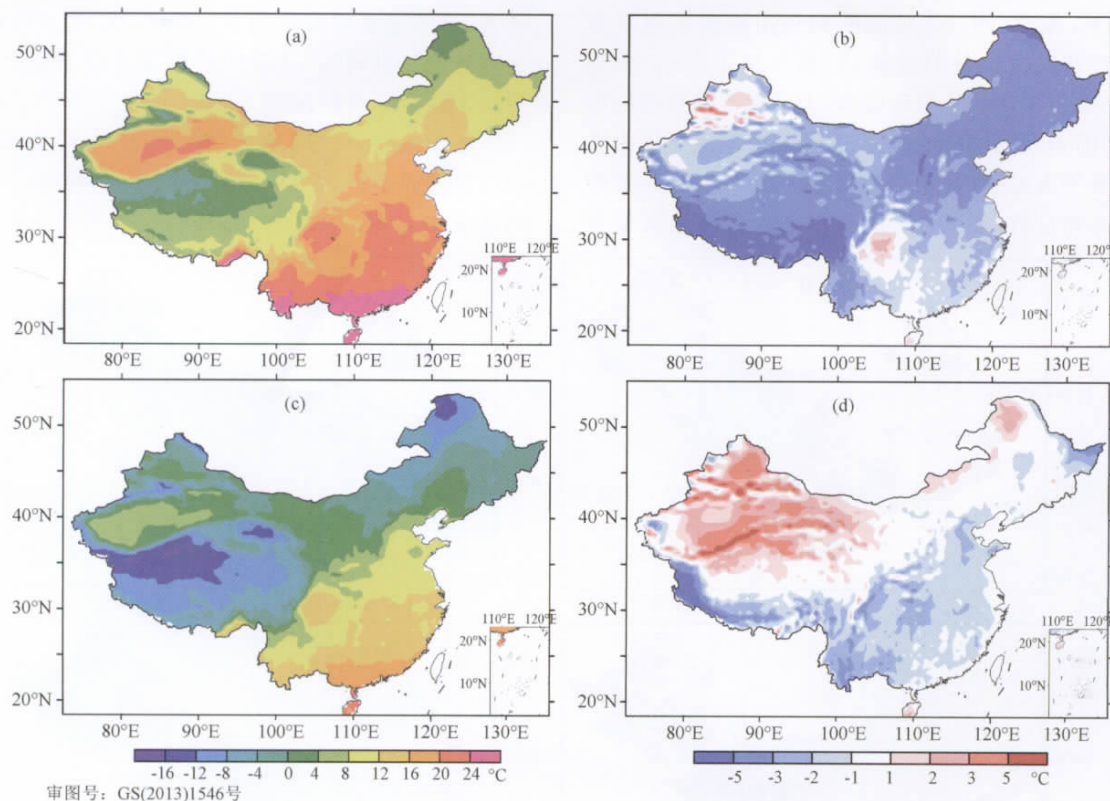


图 2 1981—2000 年平均的日最高、最低温度空间分布

观测: (a) 日最高温度 (T_{\max}), (c) 日最低温度 (T_{\min}); 模拟偏差: (b) 日最高温度, (d) 日最低温度。

Fig. 2 Spatial distribution for annual mean daily maximum/minimum temperature during 1981—2000

Observation: (a) Daily maximum temperature (T_{\max}); (c) Daily minimum temperature (T_{\min}); Simulation bias: (b) T_{\max} ; (d) T_{\min} .

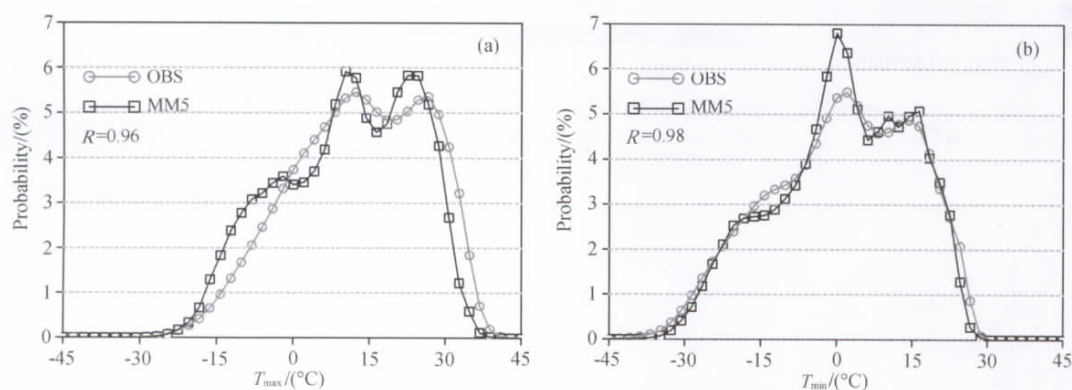


图 3 1981—2000 年日最高、最低温度的概率统计结果

(a) 日最高温度; (b) 日最低温度。

Fig. 3 Probability distribution for daily maximum/minimum temperature during 1981—2000

(a) T_{\max} ; (b) T_{\min} .

