科学通报 2015 年 第 60 卷 第 17 期: 1631 ~ 1642
论 文 www.scichina.com csb.scichina.com
《中国科学》杂志社
SCIENCE CHINA PRESS

RegCM4.0 对一个全球模式 20 世纪气候变化试验的中国区域降尺度: 温室气体和自然变率的贡献

张冬峰[①], 高学杰[②*], 罗勇[③], 夏军[④⑤], GIORGI Filippo[⑥]

① 山西省气候中心, 太原 030006;
② 中国科学院大气物理研究所气候变化研究中心, 北京 100029;
③ 清华大学地球系统科学研究中心, 北京 100084;
④ 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101;
⑤ 武汉大学水资源与水电工程科学国家重点实验室, 武汉 430072;
⑥ The Abdus Salam International Centre for Theoretical Physics, Trieste 34100, Italy
* 联系人, E-mail: gaoxj@cma.gov.cn

2015-01-06 收稿, 2015-03-09 接受, 2015-05-22 网络版发表
国家重点基础研究发展计划(2010CB428401)和山西省科技攻关项目(20130313029-2)资助

摘要 近几十年来, 中国区域气候经历了以变暖和东部降水呈现"南涝北旱"分布特征为主的变化. 这里基于一个区域气候模式(RegCM4.0)历史模拟和归因试验的对比, 探讨了温室气体排放和自然变率分别对上述特征形成及各大水文流域气候变化成因的可能贡献. 试验中RegCM4.0的分辨率取为50 km, 积分时间为1961~2005年, 两个试验的驱动场分别来自于BCC_CSM1.1全球气候模式的历史试验和归因试验结果. 分析结果表明, 1961~2005年观测中出现的气候变暖现象, 在所有流域均主要是由于人为温室气体排放引起的, 在大部分流域自然变率亦有所贡献, 中国区域平均的变暖中, 人为温室气体排放所产生的作用达到80%. 中国东部降水的"南涝北旱"分布变化, 则可能主要是自然变率起了主导作用, 人为温室气体排放在一定程度上减弱了这种变化的强度; 中国西北地区的降水增加, 可能主要源于人为温室气体排放的贡献, 自然变率的作用与其相反, 是导致降水减少的. 同时指出, 分析结果中关于气温的结论相对可靠性较高, 降水的结论尚存在较大不确定性, 未来需开展进一步的深入研究.

关键词
温室气体
自然变率
中国区域
气候变化
区域气候模式

观测表明, 全球平均气温在1880~2012年期间升高了0.85(0.65~1.06℃), 其中1951~2012年间每10年升高0.12(0.08~0.14℃). 空间分布上以北半球中高纬度大陆升温最明显; 全球陆地区域平均降水变化不大, 但在北半球中纬度地区降水量发生了整体增长[1]. 同样近几十年中国地区也经历着以气候变暖为主要特征的气候变化, 并以北方地区增温更加显著; 中国地区年平均降水量在近几十年没有明显变化趋势的同时, 在空间分布上出现较大差异, 如东部季风区出现的所谓"南涝北旱"现象(华北地区降水减少和长江中下游地区降水增加)、西北特别是新疆地区的变湿等[2~6].

气候变化的原因一般包括自然强迫(地球轨道参数变化、太阳常数和火山活动等)、气候系统的内部变率和人类活动(温室气体和气溶胶排放、植被覆盖和土地利用变化等)等. 对气候变化的归因研究一般

引用格式: 张冬峰, 高学杰, 罗勇, 等. RegCM4.0 对一个全球模式 20 世纪气候变化试验的中国区域降尺度: 温室气体和自然变率的贡献. 科学通报, 2015, 60: 1631–1642
Zhang D F, Gao X J, Luo Y, et al. Downscaling a 20th century climate change of a global model for China from RegCM4.0: Attributable contributions of greenhouse gas emissions and natural climate variability (in Chinese). Chin Sci Bull, 2015, 60: 1631–1642, doi: 10.1360/N972015-00007

通过气候模式的数值试验进行, 利用自然和人为强迫等因子分别和共同驱动全球气候模式(GCM), 将模拟结果与观测进行比较, 从而区分不同因子的作用. 例如在温室气体和自然变率的共同作用下, 模式能够较好地模拟出全球平均地表气温的变化, 而仅在自然变率的作用下, 模拟结果不能表现出观测中的增暖, 则说明温室气体排放是气候变暖的主要原因. 基于类似大量模拟研究, IPCC(政府间气候变化委员会)AR5(第5次评估报告)指出[7], 极有可能(95%以上信度)的是1951~2010年观测到的全球平均表面温度上升中, 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, 定量来说, 温室气体造成的增温可能在0.5~1.3℃, 包括气溶胶降温效应在内的其他人为强迫的贡献可能在–0.6~0.1℃, 自然强迫和自然内部变率的贡献可能均在–0.1~0.1℃. 降水变化的归因相对气温较难, 可能(>66%信度)人为活动影响了1960年以来的全球水循环, 引起全球尺度陆地降水分布的变化(中等信度).

区域尺度的气候变化归因问题相对全球难度更大, 具体到中国地区, 通过GCM的模拟, 同样可以发现温室气体的人为排放, 对中国气候变暖可能起到非常重要的作用[8~14].

中国地处东亚季风区, 一般全球模式很少能较好地模拟这一地区的降水分布[15~17], 大部分全球模式也不能再现最近几十年观测中的“南涝北旱”现象, 如姜大膀和王会军[18]对CMIP3模式(耦合模式比较计划第3阶段)和Zhou等人[13]对CMIP5模式的分析等. 很多研究指出, “南涝北旱”及与其对应的东亚夏季风减弱, 可能更多的是由于气候系统本身的年代际自然变率如海温、PDO(太平洋年代际震荡)的变化引起的[18~26]. 在气候变化预估方面, 大部分基于全球模式的分析表明, 在全球变暖背景下中国区域降水将普遍增加, 且北方较南方增加更明显, 呈现某种“北涝南旱”的特征[15,27,28], 而基于更高分辨率的区域气候模式的结果则指出, 温室效应对中国东部降水的作用存在较大不确定性[29,30]. 此外, 作为人类活动对气候影响的另外两个因子, 气溶胶排放和土地利用等也被认为可能是导致这一现象的原因之一[31,32]. Wang等人[33]使用一个气候系统模式, 通过一系列模拟试验, 指出只有考虑了所有温室气体和气溶胶强迫, 耦合模式才能合理地模拟出东亚夏季风20世纪70年代末的减弱, 海表温度变化本身也是这些强迫的结果.

研究表明, 一般全球模式对中国降水分布模拟能力偏弱的原因主要是由于其较低的分辨率, 高分辨率的区域气候模式则能在很大程度上改善这种误差, 同时由于其更大和更真实的地形强迫, 所得到的气候变化预估结果也与全球模式驱动场有较大不同[29,30,34,35]. 近期Gao等人[16]在使用一个CMIP5全球模式驱动RegCM4.0区域模式的气候变化预估试验中, 得到了同样的结论. 更进一步, 区域模式在能够更好地模拟当代气候, 并给出未来气候变化可能更可靠预估的同时, 它对过去气候变化的模拟情况怎样? 可否用于气候变化归因研究? 为研究这一问题, 我们在对Gao等人[16]试验进一步分析的基础上, 尝试使用RegCM4.0, 通过更多数值试验, 进行中国区域过去气候变化的成因和归因分析.