两者的分布形态总体较为一致,模拟结果与实际观测之间的相关系数达到 0.98,只有在 0°C 的峰值附近模拟概率明显高于观测概率。

3.2 极端降水

本文参照国家气象局颁布的降水等级划分标准对降水进行分类,将日降水总量在 $25.0\sim49.9\text{ mm}$

范围内的定义为大雨, $50.0\sim99.9\text{ mm}$ 范围内的定义为暴雨。图 4 给出了中国地区 1981—2000 年大雨和暴雨强度降水年平均日数的空间分布结果。根据观测(图 4a),大雨强度降水主要集中在“黑河—腾冲”线以东,其中江淮和华南大部分地区年平均日数在 9 d 以上,东北和华北地区则在 1~5 d 之间。

MM5V3 模式(图 4b)对江淮和华南地区大雨日数空间分布的模拟效果较好,但模拟结果在东北、华北、华中及西北部分地区偏多、四川东部及重庆地区偏少. 图 4c 显示中国地区暴雨强度降水主要集中在江淮及华南地区,其年平均日数一般不超过 7 d. 模式对暴雨日数(图 4c)的模拟在东南沿海地区偏多

显著,总体偏差幅度达到 2~6 d,在东北、中部及云南部分地区也偏多,只有四川东部地区暴雨日数模拟结果较实际观测偏少.

图 5 给出了中国地区 1981—2000 年大雨和暴雨日数的概率统计结果,其中将日降水量 ≥ 1.0 mm 的定义为有雨. 如图所示,1981—2000 年大雨日数

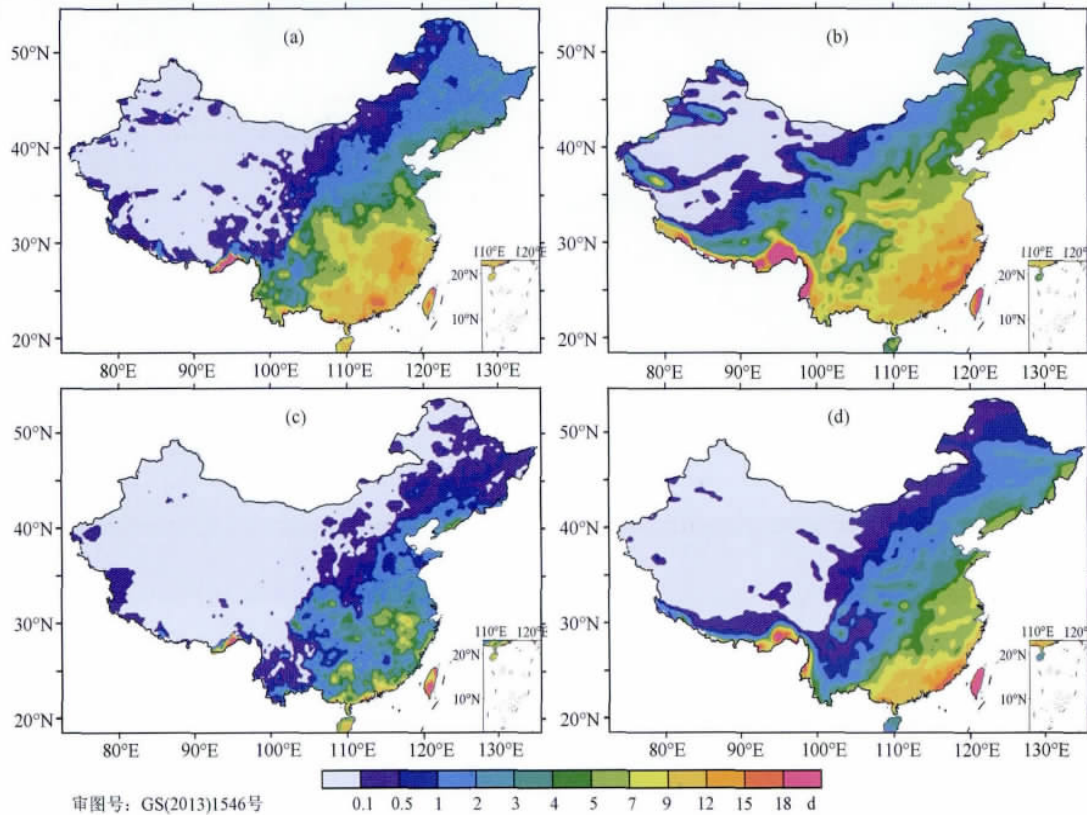


图 4 1981—2000 年大雨和暴雨强度降水年平均日数空间分布

观测:(a)大雨;(c)暴雨;模拟:(b)大雨;(d)暴雨.

Fig. 4 Spatial distribution for annual mean heavy and torrential rainy days during 1981—2000

Observation:(a) Heavy rain; (c) Torrential rain; Simulation:(b) Heavy rain; (d) Torrential rain.

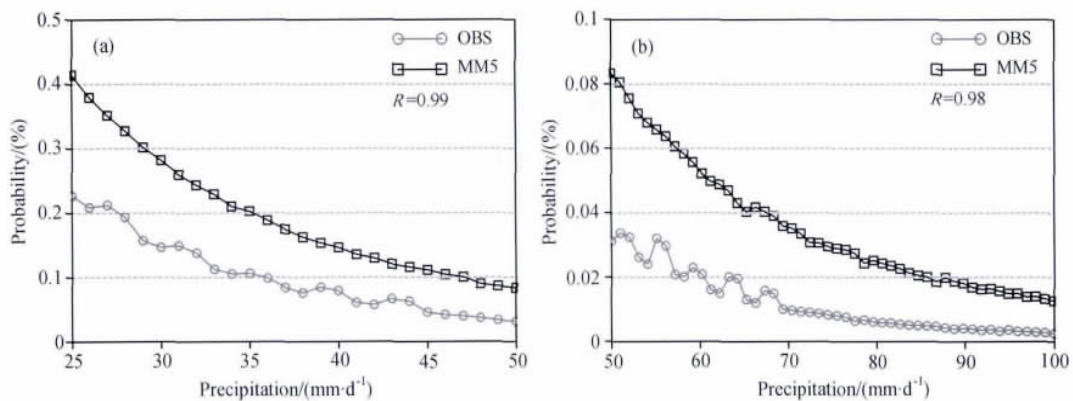


图 5 1981—2000 年大雨和暴雨日数的概率统计结果

(a)大雨;(b)暴雨.

Fig. 5 Probability distribution for heavy and torrential rainy days during 1981—2000

(a) Heavy rain; (b) Torrential rain.

占总降雨日数的 0~0.2% (图 5a), 暴雨日数则占 0~0.04% (图 5b), 且日数概率在各自降水区间内均随着降水强度的增加而下降. MM5V3 模式对两种强度降水日数的概率分布均具有一定的模拟能力, 模拟结果与实际观测之间的相关系数分别达到 0.99 和 0.98, 但存在的问题是模拟结果均较实际观测偏大, 其中大雨日数概率偏大 0.05%~0.2%, 暴雨日数概率偏大 0.01%~0.04%.

本文仅给出了 MM5V3 区域模式模拟的中国地区极端气候结果, 模拟过程中存在的不确定性在其它区域模式结果中同样有所体现^[30]. 总体来看 MM5V3 模式对中国地区的极端温度和极端降水能够进行较好的模拟, 利用其对未来极端气候进行预估是可行的.

4 中国地区未来极端气候的模拟和预估

4.1 极端温度

图 6 给出了中国地区 IPCC A1B 情景下未来极端温度指数变化的空间分布, 表 2 则给出了当代及未来极端温度指数的均值和趋势结果. 由图 6a 可见, 未来年平均极端高温 (TX1D) 在中国地区均将升高, 且升温幅度具有从南向北递增的纬向分布特征. 全国平均极端高温升高了 2.4 °C (表 2), 其中华北、内蒙古及西北地区升温幅度较大. 当代及未来极端高温均具有上升趋势, 趋势系数分别为 0.4 °C/decade 和 1.0 °C/decade, 未来升温速率将明显增大.

与极端高温类似, 未来年平均极端低温 (TN1D) 在中国地区也将一致升高 (图 6b), 平均升温达到 2.7 °C (表 2), 总体升温幅度大于极端高温. 极端低温的变化在东北地区北部及东部、黄土高原、长江中下游平原及青藏高原西部地区均较为明显, 这些地区温度升高基本都在 2.8 °C 以上, 其中黄土高原地区甚至超过 3.7 °C. 当代及未来极端低温也

均具有上升趋势, 升温速率二者大致相同, 分别为 0.5 °C/decade 和 0.6 °C/decade.

图 6c 显示未来年平均暖日日数 (HD) 在青藏高原以外的中国地区均将增加, 其中东部、中部及西南大部分地区增幅都超过了 30 d. 全国平均暖日日数增加了 19.1 d, 变化幅度达到 32.9%. 趋势分析结果显示未来暖日日数将逐年增加, 其变化速率达到 6.2 d/decade, 与当代的 1.3 d/decade 相比升高明显.

图 6d 显示未来年平均霜日日数 (FD) 在中国地区一致减少, 其中在江淮局部及青藏高原大部分地区日数减少都将超过 20 d, 变化幅度较大, 东北及华南沿海地区的减幅相对不明显. 未来全国平均霜日日数将减少 20.2 d, 与当代相比减幅为 -12.3%. 此外, 当代与未来霜日日数均具有下降趋势, 趋势系数未来为 -8.9 d/decade, 当代为 -4.2 d/decade, 未来日数减少速率更大.

与极端高温相比, 中国地区未来年平均相对高温 (TX95t) 的总体变化幅度不大 (图 6e), 全国平均升温仅 0.6 °C (表 2). 具体来看, 只有环渤海、内蒙古中部、江苏和安徽局部以及新疆局部地区升温幅度在 1 °C 以上, 而在东北地区北部、四川西部以及广西地区升温则不足 0.4 °C. 当代与未来的相对高温也均呈现出上升趋势, 温度升高速率未来达到 0.3 °C/decade, 略大于当代的 0.1 °C/decade.

图 6f 显示未来年平均相对低温 (TN5t) 在新疆及云南局部地区将有所降低, 但降温幅度不大, 在中国其它地区则依旧为升高, 其中两个温度增幅较大的地区分别为四川、贵州、湖南交界地带以及黑龙江西部地区. 全国平均相对低温升高了 0.6 °C, 线性趋势则当代及未来均不明显.