1 模式、试验设计、资料和方法

试验所使用的区域气候模式为国际理论物理研究中心(ICTP, The Abdus Salam International Center for Theoretical Physics)的区域气候模式RegCM4.0[36], 模式运行所需的初始和侧边界条件由BCC_CSM1.1全球模式的历史试验(GCM-hist)和气候归因试验(GCM-nat)提供, 这些试验由1850年开始积分至当代的2005年, 其中GCM-hist中考虑了人类活动(温室气体及气溶胶排放等)和自然因子(太阳辐射、火山气溶胶等强迫及自然变率)的共同影响, GCM-nat则只包含自然因子的作用. BCC_CSM1.1的水平分辨率为T42(~2.8°×2.8°), 垂直方向26层, 关于模式和试验更多的信息, 请参考Wu等人[37]和Xin等人[38].

本研究选取上述全球模式两个试验1960年1月1日至2005年12月31日的结果, 分别驱动50 km分辨率的RegCM4.0进行相应时段积分, 称为区域模式的历史试验(RCM-hist)和归因试验(RCM-nat), 其中1960年作为模式初始化时期不参加分析. 两个试验中区域模式所使用的温室气体浓度和全球模式相同, 分别为实际观测和工业化前值, 其他模式设置均一致, 详情参见Gao等人[16]. 图1中给出全球模式东亚区域的地形、RegCM4.0模拟范围和地形, 以及中国各大水文流域的分区.

注意到RCM-hist试验中仅考虑了温室气体的影

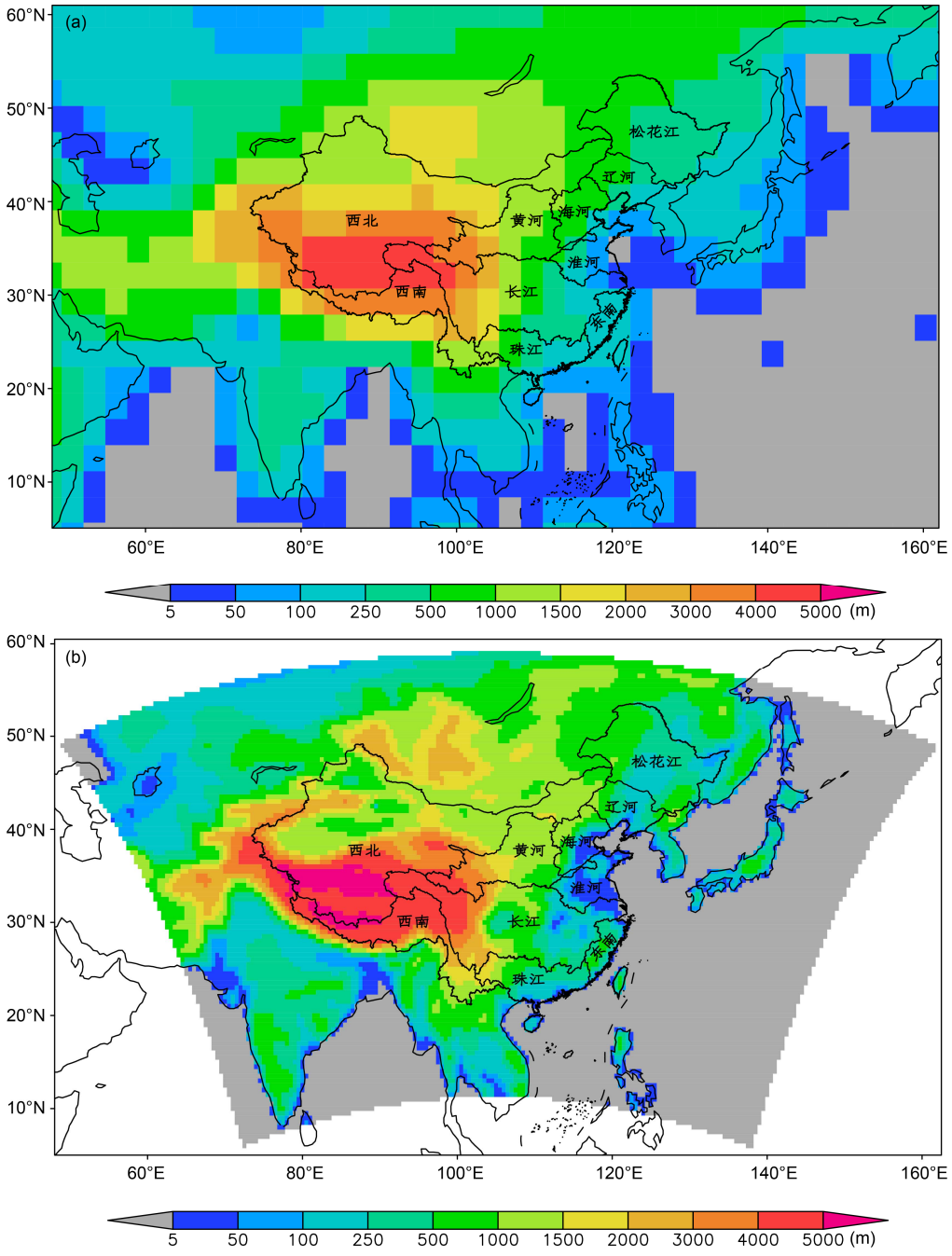


图 1 东亚地区全球模式的地形(a), RegCM4.0 模拟范围和地形(b)以及中国各流域分区(黑色实线)

Figure 1 Topography of BCC_CSM1.1 over East Asia (a), model domain and topography of RegCM4.0 (b). The solid black lines represent watersheds over China

响，气溶胶和土地利用的作用由于其不确定性较大或数值较小[39]暂未考虑；同时RCM-nat中不包括太阳辐射和火山活动等对短时间和区域尺度气候的影响相对较小的自然强迫的影响，反映的主要为气候的自然变率．文中以RCM-hist和RCM-nat差别的比较，讨论人为温室气体排放和自然变率对中国及各大流域气候的影响．用于检验模式所模拟地面气温和降水分布及其历史变化的观测资料，分别采用了同期0.5°×0.5°分辨率的CN05.1格点数据，数据基于2416个气象台站的观测资料，通过“距平逼近法”制作而成[40]．

分析中首先检验GCM-hist和RCM-hist对中国地区气候平均态和气候变化趋势的模拟性能，然后比较RCM-hist和RCM-nat模拟气候要素的变化趋势及多年平均值差别.

2 模式检验

2.1 气候平均态

图2给出中国地区1961~2005年平均地面气温的观测、模拟气温和观测的差、观测和模拟降水. RCM-hist模拟地面气温较GCM-hist有较大改进，和观测(图2(a))相比，GCM-hist模拟气温在中国大部分地区偏低，特别在西部地势较低的地区和长江流域四川盆地等偏低数值较大，超过5 ℃(图2(c)). RCM-hist模拟气温和观测的偏差除青藏高原外，大部分地区在±1 ℃之间(图2(e)).