回顾以往, 王冀等^[31]利用 IPCC 数据分发中心提供的 7 个全球模式结果对中国地区 A2、A1B、B2 情景下的 5 个极端温度指数进行了集合预估, 结果表明: 霜冻日数和温度年较差具有下降趋势; 生长季

表 2 当代及未来极端温度指数的均值和线性趋势

Table 2 Mean value and linear trend of extreme temperature indices in present and future

		TX1D/(°C)	TN1D/(°C)	HD/d	FD/d	TX95t/(°C)	TN5t/(°C)
均值	20C	28.8	-23.1	57.9	163.5	26.1	-9.9
	A1B	31.2	-20.4	77.0	143.3	26.7	-9.3
	A1B-20C	2.4	2.7	19.1(32.9%)	-20.2(-12.3%)	0.6	0.6
趋势/(decade)	20C	0.4	0.5	1.3	-4.2	0.1	0.1
	A1B	1.0	0.6	6.2	-8.9	0.3	0.1

注: 趋势结果中粗斜体表示趋势系数通过了置信度为 95% 的显著性检验.

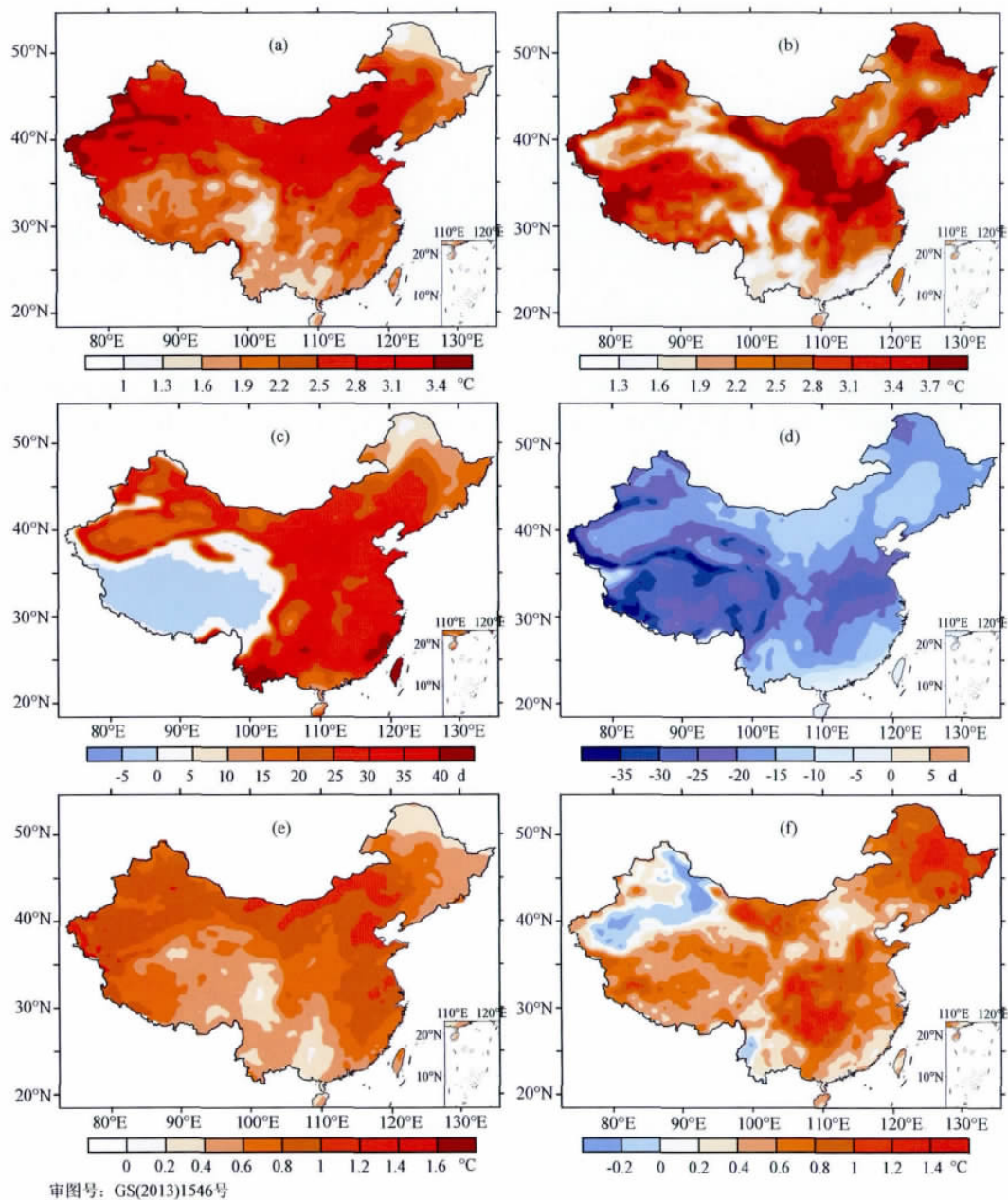


图6 研究区极端温度指数变化的空间分布结果

(a) 极端高温; (b) 极端低温; (c) 暖日日数; (d) 霜日日数; (e) 相对高温; (f) 相对低温。

Fig. 6 Spatial distribution for the change of extreme temperature indices

(a) TX1D; (b) TN1D; (c) HD; (d) FD; (e) TX95t; (f) TN5t.