观测中年平均降水整体呈现从东南向西北递减的分布特点(图2(b)). GCM-hist基本上能够模拟出中国降水从东南向西北递减的空间分布特点，但和大部分的全球模式一样[15]，在青藏高原东部到长江流

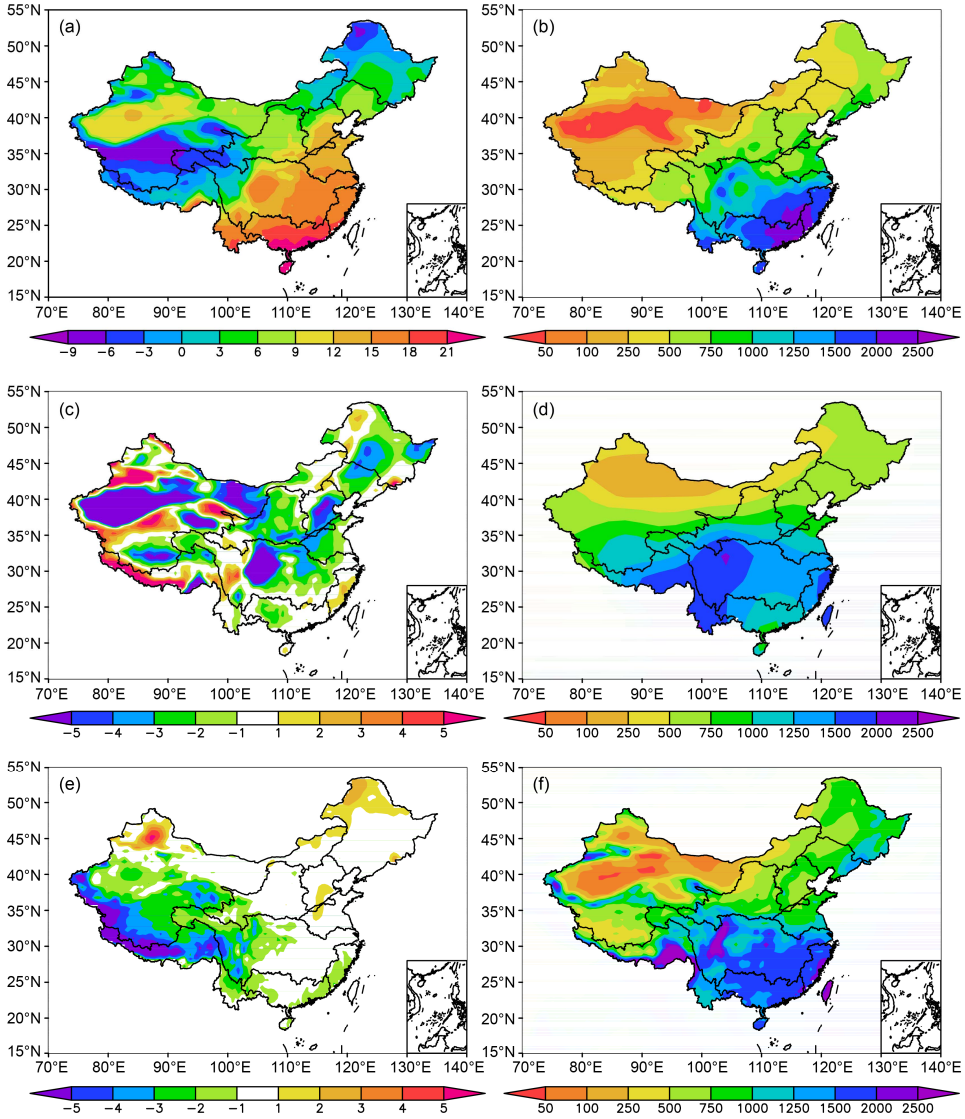


图 2 1961~2005 年中国区域年平均气温(单位: ℃)和降水(单位: mm). (a) 观测气温; (b) 观测降水; (c) GCM-hist 模拟气温与观测的差; (d) GCM-hist 模拟降水; (e) RCM-hist 模拟气温与观测的差; (f) RCM-hist 模拟降水

Figure 2 Multi-annual mean temperature (unit: °C) and precipitation (unit: mm) in 1961–2005. (a) Observed temperature; (b) observed precipitation; (c) differences of temperature between GCM-hist and observation; (d) simulated precipitation by GCM-hist; (e) differences of temperature between RCM-hist and observation; (f) simulated precipitation by RCM-hist

域西部有一虚假高值降水中心，另外模拟降水数值西北地区偏多，东南地区偏少(图2(d))．RCM-hist试验对于观测降水的空间分布和数值有更好的模拟，和以往的高分辨率RegCM模拟相似[41~43]，RCM-hist试验中青藏高原东部、西南地区到长江流域西部的虚假降水大值区范围明显缩小，模拟长江流域东南部、珠江流域和东南沿海地区年降水量大于1500 mm，对西北地区地形引起的降水如柴达木盆地的降水低值区和祁连山脉的降水高值区等也有较好的描述，与观测更加接近(图2(f))．

2.2 气温和降水的历史趋势

中国地区1961~2005年的逐年平均气温、降水变化趋势的观测和两个模式模拟的空间分布由图3给出．观测中大部分地区呈现增温趋势，北方地区增温趋势大于南方地区，如松花江流域、西北地区中东部45 a增温大于1.5℃，部分地区增温大于2.0℃；长江流域大部分地区增温速率小于0.5℃/45 a，局部地区气温降低(图3(a))．GCM-hist和RCM-hist模拟均呈现了观测中的增温特征，但对观测中北方地区增温速

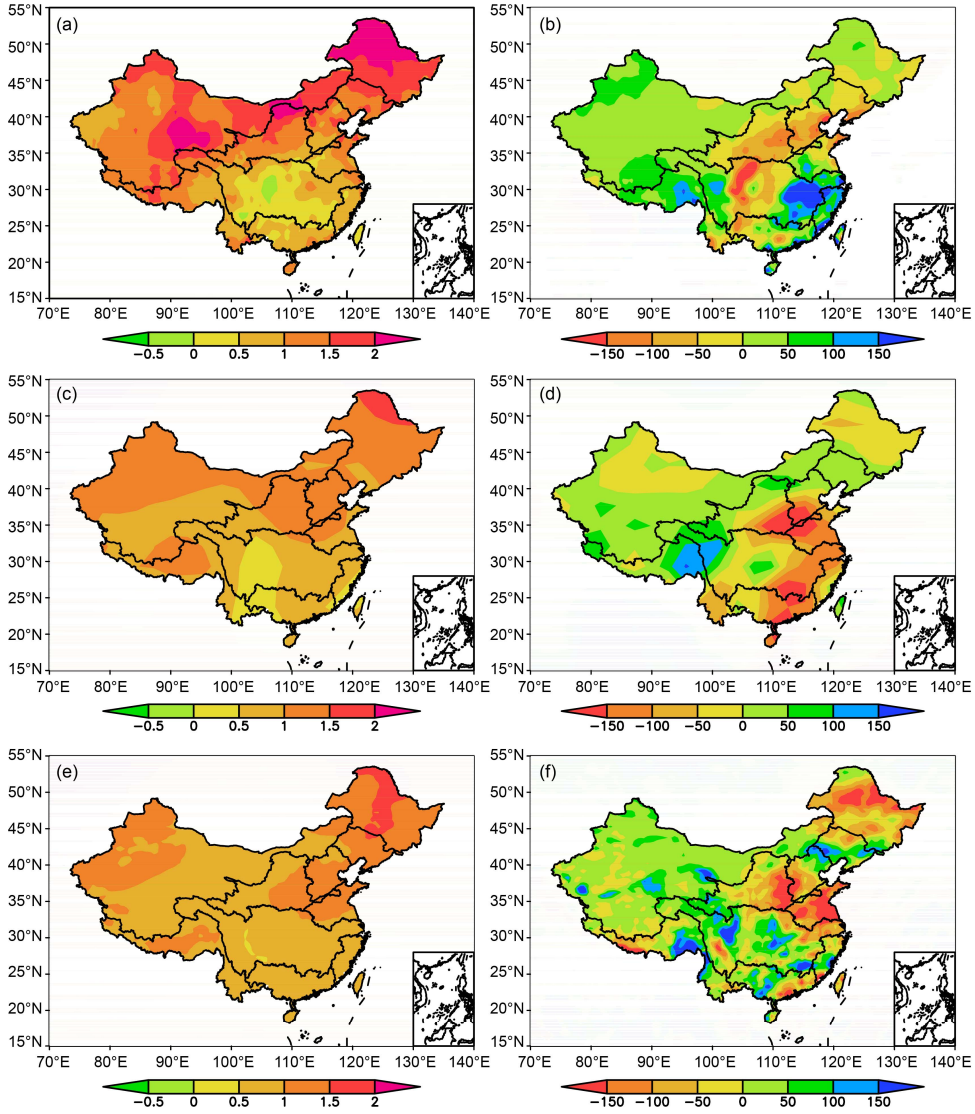


图 3 1961~2005 年中国区域年平均气温(单位: ℃/45 a)和降水趋势(单位: mm/45 a). (a) 观测气温趋势; (b) 观测降水趋势; (c) GCM-hist 模拟气温趋势; (d) GCM-hist 模拟降水趋势; (e) RCM-hist 模拟气温趋势; (f) RCM-hist 模拟降水趋势

Figure 3 Trend of multi-annual mean temperature (unit: °C/45 a) and precipitation (unit: mm/45 a) in 1961–2005. (a) Observed temperature; (b) observed precipitation; (c) simulated temperature by GCM-hist; (d) simulated precipitation by GCM-hist; (e) simulated temperature by RCM-hist; (f) simulated precipitation by RCM-hist

率大于南方地区的分布特点和模拟强度均偏弱(图3(c)和(e)). 注意到和以往进行的气候变化预估类似, 这里RegCM4.0对过去气温变化的模拟结果和驱动场全球模式相比, 除了提供更多空间分布的细节外, 总体分布型差别不是很大[30].

观测中, 中国西部大部分地区年平均降水呈增加趋势, 其中西北增加速率在1~50 mm/45 a, 相对当地较低的降水基数表现出明显的变湿[4]; 西南流域除云南外, 大部分地区增加速率在50~100 mm/45 a, 部分地区达100~150 mm/45 a. 东部表现出明显的"南涝北旱"格局, 辽河、黄河、海河、淮河北部、长江中游流域和珠江流域西部降水呈减少趋势, 其中黄河、海河、长江流域部分地区降水减少50~100 mm/45 a, 中心降水减少值大于150 mm/45 a; 同时淮河流域南部、长江中下游流域东部、东南沿海和珠江流域东部降水呈增加趋势, 中心值大于150 mm/45 a. 此外, 松花江流域大部分地区降水呈增加趋势(图3(b)). GCM-hist模拟基本表现了中国西南降水的增加趋势和东部黄河流域南部、海河流域南部及淮河流域北部的"旱", 但对西北地区变湿的降水增加趋势和东部淮河流域南部、长江中下游流域东部、东南沿海和珠江流域东部等的"涝"没有模拟能力, 模拟结果中上述地区降水呈减少趋势, 和观测趋势相反. 另外, 松花江和辽河流域模拟的降水变化趋势也和观测相反(图3(d)). RCM-hist模拟则除了较好地模拟了黄河、海河以及淮河流域北部的降水减少和一定程度上模拟出了西北地区、长江中下游流域、东南沿海和珠江流域的降水增加趋势外, 对中国西部"转湿"和东部"南涝北旱"降水格局的模拟较GCM-hist好, 但对松花江、辽河以及淮河流域降水变化趋势的模拟和观测相反, 模拟数值较GCM-hist更远离观测(图3(f)).

综上所述, RegCM4.0比驱动模式BCC_CSM1.1在气候态和历史趋势的模拟上均有较大程度提高, 在下文中我们将主要基于RegCM4.0的试验结果, 讨论人为温室气体排放和自然变率对中国及各大流域气候变化的贡献.

3 人为温室气体排放和自然变率的贡献分析

3.1 气温

图4(a)首先给出RCM-nat试验所模拟的1961~2005年年平均气温的变化趋势, 由图中可以看到, 自然变率的作用(RCM-nat)使得中国地区气温除青藏高原为弱的降低(0~–0.5℃/45 a)外, 其他大部分地区为弱的增温趋势, 速率在0~0.5℃/45 a, 其中位于高纬度地区的西北北部、松花江和辽河流域以及中纬度的海河东部、黄河南部和淮河北部增温幅度较大, 数值在0.5~1.0℃/45 a(图4(a)). 这一结果和CMIP5多全球模式结果的集合, 除在青藏高原地区外基本一致[14]. 图4(c)为RCM-hist和RCM-nat两个试验的气温趋势之差, 反映了人为温室气体排放影响在1961~2005年期间对中国气温变化的贡献, 可以看到近几十年温室气体的增加使得中国地区呈一致增温趋势, 大部分地区增温在0.5~1.0℃, 青藏高原地区(西北地区南部和西南大部)增温1.0~1.5℃.

图4(e)给出RCM-hist和RCM-nat两个试验1961~2005年多年平均气温差别的空间分布. 温室气体的人为排放由工业化革命时期的1850年开始, 引起气温的逐渐升高, 由于研究使用的驱动场GCM-hist和GCM-nat两个试验均从1850年开始, 故与图4(c)不同, 图4(e)所反映的是1850~2005年累计温室气体排放对中国区域的增温贡献. 由图中可以看到, 温室效应总体对中国区域气温的影响同样为大范围的升温, 并以西北地区最为明显, 幅度一般达到2℃以上, 东部升温相对较小, 其中南方沿海地区的升温在0.5℃以下. 对比图4(c)和(e)可以看到, 温室气体引起的升温较大区域在不同阶段表现出一定差别, 其原因可能和年代际的自然变率等有关, 有待进一步的试验说明和证实.