长度、暖夜指数和热浪指数则为明显的上升趋势; 各指数在空间尺度上基本保持一致的增加或减少变化趋势, 只有温度年较差除外。这些结论与本文对 6 个极端温度指数进行预估得到的结果基本一致。

4.2 极端降水

图 7 和表 3 分别给出了中国地区极端降水指数的未来变化空间分布结果以及当代和未来的指数均值与趋势结果。如图 7a 所示, 未来年平均单日最大

降水(RX1D)在中国大部分地区都将有所增加, 其中在华中、江淮、华南以及西南地区增幅超过 10%, 局部地区超过 30%, 在东北南部、内蒙古西部以及西北局部地区则有所减少; 全国平均单日最大降水增加了 8.7 mm, 增幅为 13.4%。趋势结果显示当代及未来单日最大降水均为上升, 降水增多速率未来达到 5.1 mm/decade, 大于当代的 2.6 mm/decade。

未来年平均连续五日最大降水(RX5D)的变化

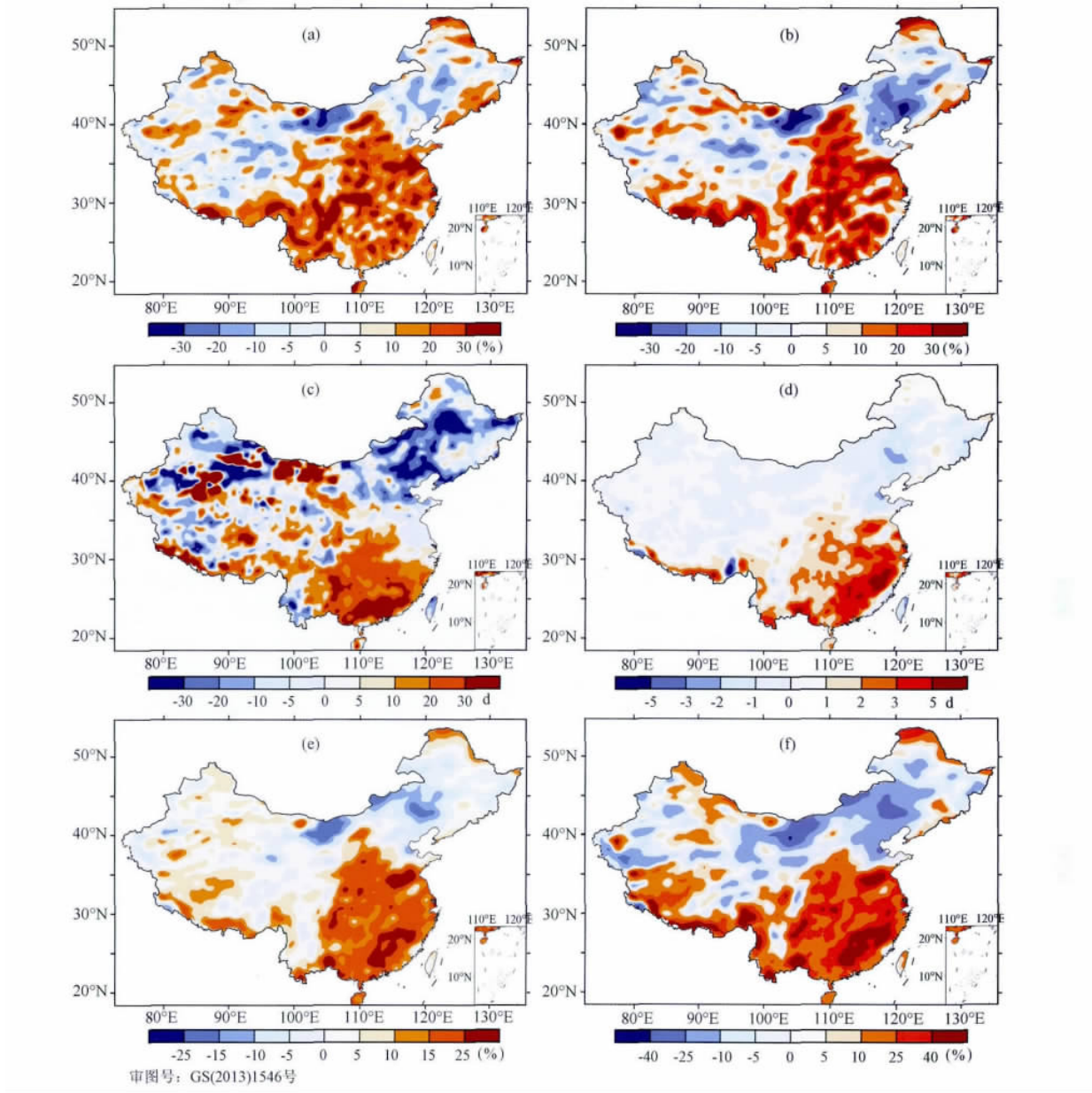


图 7 极端降水指数变化的空间分布结果

(a)单日最大降水;(b)连续五日最大降水;(c)最长无雨期;(d)强降水日数;(e)简单降水强度;(f)极端降水总量.