表1给出1961~2005年各流域和全国区域平均的观测(OBS)、人为温室气体排放和自然变率共同作用(RCM-hist)下、人为温室气体排放(GHG, RCM-hist与RCM-nat之差)以及自然变率(RCM-nat)下气温的变化趋势, 同时给出人为温室气体排放和自然变率对气温总体变化贡献所占的比例(GHG/RCM-hist和RCM-nat/RCM-hist). 其中OBS和RCM-hist用于检验模式对于历史气温变化趋势的模拟能力, 由表中可以看到, 松花江流域、西北和黄河流域RCM-hist模拟的流域平均增温幅度小于观测, 其余流域模拟值和观测相近, 观测和模拟全国平均增温速率分别为1.2和0.9℃/45 a. 在多数流域和全国平均, 人为温室气体排放引起的增温幅度贡献都较自然变率大, 一般占到总比例的50%以上, 全国区域平均人为温

表 1 人为温室气体排放、自然变率对不同流域及全国气温变化的影响

Table 1 Effects of green house gas emissions and natural climate variability on the temperature over China and basins

	松花江	辽河	海河	黄河	淮河	长江	东南	珠江	西北	西南	全国
OBS(℃/45 a) [a)]	1.9	1.4	1.2	1.3	0.9	0.6	0.5	0.6	1.4	1.0	1.2
RCM-hist(℃/45 a) [b)]	1.4	1.2	1.1	0.9	1.2	0.7	0.6	0.6	0.9	0.9	0.9
GHG(℃/45 a) [c)]	0.8	0.7	0.5	0.6	0.6	0.6	0.5	0.4	0.8	1.0	0.7
RCM-nat(℃/45 a) [d)]	0.6	0.5	0.6	0.3	0.5	0.1	0.1	0.3	0.1	–0.1	0.2
GHG/RCM-hist [e)]	0.5	0.6	0.5	0.7	0.5	0.9	0.8	0.6	0.9	1.1	0.8
RCM-nat/RCM-hist [f)]	0.5	0.4	0.5	0.3	0.5	0.1	0.2	0.4	0.1	–0.1	0.2

a)~d) 分别为观测、人为温室气体排放和自然变率共同作用、人为温室气体排放、自然变率强迫下气温的变化趋势; e), f) 为人为温室气体排放和自然变率对气温总体变化贡献所占的比例

室气体排放的贡献率为80%(0.7℃/45 a), 自然变率为20%(0.2℃/45 a), 即目前所观测到的中国区域增温现象, 大部分可以归因于人类活动引起的温室气体排放增加的影响.

3.2 降水

和气温类似, 图4(b)和(d)分别给出RCM-nat对1961~2005年逐年平均降水变化趋势的模拟及RCM-hist与其之差. 由图4(b)可以清楚看到, 在自然变率的作用下, 中国东部降水呈现明显的“南涝北旱”分布, 海河、黄河和淮河等流域降水减少明显, 最大可以达到150 mm/45 a, 长江和东南沿海流域则以增加为主. 同时人为温室气体排放的影响(图4(d))则在某种程度上与之相反, 在东部地区呈现一定程度的“北涝南旱” 现象, 使得如海河流域北部和辽河流域南部等地降水明显增加, 淮河和长江中下游流域降水减少. 在西北地区, 自然变率情况下降水减少, 人为温室气体排放则引起降水增加, 后者起主导地位, 使得模拟结果和观测一致, 区域降水增加(图3(b), 3(f)和4(d)). 注意到在大部分的气候变化预估模拟中, 未来西部地区的降水都是增加的[15,28,30]. 1850年以来温室气体排放对中国降水总的影响使得大部分地区降水增多, 但青藏高原和江南部分地区降水减少(图4(f)), 同样与未来气候变化预估结果表现出一定的类似[16].

降水本身的模拟难度较气温大很多, 尤其是在具有复杂天气气候系统的东亚区域. 对全国10个流域, RCM-hist试验结果中, 7个流域模拟的降水变化趋势和观测一致, 其中海河和黄河流域降水减少, 长江、东南沿海、珠江、西北和西南流域降水增加, 可以认为模拟结果在这些流域相对更加可靠. 其他如松花江、辽河和淮河流域, 模拟和观测的趋势相反, 甚至模拟结果较GCM-hist更差, 因而不确定性较高. 全国平均来看, 模拟中的降水趋势变化不大, 但实际观测降水为增加.

由表2中可以看到, 人为温室气体排放引起的降水变化在半数流域起到主导作用, 包括长江、珠江、西北和西南(可靠性相对较高), 以及辽河流域(不确定性较大); 自然变率占到主导作用的流域, 包括海河和黄河(可靠性相对较高), 松花江、淮河和东南(不确定性较大)流域. 此外还可以看到在辽河、海河、黄河、东南和珠江流域, 存在人为温室气体排放和自然变化的作用都很大, 最终产生一个较小的综合结果的情况, 如在模拟和观测降水变化一致的流域中, 人为温室气体排放引起海河和黄河流域降水分别增加93和46 mm/45 a, 自然变率情况下使得降水减少119和83 mm/45 a, 两者共同作用下降水减少26和38 mm/45 a.

4 结论与讨论

使用区域气候模式RegCM4.0, 单向嵌套一个全球模式, 进行了中国及其各主要水文流域气候变化成因的模拟试验. 区域气候模式较高的分辨率, 使得它在改进全球模式气候态模拟的基础上, 所模拟的历史气候变化趋势也和观测更加接近. 在RegCM4.0“有”和“无”人为温室气体排放两个试验对比的基础上, 进行了人为温室气体排放和自然变率对中国地区历史气候变化的成因分析.

结果表明, 在最近45年(1961~2005年)观测的变暖中, 自然变率除引起青藏高原等地的气温降低外, 在中国大部分地区都起到增温的作用, 增温幅度在新疆北部、东北和华北等地最大, 同一时期温室气体排放引起的增温则在青藏高原最大, 且其作用在大部分地区大于自然变率, 全国平均的增温中, 80%的