Fig. 7 Spatial distribution for the change of extreme precipitation indices
(a) RX1D;(b) RX5D;(c) MDRY;(d) R25;(e) SDII;(f) R95t.

表 3 当代及未来极端降水指数的均值和线性趋势

Table 3 Mean value and linear trend of extreme precipitation indices in present and future

		RX1D/mm	RX5D/mm	MDRY/d	R25/d	SDII/(mm/d)	R95t/mm
均值	20C	65.1	118.8	15.5	6.9	8.5	395.5
	A1B	73.8	131.4	16.7	7.5	9.3	452.2
	A1B-20C	8.7(13.4%)	12.6(10.7%)	1.2(7.6%)	0.6(8.5%)	0.8(8.9%)	56.7(14.3%)
趋势(/decade)	20C	2.6	5.9	0.1	0.7	0.3	37.7
	A1B	5.1	9.5	-2.8	0.8	0.5	46.9

注:趋势结果中粗斜体表示趋势系数通过了置信度为 95%的显著性检验.

(图 7b)与单日最大降水基本一致,均在华中、江淮、华南以及西南地区有所增加,增幅为 10%~30%,在东北大部、内蒙古以及西北局部地区为减少,特别在环渤海北部及内蒙古西部地区减幅超过 30%。全国平均连续五日最大降水未来比当代增加了 12.6 mm,增加幅度为 10.7%,且线性趋势均为上升,趋势系数未来(9.5 mm/decade)大于当代(5.9 mm/decade)。

中国地区年平均最长无雨期(MDRY)的变化如图 7c 所示,与当代相比,未来华南地区最长无雨期将显著增长,广东、广西和贵州部分地区增幅超过 30 d;而在东北及华北大部分地区最长无雨期将缩短,其中环渤海北部及内蒙古与黑龙江交界地区减幅达 30 d 以上;西部地区的变化总体较为复杂。未来全国平均最长无雨期将增长 1.2 d,增幅为 7.6%,线性趋势当代不明显(0.1 d/decade),未来则为下降趋势(-2.8 d/decade)。

未来年平均强降水日数(R25)的变化在中国地区不明显(图 7d),只有江淮及华南地区稍有增多,全国平均结果增加了 0.6 d,增幅仅为 8.5%。强降水日数的线性趋势在当代和未来均为上升,且增加速率基本一致,当代为 0.7 d/decade,未来为 0.8 d/decade。

图 7e 显示未来中国大部分地区年平均简单降水强度(SDI)都将增强,平均增幅为 8.9%。与强降水日数变化结果类似,简单降水强度也在中国东南地区变化较为明显,其中在山东、江西、广东地区均增加了 25%以上,而在东北大部及内蒙古西部地区有所减弱。当代与未来简单降水强度的线性趋势均为上升,变化速率未来(0.5 mm/d/decade)稍高于当代(0.3 mm/d/decade)。

年平均极端降水总量(R95t)的变化在中国地区具有“北减南增”的空间分布(图 7f),降水增加区域主要集中在东南地区,两个降水增加中心分别位于山东、安徽交界地带以及江西、福建、广东一带;降水减少区域则为东北、华北及西北局部地区。总体来看未来极端降水总量依旧以增加为主,全国平均增幅达到 14.3%。趋势分析结果显示当代与未来极端降水总量均具有上升趋势,降水增加速率未来(46.9 mm/decade)高于当代(37.7 mm/decade)。

综合分析极端降水指数的变化可见,未来中国南方地区干旱有可能加重,北方地区降水日数则有所增加;与之相对,南方地区降水趋向于极端化,北方地区极端降水有所减弱。上述结论与江志红等^[32]根据全球模式对极端降水进行预估得到的结果相

一致。

5 结论与讨论

本文利用 ECHAM5 全球环流模式结果驱动 MM5V3 区域气候模式,分别对中国地区当代(1978—2000 年)及未来(2038—2070 年)气候进行了长期模拟试验,并选取 1981—2000 年及 2041—2060 年结果进行分析。首先检验区域模式对当代极端温度和极端降水的模拟能力,在此基础上对 IPCC A1B 情景下 21 世纪中期 6 个极端温度指数和 6 个极端降水指数的变化进行预估。得到以下结论:

(1) MM5V3 模式对中国地区当代日最高、最低温度的空间分布及概率特征均具有一定的模拟能力,但日最高温度模拟结果在中国大部分地区偏低,冷偏差幅度在东北、华北、长江中下游以及西北地区较明显;日最低温度则在南方地区模拟偏低,北方地区模拟偏高。与实际观测相比,模式模拟的日最高温度概率分布向低值频段偏移,日最低温度概率分布在 0 °C 的峰值附近偏高。

(2) MM5V3 模式同样能够对中国地区强降水(大雨和暴雨)年平均日数的空间分布进行有效模拟,存在的问题是降水日数模拟结果在东部地区明显偏多,四川局部地区偏少,模拟的降水日数概率统计结果与实际观测相比均偏高。