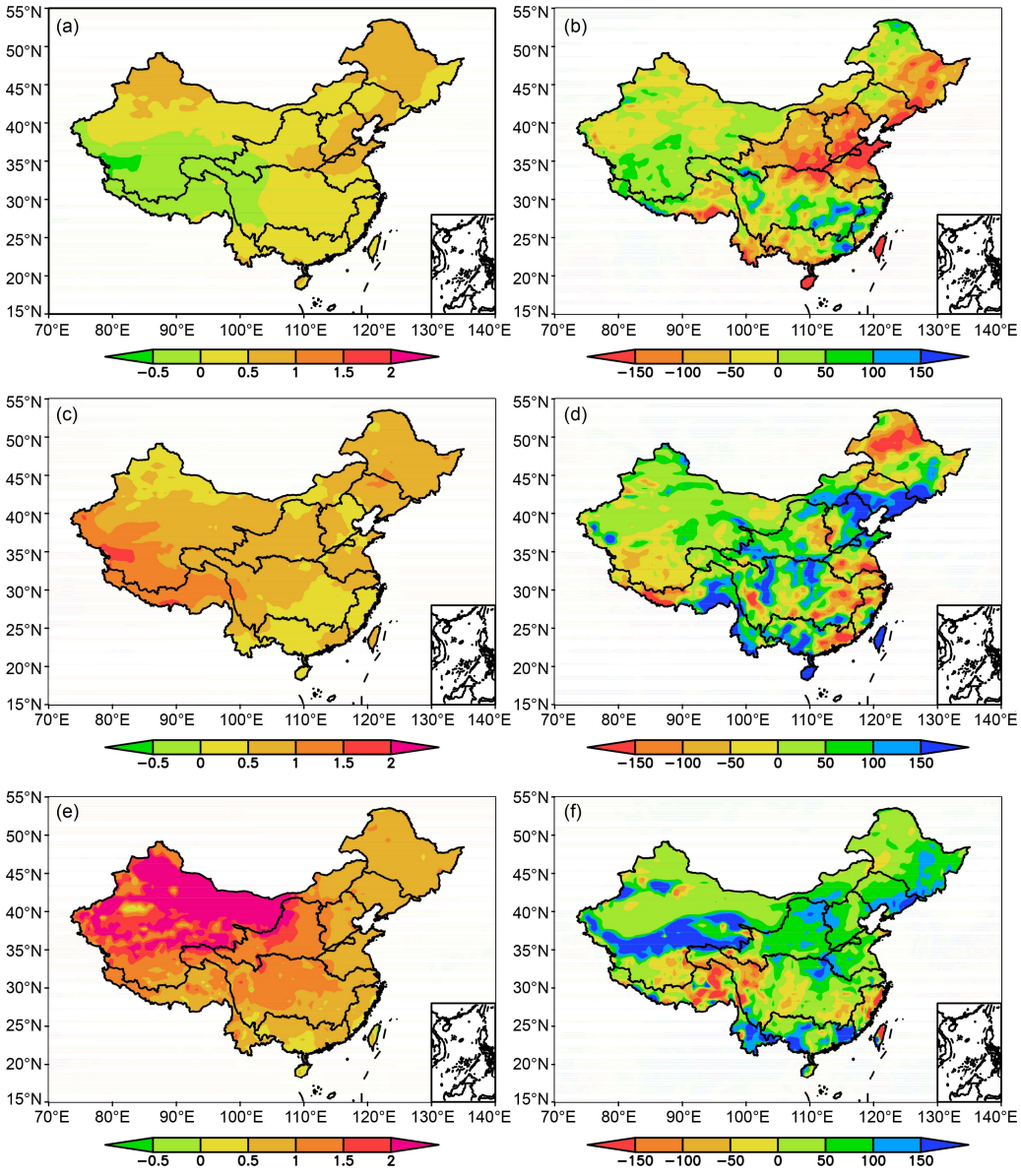


图 4 人为温室气体排放和自然变率对 1961~2005 年气温(单位: ℃/45 a)和降水(单位: mm/45 a)的影响及工业革命以来(1850~2005 年)人为温室气体排放引起的气温(单位: ℃)和降水(单位: mm)变化分布. (a) RCM-nat 模拟气温趋势; (b) RCM-nat 模拟降水趋势; (c) RCM-hist 和 RCM-nat 模拟气温趋势之差; (d) RCM-hist 和 RCM-nat 模拟降水趋势的差; (e) RCM-hist 和 RCM-nat 模拟气温之差; (f) RCM-hist 和 RCM-nat 模拟降水之差. (a)~(d) 1961~2005 年; (e), (f) 1850~2005 年

Figure 4 Effects of green house gas emissions and natural climate variability on the temperature (unit: °C/45 a) and precipitation (unit: mm/45 a) trend in 1961–2005 and changes of temperature (unit: °C) and precipitation (unit: mm) due to green house gas emissions from 1850 to 2005. (a) Simulated temperature trend by RCM-nat; (b) simulated precipitation trend by RCM-nat; (c) differences of temperature trend between RCM-hist and RCM-nat; (d) differences of precipitation trend between RCM-hist and RCM-nat; (e) differences of multi-annual mean temperature between RCM-hist and RCM-nat; (f) differences of multi-annual mean precipitation between RCM-hist and RCM-nat. (a)~(d) 1961~2005; (e), (f) 1850~2005

贡献来源于温室气体排放.

观测中, 近几十年中国东部降水呈现“南涝北旱”特征, 西北有转湿趋势. 对模式结果的分析表明, 东部地区的“南涝北旱”可能主要是自然变率起到了主导, 温室效应的作用实际呈现某种“北涝南旱”的特征. 注意到温室效应引起的增暖一般发生在冬季, 而降水主要在夏季, 这样使得中国东部降水可能受温室效应及相应季风变化的影响较小, 近几十来主要表现为在多种外部自然因素影响下的年代际变化, 此外在观测中, 中国东部夏季“南

表 2 人为温室气体排放、自然变率对不同流域及全国降水变化的影响

Table 2 Effects of green house gas emissions and natural climate variability on precipitation over China and basins

	松花江	辽河	海河	黄河	淮河	长江	东南	珠江	西北	西南	全国
OBS(mm /45 a)	8	−33	−71	−48	10	26	110	18	27	44	16
RCM-hist(mm /45 a)	−72	26	−26	−38	−147	22	5	15	24	18	0
GHG(mm /45 a)	−25	95	93	46	−11	21	−27	49	20	48	27
RCM-nat(mm /45 a)	−48	−69	−119	−83	−136	2	32	−33	4	−30	−27
GHG/RCM-hist	0.3	3.6	−3.6	−1.2	0.1	0.9	−6.0	3.1	0.8	2.6	/[a)]
RCM-nat/RCM-hist	0.7	−2.6	4.6	2.2	0.9	0.1	7.0	−2.1	0.2	−1.6	0.7

a) “/”表示无效数据

涝北旱”的降水分布型近十几年来出现一定变化, 多雨区出现在淮河流域和华南地区, 长江流域降水进入偏少阶段[44], 这在一定程度上也进一步说明自然变化而非人类活动主导了中国东部季风区的降水变化. 同时在自然变率情况下, 西部地区降水为减少, 观测中的增加主要是由于人为温室气体排放造成的. 但总体来说, 降水由于其复杂性及目前气候模式的不完善, 其归因分析的不确定性相对气温较大.

需要指出的是, 对于区域级气候变化的成因分析是一个非常复杂和困难的问题, 我们在这里仅做了一些初步的探讨, 其中尚存在的问题, 首先包括如严格意义上的检测和归因研究, 需要多模式和多样本的集合, 确定其统计意义上的显著性, 并给出信度范围[45,46], 而目前区域模式虽然已有广泛应用, 如在气候变化模拟和预估等方面, 但开展的相关归因试验的数目还非常少, 不能进行相关的统计分析. 其次本研究仅包含了人类活动中温室气体排放效应的作用, 其他如气溶胶排放[47]和土地利用改变(包括大规模城市化[48])等, 也是影响气候变化的重要因子, 尤其是在区域尺度上及中国地区, 需要在未来予以考虑. 最后我们所得的结论和一些归因研究的结果有所不同[33,49], 反映了这一问题的复杂性.

因此, 本研究的意义更多在于提供一个进行区域气候变化成因的研究方法, 所得的结论也存在较大的不确定性. 更全面和准确地认识和了解中国区域气候变化的成因, 尚需开展大量的区域气候变化模拟和分析工作.