(3) 中国地区 21 世纪中期极端高温、极端低温和相对高温在全国范围内都将升高,且升温幅度北方大于南方;霜日日数一致减少,其中江淮及青藏高原地区减幅相对较大;暖日日数除在青藏高原地区减少外,在其它地区均增多;相对低温则在新疆及云南局部地区有所降低,其它地区均为升高。当代与未来各极端温度指数的线性趋势也较为一致,其中极端高温、极端低温、暖日日数、相对高温均具有上升趋势,霜日日数则为下降趋势,只有相对低温线性趋势不明显。

(4) 中国地区 21 世纪中期极端降水指数的变化具有一定区域特征,单日最大降水、连续五日最大降水、最长无雨期、强降水日数、简单降水强度以及极端降水总量在江淮、华南及西南地区均显著增加,而在东北及内蒙古地区减少。未来中国南方地区降水整体趋向于极端化;北方地区降水日数有所增加,但降水的极端化趋势减弱。除最长无雨期外,其它极端降水指数的当代及未来线性趋势均为上升。

以上结论对于我们更好地了解 MM5V3 区域

气候模式模拟性能及中国地区未来极端气候变化都具有一定意义,但应注意到极端事件大部分由中小尺度系统所引起,对其进行模拟需要模式具有较高的水平分辨率.本文受计算资源限制,利用区域模式进行的模拟水平分辨率仅为 50 km,一些更为细致的极端气候变化特征无法被考察.高分辨率条件下的气候变化模拟研究可参考石英等^[33]、高学杰等^[34]和吴佳等^[35]的工作.此外,本文对未来极端气候变化的预估也仅局限在 IPCC A1B 温室气体排放情景下,模拟结果中并未包括土地利用变化、气溶胶辐射效应以及其它温室气体排放情景的影响,这些不足都需要在以后的工作中予以改进.最后,对未来极端气候进行预估不同模式可能给出不同结果,进行多模式集合可以使模拟结果中的不确定性得到有效控制.

参考文献 (References)

- [1] Solomon S, Qin D, Manning M, et al. Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press, 2007.
- [2] Zhou T J, Yu R C. Twentieth-century surface air temperature over China and the globe simulated by coupled climate models. *J. Climate*, 2006, 19(22): 5843-5858.
- [3] Dickinson R E, Errico R M, Giorgi F, et al. A regional climate model for the western United States. *Climatic Change*, 1989, 15(3): 383-422.
- [4] Giorgi F. Simulation of regional climate using a limited area model nested in a general circulation model. *J. Climate*, 1990, 3(9): 941-963.
- [5] Frich P, Alexander L V, Della-Marta P, et al. Observed coherent changes in climatic extremes during the second half of the twentieth century. *Climate Res.*, 2002, 19(3): 193-212.
- [6] Frei C, Schöll R, Fukutome S, et al. Future change of precipitation extremes in Europe: Intercomparison of scenarios from regional climate models. *J. Geophys. Res.*, 2006, 111(D6): D06105, doi: 10.1029/2005JD005965.
- [7] Marengo J A, Jones R, Alves L M, et al. Future change of temperature and precipitation extremes in South America as derived from the PRECIS regional climate modeling system. *Int. J. Climatol.*, 2009, 29(15): 2241-2255.
- [8] Im E S, Jung I W, Bae D H. The temporal and spatial structures of recent and future trends in extreme indices over Korea from a regional climate projection. *Int. J. Climatol.*, 2011, 31(1): 72-86.
- [9] Christensen J H, Christensen O B. Climate modelling: severe summertime flooding in Europe. *Nature*, 2003, 421(6925): 805-806.
- [10] Boo K O, Kwon W T, Oh J H, et al. Response of global warming on regional climate change over Korea: an experiment with the MM5 model. *Geophys. Res. Lett.*, 2004, 31(21): L21206.
- [11] Boo K O, Kwon W T, Back H J, et al. Change of extreme events of temperature and precipitation over Korea using regional projection of future climate change. *Geophys. Res. Lett.*, 2006, 33(1): L01701.
- [12] Beniston M, Stephenson D B, Christensen O B, et al. Future extreme events in European climate: an exploration of regional climate model projections. *Climatic Change*, 2007, 81(1): 71-95.
- [13] Bell J L, Sloan L C, Snyder M A. Regional changes in extreme climatic events: A future climate scenario. *J. Climate*, 2004, 17(1): 81-87.
- [14] Herrera S, Fita L, Fernández J, et al. Evaluation of the mean and extreme precipitation regimes from the ENSEMBLES regional climate multimodel simulations over Spain. *J. Geophys. Res.*, 2010, 115 (D21): D21117, doi: 10.1029/2010JD013936.
- [15] Gao X J, Zhao Z C, Giorgi F. Changes of extreme events in regional climate simulations over East Asia. *Adv. Atmos. Sci.*, 2002, 19(5): 927-942.
- [16] 许吟隆, 黄晓莹, 张勇等. 中国 21 世纪气候变化情景的统计分析. 气候变化研究进展, 2005, 1(2): 80-84.
- Xu Y L, Huang X Y, Zhang Y, et al. Statistical analyses of climate change scenarios over China in the 21st century. *Advances in Climate Change Research* (in Chinese), 2005, 1(2): 80-84.
- [17] Zhang Y, Xu Y L, Dong W J, et al. A future climate scenario of regional changes in extreme climate events over China using the PRECIS climate model. *Geophys. Res. Lett.*, 2006, 33(24): L24702.
- [18] 高学杰. 中国地区极端事件预估研究. 气候变化研究进展, 2007, 3(3): 162-166.
- Gao X J. Researches in projection of extreme events in China. *Advances in Climate Change Research* (in Chinese), 2007, 3(3): 162-166.
- [19] 胡伯彦, 汤剑平, 王淑瑜. 中国地区 IPCC A1B 情景下 21 世纪中期气候变化的数值模拟试验. 气象科学, 2012, 32(2): 127-136.
- Hu B Y, Tang J P, Wang S Y. A numerical simulation for mid-21st century climate change over China under IPCC A1B scenario. *Journal of the Meteorological Sciences* (in Chinese), 2012, 32(2): 127-136.
- [20] Chen F, Dudhia J. Coupling an advanced land surface-hydrology model with the Penn State-NCAR MM5 modeling system. Part I: Model implementation and sensitivity. *Mon. Wea. Rev.*, 2001, 129(4): 569-585.
- [21] Chen F, Dudhia J. Coupling an advanced land surface-hydrology model with the Penn State-NCAR MM5 modeling

- system. Part II: Preliminary model validation. *Mon. Wea. Rev.*, 2001, 129(4): 587-604.
- [22] Kain J S, Fritsch J M. A one-dimensional entraining/detraining plume model and its application in convective parameterization. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 1990, 47(23): 2784-2802.
- [23] Briegleb B P. Delta-Eddington approximation for solar radiation in the NCAR Community Climate Model. *J. Geophys. Res.*, 1992, 97(D7): 7603-7612.
- [24] Ek M B, Mitchell K E, Lin Y, et al. Implementation of Noah land surface model advances in the National Centers for Environmental Prediction operational mesoscale Eta model. *J. Geophys. Res.*, 2003, 108(D22): 8851, doi: 10.1029/2002JD003296.
- [25] Arpe K, Hagemann S, Jacob D, et al. The realism of the ECHAM5 models to simulate the hydrological cycle in the Arctic and North European area. *Nordic Hydrology*, 2005, 36(4-5): 349-367.
- [26] Nakicenovic N, Alcamo J, Davis G, et al. Special Report on Emissions Scenarios (SRES), A Special Report of Working Group III of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University Press, 2000.
- [27] Xu Y, Gao X J, Shen Y, et al. A daily temperature dataset over China and its application in validating a RCM simulation. *Adv. Atmos. Sci.*, 2009, 26(4): 763-772.
- [28] Yatagai A, Arakawa O, Kamiguchi K, et al. A 44-year daily gridded precipitation dataset for Asia based on a dense network of rain gauges. *SOLA*, 2009, 5: 137-140.
- [29] 张勇, 许吟隆, 董文杰等. SRES B2 情景下中国区域最高、最低气温及日较差变化分布特征初步分析. *地球物理学报*, 2007, 50(3): 714-723.
- Zhang Y, Xu Y L, Dong W J, et al. A preliminary analysis of distribution characteristics of maximum and minimum temperature and diurnal temperature range changes over China under SRES B 2 scenario. *Chinese J. Geophys.* (in Chinese), 2007, 50(3): 714-723.
- [30] Feng J M, Fu C B. Inter-comparison of 10-year precipitation simulated by several RCMs for Asia. *Adv. Atmos. Sci.*, 2006, 23(4): 531-542.
- [31] 王冀, 江志红, 丁裕国等. 21 世纪中国极端气温指数变化情况预估. *资源科学*, 2008, 30(7): 1084-1092.
- Wang J, Jiang Z H, Ding Y G, et al. Multi-model ensemble prediction of extreme temperature indices in China. *Resources Sciences*, (in Chinese), 2008, 30(7): 1084-1092.
- [32] 江志红, 陈威霖, 宋洁等. 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. *大气科学*, 2009, 33(1): 109-120.
- Jiang Z H, Chen W L, Song J, et al. Projection and evaluation of the precipitation extremes indices over China based on seven IPCC AR4 coupled climate models. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2009, 33(1): 109-120.
- [33] 石英, 高学杰. 温室效应对我国东部地区气候影响的高分辨率数值试验. *大气科学*, 2008, 32(5): 1006-1018.
- Shi Y, Gao X J. Influence of greenhouse effect on eastern China climate simulated by a high resolution regional climate model. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 2008, 32(5): 1006-1018.
- [34] 高学杰, 石英, Giorgi F. 中国区域气候变化的一个高分辨率数值模拟. *中国科学*, 2010, 40(7): 911-922.
- Gao X J, Shi Y, Giorgi F. A high resolution simulation of climate change over China. *Sci. China Earth Sci.*, 2010, 53(3): 462-472.
- [35] 吴佳, 高学杰, 石英等. 新疆 21 世纪气候变化的高分辨率模拟. *冰川冻土*, 2011, 33(3): 479-487.
- Wu J, Gao X J, Shi Y, et al. Climate change over Xinjiang region in the 21st century simulated by a high resolution regional climate model. *Journal of Glaciology and Geocryology* (in Chinese), 2011, 33(3): 479-487.

(本文编辑 汪海英)