参考文献

1 Hartmann D L, Klein Tank A M G, Rusticucci M, et al. Observations: Atmosphere and Surface. In: Stocker T F, Qin D, Plattner G K, et al., eds. 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: Cambridge University Press, 2013. 159−254

2 Wang H J. The weakening of the Asian monsoon circulation after the end of 1970’s. Adv Atmos Sci, 2001, 18: 376−386

3 Gong D Y, Ho C H. Shift in the summer rainfall over the Yangtze River valley in the late 1970s. Geophys Res Lett, 2002, 29: 1436

4 Shi Y F, Shen Y P, Hu R J. Preliminary study on signal, impact and foreground of climatic shift from warm-dry to warm-humid in northwest China (in Chinese). J Glaciol Geocryol, 2002, 24: 219−226 [施雅风, 沈永平, 胡汝骥. 西北气候由暖干向暖湿转型的信号、影响和前景初步探讨. 冰川冻土, 2002, 24: 219−226]

5 Ren G Y, Guo J, Xu M Z, et al. Climate changes of China’s mainland over the past half century (in Chinese). Acta Meteorol Sin, 2005, 63: 948−952 [任国玉, 郭军, 徐铭志, 等. 近50年中国地面气候变化基本特征. 气象学报, 2005, 63: 948−952]

6 Zhai P M, Zhang X B, Wan H, et al. Trends in total precipitation and frequency of daily precipitation extremes over China. J Clim, 2005, 118: 1096−108

7 IPCC. 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: Cambridge University Press, 2013

8 Zhao Z C, Wang S W, Xu Y, et al. Attribution of the 20th century climate warming in China (in Chinese). Clim Environ Res, 2005, 10: 808−817 [赵宗慈, 王绍武, 徐影, 等. 近百年我国地表气温趋势变化的可能原因. 气候与环境研究, 2005, 10: 808−817]

9 Zhou T J, Li L J, Li H M, et al. Progress in climate change attribution and projection studies (in Chinese). Chin J Atmos Sci, 2008, 32: 906−922 [周天军, 李立娟, 李红梅, 等. 气候变化的归因和预估模拟研究. 大气科学, 2008, 32: 906−922]

10 Man W M, Zhou T J, Zhang L X, et al. Contributions of natural and anthropogenic forcing in twentieth-century temperature change: Results from LASG/IAP climate system model FGOALS_gl (in Chinese). Chin J Geophys, 2012, 55: 372–383 [满文敏, 周天军, 张丽霞, 等. 20世纪温度变化中自然变率和人为因素的影响: 基于耦合气候模式的归因模拟. 地球物理学报, 2012, 55: 372–383]
11 Wang S W, Luo Y, Zhao Z C, et al. Attribution of climate warming to the causes (in Chinese). Adv Clim Change Res, 2012, 8: 308–312 [王绍武, 罗勇, 赵宗慈, 等. 气候变暖的归因研究. 气候变化研究进展, 2012, 8: 308–312]
12 Kirtman B, Power S, Adedoyin J A, et al. Near-term Climate Change: Projections and Predictability. In: Stocker T F, Qin D, Plattner G K, et al., eds. 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: Cambridge University Press, 2013. 953–1028
13 Zhou T J, Song F, Chen F. Historical evolutions of global and regional surface air temperature simulated by FGOALS-s2 and FGOALS-g2: How reliable are the model results? Adv Atoms Sci, 2013, 30: 638–657
14 Xu Y, Gao X J, Shi Y, et al. Detection and attribution analysis of annual mean temperature changes in China. Clim Res, 2015, 63: 61–71
15 Xu Y, Gao X J, Giorgi F. Upgrades to the reliability ensemble averaging method for producing probabilistic climate-change projections. Clim Res, 2010, 41: 61–81
16 Gao X J, Wang M L, Giorgi F. Climate change over China in the 21st century as simulated by BCC_CSM1.1-RegCM4.0. Atmos Ocean Sci Lett, 2013, 6: 381–386
17 Song F, Zhou T J. Interannual variability of East Asian summer monsoon simulated by CMIP3 and CMIP5 AGCMs: Skill dependence on Indian ocean–western Pacific anticyclone teleconnection. J Clim, 2014, 27: 1679–1697
18 Jiang D B, Wang H J. Natural interdecadal weakening of East Asian summer monsoon in the late 20th century. Chin Sci Bull, 2005, 50: 1923–1929 [姜大膀, 王会军. 20世纪后期东亚夏季风年代际减弱的自然属性. 科学通报, 2005, 50: 2256–2262]
19 Zhu Y M, Yang X Q. Relationships between Pacific decadal oscillation (PDO) and climate variabilities in China (in Chinese). Acta Meteorol Sin, 2003, 61: 641–654 [朱益民, 杨修群. 太平洋年代际振荡与中国气候变率的联系. 气象学报, 2003, 61: 641–654]
20 Yang X Q, Zhu Y M, Xie Q, et al. Advances in studies of Pacific decadal oscillation (in Chinese). Chin J Atmos Sci, 2004, 28: 979–992 [杨修群, 朱益民, 谢倩, 等. 太平洋年代际振荡的研究进展. 大气科学, 2004, 28: 979–992]
21 Han J P, Wang H J. Interdecadal variability of the East Asian summer monsoon in an AGCM. Adv Atoms Sci, 2007, 24: 808–818
22 Huang R, Chen J, Huang G. Characteristics and variations of the East Asian monsoon system and its impacts on climate disasters in China. Adv Atoms Sci, 2007, 24: 993–1023
23 Zhou T J, Gong D Y, Li J, et al. Detecting and understanding the multi-decadal variability of the East Asian summer monsoon-Recent progress and state of affairs. Meteorol Z, 2009, 18: 455–467
24 Wang H J, Fan K. Recent changes in the East Asian monsoon (in Chinese). Chin J Atmos Sci, 2013, 37: 313–318 [王会军, 范可. 东亚季风近几十年来的主要变化特征. 大气科学, 2013, 37: 313–318]
25 Zhou T J, Song F R. Lin R, et al. The 2012 North China floods: Explaining an extreme rainfall event in the context of a long-term drying tendency. In: Peterson T C, Hoerling M P, Stott P A, et al., eds. Explaining Extreme Events of 2012 from a Climate Perspective. Bull Amer Meteorol Soc, 2013, 94: S49–S51
26 Qian C, Zhou T J. Multidecadal variability of North China aridity and its relationship to PDO during 1900–2010. J Clim, 2014, 27: 1210–1222
27 Xu C H, Xu Y. The projection of temperature and precipitation over China under RCP scenarios using a CMIP5 multi-model ensemble. Atmos Ocean Sci Lett, 2012, 5: 527–533
28 Chen H P. Projected change in extreme rainfall events in China by the end of the 21st century using CMIP5 models. Chin Sci Bull, 2013, 58: 1462–1472 [陈活泼. CMIP5模式对21世纪末中国极端降水事件变化的预估. 科学通报, 2013, 58: 743–752]
29 Gao X J, Shi Y, Song R Y, et al. Reduction of future monsoon precipitation over China: Comparison between a high resolution RCM simulation and the driving GCM. Meteorol Atmos Phys, 2008, 100: 73–86
30 Gao X J, Shi Y, Zhang D F, et al. Uncertainties of monsoon precipitation projection over China: Results from two high resolution RCM simulations. Clim Res, 2012, 52: 213–226
31 Gao X J, Zhang D F, Chen Z X, et al. Land use effects on climate in China as simulated by a regional climate model. Sci China Ser D Earth Sci, 2007, 50: 620–628 [高学杰, 张冬峰, 陈仲新, 等. 中国当代土地利用对区域气候影响的数值模拟. 中国科学D辑: 地球科学, 2007, 37: 397–404]
32 Mahmood R, Li S L. Modeled influence of East Asian black carbonon interdecadal shifts in East China summer rainfall. Atmos Ocean Sci Lett, 2011, 4: 349–355
33 Wang T, Wang H J, Otter O H, et al. Anthropogenic forcing of shift in precipitation in Eastern China in late 1970s. Atmos Chem Phys Discuss, 2013, 13: 11997–12032

34 Gao X J, Zhao Z C, Ding Y H, et al. Climate change due to greenhouse effects in China as simulated by a regional climate model. Adv Atoms Sci, 2001, 18: 1224–1230
35 Yu E T, Wang H J, Sun J Q. A quick report on a dynamical downscaling simulation over China using the nested model. Atmos Ocean Sci Lett, 2010, 3: 325–329
36 Giorgi F, Coppola E, Solmon F, et al. RegCM4: Model description and preliminary tests over multiple CORDEX domains. Clim Res, 2012, 52: 7–29
37 Wu T W, Yu R C, Zhang F, et al. The Beijing climate center for atmospheric general circulation model (BCC-AGCM2.0.1): Description and its performance for the present-day climate. Clim Dyn, 2010, 34: 123–147
38 Xin X G, Wu T W, Li J L, et al. How well does BCC_CSM1.1 reproduce the 20th century climate change over China? Atmos Ocean Sci Lett, 2013, 6: 21–26
39 Myhre G, Shindell D, Bréon F M, et al. Anthropogenic and natural radiative forcing. In: Stocker T F, Qin D, Plattner G K, et al., eds. 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: Cambridge University Press, 2013, 659–740
40 Wu J, Gao X J. A gridded daily observation dataset over China region and comparison with the other datasets (in Chinese). Chin J Geophys, 56: 1102–1111 [吴佳, 高学杰. 一套格点化的中国区域逐日观测资料及与其他资料的对比. 地球物理学报, 2013, 56: 1102–1111]
41 Gao X J, Xu Y, Zhao Z C, et al. On the role of resolution and topography in the simulation of East Asia precipitation. Theor Appl Clim, 2006, 86: 173–185
42 Gao X J, Shi Y, Giorgi F. A high resolution simulation of climate change over China. Sci China Earth Sci, 2011, 54: 462–472
43 Gao X J, Shi Y, Zhang D F, et al. Climate change in China in the 21st century as simulated by a high resolution regional climate model. Chin Sci Bull, 2012, 57: 1188–1195
44 Zhang R H, Wu B Y, Han J P, et al. Effects on summer monsoon and rainfall change over China due to Eurasian snow cover and ocean thermal conditions. In: Bharat R S, ed. Climate Change-Realities, Impacts over Ice Cap, Sea Level and Risks. InTech: Rijeka, 2013. 227–250
45 Bindoff N L, Stott P A, AchutaRao K M, et al. Detection and attribution of climate change: From global to regional. In: Stocker T F, Qin D, Plattner G K, et al., eds. 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: Cambridge University Press, 2013. 867–952
46 Zhang X B, Wan H, Zwiers F W, et al. Attributing intensification of precipitation extremes to human influence. Geophys Res Lett, 2013, 40: 5252–5257
47 Jiang Y Q, Liu X H, Yang X Q, et al. A numerical study of the effect of different aerosol types on East Asian summer clouds and precipitation, Atmos Environ, 2013, 70: 51–63
48 Wu K, Yang X Q. Urbanization and heterogeneous surface warming in eastern China. Chin Sci Bull, 2013, 58: 1363–1373 [吴凯, 杨修群. 中国东部城市化与地面非均匀增暖. 科学通报, 2013, 58: 642–652]
49 Song F, Zhou T, Qian Y. Responses of East Asian summer monsoon to natural and anthropogenic forcings in the 17 latest CMIP5 models. Geophys Res Lett, 2014, 41: 596–603

Downscaling a 20th century climate change of a global model for China from RegCM4.0: Attributable contributions of greenhouse gas emissions and natural climate variability

ZHANG DongFeng[1], GAO XueJie[2], LUO Yong[3], XIA Jun[4,5] & GIORGI Filippo[6]

[1] *Shanxi Climate Center, Taiyuan 030006, China;*
[2] *Climate Change Research Center, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China;*
[3] *Center for Earth System Science, Tsinghua University, Beijing 100084, China;*
[4] *Geographical Science and Resources Institute, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China;*
[5] *The State Key Laboratory of Water Resources and Hydropower Engineering Science, Wuhan University, Wuhan 430072, China;*
[6] *The Abdus Salam International Centre for Theoretical Physics, Trieste 34100, Italy*

China has experienced warming and a pattern of "southern flood and northern drought" in precipitation in recent decades. Attributable contributions of greenhouse gas emissions and natural climate variability to these phenomena are discussed for China and the main hydrological basins, based on a comparison of historical and attribution simulation tests using a regional climate model (RegCM4.0). Two tests are performed at a resolution of 50 km, driven by the results of BCC_CSM1.1 historical and attribution simulation tests of CMIP5 in 1961–2005, respectively. The forcing of greenhouse gas emissions and natural climate variability are included in the historical test, and greenhouse gas emission is excluded in the attribution test. Results show that the simulated trends of temperature and precipitation from RegCM4.0 are more reasonable than from BCC_CSM1.1 for 1961–2005, and the warming during this period was mainly caused by the emission of greenhouse gases, although natural climate variability also led to regional warming in most areas except the Tibetan Plateau. The warming magnitude from greenhouse gas emissions was much larger than from natural climate variability over most basins and China as a whole, with 80% of the warming attributable to forcing by greenhouse gases. The "southern flood and northern drought" pattern of precipitation in Eastern China may be largely due to natural climate variability, and greenhouse gas emission to some extent weakens the strength of this change; increased precipitation in Northwest China is mainly induced by increased greenhouse gas emission, while natural climate variability, in contrast, leads to reduced precipitation. The assessments of temperature are more reliable than those of precipitation, because model limitations and the complex relationship between precipitation and external factors result in large remaining uncertainties in precipitation assessments. It should be pointed out that attribution studies of climate change on the regional scale are very complex, and only preliminary modeling results of aerosol and land use forcing in the absence are shown in this study. An ensemble of multiple models and samples with statistical significance and confidence is needed for comprehensive detection and attribution studies, and the limitations associated with all these factors lead to large uncertainties in the conclusions. The aim of this study is to provide a detection and attribution method for studying regional climate change. A more comprehensive and accurate understanding of the causes of climate change in China would require further regional climate simulations and analyses.

greenhouse gases, natural climate variability, China, climate change, regional climate model

doi: 10.1360/N972015-00007